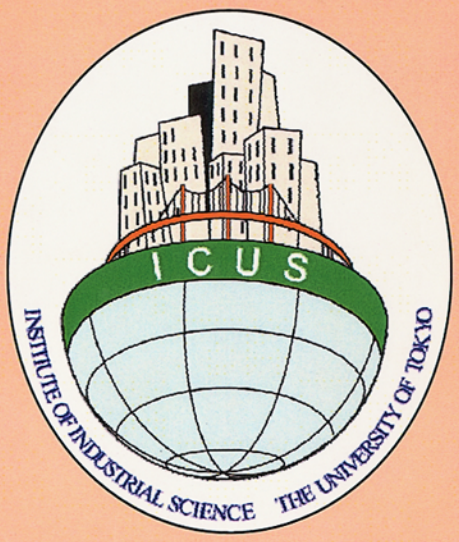
ICUS REPORT 2009-10



都市基盤安全工学国際研究センター

東京大学生産技術研究所

長期的津波監視の維持を重視した総合的津波防災戦略モデルの提案と発展途上国への導入

都市基盤安全工学国際研究センター
東京大学生産技術研究所

ISBN 4-903661-38-5

Serial Number 46

長期的津波監視の維持を重視した
総合的津波防災戦略モデルの提案と発展途上国への導入

ＩＣＵＳ Report No.46

2010年3月

都市基盤安全工学国際研究センター

巻頭言

2004年12月26日に発生したスマトラ沖地震（M9.0）が引き起こした津波は，インド洋沿岸の広い地域に甚大な被害をもたらした。この災害以来，インド洋沿岸諸国では，津波防災対策へのニーズが急速に高まっているが，同じ震源で地震が発生するのは，百年～数百年後であり，次に発生する地震はスンダ海溝沿いの別の領域で発生する可能性が高い。その場合の津波災害の被災地は，2004年12月のイベントとは異なるものと考えられる。そのような潜在的な別の津波災害シナリオを考慮することなく，拙速に津波防災対策を実施すれば，再び「想定外」の津波災害に襲われることになる。

また，インド洋沿岸諸国では津波監視・警報システムの導入が検討されているが，これらのシステムは，これまで莫大な予算と時間を費やして，太平洋沿岸の津波監視システムとして開発されたものをインド洋沿岸に適用しようとするものである。先進的ではあるが、高コストで専門性の高い組織による維持管理が求められるこのようなシステムを，津波災害の経験が乏しく，人的・財政的資源が豊富とはいえないインド洋沿岸地域で，適切に維持管理し，運用し続けることが可能だろうか。またシステムの寿命と大規模津波災害の発生頻度を比較した場合に，導入されたシステムが本当に津波災害軽減に役立つ機会はどれほどあるのだろうか。さらに警報システムを導入しても，住民が警報を受けて安全に避難出来る体制が整備されていないことには，被害の軽減につながらない。地域の住民には，警報システムがどのような機能を持つもので，警報が出た場合にはどのように行動すればよいのかを理解してもらわなければならない。このように，効果的な津波防災対策を実施するためには，津波防災に関わる様々な要素を包括的に勘案した総合的な津波防災戦略が不可欠となる。

本研究では，津波災害経験の乏しい発展途上国を主な対象として，効果的な津波防災対策を実施する際に必要な総合的な津波防災戦略のモデルを提案するとともに，いくつかの発展途上国への具体的な導入考えた場合の課題を整理した上で，提案する戦略モデルの有効性を検証することである。

津波発生時の被害を最小化する主な方策としては、沿岸部の土地利用の規制と避難を前提とした効果的な避難支援システムの構築がある。沿岸漁業とマリーンリゾートを中心とした観光業を基幹産業としているインド洋沿岸諸国の状況を考えると，沿岸部にバッファゾーンを設置するような土地利用規制は一般に受け入れられにくい。ごく稀に起こる津波災害の軽減が可能になっても日常生活における問題が発生してしまうからである。このような状況を踏まえると，適切な避難を前提とした環境の整備が現実的な解決策になる。この場合には，常に津波を監視し，津波発生時には確実に警報を発せられるシステムと警報を受けた住民が迅速に避難できる体制，つまりに住民の防災教育と避難場所の確保が求められる。近地に避難に適した高台があれば，これを避難場所に利用できるが，これがない

地域においては，警報を受けた住民が安心して避難できる避難施設を確保しなくてはいけない。この避難施設は津波外力に対し十分な耐力を持ち，適切な場所に配置される必要がある。また，住民は津波災害リスク，警報システム・避難施設の機能，津波発生時にとるべき行動を理解し，実際に災害が発生した場合には，適切な対応行動が取られなければならない。

我々が提案する津波警報システムの特色は，1)シンプルかつ安価なシステムで、途上国でも問題なくメンテナンスできる点、2)平時利用を主目的とし、日常的に沿岸地域の人々に有益な情報を提供するとともに、拡張機能として津波発生時には津波警報システムとして機能する点，3)公的機関ではなく，国際的なネットワークを有するリゾートホテルが主体となって設置・運用を行う点，である。地域の基幹産業を支えるリゾートホテル群が中心となって，国際的な津波監視ネットワークを構成することで，非科学的な流言を打破し，地域の津波防災に貢献するビーチリゾートとしてのブランド価値を高めるとともに，スマトラ地震津波災害からの復興を促進することができる。また，平時には沿岸部の環境を継続的に観測し，リゾート客，沿岸部住民・産業に対し，気象情報，レジャーコンディション情報，海洋資源監視，海洋環境監視に利用できるため，新たなビジネスチャンスを創出できる。

平行して，特に津波災害の経験が乏しい地域の住民に対する地域の津波災害リスク・津波防災対策に関する教育・啓発活動のあり方を検討する。また，津波防災対策が実効性を持つためには，その対策により守られる地域の利害関係者が，自分たちが作った計画であるという感覚（Sense of Ownership）を関係者間で共有すること，計画が実行に移されることが重要である。そこで，ステークホルダ参画ワークショップによる津波防災計画の立案・実施・監視プロセスのあり方について検討を行う。

従来も，「巨大地震・津波による太平洋沿岸巨大連担都市圏の総合的対応シミュレーションと活用手法の開発（平成 14～18 年度）等において包括的な津波防災対策のあり方に関する研究は実施されてきている。しかし，それは津波災害の経験，津波防災に関する豊富な学術的知見，高度な津波防災技術が前提となったもので，それらの乏しい発展途上国にそのまま適用可能なものではない。上記の前提条件が乏しい発展途上国を対象として，特に長期的な津波監視の維持を重視した形での総合的津波防災戦略のモデルを提供できる点で本研究の意義は大きい。

本報告書は、上記のような考え方の下で我々が進めてきた４年間の研究の成果をまとめたものである。本報告書が、今後の津波防災研究の一里塚の一つとなれば幸甚である。

東京大学生産技術研究所　目黒公郎

長期的津波監視の維持を重視した
総合的津波防災戦略モデルの提案と発展途上国への導入

目　次

第１章　長期的な津波監視における多目的海洋観測ブイの重要性・・・・・・・・・・・・・1
1.1　津波防災対策の現状と課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1
1.2　多目的ブイを用いた津波警報システムの概要と特徴・・・・・・・・・・・・・・・・11
1.3　本報告書の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・17
第１章の参考文献・Web サイト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・19

第２章　海洋観測ニーズの分析・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・23
2.1　調査背景・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・23
2.2　タイ・プーケットの海洋研究者へのインタビュー・・・・・・・・・・・・・・・・・24
2.3　タイ・プーケットのダイビングショップ経営者へのインタビュー・・・・・・・・・44
2.4　タイ・プーケットの漁業者（Fish Marketing Organization）
へのインタビュー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・51
2.5　タイ・プーケットの Tourist Association へのインタビュー・・・・・・・・・・・58
2.6　タイ・プーケットの環境保護関係者(KhaoLak National Marine Park)
へのインタビュー・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・61
2.7　タイ・プーケットにおけるインタビュー結果の整理・・・・・・・・・・・・・・・・65
2.8　沖縄県リゾートホテルへの海洋観測情報利用状況のアンケート調査・・・・・・・・70
2.9　既存の海洋観測ブイの性能調査・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・79
第２章の参考文献・Web サイト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・85

第３章　多目的海洋観測ブイの開発とその運用実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・87
3.1　多目的海洋観測ブイとその運用における設計思想・・・・・・・・・・・・・・・・・87
3.2　多目的海洋観測ブイの開発・実験計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・88
3.3　多目的海洋観測ブイ１号機の開発と運用実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・91
3.4　１号機の運用実験結果の検証・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・96
3.5　ブイ１号機改の開発と運用実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・111
3.6　１号機改の運用実験結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・114
3.7　ブイ２号機の開発と運用実験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・124
3.8　まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・128
第３章の参考文献・Web サイト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・129

第４章　津波シミュレーションを用いたブイの最適配置・・・・・・・・・・・・・・・131
4.1　ＧＰＳブイの津波警報への利活用・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・131
4.2　津波シミュレーションによる津波警報システムの人的被害軽減効果検討手法・・137
4.3　津波シミュレーションによる津波警報システムの人的被害軽減効果・・・・・・161
4.4　海山列に着目した遠地津波の最大波遅延要因の分析と
予報精度向上に向けての課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・213
4.5　まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・224
第４章の参考文献・Web サイト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・225

第５章　津波避難シミュレーションに基づく津波避難態勢の構築・・・・・・・・・・229
5.1　はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・229
5.2　解析手法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・233
5.3　スリランカ・ゴール地方を対象としたシミュレーション・・・・・・・・・・・265
5.4　三重県尾鷲市を対象としたシミュレーション・・・・・・・・・・・・・・・・282
5.5　最適な避難行動のためのマッピングシステムの構築・・・・・・・・・・・・・322
5.6　結論・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・332
第５章の参考文献・Web サイト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・334

第６章　津波避難施設が保有すべき津波外力に対する強度・・・・・・・・・・・・337
6.1　本章の位置づけ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・337
6.2　分析対象とする地震津波，及び本研究に係わる研究動向・・・・・・・・・・337
6.3　2006 年ジャワ島南西沖地震津波の際の家屋被害の特徴・・・・・・・・・・338
6.4　構造部材の津波外力に対する強度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・344
6.5　津波避難施設が保有すべき強度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・352
第６章の参考文献・Web サイト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・354

第７章　津波に対する住民の意識および避難行動の意向に関する空間的考察・・・・355
7.1　津波に対する住民の意識と避難行動・・・・・・・・・・・・・・・・・・・355
7.2　研究の方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・356
7.3　単純集計結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・358
7.4　津波防災に対する意識について・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・359
7.5　津波発生時における避難行動の意向について・・・・・・・・・・・・・・・361
7.6　まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・362
第７章の参考文献・Web サイト・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・375

第８章　多目的海洋観測ブイの実現に向けて・・・・・・・・・・・・・・・・・・・377

執筆者一覧

（執筆章節順）

研究総括　東京大学　生産技術研究所・教授　目黒　公郎
　　巻頭言・第1章・第8章を執筆

東京大学　生産技術研究所　目黒研究室修士2年　竹内　雅彦（平成19年度卒）
　　第2章・第4章を共同執筆

東京大学　生産技術研究所　目黒研究室修士2年　花谷　仁志
　　第2章を共同執筆

東京大学　生産技術研究所　目黒研究室修士1年　高石　孟
　　第2章・第3章を共同執筆

富士常葉大学大学院　環境防災研究科・准教授　　高島　正典
　　第3章を共同執筆

東北大学大学院　工学研究科・准教授　越村　俊一
　　第4章を共同執筆

東京大学生産技術研究所　目黒研究室修士1年　岡本　睦（平成18年度卒）
　　第5章を執筆

筑波大学大学院　システム情報工学研究科・講師　庄司　学
　　第6章を執筆

筑波大学大学院　システム情報工学研究科・准教授　村尾　修
　　第7章を執筆

第１章　長期的な津波監視における多目的海洋観測ブイの重要性

１．１　津波防災対策の現状と課題

１）2004 年スマトラ沖地震津波で明らかになった津波防災対策の問題点

2004 年 12 月 26 日 0 時 58 分 53 秒(UTC), インドネシア・スマトラ島の西方沖を震源とする巨大地震が発生した[1]. 米国ハーバード大学の発表によるとマグニチュードは 9.1 と 1900 年以降に世界で発生したすべての地震のうち 3 番目となる巨大なもので[2](**表１．１**), モーメントマグニチュード Mw は 9.0 であった[3]. この地震により発生した津波はインド洋沿岸を中心に甚大な被害をもたらした. USGS によると, 2005 年 2 月 25 日時点で死者 283100 人以上, 行方不明者 14100 人以上にのぼると報告されている[4]. 各国別の人的被害者数は, 平成 17 年の外務省緊急対策本部の発表[5] (**表１．２**)によると, インドネシアで最も多く 166,320 人, ついでスリランカの 30,922 人, インドの 10749 人, タイの 5318 人とされている. このような大きな被害を発生させた要因として, その津波の規模の大きさが挙げられると共に, インド洋沿岸域における津波の知識・経験の不足, 及び津波警報システム等の津波対策の不足が強く指摘された[6].

このような背景からインド洋の津波防災対策推進に向けての国際社会の要請が高まり, インド洋沿岸の津波対策としての様々な取り組みが行われることになった. これまで, 世界的に津波警報システムを運用している国は, 米国, オーストラリア, ロシア, チリそして我が国などが知られているが[7], インド洋沿岸各国においても, 津波警報システムの構築に本格的に取り組むこととなった. 主な取り組みとしては, インド洋沿岸の津波警報システムである IOTWS(Indian Ocean Tsunami Warning and Mitigation System)構築への取り組み, 及びインド洋沿岸各国内での津波防災対策への取り組みが挙げられる. 以下, それらについての概要, 現状及び問題点について俯瞰する.

２）IOTWS(インド洋津波警報システム)

IOTWS とは, インド洋沿岸における国際的な津波防災対策への取り組みである. インド洋沿岸の 27 カ国を対象に, 津波の観測技術, 住民への警報といった体制の整備と, 各国関係機関による早期警戒ネットワークの構築を目指している. 日本を含む太平洋域での津波防災の取り組みを参考としながら, 国際社会からの技術・財政支援を進め, 国連国際防災戦略, 世界気象機関などの国際機関が活動している. 日本においても内閣府や気象庁が全面協力し, 400 万ドルの支援を行っている[8].

IOTWS 設立の経緯は以下のとおりである. 2004 年スマトラ島沖地震津波後の 2005 年 1 月 6 日にジャカルタで行われたアセアン緊急首脳会議において, 日本によりインド洋及び

表２．１ Largest Earthquakes in the World Since 1900

	Location	Date UTC	Magnitude
1	Chile	1960 05 22	9.5
2	Prince William Sound, Alaska	1964 03 28	9.2
3	Off the West Coast of Northern Sumatra	2004 12 26	9.1
4	Kamchatka	1952 11 04	9
5	Off the Coast of Ecuador	1906 01 31	8.8
6	Rat Islands, Alaska	1965 02 04	8.7
7	Northern Sumatra, Indonesia	2005 03 28	8.6
7	Assam - Tibet	1950 08 15	8.6
7	Andreanof Islands, Alaska	1957 03 09	8.6
10	Banda Sea, Indonesia	1938 02 01	8.5
10	Kamchatka	1923 02 03	8.5
10	Chile-Argentina Border	1922 11 11	8.5
10	Kuril Islands	1963 10 13	8.5

Updated 2007 June 26

（出展：USGS の資料をもとに筆者作成）

表２．２　外務省発表のスマトラ沖大地震及びインド洋津波被害

被災国	死者
インドネシア	166,320名（保健省）
タイ	5,318名（内務省）
マレーシア	68名（警察庁）
スリランカ	3万0922名（スリランカ国家対策本部） （注：公安省は死者数を3万8000人と発表）
モルディブ	82名（大統領府）
インド （うちアンダマン・ニコバル諸島）	10,749名 （1,899名。行方不明者数5640名）（内務省）
ミャンマー	64名 （ミャンマー社会福祉・復興救済省）
バングラデシュ	2名
ソマリア	298名（ソマリア暫定政府当局発表）
タンザニア	10名
ケニア	1名
セーシェル	1名

*報道によれば、死者数は21万人以上に上る（18日の国連発表によれば、15万7千人以上が死亡し、行方不明者は2万7千人以上、避難民は116万人以上に上る。）
*25名の邦人の死亡を確認（タイで14名、スリランカで11名）

（出展：外務省緊急対策本部）

東南アジア地域における地域津波早期警報システムの構築が提案された．またその提案と前後して UNESCO の IOC(Intergovernmental Oceanographic Commission)により，太平洋津波警報システムを統括する知見のインド洋への適用が提案された．2005 年 1 月 19 日に神戸で開催された国連防災世界会議のテーマ別会合特別セッションにおいて，インド洋災害に関する共同声明が採択され，これを受けて IOTWS への取り組みが本格的にスタートした[9]．2005 年 6 月の UNESCO/IOC 総会において，IOC の下位に ICG/IOTWS (Intergovernmental Coordination Group for IOTWS)が設置され（**図１．１**），2008 年 2 月現在まで IOTWS の設計・実行，調整を行っている[11]．ICG/IOTWS では 2007 年末までに 4 回の総会が開催されており，一番新しい第 4 回の会合は，2007 年 2 月 28 日から 3 月 2 日に開催された．

IOTWS はインド洋地域または遠隔地域で発生した津波を予測し，その津波の規模などを特定し，津波による被害を軽減させることを主な目標としている．この目標を達成するために IOTWS は，津波の検出・予報，リスク評価，警報メッセージの送信などの機能を含んだエンド・ツー・エンドの津波警報システムが必要であるとしている．また関係各国に対しては，それぞれの津波検出装置及び各自の関連ネットワークを維持し，絶えず津波に対するモニタリング・検出を可能とするとともに，警報が国内の住民に届くコミュニケーションシステムの整備を行うことが必要であるとしている．また，通常の開発活動の一環として，多様な減災対策が行われなければならないとしている[12]．

ICG/IOTWS の取り組みは，主に WG1～WG5 及び後ほど追加された WG6 とあわせて 6 つのワーキンググループによって進められている．WG1～WG6 の取り組み目標と主な活動は(**表１．３**)のようになっている．

３）太平洋津波警報センター（PTWC）及び日本の気象庁

インド洋での本格的な津波警報センターが構築されるまでの間，暫定的に，太平洋域の津波情報提供機関である米国大気海洋庁の太平洋津波警報センター(PTWC：Pacific Tsunami Warning Center)と日本の気象庁とが連携して，インド洋沿岸諸国へ「インド洋津波監視情報」を提供することとなっている[15]．気象庁は，平成 17 年 3 月 31 日から情報提供を開始した[13]．平成 20 年 2 月現在，要請のあったインド洋沿岸 26 カ国への情報提供体制をとっている．

インド洋津波監視情報は，インド洋域でマグニチュード 6.5 以上の地震が発生した場合に，地震の発生時刻，震源の位置，マグニチュード，津波の発生可能性の有無，及び津波の発生可能性が有る場合には，インド洋沿岸を 43 に分割した沿岸区域への津波の到達伝播時間の予測値を伝えるものである．そのため，インターネットを使って取得できる，世界中に展開された地震観測網(IRIS)約 80 地点のリアルタイムデータを使用し，震源やマグニチュードを決定している．しかし，津波の観測値は，津波情報やそれに基づく警戒判断にとって重要であるが，インド洋域で潮位データを常時モニターできる観測点は限定的であり，その点においても暫定的な提供体制と言える．

なお，2007 年 9 月 11 日 11 時 10 分(UTC)に発生したスマトラ島ブンクル沖地震による津

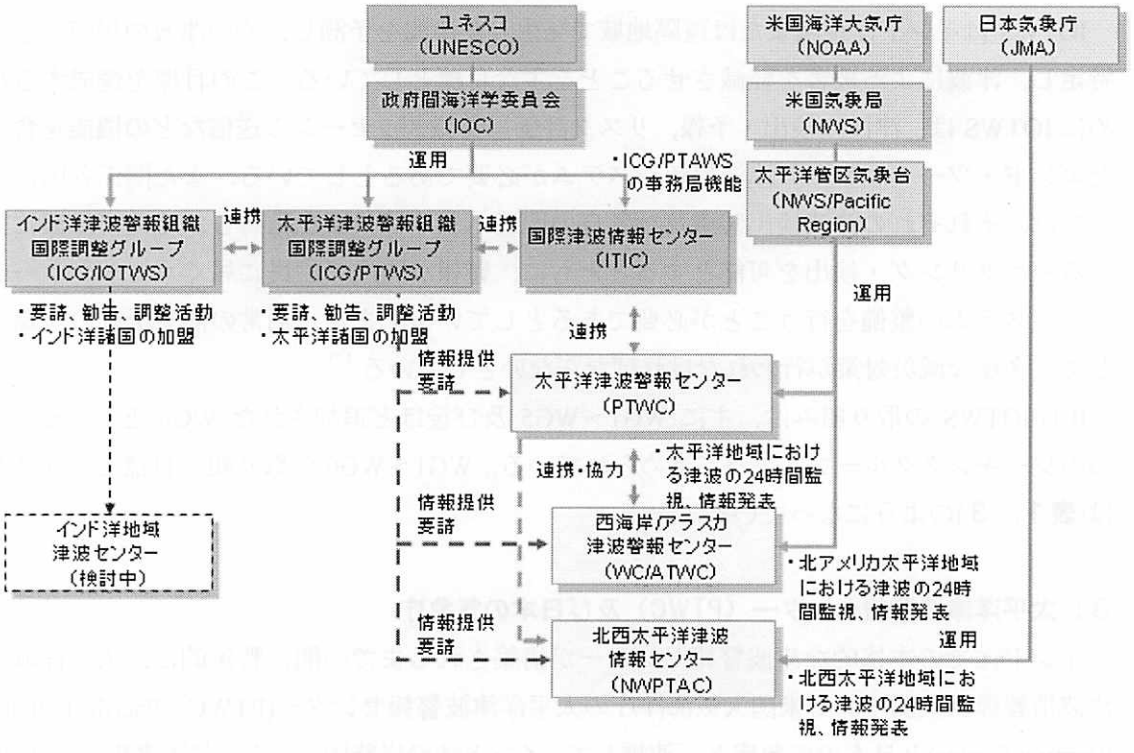


図1．1　IOTWS の構築に関わる組織関係

(出展：NTT データ,インド洋各国における津波防災対策 [10])

表１．３　ICG/IOTWS の WG1～WG6 の目標と主な活動

グループ名	目標	主な活動
WG1: 地震観測、データ収集及び交換	2010 年までに装置要件や標準を満たした地震観測コアネットワークの運用を開始	全地球地震測位システムの改善、地震観測・リスク評価の能力開発研修の実施、新しい地震観測所の設立、インド洋諸国の 30 の地震観測所の改善、インド洋地域の地震を観測するコア観測所からのデータの共有など
WG2: 潮位観測	2010 年までにインド洋地域の各国において、装置要件や標準を満たした沿岸潮位観測及び深海観測のコアネットワークの運用を開始	コアとなる沿岸潮位観測所の改善及びインド洋沿岸諸国津波警報システムの維持、潮位データを安全、かつ広範に交換、コアネットワークにおける深海潮位観測点の設立（計 32 ブイ）など
WG3: 災害リスク評価	標準化された災害リスク評価手法、製品を開発・普及及び準国家レベルでの防災準備、計画、災害リスク低減などの環境整備の評価など	津波リスク評価の方法論及びガイドラインの策定、地域社会の災害モデルの作成、地域社会で活用できる災害分析ツールの作成及び訓練の実施、既存の津波記録の研究など
WG4: モデリング	インド洋で利用でき、かつ基準に従って評価され、妥当性が実証された数値モデリングの手法及びソフトウェアを提供・普及	10 年以内でのさまざまなシナリオにおけるインド洋沿岸地域の浸水マップの作成、浸水・予報モデリングのウェブベースの地域社会ポータルの開発、津波デジタルデータリポジトリの構築など
WG5: 警報センター	共同運用可能なインド洋全域警報システムを構築、効果的なコミュニケーションプログラムを通じて、「ラストマイル」まで津波警報を送信	システム共同運用の合意形成、標準実施要領や地域・国家計画概要を含む観測・警報ガイドラインの策定、津波警報のラストマイルに関する包括的なガイドラインの策定、バックアップシステムを含む、地域津波警報プロバイダー（RTWP）と国の津波警報センター（NTWC）との間のコミュニケーション及び協力の推進

WG6: 減災・準備・対応	防災力向上の為の津波に関する事例、措置、情報等の共有や促進、津波警報・減災システムの計画と実行、インド洋沿岸地域での災害リスク軽減等のための各機関協同委員会の設置等	緊急時対応に備えた国家及び地域機関の性能向上、避難地図を含めた国家及び地域での緊急対応計画の策定、災害対応のための重要な社会基盤の調査、公的機関を加えた緊急対応訓練の実施、学校での津波及び災害対応教育及び広報キャンペーンの実施、メディアとの効果的なリスクコミュニケーションのネットワークの構築など

(出典:NTT データ,インド洋各国における津波防災対策[13]及び Indian Ocean Tsunami Warning and Mitigation System (IOTWS) Implementation Plan(ICG/IOTWS-Ⅲ)[14]の資料を基に筆者作成)

波においては，14 分後の 11 時 24 分(UTC)に，PTWC からの津波警戒速報第 1 報が伝えられている [17]．第 1 報では，地震のマグニチュードは 7.9 とされ，その約 30 分後，地震発生から 43 分後の第 2 報でマグニチュードは 8.2 に改正されている．

4）インド洋沿岸各国の津波防災対策

ICG/IOTWS の取り組みと平行して，インド洋沿岸諸国も ICG/IOTWS の支援を受けながら，津波警報システムの一部や国内の警報を伝達するコミュニケーションシステムの構築など，津波対策への取り組みを行っている．以下，スマトラ沖地震津波の際，被害の大きかったタイ，インドネシア，インド，スリランカの津波防災対策への取り組みを概観する．

a．タイ

タイでは，2005 年 5 月 30 日に国立災害警報センター(NDWC: National Disaster Warning Centre)が設立され(**図 1．2**)[18]，国家災害警報システムの中枢となり，地震の探知・データ分析から津波発生の可能性を判断し，住民を安全に避難させる役割を担っている [19]．NDWS は，気象局（Thai Meteorological Department），防災局（Department of Disaster Prevention and Mitigation），灌漑局（Royal Irrigation Department）などの政府機関や PTWC，日本の気象庁などからの情報をもって判断する義務を負っている [20]．

NDWC のもとで，タイは津波災害への対策を中心とした自然災害警報システムに関する政策や戦略が策定され，この戦略においては，あらゆる自然災害に対応した早期警報システムの確立，対応能力の向上及び知識拡充，地域早期警報ネットワークの確立の 3 つの取り組みが計画された．NDWC では，2005 年度は 470 万 US ドル，2006 年度は 700 万ドルの予算が計上された [21]．早期警報システムに関する政策・計画及び技術については，NDWC の上部組織である 2 つの委員会がそれぞれ検討を行うが，実際の運用は NDWC が担っている．早期警報システムにおいては，標準実施要領が作成され，国内外の機関から情報受信，データ分析が可能となるとしている．また，警報の発令・対応・被害軽減策については，各地方自治体や防災省と協調して進めている状況である．NDWC では，自然災害警報情報を INMARSAT 衛星経由で自治体警報タワーに直接送信するほか，タイ中央・北・東北の地方ラジオ局にも送信し，ラジオ局はさらにその警報を被災地域の通信局に転送し，通信局は警報メッセージを農村部まで中継するようになっている．現在，警報タワーの増設，地震観測所・潮位観測所の設置・津波監視塔の設置・DART(Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)の設置などに取り組んでいる．津波監視塔(**図 1．3**)[22]は 2km おきに設置され，それぞれの監視塔が出す警報は 1km 先まで聞こえるようになっている．警報は 6 ヶ国語（タイ語，英語，ドイツ語，中国語，日本語）で発信される．なお，津波監視塔の設置は地方総務庁が行うが，監視塔の運営に関しては今後 NDWC が受け持つ．沖合の海底にはレコーダーが設置され，潮の変化や水圧などのデータが海面のブイ，衛星を介して自然災害警報センターへ送られるようになっている．

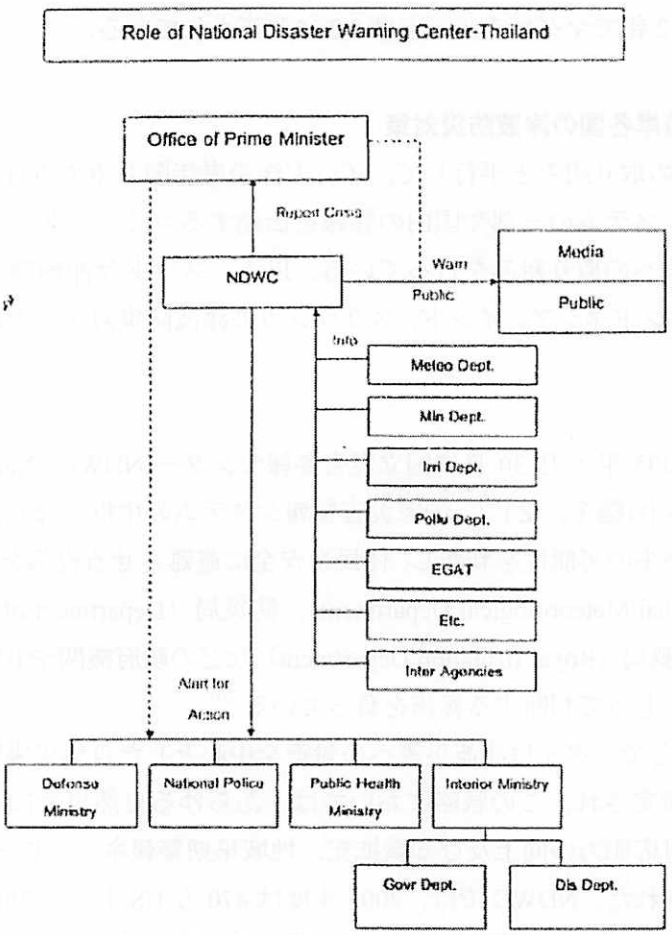


図１．２　タイの NDWC に関わる組織関係図

(出展：NDWC　Concept of operation[18])

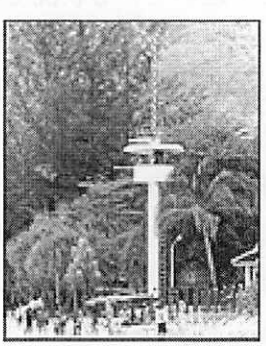


図２．３　タイの津波監視タワー

(出展：スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する
緊急調査研究 調査報告書 [22])

2005 年 4 月 29 日には，プーケット県のパトンビーチに設置された津波監視塔 1 台から警報を発令することにより，観光客などを含めた約 1,500 人が避難訓練を行った．パンガー県でも 2005 年 5 月 10 日に避難訓練が実現している．2006 年 4 月には太平洋防災センター(PDC: Pacific Disaster Center)と共同で津波の早期警報に関する意思決定支援プラットフォームのプロトタイプを開発した．2007 年 7 月 25 日には，アンダマン海沿岸の 6 つの自治体合同の避難訓練を実施した [23].

制度面では，タイでは個々の地域での計画は県により内容が異なるが，2004 年の津波の際特に大きな被災となった 3 県(プーケット県，パンガー県，クラビ県)の復興計画においては，いずれにおいても海岸からの距離に応じた建物の建築制限等の規制がなされている [24]. またタイは，インド洋及び東南アジア早期警報システムの地域センターを自国のバンコクに誘致しようとし，積極的に国際協定の締結を進めている [25].

b．インドネシア

インドネシア政府は，2004 年スマトラ島沖地震津波よる被害が甚大であった原因として「津波警報システムの未整備」「住民教育とコミュニティ防災体制の欠如」等の反省点を挙げている [26]. そして，ICG/IOTWS の支援のものと，既存の地震観測システムを含めた津波警報システム構築の基本構想である InaTEWS(Indonesian Tsunami Early Warning System)を打ち出した [27]. 同基本構想では，設置された地震計，海底圧力計などにより検地された地震や津波データを津波警報センターに転送し，そのデータを分析処理し，24 時間体制で多チャンネルから警報を鳴らすシステムを計画している [28].

c．インド

インドの津波警報システムの取り組みは，主にインド国立海洋情報サービスセンター(INCOIS: Indian National Centre for Ocean Information Services)が担っている．これは，測定ネットワーク層，データ通信層，津波警報分析層の 3 層構造の設計となっている．測定ネットワーク層は，レーダーに基づく海観測所，陸上地震観測所ネットワークなど陸地での観測ネットワーク，ブイによる観測，DART ネットワークなど海洋での観測ネットワークから構築される．データ通信ネットワークは INSAT(Indian National Satellite)に基づく衛星通信ネットワークを構築する．津波警報分析層では，各観測所から検出されたデータをもとに，津波発生の恐れがあれば，警報を発令する [29]. 2005 年 7 月には，INCOIS の元に，暫定的な津波警報センターが設立された [30]. ここでは，地震及び津波の情報をインド気象庁(India Meteorological Department)，日本の気象庁，PTWC から収集し，警報を発信するようになっている．また，国内の検潮器の整備，海底水圧計の設置も進められている [31].

d．スリランカ

スリランカの津波警報システムの取り組みとしては，防災省の設置，ハイレベル防災会

議及び防災会議の開催，災害対応センターの設立が挙げられる [32]．また，Colombo，Trincomalee，Kirinda の 3 地点での潮位観測ネットワークがある．

制度面では，2004 年スマトラ沖地震津波後の 2004 年 12 月 31 日から 2005 年 1 月 1 日にかけて，UDA(Urban Development Authority)が被災建物の再建に関するガイドラインを公表した [33]．それは，「平均高水位線から 1km 地帯の沿岸地帯を危険地帯とする」，「3 つの区域に分け開発の方針を定める」，そして「危険地帯内にある建物の土台が標高 3m 未満の高さにある場合は，少なくとも 3m の高さになるよう嵩上げする」などの方針が示されたものであった．その後，2005 年 1 月 19 日に CCZ に関して追加・修正されたものが発表され，同 2 月 27 日に国土再建特別委員会（TAFREN: Task Force to Rebuild the Nation）により，さらに修正されたものが公開された．この方針の概要は，海岸から 1km までの沿岸地帯を二つの地域（1st Land Strip と 2nd Land Strip）に分け開発する，1st Land Strip に関しては，西側を 100m，東側はサイクロンの影響なども考慮し，200m とする，ただし，沿岸保全局（CCD：Coastal Conservation Department）の沿岸地帯マネージメント・プランに指定されている 10 地域については別の規制を適用する，などが柱として挙げられている．しかしながら，沿岸保全帯の規制はこれまで必ずしも遵守されてきているわけではなく，今回発表された復興方針についても，その是非が議論されている [34]．

5）インド洋沿岸の津波対策の課題

前述のようにインド洋沿岸では津波防災対策が進められているが，それらの対策には現在の津波防災対策が本来的に持ち合わせている課題である観測技術向上，住民への啓蒙活動，情報伝達手法の構築等の他に，以下に見るようなインド洋沿岸の国々特有の課題も指摘されている．

a．資金・資源面の課題

太平洋沿岸各国に比べて，インド洋沿岸各国は経済・財政の規模が小さく，技術力のある人材数や技術水準も不十分であるため，津波防災対策に割くことのできる資金も資源も限られてしまうという課題があると考えられる．NTT データの資料によると，資金不足により津波警報システム構築が大幅に遅れているということが指摘されている [35]．また，タイの国立災害警報センター(NDWC)による'Information and Communication Technology Gap Analysis[36]において，資金・資材の不足について言及されている．例えば，NDWC 施設の災害に対する耐久力不足のため建て直しの推奨や，PC ネットワーク環境やそこで働く人材の数及び技術力が最低限の水準しか満たしておらず，スタッフ数及び技術力が不足している点などが指摘されている．特に，導入する津波警報システムが高額な場合，技術水準が高い場合，及び維持管理の負担が大きい場合において，資金不足及びそれを扱う人材や技術力が不足し，継続的な運用が困難になってしまうという懸念も考えられる．

b．政治面での課題

インド洋沿岸の関係各国の連携における政治的問題が指摘されている．ICG/IOTWS のエンド・ツー・エンド津波警報システムの設計原理は，もともと地域ないし国際社会の連携を前提としたものであり，現在 ICG/IOTWS の下で関係各国が連携を進めている．しかし，その際に各国の思惑の相違により調整が難航し，津波防災対策の実施に遅延が生じている．例えば，IOTWS の地域センター誘致の争いにおいて，タイ政府がバンコクにあるアジア災害予防センターを地域センターにしようと提案したことに対して，インドネシアが「地域拠点は一箇所にするべきではない」と意見を出し，地域センターが決まらないこと [37]や，その他様々な調整のための国際会議の増加が，遅延の原因として指摘されている [38]．

c．制度面での課題

前述のタイとスリランカの津波防災対策の中でも紹介した通り，沿岸からの距離に応じた建物の建築制限等の規制がかけられている．しかし，この土地利用規制により住民の移転問題の発生が指摘されている [39]．また，規制が必ずしも遵守されてきているわけではなく，既に規制区域内に多くの建物が建築され，住民の生活の基盤となっている例も見られる [40]．このような場合，土地利用の規制による津波対策だけでは不十分な点があり，津波の際には警報による避難に頼らざる得ない状況であるため，常に津波を監視し，津波発生時には確実に警報を発せられるシステム，及び避難に適した高台等の避難場所が不可欠であると考えられる．

1．2　多目的ブイを用いた津波警報システムの概要と特徴

以上のようなニーズを満たし，効果的な津波防災対策を実施するためには，どのような調査・研究・活動を実施すべきかを整理したものが，**図1．4**の総合的津波防災戦略フレームである．津波防災対策評価システムは，様々な津波防災対策を実施した際の効果をシミュレーションにより評価するものである．構造物被害調査では，津波によって建物にどのような荷重がかかるのかを明らかにし，どのような避難施設を設計すれば，津波外力に対して安全・有利であるかを明らかにする．その避難施設をどこに配置すべきかについては，我々の調査･研究チームで実績を持っている津波シミュレーション（越村・高島他（2005））[41]および避難シミュレーション（目黒他（2005））[42]を用いて，想定される様々な津波シナリオに対し，最適な避難施設の設置場所を決定する．避難シミュレーションを実施するためには，シミュレーション対象地域に関する詳細な標高データが不可欠であるため高精度測量を実施する．得られた標高データは，来襲しうる様々な津波発生シナリオにおける浸水状況の計算と，避難者の避難路選択行動の計算に利用される．加えて，インタビュー・アンケートを通じて，実際の避難者の証言から，避難にまつわる意思決定・行動

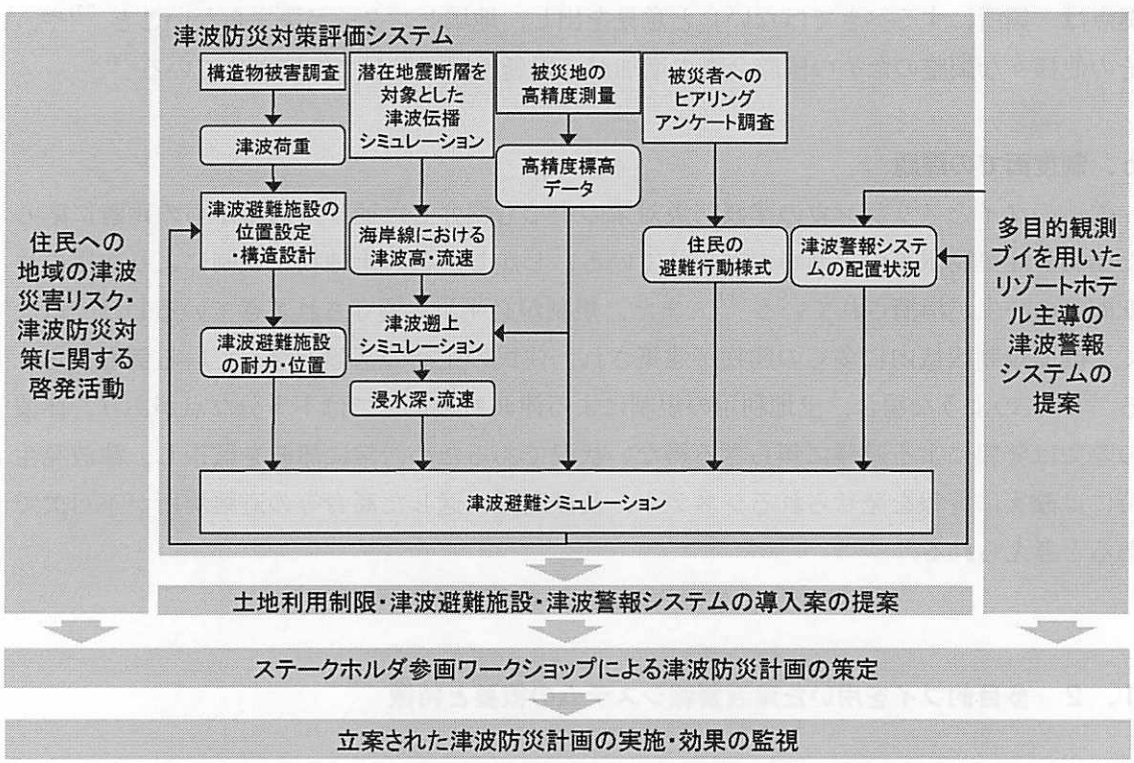


図１．４　総合的津波防災戦略フレームワークの概念図

パターンをモデル化し，シミュレーションに反映させる．この津波防災対策評価システムにより，様々な津波シナリオを考慮した最適な津波警報システム・避難施設・避難誘導設備の設置場所の決定，より良い土地利用のあり方の提案が可能となる．特に遠地津波における避難では，津波警報システムが不可欠である．低頻度大規模災害である津波に対しては，100 年単位の再現周期に対して運用を継続し，いつ津波が発生しようとも確実に警報を発せられるよう，維持が容易な津波警報システムの運用のあり方を検討する必要がある．我々はそのような津波警報システムの運用のあり方として「多目的観測ブイを用いたリゾートホテル主導の津波警報システム」を提案する．

1）日常的に利用可能

多目的ブイを用いた津波警報システムの大きな特徴の一つは，日常的に利用可能であるという点である(**図1．5**)[43]．ブイ設置地域における日常的な海洋観測ニーズを満たした観測ブイに，津波監視機能を搭載させ，日常的に運用するというのが今回の構想である．日常ニーズとしては，マリンレジャー関連の環境情報，気象情報，漁業関係者への海洋情報，自然環境保護のための海洋情報など，現在様々なニーズを想定している．日常ニーズを満たすことによる効果としては，主に以下の 3 つが考えられる．

まず「維持管理のインセンティブの向上」が挙げられる．数十年～数百年に 1 度のオーダーで襲来する巨大津波の監視のみの為に，海洋観測施設を常時維持管理していくインセンティブを持たせるのは難しく，特に経済的にも資源的にも余裕の少ない地域においては，維持管理のインセンティブが低下し，メンテナンス不良などの問題発生し，ついには津波監視が持続されなくなってしまうことが懸念される．しかし，日常ニーズを満たした海洋観測ブイであれば，日常的に利用され維持管理されるため，持続可能性の高い津波観測システムの構築が可能ではないかと考えられる．

次に，「費用便益効果の向上」が挙げられる．ブイの耐用年数が約 5 年程度と考えた場合，津波観測機能のみを有するブイから得られる付加価値は，津波の際の観測機能及び，津波研究者への情報提供のみであり，極論を言ってしまえば，津波が発生しない場合は 5 年間で費用のみがかかることになる．これでは数十年～数百年のオーダーで発生する津波に対して，経済的負担の非常に大きなシステムとなってしまい，維持管理するインセンティブの低下が懸念される．これに対し，提案されている日常ニーズを満たした海洋観測ブイの場合，5 年間の耐用年数の間に日常ニーズにおいて費用を上回る便益を得られるような機能を備えることができれば，津波が起こらない場合でも費用便益効果の良いシステムになり，海洋観測ブイの導入の障壁も低下し，持続可能性も向上すると考えられる．

最後に，「津波発生時のシステム使用のリテラシーの向上」が挙げられる．災害時にしか利用されないシステムは，その使用のリテラシーが低く，災害時に上手く機能しない可能性が高いと考えられる．それに対し日常的に利用しているシステムであれば，使用に対するリテラシーも高く，災害時に有効に機能する可能性が高いと考えられる．また，日常的

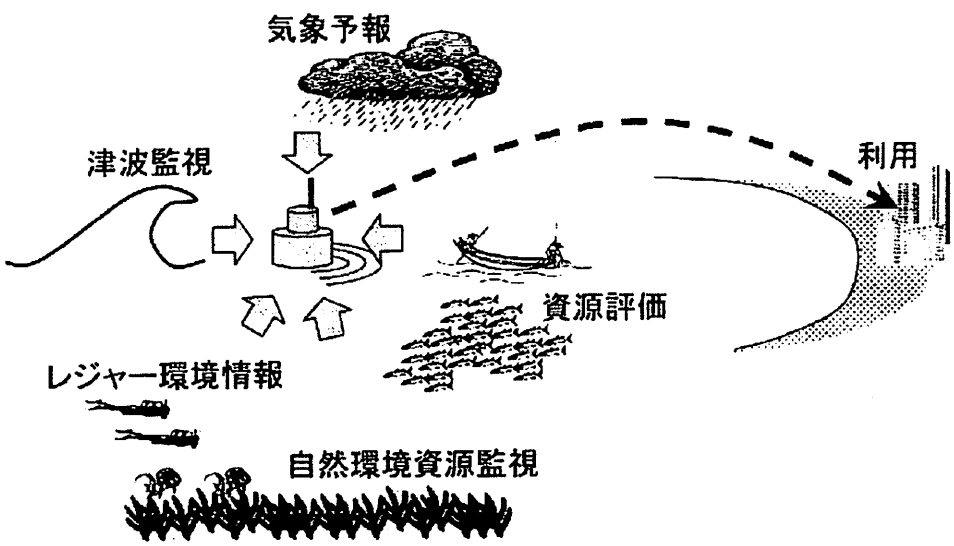


図１．５　多目的ブイを用いた津波警報システムの概念図

（出展：スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書[43]）

に利用していることで，利用している地域住民への津波防災へのリテラシー向上効果も期待でき，津波防災対策の課題である住民への啓蒙活動に貢献することが期待される．

2）シンプル・安価

提案されている多目的ブイは，シンプル(運用が簡単)で安価(経済的)なシステムであることを特徴としている．この主な効果としては，「持続可能性の向上」が挙げられる．現在インド洋沿岸の津波警報システム構築の際に参考とされている環太平洋で稼動している津波監視システムは，地球物理・海洋物理の究明という面では非常に有用かもしれないが，津波防災，すなわち津波の発生，襲来を察知し，警報を伝えるという用途に限って考えれば，オーバースペックであり，専門性の高い多くの専任の技術者や研究者によって運用される非常に高コストなもので，このようなシステムをインド洋沿岸で継続的に問題なく運用・維持し，次の津波の際に確実に機能するかという点については，甚だ疑問であるという指摘がなされている[44]．また，日本で導入されている数十 km に及ぶ海底ケーブルを伴う海底設置式水圧式津波計や，アメリカ合衆国で導入されている「ツナメータ」と呼ばれる大水深改定の水圧変動計測を伴うシステムは，高価であると共に，システム自体の長期安定性がまだ十分に示されていないとの指摘がある[45]．既に**1．1 5）**において，現在のインド洋沿岸の津波警報システムにおける資金・人材・技術の不足を課題として挙げたが，それらの課題の克服がなされない限り，環太平洋で稼動している津波監視システムをそのまま導入した持続可能な津波警報システムの構築は困難であると考えられる．それに対し，今回提案されている多目的ブイは，設置位置を沿岸に近くする，津波観測システムを必要最小限の機能に簡素化する等，できる限り安価で，運用が簡単なシンプルなシステムの構築を目的としており，より持続可能性のあるシステムであると考えられる．

3）ネットワーク化して広域監視することによる効果の拡大

提案されている多目的ブイシステムでは，日常的なブイの利用ニーズがある地域において，この津波警報システムの提案に賛同してもらうことで，大きなネットワークを構築することが可能であり，その結果としてより広域の津波観測ネットワークが構築できるというメリットが出てくる．ゆえに特定地域や国内ネットワークにとどまらず，インド洋沿岸諸国を対象とした国際ネットワークの構築が望まれる[46]．そうすることで津波発生時には，ネットワーク上のメンバーが観測した津波情報を他のメンバーが共同利用することで，津波警報のシステムとしてより有効なものとなる（**図1．6**）[43]．

4）既存の組織を運用主体として活用

提案されている多目的ブイシステムの運用主体としては，それを専門に行う組織を新たに作ることはせず，地元の観光協会，大手のリゾートホテル・ホテル協会，漁業関係者，地元自治体など既存の組織を運用主体として活用することが提案されている[47]．これによ

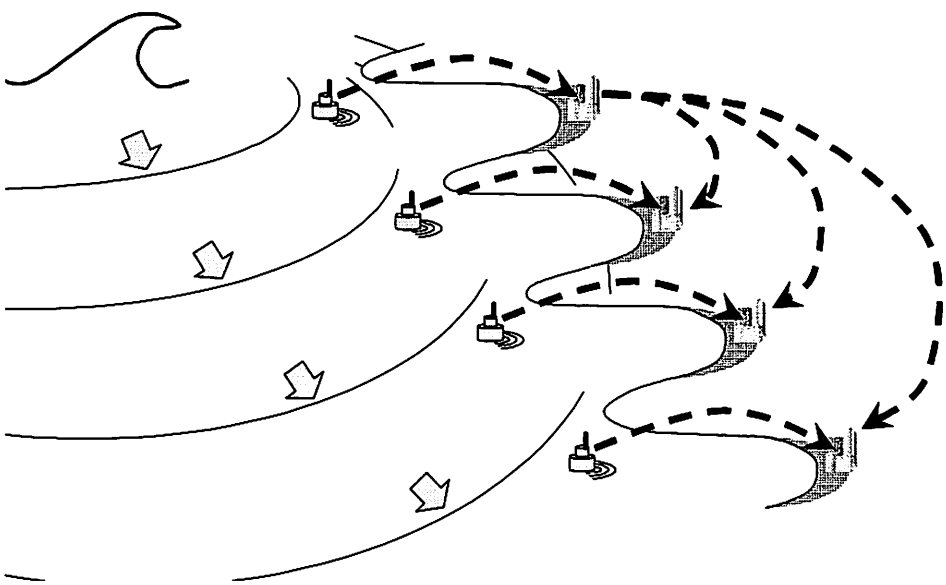


図１．６　多目的観測ブイシステムのネットワーク化の概念図

（出展：スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書[43]）

り，新たに組織を作る時間とコストの削減及び既存組織を活用することによる持続可能性の向上が期待されている．

提案では運用主体として，第一に大手ビーチリゾートホテルを挙げられている．物理的被害はほとんど出なかったにもかかわらず，風評被害で稼働率が低い観光地・協会・ホテルがリードすることが想定されている．これらのホテル・協会がブイを導入・運用し，自分たちの顧客向けに情報を提供し，「安全なビーチリゾート」としてのブランドを先行的に確立してもらい，その後徐々にそのブイが獲得する情報を地元の他のホテル，地元の漁業関係者，地元自治体へも提供していきながら，それらの関係者に運用経費の一部負担を求めていくことが考えられている．理由としては，ビーチリゾート地域において地元の経済が大手ビーチリゾートホテルを頂点としたピラミッド構造を形成していて，大手ビーチリゾートの復興・活性化が，地元経済全体を支えることになること，津波の影響の当事者であって，観測ブイの導入・維持の立ち上げの部分を負担できるような主体が他に見当たらないこと，物理的被害がないのに津波の風評被害を大きく受けていて，「安全なビーチリゾート」としてのブランド確立に積極的であること，大手ビーチリゾート経営母体は，他国のビーチリゾートも経営していることが多く，そのビーチへの多目的観測ブイの設置を促しうること，ほとんどの場合英語でコミュニケーションがとれ，比較的教育程度が高い人々が従事していてブイの意義を理解してもらいやすいことが挙げられている．しかし，ホテル業界に限らず地元の自治体，漁業組合等，他の組織が自発的に中心になることも十分に想定されている．

5）津波地震への対応が可能

提案されている津波警報システムは，直接観測できる海洋情報を活用しているため，津波地震に対して有効に機能すると考えられる．津波地震とは，地震のマグニチュードに応じて断層長さ，断層幅，滑り量を算出することで予測した津波の規模に対して，大きく上回る規模の津波が発生する地震のことを言う．地震のマグニチュードによる津波の予測は即時性には優れているものの，津波地震や横すれ断層による津波の場合の津波の予測値の修正が課題とされており[48]，本システムはこの予測値を修正し，より精度の高い津波観測情報を提供することに貢献すると考えられる．

1．3　本報告書の構成

我々の研究グループは，ここまでに述べた問題意識と，フレームワークのもと平成18年より4年間研究を進めてきた．本報告書では，その結果明らかとなった知見を，以下の構成で報告する．

第2章では，多目的海洋観測ブイを開発するにあたり，国内外の海洋観測ニーズに関す

る調査結果について報告する．第３章では，多目的海洋観測ブイの設計における考え方と，開発されたブイについて解説するとともに，その運用実験の結果得られた知見を報告する．第４章では，開発したブイをインド洋等の大洋の沿岸地域にどのように配置すればよいかを津波シミュレーションに基づき検討し，ネットワーク化された多目的海洋観測ブイによる人的被害軽減効果を検証する．第５章では，津波シミュレーションと避難シミュレーションの組み合わせにより，想定される様々な津波シナリオに対する，最適な避難施設の配置決定手法，避難誘導手法を報告する．第６章では，津波外力に対する避難施設の持つべき耐力について，スマトラ地震津波被災地の建物被害調査結果に基づく知見を報告する．第７章では，津波に対する住民の意識と避難意向に関する調査結果を報告する．

第１章の参考文献・Web サイト

[1]USGS HP　Magnitude 9.1 - OFF THE WEST COAST OF NORTHERN SUMATRA
http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2004/usslav/#details

[2]USGS　Largest Earthquakes in the World Since 1900
http://earthquake.usgs.gov/regional/world/10_largest_world.php

[3]Harvard Moment Tensor Solution Magnitude 9.1 OFF THE WEST COAST OF NORTHERN SUMATRA Sunday, December 26, 2004 at 00:58:53 UTC
http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2004/eq_041226/neic_slav_hrv.html

[4]USGS　News Release Magnitude 9.1 OFF THE WEST COAST OF NORTHERN SUMATRA Sunday, December 26, 2004 at 00:58:53 UTC
http://neic.usgs.gov/neis/eq_depot/2004/eq_041226/neic_slav_nr.html

[5]外務省緊急対策本部：スマトラ沖大地震及びインド洋津波被害, 外務省, 2005, 1, 21
http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/seisaku/kondankai/senryaku/20_shiryo/shiryo`6_1.html

[6]永井章：インド洋における津波警報システム,消防科学と情報(82),pp.24-28,2005/秋

[7]永井章：インド洋における津波警報システム,消防科学と情報(82),pp.24-28,2005/秋

[8]日経ビジネスアソシエ：自然災害,2006,02,07

[9]NTT データ：インド洋各国における津波防災対策,2006.9
http://e-public.nttdata.co.jp/f/repo/405_a0609/a0609.aspx

[10]NTT データ：インド洋各国における津波防災対策,2006.9
http://e-public.nttdata.co.jp/f/repo/405_a0609/a0609.aspx

[11]平成 18 年版　防災白書　本文 > 第１部 > 第４章 > ２ > ２－３　世界の早期警戒能力の向上
http://www.bousai.go.jp/hakusho/h18/BOUSAI_2006/html/honmon/hm01040203.htm

[12]Indian Ocean Tsunami Warning and Mitigation System (IOTWS) Implementation Plan pp.1-1
http://ioc3.unesco.org/indotsunami/documents/IOC_TS_71web.pdf

[13]NTT データ：インド洋各国における津波防災対策,2006.9
http://e-public.nttdata.co.jp/f/repo/405_a0609/a0609.aspx

[14]Indian Ocean Tsunami Warning and Mitigation System (IOTWS) Implementation Plan
http://ioc3.unesco.org/indotsunami/documents/IOC_TS_71web.pdf

[15]気象庁：インド洋津波監視情報について
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/fareq/TWI.html

[16]永井章：インド洋における津波警報システム,消防科学と情報,No82,2005 秋
http://www.isad.or.jp/cgi-bin/hp/index.cgi?ac1=IB17&ac2=82fall&ac3=3952&Page=hpd_view

[17]PTWC：Message indian.2007.09.12.112427
http://www.prh.noaa.gov/ptwc/?region=3&id=indian.2007.09.12.112427

[18]Pacific Disaster Center: National Disaster Warning Center, Thailand, Concept of Operation

[19]Pacific Disaster Center: National Disaster Warning Center, Thailand, Concept of Operation
[20]平成１６年度科学技術振興調整費　緊急に対応を必要とする研究開発等
スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書
[21]NTT データ：インド洋各国における津波防災対策,2006.9
http://e-public.nttdata.co.jp/f/repo/405_a0609/a0609.aspx
[22]平成１６年度科学技術振興調整費　緊急に対応を必要とする研究開発等
スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書
[23]National Disaster Warning Center: THE ANDAMAN WAVE JULY 25,2007 FULL-SCALE EXERCISE WITH EVACUATION IN SIX ANDAMAN COASTAL PROVINCES OF THAILAND
[24]平成１６年度科学技術振興調整費　緊急に対応を必要とする研究開発等
スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書
[25]NTT データ：インド洋各国における津波防災対策,2006.9
http://e-public.nttdata.co.jp/f/repo/405_a0609/a0609.aspx
[26]NTT データ：インド洋各国における津波防災対策,2006.9
http://e-public.nttdata.co.jp/f/repo/405_a0609/a0609.aspx
[27]INDONESIA: NATIONAL REPORT, ICG/IOTWS-IV,2007
http://ioc3.unesco.org/icg/files/Indonesia%20National%20Report_ICG_IOTWS-IV.pdf
[28]NTT データ：インド洋各国における津波防災対策,2006.9
http://e-public.nttdata.co.jp/f/repo/405_a0609/a0609.aspx
[29]NTT データ：インド洋各国における津波防災対策,2006.9
http://e-public.nttdata.co.jp/f/repo/405_a0609/a0609.aspx
[30]India Status Report on Setting up of an Early Warning System for Tsunami & Storm Surges, report for ICG/IOTWS-IV
http://ioc3.unesco.org/icg/files/Indian%20National%20Report%20for%20ICG%20IOTWS-IV%20Feb%2028,%202007.doc
[31]India Status Report on Setting up of an Early Warning System for Tsunami & Storm Surges, report for ICG/IOTWS-IV
http://ioc3.unesco.org/icg/files/Indian%20National%20Report%20for%20ICG%20IOTWS-IV%20Feb%2028,%202007.doc
[32]Sri Lanka Presentation ICG/IOTWS-IV,2007
http://ioc3.unesco.org/icg/files/Presentations%20Day%202/Sri%20Lanka%20National%20Report.pdf
[33]Urban Development Authority : Physical Planning Guidelines and Project Proposals for the "Vulnerable" Coastal Zone of Sri Lanka, January 2005
[34]平成１６年度科学技術振興調整費　緊急に対応を必要とする研究開発等

スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書
[35] NTT データ：インド洋各国における津波防災対策,2006.9
http://e-public.nttdata.co.jp/f/repo/405_a0609/a0609.aspx
[36] National Disaster Warning Center, Thailand : Information and Communication Technology Gap Analysis Report,2006.4
[37]プーケットナビゲーター
http://phuketnavi.hp.infoseek.co.jp/top/hktbousai.html
[38]NTT データ：インド洋各国における津波防災対策,2006.9
http://e-public.nttdata.co.jp/f/repo/405_a0609/a0609.aspx
[39]平成１６年度科学技術振興調整費　緊急に対応を必要とする研究開発等
スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書
[40]平成１６年度科学技術振興調整費　緊急に対応を必要とする研究開発等
スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書
[41]越村俊一,高島正典,鈴木進吾,林春男,今村文彦,河田惠昭：インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャルの評価,海岸工学論文集,第 52 巻,(2005),印刷中
[42]目黒公郎，織田浩平：津波災害時の避難行動シミュレーションモデルの開発,土木学会第 60 回年次学術講演会,Ⅱ-178,355-356(2005)
[43]平成１６年度科学技術振興調整費　緊急に対応を必要とする研究開発等
スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書
[44]平成１６年度科学技術振興調整費　緊急に対応を必要とする研究開発等
スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書
[45]永井俊彦ら：GPS 津波計測システムを活用した津波監視情報網をめざして,土木学会誌,2005,8
[46]平成１６年度科学技術振興調整費　緊急に対応を必要とする研究開発等
スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書
[47]平成１６年度科学技術振興調整費　緊急に対応を必要とする研究開発等
スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書
[48]大垣圭一ら：リアルタイム観測情報を利用した津波予報の段階的修正法,海岸工学論文集,第 53 巻,2006

第２章　海洋観測ニーズの分析

２．１　調査背景

2004 年スマトラ沖津波の被災地はビーチリゾートを中心とした観光業と沿岸漁業の混合地域であるが，これらの地域には津波以外にも多くの海洋観測ニーズがあると考えられる．

観光業の視点からは，まず，単純に正確な気象予報は，観光客の安全確保，またより良いツアーリングのタイミングを計るのに貴重な情報となり得る．ビーチリゾートでは，各種の自然現象（珊瑚の産卵，海亀の産卵，イルカ・鯨の回遊）の観察をイベントとしているが，水温，水質，流速等から，これらをより正確に予測できれば，より高い顧客満足を達成できるものと思われる．スキューバダイビングも盛んであるが，海中のコンディションも貴重な情報となり得る．現在大きな問題となっている「oo日にまた津波が沿岸を襲う」などの非科学的なうわさによる地域の混乱や観光客の減少を打破することも可能である．さらにサンゴ礁をはじめ希少な海洋観光資源を守る上でも水質の監視は重要と思われる．プーケットでは，“ERIN，Environmental Resource Information Net”と呼ばれる環境監視システムが予算不足でサスペンドの状態になっていることが，過去の調査におけるインタビューの結果明らかになっている．

漁業側から見ても，正確な気象予報は，漁民の安全の確保，より良い漁獲作業のタイミングを計るのに貴重な情報となり得る．また，水温，水質から漁獲に最適な時期，漁獲量が予測できれば，適正な価格維持に役立つと考えられる．

このような海洋観測ニーズを把握することは，多目的海洋観測ブイの観測機能を決定する上で，極めて重要である．ここでは，本研究で行った，タイ・プーケットにおける海洋観測ニーズに関するインタビュー調査と，日本国内における海洋観測ニーズに関する文献調査及び，アンケート調査の結果について報告する．

2．2　タイ・プーケットの海洋研究者へのインタビュー

Phuket Marine Biological Center (PMBC) [1], Department of Fisheries, Ministry of Agriculture and Cooperatives はデンマークのアンダマン海周辺沿いでの活動 5 周年を記念して，1966 年に建てられた施設である．PMBC はタイ周辺の海などの海洋生物保護や生態研究などを行うとともに，未来のために研究者や学生などの教育も行われている．

インタビューは 4 人の研究者を対象として 2009 年 9 月 21 日 9:00～16:00 に Phuket Marine Biological Center で実施した．

1）Dr. NIPON 氏へのインタビュー

Dr.Nipon 氏はアンダマン海のサンゴ礁の様子の研究している．サンゴは日の光が必要であり，水深 30m までの地域に生息しており，モンスーンの吹くような海岸での生息は少ない．サンゴの生息状況などの調査は 4 年に 1 回，目視で行われ，1 地点 2 分間の観察を行う．**図2．5**，**図2．6**は目視によるサンゴの存在する坂の部分の観察風景である．この観察は，1 地点につき，1～5 の 5 段階で評価（1 が良い評価）されるが，この評価方法はタイ独自のものである．

Dr.Nipon による説明ではサンゴがダメージを受ける原因は様々であることが分かった，台風によるダメージ，サンゴを餌にするオニヒトデの増加によるダメージ，津波によるダメージでは，2004 年スマトラ沖地震津波ではタイ周辺の被害地域に生息するサンゴの 15%が死んだことが分かった．平均水位低下によるダメージでは，**図2．7**の丸で示した，干潮時の平均水位の極端な低下時にサンゴが大量に死んだ．赤土によるダメージでは，**図2．8**で示したような森林伐採による赤土の流入による影響があった．サンゴの白化によるダメージでは，**図2．9**で示すようにサンゴは水温が 30.11℃を超えると白化することがわかっていて，地球温暖化により，アンダマン海でも**図2．10**のように年々平均水温が上昇中である，そのことが原因でサンゴの白化が起こっていることが分かった．しかしアンダマン海では冷たい水が海流にのってやってくる地域があり，その地域では白化はほとんど見られない．海藻などの増加によるダメージでは，今までは，海藻は魚やウニなどに食べられるためサンゴへの影響は少なかったが，人によるそれらの生物の乱獲により，生態系が崩れ海藻の増加が起きていた．乱獲の他にも**図2．11**のようなアンダマン海の赤潮の影響，**図2．12**のような観光のための海岸の道路整備によるダメージ，**図2．13**のような漁師の網が絡まったことによるダメージ，**図2．14**のようなダイバーによるダメージがあることがわかった．これらの影響に弱いサンゴの数は非常に数を減らしていて，影響に強いサンゴは生き残るという現象が発生しているので，生息するサンゴの種類が，現象している．

Dr.Nipon によると，人間が原因とするものや環境変化によるサンゴの減少が極端に進ん

でしまった地域では，**図2．15**，**図2．16**のようにサンゴの養殖がおこなわれている．水質汚染などがサンゴに与える影響については，アンダマン海の40～50地点で定期的に観測しているはずとのことであった．サンゴの成長には水温と水質が重要である．水質に関しては，酸素濃度，pH，リン，窒素，塩分濃度，沈殿物，浮遊量，沈殿物の量を調査している．

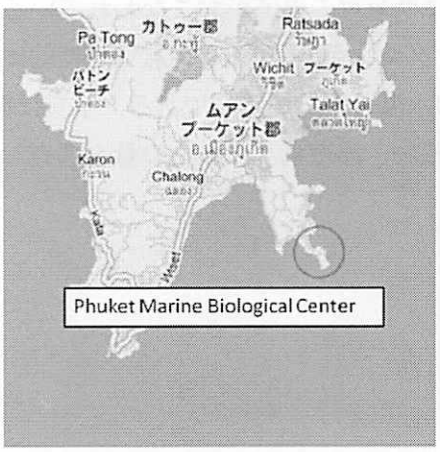


図２．１　所在地

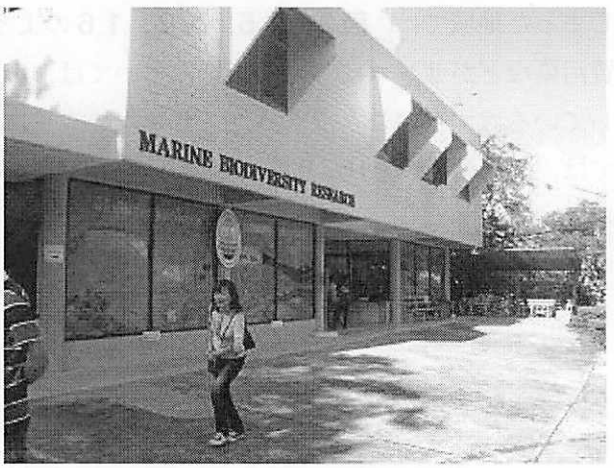


図２．２　建物外観

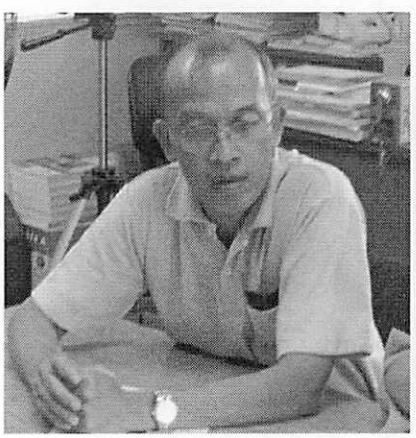


図２．３　Dr. Nipon

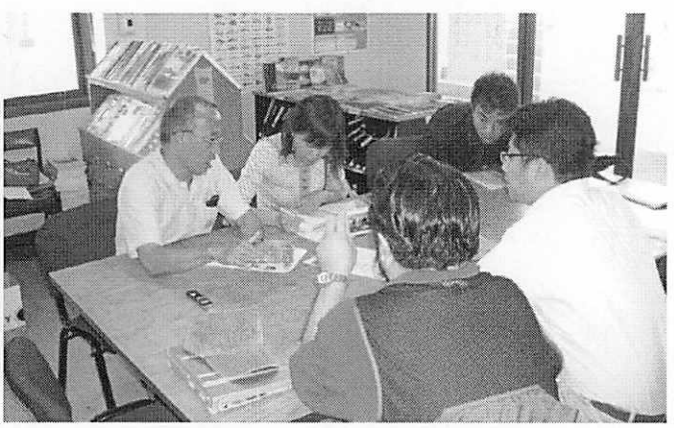


図２．４　インタビュー風景

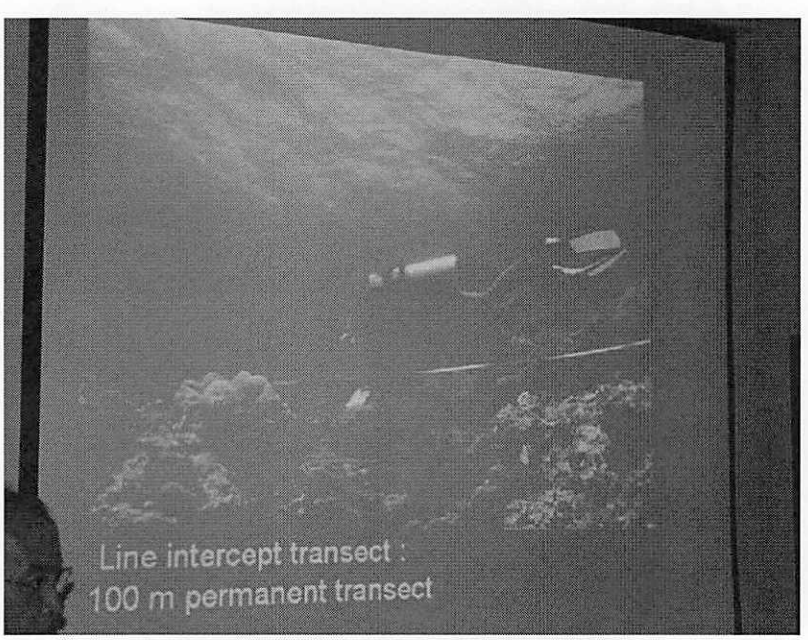


図２．５　サンゴの健康状態調査風景

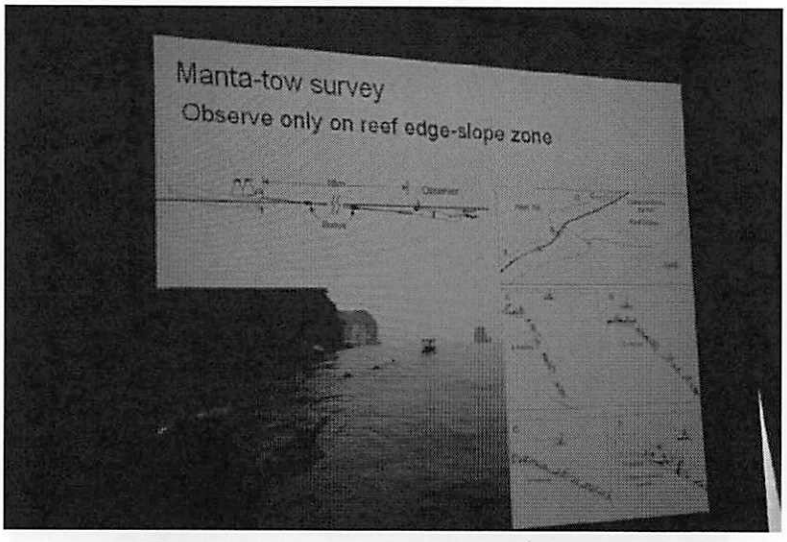


図２．６　サンゴの健康状態調査模式図

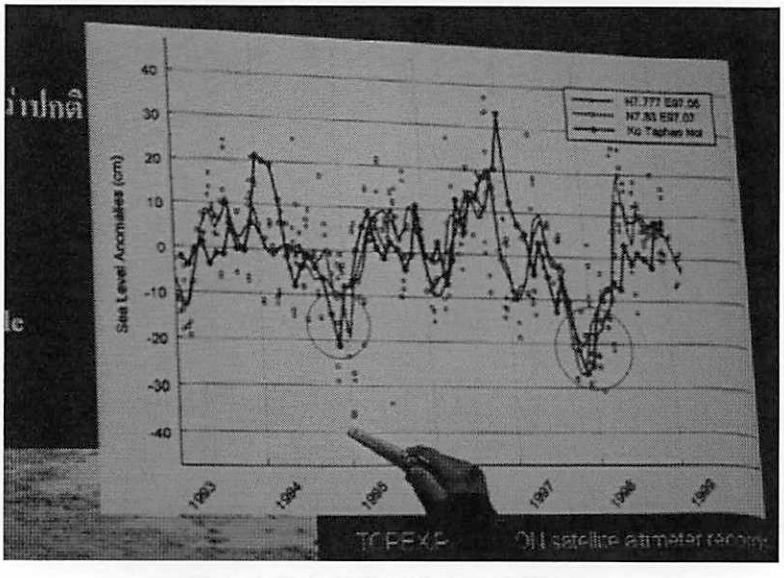


図２．７　平均水位低下のグラフ



図２．８　赤土の流入の原因となる森林伐採

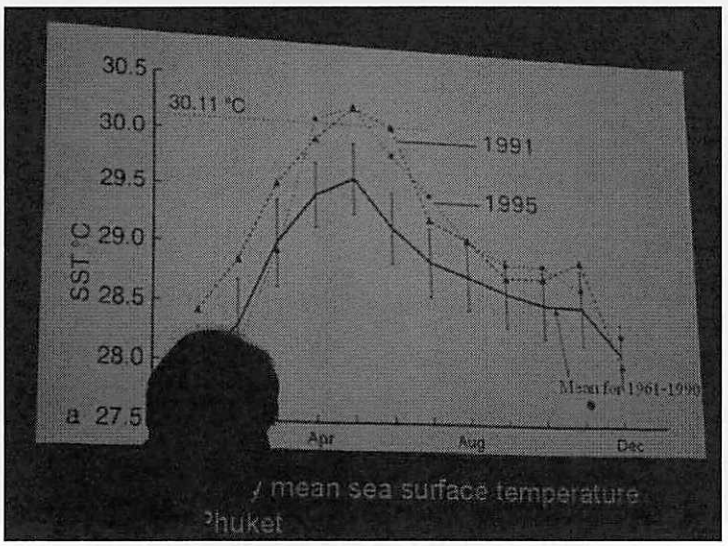


図２．９　月別の平均水温

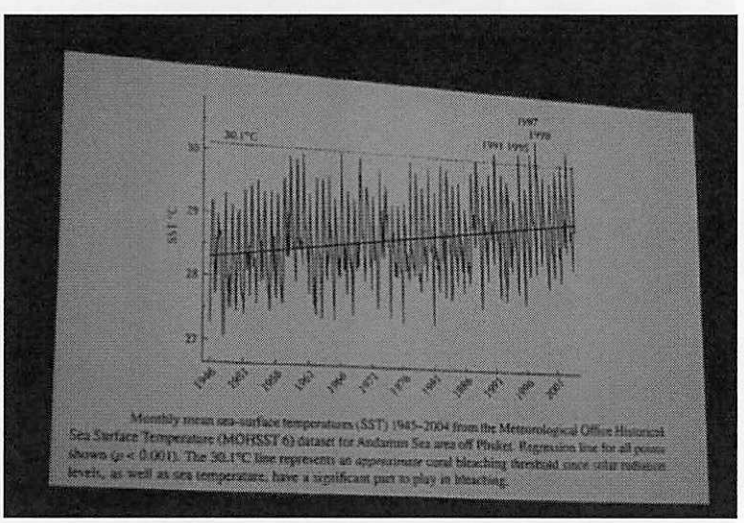


図２．１０　平均水温の上昇

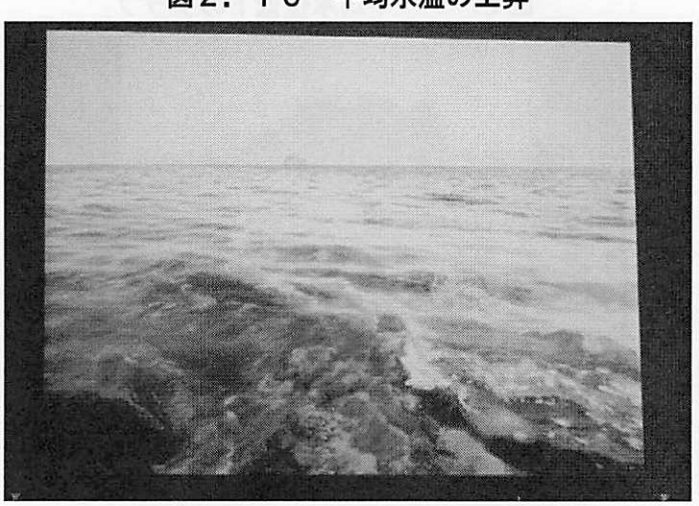


図２．１１　アンダマン海の赤潮

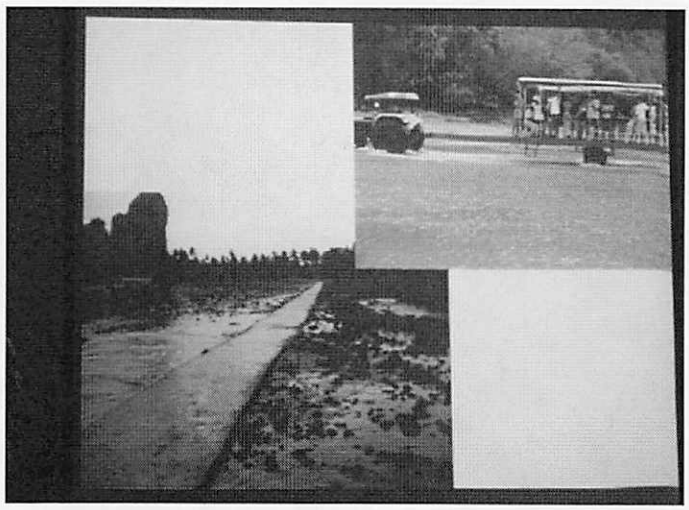


図２．１２　海岸の開発と車による進入

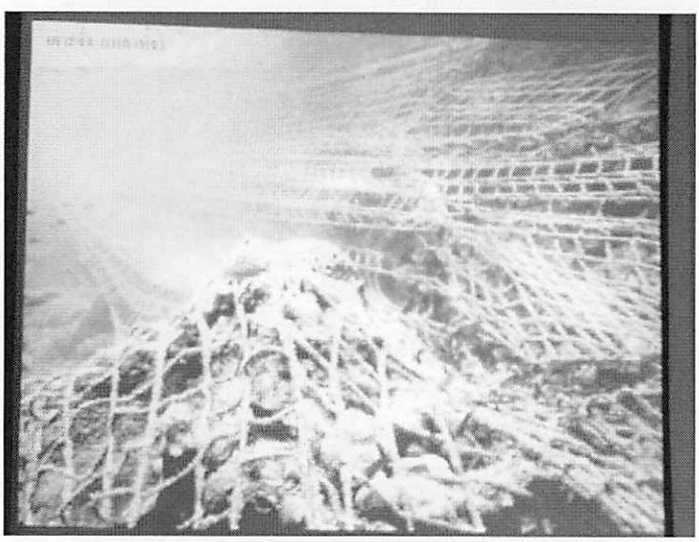


図２．１３　漁業用の網が絡まった様子



図２．１４　ダイバーがサンゴを踏んでいる様子

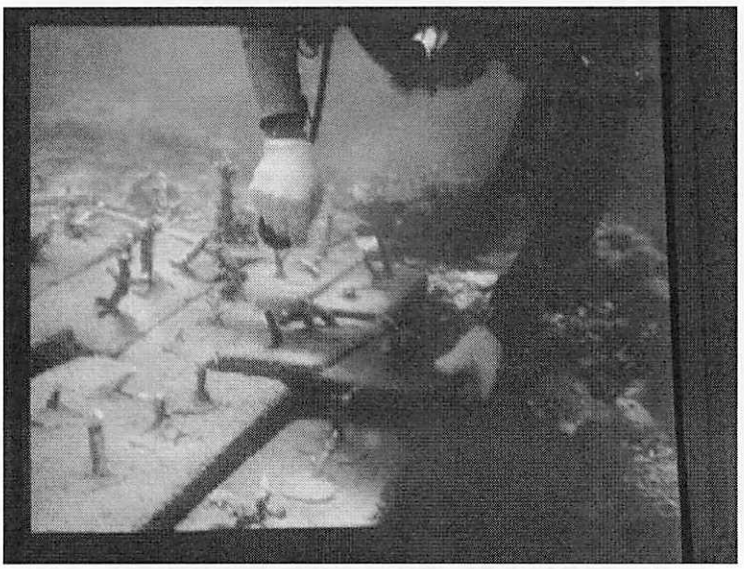


図２．１５　サンゴの養殖の様子

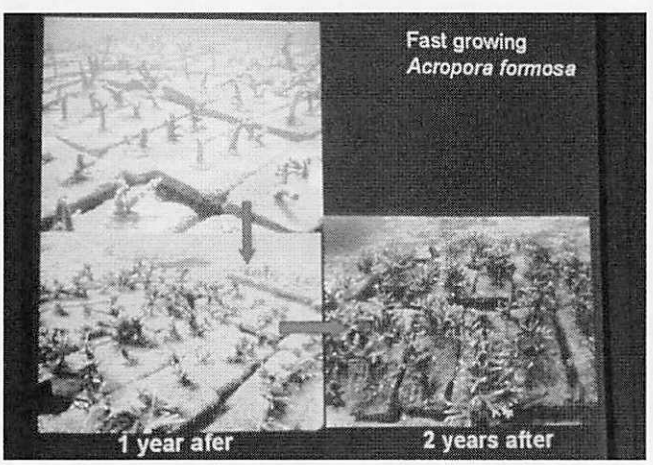


図２．１６　養殖サンゴの成長過程

2）Tipamat Upanoi 氏へのインタビュー

Upanoi 氏は，魚と無脊椎動物の生息数などの調査についての海洋生物学の専門家である．エビの生息数と生息地域の調査を割り出すような調査も実施していて，図 3. 20 は調査の結果で，赤いでエビの生息域を示し，その大きさが生息数である．Upanoi 氏たちのチームでは，魚と無脊椎動物の生息数などの調査も行っていた．調査は**図２．２０**の星で示された地域でおこなわれていて，方法は**図２．２１**，**図２．２２**のようにダイバーが潜ってロープを伝い，決められた距離を目視により，左右 5m の無脊椎動物や魚の個体数と種類を数えるというものである．しかし，この調査ではサンゴの中に隠れている生物は数えることができないので，**図２．２３**の方法を用いる．この方法は自然から得られた油を使用し，魚を眠らせ，出てきたところ数えるというものだ．手順はまず，ネットと袋を重ねたもので調査を行う場所を覆う．次に，袋の中に油を注入し，魚を眠らせる．最後に，袋からネットを取りだすと眠って出てきた魚が入っていて，その数を数える．調査の結果，調査が行われた 7 点の地域には 89 種類の魚介類がいることがわかった．**図２．２４**でその調査の詳細を示した．表の上段は調査で泳いでいるだけで確認できた数，下段は調査の際に眠らすことにより観察できた数，左列は観察できた種類数，右列は観察できた個体数である．

Upanoi 氏たちはその他に生息地域に対する魚などの種類数の調査も行っている．**図２．２５**は左からマングローブに調査時に生息していた種類数，真中は海藻，左はサンゴ礁である．**図２．２６**では各生息数でのオーバーラップも考慮した表である．この表の見方は 1 段目はマングローブと海藻の両方で観察された種類数と全体の種類数からの割合，2 段目はマングローブとサンゴ礁，3 段目はサンゴ礁と海藻，4 段目は 3 つすべてである．

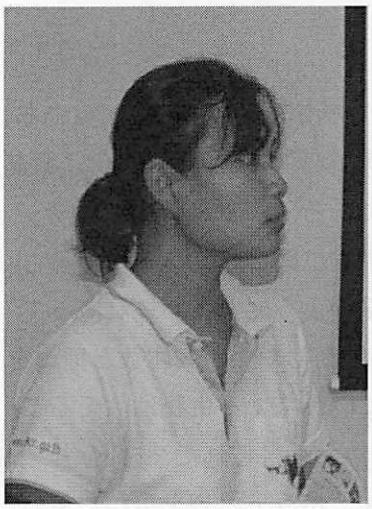


図２．１７　Tipamat Upanoi 氏



図２．１８　インタビュー風景

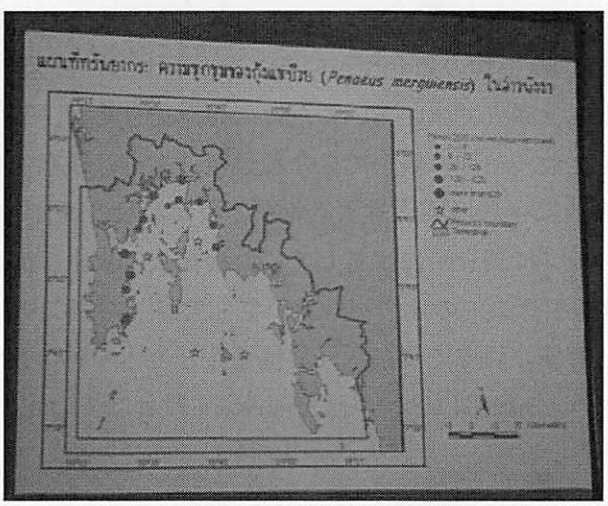


図２．１９　エビの生息地域と数の分布

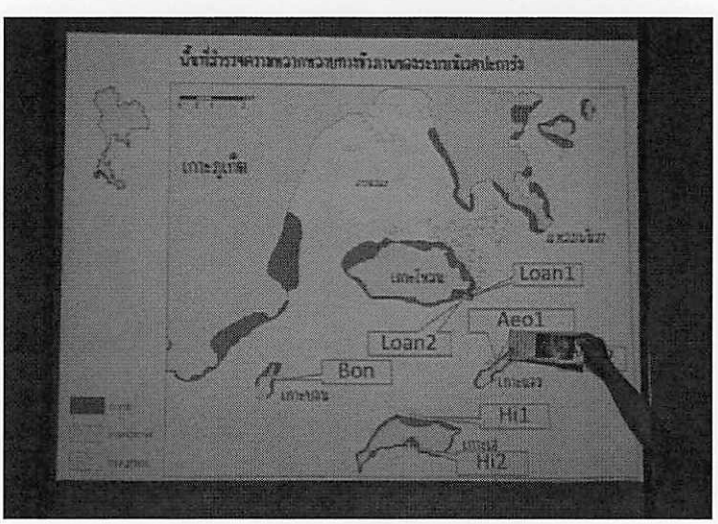


図２．２０　海洋生物調査地域

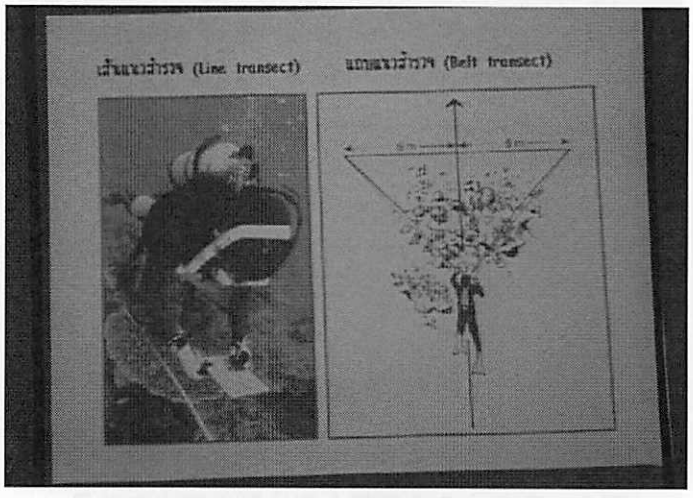


図２．２１　調査方法

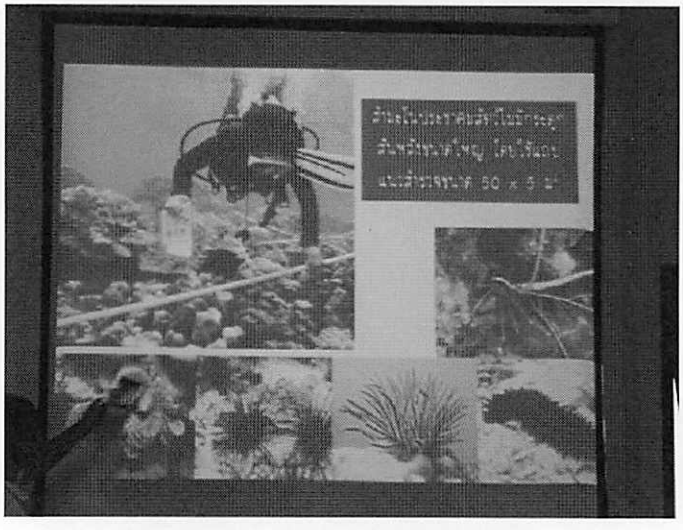


図２．２２　調査の様子



図２．２３　サンゴ内に隠れている魚の調査の様子

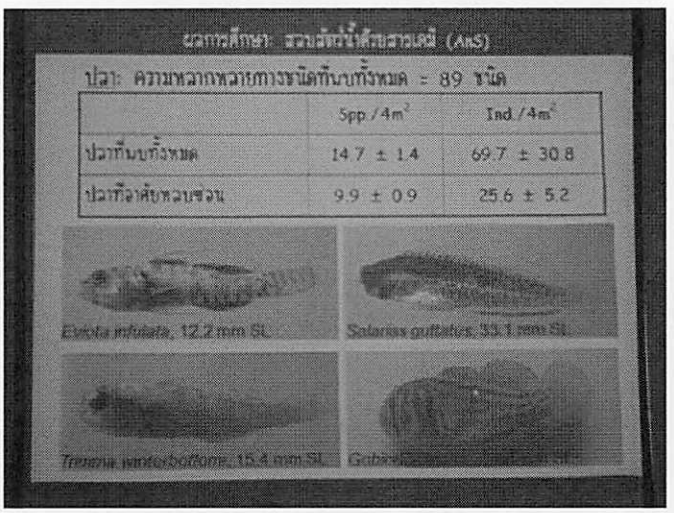


図２．２４　魚の種類と個体数の調査の結果

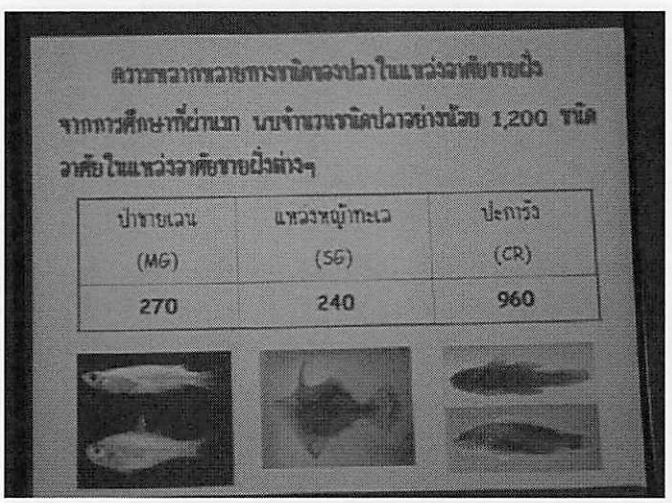


図２．２５　生息地域別の魚の種類数

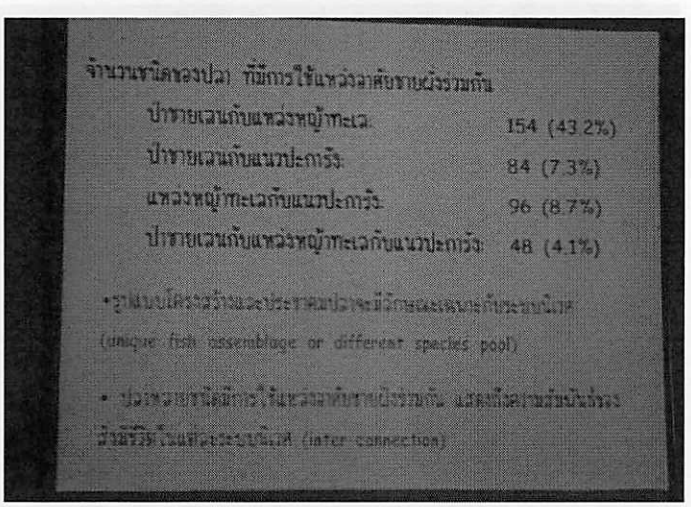


図２．２６　生息地域別の魚の種類数の割合

3）Dr. Somkiat Khokiattiwong へのインタビュー

Dr. Somkiat Khokiattiwong は IOGOOS のメンバーの一人でモンスーン下での気候と水温の関係などや気候と水温からのモンスーンの発生状況などの研究をしている．その研究で，彼は ADCP（Acoustic Doppler Current Profiler **図2．29**）を搭載したブイをタイ領海に設置しようとしている．タイ政府にその設置の許可を得るために申請している．そのほかにタイでは，3 つの国際的なプロジェクトが進行中である．以下は，Dr.Somkiat との質疑応答の内容を示す．

2005 年に IOC（Intergovernmental Oceanographic Commission）はブイを導入したが，そのブイは，次いつ使われるかわからないので，非効率的である．だから気象学的なデータの収集を行うべきである．IOC の活動としては，11 月に DART ブイをマニラに設置する予定である．

<Interviewer>　研究のためにどんなセンサーが必要か？
<Dr. Somkiat> 気温，プロファイルの水温データ，流向，流速，風速，風向

<Interviewer>　現在タイ政府が許可を出しているブイはいくつあるのか？
<Dr. Somkiat>　1 つしかない．それは internal wave の研究のために使用しているブイで中国のブイ，リアルタイムに観測できるではなく 2 週間と 4 カ月という 2 つの期間で区切り観測データを収集している．アンダマン海の気候などの研究をするためには，気温と風と潮汐の上下動とそれに伴う水温の変動を知ることは重要である．

<Interviewer>　なぜリアルタイムにデータを送れないブイを採用したのか？
<Dr. Somkiat> コストが小さいから．
<Interviewer>　あなたはいくつのブイを研究のためにすでに設置してきたか？
<Dr. Somkiat> タイの領海内には今は 1 つもない．12 年前に国内のリゾートの要請で 7 個のブイが政府によって置かれた，それらのブイは 7～10 年運営されていた．

<Interviewer>　設置されたブイが，7～10 年で運営が終了されたのはブイ自体の寿命を迎えたのが理由？
<Dr. Somkiat> ブイ自体が原因ではなく運営費が高く運営が困難になったからである．

<Interviewer>　リアルタイムではないブイの寿命はどのくらいの長さか？
<Dr. Somkiat>　3 年間の実験を考えているがそのあとにさらに続けるかどうかは中国次第である．タイ自体でも津波警報システムを導入しようという動きがある，名前は覚えてい

ないが，スマトラ沖地震津波が起きた後に設立されたセンターがその運営にあたる．

<Interviewer>　どのような機能をブイに導入する予定ですか？
<Dr. Somkiat>　HF レーダーを導入する予定である．（日本でも大阪にある．）

<Interviewer>　あなたの研究はモンスーン下での気候と海の関係についてだそうですが，その中で重要なパラメーターはなにか？
<Dr. Somkiat> 気温とプロファイルの水温データとサクレイションと風向，風速などの気象データ

<Interviewer>　化学的なデータは収集していないのか？
<Dr. Somkiat> 化学的なデータは重要ではない．例えば internal wave の研究をしている．これは，アンダマン海にあるシミラン島やピピ島などの島々では 1～3 月に岸の近くまで internal wave が来ることによってサンゴなどに悪影響を及ぼすことを調査するためである．しかし，化学的なデータを使っている研究も行われていて，それは EU の行っている気候変動によるサンゴの白化について研究で，pH の変動がサンゴにどのような影響を与えるかについて研究に使用されている．具体的には，通常時のアンダマン海の pH は 8.2 であるが CO2 の増加により CO2 が海に溶け出し，pH が下がって現在は，7.8～7.9 になっていてサンゴに対して影響を及ぼしている．

<Interviewer>　現在，導入しようとしているブイのコストは？
<Dr. Somkiat> ADCP は一基につき，130 万バーツかかり，1 つのブイについて 2 基搭載する予定である．水温センサーもプロファイルデータをとる予定なので 1000 米ドルくらいかかる．太陽光発電にもコストはかかるので，非常に大きな資金が必要となる．
<Interviewer>　多目的ブイを導入しようとするとどの距離に置きたいか？
<Dr. Somkiat> 岸から 300km～400km で約水深 1200 の地点に置きたい．なぜなら岸に近い情報は容易に収集できるが，遠くのデータは難しいから

<Interviewer>　現在，いくつの観察点がこの周辺にはあるか？
<Dr. Somkiat> 島の西に 3 個と東に 3 個の計 6 個，水温を計測することができる気温 decoy を設置している．このデータロガーはアメリカ製の形状は小さく 30 分に 1 度データを取得しており，ダイバーなどに盗まれるのでサンゴの中に隠している．タイ政府は現在，潮位などをリアルタイムに観測するために政府下で携帯電話による通信機器を開発している．名前は NETC でコストは小さくて済む．

<Interviewer>　decoy のデータはどう集約しているか？
<Dr. Somkiat> 海岸から 500m～3km の fix ステーションがあり，そこが収集する．アンダマン海では 3 個のステーションが海岸から 100～500m 以内にある．

<Interviewer> なぜビーチとの通信機能を decoy に搭載しないのか？それは盗難が原因か？
<Dr. Somkiat> 一番の理由はコストが大きいことである．そんなに可能性は高くないが，盗難も理由の 1 つである．オペレーションの予算はオペレーションでしか使えない．装置を買う予算は買うことしかできない．という制度がタイであるため国の物を失うと調査をしなくてはいけないし，金も払う必要がある．

<Interviewer>　Tsunami Tax を考えているがどうか？
<Dr. Somkiat> すでに Room Tax がある．それはパトンなどの地元の政府が集めている．だから地元の政府に聞くといい．

<Interviewer> あなたの研究ではリゾートアソシエーションなど民間の組織とプロジェクトはしているか？
<Dr. Somkiat> 私たちは，いつもプーケット県などの地元政府とプロジェクトを実施している．県からその予算が来ている．しかし協力的な組織はあると思う．グリーンフィンという人々にサンゴなどとの設置方法を教えている，ダイバーズの組織とホテルの組織からなるボランティアの組織があり，そこは海洋情報などを収集している．

以下インタヴュー内に出てくる用語について補足する．

a．ADCP[2)]

音響を利用し川や海の流速や流向を測る機器である．ブイやボートにつけ海底や波の研究のために使われる．

b. 3 つのプロジェクト

ここで言う 3 つのプロジェクトとは

(1)Clivar

(2)IOGOOS

(3)RAMAbuoy

(1)CLIMATE VARIABILITY AND PREDICTABILITY (Clivar[3)]) **図2．30**

Clivar が中心となり Indian Ocean GOOS と the Intergovernmental Oceanographic Commission, の協力を得て，インド洋の中の海洋情報を共有し，集約するようなシステムを作ろうとしているプロジェクトである．

(2) Indian Ocean Global Ocean Observing System(IOGOOS) [4)]

GOOS のインド洋担当の機関, 気候の変動などの調査のために海洋情報などの観測を行う機関で，海洋情報の取得を目指している.

(3)RAMAbuoy（**図2．31**）

RAMA(Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction) というプロジェクト名のもとでNOAAが国際的な観測網の構築計画の一環として行っているのも．ブイの構造などは，トライトンブイと変わらないものの，測点が増えることで，温度，風力，湿度などの気象データに加え，深度別の温度，圧力や津波センサーなどを観測することで，環境の状態をより正確に測り予想する根拠となることが期待される.

c. internal wave[5)]（内部波）

水温の違いや密度に違いにより発生する層ができる．この不連続面の振動を内部波（内部静振）と呼ぶ.



図２．２７ Mr. Somkiat Khokiattiwong



図２．２８　インタビュー風景

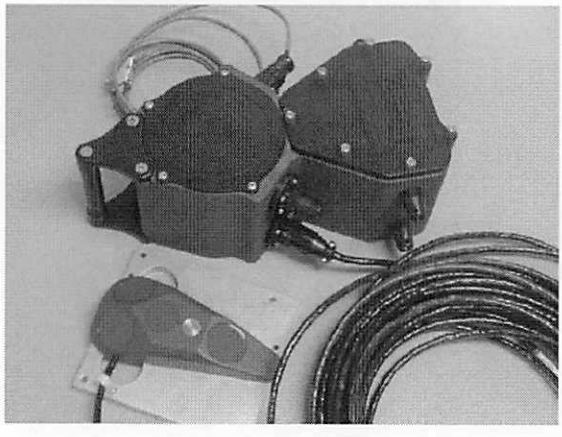


図２．２９　ADCP

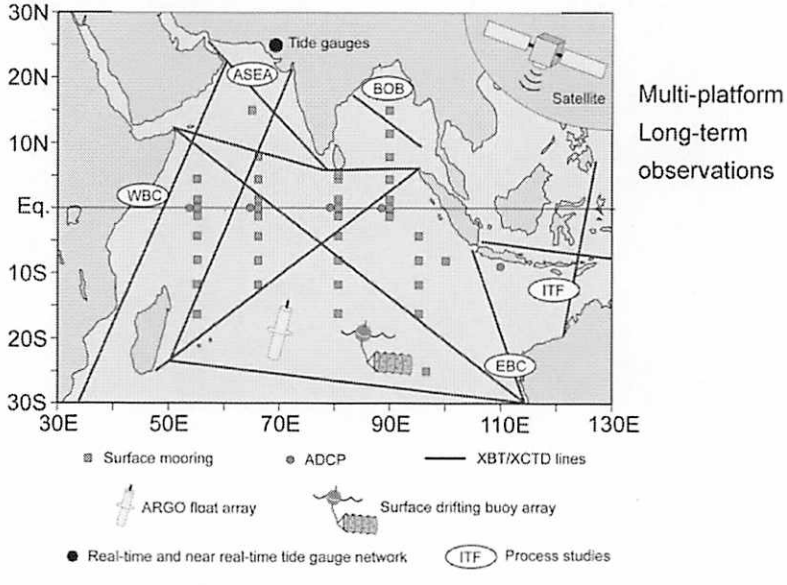


図２．３０ Clivar 概念図[6)]

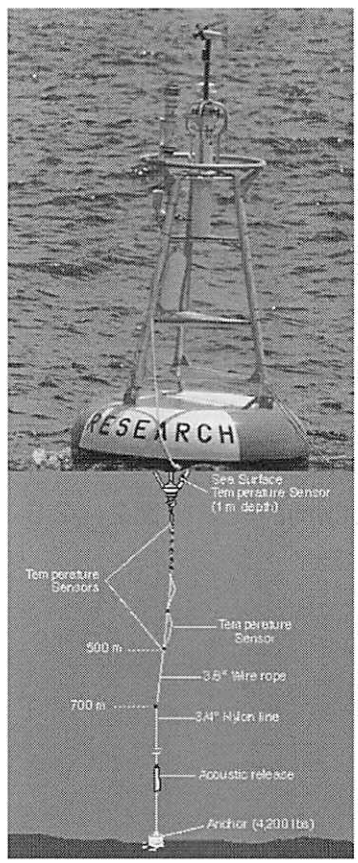


図２．３１　RAMAbuoy[7)]

4）Dr. Kongkiat 氏へのインタビュー

Dr. Kongkiat 氏はウミガメの研究をしていて，ウミガメの研究を進めるためには水温，ウミガメの産卵場所の砂浜の温度が重要である．なぜなら気温により，ウミガメの性別と産卵の量が決まってしまうからである．例えば，水温とウミガメの産卵数には，**図2．34**のように相関関係がある．水温が高い時には産卵数が多くなり，低い場合には産卵数が減る．1998 年のようにエルニーニョなどが原因で水温が極端に上昇した場合には，産卵数は減少する．水温が極端に低い場合も減少する．産卵場所の砂浜の温度とウミガメの性別にも関係がある．**図2．35**は孵化したウミガメのメス割合であるが，この図を見ると，図で見ると右の方，つまり温度が高い場合にメスの割合が高くなり，左の方，温度が低い場合にメスの割合が低い，つまり，オスの割合が高くなることが分かる．近年の地球温暖化によってウミガメのメス化が起こっている．これに対し温度と性別の関係を利用し，低い温度で人工的に孵化させることで性別の調整も行われている．

Dr. Kongkiat 氏らはウミガメの生態や産卵時期の調査のためにウミガメの動きを発信器（**図2．36**，**図2．37**）などを用い観察している．その研究により，成長すると 2～3 年周期でまた孵化した海岸に戻ってくることがわかっている．そこで**図2．38**のように動いているウミガメの場合，いつ産卵のために帰って数が増加するかは，プーケット島と反対側にあるニコバル諸島の水温とプーケット周辺の水温を観察することで予測できる．

<Interviewer> 温度の他に重要なデータはあるか？
特にない．一番水温などの温度が重要だから．

<Interviewer> ダイバーなどのためにウミガメが浜に帰ってくる時期を予測できるか？
<Dr. Kongkiat 氏> 岸から 5～6ｋｍの地点で水深 10ｍのところで調査を行っている？
20 分ほどで息継ぎをするから発見できる．

<Interviewer> 他にブイを何か利用できることはないか？
<Dr. Kongkiat 氏>我々のユニットではジュゴンの保護をおこなっていおり，その中でジュゴンの食料確保のために海藻を観察していている．観察のために特定のエリアの図を撮って観察を容易にできるようにしたい．その活動は沖縄県にある琉球大学と協力し行っている．

<Interviewer> ウミガメの動きを追う機器は寿命はどのくらいの長さか？
<Dr. Kongkiat 氏>ウミガメに動きを追うのは，小型のものだと１～４か月で限界になる．大型なものになると１年くらいになる．



図２.32　Dr. Kongkiat 氏

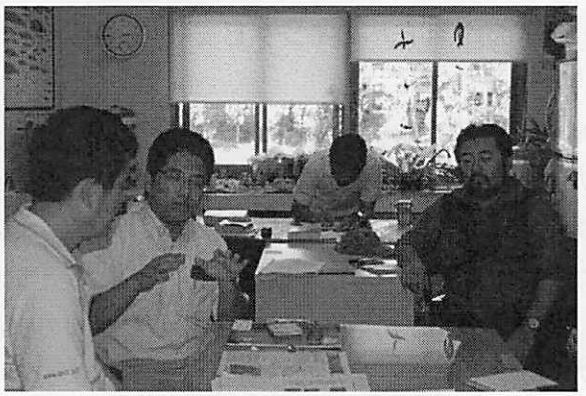


図２.33 インタビュー風景

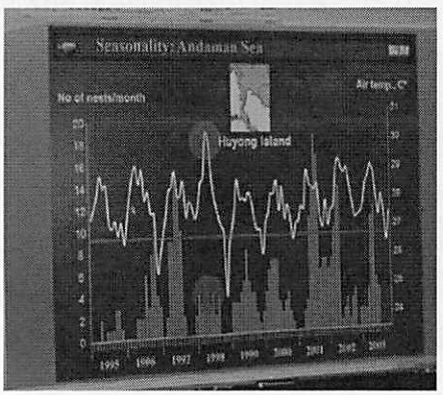


図２.34　ウミガメの卵の産卵数と水温

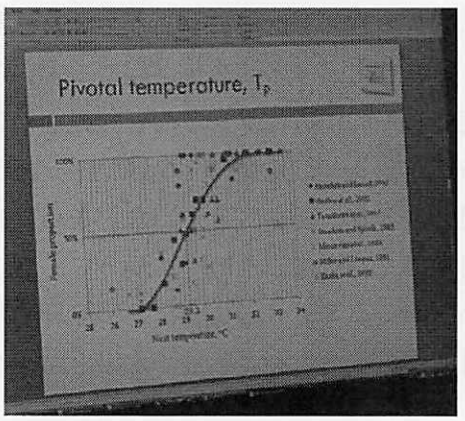


図２.35　ウミガメのメス比率と水温

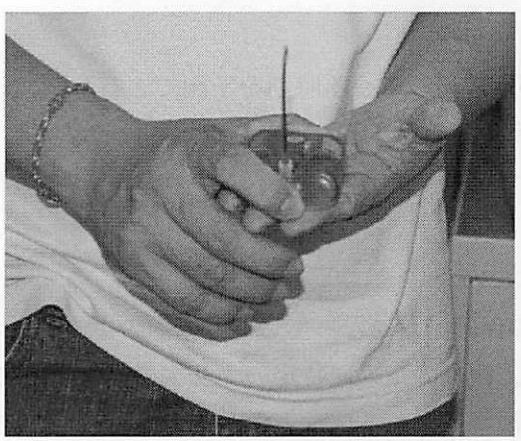


図２.36　ウミガメに設置する発信器

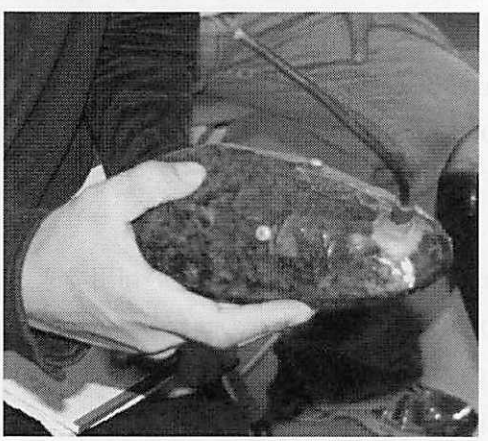


図２.37 ウミガメに設置する大型発信器

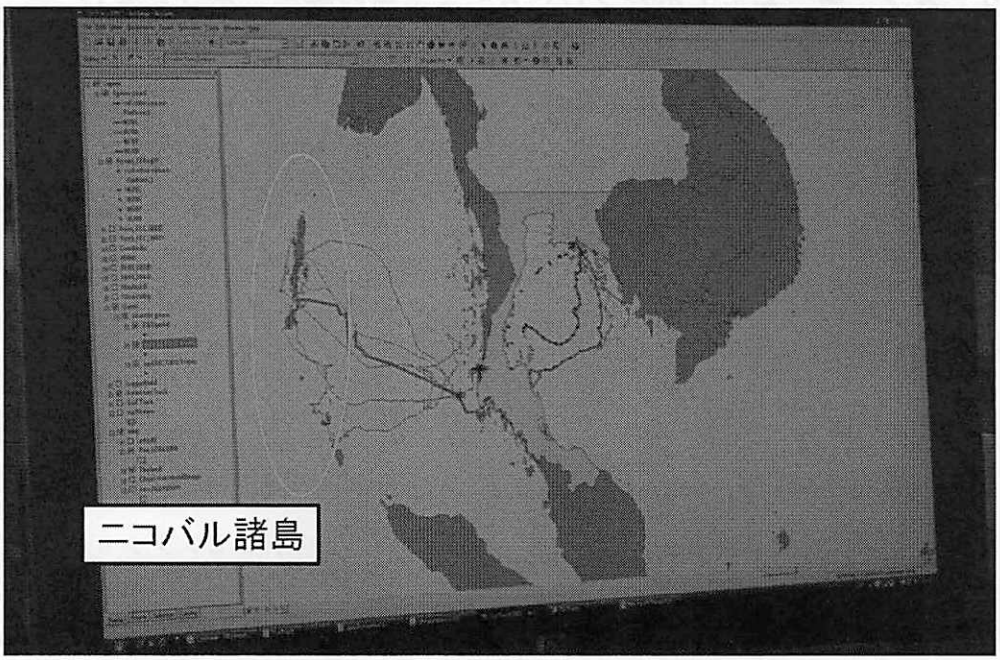


図2.38　ウミガメの泳ぐ経路

2．3　タイ・プーケットのダイビングショップ経営者へのインタビュー

1）カタダイビング[8]経営者　宮下氏へのインタビュー

カタダイビングはタイの日本人経営ダイビングショップで，プーケット周辺の様々なダイビングツアーの手配を行っている．

インタヴューは2009年9月21日にプーケット市内カタダイビング店内で行った．

カタダイビング　オーナー　宮下一和司 氏（プーケット日本人会会長）によるとスマトラ沖地震津波の後，観光業は非常に大きなダメージを受けた．特に日本人が起こしたダイビングショップなどの撤退が相次いだ，というのも，これらのダイビングショップでは日本人観光客が中心的なユーザーであったからである．日本ではプーケットが壊滅的だという報道が流れ，その後の回復状態をメディアが報道しなかったため，様々な機能が回復したにも関わらず，日本人観光客がプーケットへの観光を控えるという現象が起こった．

津波対策としては，観光客プーケット宮下氏らはブイ自体がタイの沖合に浮いているのは知っていて，津波が起こると警報が流れるという話は聞いているが具体的な話は何も聞いていないが，年に1回訓練が行われている．沖合に浮いているによる誤報が1度，流れたことがある．宮下氏らはタイ政府と協力し日本にブイなどが整備されていのので，プーケットは安全だとアナウンスしている．

ダイビングとしては，多目的ブイを利用し長期的なデータを収集し蓄積することにより，ジンベイザメ，イルカなどの出現情報を予測することができれば，より効率的に運営ができ，「なぜそれらの生物が来るか」が解明できれば，生物の保護などを実施できるとメリットがある．今の海洋生物の出現予測などは完全に漁師やダイバーの勘と実際に海に出たときの発見情報に頼っている．その他，プーケットでは環境面森林の伐採が進んだこと，人が増加したことで汚水の流入，赤土の流入が増加しサンゴが減少などによる環境破壊が観光業者としても影響を受けているので，多目的ブイを利用することにより，長期的な調査を行い，そのデータに基づいた，環境保護が行えればメリットがある．

多目的ブイの導入には旅行業界からプーケット県とTATをプッシュしてもらえれば良い．TATではもっと観光客を呼びたいと考えているので，津波に対する安全を国外にアピールできることを主張すると，協力を仰げるのではないかと考えている．宮下氏にもTATから「なぜ日本人は観光に来ないのか」と相談を受けている．

実際導入することを考えると盗難が問題となってくる．それらの問題としては，軍の管理下であれば，盗難の可能性は少ないと考えられるが，管理が行き届きにくいと盗難の可能性が非常に高いと考えられる．例えば，タイのナショナルパーク付近では漁が禁止されている地域があり，そこは乾季ではナショナルパークに政府の管理人がいる．しかし，雨

季には非常に波が高くなるので，そのナショナルパーク付近を利用する人がいないために管理人がいなくなる．乾季では漁は行われないが，管理人のいない，雨季では漁が行われているという現状がある．盗難を防ぐためには，漁師の人たちにオーナーシップを感じてもらい，自分たちにもメリットがあるとアナウンスする必要がある．

<Interviewer> ダイビングに必要な情報はどのようなものであるか？
<宮下氏> サンゴの白化が問題になっているので，観光資源保護の観点から温度などを取れれば意味があるものになると思う．

<Interviewer> ダイビングスポットの監視をするような利用はどうか？
<宮下氏> 今は，ジンベイザメやマンタなどの生物が来るかどうかは完全に経験なので，ジンベイザメが来るか予報できるようなパラメーターを収集するとよいかもしれない．シミラン諸島（水深約３０ｍで陸からの距離は３０～５０km）の近くに据え付けて，１年間データ収集すると雨季でもジンベイザメが来ているかが分かればより有効に使える．

<Interviewer> 水温などの情報は必要か？
<宮下氏> 現在は，ダイバーが潜った人が計測していてその計測結果が蓄積されている．

<Interviewer> データをどこで取りたいか？
<宮下氏> スリン島のリチェールロックにおいて，データを収集することによってジンベイザメが出現予報などを実施してほしい．雨季は５～６ｍの非常に大きな波になるので雨季にはダイビングは難しい，だがその間の情報も欲しい．スリン島の近くだが携帯電話は通じない地域



図2.３９ 看板



図２．４０ 建物外観

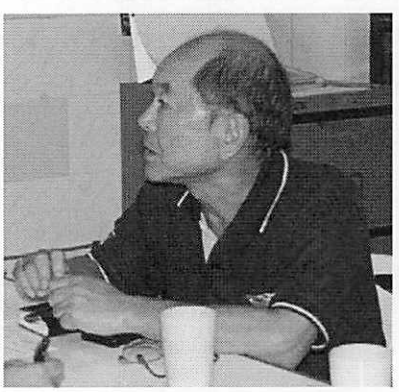


図２．４１ 宮下一和司 氏



図２．４２ インタビュー風景

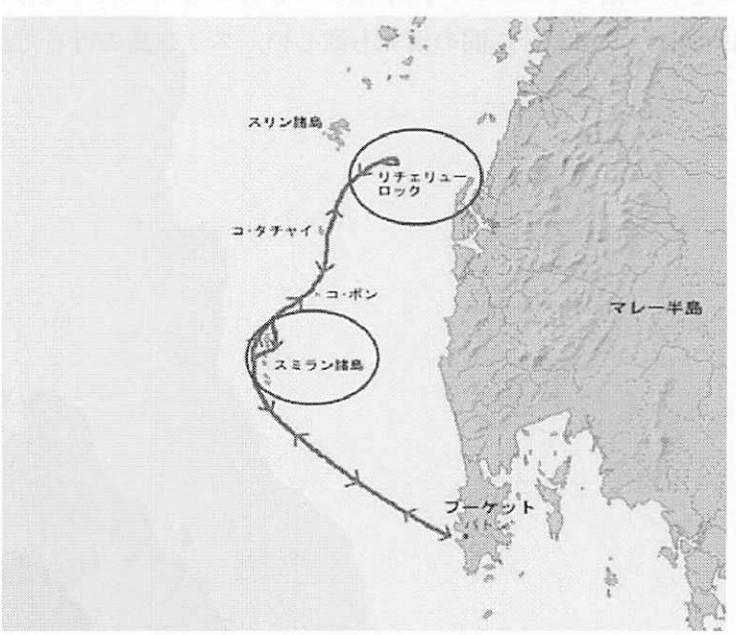


図２．４３ シミラン諸島とリチェールロック地図

2）ダイビングアウトレット[9]経営者・藤中氏へのインタビュー

ダイビングアウトレットはタイの日本人経営ダイビングショップで，プーケット周辺の様々なダイビングツアーの手配を行っている．

インタヴューは2009年9月22日に，プーケット市内レストランで行った．

<Interviewer> ダイビングに必要な情報はどのようなものであるか？
<藤中氏>基本的にダイビングにおいて判断のベースとなるのは蓄積された経験である．現在利用している情報の中で特に重要なものは潮汐のデータである．潮汐データは潮の流れを予測するために必要なデータである．ロイヤルネイビーから1年に1回潮汐予測が出ており，この情報を取得している．しかし，この潮汐情報は大まかな範囲の潮汐情報であり，個々のダイビングスポットで得られた経験とは逆のデータであることがある．また，WindGURU[10]（風向・風速・波高・波の周期・波向・気温・雲の量・雨量の一週間分の予測値が得られる.）というサイトがあり，このサイトの情報も参考にしている．このサイトは全世界のサーファーやダイバーが参考にしているサイトなので，一度見てみるとよい．サイトの情報は4時間おきに更新されている．

<Interviewer> 今後観測ブイを置くとして，あればよいと思われる情報はどのようなものであるか？
<藤中氏>1週間後 2 週間後の海洋情報の予報がわかれば最高である．さらには詳細な地域のデータがあればよい．たとえば日本のインターネットで入手できるような詳細な地域の天気予報のようなものがあればよいと思う．

また，ブイを観測のために用いるだけではなく，ダイビングスポットとしての魚礁として利用するのが良いと思う．魚礁として機能するブイであれば，日常利用できるブイとしてダイビングには有益である．浮き漁礁というものが日本でも設置されているので調べてみるとよい．ちなみに，漁礁の実験はアンダマン海でたくさん行われている．しかし，1年で95%は残骸になっており，私に言わせると産業廃棄物である．

<Interviewer> 風評被害対策として，ブイ設置による安全対策をアピールすることは可能か？
<藤中氏>シミラン諸島の No.4（**図2．46**）で波の高さを計測していることを以前聞いたことがある．インタビューを行っていたが，わり箸のようなもので計測しているだけであった．現在はどうなっているかはわからない．安全対策を行っているといっても現在はこのようなレベルである．カロンビーチはブイによる波高計測で津波警報システムを導入して

いるが，3 回誤作動が起きている．そのため，警報が鳴っても誰も逃げない状況である．

<Interviewer> 先進国では世界中の地震波を感知できる．究極には地震波を感知した時に津波来襲地域の知り合いに電話などで知らせてあげれば津波対策になるのだが‥

<藤中氏>現在タイでも携帯電話会社によって津波警報を携帯電話で知らせるサービスもある．しかし，津波時に携帯電話が使えるかどうかわからない．

<Interviewer> ブイの設置について
<藤中氏>ブイの設置するにあたって，水面にブイを置くと船の運航上の問題がある．ブイに目印としてライトをつけているが，波が 4m あるとブイにライトをつけても見えない．タイ人は今日明日のことしか考えられない．将来予報に役立つようなデータを取得しているというような話をしても今日明日の不利益があると無理である．つまり，将来のためのデータを取るというだけの名目でブイを置いたとしても受け入れられない．

<Interviewer> 昔と今とで海洋資源の量は変わったか？
<藤中氏>昔と今では魚の量は変わらないと思う．個別の事例としてはカツオの群れがいなくなったなどあるが，逆に昔はいなかったところに魚がいるようになったという事例もある．海洋資源の減少に関連して問題となっているのは資材の搬入である．プーケットのリゾートホテルを建設するために大量の資材を搬入しなければならないが，搬入のための運搬船が出す汚染物質がとてもひどい．船のガソリンや漁船のアンカーなど，人の活動でサンゴなどが壊れてしまった面はある．

<Interviewer>エコに気を使っているということが，ビジネス上魅力が高い・有利になることはあるか？
<藤中氏>ブイを設置することがエコにつながるのか？直接的でないのでわかりにくい．もっとわかりやすい活動をしなければビジネス上アピールにはならない．具体的には海岸のごみ拾い・サンゴの移植などが挙げられる．観光業はわかりやすいということが大切である．また，ヨーロッパ人とアジア人のエコの考え方は異なっていて，ヨーロッパ人は「Don't touch」の精神であるのに対して，アジア人は「Touch with love」の精神である．ヨーロッパでは近年エコツーリズムがスタンダードになってきている．プーケットは乱開発でつくられたリゾートなので，エコツーリズムがスタンダードになればプーケットが他のリゾート地と比較されて落ちる可能性がある．つまり，環境に配慮しないような野蛮人のいるところには行くなということになりうる．

<Interviewer> ブイ設置の際の追加料金については？

<藤中氏>タイ人は自由意思では払わないであろう．理念を話しているときはタイ人は肯定的であるが，いざお金を払うとなると話が違う．料金を払うとすれば国や県などが強制的に徴収するのが良いと思う．昔は堂々と旅行者から環境税は取ることができなかった．パラオのナショナルパークフィーも最近になってようやくちゃんと取るようになってきた．その取った金が誰かのポケットに入っていると思うが‥．

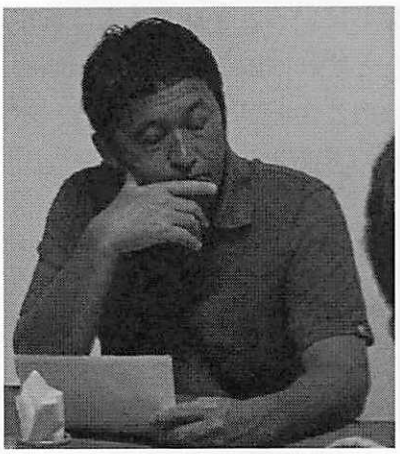


図２．４４ 藤中氏



図２．４５ インタビュー風景

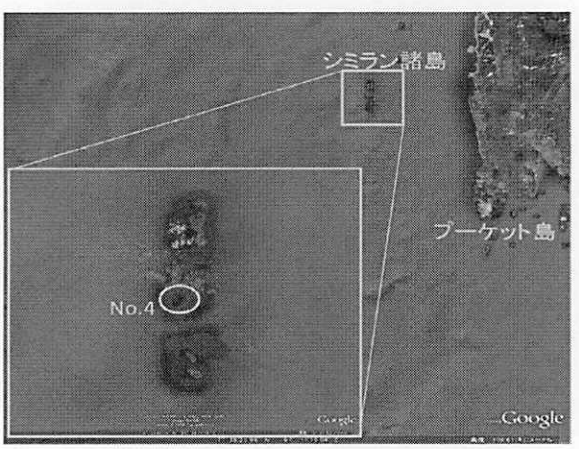


図２．４６ シミラン諸島 No.4 地図

2．4タイ・プーケットの漁業者（Fish Marketing Organization）へのインタビュー

Fish Marketing Organization はプーケット漁港に隣接する日本で言う漁協のような組織である．

インタヴューは2009年9月22日にFish Marketing Organization内の会議室で行った．

Director, Cluster of Fishing Port Operation Sec.2 (Andaman and Lower South)Mr. Pramuan Rugjai によると，漁港の現状としては，この漁港を利用している船はツナ船が多い(**図2．51**)．ツナ船は雨季は外洋にいて，乾季の 11 月に漁港へ戻ってくる．漁港ではツナを選別し，刺身となる部分は日本の築地へ飛行機便で輸出される．残りの部分は加工される．ツナ船も乾季は沿岸でツナ以外の魚をとる．ツナだけでなく，**図2．52**すべての魚の輸送先を集計したものである．ツナの送り先について，プーケットへ送るものはホテルやレストランに売っている．**表2．1**は魚の種類・漁獲高を集計したものである．漁船はパンガー県やクラビ県の船も入ってくる．このような船もここで魚の選別を行っている．

<Interviewer> 漁業関係者はタイ国内でどれぐらいいるか？
<Mr. Pramuan Rugjai> 漁業関係者は 2 万人いる．しかし，詳しくは把握できていない．把握している数は大きい船に乗っている人だけである．家族経営で小さい漁船を操業しているが，数は把握できていない．家族経営の漁業関係者の方が多いと言われている．大きい船のキャプテンと副キャプテンはだいたいタイ人であるが，その下はほとんどミャンマー人である．

<Interviewer> 漁業関係者の収入はどのぐらいであるか？
<Mr. Pramuan Rugjai> 漁業関係者の月収は最近下がってきている．それは漁獲量が減っているためである．漁獲量が減ってきている理由として，モンスーンが長いこと，荒れている日が多く操業できる日が少ないということが挙げられる．また，ガソリン・船の修理代が上がっているため，最近では漁師をやめる人も出てきている．津波後 1 年間は漁獲量が増えたが，それ以降の漁獲量は減少している．個人的には津波が漁獲量に何らかの影響を与えたのではないかと思う．

<Interviewer> ブイ設置について，何か漁協の方で関わることができるか？
<Mr. Pramuan Rugjai> ブイを置くのであれば，ハーバーデパートメントでブイの管理を行っているので，ハーバーデパートメント話を聞きに行った方が良い．

<Interviewer> 普段漁をする場所の水深はどのぐらいか？

<Mr. Pramuan Rugjai> 小さい船での沿岸漁業は水深 20m ぐらい，大きな船は水深 60m ぐらいで漁を行っている．

<Interviewer> ブイ設置にあたって漁協の協力を得られるか？
<Mr. Pramuan Rugjai> ブイ設置の場所が沖合 1 km だと，沿岸漁業の領域である．ハーバーデパートメントの管理領域であるので，ハーバーデパートメントに聞いてほしい．ブイ設置にあたって問題となるのは紛失や盗難である．漁協に管理をお願いするのが一番良いが，責任を持って管理することはできない．つまり，なくなっても責任はとれない．ブイには GPS が付いていて，盗まれたとしても場所がわかってしまい犯人は捕まるが，GPS をつけているぐらいでは盗まれないという保証はない．ブイの意義を説明すればある程度の人は盗まなくなるが，それ以外の人がたくさんいるため，盗まれる可能性はある．岸から離れた方が盗難の可能性は減る．それはそこまで行く人が少なくなるからである．また，夜の方が盗まれる可能性は高い．ハーバーデパートメントにブイ管理の良い方法があるかもしれないので，いざ設置する時はハーバーデパートメントに話を聞きに行ったほうがよい．

<Interviewer> 漁で使うハエナワも盗まれるのか？
<Mr. Pramuan Rugjai> ハエナワ漁の仕掛けも盗まれる．ハエナワは漁師の儲けに直結するため管理が厳しいがそれでも時々盗まれる．ハーバーデパートメントが管理している発光ブイ(漁船の目印になるもの)も，時々盗まれている．ブイに関して設置の許可や管理をしているのはハーバーデパートメントである．もし試験的にブイを設置するときに，ブイがタイ国のものでなければ，ハーバーデパートメントでは管理できない．ただし，政府や県から管理を指示されれば管理することは可能である．　漁協としては，ブイの趣旨を漁師たちに説明し，管理の協力を呼びかけることは可能である．

<Interviewer> ブイ設置の際に日本の場合は漁船を使ったが，タイの漁船はブイ設置が可能なスペックがあるか？
<Mr. Pramuan Rugjai> ツナ船はそれほど大きくない．約 50～60t である．中には冷蔵庫がない船もある．0 度に保つ装置があるので 20 日ぐらいはツナを保存できる．漁は一回だいたい 20 日以内で漁獲量は 100 匹ぐらいである．ツナは朝についたら，夜に発送し，次の日の朝には日本に着く．ツナのいい部分は日本へ，次にいい部分は加工してプーケットやヨーロッパへ輸出されている．

<Interviewer> 資料の中で，年々消費ガソリン量が急激に減っているのはなぜか？
<Mr. Pramuan Rugjai> 船は海洋上でガソリンを入れる．港で入れるよりもガソリン代がかなり安いこと，また，ガソリン補給のために港まで戻ってくるのが無駄なことが理由である．港でのガソリン補給量が減っているということである．

<Interviewer> 主力漁業はツナ船か？
<Mr. Pramuan Rugjai> ツナ船は日本の市場などに左右される．ツナを獲ってきても日本の消費が少ない時は売れないこともある．それよりも海老や小魚といった沿岸漁業の方が儲かる．それは道端で売ることができる．つまり買う人が多いからである．

<Interviewer> プーケット漁港の規模はどのぐらいか？
<Mr. Pramuan Rugjai> 最近はプーケット付近の漁獲量が減ってきており，インドネシアやマレーシア，ミャンマーの方へ漁に行く船が多い．それはやはり魚が多いからである．外国の方へ漁に行く船はその国に近い漁港を使うため，プーケット漁港を利用する船は減ってきている．タイ国の中でプーケットの漁獲高は公営の 13 漁港のうち 3～4 位である．公営の漁港以外にも漁港はたくさんある．

<Interviewer> 漁港の使用料はどのぐらい取っているのか？
<Mr. Pramuan Rugjai> 船の滞在料がある．これは漁獲量に対する料金であり，1t につき 200B である．プーケット漁港は半官半民なのでほかの漁港よりも安い．

<Interviewer> 漁師の売り上げに対する利益はどのぐらいか？
<Mr. Pramuan Rugjai> 漁師の売り上げに対する利益は 20～30％ぐらいである．

<Interviewer> ブイの観測機能としてソナーのような魚群探知情報は必要か？
<Mr. Pramuan Rugjai> 大きな船にはもともとソナーが付いているので必要ない．ソナーが付いていない小さい船が多い沿岸漁業ではこのような情報は有効だと思われる．

<Interviewer> ブイの設置に際して留意すべきことはなにかあるか？
<Mr. Pramuan Rugjai> ハーバーデパートメントを通し，まずは小さい漁港を選んで村人全員と協議してブイを設置した方が良い．漁村で協議して村人全員でブイを守っていった(みんなで協力)方が，国や県からの指示で行うよりも成功すると思う．このようなボトムアップ式で成功した例として，自分たちの領域へ侵入する他の船に対しての見張りを当番制にしたという例がある．ブイの観測機能として，自分の領域に他の船が入ってくるのを警報で知らせるという機能があると役に立つし，みんな喜ぶと思う．ただ，船が他の領域に入るということは違法というわけではない．

<Interviewer> 津波時の被害はあったか？
<Mr. Pramuan Rugjai> プーケット港に津波の被害はなかった．港の水深は４ｍあるが，水が

なくなるぐらいの海面変動があった．この海面変動で船同士が接触して壊れたというような被害はあった．

<Interviewer> プーケット漁港の立地は不便な気がするが？

<Mr. Pramuan Rugjai> プーケット港の位置の理由は昔から漁師がたくさん住んでいたからである．また台風や高波の影響が少ないということもある．

<Interviewer> 漁に出る時に現在利用している情報はあるか？

<Mr. Pramuan Rugjai>ラジオの気象情報は１日に３回更新されている．この気象情報は台風の時は１時間に１回更新される．また，漁師同士の無線情報や大きい船は衛星情報を取得している．漁師の勘というのもある．

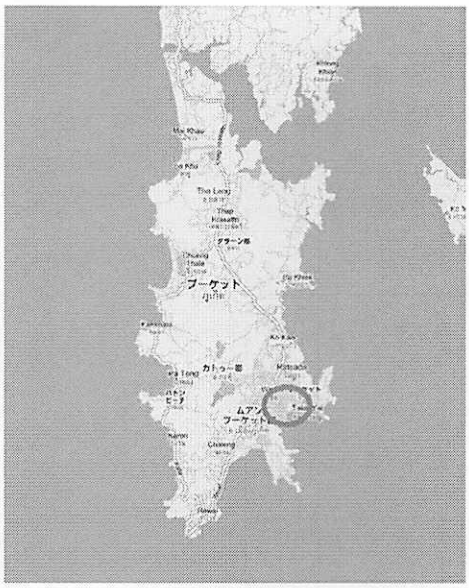


図２．４７ 所在地



図２．４８ 建物外観



図２．４９ Mr. Pramuan Rugjai



図２．５０ インタビュー風景

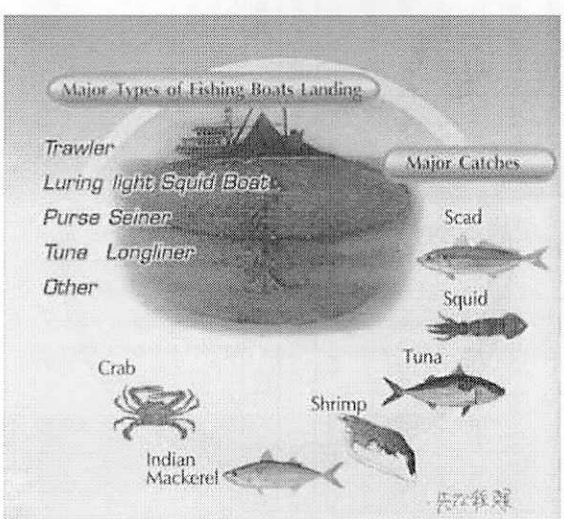


図２．５１ 水揚げされる主な魚種と船種

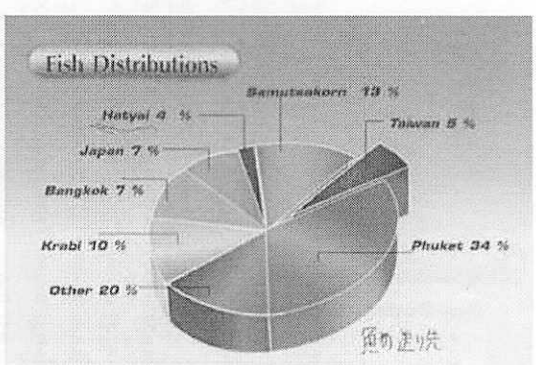


図２．５２ 魚の輸送先

表２．１　漁種と漁獲高

มูลค่าสัตว์น้ำแยกประเภท ท่าเทียบเรือประมงภูเก็ต ปีงบประมาณ 2551

Value of Fish Unloading by Species of Phuket Fishing Port 2008 (Budget Year)

มูลค่า(Value) / บาท(Baht)

เดือน Month	ปลาหูแขก Scad	ปลาเศรษฐกิจ Food fish	กุ้ง Shrimp	ปลาทูน่า Tuna	ปลาหมึก Squid	ปู Crab	ปลาทู Indian mackerel	ปลาเป็ด Trush fish	ปลากะตัก	ปลาไอ	ปลาสีกุน	ปลาทรายแดง	ปลาปากคม	รวม total
ต.ค.50 (oct.07)	6,432,985	50,641,593	1,602,800	8,275,705	2,355,576	1,399,825	2,847,094	1,905,120	2,034,314	1,188,447	484,397	2,055,156	364,881	81,587,893
พ.ย.50 (Nov.07)	5,906,936	49,780,992	1,805,189	26,085,748	3,254,256	1,798,939	1,902,160	951,778	2,329,286	1,032,740	426,646	1,792,545	356,042	97,423,257
ธ.ค.50 (Dec.07)	5,518,203	57,069,181	2,272,806	67,829,097	4,375,638	2,095,773	2,740,829	290,115	4,825,198	798,595	551,829	1,888,188	421,792	150,677,244
ม.ค.51 (Jan.08)	7,390,380	50,978,783	2,438,488	87,229,755	3,833,173	3,318,490	2,248,693	359,536	7,322,737	1,248,305	544,421	1,772,938	386,462	169,072,161
ก.พ.51 (Feb.08)	4,698,465	59,797,851	2,754,665	88,069,742	2,084,603	1,777,148	1,790,078	12,196	6,403,139	917,157	495,008	1,694,238	402,220	170,896,510
มี.ค.51 (Mar.08)	7,191,660	55,554,174	2,209,474	29,728,754	2,629,145	1,682,074	1,788,626	14,385	6,554,523	890,652	632,803	1,878,156	483,902	111,238,328
เม.ย.51 (Apr.08)	6,439,257	56,915,473	1,967,893	37,363,699	3,420,905	1,857,342	1,429,629	151,996	6,521,561	1,194,934	604,710	2,184,989	708,995	120,761,383
พ.ค.51 (May.08)	5,359,481	48,850,182	2,015,292	16,352,321	2,746,201	1,817,788	1,833,085	60,528	4,206,040	995,602	479,555	1,770,286	560,563	87,046,924
มิ.ย.51 (Jun.08)	7,048,529	55,319,235	1,852,489	17,237,364	2,589,844	1,690,570	1,335,594	13,770	11,945,709	696,097	586,310	2,204,444	720,517	103,240,472
ก.ค.51 (Jul.08)	10,189,560	48,754,847	2,284,402	15,418,929	3,105,335	2,124,943	4,081,389	75,263	7,599,965	3,203,144	791,036	2,044,729	734,124	100,407,666
ส.ค.51 (Aug.08)	6,652,998	40,411,653	1,865,344	8,515,805	2,914,510	1,577,539	2,390,727	5,933	4,619,923	8,939,858	566,487	2,154,313	755,761	81,370,851
ก.ย.51 (Sep.08)	6,410,683	46,139,157	3,466,603	11,572,727	2,486,512	1,807,018	1,943,703	6,480	6,486,468	1,429,290	517,304	1,465,226	563,003	84,294,174
รวม(Total)	79,239,137	620,213,121	26,535,445	413,679,646	35,795,698	22,947,449	26,331,607	3,847,100	70,848,863	22,534,821	6,680,506	22,905,208	6,458,262	1,358,016,863
%	5.83	45.67	1.95	30.46	2.64	1.69	1.94	17.07	5.22	1.66	0.49	1.69	0.48	100.00

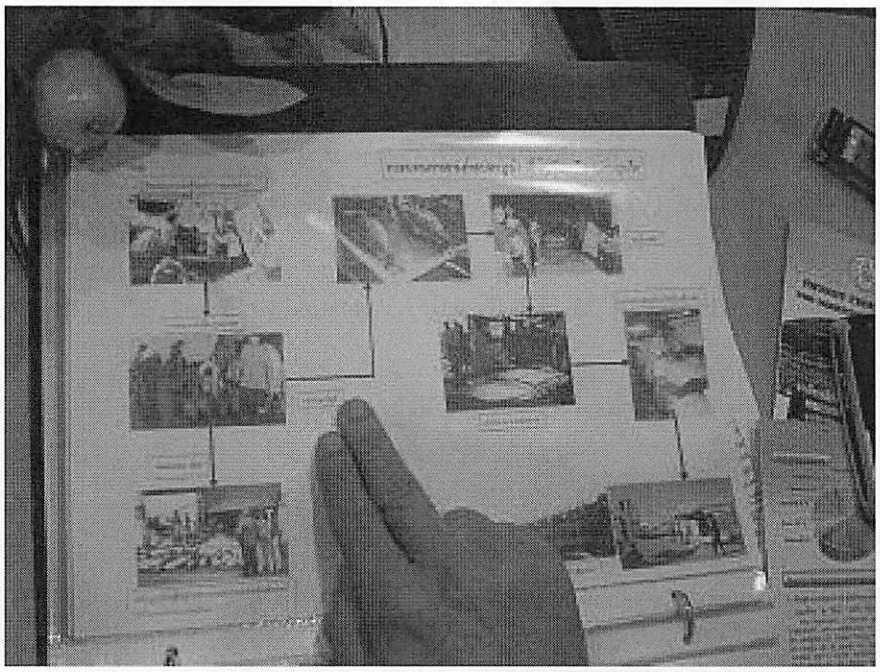


図２．５３ ツナの選別過程の資料

2．5　タイ・プーケットの Tourist Association へのインタビュー

プーケットの観光協会（Tourist Association）はプーケットの観光業関係者，ホテル・エージェント・レストラン・土産屋・病院が加入している組織で会員数は 300～400(そのうちホテルが 200)いる．プーケットにある 550 ホテル中 200 ホテルが加入している．

インタヴューは 2009 年 9 月 23 日に Tourist Association のオフィスで行った．

Phuket Tourist Association, Vice President　Mr. Sarayuth Mallam によると Tourist Association に病院が加盟しているのは，病院はけがをした時に関係するのに加え，整形など医療費が安いため，プーケットで治療するためにツーリストが来るためである．主な仕事はマーケティング・外国メディアへの広報・国内と外国をつなげる仕事である．会費は一年に一律 2500B であるが，Tourist Association の仕事はボランティアで行われて，現在の運営のメンバーは 10 人である．ボランティアでも生活していけるのはメンバーの人は自分でホテルを経営していたりして，他に仕事を持っているからである．県はホテルから bed tax 3000 万バーツを集めていて，そのうち 700 万バーツを Tourist Association がもらっている．もし多目的観測ブイのプロジェクトをやるなら喜んで協力する．Tourist Association は運営費が 700 万バーツで足りなければ県に言えば追加でお金をもらえる．パトン市役所には話をし行った方が良い，なぜならブイの権限があるのはプーケット市役所ではなくパトン市役所である．

<Interviewer>　既に津波警報のためのブイは設置しているか？
<Mr. Sarayuth Mallam>ドイツが資金を出して，ブイを置いている．津波を測るのみである．

<Interviewer>　観光業として，あれば有益な情報はあるか？
<Mr. Sarayuth Mallam> プーケットに来る観光客の８割はエージェント(ツアー)の客である．なので，現地で情報を得るというよりも自分の国で情報を得てから来ることが多い．そこで，安全情報がわかればよいのではないかと思う．現在は津波警報のためのブイが一つあるが，私たちはどこにあるのかわからない．安全のためのシステムが動いていると自分の身ではっきり分かるようなものがあるよい．さらには日本が作ったものがあるということは安心感の向上につながる．単に観測したデータを配信するだけでなく，データに基づいた予測情報があればよい．観光地は安全が一番重要な項目である．日本の旅行会社でも，津波前はプーケットのパンフレットが１番上に並べてあったが，津波後は違う．現在，ウェブサイトに安全情報をのせている．

<Interviewer>　同じような組織はプーケットにあるか？

<Mr. Sarayuth Mallam> 同じような組織はホテルアソシエーション，ガイドアソシエーション，エージェントアソシエーションなどの業務別の組織が存在する．

<Interviewer> 現在 tsunami tax のようなことはやっているか？
<Mr. Sarayuth Mallam> 県がホテルから徴収している bed tax がある．bed tax は宿泊料に含まれている．bed tax の目的は，外国人がホテル内の施設(水道などのインフラ)を使うことに対する税金である．ホテルの料金に含まれている割合は，サービスチャージ 7%，bed tax10%である．もし，ブイを浮かべるなら，県に言えば費用を払ってくれる．ホテルに言うよりはやりやすい．



図２．５４ 所在地



図２．５５ 建物外観



図２．５６ Mr. Sarayuth Mallam

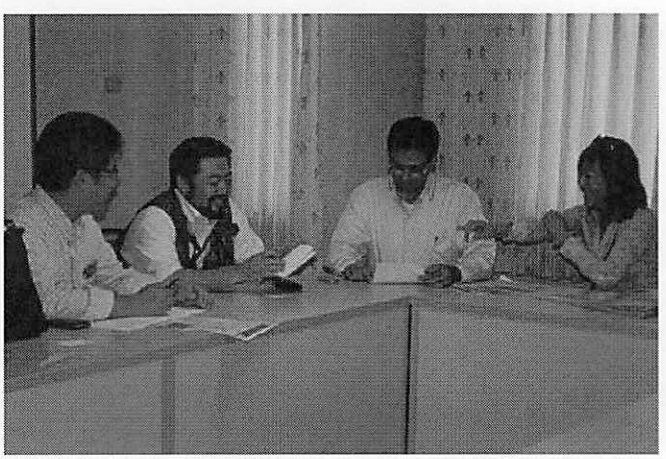


図２．５７ インタビュー風景

２．６　タイ・プーケットの環境保護関係者(KhaoLak National Marine Park)へのインタビュー

KhaoLak National Marine Park は，タイのチュラボーン王女(４番目の王女)の記念に作られた，NGO のような組織である．運営資金は政府・海軍・王女・寄付でまかなっていて，主な目的はアンダマン海でのサンゴ礁の保護である．

インタヴューは 2009 年 9 月 23 日に KhaoLak National Marine Park のオフィスで行った．

KhaoLak National Marine Park 所長によるとアンダマン海においてのサンゴ礁が破壊の原因となるのは，おもに観光船や漁師の船がアンカーするときの傷み，船が出す汚染物質が原因である．そこで，組織ではサンゴ礁の周りにブイをおいて，観光船や漁師の船がサンゴ礁の海域に入らないようにしている．サンゴの保護のために調査も行っていて，それは一年に一回各サンゴ礁で調査を行っている．乾期の 6 ヶ月ですべてのサンゴ礁の調査に回っていて，雨季には調査は行わない．結果などは**図２．６２**，**図２．６３**のような図にして保護に役立てている．

図２．６４のようなブイをマーキングのために使用していて，このブイにかかる費用はブイとブロックのセットを 1 万バーツで作ることができる．1995 年の創立以来，ブイは合計 300 個ぐらい作っている．そのうち，80 個を Marine Park が所有，残りはナショナルパークや県が所持しているが，管理は全てナショナルパークが行っている．

サンゴの保護などに協力的ではない漁師がブイを切ったり，何隻もの船をアンカー代りにするので，ブイが切れることがある．しかし，沈めるブロックは残るのでそこまでの損傷ではない．ブイの輸送は**図２．６５**のような船で一度にブイを 20～40 個持っていくことができ設置する．しかし，ブイのブロックを持っていくのが大変なので，もしブイを設置するなら一緒に使った方が効率がいいと考えられる．

<Interviewer> サンゴ礁を保護する観点で，必要な情報はどのようなものか？
<KhaoLak National Marine Park 所長>現在観測しているデータはないが，考えられるものとして水温・水質・波の高さである．ph など水質の具体的な内容はわからない．アンダマン海は変化が激しいので水質は良い．透明度は人の目視で計測しているが，平均 15m ある．

<Interviewer> 観察結果はどのようなデータにしているか？五段階評価のようなものを行っているのか？
<KhaoLak National Marine Park 所長> サンゴの観察は，状態が良くない状態の時に報告するだけである．五段階で記録とかはしていない．

<Interviewer> パンフレットに災害時の貢献とあるが，具体的な行動は？
<KhaoLak National Marine Park 所長> 災害時に船を使って物資を運んだりすることがある．また，海洋上の救難を行っている．Marine Park の職員は全員海軍出身である．

<Interviewer> 現在ブイ設置やサンゴ調査の際に使っている海洋情報はあるか？
<KhaoLak National Marine Park 所長> 海洋情報はラジオで得ている．

<Interviewer> ブイ設置の費用はどのぐらいか？
<KhaoLak National Marine Park 所長> ブイ設置一回 1 万バーツかかる．ブイの費用と合わせて 2 万バーツである．水深が 60m のところは，人が潜れるのは 20m までなので，後は投げて設置する．



図２.58 所在地

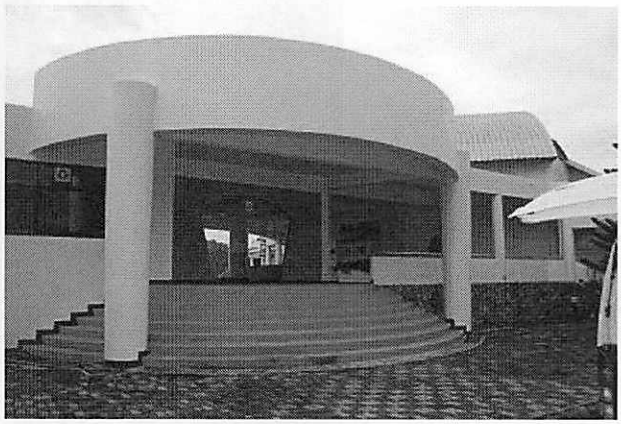


図２.59 建物外観

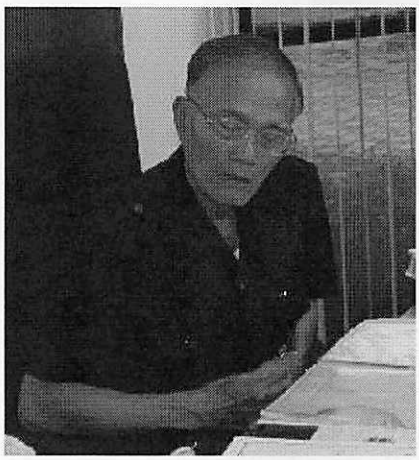


図２.60 KhaoLak National Marine Park 所長

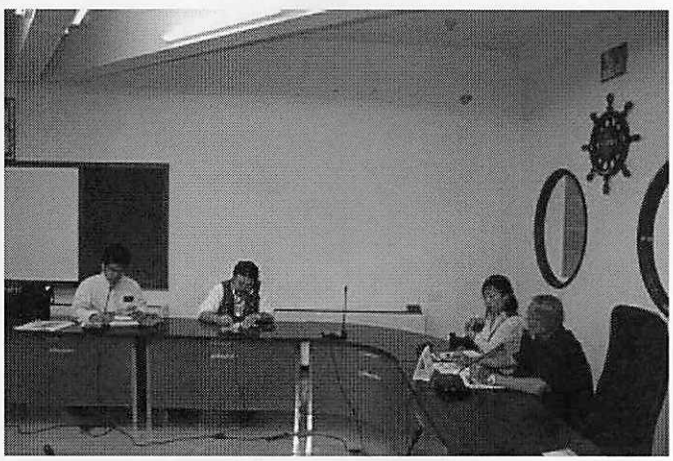


図２.61 インタビュー風景

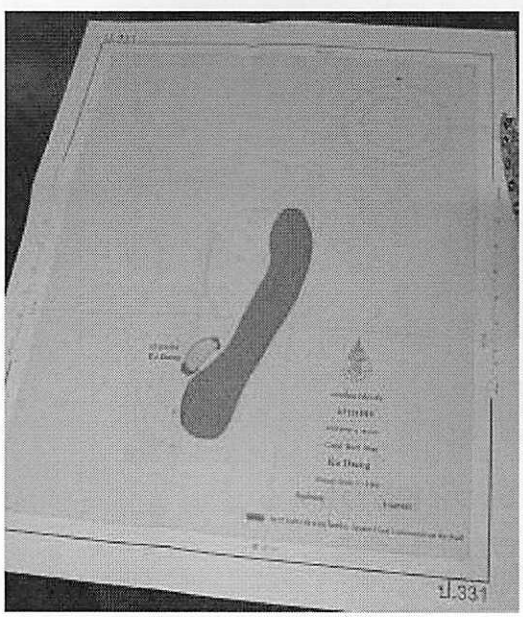


図２.62 サンゴ礁の地図１



図２.63 サンゴ礁の地図２

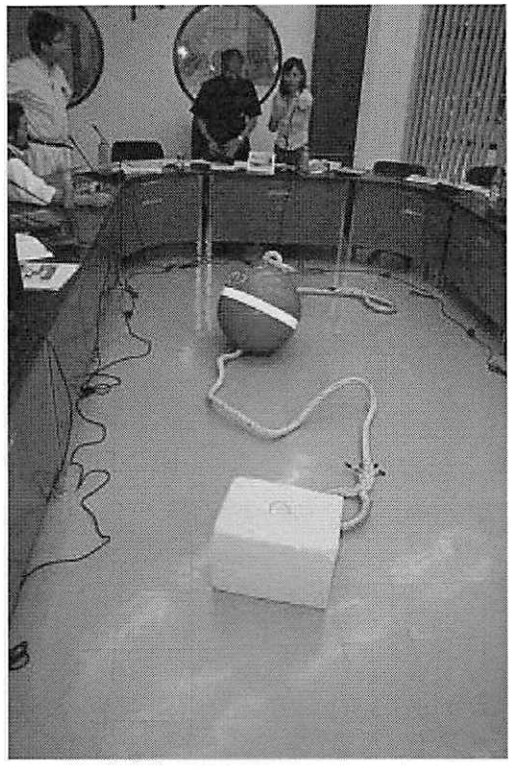


図２.６４ 現在使用しているブイ

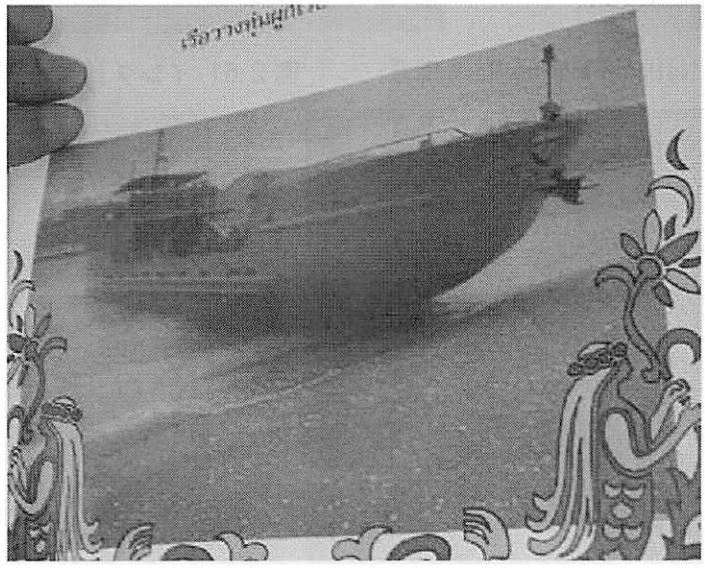


図２．６５ ブイ設置の船

2．7　タイ・プーケットにおけるインタビュー結果の整理

1）各組織と海洋情報観測ニーズ

今回の日常ニーズ調査の結果を**表2．2**に示す．結果によると海洋研究者からのニーズが多くあり，ダイビングショップなどでは少ないことが示された．しかし，今回の調査の結果がニーズの大小とは直結しないと考えられる．海洋研究者は自分の研究において，どのパラメーターが必要であるか詳細にわかっているのに対し，その他の機関では，自分たちにとって欲しい情報を得るために，どのパラメーターが必要であるかわかっていない可能性がある．例えば，「ある魚」が多く出現する地域と多く出現する時期と，水温，潮汐，風向，波高に関係があるとしても，現在は全て勘に頼っているので，パラメーターの詳細はわからないのである．これらの必要なパラメーターを知るためにブイを導入し，長期的にデータを収集することで，地域ごとの必要なパラメーターの割り出し，特定の魚の出現予想精度の向上などが可能であると考えられる．表には示していないが，ツーリスト協会ではブイを導入することによる安全性アピール，プーケット漁港では，漁港ごとの漁業海域侵入の通報機能，ダイビングショップでは，水中に設置する漁礁としての利用などのニーズもあることがわかった．今回の結果では，日常的なニーズはあるので，導入することでさらにニーズが増える可能性も示すことができた．

2）盗難の問題についての考察

海に置く上で大きな問題として，盗難の問題がある．これは，どこのインタビューでも指摘された点である．気候の専門家が調査のために置いているセンサーも盗まれることが原因でサンゴ礁に隠している現状がある．しかし，ナショナルパークの管理下に置くか，軍の管理にすると盗難の可能性が減ることも分かった．　今後，ナショナルパークの管理が無くなるオフシーズンの対策を考えることや漁師などのステークホルダーに当事者意識を持たせる必要がある．

3）Tsunami Tax 導入による多目的海洋観測ブイの運用の可能性

多目的観測ブイを運用するにあたって，資金をどのように集めるかについて説明する．そこで，我々は観光客から Tsunami Tax をリゾートホテルの宿泊料に上乗せするという案を提案している．以下，Tsunami Tax をどのぐらい上乗せすればブイの運用が可能であるかを試算した．まず，プーケットにあるリゾートホテルの部屋数を集計した [11]．そして，各ビーチのホテル1部屋について1泊当たりの料金に1ドル上乗せをすると考えると，以下の表のようになる．

表の結果より，100 日稼働の場合，各ビーチでブイの維持管理費を払う場合，もっとも部屋数が少ないビーチでも毎年 2.5 万ドルを維持管理費として利用できることがわかった．プーケット全体で Tsunami Tax を収集し分配した場合は，各ビーチで毎年 13 万ドル以上を維持管理費として使用できることが分かった．

150 日稼働の場合，もっとも部屋数が少ないビーチでも毎年 4 万ドル，プーケット全体で収集した場合では各ビーチ毎年 19.5 万ドルを維持管理費として使用できることが分かった．

我々は観測ブイの寿命が 5 年，ライフサイクルコストが 10 万ドル～20 万ドルと試算している．100 日稼働，もっとも部屋数が少ないビーチであっても毎年 2.5 万ドル×5 年で 12.5 万ドルを維持管理費として捻出することができる．よって，1 泊 1 ドルの Tsunami Tax を導入するだけで維持管理費は支払えるということがわかった．

表２．２ 海洋情報観測ニーズ

パラメータ	サンゴ研究	魚研究	海洋気象研究	ウミガメ研究	ダイビングショップ	ツーリスト協会	マリンパーク	プーケット漁港
水温	○		○	○	○		○	
気温			○	○				
波高							○	
流向			○					
流速			○					
風向			○					
風速			○					
潮汐					○			
pH	○		○					
リン濃度	○							
窒素濃度	○							
塩分濃度								
酸素濃度	○							
水質							○	
魚の個体数		○						
海洋生物の出現情報					○			
浮き漁礁					○			
侵入に関する情報								○
安全情報	○					○		

表２．３　１年間で１部屋平均 100 日間稼働

場所	部屋数	ドル
パンワ岬	266	26600
パトン	4221	422100
カロン・カタ	2467	246700
カマラ・スリン	893	89300
バンタオ・タオ	653	65300
ナイヤン	268	26800
ナイハーン・ラワイ・チャロイ	393	39300

表２．４　１年間で１部屋平均 150 日間稼働

場所	部屋数	ドル
パンワ岬	266	39900
パトン	4221	633150
カロン・カタ	2467	370050
カマラ・スリン	893	133950
バンタオ・タオ	653	97950
ナイヤン	268	40200
ナイハーン・ラワイ・チャロイ	393	58950

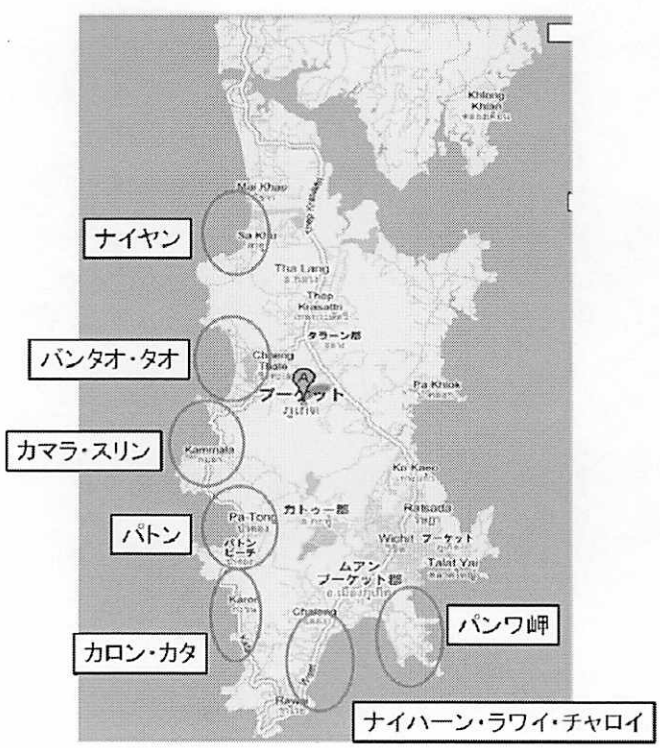


図２．６６　プーケットのビーチ

インタビューの結果，提案しているTsunami　Taxは実現すれば，各ビーチでブイを設置しても維持管理ができる可能性があることが分かった．この税金の実現のためには，現在，プーケット県がホテルから徴収しているbed taxに習いホテルアソシエーションの方の協力を得て県などに働きかけていく必要がある．

4）各組織の設置位置の距離と水深

表2．5に示したとおり，水深50～30m付近，海岸から5km以内でのニーズが多いことが分かった．海洋気候の専門家は特殊で，すでに情報を様々な方法で得ているために海岸からの距離が長い地域のニーズがあったが，現在の調査との統合などを行うことでニーズが生まれる可能性がある．この距離であれば，波高観測機器はGPSを用いれば当然可能で，音響測深機でも十分に可能性はあることが分かった．

表2．5　理想ブイ設置距離と水深

分類	インタビュー対象	岸からの距離	水深
Phuket Marine Biological Center	サンゴの専門家	1～3km	30m
	気候の専門家	300km～400km	1200m
	魚の専門家		
	ウミガメの専門家	5km	20～50m
ダイビングショップ	カタダイビング	30km～40km	30m
	ダイビングアウトレット		30m
その他組織	プーケット漁港	1～3km	
	マリンパーク		60m
	ツーリストアソシエーション		

2．8　沖縄県リゾートホテルへの海洋観測情報利用状況のアンケート調査

1）アンケート調査の概要

アンケート調査の概要として，調査のねらい，調査内容の概要，調査日時，調査対象及び抽出方法，回答率，調査手法を以下に記す.

a.調査のねらい

リゾートホテルの災害時と平常時の両方の海洋観測情報の利用状況とニーズを把握する.

b.調査内容の概要

災害時については，2007年10月6日，7日の台風15号の際の対応について調査した.平常時については，主にマリンレジャー関係での海洋観測情報の利用状況とニーズを中心に調査を行った.

c.調査日時

2008年1月21日にアンケート送付，返信期限を1月28日に設定した.

d.調査対象及び抽出方法

沖縄県のリゾートホテル．抽出方法は，沖縄観光情報ウェブサイト「沖縄ツアーランド」[12)]の中で，ホテルタイプがリゾートとして登録されているホテル計93件とした.

e.回答率

有効回答数は38，回答率は40.9%であった.

f.調査手法

ファックスによりアンケートを送付，回収した.

2）アンケート調査結果

a．台風による高潮への対応について

昨年(2007年)10月6-7日に九州・沖縄地方で高潮が観測された台風15号時の対応について教えてください。

1. 台風及び高潮の対策を行う際、波の高さ情報などの海洋観測情報は利用しましたか？

リゾートホテルの多くが災害時に海洋観測情報を利用していることがわかった（**図２．６７**）.

1-①. 高潮の情報をどこから入手しましたか？(複数回答可)

海洋観測情報入手媒体は，主にインターネットとテレビであった（**図２．６８**）.

1-②. どのような方法で情報を入手しましたか？(一つ選択)

情報入手方法は主に「自分からの問い合わせ」だが，「発信元からの連絡」もあった（**図２．６９**）.

1-③. ホテル内の宿泊客に災害情報を伝えましたか？

災害情報の伝達は問い合わせのあった客に個別に答える方法が主にとられていたが，館内放送を使用するホテルもあった（**図２．７０**）.

1-④. 入手した高潮の情報に関して、漁業関係者とやり取りをしましたか？
1-⑤. 入手した高潮の情報に関して、マリンレジャー関係者とやり取りしましたか？

災害時に他組織(漁業関係者・マリンレジャー関係者)と情報を交換したリゾートホテルは半分以下で，情報共有体制は整っているとはいえない．特に漁業関係者との情報共有体制は整っていないといえる（**図２．７１，図２．７２**）.

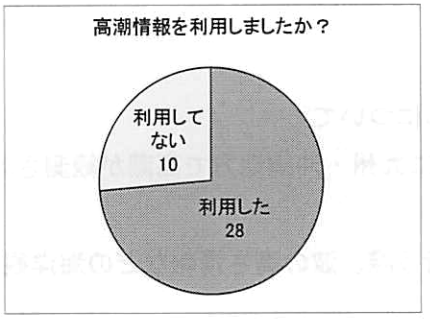
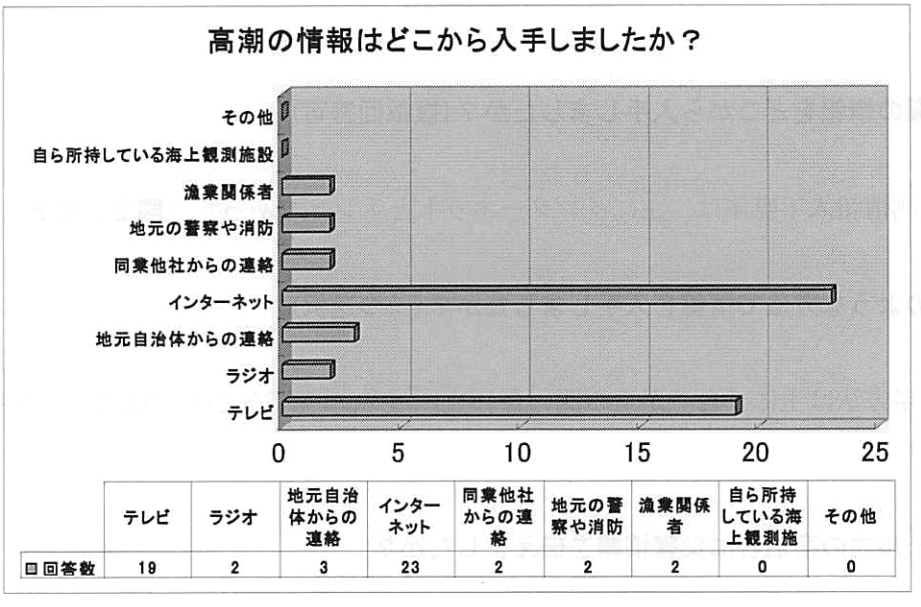


図２．６７　高潮情報の利用状況



	テレビ	ラジオ	地元自治体からの連絡	インターネット	同業他社からの連絡	地元の警察や消防	漁業関係者	自ら所持している海上観測施	その他
回答数	19	2	3	23	2	2	2	0	0

図２．６８　高潮情報の入手媒体

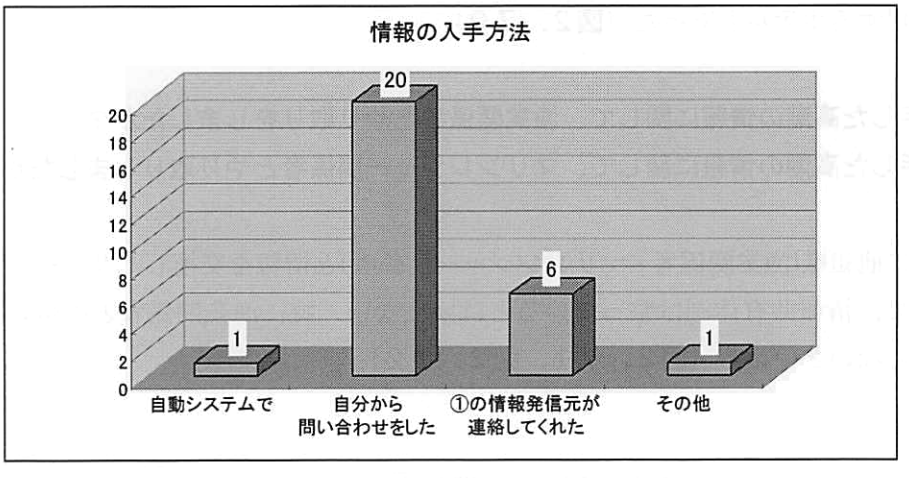


図２．６９　高潮情報の入手の仕方

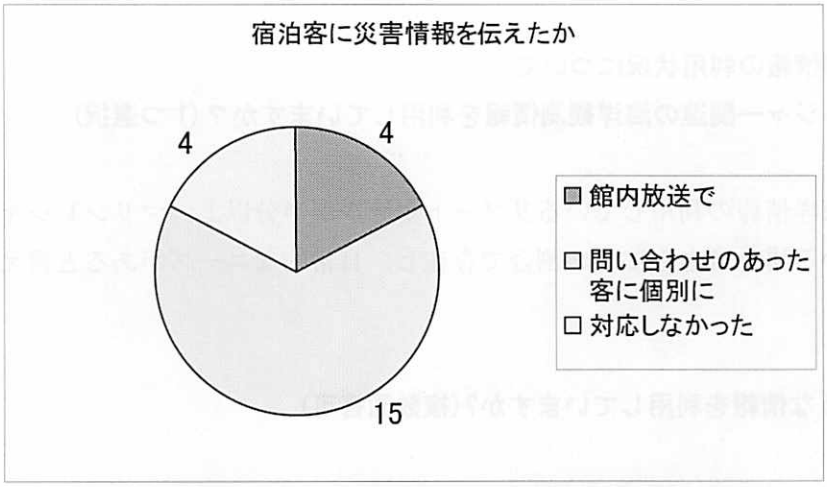


図２．７０　高潮情報の宿泊客への伝達

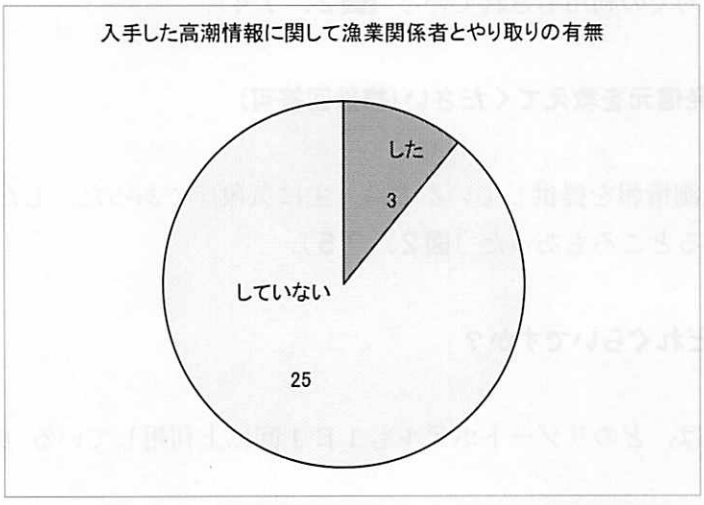


図２．７１　高潮情報の漁業関係者とのやりとり

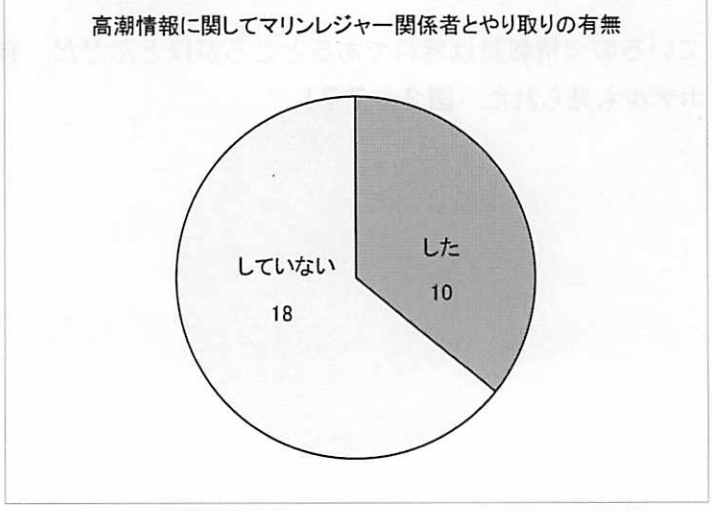


図２．７２　高潮情報のマリンレジャー関係者とのやり取り

b．海洋観測情報の利用状況について

2.　マリンレジャー関連の海洋観測情報を利用していますか？(1つ選択)

日常的に海洋情報の利用しているリゾートホテルが半分以上，マリンレジャー関係の事業を行っている場合はさらに多い割合で存在し，日常的なニーズがあると言える（**図2．73**）.

2-①.どのような情報を利用していますか?(複数回答可)

ダイビングに必要な情報は，どれも利用されており，ニーズがあると言える．また，ダイビング以外の目的での利用もされている（**図2．74**）.

2-②. その情報の発信元を教えてください(複数回答可)

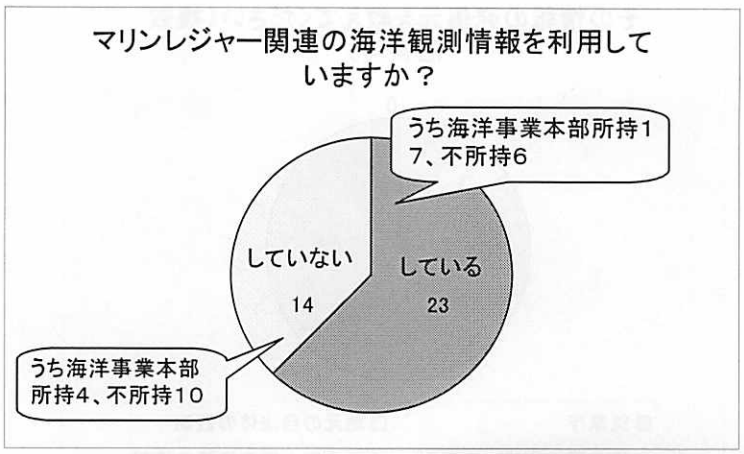
日常的な海洋観測情報を提供しているのは，主に気象庁であった．しかし，その他団体から情報を得ているところもあった（**図2．75**）.

2-③. 利用頻度はどれぐらいですか？

利用頻度としては，どのリゾートホテルも1日1回以上利用している（**図2．76**）.

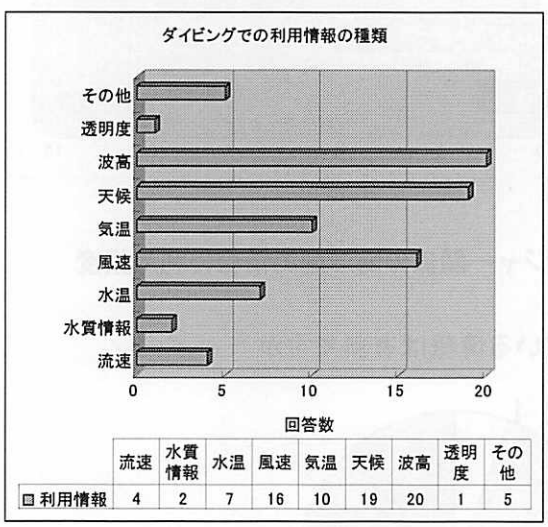
2-④.利用している情報は有料ですか？

気象庁が提供しているので情報量は無料であるところがほとんどだ，有料で情報を利用しているリゾートホテルも見られた（**図2．77**）.



マリンレジャー関連の海洋観測情報を利用していますか	総計	海洋事業部関係の所持有無	
		所持〇	不所持×
している〇	23	17	5
していない×	14	4	10

図２．７３　マリンレジャー関係の海洋観測情報の利用状況



＜その他＞
魚群予測
鯨やイルカの出現予測
風向
危険生物発生状況

図２．７４　マリンレジャー関係の海洋観測情報の種類

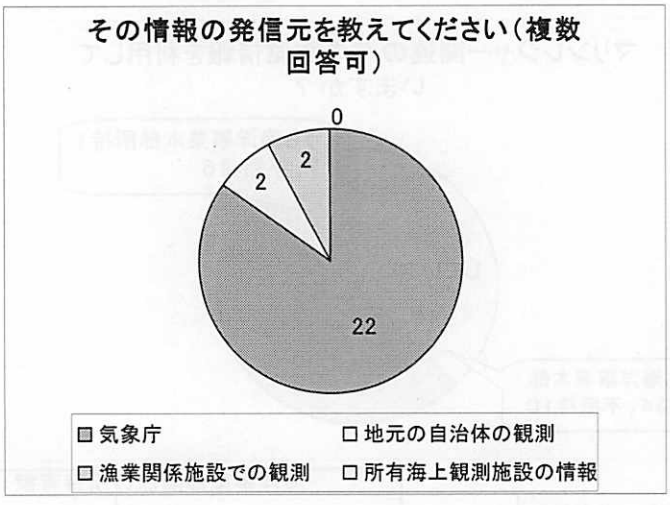


図２．７５　マリンレジャー関係の海洋観測情報の発信元

1日平均	回答数
1回	9
2～3回	9
4～5回	4
毎時	1

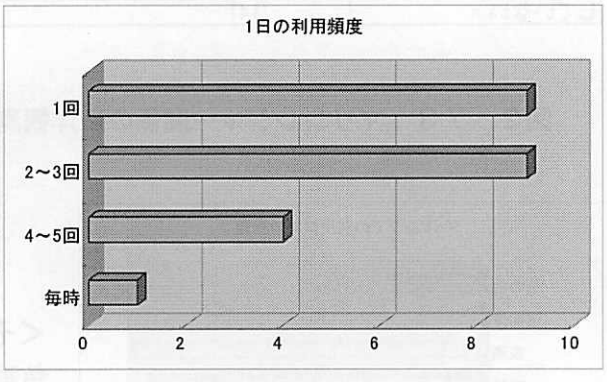


図２．７６　マリンレジャー関係の海洋観測情報の利用頻度

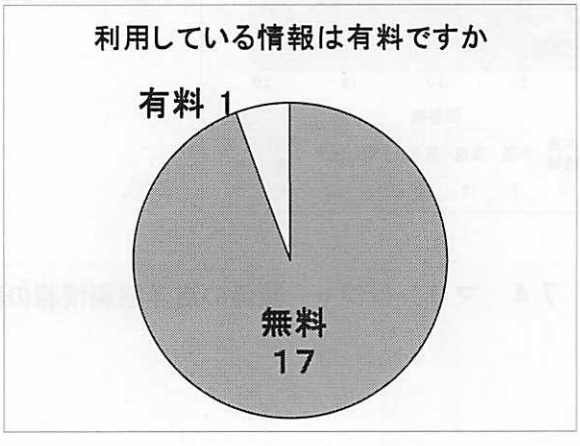


図２．７７　マリンレジャー関係の海洋観測情報の利用価格

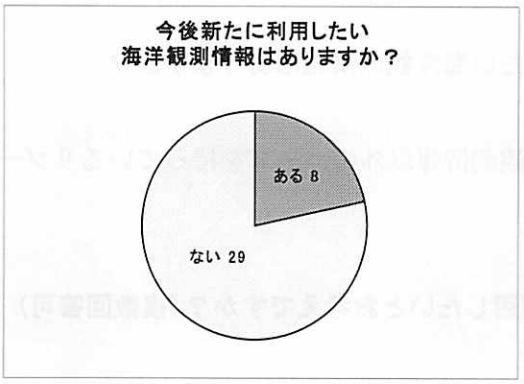
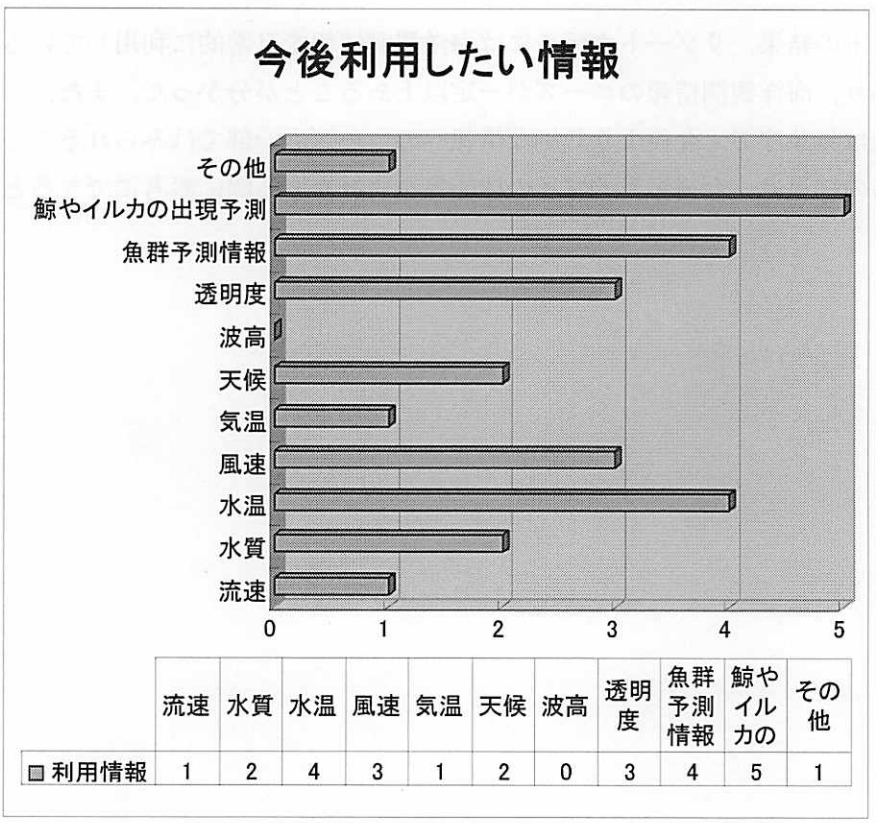


図２．７８　マリンレジャー関係の海洋観測情報の新たな情報のニーズ



	流速	水質	水温	風速	気温	天候	波高	透明度	魚群予測情報	鯨やイルカの	その他
利用情報	1	2	4	3	1	2	0	3	4	5	1

図２．７９　マリンレジャー関係の海洋観測情報の新たなニーズの詳細

3. 今後、新たに利用したい海洋観測情報はありますか？

現在利用している海洋観測情報以外のニーズを持っているリゾートホテルが 1/4 ほどみられた（**図２．７８**）.

3-①.どのような情報を利用したいとお考えですか？(複数回答可)

海洋観測情報の利用ニーズとしては，ダイビングに利用する情報の詳細のほかに，鯨やイルカの出現予測など，他のマリンレジャー関連の情報が多くみられた（**図２．７９**）.

アンケートの結果，リゾートホテルには海洋観測情報を日常的に利用しているところが半数以上あり，海洋観測情報のニーズが一定以上あることが分かった．また，それらの情報の発信元は気象庁で，今後より詳細な情報へのニーズも一部ではみられることが分かった．これらの結果は，今後多目的ブイの機能等を設計をする際に参考にできると考えられる.

２．９　既存の海洋観測ブイの性能調査

１）調査の概要

調査の概要として，調査のねらい，調査内容の概要，アンケート実施日時，調査対象及び抽出方法，アンケートの調査手法，調査項目(**表２．６**)を以下に記した．

a.調査のねらい

既存の海洋観測ブイの機能(利用目的や観測手法)やスペック(サイズ，設置位置，耐用年数等)について調査しデータベース化する．

b.調査内容の概要

気象庁が運用する海洋観測ブイについては，気象庁ウェブページ [13]より検索を行った．漁業関係組織が運用する海洋観測ブイについては，各都道府県の水産試験場及びそれに順ずる機関のウェブページより，対象となる海洋観測ブイ情報の検索を行った．また，海洋観測ブイの調査項目のうち web 上にデータのなかったものについては，そのブイの維持管理団体宛にアンケートを行い調査した．

c.アンケート実施日時

2008 年 2 月 6 日，7 日にアンケート送付，返信期限を 2 月 12 日に設定した．

d.調査対象及び抽出方法

気象庁，各都道府県の水産試験場及びそれに順ずる機関．

e.アンケートの調査手法

電子メールにてアンケートの送信，回答の受信を行った．

２）既存の海洋観測ブイの性能データベース

調査により得られた情報に基づき，既存の海洋観測ブイの性能データベースを以下に作成した(**表２．７**)．このデータベースを作成したことにより，今後多目的ブイのスペック等を設計する際に参考にできると考えられる．

表２．６　既存の海洋観測ブイの性能調査の調査項目

調査項目	
ブイの名前	ブイのサイズ
観測情報の主な利用目的	ブイの設置位置(沿岸距離、水深、観測水深)
設置海域名(伊勢湾沖　等)	メンテナンス期間
ブイ管理団体	耐用年数
観測情報	初期費用
観測時間	維持管理費用
電源	備考
ブイからの情報伝達方法	参照

表7．4　既存の海洋観測ブイの性能データベース（1）

ブイの名称	観測情報の主な利用目的	設置海域と主な（係留海洋名）	ブイ管理団体	観測情報	観測時間	電源	ブイからの情報伝達方法	ブイのサイズ	ブイの設置海域（緯度経度、水深、概略）	メンテナンス期間	耐用年数	初期費用	維持管理費用	備考	参照
海水温自動観測ブイシステムCANS－miniOMI型	依北北部地区水産技術普及指導所をはじめとしてホタテガイ養殖漁業関連業務で活用札幌市保健所の行う夏季の食中毒予測の参考資料	北海道	北海道立中央水産試験場 海洋環境部	水温	1時間毎	バッテリー			小樽市赤岩沖水深約40m地点（水深1、10、20、30mの4層観測）	年2回程度のバッテリーの交換時	5年				http://www.fishexp.ac.affrc.go.jp/shikenjo/50110/550-2304-2304.htm
自動観測ブイ	漁業 研究機関への情報提供	青森	青森県水産総合研究センター	水温、塩分、溶存酸素、流向・流速、風向・風速、気温、照度強度	1時間毎	太陽光発電システム	NTTドコモのパケット通信網（DoPa網）を通じて増養殖研究所内の基地局に送られる	陸奥湾沖水深47m地点に3台 平舘、東湾ブイ（直径4.5m、高さ6.8m）、青森ブイ（直径2.5m、高さ1.5m） 水深別に10層観測		約10年	工事費、設計費、旧システム撤去費含みで約3．53億円	県年度平均で約1700万円			http://www.nr.aomori.jp/zoshoku/suisan/system.html http://www.mutsu-wanbuoy.jp/intro/chart.cgi.html
流速計（ケーブル式多層型） 波浪計 水温観測ブイ	漁港の安全や工事の安全の確保 大型クラゲ対策	岩手	・島の越漁港波高観測所 ・岩手県水産技術センター	超音波による波高、水圧による波高、電磁流速計による流向流速を検出 水温	1時間毎				島越漁港の波高が5,500m超えの波高：1、10、30、50m深					漁業情報サービスセンター（http://www.jafic.or.jp/）が、各都道府県における大型クラゲの状況を水温の面から探るために設置したもの	http://shimanoshoshi.jp/shimane/fmate.html http://www.enaf.jwata.or.jp/~hp85021/
水温観測ブイ	各道府県における大型クラゲの状況を水温の面から探るため	岩手	漁業情報サービスセンター	水温	1時間毎				1、10、30、50m深					本県（岩手県）の他に唯一長崎の対馬から北は北海道の松前まで15箇所の松前まで15箇所設置されています	http://www.enaf.jwata.or.jp/~hp85021/ http://www.enaf.jwata.or.jp/ohmaisuionfarmshu/newmake1.htm
城ヶ島観測ブイ	漁業、水産資源の安定	神奈川	神奈川県水産技術センター	水温、流行、流速、風向、風速、緯度、経度	30分毎										http://www.aeri.or.jp/kanagawa/suisoken/kaihyo/realtime.asp
観測ブイ（マリンロボ）	「集魚機能」 「気象及び海洋観測機能」	静岡	静岡県水産技術研究所	風向、風速、気温、気圧、水温、表層流向、流向	1時間毎	無線	直径6～8m	①沿岸25m、設置水深120m ②沿岸28m、設置水深80m ③沿岸7m、設置水深470m ④沿岸5.4m、設置水深245m						海上に設置した4基の多機能型ブイ、中継基地、水産技術研究所に設置された管制機器等から構成されています。 浮魚礁では7ブイを中心に5kmの範囲で回遊魚が集まり、漁場を形成することが知られています	https://fish-exp.enaf.shizuoka.ac.jp/mr/index.html https://fish-exp.enaf.shizuoka.ac.jp/mr/mr_top.html
定点観測ブイシステムの構築	生態系や漁場形成のメカニズムを解明するため		科学技術庁（現、文部科学省）			太陽電池と蓄電池（リチウム蓄池）	全長5．4m 全幅1．6m 全高3．26	相模湾沖						使われているものではなく、研究だけかもしれません。	
下甑島沖海流データ	漁業	鹿児島	鹿児島県水産技術開発センター	水温、風向、風速	2時間毎										http://jaxa.jp/press/jaxa/kakushin_boujyo/boujyo_seaice_j.html http://jaxa.jp/press/jaxa/kakushin_boujyo/kaiyou/kaiyou_tokutei/kaiyou_tokutei9.pdf
表示付自動観測ブイ	赤潮や養殖のリアルタイムの状況・成長に関するデータを公開するため	熊本	熊本県水産研究センター	水温、塩分、溶存酸素、粕濾プロファイル	20分毎				各地点表層　0．5m層						http://www.nanotech.co.jp/humamgotAds/login.html

表７．４　既存の海洋観測ブイの性能データベース（２）

ブイの名前	観測情報の主な利用目的	設置海域名（伊勢湾沖等）	ブイ管理団体	観測情報	観測時間	電源	ブイからの情報伝達方法	ブイのサイズ	ブイの設置位置（沿岸距離、水深、観測定点）	メンテナンス期間	耐用年数	初期費用	維持管理費用	備考	参照
有明海テレメータ	閉鎖性水域のノリ色落ち対策のための、漁業環境の観測	福岡	福岡県水産海洋技術センター	水温 比重 塩分 気圧 気温 平均風速 最大風速 風向 風向 日射量 降水量 濁度 DO クロロフィル	1時間毎		無線によるデータ転送							漁業者参加型漁場環境予報システムを使用	http://www.sag-net.pref.fukuoka.jp/links/dbsys/db41.htm http://www.sag-net.pref.fukuoka.jp/links/dbsys/db54.htm
土佐黒潮牧場ブイ	漁業	高知（土佐湾沖 等）	土佐黒潮牧場管理運営委員会、高知県水産振興課、高知県水産試験場	風向、風力、流速、流向、水温	1時間毎		無線通信またはオープコム通信衛星	直径8～10m、高さ約12m	水深326～1300m 沿岸から12.9～48.5km	年3回 清掃、点検等を委託して行っている。	10年	約2億円	1基当たり約80万円	１０号、１２号、	http://www.pref.kochi.jp/~sangi/suishi/6topix/golem/kuroboku.html
水温ブイ	急潮などの発生を知るため	愛媛	愛媛県水産試験場、中予水産試験場、愛媛大学沿岸環境科学研究センター(CMES)	水温、塩分、気温、DO	2時間毎		衛星経由	不明、写真参照（1m？）	沿岸に設置、5m深の水温					株式会社ゼニライトブイ観の通信衛星オープコム対応型水温ブイを使用	http://www.rostec.or.jp/~eeoc/washiryou/fish_wspdf/ehime.PDF
水温観測ブイ	赤潮対策や養殖管理、一般県民（釣りや海洋レジャー）に水温情報の提供	香川(引田沖 屋島湾 燧灘沖)	香川県水産試験場・赤潮研究所	水温	30分毎に、24時間観測		ドーバーの方式のメール受信	日油技研の水温ブイ（本体5kg 幅30cm横30cm）	1、5m、0、5m深	1年に1回 センサーの清掃	メーカー5年	1基 70万円程度	年間約20万円程度		http://www.pref.kagawa.jp/suisanshikon/suisinkyouhou/suion.htm
かき養殖漁場環境リモート監視システム（テスト中）	かきの養殖	広島	広島県立総合技術研究所 水産海洋技術センター	水温、塩分、溶存酸素、濁度、クロロフィル濃度					1m、5m深						http://www2.ocn.ne.jp/~hfes/kaki/kakiindex.html
自動観測装置（テレメータブイ）	海苔養殖や魚類養殖の参考資料	岡山(播磨灘北西部 牛窓地先)	岡山県水産試験場	水温H17年度から塩分(0.5m)も試験的に測定	30分毎	太陽電池	DoPPs通信		0、5m、2m、4m深	約2ヶ月毎の清掃、1～3年毎の点検		通信システムも併せ1,000万円程度と思われる。	不明 H17年度に更新したため、故障時の修理費、測器点検料等が発生していない		http://www.pref.okayama.jp/norin/suishiken/okasuion/index.html http://www.pref.okayama.jp/norin/suishiken/okasuion/okasuion1.htm
兵庫県漁場環境情報システム水温等自動観測ユニット	漁業者が実践する資源回復計画の推進とノリ養殖業や魚類養殖業における色落ち対策や病害対策の迅速化を図る	兵庫(兵庫県瀬戸内海域)	兵庫県立農林水産技術総合センター・水産技術センター	二見は水温、塩分、クロロフィル及び気象（風向、風速、日射量、気温、湿度、気圧、降水量） 明石・坊勢・交流の翼港・沼島・福良は水温）	二見局は30分毎、二見局以外は10分毎HP掲載データの更新は毎日9時半頃	太陽光発電	観測局から1日に2回メールでデータ送信		明石、交流の翼港、沼島、坊勢、福良、二見	405(W)×300(D)×390(H)mm	システム全体で5年	観測ユニット工事費4166万5千円	観測ユニット保守点検管理委託費約100万円/年		http://www.hyogo-suisi.jp/index.htm http://www.hyogo-suisi.jp/suion/pc_mnsui.htm http://ocean.nishi.com/catalogue/ct_jp_AEM_Body.pdf
早田定置網ブイ	三河湾の水質観測調査	三重	三重県科学技術振興センター水産研究部	海面下1m水温、海面下10m水温・流向流速	10分毎				設置水深80m、観測水深1m、10m						http://www.mpstpc.pref.mie.jp/SUI/ http://www.mpstpc.pref.mie.jp/SUI/shigen/haida/
衛星通信自動観測ブイ（片田定置漁場ブイ）	海洋構造に敏感に反応するブリ等回遊魚の来遊動向と海洋環境の関係を把握し回遊魚の来遊量を予測すること	三重県	独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所（運営協力：三重県科学技術振興センター水産研究部 運営協力：片田定置株式会社）	水温	10分毎				測定場所 水深約60m 測定水深海面下10m						http://nrifs.fra.affrc.go.jp/temperature/katada/index2.htm http://nrifs.fra.affrc.go.jp/temperature/katada/Intro.htm
自動観測ブイ		愛知	愛知県水産試験場	水温、塩分、DO	1時間毎			写真参照	設置水深10、13m						http://www.pref.aichi.jp/suisanshiken/ http://www.pref.aichi.jp/suisanshiken/232.htm http://www.pref.aichi.jp/suisanshiken/2321.htm

表７．４　既存の海洋観測ブイの性能データベース（３）

ブイの名前	観測結果の主な利用目的	ブイを管理する機関（問合せ先）	観測特項目	観測時間	電源	ブイからの情報伝達方法	ブイのサイズ	ブイの係留位置の特徴（水深、底質、潮流）	メンテナンス期間	耐用年数	主な費用	主な維持費/月	備考	参照
リアルタイムブイ	急潮発生予測、エチゼンクラゲ回避予測、海況情報提供	石川（能登半島北沖、西海沖）	水温	10分間隔	太陽電池	Doppa網(NTT movaによるE-mail		西海門前高層、沿岸距離2200m～3000m 水深42m～81m 観測水深1m～80m間でさまざま。	1年	10年	各200万円	各20万円	冬期間（概ね11～3月）は、引き上げ休止となります	http://www.pref.ishikawa.jp/suisan/gyokuri/saisyu/files/velocity/VELOCITY-index.html
リアルタイムブイ	急潮発生予測、エチゼンクラゲ回避予測、海況情報提供	石川（石川県加賀沖、富山湾）	流向、水温、流速	10分間隔	太陽電池	Doppa網(NTT movaによるE-mail		場所によりさまざま（4～6層）安宅、小浦、舘川、岸壁 沿岸距離2000m～3500m 水深23m～91m 観測水深10m	1年	10年	各250万円	各20万円	安宅は冬期間（概ね11～3月）は、引き上げ休止となります。岸壁は冬期間のみ設置	http://www.pref.ishikawa.jp/suisan/gyokuri/saisyu/files/velocity/VELOCITY-index.html
衛星通信自動観測ブイ	海洋構造に敏感に反応するカツ等回遊魚の来遊動向と海洋環境の関係を把握し回遊魚の来遊量を予測すること	宮崎県	独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所（運営協力 宮崎県水産試験場 運営協力 東水産株式会社	水温	10分毎			測定場所　水深約50m 測定水深海面下10m						http://nrfs.fra.affrc.go.jp/tamaratsu/kushima/index2.htm http://nrfs.fra.affrc.go.jp/tamaratsu/kushima/intro.htm
携帯通信自動観測ブイ	海洋構造に敏感に反応するカツ等回遊魚の来遊動向と海洋環境の関係を把握し、その来遊量を予測すること	鹿児島県	独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所（運営協力 鹿児島県水産技術開発センター 漁協協力 南種子町漁業協同組合）	水温	10分毎			測定場所　水深約25m 測定水深海面下1.10m						http://nrfs.fra.affrc.go.jp/tamaratsu/kushima/index3.htm http://nrfs.fra.affrc.go.jp/tamaratsu/kushima/intro.htm
携帯通信自動観測ブイ	海洋構造に敏感に反応するカツ等回遊魚の来遊動向と海洋環境の関係を把握し回遊魚の来遊量を予測すること、また黒潮変動のモニタリングが目的	和歌山県	独立行政法人水産総合研究センター中央水産研究所（運営協力 和歌山県林水産総合技術センター水産試験場）	水温	10分毎			西側 測定場所 水深 約9m 測定水深 海面下 1.5m 東側 測定場所 水深 約17m 測定水深 海面下 1、5、10、13m						http://nrfs.fra.affrc.go.jp/tamaratsu/kushimoto/index2.htm http://nrfs.fra.affrc.go.jp/tamaratsu/kushimoto/intro.htm
水温ブイ	急潮などの発生を知るため	能登水産振興センター（学和島）	水温、塩分、気温、DO	2時間毎	太陽電池	衛星経由	直径φ160×高さ2500mm（＋アンテナ長515mm	岸に設置、5m深の海岸	随時	おおよそ7年	1,575,000円/台	通信費 5,250円/台/月		http://www.center.ac.affrc.go.jp/tashiro/suisoku/fish_assist/ishikawa.pdf

表７．４　既存の海洋観測ブイの性能データベース（４）

ブイの名前	観測結果の主な利用目的	設置場所（緯度、経度、水深）	ブイ管理担当	観測項目	観測時間	電源	ブイからの情報伝達方法	ブイのサイズ	ブイの係留位置（緯度、経度、水深）	メンテナンス期間	運用年数	初期費用	維持管理費用	備考	参照
漂流型海洋気象ブイロボット	洋上での観測データ取得を効率よく行うこと	四国沖	気象庁	海上気圧・海面水温・波浪の高さ／周期の観測	3時間毎		通信衛星（オーブコム衛星）経由	直径約64cm、高さ約66cmの円筒形、重量約60kg			数ヶ月				http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/buoy/buoy.pdf http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/buoy/buoy_obs.pdf
DOPSブイ	潮流観測	沖縄県	第十一管区海上保安本部 海洋情報調査課長 成田 学 TEL098-867-0118（内線2530）	大潮時期1日の海面付近の流れ観測						ムーンピーチ・サンマリーナ付近					http://www.kaiho.mlit.go.jp/11kanku/03saigai/kinkan/press/kisyuhou/170325%20moon.pdf
自動観測ブイ	有明海で一昨年大きな問題となったノリ不作（色落）について、原因究明のための調査や海域環境の監視・予報体制の強化		西海区水産研究所	水温、塩分、溶存酸素、クロロフィル量、濁度、流向、流速			NTTのDoPa網を通じて日本水産資源保護協会の情報センター（東京都）に集められ、リアルタイムでインターネットを通じ漁業者のパソコン・携帯電話で受信								http://cmfs.fra.affrc.go.jp/saiyo/13.htm http://219.163.131211/anake/anzi.htm
トライトンブイ	赤道域の暖水が世界中の気候におよぼす影響を調査するため（エルニーニョやアジアモンスーンに関わる気候変動研究）	インド洋から西太平洋の熱帯域	独立行政法人海洋研究開発機構	風、大気温度、湿度、降水量、日射量、海水温度、塩分濃度及び潮流		リチウム一次電池共用 12[V]×1,860[AH]/年	人工衛星（アルゴス）	浮体直径×高さ 2.4m×1.54m 重量空中 2.4ton 全没時排水量 5.7ton	熱帯域を中心に18基、北太平洋中緯度域に2基 計20基設置、1998年3月より実績150度の北緯8度、5度、2度、0度に4基設置 開始、以降A海域においては米国のブイと交換でいる。 観測水深：750m					トライトンブイ 太平洋設置観測中（1998～） mトライトンブイ 開発・試験（2004-2006） インド洋小型トライトンブイ 本格運用（2006～）	http://www.jamstec.go.jp/obsern/buoy.html http://www.jamstec.go.jp/jamstec-j/marutes/prod/blue_earth/yokou/M20.pdf
DGPS型潮流ブイ	離岸流の発生状況の把握	愛知県	第四管区海上保安本部海洋情報部 海洋調査課長 細貝 泉 電話0052(661)1611 内線2530 第四管区海上保安本部 航機課長 海野 敏二 電話0052(661)1611 内線3251	位置情報	一秒毎		DGPS局の発信する電波		愛知県赤羽根海岸（太平洋ロングビーチ）						http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KANKYO/kaiho/kaiho2003/2.pdf

第２章の参考文献・Web サイト

[1)]Biological Center HP

http://www.pmbc.go.th

[2)]IOGOOS HP

http://www.incois.gov.in/Incois/iogoos/home.jsp

[3)]CLIVAR HP

http://www.clivar.org/index.php

[4)]IOGOOS HP

http://www.incois.gov.in/Incois/iogoos/home.jsp

[5)]滋賀大学遠藤ゼミ

http://www.edu.shiga-u.ac.jp/~endoh/koryu/naibuha.html

[6)]CLIVAR 概念図

http://www.clivar.org/organization/indian/IndOOS/obs.php

[7)]RAMA buoy

http://www.noaanews.noaa.gov/stories2009/20090504_indianoceanbuoys.html

[8)]カタダイビング HP

http://www.katadiving.net/

[9)]ダイビングアウトレット HP

http://www.divingoutlet.net/

[10)]windguru

http://www.windguru.com/int/

[11)]ホテル予約サイト agoda

http://www.agoda.jp/asia/thailand/phuket.html

[12)]沖縄ツアーランド ウェブページ

http://hotel.okitour.net/q.asp

[13)]気象庁ウェブページ

http://www.jma.go.jp/jma/index.html

第３章　多目的海洋観測ブイの開発とその運用実験

３．１　多目的海洋観測ブイとその運用における設計思想

多目的海洋観測ブイに求められる要件は，機能面，経済面，技術面の三つの側面から構成される．まず，機能面として，津波監視機能が欠かせない．本研究では津波監視を，波高のモニタリングにより，実施する．波高のモニタリングの方法として，音響測深器と GPS 波高計をそれぞれ用いた運用実験を行った．音響測深器は，GPS 波高計ほどの計測精度は持たないものの，100 万円以下の装置で計測が可能である．GPS 波高計は，その逆の特性を持つ．津波監視機能に加え，平時の沿岸地域社会，沿岸産業のニーズにこたえるための各種計測器を搭載する必要がある．ここでは，最終的に，波高，流向，流速，風向，風速，水温を同時に計測可能なものを目指した．これらの計測対象は，第 2 章での検討でも，ニーズが高いことが明らかとなったものである．また，後述する運用実験海域にある観測塔でも計測されている項目であるので，運用実験後に多目的海洋観測ブイによる観測結果の検証が可能である．

津波監視およびその他の多目的観測は，常時継続的に実施する必要があるため，そのための電源システムと，ブイでの観測データをリアルタイムで把握するための通信システムが不可欠である．後述するように，本研究では，最終的に，太陽電池とバッテリーから構成される電源システムにより，基本的に昼夜を問わず，継続的に電源を供給可能なシステムを搭載した．また，PHS を用いた常時接続により，ブイでの観測データをリアルタイムに基地局に送信するシステムを搭載した．

経済面の要件は，システムそのものにかかるコスト，設置コスト，運用コストの三つの面からなる．本研究では，システムそのものにかかるコストを 1000 万円程度，設置コストを 100 万円程度，運用コストを年間 100 万円程度に抑えることを目指している．この程度のコストであれば，後述する「ホテル税」制度等によって，沿岸地域社会で十分にカバーできる可能性が高い．

技術面の要件は，ブイの設置・運用を，最大限，地元が保有する技術･能力の内側で実現することである．この点は，地元の産業がこの多目的海洋観測ブイの運用に参画する上で極めて重要である．第 1 章でも述べたように，地元産業自身が，多目的海洋観測ブイの運用に参画することは，津波という発生頻度の極めて低い災害に対して長期的に監視を続けていく上で不可欠な要素である．その意味で，この技術面の要件は，多目的海洋観測ブイの性格を最も端的に表している要件といえる．本研究では，ブイの設置，運用に当たり，地元漁協の協力を全面的に受けている．逆の言い方をすれば，多目的海洋観測ブイは，地元漁協の保有する技術・能力で設置，運用が可能なものとなっているということである．

これらの三つの側面は，互いに完全に独立に検討できるわけではなかった．具体的には，ブイの浮体の大きさが，この三つの側面の検討に大きく影響している．搭載される計測器が増えるほど，ブイの浮体は大きくならざるを得ない．その理由の一つは，計測器の重量が増え，また，計測器に電源を供給するバッテリーが増えるため，それらを支える浮力が必要になる点である．いま一つは，計測器全体の消費電力が増えることで，その電源をまかなうための太陽電池パネルの面積を増やさざるを得ず，結果として太陽電池パネルを貼るためのブイの表面積を増やさざるを得ない点である．

ブイが大きくなる影響は，単にブイの費用が高くなるだけにとどまらない．ブイが大きくなると，設置時にブイが波から受ける力も大きくなる．その結果，ブイの係留索はより耐久性の高い物が必要となり，係留索を海底につなぎとめるためのアンカーもより大規模なものを用いざるを得ない．結果，ブイを係留するための資材全体のコストが上がる．また，ブイ運搬，設置を行う人員，船，車両に求められる能力も特殊なものとなり，設置にかかるコストも上がる．無論，ブイ設置に地元産業が参画することも難しくなる．その意味で，最終的なブイの仕様の検討上，電源を確保しながら，どれだけブイの規模を小さく抑えられるかが，大きなポイントであった．

3．2　多目的海洋観測ブイの開発・実験計画

1）試作されたブイ

本研究においては，1 号機，1 号機改，2 号機の三つのブイを試作し，運用実験を行った．

1 号機は，小型のブイに音響測深器を搭載して，安価な波高計測の可能性を検討するために作られた．その目的以外の機能は搭載されていない．電源システムは，バッテリーだけであるため，計測可能期間は限られている．また，通信機能を持っていないため，計測期間終了後，ブイに搭載されたデータロガー内のデータを回収した．

1 号機改は，1 号機を改造し，GPS 波高計を搭載できるようにしたものである．小型のブイにより計測精度の高い GPS 波高計を搭載して，どの程度の波高計測が可能かを検討した．電源システムは，バッテリーのみであり，1 号機同様計測可能期間は限定されている．ブイには GPS のセンサーだけが搭載されており，GPS が計測した位置情報を PHS 通信によって，基地局に送り，位置情報を元に波高を計算する．

2 号機では，多目的観測が可能なブイの試作機として，波高に加え，流向，流速，風向，風速，水温を計測できるようにした．電源システムも，バッテリーと太陽電池パネルの組み合わせにより，長期間にわたる継続的な観測を可能にした．計測機器の増加と太陽電池パネルの搭載を受け入れつつ，浮体の大きさをできるだけ抑えた形状になっている．

これらのブイの製造および GPS 波高計の運用については，GPS 津波観測ブイの開発・製造で数多くの実績を持つ，日立造船株式会社の協力を得た．

2）東京大学平塚総合海洋実験場での運用実験

実験サイトとしては，神奈川県平塚市沖にある東京大学平塚総合海洋実験場（**図3．1**）平塚沖総合実験タワー（以下観測塔，旧防災科学技術研究所平塚実験場波浪観測塔，2009年7月1日に東京大学へ移管）の西側海域とした．観測塔では，波高，風向，風速，流向，流速，水温の計測を常時行っている．このデータを使って，ブイでの観測データの検証を行うことが可能となる．観測塔は，平塚市沖約1kmにあり，ブイはその西側約30mの地点に設置された．ブイ設置点の水深は約20mで，海底は砂地である．平塚市の海岸線は，ほぼ東西にまっすぐ伸びており，その沖は，北から南に向かって緩やかに水深が増している．観測塔は，その緩やかな海底斜面上にある．

3）地元漁業協同組合の協力

ブイの設置に当たっては，平塚市漁業協同組合の協力を得た．実験海域は，多くの漁船等の航路にあたり，周辺では定置網が敷設されている．観測塔を中心に半径30mの海域は，当時観測塔を管理していた防災科学技術研究所が実験で使用することに関して，漁協との間で合意が得られていた．今回の実験では，ブイやその係留索，アンカーなどがその海域の外側にまで及ぶことが予想されたため，航路や漁業の邪魔にならない設置位置について漁協の指示，アドバイスを頂いている（**図3．2**）．

また，試作したブイに適した係留方式の設計から，実際の設置作業までを全て一括で平塚市漁業協同組合に依頼した．平塚市漁業協同組合下には，定置網を設置するための技術，船を持つ漁業者も所属しており，日常的に平塚沖で定置網の設置・維持管理を行っている．今回，係留方式の設計は，神奈川漁業資材株式会社，設置作業は，日海丸（**図3．3**，田中船長）にお願いした．現地の海底地形，気象・海象特性にも通じている．また，設置を地元漁協に依頼したことで，最適な設置方法が選択され，費用も最小限に抑制できたものと考えている．なお，ブイ設置にあたっては，湘南海上保安署に対し，工事・作業届を提出している．

ブイの設置場所は，日頃，日海丸が作業を行う海域でもあり，後述の通り，ブイや係留索の状況については，日常的に目を配っていただいていた様子がある．このような配慮がいただけたのも，地元の人々にブイ設置に参画していただいた効果と考えている．

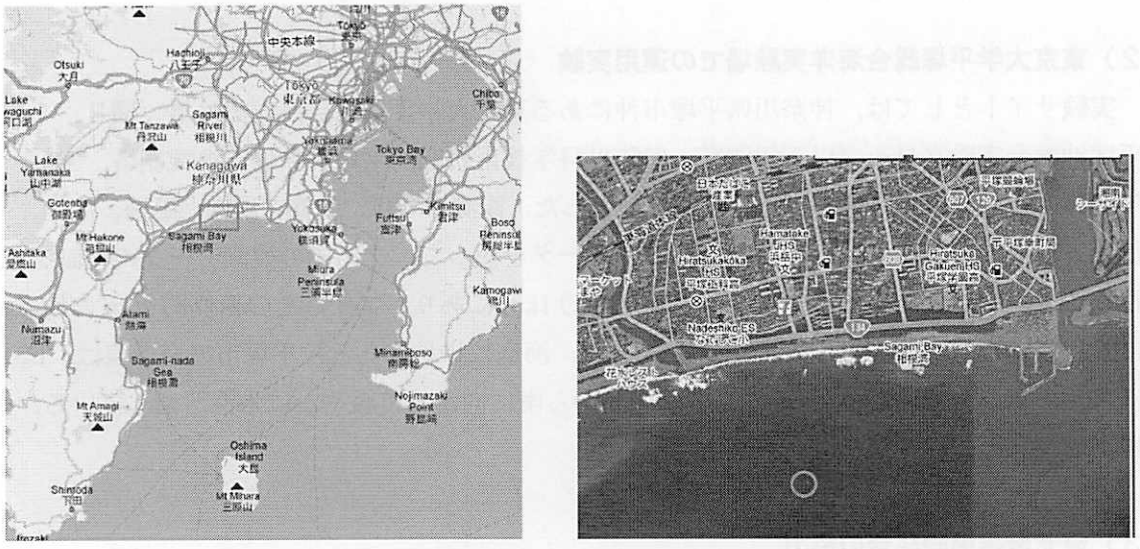


図３．１　東京大学平塚総合海洋実験場と平塚沖総合実験タワーの位置



図３．２　平塚市漁業協同組合とのブイ設置に関する打ち合わせ



図３．３　日海丸

３．３　多目的海洋観測ブイ１号機の開発と運用実験

１）１号機の仕様

１号機は，最初の試作機として，安価な波高計測の可能性を検討するために作られた．**図３．４，図３．５，図３．６**に１号機の概観図および外観，係留された状態を示す．ブイの総重量は約200kg，全浮力は，約4.0kN（500kgf）である．ブイの材質は，機器・電源収納部がアルミニウム合金，フロート部がポリウレタンフォームが充填されたポリエチレンである．

波高計測器として音響測深器TDM-9000A（タマヤ計測，12V,0.65A）を搭載し，計測された水深データは，同じくブイに搭載されているデータコレクタTDC-9A（タマヤ計測，7.4V,0.21A）内のSDカードに記録される．音響測深器およびデータコレクタの電源は，直列に接続された四つのリチウムイオンバッテリーCL-350H（3V，350Ah）によって供給される．計測可能期間は17日弱である．通信機能を持っていないため，計測期間終了後，ブイに搭載されたデータロガー内のデータを回収する必要がある．

２）１号機の設置・運用

図３．７に係留方法の概要を示す．ブイの触れ回りを抑え，観測塔や周辺を航行中の船との衝突をさけるため，３点係留となった．資材にかかった費用は246,645円であった．

設置作業は，平成20年２月19日（火）に実施した．田中船長を含めた４人が設置作業に従事した．作業に用いられた船は，日海丸（以下親船）と小型漁船の二艘であった．船代・人件費にかかった費用は，215,250円であった．ブイは，4tトラックで東京大学生産技術研究所から，平塚新港まで輸送され，他の係留に必要な資材と共に親船に積載された．

ブイ設置までの大まかな流れは以下の通りである．まず，ブイを設置する目標点を決める．目標点には仮の小さな浮標を入れる．その地点で，三本の係留索の一端を子船に渡し，もう一端を親船に積まれた500kg土嚢を四つに結びつける．一本の係留索あたり，2tの重りで支えることになる．子船は仮浮標の側に静止させた状態で，親船は係留索を張りながら一セット目の土嚢を沈める位置まで移動する．土嚢は，舷側にロープで結び付けられており，土嚢を沈める位置まで親船が来ると，そのロープを切って土嚢を海中に落とす．こうして張られた一本目の係留索と二本目の係留索が120度を成すように，親船と子船が連絡をとりながら，二セット目の土嚢を落とし，二本目の係留索を張る．三本目の係留索も同様である．この段階で，子船を中心に三本の係留索が互いに120度を成すように，張られた状態になる．親船は，仮浮標の位置に戻り，ブイを船載のクレーンで海上に吊るし，子船に預けてあった三本の係留索の端と，ブイの三箇所の係留環をシャックルで接続する．この段階では，係留索はブイへの接続作業用にゆとりを持たせた状態になっている．ブイを着水させた後，係留索の長さを調整し，設置が完了となる．設置海域に到着したのが，午前９時15分で，設置作業が終わったのは，午前11時36分であった．作業にかかった時

間は 2 時間 21 分であった.

その後，3 月 11 日にブイの回収作業を行うまで，計測を行った．その間，2 月 23 日に春一番が吹き，26 日に荒天に見舞われるなど，海況が荒れることもあったが，係留上の問題は無かった. 回収も設置同様，二艘の漁船と，4 人の作業員で実施された. かかった費用は，178,500 円（税込）であった．作業にかかった時間は 1 時間程度であった．係留索は，仮の浮標に結びつけ，次回のブイ設置に備えた．ブイ内部の機器が搭載された空間への海水の侵入は無く，データロガーには，計測記録が残っていた.

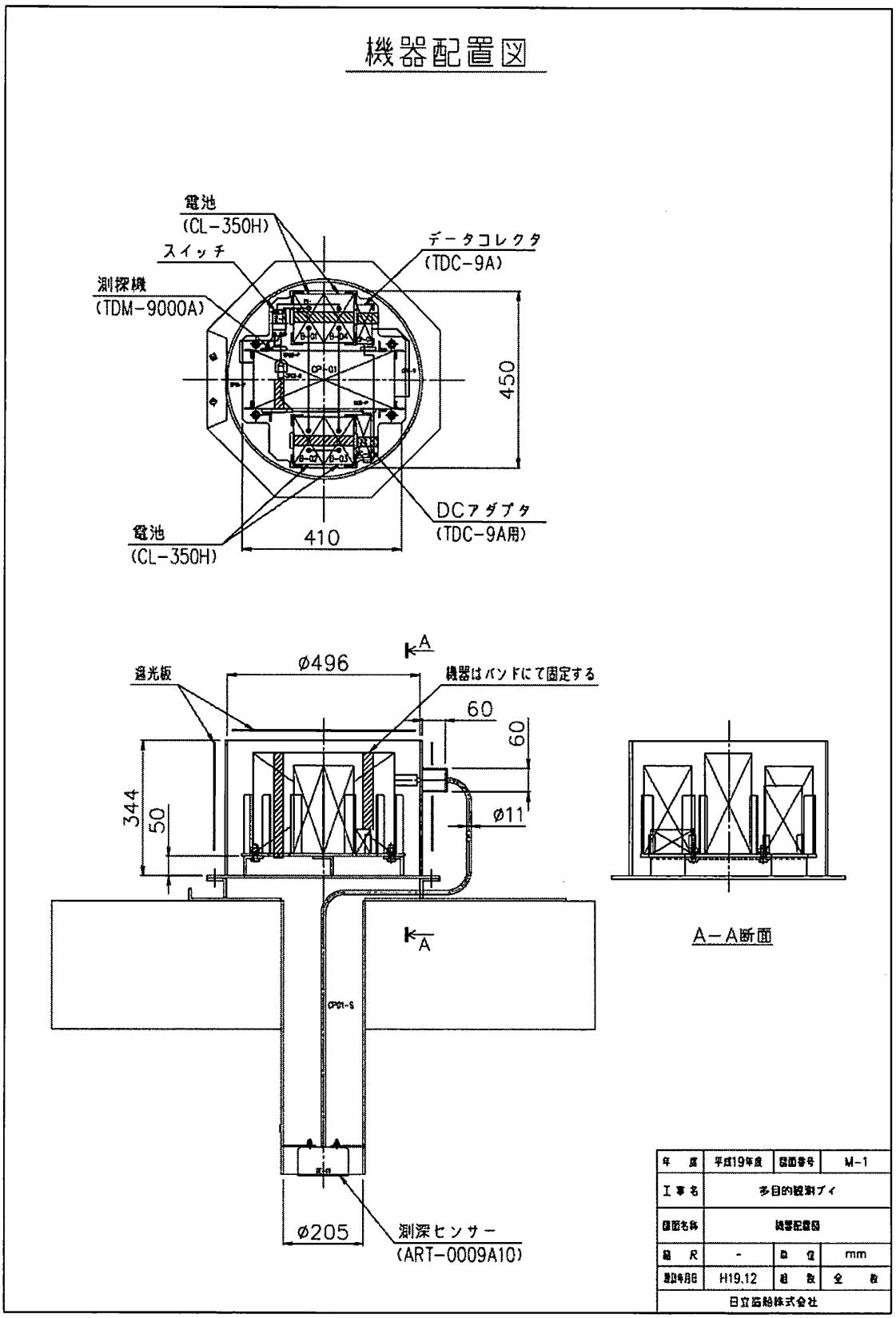

機器配置図
電池
(CL-350H)
スイッチ
測探機
(TDM-9000A)
データコレクタ
(TDC-9A)
450
DCアダプタ
(TDC-9A用)
電池
(CL-350H)
410
A
ø496
遮光板
機器はバンドにて固定する
60
60
344
50
ø11
A
A－A断面
CP01-S
ø205
測深センサー
(ART-0009A10)
年度
平成19年度
図面番号
M-1
工事名
多目的観測ブイ
図面名称
機器配置図
縮尺
-
単位
mm
製図年月日
H19.12
枚数
全 枚
日立造船株式会社

図3．4　1号機の概観図

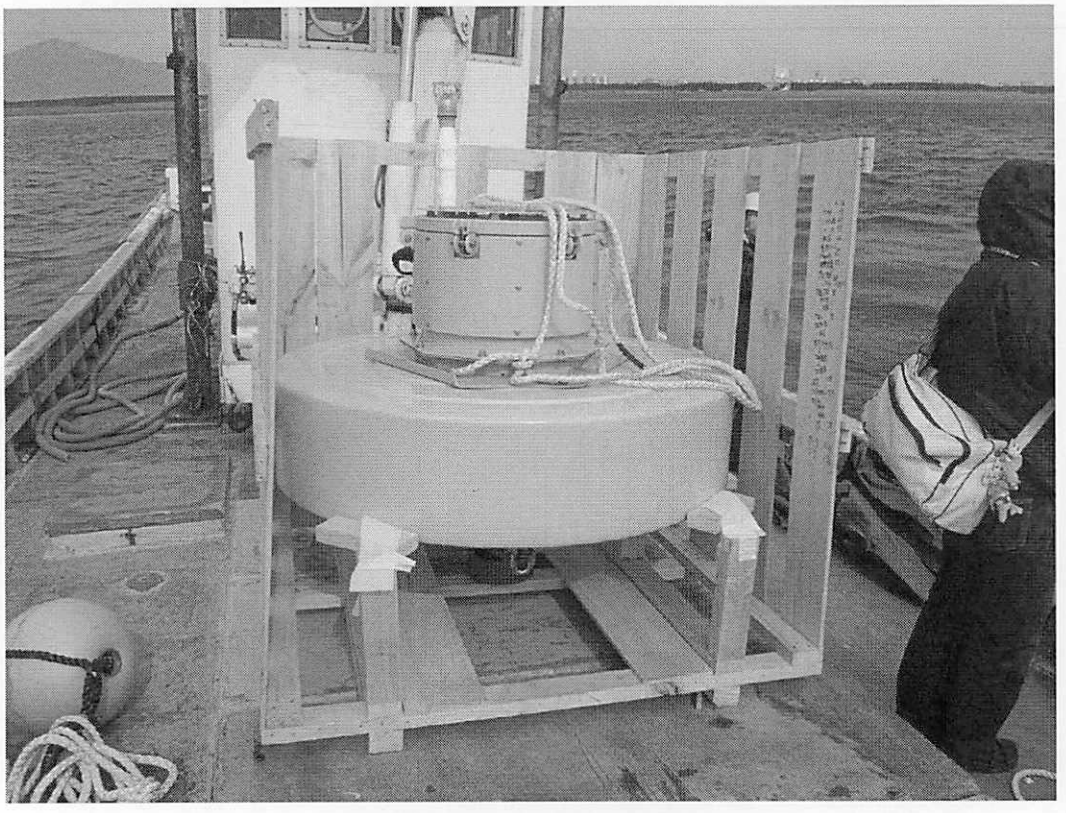


図３．５　１号機の外観



図３．６　係留された１号機

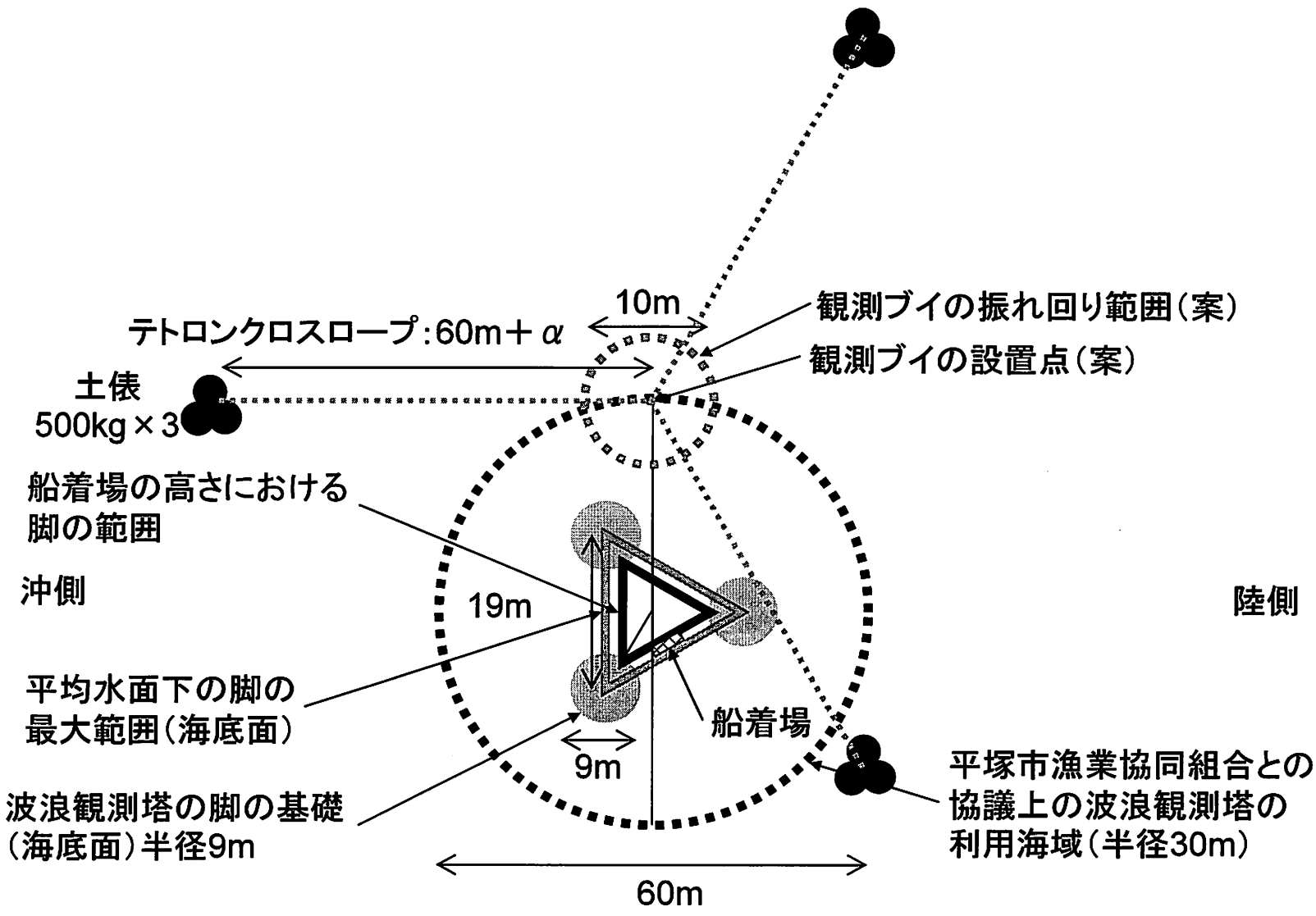

10m
観測ブイの振れ回り範囲（案）
テトロンクロスロープ：60m＋α
観測ブイの設置点（案）
土俵
500kg×3
船着場の高さにおける
脚の範囲
沖側
19m
陸側
平均水面下の脚の
最大範囲（海底面）
船着場
9m
平塚市漁業協同組合との
協議上の波浪観測塔の
利用海域（半径30m）
波浪観測塔の脚の基礎
（海底面）半径9m
60m

図3．7　三点係留の概要

３．４　１号機の運用実験結果の検証

今回の実験では，ブイに搭載した音響測深機による波高観測方法の確立のため，実験ブイの観測結果と波高観測技術が確立された観測結果との比較を行う必要がある．そこで，実験ブイの観測結果との比較を行うために，神奈川県波浪等観測塔の観測結果を利用する．神奈川県波浪等観測塔は現在まで様々な研究で利用されており十分な精度のあるものである．

神奈川県波浪等観測塔と実験ブイの間に約 30m という距離があること，さらにデータの観測間隔が異なるため直接的に波形を比較することによる検証はできないので連続的に観測している波をある時間帯に区切り，代表的な波として表現し比較検証を行う．

１）神奈川県波浪等観測塔（旧防災科学技術研究所波浪等観測塔）概要

本実験では，ブイに搭載した音響測深機による波高取得方法の確立のため，実験ブイで得られたデータと波高取得技術が確立されたデータとの比較を行う必要がある．そこで，実験ブイデータとの比較を行うために，現在まで様々な研究で利用されている神奈川県波浪等観測塔で得られたデータを利用した．よって神奈川県波浪等観測塔の概要と実験期間中の状態を以下にまとめる．[1)]

神奈川県波浪等観測塔(以下観測塔とする)（**図３．８**）は 1965 年(昭和 40 年)8 月に外洋における海象・気象現象についての観測研究を総合的に，かつ継続的に行うことを目的とし，神奈川県平塚市虹ヶ浜から約 1km の沖合，水深 20m の位置に設置された．

波浪等観測塔では様々な海象・気象観測機が取りつけられ，波浪，潮位，流速，水温，気温，塔の振動の観測がおこなわれており，この観測値は現在，神奈川県のホームページ[2)]で公開されており誰でも自由に利用することが可能である．

本体の構造は 3 本の鋼管製の主柱からなる下部構造の上に，直径 7.4m の観測室を載せた上部構造物が載った形をしており，海底から計った塔の高さは 40.0m である．海底ケーブルにより電力を供給，観測データの送信，陸上施設との相互電話を行っている．

今回実験で比較する波高に関して，観測塔では空中式超音波波高計を用いて観測している．観測塔付近は魚が多く生息しており，釣り客を乗せた船が空中式超音波波高計の下に停泊していることがある．また，海上に位置しているため空中式超音波波高計の下を鳥が通過することがある．このような場合には空中式超音波波高計の特性上，観測結果に異常が見られる．神奈川県のホームページではほぼリアルタイムで観測値を公開している．そのため，鳥などの影響による異常値は除去アルゴリズムを用い除去を行っているが，釣り客などの影響による異常値については除去せずに公開されている．その後，防災科学技術研究所平塚実験所で平塚市沖の波高観測結果として保存する際には異常値の数が少ない場合は人の手により除去作業を行うが，異常値の数が多い場合は観測値としての保存は行っていない．

空中式超音波波高計とは水面上の空気中に送受波器を設置し，送波器からパルス音波を放射し，水面から反射した音波を受波器で受波し，送受波の時間間隔を測定する計測器である．空気中の音速は既知であるので，この時間間隔と波高とを対応させることにより波高を求めている．

設置から約45年が経過しこれまで，台風，波圧，腐食や付着生物などにより様々な被害を受けてきたが，独立法人防災科学研究所により維持管理が行われきた．しかし独立行政法人整理合理化計画に伴い2008年度より神奈川県により維持管理が行われ，2009年より現在は東京大学が管理をしている．約45年という時間経過があり，劣化が進んでいるが今後も海象・気象現象の観測研究において大きく貢献すると考えられる．実験期間中の状態は2007年の台風により3基の空中式超音波波高計が破壊されたが，3基のうち北側(陸側)のの空中式超音波波高計を修理し波高の観測に使用しており，今回の実験で用いられている観測塔の波高観測結果はすべて北側(陸側)のものである．

2）波の表現方法

本研究の分析では，海で発生している波を分析するため非常に複雑な波を対象としている，そこで，それらの不規則波を比較しやすくするために個々の波を定義し，それら定義した波をそれぞれの方法で処理し表現する．

比較する代表波の表現方法として「有義波」を用いた．大きな波や小さな波が混在する実際の海面では，目視で観測される波高は有義波の高さである「有義波高」に近いので，一般に波高と言った場合は有義波高を指し，さらに様々な研究で用いられている表現方法であるため本研究でも「有義波高」を用いた．

「有義波」とは，ある地点で連続する波を観測したとき，波高の高いほうから順に全体の1/3の個数の波（例えば20分間で100個の波が観測されれば，大きい方の33個の波）を選び，これらの波高および周期を平均したものである．有義波（3分の1最大波）は，一番高い波でも，単なる平均の波ではない．[3)]

波の定義方法としては「ゼロアップクロス法」を用いた．用いた理由としては神奈川県波浪等観測等でも利用されている定義方法であることと一般的に用いられている定義方法だからである．

ゼロアップクロス法とは[4)]**図3．9**のように観測した水面変動（時系列）から平均水位を求め，その平均水面をきりあがる点（ゼロアップクロス点）を探し，ゼロアップクロス点から次のゼロアップクロス点までを1つの波と定義する方法である．

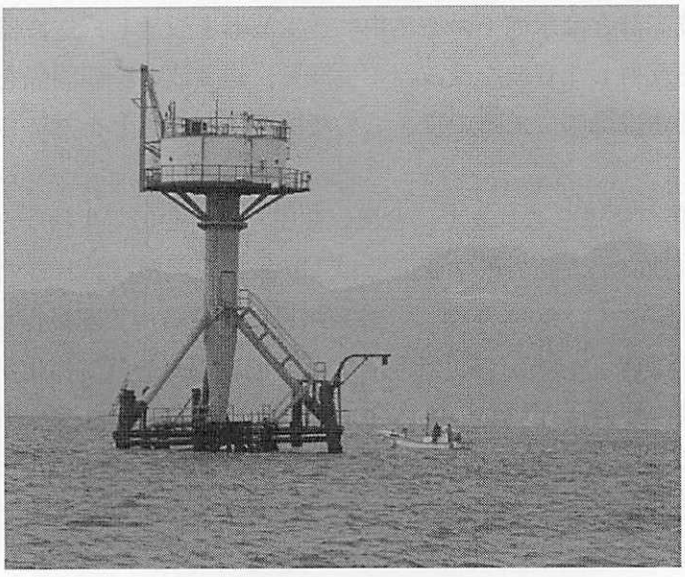


図３．８　神奈川県波浪等観測塔の全体写真

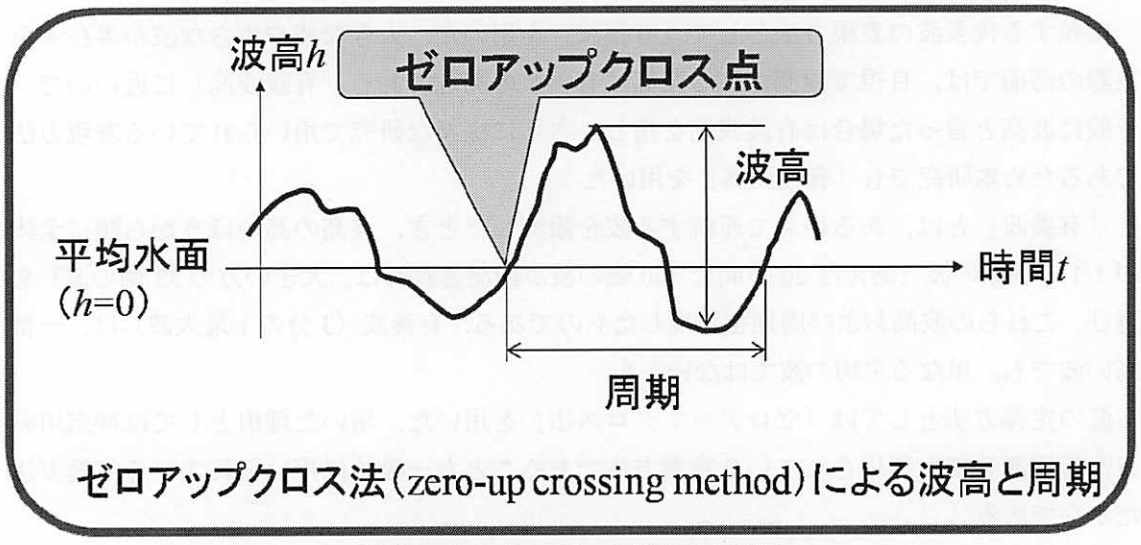


図３．９　ゼロアップクロスの図

(出展：酒井哲郎著：海岸工学入門 [4]の図に筆者が加筆)

3）神奈川県波浪等観測塔波高観測結果と実験ブイ波高観測結果の欠測の取扱い

2008年2月18日～2008年3月5日で得られた観測値について詳細を示す.

観測塔の観測値については実験期間中ほぼ波高を観測出来ていたが3月3日18時の観測値に異常が見られた. この原因としては釣り客が観測塔の下で釣りをしていた可能性が考えられる. この観測値の取り扱いに関しては, 防災科学技術研究所平塚実験場でも観測結果としての保存を行っていないことから本分析でも観測値としての取り扱いをしない.

実験ブイの観測データについては設置の初期段階の2月18日と2月19日ではほぼすべての観測値が, 異常値があった. その後は, 2月23日12時, 13時, 2月26日16時, 3月1日11時で異常値が見られた. これは, 実験ブイを繋ぎとめておく繋留索の止め方や実験ブイ自体が小さいため波による影響を大きく受け, 実験ブイ自体が傾く. そして音響測深機の特性上大きく傾いてしまった場合に音波が海底へ到達しない場合, エラーを表すために水深の測定結果が75cmとなり観測結果が異常値となる場合や何らかの理由で観測値が異常値をとなる場合がある. 前述した, 2月23日12時, 13時, 2月26日16時, 3月1日11時については非常に風速が速い時間であるため, 実験ブイが傾いて音波が海底まで届かないために異常値が発生していると考えられる. 2月28日9時, 28日10時に関しては何らかの影響により異常値が発生している. よってこれらの観測結果は異常値として手作業により除去を行った.

4）実験ブイ波高観測結果のその他の異常値の除去方法

上記の欠測の他に何らかの理由(この理由については本章の最後に考察する)で異常値が観測されている観測結果がある. **図3．10**は何らかの異常値を除去する前の有義波高の経時変化の比較の図である. 図の中の矢印で指した部分について観測塔の観測値と実験ブイの観測値の差が非常に大きくなっているのでこの時間の観測値について詳細に見た. 詳細な図を**図3．11**と**図3．12**に示す.

この2つの図より異常値が多く出ていることがわかった. 図のような異常値は全実験期間中に数多くみられた. まず, 観測塔での観測結果処理で行われている除去方法を防災科学技術研究所平塚実験場の方から教えていただきその方法と同様の方法により処理を行った. それでも除去できない異常値に関しては, 波高発生の確率分布が正規分布とみなせることから, 移動平均と分散値を用いて, 以下の手順で異常値の除去を行った.

①毎正時の平均を算出する

②得られた平均値を用い標準偏差を出す

③平均値＋標準偏差×3.291の値より外れた値を観測している観測結果を除去する.

標準偏差に3.291を掛けた値を今回使用した理由は, 実験ブイそのものの特性を消すことなく観測結果そのものの精度を算出するためである. 波は正規分布で表わされる[5]という性質を利用し, 平均値±標準偏差×3.291（99.9%信頼区間）の以上の波高を棄却することとした.

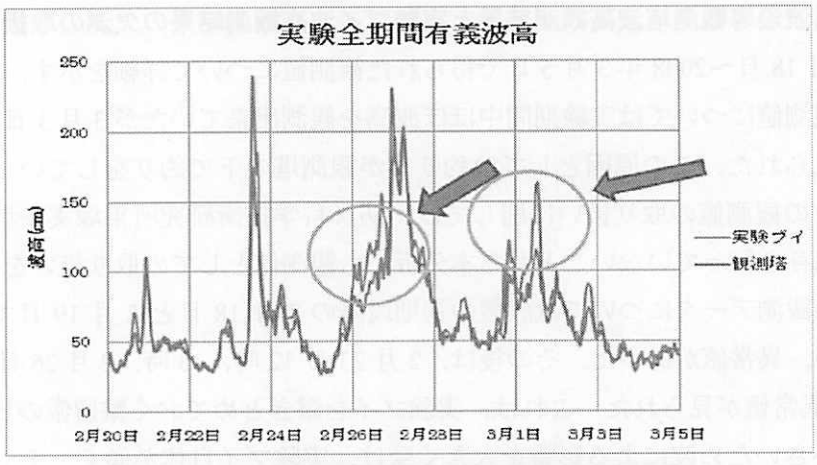


図３．１０　異常値除去前実験全期間有義波高

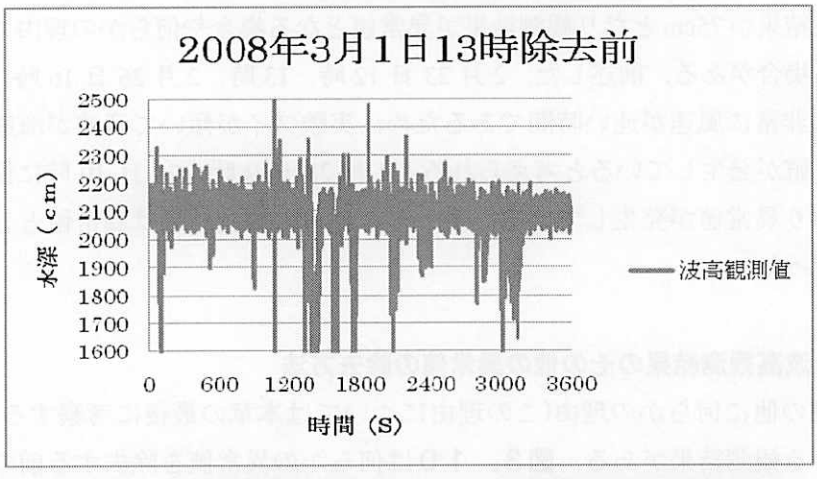


図３．１１　異常値除去前３月１日１３時実験ブイ観測水深図

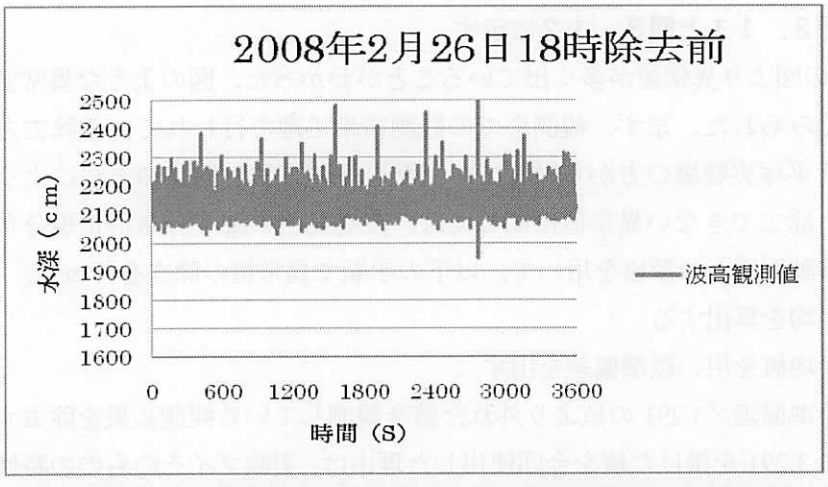


図３．１２　異常値除去前２月２６日１８時実験ブイ観測水深図

5）異常値除去の結果

以上の異常値除去方法を用い**図3．11**と**図3．12**についての異常値の除去を行った．**図3．13**と**図3．14**は 3.4.4)で述べた除去方法を実施した後の同日同時刻の図である．3 月 1 日 13 時でまとまって水深を浅く観測していた部分については，改善が見られた．2 月 26 日 18 時で大きく水深を浅く観測していた部分についても改善が見られた．

6）異常値除去方法の検証

3.1.5)では異常値の除去を行い，その除去ができたことが言えた．しかしその異常値の除去方法が的確であったかはまだ不明であるので，本節では異常値が観測されていない場合で観測値が除去されるかどうかの検証を行う．

この検証では，以下のこの 2 つの場合の検証を行った．

①波高が低く，異常値がほとんど見られない 2 月 20 日 1 時

②波高が比較高く，異常値がほとんど見られない 2 月 20 日 22 時

この検証を 2 つの場合の検証を行い波高観測値が大きく変化していた場合は今回利用した異常値の除去方法が，異常ではないと思われる値を除去していることになり，ブイ自体の波高観測についての特性も除去していることになり，その除去方法が不適格であるとわかる．一方この検証により波高観測値が大きな変化をしていなかった場合は今回の異常値の除去は適格であり，この方法で異常値除去を行った後の観測値は異常値がほぼ消え，なおかつブイ自体の特性を表現しているということになる．

図3．15と**図3．16**は①の波高が低くさらに異常値がほとんど見られない 2 月 20 日 1 時である．よってこの場合の観測値に大きな変化が見られればブイ自体の特性を消していることになり除去方法が不適格であると考えられる．

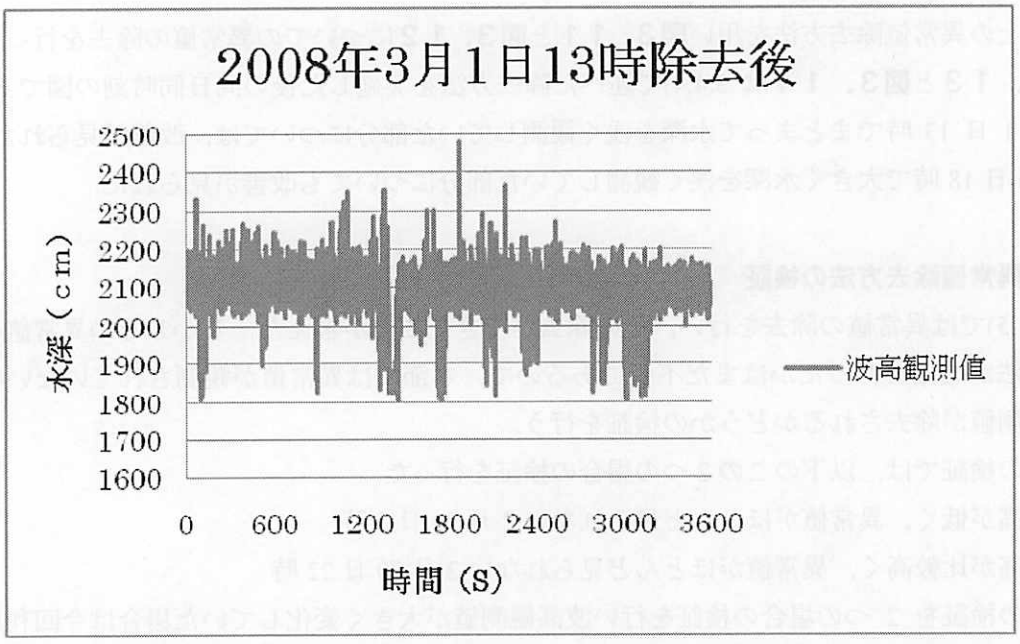


図３．１３　異常値除去後３月１日13時実験ブイ観測水深図

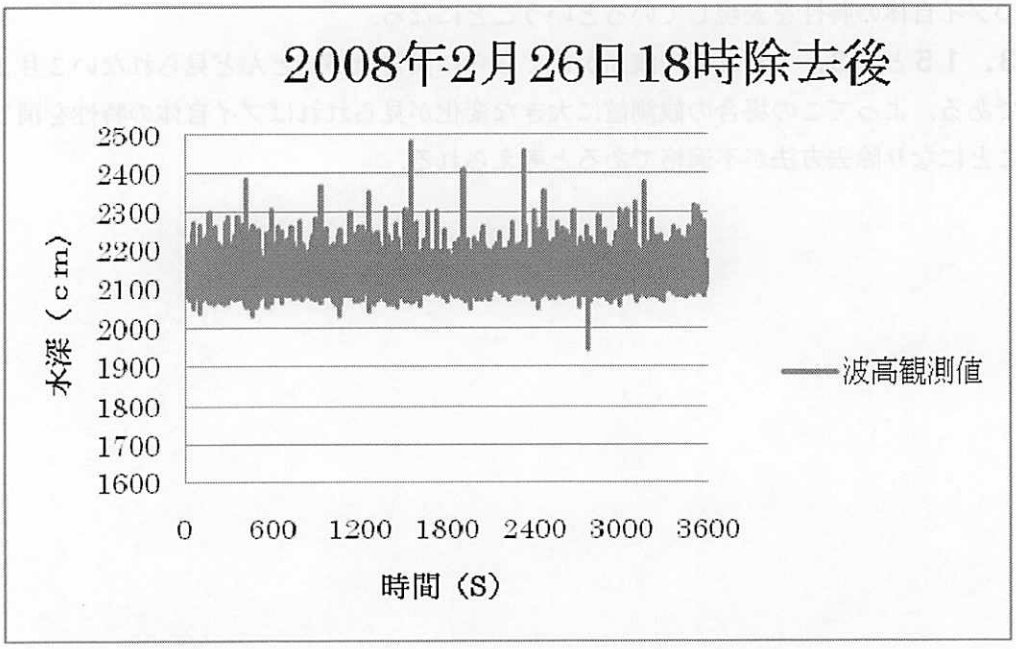


図３．１４　異常値除去後２月26日18時実験ブイ観測水深図

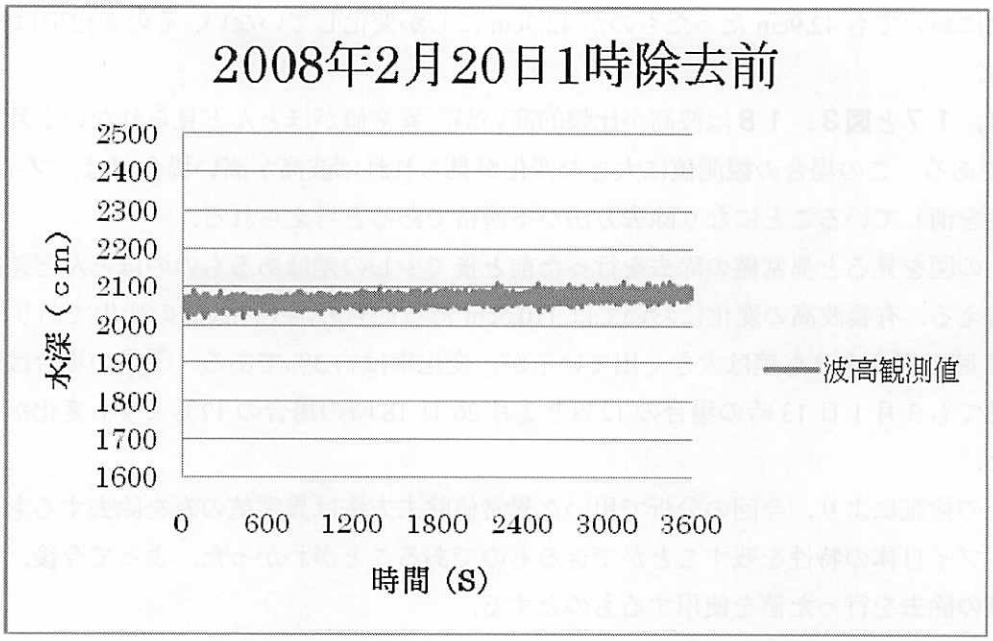


図３．１５　異常値除去前２月20日１時実験ブイ観測水深図

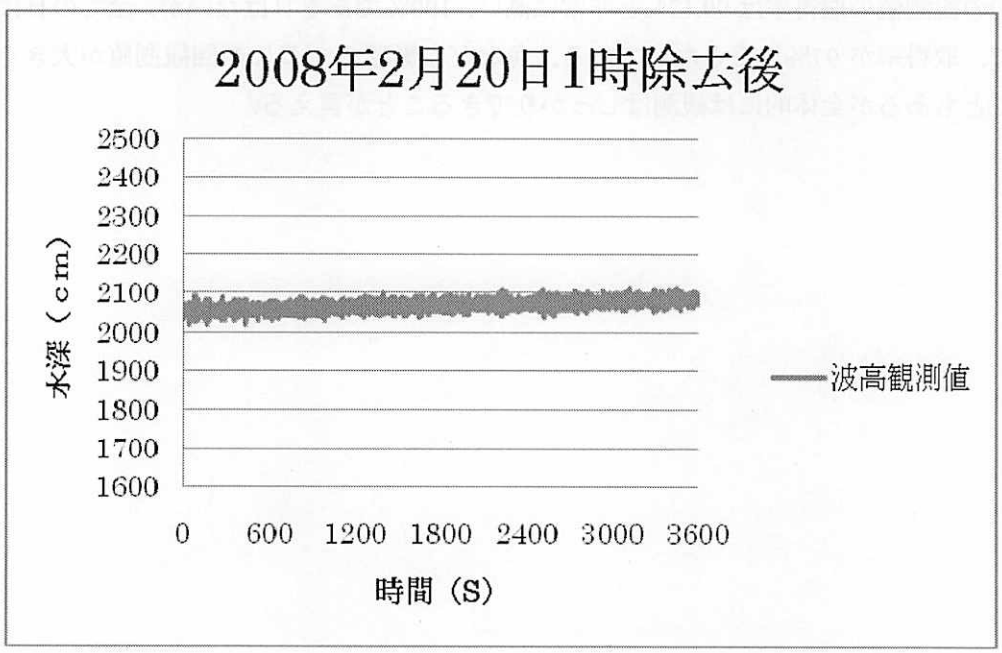


図３．１６　異常値除去後２月20日１時実験ブイ観測水深図

以上の図を見ると異常値の除去を行った前と後でほとんど変化はない．さらに有義波高の変化においても 42.9cm だったものが 42.3cm にしか変化していない．その変化率は約 1%である．

図３．１７と**図３．１８**は波高が比較的高いが，異常値がほとんど見られない 2 月 20 日 22 時である．この場合の観測値に大きな変化が見られれば波高が高い場合では，ブイ自体の特性を消していることになり除去方法が不適格であると考えられる．

以上の図を見ると異常値の除去を行った前と後で少しの差はあるもののほとんど差は無いと言える．有義波高の変化においては 110.5cm だったものが 107.2cm の変化であり，2 月 20 日 1 時の場合よりも差は大きく出ているが，変化率は約 3%である．①②の場合は変化率で見ても 3 月 1 日 13 時の場合の 12%と 2 月 26 日 18 時の場合の 17%よりも変化が少なかった．

以上の検証により，今回の分析で用いた異常値除去方法は異常値のみを除去するものであり，ブイ自体の特性を残すことができるものであることがわかった．よって今後，この異常値の除去を行った値を使用するものとする．

７）観測値取得率

表３．１は本実験における観測値の取得率である．99.9%信頼区間で異常値を取り除いた後の平均の観測値の取得率は 99.17%と非常に高い．100%である日はないが，全ての日にちに対して，取得率が 97%以上となっている．魚などの影響で 1 日に数回観測値が大きく変化することもあるが全体的には観測はしっかりできることが言える．

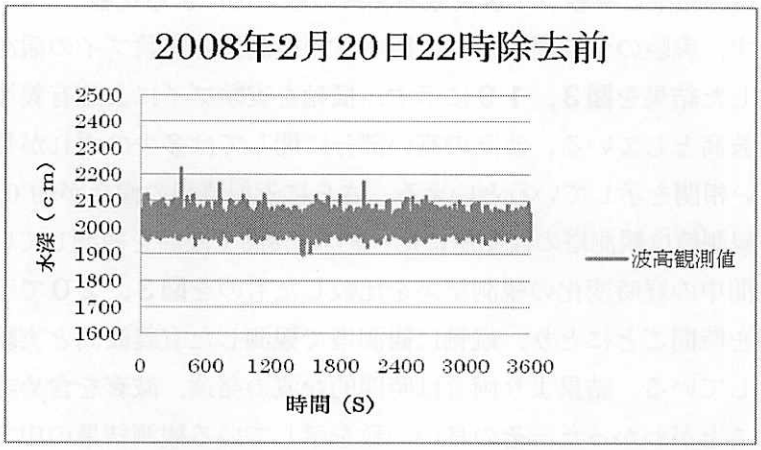


図３．１７　異常値除去前２月20日22時実験ブイ観測水深図

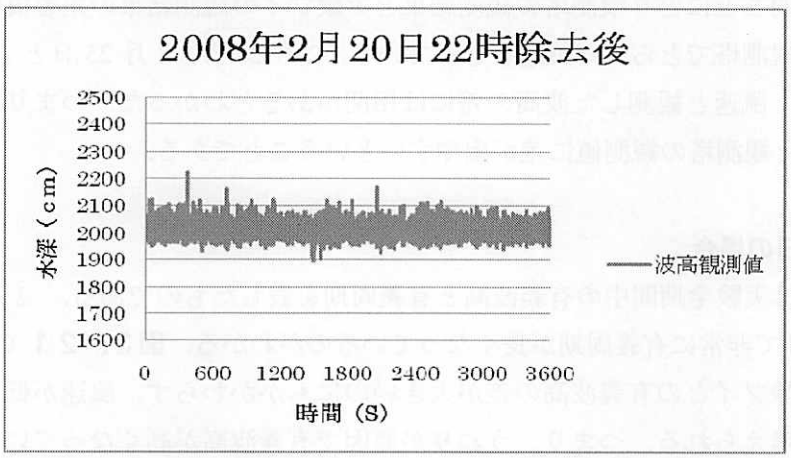


図３．１８　異常値除去後２月20日22時実験ブイ観測水深図

表３．１　観測値の取得率

日付	波高取得率(%)
2月20日	99.5802
2月21日	99.85852
2月22日	99.79358
2月23日	98.37473
2月24日	99.01864
2月25日	99.60513
2月26日	98.66987
2月27日	99.62717
2月28日	97.9561
2月29日	99.18766
3月1日	98.02915
3月2日	99.43235
3月3日	99.57904
3月4日	99.7327
平均	99.17463

8）観測塔波高観測結果と実験ブイ波高観測結果の散布図による比較

本分析ではまず，実験の全期間に対して観測塔の観測値と実験ブイの観測値から出した有義波高を比較した結果を**図3．19**に示す．横軸を実験ブイによる有義波高と縦軸を観測塔による有義波高としている．波高の高い部分に関しては多少のずれが見られるが全体的には非常に高い相関を示しているといえる．さらに近似直線の傾きが約 0.81 ということから実験ブイの観測値は観測塔の観測値に比べ約 18%高く波高を観測していることがわかった．実験全期間中の経時変化の観測結果を比較したものを**図3．20**で示す．この図は横軸に実験期間を時間ごとにとり，縦軸に観測塔で観測した有義波高と実験ブイで観測した有義波高をとしている．結果より両者は時間的な波の発達，減衰を含め非常によく一致しているということがわかった．その良い一致を示している観測結果の中でどのような時に観測塔と実験ブイの観測結果の差が大きくなるかを**図3．21**を用いて示す．横軸を実験全期間の時間ごとにとり観測塔の観測結果と実験ブイの観測結果の差を縦軸にとり，さらに第 2 軸に観測塔でとられた風速をとっている．2 月 24 日，2 月 25 日と 2 月 27 日以外の日にちでは，風速と観測した波高の差には相関があるとわかった．つまり風速が速い場合は実験ブイと観測塔の観測値に差が出やすいということである．

a． 2 月 27 日の場合

図3．22は実験全期間中の有義波高と有義周期を表したものである． 2 月 27 日から 2 月 28 日にかけて非常に有義周期が長くなっているのがわかる．**図3．21**では 2 月 27 日は観測塔と実験ブイとの有義波高の差が大きいのにもかかわらず，風速が低いのはうねりによるものと考えられる．つまり，うねりが原因で有義波高が高くなっていて有義波高の差が大きくなったが，うねりが原因の波なので，観測塔付近では風が比較的弱かったということである．うねりとは[6]遠方で台風などにより作られた波が伝わってきたもので，滑らかな波面を持ち，波長の長い規則的な波であり 8 秒以上の周期が一般的である．

b．2 月 24 日と 2 月 25 日の場合

図3．23には観測塔と実験ブイの有義波高差と風向きを示す．この図は角度を数値にしグラフ化したものである．北の方向を 0 とし南の方向 180 とした．この**図3．23**を見ると 2 月 27 日を除いた，他の部分では北寄りの風の場合に観測塔と実験ブイの有義波高差が低くなっているのがわかる．そして南寄りの風が吹いている際には波高差が大きくなっている所となっていない所が見られる．南寄りの風の場合の波高差が小さい時は風が弱い時である．**図3．21**での 2 月 24 日と 2 月 25 日は比較的風速が速くなっているのにもかかわらず観測塔と実験ブイの有義波高差が小さくなっているのは，風は比較的強く吹いているが南寄りの風が発生していないことにより，波が発達していないため波高差が小さくなっていると考えられる．

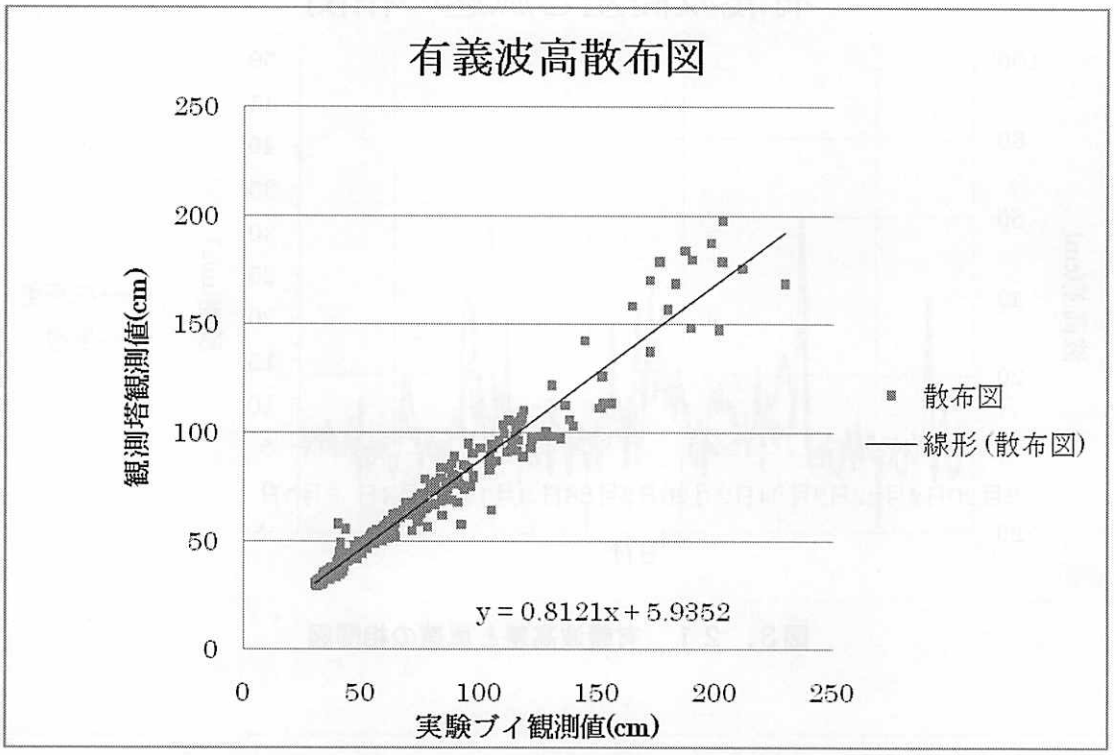


図３．１９　観測塔と実験ブイの観測値の比較

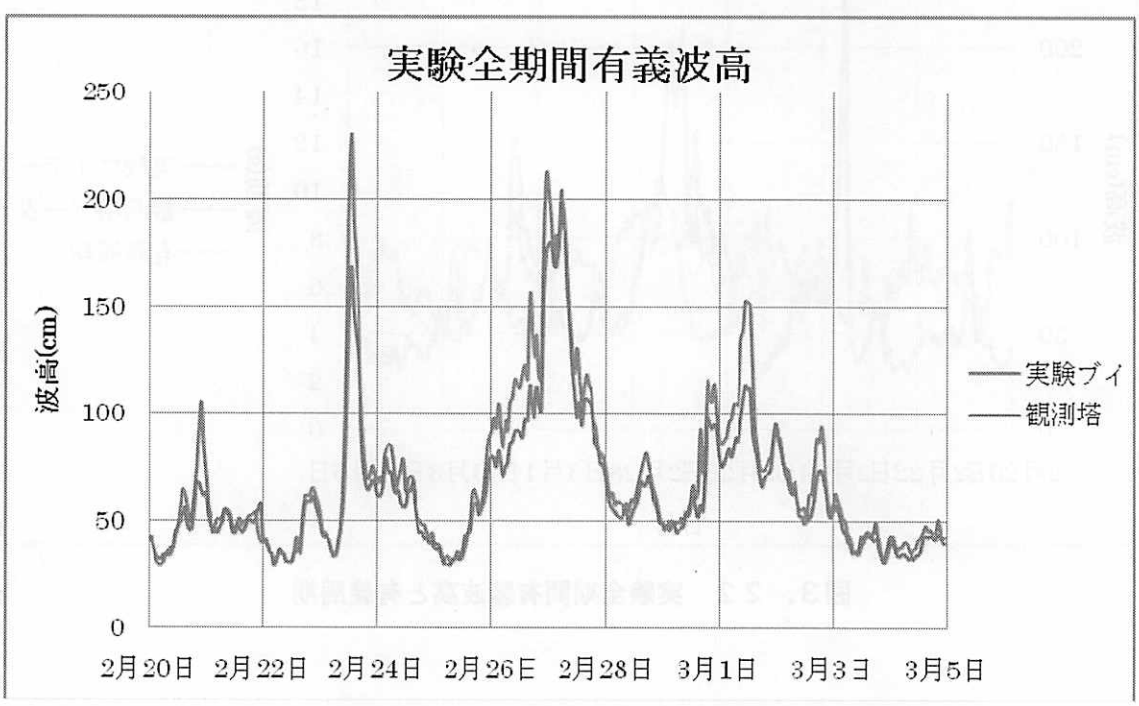


図３．２０　有義波高の経時変化の比較

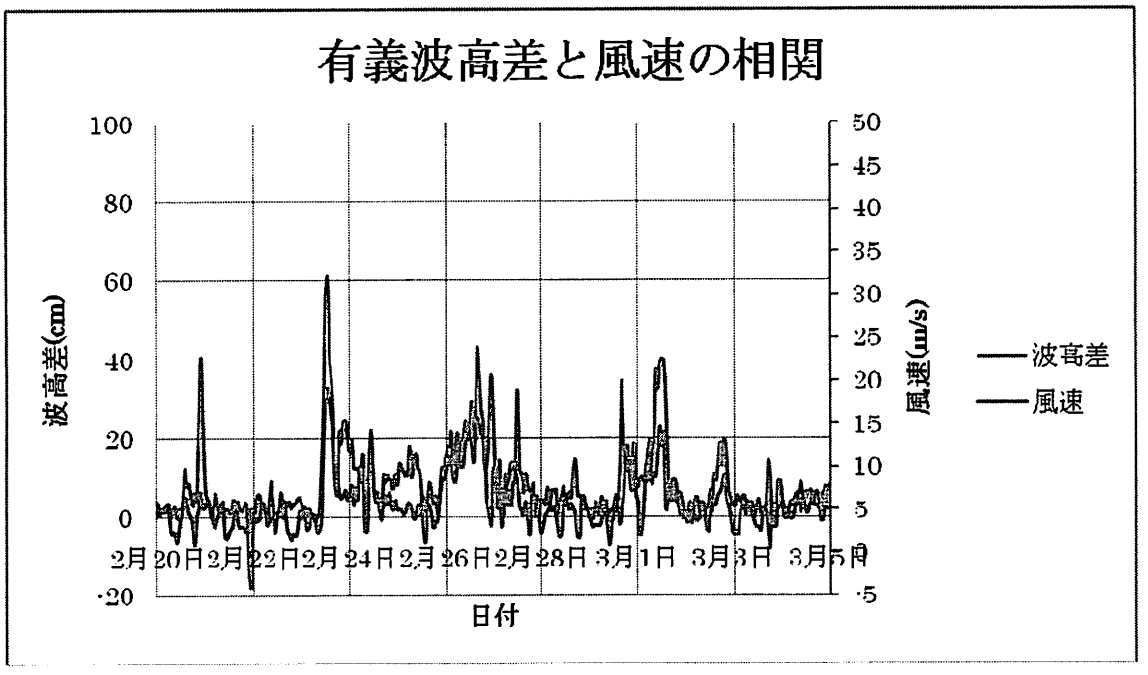


図３．２１　有義波高差と風速の相関図

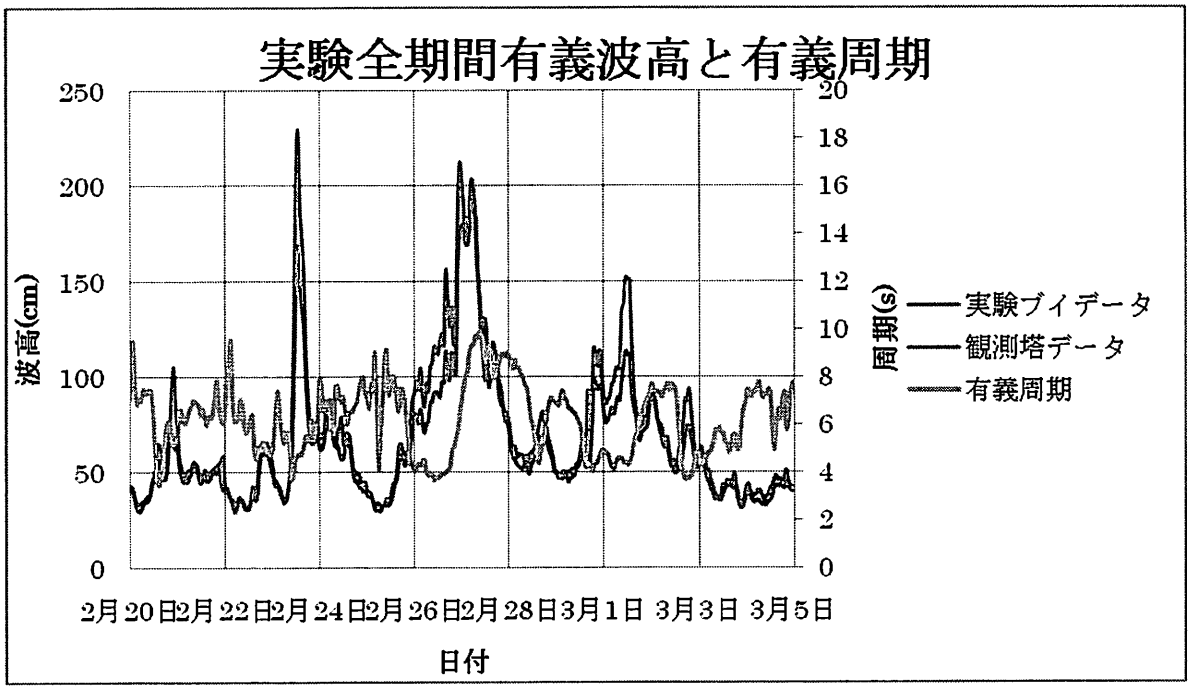


図３．２２　実験全期間有義波高と有義周期

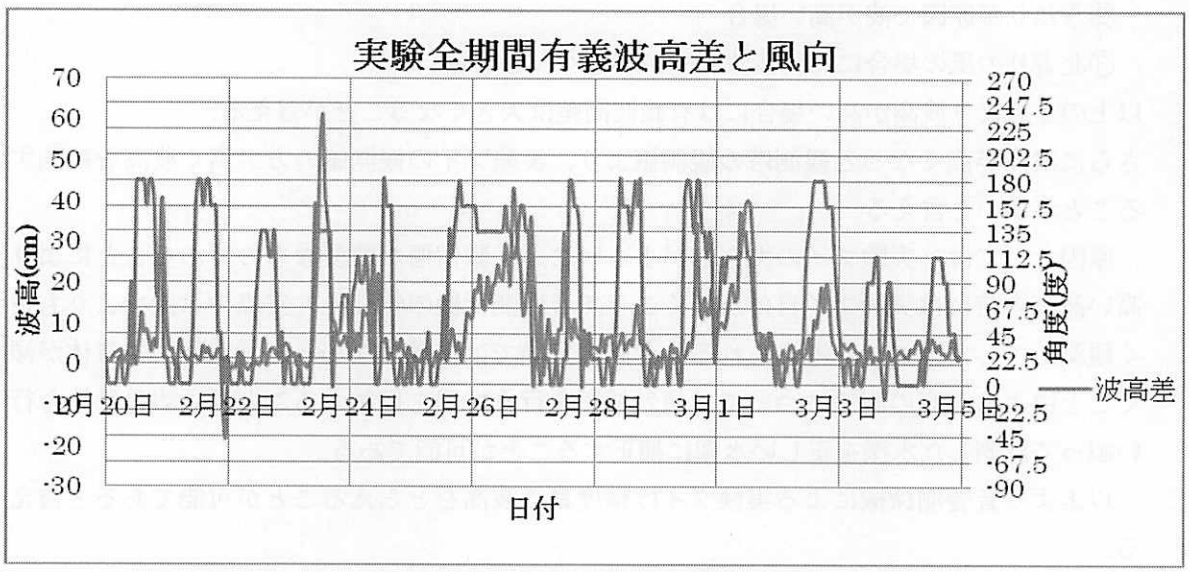


図３．２３　実験全期間有義波高差と風向

9）波高観測方法についての結果

音響測深機は波高観測装置として十分な精度を有しているということが確認された．風速と有義波高の差には相関がみることができた．さらに風速だけではなく，風のない場合でもうねりなどが原因で波が高くなった場合や風向きが有義波高差に与える影響がわかった．

①風速が速い場合

②うねりが原因で波が高い場合

③北寄りの風の場合に有義波波高差が小さくなる場合

以上の3点より波高が高い場合には有義波高差は大きくなることが言える．

さらに波高が高くなると観測塔の観測値より，実験ブイの観測値の方が高く波高を観測することが多いと言える．

原因としては，実験ブイの大きさが小さいこと，繋留柵が簡易なものであることにより高い波高の時には実験ブイ自体が傾くことで音響測深機の特性上，実際の水深をよりも長く観測してしまうことが考えられる．今回の実験では搭載しなかったが実験ブイ自体が傾くことによる波高の誤差については傾斜補正を行う機器を搭載することで，誤差計算を行い誤って計測した水深を正しい水深に補正することが可能である．

以上より音響測深機による実験ブイは精度良く波高をとらえることが可能であると言える．

10）異常値についての考察

(図3．11)(図3．12)のような異常値は実験期間中に多くの日に見られる現象である．この異常値は魚が原因である可能性がある．つまり，魚が音響測深機の下を通過したことによりその魚で音波が跳ね返り，音響測深機が異常に浅い水深を示していたということである．漁業関係者によると観測塔付近には，魚が数多く集まっていているとのことである．もしこの異常値が魚によるものであるならば，ブイに搭載した音響測深機はただ水深をはかるためだけのものではなく，漁業などに生かせる可能性が出てくる．多目的ブイという名前の通り津波観測は付加的な機能にすぎない．今後様々な機能をブイに持たせて日常的な利用を目指す上で，もし音響測深機が魚を観測できるのであれば，ブイの大きさと費用を抑えることができ，本研究が目指すシステムの実現可能性がさらに広がると考えられる．

３．５　ブイ１号機改の開発と運用実験

１）１号機改の仕様

１号機改は，日立造船株式会社が開発したGPS波高計を用いた波高計測を行うことを目的に，開発された．１号機をベースに，音響測深器，データロガーを取り外し，GPS受信機とリアルタイム通信用アンテナを取り付ける改造を施した．

GPS受信機で，計測されたGPS情報は，同じくブイに搭載されているPHSからWebを介して日立造船株式会社内のサーバに送られ，波高が計算される．GPS受信機およびPHSの電源は，直列に接続された四つのリチウムイオンバッテリーCL-350Hによって供給される．計測可能期間は15日間である．**図３．２４，図３．２５，図３．２６**にブイ１号機改の概観図，外観，係留された状況を示す．

２）１号機改の設置・運用

１号機改の設置は，平成21年３月24日に実施した．係留索は１号機設置時に既に敷設されており，ブイ側の係留環も変っていないため，作業内容としては，ブイと係留索を接続するだけであった．作業は１号機同様，二艘の漁船と，４人の作業員で実施された．かかった費用は，210,000円（税込）であった．作業にかかった時間は１時間程度であった．

１号機改は，平成21年４月10日に回収した．この間特に係留上の問題は生じなかった．

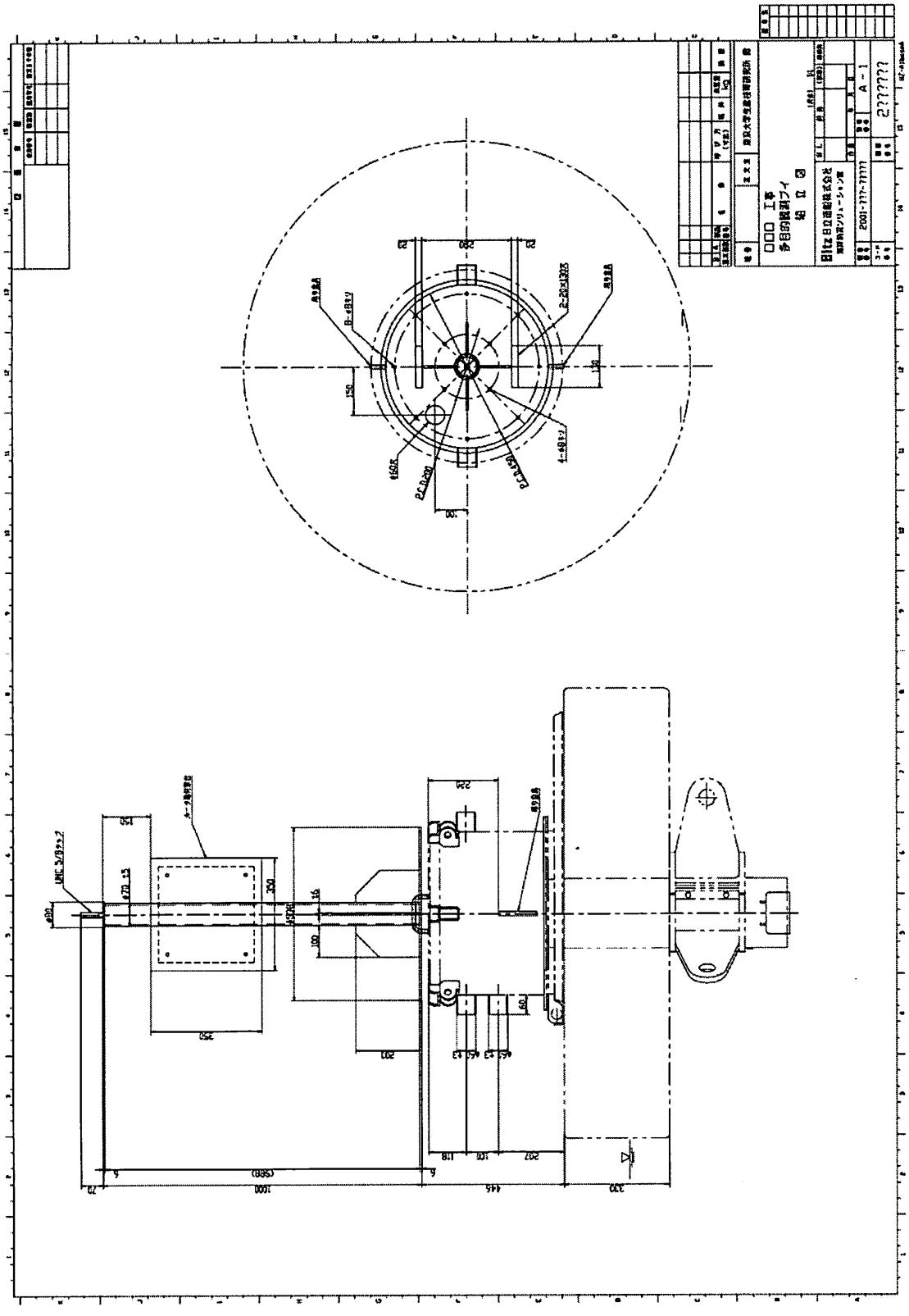


図３．２４　ブイ１号機改の概観図

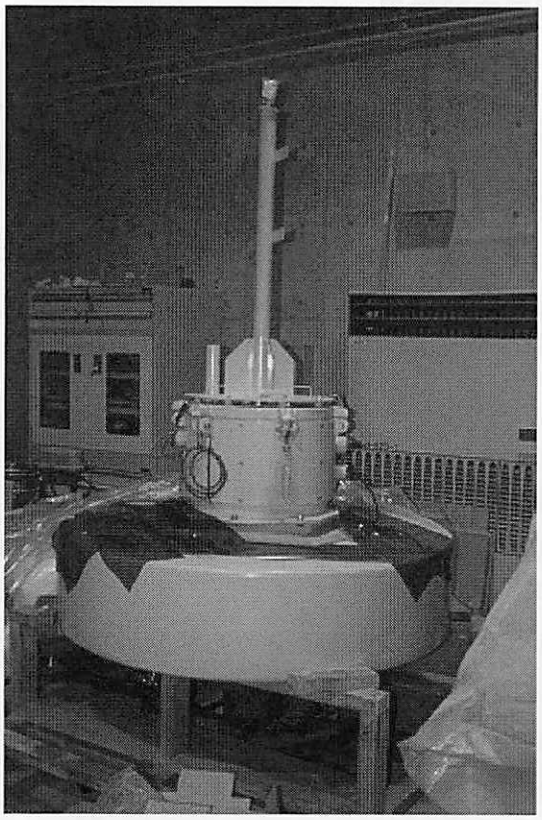


図３．２５　１号機改の外観（GPS 受信アンテナ取り付け前）



図３．２６　係留された１号機改

３．６　１号機改の運用実験結果

１号機改の実験では，小型 GPS 波高計を用い波高の計測を行った．１号機改でも，波高観測方法の確立のため，１号機と同様に神奈川県波浪等観測塔の観測結果との比較を行う．

今回の実験は １ 号機と同様の場所を実験場所として選んだため，神奈川県波浪等観測塔と実験ブイの間に約 30m という距離があること，さらにデータの観測間隔が異なるため直接的に波形を比較することによる検証はできないので連続的に観測している波をある時間帯に区切り，代表的な波として表現し比較検証を行う．２号機では１秒間ごとに観測値を取得している．

１）波浪観測塔観測結果と実験ブイ波高観測結果の欠測の取扱い

2009 年 3 月 24 日～2009 年 4 月 10 日で得られた観測値について詳細を示す．観測塔の観測値は，釣り人などの影響がなく，ほぼ異常値がなく観測できていたため，全て採用した．今回の実験ブイの観測値では，設置の初期段階から観測ができていた．しかし，３月 26 日 22 時から３月 28 日８時の約１．５日の間，波高観測ができていなかった．その原因としては，通信装置の異常であると考えられる．４月４日０時～15 時の間も波高観測ができなくなっていたが，これについても通信装置の異常であると考えられる（**図３．２７**）．

実験期間中，１日に１回，通信が切れるという現象が発生した．これは，携帯会社の通信会社が原因である．今回の実験では，リアルタイムに観測値を送信するために通信会社の無線通信を利用し，１日中接続し続けているため，１日に１回通信会社で接続を切るということが行われたためである．（**図３．２８，図３．２９**）

異常値の除去については，今回の実験ではエラーが発生したような観測値がないため手作業による処理は行わなかった．エラーでないはずれ値に関しては １ 号機の観測値分析と同様に 99.9%信頼区間で処理を行った．

表３．２，図３．３０は本実験における観測値の取得率である．平均の観測値の取得率は 88.58%とあまり高いとは言えないが，それは，通信装置の異常でなどの要因で３月 26 日 22 時～3 月 28 日８時，４月４日０時～15 時の観測値が取得できていない期間の観測結果を含まなければ，約 99%の観測値取得率となる．

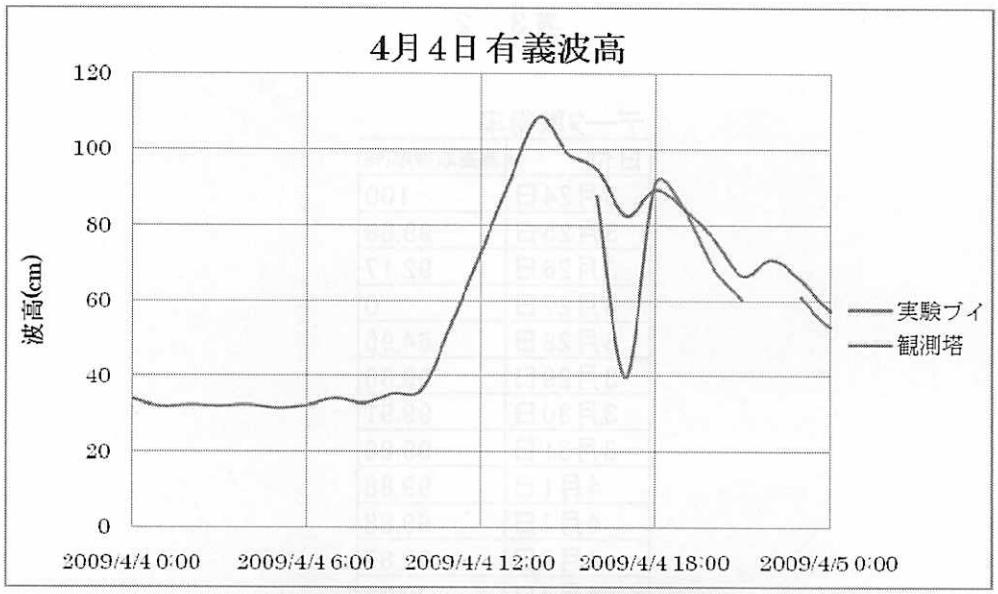


図３．２７　４月４日有義波高観測値

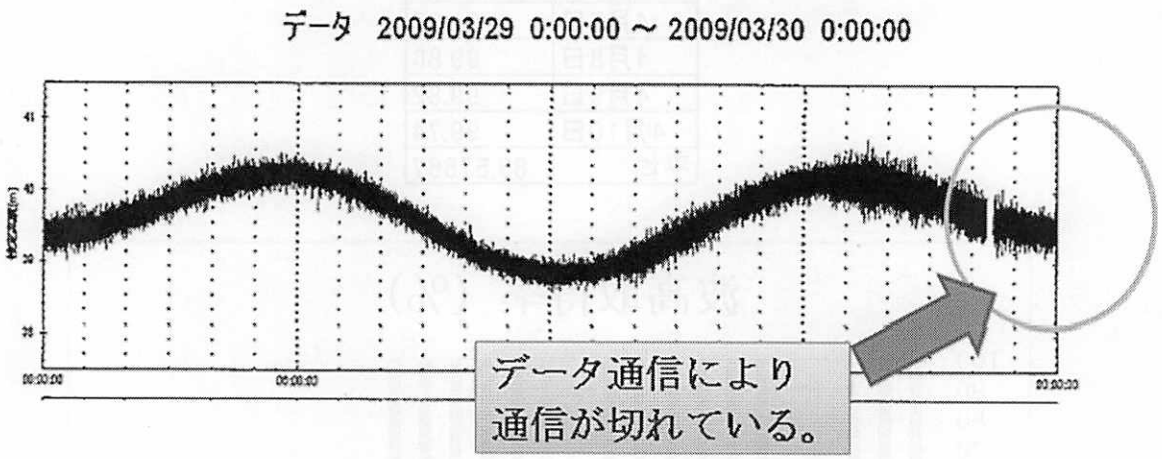


図３．２８　３月29日波高観測値

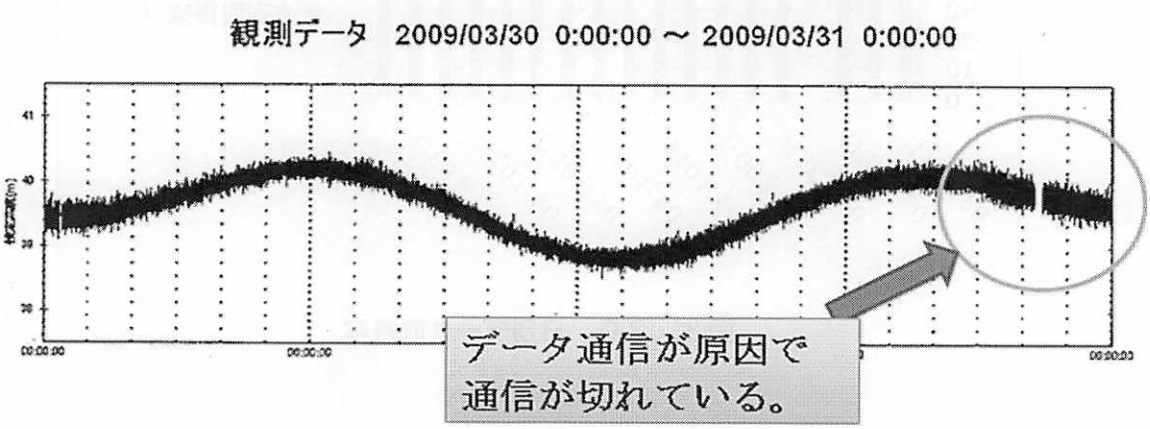


図３．２９　３月30日波高観測値

表3．2

データ取得率	
日付	波高取得率(%)
3月24日	100
3月25日	99.88
3月26日	92.17
3月27日	0
3月28日	64.96
3月29日	99.86
3月30日	99.91
3月31日	99.88
4月1日	99.88
4月2日	99.88
4月3日	99.87
4月4日	39.07
4月5日	99.87
4月6日	99.86
4月7日	99.87
4月8日	99.86
4月9日	99.82
4月10日	99.74
平均	88.57667

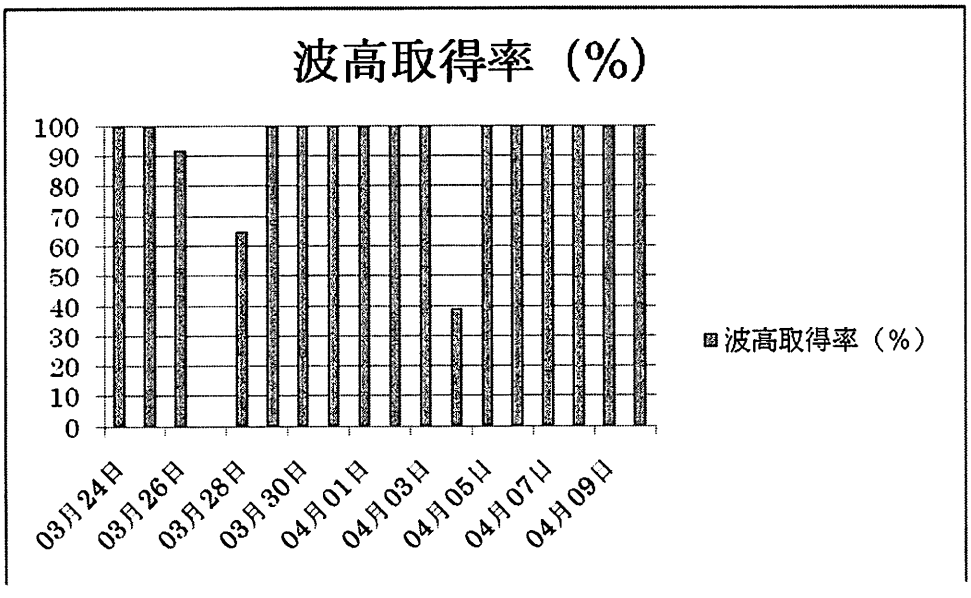


図3．30　日別データ取得率

2）観測塔波高観測結果と実験ブイ波高観測結果の散布図による比較

本分析ではまず，実験の全期間に対して観測塔の観測値と実験ブイの観測値から出した有義波高を比較した結果を**図3．31**に示す．横軸を実験ブイによる有義波高と縦軸を観測塔による有義波高としている．波高の高い部分に関しては多少のずれが見られるが全体的には非常に高い相関を示しているといえる．さらに近似直線の傾きが約 0.98 ということから実験ブイの観測値は観測塔の観測値に比べ約 2%高く波高を観測していることがわかった．本実験では，傾きを感知する傾斜計により，ブイが傾く角度を計測したため，その角度によって観測値の補正を行った．

図3．32は補正を行ったあとのブイの有義波高と観測塔の有義波高の観測値の散布図である．図のようにほとんど傾きに変化はなく，補正により補正前より 0.2%傾きが低くなった．つまり，補正を加えた方が加えない時よりも 0.2%波高を高く観測したということである．

実験全期間中の経時変化の観測結果を比較したものを**図3．33**で示す．この図は横軸に実験期間を時間ごとにとり，縦軸に観測塔で観測した有義波高と実験ブイで観測した有義波高をとしている．両者は時間的な波の発達，減衰を含め非常によく一致しているということがわかった．

その良い一致を示している観測結果がどのような時に大きくなるかを**図3．34**を用いて示す．横軸を実験全期間の時間ごとにとり観測塔の観測結果と実験ブイの観測結果の差を縦軸にとり，さらに第２軸に観測塔でとられた風速をとった図である．

風速と観測した波高の差にはほとんど，相関がみられないことが分かった．つまり風速が速い場合は実験ブイと観測塔の観測値に差が出やすいということである．つまり前回実験と異なり，風速によるブイへの影響はほとんど見られないことが分かった．

図3．35は実験全期間中の有義波高と有義周期を表したものである．図より，今回の実験では，うねり時に観測値の取得ができていないが，特に音響測深機と同様，周期と観測値の誤差に相関がないことが分かった．

図3．36はブイの傾きと風速を表した図である．１号機改では傾斜計を搭載したためブイの傾きが計測できた．１号機と１号機改では形状がほぼ同じであり，風や波に対し，ほぼ同様の動きをすると考えられるため，１号機の波高計測の際にみられた，風速と波高差に相関の原因がブイの傾きであったという可能性の検証を行う．１号機には傾斜計を搭載していなかったため，風速と波高差に相関についてはあくまで可能性でしかなかったからである．図を見ると風速が上がると傾きが大きくなるというように風速とブイの傾きの間に相関が見て取れる．つまり，１号機の際に風速が強い時に，ブイが傾き波高が高くなるということがわかった．

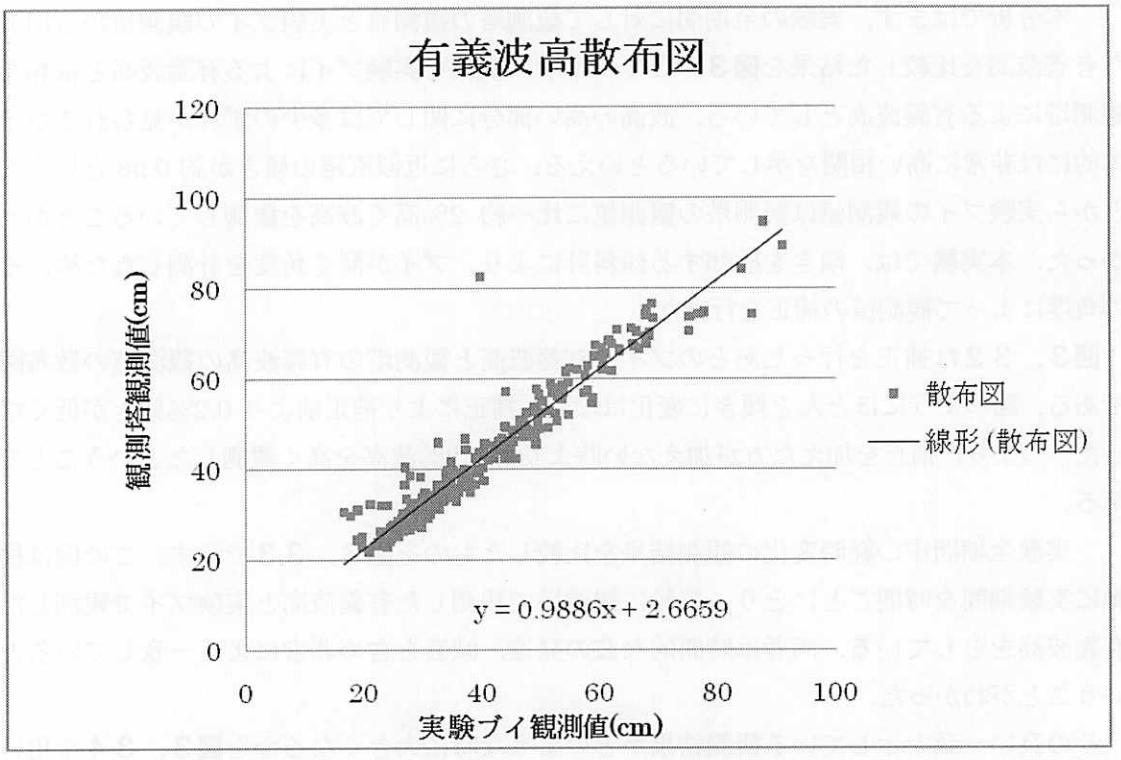


図３．３１　観測塔と実験ブイの観測値の比較

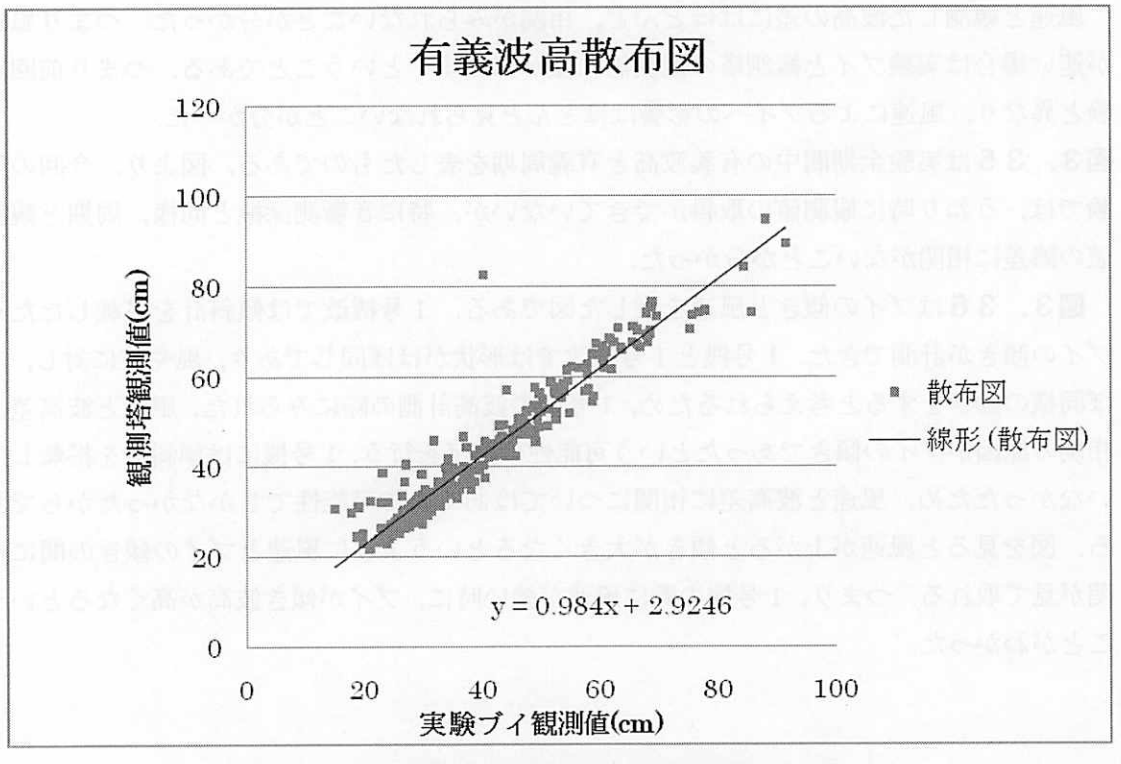


図３．３２　観測塔と実験ブイの観測値の比較

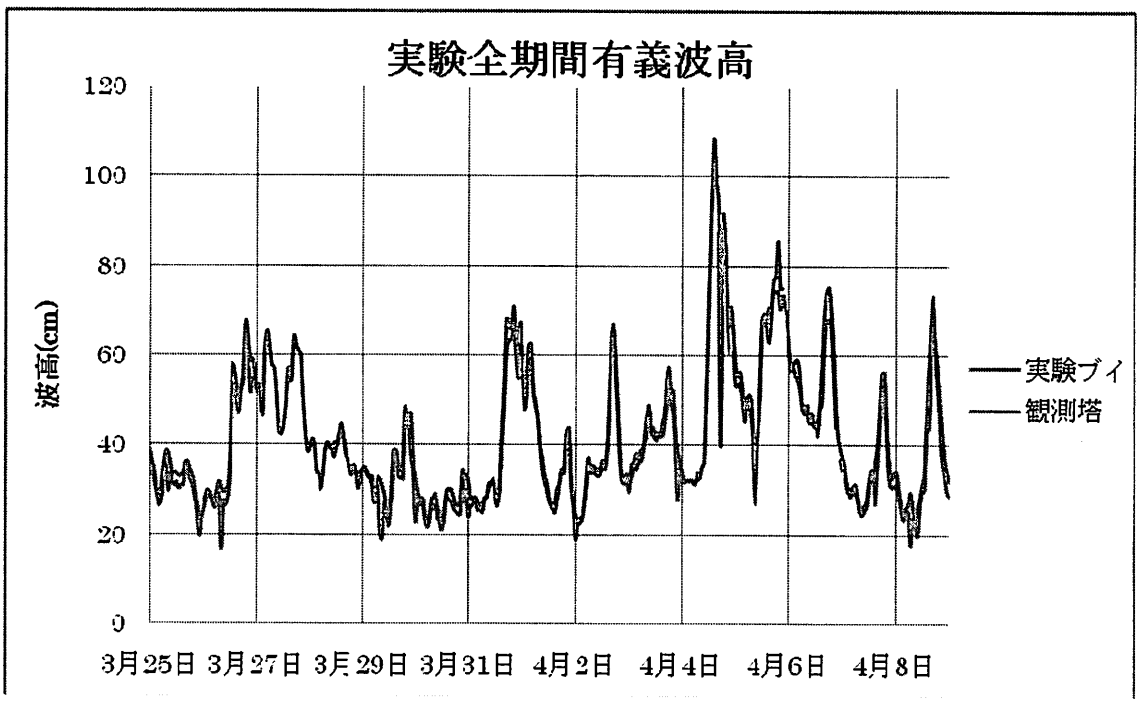


図３．３３　有義波高の経時変化の比較

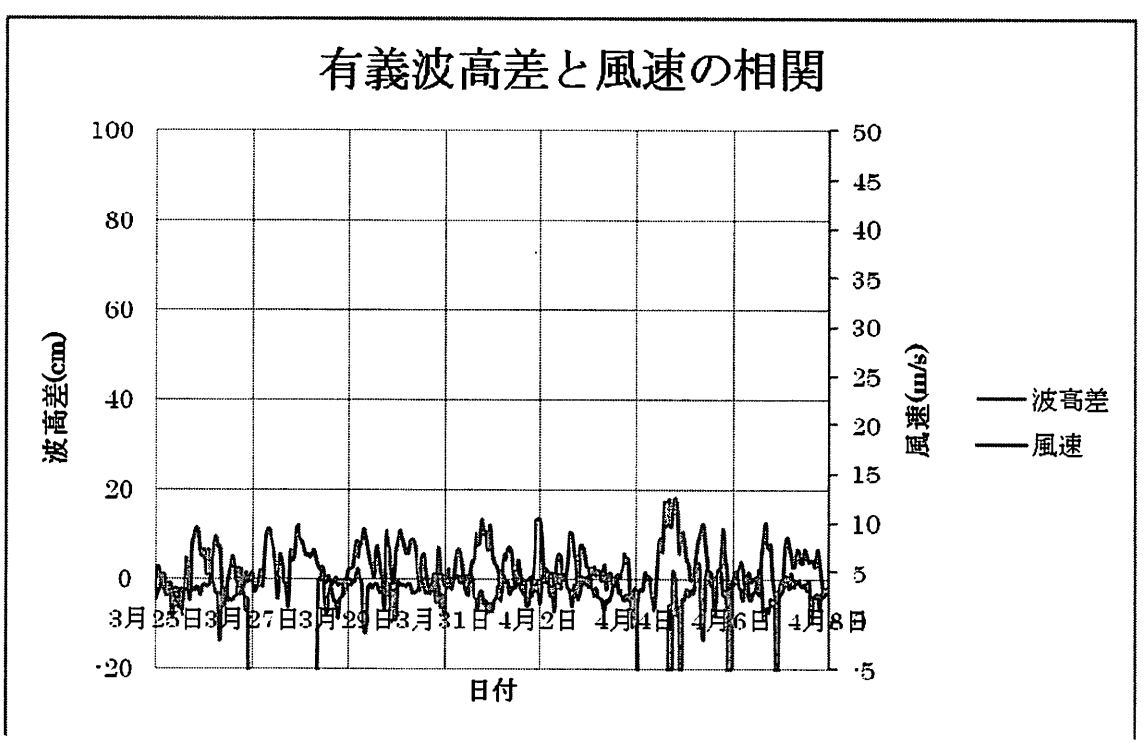


図３．３４　有義波高差と風速の相関図

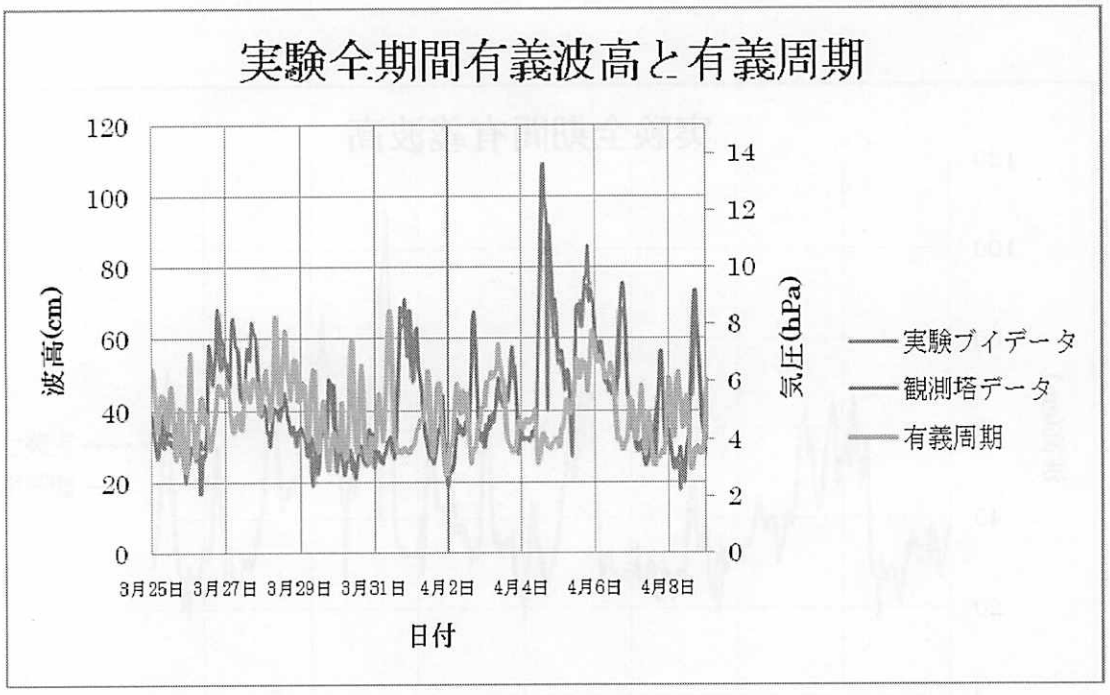


図3．35　実験全期間有義波高と有義周期

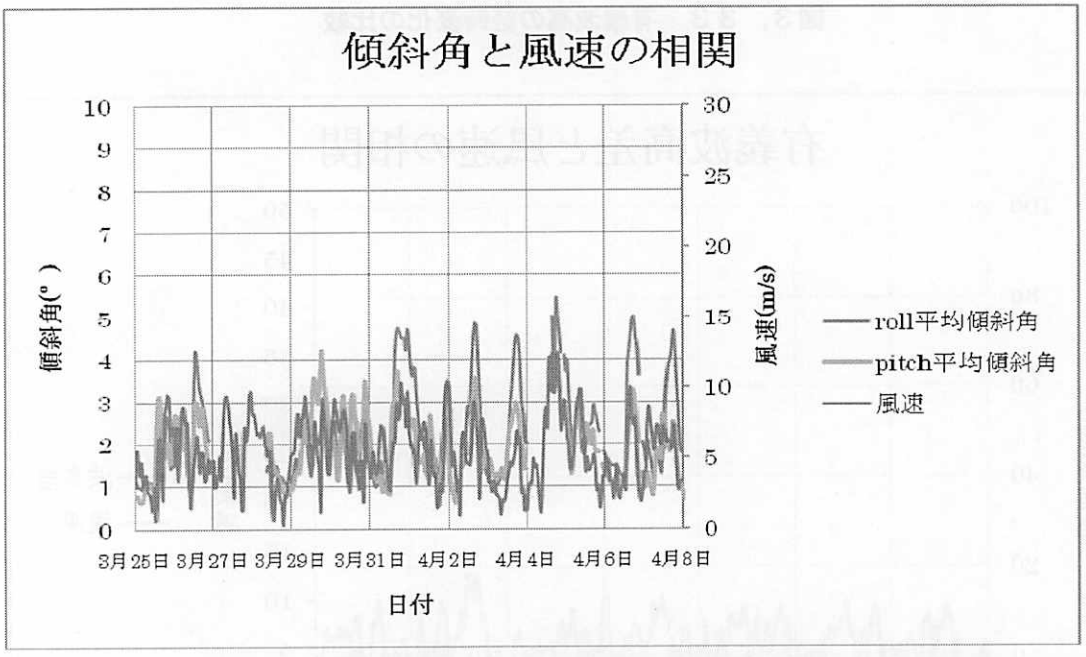


図3．36　実験全期間有義波高と有義周期

3）まとめ

分析の結果，GPS 波高計を導入したブイでは非常に精度の高い観測値が得られることが分かった．音響測深機とは異なり，観測塔とブイの観測値の差がほとんどなく，その差に風速との相関などは見られなかった．この実験でも，実験ブイの大きさは前回の実験と同じサイズの物を利用している点から，繋留柵が簡易なものであり，高い波高の時には実験ブイ自体が傾くという現象が発生しても非常に精度良く波高を観測できることが分かった．今回の実験では傾斜計を搭載したため，実験ブイ自体が傾くことによる波高の誤差については傾斜補正を行うことができ，誤差計算を行い誤って計測した水深を正しい水深に補正することが可能であった．

音響測深機を用いた場合および GPS 波高計を用いた場合の二回の実験結果を比較すると，データ取得率では，音響測深機が 99.14%，GPS 波高計が 88.57%となっている．音響測深機は通信をしてないということもあるが，音響測深機の方がデータ取得率は高い，高い精度を実現できる GPS 波高計より，ややローテクな音響測深機の方がデータ取得の面では有利であると考えられる．

精度では，神奈川県波浪等観測塔と比較したときの散布図の傾きが音響測深機では，0.81，GPS 波高計では 0.98 と GPS 波高計の方が非常に高い精度で波高を観測できることが分かった．これについては，GPS 波高計の精度が非常に高いということが言えるが，音響測深は水深（約 20m）を計測しており，傾きの影響を大きく受けることが原因の一つであると考えられる．それは**図3．37**，**図3．38**で示す，風速と波高差の関係でもわかるように，風を受けた時の長さの変動の違いでもわかる．精度の悪さが傾きの影響が大きいと考えられるので，今後，傾斜計を搭載した場合の精度を比較した場合，今回ほどの差がつかない可能性もある．今後は，価格と精度のトレードオフを以下に考えていくかが課題となる．最後に今回の比較を表にまとめる．

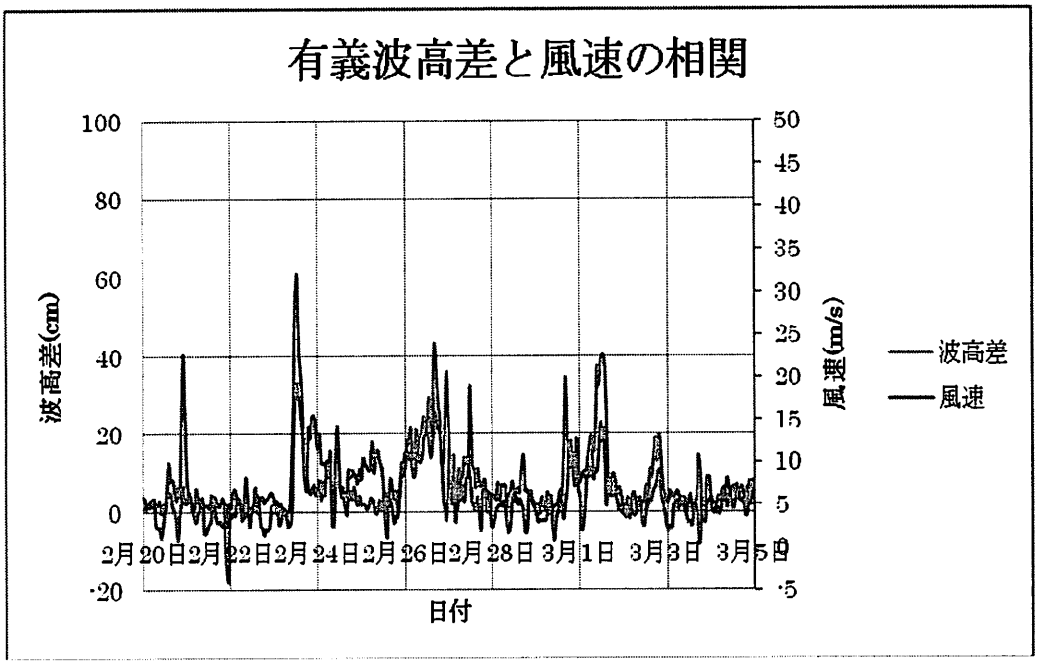


図3．37　音響測深機と風速の関係

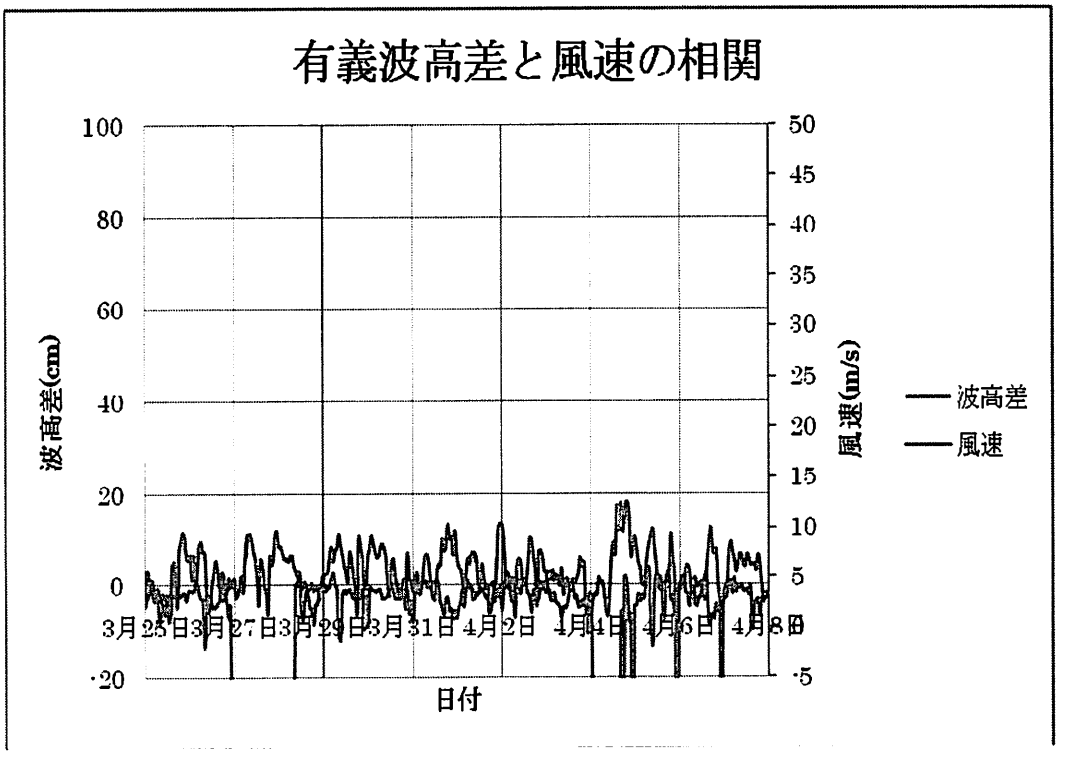


図3．38　GPS 波高計と風速の関係

表３．３　音響測深機およびＧＰＳ波高計の波高計測への適性の比較

音響測深機	観測機器	GPS波高計
高い	データ取得率	低い
低い	精度	高い
低い	価格	高い
低い	技術力	高い
浅い	対応水深	関係ない
なし	実績	あり

3．7　ブイ2号機の開発と運用実験

1）2号機の仕様

2号機は，「多目的」海洋観測ブイの試作機として，安価な波高計測の可能性を検討するために作られた．**図3．39，図3．40，図3．41**に2号機の一般図および外観係留状況を示す．ブイの総重量は約400kg，全浮力は，約13.1kN（1340kgf），全幅約1.9m，全高約2.5mである．ブイの大型化に伴う重量増を抑制するため，ブイの主要部はアルミニウムで作られている．

1号機改同様，GPS波高計が搭載されている他，風向・風速計，流向・流速計，水温計，気圧計が搭載されている．波高の他，さまざまな海況情報をリアルタイムで観測できる．また，太陽電池を搭載しており，継続的な観測が可能である．

2）2号機の設置・運用

2号機の設置は，平成22年1月15日に実施した．1,1号機改設置時に使用した三本の係留索が，平成21年中の台風で順次流されてしまったこと，また，2号機が，1，1号機改から大型化したことに伴い，ブイにかかる浮力も大きくなったことから，それを支えられるだけの係留索を新規に設置することとなった．2号機の係留索の大きな特徴は，アンカーを1，1号機改の際に用いた土嚢から，土井式3号と呼ばれる錨型に変更したことである．錨型のアンカーは，海底に食い込むため，土嚢よりもはるかに大きな抵抗力を持つ．作業は1号機同様，二艘の漁船と，4人の作業員で実施された．かかった費用は，1,220,270円（税込）であった．作業にかかった時間は2時間程度であった．

残念ながら，2号機は，設置から5日後の1月20日に通信が途絶えた．それまでの電圧変化の状況から，設置までの待機期間中のバッテリーの放電，冬季の日照不足が重なり，バッテリーが過放電状態となり，太陽電池による再充電が不可能となったことが原因と考えられる．そこで，2月17日にブイを回収したが，その際，ブイの三つの係留環がどれも大きく削れ，環が切れかかっていることが明らかとなった．平塚市漁業協同組合によれば，アルミ製の係留環と，鉄製のシャックルが電蝕を起こしているところに，ブイの動揺に伴い，係留環とシャックルが常に擦れあう状態にあったために，磨耗が大きくすすんだと考えられる．本報告書執筆時点では，磨耗した係留環を切断し，シャックルの代わりに，ロープでブイと係留索を接続することができるように，新しい係留環を溶接する計画である．

3）2号機の運用実験結果

前節でも述べたとおり，2号機は，5日間の運用の後，回収され，本報告書執筆時点において，係留環の改修工事が行われている．そのため，計測データも5日間分に限られている．この間，波高を初め，その他の観測データについては，観測塔における観測データと概ね一致していることが確認されている．改修後の再運用時に，より長期間の観測データが入手できれば，より詳細な検証が可能となると考える．

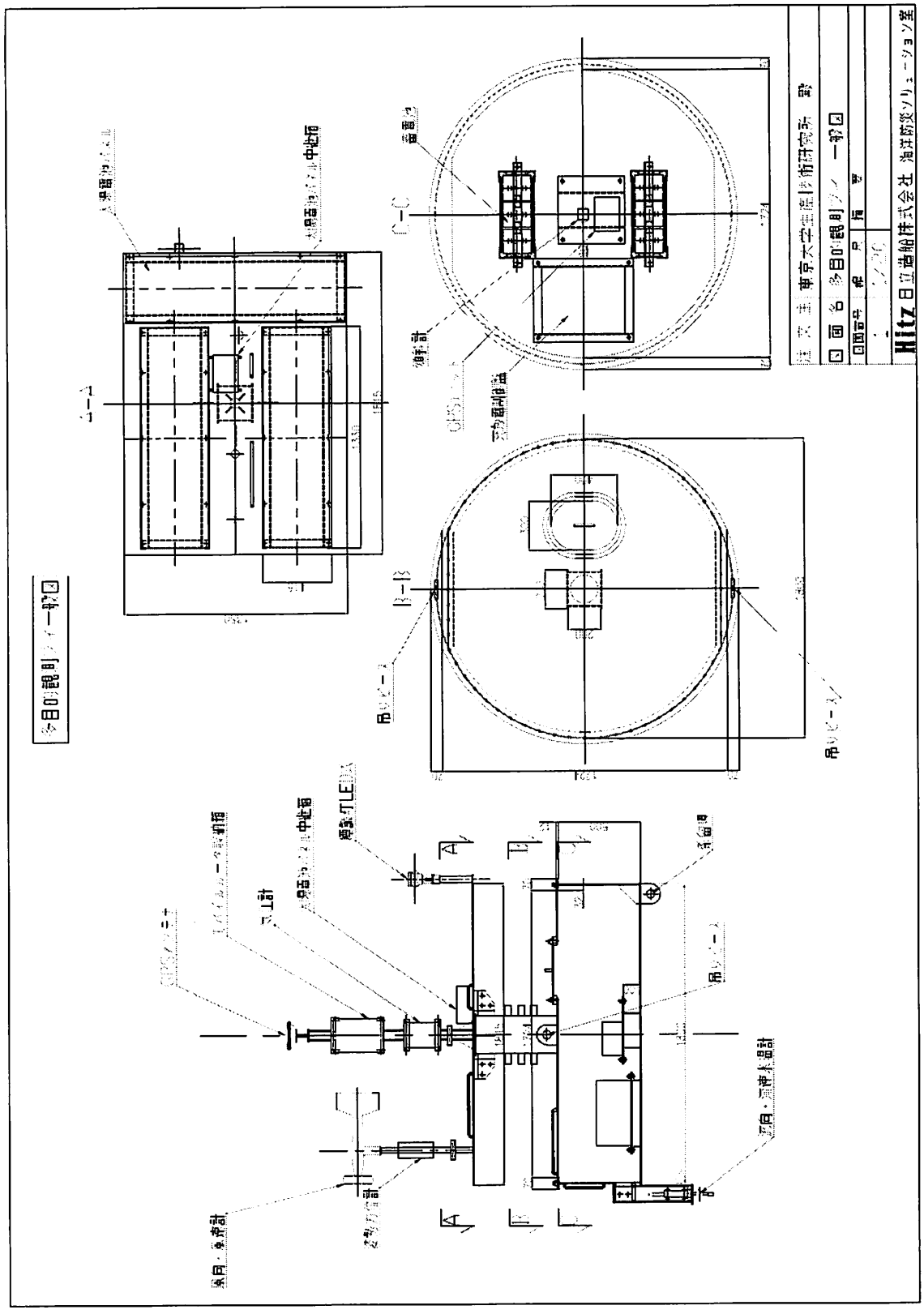


図３．３９　２号機の一般図

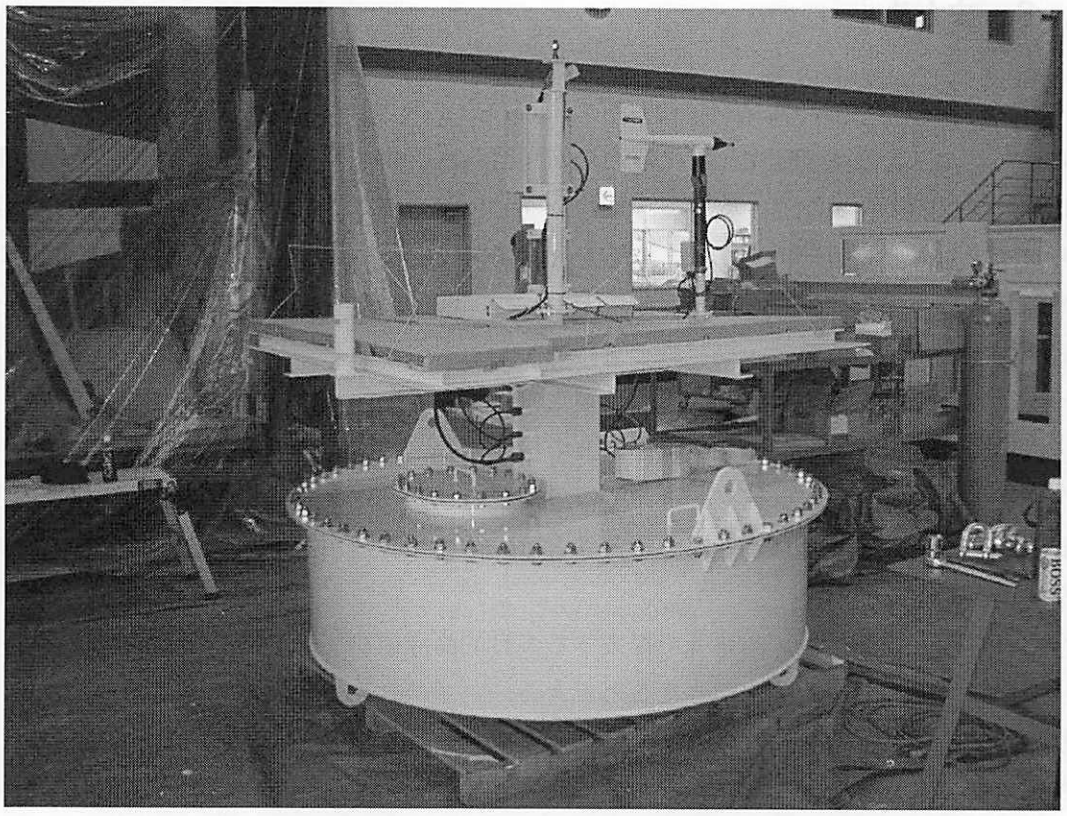


図３．４０　２号機の外観



図３．４１　係留されている２号機

3．8　まとめ

本章では，多目的海洋観測ブイの設計および運用上の思想について述べると共に，ブイの開発プロセスと設置・運用，また運用の結果得られた観測データの検証結果について報告した．多目的海洋観測ブイの開発・運用を通して得られたことの第一は，このような小型のブイでも，波高をモニタリングすることは可能であること，そして，本研究で開発したアルゴリズムを用いれば，シミュレートされた津波波高データと，多目的海洋観測ブイが観測した平常時の波高データ記録を重ね合わせたものから，津波をほぼリアルタイムに探知できることである．本格的な津波監視に向けてブイの信頼性を高めていくためには，今後長期の検証運用を通して，実際の津波の観測事例の蓄積を待つ必要がある．しかし，少なくとも，シミュレーションベースでは，津波をリアルタイムに探知できる観測機器と観測データ処理アルゴリズムを得られたことは，今後検証運用を進めていくためにも，大きな意義がある．

得られたことの第二は，本研究で提案する多目的海洋観測ブイの設置を地元漁業者の持つ技術・設備の範囲内で実施できたことである．ブイの大きさを極力小型に抑えたことにより，少なくとも定置網漁の技術を持つ漁業者であれば，100 万円程度の費用で設置できることが確認できた．このことは，多目的海洋観測ブイを沿岸産業主体による運用を実現する上で不可避の条件をクリアしたという意味で，極めて重要であり，今後他の地域で運用を推進していく上での大きな足がかりである．今回，予算面以外でも，地元漁業者に設置に関わっていただいたことの効果は，非常に大きい．実験中事故が無かったのも，係留地点の選定や，係留方法に関して当該海域に最も詳しい平塚市漁業協同組合に全面的に協力を得たことが大きな要因となっていると考えている．また，1 号機改の改修後，係留索が台風で紛失したことの第一報は，実は平塚市漁業協同組合から寄せられている．設置時だけでなく，我々の知らないところで，普段からブイや係留索の状況について目配りいただいていたことをこの時知った．また，2 号機の係留環の磨耗が発見された際にも，新しい係留環のデザインに関しても，長年の漁具の磨耗の経験を踏まえた提案をいただけている．このような協力が得られたのも，ブイの設置に平塚市漁業協同組合に参画いただいていることが大きい．

また，日立造船株式会社の全面的な協力のもと，ブイとブイに搭載されるセンサ類に関しても，今回冒頭に示した目標額には至らなかったものの，それに迫る費用で，準備いただいた．この費用が製造者側から見て，採算ベースとなりうるかについては，今後更なる検討が必要であるが，少なくとも，この目標額を目標とすることが非現実的なものではないことは確認できた．

今後は，更なる運用実験を通して，津波監視への実用上の課題解決に向けた知見の蓄積を目指したい．

謝辞

日立造船株式会社には，ブイの開発，GPS 波高計の導入に際し，これまでの津波監視ブイ運用実績に基づくノウハウの提供等，多大な協力を得た．

平塚市漁業協同組合には，海域における本実験の実施を快く了解していただいた．ブイの設置，回収に際し，多数の貴重なアドバイスを頂くとともに，実験中においては，ブイや係留索の状態に関して日常的に目配り頂いた．

東京大学平塚海洋総合研究センター（前・防災科学技術研究所平塚実験場）には，波浪観測塔の観測データを提供いただくと共に，周辺海域において円滑に実験を実施するための貴重なアドバイスを頂いた．

これらの組織の協力があったからこそ，本研究が実現したことを，ここに記して謝意を表す．

第３章の参考文献・Web サイト

[1]国立防災科学技術センター”波浪等観測塔”20 年の記録　1966 年 3 月　防災科学技術総合研究速報第 1 号
http://www.bosai.go.jp/library/pub/technical_note/PDF/KJ-01_110.pdf
[2]神奈川県平塚沖波浪等計測データ HP
http://158.203.31.141/index.html
[3]気象庁 HP
http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/wave/comment/term/yuugi.html
[4]酒井哲郎：海岸工学入門，森北出版　第 3 章（pp.27-36）2001-01-31
http://www.suiri.civil.yamaguchi-u.ac.jp/lecture/kaigan/coast5.ppt
[5]渡部　勲・徳田正幸　沿岸波浪観測システムに関する研究 I.波高の定時観測　防災科学技術センター研究速報 1984 年 10 月 551，466．3（265．5）
http://www.bosai.go.jp/library/haikan/c_sokuhou/61/61_01.pdf
[6]気象庁 HP
http://www.data.kishou.go.jp/db/wave/comment/term/furoune.html

第４章　津波シミュレーションを用いたブイの最適配置

４．１　ＧＰＳブイの津波警報への利活用

１）序論

近年，津波の早期検知を目的とした沖合のリアルタイム津波観測網の整備が進んでいる．その代表的なものが（独）港湾空港技術研究所が主体となって進めている GPS 津波計（GPS 津浪計）による観測網の展開である.平成 20 年 3 月現在で，我が国太平洋岸の沖合 8 ヶ所においてすでに GPS ブイの設置・運用を開始しており，日本全国でおよそ 50 地点でのリアルタイム津波観測計画が進行中である．ここでは，GPS 津波計による津波観測網の津波予報への利活用に着目し，その展望と技術的課題について論ずる．

２）GPS 津波計の概要

GPS 津波計（または GPS 波浪計）とは，沖合洋上に浮かべた観測ブイ上に搭載した GPS によりブイの上下・水平の変動を毎秒測位し，津波を検出するシステムである．通常のカーナビゲーション等に利用される GPS は 1 台の GPS アンテナで測位を行うために数メートルの測位誤差が含まれるが，GPS 津波計の測位は，ブイ上のアンテナと陸上の基地局のアンテナを用いて逐次相対測位を行うため（RTK-GPS：リアルタイムキネマティック測位），誤差 1cm という高精度での海面変動測位を実現している（寺田・加藤，2003）[1]．

GPS 津波計は，東京大学地震研究所加藤照之教授と日立造船株式会社寺田幸博氏（現高知工業高等専門学校教授）を中心としたグループにより開発が進められ，神奈川県油壺沖，岩手県大船渡沖，高知県室戸岬沖で試験観測が行われた（加藤ら，2005）[2]．観測期間中，2001 年ペルー沖地震津波，2003 年十勝沖地震津波，2004 年紀伊半島沖地震津波の沖合観測に成功している．その後，（独）港湾空港技術研究所が中心となり，実用化に向けての本格的な研究・開発が進められ，主に海象の測定精度や活用方策，耐用年数や耐久性についての技術的課題の解決後，実用化された．現在，設置されている標準的なブイ筐体の諸元は，直径約 5m，高さ約 18m（海面上約 8m），重量約 40t で，耐用年数は 10 年以上を目標としている．GPS 津波計の標準的な設置位置は沖合約 15km で，水深 150-200m の海底に沈められたアンカーにチェーンで係留される．沖合の GPS ブイで測位した情報は無線で陸上基地局に転送され，ノイズやブイ固有の応答特性の除去，長周期成分と単周期成分の分離，ブイの変動成分の分離等（上下動=海面変動，水平変動=海面流速）のデータ処理後に，各関係機関へ配信される．

3）津波予報技術へのGPS津波計の利活用

GPS 津波計の津波予報技術への貢献は，以下の4つが挙げられよう．ここでは，それぞれについての研究の現状と課題について述べる．

a．津波の早期検知

沖合で津波を観測する最大の利点は，津波が沿岸部に到達する前に水位変化の検知ができることである．**図4．1**は，南海地震津波の発生を想定して，室戸沖に設置されたGPS津波計と周辺の港（室戸漁港）における津波波形を試算したものである（越村ら，2004）[3]．この場合，GPS津波計の設置位置は南海地震津波の想定波源域内にあるため，地震発生時にすでに海面が上昇している．波形のピークが出現する時間で比較すると，沖合の津波が沿岸に到達するまでにはおよそ10分の時間的猶予が見込める．地震発生直後の海面変動をリアルタイムで監視し，潮位の異常を検知できれば，緊急対応へのリードタイム（時間的猶予）を得ることができる．

しかし実際には，南海地震のような近地の場合を除けば理論的なリードタイムを得るのはかなり難しいと考えるべきであろう．津波の周期は，一般的には数十分から長いもので1時間程度になる．沖合津波計で観測された波高に対する沿岸の津波増幅特性を数値シミュレーションによりある程度予測しておくことは可能であるが，遠地で発生した地震による津波をGPS津波計がとらえても，立ち上がりのピークを確認するためには少なくとも1/4周期（5分から15分程度）は待たなくてはならない．沖合観測波高のみに頼った予測手法ではリードタイムを活かせない．世界中の地震発生情報をトリガーとし，ある閾値以上の水位変動が観測されたと同時に緊急対応体制の発動とするような仕組みが必要であろう．

b．津波発生機構の解明

沖合津波観測のもう一つの利点は，津波発生機構解明への活用である．沿岸の津波を予測するための数値シミュレーションには，その初期条件として断層運動による初期水位変動を与える．地震発生直後の地震波解析だけでは断層破壊領域の位置を推定することは難しいが，津波観測記録を利用して逆解析を行うことで，詳細な津波発生機構（初期水位変動分布や断層破壊領域）を推定することができる（たとえば，Satake et al.，2005）[4]．しかし，港湾内の検潮儀等で得られる波形には検潮儀特有の水理フィルターの特性や湾固有の振動・波高増幅の効果といった情報が含まれる．純粋な津波波源の情報を得るためには，ローカルな振動特性を除去するための波形処理を施さなければならない．沖合観測波形を用いる場合にはそのような波形処理を施す必要がなく，津波発生機構をより正確に予測できる可能性が高くなる．**図4．2**は，2004年9月に発生した紀伊半島沖地震津波の室戸沖GPS津波計の観測波形と計算波形の比較である（加藤ら，2005）[2]．このように，数値シミュレーションと沖合観測情報の融合により，予測精度の飛躍的向上が期待できる．また，近年の計算機性能の向上を背景に，リアルタイムで津波の浸水予測を実施する技術も先駆

的に開発されている（たとえば阿部・今村，2004）[5]．沖合観測情報から推定した津波初期水位分布を初期条件として，より精度の高い浸水予測や津波被害予測計算を津波到達前に終了させる技術の開発も進められている．

c．津波予報の修正

1999年に施行された気象庁の量的津波予報は，世界に先駆けた津波数値シミュレーションのデータベースを利用した数値予報システムである．日本近海の40万通りの地震を想定して，それぞれの地震に対する沿岸津波高をあらかじめ計算しておくことで，地震発生から数分以内に予報値を発表することが可能となる．しかし，このデータベース駆動型数値予報は，津波予測値をデータベースから引き出す際に地震発生直後の震源情報（震源位置，マグニチュード）を利用するため，地震動の強さに比してより大きな津波を発生させる「津波地震」による津波高を過小評価する傾向がある．沖合観測情報を逐次利用すれば，一旦予報値を決定した後であっても予報の修正を行うことができる．**図4．3**は，津波地震を想定した場合の気象庁データベースに相当する津波予測値の分布（筆者らが疑似的に作成したデータベース）と沖合津波観測情報を利用した修正予測値の比較である（大垣ら，2006）[6]．沖合観測点において出力した予測結果と実際に観測された津波高の比を修正係数としてデータベース値に乗ずることにより，即時性に優れる気象庁のデータベースを活かしながら，リアルタイム観測データの取得状況に応じて段階的に予報値を修正することが可能である．しかし，この方法は沖合観測による「津波高」の情報を利用するため，現状のGPS津波計の配置では沿岸への津波到達前に予報値を修正することは難しい．GPS津波計は，陸上の基地局への測位結果の送信・修正に無線を使用するため，沖合の設置位置に制限がある（陸上基地局からの距離は約20km以内）．津波発生域により近い位置で観測が可能な海底ケーブル式津波観測システムとの融合や（たとえば日野ら，2005）[7]，GPSブイの更なる沖合展開が今後の課題であろう．

d．広域的津波監視による人的被害の軽減

津波災害最大の特徴は，その被害の広域性にある．地震動による被害が震源域周辺に集中し震源から離れるに従いその程度が小さくなるのに対し，津波は大洋を伝播し地震動による被害が無い沿岸地域に対しても広範囲にわたり被害を及ぼすことがある．1960年にチリ沖で発生したチリ地震津波は太平洋を横断し，日本でも100名以上の人的被害が報告された．また，2004年スマトラ島沖地震津波の被害がインド洋全体に波及したのは記憶に新しい．津波観測の最大の意義は，広域的津波監視による人的被害の軽減にあるといってよい．すなわち，沖合津波計単独での水位計測によりそれを実現するのではなく，複数の観測施設による広域的な監視体制の確立が必要である．津波の発生した波源域近傍の地域では，たとえ沖合観測が実現したとしても津波到達前にその検知情報を活用するのは難しい場合がある．しかし，伝播途上の津波を時々刻々ととらえ，それを国や地域全体で共有す

ることができれば，その情報は他の地域にとって大きなリードタイムを与えてくれることになる．**図4．4**に示すのは，竹内（2008）による研究[8]で，スンダ海溝に沿って160通りの地震津波の発生を想定し，津波ブイの観測情報により得られたリードタイムを数値計算により求めその効果を人的被害の軽減率として算出した結果である．インド洋に津波ブイネットワークを配置した場合，自国のみのネットワークによる情報共有よりも，大幅に人的被害の軽減が可能であることが分かる．したがって，津波観測網の設置・整備・維持管理は国の責任であるとか，施設設置位置近傍の自治体や組織だけが行うべきであると考えるのは間違いである．むしろ遠く離れた地域こそがその恩恵を受ける場合の方が多いのである．

また，広域津波監視の目的は津波の発生や津波第1波の検知だけではない．津波は第1波以降，何度も振動を繰り返し，場合によっては地震発生から半日経った後に最大波が後続波として到達し被害を生む場合がある．後続波の予測は現在の津波予報技術においては不可能であり，特に予報解除のタイミングの意志決定は，観測情報に頼らざるを得ない．沖合・沿岸にかかわらず津波観測情報の一元集約と情報共有が今後の大きな課題と言えるだろう（越村ら，2004）．沖合観測と沿岸観測を一元的に集約し，津波観測網の充実を目指した計画は，永井ら（2005）[9]により提案され，現在進行中である．詳細については参考文献を参照されたい．

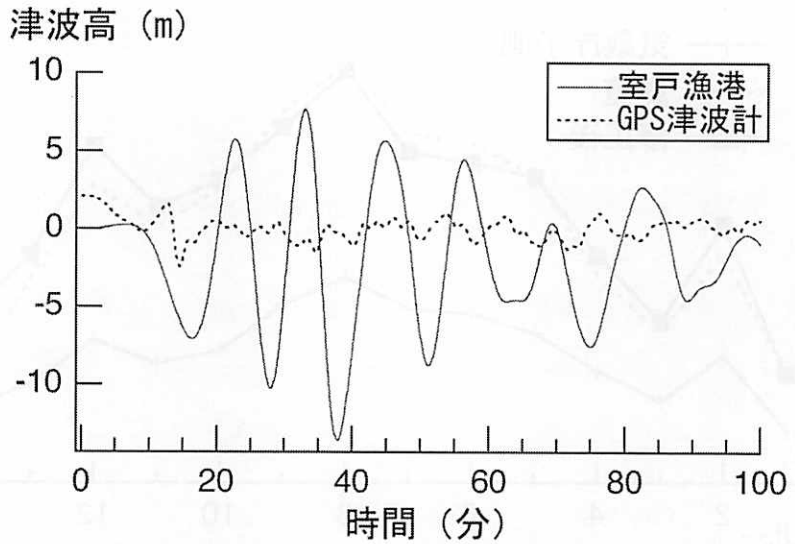


図４．１　室戸沖 GPS 津波計と室戸漁港における津波波形（南海地震津波の発生を想定して筆者が試算）

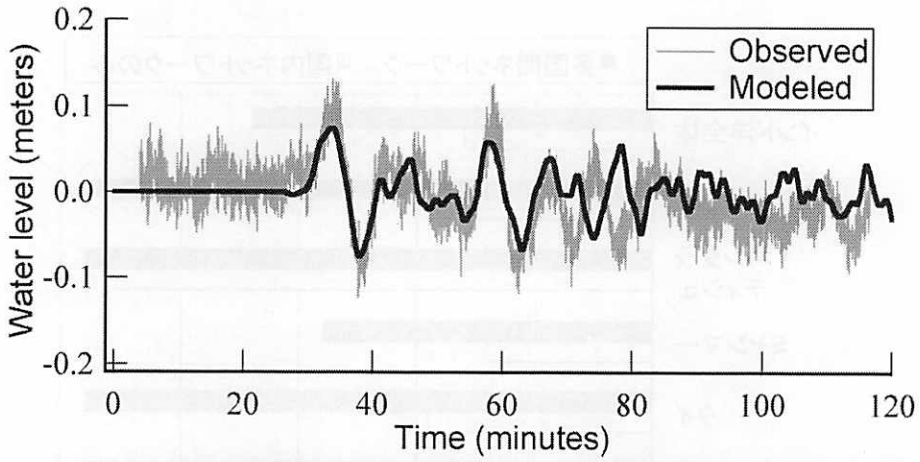


図４．２　2004 年 9 月 5 日紀伊半島沖地震津波における室戸岬 GPS 津波計の観測波形とシミュレーション波形

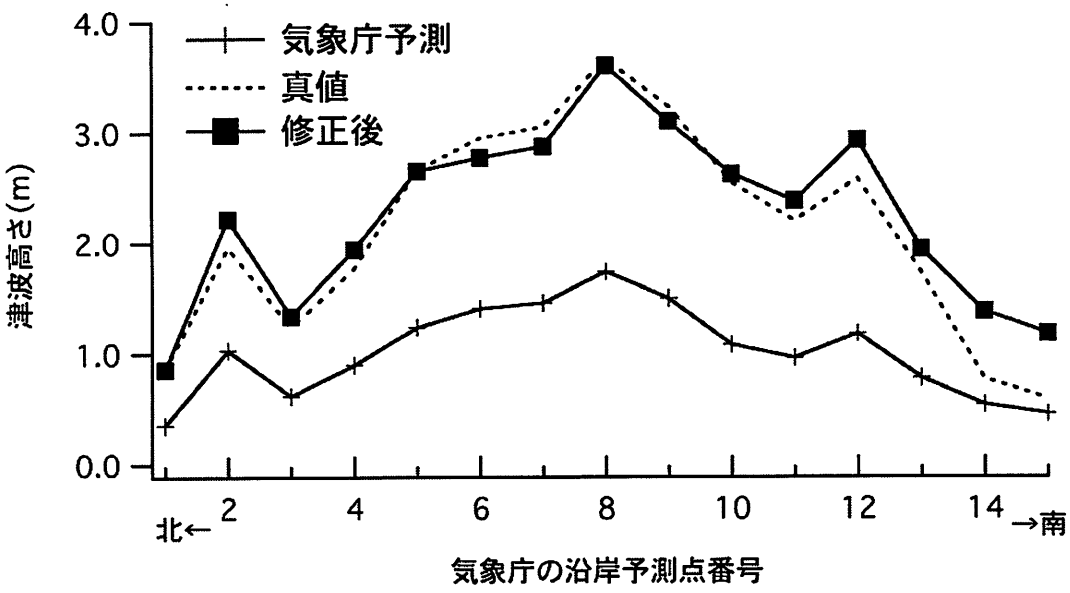


図4．3　津波地震を想定した場合の気象庁データベースに相当する予測値と沖合観測情報を利用した修正予測値[6)]

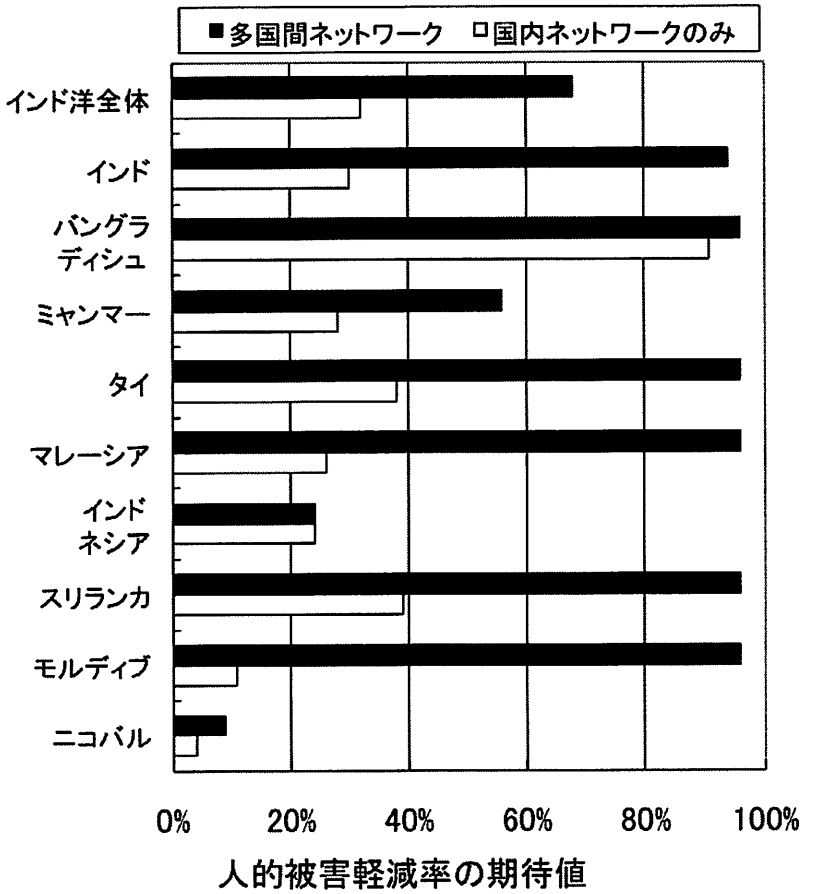


図4．4　津波観測ブイの多国間共有による人的被害軽減効果（竹内，2008）[8)]

4．2　津波シミュレーションによる津波警報システムの人的被害軽減効果検討手法

1）検討の目的

多目的ブイを用いた津波警報システムは，ブイによる洋上観測で津波を早期に探知し，警報を発することで人的被害を軽減することを想定している．そこで本検討では，主に各地域の位置，ブイの設置位置，津波の発生位置といった地理的要因による人的被害効果の影響を検討する．具体的には主に以下の3つに主眼を置いて検討を行う．

① インド洋沿岸各国の津波に対する人的被害リスクの推計
② 多目的ブイシステムのネットワーク拡大による人的被害軽減効果の推計
③ 多目的ブイの有効な設置位置の検討

次項より，シミュレーションによる検討手法について説明する．

2）検討すべき津波警報システムの人的被害軽減効果の概要

今回検討を行う津波警報システムは，ブイによるリアルタイム潮位観測で観測された津波の情報を，ネットワーク化されている他の地域と情報共有し，その情報をもとに津波警報を発することで津波到達までのリードタイムを稼ぎ，その間に避難を行うというものである．ブイによる津波観測が早ければ早いほど，その情報を共有し，津波警報を発信するまでの時間が短くなり，結果として津波到達までのリードタイムが増加し，被害軽減効果も大きくなると考えられる．そのため，より早く観測できる位置にブイが設置されていることが望ましい．

1.2.1)で既に述べたように，普段多目的ブイは日常的に活用できる海洋データを観測するため，ブイの設置位置は沿岸から2km以内を想定している．そのため，広大なインド洋を津波観測の対象範囲と考えた場合，今後発生するだろう津波に対しては，より広いネットワークが展開できるほど減災効果が高くなると考えられる．

ブイによる津波のリアルタイム観測に関する試みは，DART(Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)やGPS津波観測システムが挙げられる．DART[10] (**図4．5**)は，津波のリアルタイム予測の為のブイシステムで，NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration's)によって開発された．既に太平洋沿岸ではDART観測網が整備されてきており，現在インド洋でも**図4．5**[11] にみられるように2機のDARTが設置されている．また，GPS津波観測システム(**図4．6**)は，RTK(Real Time Kinematic)法を用いた陸上基地局との比較観測によって，陸上基地局から20km以内に設置されれば，1cmの精度で毎秒のブイの上下変動を計測することができるブイシステムである．現在永井ら[12]によるGPS津波観測システムを利用した津波監視情報網構想(スーパーナウファス構想)などが行われている．

ブイによるリアルタイム観測情報を利用した津波予報の試みとしては，主に地震波による津波予報の修正法と，津波の逆伝播手法を利用したものが挙げられる．前者は大垣ら[13]

による気象庁の地震波を活用した量的津波予報の段階的修正法のように，地震から得られる震央位置とマグニチュードから推計される津波の規模情報と，海洋観測による津波到達時間と観測波高情報を利用した方法である．後者は，同じく大垣ら[14]の研究や藤井[15]ら(2006)の検討で見られるような，複数の海洋観測点の津波到達時刻と波高情報から逆伝播手法を利用した断層パラメータの推定手法である．今回提案する多目的ブイシステムにおいては，具体的な津波予測手法は検討段階であるが，これらの手法の活用は十分に想定されている．その他の試みとして，泉宮ら[16] (2006)による海表面流速場を用いた手法などが見られる．

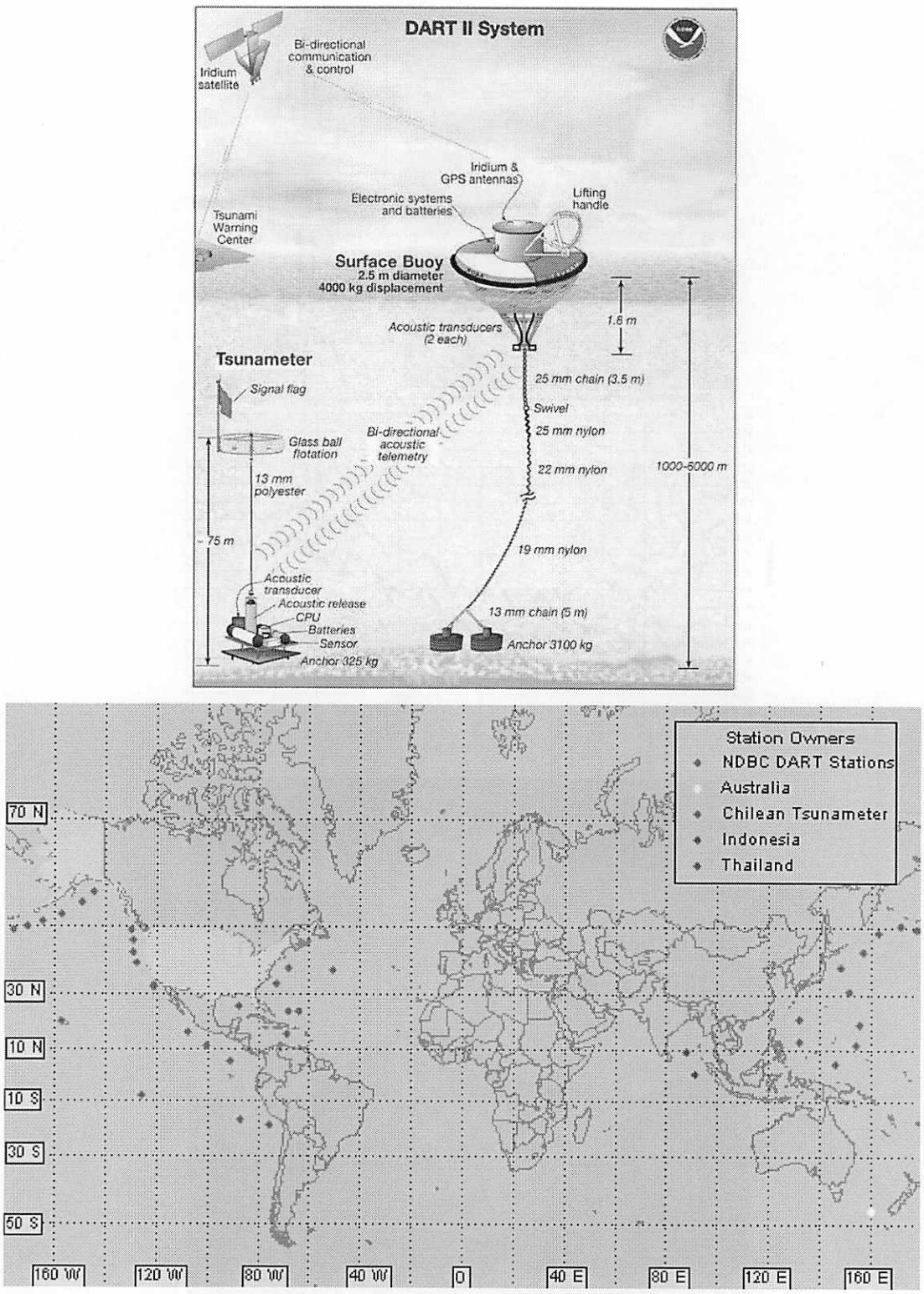


図4．5 DART(Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)
(出展：National Oceanic and Atmospheric Administration's,
National Data Buoy Center HP[17])

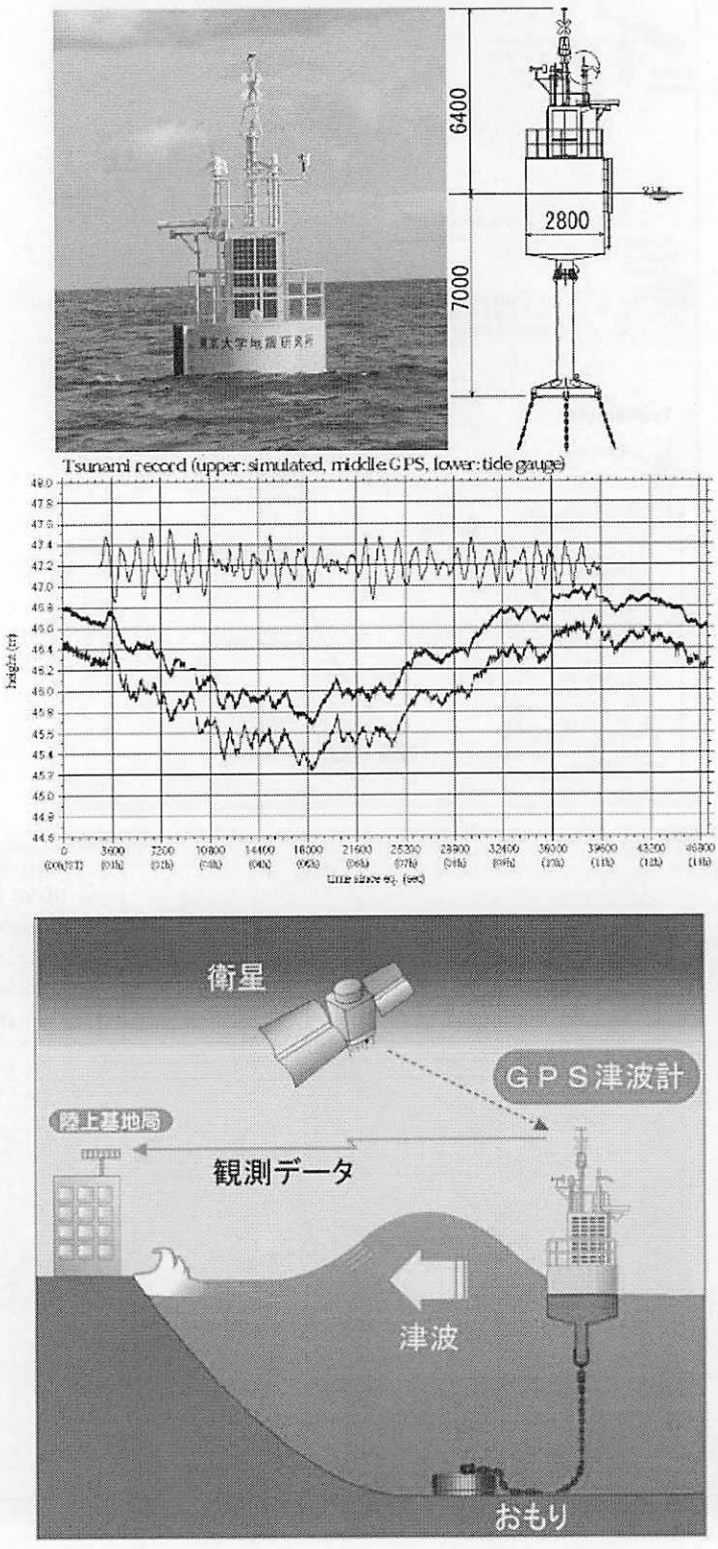


図４．６　GPS 海洋観測ブイ　（出展：日立造船 HP[18]）

3）線形長波理論と Staggered leap-frog 法を用いた津波シミュレーションの概要

a．人的被害軽減効果検討のための津波シミュレーション活用の利点

津波に関する研究では，シミュレーションを利用した研究が多く行われている．これは，過去の津波災害事例調査でのデータだけでは，津波の挙動の特性の検証や，津波対策の安全性の検討において限界があるからである．特に，これから起こりうる津波へ向けた津波防災対策の効果を検討する際に，シミュレーションにより想定される津波を再現し，データを収集して分析を行うことは，有効な方法と考えられる．本検討における多目的ブイを用いた津波警報システムは，インド洋で起こりうる津波を対象とした津波防災対策であり，その効果の検討を行うためには，将来起こりうる津波を対象としたシミュレーションを行い，そこから得られるデータを検討に活用することが非常に有効と考えられる．

b．津波シミュレーションの既往研究

津波シミュレーションの既往研究として，まず 2004 年のインド洋スマトラ沖地震津波の数値シミュレーションを試みる研究が挙げられる．越村ら(2005)[19]は，スマトラ沖地震津波のシミュレーションと人工衛星 Jason-1 の捉えた津波波高を比較し，数値シミュレーションによる第 1 波の津波再現性が十分な精度で可能であることを示した．また，Kowalik ら(2005)は，インド洋津波が太平洋にまで様々なルートを通って伝播していることを，シミュレーションにより確認した[20]．また，大家ら(2006)[21]は，バンダ・アチェ市街地における津波氾濫の再現を数値解析により実施し，その妥当性を検証した．これらスマトラ沖地震津波を再現した数値シミュレーションの成果により，現在の津波シミュレーション技術が一定レベルの精度を持っていることが示され，それらを活用して将来想定される津波に対する検討を行うことの妥当性が示された．これは，本検討において津波シミュレーションを活用することの有効性を示している．

また，将来起こりうる津波を想定したシミュレーションにより，津波の被害想定や防災対策の効果の検討を行った既往研究としては，ミクロレベルでの，特定地域・領域を対象とした津波遡上シミュレーションを用いた津波防災対策の検討と，マクロレベルでの外洋を伝播する津波の広域被害想定が挙げられる．ミクロレベルでは，岡本ら[22](2007)による尾鷲市を対象として，津波シミュレーションと避難行動シミュレーションを組み合わせた尾鷲市の津波防災対策に関する研究などが例として挙げられる．マクロレベルでは，気象庁による量的津波予報での津波の沿岸への到達波高予測においての津波シミュレーションの活用が挙げられる．また越村ら(2005)[23]は，インド洋スンダ海溝に沿って，将来発生しうる M9 クラスの巨大地震津波を対象として，発生場所を変えた 4 通りのシミュレーションによる被害想定を行い，2004 年のスマトラ沖地震津波が必ずしもインド洋沿岸における最悪のイベントではないことを示した．

c．本検討の意義

シミュレーションを利用した研究は，4.2 3)b.に示した以外にも多くの研究例があり，本検討もその一つと位置づけられる．しかし既往研究においては，インド洋でのある特定の津波を想定した津波防災対策の検討例はあるものの，インド洋で起こりうる可能性のある津波を網羅的に考慮して，津波防災対策の効果を検討した研究は見当たらない．津波の発生する可能性のある地域がある程度広がりを持っている場合，特定の津波のみを想定して津波防災システムの有効性を検討することは，想定していない津波への有効性も考えた場合必ずしも十分な検討であるとは言えない．インド洋沿岸においては，スンダ海溝沿いの広い範囲で今後津波が発生する可能性が指摘されており [24]，これらを網羅的に考慮して津波防災システムの効果を検討する必要があると考えられる．

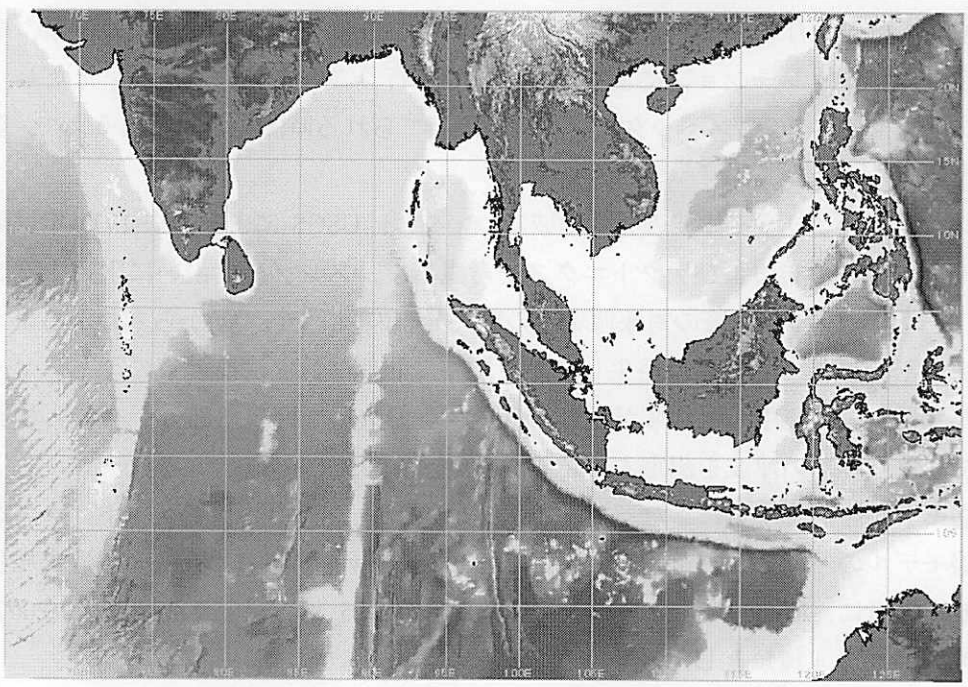
そこで本検討では，インド洋で起こりうる津波をある程度網羅的に考慮したかたちで，多目的ブイを利用した津波警報システムの有効性を検討するために，気象庁の量的津波予報の考え方を参考に，越村ら(2005)の行った研究を拡張して，インド洋スンダ海溝沿いに発生しうる 160 個の津波を対象としたシミュレーションにより，人的被害想定を算出し検討を行う．

4）津波シミュレーションによる検討手順

a．数値シミュレーションの計算条件

本検討では，インド洋における外洋を伝播する津波を対象とし，対象領域は**図4．7**に示すように，北緯 25° ～南緯 20° ，東経 65° ～130° とした．対象とした国と地域はインド，バングラディッシュ，ミャンマー，タイ，マレーシア，インドネシア，スリランカ，モルディブ，ニコバル諸島とする．以後，特に断りがない限り本検討における「各国」は以上に挙げた国を指すこととする．

今回対象とするのは外洋を伝播する津波であるため，数値計算には東北大学が作成した TUNAMI-CODE[25] (Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Tsunami) を参考に，コリオリ力 f を考慮した地球座標系の線形長波理論に基づく Staggered Leap Frog 法を採用した．また，断層モデルによる地盤変動量の計算には Mansinha・Smylie[26] (1971) 法を用いる．解析に用いる地盤データは，英国 General Bathymetric Chart of the Oceans(GEBCO)から得た 1 分メッシュデータを用いる．



領　　域: N25° ~ S20°　　E65° ~ E130°

格子間隔:　　1'×1'

図４．７　本検討の対象領域

b．想定する津波の断層モデル

想定する津波の断層モデルを，Mw と断層モデルの位置を変数として，Mw が 4 種類(8，8.3，8.7，9)，断層モデルの基準点の位置をスンダ海溝に沿った 40 種に設定し，計 160 個の津波を想定してシミュレーションを行った．以下その決定理由について見ていく．

本検討では気象庁の量的津波予報を参考としており，できる限り多くの種類の津波地震を想定し，シミュレーションによるデータ収集を行うことが目標である．ただし，シミュレーションで使う PC のスペック及び本検討に当てられる時間を考慮したうえで，妥当な数を決定した．

インド洋で起こりうる津波の発生地域については，USGS による過去 1971 年以降に発生した地震の震央分布およびテクトニクスを考慮して，スンダ海溝沿いに限定することとした(**図４．８**)．1971 年以降の対象領域内の震央分布の図(**図４．９**)からもわかるように，スンダ海溝沿い以外でも地震は発生しており，特に北側スンダ海溝の東のミャンマーに伸びるあたりに震央が集中した地域が見られる(**図４．９**の丸で囲った部分)．今後の検討の課題として，より多くの津波を想定する必要がある．

断層モデルを決定するに当たって，Mw を変数とし，スンダ海溝のテクトニクスを考慮して断層モデルのパラメータを設定することとした．Mw の種類については，過去発生した地震津波を参考に，Mw9(2004 年スマトラ沖型)，8.7(2005 年スマトラ沖型)，8.3(2007 年スマトラ沖型)，8 の 4 種類とした．

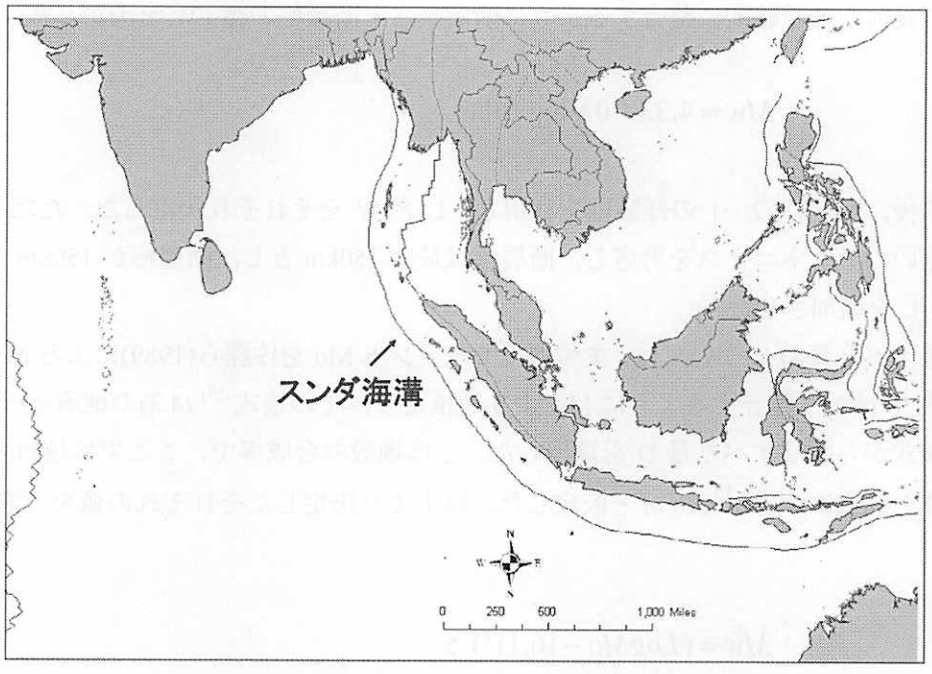


図４．８　スンダ海溝のテクトニクス

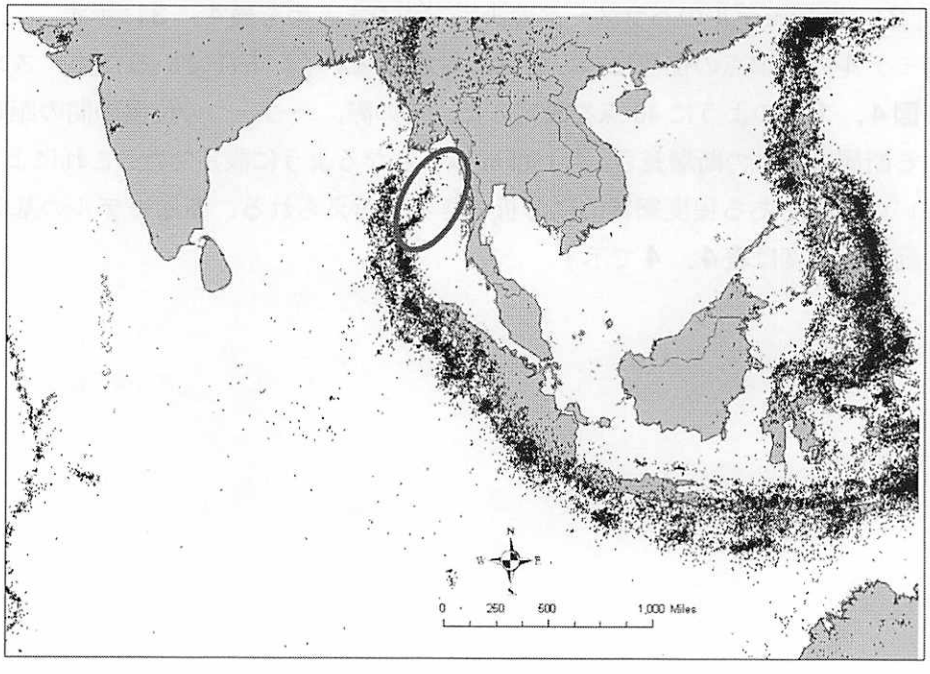


図４．９　震央分布図

断層長さLと断層幅Wは，まず式(4.1)に示すWells and Coppersmith[27] (1994)による断層モデルの幾何学的経験則に整合するように断層長さと断層幅の積LWを決定した．

$$Mw = 4.33 + 0.9 \log LW \tag{4.1}$$

その後，L：W＝2：1の経験則を利用し，LとWをそれぞれ決定した．ただし，スンダ海溝沿いのテクトニクスを考慮し，断層幅は最大150kmとし，断層幅が150kmを超える場合は，Lを増加させた．

断層すべり量Dについては，まず地震モーメントMoを佐藤ら(1989)によるMwとMoの関係式[28] (4.2)に整合するようにMwより逆推定し，その後式[29] (4.3)の地震モーメントMoの定義式から断層すべり量Dを算出した．μは地殻の合成率で，ここでは越村ら[30] (2005)の研究と同様の$3\times10^{10} N/m$と仮定した．以上より決定したそれぞれの値を（表4.1）に示す．

$$Mw = (LogMo - 16.1)/1.5 \tag{4.2}$$

$$Mo = \mu DLW \tag{4.3}$$

断層の走行はスンダ海溝沿いのテクトニクスに沿うように設定した(**図4．10**)．傾斜角，すべり角については，越村ら(2005)の研究の値をそのまま適用し，15°，90°で一定とした(**表4．2**)．断層モデルのパラメータの決定方法のまとめを**表4．3**に示す．

断層モデルの基準点の位置については，対象領域がインド洋であるため，スンダ海溝に沿って**図4．11**のように40点を設定した．その際，一つ一つの位置の間の距離が，今回想定する断層モデルの断層長さL≒150km以下となるように設定した．これにより，スンダ海溝沿いの海面をある程度網羅的に分析できると考えられる．断層モデルの基準点の開始位置の経度，緯度は**表4．4**で示す．

表４．１　地震モーメント Mo、断層の長さ L、幅 W、すべり量 D

Mw	Mo(Nm)	LW(km^2)	L(km)	W(Max150)(km)	D(m)
9	3.98E+29	154485.9	1029.9061	150	8.589935
8.7	1.41E+29	71706.01	478.0401	150	6.566337
8.3	3.55E+28	25769.8	227.0234	113.51168	4.589524
8	1.26E+28	11961.28	154.6692	77.33461	3.508334

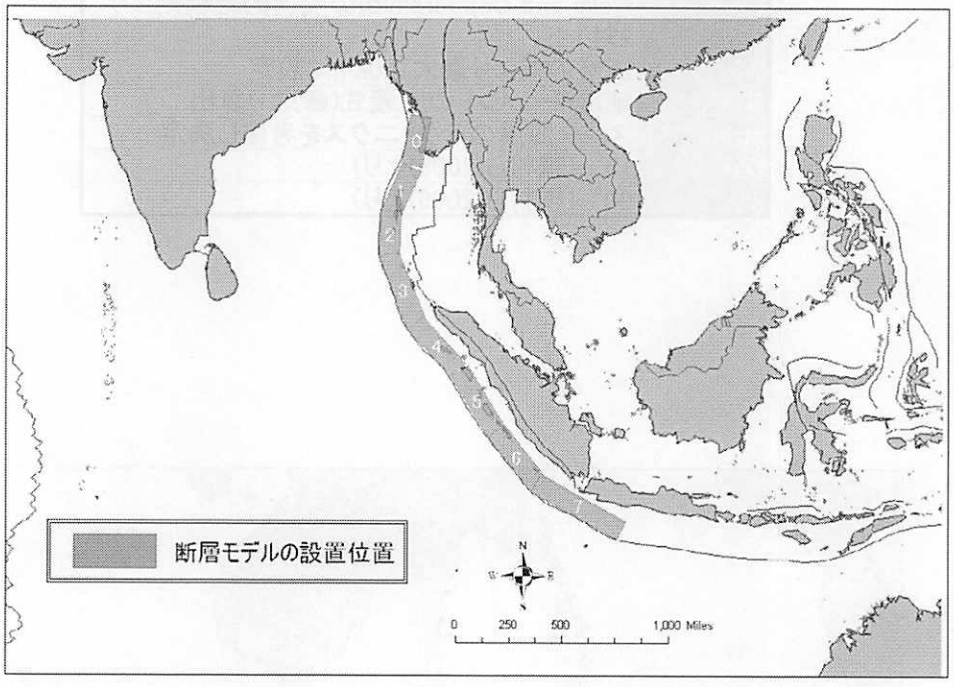


図４．１０　断層モデルの走行

表４．２　各断層モデルの設置位置の走行、傾斜角、すべり角の値

Id	strike(°)
0	9.6282
1	24.4929
2	2.0846
3	338.2844
4	316.9967
5	328.191
6	321.0454
7	298.7682

Dip (°)	15°
slip (°)	90°

表４．３　断層モデルのパラメータの決定方法のまとめ

Mw	過去の津波を参考に決定
Mo	式(●)からMwより逆推定
LW	Wells and Coppersmithの幾何的経験則より
L:W	2対1
W	断層の幅より最大150kmに設定
D	地震モーメントの定義式(●)より算出
strike	スンダ海溝のテクトニクスを考慮し決定
Dip	15°（越村ら(2005)より）
slip	90°（越村ら(2006)より）

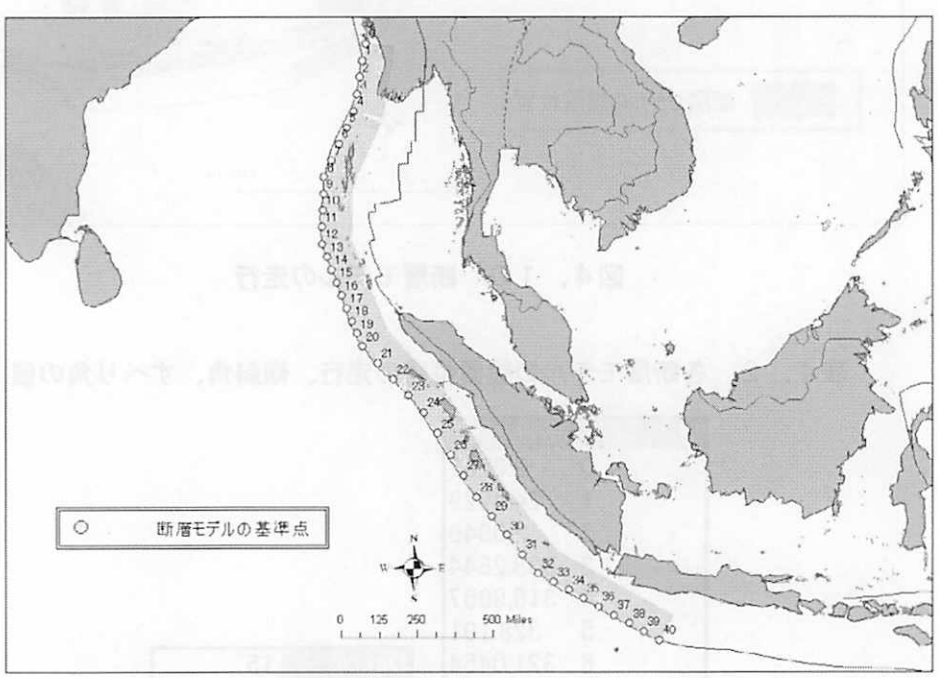


図４．１１　断層モデルの基準点の位置

表４．４　断層モデルの基準点の経度、緯度

Id	latitude	longitude	Id	latitude	longitude
1	17.64	93.51	21	3.22	94.24
2	16.83	93.38	22	2.43	94.98
3	16.02	93.24	23	1.63	95.72
4	15.22	93.10	24	0.84	96.46
5	14.43	92.74	25	−0.16	97.08
6	13.65	92.39	26	−1.16	97.70
7	12.86	92.03	27	−2.16	98.32
8	12.08	91.67	28	−3.16	98.94
9	11.28	91.64	29	−4.08	99.69
10	10.49	91.61	30	−5.00	100.43
11	9.70	91.58	31	−5.91	101.16
12	8.90	91.56	32	−6.81	101.89
13	8.29	91.80	33	−7.22	102.63
14	7.68	92.04	34	−7.62	103.35
15	7.07	92.29	35	−8.02	104.08
16	6.46	92.53	36	−8.42	104.80
17	5.85	92.77	37	−8.81	105.53
18	5.23	93.02	38	−9.21	106.25
19	4.62	93.26	39	−9.61	106.98
20	4.01	93.51	40	−10.01	107.70

c．人的被害想定の方法の決定

まず，津波被害の対象を人的被害に限定した．これはブイによって得られる効果が津波到達までのリードタイムを稼ぐことであるため，建物被害に対してはほとんど影響を与えないと考えられるためである．

人的被害想定の方法としては，越村ら(2005)の設定した津波影響人口(PTE：Potential Tsunami Exposure)の概念を拡張し，以下の(式 4.4)で表される推定人的被害者数(PED：Potential Exposure Death)を設定することで検討を行う．PED は，津波暴露人口（PEP：Potential Exposure People)(式 4.5)に，浸水深による死亡率をかけたものである．

$$PED = \alpha(\eta)PEP = \alpha(\eta)(1-\beta(LT))Pop \qquad (4.4)$$

$$PEP = (1-\beta(LT))Pop \qquad (4.5)$$

Pop：グリッド内人口，η：浸水深，LT：リードタイム，$\alpha(\eta)$：浸水深による死亡率，β(LT)：リードタイムによる避難完了率，$1-\beta$(LT)：津波暴露率

人的被害に影響を与えるパラメータを越村ら[31](2005)の研究を参考に，津波の浸水深η，警報発信から津波到達までのリードタイム LT，各グリッドのグリッド内人口 Pop とした．岡本ら[32](2007)による研究では，津波の流速もパラメータとして設定されているが，今回はマクロレベルでの検討のため，流速による差は誤差の範囲内として除外した．

これらパラメータを利用し，津波浸水域のグリッドにいる人口 Pop に，浸水深ηによる被害関数$\alpha(\eta)$と，リードタイム LT による避難完了率を関数β(LT)とした際の津波暴露率（$1-\beta$(LT)）の積を取り，その値を各グリッドの推定人的被害者数 PED とする．

グリッド内人口 Pop については，米国 Ork Ridge National University(2003)が公開している LandScan 2003[33]を採用した．LandScan とは，各国の県・州レベルの人口を，土地の傾斜，土地被服，主要道からの距離，都市光が観測された頻度で，30 秒メッシュに按分することで得られたものである．ただし，特に発展途上国における統計データの精度検証が十分に行われておらず，利用に当たっては注意が必要である．本検討では，30 秒メッシュ 4 つを足し合わせて，1 分メッシュとして利用した(**図４．１２**)．

浸水可能域は，過去の津波被害調査報告書より沿岸から最大 4km までの遡上が確認されているので，沿岸から縦，横，斜め 3 グリッド分の陸上グリッド(約 5km)と設定した(**図４．１３**)．

浸水域の決定及び浸水深ηの算出方法は，浸水可能域の各グリッドごとに，最も近い沿岸グリッドの津波波高から地盤高を引いた値を浸水深ηとし，$\eta > 0$となると津波浸水域と判定した．該当する沿岸グリッドが複数有る場合は，津波高の高いほうの沿岸グリッドの値を採用した．なお，GEBCO による地盤データのメッシュと LandScan2003 のメッシュが一部において重ならず，海面上に人口データが存在するグリッドが少数見られたが，この場合地盤高を 0m として計算を行った．

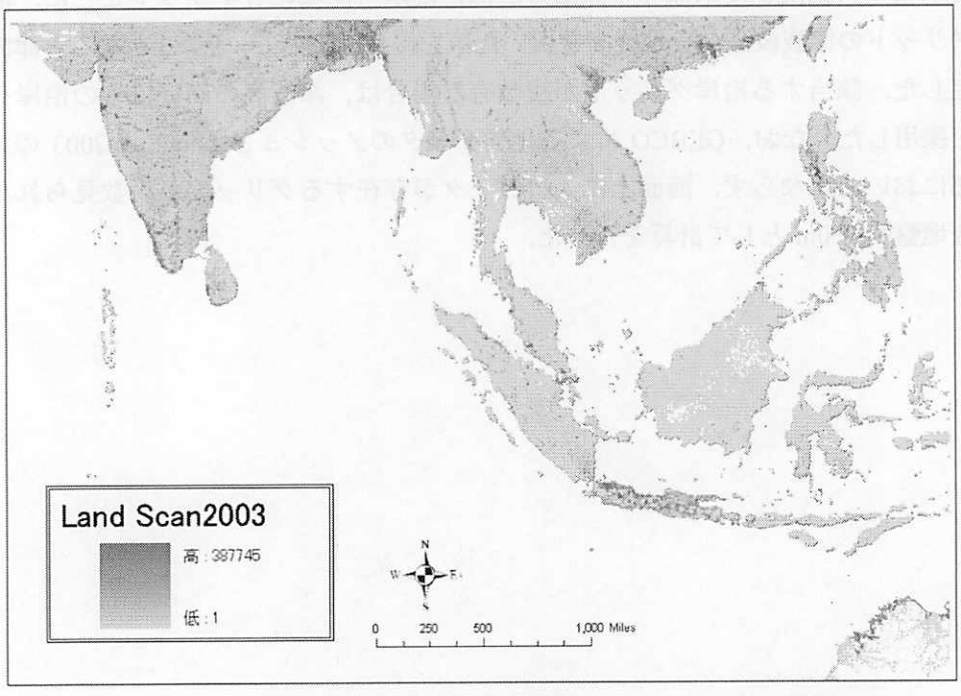
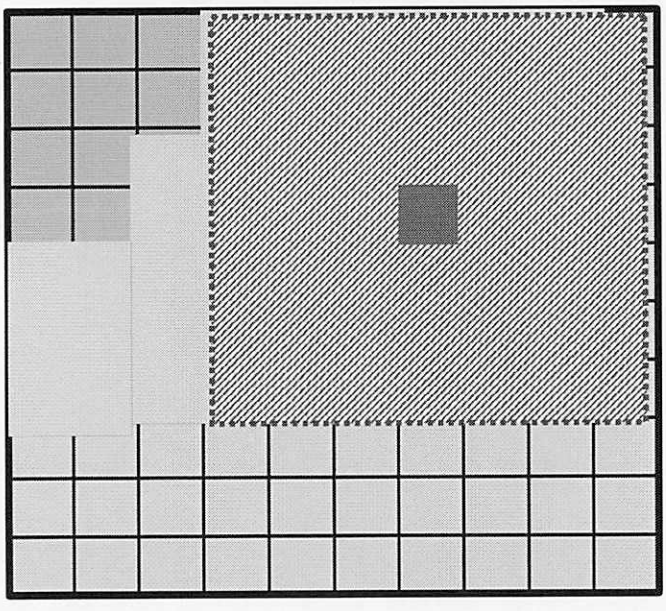


図４．１２　Land Scan2003 を利用した 1’ ×1’ 人口分布図



沿岸グリッド を基準として考えた場合の浸水可能域となる範囲

(海上グリッド、 陸上グリッド、 浸水可能域グリッド)

図４．１３　浸水可能域の設定

浸水深ηと，津波による死者・行方不明者の関係式である被害関数$\alpha(\eta)$は，越村ら[34](2008)による 2004 年スマトラ沖地震津波の際のバンダ・アチェでの調査データを基にした被害関数を引用する．被害関数は，その平均λが 3.63，標準偏差ζが 1.36 の累積分布関数となっている(**図4．14**).

今回は，地理的要因による人的被害軽減効果の検討のため，すべての地域で一様に被害関数を設定した．今後本検討の発展形として，地域差を含めた検討を行う際には，地域によって異なる被害関数を設定することが考えられる．

また，本検討では，浸水深によるフラジリティ$\alpha(\eta)$を累積分布関数で仮定しており，その場合浸水深が小さくなっても，ごく少数の割合で死者が発生することになる．グリッド内人口が多い場合，$\alpha(\eta)$がこのような小さな割合であっても，ある程度多くの数の PED が発生してしまい，現実との誤差が大きくなってしまう．今後の課題としては，$\alpha(\eta)$のηに下限ηo を設けて，ηo 以上で無ければ PED が発生しないという仮定を置くことで，シミュレーションの精度の向上を図ることが考えられる．

沿岸グリッドへの津波到達時間 AT(分)は，津波発生直後から沿岸グリッドの津波波高が±20cm を最初に記録するまでの時間とする．±20cm での津波検知は，現在研究が進められている GPS 津波観測計の研究を参考にした[35].

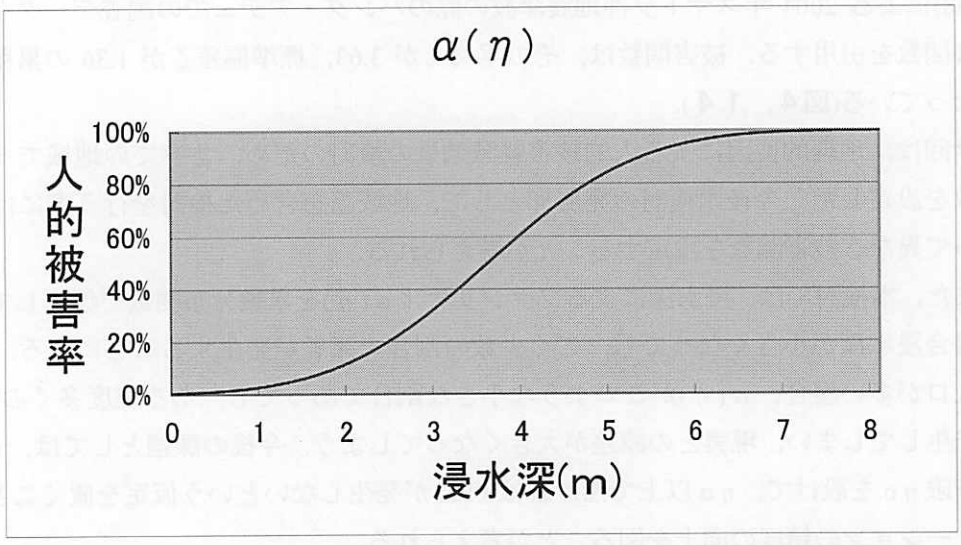
浸水域への津波到達時間 AT は，浸水深を決定する際の沿岸グリッドの AT をそのまま採用した．本来であれば浸水域の AT は，沿岸グリッドの AT よりも遅くなる．仮に沿岸 2km で津波を観測した場合，その津波が陸に到達するまでの時間は，水深 10m と仮定すると，津波の速度 v=$\sqrt{gh}$ から試算しおよそ 4 分となる．つまり，本検討ではより被害想定が大きく推計される側に近似したことになる．

津波探知・警報発信時間 AT0(分)については，津波が発生してから各地域に津波警報を発信するまでの時間と定義する．AT0 の決定方法については，特に宣言が無い場合，本論文においては，津波観測ブイ設置グリッドのうち津波を最も早く探知したグリッドの AT に 15 分を追加した値とする(式 4.6).

$$ATo = \min\left(AT_d\right)+15 \tag{4.6}$$

(AT_d ：津波観測ブイ設置グリッドの AT)

多目的ブイシステムでは，リアルタイム津波観測を想定している．そこで本検討においては地震波による情報とブイによって得られる情報による津波警報を仮定し，津波の第一波の波高が観測できた時点で津波警報を発生できるとした．津波の周期を 1 時間と仮定すると，第一波の波高観測までの時間は 1/4 波長分の 15 分となるため，上記式のように AT0 を設定した．なお，地震波による情報発信は，2007 年のスマトラ沖地震津波の際には 14 分後に行われており，本仮定の条件に整合すると考えられる．



$\alpha(\eta)$：浸水深による死亡率(η：浸水深)

(2007 Koshimura)

$$\left\{ \begin{array}{ll} \alpha(\eta)=\Phi\left\{\dfrac{\eta-\lambda}{\zeta}\right\} & \lambda=3.63 \\ & \zeta=1.36 \end{array} \right\}$$

図４．１４　浸水深ηによる被害関数$\alpha(\eta)$のグラフ

本検討においては地理的要因の差を検討課題としているため，津波探知から津波警報発信までの時間をすべての地域で一様と仮定している．つまり，津波が探知されたら，インド洋の各国沿岸で同時刻に一斉に津波警報が発信される状況である．しかし実際には津波探知から津波警報が発信されるまでの時間は，津波情報の受信システムの有無などにより，地域ごとに差があるものである．今後の研究課題として，津波情報受信システムの設置位置やその情報伝達手段の違いにより，津波探知から警報発信までの時間に地域差をつけ，効果的な津波情報の伝達手段を検討することなどが挙げられる．

本検討におけるリードタイム LT は，津波警報発信から津波到達までの時間と定義する．（式 4.7）また，β(LT)は，津波警報発信後の経過時間 t と避難完了者の割合の関係式と定義する．

$$LT = AT - ATo \tag{4.7}$$

以下，β(LT)の決定方法についてみていく．

まず本検討における定義として，「避難時間：津波を探知し津波警報を発信した時間から避難が完了するまでの時間」を，式(4.8)のように，「情報取得時間：津波警報が発信されてから，その情報を取得するまでの時間」と「避難準備・完了時間：避難準備を始めてから避難を完了するまでの時間」の２つのセクションに分けることとする．

$$\text{避難時間} = \text{情報取得時間} + \text{避難準備・避難完了時間} \tag{4.8}$$

ここで，「情報取得時間」のセクションにおいて，津波警報発信後からの経過時間 t と情報を取得した人々の割合の関係式を情報取得率 G(t)とし，「避難準備・避難完了時間」のセクションにおいて，情報を取得してからの経過時間と避難完了者の割合の関係式を避難準備・完了率 E(t)とすると，リードタイムが LT であった際の避難完了者の割合 β(LT)は以下の(式 3.9)で表される．

$$\beta(LT) = \int_0^{LT} G'(t)E(LT-t)dt \tag{4.9}$$

G(t)，E(t)については，これまでと同様に地理的要因が分析対象のため，地域差をつけずに各地域で同じ関数を用いる．関数の設定に関しては，関係する既往研究や津波対策を参考に，常識の範囲から考えて著しく逸脱しないようなものとした．

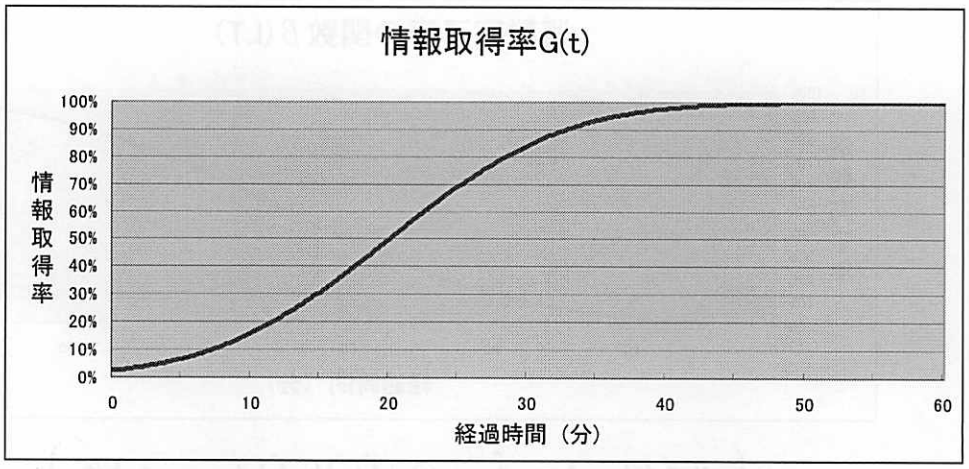
G(t)の設定については，片田らの東海豪雨災害における住民の情報取得に関する研究[36]や，GIS を用いた災害情報伝達のシミュレーション分析[37]を参考にし，平均λが 15 分，標

準偏差がζ10分の累積分布関数とした(**図4．15**).

E(t)については，岡本ら[38] (2007)の研究で仮定している避難準備時間15分，及びパトンビーチ再開発計画の「津波警報発令後，15分以内に避難できる避難所を海岸沿いに10カ所整備する[39]」という項目等を参考にし，平均λが20分，標準偏差ζが10分の累積分布関数とした(**図4．16**).

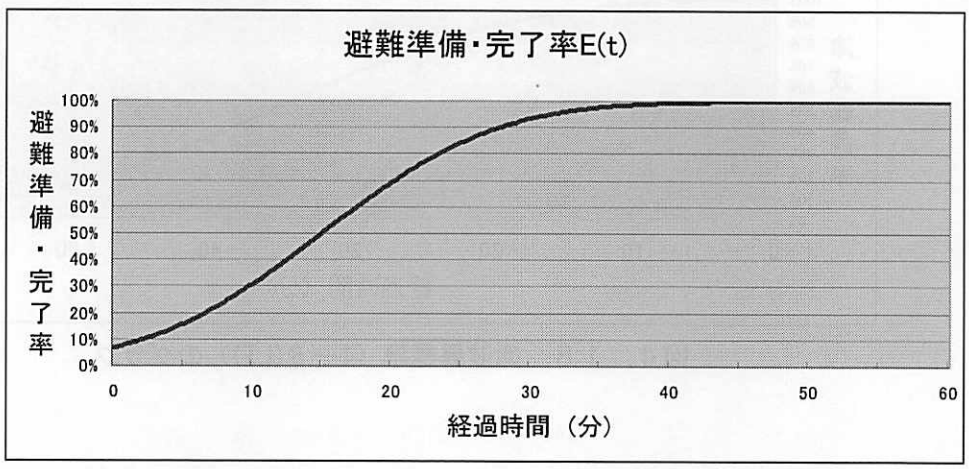
その結果，β(LT)は(**図4．17**)，(1－β(LT))は(**図4．18**)のようなグラフになる．本検討ではこの値を利用する．まとめとして，本検討における津波発生から避難完了までの時間の設定を**図4．19**に示す.

今後の研究課題として，情報取得率関数G(t)や避難準備・完了率関数の関数E(t)を変化させるたり，地域差をもたせたりすることによる地域差の影響の検討や，津波探知・警報時間や避難時間についてより細かくセクション分けを行い，そのわけられたセクションの影響の検討を行うことなどが考えられる.



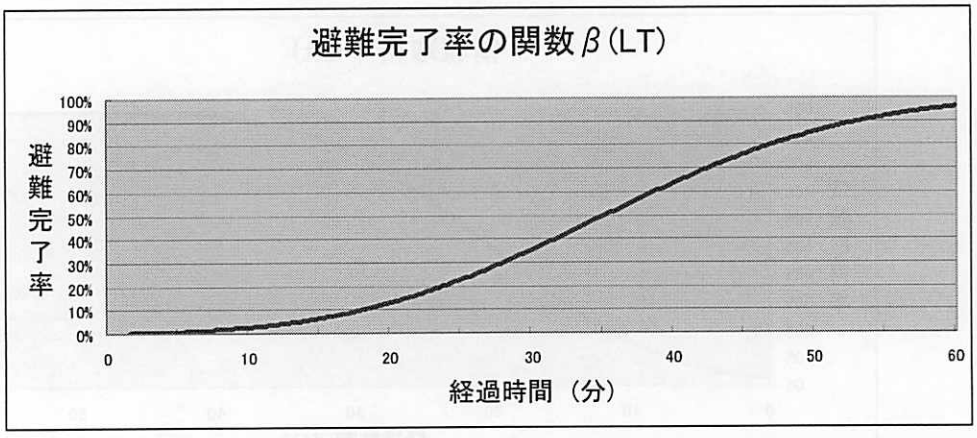
$$\left\{ \begin{array}{ll} G(t)=\Phi\left\{\dfrac{\eta-\lambda}{\zeta}\right\} & \lambda=15 \\ & \zeta=10 \end{array} \right\}$$

図４．１５　情報取得率 G(t)のグラフ



$$\left\{ \begin{array}{ll} G(t)=\Phi\left\{\dfrac{\eta-\lambda}{\zeta}\right\} & \lambda=20 \\ & \zeta=10 \end{array} \right\}$$

図４．１６　避難準備・完了



$$\left(\beta \left(LT \right) = \int_0^{LT} G'(t) E \left(LT - t \right) dt \right)$$

図４．１７　避難完了率の関数β(LT)のグラフ

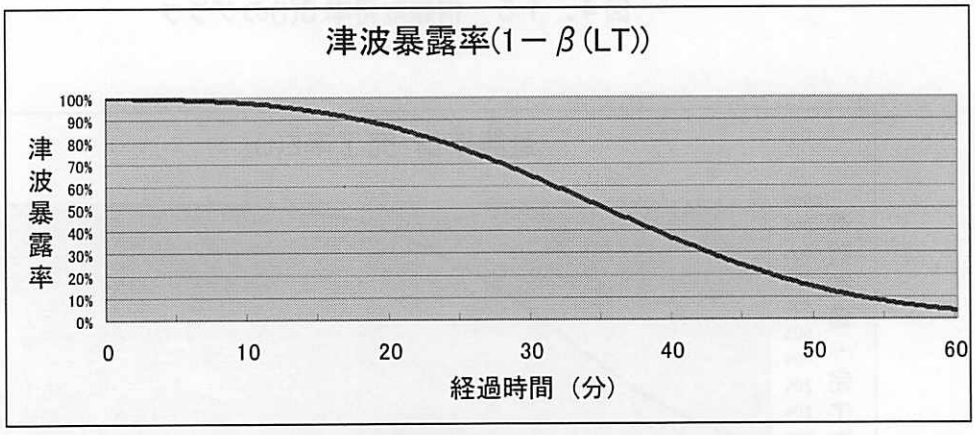


図４．１８　津波暴露率（(1－β(LT)）のグラフ

時間	本研究での仮定
津波探知・警報発信時間	±20cm検知時間＋15min　(1/4波長分)
情報取得時間	累積分布関数G(t)　(λ=15min, ζ=10min)
避難準備・完了時間	累積分布関数E(t)　(λ=15min, ζ=10min)

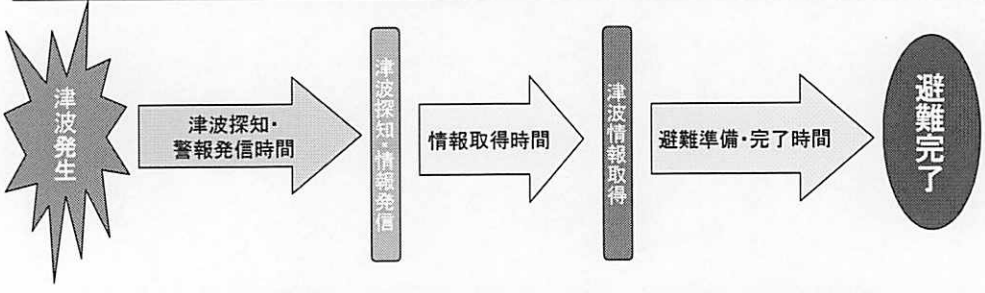


図４．１９　本検討における津波発生から避難完了までの時間の設定

d．多目的ブイの設置位置の決定

本シミュレーションにおいて，ブイ設置可能域は，特に条件設定をしてある場合を除いて，グリッド内人口が 1 万人を越える陸地グリッドに隣接する沿岸グリッドと設定した．

多目的ブイシステムについては，既存の組織が運用主体となることを想定しており，例えば大手リゾートホテルグループ，漁業関係者，地元自治体などが挙げられる．そこで，ブイ設置可能点の選定においては，ブイを維持管理できるような一定規模の組織があると推測できる地域を，グリッド内人口が 1 万人を越える地域と仮定した．例として，スリランカのグリッド内人口 1 万人以上のグリッドを図示した(**図4．20**)．そして，多目的ブイは当該組織が日常的に利用するため，隣接する沿岸グリッドをブイ設置可能点とした．また，上記のような仮定の下で検討を行うとともに，ブイ設置可能域を形成するグリッド内人口の条件を，「千人以上」，「5 千人以上」，「2 万人以上」と変化させた場合の ATo の変化についての検討も行った．

e．シミュレーションの結果を利用した分析の方法の決定

以上の設定をもとにシミュレーションを行い，データを収集する．160 個のシミュレーションに番号をつけ(i=1,2,…160)，各浸水域グリッド及び沿岸グリッドが持つパラメータをまとめると，**表4．5**のようになる．

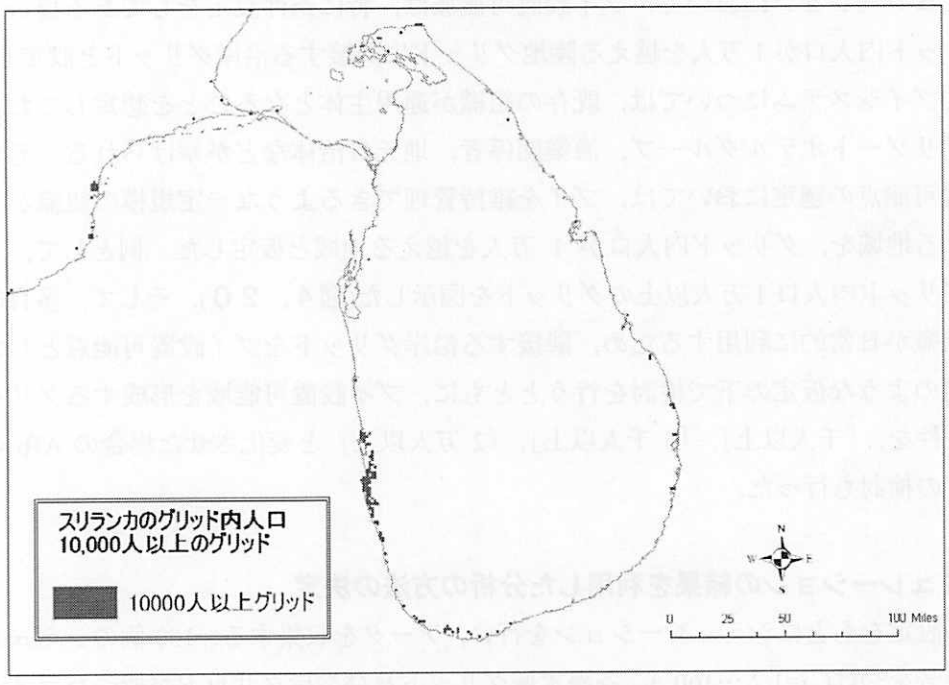


図４．２０　スリランカのグリッド内人口１万人以上のグリッド

表４．５　浸水域グリッド・沿岸グリッドが持つパラメータ

浸水域グリッド	パラメータ
浸水深(m)	η i
津波到達時間(分)	Ati
グリッド内人口(人)	Pop
国番号	c

沿岸グリッド	パラメータ
最大到達波高(m)	hi
津波到達時間(分)	Ati
国番号	c

4．3 津波シミュレーションによる津波警報システムの人的被害軽減効果

1）インド洋沿岸各国の津波に対する人的被害危険度の推計

本検討の目的である多目的ブイを利用した津波警報システムの効果の検討を行うにあたり，まずは発生する可能性のある津波に対するインド洋沿岸地域の人的被害危険度を示す必要がある．以下に 160 通りの地震発生シナリオに基づく津波シミュレーション結果を分析し，人的被害危険度を国別，断層モデルの位置別，Mw 等の関連で示した．

国別の考察について，主に図などで各国を表す際には，**表4．6**の国名コードを用いる．

断層モデルの位置別の考察については，それぞれ個別に見ていく以外に，断層モデルの基準点を北部(no1～no12)，中部(no13～no24)，南部(no25～40)の 3 つのセグメントに分け，分析したものを作成した(**図4．21**)．その際，断層モデルの「基準点」の位置別に分けており，必ずしも各セグメントから発生する津波の初期波形が各セグメント内には収まらないことに留意が必要である．例えば，Mw9，no25 の津波は「南部」セグメントに属するが，その初期波形の大部分は「中部」セグメントにはみ出していることになる．このようなくいちがいは存在するものの，スンダ海溝の北部，中部，南部という発生地域別の大まかな傾向をつかむことはできると考えられるため，3 つのセグメントわけによる分析を行った．

なお，北部・中部と南部は北半球と南半球といった違いがあり，北部と中部・南部には走行が 0° から見て右に傾いているか左に傾いているかといった違いが見られる．

表４．６　国名コード対応表

国名コード	国名	国名コード	国名
IN	インド	ID	インドネシア
BD	バングラディッシュ	LK	スリランカ
MM	ミャンマー	MD	モルディブ
TH	タイ	NC	ニコバル
MY	マレーシア		

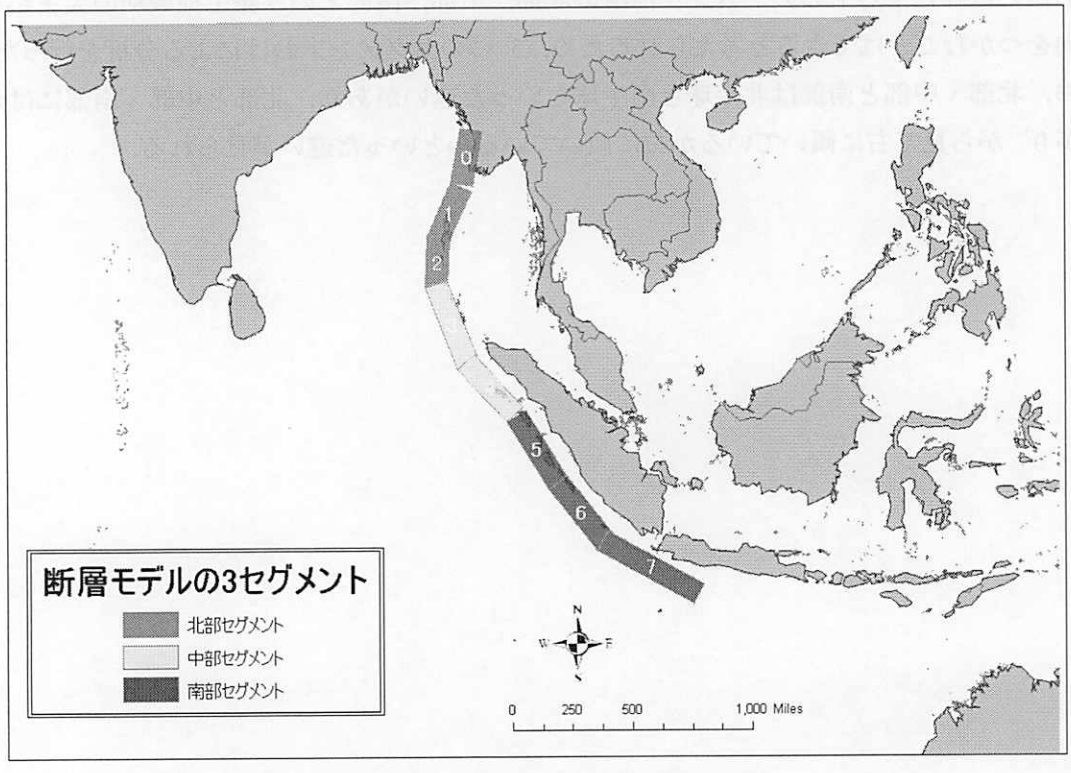


図４．２１　断層モデルの３つのセグメント

a．2004 年スマトラ沖地震津波の人的被害者数との比較

まず，本検討における結果の妥当性の検証のため，2004 年スマトラ沖地震津波(Mw9)に最も近いシミュレーション結果の推定人的被害者数（PED）と，実際の死者・行方不明者の値(約 21 万人)との比較を試みた．比較対象とするシミュレーションの Mw は 9，断層モデルの基準点の位置は大家ら[40](2006)による断層パラメータを参考に，no21(北緯 3.22 度，東経 94.24 度)を選択した(以後，Mw9no21 と呼ぶ)．Mw9no21 の断層パラメータを**表４．７**に，また初期波形を**図４．２２**に，津波発生 24 時間経過後の最大波高分布を**図４．２３**に示す．

Mw9no21 の PED と 2004 年スマトラ沖地震津波の被害者数を比較したものが，**表４．８**である．これを見ると，Mw9no21 の PED の合計値(約 410 万人)が実際の値(約 21 万人)と比べ 20 倍となっており，各国の占める割合を見ても，インド及びスリランカにおける PED の値(インド約 220 万人，スリランカ約 112 万人)が，実際(インド約 1 万人，スリランカ約 3 万人)と比較して非常に大きくなっている．

このような結果が出た大きな理由としては，本検討における断層モデルの滑り量が一様であるのに対し，2004 年スマトラ沖地震津波の際の断層モデルの特徴として，南側の断層のすべり量は大きく，北側は小さかった点が挙げられる．Fujii et al[41] (2007)による 2004 年スマトラ沖地震津波の断層モデルパラメータの**図４．２４**によると，南側の滑り量は 20m を越えるものがあるのに比べて，北側は 5m 以下であることが見て取れる(Mw9no21 の初期波形との比較は**図４．２５**)．Mw9no21 の最大波高分布の**図４．２６**の点線で囲まれた部分からも見て取れるように，インド及びスリランカに大きな被害をもたらすのは，主に北側の断層による津波であり，北側の断層の滑り量が小さくなると，インドやスリランカの被害者数も減少すると考えられる．

参考までに本シミュレーションにおける北側断層モデルの開始位置と考えられる no12(北緯 8.90 度，東経 91.56 度)を基準点として，滑り量 D が 5m より小さい Mw8.3(D=4.59m)，Mw=8.0(D=3.51m)の際のインドとスリランカの PED を**表４．９**に挙げてみる．単純に比較することはできないものの，北側の滑り量が減少することで，実際の値とかなり整合性が高い値となる．これは本検討における PED 値の一定レベルの妥当性を示すことになると考えられる．

表４．７　Mw9no21 の断層パラメータ

断層	経度(°)	緯度(°)	断層長さ(km)	断層幅(km)	滑り量(m)	走行(°)	傾斜角(°)	滑り角(°)	断層深さ(km)
1	3.22	94.24	120.00	150.00	8.59	317.00	15	90	7
2	4.01	93.51	582.56	150.00	8.59	337.10	15	90	7
3	8.90	91.56	327.35	150.00	8.59	1.20	15	90	7

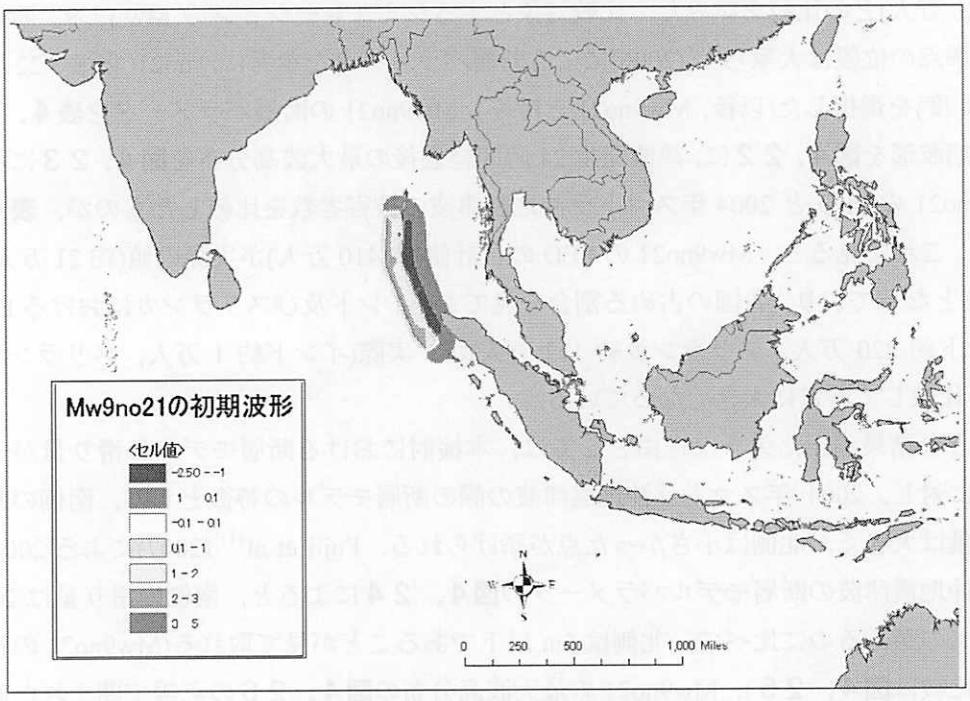


図４．２２　Mw9no21 の初期波形

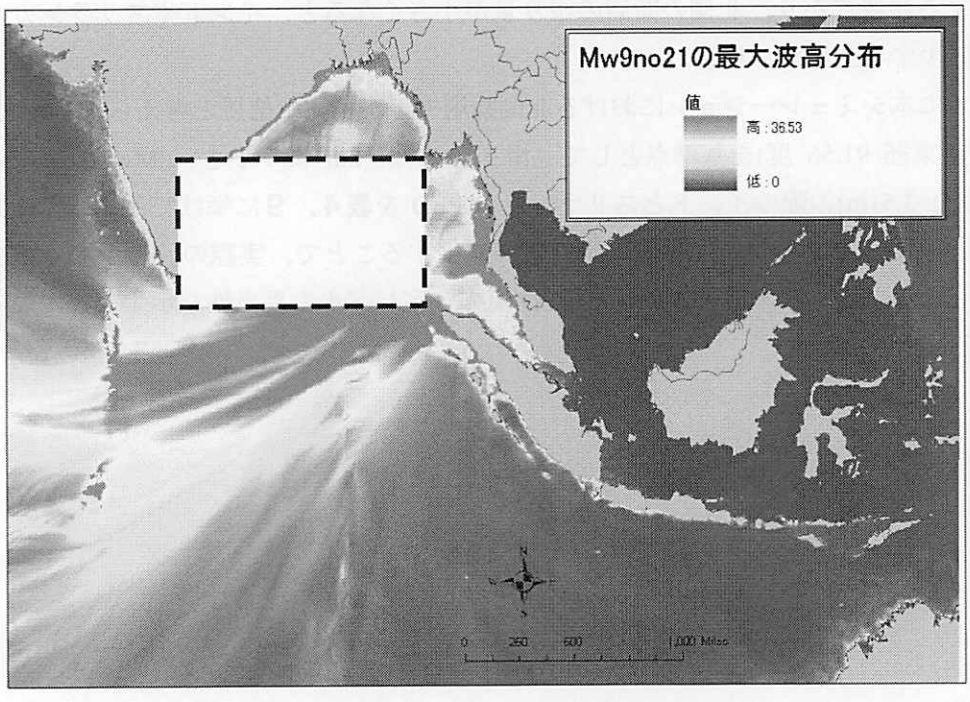


図４．２３　Mw9no21 の最大波高分布

表４．８　2004 年スマトラ沖地震津波の死者・行方不明者数と Mw9no21 の PED の比較

IN	BD	MM	TH	MY	ID	LK	MD	NC	計
8,850	2	64	5,318	68	166,320	30,922	82	1,899	213,525
2,208,769	137,481	59,975	61,756	54,638	343,060	1,120,614	15,662	97,868	4,099,823

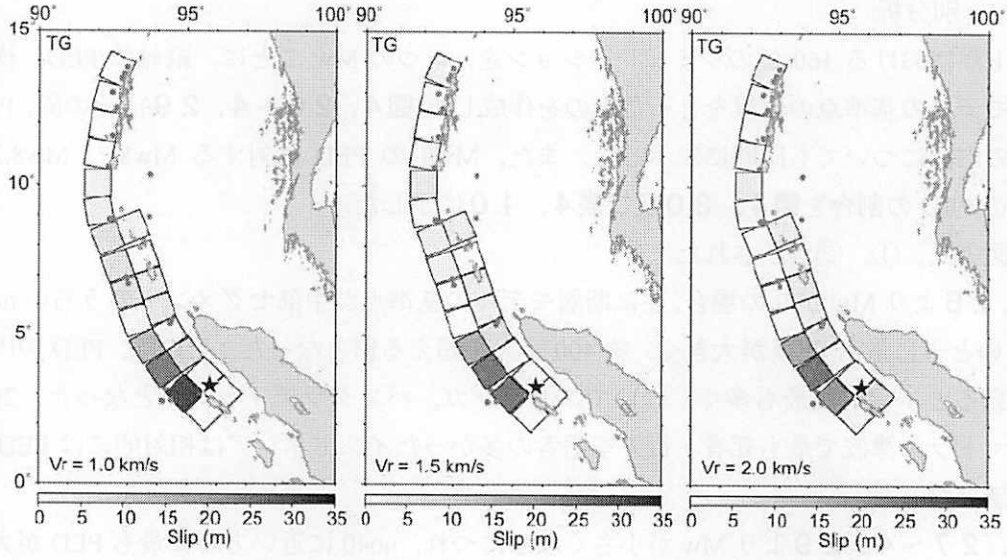


図４.24　Fujii et al (2007)による 2004 年スマトラ沖地震津波の断層モデルパラメータ

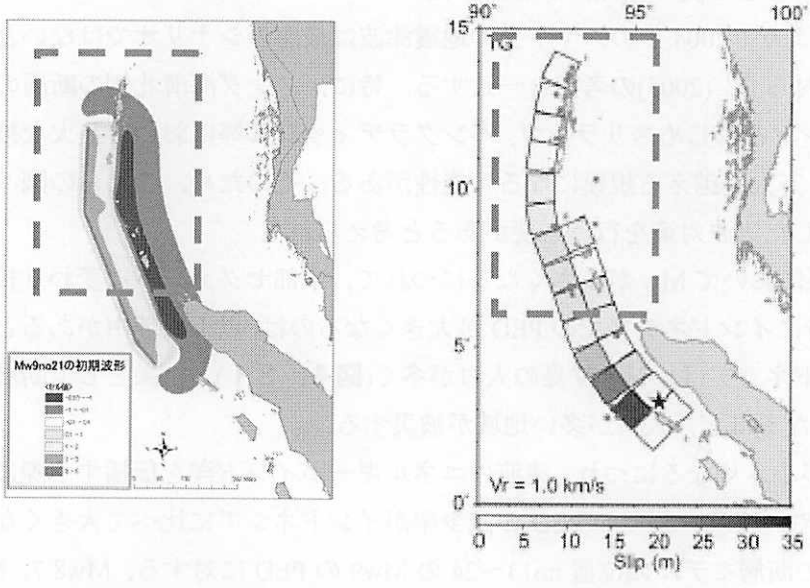


図４．２５　図４．２２と図４．２４の比較

表４．９　北部断層の滑り量を小さくした際のインドとスリランカの PED

津波	滑り量(m)	インドの被害者数	スリランカの被害者数
Mw83no12	4.59	58,012	19,757
Mw80no12	3.51	12,874	10,297
2004スマトラ	5m未満	8,850	30,922

b．断層モデルの位置・津波の規模別の推定人的被害者数(PED)

インド洋における160個のシミュレーションの結果得られたPEDを，＜Mw別＞及び＜国別＞に分けて示すことにより，分析・考察を行った．

（1）Mw別分析

インド洋における160個のシミュレーションを，4つのMwごとに，縦軸にPED，横軸に断層モデルの基準点の位置をとったものを作成した(**図4．26～4．29**)．その際，PEDの各国の内訳についても同時に表示した．また，Mw9のPEDに対するMw8.7，Mw8.3，Mw8.0のPEDの割合を**図4．30**及び**表4．10**に示した．

この図より，①，②が示された．

①**図4．26**よりMwが9の場合，主に断層モデルの基準点が中部セグメントのうちのno13～no21のときに最もPEDが大きく，約400万人を超える値となった．その際，PEDの国別内訳を見るとインドが最も多く，ついでスリランカ，バングラディッシュとなった．2004年のスマトラ沖津波で最も死者・行方不明者の多かったインドネシアは相対的にはPEDは小さい値となった．

②**図4．27～4．29**よりMwが小さくなるにつれ，no40に近い方時に最もPEDが大きくなった．その際，PEDの国別内訳を見るとインドネシアがほとんどを占めていた．

その結果考察として次のi）ii）が分かった．

i）①の結果より，2004年のスマトラ沖地震津波は最悪のシナリオではないといえる．この結果は，越村ら[42] (2005)の考察と一致する．特に，スンダ海溝北側の断層の滑り量が大きい場合，インドをはじめスリランカ，バングラディッシュ等において甚大な被害を及ぼし，合計で400万人を越える規模になる可能性がある．そのため，これらの国々は最悪のシナリオを想定した津波対策を行う必要があると考えられる．

ii）②の結果においてMwが小さくなるにつれて，中部セグメントに変わり相対的に南部セグメント，特にインドネシアでのPEDが大きくなるのは，以下の理由があると考えられる．

（ア）インドネシアは，ジャワ島の人口が多く(**図4．31**)，結果として断層モデルの位置noが大きくなるほど，人口が多い地域が被災する．

（イ）Mwが小さくなるにつれ，津波のエネルギーがインド洋を伝播する際に分散するために，インドやスリランカでのPEDの減少率がインドネシアに比べて大きくなる．参考として，インドの断層モデルの位置no13～24のMw9のPEDに対する，Mw8.7，Mw8.3，Mw8.0のPEDの割合を，インドネシアのno29～40のそれと比較してみた結果，**表4．11**及び**図4．32**のようになり，インドのほうがMwが減少した際のPEDの減少率が大きいことが分かる．

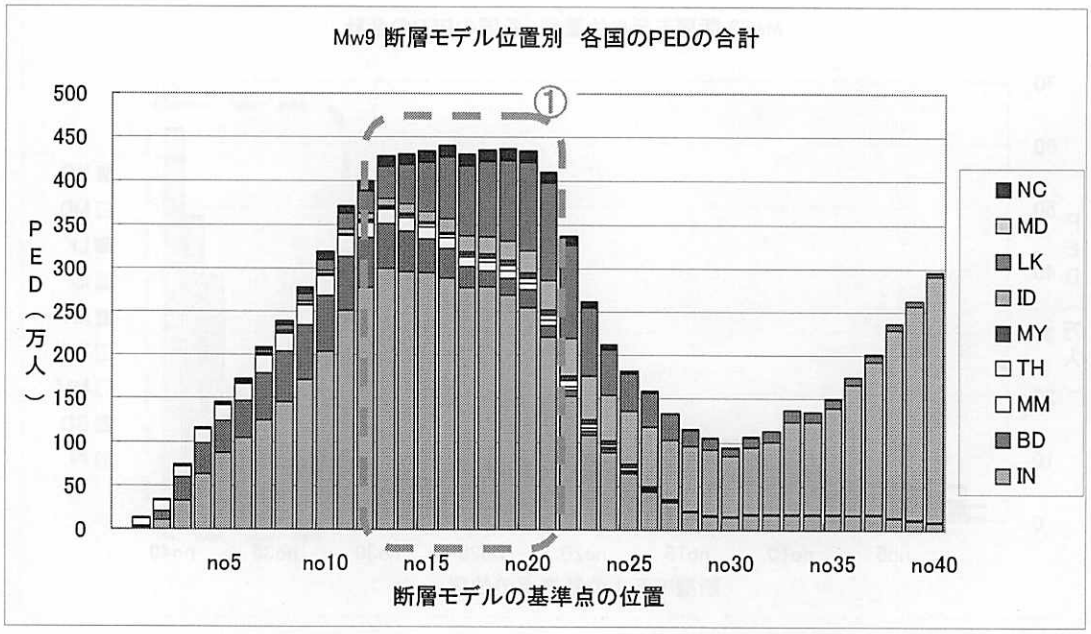


図４．２６　Mw9 の断層モデルの位置別各国の PED の合計

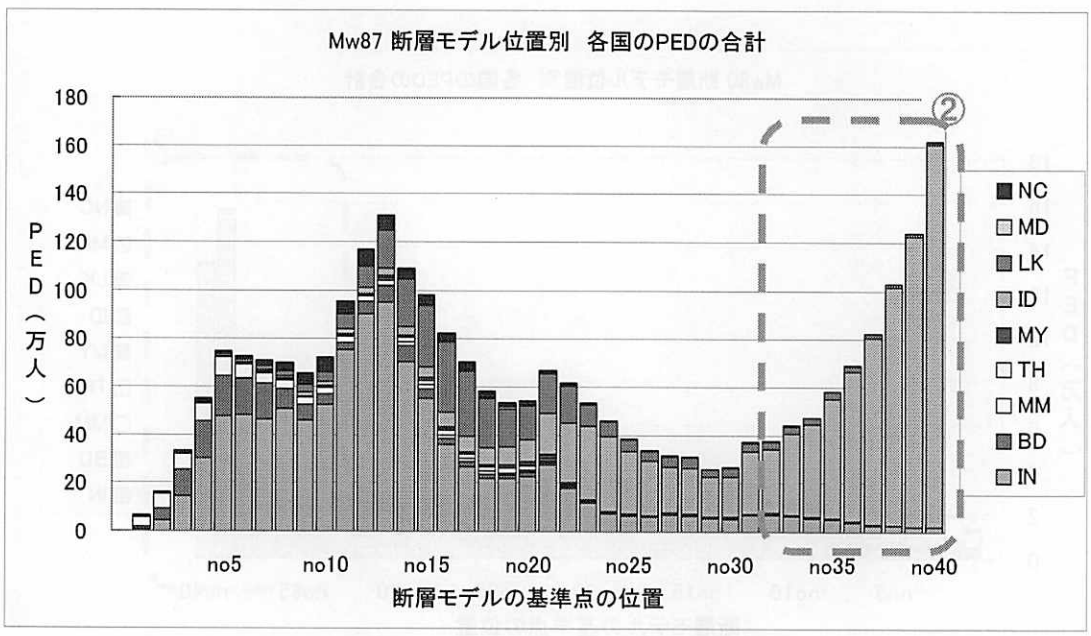


図４．２７　Mw87 の断層モデルの位置別各国の PED の合計

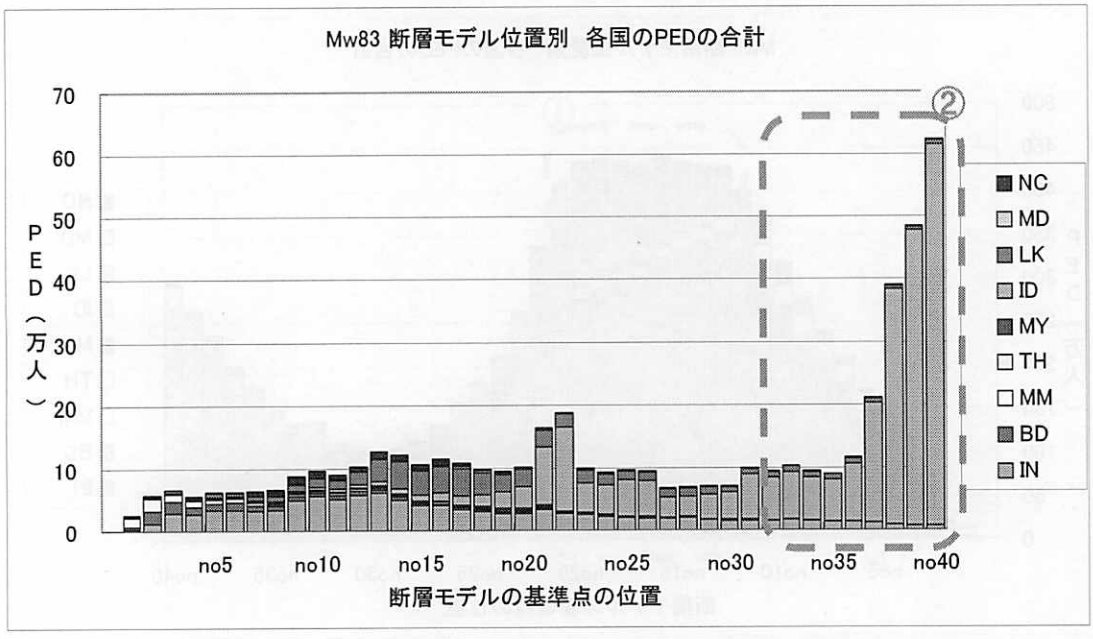


図４．２８　Mw83 の断層モデルの位置別各国の PED の合計

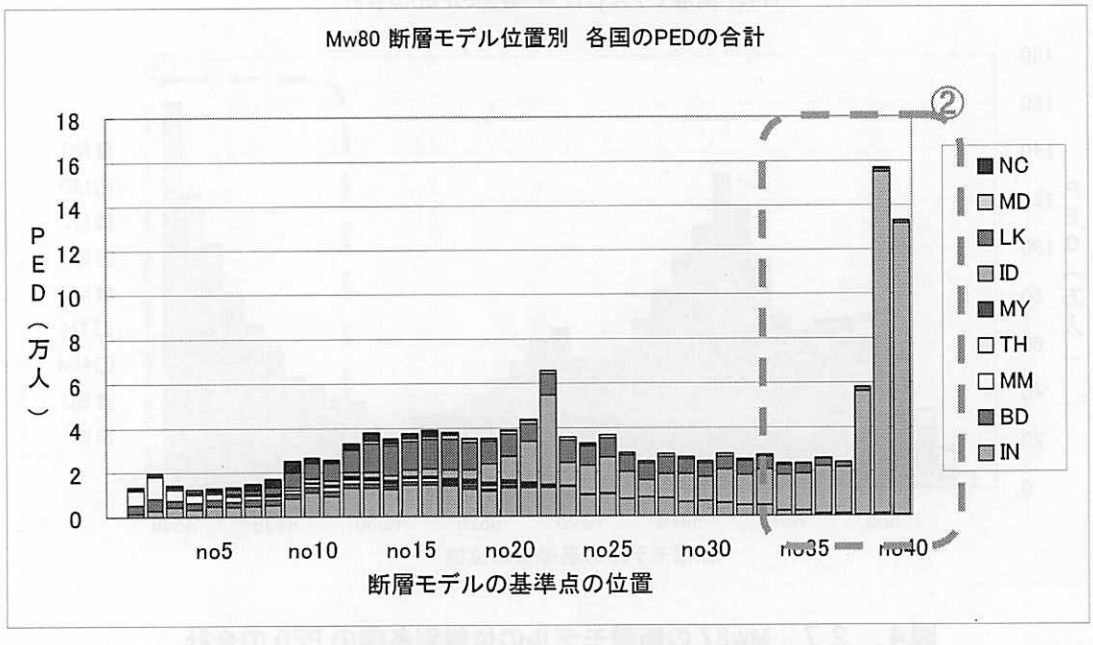


図４．２９　Mw80 の断層モデルの位置別各国の PED の合計

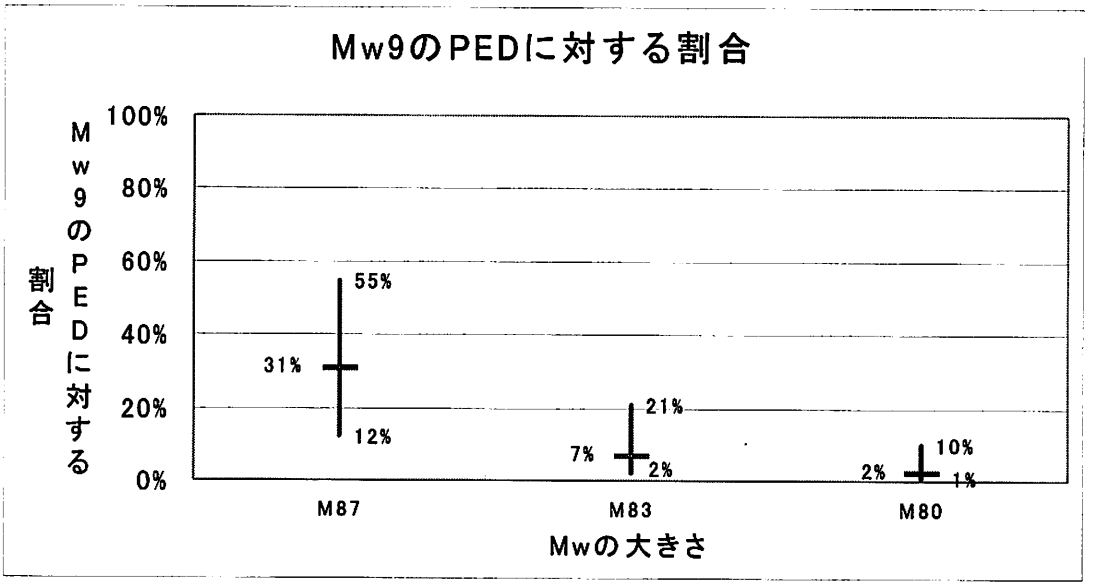


図4．30　Mw9 の PED に対する割合

表4．10　Mw9 の PED に対する割合

	M87/M9	M83/M9	M80/M9
最大値	55%	21%	10%
最小値	12%	2%	1%
平均値	31%	7%	2%

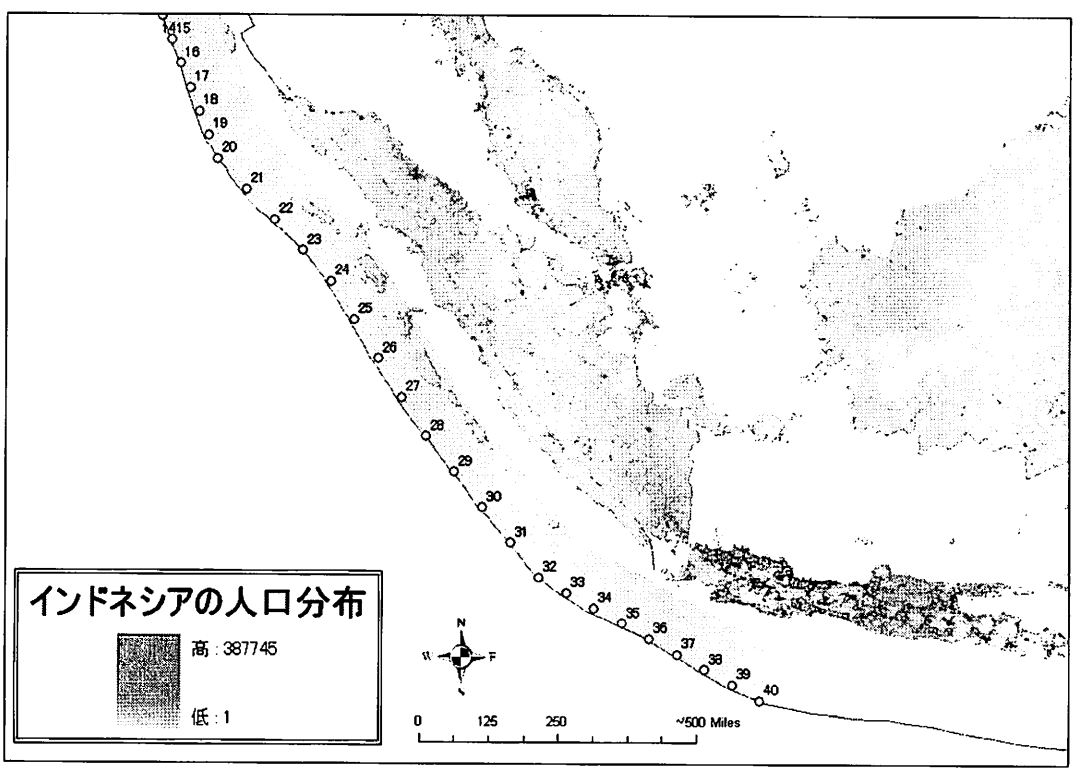


図4．31　インドネシアの人口分布

表４．１１　インド(左)とインドネシア(右)の Mw 減少時の PED の減少率の比較

【インド】

IN no13～24			
no	Mw87/Mw9	Mw83/Mw9	Mw80/Mw9
13	32%	2%	0%
14	24%	2%	0%
15	19%	1%	0%
16	12%	1%	0%
17	10%	1%	0%
18	8%	1%	0%
19	8%	1%	0%
20	9%	1%	1%
21	12%	2%	1%
22	12%	2%	1%
23	11%	2%	1%
24	9%	2%	1%
MAX	32%	2%	1%
min	8%	1%	0%
average	14%	2%	1%

【インドネシア】

ID no29～40			
no	Mw87/Mw9	Mw83/Mw9	Mw80/Mw9
29	22%	5%	2%
30	24%	6%	2%
31	34%	9%	2%
32	32%	8%	2%
33	32%	7%	2%
34	36%	7%	2%
35	41%	6%	1%
36	42%	6%	1%
37	44%	11%	1%
38	46%	17%	3%
39	49%	19%	6%
40	56%	22%	5%
MAX	56%	22%	6%
min	22%	5%	1%
average	38%	10%	2%

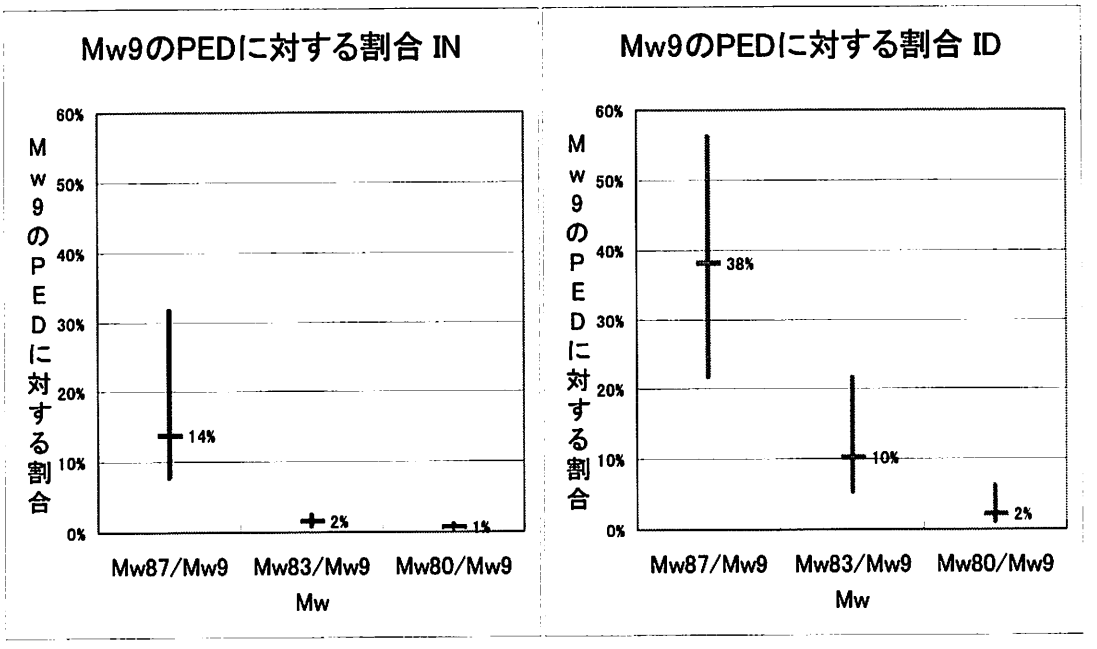


図４．３２　インド(左)とインドネシア(右)の Mw 減少時の PED の減少率の比較

b．国別分析

次に，インド洋全体，及び各国ごとに

①縦軸に PED，横軸に断層モデルの基準点の位置をとったもの(**図4．33～4．41**)
②Mw9 の PED に対する Mw8.7，Mw8.3，Mw8.0 の PED の割合（**図4．42**）

を作成した．これにより，各国ごとに以下のことが示された．

③危険度が大きい断層の位置
④津波の規模の変化による(Mw9～Mw8)平均的な PED の変化の割合

例えば，①より，インドであれば中部セグメントでの地震津波が危険であり，インドネシアでは南部に行くほど危険であるといったことが読み取れる．また②より，各国とも津波の規模が Mw9 から Mw8.7 になると被害者の規模は 3～4 割に，Mw8.3 になると 1 割を切るところが多く，Mw8.0 では 1～2%ほどになることが読み取れる．他国に比べてモルディブが津波の規模の変化による PED の減少率が低いのは，全体的に陸上の標高が低く国土も小さいためではないかと考えられる．

インド

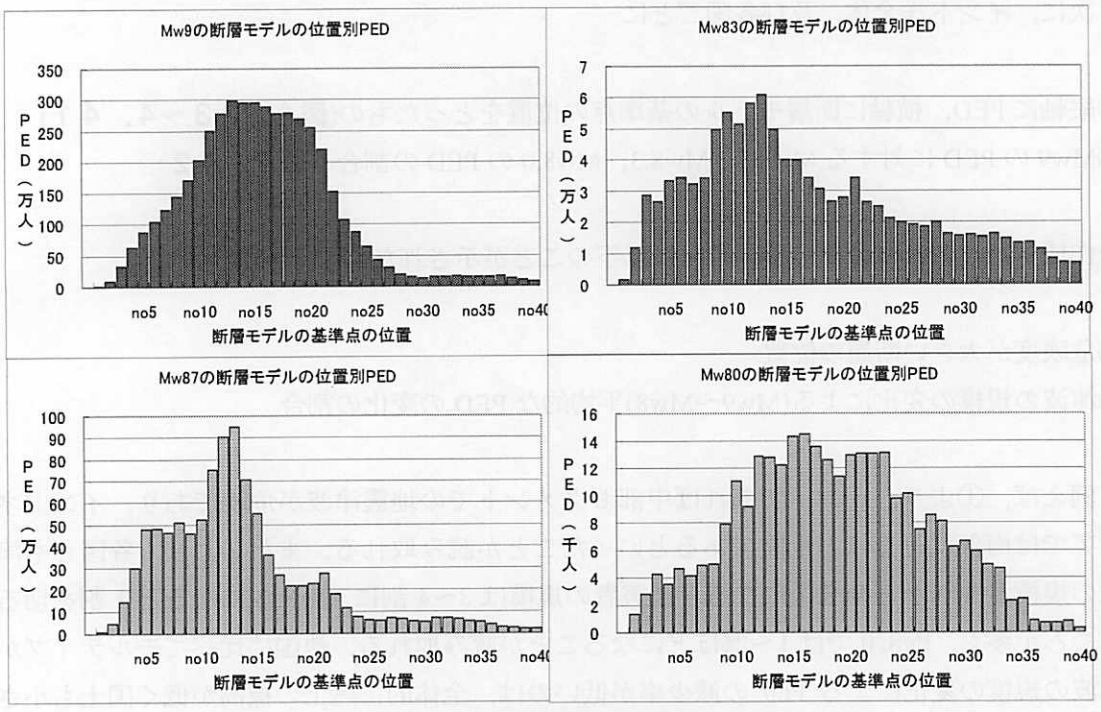


図４．３３　Mw 別　断層位置別の PED インド

バングラディッシュ

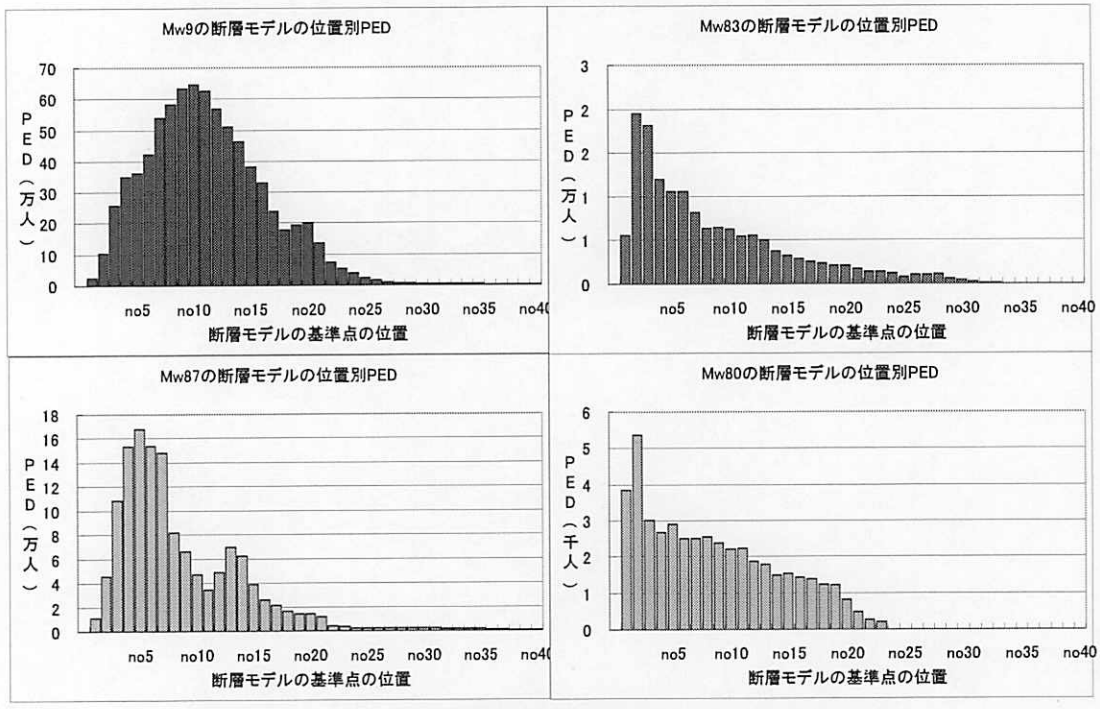


図４．３４　Mw 別　断層位置別の PED バングラディッシュ

ミャンマー

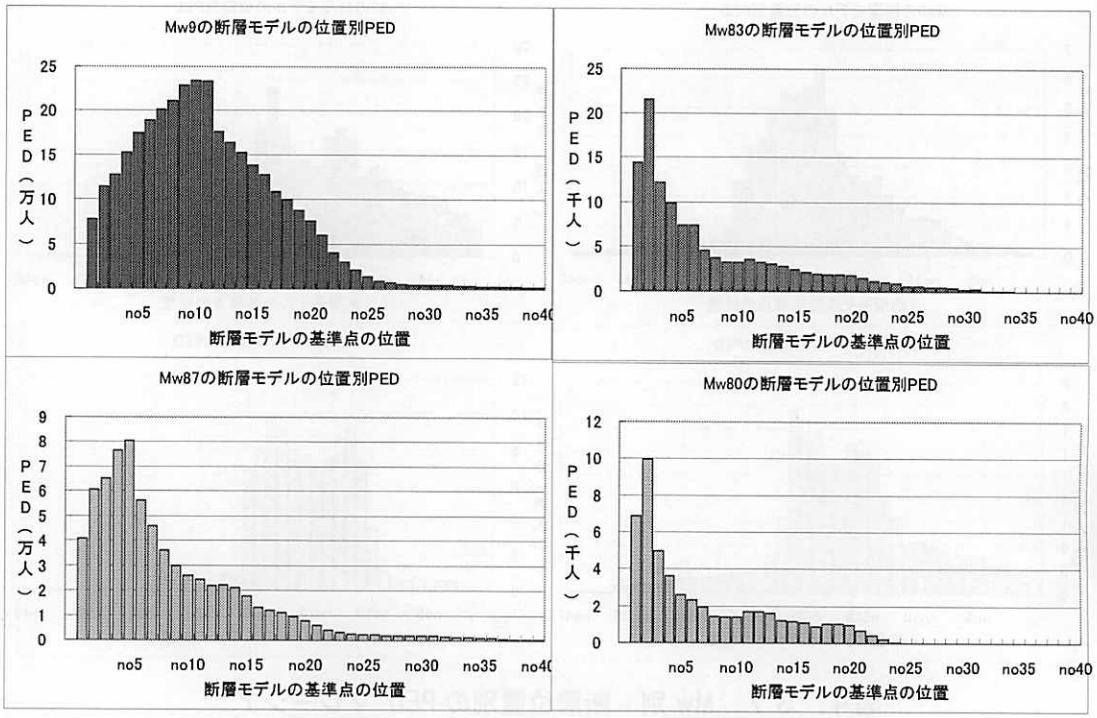


図４．３５　Mw 別　断層位置別の PED ミャンマー

タイ

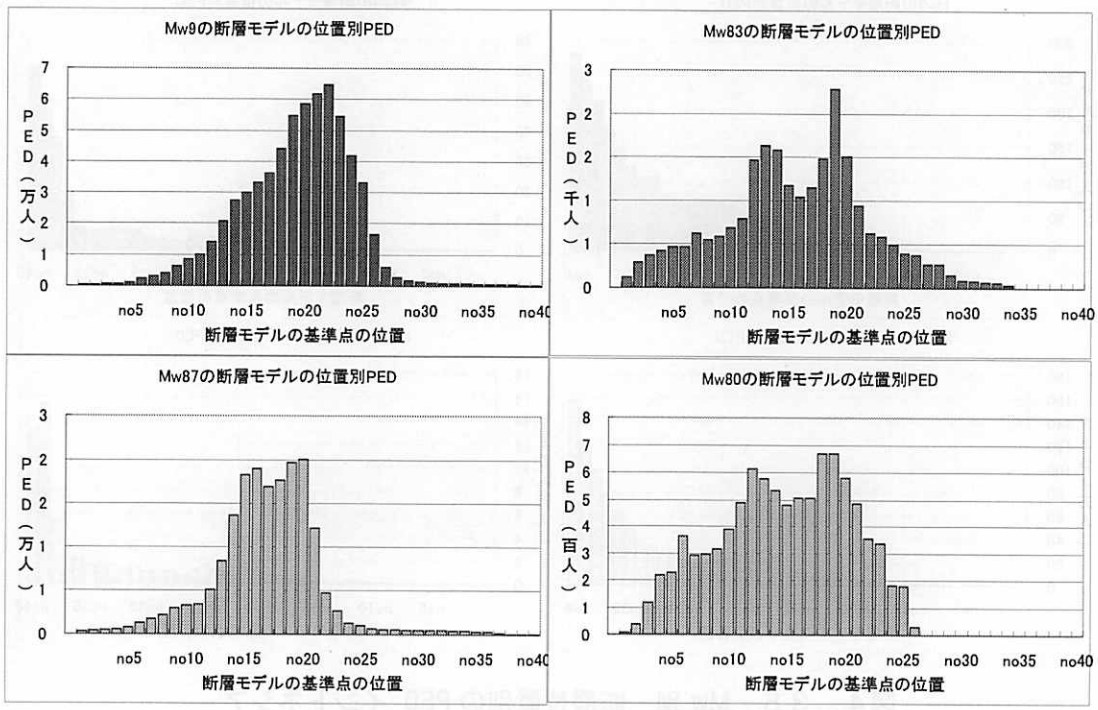


図４．３６　Mw 別　断層位置別の PED タイ

マレーシア

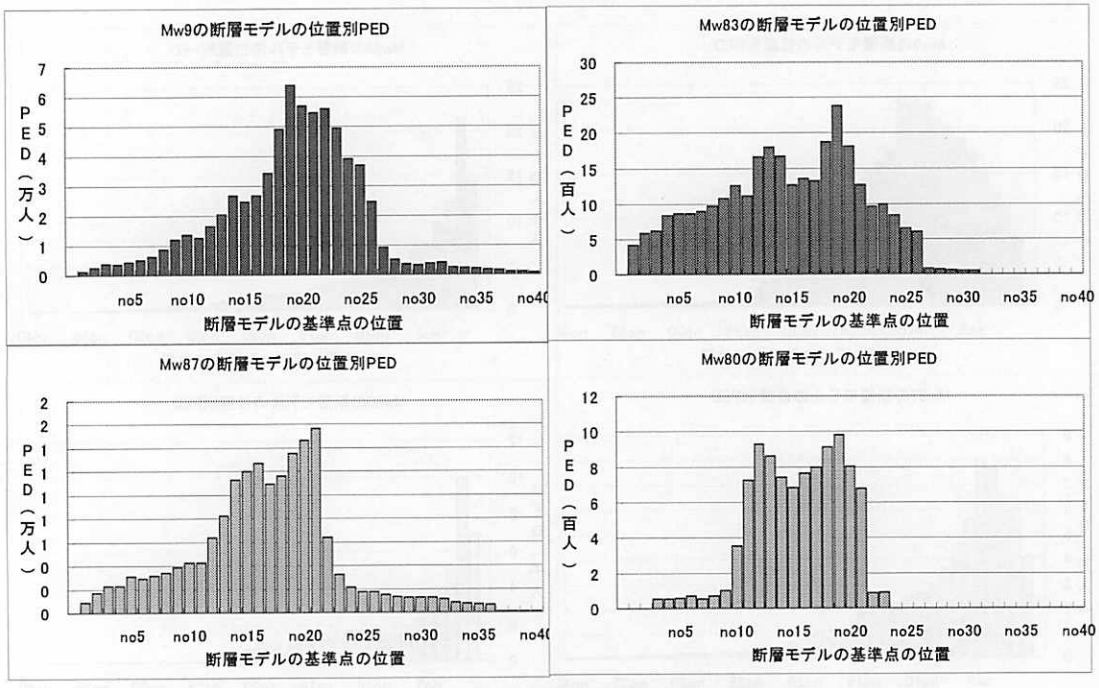


図４．３７　Mw 別　断層位置別の PED マレーシア

インドネシア

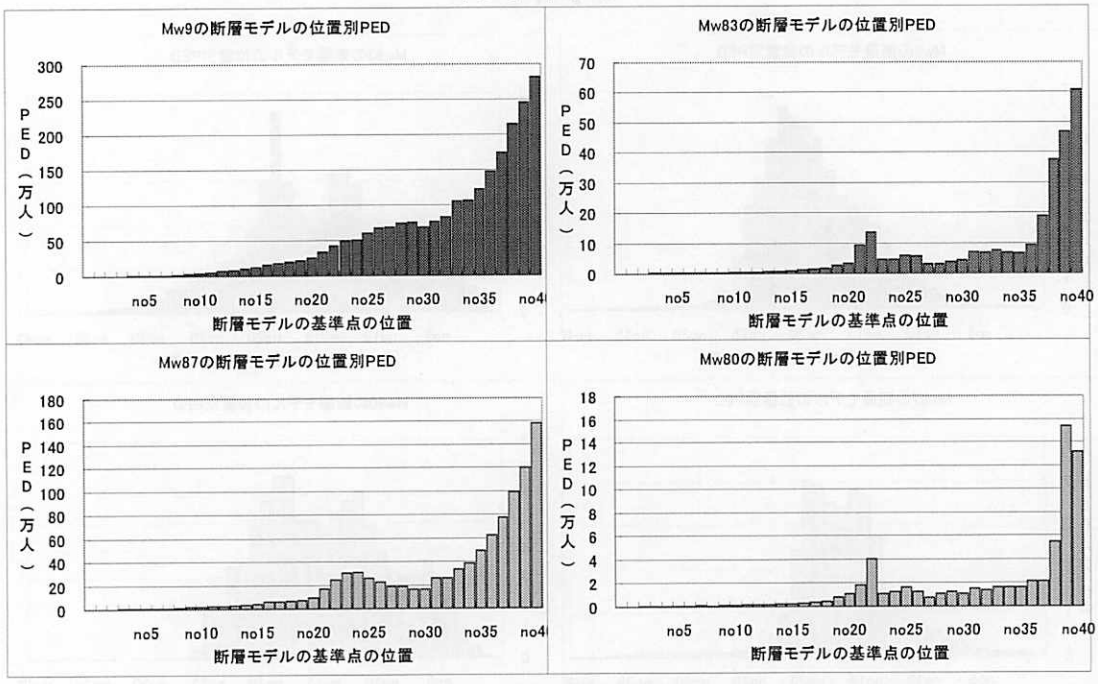


図４．３８　Mw 別　断層位置別の PED インドネシア

スリランカ

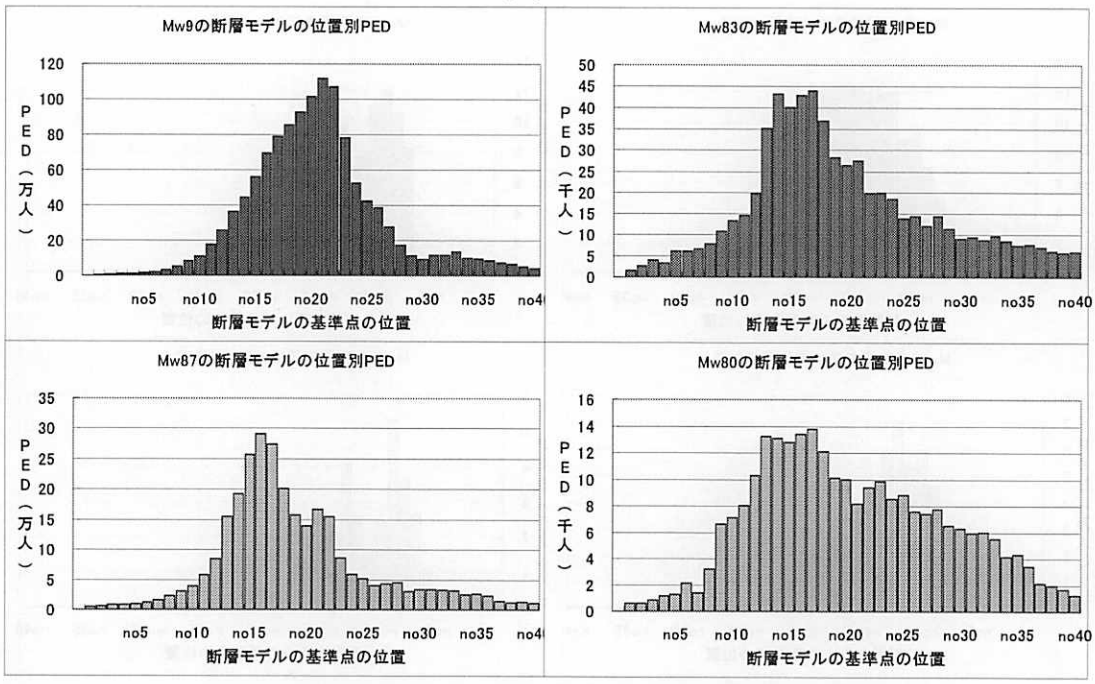


図４．３９　Mw 別　断層位置別の PED スリランカ

モルディブ

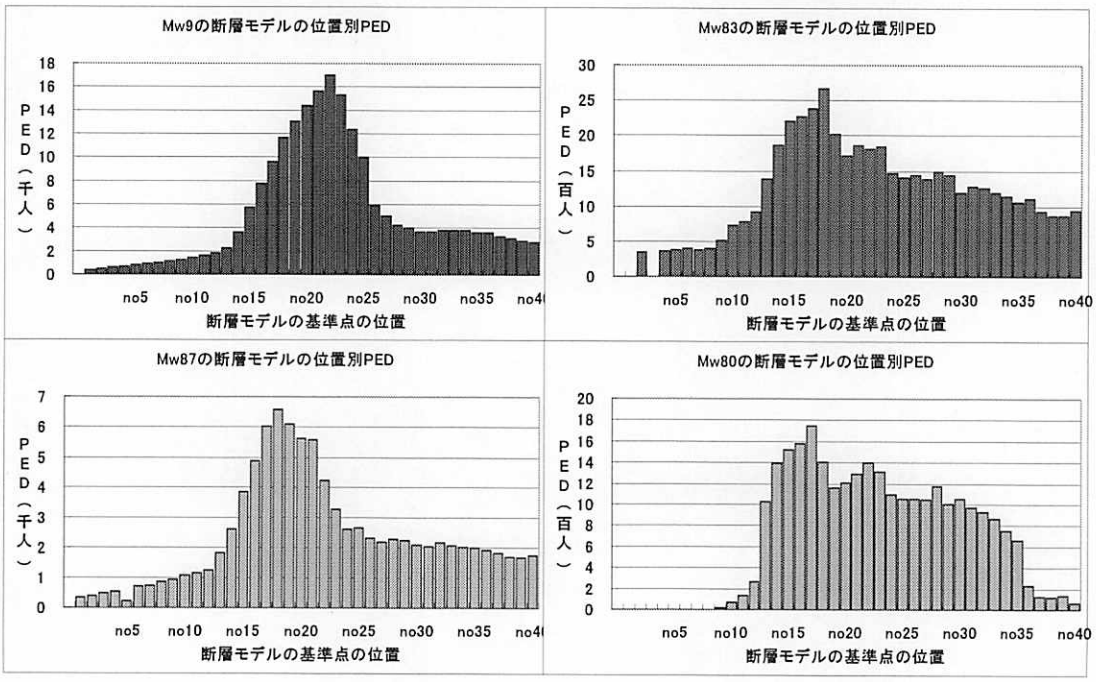


図４．４０　Mw 別　断層位置別の PED モルディブ

ニコバル

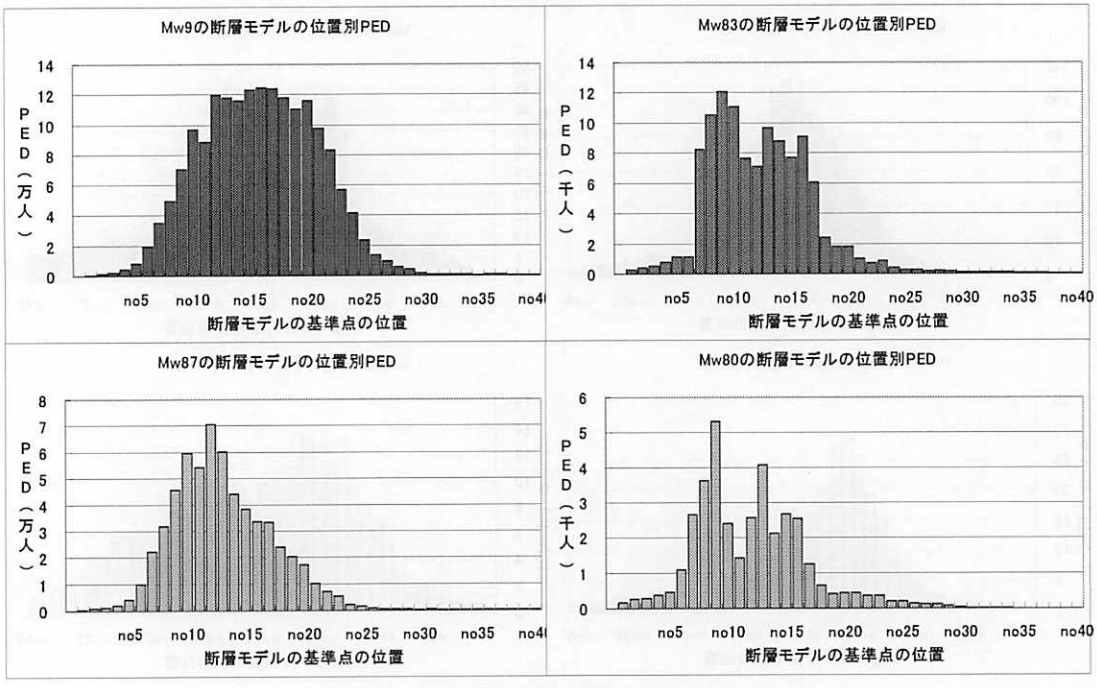


図４．４１　Mw 別　断層位置別の PED ニコバル

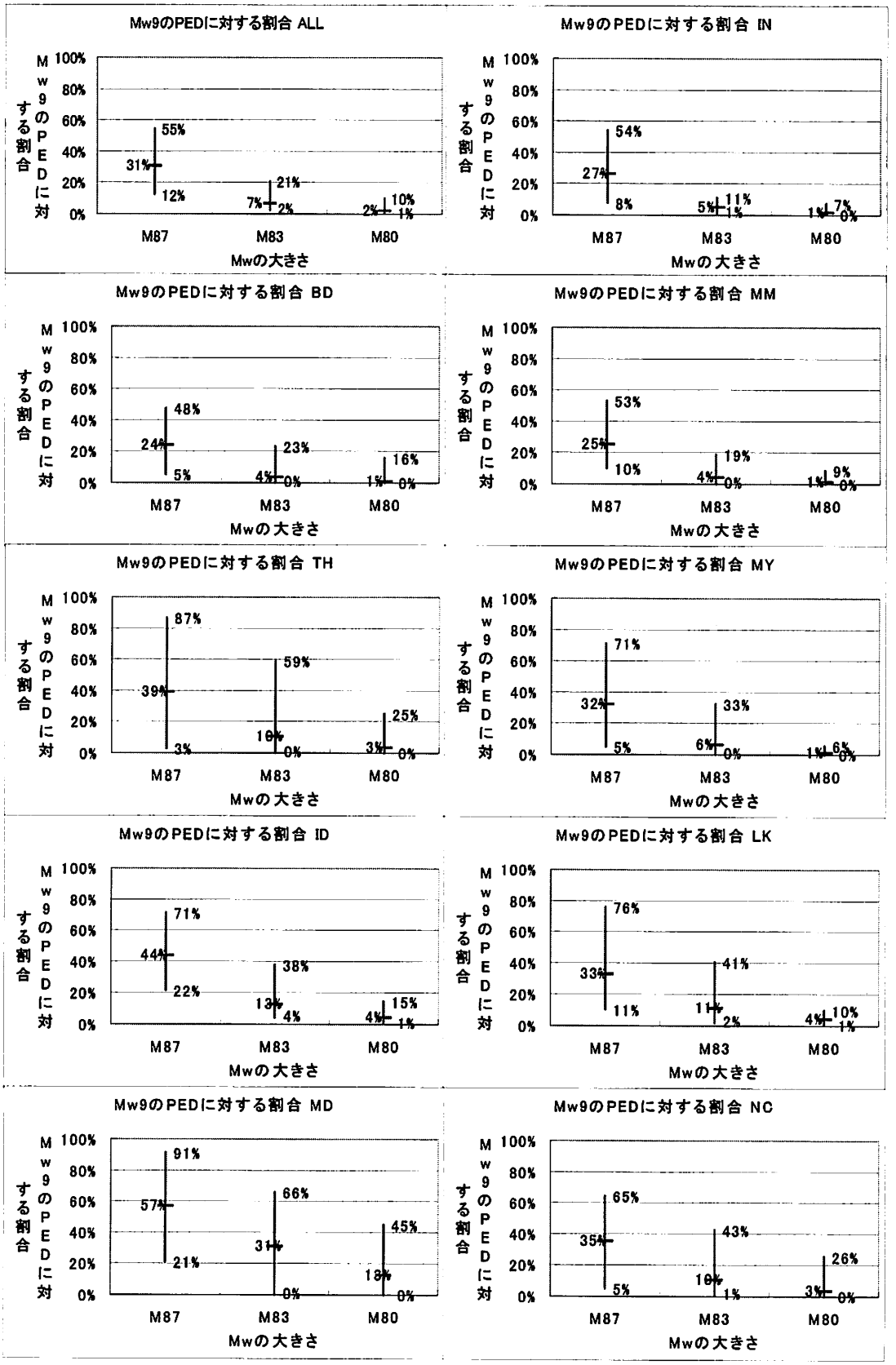


図４．４２　津波の規模の変化による(Mw9～Mw8)平均的なPEDの変化の割合

c．推定人的被害者数(PED)の期待値，及び期待値/人口

PED の期待値と期待値/人口を定義し，それらを分析に用いることで考察を行った．

本検討で対象としている津波は，その発生位置，規模の大きさによって発生頻度は一様でないと考えられる．そこで 160 個のシミュレーションについて，Mw の規模による発生頻度の経験則を利用した重み付けを行い，各地域の PED の期待値，及び期待値/人口を推計することで，以下のような津波に対する危険度を表した．

①期待値：津波に対して潜在的に被害者数が多い地域を示すことができる．
②期待値/人口：人口一人当たりの PED の期待値が多い地域，つまり津波に対して脆弱な地域を示すことができる．

①，②の定義式は，以下の通りである(①は式(4. 10)，②は式(4. 11))．また，断層モデルの北部，中部，南部の各セグメントごとの期待値，期待値/人口についても同様の手法で算出することが可能であると考えられる．

$$①\sum_{i=1}^{160} K_i \times PEDi \qquad \cdots(4.10)$$

$$②\sum_{i=1}^{160}\left(K_i \times \frac{PED_i}{Pop_i}\right)=\sum_{i=1}^{160}\left(K_i \times \frac{\alpha(\eta_i)PEP_i}{Pop_i}\right)=\sum_{i=1}^{160}(K_i \times \alpha(\eta_i)) \qquad \cdots(4.11)$$

Ki: Mw の規模による発生頻度の差による重み付け（ΣKi=1 を満たす），ここで PEPi は，避難行動がまったく行われなかった場合を想定しているため，PEPi=Pop となる．）

①により，各国が重点的に津波対策(事前及び事後)を行う必要性がある地域を示すことができる．それらの地域は，ミクロレベルの津波防災対策の検討を行うなどすることで津波防災力を確認し，不足している場合は対策を立てて津波防災力を高めておく必要がある．
また②により，津波に対して潜在的に脆弱な地域を示すことができる．それにより例えば，今後各国が沿岸地域の都市開発を計画する際により津波の脆弱性の低い地域の開発を選択できるようになったり，津波の脆弱性が高い地域であることを事前に考慮し，対策を施した上での都市開発計画を作成するといったことが可能となると考えられる．ここで，重み付け Ki を設定する必要があるが，インド洋沿岸のスンダ海溝沿いの地震の発生確率について定量的に示したものは見当たらない．
定性的には，SIEH(2007)がスンダ海溝を北緯部分と南緯部分の二つの地域に分け，歴史津波

と現在の地盤の移動量から，今後の津波の発生の危険度について述べている．その中でSIEHは，北緯部分については，2004年のスマトラ沖地震津波は数百年オーダーで，2005年のスマトラ沖地震津波についても今後100年以上は発生しないだろうが，ニアス島付近でのやや小規模の地震津波が今後100年で起こる潜在的危険性があるとしている．南緯部分については，2世紀周期で発生しているM8.7以上の地震津波が，スマトラ島南部付近でいつ発生してもおかしくないとしている．またSIEHは，今後スンダ海溝沿いの地域別津波発生確率を定量的に示すことを試みるとしている．現段階では定量的に示されたものがない点，スマトラ島付近以外の地震津波についての言及がない点などの懸念があるものの，本研究のKi設定において参考として取り入れ，期待値と期待値/人口をスンダ海溝の北部，中部，南部セグメントの3つに分けてそれぞれ算出することとした．

このようにKiの設定については定量的な資料が無いため，本検討においては，暫定的にグーテンベルク・リヒターの式[43] (式4.12)のb=1により得られる発生頻度の差を重み付けに利用すると仮定し，「次にMw8.0以上の津波が発生した際の期待値及び期待値/人口」について，インド洋全体，及び北部，中部，南部の3セグメント別に示した．これにより，仮定による誤差を含むもののインド洋沿岸地域の危険度を期待値と期待値/人口により表現することが可能となった．

$$\log n = a + bM \qquad (4.12)$$

(本検討では，b=1を仮定する[44])

これらの仮定をもとに，インド洋全体，及び北部，中部，南部の各セグメントについて，各グリッド毎の期待値と期待値/人口を図示した(**図4．43～4．58**)．

また，各国ごとに各セグメント別で集計した期待値についても図示した(**図4．59～4．74**)．この図より，各国にとって期待値のセグメントは，危険度の高い津波の発生地域であるといえる．

今後の研究の課題として，より精度の高いスンダ海溝沿いの津波の定量的な発生確率をKiとして，期待値及び期待値/人口の信頼性の向上を図ることが挙げられる．

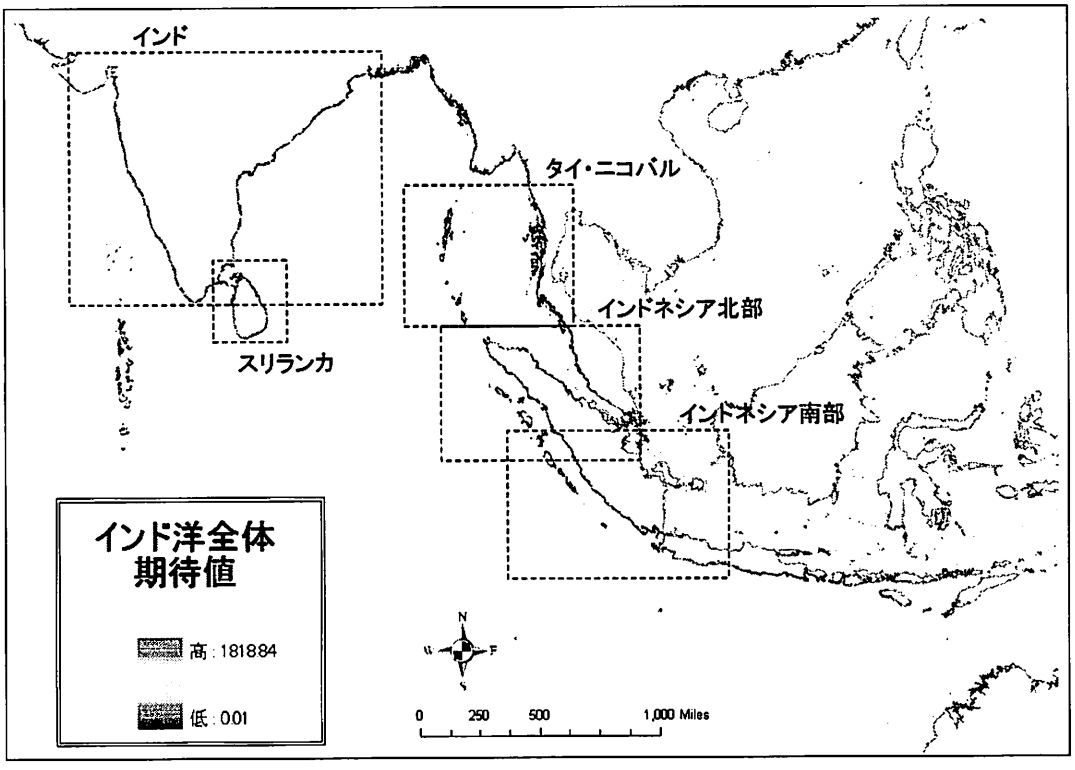


図４．４３　期待値　インド洋全体

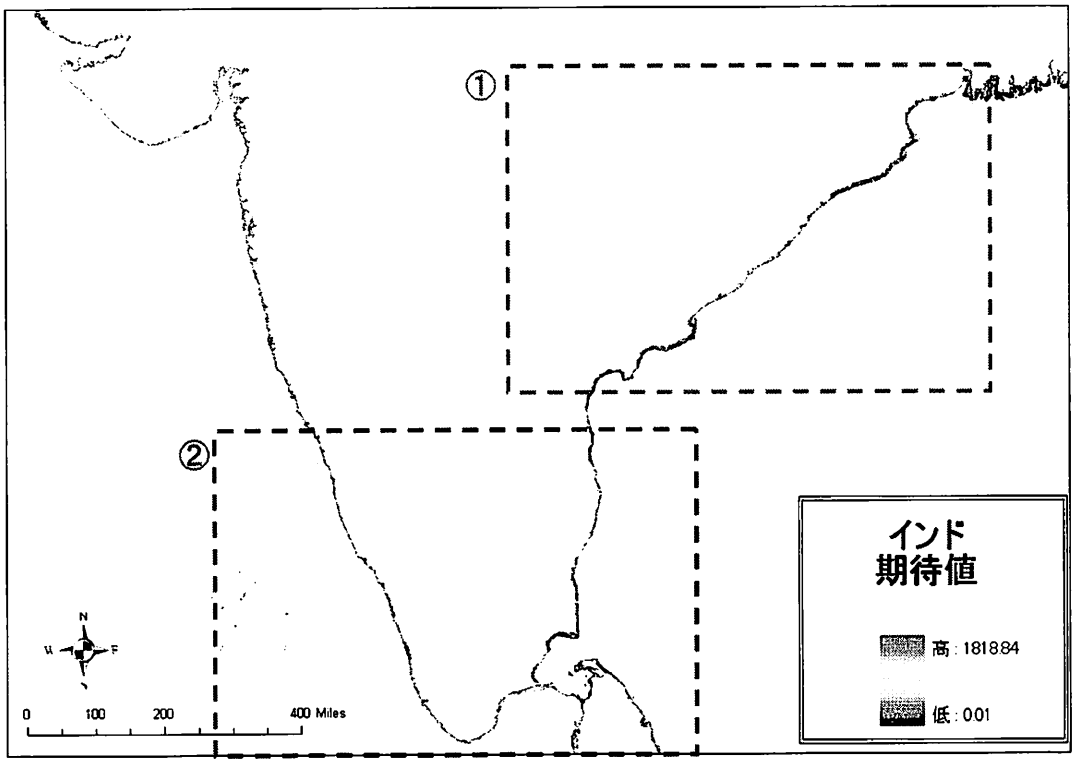


図４．４４　期待値　インド

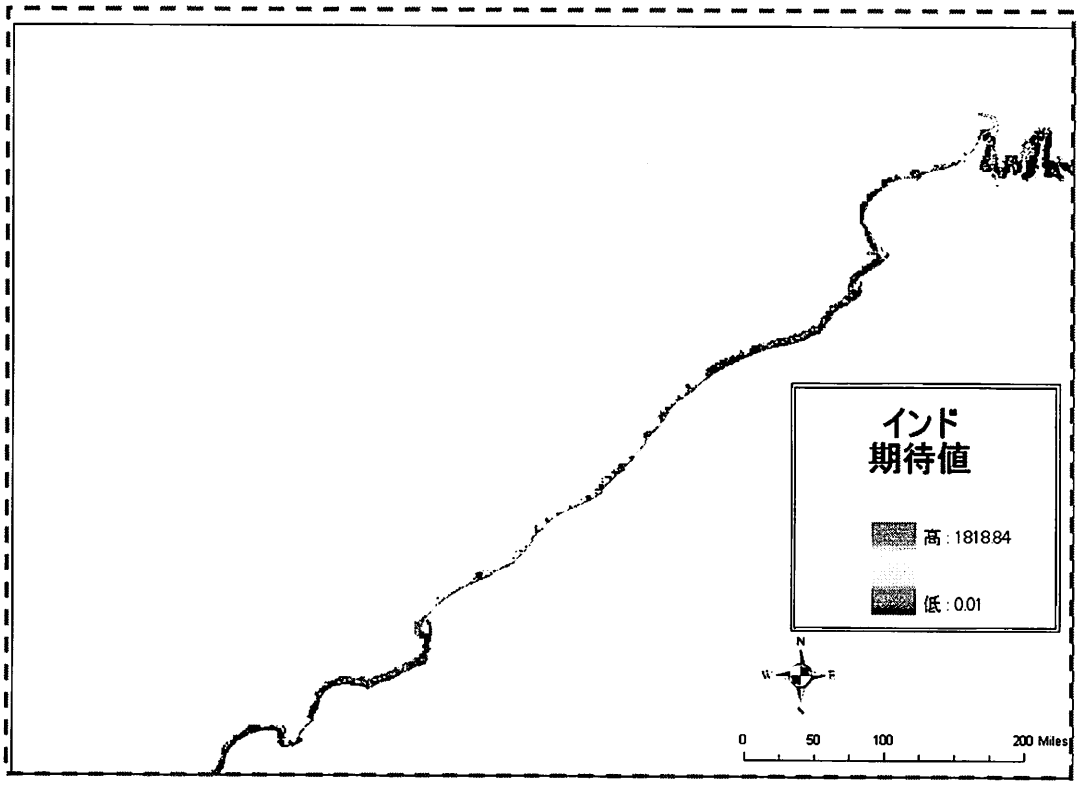


図4．45　期待値　インド①

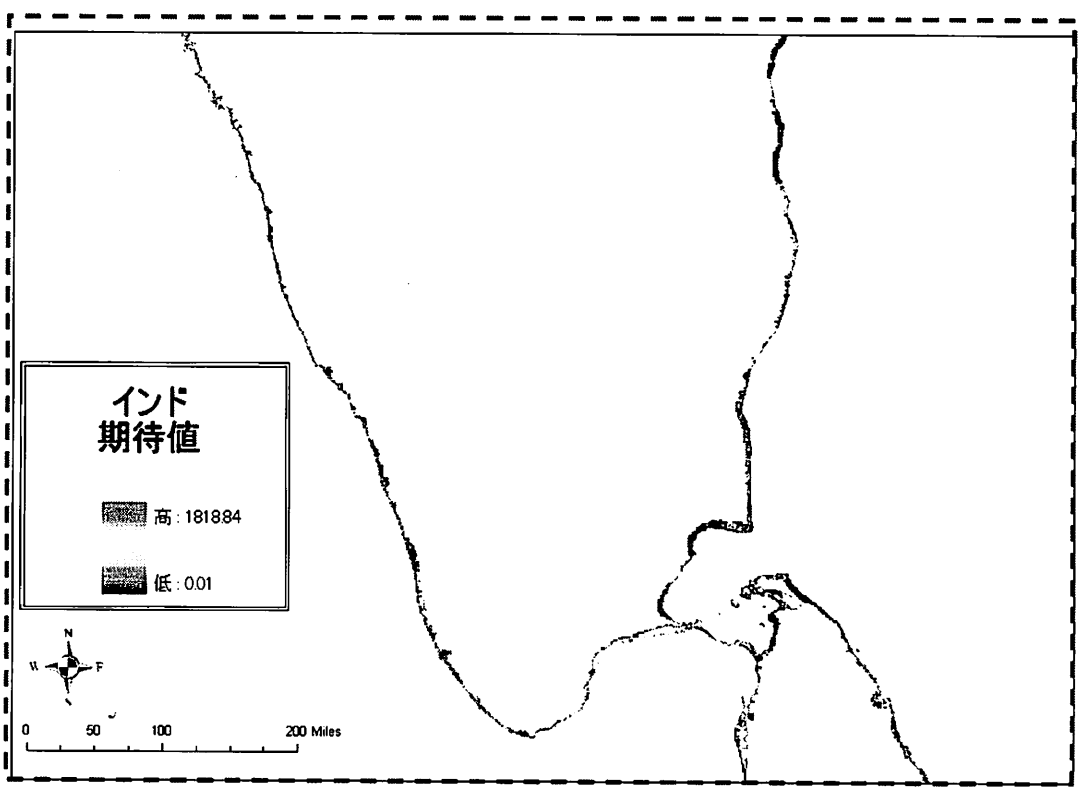


図4．46　期待値　インド②

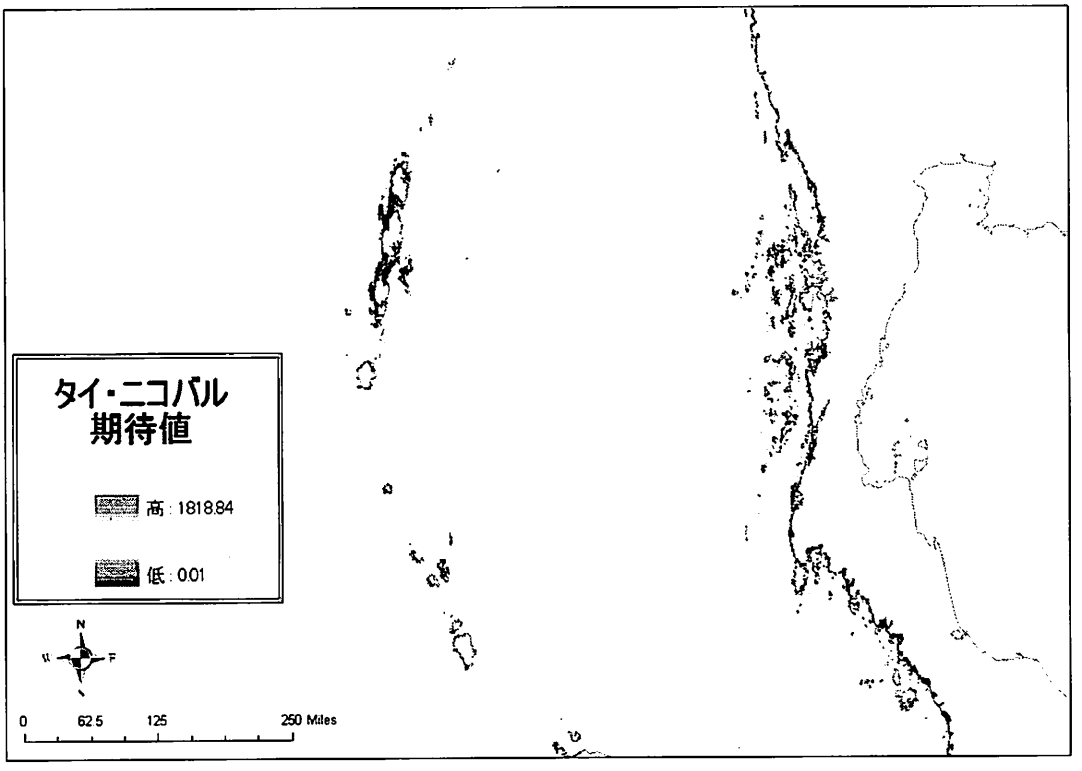


図4．47　期待値　タイ・ニコバル

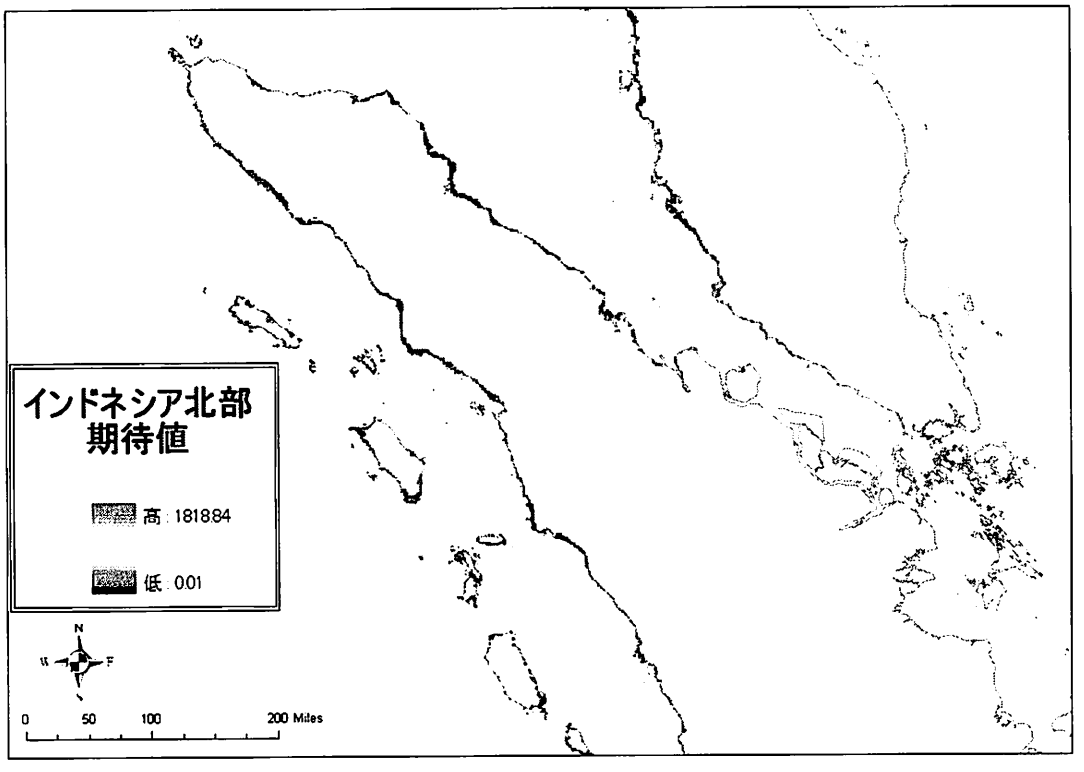


図4．48　期待値　インドネシア北部

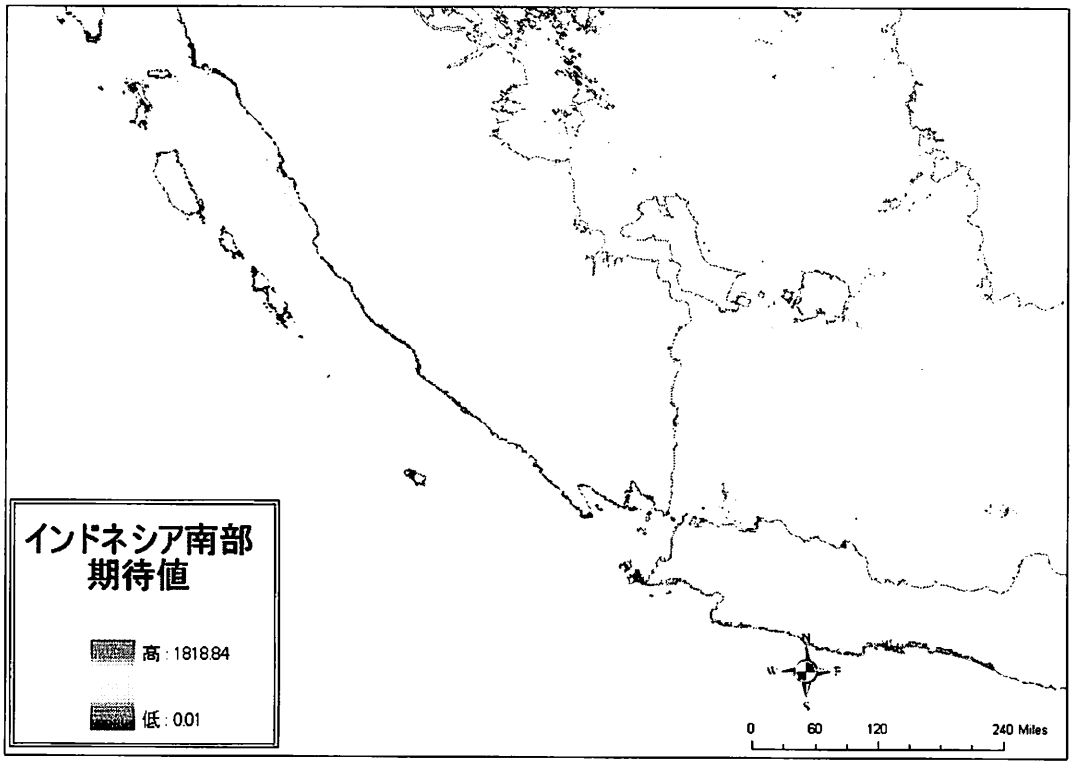


図4．49　期待値　インドネシア南部

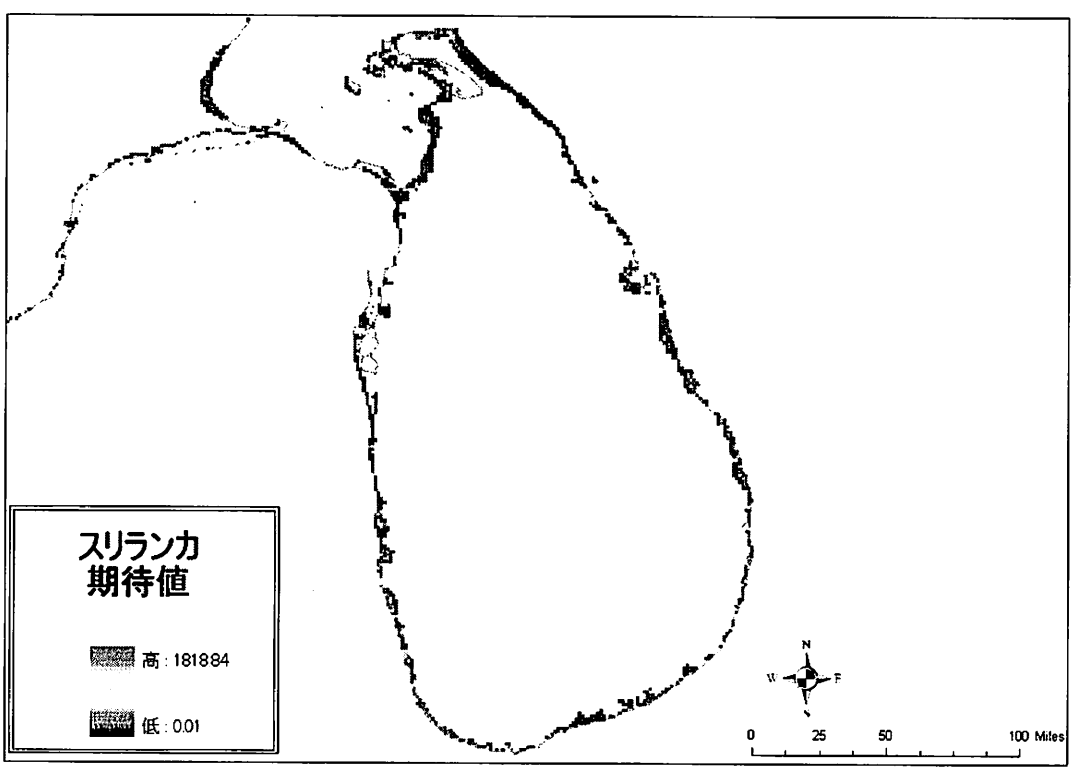


図4．50　期待値　スリランカ

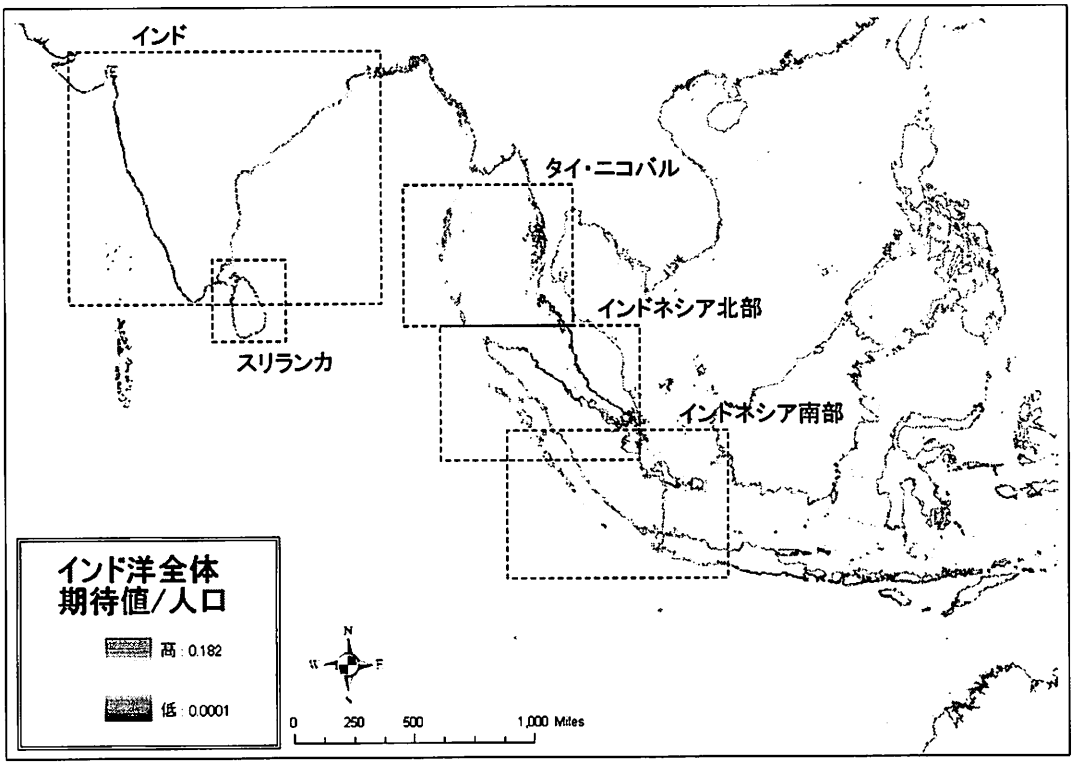


図４．５１　期待値/人口　インド洋全体

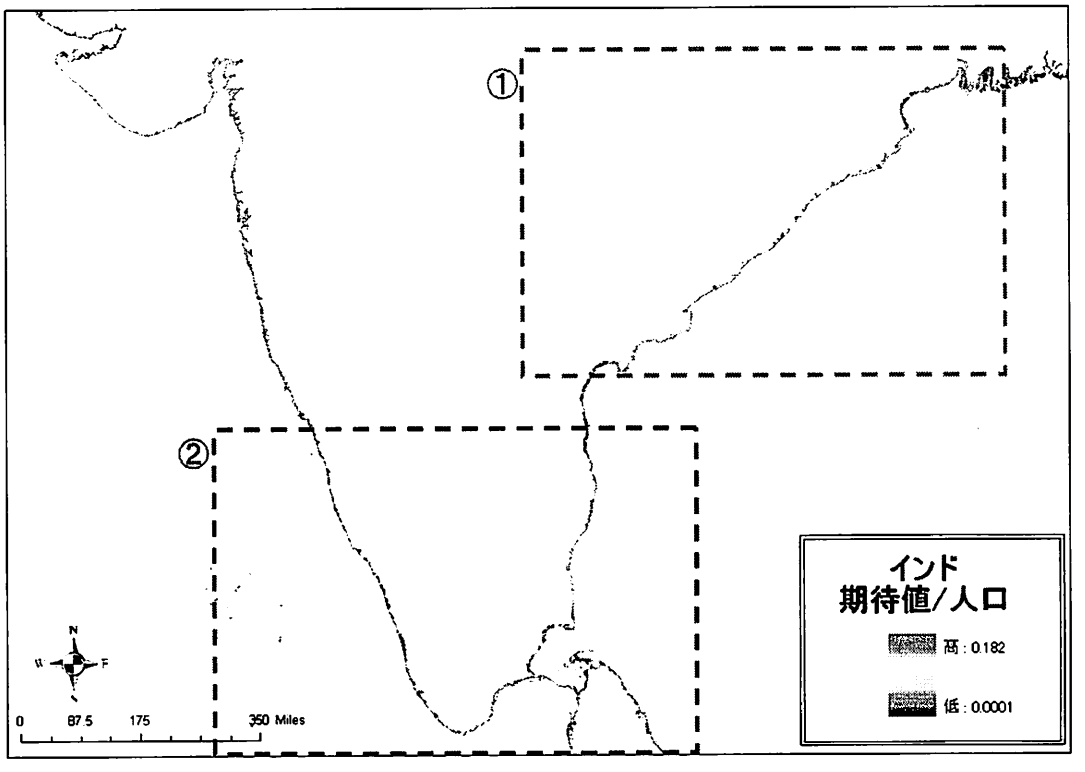


図４．５２　期待値/人口　インド

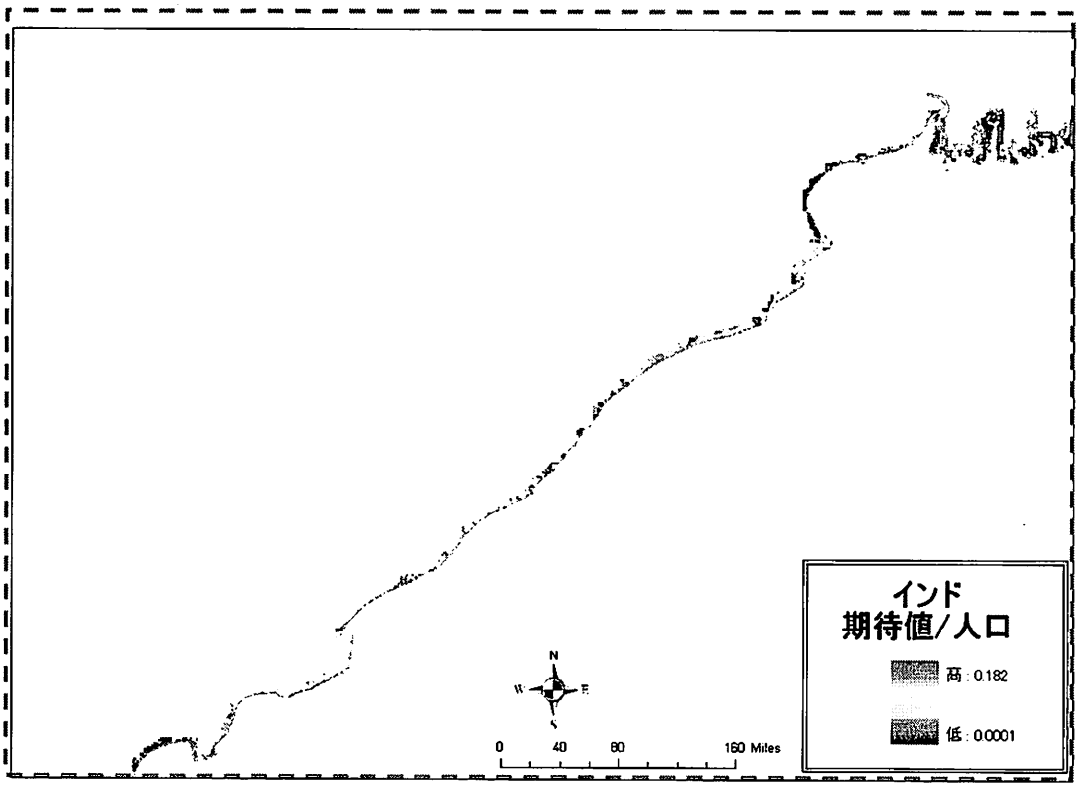


図4．53　期待値/人口　インド①

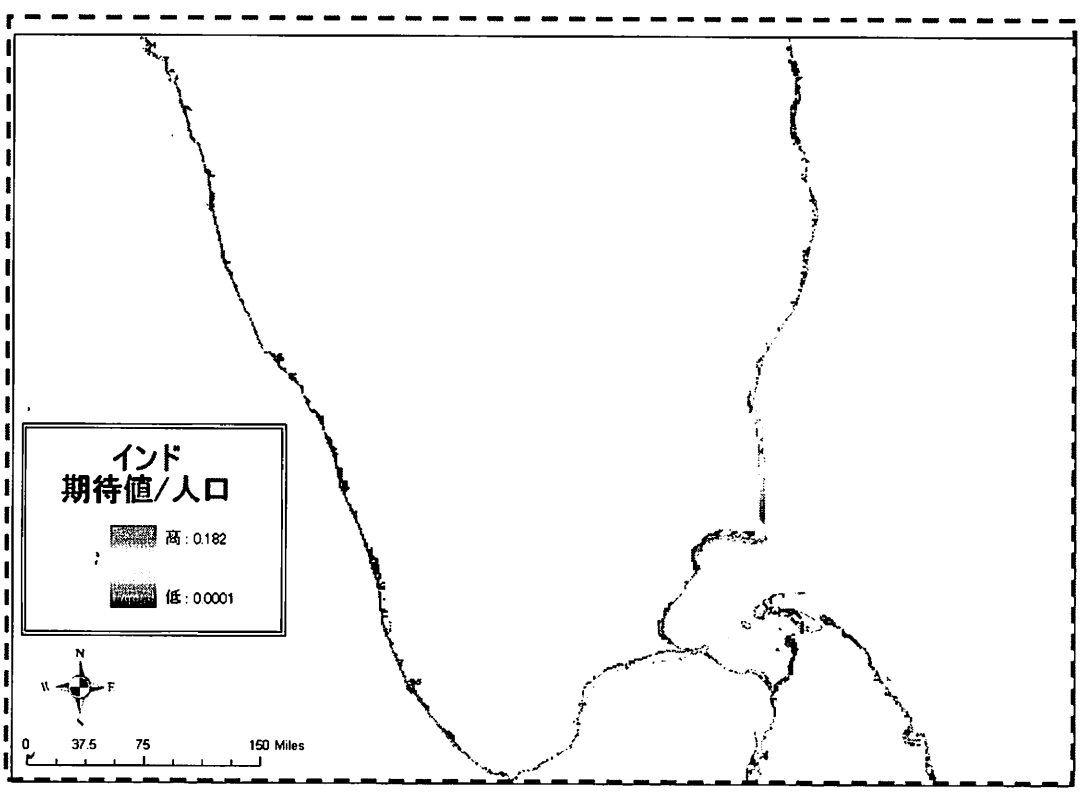


図4．54　期待値/人口　インド②

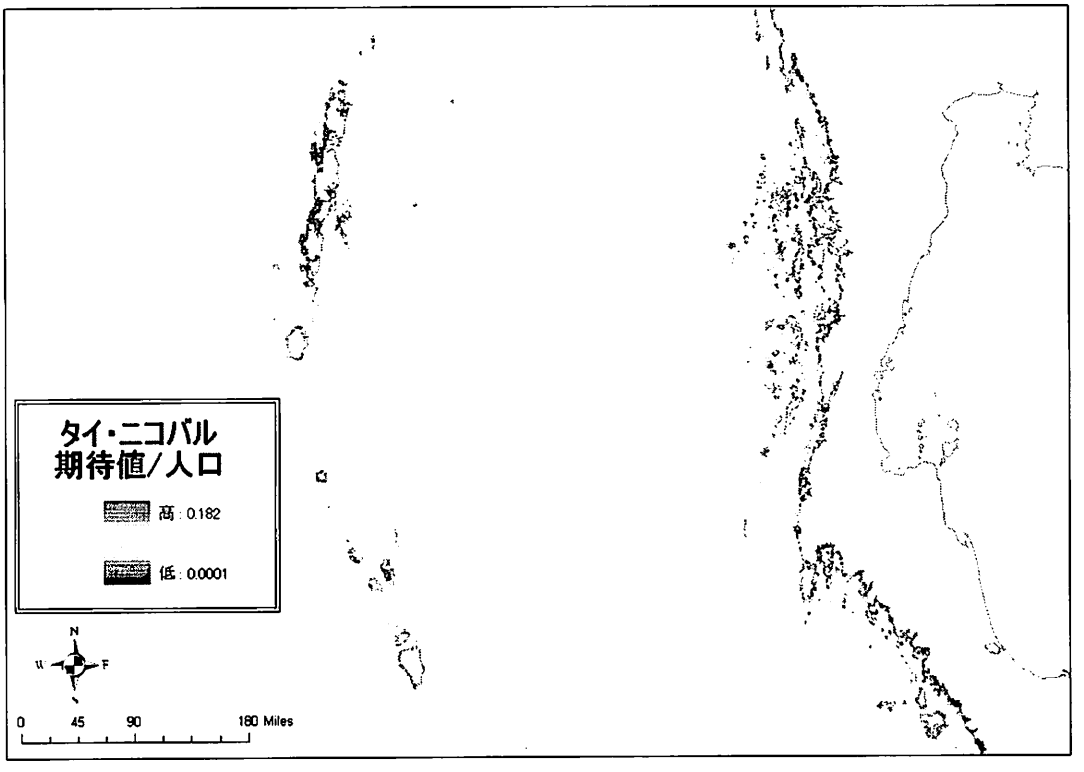


図４．５５　期待値/人口　タイ・ニコバル

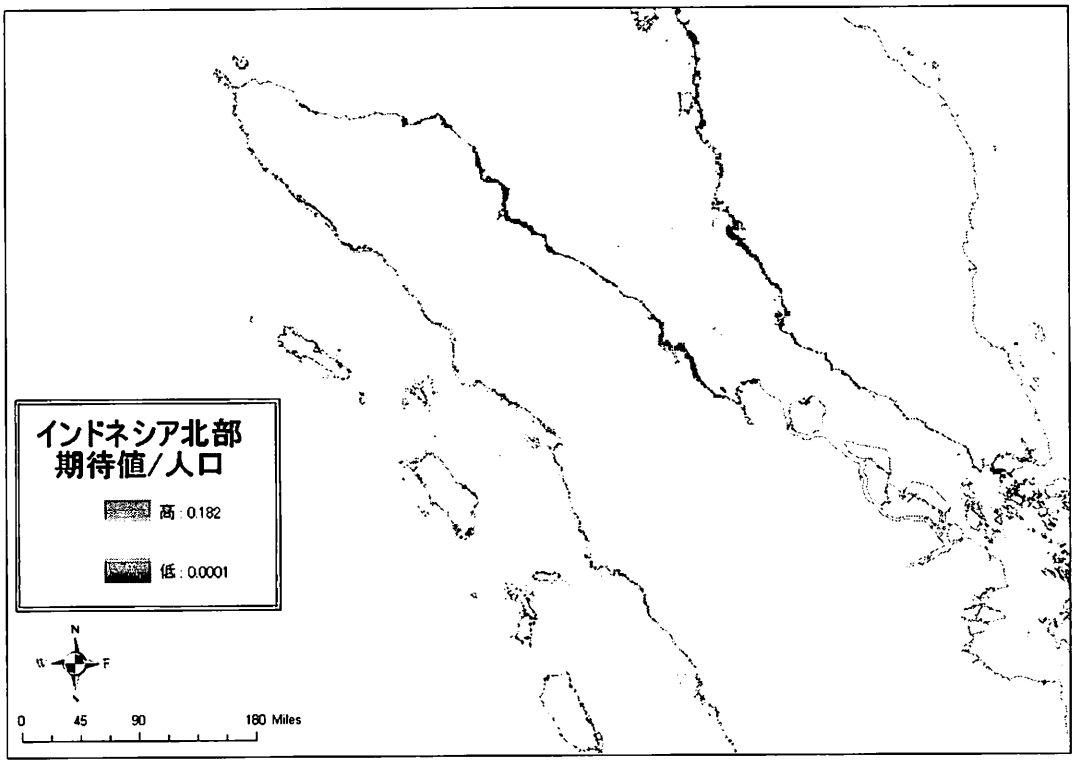


図４．５６　期待値/人口　インドネシア北部

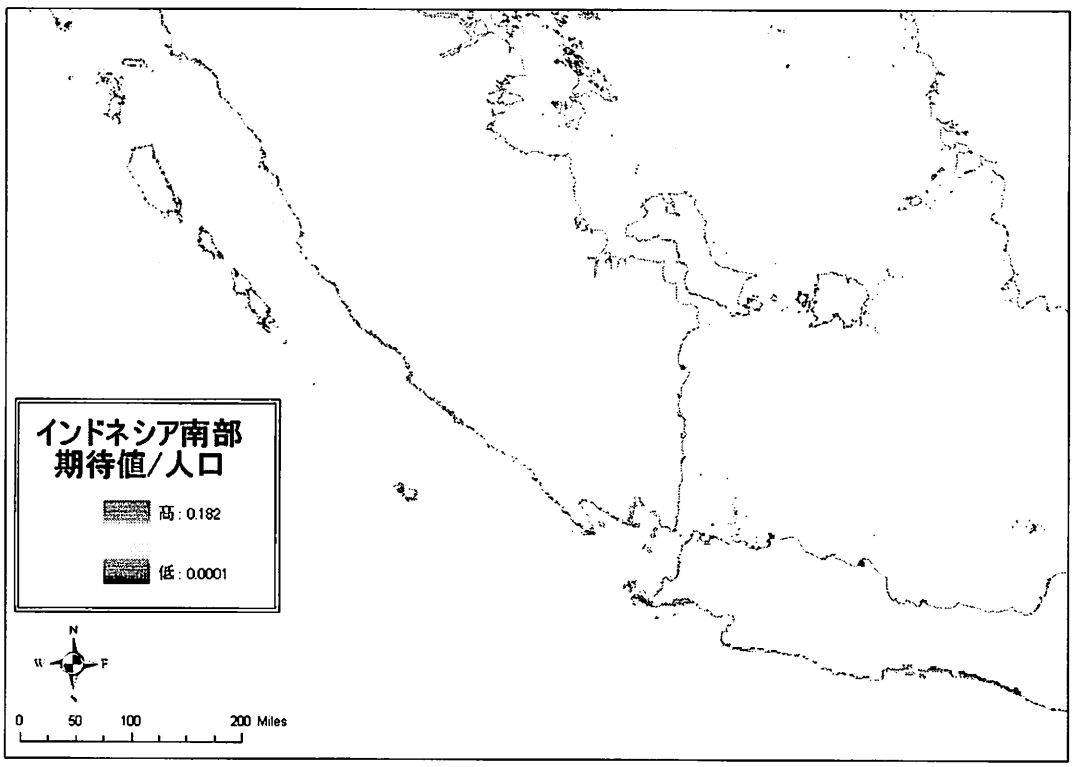


図4．57　期待値/人口　インドネシア南部

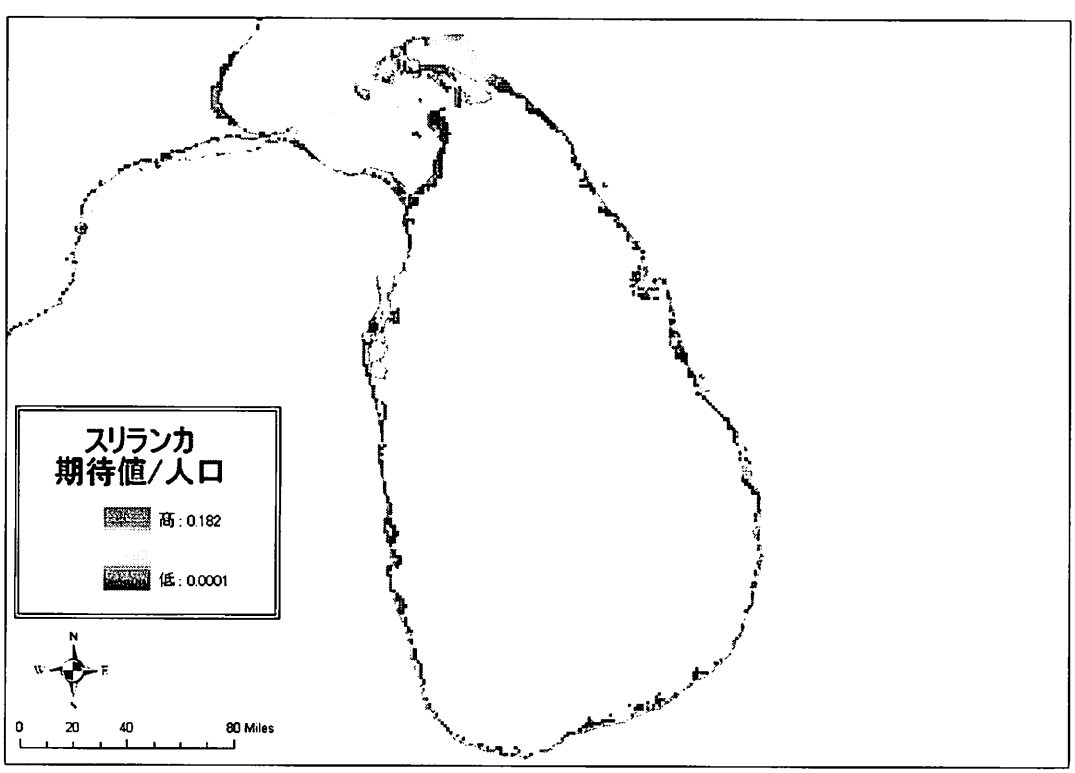


図4．58　期待値/人口　スリランカ

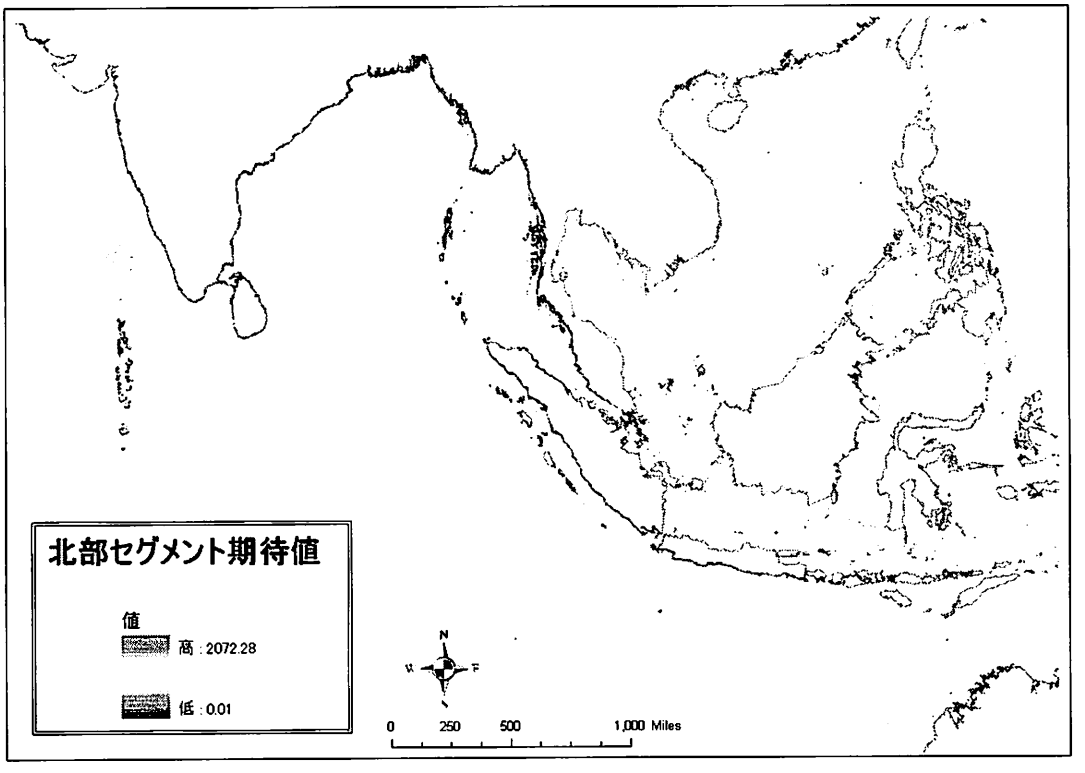


図４．５９　北部セグメント　期待値

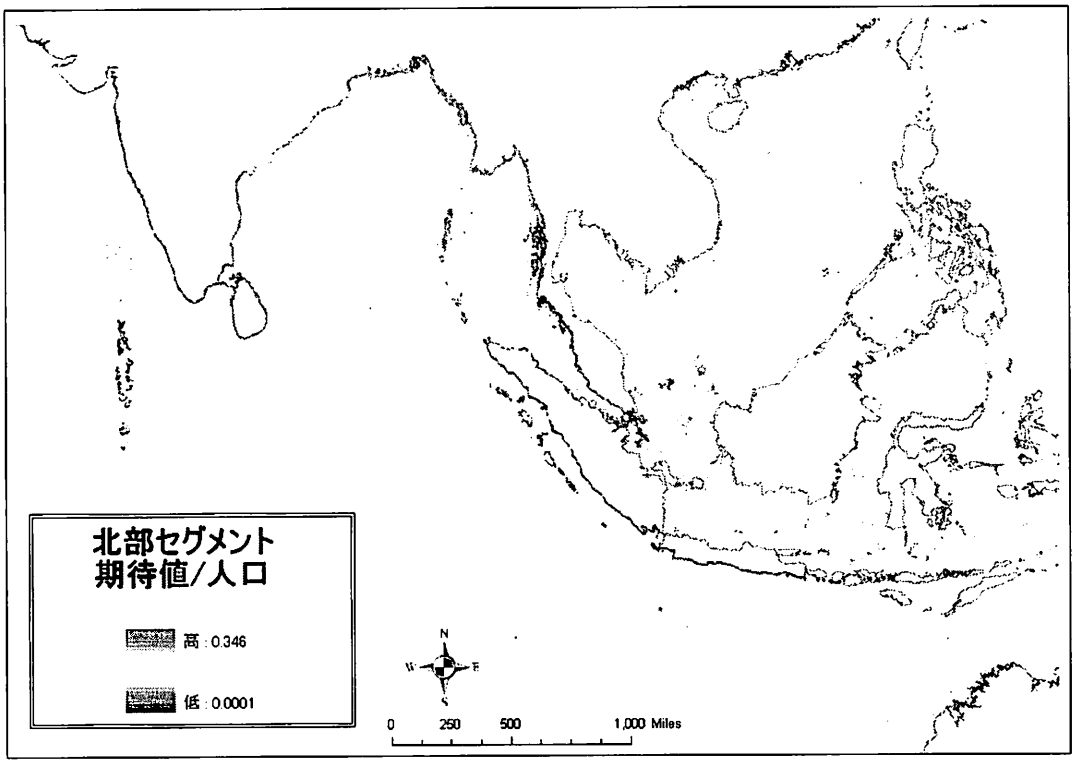


図４．６０　北部セグメント　期待値/人口

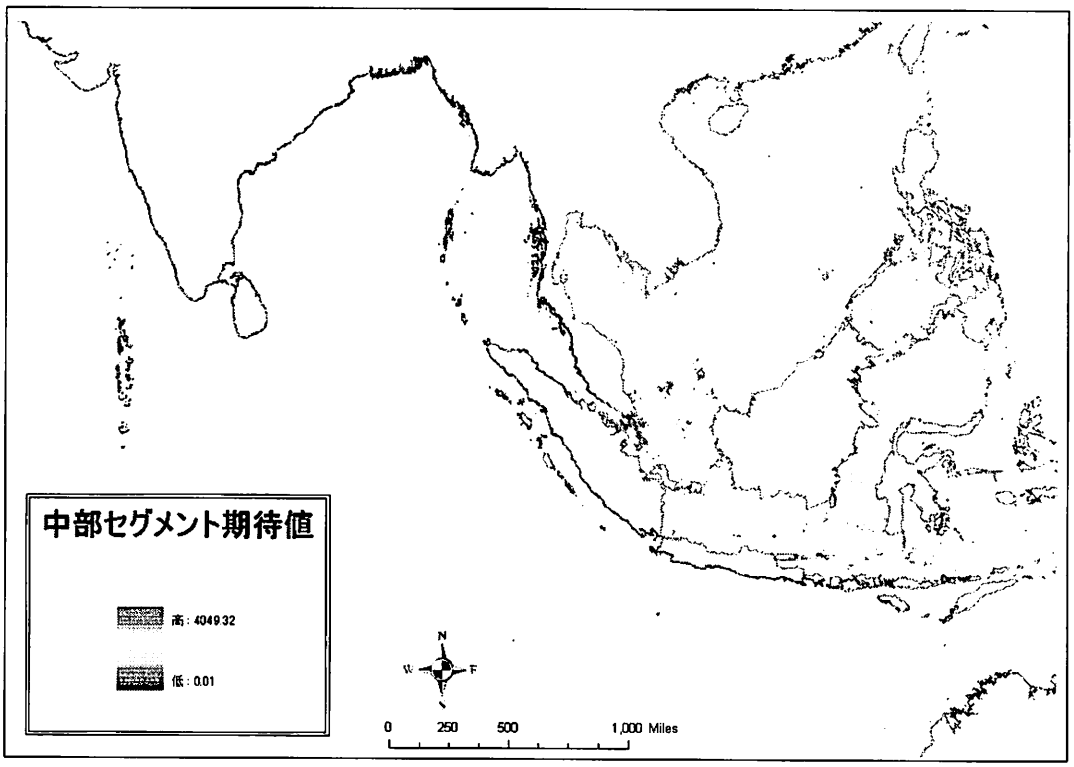


図４．６１　中部セグメント　期待値

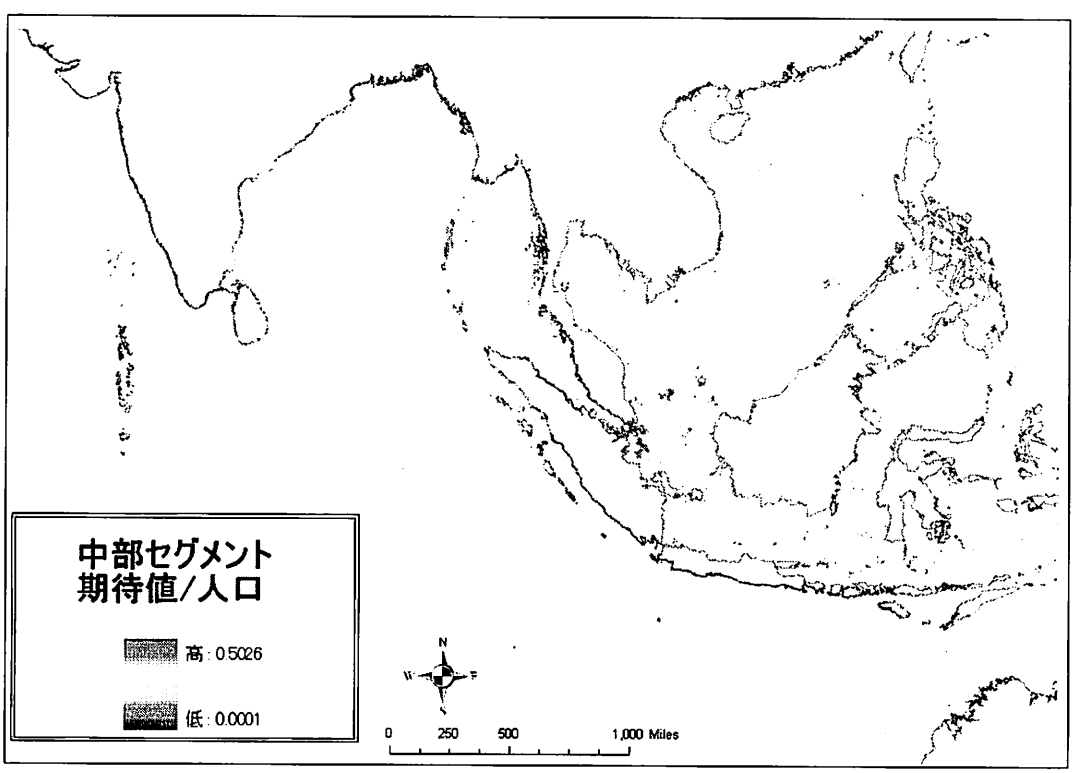


図４．６２　中部セグメント　期待値/人口

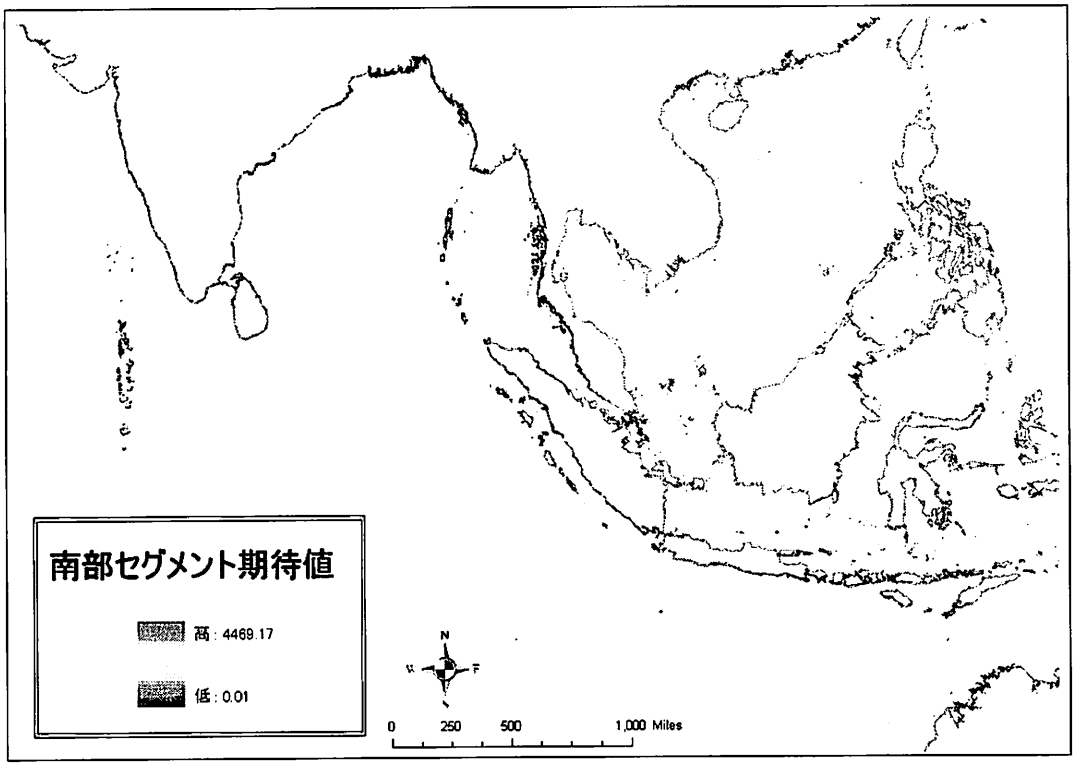


図４．６３　南部セグメント　期待値

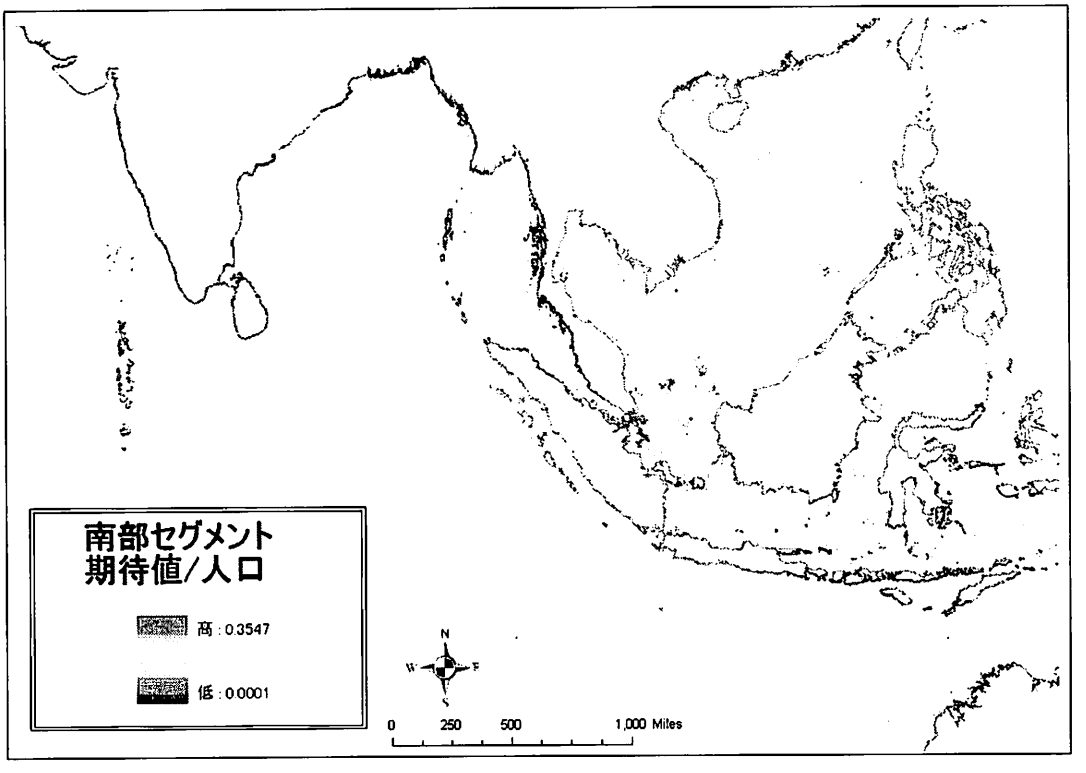


図４．６４　南部セグメント　期待値/人口

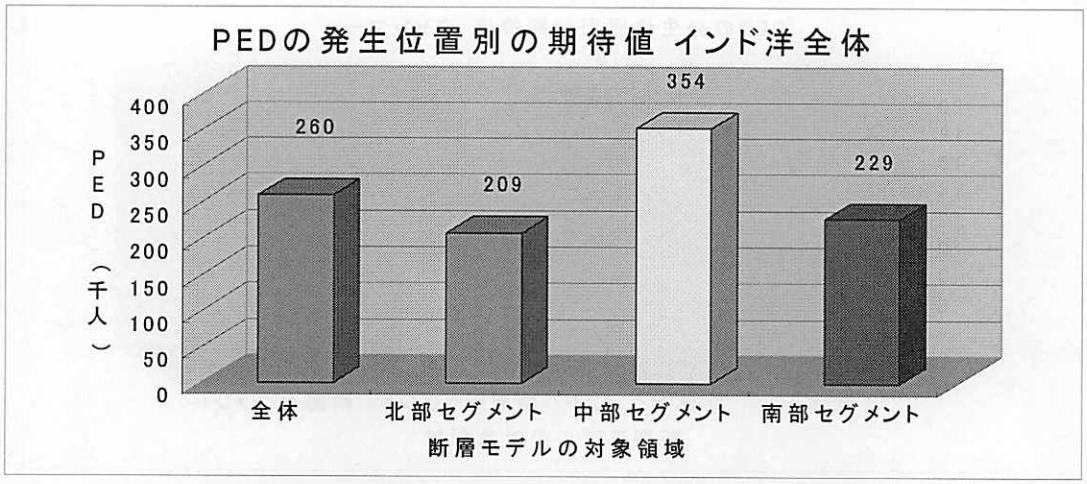


図4．65　各セグメント別期待値　インド洋全体

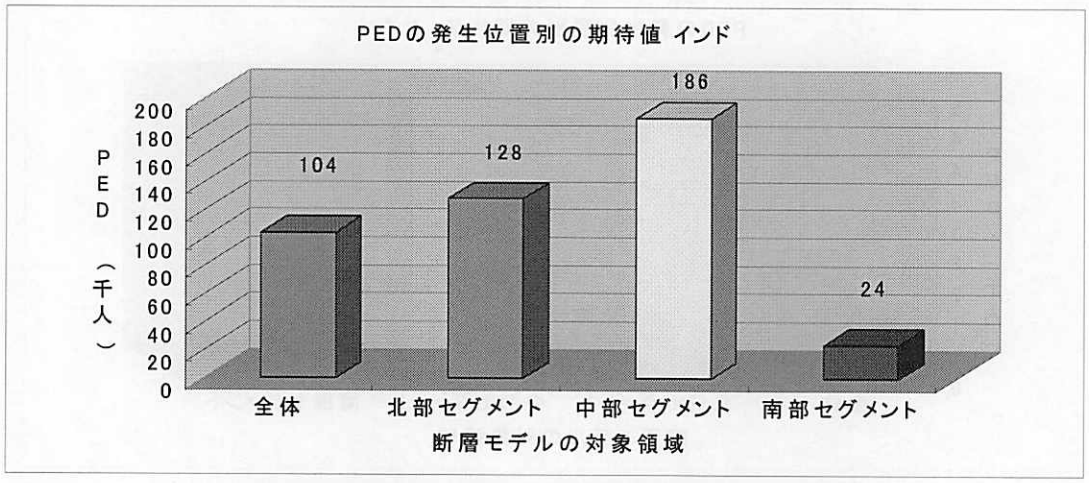


図4．66　各セグメント別期待値　インド

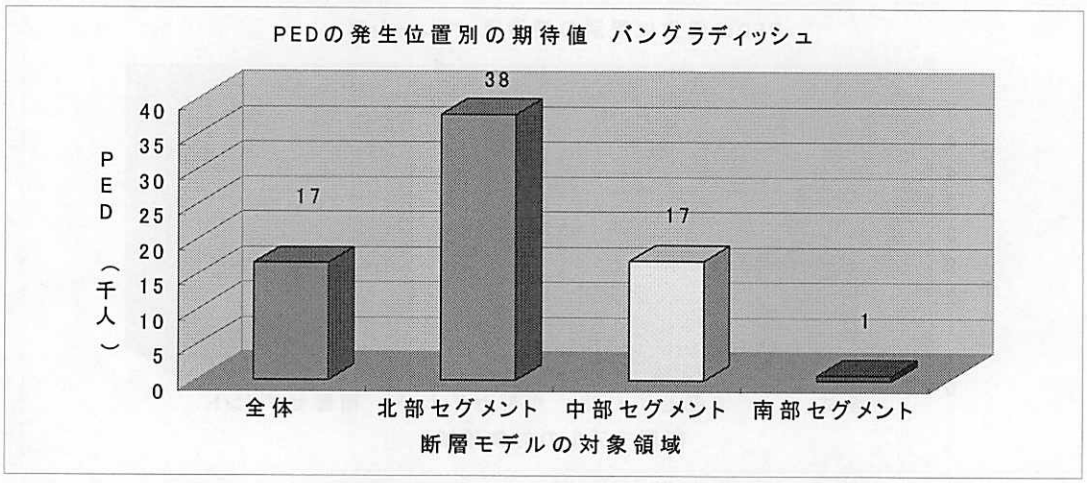


図4．67　各セグメント別期待値　バングラディッシュ

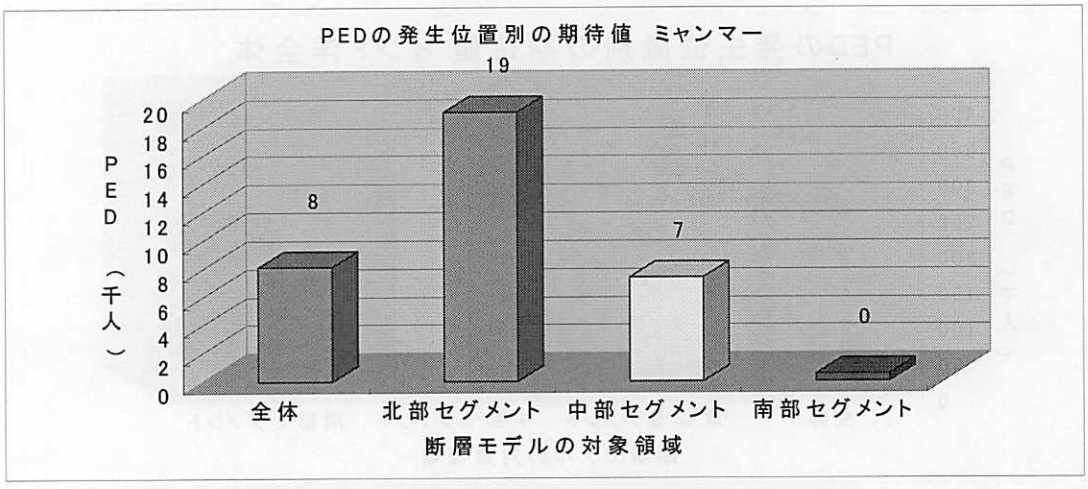


図4．68　各セグメント別期待値　ミャンマー

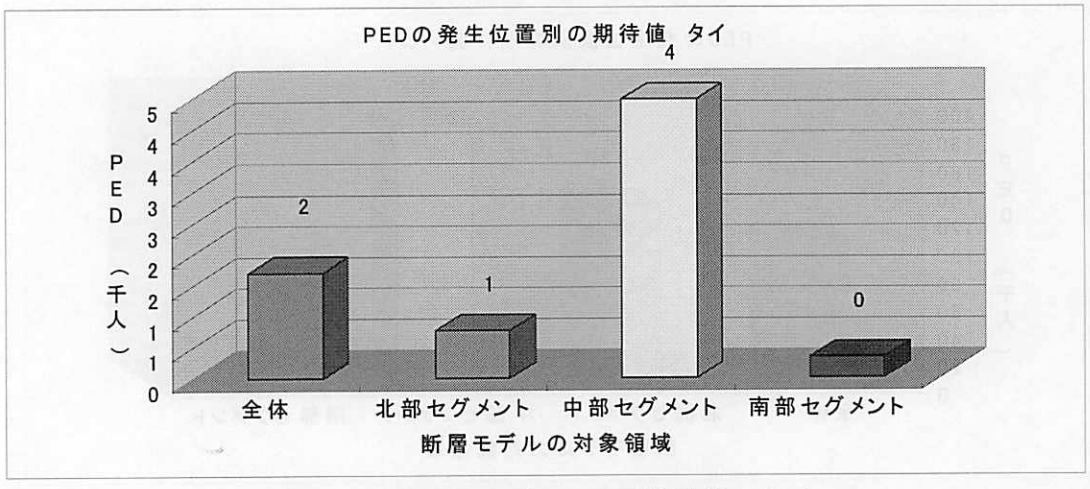


図4．69　各セグメント別期待値　タイ

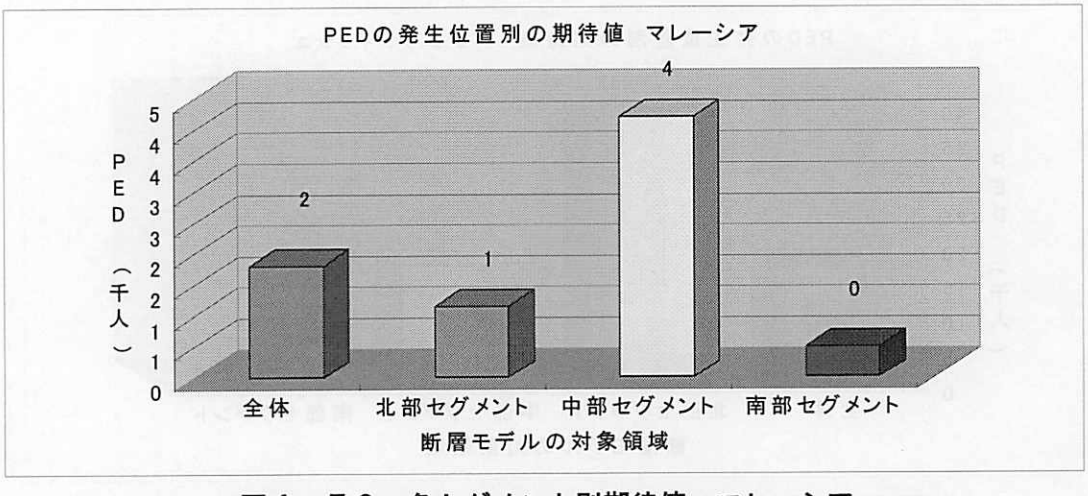


図4．70　各セグメント別期待値　マレーシア

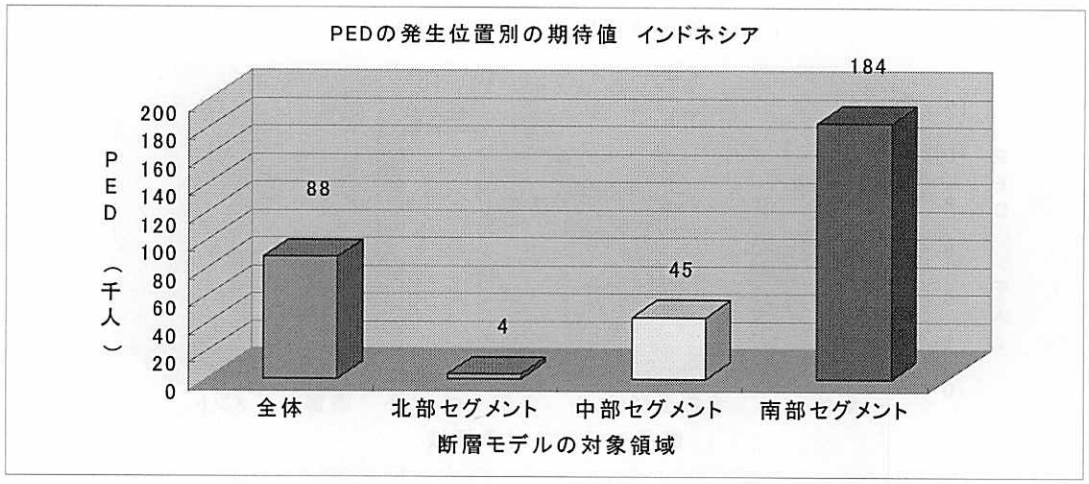


図4．71　各セグメント別期待値　インドネシア

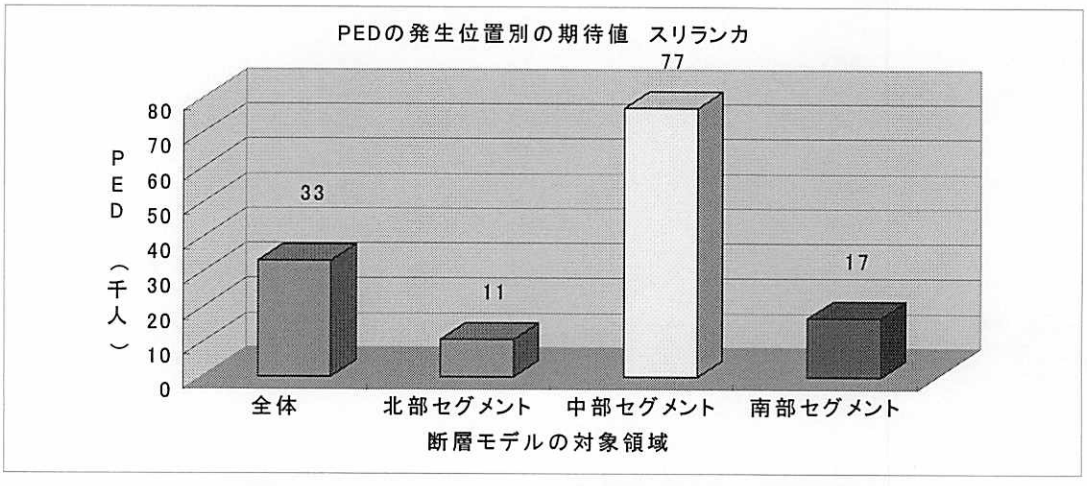


図4．72　各セグメント別期待値　スリランカ

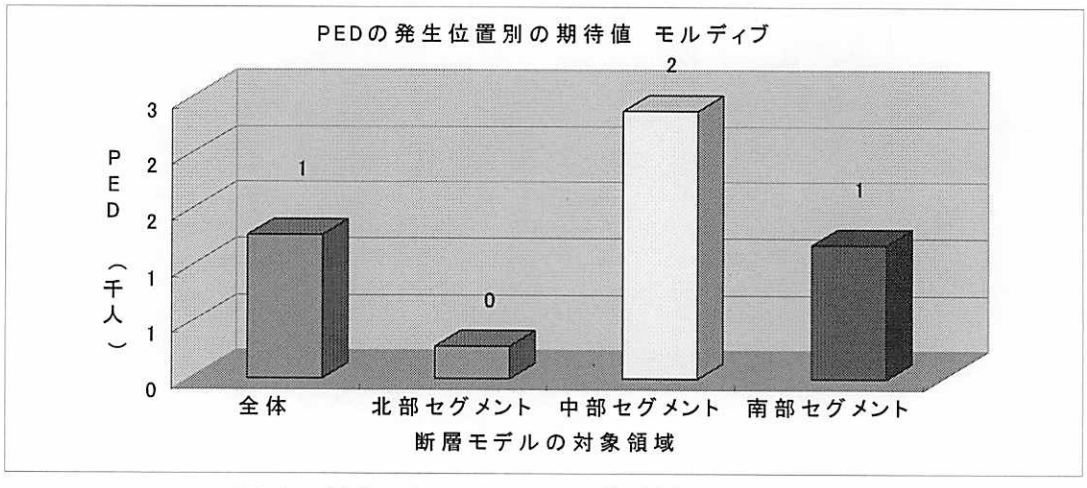


図4．73　各セグメント別期待値　モルディブ

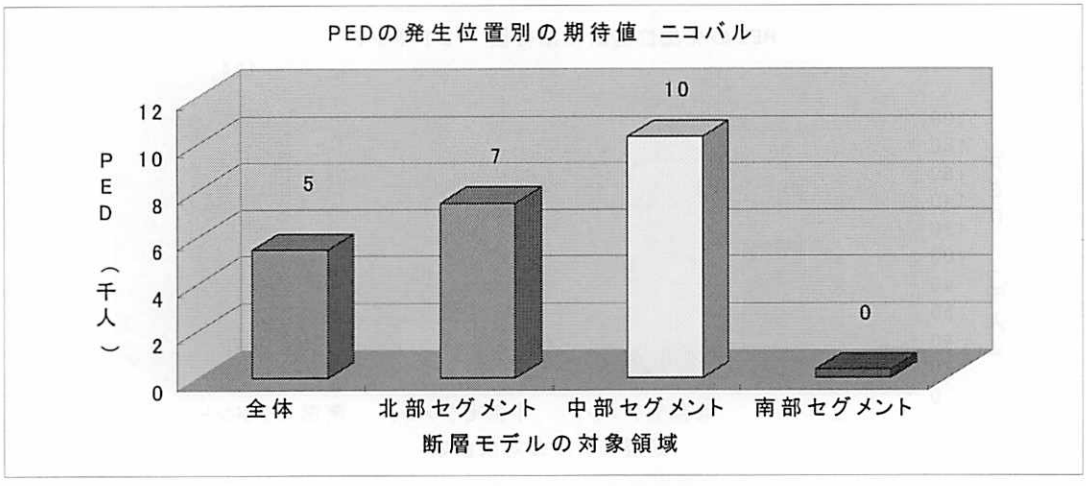


図４．７４　各セグメント別期待値　ニコバル

2）多目的ブイの効果的な設置位置及び津波探知・警報時間 ATo

a．多目的ブイの「効果的な設置位置」の定義と抽出手法

ここでは人的被害危険度を減少させるために，多目的ブイを用いた津波防災システムにおいて，最も早く津波を探知できる点を「効果的な設置位置」と定義し，検討を行った．

具体的な抽出条件・手法については，条件としてある「領域」と「ブイ設置可能点」を設定し，160 個のシミュレーションそれぞれについて，ブイ設置可能点の中から最も早く津波を探知できる点の「抽出」を行った．「領域」の設定については，本検討の目的の一つであるネットワークの拡大効果を示すために，「国際ネットワーク」と「各国内ネットワーク」を設定し，分析・考察を行った．「ブイ設置可能点」の設定については，「グリッド内人口が 1 万人を越える陸地グリッドに隣接する沿岸グリッド」とすると共に，グリッド内人口の条件を，「千人以上」，「5 千人以上」，「2 万人以上」と変化させた場合の ATo の変化についての検討も行った．また，逆伝播手法を利用した断層パラメータの推定手法に関する検討として，津波検知のために必要なブイの数と津波検知・警報発信時間の関係について示し，考察を行った．

b．国内ネットワークと国際ネットワークでの効果的な設置位置

国際ネットワークでの多目的ブイの効果的な設置位置(**図４．７５**)と，各国の国内ネットワークでの多目的ブイの効果的な設置位置(**図４．７６**)について抽出し，図示した．この結果より，これらの設置位置はスンダ海溝沿いの津波に対する多目的ブイの「効果的な設置位置」であると考えられる．

また，それらの設置位置が，断層モデルの基準点の 3 つのセグメント(北部，中部，南部)のどこで発生した津波を観測するのかを**図４．７７～４．８２**で示した．これらの図は，「効果的な観測点」による観測情報が，どの地域で発生する津波のリアルタイム津波警報に活用されるかを示したものだといえる．

さらに，160 個の津波シミュレーションそれぞれについて効果的な設置位置を抽出した結果，いくつかの津波において同じ点が効果的な設置位置として抽出された．そこで，抽出された設置位置について抽出された回数を「重要度」と定義した．例として，重要度 15 以上のブイ設置位置を**図４．８３**に示した．その結果，インドネシア，ニコバル，ミャンマーにおいて重要度の高い設置位置が見られた．

これらの結果より，国際ネットワークを作成する際，インドネシア，ニコバル，ミャンマーは津波の際に津波観測情報を発信する側として重要な観測点を持つことになると考えられる．また，重要度の高い設置位置に優先的に多目的ブイシステムを設置するなど，今後の津波観測施設の設置計画を作る際に役立てることができる．

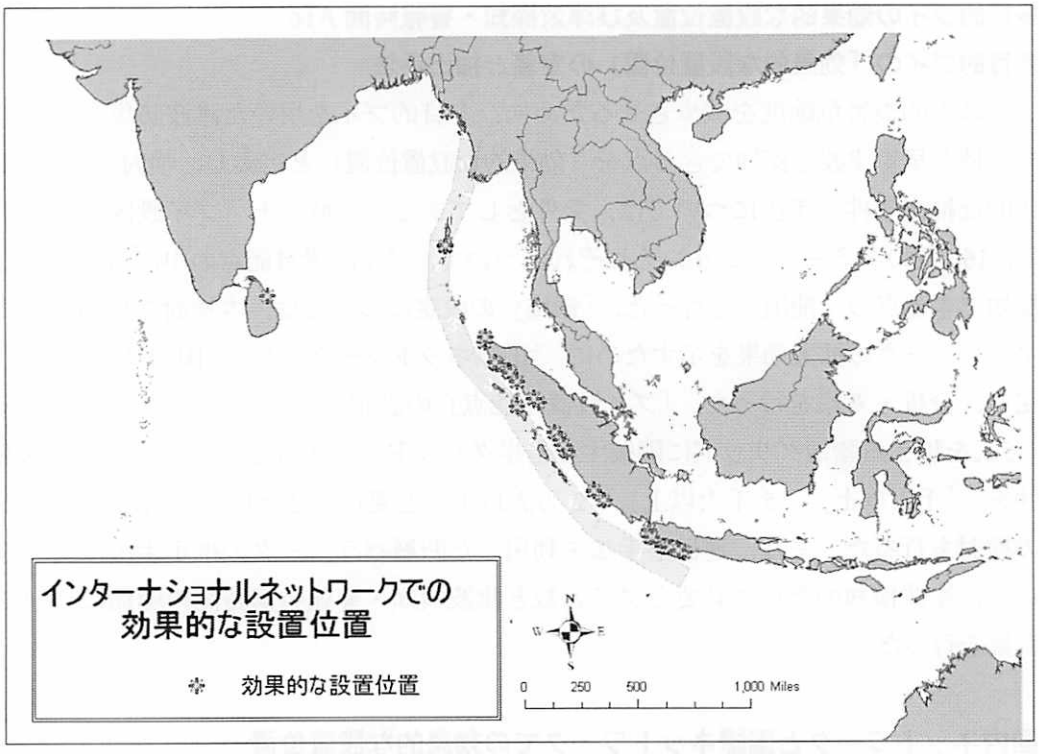


図４．７５　国際ネットワークでの効果的な設置位置

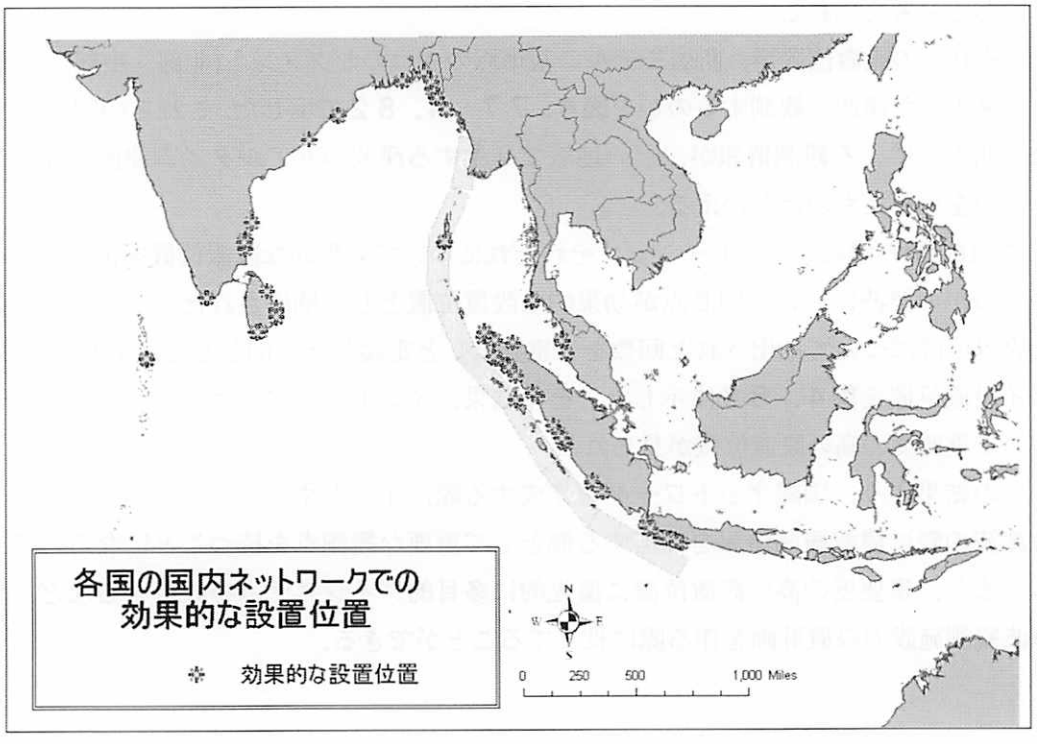


図４．７６　各国の国内ネットワークでの効果的な設置位置

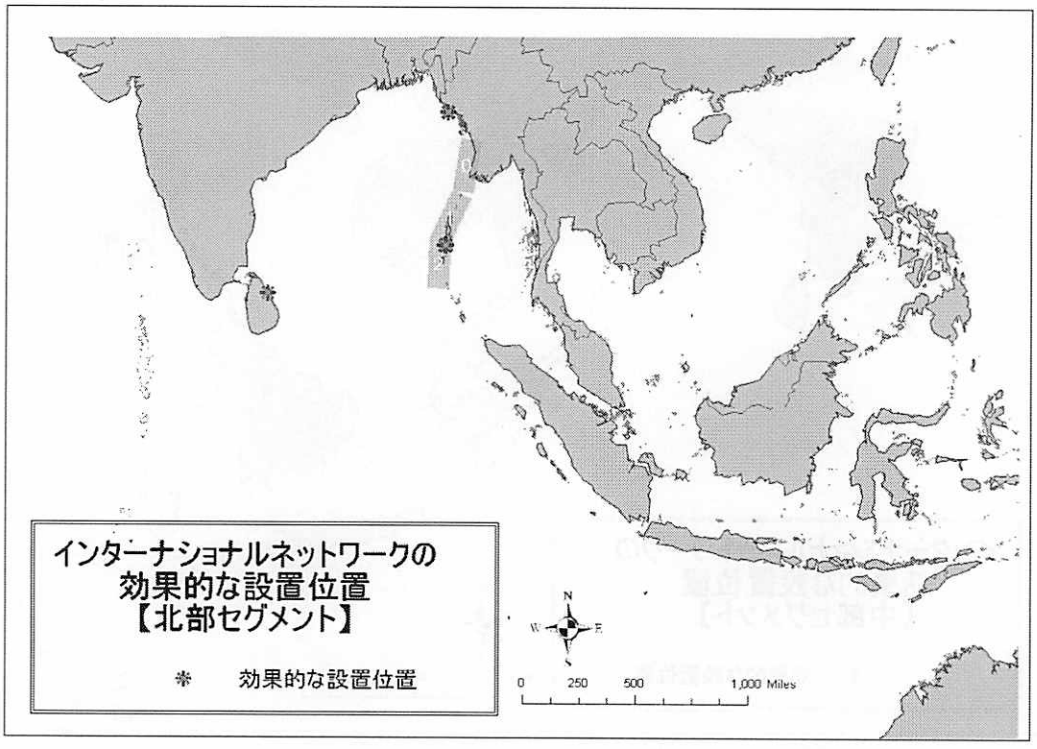


図４．７７　国際ネットワークでの効果的な設置位置【北部セグメント】

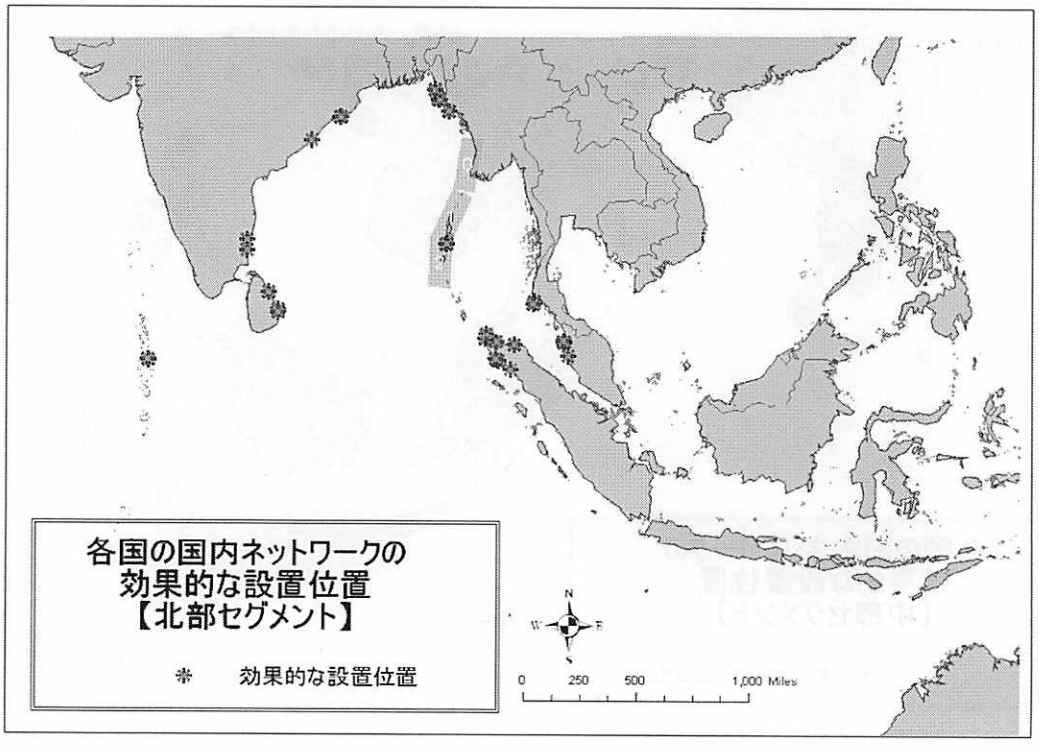


図４．７８　各国の国内ネットワークでの効果的な設置位置【北部セグメント】

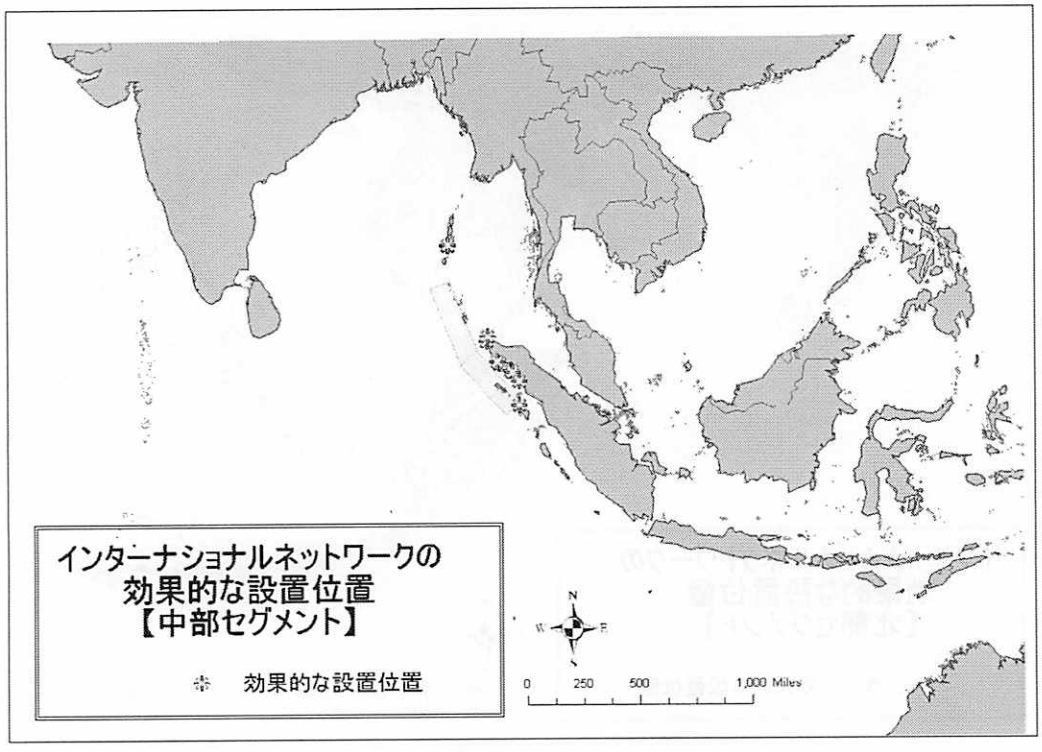


図４．７９　国際ネットワークでの効果的な設置位置【中部セグメント】

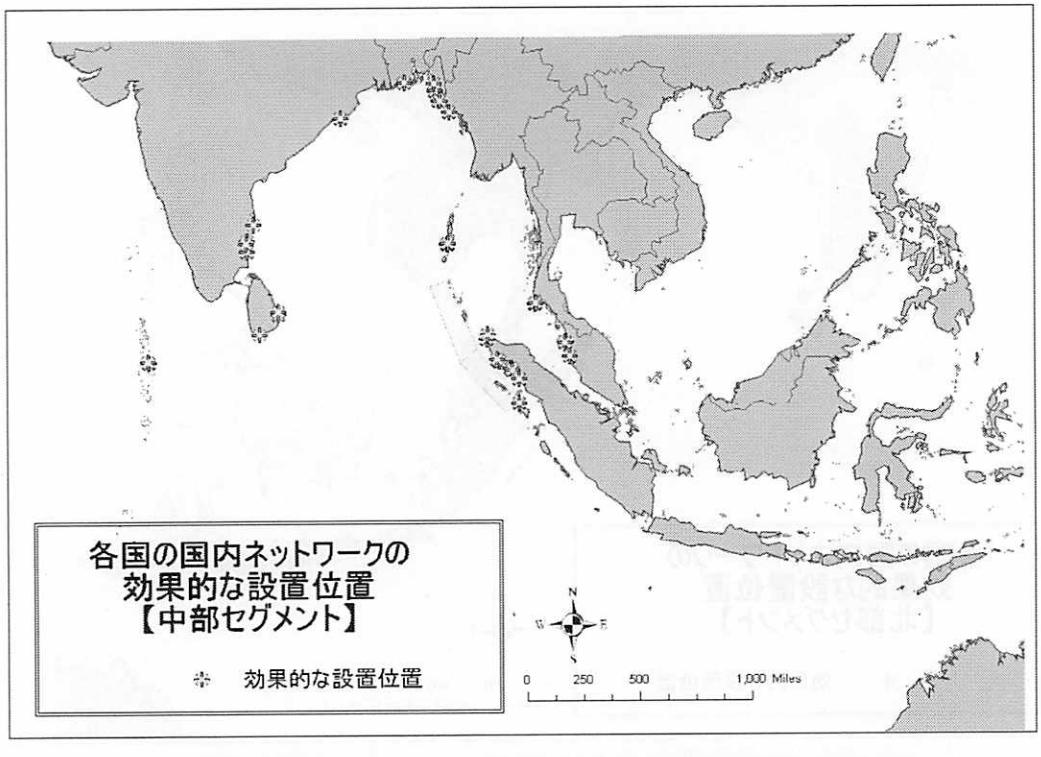


図４．８０　各国の国内ネットワークでの効果的な設置位置【中部セグメント】

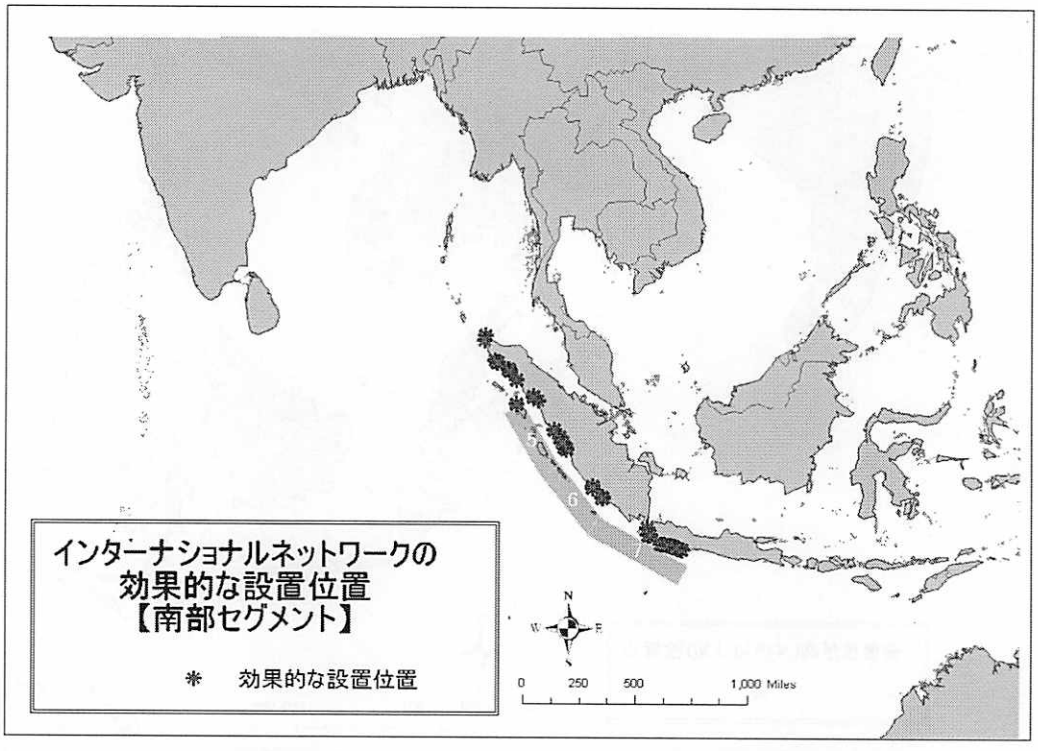


図４．８１　国際ネットワークでの効果的な設置位置【南部セグメント】

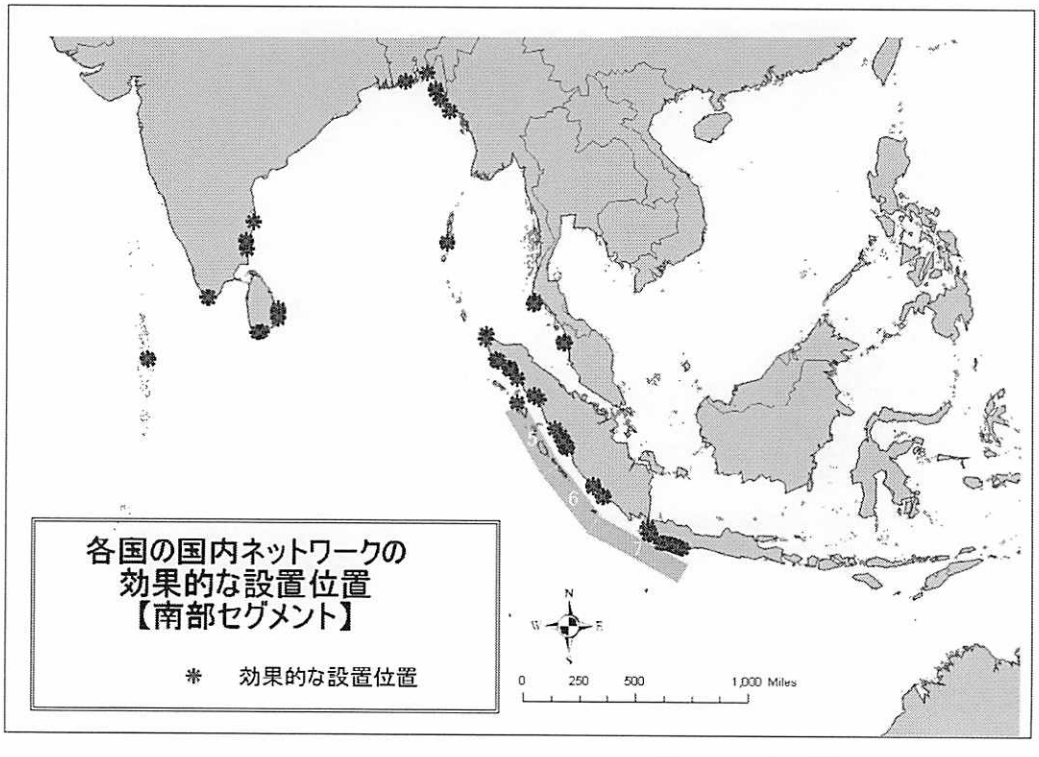


図４．８２　各国の国内ネットワークでの効果的な設置位置【南部セグメント】

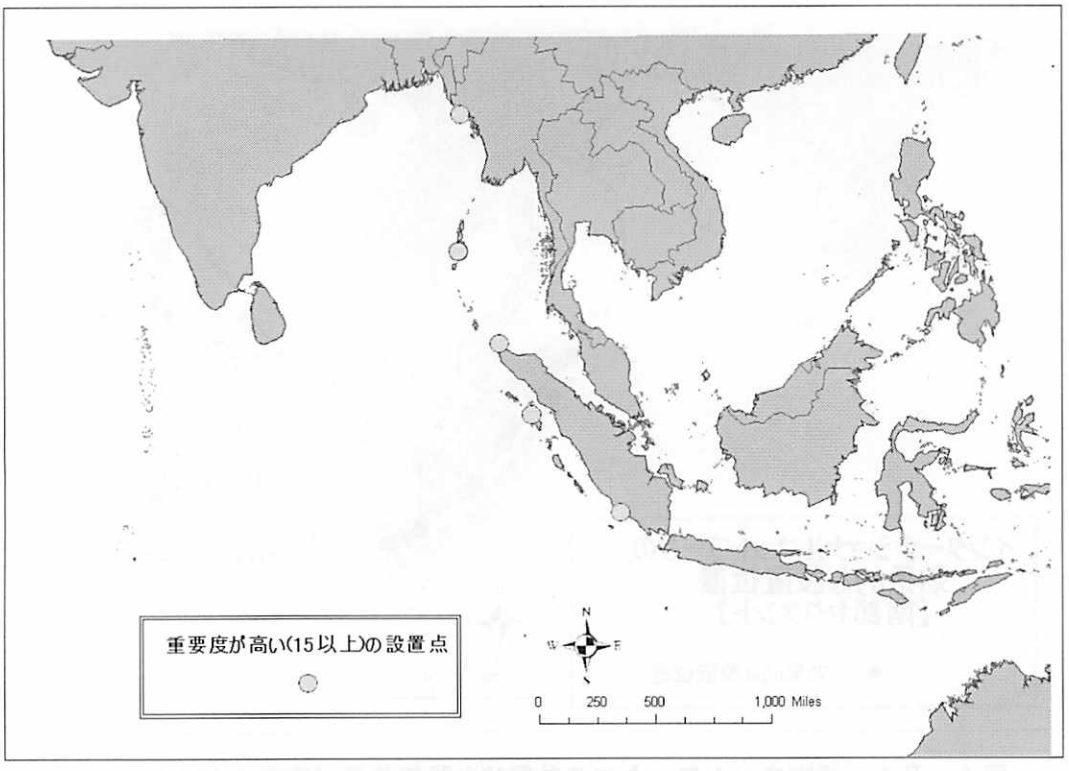


図４．８３　重要度 15 以上のブイ設置位置

c．国内ネットワークと国際ネットワークでの津波探知時間 ATo の比較

160 個の津波それぞれに対して，多目的ブイを用いた津波警報システムによる「国際ネットワークの ATo」と「各国別ネットワークの ATc(ATc は各国ごとの値)」が得られた．ここでは，得られた ATo 及び ATc の最大値，最小値，平均値を比較した図を示す(図４．８４)．この図より，国際ネットワークと各国別ネットワークの津波探知時間 ATo の差が分かる．この図から，ALL(国際ネットワーク)の ATo と，他の国々の ATc を比べた場合，平均値も最大値も国際ネットワークの ATo ほうが早く，津波警報システムとしての効果が高いことが見て取れる．ここで得られた ATo 及び ATc をもとに，4.3 における多目的ブイシステムによる人的被害軽減効果の推計を行う．

d．ブイ設置可能条件(グリッド内人口数)の変更による効果

ブイ設置可能条件におけるグリッド内人口数の変化による ATo の変化を，縦軸に ATo，横軸に断層モデルの位置をとり図示した(**図４．８５**)．
この値をどう読みとるかは価値観によるところではあるが，この図をもとに，今後多目的ブイを，およそどれ位の規模の都市で利用することを見越して開発していくかについて検討する際の材料となると考えられる．例えば，Mw9 の地震津波については常に ATo が最短の値をとるようにブイを設置しようとすれば，今回の検討をもとにするとグリッド内人口条件が 5 千人人以上の都市を設置可能地域にしなければいけないということになる．

e．津波探知のために必要なブイの個数の変更による効果

逆伝播手法を利用した断層パラメータの推定手法のための考察として，津波検知のために必要なブイの数と津波検知・警報発信時間の関係について示した．津波探知に必要なブイの数を縦軸，ブイ設置可能グリッドの人口条件を横軸にしたマトリックスを作り，ATo の平均値と最大値を表記した**表４．１２**を作成した．また，人口条件別に，縦軸に津波探知時間 ATo，横軸に Mw 及び断層モデルの位置をとり，図示した．

これらの分析は，今後津波警報ネットワーク計画を作る際の参考となると考えられる．例えば津波警報ネットワーク形成において，すべての津波を 100 分以内に探知できるような観測にするという条件を設定した場合(**図４．８６**の点線)，人口条件が千人であれば津波探知の為に 10 個のブイが必要であっても可能だが，人口条件が 5 千人であると，Mw8.0 の規模においてギリギリの探知時間となり，人口条件 2 万人だと，探知に必要なブイの数が 1 つであっても，100 分以内に探知するのは難しくなるといった考察を行うことが可能である．また，100 分以内に 160 個の津波を探知できる条件を満たすためには，人口条件を何人以上に設定しなければいけないかといった分析も可能となる．本研究ではこれ以上は行わないが，今後の検討課題として，ブイによる津波の探知条件とブイ設置可能地域の条件を考慮した分析・考察を行うことが挙げられる．

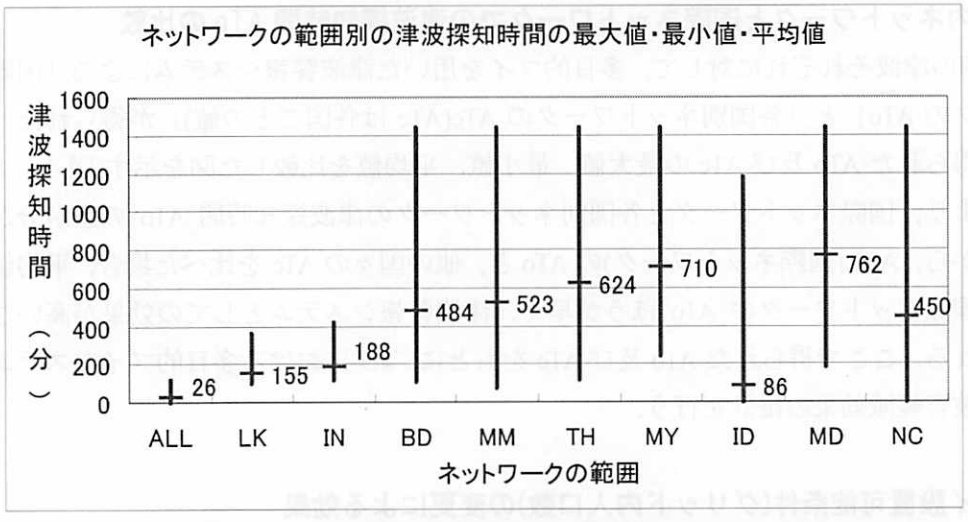


図４．８４　ネットワークの範囲別の津波探知時間の最大値・最小値・平均値

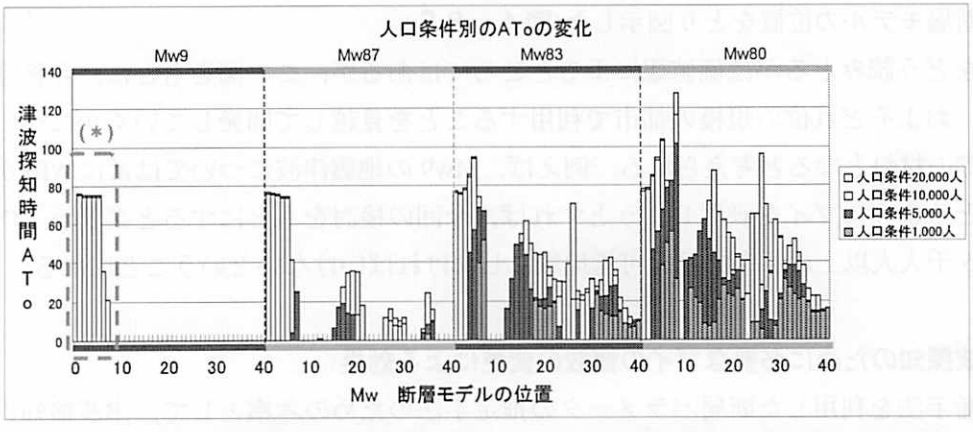


図４．８５　ブイ設置可能条件(グリッド内人口数)の変更による ATo の変化

表４．１２「探知に必要なブイの数」と「ブイ設置可能人口条件」の変化による ATo の最大値及び平均値のマトリックス

津波探知時間ATo(min)（上段:最大値、下段:平均値）			ブイ設置可能グリッドの人口			
			1000	5000	10000	20000
津波探知に必要なブイの数	1	Max	56	101	116	128
		ave	6	14	26	31
	5	Max	74	110	125	163
		ave	9	24	46	58
	10	Max	81	112	132	215
		ave	14	38	58	88

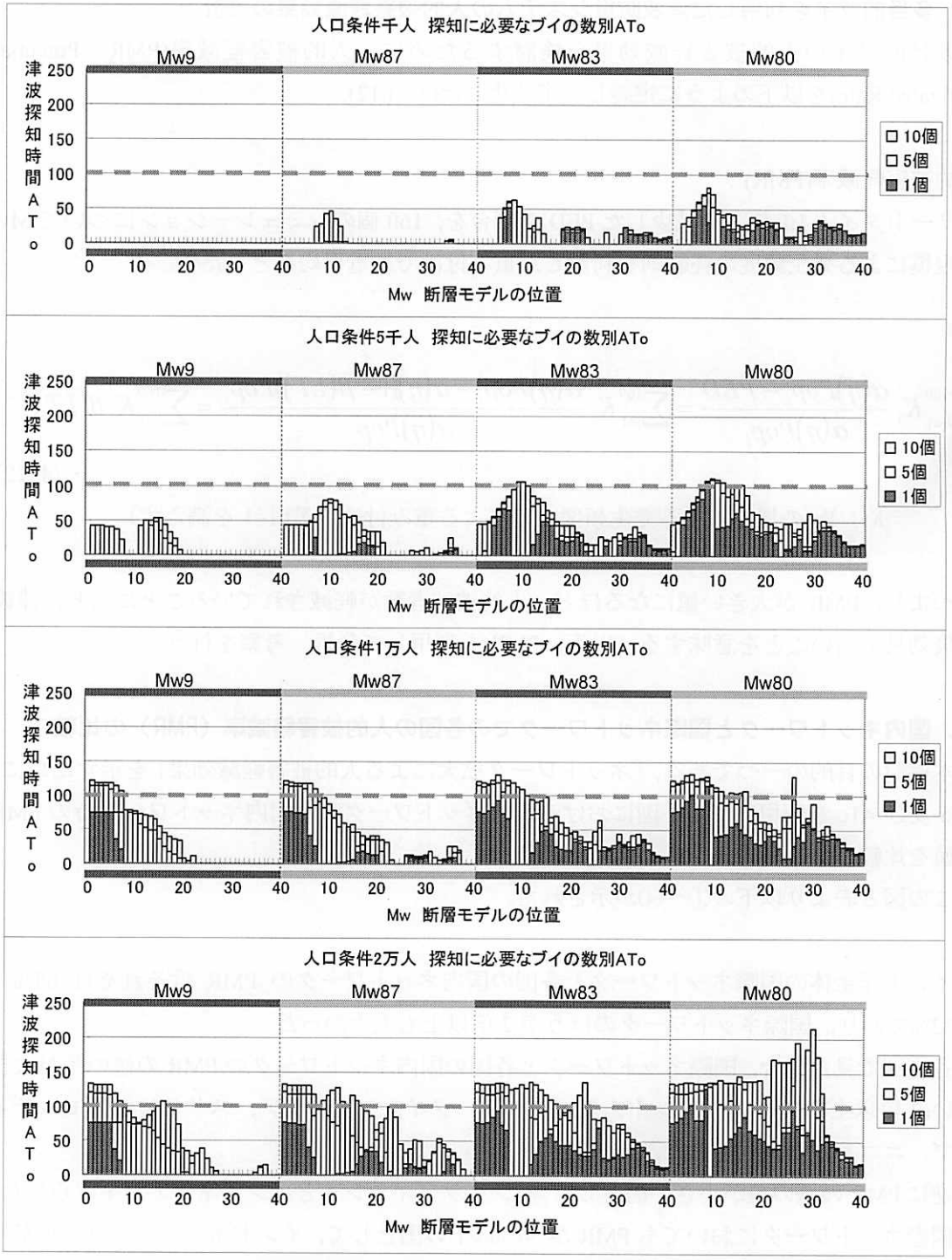


図４．８６　ブイ設置可能条件(グリッド内人口数)の変更による ATo の変化

2）多目的ブイを利用した津波防災システムの人的被害軽減効果の推計

多目的ブイの人的被害軽減効果を検討するために，人的被害軽減率(PMR：Potential Mitigated Rate)を以下のように定義し，定式化した(式 4.12).

人的被害軽減率(PMR)：

リードタイム LT により減少した PED の割合を，160 個のシミュレーションについて Mw の規模による発生頻度の経験則を利用した重み付けで加重平均をとった値

$$\sum_{i=1}^{160} K_i \frac{\alpha(\eta)Pop_i - PED}{\alpha(\eta)Pop_i} = \sum_{i=1}^{160} K_i \frac{\alpha(\eta)Pop_i - \alpha(\eta)(1-\beta(LT))Pop_i}{\alpha(\eta)Pop_i} = \sum_{i=1}^{160} K_i \beta(LT) \quad \cdots(4.12)$$

Ki：Mw の規模による発生頻度の差による重み付け（ΣKi=1 を満たす）

つまり，PMR が大きい値になるほど，人的被害者数が軽減されていることになり，津波減災効果が高いことを意味する．以下，PMR を利用して分析，考察を行う．

a．国内ネットワークと国際ネットワークでの各国の人的被害軽減率（PMR）の比較

本検討の目的の一つである，「ネットワーク拡大による人的被害軽減効果」を示すために，ATo 及び ATc を利用して，各国における国際ネットワーク時と国内ネットワーク時の PMR の値を比較した（**表4．13，図4．87**）.

この図と表より以下の①～④が示された.

①インド洋全体の国際ネットワークと各国の国内ネットワークの PMR はそれぞれ 68%，32%であり，国際ネットワークのほうが 2 倍以上も大きかった.

②各国別で見た場合，国際ネットワークと各国の国内ネットワークの PMR の値の差が大きい(2 倍以上)国としてはインド，ミャンマー，タイ，マレーシア，スリランカ，モルディブ，ニコバルが挙げられた.

③逆に PMR の値の差が小さい国として，バングラディッシュとインドネシアが挙げられた.

④国際ネットワークにおいても PMR が 50%以下の国として，インドネシアとニコバルが挙げられた.

その結果考察として，以下の 1)～4) が得られた．

1)①の結果より，ネットワークが拡大することによって，人的被害軽減効果は増加するといえる．試算では人的被害軽減率が 33%から 67%と 2 倍になった．

2)②の結果より，インド，ミャンマー，タイ，マレーシア，スリランカ，モルディブ，ニコバルは，ネットワークが拡大することによる恩恵を大きく受ける国である．これはつまり，多国の津波観測情報を利用することで津波防災力を高めることができる「津波情報受信側の国」といえる．これらの国々は，津波情報発信国のシステムをサポートし，ネットワーク拡大を推進させることが望ましいといえる．ニコバルについては津波観測可能点が東側を向いており，西側で発生する津波に対しては津波を探知するのが遅れるため，スンダ海溝沿いの地域であるにもかかわらず本検討においては「津波情報受信側の国」となったと考えられる．

3)③の結果より，インドネシアとバングラディッシュは，ネットワークが拡大した際の効果が相対的に小さい．バングラディッシュについては地理的な条件が原因と考えられる．インドネシアについては，インドネシアに大きな PED を発生させる津波のほとんどすべてを，自国の観測点で観測することになるのが原因であると考えられる．バングラディッシュが D ネットワークでも PMR が大きいのは，バングラディッシュの津波観測点が南側にあり，かつ水深が浅く北側に津波が到達するまでに時間がかかるためではないかと考えられる．

4)④の結果より，インドネシアとニコバルは，ネットワーク拡大による人的被害軽減効果だけでは不十分なため，それ以外の対策(防波堤や避難施設の設置等ハード面の対策や，防災教育や情報伝達の速度向上などソフト面の対策など)が重要となってくるといえる．

表４．１３　各国における国際ネットワーク時と国内ネットワーク時の PMR

人的被害軽減率(PMR)の期待値		
	多国間ネットワーク	国内ネットワークのみ
ALL	68%	32%
IN	94%	30%
BD	96%	91%
MM	56%	28%
TH	96%	38%
MY	96%	26%
ID	24%	24%
LK	96%	39%
MD	96%	11%
NC	9%	4%

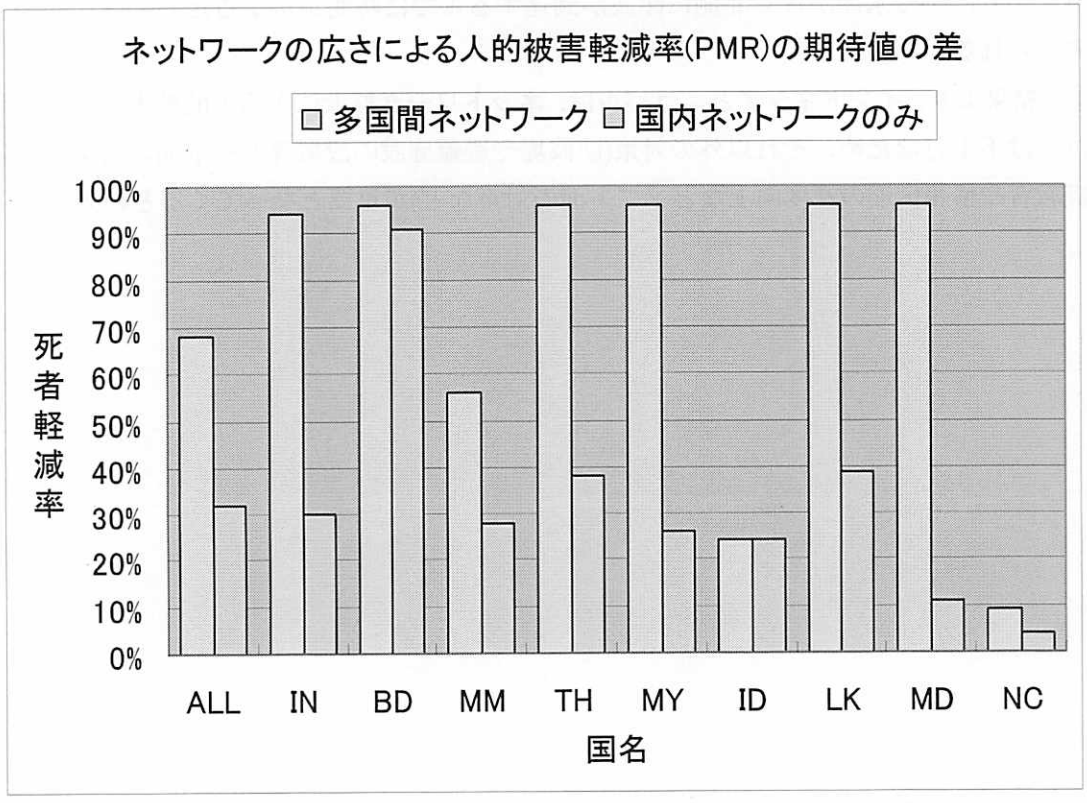


図４．８７　各国における国際ネットワーク時と国内ネットワーク時の PMR

b．リアルタイム津波警報システムのポテンシャルと多目的ブイを利用した津波警報システムの効果の比較

160個のシミュレーションすべてにおいてATo=0の際のPMRの期待値を求めた．これは，津波発生と同時に津波を探知することを意味するため，本検討の仮定内におけるリアルタイム津波警報システムの人的被害軽減効果の最大値をあらわすことになる．これを「リアルタイム津波警報システムのポテンシャル」と定義した．そして，多目的ブイを利用した津波警報システムの国際ネットワーク及び国内ネットワークの PMR の期待値と比較した(**表４．１４**及び**図４．８８**).

その結果，国際ネットワークのPMRの期待値は，リアルタイム津波警報システムのポテンシャルにかなり近い値となった．

津波探知条件等については本検討内で仮定を置いているため，この結果に示す効果が現状として実現可能であるとはいえないが，本検討で仮定した津波観測施設の「効果的な設置位置」の妥当性，及び多目的ブイを利用した津波警報システムが，津波警報システムとして十分な効果を持つ可能性があることを示したと考えられる．

c．グリッドごとの国際ネットワークでの人的被害軽減率（PMR）の比較

国際ネットワークにおける各グリッドの PMR を求め，図示した(**図４．８９**)．これは，各グリッドにおけるインターナショナル津波警報ネットワークの減災効果を定量的に示したものだと考えられる．これを示したことで，減災効果の恩恵を受けている地域が国際ネットワークを形成する動機となると共に，自地域にない津波警報システムを共同で維持管理していくことの動機となると考えられる．また，各地域の津波警報システムによる減災効果の差を定量的に示したことで，各国，各地域がインターナショナルの津波警報システムの費用負担の割合を考える際に活用できると考えられる．

表４．１４　リアルタイム津波警報のポテンシャルとの比較

人的被害軽減率(PMR)の期待値			
	リアルタイム津波警報のポテンシャル	インターナショナルネットワーク	国内ネットワーク
ALL	70%	68%	32%
IN	96%	94%	30%
BD	96%	96%	91%
MM	66%	56%	28%
TH	96%	96%	38%
MY	96%	96%	26%
ID	28%	24%	24%
LK	96%	96%	39%
MD	96%	96%	11%
NC	13%	9%	4%

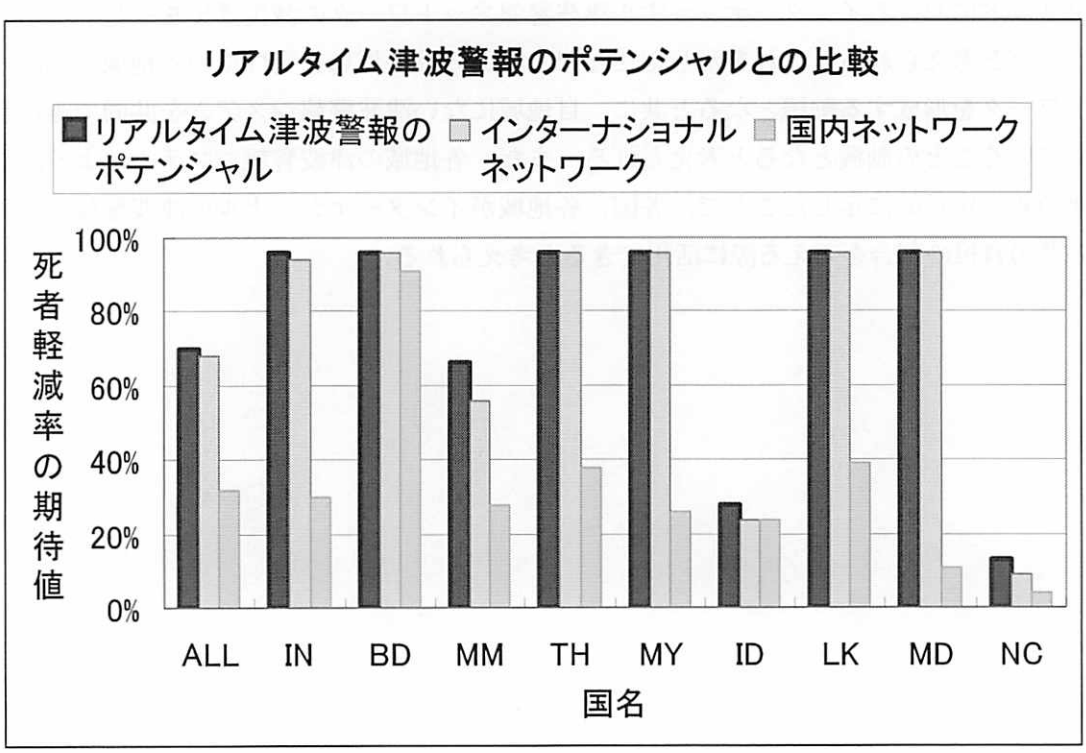


図４.88 各国におけるインターナショナルネットワーク時と国内ネットワーク時の PMR

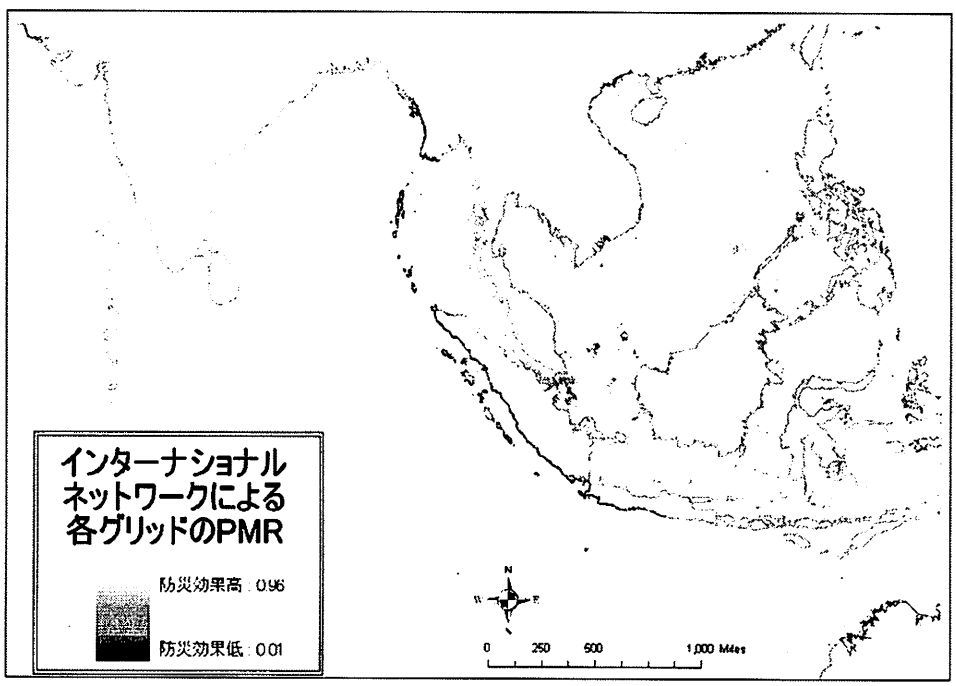


図４．８９　インターナショナルネットワークによる各グリッドの PMR

d．各地域ごとの減災効果をもたらすブイの設置位置の検討

各地域の費用負担について，費用と便益(減災効果)の関係をより明確に考えるために，「どの地域に設置されたブイが自地域にどれだけ減災効果をもたらしているか」を，以下の手順で検討する．

①まず，断層モデルの基準点の3つのセグメント(北部，中部，南部)に分けて考える．
②**図4．77，4．79，4．81**で，各セグメントで発生する津波を観測するブイが示されており，これを「当該セグメントで発生した津波に対して減災効果をもたらすブイネットワーク(当該ブイネットワーク)」と定義する．
③次に，各セグメントで発生した津波に対して，当該ブイネットワークによりどれだけ「減災効果」が得られるかを，各グリッドごとに以下の(式4.13)で表すことと定義する．

ブイネットワークによる減災効果
=（人的被害軽減率（PMR）の期待値）×（推定人的被害者数（PED）の期待値／人口）
…(4.13)

これは，各セグメントで発生する津波によるPEDの大きさと，当該ブイネットワークによるPMRを考慮した値になっており，「各グリッドの人口一人当たりの人的被害軽減度の期待値」を表している．

PEDを考慮せずにPMRのみで当該ブイネットワークの各地域への効果を評価した場合，被害の規模を考慮していない値となり，ブイネットワークによる減災害効果を十分に表せないことになる．例えば人口1500人のグリッドにおいて，「PEDを1000から200に減らした」ブイネットワークよりも，「PEDを10から1に減らした」ブイネットワークのほうが減災効果が高いということになってしまう．それを防ぐために，「人口一人当たりの人的被害軽減度の期待値（PEDの減少数の期待値）」をブイネットワークによる減災効果として定義した．
④各セグメント別に，グリッドごとの「ブイネットワークによる減災効果」の値を図示した(**図4．90～4．92**)．

これにより，各地域がどこのブイネットワークにより減災効果を得ているかが示されたことになり，各地域がどの地域に設置されているブイネットワークに対して費用負担をするのかを検討する際に活用できると考えられる．

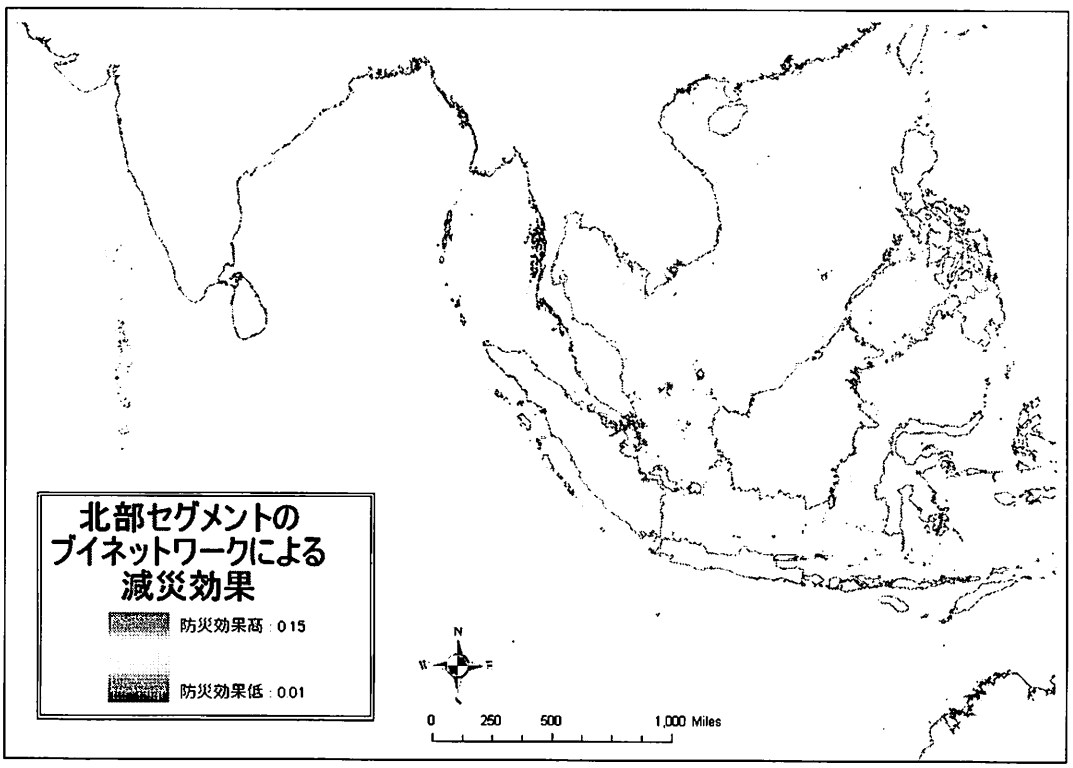


図４．９０　北部セグメントのブイネットワークによる減災効果

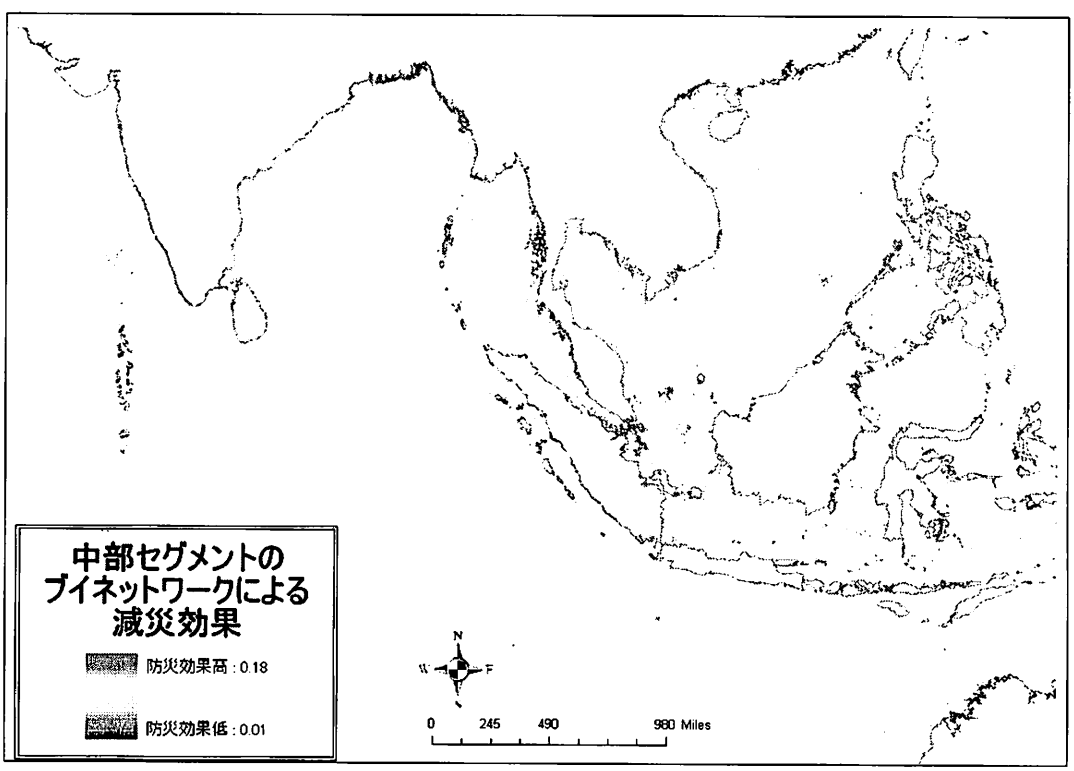


図４．９１　中部セグメントのブイネットワークによる減災効果

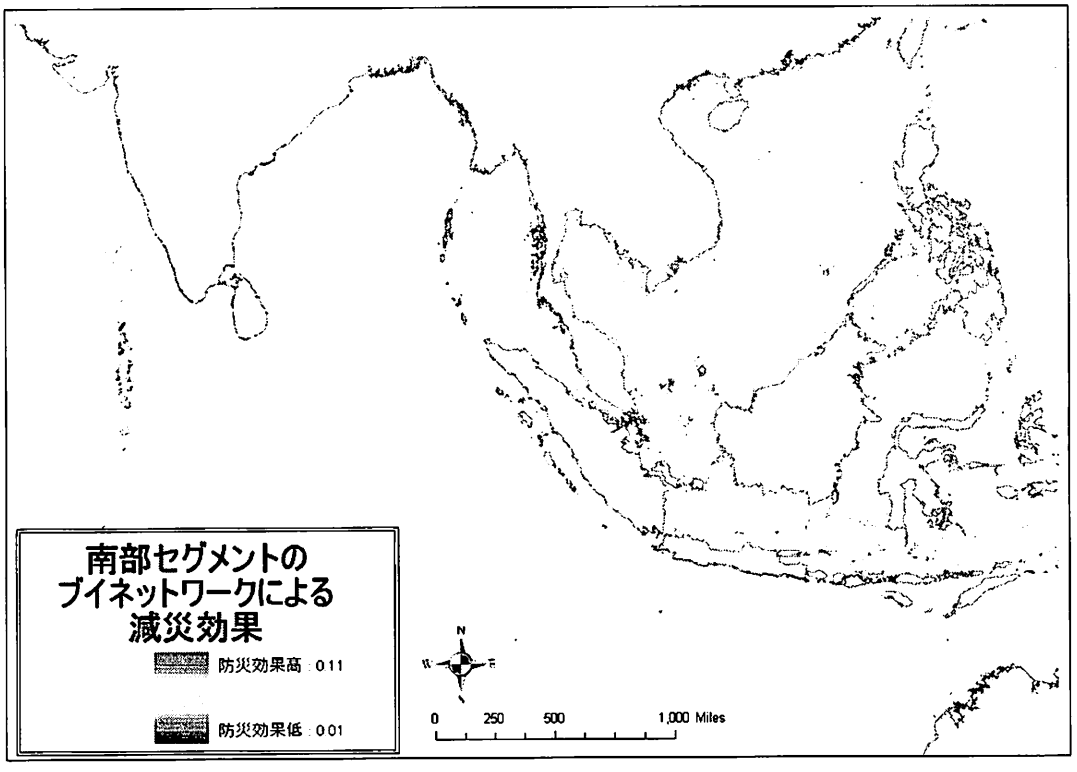


図４．９２　南部セグメントのブイネットワークによる減災効果

4．4　海山列に着目した遠地津波の最大波遅延要因の分析と予報精度向上に向けての課題

1）序論

津波の伝播特性を規定するのは海底地形である．ここでは，特に近年の津波観測事例を通じて，海山による津波の散乱や遠地津波の観測上問題となる最大波の遅延の問題に着目し，その特徴や防災上の問題点・課題について整理する．

2006年千島列島沖地震津波では，海山列で発生した散乱波の影響で，我が国への最大波到達が地震発生後6時間以降と大きく遅延した．この事例は，海山で励起される散乱波が最大波の到達を遅延させる危険性があること，散乱波の要因となる海底地形の把握と到達時間の予測が津波予報解除の基準を考慮する上で重要な課題である事を示唆している． 本研究では，太平洋を伝播して我が国に到達する津波に着目し，最大波の遅延が生じる条件を，津波波源の位置，地震の規模，散乱波の発生メカニズムとの関連で明らかにし，我が国の遠地津波の予報精度向上に向けた課題を整理する．

2）散乱源の特定

ここでは，太平洋に無数に存在する海山のうち，津波最大波の遅延を考慮した際に重要な海山を特定する．具体的には，Mofjeld ら(2004)が提案している Scattering Index[45)]を用いて我が国近海の散乱源（顕著な散乱波を発生させる海山地形）を調べ，その結果を数値解析によって検証する．次に，海山のスケールや我が国との位置関係，海山と我が国の間の海底地形の特徴などを考慮し，我が国太平洋岸における最大波遅延という観点から最も重要な散乱源を特定する．散乱源に関して，Mofjeld ら(2004)は Scattring Index という指標を用いて，散乱波が発生しやすい海底地形を評価した．Scattering Index の定義を以下に示す．

$$S = 1 - T_{min}$$

$$T_{min} = \frac{2\epsilon}{(1+\epsilon^2)}, \epsilon = \sqrt{H_0/H_1}$$

ここで，H_0, H_1 はそれぞれ海山上の水深と海山周辺の水深を表す．

Mofjeld らはこの指標を用いて，海山周辺の水深が4000mから6000mの領域で散乱波の発生に関して検討を行い，その結果を**表4．15**のようにまとめている．これによると，海山の頂面水深が1500mより浅い領域では散乱波が発生しやすいことがわかる．この基準を用い，我が国周辺の散乱源を調べた結果を**図4．93**に示す．この図において，白い部分は水深1500m以深の領域，黒い部分は水深1500m以浅の領域を表す．ただし，水深1500m未満の部分には島嶼も含む．こうして特定した散乱源は，数値解析結果を可視化して確認したところ顕著な散乱波を励起することが確認された．

次に，これらの散乱源のうち，太平洋岸での最大波遅延を考慮する際に重要な海山を選定する．散乱源の水平スケールに関しては，海山の水平スケールより波長が短い波が散乱

しやすいことがLonguet-Higgins(1967)の散乱波の理論解によってわかっているので，水平方向のスケールが大きい方が散乱源として重要である．次に，最大波の遅延という観点からは，散乱源は我が国に遠い方が危険であると考えられる．ここで，**図4．93**中の，天皇海山列に着目すると，天皇海山列には水平方向のスケールが大きな散乱源があり，我が国から約3000kmと離れたところに存在し，さらに我が国と天皇海山列の間には散乱源が少ない事がわかる．よって，最大波の遅延という観点から最も危険な海山は天皇海山列に存在する海山であるという事がわかる．

2）海山列による散乱波の周波数特性

ここでは，天皇海山列で発生する散乱波の周波数特性に関して，Longuet-Higgins(1967)の単一円筒の散乱波理論[46]を海山列に対してあてはめて検討する．Longuet-Higgins(1967)の単一円筒海山モデルを**図4．94**に示す．この円筒モデルに基づいて天皇海山列の代表的な海山，推古，仁徳，欽明海山周辺を円筒で近似し，発生する散乱波の振幅の理論解を比べる事で，天皇海山「列」で発生する散乱波の周波数特性を検討する．

図4．95に天皇海山列付近の水深，代表的な海山を含んだ領域，円筒でそれらの領域をモデル化した際の円及び円の直径（R)を示す．ここで，代表的な海山は頂面水深，円筒で近似した際の円の直径で選定した．モデル化の際は，水深3000m以浅の部分に着目してモデル化を行った．**図4．96**に推古海山，仁徳海山，欽明海山周辺を円筒モデルでモデル化し，入射波周期及び入射波波長に対する散乱波の振幅の理論解Bnを示す．Bnは以下のように定義される．

$$B_n = i^n \cdot \frac{J_n(v)J_n'(sv) - sJ_n'(v)J_n(sv)}{sJ_n'(v)H_n(sv) - J_n(v)H_n'(sv)}$$

ここで，J_n, H_nはn次の第1種ベッセル関数と第1種ハンケル関数，'は微分演算子である．sは海山周辺海域と海山頂部の水深比$s=(h2/h1)^{1/2}$，vは海山上の津波の波数k_2と海山の半径aによる無次元波数$v=ak_2=ak_1/s$である．**図4．96**から，周期12分以下，波長150km以下の領域にピークが多い事がわかる．これは，この領域の周期あるいは波長の津波が天皇海山列に入射した場合，励起される散乱波の振幅が大きくなりやすい傾向を示している．ところで，この150kmという値は，欽明海山を含む領域を円筒で近似した際の直径に等しい．この値を天皇海山列付近の水深5000mにおける長波の波速を用いて周期に直すと，11.29(分)となる．これより，周期が11分未満，波長150km以下の津波が天皇海山列で散乱されやすいことが分かる．

3）天皇海山列で発生する散乱波により最大波の遅延が生じる津波シナリオ

ここでは，天皇海山列で発生する散乱波によって最大波の遅延が生じる津波シナリオについて，数値解析的に検討する．具体的には，千島海溝，アリューシャン海溝，日本海溝，伊豆海溝，マリアナ海溝のプレート境界において，マグニチュード8クラスの地震を想定し，天皇海山列で発生する散乱波が我が国太平洋岸における最大波にどのような影響を与えているか，天皇海山列が存在する実地形データと，天皇海山列が存在しない仮想地形データに基づく計算波形を比較することにより検討する．ここでマグニチュード8というのは，2006年千島列島沖地震津波の事例を参考に決定し，天皇海山列が存在しない地形データは，越村ら(2007)[47]に倣い，天皇海山列付近の水深を一定値の5000mとする事で作成した．

図4．97本研究で検討した波源（図中の四角)の位置を示す．北米，中米，チリ海溝における津波シナリオを検討していないのは，これらの海溝で発生した津波によって天皇海山列で発生する散乱波が，最大波の遅延に寄与しないと確認されたためである．これは，天皇海山列が，我が国と波源の間に存在するために，北米，中米，チリ海溝で発生する津波が天皇海山列に到達し，我が国に到達するまでの時間と，天皇海山列で発生する散乱波が我が国到達する時間の差が小さいことが主因である（前方散乱)．波源モデルに関しては，千島海溝，アリューシャン海溝には，それぞれの海溝で発生した地震の履歴を考慮して，越村ら(2007)[12]の波源モデルを断層の基準点の位置及び断層の走向を変えて設定し，日本海溝，伊豆海溝，マリアナ海溝に関しては，阿部・今村(2007)[48]を参考に以下の相似則に基づいて求めた．

断層の走向は海溝軸と平行になる様に設定した．支配方程式は線形長波理論式，時間格子間隔は3秒とし．再現時間は12時間とした．地形データは，GEBCO(British Oceanographic Data Centre, 1997)の1分グリッドデータ[49]を用いた．

アリューシャン海溝での検討結果の一例を**図4．98**と**図4．99**に示す．

図4．98の実線は，天皇海山列が存在する実地形データに基づく計算波形，点線は天皇海山列が存在しない仮想地形データに基づく計算波形である．地震発生後約8時間後に見られるのが最大波であり，最大波において実線と点線の波形に違いが見られ，これより，天皇海山列で発生する散乱波の影響で，最大波の遅延が起こりうる事がわかる．ここでは，天皇海山列で発生した散乱波の到達後に，2006年千島列島沖地震津波の事例のように短周期成分の増加が見られない．宗本ら(2008)[50]は，千島海溝で発生した津波において，散乱波が後続波として卓越する場合，短周期成分の増加が起こるとしている． この散乱波到達後の周波数特性の違いは，我が国と天皇海山列と波源の位置関係の違いであると考えられる．つまり，千島海溝で発生した津波によって，天皇海山列で発生する散乱波は，波源から一度我が国とは別の方向へ放出され，それが天皇海山列で散乱して我が国に到達した成分であるが，アリューシャン海溝のこの事例においては，波源，我が国，天皇海山列の位置関係により，海山上で励起される成分と，励起されない成分の両方が我が国に来襲するため，

千島海溝における事例のような，顕著な周波数特性が見られないのだと考えられる．

最大波高分布図を**図４．９９**に示す．この事例では，比較的高い津波エネルギーが天皇海山列に到達しているのがわかる．そのため，散乱波の影響が比較的大きく出たのであろう．ここでは**図４．１００**に波源から我が国へ直接来襲する津波の走時(a)と，天皇海山列で発生する散乱波の走時(b)を示す．波源で発生した津波は3時間で天皇海山列最南端に到達し，そこで発生した散乱波は約7時間後に東北地方太平洋沿岸部に到達する事がわかる．これは，**図４．９８**における最大波出現時間と良く一致する．このようにアリューシャン海溝沿いで想定した津波のシナリオについて，実地形データと仮想地形データに基づいた波形の違いと，最大波高分布図及び，波向線法に基づいた津波の走時を踏まえた検討をした結果，アリューシャン海溝では，東経173°から180°付近で津波が発生すると天皇海山列の影響で最大波が遅延しうる事，その際の最大波は東北地方沿岸部で7時間後以降に来襲する危険性があることがわかった．

次に，日本海溝で同様の検討を行った結果，東北地方の沖合で津波が発生した場合，指向性の関係で天皇海山列に比較的強い津波エネルギーが天皇海山列に到達している事がわかった．しかし，天皇海山列の有無が計算波形に与える影響を調べたところ，波源の近くの計算波形出力地点では，天皇海山列の影響が殆ど無かった．これは，天皇海山列で発生する散乱波の影響よりも，波源が近い事による振動の継続影響の方が強かったと考えられる．この事例のように，東北地方の沖合で想定したケースでは，天皇海山列に強い津波エネルギーが到達することがわかった．その場合，波源付近では天皇海山列で発生した散乱波の影響は小さいが，波源から離れた場所では，散乱波の影響で振動が長期化することが懸念される．

最後に，伊豆海溝，マリアナ海溝で発生する津波に関しては，天皇海山列で発生する散乱波の影響は極めて小さくなる事がわかった．

以上の検討と千島海溝に関する検討を行った宗本ら(2008)の結果を総合し，我が国への最大波の遅延をもたらす津波波源の位置を特定した結果を**図４．１０１**に示す．天皇海山列で発生する散乱波の影響で最大波の遅延が起こりうるのは，マグニチュード8クラス以上の地震による津波が，千島海溝では北緯46°から49°，アリューシャン海溝では，東経173から180°，日本海溝では東北地方の沖で津波が発生した時である．ただし，東北地方の沖合で津波が発生した場合には，東北・北海道太平洋岸など比較的波源の近くの地点では散乱波の影響が小さいが，波源から遠く離れた場所では，散乱波の影響で振動が長期化し，最大波の遅延が生じることが懸念される．

4）遠地津波の予報精度向上に向けて

現状の津波予報・警報システムでは，2006年千島列島沖地震津波や，2009年パプアニューギニア地震津波のような，いったん海面震動が収まるかの様に見えて，その後，海山や島などの散乱波によって最大波が大きく遅延するような事例では，予報解除の判断を間違えてしまう危険性がある．これは，あらかじめ後続波として来襲することが予想される波動の性質や，最大波来襲時刻などが整理されていない事から起きると考えられる．そこで本研究では，遠地津波に関して，天皇海山列で発生する散乱波に着目して，地震の規模や，波源の位置，最大波の来襲時刻等について整理する事を試みた．他の様々な最大波遅延要因に関しても同様の検討をしていく必要があると考えられる．

特に，波源の位置から後続波として卓越する津波の有無，後続波の減衰特性についての経験則を整備し，最大波の来襲時間についての予測精度を上げることが津波予警報システムへの信頼性向上に不可欠である．

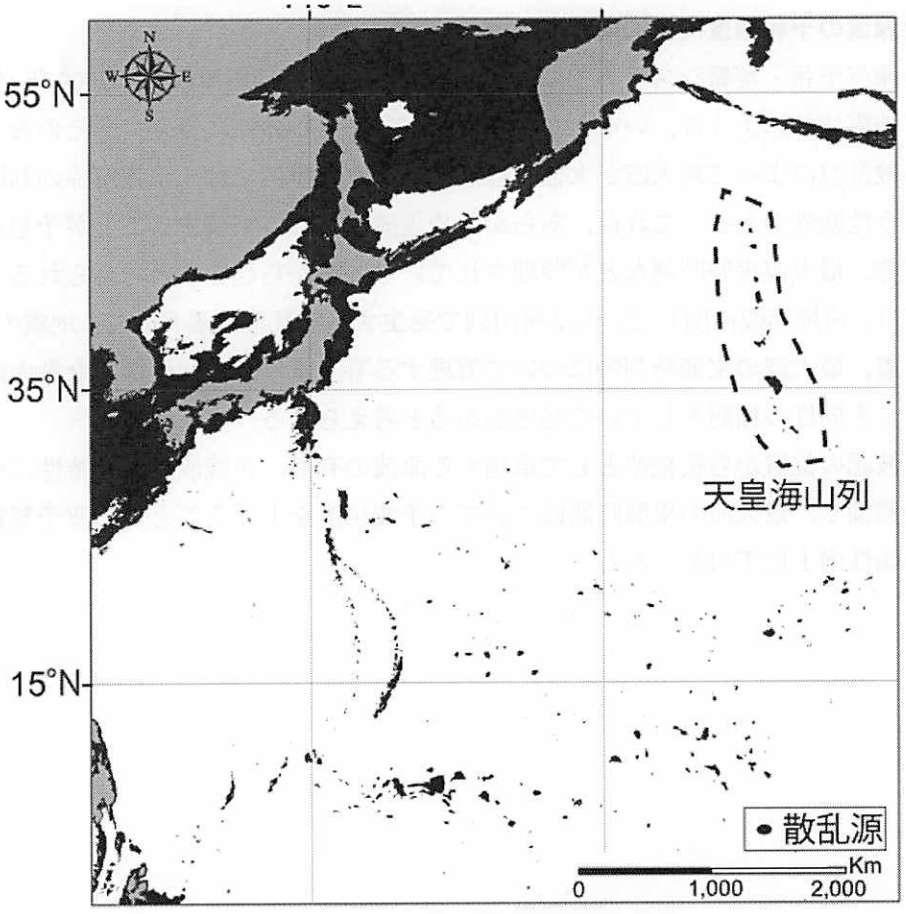


図４．９３　日本近海の顕著な散乱源

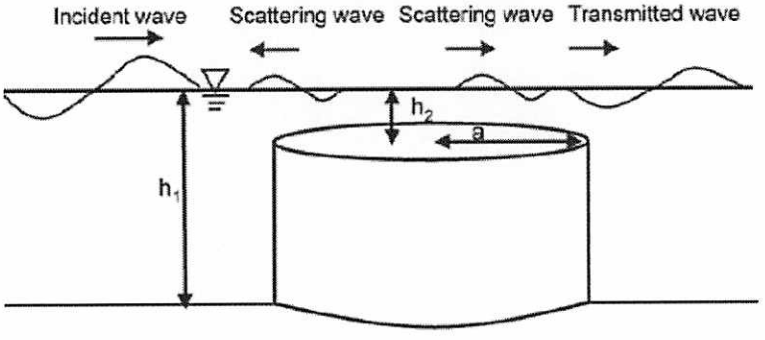


図４．９４　Longuet-Higgins の単一円筒海山モデル

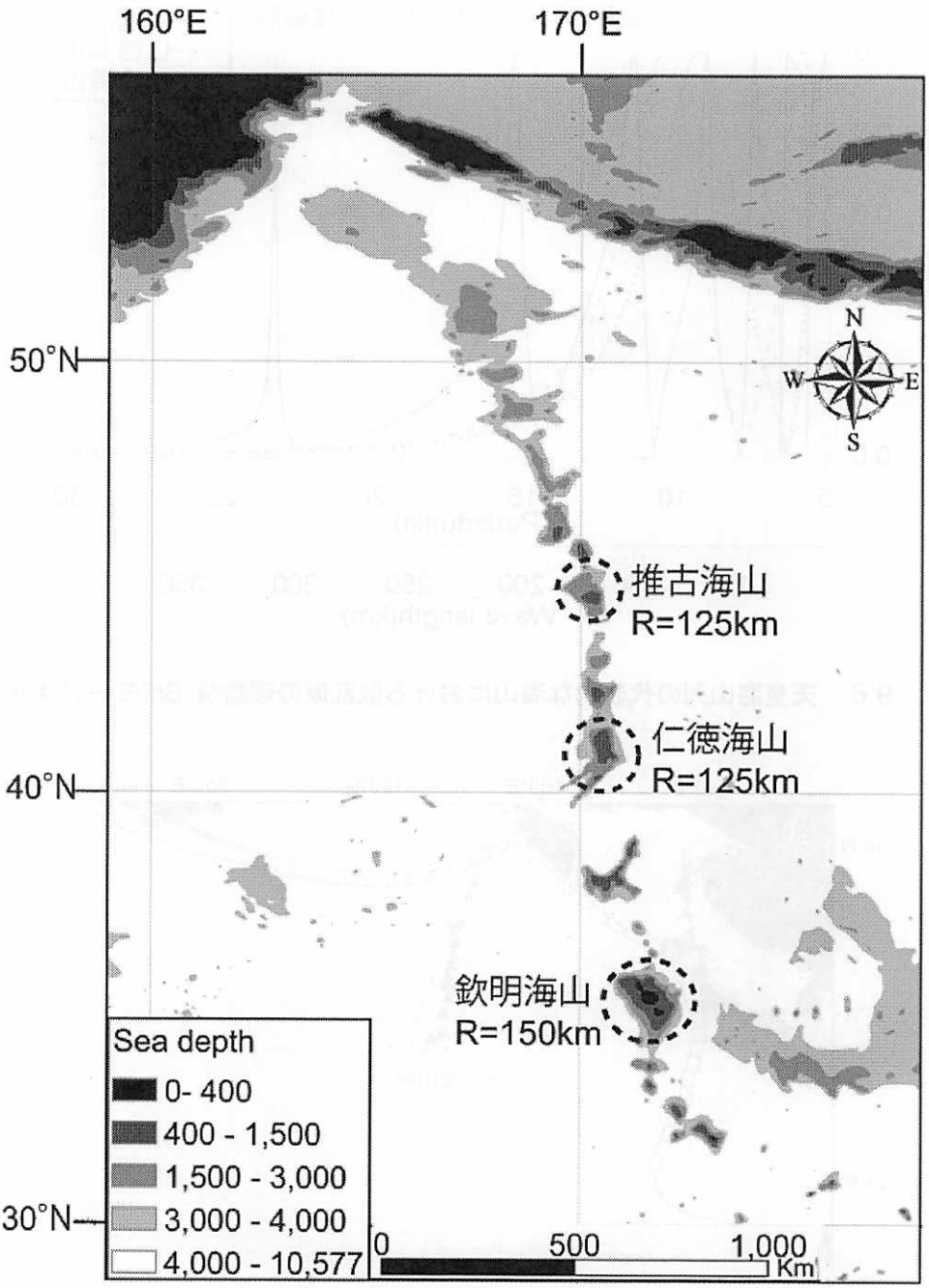


図４．９５　天皇海山列の代表的な海山

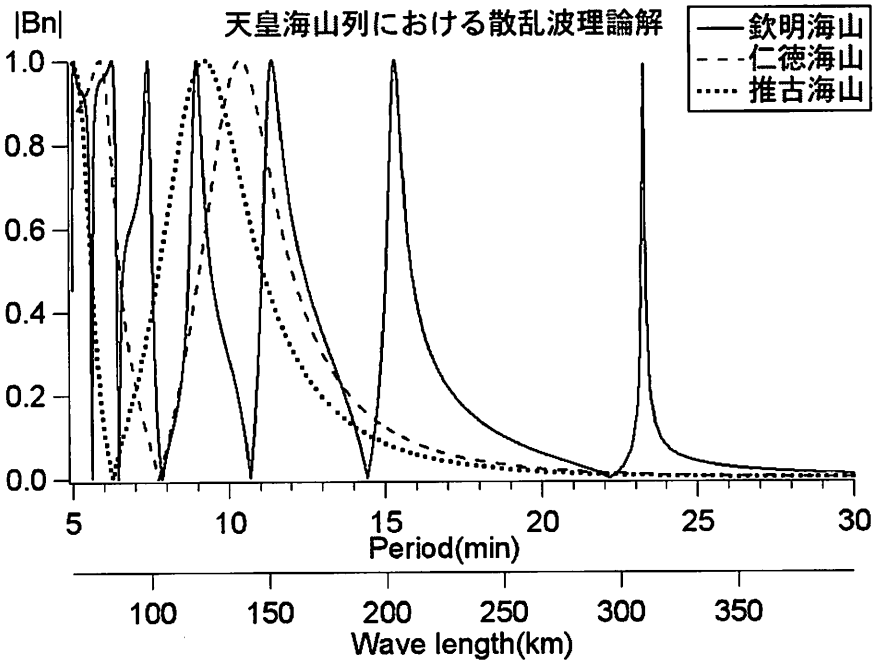


図４．９６　天皇海山列の代表的な海山における散乱波の理論解 Bn(モードは n = 2)

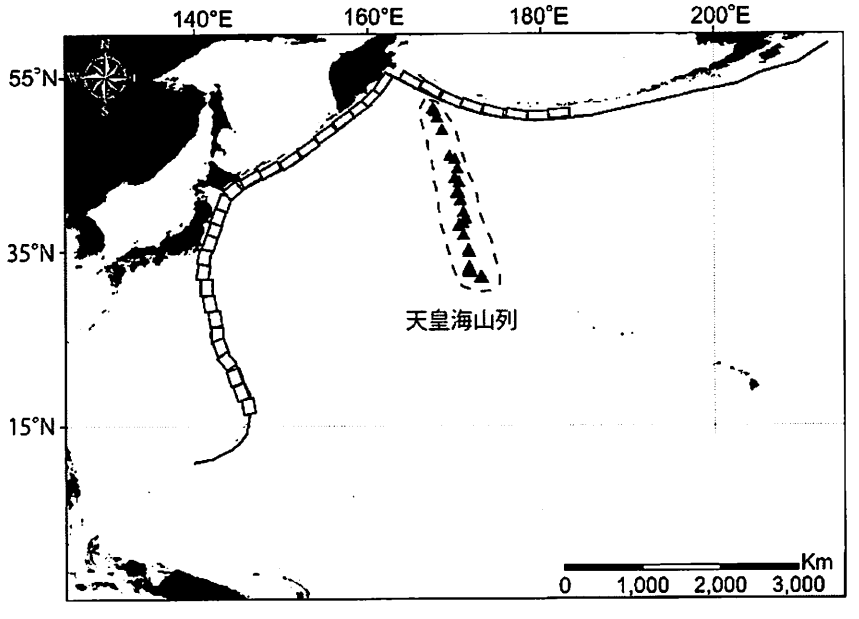


図４．９７　検討領域と想定した津波波源

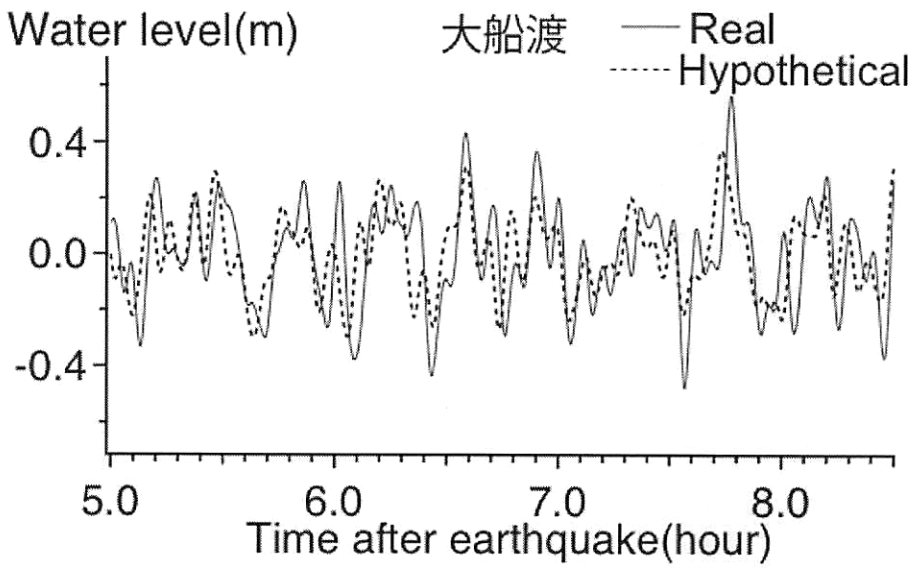


図４．98 アリューシャン海溝における検討の一例(波形) 実線: 実地形データに基づいたもの,破線:仮想地形データに 基づいたもの

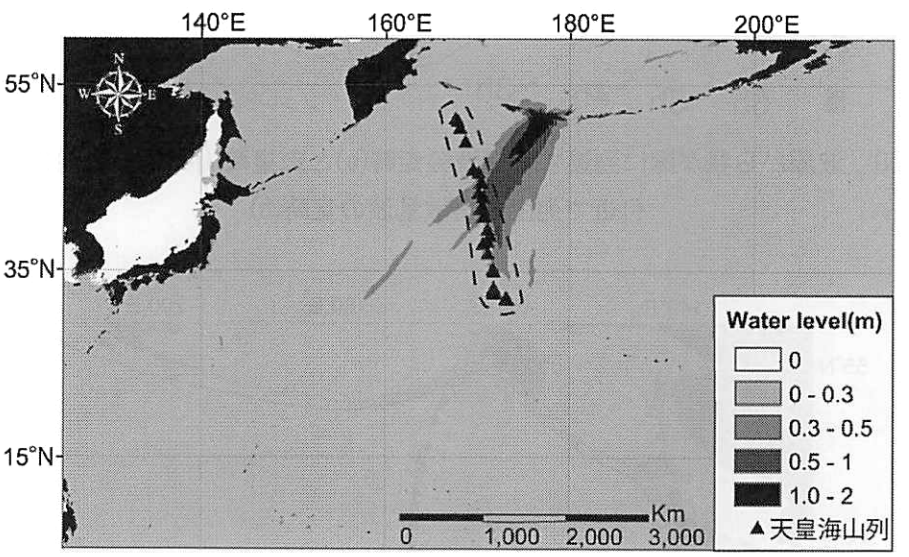


図４．９９　アリューシャン海溝で発生する津波の最大波高分布図 の一例

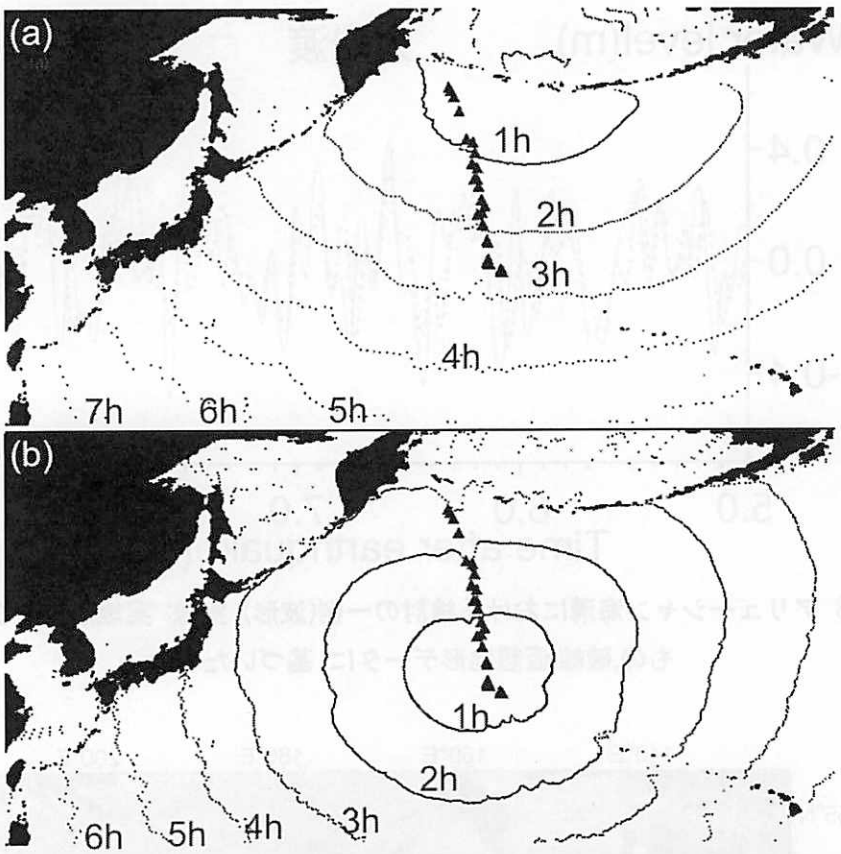


図４.100　波源から我が国に到達する津波の走時(a)と天皇海山列中最大規模の欽明海山付近で発生した散乱波の走時(b)

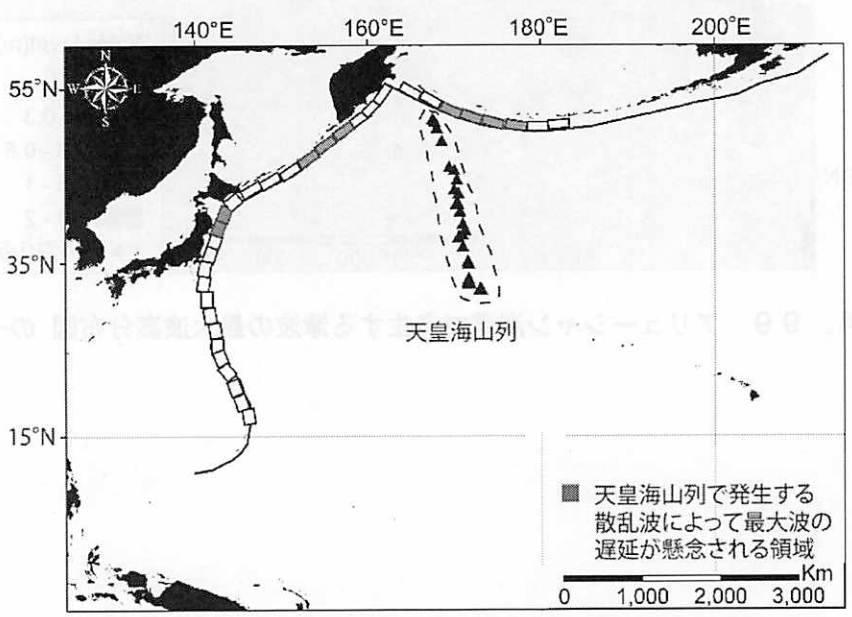


図４．１０１　我が国への最大波の遅延が起こりうる波源域

表４．１５　Mofjeld ら(2004)による頂面水深と津波の散乱の関係

頂面深度 (m)	散乱度
ー400	Major scattering
400ー1500	Substantial scattering

表４．１６　代表的な海山の比高と平均頂面深度

海山名	比高 (m)	平均頂面深度 (m)
欽明海山	5000	500
推古海山	5200	1000ー2000
仁徳海山	5000	1000ー1500

4．5　まとめ

本章では，津波の沖合観測技術と津波予報技術への利活用について，および沖合観測施設のネットワーク化による防災上の効果について検討した．また，特に近年の津波観測事例を通じて，海山による津波の散乱や遠地津波の観測上問題となる最大波の遅延の問題に着目し，その特徴や防災上の問題点について整理した．以下に得られた結論を列挙する．

各地域の津波危険度を，津波が発生した際に被害者の絶対数が多い地域の期待値として定量的に示すことができた．この結果は，津波防災対策推進地域の優先順位付けに利用できると考えられる．インド洋沿岸において，津波による人的被害の軽減に効果的な多目的ブイの設置位置を推定した．主にミャンマー，ニコバル，インドネシアが津波観測情報発信国となればインド洋全体での人的被害の軽減が可能であることが分かった．各地の人的被害軽減率を推計した結果，広範囲に多目的ブイのネットワークを構築すれば人的被害の大幅削減が可能であることが分かった．特にインド・スリランカ・バングラディシュ・タイなどでは最大 96%の軽減が可能である．また，多目的ブイネットワークによる人的被害軽減率の期待値は，沿岸各地のブイ設置・維持費用負担率を決める際にも活用できる．国毎の多目的ブイのネットワーク化の効果を，人的被害軽減率を尺度にして，自国内のみでネットワーク化する場合とインド洋全体で共有する場合に分けて評価した．その結果，インド洋全体で観測ネットワークを整備した場合には，自国のみの場合に比べて最大 9 倍程度の人的被害軽減が見込めることが分かった．多目的ブイによる観測ネットワークが津波警報システムとして十分な効果を持つことが分かった．

Mofjeld ら(2004)が提案している Scattering Index を用いた散乱源の特定手法と数値解析結果をふまえ，我が国における最大波の遅延という観点から，最も需要な海山は天皇海山列である事がわかった．Longuet--Higgins(1967)の単一円筒海山理論に基づき，天皇海山列で発生する散乱波の周波数特性を理論的に検討した．その結果，天皇海山列では，周期 11 分以下，波長 150km 以下の津波が散乱しやすいことがわかった．天皇海山列で発生する散乱波によって最大波の遅延が起こることが懸念される津波シナリオを特定した．遠地津波予報解除の基準を策定する際には，特に天皇海山列に入射する津波の波高と周波数特性に留意し，津波波源の位置，規模と，我が国への伝播途上で観測される津波波形のリアルタイム処理で得られる周波数特性，および散乱波の走時との関連で予報解除の基準を策定することが可能である．そのためのデータベースを，観測実績や数値解析を用いて構築することが，遠地津波の予報精度向上に繋がることがわかった．

第４章の参考文献・Webサイト

[1] 寺田幸博, 加藤照之：GPS津波計, 非破壊検査, Vol.52, No.7, pp.338-343 (2003)

[2] 加藤照之, 寺田幸博, 越村俊一, 永井紀彦：GPS津波計による津波観測, 月刊地球, Vol.37, No.3, pp.179-183 (2005)

[3] 越村俊一, 鈴木進吾, 大利桂子, 村田行泰, 寺田幸博, 河田恵昭, 加藤照之, 今村文彦；東南海・南海地震津波対策に向けての広域連携情報ネットワークの提案, 地域安全学会論文集, Vol.6, pp.139-148 (2004)

[4] K. Satake, T. Baba, K. Hirata, S. Iwasaki, T. Kato, S. Koshimura, J. Takenaka and Y. Terada : Tsunami Source of the 2004 Off Kii-Peninsula Earthquakes Inferred from Offshore Tsunami and Coastal Tide Gauges, Earth, Planets and Space, Vol.57, pp.173-178 (2005)

[5] 阿部郁男, 今村文彦, 並列計算によるリアルタイム津波（浸水）計算の高速化：海岸工学論文集, 第51巻, pp.251-255 (2004)

[6] 大垣圭一, 安間友輔, 越村俊一, 今村文彦：リアルタイム観測情報を用いた津波予報の段階的修正法, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.216-220 (2006)

[7] 日野亮太, 藤本博巳, 桑野亜佐子, 西野実, 金沢敏彦, 酒井慎一, 中尾茂, 三陸沖光ケーブル式海底地震・津波観測システムによる津波計測 −リアルタイム・沖合観測の有効性−, 月刊地球, Vol.37, No.3, pp.190-196 (2005)

[8] 竹内雅彦, 多目的ブイを用いた津波警報システムの人的被害軽減効果と要求性能に関する研究, 東京大学大学院工学系研究科修士論文, 135p., (2008)

[9] 永井紀彦・加藤照之・額田恭史・泉裕明・寺田幸博・三井正雄：沖合・沿岸・オンサイト観測を組み合わせた津波観測網に関する提言, 土木学会・海洋開発論文集, 第21巻, pp.61-66 (2005)

[10] National Oceanic and Atmospheric Administration's, National Data Buoy Center HP : Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunami(DART)
http://www.ndbc.noaa.gov/dart/dart.shtml

[11] National Oceanic and Atmospheric Administration's, National Data Buoy Center HP : http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml

[12] 永井紀彦：GPS津波計を活用した津波監視網構想

[13] 大垣圭一ら：リアルタイム観測情報を利用した津波予報の段階的修正法,海岸工学論文集, 第53巻(2006),土木学会,pp.216-220

[14] 大垣圭一ら：リアルタイム観測情報を利用した津波予報の段階的修正法,海岸工学論文集, 第53巻(2006),土木学会,pp.216-220

[15] 藤井雄士郎,06年11月千島沖地震による津波, 活断層研究センターニュース no.62 2006年11月号 http://unit.aist.go.jp/actfault/katsudo/news/no.62/topics/index.html

[16] 泉宮尊司ら:時間平均された海表面流速場を用いた津波のリアルタイム予測,海岸工学論文集,第 53 巻,2006,土木学科,pp246-250

[17] National Oceanic and Atmospheric Administration's, National Data Buoy Center HP : Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunami(DART) http://www.ndbc.noaa.gov/dart/dart.shtml

[18] 日立造船 HP: http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/koho/press/GPS2007/gps2007.html

[19] 越村俊一：2004 年 12 月インド洋大津波の数値シミュレーションと早期津波被害把握に向けての技術展望,消防科学と情報,No82,2005,pp.12-18

[20] KOWALIK : The Tsunami of 26 December 2004:Numerical Modeling and Energy Considerations, 22nd IUGG International Tsunami Symposium, Chania, 27-29 June, 2005

[21] 大家隆行：2004 年インド洋大津波によるバンダ・アチェ市街地の津波氾濫解析と被害評価,海岸工学論文集,第 53 巻(2006),土木学会,pp.221-225

[22] 岡本睦：避難行動シミュレーションに基づく避難困難度マッピングシステムの構築,2007.3

[23] 越村俊一：インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャルの評価,海岸工学論文集,第 52 巻(2005),土木学会,pp.1416-1420

[24] KERRY SHIE,THE SUNDA MEGATHRUST –PAST, PRESENT AND FUTURE, Journal of Tsunami Vol1, No1 (2007) 1-19

[25] 東北大学:TUNAMI-CODE(Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Tsunami), 2007, 6, 11

[26] Mansinha,L. and D.E.Smylie. : The displacement ields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, 1971, Vol.61, No5, pp1433-1440

[27] Wells, D. L. and K. J. Coppersmith : New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, Bulletin of the Seismological Society of America,2005,84,(4),pp.974-1002

[28]佐藤良輔編著：日本の地震断層パラメター・ハンドブック, 鹿島出版会,1989

[29]佐藤良輔編著：日本の地震断層パラメター・ハンドブック, 鹿島出版会,1989

[30]越村俊一：インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャルの評価,海岸工学論文集,第 52 巻(2005),土木学会,pp.1416-1420

[31]越村俊一：インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャルの評価,海岸工学論文集,第 52 巻(2005),土木学会,pp.1416-1420

[32]岡本睦:避難行動シミュレーションに基づく避難困難度マッピングシステムの構築,2007.3

[33] 現在は LandScan2005 が公開されている. http://www.ornl.gov/sci/landscan/landscan2005/landscan05_readme.html

[34])Koshimura et al., Developing Fragility Functions For Tsunami Damage Estimation Using

Numerical Model And Post--Tsunami Survey Data From Banda Aceh, Indonesia, Coastal Engineering Journal, submitted

[35]室戸沖ＧＰＳ津波計沖合実証実験データ公開ページ http://www.tsunamigps.com/

[36]片田敏孝, 東海豪雨災害における住民の情報取得と避難行動に関する研究,河川技術論文集,第 7 巻 2001,6

[37]片田敏孝,GIS を用いた災害情報伝達のシミュレーション分析

[38]岡本睦:避難行動シミュレーションに基づく避難困難度マッピングシステムの構築,2007.3

[39]平成１６年度科学技術振興調整費　緊急に対応を必要とする研究開発等
スマトラ島沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究 調査報告書

[40]大家隆行：2004 年インド洋大津波によるバンダ・アチェ市街地の津波氾濫解析と被害評価,海岸工学論文集,第 53 巻(2006),土木学会,pp.221-225

[41] Yoshiro Fujii et al : Tsunami Source of the 2004 Sumatra–Andaman Earthquake Inferred from Tide Gauge and Satellite Data, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No. 1A, pp. S192–S207, January 2007

[42]越村俊一：インド洋における巨大地震津波災害ポテンシャルの評価,海岸工学論文集,第 52 巻(2005),土木学会,pp.1416-1420

[43] 木下繁夫・大竹政和 監修：強震動の基礎 ウェブテキスト 2000 版, 3-2-4 グーテンベルク・リヒターの関係式 http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/gk/publication/1/I-3.2.4.html

[44] 木下繁夫・大竹政和 監修：強震動の基礎 ウェブテキスト 2000 版, 3-2-4 グーテンベルク・リヒターの関係式 http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/gk/publication/1/I-3.2.4.html

[45] Mofjeld, H. O., C. M. Symons, P. Lonsdale, F. I. Gonzalez and V. V. Titov:Tsunami Scattering and Earthquake Faults in the Deep Pacific Ocean, Oceangraphy, 17(1), pp.38-46 (2004)

[46] Longuet-Higgins, M.S.:On the trapping of wave energy round islands, J. Fluid Mech., 29(4), pp. 781-821 (1967)

[47] 越村俊一, 宗本金吾, 大家隆行, 柳沢英明, 阿部郁男, 今村文彦:2006 年千島列島沖地震津波の伝播特性における天皇海山列の影響評価, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.171-175 (2007)

[48] 阿部郁男, 今村文彦：津波データベースを利用した簡易的な津波減衰指標の提案, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.186-190 (2007)

[49] British Oceanographic Data Centre, The Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas (CD-ROM) (1997)

[50] 宗本金吾・越村俊一・今村文彦 ：千島海溝で発生する津波の後続波に関する研究, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.296-300 (2008)

第５章　津波避難シミュレーションに基づく津波避難態勢の構築

５．１ はじめに

１）研究の背景

従来，都市施設や都市空間の安全性を議論する際には，主に構造物自体の強度を中心に議論されることが多かった．しかし，地下街・地下駅・大規模展示場などのように，不特定多数の利用者が存在する空間では，施設の強度の確保に加えて，利用者の避難安全性の観点からの議論が重要な意味を持つ．

さらに地震時における火災や津波などの災害が発生した際には，同時多発的な被害発生の危険性を伴っており，通常利用可能であった出口が転倒物によってふさがれてしまったり，構造物自体あるいは周辺の設備の被災によって利用できなくなることも考えられる．また，火災や津波といった災害時の状況は時々刻々と変化する．そのような場合には，即座にその状況を把握し，利用者を安全な出口へ誘導する事は，災害時の被害を軽減させるために大きな意味を持つはずである．

ところで，これらの避難安全性の問題を議論するためには，「人間行動」を扱わなくてはならないが，従来この種の研究は「過去の災害事例調査」「被験者実験」「コンピュータシミュレーション」を用いて行われてきた．

「過去の災害事例調査」は，実際の災害時における避難行動を知ることができるという点においては貴重である．しかし，事例の数は必ずしも多くないため，得られる情報の量にも限界があるほか，避難できず亡くなった人がどのように行動したのかという情報は得ることができないなどの欠点がある．

また，「被験者実験」は，実施者が状況を管理することができるため，必要な情報を得やすいという利点があるが，被験者は生命の危険にさらされているという危機感はないため，実際の災害時とは心理状況が大きく異なることは避けられない．また，大規模な空間を用いて多人数による実験は簡単に実施できるものではなく，同様の実験を何度も繰り返し行うことは事実上不可能である．

ところで避難安全性の問題を議論するためには，施設の計画段階での検討が重要であると考えられるが，上記の 2 つの方法は，計画段階の構造物に対して適用することが不可能である点は致命的である．

一方「コンピュータシミュレーション」を用いた避難行動解析は計画段階の空間の安全性の評価が可能であり，この点で有利である．コンピュータシミュレーションでは，「用いるモデルが現実をきちんと再現できるかどうか」が重要なポイントとなるが，上記の「過

去の災害事例調査」「被験者実験」などで得られたデータを活用してシミュレーションモデルを構築すれば，再現性を向上させる事ができる．そして構築されたモデルを用いて対象構造物に適用し，様々な条件を調整しながら繰り返し解析する事によって，安全性の高い設計が可能となる．実際に利用されている空間に適用すれば空間利用の検討や危険な場所の認知にも役立つ．

近年では津波やその危険性を含んだ地震の発生が相次いでいる．世界に目を向けてみると 2004 年 12 月に発生したスマトラ島沖地震では 10m 以上の津波が数回押し寄せ，場所によっては 30mを越す津波を観測した場所もあり，その被害は人的被害，物的被害，経済損失のどれをとっても，これまでに類をみないほどのものとなった．2006 年 7 月に発生したジャワ島地震においても津波が発生し，死者行方不明者を出した．さらにこれら二つの地震と同じスンダ海溝沿いを震源として，スマトラ島沖地震と同規模の地震が発生した場合には 2004 年の地震以上に被害が発生する可能性がある．

日本においては，幸い津波を伴う地震による被害は 1994 年の北海道東方沖地震以来，発生してはいないが，津波を伴う地震自体は依然として発生している．さらには今世紀中にも東海・東南海・南海地震の発生が危惧されている．中央防災会議によると，人的被害は死者が最大で約 1 万 7 千人と予想されており，その半数近くが津波の影響によるものであるとの報告もある．これらの津波災害を軽減するためには，防御施設の整備強化などハード面の対策に加えて，避難体制や情報伝達体制の確立などといったソフト面までを包括的に考慮した総合的な津波防災体制の確立が必要となってくる．

2）研究の目的

本研究では，迫りくる大規模地震による被害の軽減に向けて，構造物の強度の確保や防御施設の強化などといったハード面の対策に加え，情報伝達体制や住民の意識といったソフト面の対策までを含んだ総合的な防災体制を確立することを最終的な目標としている．

そのために津波災害が懸念される地域または実際に津波により多くの被害を出した地域を対象空間と設定し，目黒らにより開発された「避難行動シミュレーションモデル」を用いて，現状の防災施設の把握・評価など，詳細な検討を行う．さらにそのなかで得られた結果を盛り込んだ情報閲覧ツールを作成し，住民の防災に対する意識を高めることを通じて，行政側・住民側の両サイドから地域の防災力を向上させ，被害を軽減させることを目的としている．

具体的には，尾鷲市を対象としたシミュレーションにおいては，まず，防潮堤などといったハード施設の効果の検証を行い，防御施設の重要性を示す．次にソフト面の検討として，津波による被害者を減らすため，避難経路の検討を行った．これらに加えて，津波が来襲することが予想されている地域に関して，予想される被害の情報を開示するツールを作成する．このツールにおいては，これまでのように地域全体を見る行政側の視点だけでなく，避難者各個人の視点を考慮し，自らの住む場所の周りではどのような状況になるか

をより現実的に考えてもらえるようなものにする．

また，実際に津波による被害を出した地域として，スマトラ島沖地震の際に津波によって被災したスリランカのゴール地方を対象として避難シミュレーションを行った．スマトラ島沖地震の際に甚大な被害を被った地域は津波に関する情報が的確に伝えられなかったことによるものが多い．そこで，本研究においては情報を受け取る時間を変化させることで，現地の方々に情報伝達設備の必要性を示すことを目的としている．

3）既往の研究

都市空間からの避難安全性に関する研究は，主に建築の分野で行われてきた．被災時の人間行動をコンピュータシミュレーションによって解析するためには，対象空間や避難者をどのようにモデル化するかが問題となる．

現在までに様々なモデル化が提案されているが，ここで少しそれらの特徴を整理する．

まず，対象空間のモデル化に関しては，①ノードとリンクを用いてネットワークに抽象化したオートマトンモデル，三次元ネットワークモデル，遺伝子モデルなどのネットワーク型モデル，②対象空間を適当な大きさのメッシュに分割し，各メッシュの収容人数・密度やメッシュ間の移動人数を制限する事により群集を表すメッシュ型モデル，③対象空間を座標系で表現し，その座標空間内を避難者が自由に移動するような座標系モデル，の３つに大別される．

次に，避難者のモデル化に関しては，①群集としての避難行動を密度流などの流体として扱う集団型モデルと，②避難者ひとりひとりをそれぞれ個別に扱う個人型モデルに分類できる．集団型モデルは避難者全体の流れを把握するのに適しているという利点を持つ反面，個々の人間行動を表現するには限界があり，特に避難者の心理状態などを反映させることなどは困難である．これに対して個人型モデルは，避難者の歩行速度の違いや対象空間の地理に対する認知度に差をつける事が可能であり，また周囲の避難者の流れに同調する避難者の心理や，避難者同士での情報交換，なども考慮する事が可能である．平井らによるパニック時の群集行動モデル，位寄による心理状態を考慮したモデル，仲谷らによる避難行動の情報処理モデル，海老原・大槻らによる災害時人間行動シミュレーションなどがこの範疇に入る．

これらの集団あるいは個人の行動決定モデルについても，様々な理論が提案されており，情報処理理論，ポテンシャル理論，磁場理論，流体理論，力学理論などが応用され，最近ではマルチエージェント理論が避難行動の研究によく用いられている．

また，避難の対象となる空間の大きさも，都市全域などかなり広い地域からの避難行動を対象とした広域型避難シミュレーションと，建物等の限定領域からの避難行動を対象とした局所型避難シミュレーションの２つに分類できる．

本研究では，避難者のモデル化については個々の避難者の個人特性を考慮できる「個人型モデル」，対象空間のモデル化については「メッシュ型モデル」を採用している．また避

難者の行動決定については「ポテンシャルモデル」を採用している．本論文では避難の対象となる空間の広さは，閉空間からの避難を対象とした局所型シミュレーションを紹介しているが，モデルの簡便性から多数の避難者が大規模な空間内を移動する現象を取り扱うことが可能であるので，全く同じ手法を用いて広域型シミュレーションに適用する事も可能であるし，シミュレーションの結果として「集団型モデル」と同様の集団としての避難行動も再現できる．

ポテンシャルモデルを採用した過去の研究成果として，目黒・原田ら(1999)[1)]はコンピュータシミュレーションを行い，都市施設における最適な避難誘導による効果を研究している．ここでは，災害時に出入口がふさがれた場合避難誘導の違いにより残留避難者数の減少に対して変動があるということを言及している．さらに，藤田ら(2002)[2)]により利用動向を踏まえた上での現実性の高い避難行動シミュレーションが行われている．その後，目黒・織田ら（2005）[3)]は高層ビルにおける避難行動シミュレーションにおいて混雑度や避難時間といった観点から避難安全性を比較することで，効果的な避難誘導方法を提示している．同時に津波災害時の避難行動シミュレーションへと拡張され，行政の情報伝達体制や住民の意思決定などソフト面の検討に加えて，津波避難ビルの効果や道路閉塞の影響などハード面の評価を行っている．

4）本研究の構成

5．2では，解析に使用したモデルについて説明する．まず，ポテンシャルモデルの基本的な概念から，実際に対象となる空間に対してのポテンシャルの与え方・避難誘導の扱い方等を記述する． 次に避難者のモデル化で解析の中での人間の行動について，津波のモデル化で使用した津波データについて，情報伝達のモデル化では本研究で用いた情報伝達についてそれぞれ説明する．

5．3では，スマトラ沖地震によって被害を受けた，スリランカ・ゴール地方を対象としたシミュレーションについてまとめていく．ここでは簡易的に作成した津波データを用いて避難開始時刻を変更したときの被害の比較を行う．

5．4では，三重県尾鷲市を対象とした津波災害時の避難行動シミュレーションを行う．まず，人的被害の算出方法に変更を加え，より力学的に人的被害を評価する．次に，防御施設の効果の検証として，実際に存在する防潮堤の評価を行う．最後に，人的被害を減らすため，これまでに得られた結果を参考に，より安全性の高い経路の検討を行う．

5．5では，津波災害時の避難行動シミュレーションに基づく避難困難度マッピングシステムの構築を行う．これまで，様々なシミュレーションにおいて対象とした地域全体を見るものが多かったが，これは住民個人の視点から津波防災対策の効果が見えるシステムとなっている．

そして**5．6**において，本論文で得られた結論および知見をまとめ，将来に残された課題を整理し，今後期待される本研究の方向性を示す．

5．2　解析手法

1）ポテンシャルモデルの概要

本研究で用いるポテンシャルモデルでは，まず対象空間は適当なサイズのメッシュに区切って考える．メッシュの1辺のサイズ d は任意に決めることが可能であるが，空間内の構成や歩行者の速度と，解析に要する時間への影響を考慮すれば，通常は d ＝1.0[m]程度を用いるのが適当であると考えられる．より複雑で小さなサイズの障害物などを考慮すべき空間に対しては，メッシュサイズを小さくすれば良い．逆に，広い都市空間を対象として，避難所などへの広域な避難行動を扱う場合には，もっと大きなメッシュサイズの適用が有利になる．

また避難行動シミュレーションの時間ステップ dt も，同様の理由で，dt＝1.0[s]程度が適当であろう．もちろん適切な dt は解析の対象に応じて変化するものである．

避難行動をコンピュータシミュレーションによって再現する場合には，避難行動に影響を与えると考えられる「対象空間の平面構成」「災害状況」「避難者の個人属性」「群集の密度」などのパラメータを可能な限り詳細に分析し用いることによって，細かい環境設定を行い，現実に近いシミュレーションを可能にすることができると考えられる．しかし現実的には，パラメータの数をいたずらに増やすことはプログラムを複雑にしてしまい，さらには解析に要する時間も長くなってしまうため，避難行動に大きな影響を与えると考えられるパラメータを効率よく抽出し，それらを簡単にモデル化する手法を構築することがポイントとなる．

本研究で用いる避難行動シミュレーションでは，対象とする空間をポテンシャル場として表現している．「対象空間の平面構成」「避難者の個人属性」「災害状況」等をポテンシャルという統一した概念で扱うことにより，計算時間を短くすることができる様に工夫しているのである．

ポテンシャル場は避難者毎に定義され，避難者の位置の変化や時間の経過とともに変化する．任意時刻に任意地点に存在する避難者に対するポテンシャル分布は，主に次にあげる3つのポテンシャル分布の重ねあわせとして表現されている（**図5．1**）．

a．物理的な要因によるポテンシャル

このポテンシャル分布は，対象空間が物理的な空間配置に基づいて有するポテンシャルである．壁や柱などの障害物は正のポテンシャルを有し，出口や出口の存在を示す避難誘導灯は負のポテンシャルを有する．物理的要因に起因するこのポテンシャルは全避難者に対して共通で，時刻によっても基本的には変化しない．

b．個人特性によるポテンシャル

このポテンシャル分布は避難者の個人特性を避難行動に反映するためのポテンシャルである．一般の災害時の避難行動を考えると，付近にすぐに利用できる出口を発見できない場合，避難者は多少遠くても自分がよく知っている出口を利用する傾向がある．そこで，ある避難者が「よく知っている出口」は，「知らない出口」よりも低いポテンシャルを生じる事としている．もちろん「よく知っている出口」というのは，避難者によって異なる．

また，発災時に最初はしばらく周囲の様子を見る避難者や他の避難者に追随する傾向の強い避難者など，与えられた情報に対する反応もひとりひとり異なるはずである．従って，個人特性によるポテンシャルは，避難者ごとに異なり，時刻によっても変化する場合がある．

c．災害要因によるポテンシャル

このポテンシャル分布は火災などの災害による影響を取り扱うためのポテンシャルである．火災やそれによる煙などが発生すると，正のポテンシャルが生じる．またこのポテンシャルは時刻とともに拡散していく．地震時などに，設備の損壊や転倒などにより出口や通路の一部が使用不可能となったりする影響も災害要因による正のポテンシャルとして表現する事ができる．

この様にして決められた対象空間内において，それぞれの避難者は，時間ステップごとにポテンシャルの低い方を進行方向として移動を繰り返す事によって，最終的に出口に辿り着く．

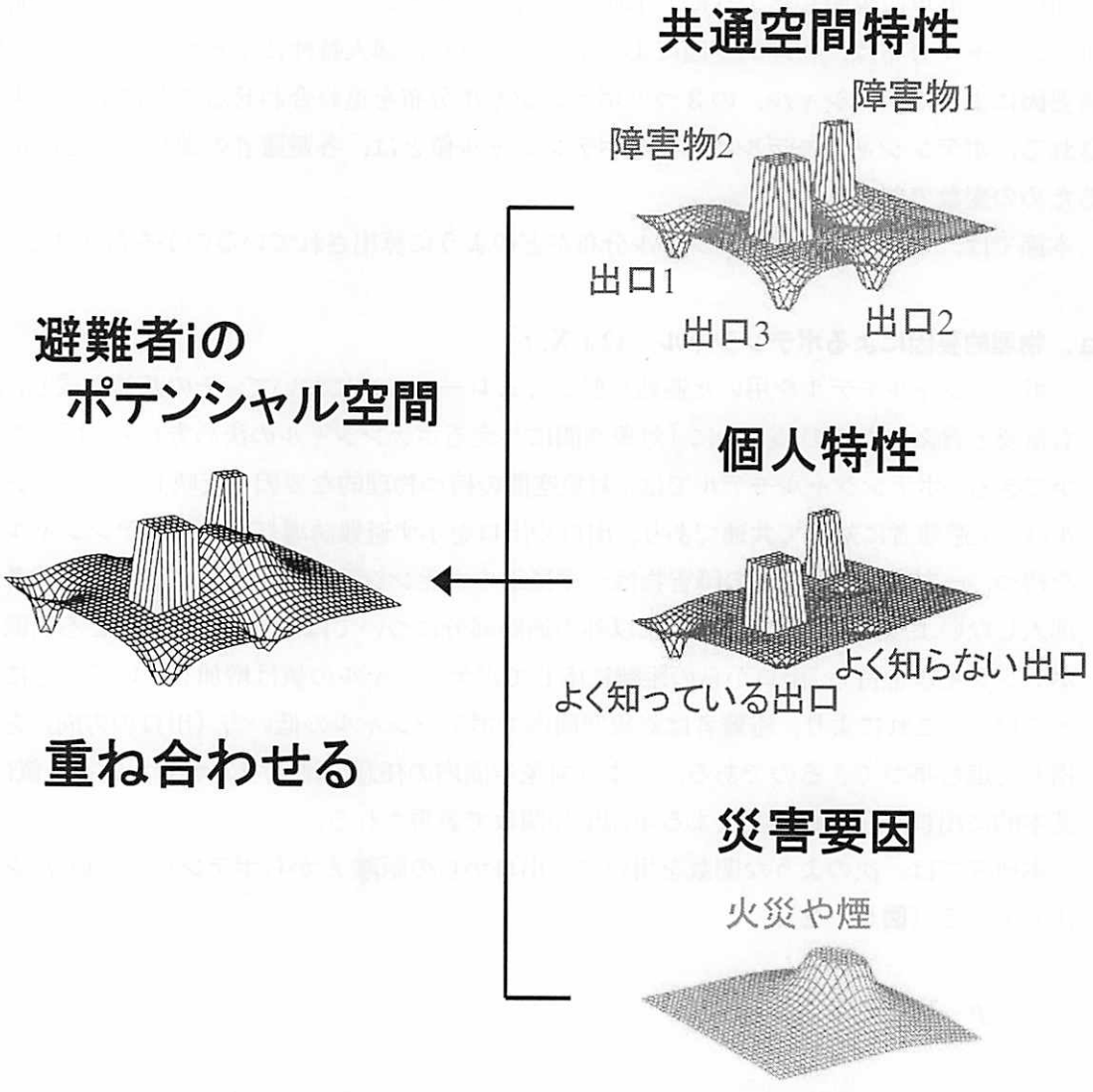


図５．１　ポテンシャルの重ね合わせ

2）対象空間のモデル化

前節でも簡単に説明したように，本研究で用いるポテンシャルモデルでは，対象空間のポテンシャル分布は，物理的要因によるポテンシャル，個人特性によるポテンシャル，災害要因によるポテンシャル，の３つのポテンシャル分布を重ね合わせることによって決定される．ポテンシャルモデルにおけるポテンシャル値とは，各避難者の進行方向を決定するための変数である．

本節では，それぞれのポテンシャル分布がどのように算出されているのかを解説する．

a．物理的要因によるポテンシャル　$\Omega_{ij}(\mathbf{X}, t)$

ポテンシャルモデルを用いた避難行動シミュレーションにおいて，その基盤を成し，最も重要と言えるもののひとつに「対象空間に与えるポテンシャルの決め方」をあげることができる．ポテンシャルモデルでは，対象空間の持つ物理的な要因を反映したポテンシャルは，全避難者に対して共通であり，出口や出口を示す避難誘導灯は負のポテンシャル値を持つ．一方，壁や柱などの障害物は一律に正のポテンシャル値を持っており，避難者が進入しないようになっている．それ以外の通路部分については，出口に近いところ程低いポテンシャルを持ち，出口からの距離に応じてポテンシャルの値は増加していくことになっている．これにより，避難者は対象空間内でポテンシャルの低い方（出口の方向）を目指して進む事ができるのである．つまり対象空間内の任意の地点でのポテンシャル値は，基本的に出口からの距離で決まる単調増加関数で表現される．

本研究では，次のような関数を用いて，出口からの距離 L からポテンシャル値 P を算出している（**図５．２**）．

$$P = -C \times exp(-\beta \times L) \tag{5.1}$$

ここで採用した関数は，L が小さい所では勾配が急で，L が増加するにしたがって勾配が緩やかになっており，「出口近くの避難者は直接出口に向かう方向を選択する傾向が強いが，出口から離れた避難者は相対的に他の要因で行動を決定する可能性も高い」という様子を表現している．

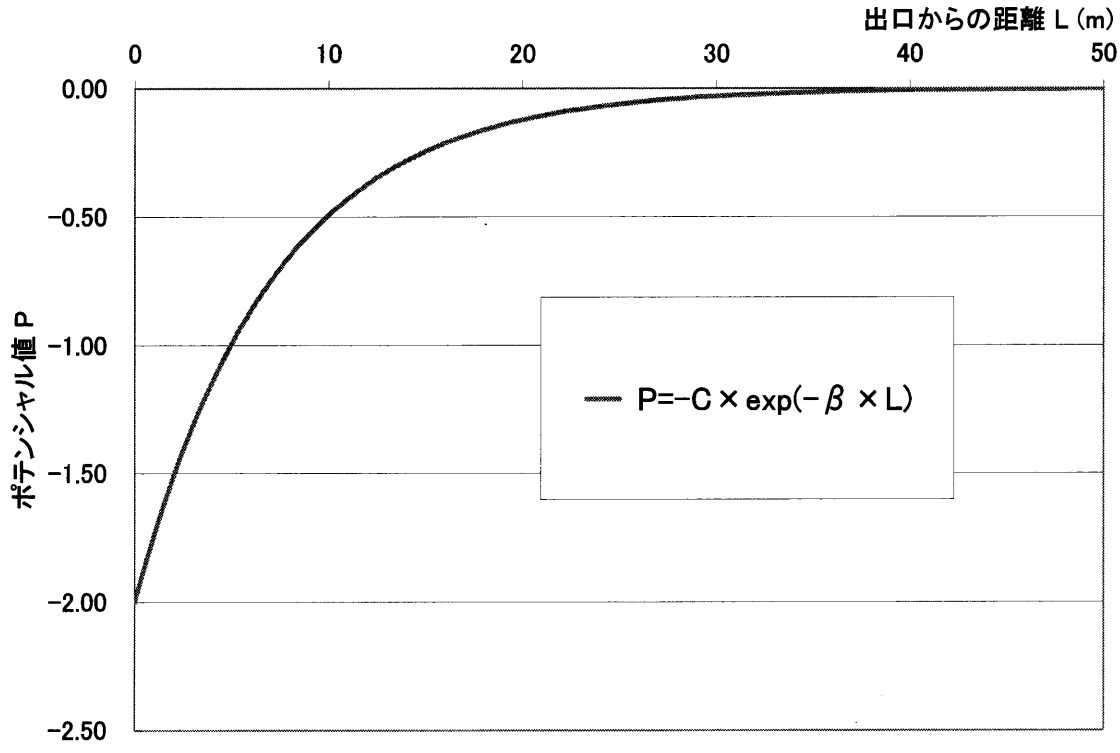


図５．２　出口からの距離 L とポテンシャル値 P の関係

ところで，出口からポテンシャル値を決定したいメッシュまでの距離を L とするとしたが，本研究では L の決め方についても以下のような2,3の工夫を行っている．

もし仮に出口から任意地点の距離 L として「その直線距離」を採用して，任意地点のポテンシャル値を決定した場合には，避難者が壁などの障害物にぶつかってしまい動きが止まってしまう問題が起こりうる（**図5．3**）．横山のプログラムではこの問題を回避すべく，対象空間内に仮想的なネットワークを構築しているが，「求めた L の精度に問題がある」，「計算時間が長くなってしまう」，対象空間が変わる度に設定をし直さなくてはならないため「汎用性の点において改良の余地がある」などの問題点を有していた．

そこで原田らによる研究[1-1)]においては，次のような新しい考え方を導入することにより，この問題の解決を行っている．導入した方法は，いかなる対象空間にも全く同じ手続きで適用可能であり，またアルゴリズムが簡単で計算時間が短いという特徴を持つ．

その考え方のイメージは次の様なものである．まず対象空間を水の入った水槽に見立てる．そして水槽の縁に出口がある（必ずしも縁でなくてもかまわない）．次に出口の場所の水面に針の様な物で振動を与えると水面全体に波紋が広がる．これが各地点における出口からの等距離線である．その際に障害物があれば，波はそれら避けて回折するため，対象空間内のすべての箇所において，「障害物の存在も考慮した出口までの最短距離」を求める事ができるのである（**図5．4**）．

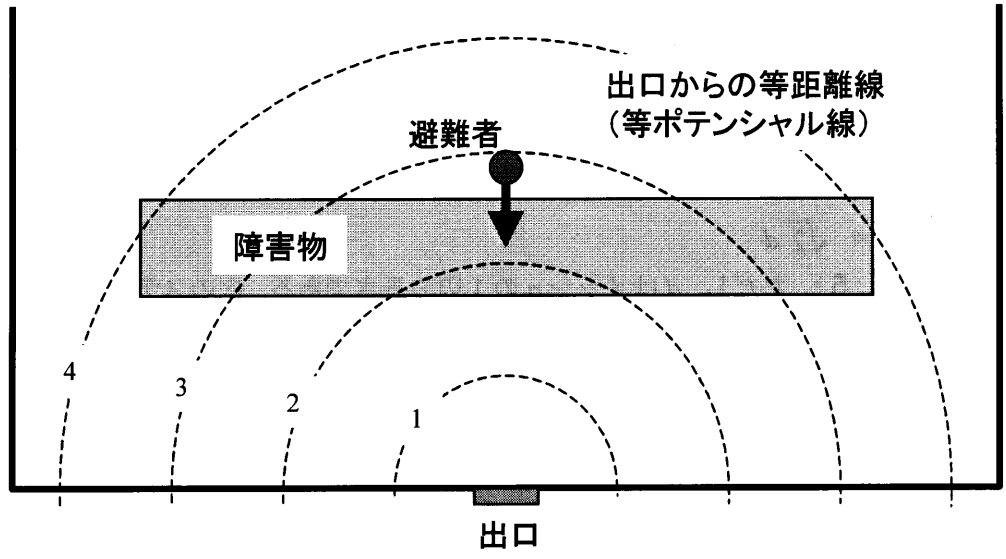


図５．３　避難者の進行方向（出口からの直線距離を採用した場合）

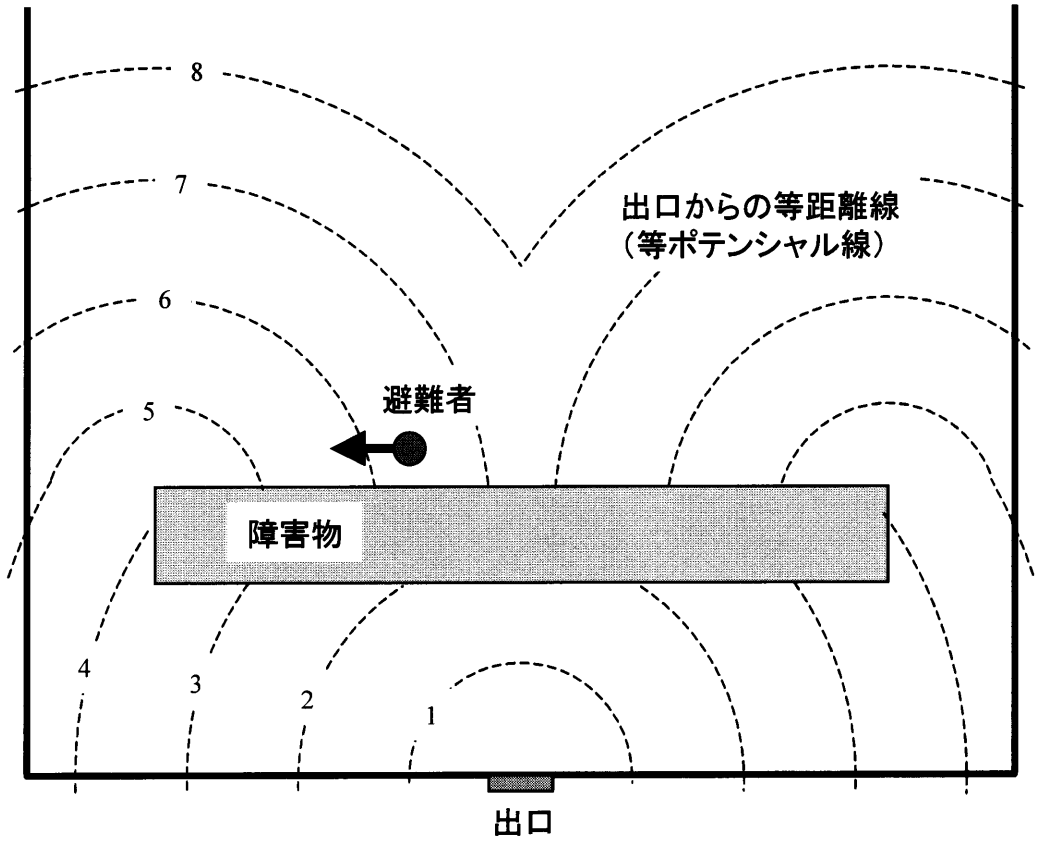


図５．４　避難者の進行方向（新しい考え方を用いた場合）

具体的にはまず，対象空間内で「出口」と定義されているメッシュは，当然出口までの距離 L は 0 であるので，その出口の座標を(i,j)とすれば

$$L_{i,j} = 0$$

とする．続いてその周りの８メッシュに対し，

$$L_{i-1,j} = d$$

$$L_{i-1,j-1} = \sqrt{2}\, d$$

を代入する（**図５．５**）．ただし，d はメッシュの１辺の長さである．次のステップとして，さらに外側のメッシュに対しても同様に

$$L_{i-2,j} = L_{i-1,j} + d = 2d$$

$$L_{i-2,j-1} = L_{i-1,j-1} + d = (1+\sqrt{2})\, d$$

$$L_{i-2,j-2} = L_{i-1,j-1} + \sqrt{2}\, d = 2\sqrt{2}\, d$$

とポテンシャル値を決めていく．順次同様の作業を繰り返していけば対象空間内の全てのメッシュに対して「出口までの距離 L」を決定する事ができる．ただし，２通り以上の距離が算出される場合には，L が最も小さくなるものを出口までの距離 L とする．

こうして求まった出口までの距離 L を，上記の**式**(5.1)に代入して任意地点でのポテンシャル値を算出する．もちろん出口が複数ある場合にも，同様の作業で空間全体のポテンシャルを求めることができる．

こうして求まったポテンシャル分布を**図５．６**に示す．メッシュを単位として算出しているので多少いびつな形をしているが，避難者が自分の周り８メッシュのポテンシャル値を参照して進行方向を決めていく過程では問題は生じない．

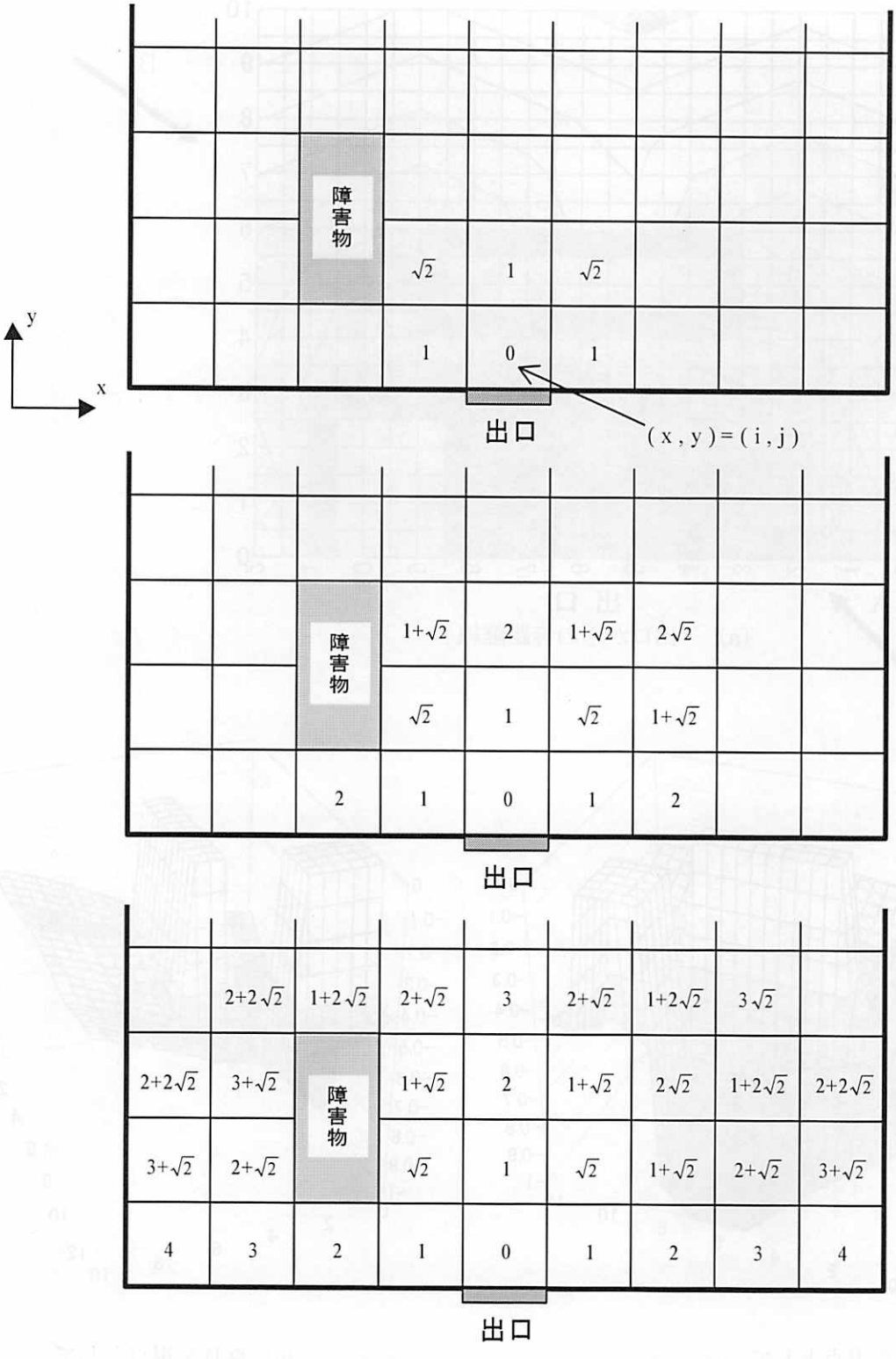
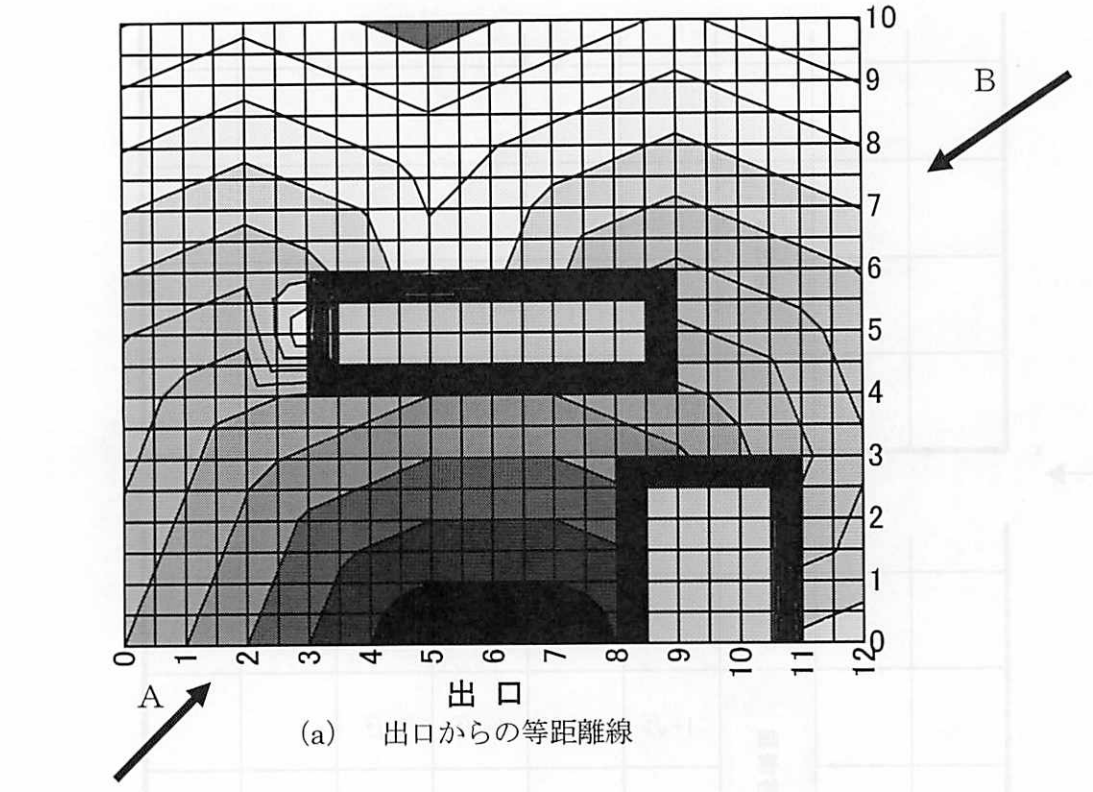
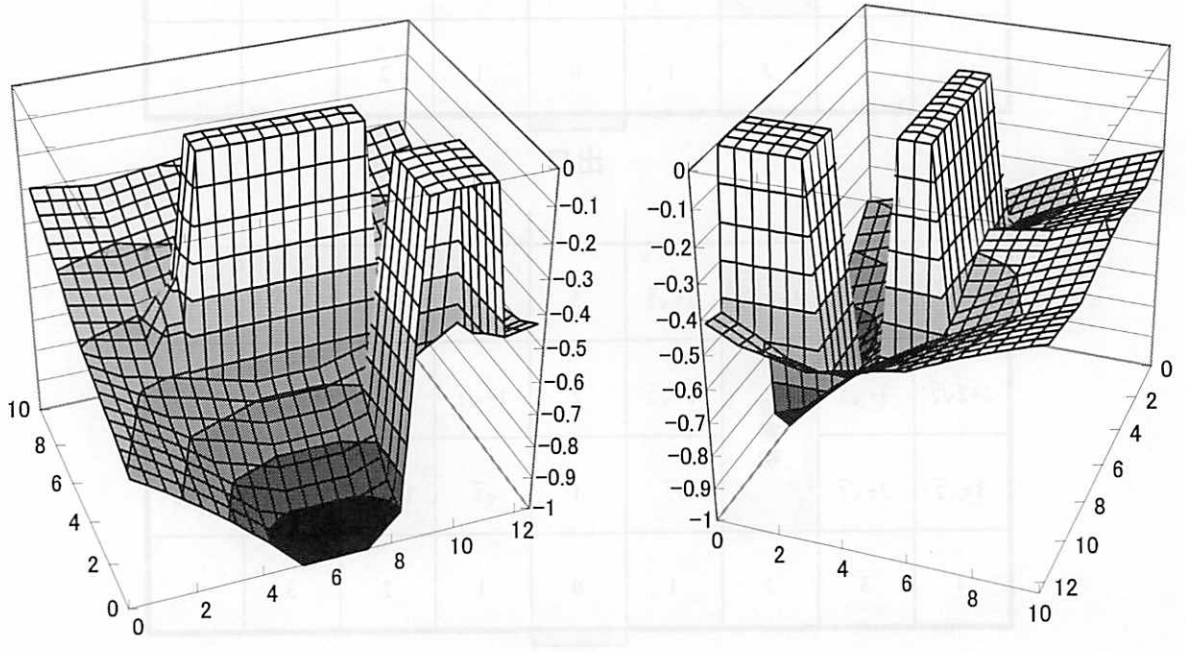


図５．５　出口から任意メッシュへの距離の算出方法



(a)　出口からの等距離線



(b) 点Aを視点として

(c) 点Bを視点として

図5．6　ポテンシャル分布の例

b．個人特性によるポテンシャル　$\Omega_{ik}(\mathbf{X}, t)$

このポテンシャルは避難者の個人特性を表現するポテンシャルであり，それぞれの避難者に対して個別に設定される．主に避難者の空間内の地理に対する認知度や情報に対する反応の違いなどにより決定される．例えば，ある避難者が通常よく利用するなどの理由で「よく知っている出口」があり，災害時に近くに他の認識できる出口がなかった場合，その出口が多少離れていても，脱出の際に利用しようとする可能性は高い．

このような状況を再現するために，「よく知っている出口」は「知らない出口」に比べて低いポテンシャル値を与えることにしている．（**図５．１**）

また，分岐点にさしかかったときに，直進する傾向の強い避難者や，右に曲がる傾向の強い避難者などの状況判断や，「他の避難者の流れについていきやすい」などの心理状態もこの個人特性ポテンシャルモデルによって表現される．

c．災害要因によるポテンシャル　$\Omega_{il}(\mathbf{X}, t)$

火災やそれによる煙などが発生すれば，避難者はそれを避けて避難せざるを得ない．また一般に，炎や煙は時間とともに広がっていく．

したがって，この様な状況を表現するために，本モデルでは災害地点では正のポテンシャルが生じる事としており，時間とともにポテンシャル値が変化し，また拡散していくことにしている．また，地震災害時には転倒物や落下物によって通路や出口が塞がれて利用できなくなることも考えられる．このような場合には，物理的要因によるポテンシャルで扱った壁や柱のポテンシャルと同じ方法で，その箇所には正のポテンシャルを与えることによって，災害形態をポテンシャル分布に反映させることができる．

d．避難誘導の考慮

実際の災害時に，「避難誘導によって犠牲者を少なくできた事」や逆に「誤った誘導がかえって犠牲者を増やしてしまった事例」もいくつか報告されており，災害による被害を最小限に抑えるためには適切な避難誘導を行うは不可欠である．

本モデルでも避難誘導の存在を考慮し，積極的に最適な誘導方法を見つけるための手段として活用できるよう，その影響を考慮できるモデルとしている．ここでは，非常口の上に設置された避難誘導灯の ON/OFF などの光による誘導や，非常口にとりつけられたスピーカーや避難誘導員の声によって「こちらに避難して下さい」という音声による誘導を念頭において，避難誘導の行われる出口では他の出口よりも低いポテンシャルを与えることとしている．こうすることによって，避難者が知らない出口で誘導が行われたとしても，それがあたかも知っている出口の様に扱われることになる．

e．その他の要因によるポテンシャル

ここまでに紹介したもの以外でも，ポテンシャルと言う概念を用いれば，様々な現象を再現することができ，今後の拡張性の点においてもポテンシャルモデルは優れていると言うことができる．ここでは，現在までに考慮しているその他のポテンシャルと今後拡張が期待されるポテンシャルについて説明する．

（1） 避難者自身の持つポテンシャル

災害時の避難行動に限らず通常の歩行についても，「人間相互の距離が近くなりすぎた場合には，互いに不快感を覚え，一定の距離をあけようとする」ことが報告されている（例えば，Fruin1973，渡辺 1982 など）．そこで本モデルでは，避難者ひとりひとりが存在することによって，そのメッシュのポテンシャル値を微増する事としている．これにより，前方にいる歩行速度の遅い避難者に近づくのではなく，左右どちらかに迂回して出口に向かおうとする現象を再現している．

（2）直進性向を示すポテンシャル

5．2 1）b．でも説明したが，避難者の直進性向についてもポテンシャルを用いて表現している．ここでは，避難者の進行方向の選択の際に「直進方向」のメッシュのポテンシャル値を微小分だけ減少させることによって，直進しやすい状態をつくっている．直進性向の強い避難者に対しては減少分を大きくすれば良いし，直進性向を考えない避難者に対しては，この項目を扱わなければ良い訳である．

f．各メッシュの最大収容人数について

ポテンシャルモデルでは，対象空間をメッシュ単位で扱っているため，避難者同士の物理的な接触などを扱うことはできない．しかし実際には，避難者には体積があるため群集流の密度はある限度以上は高くなることはあり得ない．静止状態での群集密度と混雑度について岡田(1988)がまとめた結果によると，通勤電車の混雑度 150%程度（新聞が読め，車内も何とか通行できる状態）の場合の群集密度は約 4 人/m^2，エレベーターが満員になったときの密度が約 5〜7 人/m^2 程度であり，群衆密度が 11〜12 人/m^2 程度になると周囲からの体圧を感じ，13 人/m^2 以上ではうめき声→悲鳴を発する人が多くなる．また，歩行状態では，群集密度が 1.2〜1.4 人/m^2 以上になると速度が急激に低下し，4 人程度以上では停止状態となることが，Fruin(1982)からも指摘されており，多くの「群集密度－歩行速度」の関係式は適用限界が 3〜4 人/m^2 前後までである．

そこで本モデルでは１メッシュに入れる避難者数を制限する事により，この現象を取り入れている．１m×１m のメッシュサイズを採用している場合には，１メッシュの最大収容人数は３〜４人程度が適当であると考えられる．もちろんメッシュサイズが異なる場合には，そのサイズに応じて適切な値を決める必要がある．

3）避難者のモデル化

a．避難行動意志決定モデル

ここでは，前節までに決められた対象空間内において，避難者がどのように行動決定を行い，出口まで達するのかを説明する．

避難者の進行方向の選択と，移動は以下のステップに従って行われる．

（1）進行方向の選択

避難者の進行方向は，現在位置のポテンシャル値と自分の周囲８メッシュのポテンシャル値によって決定される．つまり８方向のうち「ポテンシャル値」がもっとも低い方向がその避難者の進もうとする方向である（**図５．７**）．現在避難者が存在するメッシュよりもポテンシャル値が小さいメッシュは，全て進行方向の候補であり，そのポテンシャル値が小さい順に優先順位がつけられる．ここではあくまでも，進行方向の候補を決めただけであり，実際に避難者を移動させるのは次のステップである．

（2）避難者の移動

そして次に，その避難者が選択した進行方向に実際に移動させるのだが，そのためには次の３つの条件が満たされていなければなれない．

条件Ａ：その避難者が単位時間ステップに移動できる距離がメッシュの１辺の長さdよりも大きい．

条件Ｂ：移動先メッシュに既に存在している人数が，あらかじめ定めてある「定員」に達していない．

一番ポテンシャル値の低いメッシュがこの**Ａ,Ｂ**の条件をいずれも満たしていない場合は，順次ポテンシャルの低いメッシュから順に上記**Ａ,Ｂ**の全ての条件を満たすメッシュを探し，該当するメッシュがあればそこに移動する．避難者の周りのメッシュで「自分の位置よりもポテンシャル値が小さい」メッシュがいずれも上記**Ａ,Ｂ**の条件を満足しない場合には，避難者は現在のメッシュに残る事になり，次の時間ステップに改めて上記①からの判断を行う．

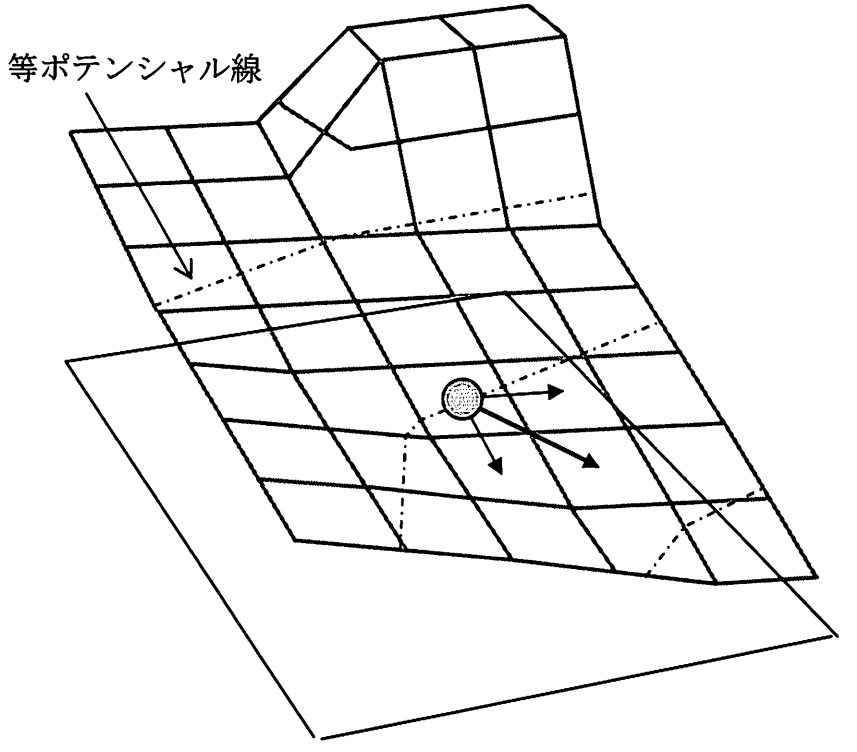


図５．７　避難者の進行方向の選択

ここで**条件A**，つまり単位時間ステップに避難者が移動できる距離について少し説明しておく．

本研究の避難行動シミュレーションでは，避難開始から終了までの解析は時間ステップdt(例えば1 [s])を最小単位としている．したがって，仮に歩行速度がV [m/s]の避難者がいたとすると，この避難者が単位時間ステップに進める距離Rは，

$$R\,[\mathrm{m}] \;=\; V\,[\mathrm{m/s}] \times dt\,[\mathrm{s}]$$

ということになる．

一方，解析の対象となる空間はシミュレーション上では一辺d [m]の正方形メッシュに区切られている．従って，$R > d$ ならば，避難者は上記**条件A**を満たし，その時間ステップに移動することができる．しかし逆に$R < d$ となってしまった場合には，避難者はその時間ステップには移動することができない．そのような場合には，歩行可能距離Rは次の時間ステップまで保存され，次の時間ステップには

$$\text{歩行可能距離}\,R\,[\mathrm{m}] \;=\; V{\times}dt\,[\mathrm{m}] + V{\times}dt\,[\mathrm{m}] \;=\; 2\,V{\times}dt\,[\mathrm{m}]$$

となる．ここで，$R > d$ となれば，この時間ステップに避難者は移動する事ができるようになる（**図5．8**）．それでもまだ $R < d$ である場合には，**条件A**を満たすまで現在の位置から動けない事になる．

ただし，**条件B**を満たすことができずに避難者が移動できなかった場合には，歩行可能距離は保存されない．

そしてある時間ステップに移動を行った避難者は自分の持っている「歩行可能距離R」から実際に移動を行った分だけ値を減じることになる．したがって，距離の長い斜め方向に移動を行った避難者は，一時的に「歩行可能距離R」が負の値をとることもあり得るが，次の時間ステップ以降ふたたびRは蓄積されていくので，何ら問題は生じない．

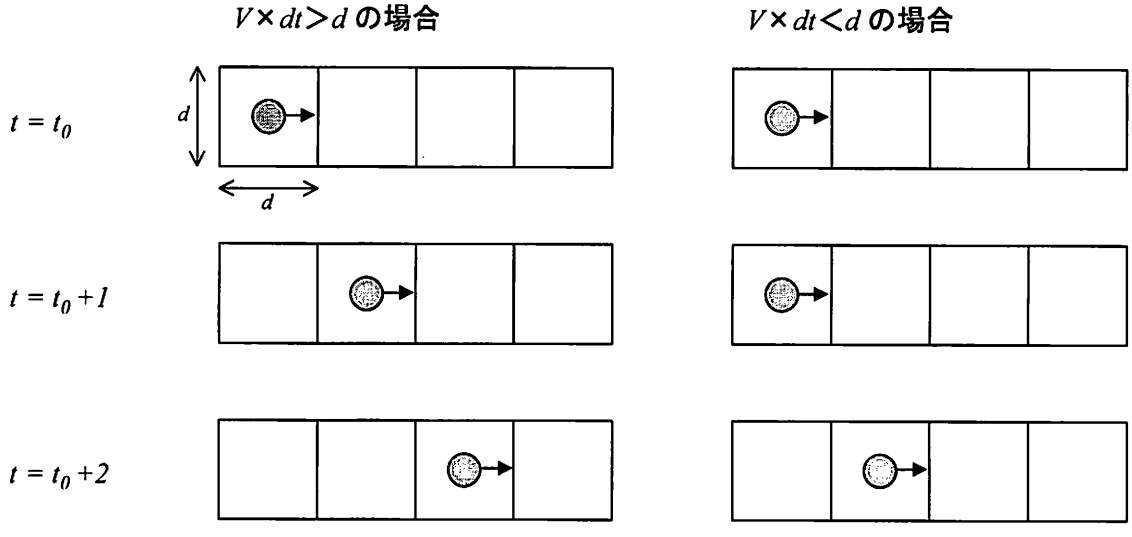


図５．８　歩行者の歩行速度と時間ステップ

b．避難者の歩行速度

本研究では，避難者ひとりひとりを個別に扱っているため，その最大歩行速度(歩行能力) V_{max}[m/s]も避難者ごとに設定されている．したがって，この最大歩行速度を適当に変化させることにより，老人や子供など歩行速度の遅い避難者が群集全体の避難行動に及ぼす影響なども取り入れることができる．

ここであえて「最大歩行速度」という言葉を使ったのは，避難者はいつでも必ずその能力を発揮できるとは限らないからである．つまり，非常に混雑した状態で空間に余裕がなくなれば，歩行動作が困難になり，歩行速度の減少を余儀なくされるのである．

例えば Fruin によると，通常の状態での歩行者の平均速度は男性で 1.35[m/s]，女性で 1.27[m/s]，全体で 1.325[m/s]と報告されており，群集密度と歩行速度の関係は**図5．9**の様な関係があることがわかっている[4]．すなわち群集密度が 1.2～1.4 人/m^2 以上になると速度が急激に低下し，4 人程度以上では停止状態となる．ただし図中の歩行者空間モジュール[m^2/人]とは密度[人/m^2]の逆数であり，群集密度を表す指標である．

そこで本研究においても，**図5．9**の Fruin の経験式にあわせて，避難者の歩行速度を変えることとした．

仮に平均的な走行速度(V_{max}＝1.325[m/s])を持つ避難者がいた場合に，群集密度が低ければ，避難者は自分の自由なペースでの走行が可能であるから，避難速度 V は

$$V = V_{max} = 1.325 \text{ [m/s]} \tag{5.2}$$

であるが，密度が高くなると避難者の歩行速度は，周辺の群集密度 *dens* [人/m^2]を用いて，次式で記述される速度に減少する事にしている（**図5．10**）．

$$V = 1.45 - 0.41 \times dens \text{ [m/s]} \tag{5.3}$$

これを，最大避難速度 V_{max} の避難者に対して正規化し，全ての避難者の避難速度は次の式で表現する事にした．

$$V = (1.45 - 0.41 \times dens) \times V_{max} \ / 1.325 \text{[m/s]} \tag{5.4}$$

ただし，**図5．9**では歩行者空間モジュールが 0.25 以下では歩行速度が 0 となっているが，これは現実とはかけ離れているため，ここでは避難者の最低歩行速度を 0.1[m/s]とした．また式(5.4)を用いると群集密度が非常に低いところでは避難者の歩行速度が最大歩行速度を上回ってしまうが，そのような場合には $V = V_{max}$ を用いることにしている．

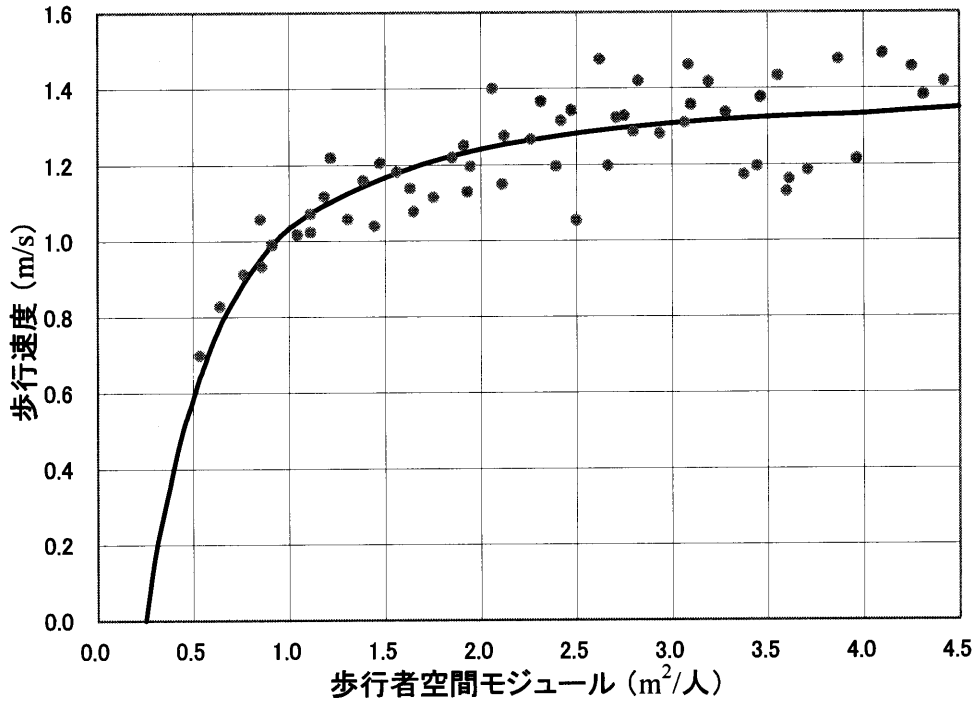


図５．９　交通に摩擦のある場合の群集密度と歩行速度の関係

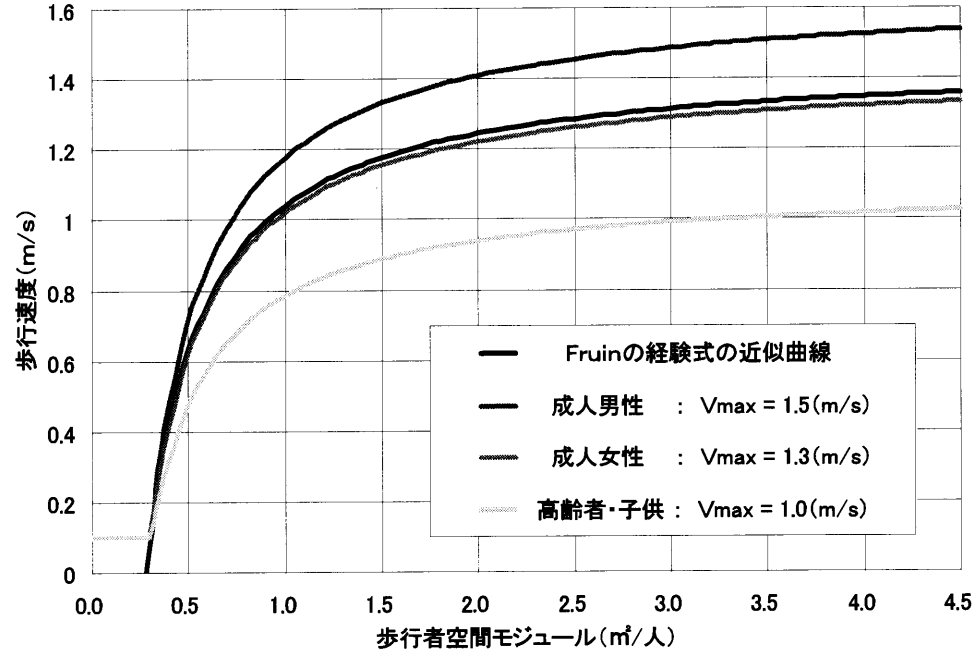


図５．１０　Fruin の経験式の近似直線

織田らによる研究[3]では，群集密度の測定方法に関しても改良を行っている．従来のモデルでは避難者が速度を決定する際の密度決定において，避難者自身の周りのメッシュ領域を群集密度決定領域としていた．しかしこの方法を用いると，視覚的に確認不可能であろうと思われる背後のメッシュの影響を考慮してしまうという問題点を有する．

そこで織田らによる研究においては，避難者自身を含む進行方向側のメッシュ領域を群集密度決定領域とした（**図５．１１**）．こうすることで上記の問題点を改善でき，より現実性の高いシミュレーションを行うことが可能となる．

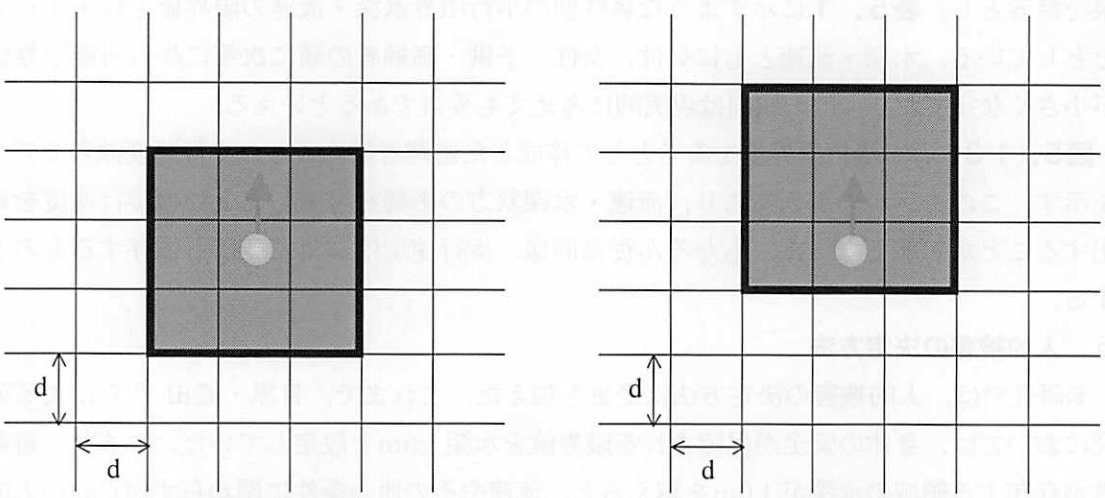


図５．１１　群集密度決定領域

4）津波の影響のモデル化

a．津波が歩行に及ぼす影響のモデル化

津波災害時の避難行動をシミュレートする際に，人間行動を扱う上で軽視できない要因の一つとして，浸水深や流速が避難者へ与える影響が考えられる．これらの災害要因は，避難時の心理状態に影響を及ぼすだけでなく，浸水深や流速の変化に伴う歩行速度の低下がもたらす避難効率の悪化が懸念され，人的被害の規模を推定していく上で取り扱うべき重要な課題であるといえる．

そこで織田らによる研究では，避難者の歩行速度が浸水深や流速の影響により，変化するような歩行速度減衰モデルの導入を行っている．水中歩行実験（須賀ら）[5]で得られた結果を基に作成された，水中歩行が可能な領域を示した**図5．12**や，その他の文献・報告結果を参考とし，**表5．1**に示すような属性別の歩行限界水深・流速の限界値を採用することとしている．水深・流速ともに男性，女性，子供・高齢者の順に次第に歩行可能限界値が小さくなっており，この傾向は現実的に考えても妥当であるといえる．

図5．13には，歩行限界値を参考として作成した避難者属性ごとの歩行速度減衰モデルを示す．このモデルの導入により，流速・水深双方の影響を考慮した上での歩行速度を算出することが可能となった．もちろん従来同様，歩行速度は群集密度にも依存するものとする．

b．人的被害の決定方法

本研究では，人的被害の決定方法に変更を加えた．これまで，目黒・織田[3]らによる研究においては，身体の安全が保障される限界値を水深1.0mと設定していた．つまり，避難者が存在する領域の水深が1.0mを越えると，流速やその他の条件に関わらず何らかの人的被害が発生したものとして仮定していた．しかし，本研究においては，より力学的に人的被害を評価するために，越村ら(2002)[6]によって示された人的被害の評価式（5.5）を用いて人的被害を決定する．

$$f(mg-w) \le \alpha \int 0.5\rho C_D u^2 dS + \int \rho C_M \frac{\partial u}{\partial t} dV \qquad (5.5)$$

左辺は歩行の摩擦力，右辺はモリソン式に基づく流体力をそれぞれ表現している．左辺の値より右辺の値が大きくなったときに，流されたものとしてモデル化し，人的被害としてカウントする．ここで，fは歩行面における摩擦力，mは考慮する人体の質量であり，本研究においては，日本人人体寸法データベースのデータ[7]をもとに，男性：64.5kg，女性：53.1kg，子供・高齢者：51.4kgとした，wは流水中の人体に作用する浮力，αは歩行者の体力・流れに対する感じ方を考慮した係数（=2.0），ρは水の密度（=1.0g/cm^2），C_Dは抗力係数（=1.0），C_Mは付加重力係数（=2.0）としており，dS, dVはそれぞれ人体モデルの流れに対する微小投影面積，浸水した人体部分の体積要素を表している．

図5．14に$\frac{\partial u}{\partial t}$=1.0の場合における，流体力と浸水深，流速の関係を示す．

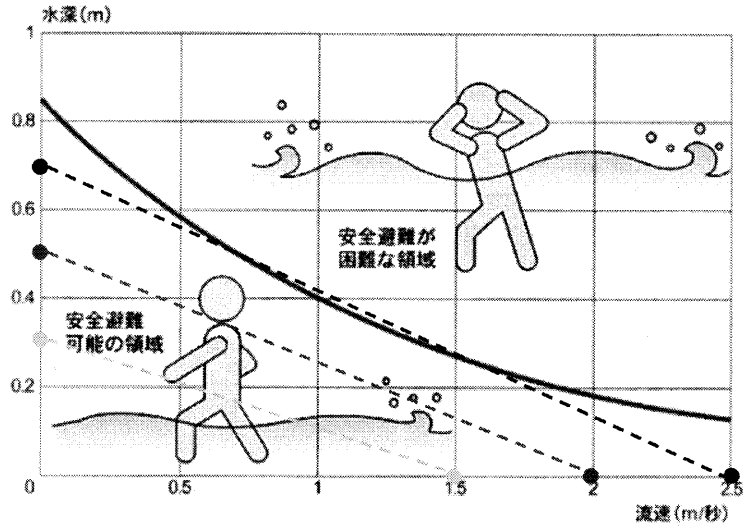


図５．１２　洪水避難時に水中歩行できる領域

表５．１　各避難者の歩行限界

	歩行限界水深（m）	歩行限界流速（m/s）
成人男性	0.7	2.5
成人女性	0.5	2.0
子供・高齢者	0.3	1.5

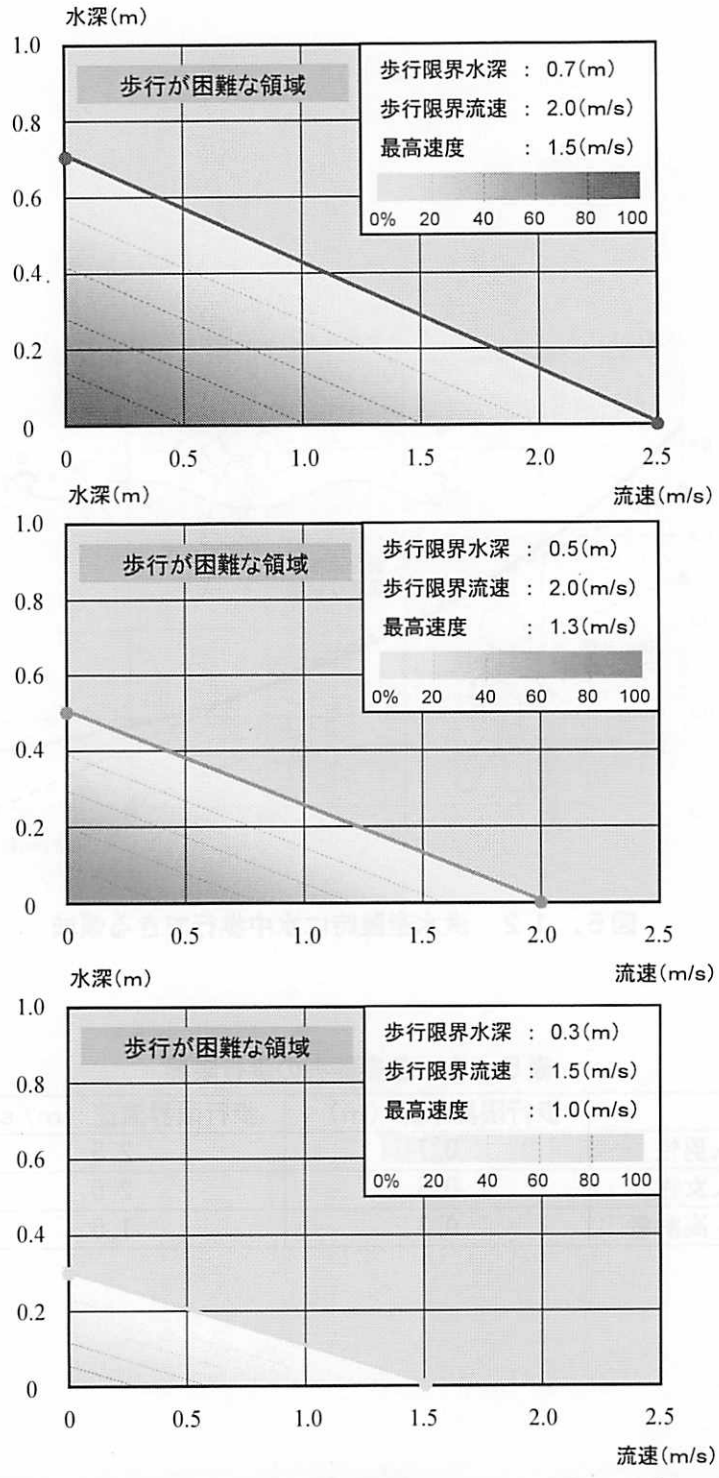


図５．１３　水深および流速と最高歩行速度の関係（上から男性，女性，子供・高齢者）

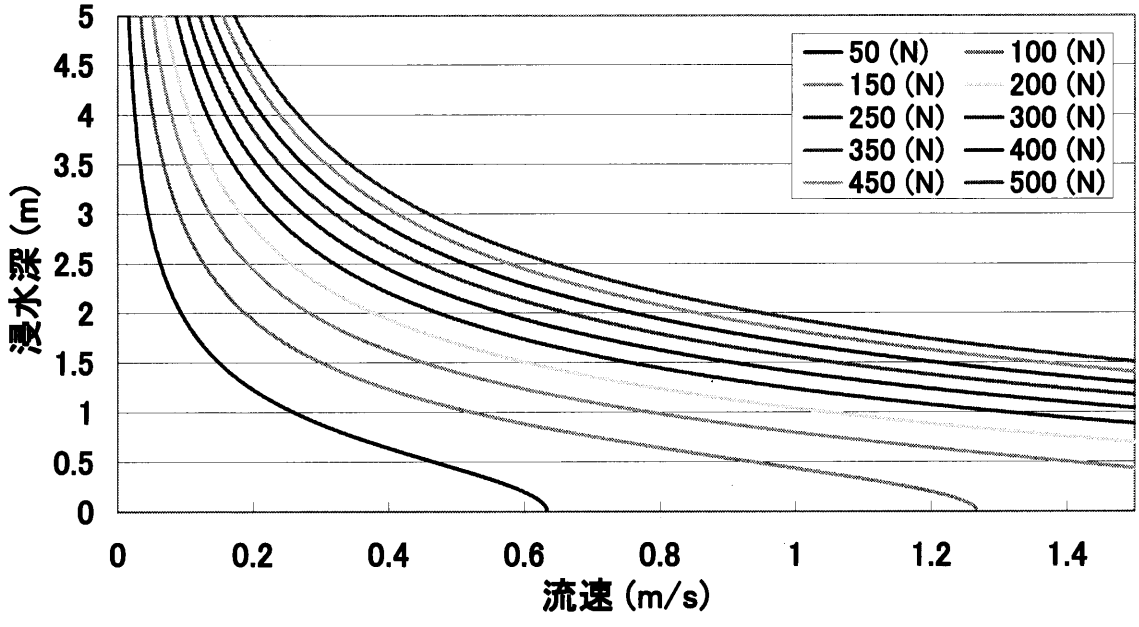


図５．１４　流体力と浸水深，流速の関係

5）避難開始のモデル化

a．情報伝達モデル

地震時などの災害時に，行政や報道機関などから発信される災害情報は，住民にとっては適切な対応を行うための重要な判断材料となっており，情報発信者が地域住民に対して迅速かつ正確に情報を伝達することは，人的被害の大小を左右する大きな要因となりえる．

特に本研究で取り扱っているような津波災害に関しては，早急な情報伝達やそれに伴う避難行動が住民の生死を分けるといっても過言ではない．したがって，地域の防災計画において災害情報の効率的な伝達体制整備に向けた検討を行うことは重要な課題であるといえる[4-9]．

そこで本研究では，各種情報伝達メディアによる時系列的な情報伝達の過程を再現した情報伝達シミュレーションを行うことで，各避難者が地震発生後から情報の取得に至るまでにかかる時間の算出を行っていく．将来的なビジョンとしては，避難行動シミュレーションと災害情報伝達シミュレーションを統合することで，津波の発生から避難開始・終了，または被災までの過程を総合的に扱うことが可能なシミュレーションモデルの構築を目指したものである．

今回行った災害情報伝達シミュレーションは，被災状況下において避難勧告・指示などの災害情報が地域住民に対して発令されてから，その情報が伝達メディア「防災行政無線，広報車，マスメディア（テレビ・ラジオ等）」を通じて伝達されていく過程を表現するモデルである．さらに地震津波に関して言えば，「地震の揺れ」自体も津波の来襲を予想させる情報メディアの一種と見なすことができる．

以下には，本研究において情報伝達メディアとして扱った「(1) 地震の揺れ，(2) マスメディア，(3) 防災行政無線，(4) 広報車」の，情報伝達過程の様子や特性パラメータを紹介する．

（1）地震の揺れ

ここでは「地震の揺れ」により，住民が津波来襲を感知する状況のモデル化を行う．

表5．2に特性パラメータの一例を示す．災害情報は空間内の全住民を対象として発信されるものとする．全住民を対象とした理由としては，本対象空間内では全域が地理的・地形的に類似しており，構造物特性等の違いにより各個人が感じる揺れの大きさは多少違うものの，ほぼ全員が「地震の揺れ」を災害情報として認知・取得できることに因る．

このモデルでは，任意の情報取得率を設定することにより，情報の伝達割合を変化させることが可能である．情報取得率が高ければ高くなるほど，早期に避難を開始する避難者の割合が高くなると言え，言い換えれば情報取得率は住民の防災意識の高さを表している指標であるとも言える．

（2）マスメディア

ここでは，テレビ・ラジオなどのマスメディアによる情報伝達のモデル化を行う．

表5．3に特性パラメータの一例および情報伝達過程の様子を示す．(1) と同様に空間内の全住民を情報取得の対象者としており，全住民はテレビやラジオなど何らかの手段を講じることにより災害情報を取得できる．本研究では視聴率を情報取得率と同値として扱っているので，災害発生時刻や被災状況，住民の防災意識などにより住民が情報を視聴できる環境が変化することによる影響は，視聴率を適宜変化させることで擬似的に表現している．

（3）防災行政無線

ここでは，防災行政無線による情報伝達のモデル化を行う．防災行政無線による情報伝達とは，尾鷲市が所持する計 29 基（対象エリア内 11 基）の屋外拡声器による放送である．尾鷲市地域防災計画によれば，津波予報に関して「市防災行政無線による広報，鐘音，サイレン，広報車により警報等の周知を行う．」とされており，防災行政無線による情報の発信は，災害情報の伝達手段として有効な手法のひとつである．

表5．4，図5．15に特性パラメータの一例を示す．防災行政無線による放送では，物理的に音声情報が行き届く距離が限定されるため，音声到達可能エリア内にいる住民を情報伝達の対象とした．拡声器の性能や，天候・時間帯による聴取率の影響を臨機応変に変化させることにより，情報取得率を決定するものとする．

表５．２　伝達特性パラメータ

伝達方法	伝達特性パラメータ	
(1) 地震の揺れ	情報発信タイミング	1分後
	情報取得率	30%

表５．３　伝達特性パラメータ

伝達方法	伝達特性パラメータ	
(2) マスメディア	情報放送タイミング	2分後
	情報取得率	30%

表５．４　伝達特性パラメータ

伝達方法	伝達特性パラメータ	
(3) 防災行政無線	設置数	11基
	情報放送タイミング	3分後
	音声情報到達範囲	200m
	情報取得率	30%

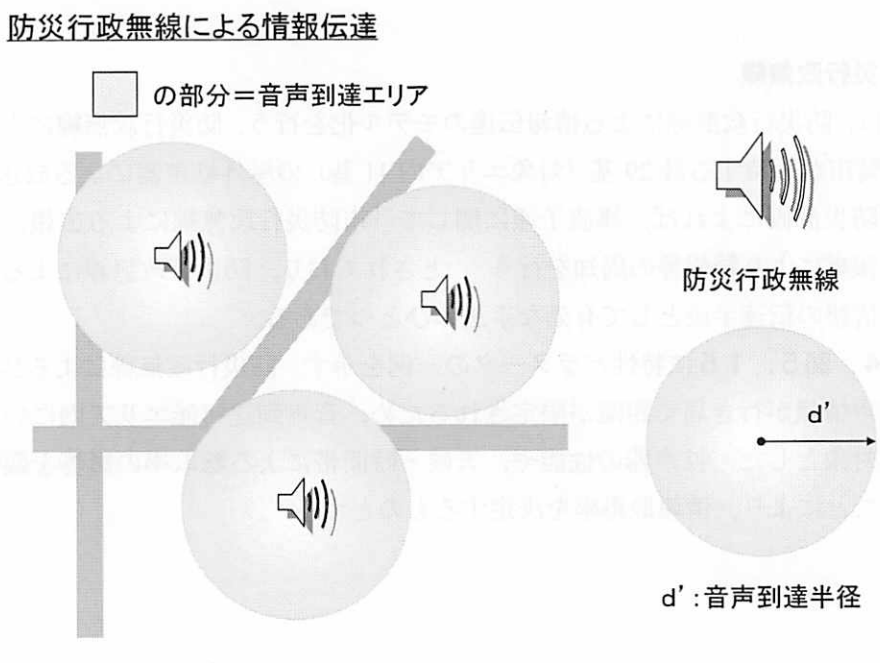


図５．１５　防災行政無線による情報伝達の様子

（4）広報車

ここでは，広報車による情報伝達のモデル化を行う．防災行政無線と同様に，尾鷲市地域防災計画では，広報車による津波情報の周知も検討されており，防災無線などのように固定された情報発信端末には不向きといえる，適宜状況に応じた効果的な広報活動が可能であると考えられ，広報車による情報発信の有効性は高いといえる．

表5．5，図5．16に特性パラメータの一例を示す．今回は市役所を出発地点とする2台の広報車を対象とし，広報車が辿るルートは市役所より提示された資料を基に作成し，効果的な情報伝達ができるルートを選定した．広報車による広報活動では，(3) と同様に音声情報が行き届く距離が限定されるため，音声到達可能エリア内にいる住民を情報伝達の対象としている．広報車に取り付けられたスピーカーの性能や，天候・時間帯による聴取率の影響を臨機応変に変化させることにより，情報取得率を決定するものとする．

表５．５　伝達特性パラメータ

伝達方法	伝達特性パラメータ	
(4) 広報車	台数	2台
	発車タイミング	5分後
	移動速度	20km/hr
	音声情報到達範囲	200m
	情報取得率	30%

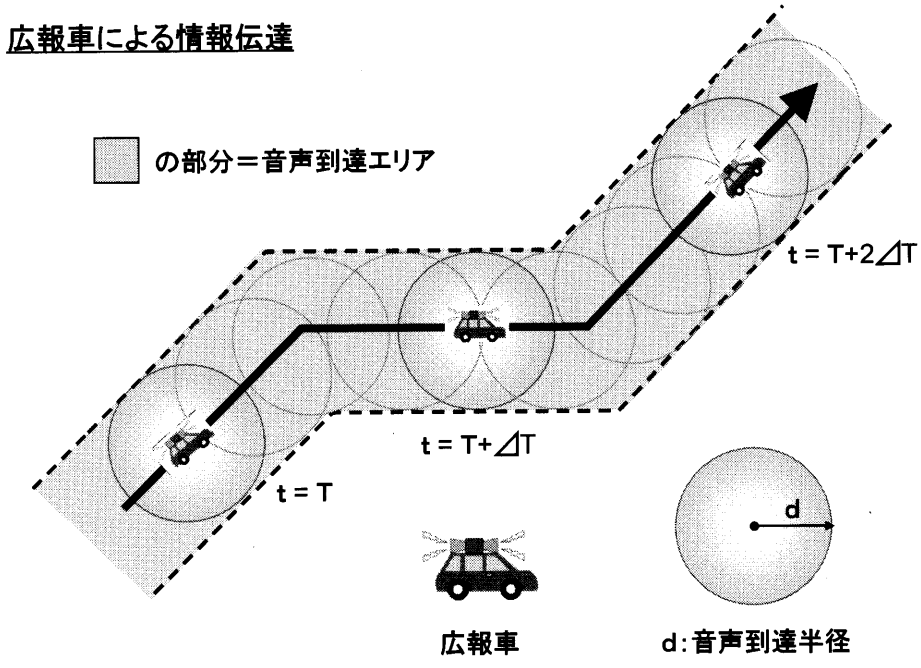


図５．１６　広報車による情報伝達の様子

b．避難開始時刻の設定

地震発生後から住民が避難を開始するまでの行動を考えてみると，住民は何らかの手段を通じて災害情報を取得した後，避難行動の意思決定や避難に際する準備時間を経て避難行動を開始する．本研究では，避難開始時刻を以下の式により決定することとした．

$$\text{避難開始時刻} = \text{情報取得時刻} + \text{避難準備時間}$$

情報取得時刻とは，先述したように情報伝達メディアを介して住民が災害情報を取得した時刻であり，避難準備時間とは，災害情報を取得してから実際に避難し始めるまでの，避難行動の意思決定や携帯品の収集など避難に際する準備が行われる時間である．

本研究における避難準備時間の設定に関しては，多少のばらつきを持たせるために，任意に与える平均値 μ と標準偏差 σ による正規分布をなす値を与えることとした．平均値 μ に限らず，標準偏差 σ は 60 秒とし，各避難者には値をランダムに振り分けている．**図5．17**に避難準備時間と人数の関係を表したヒストグラムを示す．

できるかぎり実際の災害状況を反映させるため，情報未取得者の行動に対してもいくつか制約を設けた．例えば，津波が来襲しているのにも関わらず情報未取得者が避難を開始しないとは考えるのは不自然である．したがって本研究では，津波が来襲した時点で即時に情報身取得者も避難行動を開始するものとした．また行政の対応状況に応じて，避難開始時刻の上限値を設定することにより，情報未取得者もある一定の時刻になると避難し始めるようにした．

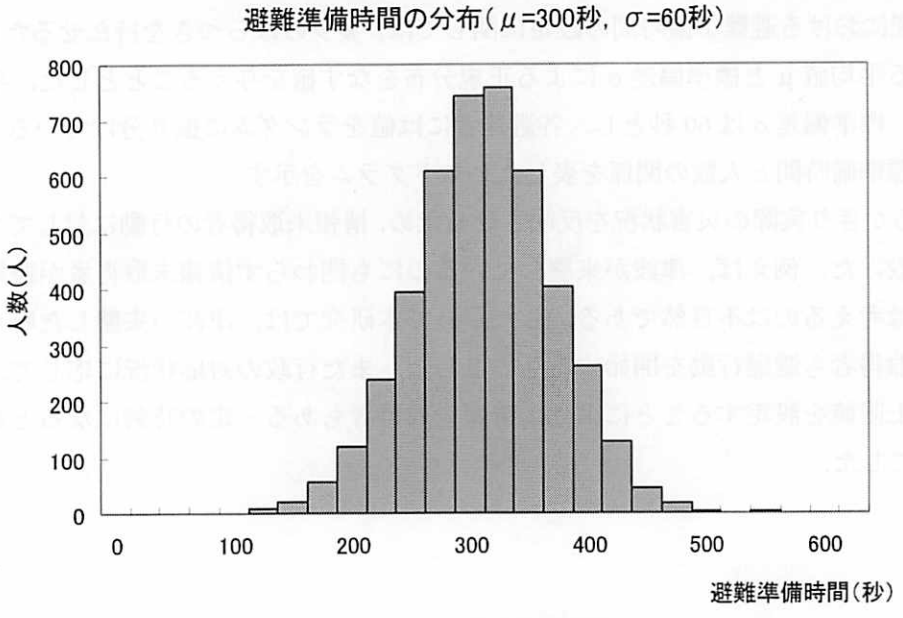

避難準備時間の分布（μ=300秒，σ=60秒）
800
700
600
500
400
300
200
100
0
人数(人)
0
100
200
300
400
500
600
避難準備時間(秒)

図５．１７　避難準備時間

5．3　スリランカ・ゴール地方を対象としたシミュレーション

1）対象地域の概要

a．スマトラ島沖地震について

2004年12月26日，インドネシア西部時間午前7時58分50秒（日本時間午前9時58分，UTC午前0時58分）にインドネシア西部，スマトラ島西方約160km，深さ10kmを震源とするマグニチュード9.3という巨大地震が発生した．これにより大津波が引き起こされ，インドネシアのみならず，インド洋沿岸のインド，スリランカ，タイ王国，マレーシア，東アフリカ等を襲い，約30万人という死者，行方不明者を出した．**図5．18**に主な被災地域，**図5．19**に被害の様子を写した写真，**表5．6**に各国の被害状況を示す．

特に津波による被害が大きかったのがこの地震の特徴である．平均で高さ10m，地形によっては34mに達する津波が数回，インド洋沿岸に押し寄せた．アンダマン・ニコバル諸島近海からスマトラ島北西部近海にかけてのおよそ1,500kmの帯状の地域の，およそ海底4,000mの場所で津波が発生，津波発生時には2～3mほど海底が持ち上がり，津波が押し寄せたと見られる．津波が早くに到達したスリランカ，インド，モルディブ，アフリカ諸国などに対して，震源の東側となったタイ，マレーシア，インドネシア，ミャンマーなどでは，比較的遅いスピードで津波が押し寄せた．特に，タイのプーケットでは津波が通過したアンダマン海が，広い大陸棚が広がる浅い海だったので，津波が到達したのは，地震発生から2時間30分後だった．

また，津波はアフリカ大陸東岸のソマリア，ケニア，タンザニアにも到達し，ソマリアで100人以上の死者が発生．ケニアのモンバサでは避難命令が出された．南極大陸の昭和基地でも半日後に73cmの津波を観測し，アメリカ合衆国の西海岸，南アメリカ大陸でも数十cmの津波を記録した．

インド洋の各国では太平洋側の各国にて整備されている津波警報国際ネットワーク（津波早期警報システム）が無く，2時間後に到達する地域においても避難勧告を出すことができなかった．この為，被害を拡大させる一因となった．しかも太平洋津波警報センター（ハワイ）は津波発生の恐れに気づいたものの，警報を出したのはディエゴガルシア島駐留米軍宛のみで，関係各国には“告知”しか送らず，津波被災経験ゼロのインドネシアではその重大性に気づけなかったとされている．

さらに，この津波被害の特徴として，津波が来襲した地域に多くのリゾート地を含んでいたのに加えて，クリスマス後，正月前の休暇シーズンに地震が発生したということで，ヨーロッパからの旅行者を中心に外国人の被災者も多かったことが挙げられる．

津波による被害としては，22,000人以上が死亡したとされる1896年の日本での明治三陸地震，36,417人が死亡した1883年のインドネシア・クラカトア島の噴火をはるかに超える観測史上最悪の惨事となった．

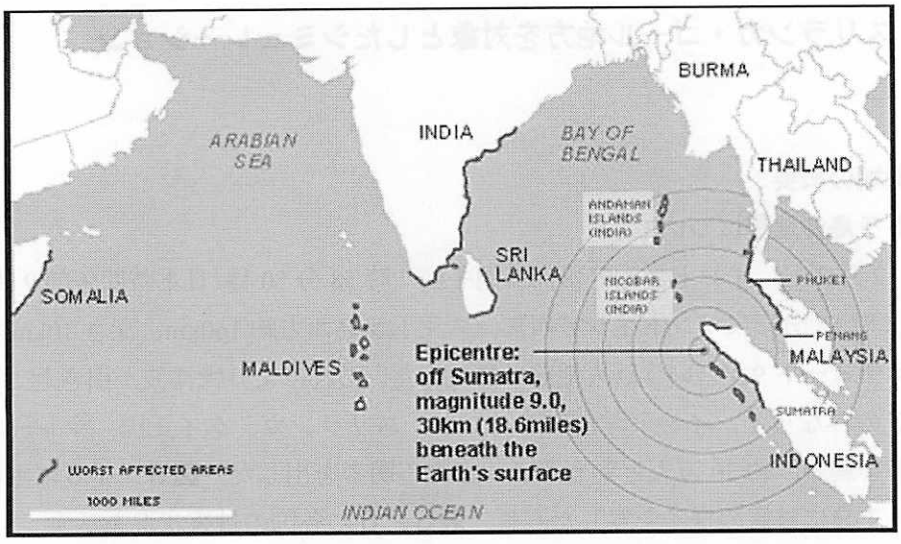


図５．１８　被災地域

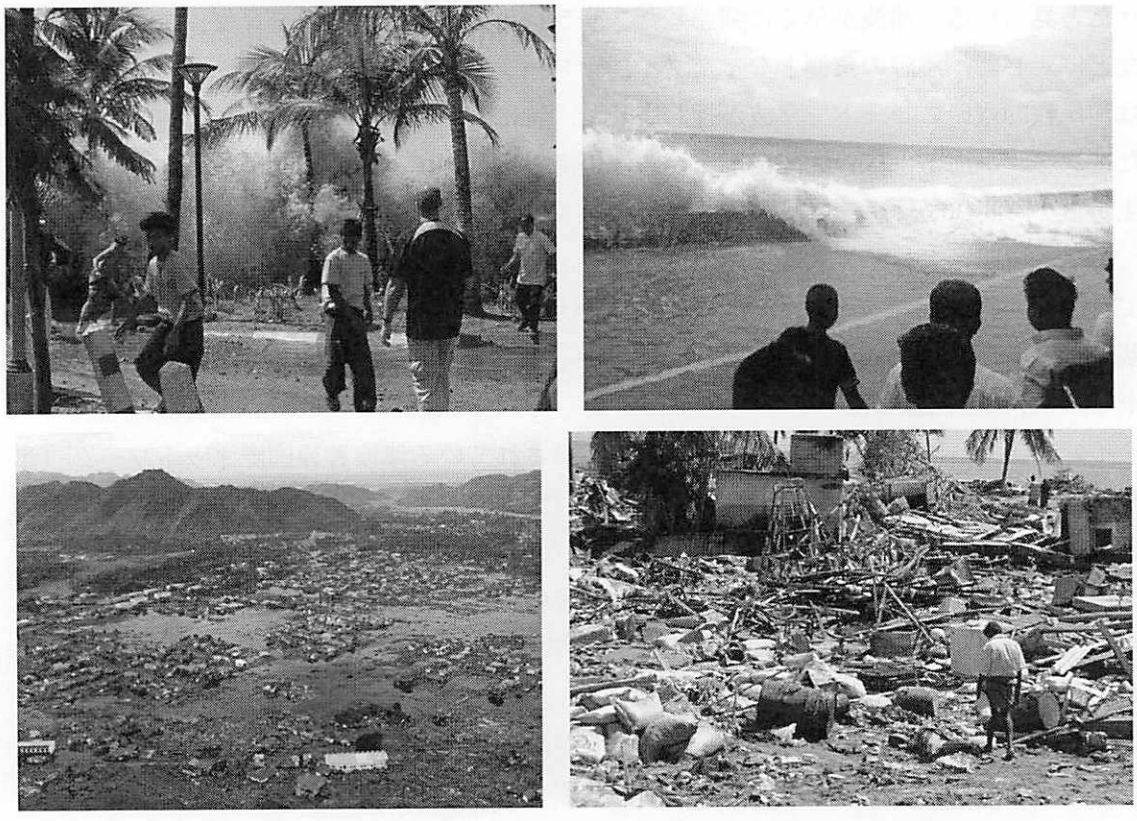


図５．１９　各地の被害の様子

（左上：タイ，右上：モルディブ，左下：インドネシア，右下：スリランカ）

表５．６　各国の人的被害状況

	国名	負傷者(人)	行方不明者(人)	死者(人)
被災地域内	スリランカ	16,637	5,637	31,229
	インド	6898	10,000 以上	12,407
	インドネシア	最大 100,000 入院 1,736	127,749	101,199
	タイ	8,457	3,144	5,332
	マレーシア	入院 73 694	6	68
	モルディブ	1,313	26	83
	ミャンマー	43	3	80
	バングラディッシュ			2
	東アフリカ			137
	ソマリア			少なくとも 150
	タンザニア			10
	ケニア			2
被災地域外	フランス		99	22
	英国		約 160	40
	ノルウェー		78	16
	イタリア		436	18
	スウェーデン		1,800 以上	60
	米国			15
	オーストラリア		79	12
	日本			40
	韓国			4
	北朝鮮			3
	香港		6	34
	ドイツ		970	60
	オーストリア			4
	スイス		95	16
	カナダ			3
	ベルギー			2
	シンガポール			2
	デンマーク			2
	南アフリカ			2
	ニュージーランド			1

※ 交通・通信網の破壊や情報の錯綜により，被害状況がはっきりしていない部分が多いので，各参考資料 [8) 9) 10)] のうち，最大のものを使用して著者が編集した．行方不明者と死者に関しては，合計した値が最大のものを採用した．

b．解析の対象空間

本研究ではスリランカのゴール県の沿岸部を対象として避難行動シミュレーションモデルを用いて，スマトラ島沖地震による津波発生時の避難行動の検証を行った．

スリランカはスリ・ジャヤワルダナプラ・コッテを首都とし，人口 19,905,165 人（2004年），民族構成は 74%がシンハラ人，18%がタミル人，7%がムーア人，１%がバーガー人となっており，宗教の割合は仏教が 70%，ヒンズー教が 15%，キリスト教が 8%，イスラム教が 7%となっている．

スリランカでは，場所によっては 10m近い津波が押し寄せた場所もあったが，ほとんどの場所で 4～5mの津波が来襲し，その遡上域は標高にもよるが海岸から約 1ｋｍの位置までに及んだ．第 5 波まで各地に様々な間隔で到達し，東部と南部の多くの地域では 2 つの波が非常に狭い間隔で押し寄せた．**図５．２０**に各地での調査によって得られた最大浸水深を示す．

人的被害の状況は，死者：31,229 人，行方不明者：4,100 人となっており，地域ごとの人的被害の詳細を**図５．２１**と**表５．７**に示す．一方，建物被害の状況は，全壊が 39,617 棟，半壊が 10,660 棟，一部損壊が 38,561 棟となっており，その詳細を**表５．８**に示す．スリランカでの目立った被害としては，コロンボ発ボール行きの列車が津波に流され転覆したことで乗客の他，屋根の上や車内に避難した地元住民を含め，約 1,000 人が死亡した．

シミュレーションの対象としたゴール県はスリランカの南部，最大の港湾であるコロンボから 120ｋｍ南に位置するインド洋に面した人口約 11 万人の歴史都市である．ゴール港はオランダによる統治時代の貿易代表港として開港され，スリランカの港の中でも最も長い歴史を有し，現在ではコロンボ港，トリンコマリー港と共にスリランカにおける海上輸送の重要な基地となっている．

被災した当日は，午前 9 時 26 分に津波の第 1 波が来襲し，その 20 分後にさらに大きな第 2 波が押し寄せ，ゴール市内が 6m程度浸水した．

被災状況は，旧市街地のフォート地区は高台にあり，かつ砦に守られていたため津波の被害は大きくなかったが，新市街地は半島の両側の海岸に沿って内陸に向かって発達しており，海岸部には防波堤などの防災施設がなかったため，海岸から 200m～500mにわたって津波の遡上による甚大な被害を受けた．ゴール県だけで，人的被害数は死者 4,330 人，行方不明者 564 人となっている．

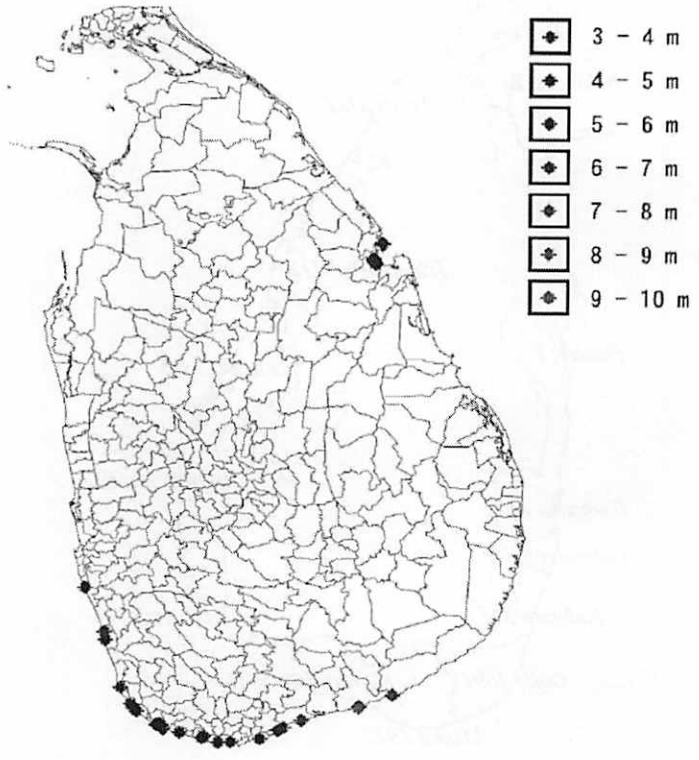


図５．２０　各地の最大浸水深

表５．７　各地区の人的被害

州	地区	死者(人)	行方不明者(人)
Northern	Jaffna	2,640	540
	Killinochchi	560	0
	Mullaitivu	3,000	421
Eastern	Trincomalee	1,078	45
	Batticaloa	2,975	340
	Ampara	10,436	161
Southern	Hambantota	4,500	1,341
	Matara	1,342	600
	Galle	4,330	564
Western	Kalutara	279	68
	Colmbo	79	12
	Gampaha	6	5
North Western	Puttlam	4	3
total		31,229	4,100

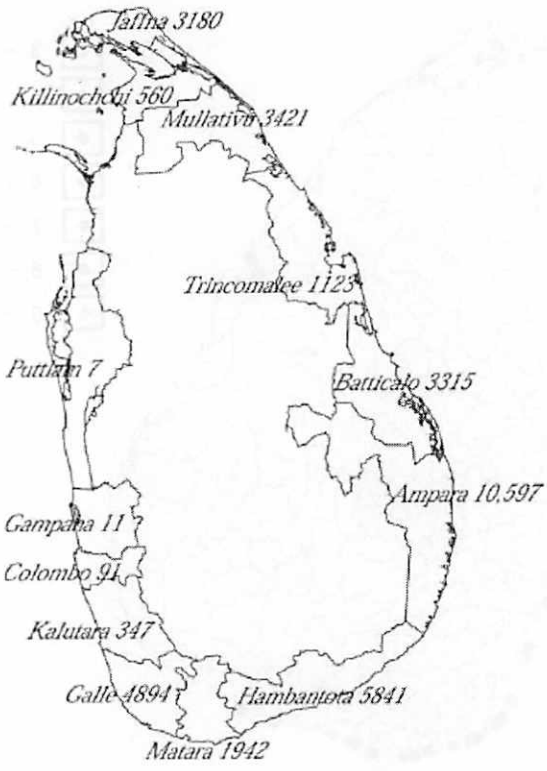


図５．２１　各地区の人的被害（死者+行方不明者）

表５，８　各地区の建物被害

		全壊(棟)	半壊(棟)	合計(棟)	一部損壊(棟)
	Jaffna	3,369	317	3,686	1,829
	Mullaitivu	4,428	709	5,137	554
Northern Province		7,797	1,026	8,823	2,383
	Trincomalee	3,893	750	4,643	2,888
	Batticaloa	7,445	2,460	9,905	7,500
	Ampara	8,139	2,427	10,566	8,244
Eastern Province		19,477	5,637	25,114	18,632
	Hambantota	1,076	275	1,351	1,094
	Matara	1,667	734	2,401	3,837
	Galle	4,482	1,687	6,169	6,040
Southern Province		7,225	2,696	9,921	10,971
	Kalutara	2,056	615	2,671	3,070
	Colmbo	2,824	573	3,397	2,948
	Gampaha	227	97	324	530
Western Province		5,107	1,285	6,392	6,548
	Puttlam	11	16	27	27
North Western Province		11	16	27	27

2）解析に用いたデータ

ここでは避難行動シミュレーションを行う上で，使用した各種データの紹介，および計算領域についての説明を行う．

本研究における計算範囲に関して説明する．対象としたゴール地方は約 72 k mに及ぶ海岸線に接しており，沿岸域は港湾施設，突堤，ラグーン，河口域などを含有する大変変化に富んだ地域である．これあの非一様な海岸域の変化特性や，新市街地が低地に立地しているという特性が人命と財産お損失に対して大きな影響をあたえたものと考えられている．今回の津波災害ではゴール県はスリランカの中で2番目に大きな被害を受けた．

そこで，本研究では特徴的であるフォート地区と新市街地を含む約 2.5 k m×約 3 k mの地域を対象として，避難行動シミュレーションを行う．

避難行動シミュレーションの中で扱った GIS データは土地利用データ，最大浸水深データ，標高データである．土地利用データはシミュレーション内で避難に使用できる道路メッシュの割り出しや避難場所の選定に利用した．また，最大浸水深データは Herath らによって実施された現地調査[11]によって得られたデータである．これを用いて，津波の浸水域と浸水深の時刻暦データの作成に利用した．**図5．22**は Herath らの調査における観測ポイントと浸水域を3次元マップ上に示したものである．標高データは浸水深の時刻暦を作成する際と避難場所の設定の際に利用した．**図5．23～図5．25**に使用した GIS データを示す．

避難場所については，現地の地図や調査の結果を参考に，①冠水しない標高の高い土地，②寺院などの宗教施設，③軍の施設の三種類を設定した．④の宗教施設は信仰心の強いスリランカの国民性を考え，精神的支えになること，一般住宅よりもメインテナンスもきちんとされ，強度の高い建物でできているといこと，周辺の住民がその場所をよく知っているという理由から避難場所として選んだ．実際にもゴールの寺院に多くの人々が避難したとの報告がある．

また，対象とした地域の住民は4万人であるが，本研究ではそのうち 4698 人を代表させた．その住民を区域ごとに面積比例配分を行い，使用する道路上に配置した．道路上に配置した理由としては，建物と道路をつなぐデータが存在しなかったため，簡易化するためである．住民の男女比率は実際のデータに基づき，男性 51%，女性 49%とした．1つのメッシュの大きさは 5m四方とし，計算間隔は2秒として計算を行った．

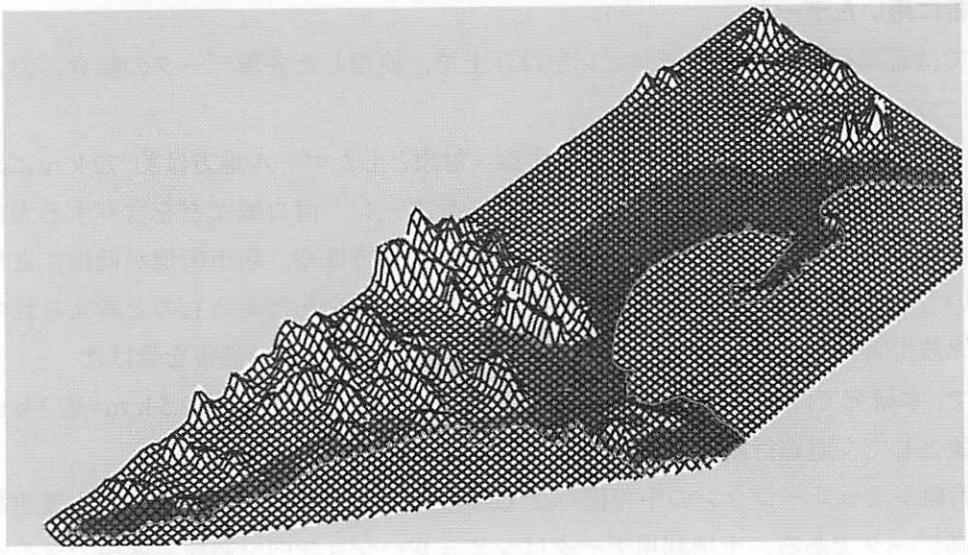


図５．２２　津波の浸水域と最大浸水深の調査結果

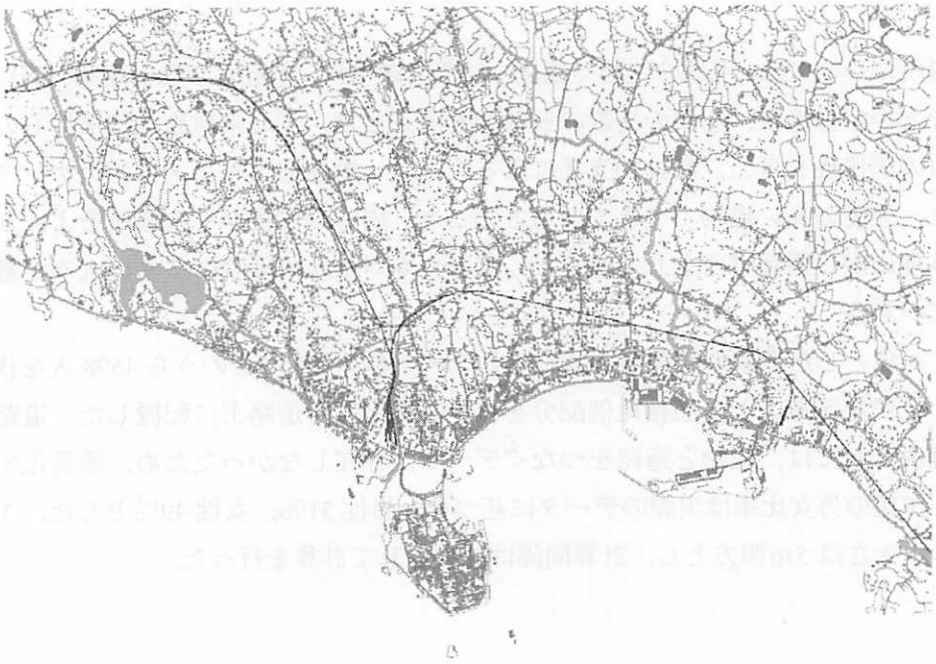


図５．２３　土地利用データ

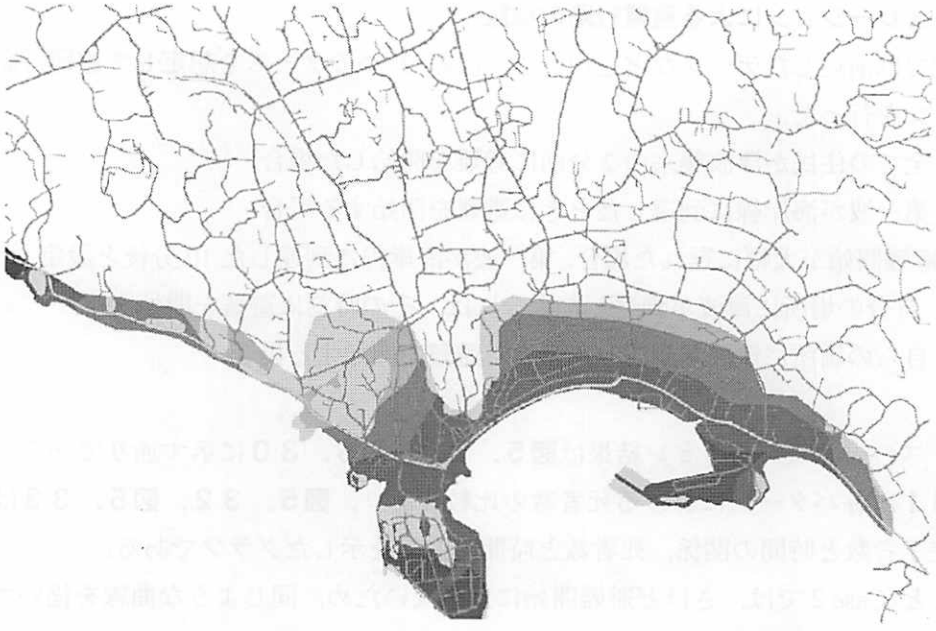


図５．２４　最大浸水深データ



図５．２５　標高データ

3）シミュレーションによる避難行動の検証

本研究では前述したデータなどを用いて，次の 3 つのケースを想定して避難行動シミュレーションを行った．

Case 1 ：全ての住民が津波襲来の 2 分前に避難を開始した場合．

Case 2 ：第一波が海岸線に到達したときに避難を開始する場合．

Case 3 ：避難開始が大幅に遅れた場合．第一波が海岸線に到達した 10 分後と設定．ただし，自分の場所に津波が到達した場合には，その時刻に避難を開始する．

Case 4 ：自らの場所に津波が到達したときに避難を開始する場合．

各ケースのシミュレーション結果は**図5．29～図5．30**に示す通りである．また，**図5．31**は各パターンにおける死者数の比較であり，**図5．32**，**図5．33**はぞれぞれ避難完了者数と時間の関係，死者数と時間の関係を示したグラフである．

Case 1 と Case 2 では，さほど避難開始に差がないため，同じような曲線を描いているが少しでも避難開始時刻が遅れると，被害者数が増加することがわかる．一方，Case 3，Case4 は実際のケースと似た条件として，自らが津波の来襲を確認してから避難を開始する場合を模擬しているが，このケースでは避難開始が大幅に遅れることで，人的被害が急激に増加していることがわかる．なおこの条件は，アジア防災センターによる現地住民のアンケートの結果（**図5．26**），被災時においても避難するきっかけとなったのは『波が迫ってくるのを見て』と『実際に津波に襲われて』が 60%以上を占めていることを参考にしている．

実際の状況では情報が伝わらなかったとされており，アンケートの結果を見ても，Case3 のようにある時間で，強制的に避難を開始することは無く，全て住民の意思によって避難が開始されるものである．それらを考慮に入れると，現時点では日本などの津波常襲地域と比較して，住民の意識や情報伝達体制などソフト面の対策の重要度が増してくる．

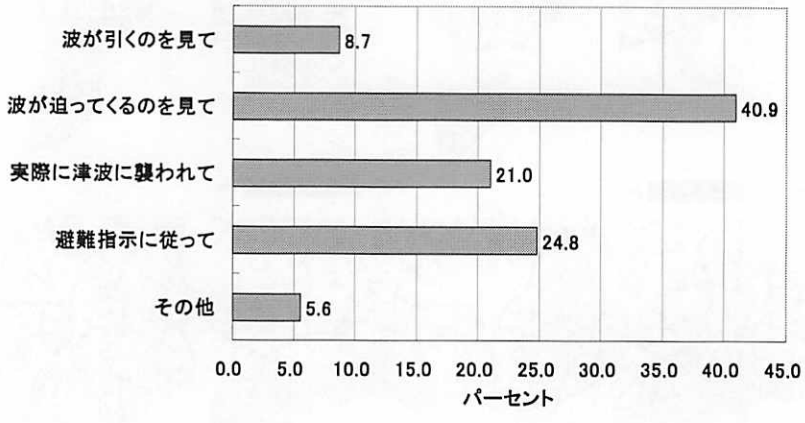


図５．２６　スマトラ島沖地震において避難したきっかけ

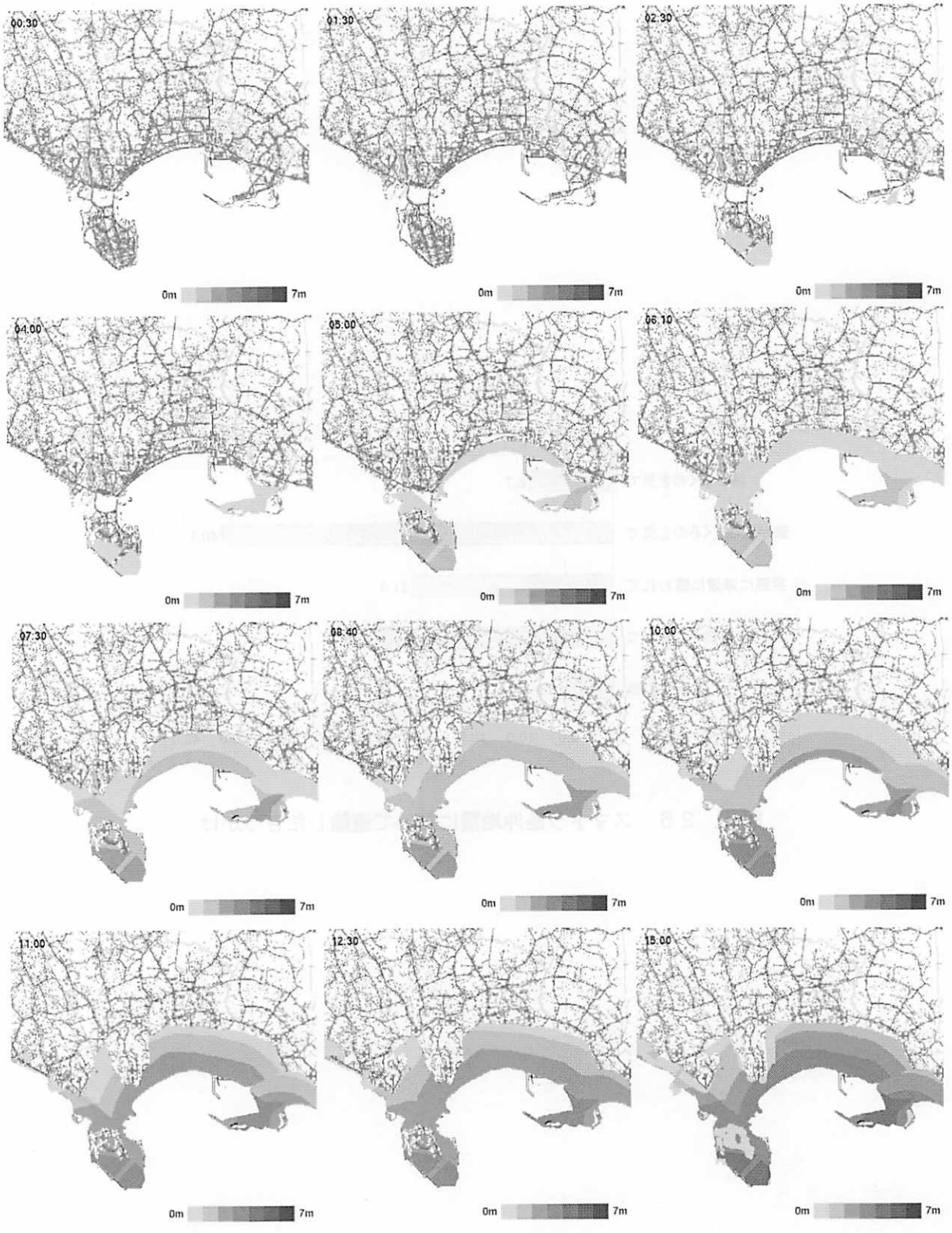

00.30
01.30
02.30
04.00
05.00
06.10
07.30
08.40
10.00
11.00
12.30
15.00
0m
7m

図5．２７　Case1

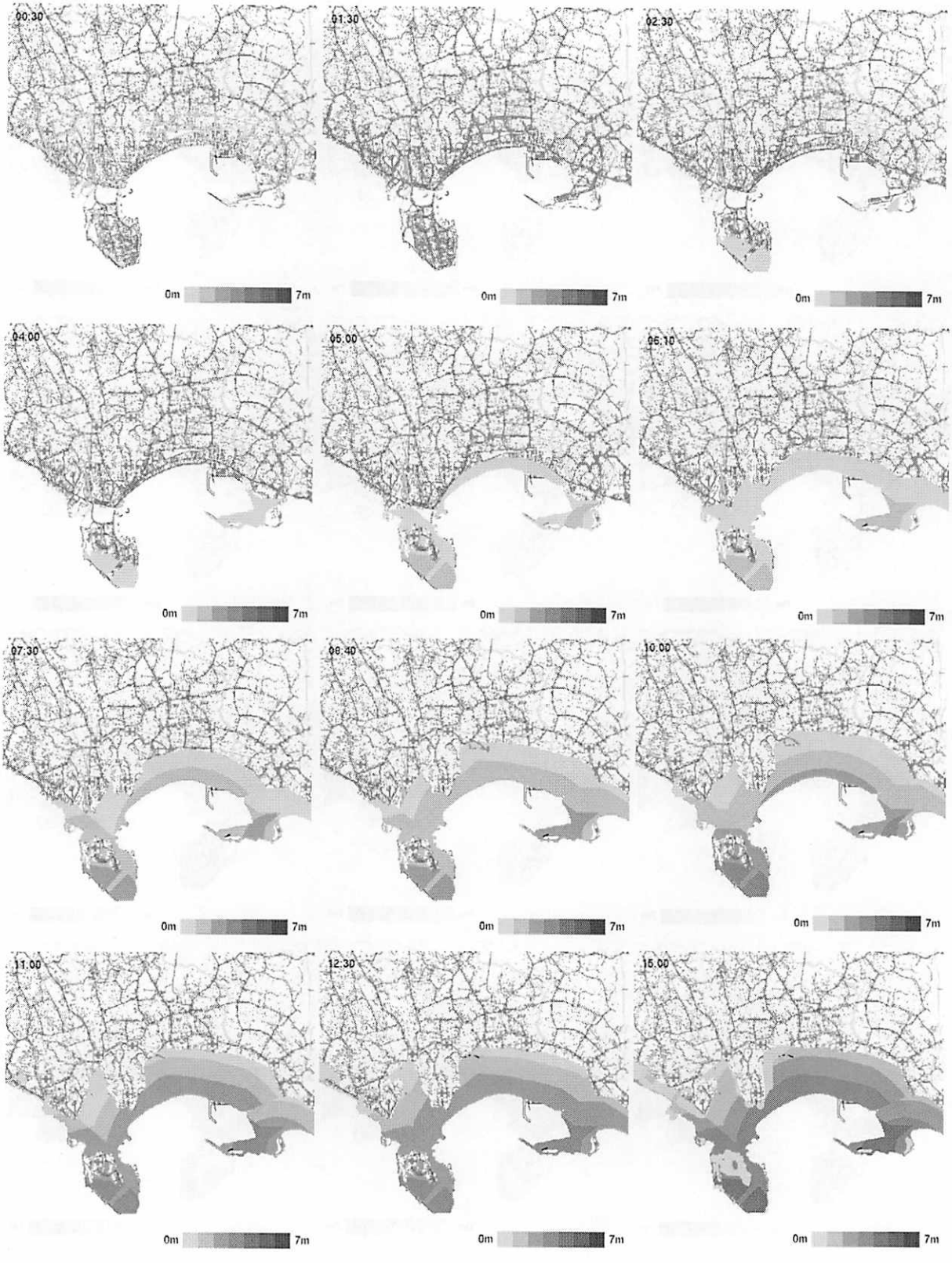

00:30
01:30
02:30
04:00
05:00
06:10
07:30
08:40
10:00
11:00
12:30
15:00
0m
7m

図5．28　Case2

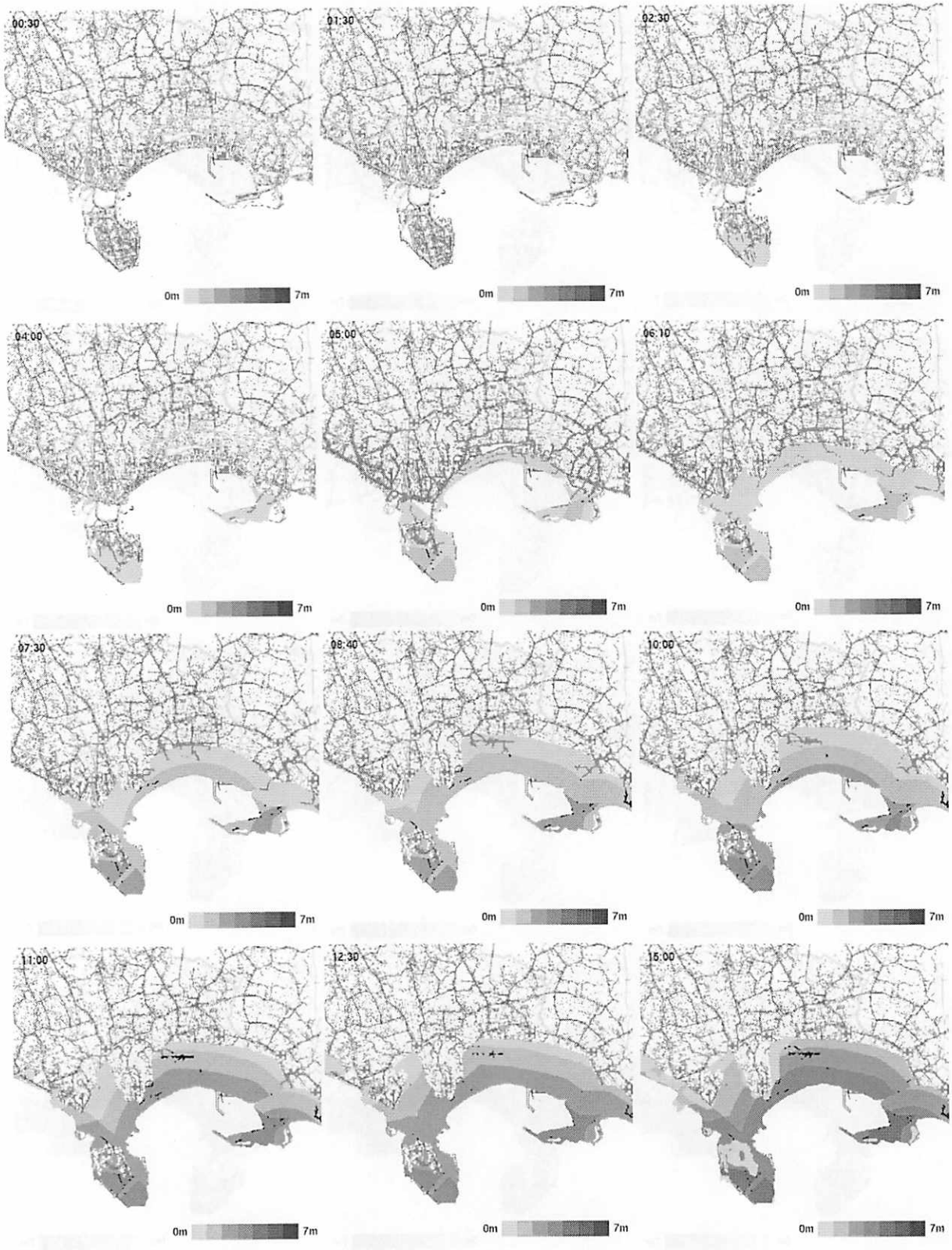

00:30
01:30
02:30
04:00
05:00
06:10
07:30
08:40
10:00
11:00
12:30
15:00
0m
7m

図5．２９　Case3

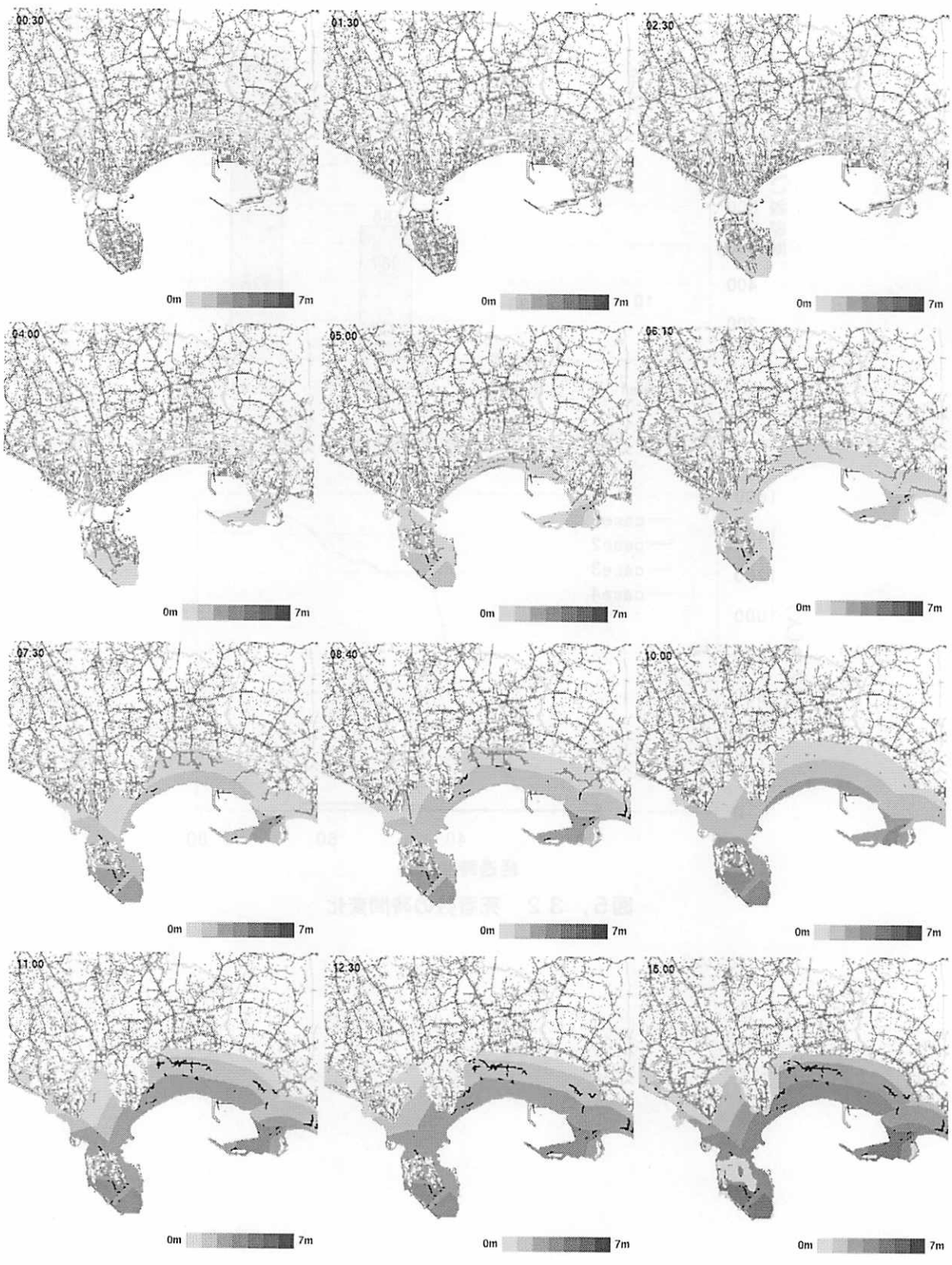

00:30
01:30
02:30
04:00
05:00
06:10
07:30
08:40
10:00
11:00
12:30
15:00
0m
7m

図5．30　Case4

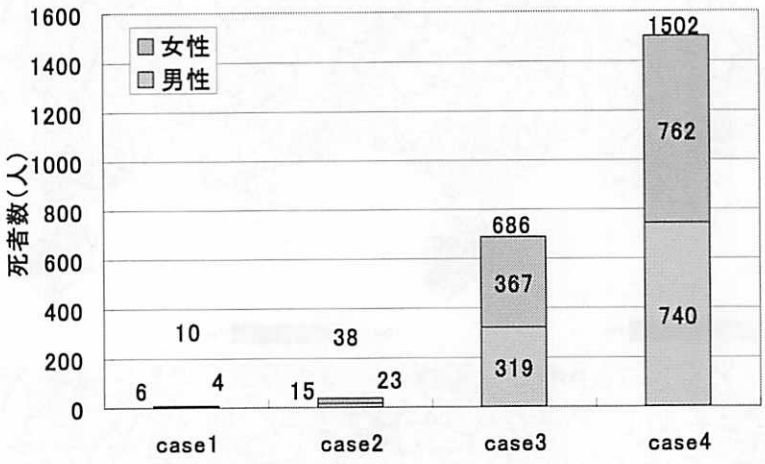


図５．３１　死者数の比較

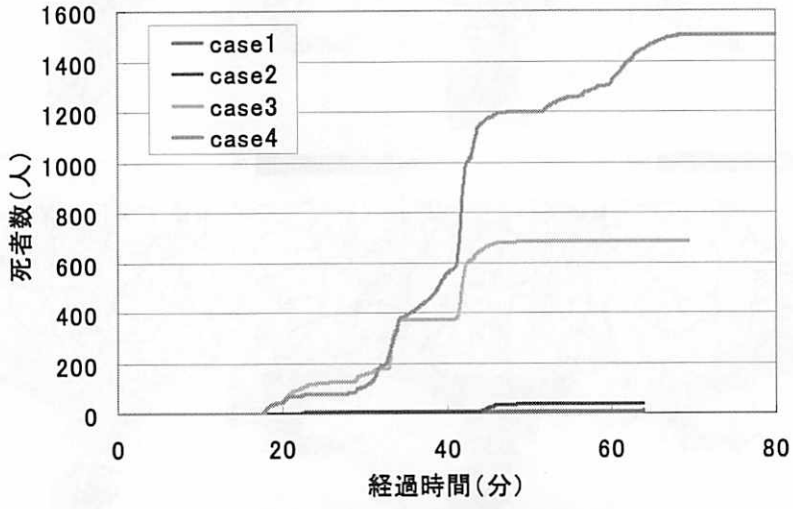


図５．３２　死者数の時間変化

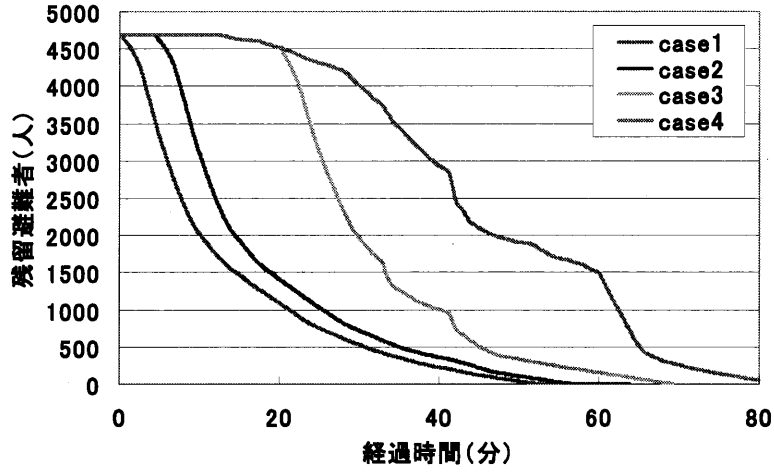


図５．３３　残留者の時間変化

5．4　三重県尾鷲市を対象としたシミュレーション

1）対象地域の概要

a．東海・東南海・南海地震について

今世紀前半にも東海・東南海・南海地震の発生が危惧されている．これら海洋型の地震による被害は，揺れによる直接的な被害に加えて，大規模な津波によって引き起こされる甚大な被害が指摘されている．

中央防災会議の「東南海，南海地震に関する専門委員会」によると，被害は関東から九州にかけての広い範囲で発生し，建物被害は全壊棟数が最大で約62万棟（18時，風速15m），人的被害は死者が最大で約1万7千人（5時，風速15m），経済被害については最大で役57兆円と想定されている[12]（**表5．9，表5．10**）．

東海・東南海・南海地震は，内陸の直下型地震とは異なり，巨大な海溝型の地震であり，震源域が海域にある割合も多いために，広域に巨大な津波が来襲することが予想される（**図5．34，図5．35**）．上記委員会が算定した津波による人的被害を比較すると，住民の避難意識が高い場合（未避難率28.9%：北海道南西沖地震での奥尻島の場合）でも約3300人（5時），約2200人（12時），2300人（18時）と多大な被害者数が想定されており，住民の避難意識が低い場合（未避難率80%：日本海中部地震の場合等）に至っては，約8600人（5時），約4100人（12時），約5000人（18時）と，人的被害の半数近くを津波による被害者が占めるような状況となる．ただし，これらは水門等が正常に機能した場合の想定値であり，仮に水門の閉鎖不能等を考慮した場合の被害はさらに増大すると考えられる．

過去の地震津波による被害をみてみると，1944年の東南海地震（M7.9）では三重県尾鷲市で最大9m，熊野灘沿岸では6～9mの津波が来襲した．また1946年の南海地震（M8.0）では，三重県，和歌山県沿岸で4～6mの津波が来襲し，それぞれ甚大な被害をもたらしている[13]（**表5．11，表5．12，図5．36**）．

次の東海・東南海・南海地震は同時に発生する可能性もあり，委員会では，同時発生時，規模はM8.6の巨大地震を想定した．同調査会の被害想定によれば，津波による人的被害，建物被害について次のような状況が予測されている．

◇津波による人的被害

・津波からの逃げ遅れ等により，死傷者が生じる．
・津波防災施設の損壊や水門が閉められなかった場合，浸水被害が拡大する．
・高齢化が進む地域は，逃げ遅れによる被害の拡大も考えられる．
・海水浴シーズンでは，津波来襲時の海浜入り込み客の逃げ遅れに伴い，大量の死傷者が生じる危険性がある．
・都市部では地下水が浸水する可能性がある．
・都市構造によっては，車を利用した避難者により渋滞が発生する可能性があり，逃げ遅れなどによる被害の拡大もあり得る．

◇津波による建物被害

・浸水深 1m以上のエリアで木造家屋の半壊被害，2m以上で全壊被害が生じる．
・強い揺れや液状化による津波防災施設の損壊や水門が閉められなかった場合，浸水被害が拡大する．
・津波被害を受けた家屋からの出火被害が生じる場合がある．

◇ その他津波に関する被害

①交通・輸送施設被害

・津波による浸水が想定される東海から四国にかけての太平洋沿岸域を中心に，耐震岸壁を除く岸壁，エプロン部分，上屋，クレーン等が破損する可能性がある．
・港湾へのアクセスルートの寸断により輸送機能が低下する恐れがある．
・発災後長時間にわたり繰り返し津波が到達し，港湾機能が停止．津波到達後も木材や流失物の散乱により数日間港湾機能が不可能となる恐れがある．
・大阪湾，瀬戸内海では，発災後 2 時間前後以上してから津波が到達．その後繰り返し到達するため，当日の港湾機能は停止．津波による散乱物の状況によっては，機能停止は数日間継続の可能性がある．ただし,港湾岸壁等の施設被害はほとんど発生しない．
・地殻変動が発生した場合，港湾施設が沈水や，水深低下による航路障害が起こる可能性がある．

②漁船・船舶，水産関連施設被害

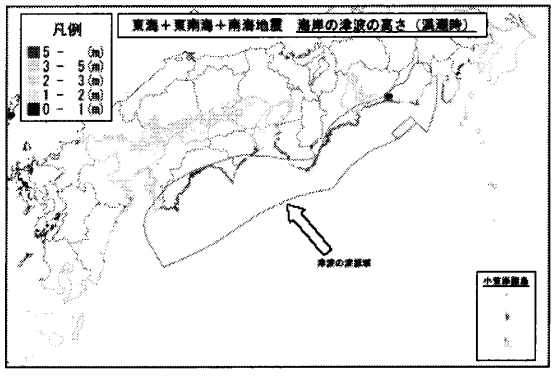
・津波来襲時の引き波により水深の浅いバースに係留中の大型船舶が座礁する恐れがある．
・流木・漂流船舶等の衝突が多発し，船舶被害が拡大する危険性がある．
・横波により避難船舶が転覆する危険性がある．
・津波により水産養殖施設，漁具，漁網等が流出し，湾口閉鎖，航路障害等の機能被害をもたらした場合，港湾・漁港機能が麻痺し，経済的な波及被害が拡大する危険性がある．
・廃船などの大型漂流物が人家や貯蔵タンクなどに衝突し，二次的な被害をもたらす恐れがある．

表５．９　東海・東南海・南海地震の建物被害の想定（中央防災会議資料より抜粋）

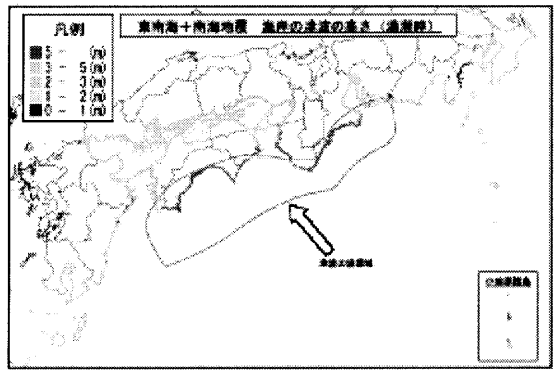
項目		5時	12時	18時
揺れによる被害		（木造）約 141,700 棟，（非木造）約 24,800 棟 計　約 166,500 棟		
液状化による被害		（木造）約 70,000 棟，（非木造）約 18,300 棟 計　約 88,300 棟		
津波による被害		（水門が正常に機能した場合） 約 38,800 棟		
急傾斜地崩壊による被害		約 20,600 棟		
火災による被害	阪神・淡路大震災の時と同様の風速 3m	約 13,000 棟	約 12,700 棟	約 114,000 棟
	関東大震災の時と同様の風速 15m	約 39,100 棟	約 38,500 棟	約 301,800 棟
合計	風速 3m	約 327,100 棟	約 326,800 棟	約 428,200 棟
	風速 15m	約 353,200 棟	約 352,600 棟	約 615,900 棟

表５．１０　東海・東南海・南海地震の人的被害の想定（中央防災会議資料より抜粋）

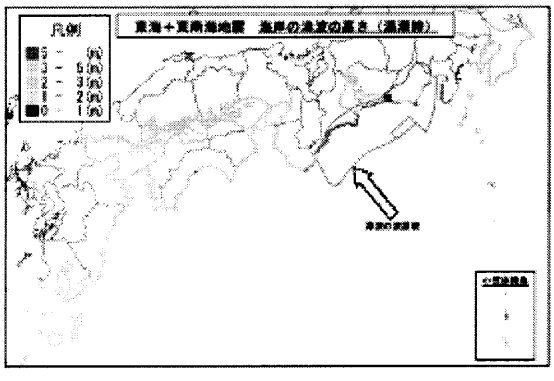
項目		5時	12時	18時
揺れによる被害		約 6,500 人	約 2,900 人	約 3,900 人
津波による被害	避難意識が高い場合（未避難率 28.9%）（北海道南西沖地での奥尻町の場合）	約 3,300 人	約 2,200 人	約 2,300 人
	避難意識が低い場合（未避難率 80%）（日本海中部地震の場合等）	約 8,600 人	約 4,100 人	約 5,000 人
急傾斜地崩壊による被害		約 1,900 人	約 1,000 人	約 1,300 人
火災の被害	阪神・淡路大震災の時と同様の風速 3m	約 100 人	約 60 人	約 800 人
	関東大震災の時と同様の風速 15m	約 400 人	約 200 人	約 2,100 人
地すべり・大規模崩壊		地すべり，大規模崩壊の発生場所によっては1箇所でも多数の死傷者が生じる場合がある．		
合計	風速 3mの場合	約 11,900 人 ～約 17,100 人	約 6,100 人 ～約 8,000 人	約 8,300 人 ～約 11,000 人
	風速 15mの場合	約 12,100 人 ～約 17,400 人	約 6,200 人 ～約 8,100 人	約 9,600 人 ～約 12,300 人



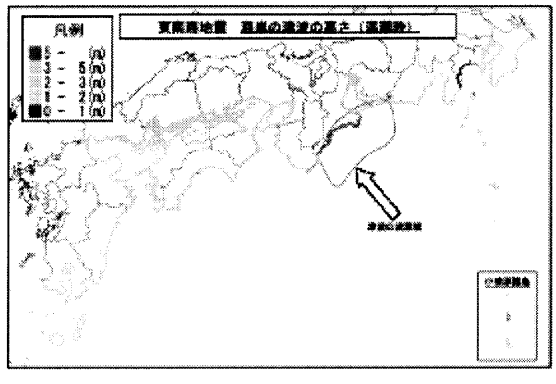
東海＋東南海＋南海



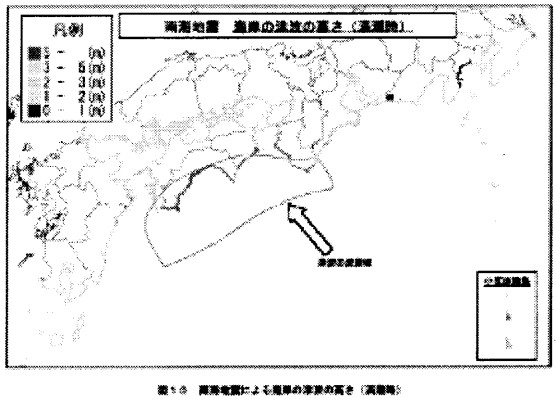
東南海＋南海



東海＋東南海



東南海



南海

図５．３４　海岸の津波高さ（満潮時）

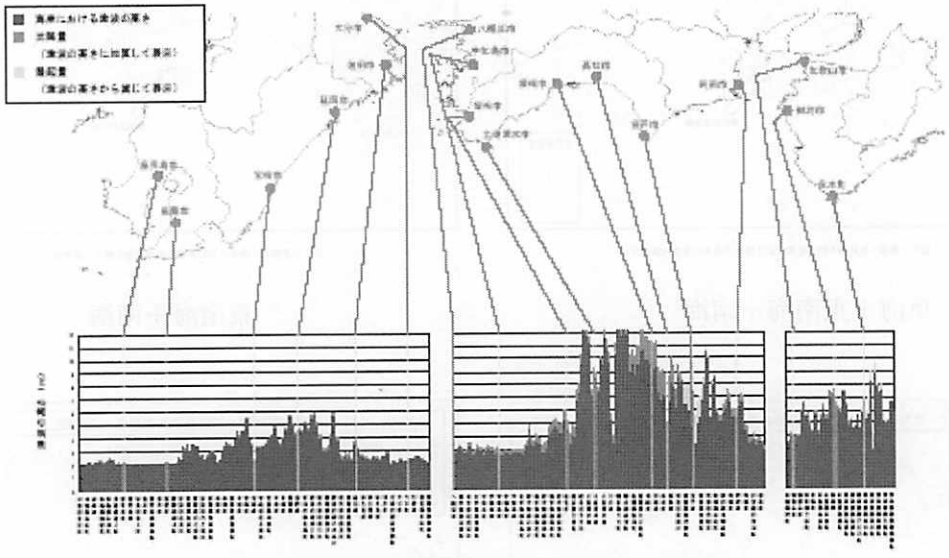


図１１　東南海＋南海地震津波による海岸の津波の高さの分布図（太平洋側１、満潮時）

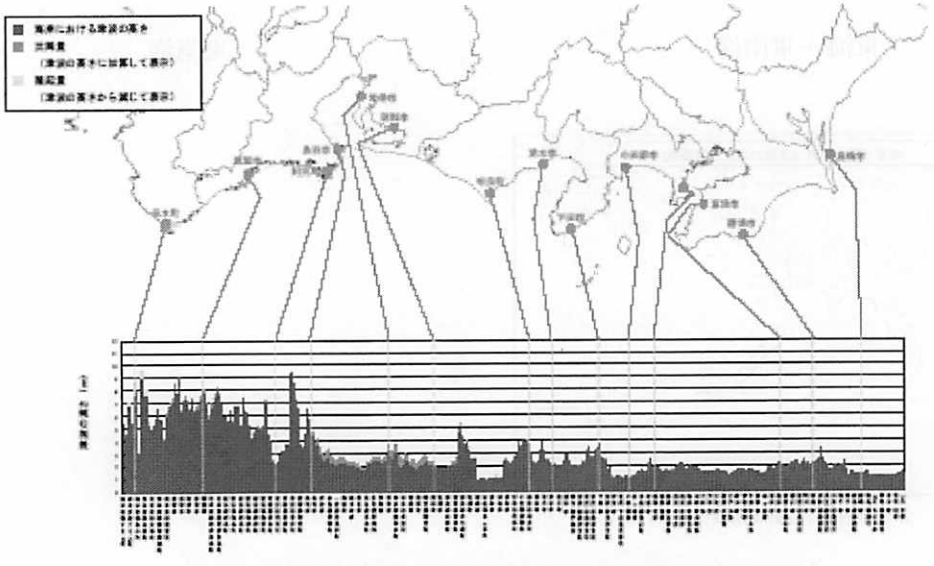


図１２　東南海＋南海地震津波による海岸での津波の高さの分布図（太平洋側２、満潮時）

図５．３５　海岸での津波高さの分布図（満潮時）

表５．１１　昭和東南海地震（1944）での主な被害

県名	死者（含行方不明）	負傷者	住家（戸）		非住家（棟）		流出家屋	浸水家屋
			全壊	半壊	全壊	半壊		
愛知県	461	1,188	6,968	19,676	10,178	4,951		150
静岡県	317	900	6,970	9,522	4,684	5,563		208
三重県	389	608	1,627	4,210	1,103	1,901	2,759	7,579
岐阜県	16	43	411	623	494	448		
奈良県	3	21	89	177	234	214		
滋賀県			7	76	28	38		
和歌山県	51	74	121	604	46	63	153	1,978
大阪府	14	135	199	1,629	124	63		2,241
山梨県			13	11	14	3		
石川県			3	11	6	8		
福井県			1	2	2	3		
兵庫県		2	3		23	9		
長野県			13	49	1	2		
合計	1,251	2,971	16,425	36,590	16,937	13,266	2,912	12,156

表５．１２　昭和東南海地震（1944）での津波被害

県名	人的被害			家屋被害			
	死者	傷者	行方不明	流失	全壊	半壊	浸水
三重県	144	55	445	4,918	882	585	5,122
和歌山県	45	74	5	153	57	490	1,479



図５．３６　震災直後の三重県尾鷲市の様子

b．尾鷲市の概要

尾鷲市は三重県南部，東紀州地域の中央に位置し，北は北牟婁郡海山町，南は熊野市，西は大台山系を境に奈良県に接し，東は太平洋（熊野灘）に臨んでいる（**図5．37**）．193.16k㎡の面積を有し，広がりは東西21km，南北19kmに及んでいる．平成15年10月1日現在の人口は23,772人（男11,163人，女12,609人）世帯数10,492世帯いる．そのうち，全体の約80%に当たる，18,054人（全体の79.7%），7,945世帯（全体の77.0%）が尾鷲駅付近の市街化された地域に存在する．年齢分布は**図5．38**に示す通りとなっている[14]．

地勢としては，総面積の90%が山林で覆われ，沿岸部には変化に富んだリアス式海岸が形成されており，平坦地が極めて少なく集落は湾奥に位置しているのが特徴である．気候条件としては，黒潮の流れる熊野灘に面し，背後が三方高い山に囲まれていることから，全国有数の多雨地帯であり，年間降水量は4,000mm以上を記録しており，鹿児島県屋久島に次いで年間降水量の多い地域となっている．

尾鷲市はリアス式海岸の湾奥に位置しているため，かねてより津波の常襲地域である．そのなかでも，昭和東南海地震（1944）で，地震津波により多大な被害を被った．尾鷲市沿岸部では最大で9m以上の津波が来襲し，三重県全域の人的被害は600人超，家屋被害に関しては1万棟を超す規模の大惨事であった．最近発生した地震によっても，目立った被害こそ出てはいないものの，津波の来襲が確認されている．2004年9月5日に紀伊半島沖を震源として発生した地震においては，0.6mの第1波が6日00時21分に到達しており，その20分後に同じく0.6mの津波の到達が確認されている．

先述した中央防災会議専門委員会の報告によると，次回の東南海・南海地震においても，尾鷲市は最大で8m規模の津波の来襲が想定されており，大規模な被害が懸念されている．**図5．39**には想定東海地震，東南海地震，南海地震が同時に発生した場合の尾鷲市周辺の津波評価点における津波波形を示す．**図5．40**は中央防災会議「東南海，南海地震等に関する専門調査会」（平成15年9月17日）において発表されたシミュレーションをもとに，三重県が独自に作成した，県内152ヶ所における最大浸水深の津波浸水予測図である[15]．市街化された地域における，浸水が予想される範囲内の世帯数，人口数（また,その男女比）は**図5．41**に示すとおりであり，半数以上の住民が津波の危険にさらされている．

c．現地調査

三重県尾鷲市を対象とした避難行動シミュレーションモデルを開発するにあたり，現地状況の把握と各種資料収集，尾鷲市長，尾鷲市防災危機管理室の担当者の方々との意見交換を行うため，2006年11月に津波被害が懸念される尾鷲市市街地での現地調査を実施した．

調査スケジュールを**表5．13**に示す．本調査では，現地踏査により海岸部，市街地，広域避難場所を含め現地の地勢を把握するとともに，2004年に織田によって実施された現地調査における情報の更新を目的としている．**図5．42**に調査行程を，**図5．43～図5．45**には撮影した写真の一例を示す．

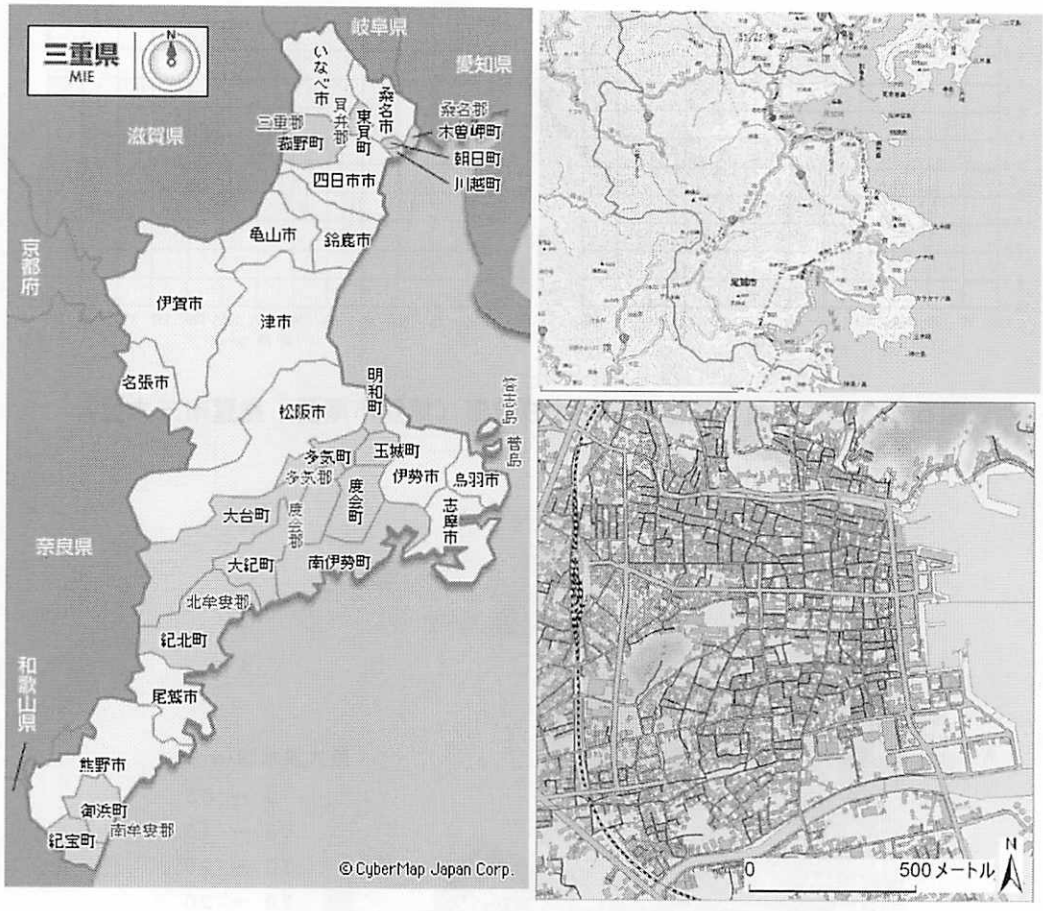


図５．３７　三重県尾鷲市

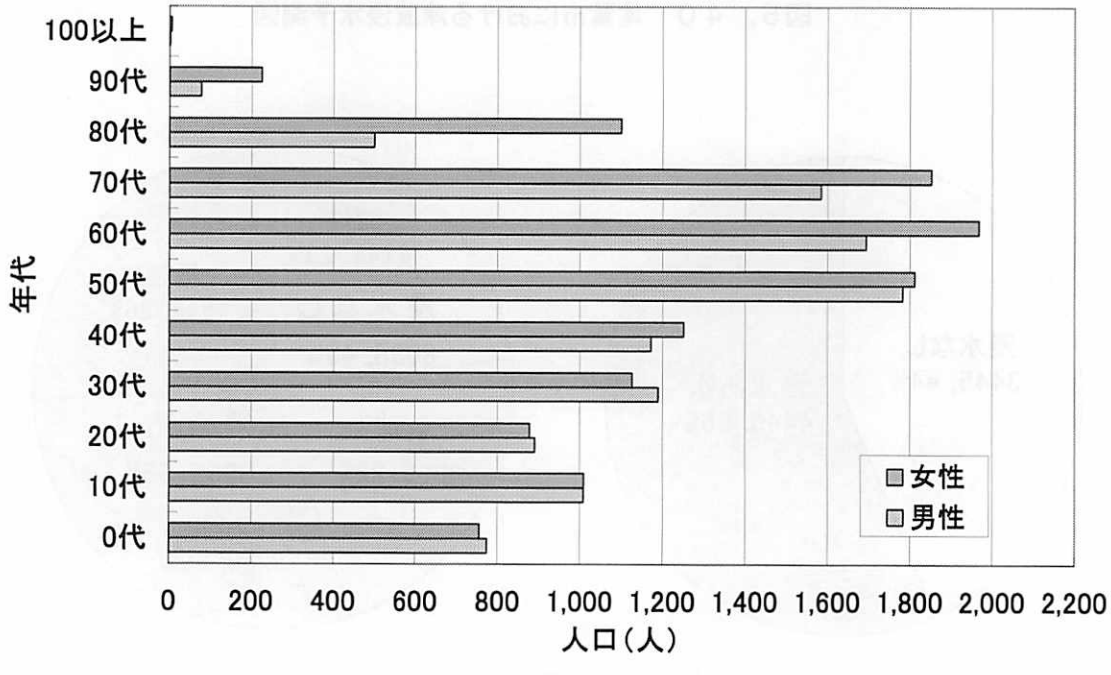


図５．３８　尾鷲市の年齢分布

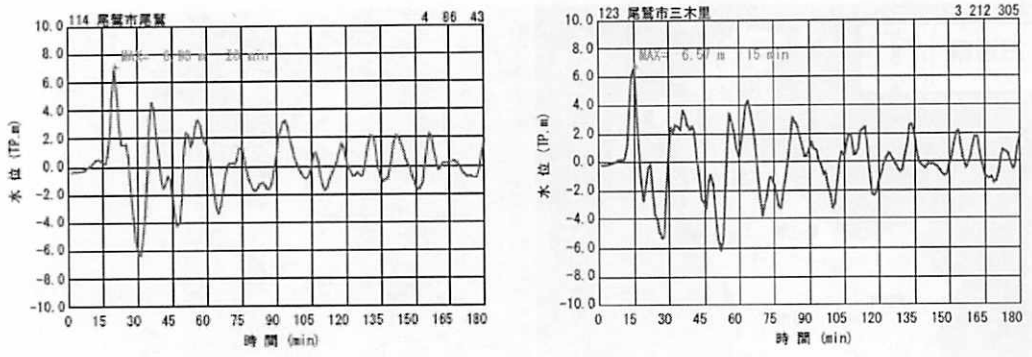


図５．３９　尾鷲市周辺の予想津波波形（尾鷲市尾鷲，尾鷲市三木里）

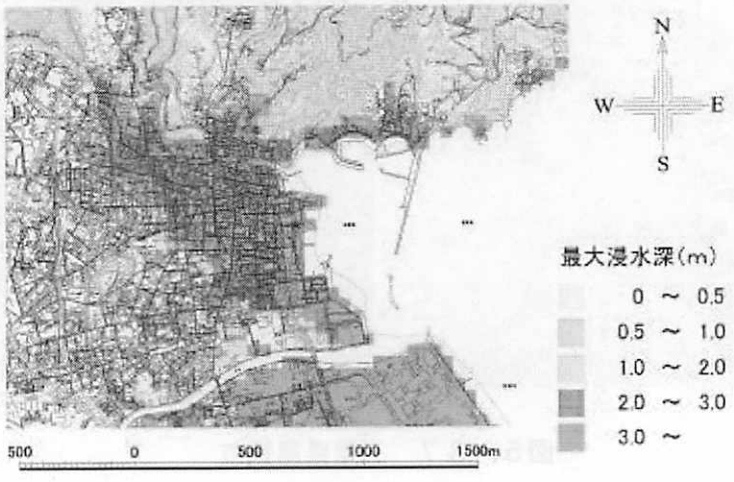


図５．４０　尾鷲市における津波浸水予測図

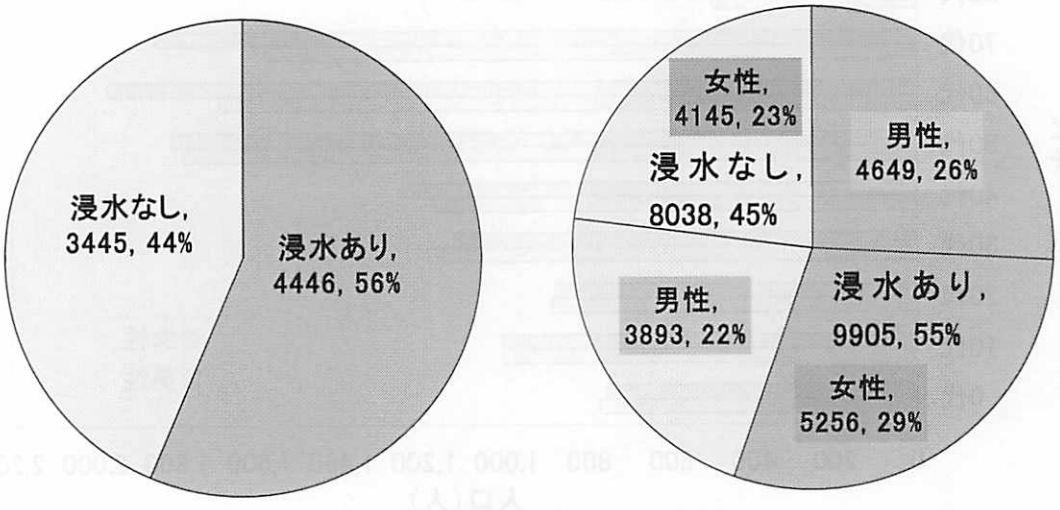


図５．４１　市街化地域の浸水予想（左：世帯数，右：人口）

表５．１３　現地調査スケジュール

日時		調査内容
11 月 27 日	午前	移動
	午後	住宅密集地・沿岸地域
11 月 28 日	午前	住宅密集地・沿岸地域・広域避難場所
	午後	尾鷲市長，防災担当の方々と意見交換
11 月 29 日	午前	住宅密集地・防災センター
	午後	移動

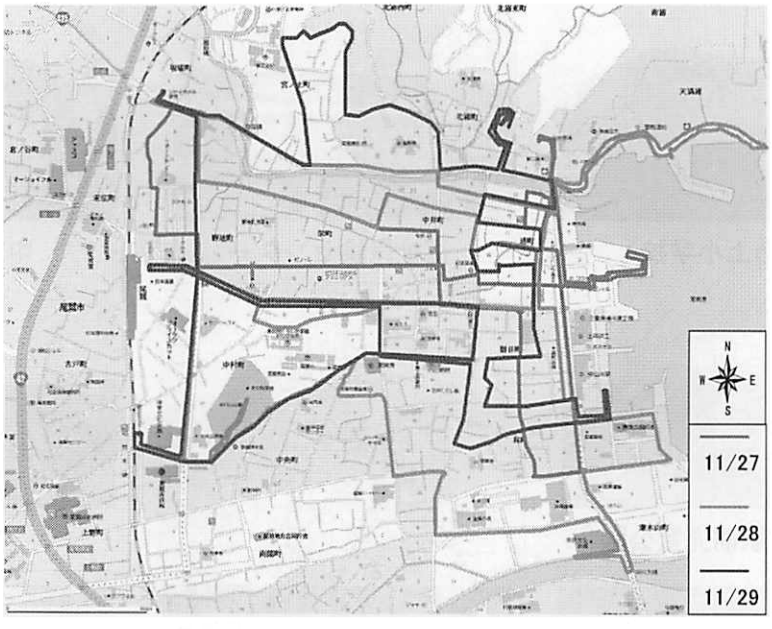


図５．４２　調査行程



図５．４３　尾鷲市役所全景および防災対策室の様子



図５．４４　広域避難場所（図中の赤い丸は，解析で使用した避難場所を示している）

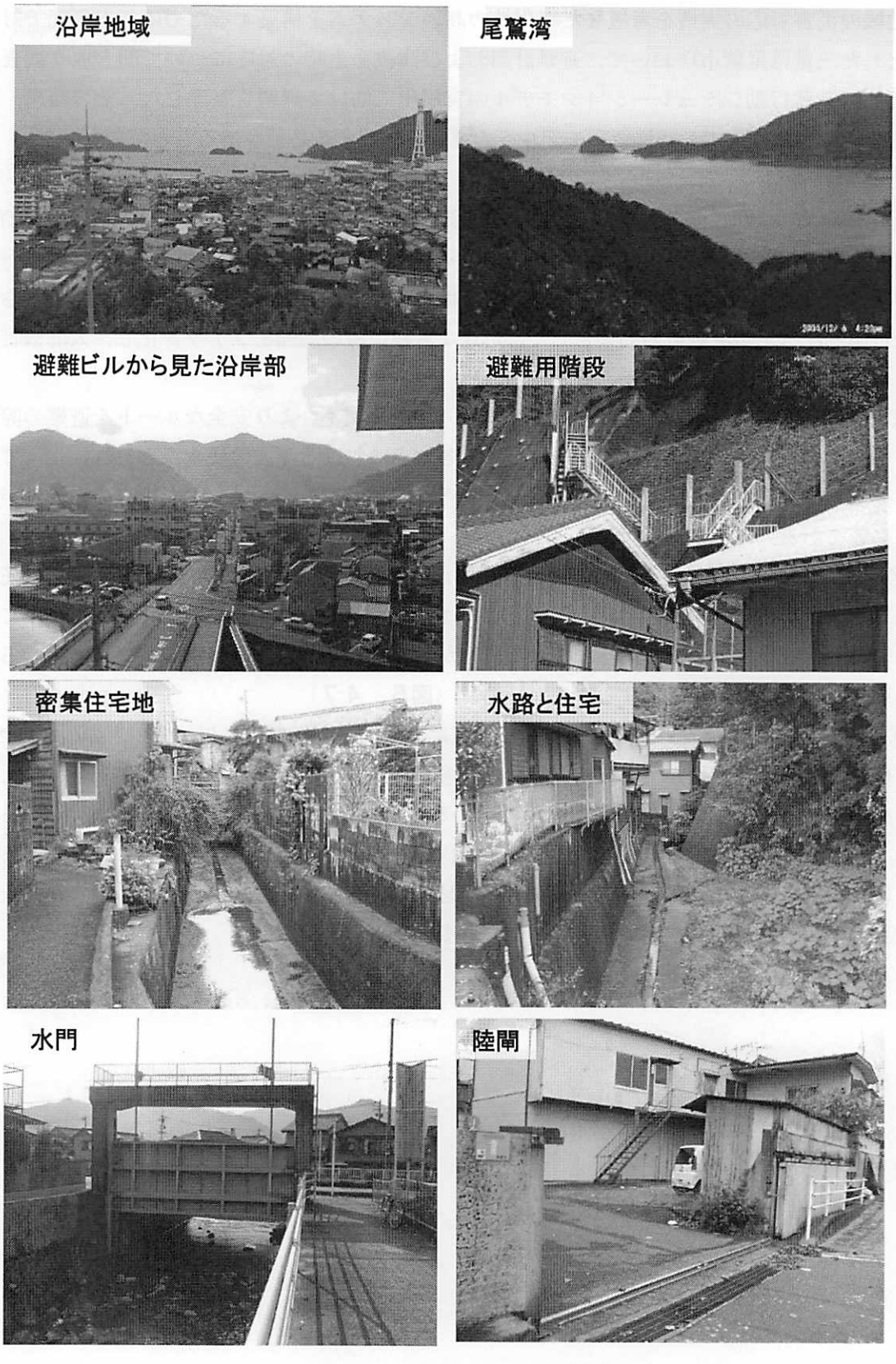


図５．４５　尾鷲市の様子

地域の災害対応の実情を考慮した実用性の高いシステムを構築するために，本研究で対象とした三重県尾鷲市において，避難計画および津波発生時の対応について聞き取り調査を行い，避難行動シミュレーションモデルの実用化に向けて課題を整理した．その結果，特に以下の点について，避難行動モデルへの導入を検討する必要があることが分かった．

①尾鷲市では，防災センターが新設され，津波災害への対応については本センターが初動的な対応にあたることになる．特に津波情報については，緊急地震速報システム（**図5．46**）が仮運用段階にあり，東南海・南海地震では揺れの数十秒前に警報を出すことも可能となる．防災対策の効果として，迅速な避難情報の周知をシナリオ化し，人的被害の軽減効果を明らかにする必要がある．

②避難の際には，たとえ遠回りで時間がかかったとしても，より安全なルートを避難の際に選択することが重要である．そのため，各地点における津波の浸水深とそれによって発生する力を考慮し，シミュレーションを行うことで，最適なルートを検討することが必要である．

③尾鷲漁港前では津波発生時に自動で閉鎖される鉄扉が導入されおり，水圧およびガス圧で津波来襲時に自動閉鎖される設計となっているが，鉄扉のレール上に物が配置されていたり，液状化によって閉らなくなることが考えられる．これらの状況によって異なる被害発生シナリオを考慮する必要がある．（**図5．47**）

④シミュレーションの対象とした市街化地域は比較的若い年代の人口が多いものの，市全体として高齢化が進んでおり，避難の際に多くの援護が必要となる可能性がある．またその際に，どこに何人災害時用援護者がいるのかといった情報を整理する必要がある．しかしながら，現時点においては個人情報保護法などとの兼ね合いもあり，アンケートによる把握，つまりは挙手による情報の整理しかできていない．よって今後は潜在的な災害時用援護者に対する対応策の検討が必要である．



図５．４６　緊急地震速報システム



図５．４７　尾鷲漁港前の鉄扉

2）解析に使用したデータ

a．GISデータ

ここでは避難行動シミュレーションをするにあたって使用したGIS（地理情報システム）データの紹介，および計算領域についての説明を行う．

まず本研究における計算領域に関して説明する．尾鷲市は193.16k m^2の面積を有しているが，その人口の多くが市街地部分に集中している．市街地以外の大部分は，住居の存在しない山地となっており，津波災害を想定した場合の防災対策の対象にはならないと考えられる．さらに先述した予想津波浸水領域を考慮に入れ，市街地部分を中心とし尾鷲湾沿岸部も含めた1500m×1500mのエリア内の地区とした．

表5．14には使用したGISデータの一覧[16]を，**図5．48～図5．54**には各データを示す．**表5．14**内に示す『利用対象』は，避難行動シミュレーションや後述する津波シミュレーション，情報伝達シミュレーションでの各データの使用区分を示している．

避難者の初期位置に関しては，対象空間内4424棟の各住宅中心点に一人ずつ避難者が存在するものと仮定した．なお，避難時の最高歩行速度を決定するための住民属性に関しては，今回は①成人男性②成人女性③高齢者（65歳以上）・子供（12歳以下）の3タイプの避難者が混在するものとし，平成12年度国勢調査の結果を基に各属性の混在割合を決定した（**表5．15**）．

津波来襲時の住民の避難場所としては，市に指定されている災害時緊急避難場所のうち，解析対象エリア内に存在する6ヶ所を対象とした．**表5．16**に各避難場所の名称および避難場所を示す．各避難場所は避難者数に対して十分な収容面積を有していることから，計算上では避難者を無制限で収容できるものとした．

防災行政無線と広報車ルートに関しては，尾鷲市により提供されたものを基に作成した．災害時には，エリア内に存在する11基の防災行政無線と，尾鷲市役所を出発地点とする2台の広報車により災害情報が伝達される．

表５．１４　主な使用データ一覧

データ	データ形式	利用対象
住宅中心点	・シェープファイル（ポイント） ・DBF ファイル（属性情報）	避難／情報伝達
避難場所	・シェープファイル（ポイント） ・DBF ファイル（属性情報）	避難
建物形状	・シェープファイル（ポリゴン） ・DBF ファイル（属性情報）	避難
道路ネットワーク	・シェープファイル（ライン） ・DBF ファイル（属性情報）	避難／情報伝達
標高	・シェープファイル（ポイント） →2m間隔の LP データを使用	避難／津波解析
防災行政無線	・シェープファイル（ポイント）	情報伝達
広報車ルート	・シェープファイル（ライン）	情報伝達



図５．４８　住宅中心点

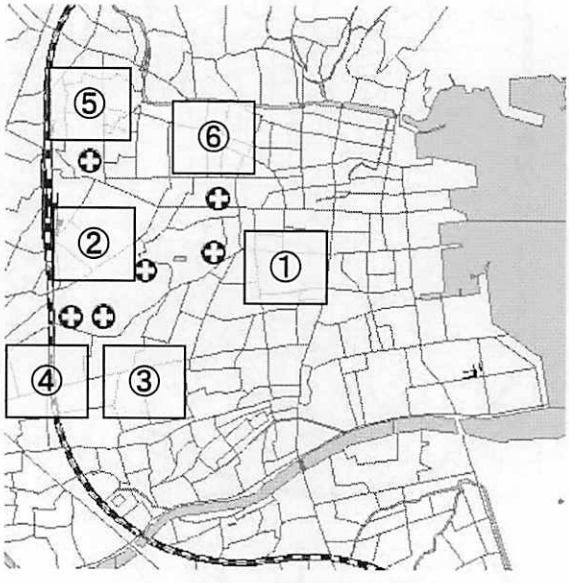


図５．４９　広域避難場所

表５．１５　避難者の属性データ

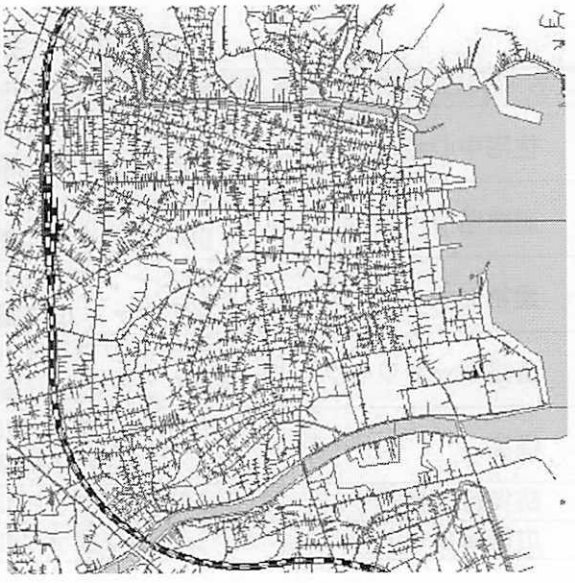
	割合	歩行速度
成人男性	30%	1.5（m/s）
成人女性	30%	1.3（m/s）
子供・高齢者	40%	1.0（m/s）

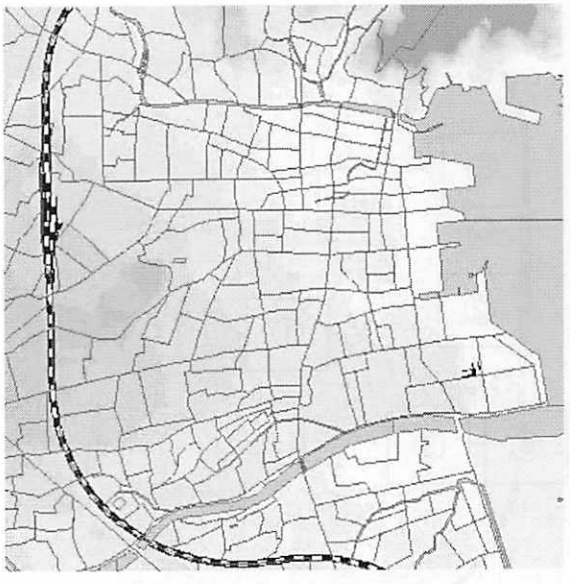
H12 年度国勢調査より

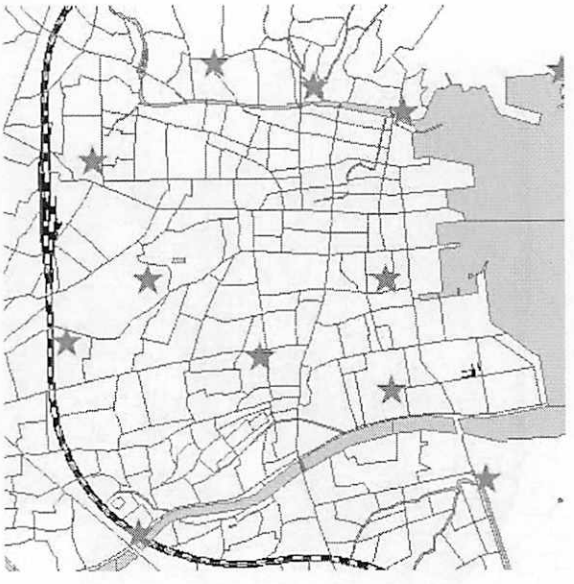
表５．１６　避難場所の属性データ

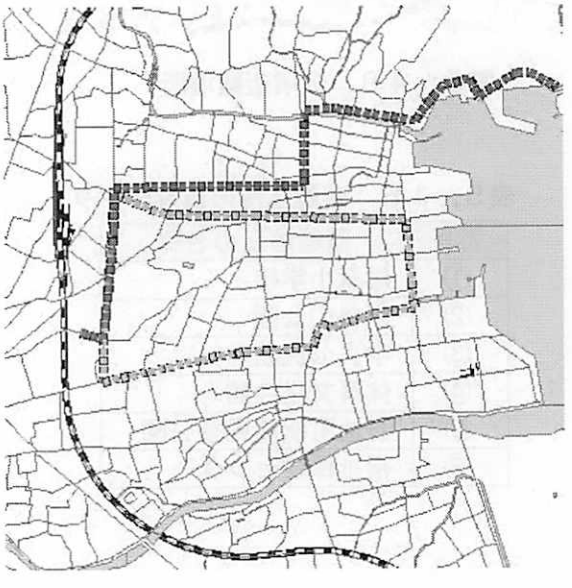
番号	避難場所の名称
①	尾鷲小学校
②	中村山公園
③	中央公民館
④	体育文化会館
⑤	野地町駅前児童公園
⑥	福祉保険センター











左上段：図５．５０　建物形状
右上段：図５．５１　道路ネットワーク
左中段：図５．５２　標高
右中段：図５．５３　防災無線
左下段：図５．５４　広報車ルート

b．津波データ

本研究では，津波モデルとして中央防災会議が想定している南海・東南海連動型地震を対象とした尾鷲市における津波氾濫シミュレーションの解析結果を導入した．以下に津波氾濫シミュレーションの手法とその結果について，参考資料[16]より抜粋し記載する．

津波計算をするにあたっては，津波の流体運動を記述するのに適した非線型長波方程式をリープフロッグ法で差分化したモデル[17]を使用している．計算領域は，太平洋沿岸部全体を計算する大領域から，尾鷲市の市街地氾濫を計算する詳細領域まで，6段階の差分格子を変化させるNesting Grid Systemを用いている．**表5．17**に計算条件を示す．領域AからCまでは沿岸部で完全反射（津波遡上なし）の仮定で計算をおこない，領域D，E，Fについては陸上遡上を考慮する．計算に用いる地形データは内閣府から提供を受けたものである．**図5．55**には地震による地盤変動量を示す．

図5．56に，地震発生10分後から5分ごとに出力した尾鷲市街地への津波氾濫計算のスナップショットを示す．図は領域F（5.56mメッシュ）の計算結果を示したものである．尾鷲湾には，およそ10分後から津波が来襲し，市街地への氾濫は約20分後から始まることが分かる．

図5．57は，尾鷲市街地における津波浸水深の分布である．津波は尾鷲湾奥北側の北川に沿って遡上し，市街地の約1.24km^{2}が浸水する．そのうち1m以上浸水する面積は0.68km^{2}に及ぶ．

津波の陸上への遡上は，水際から1km程度内陸に広がる．5m程度の浸水が予想される尾鷲港には，漁協や鉄工場，港湾合同庁舎等が立地しており，この地域で業務に従事する市民は，地震後10分以内に，津波に耐えられると考えられる3階以上の鉄筋コンクリートの建物（避難ビル）に緊急避難する必要がある．また，南側においては中部電力発電所および中川河口部にある石油タンクが津波浸水域に含まれることになる．浸水深はさほど深くはないものの，可燃物の取り扱い，貯蔵方法など，大規模延焼火災を防ぐための対策を検討する必要がある．

図5．58は，尾鷲市街地における津波氾濫流の最大流速分布である．尾鷲港北川及び中川河口部付近では5m/sを越える流れが発生する．市街地内においても2-4m/sの流れが発生する可能性が高い．尾鷲市では地震後10分で津波が来襲するために，ともすれば市民は津波氾濫流の中を歩いて避難する状況も考えられる．津波避難路の策定には，津波氾濫流による強い流れが発生する場所を避けるように留意する必要がある．

表５．１７　計算条件

領域	A	B	C	D	E	F
計算格子間隔	1350m	450m	150m	50m	16.7m	5.56m
基礎方程式	非線型長波理論	非線型長波理論	非線型長波理論	非線型長波理論	非線型長波理論	非線型長波理論
最低水深	50m	10m	10m	5m	なし	なし
潮位条件	平均潮位（T.P. +0.0m）					
対象津波	中央防災会議想定　東南海・南海地震津波（連動型）					
計算時間	津波発生後３時間					

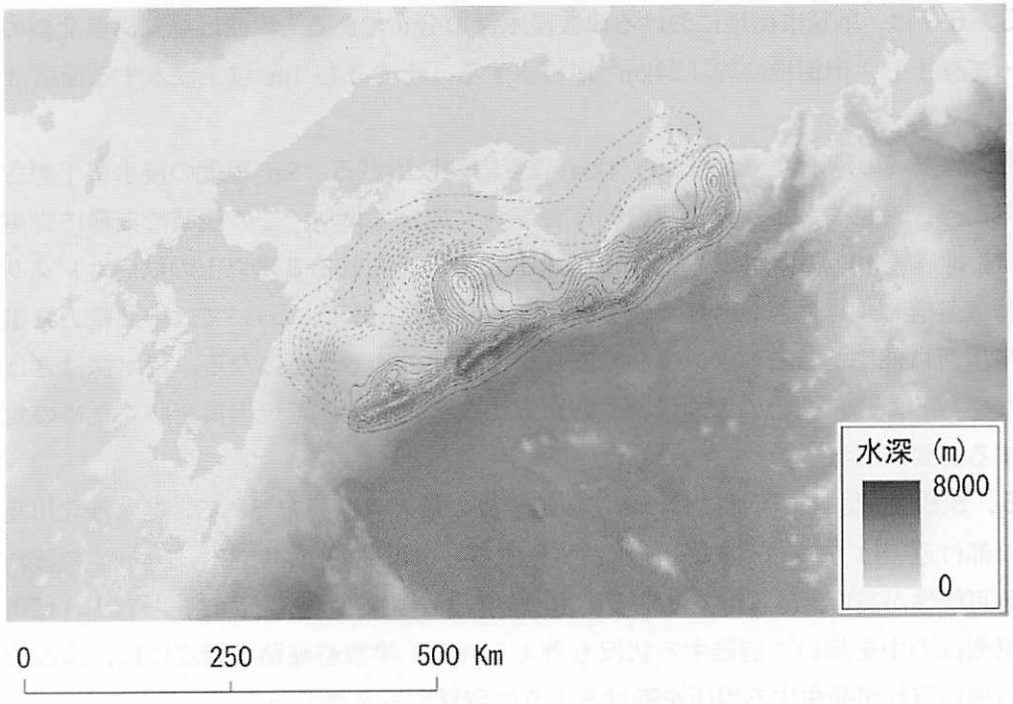


図５．５５　東南海・南海地震による地盤変動量

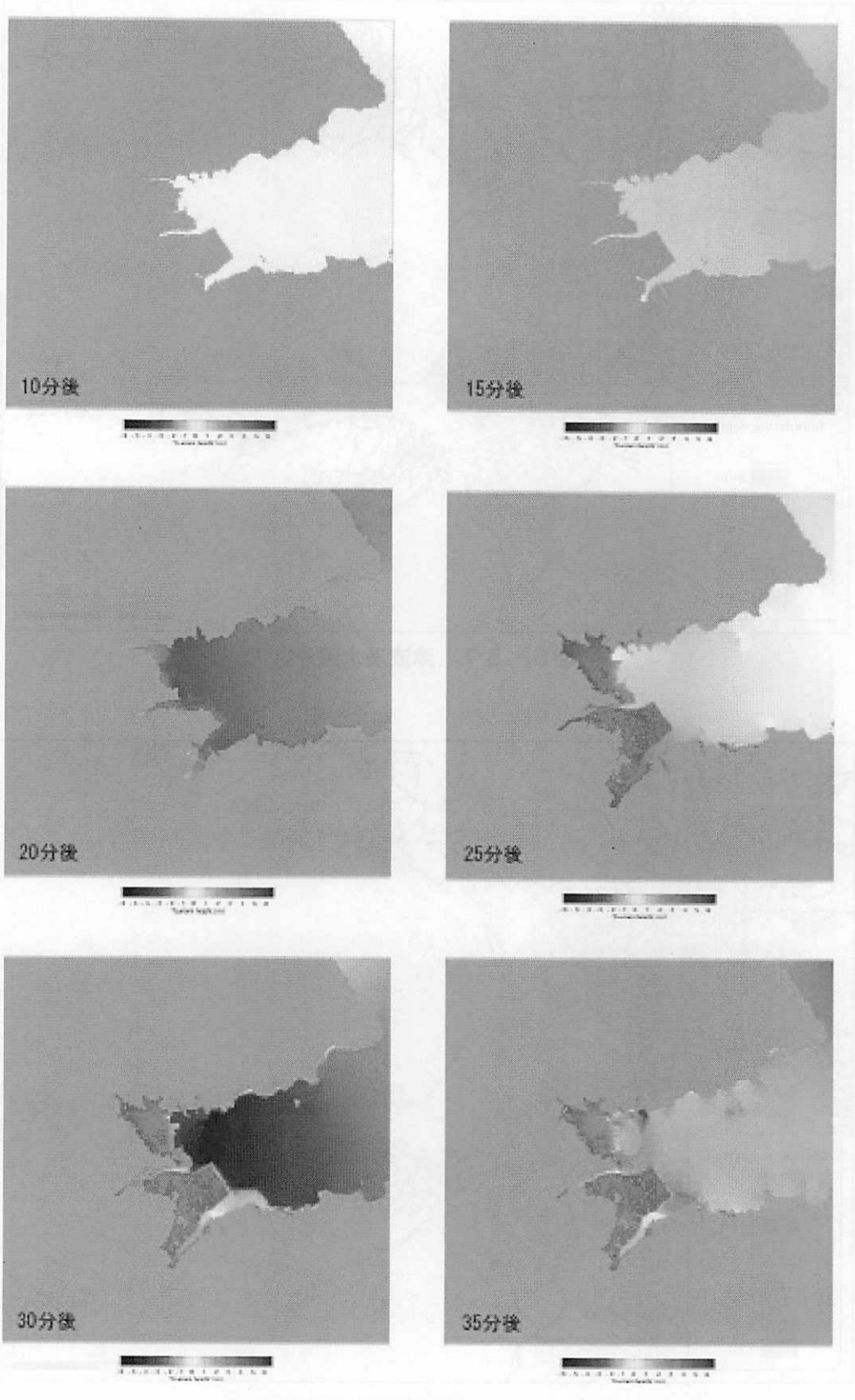


図５．５６　津波が浸水していく様子

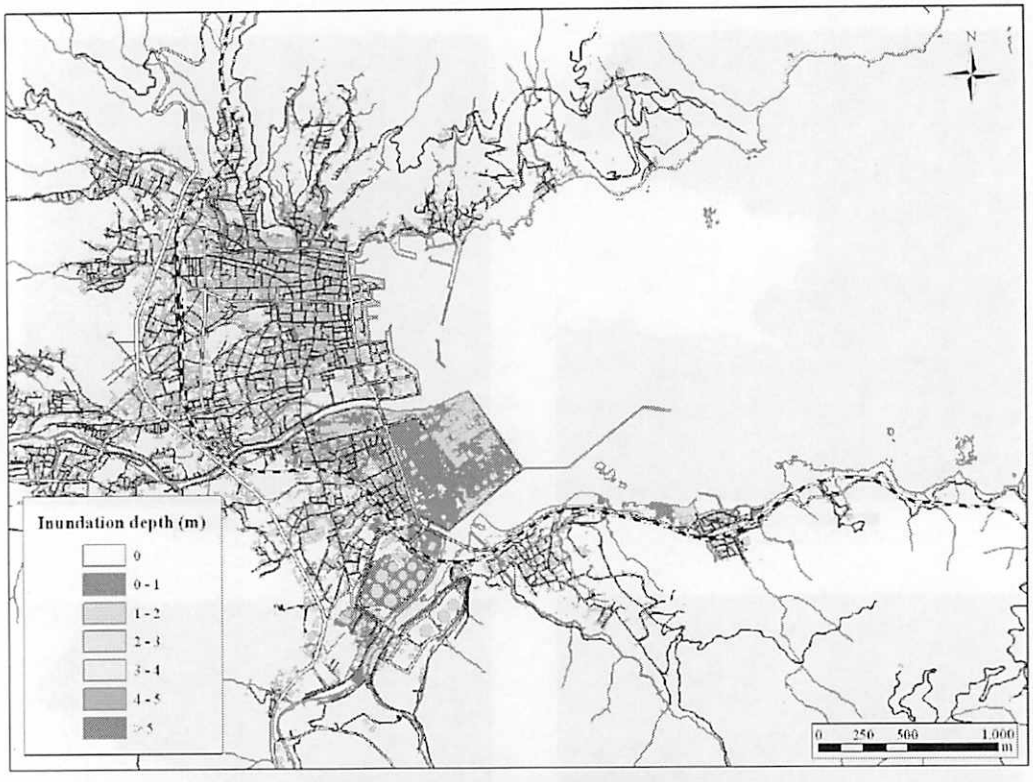


図５．５７　津波浸水深分布

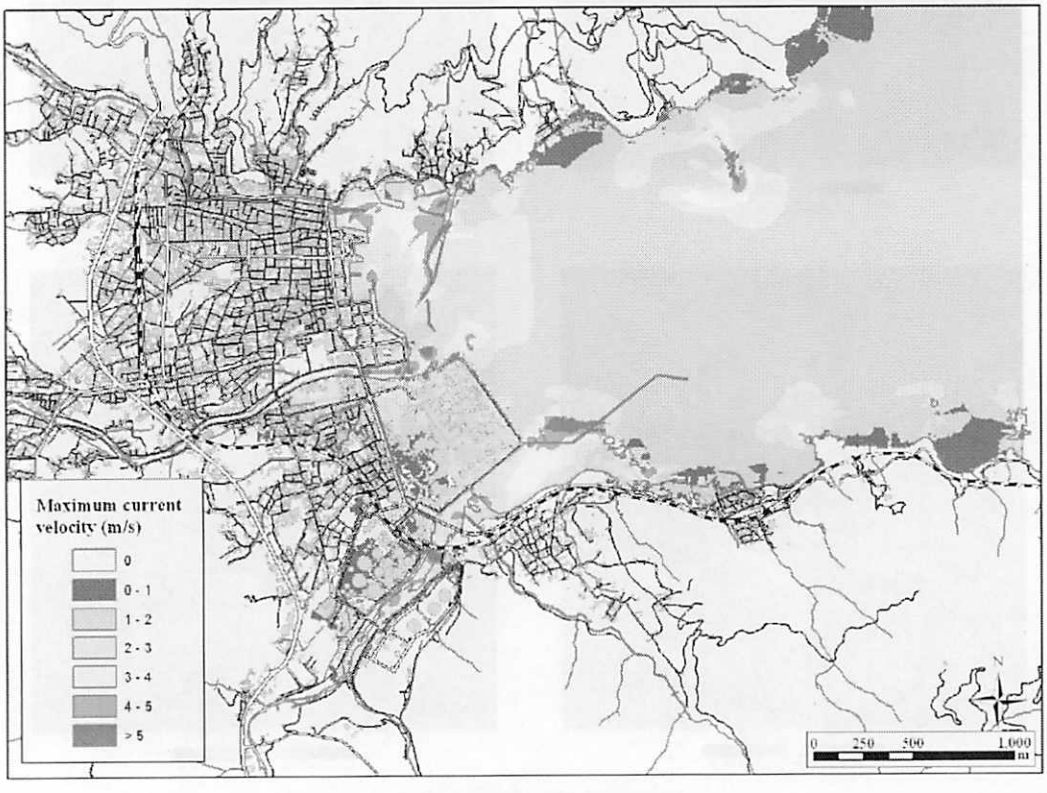


図５．５８　津波流速分布

c．津波解析データの補間／補正

本研究においては，可能な限り詳細な津波氾濫解析データを避難行動シミュレーションに反映させるために，津波氾濫解析データ（波高分布・流速分布）の空間的・時間的な補間／補正を行い，より高分解能なデータの生成を行った．（**表５．１８**）．

まず，空間的・時間的な補間手法について説明する．ここで言う空間的補間とは5.56mメッシュ間隔で出力されている波高データを周囲メッシュの情報に基づきながら，1mメッシュ間隔のデータ値まで補間することであり，時間的補間とは，1.2秒間隔で出力された波高データを前後の情報により推測し，線形に補間することを意味する．

次に，避難行動シミュレーションをするにあたって避難者の歩行条件に影響を及ぼす浸水深データの算出を行った．浸水深とは，その場所を基準とした場合の津波の高さを示す指標である．本研究においては，津波氾濫解析により算出されたある地点での波高値（平均潮位からの波高値）から，その場所における標高値を差し引くことにより浸水深データの算出を行った．その際には地震による地殻変動（沈降）による影響も考慮し，補正を行っている．

流速分布についても東西方向，南北方向にベクトル分解したそれぞれの流速データを対象として，同様の空間的・時間的補間処理を行うことにより，避難空間に適合する高分解能なデータの生成を行った．

これまで目黒らによって使用されていた津波に関するデータは 50mのデータを補完したものであったが，本研究においては 5.56mのデータを補間し，使用した．これにより，河川を遡上する津波や津波が引いていく様子などを細部まで表現することができるようになった．また，このデータをしようした避難行動シミュレーションにおいては，河川に挟まれた土地の避難者を確認することができ，より詳細な検討ができるようになった．また，第一波の引いていく速度が 50mメッシュのときのほうが速くなってしまっていることがわかった．**図５．５９**にこれまで使用していたデータと本研究で使用したデータの比較を示す．

表５．１８　津波データの補間／補正

	基データ	処　理	補間／補正後
メッシュ精度	5.56m	空間的な補間	1m
データ間隔	1.2秒	時間的な補間	1秒
データ内容 （波高分布）	平均潮位を基準とした水面高（m）	標高値・地殻変動量による補正	その場所における浸水深（m）
データ内容 （流速分布）	流速ベクトル(m/s)	空間・時間補間	流速ベクトル (m/s)

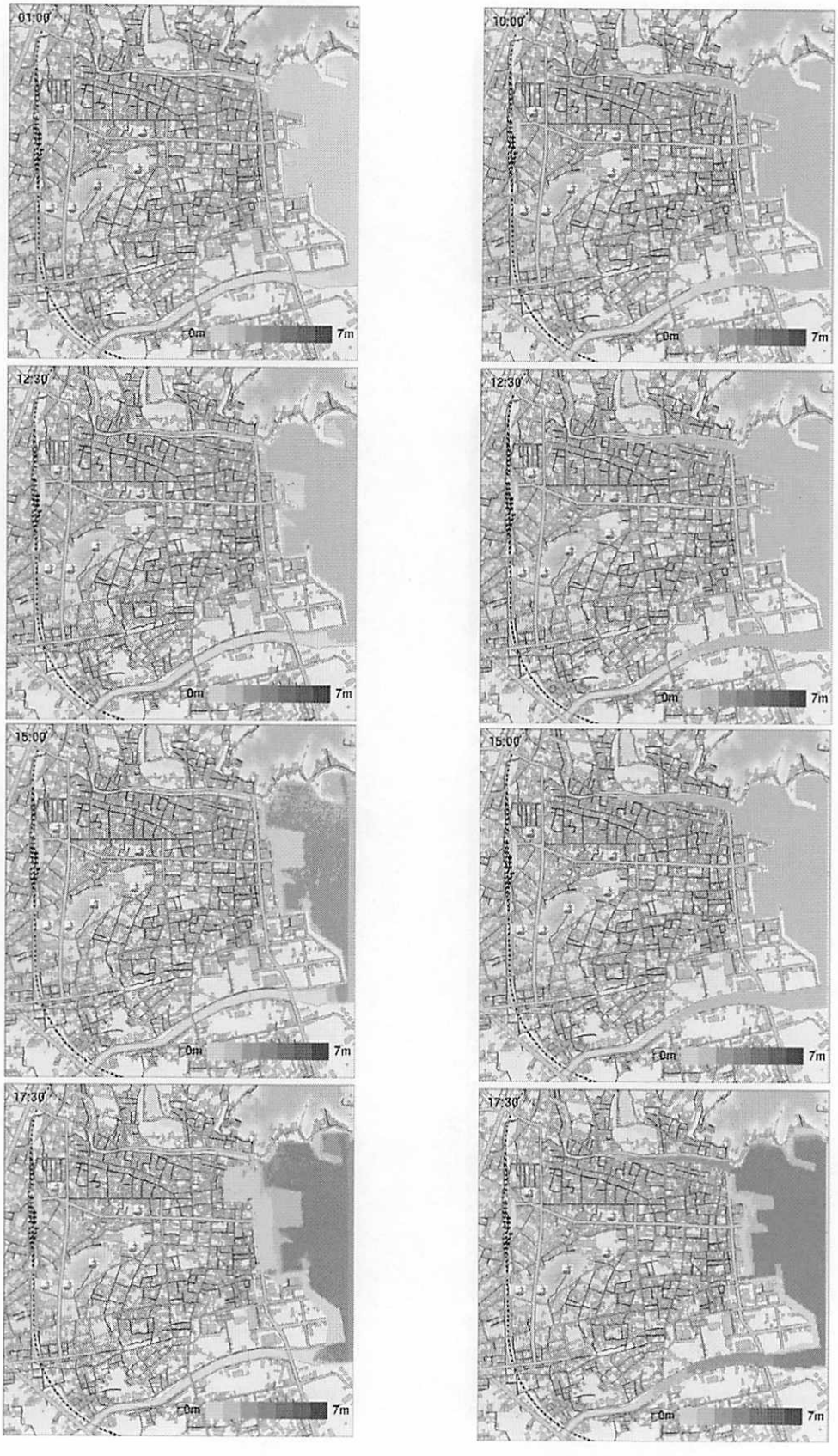


図５．５９①　津波データの比較（左：50m→1m，右：5.56m→1m）

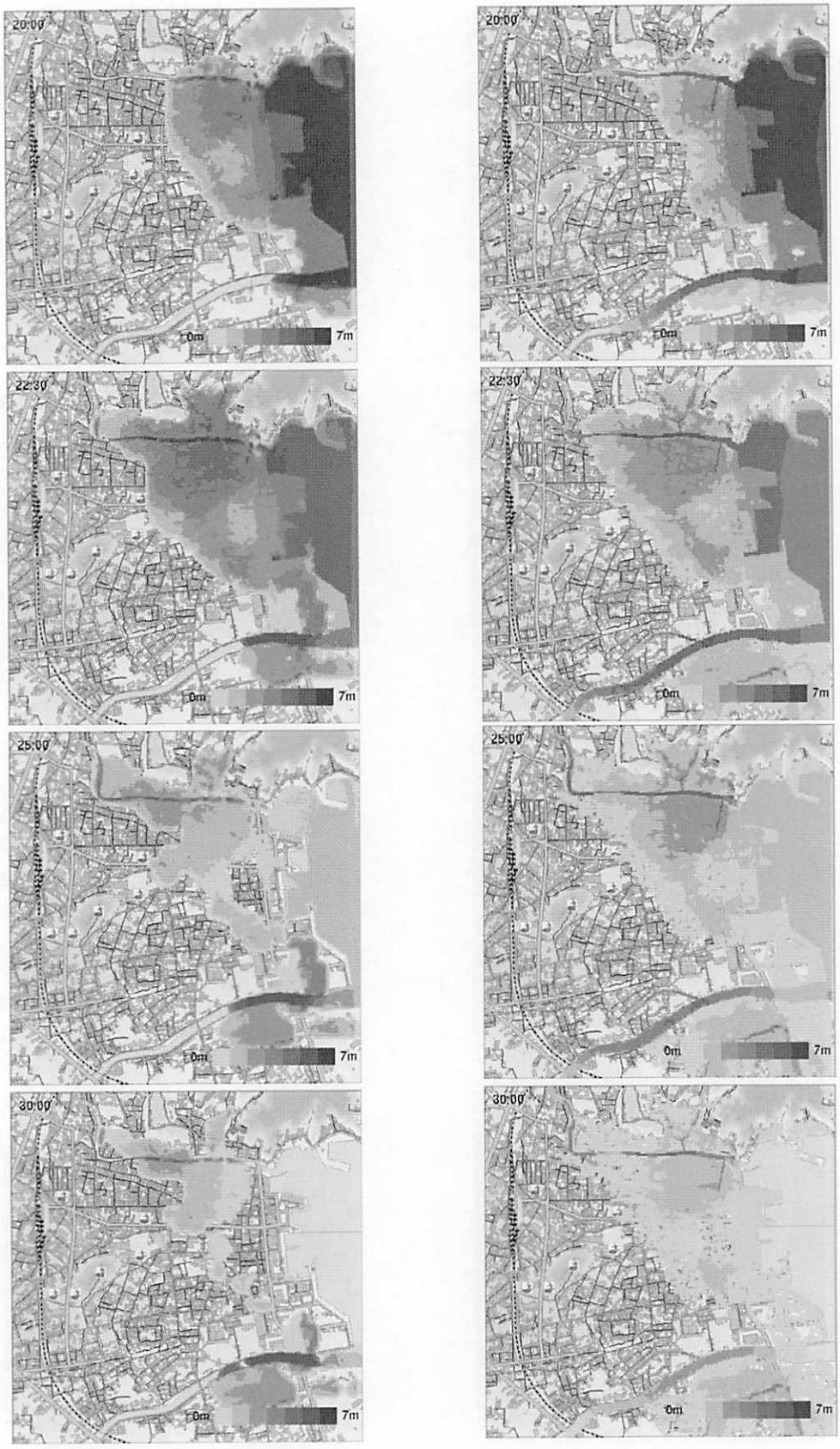


図５．５５②　津波データの比較（左：50m→1m，右：5.56m→1m）

3）防潮堤の効果の検証

現在我が国においては，津波を伴う大規模地震の発生が危ぶまれている．しかしながら，日本の津波に対する対応状況を見てみると，まだまだ十分とは程遠いものとなっている．

平成 16 年に実施された海岸堤防・護岸の高さついての調査結果を**図５．６０～図５．６２**に示す．まず，海岸堤防・護岸の高さについては，全国で約 18%の海岸堤防・護岸が想定津波高より低く，約 30%の海岸堤防・護岸が想定津波高より高いか低いかの調査が未実施である．さらに都道府県別に見てみると，東海地震による津波の被害が想定されている静岡県，愛知県，神奈川県などでは比較的想定津波よりも低い堤防・護岸は少なくなっているが，東南海・南海地震で津波被害が予想される三重県，和歌山県，徳島県や高知県で堤防・護岸の高さが想定津波より低くなっている．一方で，新潟県，鳥取県，佐賀県，長崎県，熊本県ではまったく調査が行われておらず，現状の把握すらできてないといった状況であり，早急な調査が必要である．

また，**図５．６３～図５．６６**には海岸堤防の耐震性に関する調査結果を示す．この調査結果によると全国で約 7%の海岸堤防が耐震化の必要があり，約 60%の海岸堤防は耐震調査が未実施である．海岸堤防が，東海，東南海・南海地震等の大地震発生に伴う津波に対して機能を発揮するためには，耐震化の必要がある．さらに都道府県別のグラフを見てみると，海岸堤防・護岸の高さに関する調査に比べ，調査全体に遅れが目立つ．市町村別の調査結果によると，北海道ではほぼ調査が完了しており，耐震化の状況も他の都道府県に比べて進んでいると言える．一方で，東日本から北日本の太平洋側で耐震化が必要な箇所が多く示されている．また，日本海側や四国，九州の太平洋側の調査はほとんど実施されていない．特に四国，九州は東南海・南海地震によって津波の来襲が想定されているので，早急な調査・対応が必要である．

さらに，本報告には掲載していないが，水門・陸閘など堤防に設けられた開口部に関する調査も行われている．それによると，全体の 27%が津波到達までに閉鎖が完了し，17.7%は閉鎖が完了できないものとなっている．たとえ堤防などが想定される津波に対して機能を発揮すると予想されていたとしても，開口部を適切に閉鎖できなければ被害が広がる恐れがある．堤防の高さや強さと同時に，開口部に関する調査・対応を進めていくことが重要である．

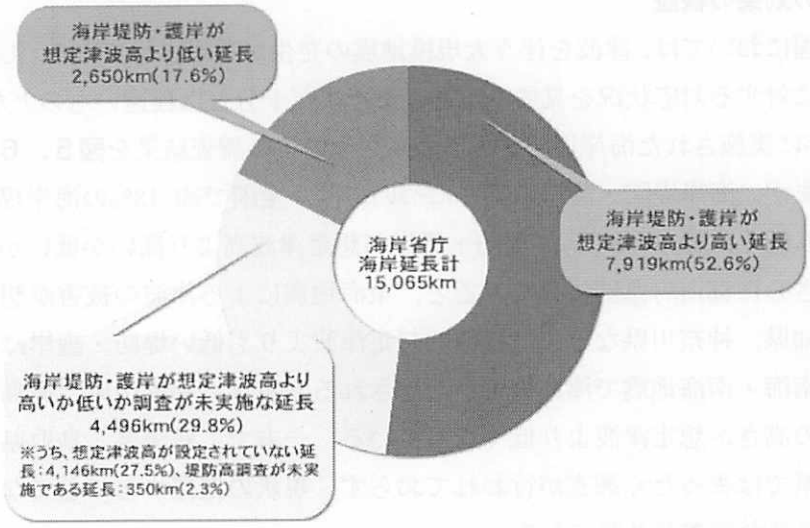


図５．６０　堤防高さ状況（全国）



■：「海岸堤防・護岸が想定津波高より低い延長」の割合

：「想定津波高が設定されていない，あるいは海岸堤防・護岸が想定津波高より高いか低いか調査が未実施な延長 」の割合

図５．６１　堤防高さ状況（都道府県別）

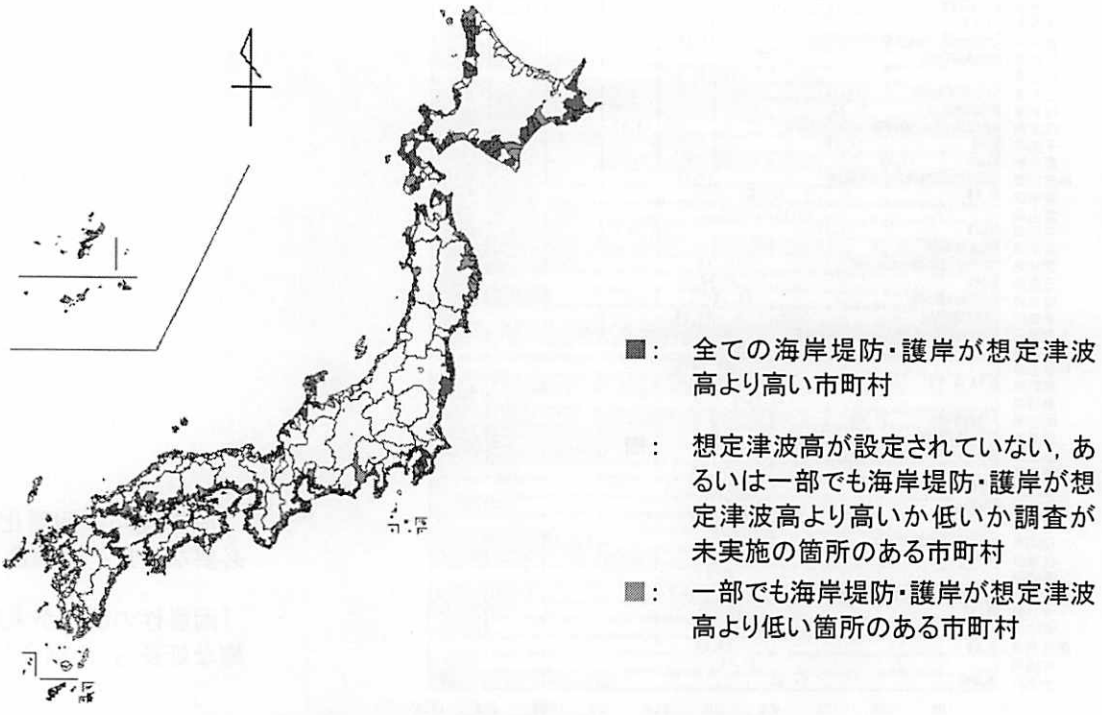


図５．６２　堤防高さ状況（市町村別）

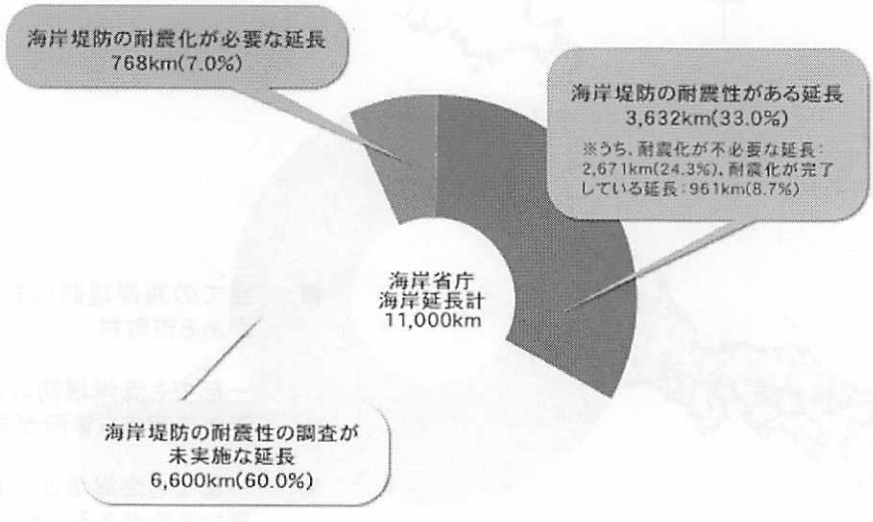
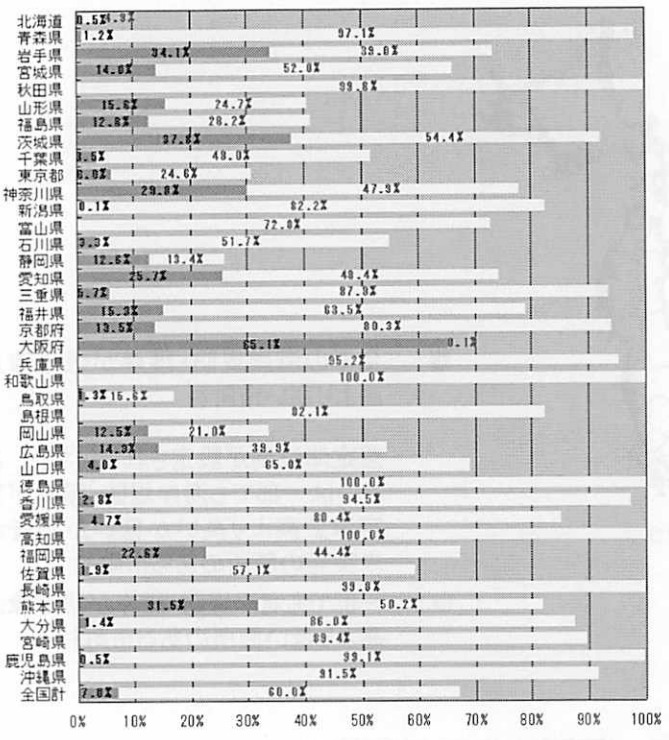


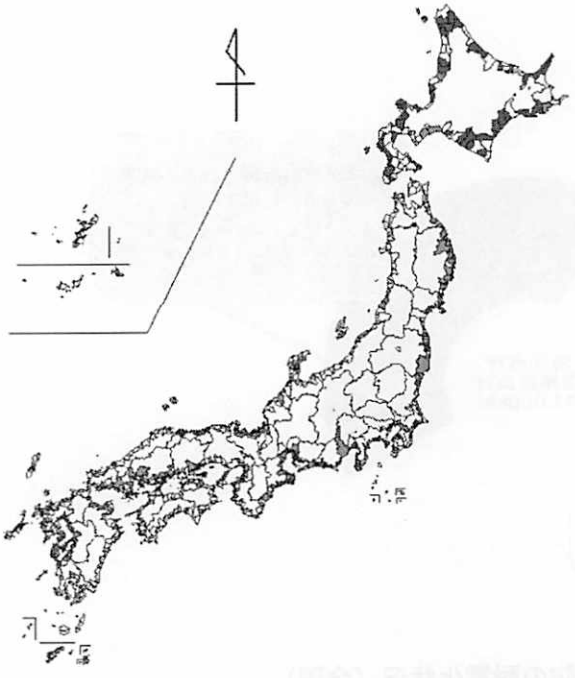
図５．６３　堤防の耐震化状況（全国）



■：「海岸堤防の耐震化が必要な延長」の割合

：「耐震性の調査が未実施な延長 」の割合

図５．６４　堤防の耐震化状況（都道府県別）



■：全ての海岸堤防において耐震性がある市町村

：一部でも海岸堤防の耐震性の調査が未実施な箇所がある市町村

■：一部でも海岸堤防の耐震化が必要な箇所がある市町村

図５．６５　堤防の耐震化状況（市町村別）

尾鷲市の沿岸部には高さ約2.0mの防潮堤が県道に沿って南北に約570m設置されている．実際の防潮堤の写真を**図5．66**に示す．この防潮堤は1959年の伊勢湾台風の際の被害を基準にして建設されたものであるが，適切に使用することで津波発生時にも効果を発揮することが予想される．そこで本研究では，この防潮堤が機能する場合としない場合での人的被害発生の比較を行なった．

まず初めにGIS上において防潮堤と交差点に設置されている陸閘に関するレイヤを作成し（**図5．67**）座標を作成取り出し，影響範囲（**図5．68**）を求めた．次に，越村による津波氾濫シミュレーション[17]では防潮堤を考慮しない場合の浸水深を算出している．この結果を用いて，防潮堤を越流した際には防潮堤の後ろ側にある影響範囲の浸水深から2.0m分差し引き（**図5．69**），単純化して防潮堤が機能する場合の浸水深を求めた．

図5．70は中央防災会議「東南海，南海地震等に関する専門調査会」（平成15年9月17日）において発表されたシミュレーションをもとに，三重県が独自に作成した防潮堤が機能した場合の最大津波浸水予測図である[18]．**図5．71**は本研究で算出した，防潮堤が機能する場合の各地点における最大浸水深を示したものである．これらを比較すると本研究においては非常に簡単なモデルを使用したが，整合性は確保できたと考えることができる．

防潮堤が機能しない場合のシミュレーション結果を**図5．72**に，機能すると仮定した場合の結果を**図5．73**に示す．また，それぞれの死者数の比較を**図5．74**に，残留避難者数と死者数の時刻暦を**図5．75**に示す．これらによると防潮堤が機能した場合，死者数を513人から78人にまで減らすことが可能という結果が得られた．さらに詳しく見ていくと，防潮堤が機能しない場合では最大波が到達する地震発生から20分付近で死者数が一気増加し，500人を超えているのに対し，防潮堤が機能する場合においては，津波の進入を防ぐことで，死者の増加を食い止めていることがわかる．以上より，防潮堤が機能することで，約85%もの死者数を低減すること，またその重要性が示された．ただし，本研究においては，防潮堤の破壊や水門・陸閘に障害がなく，完全に閉鎖に成功した場合を想定している．今後，水門・陸閘が閉鎖できなかった場合などを考慮に入れてシミュレーションを行う必要がある．

なおこのシミュレーションは，行政などからの情報伝達に遅れはなく，情報取得率30%，避難準備時間15分という条件のもとで行った．



図５．６６　尾鷲市沿岸部に設置された防潮堤

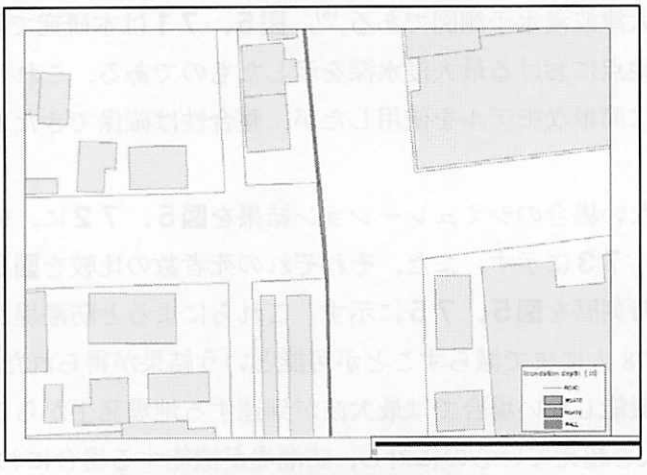


図５．６７　防潮堤の GIS データ

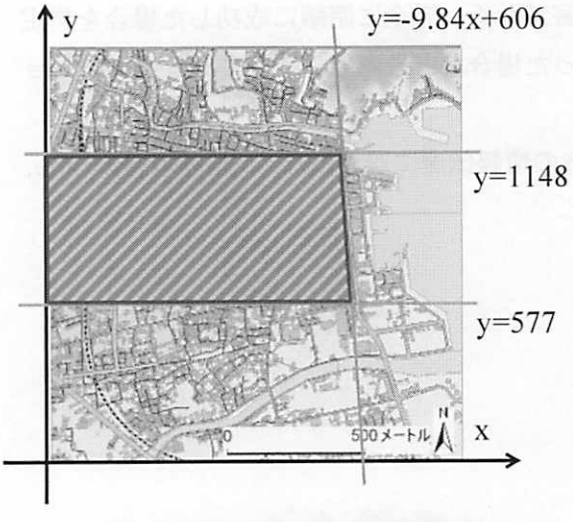


図５．６８　防潮堤の影響範囲

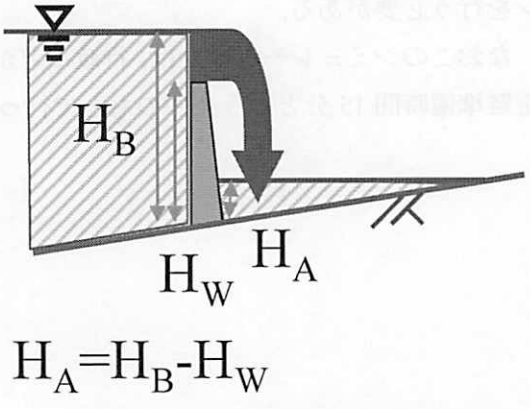


図５．６９　越流のモデル化

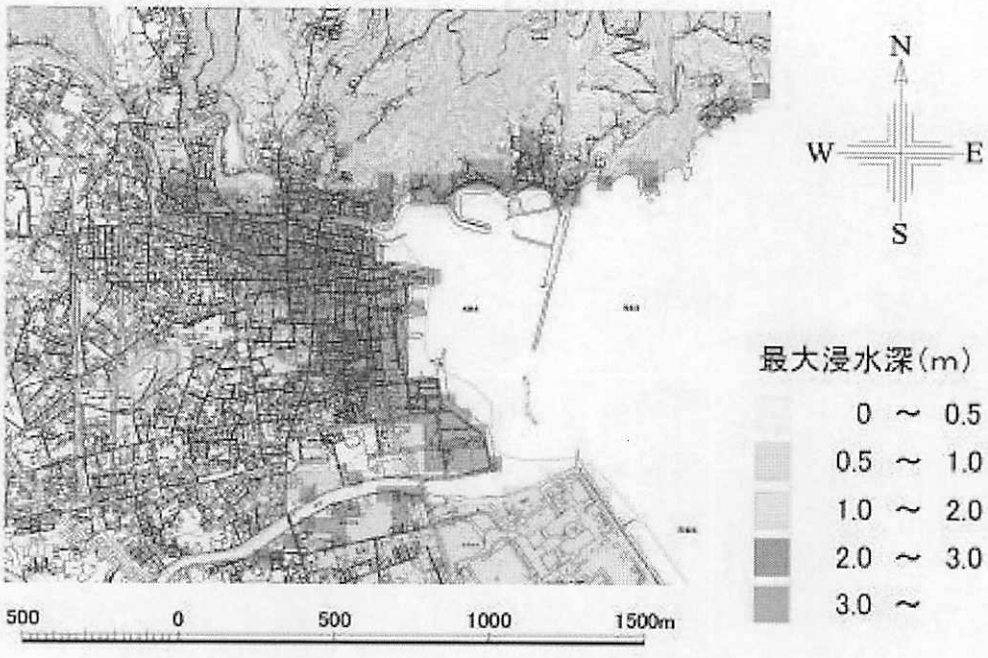


図５．７０　三重県による浸水予測図

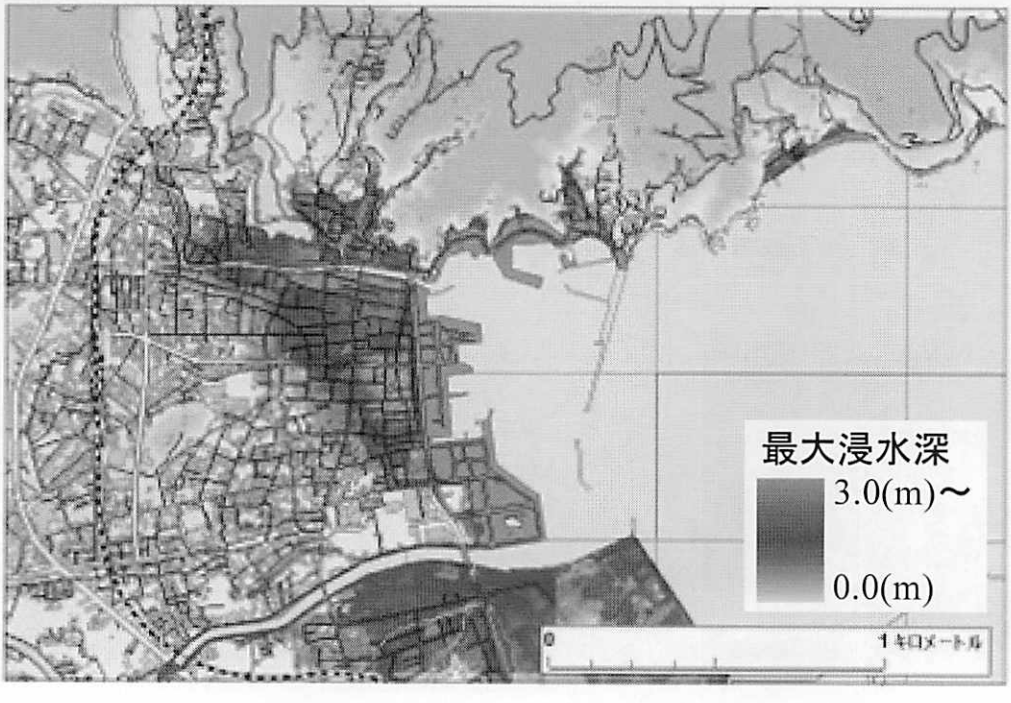


図５．７１　本研究による浸水予想図

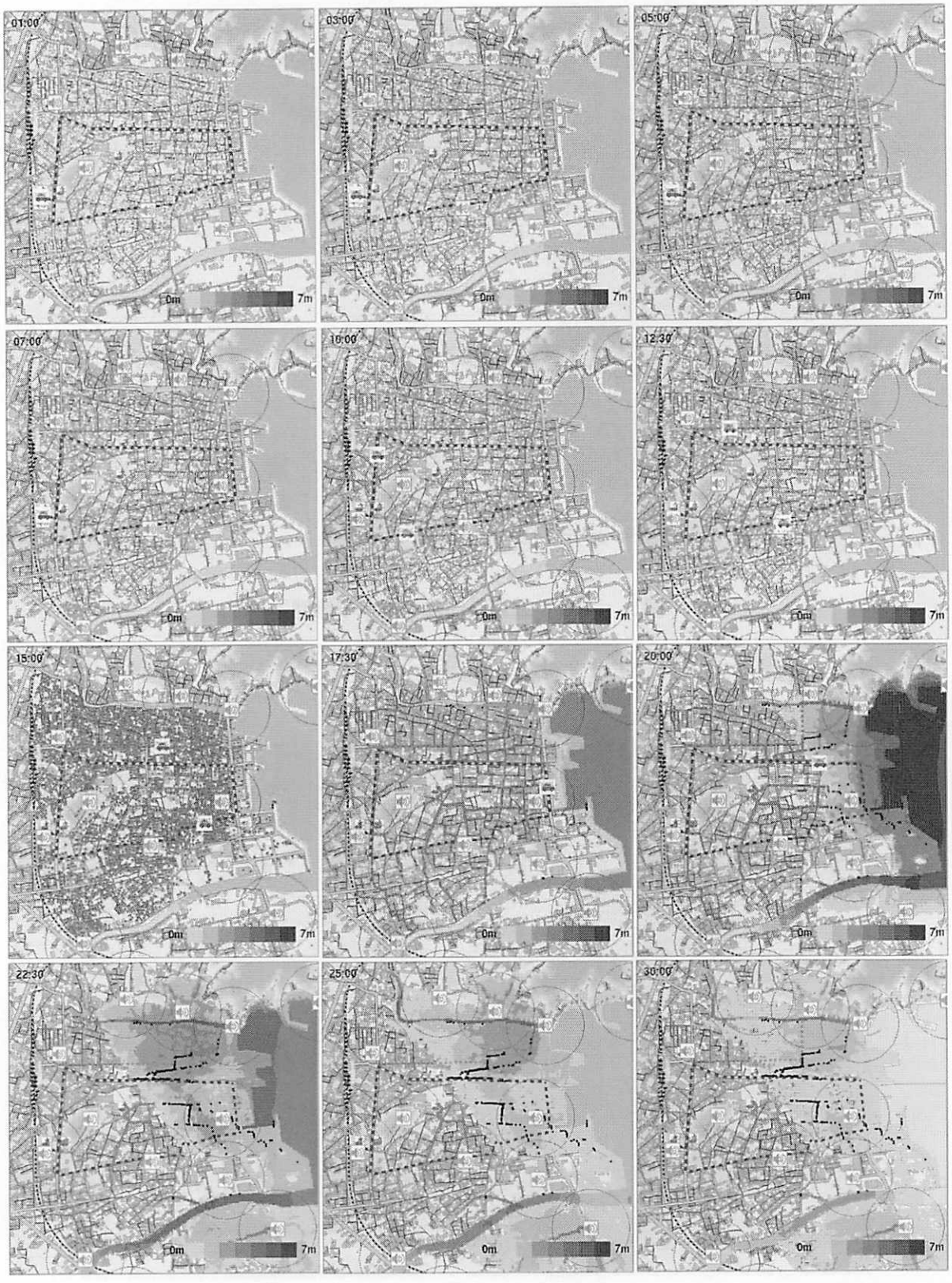


図５．７２　防潮堤が機能しない場合

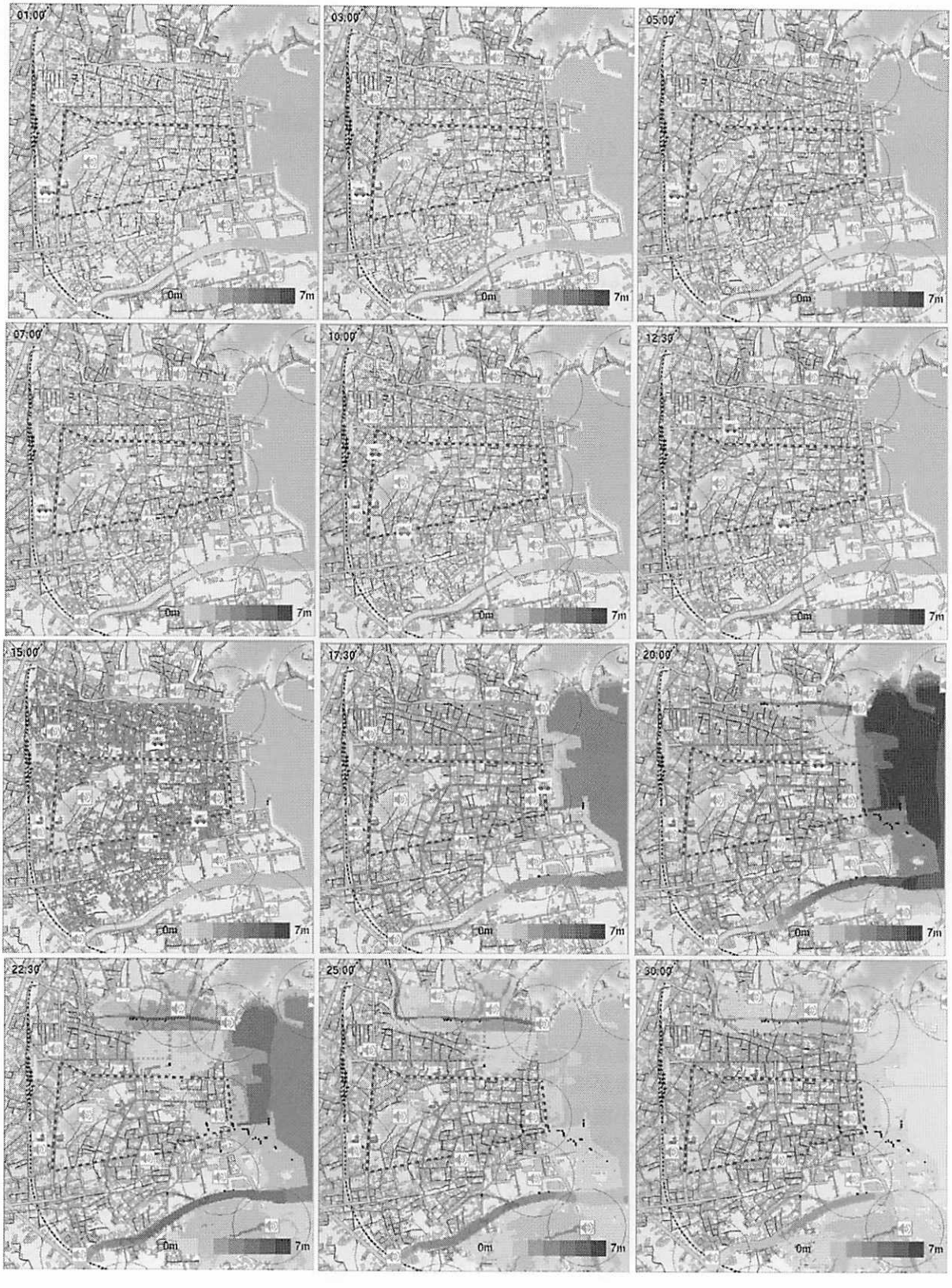


図５．７３　防潮堤が機能する場合

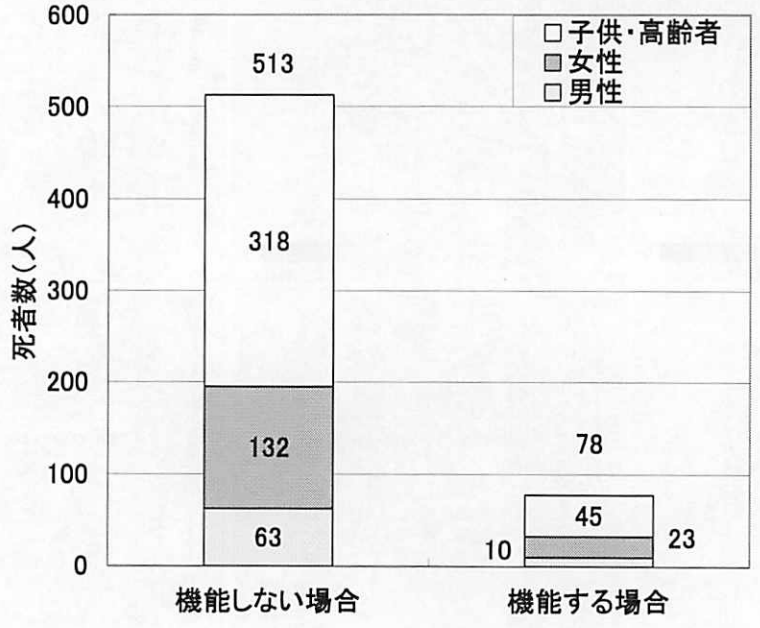


図５．７４　死者数の比較

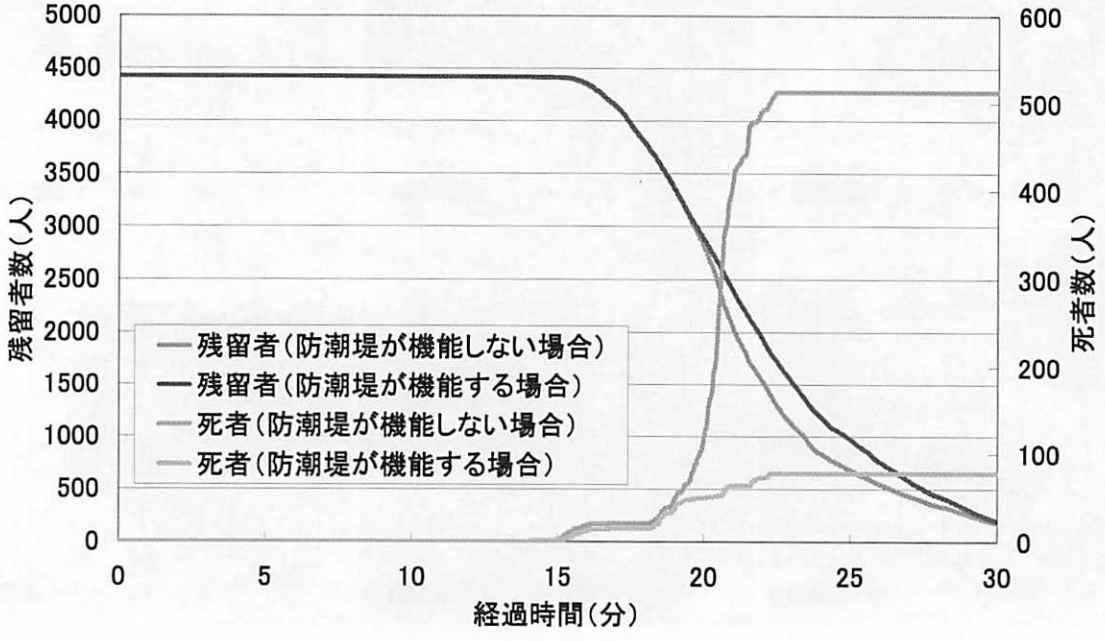


図５．７５　残留避難者数と死者数の時刻暦

4）避難経路の検討

一般に避難を考える際には最短の経路を用いて避難することを考えがちである．しかしながら，津波などのように時々刻々と変化する災害時では，避難経路の選択によっては，より深刻な被害を出す可能性がある．　しかし，現状の日本においては詳細な避難訓練が行われていないばかりか，浸水予想区域を示したハザードマップさえ作成もしくは公表していない都道府県がほとんどである（**図5．76，図5．77**）．

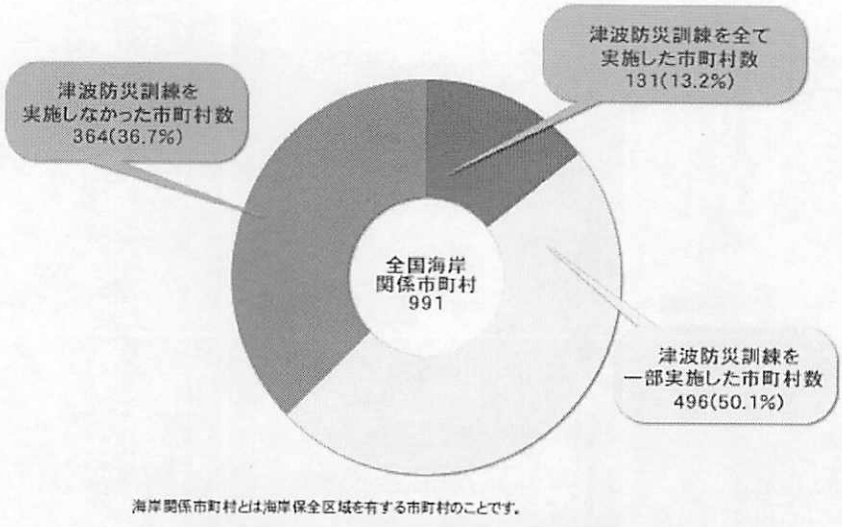
本研究では，これまで得られたシミュレーション結果を用いて，どの地域において，何を原因として人的被害につながっているかを分析し，より効果的な避難経路の検討を試みた．これまで行ったシミュレーション結果においては，海岸線に平行な方向への移動を早い段階で行うことで，津波に巻き込まれているということが見て取れた．

実際の避難の際には，たとえまわり道になり，時間がかかったとしても逃げ切ることが重要である．そこで，最短距離で避難場所に向かわせるのではなく，津波から離れることを最優先させることで，被害の軽減を試みた．避難者の避難経路を変更させるために，以下に示す３つの方法を用いて検討を行った．まず，①津波によって与えられるポテンシャル値を大幅に増加させる．②任意に決めたポイントを経由して避難場所へ向かわせるために，そのポイントのポテンシャル値を減少させる．③海岸線に平行な方向への移動を制限し，強制的に津波から逃げる方向への移動を優先させる．

①，②についてはほとんど効果が見られなかった．その原因として，①では津波来襲の速度が避難者の歩行速度に比べて大きく，避難方向の決定に影響を及ぼしていないことが考えられる．これは現実の場合にも十分考えられることであり，津波が目で確認できるほどの距離まで近づいてしまったら，逃げることが難しいことを表現している．被害に遭わないためには，やはり早めの避難が必要になってくる．次に②に関しては，避難者の行動に若干の変化は見られたが，人的被害数を大幅に減らすほどの変化ではなかった．また，ポテンシャルを下げた地点がくぼ地のようになってしまい，避難者がその場にとどまってしまうという現象が見られ，現実を表しているとは言い難い．最終的に③の方法で避難者を意図したとおりに動かすことができた．

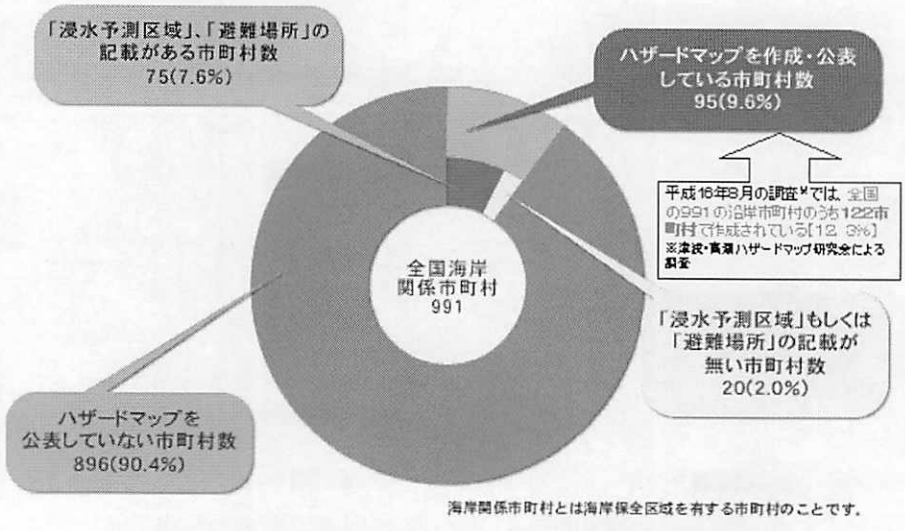
その結果，人的被害数を 513 人から 287 人に約 44%減らすことができた．核時間における避難者の位置と津波の様子を**図5．78**に，死者数の比較，残留避難者数と死者数の時刻暦をそれぞれ**図5．79，図5．80**に示す．今回，本研究で用いた方法は半ば強制的に意図した方向へ導いたことになるが，これはシミュレーション結果さえあれば現実の場合においても有効な検討方法である．このように事前にシミュレーション結果を用いて地域ごとに詳細な避難経路を検討しておくことで，被害を軽減できると考えられる．また，これをシミュレーションによって行う場合には，本研究において算出した，各交差点における津波から受ける力を参考に，「○分後にはあの交差点は使えなくなる」といった条件を

時間ごとに決定していき，モデルに組み込むことで状況に合わせた最適な避難経路の検討をシミュレーションで示すことができるようになると考えられる．



海岸関係市町村とは海岸保全区域を有する市町村のことです。

図５．７６　津波防災訓練実施状況



海岸関係市町村とは海岸保全区域を有する市町村のことです。

図５．７７　津波ハザードマップ作成・公表状況

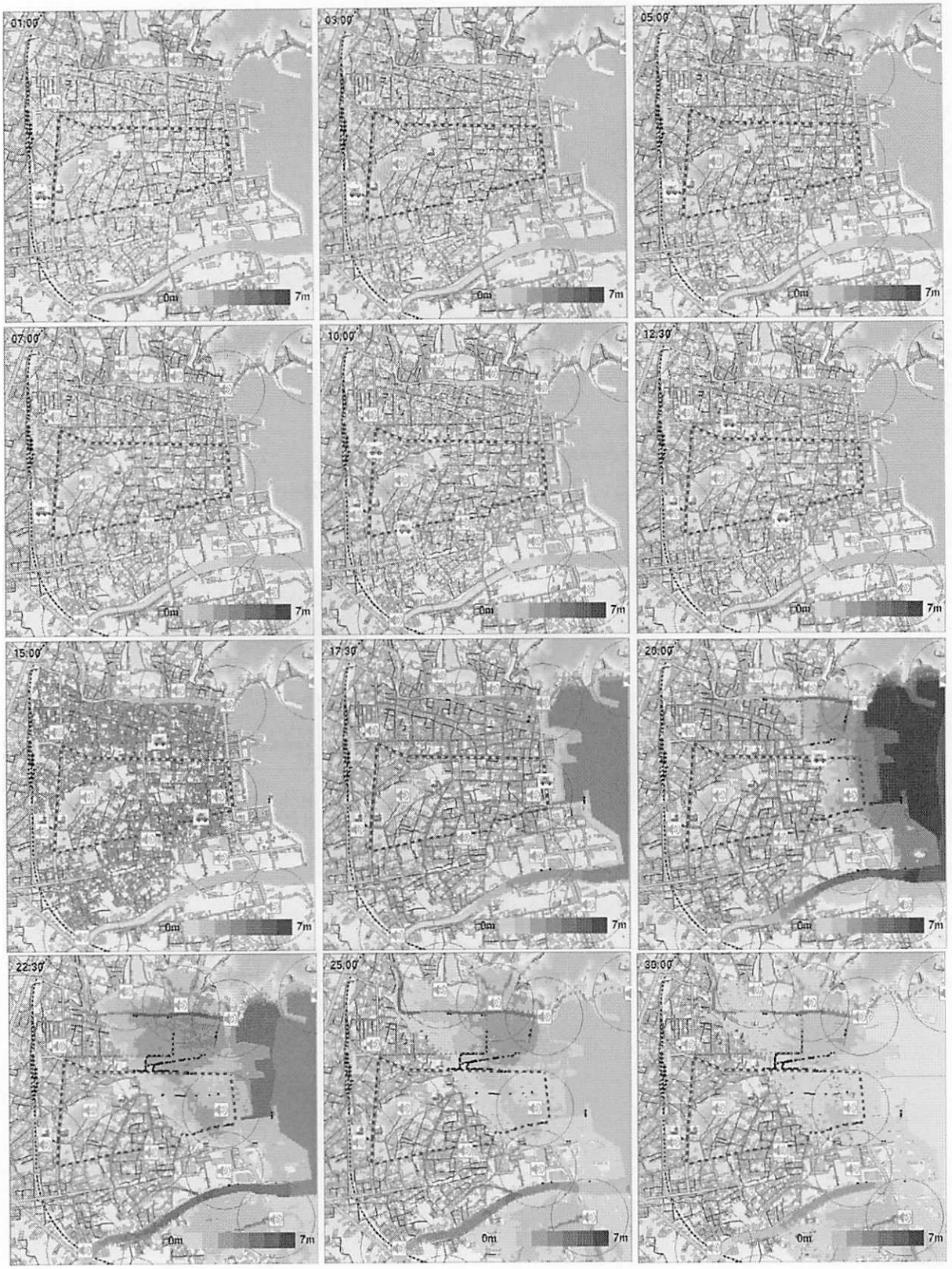


図５．７８　避難経路の設計を行った場合

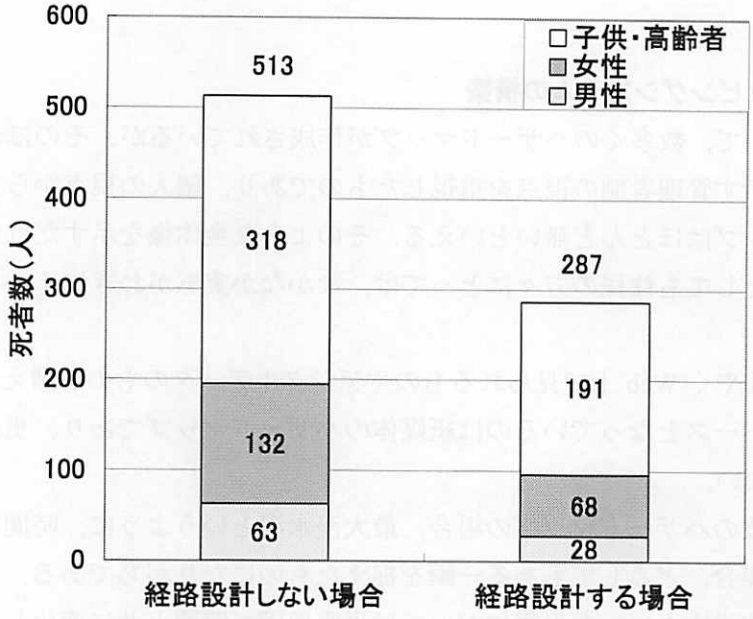


図５．７９　死者数の比較

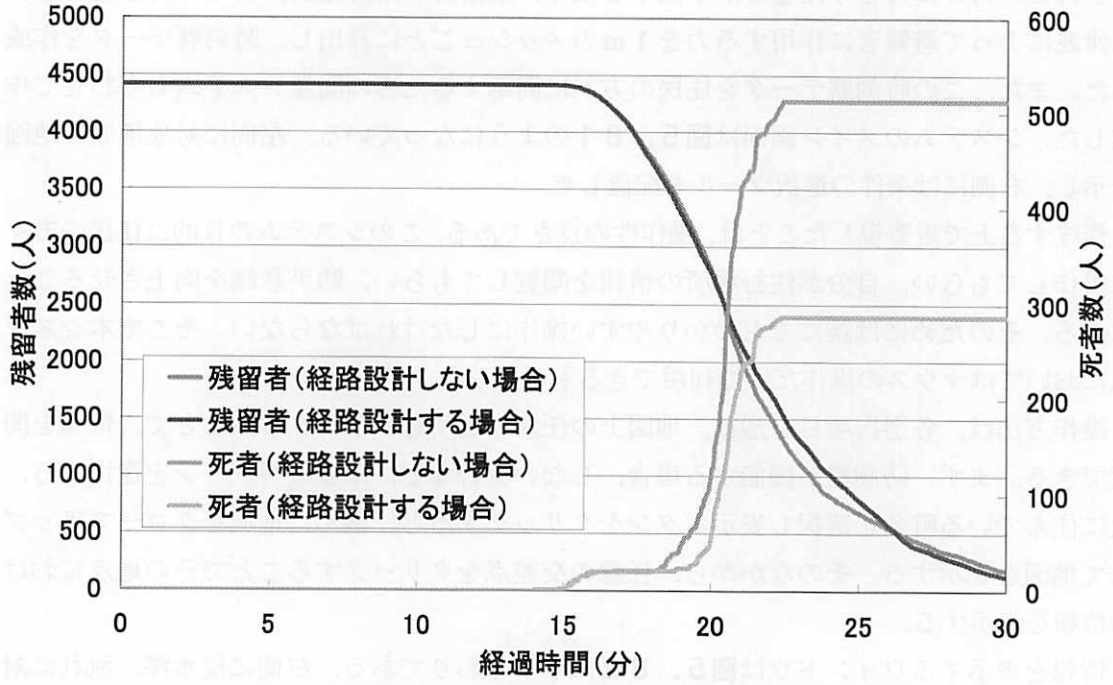


図５．８０　残留避難者数と死者数の時刻暦

５．５　最適な避難行動のためのマッピングシステムの構築

１）避難困難度マッピングシステムの構築

現在，社会において，数多くのハザードマップが作成されているが，そのほとんどが対象地域の全体像を示す管理者側の視点を重視したものであり，個人の視点から見ることのできるハザードマップはほとんど無いといえる．そのような全体像を示すだけのハザードマップを使用したとしても住民の方々にとっては，なかなか実感がわきにくいものとなってしまう．

最近になってようやく Web 上で見られるものやデジタルデータのものが増えてきてはいるが，もともとのベースとなっているのは紙媒体のハザードマップであり，更新性もそこまでいいとは言えない．

また，例えば津波のハザードマップの場合，最大浸水深というように，時間で変化するものを対象とした場合，どうしてもある一瞬を捉えたものになりがちである．しかしながら，とりわけ津波や洪水といった災害においては災害要因が時間と共に変化し，「さっきまでは安全だったけれども，今は危険」などといった状況が十分起こりうる．よって最大や最高などといった側面だけでは安全性を評価しきれないという問題がある．

そこで本研究では，シミュレーションにおいて，津波からの避難の際に津波による流れがどれだけ人体に力を与えるのか予測するため，東南海・南海地震によって引き起こされる津波によって避難者に作用する力を１ｍのメッシュごとに算出し，時刻暦データを作成した．また，この時刻暦データを住民の方々に開示するための閲覧システムもあわせて作成した．システムのメイン画面は**図５．８１**のようになっている．左側に対象地域の地図を示し，右側には条件の選択ツールを配置した．

作成する上で重要視したことは，操作性の良さである．このシステムの目的は住民の方々に操作してもらい，自分が住む場所の情報を閲覧してもらい，防災意識を向上させることにある．そのためには誰にでもわかりやすい操作にしなければならない．そこで本システムにおいてはマウスの操作だけで利用できるものとした．

操作方法は，各選択項目を選び，地図上の任意の場所をクリックすることで，情報を閲覧できる．まず，防潮堤が機能する場合，しない場合など，津波のパターンを選択する．次に住んでいる町名を選択し表示ボタンをクリックすると，選んだ地域をクローズアップして地図を表示する．そのなかから，任意の交差点をクリックすることでその地点における情報を表示する．

情報を表示するウィンドウは**図５．８２**に示すとおりである．左側に浸水深，流れに対する抵抗力，津波から受ける力の時刻暦データを表示する．右側には選んだポイントに関する情報が記載されており，基本的な情報として，住所，標高，海からの距離，また，避難場所に関する情報として，避難場所名，避難場所までの距離が表示されおり，さらにそ

の下にはイメージの手助けをするため現地の写真と避難場所の写真を掲載している．

さらにメイン画面では，シミュレーションによって得られた動画を再生することができるようになっている．メイン画面上の「動画を再生する」と描かれたボタンをクリックすることで，**図５．８３**に示す動画再生用のウィンドウが立ち上がるようになっている．このウィンドウ内で，再生したい動画をリストから選び，「再生」ボタンを押すだけで，見たい動画が見られるようになっている．

このシステムは最終的に総合的な避難支援ツールにすることを目的としている．現時点では各地点における，情報の閲覧とシミュレーション結果の表示を行っているが，今後，３次元 GIS との連動や，最適な避難経路の表示など，本研究で利用した避難行動シミュレーションとの連携を深めていく予定である．



図５．８１　アプリケーション実行画面

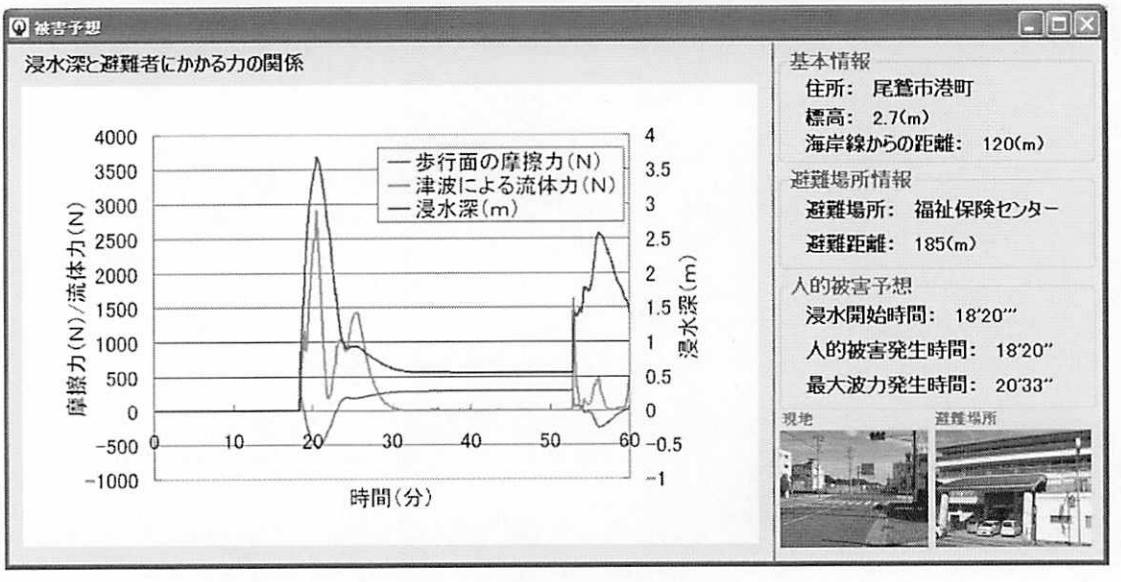


図５．８２　情報閲覧用ウィンドウ



図５．８３　動画再生用ウィンドウ

2）各交差点における津波による波力

ここでは本研究で求めた各ポイントにおける，浸水深，流れに抵抗する力，津波から受ける力のグラフを紹介する．本研究では，尾鷲市の市街地にあるほぼ全ての交差点に関して，津波に関する上記３つの情報を時刻暦でまとめた．

これにより，時々刻々と変化する津波の情報を各地点ごとに把握することが可能となった．それらのうち，一例を以下に示す．

図５．８４は各交差点に番号をつけた様子を示してある．**図５．８５①～図５．８５⑨**では各番号に対応する交差点での時刻暦データである．

それぞれのグラフを見てみると，どの地点においてもおおよそ同じ傾向を示している．まず，地震発生から 20 分前後で第一波が来襲し，その約 30 分後に第二波が押し寄せていることがわかる．ただし，④と⑦については第二波の影響はほぼないと言える．

また，一般的に海に近いほうが浸水深が高くなる．④⑤⑥はその傾向をそのまま示しているが，①②③は河川方向からの浸水が激しく，どの地点でも３ｍを超える浸水が予想される．

曲線の立ち上がりについて，ほとんどの場所で立ち上がった後，ほぼ同様の傾きで浸水深が下がっているが，①②③に関しては，これも河川方向からの浸水によって水の量が多くなり，浸水深の低下に時間がかかっているのではないかと考えられる．

次に力の関係に着目してみる．緑線で示す流れに対する抵抗力と赤線で示す津波の力のが人体評価の基準であり，抵抗力を津波の力が上回ったとき，つまり，緑線の上に赤線が来たときに，人的被害が発生したものとモデル化している．どの地点においても第一波目で人的被害となりうるほどの力が発生しているのがわかる．

津波による力は浸水深に比例しているのがわかるが，浸水深が最大となるときには津波の力はほぼ０に近いところまで落ち込んでいるのがわかる．これは２章で示した津波の力の算出式からもわかるが，津波の力は流速の二乗に比例しているので，流速の変曲点となる浸水深が最大の時に急激に落ち込むのだと考えられる．

この情報を使用することで，時間というパラメータを考慮したうえでの様々な議論が可能になった．特に災害時においては時間によって状況が変化し，その都度取る対応が変わるものである．避難経路を検討する際などにはこういった情報を踏まえたうえでの検討が重要になってくる．

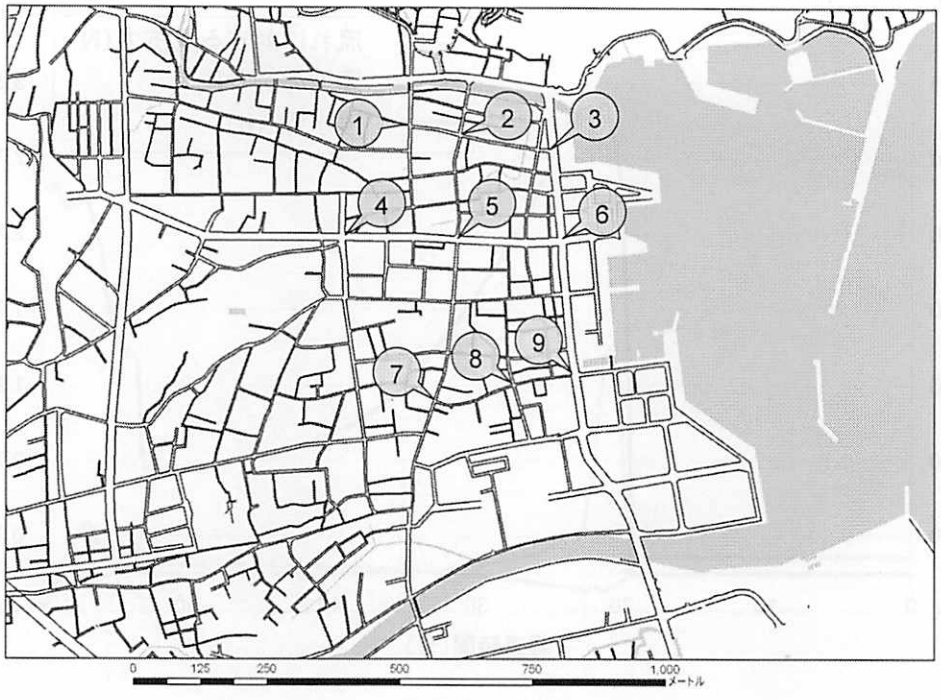


図５．８４　交差点の位置と番号

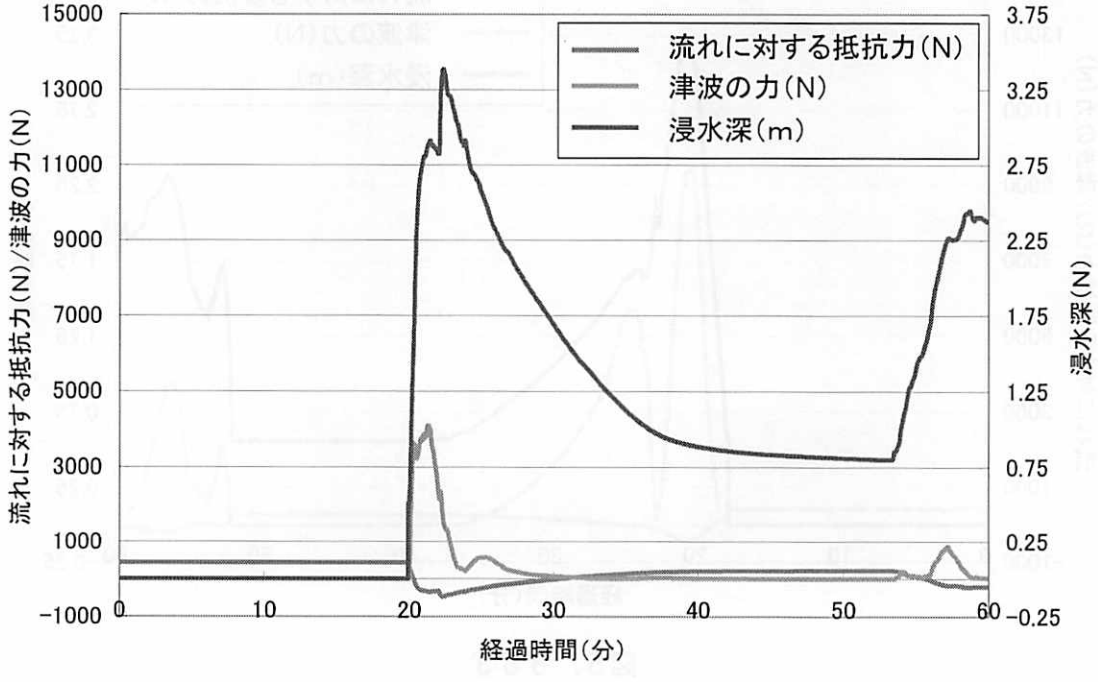


図５．８５①

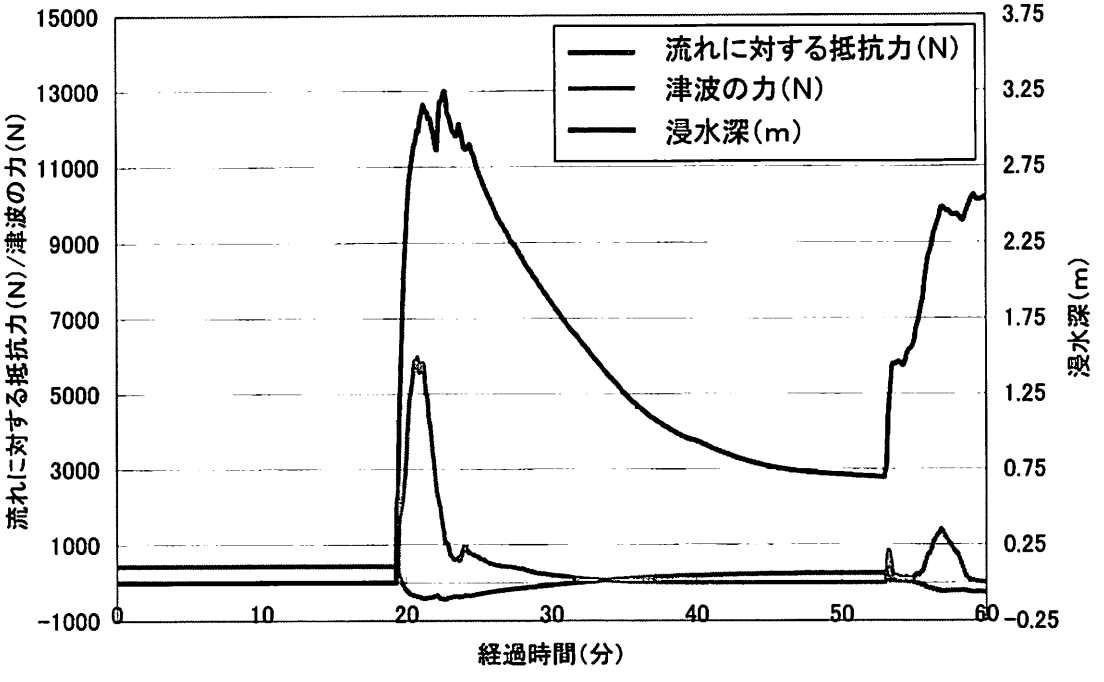

流れに対する抵抗力(N)
津波の力(N)
浸水深(m)
流れに対する抵抗力(N)/津波の力(N)
浸水深(m)
経過時間(分)
15000
13000
11000
9000
7000
5000
3000
1000
-1000
3.75
3.25
2.75
2.25
1.75
1.25
0.75
0.25
-0.25
0
10
20
30
40
50
60

図5．85②

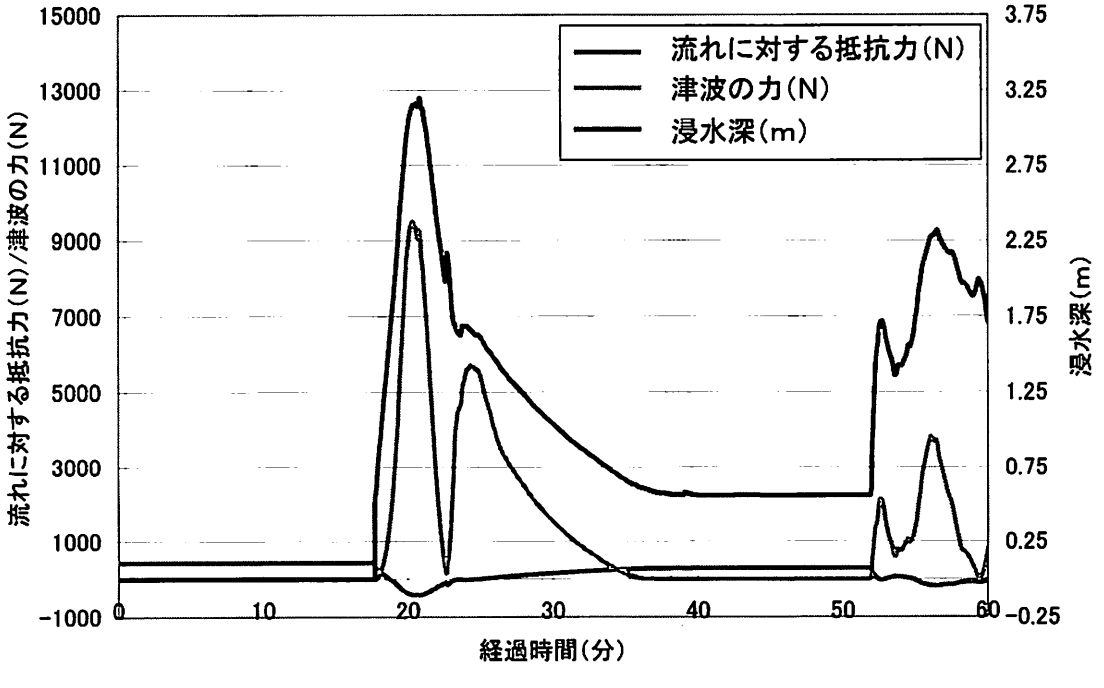

流れに対する抵抗力(N)
津波の力(N)
浸水深(m)
流れに対する抵抗力(N)/津波の力(N)
浸水深(m)
経過時間(分)
15000
13000
11000
9000
7000
5000
3000
1000
-1000
3.75
3.25
2.75
2.25
1.75
1.25
0.75
0.25
-0.25
0
10
20
30
40
50
60

図5．85③

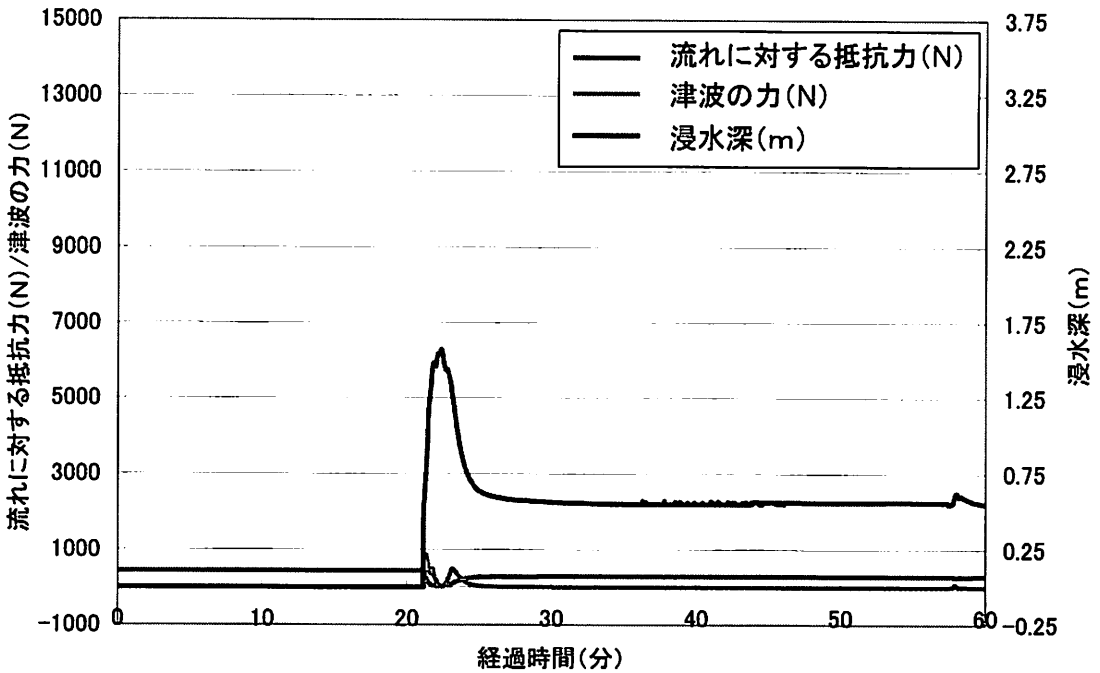

流れに対する抵抗力(N)
津波の力(N)
浸水深(m)
流れに対する抵抗力(N)/津波の力(N)
浸水深(m)
経過時間(分)
15000
13000
11000
9000
7000
5000
3000
1000
-1000
3.75
3.25
2.75
2.25
1.75
1.25
0.75
0.25
-0.25
0
10
20
30
40
50
60

図5．85④

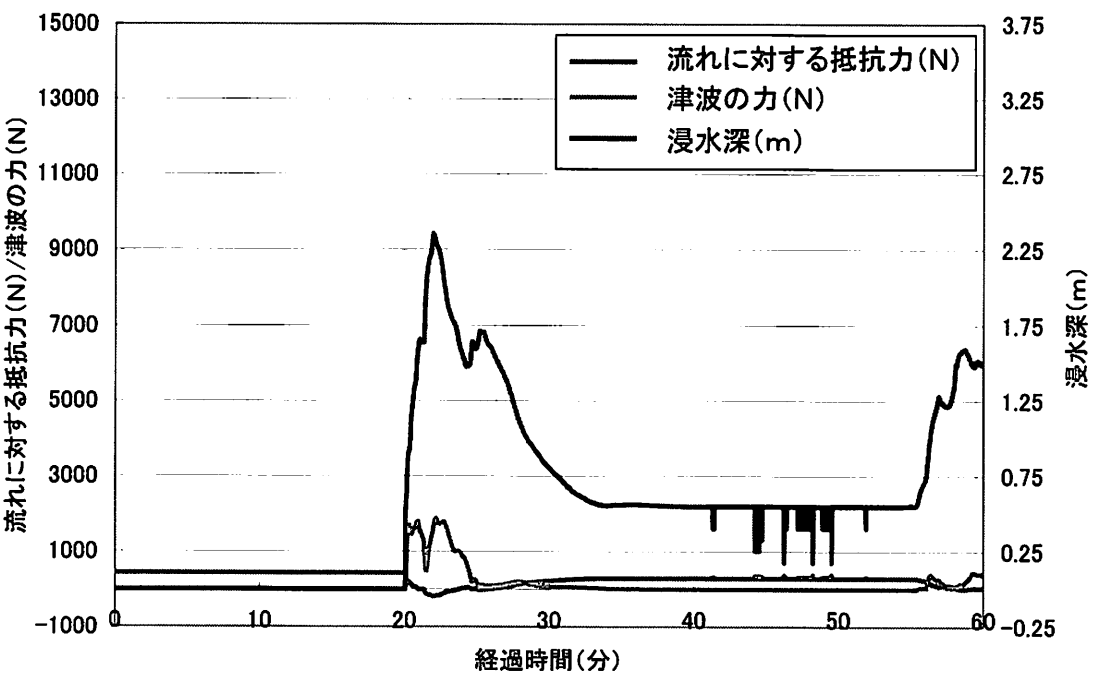

流れに対する抵抗力(N)
津波の力(N)
浸水深(m)
流れに対する抵抗力(N)/津波の力(N)
浸水深(m)
経過時間(分)
15000
13000
11000
9000
7000
5000
3000
1000
-1000
3.75
3.25
2.75
2.25
1.75
1.25
0.75
0.25
-0.25
0
10
20
30
40
50
60

図5．85⑤

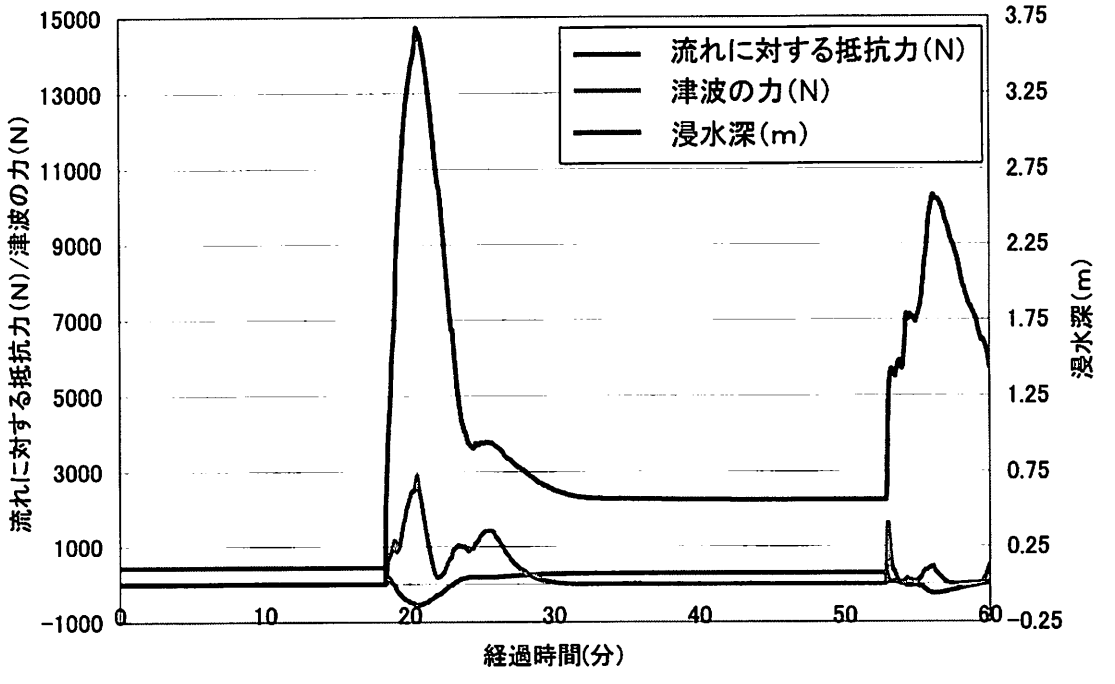

流れに対する抵抗力(N)
津波の力(N)
浸水深(m)
流れに対する抵抗力(N)/津波の力(N)
浸水深(m)
経過時間(分)
15000
13000
11000
9000
7000
5000
3000
1000
-1000
3.75
3.25
2.75
2.25
1.75
1.25
0.75
0.25
-0.25
0
10
20
30
40
50
60

図5．85⑥

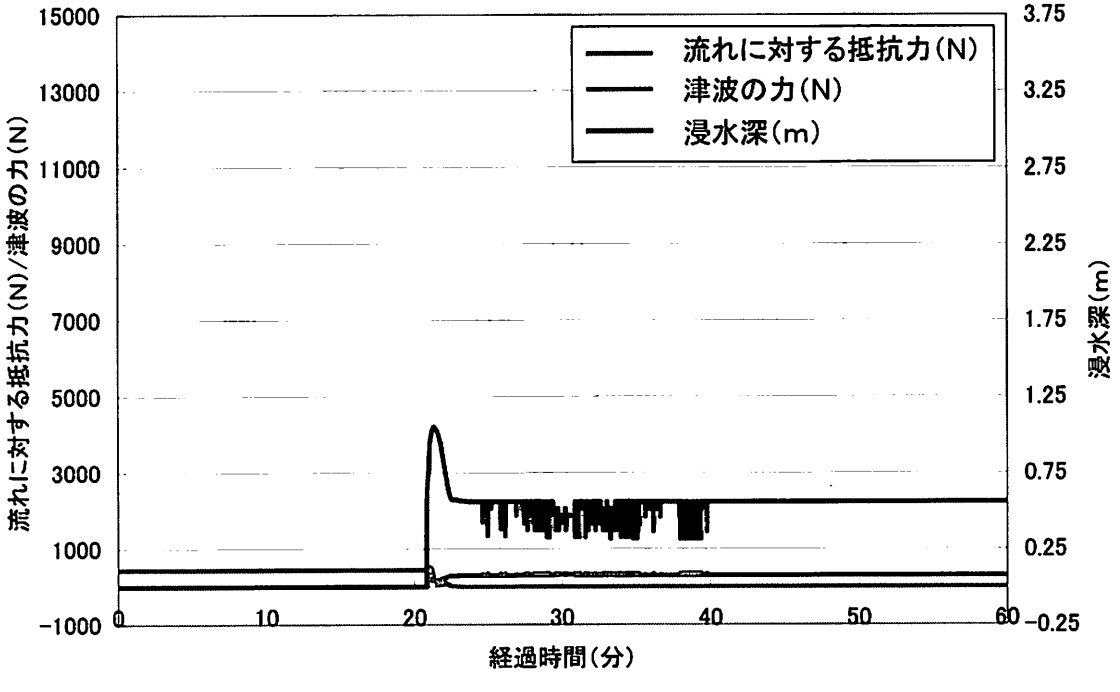

流れに対する抵抗力(N)
津波の力(N)
浸水深(m)
流れに対する抵抗力(N)/津波の力(N)
浸水深(m)
経過時間(分)
15000
13000
11000
9000
7000
5000
3000
1000
-1000
3.75
3.25
2.75
2.25
1.75
1.25
0.75
0.25
-0.25
0
10
20
30
40
50
60

図5．85⑦

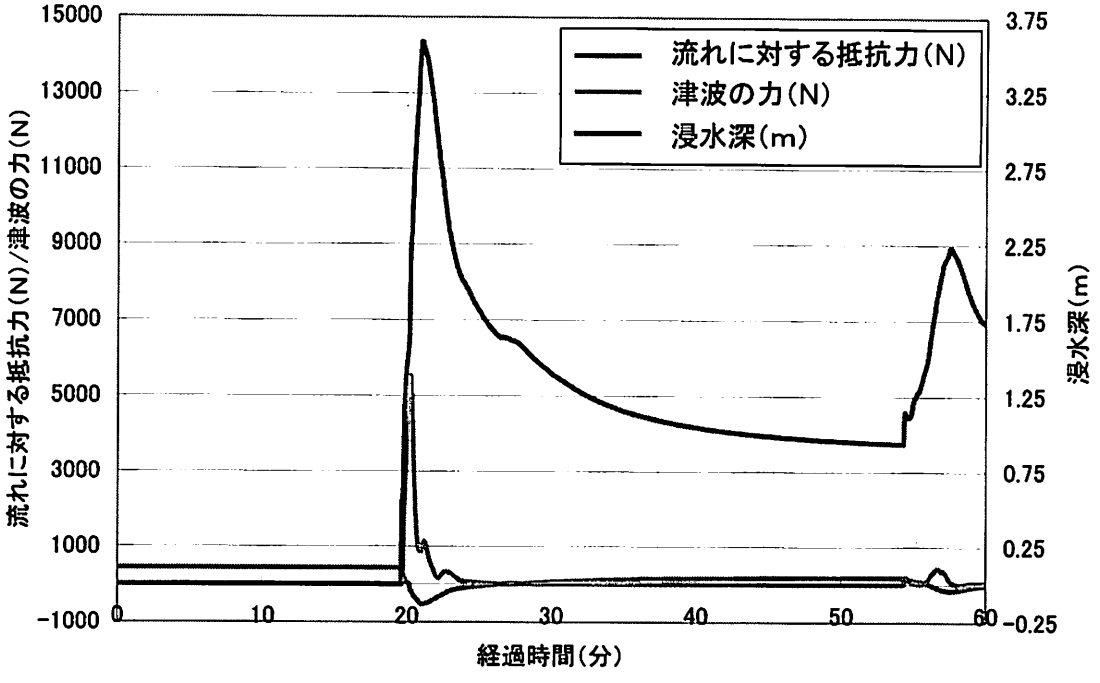

流れに対する抵抗力(N)
津波の力(N)
浸水深(m)
流れに対する抵抗力(N)/津波の力(N)
浸水深(m)
経過時間(分)
15000
13000
11000
9000
7000
5000
3000
1000
-1000
3.75
3.25
2.75
2.25
1.75
1.25
0.75
0.25
-0.25
0
10
20
30
40
50
60

図5．85⑧

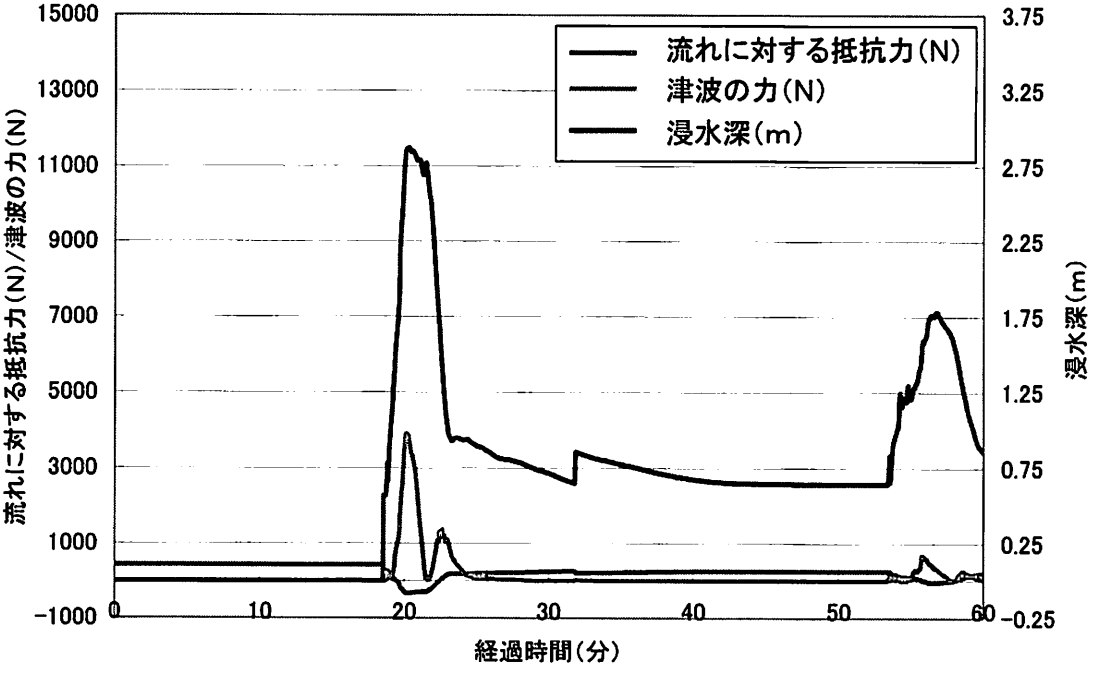

流れに対する抵抗力(N)
津波の力(N)
浸水深(m)
流れに対する抵抗力(N)/津波の力(N)
浸水深(m)
経過時間(分)
15000
13000
11000
9000
7000
5000
3000
1000
-1000
3.75
3.25
2.75
2.25
1.75
1.25
0.75
0.25
-0.25
0
10
20
30
40
50
60

図5．85⑨

5．6　結論

1）本章のまとめ

本研究では，津波災害時の避難行動モデルに力学的な手法で人的被害を算出するモデルを組み込んだ．それと同時に，5m メッシュの津波浸水シミュレーション結果を補間し，1m メッシュにした津波浸水データを災害ポテンシャルとして，避難行動シミュレーションをおこなった．この結果，河川の遡上までも表現することが可能になり，河川付近で人的被害が発生してしまっていることがわかった．

次に作成した津波浸水データを用いて防潮堤の効果の検証を行った．この結果，防潮堤に十分強度があり，水門や陸閘が完全に閉められるような場合にはその効果は非常に大きく，大幅な被害軽減が期待できることが明らかになった．

また，人的被害を評価する際に，各メッシュにおける浸水深，津波による波力，水の流れに対する抵抗力を算出した．それらのデータに加えて，その土地の属性情報，避難場所に関する情報を簡単に表示するアプリケーションの作成を行った．このアプリケーションに関しては，更なる情報の追加や，避難行動シミュレーションと連動させることで住民側の防災ツールとして今後開発を進めていく予定である．

最後に，地域の災害対応の実情を考慮した実用性の高いシステムを構築するために，本研究で対象とした三重県尾鷲市において，避難計画および津波発生時の対応について聞き取り調査を行い，本システム実用化に向けての課題を整理した．その結果，特に以下の点について，避難行動モデルへの導入を検討する必要があることが分かった．

①尾鷲市では，防災センターが新設され，津波災害への対応については本センターが初動的な対応にあたることになる．特に津波情報については，緊急地震速報システムが仮運用段階にあり，東南海・南海地震では揺れの数十秒前に警報を出すことも可能となる．防災対策の効果として，迅速な避難情報の周知をシナリオ化し，人的被害の軽減効果を明らかにする必要がある．

②避難の際には，たとえ遠回りで時間がかかったとしても，より安全なルートを避難の際に選択することが重要である．そのため，各地点における津波の浸水深とそれによって発生する力を考慮し，シミュレーションを行うことで，最適なルートを検討することが必要である．

③尾鷲漁港前では津波発生時に自動で閉鎖される鉄扉が導入されおり，水圧およびガス圧で津波来襲時に自動閉鎖される設計となっているが，鉄扉のレール上に物が配置されていたり，液状化によって閉らなくなることが考えられる．これらの状況によって異なる被害発生シナリオを考慮する必要がある．

④シミュレーションの対象とした市街化地域は比較的若い年代の人口が多いものの，市全体として高齢化が進んでおり，避難の際に多くの援護が必要となる可能性がある．

2）今後の課題

本研究では，津波災害時での避難行動シミュレーションを行い，より適切な対応策の検討や施設の検証などを行った．以下に，今後の避難研究に対する課題をまとめる．

a．非常時の人間行動の把握

本研究で扱ったポテンシャルモデルでは，日常的な人間行動についてはかなりの再現性を有していると考えられるが，非常時の人間行動については十分に再現されていない可能性がある．今後ともシミュレーションモデルの再現性向上は，重要検討項目であるといえる．

b．実データに基づいた避難行動解析

本研究では，便宜的に利用者を均一に配置したり，建物 1 軒に 1 人の避難者を配置したりと，様々な仮定のもとでシミュレーションを行った．今後入手できるであろう住民データや建物データ，時間帯別人口データ，アンケート調査の結果など，実データに基づいたシミュレーションを行い，より現実に即した条件化で避難安全性に向けた各種検討を行うことが望まれる．

c．システム実用化に向けて

本研究は，近い将来の実用化を念頭に置いて行ったものである．今後は津波シミュレーションなど各シミュレーション系との統合を行い，実用性の高いシステムの開発が望まれる．また，本システムの効果的な利用法を提示したり，運用マニュアルを設計するなど，利用者側のニーズを十分に汲み取った検討が必要である．さらには，本研究において構築した情報閲覧ツールは，更なる情報の追加や，避難行動シミュレーションと連動させることで住民側の防災ツールとして今後開発を進めていく必要がある．

第５章の参考文献・Ｗｅｂサイト

[1]原田雅也：ポテンシャルモデルを用いた最適避難誘導のための基礎的研究，東京大学大学院工学系研究科修士論文，pp.3-3-(1)-3-3-(10)，1998.

[2]藤田卓：都市施設における避難安全性向上のための基礎的研究，中央大学大学院理工学研究科修士論文，pp. 3-3-(1)-3-4-(5)，2002.

[3]織田浩平：津波災害時の避難行動シミュレーションモデルの開発，中央大学大学院理工学研究科修士論文 2005.

[4]Fruin,J，長島正充訳：歩行者の空間，鹿島出版会，1974.

[5]須賀堯三他：水害時の安全避難行動（水中歩行）に関する実験，水工学論文集，1995,2.

[6]津波の市街地氾濫シミュレーションと人的被害評価，文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」平成 16 年成果報告書，2005

[7]河内まき子，持丸正明，岩澤洋，三谷誠二（2000）：日本人人体寸法データベース 1997-98，通商産業省工業技術院くらしと JIS センター

[8]インド洋地震津波災害調査研究グループ　ウェブページ
http://www.drs.dpri.kyoto-u.ac.jp/sumatra/index-j.html#casualty

[9]インドネシア・スマトラ沖地震情報　ウェブページ
http://rescuenow.cocolog-nifty.com/sumatra_earthquake/

[10]ウィキペディア　ウェブページ
http://ja.wikipedia.org/wiki/

[11]S.HERATH：The 26 December 2004 Tsunami Disaster And Recovery Challenges in Srilanka. ICUS Report 2005-01，pp.101-128，2005

[12]内閣府：中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」資料，　2001.10.

[13]宇佐美龍生：新編 日本被害地震総覧，東京大学出版会，1996.8.

[14]三重県尾鷲市 公式ホームページ
http://www.city.owase.mie.jp/

[15]防災みえ.jp ホームページ
http://www.bosaimie.jp/mie/index.html

[16]石橋晃睦，桑沢敬行：津波災害総合シミュレータ構築のためのデータベース整備，文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」平成 15 年度成果報告書，2004.

[17]越村俊一：津波の市街地氾濫シミュレーションと人的被害評価，文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」平成 15 年度成果報告書，2004.

[18]Imamura, F：Review of Tsunami Simulation with a Finite Difference Method, Long-Wave Runup Models, World Scientific, River Edge,　NJ，pp.43-87，1996.

[19]片田敏孝：臨海部における津波災害総合シミュレータの開発，文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」平成 15 年度成果報告書，2004.

20)尾鷲市防災会議：尾鷲市地域防災計画（震災対策編・風水害対策編・各編共通添付資料），尾鷲市，2003.

第６章　津波避難施設が保有すべき津波外力に対する強度

６．１　本章の位置づけ

津波避難施設が保有すべき津波外力に関しては，内閣府による津波避難ビル等に係るガイドライン（2005）[1]においてその評価方法の枠組みが示されている．ガイドラインの中では，構造物に作用する津波波圧を評価する算定式として，朝倉ら（2000）[2]による津波波圧算定式が採用されている．朝倉らの算定式は水理実験を通じて得られた算定式であり，津波被害分析を通じた実証的な検証が不可欠であると考えられる．このような背景に基づき，本章では，近年の地震津波災害の中でも2006年に発生したジャワ島南西沖地震津波を取り上げ，その際に被害を受けた家屋等構造物に対する被害分析を通じて，それらの構造物に作用する津波外力の評価を行い，津波避難施設が保有すべき津波外力に対する強度について検討を行った．

６．２　分析対象とする地震津波，及び本研究に係わる研究動向

2006年7月17日（UTC 08:19:28），ジャワ島南西沖235kmを震源としたMw=7.7の地震が発生した（USGS（2006））[3]．この地震に伴って発生した津波は，ジャワ島南岸部で600人を超える死者を出す大災害となった（USGS（2006））[3]．この津波被害の要因としては，家屋等の構造物の被災が挙げられる．例えば，死者数が300人を越えたCiamisのPangandaranでは，海岸線近傍の家屋の大部分が津波により破壊された（（独）港湾空港技術研究所（2006））[4]．

家屋等構造物に対する津波荷重に関しては先行研究において多くの知見が得られている．首藤（1992）[5]は，家屋の被害が構造形式によって大きく異なり，その被害率を津波高との関係から論じることの重要性を指摘しており，松冨・首藤（1994）[6]はそれらの関係を1993年北海道南西沖地震津波の被害調査データに基づいて評価している．実験的検討の一例としては，朝倉ら（2000）[2]は護岸を越流した津波による波力を明らかとするために，水理実験を行い，内陸に遡上した津波が構造物に作用する津波波圧の算定式を提案している．６．１で述べたようにこの算定式は，内閣府による津波避難ビル等に係るガイドライン（2005）[1]で採用されている．このような中で，中埜（2005）[7]ならびに中埜・朴（2005a, 2005b）[8][9]は2004年スマトラ島沖地震による津波被害を受けたスリランカならびにタイの家屋部材の損傷状況から津波波圧を逆同定し，朝倉らの研究から得られた津波波圧の算定式の妥当性を検討している．

そこで，本章では，2006 年ジャワ島南西沖地震により発生した津波の津波被害調査データ（ジャワ島南西沖地震・津波災害現地調査団（2006））[10] を用いて，第一に，家屋被害データの基礎的な分析を行った上で，第二に，先述した中埜ならびに中埜・朴の方法論に立脚し，Pangandaran，Cilacap 周辺の家屋等構造物の損傷状況から津波波圧の逆同定を試み，朝倉らによる津波波圧の算定式の妥当性を検討した．

6．3　2006 年ジャワ島南西沖地震津波の際の家屋被害の特徴

1）分析対象データとその分析方法

分析対象とする地域は，**図6．1** に示すように，Pangandaran ならびに Cilacap 東部を中心とした Tasikmalaya から Kebumen の間の海岸沿い約 100km の領域である．ここでは，特に Pangandaran 西海岸ならびに東海岸と Cilacap の東部海岸沿いにおいて特徴的な被害が発生した 102 地点に及ぶ家屋等構造物の被害データに対する分析を行った．

まず，家屋の構造及び津波による被害の形態を精査し，家屋の被災度を**表6．1** 並びに**図6．2** のように定義した．その上で，上記の 102 地点の被害データに対して，RC 造骨組煉瓦組積造に対象を絞り，さらに，シンプルな構造である 1 戸建てかつ 1 階建ての家屋，及び，津波作用の形態の観点から入り口の開口部が海岸線に並行な家屋という制約を課して分析を行うこととした．以上の制約に基づくと，分析対象データは 102 データから 23 データに絞られた．**表6．1** の定義に基づき，これらの分析対象データの津波被災度をまとめると**表6．2** のようになる．ここで，**表6．2** にはデータの識別番号や対象とする家屋の緯度，経度，及び，家屋の極近傍で計測された浸水深に関する情報が含まれている．

2）家屋の津波被害の特徴

図6．3 には，分析対象とする家屋の津波被災度のヒストグラムを示す．頻度が最も顕著な被災度は被災度 C である．「壁の損壊，柱の曲げ損壊」以上の被害（被災度 A，B，C），すなわち，構造的に中程度以上の被害は合計 18 件発生しており，それらの中で最も被害が顕著な「全壊，基礎を残し流出」は 6 件発生している．一方，「壁または柱の一部損壊」以下（被災度 D，E）の相対的に小規模な被害は合計 5 件発生している．

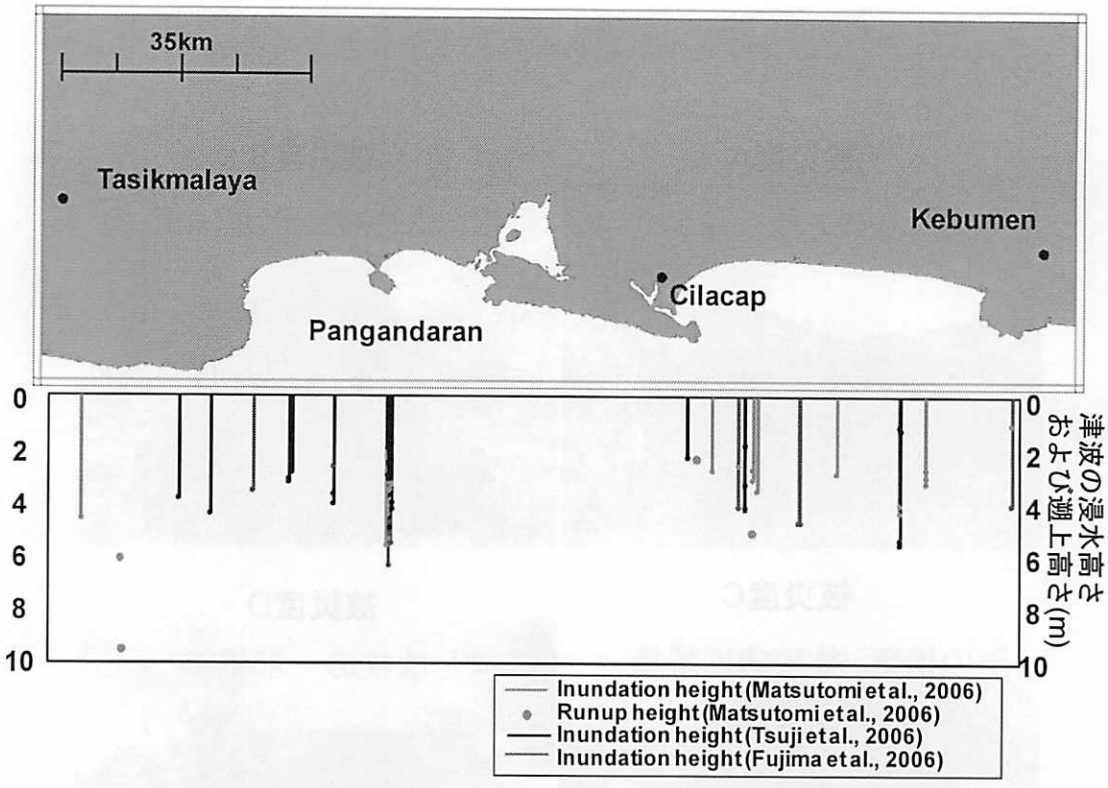


図６．１　分析対象とする地域

表６．１　家屋の津波被災度の定義

被災度	定義
A	全壊，基礎を残し流出
B	屋根を含め柱，梁，壁の崩壊
C	壁の損壊，柱の曲げ損壊
D	壁または柱の一部損壊
E	壁にひび割れ，窓の損壊，柱の軽微な損壊等および無被害

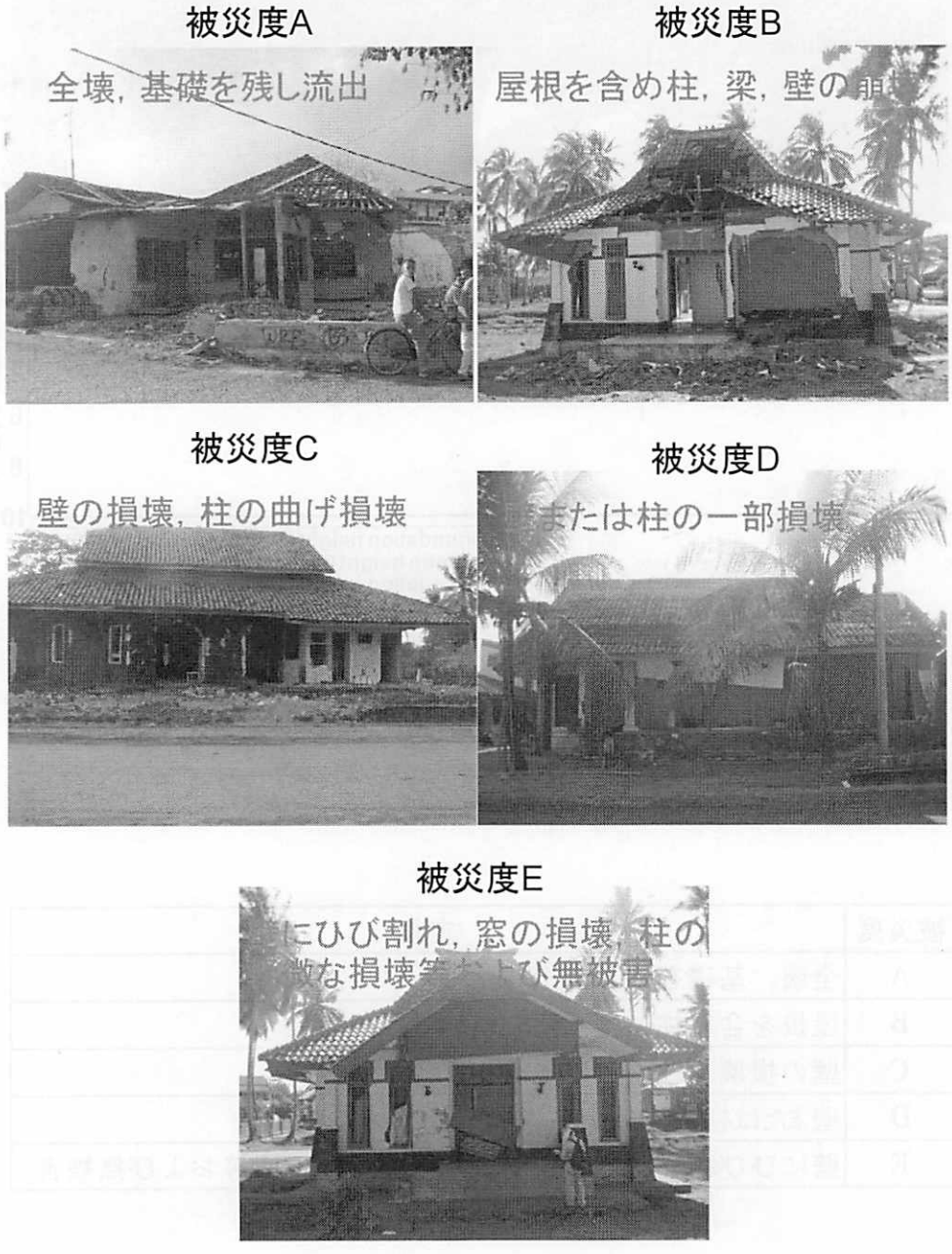


図６．２　家屋の津波被災度の定義

表6．2　分析対象データ

識別番号	対象家屋	調査日	緯度	経度	海岸線からの距離(m)	津波の浸水深さ(m)	地盤高(m)	被災度
浸水深計測地点	商店	2006/8/4	S7°42' 17"	E108°39' 23"	104.31	1.64	2.46	
1	緑の小屋	2006/8/5	S7°42' 17"	E108°39' 23"	-	-	-	E
2	家	2006/8/5	S7°42' 06.7"	E108°39' 23.2"	-	-	-	A
3	Lonely Planetレストラン	2006/8/5	S7°42' 06.7"	E108°39' 23.2"	-	-	-	A
4	黒い家	2006/8/5	S7°42' 04.6"	E108°39' 22.4"	-	-	-	C
5	小屋	2006/8/5	S7°42' 03.6"	E108°39' 23.0"	-	-	-	C
6	ペンション(オレンジ)	2006/8/5	S7°42' 03.0"	E108°39' 23.2"	-	-	-	A
7	緑のペンション	2006/8/5	S7°42' 02.1"	E108°39' 22.2"	-	-	-	B
8	緑のペンション2	2006/8/5	S7°42' 00.8"	E108°39' 22.0"	-	-	-	A
9	緑のペンション3	2006/8/5	S7°42' 00.8"	E108°39' 22.0"	-	-	-	C
浸水深計測地点	貸し別荘	2006/8/5	S7°42' 00.1"	E108°39' 22"	62.86	1.34	3.24	
10	緑のペンション4	2006/8/5	S7°41' 59.4"	E108°39' 22.1"	-	-	-	C
11	ショップ2	2006/8/5	S7°41' 58.1"	E108°39' 21.6"	-	-	-	B
12	ショップ（白い家）	2006/8/5	S7°41' 57.8"	E108°39' 21.5"	-	-	-	C
13	橋の横の1件	2006/8/4	S7°41' 54.6"	E108°39' 20.5"	-	-	-	D
浸水深計測地点	レストラン	2006/8/5	S7°41' 54"	E108°39' 20"	78.91	2.40	2.56	
浸水深計測地点	監視台	2006/8/5	S7°41' 47"	E108°39' 14"	17.71	1.58	-	
14-15	更地	2006/8/4	S7°41' 47"	E108°39' 14"	-	-	-	A, A
16	ペンション1	2006/8/5	S7°41' 43.8"	E108°39' 12.8"	-	-	-	B
17	ペンション2	2006/8/5	S7°41' 43.0"	E108°39' 12.1"	-	-	-	B
18	ペンション3	2006/8/5	S7°41' 43.0"	E108°39' 12.1"	-	-	-	E
19	ペンション4	2006/8/5	S7°41' 43.0"	E108°39' 12.1"	-	-	-	E
浸水深計測地点	貸し別荘	2006/8/4	S7°41' 42"	E108°39' 11"	100.40	1.58	3.65	
20	ペンション5	2006/8/5	S7°41' 41.2"	E108°39' 10.2"	-	-	-	B
21	緑のレストラン	2006/8/5	S7°41' 38.2"	E108°39' 06.0"	-	-	-	D
浸水深計測地点	ホテル	2006/8/5	S7°41' 33.4"	E108°39' 02.1"	116.24	0.13	-	
浸水深計測地点	警察署寮の小屋	2006/8/5	S7°42' 16"	E108°39' 32"	60.15	1.43	2.47	
22	ショップ	2006/8/5	S7°42' 10.7"	E108°39' 30.2"	-	-	-	C
23	ホテル	2006/8/5	S7°42' 10.0"	E108°39' 30.4"	-	-	-	C
浸水深計測地点	食道	2006/8/5	S7°41' 46"	E108°39' 37"	35.58	1.10	2.68	

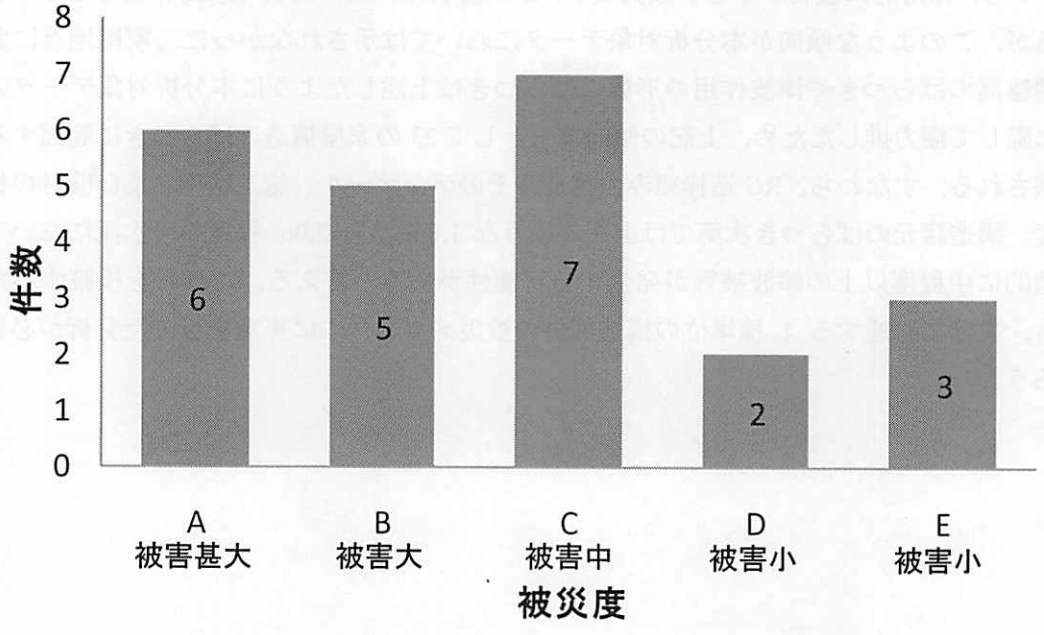


図6．3　分析対象とした家屋の津波被災度の分布

次に，分析対象とする家屋の位置と浸水深計測地点を衛星写真上にプロットすると**図6．4**のようになる．**図6．4**を用いて各浸水深計測地点から半径250m以内に位置する対象家屋を同一の浸水深と仮定し，浸水深に対する家屋の被災度の分布を**図6．5**のように明らかにした．なお，原理的には全ての家屋地点において浸水深の計測データが必要となるが，現実的にそれは困難であり，本データの場合は浸水深計測地点が**図6．4**に示す通り8データのみであるため，家屋地点と浸水深計測地点の地盤高の特徴を考慮して，各浸水深計測地点の支配的な領域を上述のように250m以内と仮定した．なお，本仮定に関しては，SRTM-3データに基づいた地盤高に対する検討を踏まえた結果であるが，今後は現地調査やリモートセンシングデータに基づき，更に精査する必要がある．なお，**図6．5**においては，分析対象領域の浸水深の最大値が2.40mであったため，その値を上限として含み，区間幅は0.2mとした．

図6．5より，被害の大きい被災度A，B，Cのデータは全て浸水深1.2m～1.6mの幅に入っており，一方，被害が最も低い被災度Eのデータは浸水深1.4m～1.8mの幅に入っていることがわかる．被災度Dの2つのデータに関しては，浸水深との対応関係が全く異なっており，この原因については現在わかっていない．これらの2棟については今後の詳細な分析が必要である．

理論的には，相対的に被害が大きい被災度A，B，Cは浸水深が高い領域で頻度が高くなり，一方，相対的に被害が小さい被災度D，Eは浸水深が低い領域で頻度が高くなるはずであるが，このような傾向が本分析対象データにおいては示されなかった．家屋地点における地盤高のばらつきや津波作用の形態のばらつきは上述したように本分析対象データの選定に際して極力排したため，上記の傾向は主として23の家屋構造のばらつきに起因すると推察される．すなわち，RC造枠組みの構造やそのディテール，施工精度，及び壁材の材料強度，構造諸元のばらつき次第では上記のような1.0mから2.0m程度の浸水深においても構造的に中程度以上の津波被害が発生する可能性があると言える．これらを検証するためにも，次節で詳述する1棟単位の構造部材の被災メカニズムに焦点を当てた分析が必要となろう．

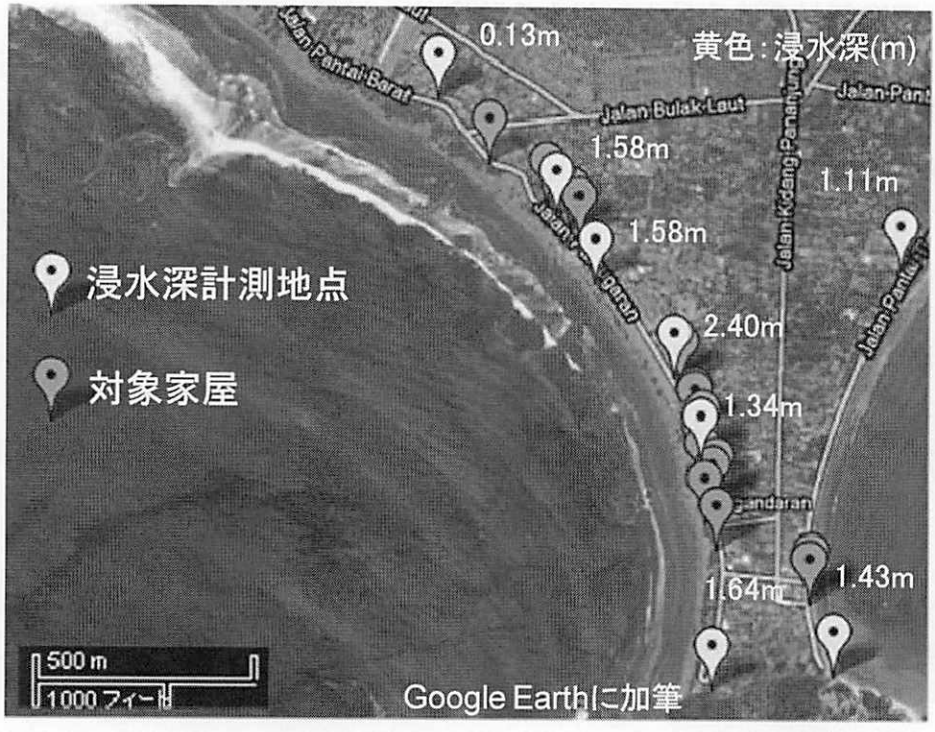


図６．４　分析対象とした家屋の位置と浸水深計測地点の関係

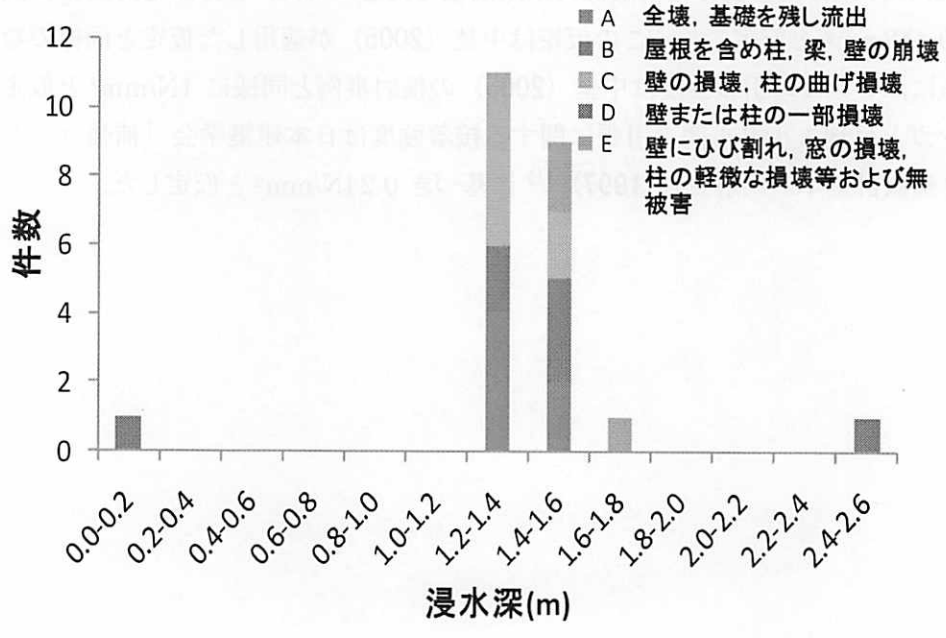


図６．５　家屋の被災度と浸水深の関係

6．4　構造部材の津波外力に対する強度

1）津波耐力の算定

本節では，**6．3　1）**で示した 102 地点の構造物の中から，**表6．3**ならびに**図6．6**に示す合計 6 通りの構造部材を取り上げ，それらの津波による損傷状況から構造部材の津波耐力を推定した．その際には，漂流物の影響を受けていないと推察される構造部材を選定し，さらに，損傷時の耐力が容易に推定できる単純な構造部材を選定した．耐力計算は損傷状況に応じて降伏曲げ耐力 M_y，最大曲げ耐力 M_u，転倒曲げ耐力 M_T，せん断耐力 V_u を算定した．

耐力評価における共通の仮定として，RC 柱の曲げ耐力を評価する際の次式を適用した．

$$M_y = 0.9 a_t \sigma_y d, \quad M_u = 0.9 a_t \sigma_u d \tag{6.1}$$

ここで，a_t は引張鉄筋の断面積であり，d は引張力の作用位置である．また，σ_y，σ_u はそれぞれ降伏曲げ応力度ならびに終局曲げ応力度であるが，本分析対象地域において一般的に用いられている鉄筋のデータが得られなかったので，中埜（2005）によるスリランカの鉄筋の引張試験の結果を適用し，σ_y，σ_u はそれぞれ σ_y=487N/mm^2，σ_u =605N/mm^2 と仮定した．

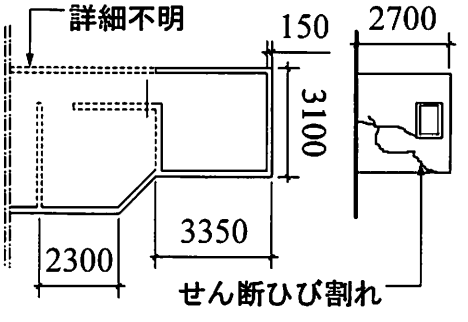
次に，レンガ塀やレンガ壁に対するせん断耐力 V_u の評価には次式を適用した．

$$V_u = \tau_u A \tag{6.2}$$

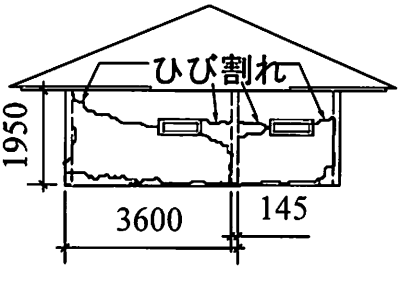
ここで，A は津波作用を受けた構造部材の断面積である．また，せん断応力度 τ_u に関しては一律に 0.4N/mm^2 と仮定した．この仮定は中埜（2005）が適用した仮定と同様の数値である．さらに，レンガの引張強度は中埜（2005）の検討事例と同様に 1N/mm^2 と仮定し，また，レンガと目地モルタル間の引張に関する接着強度は日本建築学会「補強コンクリートブロック造設計基準・同解説」（1997）[11] に基づき 0.24N/mm^2 と仮定した．

表6．3　分析対象とした構造部材

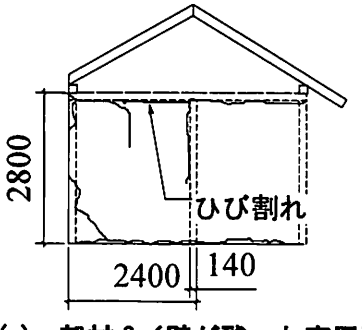
構造部材番号	名称	損傷状態	所在地	緯度	経度	部材高(m)	部材幅(m)	没水深さ(m)	没水高さ(m)	壁厚(m)	その他データ
1	ペンション	海岸線に直交する壁にせん断ひび割れが生じる.	Pangandaran 西海岸	7.414	108.391	2.70	3.10	1.34	4.70	0.150	梁間方向の壁の横の長さを写真判定により3.10mと仮定
2	店舗の壁	海岸線と平行な壁にひび割れが生じる.	Pangandaran 東海岸	7.421	108.393	1.95	3.60	1.43	4.02	0.145	－
3	壁が残った家屋	海岸線と平行な壁にひび割れが生じる.	Pangandaran 東海岸	部材2の真横		2.80	2.40	1.43	4.02	0.140	－
4	道路壁	2径間以上にわたって倒壊	Pangandaran 東海岸	7.415	108.393	0.60	11.10	1.10	3.90	0.360	壁を支持する柱の断面寸法は0.26m×0.40m，柱のスパン(芯芯)は4.35m．柱の主筋はD12mmの丸鋼が1本と仮定
5	倒壊した柱	柱基部で曲げ破壊(主筋が破断)	Cilacap 東部	7.415	109.155	4.00	0.31	5.22	6.05	－	柱の断面寸法は0.31m×0.31m，かぶり(芯まで)は0.05m，主筋はD12mmの丸鋼が8本配筋されている.
6	水平クラックが生じた家屋	海岸線に直交する壁にせん断ひび割れが生じる.	Cilacap東部	7.420	109.173	2.70	5.03	1.57	4.59	0.140	壁の横の長さは2.75m，側部に高さ1.9m×横0.9mの開口部，梁間方向の壁の横の長さは4.75m



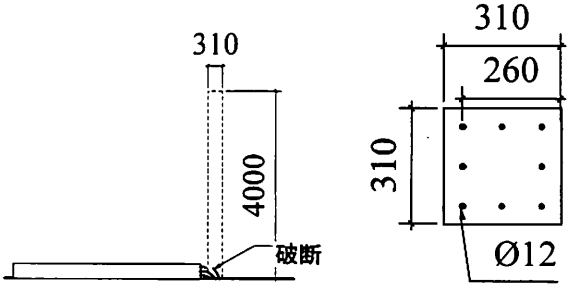
(a)　部材 1（ペンション）



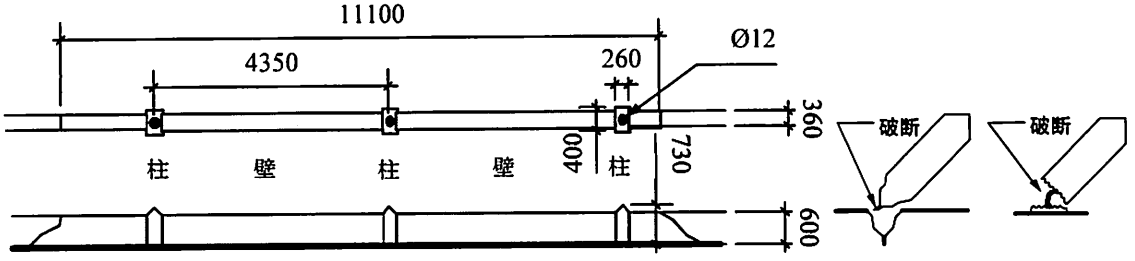
(b)　部材 2（店舗の壁）



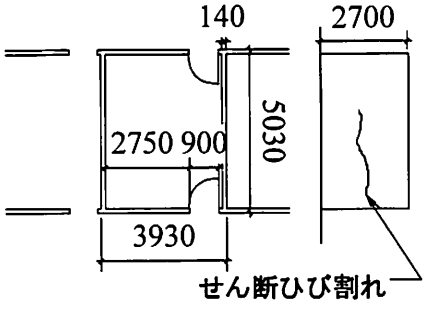
(c)　部材 3（壁が残った家屋）



(e)　部材 4（倒壊した柱）



(d) 部材 5（道路壁，斜線部は倒壊部分）



(f) 部材 6（水平クラックが生じた家屋）

図6．6 分析対象とした構造部材（図中の単位はすべて mm 単位）

2）津波耐力の算定結果

a． 部材 1（ペンション）

Pangandaran 西海岸沿いに位置するペンション群は，海岸線沿いに立地しているため，津波作用を直接受けたと考えられる．**図6．6 (a)**に示すように海岸線と直交方向の片側の壁には，津波作用によりせん断ひび割れが生じていた．従って，この壁のせん断耐力 V_u は，**表6．3**の構造諸元より，式(6.2)を用いて，

$$V_u = 0.4\,N/mm^2 \times 3100mm \times 150mm = 186.00kN \tag{6.3}$$

と求められる．

b． 部材 2（店舗の壁）

分析対象とする構造部材は Pangandaran 東海岸沿いに位置する店舗の壁であり，**図6．6 (b)**に示すように津波作用により壁周辺部のレンガ間の接着がとれ，壁の全周にわたってひび割れが生じていた．このようなひび割れの発生には，レンガと目地モルタル間の引張により曲げひび割れが生じるメカニズム（ひび割れ発生メカニズム 1）と，レンガと目地モル

タル間のせん断によりせん断ひび割れが生じるメカニズム（ひび割れ発生メカニズム 2）の 2 通りが考えられる.

ひび割れ発生メカニズム 1 の場合には，前述したように，レンガと目地モルタル間の引張に関する接着強度を 0.24N/mm^2 と仮定したので，引張耐力T_bは**表6．3**の構造諸元より，

$$T_b = 0.24\mathrm{N/mm^2} \times (3600\mathrm{mm} + 1950\mathrm{mm}) \times 2 \times 145\mathrm{mm} = 386.28\mathrm{kN} \qquad (6.4)$$

と求められる.

また，ひび割れメカニズム 2 の場合には，真田ら（2006）[12] によるレンガと目地モルタル間のせん断強度測定実験による結果から，せん断に関する接着強度$\tau_b{}^S$を$\tau_b^S = 0.09\mathrm{N/mm^2}$と仮定すると，このメカニズムの基づいたせん断耐力 V_bは**表6．3**の構造諸元より，

$$V_b = 0.09\mathrm{N/mm^2} \times (3600\mathrm{mm} + 1950\mathrm{mm}) \times 2 \times 145\mathrm{mm} = 144.86\mathrm{kN} \qquad (6.5)$$

と求められる.

c． 部材 3（壁が残った家屋）

分析対象とする構造部材は，Pangandaran 東海岸沿いに位置する家屋の壁であり，**図6．6 (c)**に示すように津波作用により壁の全面にわたってひび割れが生じていた．この壁も上記の **b** の壁と同様に 2 通りのひび割れ発生メカニズムが考えられる．ひび割れ発生メカニズム 1 に基づくと，引張耐力 T_bは，**表6．3**の構造諸元より，$T_b = 349.44\mathrm{kN}$と求められ，また，ひび割れ発生メカニズム 2 に基づくと，せん断耐力 V_bは，$V_b = 131.04\mathrm{kN}$と求められる.

d． 部材 4（倒壊した道路壁）

分析対象とする構造部材は，Pangandaran 東海岸沿いの道路壁であり，**図6．6 (d)**に示すように津波作用により全長 23.4m の中で 11.1m にわたって倒壊した．この壁は，RC 柱とレンガ壁からなるが，津波作用により壁だけではなく柱も倒壊した．その破壊メカニズムとしては，レンガ壁と柱が一体となって柱の主筋ごと引き抜かれたコーン破壊のメカニズム（コーン破壊メカニズム）と，柱基部が曲げ破壊したメカニズム（曲げ破壊メカニズム）の 2 種類が考えられる.

ここで，それらの柱の主筋は芯鉄筋が 1 本配筋されていると仮定し，また，壁厚に関しては柱の幅厚を参照し，写真判定により 36cm と仮定する.

その上で，まず，コーン破壊メカニズムについて考えると，レンガの引張強度を 1N/mm^2 と仮定したので，1 本の柱に対する柱基部における引張耐力 T^1 は**表6．3**の構造諸元より，$T^1 = 1.0\mathrm{N/mm^2} \times 400\mathrm{mm} \times 260\mathrm{mm} = 104\mathrm{kN}$と求められる．これより，圧縮縁から主筋位

置までの距離は200mmであるので，倒壊した柱3本分相当の曲げ耐力 Mu_1 は，

$$Mu_1 = 104\text{kN} \times 200\text{mm} \times 3 = 62.4\text{kNm} \tag{6.6}$$

と求められる．

今，コーン破壊部分を除くレンガ壁の長さは10.32m（=11.1m□0.26m×3）であるので，レンガと目地モルタル間の接着強度をレンガ壁の引張縁で0.24N/mm^2，圧縮縁で0と仮定すれば，目地モルタルの引張強度の寄与分 Mu_2 は，

$$Mu_2 = 1/2 \times (0.24\text{N/mm}^2 \times 360\text{mm}) \times 2/3 \times 360\text{mm} \times 10320\text{mm} = 107.00\text{kNm} \tag{6.7}$$

と求まる．

よって，コーン破壊メカニズムを想定すると，道路壁の転倒曲げ耐力 M_T は柱3本分の曲げ耐力 Mu_1 と壁基部における目地モルタルの接着強度の寄与分 Mu_2 を足し合わせて，$M_T = 169.40\text{kNm}$ と求められる．

次に，曲げ破壊メカニズムに関しては，3本の柱の主筋が破断していたため，そのような曲げ破壊を想定し，式(6.1)の曲げ耐力評価式を適用する．その際，主筋の直径を12mmと仮定すれば，柱3本分の曲げ耐力 Mu_1 は，

$$Mu_1 = 0.9 \times (6 \times 6 \times 3.14)\text{mm}^2 \times 605\text{N/mm}^2 \times 200\text{mm} \times 3 = 36.93\text{kNm} \tag{6.8}$$

と求まる．レンガと目地モルタル間の接着による寄与分 Mu_2 は上述したコーン破壊メカニズムと同様であるので，道路壁の転倒曲げ耐力 M_T は曲げ破壊メカニズムを想定すると $M_T = 143.93\text{kNm}$ となる．

e． 部材5（倒壊した柱）

分析対象とする構造部材は，**図6．6** (e)のように柱基部が曲げ破壊した柱である．この柱はRC柱であるが，8本の主筋の中で4本の主筋に破断が生じていたことから，**表6．3** の構造諸元を基に式(6.1)を用いて柱の曲げ耐力 M_u は，

$$M_u = 0.9 \times (3 \times 6 \times 6 \times 3.14)\text{mm}^2 \times 605\text{N/mm}^2 \times 260\text{mm} = 48.01\text{kNm} \tag{6.9}$$

と求められる．

f． 部材 6（水平クラックが生じた家屋）

対象とする構造物は Cilacap 東部海岸沿いの家屋であり，海岸線と直交方向にある壁にせん断ひび割れが生じていた。この壁と接合する桁行方向の壁は，津波作用を直接受けたと考えられる。よって，レンガ壁のせん断応力度τ_uは 0.4N/mm^2 と想定したので，壁のせん断耐力 V_uは，**表6．3**の構造諸元より，式(6.2)を用いて，

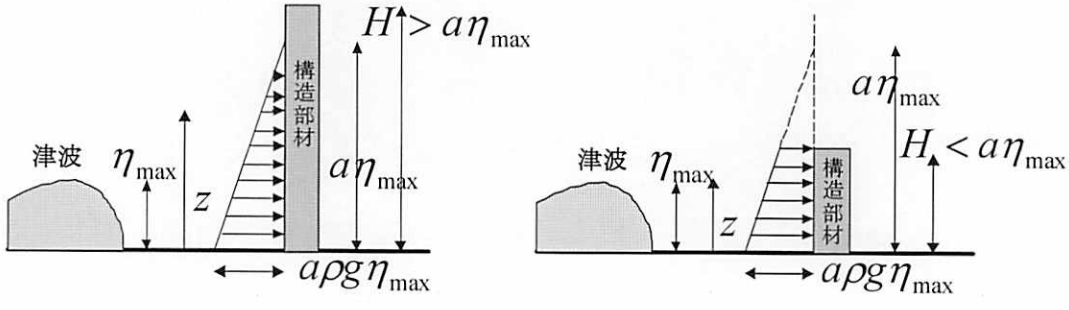
$$V_u = 0.4\,\mathrm{N/mm^2} \times 140\mathrm{mm} \times 5030\mathrm{mm} = 281.68\mathrm{kN} \tag{6.10}$$

と求められる。

以上，a から f の合計 6 種類の構造部材に対して津波被害から逆算された曲げ耐力ならびにせん断耐力をまとめると**表6．4**のようになる．なお，この表には当該構造部材の立地地点における最大浸水深さη_{max}ならびに，後述する津波荷重評価の結果も併せて示している．

表6．4　津波被害より逆算された曲げ耐力ならびにせん断耐力

構造部材番号	名称	所在地	部材種別	損傷モード	曲げ耐力(kNm)	せん断耐力(kN)	最大浸水深さ(m)η_{max}	逆算された波圧分	η' $(=a\eta_{max})$	パラメータ a
1	ペンション	Pangandaran 西海岸	壁	せん断ひび割れ	—	186.00	1.34	三角形	5.61	4.19
2	店舗の壁	Pangandaran 東海岸	壁	曲げひび割れ(部材2-1)	—	386.28	1.43	台形	6.59	4.61
				せん断ひび割れ(部材2-2)		144.86		台形	3.08	2.15
3	壁が残った家屋	Pangandaran 東海岸	壁	曲げひび割れ(部材3-1)	—	349.44	1.43	台形	6.70	4.69
				せん断ひび割れ(部材3-2)		131.04		台形	3.39	2.37
4	道路壁	Pangandaran 東海岸	壁+柱	柱はコーン破壊，壁は曲げ破壊(部材4-1)	169.40	—	1.10	台形	9.05	8.23
				柱，壁ともに曲げ破壊(部材4-2)	143.93	—		台形	7.74	7.04
5	倒壊した柱	Cilacap 東部	柱	曲げ破壊	48.01	—	5.22	台形	4.64	0.89
6	水平クラックが生じた家屋	Cilacap 東部	壁	せん断ひび割れ	—	281.68	1.57	台形	8.37	5.33



(a)　$H \geq a\eta_{max}$の場合　　(b)　$H < a\eta_{max}$の場合

図6．7　最大浸水深さ η_{max} と構造物の高さ H，波圧分布 p_x の関係

3）津波外力の評価

構造物に作用する津波の水平波圧は，前述した朝倉ら（2000）によって次式が提案されている．

$$p_x(z) = \rho g(3\eta_{max} - z) \tag{6.11}$$

ここで，p_xは最大浸水深さη_{max}の場合の進行方向の津波の波圧(kN/m^2)，ρは海水の単位体積質量(t/m^3)，zは当該地盤面からの高さ(m)である．

ここでは構造部材の曲げ耐力ならびにせん断耐力と津波による水平波力が等しくなった場合に，前項で対象とした6つの構造部材の損傷が生じたと想定する．そのために式(6.11)を以下のように変形し，構造部材の水平耐力相当の波圧 p_x ならびに当該構造物の立地地点おける最大浸水深さη_{max}により係数 a を逆算する．

$$a = \frac{1}{\eta_{max}}\left(\frac{p_x}{\rho g} + z\right) \tag{6.12}$$

ここで，aは曲げ耐力ならびにせん断耐力相当時における浸水深さと実測された最大浸水深さη_{max}との比である．

表６．４に示した構造部材の曲げ耐力ならびにせん断耐力相当の津波の浸水深さ$\eta' = a\eta_{max}$を式(6.12)ならびに**図６．７**の波圧分布に基づき求める．ただし，ηが構造物の高さHを越える場合は，ηの上限をHとし，**図６．７ (b)**のように台形の波圧分布を仮定する．

以上より，**表６．４**には逆算されたηならびに係数aを示す．また，**図６．８**にはスリランカならびにタイの津波被害データに基づいて中埜（2005）が算出したそれらの結果を示すと共に，**図６．９**には本研究によって得られた結果を示す．

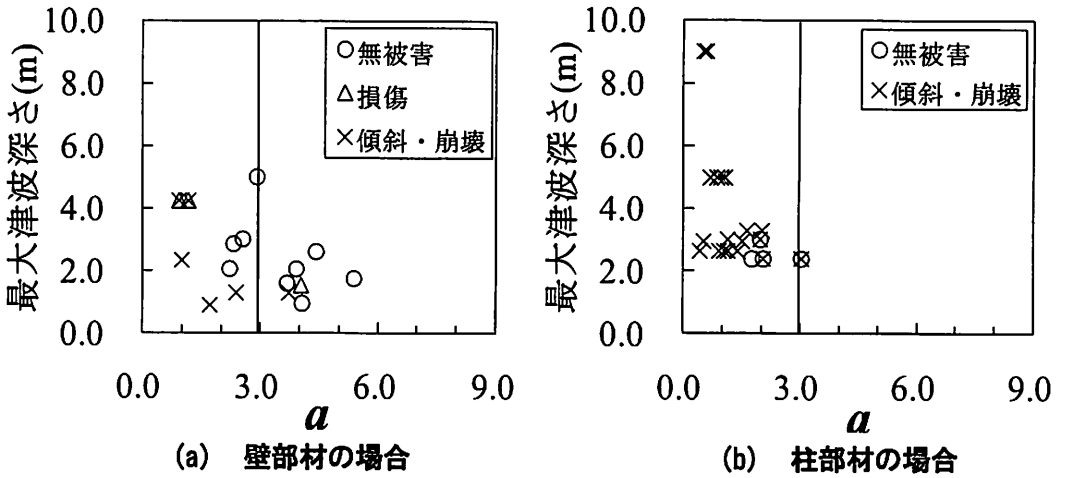


図6．8 スリランカおよびタイの津波被災データに基づいて逆算された係数aと津波の最大浸水深さη_{max}の関係（中埜（2005））

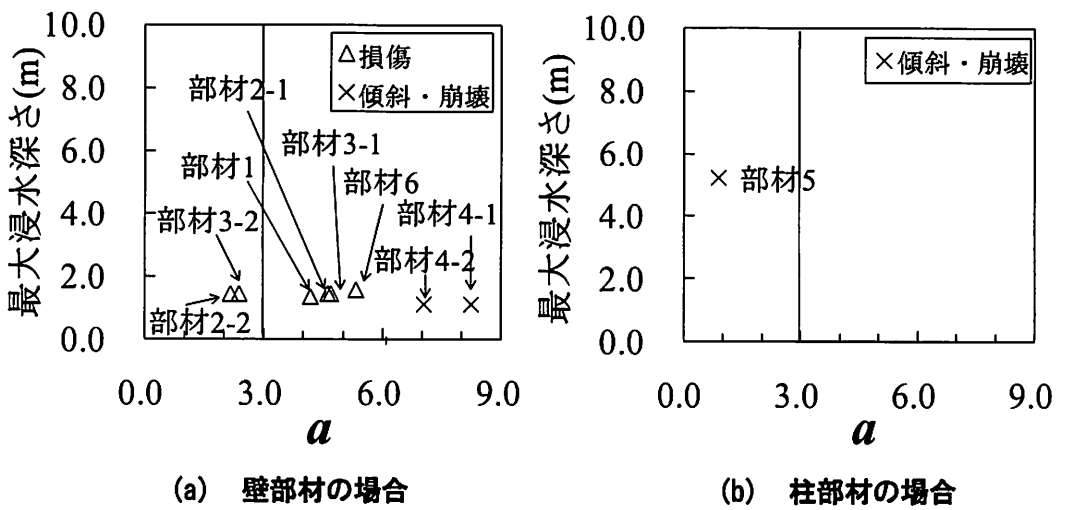


図6．9 ジャワ島南西沖地震津波の津波被害データに基づいて逆算された係数aと津波の最大浸水深さη_{max}の関係

朝倉ら（2000）の算定式におけるa=3は構造部材の被害－無被害を分ける境界値であることを意味している．**図6．8**によれば中埜（2005）によって示された壁部材，柱部材の津波耐力と実被害との関係は，a=3を境界値として分離して説明できている．これに対して**図6．9 (b)**によれば，柱部材に関しては，本研究によって検討されたデータは1データのみであるが，a=0.89を示しており，$a \leq 3$となっているため，柱に崩壊の被害が生じたことと調和的であると言える．

一方，**図6．9 (a)**によれば，壁部材に関しては，部材1，部材2-1，部材3-1の3つの部

材は α =4~5 の領域の耐力を有していると推定されるにも関わらず，ひび割れが生じている．このため，壁部材が α=4~5 の耐力を有する場合には，崩壊レベルの損傷には至らないが，ひび割れ相当の損傷を受ける可能性があると考えられる．しかし，同一の部材でも異なった破壊メカニズムを想定すると，部材2-2と部材3-2ではα=2~2.5の数値を示しており，$\alpha \leq 3$の耐力と見積もられる場合もある．さらに，部材 6 は α=5.33 の大きな耐力を有すると推定されるにも関わらず，ひび割れが生じている．この理由としては，**図6．6 (f)**から明らかなように，対象家屋が海岸方向に部分的に開口部を有するため，津波の流れによる直接的な作用と開口部から流入した津波の海岸線直交方向からの作用の 2 つの津波作用の影響によると考えられる．また，部材 4-1，部材 4-2 に関しては，$\alpha \geq 3$の α=9.05，α=7.38 となる大きな耐力を有すると推定されるが，壁の部材幅が 11.10m と長いため，水流が部材の裏側に迂回せず，柱や他の壁部材よりもその損傷が大きくなったと考えられる．

6．5　津波避難施設が保有すべき強度

以上，本章の検討により，津波避難施設が保有すべき強度に関して得られた知見は以下のとおりである．

- 対象とする施設の構造やそのディテール，施工精度，及び壁材の材料強度，構造諸元のばらつき次第では，1.0m から 2.0m 程度の相対的に高さが低いと考えられている浸水深においても構造的に中程度以上の津波被害が発生する可能性がある．この点は，我が国以外の開発途上国において津波避難施設を設計する際には，特に留意すべき事項である．
- 対象とする施設を構成する壁材及び柱材に作用する津波の水平波圧は，次式の朝倉ら（2000）の算定式（以下，再掲）で概ね照査することができる．

$$p_x(z) = \rho g(3\eta_{max} - z) \tag{6.12}$$

ここで，p_x は最大浸水深さη_{max}の場合の進行方向の津波の波圧(kN/m^2)，ρ は海水の単位体積質量(t/m^3)，z は当該地盤面からの高さ(m)である．

- その際には，壁材及び柱材のいずれに対してもそれらの全ての破壊モードを考慮した上で，最も弱い津波耐力となるモードを取り上げて上記の式(6.12)を適用し，構造部材に対する照査を行う必要がある．
- 併せて，対象とする施設の立地に関して，海岸部を含めた施設周辺の地形や植樹の状況，障害物の有無等を精査し，構造部材に作用する津波の流況（構造部材に対する津波作用の境界条件）を入念に検討する必要がある．

我が国を含め，国内外において津波避難施設の設計及び建設は 2004 年のインド洋大津波を契機として始まったばかりである。国内外における津波避難施設の具体例を**図6．10**

に示す．このような既設の施設に対しては，上記の 4 項目の観点から対津波補強（耐震補強と対応）という位置付けで施設をアップデイトする必要があろう．併せて，新規の施設の設計に当たっては，上記の 4 項目の観点を照査体系の中に改めて組み込んでいく必要がある．



(a) タイ・カオラックの事例　　(b) 徳島の事例

図6．10　津波避難施設の事例

第6章の参考文献・Webサイト

[1] 内閣府・津波避難ビル等に係るガイドライン検討会：津波避難ビル等に係るガイドライン, http://www.bousai.go.jp/oshirase/h17/050610/guideline.pdf (2005)

[2] 朝倉良介, 岩瀬浩二, 池谷毅, 高尾誠, 金戸俊道, 藤井直樹, 大森政則：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第47巻, 911-915 (2000)

[3] USGS : Magnitude 7.7–South of Java,Indonesia,http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2006/usqgaf/ (2006)

[4] (独)港湾空港技術研究所, インドネシア国海洋漁業省, (社)土木学会：2006年ジャワ津波災害に関するインドネシア・日本合同調査, http://www.pari.go.jp/information/news/h18d/3/tunami_cyukannhokoku.pdf (2006)

[5] 首藤伸夫：津波強度と被害, 津波工学研究報告, 第9号, 101-118 (1992)

[6] 松冨英夫, 首藤伸夫：津波の浸水深, 流速と家屋被害, 海岸工学論文集, 第41巻, 246-250 (1994)

[7] 中埜良昭(2005) : 2004年12月26日　スマトラ島沖地震による津波被害を受けた構造物の調査報告 Ver.2.2, http://sismo.iis.u-tokyo.ac.jp/Research.files/topic4.files/topic4-007.files/T4-7-1.pdf (2005).

[8] 中埜良昭, 朴珍和：構造耐力との比較に基づく2004年スマトラ島沖地震津波による津波荷重の評価(その1) 調査方針および調査概要, 日本建築学会学術講演梗概集(近畿), 723-724 (2005)

[9] 中埜良昭, 朴珍和：構造耐力との比較に基づく2004年スマトラ島沖地震津波による津波荷重の評価(その2) 津波荷重と構造耐力の比較検討, 日本建築学会学術講演梗概集(近畿), 725-726 (2005)

[10] ジャワ島南西沖地震・津波災害現地調査団：インドネシアジャワ島南西沖地震・津波 (速報), 土木学会誌, Vol.91, No.10, 54-55 (2006)

[11] 日本建築学会：補強コンクリートブロック造設計基準・同解説 (1997)

[12] 真田靖士, 中村友紀子, 山内成人, 崔琥, 中埜良昭：枠組組積造の水平力抵抗機構から推察される無補強組積造建築の高耐震化技術, 日本建築学会構造系論文集, No.605, 159-166 (2006)

第７章　津波に対する住民の意識および避難行動の意向に関する空間的考察

７．１　津波に対する住民の意識と避難行動

１）研究の背景

わが国は地震が頻繁に発生する島国であり，海に近い平野部に多くの人が居住することもあって，過去幾度となく大きな津波被害を受けてきた．わが国で今後発生すると予想される東海地震や東南海・南海地震などでは津波による大きな被害が懸念されているほか，海外で発生した地震に伴う津波によっても被害が生じることがあり，津波防災対策は重要な課題となっている．津波発生時の人的被害への影響は，人々の避難行動に依存するところが大きい．そのため，人間の心理や行動特性を踏まえたソフト面での対策が不可欠である．

わが国における津波防災対策の最近の動向をみると，まず，自治体による津波ハザードマップの作成・公開が挙げられる．国（内閣府など）は平成16年3月，「津波・高潮ハザードマップマニュアル[1]」を配布し，防災担当者等を対象とした説明会を実施するなど，作成支援を行なっている．また，周囲に高台等がない地域で堅固な中・高層建物を一時的な避難場所として利用する津波避難ビルの要件，運営方法等を整理した「津波避難ビル等に係るガイドライン[2]」を作成し，自治体による整備・指定を推進している．さらに，平成16年12月に発生し約23万人の死者･行方不明者が生じたインド洋大津波[3]を契機として，現状の対策についての総点検と再検討が行われた．そして，国土交通省の津波対策検討委員会は平成17年3月，今後の基本方針として，従来のハード整備中心から，事前から事後に渡ってハード整備およびソフト対策をあわせて展開し，被害の最小化を目指す方針に転換するよう提言した[4]．こうした流れの中で，沿岸自治体は，それぞれの地域特性を考慮して，地域防災計画等に基づき総合的な対策を立てることが求められている．

沿岸域で発生する津波災害は，影響を及ぼす範囲がある程度予想できるという特徴がある．そのため，人々の津波に対する意識は，地形などの空間的要素と密接な関係をもっていると考えられる．さらに，実際に津波が発生した際に人々がとる行動は，紛れもなく広がりをもった空間上で展開されるものである．そこで，本研究では，津波に対する意識と避難行動の意向について，住民の居住地や避難経路に焦点を当て，分析していく．

2）津波に対する意識と避難行動に関する既往研究

わが国において，津波に対する人間の心理や行動が着目されたのは1983年の日本海中部地震以降[5]であり，実際の津波に関しての事例報告は多くはないが，津波時における住民の避難行動を検証したものとして大友ら[6]，宮野ら[7]による研究がある．また，津波襲来が懸念された状況における住民行動とその背景を分析したものとして，片田ら[8]の研究がある．河田ら[9]は，津波常襲地域を対象として，平常時の防災意識の現状や問題点を指摘している．また，鈴木ら[10]はシミュレーションへの応用を目的とし，避難行動のモデル化を行っている．しかし，事後的な調査だけでは，平常時における住民の意識と避難行動の関係を分析することはできない．また，事前の調査は経路選択や意思決定に特化した研究がほとんどで，ある地域全域を対象として住民の津波に対する意識や避難行動の意向を合わせて調査し，分析している研究は少ない．さらに，空間的な要素に着目した研究は見当たらない．

3）研究の目的

そこで，本研究では津波の危険性の高い沿岸地域の住民に対して，津波に対する意識や避難行動の意向を尋ねるアンケートを実施し，その結果を主に空間的な観点から考察する．

本研究には「平常時における津波防災全般に対する意識」と「津波発生時における避難行動の意向」という二つの柱がある．実際に津波が発生した場合，もっとも重要なのは迅速な避難であることは明らかであるが，そのためには人々が日頃から高い意識を有している必要があると考えられる．一方で，高い意識を有していても適切な行動に結びつかない可能性もある．従って，本研究ではこれら両方を考察することによって，住民の意識構造の特徴を把握するとともに，今後の防災行政の一助となる成果を得ることを目的とする．

7．2　研究の方法

本研究では，平成20年にハザードマップが作成された千葉県夷隅郡御宿町を対象地とし，以下のように進めていく．

まず御宿町の地域特性を把握し，次にそれを踏まえて沿岸住民を対象とするアンケート調査を実施し，住民意識の概要を把握する．さらにアンケートを基に，住民の津波防災に対する意識，および避難行動の意向について，居住地の浸水予想との関連性や地形条件，避難経路の方向や長さ等の空間的な側面に着目して考察を行なう．

1）対象地域の概要

御宿町は房総半島の中央東端に位置する人口約8,000人，面積約25km2の町で，基幹産業は漁業と観光である[11]．南に太平洋，東・北・西の三方を丘陵に囲まれた空間構成が特徴で，湾（網代湾）に面していることから波高が高まりやすく，中心部を川（清水川）が

流れているため，津波が遡上しやすい地形条件を持っている．対象地域の空間構成および浸水予想図を**図7．1**に示す．過去，延宝5年（1677年）の地震時には6m，元禄16年（1703年）の地震時には8mの津波に襲われたと推定されている．当時の詳しい様子は定かではないが，延宝時には倒家170棟，溺死53人，元禄時には流失258棟，死者34人と大きな被害が出たとの記録がある[12]．

町では元禄地震時と同等の高さ8mの津波が再来することを想定して防災行政を行なっており，平成20年9月に津波ハザードマップ[13]が全世帯に配布された．この素案は平成18年から19年にかけて，千葉県との共催による住民参加型のワークショップで作成された．配布されたマップは，県の行なった延宝・元禄の津波シミュレーションによる浸水予測図（深さにより7段階に分類）をベースに，避難に必要な情報や防災に関する啓発情報が掲載されている．このうち，避難に必要な情報は，避難場所や公共施設の位置，避難の方向，幹線道路，橋梁，急な坂や狭い道等が色分けされて表示されている．また，啓発情報は，地震や津波に関して知っておくべき事項や非常持出品リスト等が掲載されている．

町では，災害時の避難場所として13ヶ所（避難場所10ヶ所，一時避難場所3ヶ所）を指定している（**図7．1**[注1)]）．一時避難場所は，津波発生時に避難場所まで逃げられない場合に一時的に避難するための高台上の空地である．なお，避難場所のうち2ヶ所は浸水予想区域内に存在するため，津波時には別の場所に避難するよう広報している．各避難場所の周辺には，避難場所の方向と距離を示す標柱が立てられている．

緊急時の情報伝達手段としては防災行政無線が整備されている他，補助的に戸別受信機を設置している．また，消防署や消防団，警察も通じて情報を伝達することとなっている．その他，阪神・淡路大震災をきっかけに，災害被害を最小限に抑えるために自主防災会が組織された．平成18年までに町内の全地区で発足している．

2）アンケート調査の概要

本研究のベースとなる「津波防災に関するアンケート調査」の概要を示す． アンケートの質問内容は大きく以下の三項目に分類される．

a．津波防災意識に関する設問

津波に対する自宅の浸水リスク認知，ハザードマップへの接触度，地域の防災活動（自主防災会，町の防災訓練）への関心および参加状況，家庭での防災対策（津波時にとるべき行動についての話し合い，避難場所や避難経路の確認，家具の転倒防止，非常持出品の準備）の状況について尋ねた．

b．津波発生時における行動の意向に関する設問

以下のシナリオ[注2)]のもとで，地震発生後から避難する場所[注3)]に到着するまでの行動を時間軸に沿って回答していただいた．

正午に在宅している状況で，房総半島沖で地震が発生し，揺れを感じた．およそ 3 分後に津波警報が発令された．それによると，町への津波到達予想時刻は 12 時 15 分頃，予想される津波の高さは8m である．

地震発生から津波警報発令までの時間を約 3 分としたのは，現在の気象庁の地震・津波情報の発表体制 [14]による．予想津波高および津波到達までの時間は元禄地震津波時の推定値を基に設定している．行動として尋ねた項目は避難意思の有無および意思決定を行なうタイミング，避難する場所・経路，避難手段，同行者である．このうち，避難する場所・経路については，対象地区全体の地図（国土地理院発行の 1/25,000 地形図を基にした）上に丸と矢印で記入していただいた．

c．個人属性・その他

居住地区，性別，年齢，居住年数，および家族人数，避難困難者の有無を尋ねた．また，自由記述欄を設け，津波対策への意見や要望を記入していただいた．

配布・回収結果を**表7．1**に示す．調査票は，各家庭の代表者一名に回答していただくこととし，町内の津波浸水予想区域全体を含む 6 地区の全世帯に 2,285 票を配布し，564 票を回収した（回収率 24.7%）．

7．3　単純集計結果

はじめに，回答者の属性について把握する．男女比はほぼ半々であったが，60 歳以上の回答者が約 7 割を占めていた[注4)]．地図記述部分については，**表7．2**のとおり扱った．地図からおおよその居住地が分かる回答は 508 件あり，ハザードマップと照合した結果，浸水予想区域内の回答者と浸水予想区域外の回答者の数はほぼ同数であった．

次に，津波防災意識に関する各設問の結果であるが，ハザードマップについては，程度の差はあるものの，9 割近くが目を通していた（**図7．2**）．自宅が浸水するリスクについては約 6 割が危険側に認知していた（**図7．3**）．元禄地震津波を知っている人は 5 割強にとどまった（**図7．4**）．地域の防災活動に対しては約 6 割が関心を示したが（**図7．5**），一方で自主防災会や町の防災訓練に参加したことがある人は 4 割程度だった（**図7．6**）．家具の転倒防止，非常持出品の準備はいずれも必要と感じてはいるが行なっていない人が 7 割近かった（**図7．7**）．

津波時の行動の意向について，今回想定した状況ではほとんどの人が避難する意思は持っていた．しかし，意思決定をおこなうタイミングについては，様々であった．「津波警報

が発令されてすぐ」と答えた人がほぼ半数に達し，続いて「避難の呼びかけがあってから」が多かった．「揺れを感じてすぐ」と答えたのはわずか5%にとどまった（**図7．8**）．避難経路長の平均は約590mで，「250～500m」がもっとも多かった（**図7．9**）．避難手段としては「徒歩」が8割であった．「自動車」との回答も1割以上あった（**図7．10**）．避難同行者は「家族全員で」が最も多く，次いで「近所の人たちと」となっていた．「近所のお年寄りや体の不自由な人と」という回答も2割弱存在していた（**図7．11**）．

7．4　津波防災に対する意識について

ここでは，アンケートにより得られた住民の津波防災に対する意識について，主に空間的な観点から考察を行なう．

1）地区ごとの特性

前述したように，対象地域は行政区界として6つの地区に分かれている．地区別の浸水リスクの認知状況を**図7．12**に示す．回答者の属性は岩和田でやや高齢の回答者が少なくなっているものの，大きな違いはない．「非常に危険」と「どちらかというと危険」を合わせて「危険側」と呼ぶことにすると，海に面していない久保において，危険側に認知している住民が少ないのが目立つ．一方，須賀・浜など，多くが浸水予想区域に含まれる地区では危険側に認知している住民が多い．居住地が浸水予想区域に含まれる住民に限定しても，地区間で同じような差異が見られた．

2）予想される浸水程度との関係

1）において，浸水リスク認知に居住地が影響することが示唆されたため，津波防災に対する意識全般について，ハザードマップに示された予想される浸水程度との関連から詳しく見ていくことにする。ここでは回答者を居住地情報とハザードマップとを重ね合わせ，3つの群に分類した．

まず，自宅が浸水するリスクの認知状況について，予想される浸水の程度別に把握した結果を**図7．13**に示す[注5)]．危険側に認知している住民の比率を見ると，2m以上浸水する危険のある群では浸水予想区域外の群より4割以上高くなっているなど，予想される浸水程度に応じて分布していることが見て取れる．特に「非常に危険」と回答した人の割合についてはそれが顕著である．次に，地域の防災活動に対する関心（**図7．14**）や津波時にとるべき行動についての話し合い（**図7．15**）についても，浸水予想区域内住民が相対的に高い関心・実施状況を有していることが分かる．一方，ハザードマップへの接触状況（**図7．16**）や過去の津波の知識（**図7．17**），町の防災訓練への参加，家具の転倒防止については，いずれも予想される浸水程度による違いが希薄であった．

3）地形条件との関係注[6)]

2）において，津波防災意識に関する指標の中で，浸水リスク認知がもっとも空間的要素との関連性が高いものと考えられた．そのため，居住地の海との関係や高さといった地形条件が住民の浸水リスク認知にどう影響しているのかを考察する．

まず，海岸からの距離ごとに集計した結果が**図7．18**である．危険側に認知する割合は，海岸から遠ざかるにつれて減少していくことが確認できる．「非常に危険」と答えた人については特にこれが顕著である．次に，標高ごとに集計した結果を**図7．19**に示す．海抜5m以上の住民は，5m未満の住民よりも，危険側に認知している率が3割以上低いことが分かる．さらに，回答者の居住地を海岸からの距離と標高の二次元座標に分類し，危険側認知率を比較すると，**図7．20**のようになった．海岸から最も近い群に属していても，標高が5m以上になると安全側に考えている人が4割以上いることが分かる．浸水予想区域内の回答者に限っても，ほぼ同じ傾向が見られた（**図7．21**）．

4）定量的分析

浸水リスク認知について，空間要因との間でカイ二乗検定を行ない，統計的な関連性の有無を調査した．また，合わせて他の防災意識項目，個人属性との間でもカイ二乗検定を行なった．検定結果を**表7．3**に示す．予想される浸水程度，海岸からの距離，標高との間にはいずれも強い有意性が見られた．防災活動への関心や話し合い，避難場所・経路の確認などの防災意識項目との間にも，概ね関連性がある結果となった．一方，性別，年齢，家族人数，居住年数とリスク認知の間には，いずれも統計的な有意性は見られなかった．

津波に対する自宅の浸水リスク認知を外的基準，カイ二乗検定で1%有意となった項目を説明変数とし，数量化理論Ⅱ類により浸水リスク認知への寄与の度合いを評価した．ただし，多重共線性が認められたため，予想浸水程度と避難場所・経路の確認の2つは説明変数から除外した．また，度数の小さいカテゴリーは，隣接するカテゴリーと統合した．解析結果を**表7．4**に示す．外的基準のカテゴリーが3つの場合，解は2つ求められるが，第2の解は相関比が小さかった（0.0558）ため無視した．用いた変数で外的基準をどの程度説明し得たかを示す相関比は0.328，判別的中率は0.582であり，精度としては悪くはない程度の結果を得た．レンジ，偏相関係数とも1位となったのは海岸からの距離で，続いて標高であり，地形条件を規定する要因の影響が大きいことが示された．カテゴリースコアの値は正の値をとるほど安全側に，負の値をとるほど危険側に認知する傾向を示しているが，特に標高が5mを越えると安全と認知しやすいことが分かる．一方，意識に関連する項目では，防災活動への関心がもっとも強く影響している結果となった．

７．５　津波発生時における避難行動の意向について

ここでは，アンケートにより得られた，津波発生時における避難行動の意向について，主に空間的な観点から考察を行なう．

１）避難に関する意思決定

避難意思決定のタイミングについて，4 章と同様に，予想される浸水程度および地形条件との関連性を把握した．まず，予想される浸水程度別の結果を**図７．２２**に示す．浸水予想区域外の住民に意思決定が遅くなる傾向は見られるものの，浸水リスク認知（**図７．１３**）のような明確な差異は見られない．

次に，海岸からの距離および標高別の結果を**図７．２３**に示す．津波警報発令直後まで（「揺れを感じてすぐ」と「津波警報が発令されてすぐ」）に避難意思決定を行なう住民の比率は，もっとも海に近い群，標高の低い群でそれぞれ高くはなっているものの，他の群とは最大 1 割程度しか差がない．これは浸水リスク認知の結果（**図７．２０**）とは対照的である．今回はあくまでも仮想状況下での住民の意向ではあるが，居住地が相対的にリスクの高い住民でも概して避難の意思決定が早くはないことが明らかとなった．しかも，実際に避難を開始できるまでには意思決定後，さらに準備等の時間が必要であるから，逃げ遅れ等による被害発生が懸念される結果であり，現状の住民意識には課題があると言える．

２）避難行動

津波から逃れるために避難する場所は，**図７．２４**のようになっていた．有効回答の 57%が町指定の避難場所を，43%が指定以外の場所を挙げていた．指定避難場所では収容人数の多い学校を目指す人が多く，指定以外の場所では神社等の高台が多く挙げられていた．浸水予想区域内の避難場所[注7)]を目指す人も約 1 割いることが分かり，更なる周知が必要であると言える．避難すると回答した住民について，避難経路の長さを計測したところ，**図７．２５**に示すように地区ごとに大きな違いが確認された．対象地域の中央寄りに位置する新町，須賀で長く，背後に山が迫っている浜などでは短くなっている．今回与えた想定のように，津波来襲までの時間が短い場合，特に中心部の住民が逃げ切れないことが懸念される．

また，避難経路の中で，海に近づく・川を渡る・浸水予想区域外から区域内に入る等，危険と考えられる回答がそれぞれ 1 割以上見受けられた（**表７．５**）．このうち，浸水予想区域外から区域内に入る経路を選択した人はそれ以外の人に比べハザードマップをよく見ておらず，自宅の浸水リスクを安全側に認知している傾向が見られた．一方，海に近づく経路や川を越える経路の有無とハザードマップへの接触度，浸水リスク認知との間には関連が見られなかった．他方，これらの経路を選択した回答者の 8 割前後は指定避難場所を

目指しており（**表7．5**），これらの経路を選択していない回答者に比べて高くなっていた．町で指定された場所へ避難するのが安全だと思った結果，逆にリスクが増しかねない行動をとっていると考えられる．

3）定量的分析

避難意思決定のタイミングについて，空間要因，防災意識項目，個人属性との間でカイ二乗検定を行ない，統計的に関連性の有無を調査した．検定結果を**表7．6**に示す．予想される浸水程度との間では5%有意となったものの，海岸からの距離や標高との関連性は希薄であった．性別，年齢，居住年数と意思決定の間でも，いずれも統計的な有意性は見られなかった．家族人数についてはばらつきが大きかったために1%有意となったが，明確な関係は見出せなかった．一方，防災意識とこれらの間には，概ね関連性がある結果となった．

7．6　まとめ

実際に津波が発生した場合，もっとも重要なのは迅速な避難であることは明らかであるが，そのためには人々が日頃から高い意識を有している必要があると考えられる．一方で，高い意識を有していても適切な行動に結びつかない可能性もある．そこで本研究では，「平常時における津波防災全般に対する意識」と「津波発生時における避難行動の意向」という2つの視点から，住民の意識構造の特徴を把握するとともに，今後の防災行政の一助となる成果を得ることを目的として実施した．

研究は，平成20年にハザードマップが作成された千葉県夷隅郡御宿町を対象地とし，次のように実施した．まず御宿町の地域特性を把握し，次にそれを踏まえて沿岸住民を対象とするアンケート調査を実施し，住民意識の概要を把握する．さらにアンケートを基に，住民の津波防災に対する意識，および避難行動の意向について，居住地の浸水予想との関連性や地形条件，避難経路の方向や長さ等の空間的な側面に着目して考察を行なう．その結果，得られた主な成果は以下の通りである．

① 予想浸水程度別に把握した結果，津波に対する浸水リスクについては，予想される浸水程度に応じて段階的に認知していることが顕著に見られた．一方，津波時に避難の意思決定を行うタイミングは，予想される浸水程度との関連が希薄であった．

② 地形条件による違いを把握した結果，居住地の海岸からの距離や標高は，浸水リスク認知に強い影響を及ぼすことが示された．一方，これらの要素と意思決定のタイミングとの関連は認められなかった．意思決定のタイミングについては，津波警報や避難の呼びかけを待つ考えの人が多く，逃げ遅れが懸念される．

③ 回答された避難経路を分析した結果，避難に際して，危険が増しかねない行動をとることを考えている住民がいることが明らかとなった．これらの行動は，指定された避難場所を目指す住民に多く発生していた．

④ 個人属性との関連性についても把握したが，今回扱った個人属性が津波に対する意識や行動の意向に直接及ぼす影響は認められなかった．一方で，日常から防災に関心の高い住民は津波に対して強い危機意識をもっていた．

本研究を踏まえた提言として，一刻も早く浸水の危険性がある場所から逃れるという大原則を住民に徹底する防災教育の推進や避難場所指定の再検討が挙げられる．また住民の居住地による避難意向の違いはシナリオ型の被害想定に反映させることができよう．今後は回答された避難行動の意向について，建物や道路網などを考慮した詳細な分析を行なうとともに，実態に即したシミュレーションを構築してリスクコミュニケーションのツールとしての利用および津波時の被害想定への活用等の発展をさせていきたい．

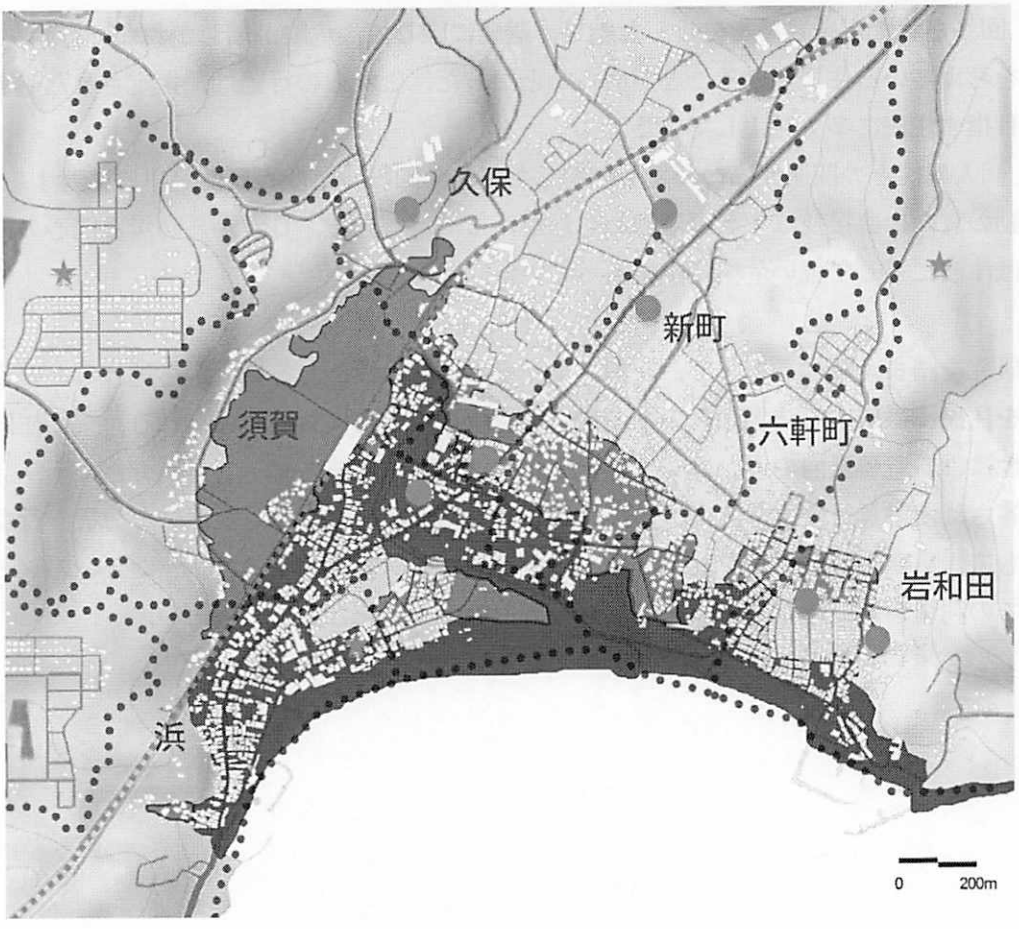


図７．１　対象地域の空間構成と避難場所の分布

表７．１　調査概要

調査対象地域	御宿町内の津波浸水予想区域及びその周辺の6地区（浜，須賀，久保，新町，六軒町，岩和田）
対象者	対象地区内の全世帯
調査票の配布	配布日　：2008年12月10日～
	配布方法：広報誌と一緒に配布
	配布数　：2,285票
調査票の回収	回収期間：2008年12月10日～2009年1月31日
	回収方法：郵送回収
	回収数　：564票
	回収率　：24.7%

表７．２　地図記述部分の集計規則

集計項目		内容
居住場所	予想される浸水程度	ハザードマップを基に，「2m以上浸水」，「2m未満浸水」，「浸水域外」に分類
	海岸からの距離	海岸線からおよそ「250m未満」，「250m以上500m未満」，「500m以上」に分類
	標高	海抜「5m未満」，「5m以上10m未満」，「10m以上」に分類
避難する場所	避難する場所の種別	町指定の場所か，それ以外の場所か
	避難する場所名	
避難経路	経路長	地図上における矢印の長さを5mm単位で計測
	海に近づく経路の有無	経路中の各点から海岸線までの直線距離が，居住場所から海岸線までの直線距離よりも短い箇所がある件数をカウント
	川を渡る経路の有無	清水川を渡る件数をカウント
	浸水予想区域内に入る経路	浸水予想区域外に居住している回答者が，区域内に入る件数をカウント

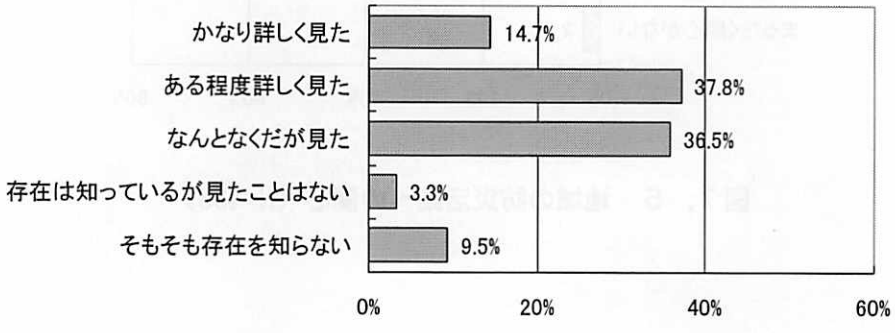


図７．２　ハザードマップへの接触度（N=555）

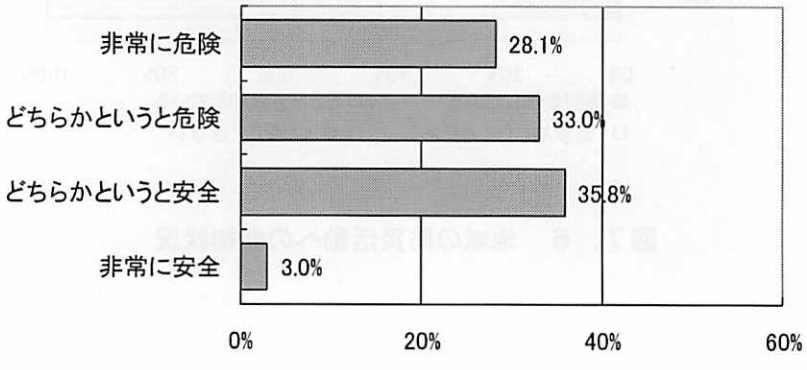


図７．３　自宅の浸水リスク認知（N=558）

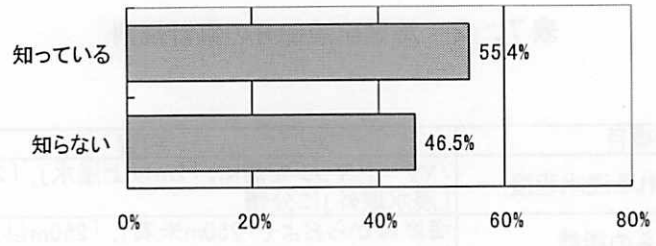


図７．４　元禄地震津波の知識（N=561）

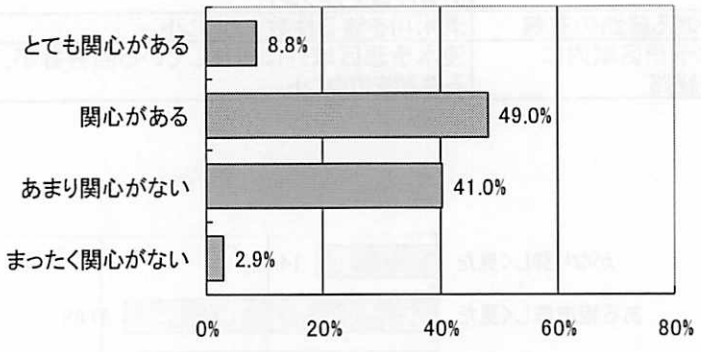


図７．５　地域の防災活動への関心（N=488）

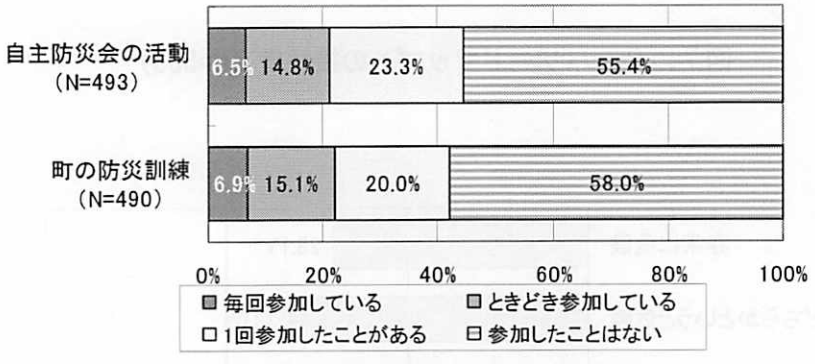


図７．６　地域の防災活動への参加状況

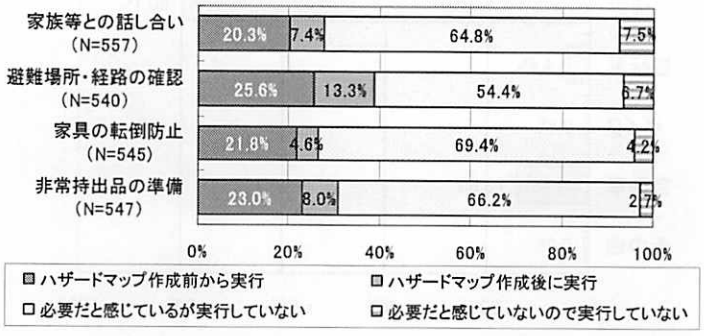


図7．7　家庭での防災対策の状況

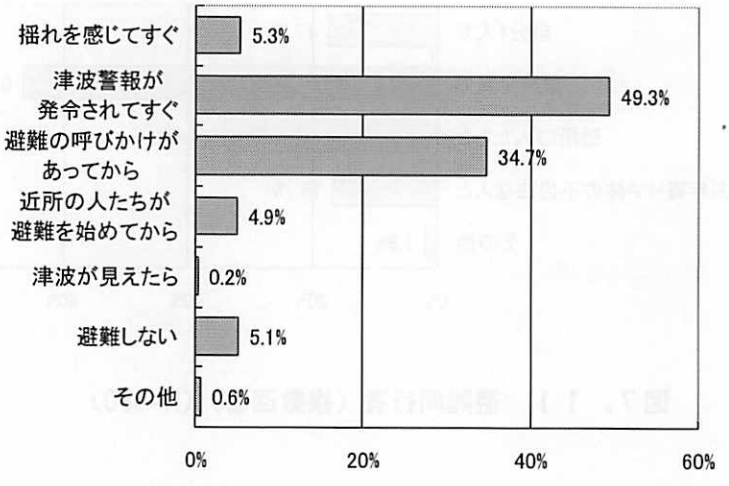


図7．8　避難意思決定のタイミング（N=493）

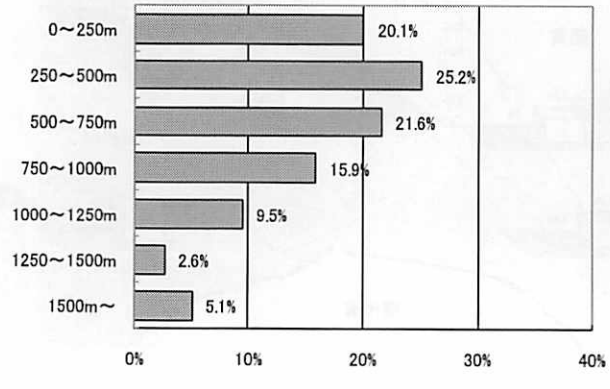


図7．9　避難経路長（N=453）

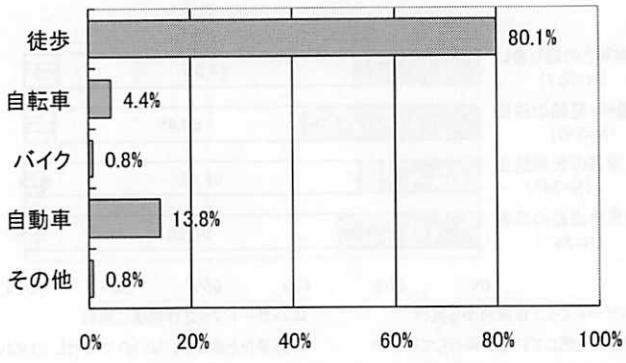


図７．１０　避難手段（N=478）

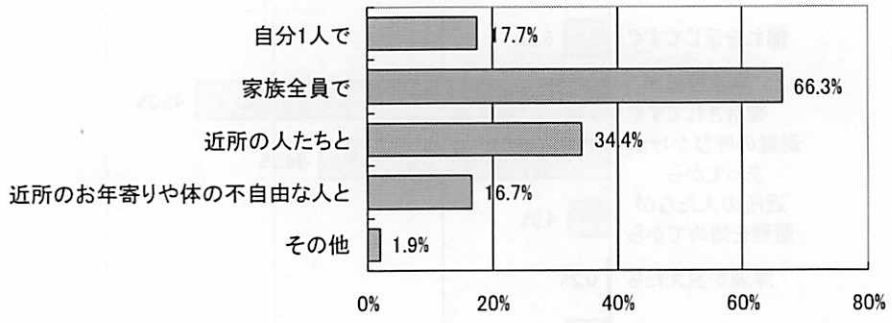


図７．１１　避難同行者（複数回答）（N=480）

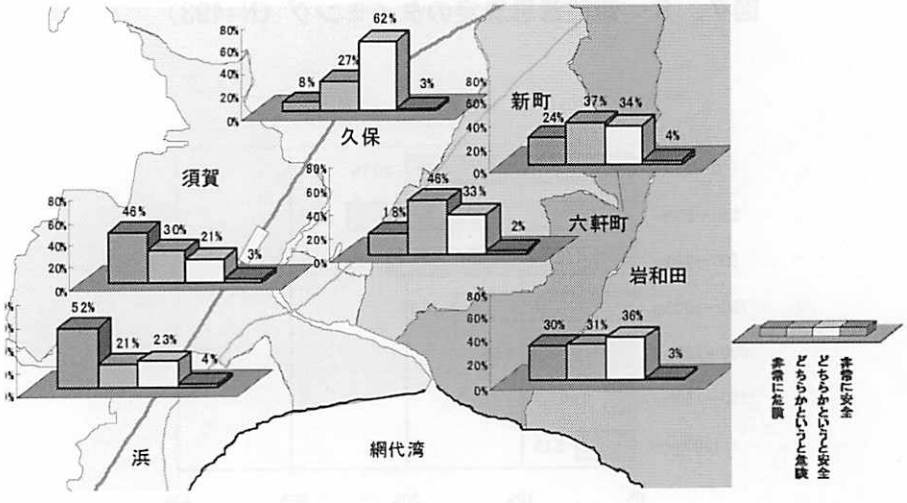


図７．１２　地区別の浸水リスク認知状況（N=556）

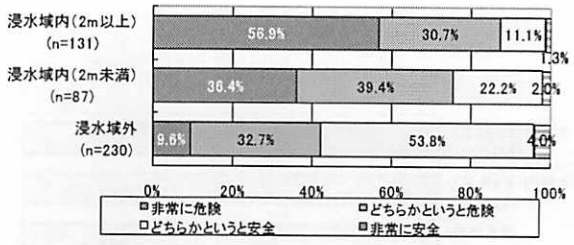


図７．１３　予想浸水程度別にみた浸水リスク認知

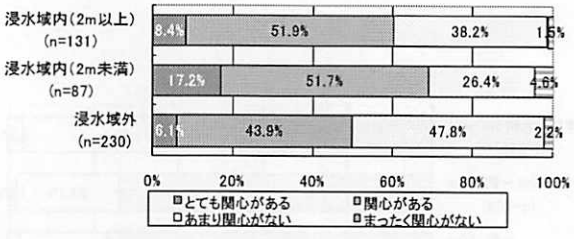


図７．１４　予想浸水程度別にみた地域の防災活動に対する関心

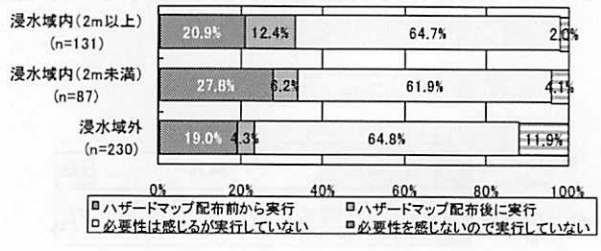


図７．１５　予想浸水程度別にみた津波時にとるべき行動についての話し合い

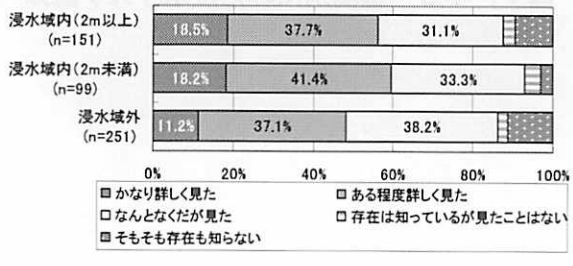


図７．１６　予想浸水程度別にみたハザードマップへの接触度

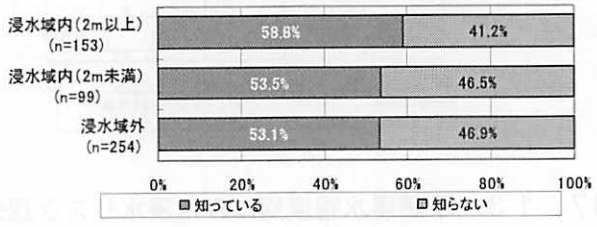


図７．１７　予想浸水程度別にみた元禄地震津波の知識

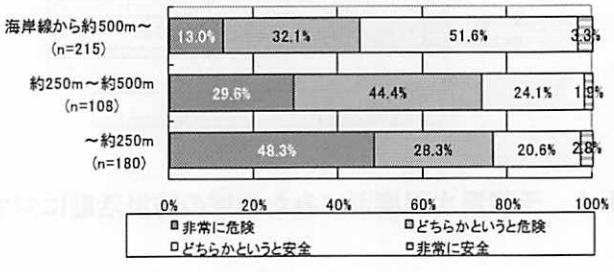


図７．１８　海岸からの距離別にみた浸水リスク認知

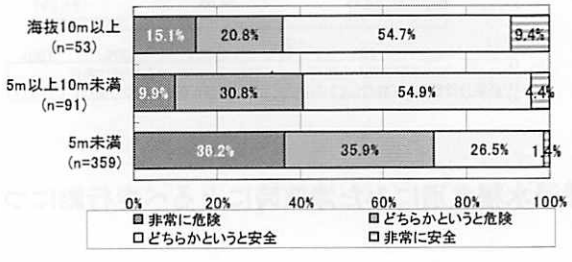


図７．１９　標高別にみた浸水リスク認知

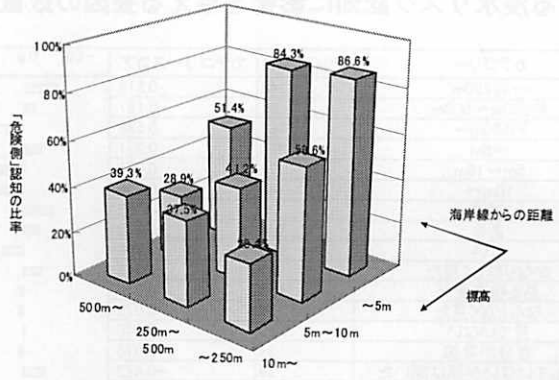


図７．２０　海岸からの距離・標高による「危険側」認知の比率（全体）(N=503)

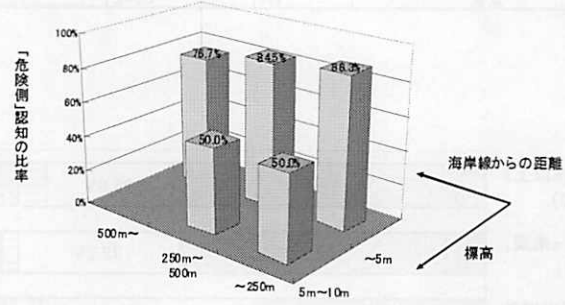


図７．２１　海岸からの距離・標高による「危険側」認知の比率（浸水予想区域内）(N=253)

表７．３　津波に対する浸水リスク認知に影響する要因のカイ二乗検定結果

	説明変数	カイ二乗値	自由度	p値	判定
空間要因	予想される浸水程度	134.353	4	0.0000	**
	海岸からの距離	78.162	4	0.0000	**
	標高	55.293	4	0.0000	**
防災意識	元禄地震津波の知識	1.707	2	0.4259	
	防災活動への関心	46.085	6	0.0000	**
	ハザードマップへの接触度	27.896	8	0.0005	**
	ワークショップへの参加	17.728	4	0.0014	**
	自主防災会への参加	15.652	6	0.0157	*
	防災訓練への参加	11.780	6	0.0670	
	家族等との話し合い	42.748	6	0.0000	**
	避難場所・経路の確認	32.376	6	0.0000	**
	家具の転倒防止	9.850	6	0.1311	
	非常持出品の準備	13.470	6	0.0362	*
個人属性	性別	2.020	2	0.3643	
	年齢	4.286	10	0.9335	
	家族人数	6.953	10	0.7298	
	居住年数	3.153	10	0.9776	

※判定欄について，「＊＊」は 1%有意，「＊」は 5%有意，空白は非有意である．

表７．４　津波に対する浸水リスク認知に影響を与える要因の数量化理論Ⅱ類解析結果

説明変数	カテゴリー	サンプル数	カテゴリースコア	−1.0 0.0 1.0	レンジ	偏相関係数
海岸からの距離	～約250m	148	−0.616		1.203	0.3487
	約250m～500m	91	−0.187			
	約500m～	184	0.588			
標高（海抜）	～5m	300	−0.321		1.129	0.3278
	5m～10m	79	0.771			
	10m～	44	0.808			
防災活動への関心	とてもある	38	−0.552		0.948	0.2387
	ある	195	−0.278			
	ない	190	0.396			
ハザードマップへの接触度	かなり詳しく見た	61	−0.342		0.421	0.0993
	ある程度見た	155	0.070			
	なんとなく見た	157	0.078			
	見ていない	50	−0.046			
ワークショップへの参加	自分が参加	34	0.076		0.498	0.0884
	参加していないが話は聞いた	36	−0.422			
	参加していないし話も聞いていない	353	0.036			
家族等との話し合い	ハザードマップ配布前から実行	90	−0.323		0.902	0.1575
	ハザードマップ配布後に実行	29	0.310			
	必要と感じるが実行せず	272	0.006			
	必要と感じないので実行せず	32	0.579			

外的基準	カテゴリー	サンプル数	軸の重心	−1.0 0.0 1.0	判別的中率	相関比
自宅の浸水リスク認知	非常に危険	120	−0.767		0.582	0.328
	どちらかというと危険	141	−0.085			
	安全	162	0.642			

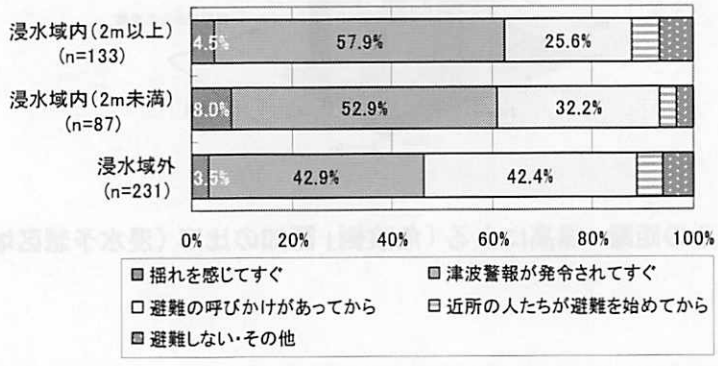


図７．２２　予想浸水程度別にみた意思決定のタイミング

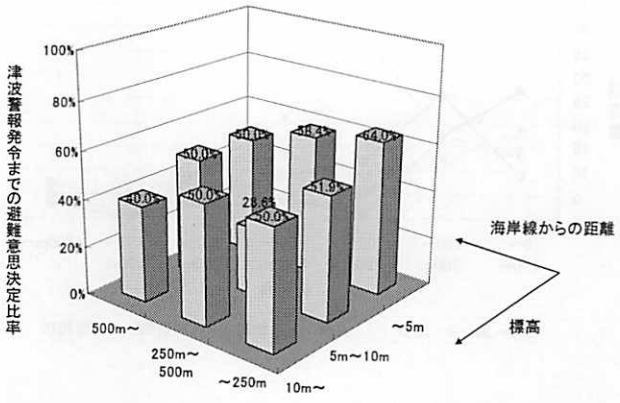


図７．２３　海岸からの距離・標高による津波警報発令までの避難意思決定比率（N=451）

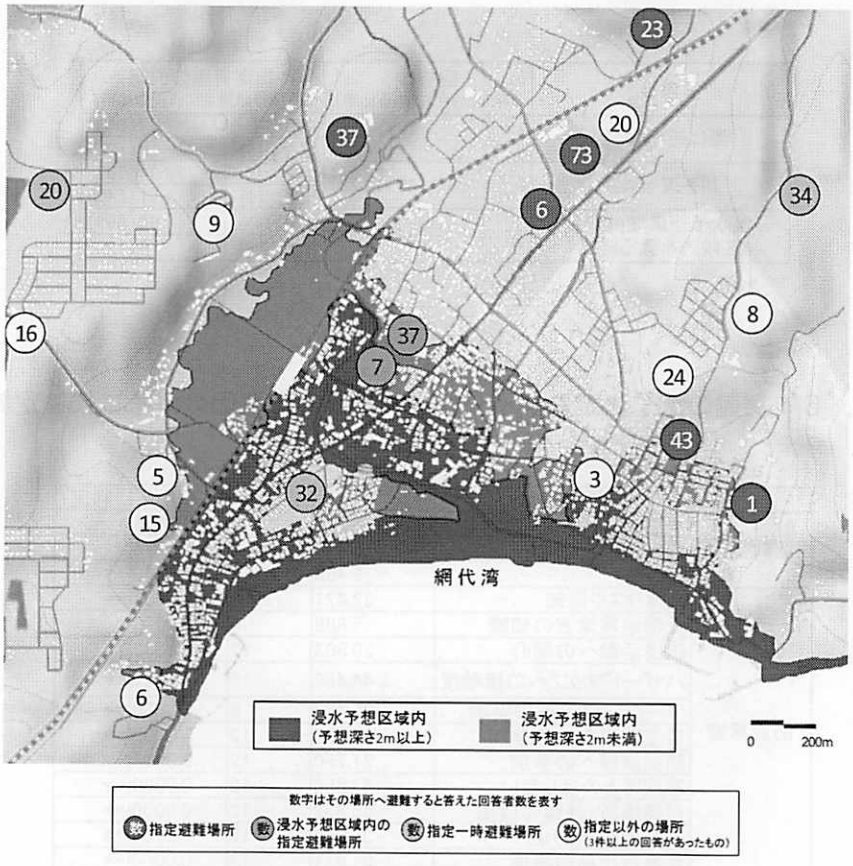


図７．２４　主な場所への避難人数

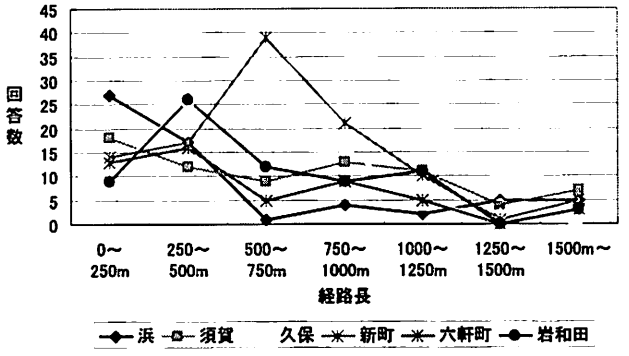


図7．25　地区ごとの避難経路長

表7．5　危険と考えられる避難経路の回答数と避難する場所の指定の有無（N=441）

項目	回答数（有効回答に占める比率）	指定有無の内訳（各項目該当者に占める比率）	
海に近づく経路	64(14.5%)	指定	52(81%)
		指定以外	12(19%)
川を渡る経路	45(10.2%)	指定	34(76%)
		指定以外	11(24%)
浸水予想区域外から区域内へ入る経路	54(12.2%)	指定	48(89%)
		指定以外	6(11%)

表7．6　避難の意思決定のタイミングに影響する要因のカイ二乗検定結果

	説明変数	カイ二乗値	自由度	p値	判定
空間要因	予想される浸水程度	15.770	8	0.0458	*
	海岸からの距離	10.411	8	0.2374	
	標高	9.409	8	0.3090	
防災意識	浸水リスク認知	32.421	8	0.0001	**
	元禄地震津波の知識	5.889	4	0.2076	
	防災活動への関心	20.803	12	0.0533	
	ハザードマップへの接触度	44.469	16	0.0002	**
	ワークショップへの参加	35.428	8	0.0000	**
	自主防災会への参加	34.722	12	0.0005	**
	防災訓練への参加	21.750	12	0.0404	*
	家族等との話し合い	63.656	12	0.0000	**
	避難場所・経路の確認	55.852	12	0.0000	**
	家具の転倒防止	35.263	12	0.0004	**
	非常持出品の準備	51.611	12	0.0000	**
個人属性	性別	3.343	4	0.5022	
	年齢	23.543	20	0.2629	
	家族人数	45.563	20	0.0009	**
	居住年数	29.768	20	0.0737	
その他	避難経路の歩行経験	9.349	12	0.6728	

※判定欄について，「＊＊」は1%有意，「＊」は5%有意，空白は非有意である．

第7章の参考文献・Webサイト

[1] 内閣府，農林水産省，国土交通省：津波・高潮ハザードマップマニュアル，2004.3

[2] 内閣府：津波避難ビル等に係るガイドライン，2005.6

[3] 内閣府編：平成18年版防災白書，2006

[4] 内閣府編：平成20年版防災白書，2008

[5] 木村玲欧：人間の津波認知から明らかになった避難のあり方－1944年東南海地震・被災者体験談をもとにして－，歴史地震，第23号，pp.131-143，2008

[6] 大友諒香，室崎益輝，北後明彦：津波時における人間の行動特性を考慮した避難システムのあり方に関する研究，地域安全学会梗概集，No.14，pp.77-80，2004

[7] 宮野道雄，呂恒倹，岡田成幸，天国邦博，村上ひとみ，望月利男：1993年北海道南西沖地震の奥尻島における世帯別アンケート調査報告　その2　住民の避難行動，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅰ，pp.293-294，1994.9

[8] 片田敏孝，児玉真，桑沢敬行，越村俊一：住民の避難行動にみる津波防災の現状と課題－2003年宮城県沖の地震・気仙沼市民意識調査から－，土木学会論文集，No.789，pp.93-104，2005.5

[9] 河田恵昭，柄谷友香，酒井浩一，矢代晴実，松本逸子：津波常襲地域における住民の防災意識に関するアンケート調査，海岸工学論文集，第46巻，pp.1291-1295，1999

[10] 鈴木介，今村文彦：住民意識・行動を考慮した津波避難シミュレーションモデル，自然災害科学，23(4)，pp.521-538，2005

[11] 御宿町：Data File ONJUKU 資料編，2007.12

[12] 千葉県：元禄地震―九十九里浜大津波の記録―，総務部消防防災課，1975

[13] 御宿町：御宿町津波ハザードマップ，2008.8

[14] 気象庁：津波警報・注意報、津波情報、津波予報について，http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/index_tsunamiinfo.html，(参照2009.4.4)

補注

注1) 本図では，沿岸部のみを掲載している．

注2) 今回は特に津波に特化して住民の意識と行動の意向を調査することを目的とし，震度は特に明示しなかった．しかし，地震と津波は連動しているので，今後の検討課題としたい．

注3) 本稿では，町で指定した避難場所を「避難場所」もしくは「指定避難場所」と表記し，町で指定していないが住民が避難すると回答した場所と区別する．また，両者の総称として「避難する場所」と表記する．

注4) 2007年11月30日時点の住民基本台帳の数値によれば，60歳以上は46.5%であり，今

回の回答者の属性は，町全体の人口構成と比べて高齢者が多い結果となった．これは，各家庭の代表者1名に回答していただいた影響もあると考えられる．

注5) 図中では「浸水予想区域」のことを「浸水域」と略記している．

注6) 津波が河川から遡上することも考えられるが，川の河岸からの距離を考慮しなかったのは，対象地域が扇状地であるため，「海岸からの距離」と「標高」の2つで地形をおよそ表現できると考えたからである．

注7) これらの場所は，津波以外の災害時における避難場所であり，行政では津波時に利用しないよう呼びかけている．

謝辞

本研究を進めるに当たり，調査にご協力頂いた御宿町役場総務課の皆様，ならびにアンケートに回答して下さった御宿町の皆様に心から感謝いたします．

第８章　多目的海洋観測ブイの実現に向けて

ここまでに報告した一連の研究によって，多目的海洋観測ブイを用いた長期的な津波監視システムの実現に向けた見通しが大きく開けたと考えている．

多目的海洋観測ブイの試作機が開発され，小型ブイによる津波モニタリングの可能性が確認された．ブイとその設置にかかる費用も，Tsunami Tax の導入により，カバー可能な範囲に収められる見通しもたった．技術的にも，ブイは，地元漁協によって設置可能であり，沿岸地域産業主導のシステムの維持の目途もたった．

開発されたブイの配置の最適化についても，津波シミュレーションに基づき検討し，効果的な配置により，人的被害軽減効果を期待できることが確認できた．また，近年の津波観測事例を通じて，海山による津波の散乱や遠地津波の観測上問題となる最大波の遅延の問題に着目し，遅延が発生する津波シナリオも特定された．

津波シミュレーションと避難シミュレーションの組み合わせにより，想定される様々な津波シナリオに対して，最適な避難施設の配置決定および避難誘導手法を開発した．スマトラ地震津波被災地の建物被害の調査結果から，避難施設が持つべき耐力も明らかとなった．

津波に対する住民の意識と避難行動の意向を調査した結果，津波に対する浸水リスクについては，予想される浸水程度に応じて段階的に認知していることが顕著に見られる一方，津波時に避難の意思決定を行うタイミングは，予想される浸水程度との関連が希薄である，など，津波避難に関するリスクコミュニケーションにおいて，留意すべき点が明らかとなった．

以上の一連の研究成果により，津波を探知し，警報を出し，住民を避難させるに至るまでの全プロセスを総合的に支援するシステムを長期的に維持するフレームワークの基盤が整ったと考えている．今後必要なのは，具体的にフィールドを決めて，このフレームワークに則った総合的な津波減災システムを導入し，長期に渡る実運用を通じて，知見の蓄積と検証を進めていくことである．ニーズ調査では，沿岸地域は様々な海洋観測ニーズをもっていることが明らかとなった．本研究で確立したフレームワークは，平常時のシステムの利活用まで視野に入れているため，前述した実地検証までの道のりは遠くないであろう．

低頻度巨大災害の典型である津波災害に対して備える為には，備えをどこかの誰かがやってくれている特別な仕事にするのではなく，地域の人々の日常生活の中に織り込んでいくしかない．海が生活に密着している人々が，自分達の手で多目的海洋観測ブイを利用・維持していくことで，地元の海に対する理解をさらに深め，生産性や生活の質を向上させ，いざという時に備えるのが，本研究で確立したフレームワークの考え方である．そのような日の到来に向けて，さらに研究を深めていく決意を新たにしつつ，本報告を終えたい．

東京大学 生産技術研究所
都市基盤安全工学国際研究センター
〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1
http://icus.iis.u-tokyo.ac.jp/
E-mail: icus@iis.u-tokyo.ac.jp

Tel:(+81-3)5452-6472
Fax:(+81-3)5452-6476