

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

第16回 ICUSオープンレクチャ

都市環境向上への地盤工学の取組み

2009年4月3日(金)

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

第 16 回 ICUS オープンレクチャ

都市環境向上への地盤工学の取組み

2009 年 4 月 3 日 (金)

東畑 郁生, 土橋 浩, 今村 聰, 桑野 玲子

ICUS Report No. 42

2009 年 11 月

都市基盤安全工学国際研究センター

Contribution of Geotechnical Engineering to the Urban Infrastructure Environment

3 April, 2009

By

Ikuo Towhata, Hiroshi Dobashi, Satoshi Imamura, Reiko Kuwano

ICUS Repot No. 42, November 2009

第16回 ICUS オープンレクチャ

目次

1. 開会の挨拶（桑野 玲子）	1
2. 「廃棄物地盤の工学的特性とその利用可能性」（東畠 郁生）	3
2.1 はじめに	3
2.2 廃棄物地盤を取り巻く現状	4
2.3 歴史に見る都市の滅びるメカニズムと再生	9
2.4 地盤沈下とその対策	26
2.5 東京湾埋立地の可能性	43
3. 「首都高速中央環状新宿線プロジェクト」 ～都市の環境保全に向けた道路建設の取り組みおよび防災安全への取り組み～（土橋 浩）	47
3.1 はじめに	48
3.2 ネットワーク整備による取り組み	49
3.3 非開削化による環境負荷	56
3.4 換気所及び移行区間の環境対策	63
3.5 トンネル防災安全の取り組み	68
3.5.1 ソフト対策	68
3.5.2 ハード面での対策	76
3.6 最後に	79
4. 「二酸化炭素削減に向けた技術開発の取り組み」 ～CO ₂ 回収貯留大規模シミュレーション～（今村 聰）	81
4.1 はじめに	81
4.2 二酸化炭素の回収・貯留技術について	83
4.3 CO ₂ 地下貯留とメカニズムとシミュレーション	87
4.4 CO ₂ 地下貯留の周辺環境影響シミュレーションについて	99
4.5 その他の取り組み	109
5. 閉会の挨拶（目黒 公郎）	119

付録：プログラム

1. 開会の挨拶

桑野 玲子(ICUS 准教授)

(桑野) 本日は、年度替り目のお忙しい中、お集まりいただきありがとうございます。これより第 16 回 ICUS オープンレクチャーを始めます。私は、本日司会を務めさせていただきます ICUS の桑野と申します。よろしくお願ひいたします。

まず、開会に先立ちまして、ICUS オープンレクチャーの簡単なご紹介をしたいと思います。先ほど来、ICUS、ICUS と申し上げておりますのは、都市基盤安全工学国際研究センター、International Center for Urban Safety Engineering の略称でして、目黒センター長を筆頭に 12 名の研究者とスタッフが、都市基盤の安全、環境、持続可能性をキーワードにそれぞれ研究を進めています。所属する研究者の専門分野はいろいろですが、都市の環境保全という観点で、私たちの生活に密接に関連した分野です。いろいろな分野の専門家のお話を伺って情報交換しまして、一般の方も専門家も一緒に都市について考えましょうというのが、年 2 回のペースで開催しているこのオープンレクチャーの趣旨となっております。

さて、この ICUS オープンレクチャーは今日で 16 回目になりますが、「都市環境向上のための地盤工学の取り組み」というテーマで 3 人の先生方にお話しいただきます。地盤工学という言葉も、なじみのない方もいらっしゃるかと思いますが、名前のとおり、地盤や構造物基礎の工学的特性を明らかにすることが主な目的で、普段、一般の方の目には付きにくいと思うのですが、都市の安全や環境保全のために重要な役割を担っております。

本日は地盤工学の最前線を走っていらっしゃる方々から、都市環境の向上における貢献事例をご紹介いただきます。最初に、東京大学教授の東畑郁生先生から廃棄物地盤、つまりごみの埋立地盤の特性と、その利用可能性についてお話しいただきます。東畑先生は、東京大学土木工学科をご卒業、大学院博士課程を修了された後、引き続き東京大学土木工学科で研究・教育を続けていらっしゃいます。独特の発想・アイデアが服を着て歩いていらっしゃるような非常に個性的な先生で、常に地盤工学のフロンティアを切り開いて、独創的な研究をされております。今日もどのようなユニークなお話が聞けるか大変楽しみです。

その後、休憩を挟みまして、首都高速道路公団の土橋浩先生に、首都高速中央環状線のお話を聞いていただきます。現代の土木技術の結晶ともいえる大きなプロジェクトですが、一方で東京の地下の道路建設ということで、私たちにたいへん身近な話題です。このプロジェクトを実質的に統括されている土橋先生に、環境や安全に配慮するためにいかにご苦労されているかということも含めて、東京の地下で何が起こっているかを聞かせていただきたいと思います。

最後に、大成建設株式会社の今村聰先生に、二酸化炭素削減に向けた技術開発についてご紹介いただきます。今村先生は、地盤環境工学の分野に早くから取り組んでこられたパイオニアで、建設会社のお立場だけでなく、日本の地盤環境工学の代表選手のお 1 人と申

し上げてもいいと思います。二酸化炭素を地下に封じ込めるという地球規模の取り組みについて、スケールの大きなお話を聞かせていただけると思います。

講演会の後で恒例の懇親会も準備しております。本日の講師の先生方にもご都合の付く限りご参加いただけると思いますので、皆さんの情報交換の場としていただければ幸いです。大変貴重な機会ですので、本日の講演会、そして引き続きの懇親会の時間を有効にご活用いただければと思っております。

では、そろそろ最初のご講演に移りたいと思います。では、よろしくお願ひします。



2. 「廃棄物地盤の工学的特性とその利用可能性」

東畑 郁生(東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学科 教授)



(桑野) 最初のご講演に移りたいと思います。東畑先生は、ご専門は地盤工学で、冒頭にもご紹介しましたとおり、独創性を信条としていらっしゃいます。研究業績はご紹介しきれないほどですが、現在、東京大学大学院工学系研究科社会基盤学科の教授をお務めになつていらっしゃいます。では、よろしくお願いします。



図-2.1 タイトル

2.1 はじめに

(東畑) 先日、テレビ番組の収録に行きました。日曜日のゴールデンタイム、夕方 6 時半から 7 時まで 12 チャンネルで、とことん何とかという、いろいろ皆さんよく分からぬことを追求してみようというものです。俳優の高橋英樹さんが司会で、あとは上方系のお笑い芸人の女の子が 3 人ぐらい出て、あれこれやるのです。テーマが埋立地なのです。

埋立地は一体どうなっているのだろうと、普段入れないところも見てきましたということで、前半が羽田空港のD滑走路の現場で、房総半島から土を探っていますといった話です。地元の皆さんにも、ご苦労さまというかご迷惑をお掛けしていますとか、そういう話です。

それから後半が、廃棄物の処分場は一体どうなっているのだと、また取材に行ってきましたと、それを見て私などが何か言うのですが、そういうものは初めてで、最初は連中のしゃべりに圧倒されて、ごちゃごちゃと言っているうちに、羽田滑走路の話が過ぎてしまいました。後半になって、やっとそういうものなのか、台本など気にならないでしゃべりまくっているのが番組の作り方なのだと。そんなことでちょっと調子が出てきまして、実は結構思い切ったことも後半はしゃべったので、カットされている可能性があり、どれぐらい出ているのか分かりませんが、ご興味のある方は一杯飲みながら、日曜日、4月19日の6時半ですので、ご覧ください。

2.2 廃棄物地盤を取り巻く現状

廃棄物地盤の話でございます。趣旨は近年の世相というか、近未来予測で、わが国のインフラストラクチャーで、非常に大きな資産が存在している。今後はこれを一体どううまく使っていくのか。つまり、持続再生やサステイナビリティという話があちこちで出るわけです。それはいいです。9割正しいと思っているのです。でも、1割は危ないのでないかと思うわけです。

つまり、やはり国際的な競争があるわけです。今あるから、今ハッピーだから、あとは何とかこれを引き伸ばしていこうと日本の国だけで思っていても、周辺国は関係ないのです。もっとマーケットを奪おう、より自分たちがリッチに豊かになっていこう、あるいは生き延びようというのが基本的な国際環境ですから、わが国だけが勝手に今のままと言つても、そういうのは知ったことではないのです。今のままと思っているところが落ちていく始まりで、あと20年、30年たって、海外から油や食糧などを買うお金があるのだろうかというものが、非常に私は心配なところでございます。

そういう話も、日曜日に番組のためにちょっとしたのです。けしからんと切られるかもしれません。その一環で、このような話題を準備してまいりました。

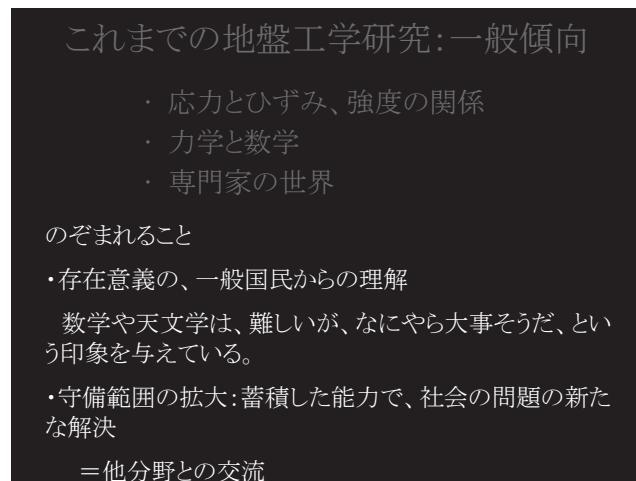


図-2.2 これまでの地盤工学研究：一般傾向

まず、この地盤工学の一般傾向は何だったかと、この20～30年を振り返りますと、応力、ひずみ、強度です。これは昔から支持力や斜面安定、一次元圧縮試験などとかと。それに使われる学問は、力学や数学です。割と専門家の世界で来ましたが、やはりこれは行き詰まりであると思っています。

何をしないといけないかというと、基本的には存在意義を一般国民から認識していただくことなのですが、これが意外と難しいです。難しくて易しくて、易しくて難しいのです。つまり、数学や天文学、インド哲学というのは分からぬのです。国民は理解しません。できませんが、こういう学問は大事そうだという見方があるのです。

反対に、地盤というと、例えば下水工事がものごとを直していますというのはよく分かるのです。分かりやすいのです。でも、何か逆風で、息子がこういう職業をやろうとしたら、親が駄目といったことになるのです。そんな職業を一生懸命やっても、税金の無駄遣いをしているのではないかと、非常にネガティブな見方があります。

ですから、存在意義の理解は簡単ですが、一体どうしていったらいいかというのは、なかなか難しいです。ただ、何となく私が感じていますのは、守備範囲の拡大というのでしょうか。いろいろな能力を発揮して、社会に次々出てくる問題をどんどん解決方法を示していくことが要るのではないかと思うのです。その辺が天文学とは違うところかと思います。そのためには、少し他分野との交流も、あるいは他分野の方たちが取り組んでいらっしゃる問題にも何となく参画したいと思います。



図-2.3 都市の一般廃棄物の問題リサイクル（ルソン島）

一番上に都市の一般廃棄物の問題として、リデュース、リユース、リサイクルとあります。普通はリサイクルがいいのだとなっていました、これも世の中の常識でございます。こういう情景を見て、リサイクルでやっていけるのかというの、甚だ疑問なのです。ここから何が出てくるか。もう無理ではないかと思うのです。それぐらいだったら、リデュース、リユースです。リデュースは、あまりごみを出さないことです。それからリユースは、ぽいぽい物を捨てないで、何でも大事に使いましょうという方法です。本当にそれをやり出すと、今度は GDP を減らしてしまうことがあります、やはり基本的に資源に限りのあるという 21 世紀ですから、リデュース、リユースです。無理やりこういう汚いものをリサイクルしようとしても、そこでまたエネルギーを食ってしまって無駄になることがあります。だから、私はアンチリサイクルで、リデュース・リユース主義です。

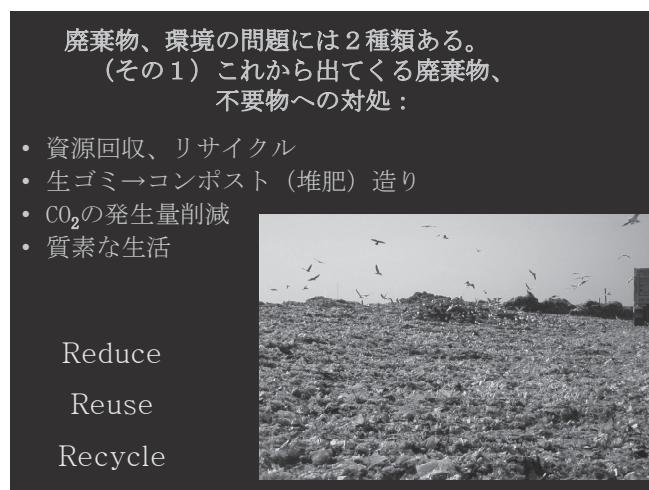


図-2.4 廃棄物、環境の問題（その 1）

これはごみ捨て場です。いろいろなことが呼ばれており、資源回収・リサイクルもできればいいのですが、もちろんそれはコストとの兼ね合いで決まります。生ごみからコンポストを作るのだとおっしゃっている方もおられますが、先日新聞で読んでいましたら、農家の方は「畑はごみ捨て場ではないのだ」と非常に反感も持ついらっしゃいます。つまり、一体何が入ったものか分からぬということです。

それから CO_2 のことも大変重要な問題ですが、実はこういう処分場からは、 CO_2 よりも温室効果の 26 倍高いメタンガスも出ていることもあります、それは言ってはいけないと。どなたに言われたのか覚えていませんが、タブーがあるそうです。ですから、私はあくまで質素な生活を目指したいと思っています。

廃棄物、環境の問題には 2 種類ある。
(その 2) 二十世紀の負の遺産

• 水質汚染	• 生態系の崩壊
• 大気汚染	• 放射能汚染
• 地盤汚染	• 過剰人口
• 景観汚染	• 大量生産・大量消費型ライフスタイル
	• 形而上世界の衰退

負の遺産を後代に残さない；世界の浄化。
しかし、後始末ばかりでは、元気が出ない。ここで負を正に変えられないか？

図-2.5 廃棄物、環境の問題（その 2）

一方、やはり 20 世紀の負の遺産がありまして、いろいろな問題がこのようにあります。水が汚くなってしまったところから始まりまして、大気・地盤汚染、景色もごちゃごちゃ何か変な縦看板や、生態系だ、放射能だ、人間が多すぎるとか、ライフスタイルとか。それから、今どきの学生はどうも学力の低いやつばかりだとかです。形而上世界の衰退で、抽象的なことは全然考える能力はないとか、みんな負の遺産なのです。負の遺産を後の世に残さないというのは、やはりわれわれの責任です。

しかし、こればかり言つてると、後始末ばかりだと、どうも元気が出ません。何かやっているうちに、本当に悪いのは自分たちの親の世代ではないかとか、連中こそたっぷり楽しんでいるのではないかとかありますので、やはり負をプラス（正）に変えられないかということも考えています。

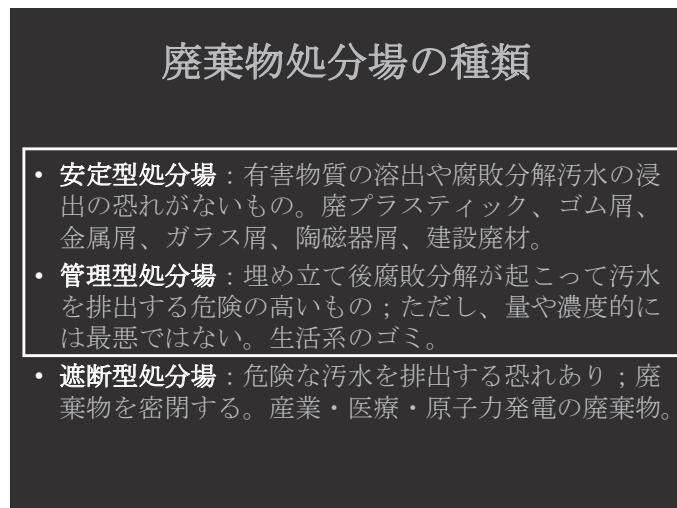


図-2.6 廃棄物処分場の種類

これは多分、今村さんなどが話されるかも知りませんが、ごみ捨て場というのは何種類かあって、安定型処分場というのは、周りを汚す危険のあまりないものを捨てるところです。

管理型は、ちょっと腐るかもしれませんということで、この辺が生ごみなどだと思います。

それからもっと危ないものとして、びっちりと密閉しないといけないものがあります。

今日、私がお話ししたいのは 2 番目です。要するに、皆さま方のご家庭から出てくるごみの処分場のことを頭に置いてお話しします。

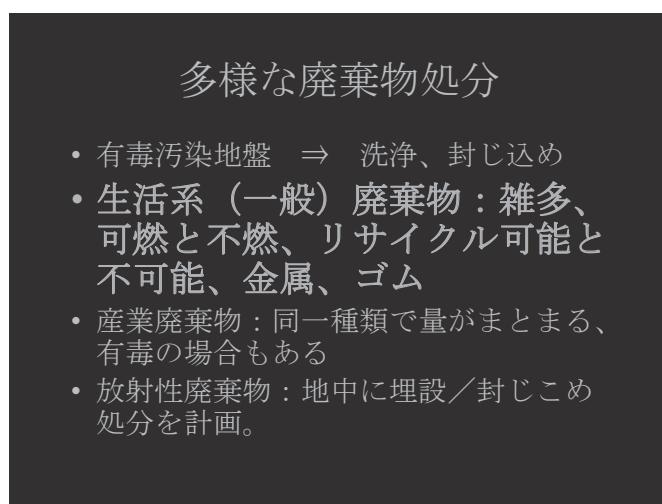


図-2.7 多様な廃棄物処分

つまりどういうものかと申しますと、生活系廃棄物、雑多、可燃と不燃、リサイクル可能と不可能、金属、ゴムなどです。皆さまが台所でいくらでもご覧になるようなものだと

思います。

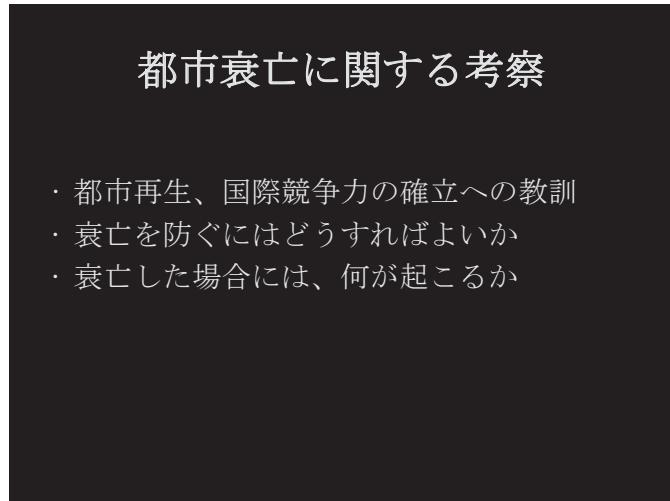


図-2.8 都市衰亡に関する考察

2.3 歴史に見る都市の滅びるメカニズムと再生

その前に、既に終わりましたが、私どもの土木や建築で連合して、一昨年まで、都市の再生というプロジェクトをやっていました、少しだけ参加させてもらいました。やっていたのが、私が考えていたのは、皆が都市再生の栄える話ばかりだったので、私は滅びる方が興味があると言って、滅びるメカニズムをいろいろ取材をしたりして勉強してみました。

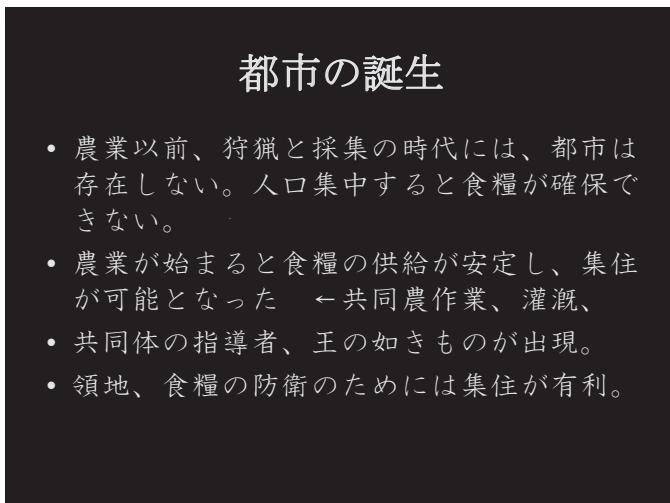


図-2.9 都市の誕生

都市の歴史を見ますと、結局、農業がないときは都市、つまり人間がたくさん集まって住むということは、不経済というか、あり得ないです。つまり、シカやウサギが何匹いるかで食べ物が決まりますから、たくさん集まるとそれだけ飢えるのです。そういう時代

は、都市がありません。せいぜいホモサピエンスが群れをなしている程度です。

ところが、8000年前か9000年前か知りませんが、農業が始まると、麦1粒から二十何粒の麦が採れるといったことになり、少し能率がいいので集まって住みます。すると、共同農作業ができ、かんがい用水路を造れるなど、いろいろなプラスがあるということで、集まり始めました。

集まっていると指導者が要るので、王さまみたいな者も出ます。しかも、領地や畠、あるいは蓄えた食べ物を守るためにには、やはりたくさん集まっていた方が戦いにも有利だということ、何かだんだん都市のようなものができてきました。

集住する都市内部では、物資の自給はできない

- ・交易（商業）
- ・食糧その他の資源を外部から確保するためには、代わりに売れる資源が必要。
- ・職人：鉱工業が出現。原材料を加工して販売。

図-2.10 都市の交易、ビジネス、取引の始まり

自給はできないのです。集まっていますが、100人ぐらいならいいのでしょう。1000人も集まり出すと、あらゆるもの自給はできません。そこで交易、ビジネス、取引が始まることで、食糧は割と広いところから集めてきます。その代わり、何か売らなければいけないということで、職人さんが売るものを作るとか、すき・くわを作るとか布を織るといったことで商売ができます。すると、都市としてどんどん発展していきます。

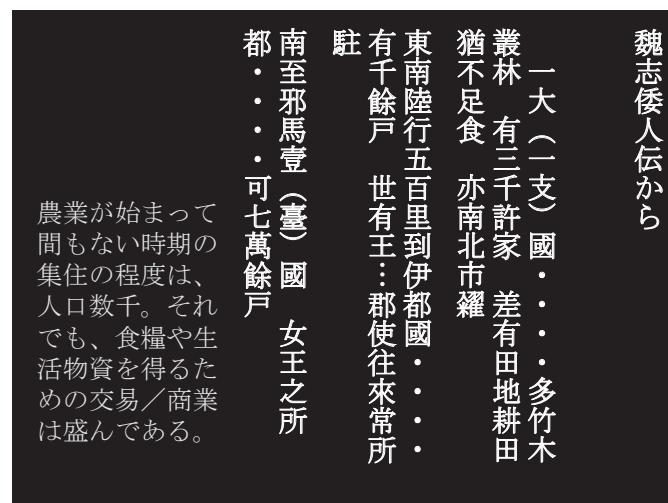


図-2.11 魏志倭人伝から

これは『魏志倭人伝』です。本当の名前は、『三国志魏志東夷伝倭人条』です。ここから、一体当時、今から 1800 年ぐらい前に日本のいわゆる都市は何人ぐらい住んでいたのかと数字の出ているところを見ます。一つ、壱岐の島を見ていると、大体 3000 ばかりの家があります。1軒何人か知りませんが、4倍しますと 1 万人ぐらい住んでいます。田畠を耕しているらしいのですが、足りないから南や北へ行って商売をして、足らないものをか買ってきます。もう既に都市として機能しております。

それから、こちらが伊都國といいまして、これは福岡県の西の方の糸島半島だというので、ここは 1000 軒ぐらい、4000 人ぐらいしかいない規模です。

肝心の邪馬臺國は、のめり込むと切りがないのですが、数字はむちゃくちゃなことが書いてあって、7 万軒。4 倍したら 28 万人で、本当か。どうもこれはでたらめを書いているらしいということになっていますが、そういう数字が出ております。

いずれにしても、商売をして、大勢集まってやりくりしているという意味では、既に都市としての原則が達成されております。

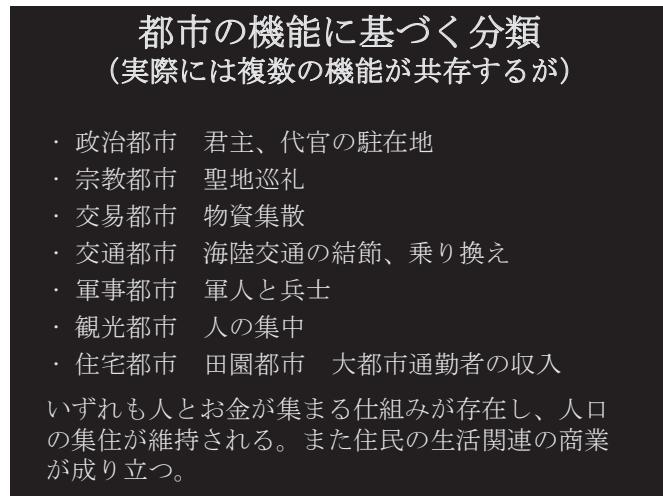


図-2.12 都市の機能に基づく分類

都市を分類して、政治、宗教、交易、交通、軍事、観光、住宅といろいろなものがあり、いろいろな機能があります。なぜこの都市が成立しているのだろう、その根本メカニズムは何かということを考えました。

すると、実はいざれも人とお金です。お金が集まる仕組みが存在します。ですから、人間が住んでいられるのです。つまり、よそから食べ物を買ってくる資本があるのです。また大勢人間が住んでいますから、その人間の生活を支えるために、仕立て屋さんや大工さんなど、いろいろなビジネスも成立してくるのです。

政治だったら、例えどこからお金が入ってくるかというと、何といっても税金です。また、王さまがぜいたくをします。それで市民は仕事ができます。宗教都市はおさい錢、交易都市は物資集散の手間賃と、税金も取れるでしょう。

交通都市は、乗り物の運賃もそうですし、船とか汽車とかの修理修繕などいろいろなことで仕事ができます。

軍事都市は、兵隊さんのための食べ物、武器の手入れの需要があるので、商売が成り立ちます。観光都市は土産物屋さん、旅館です。住宅都市は、やはり八百屋さん、魚屋さんでしょう。それから通勤者がいるので、彼らが勤め先からお金を持ってくるのです。そのようにして、人とお金が集まります。

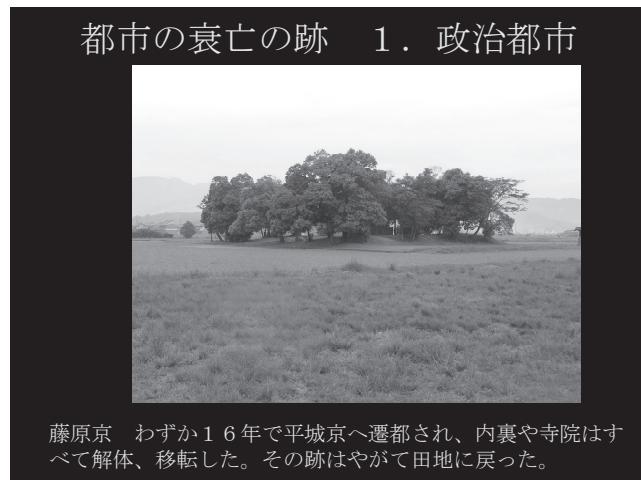


図-2.13 都市の衰亡の跡（政治都市/日本・藤原京）

政治都市の滅びた例は、例えば藤原京です。全部取材に行って歩き回っています。たった16年でアウトで、その後はあつという間に田んぼと畠に戻ったとたしか『続日本紀』に書いてあります。



図-2.14 藤原京の位置

その後は、何もかも無くなってしまって、一体どの辺までが首都だったのかも分からないという状況です。きれいさっぱりなくなってしまった例です。「なぜ16年で、もったいない話だな」という理由は、いろいろな方が興味を持たれ、諸説あるのですが、そこまでいくと話がずれるので、描いておきます。

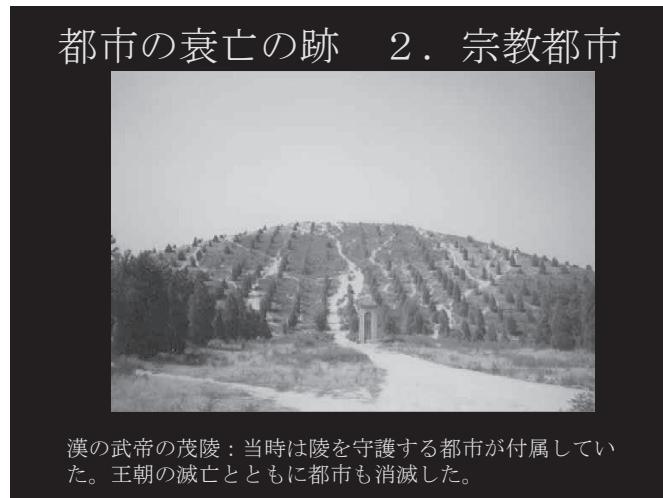


図-2.15 都市の衰亡の跡（宗教都市/中国・西安）

次は宗教です。漢の武帝陵が西安、中国の西の方にあります。これも、その昔は陸をお守りするということで都市があったのです。ところが、王朝が滅びてしまうと、もう誰もケアしないので、きれいさっぱり町も滅びてしまっており、農村になっております。



図-2.16 都市の衰亡の跡（交易都市/シルクロード）

交易都市で、シルクロードも滅びた例です。昔はここを通って中国とヨーロッパがつながっていたのですが、バスコ・ダ・ガマでしょうか。船でインドに行くようになってから、がっくりになっています。今は再興して観光地です。



図-2.17 都市の衰亡の跡（青森県十三湊遺跡）

日本で滅びた例は、青森湖の十三湊の出口にある十三湊遺跡です。ここは小さな町で、しじみのご飯が唯一の名物ですが、室町時代から戦国時代にかけては非常に大きな交易都市で、蝦夷地と上方をつなぐ航路の停泊地だったのです。

なぜ消えてしまったかというと、要するにお金が入ってこないのです。では、なぜお金が入ってこなくなったのかというと、俗説は中世末の大津波で全部流されてしまったからだというのですが、実際に考古学調査を一生懸命やっていらっしゃいまして、津波の跡、つまり砂の堆積です。津波が運んできた砂が堆積していれば、これで津波だとなるのですが、そういうものはないということです。むしろ、一つは商売に熱心だった領主の安東氏がよそへ追い出されてしまって、津軽氏という農業的な大名が来て領主になったから、と言います。また、ここは対岸の潮流で砂がたまるのですが、出口が昔はここから来て、この砂州の後ろを通ってこう来て、ここが出口だったのですがここから船が入ってきて、波が静かなところで停泊したという地形だったのですが、どんどんこの入り口の辺が砂がたまって浅くなりまして、船が入れない。それでギブアップです。その後、洪水で、この水路が新しく出来たということだそうです。

いずれにしましても、自然条件、それから政治条件でお金が入ってこなくなって、町として継続しなくなりました。



図-2.18 都市の衰亡の跡（交通都市/パナマ・プンタアレーナス）

交通都市です。また交通ばかりですが、プンタアレーナスです。これはマゼラン海峡で、パナマ運河の前と後とで全然違います。

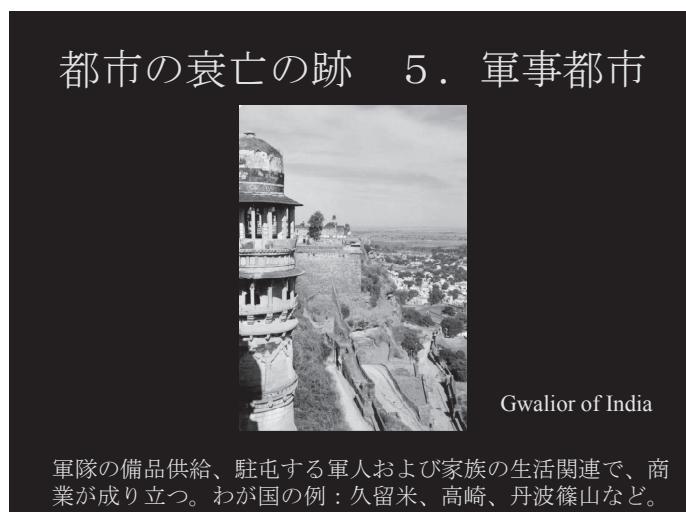


図-2.19 都市の衰亡の跡（軍事都市/インド・Gwalior）

軍事都市は、軍人さんがいなくなれば駄目です。Gwalior はインドです。軍事か政治か分かりませんが、今は権力がなくなってしまって、田舎です。

昔のわが国ですと、連隊所在地といって、久留米、高崎、丹波篠山とかありますが、篠山なども、今はごく静かな町になっています。

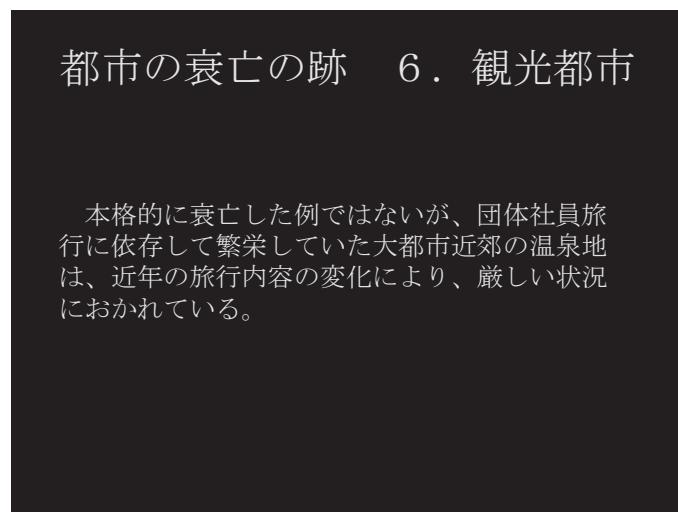


図-2.20 都市の衰亡の跡（観光都市）

観光都市はなかなかいい例がなくて、ちょっと言ってしまうと、都市近郊の大温泉地です。それはなかなか近年、旅館業も厳しく、団体旅行が廃れたということだそうです。いずれにしても、お金が入ってきません。



図-2.21 都市の滅亡の跡（自然災害 ペルー・Yungay）

自然災害も、若干方向性は違いますが、これはペルーの Yungay で、これは 1968 年か何かの写真ですが、結構地方の中心都市です。71 年でしたか。地震で山津波がこの後ろのワスカランという山から落ちてきて、それで全部一瞬に埋められて、3 万人ぐらい亡くなつて、こんな危ないところに住んでいられないということになり、よそへ移つたところです。ここはお金とは関係ありません。十数年前行ったときにはこのようで、この丘があるから向こうから土石流が来ても平気だと言っていたら、もっと大きなものが来て、乗り越えて全滅してしまったという事例です。

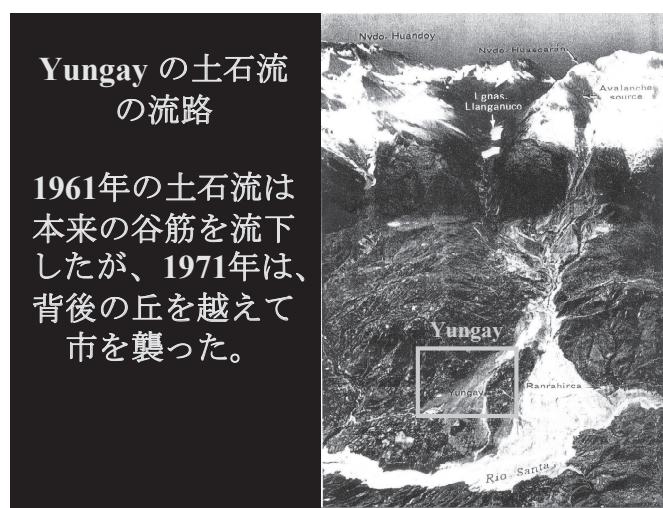


図-2.22 ペルー・Yungay の土石流の流路

これは上から見た写真です。ここから土石流がだだっと来て、本当はこちらへ行くはずが、この尾根を乗り越えて、こちらへ来たというのが悲劇でした。

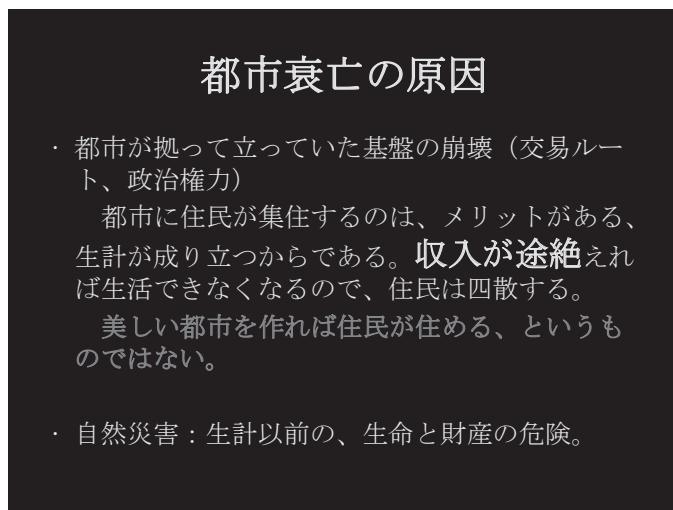


図-2.23 都市衰亡の原因

都市の滅びた原因を見てまいりますと、自然災害は別として、大体収入途絶です。

どうも私は、美しい都市を造りたがっている方たちがちょっと信用できなくて、結果として美しい都市はいいのですが、美しい都市を造るのが都市再生かというと、どうもそうは思えません。やはりお金です。お金があるから、住民が住みます。住むから、いろいろお金持ちもてきてぜいたくをして、きれいな家も建てます。いろいろな文化も発展するというものだと思うのです。

初めから、とにかくきれいな都市計画だけして、お金のことを考えていないというのでは、どうにもならないと思います。皆さんもそう思うでしょう。きれいな町だけれど、米

びつが空っぽではどうしようもないです。誰だって家族を養わないといけないので、もつと仕事のあるところに行ってしまおうと思うのです。

例外は自然災害で、お金以前に命はまず大事ですから、ちょっと例外になります。

いずれにしても、何か身もふたもない言い方ですが、お金です。

存在の基盤が失われても、なお存続した
都市がある。



平城京→奈良

図-2.24 存続した都市（日本/奈良・平城京）

不思議なのは、そういう収入の基盤、存在の基盤が失われたのに頑張って生き続けている町があるのです。これは非常に不思議です。例えば奈良で、平城京は 794 年に移ってしまいました。それでアウトかというと、往年の繁栄はないにしても、その後 1200 年、ちゃんと存続しています。これは大したものです。

政治都市としての平城京から、宗教、商業、地方政治の中心としての奈良に変容した。南都の諸大寺は、平安京へ移転しなかつた。荘園からの収入が続いた。



図-2.25 東大寺（奈良県）

これは政治都市ではないかもしれません、やはり東大寺、興福寺など、すごいものが残っています。宗教権威があります。すると、宗教都市としての性格は残ります。商業も、

大和の国の中心ですから、それなりの収入が来るということで、ずっと来たのではないかと思います。特にこの土地は、室町時代までは荘園からのお米が、収入が来ます。ですから、存在基盤としてのお金の流れは続いたのです。



図-2.26 存続した都市（日本/京都・平安京）

では、京都はどうでしょうか。京都はもっとすごいです。

朝廷は、明治に東京へ去りました。でも、もともと京都の朝廷は貧乏で、数万石ぐらいしかないので。江戸幕府がきりきりに締め上げて、貧乏だったのです。お公家さんも、もっと貧乏なのです。何百石ぐらいの収入しかありません。ですから、そういうものがどこかへ行ってしまっても、町としての存在基盤には関係がありません。むしろ東本願寺、西本願寺や伏見稻荷などすごいものがあり、そちらの収入があります。

あるいは伝統産業です。これも明治以降残っています。さらに京都の人たちは頑張っているのです。疎水を造り、電車を造り、次の時代を先取りする努力をやってこられました。だから、現在でもユニークな大学、ユニークな産業があるのです。

大学の権威はすごいです。京都大学の偉い先生がいると、お茶屋さんの裏から入ると 5000 円でいいのです。表から普通の方が行くと 10 万円だそうです。本當です。私は、某大学の K 先生に連れて行きました。すると裏道を通るので、なぜ裏道を行くのかと思ったら、塀に手をかけるのです。がちゃがちゃといわせたら、塀の一部ががたっと外れて中に入れます。中に入ったら、おいしいお酒をいただけました。東京ではありません。そのようにして、いろいろな人を大事にして、ユニークさを保ってきました。そこは大した町だと思います。

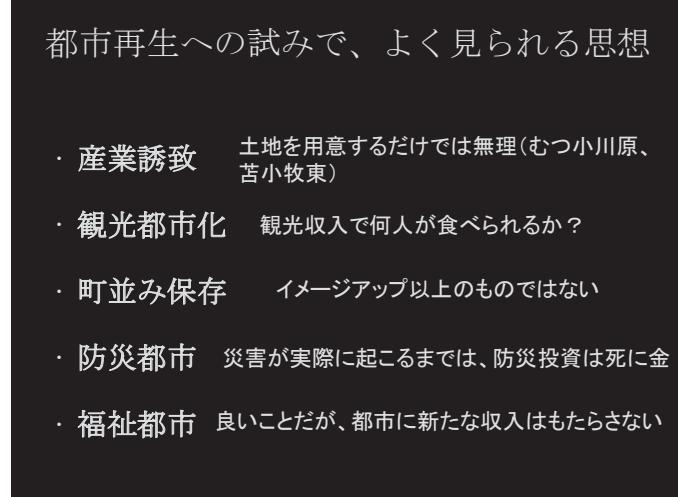


図-2.27 都市再生の発想

都市再生では、このような発想が世の中で今よくあるわけです。産業を持ってこよう。それはそうで、お金を持ってこないといけません。観光都市化しよう。町並み保存も結構です。防災都市もまあいいです。福祉都市もいいです。でも、ちょっとよく考えてください。すべて立派ないい発想なのですが、それに町の存在基盤を委ねるのは、本当に正しいのかということです。

つまり産業誘致ですが、今、最近いっぱい苦しい例があります。土地を用意するだけでは無理ではないでしょうか。それにつながる、例えば人材供給や周辺の生活環境、あるいはマーケットなど、いろいろ要るでしょう。観光都市もいいのですが、それで何人食べられるでしょうか。例えば私などが奮発して、家族でワイフを連れて旅行に行きます。よし、1泊1人2万円のところに泊まろうと、2人で4万円です。何だかんだと買い物をして、10万円ぐらい使ってきます。10万円のうち地元に残るのは、3万円か4~5万円でしょう。3万円お金を落としていくと、年間100万人、つまり2人の50万倍の人間が行って3万円、1人1万5000円×100万人のお金を落としていったら、合計が150億円です。150億円で何人が養えるだろうかと考えたのです。1世帯で年間500万円ぐらい要るでしょうか。150億円を500万円で割ると、3000世帯です。1万人を超えるぐらいの人間しか養えないので。そんなものなのです。これはちょっとつらいです。

観光も、特に小さい町ならいいのです。ただ、大都市や地方の県庁所在地くらいの都市を観光で養っていこうというのは、かなり難しい話だと思います。やはりほかのものと共に存し、ほかの機能と合わせてやっていかないと、なかなかいけないものだと思います。

観光の役に立つから、町並み保存もいいのです。でも、イメージアップ以上のものではないというのは、身もふたもない言い方で、イメージアップしたから、住んでいる方がプライドが生まれて、元気が出ることももちろんあります。しかし、それに賭けるのは難しいです。

防災も、災害が実際に起こるまでは、建設投資という意味ではプラスですが、本当は半分死に金です。福祉もいいです。いいことですが、要は新たなお金が生まれるわけではありません。今住んでいる方たちのために、うまくお金を使いましょうということですから、なかなか新しいビジネスとして、よそからお金が流れ込んでくるものではないでしょう。東京から、こんなところに住んでいられないで、どこかへいらっしゃって福祉都市に住めば、気持ちはいいのですが、その分どこかが減るわけですから、全体としてはプラスになっていないわけです。

リバプールの都市再生施策

- ・ リバプールは元来港湾を中心
に繁栄して来た
- ・ 1995年以降の再生プロジェクトでは、市街地を1.1のゾーンに区分し、それぞれの特色
を活かした開発を進めている
- ・ その方針：古い港湾施設の観
光資源化、高級アパート建設、
レストランや高級ホテルの建
設、歴史的景観の保護、文化
施設の質向上、ショッピング
センターの近代化(写真→)、
娯楽街の形成
- ・ リバプールの人口減少は下げ
止まったように見える



イメージアップ策に過ぎない。資金の流入を積極的に図る施策ではない。

図-2.28 リバプールの都市再生施策

リバプールの都市再生施策を調べました。このような写真を出して「すごい」と言って自慢しているので、「何だ、これは」と思ったのが正直なところです。どこが「何だ、これは」かというと、古い港湾施設を観光資源にしようとか、高級アパートやレストラン、ホテルとか何か言って、これで例えロンドンやパリに勝てるのでしょうか。私にはとてもそうは思えません。要は、このリバプールの周辺に住んでいる人たちが、ちょっと町へ買
い物に行こうかというので、とてもとても、よそからどっと金を持ってくるものになつ
ているとは思えないのです。でも、人口減少は少し下げ止まっているという1文があり、
何か効果があったのかとも思いますが、とても都市再生したと言い切れるものではなく、
何となくイメージで走っているに過ぎません。

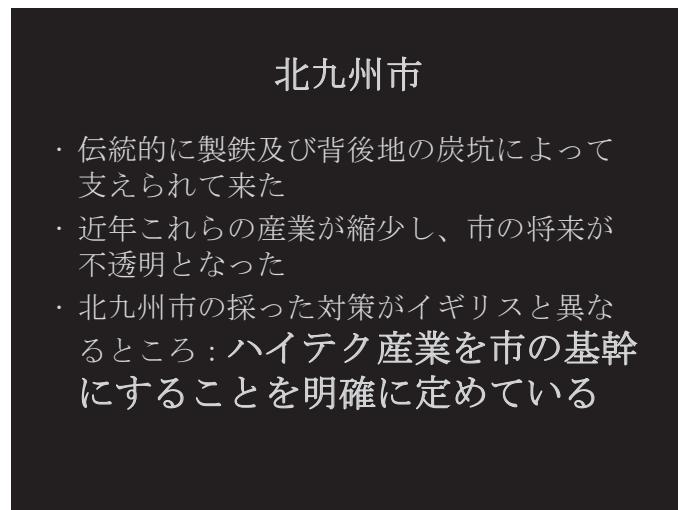


図-2.29 北九州市の取り組み

北九州市の市役所の方が、なんと東京まで来てくださいまして、取り組みを説明してくださいました。だから、あまり身もふたもないことも言えないのですが、ご紹介します。やはり産業です。産業を一つ興そうと。それを市の新しい収入源にしていこうではないか、もう一つは、九州から東アジアという一つの経済圏を打ち立てていこうと考えていらっしゃるようで、そういうものによって、従来の八幡製鉄や炭鉱に代わるものに育てたいというご意志です。



図-2.30 河内貯水池(北九州市)

売りは、幸か不幸か、製鉄の需要が減ってきたので、水資源が余っています。あちこちで毎年、水飢饉になっていますから、水は日本の都市には大事なのです。うちは心配しないでくれ、八幡製鉄所が設置した河内貯水池などの遺産がちゃんとあるということです。



図-2.31 北九州学術研究都市

あるいは学術研究都市です。やはり新しい人材、あるいは技術のシーズが生まれてきましたとおっしゃっていました、なるほどと感じました。そういうところに、大学クラスから工業高校までが、狭い範囲に集まっているのが特徴だそうです。「室蘭などと比べてどうですか」と聞いたら、北九州市として室蘭はライバルかというと、「あちらはいろいろな学校まで遠い。うちは近くに全部そろっている」ということを強調しておられました。



図-2.32 テーマパーク（北九州市）

これは失敗例です。どうもテーマパークは具合が悪くていけません。子どもが少ないのです。



図-2.33 製鉄所の再利用

これも製鉄所が面積が減りまして、空き地ができたと。すると、それを単に売り払って空き地にしておいても、もったいないということで、全体が塀に囲まれていますから、実はセキュリティが万全である、入り口に門番さんもいるということで、その中に工場を立地させると、セキュリティをあまり心配しなくとも安全な工場が自動的に手に入る。それを売りにしておられて、結構企業も入ったそうです。

北九州市の施策

- ・ 物流特区（港）と陸海空の高速交通（空港、高速道路）とを結合
- ・ 学術研究機関を集める
- ・ 持てる資産：水や電力の潤沢な供給
　　製鉄所内の空きスペースをセキュリティー完備の工場用地として貸し出す
　　材料や機械関係の在来産業基盤
　　エンジニアの雇用のやすしさ
- ・ レトロな門司港の観光は英国と通ずる所があるが、これは地域のイメージアップの策
- ・ 高級住宅が比較的安価で入手できる

これらの施策によって、従来産業の縮少による人口減少の跡を埋めることはできた。発展の成果を見るのは、今後の目標。

図-2.34 北九州市の施策

というわけで、特区から始めて、交通、空港、高速道路は全部あります。水もあるし、なんやかんやで人材も豊富です。その上で門司港の辺をレトロ化して、町並み保存もする。また、やはりちょっと人口も減ってきたので、高級住宅地がすぐそばにあって安いということまで言ってらっしゃいました。

これはうまくいったらしいなと思っていたのですが、もうちょっとなのです。やはり人口は少し減ったようです。日本全体が減っていますから、ここだけプラスはなかなか難し

いのでしょうが、もう少し頑張っていただきたいと期待している町です。

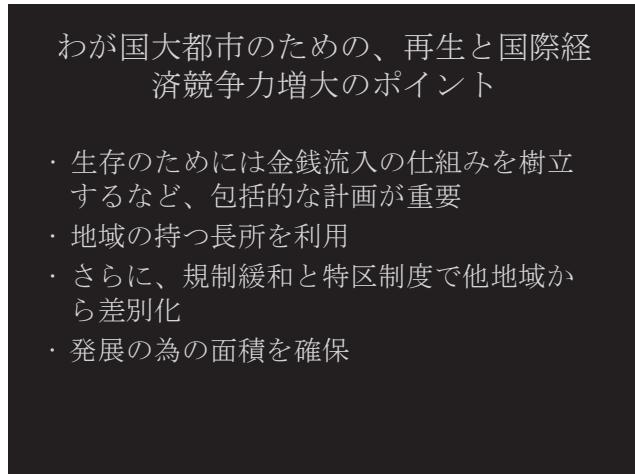


図-2.35 再生の国際経済競争力増大のポイント

今日の私の話は、国全体として国民がお米をかい、ご飯をかい、燃料をかい、そのお金をして手にするには一体どうしていったらいいのだろうという視点で話をしております。ですから、サステイナビリティや環境も大事ですが、そういうものがよくても、おなかがペコペコではどうしようもないということで、ややお金に重点を置いています。そのためには、わが国の大都市が国際的に経済力を持っていないといけないと思っています。

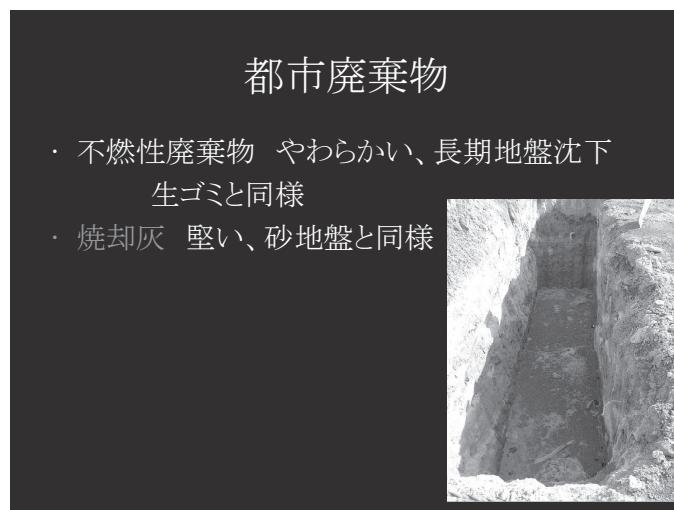


図-2.36 都市廃棄物の利用

2.4 地盤沈下とその対策

そこで、こういう話になってきます。結局、わが国の弱点は何かというと、今は面積です。緑地をたっぷり取ってきませんでした。パリ、あるいはフランクフルトでしたか。周りにわっと緑地や畑が残っていて、飛行場を拡張したくなったら、そこにはばんと造ればいい

いということがあるのですが、わが国はなかなか厳しいです。東京もそうですが、大阪なども、生駒山から宝塚までぎっしり人が住んでいて、なかなか新しい面積がありません。

そういう状況において、近隣諸国が突然大きな港や飛行場のすごいものを造って、どんどんハブ化して国際的な交通の焦点になってきているのに、わが国ではなかなか手が出せません。土地を入手しようとすると、膨大な手間がかかるのです。そういう状況で、面積だけで計算すれば、ごみを捨てた後は陸地ですから、陸地で面積資源です。買収しなくていいので、パブリックなのです。これは何とかならないかと思ったのが研究の動機です。

いろいろなごみがあるのですが、最近、東京のご家庭のごみは大体、分別しなくてよくなってきました。もともとは燃えないごみと燃えるごみです。燃えるごみは本当に燃やしまいます。最近は燃やし方もどんどんよくなってきて、いいごみになっていますが、ちょっと前まではまだ灰でした。

プラスチックは、なかなか燃やせません。最近また燃やし出したのですが、もともとは燃やせなかったので、そのままビニールで捨てているものが、現実にたくさん存在しています。

問題は、地盤沈下です。話題がここまで来ますと、地盤工学という話になってきます。こちらは、一応、焼却灰ですから大体 800°C で燃やした後で、結構立派な砂地盤的なのです。若干、粘着力もあって、掘っても崩れないで自立しています。そういう材料で、力学だけ見ていると、これはなかなかいい地盤です。上のこちらは駄目です。

歴史です。これも歴史の必然というか、江戸時代からずっと下っていくと、もともとの江戸は、入り江や水や芦原で、ぐちゃぐちゃになっていたことがありました。徳川家康がやって来て、日比谷を埋め立てて町を作り、御茶ノ水の辺の切り通しや、江戸城の周りのお堀を掘った土砂などいろいろなものを使って、あるいは火事のがれきや若干のごみを海へ捨てていくことで、だんだん陸地が広がってきました。

これが羽田空港で、大井で、これがお台場です。廃棄物だけでいうと、今はこの辺に中央部があって、内側、外側、新海面処分場といいまして、これが若洲というゴルフ場で、その前が夢の島がここで、その前の潮見がここなのです。昭和 20 年代までごみ捨て場だったところです。ほかは基本的に土です。



図-2.37 廃棄物地盤の問題

問題は、繰り返し申しますが、地盤沈下と、ガスが出ているということです。テレビ番組で先日収録してきました。なぜごみ捨て場に鉄パイプが立っているのだろう、不思議だという話になって、「これはメタンガスが出てくる煙突です」という話もしました。例えばゴルフ場に、こういうものが立っているのです。

夢の島の、昭和40年代の処分場跡です。マンホールのふたに、かなり沈下した跡が残っています。

その隣の若洲のゴルフ場のクラブハウスですが、1mぐらいの沈下が見えます。

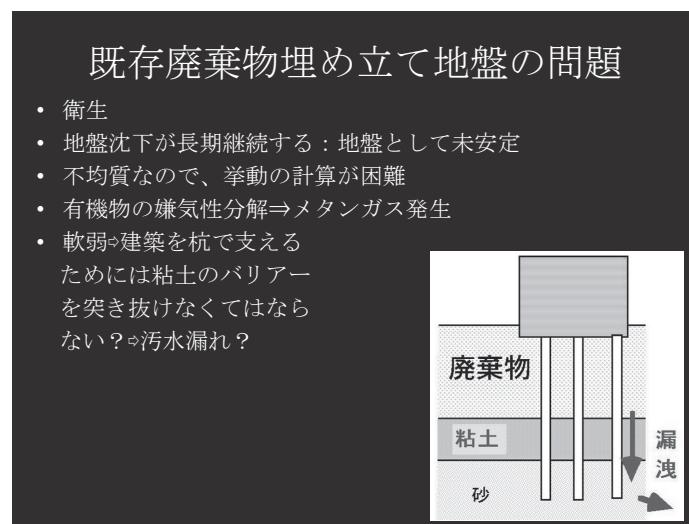


図-2.38 既存廃棄物埋め立て地盤の問題

どういう問題があるかというと、地盤沈下の長期継続で、じわじわと沈下していきます。不均質です。捨てられたものの記録はあるのですが、決して均一地盤ではないので、なかなか挙動の計算が困難です。あるいはガスが発生します。そのようなところに物を造ろう

とすると、なかなか基礎が難しいです。つまり、ちょっと考えると、杭で支えればいいではないかというのですが、杭で堅い地盤まで押し込むと、途中で粘土層になります。ここから汚水が外へ漏れるのを止めているわけですから、そこを貫くのはかなり危険です。うまく工事している例もありますが、後でまた紹介します。

これは中央防波堤外側埋立地で建設途上の道路橋脚です。こういうところのそばで造つていらっしゃいます。

これが中央防波堤外側の島と、若洲ゴルフ場方面をつないでいく道路の橋脚です。これは私は詳しいことは知らないのです。今村さん、知っていますか。杭基礎ですが、粘土バリアを貫通しているのです。そこに最初は薬液注入して漏れをふさいだらしいということを最初は議論していたのですが、最終的にどうやって造ったかご存じですか。

(今村) 知ないです。

(東畠) ご存じないですか。粘土層が厚いので、結局ふさがってしまうので大丈夫だという意見もあったと伺っています。取りあえず、今の技術ではできるので、現に造っているわけです。

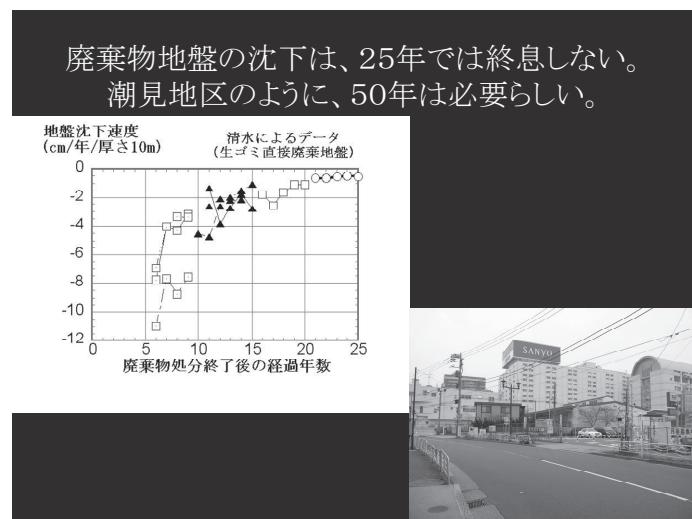


図-2.39 廃棄物の沈下

沈下の方ですが、これは割とクラシックなデータです。地盤沈下はすぐに終わるものではありません。何が地盤沈下するのかというと、もちろん東京湾ですから、下の方に粘土があります。粘土層が、上に乗っかった土やごみの重さで沈下することもあるのですが、軟らかい生ごみなどごみそのものの沈下もあるわけです。

横軸は捨て終わってから何年ということで、右の 25 年というのは、要するに 25 年ほどたった処分場という意味です。左側の縦軸は、地盤沈下のスピードですが、いろいろな厚さのものがあるのです。小さな捨て場や分厚いものです。ですから、ばらばらにプロット

するのではなくて、沈下量の一年毎のスピードに直し、それをさらに厚さ 10m 当たりに正規化しています。ですから、このように見ると、右上がりで、若い地盤はどんどん激しく地盤沈下していくけれども、二十何年たつと減ります。ただ減ったというけれども、まだ例えば 10m 当たり毎年 1cm 沈みます。例えば典型的な例として 30m あるとしますと、毎年 3cm 沈むので、これはまだまだ問題のあるレベルです。

ですから、例で出ていますが、昭和 20 年代に生ごみを捨てていたところは、昭和 30 年から数えて、もう 54 年です。それくらいの年月が過ぎると、このように町になっています。ですから、50 年近くの年月があれば、町にしても大丈夫だなという感じです。



図-2. 40 廃棄物地盤の屋内スキー場（ドイツ・ケルン）

ドイツへ取材に行きました、なかなか思い切ったことをするなと思いました。この後ろの丘が、ごみを捨てた跡なのです。上表面に土をかぶせています。その上に、あるのが、屋内スキー場です。東京の郊外にも以前はありました、残念ながら閉鎖になってしまいました。東京だと、屋内スキー場の存続は、上越新幹線に乗ると 1 時間で自然のスキー場に行ってしまうので、なかなか難しかったのです。ところが、ここはドイツのケルンのそばで、本物のスキー場はまだまだずっと南のアルプスまで行かないとありません。すると、オランダ人などが喜んで来るのだそうで、便利だというので、結構もうかつていると聞きました。この下がごみです。

よくこんな物を造るなと思うのですが、では日本でもまねしたらというと、なかなか難しくて、この基礎はごみの上にかぶせた土の中にあるのです。浅い土のフーチングです。すると、何とか支持力は頑張っていまして、万一ちょっと沈下し出したら、すぐ横から何かいろいろ挟み込んで、直します。あるいは変になったら、すぐリフトなどもストップして、人は外へ出します。そういう安全策を講じています。

ただ、ドイツですから、幸いなことに地震荷重がありません。すると、横荷重がほとんどないので、何とか成り立っているという代物です。それにしても、結構思い切ったもの

が海外にはあるものです。

やりすぎた例ですが、ハンブルグ郊外の処分場跡地で、ガスも出ています。そういうメタンガスを集めている機械の小屋ですが、確かに地盤沈下の跡があります。

そういうところは、賃貸アパートを建てている分にはいいのです。沈下しても、賃貸ですからいいです。そういうところの横で宅地分譲をしました。そして、安全も評価しました、保証も付けた、万一のときは弁償しますとかです。誰も買いません。残念だったとか言うのですが、これは戦略誤りではないでしょうか。そんな所は、ガスが出て沈下するのに、そもそも個人が自分のなけなしのお金をはたいて、買うわけがありません。ほかにもいっぱい土地はあるのです。だから、これは大失敗です。

そんなことをやるぐらいなら、パブリックな施設や図書館、あるいはショッピングセンターとか、なぜそういうものにしなかったのかと言うと、こういう所にはそういうものを造るべきではないとか、ショッピングセンターではないとか、コンビニでもいいだろうに、そういう所ではないと言って、堅苦しいのです。「融通が利かないやつらだ」と言って、ばかりにして帰ってきました。

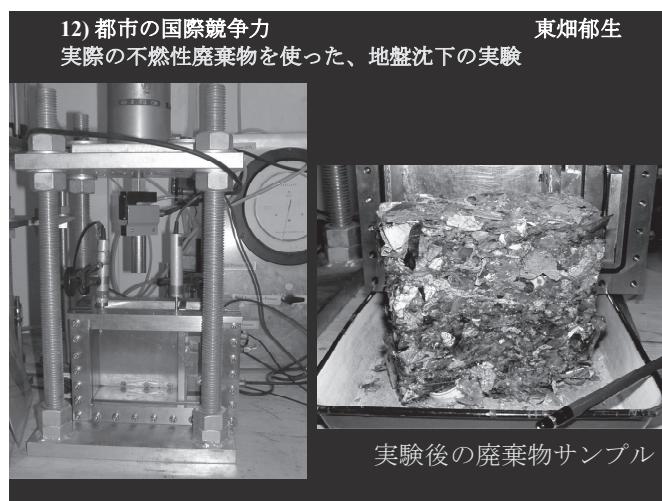


図-2.41 不燃性廃棄物を使った地盤沈下の実験

もう少し力学も勉強した方がいいというわけで、実験をやってきました。

数年前の結果で、一応ドイツの生ごみです。生ごみといいましても、少しバクテリアに食わせて消化したごみだそうですが、1トン輸入したのです。きちんと手続きをすれば、ごみも輸入できるのです。それから、これは確か東京の中央防波堤外側のごみだったと思います。こういうものを一次元圧密実験と、三軸せん断試験などとやっています。

沈下は、だぶりますが、このようなものだということです。廃棄物処分場跡に位置する若洲ゴルフ場クラブハウスの基礎ですが、表面がひずんだり、基礎からぐわっと下がってしまって、いろいろごまかしているわけです。

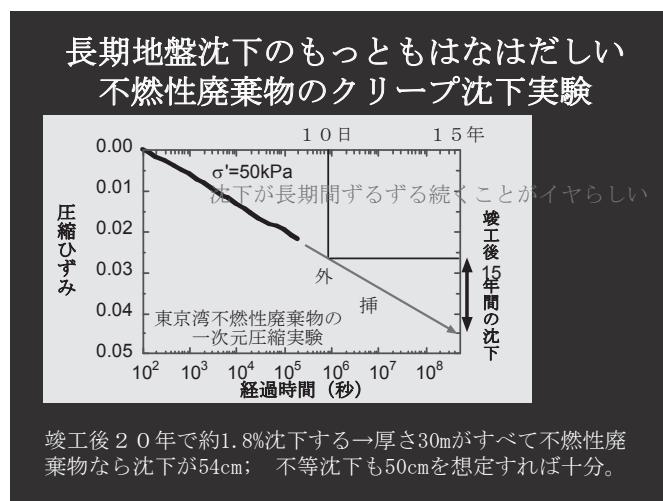


図-2.42 東京湾不燃性廃棄物の一次元圧縮実験

何といっても地盤沈下問題が深刻だというので、圧密地盤沈下のひずみと時間をプロットしました。

これは東京湾の埋立地から取ってきた燃えないごみ、ビニール系統です。あまり根性がなくて、1週間で終わったのですが、強引に外挿すると、15年ぐらいを \log で取ると、2%弱ぐらいの沈下は起こります。だから、30mあるとしますと2%ですから、60cmぐらいという数字が出てくるわけです。

それを見て、50cmぐらい沈下しても大丈夫な技術を考えればいいのかと思いました。そして、ビルディングか何か知りませんが、建てる考えをすればいいのではないかと思っています。20年たてば取り壊して、また新しくやればいいというタイプの建物でいいのではないかと思います。

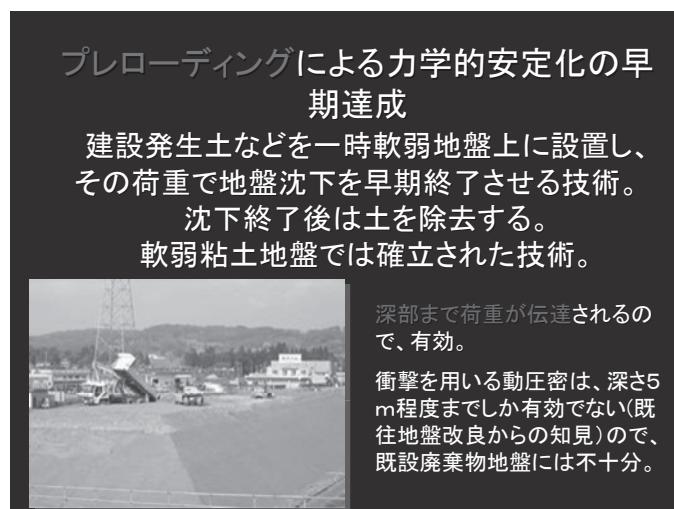


図-2.43 プレローディングによる対策

とはいいましても、やはり地盤沈下はあまりうれしくないのですが、対策技術はわが国にはたくさんあります。一番簡単なのはプレローディングです。あらかじめ、それこそ捨てたい残土、建設発生土がたくさんあるので、ちょっと借りてきて、1年ぐらい預かって上に積んでおいて、十分沈下したら、どこかまた別のところに持つていいのです。そして、また別のところで、プレローディングでごみ地盤の沈下をまた起こさせて、そして安定させればいいと考えました。

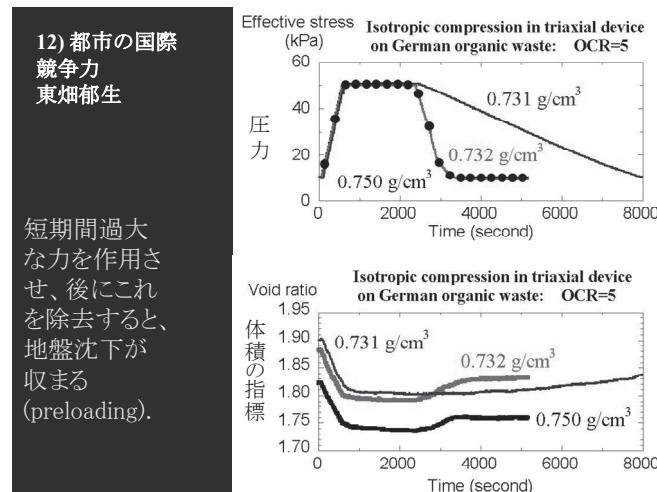


図-2.44 プレローディング技術の実験(1)

実験ですが、圧力の変化です。最初に 10kPa ぐらいです。ぱっとたくさん積んでしばらく置いておいて、そして除去します。早く除去したのとゆっくりやったのとがあるのですが、あまり変わりありません。そして、縦軸が間隙比です。ご存じのない方は、要するに体積が大きいか小さいかと思ってください。そうしますと、時間に対して最初、上に物を積みますからどっと沈みます。じわじわじわとまた沈んでいくのですが、しばらくして重みを取ってやりますと、ぱっと浮き上がって、それ以上はほとんど沈まなくなります。これがプレローディング技術の目指すところで、従来の土ではなくて、ごみにも同様に適用できます。要するにごみは、コンクリートや金属の力学ではなくて、土質力学だと思えば、間隙比なども適用できます。

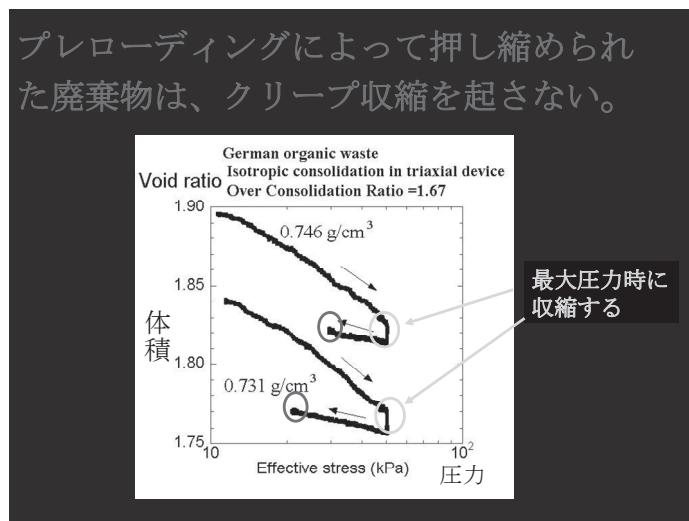


図-2.45 プレローティング技術の実験(2)

これは同じ話を $e-\log P$ で、間隙比と有効応力でプロットしてみますと、最初にぐっと力を入れると縮むのです。しばらく放っておくと、クリープでもっと縮んでいくのですか、後で除荷して力を抜くと、ここ（○印の位置）へ来て安定することを狙っているわけです。

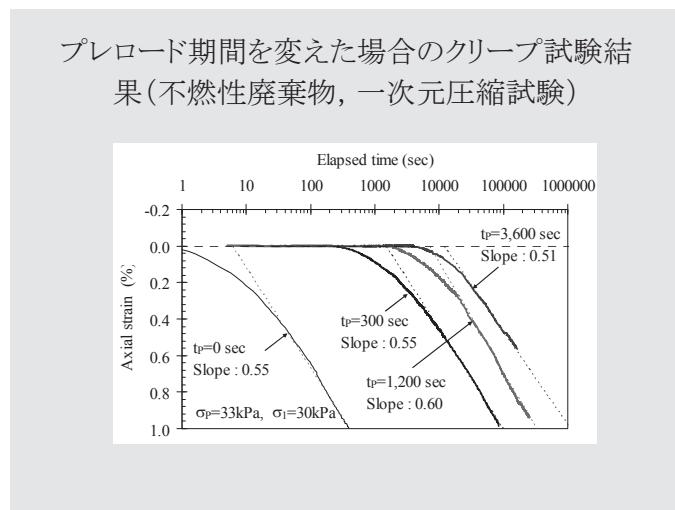


図-2.46 プレローティング技術の実験(3)

プレローディングによる沈下抑制ですが、同じような実験結果はたくさんあり、自分で飽きてくるので飛ばします。

これもプレローディングの効果実証で、同じ話です。

時間です。どれぐらいの時間、プレローディングしておいたらいいのかということになり、時間を変えてやってみたのです。何もしないときは、時間に対して圧縮のひずみがじわっと速く進んでしまいます。それが 300 秒間、圧力を 33kPa かけておいて、その後に 30kPa

に除荷するのです。すると、300秒だからこの辺で終わりで、少ししてから縮み出します。

それから3600秒まではプレロードしていて、それを除荷すると、またじわっと縮み出します。線がみんな平行なので効果がないのかというと、そうではなくて、横軸がlogですから、やはり長い時間プレローディングしておいた方が、logで平行、つまり実際はずっと遅いスピードになるわけです。ですから、これで15年、20年たっても、大した地盤沈下は起こらないとなってくれれば、しめたものです。

プレロード荷重を変えた場合のクリープ試験 結果(不燃性廃棄物、一次元圧縮試験)

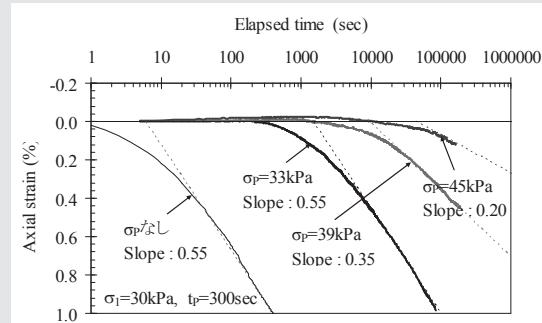


図-2.47 プレローディング技術の実験(4)

ほかに皆さんを考えるのは、プレローディング荷重もそんなに中途半端ではなくて、もっと強烈な、高い荷重をかけたらいいではないかということは当然で、少しの荷重だとこんなもので沈み出します。荷重をかけて300秒で除荷すると、ずっと沈下するのですが、あらかじめすごい荷重をかけてありますと、まだ当分頑張って、8000～9000秒になったところで、ゆっくり地盤沈下が始まります。

そんなわけで、結局たくさんあちこちから建設発生土を集めてきて、プレローディングしておいて、少し気長に1～2年やっておけば、その後20年ぐらいはOKだろうという結論になってきます。



図-2.48 一般廃棄物処分場(日本・東京)

もう一つは、割とよくある誤解です。こういう一般廃棄物は軟らかい。ですから地盤の支持力が小さい。と考えられる方があります。しかし、材料として弱いのと軟らかいということは、少し違う話です。例えば輪ゴムなどは軟らかいのですが、結構頑張ります。一方では、鋳物の鉄などは堅いのですが、材料としてはあまり強くなくて、ハンマーで殴ると割れたりするということがあります。ですから、軟らかいことと弱いことは、必ずしも同じ意味ではありません。ごみも、軟らかいのですが、実際これは東京湾の例ですが、切り立った崖として安定をしているわけです。



図-2.49 一般廃棄物処分場(ドイツ・Goettingen)

似たような例がドイツもありました。ここは何でもかんでも全部捨てているところですが、こうやって崖がありまして、やはり崩れません。



図-2.50 廃棄物体積状況（ドイツ・Goettingen）

軟らかいくせに結構頑張るではないかというのですが、これはなぜかといいますと、断面を見ますといろいろなものが入っています。紙やビニールなどが入っています。大体捨てるときのプロセスは、ダンプカーで持ってきて、ばさっと捨てて、上をブルドーザーでならすということですから、こういう繊維的なもの、長いものは横に入ります。こう横向けです。縦に入りません。横向きに入っていて、縦方向に押されるわけですから、横に伸びられないのです。繊維が、横に伸びることに抵抗するわけです。こういうものを補強土といっていいのか知りませんが、全然洗練されていないので補強土とはいえませんが、現場でいろいろ最近はやりの補強土工法と全く一緒で、崩れないです。

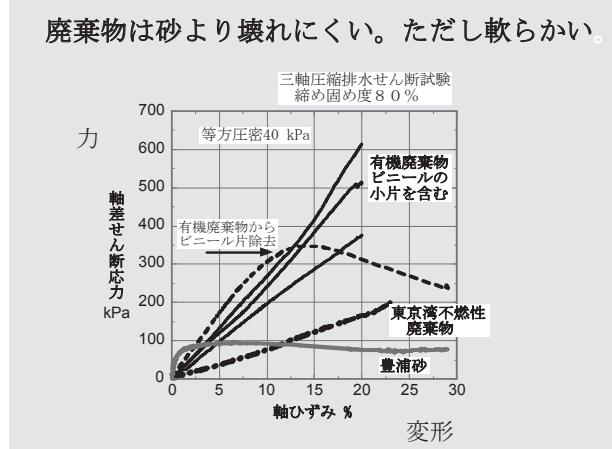


図-2.51 三軸圧縮試験

それを再現した三軸圧縮試験ですが、縦軸が荷重で、横軸がひずみです。これはドイツから輸入したもので、結構、降伏しないのです。軟らかいのです。これが豊浦砂の実験ですから、硬さでいうとこれぐらいです。ごみは軟らかいのです。それは全くそうですが、強度を見ると、砂は、同じ圧力下で 100kPa もいかないのに、ごみはここまでいくのです。

そして、まだ降伏しないわけです。

これはなぜかというと、結局、ビニールがいっぱい入っているからです。それを全部ビンセットで除去して、もういっぺん実験したのです。今度はやはりなぜか強いのですが、これは別に締め固めた都合で前よりも堅くなつたのです。ポイントは、ここで降伏して、こちらはアウトだと。つまり、ビニールが減ると、補強土効果が減ってきて、強度には限界が出てくるわけです。

これは東京湾の埋立地から持ってきたもので、もっと軟らかいのですが、ビニールがたくさん入っていますから、やはり頑張るのです。こういうことがあります。結局こういう廃棄物、軟らかい廃棄物の力学的な問題点は、強さではなくて軟らかさなのです。ヤング率の方が大事です。せん断強さは、実際は問題になりません。別の言葉で言うと、基礎の支持力は問題にならないのです。基礎の重みによる沈下の方が重要な問題になります。

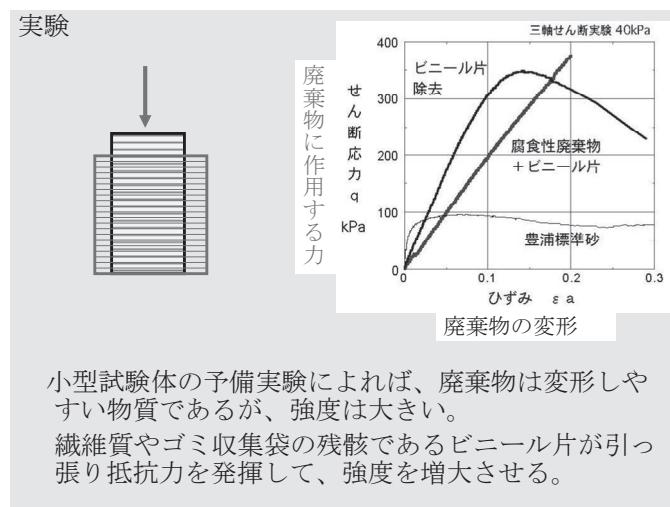


図-2.52 小型試験体の予備実験

これも、今の話も全く理由は同じで、横向きにビニールが入っているから、横には伸びにくいのです。補強土です。

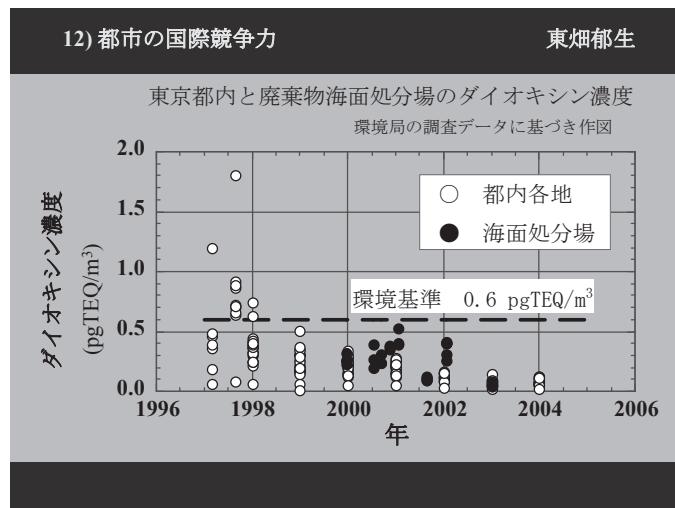


図-2.53 ダイオキシン濃度

この話は私も、よく分からぬのです。形式上、東京都のインターネットのサイトから引っ張ってきただけの数字です。私はこれを評価できないのです。要するに、ダイオキシンのことを心配されるので、東京都のデータはこういうものがでているということです。大気中で集めてきた、採集した空気のダイオキシン濃度は、このようなものだというのが出ています。環境基準はここだから、みんな下ですよというのも出ています。これをどう評価するのか、私はそこまで偉そうなことを言う実力はないのですが、海上ですから、風がよく吹きますので、何かガスが出ても、吹き飛ばされるのだろうということだと思います。ただ、品川や渋谷も濃度は似たようなものです。

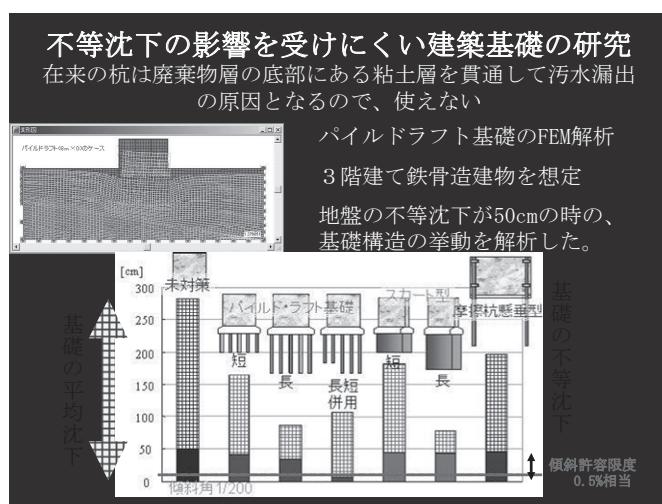


図-2.54 不等沈下の影響を受けにくい建築基礎の研究

要するに、私の最終目標としているところは、テレビでも少し言ったのですが、ごみ捨て場、処分場は、パブリックな大きくまとまった土地なので、最初は公園もよかろう。才

リンピックの何か会場にするのもよかろう。でも近い将来は、わが国の都市の経済競争力を支える一つの土地の面積の資源として、リサイクルしたいということなのです。材料としてリサイクルするのはなかなか大変なので、面積としてリサイクルできないかというのが趣旨です。

すると、公園だとお金ももうからないので、少なくともゴルフ場です。さらにもう一步踏み出ると、何か2~3階建てのものが建って、一つ、国際経済センターにならないかというわけです。そういうときに、基礎はどうするのかという問題があります。現状は、例えば30m廃棄物がたまっていますから、それを貫いて、さらにその下の土を捨ててある部分までというと、30mの杭が必要だと思います。ちょっと値段が高いと思います。しょせん2~3階建てのものだったら、もう少し安くする手もあるのではないかということで、ちょっと考えました。

これは全部、有限要素解析ですが、何にも対策しないで、ぽんと建物が上に乗っかっているだけだと、計算しますと、この例で30mあるのですが、2m80cm沈下する。これはむちゅくちゃです。本当に問題になるのは不等沈下で、傾く方ですから、それは左端と右端で50cmです。不等沈下でこれも嫌だということで、ではパイルドラフト基礎で、途中まで杭が入って、下まで届かせる必要はありません。この辺が経済的でいいかなということやると、そこそこいい線にいきます。特に、不等沈下をかなり抑えられるということがあります。



図-2.55 節杭

杭も、こういうでこぼこのあるものがいいというわけです。そして施工風景です。

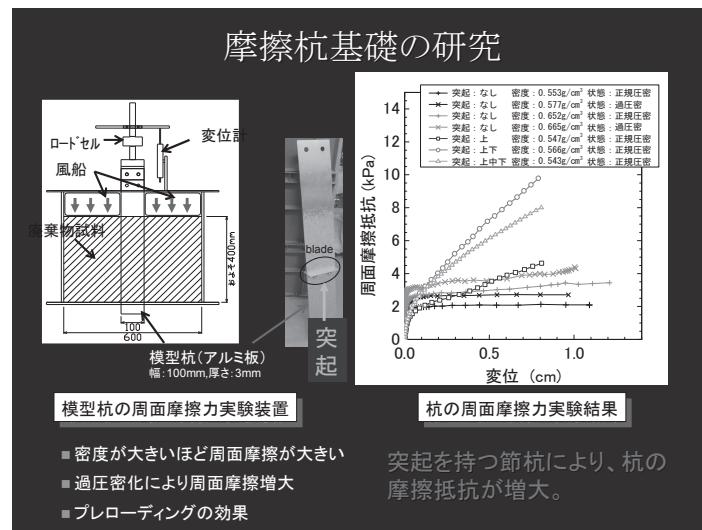


図-2.56 杭の実験(摩擦杭基礎の研究)

杭の実験をしまして、杭の変位と荷重の関係をお見せします。何にもしない一つの杭としたものに比べて、でこぼこ突起を付けておくと、結構頑張るということもあります。

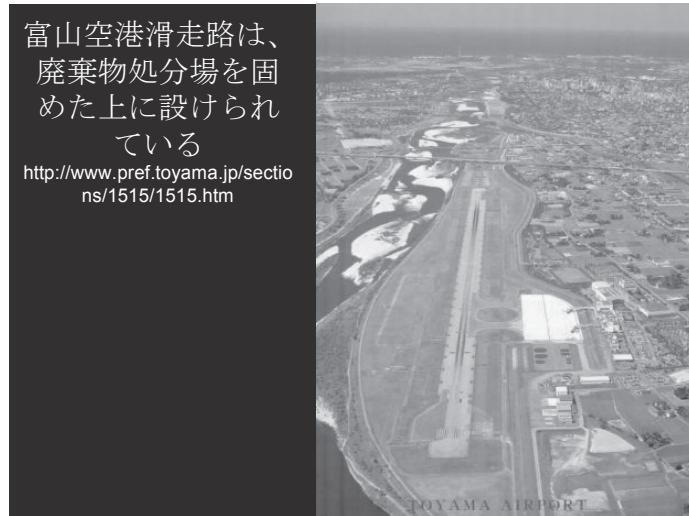


図-2.57 廃棄物地盤の実例（富山空港）

実例も、そんなごみ地盤で何か造った例があるのかというと、富山空港がそうです。

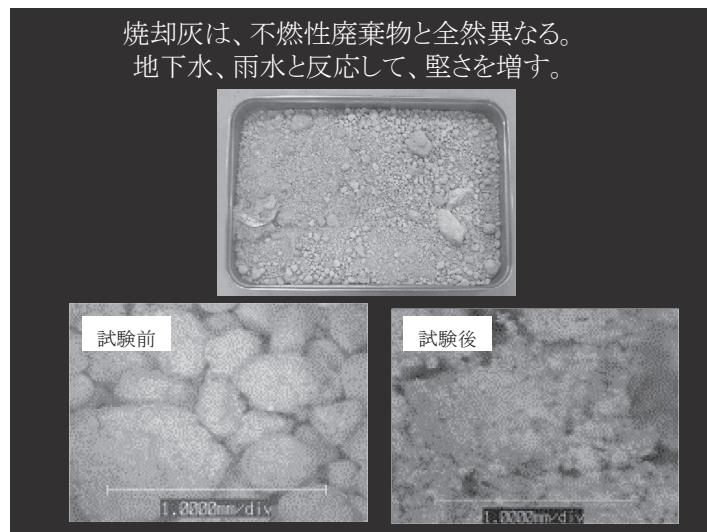


図-2.58 焼却灰

今まで全部プラスチック、燃えないごみですが、燃える方のごみが結構いいのです。しかも焼却灰です。これは燃やした後で、水と反応すると何かぼわっとしてきて、堅くなるというセメンテーション（cementation）があります。

焼却灰の長期地盤沈下は微少です。

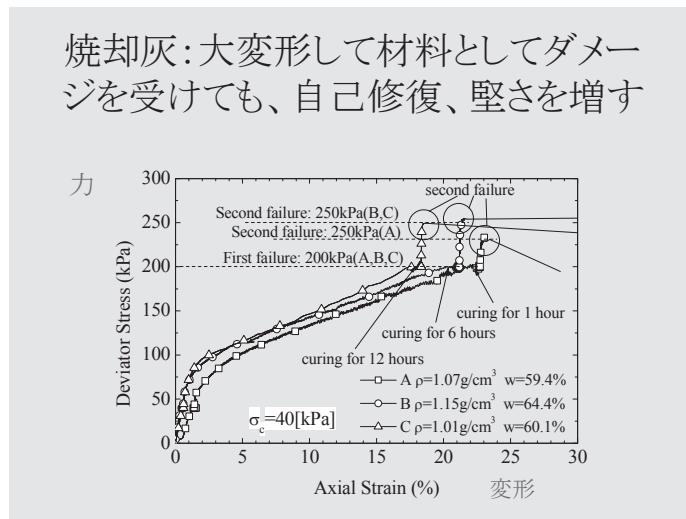


図-2.59 焼却灰の自己修復能力

三軸圧縮ですが、200kPaまで来て、その後250kPaまで来るのです。しばらく放っておくと、さらに水と反応して、また堅くなるということです。自己修復能力があるのではないかということで、これはなかなか立派な地盤ではないかという気もしました。

2.5 東京湾埋立地の可能性

そういうことの上で、国際ビジネスセンター論です。国際空港の横にいろいろな拠点を造るということです。

国の経営は、やはりサステイナビリティにあまりだまされると大変です。90%正しいのですが、10%は正しくありません。わが国は既に、港にしても空港にしても国際的な視点を欠いていたために競争に失敗している例があるわけです。しかし、すぐにこういうものをやろうとしても、面積の余裕がないということで、土地として使えないかというわけです。

これが空から撮った写真ですが、この横にこれだけの面積があり、全部合わせて大体、 9km^2 ぐらいになります。この周辺に東京港、京浜港といった大港湾があり、羽田空港に D 滑走路ができ、もう少し頑張ってもらって、もう 1 本ぐらいできたら、近距離のアジアの国際線はこちらでやるとなってくれたら。人口が周りに 2000 万人いて、鉄道もたくさんあるという、こんないいところは他にないと思います。

これは中国の古い言葉で「衢地」（くち）と言いますが、交通の要所の意味です。ここを空き地にして放っておく手はないではないかというわけです。それを言いますと、当然、千葉県の方が、これまで成田空港のところでさんざん苦労してきたのに、まだ今ごろ国際線をこちらに持つていこうというのは、けしからんと言います。それは当然そのように考えられるわけです。しかも、ここ埋め立てをするときに、また房総半島の山を削っていまして、また地元の方がダンプカーで確かに迷惑を被っています。だから、それを放つておいて、東京だけが国際的な競争力強化という、そんな勝手な話はないだろうと思うわけです。

これも、これだけは言ってやろうと思ってテレビでしゃべりましたが、今ごろカットしているのでしょうか。まずいのですが、妙案です。国際空港の部分は千葉県にして、東京都と千葉県の境をこの辺に作って、ここから向こうは千葉県だ。固定資産税などは千葉県にお金が行くのです。しかも仕事も、東京湾はここに横断道路があるので、木更津市民は国際線の部分で働いてください、給料を弾みますという手もあるわけです。千葉県木更津市羽田とかです。するとテレビで、「それはちょっと東京都が」と言うので、今の東京都知事はそんな細かいことにこだわる人ではないでしょう、などと言ってきたのですが、どう思われますか。対極です。千葉県も東京都も、両方の面子が立つと思うのです。東京都だけが榮えようとするのは良くなくて、共存共栄しなければいけないというのが趣旨です。

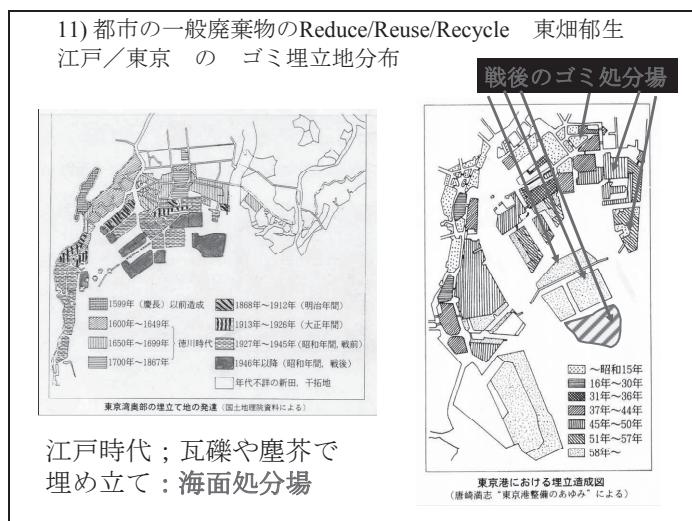


図-2.60 ゴミ埋立地分布(日本・東京)

江戸／東京のごみ埋立地分布です。

海外の例を見せると、テヘランです。結構取材したのです。もう何でもかんでも捨てていて、イランは、とにかくごみが水っぽいのが特徴です。酒が飲めないので、果物をやたら食べるので、水が多いそうです。だから、燃やすのは得策ではないと言っていました。コンポスト肥料の製造をやって、結構もうかるのだそうです。空気を導入して、早く分解する実験も当時やっていました。これは、もう6～7年前の写真です。

コンポストは、変なものが混じてくるので、日本の農家の方が結構嫌がっていらっしゃいます。



図-2.61 フィリピン（ルソン島）

フィリピンは、むちゃくちゃです。ニワトリがいて、卵を産んで、人間が食べます。人間から出たごみがここへ行って、ニワトリが食って卵が出て、また人間に戻るというリサイ

イクルです。



図-2.62 マニラ (Payatas)

ただ、時々悲劇がありまして、ごそっと崩れるのです。マニラの Payatas では、2001 年に千何百人亡くなった例であります。これは危ないというので全部取り除くのはいいのですが、それをどこかへ持つて行って、また別のところで同じことが起こります。こういうところは、地元の人間が来て、ごみを拾つて売るのは、廃品回収です。そういう人たちが住んでいて、こういうときに雨が降ると、崩れて犠牲になっています。



図-2.63 インドネシア (バンドン)

インドネシアにも同じものがあります。これは 2005 年でしたか。どつと崩れて、170 人ぐらい亡くなった跡です。なぜ崩れるのでしょうか。先ほど、私は補強土だと言って、ごみは強いと言ったばかりです。ところが、ここはメタンガスで紙やビニールが燃えているのです。せっかく補強した材料が燃えて、消えてしまっているので、弱くなっています。だ

から、雨が降ると、どっと崩れたのです。

フィリピンも同じだと言っていたら、どうもそちらは燃えていなかつたはずだと言うのです。でも、フィリピンのごみがよく燃えるのは、割と昔から有名なので、やはり私はいろいろなものが燃えていたのではないかと今でも思っています。

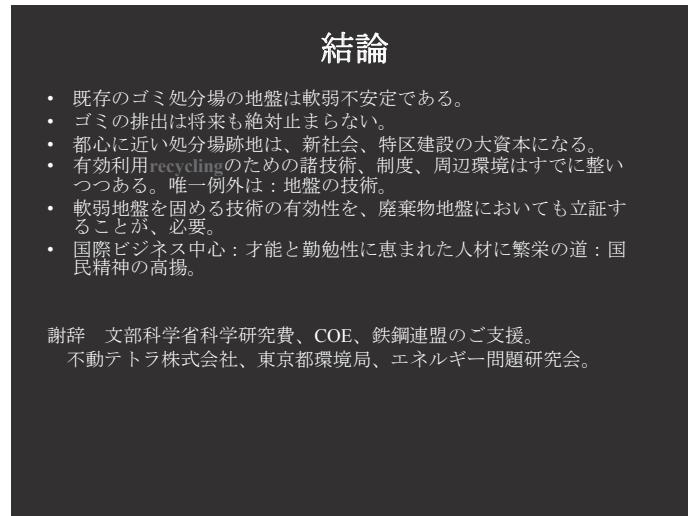


図-2.64 結論

というわけで、ごみはせっかくの面積資源なので、50年、60年たてば、今の東京湾のごみの島も安定して、いい土地になるのでしょうかけれども、そんなに待たないで、もう20年ぐらいで何とか新しい交通の結節点としてのビジネス中心にして、いろいろな人が活躍できる、税金もどかっと安くするとかの特区にして、何とかわが国に海外からお金を引っ張り込む窓口にする。出島という人もいるのですが、そういうけちなことは考えていなくて、入る島、入島です。

そういうわけで、いろいろなところからご支援を賜りましてありがとうございました。
以上で私の報告は終わります。ありがとうございました。

(桑野) ありがとうございました。大変刺激的な面白いお話を聞かせていただいたと思います。

3. 「首都高速中央環状新宿線プロジェクト」

～都市の環境保全に向けた道路建設の取り組みおよび防災安全への取り組み～
土橋 浩(首都高速道路株式会社 技術管理室 設計技術グループ

総括マネージャー)



(桑野) では、時間となりましたので、2番目のご講演をお願いしたいと思います。2番目のご講演は、首都高速道路株式会社の土橋先生にお願いいたします。

土橋先生は、東京大学大学院修士課程を修了された後、首都高速道路公団に入られまして、2003年から中央環状新宿線、それから品川線の設計に従事されております。その関連技術で、土木学会やコンクリート工学協会の技術開発賞を受賞されていますほか、昨年東京大学で学位も取得されました。現在、技術管理室設計技術グループ総括マネージャーをお務めになっていらっしゃいます。

では土橋先生、よろしくお願ひいたします。

第16回ICUSオープンレクチャー
都市環境向上への地盤工学の取り組み

首都高速中央環状新宿線プロジェクト
～都市の環境保全に向けた道路建設
および防災安全への取り組み～

2009年4月3日

首都高速道路(株)技術管理室
設計技術グループ
土 橋 浩

1

首都高速道路

図-3.1 タイトル

3.1 はじめに

ただ今ご紹介いただきました、首都高速道路の土橋でございます。本日はこのような機会をいただきまして、誠にありがとうございます。

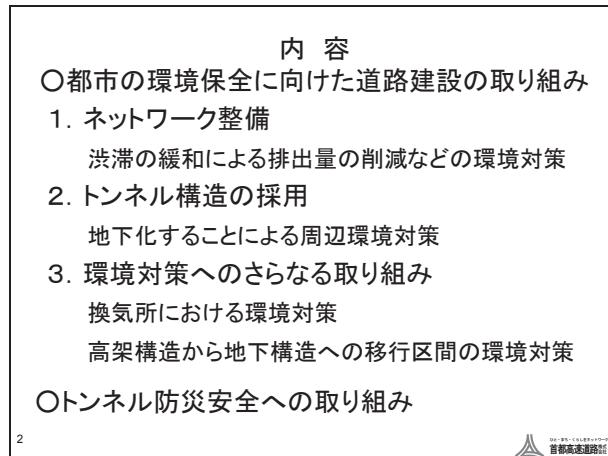


図-3.2 講演内容

本日お話しさせていただきます内容は、首都高速中央環状新宿線のプロジェクトにおきまして、都市の環境保全に向けた道路建設、道路整備の取り組みと山手トンネルにおける防災安全の取り組みの二つについて、ご紹介させていただきたいと思います。

先ほど、東畠先生の方から、非常にグローバルな歴史的深い都市の誕生についてお話し頂きましたが、その都市の中の首都圏東京におきまして、どのような道路整備をしているかということについて、本日ご紹介させていただきたいと思います。

本日のテーマは二つあります。まず都市環境保全に向けた道路建設の取り組みということで、ネットワーク整備に伴う環境保全対策です。これからご紹介します新宿線は、全線のほとんどにトンネル構造を採用しています。トンネル構造を採用すること自体が、周辺への環境保全対策ということになっていますが、トンネル構造の採用に当たっての経緯についてまずご紹介させていただきます。

次に、ネットワーク整備とトンネル構造の採用によりまして都市部の環境保全に対してはかなりの効果が発現されていますが、さらなる取り組みとして換気所における環境対策、それから既存の高架構造から地下構造への移行区間における環境対策についてご紹介させていただきます。

そして、都市の安全対策とまでは言い過ぎかもしれません、このトンネルにおける防災安全対策の取り組みについて最後にご紹介させていただきたいと思います。

3.2 ネットワーク整備による取り組み

まず、都市環境保全に向けた道路建設の取り組みということで、ネットワーク整備についてご紹介させていただきたいと思います。

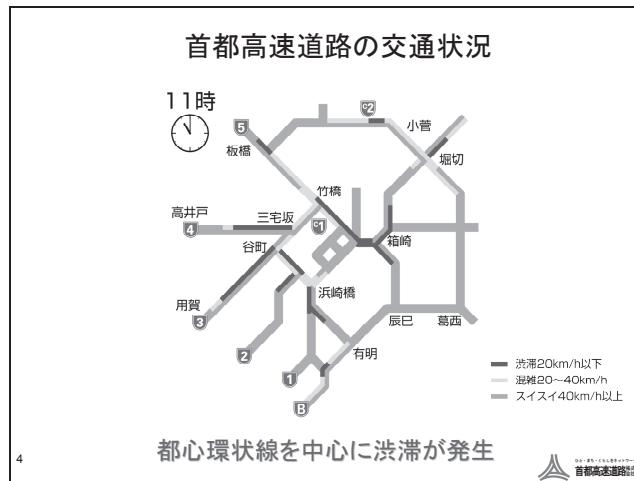


図-3.3 首都高速道路の交通状況

ちょっと古いデータで恐縮ですが、現在既にこの区間が開通しておりますが、この山手トンネルが開通する前の首都高速の交通状況でございます。これは、朝の7時の状況です。それから9時、11時です。これが一日の中で渋滞がピークとなる時間帯で、都心環状線を中心とした放射方向の渋滞が続いている状況です。その後13時、15時、夕方の渋滞時、それから19時です。



図-3.4 渋滞の原因是・・

この渋滞の原因を、ご存知の方はたくさんいらっしゃるかと思いますが、都心環状線に放射方向の道路から交通が流入してきますので、結節点のところで渋滞が発生していると

ということです。従って、現在放射道路をつなぐ環状道路は、都心環状線しかありませんが、ここをバイパスする迂回路の建設が重要となっています。

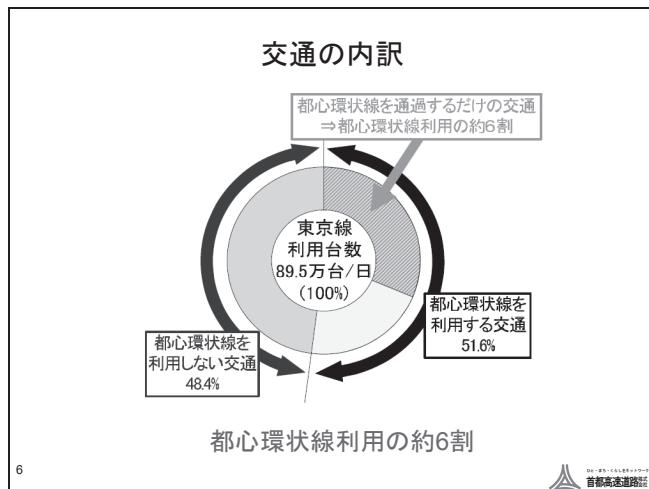


図-3.5 交通の内訳

次に、交通の内訳を見てみます。東京地区の利用台数は大体1日約90万台で、このうち約半分が都心環状線を利用していない交通です。すなわち、約半分の交通が都心環状線を利用している車で、約45万台です。このうちの約6割の交通は、都心に目的地を持たない、通過するだけの交通となっています。この6割の交通を、いかに中央環状線によってバイパスし、迂回分散するかが渋滞解消のキーになります。

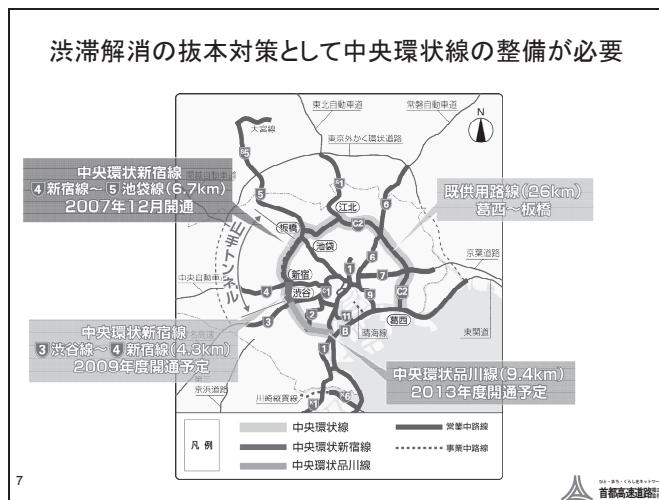


図-3.6 渋滞解消の抜本対策

そのために、首都圏では3環状道路の建設が進められており、一番内側が中央環状線、その外側に外かく環状道路があり、この地図にはありませんがその外側に圏央道があります。中央環状線は3環状道路の一番内側で、都心から半径約8kmに位置する延長約47kmの

路線です。

現在この路線の整備が急務になっていますが、既に東側・北側の 26km、ならびに一昨年の 12 月に開通した新宿線の西側の一部で、この区間が既に開通しています。延長約 47km のうち、新宿から渋谷間、それから渋谷から湾岸線の大井ジャンクションまでの区間が建設中で、新宿から渋谷までの区間については今年度末の開通を予定しているところです。

また、その先については 2013（平成 25）年度に、湾岸線の大井ジャンクションまで接続する予定です。これによって中央環状線のリング、首都圏 3 環状道路の一番内側のリングが完成いたします。

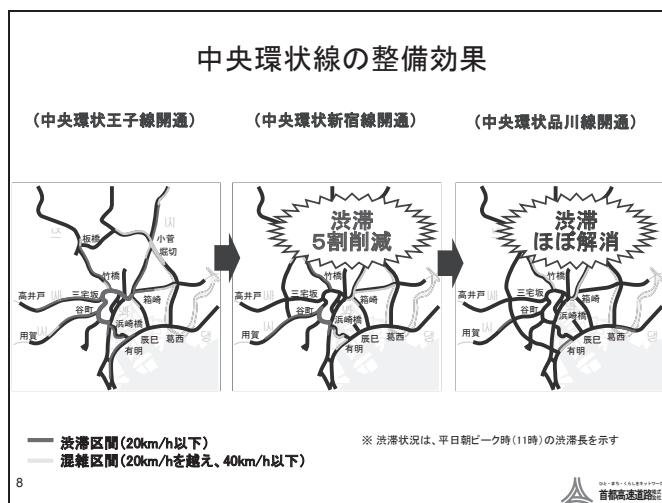


図-3.7 中央環状線の整備効果

これに伴ってどのような効果があるかといいますと、これは山手トンネルの一部が開通する前の状況です。このような渋滞状況が、今年度末になれば渋谷の大橋ジャンクションまで開通しますので、概ね渋滞が 5 割削減できます。また、湾岸線の大井ジャンクションまで接続することによって、渋滞はほぼ解消されます。

現在、山手トンネルは 5 号線の池袋から 4 号線の新宿まで開通していますが、これによる効果をご紹介します。

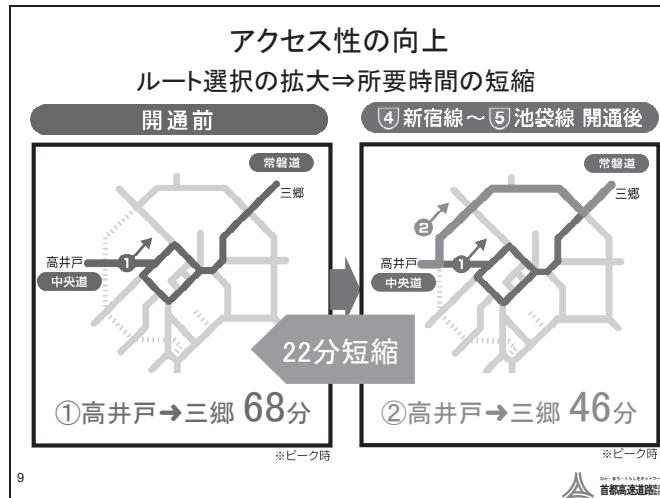


図-3.8 アクセス性の効果

まず、アクセス性の効果です。中央道の高井戸都心環状線を経由して、三郷、常磐道へ通過していた交通が、現在、新宿線の一部が開通したことによって、このように高井戸から新宿線山手トンネルを経由して、三郷、常磐道に向かうルート選択が可能になりました。これによって、約 22 分の時間短縮効果が発生しています。

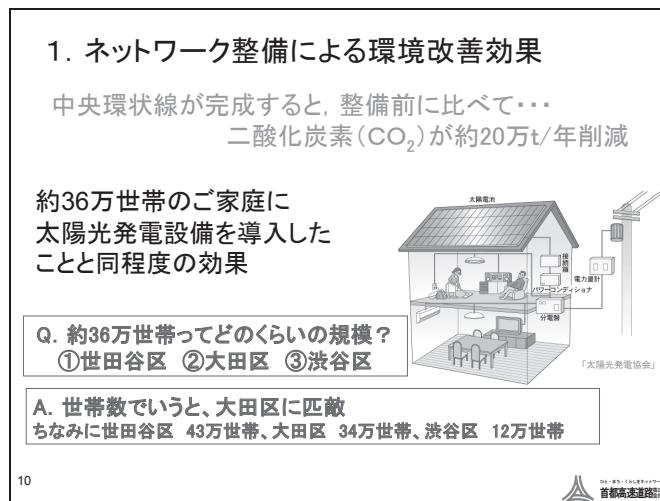


図-3.9 ネットワーク整備による効果

次に、環境面について、ネットワーク整備によってどのような効果があるのかといいますと、CO₂だけではございませんが、1例としまして CO₂を取り上げさせていただきますと、年間約 20 万トンの CO₂が削減できます。家庭の電力で比較しますと、約 36 万世帯の家庭に太陽光発電を導入したのとほぼ同程度の効果があるということです。

36 万世帯と一概に言われても、ぴんと来ないかもしれません。ここでクエスチョンですが、36 万世帯とは世田谷、大田、渋谷のいずれの区の世帯数に匹敵します?… 答えをご

紹介しますと、大田区に匹敵するほどです。大田区の各世帯に太陽光発電を導入したのと同程度の効果が、山手トンネルのネットワーク整備によって得られるという効果です。

以上、まずネットワークの整備によって、どのような整備効果が得られるかということについて、渋滞の解消にともなうアクセス性の向上や環境改善効果についてご紹介させていただきました。

次に二つ目のトンネル構造の採用についてご説明します。中央環状新宿線は全線ほぼトンネル構造を採用しています。トンネル構造を採用すること自体が、騒音、振動、大気などに対して環境保全対策になっています。今回、都市中心部にトンネルを建設するということで、さまざまな建設時の取り組み、技術開発について、ご紹介させていただきたいと思います。

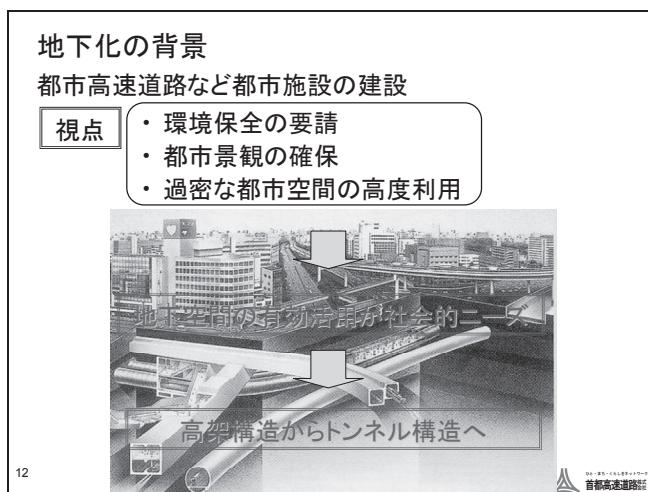


図-3.10 地下化の背景

まず、過密都市部に高速道路などの施設を建設する場合、大きく三つの視点があろうかと思います。まず、言うまでもありませんが環境保全の要請に対する視点、そして都市景観の確保、過密な都市空間の高度化利用という三つの視点を踏まえて、現在建設されている状況です。これらの視点で考えますと、従来は高架構造で建設されていましたが、昨今では地下構造による建設が増えてきています。地下空間の有効活用が社会的なニーズとなるとともに、高架構造からトンネル構造へと移行してきているという状況です。

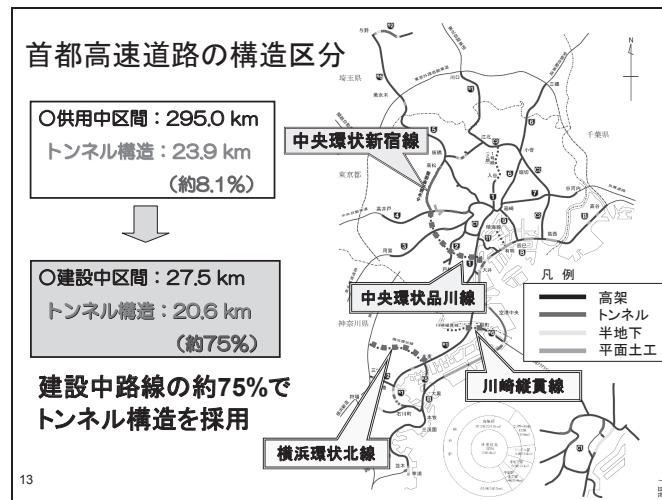


図-3.11 首都高速道路の構造区分

このことを首都高速の構造別に歴史的に振り返ってみます。首都高速は現在、295kmが開通していますが、このうちトンネル構造は23.9kmです。先ほどの紹介にもありました江戸時代のお堀や運河、河川を利用して高速道路ネットワークを整備してきましたが、現在は、既設の道路の地下などの公共空間を利用することが増えてきています。

これまでに建設された首都高速道路のトンネル構造の比率は現在8.1%ですが、現在建設している路線は、ただ今ご紹介しました中央環状新宿線・品川線やアクアラインから接続する川崎縦貫線、それから神奈川1号横羽線の生麦ジャンクションから第3京浜道路の港北インターチェンジに接続する横浜環状北線です。これら建設中の路線については、延長27.5kmのうち、20.6kmにトンネル構造が採用されており、約75%がトンネル構造で建設されている状況です。

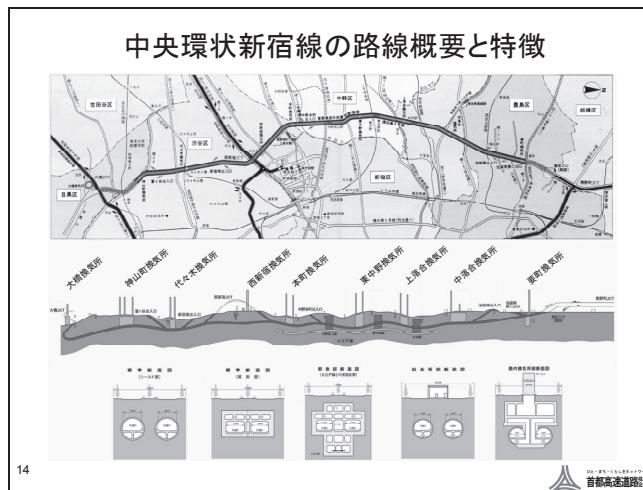


図-3.12 中央環状新宿線の路線概要と特徴

次に、新宿線の概要について説明します。南北が左右になってしましましたが、右側が北で池袋、それから中央部が新宿、左側が南で渋谷・大橋です。山手通りの地下に計画されており、既設の3号渋谷線、4号新宿線、5号池袋線と接続するジャンクション部のみが高架構造です。

この路線は山手通りの地下に建設されますので、多数の地下鉄、河川、それから幹線道路と交差しています。したがって、その地下構造物の間を縫うような形で建設を進めてきているという状況です。

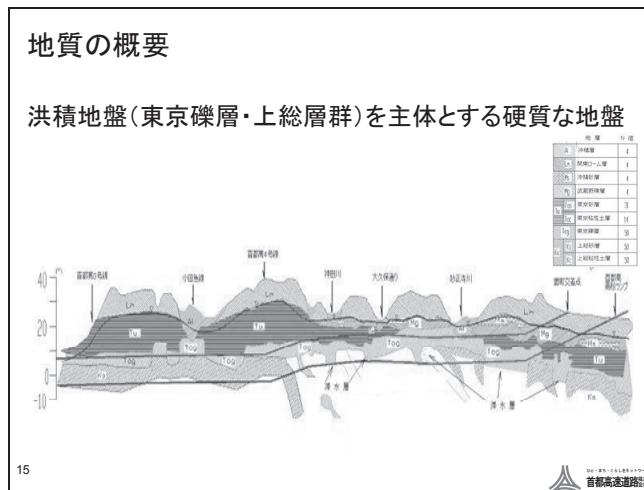


図-3.13 地質の概要

この路線の地質の概要ですが、ここに示すとおり硬質な地盤に建設されています。山手トンネルは、武蔵野台地の東部地域を南北に縦断し、東京礫層や上総層など洪積地盤の中を通過するため、非常に硬質な地盤を掘削しながら施工することになります。

東京礫層は、地下水流量が豊富で場合によっては 300mm もの大きな礫が点在するため、実際の工事においては難所となるところです。

地下構造物の建設にあたっての課題・制約条件	
環状第6号線(山手通り)直下での建設工事	
・地下鉄と9箇所、鉄道と4箇所、河川と2箇所で交差	⇒ 公共インフラなどの機能確保
・大規模地下埋設物(幹線管路、洞道など)が多数存在	⇒ ライフライン機能の確保
・山手通りの拡幅工事(22m⇒40m)と一体施工	⇒ 用地取得、沿道の高低差対応
・山手通りには多くの交通が往来(約5万台/日)	⇒ 街路交通の確保および影響の低減
・周辺には住居系、商業系の建物が隣接・密集	⇒ 地下水対策、地盤沈下対策、沿道環境対策
16	

図-3. 14 地下構造建設の課題や制約条件

3.3 非開削化による環境負荷

さて、このような都心部でのトンネルの建設に当たり、どのような課題や制約条件があるかということです。環状第6号線、山手通り直下での建設工事となりますので、先ほど申しましたように、地下鉄、鉄道、河川等と多数の交差があるため、公共インフラの機能を確保しながら、建設を進める必要があります。

また、このような幹線道路の地下には大規模な地下埋設物等がありますので、こういったライフラインの機能を確保しながら工事を進める必要があります。

さらに、今回の高速道路の整備に伴い、山手通りの拡幅工事も一体的に進められています。現道22mの幅員を40mに拡幅し、緑豊かな、幅が広く段差の少ない歩道を有する道路整備を、現在進めているところです。このため、用地を取得しながらの施工や拡幅に伴って地先の公私境界の高低差等の調整も必要になってきます。

また、山手通りは1日約5万台の交通を有していますので、この街路の交通確保、影響の低減も大きな課題になります。

また山手通り周辺は、住居系・商業系の建物が隣接・密集し、非常に高度化された地域ですので、このような地域における地下水低下に伴う地盤沈下対策、あるいは沿道への環境への対策も必要となります。

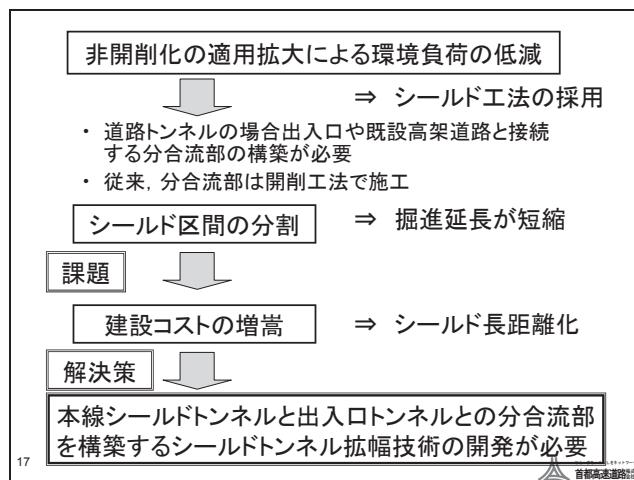


図-3.15 トンネルの建設工法

このような条件を踏まえますと、一般に、トンネルの建設工法としては、地上から掘削して躯体を構築する開削工法が採用されていますが、先に、説明しましたとおり山手通りの直下での工事ということもあり、できる限り非開削化を図り、地上から掘らない工法によって環境負荷を低減することを今回ターゲットにしました。

そのためには、現在非開削工法として一般的なシールド工法の採用が大きなポイントになります。しかし、道路トンネルでは、出入口や既設の高架道路等との接続がありますので、そういった出入口等の分合流部の構築が必要になってきます。従前、この分合流部の施工については、地上から掘削する開削工法により、建設せざるを得ませんでした。そのため、せっかくのシールド工法採用も、そこでシールド区間が分断されてしまいシールドの掘進の延長が短くなってしまい、どうしてもこれがコスト高の原因となっています。

従って、シールドの長距離化を図ることが、今回のプロジェクトの大きな課題となったわけです。そこで今回、新たな技術としまして、本線シールドトンネルと出入口との分合流部を構築する、シールドトンネルの拡幅技術を開発しました。これについて、ご紹介させていただきたいと思います。

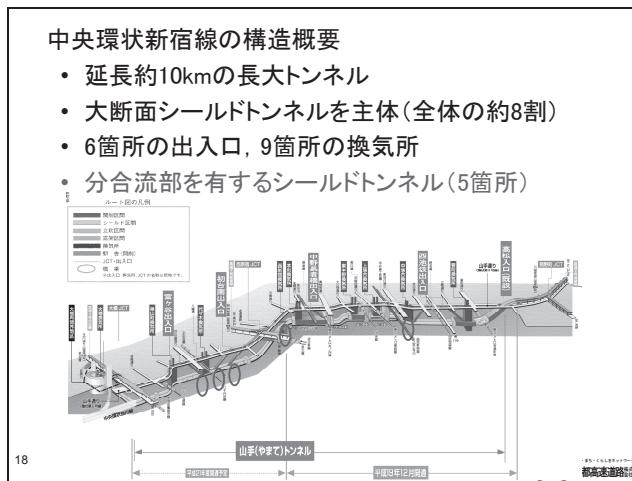


図-3.16 中央環状新宿線の構造概要(2)

先ほどの路線概要と同じですが、これは新宿線を鳥瞰的に見たものです。これが街路の山手通りで、その地下に中央環状線山手トンネルが建設されます。この赤いところが開削トンネル部で、開削工法により施工されるところです。このように、換気所の箇所や、高架と接続する箇所は開削工法で施工されます。それ以外の水色の部分は、シールドで施工する箇所です。

多くの鉄道等が交差しているため、安全性を確保しながら施工することも重要な課題ですが、シールドトンネルと出入口が分合流する部分を、いかに作るかということが今回のポイントになります。このような分合流部は全体で5カ所存在します。

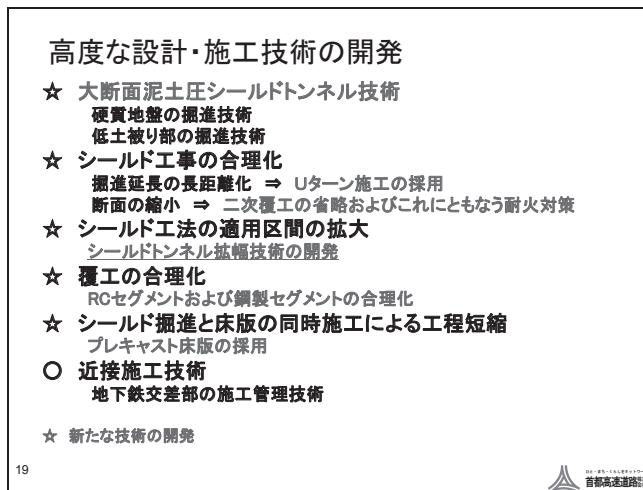


図-3.17 トンネル構築のための高度な技術開発

シールドとの分合流部以外にも、今回都心部でトンネルを構築するため、多岐にわたる高度な技術開発が必要になりました。やはり都心部での施工となりますと、用地・施工ヤードが限られてきます。そのため、一般的には大口径では泥水シールド工法が採用されて

いましたが、今回この路線では大口径の泥土圧シールドの掘削技術を確立しました。特に先ほど申しました硬質地盤の掘削、あるいは低土被り工事、例えばシールド径(D) 12mに對して、1Dを下回るような低土被りの掘進が必要になりました。

それから、先ほどの分合流部の施工技術を開発して、シールドの長距離化を図りました。いろいろな条件から、シールドの掘進延長が短くならざるを得ないところがあります。そこで1台のシールドを内回り・外回り両方の掘削に使用する、Uターン施工を採用しました。

一方、コスト削減も大きな課題でありまして、シールドの長距離化に加えてシールド断面を縮小するということで、二次覆工を省略し耐火対策を実施しました。これについては後ほど防災安全のところでご説明したいと思います。ここではシールドトンネル拡幅技術の開発を中心にご紹介したいと思います。そのほかにも幾つか、工程短縮等の施工技術を開発しながら工事を進めてきたところです。

さて、シールドトンネルの拡幅技術ですが、本線のトンネルを円いシールドトンネルで建設し、地上から本線のトンネルに分岐あるいは合流するような出入口が接続される箇所を構築する技術です。分合流部は断面形状が非常に複雑に変化しますので、この箇所の施工技術が今回大きなポイントとなったわけです。この施工技術を確立すべく、さまざまな実験・解析等を行い検証した結果、今回新たな技術を開発することができました。

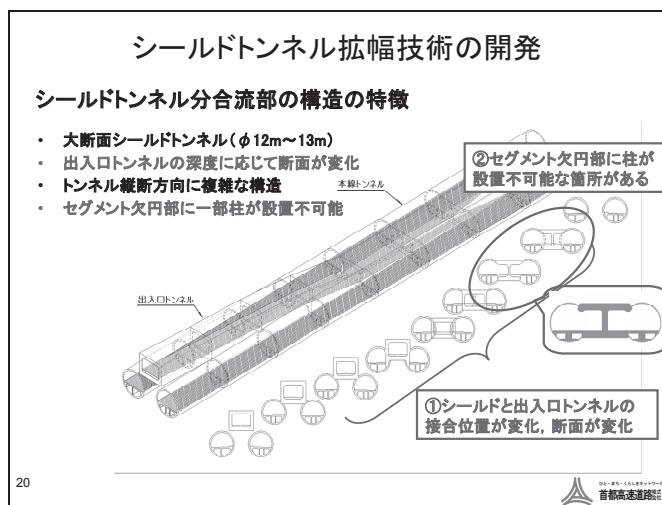


図-3.18 シールドトンネル拡幅技術の開発

これは、先ほどの分合流部の構造概要です。本線のトンネルに対して、出入口が地上から下りてきて、このあたりで合流あるいは分岐します。特に分合流部で円形のシールドトンネルの一部を撤去して、このように出入口トンネルを接続するため中央にしか柱が設置できない部分が設計・施工上のポイント、課題となります。

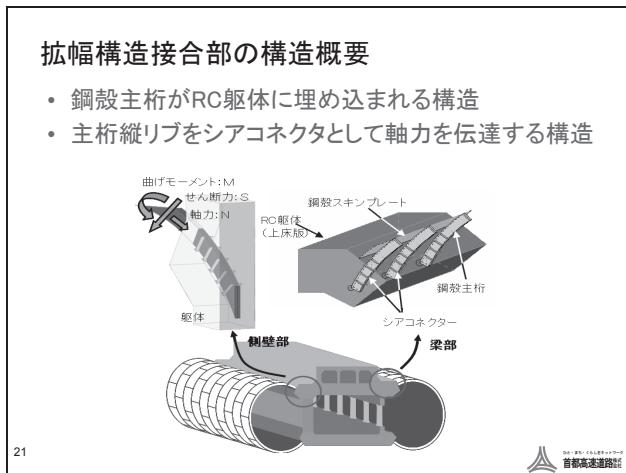


図-3. 19 拡幅構造接合部の構造概要

この接合部の詳細を見てみると、このようにシールドのトンネルから伝わる軸力を、上床版の梁で受ける構造です。この梁との接合部の設計については、過去に実施例がありませんでしたので、この設計法の提案にあたりまして、さまざまな実験・解析等を実施して検証してきました。さらに実際の工事においては、計測による管理を実施しながら安全に施工いたしました。

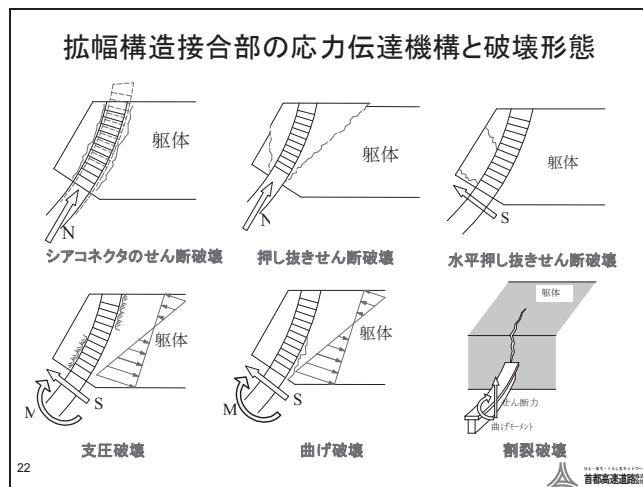


図-3. 20 拡幅構造接合部の応力伝達機構と破壊形態

この接合部において、どのような構造上の課題があるかといいますと、当然、トンネルは周りから土圧や水圧を受けていますので、その土水圧によって、このトンネルには主に軸力が発生しているわけです。リングが円形につながっていればこの軸力に対してセグメントトーリングを設計すればいいのですが、今回セグメントの一部が切断撤去されてしましますので、この軸力が、鉄筋コンクリートの軸体にどのように伝達されるか。伝達に当たつては、伝達部材であるシアコネクタという鋼板の破壊耐力はどの程度あるか。あるいはコ

ンクリートの押し抜き破壊に対する耐力はどの程度かなどについて確認する必要がありました。

さらに、軸力のみならず、せん断力と曲げモーメントが作用しますので、このせん断力、曲げモーメントに対してコンクリートの押し抜き破壊や支圧破壊が起こらないか、あるいは割裂破壊が発生しないかなどについて破壊形態や耐力を検証する必要があります。

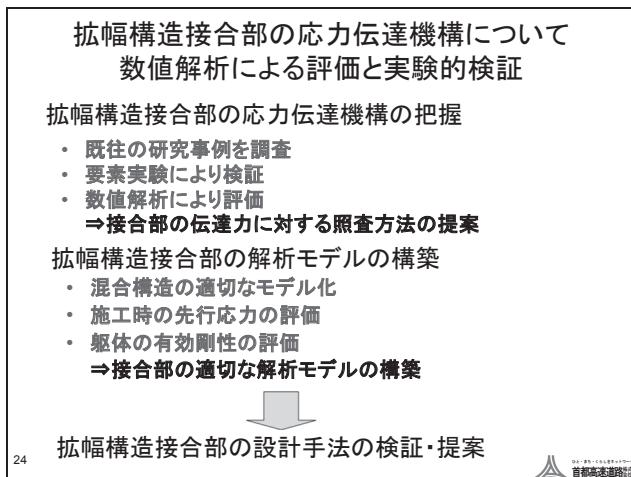


図-3. 21 数値解析による評価と実験的検証

これらを検証すべく、まず接合部の応力の伝達機構に対して、既往の研究事例の調査、それから要素実験による検証、数値解析により評価を行って、この接合部の荷重の伝達に対する照査方法を提案させていただきました。

拡幅構造の照査方法の提案に当たりましては、全体構造系に対するモデルが必要と考えられますので、この拡幅構造接合部を含めた解析モデルの構築が必要になってきます。このため、先ほども説明したが、鋼と鉄筋コンクリートの複合、混合構造に対する適切なモデル化、それから施工が非常に複雑なステップとなりますので、施工時に発生する先行力、および施工時応力の評価、それから最終的に軸体に作用する荷重に対して鉄筋コンクリートの軸体の有効剛性の評価を考慮するための解析モデルを構築し数値解析を行うとともに、最終的には実物大の2分の1のモデルにより破壊実験を行って、その接合部の耐力、設計手法の検証あるいは提案をしました。

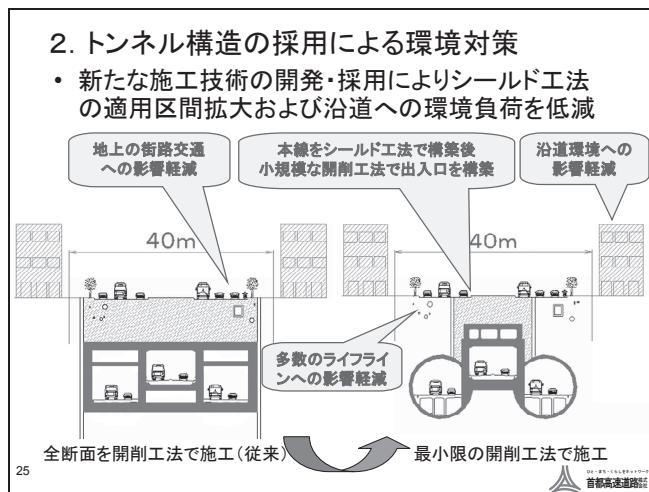


図-3.22 トンネル構造の採用による環境対策

この結果、このようなシールドトンネルを拡幅する施工が可能となりました。ここではシールドトンネルを掘削した後、開削工法で出入口トンネルを建設する事例をお示しします。従来の工法ですと、現在 40m に拡幅している山手通りのほぼ全幅員 40m 付近まで土留め壁を施工し、大規模な堀削を行った後、ボックスカルバートの本線トンネルと中央には出入口を構築します。すなわち、いったんトンネル下端まで掘って、また土を埋め戻して出入口トンネル部を建設します。

そうしますと、地上には環状第 6 号線の交通や、地下にはライフラインが埋まっていますので、これらに対する影響が発生してくるということです。今回開発した工法を採用しますと、シールドトンネルの施工では、地上にほとんど影響は与えることなく掘削が可能です。さらに、この出入口トンネル部を地上から最小限の掘削範囲で施工することが可能になったということです。これによって、例えばライフラインへの影響を軽減することが可能になるとか、地上の交通の切り回し等も減ることによって、地上への影響が減ります。また沿道環境対策としては、周辺のマンションなどの建物のすぐ軒先近くで土留め壁を施工することなく、離れたところで施工ができることから、沿道環境への負荷の軽減にもなっています。

最小限の開削工事で出入口を建設することができることとなり、地下化に当って、できる限り地上から掘らない工法を採用することが可能になったことによる環境改善効果が第 2 点目のポイントです。



図-3. 23 拡幅箇所の施工中と施工後

これは、拡幅箇所の施工中と施工後の写真です。円い箇所がシールドトンネルの部分で、鉄筋コンクリートのスラブ（上床版）と壁が見えるかと思いますが、施工中にシールドトンネルの一部を切断、撤去している状況です。最終的にはこのような出来上がりとなりまして、現在、池袋と新宿の間の山手トンネルが開通しています。

トンネルを採用することによって、騒音、振動、大気対策への負荷を軽減するとともに、シールドトンネル拡幅技術の開発によって、施工時の環境負荷をもより低減することができになりました。

3. 環境対策へのさらなる取り組み

- 換気所設備における環境対策
電気集塵機および低濃度脱硝装置を導入
⇒除去率: SPM(浮遊粒子状物質)は80%以上, NO₂は90%以上
- 高架構造から地下構造への移行区間の環境対策
ジャンクション部の覆蓋化
遮音壁・裏面吸音板の設置
緑化対策
- 山手通りの整備
沿道環境対策(緑化、電線類の地中化など)
換気塔の景観デザイン

28

図-3. 24 環境対策へのさらなる取り組み

3.4 換気所及び移行区間の環境対策

続きまして、このトンネルの建設に当たっての環境対策として、これまで、施工技術の高度化についてご紹介しましたが、さらなる環境対策の取り組みについてご紹介します。

トンネルですから、トンネル内の空気を入れ換えるため換気をすることが必要となります。山手トンネルでは、全体で9カ所の換気所があります。この換気所における新たな環境対策と、トンネルと高架部分の接続部、いわゆる移行区間において実施している環境対策の2点について、取り組みをご紹介させていただきたいと思います。

まず、換気所設備における環境対策です。山手トンネルには換気所は9カ所ありますが、換気所の中にはトンネル内の空気を入れ換えるためのファンがあります。ファンによって換気塔から粉塵を除去した空気を上空高く吹き上げて大気中に拡散します。今回、電気集塵機ならびに低濃度脱硝装置を換気所に新たに導入しています。これにより、1日平均値で浮遊粒子状物質(SPM)は80%以上、NO₂は90%以上取り除かれている状況です。

それから、高架から地下部への移行区間については、ジャンクション部そのものを覆蓋化する覆蓋構造の採用、遮音壁・裏面吸音板の設置による騒音対策、さらに沿道の環境との調和を図る緑化対策等を施しております。

また、山手通りの拡幅整備も平行して行っており、緑化や電線の地中化、いわゆるCCボックスを埋設して無電柱化の工事も実施しております。また、換気塔が山手通りの中央分離帯に建設されるため、塔のデザインにも配慮し、周辺の景観との調和を図っています。

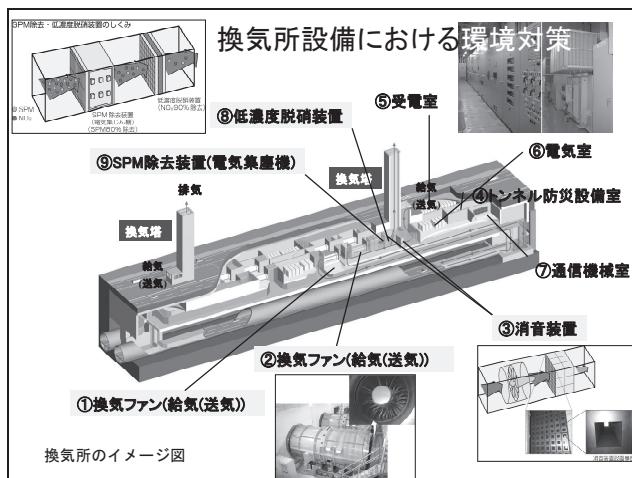


図-3.25 換気所設備における環境対策

一つずつご紹介しますと、まず換気所設備における環境対策ですが、こちらに本線のシールドトンネルがあります。山手通りの地下にはこのようなボックスカルバートの換気所が建設されており、地上にはこのように塔が2塔建っているだけです。

このブルーの線が送気のルートで、地上からの空気を吸ってこのブルーの系統を通ってトンネルの中に空気を送り込みます。そして、トンネルの中に送り込まれた空気と、トンネル内の空気と混合して、混合された空気は黄色の系統を通って地上に排出されます。

換気塔の高さは地上から45mであり、毎秒10mの吹き上げ速度で、約100mくらいの高さの上空に吹き上げて拡散するということで、環境影響評価上は基準値の100分の1以下のオーダーになります。さらに換気所周辺の局所対策として、換気ファンと換気塔の間に、

SPM（浮遊粒子状物質）を取り除く電気集塵機や低濃度脱硝装置を設置して、さらなる環境対策を実施しています。当然、音が漏れないように消音装置等も設置して、騒音対策も実施しています。

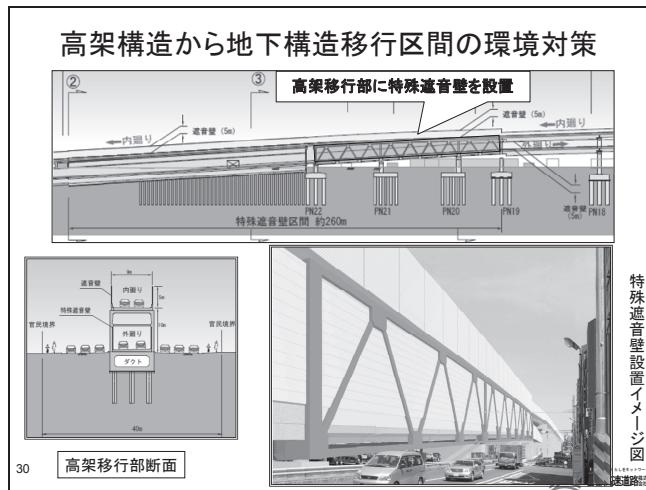


図-3.26 高架構造から地下構造移行区間の環境対策 事例 1

それから、高架構造から地下に移行する区間は、どうしても既設の高速道路とトンネルを接続するために、必要となります。こちらは池袋の例ですが、高架構造からトンネルに移行する区間で、特に下層の上り側は、トラス橋の側面を遮音壁によって覆蓋化した事例です。また上層の下り側についても遮音壁を設置して、騒音対策を実施しています。この下層は構造設計上は高架構造ですが、覆蓋化されるため、防災安全上はトンネルと同等の設計をしています。



図-3.27 高架構造から地下構造移行区間の環境対策 事例 2

もう一つの事例は大橋ジャンクションです。ご当地の近く、目黒区の池尻大橋の付近で現在大橋ジャンクションの建設をしています。これは東名と接続する3号渋谷線と山手ト

ンネルを接続するジャンクションです。これは、ちょうど国立競技場の400mトラックが地上に約30mくらいの高さまで建ち上がった状況をイメージしていただければよろしいかと思います。400mトラックを2回転して、地下トンネルから高架構造に接続しますが、側面をすべて覆蓋化した鉄筋コンクリートのラーメン構造を採用することによって、排ガスならびに騒音・振動対策を実施しています。



図-3.28 大橋ジャンクション鳥瞰図

鳥瞰図で上から見てみると、こちらが既設の3号渋谷線で、山手トンネルは地下からここでループを2回転して、3号線と接続します。

こちらはイメージ図です。これが現在の工事の状況で、かなり建設が進んできています。現在、3号線と接続するための桁を架設している状況で、今週末、来週の月曜日の朝、3号線を通行止めにしてこの部分の桁の架設を行う予定です。さらに、4月20日にはまた反対側を通行止めして桁を架設する予定で、まさに今年度末の開通に向けて、急ピッチで工事が行われているところです。

この地区の特徴としましては、イメージ図にありますように、二つの再開発ビルと一体的に高速道路を整備しています。手前側のビルは既に建設が終わって4月から入居が始まります。再開発事業と一体となった高速道路整備を行うため、周辺との景観の調和を図る必要があります。ジャンクションの屋上については、目黒区が公園化する計画で、現在設計を進めている段階です。

また、目黒川沿いにも今、ちょうど桜が咲いている時期かと思いますが、桜並木の周辺を緑化する計画で、緑豊かなジャンクションを今後は建設していきます。ちょうどこれが400mトラックに相当します。2周するループの側面は、すべてコンクリート構造で覆蓋化しています。

このようなバルキーな構造になりますので、壁面のテクスチャーなどに工夫を加えて、圧迫感の少ないデザインの構造を構築しているところです。

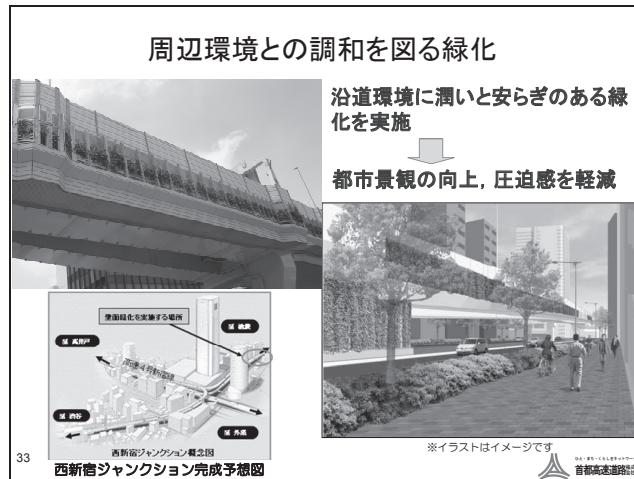


図-3.29 周辺環境との調和を図る緑化 事例1

続きまして、こちらも初めて実施した事例ですが、これは桁緑化のイメージ図です。4号新宿線と中央環状新宿線が接続する西新宿ジャンクションでは、隣接して、TOC（オペラシティ）とNTTビルなどがあります。街路では植栽を進めていますが高架構造の一部で、高速道路の桁の側面についても周辺との景観、それから潤いと安らぎのある緑化ということで、初めての試みですが、桁の側面を緑化しました。今、ちょうど供用して1年半でこのぐらいまで育っていますが、まだこの写真にありますとおり育ちかけの状況です。何年かしますと、イメージ図のような形に育っていくのではないかと考えています。



図-3.30 周辺環境との調和を図る緑化 事例2

それから山手通りの整備です。幅員を40mに拡幅する街路事業と一体的に整備していると申し上げましたが、このように換気所部では換気塔のみが山手通りの中央分離帯に建っています。塔の幅は約6~7mくらいで、全体としては6角形の形状です。実際近くで見ていただきますと、斜めにスリットの入った構造で、塔をスリム化するとともに、圧迫感を

軽減するようなデザインになっています。このデザインに当たっては、地元の方々のご意見も参考にしながら設計に反映させていただいております。

さらに街路を見てみると、40mの幅員で、歩道幅員も約9mになります。歩道と自転車道がそれぞれ分離された形態になり、植樹帯も増えます。さらにCCボックス化することによって電柱等もなくなり、高低差の少ないバリアフリー化された、緑豊かな山手通りが出来上がります。

このように街路における環境対策も進めながら、高速道路の建設を進めているところです。

ただ今申し上げましたのは、まずネットワークの整備によって環境対策を進めることと、高速道路を地下化することによって、周辺環境への対策をするという2点についてご紹介させていただきました。また周辺への環境対策として、換気所や移行区間など、さらなる取り組みについてご紹介しました。

3.5 トンネル防災安全の取り組み

最後に、トンネル防災安全の取り組みについてご紹介します。現在開通している区間は約6km弱のトンネルで、今年度末に渋谷まで開通しますと10kmのトンネルになり、都市内においては非常に長大なトンネルとなります。また、平成25年度末には、湾岸線の大井ジャンクションまで接続されると、延長で18kmのトンネルとなり、都市部では最長のトンネルになります。そこで、当然、都市の安全という視点も含めて、トンネルの防災安全への取り組みが重要になってきます。

中央環状新宿線(山手トンネル)の特徴

- 都市内の道路トンネルとして国内最長(約10km)
- 交通量が多い(約6~8万台/日)
- トンネル内で多数の分合流(出入口、JCT計7箇所)

⇒国の基準(道路トンネル非常用施設設置基準)をベースに、上記特徴を踏まえた非常用施設を設置

36

 首都高速道路

図-3.31 中央環状新宿線の特徴

3.5.1 ソフト対策

まず山手トンネルの特徴ですが、池袋から渋谷まで開通しますと約10kmのトンネルにな

ることと、1日の交通量が約6~8万台の高速道路であるということで、非常に交通量の多い都市トンネルであります。さらには、トンネル内で出入口やジャンクション等の分合流部を多数有しているということで、国の基準であります道路トンネルの非常用施設設置基準をベースにしています。

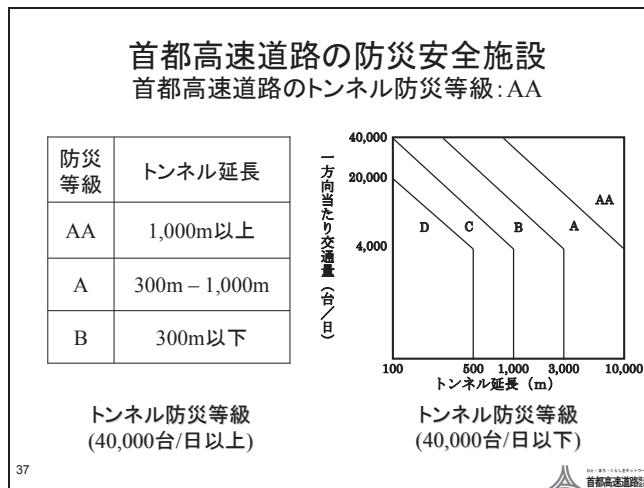


図-3.32 首都高速道路の防災安全施設

このような条件を前提に、山手トンネルの防災等級としては、4万台を超える交通量で、1kmを超えるトンネルということで、AA等級という最上級の等級となります。

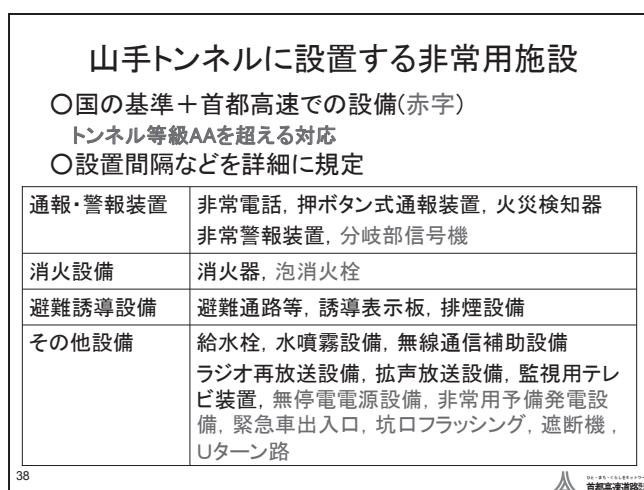


図-3.33 山手トンネルに設置する非常用施設

山手トンネルでは、この最上級の防災等級をさらに上回る対応を実施しています。その内容を、赤字で示していますが、トンネル坑口の信号機や、消火器は通常ありますが、それ以外に泡消火栓を設置したり、緊急車両出入口、無停電電源設備、それからUターン路、遮断機等を設けたりして対応しています。

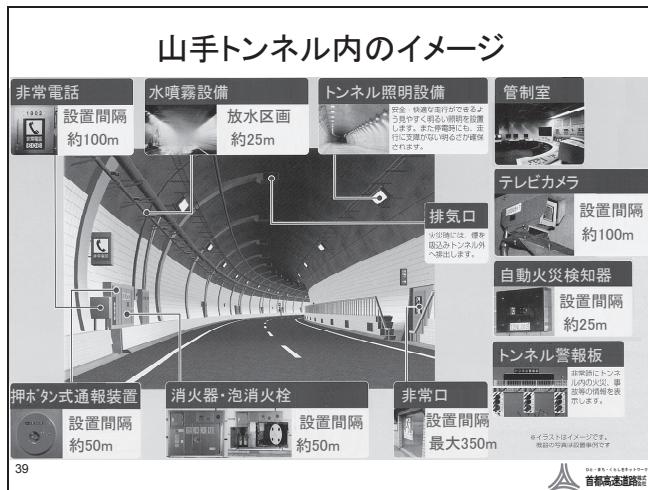


図-3.34 山手トンネル内のイメージ

具体的に見てみると、これが山手トンネル内のイメージでございます。通常、皆さんが車を運転されますと見かける非常電話や、押しボタン式の通報装置、消火栓等がありますが、ここに泡消火栓が今回設置されています。それから、後ほどご紹介しますが、これはテレビカメラです。テレビカメラについても、今回、特殊というか、いわゆる交通管制室でテレビモニターを見て監視していますが、山手トンネルは今現在でも 6km 弱の都市内長大トンネルで、テレビカメラが約 160 台付いていますので、160 台のカメラを瞬時にモニターで確認することは不可能です。

大橋ジャンクションまで開通しますと、約 380 台を超えるテレビカメラが設置されますので、トンネルの中で起こっている事象を人の目で一つ一つ確認するのには時間がかかります。もちろん確認はしていますが、瞬時には全てのカメラの映像を確認できないということで、このテレビカメラには特別なシステムを導入しています。このような非常用施設を用いて、トンネル内で起こっている事象を交通管制室で監視しながら、24 時間・365 日体制で山手トンネルの安全を管理しているところです。

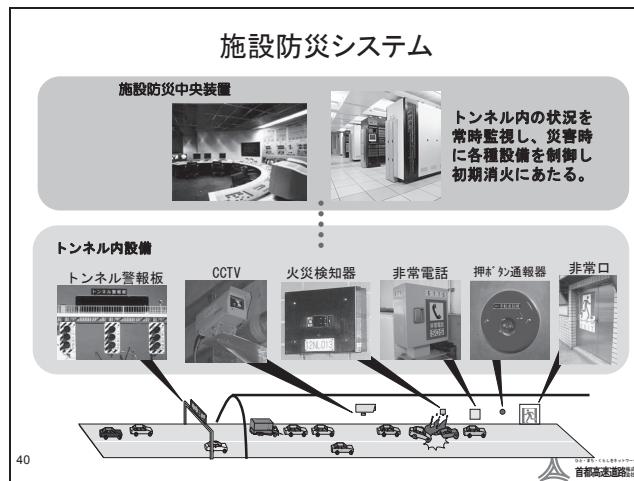


図-3.35 施設防災システム

施設防災システムとしては、テレビカメラ、あるいはトンネルをご利用されている方からの電話、押しボタン等の通報により、情報が施設防災中央装置に集約され、交通管制システムによりトンネル警報板に情報を提供するとか、信号処理をすることになっています。

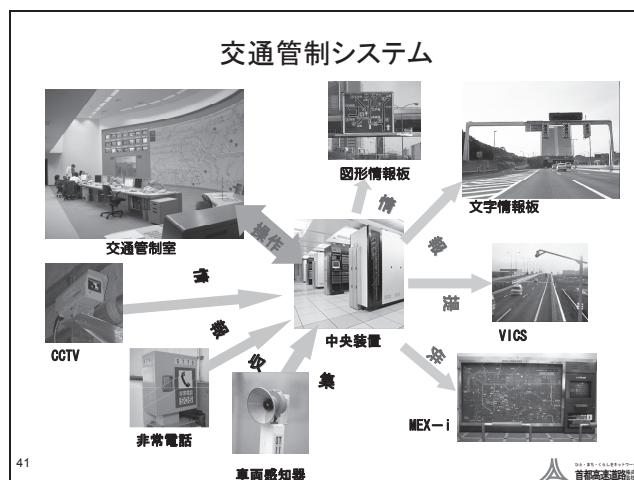


図-3.36 交通管制システム

それと併せて、交通の状況も、交通管制室で24時間監視しています。様々な設備から収集される情報を集約して、適切な情報の提供、情報板への表示等を行いながら安全な管理を進めています。このように交通管制システムと施設管制システムを連携させながら、トンネルの防災安全に取り組んでいるということです。

先ほど、国のトンネル防災等級のAA等級を上回ると申し上げましたが、その中でも特に山手トンネルに新たに導入したものを幾つかご紹介をさせていただきます。

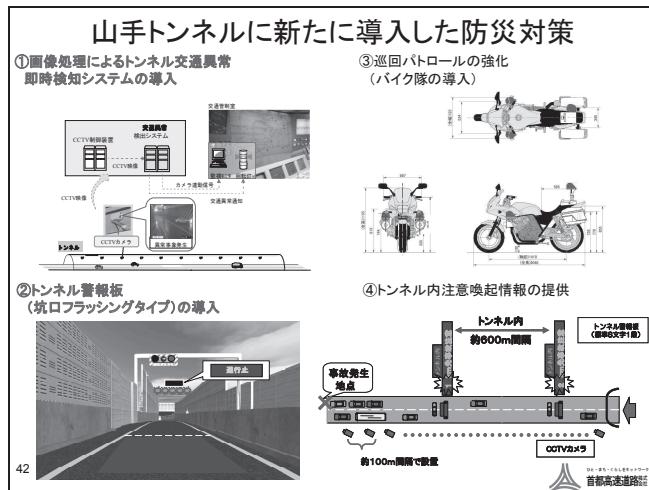


図-3.37 山手トンネルに新たに導入した防災対策

先ほどのテレビカメラについて、例えば交通に異常があったら、テレビカメラの画像を処理することによって、例えば事故車がいるとか、車両が止まっているかが検出できるシステムを導入しています。

それから、アンケートの結果をご紹介しますが、通常トンネルの入口には信号機が付いています。赤であれば止まるのですが、中には赤信号に気づかずに停止車両の脇をすり抜ける車もいまして、それらの車両にどうやって止まってもらおうかということで、ここにフラッシングを新しく付けました。赤信号に気づいて止まる方がほとんどなのですが、それに気づかずに通行してしまう人も、何かトンネル入口にウォーニングサインがあれば、そのウォーニングサインに気づきました。赤信号にも気づいて、何か異常が発生しているということが分かっていただけるのではないかということで、トンネル坑口にフラッシングを設けています。

また、トンネル内では、渋滞等も予想されますので、臨機応変にその発災地点や事故現場に急行できるように、バイク隊を今回新たに創設して、常にトンネルの監視をしながら警備をしています。さらに注意喚起情報を提供しながら、トンネル内で火災などが起った場合、通行止めをしてすぐ直近の出口で出ていただくような情報も提供しているところです。

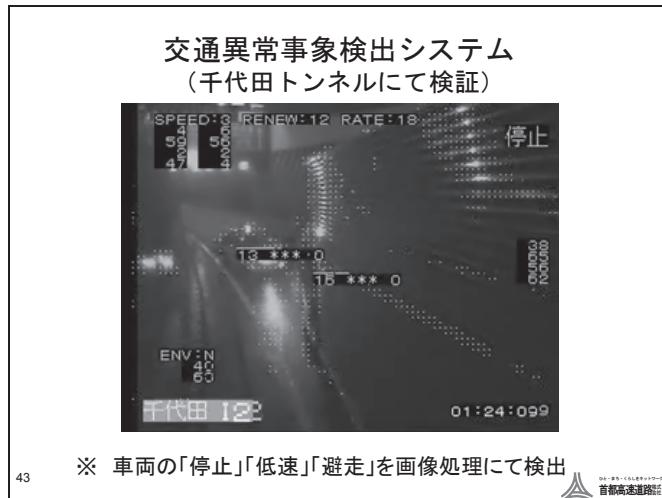


図-3.38 交通異常事象検出システム (1)

まず 1 点目ですが、テレビカメラで、車の流れを画像処理しまして、例えばスピンした車が止まっていることが画像で検出されます。この画像が車が停止しているという情報を提供してくれます。表示されるテレビモニターの画面には限りがありますが、この情報が検出されると、この画面にすぐに切り替わって、この画面が先ほどの交通管制システムのモニターに表示されます。約 160 台のカメラの画像を全て確認することなく、こういう状況が起これば、このカメラの画像がすぐモニターに現れてくるようなシステムを、今回導入しています。



図-3.39 交通異常事象検出システム (2)

同じように、別の事例を、ご覧になっていただきたいと思います。これは停止している車両があるため、交通の流れが迂回しています。車線変更していますという表示が、モニターの画像に現れるので、このように停止車両があることがすぐに分かるというシステムです。



図-3.40 交通異常事象検出システム（3）

次の画像は少しショッキングかもしれません、車両が転倒して止まった状態です。これも画像処理して、低速・停止という表示をして、このような車両があるということを、すぐに分かるようなシステムを導入しています。今後中央環状線が品川まで開通しますと、18km 都市内長大トンネルになりますので、現在、首都高では、よりこれらの防災システムのレベルをアップし、安全を確保するための対策を検討しているところです。

次の事例は、トンネル入り口のフラッシングです。

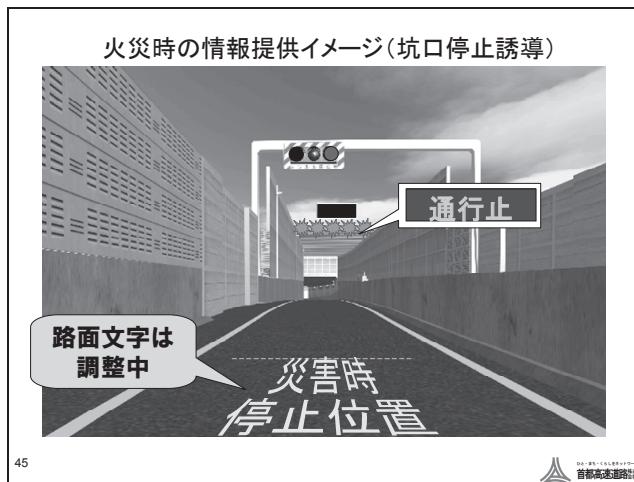


図-3.41 火災時の情報提供イメージ

こちらの事例を見ていただきます。ちょうど高架構造からトンネルに入るところです。中で火災など発生して、信号が赤となっていますが、気付きにくいことがあります。しかし、フラッシングがあると、何か異常があることに気が付いていただけて、信号も赤であることに気づき、ここで停止していただけたということです。このような効果を併せ持った、安全対策を現在しているところです。

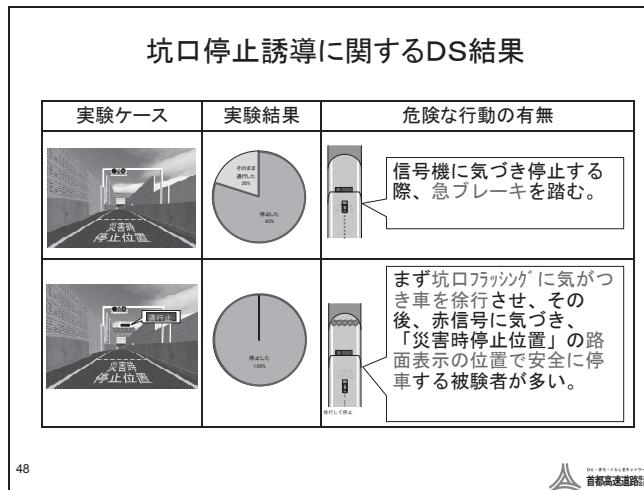


図-3.42 ドライビングシミュレーターの結果

これについて、ドライビングシミュレーターの結果をご紹介します。フラッシングのない状態で実験を行いますと、8割の方は停止していただけますが、やはり2割の方は、気付かずに通行してしまっています。気が付いたとしても、急ブレーキを踏んで止まっているという状態でした。

しかし、フラッシングを実施しますと、何かトンネル内で異常が発生しているということが事前に分かりますので、車を徐行させながら、かつ赤信号に気付きやすくなつて停止しています。フラッシングがある状態ですと 100%の方が停止しています。このようにトンネル内で火災等の異常が起こったら、交通をまず止めることが原則になつていますので、トンネル内には流入させないため、新たな対策も行つてゐるということです。

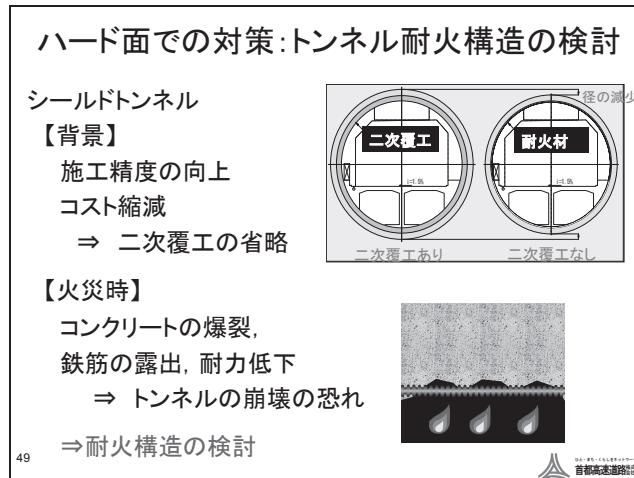


図-3.43 ハード面での対策

3.5.2 ハード面での対策

ここまでが、どちらかというとソフト面、および防災設備面の対策です。先ほど、トンネルの建設コストを下げるために、断面を縮小したという説明をしましたが、従来は外側の一次覆工といわれるトンネル構造物の内側には、耐火や止水に対する機能として二次覆工がありました。この二次覆工の部分を省略することによって、断面を縮小し、コスト削減を図ったわけですが、当然のことながらもともとあった機能がなくなりますので、これを代替する構造物が必要になってきます。

止水性など、別の構造機能的なものについては、施工精度や品質の向上によって、現在確保できていますが、耐火性能に対しては、道路トンネルですから、火災に対して対策が必要になります。例えば鉄筋コンクリート構造物では、火災が起こって、火炎で熱せられた場合、コンクリートにスポーリング、爆裂という現象が発生する可能性があります。爆裂の発生によって、トンネルが崩壊しないレベルにまで安全を確保する必要がありますので、これに対する耐火構造の検討をハード対策として行いました。

想定する火災規模																								
• 火災初期段階の火災規模として、EUREKA火災実験のデータ等を勘案し、30MWを想定																								
参考: 欧州における設計火災規模																								
トンネル換気設計等に用いる車両の熱出力の最高値																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>車種</th> <th>PIARC 熱出力の最高値(MW)</th> <th>フランスの推奨値 熱出力の最高値(MW)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>小型乗用車1台</td> <td>2.5</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>普通乗用車1台</td> <td>5</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>乗用車2~3台</td> <td>8</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>貨客車1台</td> <td>15</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>バス1台</td> <td>20</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>一般可燃物積載車</td> <td>20~30</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>油送トラック1台</td> <td>-</td> <td>200</td> </tr> </tbody> </table>	車種	PIARC 熱出力の最高値(MW)	フランスの推奨値 熱出力の最高値(MW)	小型乗用車1台	2.5	-	普通乗用車1台	5	-	乗用車2~3台	8	8	貨客車1台	15	15	バス1台	20	-	一般可燃物積載車	20~30	30	油送トラック1台	-	200
車種	PIARC 熱出力の最高値(MW)	フランスの推奨値 熱出力の最高値(MW)																						
小型乗用車1台	2.5	-																						
普通乗用車1台	5	-																						
乗用車2~3台	8	8																						
貨客車1台	15	15																						
バス1台	20	-																						
一般可燃物積載車	20~30	30																						
油送トラック1台	-	200																						
ドイツにおける火災基礎データ																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>火災の種類</th> <th>火災強度(MW) (熱出力の最高値)</th> <th>トンネルにおける 等価燃料面積(m²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1~2台の乗用車</td> <td>5~10</td> <td>2~4</td> </tr> <tr> <td>トラック/バス</td> <td>20~30</td> <td>8~12</td> </tr> <tr> <td>タンクローリー</td> <td>50~100</td> <td>30~60</td> </tr> </tbody> </table>	火災の種類	火災強度(MW) (熱出力の最高値)	トンネルにおける 等価燃料面積(m ²)	1~2台の乗用車	5~10	2~4	トラック/バス	20~30	8~12	タンクローリー	50~100	30~60												
火災の種類	火災強度(MW) (熱出力の最高値)	トンネルにおける 等価燃料面積(m ²)																						
1~2台の乗用車	5~10	2~4																						
トラック/バス	20~30	8~12																						
タンクローリー	50~100	30~60																						
※ 新宿線では危険物積載車両の通行を規制している																								
 首都高速道路株式会社																								

図-3.44 想定する火災規模

これは耐火に対する設計で、想定する火災規模です。新宿線については、5 km以上の長大トンネルであるため、危険物積載車両の通行は規制されています。これはヨーロッパで行われたEUREKA火災実験を参考に定められた火災規模です。各国の基準を見ますと、バス・トラック等が燃焼する場合で、30MWが火災強度としてあります。今回、この30MWを火災の規模として想定しました。

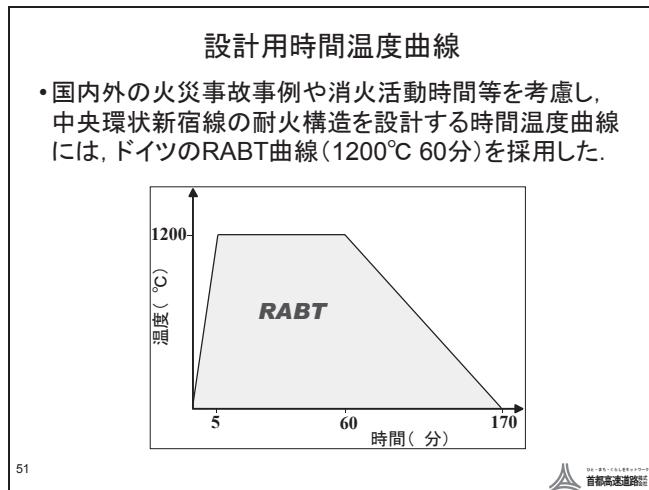


図-3.45 設計用時間温度曲線

これはドイツの基準ですが、加熱開始後 5 分で 1200 度 C の温度に達して、約 1 時間燃焼が継続します。その後、温度が下がっていきますが、この RABT 曲線と呼ばれている時間温度カーブを使って、先ほどの耐火構造の検討をしています。

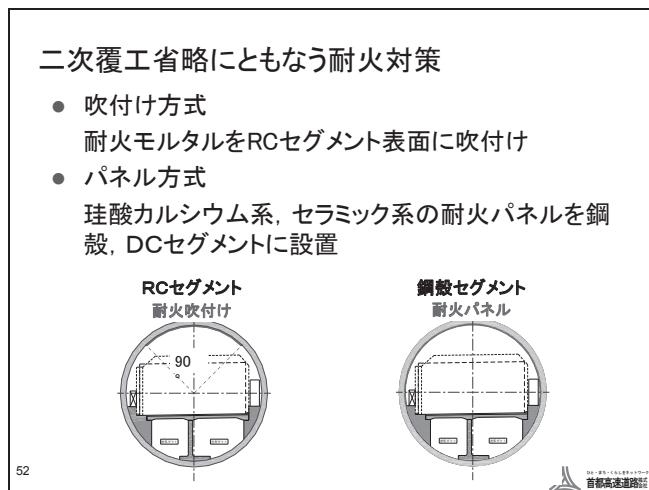


図-3.46 耐火対策

その結果、耐火材には次の 2 種類を選定しました。例えば鉄筋コンクリートのセグメントの場合、クラウンと呼ばれているシールドトンネルの天井の部分が、火災によって熱影響を受けて爆裂した場合、トンネル全体の崩壊につながる可能性があります。この天井部分に、耐火材を吹き付けることとしました。一方、先ほどご紹介した出入口との分合流部では、RC セグメントでは強度が不足しますので、鋼製（スチール）のセグメントを使っています。スチールの場合、当然高温の熱により強度低下しないように、トンネルの車道内全面にパネル形式の耐火材を設置して、耐火対策を実施しました。

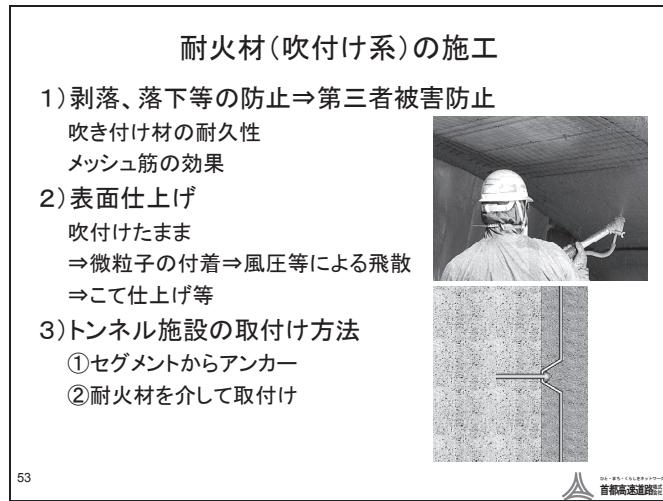


図-3.47 耐火材（吹付け系）の施工

耐火材（吹付け系）の施工です。対策工としては、鉄筋コンクリートのセグメントにアンカーを取り付け、耐火材が落下しないようにステンレスメッシュ筋を埋め込んで、耐火材料を30mmの厚さで吹き付けて、耐火被覆をしています。

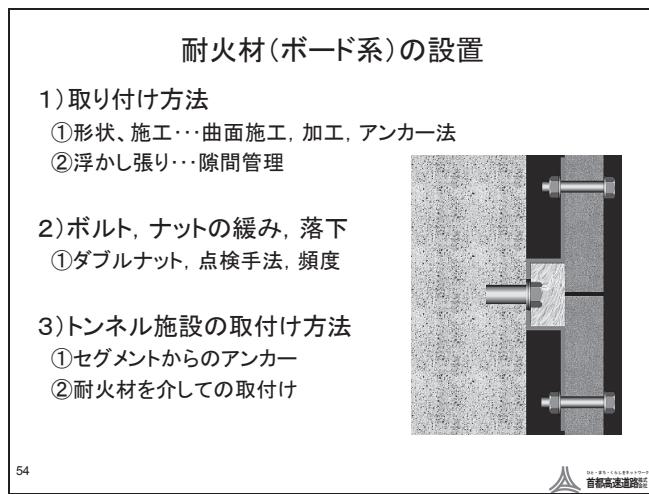


図-3.48 耐火材（ボード系）の設置

それから、耐火材（ボード系）の設置ですが、スチールセグメントにアンカーを設置して、耐火のボードを設置しています。

このような耐火工を行うことにより、二次覆工を省略し、断面を縮小していることに対する対策を行っています。

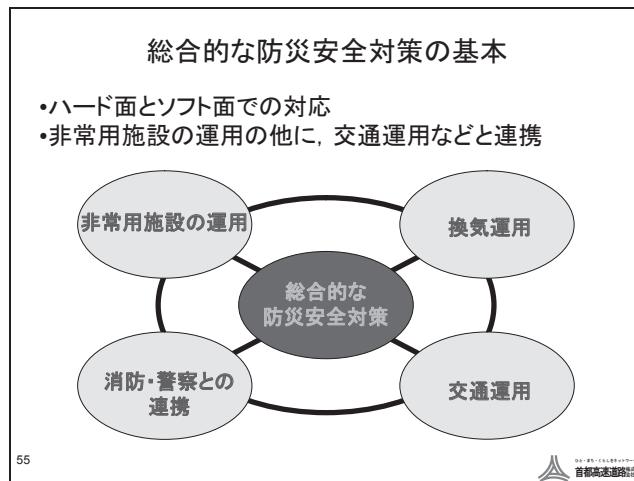


図-3.49 防災安全対策の基本

以上ご説明をしてきましたが、ハード・ソフト両面でそれぞれ対策を実施していることと、いろいろな設備を連携させながら総合的な防災安全に取り組んでいるということです。さらに、防災安全対策については、消防・警察との連携もあります。また、本日ご紹介しましたが、トンネルの中で火災が起きたときに、排煙をどのようにするかということで、換気運転システムについても連携を図りながら、トンネル内の防災安全に取り組んでいます。

3.6 最後に

本日ご説明した内容をまとめてみます。

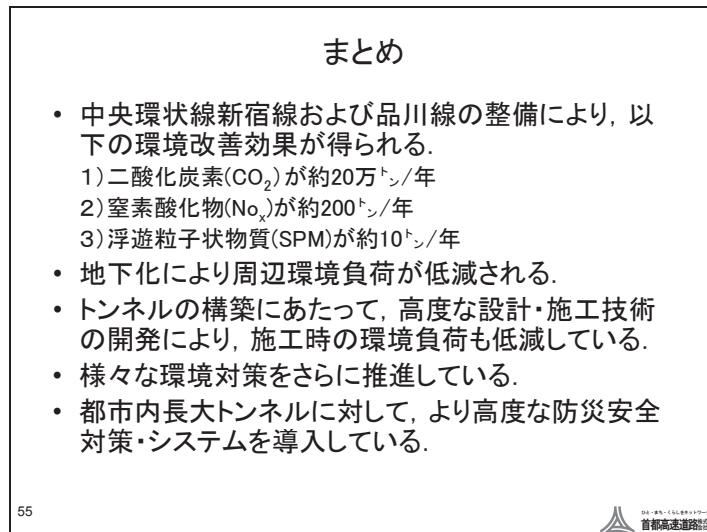


図-3.50 まとめ

中央環状新宿線および品川線の整備により、本日は「新宿線プロジェクト」につきましてご紹介させていただきましたが、品川線が、湾岸線の大井のジャンクションまで接続されることにより、このような環境改善効果があります。先ほど、二酸化炭素について説明させていただきましたが、それ以外にも窒素酸化物が年間 200 トン削減できます。また、SPM についても年間 10 トンの削減につながる整備効果、改善効果があります。これらのネットワーク整備に伴う環境改善がまず 1 点目として挙げられます。

それから 2 点目は、地下化すること自体によって、沿道への環境負荷が低減されるということで、今後、建設される高速道路ネットワークは、地下化による環境負荷の低減が期待されています。

さらに、都市部のトンネル建設に当たっては、高度な設計・施工技術を開発することによって、施工中における環境の負荷も低減しています。

それから、3 点目はさまざまな環境対策の取り組みということで、覆蓋化や緑化、公園化などの対策を実施することによって、さらなる環境対策を推進しています。ここまでがどちらかというと環境面の内容です。

最後には防災面ということで、先ほど申しました都市内の長大トンネルに対して、より高度な防災安全対策・システムを導入しています。山手トンネルは今年度末には 10km の長大トンネルとなりますが、その長大トンネルの防災安全性をさらに高めていきたいと考えている次第です。

私のご説明は以上です。ご清聴ありがとうございました。

(桑野) ありがとうございました。普段何気なく通っている道路ですが、非常に安全面や環境面に多くの努力が払われていることが理解できました。

4. 「二酸化炭素削減に向けた技術開発の取り組み」

～CO₂回収貯留大規模シミュレーション～

今村 聰(大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所長)



(桑野) 最後の講演は今村先生にお願いいたします。今村先生は京都大学土木工学科をご卒業になり、大学院修士課程を修了され、大成建設株式会社に入社されました。技術研究所、海外留学などで放射性廃棄物処分や土壤地下水汚染浄化に関する研究に従事されておりますが、その間、さまざまな学会や機関から表彰を受けていらっしゃいます。つい先日、4月1日付けで技術センター土木技術研究所の所長に就任されました。では、今村先生。よろしくお願いいたします。



図-4.1 タイトル

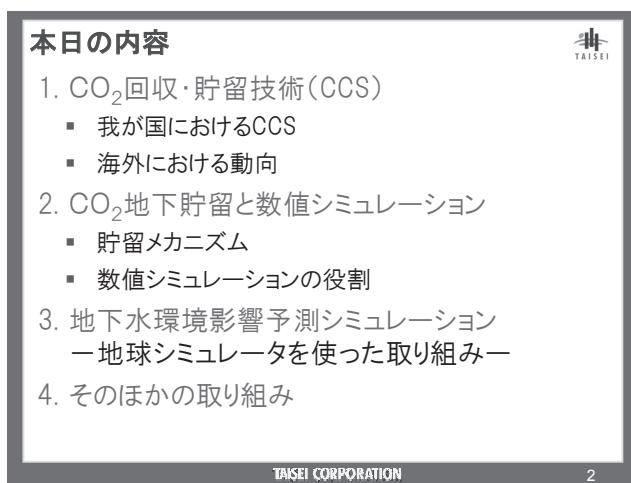
4.1 はじめに

ただ今ご紹介にあずかりました、大成建設の今村でございます。本日は、「二酸化炭素削減に向けた技術開発の取り組み」ということでご紹介させていただきたいと思います。当

社は、いろいろなことで二酸化炭素削減問題も考えており、本日、三つぐらい用意しています。

一つは、ここに書いてある CO₂の回収貯留の大規模な技術開発に対して、どういう取り組みがわれわれにできるのかということ、また、再生利用可能エネルギーということで、バイオマス・・・、無加水メタンといって、あまり水を入れないで、生ごみからメタンを発生させて、それをそのままガスとして使ったり、発電として使ったりするようなことを考えています。あとは、湾岸地域や海浜地域、特に再開発地域においては、アマゴなどを増やして、CO₂吸収の一助とすることも考えております。

本日は、この中から、CO₂の回収貯留大規模シミュレーション技術開発についてご紹介させていただきたいと思います。



TAISEI CORPORATION

2

図-4.2 講演内容

本日の内容ですが、まず1番目にCO₂の回収貯留技術、略してCCSと言いますが、Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS)で、sequestrationと言う人もいます。わが国において今、CCSがどういう位置付けにあるのか、海外でどのようなことをやっているのかをお話した後、2番目にCO₂地下貯留と数値シミュレーションということで、どういう原理で貯留されるのか。そのときに数値シミュレーションが果たす役割は何かということを説明します。3番目に、大規模地下水環境影響予測シミュレーションということで、横浜のJAMSTECにあります、つい5年ほど前までは世界最速だった地球シミュレーターという並列コンピューターを使った取り組みについて、ご紹介させていただきたいと思います。

最後は、時間があれば、そのほかの取り組みについてもお話ししたいと思います。

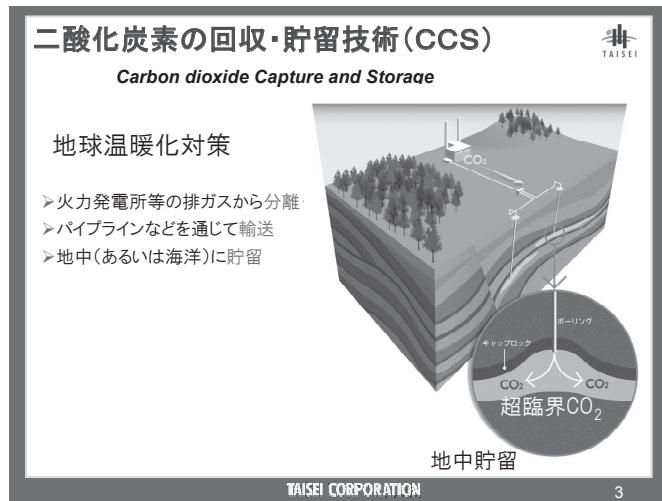


図-4. 3 二酸化炭素の回収・貯留技術

4.2 二酸化炭素の回収・貯留技術について

まず初めに、ご存じではない方もおられるかもしれませんので、簡単に二酸化炭素の回収・貯留技術についてご紹介しようと思います。

これは地球温暖化対策の一つで、大規模排出源と呼ばれる火力発電所やセメント工場、製鉄所などから出てくる排ガスから二酸化炭素を分離して、それをパイプラインなどを通じてどこかに輸送して、それを地中に貯留しようということです。海洋はまだ認められていませんので、基本的には現在のところ、地上から約 1km の地中に貯留しようということになっています。今現在よく考えられているのは、油田があるようなキャップロックと呼ばれる空気やガスを通しにくい層の下に CO_2 を埋めようということです。

超臨界というのは、1km ぐらいのところに埋めて、温度が 30~35°C ぐらいになりますと、 CO_2 は超臨界状態になるということです。

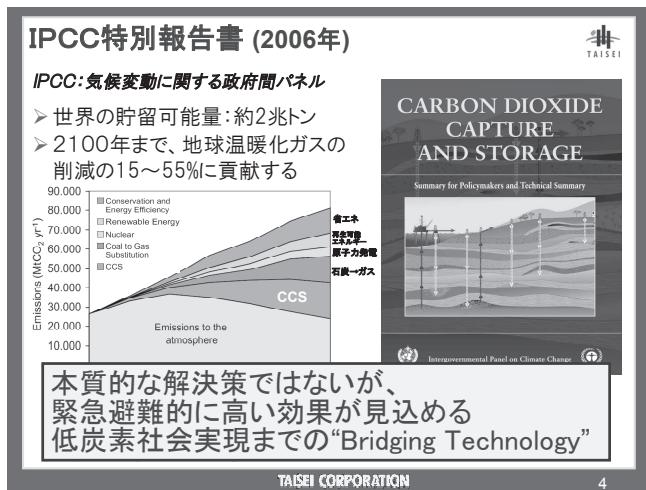


図-4.4 IPCC 特別報告書（2006 年）

これは 2006 年に出た IPCC 気候変動に関する政府間パネルということで、この 2006 年に出た IPCC 特別報告書で初めて、世界でカーボンダイオキサイドのキャプチャーの CCS という概念が認められました。これはやれる可能性はあるのではないかということで、今後、研究開発をやっていきましょうということになりました。

その後、CDM (Clean Development Mechanism) の中に、この方法を入れるかどうかというのはなかなか問題があって、日本は賛成しているようですが、ブラジルなどが大反対して、CDM に取り入れられるかどうかは分かりません。

なぜ認められたかということですが、二酸化炭素削減は、本来は省エネや、先ほど見た再生可能エネルギーで行うのが一番いいだろうと。原子力発電もいいのですが、原子力発電は原子力発電で、また別の意味でのいろいろ反対がありますので、全部に取って代わるほどは、安全保障上もなかなか難しいのではないでしょうか。これでは、ポイント・オブ・ノーリターンと呼ばれる激しいな気候変動を招いてしまうことが、IPCC の意見です。

最悪な計算結果では、約 5 年後にポイント・オブ・ノーリターンを迎えます。それで、緊急避難的に何か方法はないのかということで、CCS が脚光を浴びていて、IPCC も認めたという経緯があります。

世界的な貯留可能量は約 2 兆トンあって、2100 年までの将来、あと 100 年ぐらいのことといえば、地球温暖化ガスの削減量 15~55% 貢献することができます。そうすると、基本的にこれは重要なことだと思うのですが、本質的な解決策ではないが、もし本当に激しい気候変動があって、人類の半分ぐらい死ぬようなことが起こるのであれば、緊急避難的に高い効果を認める低炭素社会ということで、本当の低炭素社会が実現するまでのブリッジングテクノロジーとして使いましょうということだと思います。

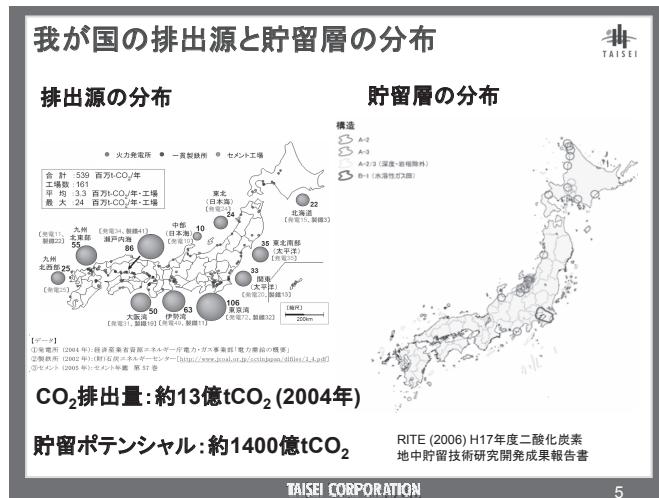


図-4.5 わが国の排出源と貯留層の分布

わが国は、どのぐらいの貯留量が可能であるかを、RITE というところでいろいろ計算をしています。これは平成 17 年に出た報告書です。ここにはいろいろ書いてあるのですが、この青丸が A2 という構造です。

A2 とは、比較的深部の地層が分かっていて、構造的に貯留ができる構造で、A3 というのは、下はよく分からなければ、簡単な弾性波探査みたいな結果によると、貯留可能な構造があるであろう。今後、調査が結構必要だけど、少しは埋められるのではないかということです。

B1 というのは、さっき言ったキャップロックという石油がたまるような背斜構造は持っていないけれども、大規模な帯水層があって、そこにはためられるでしょうということです。東京地区ですと、B1 という構造はかなりたくさんあるということで、ほかに北陸や北海道にもあります。

かたや、排出源の分布では、当然、東京湾地区が多くて、毎年 1 億トンぐらい出しています。あとは瀬戸内海や九州、それから大阪湾、伊勢湾のあたりが大規模排出源ということです。要は、CO₂を分離してどこかに埋めますから、基本的には大規模排出源と貯留するところが近い方がコストメリットがあります。あまりコストメリットがないと、発電した分、例えば石炭火力で発電した分を、全部 CCS に要るのだったら、何をやっているのか分からないので、そのメリットはどこかという問題もあるのです。現在の場合だと、CCS の分離回収コストが高くて、建設も含めて、平均的に約 4 割のエネルギーを使用することになっています。

CO₂の排出量は、日本全体では2004年で約13億トンです。貯留ポテンシャルとしては1400億トンくらいあるので、100年分ぐらいは何とかなるのではないかということになります。

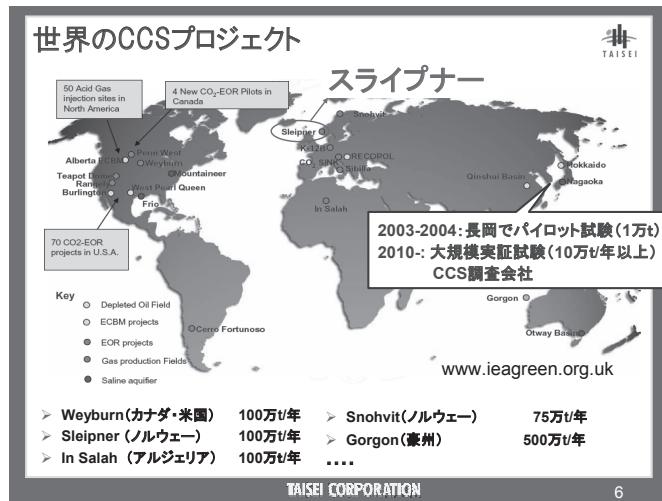


図-4.6 世界の CCS プロジェクト

世界的な CCS プロジェクトは、今、実際に実証しているというか、動いているところもあり、アメリカやヨーロッパで盛んです。アメリカでやっているのは、ここに 70 個の CO₂-EOR と書いてあります。EOR は Enhanced Oil Recovery といって、もともと油田だったのですが、油田でなかなか油が上がらなくなって、昔は水を注入して油を寄せて回収していたのですが、超臨界の CO₂ の方が地層のすき間までよく行きやすいので、よく取りやすいということでやっているのが CO₂-EOR です。だから、これは実際には CO₂ は入れているのですが、目的は油の回収のようです。

純粋の CCS プロジェクトというと、カナダの米国でいわれている Weyburn で、今、年間 100 万トンぐらい回収しています。Sleipner はノルウェーで、これも年間 100 万トンです。In Salah はアルジェリアで、年間 100 万トンぐらいです。Snohvit も 75 万トン、Gorgon が大きくて年間 500 万トンぐらいを埋めていこうとしています。

日本は 2003~2004 年で、長岡のパイロット試験で 1 万トンを埋めたということです。今年度から大規模実証試験ということで、CCS 調査株式会社ができる、それが 10 万トンぐらい埋めたいということです。場所は勿来のあたりだと思います。

あとはスライプナーが商業的にやっている一番大きなサイトについて、少しご紹介しようと思います。

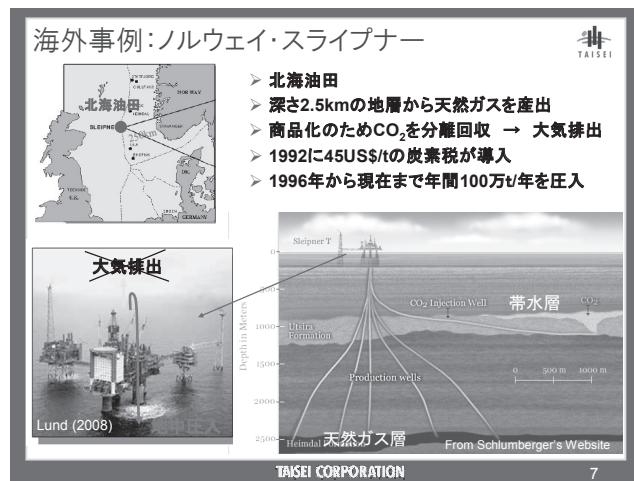


図-4.7 海外事例：ノルウェイ・スライプナー

ノルウェーのスライプナーですが、北海油田の真ん中にあり、昔から深さ 2.5km のところから天然ガスを採取していました。採取したものをお手本化のため、二酸化炭素を分離回収していく、大気排出をしようとしていたのです。1992 年にヨーロッパは非常に高い炭素税をかけていました、炭素を減らすということで、1 トン当たり 4500 円ぐらいの炭素税が導入されました。これは非常に高い値段です。炭素税を払うぐらいいだったら、約 1km のところにある、この Utsira Formation と呼ばれる帶水層の中に入れようということで、年間 100 万トンぐらいをスライプナーでは毎年、1996 年からかれこれ 10 年以上埋めていることになります。

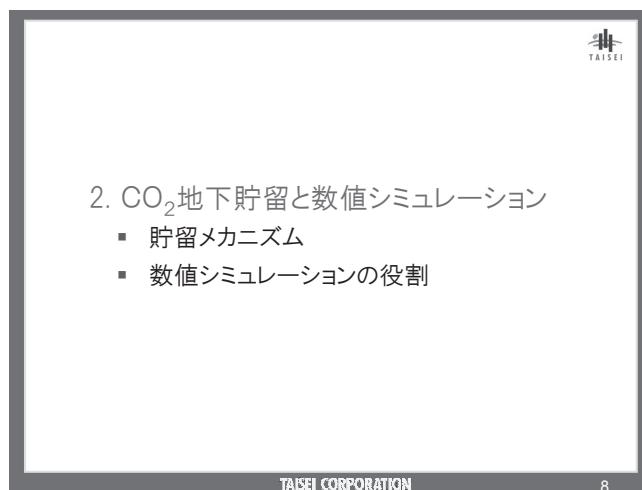
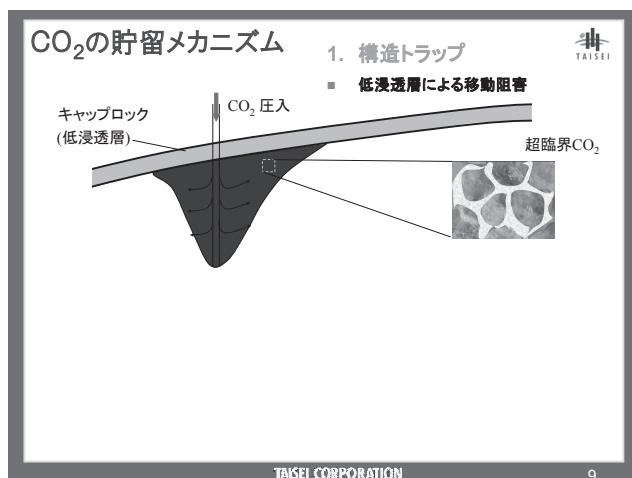


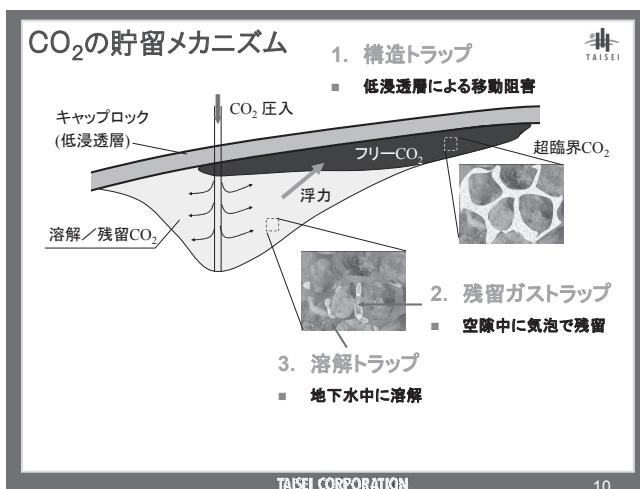
図-4.8 タイトル 2

4.3 CO₂地下貯留とメカニズムとシミュレーション

次に、CO₂地下貯留とメカニズムとシミュレーションの話をしたいと思います。

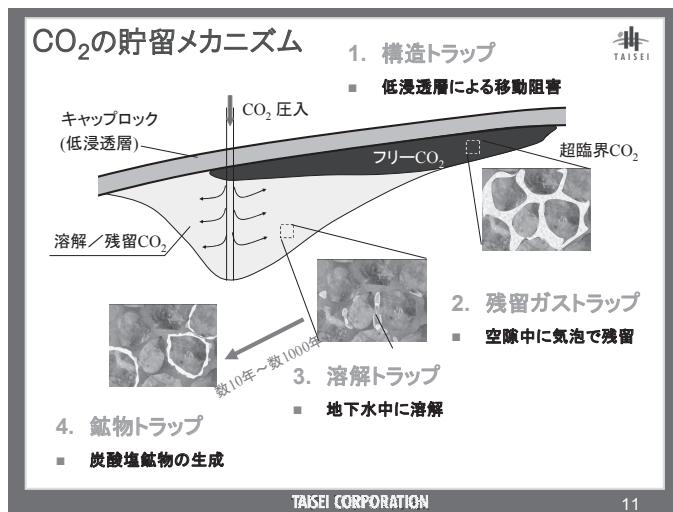
図-4.9 CO₂の貯留メカニズム-1

CO₂のメカニズムの一つ目は、構造トラップと呼ばれるものです。要は、先ほど言ったキャップロックのようなものがあって、そこへCO₂を入れたら、そこで止まるという分かりやすいものです。

図-4.10 CO₂の貯留メカニズム-2

超臨界のCO₂は、重さが約0.6～0.7ぐらいですから、比重が水よりは少し軽いので、フリーの超臨界CO₂として上がっていきます。上がっていく過程において、要するに超臨界のCO₂は、地層のすき間に、油のように残存して残っていきます。こういうものを「残留ガストラップ」といいます。

あとは炭酸ガスも結構、水に溶けますから、水に溶けたものも溶解トラップといって、重要な貯留メカニズムになります。

図-4. 11 CO₂ の貯留メカニズム-3

最後に進むと、数十年から数千年経ると、溶解トラップから、鉱物トラップと呼ばれる炭酸塩鉱物を生成して、安定的に地中に保存されることになります。この辺のメカニズムがちょっと怪しいことになります。

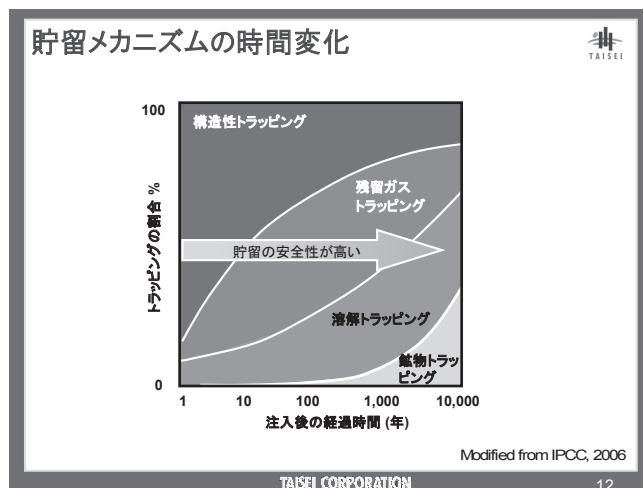


図-4. 12 貯留メカニズムの時間変化

貯留メカニズムの時間変化で、これは横軸が1年目から1万年目まで書いてありますが、トラッピングの割合は、最初は当然、圧倒的に構造性トラッピングです。だんだん残留ガストラッピングがなくなり、溶解トラッピングが増えてきて、最後は鉱物トラッピングが増えます。この辺まで人間として制御できるかが問題かと思います。

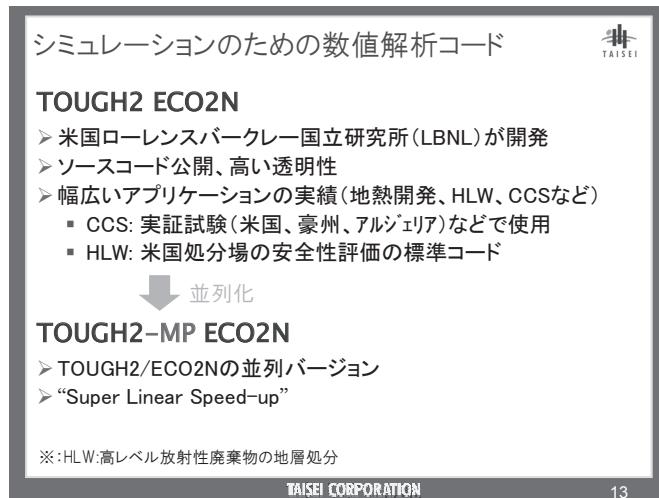


図-4.13 シミュレーションのための数値解析コード

シミュレーションのための数値解析コードは世の中にいろいろあって、RITEではJEMというコードを使われて有限予想ですが、当社で使っているのはTOUGH2 ECO2Nというコードです。これは、アメリカのローレンスバークレー国立研究所で開発したもので、ソースコードが公開されています。非常に高い透明性があります。それから、幅広いアプリケーションの実績で、地熱や高レベルの放射性廃棄物、二酸化炭素貯留のような実績があって、米国の実証試験や豪州の実証試験、アルジェリアのIn Salahの実証試験などで使用されて、使えるのではないかということが言われています。米国の放射性廃棄物処分場の安全性評価の標準コードでもありますから、世界的にはある程度信頼されているコードです。

今回はそのコードを並列化して、非常に高速化しました。TOUGH2 ECO2Nの並列バージョンということで、スーパーリニアスピードアップというものは実現していないのですが、8CPUぐらいで使うと、要するに8個に分散すれば、8倍速度が早くなるところを、実は10倍ぐらい早くなるのを、スーパーリニアスピードアップといいます。LBLNでは、8CPUでは成功していたのですが、今われわれは1024CPUでやっていますから、それだとそういうことは起きないかと。もともとのチューニングに問題があるのではないかという気がします。

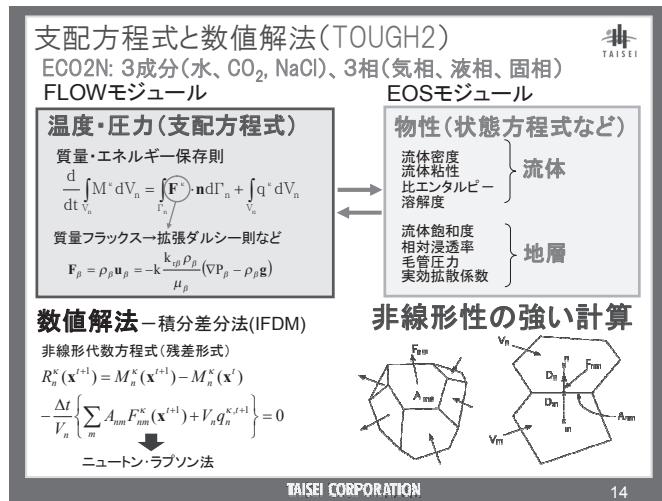


図-4. 14 支配方程式と数値解法 (TOUGH2)

TOUGH2はどんなコードかというと、要は水と二酸化炭素、ガスの状態も溶解した状態も、それから超臨界の状態も含めてCO₂です。塩分濃度もいろいろ関係がありますので、塩分濃度も当然追えます。あと、気相状態、液相状態、固相状態です。この気相は、超臨界状態も含めて気相といいます。これを扱えるように、いろいろ書いてありますが、普通の温度と水の圧力の支配方程式と、それから物性の状態方程式をカップリングさせているという方法です。

数値解法はちょっと特殊な方法で、積分差分法と呼ばれる方法で、今から40年ぐらい前に開発されて、扱いやすくて拡張が簡単ということで、よく使われているコードです。

今回の問題は、非線形性、液からガスや固相からガスなどに移るというのは、非常に線形性の強い計算なので、計算時間がかかることがあります。

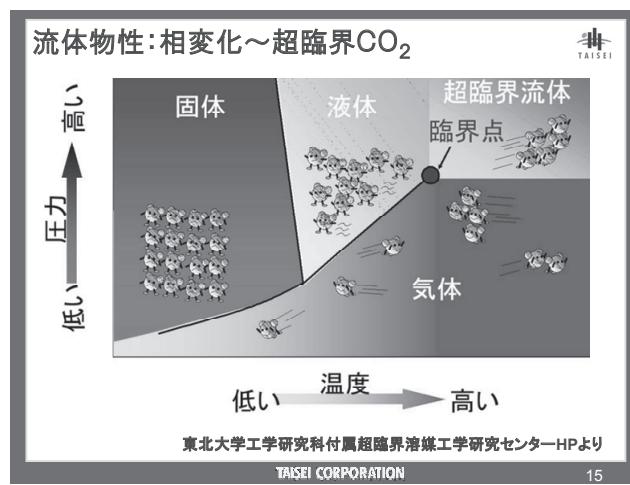


図-4. 15 超臨界状態の液体の物性の相変化

これは、超臨界状態の液体の物性の相変化を、東北大学のホームページから持ってきま

した。温度が低いところは高い、圧力が低いと、この辺では気体として存在します。この辺では固体、いわゆるドライアイスとして存在します。この辺では液体です。

この超臨界点に A 点と B 点がありますが、この A 点の方は、約 35°C の 7.8 メガが臨界点です。要は、30°C 以上で 800m 以下に埋めると、超臨界流体として存在するということです。

(フロア) その状態で超臨界だと、どういう状態と理解すればいいですか。

(今村) 超臨界というのは、液体と気体の間にあることから分かるように、要するに密度は液体と同じぐらいなのです。だから、0.6~0.7 ぐらいの密度はあるのですが、分子運動の状態は気体と同じということで、非常に反応性の富んだ液体のようなものだということになります。

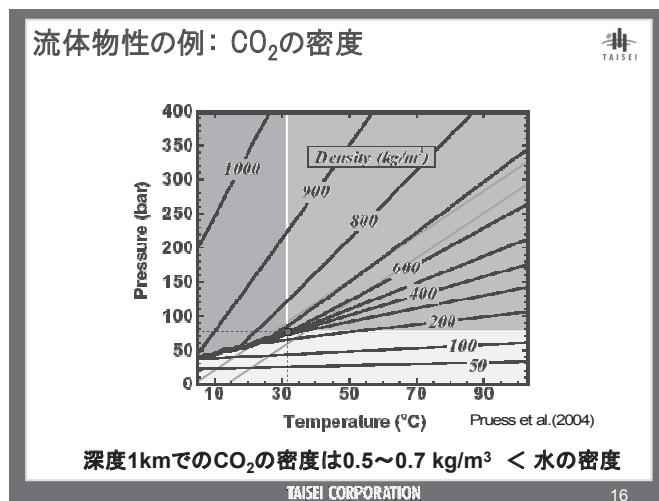


図-4. 16 液体物性の例 : CO₂ の密度

これが CO₂ の密度の温度と圧力の関係です。この線を引いているのが通常の地下の地層の温度勾配の範囲ということになります。そうすると、大体 1km いくと 0.5~0.7 ぐらいの密度になります。

密度が増えると何がいいことがあるかというと、要するにたくさん入ります。ガス状態で入れるよりは、はるかにたくさん入るということで、超臨界状態の地下貯留が有利ではないかといわれているわけです。

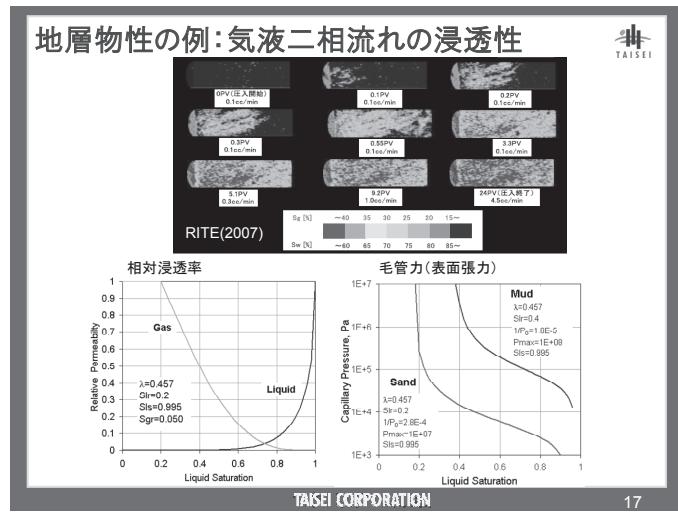
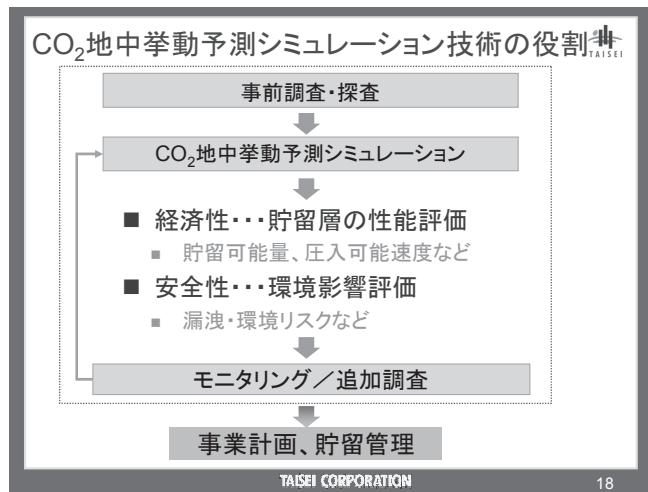


図-4.17 地層物性の例：気液二相流れの浸透性

これは、実際に CO_2 の超臨界を押し込んでいくとどういうことが起きるかを模擬している RITE の実験です。例えばこれを一つの岩の砂岩なら砂岩と考えてください。この青い方が水の飽和度で、飽和度がだんだん高くなって、赤い方がガスの飽和度だと思ってください。これは最初、圧入開始のときは真っ青です。だんだん入って、これが間隙流体の 10%, 20%, 30%, 55%, 330%，これは 2400%ですか。24 倍分のガスを流すと、このような状態になって、ほぼ圧入が完了します。

全部赤にならないのは、こういうところが要は残留ガストラッピングと呼ばれるものということになります。それを簡単に物性として表しているのが、この図です。これは、例えば CO_2 の飽和度で、全部 CO_2 です。これは 20%だけ CO_2 です。そのときのガスの通りやすさ、水の通りやすさを表したものです。これはそのときの負圧というか、サクション圧を表したことになります。そういうことを利用して、一個一個測って計算していきます。

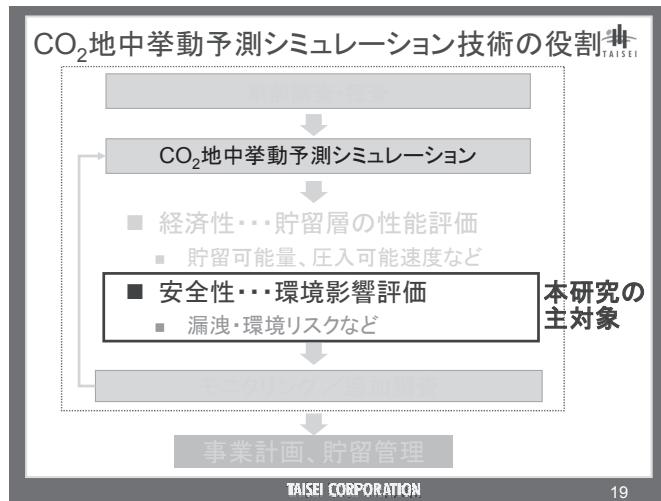
図-4.18 CO₂ の地中挙動の予測シミュレーション技術の役割－1

CO₂ の地中挙動の予測シミュレーション技術の役割とは何かというと、まず地下がどのようなことになっているのか、どのような水の通りやすさ、どのようなガスの通りやすさになっているのか、どういう構造をしているのかという事前調査・探査を行います。それで、そこに入れたときにどうなるかを、今からお見せするようなシミュレーションでやります。

まず経済性で、貯留層がどのぐらいあって、せっかく 1km 挖って入れたのにはほんの少しあらないと、コストがばか高くてやっていられないで、それがコスト的にフィージビリティか。あとは貯留が本当はどのぐらい入るものか。例えば 8 MPa とか 10MPa の圧力で押し込んだときに、それがどのぐらいの速度で入っていくのか。年間 100 万トン入れることは可能かということを評価します。今のは入れる方です。

もう一つが入れる方の逆で、では入れたものは本当に安全なのか。入れるはしからポカポカ漏れて地上に出てきて、どこかアフリカの火山帯で人が死んだような事件がありましたが、そういう問題はないのかという環境影響評価があります。

これが両方とも大丈夫であれば、モニタリングや追加調査をして、最終的に事業計画と貯留管理となります。これの一連のものは、一応世界的には勝手にやってはいけないことになっていて、今、これをどのように第三者機関が管理するかを決めています。日本の経産省や環境省でもガイドラインを決めようとしていますし、EU は EU で決めようとしていますし、米国は米国で決めようとしています。それも世界的に足並みをそろえて決めることがしていくのだろうと思います。

図-4. 19 CO₂の地中挙動の予測シミュレーション技術の役割-2

今日ご紹介するのは、その安全性の環境影響評価についてするためには、大規模シミュレーションが必要ではないでしょうかと申し上げているわけです。

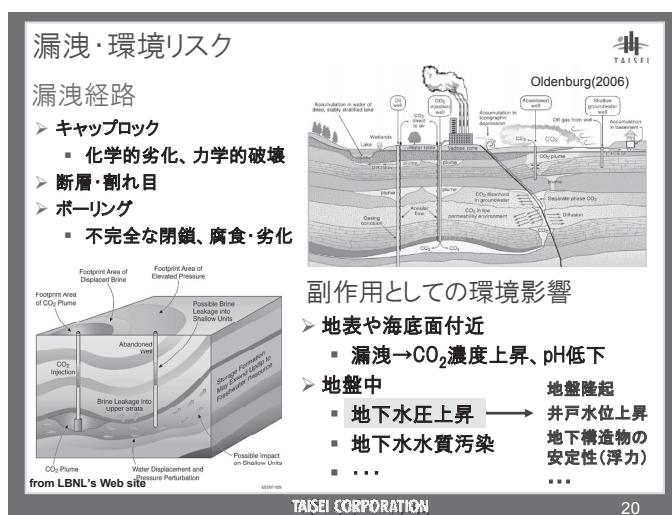


図-4. 20 漏洩や環境リスク

漏洩や環境リスクはどうして起こるかということです。まず、漏洩経路は、これだとここにCO₂を埋めており、ここにキャップロックがありますが、このキャップロックに、例え化学的劣化が起こるかもしれません。化学的劣化というのは、CO₂を入れると当然、pHが下がります。地下深くの深部は弱アルカリ性ですから、それが弱酸性になることによって、鉱物は当然変化を受けて、多分溶ける方向に向かうのです。そうすると、そういう化学的劣化によって、本来はびしっとしたキャップロックだったかもしれないのですが、100年とか200年たったら、漏れ出る経路ができるのではないかでしょうか。

または、ここに10MPaの圧力で押したときに、このキャップロックに脆弱性があると、

ここに力学的な破壊が起きてしまうのではないかでしょうか。また、こういうところに断層があれば、断層沿いはやはり弱いでしょうから、強いところもあるのですが、そういうところから出てしまうのではないかでしょうか。また、昔掘ったボーリングの横を抜けていくのではないか、自分の掘ったボーリングが1000年間大丈夫でしょうかなど、いろいろな問題があるって、こういうものの漏洩経路を調査しなければいけません。

副作用としての環境影響は、では実際に入れたとき、漏洩したときに、地表や海面付近のCO₂が問題になるような量なのか、問題にならないような量なのかということの検討も必要かと思います。pHは当然、低下するので、このpH低下が、地表や海底面付近でどういう問題を起こすかについても、今後、調査が必要です。また地盤中だと、地下水圧が上昇して地盤が隆起したり、井戸の水位が上昇したり、地下構造物の安定性に問題はないのか。弱酸性になることによって重金属類が少し溶け出してきて、水質汚染につながらないのかといったことも今後、検討していくかなくてはいけないことになります。

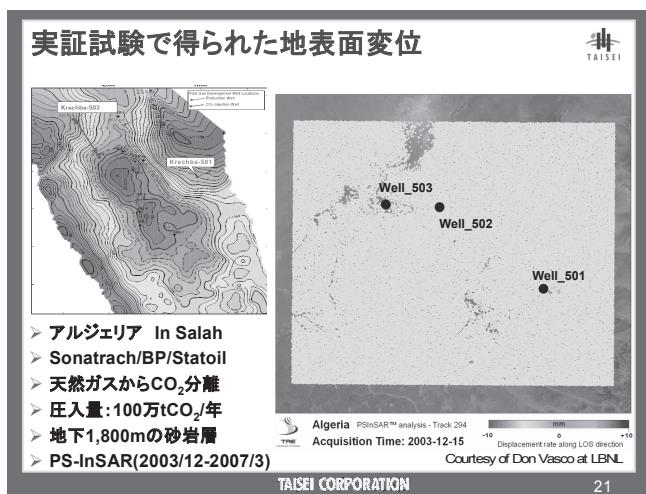


図-4. 21 実証試験で得られた地表面変位

隆起というのは、本当にどのぐらい起こるのかというのがアルジェリアのIn Salahで測られて、これが実証試験で得られた地表面変異です。2003年の12月15日から入れており、青くなるところが隆起で、赤くなっているところが沈下しているのです。そして、このwellというものが入れている井戸で、入れている井戸は大体約10mm、2003～2007年の4年間入れて、10mmぐらいは隆起しています。沈下しているところも、これは構造性の問題でしょうけれど、谷地域のところなどによって、赤いところが10mmぐらい沈下しているということです。年間100万トンの2003～2007年でプラスマイナス10mmぐらいの隆起が起きています。では、これは問題なのか、問題ではないのかということも議論が必要だと思います。

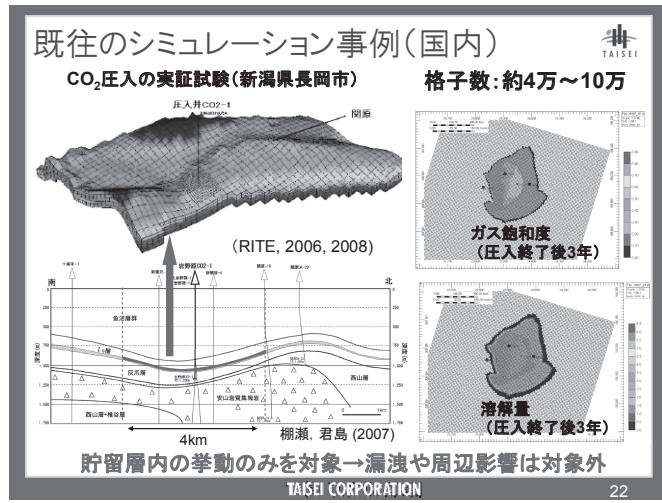


図-4.22 既往のシミュレーション事例（国内）

既往のシミュレーションはされているわけで、これは日本の RITE が 2006 年と 2008 年に行ったシミュレーションです。CO₂ を、新潟県の長岡で入れたときのガスの飽和度を計算した結果がこれです。基本的には産総研の方が計算されたのでしょうか。4km ぐらいの範囲について計算されています。節点数は 4~10 万点ぐらいで計算されたということです。

このときは実証試験ですから、当然、周辺影響というよりは、貯留層の中にガスが、飽和度がどう変化していくのかを、実験と解析でフィッティングするのが主な興味ですから、このときは漏洩や周辺環境は対象外です。実務的にも、4~10 万点で 3~4 年計算するだけでも、今の技術だと多分 1 週間ぐらいかかりますので、そうするとなかなか難しいことがあります。

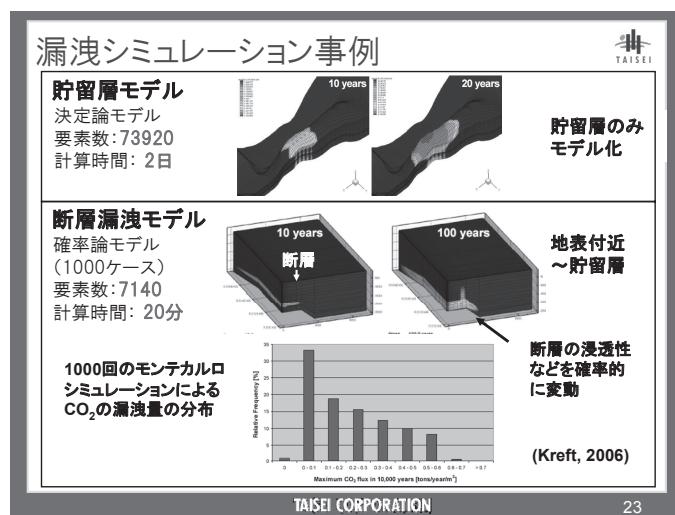


図-4.23 漏洩シミュレーション事例

これは米国の実験で、7 万点で決定論モデルでやって、約 2 日間かかったのです。先ほど

ご紹介したように、断層が漏れるか漏れないかは、断層の浸透経路の浸透係数というか通りやすさはなかなか分からないので、当然パラメトリックにやる必要があって、断層の浸透性をいろいろ変えていって、どうだったら問題があるのか。一番最悪の場合でもどうなのがを計算していって、確率論的に評価する方がふさわしいだろうと思います。

このケースでは 7000 節点で 1000 ケースやって、1 ケース当たりは 20 分です。1000 ケース。わずか 7000 節点で 20 分で 1000 ケースやると、かなりの時間がかかることになります。

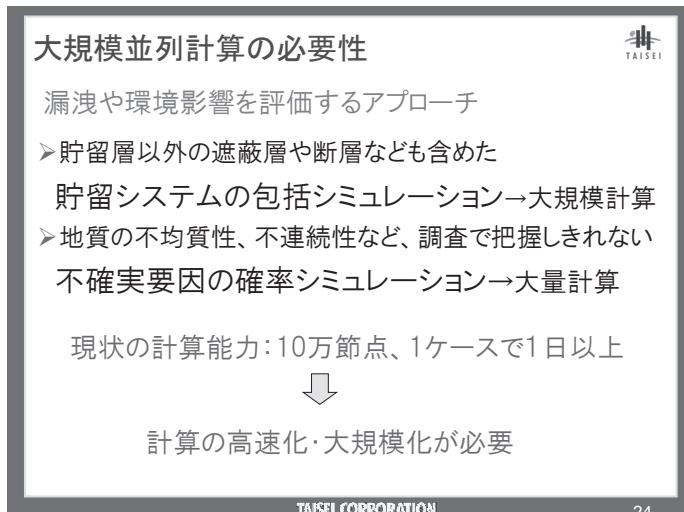


図-4. 24 大規模並列計算の必要性

われわれが大規模並列計算をなぜやっているかをお話します。そういう大きな領域の漏洩や環境影響を評価しようとすると、当然、貯留層以外の遮蔽層や、横の近くの 1km 横の断層なども含めた、貯留システムの包括シミュレーションが必要だらうと思っております。

また、先ほど言った断層など、いろいろ地質は不均質性があつたり不連続性がありますので、調査で完璧に分かるかというと、地盤工学をやっていらっしゃる方はお分かりのように、当然把握し切れないで、不確実要因の確率シミュレーションをして、リスクとして CCS の問題を考えていくのが常道かなど・・・日本で認められるかどうかはわかりませんが、それが現実的だらうと思います。

現状の計算能力ですと、10 万節点で 1 ケースで 1 日とか 2 日とか、コンピューター能力によっては 7 日とかかかりますので、それで計算の高速化、大規模化をしようと考えたわけです。

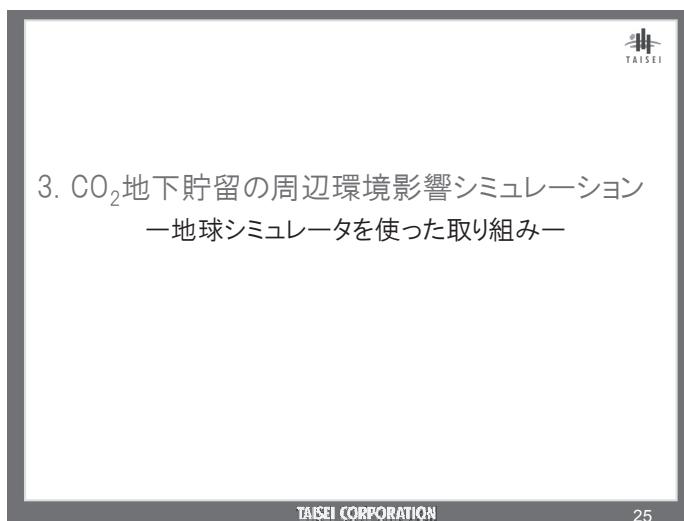
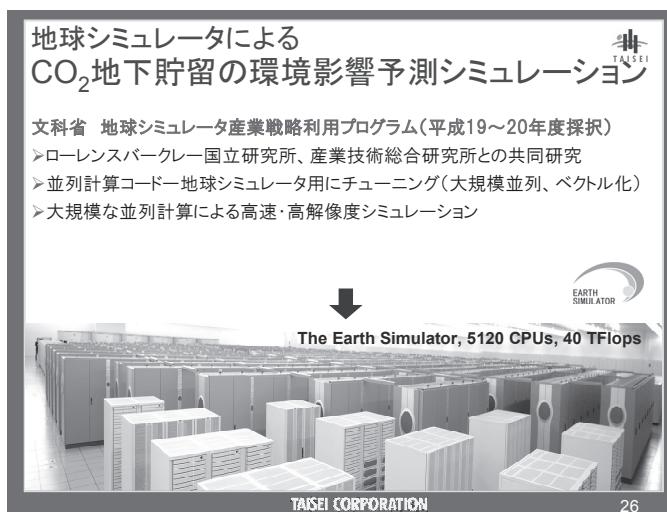


図-4. 25 タイトル 3

4.4 CO₂ 地下貯留の周辺環境影響シミュレーションについて

地球シミュレータを使ったシミュレーションの話をしたいと思います.

図-4. 26 CO₂ 地下貯留の周辺環境影響シミュレーション

文部科学省の地球シミュレーター産業戦略利用プログラムがあって、われわれが考えた問題を提案して、横浜にある JAMSTEC のアースシミュレーター、これは 5120CPU を持っている 40TFlops という驚異的なもので、つい 5 年前までは世界最速のコンピューターでした。それを使って計算しましょうということで、アメリカのローレンスバーカー国立研究所と、日本の産総研と当社の共同研究でチューニングを開始しました。そして、大規模並列ベクトル化の高解像度シミュレーションをしようということにしました。

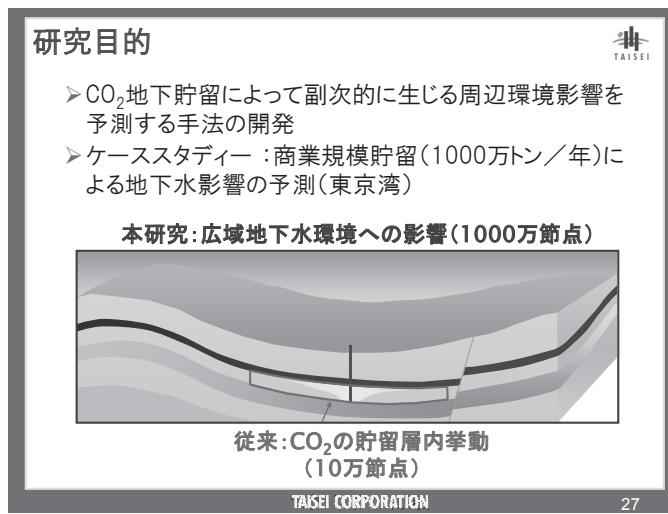


図-4.27 研究目的

目的は、CO₂地下貯留によって、二次的に生じる周辺環境影響です。今回は隆起はやっていないのですが、地下水がどうなるかなどの話をしたいと思いました。どこをケーススタディーにするかということで、いろいろ問題があるのですが、一応、商業的規模貯留だと東京湾沿岸で約1億トンの排出がありますから、年間1割に減らしても1000万トン入れないと、ということで、1000万トンぐらいを入れたときに、東京湾にどのような影響があるかを計算してみました。

10万節点というと、この近くしかできないので、当然、周辺影響は無理なので、今回は全部を含めた1000万節点で計算しましょうということです。

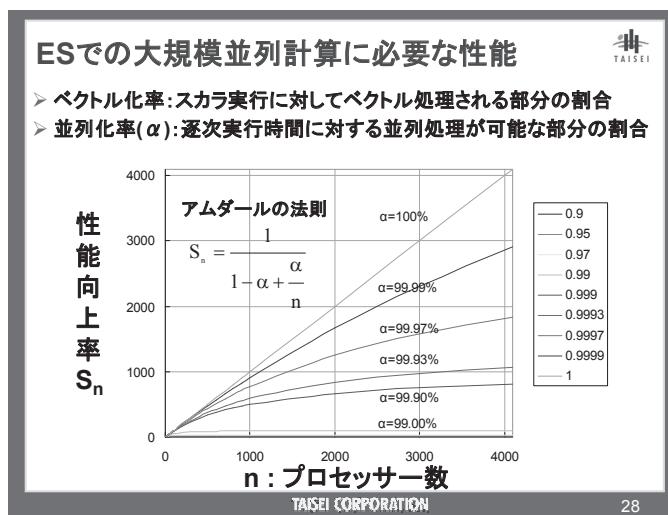


図-4.28 ES での大規模並列計算に必要な性能

アースシミュレーターで大規模並列計算をするのに、何が大変かというと、ベクトル化が分からぬ方もいらっしゃると思いますが、配列を一緒にばんと処理するみたいな方法

で、一個一個計算するのではないという意味を分かっていただければいいと思います。その割合と、並列化率で、何個のコンピューターをいかに上手に使うかが重要です。性能向上率 S_n をプロセッサー数を並列化率で見ると、例えば並列化を 99% 並列化しても、能力なんてほとんど上がらないです。10CPU 使うのと同じことで、そうすると 99.99% ぐらいの並列化にしないと、プロセッサーを増やした意味はないことになります。

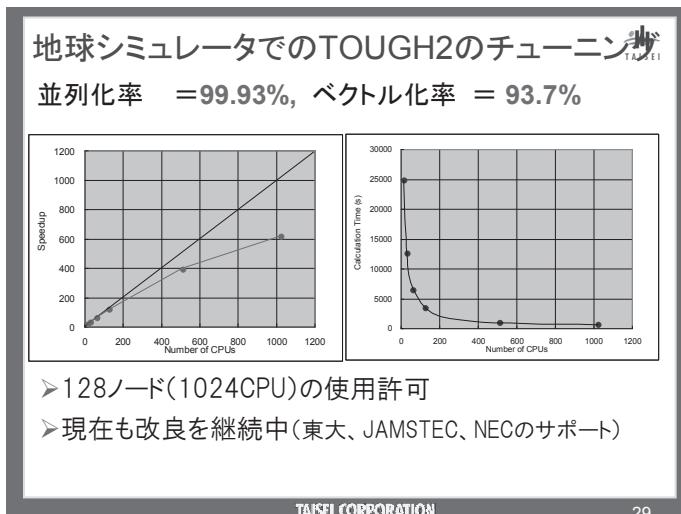


図-4. 29 地球シミュレータでの TOUGH2 のチューニング

頑張っているのですが、なかなか上がらなくて、結局、今のところ並列化率が 99.93% で、ベクトル化率 93.7% です。今、1024CPU で計算していますから、1CPU で計算している今約 600 倍の速度で計算できることになります。

一応、現在も改良継続中で、東大の中島先生や、JAMSTEC 自体もスタッフがたくさんおられたり、NEC の方にも、われわれよりはるかにプロフェッショナルがいて、サポートしていただいているというより、やっていただいているといった方がいいかもしれません、結構お手伝いいただいております。

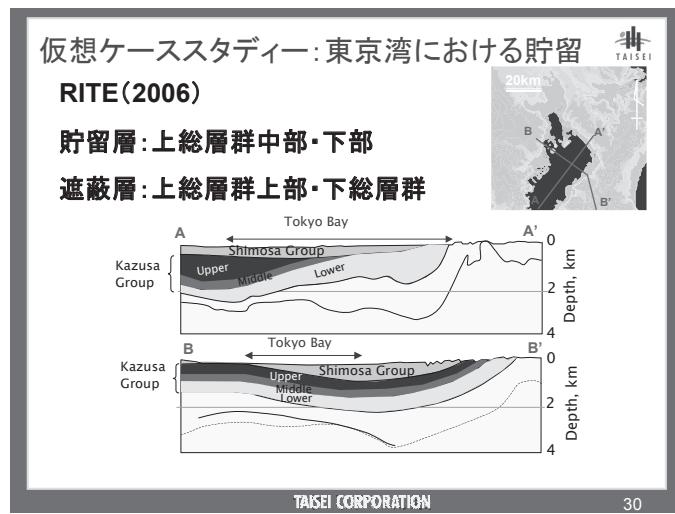


図-4.30 仮想ケーススタディー：東京湾における貯留

仮想ケーススタディーということで、次にモデル化をしなければいけません。簡単に言うと、貯留層は上総層群中部・下部ぐらいにしよう。それで中部・下部というと、Middle Layer, Lower Layer です。それから、遮蔽層は上総層群上部の下総層群でいいのではないかということで、始めました。

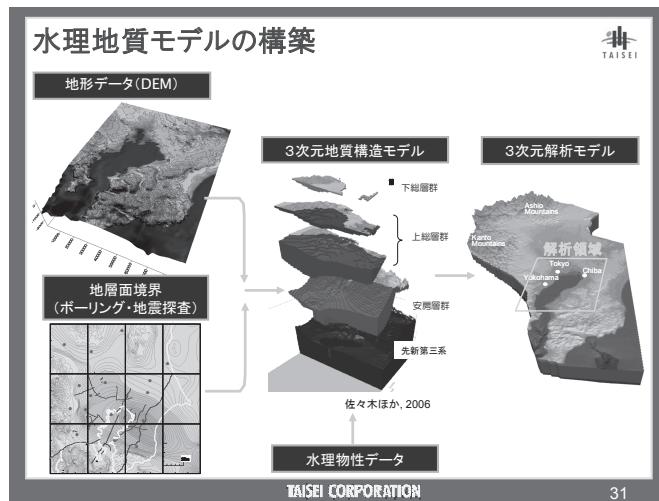


図-4.31 水理地質モデルの構築

地形データは普通の数値データがありますから、地形データは地形データから取って、地層面の境界は地震探査でよく使われたボーリング探査と、それから浅層の表面地震波探査です。そういうものから、産総研が3次元の地質構造モデルを決めておられ、今回はこれを使わせていただいて、ボーリング探査と地形データを合わせて、3次元の解析モデルを作成しました。

東京湾に埋めるので、基本的に解析領域は横浜の奥の方、大和市ぐらいと、千葉の山地

付近までを解析領域にしました。160km、60km ぐらいです。そして深さは 2km ぐらいです。

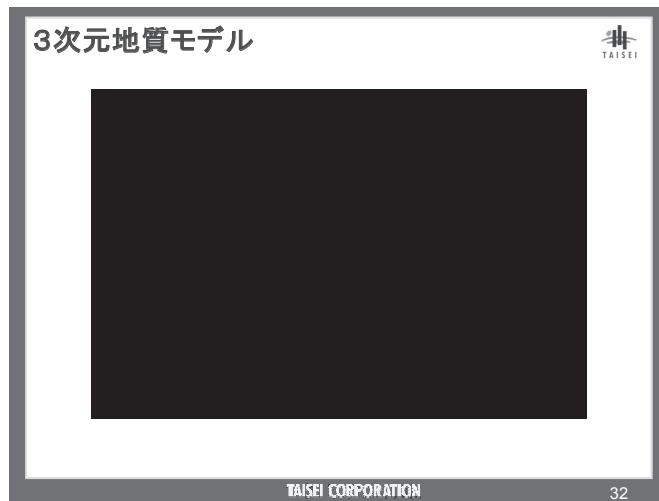


図-4. 32 3 次元地質モデル(動画)

地質モデルは、もう少し格好いい絵があるのですが、このような感じで地層モデルを作りました。

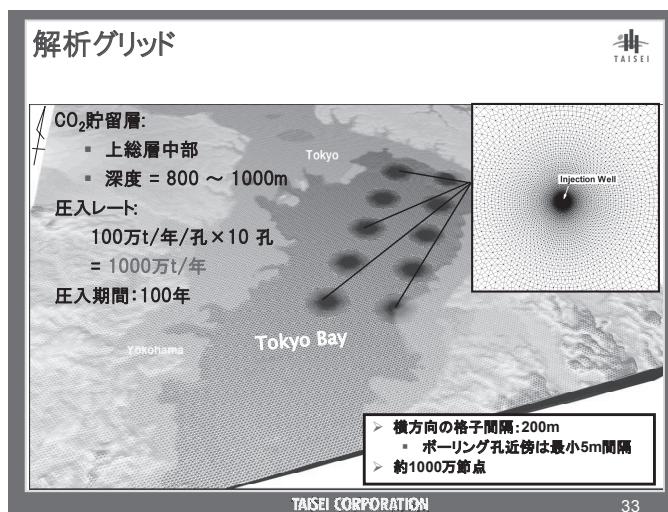


図-4. 33 解析グリッド

解析グリッドは 1000 万点で、特に緯度の方向は最初 5m ぐらいを取っていて、横方向の格子間隔は、最大で 200m ぐらいで 1000 万節点のものを作っております。CO₂の貯留層は上総層の中部に入れて、深度 800~1000m に入れて、圧入レートは年間 100 万トンで、10 孔に入れようと、圧入期間は 100 年を想定しています。

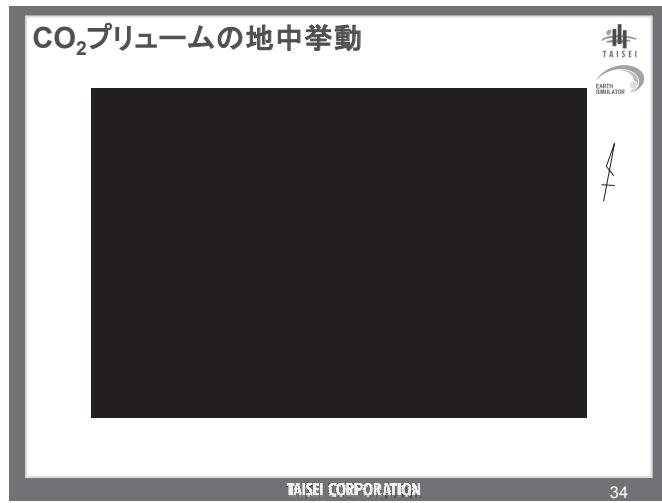


図-4.34 CO₂のプリュームの挙動（動画）

これが CO₂のプリュームの挙動です。この白く見えているのが CO₂の超臨界状態だと思ってください。これはガス状というか、残留状に残っているような計算結果になっています。

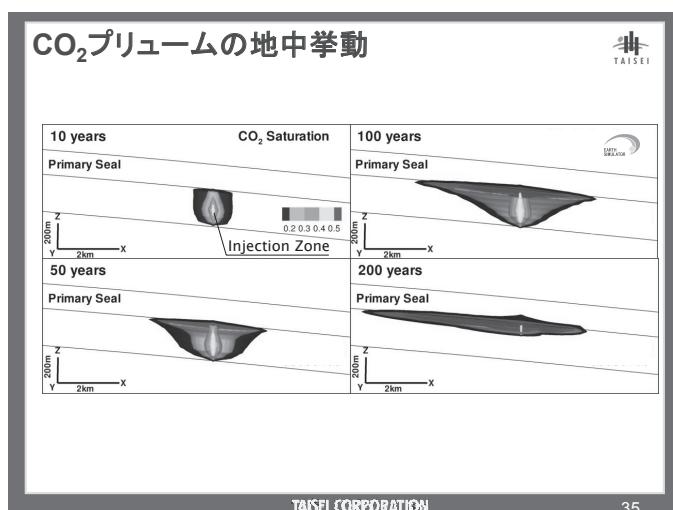
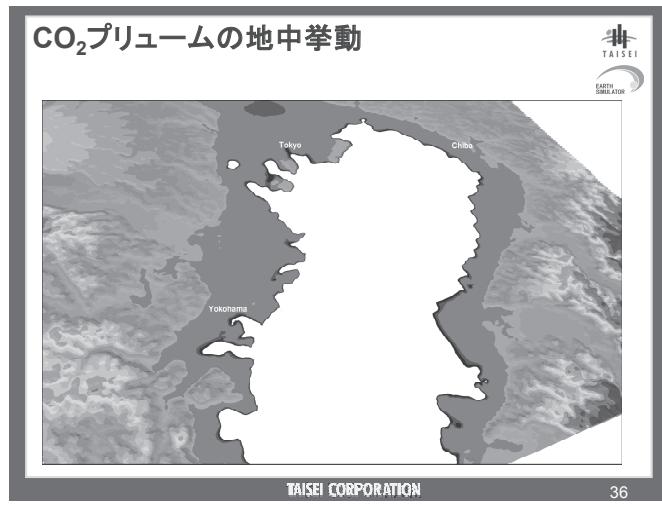
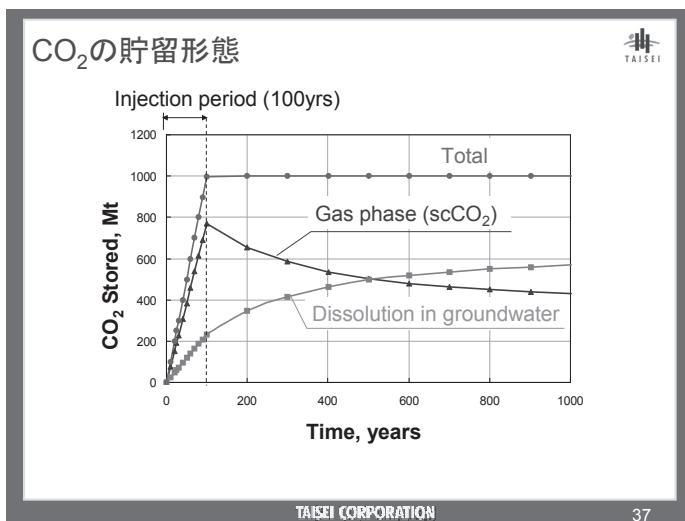


図-4.35 CO₂のプリュームの挙動-1

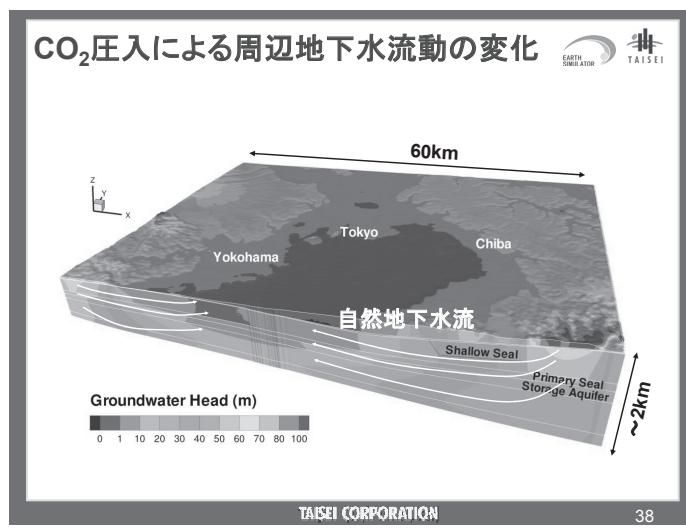
もう少し平面的に見ると、CO₂をインジェクションしたところに、大体コンマ4のサチュレーション濃度で入っていって、50年、100年後です。100年後でやりますから、プライマリーシールの下をずっとはっていくような計算結果になっています。

図-4. 36 CO₂のプリュームの挙動-2

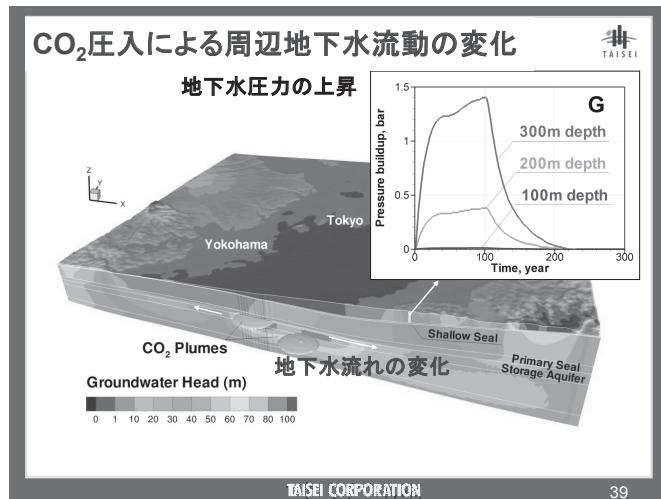
これは上から見たところで、10点のCO₂プリュームがずっと入って、100年後からだんだん地下水層に広がっていく様子も分かると思います。

図-4. 37 CO₂の貯留形態

貯留形態としては、100年後までは当然トータルしてこれだけ入れているのですが、超臨界のCO₂として約700トンになっていて、水に溶けている部分が約200トンです。水に溶けている部分がだんだん多くなるとともに、超臨界の部分がだんだん減っていくという計算になります。

図-4.38 CO₂圧入による周辺地下水流動の変化-1

この付近の地下水流動はどうなっているかというのも産総研の方は結構やられていて、昔からもいわれていることですが、湾岸地域に置くと、当然というか、ちょうど東京湾を湾奥に向かって流れるものが基本的には主流です。だから、当社がアクアラインを掘ったときも、あそこに出てくるのは淡水ですから、自然地下水流は湾奥に向かって流れていることになります。

図-4.39 CO₂圧入による周辺地下水流動の変化-2

では、周辺の地下水の圧力はどのぐらい上がるかということで、下総レイヤーの上の300mのところを見てみると、300mのところは100年で、水頭にして約12~13m上がります。深度200mのところですと、約2.5mです。100mぐらいだと10cmぐらいの水頭状況しかないというぐらいの圧力影響があるということです。

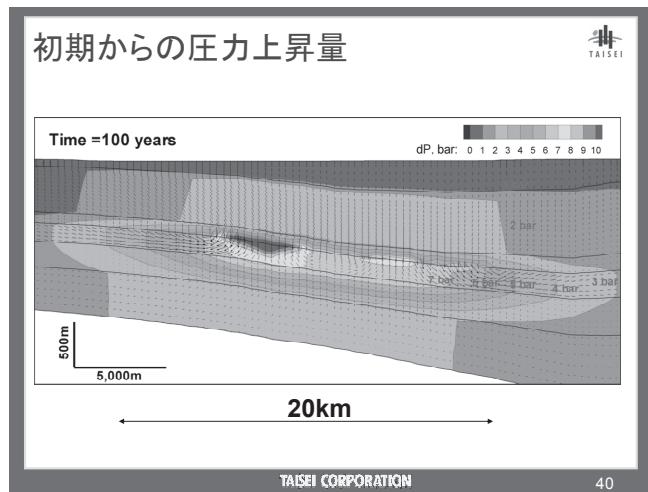


図-4.40 初期からの圧力上昇量

これが初期の圧力からの上昇です。上方にいくと、ほとんど影響がないことが分かるかと思います。

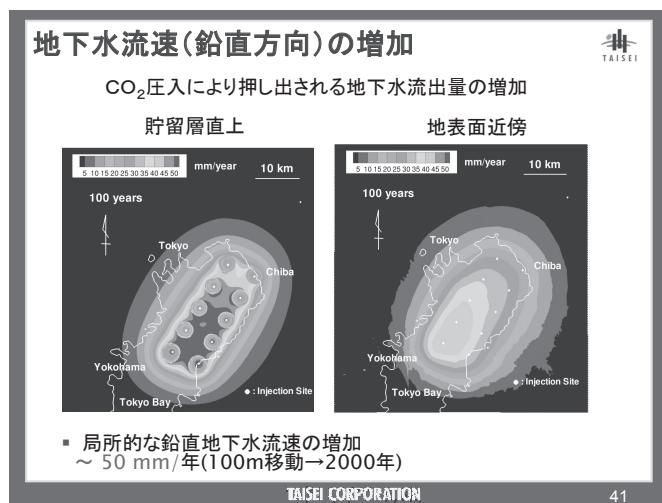


図-4.41 地下水流速（鉛直方向）の増加

圧力に影響がなくても、要するに地下水は押し出されているので、800～1000mにある地下水が地表や周辺に流れていきます。これは貯留層側状の地下水の流出量を、鉛直地下水流速で表したもので、赤が約50mmですから、年間50mmぐらいのプラスの地表面に向かっていく流れが出てくるということです。100mいくのに2000年かかるから、CO₂のプリュームが上に立つのは、断層や、すごいパスがなければ大きな問題はないのかと思います。

これが地表面近傍の流速ですと、約30～40mmとなります。

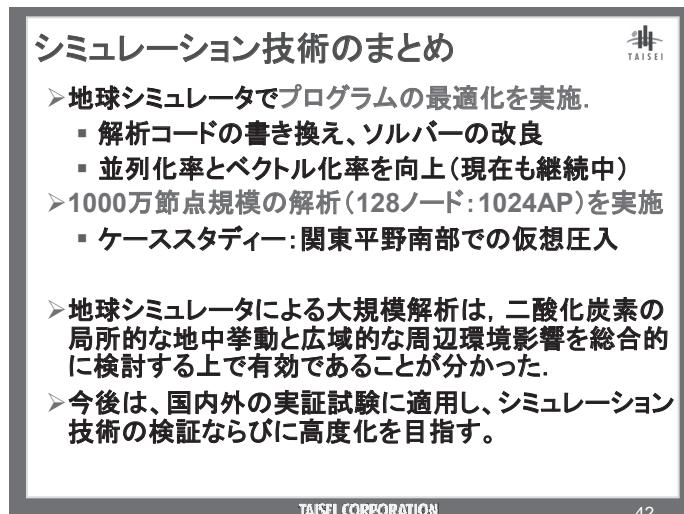


図-4.42 シミュレーション技術のまとめ

シミュレーション技術のまとめということで、一応 3 年間でやったことは、地球シミュレーターでプログラムの最適化で、大体 1000 万節点の 1000 年を約 2 日でできるようになりました。もう少し継続してできれば 1 日ぐらいになって、確率論評価が可能なようにしたいと思っております。

これは我田引水かもしれません、このような解析は、二酸化炭素の局所的な地球挙動だけでは分からなかったり、広域的な周辺環境影響が具体的に本当に正しいかどうかは分からないです、ある規模では分かります。あとは確率論的な評価でやって、皆さんに認めてもらえるようにしなくてはいけないかと思います。

今度は国内外の実証試験に適用して、この技術が正しいとかもっと効率的にできないかということをやりたいと思っています。



図-4.43 新聞発表（日本経済新聞 4/6）

いろいろ新聞発表もしています。

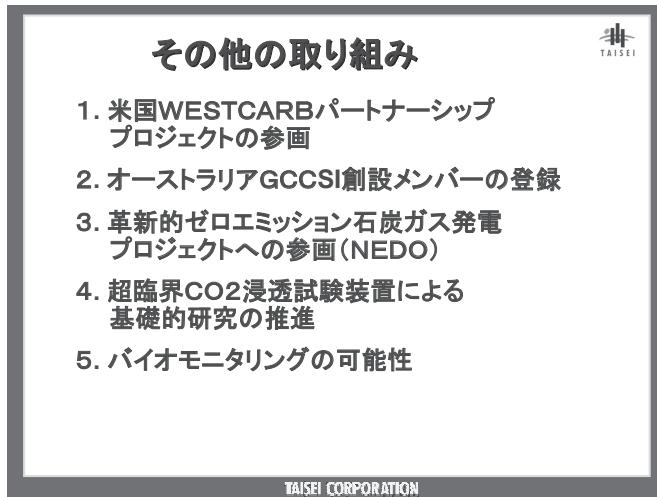


図-4.44 その他の取り組み

4.5 その他の取り組み

そのほかの取り組みとして、日本のプロジェクトがなかなか進まないので、アメリカのウエストカーブ・パートナーシップ・プロジェクトに参画して、このシミュレーターを使って今計算しています。オーストラリアが、11月に首相が要するに、オーストラリアは世界的な CCS のプロジェクトを推進するための国際センターを作る。そのために 100 億豪ドルを拠出しますと、一緒にやれる人はやりましょうというような呼び掛けをされました。日本の経産省も入っていて、今、約 20 カ国が入ろうとしているのでしょうか。企業としては、50 団体ぐらいが入ろうとしています。もう入っているでしょうか。それをもっと広げたいと思っていらっしゃるようですが、うちは 2 月に一応創設メンバーに登録をしました。

NEDO は、革新的ゼロエミッションの石炭ガス発電のプロジェクトをやっています。発電から輸送、貯留、それから環境影響評価も全部やるようなプロジェクトを開始しています。

当社では、もうちょっとまじめにというか、超臨界の CO₂ の浸透装置で、実際にモニタリングをどうやっていくのかということも始めました。また、漏洩を検知する何かが必要なので、バイオモニタリングも可能性としてあるのかと考えています。

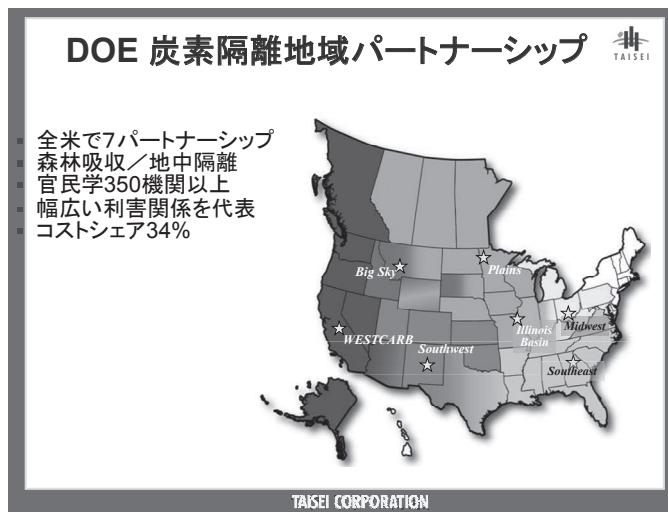


図-4. 45 DOE 炭素隔離地域パートナーシップ

DOE の炭素確率地域パートナーシップとはどういうものかというと、全米で 7 パートナーシップに分けて、WESTCARB (West Coast Regional Carbon Sequestration Partnership) で、Southwest, Illinois Basin, Midwest, Southeast, Plains, Big Sky という七つのパートナーシップです。やろうとしていることは、要は IGCC と呼ばれる Combined Coal-Gass 発電（石炭ガス発電）の純酸素燃焼の高度な石炭発電、石炭火力を用いて、それで出たものを地中貯留、もしくは森林吸収させるという、ゼロエミッションの石炭火力発電所のプロジェクトです。これは DOE が結構お金を出してやっているのですが、みんなで一緒にやりましょうということを言っています。

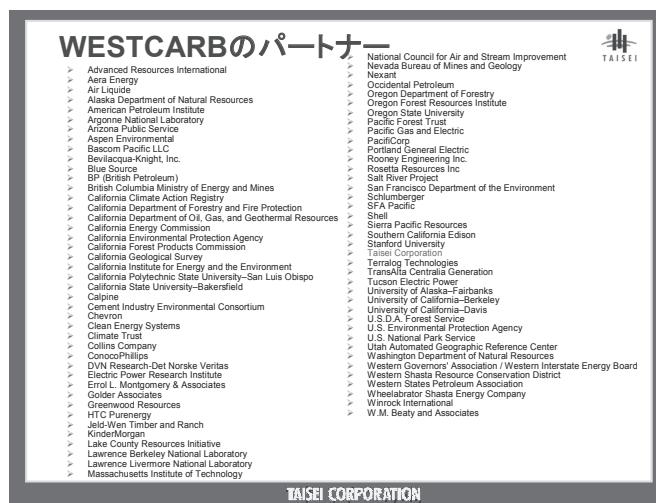


図-4. 46 WESTCARB のパートナー一覧

これが今、WESTCARB のパートナーとして約 50 社・50 団体ぐらいですが、うちもその中の一つとして入って計算を受け持つことになりました。

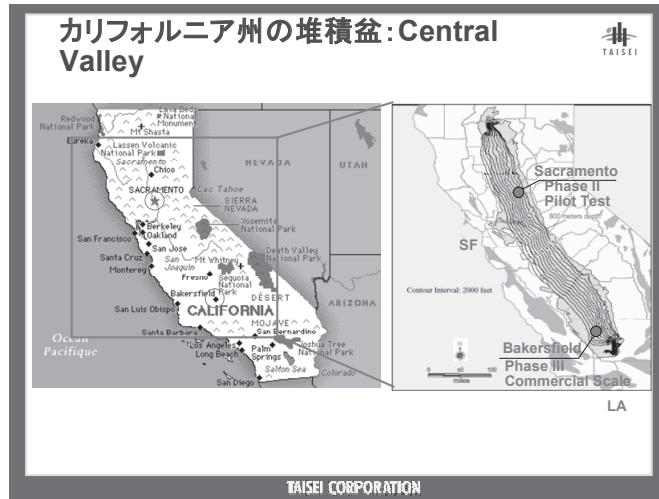


図-4.47 カリフォルニア州の堆積盆

どこを計算するかということ、これはカリフォルニア州の堆積盆で、サクラメントとベーカーズフィールドです。サクラメントがフェーズIIのパイロットプロジェクトで、これから始まるのがベーカーズフィールドの、コマーシャルスケールの地中貯留プロジェクトです。

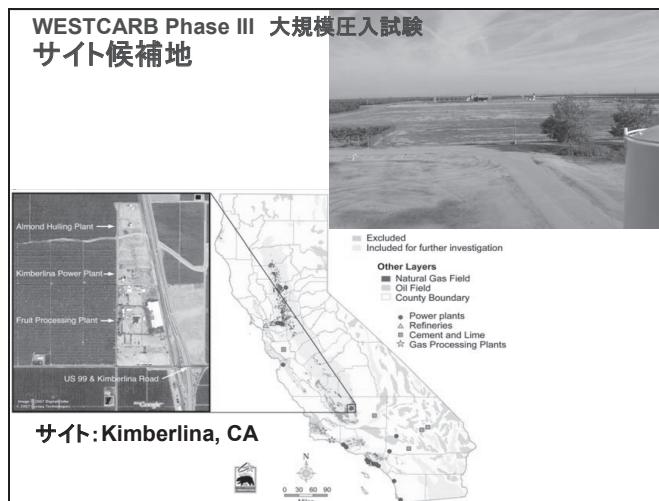


図-4.48 大規模圧入試験 サイト候補地

これが写真です。これは航空写真で見たものです。もともと、この赤で書いてあるところに天然ガスのフィールドがあって、緑のところにオイルフィールドがあります。従って、要はオイルフィールドや天然ガスフィールドがあるところは、たくさん深層のボーリングをやっているので、地下構造が分かっているところです。そこにパワープラント、製油所、セメント工場、ガス処理プラントなどを造って入れようと考えているようです。

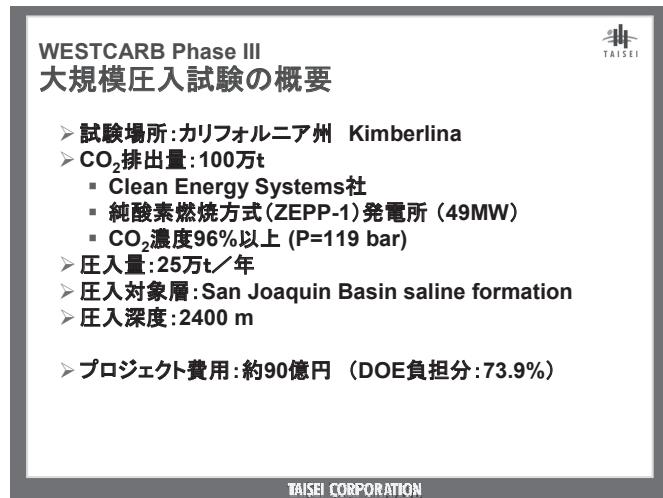


図-4.49 大規模圧入試験の概要

圧入試験の概要としては、年間 100 万トンを純酸素燃焼方式の発電所で出します。CO₂濃度を 96%にして、年間 25 万トン入れるということです。圧入の対象層は、San Joaquin Basin saline formation という地層面です。圧入深度は 2400m です。プロジェクト費用としては約 90 億円で、DOE が 7 割払います。

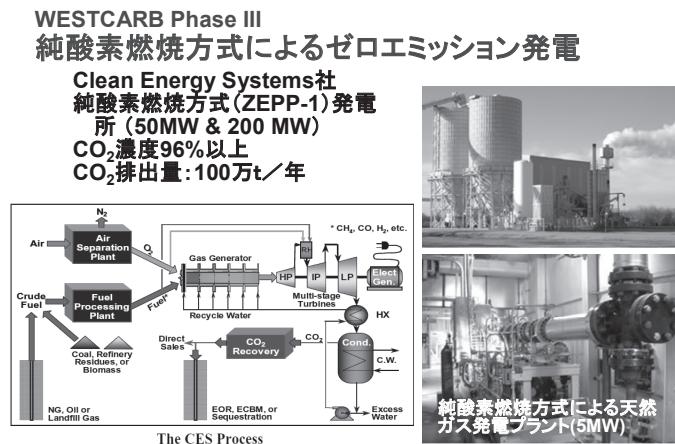


図-4.50 純酸素燃焼方式によるゼロエミッション発電

これがウエストカーブ・フェーズIIのゼロエミッションです。エアから窒素を抜いて、純酸素だけで燃焼し、CO₂の回収コストを安くして、それを地中に入れようといっているわけです。

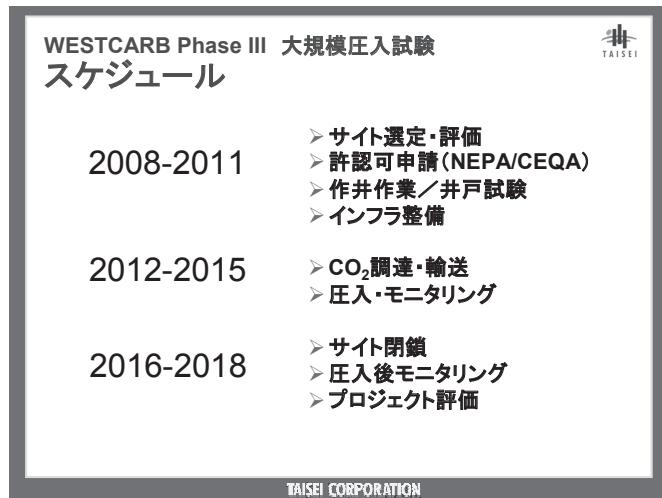


図-4. 51 大規模圧入試験 スケジュール

スケジュールとしては、2011 年までにこの整備をやって、もうすぐ、許認可申請の段階でしょうか。そして、作成に入って、インフラ整備をします。2012～2015 年に圧入・モニタリングをします。2016～2018 年までがプロジェクト評価ということで、現在、当社では試計算を始めているところです。

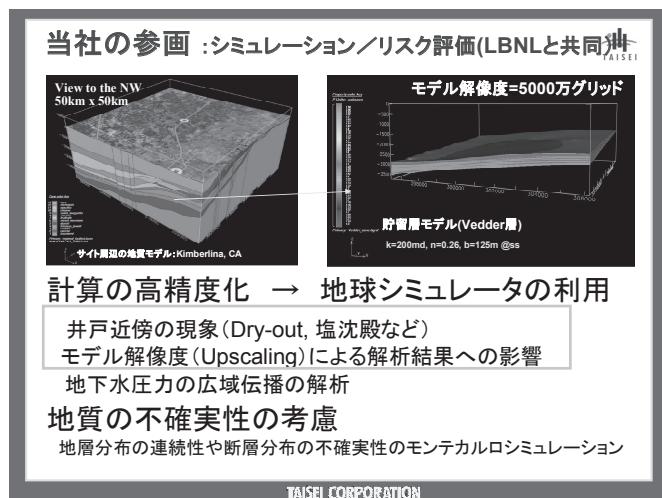


図-4. 52 大成建設の参画

実際には、サイト周辺の、先ほど見せたものを同じようなものを、今回 5000 万グリッドで貯留層のモデルでやろうということです。LBNL もやって、うちもやります。うちは高精度化ということで、井戸近傍の現象とアップスケールによる解析結果が、低い解像度でやったときと何が違うか。どこまでが分かって、どこまでが分からなかというようなことと、先ほどご説明したような広域的に問題はないか。また、不確実性のモンテカルロシミュレーションをやって、確率論的な評価をすることが当社の役目かと思います。

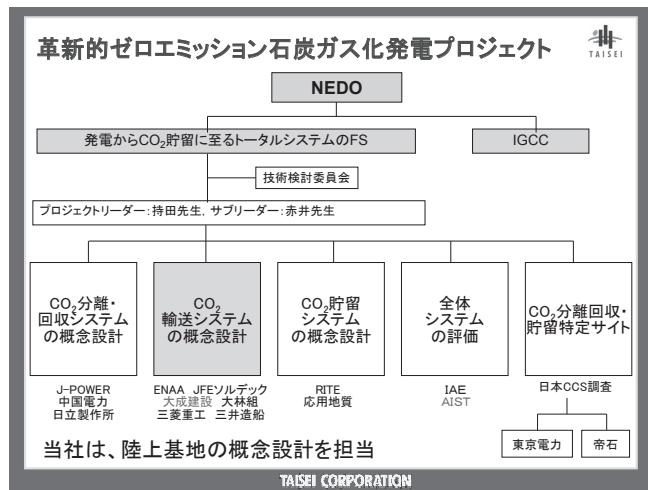
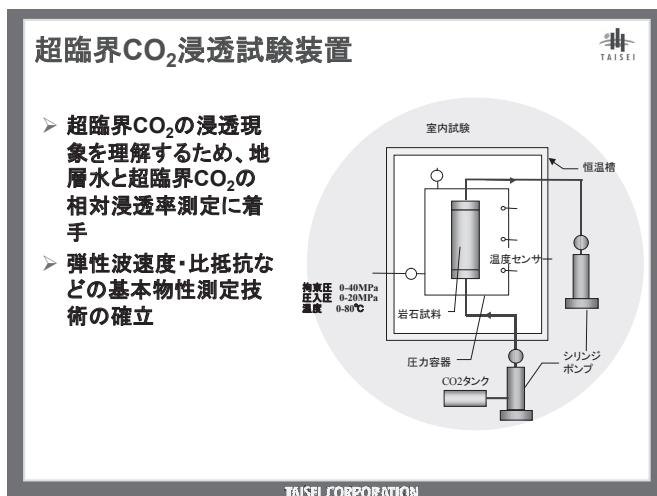


図-4. 53 革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト

先ほどお話しした革新的 NEDO の発電は、こういうシステム体系でやっています。プロジェクトリーダーは、産総研の赤井さんなどがやっていらっしゃって、実は CO_2 の分離回収をやっているのが、J-POWER と中国電力と日立製作所です。うちは、輸送システムの特に貯留です。陸上基地の概念設計を担当していて、ENAA（エンジニアリング振興協会）、ソルデック、大成、大林、三菱、三井でやっています。貯留システムの概念設計は、RITE と応用地質でやって、全体システムの評価は、IAE と産総研であります。最後の実験は CCS でやるよう聞いております。

図-4. 54 超臨界 CO_2 浸透試験装置

今というか、昨年度うちで作ったのは、超臨界の CO_2 の実験装置です。先ほど言った 10MPa で温度が 35°C ぐらいになるようなところに押し込んで、そこの浸透率や、P 波と S 波の速度がどう変わるかというのをやって、実際の P 波・S 波の探査で CO_2 をどこまで入ったのか、

漏れていないのかを検知する一助にしましょうという基礎実験を始めています。

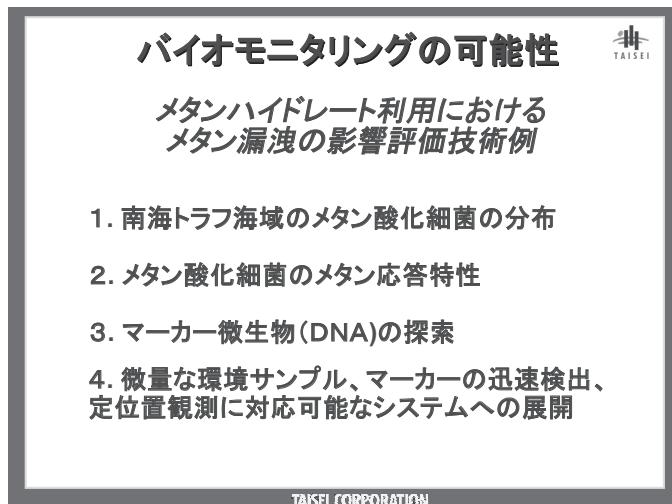


図-4.55 バイオモニタリングの可能性

また、バイオモニタリングの可能性ですが、これは実際にまだ何もやっていなくて、メタンハイドレート利用で、メタン漏洩で今やろうとしているような技術例があります。この数年で、メタンハイドレートグループがやってきたことは、南海トラフ海域でメタン酸化細菌がどう分布しているのか。メタン酸化細菌は、メタンが出てくるとどう応答するのか。それを敏速に測れるDNAの探索、マーカー微生物は何にするかと。最終的には、微量な環境サンプルを使って、マーカーを迅速に検知して定位置で観測し、ここが漏れていると検出するようなシステムへの展開を考えているようです。

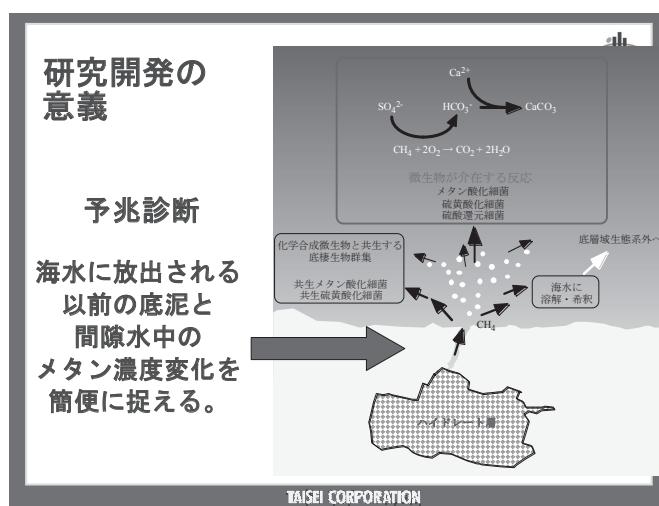


図-4.56 研究開発の意義

実際にはメタンハイドレートが、人間がいろいろ利用しようとしたときに、何かの原因で思わぬところに漏れたときに、メタンが海水に溶解・希釈していくので、そのときに共生

メタン細菌や共生酸化細菌は当然活動を及ぼすだろう、その反応を見ましょうということです。

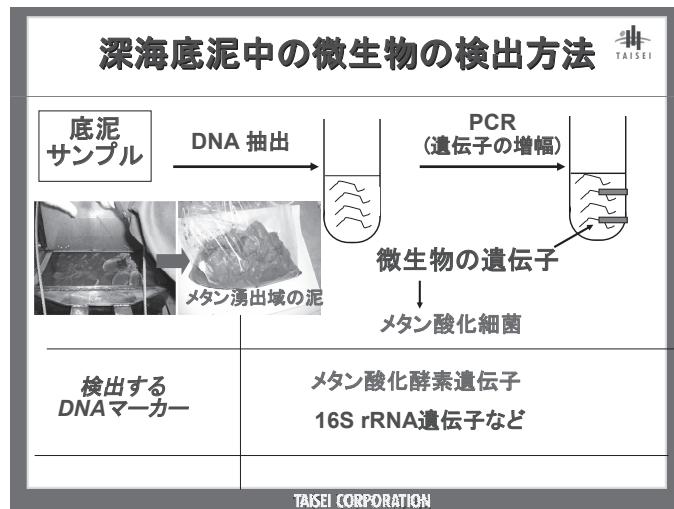


図-4.57 深海底泥中の微生物の検出方法

具体的には、南海トラフの定点サンプルを取って、微生物の遺伝子を PCR (Polymerase Chain Reaction) で、遺伝子を増幅させて、迅速にその遺伝子を見つけます。遺伝子は、メタン酸化酵素遺伝子が決まったようですが、これでいけるのではないかと思っているようです。

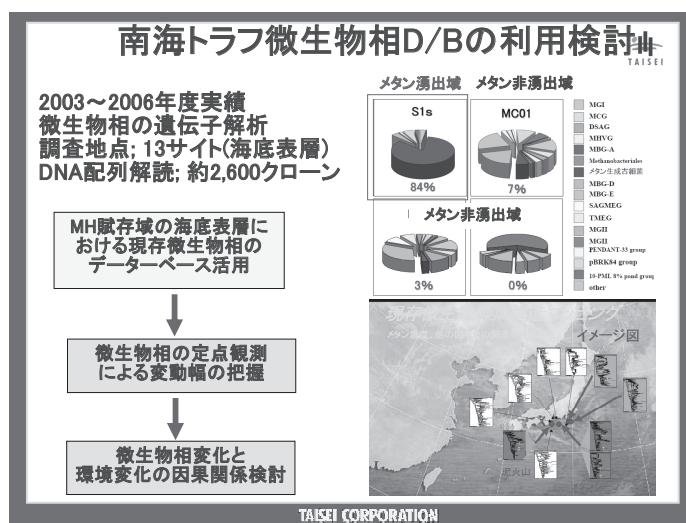


図-4.58 南海トラフ微生物相 D/B の利用検討

南海トラフでは、微生物層のデータベースもある程度できていて、これが基のデータです。では、南海トラフから、もしメタンハイドレートを探掘して、問題があるかということが分かるようなことを考えているようです。

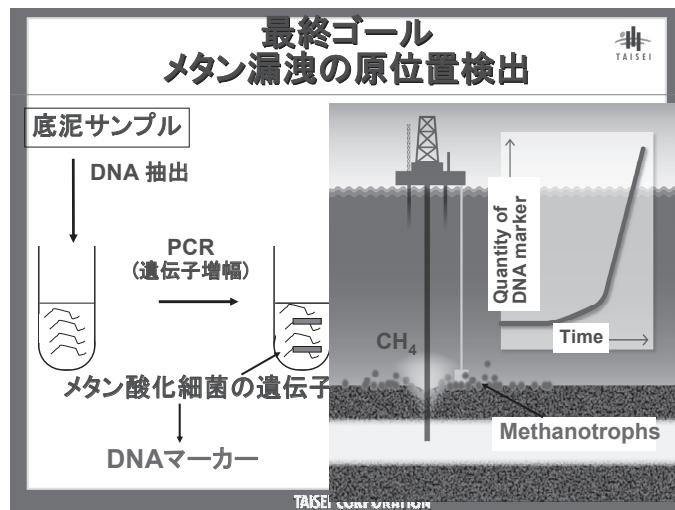
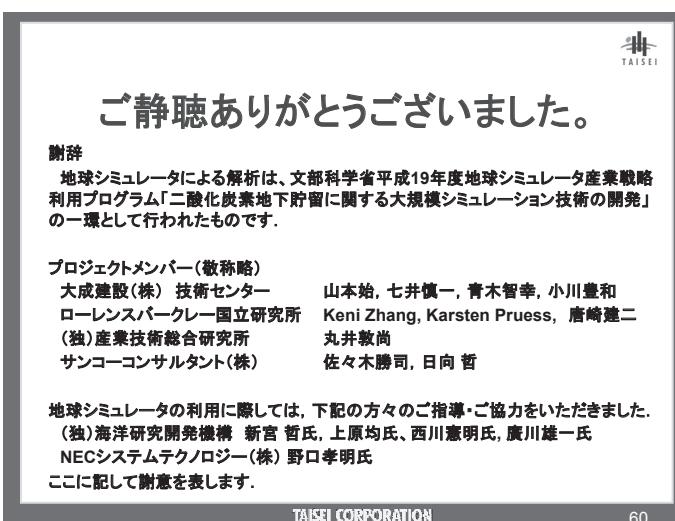


図-4.59 最終ゴール メタン漏洩の原位置検出

最終ゴールとしては、メタン漏洩の原位置検出を目指しています。DNA マーカーを使って、実際にメタンを回収しようとしたときに、いろいろなところにモニタリングを置こう。漏れてきたら、要するに Methanotrophs というメタンの細菌が活動して、その数が増えるだろう。それを原位置で検出できるような装置があれば、それは安全というか、環境を守るモニタリングとして成り立つのではないかということが、メタンハイドレートでは少し考えられていて、こういうものを CO_2 でできないかということも考えています。



TAISEI CORPORATION

60

図-4.60 謝辞

今回の話は、非常に多くの人に助けていただいております。大成建設の技術センターはさることながら、LBNL の方、産総研の方、サンコーコンサルタントの方、先ほどもご紹介した JAMSTEC の強力なメンバーや、NEC のシステムテクノロジーの方にも非常に助けていただいて、ようようやっているところです。

(桑野) ありがとうございました。地球を救う技術開発ということで、大変スケールの大きなお話を聞いていただきました。

5. 閉会の挨拶

目黒 公郎 (ICUS センター長/教授)

(目黒) 本日は新年度が始まって 3 日目ですが、お忙しい中、私どもの研究センター ICUS の公開講演会にご参加いただき、誠にありがとうございました。ICUS では、このような公開講演会を、年 2 回ほどのペースで継続的に開催させていただいているが、その理由は講演会の冒頭で桑野先生も述べておられたように、「都市の安全性を向上させるには、専門家の間だけでの情報のやりとりでは不十分である。一般市民の皆さんに誤解が生じないように、正確な情報を分かりやすい形で提供すると同時に、一般市民の意識や考え方を専門家はもっと勉強すべきだ。そうすることによって、初めてより適切な情報配信や研究のあるべき姿などが分かってくるはずだ。」と ICUS が考えているからです。

今日の講演会では「都市環境向上への地盤工学への取り組み」という全体テーマの下、それぞれの分野で最先端の研究をされている 3 名の先生方にお話を伺いました。非常に大きなスケールの話や専門性の高い話を、とても分かりやすく説明していただきましたが、それらのお話を聞きになって、皆さんはいろいろなことをお感じになられたのではないかでしょうか。都市環境や地盤工学に関して、今まで以上に興味がわいたり、先生方に確認したい疑問が生まれたりしていませんか？

そこでもうひとつ大切なお話をあります。ICUS の公開講演会の価値は、一流の講師の先生方から貴重な話を直接聴くことができることに加え、講演会の後に開催される懇親会で、さらに自分の考えや疑問について、講師の先生方や他の参加者の皆さんと情報交換できる場が用意されているということです。ですから懇親会に参加しないということは、フルコースのディナーの途中で退出するようなものです。本当にもったいないことですので、お時間の予定がつくようであれば、ぜひご参加されることをお勧めします。

会費もリーズナブルです。1,000 円だったと思いますが、食事や飲み物の内容はその数倍の価値があると思いますので、ご自分で確かめてみてください。おいしい食事や飲み物をいただきながら、講師の先生方や他の参加者の皆さんとの情報交換の時間をぜひお楽しみいただきたいと思います。

最後になりますが、今日、講師をしていただいた東畠先生、土橋先生、今村先生の 3 名の先生方におかれましては、貴重なお話を来ていただき、本当にありがとうございました。また、会場にご列席の皆さん、ICUS の公開講演会に参加していただき、深く感謝いたします。ICUS は今後も同様な公開講演会を継続していきます。今回ご出席いただいた皆さんのもとには、これからも案内が届くと思います。その際には、お忙しいことは重々承知しておりますが、何とか時間をやりくりして、ICUS シンパシーとして公開講演会にご出席いただきますようお願いします。懇親会が待っていますので、私の閉会のご挨拶はこの辺でおわりにさせていただきます。本日は本当に、ありがとうございました。

テーマ:「都市環境向上への地盤工学の取組み」2009/04/03

東京大学駒場リサーチキャンパス生産技術研究所 An棟2F コンベンションホール

プログラム

趣旨

地盤工学は、地盤や構造物基礎、土構造物等の力学的、物理的、環境的特性を明らかにすることが主な目的で、普段一般の人々の目にはつきにくいものの、都市の安全や環境保全のために重要な役割を担っています。本レクチャーでは、地盤工学の最前線における、都市環境の向上、ひいては地球環境の保全のための貢献事例を紹介していただきます。

講師として、独創性を信条として地盤工学を牽引していらっしゃる東畠郁生先生（東京大学教授）、現在東京の地下で進行中の首都高速中央環状線プロジェクトの総括マネージャーである土橋浩先生（首都高速道路株式会社）、日本の地盤環境工学における先駆者の一人である今村聰先生（大成建設株式会社）をお招きし、都市の安全と環境保全について、その足下から考えたいと思います。

司会 桑野 玲子 (ICUS 准教授)

13:00～ 受付開始

13:30～ 開会の挨拶 桑野 玲子 (ICUS 准教授)

13:35～ 廃棄物地盤の工学的特性とその利用可能性 東畠 郁生 (東京大学教授)

14:35～ 休憩

14:50～ 首都高速中央環状線プロジェクト (仮題) 土橋 浩 (首都高速道路 (株))

15:50～ 二酸化炭素削減に向けた技術開発の取組み 今村 聰 (大成建設 (株))

16:50～ 閉会の挨拶 目黒 公郎 (ICUS センター長/教授)

17:00～ 懇親会

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