

基調講演 1

環境の変化の中での構造工学の今後の展開

－ 研究，実務とそのブリッジ －



藤野陽三 氏

東京大学工学系研究科社会基盤工学教授

(塩見) どうもありがとうございました。それでは、基調講演に移りたいと思います。最初に東京大学工学系研究科教授、藤野陽三先生をお願いします。

藤野先生は、国内の各種委員会はもとより、ロンドンミレニアム歩道橋の振動問題のアドバイザー、香港ストーンカッター斜張橋の設計アドバイザー、イリノイ大学地震工学拠点センター評価委員、あるいは国際誌5誌の編集委員を務めるなど、国際的にも大変ご活躍の方でございます。

本日は、「環境の変化の中での構造工学の今後の展開」、副題といたしまして「研究と実務とのブリッジ」と題してのご講演でございます。藤野先生よろしくをお願いします。

(藤野 東京大学) ご紹介いただきました藤野です。25周年大変おめでとうでございます。

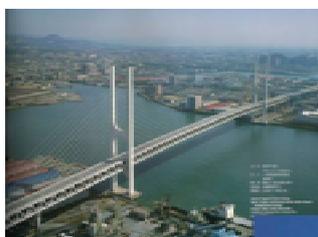
私が筑波大学に勤めていた頃でしょうかから25年近く前でしょうか、長谷川章夫先生に連れられてSTSG研究会に一回だけ参加させていただいたことを思い出しております。先ほど福本先生にも申し上げたのですが、もし長谷川章夫先生がご存命であれば、今日は長谷川先生が話されるのかなと思って参りました。長谷川先生を知らない人がいる時代になったのかもしれないですが、長谷川先生と留学時代も一緒であった私にとり今日の機会は、ありがたく光栄に思っております。

すこし前ですが、eメールが宇佐美先生から来まして、またテニスのお誘いかなと思って開けてみたら、STSGの記念大会に講演をしてくださいという光栄な内容でした。今回も前日、つまり昨日ですが、夜、テニスをやらないかと誘われたので、昨日の夜は来られないので、今日の夜、やりましようと言ったら、今日の夜だけは懇親会があるので勘弁して欲しいと言われたので、今日は珍しく名古屋でテニスをしないでそのまま帰ります(笑)。

今日、お話しさせていただく「環境」ということですが、わたしのあとで川人さん、それから佐野さんが本当の意味での環境の話がされます。私はあまりその方面に強くないので、我々の周りの環境、とくに社会環境がいろいろ変化している中で、構造工学を今後どう進めたらよいのかについて、自分が思っていること、考えていることを少しお話しさせていただきます。

何かと元気がない社会なので、なるべく元気が出るお話しをしたいというふうに思っております。私は、東京大学に勤めて20年と少し経つのですが、よい時代に過ごしてきたと思っております。大変な時代になってきましたが、別に今の時代が嫌いなわけでもなくて、今の時代もいいなと思っております。

(スライド1、2) 東京大学では橋梁研究室というところに所属し、橋に関係するようになりました。東神戸大橋や横浜ベイブリッジなどの風洞実験をうちの研究室でやっているのを見たり、実際にやったりしてまい

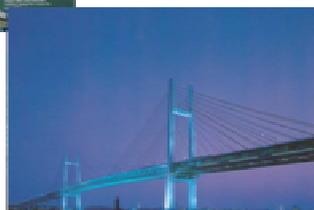


東神戸大橋

明石海峡大橋



横浜ベイブリッジ
スライド1



多々羅大橋
スライド2

りました。明石海峡大橋や多々羅大橋にも風の関係で関与させていただきました。

(スライド3) こういうすこし珍しい橋にも関係しました,これはアジア大会の自転車のサイクルロードに使うために広島にできた橋です。木橋で長い橋をはじめて架けるので心配だということで風洞実験をやったり,現場へ行って加振機をやって揺らしたりしました。10年以上も前です。写真でケーブルを押さえているのが私です。僕もあのころは若かった。



用倉大橋
木橋

風洞実験
振動実験
スライド3



(スライド4) 明石の箱桁案の風洞実験もやりました。実験計画,模型の調整や風洞実験を合わせると一年以上も時間を使い,模型の調整など大変苦労しました。結局,箱桁案は採用されませんでした,大変勉強させていただくとともに,これをやったおかげで,風の仲間に入れてもらえました。

そういうことをやりつつも,自分というのは,橋の中でも「耐風」というやや特殊な分野をやっているのだという思いがし,いわゆる橋梁の本流とは随分違うところに自分がいるという意識を,常に自分の中で持ってやってきたというのを強く覚えています。

(スライド5) 若いときに,いろいろとまかされてやらせてもらえるというのは非常にありがたいことです。30歳台の終わりのころですが,レインボーブリッジの設計検討委員会に入れていただいて,耐風設計を任せられました。部分模型からはじまって全橋模型まですべての風洞実験を東大で行いました。実はこの橋はダブルデッキ構造で,新交通も載せる複雑な断面なため,それほど長いスパンではありませんが,結構,風で揺れるのです。どうやったら振動が止まるかというのを,1年近くやりました。自信をつけさせていただくという意味で,大変よい経験をさせていただいたと思っています。やはり,若いときに何か1つのことを責任をもって任せられるのは,非常に糧になるのだという思いを強く感じております。

(スライド6) 橋に関して,いろいろな経験や知識を培わせていただき,小学校などに行って話ができるようにまできました。これは,風と橋というテーマで,うちの子供が行っている小学校で行ったときのものです。これがうちの長男

● 風洞実験

明石箱桁案 風洞実験



スライド4 Wind Engineering Lab., University of Tokyo

レインボーブリッジ
1991



耐風検討を一任
スライド5

出前講義「風と橋」 目黒区立八雲小学校



スライド6

です(笑)。ほとんど顔が同じです。長男はもう中学生になりましたが、まだ下に2人小学生がいるので、出前講義というのをやらせてもらいたいのですが、あまりお声がかからない。

(スライド7) 小学校の「総合学習」の一部ですから、いろいろなことを盛り込んだ講義にしなくてははいけないと思いましたが、これは皆さんなら読めると思うのですが、でも、小学4年生、5年生でも、ちゃんと読みました。これは嵐です、カエデ、これはタコ、次はわかりますか、木枯らし、ナギ、こういうのを子供たちにクイズとして出します。

(スライド8) もう少しサイエンティフィックになりますと、例えば30メートルの風が人に当たると、だいたい65キログラム重ぐらい受けるのですが、「風速の倍の60メートルだと力も倍の130キログラム重、これでいいですか」と質問するのです。子供たちは困った顔をします。そこで、「空気の当たるスピードが倍、速いし、1秒間に当たる空気量も粒で表せば、倍に増えるわけで、力が倍、単位時間に当たる空気量も倍だから4倍ですよと、そうすると65+65+65+65=260。これが正解です。」と説明しました。こういうことをやって、楽しんでいるわけです(笑)。

(スライド9) 小学生に教えることは楽しいことなのですが、現実を見てみると、なかなか厳しいものがある。明治以来、もっと前からかもしれませんが、建設を謳歌する時代でした。我々はその中にすっぽり入って、上り調子の中で来たのですけれども、やはり本四プロジェクトの完了をもって、大きなプロジェクトがピークを迎えたということを認識するべきかと思えます。いろいろな意味で変曲点であることは事実です。ただし、日本全体がいろいろな意味で変曲点なので、我々だけが悲観的になる必要はないのです。

5年、10年、先がどういう時代かというのもなかなか分からない。僕も分からないし、福本先生でもやはり分からないし、宇佐美先生でも分からないのではないかと思います。分からないから何もやらないというのではなくて、分からないから何かいろいろとトライをして、10個やれば1個ぐらい当たるんじゃないかというつもりでやっていかないと、世の中が開けないのではないかと思います。大型プロジェクトは確実に減っている。今の若い方には申し訳ないですが、それが事実だろうと思えます。しかし、プロジェクトがなくなるわけではない。

(スライド10) いろいろと悪いことを挙げればきりがありません。福本先生を前に失礼ですが、年寄りの方が増えている。20年も経たずして私も70歳を越します。少子高齢化、人口減の中で、これからどうい

風のつく漢字

- 嵐 あらし
- 楓 かえで
- 嵐 たこ
- 風 こがらし
- 風 なぎ



スライド7

風速がはやいと

風速30メートル(毎秒)の風だと65キログラムの重さがかかる

風速60メートルだと130キログラムの重さがかかる? ホント?

ぶつかったときの力 2倍
ぶつかる空気量 2倍

65+65+65+65
260キログラムの重さの力がかかる

力 4倍

スライド8

建設をとりまく社会環境

明治以来続いた建設謳歌時代も本四建設完了でピーク?

時代の変曲点 土木だけではない

不確定な時代 不透明な時代

大型構造物プロジェクトの減少

スライド9

社会を開くのかというのが大きな問題かと思えます。それから公共セクターの財政状況も非常に悪い。しかし、外国などと比べてみると、我々の社会資本というのは、まだまだ不十分であることは明らかで、あるレベルでの投資は確実に続く。今までのレベルでは高推移でずうっときてきたのに慣れすぎているというところがあると思えます。

当然、社会資本のストックがいろいろと増えていますので、維持管理というのものもあるわけで、総体として仕事が極端に減るわけではない。ただ、それに何人の人が携われるかというのは、いろいろ技術が進んでいるので減ってくると思いますが、ただ、仕事量が大幅に減るわけではないと、私は思っています。

(スライド11) 維持管理についてはアメリカが先輩です。ブルックリンやマンハッタンやウィリアムズバーグ橋など、建設から100年前後経った橋がいろいろと問題を起こしてきたわけです。こういう事態にならないようにするために、我々は橋のお医者さんに相当する人と技術をどんどんこれから育てていくという必要があるわけです。

(スライド12) 構造工学は構造物を設計・施工するための学問に間違いありませんが、何を目的にやってきたかという、目的関数というのは1つにかなり近かったと思うのです。それは重量を最小にするということであったかと思えます。私の大学でいえば奥村先生、それから西野先生、長谷川先生などはずうっとやってきておられたわけです。この明快なターゲットの中で構造力学や構造工学が、深く、深く進んでいったというのが歴史的な展開かと思えます。しかし、考えてみると、今や、いろいろな尺度があります。コスト、それから後でも話が出るかもしれませんが、LCC、伊藤先生から話があると思いますが、環境負荷の問題、それから美的なものとか、いろいろな尺度、指標、インデックスがマルチプルに出てきている時代だと思えます。

(スライド13) もちろん、力学が重要であることに誰もが異論はないはずですが、これはベースでありますから、間違いのないことなのですが、実際に力学だけでこれからの展開を乗り切ろうというのだと、弱いと思います。私はそういう認識のもとでずうっとやってきました。私自身の力学が弱いせいもあるのですが、力学以外の要素を取り込むような形で、構造工学というのを拡大的に再構築するようなことを我々は考えていけないといけない。

少子高齢化・人口減社会の到来
公共セクターの財政状況の悪化

一方、
しかし、依然として不十分な社会資本への投資はあるレベルで継続と予想

社会資本ストックの増大による維持管理

総体として仕事が激減するわけではない
スライド10

アメリカの先例:BMW



スライド11

構造工学の変容

かつては目的関数はひとつ(に近い)
:最小重量

明快な目的の中で
構造力学・構造工学は深く深く

これからは目的関数が多数、多様
コスト、LCC、環境負荷、美しさ...

スライド12

力学は重要、しかし、それ以外も重要に

それらを取り込み、構造工学を拡大的に
再構築する姿勢が重要:

環境学、マネジメント学 等々

スライド13

今日あとでお話しがあるような環境の問題は勿論のこと、作る際、維持管理する際問題となるマネジメントの問題など、そういうものを取り込むようなことを構造工学という範疇で、考えていくべきと思っております。

(スライド14) どういうふうに技術の方向をもっていくかというのですが、まず技術についていえば、今までのものよりも安く、かつ高品質の物を作るというのが本物の技術です。後で話しますが、新しいことをやるだけが技術ではなくて、実際にそれが安くて、なおかつ出来上がったアウトプットがいいものであることが必要です。維持管理も同じことです。

我々は橋を対象の中心に、鉄だ、コンクリートだと内部のことばかり言いますが、構造物というのは施設の1つであって、むしろ構造物の周辺の方の意味が大きいことも多いのです。箱物ばかりに注目しているという時代でもないだろうと思います。箱物周辺、それ以外にも我々自身が進出していく必要があると思っております。

(スライド15) シーズ技術というのは、いろいろな方の努力で生まれてきているわけです。そういうものの開発も大事ですが、実際にはうまい物を組み合わせる、あるいは、それらをつないでシステムにしていくということが、たぶんより大事な技術になっていくのではないかという気がいたします。もちろんこれから、革新的なものが生まれると思いますけれども、社会のニーズを見たときには、ニーズに対してどういうものを組み合わせるかということ、視点には考えていきたいと思うのです。

大学は基礎研究をやる場所だと言われます。事実、基礎研究、あるいはシーズ研究が盛んですが、それに傾斜しすぎている気がします。これは少し危険です。基礎研究だけでは食えないのですから。

(スライド16) 例えがよいのかどうか分かりませんが、料理にたとえると、素材である野菜、肉ばかりいくら作っても、一向に我々の口には入らないわけです。生野菜を食べれば別ですが、実際にはそれを組み合わせ、クッキングして食べられるものを作らなければいけません。いくらシーズが、すなわち目の前に食料品があっても、それが料理されなければ、我々の社会にとって栄養にならないです。日本料理、フランス料理、何でもいいのですが、素材を料理にする努力を大学陣も、これからやっていくべきかと思っております。

(スライド17) 環境というのは、いろいろと取り方があると思うのですが、一応、技術環境ということで、環境の1つに入れてさせていただくと、いくつかこれから時代を変えていく技術があるだろうと思います。例えば、計算技術、FEMとかコンピューテーショナルな技術というのが明らかに進んでいるし、我々

技術開発の方向

新しい技術を使って、より安く、より精度・品質の高い構造物を、維持管理を

ほこもの(構造物)だけでなく、ほこもの周辺、それ以外にも進出を

スライド14

シード技術の組み合わせによるハイブリッド技術 システム技術

ニーズを見据えた研究・技術開発が肝要

大学では、シーズ研究・基礎研究が盛ん、ややそれに傾斜しすぎたのではないかと

スライド15

料理に例えれば

素材(基礎研究、シーズ研究)ばかり増やして料理が一向に出てこない



スライド16

の仕事のかなりの部分は完全にリブレースされようとして
いるということ。それからセンシング・情報技術、これもお
そらくこの10年の間には、われわれの分野にもものすごく影
響を与えているだろうと思います。

それから、いろいろな形で制御を組み込んだ構造物というも
のが、実際に作られています。日本の建物ですと150mを
越すようなかなり高いものは、大体、振動制御技術が入れて
地震や、風などを制御するのが普通になってきている時代で
す。10年前は、それほどではなかったのですけれども、今はもうかなり当たり前になっています。これをま
たどういふふうに構造工学のなかで新しく展開するかということも重要なテーマであり、私のグループでも考
えております。

(スライド18) 自分の周りでやっている研究をいくつかご
紹介して、私のグループが志向していることを、少し理解い
ただきたいと思っています。風の問題、モニタリングの問題、
計測の問題、画像による計測やセンサー、あるいは制御技術
について述べてみたいと思います。

(スライド19) 私のグループには、2人の超優秀な助教
授がおります。石原先生は、東工大の日野先生のところで流
体を勉強した方で、民間の研究所での経験をお持ちで、3年
半前に東大においていただきました。阿部先生は、うちの研



石原 孟 助教授



阿部 雅人 助教授

スライド19

技術環境の変化

1) 計算技術 FEM, CFD

2) センシング・情報技術(コピキタス時代
の到来): MEMS

3) 制御技術: Passive/Active control
これらも取り込んだ、新しい領域、技術を
生み出したい、適用したい。

スライド17

新しい技術を利用した、自分の周りの研究の紹介

風の子測(計算技術の利用)

短期予測、長期予測 計測士の風子測など

モニタリングによる状態解析(計算技術)

レーザー速度計の利用(計測技術)

画像技術(計測技術)

センサー開発 VIMSとRIMS(計測技術)

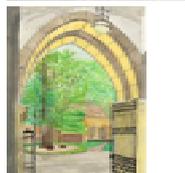
管桁の振動防止(制御技術)

スライド18



橋梁研究室

スライド20



究室を出てアメリカへ行き、博士をとって帰ってきて、今は助教授をしています。実際、私はあまり研究はや
っていませんで、この2人が99.9%、うちの研究室の研究をやっているわけです。若いから、私とは感覚が
違う研究をどしどしやっているのを毎日みております。

(スライド20) このスライドは、うちの研究室のメンバーで旅行をしたり、うちの家で飯を食ったりして
いるときなのですが、もう30数名になって研究室はパン
クしそうです。この大所帯を2人の若い先生がまめに指導し
ているので、驚く限りです。不確定、不透明な時代ですか
ら、いろいろ違うテーマ、違う分野でいろいろとやって、そ



山の中の橋

スライド21

しているいろとチャレンジして、だめなこともあるかもしれないけれど、やってみるという姿勢で研究室が動いています。

(スライド21) 昔は大きな橋というのは、だいたい海に架かっていたのですが、このごろは例えば、山なんかにかかる例が非常に増えています。もちろん、このぐらいの橋ですと風なんていうのはあまり問題にはならないのですが、山の中に橋を造ったときに、もし風が問題になるようだと、設計で用いる風というのは、どういうふうにか考えたらいいのか？ と思うわけです。

(スライド22、23、24) 海の風というのは、だいたいサラッと流れますから扱い易いのですが、山の中というのは、山の起伏でいろいろと風が変わります。日本は傾斜の高いきつところがたくさんあるし、ローカルには丘があり、谷があるというわけです。平なところに吹く風であれば、海から吹いてきた風がそのまま橋、あるいは構造物にぶつかるわけですが、山の中の橋や構造物には、山を越え谷をまたいだ変曲した風が吹いてくるわけです。そういう風を相手に構造物を設計するときどういうふうにか考えるか。

例えば、100年再現風速マップというものを、これまで実際の設計で使っているわけです。海辺ではよいとして、山の中や崖の上でできる構造物にこれを使うとなると、ちょっと怪しいなというのは誰でも思います。いろいろ係数を付けたりしてやっているのですが、今の時代だったら、もう少しハイレベルのアドバンスな方法があるのではないかとということです。

(スライド25) このビデオは9119号の台風のときのもので、日本は台風も多いので、こういう強風から構造物をいかに守るかというのも非常に大事なテーマです。ビデオでは屋根が飛んでますけれども、今は鉄筋コンクリートの家に住んでいる



スライド25

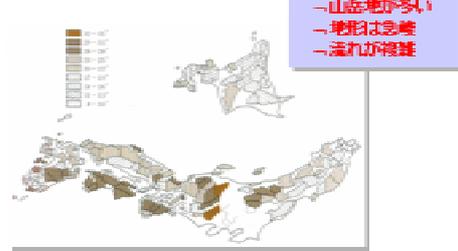
と怖さはあまり感じないのも事実です。しかし、実際には日本中みれば台風によって、農作物もやられるし、交通も遮断されるということで、ダメージが非常に大きいので

す。

(スライド26) これは台風によって支払われる保険金額で、1989~1999年までプロットしています。1991年の9119号では、

●日本の地形

山岳地における平均傾斜勾配



スライド22

設計風速

従来:
100年再現
風速マップ



スライド23

●風

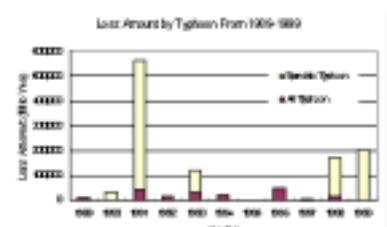
風の数値予測

平坦な地形から複雑な地形の風

極値風から日常風まで

スライド24

近年の台風災害による保険金支払い



台風9119号: 9675億円 → 兵庫県南部地震: 891億

スライド26

6,000 億円近いお金が損害として支払われています。神戸地震のときの支払い額の数倍以上です。伊勢湾台風の後、しばらく大型台風が少なかったのですが、最近比較的大型台風が多くて、また都市化も進んでいる中で、平均して年 1,000~2,000 億円のお金が保険金で出ていくというわけです。そうすると風を精緻に予測というのは、すこし言葉は悪いですが、ビジネスとしても当然考えられるテーマなわけです。

(スライド 27) 山岳地帯には橋もある。送電鉄塔もある。最近大変注目を集めている、風車でエネルギーをおこすウィンドパークも日本の場合、急峻な地形の上に造らざるを得ない。橋や送電鉄塔ですと、風で壊れるか壊れないかという問題ですけど、風車の場合は電気をおこす日常の風が問題となる。風速の 3 乗で効率が効いてきますから、風の予測に 2 割エラーがあると発電エネルギーには 6 割、7 割の誤差が出てくるというわけです。ですから、風の正確な予測が、風車の性能、コストパフォーマンスを決めるクリティカル・ポイントになるわけです。

(スライド 28) これは三菱重工の地形模型の実験で、長崎の湾口に架ける女神橋の実験をしているところです。普通は、こういう地形模型を使って風がどうなるかを予測するわけです。確かに風洞実験の信頼度は高い。しかし費用もかかる。それから時間もかかるわけです。数カ月のオーダーはゆうにかかるのです。風車などは一機 2 億円ですから、橋に比べ規模が小さいわけで、いちいち風洞実験を行う余裕が予算的にありません。

(スライド 29) うちの石原先生が中心になって、3次元の風の数値予測を開発してきており、完成の域に近づいています。このソフトは、名前をみんなに親しんでもらうというので、頭文字をとってマスコット(MASCOT)という名称をつけています。これは数値流体解析によるプログラムで、独自に開発しているものです。これをいかにいろいろな所で使えるようにするというのが技術開発課題の一つです。

(スライド 30) 今の時代ですと、地形のデータもデジタル化されています。それから土地利用、つまり林なのか田んぼというのも、風に影響しますのでインプットしなくては行けません。そういうのもデジタル情報になっているわけです。デジタルデータがあれば 10~20 分で入力データがすべてインプットできるという時代になっています。そこに風を吹かせてやるわけですが、数値風洞ですので計算機が当然必要なわけです。今や、200 万とかそういうオ

◆ 複雑地形上のインフラ



◆ 風洞実験 信頼度は高い、しかし費用も高い、時間もかかる



◆ 3次元風況予測プログラム (MASCOT)

Microclimate Analysis System for COmplex Terrain

非線形モデルにより複雑地形に吹く風を予測する数値解析

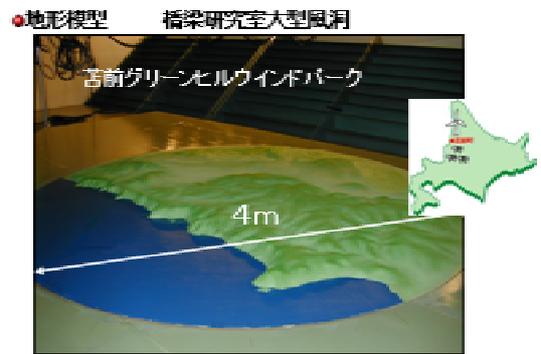
- 座標系 : 一般座標座標
- 格子系 : 非直交コケート格子
- 離散化方法 : 有限体積法
- 数値解法 : 改良 SIMPLE 法

解析条件

- 国土地理院発行 90mメッシュの高さデータ → 地形
- 国土地理院発行 100mメッシュ土地利用データ → 地表面粗度
- 流入風の経路プロフィール
 - ベギ指数 0.22 (経度区分Ⅳ)
- メッシュ間隔
 - 最小 50m
 - 100万メッシュ
- 計算時間
 - 2,3時間程度

オーダーのメッシュのものが、いろんな方位で解いても数時間のオーダーで出てきます。問題はこれが正しいかどうかということですが、計算はできる時代になっています。もちろん、すべての人にできるわけではなくて、そういうことをやっている人だけができるわけです。

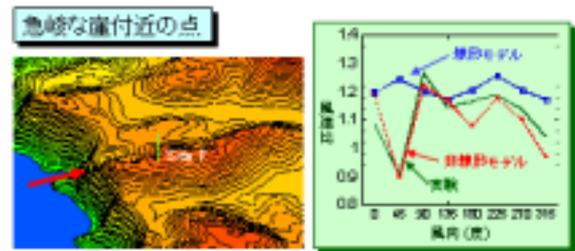
(スライド31) 昔は、うちの風洞は前にお見せしたように本四連絡橋などの大型橋の模型があったのですが、このころは外国の橋がたまにごくたまに入るかどうかで、日本の橋はほとんど、うちの風洞には入らなくなりました。その代わりに、送電線の実験や地形の模型を実験することが多くなっています。地形でどう風が変わるか。シミュレーション結果と、どのくらい整合するかということを風洞実験でやっているわけです。例えば、海辺の絶壁のところには風車を造ったとすると、風向によって風速が増幅されたり、それから減速されたりするわけですね。これが風力エネルギーの効率に敏感に効いているわけです。



スライド31 東京大学 風工学実験室

(スライド32) ヨーロッパでは線形モデルによる風況予測プログラムというのを使得っておりまして、これで予測すると地形が平らなヨーロッパでは精度は高いのですが、急峻な地形の日本ではとても適用できない。マスコットを使うと、実験室とよく合うというわけです。

非線形モデルの検証

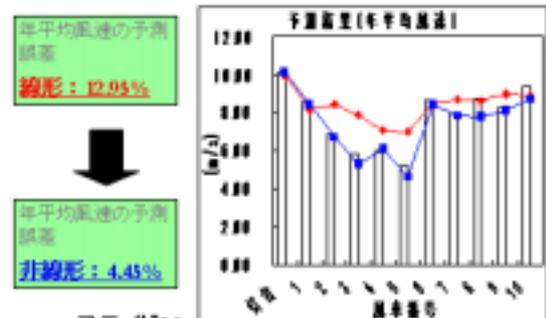


非線形モデルは風速の減速を再現可能

スライド32

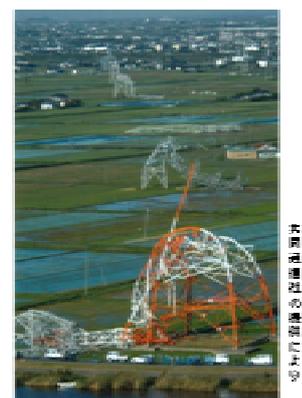
(スライド33) 我々の研究というのは実験室の中だけでは十分ではなく、常に現場はどうかということになります。これはあるウインドパークの実際にある風車の番号ですが、縦棒が実測の年平均風速です。すると場所によって随分違うんですね。あまり風の情報がなかで配置を決めたため、5番の風車というのは非常に効率が悪いものになっています。赤線が線形モデルによる結果で、ヨーロッパで使われているものです。これでやると所々合いません。それに反してマスコットではどの風車もよくあっていますね、ローカルな地形による風の変化を考えたプログラムで数値計算をやると、実際の複雑な地形での風を予測ができる時代になってきています。これからはますますこういうことが増えるかと思えます。計算コストはどんどん低くなっています。よい時代というか、すごい時代がくるのかと思えます。

年平均風速の予測結果



スライド33

スライド34



(スライド34) 次の話は、去年の10月に台風で、霞ヶ浦の方の送電鉄塔が被害を受けましたが、その原因を探ろうというものです。物が壊れるというのは、キャパシティーを外力が超えたときに決まっているわけです。どうして壊れたのかというのを、風の面からうちの研究室で調査し、いろいろと検討しました。東京電力にとっては、平地部で初めて風により送電鉄塔が倒れたというので大変な問題だったので。

(スライド35) たまたま国土交通省ほかが風速を測っておりまして、台風のパスを赤線で示しています。台風の気圧や中心半径など気象学データであるわけです。そうすると台風の経路に応じて、どのような風が吹くのかというのは、モデルがうまくできれば、予測できることになります。

(スライド36) 時間が19時から24時、風速が局所的に低くなっているところは台風が目がそばを通過しています。気象庁が発表する気象データを使って、我々が開発している台風モデルを用いると、台風から直接、風速を予測することもできるわけです。

(スライド37) 実際に送電鉄塔があったのはここですが、この風が本当に鉄塔の耐力を上回るような風だったかどうかというのがポイントになるわけです。ここでは、先ほどのマスコットというのを使うわけですが、当然データとして入れるのは地形であるとか、その土地の利用です。林や木や市街地などというのを入れます。この断面で切り

ますと、こっち方向の風の赤いところほど風が強いです。鉄塔のあるところだけ高い風速のところが下まで降りてきております。鉄塔のところだけどうも風が強かったわけです。これが高さ70メートルの鉄塔の位置での風速の、絶対スケールは書いてないのですが風速の分布で、まわりよりも、あきらかに鉄塔があるところが高い。それはなぜかと言われると、風が南から吹いて来るわけですが、風上が湖や川であったりして、ツルツルの平地であるため風がスルスル抜けるわけです。言ってみれば、ボウリング場の床みたいなのところなのです。ほかのところはデコボコしているところで、風がそこでぶつかってエネルギーを失し、風速が上がらないわけです。鉄塔が倒れたところは確かに風が強いということが数値シミュレーションから言えるというわけです。

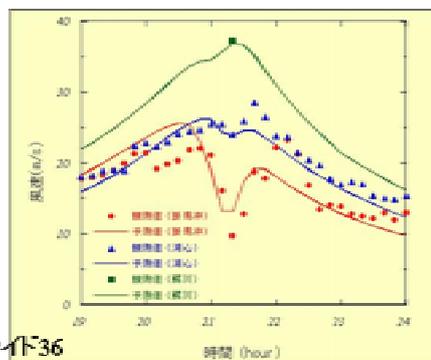
(スライド38,39) 実際にいろいろなものを実測してやっているわけですが、もう少しリアルタイムな風予測というの

●地上風観測地点の分布図



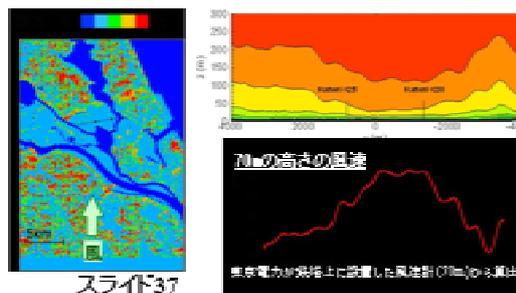
スライド35

●台風シミュレーションによる地上風の予測



スライド36

風直方向の風速分布の変化



スライド37

●内容

局地風の予測
リアルタイムな風予測

スライド38

を考えました。これは日本の高層気象観測の図ですが、日本だけでなく世界中、といっても北半球が多いですが、上の方でいつも気象を測っています。温度や風速や気圧などを測ります。世界中で150点ゾンデを上げて、地表から高層の気象を測っています。このデータを使って、数十キロのオーダー間隔の地点での気象情報が計算され、提供されています。

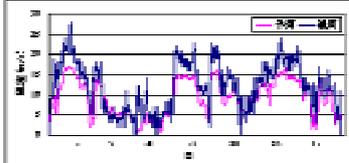
(スライド40) そこからさらに細かく、FEM(有限要素法)でいうところのズームングみたいなことをしていくと、ローカルな風もわかるわけです。ですから、この名古屋に吹く風はどうだという議論ができるズームングをしていくわけです。どんどん小さいメッシュというかゾーンにして解析いくと、すなわち数十メートルというオーダーの小さい領域まで計算できないわけではありません。しかし、今でも天文学的な計算時間がかかります。

(スライド41) これは津軽海峡に、ある夏、吹いている風の様子を、世界中で測っている高層気象の方から持ってきたものです。もっとローカルな風も計算できます。

(スライド42) 例えば、竜飛岬に灯台があってそこで風を測っています。これはある月の1カ月の風速のデータで、観測が青字で、ある時は25メートル吹いたりいろいろと変わるわけですね。上空で測っているデータを、ズームングして持ってきて求めたのが、この赤字です。1年分を計算するのに2週間ぐらい掛かるんです。傾向は確かに驚くほど竜飛岬と合います。ただやはり、所々でエラーがあって、25%程度のエラーになっているわけです。

● 竜飛岬灯台の風観測データとの比較

▼ 風速の子測値と観測値との比較



地形が再現できないために風速が過小評価、年平均風速に25.4%の予測誤差

気象モデルのみでは建設地点の詳細風況の予測ができない

スライド42

▼ 竜飛岬灯台



気象のモニタリングと風のオンライン予測

WMO(世界気象機関) 900点で高層気象の測定 日本では18地点

これを用いて粗い気象予測 (RAMS)
- 数十kmの粗さ
- 即時タッチ
- 2日先まで

このグリッド予測からミクロな地形、地物を考慮したオンライン風況予測が可能

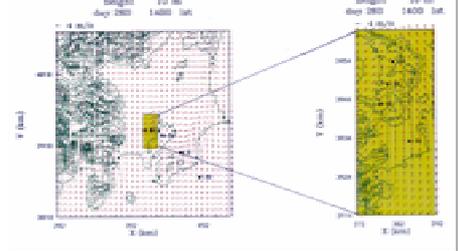
スライド39

わが国の高層気象観測地点



● 従来の風予測(気象学的アプローチ)

▼ 風の子測例

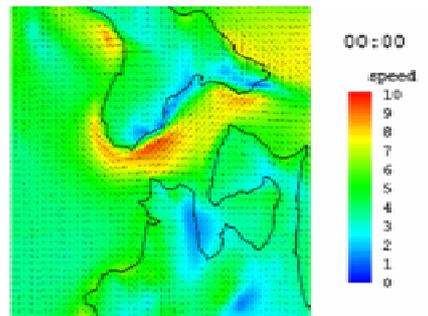


→ 風を正確に予測するが、時間がかかりすぎる

→ 工学的に使うには分解能と精度は不十分

スライド40

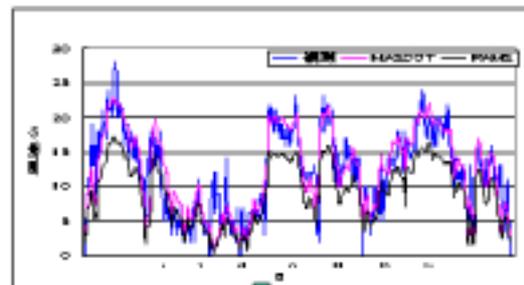
津軽海峡のあるときの風



スライド41

● MASCOTと組み合わせた詳細風況の予測結果

風速の子測値と観測値との比較



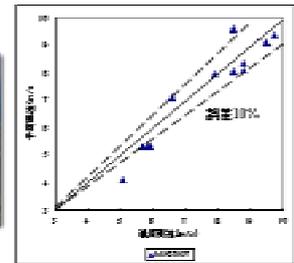
スライド43 予測誤差が3.5%

(スライド43) ローカルなところというか、所々で合っていないというのは、やはりズームングが不十分なのです。この方法だと、計算時間があまりにかかるので、細かい地形まではとても入れられない。そこで先ほどの細かい地形に対応できるマスコットをある段階で併用して計算したのがこの結果です。青字がやはり観測値で、今度、赤字でこう書きましたけど、ほとんど竜飛岬の1カ月分の風を驚くべき精度で予測してしまうのです。誤差が3.5%です。ですから、関心のある地点の風を実際に測ることなく、上空で常に測っているデータからずっと求めてきて、最後にこの細かい地形の反映した解析をやれば、任意の地点の風が分かるのです。

(スライド44) あるウインドパークのところを全部解析した結果です。ウインドパークのところは全部風を測っています。実際に1年間の平均風速と、それから予測値を採ってみますと、誤差が10%以内で入ってくる。ということはどういうことかということ 極端に言えば任意の地点の風が、弱風も強風も現在もそして未来も、未来は統計的になりますけれど、予測できるような時代に、我々が入ってきているというわけです。

● 予測と観測値との比較

竜飛ウインドパーク



任意の地点の風が予測できる
スライド44

弱風も強風も
現在も、
将来も(数時間、100年)

(スライド45) こういう風の数値予測というのは、もちろん環境問題、あるいは構造、例えばサビがどのくらい進むかというときに、飛来塩分というのが問題になるわけですが、そういうもののシミュレーションにも使えるし、もちろん防災・交通・エネルギーなどの応用もできるということがありまして、そういうことを考えていきたいというわけです。

風の数値予測

- 環境
- 構造環境(塩分飛来によるさび)
- 防災
- 交通
- エネルギー
- ... への利用

スライド45

(スライド46,47) これは、何百回と使っているスライドですが、東京のTブリッジというところで、ポートルース場にある橋です。ポートルース賭博で負けた人が、バスに乗るために一斉に渡るのです(笑)。あるとき計測に行ったら、知っている人に会いまして、ばつの悪そうな顔をしてました(笑)。こういう橋があって、これが横に揺れるというのが、15年ぐらい前に起こりました。今は東海大の教授をしています、当時新日本製鉄に勤めていた中村俊一さんという僕の友人が教えてくれま

T橋

1988年開通



スライド46



スライド47

した。僕が彼に思わず「それは面白い現象だ」と言ったそうですが、現地に行ってみると確かに横揺れしている。橋の上に立っていると分からなかったのですが、上の観覧席から橋を見ると一目瞭然で、皆さん歩き方が変わってくる。皆さん同じように、知らない間に同じ歩調で、同じような位相で歩くから、小さい力ですが、たくさんの人の力が足し算になって揺れてしまう。みんながでたらめに歩けば、とても橋を横に揺らすほどの力にはならないわけです。「シンクロナイズーション」という言葉にしましたが、そういうことがあるというのを人間の歩行を分析して明らかにしたのです。

(スライド 48,49) これに、当時遊んでいた液体ダンパーを2,000箱ぐらい買って来て、学生と入れ込んだのですが、まあまあ、それなりに効きました。10年以上して、また見に行っただんですが、随分ふたがパカパカと開いて水がなくなっていましたけど、それでも水の音がしていましたから、まだ水が入っている液体ダンパーがかなりあり、それなりに効いているのだと思います。これは施主のいる問題なので、

日本語で論文は書くのを遠慮しました。とうとうあまりにもったいないから、英語で論文を書いたんですね(笑)。留学生出身のパチェコ助教授、留学生のペンヌンさん、そして中村さんと論文を書きました。いま、パチェコ先生はフィリピンでコンサルタントの社長をしており、あそこでは大変な実力者です。ペンヌンさんは今、A I Tの先生をしています。中村さんは大学の先生に転身されました。皆さん偉くなられています。

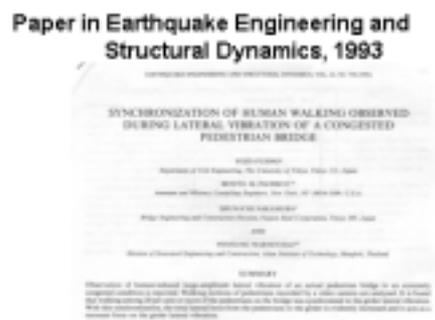
論文を書いて、まあ、これで終わりだな、こういうことは、もう起こらないんだなと思っていました。

(スライド 50) 現象が起きてから15年後になりますが、ミムラムさんという向こうでは有名な建築家が設計したパリの橋がありまして、これが、開通式でたくさんの人がワッと渡ったとき、横揺れして橋が閉鎖されたんですね。彼は慌てたようです。鳴り物入りの橋でマスコミからかなり叩かれたようですから。1月に彼が日本に来たときに、Fujino に絶対に会いたいというので、ホテルに会いに行きましたら「どうしたらよいのだ」と言われました。あの英語の論文を書いていたので、呼び出されたわけです。

(スライド 51) 去年の11月にパリで歩道橋の会議がありました。彼が主催した会議ですけど、そのとき一緒にかれとあの橋に行き、撮ったのがこの写真です。TMDのおかげで振動が



スライド48



スライド49



スライド50

TMDで解決

2002年11月

スライド51



収まり、無事に開通し「めでたし、めでたし」というご満悦でした。会議でも、振動で困っていたときに、Fujino が相談に乗ってくれたと感謝されました。うれしかったですね。

(スライド52) フランスの橋が閉鎖して6か月後に、先ほどご紹介したミレニアムブリッジが開通しました。2000年の6月です。ノーマン・フォスターの設計で、私もこれはなかなかしゃれた橋だなと思って気にはしていました。開通したとたんに閉鎖されたという話は知らなかったんです。横揺れで3日後に閉鎖され、日本のニュースでも映像が流れたようです。私はテレビを見ないので知らなかったのです。エリザベス女王もテープカットに来るぐらい、これも鳴り物入りの橋で、有名な設計家の設計でしたので、閉鎖されてむこうでは大センセーションになったらいいです。

(スライド53) これがビデオです。これもあのT橋と同じなんです。Tブリッジよりも振幅が大きくて、7センチぐらい揺れています。それで向こうでは慌てふためいたわけです。6月中旬、オフィスで仕事を夜していたらイギリスから電話があり、ともかく私に来てくれないかと言われ、行ってみたら「どうして揺れるんだ？」と、それは「人間がたくさんいるから揺れるんだ」と言ったのですが、どうして止めるんだと言われたときに弱りました。つまり人間がどう動くかといのは、我々にとって未知の問題で、イギリス人と日本人がそんなに違うとは思わないけど、やはり人間の動きというのは、なかなか分かっていないので...

(スライド54) 閉鎖している橋の上で、俺の論文を彼らが設計のときに読んでおけばとすこし優越感を味わいました(笑)。

(スライド55) うれしかったことは、イギリスの雑誌などがこの問題を取り上げてくれまして、日本の技術がこの橋をとめる鍵を握っていると大げさに書いてくれたんです。

(スライド56) 構造設計を担当したアラップというコンサルタントはダンパーを組み入れたパッシブな方式で止めたいと言っていました。僕は、ミレニアムというのだから新しい技術を使うべきだ、アクティブ制御をやったらいじゃないかと主張しました。アクティブダンパ

ロンドンのミレニアムブリッジ 2000年6月開通
3日後に歩行者の横揺れ振動のため閉鎖



スライド53



スライド54

イギリスの雑誌から



スライド55

ーが見えるところにあっけないんじゃないかというわけです。子供たちが見て、この橋の振動をとめているのは、このマシンが止めているのだということが分かる方が、ミレニアムらしいと言ったんですけど、却下されました（笑）。

（スライド 57,58）日本はこの辺の技術が非常に進んでいます。ビルでもそうですし、橋でも、レインボーブリッジを皮切りに、アクティブ制御がいろいろな橋のタワーにとりつけられました。多少ぜいたくな技術だったのですが、こういうものを造っては風による振動を止めてきたわけです。エンジニアリングというのは経験、実際に作ってみるというのが大事です。やっている中で遭遇するいろいろな問題を克服したノウハウが、そのグループにあるのです。世界でこういうものを造れるというのは、今でも実際には日本だけだろうと思います。

向こうに行くと、アクティブ制御を入れようと言ったものですから、IHIの人に来てもらって一緒に議論しました。向こうでも接待はします。夜になると飯を食いに行き、ごちそうを食わせてくれます。だから、接待は悪いわけではないのです。ただ、日本と違って、酒は飲み過ぎません。

振動の制御

- 1) パッシブダンパー+TMD
- 2) アクティブ制御(V&H) (私の提案)

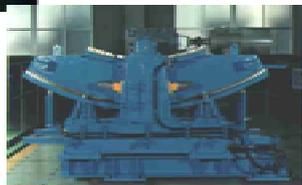


スライド56



東京レインボーブリッジ
1991年完成
塔の振動にアクティブ制御

スライド57



スライド58

（スライド 59）実際には、閉鎖から1年半以上掛かって開通しました。僕は、どうもこのダンパーは効かないんじゃないかと言ったのです。非常に小さい振幅で効かないといけなからです。ダンパーの場合、普通、遊びがあるから危ないんじゃないか言ったんですけど、精度の高いものすごく高価なダンパーを注文したので、25億円の橋に数億円を振動ダンパーに使っているわけです。結局これで止まりました。私も渡ってみましたを感じるような振動は幸いしてません。



2002年2月に再開

25億円の橋に
8億円を振動対策に

スライド59



Stonecutters, Hong Kong



橋 上10は鋼、下はRC
桁は下面を流線形箱桁を両側箱梁でつなぐ2箱桁形式
設計風速 桁位置で1分間風速95m/秒

スライド60

ザーとして呼ばれ、設計パネルに入れていただき、いろいろ議論することになりました。

(スライド61) この橋は今、資格審査が終わって入札に入る段階かと思うんですけど、日本の会社が随分名乗り出てます。ともかくこの橋は世界で初めてセクタースパンが1キロを超える斜張橋でありまして、技術的課題も多いわけです、私が呼ばれたというより、私なら日本のことをいろいろ知っているだろうし、ダンパーのことと、いろいろな先進技術のこと、風のことを知っているだろう、そういうことで呼ばれたのだと思います。ですから皆さんの代表ということで、声が掛かったということでしょう。

(スライド62) 面白かったのは、向こうで開かれた設計協議です。設計協議にはいろいろな人が参加します。施主、施主側に付いているコンサルタント、それからいわゆるコンサルタント、これもアラップです。それから学資経験者でフランスのビルロジューや、上海のシャンハイファンや、デンマークのギムシングなど、そういう人たちが集められました。また建築家も来るんですね。いろいろ設計変更をすると、それはちょっと美的にまずいんじゃないとか、ちゃちゃを入れるんです。この議論もおもしろかったです。もっと面白かったのは、中立的なこの仕事に全く関係ない人が

司会をするのですね。というのは、施主が司会をやると声が強いから、施主の言いなりになるので、施主も1人のパーティシパントにさせられるわけです。橋にはまったく関係ない人が司会をしながら議論を進めていくのです。藤野さんどう思いますか、ギムシングはどうですかということを聞きながら、意見を集約していく。こういうのをバリュー・ワークショップと言うのだそうですけど、こういう会議を開催して物を決めていく。

日本だともっと深くいろいろと実験しないと分からないということを使うんですけど、今ある知識は、データはこれだけしかないのだから、この中で今、決めるとすればどうなんだという議論を、常にするんです。日本だと次回までにまた実験をしないと、先送りにするんですけど、彼らはあまりそういうことはしない。設計というのは「決め」だなと思いました。あるときには判断すなわち「決め」

(スライド60) 外国に顔を売るのは、これからは大事なことだと思い始めて、いろいろと顔を売っていると、ストーンカッターズという香港の橋のアドバイ

Stonecutters Bridge

中央スパン: 1018m

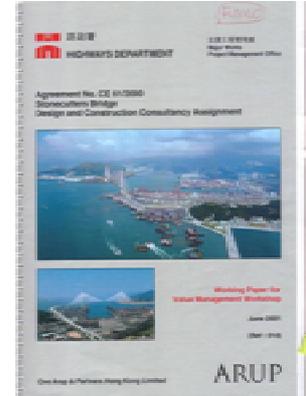
2007年完成予定

世界最長の斜張橋

コンサルタント

Ove Arup

スライド61



施主、コンサルタント、
施主側コンサルタント
学資経験者、建築家
中立者(司会)

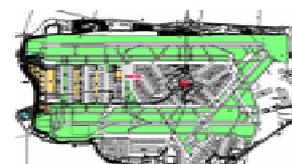
技術的議論は
対等な立場で
「設計」は「決め」
広汎な知識

スライド62



ロンドン
ヒースロー空港

拡張に伴い、
新しい管制塔



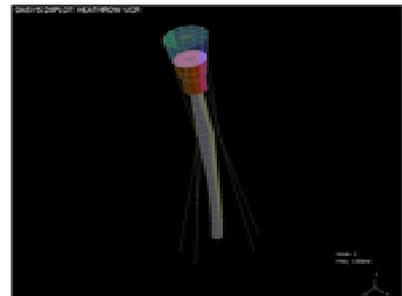
スライド63

というのが大事で、それをデータばかり追っかけていたら、これはエンドレスの作業だということをつくづく痛感しました。

(スライド63) そうこうしていましたが、途中ミレニアムをやっているときに知り合ったアラップのエンジニアから、ヒースロー空港の話が入ってきました。

(スライド64) ヒースロー空港が拡張され、管制塔が新たにできるのですが、これが結構ヒョロヒョロした構造で、どう見ても風で揺れそうだとのことでした。風で揺れることが懸念、管制官の作業能率、振動を抑える必要、日本に相談

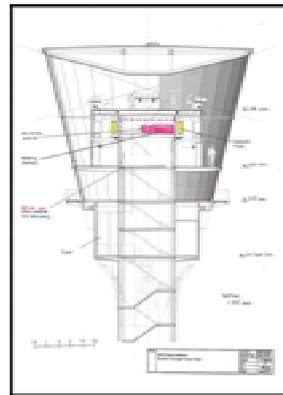
スライド64



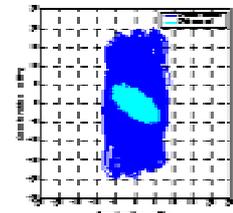
(スライド65) 宇野さんという方です。宇野さんは僕らの先輩の橋屋さんで、もう60歳すぎくらいの方ですけど、技術、それも新しい技術に熱心な方で、私が尊敬しているかたの一人です。宇野さんが非常に真摯に対応してくださり、2年近くかかりましたが、IHIが向こうと契約することに決まったようです。日本で初めて海外の振動制御技術を輸出するコントラクトを取ったのです。非常に楽しみにしています。ヒースローの管制塔には、日本製のアクティブ振動制御装置が、1,2年後くらいには載るのです。

IHIが担当(宇野さん)

アクティブ制御



管制塔の風による揺れ(制御なし、あり)



スライド65

(スライド66) 最近の日本は新設の大型橋梁が少ないので、風洞実験をする機会がぜんぜんありませんので、海外の橋に興味が移っています。これはベトナムの橋です。コンクリート橋ですけれども、向こうは地震がないので風で全部決まります。したがって風洞実験が必要になるのですが、先ほどのCFDを使って、タワーの最適形状を考えるとというようなことを学生とやろうと話しています。

(スライド67) もっと凝っているのは、バングラデシュに掛ける橋です。川幅が4キロくらいあり、そこに橋を架けるのですが、河道の移動と洗堀が激しく、河川工学、地盤の話もはいつてきますし、橋の経済効

ベトナムの橋



スパン400mを超える斜張橋

コンクリート1本柱

地震がないから風で設計が決まる

風洞実験+数値流体力学解析

スライド66



バングラデシュ バドマ河 架橋プロジェクト



スライド67

地盤が極めて弱い: 耐候性鋼が使えないかな?

