

第10回 鋼構造技術継承講演会

「経験豊富な先人に学ぶ次世代への継承技術」

配布資料

令和4年12月13日

土木学会 鋼構造委員会

# Preparing for the unexpected

想定外な（予期せぬ）ことがいろいろあった50年余り

土木学会鋼構造委員会  
第10回 鋼構造技術継承講演会  
2022年12月13日

藤野陽三  
城西大学  
横浜国立大学/東京大学

1

## 漫談 の流れ

- 1) 導入
- 2) 18歳(1968)ー30歳ごろまで
- 3) 30歳(1980)から40歳ごろまで
- 4) 40歳(1990)から50歳ごろまで
- 5) 50歳(2000)から60歳ごろまで
- 6) 60歳(2010)ごろからこれまで
- 7) 終わりに

2

### Thatcher's law(1982)

フォークランド戦争でイギリス軍の兵士に向かって  
"The unexpected happens, and you'd better prepare  
(be ready) for it "

予期せぬこと(想定外)は起こる。だから準備せよ。



ゆりかもめの事故（車軸の疲労破壊）  
2006年4月 -



“想定外” 弁明に使われる。



原因は車輪軸の疲労破壊。  
運行会社の弁  
1) 想定外  
2) 検査では見抜けなかった

3

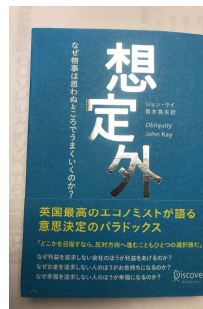
### 未曾有と想定外

東日本大震災に学ぶ  
畑村洋太郎

私たちは  
今回の災害を  
転換点にできるのか？

失敗学の畑村教授が  
いままで考えてきたこと、  
そして3月11日から  
「原発事故調査・  
検証委員会」委員長に  
なるまでに考えたこと

講談社現代新書



4



# Preparing for the Unexpected

Hiroo Kanamori  
California Institute of Technology

金森博雄  
カリフォルニア  
工科大学名誉教授  
地球物理学  
現在86歳



(This talk was presented at the Luncheon of the  
SGA-EMW Joint Symposium, April 7, 1994. It  
has been slightly edited for publication.)

1994.1.17ノースリッジ地震の後、米地震学会と米地震工学会  
の合同報告会での午餐講演

Seismological Research Letters, 1995 2ページ

surface break, surface break without much seismic radiation, to take such an approach, probably because of conservatism  
and a south-dipping fault in an area of primarily north- and difficulty in convincing their clients of the validity of

地球物理学/地震学/土木工学など実験が難しい学問の一つの姿勢

# 想定外 予期せぬこと unexpected

悪い響き

良い響き

の両面がある。私の研究者もどきの50年  
の中で、その両面を見てみたい。

# 漫談の流れ

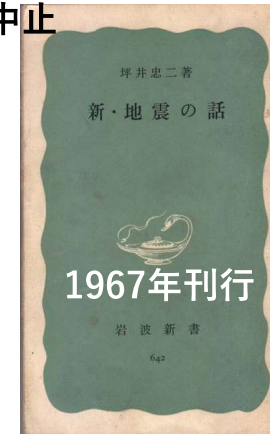
- 1) 導入
- 2) 18歳(1968)ー30歳ごろまで
- 3) 30歳(1980)から40歳ごろまで
- 4) 40歳(1990)から50歳ごろまで
- 5) 50歳(2000)から60歳ごろまで
- 6) 60歳(2010)ごろからこれまで
- 7) 終わりに

1968年4月大学入学  
1969年1月東大に機動隊  
3月東大入試中止  
想定外

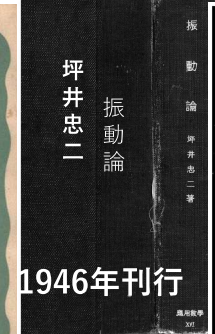
坪井 忠二  
東大地震研究所所長



東大安田講堂



1967年刊行



1946年刊行

振動論を独学  
教わるのではなく自分から

タテ社会の人間関係  
単一社会の理論  
中根千枝



中根 千枝 (社会人類学)  
東大東洋文化研究所 名誉教授

底辺の無い  
三角形

横が弱い

目標が明確  
なら効率的



軍隊

大学は？

9

1967年初版

日本論不朽の名著  
読まれつづけて  
110万部突破!

「ファミリー」「チルドレン」意識を支える日本の社会構造を深く析出

タテ社会と現代日本  
中根千枝  
構成・現代社会編集部

「タテ社会の人間関係」著者の最新刊!  
非正規雇用、  
長時間労働、  
いじめ、孤独死、  
女性活躍社会…

「資格よれる場」「序列意識」  
「ウチとソト」など、  
日本社会独自の構造を野やかに  
解き明かした「タテ」の理論。  
現代日本の抱える問題を  
「タテ」の理論から読み解く  
52年目の続編!

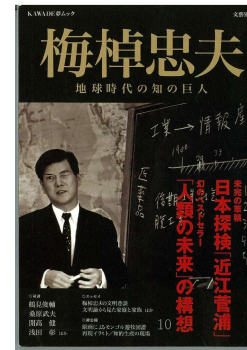
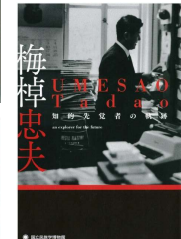
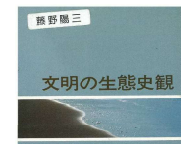


2019年



京大型カード

新しい考えは、いろいろな知識の組み合わせ それがカードで…



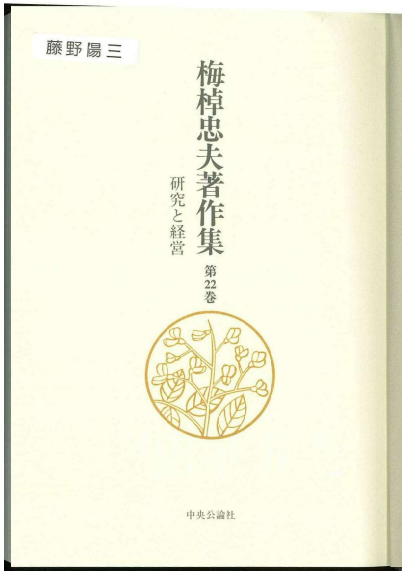
「人文科学」の中心  
京大人文研究所  
のちに梅棹先生は  
国立民族学博物館を創設

民族学博物館のメンバーに

研究 穴 (縦) ばかり掘るな!  
横に拡がれ、  
横に繋がれ! 共同研究を

君らに 研究の自由はある、  
しかし、研究しない自由はない。

君らを評価する。



11

寺田寅彦 (1878-1935)



「天災は忘れた頃にやってくる」

1968年十勝沖地震



地震防災に関連する専門  
に進みたいが...





地球物理学科進学は諦めて  
土木工学科に進学



## 東大本郷の研究室

交通  
河川  
港湾  
土質  
コンクリート  
応力  
橋梁

縦  
割  
り

地震研究所  
伯野研究室

卒論生も受け入れ

生産技術研究所  
(院からのみ進学)

久保研, 丸安研  
ほか

横断的にやりたかった

結果的には何でもありの「土木」  
を選んでよかった

13

## 東大地震研究所で過ごす

卒業研究, 修士

地震研はその間, 紛争中

先生は大学に一回も来れず,

放牧場のような生活

理学系の院生 (深尾, 安藤, 本蔵さん他) との付き合い



伯野元彦先生

卒論の時, 金森先生の計算機アカウントを使わせていただいた。  
34歳で教授になられた, その金森先生が1972年にCaltechカルテク  
に, 頭脳流失, 紛争で研究が思うようにできなかったため,  
海外への道. . .

私は, 1973年8月末に カナダWaterloo大学 博士課程に留学  
金森先生の影響もあって 想定外

14

## 伯野元彦先生



2022.11.27

講義に魅了された  
卒研をえらんだのも

地震被害調査に熱心 現場主義

楽しい研究しかやらない

ユニークな研究

オンライン  
ハイブリッド実験  
10秒前地震警報システム

研究は楽しまねば を教わった

土木学会論文報告書  
第249号・1975年8月

地盤の非線形性を考慮した地震動特性  
CHARACTERISTICS OF ELASTO-PLASTIC VIBRATION OF  
THE GROUND DUE TO EARTHQUAKES

藤野 陽 三\*・伯野 元彦\*\*  
By Yosyo FUJINO and Motohiko HAKUNO

1. はじめに

一般に, 地盤の応力-ひずみ関係はひずみ値が  $10^{-4}$  ~  $10^{-2}$  をこえると非線形性を示すことが知られている。普通程度の地震では, 地盤の最大ひずみは  $10^{-2}$  をこえないが, こえてもごくわずかで, 線形として扱って

超高速計算機の助けをかりて, F.E.M. による動的弾性, 弾塑性解析に関する論文はさかかたに増えている(たとえば2)。中でも地上・地下構造物と地盤系との動的相互作用を検討する際には最も有力な手段の一つである。しかし現在のところ F.E.M. による地盤動的解析においては, 地盤が半無窮であるため, 地表面が地盤により振動してもその振動エネルギーが地下に逃散し, 振動が減衰する(たとえば3)。

初めての学会論文の論文。  
ただし自分で書いた記憶が一切ない。



金森博雄先生

金森先生を囲んでの若手によるセミナー (2012年)



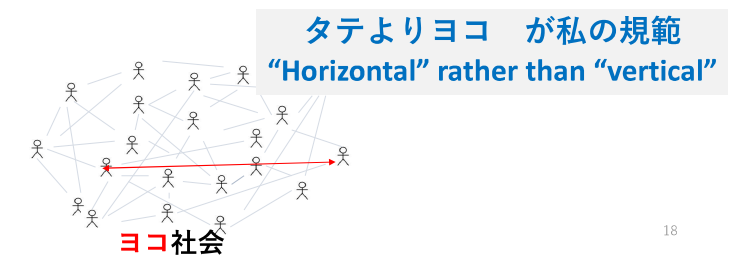
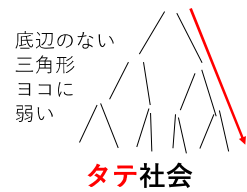
N.C. Lind 教授 (デンマーク人) 知的な方で、影響を受けました

Waterloo 大学  
Solid Mechanics Division

大学からの奨学金とTAで貧乏な生活。ポスドクを入れて3年半をカナダで貴重な体験  
先生はいつも不在。ここでも放牧場  
(テーマは自分で見つけろ)  
博士論文は信頼性設計

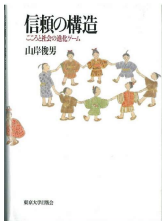
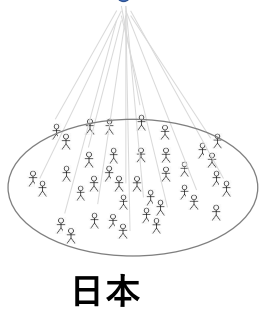
### 驚きのいくつか

- ・カナダ人の院生に加えて中国、インドなどからの留学生など多様な構成
- ・「研究室」が無い！先輩・後輩の意識無し。年齢を聞かれたこともない
- ・指導教員と院生は1対1の関係 院生同士のつながりは友人として
- ・日本ではふつうの「タテ社会」は存在せず、あるのはフラットなヨコ社会



山岸俊男 北大名誉教授 日本を代表する、世界的にも著名な社会心理学者 1948-2018

安心社会： タテ社会  
集団主義的秩序の社会、安心を社会が提供  
ムラ社会、統治社会、  
武士道の社会

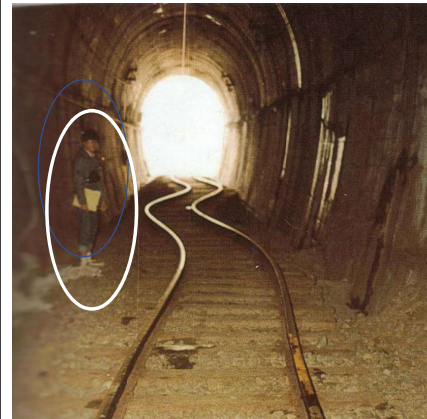


信頼社会： ヨコ社会  
社会が提供する「安心」に頼らず、自らの責任でリスクを覚悟で他者と協力関係を結ぶことによって得られるメリットの方が大きいと考える社会。商人道。

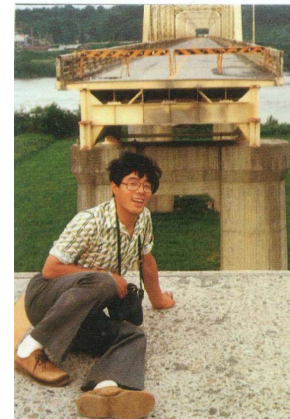


Ph.Dのあと東大地震研究所で助手を1年

恩師の配慮に感謝



1978.1.14 伊豆大島近海地震



1978.6.12 宮城県沖地震

現場を見て、現場から課題を見つける



# 筑波大学（4年間）

新設校 工学系は全くnew

構造工学系（横断的）  
機械，土木，建築，造船  
航空，電気，...

英語，数学の他に

「構造系外乱論」を講義  
地震，風など全ての  
外乱を統一的に扱う

筑波大学における教育と  
研究 土木工学関連部門を中心として

黒川 洸  
正会員 工博 筑波大学助教授 社会工学系

西村 仁嗣  
正会員 工博 筑波大学助教授 構造工学系

藤野 陽三  
正会員 Ph.D. 筑波大学助手 構造工学系



Takashi KUROKAWA Hisashi NISHIMURA



Youshi FUJINO

まえがき

筑波大学は東京教育大学の筑波研究学園都市への移転を契機として、昭和48年10月に創設された国立の総合大学である。わが国の大学は、高等教育および学術研究のための機関として、長年にわたり文化の進展に寄与してきたが、近年における社会の急激な発展と多様な問題の発生に伴い、大学改革の必要性が叫ばれるようになった。本学はこの要請にこたえるべく、柔軟かつ有機的に機能する教育・研究体制を確立し、さらに従来の大学には見られない新しい構想をも盛り込んで、あらゆる意味で社会に開かれた大学となることを理想としている。このような観点から現在各分野で最大限の努力がなされているが、これらはいずれもその緒についたところで

一方、筆者も最近本学に籍を置くようになった次第で、筑波大学の現状と方向性を十分に理解しているとは考えにくい。したがって、本文の記述が正確さを欠き、あるいはある程度の偏見を帯びているところもあろうと懸念するものである。また、本学の組織は在来の大学におけるそれとかなり異なるため、ここで可能なことは筆者らの直接関係する部門の概要を記述することであり、それが従来の土木工学の教育・研究に一律に対応するものでない。これらの点については、あらかじめお断わりを申し上げておかなければならない。

### 1. 全体構想

筑波大学の特色は、教育と研究の新しい仕組み、大学ぐるみの機動的な自治、社会への大学開放の立場に現れる。「開かれた大学」とは、大学自体の管理運営に学外の意見を反映させ、教育・文化活動を社会に開放し、かつまた内外の他大学との交流を推進することによって理想的な学園を建設しようとする姿勢を意味する言葉である。

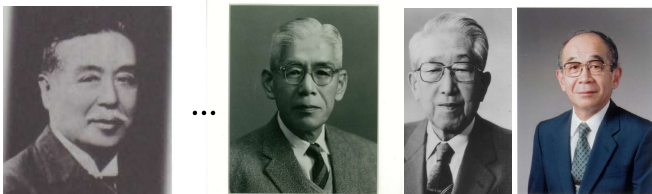
さて、本文の主たる論点は教育ならびに研究の体制にある。図-2から明らかのように、筑波大学の管理、運

# 漫談の流れ

- 1) 導入
- 2) 18歳(1968)ー30歳ごろまで
- 3) 30歳(1980)から40歳ごろまで
- 4) 40歳(1990)から50歳ごろまで
- 5) 50歳(2000)から60歳ごろまで
- 6) 60歳(2010)ごろからこれまで
- 7) 終わりに

# 1982年に東大橋梁研究室助教授に 32歳

想定外



廣井 勇 田中 豊 平井 敦 伊藤 學

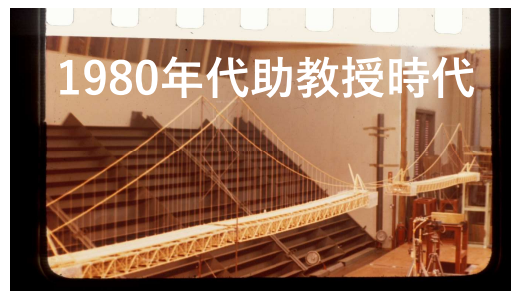


全径間風洞実験室

昭和39年（1964年）竣工

橋

設計論と風



1980年代助教授時代  
本四公団ほかからの委託研究

長大橋の風洞検証実験  
全体挙動を知る上で勉強になった。  
研究費もいただいた。  
(バブルの時代)

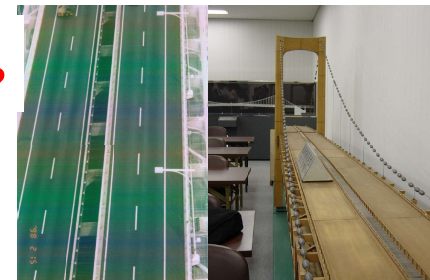


レインボーブリッジ



これで  
食べるの？

明石海峡箱桁案  
風洞実験



# 若手地震工学者の会 若手信頼性研究者の会 をスタート

研究は西高東低

京大・阪大ほか全国の若手と組む

第1回 若手耐震工学研究者のセミナー

期日 / 1983年7月18日(月)~19日(火)  
会場 建設省土木研究所

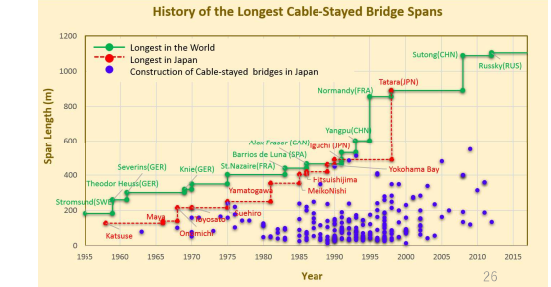


京都市左京区吉田本町  
京都大学工学部土木工学科  
杉 野 真 太  
〒606-8501 電話075-753-1313(内線)

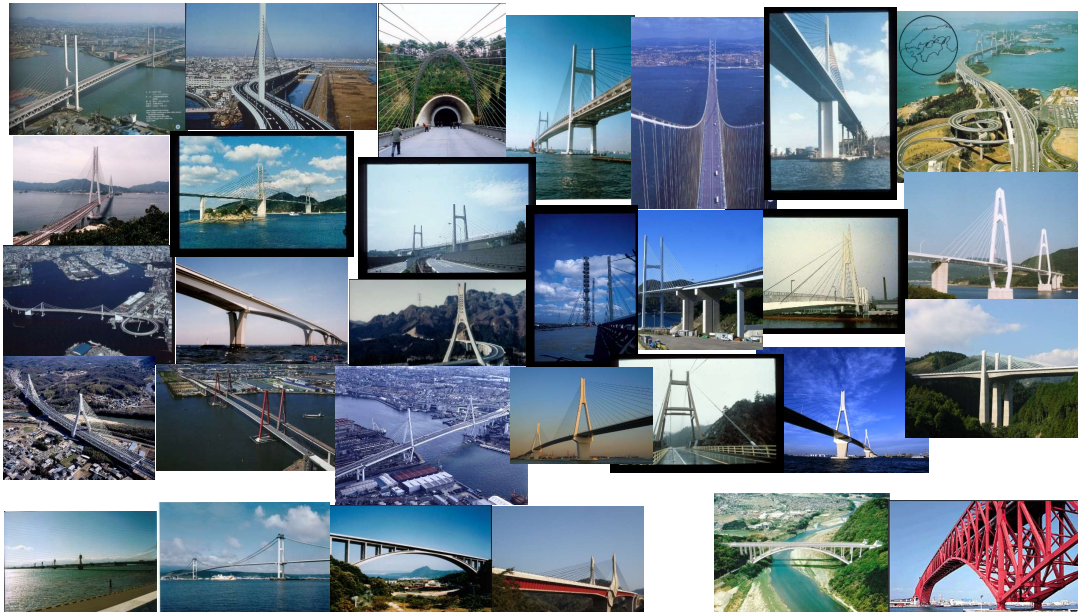


25

20世紀後半から長大橋建設の時代  
日本は1980年代から



26



デンマーク 訪問 1987年  
先進的な橋を  
長井正嗣さんのお誘いで  
(私の橋の恩師)

1987年に訪問  
38歳

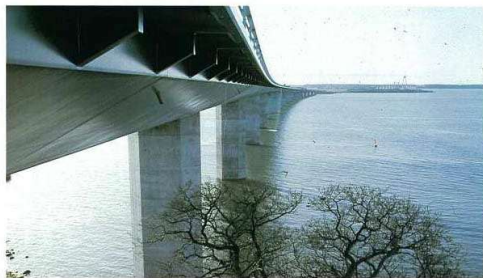


28

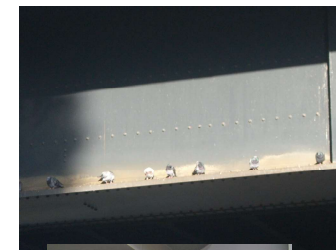




Faro ファロー橋  
1984年ごろ完成



全長1.7km等断面



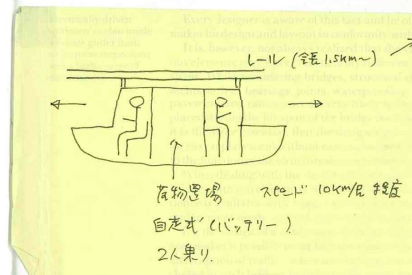
鳥の糞が溜まらないように  
(ドイツの橋)



桁の中は、  
塗装ではなく、  
密閉して除湿で



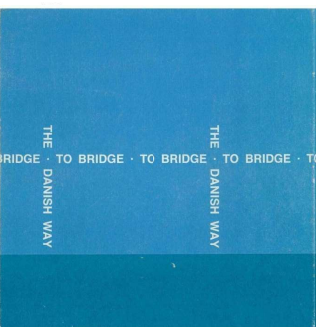
格段に経済的



could be given a protective layer to prolong the life span but it is in any case advisable to make exposed concrete elements easily replaceable and not be tempted to integrate such elements in the overall function with a risk for disruption of such function the day the deteriorated element must be replaced.

**Adaptability**

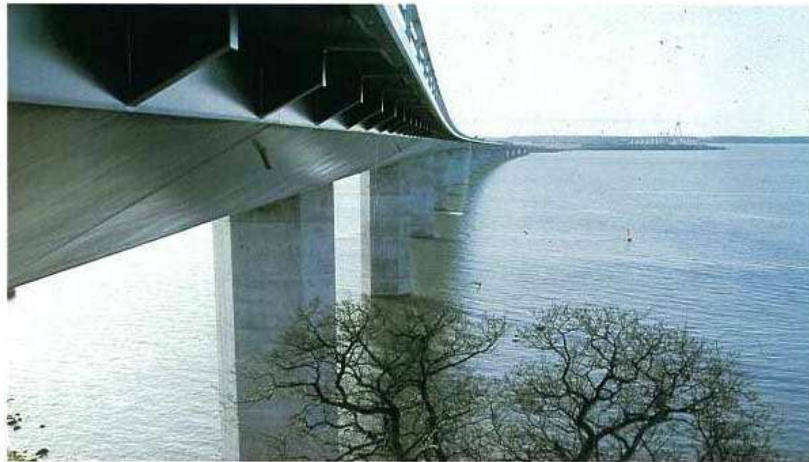
At the functional point... The ability to respond... The philosophy...



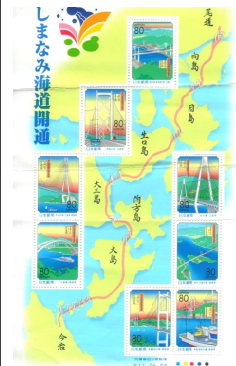
ambitions) in the design without endangering the economics of the structure. The best advice is: increased functional capability as long as it is an option which may often be the case when all other options have been considered. A slight increase in the reinforcement in a concrete structure may give a considerable increase in load carrying capacity. When this type of natural exploitation of possibilities has been achieved, structural engineers

Exposed concrete elements are known to deteriorate at an alarming rate compared to the concrete





技術者にとって感動を与える橋

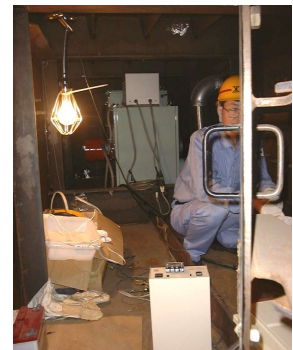


桁塔内のさびの進行を見る  
どちらがさびの進行が速いか？



1990年ごろ 帯広 白鳥橋

除湿器設置 日本第一号



橋の耐風

宮田利雄 横国大  
松本 勝 京大  
ほか

ライバルだらけ  
後輩も続々

橋の鋼構造・構造力学

長谷川彰夫 (東大 1990年逝去)  
三木 千寿 東工大 依田 照彦 早大  
増田 陳紀 武工大 井浦 雅司 東京電機大

中部関西には (全国的)  
宇佐美 勉 名大  
渡邊 英一 京大 沢山の先生方

橋の設計論

古田 均 京大

橋の耐震

大町 達夫 東工大  
家村 浩和 京大  
佐藤 忠信 京大

7人会 藤野も入って7人  
年に4回、各自の大学を回って  
研究紹介&親睦呑み会  
数年続いた。今は2,3年に一度



藤野さんは橋の耐風で世界のトップに  
なれるの？ 鋼構造で??  
何で打って (売って?) 出るの？

東大に行って5年ぐらいしてから、  
30歳台後半の最大の悩み 何をやるの？

# 東大工学部総合試験所

1987年—1990年出向  
3年間

電気, 機械, 原子力,  
計測, 化学他の所員 (all助教授)  
とヨコの交流



流体



機械力学



ロボット



画像



計測



原子力



石川正俊先生 (東大計測工学) 慶應大学 故吉田和夫先生 (機械制御) 塾長安西祐一郎先生 (情報科学)



研究会「知的社会基盤」に入れてもらった

**振動制御・モニタリング (状態監視) で勝負しよう!**

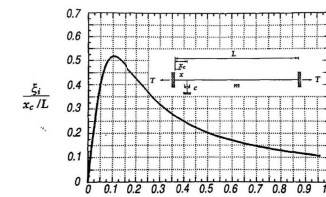
機械系, 制御・計測系  
の方々との交流

# 私の構造制御研究の例

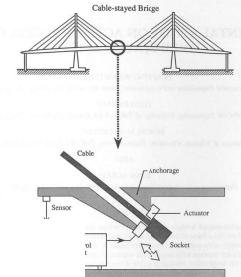
液体ダンパー  
Tuned Liquid Damper (TLD) (命名)



斜張橋ケーブルの  
ダンパーの設計曲線



斜張橋の  
アクティブ振動制御



**大きな成果が出た**

L-M Sun



B. M. Pacheco



TMD, マルチプルTMD  
摂動解による設計公式

阿部雅人



W. Pennung



吉田 純司



# ラッキー (想定外) の研究

1989年12月31日撮影



想定外の振動  
競艇場の中の  
歩行者専用橋

鉛直振動ではなく  
横たわみ振動が  
発生

友人中村俊一さん  
が教えてくれた。



人の縁は大事



人々の歩行が同期する

TLDを入れた



競艇場にある橋で,  
競艇が終わると3万人  
が渡る

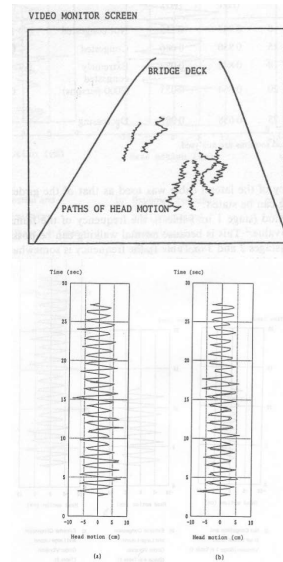


Figure 11. Examples of synchronized motions of two persons fully synchronized from data in Table II.

ビデオ画像から歩行者の動きをトレース  
(動的現象の解明に画像解析を適用)

人の歩行が橋桁が横振動すると同期  
(Synchronization) していくことを  
定量的に明らかにし, それを橋の有意な  
大きさの横振動を励起することを明らかに  
そして, それをイギリスの国際誌に

EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, VOL. 22, 741-758 (1994)

SYNCHRONIZATION OF HUMAN WALKING OBSERVED  
DURING LATERAL VIBRATION OF A CONGESTED  
PEDESTRIAN BRIDGE

YUZO FUJINO\*

Department of Civil Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113, Japan

BENITO M. PACHECO\*\*

American and Wherry Consulting Engineers, New York, NY 10014-1009, U.S.A.

SHUNICHI NAKAMURA†

Bridge Engineering and Construction Division, Nippon Steel Corporation, Tokyo 106, Japan

AND

PENNING WARENTICHAJ‡

Division of Structural Engineering and Construction, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand



パリ 1999年12月  
ソルフェリーノブリッジ  
ミムラム 設計



ロンドン 2000年6月  
ミレニアムブリッジ  
N. Foster Sir 設計



エリザベス女王のテープカットのあと  
彼らには**想定外の振動** 私には**想定内**  
橋は閉鎖し、大騒ぎ 日本でも報道

41

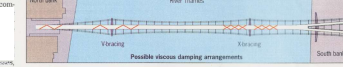
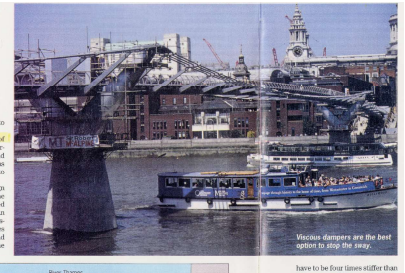


アドバイザーと呼ばれた



Japanese key  
to Millennium  
bridge sway

EXCESSIVE SWAY caused closure of London's Millennium Footbridge across the Thames... Professor Fujino... of the results of the analysis, to avoid embarrassment... of the investigation and design of the solution, was promptly retained by Arup to advise the design team... Dashed initially, the design team had never ruled out the possibility of unexpected dynamic problems with such an unusual structure. But early suspicions that the loss of Baggot's eyes led for the opening day had fed abnormal forces into the bridge were soon discounted.



Viscous dampers are the best option to stop the sway. have to be four times stiffer than it is now - and this could only be achieved by propping the spans. "But we are convinced that increasing the damping by a factor of 10 would work, and at this point it looks like there will be a very effective solution." Shock dampers were ruled out because they are not suitable for



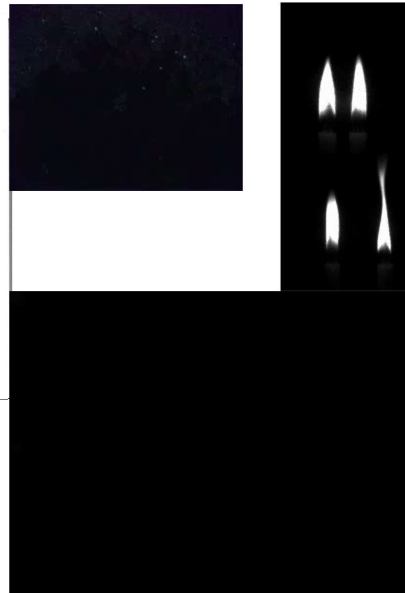
Synchronization  
同期

数理科学の  
分野で注目  
*Nature*にも論文

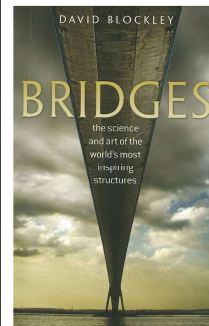


CONTENTS	
Preface	1
I. Lateral Sway	
On	11
Fluidity and the Instability of Sync	11
Just	40
Brain Waves and the Conditions for Sync	40
Time	70
Sleep and the Daily Struggle for Sync	70
II. Dicrotism/Sync	
Five	103
The Symphonic Universe	103
Five	127
Quantum Chesses	127
Six	153
Bridges	153

Bridges 橋



Oxford 大学出版, 2012



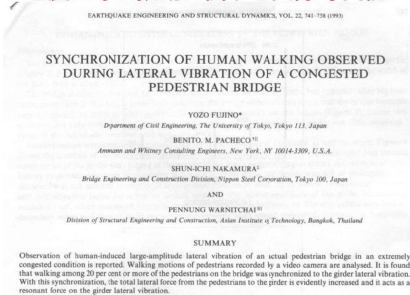
BRIDGES ARE BATS

The intense media publicity brought to light some previous eyewitness accounts of this kind of wobble. Examples in the 1970s included UK bridges at the National Exhibition Centre and in Chester and also the Auckland Harbour Road Bridge, New Zealand, during a Maori demonstration. One month after the Millennium Bridge opened a 100-year-old road bridge in Ottawa wobbled as a huge crowd left the bridge. The Golden Gate Bridge on the day of its opening and the Brooklyn Bridge during a power outage have both also suffered. A colleague at the University of Bristol, John Macdonald, has recently measured similar movements on Brunel's Clifton Suspension Bridge in Bristol.

The only documented technical study before the millennium celebrations was in 1993 by a Japanese team lead by Yozo Fujino of the University of Tokyo. In a technical research paper they wrote, "It seems that human-induced lateral vibration has not been checked in designing pedestrian bridges." They reported experiments on a cable-stayed pedestrian bridge next to a boat race stadium. After a race as many as 20,000 people passed over the bridge in 20 minutes. The Japanese team produced evidence demonstrating synchronized walking and lateral vibration of the bridge. Unfortunately the paper was published in a research journal about earthquake engineering rather than one directly concerned with bridges—an illustration of the difficulty of sharing this kind of information.

The solution to stop the wobble of the London Millennium Bridge was to install shock absorbers, rather like in a car. Using the results of their quantitative research the engineers designed a

地震工学と振動に関する国際専門誌



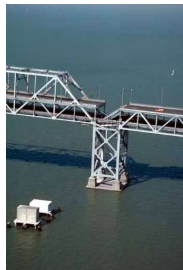
国際誌に論文を出すこと  
の意義を痛切に感じた

44

もう一つの記念すべき1989年 **Loma Prieta 地震, 1989.10.17**



当時、東大橋梁研究室で長大橋の耐風工学の研究をやっていたところに、意外なことに、昔からご指導いただいている京大 亀田弘行先生から声がかかって調査に参加



人の縁の大事さ



インフラ、特に橋の甚大な被害

人生観を変えた



Loma Prieta 地震, 1989



日本の国際的に著名な地震工学者の言

*日本ではありえない 想定されない  
This kind of damage would not be expected in Japan.....*

日本はバブルの時代

1989年Loma Prieta 地震被害調査報告書

タイトル *Competing against time*  
時間との闘い

COMPETING AGAINST TIME



Report to Governor George Deukmejian from The Governor's Board of Inquiry on the 1989 Loma Prieta Earthquake

George W. Housner, Chairman May 1990

1989年Loma Prieta 地震被害調査委員会委員長



G. W. ハウズナー (Housner) (1910-2008)  
カルテク (CIT) 名誉教授 地震工学の父



Loma Prieta地震の被害（一回の地震が大都市を崩壊させる）の最大の教訓は正しく *Preparing for the unexpected* だったのでは？  
そこで タイトルは *Competing against time*

カリフォルニア交通運輸局は以来、地震レトロフィットに励み、その動きは全米に広がった。 **社会に責任を持つ学者。**

先生は、世界構造制御(Structural Control)学会(1993)を立ち上げた。



東大での若手セミナー



わが家でのパーティ



1999年 震災予防ニュース  
に対談が掲載

漫談の流れ

- 1) 導入
- 2) 18歳(1968)ー30歳ごろまで
- 3) 30歳(1980)から40歳ごろまで
- 4) **40歳(1990)から50歳ごろまで**
- 5) 50歳(2000)から60歳ごろまで
- 6) 60歳(2010)ごろからこれまで
- 7) 終わりに



1990年に教授になって 橋の風景画教室  
橋を知るために1993年にスタート  
今年で30年目

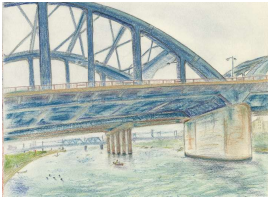


女子美の先生を毎回、  
講師に迎えて

2000年度 風景画教室作品集

50年も100年も町の  
中に存在する橋は  
記憶referenceに  
なりうる。

- 2000年度風景画教室
- 第1回 2000年4月22日(土) 皇居平川橋
  - 第2回 2000年5月13日(土) 東京駅
  - 第3回 2000年6月 3日(土) みなとみらい21
  - 第4回 2000年6月24日(土) 多摩川園
  - 第5回 2000年7月15日(土) 勝鬨橋



ドイツの橋

橋は文化でもある



梅棹 忠夫



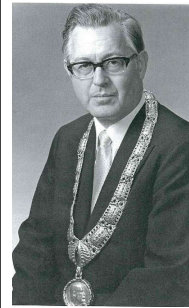
フランスの橋

土木インフラ  
文明の装置

お国柄 地域柄

ならば「〇〇」  
へ

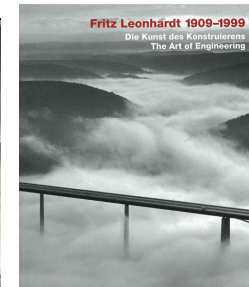
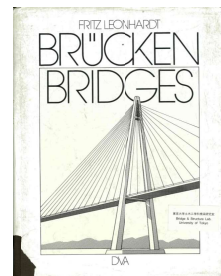
橋は〇〇か？



F.  
レオンハルト  
博士  
Sttugart  
大学学長



レオンハルトが設計  
2重合成桁 高速鉄道橋





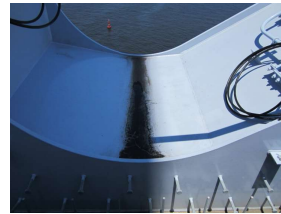


日本のある  
比較的  
新しい  
トラス橋

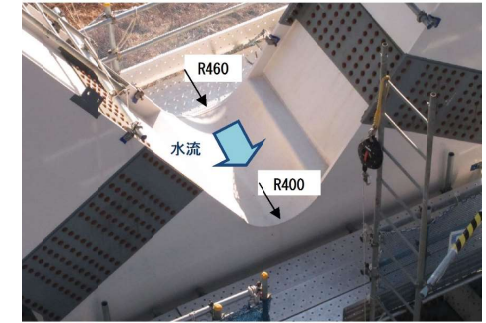


繊細な配慮  
水処理

感銘！ Art!



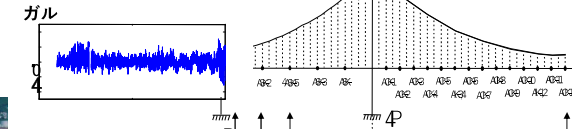
## 横浜北線 大熊川トラス橋（首都高速）



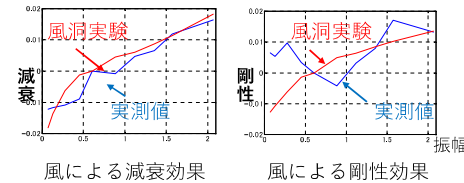
## 漫談の流れ

- 1) 導入
- 2) 18歳(1968)ー30歳ごろまで
- 3) 30歳(1980)から40歳ごろまで
- 4) 40歳(1990)から50歳ごろまで
- 5) 50歳(2000)から60歳ごろまで
- 6) 60歳(2010)ごろからこれまで
- 7) 終わりに

## 世界でもっとも密な振動測定を白鳥大橋で実施（1997年）



40個（120方向）の加速度センサー風振動を連続計測。非比例系減衰系の逆解析手法を開発しデータに適用。風洞実験の結果と実際の風での橋の挙動が整合的であることを世界で初めて示した。画期的成果。



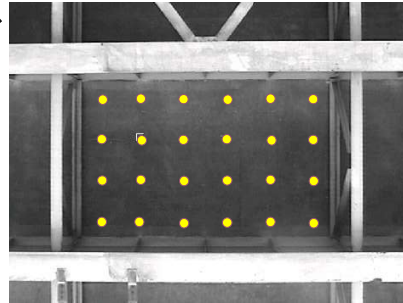
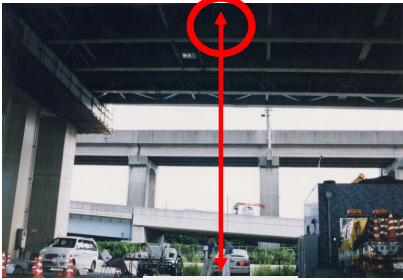
長山, 阿部, 藤野, 池田  
Nagayama, T.他 (2005) Structural identification of a non-proportionally damped system and its application to a full-scale suspension bridge, *J. of Structural Engineering*, pp.1536-1545.



自らの研究成果に我が国の成果を加え, 「Wind Resistant Design of Bridges in Japan」(Elsevier社)を2009年に刊行して世界に発信。



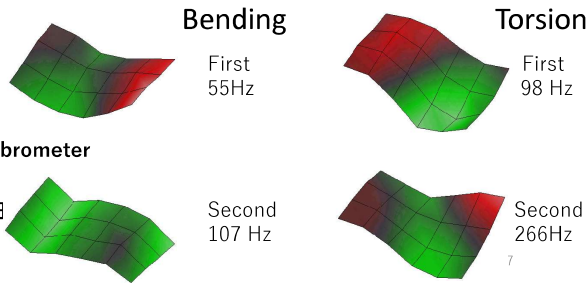
レーザードプラーによるスキヤニング  
計測 RC床版の振動 1999年



貝戸清之  
当時、博士課程  
現在、阪大准教授

Laser Doppler Vibrometer  
LDV

1500万円



ドクターイエロー



土木学会第58回年次学術講演会 (平成15年9月)

車両振動に着目した軌道モニタリングシステムの開発

営業車両の走行時の振動を利用した  
軌道モニタリングシステム

TIMS 2002年頃

(Train Intelligent Monitoring System)



加速度計  
GPS

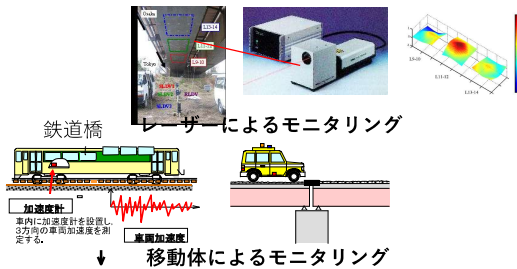


2003年

- 東京大学 学生会員 ○下園 武範 東京大学 正会員 阿部 雅人
- 東京大学 フェロー 藤野 陽三 BMC 正会員 小芝 明弘
- いすみ鉄道 鹿間 剛

振動計測から構造ヘルス  
モニタリングの研究へ

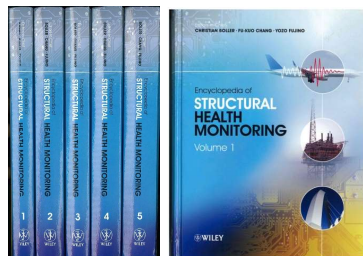
- ・スキヤニングドプラーレーザーによる高密度面のモニタリング
- ・新しい移動体モニタリングの提案  
JR鉄道会社、道路で実用化  
等々



構造ヘルスモニタリング百科事典  
(全5冊, 2709ページ) ワイリー社  
2009年刊行

欧米の研究者とモニタリング技術をレビュー

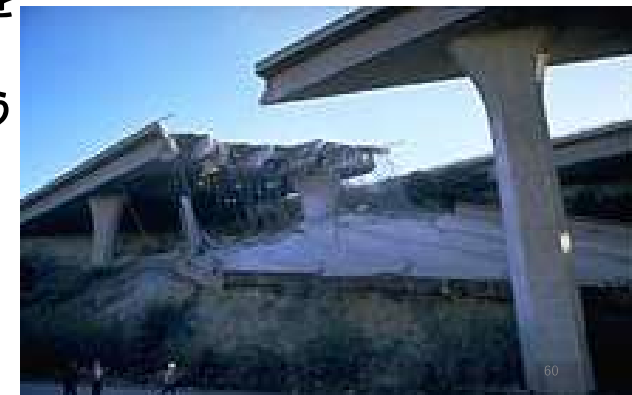
- Boller, C. (独Saarland 大学)
- Chang, F-K. (米Stanford大学)
- Fujino, Y. (当時 東京大学)



Northridge EQ, 1994.1.17

1989年以降、耐震補強を進めた。  
済まないものは同じように被害を受けた。  
済んだものはOK

大きな教訓。





# Preparing for the Unexpected

Hiroo Kanamori  
California Institute of Technology

想定外に準備しよう  
1995年



金森博雄 (カリフォルニア工科大学名誉教授 元東大地震研教授 34歳で教授)

(This talk was presented at the Luncheon of the SEA-FAR Joint Symposium, April 7, 1994. It has been slightly edited for publication.)

Living in California means living with earthquakes. During the last decade alone we have experienced several damaging earthquakes, some of which have come as big surprises. We were surprised by earthquakes without surface break, surface break without much seismic radiation, and a south-dipping fault in an area of primarily north-dipping structures. Why were we taken by surprise? We were surprised primarily because the duration of our data base is so often constrained with the time scale of earthquake occurrence.

to a "deductive" approach in which we use some theories or inferences drawn from something familiar. In science, we take this approach frequently, often with a good success. In engineering practice, however, people seem to be reluctant to take such an approach, probably because of conservatism and difficulty in convincing their clients of the validity of such a deductive approach. This is understandable, such conservatism may be inevitable in dealing with the real world rather than academia. Under these circumstances, an

Seismological Research Letters, Jan.-Feb. 1995



# 1995.1.17 阪神大震災

莫大な被害額 耐震設計も大きく変わった。  
既存不適格に要注意 耐震補強に目覚め、進めた。  
(高速道路会社, 国の橋梁を中心に) **その効果は大**

一度起こることは二度起こる

# 東神戸大橋 1994年完成

1995年兵庫県南部地震

エンドリンクの破損  
意外なところで 想定外?



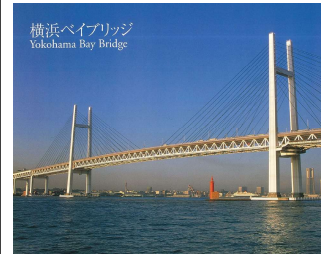
中間橋脚 これで助かった



橋桁の端部

端橋脚

ウィンドタングの破損



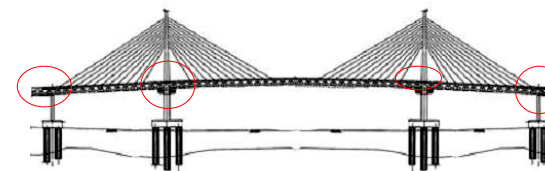
横浜ベイブリッジ  
Yokohama Bay Bridge

# 横浜ベイブリッジ 1989年完成

リンク構造 (タワー, 端橋脚)



1. 橋軸方向には振り子のような構造
2. 構造モデルでは, 完全ヒンジ



Location of Link Bearing

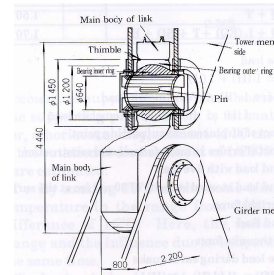
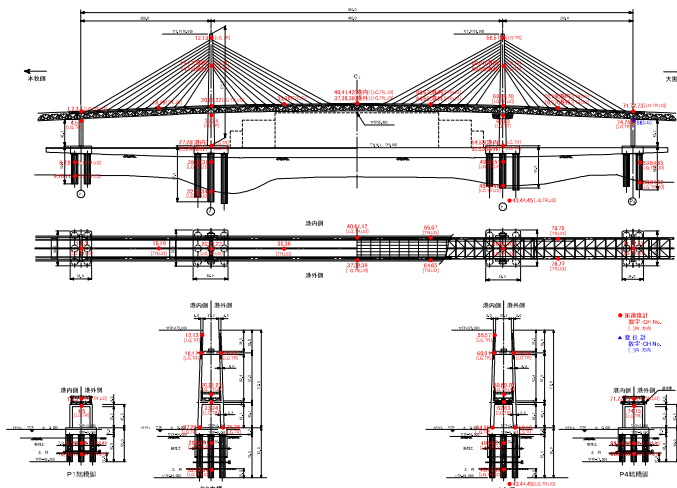


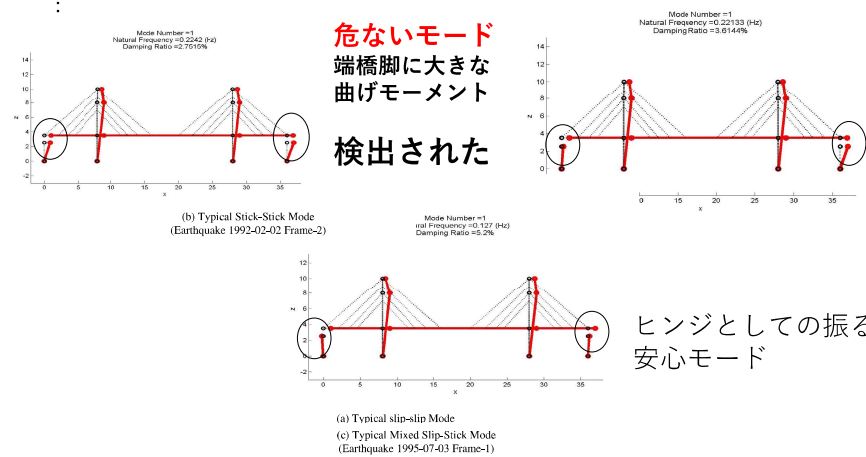
Fig.7 Link Bearing at Tower

# 横浜ベイブリッジの地震動・地震応答モニタリング



- (1) 豊富な観測点  
85(チャンネル)加速度計
- (2) 豊富な件数  
30年間の30以上の地震

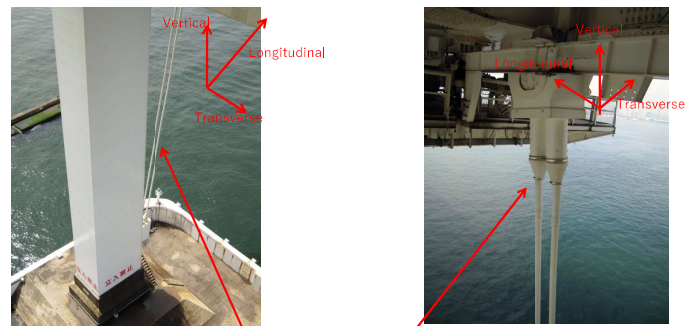
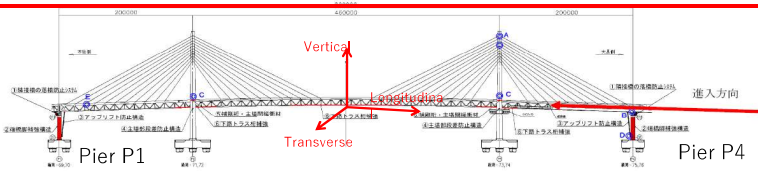
# 同定された3つの遊動円木振動モード



危険なモード  
端橋脚に大きな  
曲げモーメント  
検出された

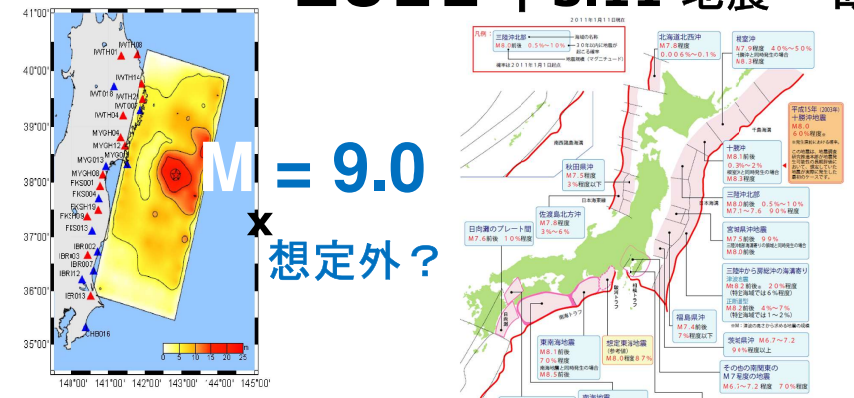
ヒンジとしての振る舞い  
安心モード

# ファイルセーフを考えた耐震補強実施 (2006年ごろ)



端橋脚，リンクが地震で破損しても主桁をPCケーブルで守れるように

# 2011年3.11 地震 断層

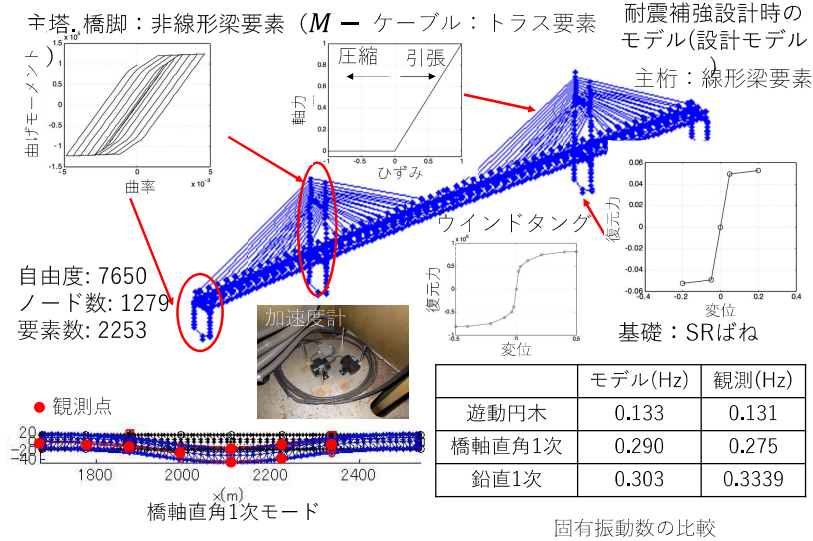


1978 宮城県沖 EQ.  
M=7.4

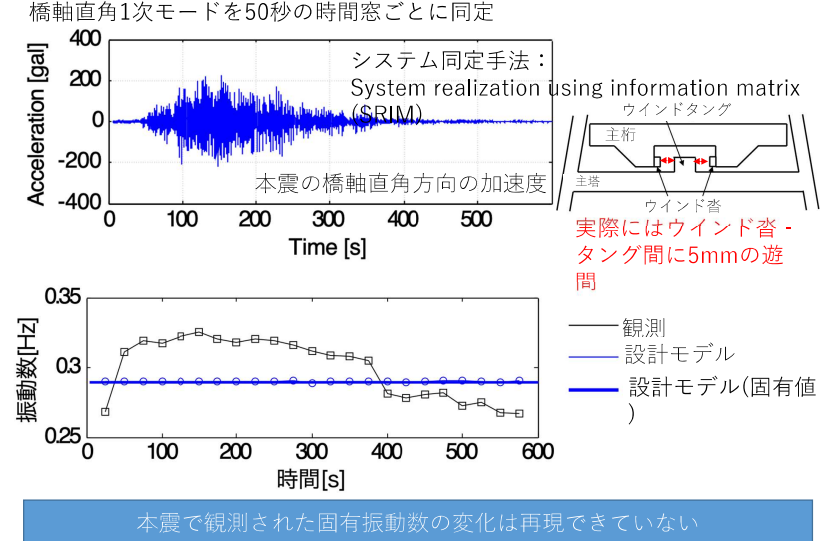




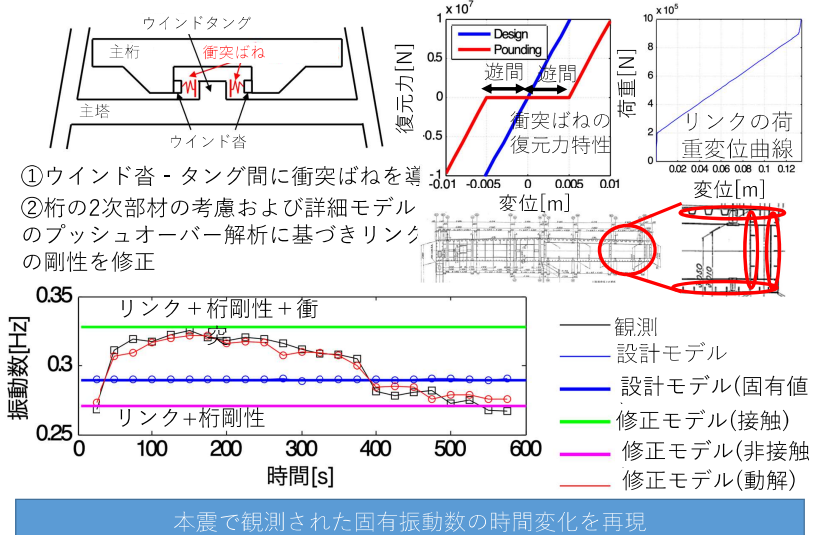
## 観測結果に基づく三次元骨組みモデルと妥当性の検証



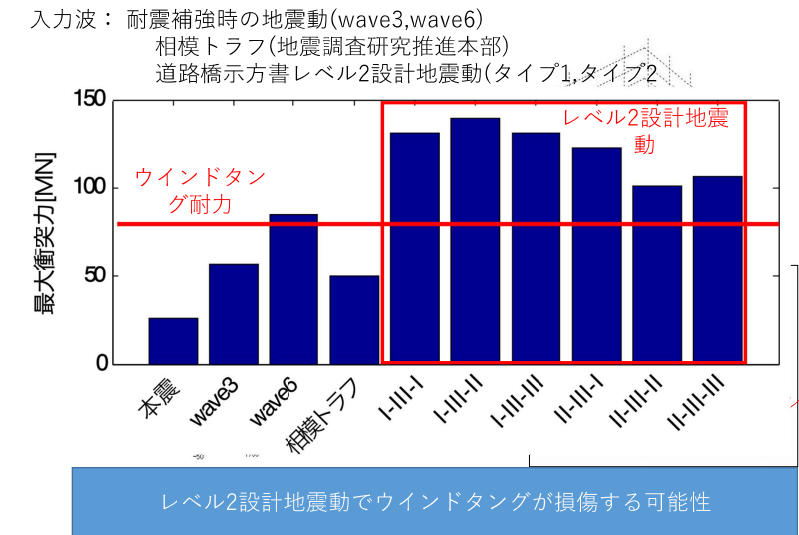
## 動的解析による観測された衝突応答の再現



## 動的解析による観測された衝突応答の再現

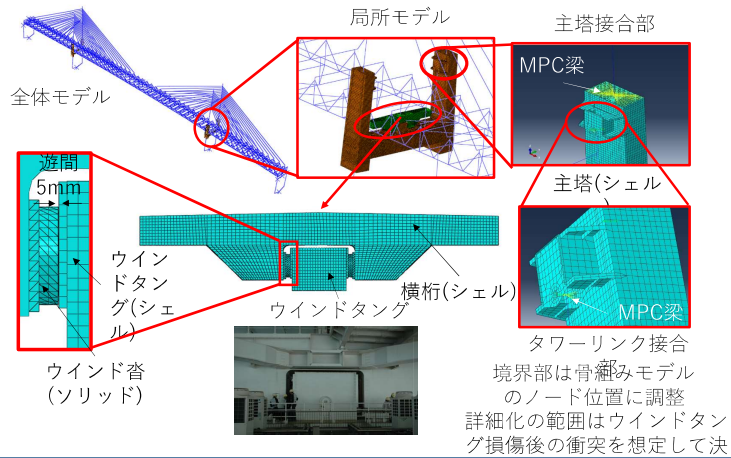


## 将来の大地震時における衝突力の推定





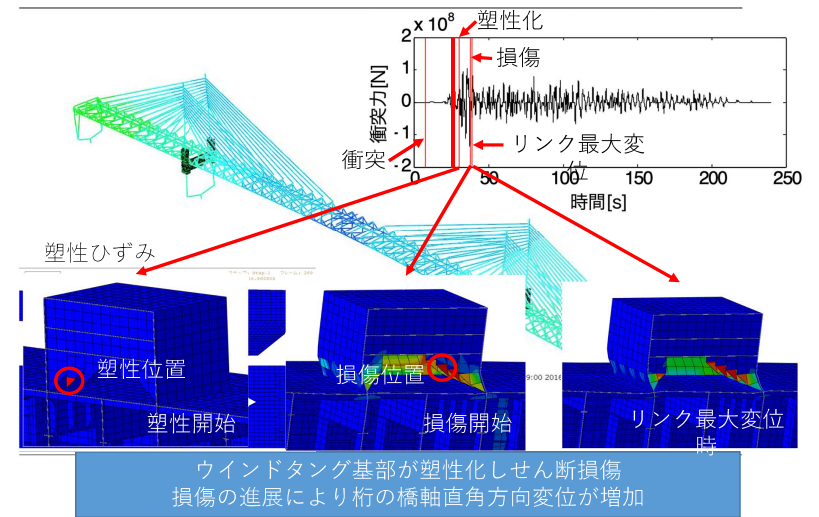
# マルチスケールモデルの構築 77



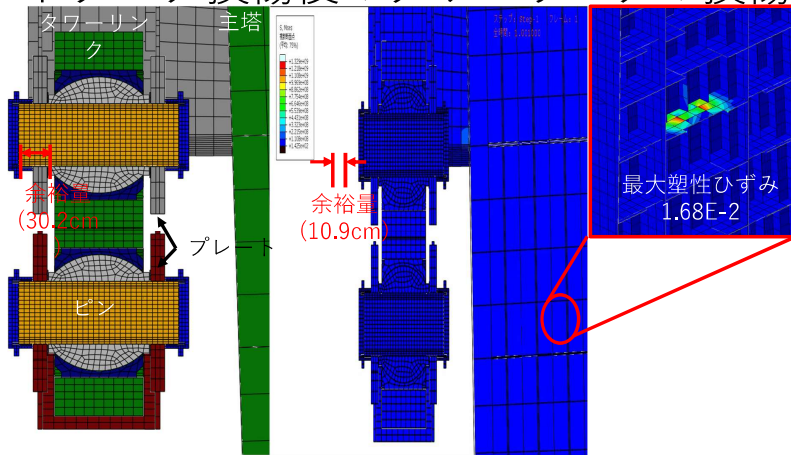
ウインドタンクの変形状態および損傷状態を評価するためにマルチスケールモデルを構築

# 大地震時におけるウインドタングの損傷評価 78

入力波: レベル2設計地震動 I-III-II 増幅倍率: 10

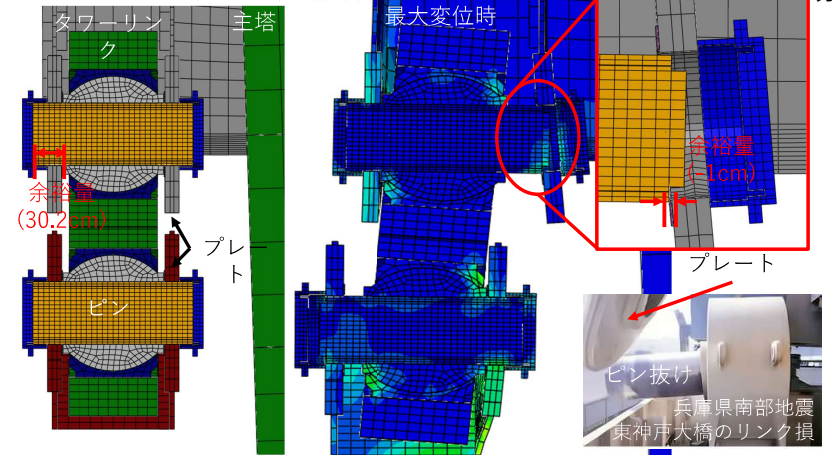


# ウインドタンク損傷後のタワーリンクの損傷評価 79



衝突により主塔の一部が塑性化するが主塔の損傷は小さい  
リンクが干渉後にプレートが面外変形、ピンの余裕量が11cm程度まで減少

# ウインドタンク損傷後のタワーリンクの損傷評価 80



リンクが干渉後にプレートが面外変形  
最大変位時にピンの余裕量が-1cm程度まで減少し脱落

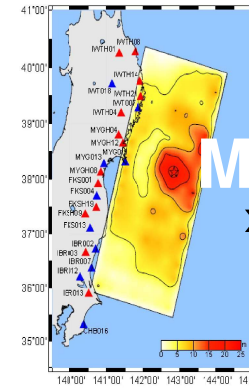


桁を支える，塔の中間梁の台座



桁の衝突に備えた衝撃力  
吸収繊維ラバー

# 2011年3.11 地震 断層



M = 9.0  
×  
想定外?



1978 宮城県沖 EQ.  
M=7.4

## 2011.3.11 東北大震災 高速道路 2日後には緊急物資輸送 2週間後の3月25日には全面開通 耐震補強の効果大



東北地方の工場からの部品のサプライの途絶えが短期間で済んだ



全国での耐震補強費5000億円はもとを取った?

## H23年 東北地方太平洋沖地震(平成23年3月11日)

1

- ①北上-盛岡間 高架橋鉄筋露出
- ②新花巻付近 橋脚座屈
- ③一ノ宮-水沢江刺間 橋脚の鉄筋露出
- ④福島-白石間 電化柱倒れ
- ⑤郡山付近 ラン高架橋鉄筋露出
- ⑥小山~宇都宮間、那須塩原 高架橋柱のクラック

**開通は4月末  
損傷した電化柱の  
の取り替えに時間  
が取られた**

宮城県栗原市(震度7)  
震源から約150km

電化柱 470ヶ所  
1100本破損

3/12 3:59 M6.7の地震の震源

3/11 M7.3



2004.10.23 新潟中越地震

耐震補強のお蔭で高架橋は被害なし



脱線防止ガード



新幹線の脱線



電化柱の被害  
(付属物 電気の担当)  
新しい被害

被害は進化する

あの時、研究を始めていれば... 悔やむ



首都圏の道路 日本経済の30%を支える  
高速道路 物流の半分以上を担う

安全 機能 function 簡単に失う

地震後、何時間で開通できるか？ 1時間 1日 一週間  
長くなると、日本の経済そのものに悪影響が...

建設後 50数年 その価値はますます高い  
本体の耐震補強はほぼ終わったが、  
本当に地震に対してレジリエントか？ サステナブルか？



2011.3.11 電化柱  
東北新幹線 想定外？



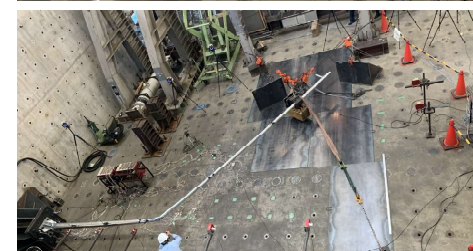
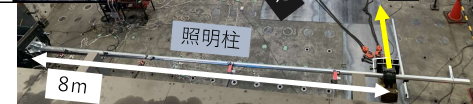
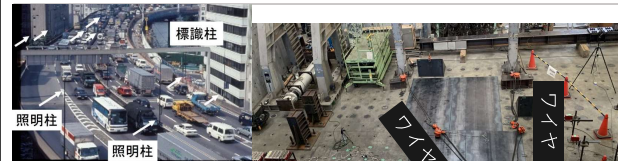
1995神戸地震  
共振すれば倒れる



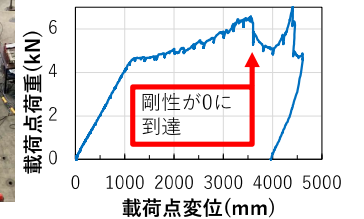
照明柱, 標識柱が倒れたら

道路の機能停止はいろいろなことで起こる 付属物  
やるべきことは沢山ある

### 照明柱 (実物) の耐震性能試験



2019年10月30日  
実施：首都高速道路



# 橋が地震に壊れなくても...

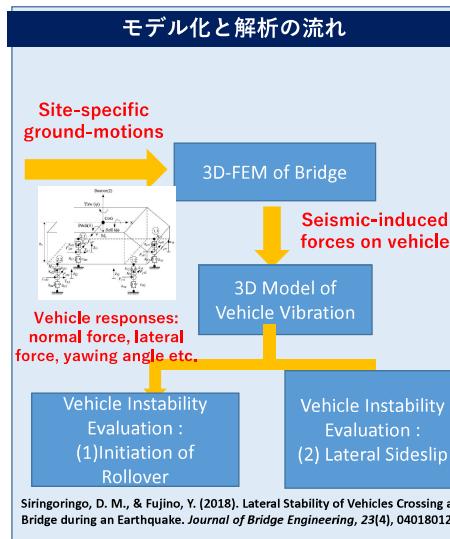


		全線		
		普通車	大型車	合計
全日	H27.12	880,785	100,590	981,375
	H26.12	846,399	103,192	949,591

一日の通行大型車両が10万台  
79%が揺れが増幅される高架構造

橋梁の耐震化が進んでいる中で橋梁に被害が無くても大型車が転倒すると、首都高速が駐車場化し、交通機能が停止の可能性大。

# 地震による大型車の走行時の転倒解析 世界初



Case study : Curved Bridge Kinko Junction

Input: Site specific 2 level earthquakes (L1 & L2)

モーニング

転倒と滑動:

- Initiation of Rollover: Zero Normal Force
- Lateral Slip (Sideslip): Critical lateral friction force  $F_x > F_{x\_critical}$

Tire loses the contact force  $N_{ij} = 0$

Siringoringo, D.

## 結果の例

- : 転倒, 滑動なし 安全
- △: 1輪が浮くか滑動
- ×: 2輪以上で浮くか滑動

		レベル2地震: L2						レベル2地震の半分: 1/2 L2								
		曲線部				直線部				曲線部				直線部		
速度 (km/h)	Radius 72-84 m	Line 3	Line 4	radius 90-110 m	Line 1	Line 2	Line 5	Line 6	Vel (km/h)	Radius 72-84 m	Line 3	Line 4	Line 1	Line 2	Line 5	Line 6
20		×	×		△	△	△	△	20		△	△	○	○	○	○
40		×	×		×	×	×	×	40		△	×	○	○	○	○
60		×	×		×	×	×	×	60		×	×	△	△	○	○
80		×	×		×	×	×	×	80		×	×	△	△	○	○

L2地震なら直線部でも、L2半分程度でも曲線部では転倒の可能性大  
10万台/日 瞬時に1000台程度は走行

## 早期地震警報システムを使って 自動運転の車に知らせ、うまく減速すれば 検討課題

Warning received by Self-driving Vehicle on bridge to start decelerate and pull-over

Dissemination of Earthquake Early Warning

Detection of incoming earthquake by network of seismometers

JMA

Japan Meteorology Agency

Issuance of Earthquake Early Warning

Smart system can be embedded onto the self-driving vehicles to provide countermeasures to minimize effect of seismic force on the vehicle stability before arrival of seismic shaking.



## 2022年3月16日福島県沖地震での東北新幹線の被害

震度6強

新幹線脱線箇所 (東京駅より約283.5km~284.3km付近)

第1小坂街道跨道橋を支持するラーメン橋台：耐震補強は済んでいたところなぜ？



国見町 (国見インター付近) (東京駅より約270.7km付近)

伊達駅付近 (東京駅より約263.5km~263.9km付近)



出典：  
<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20220317/k10013537161000.html>

新白石き電区分所  
トンネルを出たところ  
もしトンネル中だったら

出典：福島県沖で発生した地震による東北新幹線の被災状況について  
[https://www.jreast.co.jp/press/2021/20220317\\_ho01.pdf](https://www.jreast.co.jp/press/2021/20220317_ho01.pdf)

## 2層式ラーメン高架橋の中層横梁に生じた被害

損傷が確認されなかった2層式ラーメン高架橋害



柱の耐震補強無し  
3径間ゲルバー式RCラーメン高架橋



<https://www.youtube.com/watch?v=8ZFhIRDGPHk>に加筆

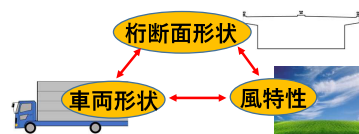
いろいろ考えさせられる。まだまだやるべき...

## 橋梁上での車両の風による転倒 金, 藤野, 勝地, DION, 山田

### 東京湾アクアライン



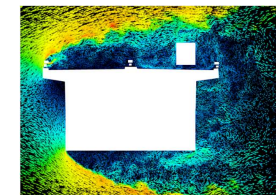
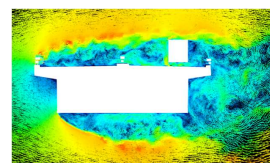
2018年台風20,21号で43件発生



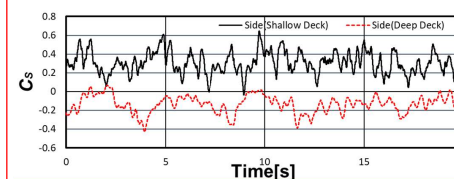
数値流体解析でアクアライン上での車両の安定性を検討

## 橋桁-車両モデルの解析 桁高に関する比較 流れ場

薄桁高モデル 流れ場 (ベクトル) 厚桁高モデル 流れ場 (ベクトル)



横力係数  $C_s$  薄桁高 厚桁高



風向 + 
$$C_s = \frac{F_s}{1/2 \rho U^2 A_s}$$

薄桁高では加速された流れが衝突  
厚桁高では加速された流れが車両上部を通過 → スパン中央部が危険

# 漫談の流れ

- 1) 導入
- 2) 18歳(1968)ー30歳ごろまで
- 3) 30歳(1980)から40歳ごろまで
- 4) 40歳(1990)から50歳ごろまで
- 5) 50歳(2000)から60歳ごろまで
- 6) 60歳(2010)ごろからこれまで
- 7) 終わりに

97

2000年に入り、大きな橋のプロジェクトが一段落。  
何を対象に. . .

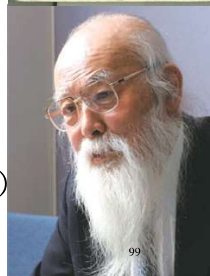
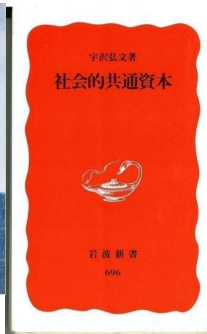
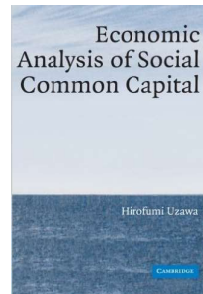
橋などのインフラの維持管理を研究対象に  
それだけでは. . . .

98

## インフラストラクチャ = 「社会的共通資本」

「みんなが使う、みんなのもの」  
「公」(官ではない) 対「私」 カモンズ

- 1) 自然環境 **サイエンス的要素**  
大気, 水, 森林, 河川, 湖沼,  
海洋, 沿岸湿地帯, 土壌, 地震, 雨...
- 2) **社会的インフラストラクチャー 工学 : 今日の話**  
道路, 交通機関, 上下水道, 港湾  
電力・ガス 所謂「社会資本」 最近だと**情報インフラ**
- 3) 制度資本 (システム) **社会科学的要素**  
公共政策, 教育, 医療, 金融, 司法, 行政  
工学を中心に, 科学も社会科学も守備範囲.  
常に, 自然と社会を見て, 広い視野でことに臨む.  
土木の広さをお教わった. 救われた気持ちになった



宇沢弘文  
(1928-2014)

99

2003年暮れ  
に近いころ

招集令状



石川正俊  
東大産学連携本部長



保立和夫教授  
(後の 産学連携本部長)



三菱電機  
久間和生  
先端総合  
研究所所長

100



# 都市空間・都市基盤の安全 センシング技術の応用

石川本部長「一味違うことを！」

## 連戦連敗

101

# 都市基盤の災害事故リスク の監視とマネジメント 2006年—2012年



代表 藤野 陽三

(東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻)

土木 + 計測 + 情報 + 電気子 (学 + 民)

102

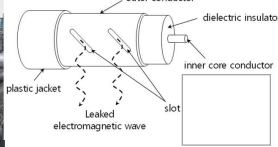
## 漏洩同軸ケーブル(LCX)による豪雨モニタリング



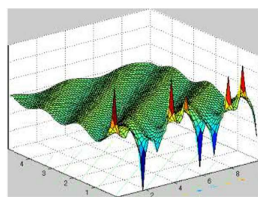
集中豪雨



漏洩同軸ケーブル (LCX)

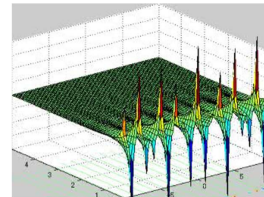


降雨を検出するのに適した電波の状態を研究



放射モード

エネルギー放射状態



表面波モード

エネルギー集中状態

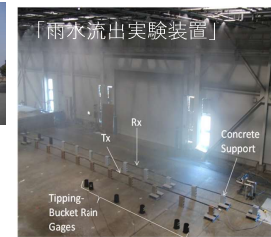


103

## ◆人工降雨実験



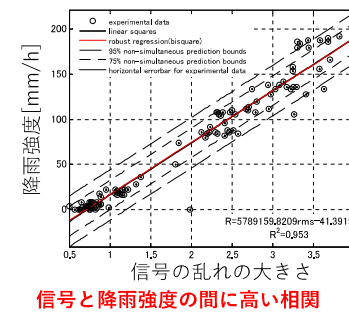
京大防災研究所 宇治川 オープンラボラトリー



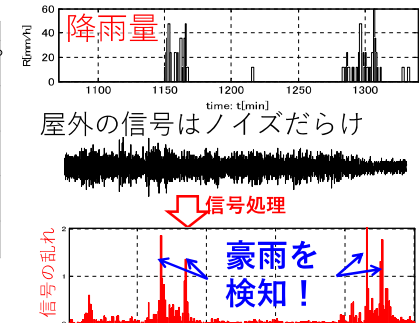
## ◆実降雨実験



水谷 司 東大生研准教授



信号と降雨強度の間に高い相関



104

## 2008年春 グローバルCOE 5年間 都市空間の持続再生学の展開

拠点リーダー 藤野 陽三 (社会基盤学専攻・教授)

想定外

東京大学大学院 工学系研究科  
都市工学専攻・社会基盤学専攻・建築学専攻

大垣 眞一郎

都市工学専攻・教授

坂本 雄三

建築学専攻・教授

花木 啓祐

都市工学専攻・教授

古米弘明

都市工学専攻・教授

沖 大幹

生産技術研究所・教授

神田 順

新領域創成科学研究科

・環境学専攻・教授

前川 宏一

社会基盤学専攻・教授

野口 貴文

建築学専攻・准教授

西村 幸夫

都市工学専攻・教授

加藤 信介

生産技術研究所・教授

堀 宗朗

地震研究所・教授

伊藤 毅

建築学専攻・教授

西出 和彦

建築学専攻・教授

大方 潤一郎

都市工学専攻・教授

家田 仁

社会基盤学専攻・教授

松村 秀二

建築学専攻・教授

内藤 廣

社会基盤学専攻・教授

石川 幹子

都市工学専攻・教授

105/31

105

## 若手人材育成の理念

実践力

横断的理解力

専門力

専門力のみを有するI型人間から

横断的理解力をもつT型人間を

そして、

実践力を兼ね備えた **Tプラス型人間**へ

106/31

106

## 2008年-2013年 グローバルCOE

### 都市空間の持続再生学の展開



2012.12. 1-2 国際ワークショップ 武田先端知ホール

107

## 漫談の流れ

- 1) 導入
- 2) 18歳(1968)ー30歳ごろまで
- 3) 30歳(1980)から40歳ごろまで
- 4) 40歳(1990)から50歳ごろまで
- 5) 50歳(2000)から60歳ごろまで
- 6) **60歳(2010)ごろからこれまで**
- 7) 終わりに

108



2014年から  
横浜国大  
先端科学高等研究院  
に

横国大山田均先生が  
呼んでくださった



横浜の橋

打越橋 赤レンガ倉庫と横浜ベイブリッジ MM21 陣ヶ下高架橋 つるみつばさ橋 MM21から見た横浜ベイブリッジ 響橋 大棧橋から見た横浜ベイブリッジ 榎道橋 浦舟水道橋 谷戸橋 ランドマークタワーMM21

土木学会100周年 2014年 実行委員会委員長  
創立：1914年11月24日（大正3年）

想定外



古市公威初代土木学会会長の就任演説

土木技術者は  
「指揮者を指揮する人」, 「將に將たる人」  
たらねばならぬことを力強く述べ、  
土木学会会員に  
「研究の範囲を縦横に拡張せられんこと」を、  
そしてそれと同時に  
「その中心に土木あることを忘れられざらんこと」

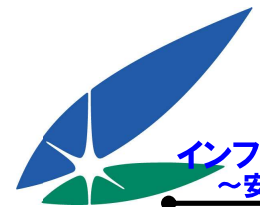


土木はそもそもマネジメント  
専門にこだわるな！



帝国工科大学  
初代学長  
貴族院議員

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)

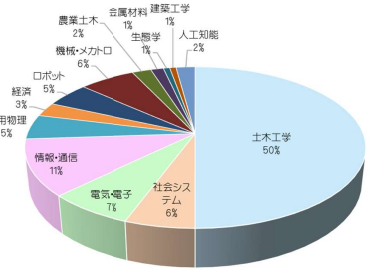
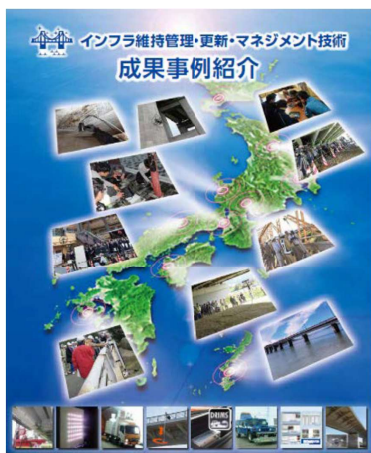


インフラの維持管理・更新・マネジメント技術  
～安全で強靱なインフラシステムの構築を目指して～

内閣府 PDプログラムディレクター  
藤野 陽三

平成26(2014)年度から年間30億円あまり 2019年までの5年間

成果事例



SIPインフラ参加研究者の専門分野

土木分野だけでなく、様々な理工学分野、学際分野の研究者が参画し、これまでにない成果、出口につなげた。

SIPインフラの4年間(1) スタート時の構想

60数課題 1000名を超す 土木インフラ以外からの多数の参加



地域実装チーム (北海道, 東北, ...沖縄) 11

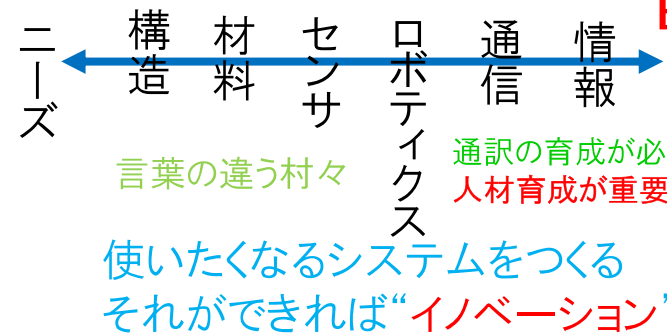
インフラストラクチャ

道路, 鉄道, 港湾, 空港, 農業水利施設, 上水道 (地下構造物) 河川堤防, のり面・斜面, ダム

•SIPインフラ研究開発の姿勢

横串し

橋渡し  
Bridging



城西大学はあなたの「協創力」を育みます

1965年に創立。自ら育み上げてきた城西大学の「協創力」を育みます。協創力とは、異なる分野の知識や技術、人材を組み合わせ、新たな価値を生み出す力のことです。城西大学は、この協創力を育むために、様々な取り組みを行っています。例えば、産学連携による共同研究や、国際交流によるグローバル人材の育成などです。城西大学は、あなたの協創力を育み、社会に貢献できる人材を育てます。

学長に

城西大学 学長 藤野 陽三

全くの想定外

城西大学 + 城西短期大学

1965年創立 埼玉県坂戸

経済, 経営, 現代政策  
理学 (数, 化), 薬学

学生数 7500名

2025年 創立60周年

日本学術振興会JSPS学術システム研究センターの現役  
OBOGと小野理事長退任をお祝いする会 2011年春

藤野陽三

小野元之  
JSPS理事長

小林誠先生  
センター長  
(ノーベル物理学賞)

私はコンパを段取りする掛かり



# 城西大学に勤めて3年目

変わる、城西大学 ー学長からのメッセージー 2021年6月

## 「競争」から「協創」へ: 21世紀の建学の精神「学問による人間形成」

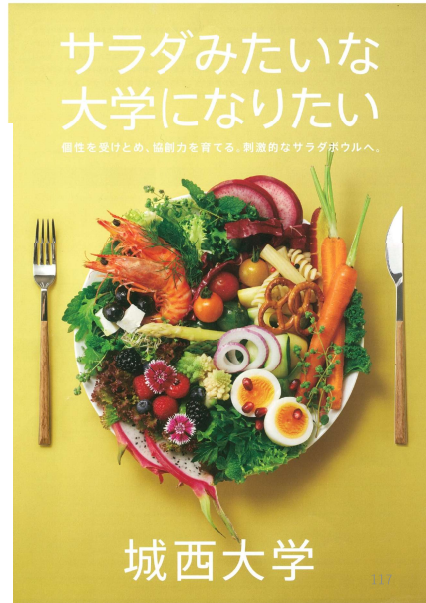
これからは「競争」力より、「協創」力が求められる時代になります。



ゼミで学生と語り合う藤野陽三学長(2020年4月着任)

21世紀に入り、世界的に格差や分断が広がっていることは、ニュースを通して皆さんもご存じでしょう。インターネットによって、情報は瞬時に全地球に伝わります。世界がつながったことで、残念なことに、国を越えた「競争」がますます激しくなっています。

今、世界が抱える問題は、すべての国や地域の人びとが協力して新しいアイデアを生み出さない限り解決できません。沈みかけた船の上で、みんなが競争しているうちに、船が沈んでしまっは元も子もありません。これからの時代は、「競争」して勝つことより、持続可能な社会を、協力し、助け合い、創りあげて行く「協創」の精神が求められるのです。



# Preparing for the unexpected

現実起きていたことからヒントを得て  
起きていなくても想像力を働かせ  
いろいろなことを想定（シミュレーション）し、  
対応することが大切。

**“気づき”**

そのためには

広い視野、様々な視点を持つ  
システムとして考える  
タテ割りではなく、フラットに ヨコに広がる



縦タテ  
より  
横ヨコ

ご清聴をありがとうございました。

道路橋長寿命化の提唱と、  
その実現のための技術開発、および  
点検・診断技術の普及への貢献  
ー気づいたこと、考えたことー

前 国立研究開発法人土木研究所理事長  
兼構造物メンテナンス研究センター長

西川和廣

nishi007@mail1.accsnet.ne.jp

気づいたこと、考えたこと

1. 老朽化するインフラの将来
  - 橋の寿命とは、長寿命化とライフサイクルコスト
2. 維持管理を戦略的に行うこと
  - 彼(敵)ヲ知り、己ヲ知レバ百戦殆フカラズ
3. 道路橋と鉄道橋との違い
  - 鉄道橋はなぜ長持ちか、2次元設計で見逃されること
4. 道路橋メンテナンスへのAI導入
  - なぜAI導入なのか、診断の信頼性を維持する仕組み
5. 多摩川スカイブリッジのデザインコンセプト
  - 初めての構造計画への関与で実現しなかったこと

1. 老朽化するインフラの将来

橋の寿命とは、長寿命化とライフサイクルコスト

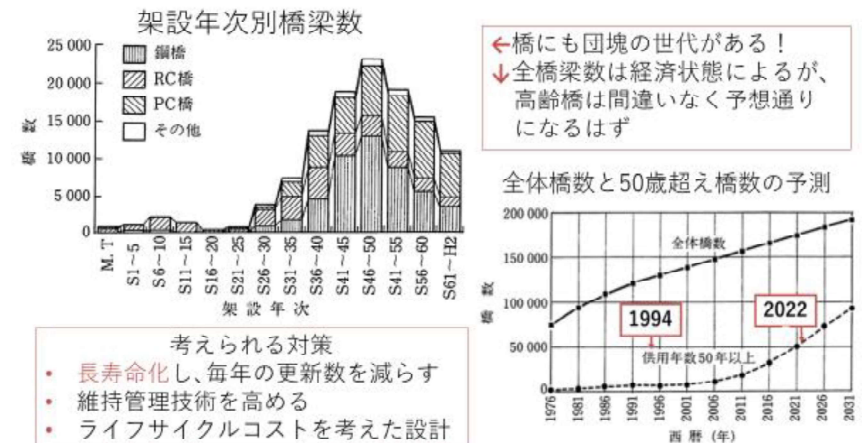
- 橋の寿命とは何か？
  - 使われなくなることはないか
    - ① 戦争や災害による破壊
    - ② 機能の陳腐化による架換え
    - ③ 維持管理負担の増大による放棄
    - ④ 使う人がいなくなることによる忘却？
  - こんな分類も
    - ① 物理的寿命
    - ② 経済的寿命
      - 法定耐用年数(statutory useful life)
      - 陳腐化による耐用年数(economic useful life)
- 「高齢橋は老朽橋でなく長寿橋である」コンクリート工学、2008.9

維持管理で克服  
すべき寿命は？

1. 老朽化するインフラの将来

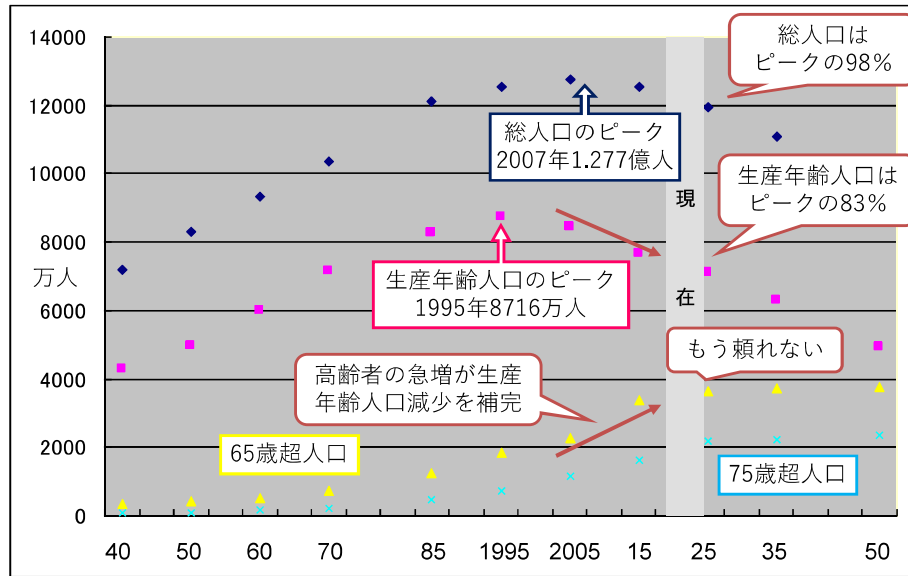
橋の寿命とは、長寿命化とライフサイクルコスト

道路橋の老朽化予測 1994年

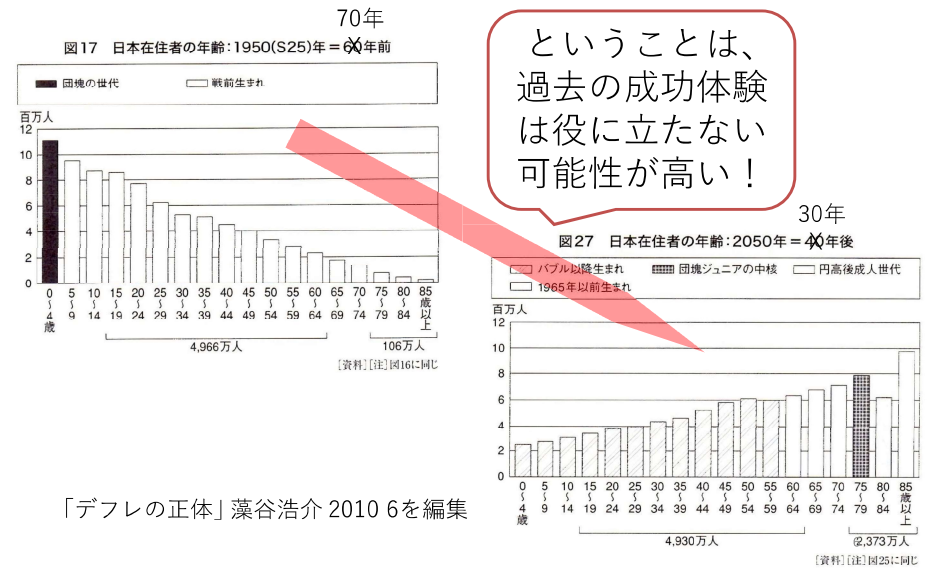




# 人口減少は加速する、手戻りしている暇はない



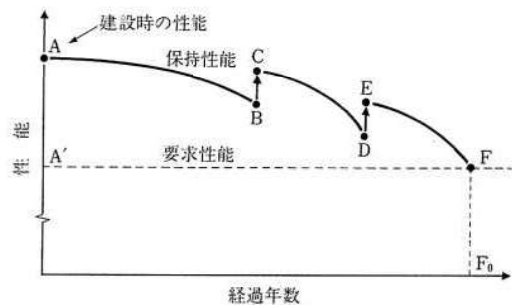
# 100年で別の国になる日本



## 劣化曲線について

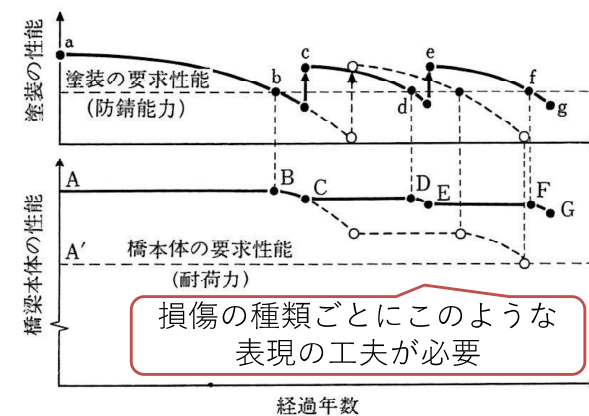
- 長寿命化の実現とライフサイクルコスト重視の設計を推奨するために使用した曲線
- 概念を説明するには便利で有効だが、現実には存在しない
- 縦軸の定義が困難かつ実測不可能

一般論でしかない



- これは単なるイメージ図
- 経済学者用のモデル
- 実際の橋の寿命を左右する現象はもっと複雑

## 塗装と橋本体の劣化曲線を分離



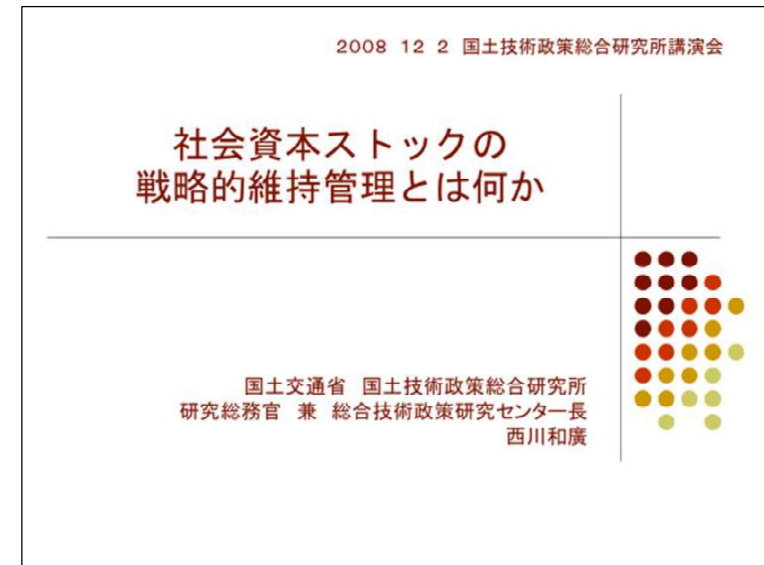
- 塗装の性能が限界を下回った期間のみ、橋本体の性能は劣化する
- 塗膜の劣化段階、橋本体の部位を考慮すると非常に複雑になる

➤ 結論：塗装(防食)を適切にマネジメントすれば、鋼橋は永久橋になり得る

## 長寿命化とライフサイクルコスト最小 そして長寿命化が結論

- 持続的な道路ネットワークへの選択肢
  - a. 法定耐用年数が来たら更新
  - b. ライフサイクルコスト最小のマネジメント
- 経済的にa.という選択はあり得ない
- ライフサイクルの中で最大のコストは何か？
- 更新と更新に伴う社会的損失！
- だから長寿命化が最適解！
- でも、もう手遅れかもしれない・・・

## 2. 維持管理を戦略的に行うこと 彼(敵)ヲ知り、己ヲ知レバ百戦殆フカラズ



## 2. 維持管理を戦略的に行うこと 彼(敵)ヲ知り、己ヲ知レバ百戦殆フカラズ

### 彼(敵)ヲ知ル

1. 施設の性質・性格を知る
2. 寿命を縮める損傷・劣化要因とメカニズムを知る
3. 何処に、どんな状況で使われているか知る
4. 点検・診断手法、補修工法、予防方法を知る

### 己ヲ知ル

1. 自らの戦力を知る
2. 自らの立場を知る
3. 維持管理に必要な“脳”力を知る
4. 自らの弱点を知る

## 最終的な戦略目標は何か

長寿命化は最終目標ではない

- 「重要な基盤インフラとしての道路の機能が将来にわたって持続的に維持され、老朽化によって喪失されないこと」これが最終目標
- 最小限かつ適切な維持管理行為により、既設・新設橋梁ともに極力長持ちさせて使うこと、すなわち長寿命化がとるべき戦略
- 予防保全は長寿命化を実現するための戦術
- 早期発見、早期治療はわかりやすい作戦、言い換えれば実務者の行動規範



## 維持管理を戦略的に行う理由

- ① 戦略的と計画的とは違う
  - 計画通りに行かないのが維持管理最大の特徴
- ② 戦況は常に化する
  - 劣化・損傷は突然発生し、経年的に進行する
- ③ 戦力をどのように活かすかが鍵になる
  - 理想的な条件はあり得ない、持てる戦力でどのように対処するかが戦略の基本
- ④ 戦略には賭けの要素がある
  - リスクマネジメントの観点が不可欠
- ⑤ 一般論は意味をなさない
  - 個別具体の対象・戦力を前提とした議論が必要

何時まで待っても  
その日は来ない

これが最も重要

13

## (マネジメント) 立場により異なる戦略と戦術

1. 財政責任者 アセットマネジメント(資産運用)
  - 目的 投資効果を最大にしたい
  - 対象 出資者、料金負担者
  - 関心事 運用の適切性、透明性
  - 指標等 劣化曲線、他機関と比較可能な指標
2. 政策責任者 ストックマネジメント(マクロ)
  - 目的 インフラ機能の確保、総予算は抑制的
  - 対象 国民全般、道路ネットワークの健全性、信頼性
  - 関心事 健全度の動向、地域間格差
  - 指標等 施設ごとの健全度指標(I~IV)
3. 現場責任者 ストックマネジメント(ミクロ)
  - 目的 限られた予算で供用の安全性、信頼性の確保
  - 対象 管内の施設利用者、施設の安全性、供用性
  - 関心事 損傷種類、部位、補修/規制の要否、可否、LCCetc.
  - 指標 損傷部位、判定区分(A,B,C1, C2, E1,E2,M, S1,S2)

一般論



具体論

14

## 予防保全への移行が進まない理由

- 予算が足りない
- 技術者がいない、技術力が不足
- 既に予防保全の時期を過ぎた構造物が多い

いずれも事実だが

- 診断結果が信頼されていない
- 補修工事の品質が保たれていない
- その結果再劣化による手戻りが少なくない

という問題もある

どうすれば良いのだろうか

15

3. 道路橋と鉄道橋との違い  
鉄道橋はなぜ長寿命なのか、2次元設計で見逃されること

2016 9 9 東北大学  
土木学会年次学術講演会  
共通セッション CS-6

### 鉄道橋はなぜ長寿命なのか

(一財) 土木研究センター  
西川和廣

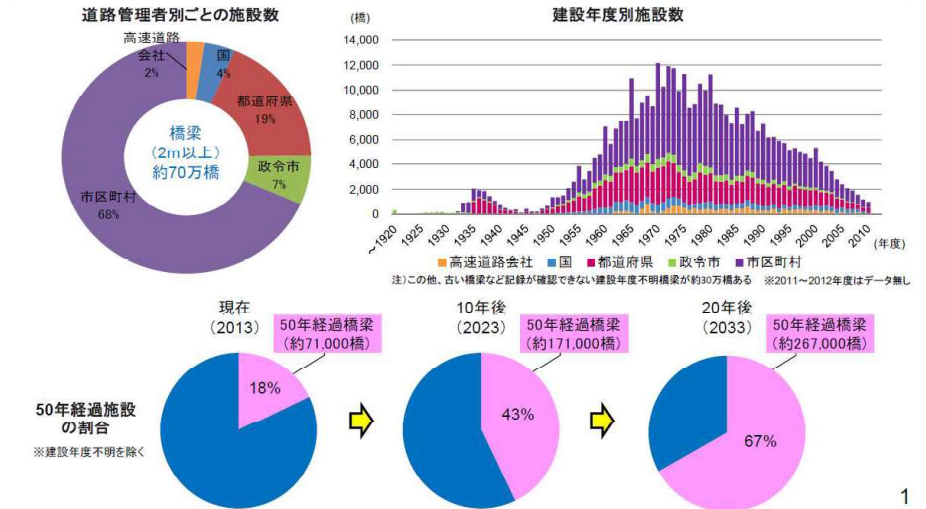
# 鉄道橋はなぜ長寿命なのか

- 我が国の大量輸送は、水運、鉄道、道路の順に発展してきた
- 鉄道橋には100年を超えて供用されているものが多いが、遅れて整備が進んだ道路橋に同じことが期待出来るだろうか
- 計画・設計は仮説で、長年供用された構造物の姿は、その実証結果である
- 維持管理の視点から見ると、鉄道橋の有利な点をいくつも見出すことが出来る
- ここに長寿命化実現のヒントがあるはずである

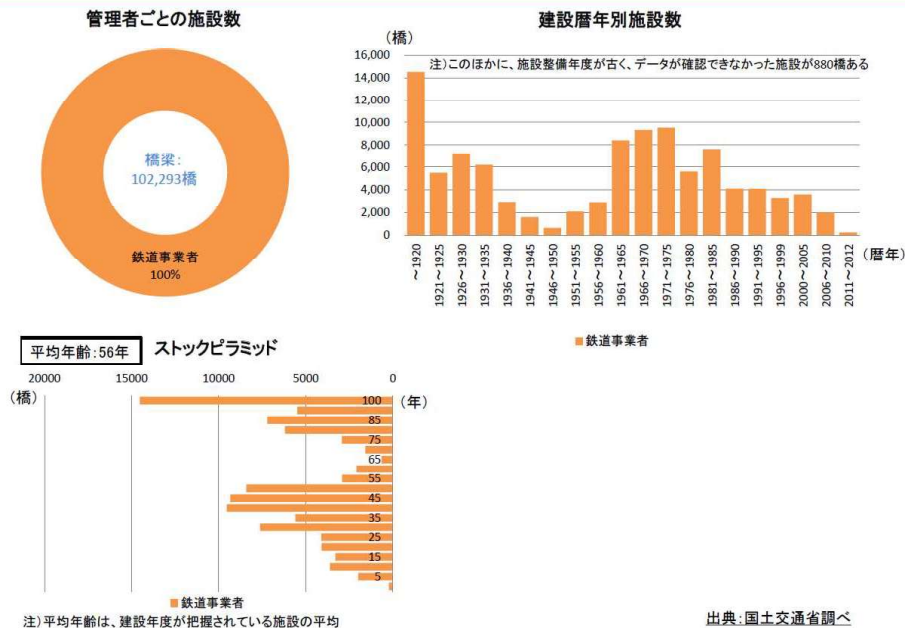
## 道路構造物の現状(橋梁)

※東日本大震災の被災地域は一部含まず  
 ※都道府県・政令市は、地方道路公社を含む  
 ※H25.4道路局集計

全国の橋梁数は約70万橋。このうち、建設後50年を超えた橋梁(2m以上)の割合は、**現在は18%**であるが、**10年後には43%、20年後には67%**へと増加



## 鉄道(橋梁)



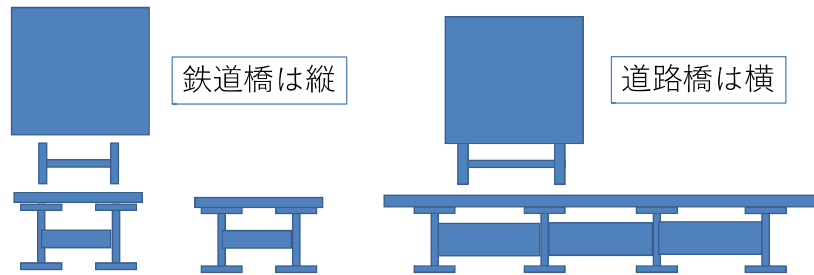
## 鉄道が長寿命である理由

- その1 通行車両の重量を管理できる
- その2 鉄道橋では塩を撒かない
- その3 排水が必要な路面が存在しない
- その4 設計・管理が内部化されている
- その5 車両が必ず軌道上を走行する



## その5 車両が必ず軌道上を走行する

- 鉄道橋は活荷重と構造体が1対1
- 道路橋は複数の構造体が分担する立体構造
  - 3次元たわみ（荷重分配）による2次応力が大きい
  - 鉄道橋とはタイプの異なる疲労損傷が多い
- 平面内構造として設計する教育課程の橋梁設計は鉄道橋のもの、道路橋にそのまま用いるのは不適當



## 橋は3次元(立体)構造物

- 橋は3次元(立体)構造物である
- 大半の疲労損傷は橋が3次元挙動することを忘れて設計されたことが主要因になっている
- 2次元設計が有効なのは、省略した3次元たわみ挙動の影響が十分に小さい場合に限られるが、疲労損傷に対しては影響が顕著に現れる
- 厚さと剛性の大きいコンクリート床版も、連続体として3次的に挙動する
- 決して有効幅でのぶつ切り構造ではない
- したがって、コンクリート床版を有する桁橋のたわみ挙動は版のたわみ支配される

### 垂直補剛材上端の疲労損傷

この図は2次元世界で考えたメカニズム  
誤りだったので訂正します

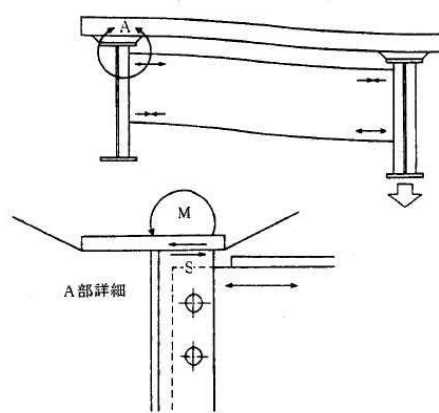


図-3.1 予想される損傷原因 (1)横桁の荷重分配作用

- 桁橋全体系の3次元たわみ挙動は床版に支配される
- 格子桁モデルとは乖離
- RC床版と荷重分配横桁、2つの荷重分配系の干渉が要因である
- 横桁は、床版による滑らかな荷重分配を妨げるように働く
- 横桁を外すor位置を下げる、剛性を下げることが解決策

### こちらは誤りとは言えないが...

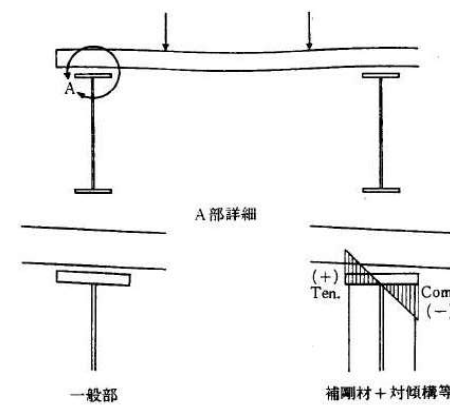


図-3.2 予想される損傷原因 (2)床版のたわみ

- 垂直補剛材と上(圧縮)フランジを溶接する意味は何か
- 溶接をしない
  - 疲労は解決
- フランジと距離を開け、コバ側を斜めにカットする
  - 塗装の耐久性に有利
- ウェブのせん断座屈に対する影響はどこまで許容できるか

...こんな研究が欲しい

## 横桁or対傾構撤去試験

- 局部付近の部材取り外し(あるいはボルト外し)では効果が表れない。なぜか？
- それは疲労損傷の原因となる局部ひずみが橋全体の3次元たわみ挙動によるものであり、局部の改良では変化しないから
- 応力は仮想的な指標であり現実には存在しない
- 存在し計測できるたわみ変位～変形～ひずみ系で考えることが疲労損傷対策には重要
- 3次元に時間軸(車両走行数、車両の移動)を加えた3+1次元で考えれば、疲労フリーの鋼橋設計法の確立は可能ではないだろうか

## 4. 道路橋メンテナンスへのAI導入

なぜAI導入なのか、診断の信頼性を維持する仕組み

### なぜAI導入を決意したのか

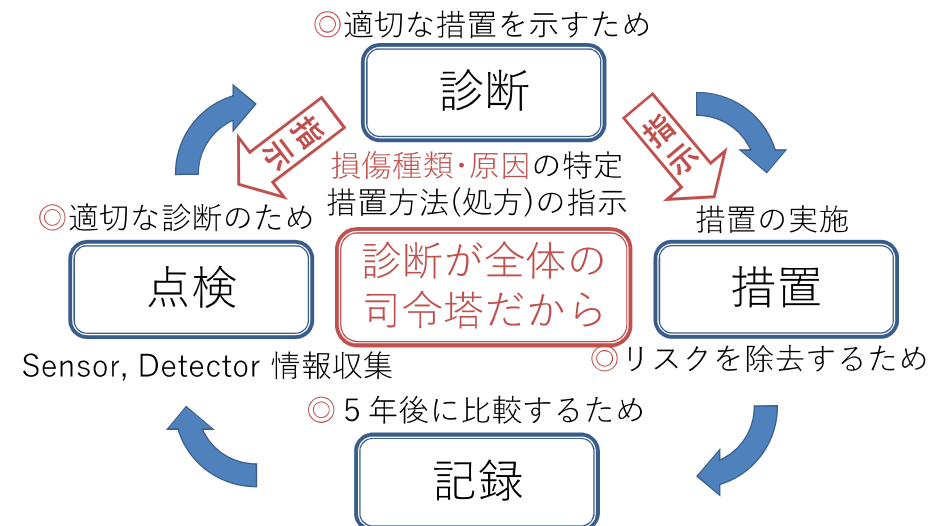
- 追いつかない技術者の育成(特に地方自治体)
- 加速する担い手不足、高齢者頼りも限界
  - ICT技術のパワーを借りることが必要
- しかし、メンテナンスには**技術者の判断**を必要とする場面が多く、単純な省力化、自動化は適さない
  - AI(人工知能)ならば、技術者の熟練度不足の補完が可能かもしれない
  - 技術者のスキルアップと技術の継承も期待出来るのではないか

## 土木研究所の開発する診断AI

- ① なぜ**診断AI**なのか
- ② どの**AI**を用いるのか
- ③ **AI**に教えなければならないこと
- ④ **AI**を教育するための教材
- ⑤ 診断結果の出力
- ⑥ システム開発の現状とこれから
- ⑦ 長寿命化・延命・危機管理

### ① なぜ**診断AI**なのか

メンテナンスサイクル各要素の目的とは？





## ② どのAIを用いるのか

### ○Deep Learning (Neural Network)

- ・人間において「目が慣れる」課程を自ら学習
- ・早い、疲れない、間違いが少ない
- △高度な単機能のセンサーでしかない

Black Box

### △Genetic Algorithm

- ・膨大な組合せから最適解を抽出

Black Box

### ◎Expert System

- ・問題の絞込みが可能
- ・診断プロセスの出力(=説明)が可能
- ・技術の継承に有効

Important!

△膨大な教育が必要、でもやる価値がある！

29

## ③ AIに教えなければならないこと

- a. すべての損傷のメカニズム(どんな原因で発症し、どんなプロセスを経て進行するか)
- b. 診断に必要な情報を得るための点検方法(どうすれば早期発見ができるか)
- c. 措置方法の仕分け = 診断に必要な限界状態(どの段階ならば、どんな措置が可能であるか)
- d. 各種措置方法(補修・補強工法)と適用条件

以上をメカニズム、点検、診断、措置のセット(略称診断セット)と称し、すべての損傷について準備

30

## ④ AIを教育するための教材

損傷メカニズムの各段階を紙芝居形式で表現

### 紙芝居方式の利点

- ・損傷・劣化による構造系や材料の状態の変化がページが変わるごとに表現され、適用可能な点検方法や措置方法との対応が明確になる
- ・イラストの方が、写真よりも伝えたいことを明確に示すことができる

### 出力でも有効活用

- ・紙芝居のページ+該当点検写真(データ)を診断理由の説明資料として活用することで、判断プロセスの出力が可能なAIを実現できる

31

## 損傷メカニズムの紙芝居化事例 RC床版土砂化

5年前の点検写真  
疲労損傷の兆候なし

2013年5月 いきなり陥没  
一面の遊離石灰にも注目



土砂化損傷！下からの点検では予防保全は不可能

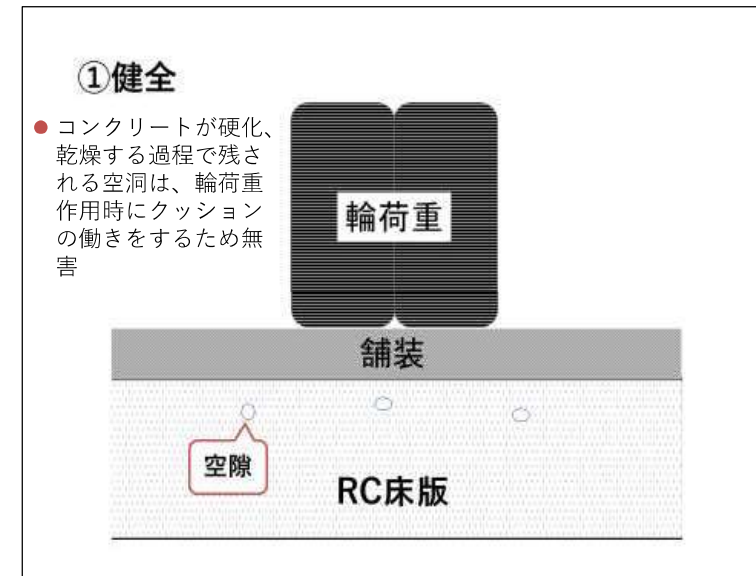
32

## 土砂化は路面側から進行 下面からひび割れを点検してもわからない

- 床版上部のコンクリートが土砂状に
- 水の影響が疑われる
- 進行した土砂化は舗装の損傷として表面化する
- 予防保全としては手遅れ

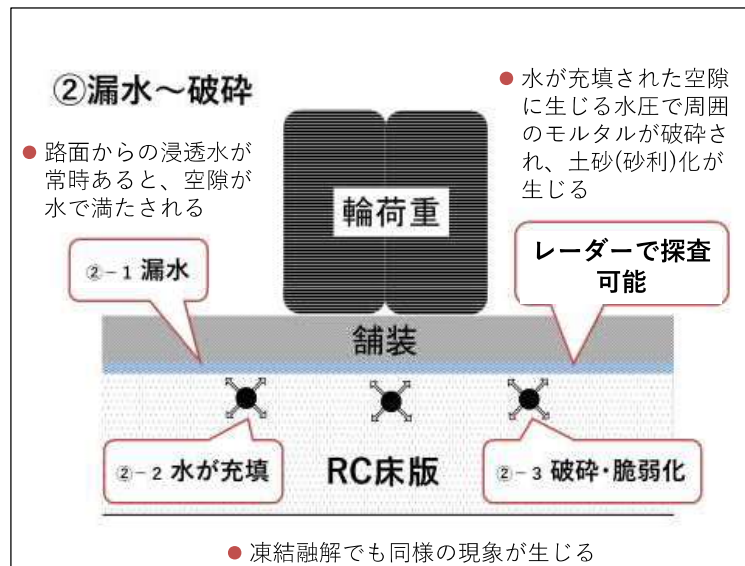


## RC床版土砂化の紙芝居



34

## RC床版土砂化の紙芝居→漏水・脆弱化

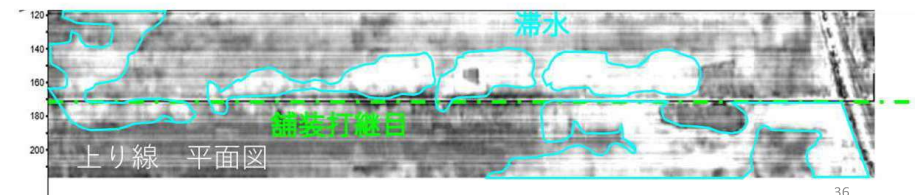


35

## 電磁波レーダーを用いた水の探査 滞水・湿潤範囲をAIが判別して図示



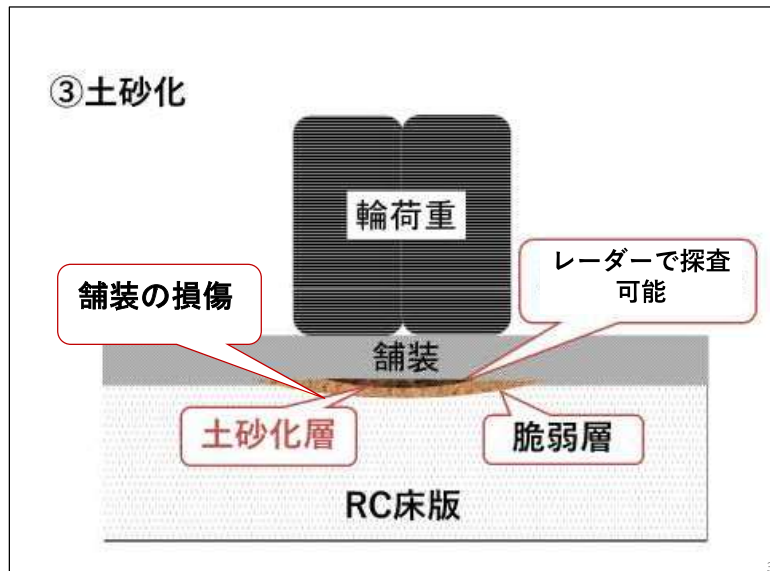
- 車載型電磁波レーダーで漏水、滞水の有無をスクリーニング
- AI技術を用いて滞水の範囲を特定し、漏水の経路をたどることで予防保全が可能になる



36



## RC床版土砂化の紙芝居→土砂化層の形成



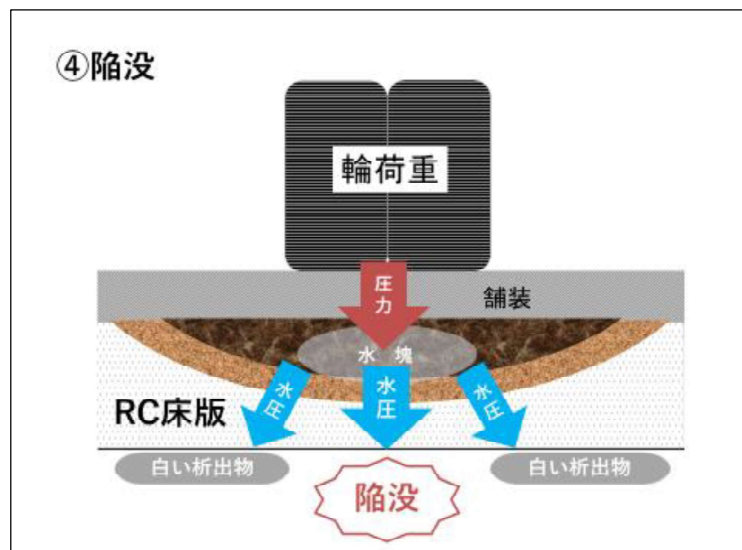
## 土砂化したRC床版の表層

舗装の下はどろどろに



38

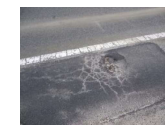
## RC床版土砂化の紙芝居→終局段階



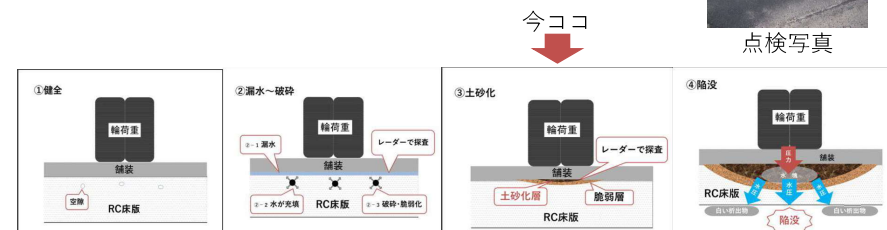
39

## ⑤ 診断結果の出力

- 診断結果は、点検写真やデータとともに該当する紙芝居のページが出力される
  - ✓ 現在この損傷のこの段階にあって、その決め手はこの写真(データ)であると示される
  - ✓ 必要があれば、損傷メカニズムの解説とリンクして、診断理由を知ることができる
  - ✓ スキルアップ、技術の継承にも有効



点検写真



## 論理的診断の基本パターン

- i. 点検で\_\_\_\_損傷が疑われる**変状**が見つかった。
- ii. 台帳データやカルテからもその可能性は高い。  
✓詳細調査で\_\_\_\_が確認されたのでほぼ断定できる。
- iii. 現地の状況から**原因**は\_\_\_\_と推定される。
- iv. 明らかになっている\_\_\_\_**損傷のメカニズム**から考えると、すでに\_\_\_\_の段階にある。
- v. この段階では\_\_\_\_の**作用が支配的**と考えられるから、\_\_\_\_工法による補修が効果的である。  
✓交通規制が困難な場合には\_\_\_\_という工法もあるが、やや手遅れなので**再発のリスク**は否定できない。

41

## ⑥ 長寿命化・延命・危機管理

### 土研流措置方法の分類

- I. 長寿命化
  - 損傷原因を除去するとともに損傷部分を完全に補修、健全な状態に復帰させる
  - 発症前、損傷初期など完治可能な段階に適用可能
- II. 延命
  - 完治の時期を逸したが、損傷の進行を制御することで供用期間を引き延ばす
  - 延命期間は損傷の進行程度により効果の差は大きい
- III. 危機管理
  - もはや損傷の進行は制御困難で危険の回避が主体
  - 更新を前提にモニタリングで監視

## ⑦ システム開発の現状

- もっとも損傷事例の多いRC床版を中心に、コンクリート床版橋を含めて試行を開始
- 点検はタブレットの誘導で人が行うが、点検後の調書作成等の工程短縮に重点
- R6年度を目標にVer.1.0システムを公表し、アップデートできる体制を構築
- 新たな点検技術として車載型の電磁波レーダーによるスクリーニングを採用
- 近接点検が必要な損傷については、ひとつひとつ技術開発の上自動化を進める

6. 多摩川スカイブリッジのデザインコンセプト初めての構造計画への関与で実現したかったこと

2022年9月16日  
土木学会年次学術講演会  
於京都大学

「維持管理現場からのフィードバック」  
と「ライフサイクルコスト」  
-多摩川スカイブリッジのデザインコンセプト-

西川和廣

前 国立研究開発法人土木研究所理事長  
兼 構造物メンテナンス研究センター長  
nishi007@mail1.accsnet.ne.jp

37



「維持管理現場からのフィードバック」と  
「ライフサイクルコスト」  
ー多摩川スカイブリッジのデザインコンセプトー

1. 「維持管理現場からのフィードバック」と「ライフサイクルコスト」
2. 多摩川スカイブリッジ、厳しかった与条件
3. 支承と伸縮装置を減らす
4. 防食対策の徹底と排水管の排除
5. 照明柱の排除と高欄照明の採用
6. デザインコンセプトの提示と実践

1. 「維持管理現場からのフィードバック」と「ライフサイクルコスト」

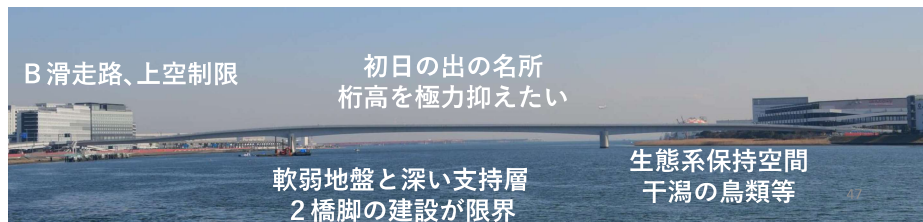
- 類似した言葉に見えるが、本質的に大きな違いがある
- 橋梁の計画にはいずれも必要不可欠な概念である
- 本年3月に開通した橋の基本構造とデザインコンセプトに対し、提案したことについて紹介したい

すべての写真は川崎市提供



2. 多摩川スカイブリッジ厳しかった与条件

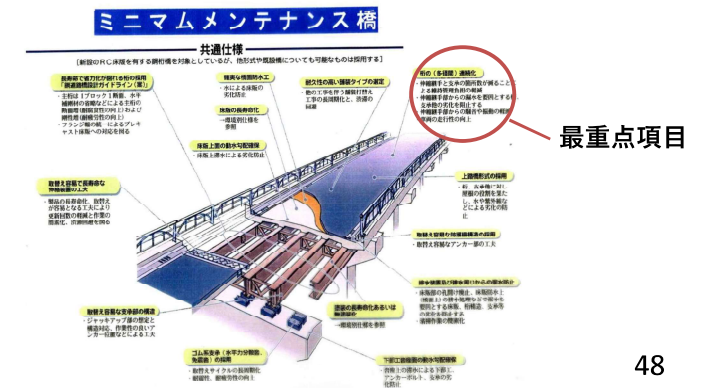
- 東京オリンピックまでに造れという無茶振り！
  - 干潟(右岸側180m)の生態系保持空間の保全
  - 180m + 240m + 180mの支間割りにほぼ限定
  - 空港隣接のため橋面上の構造物は厳しく制限
  - 軟弱地盤(羽田マヨネーズ層)と深い支持層
  - 河口の水平基調の景観への調和
- 複合ラーメン構造の採用で、与条件を克服



3. 支承と伸縮装置を減らす

- ライフサイクルコスト最小化を具体化・可視化したミニмумメンテナンス橋概念を提示

「ライフサイクルコストを最小化するミニмумメンテナンス橋の提案」1997.8 橋梁と基礎



## ミニマムメンテナンス橋

【新設のRC床版を有する鋼桁】

長寿命で維持管理が容易な桁の採用  
「新造路橋設計ガイドライン(案)」

- ・桁は「ブロック」断面、水平補剛材の省略などによる主桁の断面増(耐腐食性の向上)および剛性増(耐震方向性の向上)
- ・フランジ端の剛一によるプレキャスト床版への対応を図る

取替容易な長寿命な伸縮装置の工夫

- ・製品の長寿命化、取替が容易となる工夫により更新回数の軽減と作業の簡素化、渋滞回避を図る

取替容易な伸縮装置の採用

- ・取替容易なアンカー部の工夫

伸縮装置及び止水部からの漏水防止

- ・止水部の孔閉り防止、止水防水(樹脂工)の継手処理などで漏水を要因とする床版、桁筋道、支保等の劣化を防止する
- ・清掃作業の簡素化

取替容易な支保部の構造

- ・ジャッキアップ部の想定と構造対応、作業性の良いアンカー位置などによる工夫

塗装の長期耐用あるいは無塗装化

- ・期成別仕様を参照

下部工面側の動水勾配確保

- ・荷重上の部材による下部工、アンカーボルト、支保の劣化防止

ゴム系支保(水平力分散器、免震器)の採用

- ・取替容易なサイクルの長期耐用化
- ・耐震性、耐腐食性の向上

桁の(多径間)連続化

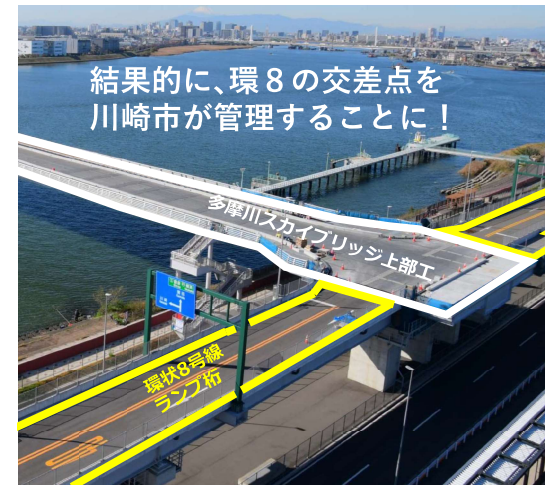
- ・伸縮継手と支保の箇所数が減ることによる維持管理負担の軽減
- ・伸縮継手部からの漏水を要因とする桁、支保他の劣化を阻止する
- ・伸縮継手部からの騒音や振動の軽減
- ・車両の走行性の向上

49

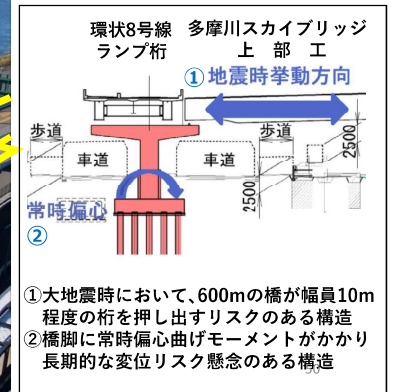
## 地震時の衝突挙動と常時偏心荷重の回避

環状8号線との交差点部

- ①想定外の地震時の衝突リスクの解消
- ②橋脚への常時偏心曲げモーメントの作用を解消



【元案】環状8号線ランプの桁橋脚に添架した構造



## 4.防食対策の徹底と排水管の排除

- ・桁側面の維持管理上かつ景観上、最大の障害となる排水管を排除
- ・塗装の弱点となる足場用吊り金具をアイボルト形式に変更
- ・添接板端部を45度に切断し、防食性の向上と凹凸感を軽減

付属部材を最小とした桁側面



アイボルト形式の吊り金具

添接板の面取り加工



## 4.防食対策の徹底と排水管の排除

- ・歩道マウントアップ部を活用した鋼製排水溝の設置により、全橋(600m)にわたり排水柵と排水管を排除

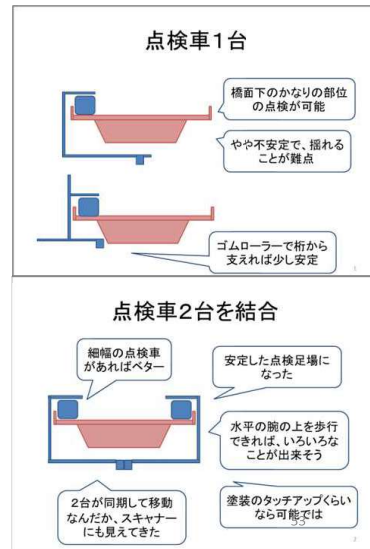
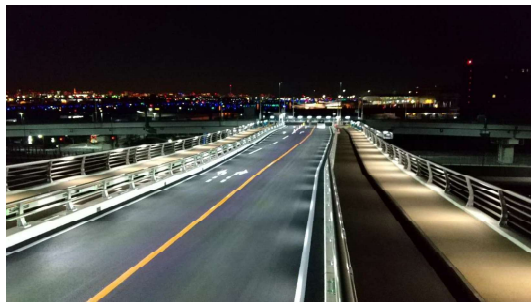


歩道マウントアップ部を活用した鋼製排水溝の設置



## 5. 照明柱の排除と高欄照明の採用

- 車両用防護柵および高欄に内蔵した低位置照明を採用し照明柱を排除
- 橋梁点検車での点検が効率化されるほか、照明器具の交換等維持管理性が向上



## デザインコンセプトの提示と実践

- 私にとって、多摩川スカイブリッジは数少ない基本構造計画段階での参加
- 厳しかった与条件の解決策を提案するとともに、本橋に必要なデザインコンセプトについて様々な観点から提示した
- 完成してみると、「維持管理現場からのフィードバック」と「ライフサイクルコスト」が軸になっていることに気がつく
- デザインコンセプトの共有が、チームをしっかりと結びつけることを実感
- ABCD Association for Bridge Conceptual Design のセッションから発信した理由

54

## 実は維持管理からのフィードバック

- 維持管理負担の大きい支承と伸縮装置を減らしたい
- 3径連続間複合ラーメン橋
- 見苦しく維持管理の障害になる配水管をなくしたい
- 路面排水を活用
- 塗装の持ちをよくしたい
- 主桁への付属物の溶接を禁止
- 点検車を活用したい → 照明柱なし、高欄照明



排水管追放! のきっかけとなった高架橋

★ 70万橋すべてが実験橋だと考えれば当然の結論

55

- 6. 多摩川スカイブリッジのデザインコンセプト  
初めての構造計画への関与で実現したかったこと  
実はもうひとつ

### うまい・早い・安い

- 用・強・美：古代ローマ Vitruvius 提唱、建築の3大要素
- 現代の3大要素、うまい・早い・安い？
- 多摩川スカイブリッジ(3/12開通)はうまい橋になるか？
  - きっかけは「早い」橋の形式選定
  - 「うまい」橋にするために技術とアイデアを総動員

\* 3径間連続鋼床版箱桁複合ラーメン橋 支間189+240+171m



# ご清聴ありがとうございました

－今年の初日の出－



# おわりに

気が付いて問題意識を持つこと  
そして考えることが大切  
それがすべてだと思います  
これからも機会があれば、  
気が付いたこと、考えたことについて  
伝えていきたいと思っています

ご清聴ありがとうございました  
また、素晴らしい機会をいただき  
ありがとうございました

## 土木学会年次学術講演会への投稿

- 2022 「維持管理現場からのフィードバックとライフサイクルコスト」－多摩川スカイブリッジのデザインコンセプト－
- 2020 「洗掘による洪水被害と予防保全」
- 2019 「70万橋の耐久性実験実験」  
～メンテナンスに学ぶ橋のデザイン～
- 2018 「道路橋メンテナンスサイクルへのAI導入に関する一考察」
- 2016 「鉄道橋はなぜ長寿命なのか」
- 2015 「道路橋の減築と現状維持工事」
- 2014 「道路橋更新の判断についてその2」
- 2013 「道路橋更新の判断について」
- 2009 「これからの橋梁計画の進むべき方向に関する一考察」

## 直近5年間の投稿記事

- 2208 特集号 総論 橋を水から守る「水はどのようにして橋を壊すのか」橋梁と基礎
- 2011 「道路橋メンテナンスサイクルへのAI導入について」  
AI・データサイエンスシンポジウム
- 2008 特集号 総論 「道路橋床版に求められる保全技術と展望」  
橋梁と基礎
- 1908 「鋼構造と橋 平成時代にあったこと、令和時代になすべきこと」  
第22回 鋼構造と 橋に関するシンポジウム論文報告集
- 1811 「AIに床版のメンテナンスを教えよう」  
第10回道路橋床版シンポジウム論文報告集
- 1801 「インフラメンテナンスとモニタリング」コンクリート工学
- 1704 「イオン透過抵抗法による耐候性鋼橋梁の異常さびの早期検出  
～定期点検における健全度判定の信頼性向上を目指して～」  
土木技術資料