

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

1. 日本の橋梁の現状:とくに疲労問題

社会資本整備の宿命
 需要の高い順に整備する。
 これは技術的な経験の乏しい順を意味する。
 使用条件の厳しい順とも一致する。
 1960-1970年に集中的に整備。

この時期に鋼橋は
 リベット構造から
 溶接構造へ

軽量化→経済性
 Structural redundancy
 Weld defect,
 Residual stress



TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

橋梁における疲労による事故

Hasselt Bridge Mar. 14, 1938, 全溶接フレンドール
 拘束度の高い溶接部(現場溶接)に残されていた溶接割れからの脆性破壊
 →溶接の品質管理の重要性の認識



FIG. 8. BRIDGE COLLAPSED IN THREE PARTS. FIG. 10. VIEW FROM HANSEL TOWERS.

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

鋼橋に生じた疲労事例



See: 1997. 5 鋼橋の疲労、日本道路協会

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学



See: 1997. 5 鋼橋の疲労、日本道路協会

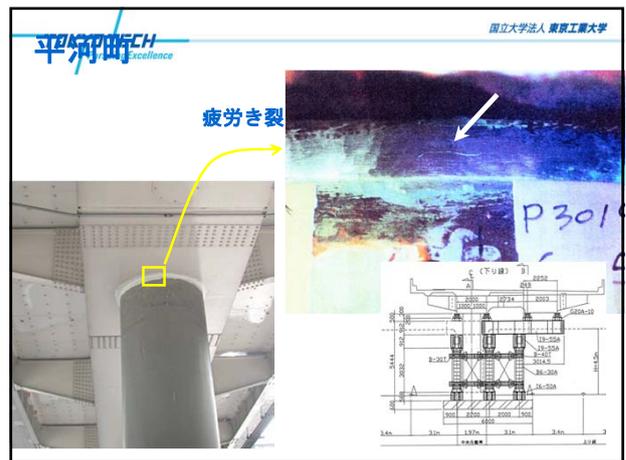
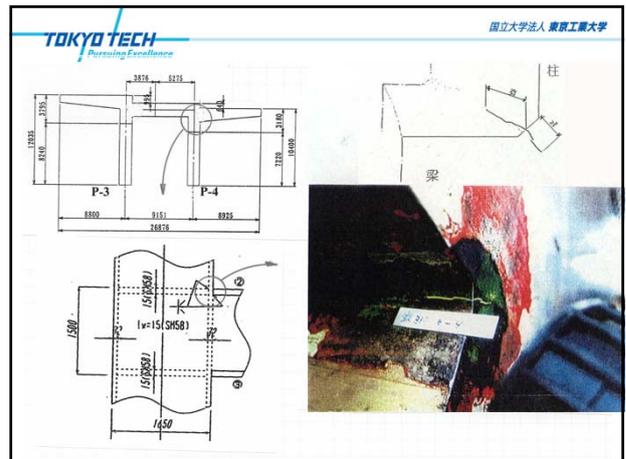
TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

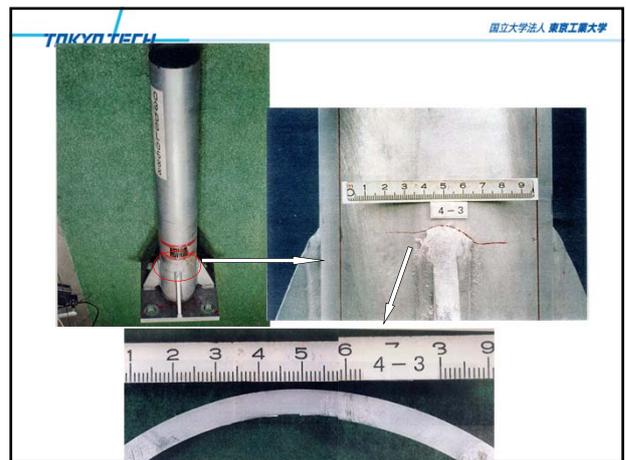
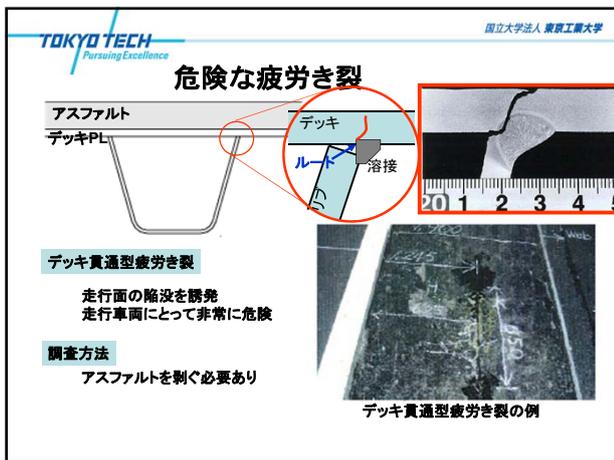
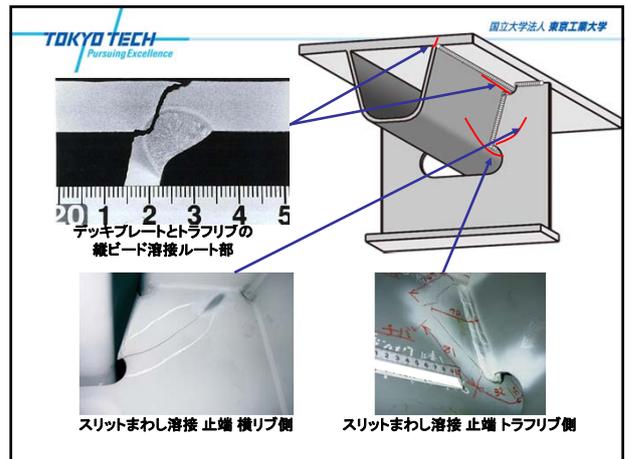
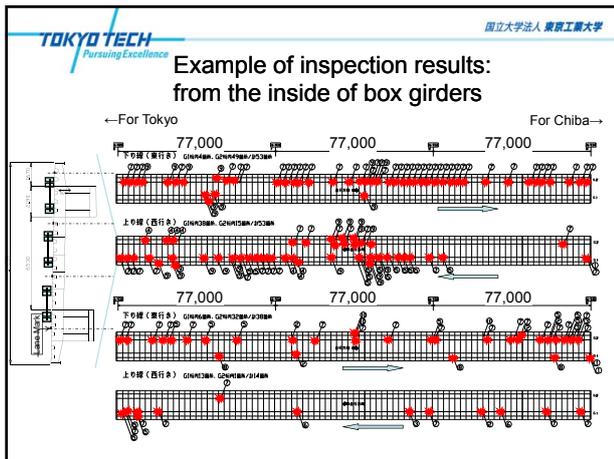


TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

腐食により固着した沓と桁端切欠部の疲労損傷







TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

鋼橋の疲労損傷の原因

- 溶接時に残された欠陥 :
驚くほど多い。道路橋示方書の品質規定は無視？
不溶着部、割れなど
- 疲労強度の低いディテールの採用
日本の道路橋は2002年まで疲労設計をしていない。
全ての道路橋。
- 設計では想定していない力の集中点
設計仮定と異なる挙動。支承部など
- 部材の継手部
直交する部材
- 構造物の想定外の挙動
風や列車・自動車による振動など

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

疲労における支配的因子

応力
測定位置
応力範囲
数
一般車両 トラック
1tf 20tf 重量
応力範囲 Stress Range
トラック交通量 Number of Trucks

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

鋼橋

- 疲労の原因である荷重の実態を知ることがアセットマネジメント、ブリッジマネジメントの最初のアクション
- 活荷重についてはNo Control状態であることの認識

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

過積載車の実態

Oosaka bridge (R246) Tamagawa viaduct (R246) Arakawa bridge (R357)
Traffic volume (day) Vehicle weight (tf)
—○— Sep, 2002 —●— Jan, 2003 —△— Apr, 2003 —▽— Jul, 2003
50トンを超える重量のトラックがかなりの数通過している
法定の車両重量あるいは軸重は？
土論 NO. 773(2004-10)

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

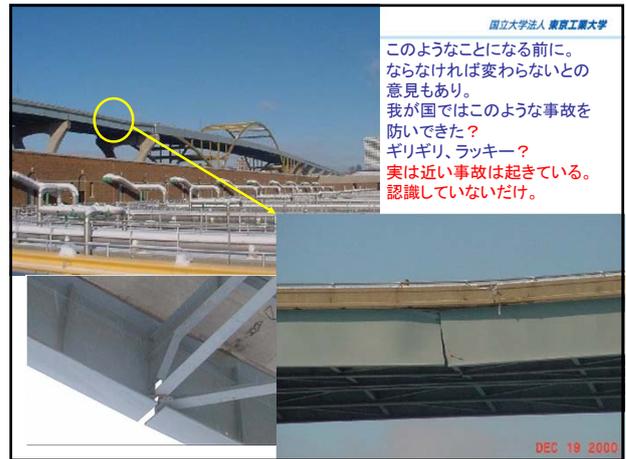
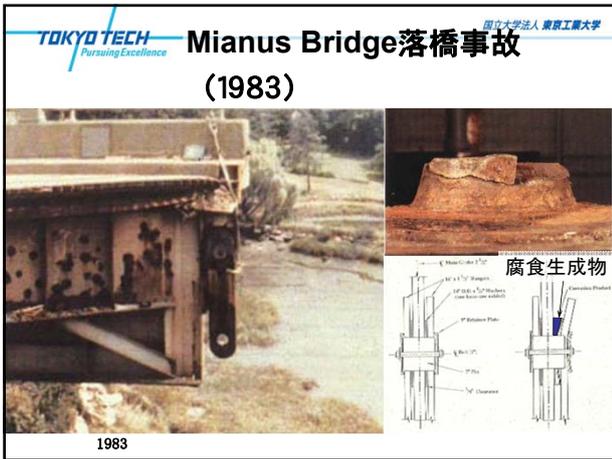
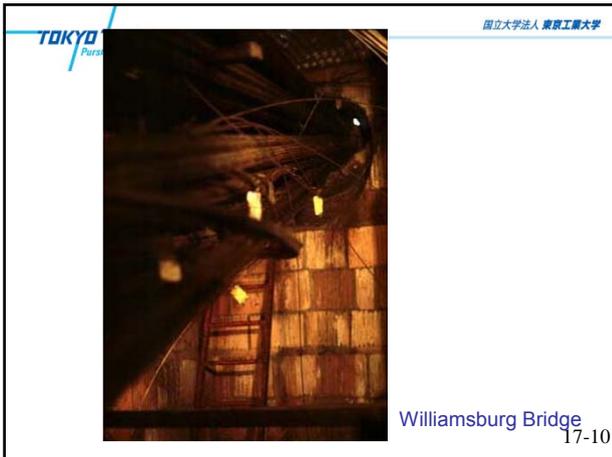
非常識ともいえる過積載、違反車両の通過

Strain due to test truck (20.96tf) in calibration test
Vehicle-1 : Semi-trailer 61.2 tf
Vehicle-2 : Semi-trailer 72.6 tf
Vehicle-3 : Truck-crane 99.0 tf
Strain (μ) Time (sec)
Strain (μ) Distance (m) [time(s) × velocity(m/s)]

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

2. America in Ruins

日本の現状はAmerica in Ruinsが発表された1980年の米国より酷いのでは。
その理由は、管理側、国民、いずれも認識が無いこと。



TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

3. メンテナンスをどうするのか

技術者いない
財源は制約
今までのやり方では到底対応できない

安全性の確保
社会的な役割、機能を発揮し続ける

---> **橋梁の管理へ
アセットマネージメント的な考え
方
を導入する**

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

アセットマネジメント

出典: フリー百科事典『ウィキペディア (Wikipedia)』

- アセットマネジメント (AM)とは、広義としては、投資用資産の管理を実際の所有者・投資家に代行して行う業務のことである。従って、株式・債券・投資用不動産、その他金融資産の管理を代行する業務一般を意味する。
- 不動産業界においては、投資用不動産を投資家に代行して管理・運用する業務を指す。
- プロパティ・マネジメント (PM) との違いは、PMが主に不動産の物理的な管理、賃借人などの契約管理・賃料の収受、管理費用の支払い代行などの業務を行うのに対し、アセット・マネジメントは、投資家・所有者の代理人としてPMの選択・PMに対する指示などを行い、投資家に対しては投資利回りを最大化する責務を負うことである。

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

アセットマネジメントとは

Asset(資産)をManagement(運用・管理する)

依頼者の資産・負債状況の分析
収入・リスク許容力・意向の反映

↓ 目的

純資産の増加

証券会社や不動産会社の場合は利潤の追求
公共事業ではVFM(Value for Money:国民の税金 (Money)の使用価値 (Value)の増大
サービス水準が一定であれば橋梁の負担するコストを低減すること
コストが一定であればサービス水準を上げること

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

社会資本における「純資産の増加」とは

利用者ニーズに最大に応えること
総合的な費用を最小にすること

- AM導入の必要性
- 既存ストックの劣化進行。メンテナンス費用の増加
- 予算制約
- サービスの低下は考えられない

従来メンテナンスでは劣化・損傷に対して対症療法的に補修補強計画が策定されてきた。利用者のニーズは把握し、事業に反映してきたが、システムの中に定量的指標として組み込まれてはいない

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

さて、橋梁のメンテナンス計画への アセットマネージメントの導入をどうするのか

具体的なシステム、ソフトはない。
しかし、ポテンシャルではないだろう。
これから目指す方向は

- 新技術
- ユビキタス社会のメンテナンス

経年の進んだ日本の膨大な数の橋梁をどの様にメンテナンスしていくのか
医療分野での成人病への対応に当たる
場当たりの対応 (対症療法型) から予防保全型メンテナンスへ
予算も限られている

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

平成15年4月：道路構造物の今後の管理・更新等のあり方に関する検討委員会

- 道路を資産として捉え、道路構造物の状態を客観的に把握・評価し、中長期的な資産の状態を予測するとともに、予算制約の下で、いつどのような対策をどこで行うのが最適であるかを決定できる総合的なマネジメントシステムの構築が必要である。

➡ **アセットマネージメントの導入**
しかし、現在までに
具体的な形にはなっていない

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

道路橋の予防保全に向けた有識者会議 国レベルでの基本方針 (H19・10-20・5)

- 点検の制度化：
全ての道路橋で点検を実施
- 保全の制度化：
技術基準、資格制度、人材育成を充実
- 技術開発の推進：
信頼性を高め、負担（労力、コスト）を軽減する技術開発を推進
- 技術拠点の整備：
損傷事例の集積と発信、高度な専門技術者の育成
- データベースの構築と活用：
効率的な維持管理とマネージメントサイクルの確立

この答申は前の答申を前提とし、具体的なアクションを記述したものの
しかし、だれが、どのように実現していくのが問題

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

4. 具体的な取組の事例： 東京都の橋梁長寿命化プログラム

- アセットマネージメントの導入
- 対症療法から予防保全へ
- 自治体での橋梁の長寿命化策定プログラム
統一したマニュアルでの点検、診断、措置の計画が行われた。
実力を見る上で有用。

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

点検の判断基準

定期点検の判断基準(部材単位)

判定区分	健全	状況
a	健全	損傷が特に認められない
b	ほぼ健全	損傷が小さい
c	やや注意	損傷がある
d	注意	損傷が大きい
e	危険	損傷が著しい。又は、第三者への影響を与える可能性がある

東京都建設局：橋梁の管理に関する中長期計画、平成21年3月より

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

点検の判断基準

定期点検の総合判定基準(径間・橋梁単位)

判定区分	健全	状況
A	健全	総合健全度判定式による
B	ほぼ健全	
C	やや注意	
D	注意	
E	危険	

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

橋梁別定期点検健全度評価の推移

昭和62年～平成17年(3次～6次) 橋梁の健全度割合の推移

回数	平均健全度	A (健全)	B (ほぼ健全)	C (やや注意)	D (注意)	E (危険)
第3次 (昭和62年)	8.90	37.7%	26.0%	27.7%	8.0%	0.7%
第4次 (平成6年)	8.98	36.3%	32.6%	21.4%	9.7%	0.0%
第5次 (平成9年)	8.74	26.5%	33.2%	30.3%	9.9%	0.1%
第6次 (平成14年)	8.68	21.1%	32.6%	34.0%	11.9%	0.4%

(平均健全度:A,B,C,D,Eをそれぞれ5,4,3,2,1として平均した値)
同一のマニュアルによる点検が実施されていたことがKey

東京都建設局：橋梁の管理に関する中長期計画、平成21年3月より

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

予防保全型管理による効果 (橋梁関連経費試算例)

30年間橋梁総事業費 縮減額:1兆円

1兆6000億円 → 6000億円

東京都建設局：橋梁の管理に関する中長期計画、平成21年3月より

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

5. これからの取組

その1. 構造物の寿命をどのように考えるか

- ・ 財産管理上の寿命は50年程度
- ・ この期間が過ぎたら取替え?
- ・ 廃棄と新設——運行止め——膨大な社会的損出
- ・ 建設廃材と新規の材料——新たな環境問題

---->都市部では取替えの選択は困難
 ---->Repair /Retrofit技術が必要

物理的な老朽化とは100年以上
50年を100年としたらシナリオが変わる
 そもそも50年で取替えなければならないような構造物を作ってきたのか、また、
 今も作っているのか?

プラス100年プロジェクトを立ち上げる時期
 メンテナンスの発想の転換

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

その2. アメリカと日本との状況は本当に同じか?

America in ruinsのシナリオの真似をする必要はない。

America in Ruins

1981年FHWA：524,966橋のうち2/5が大幅な補修あるいは架け替えが必要。98,000橋は構造上の強度不足。橋梁の寿命は50年程度、アメリカの橋梁の3/4は使用開始後45年以上、1900年以前に竣工した25,000橋がいまだに使われている。1935年までは材料、設計、製作などの標準化はされていなかった。

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

+100年P

橋梁の有する真の耐力を知るための技術、劣化を予測する技術。

鋼橋の疲労対策P、橋梁の長寿命化修繕策定Pなどで見えてきたこと

- ・ 点検と診断：老朽化した、荒廃したというが、実際の耐力(疲労、終局)をきちんと把握しているか?
- ・ 疲労を知っている技術者がどれくらいいるのか?管理者、コンサルタント、橋梁会社。
- ・ 「点検結果から劣化曲線を設定します(ソフト)」そのようなことは可能か?
- ・ 疲労を破壊の防止からは**現在の点検および診断は NO**
- ・ 新しい技術、理解できないことに対する**拒絶反応**。

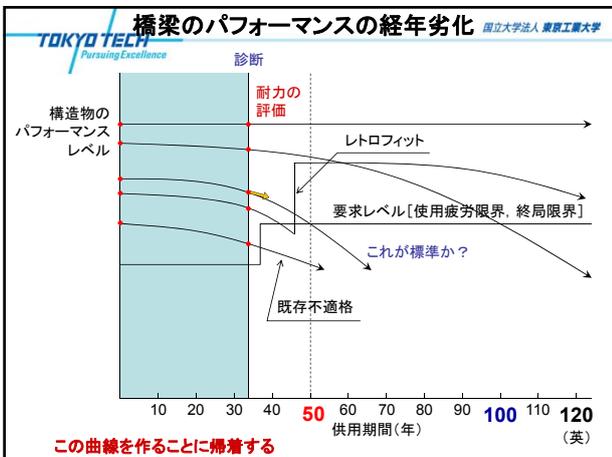
橋梁の診断は人間の診断と同じレベルの重要性であることの認識が薄い。
 民間に関連技術の開発意欲は無い。(ビジネスモデルが成立しないことから)

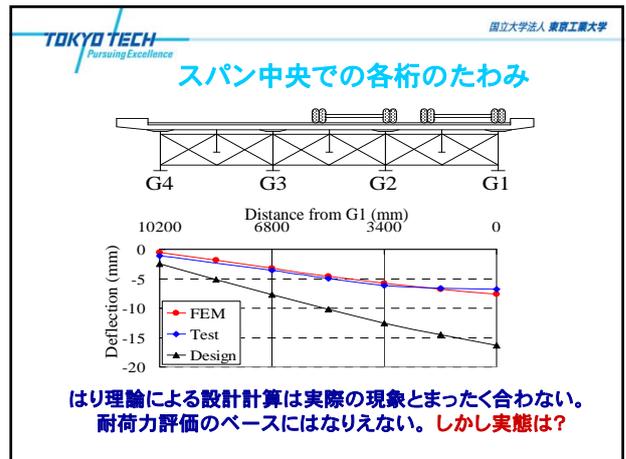
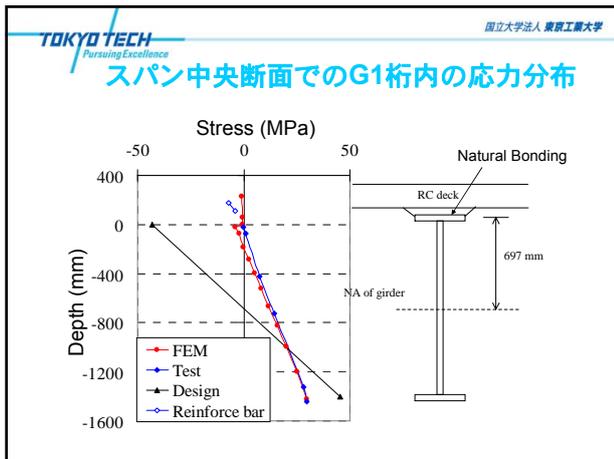
この課題に対してどこが主体的に取り組むかを考えなければならない。

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

6. 橋梁の真の性能を把握する

- ・ 設計計算とは全く異なることの認識





TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

はり理論ベースの設計計算から別れよう。

- ・ 実応力比：実測応力/設計計算応力（同一の荷重条件下）は0.5-
- ・ 残りはどこが負担しているのか？→疲労の原因
- ・ 疲労を考える上では実際の応力が重要。
- ・ 特に疲労に対する補修・補強においては必須。
- ・ FEMでは容易に合うような解析が可能。

FEMなどを使えば精度よく予測可能

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

5. 疲労亀裂を見つける（非破壊検査）

プロの目視が一番、

- ・ しかしプロは少ない。
- ・ 疲労亀裂を見たことが無い。
- ・ どこを見たらよいか分からない。

支援するためのシステムあり, on Web.
非破壊検査。しかし、現状は使えるものが少ない。
Needsにより新しい非破壊検査の開発を。
UT, サーモグラフィー、New Tech.

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

新しいUT：面状欠陥に起因するエコーの特性と探触子の指向性への対応

2002~~ 2004~~

Tandem Array System

Impossible to sweep direction

Phased Array System

Linear Phased Array

Focus to arbitrary point in 2D inspection area

Planer Phased Array

Focus to arbitrary point in 3D inspection area

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

プレーナーフェーズドアレイ探触子による非破壊検査

プレーナーフェーズドアレイ探触子

探傷

探傷結果の再構成画像

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

非破壊検査により損傷の大きな場所が特定ができるだけでも
保守作業は効率化する
自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の検出

鋼床版のデッキプレートと垂直補剛材の溶接部に適用
版上: 土木学会第61回年次学術講演会概要集より

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

6. 疲労の原因の特定: 変位誘起疲労 (最も数が多い疲労損傷)

- いままでは応力測定とFEM
- Wireless Sensor Network(WSN)を使う試み

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学 69

Wireless Sensor Network (WSN)

Advantages of WSN

- ✓ No wiring cost
- ✓ Flexible deployment
- ✓ Self-routing of data transmission

Disadvantages of WSN

- ✓ Time synchronization among nodes
- ✓ Data loss

∴ 多数のWSNを配置しての構造同定が安価に実現できる

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

モニタリングへのMEMS技術の利用

現場計測デバイスの一つである加速度計の単価を比較する

- 一般的な有線の加速度計
3軸加速度計 約150,000円/個
- MEMS加速度センサ
Crossbow ネットワークノード(センサ基盤含む) 約50,000円/個
- Wiiリモコン + Wiiモーションプラス
3軸加速度計 + ジャイロセンサ 3,800円 + 1,500円/set
MEMSセンサは非常に低コストである

ちなみに自動車には1台あたり約50から100個のセンサ(enbedded system: マイクロコンピュータ)を搭載

- エアバック作動スイッチ用加速度センサ
- 各種姿勢制御用センサ
- 障害物探知用のレーザーレーダ 等

車体価格が200万円として、その全てがセンサに費やされるとしても1個あたり約2万円程度である:
実際のプライスは100円/個以下とのこと

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学 71

現場測定

Object of measurement
Metropolitan Expressway 5

Plain view
Unit: mm
Driving lane
Fast lane

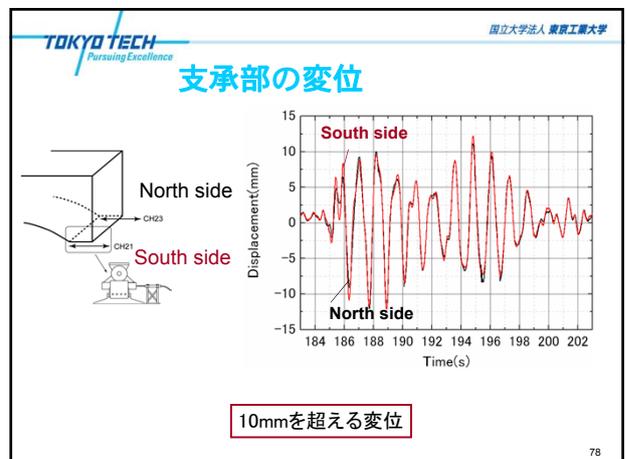
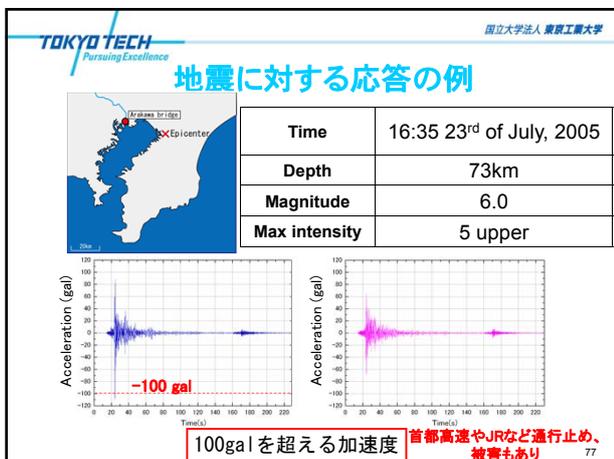
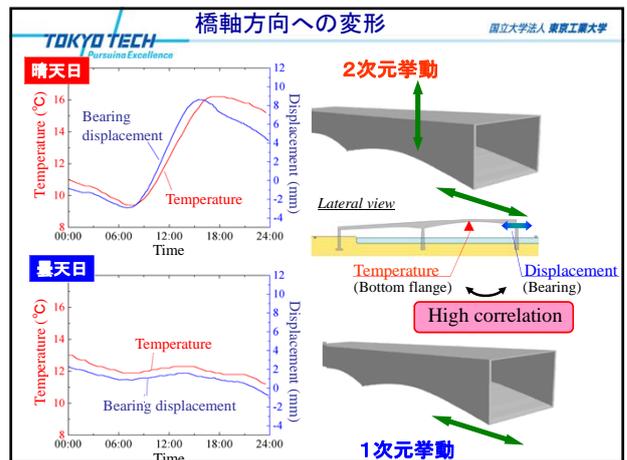
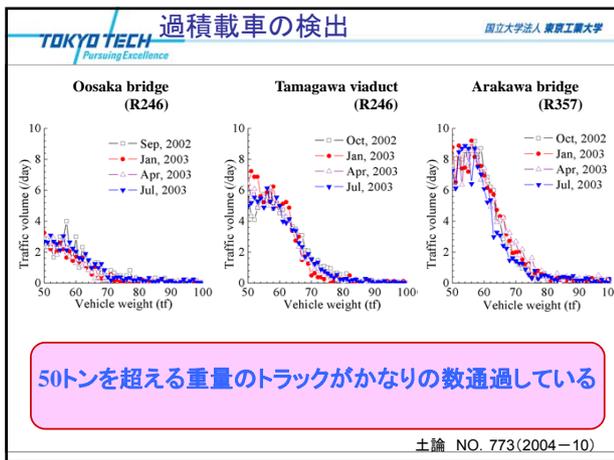
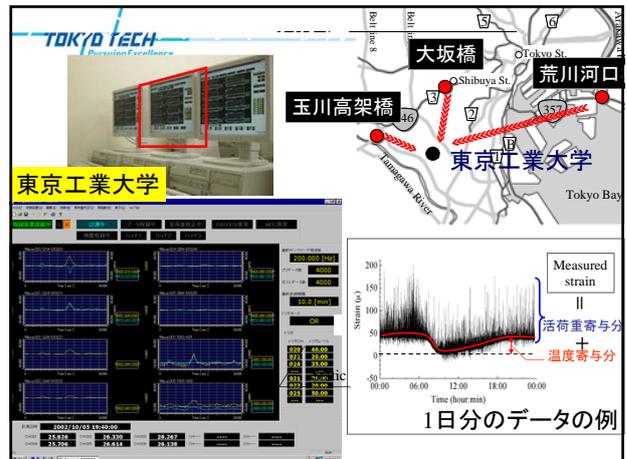
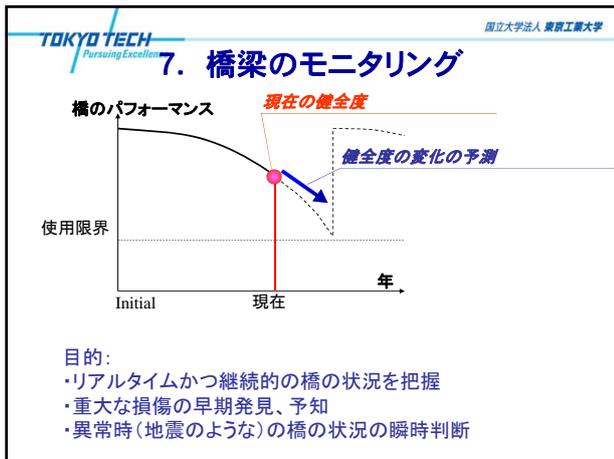
TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学 72

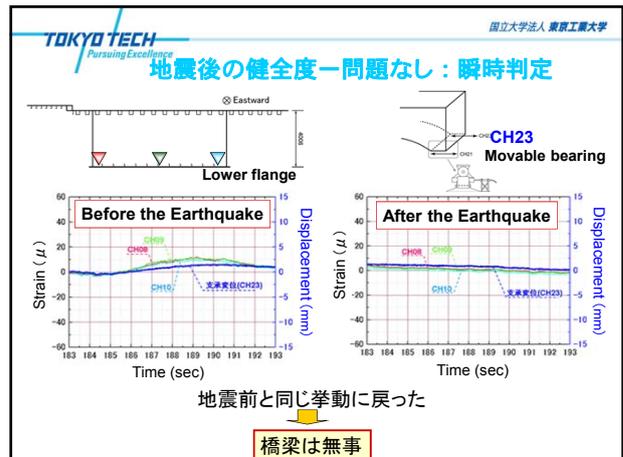
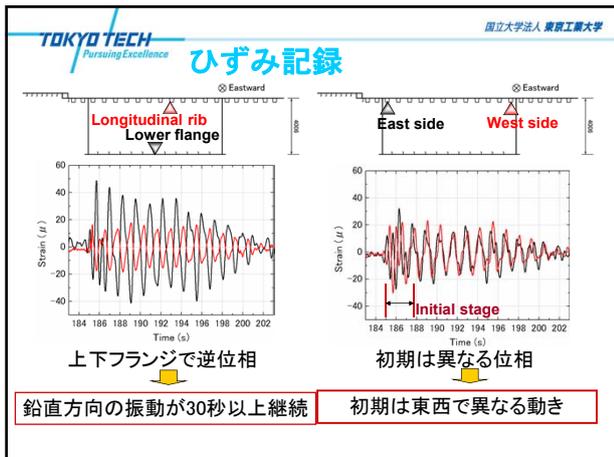
ひずみと加速度の測定

局部の応力に關係する各部材の変位
疲労の原因となる局所の応力 σ_{vs}

Detected fatigue crack

Upper flange
Vertical Stiffener
Local stress σ_{vs}





TOKYO TECH Pursuing Excellence 8. 米国でのこの分野の技術開発の例 国立大学法人 東京工業大学

NIST (National Institute of Standards and Technology)
アメリカ国立標準技術研究所

Technology Innovation Program (TIP)

2008 [Advanced Sensing Technologies for the Infrastructure: Roads, Highways, Bridges and Water Systems](#)
(インフラの構成要素である橋、道路、水道の構造健全性を適時かつ詳細にモニタリング・点検するための高度なセンサー技術の開発)
9 projects out of 46 applicants

2009 [Expanded its scope, including new technologies for repair and retrofit of existing structures](#)
8 projects

\$73 million of TIP funds, \$77 million of cost shared funding
Total investment of \$150 million in new R&D

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

Keywords of
Innovative technology on maintenance of civil infrastructure

- * Wireless sensor and Wireless network
- * Self-powered (solar, wind, vibrations in bridge)
- * Non destructive evaluation
- * Data integration and visualization
- * Robot technology
- * New material

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

TIPで採択されているプロジェクトの例

- Development of Rapid, Reliable, and Economical Methods for Inspection and Monitoring of Highway Bridges
道路橋に対する高速で信頼性が高く経済性に優れた点検・モニタリング手法の開発)
- Self Powered Wireless Sensor Network For Structural Bridge Health Prognosis
(橋梁の構造健全性を予知診断する電源内蔵型無線センサーネットワーク)
- VOTERS: Versatile Onboard Traffic Embedded Roaming Sensors
(橋や道路の状態を観測・評価する自動車搭載型システムVOTERSの開発)
- Cyber-Enabled Wireless Monitoring Systems for the Protection of Deteriorating National Infrastructure Systems
(国家インフラシステムの劣化を防ぐためのコンピュータネットワークを利用した無線監視システム)
- Microwave Thermoelectric Imager for Corrosion Detection and Monitoring in Reinforced Concrete
(鉄筋コンクリート腐食検知・モニタリング用マイクロ波熱電撮像装置)

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

9. 今後の展開

- 日本では、この分野に対する大きなFunding, Projectはなし。小規模な研究のみ。
- メンテナンスのビジネスモデルが見えない：提案すべき
- 新しい技術の導入に対する理解意欲が低い：人材の育成
- 受益者は国民であることの認識。
- 社会的損失、便益から考えるべき。

- どの機関で、誰が、どのような予算で、推進するのか？
- いまのままでは何も進まない。
- 知識、技術に相応な対価を払う仕組みの実現
(いまは物にのみへの対価、質が測れないから?)

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

橋のレトロフィットは人間の成人医療と同じ

点検
Who, When, Where, How
(検査技師)

診断
Who
(医師:ドック)(専門医)

措置: 放置、補修、補強
Who, How
(内科医、外科医、看護士)

TOKYO TECH Pursuing Excellence 国立大学法人 東京工業大学

提案: 社会インフラのスマート化!

スマートグリッド、スマーター・プラネット、スマートシティ
社会インフラのメンテナンスに存在する無駄を切る——アセットマネージメント

- ① 実世界の情報をデジタル化
- ② インターネットなどで相互接続して集約
- ③ 集まったデータを分析

点検—診断—措置

情報の見える化

データの集約
(Data integration)

データ分析
(Data mining)

意思決定
(Decision making)

橋梁緒元

定期点検

モニタリング

補修・補強

**目指すは
日本中の全ての橋梁で、
最高レベルのメンテナンスを実現すること**

