

土木学会全国大会 研究討論会  
(日本大学津田沼, 4/Sep/2013)

愛媛大学  
中畑 和之

[nakahata@cee.ehime-u.ac.jp](mailto:nakahata@cee.ehime-u.ac.jp)

# 土木分野におけるITテクノロジーの利用

～非破壊検査&センシング～

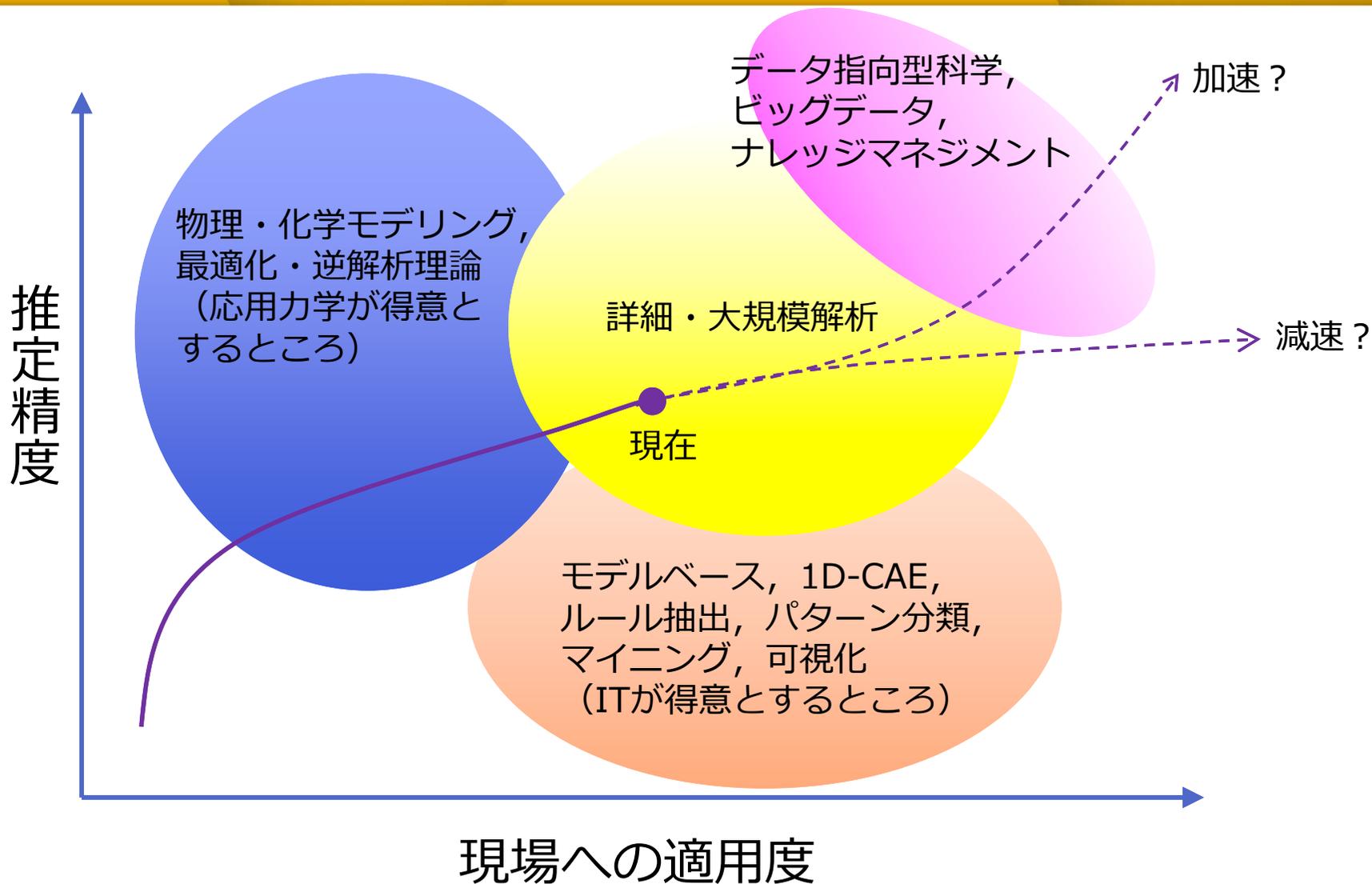
# 1. 現状認識と問題(センシングと非破壊検査の現場から)

1. 応用力学の理論・解析技術は多くの研究実績があるが、実際の現場において必ずしもこれらのアプローチが十分活用されているとは言えない。
2. 計算科学や解析データと、思考（解釈）を繋げたメンテナンス技術はまだまだ不十分



応用力学とIT技術の融合によって、新たな方法論が創出でき、推定（評価）精度は飛躍的に伸びる可能性がある

# 情報爆発時代における土木工学



# 現場を意識したアプローチ

1. 時間軸はともかく、どういう形であれ、結果的に応用力学をメンテナンスの現場の役に立つ学問としたい。
2. 大量のセンシングデータを計測・記録できるようになった現在、それを安全管理に活かすには、集約化、高速処理、情報伝達(共有)が重要なキーワード



現場で使える応用力学を目指して、メンテナンス（非破壊検査とセンシング）とITとの融合を模索

## 2. 非破壊検査へのアプローチ

- HPC技術を探傷の現場へ
- 計測データとシミュレーション技術を融合した逆解析

## 2. 非破壊検査へのアプローチ

非破壊検査の種類と近年のニーズ

超音波法

電磁波法

波動（振動，音波，弾性波，電磁波，X線，赤外線），  
磁力，電力等の物理エネルギーを利用。



超音波探傷法（三菱重工（株）HP）



電磁波レーダ法  
（構造総合技術研究所（株）HP）

## 複雑な3次元形状



配管



金型

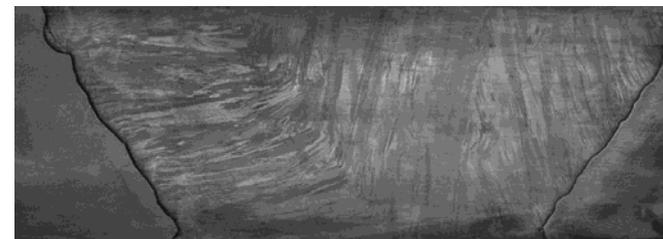
## 複合材料・異方性材料



コンクリート



繊維補強材料(FRP)



配管溶接部

# イメージベース波動伝搬シミュレータ

数値シミュレーションをもっと現場で手軽に利用したい！

- ・ 検査対象を正確にモデル化したい。  
でも、プリ作業が面倒なのは避けたい。



イメージベースモデリング

- ・ 工学的に満足できる精度で計算結果がほしい。



有限積分法(FIT)

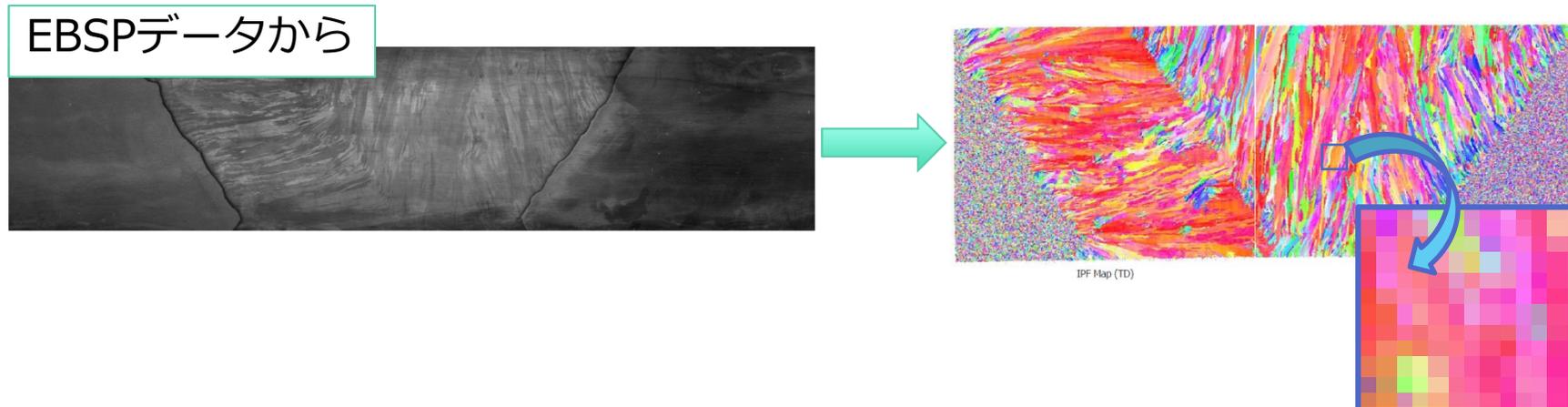
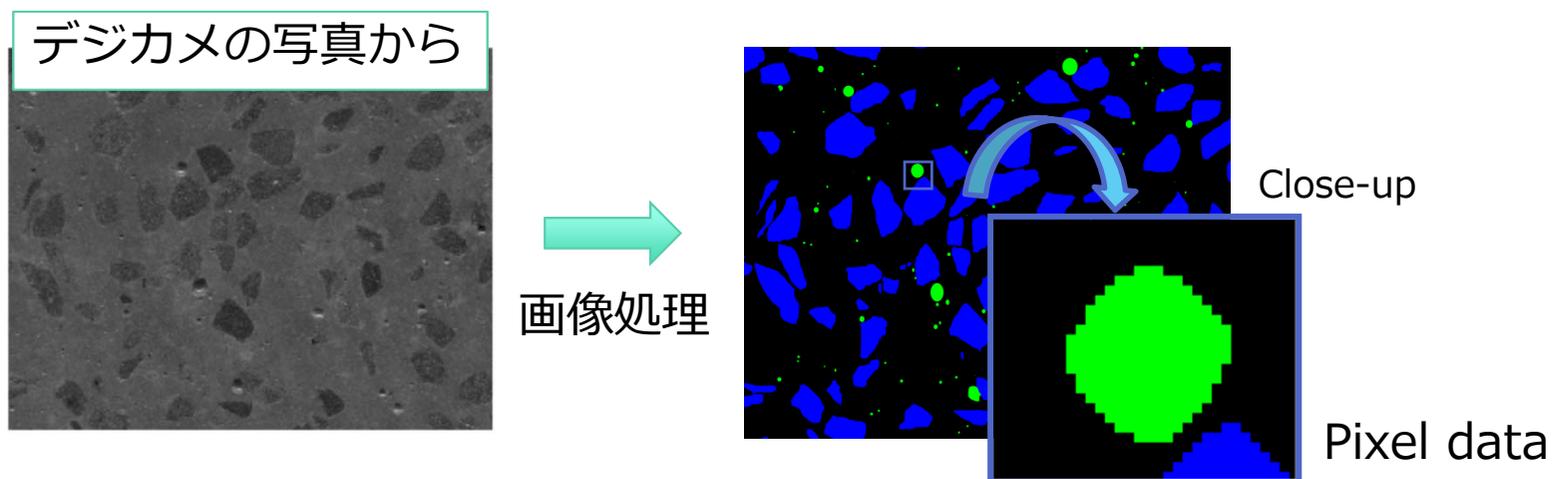
- ・ 計算時間が長いのはナンセンス



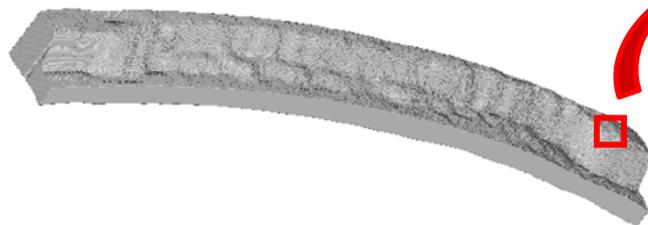
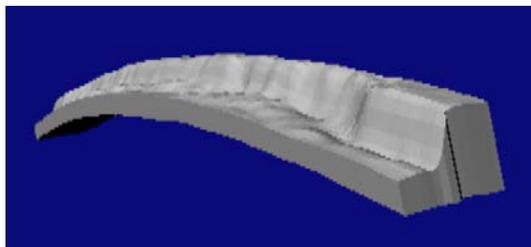
GPUによる並列計算

## a. イメージベースモデリング

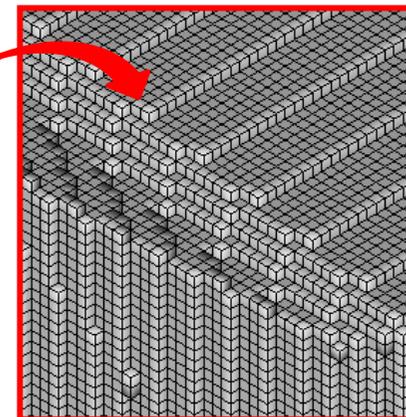
被検体の写真やCTデータ等のデジタルイメージから  
数値モデルを作成し, シミュレーションを実行する手法.



表面計測データから(光計測)

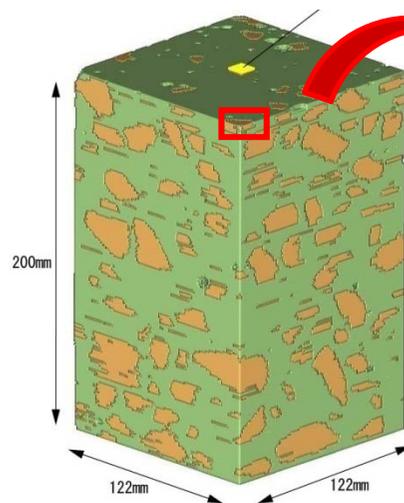


zoom

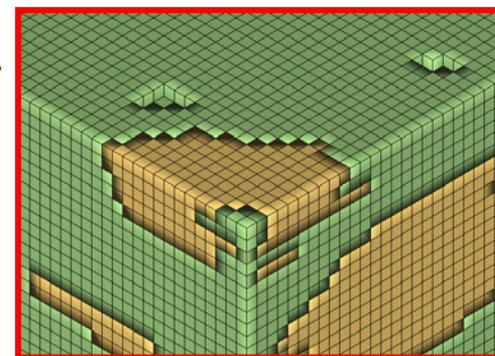


ボクセル要素

積層写真から(X線CT)



zoom



様々なデジタルデータからボクセルデータ(3D)の数値モデルを作成.

## b. 有限積分法 FIT\*(Finite Integration Technique)

- 波動伝搬解析法の一手法.
- 構成則と運動方程式（ファラデー則とアンペール則）を時間域と空間域で積分し，その離散式を時間ステップごとに逐次計算することで陽的に解を求める方法.
  - 音波版：A-FIT （空気or液体を伝搬する超音波）
  - 弾性波版：E-FIT （固体中を伝搬する超音波）
  - 電磁波版：EM-FIT （非金属を伝搬する電磁波）

### <特徴>

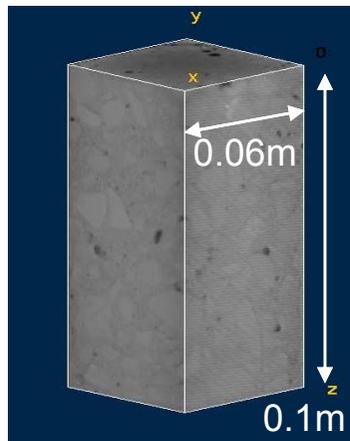
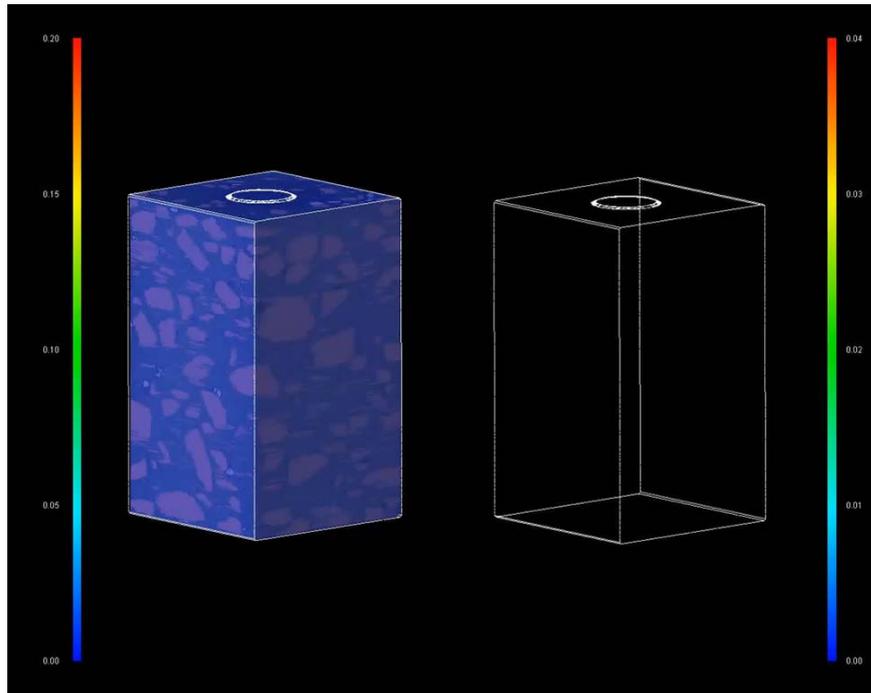
- 境界条件の取り扱いが理論的であり，非均質材料や異方性材料のモデルを計算できる.
- 積分セル形状を一定とすればステンシル計算となり，陽解法のため並列計算の効率が出やすい.

### <これまでの研究経緯>

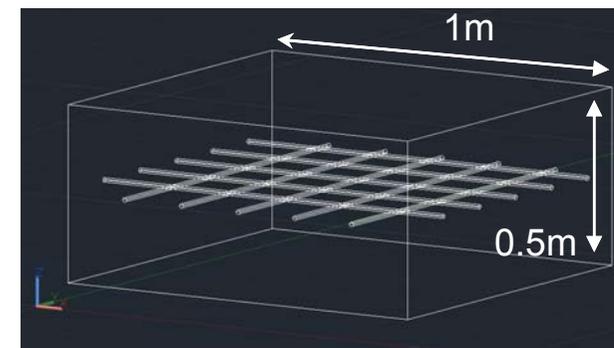
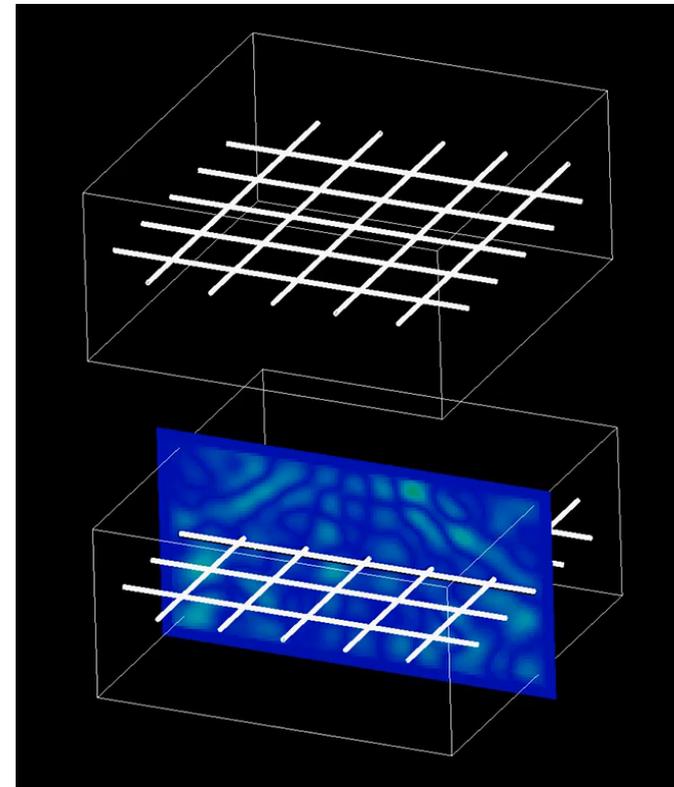
- Validation and verification は，様々な対象で実施済み.

\*K. Nakahata, K. Terada, T. Kyoya, M. Tsukino and K. Ishii, Simulation of ultrasonic and electromagnetic wave propagation for nondestructive testing of concrete using image-based FIT, Journal of Computational Science and Technology, Vol.6, No.1, pp.28-37, 2012.

# 計算例

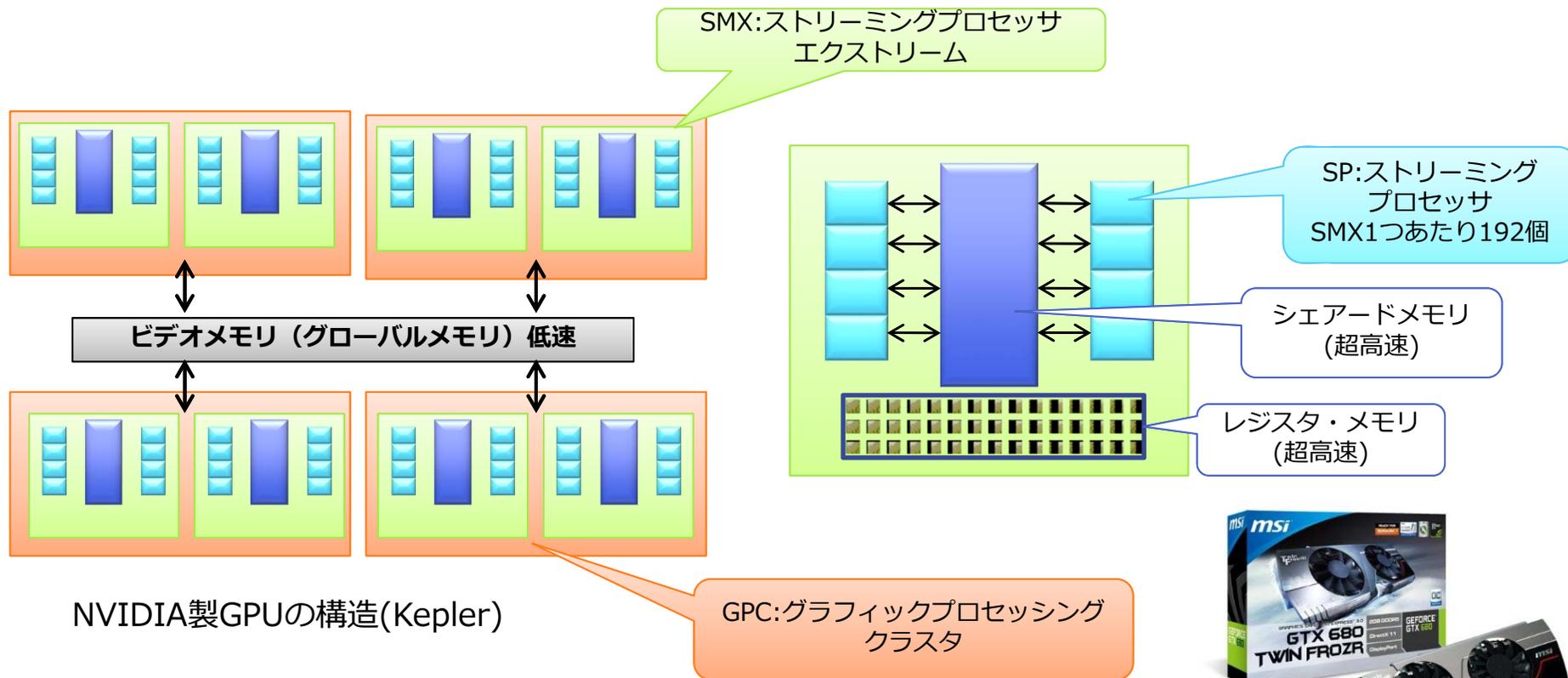


コンクリートコア中の超音波伝搬  
(E-FIT, Flat MPI, 約0.5億ボクセル)



コンクリート床板中の電磁波伝搬  
(EM-FIT, Flat MPI, 約3.5億ボクセル)

# c. GPUによる並列計算



NVIDIA製GPUの構造(Kepler)

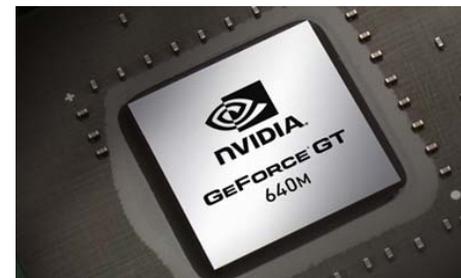


		GeForce GTX680 (GPU)	Core i7 965 (CPU)
プロセッサ性能	コア数	1536(192x2x4)	4
	クロック(MHz)	1006	3200
	ピーク演算性能	4121 Glops	51.2Gflops
メモリ	標準メモリ設定	2GB GDDR5	各自PCによる
	メモリバンド幅(GB/sec)	192.26	25.6



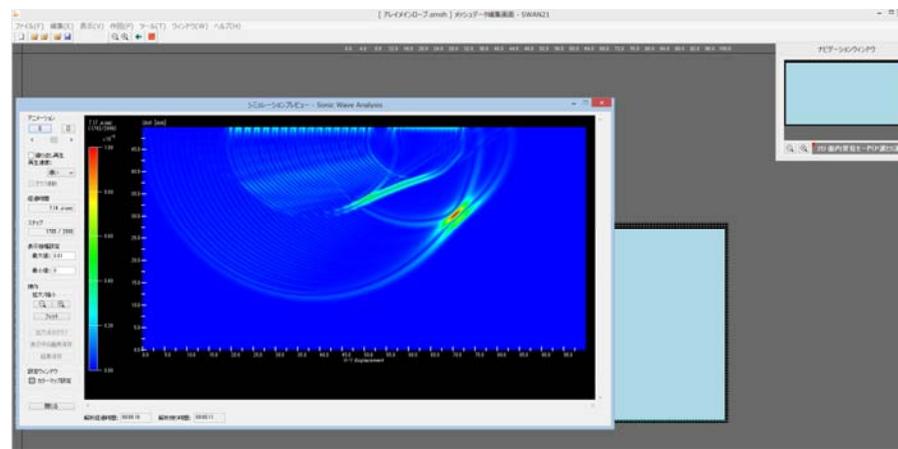
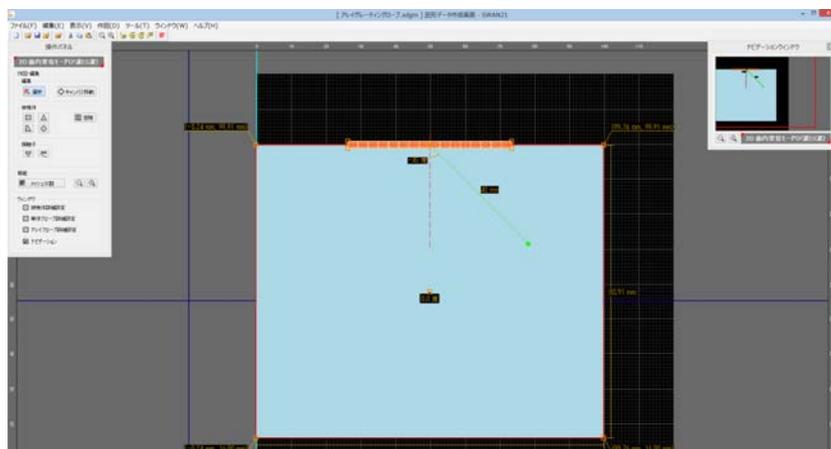
# IT企業・非破壊検査会社と共同で 「シミュレータ SWAN21」を開発

GPUによる超高速計算(愛媛大開発のGPU化したFITのコード)

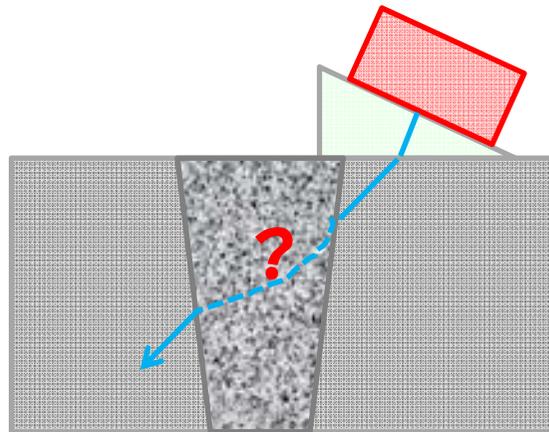


PCの空きスロットに差し込むだけで使用開始。ノートPCで駆動可能。

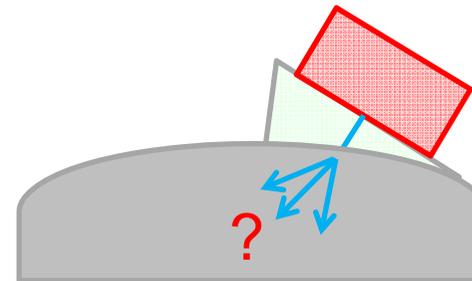
高機能GUIの設計・開発 (ジャパンプローブ(株), eCompute(株)と共同開発)



# 高速シミュレータを利用した新しい逆解析の提案



被検体内部が  
非均質，異方性材料



界面形状が複雑  
(凹凸，ギザギザも)

路程の推定が困難  
(速度分布が不均一)



逆解析 (欠陥の再構成)  
が困難

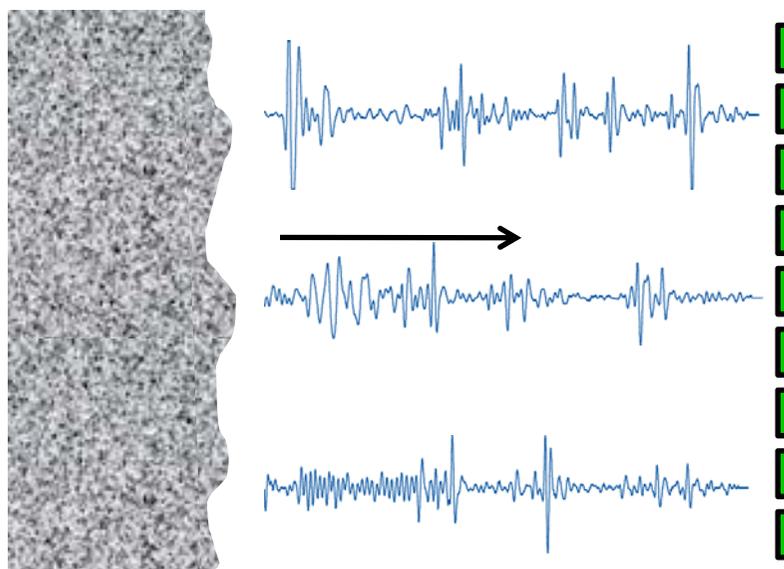
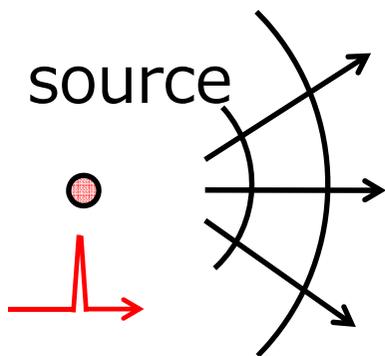
時間反転法\*



SWAN-21

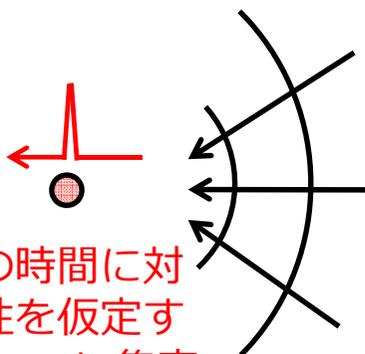
- K. Nakahata and K. Kimoto, Reconstruction of flaws in heterogeneous media using image-based FIT and time reversal approach, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.6, No.6, pp.771-781, 2012.

# 時間反転法の原理

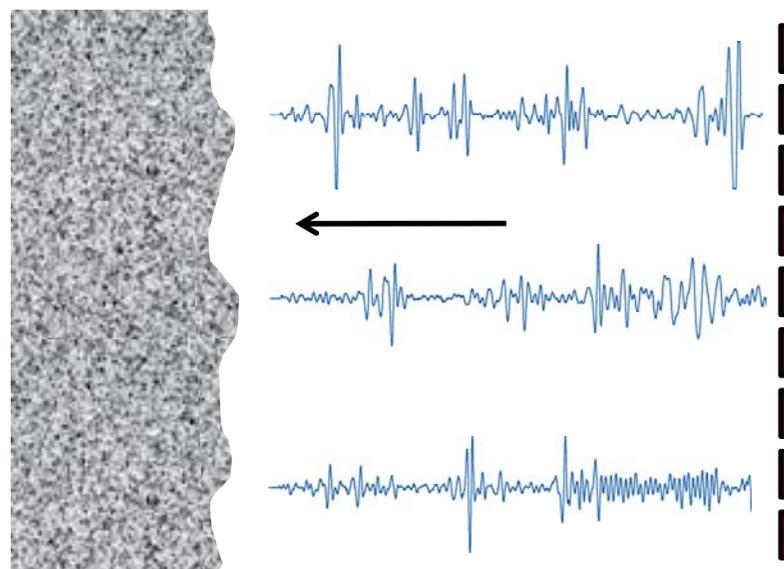


アレイ探触子

計測されたエコーを時間反転して“入射”



線形波動の時間に対する可逆性を仮定すれば, Sourceに集束する (定式化済み)

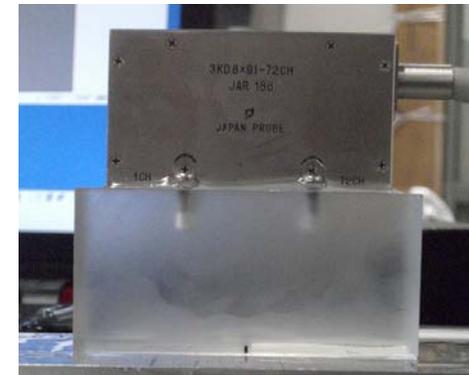


# 実験による検証



## 電子スキャン装置

- ・日立エンジニアリングアンドサービス製
- ・1素子毎のパルス波の送受信が可能



## アレイ探触子

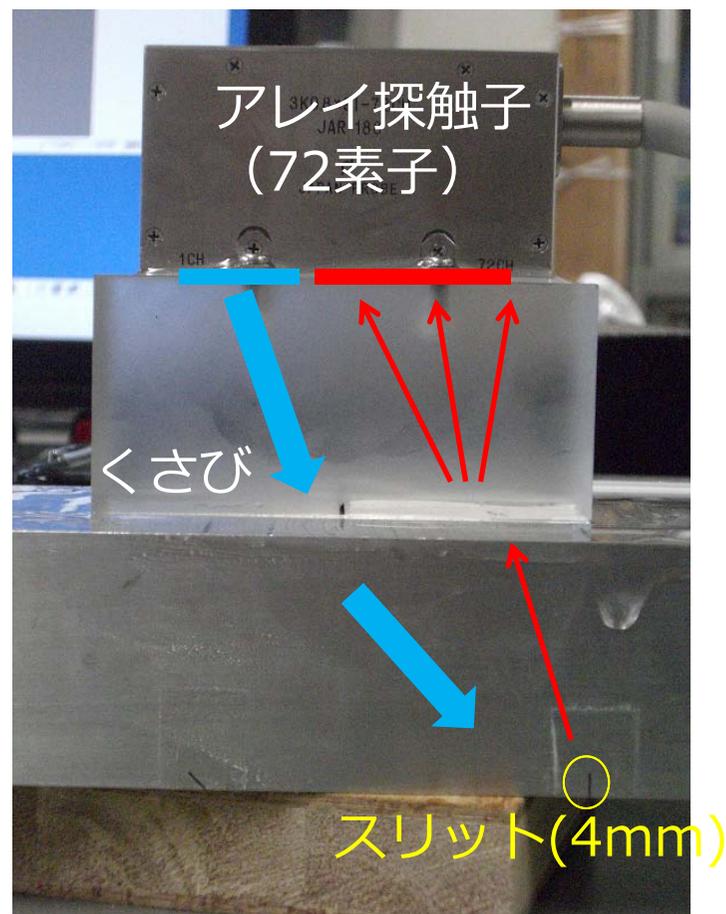
- ・ジャパンプローブ製
- ・中心周波数：3MHz(400KHz)
- ・N=64 (24)
- ・P=0.8mm(5mm)

## くさび

- ・ジャパンプローブ製
- ・ポリスチレン

# 検証実験 1

## アルミニウム中の欠陥（スリット）の映像化

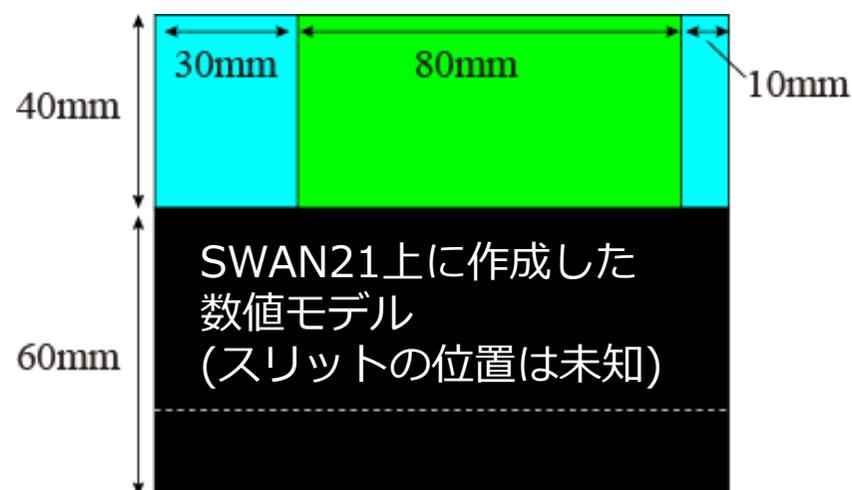


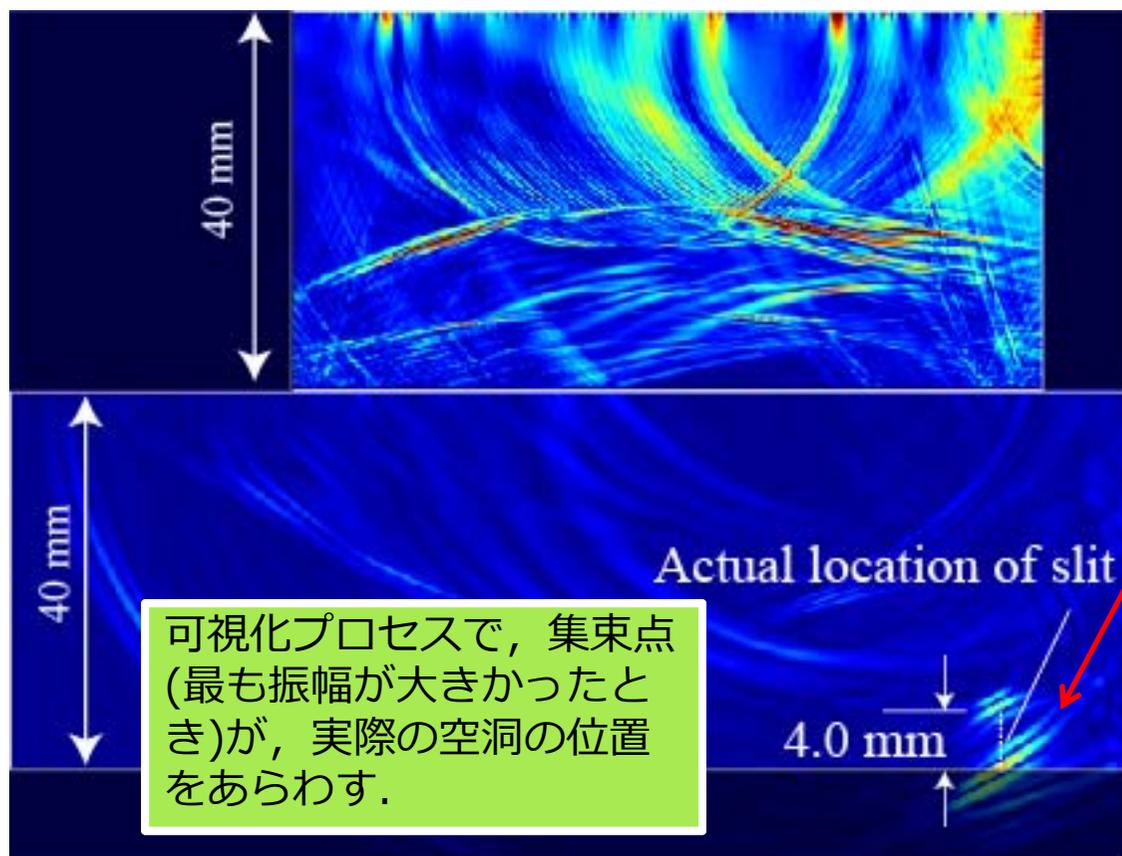
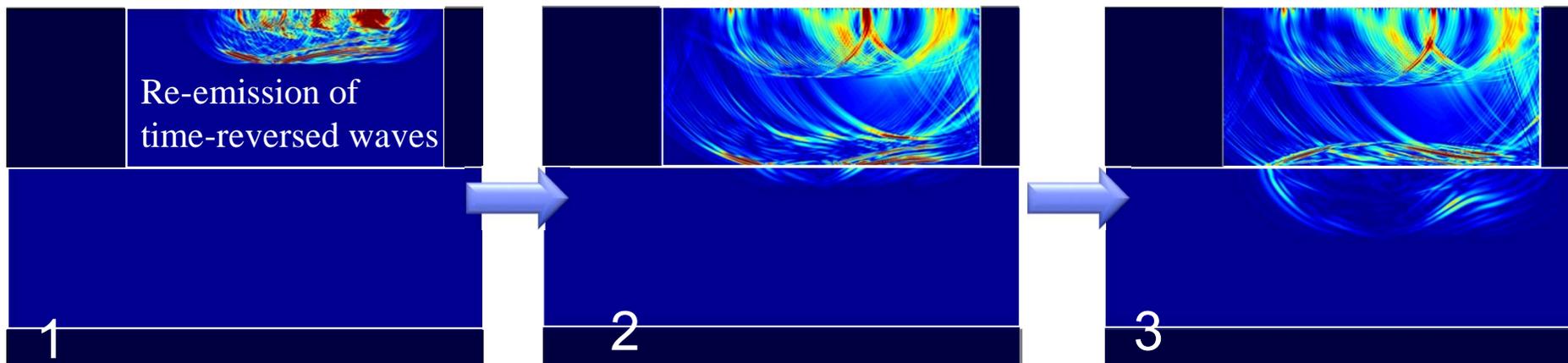
送信：素子No.1~24の合成波

受信：No.25~72素子（計48個）



48個の受信波を時間反転し、「SWAN21」に入力する。





可視化プロセスで、集束点 (最も振幅が大きかったとき) が、実際の空洞の位置をあらわす。

エコーはもともとスリットから来たものであるから、スリットに集束するはずである。

Mises応力で可視化

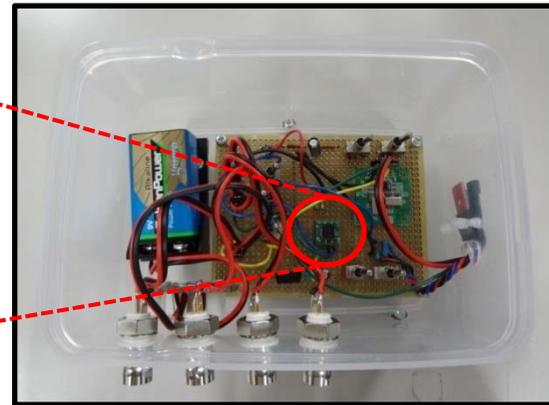
### 3. センシングへのアプローチ

- ITプラットフォームを用いたソフトウェア設計
- 計測データと可視化技術を融合した構造物の特性評価

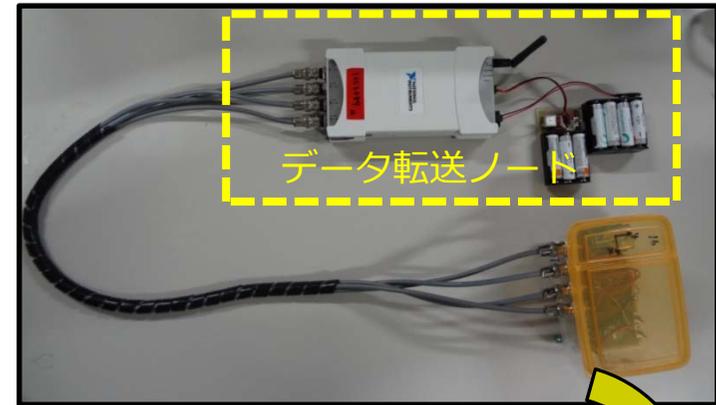
# 3. センシングへのアプローチ

## 振動の多点計測および可視化システム

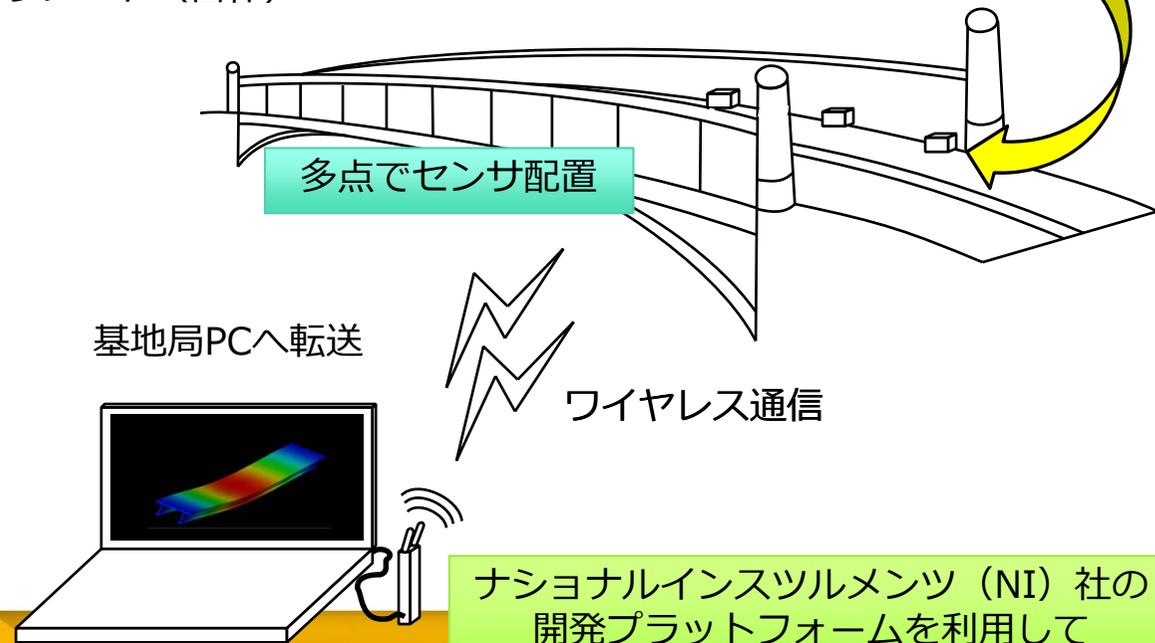
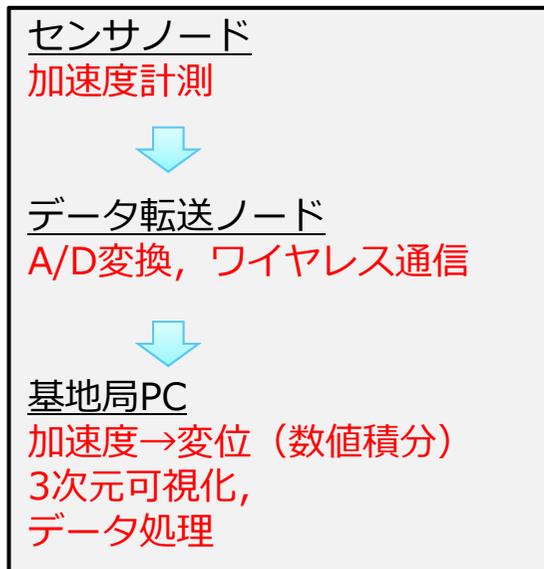
(3軸加速度センサ, MEMS)



センサノード (自作)

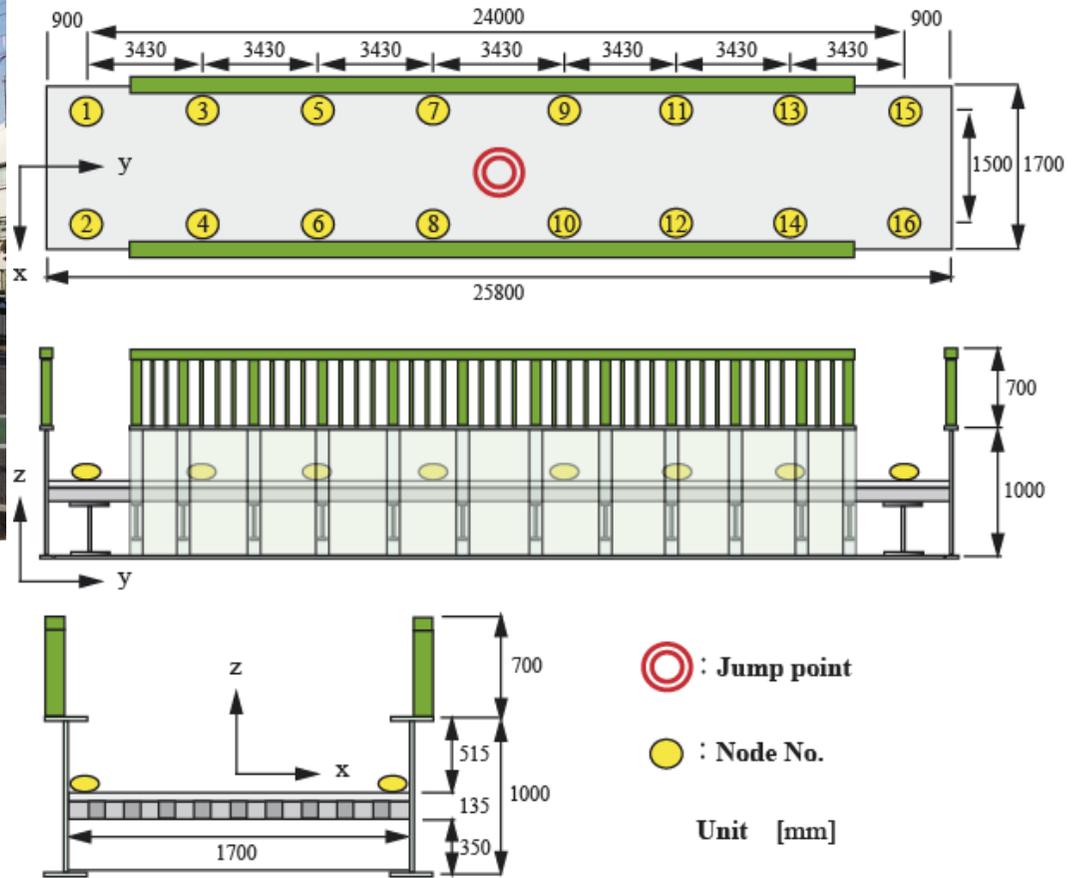


データ転送ノード



ナショナルインスツルメンツ (NI) 社の開発プラットフォームを利用して一元管理 (データ取得→転送→可視化)

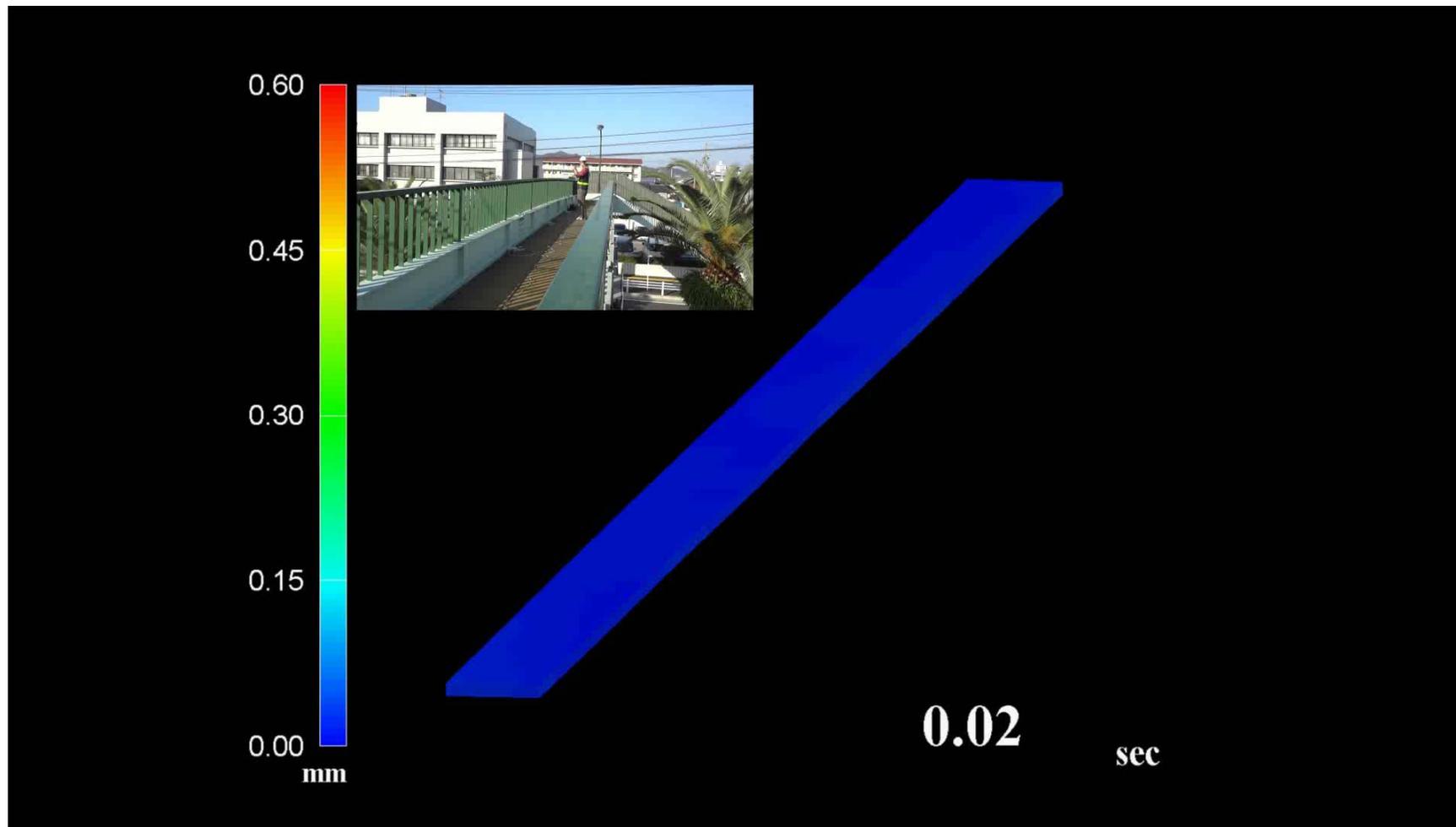
# 歩道橋で実験



## 実験条件

加振：人の跳躍による衝撃  
 サンプリングレート：1.0kHz  
 バンドパスフィルタ(2 to 400Hz)  
 データ計測時間：50 sec.

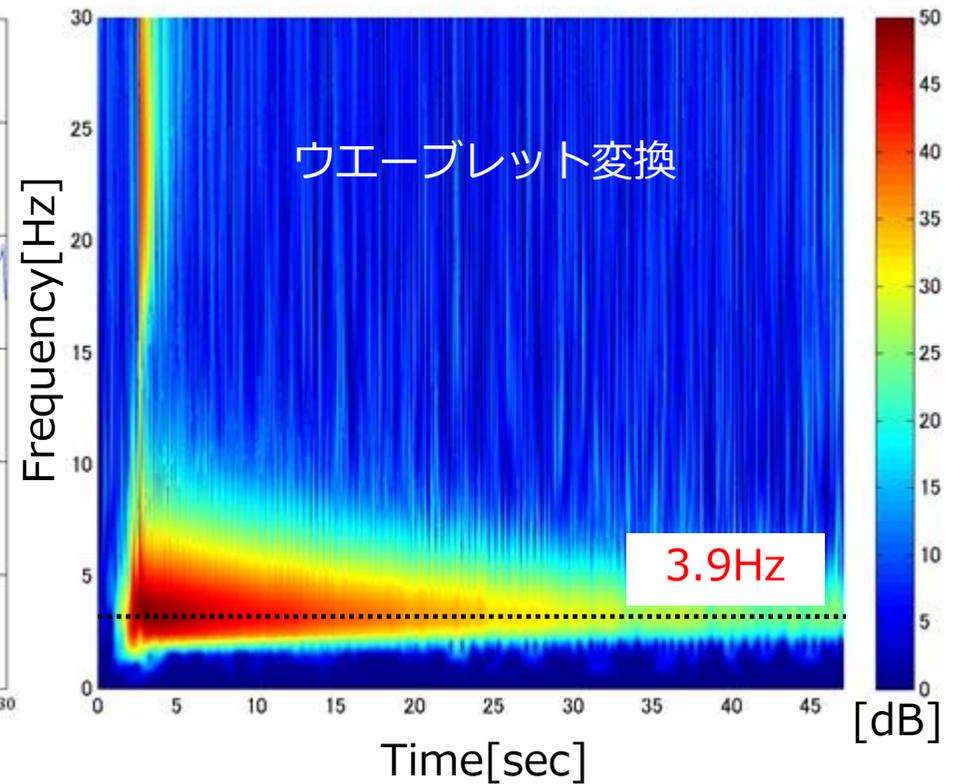
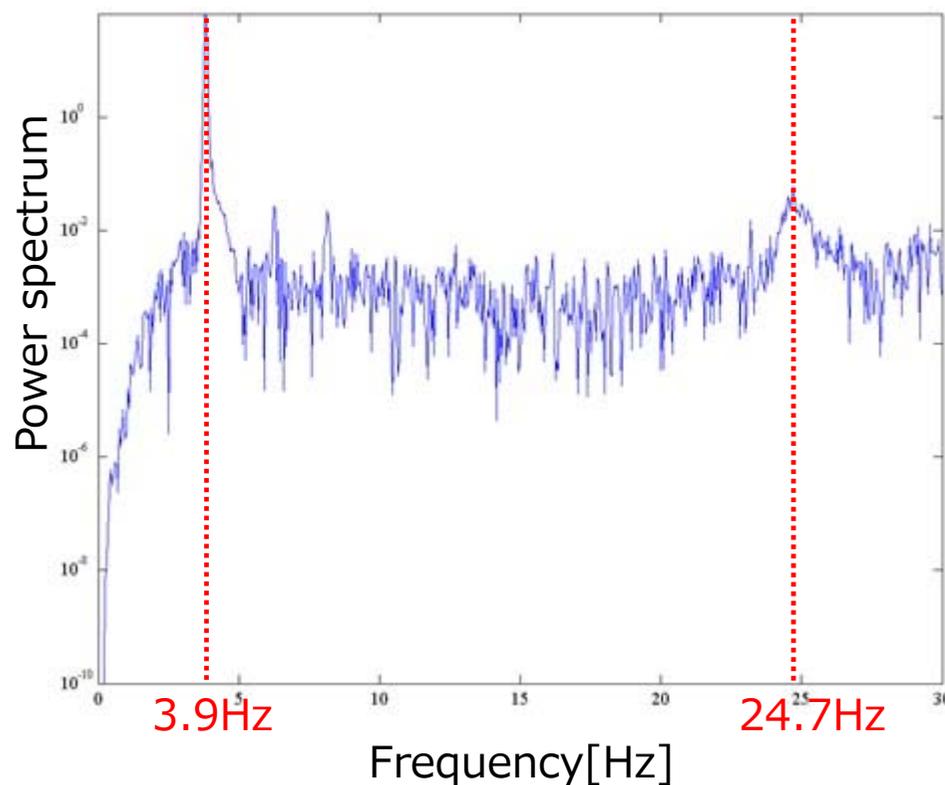
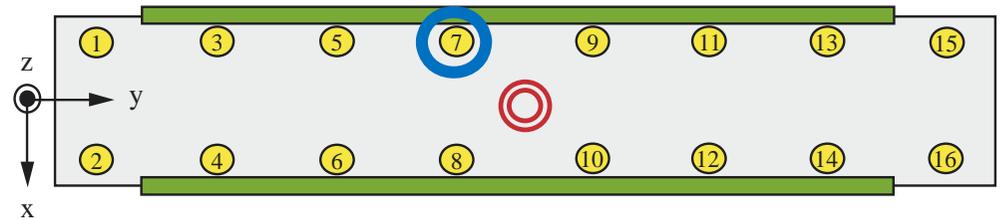
# 16点で得られた変形データをCAD上にマッピング。 衝撃による橋梁床版振動の3次元リアルタイム可視化



しゃがむ1.48 [s], 跳躍開始2.08 [s], 着地後は自由振動

# 3次元可視化から分かること

## 7番ノードの周波数解析



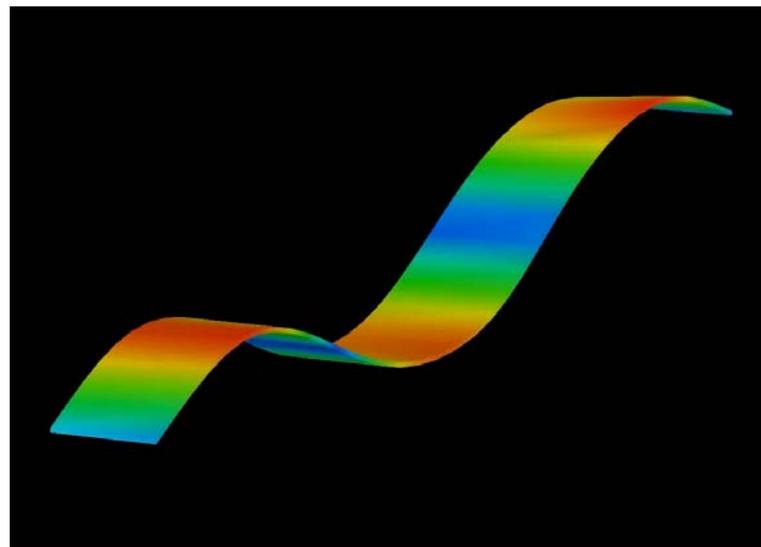
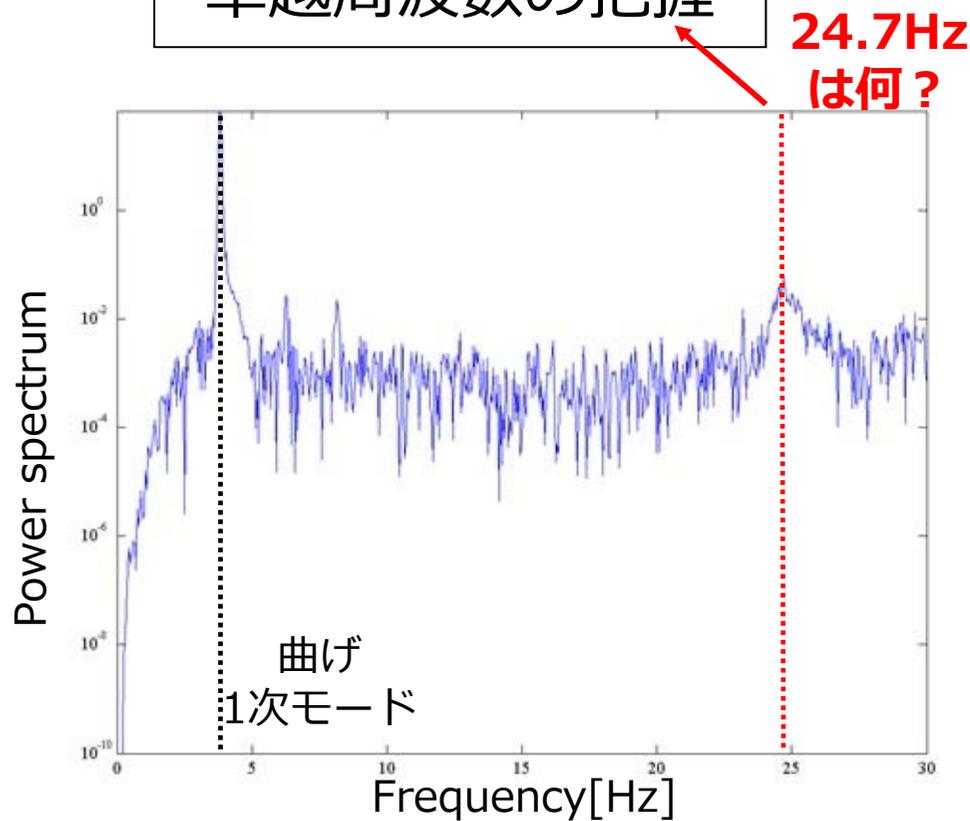
**3.9Hz** : 1次の曲げモード

**24.7Hz** : 曲げモードなのか, ねじりモードか?, 何次モードなのか?

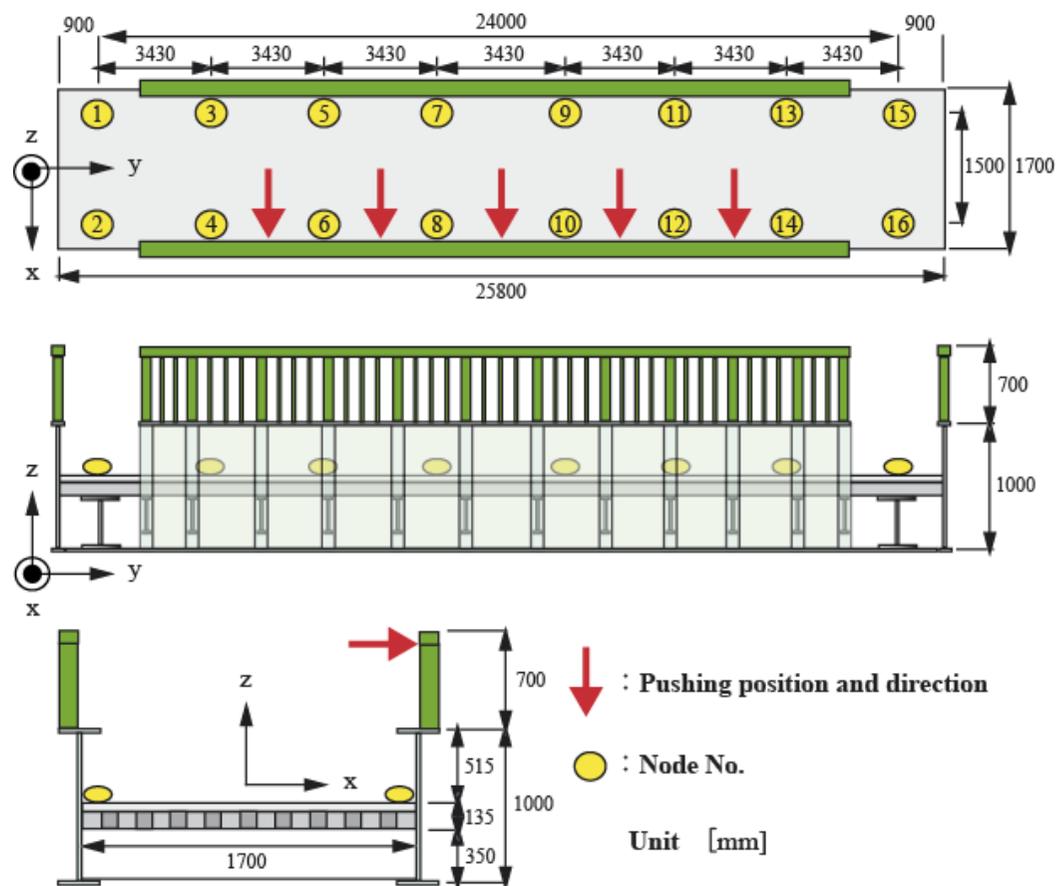
狭帯域のバンドパスフィルタを作用して、再び3次元可視化 (24.07Hz - 25.43Hz)

卓越周波数の把握

3D visualization

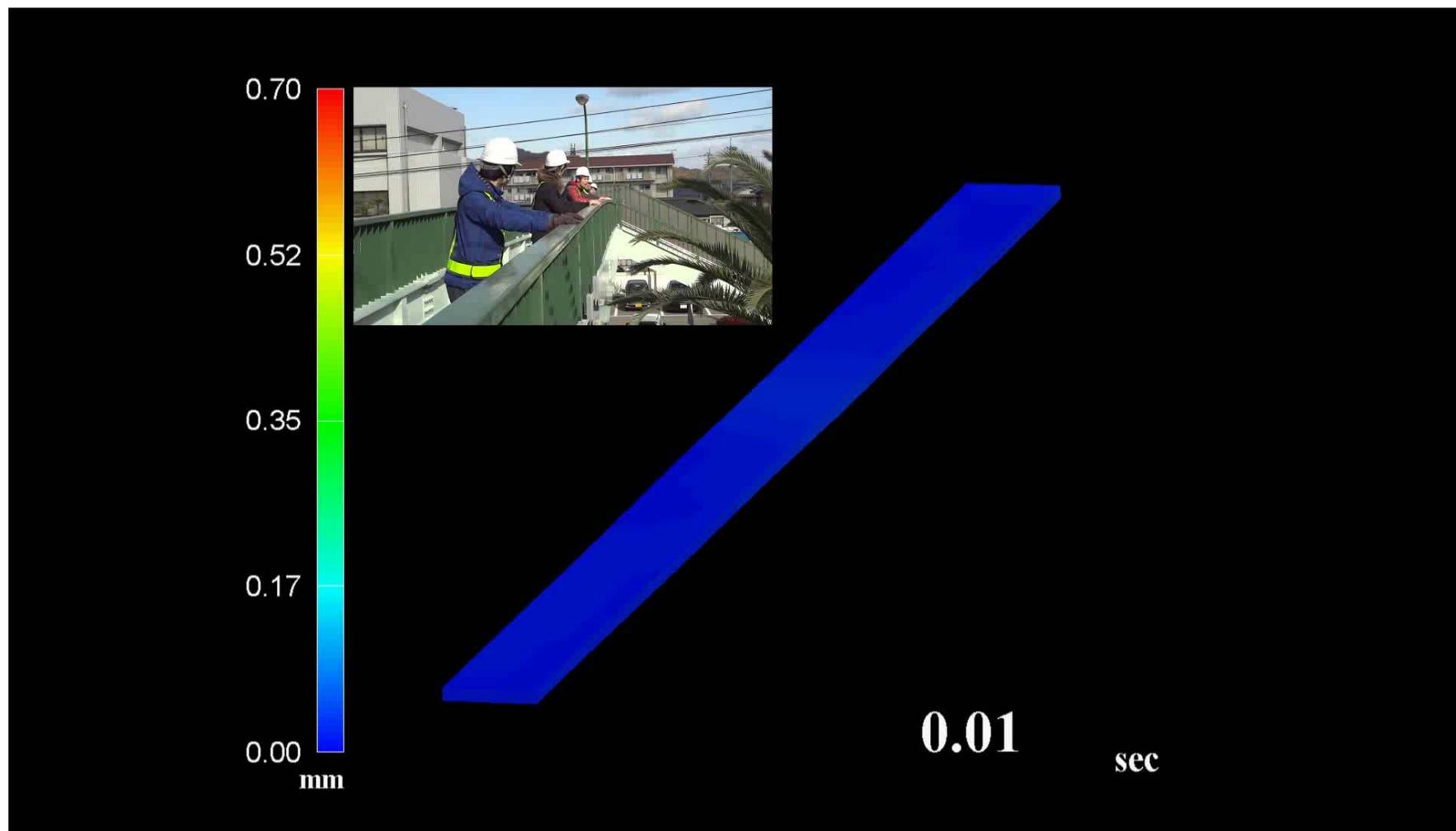


これは3次の曲げモードであることが分かる (2次では無い)



## 実験条件

加振：高覧を2Hzで揺する  
 サンプリングレート：1.0kHz  
 バンドパスフィルタ(2 to 400Hz)  
 データ計測時間：50 sec.

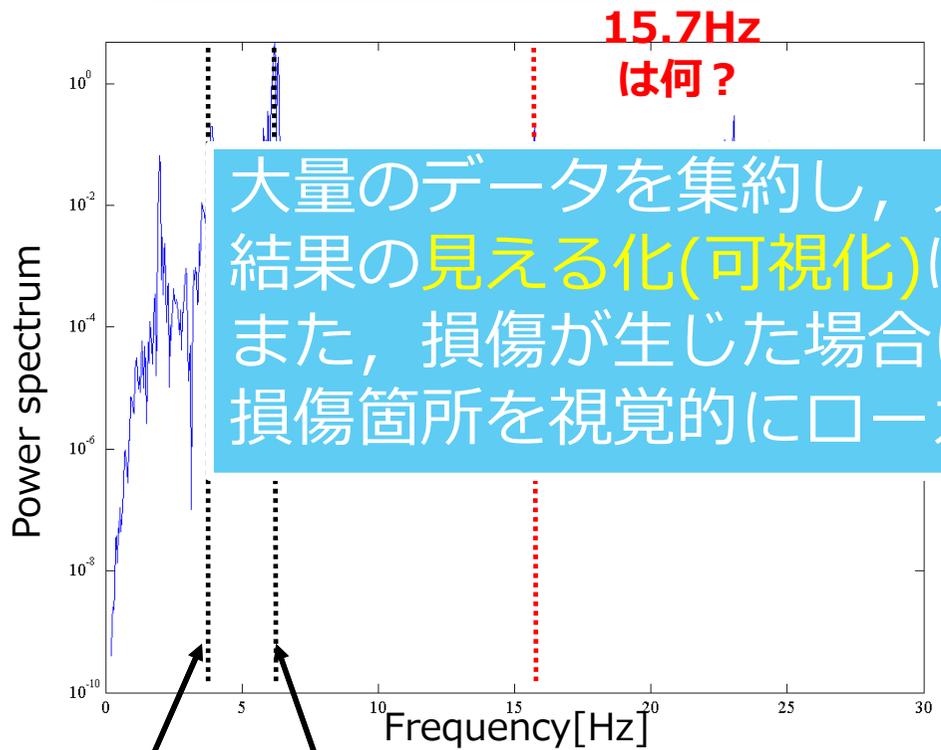


高覧の片側を2Hzで揺する

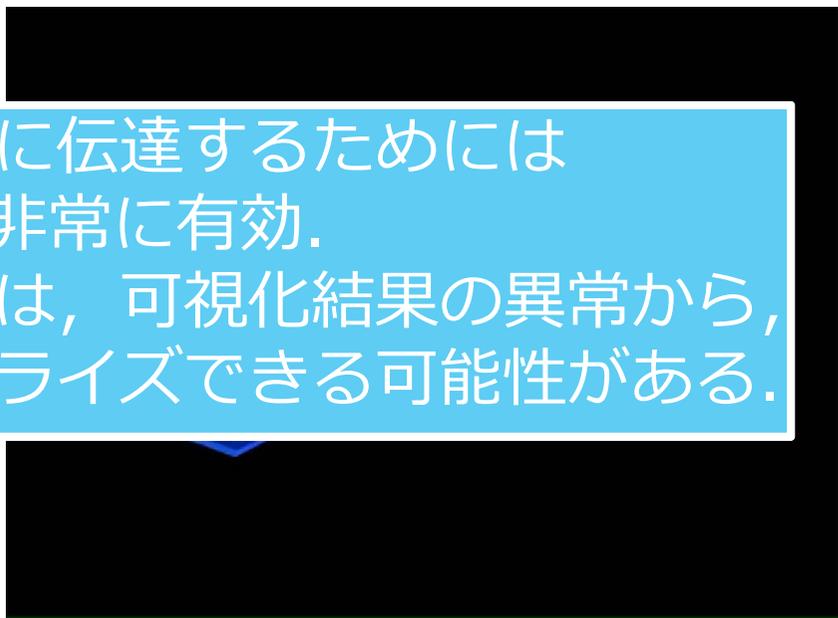


卓越周波数の把握

3D visualization



大量のデータを集約し、人に伝達するためには結果の見える化(可視化)は非常に有効。また、損傷が生じた場合には、可視化結果の異常から、損傷箇所を視覚的にローカライズできる可能性がある。



曲げ  
1次モード

ねじり  
1次モード

これは2次のねじりモードであることが分かる

# IT基盤の恩恵の享受

## 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点

**jh130013-NA08**

**構造物の劣化のモデル化とメンテナンス技術の向上に資する大規模数値解析**



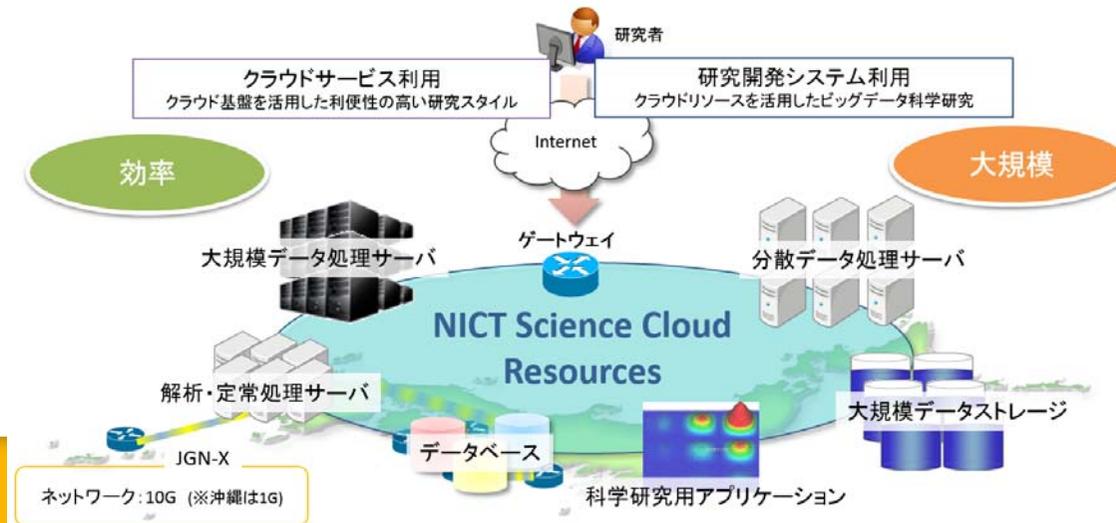
研究拠点：京都大学

研究体制：京都大（牛島，小山田，岩下），中央大（櫻山），東北大（京谷，寺田，加藤，高瀬），  
岐阜大（永井），九州大（浅井），茨城大（車谷），産総研（松本），水資源機構（藤岡），愛媛大（中畑），  
敬称略

京都大学スパコン 32ノード(1024コア 通常期)，128ノード(4096コア 集中期) の利用  
グランドチャレンジ的な問題について大規模計算を実施. 研究者の計算技術の向上と情報交換.

## 情報通信研究機構 サイエンスクラウド

研究者が個別の研究環境を用意することなく，低コストで科学研究環境（データ処理計算機やデータストレージ）を利用できる．ネットワーク管理，システム（サーバ・ストレージ・可視化環境）管理などから解放されて，研究に専念できる．



## 4. 将来予測と研究展望

### ▶ 検査装置はコンパクト化，解析はクラウドで

今後，中小規模のインフラは，スケジュールに基づいて，オンサイト検査が相変わらず実施されるはず．現場における高速・高精度計算ツールの利用は拡大．

ただ，検査装置自体は必要最低限の機能（センサ部やデータ転送部）を残して，簡素化される．あとはクラウドコンピュータ上でデータ処理・解析を行い，検査現場にはアウトプットが表示される時代が来ることを想定している．

### ▶ 検査員の技量によらない信頼性のある評価システムの開発

検査員の技量（個人知）よりも，インテグレートされたシステムとしての評価手法の信頼性（集合知）がキーとなる．逆解析の要素技術自体はもちろん重要．さらに，大量データの集約，高速処理，さらにはアウトプットをクラウドから現場に転送し検査員が状況判断するための情報伝達技術（可視化など）がキー．

### ▶ 技術者教育

だからといって個人技量は要らないわけではなく，クラウドが出力した検査結果に対して，思考（解釈）できるか，それらを活用できるか，ある種の想像力やデザイン能力も必要だと考える．そのためには，土木工学の根幹をなす学問（構造力学，水理学，土質力学，etc）の習得だけでなく，IT技術を活用するための次世代の教育カリキュラムが不可避だと考える．