

データサイエンスを利用した 非破壊検査の未来と課題

～解析と計測の融合～

中畑和之



非破壊検査は、多岐の分野・学問に渡る。海底から宇宙まで。機械、電気電子、情報、材料、建設、化学等の理工学系の知識・技術を駆使し、標準化法制度や、組織体制、人材などに支えられて実施される。

多種多様な材料、環境、使用条件に対応するために、研究・技術開発がいまも精力的になされている。



日本非破壊検査協会が発行する学術刊行物「非破壊検査」は現在66巻目(初巻は1952年)



現在の非破壊検査の縮図



情報爆発時代における非破壊検査

非破壊検査の高度化

物理・化学
モデリング
(最適化, 逆解析,
数値計算)

HPC(大規模シミュレーション)
ICT(情報通信, クラウド利用)
センシング技術(ロボティクス)

現在?

ハードウェア制御(LSI開発)

ソフトウェア制御(デジタル化, 波形処理)

IoT, CPS

データ指向型科学
(ビッグデータ処理, データ同化,
ナレッジマネジメント)

現場への適用度

非破壊検査のイノベーション

1. 物理・化学モデリング（逆解析，最適化，シミュレーション等）
非破壊検査の理論・解析技術が多く提案されてきた。
しかし，実際の現場において，これらのアプローチが十分に利活用されているとは言えない。
2. モデリング，計測データ，思考（判定・解釈）を繋げた
メンテナンス技術はまだまだ不十分



イノベーション

物理・化学モデリングと情報化時代のツールの融合によって，
新たな方法論が創出でき，評価精度は飛躍的に伸びることが
期待される。

0. シミュレーションの現状
1. データ同化
2. 可視化と機械学習
3. 今後の展望

0. シミュレーションの現状

1. データ同化

2. 可視化と機械学習

3. 今後の展望

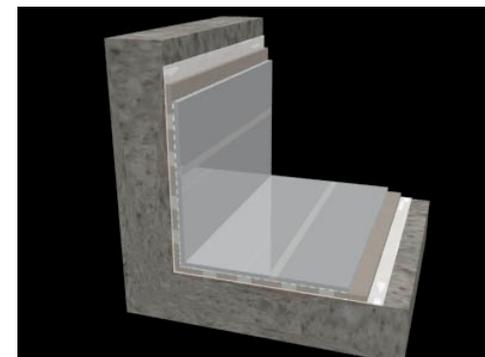
研究背景

計算機・計算手法の高度化



高性能計算 (HPC*)

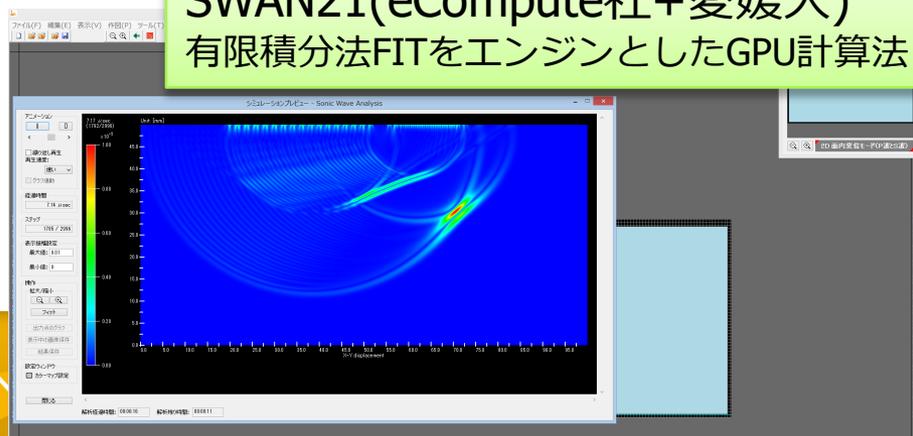
*ハイパフォーマンスコンピューティング



複雑な対象 (非均質・異方性材料) についても、
高精度に波動(超音波・電磁波)伝搬が推定可能な時代に。

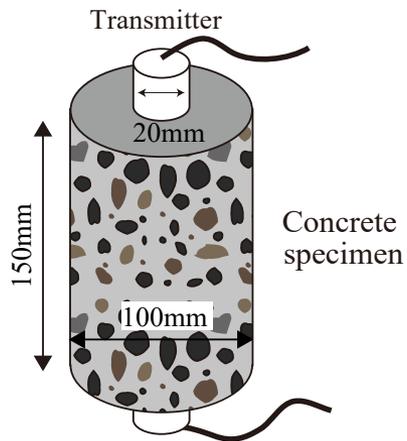
SWAN21(eCompute社+愛媛大)
有限積分法FITをエンジンとしたGPU計算法

しかも、ノートPCで、
かつリアルタイム計算も
可能な時代に！！

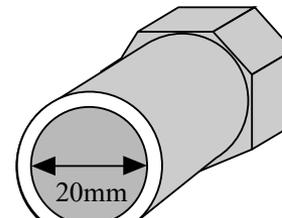


シミュレーションの妥当性 (コンクリート)

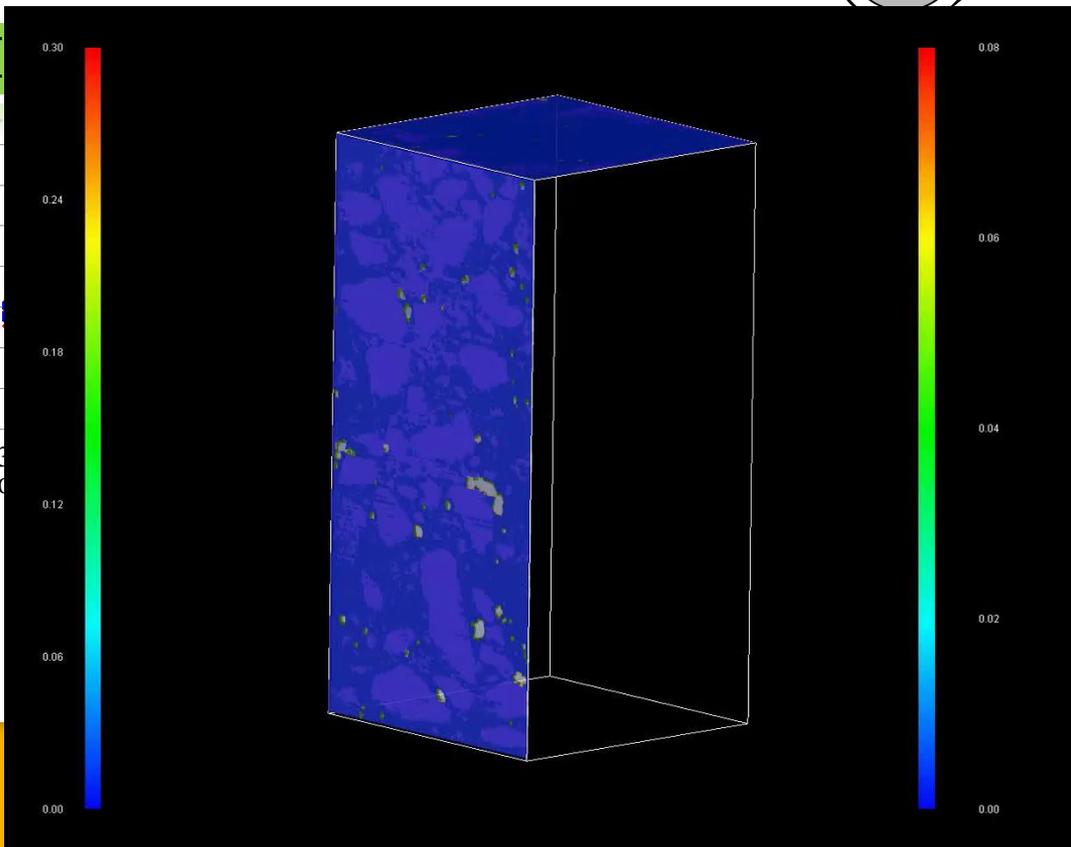
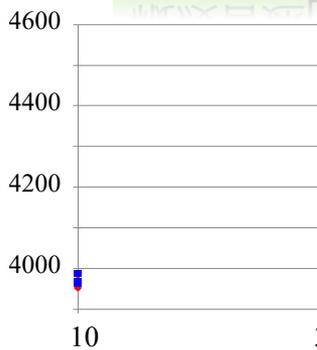
コンクリート供試体
(骨材率 $\phi=10\%$, 30% , 50%)



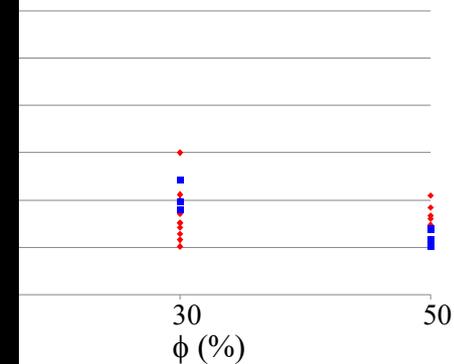
超音波探触子
(400kHz, 広帯域)



縦波音速

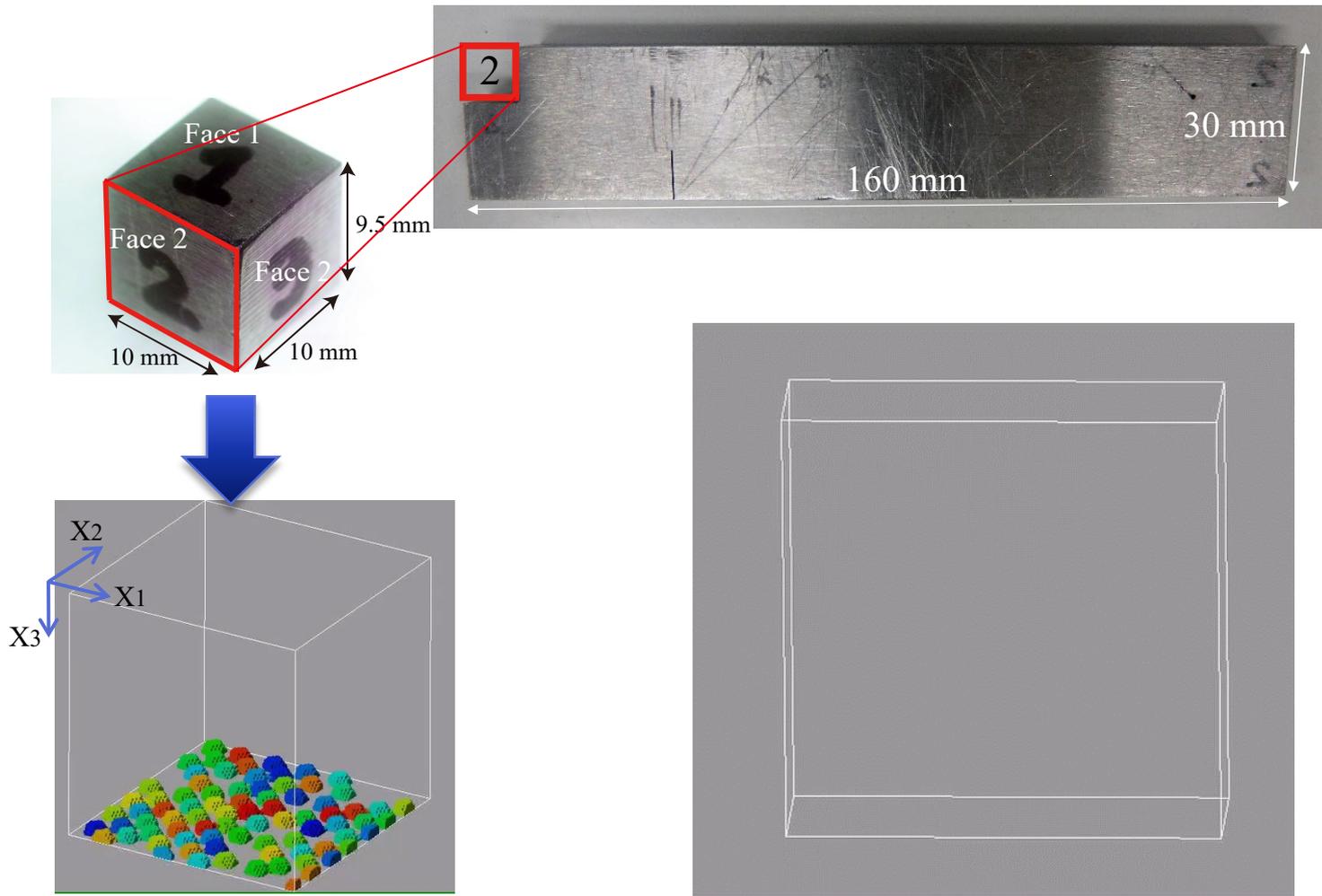


振幅比



ultrasonic wave propagation in
Building Materials, 2014.

多結晶金属

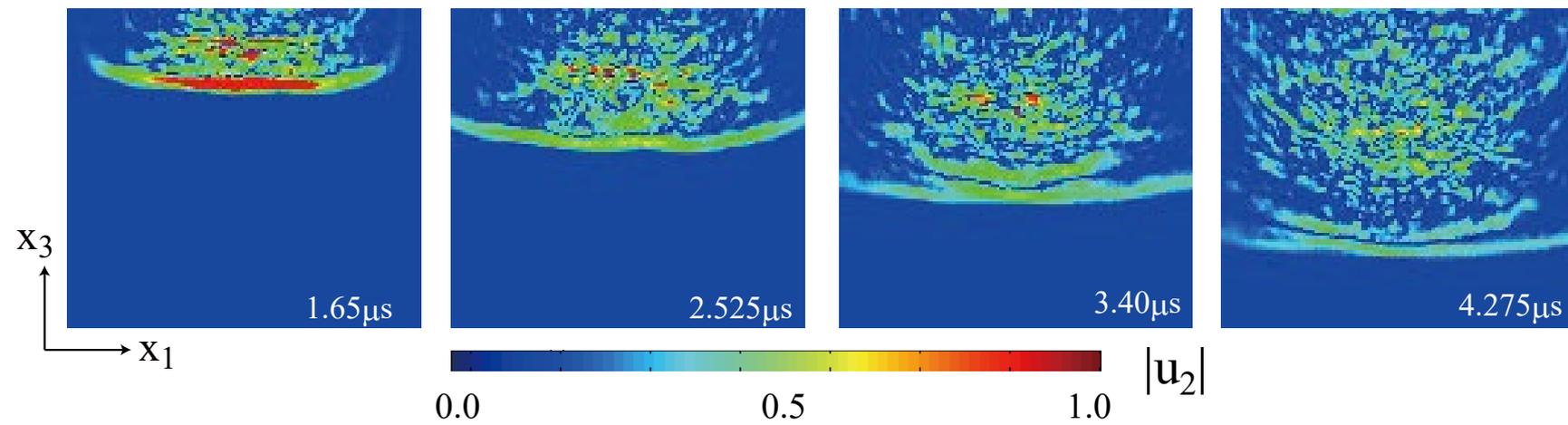
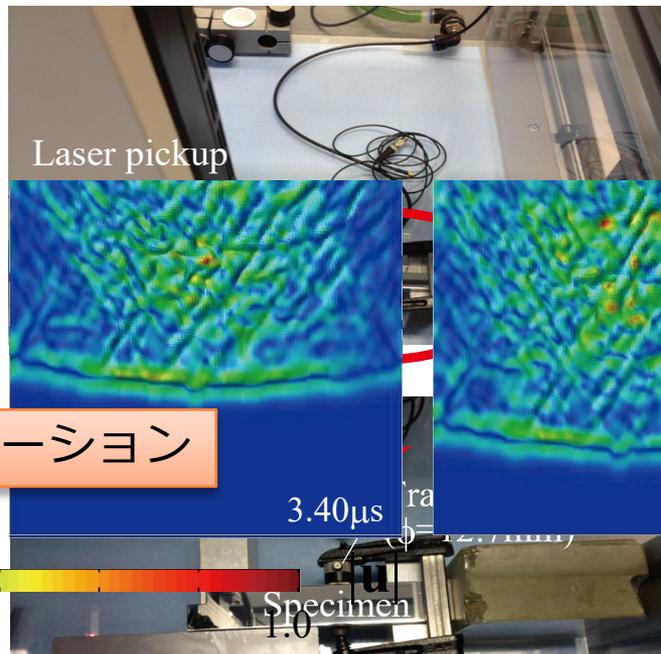
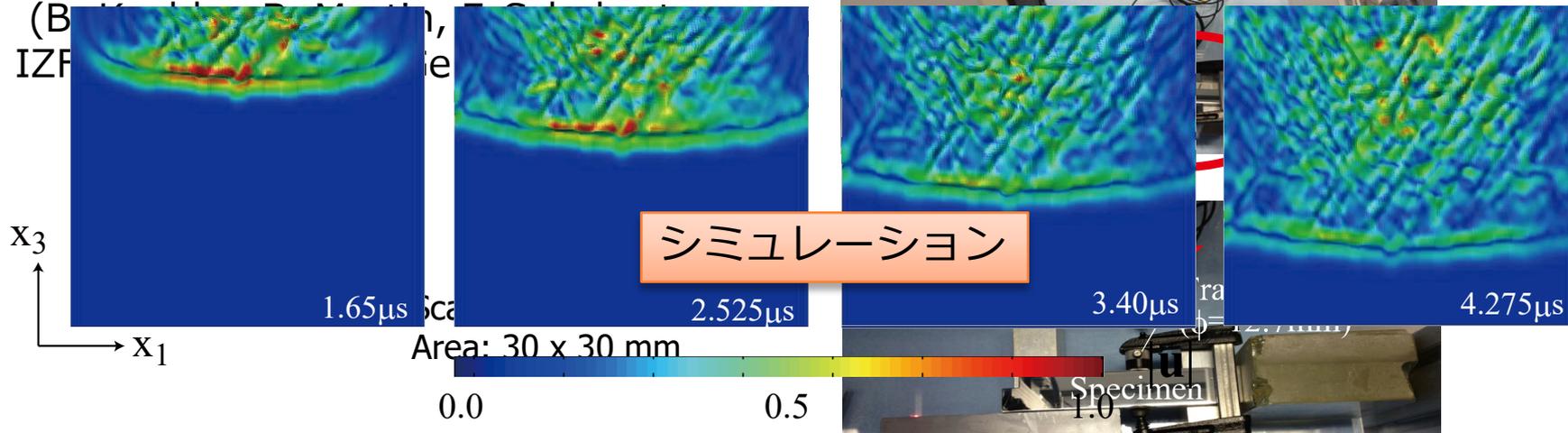


K. Nakahata et.al,

Three dimensional image-based simulation of ultrasonic wave propagation in polycrystalline metal using phase-field modeling, *Ultrasonics*, Vol.67, pp.18-29, 2016.

レーザー超音波可視化実験

(B. M. ...
IZF ...

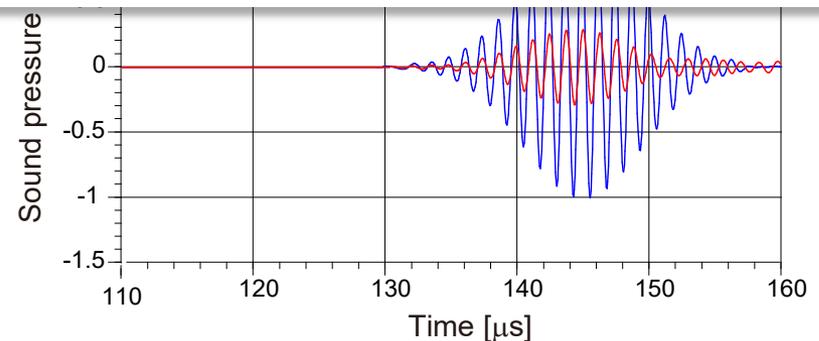
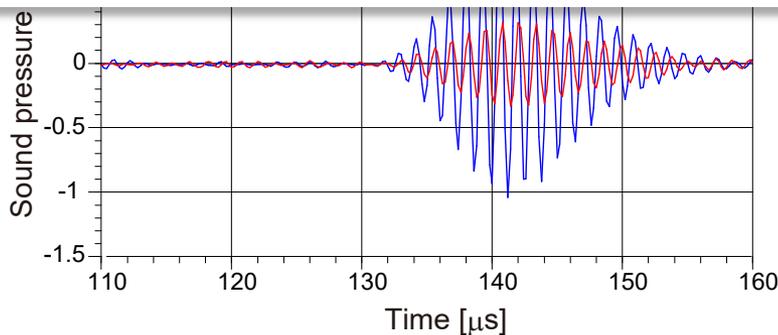




K. Nakahata et al,
"Finite integration technique for coupled acoustic and elastic wave simulation and its application to noncontact ultrasonic testing",
Acoust. Sci. & Tech., 2014.

20mm

シミュレーションの性能(精度と実行速度)が
上がると, その使い方を
考え直さなければならない



実験

シミュレーション

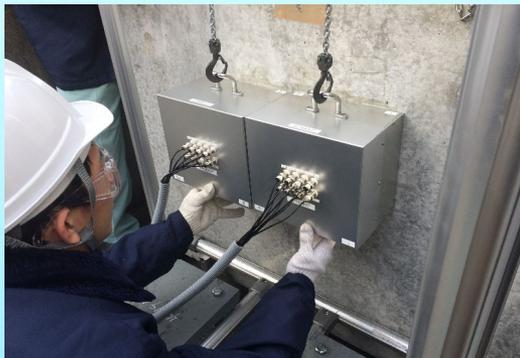
目的：数値シミュレーションの積極的活用

主としてセンサ設計とか，疑似エコーの区別とか，あるいは検査員の教育用途とか，補助的な目的でシミュレーションを使っている現状から脱却！

きずの検出や，損傷度の評価に
解析(シミュレーション)を活用できないか？



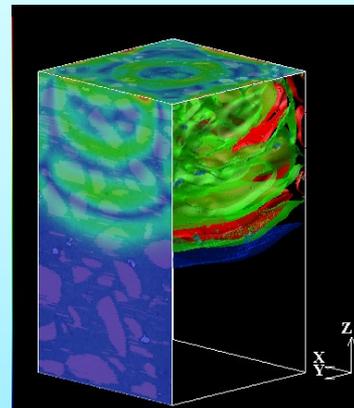
データ同化や機械学習（これから）で解析を適用する



実測値（現実データ）



どう繋げる？



数値モデル（仮想データ）

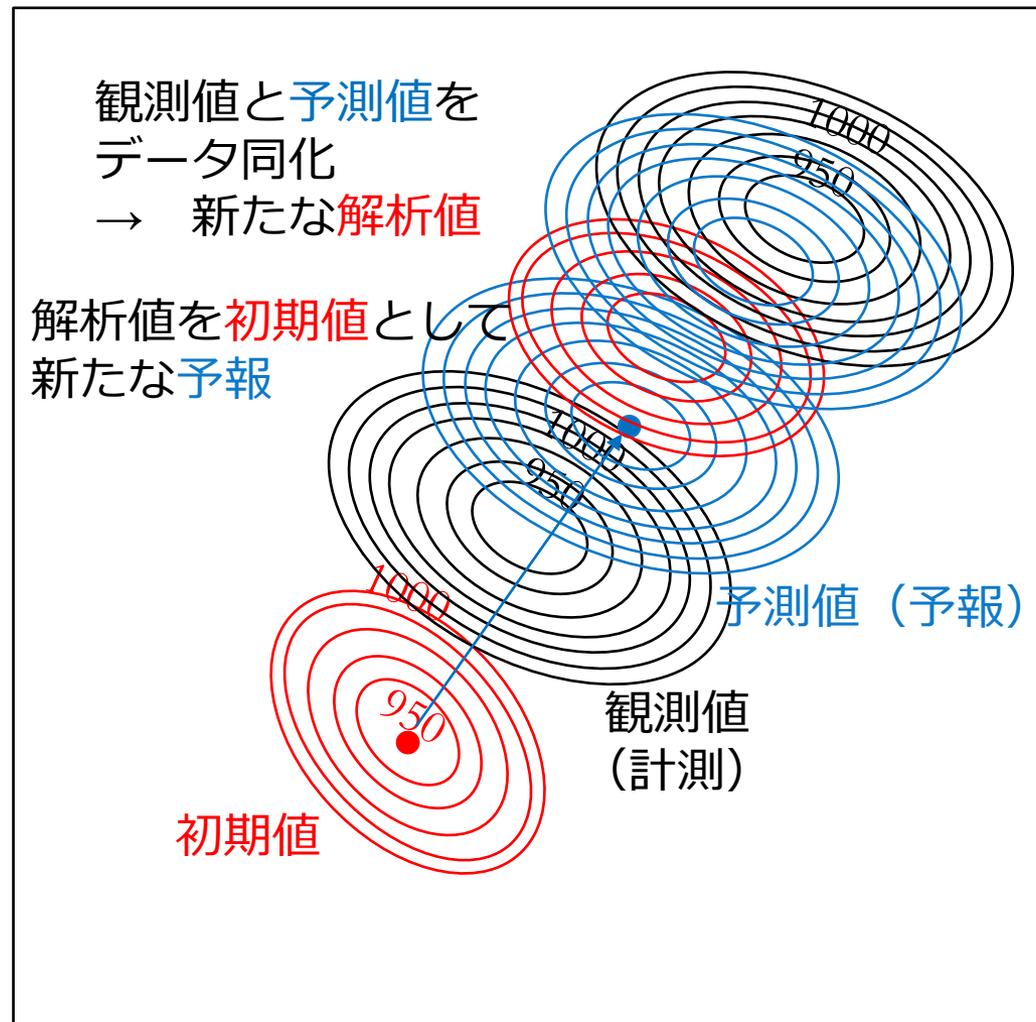
0. シミュレーションの現状

1. データ同化

2. 可視化と機械学習

3. 今後の展望

データ同化とは、**シミュレーションの精度を高める統計学的手法の1つ**。
簡単に言えば、数値モデルに実際の観測値を入力してより現実に近い結果
が出るようにすることを指す。気象（天気予測）の分野で実用化。



粒子フィルタ

未知量(状態ベクトル)の確率分布をモンテカルロ近似し, その実現値を粒子とする.
粒子の**予測**・**修正**を繰り返すステップを更新して未知量を求めるデータ同化手法.

予測 時刻 t で求めたい N 個の**状態ベクトル** $\mathbf{s}_t = \{s^{(1)}, s^{(2)}, \dots, s^{(N)}\}$
(形状, 材料定数等)

$$\mathbf{s}_t^{(i)} = f(\mathbf{s}_{t-1}^{(i)}, \mathbf{v}_t), \quad \mathbf{v}_t \sim N(\mathbf{0}, \sigma^2) \quad \mathbf{v}_t : \text{システムノイズ}$$

修正

観測できるデータを **観測ベクトル** $\mathbf{y}_t = \{y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(M)}\}$

$$\mathbf{y}_t = h(\mathbf{s}_t, \boldsymbol{\omega}_t), \quad \boldsymbol{\omega}_t \sim N(\mathbf{0}, \sigma^2) \quad \boldsymbol{\omega}_t : \text{観測ノイズ}$$

求めたい未知量は**直接測れないもの**. 観測データに潜む**状態量**を同定する.
未知数と観測数は異なっても良い.

不確かさ (ノイズ) を確率論の枠組みで考慮しながら, 最適解を求める

粒子フィルタのフロー

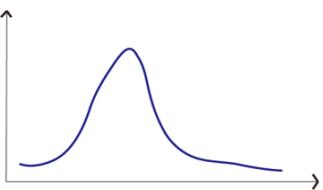
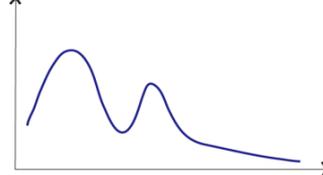
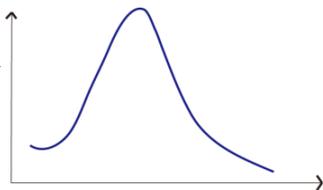
一期先予測

1. 予測粒子
(状態量)の生成

$$s_t = s_{t-1} + v_t$$

ランダムに
粒子配置

予測解析

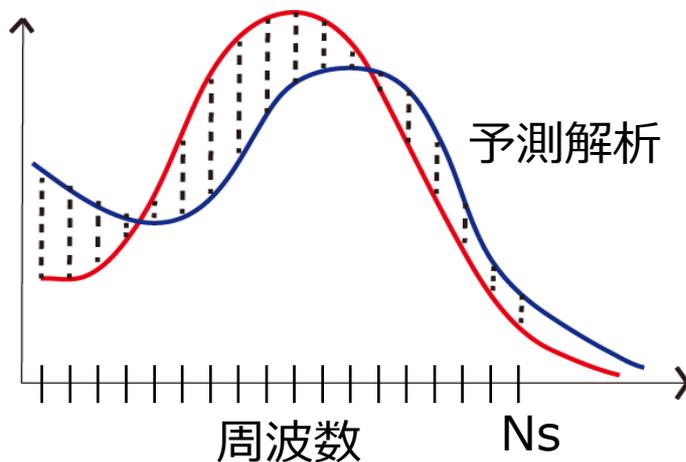


(EFIT or FEM)

— 観測データ

—

フーリエスペクトル



予測解析のフーリエスペクトルと
観測データのフーリエスペクトル
との誤差評価

各粒子の重み

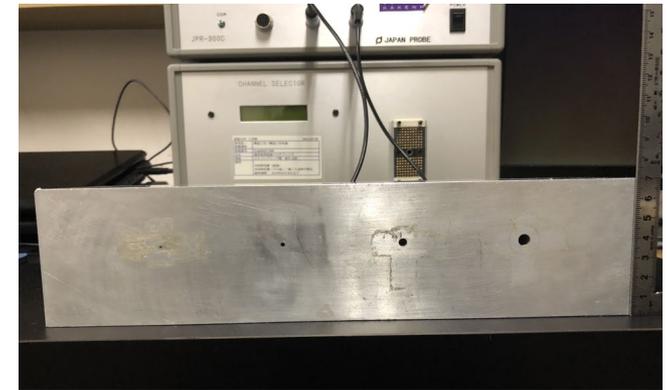
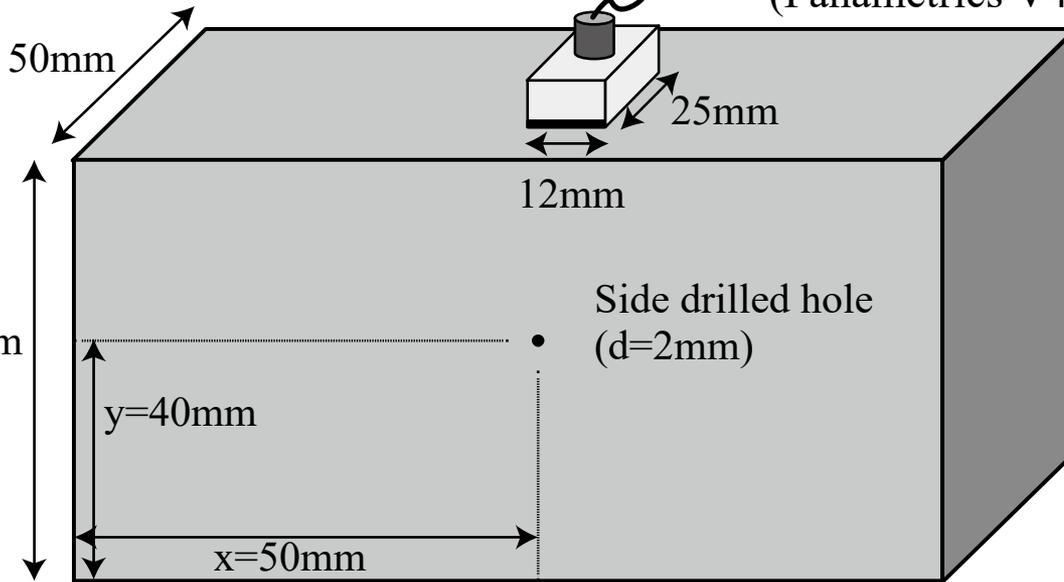
3. 計測値との比較

重みに応じて、
粒子の再配置。
さらにノイズを加えて
次のステップへ。

滅
滅
滅

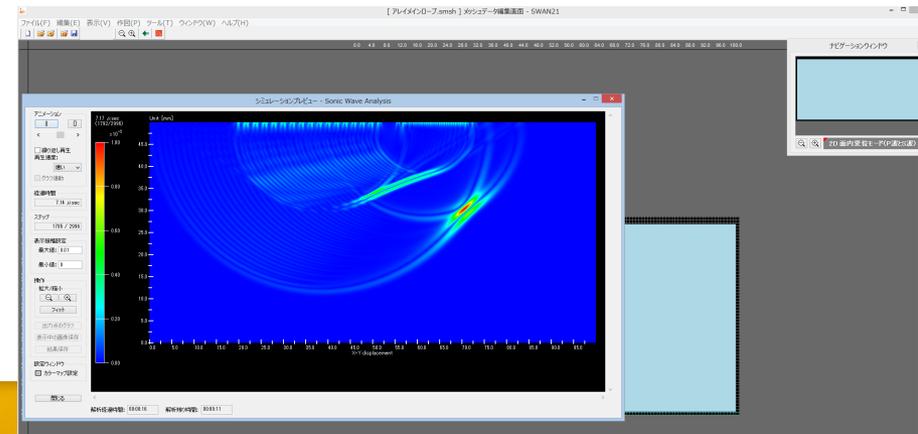
手始めに、欠陥の大きさ（直径）の推定にトライ

Transducer
(Panametrics V405)

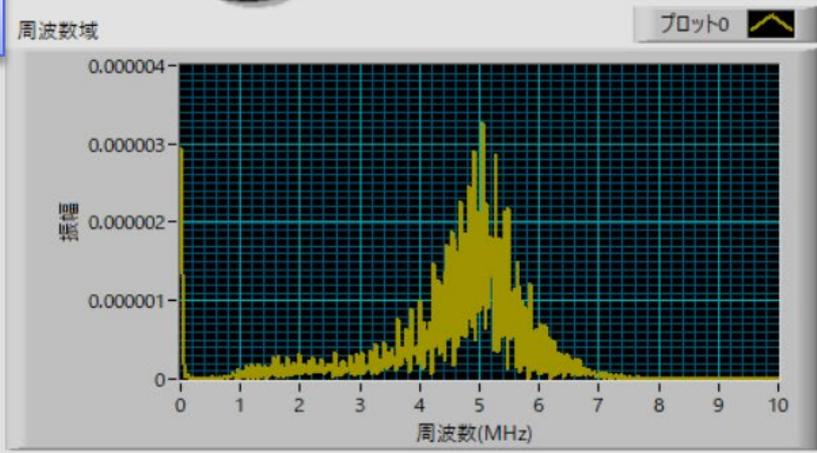
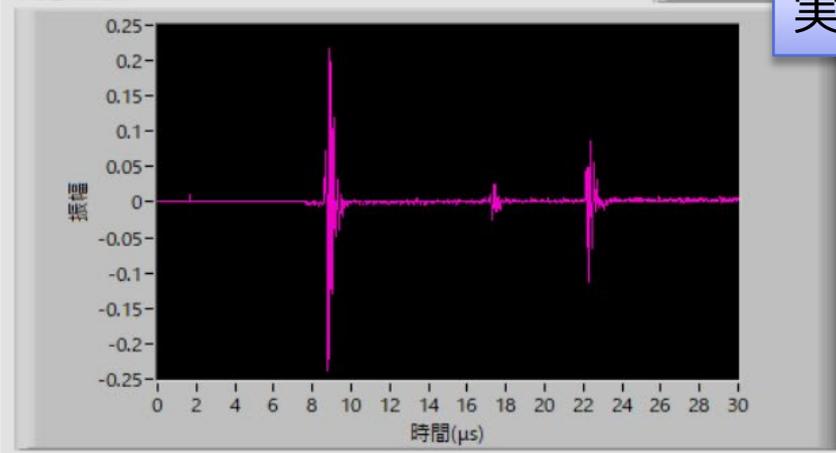


Aluminum ($c_L=6340\text{m/s}$, $c_T=3140\text{m/s}$)

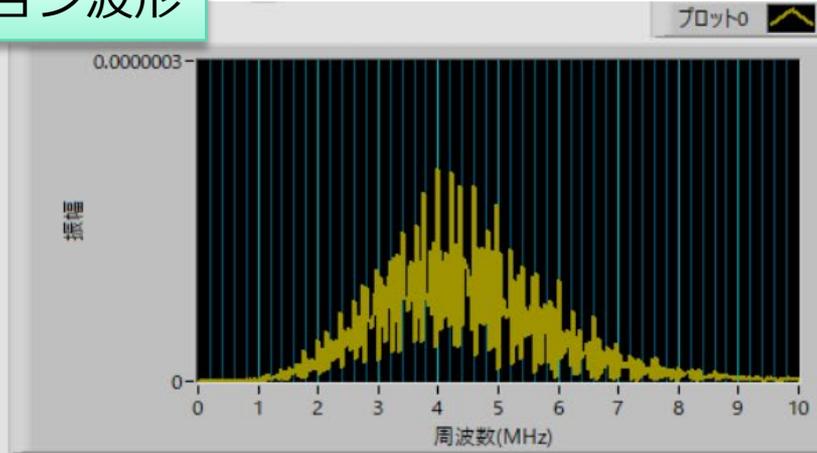
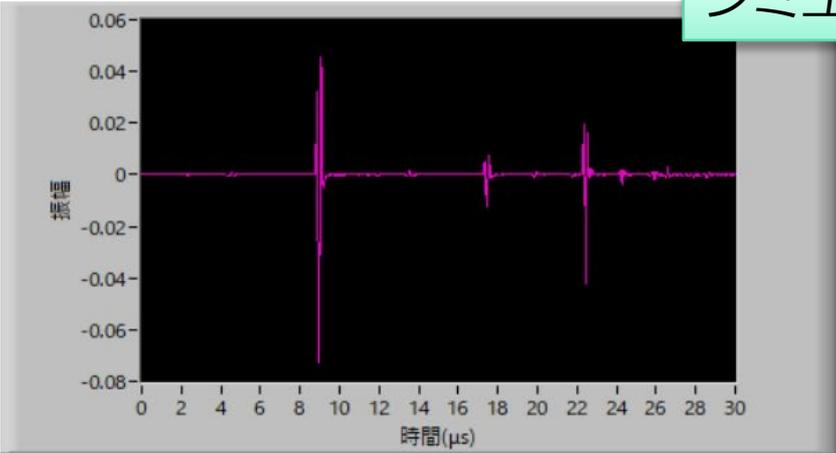
SWAN21
有限積分法FITをベースとした数値解法



実験波形



シミュレーション波形



きずエコー

$$V(\omega) = \beta(\omega)$$

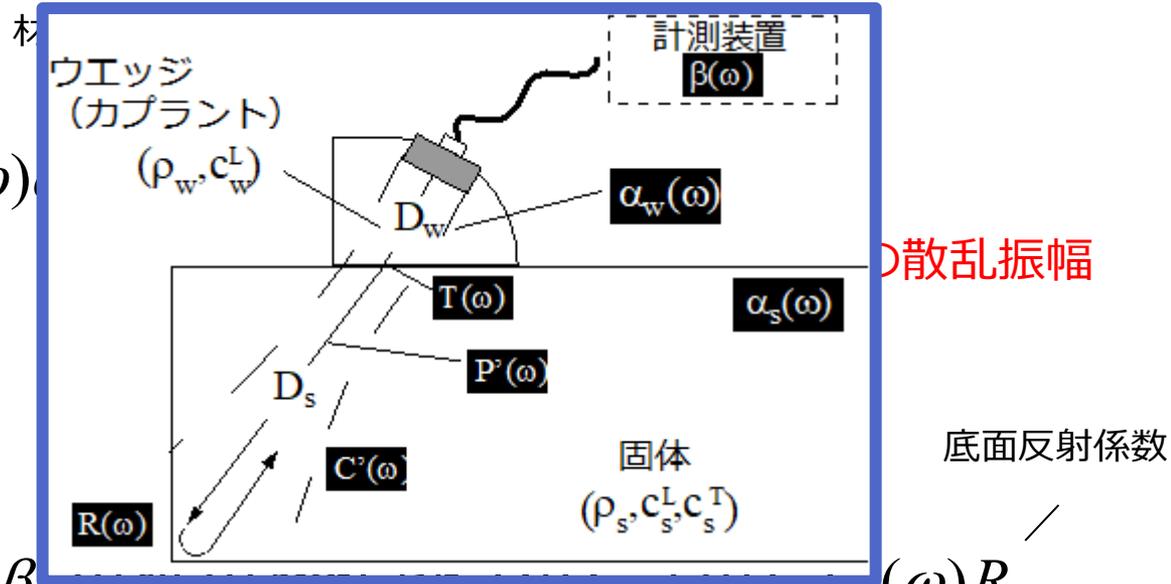
デバイスの
影響関数

底面参照波

$$V^{ref}(\omega) = \beta(\omega) \alpha(\omega) \exp(2ik_L D) (C^*(\omega))^{-1} T(\omega) R$$

$$S(\omega) (\equiv A(\omega) C^2(\omega) P^2(\omega)) = \frac{V(\omega)}{V^{ref}(\omega)} \exp(2ik_L D) (C^*(\omega))^2 R$$

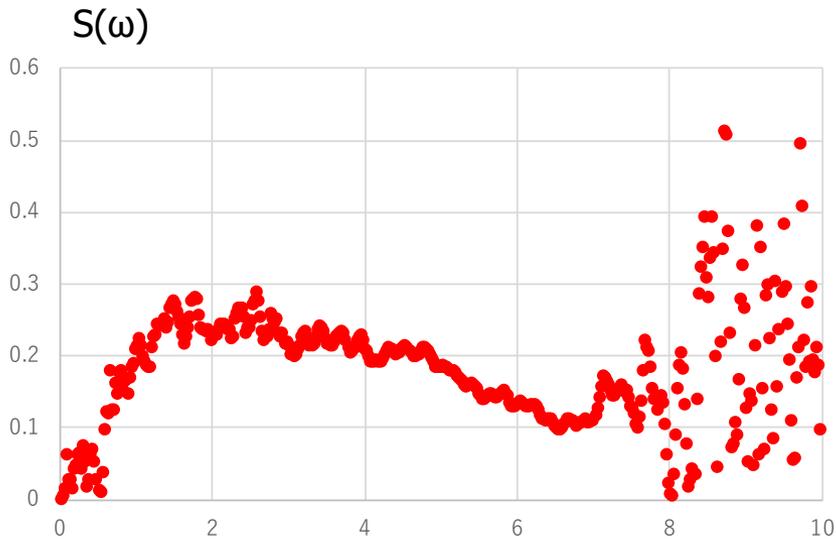
伝搬距離とビームプロファイル
を考慮した散乱振幅



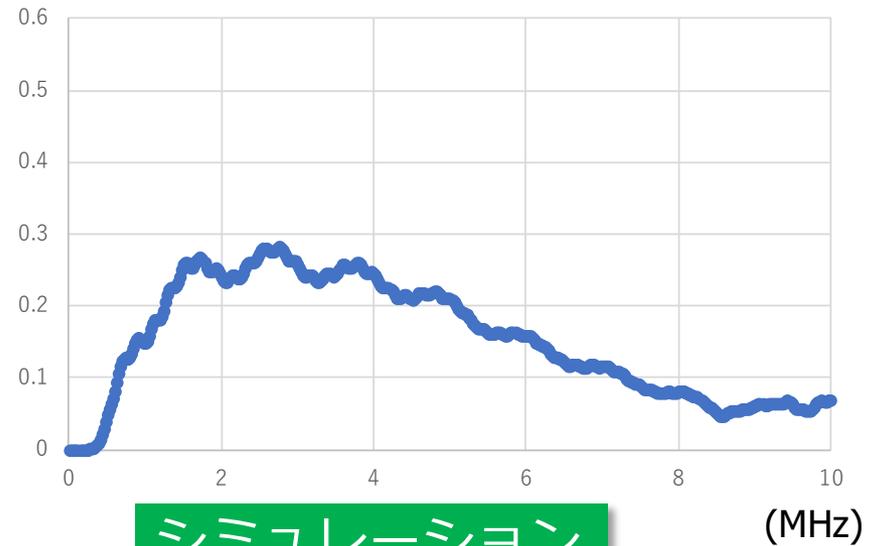
散乱振幅

底面反射係数

SDH($\phi=2\text{mm}$)



実験から求めた
散乱振幅

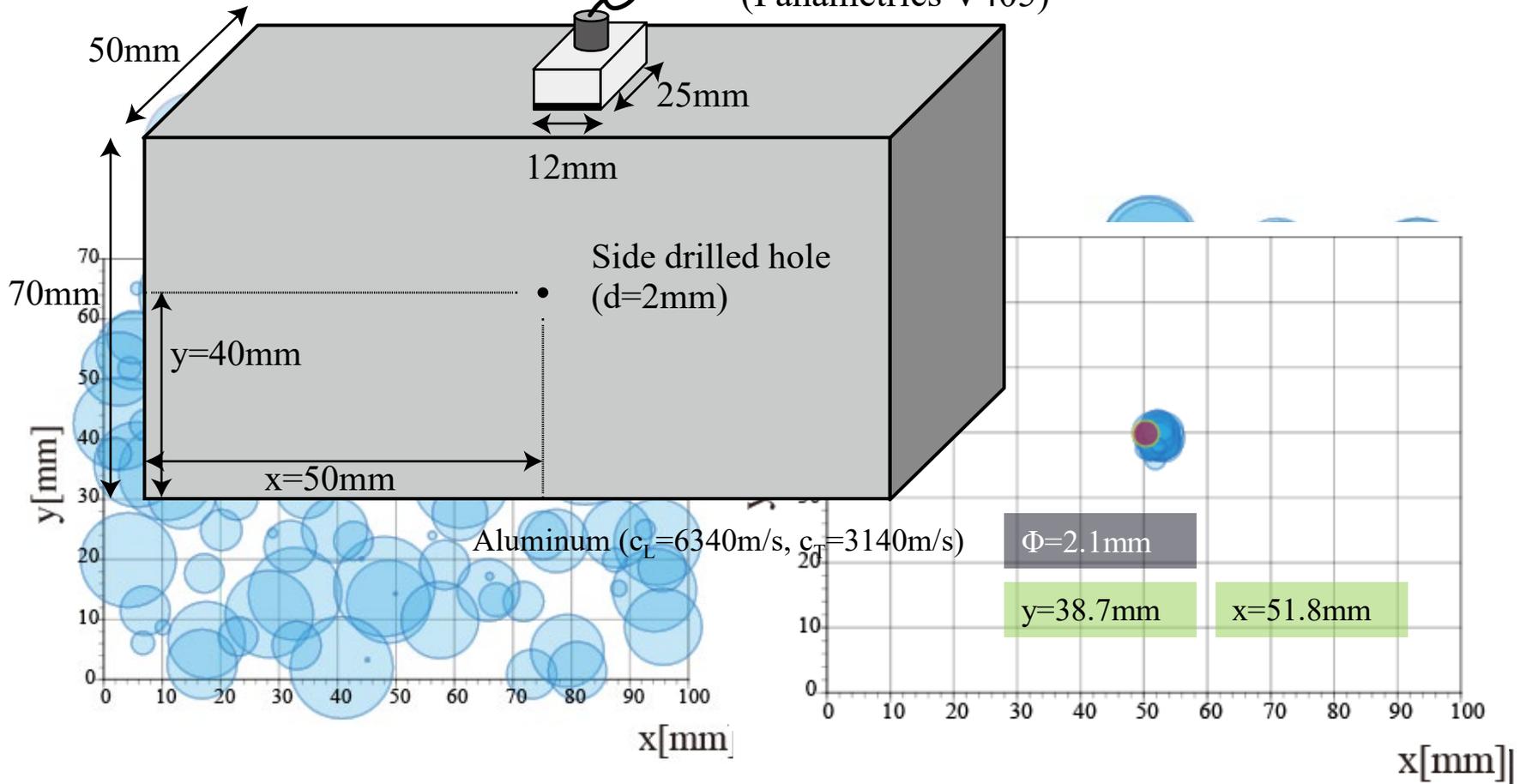


シミュレーション
結果(EFIT)

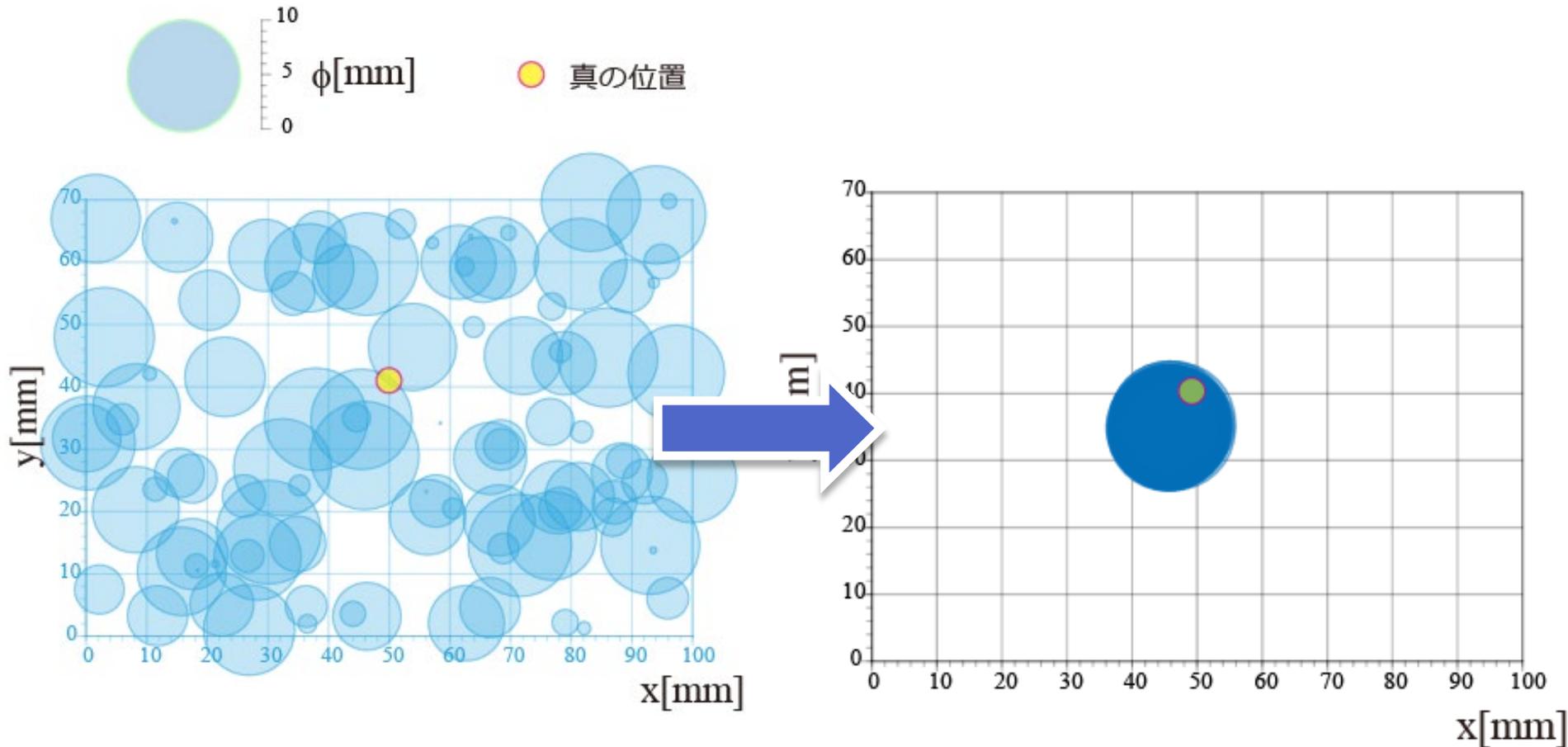
(MHz)

粒子フィルタの実行

100個の粒子（解析パタン）を、
 $x=0.1\sim 100\text{mm}$, $y=0.1\sim 70\text{mm}$, $\phi=0.1\sim 10\text{mm}$ の範囲でランダムに分布
(Panametrics V405)



ちなみに、原波形（きずエコー）で粒子フィルタを実行させた場合



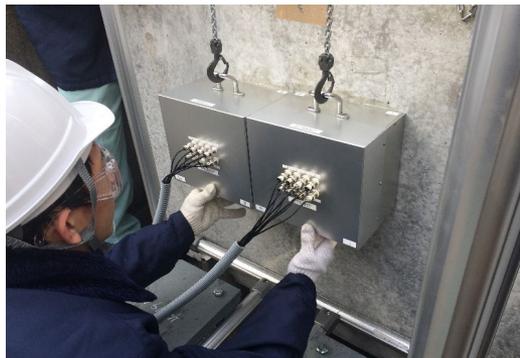
収束するが、欠陥の大きさが誤って推定されてしまう。

データ同化のまとめ

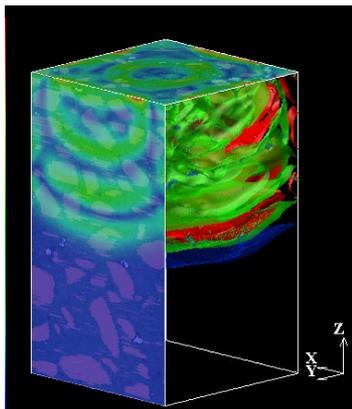
ハイパフォーマンスコンピューティング(HPC)を活用した粒子フィルタの非破壊検査への適用性について検討を行った。ここでは、欠陥の大きさ推定を試みた。

- 散乱振幅は欠陥の形状に固有なものであり、装置系に依存しない。これを活用することで、少ない粒子数で欠陥の大きさ推定が可能となる。→ 人間がある程度、適切な特徴量を指定する。

• 通常非破壊検査は、計測条件を変えながら複数のエコーから欠陥を推定する。しかし、センサの置く場所が限られる場合は計測データの取得数が少ない（スパース）ため、粒子フィルタのように逆に数値シミュレーションの条件を変えながら欠陥を推定する手法は便利である。



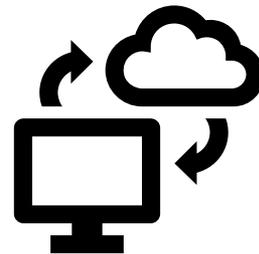
実測値（現実データ）



数値モデル（仮想データ）

スパースデータ

データ同化の精度を
上げるには、特徴指定に
人間が介入する



未知量の
推定

0. シミュレーションの現状

1. データ同化

2. 可視化と機械学習

3. 今後の展望

超音波を使い既存橋梁の健全度を測る

土木構造物は、大規模かつ非均質. しかも専用設計である(単品性)



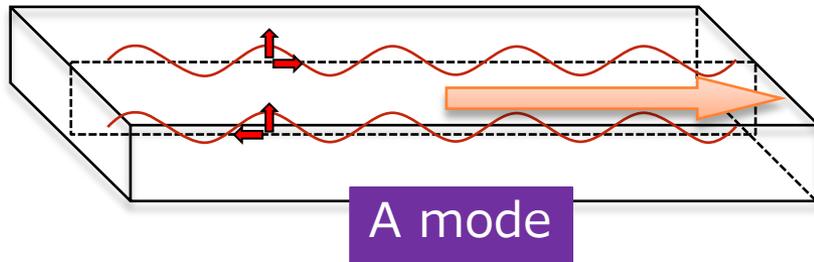
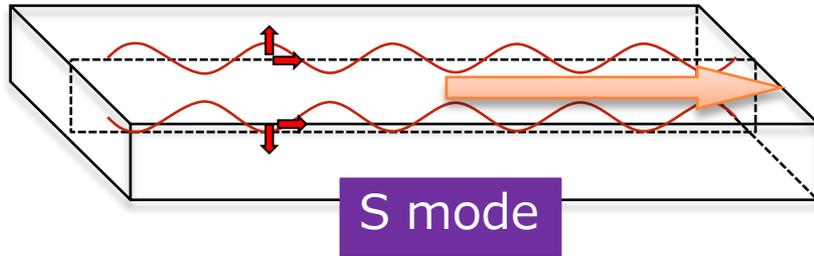
現場で簡便に使えて、安価な健全度評価手法が望まれる。
打音？ 振動？ もっと局所的に評価でき、精度のよい方法はないか？

超音波（この場合、長距離伝搬するガイド波）が候補

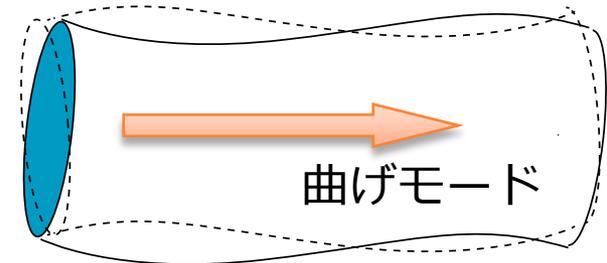
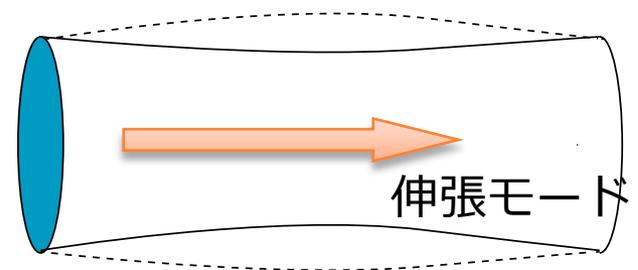
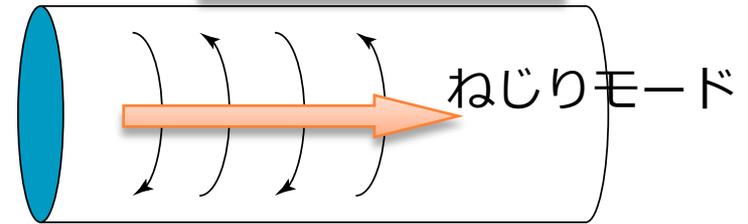


長尺材料中を伝搬するガイド波の利用

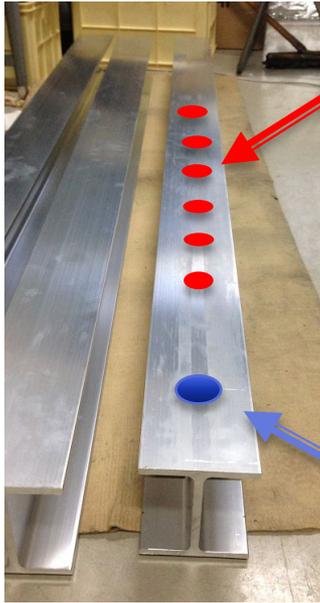
ラム波



Pipe wave



- 波動の分散性 (伝搬速度の周波数依存性).
- モードの重畳性

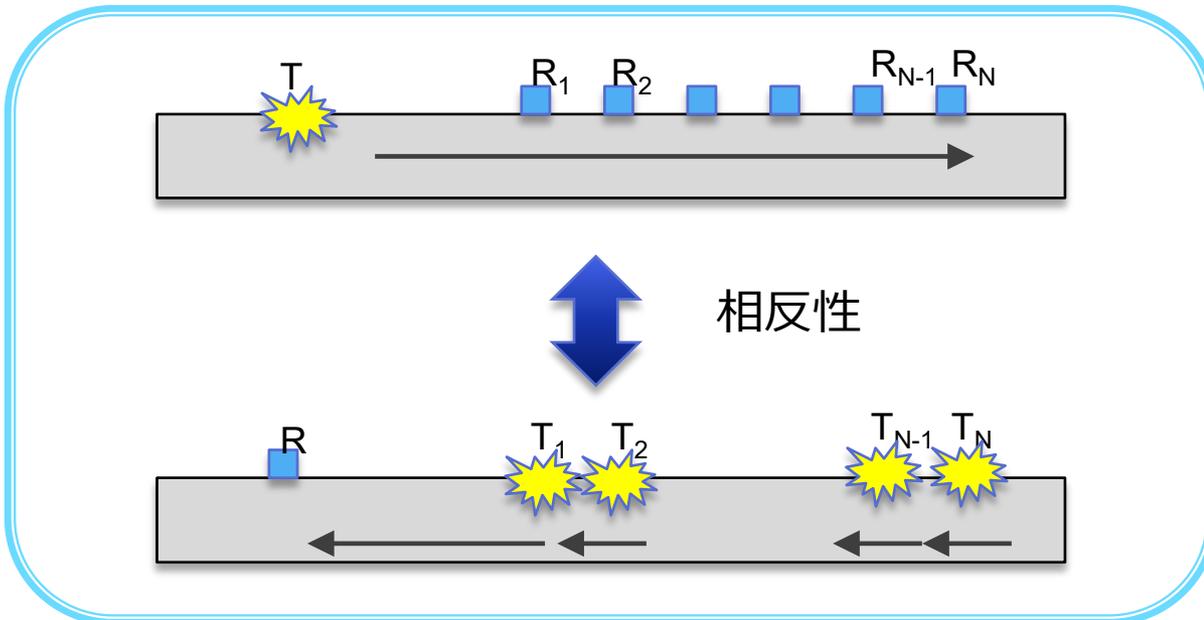


インパクトハンマー

A/D converter,
ナショナルインスツルメンツ,
NI-9234

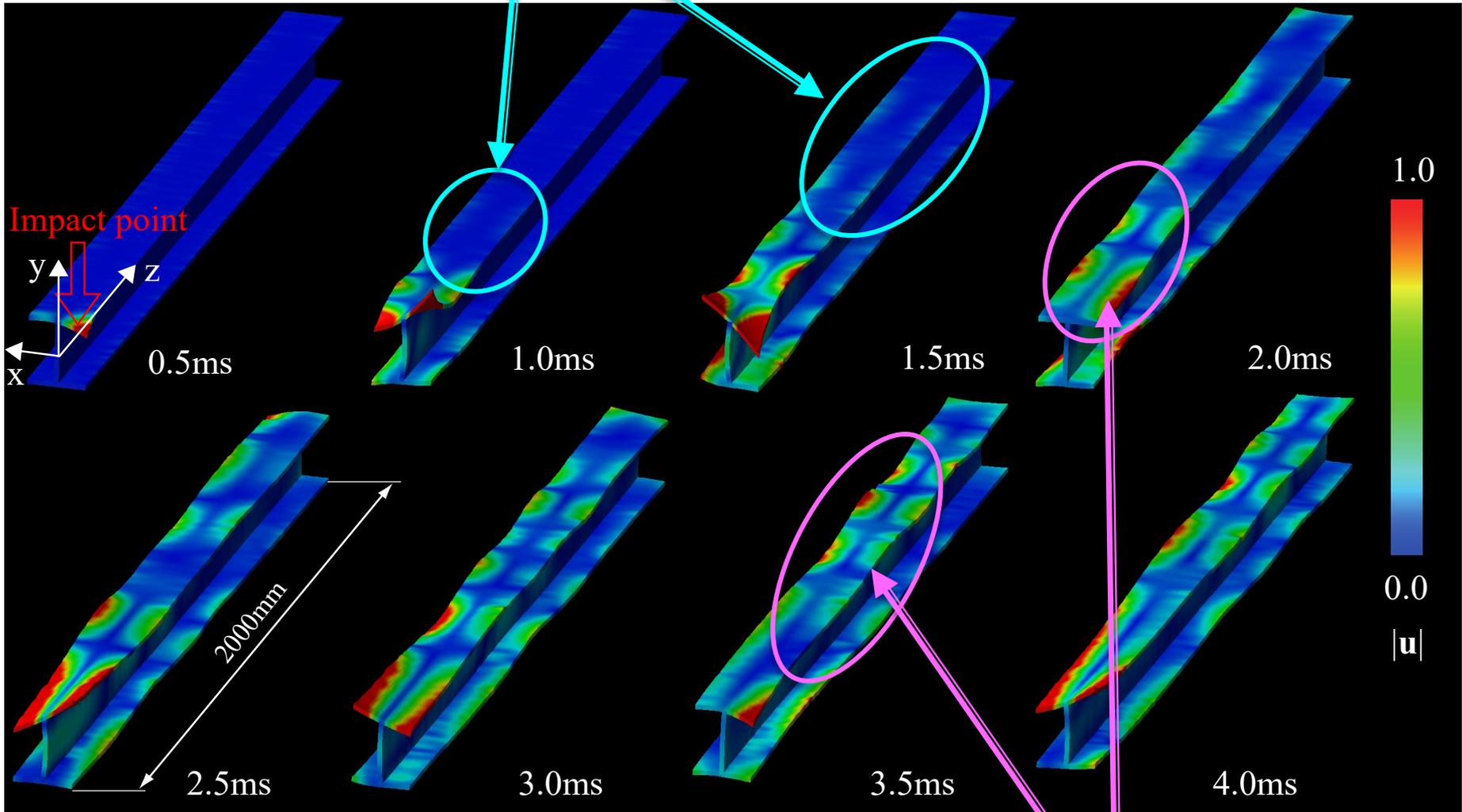


圧電型加速度計,
フジセラミクス, SA11ZSCA
(Sensitivity 1.0 mV/m/s²,
Freq. range 2 to 10kHz)



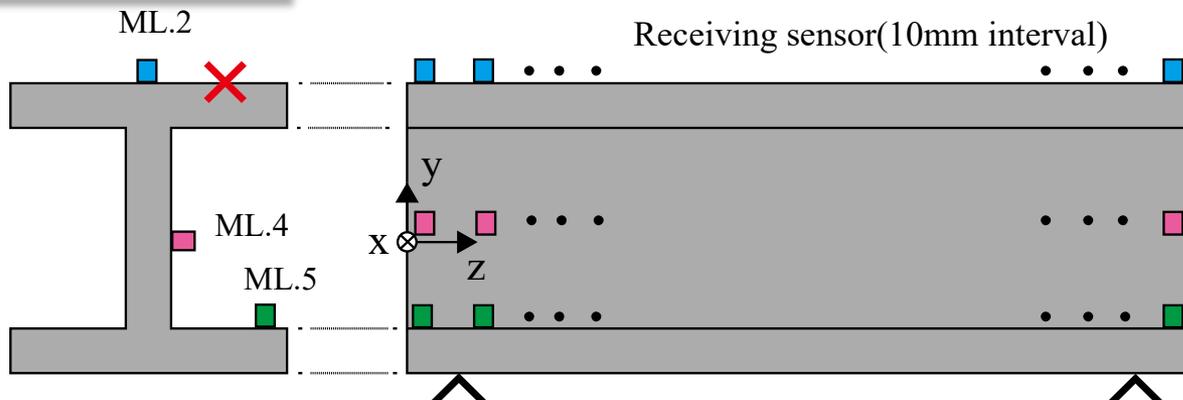
大型構造物には
無線計測が便利

ガイド波



振動

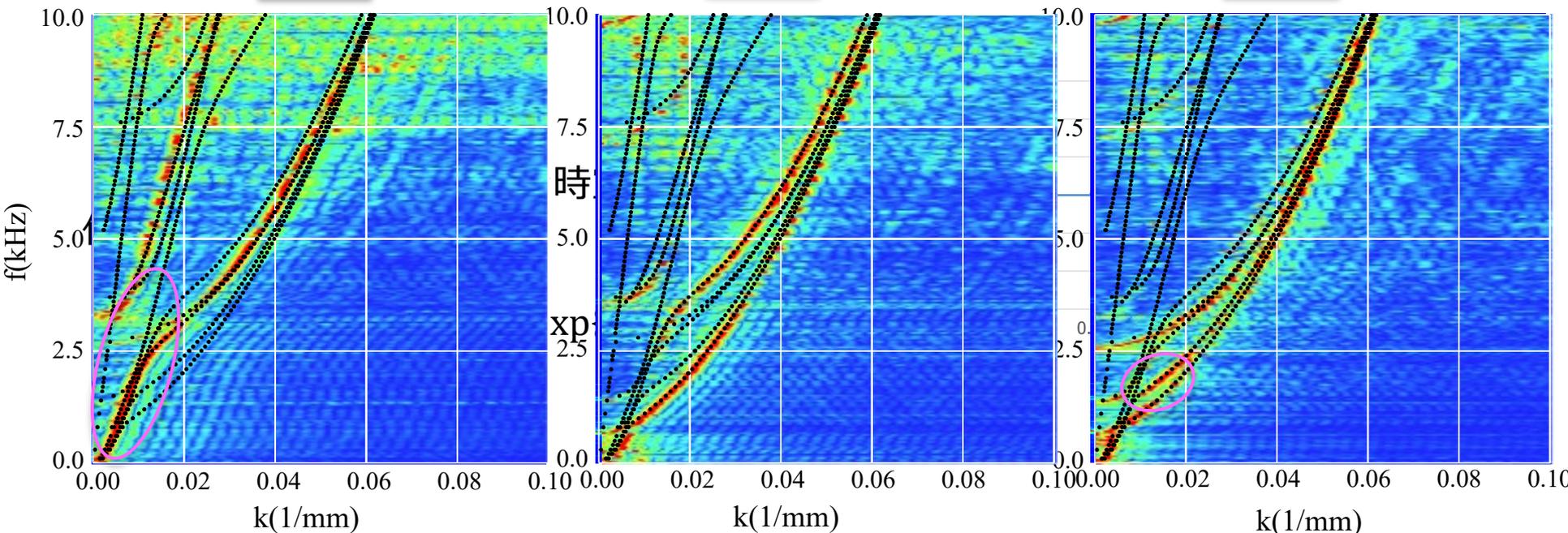
伝搬モードの抽出



Line 2

Line 4

Line 5



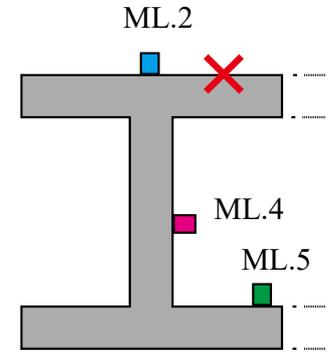
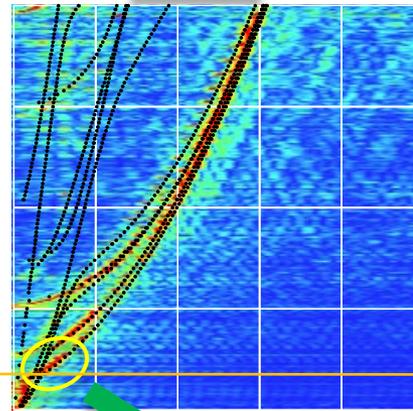
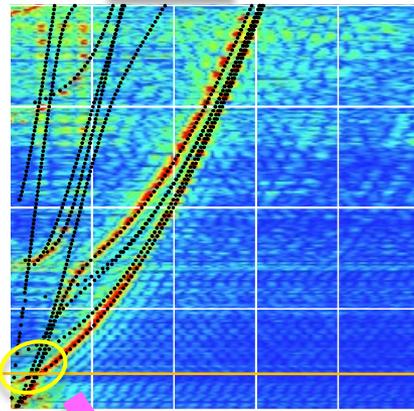
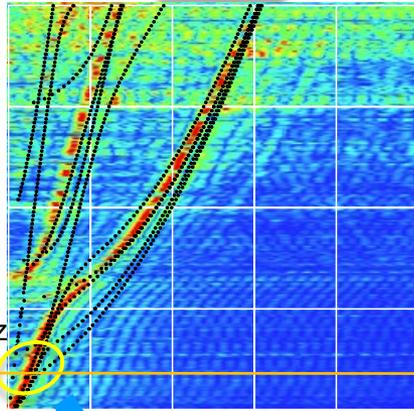
[·] → 半解析的有限要素法(SAFE)

Line 2

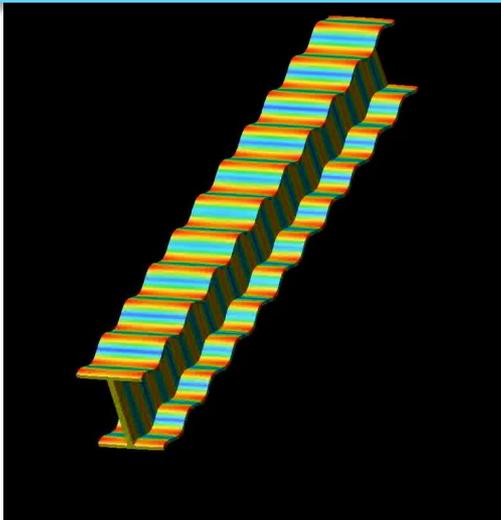
Line 4

Line 5

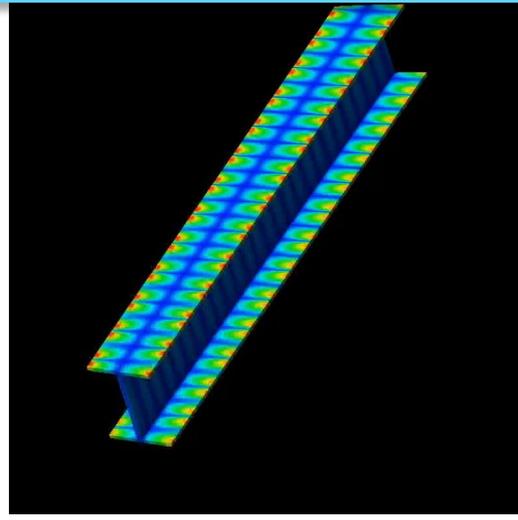
0.75KHz



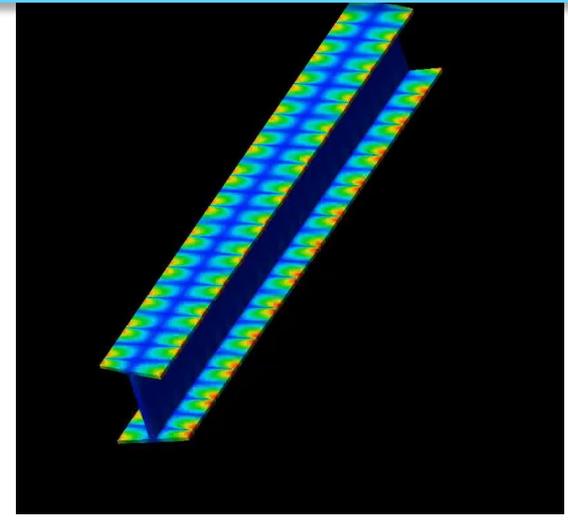
ガイド波の伝搬モードによって偏向方向が異なる。
 また、どこをハンマリングするかによって励起するモードも異なる。



$c_g=1.68\text{km/s}$
 $(c_p=1.06\text{km/s})$

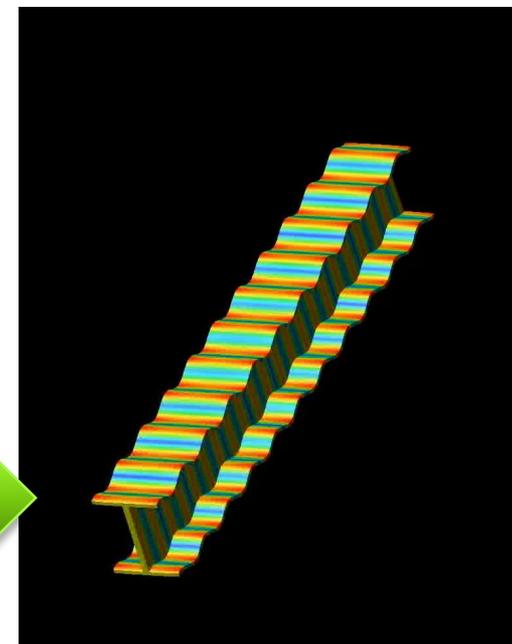
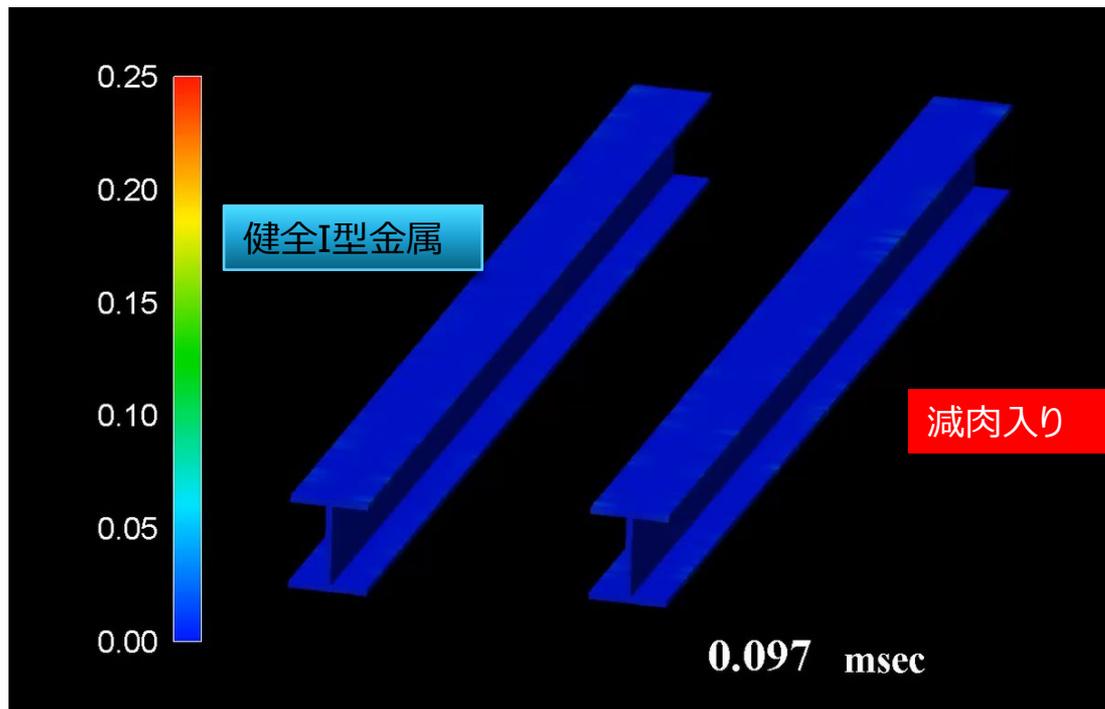
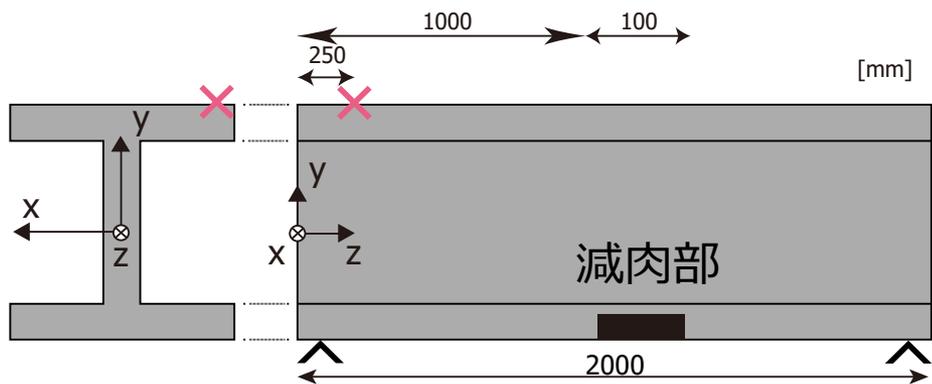


$c_g=0.91\text{km/s}$
 $(c_p=0.75\text{km/s})$



$c_g=1.41\text{km/s}$
 $(c_p=0.82\text{km/s})$

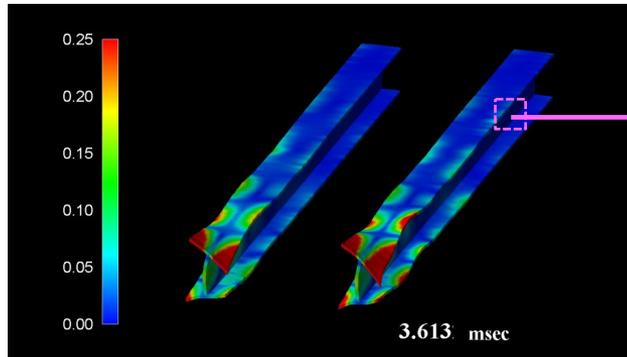
～たたいた結果を処理したら見えてくるモノ～



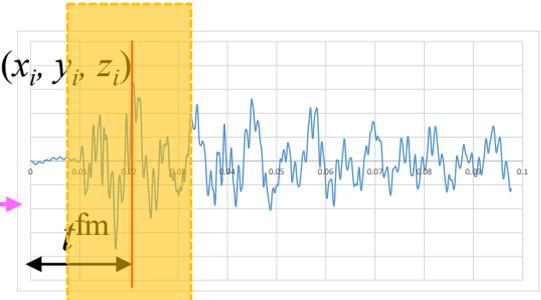
最も速い群速度は
フランジを
大きく揺するモード

機械学習によるきずの検出は難しそう

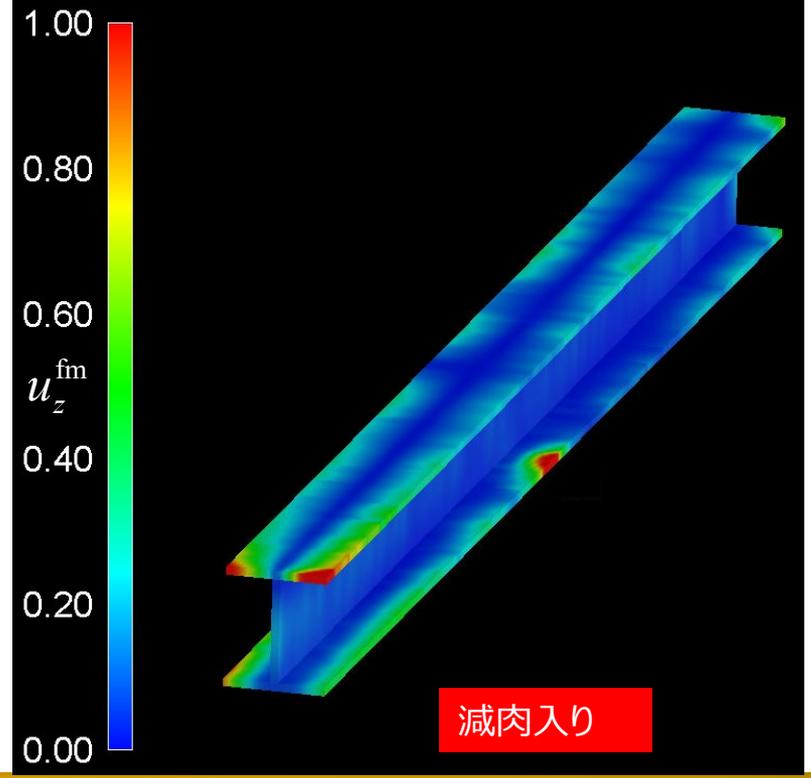
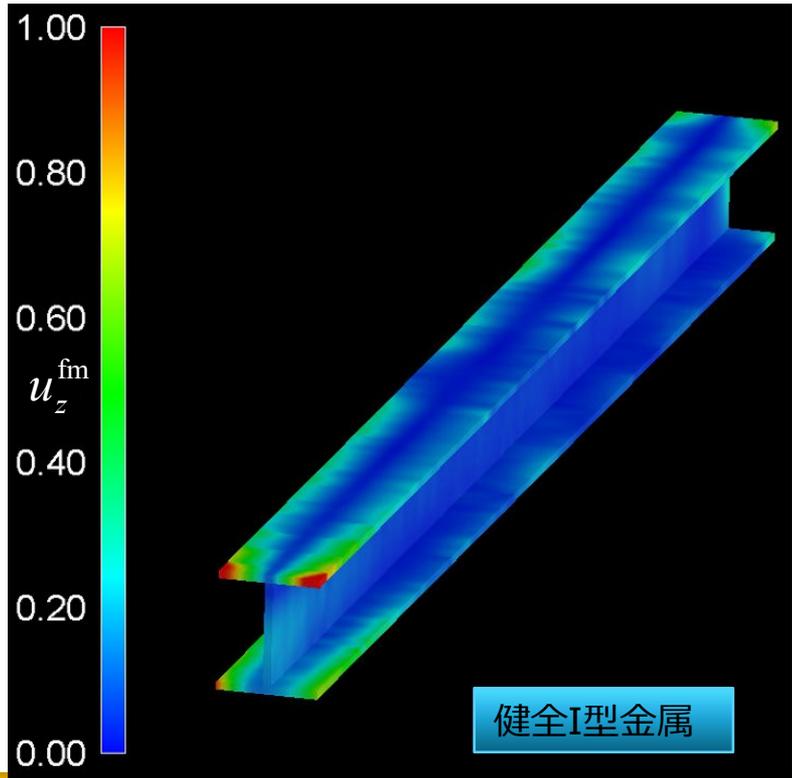
欠陥映像化手法



Waveform at (x_i, y_i, z_i)



各点で最初に到達するフランジを揺らすモードの最大振幅値をプロット

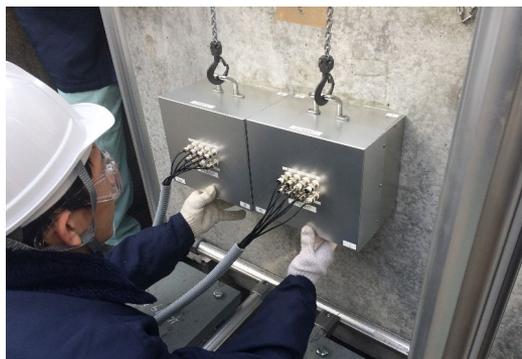


可視化のまとめ

ハンマリング試験（汎用試験）と1点観測によって、多点センシングを実現し、振動・波動伝搬を3次元的に可視化した。

- 単に可視化しただけでは、欠陥の検出や評価は難しい。
(大量の学習データがあれば、状況は違うのかもしれないが・・・)
- 土木構造物の場合、ある程度の物理的な知見やシミュレーションを援用して、特徴量を抽出することが大事。
- 画像データの適用は機械学習の得意とするところ。ここまでお膳立てすれば、あとは汎用学習ツールが使えるそう。
- 専用設計（単品性）の対象に対して、がむしゃらに機械学習を適用する前に、人間も賢くなる必要がある。

機械学習 (AI) は, 特徴を自動で抽出してくれる.

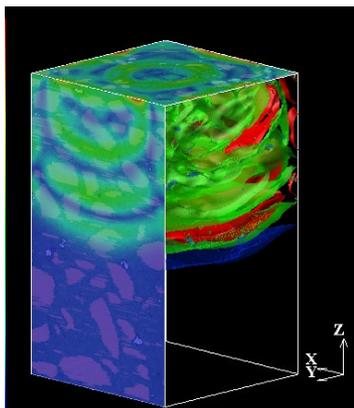


実測値 (現実データ)

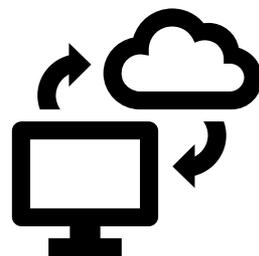


分類・回帰

解釈や処理のアシスト



数値モデル (仮想データ)



未知量の推定

データ同化の精度を上げるには, 特徴指定に人間が介入する

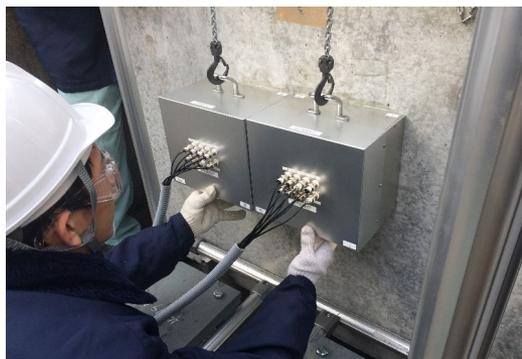
0. シミュレーションの現状

1. データ同化

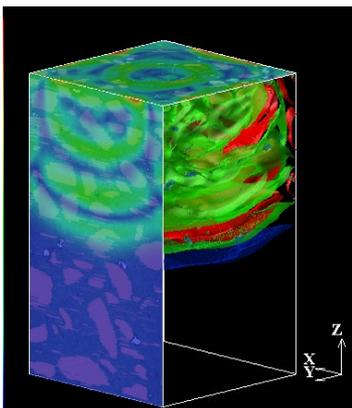
2. 可視化と機械学習

3. 今後の展望

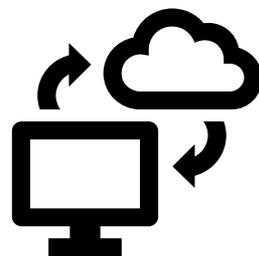
機械学習 (AI) は, 特徴を自動で抽出してくれる.



実測値 (現実データ)



数値モデル (仮想データ)



データ同化の精度を上げるには, 特徴指定に人間が介入する

分類・識別

未知量の推定



非破壊試験・健全性評価へ
データサイエンスを促進するには？



非破壊検査におけるデータの問題点（私見）

人工知能が得意としている分類，回帰，クラスタリングの事例が応用において増えつつある．非破壊検査への導入も遠い将来ではない．

非破壊検査におけるデータの問題点

- ・ 検査対象とするきずの形，サイズ，個数，きずまでの距離等が異なる．
→ そのときの成功データが，**他で当てはまるとは限らない**．
そもそもアノテーションの内容や精度もどうかと・・・
- ・ 様々な検査機器があり，そのフォーマットも出力している物理情報も様々．
→ ビッグ（な）データであるが，**現状では雑すぎる**．
- ・ 現場毎のデータの保秘
→ データの共有は無理，**データのValidationすら確認できない**．

非破壊検査の高度化は国益となるはずであるが，保秘が先行しすぎて，時期がだいぶ経過しても，**まともに他社・他者と議論できない**．**技術進展が遅い**．

出版バイアス

新しい治療法や手法が従前のものに比して優れていることを示す結果（**ポジティブな結果**）が得られた場合と、有意に優れていなかったり期待に反していたりすることを示す結果（**ネガティブな結果**）が得られた場合とでは、前者の場合に、より結果が公表されやすいことが知られており、それを「出版バイアス」と言う。

これは、一般的に、世の中の関心がポジティブな結果に集中しがちであることに原因がある。雑誌編集者はネガティブな結果を雑誌に掲載しようとする動機が弱くなり、研究者も、期待に反した結果であると論文化に消極的になることがある。

出版バイアスの弊害として、次のようなことが考えられる。

ネガティブな結果は公表されているものが少ないので、ネガティブな結果が公正に解析に統合されず、その治療法の有効性が過大評価されてしまう可能性がある。また、**無効な治療法が公表されないために、実施する意義のない試験が繰り返される**ことは、**研究資源の浪費**とも言える。

ある試験を登録することで、**その試験をスタートとした登録時から結果公表というゴールまでたどり着いているかを確認することができ**、出版バイアスの存在の可能性を知る手掛かりとなる。

【重要】UMINを詐称するフィッシングメールにご注意ください。(2019.10.28更新)

UMINの案内を悪用されたスパム、フィッシングメールが出回っております。
【サスペンションの削除】等の不明なリンクへのクリックおよびUMIN IDやパスワードの入力は行わないでください。
(報告例：件名：UMIN notice) 内容の詳細はUMINを偽装したメールについてのページをご参照ください。

ホーム

サービス一覧

UMIN概要

FAQ

ID取得

症例データレポジトリ サービス

UMIN-ICDR

(アイ・シー・ディー・アール)

臨床研究不正防止のために、すべての研究者が活用できる症例データレポジトリを提供します。

データのダウンロードは研究者側が指定した人 (UMIN ID) のみに限定され、一般公開されません。

1 of 3

主なサービス

詳細

UMINメールに関するお知らせ

UMINメールサービス

ご利用案内

- UMIN Webメール @umin.ac.jp
- UMIN Webメール @umin.org
- 各種メール転送設定

ID取得・パスワード更新

- UMIN ID・パスワードのご案内

UMINを偽装したメールにご注意ください

スパム・ウイルスメール増加に関する
注意喚起

ファイルアップロードサービス

- ファイル交換システム

大学病院業務ポータル

- 国立大学 (VPN) 担当者ログイン
- 公私立大学 担当者ログイン

UMINのご紹介

詳細

UMIN (大学病院医療情報ネットワーク = University Hospital Medical Information Network) は、国立大学附属病院長会議のもとで運用されているネットワークサービスで、大学病院業務(診療・研究・教育・研究)及び医学・生物学研究者の研究教育活動の支援を目的としてサービスを行っております。

医療・生物学系電子図書館

ELBIS

- 演題抄録/学会誌論文の検索
- 演題抄録/学会誌論文の投稿

学会・学術団体・学術集会情報

AC

- 学術団体等の検索
- 学術集会等の検索
- 専門分野別一覧

- ・人工知能技術の適切な利活用のためには**データの質や量の確保**が重要となるが、非破壊検査では失敗データが得られにくい状況。また、現場毎にデータが異なるので教師モデルの流用も難しい。AI技術を普及させるためには、**データ共有およびベンチマークモデル等**についてオープンに議論できる場とルール作りが必要。

→ 日本非破壊検査協会 UT部門

「ICTを活用した超音波による非破壊評価技術研究委員会」（2018年~2020年）

委員長：中畑和之（愛媛大），幹事：古川敬(JAPEIC)，小原良和（東北大），25名

- ・実運用には、やはり現場で即時処理が必要。組み込み機器・通信技術・エッジコンピューティングが大事である。いわゆる、**ICT（センシング）と人工知能（アナリシス）の融合**がキー。

- ・そういった意味で、工学部附属iセンシングセンターのような**分野横断的な仕組み**と**優秀な人材の恩恵**を**享受できる**のは非常に有意義である。**今後、より発展させていきたいと思っておりますので、ご協力よろしくお願い申し上げます。**