

イメージベース波動伝搬解析による 音波・弾性波・電磁波伝搬シミュレーション

愛媛大学 中畑和之

本日のお話

1. 研究背景と物理波動の数値解析
2. イメージベースモデリングと波動解析
3. ハイパフォーマンスコンピューティング
4. 計算例

1. 研究背景と物理波動の数値解析

▶ 2

CAE(計算機支援工学)

コンピュータ技術を活用して製品の設計、製造、工程設計の事前検討の支援を行うこと

- ・設計のCAD化による製品データの、コンピュータ計算への再利用。
- ・手計算では予測困難な製品形状の性能予測の実施
- ・製品に対する要求性能が高まり、最適な設計条件を求めることが必要
- ・投資、リードタイム圧縮のために試作を廃止したり、回数を減らす必要

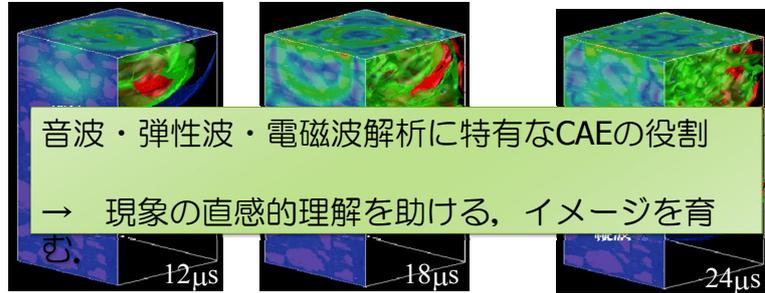
特に、自動車産業ではCAEの導入が積極的

構造解析, 振動解析, 音響解析, 衝撃解析, 流体解析, 電磁場解析, 機構解析, 圧電解析, 金型解析 (樹脂流動解析, プレス, 鋳造) 等

この3つに共通するものは・・・

波動

振動現象が時間的変化に止まらず
空間的に広がる現象



音波も弾性波も電磁波も目に見えない

非破壊試験

弾性波法

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)

弾性波

固体中を伝播する波動。伝播速度は物質・振動モードごとに異なる。
代表的な振動モードは、圧縮膨張モード（縦波）とせん断モード（横波）がある

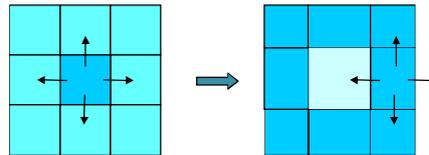
	(縦波)	(横波)
鋼	5900m/s	3230m/s
アルミニウム	6400m/s	3040m/s
コンクリート	4000m/s前後	2000m/s 前後



音波

流体・気体中を伝播する波動。圧縮膨張モードしかない。

水	1480m/s
空気	330m/s
オイル(油)	1700m/s



弾性波と音波は、何らかの媒質を振動させながら、進行する波動のこと。音波は圧縮モードしか無い。

非破壊検査

構造部材に対する超音波探傷：一般的には周波数 0.01MHz~20MHz

医療

超音波エコー検査：一般的には周波数 1MHz~20MHz

} 超音波領域

海中探査

水中ソナー（魚群探知）：一般的には周波数 数KHz~数十KHz

地中探査

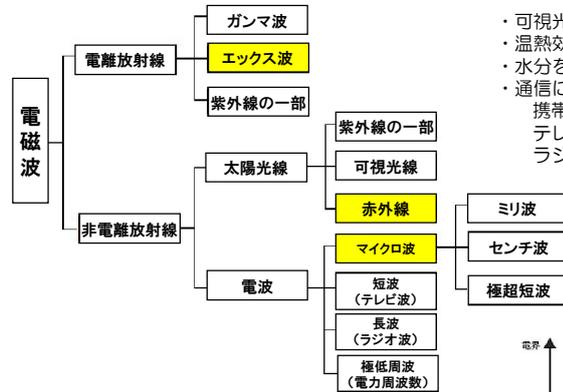
物理探査（石油探査，地層把握等）：一般的には周波数 数Hz~数百Hz

音響設計

ホール・キャビン設計：一般的には周波数 0~数KHz

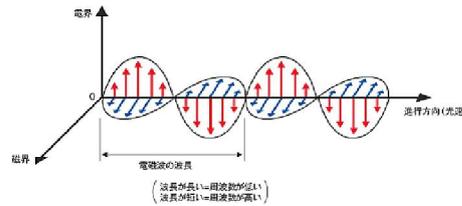


電磁波：電場（電界）と磁場（磁界）の振動が空間を伝わる現象。媒質を必要としない。



- ・可視光（波長約0.001mm）
- ・温熱効果のある赤外線（波長約0.1mm）
- ・水分を暖める電子レンジ（波長約10cm）
- ・通信に使われる各種電波（波長1~100km）
 - 携帯電話（波長約10cm）
 - テレビ放送（波長1~10m）
 - ラジオ放送（波長約10m~100m）

電磁波の速さは真空中なら全て同じ：約30万km/s
「波長」×「周波数」=「電磁波の速さ=光速」



非破壊検査という産業の裏方分野でも、波動の数値解析（特に、伝搬問題）のニーズがある。詳細は後述。



高速、高精度、ロバストな波動伝搬解析手法はないか？
汎用性のある（非均質、異方性、減衰が扱える）ものは？



波動解析に特化した商用ソフトウェアはあまりなかった。
(当時〇〇で簡単な動的解析が出来た、やってみたが、恐ろしく計算が遅かった。陰解法だったから?)



自分で作ってみようと思った。(2007年)

計算手段

高速化

汎用性（モデル化）

可視化

壁は多い・・・

弾性波(or音波)と電磁波の共通点

波動方程式
$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{s^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

波動を記述するための微分方程式
(最も基本的な二階の双曲型偏微分方程式の一つ)



弾性波と音波の場合、**構成則**と**運動方程式**を変形して導出
(ただし、弾性波の場合、縦波と横波がカップリングするため式は複雑。)
電磁波の場合、**ファラデー法則**と**アンペールの法則**を変形して導出

波の性質は全く異なるが、もしかしたら同じアプローチで
波動問題が解けるかもしれない!?

計算環境の現状

約10年前

CPUクロック 300MHz
メモリ 256MB
ハードディスク 40GB

単純計算で10倍程度
性能の向上

いま

CPUクロック 3GHz
メモリ 2GB
ハードディスク 500GB

計算コストを節約しながら、
上手な(賢い)シミュレーションする。

・限られた容量のなかで工夫して解く
(手法や理論の開発・改良)

有限要素法, 境界要素法

計算手法・理論は成熟。
計算機の性能を引き出して、効率の
良いシミュレーションをする。

・ある程度自由に使える資源の
中で高速に解く。
(並列計算, リアルタイム計算)

差分法・粒子法

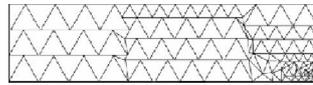
波動問題を解くための代表的な数値解析手法

FEM (有限要素法)

支配方程式から弱形式を導き、
基本境界条件を満足させながら解く。

仮想仕事の原理, スパース行列

要素分割



領域を多角形に分割

BEM (境界要素法)

支配方程式から積分方程式を導き、
境界条件を満足させながら解く

ガウスの発散定理, 密行列

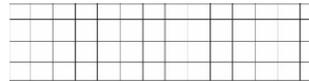


境界だけ分割

FDM (有限差分法)

微分を高次の差分で近似する。

差分式, スパース行列

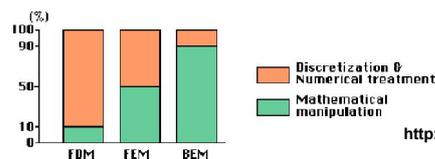


領域を格子状に分割

共通して言えること

偏微分方程式を, 結局は代数方程式 (連立方程式)
に換算して解く。

この換算アルゴリズムが, 解の精度や解析速度を左右する。



<http://www.fem.gr.jp/bem/general.html> より引用

換算アルゴリズムとは主として微分方程式から離散化までの数学処理。

つまり, 換算アルゴリズムが平易であるほど, 解析実行時になんらかの弊害をうけやすい (分割形状が正確ではない, 解が安定しない等)。

逆に, 換算アルゴリズムが複雑であるほど, 解析実行時に障害は少ない。

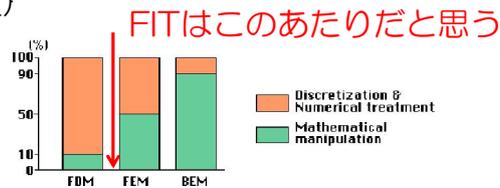
本解析で扱

有限積分法*

構成則（フックの法則）
空間域で離散化
ことと陽的に解

<特徴>

- ・グリッドベース
- ・境界条件の容易
- ・正方形・立方



*) Fellingner, P., Marklein, R., Langenberg, K.J. and Klaholz, S.: Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT -elastodynamic finite integration technique, Wave Motion, Vol.21, pp.47-66, 1995.

例えば面外波動場(SH波が伝搬する場)で示すと

運動方程式

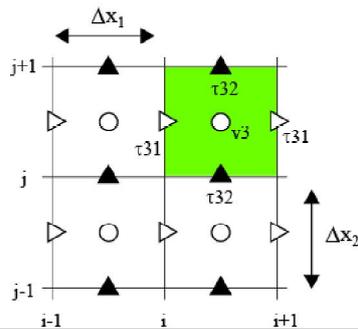
$$\rho(\mathbf{x})\dot{v}_3(\mathbf{x}, t) = \frac{\partial \tau_{31}(\mathbf{x}, t)}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{32}(\mathbf{x}, t)}{\partial x_2}$$

構成式

$$\frac{\tau_{31}(\mathbf{x}, t)}{\mu(\mathbf{x})} = \frac{\partial v_3(\mathbf{x}, t)}{\partial x_1}, \quad \frac{\tau_{32}(\mathbf{x}, t)}{\mu(\mathbf{x})} = \frac{\partial v_3(\mathbf{x}, t)}{\partial x_2}$$

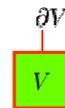
運動方程式
の積分表現

$$\int_V \rho(\mathbf{x})\dot{v}_3(\mathbf{x}, t)dV(\mathbf{x}) = \int_{\partial V} \tau_{3\beta}(\mathbf{x}, t)n_\beta d\mathbf{c}(\mathbf{x})$$



空間の離散化

- v_3 : 粒子速度
- τ_{31}, τ_{32} : 応力
- ρ : 密度
- μ : せん断弾性係数



v3 Integration cell

材料定数(ρ, μ)は
 v_3 セルで定義される。

時間の離散化 中心差分近似



面外速度とせん断応力の
時間ステップを互いにずらす

整数次の時間ステップ → 速度の計算

$$(v_3)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^{k+1} = (v_3)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^k + \Delta t \frac{(\tau_{31})_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - (\tau_{31})_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}}{\rho_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \Delta x_1} + \Delta t \frac{(\tau_{32})_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k+\frac{1}{2}} - (\tau_{32})_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}}}{\rho_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \Delta x_2}$$

半整数次の時間ステップ → せん断応力の計算

$$(\tau_{31})_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} = (\tau_{31})_{i,j+\frac{1}{2}}^{k-\frac{1}{2}} + \frac{\bar{\mu}_{i,j+\frac{1}{2}} \Delta t}{\Delta x_1} \left\{ (v_3)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^k - (v_3)_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^k \right\}$$

$$(\tau_{32})_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} = (\tau_{32})_{i+\frac{1}{2},j}^{k-\frac{1}{2}} + \frac{\bar{\mu}_{i+\frac{1}{2},j} \Delta t}{\Delta x_2} \left\{ (v_3)_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}^k - (v_3)_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}^k \right\}$$

音波版(AFIT)・弾性波版(EFIT)

運動方程式の積分表現

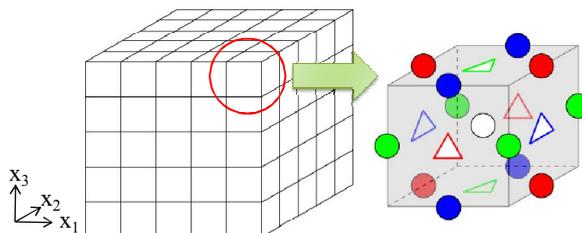
$$\left(\frac{d}{dt} \int_V \rho v_i dV = \int_S T_{ij} n_j dS + \int_V f_i dV \right)$$

v_i : 速度
 τ_{ij} : 応力
 f_i : 物体力
 ρ : 密度
 s_{ijkl} : 弾性コンプライアンス

構成則の積分表現

$$\left(\frac{d}{dt} \int_V s_{ijkl} T_{kl} dV = \int_S \frac{1}{2} (v_i n_j + v_j n_i) dS \right)$$

AFITの場合は、せん断応力と、せん断に関する弾性定数を0とすれば、統一コードが利用できる。



○	$\tau_{11}, \tau_{22}, \tau_{33}$	△	v_1
●	τ_{12}	△	v_2
●	τ_{13}	△	v_3
●	τ_{23}		

電磁波版(EMFIT)

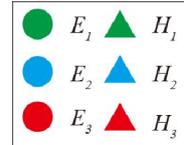
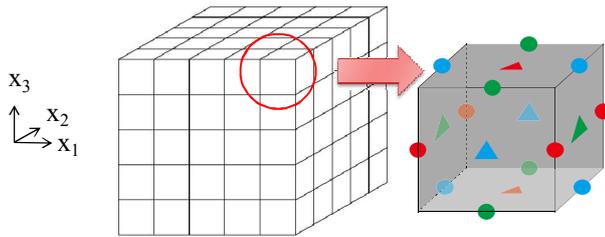
アンペール則

$$\int_S \left(\varepsilon(\mathbf{x}) \frac{\partial E_i(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \sigma(\mathbf{x}) E_i(\mathbf{x}, t) \right) n_i(\mathbf{x}) dS = \oint_C H_i(\mathbf{x}, t) t_i dC$$

ファラデー則

$$\int_S \mu(\mathbf{x}) \frac{\partial H_i(\mathbf{x}, t)}{\partial t} n_i(\mathbf{x}) dS = - \oint_C E_i(\mathbf{x}, t) t_i(\mathbf{x}) dC$$

E_i : 電場
 H_i : 磁場
 ε : 誘電率
 ρ : 伝導率
 μ : 透磁率



弾性波(音波)解析

運動方程式
構成式

積分セル上で離散化

速度の離散式
応力の離散式

→ 離散式を陽的に解く

電磁波解析

ファラデー則
アンペール則

積分セル上で離散化

電場の離散式
磁場の離散式

→ 離散式を陽的に解く

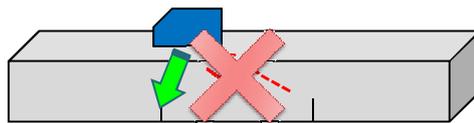
※グリッド配置は一般的なFDTD法と類似。
最大のメリットは、境界条件は積分表現から論理的に決まる(経験的ではない)こと。

2. イメージベースモデリングと波動解析

▶ 20

複雑化する対象に対して、解析的なアプローチでは、
固体内の波動場の推定が困難。

数値シミュレーションの積極的活用



- ・波動（超音波，電磁波）は目に見えないので，シミュレーションによってその伝搬経路・きずからの散乱波が推定できる。（検査精度の保証）
- ・探触子・アンテナの設計ができる。つまり，意図したところに効果的な超音波・電磁波が送信できる。（検査効率の向上）
- ・モックアップ（供試体）を作るのにお金と時間がかかる場合，それを代替してくれる。（検査コストの削減）

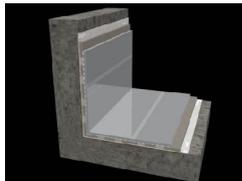
近年の非破壊検査探傷のニーズ

複雑な3次元形状

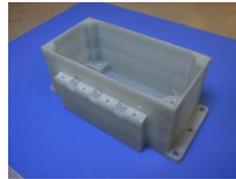


金型

複合材料・異方性材料



遮音材(コンクリート)



GFRP

シミュレーションしたい!

- できるだけ簡単な準備で計算
よく分からないけど、実行だ



イメージベースモデリング

- 精度良い計算結果がほしい。



有限積分法FIT

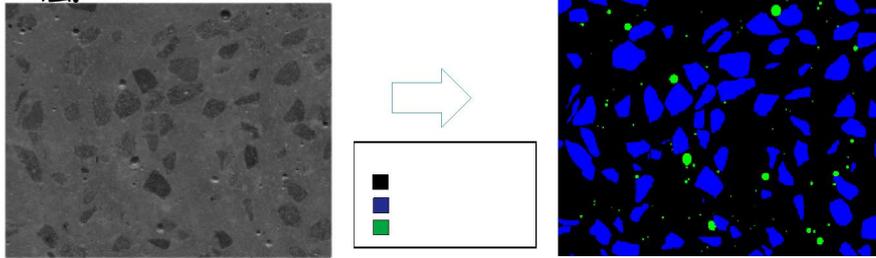
- 計算時間は短時間の方が望ましい。



マルチCPU,GPUによる並列計算

イメージベースモデ

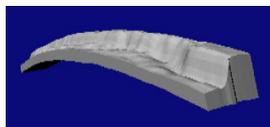
被検体の写真やCT
数値モデルを作成し
法。



デジカメの写真から

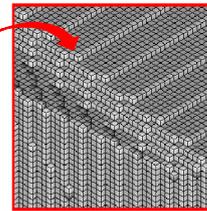
2Dはできた。3Dモデルはどうしよう・・・

表面計測データから(光計測)



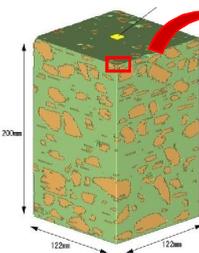
ボクセル要素

zoom

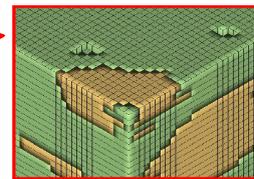


ボクセル要素

積層写真から(X線CT)

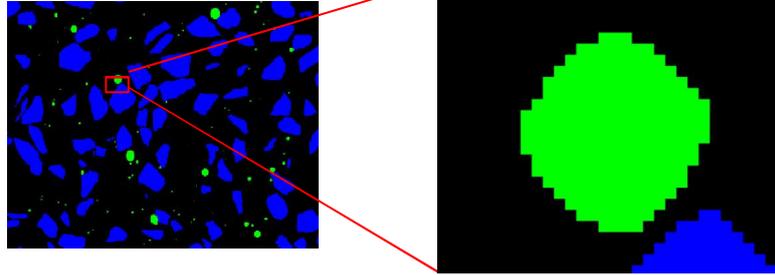


zoom



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。

イメージベースモデリングの特徴



要素形状は正方形で
かつ同サイズ



境界が曲線形状をしている場合、階段状にしか近似できない。



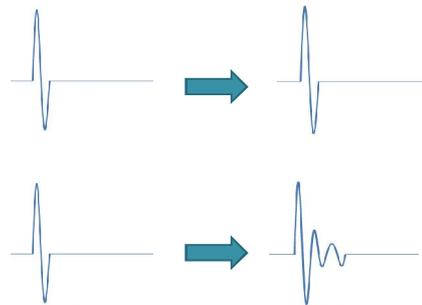
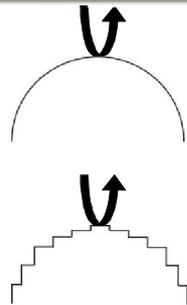
しかし、要素形状が同じであるため、計算が高速化しやすい。

数値分散と数値振動

数値分散：波が伝搬するに従って生じる位相速度の誤差



数値振動：ボクセル要素形状に起因する数値誤差



入力波形

出力波形

有限積分法FIT

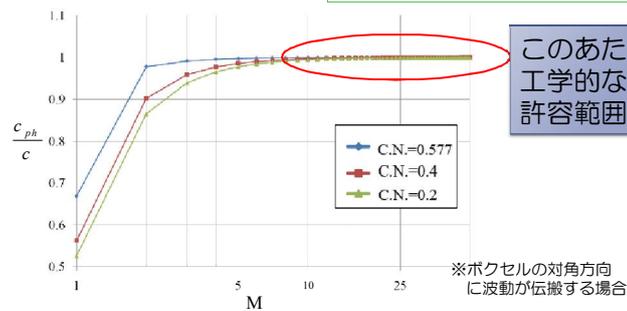
～Verification (数値分散の検証)～

送信波の波長 λ に対してボクセルサイズ Δx はどの程度なら良い？

$$M = \lambda / \Delta x \quad (M \text{ が大きいほどボクセルは細かい})$$

$$\frac{c_{ph}}{c} = \frac{M}{\pi \Delta \hat{t}} \sin^{-1} \left\{ \Delta \hat{t} \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sin^2 \left(\frac{\pi}{M} \hat{k}_i \right)} \right\}$$

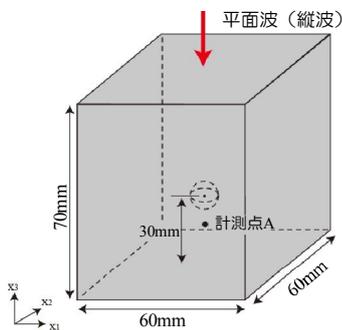
c : 波動方程式の位相速度
 $c_{ph} = k / \omega$: 計算上のみかけの位相速度
 $\Delta \hat{t} \left(= \frac{\Delta t}{\Delta x} c \right)$: Courant数(C.N.)



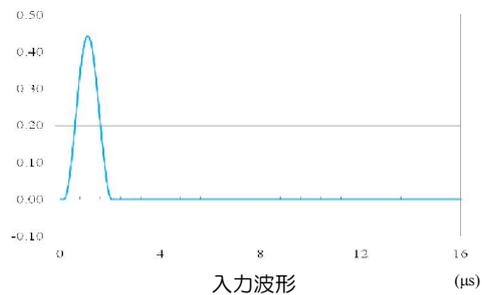
このあたりならば
工学的な精度として
許容範囲(M>8)

※ボクセルの対角方向
に波動が伝搬する場合

有限積分法FIT



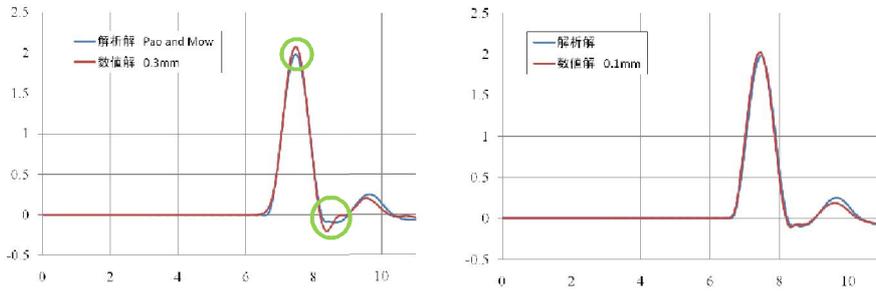
ステンレス鋼
 $(C_T=5800\text{m/s}, C_L=3100\text{m/s}, \rho=7900\text{kg/m}^3)$



<解析条件>

中心周波数 $f_{\text{cen}}=580\text{KHz}$
 最大周波数 $f_{\text{max}}=3.0\text{MHz}$
 最小波長 $\lambda_{\text{min}} = \frac{c_T}{f_{\text{max}}} = 1.03\text{mm}$
 セル長 $\Delta x=0.3\text{mm}, 0.1\text{mm}, 0.05\text{mm}$
 時間ステップ $\Delta t=4\text{ns}$
 総ステップ数 4000ステップ

解析解*)との比較 (左)



$\Delta x = 0.3\text{mm}$ では微振動が発生
 $\Delta x = 0.1\text{mm}$ 以下で解は一致



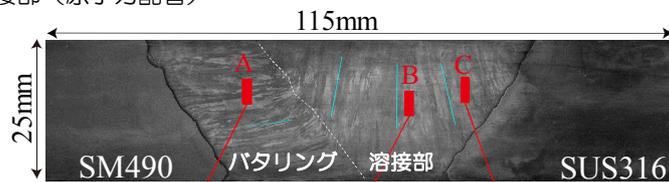
$$\Delta x \leq \frac{\lambda_{\min}}{M} = \frac{\lambda_{\min}}{10}$$

*) Pao, H.Y. and Mow, C.C.:
 Diffractions of flexural waves by a cavity in an elastic plate. American Institute of
 Aeronautics and Astronautics Journal, Vol.2, pp.2004-2010, 1964

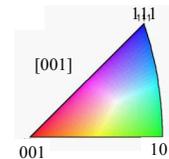
有限積分法FIT

~Validation (実験結果との比較)~

異材溶接部 (原子力配管)

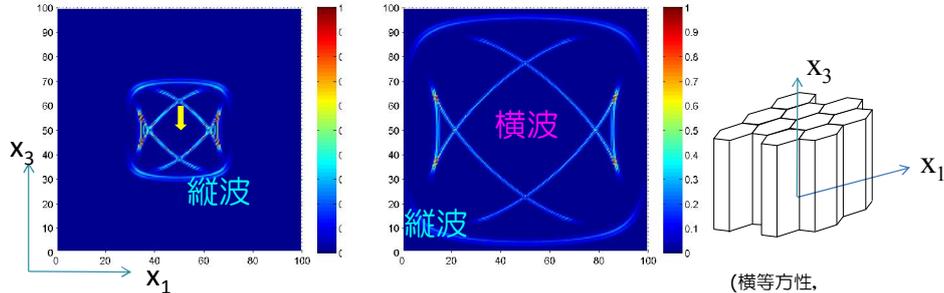


EBSF測定結果



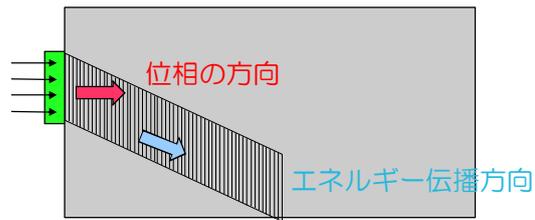
溶接組織の成長方向は局所的に異なる

異方性材料中の波動伝搬

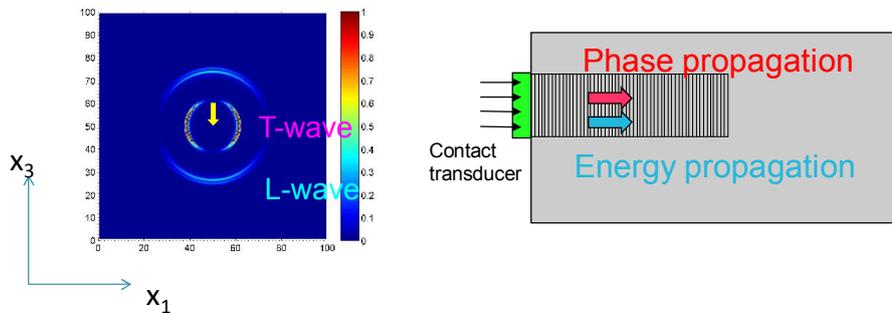


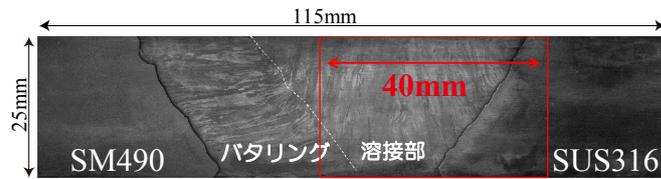
縦(L)波と横(T)波がそれぞれの方向へ異なった速度で伝搬。
一般異方性の場合、1つの縦波と2つの横波が発生する。

(横等方性,
5つの独立な
弾性スティフネス)



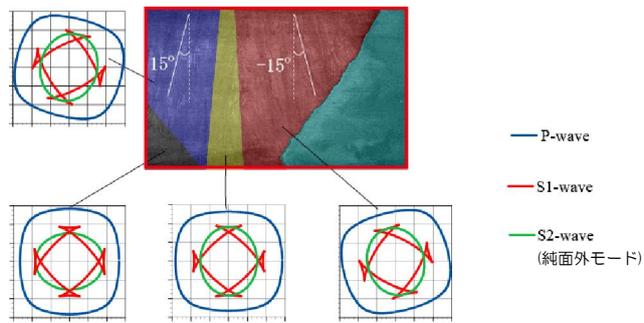
ちなみに、等方性の場合



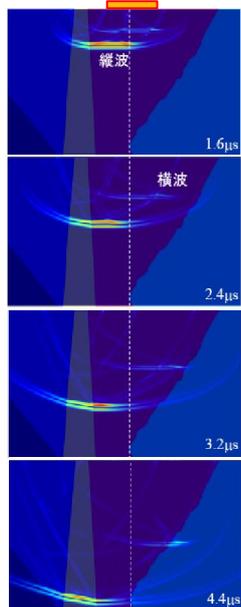


郡速度分布

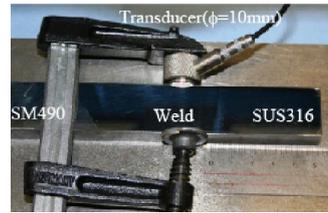
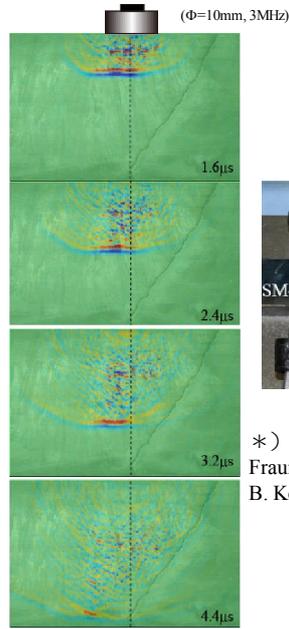
画像処理&ピクセル化



FITの計算結果



レーザー振動計による計測実験*

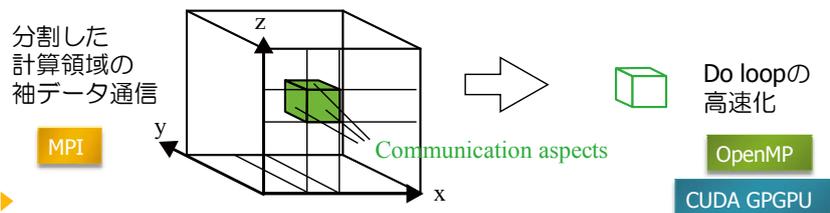
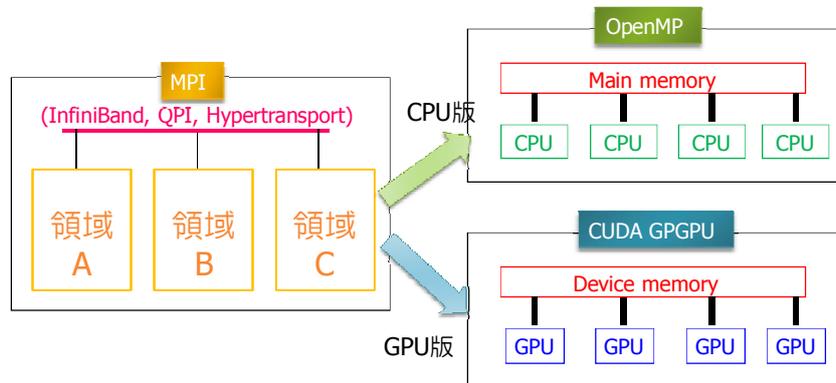


*) ドイツ
Fraunhofer Institute, IZFP-D
B. Koehler博士のご協力を得ました。

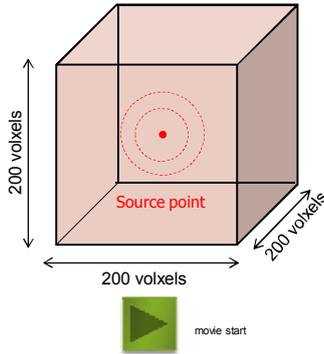
3. ハイパフォーマンスコンピューティング

▶ 36

FITは陽解法なので並列計算のパフォーマンスが出やすい。



並列計算の性能評価(マルチCPUの場合)



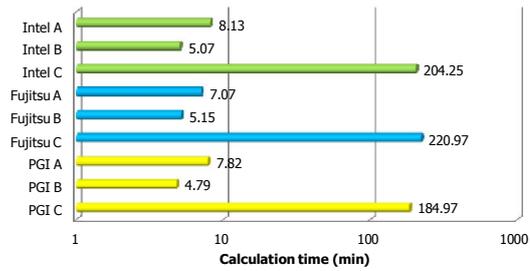
<計算条件>
ボクセル数: 800万
更新数: 1000
材料: 均質・等方
PML吸収境界

Pattern A = MPI 4 × OpenMP 16 (Hybrid)

Pattern B = MPI 64 (flat MPI)

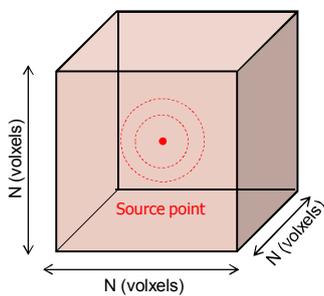
Pattern C = Single core

Calculation time in different 6 parallelization patterns



1) HX600クラス 京都大学学術情報メディアセンター (AMD Opteron (2.3GHz, 4CPU) × 4 per node, NUMA[Non-Uniform Memory Access])

スケーラビリティ (マルチCPU)



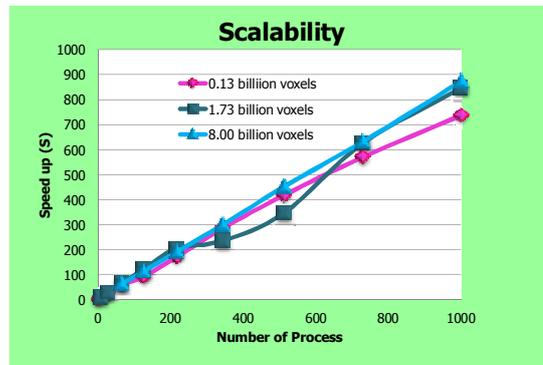
<Condition of calculation>

Total voxel number:
N=500 (1.25億ボクセル)
N=1200 (17.3億ボクセル)
N=2000 (80億ボクセル)

Plat MPI, Fujitsu compiler

Index of speed up

$$S = \frac{\text{Calculation time with 1-Process}}{\text{Calculation time with n-Processes}}$$



並列計算の性能評価(GPUの場合)



すこし, GPUの説明を・・・

2011.11現在
Amazonで3万円くらい

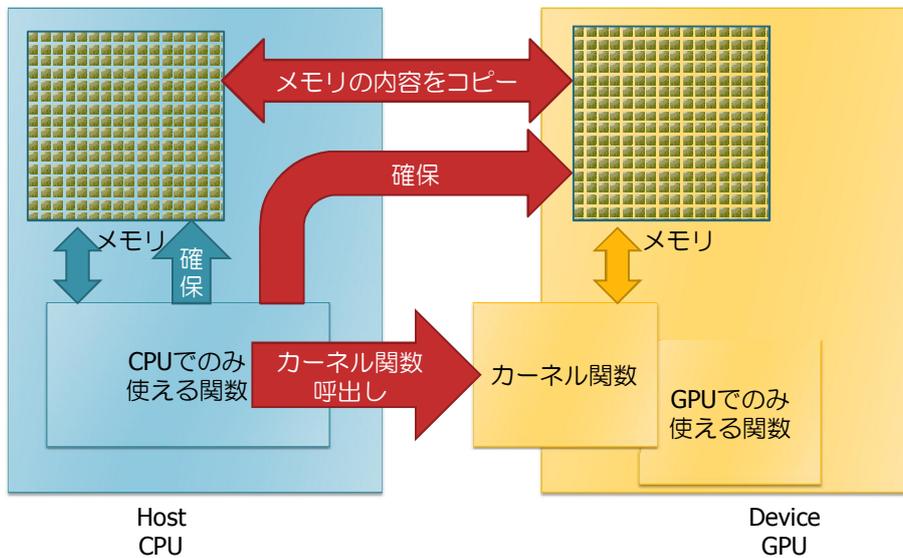
	性能	GeForce GTX 570
	コア数	480
	SP動作クロック[MHz]	1464
ビデオメモリ	メモリバンド幅[GB/s]	152.0
	メモリ・インタフェース[bit]	320
	メモリ容量	1280MB



<http://www.nvidia.co.jp/object/product-geforce-gtx-570-jp.html>

CUDAプログラムの概要

CUDA : NVIDIA社のGPUを用いた汎用計算のための統合開発環境



CPU計算(OpenMP)とGPU計算(CUDA)の違い

- ▶ CPU
 - ▶ コアの命令処理能力に優れる。その分サイズも大きい。
 - ▶ 1コアあたりの価格は高い
 - ▶ 大容量メモリが使用可能
 - ▶ スレッド並列の場合、1スレッドを1コアが使用。
 - ▶ 1コアが配列の複数要素を担当
- ▶ GPU
 - ▶ 単純な処理能力しか有していない。その分サイズも小さい。
 - ▶ コアが小さいのでたくさんのコアを内蔵、1コアあたりの価格は安い。
 - ▶ 最大でも6GB(Tesla 2075)のメモリアロケート
 - ▶ 複数のスレッドで1コアを使用(SIMD型!?)。
 - ▶ 1コアが配列の1要素を担当

C

コンセプト

マイクロソフトのOffice[®]、特にPowerPoint[®]が使える人ならば、本シミュレータを簡単に動作することができる。

特徴

操作性能：GUIの使いやすさ・軽快さの徹底的追求

動作性能： 計算は高速実行（並列CPU/GPU計算）

データ処理： 計算結果をリアルタイム可視化

▶ 拡張性： コアを増やした分だけ、計算性能はリニアに向上

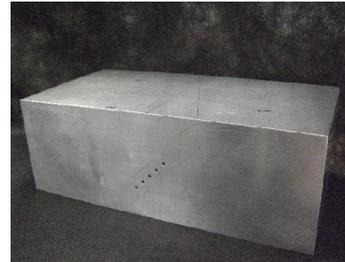
- 2-D版(SH波)を試作, Windows®で動作するGUIの紹介
- 今日のデモはGPU版を使用

使用PCのスペック

GPU : NVIDIA GeForce® GTX 560M(公称1.55GHz, 1.5GB)
(デスクトップ用と異なり, ノート用はスペックが不十分ですが・・・)

計算モデル

- 200mm×70mmのアルミニウム供試体
(要素数は4000×1400ピクセル=560万セル)
- 1.5MHzのSH波探触子を供試体上部に設置
(繰り返し数2000ステップを実行)



シミュレータのデモンストレーション

GUIは、イーコンピュート(株)との
共同研究によって製作されたものです。

eCompute

<http://www.ecompute.co.jp>

info2011@ecompute.co.jp

ソルバ部分は、中畑自身がCUDA Fortran
(PGI コンパイラ)で作りました。

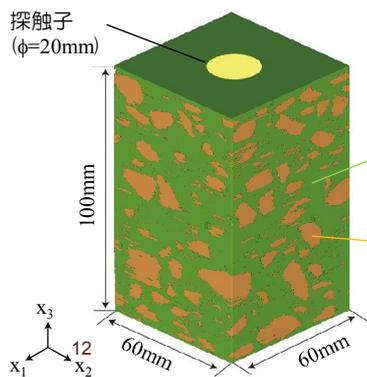
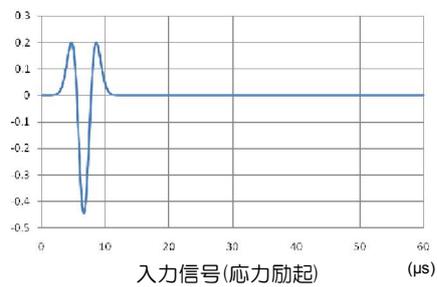


4. 計算例

(非破壊検査の例ばかりですが・・・)

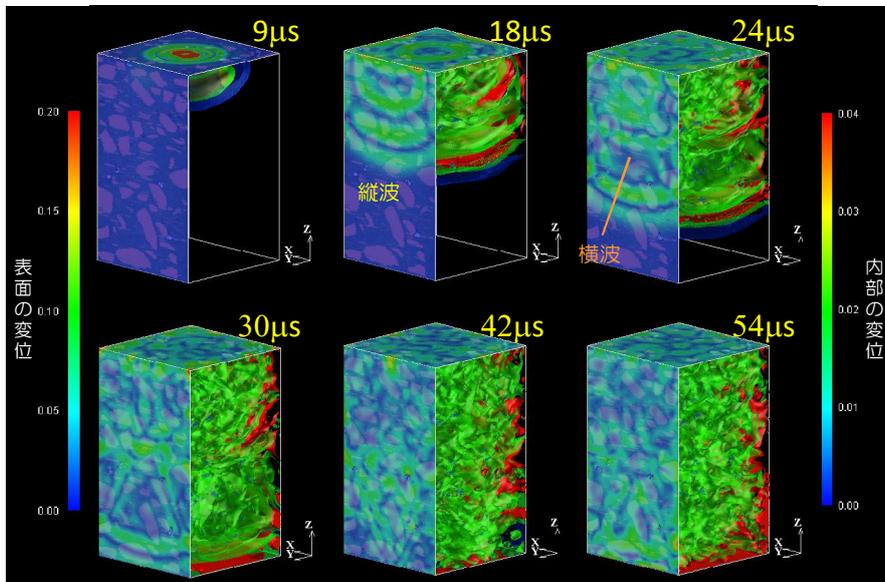
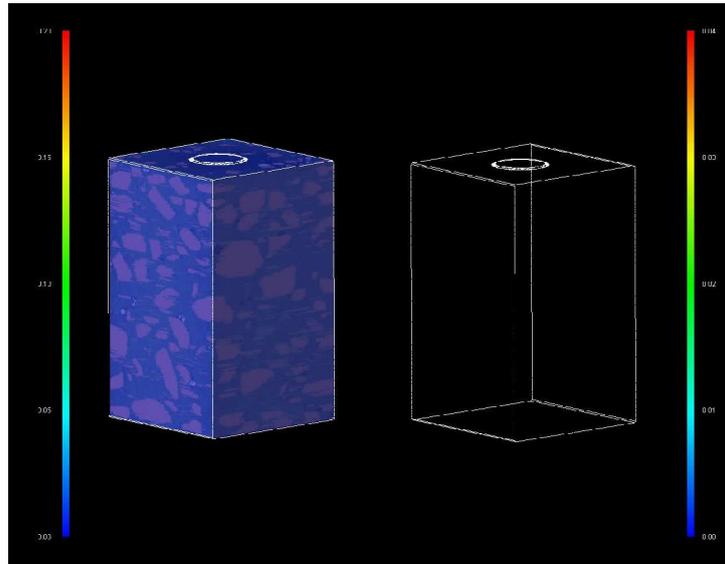
コンクリート中の超音波伝搬

<解析条件>
 送信パルス 1.5波のリッカー波
 中心周波数 0.2MHz
 セル長 $\Delta x = 0.1\text{mm}$
 総ボクセル数 約3億5千万個
 時間ステップ $\Delta t = 10\text{ns}$
 総ステップ数 6000ステップ

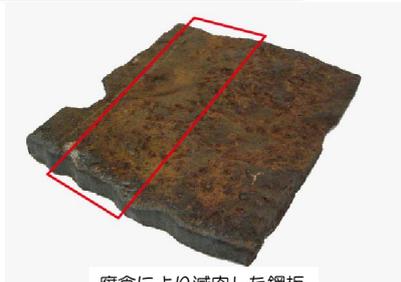


セメント(V.F.=66.9%) $\rho = 2050 \text{ kg/m}^3$
 $c_L = 3950 \text{ m/s}$
 $c_T = 2250 \text{ m/s}$

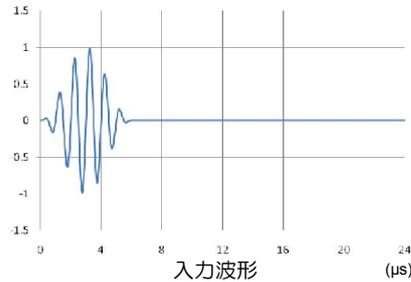
骨材(V.F.=32.8%) $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$
 $c_L = 4400 \text{ m/s}$
 $c_T = 2600 \text{ m/s}$



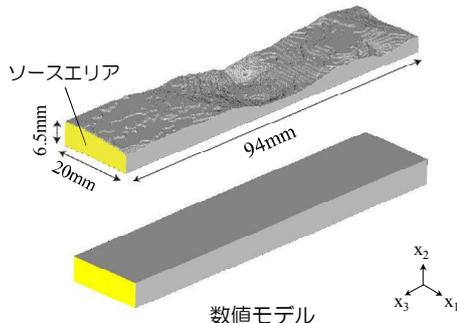
腐食鋼板の超音波伝搬



腐食により減肉した鋼板



入力波形 (μs)



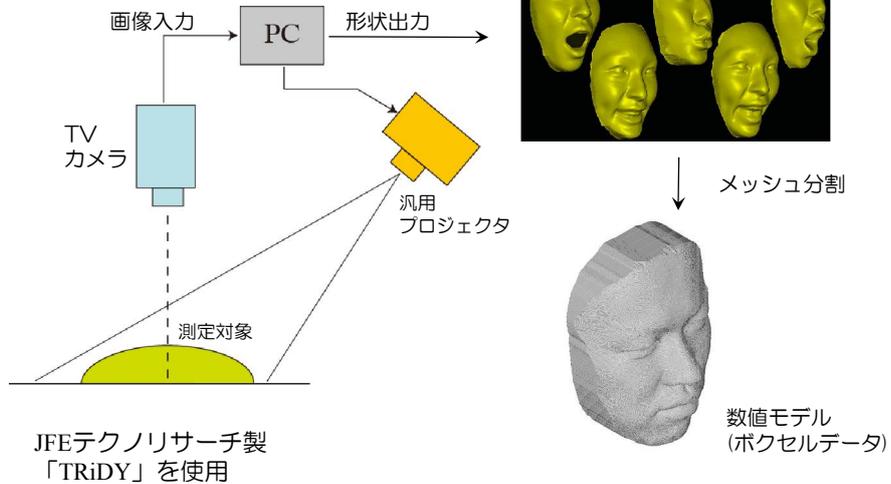
数値モデル

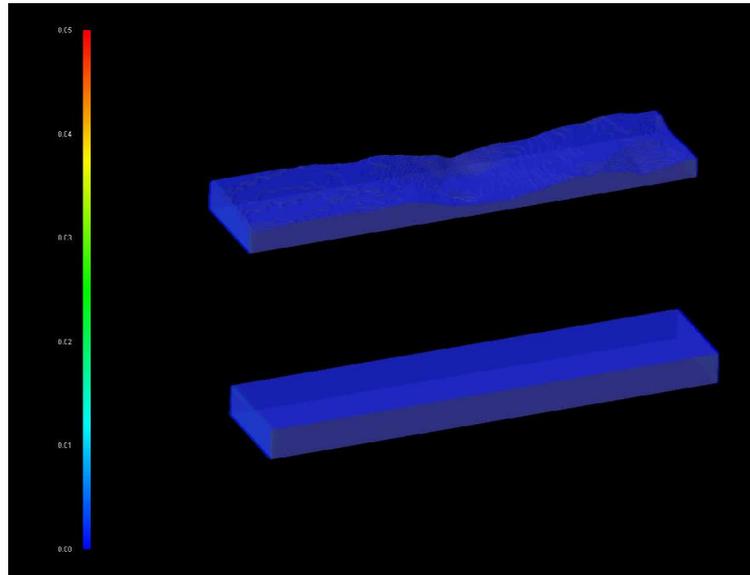
<解析条件>

- 中心周波数 1.0MHz
- 最大周波数 1.3MHz
- セル長 $\Delta x=0.05\text{mm}$
- 総ボクセル数 減肉した平板 約7千万個
平板 約1億個
- 時間ステップ $\Delta t=4\text{ns}$
- 総ステップ数 6000ステップ

鋼材 ($C_L=5800\text{m/s}$, $C_T=3100\text{m/s}$, $\rho=7900\text{kg/m}^3$)

投影光パタン法





計算時間：約4時間

空気超音波法 自動車産業に関連しそうな
シミュレーション



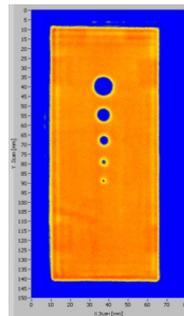
ジャパンプローブ(株) 非接触空気超音波探傷システム



リチウムイオン
電池の剥離検査

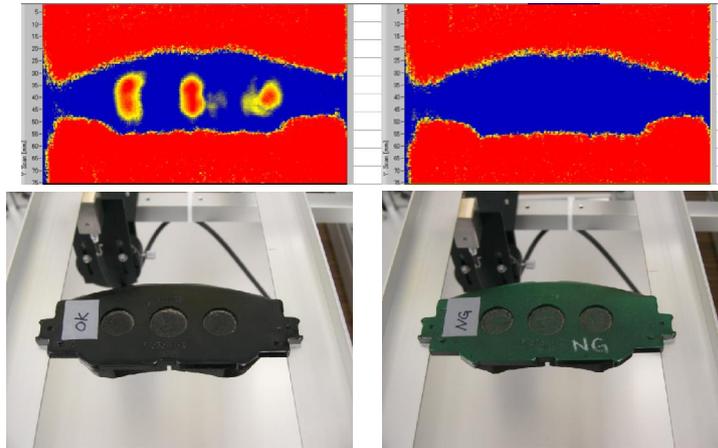


水につけることなく
非接触で探傷が可能

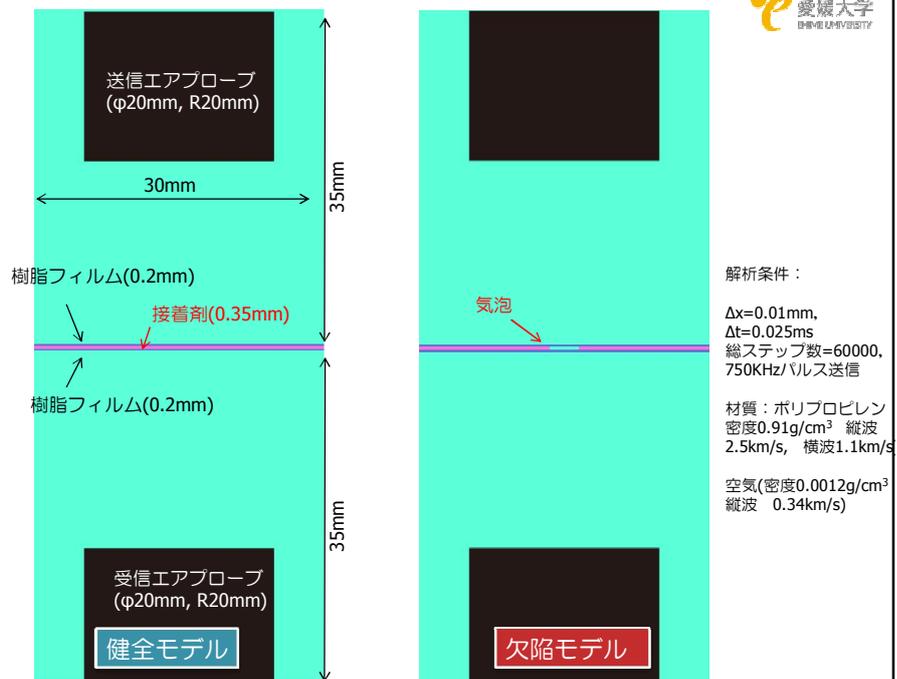


良品

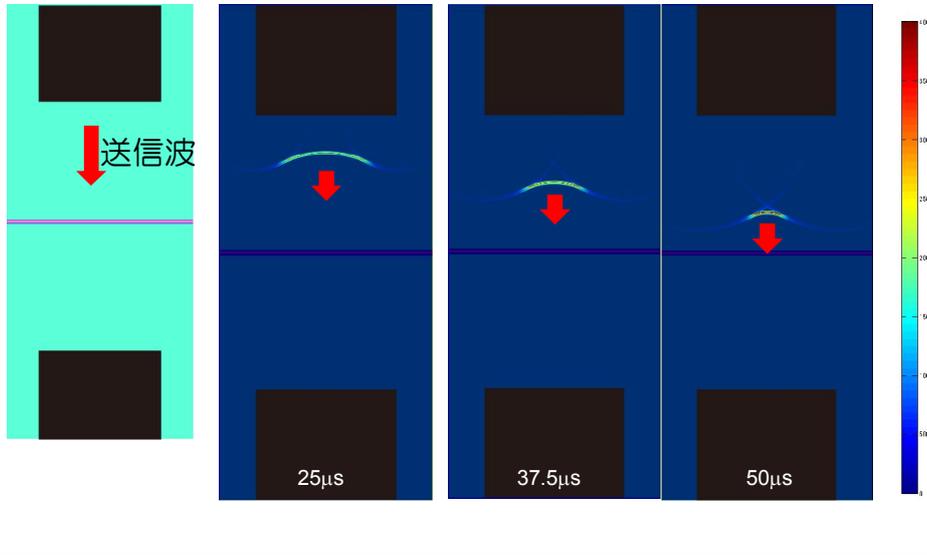
不良品



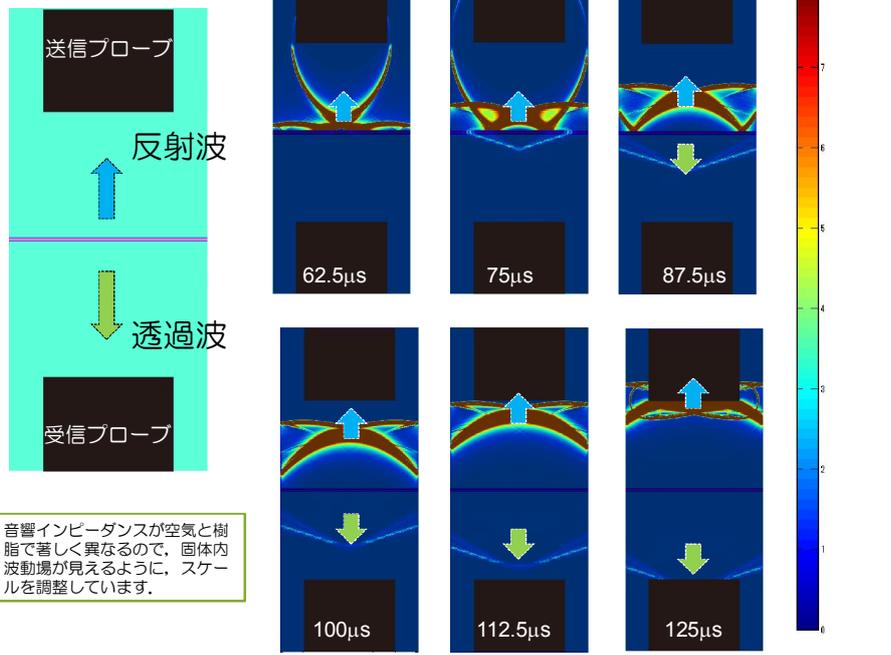
自動車のブレーキ部品

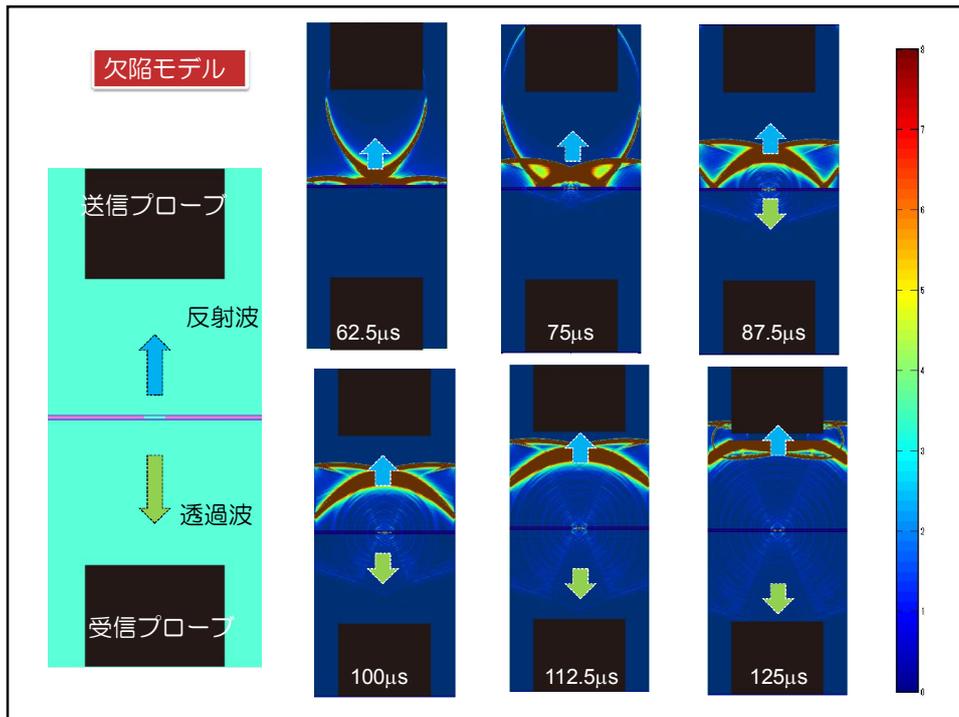


空気中音波と固体内弾性波の連成解析

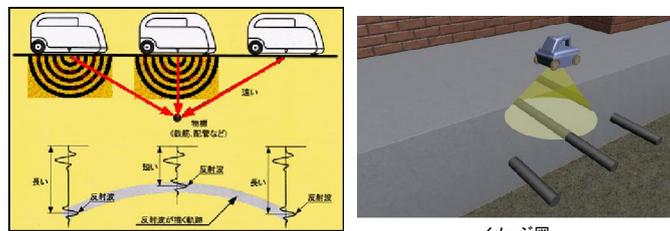


健全モデル





コンクリート中の電磁波伝搬（電磁波レーダ法）

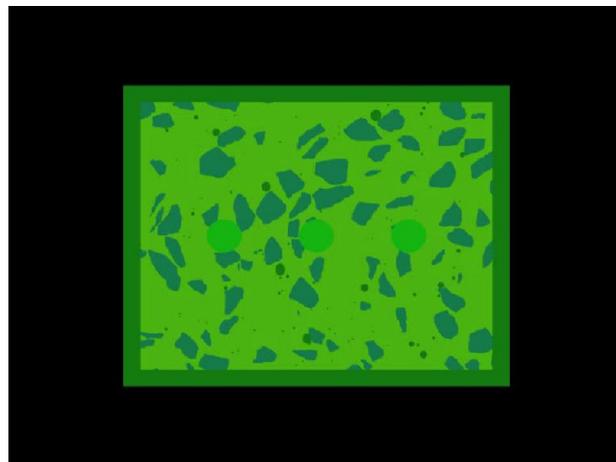
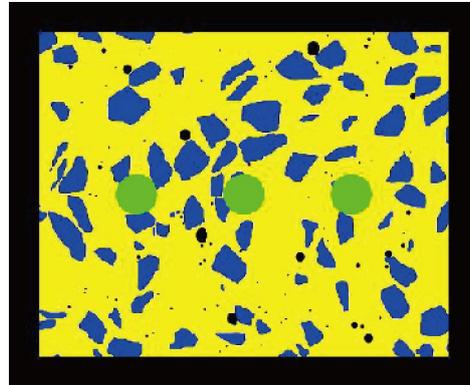


電磁波をアンテナから試験体内部に向けて放射する。コンクリートと電気的性質の異なる物質である鉄筋、埋設管などがあつた場合は電磁波がその境界面で反射するので、アンテナに到達するまでの時間差から反射物体までの距離を計測する仕組み。原理は、電磁波レーダ（GISレーダ）と同じである。

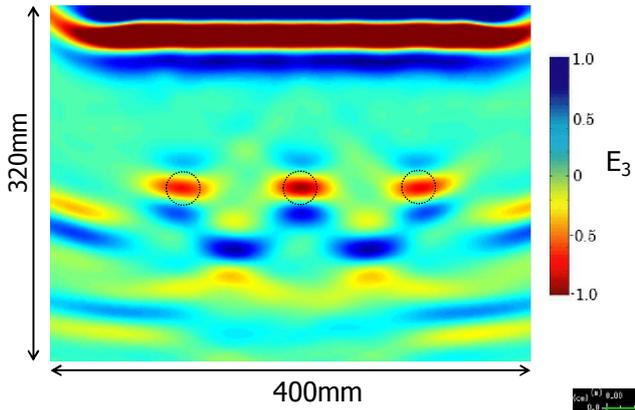
計算条件
中心周波数： 1.0GHz
セルサイズ： $\Delta x=0.1\text{mm}$
セル数： 4,830,000
時間更新： 12000ステップ



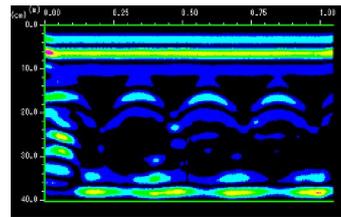
日本無線（株）HPより
www.jrc.co.jp/jp/product/comm/ndt/index.html



電磁波の伝搬挙動

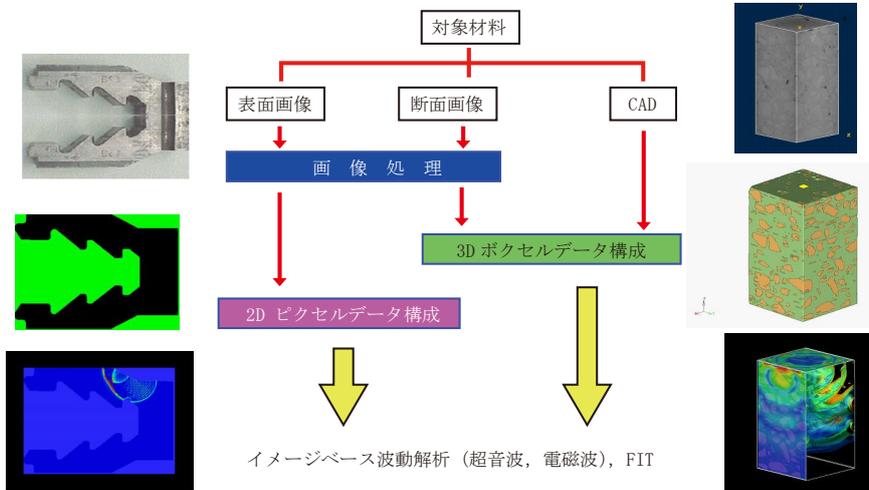


シミュレーションで得られたシグナルを元に鉄筋画像を再構成



鉄筋調査出力検査例

イメージベースFITの体系化



まとめ

イメージベース波動解析法による、音波・弾性波・電磁波伝搬シミュレーションを紹介した。

線形波動問題を安定して解くために有限積分法(FIT)を採用した。FITの解析精度・高速計算・有用性と種々の応用例を示した。イメージベース処理を組み入れたことで、非常に汎用的なツールとなった。

今後の課題

非破壊検査だけでなく種々の工学問題へ本シミュレータを応用できるようにUI等を整備する。また、一般に公開する予定。

ご静聴ありがとうございました

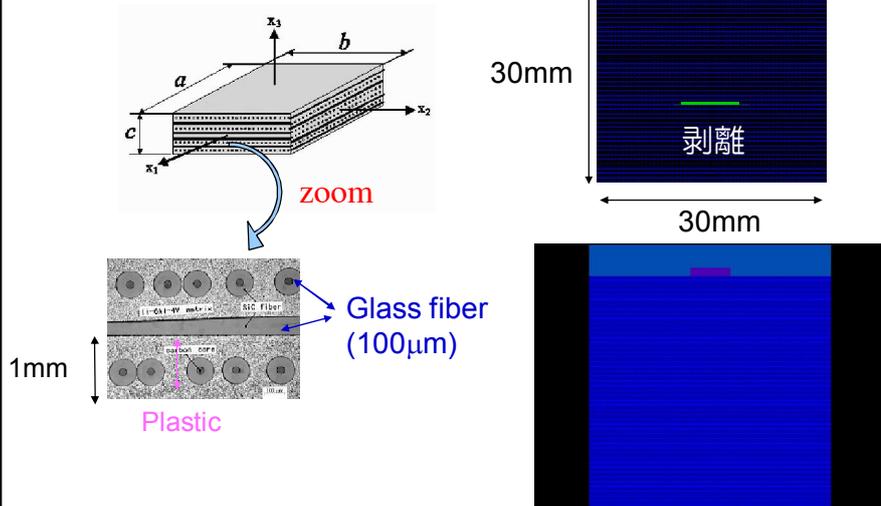
本研究は

1. ドイツFraunhofer Institute, IZFP 
2. 京都大学 学術情報メディアセンター
プログラム高度化共同研究2010  京都大学学術情報メディアセンター
Academic Center for Computing and Media Studies,
Kyoto University
3. スズキ財団（平成22年度科学技術研究助成）  公益財団法人スズキ財団
SUZUKI FOUNDATION

の援助を受けました。記して謝意を表します。

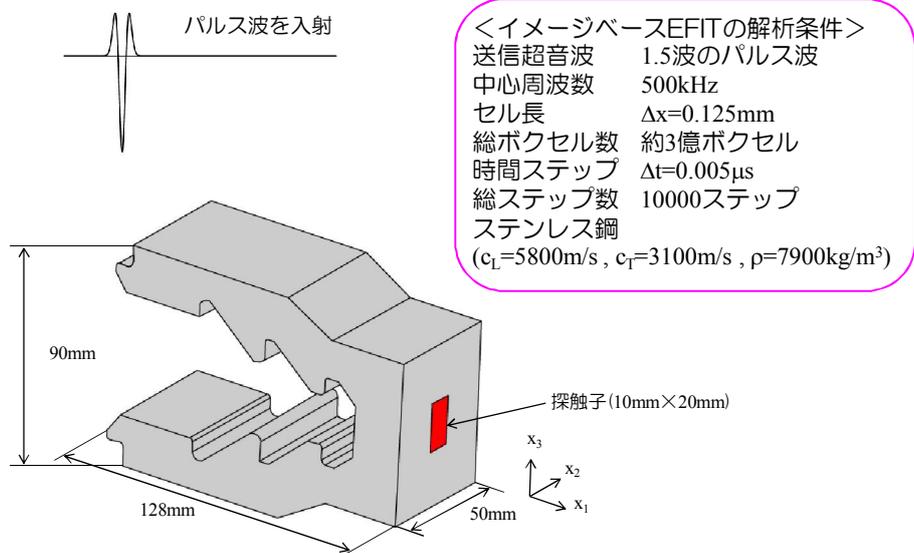
また、くいんと（株）Voxelconが無ければ本研究はここまで到達していなかったと思います。石井社長、月野様に深く感謝申し上げます。

GFRP (Plastic + Glass) モデル

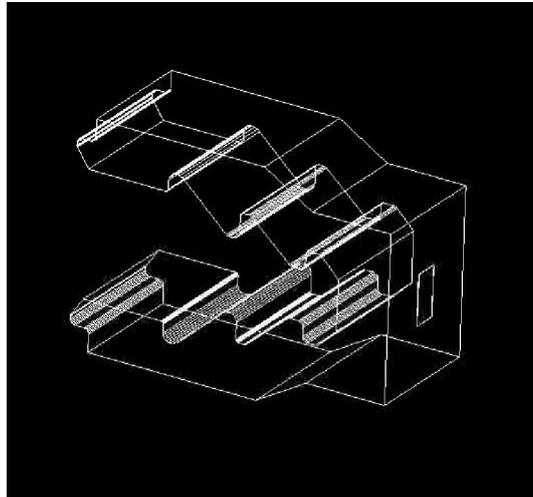


Time step: $\Delta t=1\text{ns}$ (total step=21000), Grid size: $\Delta x=10\mu\text{m}$ (grid number=10.5million) Calculation time = 60 min. (32threads)

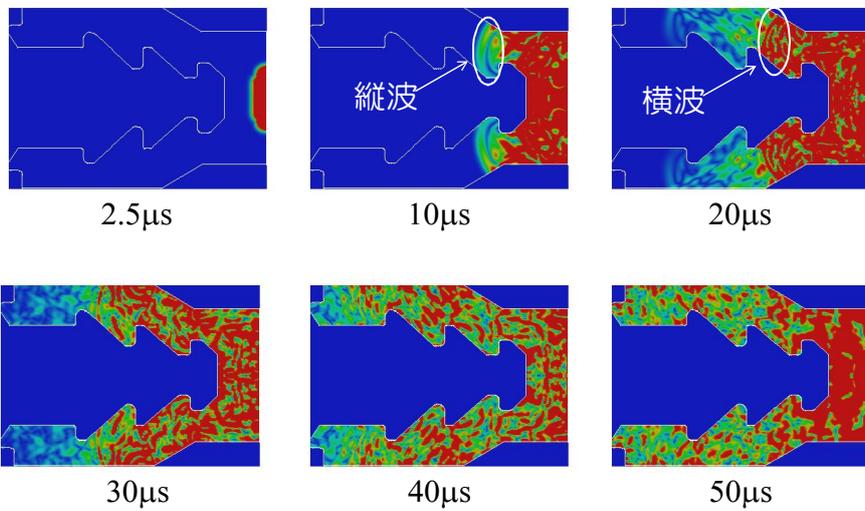
複雑形状をした解析モデル



発電プラントのタービン中の波動伝搬

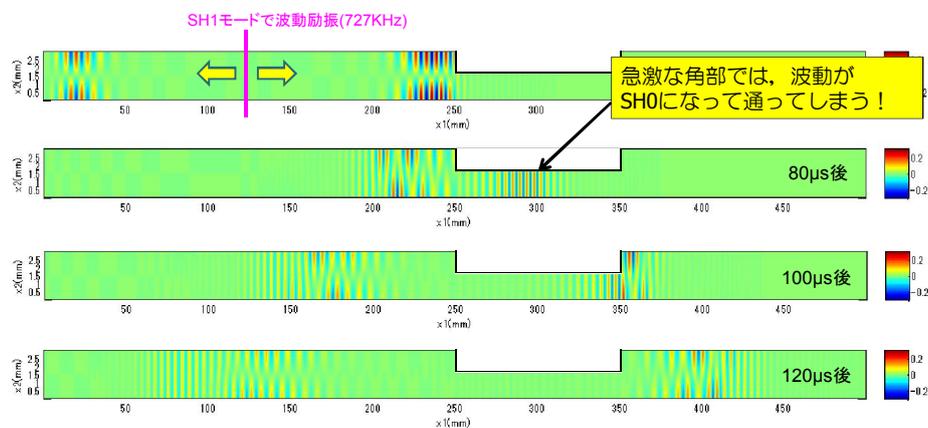
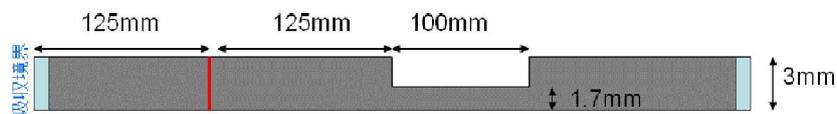
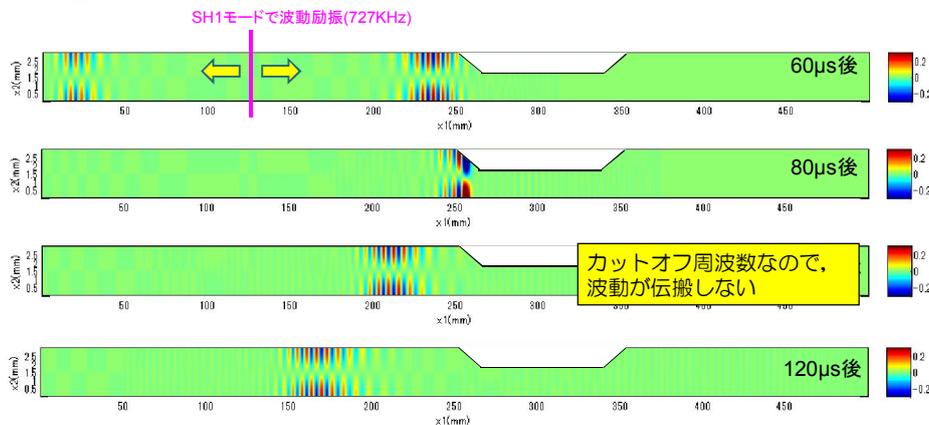
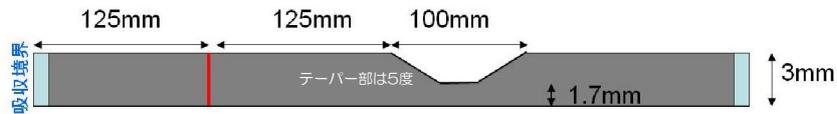


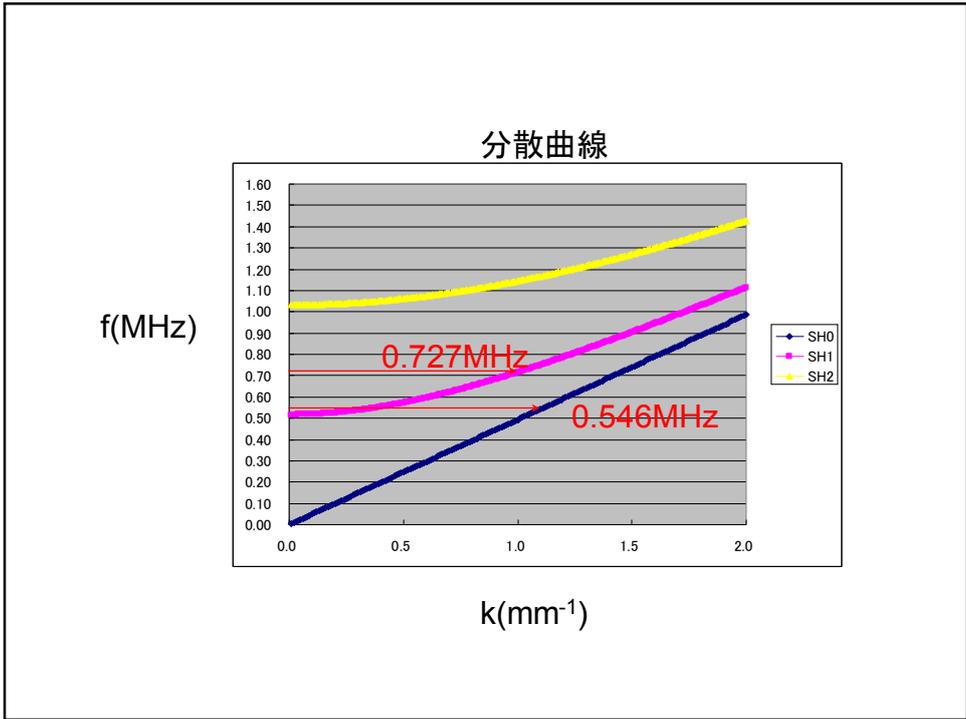
波動伝搬(x_1 - x_3 断面)



ガイド波の伝搬

中村暢伴, Silvin Uribe, 荻博次, 平尾雅彦,
 “電磁超音波センサによるSH板波のモード変換を利用したパイプの減肉検査”,
 非破壊検査, 第58巻10号, 452-458 (2009).





T継手鋼材中の波動伝搬シミュレーション

T継手鋼材

フェーズドアレイ

銅材
($C_L=5800\text{m/s}$, $C_T=3100\text{m/s}$, $\rho=7900\text{kg/m}^3$)

<解析条件>

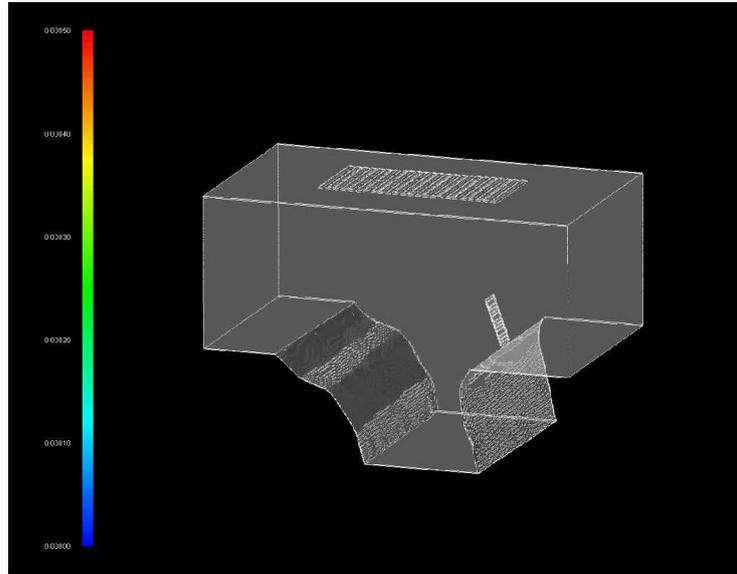
- 送信パルス 1.5波のリッカー波
- 中心周波数 4.0MHz
- セル長 $\Delta x=0.02\text{mm}$
- 総ボクセル数 約10億個
- 時間ステップ $\Delta t=1\text{ns}$
- 総ステップ数 5500ステップ

素子数 24個

素子幅 0.5mm

ピッチ長 0.6mm

T継手鋼材中の波動伝搬シミュレーション-Movie



Snapshot(x_1 - x_3 断面)

