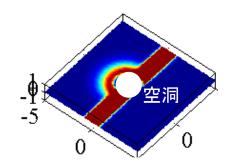
# NDE 4.0へ向けた 応用力学・計算力学と データサイエンス

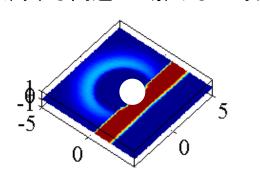


群馬大学大学院理工学府 環境創生部門 准教授 斎藤 隆泰

- 差分法, 有限要素法. 粒子法はまだメジャーではなかった
- 境界要素法(高速多重極境界要素法が登場し始めた頃. ただし 時間領域の問題はほとんど解かれていない)
- MPIやOpenMPもほとんど一般には使われていない
- 32bitのPCで数値計算(最大で4GBのメモリ)
- 2006年に東工大でTSUBAME1.0 (スーパーコンピューターが稼働)
- 世間一般にAI(人工知能)という用語はほとんど使われていない

Ex.)空洞による入射波の散乱問題の例 時間領域境界要素法はごく簡単な問題しか解けない時代



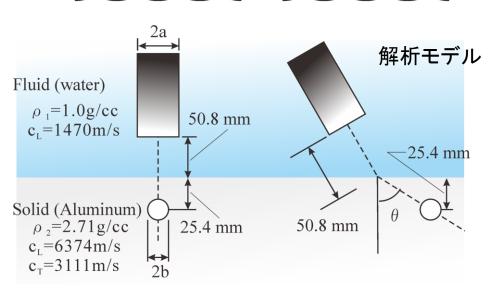


- 1. はじめに
- 2. 超音波シミュレーション技術
- 2.2 数値解析法の選択
- 2.4 ベンチマーク問題
- 3. 逆問題としてのアプローチ
- 3.2 逆散乱解析
- 4. アレイ超音波計測
- 5. 結論

0.1

#### QNDE(非破壊検査の国際会議)で出たベンチマーク問題

- USA2グループ, 韓国, ドイツが同じ問題をトライ
- いずれのグループも近似解法で解いていた(この頃はまだ十分に超音波 シミュレーションと実験を比較できなかった)



基本的に超音波の伝搬は目で見ることができない. シミュレーションによる 予測は大事

Piston Transducers: Unfocused

a=6.35 mm (1/4 in.)

Focused

a=12.7mm(1/2in.)

FG=152.4mm(6in.)

Scattering objects:

Spherical pore

Side-drilled hole

2b=0.125,0.25,0.5,1,2,4mm

Refracted angles(L and T)  $\theta = 30^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 75^{\circ}$ 

#### Reference waveform:

$$Y_0(t) = \begin{cases} 1 - \cos\left(\frac{2\pi f}{3}t\right) & \text{for } 0 \le t \le \frac{3.0}{f} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

1. はじめに

2. 超音波シミュレーション技術

2.2 数値解析法の選択

2.4 ベンチマーク問題

3. 逆問題としてのアプローチ

3.2 逆散乱解析

4. アレイ超音波計測

5. 結論

### NDE4.0:

Industry4.0に準えて非破壊評価の分野で提唱された概念. デジタライゼーションによる非破壊検査の高度化・効率化のための技術開発やデータの交換・管理などの改革を描いたロードマップ.



ビッグデータ

数値シミュレーション

(高性能計算機等) ARやVR AI(人工知能) 知的可視化、先進計測

- ・AIの応用の可能性
- J.D. Achenbach: Quantitative nondestructive evaluation, International Journal of Solids and Structures Volume 37, Issues 1–2, pp.13-27,2000.
- ・機械学習の基礎の適用の可能性 高堂谷正樹,野竹正義,北原道弘:定量的非破壊評価への ニューラルネットワークの適用,非破壊検査,42(5),pp.230-236,(1993)

# 大規模弾性波動解析の例

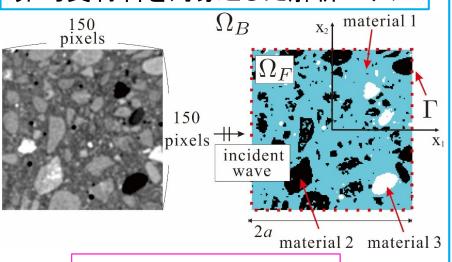
斎藤隆泰・瀬川尚揮・石田貴之・廣瀬壮一:並列化された演算子積分時間領域高速多重極境界要素法を用いた大規模多重散乱解析,計算数理工学論文集,vol.11,pp.95-100,(2011)

斎藤隆泰・市川諒・稲垣祐生:2次元波動伝搬問題に対する演算子積分時間領域境界要素法・イメージベース有限要素法結合解法,計算数理工学論文集vol.16, pp.1-6, (2016)

T. Maruyama, T. Saitoh, T. Q. Bui and S. Hirose: Transient elastic wave analysis of 3-D large-scale cavities by fast multipole BEM using implicit Runge-Kutta convolution quadrature, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol.303, pp.231-259,doi:10.1016/j.cma.2016.02.002, (2016)

T. Saitoh and H. Takeda: Convolution quadrature time-domain boundary element method for viscoelastic wave scattering by many cavities in 3-D infinite space, International Journal of computational methods, (2021), (掲載決定済)

### 非均質材料を対象とした解析モデル



#### 材料1~3のパラメータ

 $c_{L1}/c_{T1} = 1.775 \ c_{T1}/c_{T1} = 1.0 \ \rho_1/\rho_1 = 1.0$   $c_{L2}/c_{T1} = 1.955 \ c_{T2}/c_{T1} = 1.11 \ \rho_2/\rho_1 = 1.155$  $c_{L3}/c_{T1} = 0.151 \ c_{T3}/c_{T1} = 0.08 \ \rho_3/\rho_1 = 0.0005$ 

#### 解析パラメーター

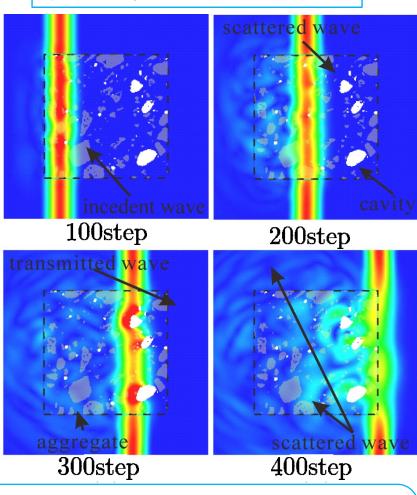
◆境界要素数: $M_B = 600$  ◆波長:  $\lambda/a = 2.0$ 

◆有限要素数:  $M_F = 22500$ 

◆時間増分:  $c_{T1}\Delta t/a = 3.33 \times 10^{-3}$ 

◆解析時間:  $c_{T1}t/a = 3.41$ 

#### 解析結果のスナップショット



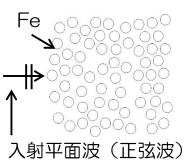
PML等を使わずに放射条件を満足する 境界要素法と結合

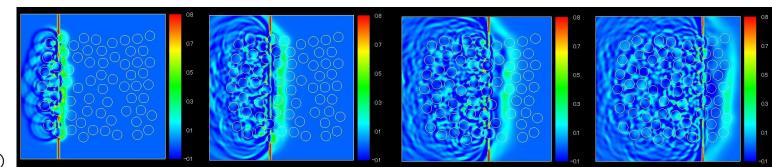
5

斎藤隆泰ら:並列化された演算子積分時間領域境界要素法を用いた大規模多重散乱解析(2010)

多重散乱問題への応用

介在物群による散乱波動場(中規模な波動解析)





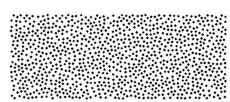
空洞群による散乱波動場(大規模で複雑な散乱波動場)

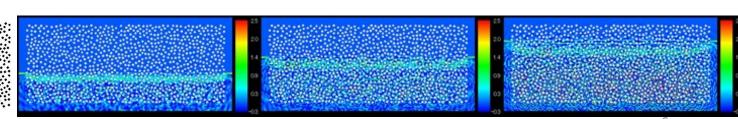
•未知数: 128,000×1024時間ステップ

=131,072,000(FEMなら未知量100億超?)

- •MPI+OpenMP+高速多重極法を利用,128並列
- •計算時間:およそ24時間程度

高速多重極法の適用により 複雑かつ大規模な波動解析 も可能となりつつある





# 異方性弾性波動解析と 逆散乱解析

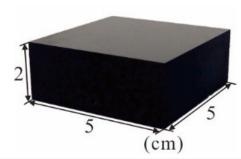
A. Furukawa, T. Saitoh and S. Hirose:Convolution quadrature time-domain boundary element method for 2-D and 3-D elastodynamic analyses in general anisotropic elastic solids, Engineering Analysis with Boundary Elements vol.39,pp.64-74(2014)

斎藤隆泰・小野寺貴・古川陽・廣瀬壮一:純面外波を利用した異方性弾性体中のき裂に対する逆散乱解析,土木学会論文集A2(応用力学),vol.74,No.2,(応用力学論文集 Vol. 21), l\_65-I\_74,(2018)

T. Saitoh, A. Mori, K. Ooashi and K. Nakahata: Development of a new dynamic elastic constant estimation method for FRP and its validation using the FDTD method, Insight- Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol.61(3),pp.162-165, (2019)

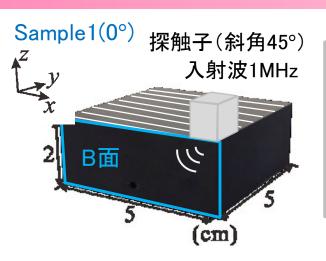
前原佑・竹田晴彦・斎藤隆泰:有限要素法を用いた屈曲CFRP中の欠陥に対する3次元順解析および時間反転解析,計算数理工学論文集,vol.19, pp.103-108, (2019)

### 解析結果と レーザー超音波可視化試験結果の比較 — Sample1(0°)



弾性定注
$$C_{ij} = \begin{pmatrix} 144.95 & 3.87 & 3.87 & 0 & 0 & 0 \\ & 14.19 & 6.03 & 0 & 0 & 0 \\ & & 14.19 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 4.08 & 0 & 0 \\ & & & & 6.09 & 0 \end{pmatrix}$$
単位: G

### >> EFITによる解析結果(LUVTと比較)



#### 弾性定数(単位:GPa)

 $C_{11} = 144.95$ 

 $C_{33} = 14.19$ 

 $C_{13} = 3.87$ 

 $C_{55} = 6.09$ 



x方向が炭素繊維の 配向方向であることより C<sub>11</sub>が他の弾性定数に比べて 大きな値となっている

#### - 解析パラメータ

入射波の周期  $T = 1.0 \times 10^{-6}$  (s)

格子点間隔  $\Delta d = 2.5 \times 10^{-5} (m)$ 

時間幅  $\Delta t \approx 1.6 \times 10^{-9} (s)$ 

粒子速度の大きさ $\sqrt{\dot{u}^2 + \dot{w}^2}$ をプロット

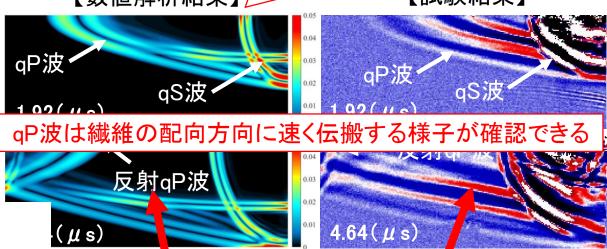
入射波(斜め入射)

 $oldsymbol{v}^{ ext{in}} = oldsymbol{a} \sin rac{2\pi t}{T} (0 \leq t \leq T)$ 

 $= \begin{pmatrix} a_x \\ a_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -rac{1}{\sqrt{2}} \\ -rac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$ 

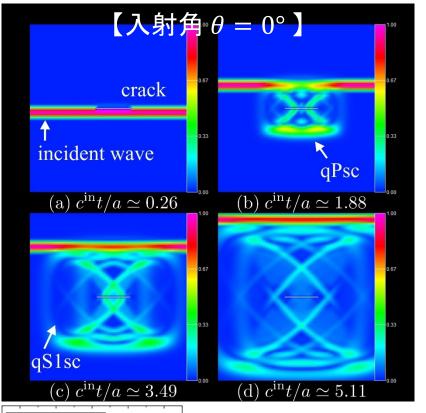
【試験結果】

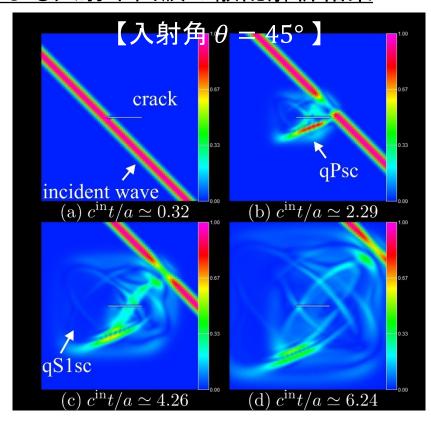
【数値解析結果】

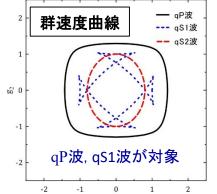


数値解析結果の超音波の伝搬挙動は νーザー可視化試験結果と<u>概ね一致している</u>ことが確認できる

推定した弾性定数は妥当であると言える







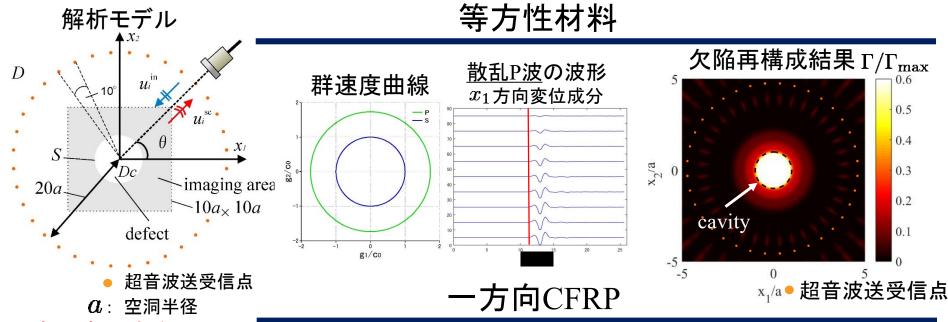


qP波は四角形状に伝搬し、 qS1波は、クロスしながら伝搬する

·時間増分:  $c^{ ext{in}}\Delta t/a\simeq 0.065~( heta=0^\circ), 0.079~( heta=45^\circ)$ 

### 2次元逆散乱解析の数値解析例(■

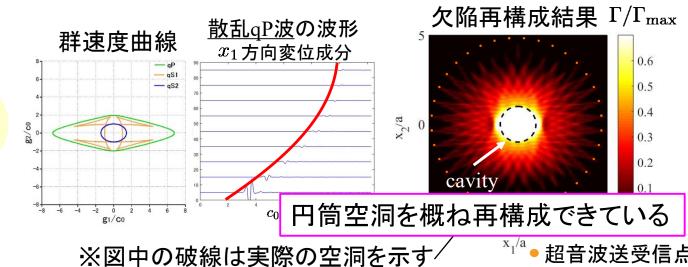
CQ-BEMを利用した順解析の結果を利用した欠陥形状再構成の数値解析例を示す



<u>空洞全周方向から</u> 超音波を送受信

特性関数  $\Gamma(y)$ の空間分布で 欠陥形状を再構成

$$\Gamma(oldsymbol{y}) = \left\{egin{array}{ll} 1 & ext{ for } oldsymbol{y} \in D_c \ 0 & ext{ for otherwise} \end{array}
ight.$$



# 時間反転法と欠陥形状再構成

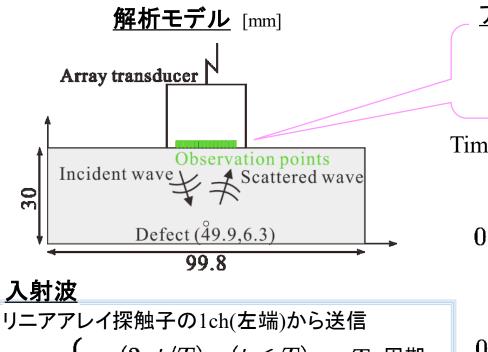
K. Kimoto, K. Nakahata and T. Saitoh: An elastodynamic computational time-reversal method for shape reconstruction of traction-free scatterers, wave motion, pp.23-40, (2017)

斎藤隆泰・田代匡彦・森川光・木本和志:トポロジー感度を欠陥検出指標に用いた時間反転法の3次元マトリクスアレイ探傷法への応用,土木学会論文集 A2(応用力学), vol. 75, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 22), I\_41-I\_49, (2019)

田代匡彦・斎藤隆泰・木本和志:トポロジー感度を欠陥検出指標に用いた二次元動弾性時間 反転解析とリニアアレイ探傷法への応用,土木学会論文集 A2(応用力学), vol. 76, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 22), p.l\_15-l\_24, (2020)

斎藤隆泰・石黒明日海:シミュレーションを活用したデジタルツイン非破壊評価に対する展望, 非破壊検査, vol. 70, No.2, pp.59-64, (2021)

T. Saitoh and A. Ishiguro: Surface crack detection in a thin plate using time reversal analysis of SH guided waves, Int. J. Structural Engineering and Mechanics, (掲載決定済), (2021)



$$u^{in} = egin{cases} \cos(2\pi t/T) & (t \leq T) & T:$$
周期 $0 & (t > T) & t:$ 時間

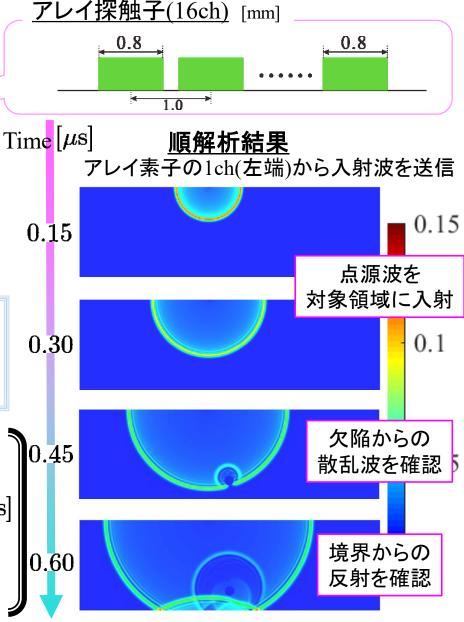
#### 解析条件

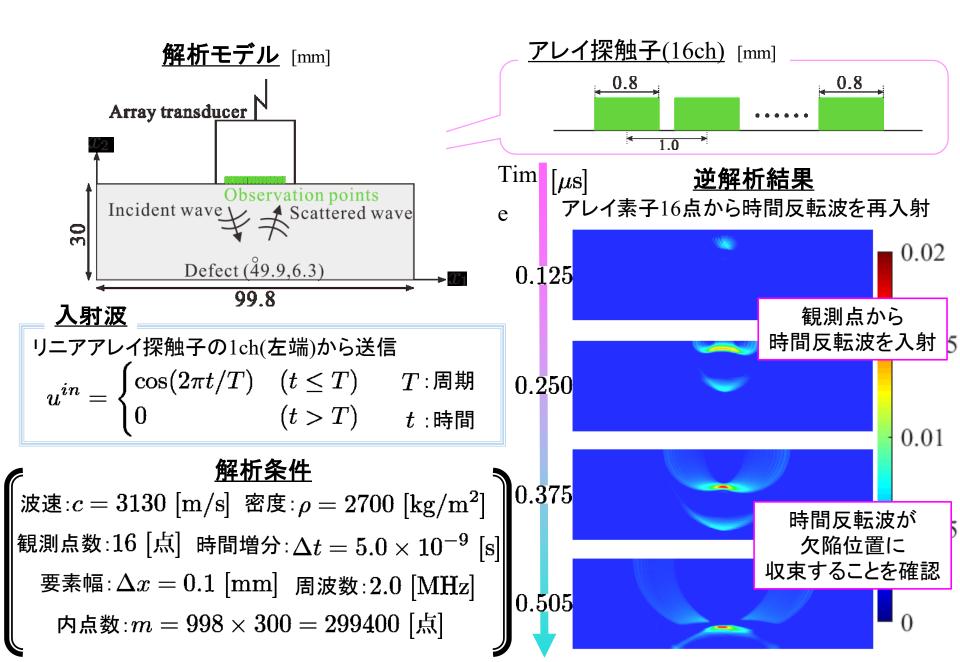
波速: $c=3130~{
m [m/s]}~$ 密度: $ho=2700~{
m [kg/m^2]}$ 

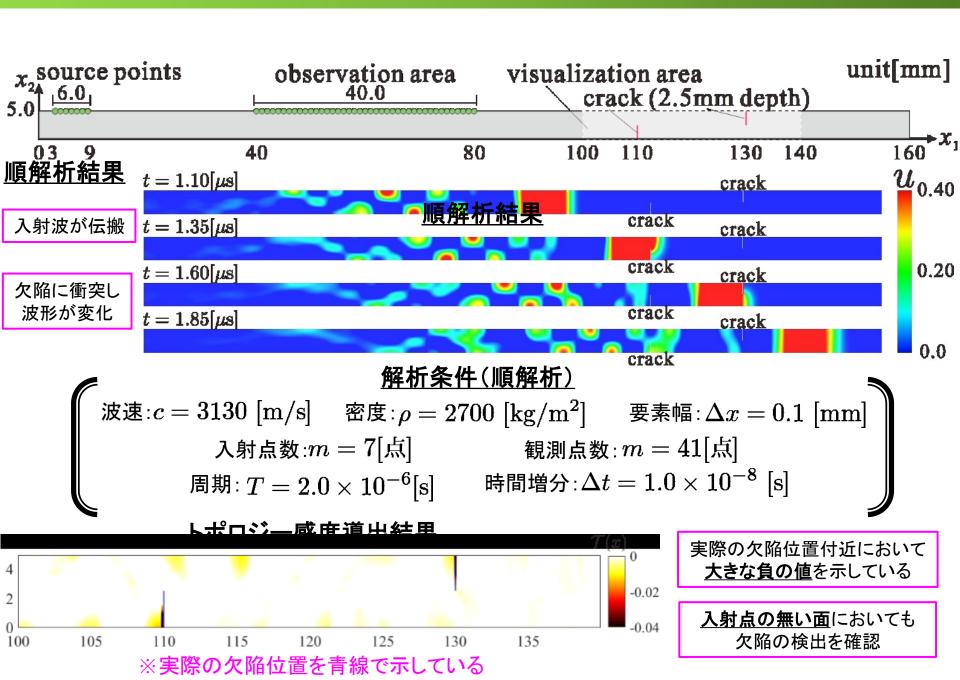
観測点数:16 [点] 時間増分: $\Delta t = 5.0 imes 10^{-9}$  [s]

要素幅:  $\Delta x = 0.1 \text{ [mm]}$  周波数: 2.0 [MHz]

内点数: $m = 998 \times 300 = 299400$  [点]







## AIのNDEへの応用

斎藤隆泰: 超音波伝搬に対する深層学習の試み, 超音波TECHNO, vol.32(3), pp.42-47, (2020)

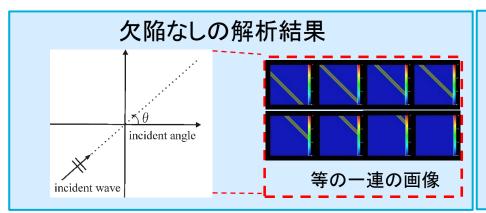
斎藤隆泰・加藤毅・廣瀬壮一:時間領域境界要素法で求めた散乱波動場の深層学習と欠陥種別の判定の試み、非破壊検査, pp.272-279, Vol.70(7), (2021)

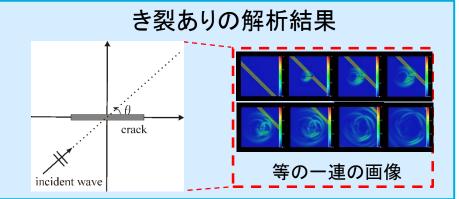
斎藤隆泰・石黒明日海:シミュレーションを活用したデジタルツイン非破壊評価に対する展望, 非破壊検査, vol. 70, No.2, pp.59-64, (2021)

#### ① 問題の設定とデータセット作成

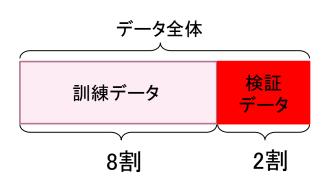
問題:き裂あり,空洞あり,欠陥なしの場合の結果を判定できるか?

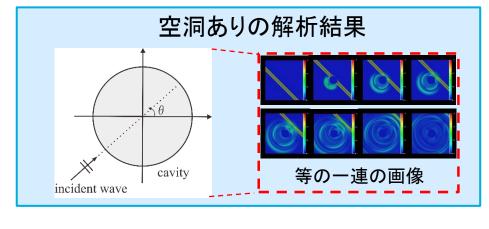
様々な入射角で入射波を送信し、BEMで画像データを取得(人間の目で違いを容易に判別)





② 深層学習モデルの生成 (トライアル例(1)と同様にCNNで)





### ③ 未知の画像の精度を検証

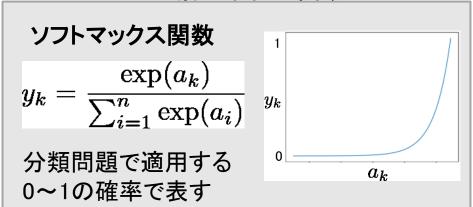
学習させてない画像データを用いて、欠陥の有無、有りならどちらかを判定する



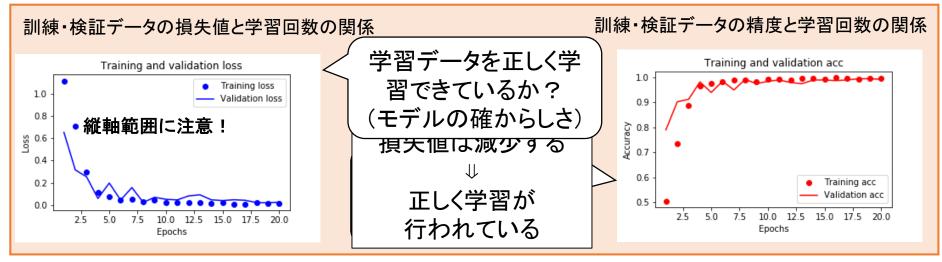
#### 学習データ

①BEMで得た入射角90度の欠陥,き裂, 欠陥なしの解析画像(全1000枚×3通り) ⇒空洞か否か,欠陥なしか合計3000通り の画像 訓練データ 検証 データ 2400枚 + 600枚 = 3000枚

#### 出力層の活性化関数



### 学習結果



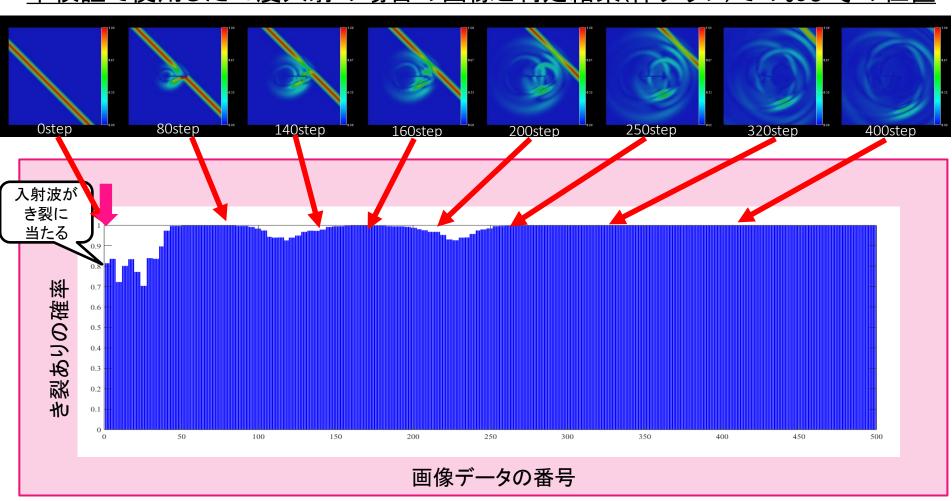
4epochsで損失値は0.1未満となり、その後、精度は上昇している

➡このモデルを用いて未知の画像を判定する



求めた学習モデルに汎用性があるか確認するため未知のデータ(45度入射) で検証する(合計500枚の空洞周辺の変位の時刻歴)

本検証で使用した45度入射の場合の画像と判定結果(棒グラフ)でのおよその位置



未知のデータに対してもき裂の有無を概ね判定できている