

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 23 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360387

研究課題名(和文)超音波探傷技術の高精度化研究

研究課題名(英文)A Study on the High Performance of Ultrasonic Inspection by Numerical Simulation

研究代表者

吉川 孝男(Yosikawa, Takao)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50380572

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,300,000円、(間接経費) 3,390,000円

研究成果の概要(和文)：点音源群の重ね合せ法をベースとした超音波伝播シミュレーションプログラムを開発し、FEM解析および実験結果との比較・検証を行ない、開発した手法の有用性を確認した。本手法により、FEM解析手法の1/1000の計算時間で、超音波探傷をシミュレーションできる。また、就航後の船体では鋼材の表裏面に塗膜がある状態での探傷が必要となるが、塗膜厚さによって非線形に欠陥からのエコー高さが変化することが問題となっているが、この原因が塗膜内での超音波の多重反射と、塗膜と鋼材とに間で生じる超音波のモード変換の両方であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have developed an ultrasonic wave propagation simulation program based on superposition method of point sound sources. The calculation results were compared with FE and experimental results, and its accuracy were confirmed.

Using the developed method, the simulation of ultrasonic propagation can be performed with 1/1000 computing time of FE calculation.

Defects detection under the presence of the coating film of the steel material is required for the ship in service. The echo height from a defect varies nonlinearly with coating thickness. It was clarified that it is due to the mode conversion of ultrasonic waves at the boundary between coating and steel and the multiple reflection of the ultrasonic wave in the coating film.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、船舶海洋工学

キーワード：超音波探傷 シミュレーション 欠陥同定 塗膜 音源重ね合わせ

### 1. 研究開始当初の背景

船舶、橋梁、プラント機器など構造物においては、溶接施工時に多層盛りの層間や開先面の融合不良や、スラグ巻き込みによる欠陥が発生することがある。また、鍛造品、鋳造品においては、製作時に欠陥が発生することがある。通常、これらの欠陥検査のために非破壊検査が行われる。

非破壊検査の一つである超音波探傷は、安全性やコスト面で他の非破壊検査より有利である面も多く、また、TOFD 法やフェーズドアレイを用いた新しい検査手法の開発などの技術的進歩もあり、X 線探傷に代わりその適用が拡大しつつある。

最近、大型コンテナ船のデッキならびにハッチコーミングに 50mm を超える極厚板が採用されつつあるが、極厚板では靱性低下が懸念され、これに起因する脆性破壊について検討するために、日本船舶技術研究協会が主催して『超大型コンテナ船構造安全対策検討委員会』が設置され、その中で、現状における船体構造に対する超音波探傷技術の実力を検証するための試験研究がなされた。その結果、今後解決すべき以下の問題点、課題があることが明らかにされた。

- ・計測波形から欠陥の寸法評価を行なう際に豊富な経験と労力を必要とする。そのため、探傷精度は検査技能者の経験・技量によるところが大きく、き裂寸法など実際の判断結果には大きなばらつきが存在する。
- ・初期き裂から進展した疲労き裂の場合、載荷状態によっては圧縮の残留応力が作用し、き裂が閉じた状態にあり、き裂の探傷精度が大きく低下する。特に、極厚の脆性破壊評価に重要な内在欠陥の板厚方向長さに関しては、短めに評価する傾向があり、場合によっては、き裂を見逃すこともある。
- ・就航後の船舶の検査においては、表面塗膜の影響で探傷精度が低下する。

### 2. 研究の目的

船舶などの構造物の安全性を確保するには、溶接部などに存在する欠陥を探傷し、有害なものについては補修し取り除く必要がある。しかしながら、従来の超音波探傷においては、その精度は検査技能者の経験・技量によるところが大きく、実際の評価結果には大きなばらつきが存在し、重大な欠陥を見逃す場合や、欠陥でないものを欠陥と判定して余分な補修施工を行う場合も多いのが現状である。そこで、本研究では検査技能者の経験・技量によらない客観的な欠陥の評価技術（欠陥の位置、大きな、形状の評価）の構築を目指す。

### 3. 研究の方法

超音波探傷試験における欠陥の寸法測定精度は検査技術者の技量に依存していると

ころが大きい。一方、超音波探傷試験で得られた欠陥からのエコー高さ、波形形状、走査グラフの形状等は欠陥の種類や性状と相関がある。したがって、これらの特徴や相関性および過去に蓄積したデータやノウハウ等を駆使することによって、欠陥形状や種類の推定が可能である。本研究では、溶接ビードの影響などにより垂直探傷法の適用が困難な溶接部近傍の欠陥に対しても、技能者の技術レベルに依存しない探傷技術を提供することを目指し、以下の研究を実施する。

#### (1) 斜角探傷技術の高精度化研究

厚板における内在欠陥を精度よく同定するための手法を提案することを目的とし、点音源群の重ね合せ法をベースとしたシミュレーションプログラムを開発する。さらに、その有効性を明らかにするために、FEM を用いたシミュレーションおよび人工欠陥試験体を用いた試験による検証を行なう。

#### (2) 建造後の探傷方法の構築

船舶の構造安全性を確保するには、建造時の非破壊検査だけでなく、建造後の稼働時や定期検査時の検査も重要となるため、これが高精度に行えるようにするために、塗膜影響をキャンセルできる新しい探傷方法を開発する。

### 4. 研究成果

#### (1) 超音波シミュレーション技術の構築

FEM を用いた超音波伝播シミュレーションに時間を要することから、これを補う手段として、点音源群の重ね合せ法をベースとしたシミュレーションプログラム SPM (Superposition method) 法を開発した。

この数値計算では、Fig.1 に示すように超音波を送受信する探触子の振動子面、探触子と探傷面との接触面、欠陥面、必要に応じて試験体底面のみを考え、それぞれ有限個の微小領域に分割し、各微小領域の中点を反射音源の代表点として面上に並ぶ点音源群の集合として扱う。それらの点音源全てが送受信を行うものとし、受信点が他の全ての送信点から受け取る音圧を逆方向に追跡して伝播経路と伝播距離による減衰である拡散減衰を理論式に基づいて計算し、得られる音圧を重ね合わせることで受信点の音圧を求める。このとき各音圧は時間の情報を含むため、音

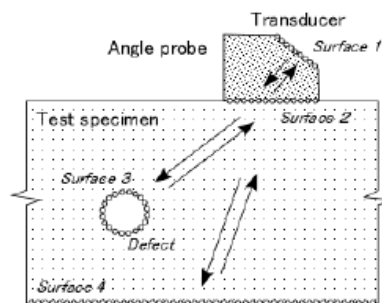


Fig.1 Image of divided sound point for angle beam ultrasonic testing

点間の距離の違いにより位相のずれが発生することになる。

本計算では2次元問題として取り扱うため、音波のエネルギーは平面を同心円状に円筒波として広がっていくものとする。音源からの距離が  $r$  である円状の波面の単位面積におけるエネルギー  $W_r$  は、音源から放射されたエネルギーを  $W_0$  として  $W_r = W_0 / (2\pi r)$  で表わされるが、その箇所での音圧は  $\sqrt{W_r}$  に比例するので、円筒波の音圧  $P_r$  は  $r$  の平方根に反比例する。また、このことを用いて、 $n$  個の微小区分領域  $(s_{1,1}, s_{1,2}, \dots, s_{1,n})$  に分割した送信面から  $m$  個の微小区分領域  $(s_{2,1}, s_{2,2}, \dots, s_{2,m})$  に分割した受信面に超音波が伝播するとき、任意の受信区分領域  $s_{2,j}$  ( $1 \leq j \leq m$ ) が時刻  $t$  に送信面から伝達する音圧  $p(s_{2,j}, t)$  は次式により算出される。

$$P(s_{2,j}, t) = \sum_{i=1}^n p\left(s_{1,i}, t - \frac{r_{i,j}}{c}\right) \cdot \sqrt{\frac{ds_{1,i}}{2\pi r_{i,j}}} \times \delta_i \cdot \cos\gamma_1 \cdot \cos\gamma_2 \quad (1)$$

ここで、

- $r_{i,j}$  :  $s_{1,i}$  と  $s_{2,j}$  との距離
- $c$  : 媒質中の音速
- $ds_{1,i}$  : 送信区分領域の長さ
- $\gamma_1$  : 伝播経路方向に垂直な面と送信区分領域のなす角
- $\gamma_2$  : 伝播経路方向に垂直な面と受信区分領域のなす角

Fig.1 の図中に示す矢印が超音波の伝播経路を示しており、振動子 (Surface 1) から発信された超音波が振動子と探傷面の接触面 (Surface 2) を通って欠陥面 (Surface 3) または底面 (Surface 4) に到達し、反射後再び Surface 2 を通って振動子に到達する。振動子の受信点で受信された音圧の平均値を受信波形とする。

## (2)構築した解析手法の検証

### FEM 計算結果との比較による検証

実際の超音波探傷試験では音圧を時系列ベースの絶対値で定量的に比較するのが難しいため、エコー高さ (振幅の最大値) で定量的な評価が行われている。Fig.2 は、垂直探傷による計算結果の一例である。本節では、縦軸は欠陥中心での反射波のエコー高さ ( $H_{c=0}$ ) を 0dB とし、各探触子位置での欠陥から反射波のエコー高さ ( $H$ ) との相対エコー高さ ( $H - H_{c=0}$ ) で表している。横軸は探触子中心と欠陥中心の距離  $c$  を表す。

探触子の寸法  $B$  が 10mm で、欠陥深さ  $d$  をそれぞれ 10mm、20mm、30mm に変えた場合を示しているが、SPM の結果はプロット点で示した FEM の結果とよく一致している。その他の探傷条件についても両者はよく一致していることを確認しており、SPM の有効性が確認できた。欠陥寸法評価法の一つである欠陥の実寸法と一致する。SPM 法を用いたシミュレーションでも欠陥寸法の検討が可能であることが確認できた。

なお、計算時間は、総要素数約 150 万、総時間ステップ数約 1 万の FEM 計算で約 6 時間要したものが、SPM では 20 秒程度と、1/1000 以下に抑えることができた。

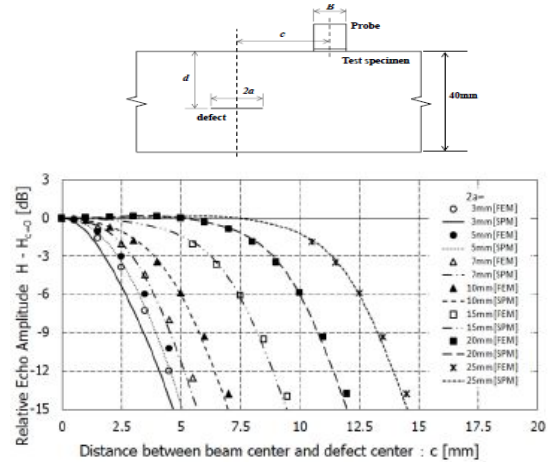


Fig.2 Comparison of SPS and FEM for echo height

### 実験による検証

人工欠陥試験体を用いた斜角探傷試験を行った。人工欠陥試験体の外観を Fig.3 に示す。試験は、周波数 2MHz、振動子寸法 10 × 10mm、屈折角 45 度の斜角探触子を用いて、試験体表面上の幅中央位置で、欠陥に対して探触子を前後に移動させることで欠陥からのエコー高さの変化を捉えた。実験結果を Fig.4 に示す。欠陥形状 (α = 45° の strip, square, slit) の違いによるエコー高さを変えると、ほぼ同じエコー高さ変化となっていることがわかる。すなわち、今回の実験の範囲では 2 次元欠陥を模擬した試験体の計算 (2 次元計算) でエコー高さの評価を行うことが可能であると言える。

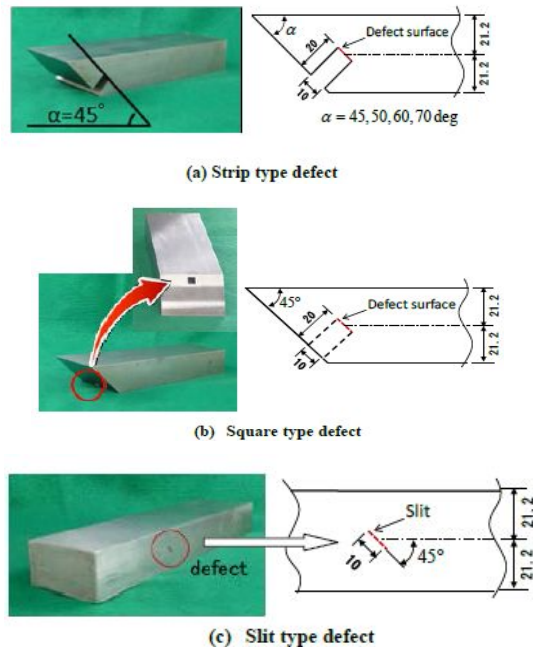


Fig.3 Test specimens

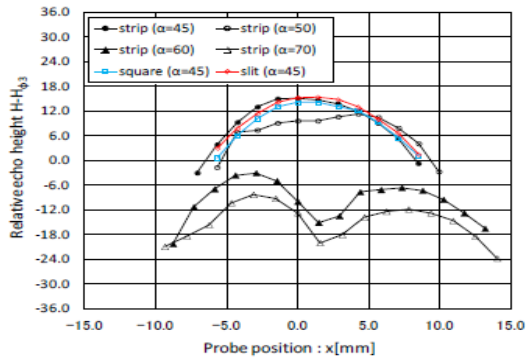
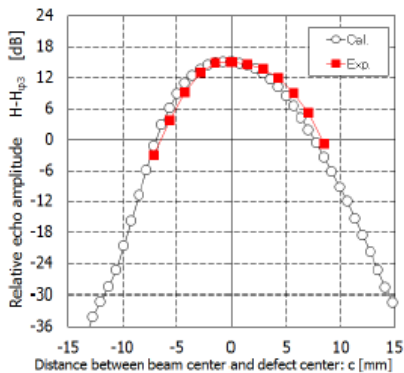


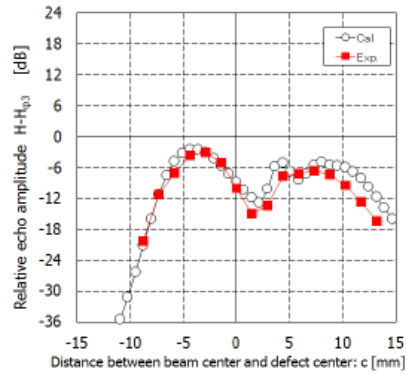
Fig. 4 Comparison of measured echo height between three types of defects

試験体に対応する計算により欠陥からのエコー高さの変化を捉えた走査グラフを求め、実験結果と比較した。得られたエコー高さの変化（走査グラフ）の結果を Fig.5 に示す。Fig.5(a)は、45度の傾きの欠陥に対して屈折角 45度の探触子を用いた場合で、欠陥中心を狙った時に欠陥面への超音波の入射角は0度（垂直入射）となる。図の横軸は探触子を移動させた際の欠陥中心からビーム中心線までの距離を表す。シミュレーション結果は実験値とよく一致している。6dB ドロップ法を適用して寸法を求めるとほぼ 10mm になっており、欠陥の実寸法と一致する。このことから、SPM を用いたシミュレーションで欠陥寸法の検討が可能であることが分かる。

また、Fig.5(b)で欠陥中心を狙ったときに超ピークエコー高さから 6dB 低下する範囲を欠陥の寸法とする 6dB ドロップ法を適用して欠陥寸法を求めると 5mm になっており、欠陥長さを評価できないことがわかる。欠陥面への入射角が 15 度となると欠陥面からの反射エコーは低く、逆に欠陥端部付近を狙ったときにエコー高さのピークが得られる。一般に端部エコーとして知られているものだが、2つのピーク間の距離を見ると約 10mm になっており、欠陥の実寸法に対応していることが分かる。このことより、SPM による簡易的な計算でもこの欠陥端部で現れるエコーがシミュレーションできることが分かった。



(a) Incident angle 0 deg. (  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$  )



(b) Incident angle 15 deg. (  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta = 60^\circ$  )

Fig.5 Comparison of calculation and experiment

### (3) 超音波探傷試験の反射エコー高さに及ぼす塗膜厚さの影響について

片面が塗装されている試験体の塗装面側から、あるいは非塗装面側から超音波探傷試験を実施する場合に塗膜厚さが超音波エコー高さに及ぼす影響について調べた。塗膜厚さが異なる塗膜付き試験体を製作し、探触子寸法、探触子周波数を変えて反射エコー高さを計測するとともに、数値シミュレーションを実施し、塗膜の厚さによりエコー高さが増減する原因を明らかにした。さらに、塗装された試験体の反射エコー高さを計測する場合に、塗膜厚さの変化の影響を受けない計測方法について検討を行った。

塗膜内超音波干渉のメカニズムについて非塗装面から探傷する場合、鋼中に入射された超音波は鋼と塗膜の境界面で反射する波と、鋼から塗膜内に入射し塗膜裏面で反射する波があり、この両者が干渉することになる。Fig.6で、入射波の波面 BB' が屈折して波面 CC' に進んだとする。CC' は同じ波面であるから、その上の各点で波の位相は同じである。C' 点で反射する波 B'C'F と、塗膜の中を通過して出てきた波 CDC'F との位相の違いは、一方の波が CDC' をよけに通ることによって生じる。屈折角を  $\alpha$  とすると、波 B'C'F と波 CDC'F との距離差は

$$CD + DC' = CD + DE = CE = 2h_p \cos \alpha \quad (4)$$

である。距離差と波長の比  $R$  を式(5)のように定義する。

$$R = 2h_p \cos \alpha / \lambda_{PL} \quad (5)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left\{ (C_{PL} / C_{SS}) \sin \theta \right\}$$

$\lambda_{PL} = C_{PL} / f$   $\lambda_{PL}$  : 塗膜中の波長  
 $C_{SS}$  : 鋼中の横波音速  
 $\theta$  : 鋼から塗膜への入射角  
 $f$  : 探触子周波数

鋼から塗膜に超音波が入射する場合、波 A' が C' 点で反射するとき位相の反転は起こらない。また、波 A が D 点で反射するとき位相の反転は起こらない。よって、 $R = 0.5 + n$  ( $n$  : 整数) のとき 2つの反射波の位相差は

$(2n+1)\pi$  となり、2つの波は弱め合う。一方、 $R=n$  のとき2つの反射波の位相差は  $2n\pi$  となり、2つの波は強め合うことになる。

塗装面から探傷する場合は、入射時および受信時に干渉が生じる。入射時には探触子から発信された超音波が塗膜下面で反射し、つぎに塗膜上面で反射する。その際に探触子からの入射波と干渉することになる。さらに、受信時には底面反射波が塗膜上面で反射し、つぎに塗膜下面で反射する。その際に底面反射波と干渉することになる。

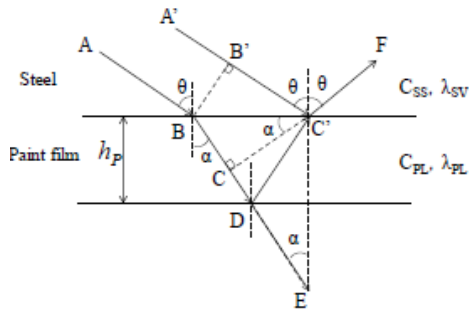


Fig. 6 Interface with the ultrasonic wave in the paint film

#### 塗膜のある場合の反射エコー計測試験とシミュレーション結果

Fig.7とFig.8に垂直探傷試験で、非塗装面、および塗装面から探傷した場合の塗膜厚さと底面反射エコー高さの関係を計算で求めた結果を示す。図からわかるようにエコー高さは  $R=0.5$  で最小値となり、 $R=1.0$  で極大値となっている。さらに、前述の無次元表示を用いると発信周波数の異なるCase1~3のエコー高さの傾向は一致する結果が得られた。図には計測結果も同時に示している。計測結果ではCase2(探触子周波数5MHz)の場合の結果にばらつきがあるものの、計算結果と計測結果は定性的に一致している。

Fig.9とFig.10に斜角探傷試験の場合について塗装面および塗装面から探傷した場合の塗膜厚さとエコー高さの関係について塗膜厚さを0.1mm刻みで変化させて計算した結果および計測結果を示す。計算値と計測値は良く一致した結果が得られている。

エコー高さは、 $R=0.5$  で極小値となり、 $R=2.0$  以降では塗膜厚さに比例して次第にエコー高さは小さくなっている。塗膜が薄い  $R=0.3$  付近の領域ではエコー高さが著しく変化している。この理由については今後検討する必要がある。

以上のことより、エコー高さの非線形な変化の原因が塗膜内の反射波の干渉によるもので、その変化は塗膜厚さとは線形関係とはならず、塗膜厚さと超音波の波長の比によりエコー高さが変化することがわかった。

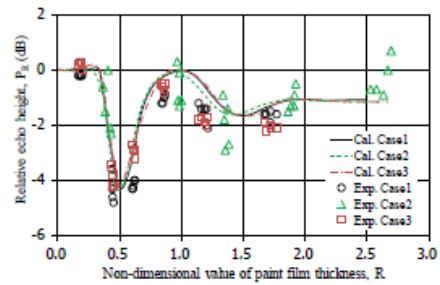


Fig. 7 Relation between paint film thickness and echo height ( for specimen painted on bottom)

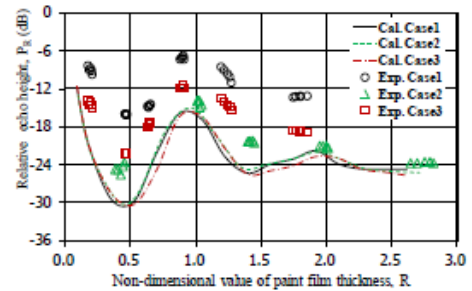


Fig. 8 Relation between paint film thickness and echo height ( for specimen painted on top)

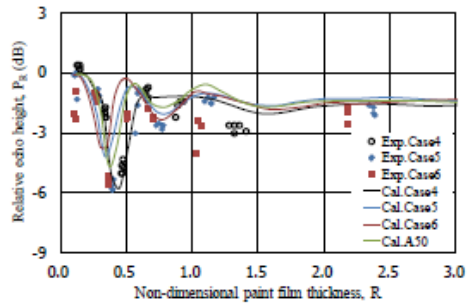


Fig. 9 Relation between paint film thickness and echo height ( for specimen painted on bottom)

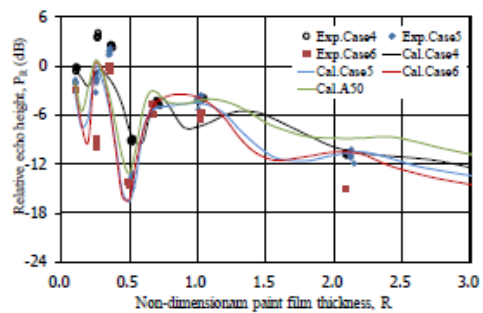


Fig. 10 Relation between paint film thickness and echo height ( for specimen painted on top)

#### 塗膜厚さの影響を受けない計測法

鋼と塗膜の境界面で反射する波と鋼から塗膜内に入射し塗膜裏面で反射する波が干渉しないようにすればエコー高さは変化せず一定値が得られることが期待できる。Fig.10に示すように試験体の裏面あるいは表面に塗膜と同じ物性値を有する非干渉板を設置し、超音波の干渉が生じないようにする方法について検討した。塗膜と同じ音響インピーダンスを有する材料を非干渉板とし

て用い、非干渉板の厚さは 2mm として計算を行った。計算結果を Fig.11 と Fig.12 に示す。いずれの場合も非干渉板を設置することにより底面反射エコーと塗膜と鋼の境界面で反射する反射エコーが分離され干渉していないことがわかる。

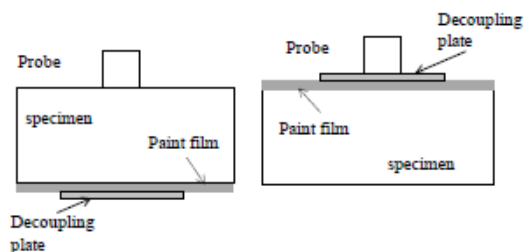


Fig. 10 Calculation model with decoupling plate

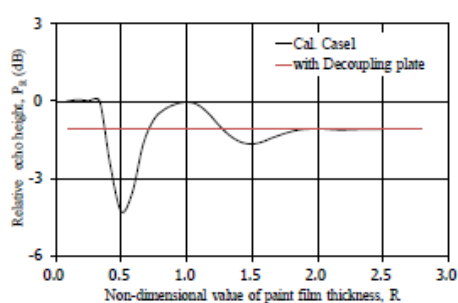


Fig. 11 Effect of decoupling plate on echo height (for specimen painted on bottom)

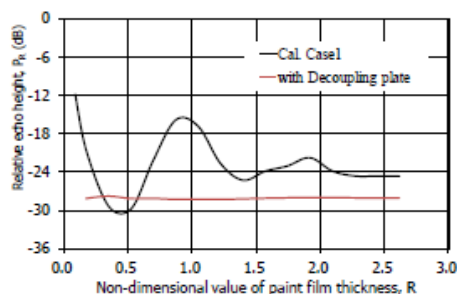


Fig. 12 Effect of decoupling plate on echo height (for specimen painted on top)

#### (4)まとめ

- ・従来の FEM によるシミュレーションに比べて大幅に計算時間の短縮が図れる、点音源群の重ね合せ法をベースとする超音波伝播シミュレーションプログラム SPM (Superposition method) を開発した。
- ・開発した SPM と FEM によるシミュレーションとは良く一致する結果が得られた。さらに、斜角探傷において実施した実験結果とも良く一致する結果が得られた。
- ・欠陥高さの高精度計測に有効な端部エコー法で利用される欠陥端部で生じるエコーに関して、点音源重ね合せシミュレーション法 (SPM) を用いてエコー高さのシミュレーションの可能性が確認された。
- ・塗膜上から超音波探傷試験を実施する場合に、塗膜の影響によりエコー高さが非線形

に変化するが、その影響を調べるために、エコー高さは超音波が干渉することにより変化することを数値シミュレーションおよび実験結果より明らかにした。塗膜内で反射波が鑑賞する影響を減じるために、非干渉板と塗膜と探触子の間に設置することで、塗膜影響をキャンセルできる可能性のあることを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

平澤英幸、柴田大貴、前田正広、吉川孝男、斜角探傷試験における欠陥同定のための音源重ね合せ超音波伝搬シミュレーションについて、日本船舶海洋工学会論文集、査読有、第 15 号 2012 年、pp.135-143

前田正広、平澤英幸、吉川孝男、超音波探傷試験の反射エコー高さに及ぼす塗膜厚さの影響、非破壊検査、査読有、Vol.61, No.9, pp.480-487, 2013

〔学会発表〕(計 1 件)

Jimi RYU, Masahiro MAEDA, Takao YOSHIKAWA, The Development of the Superposition Method for Calculating Wave Propagating in UT, Proceedings of 5<sup>th</sup> PAAMES and AMEC2012, Paper No.GT-14 (6 pages), 2012

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

吉川孝男 (YOASHIKAWA Takao)

九州大学大学院・工学研究院・教授

研究者番号：50380572

(2)研究分担者

前田正広 (Maeda Masahiro)

九州大学大学院・工学研究院・助教

研究者番号：70173713

(3)連携研究者

なし