

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年9月12日現在

機関番号：85406

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06907

研究課題名(和文)塗膜厚さの影響を排除する超音波探傷子の開発に関する研究

研究課題名(英文) A study on development of a probe that eliminates the effects of coating film thickness

研究代表者

前田 正広 (MAEDA, MASAHIRO)

海上保安大学校(国際海洋政策研究センター)・国際海洋政策研究センター・准教授

研究者番号：70173713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：塗膜がある場合の超音波探傷試験の計測波形を数値シミュレーションで再現することを可能とした。また、欠陥からのエコー高さが塗膜厚さにより非線形に変化する原因は、超音波の塗膜内での反射波と透過波との干渉によるものだけでなく、塗膜と試験体との界面で生じるモード変換による超音波の干渉が生じるためであることを明らかにした。

次に、塗膜がエコー高さに及ぼす影響を除去する方法を提案した。さらに、ニューラルネットワークを適用して計測波形から欠陥の大きさを推定する手法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

塗膜上から探傷する場合の欠陥性状の正確な評価技術の構築を目指し、塗膜厚さの影響を排除することができる超音波探傷技術について検討し、構造物の供用中、定期検査時にも超音波探傷試験が容易に適用できるようにして、欠陥の同定精度の向上に寄与しようとするものである。現在、超音波探傷試験で行なわれている多くの労力と費用を要する塗膜を剥離して超音波探傷を実施し、再塗装する工程が不要となり、超音波探傷時の大幅なコストダウンが期待でき、構造物の安全性向上に寄与できると考える。

研究成果の概要(英文)：Utilizing numerical simulation, it was possible reproduce the measurement waveform of the ultrasonic testing when coating film is present. Moreover, it was demonstrated that the cause of the nonlinear change of the height of the reflection echo from the defect depending on the thickness of the coating film is not only the interference of the reflected wave and the transmitted wave of the ultrasonic wave in the coating file, but also the interference of the ultrasonic wave due to the mode conversion that occurs at the interface between the coating and the specimen. We subsequently proposed a method to eliminate the influence of the coating film on echo height. Furthermore, we developed a method to estimate the size of defects from measured waveforms by applying neural networks.

研究分野：構造強度

キーワード：超音波探傷 シミュレーション 塗膜

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

各種機械や構造物の高精度化、長寿命化が加速し、使用環境がますます苛酷になってきている。これにともない構造部が健全であるかどうか調べるために定期的に検査保全することが必要になってきた。現在、構造物に内在する欠陥の検査には超音波探傷試験が有効な手段として利用されている。供用中の構造物は防錆の目的から塗装されており、塗膜上から探傷試験を実施する必要がある場合がある。塗膜上から超音波探傷試験を実施する場合、塗膜の厚さによりエコー高さが変化することが実験より確認されている。

一般的に、超音波探傷試験では標準試験片や対比試験片を用いて探傷感度が設定され、しきい値法やデシベルドロップ法を用いて欠陥寸法の測定が行なわれるが、表面塗膜によりエコー高さが変化すると欠陥の検出性や欠陥性状の正確な評価ができないなどの問題が生じる。塗膜の影響を補正するために検査部位と同等の塗装状態の模擬試験片を準備し、探傷器の感度調整を行なうのは困難である。また、検査精度を確保するために、塗膜を剥離して超音波探傷を実施し、再塗装するには多くの労力と費用を要する。また、超音波探傷では、主として実験的手法により新しい探触子の開発や探傷精度の検証、探傷精度を高めるための施策などが検討されてきた。この方法では、欠陥が既知の試験体を製作し、それを探傷してデータを取得することを基本とするため、コスト、時間などの問題点があった。

以上より、欠陥の検出性の向上、正確な欠陥性状の評価手法、実験的手法に代わる欠陥評価手法の構築および塗膜影響を取り除くことができる新しい検査技術の開発が望まれている。

2. 研究の目的

船舶の建造時だけでなく、供用中の検査時に塗膜上から超音波探傷試験を適用する場合、塗膜の厚さにより超音波エコー高さが変化し、欠陥の検出性の低下や欠陥性状の正確な評価ができないなどの問題が生じる。よって、塗膜によるエコー高さ変化の影響を排除する探傷技術の構築が望まれる。

本研究では、塗膜上から超音波探傷試験を実施する場合の欠陥の検出性の向上、正確な欠陥性状の評価手法の構築を目指し、塗膜厚さの影響を排除することができる超音波探傷技術の構築を目指す。

3. 研究の方法

塗膜上から超音波探傷試験を実施する場合、塗膜の厚さによりエコー高さが変化することが確認されている。通常、超音波探傷を行う際には、試験体の表面には塗膜のない状態で実施される。船舶の定期検査時などでは、すでに塗装されている状態での探傷が必要となるが、塗装面からの探傷は困難なため塗装を取り除いて探傷することになり、多大な労力を必要とする。本研究では、塗膜厚さによる超音波のエコー高さの非線形な変化の原因を解明し、非線形影響を排除する方法を提案して、塗膜のある状態で超音波探傷を精度良く行える計測方法を提供することを目指すし、以下の研究を実施する。

- ・塗膜がある場合の超音波伝播数値シミュレーションの精度検証。
- ・塗膜厚さの違いによるエコー高さの非線形変化の解明。
- ・塗膜厚さによる非線形影響を排除する方法。

4. 研究成果

(1) 垂直探傷におけるエコー高さの変化

数値シミュレーションの精度検証

超音波探傷試験では、主として実験的手法により新しい探触子の開発や探傷精度の検証、探傷精度を高めるための施策などが検討されてきた。この方法では、欠陥が既知の試験体を製作し、それを探傷してデータを取得することを基本とするため、コスト、時間などの問題があった。そこで、実験的手法に代わり数値シミュレーションを用いて欠陥評価手法の構築を行う。

垂直探傷試験を対象として、欠陥の寸法評価に必要な最大エコー高さを求めるために超音波伝播挙動の数値シミュレーションを実施した。数値シミュレーションの精度向上のため振動子の剛性やダンパーの減衰を適切に設定する必要があるため、塗膜がない場合の超音波探傷試験で得られた探触子の底面反射エコーの受信波形と数値シミュレーションの波形が一致する

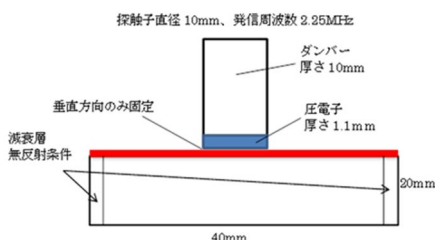


図1 垂直探傷計算モデル

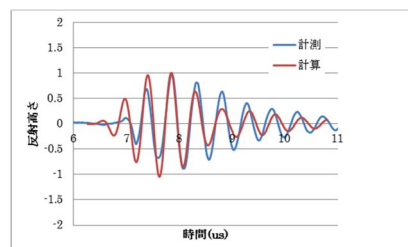


図2 底面反射波形（塗膜あり）

ように探触子のパラメータを決定した。さらに塗膜がある場合の底面反射エコーの受信波形についても計測と計算が合うように塗膜の物性値をパラメータとして数値計算を行い、塗膜の物性値の同定を行った。図1に計算モデルを示す。塗膜がある場合の底面反射波形の計算例を図2に示す。塗膜がある場合の底面反射波形は計測波形と計算波形でよく一致しており、超音波探傷試験の計測波形を数値シミュレーションで再現することが可能となった。

垂直探傷における反射エコー高さの変化

塗装面からの探傷の計算と計測の結果を図3に示す。横軸は無次元塗膜厚さ、縦軸は底面反射エコー高さを示す。計算結果と計測結果は定量的に良く一致しており、数値シミュレーションにより塗膜影響の検討が可能であることが確認できた。

図中の横軸は図4に示す入射波AとA'の塗膜内の伝播距離の差と波長の比であり、次式で定義される無次元塗膜厚さRである。

$$R = 2h \cos \alpha / \lambda \quad (1)$$

h: 塗膜厚さ, α : 屈折角,

λ : 塗膜中の超音波波長

$R = 0.5 + n$ (n: 整数) のとき2つ反射波の位相差は $(2n+1)\pi$ 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。

エコー高さは $R = 0.5$, すなわち塗膜内を超音波が往復する距離が波長の1/2で最小値となり、 $R = 1.0$, すなわち超音波が塗膜内を往復する距離と波長が等しい時最大値をとる。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あることがわかった。

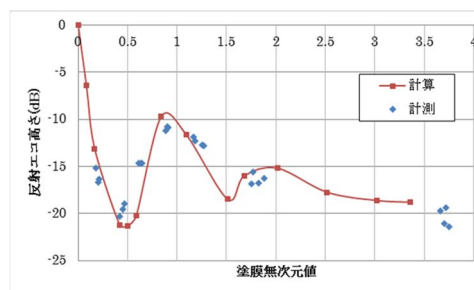


図3 エコー高さ（塗装面からの探傷）

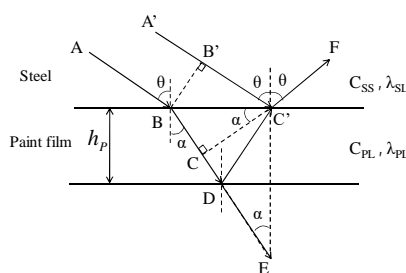


図4 塗膜中の超音波の干渉

(2) 斜角探傷におけるエコー高さ

エコー高さの変化

異なる塗膜厚さを有する試験体に対して斜角探傷試験を実施し、エコー高さを計測した。また試験に対応する数値シミュレーションを行い、両者の結果を比較した。斜角探傷試験の解析モデルを図5に示す。

図6に塗装面からの探傷結果を示す。無次元塗膜厚さが0.5以下の範囲でエコー高さが大きく変化し、無塗装の場合よりエコー高さが大きくなる範囲が存在する。またエコー高さの非線形な変化を(1)式で定義した超音波が塗膜内を往復する距離と波長の関係で表すことができないことがわかった。

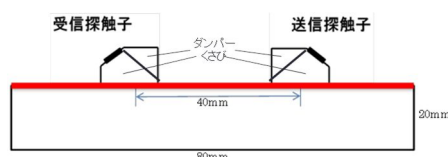


図5 斜角探傷計算モデル

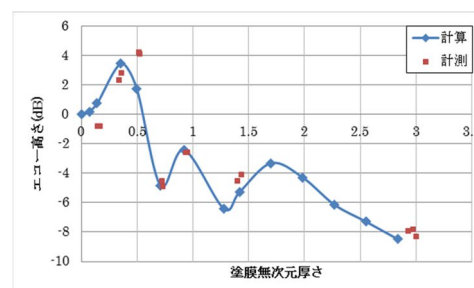


図6 エコー高さ（塗装面からの探傷）

斜角探傷における塗膜内の超音波の干渉に関する考察

図7は超音波の斜め入射時の屈折、反射およびモード変換の様子を図示したものである。赤線が縦波、青線が横波を表している。図7(a)は塗膜上から超音波を入射した場合で、くさび(アクリル)中を伝播してきた縦波が塗膜に入射し、屈折通過したときに屈折縦波fと一部が横波にモード変換した屈折横波aが塗膜中を伝播する。塗膜から鋼に屈折通過する際、横波aは屈折横波として伝播し、縦波fは入射角が臨界角に達するため、横波のみにモード変換して屈折横波gとなり鋼中を伝播する。鋼中を伝播してきた横波b,gは鋼下面で反射し反射横波c,hとして伝播する。反射縦波は入射角が臨界角に達しているため発生しない。鋼下面で反射した横波が再度塗膜に入射するとき、横波cは屈折横波dと一部がモード変換した屈折縦波eとなり、また、横波hは屈折横波iと一部がモード変換した屈折縦波jとなって伝播する。したがって、塗膜中では4つの波d,e,j,iが伝播することになる。

図7(b)は非塗装面(鋼)から超音波が入射した場合であり、くさび(アクリル)中を伝播してきた縦波が鋼中に屈折通過するときにモード変換し屈折横波aとして鋼中を伝播する。その際、入射角が臨界角に達しているため屈折縦波は発生しない。鋼中を伝播してきた横波aが塗膜に入射し、屈折通過したときに屈折横波bと一部がモード変換した屈折縦波gが塗膜中を伝播する。

塗膜下面で横波 b が反射する際、反射横波 c と一部がモード変換した反射縦波 e となり、また、縦波 g が反射する際、反射縦波 j と一部がモード変換した反射横波 h として伝播する。塗膜内を伝播してきた波が再度鋼に入射し、屈折通過する際、屈折横波 d, i とモード変換した横波 f, k となり伝播する。したがって、鋼中では d, f, i, k の 4 つの波が伝播することになる。

塗膜上面から塗膜下面までの縦波および横波の伝播時間は次式で得られる。

$$T_L = h_p / (\cos \theta_L \cdot C_{PL}) \quad (2)$$

$$T_S = h_p / (\cos \theta_S \cdot C_{PS}) \quad (3)$$

T_L, T_S : 塗膜中の縦波, 横波の伝播時間, h_p : 塗膜厚さ,

C_{PL}, C_{PS} : 塗膜中の縦波, 横波の音速, θ_L, θ_S : 縦波, 横波の屈折角

図 7(a) の場合、縦波 j が最初に到達し、次に時間 ($T_S - T_L$) だけ遅れて横波 i と縦波 e が同時に到達する。さらに時間 ($T_S - T_L$) だけ遅れて横波 d が到達する。

図 7(b) の場合、横波 k が最初に到達し、次に時間 ($T_S - T_L$) だけ遅れて横波 f と横波 i が同時に到達する。さらに時間 ($T_S - T_L$) だけ遅れて横波 d が到達することになる。

以上より、斜角探傷時は同じモードの 2 つの波の塗膜内の反射による干渉の他に、超音波が塗膜内に入射し屈折通過、反射する際に生じるモード変換により発生する波の伝播時間の差による干渉があり、複雑な干渉現象が生じ、塗膜厚さと超音波波長の比のみでエコー高さの変化を表現できないことがわかった。

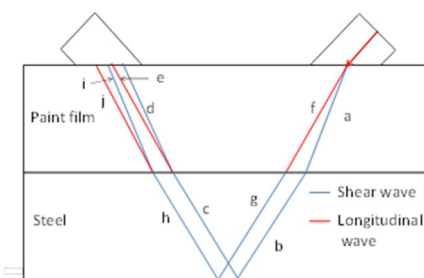


図 7(a) 超音波のモード変換
(塗膜上から入射)

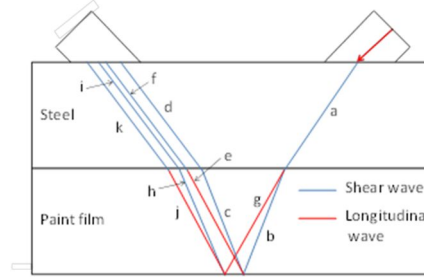


図 7(b) 超音波のモード変換
(非塗装面からの入射)

(3) 塗膜厚さの影響を受けない計測法

塗膜試験体では塗膜が厚くなるにつれて反射エコー高さが安定する傾向を示した。その特徴を利用して図 8 に示すように探触子と塗膜の間に塗膜と同じインピーダンスを持つ物質 (非干渉板) を配し、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。そこで厚みが約 3.5mm で塗膜と同じ材質の非干渉板を作製し、エコー高さの計測を行った。計測結果を図 9 に示す。非塗装面からの反射エコー高さは塗膜厚さによるエコー高さの変化が大きく改善されているが、塗装面からの計測では、塗膜厚さによるエコー高さが 5dB 程度変化しており塗膜影響を完全に排除することができていない。また、超音波の減衰が大きく計測の精度が低下するおそれがあることがわかった

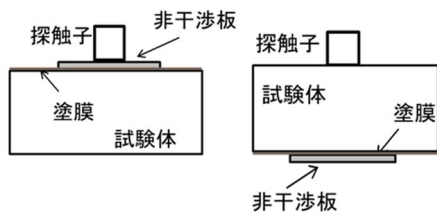


図 8 塗膜厚さの影響を受けない計測法

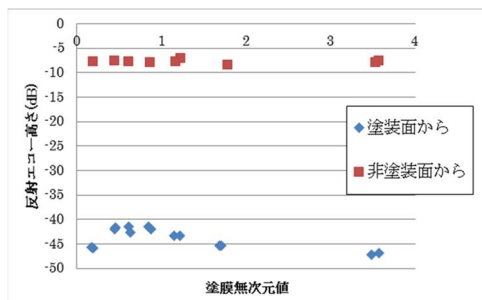


図 9 エコー高さの変化

(4) 塗膜影響を除去した欠陥推定

塗膜影響の除去法

塗膜がある場合のエコー高さから塗膜影響を除去する手順は以下の通りである。

- 1) 塗膜がない場合の底面エコー高さを対比試験片のエコー高さから求める。
- 2) 塗膜がない場合の内部欠陥と底面エコー高さの比を求める。
- 3) 塗膜がある場合の内部欠陥と底面エコー高さの比は、塗膜がない場合と同じとなり、塗膜を除去した場合の欠陥からのエコー高さが求められる。

ニューラルネットワークを適用した欠陥幅の推定

超音波探傷試験では得られた欠陥からのエコー高さ、波形形状等は欠陥の種類や性状との相

間がある。そこで、塗膜を有する試験体の内部欠陥の大きさを推定する方法として、ニューラルネットワークを適用して欠陥の大きさの推定を行った。

まず、ニューラルネットワークの学習を行うために、図 10 に示す計算モデルで塗膜厚さを 0.1 ~ 0.5mm の範囲で 0.1mm ごと、欠陥の幅を 6 ~ 12mm の範囲で 2mm ごと変化させ、FEM による超音波伝播シミュレーションにより探触子の受信波形を計算し教師データを取得した。なお、入力値として欠陥からの反射エコー高さが最大となる位置での反射エコー高さ、その位置での底面反射エコー高さの最大値、欠陥からの最大反射エコー高さを計測した位置から探触子を探触子幅の半分 (5mm) 右に移動させた位置での欠陥反射波の最大値および塗膜厚さとし、出力を欠陥幅とするニューラルネットワークを構成した。

学習済みのニューラルネットワークに欠陥幅が未知の欠陥反射波データを入力 (数値計算により取得) し、欠陥幅の推定を行った。推定結果を図 11 に示す。各塗膜厚さにおいて推定値は 5% 以内の精度で推定できている。

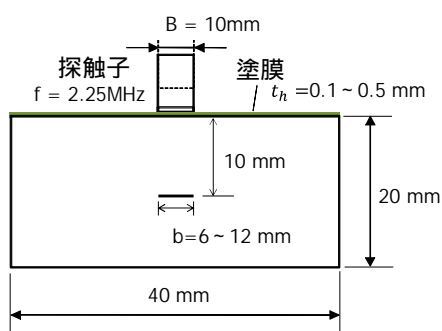


図 10 計算モデル

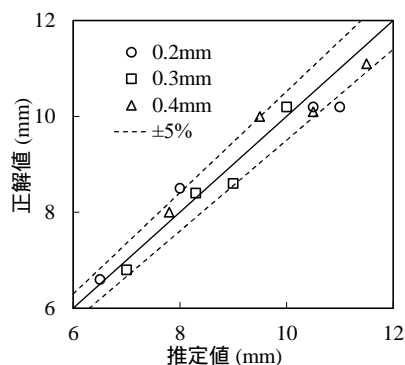


図 11 欠陥幅の推定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：吉川 孝男

ローマ字氏名：YOSHIKAWA Takao

所属研究機関名：九州大学

部局名：大学院工学研究院

職名：教授

研究者番号（8桁）：50380572

研究分担者氏名：藤 公博

ローマ字氏名：TOH Kimihiro

所属研究機関名：東京大学

部局名：大学院新領域創世科学研究科

職名：助教

研究者番号（8桁）：80790716

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。