

腐食部材劣化度の非破壊評価技術に関する基礎的研究

島田道男*、成瀬 健*、吉井徳治*、菅澤 忍*

Fundamental Study on Non-Destructive Evaluation for the Degradation of Corroded Structural Materials

by

Michio SHIMADA, Takeshi NARUSE, Tokuharu YOSHII,
and Shinobu SUGASAWA

Abstract

In order to develop new non-destructive techniques for measuring corroded steel plate thickness, we investigated on an electro-magnetic measuring technique and an electro-magnetic acoustic measuring technique.

The fluctuation of voltage in a detection coil by magnetic flux transmission through a steel plate was recorded by a personal computer when a excitation coil is driven by a step current. The 2nd peak of the waveforms was found to be correlated with steel plate thickness. We extracted 3 parameters of the peak, namely amplitude, half value breadth and delay time, and examined those quantitative dependence on steel thickness. The delay time is the best parameter for thickness measurement because it is the most stable to a change of coil lift-off and magnetization current. We also conducted electro-magnetic simulations with FEM analyses and measurements of magnetic permeability and chemical composition of the steel plates, and made clear the effect of material parameter deviation to the thickness evaluated.

An another thickness measuring technique was investigated by using an electro-magnetic acoustic resonant measuring apparatus(0.2~17MHz) and a sensor composed of a transmitter coil, a receiving coil and a permanent magnet. Measurements with this system were carried out on a rolled steel plate under tensile load or no load, and the effects of acoustic anisotropy and stress of steel plate to resonant frequency were verified to be small enough for thickness measurement. In the measurement of steel plates with machined rough surfaces (maximum difference of thickness=0~1mm), it was confirmed that the resonant peak amplitude goes down rapidly to small with roughness growing large over 1MHz, and thickness measurement is difficult in this region. In the region of 100KHz~1MHz, the amplitude still remain large with the rough surface plates, but unfortunately noises generated at the sensor and the apparatus becomes large. Development of an electro-magnetic acoustic resonant measuring system with low noise in the region of 100KHz~1MHz is essential for thickness measurement of corroded steel plates.

* 材料加工部

原稿受付 平成11年8月2日

審査済 平成12年2月4日

目 次

1. 緒 言
 2. 腐食部材劣化度評価の問題点整理と研究手法
 3. 電磁誘導法による板厚測定
 - 3.1 交流励磁による板厚評価
 - 3.1.1 有限要素解析による測定原理の確認
 - (1) 解析方法
 - (2) 解析結果および考察
 - 3.1.2 実験による適用性の検討
 - (1) 実験方法
 - (2) 実験結果および考察
 - 3.1.3 まとめ
 - 3.2 ステップ励磁による板厚評価
 - 3.2.1 実験による適用性の検討
 - (1) 実験方法
 - (2) 実験結果および考察
 - 3.2.2 有限要素解析と磁気特性測定による実験データの検証
 - (1) 解析方法
 - (2) 解析結果と実験結果に関する考察
 - 3.2.3 まとめ
 4. 電磁超音波法による板厚測定
 - 4.1 測定原理
 - 4.1.1 センサシステム
 - 4.1.2 信号処理システム
 - 4.1.3 得られるデータ
 - 4.2 測定原理の実験的確認
 - 4.2.1 板厚測定法
 - 4.2.2 音響異方性の影響
 - 4.2.3 応力の影響
 - 4.3 凹凸試験片による適用性の検討
 - 4.3.1 リフトオフ効果
 - 4.3.2 表面荒さの効果
 - 4.4 まとめ
 5. 結 言
- 参考文献

1. 緒 言

近年、長期間にわたって運用される構造物の需要が予想され、また環境保全に対する取り組みの一環としても、構造物の長期間運用が望まれている。このような構造物の安全確保や延命対策がますます重要化する傾向にある。

一方、超大型浮体式海洋構造物（メガフロート）の実現が各方面から望まれているが、そのためには、超長期運用の安全性を確保する保守管理技術の確立が不可欠である。

船舶や海洋構造物の分野では、海洋腐食環境による

部材の板厚減少が構造物全体の信頼性を低下させる大きな要因の一つであり、板厚の適切な管理が保守管理上要請されている。板厚計測には、主として超音波厚さ計が利用されているが、腐食生成物を除去し測定面を平滑化する必要があり、適用性が良くない。そのため、船体のような大きな構造物では、十分な測定点数の確保が困難である。また、超音波厚さ計は腐食によって生じた凹凸に影響され、精度を確保できない場合がある。

現在、超音波厚さ計の腐食部材への適用性を大幅に向上させることは困難と考えられる。そこで、板厚測定に適用可能な物理現象に立ち返り、超音波厚さ計以外の計測手法について広く基礎的なことから実験的検討を加える必要がある。今回、標記研究課題の下で、腐食部材へ適用するための新しい厚さ測定法として電磁誘導法と電磁超音波法について、実験的に板厚測定機能を調べた。

2. 腐食部材劣化度評価の問題点整理と研究手法

構造部材が腐食すると断面積が減少し、腐食前と同じ荷重がかかっても応力が増加して、疲労や座屈に対する強度が低下する。腐食は通常広範に生じるので、構造物の全体的な信頼性を低下させる原因となる。

そのため、超音波厚さ計を用いた測定により、部材が規則で定められた厚さ以上であるかチェックされる。しかし、測定には測定面を平滑化するためのグラインダがけを必要とするので、船舶のごとく巨大な構造物では容易な作業ではなく、改善が望まれるゆえんである。

また、超音波厚さ計は、スペック上で0.01mmないし0.1mmの測定精度を有しているが、実際は腐食による凹凸があるのでこのような精度の確保は困難であり、規則で定められた板厚があるかどうかチェックするには、それほどまでの精度は不要である。精度は低くても適用性に優れた測定手法が求められている。

超音波以外で厚さ測定に利用できる非破壊計測技術としては、X線透過試験と電磁誘導試験が挙げられる。X線については、放射線障害予防規定等の法令から、防護施設を用意できない現場での使用には困難が予想される。電磁誘導法では、そのような規制は無く適用が容易である。鋼板に接触しない状態で適用できるので、凹凸を有する腐食材の評価には有効と思われる。ただし、磁性材料である鋼板に電磁誘導法を利用した研究報告は6mm以下の厚さ測定において数例^{1),2)}あるのみであり、船舶の腐食部材のごとく板厚10mm以上を対象とする場合には、基本的原理からの検討が必要になる。

また、近年、電磁誘導を利用して超音波計測を行う電磁超音波法が開発され、応力測定等に利用されるよ

うになった。本計測法は、非接触で超音波計測できる特徴があり、錆が付いた材料に対する適用性に優れていると言われている。

今回、電磁誘導法および電磁超音波法による板厚測定技術の凹凸を有する腐食部への適用性について実験的に検討した。

3. 電磁誘導法による板厚測定

交流磁界下における導体中の磁場強度は深さの増加とともに急速に減少する。磁場強度が $1/e$ ($e=2.718\dots$)に低下する深さを表皮の深さ δ と称し、形状因子を除くと次式で計算される。

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu \sigma}} \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は真空中の透磁率($4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$)、 μ は比透磁率、 σ は導電率(S/m)、 f は周波数(Hz)である。比透磁率、導電率が大きく、周波数が高いほど表皮の深さは浅くなる。

周波数を制御することにより、表皮の深さを変え、深さ方向の情報を得ることができる。これが板厚測定の基本的な考え方であるが、材料中の磁界や渦電流の測定は不可能なので、鋼板周囲に現れる電磁場の変化を検出し、板厚情報を抽出することが必要となる。

この手法による板厚測定の可能性と実用性を調べるため、最初に一定周波数の交流励磁による方法について、検討を加えた。有限要素解析では板厚測定できることが示されたが、実験では交流励磁による方法は実用的でないことが分かった。その問題点を回避する手法としてステップ電流励磁による方法を採用し、実験および有限要素解析によって、その有効性、特徴、限界等を解明した。以下に、順を追ってその内容を記述する。

3.1 交流励磁による板厚評価

3.1.1 有限要素解析による測定原理の確認^{3),4)}

(1) 解析方法

一定周波数で交流磁化したときの鋼板内外の磁束密度を有限要素解析により求め、板厚、周波数の影響を調べた。図1が数値解析に用いたモデルである。コイル中心軸を $x=0$ 、鋼板表面を $y=0$ とする2次元軸対称座標系を用いた。解析領域は $150\text{mm} \times 200\text{mm}$ である。磁束密度変化の大きい鋼板表裏面付近の精度向上を図るため、表裏面付近の y 方向要素間隔を 0.5mm と小さくした。 x 方向要素間隔は最小 2mm である。表1に解析用に理科年表から採用した材料定数を示す。鋼板の透磁率は初透磁率の値を用いた。

周波数、板厚、リフトオフ(コイル-鋼板間の距離)をパラメータとして、有限要素解析を実行した。標準のリフトオフは 6mm とした。

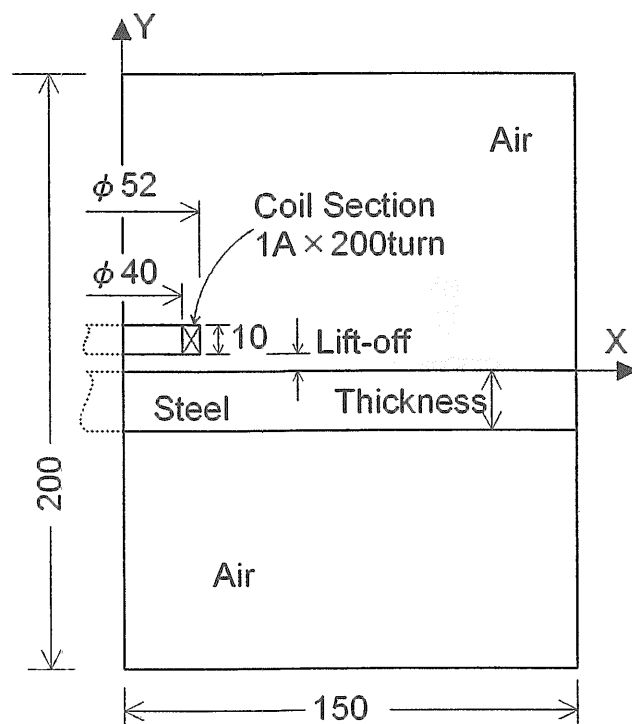


図1 交流励磁有限要素解析領域

表1 交流励磁解析用材料定数

Steel Plate	Relative Permeability μ	200
	Conductivity σ (S/m)	6.25×10^6
Coil	Relative Permeability μ	1
Air	Relative Permeability μ	1

(2) 解析結果および考察

周波数 5Hz で板厚 6mm および 18mm の鋼板を交流磁化したときの磁束密度振幅分布の計算例を図2に示す。鋼板中の磁束密度は、板厚 6mm では裏面付近まで比較的大きいが、 18mm では裏面に近付くほど小さくなった。磁束の方向は、コイル中心軸付近では y 成分が、コイルの真下部分では x 成分が主成分であった。また、コイル側空間における磁束密度分布は、板厚による差がほとんど認められなかった。

コイル中心軸上($x=0\text{mm}$)の磁束密度(この場合対称性から y 成分のみが存在する)の大きさおよび位相を表示すると、図3が得られる。周波数は 2.5Hz である。 t は板厚を示す。 $y>0$ の部分がコイル側空間を示し、 $0>y>-t$ が鋼板内部、 $-t>y$ が裏面側空間を示す。

$y>0$ における磁束密度分布には板厚の違いが見られないが、 $0>y$ の鋼板内部および裏面側空間には板厚の影響が現れている。鋼板内部で急速に磁束密度が減少する様子が見られた。位相に関しては、 $y>0$ のコイル側では変化が認められないが、 $0>y>-t$ の鋼板内部で位相の遅れが生じ、 $-t>y$ の裏面側空間では、位相は一定値となる傾向を有する。

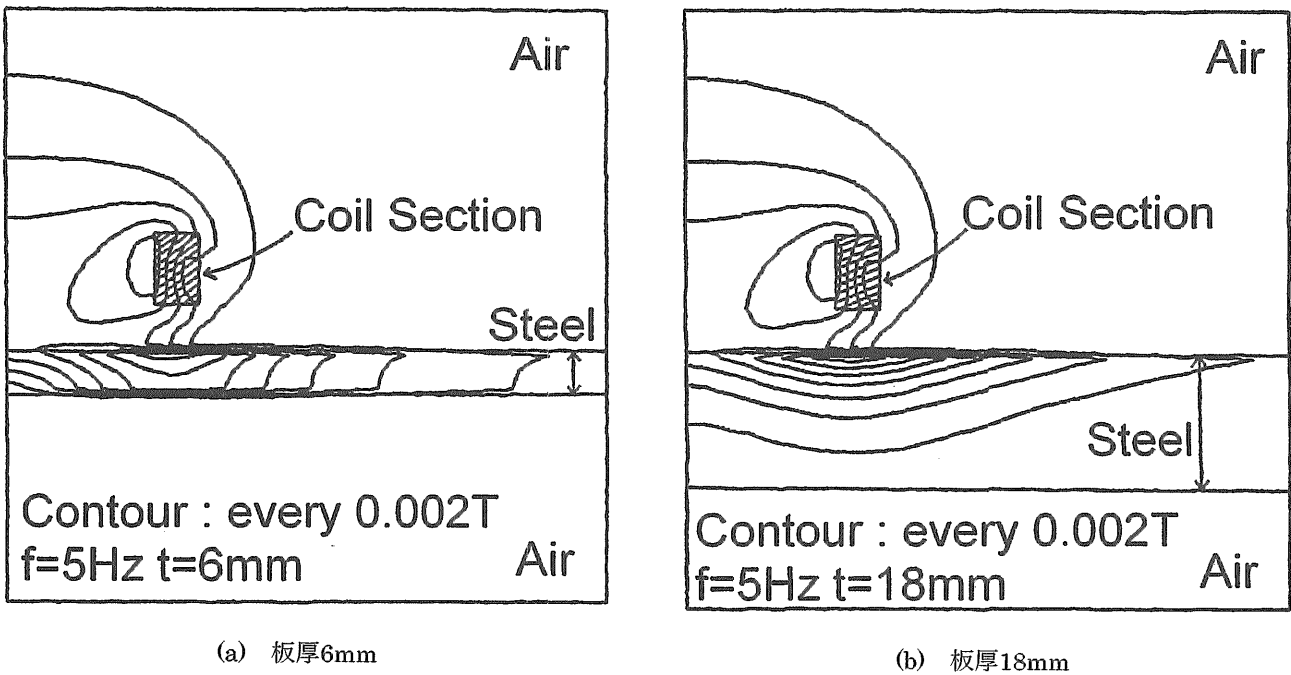


図2 磁束密度分布計算例

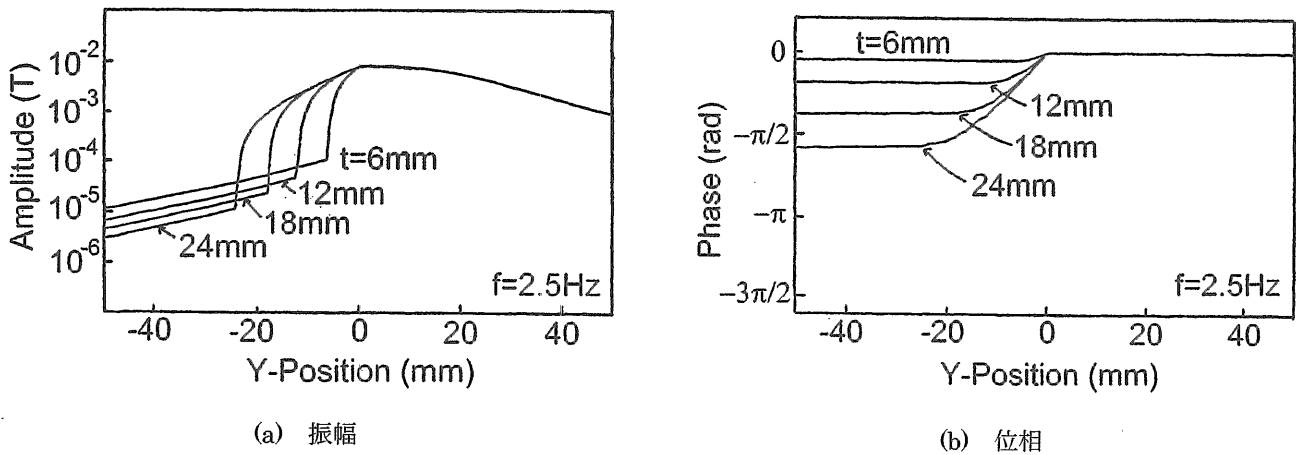


図3 中心軸上磁束密度の振幅と位相の分布

図3と同じ解析を10Hzで行うと、鋼板中および裏面側空間における磁束密度振幅の低下の割合が大きく、位相の遅れも大きいことが分かった。

中心軸上で裏面から5mm離れた空間上における磁束密度の振幅と位相を、板厚の関数として示すと図4が得られる。振幅、位相ともに周波数が高いほど、低下あるいは遅れの程度が大きい。高い周波数では、板厚に対し直線的に低下する傾向がある。振幅は対数表示であるから指数関数的に低下し、リニヤ表示である位相は直線的に位相が遅れる傾向を示している。形状ファクターを無視した一次元モデルの場合、表皮効果による鋼板内の深さ d における磁束密度の振幅 B およ

(4)

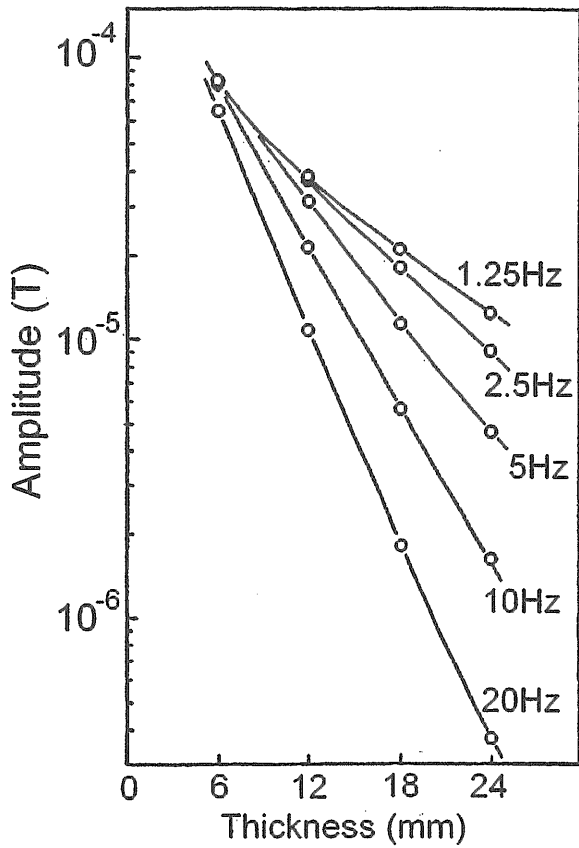
び位相 θ は、次式で与えられる。

$$B = B_0 \exp\left(-\frac{d}{\delta}\right) \quad (2)$$

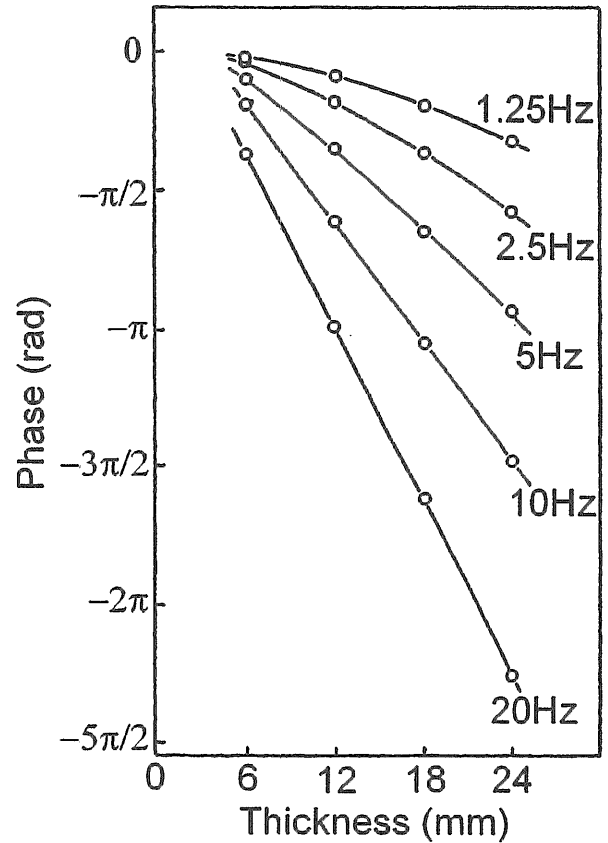
$$\theta = -\frac{d}{\delta} \quad (3)$$

ここで、 B_0 は、鋼板表面の磁束密度、 δ は(1)式による表皮の厚さである。(2)および(3)式の d が板厚に相当するので、図4では周波数が高いほど直線に近く、予想どおりの傾向であることが分かる。低い周波数では、表皮効果の効き方が弱く、形状ファクターの影響を受け、理論からずれるのとも考えられる。

腐食部材の電磁誘導計測では、リフトオフを一定にできないことが考えられる。リフトオフの影響を把握



(a) 振幅



(b) 位相

図4 磁束密度の振幅および位相と板厚の関係

するため、励磁コイルリフトオフを変え有限要素解析を実施した。中心軸上で鋼板裏面からの距離5mm、10mm、15mmにおける磁束密度の振幅と位相を図5に示した。リフトオフによって振幅は変化するが、位相の変化は極めて小さい。従って、磁束密度の振幅より、位相の方が、測定精度上有利であることが分かった。

3.1.2 実験による適用性の検討

(1) 実験方法

有限要素解析結果から、励磁コイルから見た鋼板裏面側において、交流磁化時の磁場強度振幅と位相に鋼板厚さとの相関があることが分かった。これを実験的に調べるため、図6に示した寸法の試験片およびコイルを用いた実験を実施した。試験片の材質はSS400、大きさ300mm×300mmで、厚さ t を5.6mmから21.8mmまで段階的に変化させた。励磁コイルは内径48mm、巻数200、検出コイルは内径40mm、巻数200のものを使用した。測定方法は、励磁コイルに一定周波数の交流電流を流し、鋼板をはさんで反対側の検出コイルに生じる電圧波形を励磁コイル電流波形とともにADボードを介してパーソナルコンピュータで計測した。得られた電圧波形の振幅および位相と、鋼板厚さ、

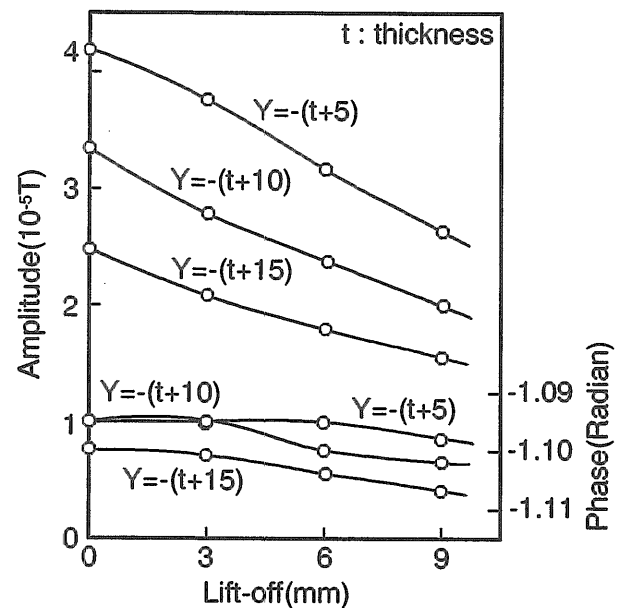


図5 磁束密度の振幅および位相とリフトオフとの関係
磁化周波数との間に前項で述べたような関係(図4や図5等)があるかデータ整理して調べた。

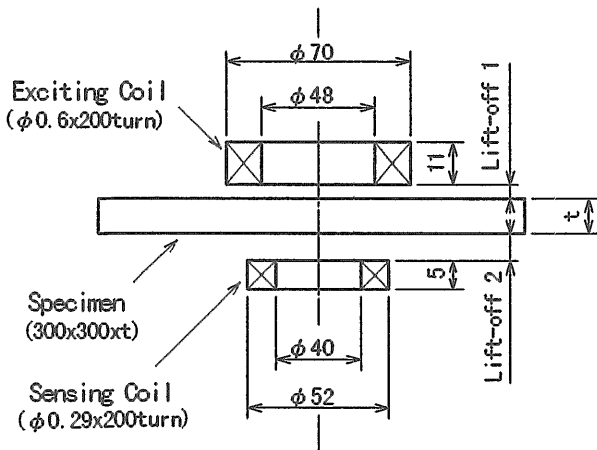


図6 実験に用いたコイルおよび試験片の寸法

(2) 実験結果および考察

1~10Hzで計測を行ったところ、板厚の増加に対し、板厚の小さい領域では振幅が減少し、位相遅れは増大したものの、板厚が大きな領域では振幅低下が見られず、位相遅れは逆に小さくなる傾向を示した。また、周波数が高いと板厚増加に対して振幅が低下せず位相遅れが小さくなる領域が広くなり、有限要素解析結果との違いが大きくなった。

原因を明らかにするため、300mm×300mmの鋼板を底面とし、厚さ1mmの4枚の鋼板を側面とする直方体の空間（高さ500mm）を形作り、底面とした鋼板上に励磁コイルを位置させ、底面の裏面に設置した検出コイルから励磁コイルを隔離して計測実験を実施した。実験結果は、囲いによって有限要素解析との違いが小さくなることを示した。このことは、検出電圧に励磁コイルからの直接磁界が作用していることを示している。実際、鋼板が厚くなって透過してくる磁界が小さくなれば、鋼板の端を回り込んでくる直接磁界の効果が相対的に大きくなり、鋼板厚が増しても振幅は低下せず、位相遅れは逆に小さくなると予想できる。

交流磁化では、このような直接磁界の影響を避けることは困難なので、次節に述べるステップ励磁電流に伴う過渡磁場応答計測による測定手法に発展させた。

3.1.3 まとめ

交流磁化による板厚測定について、有限要素解析を実施したところ、板厚6mm以上の鋼板における励磁コイルの裏面側空間において、磁束密度の振幅や位相が板厚と相関があり、板厚測定に利用できる見通しを得た。コイル側空間では、数値計算の有効桁数内では板厚の影響を認められなかった。

板厚が大きいほど、裏面側空間における磁束密度の振幅は低下し、位相遅れが大きくなることが分かった。

そこで、実際の測定における問題点を検討するため、裏面側空間における磁束密度の振幅および位相を実験的に計測した。実験では、板厚が大きく磁化周波数が

高いときには、有限要素解析結果と異なる現象を生じ、板厚測定への適用は困難であることが分かった。その原因は、励磁コイルからの直接磁界が検出コイルに侵入するためと考えられた。板厚に関する情報を含んでいる間接磁界を直接磁界と分離して計測することが必要となった。

間接磁界と直接磁界の大きな違いは、その位相にある。間接磁界は鋼板を透過する際に鋼板の厚さに応じた位相遅れを生じるが、直接磁界は空气中を伝わってくるため、ほとんど位相遅れを生じない。交流磁化ではこのような間接磁界と直接磁界を分離することは困難であることが分かった。

3.2 ステップ励磁による板厚評価

3.2.1 実験による適用性の検討^{9),10)}

(1) 実験方法

本実験に使用した試験片およびコイルの諸元は交流励磁の場合と同一である。測定方法は、パーソナルコンピュータで制御した電源から励磁コイルにステップ電流を流し、鋼板をはさんで励磁コイルと反対側に置かれた検出コイルの検出電圧をADボードによってパーソナルコンピュータで計測した。その際ADボードのサンプリングレートは1,250Hz、分解能は16bitで行った。SN比向上を図るため、励磁電流を100回流し、得られた検出波形を平均化した。測定後、検出波形を定量的に解析するために定義した波形特徴量について、板厚との関係を調べた。また、特徴量に及ぼすリフトオフおよび励磁電流値の影響を調べた。

励磁コイルのリフトオフ（図6中Lift-off 1）は通常2.3mm、検出コイルのリフトオフ（図6中Lift-off 2）は通常5mmとした。励磁電流には通常立ち上がり時間1ms、振幅1.5Aのステップ電流を使用した。

(2) 実験結果および考察

〔検出波形と特徴量〕

板厚の異なる試験片における検出コイル出力波形を図7に示す。板厚15.6mm、21.6mmについては出力波形をそれぞれ10倍、20倍したものを併記した。各板厚とも出力波形に二つのピークが確認された。最初に現れる立ち上がりの急激なピークは板厚が変化しても形状や高さがほとんど変化しなかった。しかし、二番目に現れるピークは板厚が増加するにつれ高さが低くなり、出現位置も後方に移動する傾向が見られた。

これらの傾向を定量的に解析するために出力波形に対して図8に示す特徴量を定義した。最初に現れる急激な立ち上がりのピークを第1ピーク(1st.Peak)、二つ目に現れるなだらかなピークを第2ピーク(2nd.Peak)と称し、それぞれの最大値を振幅(Amplitude)と定義した。また、励磁電流立ち上がり時からそれぞれのピーク振幅出現までの時間を遅れ時間(Delay time)、振幅の1/2における波形の幅を半値幅(Half Value Breadth

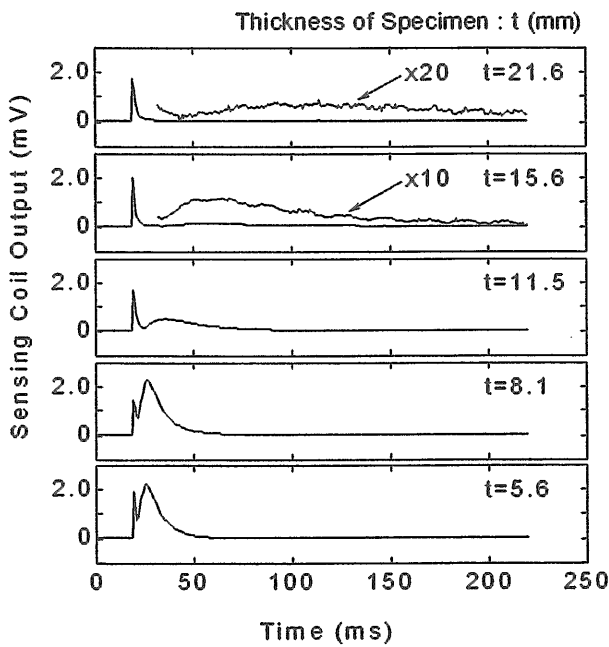


図7 板厚が異なる鋼板における検出コイル出力

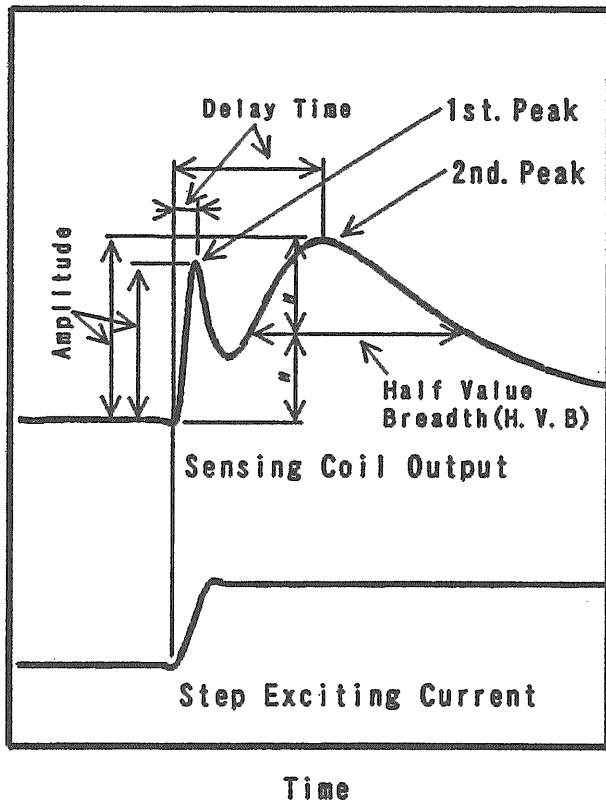


図8 検出コイル出力における特徴量

またはH.V.B.)と定義した。

【特徴量と板厚の関係】

振幅と板厚の関係を片対数表示で図9に示す。板厚が変化しても第1ピークの振幅はほぼ一定であるのに

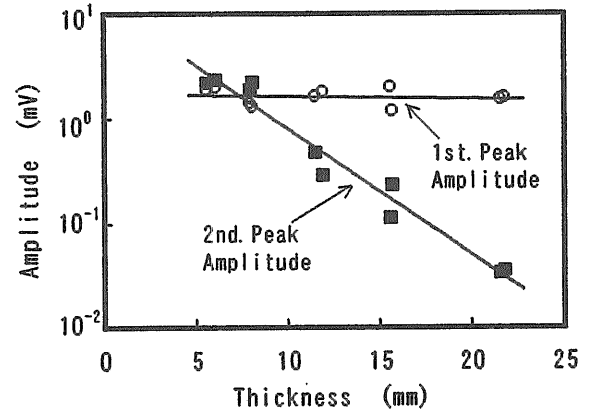


図9 振幅における板厚の効果

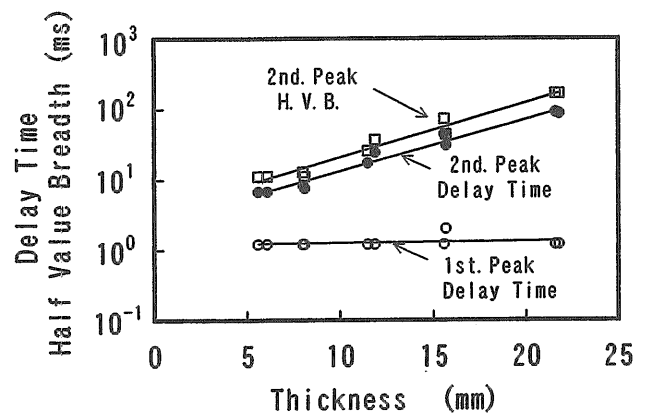


図10 遅れ時間および半値幅における板厚の効果

対し、第2ピークの振幅は板厚の増加とともに直線的に減少する傾向が見られた。また、遅れ時間および半値幅と板厚の関係を片対数表示で図10に示す。第1ピークの遅れ時間は値が小さく、また板厚による変化も認められなかった。第2ピークの遅れ時間、半値幅は板厚の増加とともに直線的に増加する傾向が見られた。

第1ピークの振幅、遅れ時間は板厚との相関関係がなく、遅れ時間も極めて小さいことから、第1ピークは試験片の外側を回り込んだ直接磁界によるピークであり、第2ピークは鋼板中を透過した磁界によるピークであると考えられる。

【リフトオフの影響】

板厚11.5mmにおける第2ピーク特徴量と励磁コイルリフトオフの関係を図11に示す。各リフトオフにおけるデータをリフトオフ2.3mmのときの値で規準化した。振幅はリフトオフ20mmでは2.3mmのときに比べ40%程度減少した。また、半値幅はリフトオフ20mmにおいて2.3mmのときより10%程度増加した。これに対し遅れ時間はリフトオフが変化してもほとんど変化しなかった。この結果から励磁コイルのリフトオフに最も影響されない特徴量は遅れ時間で次に半値幅であ

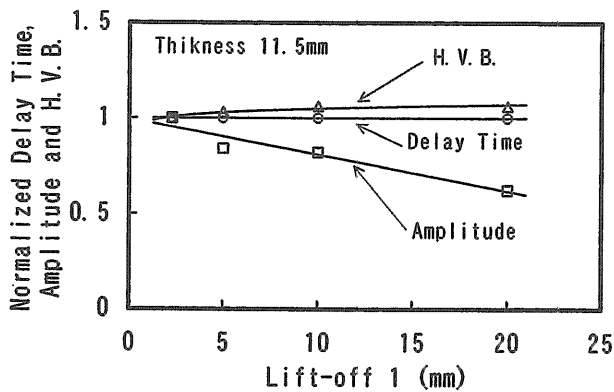


図11 第2ピーク特徴量における励磁コイルリフトオフの影響

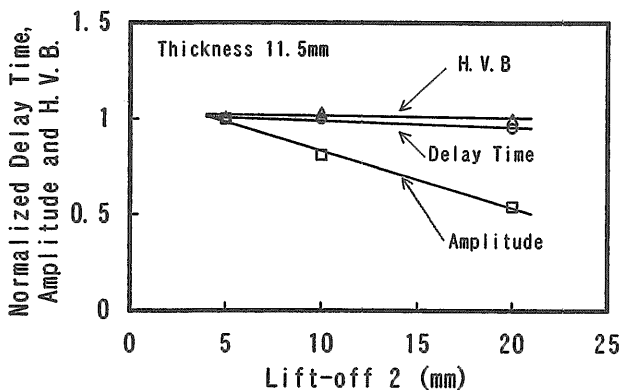


図12 第2ピーク特徴量における検出コイルリフトオフの影響

ることが分かった。

検出コイル側のリフトオフを変えたときの第2ピーク特徴量の変化を図12に示した。板厚は11.5mmである。図中のデータは、リフトオフ5mmのときの値で規準化している。振幅はリフトオフ20mmではリフトオフ5mmに比べ45%ほど減少した。しかし、遅れ時間、半値幅はともに変化が少なく、いずれもリフトオフ20mmの値は5mm値の±5%以内であった。この結果から振幅に比べ、遅れ時間、半値幅は検出コイルリフトオフに影響されにくいことが分かった。

腐食部材は表面の凹凸が大きいので板厚測定時のリフトオフは考慮すべき問題である。従って、リフトオフの影響が少ない遅れ時間、半値幅は腐食部材測定に有効な特徴量と考えられる。

【励磁電流値の影響】

板厚11.5mmにおける第1ピーク振幅および第2ピーク特徴量と励磁電流値との関係を図13に示す。図は各励磁電流値におけるデータを励磁電流値0.75Aの値で規準化している。

本測定装置のサンプリングレートが1,250Hz(0.8ms間隔)であるため、立ち上がり時間1msの励磁電流では第1ピークの幅が狭く、第1ピークの測定誤差が大きくな

る。従って本実験では、励磁電流の立ち上がり時間を変化させても振幅値が変わらない範囲を確認した後、第1ピーク振幅測定時のみ立ち上がり時間を10msに変更した。

図13から第1ピーク振幅は励磁電流値に比例し、第2ピーク振幅は電流値が増加するにつれ増加率が小さくなることが確認された。この理由は以下のように推測した。

透磁率一定の空気中の直接磁界が第1ピークの原因とすると、その振幅は励磁電流値に比例すると考えられる。一方、励磁電流増加によって磁界強度が大きくなると、鋼板の透磁率は磁化曲線に従って増加する。その結果、表皮効果の利きが良くなるので、励磁電流値の増加率より鋼板を透過する磁束の増加率は小さくなる。従って、透過した間接磁束による第2ピーク振幅は、励磁電流値の増加率より小さい増加率となったと推測される。

また、図13より第2ピークの特徴量の中で、遅れ時間と半値幅は振幅に比べ励磁電流値による変化が少いことが確認された。励磁電流値3Aの半値幅は0.75Aの値より20%程度増加したのに対し、遅れ時間はほとんど変化しないことが確認された。この結果から遅れ時間が最も励磁電流値の影響を受けにくく、広範囲の励磁電流レンジに対応しやすい特徴量であると言える。

【切欠きの影響】

本測定法の亀裂に対する感度を調べるため、深さ5mm幅1mm長さ300mmの2本の切欠きが中央で十字に交わるように加工した鋼板(300mm×300mm×12mm)を用いて、検出コイル電圧を計測した。第2ピーク特徴量を切欠きがない鋼板の値を基準として図14に示した。

最も大きな変化は遅れ時間で、約18%小さくなった。しかし、切欠きが板厚のほぼ半分の深さを有することやその長さを考慮すると、その変化は小さいと評価できる。本計測法は、亀裂に対して、比較的鈍感と

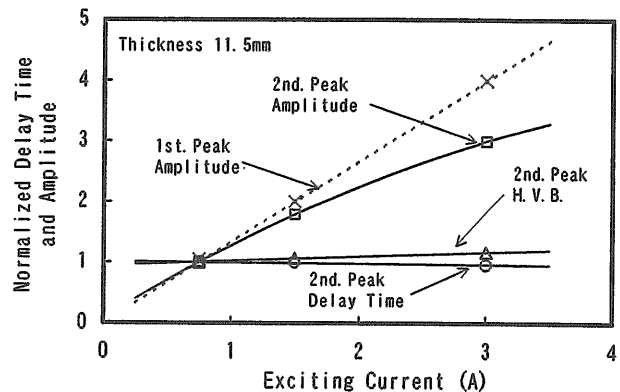


図13 第1ピーク振幅および第2ピーク特徴量における励磁電流値の影響

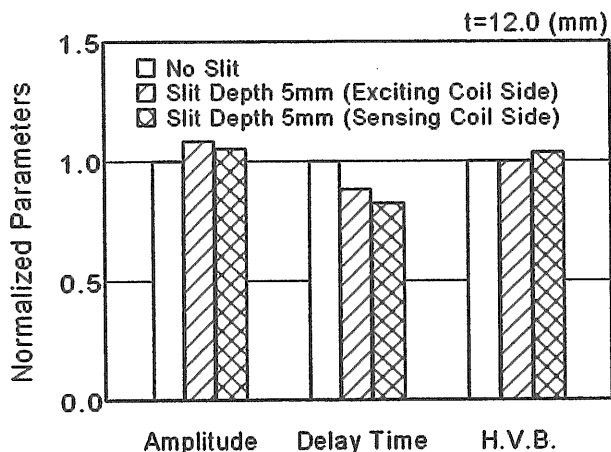


図14 第2ピーク特徴量に対する切り欠きの効果

考えられる。

また、振幅、半値幅は、切欠きの存在によって板厚をやや大きく推定するが、遅れ時間は小さ目に推定する。遅れ時間は安全側の推定になっており、板厚評価上好ましい性質といえることができる。

3.2.2 有限要素解析と磁気特性測定による実験データの検証^{7),8),9)}

(1) 解析方法

ステップ励磁電流を用いた板厚測定をより深く理解するため、有限要素法による電磁場過渡応答解析や鋼板の透磁率測定を行い、実験データと比較検証した。これを用いて、実験データのバラツキの原因についても検討した。

鋼板、励磁コイルおよび検出コイルとそれを取り巻く空間を軸対称有限要素によってモデル化した(図15参照)。鋼板厚、励磁コイルと検出コイルのリフトオフをパラメータとして、検出コイル電圧を計算した。励磁電流は、立ち上がり1msのステップ電流とした。また計算を容易にするため、 $x=500\text{mm}$ と $y=\pm 100\text{mm}$ の境界上では、磁気ベクトルポテンシャルをゼロと仮定した。

有限要素法による数値解析には、比透磁率等の材料定数が必要である。比抵抗は理科年表に載っている軟鋼材の代表的な値を用いた。比透磁率は鋼材の組成や熱処理によって変わるため、200、300、400の3ケースについて計算した。表2に用いた材料定数を示した。検出コイルは入力抵抗の大きなAD変換ボードに接続されているので、大きな比抵抗の値を設定した。

実験では、同一鋼種であるが板厚が異なる鋼板を用いたため、製造ロットも異なり、透磁率にもバラツキを生じている可能性があると考えた。そこで、用いた鋼板の透磁率測定を実施した。鋼板から内径30mm、外径50mm、厚さ t (鋼板厚)のリングを切り出し、これに励磁コイル(巻き数260)と検出コイル(巻き数110)を巻き付けた。鉄心の脱磁後、励磁コイルに

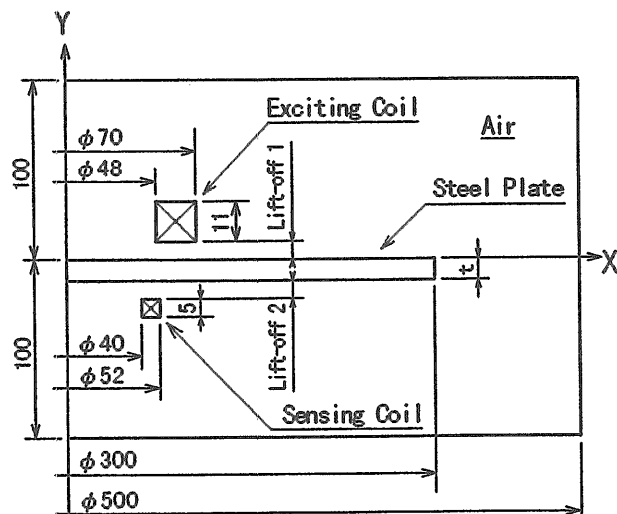


図15 ステップ励磁有限要素解析領域

表2 ステップ励磁解析用材料定数

Steel plate	Relative permeability μ	200, 300, 400
	Resistivity ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	16.0×10^{-8}
Exciting coil	Relative permeability μ	1
	Resistivity ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	10.0×10^{-8}
Sensing coil	Relative permeability μ	1
	Resistivity ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	1
Air	Relative permeability μ	1

0.125A/secで一定に増加する電流を流し、検出コイル電圧を測定した。検出電圧の積分値と励磁電流値の関係をグラフ化し、原点付近の傾きから初透磁率、傾きの最大値から最大透磁率を計算した。

(2) 解析結果と実験結果に関する考察

数値解析においても実験と同様に、ステップ励磁電流印加直後に現れる鋭い第1ピークと、その後遅れて現れるパルス幅の大きな第2ピークが得られた。第2ピークの最大振幅、遅れ時間および半値幅について、実験値と比較検討した。

【磁気特性の変動が与える影響の検証】

第2ピークの振幅および遅れ時間と板厚との関係をそれぞれ図16、図17に示した。×印は数値解析結果であり、実線はそれを滑らかに結んだものである。○印と●印は実験結果であるが、○印については実験終了後、透磁率測定を実施した。

振幅および遅れ時間の実験データは、ともに比透磁率が200~300の数値解析計算結果付近に分布した。○印の鋼板について透磁率測定および成分分析の結果を表3に示した。表から板厚8.0mmと15.7mmの鋼材は初透磁率と最大透磁率がともに小さいことが分かった。

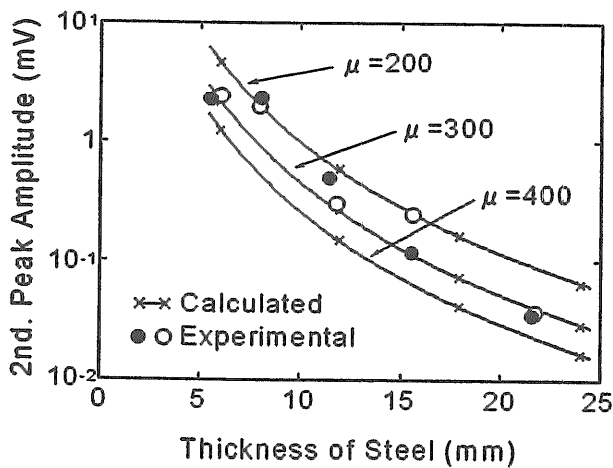


図16 第2ピーク振幅における実験と計算の比較

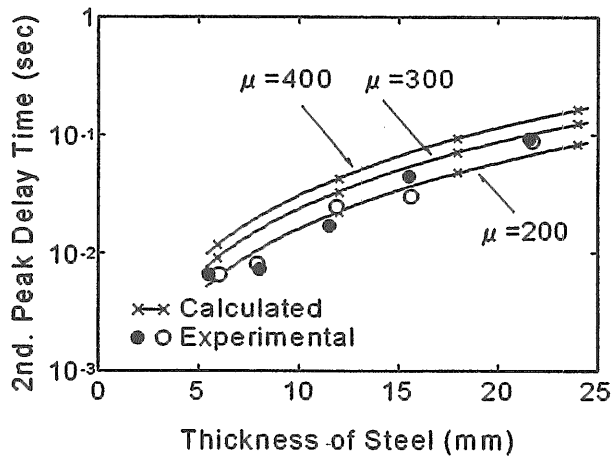


図17 第2ピーク遅れ時間における実験と計算の比較

表3 鋼板の化学成分と透磁率測定結果

Thickness (mm)	Chemical Composition wt(%)					Relative Permeability	
	Fe	C	Si	Al	Mn	μ_i	μ_m
6.1	99.259	0.097	0.262	0.062	0.697	483	1536
8.0	99.154	0.120	0.003	0.027	0.940	358	1275
11.9	99.865	0.096	0.214	0.020	0.559	625	1528
15.7	98.548	0.098	0.304	0.024	1.432	431	1107
21.8	99.289	0.097	0.152	0.025	0.886	646	1580

μ_i : Initial Permeability
 μ_m : Maximum Permeability

図16および図17における板厚8.0mmと15.7mmの○印のデータは、比透磁率200に近い位置にあり、その他の○印は、300に近い方にあるので、透磁率測定結果とデータのバラツキは定性的にその傾向が一致した。

ただし、表3に示した透磁率の測定結果は、数値解

析に用いた値よりも常に大きな値であった。電磁場過渡応答現象では透磁率だけでなく比抵抗の値も重要な定数であり、数値計算に用いた比抵抗の値が実際と異なっているため、このような食い違いを生じたとも考えられる。

【リフトオフ及び励磁電流値が与える影響の検証】

板厚11.5mmの鋼板について、励磁コイルおよび検出コイルのリフトオフが第2ピーク特徴量に与える効果を、図18、図19に示した。実験結果を○、△および□印で数値解析結果を×印で表し、それぞれリフトオフ20mmの値で規準化して示した。数値計算結果は滑らかな線をつないだ。

遅れ時間および半値幅は励磁コイルと検出コイルのリフトオフの影響が少なく、板厚評価するために適したパラメータであることが分かった。逆に、振幅はこれらの影響を受けやすいことが分かった。また、振幅に対する検出コイルリフトオフの影響では数値解析と実験とが比較的一致したが、励磁コイルのリフトオフの影響では両者は一致しなかった。励磁コイルのリフトオフを小さくしたときには、数値解析から期待されるほど振幅は増加しなかった。

励磁電流の影響に関しては、線形システムであれば、第2ピーク振幅は励磁電流に比例するはずであるが、すでに図13で示したとおり、実験では励磁電流が増加するほどその増加率は小さくなった。

これらの原因を考えるため、励磁コイル直下鋼板内部の磁束密度の時刻変化を数値解析で求め図20に示した。dは鋼板表面からの深さであり、1.7mmごとのデータを示した。図から、励磁電流印加直後に鋼板表面に磁束が集中し大きな磁束密度となることが分かった。磁束密度が大きくなると、磁化曲線の初透磁率の範囲を超えて、磁化曲線の傾きが過大になる。その結果、透磁率が大きくなり表皮効果の効力が強くなり、励磁電流を増加させるほど、検出電圧の増加率が小さ

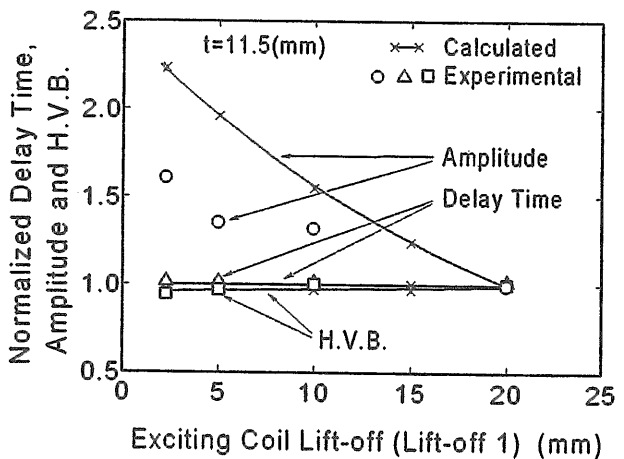


図18 励磁コイルリフトオフ効果における実験と計算の比較

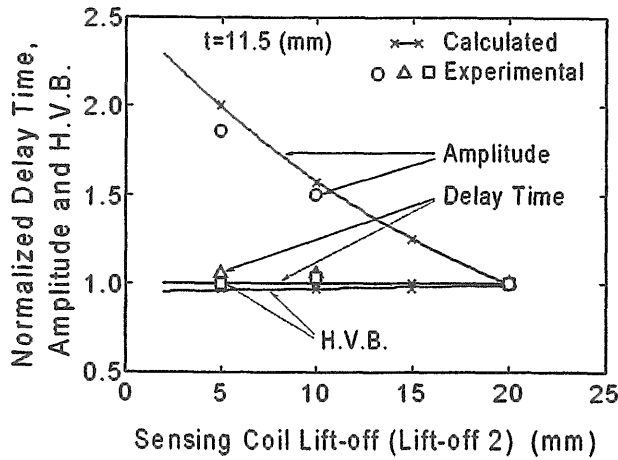


図19 検出コイルリフトオフ効果における実験と計算の比較

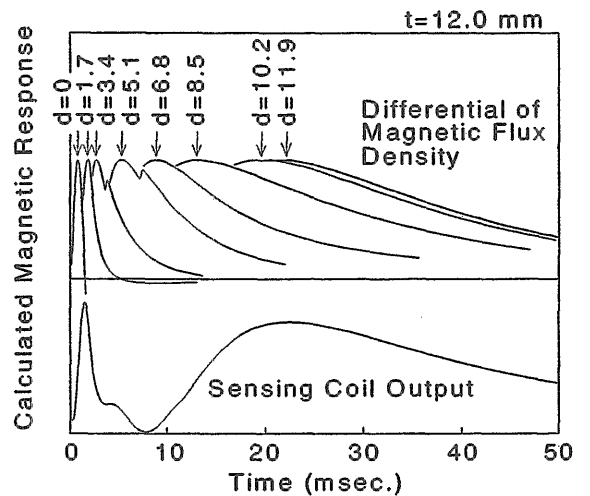


図21 鋼板内部における磁束密度変化率と検出コイル出力の時刻変化 (有限要素解析結果)

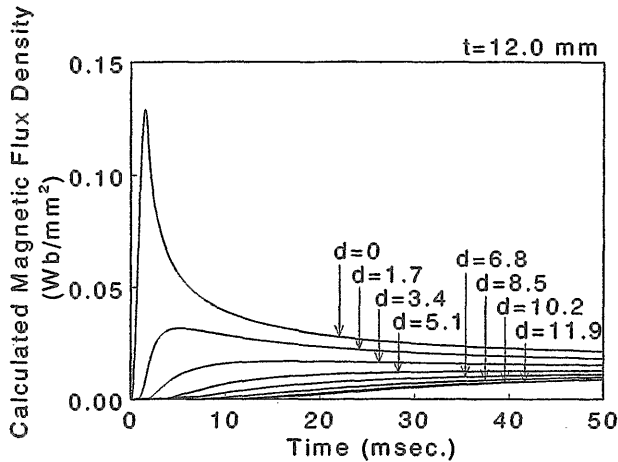


図20 鋼板内部における磁束密度の時刻変化 (有限要素解析結果)

くなくなったと考えられた。また、励磁コイルリフトオフを小さくした場合には、やはり鋼板表面に対する磁束集中の度合いが増すことになり、上記と同じメカニズムが働き、数値解析から期待される検出電圧より小さな検出電圧になったと考えられた。検出コイルリフトオフは鋼板の磁化状態に影響を与えないので、数値解析と実験が比較的良く一致したと考えられた。

【遅れ時間に励磁電流値の影響が少ないことのメカニズム】

鋼板表面の磁束密度増加が透磁率の増大を招くとすると、その効果は遅れ時間にも現れるはずであるが、実験ではその影響は小さかった。そこで、数値解析で得た検出コイル電圧と鋼板内部の磁束密度変化率の時刻変化を図21に示した。図下部に示す検出コイルの波形はほぼ鋼板裏面における磁束密度変化率 (d=10.2または11.9) に一致しているので、鋼板内部の磁束密度変化率の時刻変化から第2ピーク遅れ時間に関する現象を考えることができる。図21から、第2ピークの遅れ

時間は、鋼板表面部では小さく、鋼板の深い位置で遅れが大きくなっている。磁束が集中し磁束密度が大きくなる鋼板表層部は遅れ時間に与える影響が小さい。励磁電流値や励磁コイルリフトオフの変化によって透磁率が影響される領域は鋼板表層部に限られるため、遅れ時間には影響が少ないと考えられた。

3.2.3 まとめ

ステップ励磁電流を用いることにより、励磁コイルからの直接磁界に対応する第1ピークと鋼板を透過した間接磁界の第2ピークを分離計測できた。第2ピークから抽出した特徴量 (振幅、遅れ時間、半値幅) と板厚との間に相関関係が得られた。特に遅れ時間はリフトオフおよび励磁電流の影響を受けにくく、板厚測定に有効な特徴量であることが確認された。

有限要素法による数値解析結果と透磁率測定の結果を加味して、実験データに検討を加えた。その結果、データのバラツキに透磁率の変動が含まれていること、本手法の適用に当たっては、透磁率、比抵抗をあらかじめ調べておくか、または、同じ鋼材で板厚が既知の部位をあらかじめ測定しておく必要があることが分かった。

また、第2ピーク振幅には励磁電流振幅や励磁コイルリフトオフの影響があるが、遅れ時間には少ないことの原因を明らかにできた。

切欠き付き鋼板を用いた実験により、本手法が亀裂に対して比較的鈍感であることが分かった。

4. 電磁超音波法による板厚測定

超音波計測は多くの場合、圧電振動子を内蔵した超音波探触子を用いて行われる。この方法は装置が簡便であり、感度も良いので広く用いられているが、固体材料を対象に超音波の入射・検出を行うためには、接

触媒質と呼ばれる液体を探触子と固体表面の間に介在させなければならない。接触媒質の厚さのわずかな変動や厚さの不均一性が検出波形に大きな影響を与えるため、接触媒質を必要としないで電磁的に超音波計測を行う電磁超音波共鳴法が開発された¹⁰⁾¹¹⁾。

電磁超音波共鳴法によって、平板における音速や減衰の高精度測定が可能になり、新しい非破壊応力測定法¹²⁾として利用可能になってきた。

電磁超音波共鳴法の利点の一つは、電磁的作用を利用した非接触計測法であるため、表面に塗膜や黒皮、錆があっても適用可能な点である。例えば電車の車輪やレールの応力測定に利用できることが分かっている。しかし、これらの錆は鋼表面に大きな凹凸を与えるほどのものではない。高齢船舶のごとく、±0.5mmを超える凹凸を有する鋼板に対する適用性については、まだ検討されていない。

そこで、電磁超音波共鳴法について、平板や凹凸試験片を用いて、腐食部材のごとく凹凸面を有する鋼板に対する適用性を実験的に検討した。

4.1 測定原理

4.1.1 センサシステム

電磁超音波共鳴法に用いるセンサの構造と動作を図22に示した。センサは、平面的に巻かれた送信および受信コイルの上に永久磁石を位置させた構造を有する。図の下半に示すように、送信コイルに流す高周波電流に対応して試験体表面近傍に渦電流が励起される

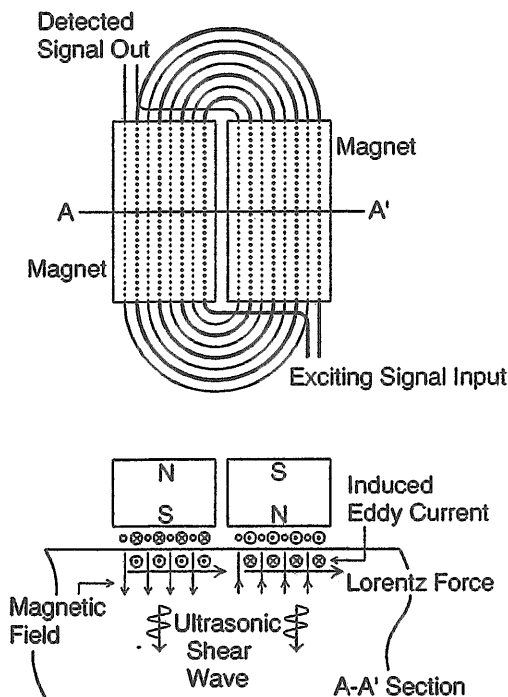


図22 電磁超音波センサの構造と動作

が、永久磁石の磁界中であるので、この渦電流に伴い試験体表面平行方向に高周波で振動する応力が生じ、横波となって材料中に伝搬していく。底面で反射された横波は、センサの真下に来ると、発生とまったく逆の現象によって受信コイルに高周波電圧を生じ、検出される。

4.1.2 信号処理システム

電磁的手法による電気-音響変換効率は、圧電センサと比較して極めて低いので、電磁超音波計測を実用なものとするためには、SN比を向上させる計測システムが不可欠である。本実験に用いた電磁超音波共鳴法計測システムのブロック図を図23に示した。

電磁超音波センサ (EMAR Sensor) を駆動する周波数 F は、パーソナルコンピュータで制御されるデジタルシンセサイザの発振周波数 $F+IF$ と中間周波発振器の発振周波数 IF (25MHz) の差によって作られる。これを決めた時間だけ増幅するゲート増幅器で電力増幅し電磁超音波センサに加える。動作周波数 F が(4)式を満たすときには、多重反射エコーが重なり合って試料内の多重反射の振幅は大きくなり、電磁超音波センサで検出される信号強度も増大する。

$$F = n \times \left(\frac{c}{2d} \right) \quad (4)$$

ここで、 n は正の整数、 c は音速、 d は板厚を表す。検出信号(周波数 F)はデジタルシンセサイザの発振周波数と混合され、中間周波数(IF)へ変換される。変換された信号は位相検波するため、中間周波発振器出力およびそれに90度位相差を有する信号と混合され、それぞれ積分回路で積分される。

SN比は、①共鳴状態での信号強度増加、②位相検波による中間周波数成分のみの抽出(センサ段階で考えれば、動作周波数成分の抽出)、③時間積分によるノイズ低減によって向上する。これらの信号処理によって、実用感度を達成している。なお、90度の位相差を有する二つの中間周波数による位相検波は、フーリエ係数のサイン、コサイン成分を求めることに対応しており、それぞれの積分器出力自乗和の平方根が求める振幅となる。

4.1.3 得られる計測データ

パーソナルコンピュータにインストールされた計測ソフトは、デジタルシンセサイザの発振周波数を変化させることによって動作周波数をスイープし、周波数と振幅の関係を自動的に求める。試料の周波数に対する応答、周波数スペクトルが得られる計測結果である。

また、動作周波数を共鳴周波数に設定した状態で、積分ゲートの時間的位置をスイープさせ、超音波の減衰を求めることも可能であるが、腐食部材の評価とは関係が薄いので、説明を省略する。

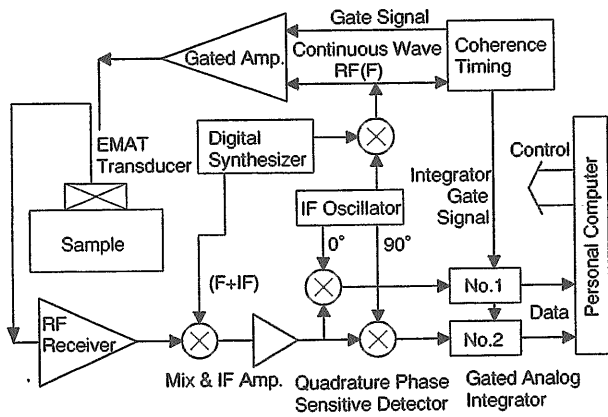


図23 電磁超音波共鳴法における信号処理システム

4.2 測定原理の実験的確認

4.2.1 板厚測定法

実験には、幅16mm×高さ16mm×厚さ10mmのコバルトサマリウム磁石と、55回巻き送受信コイルからなるセンサを用いた。磁石の磁化は厚さ方向で行っている。これを、厚さ9.6mmおよび24.6mmのSS400鋼の表面上に位置させて得たスペクトル計測結果を図24に示した。測定精度確認用にデータ点数を多く設定し、1~2MHzの周波数レンジにおいて1,500点のデータを収集した。従って、周波数の分解能は0.67KHzである。図24に示したとおり、複数の周波数にピークを有するスペクトルが得られた。ピークの周波数間隔の平均値は、板厚24.6mmでは66.3KHz、板厚6.9mmでは168.7KHzであり、板厚が大きい方がピークの周波数間隔が狭いことが分かる。また、ピーク周波数間隔における標準偏差を平均値で規準化すると、板厚24.6mmおよび9.6mmについて、それぞれ1.1%、0.6%と小さく、板厚が定まるとピーク周波数間隔は一定であることが分かった。

(4)式からピークの周波数間隔 ΔF は次式で与えられることが分かる。

$$\Delta F = \frac{c}{2d} \quad (5)$$

従って、試料の厚さは、次式で求めることができる。

$$d = \frac{c}{2\Delta F} \quad (6)$$

音速を3,230m/sec(横波)として、得られた周波数間隔を用いて(6)式で厚さを計算すると、24.4mm、9.6mmとなる。機械的に測定した試料の厚さとほぼ等しい値が得られることが分かった。従来法超音波厚さ計と同等の精度である。

4.2.2 音響異方性の影響

圧延鋼材では、図25中段に示すとおり共鳴スペクトルのピークが二つに分離する。図は板厚15mmの

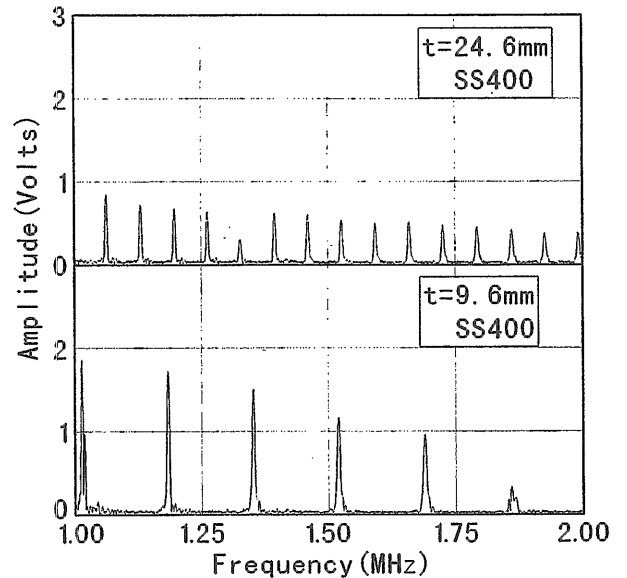


図24 板厚が異なる鋼板における共鳴スペクトルの例

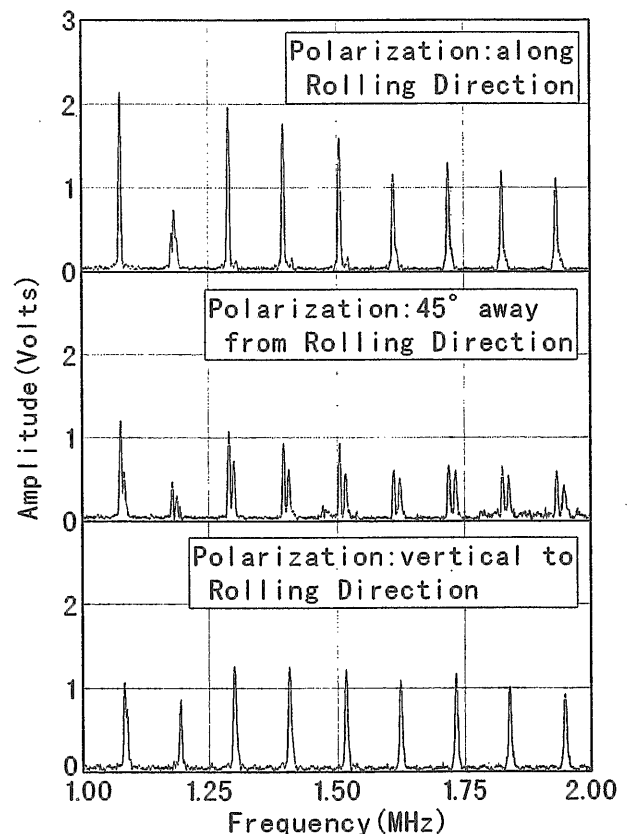


図25 音響異方性による共鳴スペクトルの分離

SM400B鋼板での計測結果である。上段、中段、下段の図はそれぞれ横波振動方向が圧延方向を基準にして平行、45度、直角の場合であり、中段の分離ピークにおける低い周波数のピークが上段に、周波数の高いピークが下段に現れている。これは、振動方向によって横波の伝搬速度がわずかに異なる音響異方性に起因

した現象である。低温で強く圧延した鋼材ほど音響異方性が現れやすい。

共鳴スペクトルのピークが二つに分離している場合には、周波数が低いピーク間の周波数間隔、或いは周波数が高いピーク間の周波数間隔を板厚測定に用いる必要がある。二つの周波数間隔はまったく同一ではなく、音響異方性に基づく伝搬速度差に対応した違いがあるはずである。図25のデータから平均周波数間隔を求めると、低い周波数ピークの周波数間隔は107.5KHzであったのに対し、高い周波数ピークの周波数間隔は108.2KHzであった。音速を3,230m/secとして板厚に換算すると、それぞれ15.0mmと14.9mmになり、きわめて小さな誤差(+0.1mm、0.6%)であることが分かった。従って、周波数間隔を正しく測定すれば、鋼板厚測定における音響異方性の影響は小さい。

これに対して、二つに分離した二対のピーク間における周波数間隔を、それぞれの分離ピークのうち周波数の高いピークと周波数の低いピークを選んで測定すると、誤差が大きくなる。特に周波数が高くなると、ピークが大きく分離するので、周波数間隔測定誤差も大きくなる。例えば、図25の中段右から2番目と3番目のピーク間隔を測定すると、94KHzであるが、板厚に変換すると、17.2mmとなり、+2.2mm、15%の誤差になる。

4.2.3 応力の影響

音響異方性の程度は、鋼板に作用している応力にも影響される。板厚15mmのSM400B鋼板で観測した1.62MHz付近における共鳴周波数と引張応力の関係を図26に示した。○印は振動方向が圧延方向に平行であり、●印は直角の横波での実験値である。応力は圧延方向に加えた。

応力がゼロから300MPaに増加すると、共鳴周波数は横波振動方向が圧延方向の時には-0.27%、直角方向では+0.045%変化することが分かった。これを板厚の変化に直すと、それぞれ-0.04mm、+0.007mmの小さな

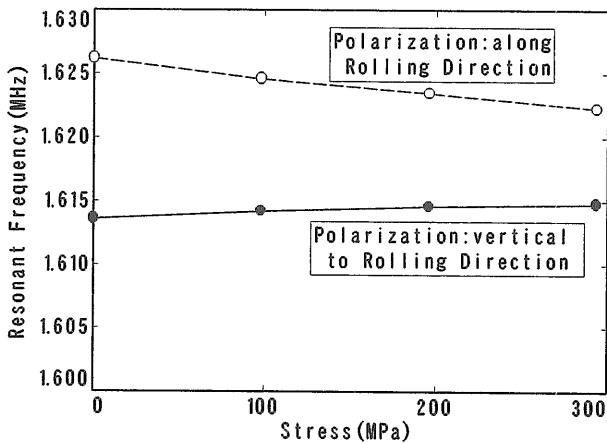


図26 応力による共鳴周波数変化の例

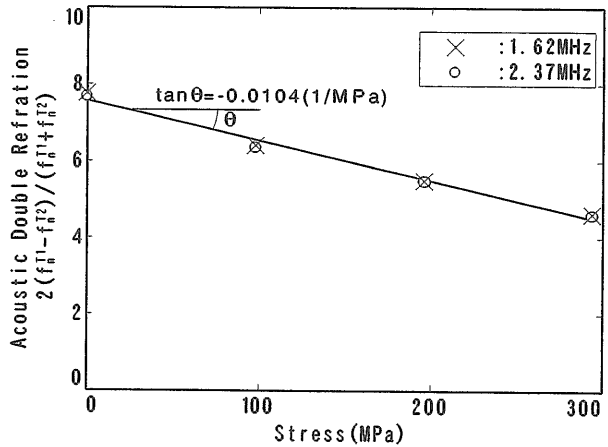


図27 応力による音響複屈折変化の例

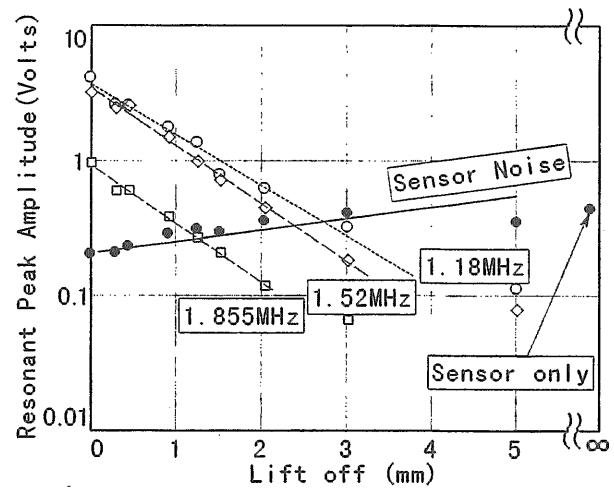


図28 共鳴振幅におけるリフトオフの効果

な変動になり、板厚測定上ほとんど考慮しなくて良いことが分かった。

なお、平均周波数で規準化した分離ピークの周波数間隔は、応力測定では音響複屈折と呼ばれる量である。音響複屈折と応力の関係を、実験値で示すと図27が得られる。共鳴周波数が異なっても、音響複屈折はほぼ同一であり、応力の一次関数であることが分かる。音弾性法による応力測定はこの現象を利用している。

電磁超音波共鳴法では、市販のセンサは無いので研究室での自作品を用いているが、図27のデータは研究室での自作センサが十分に機能していることを示している。

4.3 凹凸試験片による適用性の検討

4.3.1 リフトオフ効果

本手法による腐食部材の板厚測定を想定すると、腐食生成物を取り去った腐食による凹凸面を有する鋼板が測定対象となる。凹凸面ではセンサが鋼表面に密着できないので、鋼表面との間にある程度の間隙が存在する条件での測定となる。そこで、電磁超音波センサ

と測定面とのリフトオフの効果について調べた。

板厚9.6mmのSS400鋼板における周波数1.18、1.52、1.855MHz付近の共鳴ピーク振幅計測値とリフトオフの関係を図28に示した。1~2MHzの特定周波数にピークを形成するセンサノイズの大きさも図中に示した。リフトオフは、測定面とセンサコイル下端の間隙である。リフトオフが増大すると、共鳴振幅が急激に減少することが分かった。また、リフトオフが増えたとセ

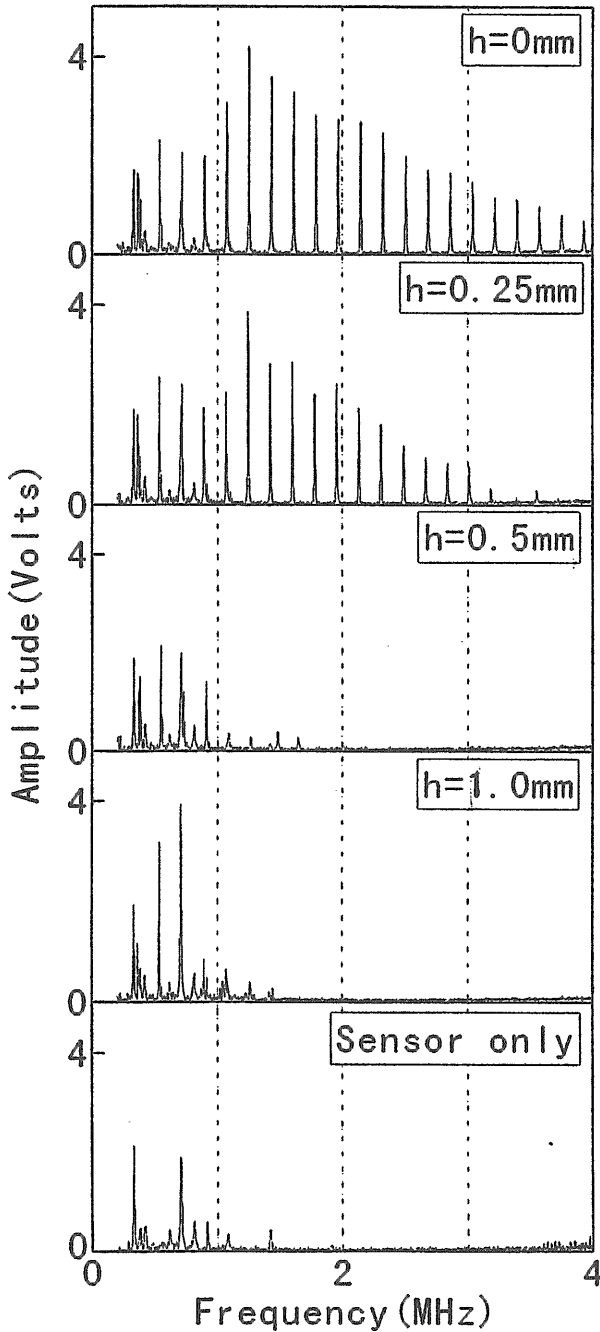
ンサノイズが増大することも分かった。センサノイズの増加は、試料に吸収される電磁場エネルギーがリフトオフ増大とともに減少するため、余ったエネルギーがセンサ内部のノイズを増加させると考えられた。なお、周波数にかかわらず広い周波数領域に存在する電気ノイズの大きさは、0.05~0.1ボルト程度であった。

電気ノイズを基準にすると、リフトオフ2mm以下であれば共鳴スペクトル計測から共鳴周波数を求めることが可能と判断できる。高齢船舶における腐食面凹凸による高低差は1mm程度と考えられるので、リフトオフの面からは本手法が適用可能と考えられる。

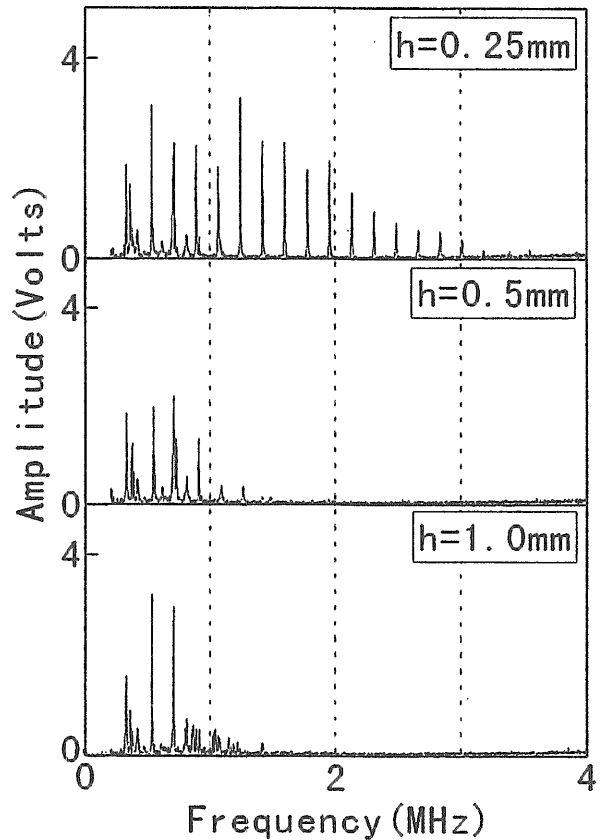
4.3.2 表面荒さの効果

腐食部材への適用性を検討するため、片面に凹凸加工した平均板厚9.0mmのSS400鋼板を用い、電磁超音波共鳴スペクトル測定を行った。凹凸面は頂点角度120度の四角錐を並べた形に加工し、山と谷の高度差を0から2.0mmまで5種用意した。高度差が小さいほど四角錐の繰返しピッチが細かい。

図29(a)に山と谷の高度差が0mm、0.25mm、0.5mm、1.0mmの試料および試料なしで測定した共鳴スペクトルの例を示した。センサは凹凸面側に設定した。凹凸が大きくなると、周波数の高い領域のスペク



(a) 粗面側に電磁超音波探触子を設定した場合



(b) 裏面側に電磁超音波探触子を設定した場合

図29 表面粗さと共鳴振幅の関係

トルが急激に小さくなることが分かった。凹凸が大きい試料でも、周波数の低い領域にはスペクトルが残った。ただし、電磁超音波共鳴センサは単体でも、図29(a)最下段に示すようなセンサノイズと考えられるスペクトルが残ることが分かった。

図29(b)は、裏面を凹凸面とし、センサを平滑面側において測定した共鳴スペクトルの例である。本スペクトルは、図29(a)と類似しており、センサが凹凸面にある場合と、反対側の平滑面にある場合でスペクトルがあまり変わらないことが分かった。このことは、電磁超音波共鳴スペクトルの振幅を左右する因子としては、凹凸面における電磁超音波の送受信効率低下が支配的でないことを表していると判断できる。4.1.2信号処理システムで述べたように、本手法では、鋼板内の多重反射波の共鳴による振幅増大を利用してSN比向上を図っているが、凹凸の大きな面では多重反射効率が大幅に低下するので、共鳴スペクトル振幅が低下するものと考えられた。

幾つかの共鳴周波数における共鳴ピーク振幅を荒さ(山と谷の高度差)を横軸として、図30に示した。縦軸の共鳴ピーク振幅は、平滑試験片の共鳴ピーク振幅で規準化した。本図では、0.1以下の値には、電気ノイズが含まれているので割引して考える必要がある。周波数が高いほど荒さの増加による振幅低下が大きいことが分かる。高い周波数では凹凸面における散乱が増大し、多重反射振幅が低下すると考えられた。

また、周波数が1MHz以上のスペクトルの共鳴ピーク振幅は、荒さが0.25mmから0.5mmに増加すると急激に振幅を減じることが分かった。1MHz以下では荒さが1mmになっても振幅の低下は少なかった。船舶等の腐食部材の評価は1MHz以下の周波数範囲において、測定できる可能性がある。

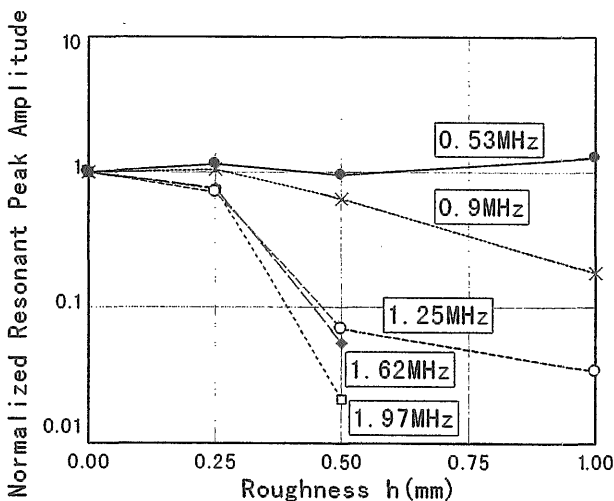


図30 共鳴振幅に与える凹凸面効果

4.4 まとめ

電磁超音波共鳴法による鋼板の板厚測定について、問題点および適用性を検討した。鋼材に音響異方性が存在したり応力が作用していても、板厚測定に与える影響は小さい。対象が平板であれば十分に板厚測定に利用でき、凹凸が0.25mm以下なら実用に耐えることが分かった。

腐食部材のごとく凹凸面を有する部材の場合には、高い周波数領域では凹凸により共鳴スペクトル振幅が低下してしまう問題があった。そのため、凹凸による振幅低下の少ない1MHz以下の周波数領域における共鳴スペクトルの測定が必要なが分かった。しかし、1MHz以下の領域はセンサノイズが多く、詳細な検討にはセンサノイズの低減が必要である。ここでは一口にセンサノイズとしたが、1MHz領域は本機の動作周波数範囲の下端部に当たり、SN比向上の信号処理が有効に働かず、むしろノイズを発生させている可能性もある。従って、腐食部材板厚測定には、50KHz~1MHzを最適周波数範囲とするセンサと信号処理システムからなる電磁超音波共鳴測定装置の開発が必要である。

5. 結 言

腐食部材における従来型超音波厚さ測定の問題点解決を目標として、新しく電磁誘導法および電磁超音波法による板厚測定法について実験的検討を加えた。

電磁誘導法に関しては、基本的な測定原理の確立、測定機能を明らかにできた。腐食部材へ適用するための凹凸試験片による検討がまだ済んでいないが、励磁・検出コイルのリフトオフに影響されない第2ピーク遅れ時間を測定することにより、腐食部材にも適用可能と判断できた。

また、電磁超音波法に関しても、基本的な測定原理の確認、鋼板の音響異方性や応力の影響などを実験的に検討し、従来法超音波厚さ計と同等の精度を有することを明らかにした。腐食部材へ適用するための凹凸試験片による検討を行ったところ、残念ながら凹凸面による多重反射能率の低下が大きく、実験に用いた装置では、凹凸が0.5mm以上ある場合は板厚測定法としての有効性を示すことができなかった。しかし、1MHz以下の周波数領域では凹凸面による振幅低下が少なく、板厚測定法として使える見通しを得た。今後、1MHz以下でノイズが少なく感度の高い電磁超音波装置の開発が必要である。

腐食部材評価は、船舶検査と関連して依然として研究課題としての重要性が高い。今後は、現場での適用条件を考慮した評価手法を研究していく必要がある。

参考文献

- 1) 三ヶ田、武尾、小笠原：電磁誘導法による板厚測定、八戸工業高等学校紀要、20, pp25-30, (1985)
- 2) 山田、鈴木：電磁誘導型肉厚センサの出力特性に及ぼす高調波成分の影響、電子情報通信学会論文誌A、J72-A(1),pp148-155,(1989)
- 3) 島田、吉井：鋼板厚測定への電磁誘導法適用の検討、第65回船舶技術研究所研究発表会講演集(1995)、pp177-180
- 4) 島田、吉井、成瀬：電磁誘導法による鋼板厚測定法に関する検討、非破壊検査平成7年度秋季大会講演概要集、pp249-252
- 5) 成瀬、島田、吉井：鋼板の電磁気応答計測による板厚測定手法の検討、第67回船舶技術研究所研究発表会講演集(1996)、pp227-230
- 6) 成瀬、島田、吉井：軟鋼板の電磁気応答解析による板厚測定手法の検討、非破壊検査平成9年度春季大会講演概要集、pp121-126
- 7) 成瀬、島田、吉井：鋼板の電磁気応答計測による板厚測定手法の検討(第2報)、第69回船舶技術研究所研究発表会講演集(1997)、pp81-84
- 8) 成瀬、島田、吉井：ステップ励磁電流を用いた電磁誘導法による鋼板厚測定手法の検討、非破壊検査(1997)、No.46, Vol.5, pp359-366
- 9) T.NARUSE, M.SHIMADA, T. YOSHII : Investigation of Steel Thickness Measurement by an Electromagnetic Method Using a Step Exciting Current, Material Evaluation(1998), Vol.56, No.5, pp631-635
- 10) 川島：電磁超音波探触子、非破壊検査(1981)、Vol.30, No.10,pp785-793
- 11) 荻、平尾：電磁超音波共鳴、非破壊検査(1994)、Vol.43, No.12, pp764-770
- 12) 日本非破壊検査協会規格NDIS 2417-1995音弾性法による応力の測定方法通則