

電磁超音波による非接触型流体速度・温度計測の高度化

(核燃料サイクル公募型研究 最終詳細報告書)

2002年3月

大阪大学大学院 工学研究科 電子情報エネルギー工学専攻
核燃料サイクル開発機構 敦賀本部 国際技術センター
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
ください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramastu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

電磁超音波による非接触型流体速度・温度計測の高度化

(核燃料サイクル公募型研究 最終詳細報告書)

大塚裕介*、西川雅弘*、
上田雅司**、荒 邦章***

要旨

本研究の目的は、ドライな環境で使用することができる電磁超音波素子によって流体速度や温度を計測することである。そのために、超音波送信器・受信器の開発を行った。また、電磁場解析によって受信器の定常磁場分布や渦電流分布についても調べた。その結果、外部励磁型受信器に比べて自己励磁型受信器は、測定分解能は高いが、リフトオフによって受信強度が大きく減少することがわかった。製作した送信器と受信器の特性は、鍛造鋼に送信器と受信器を向かい合わせになるように配置し、音速や受信強度から調べた。送信器に圧電素子を使用した場合は、製作した全ての受信器で超音波を受信することができた。しかし、受信器が小型になるほど受信強度が減少したため、電磁超音波送信器で超音波を発生させたときは、外部励磁型と自己励磁型受信器では超音波を受信することができず、磁歪型とキューブ型受信器で超音波を受信した。電磁超音波送信器・受信器を使い、水温を10～70℃まで変化させ、温度と音速の関係を求めたところ文献値と良く一致し、温度測定を行うことができた。しかし、流速測定では十分な受信強度が得られず測定できなかった。

本報告書は、大阪大学が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

*大阪大学大学院工学研究科電子情報エネルギー工学専攻

**核燃料サイクル開発機構 敦賀本部 国際技術センター ISI システム開発グループ

***核燃料サイクル開発機構大洗工学センター 要素技術開発部

次世代機器研究グループ

Development of the velocity and the temperature measurement of fluid by using electromagnetic acoustic transducers without contact

(Final Report)

Ohtsuka Yuusuke*, Masahiro Nishikawa*, Masashi Ueda** and Kuniaki Ara***

Abstract

The purpose of the investigation is to measure the velocity and the temperature of fluid from the outside of piping by using electromagnetic acoustic transducers without contact i.e. dry condition. We developed these transducers such as transmitters and detectors for this purpose. The distribution of the static magnetic flux and the eddy current was also calculated. The calculation results were shown that a self-exciter type detector had high measurement resolution and low output voltage with increasing the distance between the surface of piping and the detector, compared with a external exciter type detector. The performance of the transducers was investigated from the propagation characteristics such as the sonic speed and the amplitude of the output voltage. All of detectors received the ultrasonic waves, when the piezoresonator was used as a transmitter. However, the detectors of the external exciter type and the self-external type could not receive the ultrasonic waves transmitted by the electromagnetic transmitter due to the low output voltage obtained by smaller size of the detectors. The acoustic velocity for water from the temperature between 10 °C and 70 °C was investigated by using the electromagnetic transmitter and detectors. The result was good agreement with the reference. On the other hands, the measurement of the fluid velocity could not achieved due to the low output voltage.

* Course of Electromagnetic Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Osaka University

** ISI System Development Group, International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga Head Office, Japan Nuclear Cycle Development Institute

*** Innovative Component System Research Group, Advanced Technology Division, O-arai Engineering Center, Japan Nuclear Cycle Development Institute

目 次

| | |
|-------------------------------|----|
| はじめに | 1 |
| 1. 動作原理 | 3 |
| 1. 1 超音波伝播の特徴 | 3 |
| 1. 2 超音波送信器・受信器に求められる基本的性能 | 5 |
| 1. 2. 1 温度・流速測定の手法 | 5 |
| 1. 2. 2 電磁超音波の送信・受信原理 | 6 |
| 1. 2. 3 電磁超音波の特徴 | 7 |
| 2. 電磁超音波素子の開発と実験装置 | 9 |
| 2. 1 電磁超音波送信器の構造 | 9 |
| 2. 2 超音波受信器の構造 | 11 |
| 2. 2. 1 外部励磁型受信器 | 11 |
| 2. 2. 2 自己励磁型受信器 | 12 |
| 2. 2. 3 キューブ型受信器 | 14 |
| 2. 2. 4 磁歪型受信器 | 15 |
| 2. 2. 5 受信器の特徴 | 15 |
| 2. 3 実験装置 | 16 |
| 2. 4 電磁場解析 | 17 |
| 3. 実験結果と数値解析結果 | 19 |
| 3. 1 電磁超音波送信器の特性 | 19 |
| 3. 1. 1 出力特性 | 19 |
| 3. 1. 2 指向特性 | 21 |
| 3. 2 外部励磁型受信器による超音波の受信 | 24 |
| 3. 2. 1 実験結果 | 24 |
| 3. 2. 2 数値解析結果 | 28 |
| 3. 3 自己励磁型受信器による受信 | 32 |
| 3. 3. 1 数値解析結果 | 32 |
| 3. 3. 2 自己励磁型受信器による超音波の受信 | 40 |
| 3. 4 キューブ型受信器と磁歪型受信器による超音波の受信 | 41 |
| 3. 5 超音波による温度測定・流速測定 | 42 |
| 4 考察 | 48 |
| 4. 1 外部励磁型と自己励磁型の定常磁場分布と渦電流分布 | 48 |
| 4. 2 リフトオフと受信強度の関係 | 49 |
| 4. 3 電磁超音波による送受信強度 | 51 |
| おわりに | 53 |
| 参考文献 | 54 |
| 学会発表 | 54 |

はじめに

現在、世界のエネルギー需要の約 9 割は化石燃料で補っている。また 21 世紀をむかえ、全世界が消費するエネルギーは加速の一途をたどっている。今世紀の中頃には地球上の人口は現在の約 2 倍になると予想されており、また人類の消費するエネルギーは約 3 倍に増加すると予想されている。したがって、消費エネルギーを化石燃料だけに頼れる期間は 100~150 年程度でいずれ枯渇してしまう。ここで必要な量のエネルギーの安定供給は重要課題であり、資源に乏しくエネルギー供給構造の脆弱な日本においては、エネルギーの安定供給の確保を図ることは不可欠である。特に電力需要については、国民生活の高度化等を反映して、今後とも着実に増大すると予想されている。

現在、日本の需要電力を支える発電プラントは、火力、原子力、水力発電などがあるが、火力発電は燃料の枯渇の恐れや CO₂ の問題、水力発電においては、狭い我が国では新たな立地条件には恵まれないのが実情である。そんな中、供給安定性、環境負荷、経済性の面で優れた特徴を有している原子力発電が注目されている。しかし、この原子力発電にも多くの問題点が存在する。その代表的なものに「放射能漏洩」が挙げられる。原子力発電では、放射能が外部に漏洩することがないように多重の防護システム、安全システムが組み込まれており機能している。また、十分な安全性を確保する必要がある。しかし、未だ記憶に新しい「もんじゅ」のナトリウム事故は、配管内を流れるナトリウムの温度を測定するために、配管に直接温度計を差し込んで測定していたため、ナトリウムの流体力により温度計が振動し、高サイクル疲労を生じ、亀裂が発生、進展し破損したために起こった事故である。このような事故を起こさないためにも、システムを安定に動作させる上で重要なパラメータである液体金属の温度や流速を配管外から測定できるシステムを構築する必要がある。

配管外から液体金属などの温度を測定する場合、超音波による温度計が多く発表されているが、いずれの場合においても圧電素子による超音波の発生と検出であり、試験体との密着性を良くするために中間媒体が必須となっている。また、試験体表面の仕上げなどの前処理が面倒であり、熟練した技術も必要となる。特に中間媒体は時間の変化とともにその特性が劣化し、長時間の測定や高温等の測定環境下には適していない。それに対して電磁的に超音波を発生・検出する電磁超音波素子は配管に近接しなければならないものの、圧電素子とは異なり、原則的には非接触であり中間媒体を必要とせずドライな環境の中で計測できる優位性をもち合わせている。電磁超音波の特徴は以下の通りである[1]。

- ・電磁超音波探触子を被測定材料に接触することなしに超音波の発生・検出が可能。
- ・磁界と渦電流の方向を組み合わせることにより各種モードの超音波を発生できる。
- ・コイルと磁石で構成されているため、感度変動や劣化が極めて少ない。

欠点は電気から超音波エネルギーに変換する効率が悪く、圧電素子に比べると 40dB 以上感度が悪いことであり、使用環境によっては十分な SN 比を得ることができないことがある。

これまで当研究室においては、電磁超音波送受信器の開発とその応用に取り組み、SH 波を利用し、熱時効による材料の劣化によって音速が変化することを明らかにしてきた[2][3]。その研究過程で、超小型の電磁超音波受信器を開発し、従来よりも高い測定分解能が得られている。このセンサーが実用的に利用できる SN 比を得ることができれば、流体の温度測定に加え、流速を非接触で管径外で検出できる可能性が高まる。これまでの経験を生かし本研究では、電磁超音波による流体温度と速度計測を管外部からドライな環境で測定する縦波用電磁超音波素子を開発し、流体システムの重要なパラメータである温度を配管外から安

全に計測できるシステムを確立することを目的としている。そのために以下の内容について研究を進めた。

- (1) 非接触型電磁超音波受信器を設計開発する。
- (2) 非接触型電磁超音波送信器・受信器の動作実証と基本特性を調べる。
- (3) 製作した送信器・受信器を使った温度測定や流速測定の可能を検討する。

具体的には、(1)では従来よりも高測定分解能をもつ小型の受信器として、外寸が数 mm のフェライトにコイルと巻く構成である受信器の設計と開発を行う。(2)では製作した超音波送信器・受信器が縦波の発生と検出を行なうことができるかどうかの動作実証と発生した超音波の指向性や超音波の検出原理を数値解析によっても検討する。(3)では製作した超音波送信器・受信器を使い、中間媒体を使わずに超音波の送受信を行い、温度と音速の関係や、流速と超音波の強度分布について調べる。本報告書では、これら 3 点について得られた結果をまとめている。

1. 動作原理

1. 1 超音波伝播の特徴

粘性のある液体中を伝搬する縦波は、図 1.1 で示す極座標系で、中心から距離 r 離れた位置での面積 S と $r+\Delta r$ だけ離れた位置で $S+\Delta S$ の面を考えた場合、それぞれの面に音圧と粘性力が働く。この場合の波動方程式は、(1.1)式のように示すことができる。

$$\rho \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} = K \frac{\delta^2 u}{\delta r^2} + \frac{2K}{r} \frac{\delta^2 u}{\delta r^2} + \eta \frac{\delta^3 u}{\delta r^2 \delta t} + \frac{2\eta}{r} \frac{\delta^2 u}{\delta r \delta t} \quad (1.1)$$

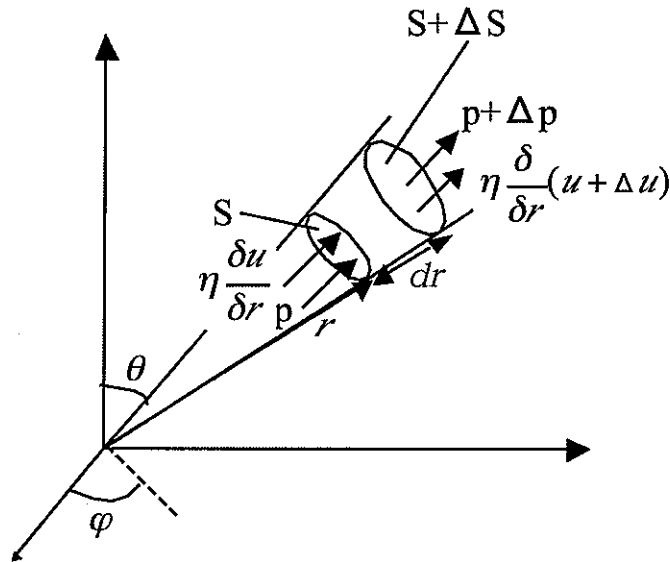


Fig.1.1 Propagation of a longitudinal waves in polar coordinates

ここで、 ρ は密度、 η は粘性率、 K は体積弾性率、 u は変位を示す。右辺の第 3 項目、第 4 項目は、粘性によって生じる項である。(1.1)式の一般解は、(1.2)式となる。

$$\xi = \frac{A}{r} e^{j\omega t} e^{-(\alpha + j\kappa)r} + \frac{A}{r} e^{j\omega t} e^{-(\alpha - j\kappa)r} \quad (1.2)$$

ここで、 α は減衰率、 κ は波数を示す。さて、(1.2)式の右辺第 1 項目は進行波、第 2 項目は後退波であり、ここでは第 1 項目のみを考慮に入れる。(1.2)式を(1.1)式に代入して解くと、音速と減衰率を求めることができ、(1.3)式、(1.4)式にそれぞれ示す。

$$v = \left[\left(\frac{\rho^2}{k^2 + \omega^2 \eta^2} \right)^{1/4} \cos \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\omega \eta}{k} \right) \right]^{-1} \quad (1.3)$$

$$\alpha = \left(\frac{\rho^2 \omega^4}{k^2 + \omega^2 \eta^2} \right)^{1/4} \sin \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\omega \eta}{k} \right) \quad (1.4)$$

粘性率が高くなると超音波の音速も周波数に依存するが、粘性率が低い場合は、一般的に知られている体積弾性率と密度との比の平方根で音速が得られる。表 1.1 は液体ナトリウムと水に対する体積弾性率、粘性率、密度を示している[4]。これらの値を(1.3)式、(1.4)式に代入し、周波数に対する音速と減衰率の依存性をそれぞれ図 1.2、図 1.3 に示す。水とナトリ

Table 1.1 Property of water and liquid Sodium

| | Volume elasticity (N/m ²) | Viscosity (kg/m/s) | Density (kg/m ³) |
|--------------------|--|-----------------------|---------------------------------|
| Water(20°C) | 5.53x10 ⁹ | 4.52x10 ⁻³ | 9.04x10 ² |
| Liq. Sodium(200°C) | 2.22x10 ⁹ | 1.00x10 ⁻³ | 9.98x10 ² |

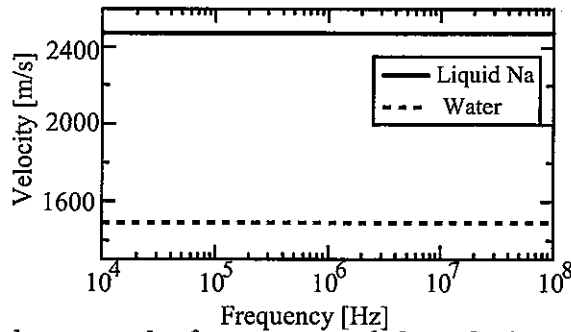


Fig.1.2 Relationship between the frequency and the velocity of a longitudinal wave

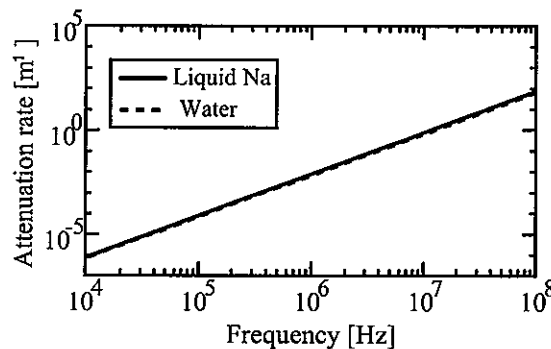


Fig.1.3 Relationship between the frequency and the attenuation rate

ウムは音響学的には良く似た性質をもっており、周波数に対して音速は依存しない。また、周波数に対する減衰率はほぼ等しく、超音波が水を伝播する際の減衰率を求めることができれば、その値を液体ナトリウムを使用する環境に適応することが可能である。

音速は周波数に対しては一定であったが、温度に対しては変化をする。体積弾性率や密度が温度に依存するからである。図 1.4 に水と液体ナトリウムの温度に対する体積弾性率、密度、音速の依存性について示す。水は、0°Cから 100°Cにかけて密度は小さくなっていくが、体積弾性率は 70°Cあたりで最大となる。そのため、音速も体積弾性率の温度依存性と同様な変化をし、70°Cまでは温度とともに音速は速くなる傾向を示す。その一方、液体ナトリウムの場合は、体積弾性率と密度は温度の上昇とともに減少するが、密度の減少率が体積弾性率よりも大きいため、音速は温度に対して単調に遅くなっていく。液体ナトリウムでは、温度と音速は一對一の関係が成り立つため、液体ナトリウム中を伝播した音速の値がわかれば、そのときの温度を求めることができることになる。温度に対する音速の変化率は、液体ナトリウムよりも水のほうが大きいため、温度に対する測定精度は水よりも厳しいことが予想される。しかし、水と液体ナトリウムでは、音波の伝播特性に多少違いがあるが、液体ナトリウムは取り扱いが簡単ではないため、水を使用することで超音波の伝播特性を評価する。

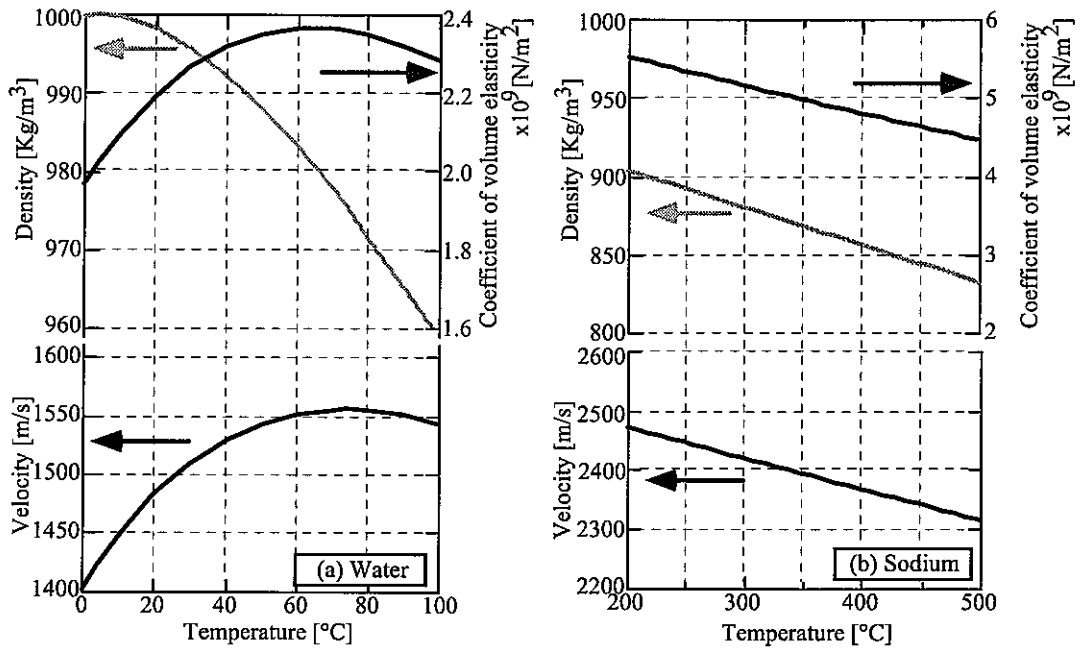


Fig.1.4 Properties of the density, the coefficient of volume elasticity, and velocity depending on temperature. The case of (a) and (b) is for the case of water and for the case of sodium, respectively.

1. 2 超音波送信器・受信器に求められる基本的性能

1. 2. 1 温度・流速測定の手法

非接触型超音波送信器・受信器を使用する場合でも、基本的に圧電素子と使った計測方法と同じ構成で超音波の送受信を行う。まず初めに、管径が送信器・受信器を配管に対して向き合うように配置しても、時間分解能として精度を保てる近接限界距離よりも大きい場合について示す。

送信器と受信器が図 1.5 に示すように管径に対して最大の距離がとれるように配置する。その際、配管の直径を D 、音波の速度を v_s 、伝播時間を τ とすると次の関係がなりたつ。

$$v_s = \frac{D}{\tau} \tag{1.5}$$

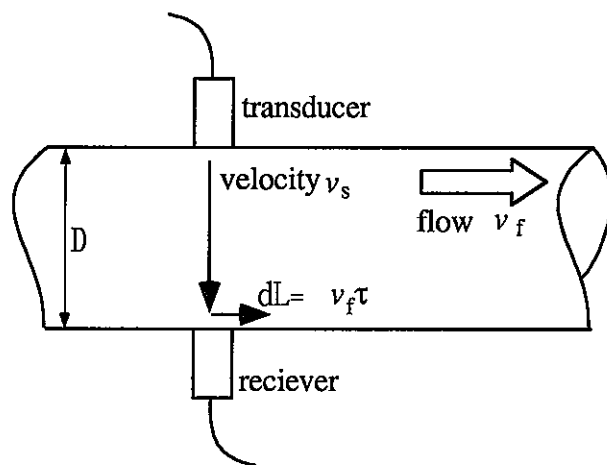


Fig.1.5 Arrangement of the transducers on the large tube

これにより、測定物の音速の温度依存性があらかじめ既知であれば温度測定が可能である。一方、管内を流れる流体の速度を v_f とし、流体によって音波が最大となる位置の変位量を ΔL とすると

$$v_f = \frac{\Delta L}{\tau} \tag{1.6}$$

となる。したがって、音波と流速の速度の比は、

$$\frac{v_f}{v_s} = \frac{\Delta L}{D} \tag{1.7}$$

となる。 ΔL は計測上から $\frac{\lambda}{2}$ 程度とればよく、これが受信器の空間分解能よりもおおきければよい。

次に管径が送信器・受信器を設置できる近接限界距離より小さい場合について示す。送信器・受信器は、図 1.6 に示すように並べて配置する。送信器によって発生させる縦波はコイルの位相差を調整することにより角度 θ で斜入射する。流体の流れに対して、下流での音波到達点を L_d 、上流での到達点を L_u とし、流体が流れていない場合からの変位量を ΔL とすると、流速は、

$$v_s = \frac{L_d - L_u}{2\tau} \tag{1.8}$$

で与えられる。変位量は

$$\Delta L = v_f \tau \tag{1.9}$$

となり、 ΔL が空間分解能程度以上あれば測定可能となる。

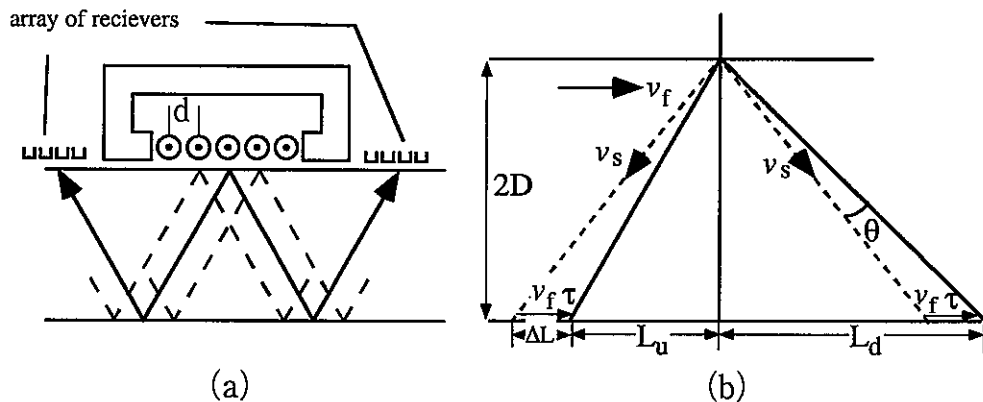


Fig.1.6 Arrangement of the transducers on the small tube. The left figure (a) shows the propagation of a longitudinal wave, which is generated by the current phase difference. The right figure (b) shows the extend elevation for the figure (a).

1. 2. 2 電磁超音波の送信・受信原理

送信器は、磁石とコイルを組み合わせることによって、電磁的に縦波を発生させることができる。図 1.7 に送信原理図を示す。

試験片表面に置かれたコイルに高周波電流を流すことにより、試験片表面に時間変化する磁場が生じ、この変化を打ち消そうとする方向、すなわちコイルの電流とは逆向きに渦電流

が発生する。渦電流[J]は永久磁石が作る静磁場[B]との相互作用によりローレンツ力[F]が

$$F = J \times B \quad (1.10)$$

として発生し、試験片表面を振動させ超音波を発生させる。

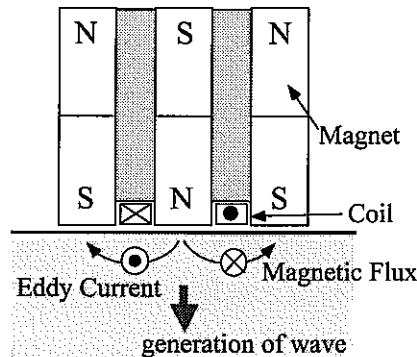


Fig.2.7 A basic principle for the generation of a longitudinal wave by using electromagnetic acoustic transducer

受信器は、透磁率の高い媒体とコイルを組み合わせることによって、電磁的に縦波を受信することができる。受信原理は基本的に送信器による縦波の発生と逆の原理である。図 1.8 に受信原理図を示す。

受信器のある試験片表面近傍に磁石等により定常磁場を印加し、そこに縦波が到達すると磁石等による定常磁場と超音波による振動の相互作用により、試験片内に渦電流が生じる。磁束は透磁率が高い媒体に集中するので、渦電流によって誘導された磁束は、試験片から媒体を通り再び試験片に戻る。よって、誘導された磁束が時間的に変化することによってコイルに電圧が誘起され縦波を受信する。

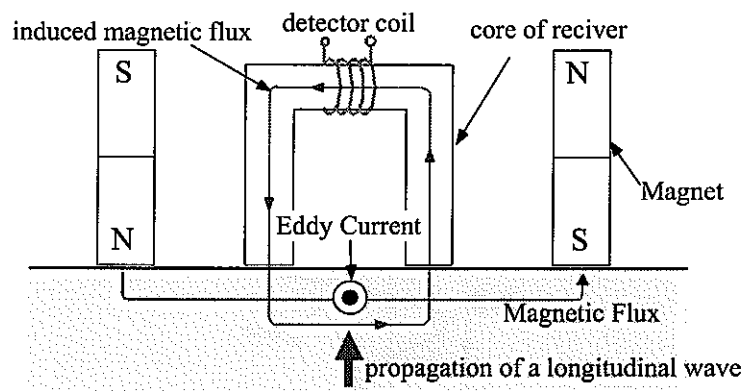


Fig.2.8 A basic principle for the detection of a longitudinal wave by using electromagnetic acoustic transducer

1. 2. 3 電磁超音波の特徴

電磁的に超音波を送信・受信するには、伝播媒体の表面に渦電流が流れるというプロセスが必要である。電磁超音波の発生・受信に関係する基本方程式は次の4つの式で、高周波電流と静磁界により半無限に広がる金属中に発生する渦電流を考えると良い。

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{1.11}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{1.12}$$

$$J = \sigma \left(E + \frac{\partial S}{\partial t} \times B \right) \tag{1.13}$$

$$\rho \frac{\partial^2 S}{\partial t^2} = C \frac{\partial^2 S}{\partial Z^2} + J \times B \tag{1.14}$$

最初の(1.11)式と(1.12)式が Maxwell の方程式であり、(1.13)式はオームの法則、(1.14)式は弾性波の方程式である。また、弾性波と磁場との相互作用により生じる項が(1.13)式と(1.14)式に付加されている。

超音波送信においては、送信器のコイル間隔が十分に広く、ベクトルポテンシャルAが平面電磁波と同じ割合で深さ z とともに変化すると仮定する。その場合、試験片中でベクトルポテンシャルAは

$$A(z) = A(0) \exp(- (j\beta + \alpha)z) \tag{1.15}$$

となる。ここで β は位相項であり、 α は減衰項である。特に α は

$$\alpha = \omega \left(\frac{\mu \epsilon}{2} \right)^{1/2} \left[\left\{ 1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2 \right\}^{1/2} - 1 \right]^{1/2} \tag{1.16}$$

で与えられる。超音波の送信周波数が数 100KHz から数 MHz であれば、 $\sigma / \omega \epsilon \gg 1$ が成り立ち、渦電流が流れる表皮厚さを δ とすると

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \tag{1.17}$$

となる。したがって、超音波を発生させる材質にもよるが、送信する周波数帯では、 δ は 0.01mm から 0.1mm 程度であり、極めて表面近傍にしか渦電流が流れないことがわかる。

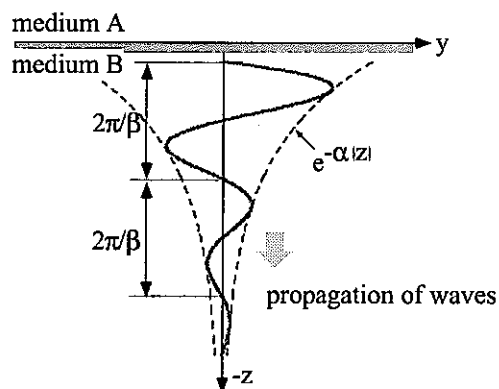


Fig.1.9 the decrease of the eddy current density into the material

2. 電磁超音波素子の開発と実験装置

2. 1 電磁超音波送信器の構造

電磁超音波送信器の一例を図 2.1 に示す。この送信器は、U 型のコイルを 10 回巻いたものであり、写真上部の 2 本の線がコイルである。コイルの下側には、非磁性材料であるプラスチックがあり、その両側を磁石で挟む構造となっている。大きさは $8 \times 10 \times 30 \text{mm}^3$ である。また、コイルの幅に相当する磁石間隔は 1 mm となっている。試験片へ超音波を発生させる時は、写真上部の面を下にして配置する。

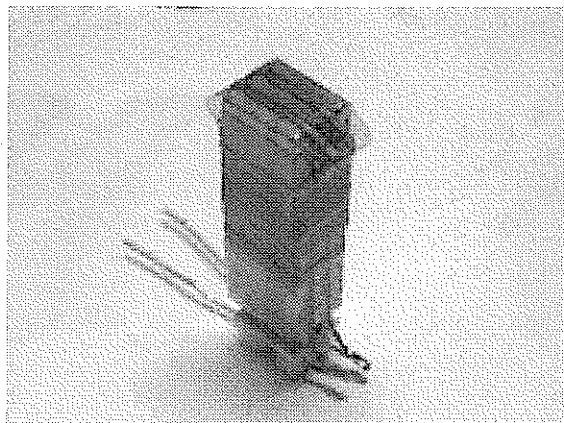


Fig.2.1 Configuration of the electromagnetic acoustic transducer.

送信器において、永久磁石の磁束密度は送信強度に直接関わってくるパラメータであり、磁束密度の高いネオジウム系希土類磁石を使用した。磁石の性質を表 2.1 に示す。コイルは、磁石の間に巻き付けるように配線するが、コイルに厚みがあると試験片と受信器の間にリフトオフが生じ、送信強度の低下につながる。そのリフトオフを軽減するために断面形状が長方形で厚さが薄い耐熱性のポリアミド被覆線 ($35 \mu\text{m} \times 1 \text{mm}$) を使用した。

次に製作した送信器の形状について説明する。コイルの巻き方は U 型と W 型の 2 種類、磁石は 1 mm 厚、2 mm 厚と 5 mm 厚のものを用いた。U 型・W 型とはコイルの巻き方の形状から名付けた。コイルの巻き方と巻数、磁石の厚さの関係について表 2.2 にまとめた。また、図 2.2 にそれぞれの送信器のコイルの巻き方と磁石の厚みについて示す。磁石間はすべて 1 mm となっていて、非磁性材料であるプラスチックを挟んでいる。

Table 2.1 Property of the magnet

| | |
|--------------------------------|--|
| Residual magnetic flux density | Br: 1.28 – 1.33 [T] |
| Shear adhesion | bHc: 955 – 1035 [KA/m] iHc: 1114 [KA/m] |
| Energy product | 310 – 342 [KJ/m] |
| Curie temperature | 365°C |
| Electric resistance | 2×10^{-4} [Ω] |
| Size | $1 \times 10 \times 30$ [mm^3], $2 \times 10 \times 30$ [mm^3], $5 \times 10 \times 30$ [mm^3] |

Table 2.2 Configuration parameters for the EMAT

| | coil pattern | turn number [turn] | thickness of magnet [mm] | size [mm] |
|-----|--------------|--------------------|--------------------------|-----------|
| (a) | U type | 5 | 1 | 5x10x30 |
| (b) | W type | 5,10 | 1 | 9x10x30 |
| (c) | U type | 1,3,5,10,20 | 2 | 8x10x30 |
| (d) | W type | 10 | 2 | 14x10x30 |
| (e) | U type | 10 | 5 | 17x10x30 |
| (f) | U type | 10 | 5x2 | 22x10x30 |

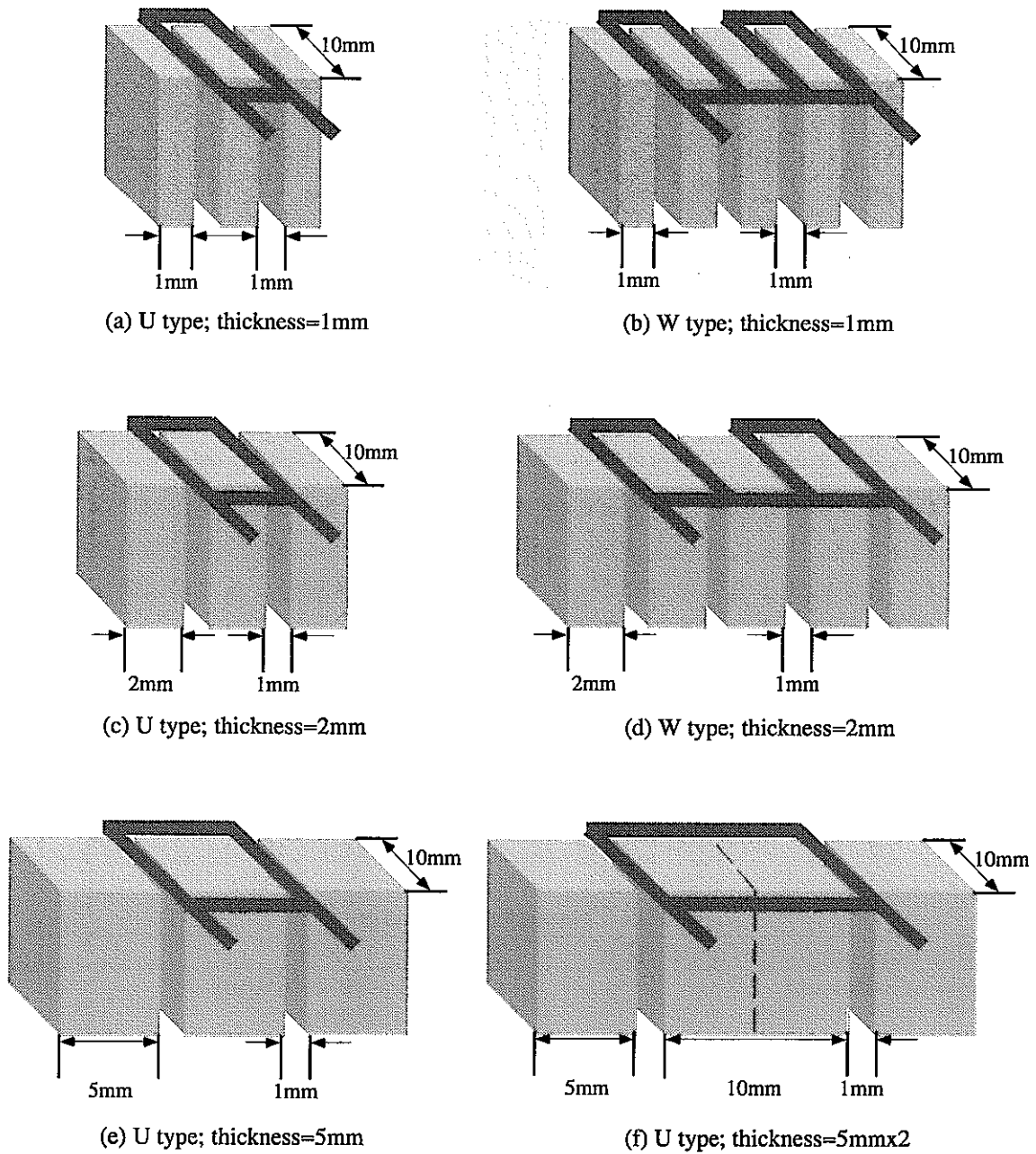


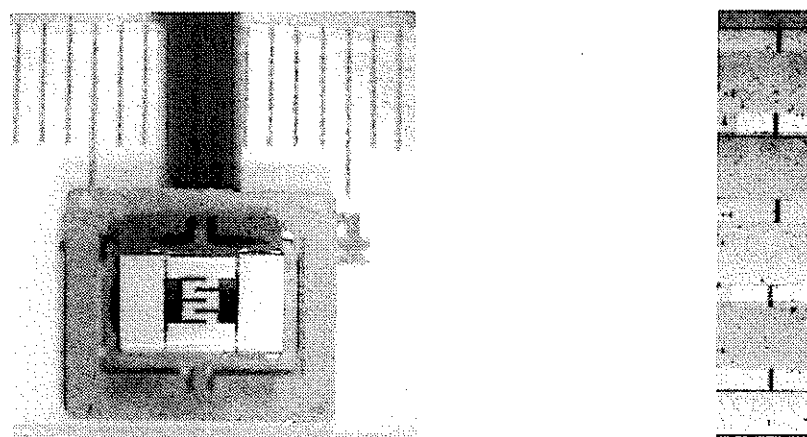
Fig.2.2 Various type of EMATs

2. 2 超音波受信器の構造

2. 2. 1 外部励磁型受信器

図 2.3 に5チャンネル分のセンサーが組み込まれている外部励磁型受信器の外観を示す。センサーは中心にある黒い5つの線の部分に収められている。そしてそれを支えるホルダーとジンバルバネに取り付けられている。ジンバルバネの大きさは $10.5 \times 9 \text{mm}^2$ となっており、枠に対して2点で支持されていることから、試験片に配置する際多少の傾きを微調できる機能を持ち合わせている。これによって、センサー部分が試験片に密着できるようになっている。

受信器の構成は、透磁率の高いフェライトコアとコイルからなる。フェライトコアには、キュリー温度が 400°C 以上である単結晶の Mn-Zn フェライトが用いられている。図 2.4 にセ



(a) a general view for sensor frame (b) a detail view for the array of sensors

Fig.2.3 Configuration of the detector which needs the permanent magnet to excite the magnet field. This sensor is called the external exciter type detector.

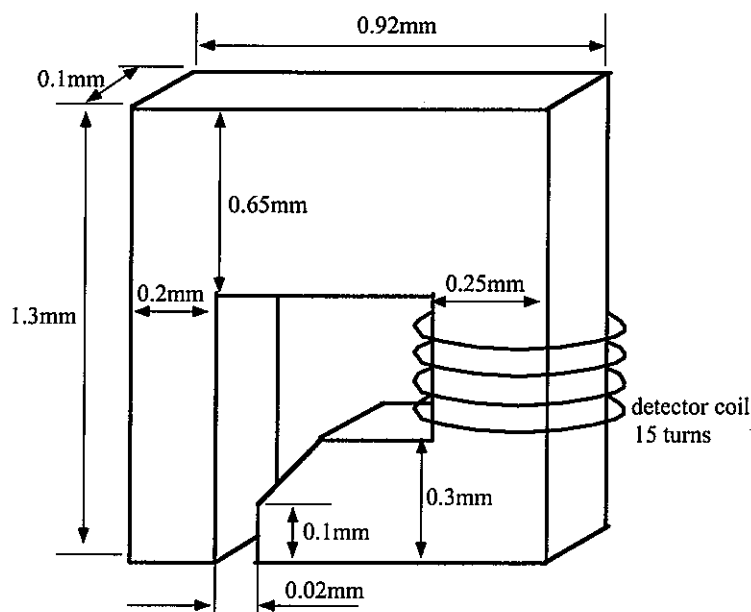


Fig.2.4 Detail view of sensor core for the external exciter type detector.

センサーの拡大図を示す。センサーの外寸は $1.3 \times 0.92 \times 0.1 \text{mm}^3$ と非常に小さく、検出用コイルを 15 ターン巻いている。表 2.3 にセンサーの緒特性について示す。また設計時に想定した受信原理 (図 2.5) は、受信器の両側に置いた磁石によって試験片に定常磁場を印加し、それと超音波による相互作用により試験片表面近傍に渦電流が生じる。その渦電流によって誘起された磁束はギャップ付近からフェライトコアを通り、時間的に変化することによって検出用コイルに電圧が発生し超音波を受信することができる。

Table 2.3 Configuration parameters for the external exciter type detector.

| | |
|--------------------------------------|------------------|
| sensor core | 5 |
| material | Mn-Zn ferrite |
| the length of the gap | 0.02 [mm] |
| sensor size | 10.5×9.0×0.4[mm] |
| the number of turns for exciter coil | 15 [turn] |
| inductance | 0.8 [μ H] |
| resistance | 20 [Ω] |

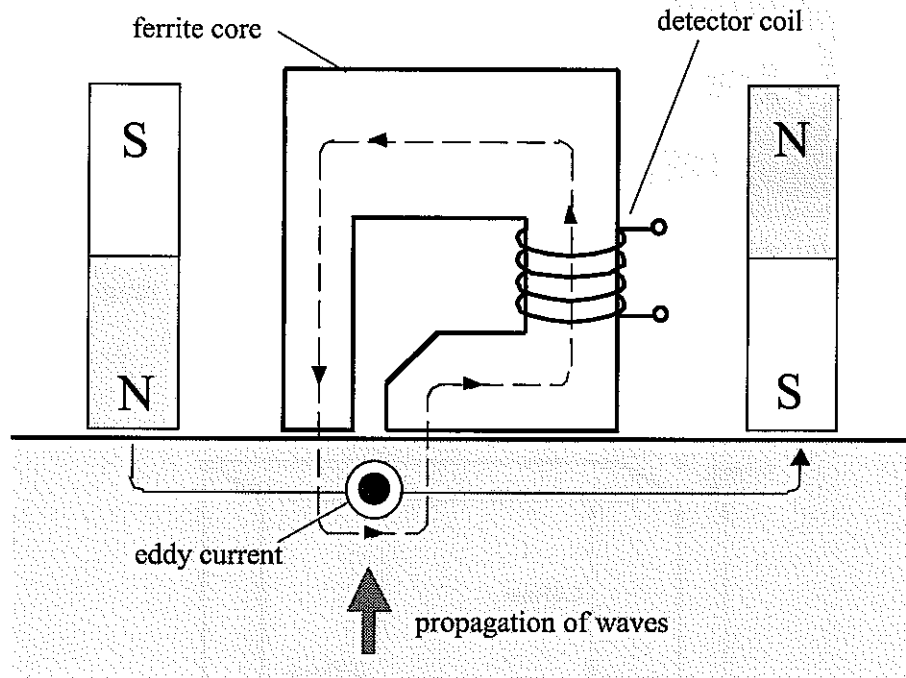
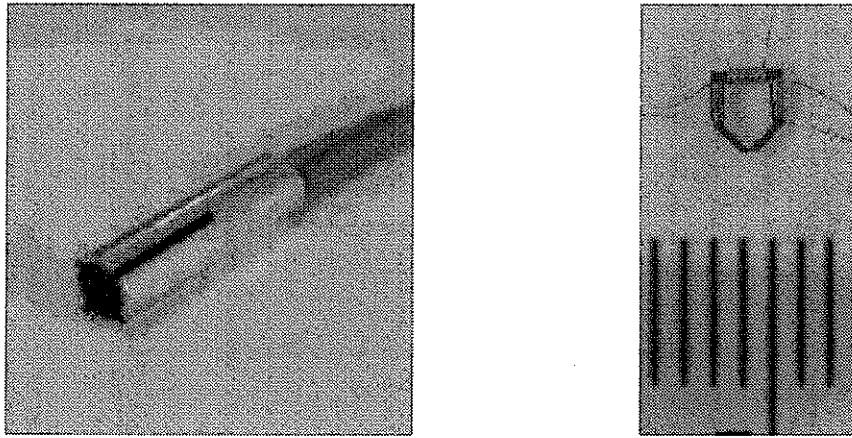


Fig.2.5 A basic principle for the detection of a longitudinal wave by the external exciter type detector.

2. 2. 2 自己励磁型受信器

図 2.6 にセンサーが組み込まれている自己励磁型受信器の外観を示す。センサーはアルミの筒の中に取り付けられており、大きさは直径 8 mm、高さ 30mm となっている。これにより、センサーは測定時に破損しないように保護されている。センサーは外部励磁型受信器と同様に、透磁率の高いフェライトコアとコイルによって構成されており、フェライトコアに



(a) a general view for sensor frame (b) a detail view for the array of sensors

Fig.2.6 Configuration of the detector which has exciter coils to excite the magnet field. This sensor is called the self-exciter type detector.

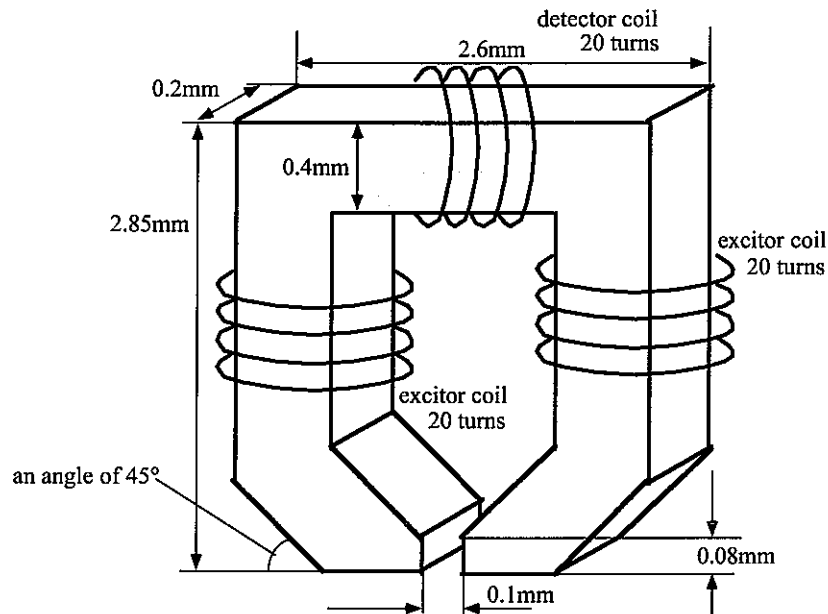


Fig.2.7 Detail view of sensor core for the self-exciter type detector.

はキュリー温度が 400℃以上である単結晶の Mn-Zn フェライトを用いている。図 2.7 にセンサーの拡大図を示す。センサーの外寸は $2.6 \times 2.85 \times 0.2 \text{mm}^3$ と非常に小さいものとなっており、励磁用コイルを 20 ターン、検出用コイルを 20 ターン巻いている。表 2.4 にセンサーの緒特性について示す。

また設計時に想定した受信原理 (図 2.8) は、受信器の両側に巻いた励磁用コイルに電流を流すと、フェライトを通り試験片表面近傍のギャップ付近のみに磁束が流れる。その磁束と超音波との相互作用により試験片表面近傍に渦電流が生じる。その渦電流によって誘起した磁束はギャップ付近からフェライトコアを通り、時間的に変化することによって受信器の上部に巻いた検出用コイルに電圧が生じ超音波を受信できる。

なお、この自己励磁型受信器は製作する前に数値解析により形状の検討を行っている。それに関しては第 3 章で述べることとする。

Table 2.4 Configuration parameters for the self-exciter type detector

| | | |
|-----------------------|---------------------|-------------------------|
| sensor core | | 1 |
| material | | Mn-Zn ferrite |
| the length of the gap | | 0.1 [mm] |
| sensor size | | $\phi 8 \times 30$ [mm] |
| exciter coil | the number of turns | 20 [turn] |
| | inductance | 6.9 [μ H] |
| detector coil | the number of turns | 20 [turn] |
| | inductance | 2.8 [μ H] |

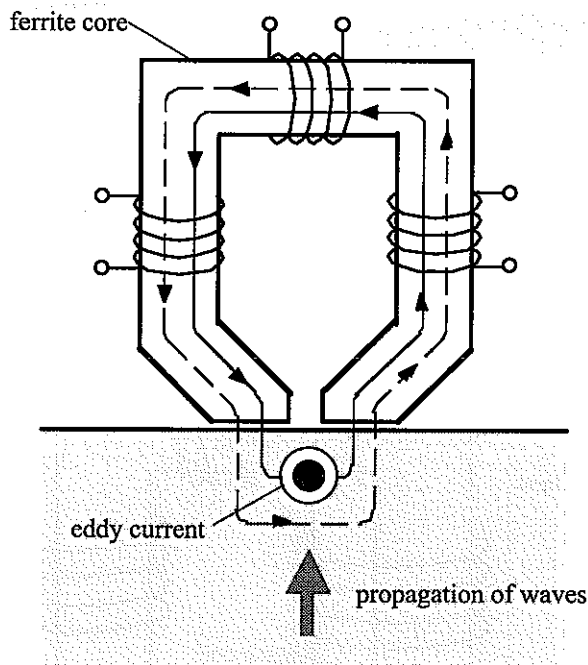


Fig.2.8 A basic principle for the detection of a longitudinal wave by the self-exciter type detector.

2. 2. 3 キューブ型受信器

キューブ型受信器は、受信感度を向上させることを優先にした受信器である。図 2.9 にその構造を示す。形状的には製作した送信器の中で最大出力である U 型磁石厚 10mm のものと同様であり、受信原理も送信原理の逆の原理となっている。唯一違う点は、磁石間が 2mm になったことと、コイル形状が丸型で $\phi 0.07\text{mm}$ のウレタン被覆となっている。コイルは磁石間に 15 ターン巻いている。

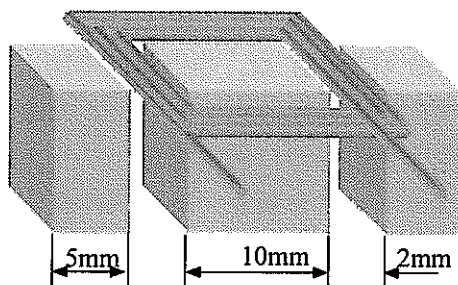
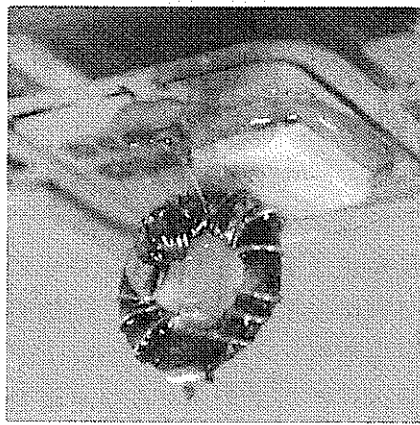


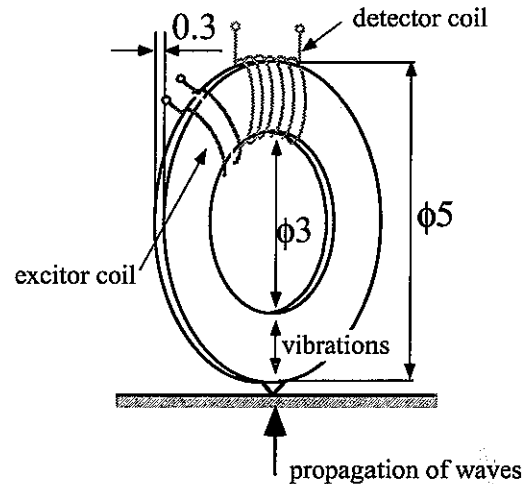
Fig.2.9 Configuration of the detector called cube type detector.

2. 2. 4 磁歪型受信器

磁歪型受信器は、逆磁歪効果によって超音波の振動を検出する。その外観を図 2.10 に示す。中央に見えるリング形状がフェライトであり、C型センサーと同じ材質である。リングの大きさは外径5mm、内径3mm、厚さ0.3mmとなっている。リングはホルダーに接着し、平行二枚バネで支持されている。検出用のコイルは、リングとジンバルバネが接触している辺りに20ターン、励磁用のコイルはリングの全体にわたって10ターン巻いてある。リングの下部には、振動をピックアップするためのダイヤモンド針が取り付けられている。針の先端は非常に鋭利なため、局所的な位置での振動を検出でき、測定空間分解能は高い。



(a) a general view for the sensor frame.



(b) the size of the detector

Fig.2.10 Configuration of the magnetostriction type detector.

2. 2. 5 受信器の特徴

超音波で音速測定を行うあたり、非接触で測定ができ、高温でも使用が可能である受信器が必要となっている。製作した受信器の特徴を圧電素子と比較すると表 2.5 のようになる。開発した受信器は共に中間媒体を必要がないという特徴がある。特に電磁方式は、非接触で測定が行える方法である。磁歪型は、ダイヤモンド針を測定対象物に接触させる必要がある。受信の波形や強度については、電磁方式は送信周波数と同一周波数の波形を受信でき、受信強度はキューブ型、磁歪型、外部励磁型、自己励磁型の順で大きな値となっている。使用可能温度については、キュリー温度が400℃以上のフェライトを使用している。

Table 2.5 Characteristics of new type detectors

| items | sensor type | new detectors | | | | piezoresonator |
|----------------------------|-------------|------------------|--------------|------|------------------|----------------|
| | | external exciter | self-excitor | cube | magnetostriction | |
| free of the contact pastes | | ○ | ○ | ○ | ○ | × |
| non-contact | | ○ | ○ | ○ | × | × |
| high measurment resolution | | ○ | ○ | △ | ◎ | △ |
| wave form | | ○ | ○ | ○ | △ | △ |
| intensity of the signal | | × | × | △ | △ | ◎ |
| time response | | ○ | ○ | ○ | △ | △ |

2. 3 実験装置

製作した超音波送信器・受信器の性能を評価するために、圧電素子と組み合わせて超音波の送受信を行い、超音波が受信器に到達する時間（伝播時間）、受信波の周波数、受信強度などを調べた。図 2.11 は実験を行うときの実験装置配置概略図である。

電磁的に超音波を発生させる場合は、まず計算機で任意の波形をデジタル信号として構成し、そのデータを任意波形生成装置に送る。ここでは、D/A 変換を行う。サンプリング周波数は 25MHz、メモリは 256 ワード、最大繰り返し周波数 100Hz となっている。アナログ送信波形は、高周波電源に送られ電流増幅を行う。また、任意波形生成装置からは同期をとるための信号がデジタルオシロに供給されている。高周波電源は周波数可変に対応した電源として、周波数帯域 0.6~3MHz、最大電流 40A の電源と、周波数帯域 0.3~5MHz、最大電流 20A の電源を 2 台用意した。状況によって使い分け、電磁超音波送信器に電流を供給する。

超音波の受信は、増幅器で信号を増幅した後、データを高速サンプリングすることができるデジタルオシロにとり込む。サンプリング周波数は 0.5GHz となっていて、送信周波数よりも十分高い周波数でサンプリングすることができる。受信器に圧電素子を使うときはパルサーレーバでは受信波形をモニタできるが、サンプリング周波数が低いためアナログ受信出力をデジタルオシロにとり込む。このように、圧電素子を使用する場合でもデータをとる装置としてデジタルオシロを使用する。特に外部励磁型受信器や自己励磁型受信器を使用した場合、受信強度が低いため 1 万回以上加算平均処理を行い SN 比の向上を行った。加算平均化処理が終了したデータは、計算機にとり込み、そこでデジタルフィルタによるノイズカット処理をした後、受信波形の評価を行った。

超音波の送受信を行うにあたり、基本的な伝播特性を調べるときは厚さの異なる SUS304 を試験片として使用した。また、水中を伝播する音波に対しては、水槽と水ループによる実験をおこなった。受信器の取付け位置の微小な変位は、水平方向に対して 0.05mm、垂直方向に対して 0.02mm の精度があるポジショナーに取付けを行った。

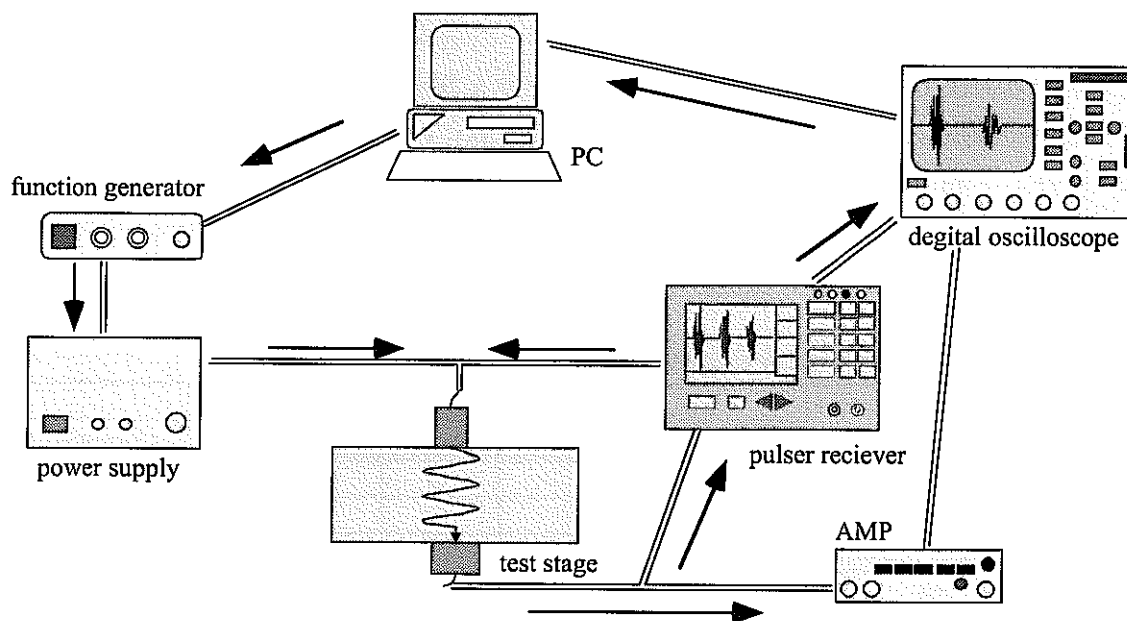


Fig.2.11 Experimental setup

2. 4 電磁場解析

本研究において、自己励磁型受信器の形状の検討および受信特性、外部励磁型受信器の受信特性を数値解析によって求めるための使用したソフトとして、初期のモデリングと解析後のポスト処理に Structural Dynamics Research Coroiration 社製の FEMAP を、また解析処理は PHOTON 社製の PHOTO-EDDY, PHOTO-EDDYj ω を使用した。図 2.12 に解析プロセスの概要図を示す。

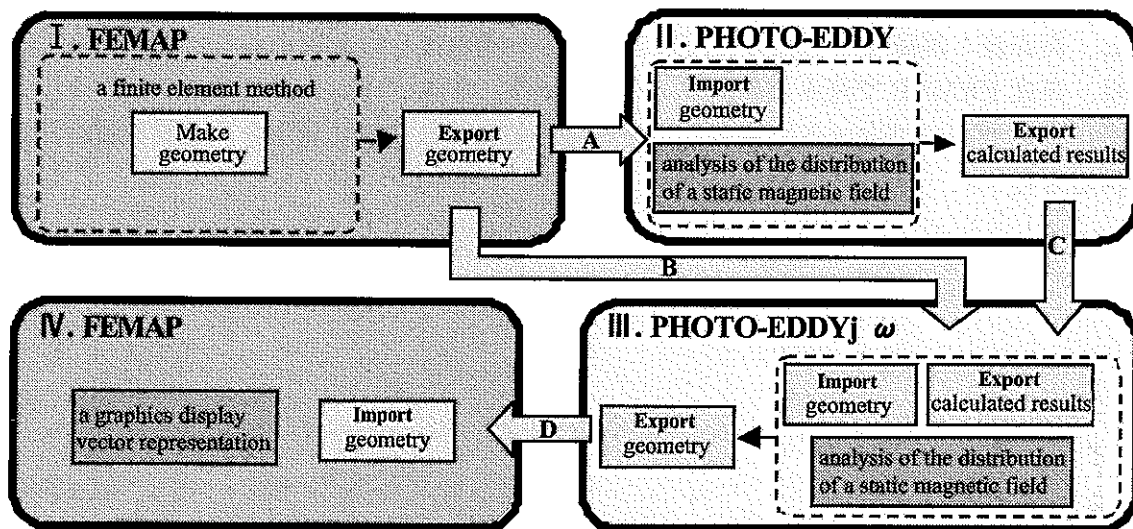


Fig.2.12 A schematic of the method of numerical calculation.

図 2.12 に示すように、まず

- I. FEMAP を用いた解析用モデル作成
- II. PHOTO-EDDY を用いた静磁場過渡応答解析
- III. PHOTO-EDDYj ω を用いた超音波周波数応答解析
- IV. 解析結果と FEMAP でのポスト処理

の 4 つの流れで解析を行った。以下に詳細を示す。

FEMAP は、エンジニアリング解析を敏速かつ的確に実行するための有限要素モデリングを行なうことができる。今回行った解析手順は、まず初めに解析領域の設定を行った。これは対象物をどこまで解析に取り入れるるかということであり、大きくとれば現実に近くなるが、あまり領域を広げすぎると計算量が大きくなり、解析が困難になる。経験的に解析対象の寸法に対し、3~5 倍程度の空気領域を取れば、十分に磁場が減衰することが分かっている。

次に解析対象の要素分割を行った。これは形状データの作成と言い換えることができる。特に注目したい箇所は要素を細かくすることでより細密な解析を行うことができるが、全体を細分化してしまうと、これも計算量が多くなってしまう原因となる。今回解析で用いた PC は、CPU Pentium III 800MHz, memory 512Mbyte であり、解析モデルによって数値は違うが Node 約 190000, Element 約 180000 で、EDDY で約 2 時間、その後の EDDYj ω で約 5 時間の計算時間が必要であった。次に作成した形状に、比透磁率や電気伝導率等のパラメータを入力終了後、モデルデータを出力する。このとき、静磁場解析用に外部磁場を与えたモデ

ルデータと、超音波周波数解析を行うための、外部磁場を与えていないモデルデータを作成した。

PHOTO-EDDYは有限要素法を用いた3次元渦電流解析を行うことができる。FEMAPで作成したモデルを読みこみ、解析の種類、解析形状のパラメータ設定をして、解析を実行する。解析が終了しだい解析結果をファイルとして作業フォルダーに書き出す。その一方、今回用いたPHOTO-EDDYj ω は、超音波解析カスタマイズ版であり、超音波(縦波)における、周波数、波長、振幅、位相、超音波の伝播領域などが変更できるようにカスタマイズされている。またこのカスタマイズ版は形状モデルとPHOTO-EDDYで作成した静磁場解析結果を入力し、超音波と静磁場との相互作用により生じる渦電流分布を求めることができる。計算結果は、再度FEMAPで読みこみ、コンタプロット、アニメーションプロット、ベクトルプロット、X-Yグラフプロットで表示し、静磁場と超音波によって発生される渦電流の磁場分布の検討を行う。

3. 実験結果と数値解析結果
 3. 1 電磁超音波送信器の特性
 3. 1. 1 出力特性

電磁超音波は圧電素子に比べると電気エネルギーと超音波エネルギー間の交換効率が悪い。そうした状況において、SN比の改善を行うためにまず送信強度を大きくする必要がある。そこで、コイルの巻き方や磁石の厚さを変えた送信器を製作し、それぞれの送信器における受信強度を調べる実験を行った。図3.1に実験の条件と配置図を示す。

実験は、送信器に電磁超音波送信器、受信器に圧電素子を用いた。送信周波数は2.25MHzとしている。送信器の形状としては、第2章で述べた構成のものを用いている。

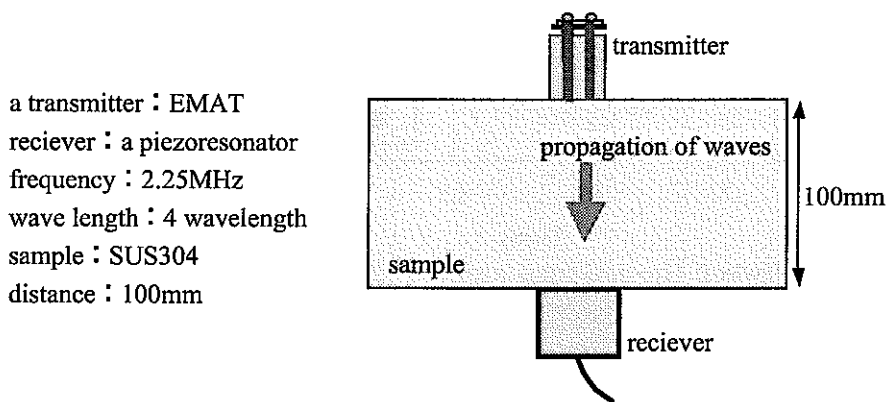


Fig.3.1 Experimental setup

図3.2に今回得られたU型10回巻き磁石厚2mmの電磁超音波送信器を用いた時の受信波形を示す。約 $5\mu s$ までの波形は超音波を送信する際に生じた電磁気ノイズの影響である。また、 $17.5\mu s$ あたりにノイズとは明らかに異なる波形が検出されていることがわかる。試験片100mmを伝播するのに $17.5\mu s$ の時間を要しているので、これを音速に直すと約5700m/sとなる。これは文献値のSUS304の音速5790m/sにほぼ一致することから、電磁超音波送信器は電磁的に縦波を送信していることが確認された。

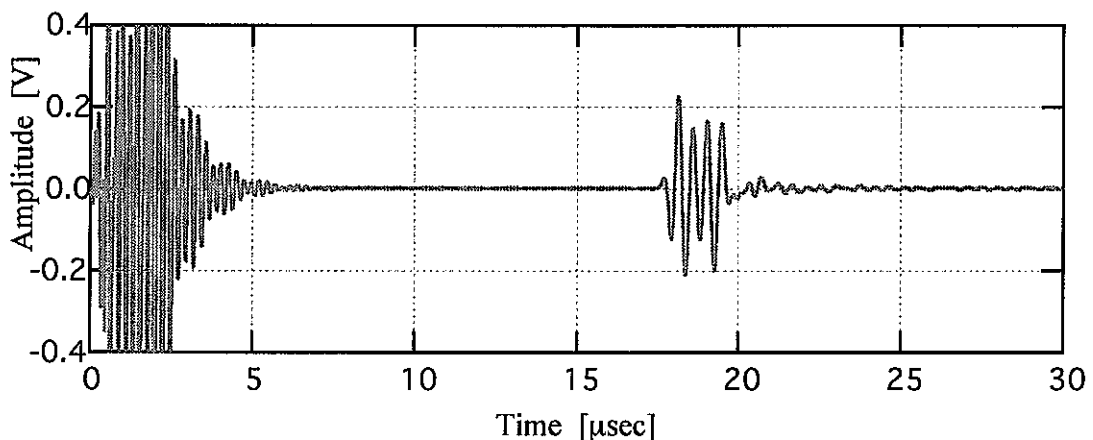


Fig.3.2 Waveform received by the piezoresonator. The wave was generated by the EMAT.

次に、それぞれの送信器の出力を比較するため、第一到達波の peak to peak を送信出力としてコイルの巻数、磁石の厚さの関係を求めた。図 3.3 に送信器の形状とその時の送信強度との関係について示す。

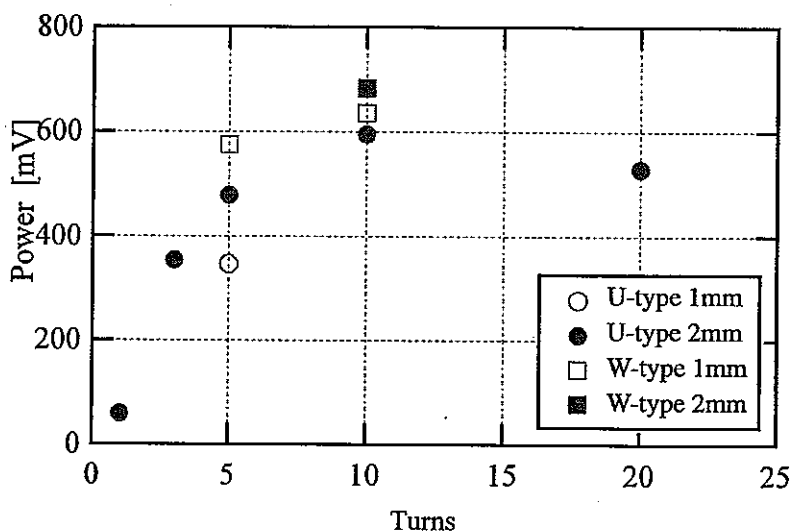


Fig.3.3 Relation between the coil turn number and the power of the signal.

送信強度はコイルの巻数を増やせば大きくなる傾向を示した。しかしながら、20回巻になると10回巻のものより送信強度が小さくなってしまった。5回巻きについて見ると、U型2mm厚はU型1mm厚の約1.4倍となり、W型1mm厚ではU型1mm厚の約1.7倍になっている。しかし、10回巻きについて見ると、W型2mm厚はU型2mm厚の約1.1倍程度に

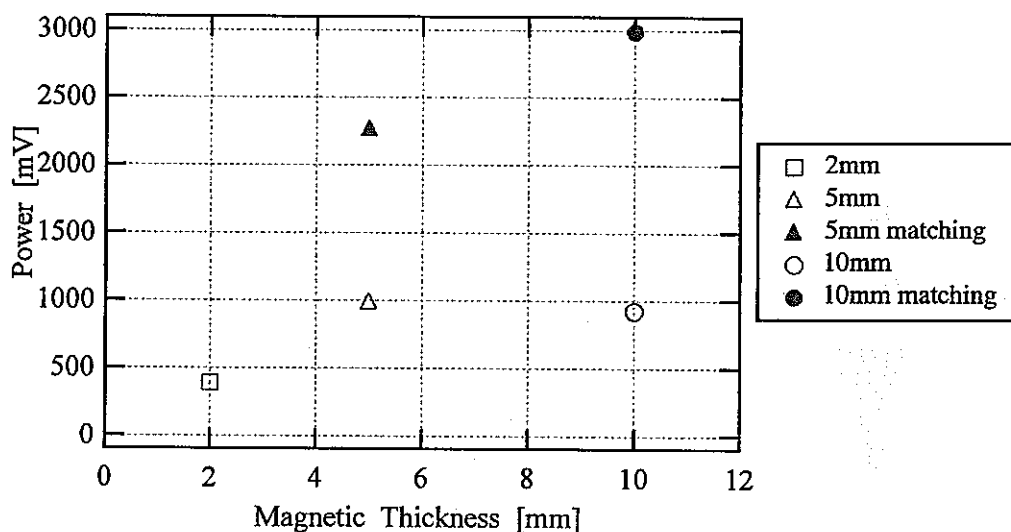


Fig.3.4 Power of the signal depending on the magnetic thickness.

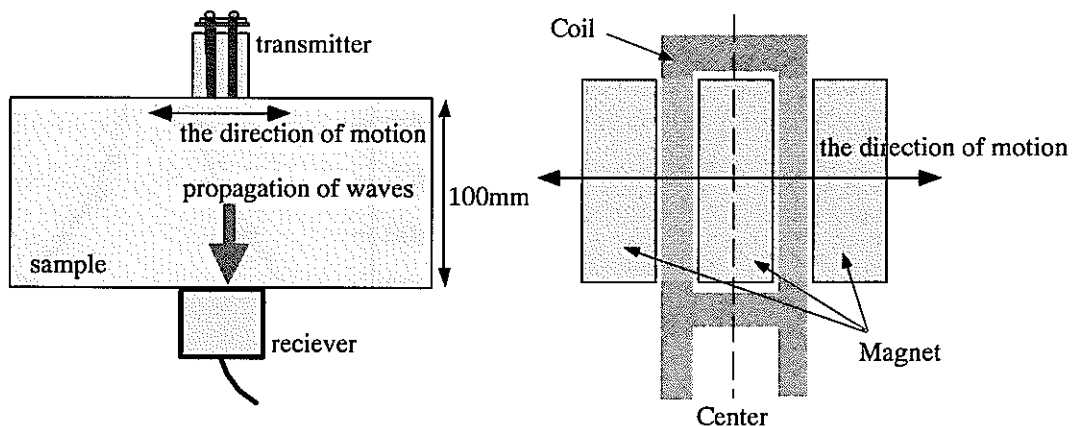
しかなかった。これは、磁石の周りにコイルを巻くため、磁石の厚さおよびコイルの巻数や巻き方によって、コイルのリアクタンス成分が大きくなるためと考えられる。

そこで、リアクタンス成分を小さくするために、コイルにコンデンサーをつけてインピーダンスマッチングを行い、送信強度にどの程度変化するか、また磁石の厚さを変えることによる送信強度の変化を調べた。使用した送信器は、U型10回巻きである。図3.4に磁石の厚さと送信強度との関係について示す。磁石の厚さを大きくすると磁石間の磁束が増え、送信強度は大きくなると思われる。また、1ターン巻くのに必要な配線が長くなると、リアクタンス成分が大きくなるため送信強度は小さくなるが、コンデンサーを付けインピーダンスマッチングを行うことで、送信強度を増加させることができる。

以上の結果から、今回製作した送信器の中で一番磁石の厚いU型10回巻き磁石厚10mmの送信器が最高出力であった。磁石の厚さを太くして磁束を増加させ、インピーダンスマッチングすることで送信強度を増加させることができる。今後、送信出力を向上させる場合、最適な磁石の厚さ、巻数、リアクタンス成分に注意しながら、送信器を製作する必要がある。

3. 1. 2 指向特性

製作した送信器の指向性について、実験と計算から求めた。図3.5に示すように、圧電素子を配置した位置を中心に送信器を左右に30mm、間隔を2mmずつ移動させ測定を行った。送信器は、電磁超音波送信器の10回巻きと、またその同じ形状の送信器を移動方向に対して隙間のないように並列につないだものを用いた。送信周波数は2.25MHzとした。送信器の構成を表3.1に示す。計算に関しては、磁石に挟まれたコイル部分を送信面とし、送信面における超音波が全面同速度、同位相で振動すると仮定して計算を行っている。送信周波数を2.25MHz、減衰率は0として計算をしている。結果を図3.6に示す。黒点が実験結果、実線が計算結果となっている。



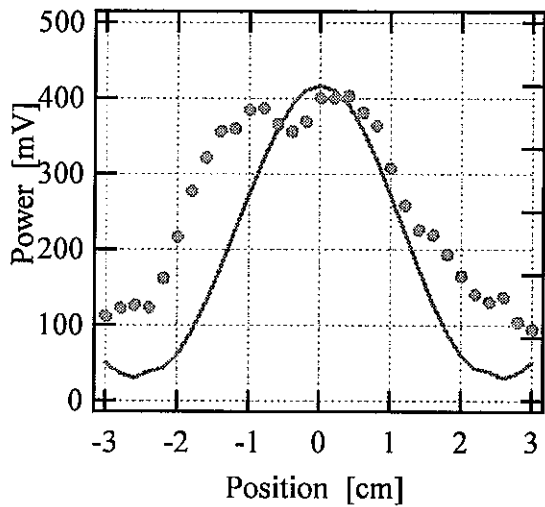
(a) arrangement

(b) a pattern from down below

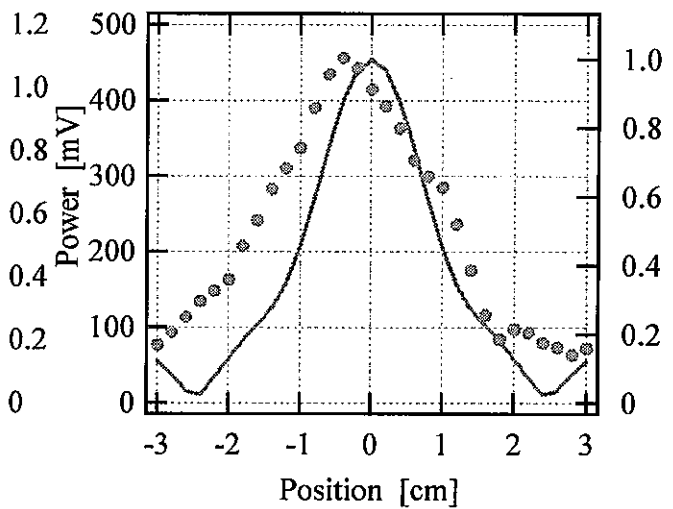
Fig.3.5 Experimental setup and the measurement condition.

Table 3.1 Combination of transmitters to measure the directivity.

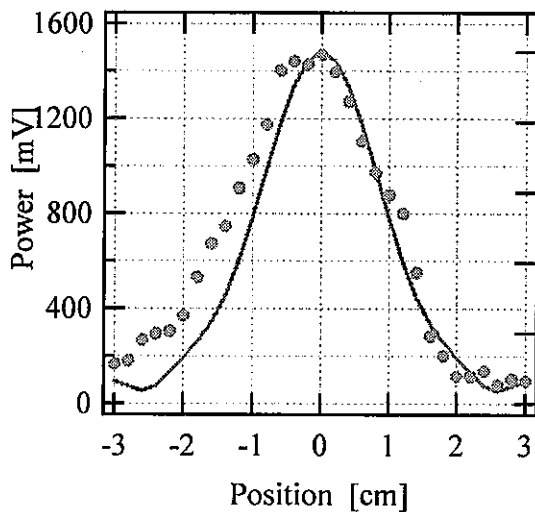
| | type | thickness of magnet [mm] |
|---|-----------------|--------------------------|
| ① | U type | 2 |
| ② | U type + U type | 2 |
| ③ | W type | 2 |
| ④ | W type + W type | 2 |
| ⑤ | U type | 5 |
| ⑥ | U type + U type | 5 |
| ⑦ | U type | 5x2 |



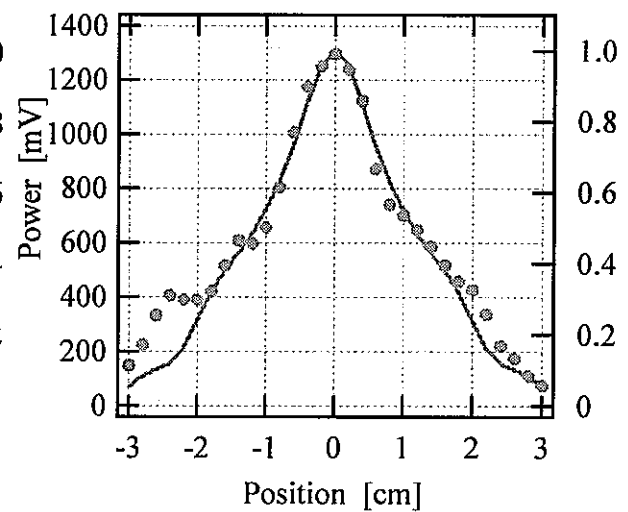
① U type, thickness=2mm



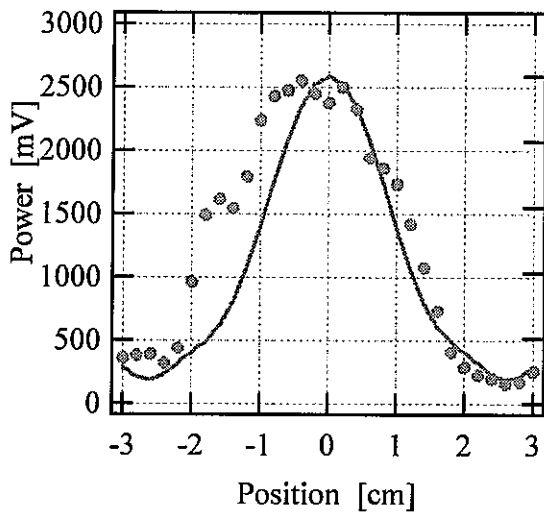
② U type + U type, thickness=2mm



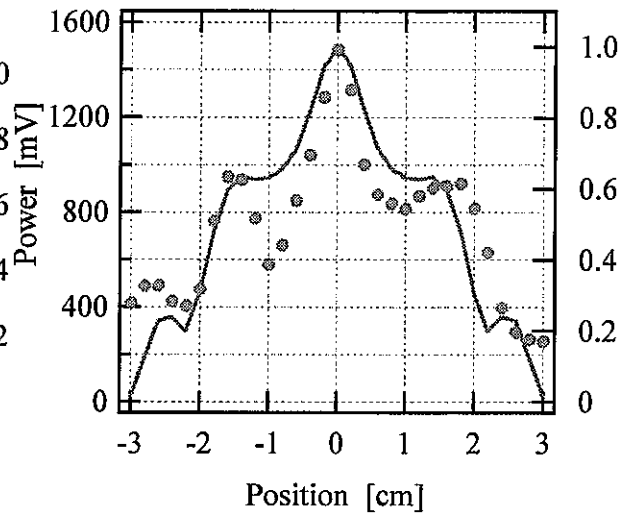
③ W type, thickness=2mm



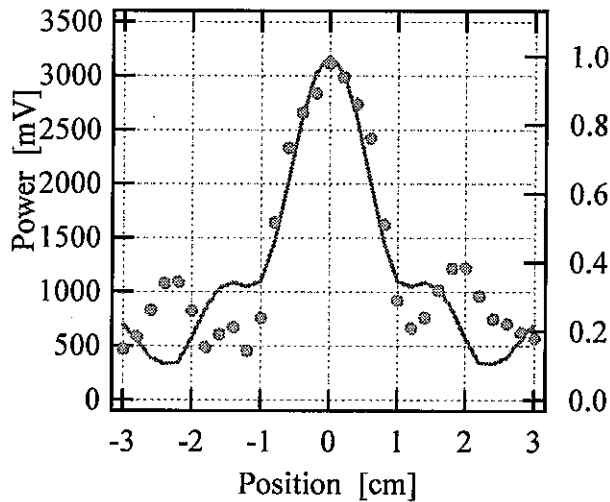
④ W type + W type, thickness=2mm



⑤ U type, thickness=5mm



⑥ U type + U type, thickness=5mm



⑦ U type, thickness=5mmx2

Fig.3.6 Directivity for the EMATs

計算結果は、実験結果の最大出力で規格化している。実験結果と計算結果はほぼ一致していた。①と②に注目してみると、U型 2mm 厚を並列にすることで単体より、指向性は鋭くなり送信出力も向上した。しかし、③と④に注目してみると、W型 2mm 厚を並列にすると、指向性は鋭くなるが送信出力は小さくなってしまった。これは、送信器の底面の幅、あるいはコイルの実抵抗に関係があると考えられる。⑤と⑥の U 型 5mm 厚に関しても、同様のことがいえる。また、U 型と W 型についてみると W 型の方が指向性は鋭く、送信出力も大きくなっていることがわかった。⑦に関しては、⑥の中心部分の指向性とほぼ一致している。これは送信器の中心部分の構成が似ているためだと考えられる。

以上の結果より、W 型は U 型よりも、また並列にすることにより指向性は鋭く、送信出力

も大きくなることがわかった。しかし、並列にする場合、底面の幅が大きくなりすぎると、送信出力が小さくなる傾向がある。これは、送信面が離れることにより、位相差が大きくなり、指向性は上がるが送信出力は下がるからである。送信器を製作する場合、底面の幅が大きくなりすぎないように注意し、最適な幅を見つけることが重要である。

3. 2 外部励磁型受信器による超音波の受信

3. 2. 1 実験結果

製作した超音波受信器は、圧電素子とは異なり中間媒体を必要としないので、ドライな環境下で使用できる特徴がある。しかし、外部励磁型や自己励磁型は圧電素子に比べサイズが小さく、また電磁的に超音波を受信することから得られる受信強度が弱い可能性がある。そこでまず初めに、外部励磁型受信器を使って超音波の受信特性を調べた。

図 3.7 に実験配置図を示す。試験片には厚さ 70mm の SUS304 を用い、送信器に圧電素子を、受信器に外部励磁型受信器を向かい合わせに配置した。外部励磁型受信器は、原理的には磁石などにより受信器真下の試験片表面付近に磁場を印加しないと超音波を受信することができないため、センサーの中心からそれぞれ 10mm 離れた位置に N 極と S 極が向き合うように配置する場合と配置しない場合のそれぞれについて調べた。送信周波数は 0.75MHz として超音波を送信した。

図 3.8 は外部励磁型受信器の横に磁石を配置したときと配置しなかったときの受信波形を示している。5 μ s までの受信波形は超音波を送信する際に生じた電磁気ノイズの影響によるものであり、外部磁場がある場合は 13 μ s から受信波が検出できている。第 1 波目の到達時間は、音速を 5790m/s とすると妥当な値である。この結果から、製作した外部励磁型受信器は縦波を非接触で受信できる素子として使用できることが確認できた。外部磁場がない場合は、第 1 波目が到達する時刻になってもノイズレベルしか受信できていないが、20 μ s から 30 μ s にかけて若干ながら縦波を受信した。これは、受信器が試験片に接触していたために振動が伝わり、逆磁歪効果として超音波を受信したためと考えられる。このような特徴を利用したのが磁歪型受信器である。図 3.8 の結果から、外部励磁型受信器の特徴は、縦波の受信強度が外部磁場の有無によって大きく違うことから、電磁的に超音波を受信するためには励磁が必要であることと、受信器が試験片に接触した場合は、中間媒体は必要ではないが振動を直接検出できることがわかった。

次に送信器である圧電素子を試験片表面に沿って移動させ、送受信間距離を変化させたときの結果を図 3.9 に示す。送受信間距離が大きくなるにつれて、第 1 波目の到達時間が遅く

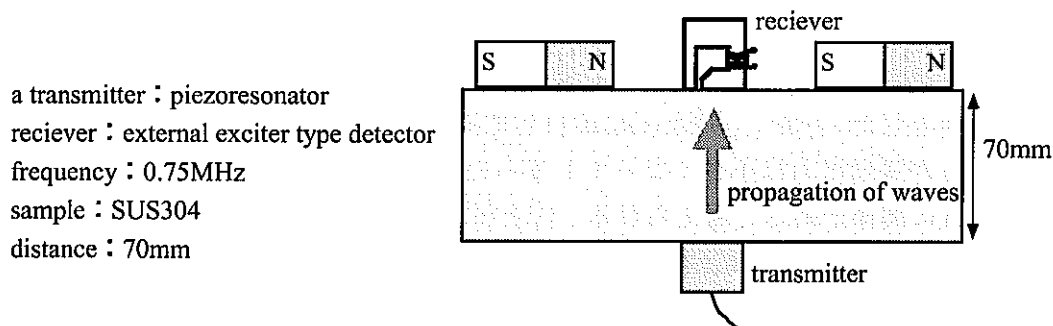


Fig.3.7 Experimental setup

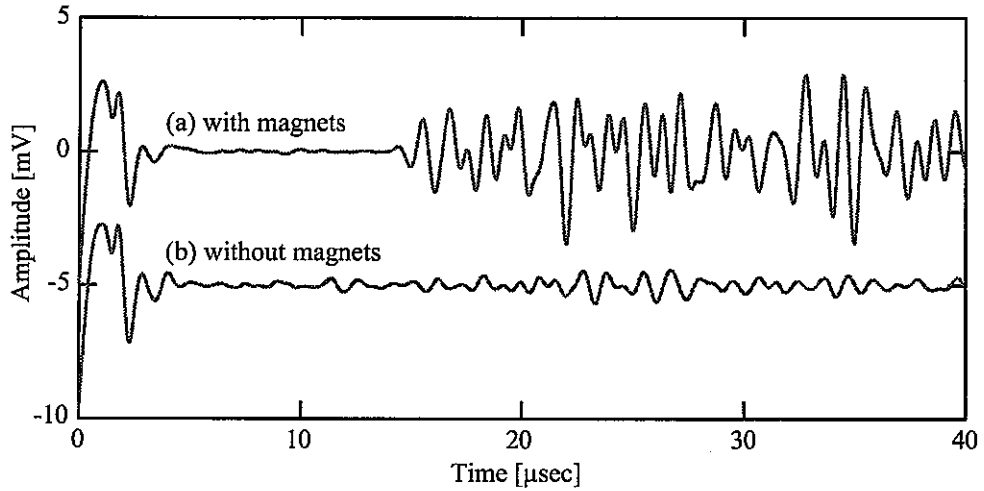


Fig.3.8 Waveform received by the external exciter type detector with and without magnets.

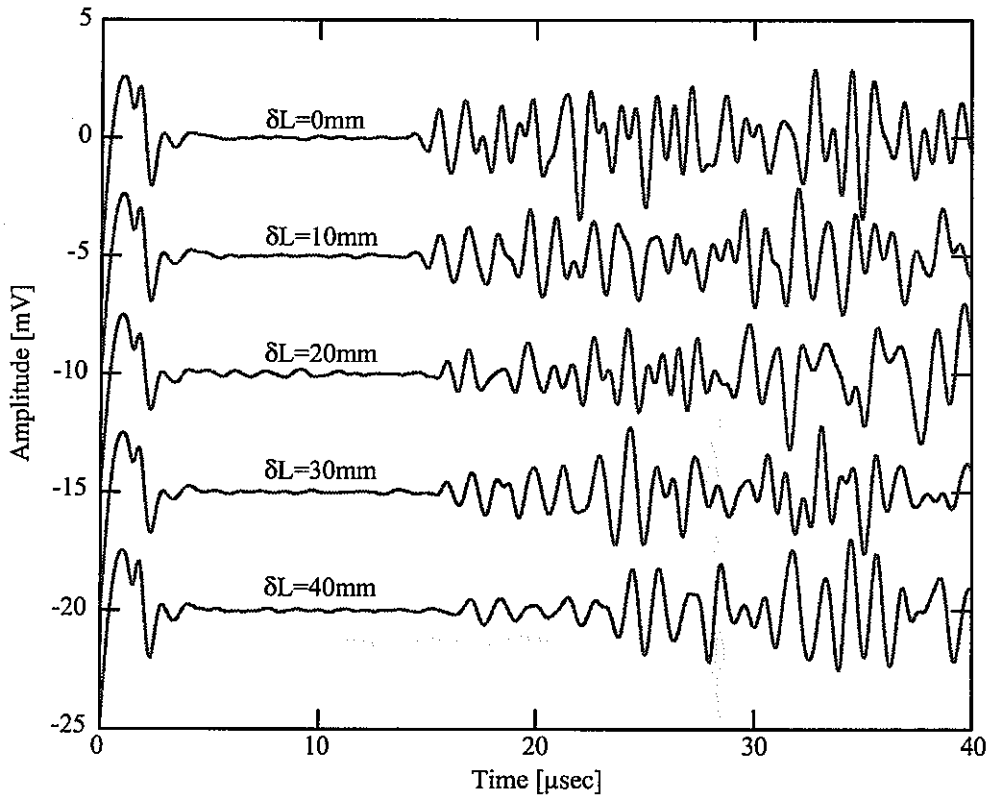


Fig.3.9 Waveform received by the external exciter type detector at the different propagated distance.

なっていることがわかる。また、受信波形は、第1波目の到達後も振動を繰り返しており、受信器が試験片と接触していたためと考えられる。

電磁超音波受信器は、超音波を電磁的に検出することを目的としているため、逆磁歪による影響が出ないことが望ましい。外部励磁型受信器は、電磁的に超音波を受信するためには

必ずしも試験片に接触させておく必要もなく、むしろ試験片から離して逆磁歪効果を取り去ることで、電磁的効果のみの受信波形を得ることができる。そこで、外部励磁型受信器をホルダーに取り付け、試験片からリフトオフすることで受信波形およびその強度がどのように変化するのかを調べた。

図 3.10 に実験配置図を示す。外部励磁型受信器はポジショナーにホルダーごと設置し、上下の移動を精度よくできるようにした。磁石は試験片に固定した状態である。試験片との距離 d は、接触に近い $20\mu\text{m}$ 以下から最大 2mm 離れた状態まで適当な間隔で実験を行った。送信周波数は 5MHz とした。

外部励磁型受信器と試験片との距離を $20\mu\text{m}$ 以下、 1mm 、 2mm とした時の受信波形を図 3.11 に示す。第一波目の到達時間は Figure 4-8 の結果とほぼ等しいが、受信器を試験片から離していくにしたがって、受信強度が低下する傾向が見られた。図 3.12 は、受信器の位置

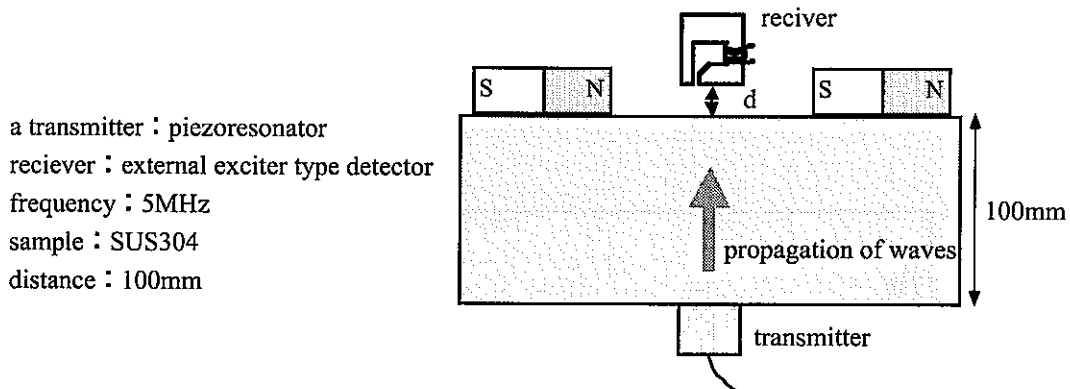


Fig.3.10 Experimental setup.

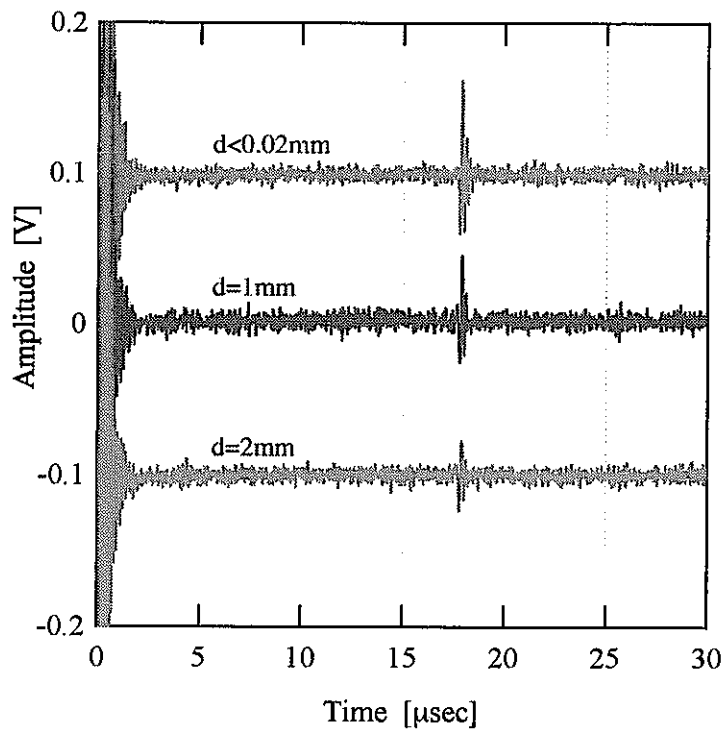


Fig.3.11 Waveform received by the external exciter type detector which separates from the surface.

が $20\mu\text{m}$ 以下の位置における第一波目の拡大図である。受信器の位置を試験片から 1mm , 2mm と離しても第一波目の波形には大きな変化は見られなかった。また、受信周波数は送信周波数の 5MHz と一致していることもわかった。これより、受信器を試験片から離れた状態でも電磁的に超音波を受信できることがわかった。

試験片から受信器までの距離と受信強度の関係を図 3.13 に示す。受信器が試験片と近い位置では受信強度はほぼ一定となっているが、これは試験片中の磁束分布と関係があると考えられる。外部励磁型受信器は、コア材料がフェライトで比透磁率は空気や SUS304 に比べて約 2000 倍と極めて磁束を通しやすい材料である。したがって受信器を試験片に近づけると、試験片中を通過していた磁束がフェライト内を通過するようになる。それにより、受信器の真下で試験片内部の磁束強度が小さくなったためと考えられる。受信強度は、試験片から 2mm 離れた位置においても $20\mu\text{m}$ 以下の場合に比べて、約 40% の大きさであった。外部励磁型受信器の受信は、ギャップ間で測定分解能が決まる仕様を想定しており、想定した値よりも相当大きな値となっていたことから、数値解析による計算により磁束の分布を調べることにした。

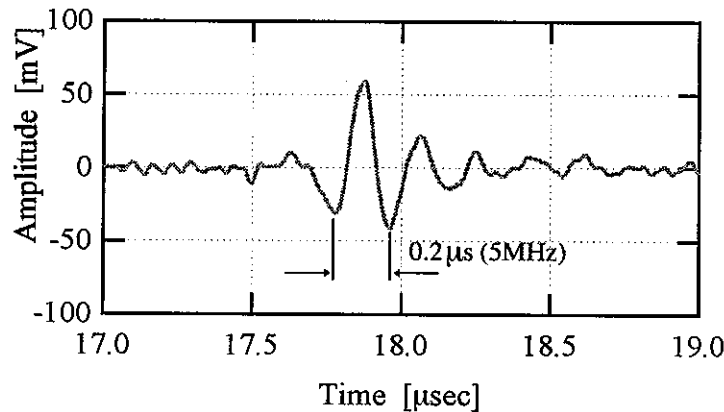


Fig.3.12 Enlarged view of the received waveform.

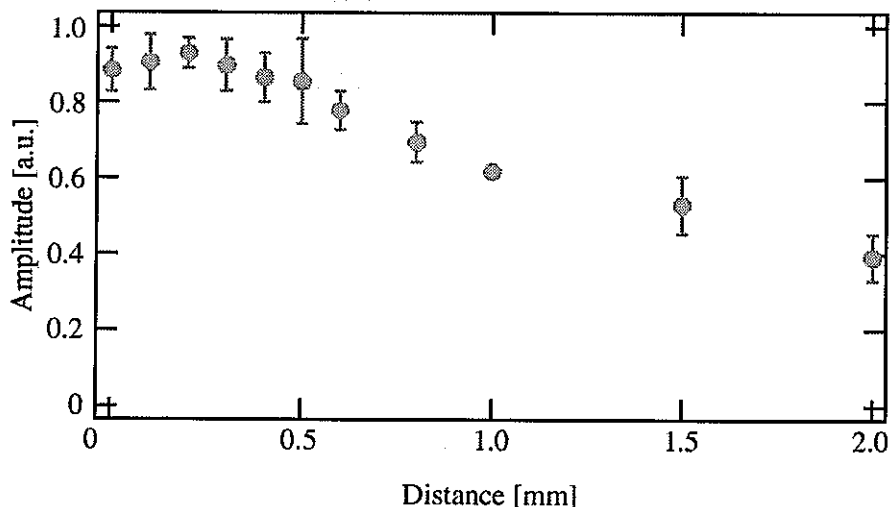


Fig.3.13 Dependence of amplitude on the distance between the detector and the surface of the sample.

3. 2. 2 数値解析結果

辺要素有限要素法を使い、電磁場解析を行った。電磁波が試験片表面に垂直に入射したとして、その際に試験片中に誘導される渦電流の表皮厚さは、

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \tag{3.1}$$

で表すことができる。ここで、 δ は表皮厚さ、 ω は角周波数、 μ は透磁率、 σ は導電率である。表 3-2 に示している物性パラメータを代入し表皮厚さを計算すると、 $6\mu\text{m}$ となり表面にしか渦電流が流れないことがわかる。一方、超音波の送信周波数を 5MHz とし、音速を 5500m/s とすると 1 波長は 1.1mm となる。試験片の厚さは波長の約 3 倍となる 3mm は計算を行うにあたり十分な深さが確保されていると考えられる。計算に使用したパラメータと計算モデルを以下に示す。

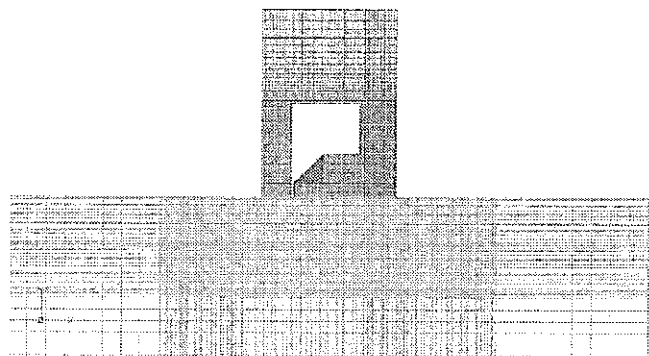


Fig.3.14 2-dimensional analysis model.

Table 3.2 Configuration parameter

| | |
|-----------|---------------------------|
| block | width 5-7mm, height 3mm |
| detector | width 0.9mm, height 1.3mm |
| node | 22320 |
| element | 22422 |
| dimension | 2D analysis model |

Table 3.3 Property parameter.

| | relative permeability | electric conductivity |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Air | 1 | |
| Detector Mn-Zn Ferrite | 2000 | |
| Block SUS304 | 1.02 | 1.38e7 [s/m] |

Table 3.4 Wave parameter.

| | |
|-----------|---------|
| Frequency | 5MHz |
| Velocity | 5500m/s |

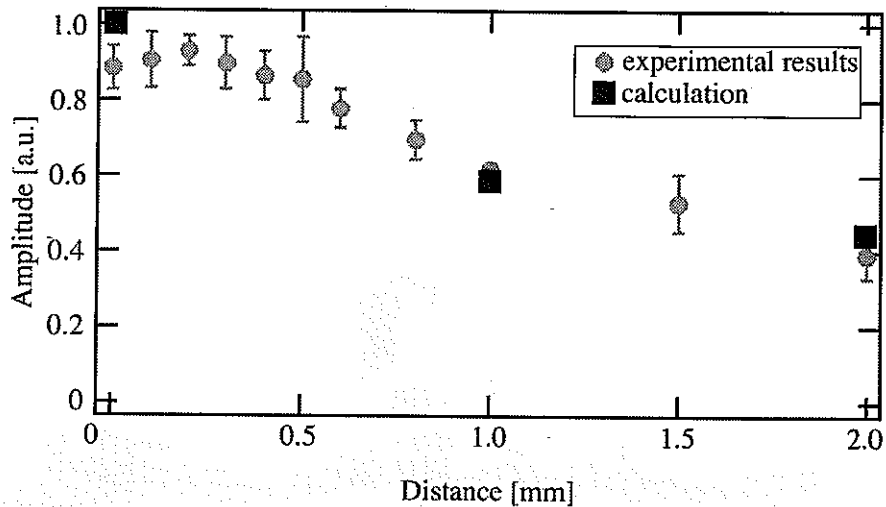


Fig.3.15 Comparison of the experimental results with calculated results.

まず計算結果の妥当性を確認するため、実験結果との比較を行った。計算では渦電流によって生じた磁束密度分布が得られる。その磁束密度分布のうち、検出コイルに対して垂直に横切る成分だけを取り出し、その値を積算することで磁束を求めた。その結果を図 3.15 に示す。解析は、 $d=0, 1, 2\text{mm}$ で行っている。 $d=0\text{mm}$ の計算結果は、 0.3mm よりも離れた位置で得られた実験結果を外挿して求めた点にプロットしており、 $d=1, 2\text{mm}$ の結果は $d=0\text{mm}$ の結果を基準としてどれだけ受信強度が小さくなるかを示している。図 3.15 からわかるように、計算結果と実験結果はほぼ一致しており、計算結果の妥当性が確かめられたと言える。次に磁束の強度分布を示す。

図 3.16 では、水平方向に渦電流がほぼ均等に流れていることがわかる。実験では、磁石による外部励磁は、磁石間隔を 20mm としてその中間に受信器を配置しているが、受信器のサイズは磁石間隔に比べて十分に小さいため、計算を行う領域では均一磁場が存在しているとしている。また、送受信間距離も 100mm あり、送信器から送信された超音波は、受信器近傍では広がっており、均一に超音波が伝播しているとしている。渦電流は、超音波の振幅変化と磁場との相互作用で生じ、それによって誘起される磁場 H は、

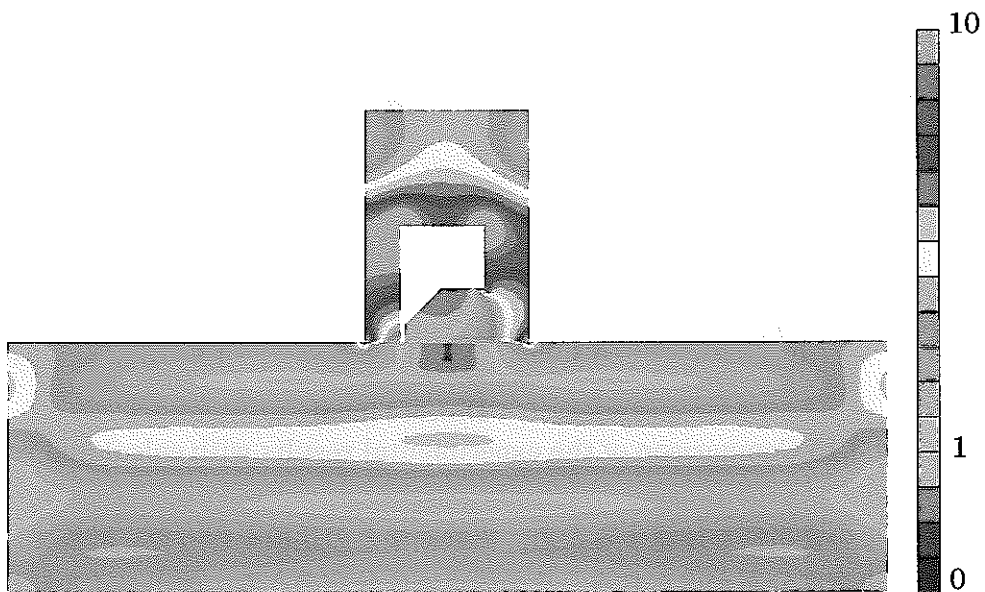
$$\text{rot}H = \sigma \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \times B_0 \right) \quad (3.2)$$

で与えられる。ここで、 σ は導電率、 ξ は超音波の振幅、 B_0 は外部励磁による磁束密度を表している。(3.2)式では、超音波の粗密が時間的にどれだけ変化するかによって磁場 H は変化することになる。特に、超音波の節にあたる部分で零となり、腹の部分で最大値をとることになる。送信周波数を 5MHz 、超音波の音速を 5500m/s とすると 1 波長は 1.1mm であり、試験片の表面を超音波の節をすれば、 0.55mm が 0.5 波長に相当する節、 0.28mm が超音波の腹に相当する。したがって、図 3.16 に示すように磁束密度の粗密ができることになる。

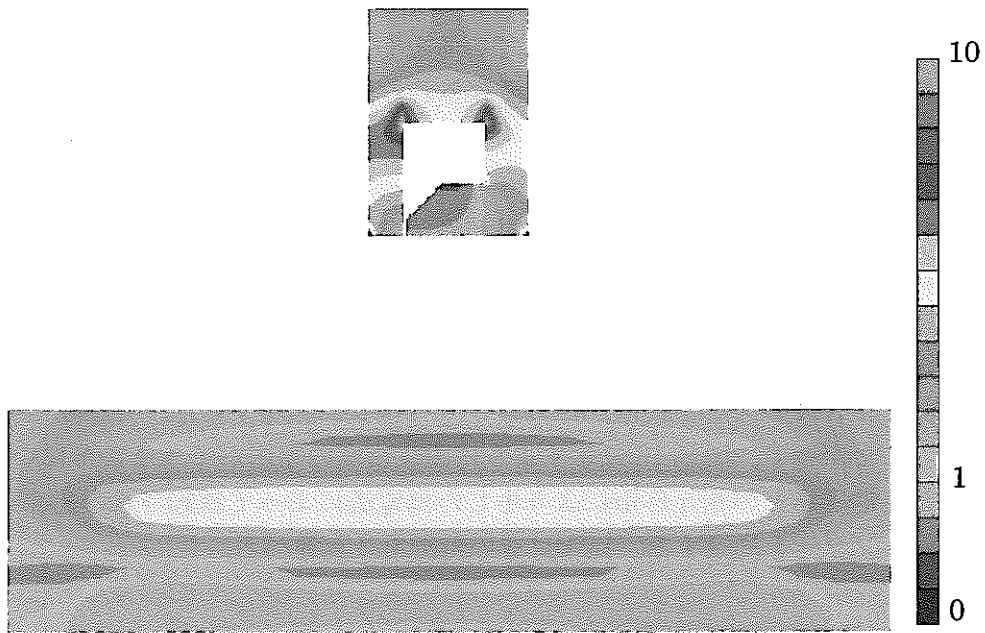
超音波と定常磁場との相互作用により生じた渦電流によって誘起された磁束の一部は、透磁率の高いセンサーを通過する。以下にその特徴を 3 点述べる。

(I) ギャップ間隔が測定分解能とはなっていない。

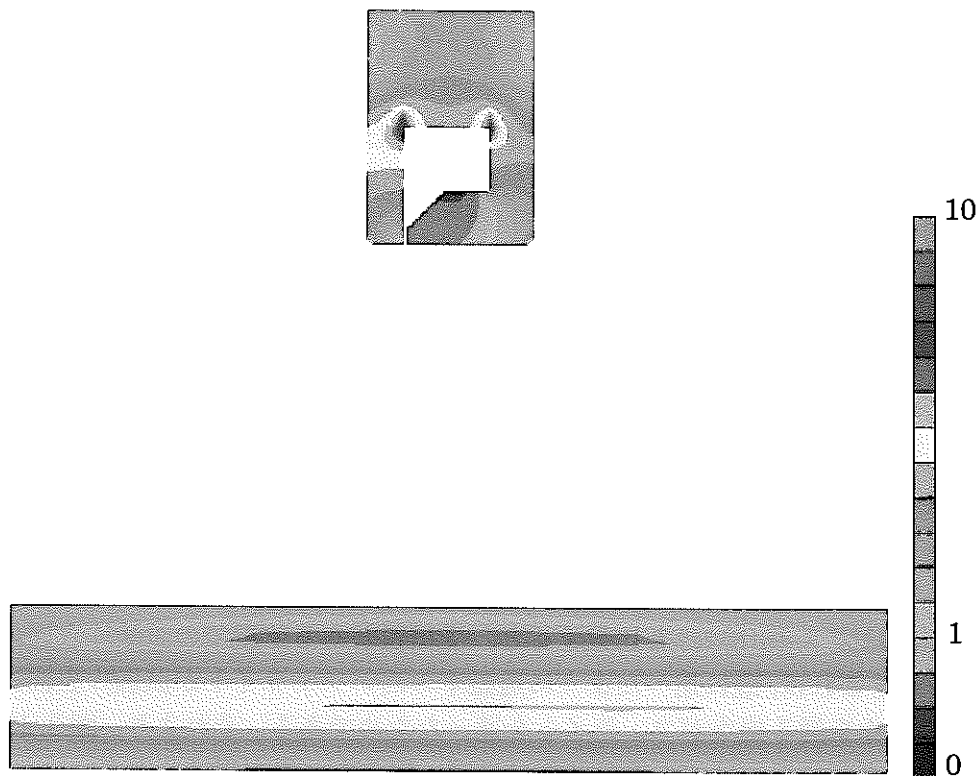
磁束の流れを図 3.17 に示す。当初は超音波によって渦電流はギャップ付近に生じ、それに



(a) The detector is in contact with the block.



(b) The distance between the detector and the surface of the sample is 1mm.



(c) The distance between the detector and the surface of the sample is 2mm.

Fig.3.16 Distribution of the induced magnetic flux density.

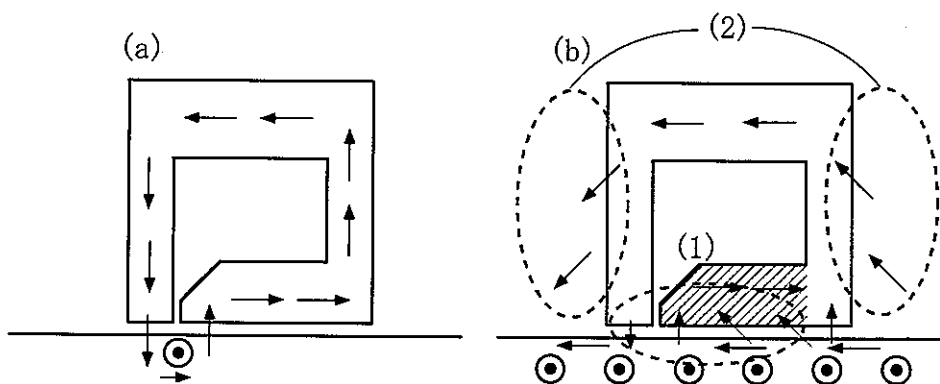


Fig.3.17 Flow of magnetic flux. The case of (a) is the prediction and the case of (b) is the calculated result.

よって誘起される磁束が、フェライトを通過するを想定していた。しかし、励磁を外部励磁型としたために、ギャップ付近以外でも渦電流が生じることになってしまった。その結果、図 3.17(a)で示すようにギャップを挟んで左から右へ磁束が流れるのではなく、図 3.17(b)の(1)で示すように、試験片の表面を右から左へ通る磁束がギャップ手前でフェライトに入る。その後、フェライトを通り抜けた磁束は再び右から左へ試験片表面を通っていくため、コイルで検出される磁束はギャップ間隔には無関係となった。また、斜線を引いてある部分においては、

- ・試験片とフェライトを通る磁束の向きが逆となっている。
- ・試験片表面を通過する磁束はギャップ手前でフェライトに入るのではなく、底面全体から入っている。
- ・底面からフェライトに入る磁束の大部分は、エッジを通過している。

という特徴があり、図 4-9 で示すように斜線部分の磁束強度は小さく、磁束を検出する上で重要ではないことがわかった。

(II) フェライトの側面から磁束が出入りしている。

実験では、外部励磁型受信器を試験片から 2mm 離れた位置においても超音波の受信ができていた。その様子は、図 3.16(c)からの分布からもわかる。超音波を受信できたのは、受信器よりも広い範囲で生じた渦電流によって誘起された磁束が、フェライトの側面から出入りすることで、試験片の外側を通る磁束を受信器に集中させる役目をしていたからである。そのために、センサーが試験片から離れても受信強度は徐々にしか減少しないことにつながっていた。

(III) センサーによって試験片表面の磁束分布が変化する。

図 3.16(a)は図 3.16(b)(c)と比較すると、受信器がある位置での試験片表面の磁束分布が異なっている。これは、既に述べたように透磁率の高いフェライトが試験片表面にあるため、本来は試験片中を通る磁束がフェライトを通ったためである。それより、図 3.15 に示すように、受信器を表面に近づけても受信強度はほぼ一定となったと考えられる。

以上の結果から、外部励磁型受信器では、ギャップ間以外でも渦電流が発生してしまい、測定分解能が低くなっていることが明らかとなった。よって、当初想定していた受信器を考えた場合、ギャップ間に渦電流を発生させることができ、測定分解能が高くなる受信器の製作が必要である。

3. 3 自己励磁型受信器による受信

3. 3. 1 数値解析結果

これまでの結果から、外部励磁型ではギャップ間以外でも渦電流が発生してしまい、測定分解能が低くなっていることが明らかとなった。そこでギャップ間だけに渦電流を発生させ、測定分解能を向上させるために、ギャップ間に渦電流を集中させることができると考えられる自己励磁型受信器を提案した。

自己励磁型センサーを製作するにあたって、まず数値解析によるセンサー形状の検討を行った。その後、そのセンサーの超音波受信特性を調べるために、検出電圧に対するギャップ間隔依存性、周波数依存性、リフトオフによる影響について計算を行った。図 3.18 は解析を行ったモデルの形状を示している。試験片の大きさは、幅 8.9mm、高さ 8.0mm、厚さ 10mm である。自己励磁センサーは幅 0.9mm、高さ 1.0mm、厚さ 0.1mm となっており、自己励磁センサーと比べて試験片の領域を十分に確保した。自己励磁センサーは左右対称の形状であり、ギャップ高さ、ギャップ間隔、角度をそれぞれ図 3.18 で示すように定義する。励磁用のコイルはセンサーの両側に 2カ所巻いてある。検出用のコイルについては、図 3.18 に示されていないが、実際にはセンサーの上部に巻かれている。数値解析は、まず励磁コイルによって誘起される磁束の分布を求めることから始める。自己励磁型センサーでは、透磁率の高いフェライトを使用することを想定しており、磁束はフェライトに沿って流れ、ギャップ付近で生

じる漏れ磁束が試験片内部に入り込む。次に、その試験片内部に生じる磁束分布と超音波との相互作用によって生じる渦電流分布を求め、最後に渦電流によって誘起される磁束分布について計算を行う。計算を行うにあたり、使用した形状、物性等のパラメータについては、表 3.5 から表 3.7 にまとめて示す。

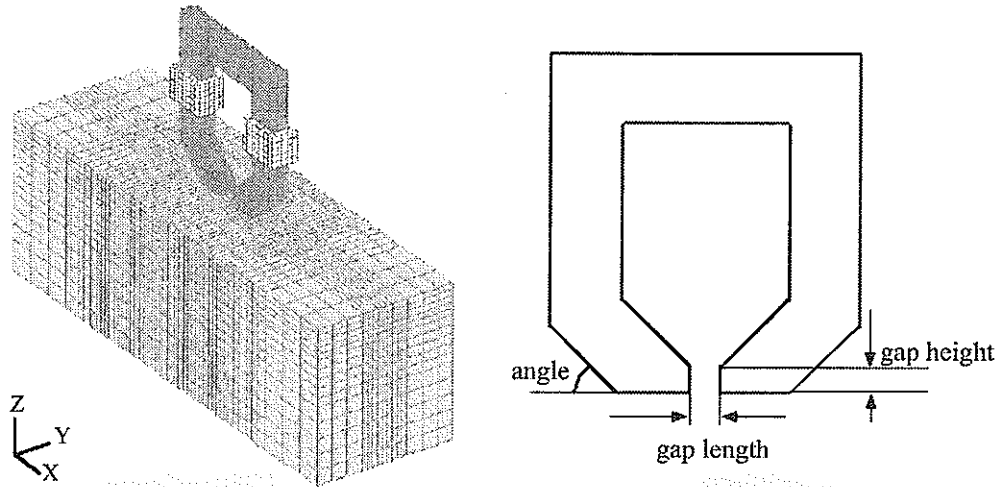


Fig.3.18 3-dimensional analysis model.

Table 3.5 Configuration parameter

| | relative permeability | electric conductivity |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Air | 1 | |
| Detector Mn-Zn Ferrite | 2000 | |
| Block SUS304 | 1.02 | 1.38e7 [s/m] |
| exciter coil | 1 | |

Table 3.6 Property parameter.

| | |
|------------|--|
| Block | width 8.9mm, height 8.0mm, thickness 1.0mm |
| Detector | width 0.9mm, height 1.0mm, thickness 0.1mm |
| Gap length | 0.05 - 0.5 mm |
| Node | 114048 |
| Element | 109595 |
| Dimension | 3D analysis model |

Table 3.7 Wave parameter.

| | |
|-----------|--------------|
| Frequency | 0.75 - 10MHz |
| Velocity | 5500m/s |

<形状の検討>

自己励磁型受信器の形状は定常磁場分布と密接に関連があり、まず数値解析によって試験片内部の磁場分布について計算を行った。励磁コイルは左側に1つだけ巻いてあり、ギャップ間隔は0.1mm、ギャップ角度は60度として、ギャップ高さを変化させて比較を行った。

図4.19は、ギャップ高さを0mm, 0.04mm, 0.08mmとした時の試験片に水平な磁場成分だけを示しており、暖色ほど磁束密度が大きいことを表している。水平成分に着目するのは、超音波と相互作用して渦電流が発生する成分だからである。これらの結果より、ギャップ間の形状は異なっているが、励磁コイルに電流を流したときに形成される磁場分布はほとんど同じであった。試験片内部の磁束分布は、試験片表面近傍ではギャップ間隔の2倍にあたる0.2mm程度の広がりをもっている。また、深さ方向分布では、右側に磁束が偏っていることがわかるが、これは励磁コイルを左側のみにしか巻いていないためだと考えられる。ギャップの形状で考慮しないといけない点として、先端が鋭利なときは励磁が強くなるとその部分で磁束が飽和してしまう恐れがあり、コイルの電流量に注意しなければならない。また、磁

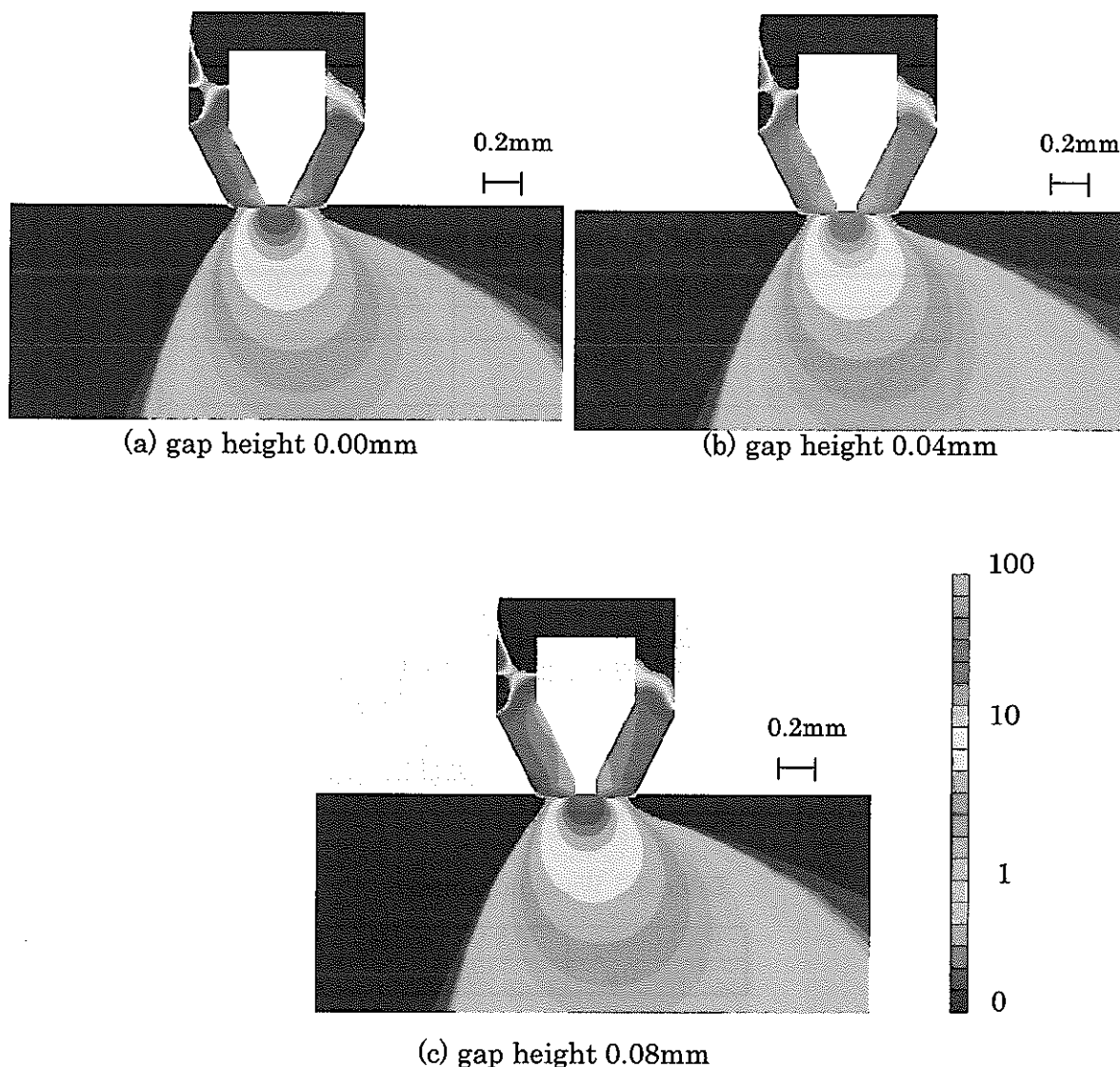


Fig.3.19 Distribution of induced magnetic flux density with different gap height.

場分布に大きな違いがなければ、先端を鋭利にする必要がない。

次に、ギャップ角度を変化させて比較を行った。ギャップ間隔を 0.1mm、ギャップの高さを 0.08mm としている。図 4.20 はギャップ角度を 30 度、45 度、60 度とした時の結果である。これらの結果から、ギャップ角度が 30 度の場合、試験片内の磁束分布の広がりが大きくなり、測定分解能が他のものに比べて低くなっている。45 度、60 度に関しては、ほとんど変化は見られなかった。また、深さ方向分布においては、先ほどと同様に右側に磁束分布が偏っている。この励磁コイルによる偏りをなくすために、コイルの巻く位置を頭部または両側にすることにより、図 4.21 のように試験片内部の磁束分布はギャップを中心に左右対称とすることができた。

これらの結果より自己励磁型受信器の形状を、ギャップ形状の先端を鋭利にする必要がないので、ギャップ高さを 0.08mm、ギャップ角度を 45 度とし、コイルの巻く位置としては、試験片内部で左右対称となるよう、またギャップ付近の試験片表面近傍に発生する磁束を大きくするためにコイルを両側に巻き、検出コイルを頭部に巻くことに決定した。

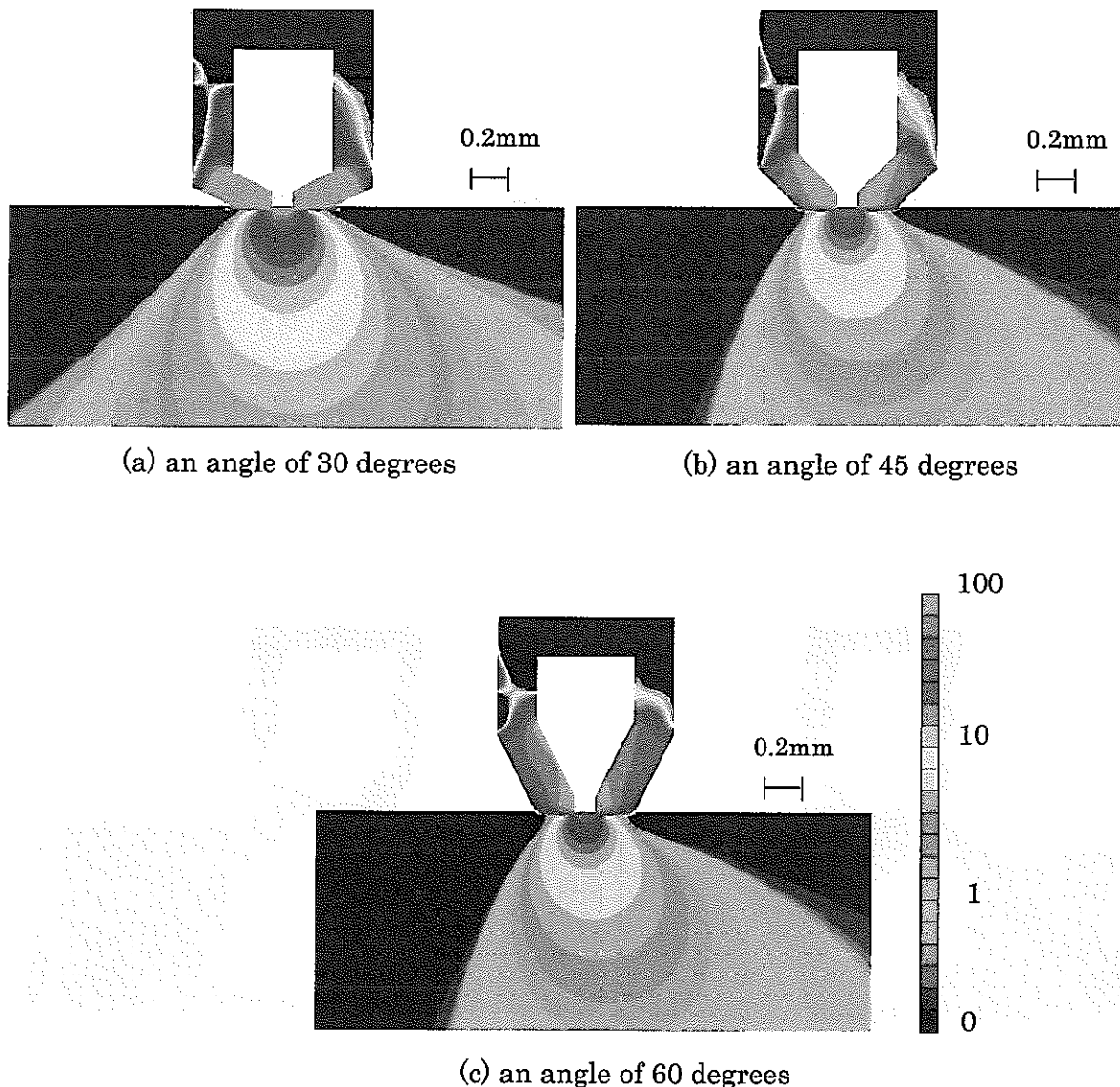


Fig.3.20 Distribution of induced magnetic flux density with different angle.

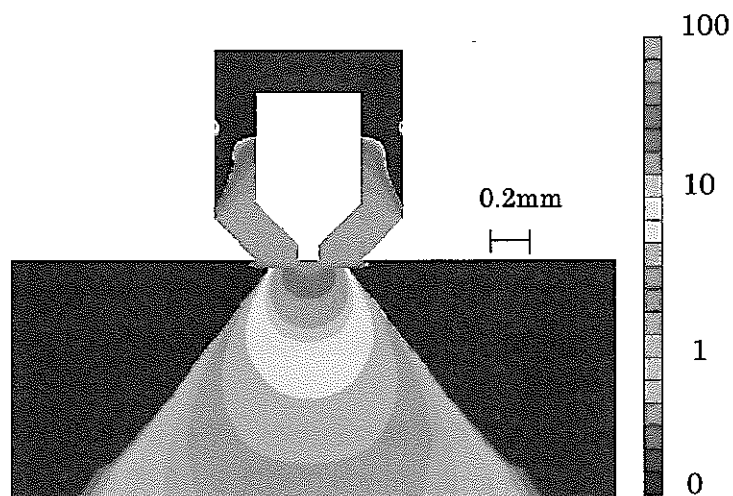


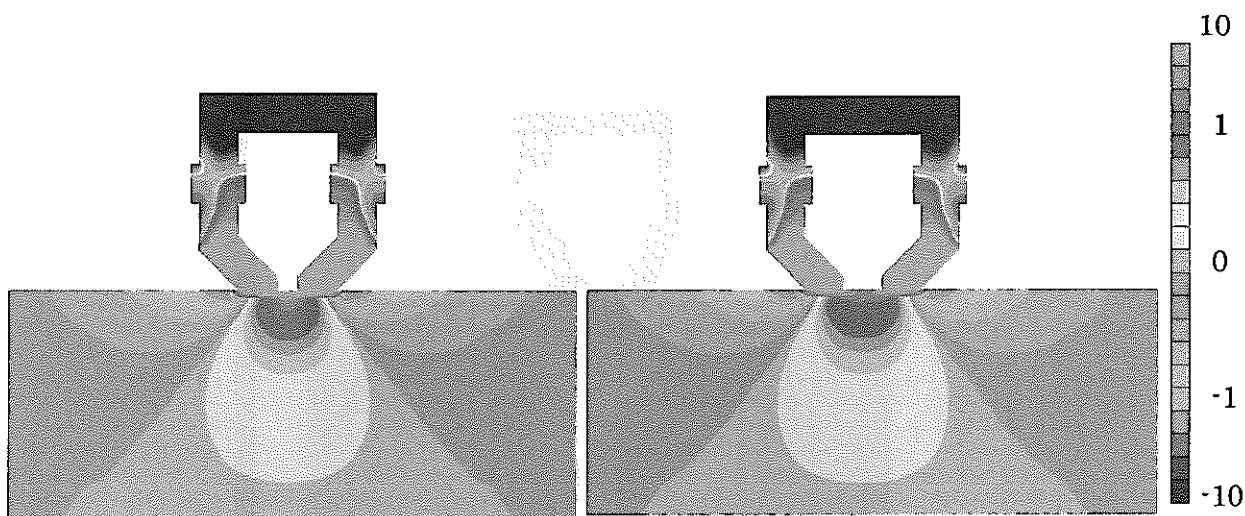
Fig.3.21 Distribution of induced magnetic flux density.

This type transducer has two exciter coils.

<ギャップ間隔依存性>

磁束分布は、おおよそセンサー幅の領域に限定されていて、その磁束の大きさは、ギャップあたりが最大であり、試験片内部へ入るにつれて大きく減衰することがわかった。このことは、超音波と相互作用して発生する渦電流の分布が、ギャップ中心の試験片表面あたりに限定されることを意味している。その一方で、渦電流の発生する領域が狭くなるとそれによって得られる出力電圧も小さくなることが考えられ、適当なギャップ間隔を決めるため、0.05mm から 0.5mm までギャップ間隔を変化させた時の受信強度について調べた。

図 3. 22 はギャップ間隔が 0.1mm と 0.2mm のときの磁束分布である。フェライトを通過する磁束分布にはほとんど違いがみられないが、ギャップ間の試験片内部にできる磁束分布は、ギャップ間隔が 0.2mm の方が 0.1mm のときよりも水平方向に広がり、深さ方向には磁束密度が小さくなっていることがわかる。図 3. 23 は、センサー中心位置の表面から深さ方向に対する



(a) a gap length of 0.1mm

(b) a gap length of 0.2mm

Fig.3.22 Distribution of induced magnetic flux density with different gap length.

磁束の大きさの変化を示している。ギャップ間隔が大きくなるとともに磁気抵抗が大きくなることから、試験片表面近傍での磁束の大きさは小さくなる。また、ギャップ間隔が 0.5mm まで大きくなると、深さ方向に対して磁束の大きさは若干減少する程度しか変化しなくなる。そうした磁束分布に対して、周波数 5MHz、音速 5500m/s の縦波超音波が試験片表面へ伝播してきた場合に得られる出力電圧を図 2.24 に示す。出力電圧は、ギャップ間隔に対してはほとんど依存しないことが明らかとなった。この理由は、図 3.23 に示すように表面の磁束密度はギャップ間隔が大きくなると減少するが、反対に磁束はギャップ間のセンサーエッジ近傍から放出して他方のエッジ近傍へ流入するので、図 3.22 に示すように水平方向成分の磁束分布はギャップ間隔とともに広がっていくからである。ただし、ギャップ間隔が広がることは測定分解能の低下につながるため、ギャップ間隔は狭い方が望ましいが、加工精度を考慮して 0.1mm とした。

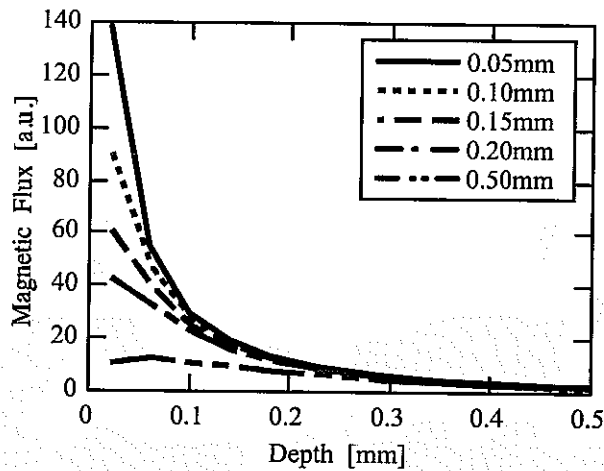


Fig.3.23 Dependence of magnetic flux on the depth at the different gap length.

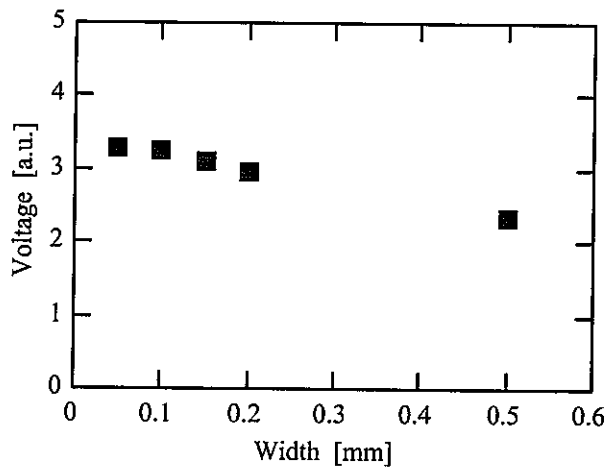


Fig.3.24 Weak dependence of voltage obtained from the variation of induced magnetic flux density on the gap length.

<周波数依存性>

次に、超音波の周波数を 0.75MHz から 10MHz まで変化させたときの出力電圧について計算を行った。図 3.25 は、超音波の振幅が一定としたときの、周波数が 1MHz の場合と 5MHz の場合の渦電流分布について示している。渦電流分布は周波数に対して強く依存していることがわかる。周波数が高いと波長が短くなり、周波数 1MHz では一波長は 5.5mm であるが、5MHz では 1.1mm となる。定常磁場分布は、図 3.23 で示しているように、試験片の深さ方向に対し急激にその大きさが減少しており、深さ 0.2mm の位置では、表面における磁束密度の 1/10 となっている。超音波の周波数が低くなると、圧力変化が最も大きい 1/4 波長に相当する位置が試験片表面から深い位置に存在するようになり、定常磁場と超音波による相互作用により発生する渦電流密度は小さくなる。それゆえ、図 3.25 で示すように、周波数が高い方が渦電流密度も多くなっていると考えられる。図 3.26 は、超音波の振幅が一定の場合の周波数に対するギャップの中心から深さ方向の渦電流密度について示している。渦電流の大部分は表面から深さ 0.2mm の範囲で発生し、深さ約 0.1mm で渦電流密度が最大値をとっている。また、

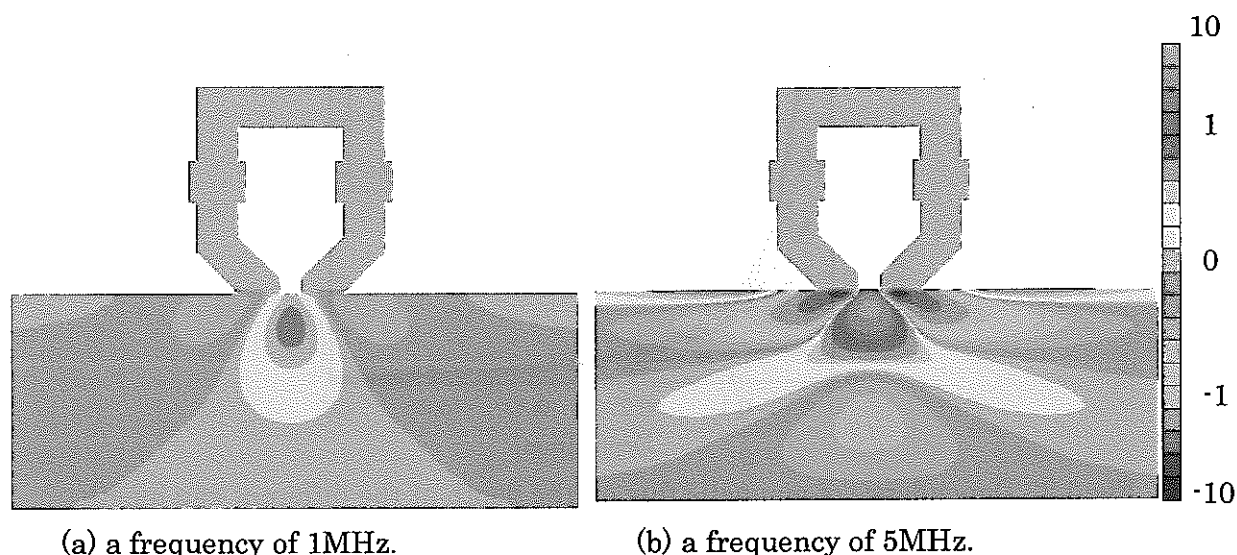


Fig.3.25 Distribution of the eddy current.

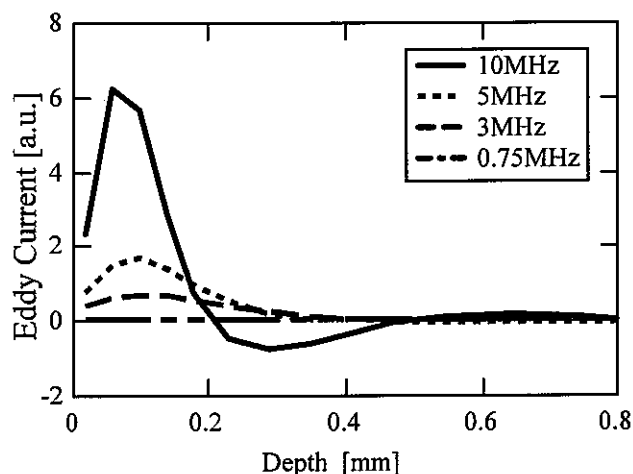


Fig.3.26 Dependence of eddy current on the depth at the different frequency.

周波数 10MHz の場合は、波長が短くなったため 0.2mm よりも深い位置では、渦電流の流れる向きが逆方向になっている。図 3.27 は周波数に対する渦電流に起因して生じた検出電圧の依存性について示している。超音波の振幅が一定の場合は、周波数が高くなるにつれて検出電圧も比例的に大きくなっていく。しかし、さらに周波数が高くなると試験片内部では、表面近傍で発生する渦電流の向きとは逆方向に流れるようになるため、得られる出力電圧は、徐々に飽和する傾向を示すようになっていく。実際の使用においては、周波数が高いほど超音波の減衰は大きくなる。したがって出力電圧は、図 3.27 で示す結果と減衰率との関係からある特定の周波数で最大となることが予想される。

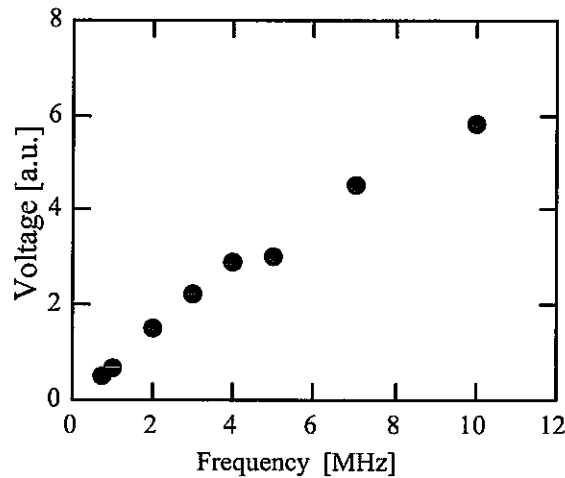


Fig.3.27 Output voltage as a function of frequency.

<リフトオフ依存性>

リフトオフによる影響について検討した結果を図 3.28 に示す。試験片とセンサーの距離は、0mm から 1mm まで変化させた。送信周波数は 5MHz で、ギャップ間隔は 0.1mm である。センサーを試験片から離すと、受信強度は指数関数的に減少することがわかった。これは、センサーが試験片から離れることで、センサーに巻いてある励磁コイルで発生させる磁場の強度が試験

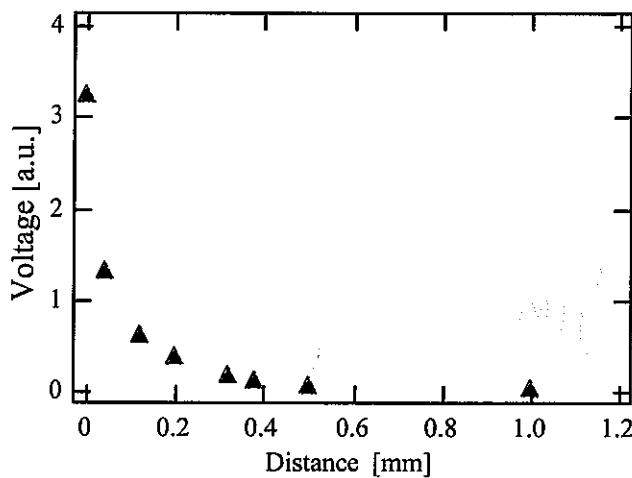


Fig.3.27 Output voltage as a function of distance between the detector and the surface of the block.

片内部で弱くなることと、その渦電流で生じた磁束もセンサーと鎖交する割合が減ったためである。それゆえ、自己励磁型では、出力電圧は試験片との距離に対して極めて依存性が高くなる。

以上の結果より、自己励磁型のセンサーは、(1)ギャップ間隔を広げると出力電圧にはほとんど変化が見られないが、測定分解能は低下する、(2)周波数を高くすることにより出力は大きくなる、(3)試験片との距離に対して出力電圧は急激に低下する、ということがわかった。

3. 3. 2 自己励磁型受信器による超音波の受信

数値解析で得られた結果に基づいて製作した自己励磁型センサーの受信特性について調べた。図 3.28 に実験配置図を示す。試験片には厚さ 25mm の SUS304 を用い、送信器に圧電素子、受信器に自己励磁型センサーを向かい合わせに配置した。磁場を励磁するために励磁コイルに 100mA の電流を流した。

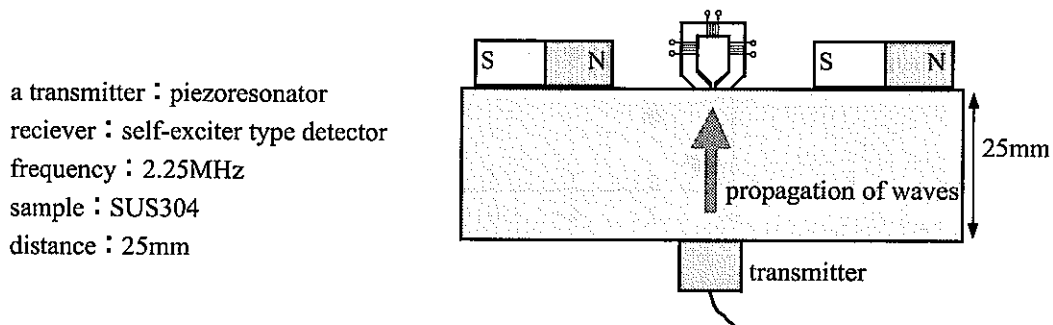


Fig. 3.28 Experimental setup.

送信周波数を 2.25MHz としたときの結果を図 3.29 に示す。この結果から、0~2 μ s までは超音波を送信する際に生じた電磁気ノイズの影響が残っているが 2 μ s 以降は十分に減衰をしていた。約 4.5 μ s あたりにノイズとは明らかに異なる波形が検出されていることがわかる。これは、圧電素子から送信された超音波を自己励磁型センサーで受信したものと考えられる。しかしながら、励磁をする領域が非常に限られており、得られた出力電圧は外部励磁型センサーよりも低かった。そのため、送信器に電磁超音波を使用した場合においては十分な出力電圧が得られず、超音波を受信することができなかった。

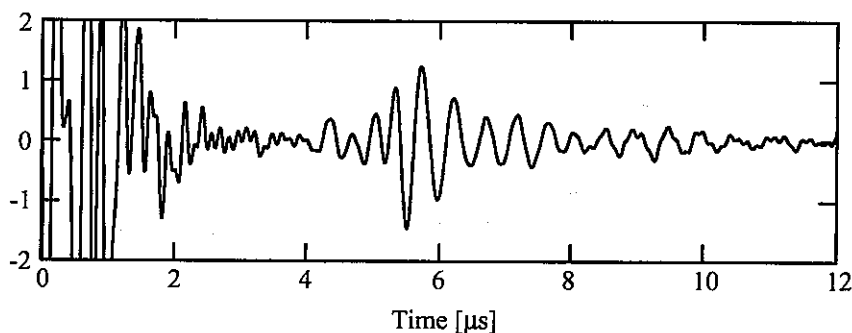


Fig. 3.29 Waveform received by the self-exciter type detector.

3. 4 キューブ型受信器と磁歪型受信器による超音波の受信

キューブ型受信器と磁歪型受信器の受信特性について調べた。図3.30に実験配置図を示す。試験片には厚さ100mmのSUS304を用い、送信器に圧電素子と電磁超音波送信器、受信器にキューブ型受信器と磁歪型受信器を適当な組み合わせで向かい合わせに配置した。

送信周波数を2.25MHzとしたときの結果を図3.31に示す。この結果から、0~8 μ sまでは超音波を送信する際に生じた電磁気ノイズの影響が残っているが8 μ s以降は十分に減衰をし

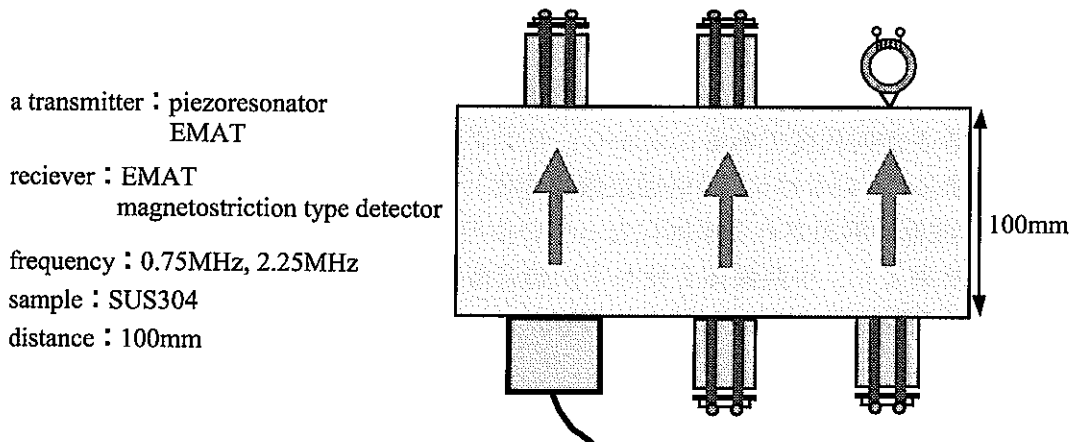
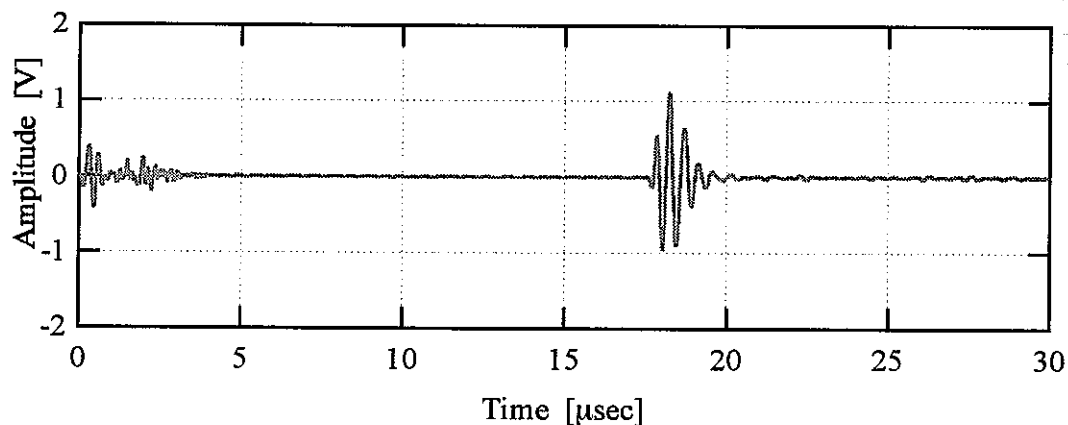
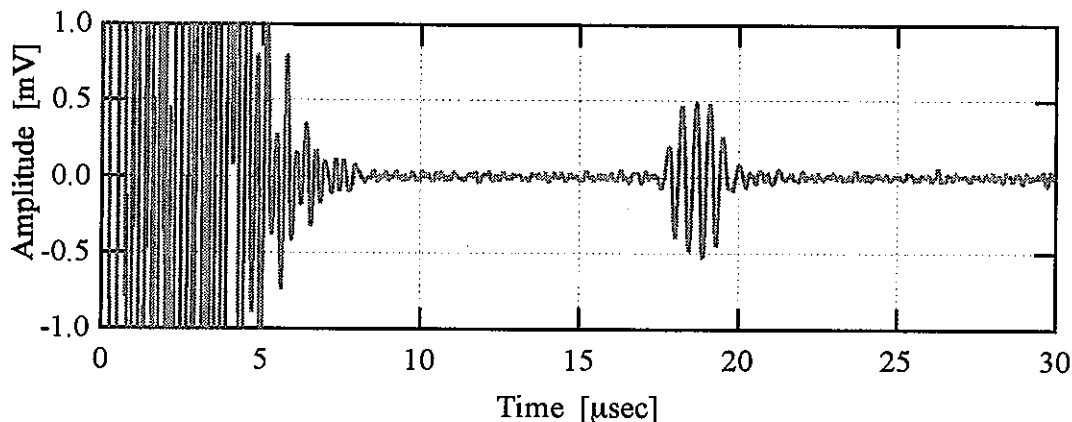


Fig. 3.30 Experimental setup.



(a) Waveform transmitted by the piezoresonator.



(b) Waveform transmitted by the EMAT.

Fig. 3.31 Waveform received by the cube type detector.

ていた。約 $17\mu\text{s}$ あたりにノイズとは明らかに異なる波形が検出されていることがわかる。これは、圧電素子から送信された超音波を自己励磁型センサーで受信したものと考えられる。また、キューブ型受信器では、送信器に電磁超音波送信器を用いたときも超音波を受信することができ、第1波目が到達する時間も送信器に圧電素子を用いたときと同じであったが、超音波の受信強度は $1/2000$ 程度であることがわかった。

受信器が磁歪型受信器の場合においても、送信器に電磁超音波を用いて超音波を受信することができた。その結果を図 3.32 に示す。受信周波数は、送信周波数を 0.75MHz の場合に限らず、 0.5MHz から 1MHz の送信周波数でも、同一周波数となる結果となった。受信周波数を 0.63MHz 、音速を 5500m/s とすると、1波長は 8.7mm となる。超音波の波長とリング形状しているコアの大きさが同程度であることから、リングに伝播した超音波がリング内で共振している可能性がある。そのために、送信周波数が変化しても受信周波数は 0.63MHz 程度であり、 $10\mu\text{s}$ 以上受信波形が検出される原因になっているのではないかと考えられる。

以上の実験結果より、中間媒体を使わずに超音波を送受信できるのは、受信器にキューブ型受信器と磁歪型受信器を用いた場合であり、これら2つの受信器について温度測定と流速測定を行った。

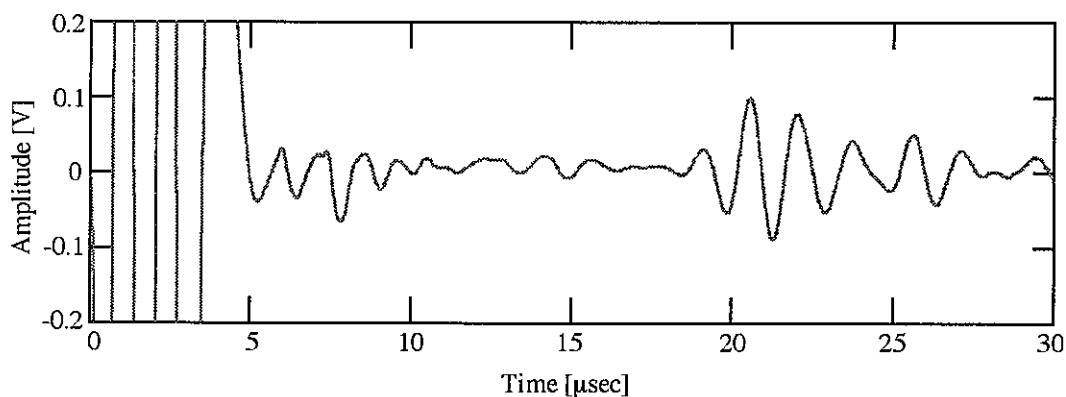


Fig. 3.32 Waveform received by the magnetostriction type detector.

3. 5 超音波による温度測定・流速測定

まず静水での実験を行った。実験構成図を図 3.33 に示す。送信器に電磁超音波送信器、受信器に磁歪型受信器を用いる場合は、超音波が水中を伝播する距離を 300mm とし、壁材質には厚さ 5mm の SUS304 を使用した。送信周波数を 750kHz としたときに得られた波形を図 3.34 に示す。超音波を発生させてから約 $205\mu\text{s}$ 後に第1到達波を検出しており、その後 $600\mu\text{s}$ 近辺で検出している波形は送信器と受信器の間を 1.5 往復した第2到達波である。送信した超音波は3波長分であるが、実際に検出された受信波は、例えば1波目であれば $50\mu\text{s}$ 以上超音波を受信していることになる。送信時間より受信時間が長くなったのは、超音波が SUS304 中で多重反射したためであることと、リング型受信器のフェライトコアへ超音波が伝播し、振動が減衰するまでに時間を要したためと考えられ、それらが複合的に影響した結果であると考えられる。

このような影響があるために、第2波目の到達時間については、その時間を正確に判断することが難しかった。図 3.34 では、約 $609\mu\text{s}$ と約 $628\mu\text{s}$ に超音波が検出されていて、受信強

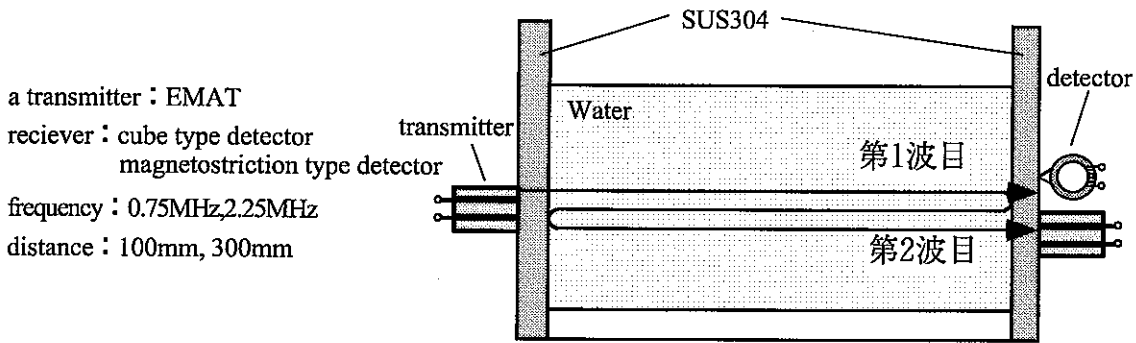


Fig.3.33 Experimental setup.

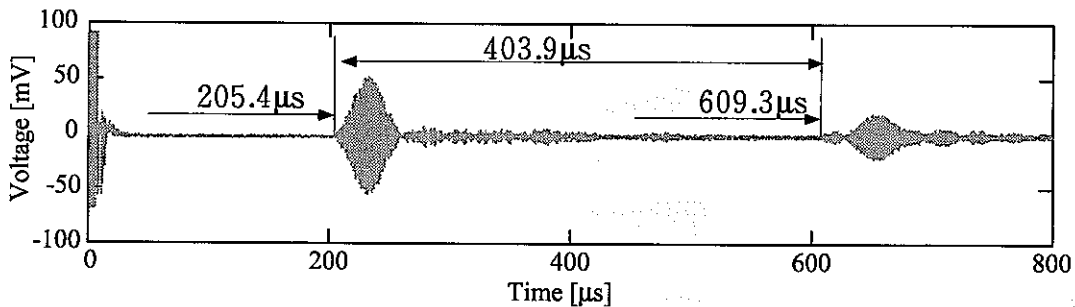


Fig.3.34 Waveform propagated in the water

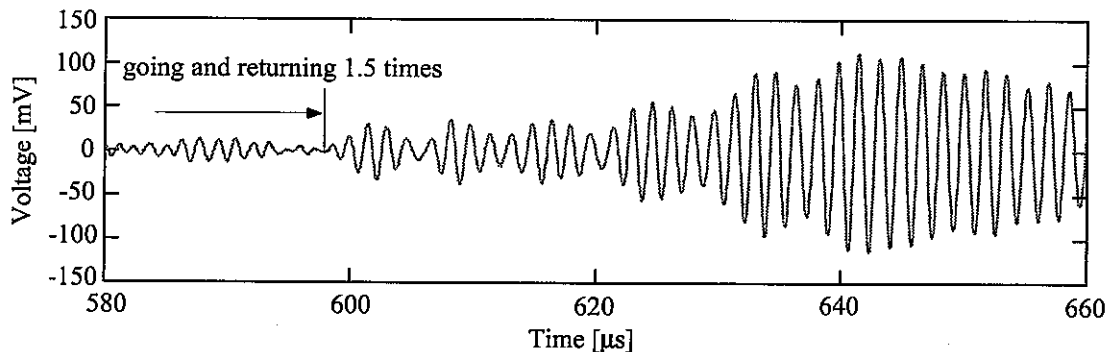


Fig.3.35 Enlarged view of a partial waveform in Fig. 3.34.

度の比較をすると、後者の方が大きな値となっている。しかしながら、第2到達波と第1到達波の時間差と水槽を往復する伝播距離から音速を求めると、約609 μ sの場合が、水温27 $^{\circ}$ Cの場合の音速とほぼ等しい値となる。図3.35は第2波目が到達する時間帯を拡大した図である。第2波目が到達する前の時間帯では、微小信号が検出されているだけであり、第2波目の立ち上がり時間は比較的容易に判断できるが、それ以降の時間ではうなりのような波形となっていて、水槽を往復した超音波であるのか、SUS304中での反射あるいは共振なのか区別をすることができなかった。水温を変化させると、必ずしも図3.35のように第2波目の到達時間を見いだすことができる結果ばかりでなく、ノイズと第2波目の波形が連続してしまい、

その立ち上がり時間を求めることが困難な結果もあった。この場合は、到達時間が正確にはわからず、測定誤差の原因となる。また、送信周波数を変えたときの受信波形を図 3.36 に示す。水温は 18.5℃であり、送信周波数は、0.5MHz から 2.5MHz となっている。測定を行ったすべての周波数に対して、第 1 到達波は同時刻に検出されており、第 1 到達波が検出された以降の波形は多重エコーが重畳していた。また、受信強度に関しては周波数が高くなると小さくなる傾向にあることがわかった。

そこで、壁材を厚くして 10mm として多重エコーによる波形の重畳を避けるとともに、壁材よりも短い周波数 2.25MHz、1.5 波長の超音波を送信波として発生させた。図 3.37 は、送信器に電磁超音波送信器、受信器にキューブ型受信器を用い、超音波の水中伝播距離が 100mm のときの受信波形について示している。この図から、超音波を発生させてから 69.5 μ s 後に第一波目が到達し、同様の波形が約 3.4 μ s の間隔で 100 μ s 以上測定され、時間とともに減衰していった。超音波が厚さ 10mm の SUS304 を往復する時間は約 3.2 μ s であることから、この一定間隔で受信されている波形は、SUS304 中を多重反射したエコーであることがわかる。さら

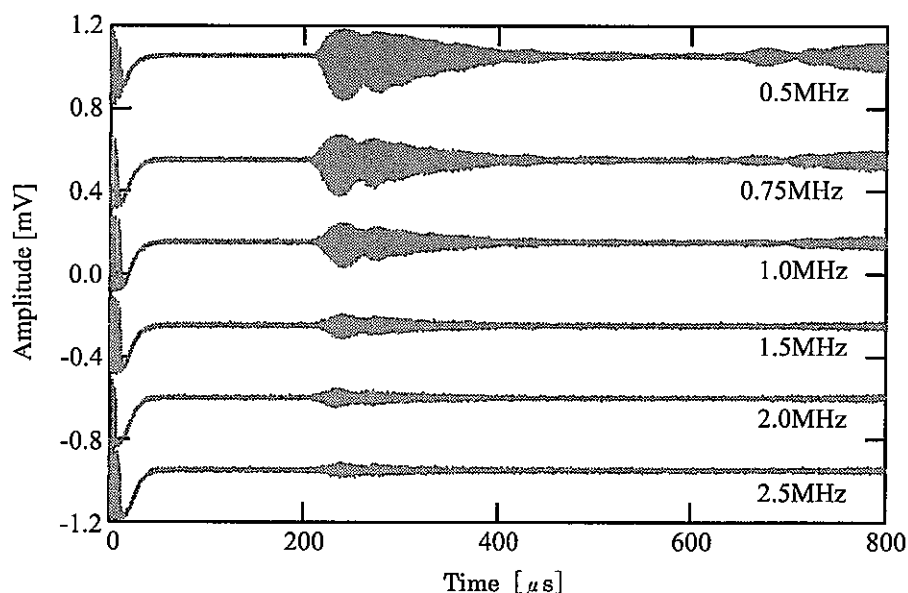


Fig.3.36 Waveforms with different frequency as a function of time received by the magnetostriction type detector.

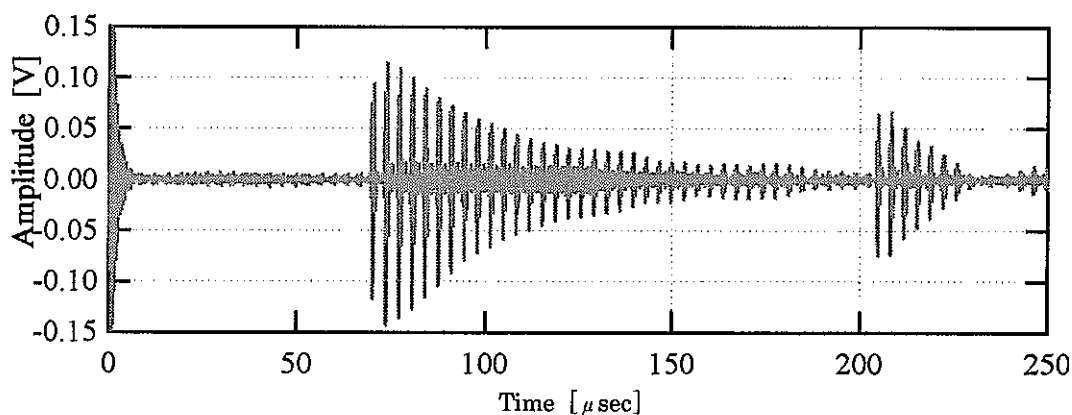


Fig.3.37 Waveform as a function of time received by the cube type detector.

にその後 $204\mu\text{s}$ で再び大きな出力電圧を検出した。ここで得られた波形は、送信器と受信器の間を 1.5 往復してきた第二波目であると考えられる。第一波目と第二波目の到達時間の差から水中を伝播した時間は $134.5\mu\text{s}$ であるので音速は約 1490m/s となり、水中を伝播する縦波の音速と一致している。したがって、電磁超音波素子を使い、水中を伝播する超音波についても送受信できることが確認できた。

水温をおよそ 10°C から 70°C まで 5°C 刻みずつ変化させて、水温に対する音速の依存性を調べた結果について図 3.38 示す。音速は第一到達波と第二到達波の時間差と水中を伝播した距離から求めた。水温の温度が 60°C 以上では、測定中における温度の変動が約 2°C あった。磁歪型受信器とキューブ型受信器で得られた結果の両方とも音速は温度が上昇するにしたがって速くなっていき、水温が 9°C の場合は 1447m/s であり、 72°C では 1545m/s であった。水を伝播する音速の文献値も温度が高くなると音速は速くなり約 75°C で最も速く、その後音速は遅くなっていく。実験値を文献値と比較した場合、 40°C まで良く一致しているが、それ以上高い温度では、実験値の方が文献値よりも若干音速が遅いという結果になった。

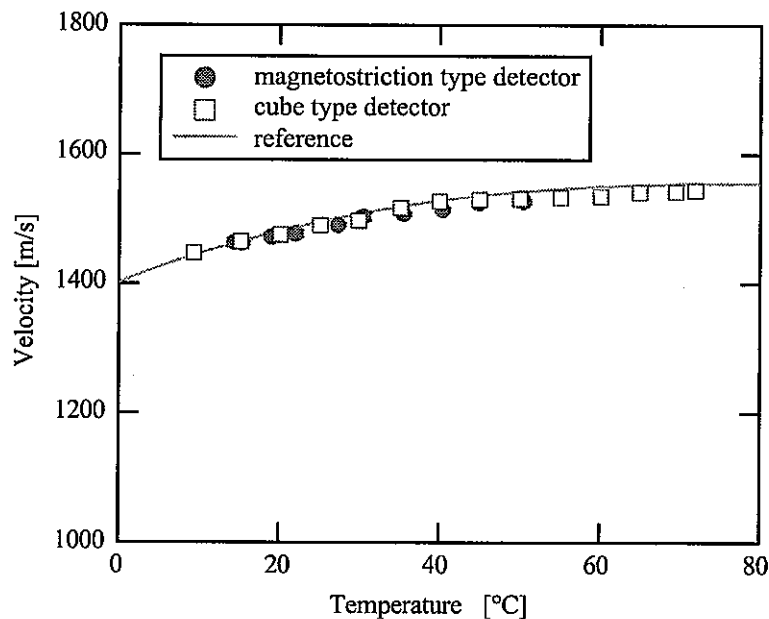


Fig.3.38 Acoustic velocity as a function of temperature.

次に水ループを使用して実験を行った。水循環ループの構成を図 3.39 に示す。ポンプは 750W の片吸込み半径流遠心ポンプであり、揚程は 13m 、最大流量は $0.2\text{m}^3/\text{min}$ である。吸い込み側の配管径は $\phi 60\text{mm}$ 、吐き出し側の配管径は $\phi 40\text{mm}$ である。吐き出し側から流れ出た水は途中で配管径を変換するためのレデューサーを通り、配管内部の一辺が 25mm の SUS304 でできた角パイプを通り、再びレデューサーを通ることで $\phi 40\text{mm}$ の配管を流れていく。流速は、吸い込み側と吐き出し側に圧力計が取り付けられており、その圧力差から求める。電磁超音波送信器とキューブ型受信器は、角パイプの両側に向かい合うように配置した。そして、周波数は 2.25MHz 、 3.5 波長分の超音波を送信した。ここで使用した送信器は最大出力が得られる送信器に対して 7 割程度の出力となっている送信器を使用した。なぜなら、これまでの実験では比較的超音波の伝搬距離が長かったが、水ループでは流体中を伝播する距離が 25mm となっていて、幅広い超音波送信器を使用すると超音波を一点に集中することができないからで

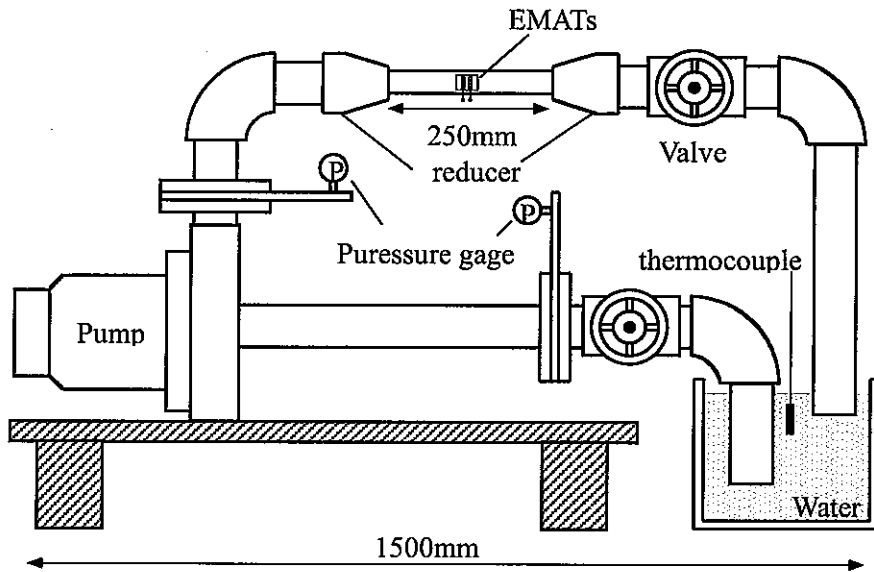


Fig.3.39 Water circulation system.

ある。そこで、比較的出力が得られ、磁石間隔が5mmの受信器を使用した。図3.40は流速が0m/sと3.2m/sのときの受信波形を示している。第一到達波の後、壁材を多重反射したエコーを検出している。流速3.2m/sにおける実験では、ポンプ電源から発生する電気的ノイズが受信波形に重畳してしまった。それによりSN比が悪くなってしまったため、図3.40に示す結果は加算平均化処理を約10分間行って得られた受信波形である。2つの受信波形を比較すると、流体中に超音波の伝搬を妨げる気泡や異物がない限り、受信波形には大きな違いがないことがわかる。図3.41は流速を変化させた時の第一到達波の時間と第一到達波の最大受信強度を示している。受信強度は電気的ノイズの影響を受けてばらつきがあるが、第一到達波の時間に関しては一定であった。受信器の位置を変化させ、超音波の送受信を行ってみたが、流速による受信強度分布の変位を確認することができなかった。

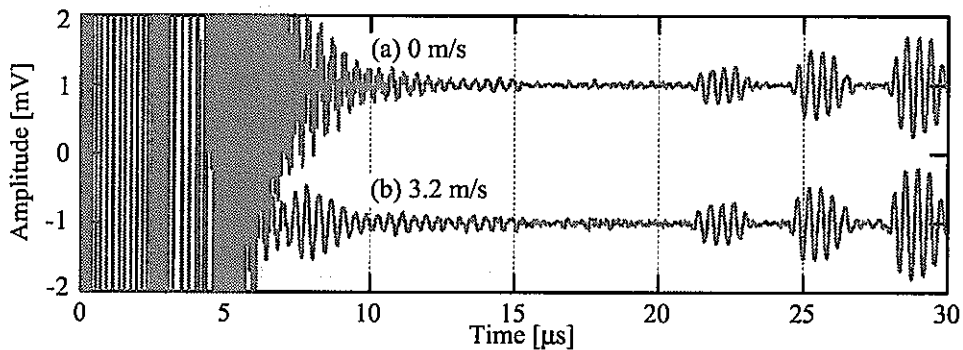


Fig.3.40 Typical waveform received by the cube type detector on the water circulation system.

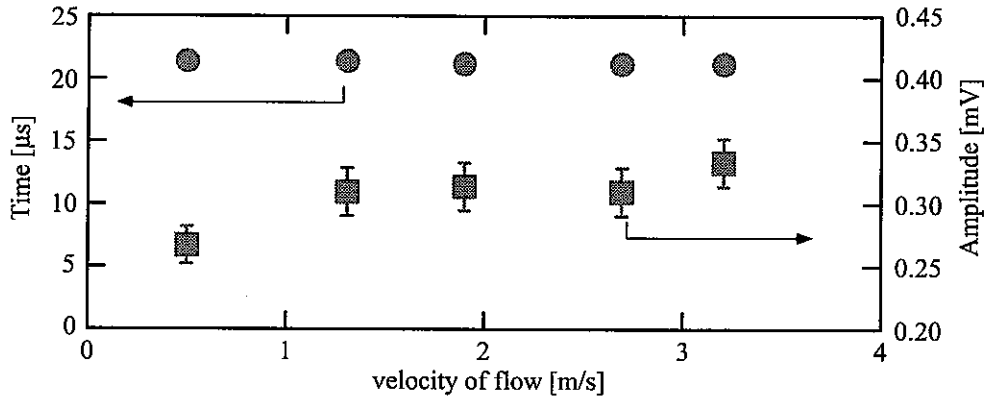
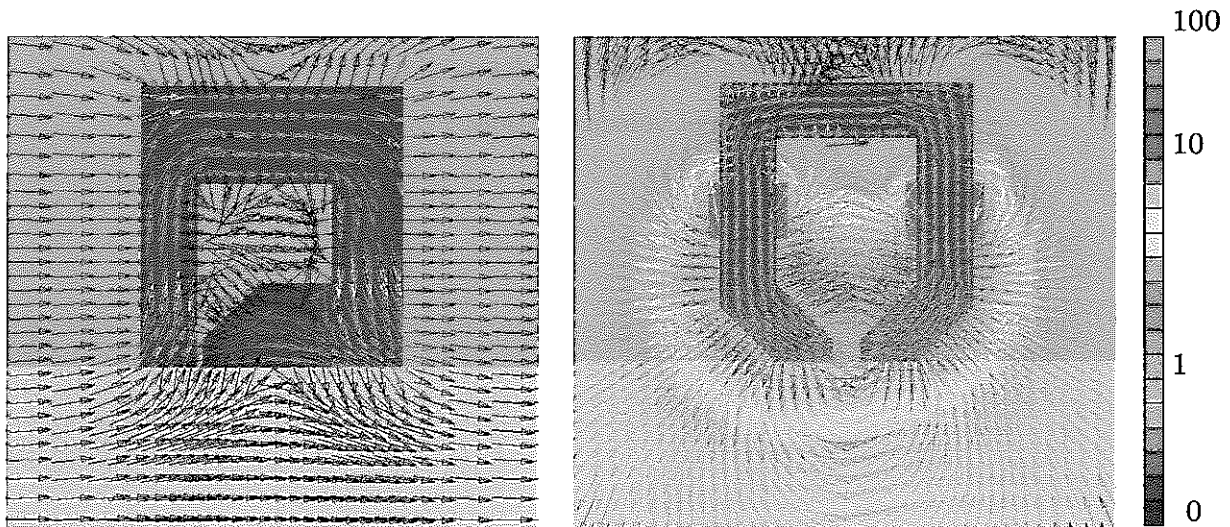


Fig.3.41 Propagation time and the detected signal amplitude as a function of velocity of flow.

4 考察

4. 1 外部励磁型と自己励磁型の定常磁場分布と渦電流分布

受信器の測定分解能は、試験片内部に生じる定常磁場分布に依存をしている。図 4.1 は外部励磁型と自己励磁型受信器の定常磁束分布について、数値解析により得られた結果をベクトル表示で示している。外部励磁型受信器では受信器を中心にして 10mm ずつ離れた位置に磁石を N 極と S 極が向き合うように配置している。そのため、受信器の大きさに比べて広い領域に磁場が発生することになる。励磁用の磁石で生じた一様磁場中へ透磁率の高いフェラ



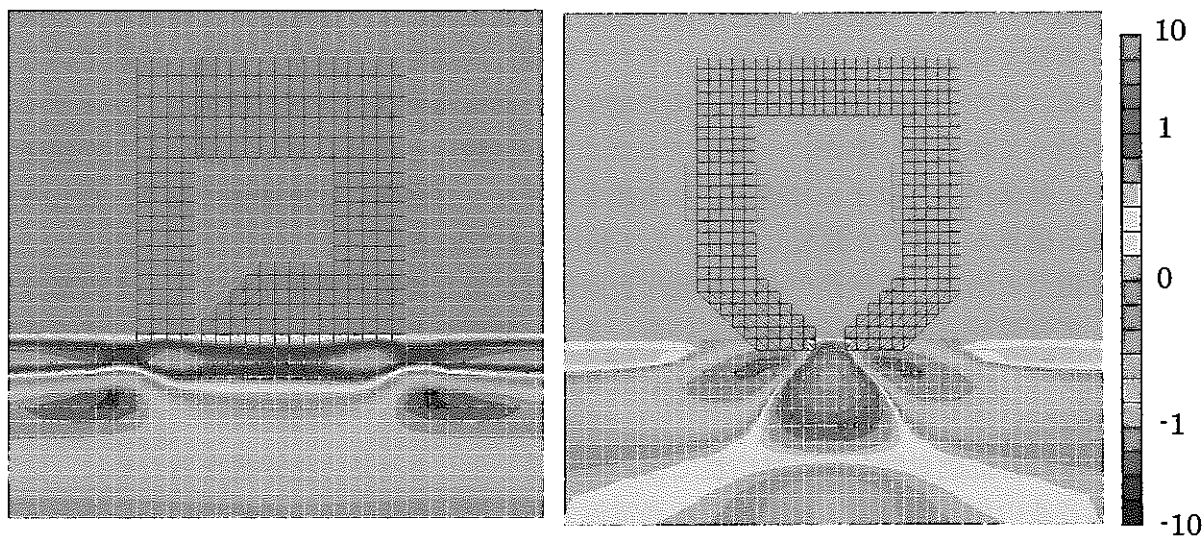
(a) the case of the external exciter type (b) the case of the self-exciter type

Fig.4.1 Flow of the static magnetic flux.

イトをもつ受信器を配置すると、図 4.1(a)のように磁束は受信器の両端のエッジ部分から出入りするようになる。特に受信器中心にあたる試験片表面周辺では、磁束は磁気抵抗の低いフェライトを通ることから磁束の大きさはエッジ部分よりも弱くなる。

それに対して自己励磁型の場合、励磁コイルによって発生する磁場はフェライトのギャップ付近の試験片表面を反時計回りに弧を描くように磁束が発生する。それにより、図 4.1(b)に示しているように受信器中心の試験片表面付近が最も静磁場が強くなる領域であり、磁束はギャップ付近を最大として試験片の深さ方向に対して大きく減少し、深さ約 0.2mm の位置で表面の値に比べ約 1/10 となっている。したがって、自己励磁型は外部励磁型とは違い、ギャップ間の試験片表面近傍にのみ強い磁束を発生させることができる。

次に、定常磁場と超音波の振動との相互作用によって生じた渦電流分布を図 4.2 に示す。外部励磁型や自己励磁型の大きさは非常に小さく、受信器まで伝播した超音波の伝播範囲は受信器の大きさよりも広いと考えられる。そこで、計算モデルでは一様に超音波が試験片の下部から上部へ向けて伝播していると与えた。超音波の周波数は 5 MHz とし、渦電流は紙面に対して垂直に発生している。暖色をプラス側へ流れる渦電流密度とすると、寒色は逆方向



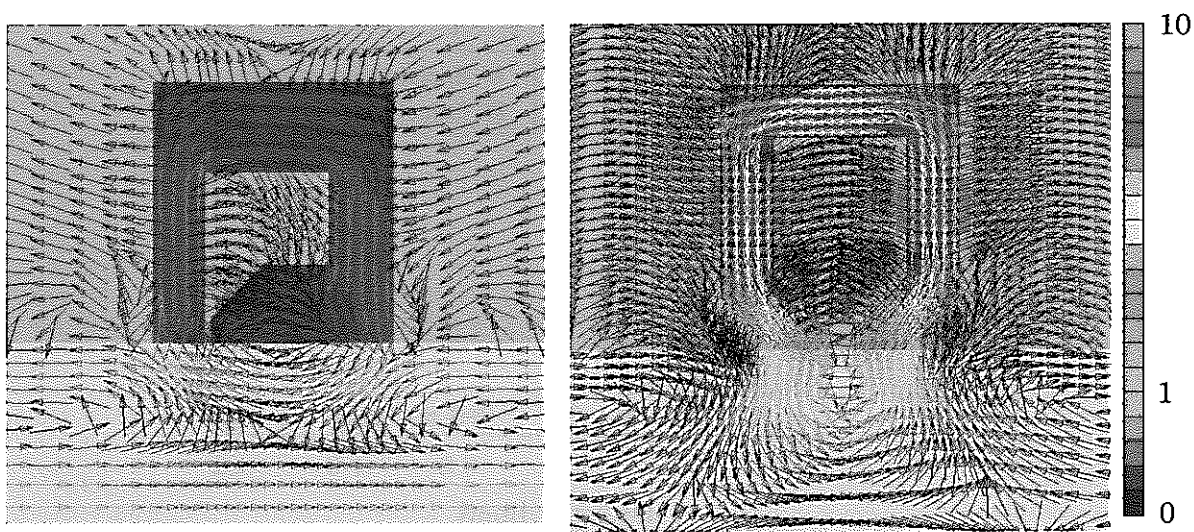
(a) the case of the external exciter type (b) the case of the self-exciter type

Fig.4.2 Distribution of the eddy current density.

へ流れる分布を示している。

外部励磁型の場合、試験片全体に存在する静磁場の強い部分に渦電流の電流密度も大きくなる傾向にある。渦電流密度は受信器中心ではなくエッジ部分で大きくなり、さらに受信器と磁石との間の試験片表面でも大きい。すなわち、受信器の大きさよりも広い範囲で渦電流が発生していることになる。自己励磁型の場合、ギャップ間の試験片表面近傍にのみ磁束が集中しているために、渦電流はギャップ間にのみ強く生じている。試験片全体には渦電流はほぼ発生していない。

外部励磁型や自己励磁型による超音波の検出は渦電流によって生じた磁束が検出コイルと鎖交することで行われる。図 4.3 は、渦電流によって誘起された磁束の流れをベクトル表示している。



(a) the case of the external exciter type (b) the case of the self-exciter type

Fig.4.3 Flow of the induced magnetic flux.

外部励磁型の場合、受信器と磁石の間で発生した渦電流により誘起された磁束は、空気中と試験片表面では右側から左側へ流れ、そして試験片内部では左側から右側へ流れていることがわかる。また、受信器のエッジ近傍で発生した渦電流で誘起された磁束は、フェライトの形状に沿って流れているが、一部はフェライトが試験片と接地している部分としか鎖交していない。結果的に、コイルで検出される磁束はギャップ間隔には無関係であり、むしろ空気中を通る磁束もコイルと鎖交し信号として検出されている。

自己励磁型の場合、受信器中心の試験片表面付近が最も渦電流密度が大きく、その部分を中心として反時計方向に磁束が流れている。また、側面などからフェライトに入ってくる磁束は弱いので、ほぼギャップ間の試験片表面近傍の渦電流によって発生した磁束を検出コイルで検出していると考えられる。

このように外部励磁型と自己励磁型では、静磁場を生じさせる方法が異なるために、定常磁場と超音波の相互作用によって生じる渦電流分布に違いが生じる。受信器中心にあたる試験片表面付近に渦電流を集中させるためには、自己励磁型が適している。しかし、励磁コイルに電流を流す方法であるため磁石を用いて励磁するよりも磁場の大きさが弱くなってしまいう欠点がある。

4. 2 リフトオフと受信強度の関係

ここでは、受信器から試験片までの距離と受信強度の関係について述べる。図 4.4 は、外部励磁型受信器と試験片までの距離に対する検出電圧依存性について示している。この結果は、図 3.10 で示す励磁用の磁石を試験片に接地させたままではなく、受信器とともに磁石を一緒にリフトオフさせている。自己励磁型の場合、リフトオフすると励磁位置も試験片から離れてしまうので、比較のため励磁方法を自己励磁型と同条件した。

受信器で使用しているフェライトは、それ自体が試験片に接触すると逆磁歪効果により磁束の時間的変化として超音波を検出してしまうため、受信器が試験片から完全に離れていることが確認できる位置から測定をした。図 3.13 の結果とは明らかに異なり、距離に対して受信強度が大きく減少していることがわかる。励磁用の磁石を受信器とともに移動すると、

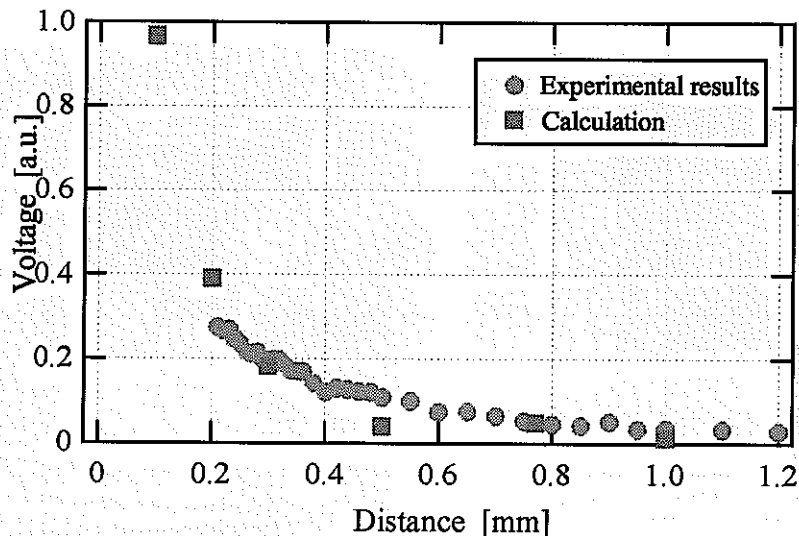


Fig.4.4 Output voltage as a function of distance between the detector and the surface of block.

試験片表面近傍で生じる磁束密度が小さくなる。それに伴って、渦電流密度も小さくなり受信強度の減少につながったと考えられる。また、数値解析によっても距離に対する受信強度の関係を調べた。計算結果も実験結果と同様に、距離に対して受信強度が大きく減少し、計算の妥当性が確認できた。

ところで、外部励磁型では実験により超音波を受信することができたが、自己励磁型では超音波を受信したが、SN比が悪く十分な受信強度を得ることができなかった。その原因の一つは、リフトオフにあるのではないかと考えられる。図4.5は、数値計算によって求めた外部励磁型と自己励磁型のリフトオフに対する受信強度の関係を示している。外部励磁型と自己励磁型の両方とも距離に対して受信強度が大きく減少し、試験片から0.3mm離れた位置では、接地の場合の1/10となっている。また、0.3mmまでの距離では、自己励磁型に対する受信強度の減少率が大きいのは、励磁する位置と関係があると考えられる。外部励磁型の場合は、励磁用磁石は受信器から両側にそれぞれ10mm離れた位置に配置している。そのため、受信器とともに励磁用磁石をリフトオフさせても、磁石と受信器が接地してあった位置との距離は、10mmとリフトオフの距離をそれぞれ2乗した和の平方根で与えられる。その一方、自己励磁型は、受信器を構成するフェライトに巻いた励磁コイルで励磁をするため、リフトオフの距離は、そのまま励磁コイルと試験片との距離となる。すなわち、自己励磁型の方が外部励磁型よりもリフトオフの影響を受けやすかったことを示している。

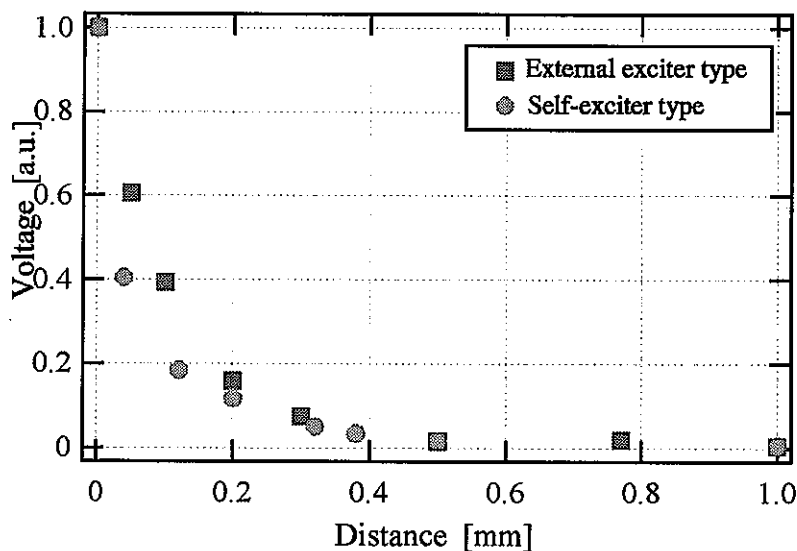


Fig.4.5 Relation between the distance from the surface of block to the detector and the output voltage.

4. 3 電磁超音波による送受信強度

電磁超音波は、電気エネルギーから超音波エネルギーに変換する効率が悪く、圧電素子に比べると送信・受信感度が低く十分なSN比が得られないことがある。実際に本研究で製作した超音波受信器による超音波の受信状況は表4.1のようになっている。

Table 4.1 Detection of longitudinal wave by combining the transducers

| transmitter | new detectors | | | |
|----------------|------------------|--------------|------|------------------|
| | external exciter | self-exciter | cube | magnetostriction |
| piezoresonator | ○ | △ | ⊙ | ⊙ |
| EMAT | × | × | △ | △ |

送信器に圧電素子を用いた場合は、製作したすべての受信器で超音波を受信できたが、送信器を電磁超音波送信器にした場合は、キューブ型と磁歪型受信器でのみ超音波を受信している。図 3.31 で示したように、電磁超音波の送信強度は、圧電素子に比べて 1/2000 程度まで低下したためである。また、伝播する超音波が、SH 波や SV 波の横波と異なり縦波のため電磁的に超音波を受信することが難しかったと考えられる。横波の場合は、超音波が端面まで伝播すると表面を振動させるので、その位置に受信器を配置すると表面で最大となる定常磁場と超音波が相互作用して渦電流を生じる。しかし、縦波の場合は、図 4.6 で示すように表面に受信器が接触していなければ、伝播媒質と空気で音響インピーダンスが大きく異なり、表面が超音波の節に相当する部分になる。そのために、表面では磁束密度は最大であるが、発生する渦電流は零になると考えられる。一方、試験片の内部方向へ入ると、超音波の腹に相当する部分があるが、定常磁場は大きく減衰していて、渦電流密度は表面ではなく、図 3.26 で示すように表面から約 0.1mm で最大値となる。このように、定常磁場が最も大きい表面で渦電流を最大にできないことが、検出感度の低下につながった原因の一つと考えられる。

受信強度は受信器のサイズが大きくなるにつれて増加し、キューブ型を使用したときが最も高い受信強度を示した。ただし、現状の送信器や受信器では、送受信強度はまだ十分ではなく、さらに高出力化していく必要がある。送信器に対しては、超音波を発生させるための駆動電流の増加がある。本研究では、送信器のインピーダンスによって電流値は変化するが、おおよそ 20~30A 程度であった。受信器に対しては、受信面を大きくすることで渦電流によって誘起される磁束とコイルが鎖交する面積を増加させる方法がある。温度計測では、超音波が送信器から受信器へ伝播する時間を求めることができれば良いので、上述の方法で対応することができる。しかし、流速計測に関しては測定分解能が悪くなるため、受信強度分布の変位を捉えることはできない。別の計測手法であるドップラー計測法等を検討しなければならない。

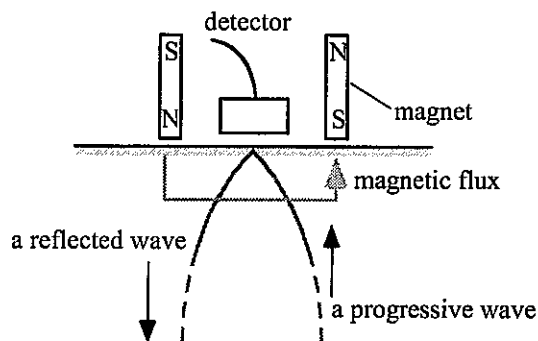


Fig.4.6 longitudinal wave propagated to the end face.

おわりに

本研究では、中間媒体を必要とせずに、超音波を発生・検出できる送信器・受信器の開発を行った。また、その送信器・受信器の特性について調べ、配管を流れる流体の速度・温度を配管外から測定することを目的として実験と数値解析を行ってきた。今回得られた結果について以下にまとめる。

電磁超音波送信器に関して、電磁的に縦波を発生していることが確認された。コイルの巻数と磁石の厚さ、またコイルのリアクタンス成分を小さくするためにインピーダンスマッチングした時と送信器の構成を変えて送信強度の変化を調べた。その結果、コイルの巻数や磁石の厚さを大きくすることにより、送信強度は上昇する傾向にあった。また、リアクタンス成分が大きくなり送信強度が低下しても、インピーダンスマッチングすることで送信強度を上昇させることができる。指向性については、受信位置が送信コイルの間隔よりも十分に遠方にあるならば、位相差が大きくなり指向性は上がる。こうした指向性は、超音波が伝播媒質で散乱しない限り、計算によっても求めることができる。

電磁超音波受信器は、外部励磁型、自己励磁型、キューブ型、そして磁歪型の4種類を設計・開発を行った。外部型と自己励磁型は、数値解析によっても超音波の受信特性を調べた。その結果、外部励磁型と自己励磁型受信器の励磁によってできる定常磁場分布と渦電流分布には大きな違いがあった。外部励磁型は、受信器の大きさに比べて広い領域に磁場が発生し、磁束は受信器の両端のエッジ部分から出入りするようになる。また、受信器の中心にあたる試験片表面周辺では、磁束は磁気抵抗の低いフェライトを通ることから磁束の大きさはエッジ部分よりも弱くなる。そのため、超音波が伝播したときに生じる渦電流分布は、受信器中心ではなくエッジ部分で電流密度が大きくなり、受信器と磁石との間の試験片表面でも渦電流が大きくなる。自己励磁型は、受信器中心の試験片表面付近が最も静磁場が強くなる領域であり、同様に渦電流も大きくなる。この違いにより、自己励磁型の方が測定分解能の高い受信器であることがわかった。実験を行ったところ、外部励磁型受信器では、励磁用の磁石を受信器の両側にそれぞれ10mm離れた位置に配置し、超音波の送受信をし、電磁的に超音波を受信することができた。また、受信器が試験片から2mm離れた位置においても接触到近い状態の約4割程度の受信強度が得られた。その一方、自己励磁型受信では、超音波の送受信を行ったところ、超音波を受信したが十分な受信強度を得ることができなかった。

電磁超音波送信器で超音波を発生させたときは、外部励磁型と自己励磁型受信器では超音波を受信することができず、磁歪型とキューブ型受信器で超音波を受信した。そこで、電磁超音波送信器と磁歪型とキューブ型受信器を使い、水温を10~70℃まで約5℃ずつ変化させ、超音波の第一波目と第二波目の到達時間から水中を伝播する超音波の音速を求め、温度と音速の関係を評価した。送信周波数は、磁歪型は0.75MHzであり、キューブ型は2.25MHzであった。音速は水温の上昇とともに速くなり、文献による音速の温度依存性とほぼ一致していた。水ループを使用した超音波の伝播特性では、流速を変化させても第一波目の到達時間に変化は生じなかった。しかし、流速測定では受信器の位置を変化させ超音波の送受信を行ってみたが、電磁超音波による送受信感度が低く十分な強度が得られず、流速による受信強度分布の変位を実証することができなかった。

参考文献

- [1] 川島捷宏:”電磁超音波の基礎と応用”,非破壊検査,No.34, Vol.11, p796-803,(1985)
- [2] Y.Kurozumi, et al: “Performance characteristics of electromagnetic generation and detection of shear horizontal waves by electromagnetic acoustic transducers”, Material Evaluation, Vol.59, No.8, p.97-103, (2001)
- [3] Y.Kurozumi, et. al: “Diagnosis of thermal aging of cast duplex stainless steel by electromagnetic ultrasonic method”, Vol.60, No.1, p71-77, (2002)
- [4] A.E. Waltar, A.B.Reynolds:”Fast Breeder Reactors”,pp.443-444

学会発表

- 大塚裕介, 他:”温度・流速計測用超音波受信素子の開発”, (社)日本原子力学会秋の大会, 青森大学, 2000年9月(第二分冊) p.377 (2000)
- 大塚裕介, 他:”温度・流速計測用超音波受信素子の開発(II)”, (社)日本原子力学会春の年会, 武蔵工業大学, 2001年3月(第二分冊) p.337 (2001)
- 清水利幸, 他:”温度・流速計測用超音波受信素子の開発(III)”, (社)日本原子力学会秋の大会, 北海道大学, 2001年9月(第二分冊) p.313 (2001)
- 大塚裕介, 他:”温度・流速計測用マイクロセンサーの超音波伝播特性”, (社)日本原子力学会春の年会, 神戸商船大学, 2002年3月(第二分冊) p.390 (2002)