

# 電磁的手法による超音波の発生・ 伝播特性ならびに材料劣化診断への道



研究ノート

西川 雅 弘\*

## Ultrasonic Wave Propagation Characteristics by Electromagnetic Acoustic Transducer and Application to Diagnostics for Aging of Material

**Key Words** : Ultrasonic Wave, Electromagnetic Acoustic Transducer,  
Aging Effect, Diagnostics, cast Iron

### 1. はじめに

当研究室は核融合炉工学分野の中ではプラズマ工学を核とした炉心周辺プラズマ現象の解明と高粒子束負荷除去に関する研究をするとともに炉設計研究を柱とした材料の欠陥検出、材料劣化診断技術に電磁的手法を用いて取り組んでいる。

核融合炉設計研究では粒子・熱負荷や中性子によって最も過酷な条件にさらされる第一壁とブランケットの構造材の損傷と劣化である。この問題を克服するための一つとして現状では想定される発電炉のプラント寿命の間に何回かの炉心要素機器の迅速交換が提案され<sup>1)</sup>、これを前提として設計研究が進められている<sup>2),3)</sup>。炉心要素機器の寿命評価は交換期間を決定することになり、それを支える重要な技術が材料の欠陥検出、材料劣化診断技術であると考えられる。

この技術は現在稼働している原子力発電の核分裂炉においても基礎的に重なる場合が非常に多く共通の課題として取り扱うことが出来るし、その効果も大きいと期待できる。

材料の劣化と何らかの力学的影響によって発生するマクロな欠陥検出は非破壊検査の領域で種々の手法が確立されており、材料、機器、システムの品質ならびに信頼性を保証する手段として、産業のあらゆる分野で近年ますますその重要性が認識されている。その応用分野も単に材料中の欠陥を検出することから、材料の機械的特性や、磁気特性などの変化を測定することによる診断技術まで多様な広がりを見せている。

ここでは適用範囲の広い電磁的手法で発生させる電磁超音波探触子を開発し、それによる超音波発生・伝播特性ならびに材料劣化診断の可能性について述べる。対象とした材料は結晶粒径の非常に小さい鍛造鋼 SUS304 と原子力プラント等の厚肉配管に使われている結晶粒径の大きいステンレス鋼である。このステンレス鋼は結晶粒が粗大で結晶異方性による超音波ビームの散乱があるため探傷検査が困難とされており超音波探傷性能向上のための活動が国内外で進められている<sup>4)</sup>。電磁超音波探触子は(1)磁石とコイルの組み合わせにより、さまざまなモードの超音波の発生が可能である。(2)探触子と材料間に超音波の伝達媒体を必要としない、(3)圧電素子の探触子と比べ、耐熱性がある等の特

\*Masahiro NISHIKAWA

1942年9月29日生

1971年大阪大学工学研究科、原子力工学専攻博士課程修了

現在、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、教授、工学博士、核融合工学、原子力工学

TEL 06-879-7234

FAX 06-879-7235

E-Mail nisikawa@ppl.eng.

osaka-u.ac.jp



徴があり、それを使った探傷検査や材料劣化診断技術確立のための研究開発が期待されている。

## 2. 電磁超音波発生メカニズム

電磁超音波探触子は、永久磁石とコイルから構成されており、材料中に誘起されるうず電流と磁界との相互作用により、材料中で直接に超音波を発生させることができる<sup>5)</sup>。

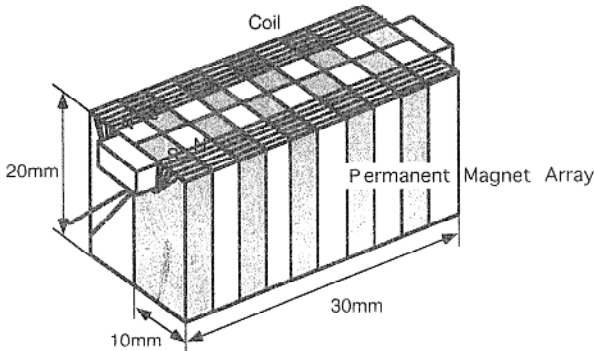


図1 SH波用電磁超音波探触子

図1に電磁超音波探触子の構造を示す。電磁超音波探触子の永久磁石にコイルを巻いた面を材料に接触させ、コイルに高周波電流を流すことにより材料表面近傍に、うず電流が誘起される。このうず電流と永久磁石による磁界との相互作用によりローレンツ力が発生し、これが材料中を超音波として伝播する。

この型では、材料の表面に平行な振動をする横波、SH波(Shear Horizontal Wave)が発生する。SH波の発生は従来の圧電素子を使った探触子では材料表面との接触状況に大きく依存して再現性の上で困難とされているが、非接触型の電磁超音波探触子ではリフトオフさえ定め

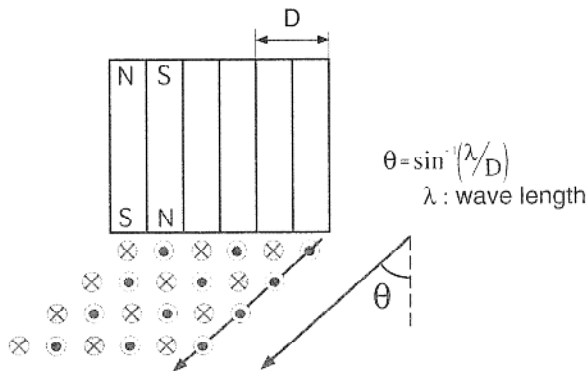


図2 SH波の伝播

ればこの問題は解決される。図2にSH波が材料中を伝播していくようすを示す。ローレンツ力による各磁石エレメント下の微小な変位が合成されて、材料中に特定の入射角θで伝播する。1組の磁石エレメントの幅をD、発生する超音波の波長をλとすると、 $\sin\theta = \lambda/D$ の関係があり、周波数を変えることによって入射角を変えることができる。図1の大きさの探触子をステンレス鋼に適用した場合、周波数500kHzでθが90°となり、SH波が材料表面を伝播する。

## 3. SH波の伝播特性

図3に本探触子で送受信した表面SH波の信号波形を示す。SUS304に適用した場合、探触子間距離に対応した位置に大きな受信波形が見られる。超音波発生メカニズムから容易に推察できるように、この受信波形は、送信、受信探触子がちょうど一直線上に向き合ったときのみ観察され、この型の探触子から発生する超音波の強い指向性を示す。ステンレス鋼材に適用した場合、探触子間距離に対応しないさまざまな位置でピークが観察される。また、これらの波形のピークはSUS304の場合のような強い

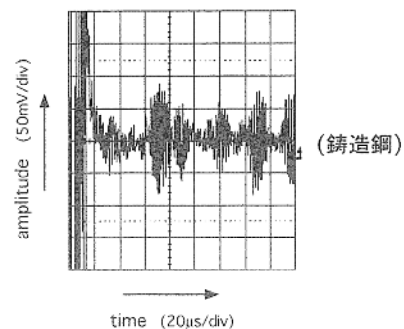
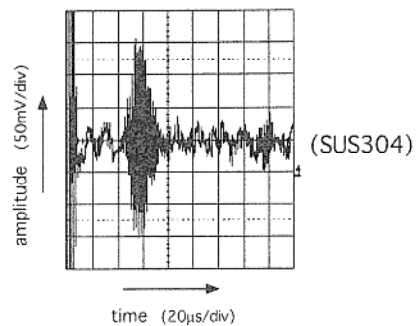


図3 SH波受信波形

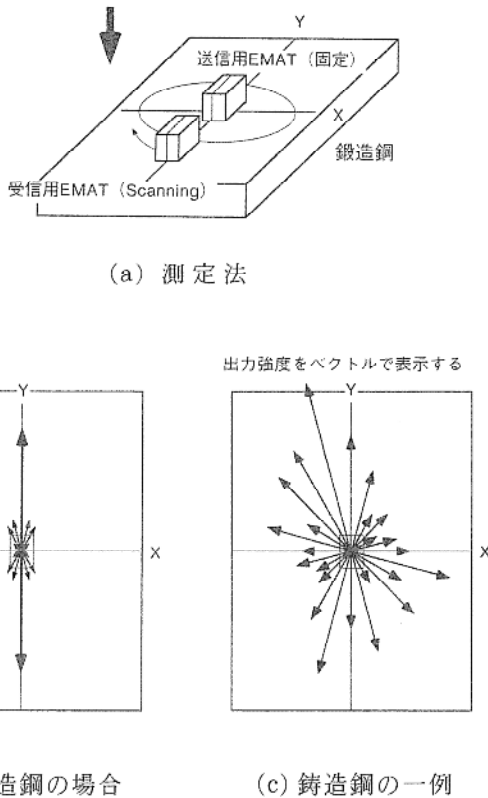


図4 表面SH波指向性

指向性を示さない。図4(a)は、受信探触子を送信探触子のまわりで1回転させて、送信される超音波の指向性を測定した様子を示したものである。図4(b)から明らかなように、SUS304の場合は、送信探触子の真正面の0°方向と180°方向で非常に強い信号が観察される。波長に比べて結晶粒の非常に小さい材料での伝播は散乱も少ないので、この結果は送・受信の探触子を含めた指向性を表していると思われるしかし、図4(c)のようにステンレス鑄鋼の場合は信号の強度に方向性がみられない。

このようなSUS304とステンレス鑄鋼材におけるSH波伝播特性の違いは、伝播波長に対して二つの材料の結晶粒の大きさと粒界の異方性の違いに起因すると考えられる。ステンレス鑄鋼の結晶粒はSUS304と比べはるかに大きい。一般に結晶粒の大きさが超音波の波長に近づいてくると、結晶粒界での超音波の散乱の影響が大きく現れるといわれており、ステンレス鑄鋼におけるSH波の挙動もこの散乱によるものと思われる。

#### 4. ステンレス鑄鋼の熱時効現象と超音波音速変化

ステンレス鑄鋼材には、 $\alpha$ 相、 $\gamma$ 相という結晶構造の異なる2つの相が存在する。本材料が一定の高温環境下に長時間おかれると、 $\alpha$ 相中に $\alpha'$ 相が発生する熱時効現象が起こる。この結果、 $\alpha$ 相の硬度の上昇、破壊靱性値の低下といった材料物性値の変化が起こる。このような材質の変化は、超音波の音速の変化あるいは超音波の散乱など超音波伝播特性の変化として観察されると思われる。

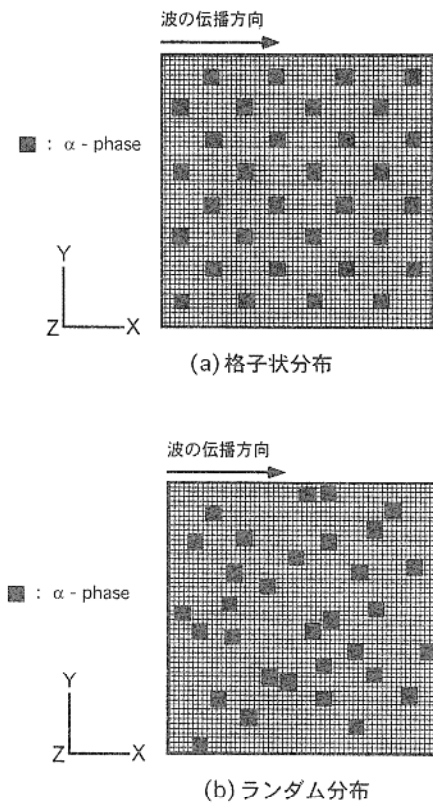


図5  $\alpha$ 相分布モデル

図5は、ステンレス鑄鋼の熱時効を2次元的に模擬したモデルである。図中の正方形で $\alpha$ 相の分布を模擬し、弾性定数を増加させることにより、 $\alpha$ 相に材質変化を与えた。超音波は、数100kHz以上のSH波、SV波としてY方向、Z方向に変位を入力し、その波長の変化で音速の変化をシミュレーションしたものである。図5(a)は $\alpha$ 相を格子状に分布させたものであり、図5(b)はランダムに分布させたものである。

表1 音速計算結果

SV波

|                  | 波長(m)     |
|------------------|-----------|
| $\alpha$ 相なし     | 0.0061172 |
| $\alpha$ 相格子状分布  | 0.0061962 |
| $\alpha$ 相ランダム分布 | 0.0061803 |

SH波

|                  | 波長(m)     |
|------------------|-----------|
| $\alpha$ 相なし     | 0.0061172 |
| $\alpha$ 相格子状分布  | 0.0061644 |
| $\alpha$ 相ランダム分布 | 0.0061909 |

表1にシミュレーションの結果を示す。弾性定数を20%増加させることにより、音速も約1.0%増加していることがわかる。このように、材質の変化にともなう伝播特性の変化は微小であり、ステンレス鋼のような音波散乱性の強い材料では、これを捕えるには結晶粒界での散乱現象など超音波の伝播にかかわる基本メカニズムを理解し、これに基づく精密な受信信号の測定ならびに受信信号のうち必要な情報を取り出すための信号処理が必要である。

5. お わ り に

ステンレス鋼の熱時効現象に対しては、伝播特性の1つである音速にある程度の変化を与えることは明らかであるが、このような音波散乱性の強い材料では、さらに周波数、散乱の変化等の特性変化に対しても研究が続けられている。また電磁超音波探触子の開発研究では、小型高周波化探触子による多チャンネルアレーブローブを開発しフォーカシングすることにより超音波強度の増加を計っている。

References

- 1) M. Nishikawa, T. Narikawa, M. Iwamoto, K. Watanabe : Fusion Technology, Vol.9, 101-115 (1986)
- 2) 西川雅弘 : J. Plasma and Fusion Research, Vol.70, 740-745 (1994)
- 3) 西川雅弘 : 機械の研究, Vol.47, 185-189 (1995)
- 4) 黒住保夫, 岡野行光, 西川雅弘 : 原子力学会誌, Vol.39, 279-286 (1997)
- 5) Y. Kurozumi, Y. Okano, T. Satou, M. Nishikawa : Proc. ENDE'96, University of Tokyo (1996)

