

電磁超音波探触子の開発



技術解説

上田 良夫*, 大塚 裕介**

Development of Electromagnetic Acoustic Transducers

Key Words : Electromagnetic Acoustic Transducer, ultrasonic wave, Shear horizontal wave, Inspection, Maintenance

1. 背景

高速炉の運転寿命は40年以上と想定されているが、その運転寿命中、疲労や腐食等による材質の経年劣化が生じ、き裂や減肉の発生等は避けられない。したがって、プラント運転中に、欠陥減肉情報を早期に得て経年変化現象や進展状況を把握するという保全活動は、事故を未然に防ぎ一層の安全性を確保する上で極めて重要な課題である。さらに、液体ナトリウム冷却高速炉は、軽水炉とは異なり、ナトリウムを常に液体状態に維持する必要があるため、供用期間中の検査においても200℃以上の高温に保持されることになる。このような高温環境下でき裂の有無やサイジングが行える非破壊検査技術の一つとして電磁超音波法がある [1-3]。この方法で用いる電磁超音波探触子 (Electromagnetic Acoustic

Transducer ; EMAT) は、一般的に利用される圧電型のピエゾ素子とは異なり、導電性の測定対象物に直接超音波を発生させる方法であるため、接触媒体が必要なく原理的には非接触で使用できる特徴を有している。それゆえ、接触媒体の状態によって超音波の伝播状況が左右されるという状況が生じず、長時間の使用によっても再現性の高い超音波受信結果を得ることができ、高温環境下においても使用できる。その一方で、送信/受信強度が圧電素子と比べて非常に小さかったことが、これまで幅広く利用されてこなかった一因となっていた。EMATは、後述する超音波発生原理により電磁的に超音波を発生させている。したがって、超音波の出力を上げるための一つの方法として、磁石で得られる磁場を強くすればよく、磁石の組み合わせ [4] や磁束が強い材料の選定が行われてきた。しかし、EMAT性能は磁石特性で基本的に決定付けられており、これ以上大幅に磁束を向上させることは難しかった。それに対して、磁石の代わりに電磁石コイルを用いて磁場を発生させるEMATは、磁石以上の磁場を発生し、より高出力の超音波の発生が期待できる。本稿では、電磁超音波法の原理と電磁石コイルを用い



*Yoshio UEDA

1958年9月生
東京大学・大学院理学系研究科・物理学
専攻博士課程修了 (1986年)
現在、大阪大学、大学院工学研究科電気
電子情報工学専攻、教授、理学博士、核
融合工学
TEL : 06-6879-7236
FAX : 06-6879-7236
E-mail : yueda@eei.eng.osaka-u.ac.jp



*Yusuke OHTSUKA

1969年2月生
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博士後期課程 (1998
年)
現在、大阪大学、大学院工学研究科 電
気電子情報工学専攻、助教、博士 (工学)、
保全工学
TEL : 06-6879-7234
FAX : 06-6879-7867
E-mail : ohtsuka@eei.eng.osaka-u.ac.jp

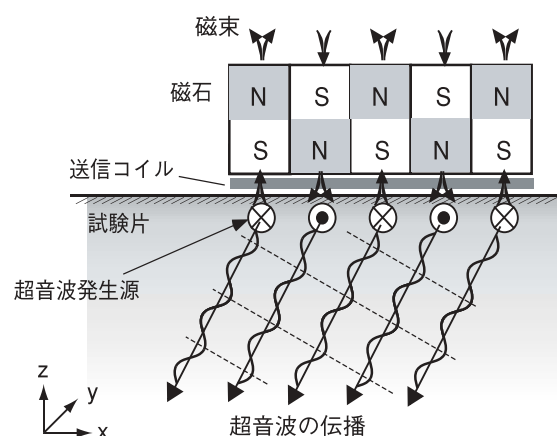


図1. 電磁超音波探触子による超音波発生原理

たEMATの構成と性能について解説する。

2. 電磁超音波探触子による超音波発生

2.1 PPM構造EMAT

EMATは、静磁場を発生させる磁石と高周波電流を流すコイルから構成されている。磁石はN極、S極交互に周期的に並べたPeriodic Permanent Magnet；PPM構造を持っている。図1にPPM構造EMATの断面を表す。送信コイルに高周波電流を流すと、材料中にはコイル電流とは逆向きに流れる渦電流 J_x が発生する。また、磁石によって材料表面を垂直に横切る磁場 B_z が生じる。したがって、渦電流と永久磁石のバイアス磁界との相互作用によるローレンツ力

$$F = J_x \times B_z \quad (1)$$

が、材料中に直接発生し超音波（SH波：Shear horizontal wave）の発生源となる。SH波は境界面で反射する際にモード変換が少ないことが知られている[5,6]。磁石面と相対する材料表面層で発生する超音波振動は十分に離れた遠距離場においては位相が揃い、特定の方向にSH波が伝播する。その超音波の指向性は、送信周波数 f と永久磁石の厚さ d によって決まり、

$$\sin \theta = \frac{v}{2df} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 v は材料を伝播する超音波の音速を示している。磁石厚 d が一定ならば、送信周波数に応じて超音波の伝播方向を変化させることができる。

2.2 パルス磁場EMAT

前述のPPM構造EMATでは磁石特性がEMATの性能を決めていた。そこで、さらに強い磁場を発生

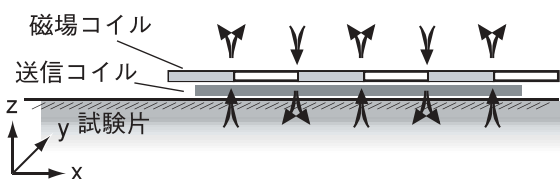


図2. 磁場コイル型EMATの構造

させるために、磁石の代わりに、磁場コイルによる電流励磁方式を採用することにした。以後、この方式によるEMATをパルス磁場EMATと呼ぶことにする。パルス磁場EMATは、磁場コイルを採用することで、磁石型EMATに比べて薄く軽量化できる特徴がある。図2にパルス磁場EMATの断面を示す。パルス磁場EMATは、2つのコイルから成り立っており、磁石の代わりに励磁を行うための磁場コイルと試験片に渦電流を発生させるための送信コイルを重ねる構造となっている。送信コイルに対して x 方向に高周波電流を流す場合、励磁コイルには y 方向に電流を流す必要がある。励磁コイルでは、電流の流れる向きが入れ替わる位置で材料表面を垂直に横切る磁場 B_z の大きさは最大となる。したがって、パルス磁場EMATでは、コイル幅 D をPPM構造EMATの磁石幅 d の2倍とすることで、PPM構造EMATと同様の超音波指向性を持たせることができる。

磁石と同様に定常磁場を生じさせるために励磁コイルに常に電流を流し続けると、励磁コイルが発熱し破損に至ってしまう。通常、超音波の送信／受信は間欠的に行われていることから、超音波を送信している間だけ定常磁場を得るように電流を流すことで、コイルの発熱を避けることができる。

3. 磁場コイルの形状および実験構成

超音波の出力を向上させるためには適当な磁場コイルの選定が重要である。図3は、3種類の磁場コイルの基本形状を示している。この基本コイルを縦横に並べて磁場コイルを構成する。コイルの幅はPPM構造EMATの磁石2個分すなわちN極S極に相当し、例えば磁石厚3mmの場合、コイル幅は6

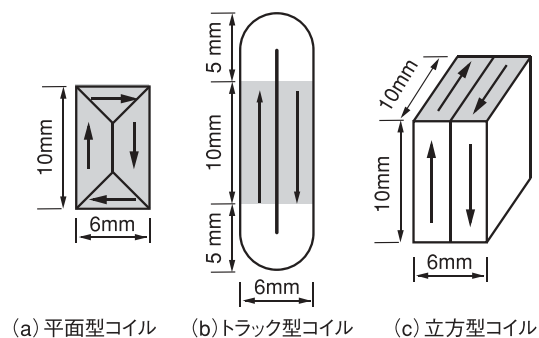
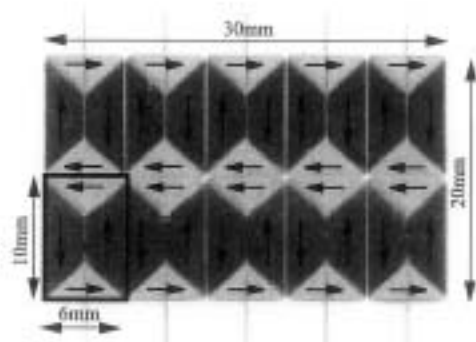
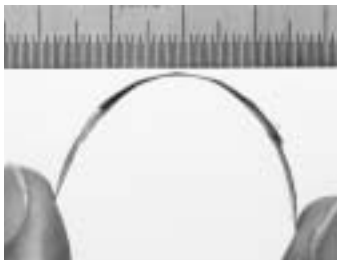


図3. 基本コイル形状



→ 電流の流れる向き
(a) 平面型コイルに流れる電流



(b) 柔軟な電磁超音波探触子

図4. 平面コイル構造

mmとなる。平面型コイルでは横6mm、縦10mmの大きさに線径 $\phi 30\mu\text{m}$ の線を72回巻いて基本コイルを構成した。図4は、その基本コイルを縦方向に2個、横方向に5個並べ、全体では幅30mm奥行き20mmとなる大きさの磁場コイルを構成した様子を示している。上段ではコイルを時計方向に、また下段ではコイルを反時計方向に巻いている。巻線方向が異なるのは、もう一枚のコイル（送信コイル）に流れる電流の向きは上段と下段では逆方向になることに対応したものである。また、平面型コイルは薄く柔軟性があり、任意の曲面に適用することが可能

	平面型	トラック型	立方型
線径	$30\mu\text{m}$	$100\mu\text{m}$	$300\mu\text{m}$
巻数	72 turns	24 turns	8 turns
抵抗値	37Ω	2.6Ω	0.32Ω

表1. 基本コイルのパラメータ



図5. タイミングチャート

である。その他の磁場コイルとして、トラック型コイルでは線径 $100\mu\text{m}$ の線を24回巻、立体型コイルでは $300\mu\text{m}$ の線を8回巻となる基本コイルを、平面型コイルと同様に並べ磁場コイルを構成した。線径と巻数が異なることから、10個の基本コイルを適当に直列あるいは並列接続し、磁場コイルのインピーダンスを $1\sim 2\Omega$ の範囲になるようにした。線径や巻数条件等については表1にまとめている。

ステンレス製の試験片の同一平面上に送信器と受信器を配置する。送信器は磁場コイルEMATとし、受信器はPPM構造EMATを使用した。受信器によって検出された超音波信号は、差動アンプによって信号を増幅した後、オシロスコープに取り込まれた。その際、信号ノイズの低減のため加算平均化処理を行った。送信用の電源として、励磁用と高周波電圧印加用となる2系統用意した。励磁用の電源は、コンデンサとコイルから構成されるパルス電源を製作し用いた。図5に超音波発生タイミングチャートを示す。磁石と同様の静磁場を発生させ、なおかつ磁場コイルの過熱を防ぐため、超音波を発生する時間帯のみ、一定の電流量が磁場コイルへ流れることが必要である。実際に製作した電源では、電圧一定となる値の90%に相当する電圧までの立ち上がり時間は $2\mu\text{s}$ であった。その後約 $25\mu\text{s}$ の時間電圧を一定に維持していた。そして、 $30\mu\text{s}$ 以降電圧が低下する波形となった。PPM構造EMATでは超音波を発生させる時間は $15\mu\text{s}$ 以下と設定していたため、電圧が一定となり定常磁場を生じさせる時間が $25\mu\text{s}$ であれば所定の超音波を発生することができる。

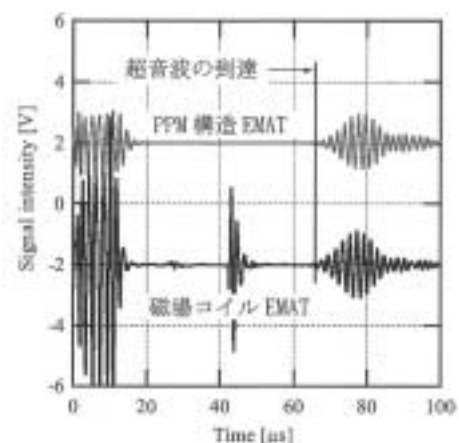


図6. 超音波受信波形

4. パルス磁場EMATによる超音波の発生

磁石を励磁コイルに置き換えたパルス磁場 EMAT を送信器として超音波を発生させたときの受信波形を図6に示す。また、比較として、同一の送信コイルを用いたPPM構造EMATによる超音波発生の実験結果も示す。磁場コイルEMATを用いたときの超音波受信波形は、40-50 μs の間に励磁電源の電流がオフになるときに生じる電磁ノイズが重畳している以外は、PPM構造EMATで送信した受信波形と非常によく一致しており、また超音波の受信開始時刻はほぼ同時刻となっていた。これらの結果から、パルス磁場EMATは、PPM構造EMATと同様に超音波を送信できることがわかる。すなわち、

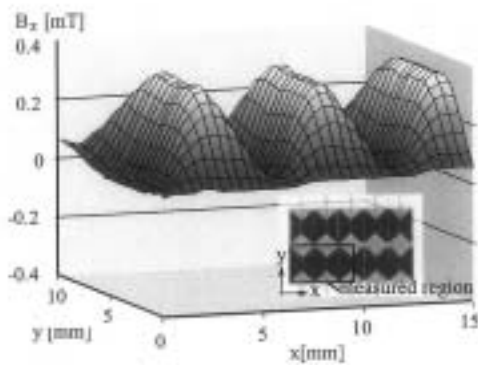


図7. 磁場分布

パルス磁場EMATは2枚のコイルを重ねる構造となっているが、超音波の発生に関して、コイル間の相互作用による影響は少ないと言える。

SH波を発生させる際の超音波送信出力は、(1)式で示されているように、試験片に対して垂直方向の磁場強度 B_z をどの程度まで高めることができるかに依存している。平面型磁場コイルに200mAの電流を流したときに発生する磁場強度分布及び測定領域を図7に示す。平面型コイルにおいては、永久磁石と同様の周期的な磁束分布が得られており、狙い通りの超音波の発生につながった。その一方で、バイアス磁場も発生したため磁場強度は全体的にプラス側へ増分していた。これは、磁場を測定した領域において、励磁コイルに流れる電流の向きは、上端では右から左へ流れ、下端では逆方向に流れているためである。しかしながら、このようなバイアス磁場は磁場コイル全体で発生しているが、超音波の発

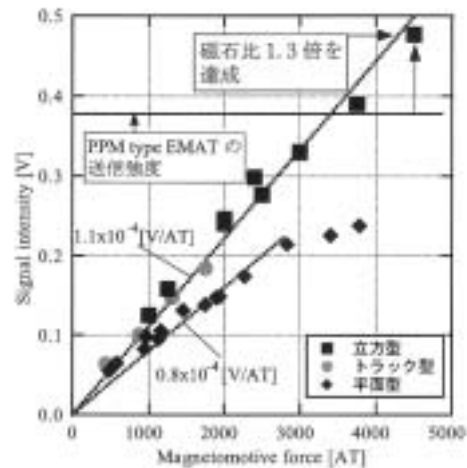


図8. 起磁力に対する受信強度の変化

生には問題にならない。パルス磁場EMATの送信面で超音波が発生しても、伝播する間に送信コイルによって誘起される渦電流の位相が反転するため、そこで発生する超音波と打ち消しあってしまうからである。パルス磁場コイルと永久磁石に対する磁場の振幅強度を比較したところ、永久磁石並みの磁場を発生させるためには、約3600ATの起磁力が必要であるという結果が得られた。コイル形状によって巻数や線径が異なっており電流の値は一概に言えないが、おおよそ、200~300Aの電流を磁場コイルに流すことで、PPM構造EMATと同程度の出力が得られることになる。

起磁力と受信強度の関係を図8に示す。受信強度は起磁力に対して比例的に増加し、ある程度の起磁力以上は受信強度が飽和していく傾向を示した。起磁力に対する受信強度の変化割合は、トラック型コイルと立方型コイルは等しく、平面型コイルはそれより低い値となった。平面型コイルでは、励磁面に送信コイルと同方向に電流が流れてしまう部分があり、超音波の発生に貢献できない部分が生じていることが原因である。立方型コイルでは、起磁力4500ATにてPPM構造EMATの1.3倍の超音波送信出力を達成することができた。3000AT以上で出力が飽和傾向を示すのは、磁場コイルEMATの発熱に起因していると考えられる。また、高強度の磁場を発生させた後、超音波の送信には大きな影響を与える状況にはまだ至っていないが、磁場コイルが電磁力によって歪んでしまう現象が生じている。

5. 今後の展開

電磁超音波探触子は、高温環境下で移動しながら探傷できることが大きな特徴のひとつであり、高速炉等への超音波探傷技術を支える重要な発振器／受信器である。しかしながら、磁石を使ったEMATでは永久磁石の性能がEMATの特性を決めており、これ以上の飛躍的な性能向上は見込みがたい状況になっていた。そこで、これまでのEMATの性能を超えるべく永久磁石を励磁コイルに大電流を流す方式に置き換えた磁場コイルEMATは、軽量化のみならず高出力化や高周波化に対応できる探触子として開発が進められてきた。現状においては、励磁コイルの発熱を抑制するために、超音波を送信する時間だけ励磁を行えるようパルス電源を使い、高出力化に対して種々のコイル形状で超音波を発生させたところ、PPM構造EMATの送信出力を超えるまでに至っている。さらなる高出力化には測定対象物とEMATの送信コイル間で、磁場コイルを多層化するなど高強度の磁場を発生できる構造で対応可能であろう。それに加えて、微小き裂の検出のためには高周波化も不可欠であり、細かいコイルパターンで構成された磁場コイルが必要となる。このような状

況から、今後の磁場コイルEMATの課題として、緻密な回路パターン、効率的な除熱特性、電磁力に対する素子構造などの開発項目が挙げられる。

参考文献

- 1) R.B. Thompson, IEEE Transactions on Sonic and Ultrasonics, Vol. SU-20 (1973) 340-346.
- 2) B.W. Maxfield et al, Material Evaluation 45 (1987) 1166-1184.
- 3) Y. Kurozumi et al, Material. Evaluation 59 (2001) 638-644.
- 4) Y. Xu et al, Recent Advances I Nondestructive Evaluation Techniques for Material Science and Industries (2004 ASME/JSME Pressure Vessels and Piping Conference) , PVP-VOL484 (2004) 91-95.
- 5) K. Hogberg, Materials and Design, Vol. 14 (4) (1993) 251-252.
- 6) H.J. Saltzburger et al, Proceedings of the 12th International Conference on NDE in Nuclear and Pressure Vessel Industries (1993) 137-142.

