



原子炉容器廻りISI検査装置の開発 - 高磁場配置型EMATの開発 -

徐 陽 山下 卓哉

敦賀本部 国際技術センター

Development on "MONJU" Reactor Vessel ISI Facilities
-Investigation of SH Wave EMAT with Halbach Magnet Configuration-

Yang XU Takuya YAMASHITA

International Cooperation and Technology Development Center, Tsuruga Head Office

本研究では、「もんじゅ」原子炉容器廻り供用期間中検査（ISI）の体積検査用電磁超音波探触子（EMAT）の高度化と軽量化を図るため、SH波EMATに新しい高磁場配置型Halbach磁石構造を導入し、その常温特性について解析と実測の両面から、一般の周期永久磁石（PPM）構造と比較しながら検討した。

Halbach磁石構造はPPM磁石構造の隣接磁石の間にPPM磁石と磁化方向の垂直の磁石を挿入して構成され、ワーキング面において強力な磁気特性を有する。また、Halbach構造SH波EMATはPPM構造SH波EMATより強い超音波音圧分布を示し、人工欠陥の探傷に用いたところ、高い欠陥信号レベルが得られ、高欠陥検出性を有することが分かった。

本研究において、解析結果と実測結果はよく一致し、解析法が妥当と考えられ、SH波EMATの磁石構造の最適化設計に応用できる。

In this paper, a horizontally polarized shear (SH) wave electromagnetic acoustic transducer (EMAT) with a Halbach magnet configuration is proposed and evaluated from numerical analyses and experiment measurements for the use of "MONJU" fast breeder reactor vessel in service inspection.

The SH wave EMAT with a Halbach magnet structure reveals a stronger magnetic flux density as well as ultrasound pressure than that of a SH wave EMAT with a periodic permanent magnet (PPM) structure. The above EMATs are used for inspection of artificial slits, and it was found that the Halbach magnetic structure has a better defect detectability than the PPM structure.

In this work, the measured magnetic flux density and the ultrasound directivity distributions for both the Halbach and PPM structure SH wave EMATs are in excellent agreement with those expected from numerical simulations. The numerical analysis method should be useful in optimizing the magnet structure for SH wave EMAT.

キーワード

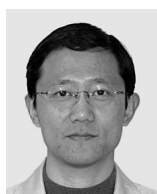
高速増殖炉，供用期間中検査，非破壊検査，電磁超音波探触子，SH波，音圧，超音波指向性，永久磁石構造，磁束密度，欠陥

Fast Breeder Reactor (FBR), In Service Inspection (ISI), Non-Destructive Testing (NDT), Electromagnetic Acoustic Transducer (EMAT), Horizontally Polarized Shear Wave (SH Wave), Sound Pressure, Ultrasound Directivity, Permanent Magnet Structure, Magnetic Flux Density, Defects

1. はじめに

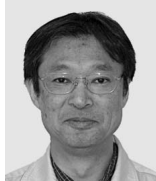
高速増殖炉「もんじゅ」の原子炉容器廻りの供用期間中検査（ISI: In Service Inspection）は、高温（約200℃）・高放射線（約10Sv/h）環境での目視検査を基本とするが、並行して電磁超音波探触子（EMAT: ElectroMagnetic Acoustic Transducer）による体積検査法の開発が行われている¹⁾²⁾。

電磁超音波探触子（以下EMATと略す）は、構



徐 陽

ISIシステム開発グループ
所属
博士研究員(中華人民共和国)
もんじゅ原子炉容器用電磁
超音波探触子(EMAT)の開
発に従事
工学博士



山下 卓哉

ISIシステム開発グループ
リーダー
もんじゅ用ISI装置の開発
整備に従事

造が簡単で、磁石（永久磁石あるいは電磁石）と渦電流励起用コイルから構成される。磁石の構造・配置とコイル構造の適切な組合せにより、縦波・横波・表面波など各種モードの超音波を簡単に送受信できる。EMATは通常の圧電素子タイプの超音波探触子より信号が弱く、電気ノイズに影響されやすい欠点があるが、ノンカプラント・冷却不要・遠隔操作可能など、優れた特徴を持つ。1970年代後半から、鉄鋼業界を始めとして原子力プラント・鉄道探傷などの分野でEMATが盛んに研究されてきた³⁻⁶⁾。

「もんじゅ」原子炉容器廻りISIの体積検査の対象はクリープ疲労による溶接線近傍の亀裂状内面欠陥である。原子炉容器の材料はSUS304ステンレス鋼で、溶接線には粗大粒・結晶異方性、熱影響部には組織多様性の特徴があり、SH波を用いた検査法が有利だと考えられる。SH波は横波の1種のhorizontally polarized shear waveのことで、振動粒子の変位方向と平行する材料境界面における反射・透過によるモード変換がない、粗大粒や溶接部による超音波減衰が少ないなどの特徴を有する⁷⁾⁸⁾。SH波EMAT⁹⁻¹¹⁾は、通常の圧電素子タイプの超音波探触子で送受信しにくいSH波を簡単に送受信でき、「もんじゅ」原子炉容器廻りISIの体積検査に適すると考えられる。

「もんじゅ」原子炉容器廻りISIは、検査機に目視検査装置と体積検査装置を搭載して、原子炉容器とガードベッセル間の30cm程度の狭隘空間でタイヤ車輪とばねの突っ張りで自重を支え、垂直走行しながら遠隔操作で実施する。重い自重によるタイヤ磨耗と滑りによる位置ずれが問題とされる。このため、検査性能の向上に加え、検査機本体と搭載する検査装置の重量を低減し、操作性と耐久性を向上することが研究課題になっていた。

今までに、SH波EMATに関するR&Dは実験的試行錯誤に基づいて行われてきたが、理論解析法による実験的手法の補完が求められている。

本研究では、現有の検査機にも搭載された通常のSH波EMATに用いられているPPM磁石構造(Periodic Permanent Magnet, 以下に「PPM構造」と略す)の代わりに、加速器分野で使用されているHalbach磁石構造を導入し、その磁気特性と対応するSH波EMATの超音波指向性を数値解析によりシミュレーションした。さらにSH波EMATを試作し、実測による検証を行い、当磁石構造SH

波EMATの優れた特性を明らかにした。実測結果と解析結果がよく一致することが観察され、解析手法の妥当性が示されるとともに、当解析手法のSH波EMATの磁石構造の最適設計への適用性が確認された。また、本研究では、試作したEMATを用い、スリット状模擬欠陥の検出性について検討し、Halbach磁石構造SH波EMATの高度な探傷性能を確認した。

2 .PPM磁石構造と高磁場配置型Halbach磁石構造

通常に使われているSH波EMATの磁石構造は30年前に提案されたPPM構造¹²⁻¹⁴⁾である。図1(a)に示すように、PPM構造は、隣接する縦方向に磁化する角柱状磁石(「縦磁化磁石」と略す)のN、S極を逆向きに配置することにより構成され、その上面または下面に励磁コイルを付ければSH波EMATが構成できる。しかし、PPM構造において、上下面の磁気エネルギーが等しいため、電磁超音波探触子として利用できる磁気エネルギーが構造全体の半分に限定されている。ここで、PPM構造の各縦磁化磁石の間に、磁極方向が交互に反対向きの横方向に磁化する扁平角柱状磁石(「横磁化磁石」と略す)を挿入したものを図1(b)に示す。この磁石構造は、加速器分野でアンジュレーターの挿入光電源用磁気回路として知られているHalbach磁石構造¹⁵⁾(Halbach構造と略す)である。Hal-

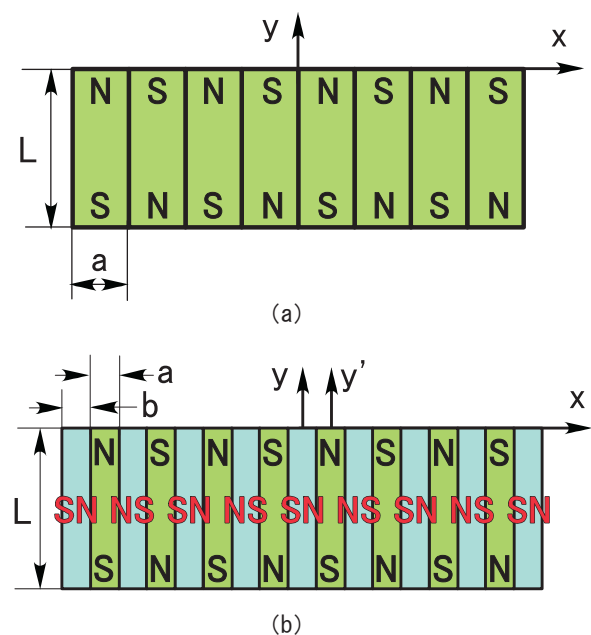


図1 PPM磁石構造(a)とHalbach磁石構造(b)の模式図

Halbach 構造は上下面の磁気特性が異なることが特徴で、磁気特性の強い面（図 1(b)において上面）を利用すれば、より強力な SH 波 EMAT を構成できる。Halbach 構造においては、隣接する 2 つの縦磁化磁石と 2 つの横磁化磁石の計 4 つの磁石により一つの配置周期を構成する。Halbach 構造を SH 波 EMAT に応用する場合、EMAT の周波数特性は磁石の配置半周期 $a + b$ (a と b はそれぞれ縦磁化磁石と横磁化磁石の厚み) の関数であり、 $a + b$ の値は Halbach 構造 SH 波 EMAT の設計上の重要パラメータになる。なお、Halbach 構造の横磁化磁石の厚み $b = 0$ の場合、Halbach 構造は PPM 構造に退化する。つまり、PPM 構造は Halbach 構造の特例に相当する。

3. 静磁場と超音波指向性解析の基礎理論

EMAT の基本動作原理は電磁誘導である。励磁コイルに高周波電流を流すと電磁誘導により導電体表面に渦電流が励起され、永久磁石による静磁場との相互作用で、同周波数のローレンツ力が発生し、結晶格子の変位振動に変わり、超音波として材料の遠方に伝播していく。コイルにより生成される動磁場は永久磁石の静磁場よりかなり弱いので、磁場解析と渦電流解析は独立に行うことができる。

マクスウェルの電磁方程式¹⁶⁾により、変位電流を無視する場合、支配方程式のアンペアの法則とファラデーの電磁誘導法則は、それぞれ

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

と

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad (2)$$

になる。また、磁束密度の保存則は

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

であり、ガウスの法則は、式 (1) の発散を取って整理すると、

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (4)$$

となる。ただし、 H は磁界の強さ、 B は磁束密度、 E は電界の強さ、 J は電流密度である。

なお、永久磁石の構成方程式は¹⁷⁾

$$B = B_r + \mu_0 \mu_r H \quad (5)$$

と表す。ただし、 B_r は残留磁束密度、 μ_0 は真空の透磁率、 μ_r は比透磁率である。

ここで、磁気スカラーポテンシャル V_m を導入すると、式 $H = -\nabla V_m$ が得られ、これを式 (5) と式 (3) に代入すると、次式となる。

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \nabla V_m - B_r) = 0 \quad (6)$$

磁石構造の磁束密度分布は微分方程式 (6) を解くことにより求められる。

一方、電気スカラーポテンシャル A 及び磁気ベクトルポテンシャル A を導入すると、式 (2) と (3) を満たすように電界の強さ E と磁束密度 B を次のように表すことができる。

$$E = -\nabla \phi - \partial A / \partial t \quad (7)$$

$$B = \nabla \times A \quad (8)$$

これらの方程式を解くことにより、渦電流

$$J^i = -\sigma \partial A / \partial t \quad (9)$$

を解くことができる。ただし、 σ は導電率である。

なお、ローレンツ力は式

$$F = J^i \times B \quad (10)$$

から計算できる。

本研究では、有限要素法で静磁場と渦電流解析を行った後、式 (10) によるローレンツ力を求め、超音波指向性解析のための音波の音圧式¹⁸⁾を

$$P(t) = \frac{\rho}{4\pi} \iiint_V \frac{1}{r} a \left(t - \frac{r}{C} \right) dV \quad (11)$$

から求める。ただし、 ρ と C はそれぞれ被検材の密度と SH 波の音速、 r は音源から解析位置までの距離、 t は時間パラメータ、 $a(t)$ は音源位置の振動加速度である。ここで、ローレンツ力を加速度 $a(t)$ の代わりに使用し、次のように表す。

$$F(t) = A_r \sin \omega(t - r/C) \quad (12)$$

ここに、 A_r はローレンツ力の振幅である。実際の音圧解析は相対評価で行うため、式 (11) の /4 項を考慮しない。

上記式を用い、磁石構造の磁束密度分布や EMAT の音圧分布、超音波指向性などが予測できる。

4. PPM構造とHalbach構造の磁束密度分布の解析結果

静磁場解析は、微分方程式に基づく有限要素解析コードFEMLAB[®]を用いて行った。

図2に示すのは、Halbach構造とPPM構造のワーキング面からリフトオフ距離（磁石表面から評価位置までの距離）0.5mmにおけるy方向の磁束密度 B_y 分布である。解析には三種類のサマリウム・コバルト磁石材料：R33H、R28HSとR30H（信越化学）の実測データを用いる。各磁石材料の残留磁束密度は表1を参照されたい。Halbach構造には、縦磁化磁石はR33H、横磁化磁石はR28HS、PPM構造には、R33HとR30Hの2種類の磁石材料を用いた。R30Hは現有の検査機に搭載された既存EMAT用の磁石材料で、R33HとR28HSは現在開発中のHalbach構造EMAT用の磁石材料である。200の高温使用において、Halbach構造の横磁化磁石は熱減磁が生じやすいの

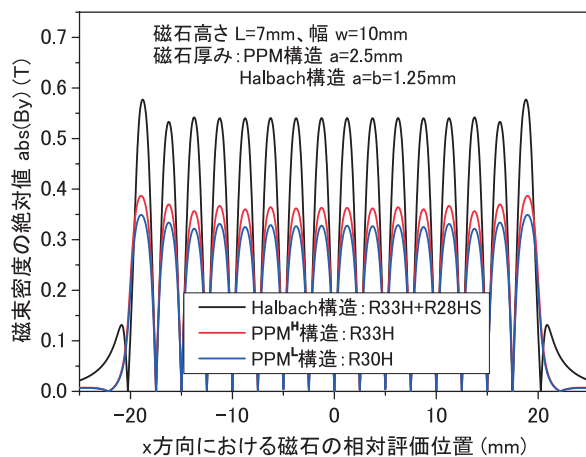


図2 Halbach構造とPPM構造のy方向磁束密度の分布特性（リフトオフ距離0.5mm）

表1 解析と実測用磁石構造の関連パラメータ

	PPM構造	Halbach構造
高さL (mm)	7	7
幅w (mm)	10	10
厚みα (mm)	2.5	1.25
厚みβ (mm)	-	1.25
縦磁化磁石 残留磁束密度 (T)	1.163 (R33H) 1.05 (R30H)	1.163 (R33H)
横磁化磁石 残留磁束密度 (T)	-	1.12 (R28HS)
リフトオフ距離 (mm)	0.5	0.5
磁石配置周期数	8	8

で、高温特性の優れるR28HSを用いた。一方、減磁しにくい縦磁化磁石はより残留磁束密度の高い磁石材料を選択して、R33Hを用いた。図2に、配置周期数8のHalbach構造とPPM構造のy方向磁束密度分布を比較して示す。磁石寸法は同図及び表1に示した。

図2のPPM構造の結果に注目すると、ハイレード磁石材料R33Hを使用し、磁石性能を改善したことによる磁束密度の向上は、高々1割程度にすぎないことがわかる。一方、Halbach構造はPPM構造に比べ約1.6倍の大幅な磁束密度の向上が観察され、磁石構造の改善は磁石性能の改善より効果的であることが分かった。

図3に示すのは、磁石の幅中心面と $x = (a + b) / 2$ 面の交線上（図1(b)のy軸に相当）におけるHalbach構造のy方向磁束密度 B_y のリフトオフ距離依存性である。解析用磁石構造のパラメータは表1に示した。高さの異なる4種類の磁石に対して、ワーキング面及びその反対側の面の磁束密度のリフトオフ依存性を比較した。横軸の0位置は磁石表面を指し、その右側は磁石外部領域（図1(b)のy軸の正方向）、左側は磁石内部領域（図1(b)のy軸の負方向）に対応する。磁石外部領域において、リフトオフ距離の増加に伴い、磁束密度が減少する。明らかにHalbach構造のワーキング面の磁束密度はその反対側の面より強力である。Halbach構造はPPM構造とほぼ同じ磁石の量を使用しても、強力な磁束密度が得られる。その理由として、Halbach構造において、横磁化磁石

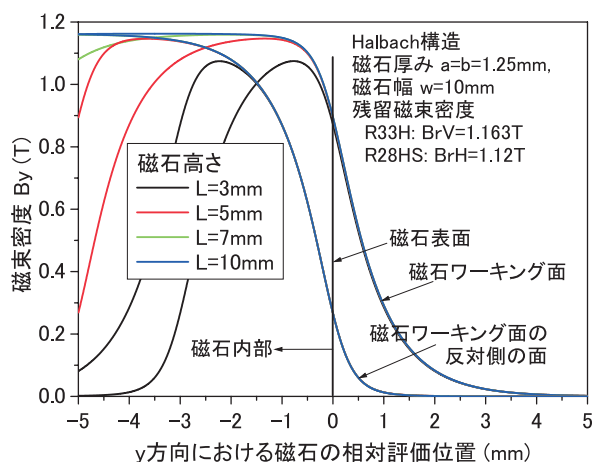


図3 Halbach構造の磁石幅中心面と $x=1.25$ mm面の交線上におけるy方向磁束密度のリフトオフ距離依存性（図1(b)のy軸上の分布）

の挿入により、磁石ワーキング面の磁力線が隣接する縦磁化磁石まで簡単に戻れず、より遠回りしてから戻ることにより、 y 方向磁束密度が強くなるものと理解される。なお、磁石ワーキング面の反対側の面においては、磁力線の流れはちょうど逆であるので、磁束密度が低下する。このように、Halbach構造は、磁石構造両側の磁気特性が異なるのが特徴で、ワーキング表面近傍の磁束密度の増加はその反対側の面の磁束密度の減少を代償として得られたのである。磁石構造の両面から取り出せる磁気エネルギーの合計は増加しないが、強力な磁気特性を有する面からより多くの磁気エネルギーを取り出すことが可能になる。なお、図3から分かるように、磁石の高さ L が3mmから10mmまでに増加しても、 B_y がほとんど変化しない。これは、多数の磁石隣接配置により、 x 方向の磁束発散が制限され、 y 方向に磁束密度が揃うのが原因と考えられる。その結果、磁石高さ寸法 L の影響が小さくなる。Halbach構造を設計する際、性能ばらつきの許容範囲内であれば、磁石高さ寸法を短くしても、磁気性能を損なうことなくEMATの軽量化ができると考えられる。

5. SH波EMATの超音波指向性の解析結果

SH波EMATの超音波屈折角と周波数 f の関係は下式で表される。

$$\sin \theta = \frac{C}{2tf} \quad (13)$$

ただし、 C はSH波の音速、 t は磁石構造の配置半周期で、Halbach構造の場合 $t = a + b$ 、PPM構造の場合 $t = a$ である。この式で示したのは、隣接距離が t の無限個の点音源（ 180° 位相差）による理想的な屈折角である。有限寸法の探触子の場合、伝播方向は上式で示した方向と多少異なり、探触子寸法や超音波周波数などにより、近距離音場限界距離も変化すると考えられる。

前節の磁束密度分布の解析結果を踏まえ、さらに渦電流解析を行ない、式(10)よりローレンツ力のピーク値を求め、式(12)の周波数効果を導入すると、式(11)から超音波音圧を算出できる。本研究では、PPM構造EMATよりHalbach構造EMATが強力であることを評価目的とするため、超音波の音圧の絶対値を論じず、相対比較を行う。なお、コイル材料は銅として、導電率 $5.998 \times 10^7 \text{ S/m}$ を用いた。また、被検体はSUS304材で、

SH波の音速を $3,120 \text{ m/s}$ 、導電率を銅の2.4%と仮定した。

図4にPPM構造SH波EMATの超音波指向性の周波数依存性を示す。解析用パラメータは表1に示した。ただし、磁石材料はR28HSを用いた。なお、リフトオフ距離を 0.5 mm とし、超音波音圧の評価位置はEMAT中心から距離 100 mm の位置である。音源としての渦電流の影響は浸透深さまでを考慮する。図4において、周波数 700 kHz において、一つ強力な超音波音圧メインローブが観察され、 700 kHz から 1.2 MHz までの周波数の増加につれ、サイドローブが大きくなるのが分かる。また、周波数の増加に伴い、SH波の超音波音圧が減少し続けるが、指向性が鋭くなる。音圧減少の主な原因は、周波数増加による被検体表面に励起される渦電流ピーク値の減少及び渦電流浸透深さの減少である。周波数は 1.1 MHz を超えると、超音波音圧のメインローブレベルが減少し、サイドローブレベルが増加し、両者が同レベルとなり、はっきりした指向性が観察されない。これは周波数増加に伴う近距離音場限界距離の増加が原因と考えられる。したがって、EMATを用いた欠陥探傷において、探傷距離に合う磁石配置半周期と超音波周波数の合理的な組合せが重要である。一方、周波数増加による屈折角の減少は式(13)から説明できる。

図5に示すのは、PPM構造SH波EMATの幅中心断面における超音波音圧分布の2次元投影である。解析周波数は 700 kHz 、リフトオフ距離は 0.5 mm 、磁石配置周期数は8、被検体材料は

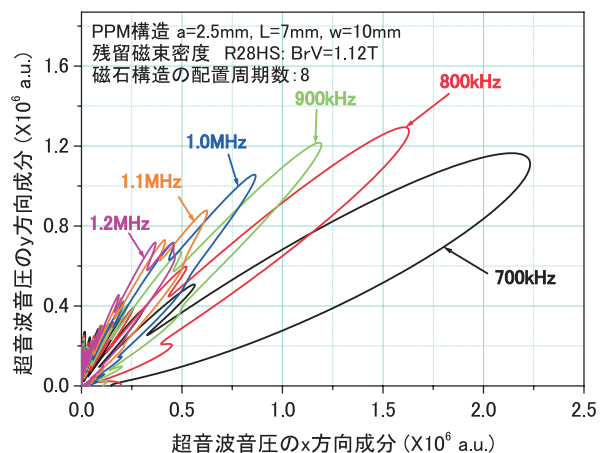


図4 PPM構造SH波EMATの超音波音圧分布の周波数依存性

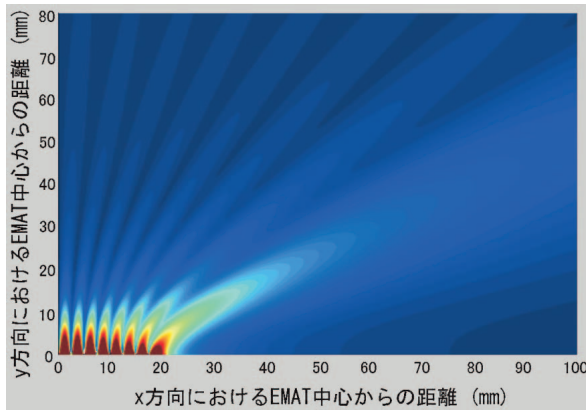
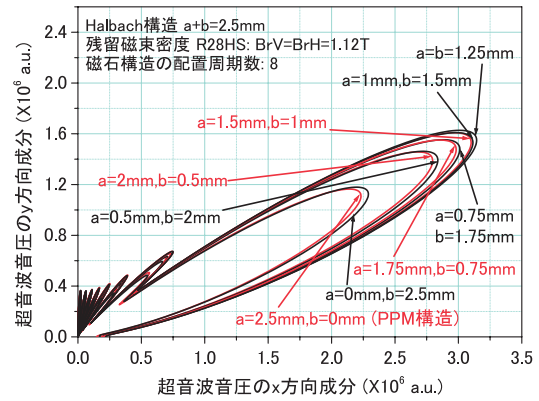


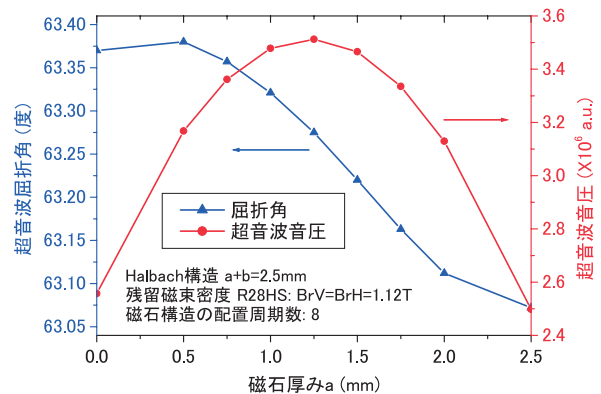
図5 SH波EMATの超音波音圧分布の投影図
(解析周波数700kHz)

SUS304ステンレス鋼である。図の左下の0位置は、EMATのワーキング面の中心部に相当し、横軸は磁石配置方向に対応する。SH波EMATは磁石構造配置中心断面を対称面として超音波音圧分布を生成するので、図に示したのは、EMAT右半分(配置周期数4、縦磁化磁石8個)に対応する音圧分布で、左側はこれと対称な分布となっている。8個の磁石からそれぞれ強力な超音波音圧が送信されることが観察できる。それらの干渉と合成により、右斜め方向(屈折角約63°)に強力な超音波音圧分布が現れ、主な超音波エネルギーの伝播方向を表す。図4に示した周波数ごとの超音波音圧分布は図5の分布から評価距離に対応する音圧を抽出して得られた結果である。

図6(a)に示すのは、配置半周期 $a+b=2.5\text{mm}$ を固定し、 a と b の組合せ変化によるHalbach構造SH波EMATの超音波音圧変化である。解析条件は主に表1に示したパラメータで、周波数は700kHzを用いた。また、横磁化磁石と縦磁化磁石は同じ磁石材料R28HSを設定した。図から分かるように、 a と b の組合せ変化により、超音波音圧のプロファイルはほとんど変化せず、強さだけが依存性を示す。図6(a)の超音波音圧ピーク値と超音波屈折角を磁石厚み a の関数として再整理した結果を図6(b)に示す。屈折角は a と b の組合せに依存するが、変化範囲はわずか0.3°に限られている。図1(b)に示したように、Halbach構造は、左右対称な磁束密度分布を構成するため、横磁化磁石は磁石配置周期の整数倍より一つ余分に配置される。屈折角の変化はこの余分に配置された磁石の厚みによる磁束密度分布の変化の影響と考えられる。一方、



(a) 超音波音圧分布の a と b 組合せの依存性



(b) 超音波音圧ピーク値及び超音波屈折角の磁石厚み寸法依存性

図6 固定 $a+b$ 寸法、異なる a と b 組合せによるHalbach構造SH波EMATの超音波特性変化

超音波音圧ピーク値は $a=0$ から $a=2.5\text{mm}$ まで磁石厚みの変化に伴い、増加してから減少していく。 $a=b=1.25\text{mm}$ におけるHalbach構造SH波EMATの超音波音圧ピーク値が最大となり、PPM構造SH波EMAT($a=2.5\text{mm}$)の1.4倍になる。この値が磁束密度ピーク値の増加(1.6倍、節4を参照)より小さい、超音波音圧は磁束密度分布の合計結果で反映されるものであることから、図2に示した磁束密度分布の面積比と理解される。いずれの a と b の組合せにおいても、Halbach構造SH波EMATはPPM構造SH波EMATより強力であることが明らかである。なお、 a と b の組合せ変化により、Halbach構造SH波EMATの性能調整ができる。

6. PPM構造、Halbach構造の磁束密度分布特性の実測結果

PPM構造とHalbach構造磁石集合体を試作し、ガウスメーターでそれぞれの磁束密度分布を測定した。試作した磁石構造のパラメータを表1に示

した。PPM 構造の磁石材料にはR33Hを用いた。実測用ガウスメートルの型番及び本研究に用いる測定用ステージなどの計測装置は表2にまとめている。

図7に両構造のy方向における磁束密度分布の実測結果と対応の解析結果を示す。リフトオフ距離は0.5mmである。Halbach構造はPPM構造より強力な磁束密度を示すことが実測データから観察できる。解析では、縦・横磁化磁石ともにそれぞれ均一な磁気特性を有すると仮定したので、得られた磁束密度分布は辺縁効果を除いて、均一的である。一方、実測結果には磁束密度分布のピーク値のばらつきが観察された。これは各単体磁石の特性がばらつき、特に磁石構造を試作する際に生じた、ワーキング面における磁石の端面の不揃いがある原因と考えられる。なお、実測と解析の磁束密度分布は少し異なったが、それは、実測用磁石のコーティング層(厚み10µm程度)、作製プ

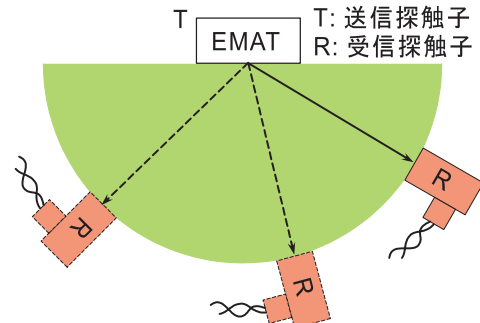
ロセスによる加工層の存在 特に製作寸法の誤差、及びガウスメートルのホール素子の位置確認誤差などの総合影響と考えられる。全体的に、実測と解析磁束密度分布は良く一致すると結論できる。

7. PPM 構造とHalbach 構造SH波EMATの超音波指向性分布の実測結果

前節で試作したPPM構造とHalbach構造に、コイルを付けてSH波EMATを作製し送信探触子として、図8(a)のような半円筒状試験片(SUS304、半径100mm)を用いて超音波指向性を測定した。受信用の探触子には表2に示した圧電素子SH波垂直探触子を用いた。図8(b)で超音波指向性の規格化実測結果と解析結果を比較する。解析は0.1°ごとに、実測は5~85°の範囲で5°ごとに行い、周波数は700kHzと900kHzを用いた。Halbach構造SH波EMATはPPM構造SH波EMATより超音波音圧が強力であることが実測結果からも確認された。超音波周波数の増加に伴い、解析と実測の指向性が共に鋭くなるが、実測指向性は解析指向性より広がり大きい特徴がある。これには二

表2 本研究で用いた測定装置一覧

名称	モデル	メーカー
ガウスメートル	HGM-8300-2V	(株)エーデーエス
ホール素子	HGM型専用A-1型	(株)エーデーエス
XYステージ	ALD-904-H1PB	中央精機(株)
Zステージ	ALZ-230-C2P	中央精機(株)
制御用コンピューター	Windows OS	-
GPIBカード	PCI-GPIB(Windows Me/9x用)	NI社
制御用ソフト	LabVIEW	NI社
高電圧探傷器	RAM-5000	RITEC社
デジタルオシロスコープ	waverunner LT584M	LeCroy社
SH波垂直探触子	2Z10 x 10SN	ジャパンローブ(株)



(a) 測定時における探触子と試験片の配置関係

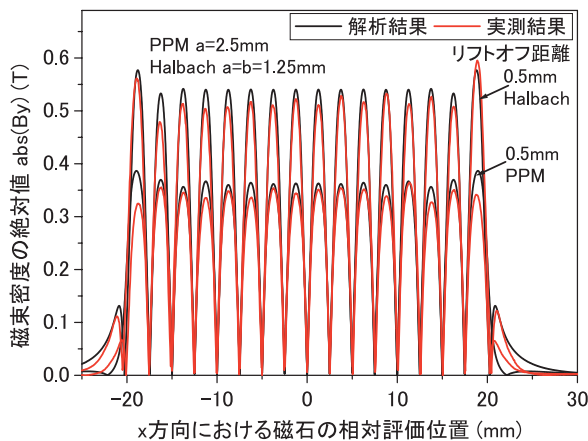
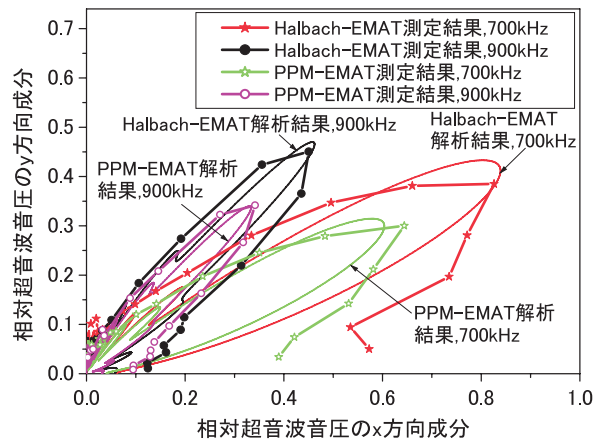


図7 Halbach構造とPPM構造の磁束密度分布の解析と実測結果の比較(リフトオフ距離0.5mm)

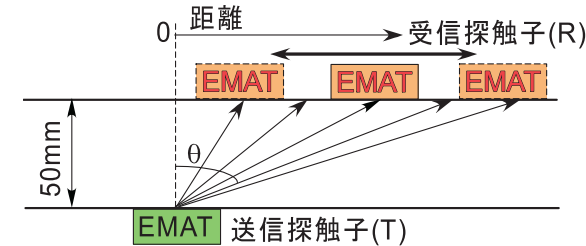


(b) 実測と解析結果の規格化データの比較

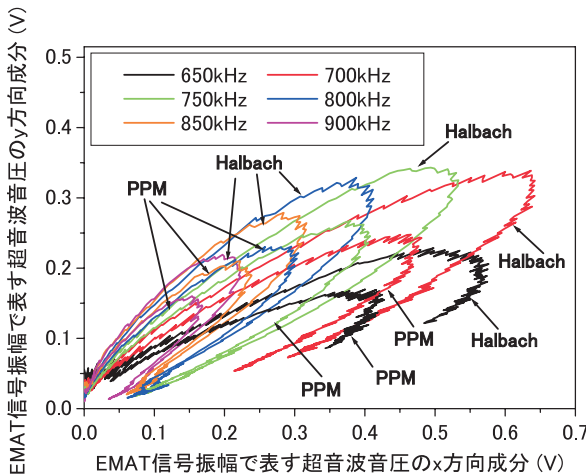
図8 送信SH波EMATの超音波指向性

つの原因が考えられる。一つは、解析周波数は単一周波数であるが、実測に使った超音波信号は単一周波数ではなく、バンド幅が存在するので、全体的に超音波指向性が広がったことが考えられる。もう一つは、受信SH波垂直探触子は点ではなく、ある面積を持つので、分解能が低下して、分布が広がったものと考えられる。解析で求めた両磁石構造SH波EMATの超音波音圧比は1.38 - 1.39(注意：縦、横磁石の残留磁束密度が異なる)であるのに対し、実測の超音波音圧比は1.3程度で、ほぼ一致するといえる。

実探傷は原子炉容器の内面欠陥の検出であるので、これに対応した状況でのSH波EMATの超音波指向性を把握する必要がある。図9(a)に実探傷状況を模擬したEMATの超音波指向性測定法を示す。平板材の片面に送信(Halbach構造あるいはPPM構造)SH波EMATを固定し、その反対面において、受信(PPM構造)SH波EMATを図に示すように平行移動しながら、送信探触子からの超音波信号を受信する。受信信号の振幅と対応する超音波屈折角との関係から換算した実探傷時相当のSH波EMATの超音波指向性を図9(b)に示す。



(a) 測定時における探触子と試験片の配置関係



(b) 音圧分布の測定結果

図9 実探傷におけるSH波EMATの超音波指向性

す。実測は650kHzから900kHzまで50kHzごとに行った。Halbach構造とPPM構造SH波EMATの超音波音圧ピーク値の比は約1.33~1.37である。この値は解析結果の1.38~1.39とほぼ同じである。注意すべきは、ここで評価したのは送信探触子から仮想欠陥位置(受信探触子)までの片道の超音波伝播距離における仮想欠陥位置での超音波音圧分布である。実探傷においては、上記仮想欠陥位置に届いた超音波音圧分布がそこで反射され、送信探触子位置に戻った信号が受信されるので、実際の受信信号とは異なると考えられる。さらに、受信EMATも送信EMATのように指向性特性を持ち、各方向の超音波信号に対する感度が異なるので、図9(b)の測定結果は仮想欠陥位置における本当の超音波指向性とも異なり、超音波指向性分布の参考データと理解されたい。図9(b)に示した最強の超音波音圧分布は周波数700kHzで現れている。

8. SH波EMATの表面欠陥検出性の実測

前節のHalbach構造とPPM構造SH波EMATを用い、SUS304板材(板厚T=50mm)の内面人工スリットの検出性を検討する。

探傷は表3に示す二つの試験片に加工した寸法の異なる8種類の表面スリットを対象に、図10の送受信EMAT配置で行う。EMATをスリットと反対表面に配置することは、容器の外表面から内面欠陥を探傷することに相当する。前節により、超音波音圧の最大ピークは周波数700kHzの場合であるので、周波数700kHzを用いて探傷を行う。

周波数700kHzに対応する超音波屈折角(約63°)と試験片の厚みから、送信EMATの最大超音波音圧位置をスリットの開口に向かうように設定して測定を行った。

表3 スリット仕様と両構造EMATの信号振幅の比較(P:PPM H:Halbach)

試料	スリット寸法(mm)	P振幅(V)	H振幅(V)	H/P
No 1	75% T × 25	0.17539	0.23746	1.354
	75% T × 12.5	0.14276	0.19406	1.359
	10% T × 25	0.10550	0.14417	1.367
	10% T × 12.5	0.08941	0.11462	1.282
No 2	5% T × 25	0.10874	0.14401	1.324
	5% T × 12.5	0.086507	0.10613	1.227
	20% T × 12.5	0.29770	0.37732	1.267
	50% T × 6	0.14460	0.19591	1.355

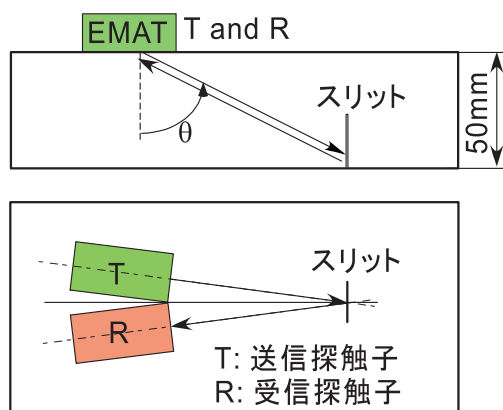
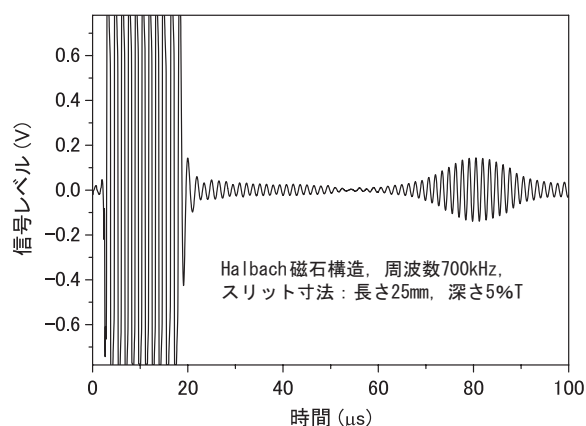


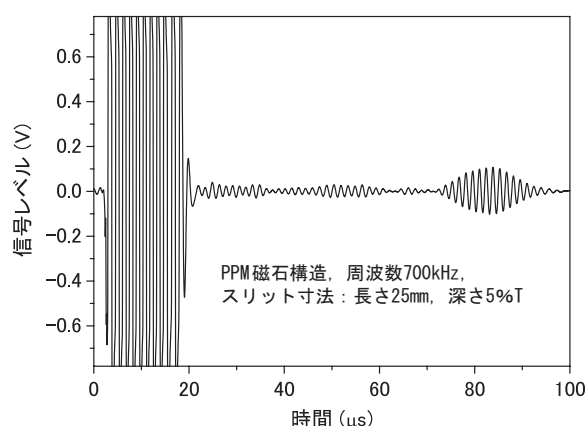
図10 欠陥検出用SH波EMATの実験配置

図11(a)と(b)は、それぞれHalbach構造とPPM構造送信EMATを用い、長さ25mm、深さ板厚5%(25mm×5%T)のスリットに対して、同じ受信EMATを用いて得られた反射波信号(80μs付近、

300回平均)である。Halbach構造EMATの信号振幅はPPM構造EMATより強力であることが観察できる。それぞれの寸法のスリットから測定した反射波信号の振幅を抽出し、その比を表3にまとめる。いずれのスリットにおいても、Halbach構造EMATから得られた欠陥信号はPPM構造EMATから得られた欠陥信号より大きい。超音波信号の振幅比は、解析及び測定超音波音圧比の結果に近い値(1.3程度)が得られた。なお、No 1とNo 2の二つの試験片のスリット信号レベル(例えば、No 1のスリット75%T×12.5とNo 2のスリット20%T×12.5)が明らかに異なるが、これは、機械加工による試験片の表面磁性化程度が試料No 2のほうが試料No 1より強いことが原因と考えられる。磁性化される程度の高い試験片はEMATの超音波信号強度も高いと思われる。一言付加えると、「もんじゅ」原子炉容器の外表面は磁性化程度が低いと想定されるので、通常非磁性体材料の探傷に相当する。



(a) Halbach構造EMAT信号



(b) PPM構造EMAT信号

図11 寸法25mm×5%Tスリット欠陥におけるHalbach構造とPPM構造SH波EMATの検出信号の比較

9. おわりに

本研究では、高磁場配置型Halbach磁石構造をPPM磁石構造の代わりに電磁超音波分野に初めて導入し、その磁束密度分布特性、SH波EMATとする超音波音圧分布特性を解析と実測の両面から検討・評価するとともに、人工欠陥の検出を試みた。

Halbach構造は、PPM構造より強力な磁束密度分布を有することを、実測と解析により示した。また、これまでに明らかではなかったHalbach構造の磁石高さによる構造磁気特性への影響を検討し、磁石高さLを適切に選ぶことにより磁石構造全体の軽量化が可能であることを明らかにした。

Halbach構造SH波EMATはPPM構造SH波EMATより1.4倍程度の超音波音圧の増加が可能で、実測と解析の両面からそれを検証した。

人工欠陥に関する検出性については、Halbach構造SH波EMATはPPM構造SH波EMATより高レベルの検出信号が得られ、高欠陥検出性が確認された。なお、自然欠陥の検出性については、これからの課題として、今後検討する予定である。

上記の解析と実測結果から、Halbach構造はPPM構造より優れた特性を有し、電磁超音波分野での活用が期待される。

ただし、Halbach構造は扁平状の横磁化磁石を

用いるので、高温環境において、熱減磁により横磁化磁石の不可逆減磁が生じる可能性があるため注意が必要である。これについては、磁石構造設計の初期段階で適切な高温用磁石材料を選定することが必要である。Halbach構造の高温特性については、別の論文で論じることにする。

本研究では、実測と解析結果が良く一致することを示し、解析手法の妥当性を証明した。これにより、解析手法のメリットを十分に利用し、磁石構造パラメータの最適設計によるSH波EMATの高性能軽量化設計が可能と考えられる。

本研究の解析手法は、他の超音波モード用EMATの開発設計にも適応できる。

謝辞

本研究進行に当たって、信越化学工業株式会社の大橋健博士からHalbach磁石構造に関する貴重な助言を頂き、また、非破壊検査株式会社の横山邦彦氏から実験測定についてアドバイスを頂きました。この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 仲村喬, 林道寛, 他: “「もんじゅ」ISIシステムの基本構想と展開”, 三菱重工技報, Vol.23, No.6, pp.65-70(1986)。
- 2) H.Rindo, N.Mitabe et al.: “Research and Development on In-Service Inspection System for Reactor Vessel of FBRs”, ASME, ICONE 2 (Second International Conference on Nuclear Engineering, San Francisco, California, U.S.A.(1993))
- 3) R.B.Thompson: “A Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves”, IEEE Trans. On Sonics and Ultrasonics, SU-20, pp.340-346(1973).
- 4) B.W.Maxfield, A.Kuramoto et al.: “Evaluating EMAT Designs for Selected Applications”, Materials Evaluation, Vol.45, pp.1166-1184(1987).
- 5) R.B.Thompson: “Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers”, in Physical Acoustics, Vol.XIX, Edited by R.N.Thurston and A.D.Pierce,

New York, Academic, pp.157-181(1990).

- 6) 川島捷宏: “電磁超音波の基礎と応用”, 非破壊検査, Vol.34, pp.796-803(1985)。
- 7) K.Hogberg: “Ultrasonic Testing Using the EMAT Technique-Electro Magnetic Acoustic Transducer”, Materials and Design, Vol.14, No.4, pp.251-252(1993)。
- 8) H.J.Saltzburger, G.Hubschen et al.: “Electromagnetic Ultrasonic(EMUS) Probes: State of the Art and Developments for Application in Nuclear Power Plants”, Proceedings of the 12th International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, pp.137-142(1993)
- 9) B.W.Maxfield and C.M.Fortunko: “The Design and Use of Electromagnetic Acoustic Wave Transducers (EMATs)”, Materials Evaluation, Vol.41, pp.1399-1408(1983)
- 10) K.Sawaragi, H.I.Saltzburger et al.: “Improvement of SH-wave EMAT phased array inspection by new eight segment probes”, Nuclear Engineering and Design, Vol.198, pp.153-163(2000)
- 11) Y.Kurozumi, M.Higashi et al.: “Performance Characteristics of Electromagnetic Generation and Detection of Shear Horizontal Waves by Electromagnetic Acoustic Transducers”, Materials Evaluation, Vol.59, No.5, pp.638-644(2001)
- 12) C.F.Vasile and R.B.Thompson: “Excitation of Horizontally Polarized Elastic Waves by Electromagnetic Transducers with Periodic Magnets”, Journal of Applied Physics, Vol.50, p.2583(1979)
- 13) C.M.Fortunko: “Ultrasonic Detection and Sizing of Two-Dimensional Defects as Long wavelengths”, Applied Physics Letters, Vol.38, p.980(1981)
- 14) C.M.Fortunko and J.C.Moulder: “Ultrasonic Inspection of Stainless Steel Butt Welds Using Horizontally Polarized Shear Waves”, Ultrasonics, May, p.113(1982)
- 15) K.Halbach, J.Chin et al.: “A permanent magnet undulator for Spear”, IEEE transactions on Nuclear Science, Vol. 28, pp.3136-3138(1981)
- 16) 坪井始, 内藤督: “数値電磁界解析法の基礎 - 日本AEM学会: 電磁力応用シリーズ1”, 養賢堂, pp.1-10(1994).
- 17) 河野照哉: “電気磁気学-電気系基礎シリーズ1”, 朝倉書店, pp.109-113(1983)
- 18) 超音波便覧編集委員会: “超音波便覧”, 丸善株式会社, p.28(1999)。