

鋳造金属に生じる内部欠陥の渦電流非破壊検査

Eddy Current Testing for Internal Defect inside Metal Casing

長田 尚一郎^{*1}(正員), 甲斐 悠史^{*1}(学生員), 榎園 正人^{*2}(正員)

Shoichiro NAGATA (Mem.), Hisafumi KAI (Stu. Mem.), Masato ENOKIZONO (Mem.)

An eddy current testing for internal defects of metal casting is presented. This paper presents aluminum castings are evaluated by multi-frequency excitation and spectrogram (MFES) method. And, X-ray CT inspection is applied in order to verify existence of internal defects. As the results, characteristic spectrograms of internal defects are obtained with some specimens. From the comparison spectrograms and CT scan images, distribution of internal defects is discussed.

Keywords: eddy current testing, MFES method, internal defect, metal casting, X-ray CT

1 緒言

鋳造は機械加工や溶接なしに最終製品形状に近い複雑な形状を持つ製品を安価に生産することができ、自動車部品や機械構造部品の大量生産など広く産業で利用されている。しかし鋳造においては鑄型に流し込んだ熔融金属が凝固する過程で、割れや寸法不良といった外観の異状に加えブローホールやひげ巣といった内部の異状が発生し、品質面でバラツキが生じることがある。

製品内部に存在する欠陥の状況を具体的に把握するためには製品を破断・切断する破壊検査、もしくは非破壊検査が必要である。内部欠陥の非破壊検査手法として超音波探傷検査、放射線透過検査などがあるが、高価な測定機器を使用する必要があり放射線の利用においては取り扱いに注意を要する。そこで本研究では渦電流非破壊検査を鑄物内部の空孔欠陥探知に適用している。渦電流非破壊検査は検査対象物に対して非接触かつ高速で探傷でき比較的安価に計測システムを構成できる利点を有する。また検査対象物に磁気的な影響を与えるのみで取り扱いが容易である。

渦電流非破壊検査を鑄物内部の空孔欠陥探知に適用するにあたり、多重周波数励磁スペクトログラム (MFES) 法を使用して研究を進めている[1,2]。磁束や渦電流の試料に対する浸透深さは周波数に依存する。MFES 法では検査対象物の励磁に多重周波数を使い欠

陥信号の周波数特性を明らかにすることで、欠陥の存在のみならず欠陥の深さに関する情報を一度に多数得ることができる。

これまで簡易的に空孔を模した人工欠陥試料に対し MFES 法を使った測定をおこない、欠陥位置を谷とする M 字型の信号が得られること、そしてその周波数特性を明らかにした[3]。しかし実際の鑄物では形状が複雑なことに加え寸法精度や表面状態が悪く、先に見られた欠陥信号の特徴を確認することが困難であった。複雑な形状をもつ鑄物でも寸法精度や表面状態が良く、形状的に等価であれば空孔の検出方法としてサンプル試料と無欠陥試料の測定結果を比較することも考えられるが、形状に個体差のある鑄物の評価には適用できない。そこで本報告ではまず空孔に特化した非破壊評価をおこなうことにした。渦電流非破壊検査の適用と検査結果の検証を考慮に入れシンプルな形状をもつ鑄物を鋳造し、MFES 法による測定後、エックス線 CT による検査結果の検証をおこなったのでこれを報告する。

2 測定試料と実験方法

2.1 測定試料

今回、測定に使用する試料としてアルミを材質とした非鉄鑄物を製作している。非磁性であるため透磁率は空気中のものとほぼ等しい。鑄型には砂型を使い、アルミを電気炉で溶解 (800°C程度) させた後、自然給湯により鑄込みをおこなっている。渦電流非破壊検査では、表皮効果の影響により磁束や渦電流が試料表面

連絡先: 長田 尚一郎, 〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西 1-1, 宮崎大学工学部電気電子工学科,
e-mail: nagata@ee.miyazaki-u.ac.jp

^{*1}宮崎大学 ^{*2}大分大学

近傍に集中する。このため検査したい領域を試料表面近傍に限れば欠陥を探知しやすいのであるが、その一方で試料の表面粗さや形状の影響を受けやすい。したがって、表面状態によっては内部の欠陥を探知できない可能性がある。そこで試料表面が平滑になるようワイヤー放電加工機で $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 18\text{mm}$ のサイズに加工したあと、さらにサンドペーパーで表面を研磨している。なお試料の表と裏の両面を使い測定ができること、検査結果の検証のために工作機械・エックス線検査装置などを使い内部の欠陥を確認することも考慮して上記のようなシンプルな形状としている。

2.2 実験方法

Fig. 1 に本研究で使用する実験装置の構成をブロックダイアグラムで示す。ファンクションジェネレータ (16bit, 10Msps) で MFES 励磁波形を合成、トランスデューサを使い検査試料を励磁する。検査試料に誘導される渦電流分布の変化を磁気センサで検出し、プリアンプを介して増幅、A/D コンバータ (12bit, 10Msps) でデータを収集する。収集したデータに対して周波数解析等の信号処理をおこない、鋳物に存在する内部欠陥の有無を評価する。励磁波形には 500Hz から 4kHz まで 500Hz ごとに正弦波を 8 波重畳した MFES 波形を使用している。

Fig. 2 は検査試料に対する励磁と欠陥信号を採取する役割を兼ねたトランスデューサの構造を示した図である。励磁ヨークにはフェライトコア (TDK PC40EE30-Z) を採用し、左右の脚部に励磁巻線 (UEW 0.3mm) をそれぞれ 25 ターンずつ、中央の脚部に探りコイル (UEW 0.05mm) を 10 ターン施してある。探りコイルは、局所的な欠陥信号を採取するため、空間的な分解能を上げられるよう、断面積を $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ としている。トランスデューサと検査試料とのリフトオフは 0.1mm である。

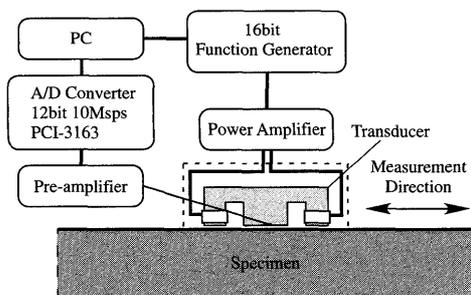


Fig. 1 Measurement system for MFES method.

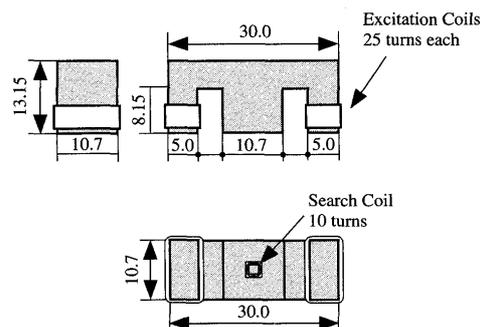


Fig. 2 Construction of a transducer.

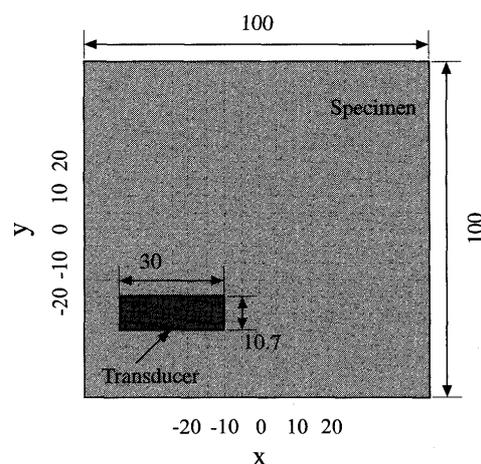


Fig. 3 Measurement area.

Fig. 3 は検査試料の測定範囲を示した図である。今回、新たにアクチュエータ (EZSM4SD030MK: オリエンタルモータ) を計測システムに組み込み、一軸方向のみではあるがトランスデューサの精密な位置決めと検査時間の短縮をはかっている。アクチュエータを使いトランスデューサを移動させる方向を x 軸と定め、 $\pm 25\text{mm}$ の範囲にわたって測定する。アクチュエータの移動幅は 0.5mm である。また y 軸に関しては x ステージを使い手でトランスデューサを移動させる。y 軸 $\pm 25\text{mm}$ の範囲を移動幅 5mm で測定したのち、結果に応じて任意の箇所を再度測定する。

3 実験結果

たとえ試料を製作しても内部に欠陥が発生するとは限らない。よって試料を複数個 (今回は 5 個製造した)、製作し測定をおこなった。検査結果の検証方法については試料を一度破壊すると MFES 法による再評価ができなくなるため、工作機械を使用すると切削しては確認するといった作業が繰り返し必要なため多くの時

間と手間がかかることを考慮し、エックス線検査装置 (inspeXio SMX-225CT : 島津製作所) を使用することにした。使用した装置はスライスピッチ 0.217mm で CT スキャンでき詳細な断層画像を得ることが可能である。

3.1 MFES 法による測定結果

Fig. 4 は内部欠陥の存在が確認できた試料 (裏面にあたる) の一つである。試料表面の特徴として直径 1mm 以下の欠陥が無数に存在している。

MFES 法による測定結果を Fig. 5 から Fig. 13 に示す。励磁磁界と比較して渦電流による反抗磁界は小さく、検出される欠陥信号もまた小さい。そこで周波数間の信号の変化がわかりやすくなるよう、各周波数について信号 (x 軸±25mm, 101 点) の平均値を求め、差し引くことでバックグラウンドを除去している。

Fig.5 は y 軸-35mm を x 軸±25mm にわたって測定した場合のスペクトルである。試料の表面欠陥が影響し、高域の周波数に向かって信号が若干変化している。

Fig.6 は y 軸-30mm の位置におけるスペクトルである。信号の変化は乏しいが周波数 1.5kHz 近傍で M 字型の欠陥信号を得ている。

Fig. 7~Fig. 10 に示すスペクトルでは 500Hz から 4kHz にわたるほぼすべて周波数範囲で M 字型の欠陥信号を得ている。高域の周波数で表皮効果が顕著なため欠陥信号は周波数軸途中で減少に転じる。どのスペクトルも人工欠陥で明らかにした内部欠陥の周波数依存性がよく現れている。y 軸-15mm で明瞭な欠陥信号を得ている。

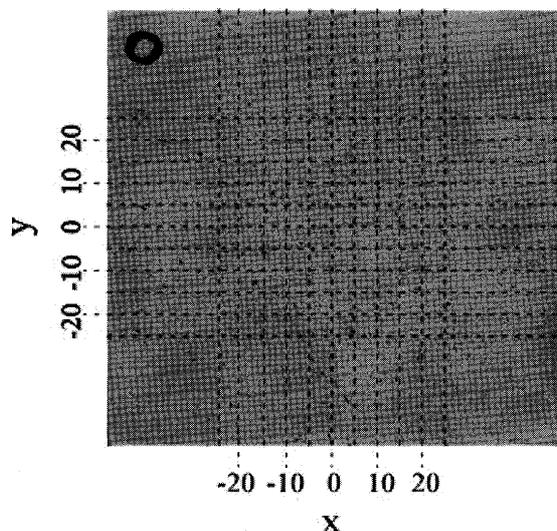


Fig. 4 Aluminum casting.

Fig. 11 と Fig. 12 に示すスペクトルでは前者がほぼすべての周波数範囲で、後者が周波数 1.5kHz 近傍で M 字型の欠陥信号を得ている。また Fig.6~Fig.10 のスペクトルよりも欠陥信号が正の位置で分布していることがわかる。y 軸 0mm で欠陥信号は変化に乏しい。

Fig. 13 からは Fig.6~Fig.12 に見られる欠陥信号を確認できない。以上、y 軸-30mm から 0mm にわたる広い測定範囲で周波数依存性のある特徴的な欠陥信号が現れている。

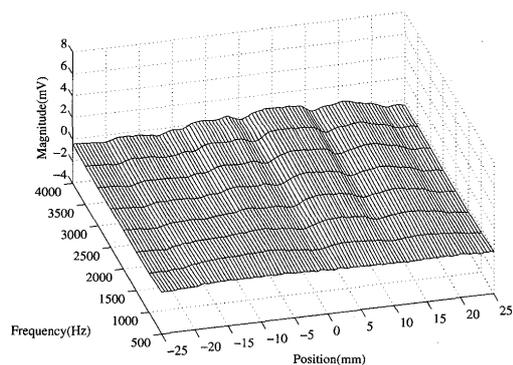


Fig. 5 Spectrogram of y axis -35mm

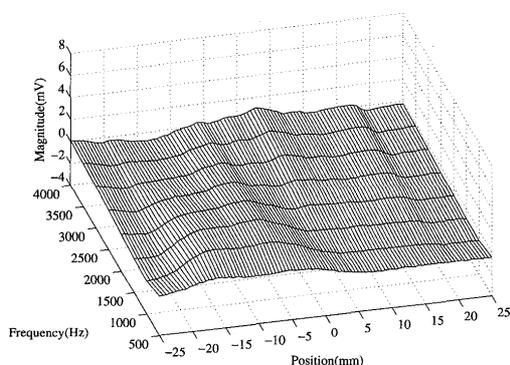


Fig. 6 Spectrogram of y axis -30mm.

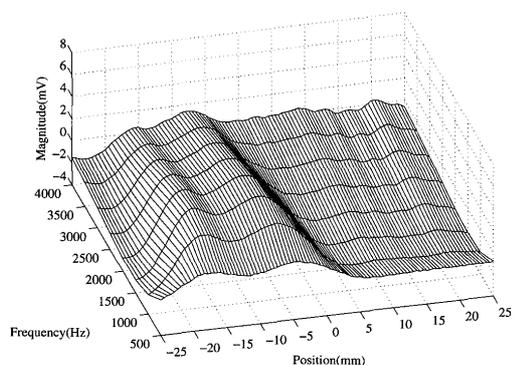


Fig. 7 Spectrogram of y axis -25mm.

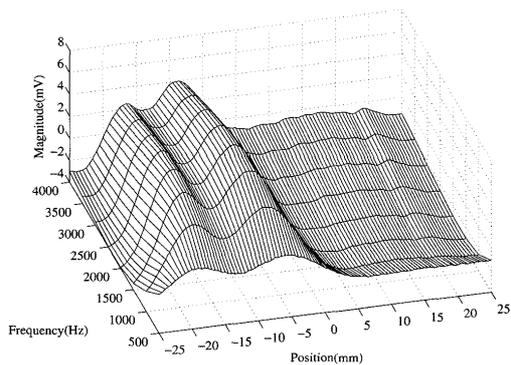


Fig. 8 Spectrogram of y axis -20mm.

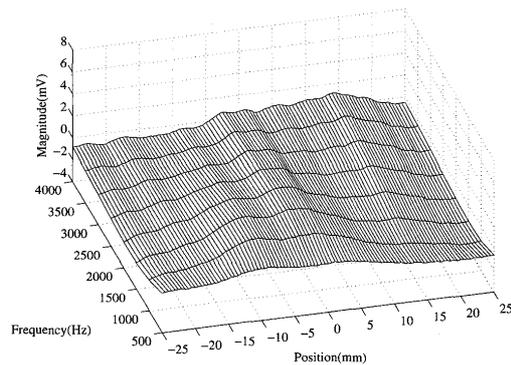


Fig. 12 Spectrogram of y axis 0mm

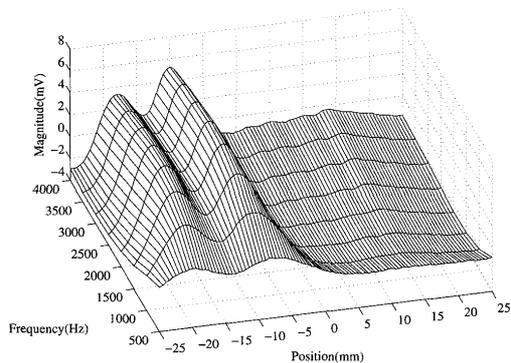


Fig. 9 Spectrogram of y axis -15mm.

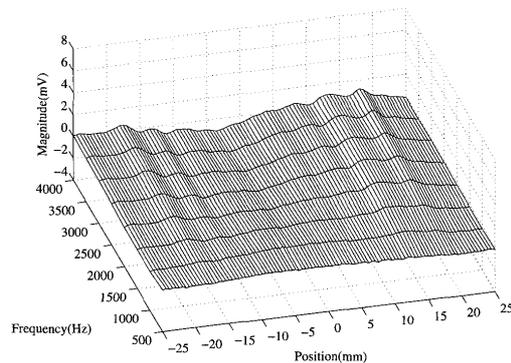


Fig. 13 Spectrogram of y axis 5mm

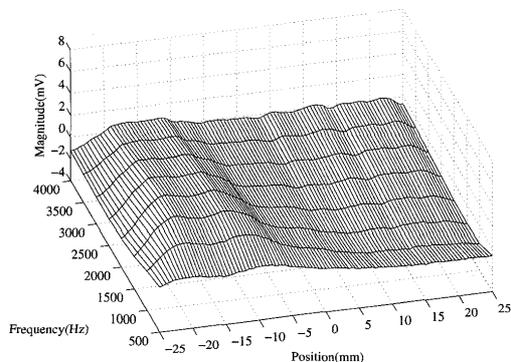


Fig. 10 Spectrogram of y axis -10mm.

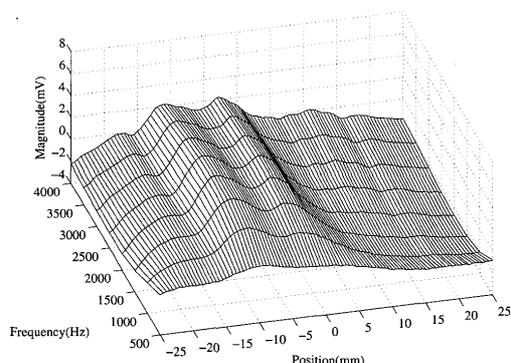


Fig.11 Spectrogram of y axis -5mm.

3.2 エックス線 CT による測定結果

エックス線CTで得られた測定結果から内部欠陥の様子を確認する。Fig. 14はFig. 4に示す試料表面を深さ 0mmとしたときの断層画像である。周波数 500Hzのとき表皮深さが約 3.8mm (ただし、アルミニウムの導電率を $3.5 \times 10^7 \text{ S/m}$, 比透磁率を 1 とする。) となることから、反抗磁界に含まれる情報は表皮深さ以降で微小と考え深さ 1mmから 4mmまでの断層画像を示している。これらの画像から主に2つの欠陥が試料内部に存在していることが確認できる。試料深さ方向について欠陥の空間的な分布をみると、深さ 1mmで欠陥は現れず、深さ 1mmから 2mmの間で欠陥Aに続き欠陥Bが現れる。そして深さ 3mmで欠陥Aは横 10mm縦 15mmとy軸方向に長く、欠陥Bは横 15mm縦 5mmとx軸方向に長くなる。深さ 4mmでは両方ともさらに大きく成長し欠陥Bにおいては左右に分岐する。およそy軸-30mm~0mmの範囲で欠陥が発生していることがわかる。

3.3 測定結果の比較と検証

MFES法で得られた測定結果と断層画像が示す欠陥位置との間に相関があるのかどうか検討する。

Fig. 15 に欠陥 A と欠陥 B が近接する位置でのスペクトル (等高線) を示す。-25mm から 0mm の間で信号が増加している位置が 3 か所存在している。-15mm 側で欠陥 A を, -5mm 側で欠陥 B をそれぞれ検出しているものと考えられる。

Fig. 16 は周波数 1.5kHz で Fig. 6~Fig. 12 のスペクトルが示す M 字型信号の谷の位置を比較したものである。Fig. 6 と Fig. 12 が 1.5kHz 近傍の低い周波数領域で M 字型信号を得ていることから, 上記の周波数を選び欠陥位置を比較することにした。y 軸-10mm から-5mm の間は欠陥 AB が互いにスペクトルに影響を及ぼすことから除いて考えている。Fig. 14 よりトランスデューサが y 軸-30mm の位置にあるとき欠陥位置は-11.5mm を示す。また y 軸-10mm の位置にあるとき-15mm を示し, y 軸-30mm から-10mm の範囲で欠陥位置が右肩下がり移動する。y 軸-5mm のとき欠陥位置は-5mm となり, y 軸-10mm から大きく位置が変化することがわかる。

Fig. 14 中に記す円形のマークはそれぞれ Fig. 16 で示した欠陥位置を表している。スペクトルで確認できる欠陥位置と画像を目で見ても直観的に判断できる欠陥位置は必ずしも一致しない。欠陥信号は渦電流の 3 次元分布の変化を起源として発生するため, 円形のマークは Fig. 14 以外の欠陥形状に関する情報を多く含んでいる。Fig. 14 (c), (d) の断層画像から欠陥 A は xy 軸に対して傾いており, 欠陥 B は y 軸に沿うように位置している。またマークの位置をみるとそれぞれ欠陥と重なりをもつように分布している。このことから試料内部で欠陥が分布する様子をスペクトルの示す欠陥位置から把握することが可能であると考えられる。

Fig. 17 と Fig. 18 は 500Hz から 4000Hz にわたる周波数範囲での最大信号を比較した図である。Fig. 17 は y 軸-19mm から-15mm の最大信号を比較したものであり, y 軸-17mm の位置で最大値を示す。また Fig. 18 は y 軸-6mm から-2mm の最大信号を比較したものであり, y 軸-5mm のとき最大値を示す。ここで Fig. 14 (b) をみると欠陥 A はおよそ y 軸-15mm から-20mm の間で出現し, 欠陥 B は y 軸-5mm から 0mm の間で出現している。このことから M 字型信号を示す欠陥位置のなかでも, 試料表面に近い欠陥部分で信号は顕著であることがわかる。表皮効果により渦電流が試料表面近くを流れようとする性質をもつことから, 試料表面に近い欠陥部分で反作用磁界の変化が大きく, 顕著な信号が得られたものと考えられる。

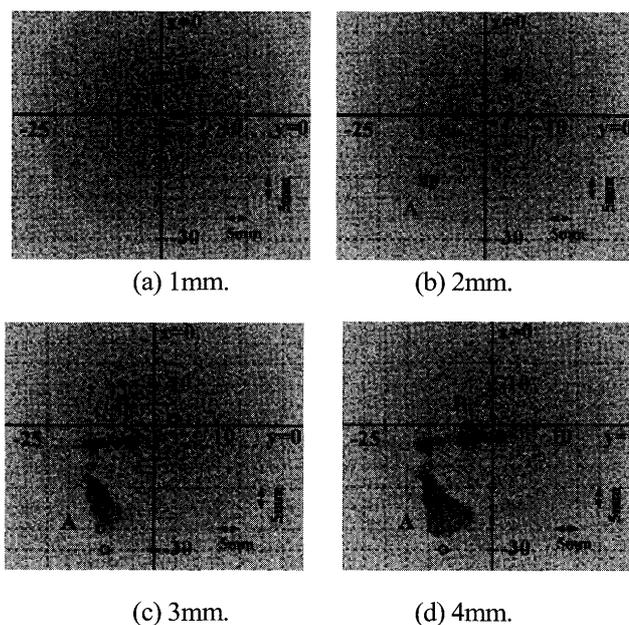


Fig.14 CT scan images of each depth.

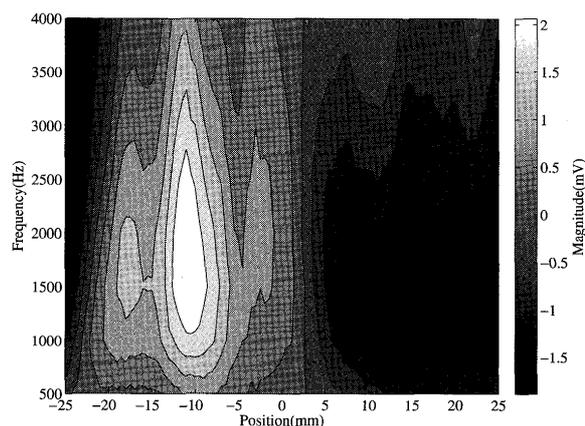


Fig. 15 Spectrogram of y axis -8mm.

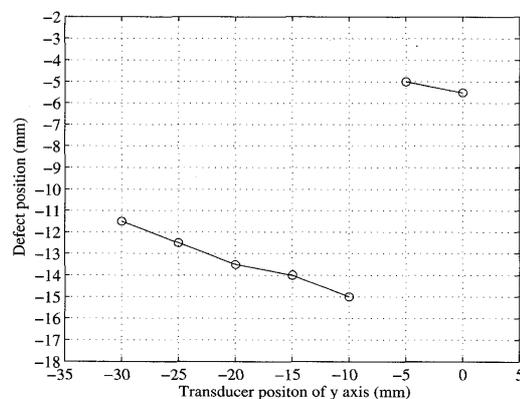


Fig. 16 Comparison of defect positions.

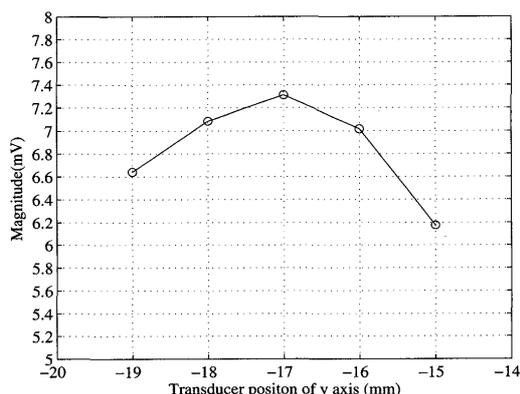


Fig. 17 Comparison of defect signals of y axis -19mm to -15mm.

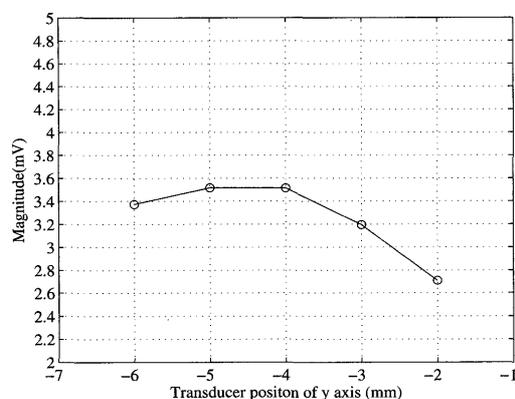


Fig. 18 Comparison of defect signals of y axis -6mm to -2mm.

4 結言

本報告では新たな試料を鋳造し MFES 法による内部欠陥探知をおこなった。またエックス線検査装置を使い実際に内部欠陥を確認するとともに、MFES 法の測定結果を検証した。以下に得られた結果をまとめる。

- スペクトルに周波数依存性をもった M 字型の欠陥信号が現れ、MFES 法で鋳物の内部欠陥探知が可能であることを明らかにした。
- スペクトルが示す欠陥位置から鋳物の内部欠陥の分布を推定できる。また試料表面に近い欠陥部分の位置をスペクトルの大きさから把握することが可能である。

今回、非磁性鋳物の内部欠陥を対象とした非破壊評

価をおこなった。鋳物には磁性体金属も存在するが、磁性体の場合は磁束が試料深さ方向に浸透しづらく、欠陥信号は磁束通路の変化により得られる傾向を示す。試料表面の荒れの影響を受けやすく、非磁性体と比較して磁性体の内部欠陥の評価は困難であると考えられる。

今後はより定量的な評価をおこなうためさまざまな種類の内部欠陥についてデータを収集していく必要がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、試料の鋳造と加工について宮崎大学工学部ものづくり教育実践センターの協力が得られた。またエックス検査装置の利用においては宮崎県工業技術センターにご協力頂いた。この場を借りて心から感謝の意を表します。

(2010年10月15日受付, 2011年2月25日再受付)

参考文献

- [1] S. Nagata, M. Enokizono, T. Chady, R. Sikora, Low Frequency Excitation of MFES, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VIII)*, IOS-Press, pp.183-189, 2004.
- [2] S. Nagata, M. Enokizono, Variable Single-Frequency Excitation and Spectrogram Method, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (IX)*, IOS-Press, pp.109-116, 2005.
- [3] S. Nagata, H. Kai, M. Enokizono, Non-destructive Evaluation for Internal Defect of Metal Casting, *JAPAMED'06 Extend Abstracts - Conference Proceedings*, No.POI2(064), pp41-42, 2009.
- [4] 長田尚一郎, 甲斐悠史, 榎園正人, 鋳造金属中の渦電流非破壊検査, 第33回日本磁気学会学術講演概要集, 12pF-5, p.123, 2009.
- [5] T. Uchimoto, T. Takagi, M. Kurosawa, S. Konoplyuk, T. Abe, Material Evaluation of Cast Iron Using the Eddy Current Method, *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (VIII)*, IOS-Press, pp.159-166, 2004.
- [6] 千々岩健児, 鋳物の現場技術, 日刊工業新聞社, 1980.