

論説



Paper

磁気センサを利用した丸棒鋼用アレイ渦流探傷技術の基礎開発

渡邊裕之^{*1}, 山田外史^{*2}, 伊藤光宏^{*1}

Development of Magnetic Sensor Based Eddy Current Technique for Surface Inspection of Rod Steel

Hiroshi Watanabe, Sotoshi Yamada, and Mitsuhiro Ito

Synopsis

Eddy current probe to detect longitudinal discontinuities such as seams of wires and bars has been discussed. Conventional encircling coil is hard to detect the longitudinal discontinuities because of the fundamental principal restriction. Moreover, a system using a rotating probe hardly has an ability to support high-speed inspection. Therefore, a probe with array sensors has been developed to detect the longitudinal discontinuities without mechanical rotor.

The spin-valve type giant magnetoresistance (SV-GMR) sensor was used as the detection sensor. It has advantages in high sensitivity, high frequency response characteristic up to 100 MHz, and the integration of the sensor element compared with coil or other magnetic sensors.

The probe is constructed from two excitation coils and 36 detection sensors. The excitation coils are encircling type such as the conventional encircling coils and excited by opposite phase each other. The detection sensors are arranged in the directions of surrounding a rod for examination between excitation coils. The probe has the capabilities to detect the longitudinal notches by sequential scanning with detection sensors. In addition, a correction method for eccentric effect is proposed by taking the addition of signals at position of opposed sensor pair. The present study showed that the probe has the ability to detect the longitudinal notch that depth of 0.3 mm with 5 mm air gap.

1. 緒 言

鋼材の製造工程の中で、表面きずの保証機器として用いられている渦流探傷装置は、磁性／非磁性を問わず適用でき、非接触で高速検査が可能である利点を活かし、古くは 1960 年頃から実用化されてきた¹⁾。

その中で、線材製品については、熱間圧延し、その後コイル状に巻き取って冷却、出荷されるため、冷却後の検査が困難であり熱間圧延中でのきず検査が要求される。そのため、一般的には水冷した貫通コイル方式の渦流探傷装置を用いた検査が行われている^{2)~4)}。ところが、貫通コイル方式は、その原理的な制約からへげきずのような短いきずの検出は可能であるが、圧延方向に延伸された線状きずの検出には不向きである。

線状きずを検出する手法としては回転プローブ方式があり、主に冷間の丸棒鋼の検査に用いられている。一方、熱間線材については、最大 100 m/sec にもなる圧延速度に対応するほど高速に回転させることは難しく、また、プローブを高温の圧延材に接近させることもできないことから、回転プローブ方式の適用は現実的ではない。過去には開発事例⁵⁾や貫通コイル方式との併用で実用化したとの報告もあるが⁶⁾、その後、普及せず現在に至っている。

最近では、プローブを回転させず、多数のプローブを検査部位に配置しておいて、電氣的に走査するアレイ方式が実用化されつつあり⁷⁾、精度や速度が要求される探傷への適用や、さらには熱間への適用なども検討されている。アレイ方式の課題は、多数のプローブを電氣的に切り替えて探傷するため、各プローブ間にばらつきがあ

2008 年 8 月 5 日受付

* 1 大同特殊鋼(株)研究開発本部 (Daido Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 金沢大学 環日本海域環境研究センター, 工博 (Dr., Eng., Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University)

ると探傷性能の低下につながることであり、そのためできる限り特性の揃ったプローブを採用することが重要となる。著者らは、プローブ用プリントコイルの開発を進め実用化したが、より微小なきずを検出するためにはコイルの小型化が必要となり、プリントコイルでは、微細パターンの製作にも限界があり巻数が減って感度低下になることが課題であった^{8)~10)}。

そこで、近年、小型化、高密度化が可能な磁気素子を渦流探傷の検出センサとして用いる事例が報告されていることから^{11), 12)}、磁気素子を利用したアレイプローブを開発し、丸棒鋼の線状きずの検出を試みた。

2. 探傷原理

2. 1 従来探傷法の原理と問題点¹³⁾

渦流探傷法は、コイルによって励起された磁束が試験体内に浸透することで試験体表面に渦電流が流れ、その表面にきずが存在すると渦電流の流れが乱れて磁束が変化するのを測定し、きずを検出する手法である。きずによる磁束の変化を検出するためのプローブとして一般的なのは、同形のコイルを2個併設して差動接続する自己比較方式である。丸棒鋼を探傷する一般的な方法を Fig.1 に示す。差動コイルの配置によって、検出可能なきずの方向が決まり、貫通コイル方式のように長手方向に差動コイルを配置する場合は、円周方向のきずやコイル幅よりも短いきずであれば検出可能であるが、コイル幅よりも長いきずが通過したときには、差動コイルが平衡してしまいきず信号が得られない。

丸棒鋼の線状きずを検出するためには、自己比較形の

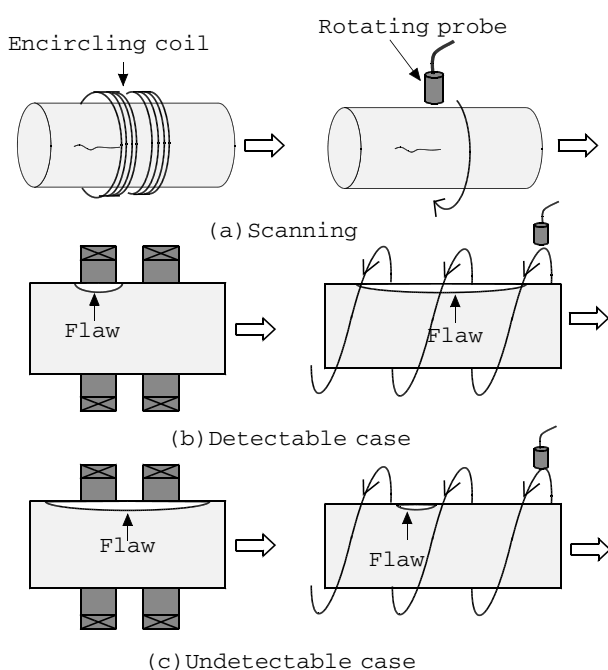


Fig.1. Comparison between encircling coil method and rotating probe method.

プローブを丸棒鋼の周りに回転させる回転プローブ方式が望ましいが、機械的な回転数で探傷速度が制約され、また、一般的には小さいプローブを用いるため、試験材からの距離が離れると急激に感度が低下してしまうという課題がある。

2. 2 磁束検出形プローブ

2個の差動接続による自己比較形の他に、きずによる磁束変化を検出する手段として、単一の縦形コイルを用いた磁束検出方式が提案されている。磁束検出方式は、励磁コイルと検出コイルの向きが直交するように配置され、きずがあるときのみ発生する磁束を検出する手法であり、プローブと材料との距離変動によるノイズが小さいという特徴がある。この方式を利用したものとしては、上置形の Θ プローブなどが実用化されている¹⁴⁾。今回、この磁束検出方式に基づくプローブを試作し、軸方向の線状きずの検出を試みた。

3. プローブ設計

3. 1 プローブ構造

プローブ構造を Fig.2 に示す。励磁は、従来と同様な貫通コイルによって行う。貫通コイル2個を接近させて配置し、 180° 位相が異なる電流により励磁する。この場合、各励磁コイル下では円周方向に渦電流が誘導され、2個の励磁コイルの中間位置では試験材表面に流れる渦電流は打ち消される。

2個の励磁コイルを貫くように試験材長手方向に線状きずが存在すると、渦電流は、きずの下を迂回して流れるか、あるいはきずに沿って軸方向に流れる。このきずに沿って軸方向に流れる渦電流成分によって発生する磁束を検出するため、2個の励磁コイルの間に検出センサを配置する。検出センサは、空間分解能を高めるため、多数のセンサを円周方向に配置することとした。

3. 2 励磁コイル間隔

2個の励磁コイルの間隔を変化させたときに、線状きずに沿って流れる渦電流がどのように変化するかを市販

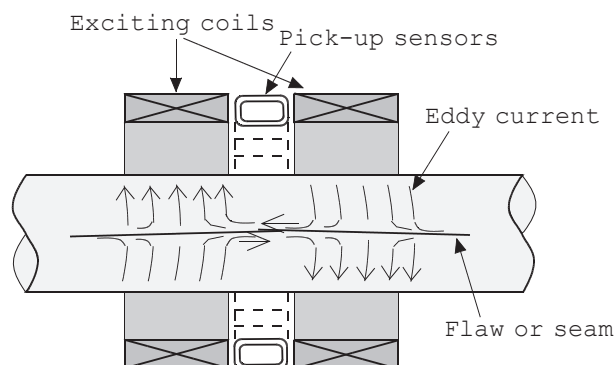


Fig.2. Structure of the probe and induced eddy current around a seam.

のシミュレーションソフトを利用して解析した。その解析条件を Table 1 に、また、結果を Fig.3 に示す。ギャップ 5 mm において、励磁コイルの間隔が 12 mm のときは 2 つのピークが存在するが、8 mm 以下まで接近すると、ピークが 1 つになり、それぞれの励磁コイルによって発生する軸方向渦電流が強め合う。この結果より、励磁コイル間隔は 8 mm 以下が望ましいが、より強調効果を得るためには、検出センサを小型化して間隔を狭くすることが重要となることが分かった。

3. 3 検出センサ数

線状きずを検出するための検出センサ数について検討した。センサ数を決めるにあたっては、きずに沿って流れる渦電流によって発生する磁束の広がりを考慮した。励磁コイル間隔と同様、シミュレーションを行い、Table 2

Table 1. Conditions of numerical analysis on Fig. 3.

Parameter	Condition
Frequency	100 kHz
Work diameter	20 mm
Coil diameter	30 mm
Coil width	14 mm
Excite current	5 A・Turn

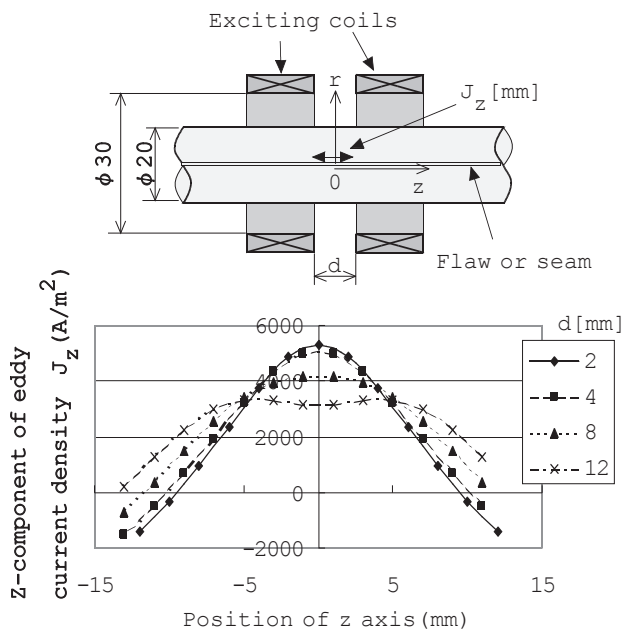


Fig.3. Relationship between distance of exciting coils and axial component of eddy current density.

Table 2. Conditions of numerical analysis on Fig. 4.

Parameter	Condition
Frequency	200 kHz
Work diameter	20 mm
Coil diameter	30 mm
Coil width	6 mm
Space of coils	4 mm
Excite current	25 A・Turn
Pick-up coil	3 Turn

の解析条件にてギャップ 5 mm の位置での磁束変化を求めた結果、Fig.4 に示すようにきずの直上を中心とし、円周方向 $\pm 50^\circ$ の比較的広い範囲で変化が現れることが判明した。従って、検出センサは、 10° ピッチに配置することとした。

3. 4 検出センサの選択

検出センサで検出する磁場は、軸方向の渦電流によって発生する円周方向の水平磁場である。従って、試験材表面に対して垂直方向の磁場を検出する従来のプリントコイルは適用が難しい。そこでまず、Fig.5 に示すように

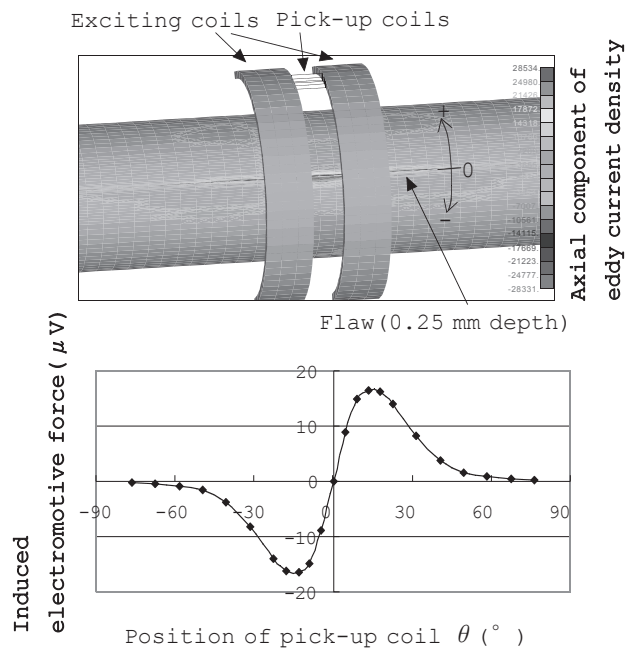
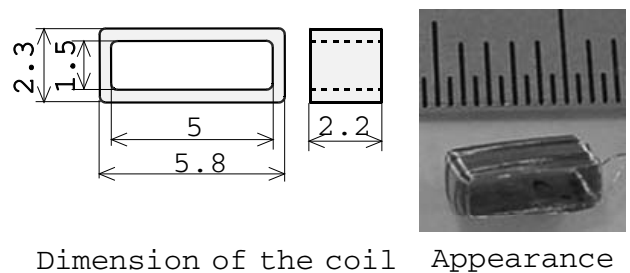
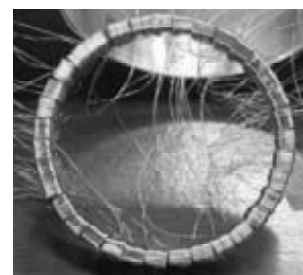


Fig.4. Calculated induced electromotive force at the position of pick-up coil.



Dimension of the coil Appearance



Array sensor with 35 coils

Fig.5. Pick-up coil wound with machine.

巻線コイル 35 個（製作精度の問題で 36 個入らなかったため）をそれぞれのコイルの軸が試験材表面と平行で円周方向となるように配置したプローブを試作してテストした。その結果 Fig.6 に示すように、個々の特性ばらつきが大きいので、きず信号を得ることが困難であった。

そこで、同じウェハから採取することで特性を揃えることのできる磁気センサを検出センサとして利用することを検討した。選択した磁気センサは、小型で、高空間分解能であり、高感度な特性をもつ巨大磁気抵抗効果素子 (giant magnetoresistance sensor:GMR) である。この GMR 素子を渦流探傷のセンサとして用いたものとしては、プリント基板の高密度配線の断線やカケの検出、あるいは平面実装技術でのハンダボールの検出に利用した実施例が報告されている¹⁵⁾。

3. 5 GMR 素子の特徴とプローブ配置

GMR 素子は、Table 3 に示すようにホール素子など他の磁気センサと比べ、周波数特性が直流から 100 MHz 以上と広く、検出感度が高いなどの特徴があり、また、素子のサイズは、数十ミクロンオーダーであるため、アレイによる高密度化が可能となる。GMR 素子の中で今回採用したのは、スピンバルブ形巨大磁気抵抗効果素子 (Spin-valve type giant magnetoresistance sensor:SV-GMR) という

タイプである。この素子は、Fig.7 に示すように磁界変化に対する感度としては、1 軸 (a) は奇関数特性をもち、もう 1 軸 (b) は偶関数特性、残りの 1 軸 (c) は磁界変化に対してほとんど反応しないという特性がある¹⁶⁾。偶関数特性をもつ 1 軸 (b) についても、Fig.8 に示すようにゼロ点付近の微小変化に対してはほとんど変化しないと見なせるため、奇関数特性をもつ 1 軸 (a) を検出すべき磁界の方向となるように配置すればよい¹⁷⁾。また、奇関数特性であるため市販の渦流探傷器に接続して探傷することも可能である。

そこで、検出センサとして用いる SV-GMR センサは、Fig.9 に示すように、奇関数特性をもつ 1 軸が試験材と平行で円周方向となるような向きに揃え、シミュレーションの結果に基づき 36 個を 10° ピッチに配置する。

3. 6 プローブ試作

上述の検討結果に基づき GMR アレイプローブを試作した。プローブ寸法は Fig.10 に示すように、試験材径 ϕ 16 mm、および ϕ 18 mm を対象とし、 ϕ 16 mm のときに、ギャップが 5 mm となるように ϕ 26 mm とした。また、励磁コイルの幅は各 10 mm とし、2 個の励磁コイルの間隔 5 mm に幅 3 mm の溝を加工して、その中に検出センサを配置した。

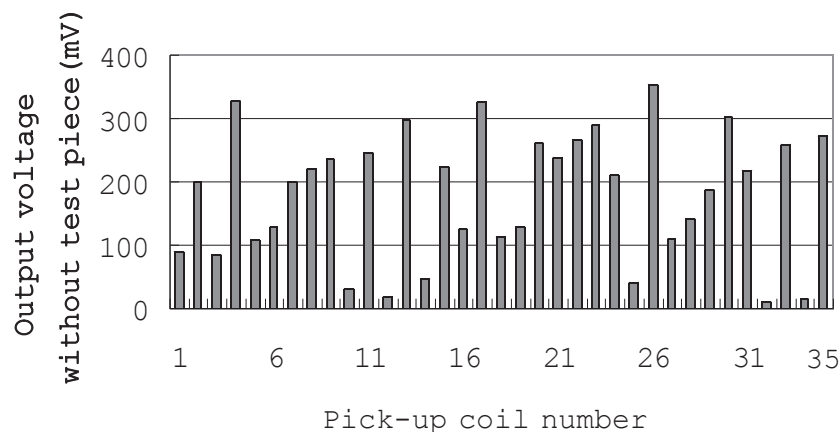
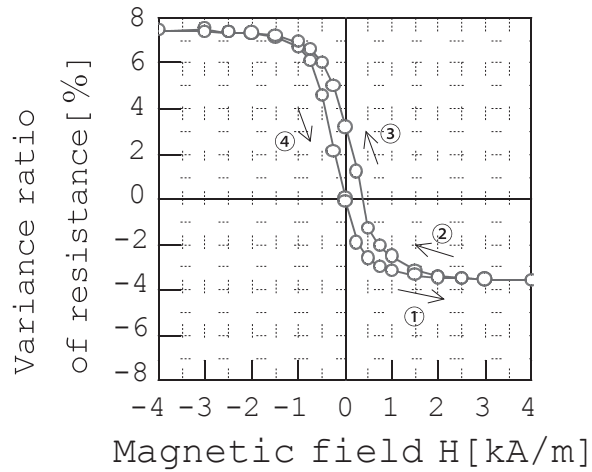


Fig.6. Unevenness of output voltage without test piece.

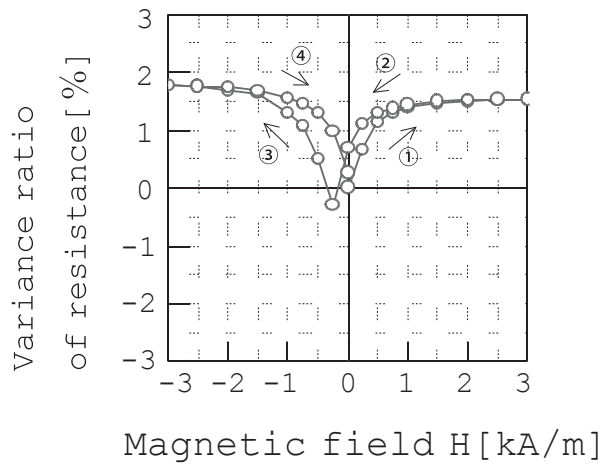
Table 3. Comparisons of magnetic sensors.

Sensor	Range [T]	Sensitivity [%/mT]	Resolution [μ T]	Frequency [kHz]
Hall element	10	—	1	10
AMR	0.1	2	1	1000
GMR	1	2	1	>100000
SV-GMR	0.01	200	0.01	>100000
MI element	0.001	1000	0.001	1000

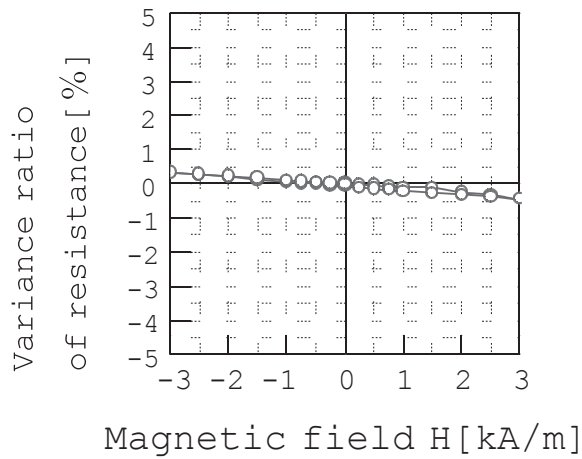
AMR:anisotropic magnetoresistive, MI:magneto impedance



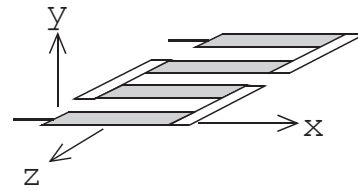
(a) z-direction



(b) x-direction



(c) y-direction



SV-GMR element

Fig.7. DC large-signal characteristics of SV-GMR sensor.

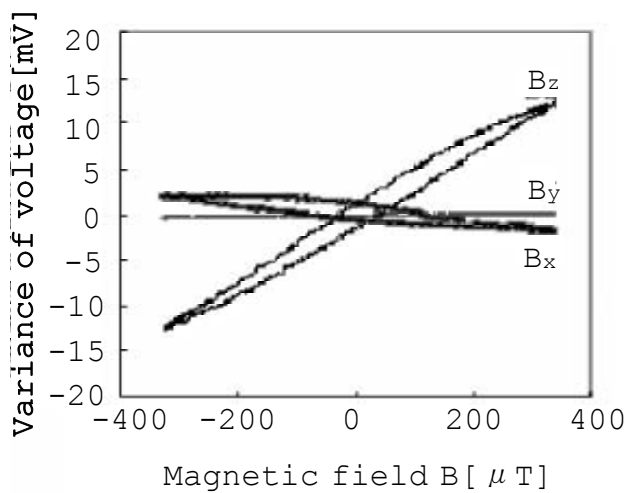


Fig.8. AC small-signal characteristics of SV-GMR sensor ($f=1.0$ kHz).

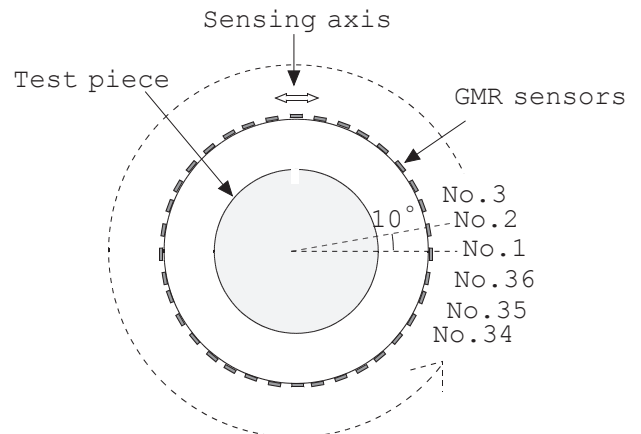


Fig.9. Layout drawing of GMR sensors and sensing axis.

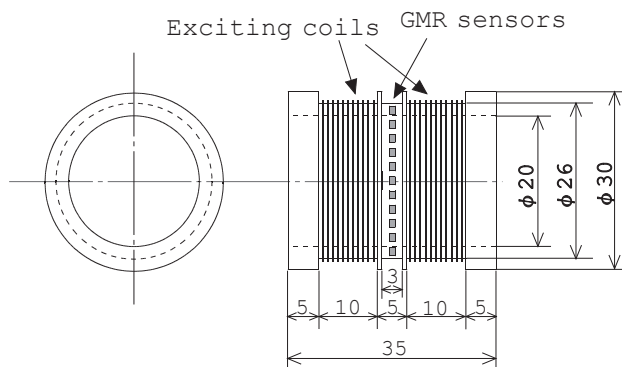


Fig.10. Schematic of probe.

4. 探傷試験

4. 1 探傷方法

試作したプローブの検出能を評価するため、人工きず加工した SUS316 丸棒鋼を用いた。人工きずは、Fig.11 のように長さ 50 mm、深さ 0.3 ~ 0.7 mm を放電加工により製作した。

探傷試験は、Fig.12 に示すように試験材を V ローラで支持し、電動スライダで自動搬送させてプローブ内を通材し、そのときの各検出センサからの信号を処理することで行った。プローブは、XZ ステージ上に配置して、定量的に位置調整を可能とした。また、各検出センサからの信号は、それぞれ同期検波してからコンピュータに取り込んで処理をした。

4. 2 プローブ評価

検出センサは、SV-GMR 素子 4 個をブリッジ配置して定電圧駆動させ、中点電位の変化を出力とした。そこでまず、プローブの特性を評価するため、GMR 素子の抵抗値にばらつきがあるかどうかを中点電位によって調査した。その結果を Fig.13 に示す。グラフより 36 個の中点電位のばらつきは、駆動電圧の 1.0 % 以下であることを確認した。

次に、検出感度のばらつきを評価するため、試験材とプローブが同軸で、人工きずがプローブ内を貫通するように配置し、試験材を回転させて各検出センサからの信号振幅を測定した。その結果、Fig.14 に示すように、平均のきず信号値に対して最大 30 % 程度のばらつきがある

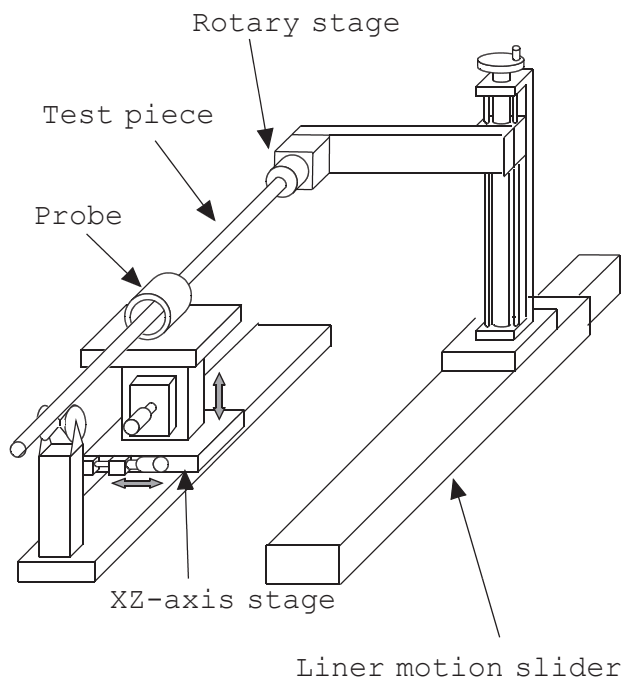


Fig.12. Schematic of experimental apparatus.

ことを確認した。この原因としては、

(ア) GMR 素子自体の感度ばらつき

(イ) GMR 素子のアライメント精度によるばらつきが推測される。

4. 3 探傷結果

きず深さ、およびギャップの検出感度への影響について調査した。φ 16 mm、φ 18 mm の各試験材の人工きずを探傷し、その信号値を φ 16 mm、深さ 0.7 mm の信号値にて正規化した結果を Fig.15 に示す。グラフより、ギャップ 1 mm の変化で、同一深さのきず信号値が約 1/2 となり、さらに、きず深さ 0.3 mm の信号値は 0.7 mm の約 1/4 となった。

次に、長手方向に試験材を搬送させて探傷したときの結果を Fig.16(a) に示す。試験材先端の健全部にて全検出センサの出力をゼロボルトに調整し、その後、試験材を搬送させて、全長にわたるデータを収集した。その中で、図に示す健全部 A、および B、また 0.3 mm と 0.7 mm のきず部の信号波形を Fig.16(b) に示す。この波形は、各断面において、36 個検出センサの出力を繋ぎ合わせたもの

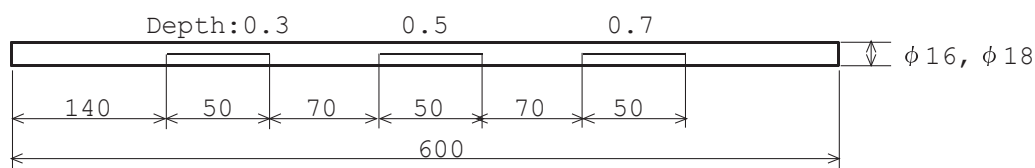


Fig.11. Test piece with EDM notches.

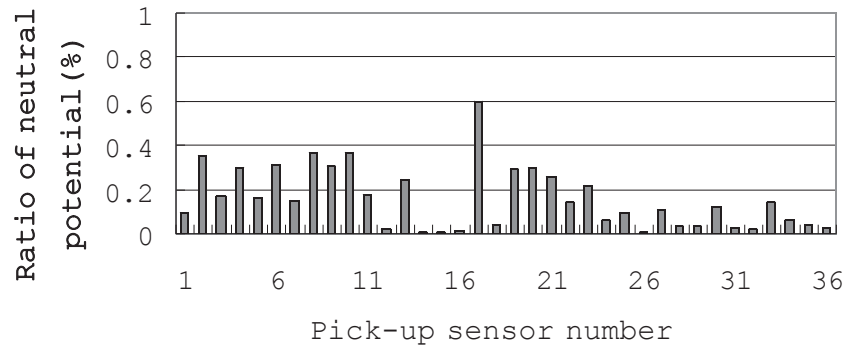


Fig.13. Unevenness of ratio of neutral potential to driving voltage.

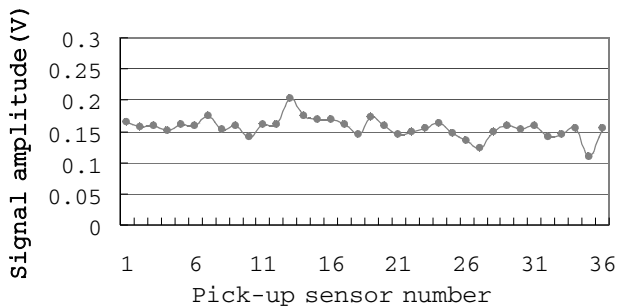


Fig.14. Unevenness of flaw signal amplitude.

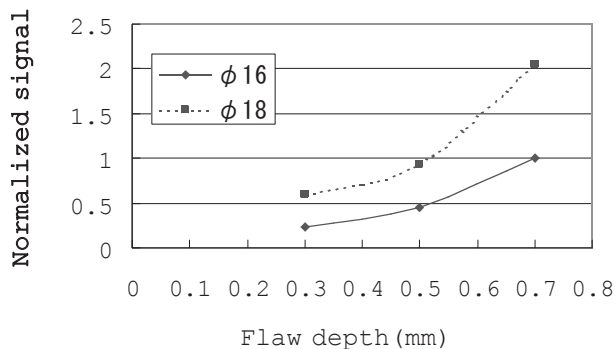


Fig.15. Relationship between flaw depth and normalized signal amplitude.

である。この結果より、0.3 mm および 0.7 mm のきず信号が得られており、その広がり、シミュレーションの結果と同様、きずを中心に約 $\pm 50^\circ$ の範囲であった。

なお、ゼロバランスをとった先端から離れた健全部 B では、きずが無いにもかかわらず 0.3 mm のきず信号より大きな信号変化が現れている。この変動は、 360° を一周期とした変動成分であることから、単なる検出センサのばらつきではないと推定し、その原因調査と対策を実施した。

4. 4 偏芯による信号変化と対策

プローブ内で試験材が偏芯すると、健全部においても円周方向の磁界成分が現れ、検出センサからの出力として検出されると推定した。試験材に対してプローブを X 方向および Z 方向に 0.5 mm ずつ偏芯させたときの信号

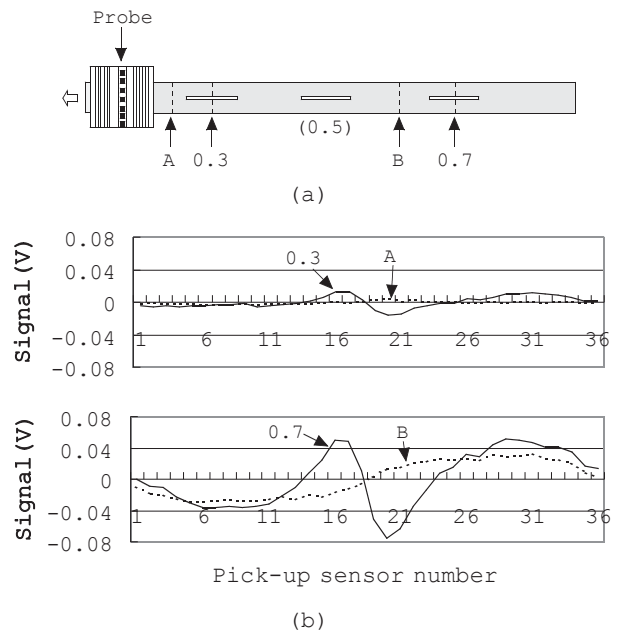


Fig.16. Signal amplitude at the sound positions and flaw positions.

変化を Fig.17 に示す。偏芯した方向にあるセンサについては、左右対象であることから円周方向の磁界成分は発生しないことが分かる。従って、 360° で 1 周期となる信号変化は、プローブ内での試験材の偏芯によるものと判断し、その対策として 180° 対向するセンサ同士の出力の和をとることでキャンセルすることを試みた。

Fig.16(b) の健全部 B および人工きず 0.3 mm と 0.7 mm の信号に対して、対向するセンサ（例えば No.1 と No.19）の出力和を求めたものを Fig.18 に示す。本処理により、健全部 B の信号振幅が 0.3 mm の信号振幅より小さくなることを確認した。

そこで、 $\phi 16$, $\phi 18$ mm の試験材全長にわたる探傷データに対して対向和で補正してその効果を確認した。その結果、Fig.19 に示すとおり、元データでは確認できなかった深さ 0.3 mm のきず信号が補正により S/N が向上して認識可能となった。

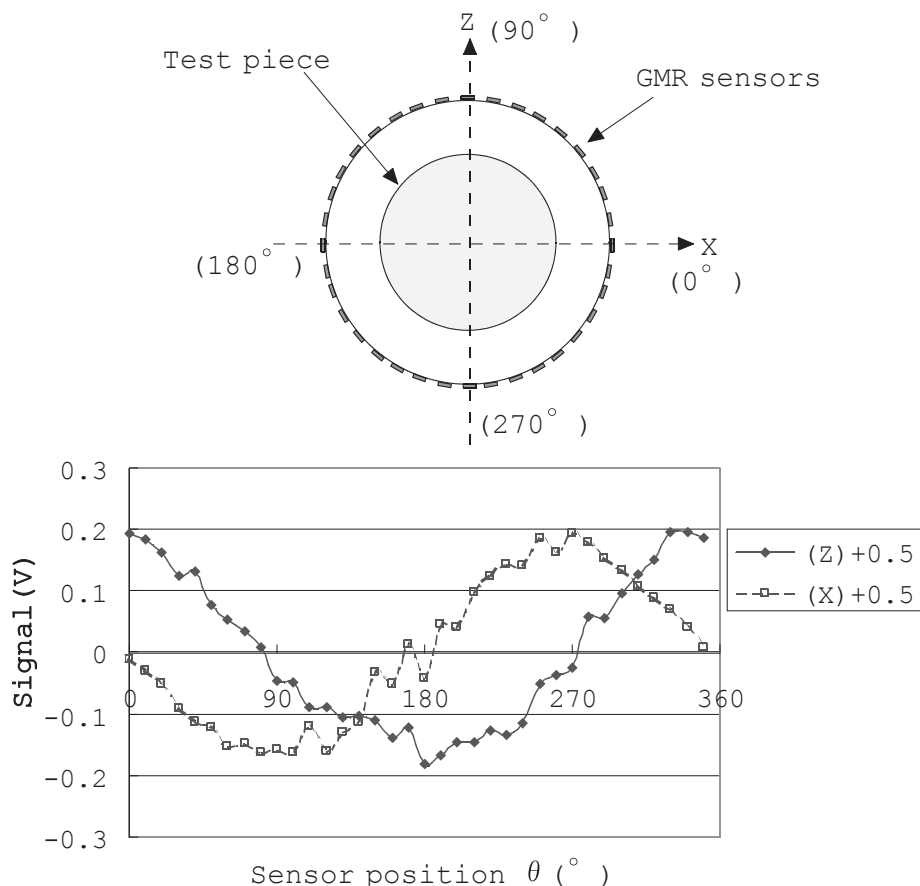


Fig.17. Signal amplitude at the eccentric probe against the test piece.

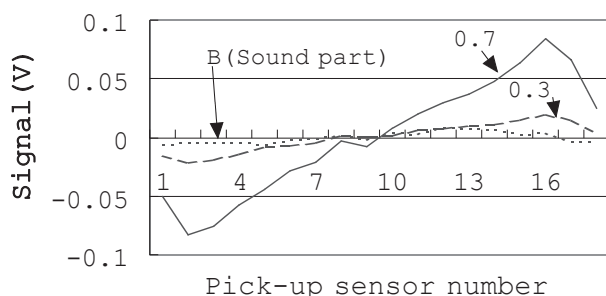


Fig.18. Signal amplitude after the addition of signals at position of opposed sensor pair.

5. 結 言

磁気センサを渦流探傷の検出センサとして利用し、そのセンサを円周方向に多数配置したアレイプローブを試作して丸棒鋼の線状きず検出を試みた。その結果、人工きずを用いた探傷性能評価において、以下の結論を得た。(1) 磁束検出センサとして採用した SV-GMR センサは、他の磁気センサに比べて高感度で素子サイズが数十マイクロンオーダーであることからプローブの小型化に対応でき、また、一般的な巻線コイルに比べてセンサ間の特性ばらつきが小さいため、各センサの出力を繋ぎ合わせて

一連の探傷信号として取り扱うことを実現した。

(2) 2 個の励磁コイルを併設し、180°位相の異なる電流で励磁したとき、その直下に線状きずがあるときのみきずに沿って軸方向の渦電流が流れ、その渦電流が作る磁界は、ギャップ 5 mm の位置では、円周方向に $\pm 50^\circ$ と広い範囲で変化するため、10°ピッチに検出センサを配置して線状きずを検出した。

(3) プローブ内で試験材が偏芯すると、360°で 1 周期となる信号変化が現れる。そのため、180°対向するセンサ同士の出力の和をとることで偏芯の影響を低減し、0.5 mm 程度の偏芯であればギャップ 5 mm のときに深さ 0.3 mm の人工きずが $S/N \approx 2$ で検出できることを確認した。

従って、提案するアレイプローブ方式により、従来の回転プローブ方式のような回転機構が不要な線状きず検出が可能となり、今後、高速検査などへの適用が期待される。

(文 献)

- 1) 佐伯 朗：非破壊検査, 57 (2008), 83.
- 2) 渡辺一雄, 武内 晃, 宇津野光朗, 志水誠之, 稲守宏夫：電気製鋼, 44 (1973), 132.

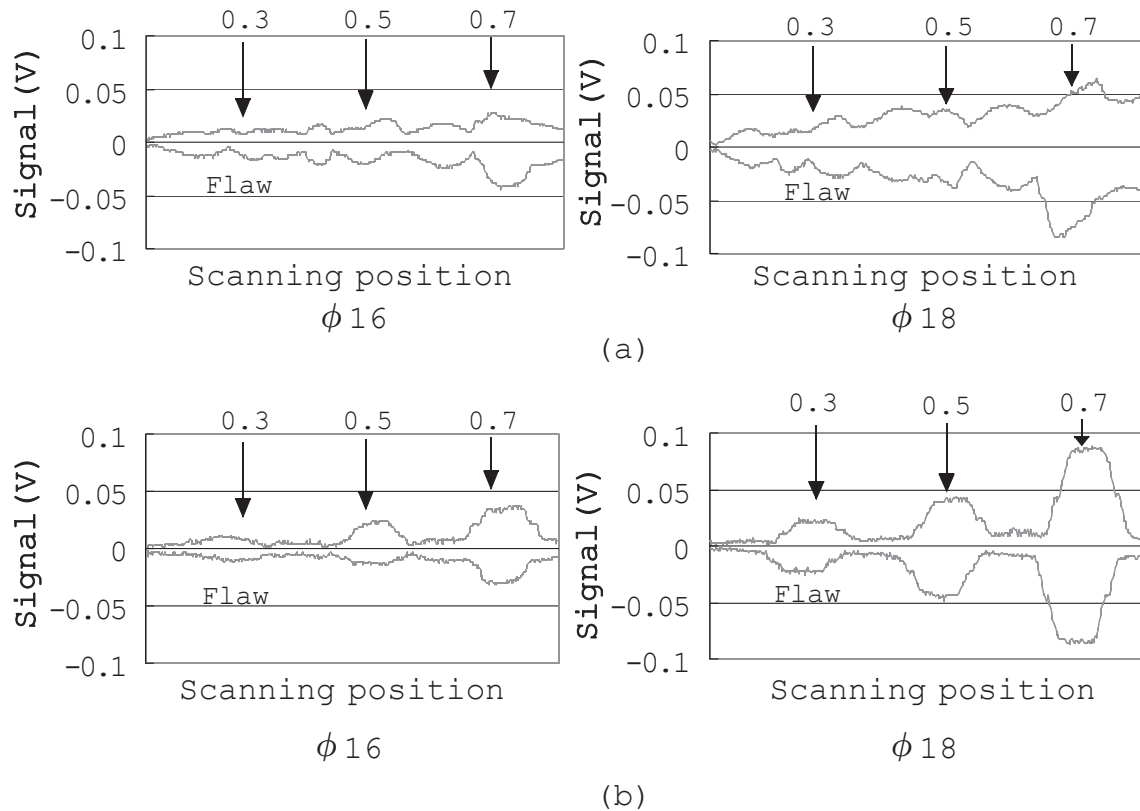


Fig.19. Signal amplitude of EDM notches: (a) before correction, (b) after correction.

- 3) 渡辺一雄, 武内 晃, 宇津野光朗, 稲守宏夫: 鉄と鋼, 10 (1975), 2478.
- 4) 木村新一郎: 非破壊検査, 53 (2004), 125.
- 5) 水野正志, 小島勝洋: 計測自動制御学会論文集, 25 (1989), 940.
- 6) 滝水莞爾, 宮田謙一, 百田陽一, 樋口英樹, 広島龍夫, 坂本隆秀: 住友金属, 36 (1984), 173.
- 7) 橋本光男, 仲矢直司: 非破壊検査, 53 (2004), 608.
- 8) 渡邊裕之, 水野正志, 小島勝洋, 伊東 貢, 平岡 裕: 電気製鋼, 71 (2000), 205.
- 9) 渡邊裕之, 富松正宏, 磯部伸一: 第8回表面探傷シンポジウム講演論文集, (2005), 117.
- 10) 渡邊裕之, 高橋信幸: 電気製鋼, 77 (2006), 189.
- 11) 藤井龍彦, Tae Hyun-sung, 高松 剛, 作田 健, 糸崎秀夫: IEEJ Trans.FM, 126 (2006), 294.
- 12) Naveen V. Nair, Vikram R. Melapud, Hector R. Jimenez, Xin Liu, Yiming Deng, Zhiwei Zeng, Lalita Udpa, Thomas J. Moran and Satish S. Udpa :IEEE Transactions on Magnetism, 42(2006), 3312.
- 13) 例えば, 社団法人 日本非破壊検査協会編: 渦流探傷試験Ⅱ, Ⅲ
- 14) 星川 洋, 小山 潔 柄澤英之: 非破壊検査, 50 (2001), 736.
- 15) 山田外史: 電気製鋼, 77 (2006), 215.
- 16) 脇若弘之: 日本応用磁気学会論文誌, 28 (2004), 825.
- 17) 福田祐三, チョムスワン・コムクリット, 山田外史, 岩原正吉, 脇若弘之, 庄司茂: 日本応用磁気学会論文誌, 28 (2004), 4.