

論説



Paper

プリントコイルによるマルチチャンネル渦流探傷技術の熱間探傷への適用に関する考察

渡邊裕之^{*}，高橋信幸^{*}

Considerations of Multi-Channel Eddy Current Testing using Printed Coils for Surface Inspection of Hot Bars

Hiroshi Watanabe and Nobuyuki Takahashi

Synopsis

The inspection methods for hot bars will be discussed. Inline inspections of surface flaws in hot rolling are one of the most difficult subjects, because of the heats, the traveling speeds of the hot bars and so on. Multi-channel array probes are advantageous for surface inspection of the bars because of the adaptability to their shapes and inspection speed compare to mechanical scanning probes. This paper shows ideas of probe designs and the improvements of the probes for more sensitive inspections. The produced probes consist of square coils printed on flexible circuit boards. These sizes are from 9 mm to 18 mm. The array probes printed on the boards are advantageous to reduce variations of characteristics of each probe. The results of experiment using the probes for hot flat bar show artificial slits, which depths are from 0.5 mm to 1.5 mm, on the bar are detected by 5 mm lift-off.

1. 緒 言

鋼材の品質保証のため，表面きず探傷は鉄鋼メーカにとって不可欠な技術である．その手法のうち，インラインでは渦流探傷法¹⁾や漏洩磁束探傷法²⁾，磁粉探傷法³⁾が主に利用されており，とくに渦流探傷法は，磁性材にも非磁性材にも適用可能な方法として広く実用化されている．渦流探傷法には，丸棒鋼や線材への貫通コイル方式や回転プローブ方式，あるいは，パイプ内面検査のための内挿コイル方式などがあり，最近では，多数配置したプローブを電子的に切り替えて探傷するマルチチャンネル方式が実用化されつつある^{4),5)}．大同特殊鋼(株)（以下，当社という）では，金型などに用いられる工具鋼平角材のインライン表面きず検査装置として，プリントコイルを用いたマルチチャンネル渦流探傷装置を開発し 2001 年に実用化している^{6),7)}．

表面きず探傷は，最終製品の品質検査だけではなく，圧延中，あるいは圧延直後の検査によって，製造条件の不適切や設備の不具合を早期に発見する目的としても強く求められているが，熱間材においては，熱のためにプローブを近づけることが困難なこと，高速で圧延される材料への倣いや追従が困難なこと，スケールによりノイズが発生すること，などの理由で，熱間での渦流探傷法による表面きず検査は困難であった．開発事例の報告としては，2 周波渦流探傷法による報告⁸⁾やハイパワー相互誘導渦流法⁹⁾，線材圧延ラインに設置される貫通コイル方式の探傷装置¹⁰⁾など数例あるのみである．

当社では，平角材用に開発したプリントコイルによるマルチチャンネル渦流探傷技術をさらに高感度，高精度化することで，熱間線材だけではなく熱間平鋼や熱間丸棒への適用を目指して技術開発を進めてきた．本稿では，プリントコイルのパターンやサイズによる検出能への影響，およ

び試作プローブによる熱間平鋼の探傷結果を示すことで、その実現性と課題について言及する。

2. 渦流探傷の原理とプリントコイル

2.1 探傷原理

渦流探傷法は、励磁コイルに交流電流を流すことによって励起された交流磁束が試験体内に浸透することで、試験体表面にその磁束を打ち消すために渦電流が流れることを利用した探傷方法である。Fig.1 に示すように試験体表面にきずがあることによって渦電流が乱れて、それに伴い変化する磁束を励磁コイル、あるいは別のコイルで検出してきずを認識する。

2.2 プリントコイル

プリントコイルは、フレキシブルプリント基板にコイルパターンを印刷して探傷プローブとして用いるもので、今回製作したプローブは、励磁と検出を別々のコイルで行い、検出コイルは、きずがないときに出力がほぼゼロで、きずがあるときに出力される差動方式のタイプとした。このタイプは一般的に相互誘導自己比較方式と呼ばれる。また、製作したプリントコイルは、Fig.2 に示すように矩形パターンから成り、スルーホールを通して両面にコイルパターンを印刷することで、巻数アップを図っている。そして、励磁コイル、検出コイルを各々両面パターンで製作し

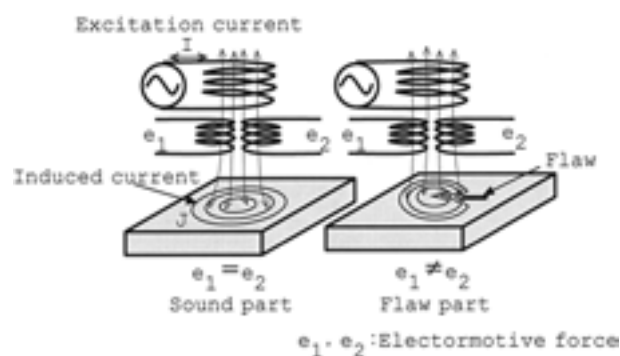


Fig.1. Principles of eddy-current testing using mutual induction method.

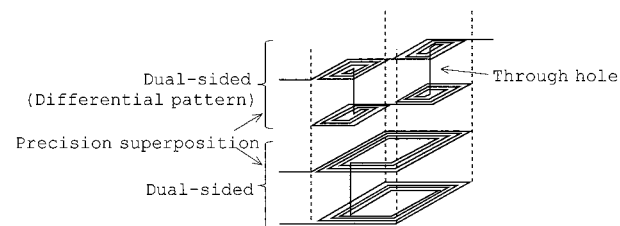


Fig.2. Patterns of coils and structure of probe.

た後、位置精度良く貼り合わせてプローブとして用いている。

2.3 探傷回路

プローブからの信号を処理する探傷回路は、マルチチャンネル対応の渦流探傷装置を用いた。処理回路は一般的な渦流探傷と同じ同期検波回路、位相回路、フィルタ回路などを有している。

3. 目標検出能

検査対象を熱間平鋼とし、開発目標は、きず深さ 0.5 mm 以上とした。また、プローブ保護のためプローブと材料との間に耐熱機構を設けることを考慮すると、プローブと材料との距離（リフトオフ）をできる限り大きくすることが望ましい。この研究では、目標値を 5 mm とした。

4. プリントコイルの試作と特性評価

4.1 コイルのサイズとパターン

渦流探傷の探傷信号に影響を及ぼす因子としては、透磁率、導電率、形状、およびリフトオフなどがあり、貫通コイルの場合は、解析的に求めた正規化インピーダンス図によって、各因子の影響を調べることができる。貫通コイルの場合の探傷コイル径と材料径とで決まる充填率の変化は、検査材を 2 次コイルと見なしたときの結合係数の変化で表され、結合係数が小さい場合には、インピーダンス図における透磁率や導電率の変化に対するインピーダンス変化の割合が小さくなる¹⁾。プローブコイルの場合についても、磁場解析によって、リフトオフと磁場の広がりについて報告されており¹¹⁾、リフトオフが大きくなった場合には、信号変化が小さくなることが示されている¹²⁾。

これらのことから、渦流探傷では、通常リフトオフが大きくなると検出感度は低下する。コイルサイズを大きくすると検出感度は高くなるが、小さなきずの検出能は低下する。従って、目標検出能や目標リフトオフに適したコイル形状やコイルサイズを選定することが重要なポイントとなる。ここでは、コイル設計のための指針となるコイルのインピーダンス特性やきず検出能を調査するため、幅が 4.5 mm から 18 mm までの矩形プリントコイルを製作し、また、同一サイズでも Fig.3 に示すように中心までコイルパターン化したもの (Type A) と外周のみにパターン化したもの (Type B) を製作して特性評価を行った。

4.2 自己インダクタンス

各種のコイルサイズ、巻数、パターンタイプにおいて、LCR メータで空芯の場合の抵抗と自己インダクタンスを測定した結果を Table 1 に示す。

Table 1. Resistance and inductance of printed coils.

No.	Width (mm)	Winding number	Type	Resistance(Ω)	Inductance(μ H)
1	4.5	18	A	1.7	1.1
2	6	24	A	2.9	2.3
3	7.5	32	A	4.5	4.5
4	9	42	A	7.7	9.2
5	9	32	A	3.2	5.0
6	9	40	A	6.3	7.7
7	12	58	A	14	22
8	15	78	A	22	43
9	15	38	B	16	28
10	18	94	A	36	77
11	18	46	B	26	47

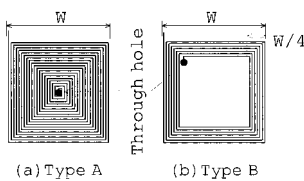


Fig.3. Patterns of coils to compare the characteristics.

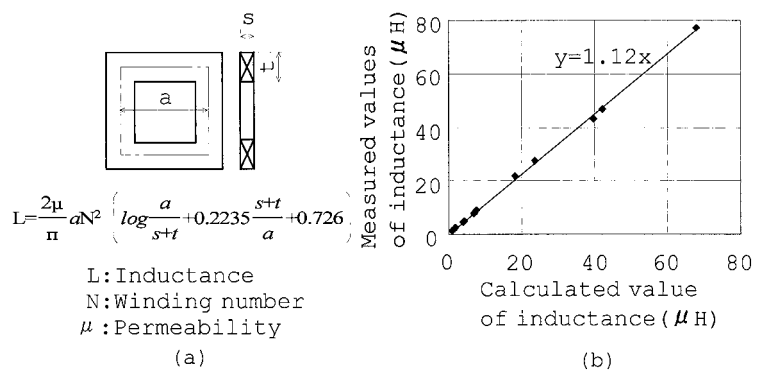


Fig.4. Approximate expression of inductance of printed coils and the comparisons of calculated and measured results.

実測したコイルの自己インダクタンスからプリントコイルの場合の自己インダクタンスを定式化するために、種々提案されているインダクタンス計算式との比較検討を行った。Fig.4(a)に示す矩形断面正方形コイルの自己インダクタンスを求める式¹³⁾に各パターンの巻数と寸法を代入して求めた計算結果と、実測値との比較をFig.4(b)に示す。このグラフから、実測値は、計算値に比べて約1.1倍大きいものの、ほぼ一致することを確認した。従って、プリントコイルの場合でも、一般的なコイルの自己インダクタンスを求める式を用いて算出できることから、この式を利用して励磁周波数および探傷回路にマッチングしたコイルサイズ、パターンおよび巻数を設計することが可能である。

4. 3 抵抗と浮遊容量

各コイルの面積と直流抵抗の関係をFig.5に示す。コイルの直流抵抗は、パターン配線の長さや断面積によって決まり、パターン幅やパターン間隔が同じであれば、コイル面積にほぼ比例することを確認した。プリントコイルは、通常の銅線コイルに比べ抵抗が高くなる傾向にある。ま

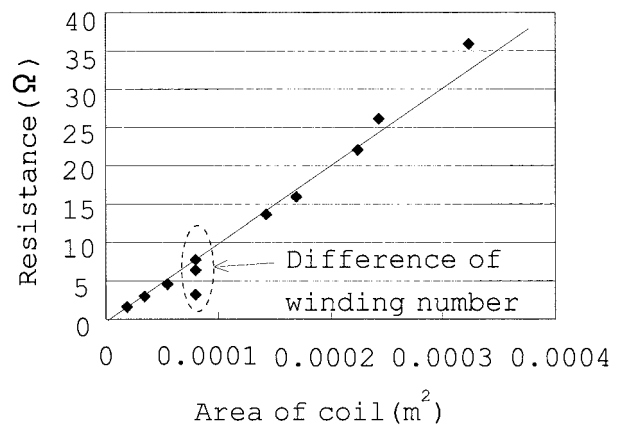


Fig.5. Relationship between areas of printed coils and resistances.

た、両面基板コイルで高周波励磁する場合には、表裏のパターン間に存在する浮遊容量の影響による共振に十分注意する必要がある。例えば、今回製作した18mmのコイルでは、2MHz前後で共振し、それ以上高い周波数では、検出感度が急激に低下してしまうことを確認している。

4. 4 リフトオフ特性

各サイズのプロープのリフトオフ特性を調査した。常温においても熱間材と同様に非磁性体である SUS316 のプレートに加工した、コイルサイズに比べて十分長い深さ 0.5 mm のスリットに対してリフトオフを変化させて探傷した。そして、リフトオフ 2 mm のときの信号値を基準として減衰率を評価した。その結果を Fig.6 に示す。

探傷は、12 ~ 18 mm のコイルと、その 1/2 サイズのコイル 2 個を Fig.2 に示すように差動配置したパターンを探傷プローブとして使用し実施した。

グラフより、リフトオフの変化に対しては、コイルパターンよりもコイルサイズの影響が大きく、リフトオフを離して探傷する必要がある場合には、コイルサイズを大きくすることでリフトオフによる減衰を抑制できることがわかる。例えば、プローブサイズを 12 mm から 18 mm へと大型化するとプローブ面積が 2.25 倍となり、グラフより、リフトオフが 2 mm から 6 mm へと 3 倍となったときに、検出感度低下は約 5 dB 改善される。

4. 5 きず長さで検出能

4.4 節で示したように、リフトオフを大きくする必要がある場合には、プローブの大型化が有効であるが、大型化すると一般的に小さなきずの検出は困難となる。ここでは、きず長さで検出能の関係について調査した。

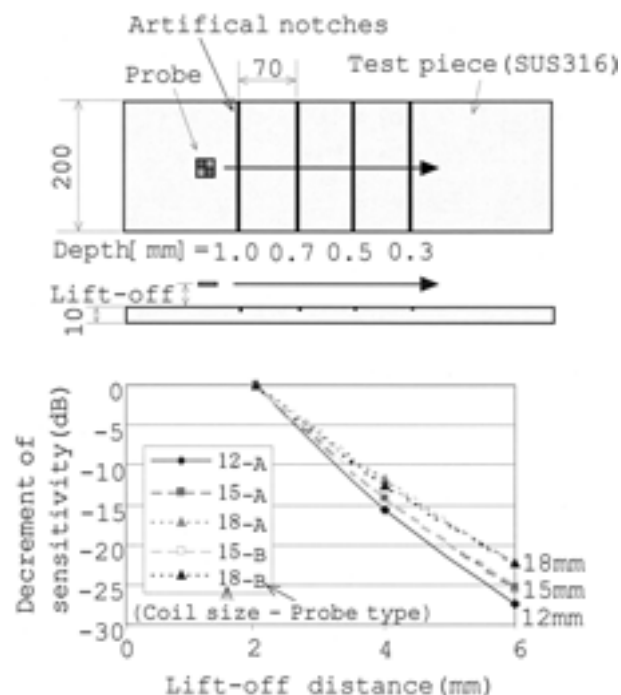


Fig.6. Relationship between lift-off distance and decrement of sensitivity.

SUS316 材のプレートに加工した、長さ 30 mm, 20 mm, 10 mm の放電加工ノッチを人工きずと見立て、各サイズのプロープでリフトオフを変化させて探傷した結果を Fig.7 に示す。グラフが示すように、コイル幅とほぼ等しい 20 mm のノッチでは、全幅に加工したノッチに比べ約 80 % の検出感度となり、コイルより短い 10 mm の場合は、50 % 以下まで検出感度が低下してしまう。また、リフトオフが大きいほど感度低下はより大きくなる。この理由は、励磁コイルの作る磁場が空間中で広がること、および材料表層に流れる渦電流密度は、プローブの外周直下が高く、プローブ中心に向かうほど低くなることにある。

今回試作したコイルパターンでは、検出すべききず長さとはほぼ等しいか、それより短いサイズのコイルを採用することが望ましいが、リフトオフを大きくする必要がある場合には、探傷感度も考慮してサイズを決定する必要がある。

5. 励磁方法の検討

5. 1 クロス配置パターン

探傷プローブは、Fig.8 に示すように励磁コイルパターンと検出コイルパターンを組み合わせた相互誘導自己比較方式とし、2 組の差動コイルをそれぞれ対角の位置に配置して、励磁コイルとして用いることを試みた。このプローブの目的は、探傷感度の改善と単一プローブで縦横どちらの方向のきずも検出することを可能にすることである。縦方向きずと横方向きずの検出のための探傷方法として、位相切り替え方式と2周波方式の2方式の励磁方法を考案した。その原理は次のとおりである。

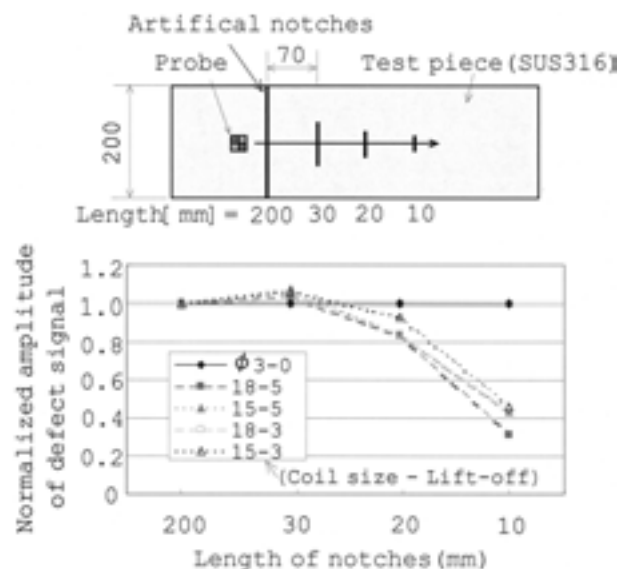


Fig.7. Relationship between lengths of notches and normalized amplitude of the signals.

5. 2 位相切り替え励磁方法

2組の励磁コイルに同一周波数で同期した励磁電流を流すと、4個のコイルがそれぞれ励磁磁場を生成するが、流す電流の向きによって、4個のコイルのうち縦方向あるいは横方向で同じ回転方向に電流が流れて向きの揃った磁場が生成される。このとき、同一方向の磁場を作るコイルの方向にきずが横切っても検出感度はほとんど無く、逆方向の磁場を作るコイルの方向にきずが横切った場合にきず信号が得られることとなる。また、Fig.9(a)に示すように2組の励磁コイルのうち、1組の励磁位相を180度反転させることで、反転させる前と比べて検出指向性が縦横変化する。そこで、時分割で1組の励磁位相を反転させながら探傷することで、縦方向のきずと横方向のきずのどちらも検出が可能となる。さらに、Fig.9(b)に示すように励

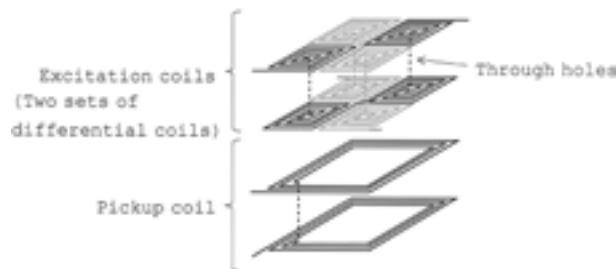


Fig.8. Structure of a new probe.

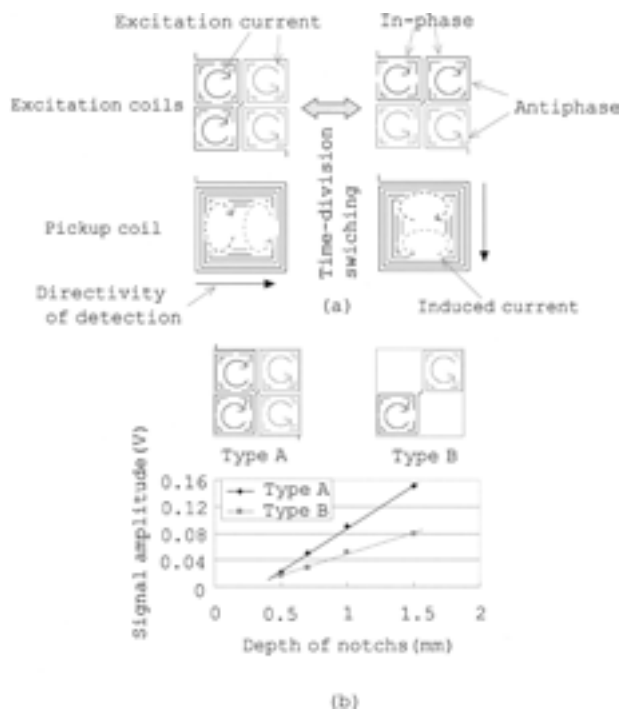


Fig.9. Idea to detect longitudinal and transverse flaws, and comparisons of sensitivities between the new probe and the former probe.

磁コイル個数が従来の方式に比べ2倍であるため、探傷感度は約2倍に改善される。

5. 3 2周波励磁方法

もう一つの励磁方法として2周波励磁方式を考案した。Fig.10に示すように、2個の励磁コイルをそれぞれ異なる周波数で励磁する。そして、単一の検出コイルから得られる検出信号をそれぞれの励磁周波数で同期検波をして探傷信号を比較する。この場合、各周波数で検波した後の信号は、それぞれの周波数で励磁しているコイル直下の情報を含んでいる。さらに変化の極性まで含めて評価をすれば、

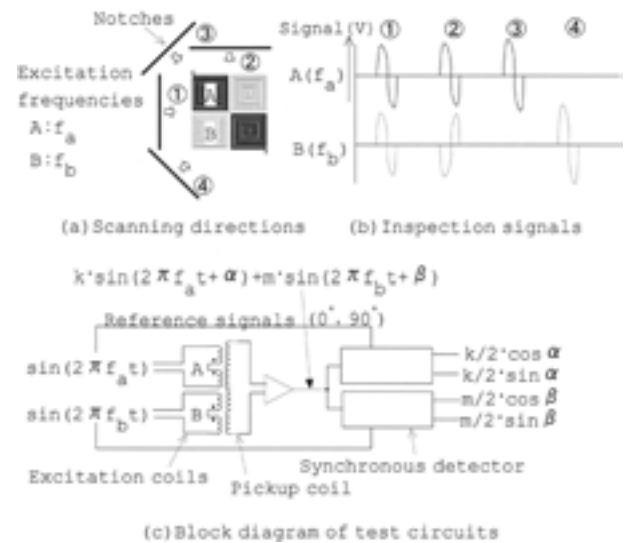


Fig.10. Idea to detect any directional flaws using dual frequencies.

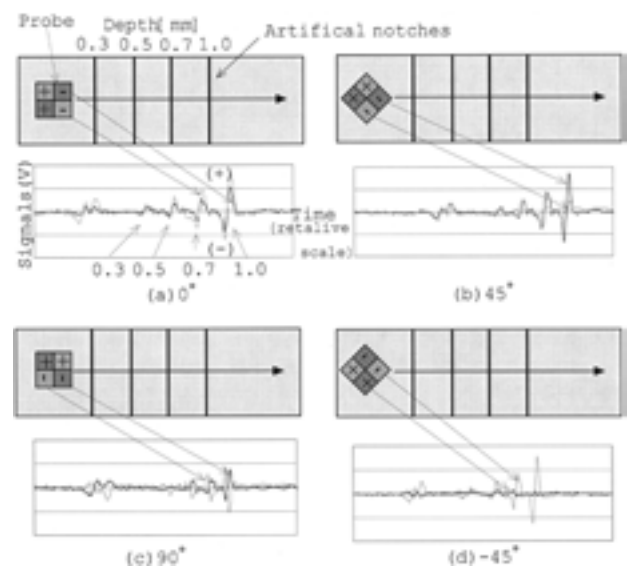


Fig.11. Examples of inspections by the probe using dual frequencies. Direction of pick up coils were changed: (a)0°, (b)45°, (c)90°, (d)-45°.

4個ある励磁コイルのうち、どのコイルの直下にきずが存在するかが判別でき、縦、横、斜め全てのきずを、その向きも含めて検出が可能となる。この方法は、時分割で切り替える必要がないため、高速探傷にも適している。Fig.11には、この方法による探傷結果を示す。プローブを 45° ずつ回転させて試験体長手方向に探傷したときの、各周波数による同期検波後の出力信号を表示しているが、この結果は、どの向きでもきずを検出でき、さらに、その波形からきずの方向を推定できること示している。

5. 4 マルチチャンネル同時励磁

4.4, 4.5節でも示したように、リフトオフを離して感度良く微小なきずを検出することがいかに難しいのか理解されるが、少しでも検出性能を向上させるために、マルチチャンネルであることを利用して隣接する励磁コイルを同時に励磁することで、渦電流密度を高めて感度アップさせることを検討した。Fig.12には、励磁コイルを隣接させて励磁した場合の材料表面の渦電流密度を、磁場解析ソフトを用いて解析した結果を示す。隣接する励磁コイルを 180° 逆相となるように励磁すると、その境界部分の材料表面では、渦電流が同方向に流れ強め合い、同相となるように励磁すると、渦電流は互いに逆向きに流れるために打ち消し合ってしまう。この結果から、隣接する励磁コイルが互いに逆相となるように励磁することで、境界下部の渦電流が強め合わされて、検出感度の向上が期待できる。

Fig.13は、5チャンネルのマルチプローブを位相切り替え方式で励磁して人工欠陥を探傷したときの各プローブの探傷波形である。個別に励磁して探傷した場合と、5

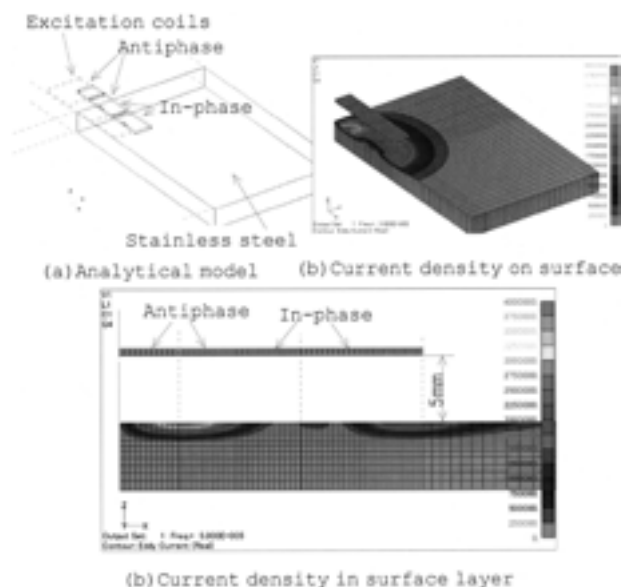


Fig.12. Results of numerical analysis for in-phase and antiphase excitations.

チャンネルを隣接する励磁コイルが逆相となるように同時励磁した場合を比較すると、同時励磁した場合の方が、個別の場合に比べ1.5倍近く検出感度が高くなるといった結果が得られた。この結果は、解析結果と一致していることを示している。

6. 熱間探傷

6. 1 プローブケース構造

熱間材にギャップ数ミリで対向して配置されるプローブケースでは、コイル保護のための冷却機構が必要となる。従来のソレノイドプローブであれば水没させることも可能であるが、プリントコイルは材質がポリイミドで湿気に弱い。そこで、プリントコイル自体には水との接触がなく、耐熱のための水冷機構を有するプローブケースを検討した結果、Fig.14に示すようにプローブ内部を2重構造と

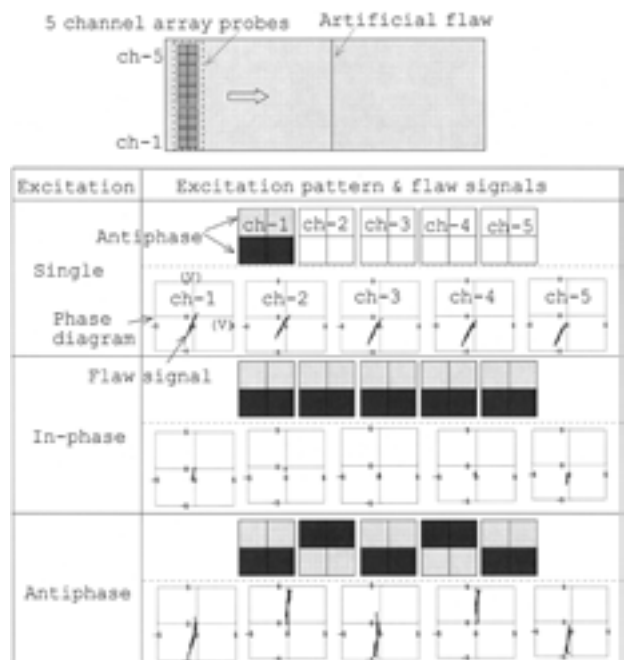


Fig.13. Measured results for in-phase and antiphase excitations using array probes.

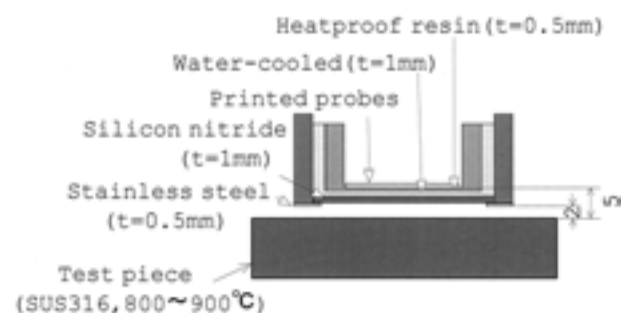


Fig.14. Structure of the probe to inspect the hot steel.

して、その隙間に冷却水を循環させる方法でプローブを試作した。

今回は、5チャンネルを収納可能なプローブケースを試作して、耐久性および検出能を調査した。

6. 2 探傷方法

試作したプローブにより、熱間での探傷試験を実施した。試験材は、SUS316の平角材に深さ0.5 mm, 0.7 mm, 1.0 mm, 1.5 mmの人工欠陥を板幅方向に加工したものを用いた。探傷試験は、試験材をエレマ炉で約900℃まで加熱した後、炉前に設置した搬送ローラに引き出し、プローブを試験材に着材させてから試験材を前後走査させることで実施した。試験で使用したプローブの仕様をTable 2に示す。なお、試験では、リフトオフが一定となるようにプローブケースをガイドローラで保持した。またこのとき、材料表面からプローブまでの距離は5 mmとした。

Table 2. Test conditions of examination with hot steel.

Item	Specification
Probe size	18 × 18 mm
Excitation frequency	200 kHz
Protect board	Silicon nitride
Liftoff	5 mm

6. 3 探傷結果

試験は、加熱前後で探傷を行い、冷間時との比較をすることで熱間材での探傷性能を評価した。その結果をFig. 15に示す。結果からは、信号振幅が冷間に比べて若干小さくなるものの、熱間においても深さ0.5 mmの欠陥がベースノイズレベルに比べて3倍以上の信号レベルで検出可能であることが確認できる。また、信号振幅が低下した要因としては、温度上昇による試験材の電気抵抗率の増大や探傷コイルのインピーダンス変化などが推測される。

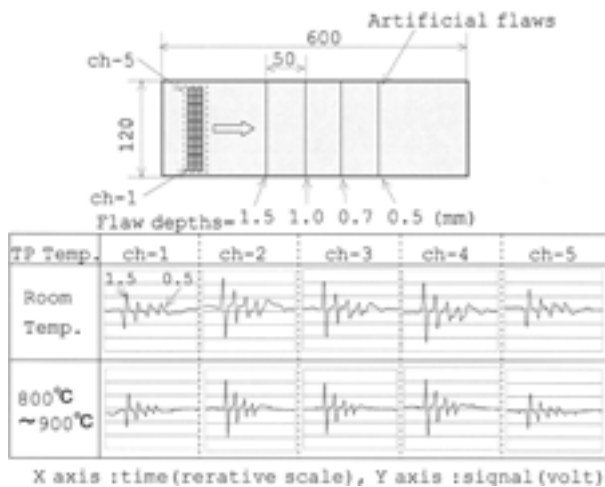


Fig.15. Strip charts of the artificial flaw inspections on the hot steel.

なお、5チャンネルのうち、両端のプローブ（Ch1とCh5）の検出感度が他のプローブより低いのは、両端では5.4節で示した同時励磁の効果が得られないためである。

7. 課 題

7. 1 振動ノイズの影響

6.3節で示した熱間材の探傷試験では、リフトオフを一定に保つためにガイドローラを使用した。圧延速度が速い場合など、接触して材料に激うことが困難な場合も想定される。一方、非接触検出では、リフトオフ変動によるガタノイズを考慮する必要がある。そこで、試作したプローブで約1 mm上下動させた場合のガタノイズと探傷信号とを比較した。その結果をFig.16に示すが、ベクトル平面上での軌跡では、ガタノイズときず信号との位相差が小さく、同期検波でガタノイズを抑制しても、約1 mmの上下動があると、検出能は深さ1 mm程度まで低下することがこの結果から想定される。

7. 2 保護板材質

試作したプローブでは、熱間材と直接対向する面でプローブを保護するために用いる保護板として窒化珪素を用いたが、一般的にセラミックスは衝撃に弱い。実用化には、より耐久性のある金属材料なども検討していく必要がある。なお、金属材料の場合は、金属内で渦電流が誘導され磁束が減衰することで検出感度が低下してしまう。従って、保護板の材質選定、および保護板内の渦電流対策は重要な課題である。

8. 結 言

本研究では、熱間材の表面きず検査を目的として、より高感度、高精度なアレイプローブを開発するためにサイズ、パターンの異なるプリントコイルを試作して調査、検

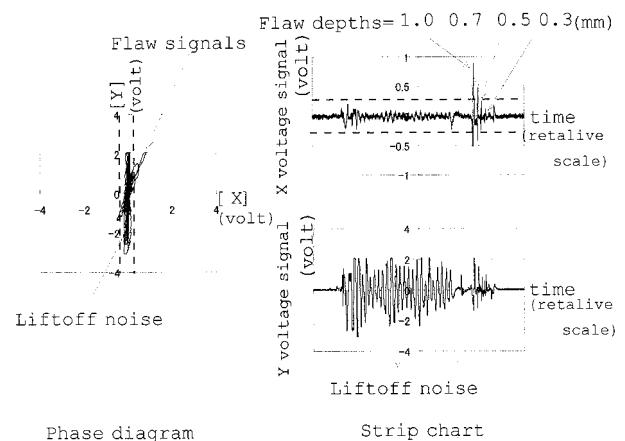


Fig.16. Influence of lift-off noise for inspection of flaws.

討を実施した。この結果得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) プリントコイルを設計する場合には、リフトオフ、検査対象欠陥サイズを考慮してコイルサイズを決定する必要がある。コイルサイズは、最小欠陥サイズと同等以下にするのが望ましいが、リフトオフを大きくする必要がある場合には、コイルの小型化より検出感度減衰率が大きくなることを考慮する必要がある。
- (2) 励磁方法としては、縦方向のきずと横方向のきずを検出するため、位相切り替え励磁方式、あるいは2周波方式が有効である。
- (3) アレイプローブを利用して隣接する励磁コイルを逆位相で励磁することで渦電流密度を高め、高感度化を図ることが可能である。
- (4) 熱間材による探傷試験では、冷間と比べ若干振幅は小さくなるが、リフトオフ5 mmで深さ0.5 mmの人工欠陥が検出できることを確認した。ただし、実用化に向けては、振動ノイズの低減やプローブ保護のための保護板の耐久性向上などが課題である。

最後に、本研究を進めるに当たりご協力していただいた原電子測器㈱の磯部伸一氏に感謝の意を表します。

(文 献)

- 1) 例えば、社団法人 日本非破壊検査協会編：渦流探傷試験Ⅲ，(2003)。
- 2) 例えば、社団法人 日本鉄鋼協会編：鉄鋼製品の漏洩磁束探傷法，(1990)。
- 3) 例えば、社団法人 日本鉄鋼協会編：鉄鋼製品の磁粉探傷法，(1990)。
- 4) 兵藤繁俊，日々野俊，谷昇：日本非破壊検査協会 平成7年度春季大会講演概要集，(1995)，81。
- 5) 江原英治：第8回表面探傷シンポジウム講演論文集，(2005)，121。
- 6) 渡邊裕之，水野正志，小島勝洋，伊藤 貢，平岡 裕：電気製鋼，71(2000)，205。
- 7) 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。
- 8) 廣島龍夫，坂本隆秀，高橋昭夫，宮田健一：非破壊検査，34(1985)，271。
- 9) 相川康浩，松岡良明，長沼洋一：非破壊検査，39(1990)，178。
- 10) 浜田努：特殊鋼，46(1997)，42。
- 11) 星川洋，小山潔，小井戸純司，石橋康雄：非破壊検査，37(1988)，722。
- 12) ASNT NONDESTRUCTIVE TESTING HANDBOOK Volume 5 Electromagnetic testing，(2004)，132。
- 13) 電子通信ハンドブック，(1967)，73。