

論 文

連 鋳 ス ラ ブ の 熱 間 渦 流 探 傷

広島 龍夫*・中西 章人*・坂本 隆秀*・高橋 昭夫*²Eddy Current Inspection for Continuously Casted Slabs
in a Production Line

Tatsuo HIROSHIMA, Akito NAKANISHI, Takahide SAKAMOTO and Akio TAKAHASHI

Synopsis :

Eddy current inspection methods for continuously casted slabs under hot stage have been developed. In order to suppress the signal caused by oscillation marks, several signal processings are discussed. A new signal processing combined with multifrequency eddy current testing and signal pattern analysis can detect fine transverse cracks at the bottom of oscillation mark.

An eddy current testing system with a spot scarfer for the detection of subsurface cracks is operating in Kashima Steel Works of Sumitomo Metals. The scarfing nozzle is used for both smoothing the surface before eddy current inspection and removing cracks by the inspection results.

These methods can detect cracks whose depth is 2mm, and will greatly contribute to the expansion of hot charge rolling process (HCR).

1. 緒 言

省エネルギー施策の一環として開始されたスラブの熱片処理 (Hot Charge Rolling, HCR) は今や鋼板製造プロセスの一つとして定着している。このプロセスでは欠陥のないスラブを高温に保持して次工程に供給することが重要で、無欠陥スラブ製造のため種々の技術開発が行われてきた。しかし現状ではすべての鋼種についてこの技術が確立されているとはいえない。そこで HCR プロセスの適用拡大には熱片段階での欠陥検査および手入れが必要となる。このため熱間スラブの表面疵を検出する方法として光学探傷法や渦流探傷法の適用が検討されてきた。

光学探傷法ではレンズなどの光学系を利用し広範囲の検査表面を遠隔観察できる利点があり、実用に供されているものも多い^{1)~5)}。しかしこの方法では欠陥深さに関する情報が得られず、欠陥の有害度を定量的に評価する手段とはなり得ないことから、その使用が限定されている。

連鋳スラブに発生する表面欠陥には縦割れのような大型の欠陥と、横ひび割れに代表されるような微小な欠陥がある。縦割れは一般に長さや深さの相関が強く、欠陥長さにより有害度を評価できるため、光学探傷法が適用されている。横ひび割れは欠陥長さが短いにもかかわらず

極めて深いものが多く、その有害度は高い。そこでこれら微小表面欠陥の検出を目的に、プローブコイルを用いる渦流探傷法の適用を検討した。

渦流探傷法は欠陥検出力に優れていること、欠陥深さの定量判定が可能であること、また高速検査が可能であることから、鋼管・棒鋼の成品検査に数多く使用されている。しかし熱間連鋳スラブの高精度探傷に用いられた例はなく、連鋳スラブの探傷に際しては、解決すべき種々の問題があつた。

著者らはプローブコイルを用いた渦流探傷を熱間連鋳スラブに適用する際の問題点と対策を考察し、表面欠陥の検出に適した二周波渦流探傷技術と表皮下欠陥検出を目的とした自動チェックスカーフ付渦流探傷技術を開発した。本報告はこれら連鋳スラブの渦流探傷技術について述べた。

2. プローブコイルによる熱間渦流探傷の
基本性能

プローブコイルを用いる渦流探傷において被検体表層部に誘起される渦電流の発生状況を支配する因子は、被検体自身の電磁気特性 (比抵抗, 透磁率), 被検体の性状 (寸法, 表面粗さ), プローブ寸法, プローブと被検体の距離 (リフトオフ), 試験周波数などである。これら因子は渦流探傷の結果に影響を及ぼす。更にプローブコ

昭和 57 年 9 月 本会講演大会にて発表 昭和 58 年 11 月 16 日 受付 (Received Nov. 16, 1983)

* 住友金属工業(株)制御技術センター (Instrumentation and Control Technology Center, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

*² 住友金属工業(株)和歌山製鉄所 (Wakayama Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

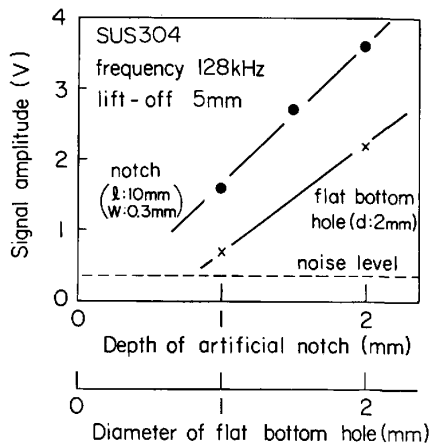


Fig. 1. Detectability of eddy current probe coil. (l : length, w : width, d : depth)

イルを熱間の連鋳鋳片に適用する場合には、被検体が熱片であることに起因する因子や連鋳鋳片固有の因子も考慮しなければならない。

プローブコイルによる渦流探傷法の一般的な検出力を Fig. 1 に示した。磁気変態点より高温域の鋼と比較的類似した電磁気特性を冷間で示すオーステナイト系ステンレス鋼を用い、欠陥検出力を評価した。有効探傷幅 5 mm のコイルを用いた場合、リフトオフ 5 mm で深さ 1 mm の人工欠陥が良好に検出される。このことは被検体の表面性状が良くリフトオフが一定に保たれる条件では、プローブコイル法は有害な表面疵を十分検出できる能力を有することを示しているが、検出力の低下をひきおこす要因の影響を検討しておく必要がある。それらの要因をまとめて次に示した。

- (1) 表面温度：被検体の電磁特性は温度依存性を有す。
- (2) プローブへの熱影響：高温スラブの直上に配置されるプローブの冷却法
- (3) 表面スケールの影響
- (4) 表面性状：連鋳鋳片固有のオッシレーションマークは探傷の妨害因子になると考えられる。

これら要因の探傷結果に及ぼす影響を把握しておくことは実用上極めて重要である。以下各要因と探傷性能の関係について述べる。

2.1 表面温度と欠陥検出力

鋼片表面に加工した人工欠陥の検出力と鋼片の表面温度の関係を示す。磁気変態点近傍では欠陥信号以外の雑音が増大し、欠陥信号との識別ができず探傷不能となった。これはこの温度域で強磁性 α 相と非磁性 γ 相が混在することおよび渦電流の支配因子である透磁率が磁気変態点直下で急激に変化すること⁶⁾に起因する

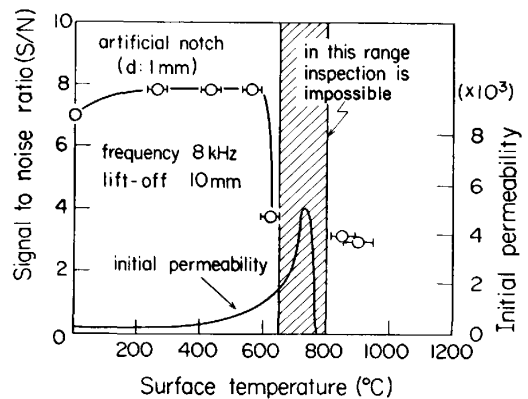


Fig. 2. Temperature dependence on detectability.

と思われる。鋼片表面内の温度むら、材質による変態挙動の相異を考慮すれば、 650°C 以下の強磁性域と 800°C 以上の非磁性域が探傷可能な温度域と考えられる。高温材料への渦流探傷の適用に際しては、探傷不能温度域を回避することが重要となる。

2.2 プローブコイルの冷却

スラブの輻射熱によるコイルの電気的特性の劣化を防止するには、コイルを強制冷却する必要がある。水及び圧縮空気によりそれぞれ冷却された 2 個のコイルを、表面温度 1000°C の鋼片直上に配置しその温度上昇を計測した結果、温度上昇はそれぞれ 10°C 、 70°C であり両者とも十分な冷却能が得られたが、熱間スラブの探傷には冷却性能の優れた水冷方式を用いることとした。

2.3 表面スケールの影響

スラブ表面上に生成する酸化物は絶縁体であるため、探傷に及ぼす影響はない。しかしマグネタイトは 585°C 以下で強磁性を示すので⁷⁾、この温度以下のマグネタイトがスラブ表面に散在する場合には雑音源となる。よつてこのような状況下で探傷する場合にはデスクレーンが必要となる。

2.4 オッシレーションマークの影響

オッシレーションマークのモデルを数種ステンレス鋼板上に作製し、プローブコイルをそれら表面に沿って走査させたとき探傷器の CRT 上で得られる信号軌跡 (渦流信号パターン) を調査した。この信号軌跡は、プローブコイル出力をある位相角で位相検波した出力を CRT の X 軸に、前記位相角と $\pi/2$ ずれた位相角で位相検波した出力を CRT の Y 軸に入力して得られる。Fig. 3 に示す結果は、リフトオフ変動に起因する信号軌跡が CRT 上の Y 軸方向になるように探傷器を位相調整した状況で得られた。オッシレーションマーク信号はリフトオフ信号と同一の位相特性を示す。また溝深さの異なるものが混在する場合 (タイプ (c)) にはその深さが一定の場合

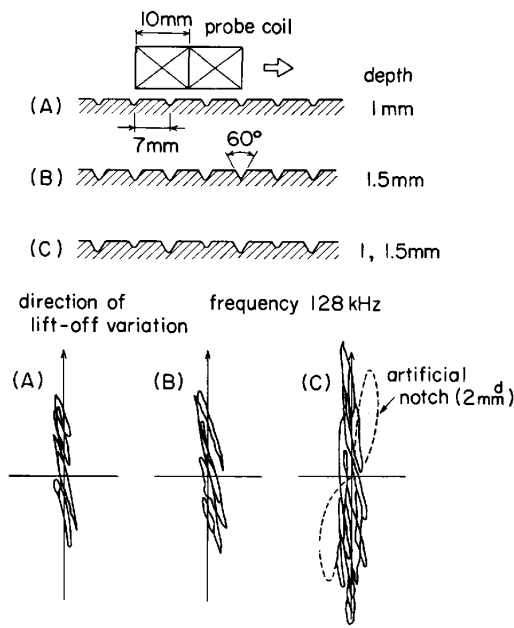


Fig. 3. Signal patterns of oscillation mark models.

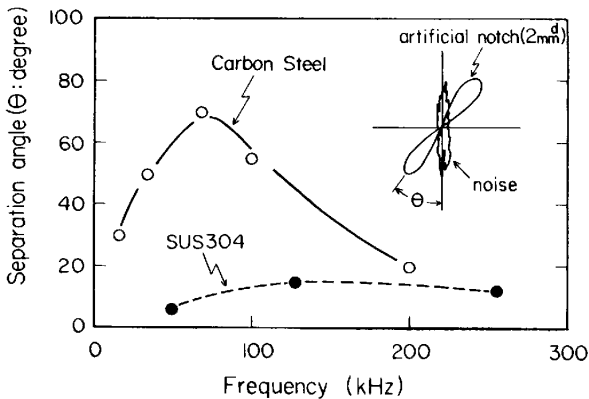


Fig. 4. Relation between test frequency and separation angle.

(タイプ (a), (b)) に比し信号振幅が大きくなり, 同図中に示した深さ 2mm の人工疵信号パターンとの弁別が困難となる. 連铸スラブに存在するオッシレーションマークはその深さが一定でないタイプ (c) が一般的であることから, オッシレーションマーク存在下での探傷では, 検出力が著しく低下すると想定される.

一般にリフトオフ信号の抑制には位相弁別が有効な手段とされている⁸⁾. Fig. 4 には位相弁別性の指標となるリフトオフ信号と欠陥信号の位相角差を示した. 強磁性域では試験周波数を適切に選択すれば位相弁別が可能である. ステンレス鋼では位相角差は小さく, 高温の非磁性域では位相弁別が困難であると推定される. このことからオッシレーションマークの存在する連铸スラブを高温非磁性域で高精度に探傷するには, オッシレーションマーク信号を抑制する新しい信号処理法が必要となる.

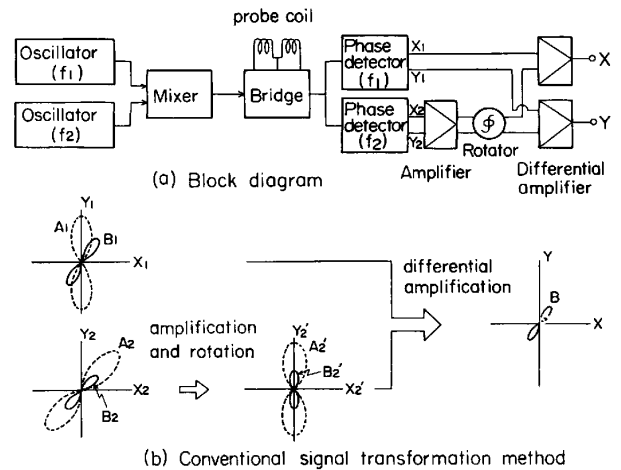


Fig. 5. Multifrequency eddy current test system.

3. 微小表面欠陥の検出法

渦流探傷試験の対象となるのは横ひび割れのような微小欠陥である. 横ひび割れのスラブ表面上での発生部位は铸片の冷却パターンに依存するといわれている. すなわちその発生が铸片の幅方向の特定の位置に限定される場合が多い. また冷却特性に応じ表面欠陥となる場合や表皮下欠陥となる場合がある. 後者の検出法は次章にゆずり, 本章では微小表面割れをオンライン (高温非磁性域) で高精度に検出するために開発した二周波渦流探傷法の概要と, その適用結果について述べる.

3.1 二周波渦流探傷法

高温非磁性域で高精度に欠陥を検出するには, オッシレーションマーク信号と欠陥信号を弁別する必要があることは前に述べた. この目的を達成するために著者らは二周波渦流探傷法の適用を検討した.

3.1.1 原理

二周波渦流探傷法は原子炉蒸気発生器の伝熱管の ISI (In-Service Inspection)⁹⁾¹⁰⁾ でその実用化が進められた. 二周波法は次のような手法で不要な信号を抑制する.

- (1) 同一のコイルに異なる周波数の交流電流を混合して印加し
- (2) 各周波数別にその出力を分離識別して検出し
- (3) 得られた各周波数別の成分を結合して望ましくないパラメータに起因する信号を除去する.

二周波渦流探傷器の構成を Fig. 5(a) に示した. この方法で最も特徴的な部分は(3)項に示す処理である. 伝熱管の内挿コイルによる ISI では管支持板に起因する信号の抑制に二周波渦流探傷法が用いられている. これは管の腐食欠陥が支持板近傍に存在した場合, 腐食信号が支持板信号の影響を受け腐食を定量的に評価できない

いたためである。

支持板信号の抑制には Fig. 5(b) に示す単純回転方式の信号演算法が採用されている。模式図に示すごとく、支持板信号 (A) が周波数 f_1, f_2 で同一の信号振幅、位相になるよう回転・増幅操作を行い、両者のベクトル減算を実施して望ましくない信号(支持板信号(A))を抑制する。

3.1.2 信号演算法

管内にコイルを内挿して探傷する内挿コイル法で抑制すべき信号は、管外に存在する支持板の信号であつた。支持板信号のごとく管肉を介して検出される信号では、管肉部で渦電流の減衰や位相のずれが生じ、支持板信号の振幅・位相とも試験周波数により大きく異なる。よつて前記の単純回転方式により、支持板信号を消去し、欠陥信号のみを抽出することが可能であつた。

しかしプローブコイルを用い連鋳鋳片の表面欠陥を検出する場合には、オッシレーションマークと表面欠陥はともにプローブに近い表面に存在することから、それら信号パターンに大きな差異はないと予想される。実際、Fig. 6 に示すように、オッシレーションマーク信号と表面欠陥信号の位相角差、振幅比とも試験周波数に強く依存せずほぼ一定となる。これは単純回転方式でオッシレーションマーク信号を消去すると、欠陥信号自身も消去されることを意味する。よつて単純回転方式はプローブコイル法における表面欠陥の検出に有用でないと判断し、他の信号演算法を検討した。

内挿コイルを用いた二周波渦流探傷法で管支持板信号以外に、コイルを掃引して探傷するとき発生するコイルの揺動に起因した信号をも抑制する方法として、複数の位相回転器を用いる多重回転法が提案されている¹⁰⁾。しかしこの方法では不要信号を抑制する演算ロジックが明らかにされていない。また内挿コイル法とプローブコ

イル法では抑制すべき信号が異なることから、プローブコイル法でオッシレーションマーク信号を抑制し、高精度に表面欠陥を検出するのに適した信号演算法の検討を行つた。抑制すべき信号をオッシレーションマーク信号のみに限定し、多重回転方式を単純化した簡易多重回転方式を考案した。ここではこの方式でオッシレーションマーク信号を抑制するための演算条件について解析した。

簡易多重回転方式の回路構成を Fig. 7(a) に示す。この方法は各々の周波数で得られる信号を回転操作した後、各周波数の X 成分で作られるベクトル平面 (X_1, X_2) で信号を再構成して不要な信号と欠陥信号を弁別するものである。

この方式で位相角差の小さい2つの信号を、位相弁別可能なように互いに直交する信号に変換するための演算条件を求める。渦流信号を Fig. 8 に示す直線ベクトルに単純化し計算を実行した。周波数 f_1 におけるベクトル

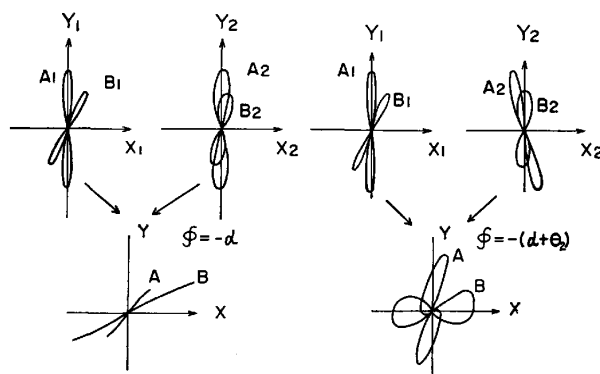
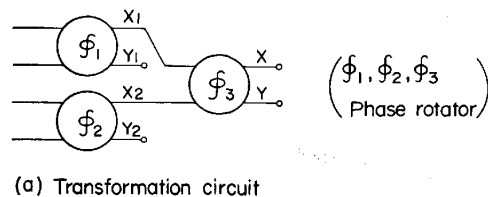


Fig. 7. Improved signal processing (multirotation method).

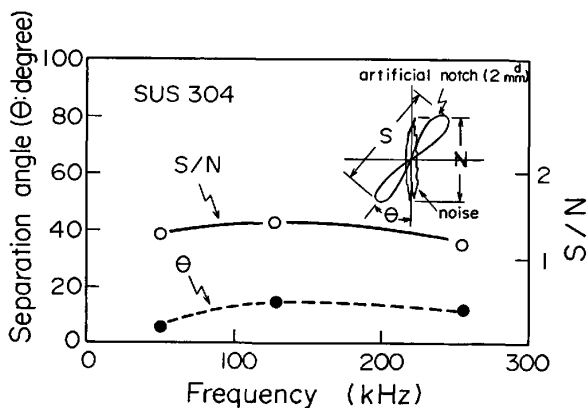


Fig. 6. Frequency dependence on separation angle and S-N.

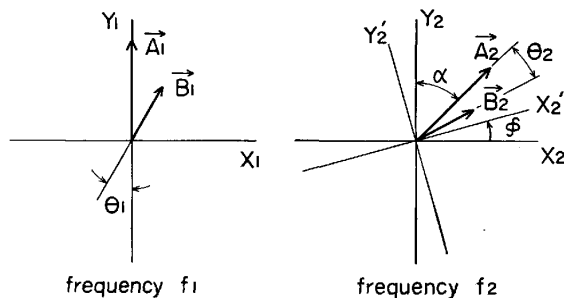


Fig. 8. Calculating model for signal transformation.

ル平面 (X_1, Y_1) での信号 \vec{A}_1, \vec{B}_1 の位相角差を θ_1 とすると、

$$\left. \begin{aligned} \vec{A}_1 &= A_1 \hat{y}_1 \\ \vec{B}_1 &= B_1 \sin \theta_1 \hat{x}_1 + B_1 \cos \theta_1 \hat{y}_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots ①$$

となる。 \hat{x}_1, \hat{y}_1 は各軸のユニットベクトルである。周波数 f_2 におけるベクトル平面 (X_2, Y_2) での信号 \vec{A}_2, \vec{B}_2 の位相角差を θ_2 、 Y_2 軸と \vec{A}_2 のなす角を α とすると

$$\left. \begin{aligned} \vec{A}_2 &= A_2 \sin \alpha \hat{x}_2 + A_2 \cos \alpha \hat{y}_2 \\ \vec{B}_2 &= B_2 \sin (\alpha + \theta_2) \hat{x}_2 + B_2 \cos (\alpha + \theta_2) \hat{y}_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots ②$$

が得られる。 (X_2, Y_2) 平面を角度 f だけ座標回転した (X'_2, Y'_2) 平面における \vec{A}'_2, \vec{B}'_2 は②式より

$$\left. \begin{aligned} \vec{A}'_2 &= A_2 \sin (\alpha + f) \hat{x}'_2 + A_2 \cos (\alpha + f) \hat{y}'_2 \\ \vec{B}'_2 &= B_2 \sin (\alpha + f + \theta_2) \hat{x}'_2 + B_2 \cos (\alpha + f + \theta_2) \hat{y}'_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots ③$$

となる。 (X_1, X'_2) 平面での \vec{A}, \vec{B} は①③式より

$$\left. \begin{aligned} \vec{A} &= A_2 \sin (\alpha + f) \hat{x}'_2 \\ \vec{B} &= B_1 \sin \theta_1 \hat{x}_1 + B_2 \sin (\alpha + f + \theta_2) \hat{x}'_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots ④$$

であるから、 \vec{A} と \vec{B} が直交する条件 $\vec{A} \cdot \vec{B} = 0$ より

$$f = -\alpha \text{ もしくは } f = -(\alpha + \theta_2)$$

を得る。 $f = -\alpha$ なる回転操作は \vec{A}_2 を Y_2 軸に設定することに相当し、 $f = -(\alpha + \theta_2)$ の回転操作は \vec{B}_2 を Y_2 軸に設定することに対応する。

さて信号 \vec{A}, \vec{B} は Fig. 8 に示すような直線ベクトルでは示されず、8字型パターン (Fig. 7(b) 参照) となるため、実際の波形を考慮して $f = -\alpha, f = -(\alpha + \theta_2)$ の回転操作後の演算結果をシミュレートすると Fig. 7 (b) のごとくなる。 $f = -\alpha$ の回転操作では信号を直線ベクトルで近似したモデルの場合、④式より \vec{A} 信号は零となるが、8字パターンモデルでは零とならず位相弁別に適した条件とはならない。 $f = -(\alpha + \theta_2)$ の回転操作では両者を良好に弁別できる。よつて簡易多重回転方式では後者の演算条件を用いることとした。

3.1.3 二周波渦流探傷のテスト結果

渦流探傷では周波数の選定が試験結果の良否を決定する因子となる。オッシレーションマーク信号と欠陥信号を弁別するには、その位相角差が最大となる周波数を選定すべきである。各種の非磁性材料に 2mm 深さの人工欠陥と深さ 1mm のオッシレーションマークモデルを加工し、比抵抗と両信号の位相角差が最大となる周波数 f_{opt} の関係を求めた。結果を Fig. 9 に示す。用いた材料はアルミニウム、鉛、ステンレス鋼 (SUS 304)、ニクロムであり、いずれの場合も位相角差の最大値は 10

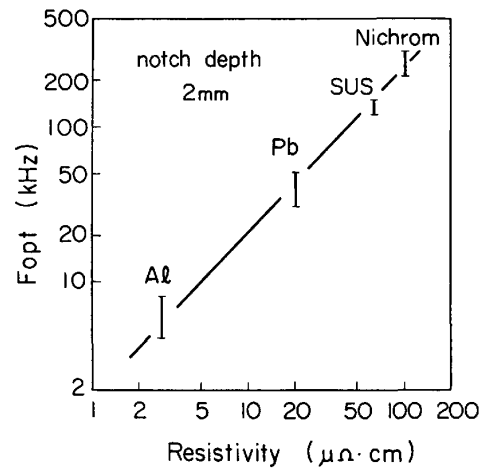
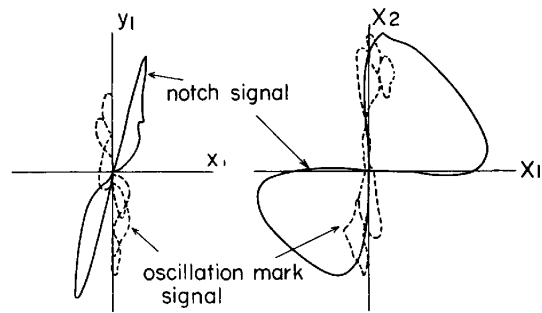


Fig. 9. Relation between resistivity and optimum frequency (f_{opt}) for phase discrimination.



(a) Single frequency $f = 256 \text{ kHz}$ (b) Dual frequency $f_1 = 128 \text{ kHz}$, $f_2 = 256 \text{ kHz}$ (multirotation)

Fig. 10. Difference of signal pattern between single frequency method and dual frequency method.

~20° であつた。

熱間鋼の比抵抗は約 $120 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ (温度 1000°C) であるため、Fig. 9 より 250 kHz 程度の周波数で位相角差が最大になると推定される。よつて二周波法では 256 kHz と他の周波数の組み合わせをテストした。

ステンレス鋼片のオッシレーションマーク底部に人工欠陥を施し、オッシレーションマーク信号と欠陥信号のパターンを得た。Fig. 10 より二周波法・簡易多重回転処理により、Fig. 7 (b) に類似の信号パターンが得られた。本方式ではオッシレーションマーク信号と欠陥信号のパターンの差が強調され、単周波法に比し両信号の弁別が容易となる。

3.2 オンラインテスト

住友金属和歌山製鉄所 No. 3 連铸機ピンチロール出側で横び割れの検出を目的に二周波渦流探傷法の実用性をテストした。横び割れの発生が予想されるスラブエッジ近傍 200 mm の全域を探傷可能なように、スラブ幅方向に 60 mm ピッチで配置された 3 個のプロープ

を铸込方向から 10° 傾けて走査する方式を採用した。信号処理には二周波簡易多重回転方式を用い、二周波処理後の X 成分信号振幅で結果を評価した。

探傷チャートの一例を Fig. 11 (a) に、欠陥深さと信号出力の関係を Fig. 11(b) に示した。深さ 1 mm 以下のオシレーションマーク信号の振幅は低く、深さ 2 mm 以上の横ひび割れを良好に検出できた。しかし深さ 1.5 mm 以上のオシレーションマークが散在する探傷面の信号振幅は大きくなり、これら信号の抑制が不十分であることを示している。これら信号の弁別法につい

ては第 5 章で考察する。

4. 表皮下欠陥の検出

表面直下に存在する横ひび割れも圧延により表面欠陥となるものが多く、その有害度は高い。渦流探傷法では渦電流の表皮効果により、表皮下欠陥の検出は困難である。住友金属鹿島製鉄所第一製鋼工場で製造される連铸铸片では主に表皮下欠陥となることが観察されている。そこで溶剤により表層を除去し表面欠陥として検出する方式を検討した。

4.1 探傷方式

探傷方式の模式図を Fig. 12(a) に示す。この方式は下記に示す利点を有す。

(1) 連铸铸片固有のオシレーションマークを溶剤により除去し平滑な探傷面を得ることを可能とする。このことはオシレーションマーク信号の抑制が不要であることを意味する。

(2) 溶剤によりスラブ表層部の温度が上昇する。溶剤直後では表面下 1 mm の温度上昇は約 250°C であり、このことはスラブ表面温度が探傷不能域にあつても、これを回避することが可能なことを示している。

(3) 探傷の前処理に用いる溶剤火口は欠陥の手入れにも活用可能である。

オシレーションマークは溶剤代 1.5 mm ではほぼ除去可能で横ひび割れは溶剤面上の表面疵となる。Fig. 12 (b) には溶剤面上の横ひび割れ、コーナー割れを検出した一例を示した。オシレーションマークの除去された平滑な探傷面では単周波法 (周波数 64 kHz) ですべての欠陥が良好に検出される。

4.2 実用装置の開発

厚板向スラブのホットチャージ拡大を目的に鹿島製鉄所厚板工場・加熱炉入側に横ひび割れの検査・手入れが同時に実施可能な装置を設置した¹¹⁾。

横ひび割れの発生はスラブ幅方向の特定位置に限定されるため、オペレータがスラブ幅方向の任意の位置に探傷ヘッドを設定できる機構とした。装置の構成を Fig. 13(a) に示す。検査・手入れは次の手順で行われる。

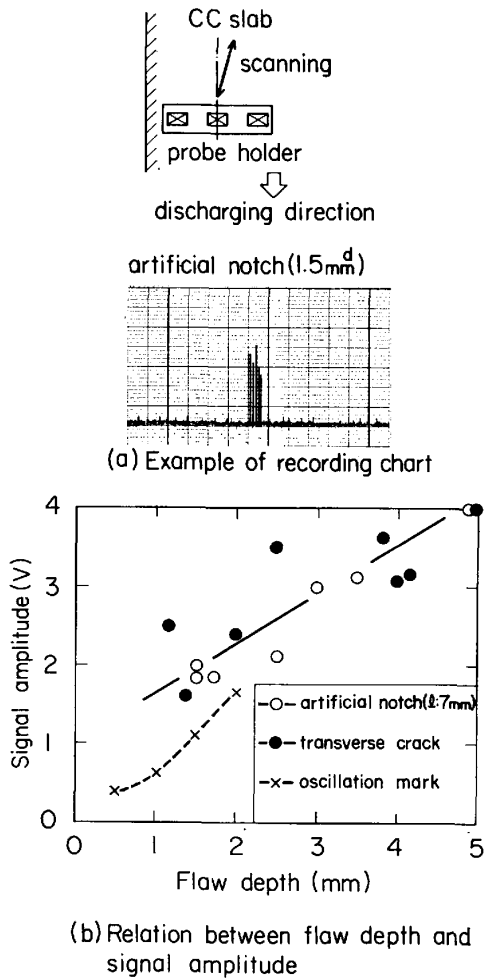


Fig. 11. Result of on-line test.

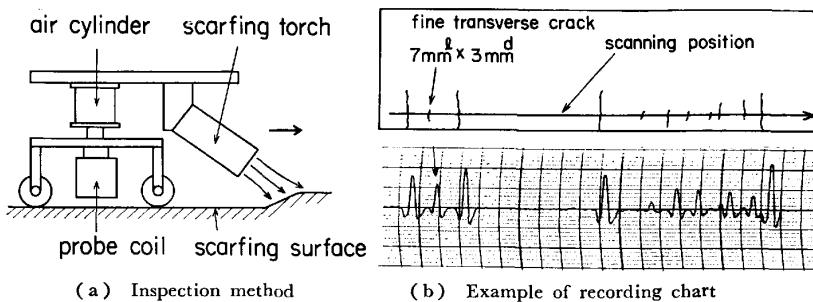


Fig. 12. Detection of subsurface crack.

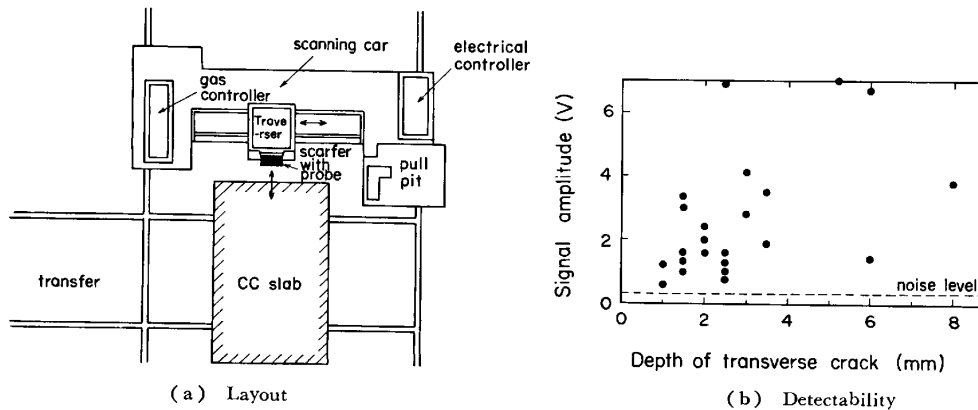


Fig. 13. Eddy current system combined with scarfer for detection of subsurface crack in CC slabs.

(1) スラブがトランスファにより探傷ステージに移送される。

(2) 横行台車が移動し、横ひび割れの発生が予想される部位に溶削・探傷ヘッドがセットされる。

(3) 走行台車がスラブ長手方向に走行する。往路で探傷の前処理のための部分溶削を行う。復路で溶削面上のノロを除去しながら探傷を実行する。

(4) 探傷結果に基づき、疵手入れのための溶削を行う。手入れ用の溶削火口は探傷の前処理火口と同一のものを使用する。

溶削では瞬時着火のためのアークラン方式や、サイドフィンのつかない溶削火口を開発した。またエンドフィン除去についても配慮されている。

ここでは往路で溶削、復路で高圧水によるデスケーリング後探傷する方式を採用しており、探傷時のスラブ表面温度は 650°C 以下の強磁性域に保たれるため、探傷ヘッド走行時の振動は単周波法における位相解析により抑制できる。探傷結果は一走査中(探傷幅 80 mm)の疵個数で表示され、走査域中の疵個数の多い部位が選択的に手入れされる。Fig. 12(b)には欠陥深さと信号出力の関係を示した。欠陥深さ 2 mm 以上の横ひび割れの検出が可能である。

5. 考 察

連铸スラブの表面疵検出を目的に渦流探傷法の適用を検討し、高精度探傷にはスラブ表面のオッシレーションマークに起因する信号やリフトオフ変動信号(オッシレーションマーク信号と同一の位相特性を示す)を抑制することが重要であることがわかった。

温間の強磁性域の探傷ではリフトオフ信号と欠陥信号の位相弁別が可能であることから、高温非磁性域の探傷に比し渦流法の適用は容易で、前述のごとく表皮下欠陥

検出用の自動チェックスカーフ付渦流探傷に実用化した。

しかし省エネルギーの観点から、次工程に搬送するスラブ温度はより高温化すると予想され、高温域での探傷のニーズが高くなると思われる。

高温非磁性域でのオッシレーションマーク信号の抑制のため、簡易多重回転方式による二周波渦流探傷技術を開発した。本方式は通常深さのオッシレーションマーク信号の抑制に効果があることが確認されたが、局部的に深いオッシレーションマーク信号の抑制は十分ではない。一般に深いオッシレーションマーク底部には横ひび割れの発生頻度が高く、このような場合の両信号の弁別法も検討しておく必要がある。本章では一般に識別が困難と予想される局部的に深いオッシレーションマークとその底部に欠陥の存在する場合の弁別能に関し従来法と開発した方法を比較し、それらの特質を明らかにする。

Fig. 14 にはステンレス鋼板上に加工された深さ 2 mm のオッシレーションマークモデルと人工欠陥が混在する場合の信号パターンを示した。単周波法では試験周波数が 128 kHz, 256 kHz の結果とも 2 mm 深さのオッシレーションマークモデル (Type (I)) とその底部に加工された人工欠陥 (Type (III)) の信号パターンは類似しており、両者の弁別は困難である。また同図に示す X 成分振幅比 (X_{III}/X_I) と X 成分振幅対 Y 成分振幅 ($(X_{III}/Y_{III})/(X_I/Y_I)$) の結果より、128 kHz と 256 kHz で Type (I) と Type (III) の信号パターンにほとんど差のないことがわかる。このことから二周波法で従来用いられていた単純回転方式の信号演算では Type (I) の信号の消去に伴い Type (III) の信号の残留が小さくなり、欠陥信号のみを抽出することが困難であることがわかる。このことは Fig. 6 の結果からも明らかである。

簡易多重回転方式を用いた場合、X 成分振幅比でも、

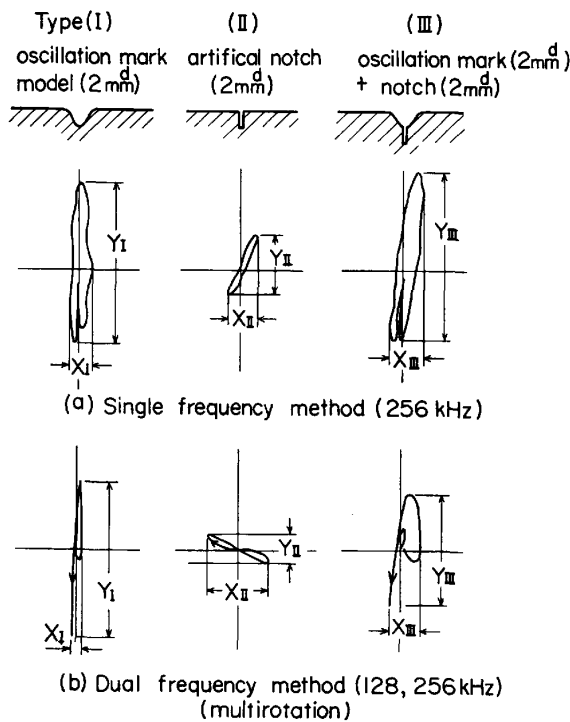


Fig. 14. Signal patterns of artificial notch at the bottom of oscillation mark.

Type (I) と Type (III) の識別は可能であるが、2つの信号のパターン差に着目すれば、更に弁別能を向上させることができる。すなわちX成分振幅とY成分振幅の比で評価すれば、その弁別能は2倍程度向上する。このことはオシレーションマーク底部に欠陥が存在する場合の信号 (\vec{C}) が、オシレーションマーク信号 (\vec{A}) と人工欠陥信号 (\vec{B}) のベクトル加算された複合信号となり、 \vec{A} に比較して \vec{C} のX成分、Y成分が各々増加、減少するようにBの信号パターンが調整されたことから理解できる。簡易多重方式の特徴は不要信号の抑制が可能なように信号パターンを変換できることにある。

単純回転方式が不要な信号の消去を目的としたのに対し、簡易多重回転方式は不要信号を消去するのではなく不要信号と欠陥信号のパターン差を強調するところに特徴をもつ。よって信号パターン差を識別するパラメータを適切に選定することにより弁別能が向上する。その一例を Fig. 14 に示すオシレーションマークモデルの弁別で示した。

多重回転方式については 3.1.2 で述べたように 2 種

類の不要信号の抑制に提案された方法であり、6個の位相回転器による不要信号の抑制例が示されている。位相回転器の設定条件に関してはその詳細が示されておらずオシレーションマーク信号の抑制効果については明らかでないが、著者らが提案した演算条件を適用すれば同様の効果が得られるものと思われる。しかしオシレーションマーク信号のみが抑制の対象となる場合には、3個の位相回転器を用いた簡易多重回転方式で十分であり、回路構成の単純化と設定条件の簡略化において、本方式の工業的価値は高いと思われる。

6. 結 言

連铸スラブの HCR 拡大を目的に、微小表面欠陥を熱温間で探傷可能な渦流探傷技術を開発した。表皮下欠陥の検査・手入れが可能な自動チェックスカーフ付渦流探傷システムは現在鹿島製鉄所にて稼動中である。またオシレーションマークに影響されずに欠陥検出が可能な二周波渦流探傷技術を開発した。この方式では二周波処理に加え信号波形解析を併用することにより高精度な探傷が可能となる。両方式とも深さ 2mm 以上の横ひび割れを良好に検出できる。また後者の方法は、今後他の鉄鋼製品の渦流探傷における欠陥検出精度向上に寄与するものと思われる。

文 献

- 1) 白岩俊男, 広島龍夫, 松井健一, 久保幸雄, 尾崎孝三郎: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 2020
- 2) 岩崎全良, 木邑信夫, 中井康秀, 西元善郎, 浦本明博, 広瀬 勇: 鉄と鋼, 65 (1979), S 248
- 3) 橋尾守規, 渡部忠男, 中塚康雄, 相馬正幸, 広島龍夫, 松井健一: 鉄と鋼, 65 (1979), S 826
- 4) 平川紀夫, 儀間真一, 豊田利夫, 松原俊郎: 鉄と鋼, 67 (1981), S 137
- 5) 上杉満昭, 山田健夫, 堀内好浩, 吉野正人, 山下元, 小森重喜, 宮野治夫: 鉄と鋼, 67 (1981), S 138
- 6) R. M. BOZORTH: Ferromagnetism (1951), p. 714 [D. Van Nostrand Company]
- 7) 例えば, 近角聴信: 強磁性体の物理 (1961), p. 75 [裳華房]
- 8) 例えば, 非破壊検査便覧(日本非破壊検査協会編) (1978), p. 662
- 9) H. L. LIBBY: Research Technique in Nondestructive Testing (Volume II) (1977), p. 151 [Academic Press]
- 10) T. J. DAVIS: Material Evaluation (1980) Jan., p. 62
- 11) 中西章人, 友部 保, 花崎一治, 木村 武, 広島龍夫, 坂本隆秀, 大垣一朗: 鉄と鋼, 68 (1982), S 1154