



漏洩磁束探傷法による 薄鋼板内部微小欠陥検出技術

田辺 英也*・松藤 泰大*・四辻 淳一*・安藤 静吾*・西藤 勝之*・稲葉 護*²

Technology of Detecting Minute Inclusions in Light Gauge Steel Sheets Using
the Magnetic Leakage Flux Method

Hideya TANABE, Yasuhiro MATSUFUJI, Junichi YOTSUJI, Seigo ANDO, Katsuyuki NISHIFUJI and Mamoru INABA

Synopsis : The leakage magnetic flux inspection method is effective for detecting minute inclusions in light gauge steel sheets. However it has been not put to practical use at on-line manufacturing processes, because the sensitivity of conventional magnetic sensors was not enough to detect such minute inclusions.

Then we have developed a new high sensitivity magnetic sensor which has higher sensitivity by 100 times in comparison with conventional ones, and have realized an on-line inspection system for detecting minute inclusions in light gauge steel sheets.

For higher detectability and higher speed inspection, we had to make clear the influence of stray magnetic field and the change of magnetic field generated by the travelling of light gauge steel sheets.

We have analyzed changes of magnetic field at the on-line inspection of light gauge steel sheets running at very high speed by computer calculation programs. On these results, we have developed a shield technique from stray magnetic disturbance and on-line high speed inspection technique.

Key words : magnetism ; the leakage magnetic flux method ; magnetic field ; computer analysis ; auto-bias circuit ; inclusion ; sensor ; steel sheet.

1. 緒言

漏洩磁束探傷法は薄鋼板の微小欠陥検出に有効な手法である。薄鋼板の主力商品の一つであるブリキ鋼板は、容器材料、特に食缶材として用いられ、フランジ加工時の割れの発生原因となる素材表面の微小欠陥や内部の非金属介在物をいかに除去するかが品質上の大きな課題であった¹⁾。これらの欠陥を検出するため、従来より主に磁粉を用いた漏洩磁束探傷法がオフラインでのサンプル検査に適用されてきた。

近年品質要求は益々高度化し、素材表面の微小欠陥や内部非金属介在物に対しても、不良缶根絶のため製品の全幅、全長検査が要請されるようになってきた。これらの $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ mm}^3$ 程度の微小欠陥検出は方法論的に漏洩磁束探傷法に限定されるため、この方法の製造ラインでのオンライン化の実現が製品の全面検査を初めて可能にする。

ブリキ鋼板製造メーカーは長年にわたりその開発を推進してきたが、なかなか実用化が進展しなかったのは、従来型の磁気センサの検出感度が微小欠陥からの微弱な磁束を検出するには不十分であったこと、またその検出感度がセン

サを被検材表面より離すと急激に低下するため、センサを極力被検材表面に近づけ、その距離を一定に保持しなければならず、エンジニアリング面での困難さから、この要求を満足する技術が容易に確立できないことにあった。

これらのブレイクスルー技術として、新たに従来型の100倍以上の感度を有する可飽和型の高感度磁気センサを開発し、薄鋼板の微小欠陥検出のオンライン化を実現したが、更に高精度・高速探傷を目指すためには浮遊磁界の影響や高速走行する鋼板を磁化する際に生起する特異な磁場変化等を解明する必要があった。

そこでオンラインでの薄鋼板漏洩磁束探傷時の磁場挙動を詳細な磁場解析に基づき解明したので、その結果を報告する。

2. 漏洩磁束探傷法

漏洩磁束探傷法は、鋼板を直流磁化し、欠陥部位での磁気抵抗の増大により外部に漏洩する磁束（漏洩磁束）を磁気センサにて検出するものである。その漏洩磁束は概して欠陥寸法にほぼ比例するため、フランジ割れの原因となる

平成4年11月4日受付 平成5年4月9日受理 (Received on Nov. 4, 1992 ; Accepted on Apr. 9, 1993)

* NKK基盤技術研究所 (Applied Technology Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

* 2 NKK福山製鉄所 (Fukuyama Works, NKK Corporation)

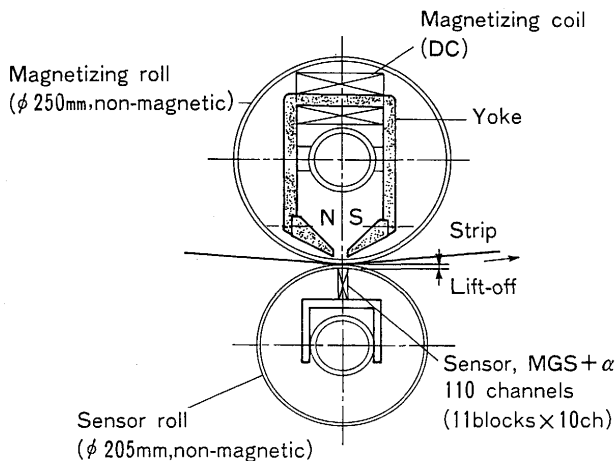


Fig.1. Double-roll coupling mechanism for leakage magnetic flux detection.

微小表面欠陥や非金属介在物からの微弱な漏洩磁束を検出するためにはそれだけ高感度な磁気センサを必要とする。

Fig. 1 に新たに開発した可飽和型の高感度磁気センサ MGS+ α を磁気センサとして組み込んだオンライン漏洩磁束探傷装置の構成図を示す。MGS+ α の開発により、従来にはない高い検出能と広い有効検出幅を得、またその高感度によって、従来型センサに比べて鋼板表面からより離れた位置にセンサを配置できることからセンサ内蔵のロール型検出ヘッドの採用が可能となり、安価で単純かつ安定な装置構成を実現した。本装置では、磁気センサは欠陥部によって発生する漏洩磁界の垂直成分を検出している。

3. 高感度磁気センサMGS+ α の原理と特性³⁾

従来漏洩磁束探傷法に用いられてきた磁気ダイオード、磁気抵抗素子等の磁気センサに代わり、新たに開発した過飽和型の高感度磁気センサMGS+ α の動作原理をFig. 2 に示す。強磁性体コアにコイルを巻き、このコイルに発振器

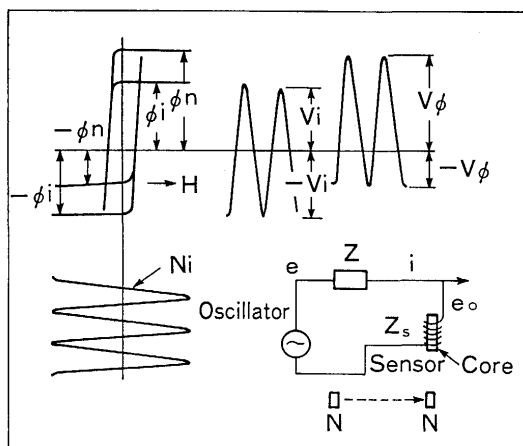


Fig.2. The principle of high sensitivity magnetic sensor MGS+ α .

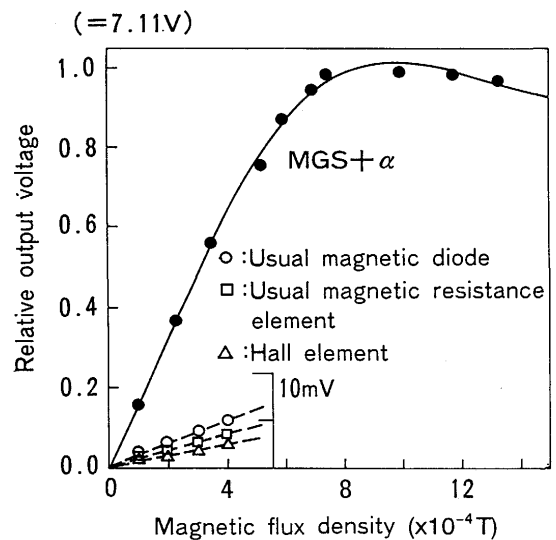


Fig.3. Detecting sensitivity.

からインピーダンスを介して交流電流を供給し強磁性体コアを飽和域まで磁化する。センサに外部磁界が交差しないときは、交流電流の正負で対称にコアは磁気飽和領域まで磁化される。このため、コイルに生じた出力電圧の正極性 (V_i) と負極性 ($-V_i$) の振幅は等しい値となる。センサに外部磁界が交差すると、強磁性体コアには外部磁界と交流磁界とが合成される。このため、外部磁界が加算されるときには小さい値の交流磁界でコアは飽和し、その逆では大きい値の交流電流で飽和する。従って、コイルに得られる出力電圧の正極性と負極性の振幅に差が発生する。この振幅の差分を検出することによって外部磁界を測定することができる。

Fig. 3 に各種磁気センサの感度比較を示す。図より、MGS+ α の動作範囲は0.001テスラ以下と狭いが、検出感度が極めて高く地磁気の1/100まで測定可能であることがわかる。

4. 高精度及び高速探傷への課題と対策

MGS+ α は薄鋼板のオンライン漏洩磁束探傷実用化への道を開いたがさらに高精度化、高速化を図る上で幾つかの考察を要した。一つは、本装置構成において鋼板表面に定常的に存在する浮遊外乱磁界による、欠陥検出能力の悪化である。もう一つは、鋼板の高速移動に伴う誘導磁界の発生による、磁気センサの飽和現象の問題である。高感度磁気センサMGS+ α は、Fig. 3 に示したごとくそのダイナミックレンジが0.001テスラ以下と狭いため、高速探傷領域において誘導磁界が発生し、その垂直成分が磁気センサのダイナミックレンジを超えてしまうと、探傷不能となってしまう。

前者については、まずFIM磁場解析プログラム (CRC社製) を用いて浮遊外乱磁場の状態を解析した。その上で浮

遊外乱磁場の侵入を防止する磁気シールド技術を確立し、欠陥検出能の向上を図った。後者については、高速漏洩磁束探傷における誘導磁界の挙動を実験及び磁場解析により考察し、その補償法を考案した。

4・1 外乱磁気シールド技術

4・1・1 静磁場解析による浮遊磁界の考察

(1) 磁場解析における簡易モデル

欠陥検出能力に影響を及ぼす要因として励磁系、鋼板の速度、鋼板の材質及び板厚等が上げられるが、ここでは鋼板速度は考慮に入れず、磁化条件を規定のものとし2次元非線形解析を行った。Fig. 4に解析のための簡易モデルを示す。

(2) シールド材の有無による磁束線図

Fig. 5に磁気センサの両側にパーマロイをシールド材として設置した場合としない場合についての、板厚0.4mmでの健全部浮遊磁界及び0.2mm幅の貫通スリット欠陥による漏洩磁界の磁束線図を示す(表示範囲はFig. 4の斜線部)。図より、母材健全部においても、磁束が磁気センサ部に漏洩

していることがわかる。シールド材を設置したときの、母材健全部の磁束線図を見ると、シールド材による浮遊磁界の吸引が認められる。シールドにより、磁気センサ部を横切る磁束が粗になるとともに、その流れが水平になっていることが明らかになった。

(3) 解析結果及び考察

欠陥検出能に対するシールドの効果を評価するため、欠陥漏洩磁束密度の垂直成分をS、健全部浮遊磁束密度の垂直成分をNとして、 S/N を求めた。理想状態では磁極間中心線上の浮遊磁界の垂直成分は0になるが、実際の探傷においては走行中の鋼板の傾きや張力分布の変化等により、必ずしも磁極間中心線上で0にならない。そこでこれらの仮定として磁極間中心線上から0.5mm離れた位置での磁気センサ長(5mm)分の磁束密度の積分値を用いて評価を行った。

シールドは磁束を粗にし、かつ水平方向の流れとするため、漏洩磁束の垂直成分を検出する方式ではその効果は非常に大きい。シールド効果の一例として、鋼板の板厚変化

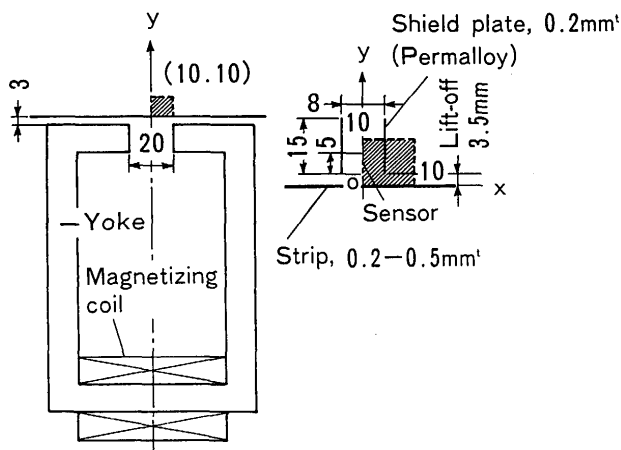


Fig. 4. Model for analysis of shielding effect on stray magnetic field.

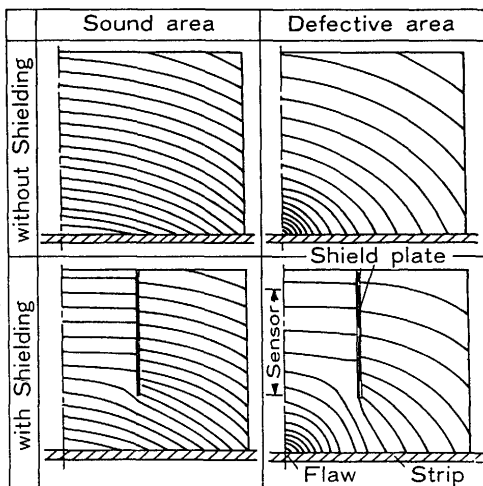


Fig. 5. Magnetic flux diagrams by 2nd dimensional FIM.

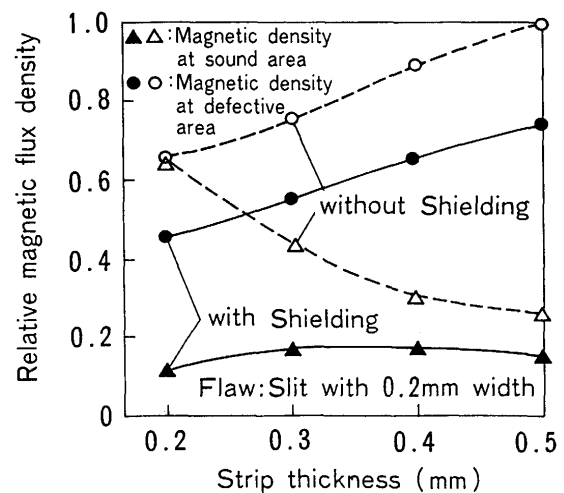


Fig. 6. Change of magnetic flux density according to strip thickness.

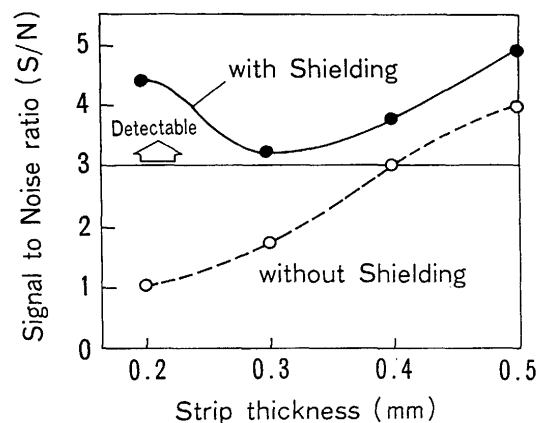


Fig. 7. Shielding effect on S/N according to strip thickness.

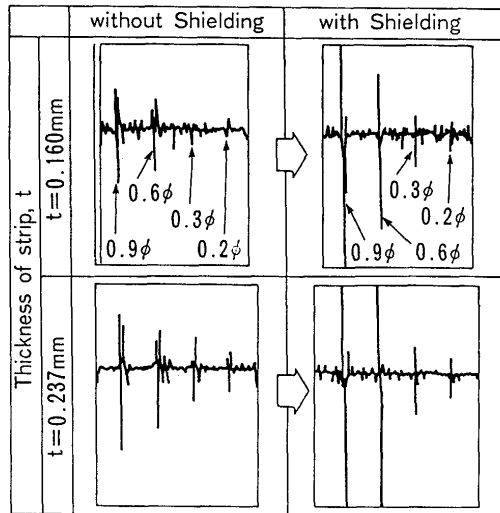


Fig.8. Flaw signals obtained with and without shielding.

がリフトオフ3.5mmにおける欠陥検出感度及びS/Nにどのように影響するか解析した結果を、Fig. 6 及びFig. 7 に示す。

解析条件として鋼板を飽和域まで十分に磁化すると、板厚の増加とともに鋼板中の磁束が増加し、その結果として同一幅貫通スリット欠陥による漏洩磁束は増加する。一方、母材健全部における浮遊磁界は、板厚の増加に伴って減少する。したがって板厚が薄くなるとS/Nは低下し、シールド無しの場合にはオンライン探傷での欠陥検出可能な値として許容される $S/N \geq 3$ を考えると、0.2mm幅のスリットの欠陥を板厚0.4mm未満では、リフトオフ3.5mmで検出できないことがわかる。

これに対しシールド有りの場合、欠陥漏洩磁束密度はやや減少するものの浮遊磁束密度が抑制され、従来検出が困難であった板厚の薄い鋼板に対しても、十分なS/Nが確保できることがわかる。

4.1.2 実際の磁気シールド¹⁾²⁾

Fig. 8 は、解析したものと同一形状の磁気シールド材(パーマロイ)を実際に適用したときとしないときの、欠陥波形である。シールド効果により、リフトオフ3.5mmにて $\phi 0.2$ mm人工欠陥を $S/N = 4 \sim 5$ で検出できるようになった。

4.2 高速探傷技術

4.2.1 動的磁場の挙動解析

(1) 実験による解析

高感度磁気センサを用いた検出ロールでの、鋼板速度に対する欠陥検出感度変化をFig. 9 曲線Aに示すが、高速化により感度は著しく低下することがわかる。Fig.10は磁極間中心線上のリフトオフ3 mmの位置に設置されたホール素子センサにて、鋼板(板厚0.24mm)健全部での浮遊磁束密度の垂直成分(B_y)及び、水平成分変化(B_x)を測定したものである(励磁コイル巻数600T、直流磁化電流0.5A)。浮遊磁束密度の垂直成分は、鋼板速度の増加とともに直線的に大きく増大する。一方、水平成分は減少するが比較的变化

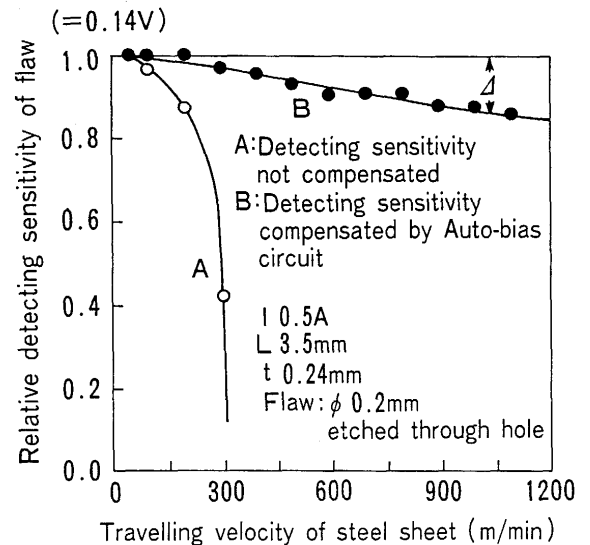


Fig.9. Travelling velocity dependence of detecting sensitivity.

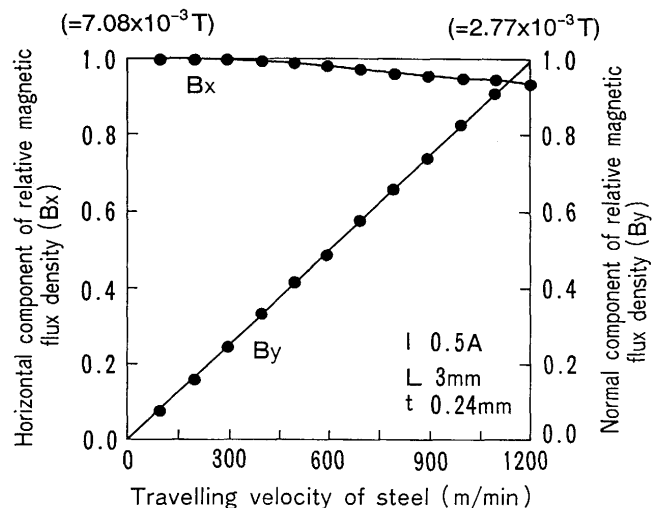


Fig.10. Change of stray magnetic field according to travelling velocity of steel sheet measured by Gaussmeter.

量は小さい。高速域で検出感度が低下するのは、磁気センサが浮遊磁束の垂直成分を検出する方式のため、高速になると垂直方向のバイアス磁界が上昇し、センサのダイナミックレンジの制約からFig. 3 にて示したような、飽和現象を招いてしまうためである。

(2) 数値計算による解析

半無限大の鋼板が直流磁化ヨークにて形成される静磁場中を移動することによって発生する、渦電流については理論式が導出されている⁴⁾。この半無限大鋼板中の磁界は、Fig. 11に示すように磁化ヨークによる強制磁界と渦電流による誘導磁界のベクトル和となり、結果的に通板方向へ磁束が倒れ込む形となる。そこで板厚を限定した場合の磁束の倒れ込みを解析するため磁場解析ソフトを用いて数値計算を行った。解析は2次元線形計算で行い、ヨークの形状はFig.

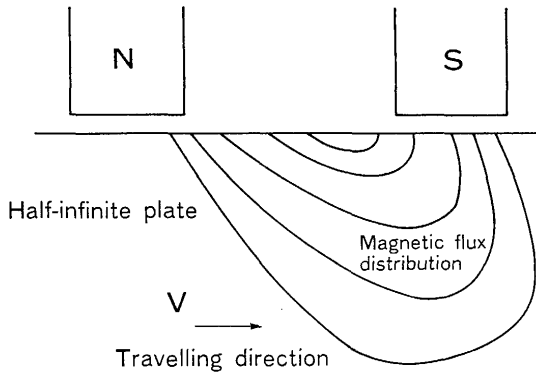


Fig.11. Deformation of magnetic flux distribution in half-infinite plate running at speed of V .

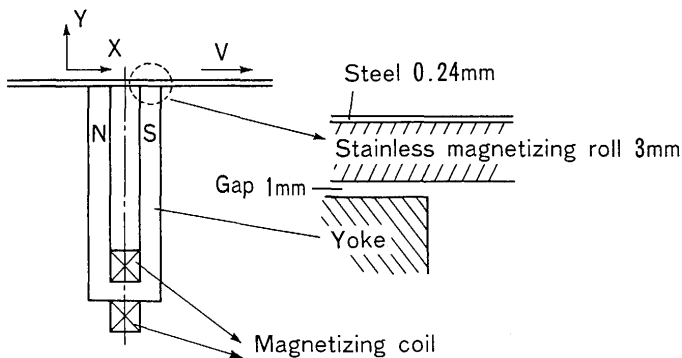


Fig.12. Model for analysis of velocity effect.

12に示すように簡略化し、また磁極間隔は、静磁場状態でのリフトオフ3mmにおける垂直成分から求められる見かけ上の磁極間隔が、実験値に等しくなるように設定した。なお、パラメーターは、以下の値を使用した。

- ・鋼板 比透磁率 250
 電気伝導度 $9.1 \times 10^6 \text{ } (\Omega\text{m})^{-1}$
- ・ステンレス 比透磁率 1
 電気伝導度 $1.4 \times 10^6 \text{ } (\Omega\text{m})^{-1}$
- ・ヨーク 比透磁率 2000

Fig.13に、磁極中心線上リフトオフ3mmでの、浮遊磁束密度の垂直成分及び、水平成分の速度特性を示す。図中 $B_x(v=0)$ で表される値は、速度零即ち静磁界中での、同一点での磁束密度水平成分である。Fig.14に静磁界での鋼板上部、磁極中心線上付近での磁束線図を、またFig.15に鋼板速度1200m/min下での磁束線図を示す。これらより、鋼板移動に伴う誘導磁界の発生により、浮遊磁界の通板方向への移行が見られ、実験結果同様に、その垂直成分の速度に対する直線的増加と、水平成分の若干の減少が導かれる。実験結果と解析値にて磁界変化の絶対値に相違がみられるのは、磁化ヨークの形状、或いは材料特性、特に鋼板の透磁率の非線形性に起因するものと考えられる。

4・2・2 オートバイアス回路による高速探傷¹⁾²⁾

上述した速度効果による、誘導磁界のもたらす磁気セン

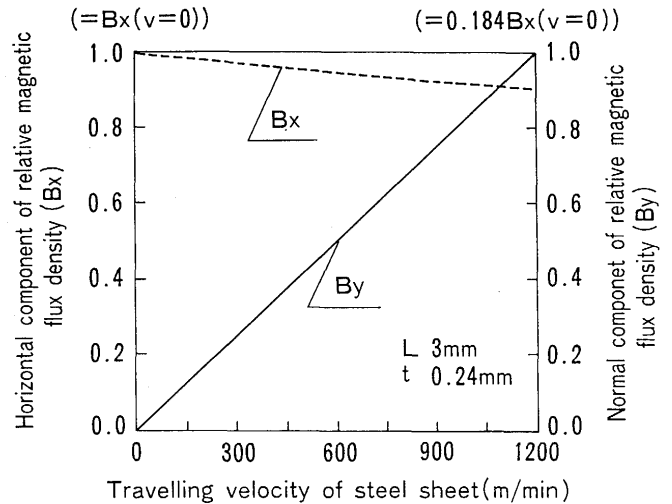


Fig.13. Change of stray magnetic field according to travelling velocity of steel sheet analyzed by computer calculation program.

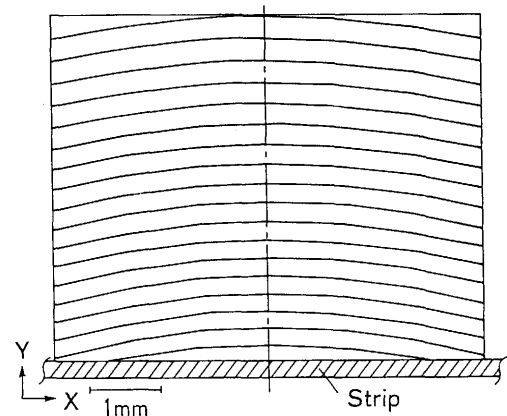


Fig.14. Static magnetic flux diagram by magnetic field analysis.

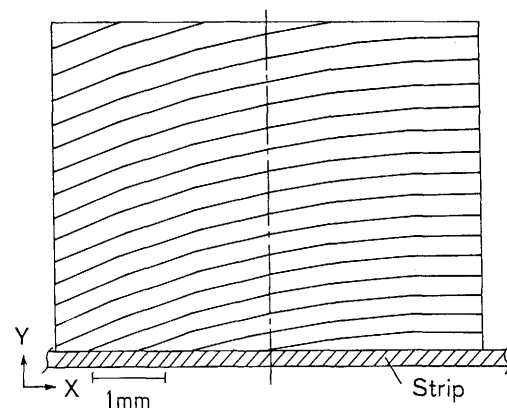


Fig.15. Dynamic magnetic flux diagram at 1200m/min by magnetic field analysis.

サの飽和現象を補償するものとして、Fig.16に示すオートバイアス回路を設けた。これは、鋼板速度上昇による誘導磁界垂直成分の増大をローパスフィルタを通して検出し、この電圧に比例した直流磁界を誘導磁界とは逆向きに磁気セ

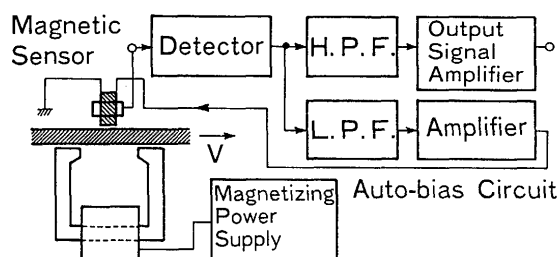


Fig. 16. Auto-bias circuit compensating for saturation in sensor sensitivity.

ンサ部に与えるものである。オートバイアス回路を用いることにより、欠陥検出感度の速度依存性は、Fig. 9 のB曲線に示すようになり、磁気センサの飽和による検出感度の低下の問題は解消された。

しかしながら、磁気センサの飽和に対する補償後においても、速度増加による検出感度の低下がまだ残る (Fig. 9 に示すΔ部分)。この感度低下は、速度300m/minを越すと無視できない量となる。この原因を以下に記す。

- ・前述した速度効果による水平磁界成分の減少、即ち鋼板の磁化力の低下が検出感度を低下させる。

- ・欠陥部からの漏洩磁束信号の鋼板速度上昇による高周波化のため、ステンレス中空ロール材及び、鋼板内での表皮効果が無視できない量になる。

この感度低下を補償するため出力信号をデータ処理する段階で、Fig. 9 のB曲線を既知とする補正が必要になる。

5. 結論

高感度磁気センサMGS+ α を応用し、外乱磁気シールド技術や高速探傷技術等の新技術を加えた漏洩磁束探傷法による、高精度オンライン薄鋼板内部微小欠陥検出技術確立した。これにより、 $5 \times 10^{-4} \text{mm}^3$ の内部微小欠陥検出が可能となり、薄鋼板の品質保証体制を大きく前進させることができた¹⁾。

特に高速探傷化に当っては、磁気センサのリフトオフ安定維持のための鋼板追従機構はもちろんのこと、鋼板移動に伴う浮遊磁界の歪みや欠陥信号の高周波化による渦電流損の影響等のいくつかの漏洩磁束探傷上のマイナス要因を比較的小規模かつ単純な装置構成で解決し、1991年3月NKK福山製鉄所において実用化を達成した。その結果、当社福山製鉄所では毎年、ガウジ欠陥によるクレームが年間10件近く発生し、また製鋼性内部介在物によるフランジ部形成時のクラックが2件程度発生していたが、本システムが導入されてからは、微小欠陥によるクレームは皆無になった。

文 献

- 1) 竹腰篤尚, 稲葉 護, 岩永賢一, 牧 宏, 安藤静吾, 保久光男: NKK技報, (1992) 138, p.63
- 2) 稲葉 護, 竹腰篤尚, 岩永賢一, 牧 宏, 古川高人, 安藤静吾, 保久光男: 鉄と鋼, 78 (1991), T13
- 3) 安藤静吾, 田辺英也, 西藤勝之: センサ技術, 10 (1990) 8, p.67
- 4) J.Lammeraner and M.Stafl: EDDY CURRENT English translation ed. by G.A.Tooms, Ph. D., (1966), p.69 [CRC PRESS]