

学術論文

SQUID による鉄道用レール白色層の検出

Non destructive test of White Etching Layer for Railway by SQUID

宮崎佳樹^{*1}, 清野寛^{*1}, 田中芳親^{*1}, 長嶋賢^{*1}, 糸崎秀夫^{*2}
 Yoshiki MIYAZAKI, Hiroshi SEINO, Yoshichika TANAKA, Ken NAGASHIMA,
 Hideo ITOZAKI

White Etching Layer generated on rail surface layer due to wheel-spin or wheel sliding, and fatigue or a microcrack by the train passage accumulates. The Ultrasonic Test is performed for the microcrack. On the other hand, White Etching Layer is noticeable as one factor of a crack, however, copes by cut of a periodical rail parietal area, rail exchange for non-establishment of an effective method. If it is possible to detect the White Etching Layer, we do not only judge the existence of crack or deterioration but also contribute to the life cycle management of the rail. In this study, we continue the examination of NDE by SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) as a rail diagnosis method in cooperation with Osaka University.

Keywords: SQUID, NDE, Eddy current, Rail, White Etching Layer.

1 緒言

鉄道用レールの頭頂面には、車輪の空転・滑走に伴う車輪-レール間の大きな滑り摩擦により、Fig. 1, Fig. 2 の写真に示すような白色層と呼ばれる熱硬化層が発生する場合がある。

白色層の周辺では微小き裂が伸展しやすく、進展した微小き裂は、レール頭頂面のはく離など、レール損傷を引き起こすことがある。白色層はこうしたレール損傷の一因となると考えられており、白色層とき裂や損傷の関係を明らかにすることが求められている[1]。

中村らは、レール頭頂面に生じる白色層について、詳細な組織分析や硬さ測定を行うとともに、反発式硬度計の原理を用いた膜厚測定システムを考案している[2]。

一方、白色層は営業線では数キロにわたって不連続に発生することもあり、このような広範囲の測定は、硬度計などの接触式検査手法では測定に膨大な時間を要する。そのため実際にはスポット的に硬さ測定、目視確認が実施されているのみであり、連続的に検査する手法は今のところ確立されていない。このような白色層の連続的な分布情報が得られれば、線区情報と白色層の発生状況、及び白色層付近の微小き裂・損傷などとの相関を検討する有効な手段となりうると考えられる。

上記のようなレール診断方法として本研究では、SQUID（超電導量子干渉素子）を用いた検出方法の基礎的検討を大阪大学と共同で進め、模擬白色層試験片による検出感度の評価、実レール白色層の検知試験を実施した。

2 レール表面に生じる白色層

レール頭頂面には、車輪の空転・滑走等に伴う車輪

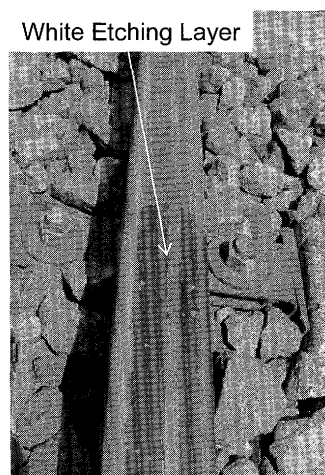


Fig. 1 White Etching Layer that occurred continually.

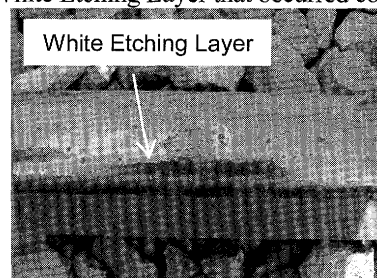


Fig. 2 White Etching Layer that occurred locally.

連絡先: 宮崎 佳樹, 〒185-8540 国分寺市光町
 2-8-38, 鉄道総合技術研究所低温システム研究室,
 e-mail: miyazaki@rtri.or.jp

*1 鉄道総合技術研究所 *2 大阪大学

-レール間の大きなすべり摩擦熱が発生し、この摩擦熱の作用によりレール表層に白色層と呼ばれる熱変態組織（マルテンサイト）が形成され、その白色層を起点とするき裂によりレールが損傷する場合がある。

レール鋼はフェライトとセメンタイトの微細な層状組織であるパーライト-ラメラ構造となっている。

白色層は、車輪転動時の転がりすべり接触による応力誘起（Fig. 1）と、車輪空転時の急激な加熱・急冷によるもの（Fig. 2）があると考えられている。白色層組織は、こうした応力、熱誘起により、母材表面に硬度の高いマルテンサイト相が発生したものと考えられる[3]。

実際のレールに生じた白色層断面写真を Fig. 3 に示す。白色層はパーライト組織より硬度が高くエッチングされにくいいため、腐食剤（ナイトール：硝酸+エタノール溶液）を塗布すると白く浮き出て見える。

この白色層とき裂の関係は、これまでほとんど定量的な知見が得られていない。現在、白色層の厚さと硬さ、白色層とそれを含むレール表層の残留応力、塑性流動及びき裂の発生状況との関係などが検討されている。たとえば白色層の厚さと硬さについては、ビッカース硬さでは、レール母材で300Hvに対して、白色層ではFig. 4 に示すように800Hvと非常に硬くなることがわかっている[4]。



Fig. 3 White Etching Layer.

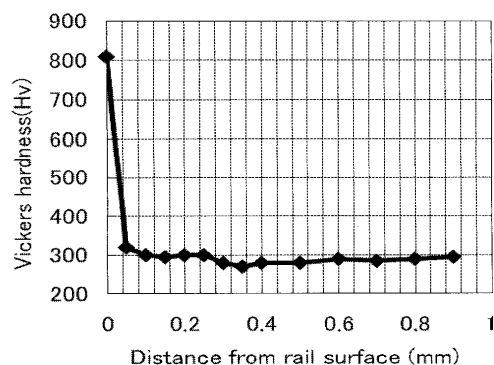


Fig. 4 Vickers hardness of rail materials.

3 模擬白色層の作成

レール母材に半導体レーザーで表面改質を施し、マルテンサイトを生成した標準試験片を製作した。製作した模擬白色層試験片を Fig. 5 に示す。白色層厚さについては、膜厚 20μm がひとつの境界厚さと言われている。そこで試験片は 20μm 付近から 100μm までの膜厚、及び模擬白色層生成状態観察用に膜厚 1mm のものを製作した。SQUID 測定用試験片については、まず厚い層で検出可能性を確認し、膜厚 5μm で回路パラメータの調整を行う方針をとった。また、エッジの影響をなるべく避けるため、測定面積を 100mm×100mm と大きくしている。Fig. 5 に試験片の外観、Fig. 6 に断面観察写真を示す。

膜厚 1mm の模擬白色層試験片について、表面からいくつかの異なる深さ位置のビッカース硬さを測定した。試験片の表面からの深さと、ビッカース硬さの関係を Table 1 に示す。

Fig. 6 に示すように、模擬層膜厚は 920~925μm とほぼ均一な厚みで形成されていることが確認できた。また、Table 1 より、模擬層の表層 100μm から模擬層-母材境界付近 920μm まで硬さが安定していることがわかる。

これらの結果より、本試料模擬層はおおよそ均一なマルテンサイト組織になっていると考えられる。実際の白色層ではオーステナイトや微細パーライトが含まれる複雑な組織ではあるが、白色層の主成分がマルテンサイトであること、実際の白色層と同程度の硬さを

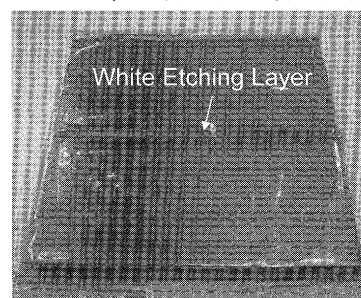


Fig. 5 Specimen of White Etching Layer.

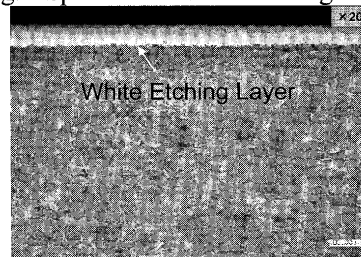


Fig. 6 White Etching Layer in a cross section.

有していることから、マルテンサイトが物性を代表するとし、製作した試験片を模擬白色層標準試験片とした。

次に、レール母材と、模擬白色層（マルテンサイト）

について、電磁気的な基本物性である電気抵抗率、比透磁率を測定した。

物性測定用に試験片を下記のように加工した。抵抗率測定用試料にレール母材および模擬白色層（マルテンサイト層）を1mm厚短冊状に切り出し、磁化測定用試料にはレール母材および模擬白色層を3mm厚リング形状（外形10mm、内径5mm程度）に切り出した。

抵抗率測定用試料について、4端子法にて電気抵抗率を測定した。抵抗率の平均値は母材で $0.24 \mu\Omega\text{m}$ 、模擬白色層で $0.34 \mu\Omega\text{m}$ であった。

磁化特性は、リング形状の試料にコイルを巻き、交流電流を印加することでヒステリシス特性および透磁率の周波数特性を測定した。Fig. 7, Fig. 8にレール母材および模擬白色層のヒステリシス特性、Fig. 9, Fig. 10にそれぞれの透磁率-周波数特性を示す。ヒステリシス特性は $\pm 4000\text{H/A}$ の範囲で、透磁率-周波数特性は50Hz, 500Hz, 5 kHz, 10 kHz, 100 kHzの周波数で測定を行った。

Fig. 7, Fig. 8より、レール母材に比べ、模擬白色層の磁束密度が小さくなるのがわかる。これは、マルテンサイト内部に固溶した炭素原子が、磁化を妨げる働きをするからだと理解できる。

また、Fig. 9, Fig. 10から、模擬白色層の交流透磁率は、母材にくらべ周波数特性がフラットであることがわかった。

Table 1 Vickers hardness of rail material.

Thickness(μm)	100	500	820	920
Vickers hardness(Hv)	844	854	846	824

4 SQUIDによる白色層検知方式の検討

白色層検知は、表層の硬化層検出であり、鋼材の焼入れ層の検出方法の適用が検討できる。焼入れ層の評価には、渦電流法や四端子法、超音波法などが検討されてきた。また、最近では漏洩磁束法による検出も検討されている。これらの評価方法のうち、レール表層を広範囲かつ連続的に測定するには、渦電流法など、前処理の不要な非接触方式が有力であ

る。

これら従来手法の対象とする焼き入れ層の膜厚が

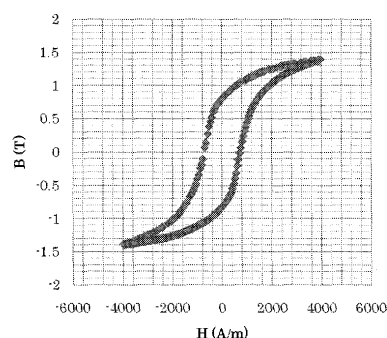


Fig. 7 BH curves of rail.

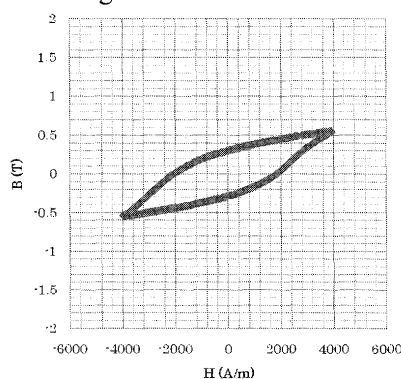


Fig. 8 BH curves of White Etching Layer.

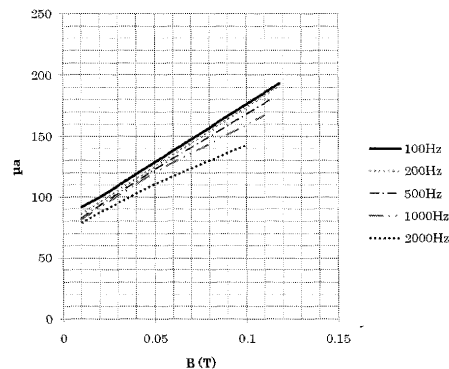


Fig. 9 Magnetic permeability of rail.

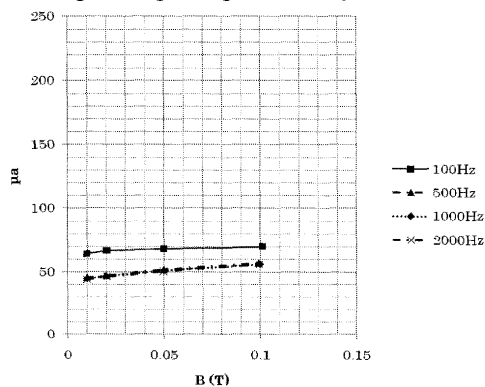


Fig. 10 Magnetic permeability of White Etching Layer.

通常 0.5～5mm 程度であるのに対し、鉄道用レール表層に生成する白色層については、膜厚が 10～50μm 程度であり、従来のサーチコイル方式の渦電流法の適用は難しい。そこで、SQUID を用いた高感度な検出について検討を行った。

4.1 渦電流探傷

本報告では、SQUIDによる非破壊測定原理に、前処理が不要かつ非接触で測定が可能な渦電流法を採用している[5, 6]。渦電流は、Fig. 11の励磁コイルに生じる交流磁場により誘起される。コイルは差動型であり、2つの励磁コイルが試験体に作る渦電流分布が試験体不良箇所で不均一となった場合、その差分が、渦電流の作る磁場としてSQUIDで観測されることとなる。SQUID直上に配置されたバランスコイルでは、励磁コイルのわずかな非対称性による交流磁場がSQUIDに入力されないようバランス調整する役割をしている。渦電流探傷では、励磁電流や励磁周波数、励磁コイル径によって感度や空間分解能が決定する[7]。以下の模擬試験片や実レールの測定では、これらのパラメータを調整して検知パラメータを決定した。

導体中の電磁界を決定するための基礎方程式は、

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{i} \quad (2)$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

である。ここで、 $\mathbf{E}$ は電場、 $\mathbf{B}$ は磁束密度、 $\mathbf{H}$ は磁場、 t は時間、 $\mathbf{i}$ は電流密度を現す。これらに加えて、等方的な導体であれば補助関係式として、

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}, \quad \mathbf{i} = \sigma\mathbf{E} \quad (4)$$

が用いられる。 μ は透磁率、 σ は導電率である。

(1)～(4)式から、導体に生じる渦電流 $i_0(x)$ は、

$$i_0(x) = i_0(0)e^{-\sqrt{j\omega\mu\sigma}x} \quad (5)$$

となる。ここで x は導体深さ、 ω は磁場の角周波数を表す。(5)式より、導体に透磁率、抵抗率が異なる部分が存在すると、誘起される渦電流密度が変化し、誘導磁場分布も変化することがわかる。

4.2 測定体系

SQUID は、極微弱な磁気が検知可能な超電導磁気センサであり、非破壊検査への応用が研究されてきた[8]。今日まで、航空機検査、原子炉圧力容器の経

年劣化診断や配管き裂検査、発電タービンブレードの疲労検知といった分野へ、SQUID を応用することが検討されている。

SQUID を環境磁場下で動作させる場合や、特に鉄鋼試料など磁性体試料に適用する場合、SQUID のダイナミックレンジを越える磁気ノイズを入力しない工夫が必要である。SQUID を環境磁気ノイズ下で安定動作させる場合には、グラジオメータなどの導入[9]、鉄系試料の測定には補償回路を用いた測定例がある[10]。本体系においては、Fig.11 の模式図に示すようなフィードバックループにより、環境磁気及びレール試料の残留磁気ノイズを除去している。

測定体系は Fig. 12 のようになっており、SQUID からの信号はロックインアンプにより位相検波される。本測定は、SN 比を稼ぐために磁気シールド内で実施した。

フィードバックシステムは、励磁周波数よりも低周波の磁気ノイズを、フィードバックコイルにより SQUID に反転入力し、SQUID に入力される低周波

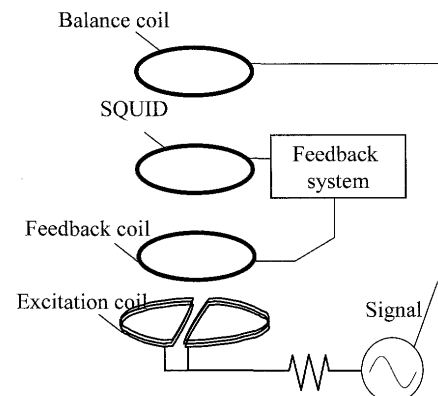


Fig. 11 Measurement principle of SQUID NDE.

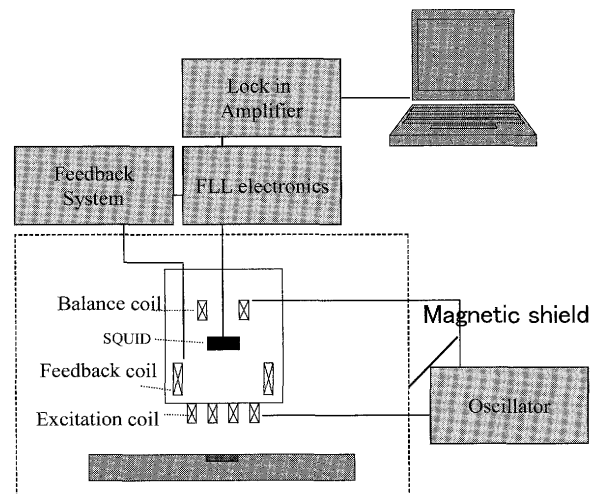


Fig. 12 Measurement System of SQUID NDE.

磁気ノイズがゼロになるよう制御している。試作したフィードバックシステムのノイズ除去効果を Fig. 13 に示す。本フィードバックシステムは、信号に用いる 100~3kHz 程度よりも低周波のノイズ成分を、LPF を用いて除去している。Fig. 13 より、低周波域で 13dB 程度のノイズ低減効果があることがわかる。

5 模擬白色層試験片測定結果

模擬白色層試験片について模擬層検知試験を実施した。Table.2 に測定条件を示す。測定は、SQUID を固定して試験片を XY ステージ上で移動して行った。

Fig. 14 に測定した膜厚 5 μm の模擬白色層試験片の写真、Fig. 15 に測定結果を示す。Fig. 14 の y 方向への走査を、x 方向に 2mm ピッチで繰返し、2 次元的な信号分布を得ている。Fig.15 のコンターはロックインアンプの出力を表す。縦軸 35mm 付近で一様に信号が変化していることが確認できる。これは模擬層の存在する場所とよく一致しており、膜厚 5 μm 程度の層までが検出可能であることが分かった。

実際の白色層厚さについては膜厚 20 μm がひとつの境界厚さと言われており、20~40 μm を超えるとき裂が発生すると言われている。模擬白色層の測定結果より、膜厚 5 μm まで十分な検出感度を有しており、実レーン白色層の検出可能性を示すことができた。

さらに、白色層の膜厚について、定量的な知見を得るため、模擬白色層を用いた膜厚測定を行った。試験片は、膜厚 120 μm 、140 μm 、150 μm を作成した。測定は白色層を横切る方向に実施し、ロックインアンプを用いて、励磁信号に対する渦電流信号の位相変化を比較した。測定結果を Fig. 16 に示す。図の横軸は試験片位置、縦軸はその位置での位相変化を表す。また、図中に模擬白色層の位置及び幅(約 4mm)を示している。

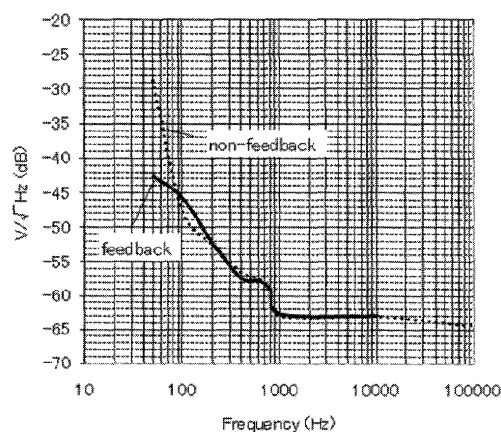


Fig. 13 Noise density.

Fig. 16 より、膜厚の増加に従い位相変化も大きくなることがわかる。特に膜厚 140 μm と 150 μm の試験片では、10 μm の差異を明瞭に確認することができる。

Table 2 Conditions of measurement of Martensite.

Excitation coil diamet	8mm
Current	440mA
Frequency	1kHz
SQUID	14nT/V
Liftoff	8mm

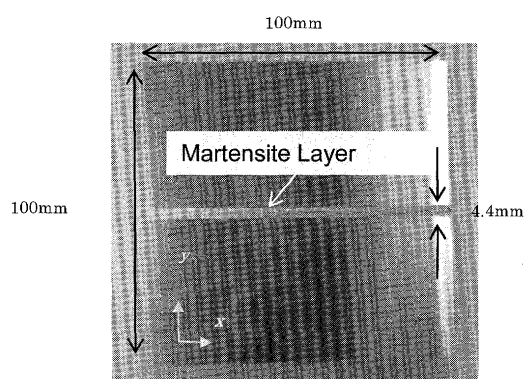


Fig. 14 Specimen of Martensite layer.

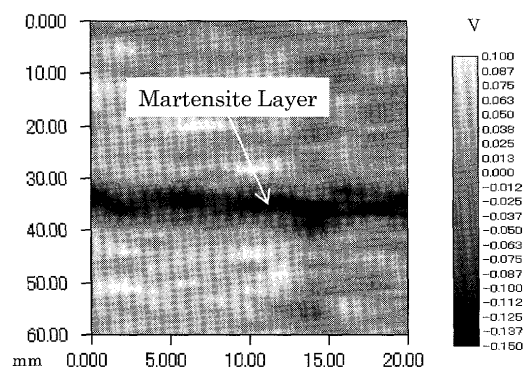


Fig. 15 Result of measurement.

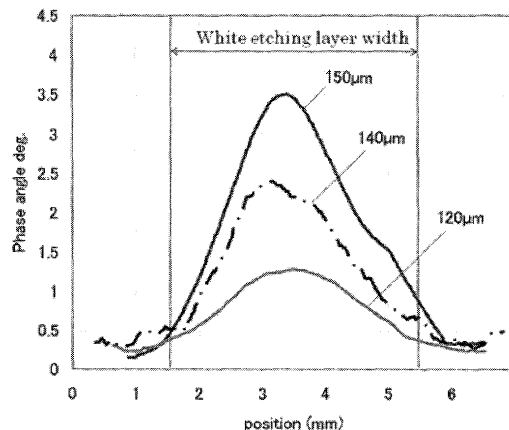


Fig.16 Signal phase change with a thickness of white etching layer.

実レール白色層の膜厚についても、位相情報を利用することで、膜厚を推定できる可能性があると思われる。

6 実レール白色層の検出

模擬白色層の測定結果を踏まえ、実レール白色層の検知試験を行った。測定条件を Table.3 に、測定に用いた実レール白色層試料を Fig. 17 に示す。図中 A, B で示した部分に白色層があり、測定は Fig.17 に示した枠内 (A, B を含む 30mm×20mm) について行った。

白色層の膜厚については、測定領域近くを実際にカットし、断面観察した結果から、30 μ m 程度と推定される。Fig. 18 に測定結果を示す。コンター強度は SQUID の出力電圧である。白色層の存在する A, B の箇所での信号変化が確認できる。

白色層のないレールでは、こうした信号変化は確認

Table3 Conditions of measurement of rail.

Excitation coil diamet	20mm
Current	80mA
Frequency	200Hz
SQUID	14nT/V
Liftoff	8mm

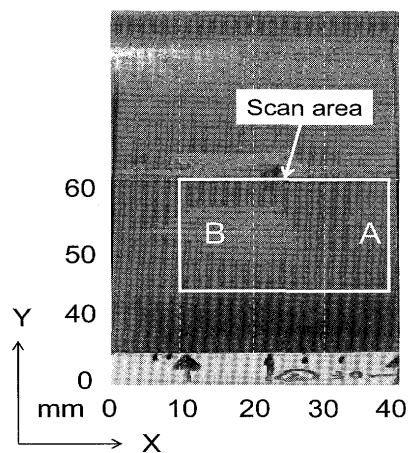


Fig. 17 Specimen of White Etching Layer Rail.

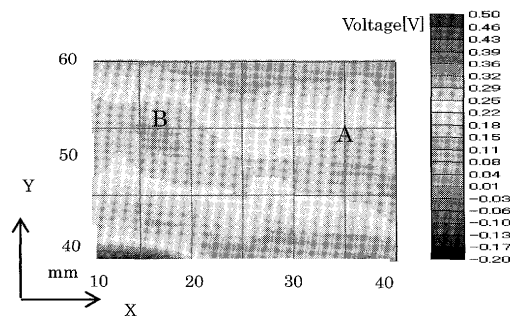


Fig. 18 Result of measurement.

されなかったことから、測定結果は白色層部の組織変化 (パーライト→マルテンサイト) などによる物性変化をとらえたものと考えられる。

7 まとめ

レールに生じる白色層の磁氣的・電氣的物性の変化について、SQUID を用いた渦電流測定による非破壊検知手法を検討した。白色層を模擬した標準試験片の物性評価を行い、抵抗率・透磁率ともに母材との有意差異を確認した。

模擬白色層試験片での検知試験では、膜厚 5 μ m 程度まで検出可能であることが分かった。また、位相情報から、白色層の膜厚を推定できる可能性を示した。

次に実レールの測定では、白色層位置に対応する信号変化をとらえることができた。

以上の基礎的検討から、SQUID によるレール白色層の検知可能性について示すことができた。今後はさらに白色層の深さ分布や形状推定法について深度化していくと共に、フィールドでの測定が可能な走行型の検査装置の開発に取り組む予定である。

(2008 年 10 月 23 日受付, 2008 年 12 月 24 日再受付)

参考文献

- [1] 中村崇, レール白層の特性評価と診断手法, トライポリジ会議, 佐賀, 2007.
- [2] 中村崇, 反発係数を用いたレール表面硬化層の評価, 第 11 回鉄道技術連合シンポジウム, 2004.
- [3] 中村崇, レール白色層の組織分析およびその削正について, 第 14 回鉄道技術連合シンポジウム, J-RAIL2007.
- [4] 金鷹, レール表面に生じる白色層の実態分析, RTRI REPORT Vol. 19, No. 9, 2005
- [5] 神村 武男, 熱交換器伝熱管の保守検査における渦電流探傷技術の変遷, 非破壊検査第 53 巻 3 号, 2004.
- [6] 葛西直子, 超電導量子干渉素子による材料の非破壊評価, 応用物理, 第 47 巻, 4 号, 1998.
- [7] 日本非破壊検査協会編, 渦流探傷試験 I ~ III
- [8] 糸崎秀夫, 高温超伝導 SQUID, 低温工学, Vol.33, No.10, pp.650-655, 1998.
- [9] 葛西直子, SQUID の非破壊検査への応用, J. IEE Japan, Vol.120, No.4, 2000.
- [10] D. F. He, M. Daibo, and M. Yoshizawa, Mobile HTS rf SQUID Magnetometer, IEEE TRANSACTIONS OF APPLIED SUPER- CONDUCTIVITY, Vol.13, No.2, pp200-202, 2003