

SQUID を用いたレール白色層の検出手法

宮崎 佳樹* 長嶋 賢* 清野 寛*
 田中 芳親* 荒井 有気* 糸崎 秀夫**

Non Destructive Test of the White Layer on Rail Surface by the SQUID

Yoshiki MIYAZAKI Ken NAGASHIMA Hiroshi SEINO
 Yoshichika TANAKA Yuuki ARAI Hideo ITOZAKI

Railway rail often suffers from generation of a hard and brittle thermal transformation structure called “white layer” due to slip / slide of wheels at the time of traction / braking of a train. Micro cracks are expected to develop around the white layer and the developed micro cracks may cause rail damage such as separation of a tread surface. Accordingly it is required to clarify the relationship among the white layer, cracks and damage. In this research, non-destructive inspection of white layers using superconducting quantum interference device (SQUID) has been studied, and an improved system that can detect the white layer in the field is reported.

キーワード：SQUID, 非破壊検査, 渦電流, レール, 白色層

1. はじめに

鉄道用レールには、車輪の空転・滑走により表層部に、白色層（White Layer: WL）と呼ばれる硬くて脆い熱変態組織が発生することがある。白色層はその表面や内部に微小き裂が発生し、それらのき裂を放置したままレールの使用を続けると、レール頭頂面に図1に示すようなシェリングと呼ばれる損傷を生じ、レール破断の原因となることがある。このため、き裂の監視やレール交換に多くの労力と費用が投入されている^{1) 2)}。

白色層は普通レール鋼と比較して硬度が高くなることから、硬度計をレール表面に押し当てることでその存在を確認することができる。また、ナイタールと呼ばれる

腐食剤をレール表面に塗布することにより白色層を観察することができる（図2）。しかし、白色層は営業線では数kmにわたって不連続に発生することもあり、このような手法では検出に膨大な時間を要する。現在のところ、白色層を連続的に検出する手法は確立されていない。

そこで本研究では、白色層とレール鋼の磁氣的、電気的物性変化に注目し、SQUID (Superconducting Quantum Interference Device : 超電導量子干渉計)³⁾を用いた白色層の検出の検討を行ってきた。実験室レベルで実レールに生じた白色層を検出できることを確認し⁴⁾、今回屋外で測定可能な検出システム構築の可能性を得たので報告する。

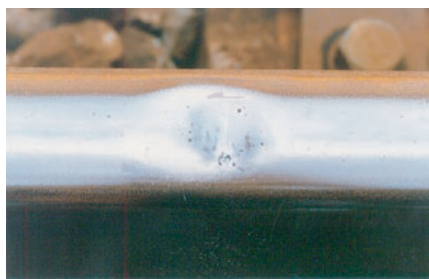


図1 シェリング外観



図2 レールに生じた白色層

* 浮上式鉄道技術研究部（低温システム）
 ** 大阪大学 基礎工学研究科 システム創成専攻

特集：浮上式鉄道技術とその応用

2. SQUID による白色層検出方法

2.1 SQUID による磁界計測の基本原則

磁気センサの中で最も高い感度を有するSQUIDは、数10 μ T程度の地磁気よりもはるかに小さな磁界を計測できる能力がある。図3にSQUIDの原理を示す。

SQUIDは、超電導の少し弱い部分である2つのジョセフソン接合で結ばれた超電導ループにより構成されている。ジョセフソン接合をもつ超電導ループの臨界電流は、ループと鎖交する磁束により変化する。この場合、超電導ループを流れる電流を外部から直接測定することはできない。そこで外部からバイアス電流を流し、これに伴って発生する直流電圧成分を測定し、臨界電流の変化を知ることにより、電流を測定することができる。

SQUIDの出力電圧は鎖交する磁束量により周期的に変化するため、このままでは出力電圧が非線形となり計測器として用いることはできない。このため測定系には磁束と電圧の関係を線形化する駆動方式が用いられている。最も一般的な手法はFLL (Flux Locked Loop) 方式である。図4にFLL回路のブロック図を示す。FLL方式は、SQUID素子の出力信号が常にゼロとなるようフィードバックコイルに積分器の出力の一部を帰還させることで、SQUIDの位相と回路の増幅率を一定に保つ駆動方式である。フィードバック量は鎖交磁束に比例するため、このフィードバック量を出力として用いることで、磁界測定が可能になる。

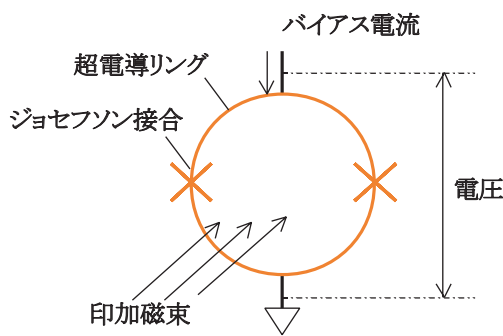


図3 SQUIDの磁界検出原理

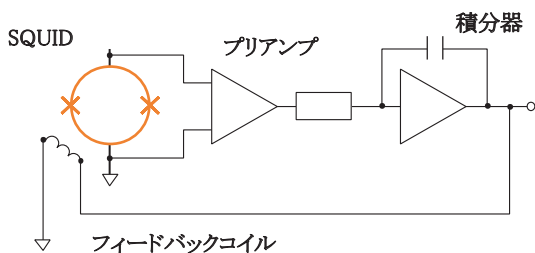


図4 FLL回路

2.2 白色層検出手法

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や、車輪空転・滑走時の急激な加熱・急冷によって、レール表面に硬度の高いマルテンサイトが発生したものである。オーステナイト系ステンレス鋼では、応力を受けることで加工誘起マルテンサイトが生成されることが知られており、母材との抵抗率や透磁率の違いを利用した非破壊検査が検討されている^{5) 6)}。

マルテンサイトである白色層においても電気・磁気物性は普通レール鋼と異なり、電磁気的な手法を用いた非破壊検査の適用可能性があるが、レール鋼、白色層ともに磁性を持つため、その差異は極微量であると考えられ、磁気センサとしてSQUIDを適用すべき対象であると考えられる。

SQUIDを用いた渦電流法の原理を図5に示す。発振器・励磁コイルによりレールに交流磁界を印加すると、レール表層にはこの磁界変化を打ち消そうとする向きに渦電流が誘起される。それとともに、渦電流による誘導磁界が発生する。渦電流は、レール表層の健全部では一定であるが、白色層の部分ではその振幅や位相が変化する。この誘導磁界の変化をSQUIDにより検出することで、白色層の有無を知ることができる。実際に用いた励磁コイルは差動型であり、2つの励磁コイルが試験体を作る渦電流分布が試験体不良箇所、つまり白色層部分で不均一となった場合、その差分が渦電流の作る磁界としてSQUIDで観測されることになる。なお、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界がSQUIDに入力されないよう調整するためのものである。

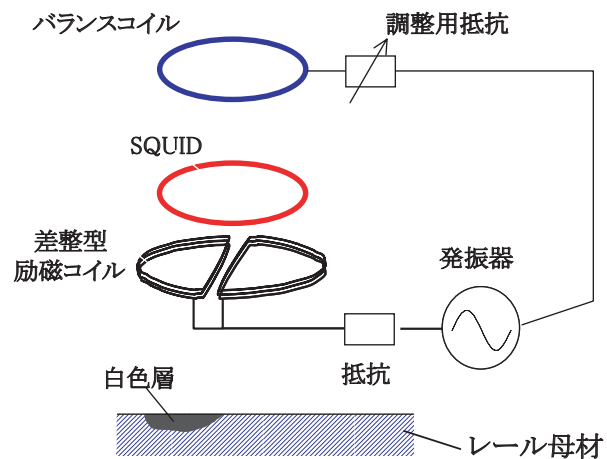


図5 SQUIDによる白色層検出原理

2.3 磁気ノイズ対策

SQUIDは超高感度であるが、その高感度ゆえに取り扱いが難しいという側面がある。地磁気程度の磁界がSQUIDに鎖交すると、ジョセフソン接合部に磁束トラップ、フラックスジャンプといわれる現象が生じ、そのままでは磁界計測が続けられないなど、磁気ノイズに非常に弱いという欠点を持っている。

また、SQUIDを環境磁気ノイズ下で安定動作させる場合には、磁界そのものではなく、磁界の空間微分を検出することで、空間的に変化しない環境磁気ノイズが直接SQUIDに鎖交しないよう工夫されたグラジオメータ⁷⁾などの導入や、SQUIDに入力される磁界成分のうち、低周波ノイズをフィードバックコイルにより打ち消す補償回路⁸⁾を用いた測定例がある。

上記のような回路構成でも強磁性体の残留磁気中でSQUIDを駆動することは容易ではなく、測定対象の多くは非磁性体であったり、残留磁気の小少な試料に限られていた。

本研究では、まず磁気ノイズの極力少ない環境でSQUIDによる白色層の検出可否を調べることにした。すなわち、レールの残留磁気については、試験片を消磁処理することで地磁気程度にまで減少させた。それでもSQUIDで試験片を走査する際には、地磁気程度ではあるが、レールの残留磁気がSQUIDに鎖交することになる。そこで、直流に近い残留磁気ノイズを打ち消す補償回路(ノイズフィードバック回路)を用い、残留磁気ノイズがSQUIDに鎖交しないようにした。さらにその他の磁気ノイズを極力抑えるため、磁気シールド内で試験を実施した。

3. 大型磁気シールドを用いた白色層検出システム

3.1 システムの概要

測定に用いたシステムの概略を図6に示す。発振器により差動型励磁コイルからレール表面層に渦電流を励起

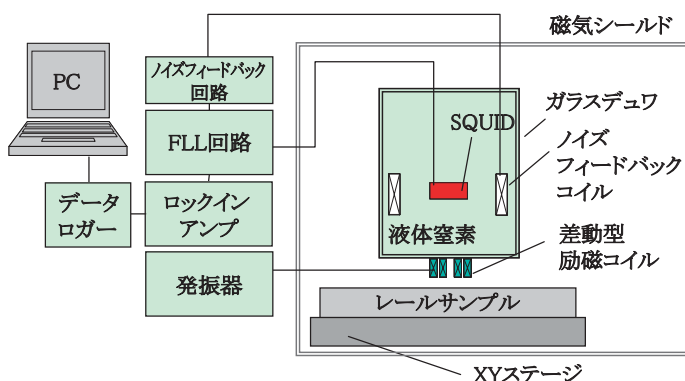


図6 白色層検出装置

し、その渦電流による誘導磁界の変化分がSQUIDに入力される。SQUIDは低温容器(ガラスデュワ)におさまられ、液体窒素で冷却されている。SQUIDに入力された磁界は、FLL回路で線形化され出力される。FLL回路の出力は交流信号の微小な振幅と位相を検出できるロックインアンプで振幅と位相情報に分解される。この情報をデータロガーにより読み取り、PCで波形として観察する。磁気シールドは、プローブ部となるガラスデュワ、レールサンプル、XYステージを覆うように設置している。レール試験片の残留磁気がSQUIDに入力されないよう、ノイズフィードバック回路によるノイズ除去を行っている。

3.2 模擬白色層試験片

試験にあたって、レール鋼表面を半導体レーザーを用いて改質し、白色層と同組織、硬さをもつ模擬白色層試験片を製作した。

製作した模擬白色層の断面観察写真を図7に示す。半導体レーザーによる表面改質により、ほぼ均一な厚さを有する模擬白色層が形成されていることがわかる。

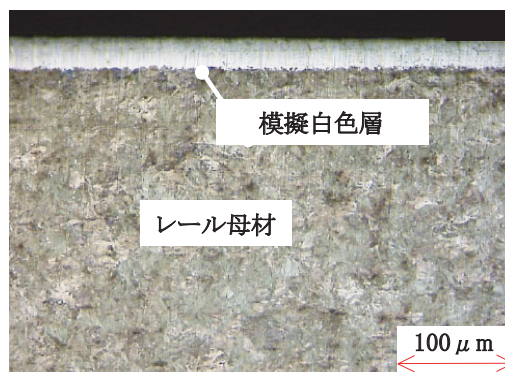


図7 模擬白色層試験片金属組織

3.3 模擬白色層および白色層検出結果

模擬白色層試験片を用い、SQUIDによる白色層検出の原理確認を行った。励磁コイルは、図5に示したように、互いに巻き線方向が逆になるよう配置した差動型励磁コイルを用いている。2つのコイルの径は4mm、差動型励磁コイルから試験片表面までの距離は約1mm、試験片表面からSQUIDまでの距離は約10mm程度となっている。発振器の励磁電圧は0.1V、励磁周波数は1kHzとした。

模擬白色層試験片の表面写真を図8に示す。試験片は100mm×100mmのレール切り出し片の中央に、幅4mmの模擬白色層を作成している。測定は図8のy方向への走査をx方向に2mmピッチで繰り返す、2次元的な信号分布を得ている。測定は試験片の残留磁気の小少な20mm×60mmの範囲について

特集：浮上式鉄道技術とその応用

行った。模擬白色層試験片の測定結果を図9に示す。コンター強度はロックインアンプの出力電圧を表しており、SQUIDの検出磁界強度に対応する。ロックインアンプの出力電圧が縦軸35mm付近で一様に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、白色層と同じ組織である模擬白色層について、厚さ5 μm 程度の検出が可能であることが分かった。実レール白色層の厚さは20~30 μm 程度であるので、十分な検出感度を有すると考えられる。

次に、模擬白色層の測定結果を踏まえ、実際のレールに発生した白色層の検出試験を行った。測定に用いた実レール白色層試料を図10に示す。測定は図10に示した枠内(A, Bを含む20mm \times 30mm)について行った。図11(a)は図10の拡大図で、A, Bで示した部分に白色層がある。白色層の厚さについては、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 μm 程度と推定される。図11(b)に測定結果を示す。コンター強度はロックインアンプの出力電圧を表しており、SQUIDの検出磁界強度に対応する。白色層の存在するA, Bの箇所に対応して、ロックインアンプの出力電圧が変化していることがわかる。

白色層のないレールでは、こうした信号変化は確認さ

れず、測定結果は白色層部の組織変化による電磁気的な物性変化をとらえられていると考えられる。

4. 屋外測定に向けた測定システム

4.1 改良した測定システム

大型磁気シールド内にて、SQUIDを用いることで白色層が検出できることを確認した。しかしSQUIDを測定対象に接近させなければならないこの方式は、頭頂面で最大1mT程度の残留磁気が存在する鉄道用レールを安定的に測定するには不利である。また、大型の磁気シールドで試験片ごと覆ってしまうシステムは、屋外に敷設された鉄道用レールに適用することはできない。これまでの測定では低周波磁気ノイズをキャンセルするためのノイズフィードバックをおこない、さらに残留磁気の影響を最小限におさえるため、測定前にレールの消磁処理を行っていた。しかし、現地で測定を行うためには、消磁など前処理の必要が無く、かつS/N比の良好なシステムが望まれる。

地磁気などの環境磁気ノイズ中でSQUIDを動作させる方法については、グラジオメータや補償回路などについて検討がなされており、SQUIDを完全に磁気シールド

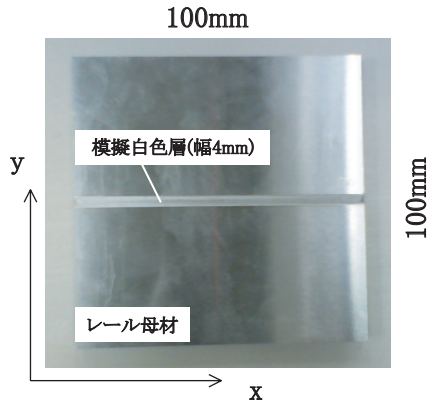


図8 模擬白色層試験片

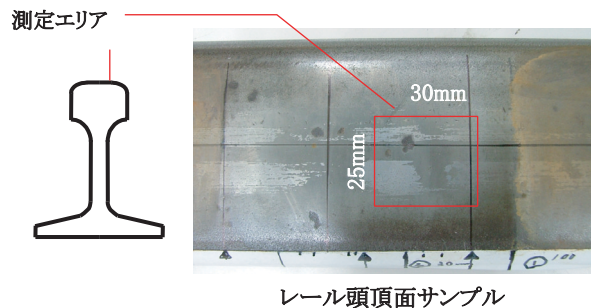


図10 実レール試験片

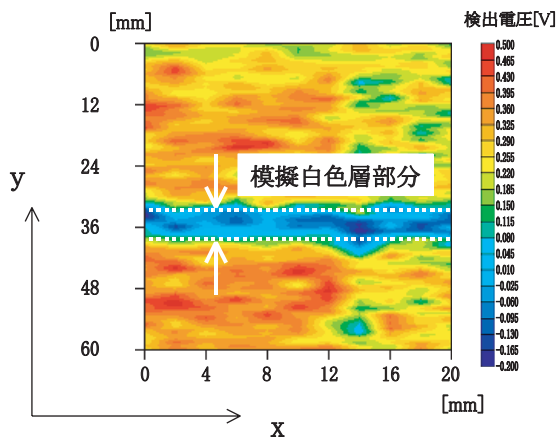


図9 模擬白色層検出結果

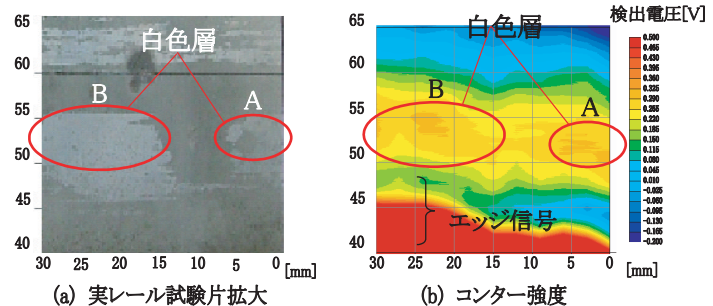


図11 実レール白色層検出結果

下に格納できる SQUID ピコボルトメータについても検討されている⁹⁾。

そこで本研究では、環境磁気ノイズおよびレール残留磁気の影響を減じるために、SQUID の測定システムを図12のように構成した。レールには、検出プローブのみを接近させる。検出プローブは差動型励磁コイル（インダクタコイル：1mH、直径5mm、室温空間に配置）で構成されており、2つのコイルはブリッジ回路により結合されている。試験片の異常個所にさしかかったときに、2つのコイルのつくる渦電流分布が変化すると、ブリッジバランスが崩れ、インプットコイルに電圧が発生する。このインプットコイルに発生した微弱磁界を SQUID が検出する。この方式では、SQUID 自体は磁気シールドに完全に格納することができ、かつレールから離れた位置に配置することができるため、レールの残留磁気の影響を受けにくい測定システムとすることができる。さらに、ノイズフィードバック回路に位相補償器を追加することで、フィードバック回路を安定化した（図13）。ノイズフィードバック回路を動作させ、SQUID を磁気

シールドに格納して動作させたときのノイズ電圧値を図14に示す。改良前の回路で、SQUID アンプが飽和する程度の磁気ノイズ（50～100 μ T）を与えた。改良後には、この程度の磁気ノイズ中でも、ノイズ電圧が発生しておらず、SQUID の安定動作が確認できた。

4.2 改良システムによる模擬白色層検出結果

前述3.3と同じ厚さ5 μ mの模擬白色層試験片をXYステージ上に載せ、検出プローブを対象からの垂直方向の距離が1mmとなるように設置した。検出プローブは固定したまま、XYステージを模擬白色層に対して垂直方向に5mm/secの速さで移動させ、改良したシステムにて測定した。発振器の励磁電圧は1V、励磁周波数は3.45kHzとした。測定の様子を図15に示す。渦電流信号はSQUID出力として得られ、これと励磁信号の位相差をロックインアンプにより比較した。位相差の測定結果を図16に示す。模擬白色層のある位置を通過する際に、明確な位相差変化が得られていることがわかる。

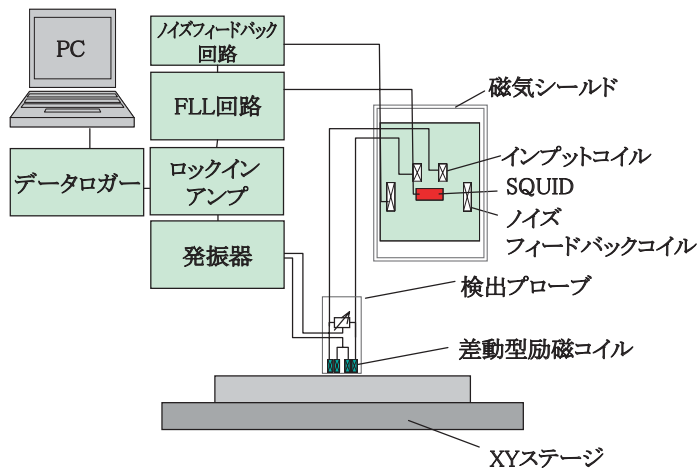


図12 改良した測定回路

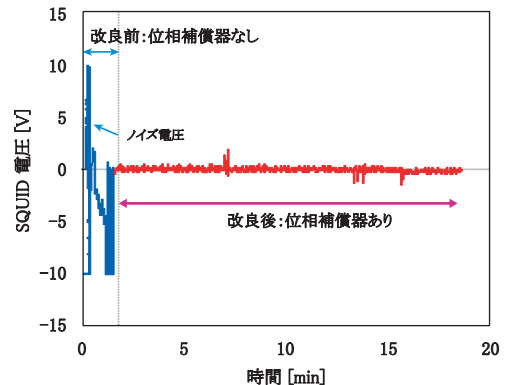


図14 改良回路のノイズ低減効果

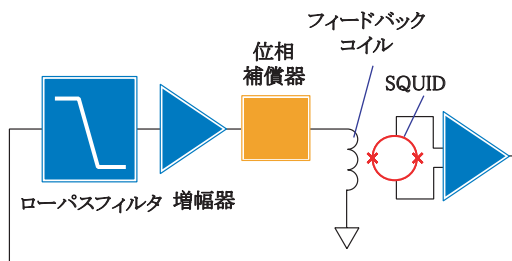


図13 ノイズフィードバック回路

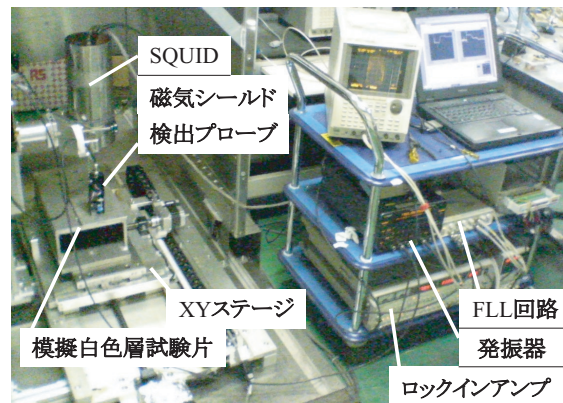


図15 改良測定装置概観

特集：浮上式鉄道技術とその応用

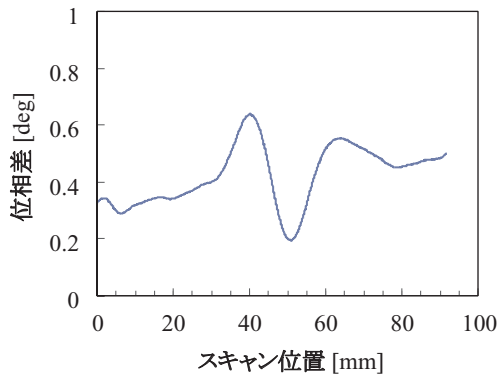


図 16 模擬白色層検出結果

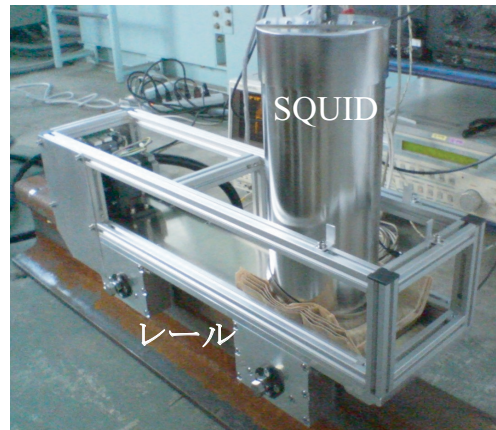


図 17 レール白色層検出装置

5. まとめ

現地でのレール白色層測定に向け、ノイズの影響を受けにくい回路方式を採用し、かつノイズフィードバックを併用することで SQUID を安定に動作させることができた。また、模擬白色層測定を実施し、装置の基本特性を確認した。

一方で、本システムは SQUID と被測定物の間に、ブリッジ回路や入力コイルで構成される中間回路があり、この中間回路での信号減衰や伝達特性が、回路全体の特性に影響を与える。そのため、今後は白色層をより感度よく検出するための回路パラメータの最適化が必要である。

現在、図17に示すようなレール上をステッピングモーターにより自走 (5~70mm/sec) 可能な測定装置を製作し、屋外適用試験を進めつつ、回路パラメータの最適化に取り組んでいる。

文 献

1) Anders, E. et al: "Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading – an overview," *Wear* 258, pp.1288- 1300, 2005.
 2) 金鷹, 石田誠: レール表面に生じる白色層の実態分析, 鉄道総研報告, Vol.19, No.9, pp.17-22, 2005

3) 糸崎秀夫: 高温超伝導 SQUID, 低温工学, Vol.33, No. 10, pp.650-655, 1998
 4) 宮崎佳樹, 岩松勝, 古澤孝之, 糸崎秀夫: SQUID を用いたレール白色層の検出に関する基礎試験, 鉄道総研報告, Vol.21, No.9, pp.41-46, 2007
 5) LOIS, A. et al: "Assessment of martensite content in austenitic stainless steel specimens by eddy current testing," *Insight*, Vol.48, No.1, pp.26-29, 2006.
 6) 薬師寺輝敏, 岡茂八郎, 吉田敬志, 榎園正人, 植田雄二: 残留磁気測定法による SUS304 鋼の疲労被害検出 (生活温度範囲における平面曲げ疲労), 日本機械学会論文集, Vol.72, No.724, pp.1970-1977, 2006
 7) 葛西直子: SQUID の非破壊検査への応用, *J. IEE Japan*, Vol.120, No.4, pp.215- 218, 2000
 8) He, D. F., Daibo, M., and Yoshizawa, M.: "Mobile HTS rf SQUID Magnetometer," *IEEE TRANSACTIONS OF APPLIED SUPER- CONDUCTIVITY*, Vol.13, No.2, pp.200-202, 2003.
 9) Yao, K.: "Eddy Current Testing Utilizing Cooled Normal Pickup Coil and Superconducting Quantum Interference Device Picovoltmeter," *Comparison between Experiment and Analysis*, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.45, No.6A, pp.4994-4999, 2006.