

超電導磁気センサーによるレール白色層の検出

浮上式鉄道技術研究部 低温システム
研究員 宮崎 佳樹

1. はじめに

鉄道用レールは、車輪の空転・滑走により、表層部に白色層(White Etching Layer: WEL)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¹⁾。白色層の周辺では微小き裂が発生しやすく、き裂の進展により、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。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。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。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⁾。また、腐食剤を頭頂面に塗布することにより目視確認が可能だが、長距離を連続的に検査する手法は今のところ確立されていない。こうした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。

上記のような白色層検出方法として本研究では、SQUID(超電導量子干渉計)³⁾を用いた非破壊検査手法の基礎的検討を進め、屋外で測定可能な検査装置を開発した。また、模擬白色層及び模擬き裂試験片を用いて検出感度の評価を行い、検査装置の有効性を検証した。

2. レール表面に生じる白色層

レールに生じた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(図1参照)。

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と、車輪空転時の急激な加熱・急冷によるもの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。白色層が厚くなると、き裂の発生確率が高まると考えられているが、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。たとえば白色層の硬さについて、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800Hvと非常に硬くなることがわかっている⁴⁾。

本研究では、白色層検知の原理確認と、任意の膜厚の白色層を評価するため、半導体レーザーを用いてレール切り出し片の表面に、マルテンサイトを生成した模擬白色層試験片を製作した。この模擬白色層試験片を図2に示す。模擬白色層を1mm



図1 レール頭頂面に発生した白色層

生成した試験片の表面からの深さ(膜厚)と、ビッカース硬さの関係を表 1 に示す。おおよそ均一なマルテンサイト組織になっており、実際の白色層と同程度の硬さを有していることがわかる。

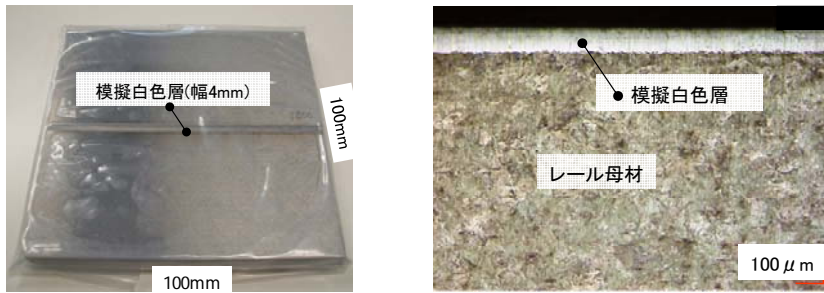


図2 模擬白色層試験片(左) 試験片断面(右)

表1 模擬白色層の硬さ

模擬白色層膜厚(μm)	100	500	820	920
ビッカース硬さ(Hv)	844	854	846	824

3. 超電導磁気センサー “SQUID”

磁気センサーの中で最も高感度の超電導量子干渉計 (Superconducting Quantum Interference Device :SQUID) は地磁気(数 10 μTesla)の 5 千万分の 1 以下の非常に小さな磁界を計測できる能力がある。このような超高感度な磁気センサーである SQUID はさまざまな分野に応用できる。医療分野では脳磁図, 心磁図検査などへの応用が始まっており, バイオ関連ではマイクロ磁気ビーズを用いた抗原抗体反応による免疫診断の研究が進んでいる⁴⁾⁵⁾⁶⁾。非破壊検査の分野では航空機, 原子炉などの構造体の疲労やき裂検査, 食品や工業原料などへの磁性体不純物混入検出などへの適用が検討され, 一部導入例もある。さらに地質調査や地殻変動調査への可能性についても精力的な検討が進んでいる。

SQUID は, 図 3 のような 2 つのジョセフソン接合で結ばれた超電導リングにより構成されている。超電導リングの臨界電流は印加される磁束により変化する。そこで, SQUID 端子に印加する磁束がゼロのときの臨界電流をバイアスとして与えておけば, SQUID に磁束が印加された際に電圧が発生し, 磁界の計測が可能になる。実際には SQUID の出力は非線形であるため, 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。

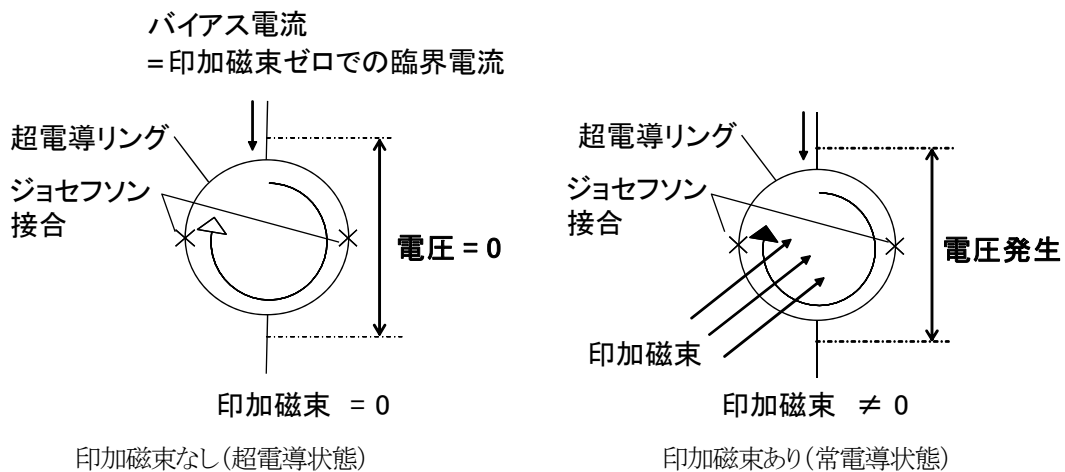


図3 SQUID 磁界検出の原理

4. SQUID 測定システム

超高感度磁気センサーである SQUID の応用は期待されているが、その高感度ゆえに取り扱いが難しいという側面を持つ。地磁気程度の磁気ノイズによりジョセフソン結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、再起動などの操作が必要になるなど、電磁ノイズに非常に弱い。そのため、環境磁気ノイズ中で SQUID を使用することや、強磁性体を検査することは困難で、検査は磁気シールド内での非磁性体サンプルに制限されている。環境磁気ノイズ中で、かつ SQUID 自体を移動させながら連続的な検査を行うことは長年難しいと考えられてきた。しかし近年、SQUID が移動する方式の開発も試みられており、フィールドでの利用に可能性が出てきた。

地磁気などの環境磁界中で SQUID を動作させる方法についていくつか検討がなされており⁷⁸⁾、SQUID を完全に磁気シールドに格納できる方式についても検討されている⁹⁾。本研究では、環境磁界およびレール残留磁化の影響を減じるために、SQUID による測定システムを図 4 のように構成した。レールには、検査プローブのみを接近させ、SQUID は入力コイルから信号を得る。この方式だと、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、レールの残留磁化の影響を受けにくい安定な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補償器を追加することで、フィードバック回路を安定化させた。ノイズ対策により、SQUID のノイズ耐性は 30~40dB 程度向上し、ノイズの影響を受けにくい測定システムを構築することができた。

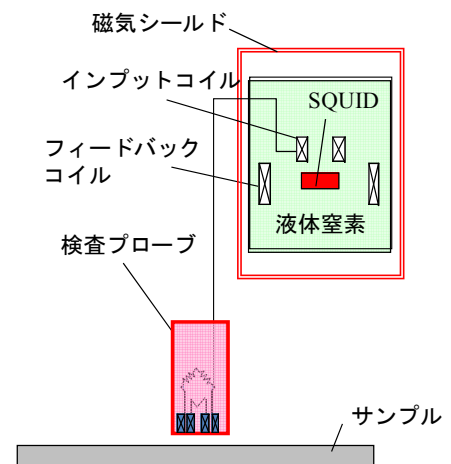


図 4 SQUID による非破壊検査回路

5. 模擬白色層および実レール白色層の測定

上記のノイズの影響を受けにくい測定システムにて、模擬白色層の測定を実施した。測定は SQUID を固定して試験片をステッピングモーターにより駆動する XY 軸の自動ステージ上で移動して行った。SQUID 出力については、ロックインアンプを用い、サンプルの健全部に対する模擬白色層信号の位相変化を比較した。膜厚 50, 90, 140, 150 μm の試験片の測定結果を膜厚と位相変化についてまとめたグラフを図 5 に示す。図より、膜厚の増加に従い位相変化も大きくなるのがわかる。

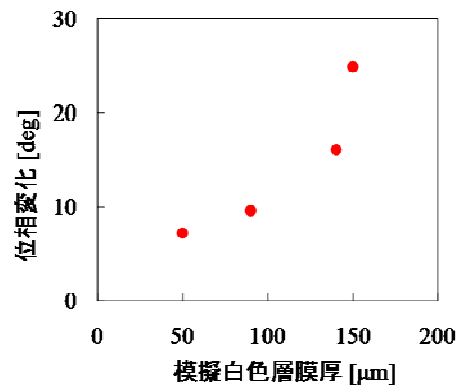


図 5 模擬白色層の膜厚と検出信号の位相

6. レール走行装置の試作

屋外測定のために、レール上を自走可能な走行装置を試作した。図 7 に装置の写真を示す。磁気シールドに格納した SQUID をレール走行装置に搭載し、動作確認試験を行った。走行はレール走行装置上に搭載されたステッピングモーターにて行った。走行速度は可変で 5mm/sec ~ 70mm/sec である。5mm/sec で走行したときの SQUID 出力のノイズレベルは 40dB 以下であり、XY ステージで測定したときと同等のノイズレベルにおさえることができた。

実用的にはより高速走査が求められると考えられるが、その際はノイズフィルタリング周波数を上げるなどで対応可能と考えている。

7. まとめ

現地でのレール白色層測定装置の実用化に向け、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、実用化にむけた装置の基本特性を確認した。

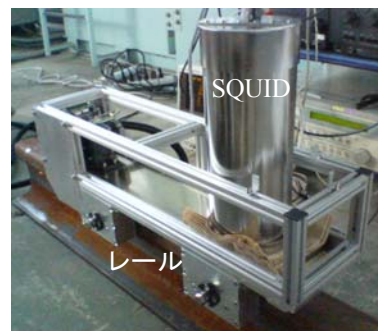


図7 レール上を自走可能な走行装置

文 献

- 1) 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, pp17-22(2005)
- 2) 中村崇, 「レール白層の特性評価と診断手法」, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, Vol.2007-9, pp37-38 (2007)
- 3) 糸崎秀夫, 「高温超伝導 SQUID」, 低温工学, Vol.33, No.10, pp.650-655 (1998)
- 4) 塚田啓二, 「最近の心磁計」, 低温工学, Vol.42, No.9, pp296-302 (2007)
- 5) 河合淳, 「脳磁場計測システムの現状と課題」, 低温工学, Vol.42, No.9, pp303-310 (2007)
- 6) 隈博幸, 「磁気マーカーを用いた免疫検査システム」, 検査と技術, Vol.37, No.2, pp174-177 (2009)
- 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) 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)
- 9) Kenichiro Yao : “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)