

# 超電導磁気センサでレールを調べる

宮崎 佳樹

前 浮上式鉄道技術研究部  
(低温システム 研究員)

荒井 有気

浮上式鉄道技術研究部  
(低温システム 研究員)

清野 寛

同  
(同 主任研究員)



みやざき よしき



あらい ゆうき



せいの ひろし

田中 芳親

同  
(同 主任研究員)

長嶋 賢

同  
(同 研究室長)



たなか よしちか



ながしま けん

## 1. はじめに

鉄道用レールの頭頂面は、車輪との接触により磨耗や疲労が生じます。レール頭頂面の疲労などにより損傷にいたる例として、横裂、水平裂などの起点となるレールシェリング(図1)があります。

レールシェリングには、車輪からの転動荷重による転がり疲労層をき裂の起点とするものと、車輪の空転・滑走に伴う摩擦熱により発生する白色層(図2, 3)と呼ばれる硬化層をき裂の起点とするものがあります。疲労層や白色層がどの程度になったらき裂が発生するかは十分にわかっていません。

このようなレールシェリングの一因となる白色層は、その生成とき裂進展のメカニズムの解明とともに早期発見が

重要ですが、レール表層のごく薄い層に発生するため、従来の超音波探傷では検出が困難です。

そこで本研究では、白色層とレール母材の電磁氣的物性変化に注目し、超電導磁気センサを用いた白色層の検出方法について基礎的な検討を行ってきました。

## 2. 白色層とその物性

レール鋼はパーライトと呼ばれる、フェライトとセメントタイト( $Fe_3C$ 鉄炭化物)の微細な層状組織です。白色層はこの組織が車輪の空転・滑走などによる摩擦熱を受け、急冷されるためにマルテンサイト変態を起こしたものです。このような白色層に対しては、これまで硬さによる検出の検討が行われてきており、ピッカース硬さでは、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ます。

材料のマルテンサイト化の例として、オーステナイト系ステンレス鋼(非磁性)が、応力を受けることでマルテンサイト(磁性)化することが知られています。磁性を帯びたマルテンサイトが生成されることを利用して、磁気センサを用いた非破壊検査が検討されています。

レールに生じる白色層においても、マルテンサイト化した部分では磁氣的・電氣的物性はレール母材と異なると考えられます。

そこで、レール母材に半導体レーザで表面改質を施し、マルテンサイトを生成した標準試験片を製作しました(図4, 5)。製作した標準試験片は実際の白色層と同程度のピッカース硬さを有することを確認しています。

製作した標準試験片について、電磁氣的物性を評価するため、電気抵抗率、比透磁率を測定し、それぞれ母材と異なる



図1 レールに発生したシェリング

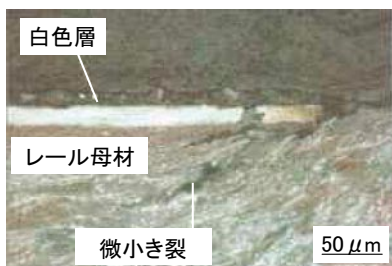


図2 白色層と微小き裂



図3 レールに発生した白色層

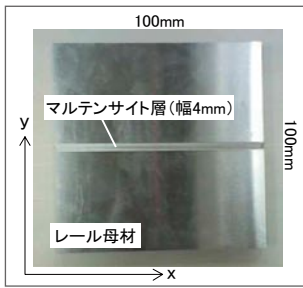


図4 標準試験片

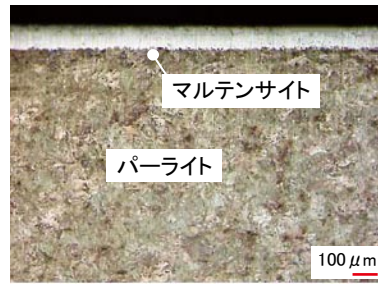


図5 標準試験片の断面

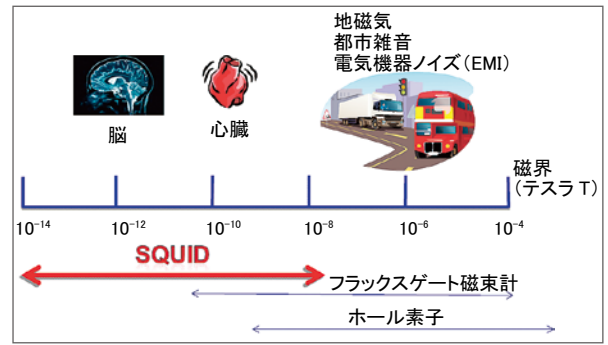


図6 SQUIDの磁界感度

る物性であることを確認しました。その他、硬さ評価、組織観察などにより製作した試験片が白色層を模擬していることを確認しました。

### 3. 超電導磁気センサ“SQUID”

磁気センサ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

$10\mu\text{ Tesla}$ ) よりもはるかに小さな磁界を計測できる能力があります (図6)。図7にSQUIDの原理を説明します。SQUIDは、ひとつの超電導ループの中に、ひとつまたは2つのジョセフソン接合を持っています。

SQUIDは「超電導」素子ですので、このループ内では抵抗ゼロで電流が流れます。電流はいくらでも流せるわけではなく、SQUIDを冷却している温度と、磁界 (外からループに入ってくる外部磁界と、ループに電流が流れることにより発生する自己磁界の和) によって上限が決まります。この上限のことを臨界電流と呼んでいます。ジョセフソン接合とは、平たくいうと、この臨界電流が超電導ループの他の部分よりも小さな部分であるといえます。

ジョセフソン接合をもつ超電導ループの臨界電流は、外からループに入力される磁界により変化しますが、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ません。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することで、臨界電流の変化を知ることができます。

SQUIDの超電導ループ直径は高々 $100\mu\text{ m}$ 程度と小さく、これだけでは外部磁界を測定する感度が得られません。このためピックアップコイルと呼ばれる広い面積を有する超電導ループで外部磁界を検出し、これをSQUIDの超電導ループに伝えるフラクストランスと呼ばれる方式が用いられています。

SQUIDはこのほか、外部磁界と出力電圧が比例せず、一定周期で変化するという独特の特徴を持っています。このままでは計測器として用いることはできません。このため測定系には磁界と電圧の関係を線形化するための回路が用いられています。最も一般的な手法はFLL (Flux

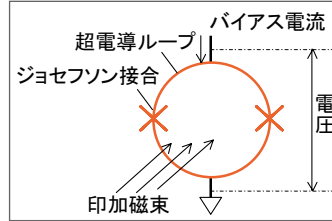


図7 SQUIDの磁界検出原理

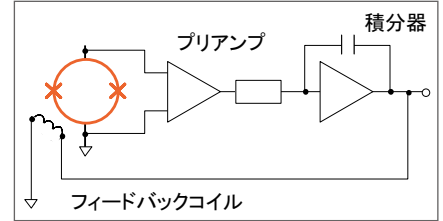


図8 FLL回路のブロック図

Locked Loop) 方式です。図8にFLL回路のブロック図を示します。

FLL回路は、SQUIDに入力される信号磁界と同じ量で逆向きの磁界をフィードバックコイルからSQUIDに入力することで、SQUIDの出力信号が常にゼロとなるよう保つことが出来ます。フィードバック量は外部磁界に比例するため、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ります。

### 4. SQUIDとノイズ

超高感度磁気センサであるSQUIDの応用は、非破壊検査や医療分野で期待されていますが、その高感度ゆえに取り扱いが難しいという側面があります。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ます。この欠点を回避するため、医療分野での応用が始まっている脳磁計、心磁計といった装置では、大型の磁気シールドルームが必要になります。

また、SQUIDを環境磁気ノイズ下で安定動作させるには大きく2つの方法がとられています。ひとつは、磁界そのものではなく、磁界の空間的变化を検出することで、空間的に変化の小さな環境磁気ノイズが直接SQUIDに入らないよう工夫されたSQUIDを用いる方法です。もうひとつは、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を用いた測定例があります。

しかしこのような工夫によっても、測定対象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ます。

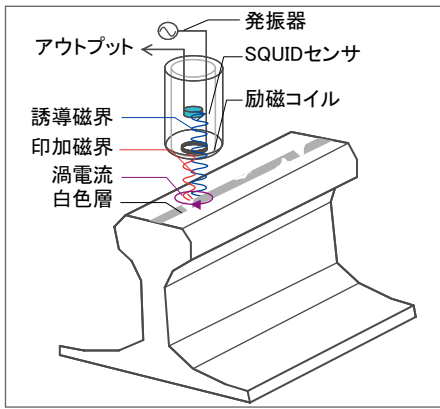


図9 SQUIDによるレール測定の基本原理

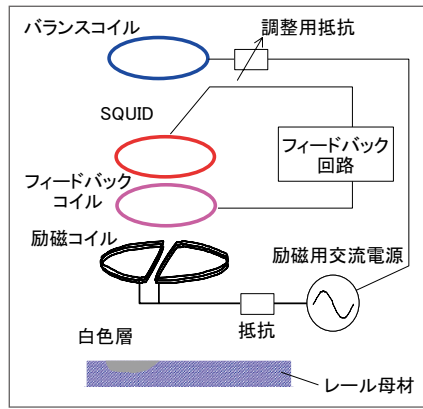


図10 検出回路部の詳細

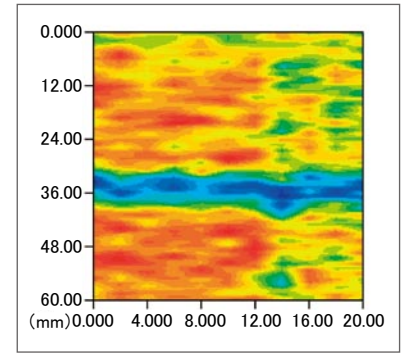


図12 模擬白色層の測定結果

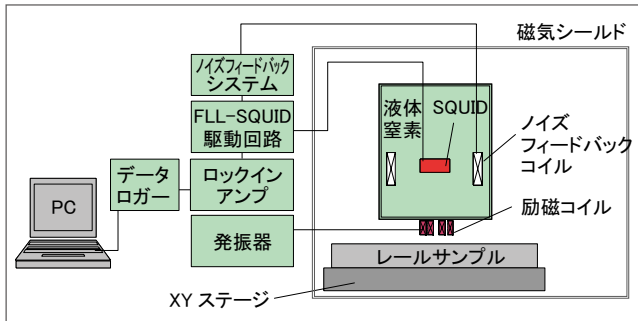


図11 測定体系概略

SQUIDにとって強磁性体はやはり大敵で、通常なら測定環境から排除される対象です。

本研究においても、まずはレールを消磁することで、残留磁気を極力小さくして、白色層の検出の可否を調べることから始めました。

## 5. SQUIDによるレール測定の原理

SQUIDによる非破壊測定原理には、渦電流法を用いています。図9にSQUIDを用いた渦電流法の基本原理を示します。まず、発振器・励磁コイルによりレールに交流磁界を印加します。すると、レール表面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ます。それとともに、渦電流による誘導磁界が発生します。渦電流は、レール表面の健全部では一定ですが、白色層の部分ではその振幅や位相が変化します。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ます。原理的には、渦電流法の検知コイルをSQUIDに置き換えたものと理解することができます。

図10は、検出回路部の詳細を表したものです。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に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ります。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調整する役割をしています。ノイズ対策としては、先述したように、レールを消磁することで残留磁気を地磁気程度に減らしています。測定の際にはSQUIDを固定し、レールを移動させていますが、レールが移動する際、地磁気程度の残留磁気がSQUIDに鎖交することになります。

そこで、低周波ノイズを打ち消す補償回路(ノイズフィードバック回路)を用いて磁気ノイズのSQUIDへの鎖交を減じる工夫をし、かつ外来磁気ノイズを極力抑えるため、磁気シールドを用いることとしました。

## 6. SQUIDを用いた白色層検出装置

製作した標準試験片(以下模擬白色層試験片)および実際のレールに発生した白色層を検出するための実験装置の概略を図11に示します。

励磁コイルからレール表面に渦電流を励起し、その渦電流による誘導磁界の変化分がSQUIDに入力されます。SQUIDは低温容器(ガラスデュワ)におさめられ、液体窒素で冷却されています。SQUIDに入力された磁界は、FLL回路で線形化され出力されます。FLL回路の出力は交流信号の振幅と位相を検出できる微小検波装置で、振幅と位相情報に分解されます。この情報をデータロガーにより読み取り、PCで波形として観察します。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ます。

## 7. 測定結果

図4に示した膜厚 $5\mu\text{m}$ の模擬白色層試験片の測定結果を、図12に示します。図4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ます。図7のコンターはロックインアンプの出力を表しています。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ます。これは模擬層の存在する場所とよく一致しており、膜厚 $5\mu\text{m}$ 程度の層までが検出可能であることが分か

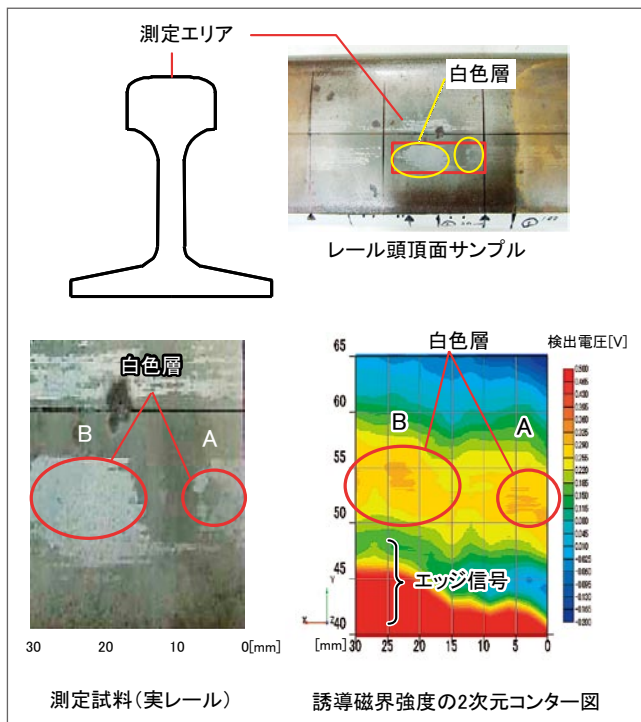


図13 白色層レールの測定結果

りました。

白色層の厚さが20~30 $\mu\text{m}$ を超えると、き裂は長く深くなり、き裂の進展が速まると考えられています。模擬白色層の測定結果から、膜厚5 $\mu\text{m}$ まで十分な検出感度を有しており、実レール白色層の検出可能性について確認することができました。

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いました。測定に用いた実レール白色層試料を図13に示します。図中A、Bで示した部分に白色層があり、測定は図13に示した枠内(A、Bを含む30mm $\times$ 20mm)について行いました。

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 $\mu\text{m}$ 程度と推定されます。図13に測定結果を示します。コンター強度はロックインアンプの出力です。白色層の存在するA、Bの箇所での信号変化が確認できます。

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ます。

## 8. 屋外測定に向けた測定回路

屋外に敷設されたレールを測定するには、レールごと磁気シールドで覆うようなシステムは不可能です。また、レールを消磁などの前処理も、検査時間を増大させるため好ましくありません。そこで、屋外測定に向け、図14のような回路に改良を行いました。レールには、ブリッジ

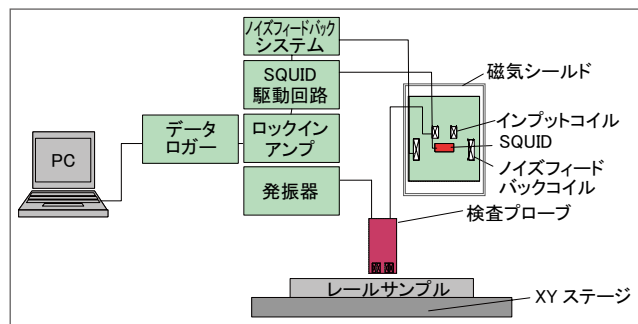


図14 測定回路概略

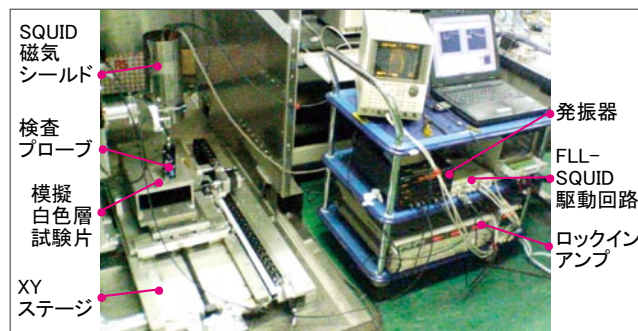


図15 測定の様子

回路を構成する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ています。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

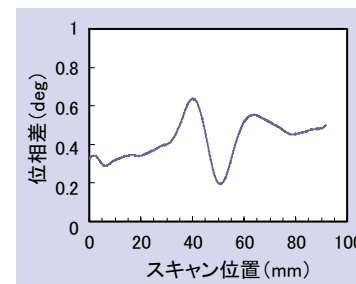


図16 測定結果

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ます。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、ノイズの影響を受けにくい測定システムを構築しました。

7章で測定に用いたのと同じ膜厚5 $\mu\text{m}$ の模擬白色層試験片をXYステージ上に載せ、検査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ました。検査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、上記測定システムにて測定しました。測定の様子を図15に示します。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ました。位相差の測定結果を図16に示します。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ります。現在、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ているところです。[RRR]