The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	超電導磁気センサによる鉄道レール表面劣化層の非破壊検査
Author(s)	宮崎, 佳樹
Citation	大阪大学, 2014, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/34501
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

超電導磁気センサによる鉄道レール表面劣化層の非破壊検査

博士（工学）論文提出先

大阪大学大学院基礎工学研究科

平成 26 年 3 月

宮崎　佳樹

概要

鉄道は膨大な設備を有する大規模システムであるが、特に営業線費用の 10%以上がレールのメンテナンスコストであることから、レールのメンテナンスの省力化・効率化が鉄道経営にとって非常に重要な課題となっている。

車輪との接触面であるレール頭頂面には、車輪の空転・滑走等に伴う大きなすべり摩擦により、白色層と呼ばれる劣化層が生じることがある。白色層の周辺では微小き裂が発生し易く、き裂が進展すると、レール頭頂面のはく離（シェリング）を引き起こす。

白色層は、車輪空転・滑走時の摩擦熱により、レール表面がごく短時間で急激に加熱され、すぐさま急冷されることによりマルテンサイト相が生成されたものと考えられている。

予防保全の観点から、折損・破断等に至る前段でレールの損傷個所は交換されるが、その交換理由の多くはシェリングによるものとなっている。白色層から発生したき裂がシェリングの原因になることが指摘されているものの、現状の超音波探傷ではレール表層部に発生する白色層の検出は難しく、白色層とき裂、シェリングの定量的な関係は十分には明らかになっていない。

そこで本研究は、SQUID（超電導量子干渉計）を用いた渦電流探傷法の白色層への適用性について検討を行った。半導体レーザーによりレール表層を急熱･急冷することで、白色層生成過程を模擬した標準試験片(模擬白色層試験片)を作成し電磁気的物性評価を行った。その結果、模擬白色層の抵抗率はレール母材に比べ増加し、透磁率は低下することを明らかにした。

白色層検出のために、SQUID を用いた渦電流検査システムを構築した。SQUID とレール試験片の距離と、励磁コイルの関係について検討を行い、感度と分解能が最適となる励磁コイル径を決定した。また、構築した検査システムを用い、標準試験片での原理確認試験を実施し、白色層検査においては、リアクタンス成分の変化が捉えられる周波数領域を利用するのが有効であることを確認し、測定条件の最適化を行った。その結果、ノイズ低減環境において実レール白色層検出の原理検証に成功した。

フィールドでも SQUID による検査が行えるよう、測定回路の見直しを行い、プローブ部にブリッジ回路(微分回路)を用いることで、走行試験においてもノイズの少ない白色層検出波形を得ることができた。これにより SQUID を用いたレール白色層検査の可能性を示すことができた。

目次

1. 序論 1
1.1. 研究背景 1
1.2. 研究目的 2
1.3. 本論文の構成 3
2. 鉄道におけるメンテナンス 4
はじめに 4
2.1. 鉄道におけるメンテナンスの課題 4
2.2. 鉄道用レールの保守・管理 5
2.3. 本章のまとめ 7
3. 鉄道用レールの損傷形態 8
はじめに 8
3.1. 転がり接触によるレール損傷 8
3.1.1. レールシェリング 8
3.1.2. きしみ割れ 10
3.1.3. 空転傷 11
3.1.4. 摩耗 11
3.2. 本章のまとめ 12
4. 白色層の材料組織 13
はじめに 13
4.1. 白色層の材料組織 13
4.2. 白色層の硬さと炭素量 14
4.3. 標準試験片の製作 16
4.4. 模擬白色層の硬さ評価 18
4.5. 模擬白色層の電磁気的物性評価 19
4.5.1. 抵抗率 19
4.5.2. 磁化特性 20
4.6. 本章のまとめ 22
5. SQUID を用いた非破壊検査の基本原理 23
はじめに 23
5.1. SQUID の動作原理 23
5.2. SQUID を用いた非破壊検査の原理 26
5.3. SQUID による非破壊検査の動向 28
5.4. 本章のまとめ 30
6. SQUID を用いたレール白色層検査の原理検証 31

はじめに 31
6.1. 原理検証システム 31
6.1.1. 試験装置 31
6.1.2. 磁性体測定の困難さ 33
6.2. SQUID による白色層模擬試験片の測定 35
6.2.1. 励磁コイルの検討 35
6.2.2. 膜厚 100 μm の模擬白色層の検出 40
6.2.3. 励磁周波数の検討 44
6.2.4. 膜厚 5 μm の模擬白色層の検出 47
6.3. SQUID による実レール白色層の測定 50
6.4. 本章のまとめ 52
7. SQUID レール検査装置の開発 53
はじめに 53
7.1. 屋外測定に向けた測定回路 53
7.1.1. 検出回路の感度特性 57
7.2. 改良システムによる白色層模擬試験片の測定 59
7.3. 走行型レール検査装置の製作 62
7.4. 走行型レール検査装置による実レール白色層の検出 63
7.5. 本章のまとめ 65
8. 展望 66
8.1 劣化診断の可能性 66
8.2 SQUID 冷却に適した冷凍技術 67
8.3 実用化への課題 69
9. 結論 71
付録 A. 冷却技術 75
はじめに 75
A.1 パルス管冷凍機 75
A.1.1 高温超電導磁石冷凍システム 76
A.1.2 試験装置 79
A.1.3 評価試験 81
A.2 磁気冷凍機 85
A.2.1 磁気冷凍 85
A.2.2 磁気冷凍技術の変遷 86
A.2.3 磁気作業物質 87
A.2.4 磁気冷凍システム 90
A.2.5 評価試験 93

A.2.6　解析による特性把握 96
A.3 まとめ 98
謝辞 99
参考文献 101
発表論文リスト 105

1. 序論

1.1. 研究背景

鉄道事業において、設備の適切なメンテナンスは鉄道の安全・安定輸送を確保する上では極めて重要である。

鉄道の設備は長大かつ膨大なため、事業費全体に占めるメンテナンス費用の割合は大きい。特に長大設備であるレールは、メンテナンスに要する人や時間、費用も膨大なものとなる。そのため、いかに効率よくレールのメンテナンスを行うかは、鉄道事業にとって重要な課題である。

レールは、鉄道車両が通過することで、車輪との転がり接触疲労が生じ、そこから様々な損傷に進展することがある。特にレール頭頂面には、車輪の空転・滑走等に伴う車輪/レール間の大きなすべり摩擦により白色層と呼ばれる劣化層が生じる。この白色層は、レールシェリング（以下「シェリング」と略称する）と呼ばれるき裂の起点となる場合がある。このようなき裂がレール内部へ進展していくと、ついにはレール折損・破断に至る。破断に至る前に超音波探傷により検査を行い、レール交換など適切な修繕がなされる。レール交換の多くがシェリングによるものであるが、シェリングの原因となる白色層については現状の超音波探傷などでは検出が難しく、未解明な部分が多く残されている。これまでの調査や経験により、一定の検査周期や判定基準が得られてはいるが、在来線への適用や個別の線区への適用などではその妥当性に依然課題が残っている。

メンテナンスの省力化には、経験のみによるのではなく、より定量的、合理的な評価に基づいた予防保全が効果的である。レール頭頂面に生じる白色層については組織分析や硬さ測定などにより調査が行われている。しかし実環境で疲労・損傷したレールは、現場で採取する以外にサンプルの取得の方法がないこともあり、十分なサンプル数が得られない。また、腐食剤を頭頂面に塗布することにより白色層の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、線区情報と白色層及び白色層付近の微小き裂・損傷の発生状況などとの相関を検討する有効な手段となりうるとともに、シェリングを未然に防止する指標を得られるなど、より高度な予防保全に寄与すると考えられる。

白色層は、レール表層から 10 ～ 40 μm 程度の深さを持って分布しており、こうしたレール表層のごく浅い領域で発生する組織変化などをとらえるためには、十分な精度および感度を有した検査技術が必要となる。しかし、現在実施されている超音波探傷では、損傷に至る手前の疲労や劣化段階での診断が難しい。そこで、超電導磁気センサを用いた非破壊検査技術のレール劣化診断への適用可能性を検討した。

白色層は、レール母材であるパーライトが、熱や応力を受けることでマルテンサイト変態を起こしたものであり、電磁気的な物性もわずかながら変化すると考えられる。この変化をとらえることができれば、白色層を検出することができる。

1.2. 研究目的

レールシェリングと呼ばれるき裂の起点となりうる白色層については、現在有効な検査方法が確立されていない。白色層の組織分析や硬さなどの評価は行われているが、電磁気的な評価については今までのところ実施された例はない。

一方、オーステナイト系ステンレス鋼（非磁性）では，応力を受けることで加工誘起マルテンサイト（磁性）が生成されることが知られており，磁気センサを用いた非破壊検査が検討されている。また、磁性体への渦電流探傷についても、適用性の検討が行われている。

鉄道用レール表層の白色層についても、同様な変質相であると考えられるが、膜厚が 20 μm 程度と薄く、かつレール母材、白色層ともに磁性を持つために、その際はごく微量であると考えられる。事前検討において、渦電流法および漏えい磁束法などを用いた検出試験を行っている [1]。渦電流法や漏えい磁束法で白色層模擬試験片を測定した場合には、100 μm 程度の膜厚で出力の変化を認めることができた。しかし、10～40 μm 程度の膜厚を判別するためには、さらなる感度が必要となる。そこで、本研究では、白色層の電磁気的な物性をとらえるため、渦電流探傷用の磁気センサとして超高感度磁気センサである超電導量子干渉計（SQUID、Superconducting Quantum Interference Device）の適用可能性を検討した。

磁気センサの中で最も高感度の 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場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体反応による免疫診断の研究が進んでいる。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められている。

本研究では、これまで非破壊的に検出することが困難であった白色層について、SQUID を用いた非破壊検査の適用可能性について基礎的検討を行い、模擬白色層試験片を用いて検出感度の評価を実施するとともに、白色層の膜厚評価の可能性について検討を行うこととした。基礎的検討に基づき、屋外で測定可能な SQUID レール検査装置を開発し、その実用可能性を示すことを目的としている。

1.3. 本論文の構成

本論文の構成を**図 1.1** に示す。第 1 章にて本論文の研究背景と研究目的を述べる。第 2 章から第 4 章では、鉄道におけるメンテナンスについて、特にレールメンテナンスが重要であることを説明し、レール損傷形態を整理する。レールの主な損傷形態には、シェリング、きしみ割れ、空転傷、摩耗などがあるが、特にシェリングの原因となる白色層については現状の超音波探傷などでは検出が難しく、有効な検査手段が確立されておらず、未解明な部分が多く残されていることを述べる。

第 5 章から第 7 章では、SQUID を用いた非破壊検査の基本原理について説明し、SQUID を用いたレール白色層検査の原理検証の内容を述べる。屋外に敷設されたレールを測定可能な測定回路の改良を行い、実使用環境における SQUID を用いたレール白色層の検出可能性について検討し、磁気ノイズおよびレールの残留磁化の影響を受けにくい SQUID レール検査装置の開発を行った。

第 8 章では、SQUID レール検査装置の適用について冷却技術や今後の課題と合わせて展望を述べ、第 9 章にて本論文で述べた研究結果を総括する。付録 A では超電導磁気センサである SQUID の冷却技術を検討した。

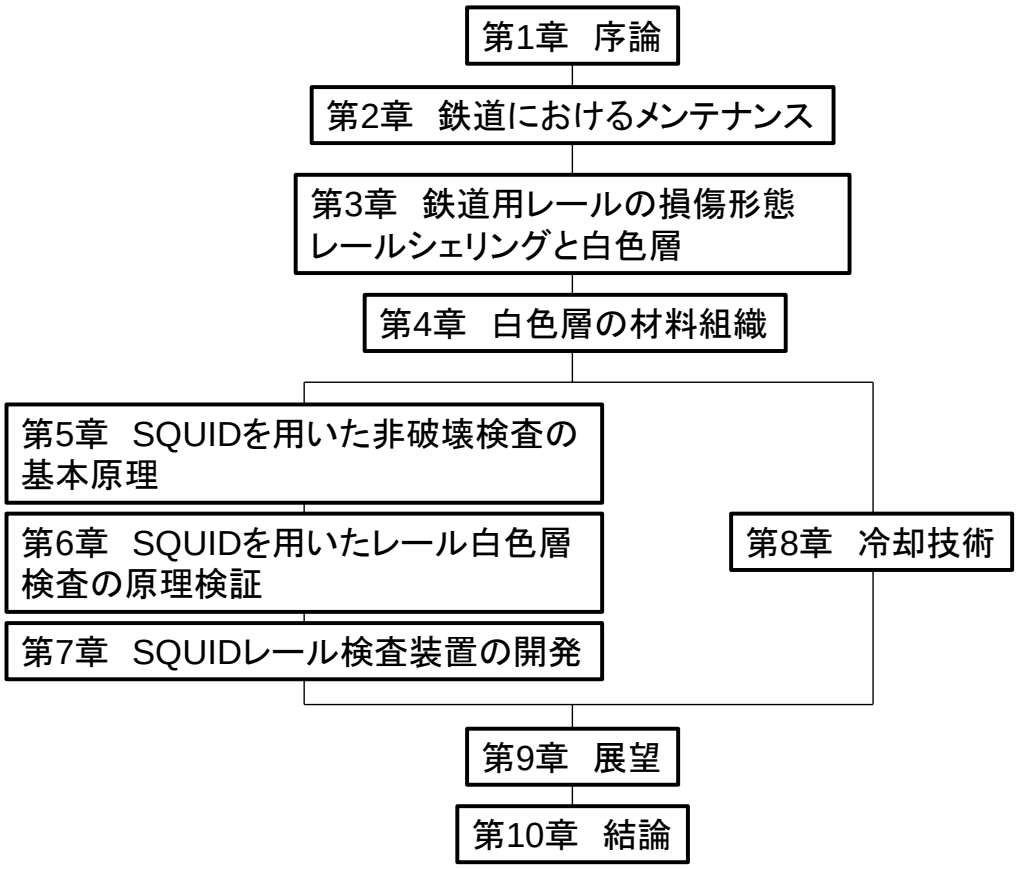


図 1.1　本論文の構成

2. 鉄道におけるメンテナンス

はじめに

本章では、鉄道におけるレールメンテナンスの重要性について述べる。鉄道の設備は長大かつ膨大であり、維持管理コストも莫大となるため、いかに効率よくメンテナンスを行うかが課題となっているとともに、予防保全の考え方の重要性についても述べる。

2.1. 鉄道におけるメンテナンスの課題

速達性、大量性、確実性、効率性に優れた輸送機関である鉄道の基盤は、安全・安定輸送にあり、鉄道事業は設備の適切なメンテナンスによって支えられている。鉄道は膨大な土木構造物、軌道、電力、信号・通信、駅設備などの地上設備と、多数の車両からなる大規模システムであり、そのメンテナンスには多くの人手と経費を要する。

事業費内訳の一例を図 2.1 に示す。各鉄道事業者の営業費用をみると、JR・民鉄を通じて、地上設備と車両の保守経費は、営業線全体の 30%程度と大きいが [2, 3, 4]、特にレールメンテナンスに要する費用の鉄道事業費に占める割合は 10%を超えている。そのため、いかにレールの保守・管理を省力化しコストダウンを進めるかが、鉄道経営にとって非常に重要な課題となっている [5, 6]。

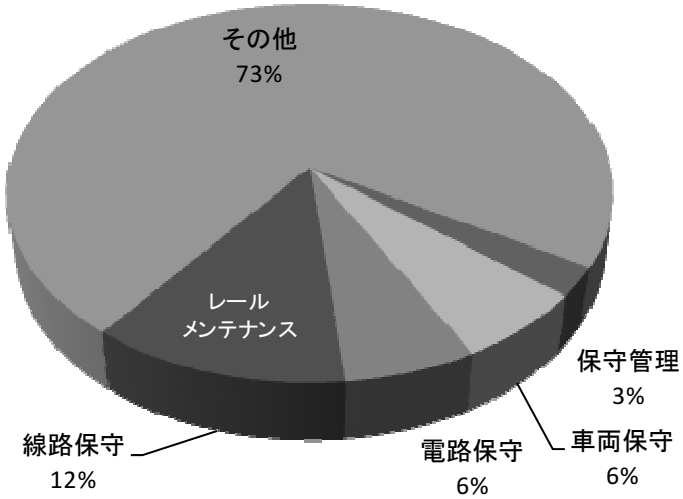


図 2.1　鉄道事業費の内訳例 [2, 3, 4]

2.2. 鉄道用レールの保守・管理

鉄道軌道は、車両の荷重を支え、路盤などへの負担を軽減しながら、車両の荷重を支え、列車が安全に走行する走行路として重要な役割を担う。軌道は**図 2.2** に示すように道床、レール、枕木などから構成されている。車両の通過により、軌道構造は徐々に変形し、それに伴いレール、道床も変形する。また、鉄道の車輪、レールは高炭素鋼でできており、両者の接触面積はごくわずかであり、接触面には非常に大きな応力が発生する。そのためレールは徐々に摩耗し、変形することが避けられない（**図 2.3**）。

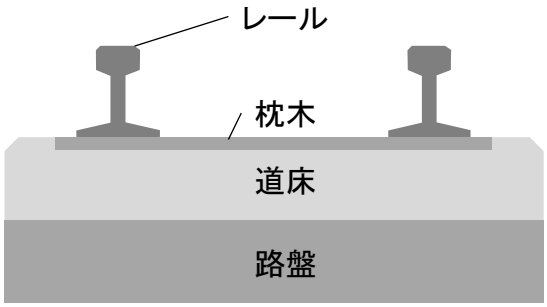


図 2.2　軌道構造

(a)　　(b)

図 2.3　レールの変形と損傷 (a) 道床の変形 (b) レール損傷

レールの変形（曲がりや落ち込み）は、軌道変位と呼ばれ、レールの高低（上下方向の曲がり）、通り（左右方向の曲がり）、水準（左右のレールの高さの差）、平面性（軌道面のねじれ）、軌間（左右レールの間隔）の 5 つの項目で評価されている。高低変位・通り変位についてはレール方向に一定の長さを持った糸を張り、この糸を基準にしてレールのたわみを測る水糸法（差分法）と呼ばれる方法で、水準変位については、水準器や傾斜計を用いて検測を行う。軌間変位については軌間ゲージと呼ばれる物差しを用いて左右レールの間隔を検測する。高低変位と通り変位は軌道の長さ方向に連続的に測定

する必要から、10 m の弦をレールに張ってその中央のレールとの距離を測定する「10 m 弦正矢法」が広く用いられている [7]。

現在では、こうした検測は、レール位置を測定する各種センサを搭載した専用の軌道検測車両を用いて走行しながら行うことができる [8]。検測車では、軌道の状態のほか、架線の摩耗状態の把握や保安装置の動作の確認などを同時に行えるようになっている。新幹線軌道検測車は東京大阪間のような長距離の検測を行うため、検測データは膨大であるが、ラボックスと呼ばれるソフトウェアを用いてパソコン上でデータ処理ができるようになっている [9]。軌道変位については、検測車により比較的高速かつ精度よく検査することができるようになっている。検査手法についても、正矢法を基本とした検査原理がほぼ確立されている。

レール損傷の検査は、レール折損を未然に防止し、安全・安定輸送を確保する上では極めて重要である。車輪がレールの上を転動することにより、レール側にも金属疲労が蓄積するが、これを転がり接触疲労と呼んでいる。転がり接触疲労には、レールシェリング、きしみ割れ、空転傷、摩耗などがある。

レールの探傷も、車上に超音波センサを搭載した探傷車などにより測定が行われるが、以下の問題点がある。

(1) 表層部に不感帯が存在し、表層から 0 ~ 数 mm 程度の範囲が検査できない。
(2) 在来線に用いられる探触子には、レール表面の水平裂（**図 2.4**）は、反射エコーに隠れるため検出できないものがある。
(3) 水平裂に隠れた横裂を検出できない。
(4) 探触子がレール中心から外れる、探触子とレール表面の水膜切れを起こすなどした場合にレール傷を検出することができない。
(5) 検出位置情報は車輪の回転数と、地上に設置された信号送受信機(地上子)からの信号検知により算出されるが、運転条件により正しく車輪回転数が得られないことや、地上子信号の誤検出などにより大幅な位置ずれが生じる可能性がある [10]。

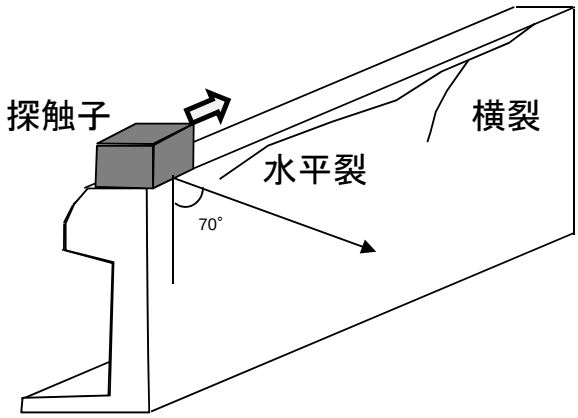


図 2.4　超音波探傷により検出が難しい傷の例

そのため、レール探傷車走行後の手検測による確認検査が必要であり、多大な検査コストを要する要因のひとつになっている。

2.3. 本章のまとめ

鉄道は巨大なシステムであるためメンテナンスには多くの人手と経費を要し、特に国内の鉄道事業者では、営業線費用の 10%以上がレールのメンテナンスコストであることから、いかにレールの保守・管理を省力化し、そのコストダウンを進めるかが、鉄道経営にとって非常に重要な課題となっている。

レールのメンテナンスのうち、特にレール損傷の検査は重要である。レールの探傷も探傷車による走行中の検査が可能であるが、走行後の手検測による確認検査が必要であるなど検査コストがかかっている。

このようなメンテナンスは、レール折損などを引き起こさないための予防保全の考えに基づくが、効率的・効果的な修繕を計画的に実施し、ライフサイクルコストを低減するためには、設備の健全度を把握した、より高度な予防保全が重要である。

この健全度の把握には、損傷に至る前段階すなわち劣化診断が必要であるが、**図 2.5** に示すように、現在のところレール劣化診断技術は確立されていない。

次の章では、レールにはどのような劣化、損傷が生じるのかを述べる。

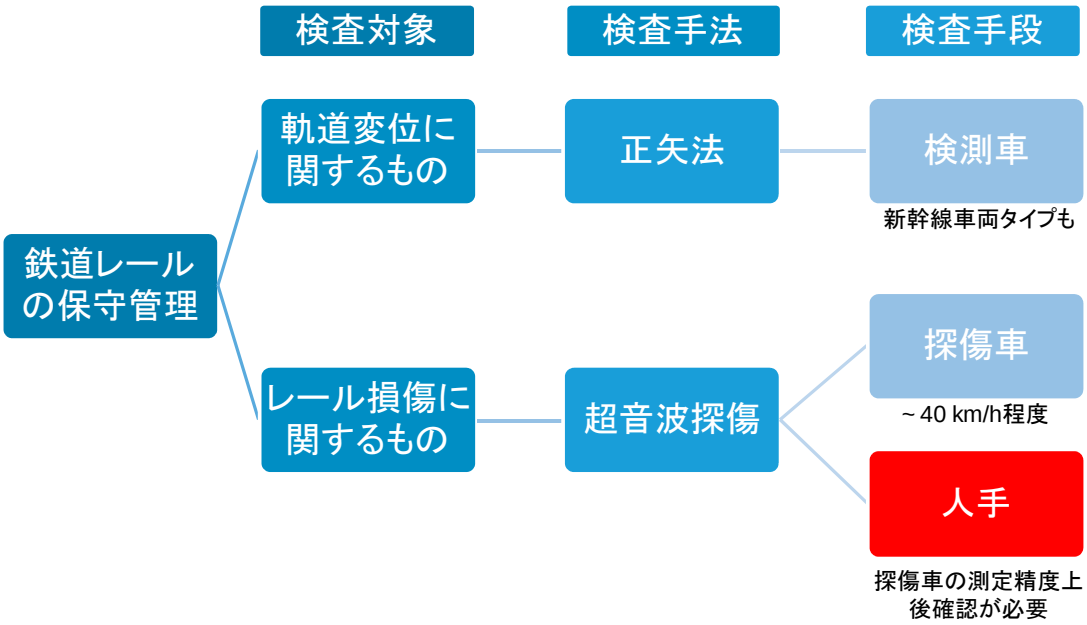


図 2.5　レール検査とその手法

3. 鉄道用レールの損傷形態

はじめに

各種のレール損傷形態を整理する。レールの主な損傷形態には、シェリング、きしみ割れ、空転傷、摩耗などがある。これらの発生メカニズムを解明すべくさまざまな検討が行われている。白色層から発生したき裂がシェリングの原因になることが指摘されているものの、現状の超音波探傷などの探傷では検出が難しく、未解明な部分が多く残されている。

これまでの調査や経験により、一定の検査周期や判定基準が得られているが、在来線への適用や個別の線区への適用などではその妥当性に依然課題が残っている。

3.1. 転がり接触によるレール損傷

3.1.1. レールシェリング

レール頭頂面には，車輪の空転・滑走等に伴う車輪/レール間の大きなすべり摩擦により白色層と呼ばれる硬化層が生じる [11]。白色層の周辺では**図 3.1** に示すように微小き裂が進展し易く、レール頭頂面のはく離やき裂により、内部に空隙が生じることで表面陥没（シェリング）を引き起こす場合がある（**図 3.2**）。白色層は車輪荷重による繰り返し応力や、車輪空転やブレーキによる摩擦によりレールの表面付近に発生し、さまざまに内部に進行していく。シェリングという名称は、疲労き裂の進展過程を示す破断面の模様が貝殻（shell）のように見えることから名づけられた。

シェリングが発生すると、**図 3.3** に示すように、その下にレール方向と水平なき裂（水平裂）が発生する。この水平裂が進展すると、レールの内部へ向かうき裂（横裂）に分岐することがある。横裂が進展するとレールの強度が低下し、破断に至る恐れがある。そのため、これを未然に防ぐために、シェリングが発見された場合にはレール交換を行っている。レール交換要因の内訳をみると、**図 3.4** のように最も大きな割合を占める損傷はシェリングによるものである [12]。

シェリング予防の面からレール研削手法が検討され、実験的な検討から研削周期を通過トン数で 5000 万トンとした場合、約 0.1 mm 削正すると平均的に 8 億トン以上シェリングの発生を抑制できる可能性が得られている。その研削手法とほぼ同様な条件で東海道新幹線において実施された調査により、予防研削によるシェリング抑制効果も報告されている [13]。しかし、その発生メカニズムの検討が実験的あるいはレール鋼の結晶学的な面から鋭意進められているが、まだ未解明な部分が多く残されている [7]。その

ため、必ずしも現在の判定基準が妥当であるとは限らず、損傷の進展メカニズムの解明により適正なレール交換など指標が得られることが望まれている。

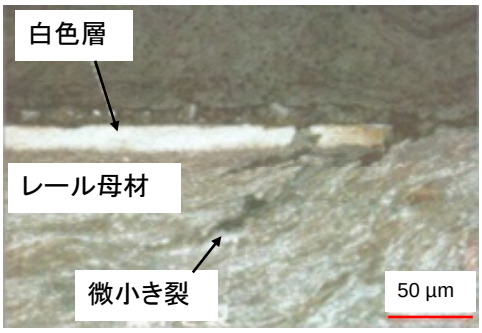


図 3.1　白色層と周辺に生じたき裂の例(レール断面)

図 3.2　シェリングの例(レール表面) [13]

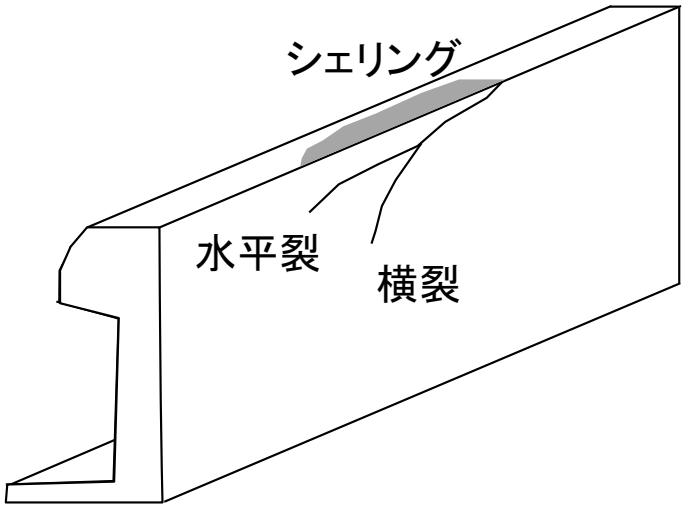


図 3.3　シェリングと、き裂の関係

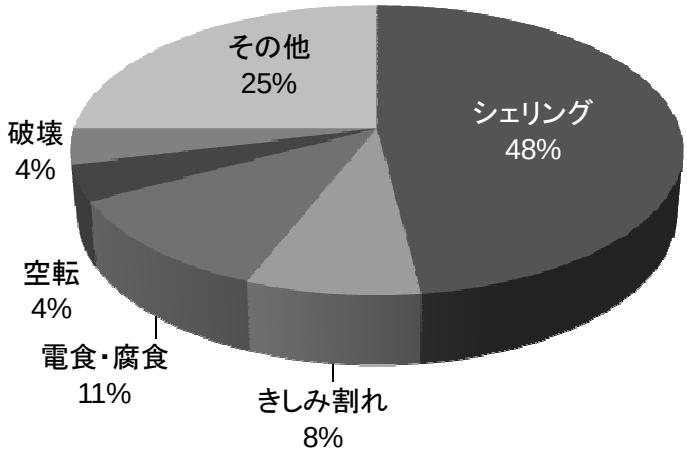


図 3.4　レール交換の要因

3.1.2. きしみ割れ

近年在来線では、曲線区間の外軌レールにおいて**図 3.5** に示すような比較的間隔が狭いき裂が連続して発生する場合が多くみられるようになった。このようなゲージコーナーに連続して発生するき裂をきしみ割れと呼んでいる。

きしみ割れは進展すると、き裂とき裂の部分がはく離する場合が多く見られるが、一部のき裂から頭頂面に生じるシェリングと同様なき裂に進展する場合があり、ゲージコーナーき裂と区別して呼ばれることがある。

このきしみ割れは、曲線半径 700～800m の区間などに比較的多く発生していることがわかっており、その原因として、曲線半径 800m 以下の外軌レールには、熱処理した硬いレールが使用されていることが関係していることが指摘されている [13]。

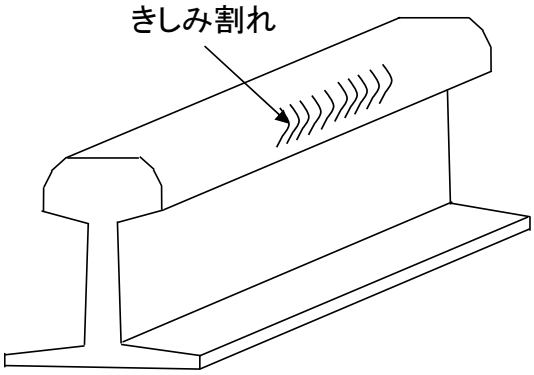


図 3.5　きしみ割れの例

3.1.3. 空転傷

走行する車輪とレールは、わずかなすべりを伴う転がり接触状態となるが、粘着力(車輪とレールの間に働く摩擦力)が不足した状態で車輪を駆動した場合、空転現象が発生し、その結果レール頭頂面表層部では急加熱・急冷により組織変化による空転傷が発生する。空転傷でその程度が大きいものは凹みが大きく、その状態では車両走行が困難になる。空転傷の例を**図 3.6** に示す。写真はナイタールを塗布したもので、空転傷の周辺に白色層と同様の表面硬化層が発生している様子がわかる。

図 3.6　空転傷の例

3.1.4. 摩耗

急曲線の外軌ゲージコーナーは、車輪フランジとの接触によって大きく摩耗するため、レール交換の原因の一つとなっている。このゲージコーナーの摩耗のことを側摩耗と呼ぶ。一方、ある一定の間隔に摩耗あるいは塑性変形してレール表面に連続した凹凸が形成される場合があり、これを波状摩耗と呼んでいる。

主な波状摩耗としては、急曲線内軌、曲線外軌および直線に発生する比較的短い波長と長い波長の 2 形態の計 4 形態がある。**図 3.7** のような波長 30～150 mm の波状摩耗が発生し、列車通過時に生じる騒音・振動の原因になっている [13]。

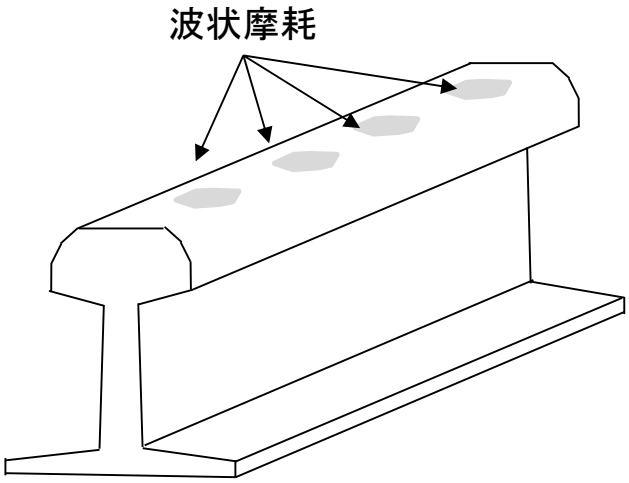


図 3.7　波状摩耗の例

3.2. 本章のまとめ

レールの主な損傷形態には、シェリング、きしみ割れ、空転傷、摩耗などがある。これまでの調査や経験により一定の検査周期や判定基準が得られているものの、在来線への適用や個別の線区への適用などではその妥当性に依然課題が残っている。

また、発生メカニズムについても、さまざまな検討が行われているが、まだ未解明な部分が多く残されている。特に、白色層から発生したき裂は、シェリングの原因になることが指摘されているが、現状の超音波探傷などの探傷では検出が難しく、これらの定量的な関係を明らかにすることが求められている。

レール頭頂面に発生する白色層の情報を広く収集できれば、シェリングや微小き裂といったレール頭頂面の損傷との相関を検討する有効な手段となりうるとともに、シェリングを未然に防止する指標を得られると考えられる。

4. 白色層の材料組織

はじめに

本章では白色層の材料的な特徴について説明する。シェリングの原因となる白色層については現状の超音波探傷などでは検出が難しく、有効な検査手段が確立されていない。これまで、白色層のビッカース硬さを調べることで、硬さ変化と白色層深さに関する調査が継続されているところである。しかし、白色層が数キロにわたって不連続に発生する場合、その分布についてはほとんど把握されていないのが現状である。そこで、白色層の基本的物性を評価した結果についても述べる。

4.1. 白色層の材料組織

レールの劣化は、車輪/レールの接触境界であるレール表面で最も生じやすく、車輪空転やブレーキによる摩擦、繰り返し荷重による応力などがレールに加わり、レール表面に劣化層が発生する。この劣化層は、腐食剤（ナイタール：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とから、「白色層」と呼ばれている（**図 4.1**）。白色層は、車輪転動時の転が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、レール表面に硬くて脆いマルテンサイトが発生したものと考えられている[14]。白色層ができると、白色層を起点とした微小き裂が生じやすく、き裂が進展すると、シェリングや、最悪の場合にはレール折損に至るおそれがある [15]。

白色層は腐食剤の塗布により目視観察が可能である。しかし、本質的にはレール表層を腐食させる”破壊”検査手法であり、数キロにわたって発生している場合にはこうした手法は限界がある。また、この方法では白色層の有無はわかっても、白色層がどの程度の厚みを持つのか、き裂を含んでいるのかといった情報を得ることはできない。

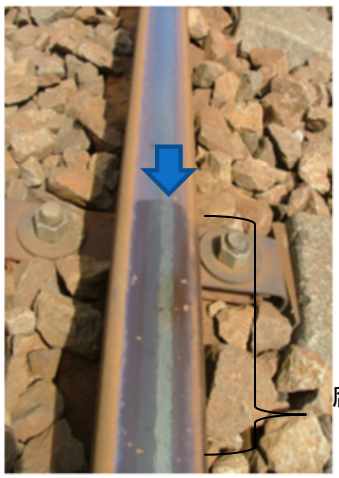


図 4.1　数キロにわたって発生した白色層の例

白色層では、組織が硬く脆くなっているため、白色層内部でき裂を生じやすい。白色層内部で生じたき裂は、**図 3.1** の白色層から生じた微小き裂の断面写真のように、白色層とレール母材であるパーライト層まで達し、そこからレール母材へと進展していくと考えられている。このような白色層は、レール以外にブレーキディスクや転がり軸受けでも観察されている [16, 17]。レールに発生する白色層はレール探傷車では捉えられないため、手作業で腐食剤を用いた観察および硬さなどによる調査が行われている。しかし、詳細な観察はレールを切り出して行う必要があるため、レールに生じる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 [18]。

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組織であり、炭素量は 0.7～0.8%である。車輪空転・滑走時の摩擦熱により、レール表面はスポット的に急激に加熱され、加熱個所はオーステナイト領域まで温度が上昇する。このときの加熱はごく短時間であるため、レール表面からの熱浸透深さはごく浅い。加熱が終了すると今度はレールの熱容量によって急冷されることになり、このとき炭素を過飽和に固溶したマルテンサイト相が生成されると考えられる。

マルテンサイトの生成に伴い、転位(格子欠陥)密度が上昇し、体積膨張により残留応力が発生する。そのため表面が硬く、脆くなることから白色層内部および端部に微小き裂が生じやすくなっている。

4.2. 白色層の硬さと炭素量

実際に白色層の生じたレールの断面をカットし、表面からの深さごとにビッカース硬さを測定した例を**図 4.2** に示す [14]。表面から 0.05 mm 程度より内部では、ビッカース硬さは 300 Hv 前後であるのに対し、白色層の生成した表層では 800 Hv と非常に硬くなっていることがわかる。**図 4.3** に、直線区間のレールで発生した白色層厚さの分布例を示す。白色層の膜厚はおおよそ 10 μm から 40 μm までに集中して分布していることがわかる [19]。

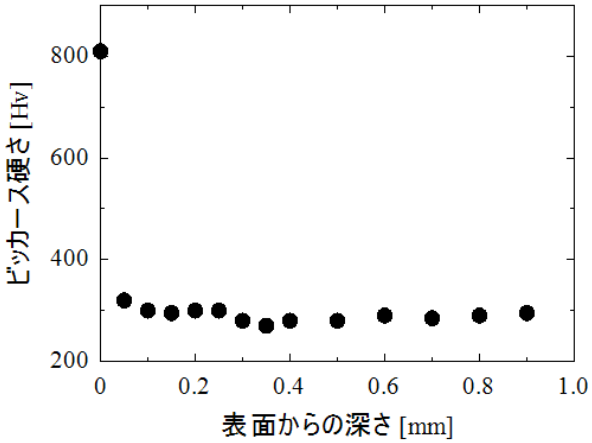


図 4.2　頭頂面からの深さに対する硬さ分布

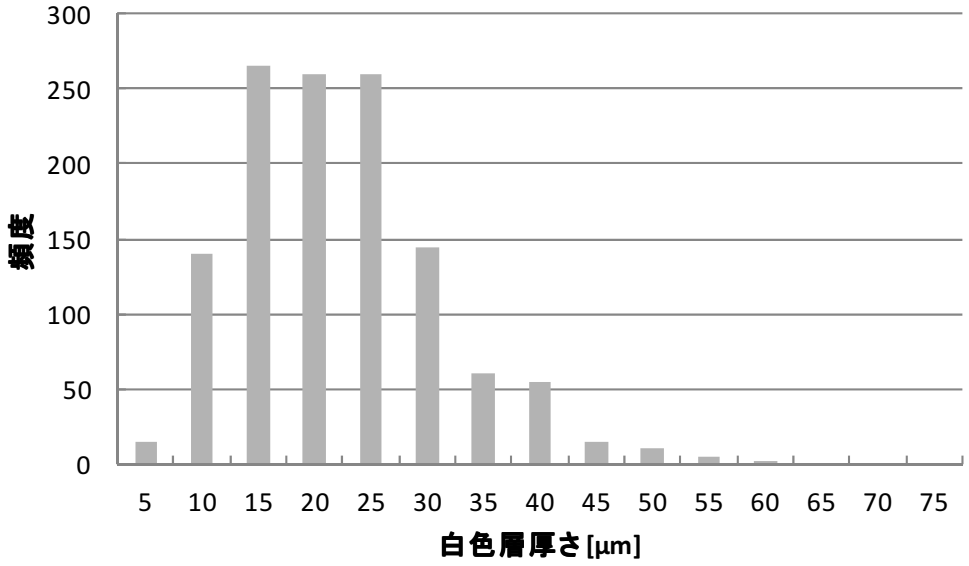


図 4.3　直線区間のレールで発生した白色層膜厚分布の一例

マルテンサイトは炭素を過飽和に強制固溶させた相で、高転位密度を持っているため、非常に硬い組織となる。**図 4.4** は、炭素鋼の炭素量とマルテンサイトの硬さを示したものである [20]。この図から読みとると、レール表層の白色層は、95%以上のマルテンサイトであることが類推できる。

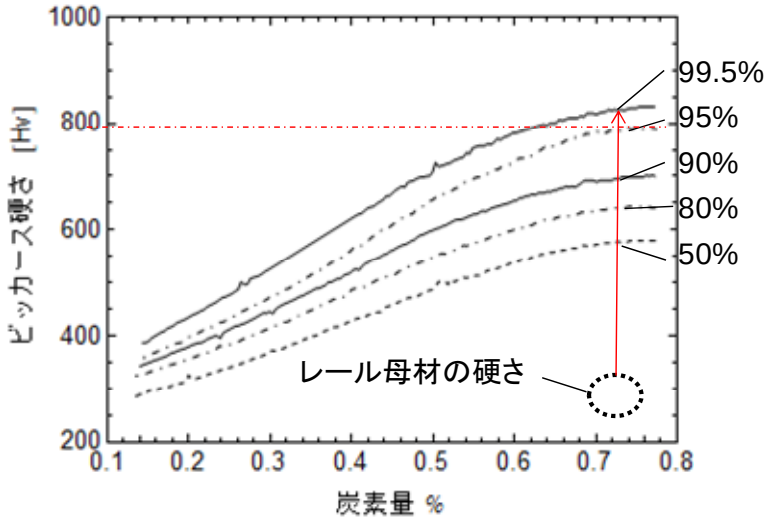


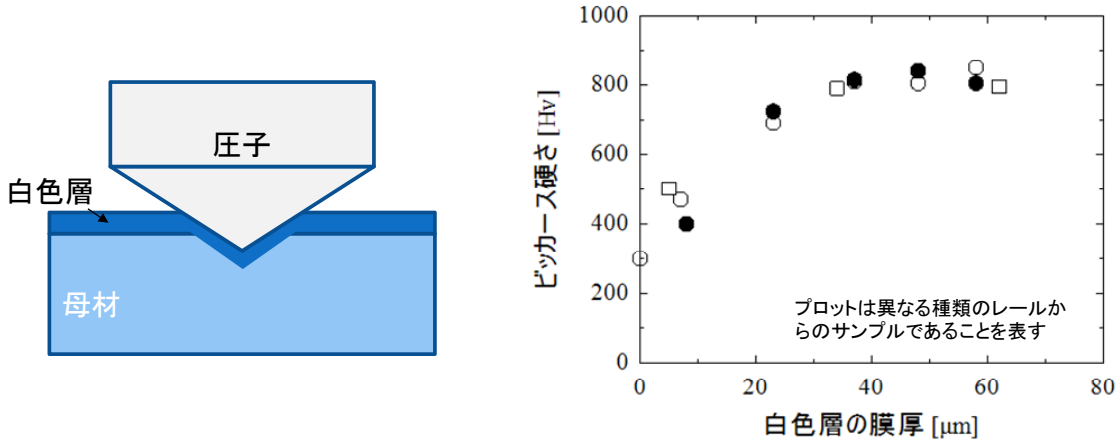
図 4.4　炭素鋼の炭素量とマルテンサイトの硬さの関係

今、100%マルテンサイト変態をしたとするときの体積変化を考える。オーステナイトの格子定数を$a_f = 3.6$Å、マルテンサイトの格子定数を$a_b = 2.85$Å，c_b=2.98Åとする。オーステナイト（面心立方）の単位胞中には 4 個の原子が入っているので、1 個の原子

の占める体積 V_f は、$a_f^3/4$。同様に、マルテンサイトは体心立方格なので、単位胞中に 2 個の原子が入っている。1 個の原子の占める体積は、$V_b = a_b^2\, c_b/\,2$である。よって、オーステナイトからマルテンサイトに変態した場合の体積変化は、4.3%程度であると考えられる。

白色層が発生すると組織の硬さが増大する。膜厚とレール頭頂面における硬さの関係を調査するため、膜厚の異なる白色層を有する数種類のレールから採取されたサンプルに対し、ビッカース硬さの測定を行った。

測定結果を**図 4.5** に示す。膜厚が厚いと、白色層の硬さは一定(白色層組織硬さ)となる。一方、膜厚が薄いと、圧子が母材の影響を受けて小さく測定される。したがって、硬さから膜厚を推定するには限界がある。



(a) (b)

図 4.5　白色層膜厚に対するビッカース硬さ　(a) 測定時の断面模式図　(b) 測定結果

4.3. 標準試験片の製作

レール頭頂面における白色層の電磁気的な評価は、これまで実施されたことはない。本研究においても白色層の電磁気的評価を試みたが、白色層の生成膜厚が薄く（20 μm 程度）、物性評価に必要な量の採取が困難であった。

実際の白色層の物性評価は困難であるが、オーステナイト系ステンレス鋼に生じる加工誘起マルテンサイトについては、抵抗率や透磁率が変化することが知られており、非破壊検査にも応用されている [21, 22, 23]。白色層もマルテンサイトを主成分とした層であるため、同様の電磁気的な変化が生じていると考えられる。そこで、半導体レーザー（**図 4.6**）によりレール表層を急加熱・急冷し、白色層生成過程を模擬することで、マルテンサイト相を生成した標準試験片を製作し、各種物性を評価することとした。

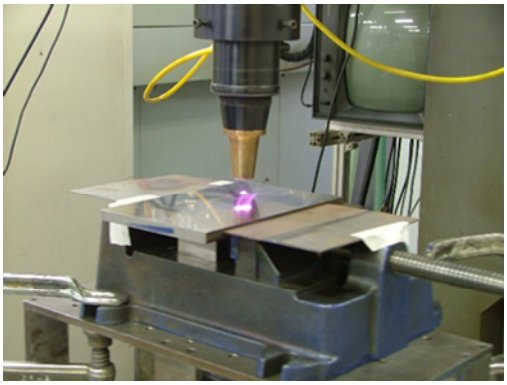


図 4.6　半導体レーザー加工の様子

レール表層に、白色層発生過程を模擬したマルテンサイト相を生成した模擬白色層試験片（マルテンサイト標準試験片）を**図 4.7** に示す。試験片は 100×100 mm×10 mm 厚、模擬白色層は幅 4.4 mm の帯状に生成した。**図 4.8** には試験片を模擬白色層に沿って切断した断面写真を示す。模擬白色層部分が均一に生成されている様子がわかる。

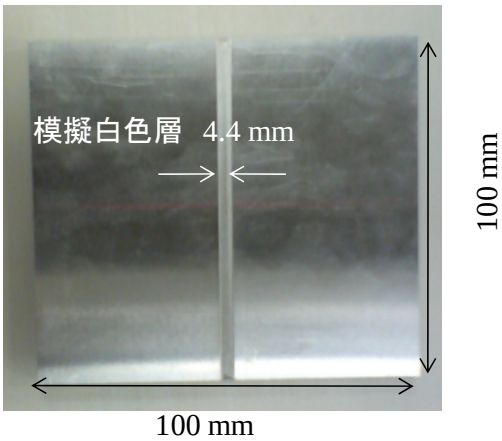


図 4.7　模擬白色層試験片寸法

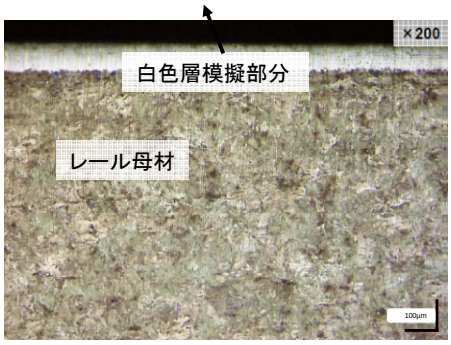


図 4.8　模擬白色層試験片の断面観察写真

レーザー出力をコントロールすることで、模擬白色層の膜厚を変えた試験片を 3 種類製作した。**表 4.1** に模擬白色層の膜厚と試験片の用途を示す。模擬白色層膜厚が 1000 μm のものは、硬さおよび電磁気的物性評価に供するために製作した。また、後述する SQUID による試験にも供している。膜厚 100 μm、5 μm のものは SQUID による検出試験に用いた。

表 4.1　製作した模擬白色層試験片

レーザ出力 W	模擬白色層膜厚 μm	試験片用途
3000	1000	硬さ、電磁気物性評価、SQUIDによる測定
900	5	SQUIDによる検出試験
1300	100	SQUIDによる検出試験

4.4. 模擬白色層の硬さ評価

模擬白色層のビッカース硬さを測定した。試料は膜厚 1 mm のものを用いた。**図 4.9** に模擬白色層表面からの深さとビッカース硬さを示す。表面からの深さ 1 mm および 5 mm に比べ、表面から 1 mm の領域で、実レール白色層と同程度まで硬さが増加していることがわかる。

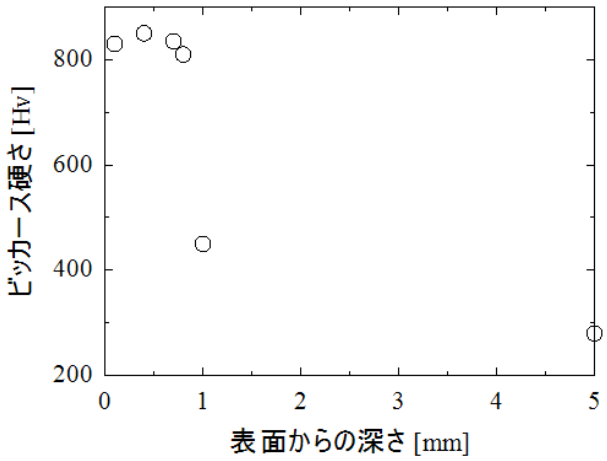


図 4.9　模擬白色層表面からの深さに対するビッカース硬さ

4.5. 模擬白色層の電磁気的物性評価

4.5.1. 抵抗率

レール母材および模擬白色層を**図 4.10** のように短冊状(1 mm 厚)に切り出した試験片を、それぞれ 3 つ作製し、4 端子法にて抵抗率を測定した（**表 4.2**）。体積抵抗率は、レール母材で 0.24 μΩ・m、模擬白色層で 0.34～0.35 μΩ・m と、模擬白色層で体積抵抗率が増加する傾向がみられた（図 4.11）。

模擬白色層で体積抵抗率が増加した理由は、炭素原子がマルテンサイトの体心立方格子中に侵入し、結晶格子を歪ませるとともに、大量の格子欠陥を生じるためであると考えられる。

図 4.10　短冊状に切り出した試験片

表 4.2　レール母材と模擬白色層試験片の体積抵抗率

試料		厚さ mm	幅 mm	断面積 mm^2	標点間距離 mm	抵抗 μΩ	体積抵抗率 μΩ・m
レール母材	No.1	0.811	2.017	1.64	20.4	2998	0.24
	No.2	0.825	2.017	1.66	20.4	2953	0.24
	No.3	0.837	2.017	1.69	20.4	2916	0.24
模擬白色層	No.1	0.901	2.025	1.82	20.4	3770	0.34
	No.2	0.888	2.026	1.8	20.4	3924	0.35
	No.3	0.905	2.026	1.83	20.4	3799	0.34

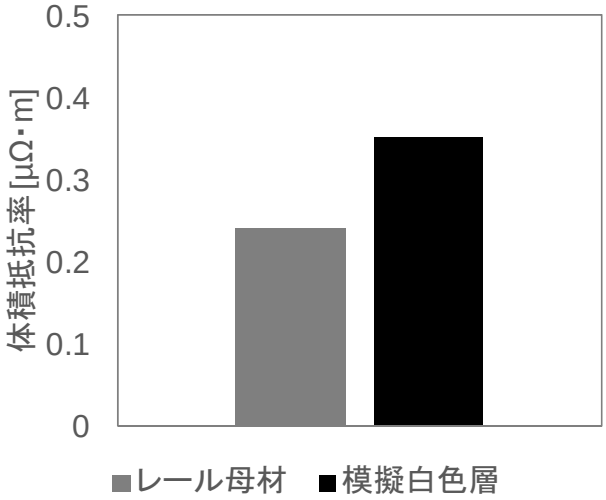


図 4.11　レール母材と模擬白色層の体積抵抗率

4.5.2. 磁化特性

レール母材および模擬白色層を**図 4.12** のようにリング形状（外形 10、内径 5mm 程度）に切り出した試験片を作成した。閉磁気回路における試験片のインダクタンスを測定する直流磁気測定法により、レール母材および模擬白色層の磁化曲線を得た。

図 4.12　リング状に切り出した試験片

図 4.13、**図 4.14** に、レール母材および模擬白色層の磁化曲線を示す。模擬白色層では、レール母材に比べて飽和磁化および残留磁化は低下し、保磁力は増加した。これは、結晶格子の歪および大量の格子欠陥により磁区の回転、磁壁の移動が妨げられ、磁化しにくくなったことが原因と考えられる。

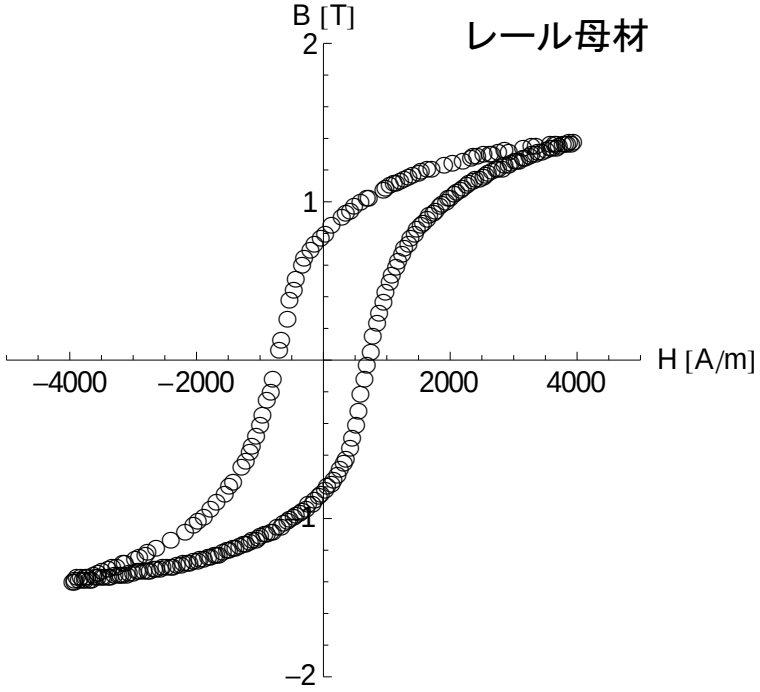


図 4.13　レール母材の磁化曲線

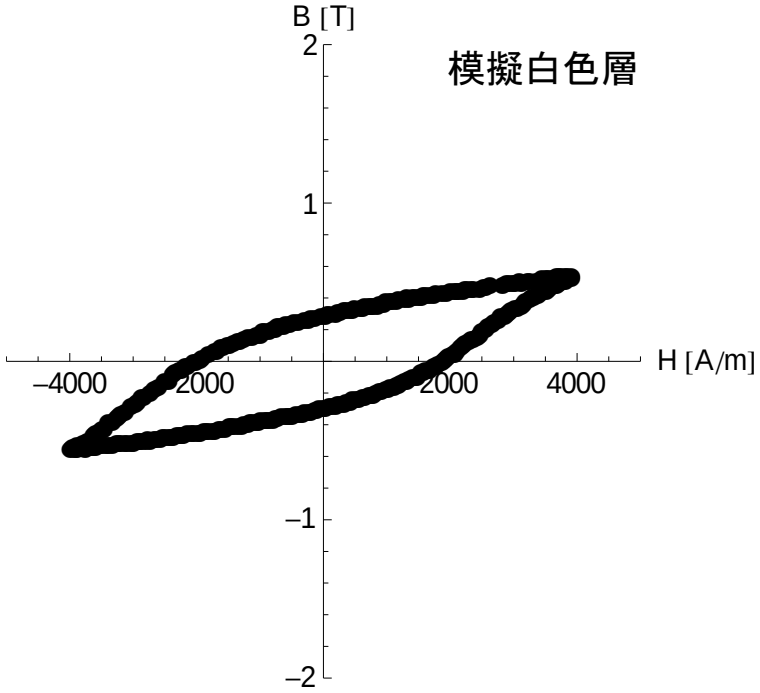


図 4.14　模擬白色層の磁化曲線

4.6. 本章のまとめ

レール表面に発生する白色層と呼ばれる劣化層は、腐食剤の塗布により目視観察が可能であるが、数キロにわたって発生している場合にはこうした手法は限界がある。また、この方法では白色層の有無はわかっても、白色層がどの程度の厚みを持つのか、き裂を含んでいるのかといった情報を得ることはできない。

白色層の膜厚はおおよそ 10 μm から 40 μm までに集中して分布していることが、これまでの調査でわかっている。白色層の生じたレール表層はビッカース硬さが 800 Hv と、母材に比べて非常に硬くなっていることから、レール頭頂面のビッカース硬さから、膜厚を推定することを試みたが、圧子が母材の影響を受けるため、硬さから膜厚を推定するには限界がある。

本研究は、渦電流法により電磁気的に白色層をとらえることを目的としている。そこで、基本物性である抵抗率と磁化特性と調べるため、白色層の生成過程を模擬した標準試験片を作製し、物性評価を行った。体積抵抗率は、レール母材で 0.24 μΩ・m、模擬白色層で 0.34～0.35 μΩ・m と、模擬白色層で体積抵抗率が増加する傾向がみられた。磁化曲線の測定結果から、模擬白色層では、レール母材に比べて飽和磁化および残留磁化は低下し、保磁力は増加することが分かった。これは、結晶格子の歪および大量の格子欠陥により抵抗率が増加するとともに、磁区の回転、磁壁の移動が妨げられ、磁化しにくくなったことが原因と考えられる。

5. SQUID を用いた非破壊検査の基本原理

はじめに

SQUID の磁場検出原理および SQUID を用いた非破壊検査の基本原理について述べる。磁気センサの中で最も高い感度を有する SQUID は、数 10 μT 程度の地磁気よりもはるかに小さな磁場を計測できる能力がある。白色層の微小な電磁気的変化をとらえるために、本研究で採用した SQUID を用いた非破壊検査の原理として、渦電流法について述べる。

5.1. SQUID の動作原理

磁気センサの中で最も高い感度を有する SQUID は、 数 10 μT 程度の地磁気よりもはるかに小さな磁場を計測できる能力がある。**図 5.1** に SQUID による磁場検出の原理を示す。

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有する。超電導状態にある SQUID 素子ループ内では、抵抗ゼロで電流が流れる。しかし SQUID の冷却温度、外部磁場、およびループに電流が流れることにより発生する自己磁場の和によって、超電導状態で流せる電流の上限が決まる。この上限電流のことを臨界電流と呼んでいる。ジョセフソン接合とは、この臨界電流が超電導ループよりも小さな部分であるといえる。

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場により変化するが、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することで、臨界電流の変化を知ることができる。

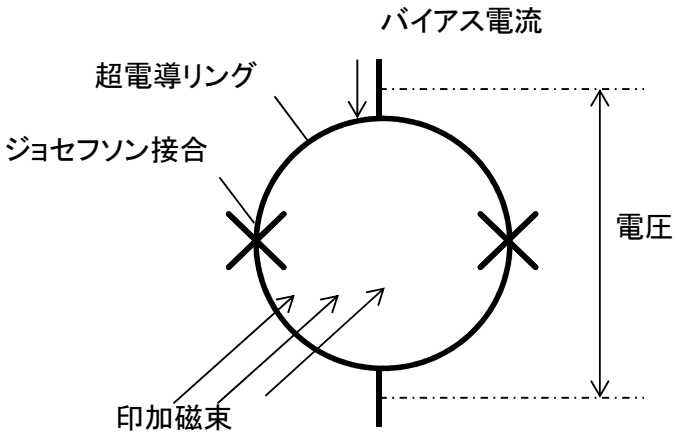


図 5.1　SQUID 磁場検出の原理

SQUID の出力電圧は外部磁場に比例せず、一定周期で変化する。**図 5.2** に SQUID の印加磁束-出力電圧特性を示す [24]。SQUID のループに磁束を印加すると、臨界電流 I_c が変化する。印加磁束をゼロから徐々に増やしていくと、I_c の値は、臨界電流の最大値から減少していき、印加磁束が磁束量子($\Phi_0 = 2.07 \times 10^{-15}$ Wb)の 1/2 となったときに最少となる。さらに磁束を増やしていくとI_cは増加していき、印加磁束がΦ_0 となったときにもとの値となる。SQUID に一定のバイアス電流を流したとき、SQUID 両端に生じる電圧は SQUID ループ内の印加磁束の大きさに対応して、単位磁束Φ_0 の周期で変化する。

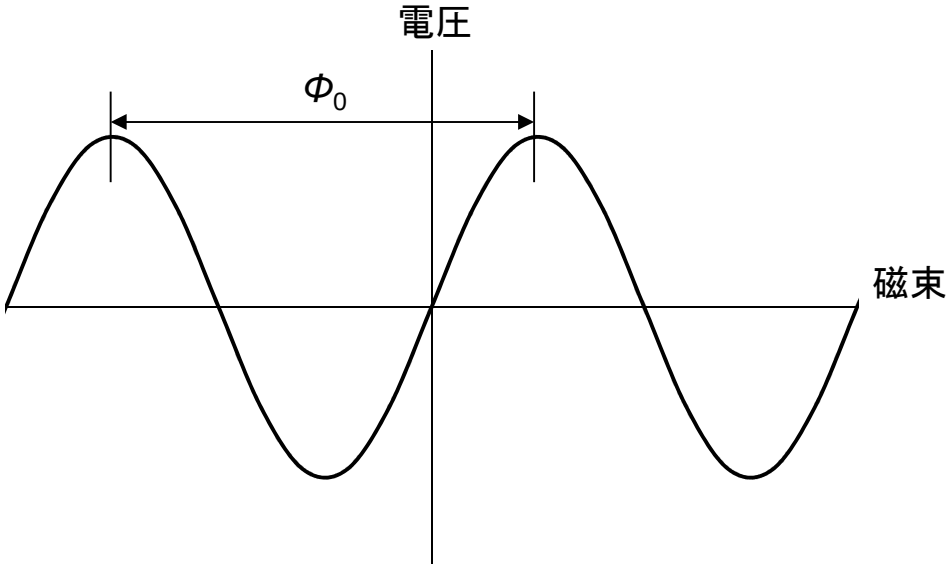


図 5.2　SQUID の印加磁束-出力電圧特性

このままでは定量的な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場と電圧の関係を線形化するための回路が用いられている。最も一般的な手法はFLL方式と呼ばれる。SQUIDを貫く磁束が一定に保たれるようにフィードバックをかけることから、磁束固定ループ（FLL： Flux Locked Loop）と呼ばれる。

図 5.3 に FLL 回路のブロック図を示す。FLL 回路は、SQUID に入力される信号磁場と同じ量で逆向きの磁場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る。フィードバック量は外部磁場に比例するため、このフィードバック量を出力として用いることで、磁場測定が可能になる。

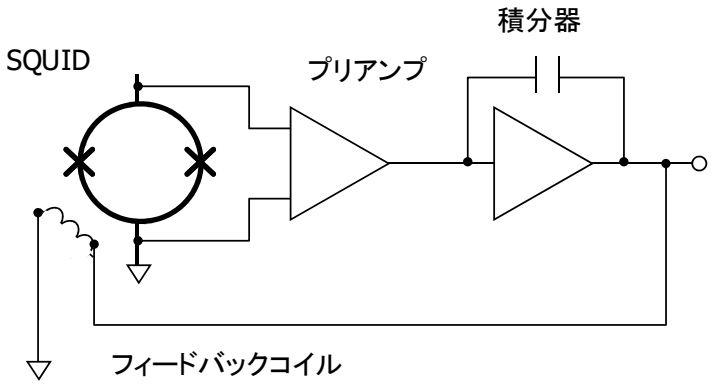


図 5.3 FLL 回路構成例

SQUIDのFLLが通常のフィードバックと大きく異なる点は、増幅度が入力に対して周期的に変わることである。従って、フィードバックの安定点が無数に存在することである。もし、FLLのスルーレートよりも速くて大きなノイズがSQUIDに入力されると、フィードバック制御が追従できず、その前後でΦ_0 の整数倍だけ異なった安定点に対してフィードバックがかかってしまうことがある。この異なった動作点で安定してしまうことをフラックスジャンプと呼び、一般にはフラックスジャンプ量は知りえない。また、SQUIDのダイナミックレンジを超えるような大きなノイズに対しては磁束ロックそのものが出来なくなることがある。いずれの場合にも、SQUIDの動作点が変更されることになり、測定は不連続となる。

本研究で用いたSQUIDセンサの諸元を**表 5.1**に示す。

表 5.1 SQUID 素子の諸元

CL1703-1.0（住友電工システムソリューション(住友電工ハイテックス)）	
サイズ	17 mmφ×4 mmt（端子部含まず）
SQUIDサイズ	5 mm角
磁束分解能	＜90μφ0/√Hz@10 Hz
磁場分解能	＜20pT/√Hz@10 Hz
磁場捕獲面積	～0.009 mm2
動作冷媒	液体窒素（－196℃）
磁場/電圧変換係数	14 nT/V

5.2. SQUID を用いた非破壊検査の原理

本研究では、SQUID を用いた非破壊検査の原理に渦電流法を採用している。SQUID を用いた渦電流法による白色層の検出システムを**図 5.4** に示す。発振器から励磁コイルに交流電流を通電し、レールに交流磁場を印加すると、レール表層にはこの磁場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場が発生する。渦電流は、レール表層の健全部では一様だが、白色層の部分では渦電流の流れが変化し、それに伴い誘導磁場の振幅や位相が変化する。この誘導磁場の変化を 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場として 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ためのものである。

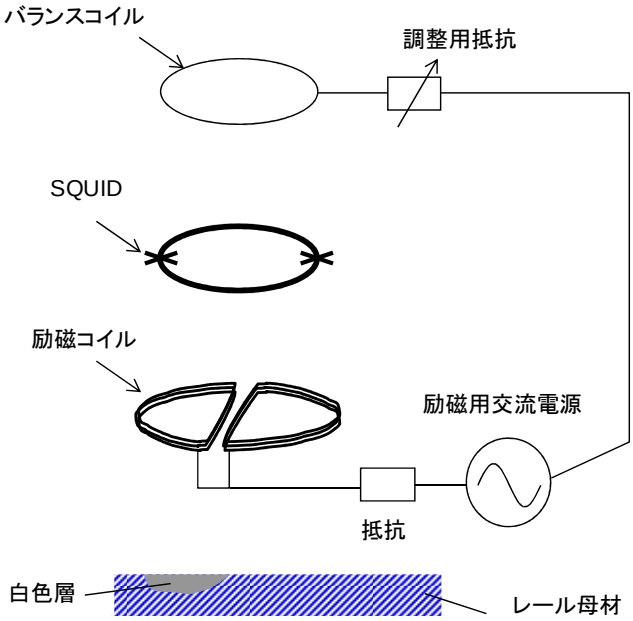


図 5.4　SQUID を用いた白色層の検出システム

導体中の電磁場を決定するための基礎方程式は、

$$\mathrm{rot}\,\boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{5-1}$$

$$\mathrm{rot}\,\boldsymbol{H} = \boldsymbol{i} \tag{5-2}$$

$$\mathrm{div}\,\boldsymbol{B} = 0 \tag{5-3}$$

である。ここで、$\boldsymbol{E}$ は電場、$\boldsymbol{B}$ は磁束密度、$\boldsymbol{H}$ は磁場、$\boldsymbol{i}$ 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、

$$\boldsymbol{B} = \mu\,\boldsymbol{H},\ \ \boldsymbol{i} = \sigma\,\boldsymbol{E} \tag{5-4}$$

が用いられる。μ は透磁率、σ は導電率である。(5-2)式に $\boldsymbol{i} = \sigma\,\boldsymbol{E}$ を代入して両辺の発散をとれば $\mathrm{div}\,\boldsymbol{E} = 0$ となる。

(5-1)式の両辺の回転をとれば、

$$\mathrm{rot}(\mathrm{rot}\,\boldsymbol{E}) = -\mu\frac{\partial}{\partial t}\mathrm{rot}\,\boldsymbol{H} \tag{5-5}$$

となる。上式の左辺をベクトル解析の公式により展開し、$\mathrm{div}\,\boldsymbol{E}=0$ を代入すれば、$\boldsymbol{E}$ に対する方程式は、

$$\Delta\boldsymbol{E} - \mu\,\sigma\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t} = 0 \tag{5-6}$$

となる。同様に $\boldsymbol{H}$ と $\boldsymbol{i}$ に対しても同形の方程式が導かれ、

$$\Delta\boldsymbol{H} - \mu\,\sigma\frac{\partial \boldsymbol{H}}{\partial t} = 0 \tag{5-7}$$

$$\Delta\boldsymbol{i} - \mu\,\sigma\frac{\partial \boldsymbol{i}}{\partial t} = 0 \tag{5-8}$$

となる。

今、導体に磁場の時間変化を与え、導体に、

$$i(x,t) = i_0(x)e^{j\omega t} \tag{5-9}$$

なる渦電流が生じたと仮定する。ここでxは導体深さ、ωは磁場の角周波数、tは時間を表す。(5-8)式より、$i_0(x)$の満たす方程式は、

$$\frac{d^2 i_0}{dx^2} = j\omega\sigma\mu\, i_0 \tag{5-10}$$

となる。この方程式の $x\to\infty$で有限な解は、

$$i_0(x) = i_0(0)e^{-\sqrt{\frac{j\omega\sigma\mu}{2}}x}\cos(\omega t - \sqrt{\frac{j\omega\sigma\mu}{2}}x + \frac{\pi}{4}) \tag{5-11}$$

となる。このことより、導体中に透磁率、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。また、渦電流の位相は表面からの距離に比例して遅れることから、欠陥深さの推定には位相情報が用いられる。

5.3. SQUID による非破壊検査の動向

SQUID の高感度磁気検出特性を用いた装置としては、磁性材料や超電導材料の物性評価を行う MPMS（Magnetic Property Measurement System)が、カンタムデザイン社から市販され、普及している。物性測定ではこのほか、NMR(Nuclear Magnetic Resonance)などへも応用されてきている。

また、SQUID の超高感度磁気センサとしての活用は、これまで非破壊検査や医療分野において精力的に研究開発が行われている。

（1）SQUID による非破壊検査技術

1990 年代後半に航空機部材を中心とした非破壊検査への適用を目指した研究開発が精力的に行われた。航空機の車輪のクラック検査や、機体のアルミ合金を固定しているリベットの周辺クラックの探傷への適用が検討された [25]。従来の渦電流探傷では、高周波を利用するため深部の探傷が難しい。そのため、複数のアルミ合金の深部情報を得るには、リベットを取り外して検査する必要があった。渦電流探傷に SQUID を用いることにより、低周波でも感度よく磁場を検出できるため、より深部の検査が可能である。

実際の検査環境での使用を想定し、磁気シールドのない条件下で環境ノイズの影響をいかに低減できるかが重要な課題となっており、その方面の研究が進められている。

低温超電導 SQUID では、積層技術を用いて 1 次微分、2 次微分のグラジオメータが開発されており、これを用いた移動型のシールドレス検査装置により SUS304 などの鋼材が検査可能であることが、東北電力の井澤らによって実証されている [26, 27]。開発された検査装置は低温超電導用 SQUID を用いたものであるが、大型の磁気シールドなどの障壁がなくなりつつあることが示されている。

また、高温超電導 SQUID についても、環境ノイズの影響を低減する技術開発が積極的に進められている。

ノイズキャンセルの手法のひとつとして、２つの SQUID を用いる手法も提案された。鉛直方向に２つの SQUID を配置することで、試験片に近い SQUID では信号をとらえ、遠方の SQUID では主にノイズを測定することになる。２つの SQUID から得られる信号の差分を取ることで、S/N 比の向上を図っている [28]。

ただ、２つの SQUID を用いる以外は、特段の磁気ノイズ対策を講じているわけではなく、使用可能な環境は比較的磁気勾配の小さな環境に限られる。

D.F. He らは、磁気ノイズを補償する回路を追加し、モバイル型 SQUID マグネトメータを開発している。直流から 20 Hz 程度の磁気ノイズのキャンセリングは良好である。補償回路付高温超電導 SQUID を用いて、強磁性体の測定に成功した [29]。

一方、SQUID 自体は磁気シールドの中に置いたまま動かさず、シールド外の銅製ピックアップコイルにより材料欠陥を測定する研究が、九州大の円福らにより進められている [30]。

2008 年に、SRL の田辺らにより、磁束検出コイルに粒界が存在しない、ランプエッジ接合を用いた HTS-SQUID が開発された。150 μT の磁気ノイズを与えても、低ノイズレベルへの復帰が可能であることが示されている。この SQUID は高い磁気ノイズ耐性を持っていることが確認されており、従来型 SQUID よりも 4~5 桁ほど磁気ノイズ耐性が高いことが示されている。豊橋技科大の廿日出らは、この SQUID を用いて残留磁化を持つ SUS304 板材中の欠陥を、磁気シールドや補償技術を用いることなく、SQUID をスキャンさせて 10 mm/sec の移動速度で検出することに成功している。

その他の分野については**表 5.2** にまとめる。

表 5.2　SQUID の応用分野

異物検査	食品中の異物検査装置（アドバンスフードテック）	HTS-SQUID
医療・バイオ	129チャンネルの脳磁システムを販売（島津製作所）	低温超電導SQUID。定置型などの磁気シールドの使用が可能
	抗原抗体反応の定量化を図る抗原抗体反応検査へのSQUIDの適用（九州大など）	磁気マーカ
地質調査	ドイツ、オーストラリア、日本で適用検討が進められている	フィールド応用。コンパクトかつ感度を上げるためにはSQUIDが有効
半導体分野	ウェハのドーピング分布の観察、デバイスの故障解析への適用	レーザーSQUID 顕微鏡

5.4. 本章のまとめ

SQUID はその原理により、超高感度な磁気センシングが可能である。SQUID の超高感度磁気センサとしての特徴を活かし、非破壊検査や医療分野への応用研究が盛んに行われている。特に医療分野では、他の検査手法では到達できない分解能を持つ優れた心磁計や脳磁計が開発されている。一方、非破壊検査の分野においても、自発磁化をもつもの、あるいは帯磁させた被測定物の発する磁場を測定することや、渦電流探傷のような誘導磁場を検出する研究が進められている。特に近年は、液体ヘリウムを用いない高温超電導 SQUID を用いた非破壊検査手法が注目されている。

本研究では、高温超電導 SQUID を用いたレール白色層の検出原理として渦電流探傷の原理を採用することとした。レール鋼は残留磁化を有しているが、白色層、レール母材ともに磁気を帯びているため、その差異を自発磁化からのみでは検出することが難しいためである。

また、渦電流の位相は表面からの距離に比例して遅れることから、位相情報を得ることで欠陥深さの推定が行える可能性がある。次章からは、SQUID を用いた白色層検出の原理検証について説明する。

6. SQUID を用いたレール白色層検査の原理検証

はじめに

SQUID を用いた白色層検査の原理検証について述べる。原理検証のため、標準試験片を用いた実験を行い、どの程度の膜厚までのマルテンサイト層の検出が可能であるかを検証する。実レールの測定では、白色層位置に対応する信号変化について説明する。これらの基礎的検討から、SQUID によるレール白色層の検知可能性について述べる。

6.1. 原理検証システム

6.1.1. 試験装置

図 6.1 に、SQUID を用いた原理検証試験における測定システムを示す。SQUID は液体窒素により 77 K に冷却されている。発振器にはファンクションジェネレータを用い、一定周波数の交流磁場を励磁コイルにより発生させる。励磁コイルには 5 章で説明した、2 つの D 型コイルを互いに鎖交磁束が逆向きとなるように配置した WD コイルを用いた。SQUID の出力はロックインアンプにより振幅と位相の情報を得た。測定は SQUID を固定し、ロボットアームによってレール試験片を移動させることで行った。

試験片は、4 章の**図 4.7** に示した模擬白色層試験片（膜厚 100, 1000, 5 μm）を用い、検出評価ならびに波形分析を行った。

原理検証システムでは環境ノイズを低減するために大型の磁気シールドを用いて環境磁気ノイズを低減した。また、SQUID 直近の磁気ノイズを十分低減するため、磁気ノイズキャンセル回路 [31]を導入した。ノイズキャンセルの範囲としては、直流~ 100 Hz までの周波数範囲とした。

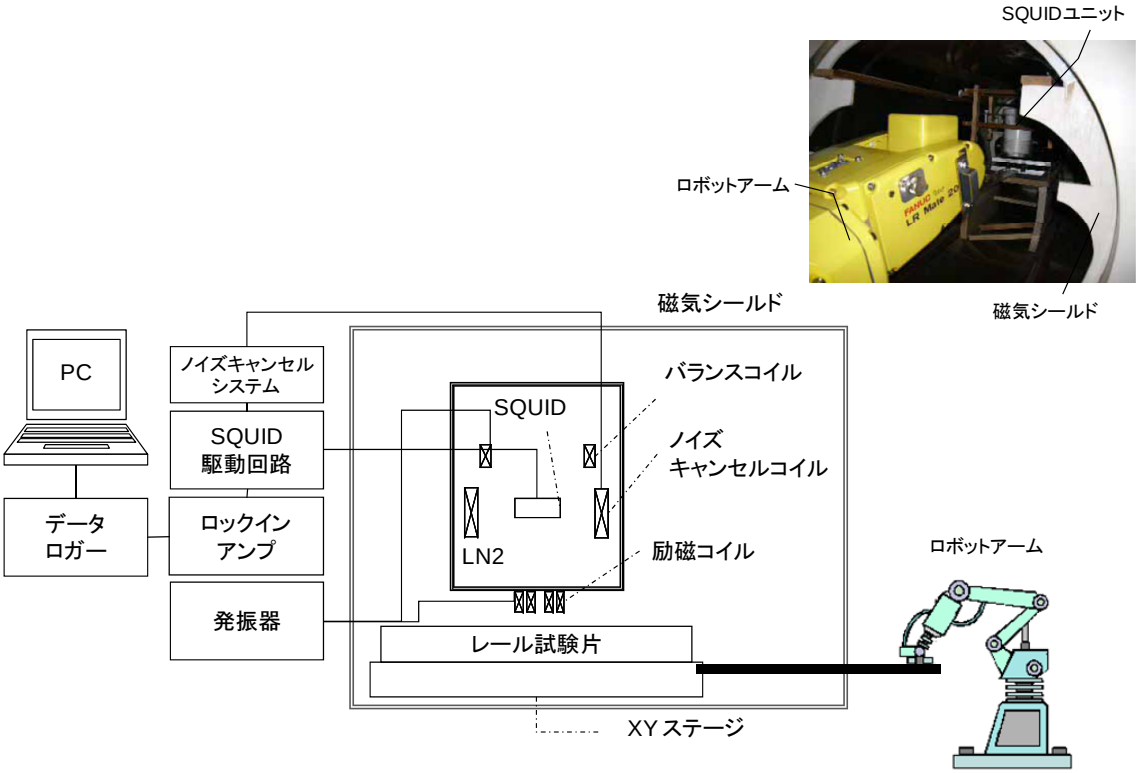


図 6.1　試験装置構成　挿入写真はロボットアームを用いた測定時の様子

図 6.2 にノイズキャンセルの概念を示す。ノイズキャンセル回路は、ローパスフィルタ(時定数は : 100 Hz)により低周波成分の入力信号を、位相を反転して SQUID に磁場として再び入力することによって、低周波磁気ノイズをキャンセルすることができる。**図 6.3** は、ノイズキャンセルを行った場合と行わない場合について、SQUID 出力のノイズスペクトルの比較結果を示す。60 Hz 程度のノイズ成分が低減できており、かつ信号周波数(200 Hz)は通過していることがわかる。

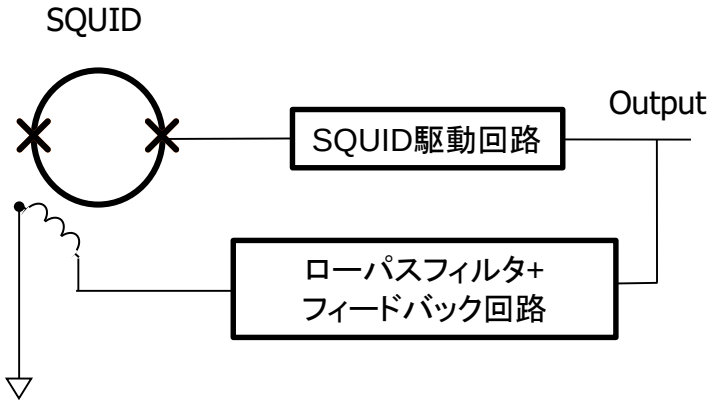


図 6.2　ノイズキャンセル回路の概念

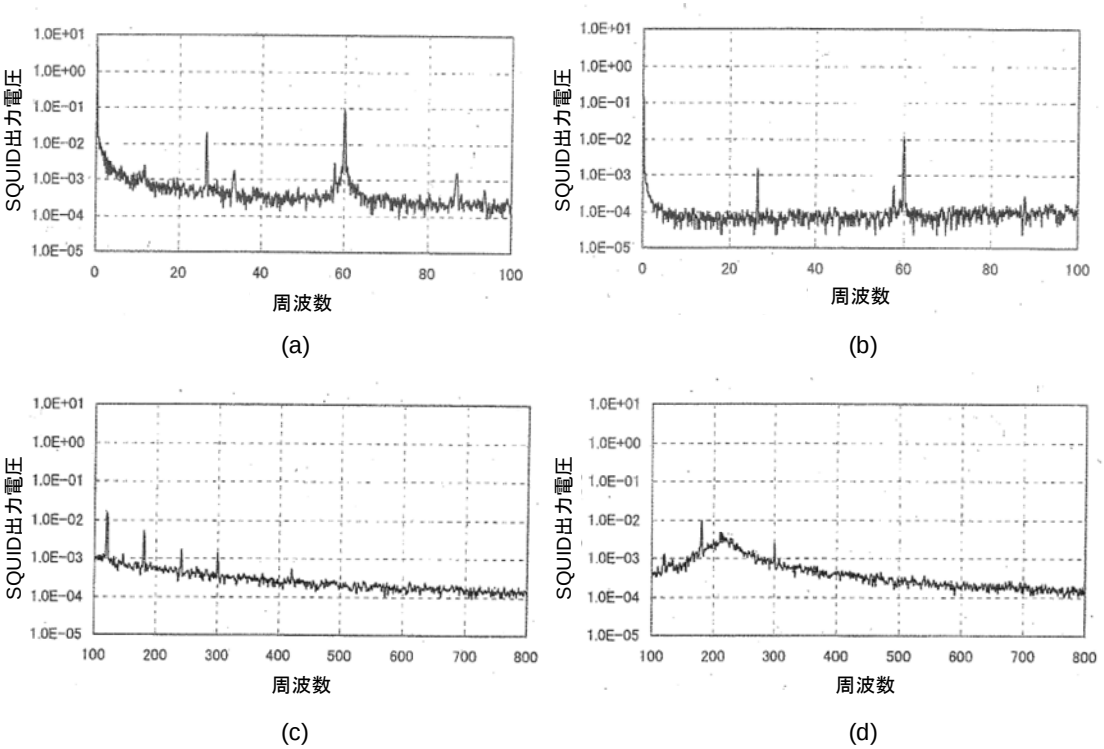


図 6.3　SQUID ノイズスペクトルの比較 (a) ノイズキャンセル無しと(b) 有のとき(0 ~ 100 Hz). (c)ノイズキャンセル時の励磁信号が印加されていない場合と(d) 印加された場合(200 Hz)

6.1.2. 磁性体測定の困難さ

環境ノイズに対しては、磁気シールドを用い、SQUID 直近のノイズに対しては磁気ノイズキャンセル回路を用いて対策を行った。しかし、測定対象となるレール鋼は磁性体であり、レール鋼そのものが残留磁気を帯びている。**図 6.4** に未使用レールの残留磁気を、SQUID よりも感度の劣る磁気センサであるフラックスゲートセンサで測定した結果を示す。測定はレール中央付近で y 軸方向に沿って行っており、各位置で x, y, z の 3 方向の磁束密度を測定した。未使用レールでは周期的な磁気勾配があり、残留磁気の最大値は±300 μT を超えている。このような試験片を SQUID でスキャンすると、**図 6.5** のようなフラックスジャンプを生じて磁束ロックがはずれ、連続測定が不可能となる。実使用されたレールでは、表面で 1 mT 程度の残留磁気があり、ノイズキャンセル回路を用いても SQUID による連続測定はできなかった。

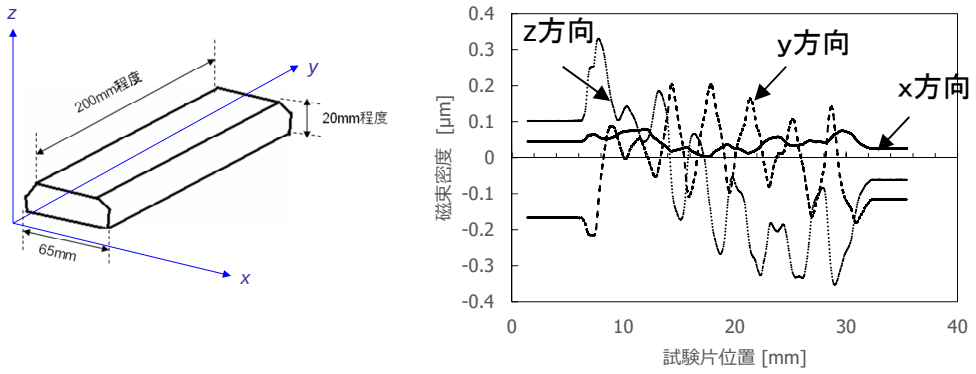


図 6.4　未使用レールの残留磁気測定結果

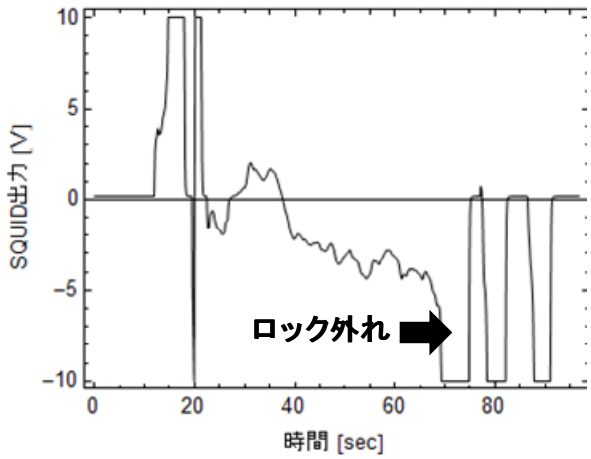


図 6.5　レール測定時の SQUID のロックはずれ

そのため、原理検証段階では、まずレール鋼を十分消磁することで残留磁気の影響を減じ、白色層の検出原理の検証を行うこととした。次のステップでは実環境を想定し、レールを消磁しないで測定可能なシステムの構築を目指すこととし、研究開発のステップを 2 つに分けた（**図 6.6**）。

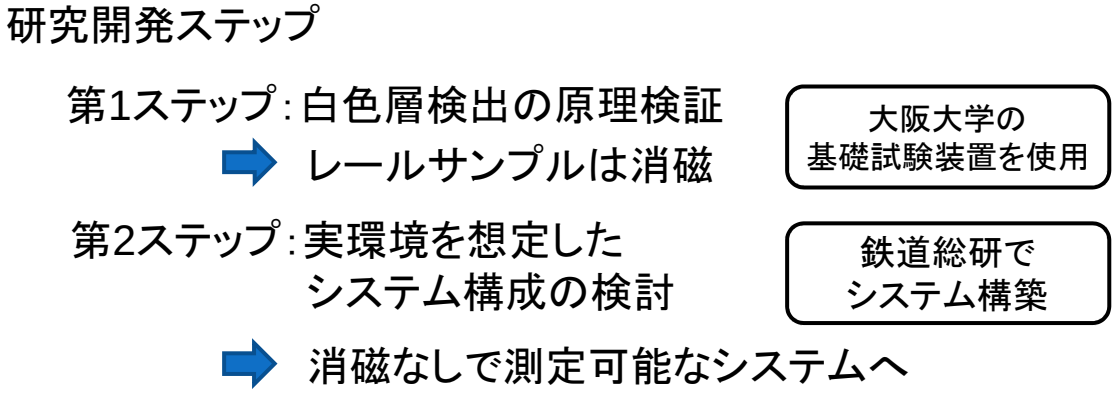


図 6.6　本研究における検討ステップ

6.2. SQUID による白色層模擬試験片の測定

6.2.1. 励磁コイルの検討

5.2 章 で見たように SQUID に入力される磁場の鉛直成分は励磁コイルと渦電流の作る磁場の差分となる。ここでは WD コイルを内径が a の円コイルとして、基礎的な検討を行う。

円コイルの作る磁場は、次式で与えられる。

・鉛直方向成分

$$B_z = \mu_0\ I \frac{k(a,r,z)}{2\,\pi\,\sqrt{4\,r\,a}}\left(EllipticK(k(a,r,z)^2) + \frac{a^2 - r^2 - z^2}{(a-r)^2 + z^2} EllipticE(k(a,r,z)^2)\right) \tag{6-1}$$

・半径方向成分

$$B_r = \mu_0\ I \frac{z\,k(a,r,z)}{2\,\pi\,r\,\sqrt{4\,r\,a}}\left(-EllipticK(k(a,r,z)^2) + \frac{a^2 + r^2 + z^2}{(a-r)^2 + z^2} EllipticE(k(a,r,z)^2)\right) \tag{6-2}$$

ただし、

$$k(a,r,z) = \sqrt{\frac{4\,a\,r}{(a+r)^2 + z^2}} \tag{6-3}$$

ここで、μ_0 は真空の透磁率、I は通電電流、r は半径方向の位置、z は鉛直方向位置を表す。また、Elliptic K, Elliptic E はそれぞれ、第 1 種、第 2 種完全楕円積分を表す。

(6-1)式、(6-2)式を、半径方向にコイル線径、鉛直方向に巻き厚だけ積分すれば、コイル形状を考慮した磁場分布は次式で得られる。

・鉛直方向成分

$$\iint B_z\, dz\, dr \tag{6-4}$$

・半径方向成分

$$\iint B_r\, dz\, dr \tag{6-5}$$

D 型コイルごとに線径 0.4　mm の銅線を 5 巻ずつ巻くと、励磁コイルは半径方向に 0.4 mm、鉛直方向に 2 mm の厚みを有する。簡単のため、試験片の比透磁率は 1 とし、円コイル直径 a = 10 mm、励磁コイルと試験片の距離を 1 mm、通電電流を 1 A とおいて、試料に作る磁場の鉛直成分 B_z の分布を計算した。計算結果のコンター図を図 6.7 に示す。図 6.7 より、励磁コイルが試験片に作る磁場の鉛直成分は、励磁コイル径程度の広がりを有していることがわかる。

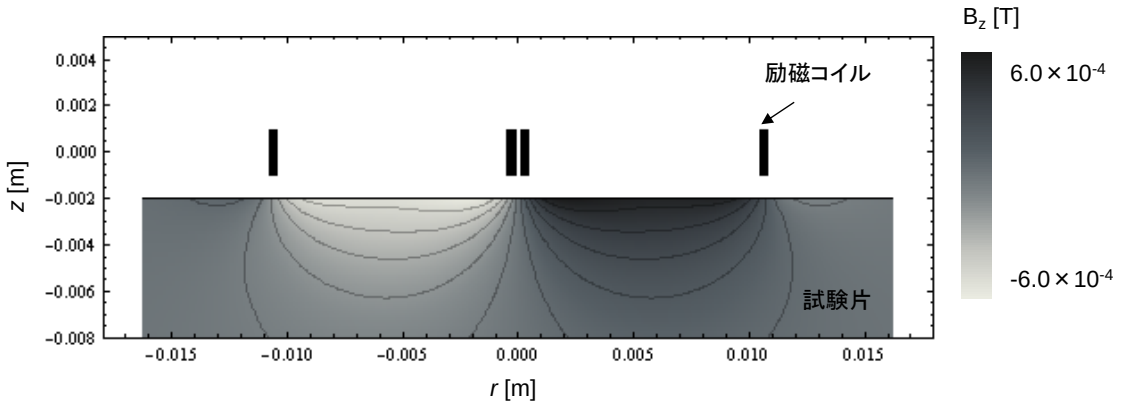


図 6.7　励磁コイルが試験片に作る磁場分布

次に、渦電流が SQUID の位置に作る磁場の鉛直成分を求めるために、**図 6.8** のように WD コイル、渦電流を円電流としてモデル化する。試験片に鎖交する磁束が変化することで、試験片に(5-4)の第 2 式に表される渦電流が誘起される。励磁コイルが試験片に作る磁場の鉛直成分は、励磁コイル径程度の広がりを有していることから、渦電流も直径 a 程度を有するものとして検討する。渦電流の径方向の分布を励磁コイルと同程度とし、鉛直方向の厚みを 2 mm として、励磁コイルと同形の電流ループを考える。

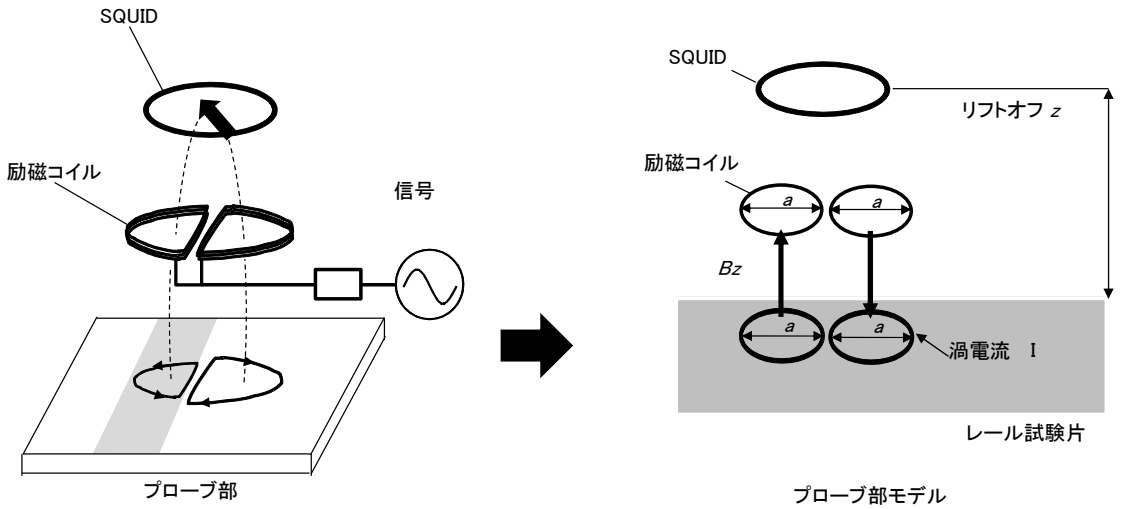
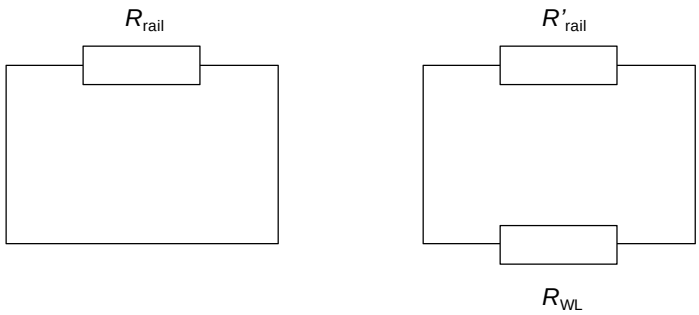


図 6.8　SQUID 検出部の円電流モデル

SQUID 位置に磁束が鎖交するためには、2 つの渦電流の分布に差異が生じる必要がある。ここでは、4.3 章で用意した幅 4.4 mm の模擬白色層が試験片表層に存在するとする。模擬白色層の厚みを渦電流の厚みと同じ 2 mm とすると、渦電流ループの抵抗を図 **6.9** のように考えることができる。R_{rail} は模擬白色層のない場合の渦電流ループの抵抗を表す。模擬白色層がある場合には、渦電流ループの抵抗は母材部分の抵抗R'_{rail}と、模擬白色層部分の抵抗R_{WL}の直列合成となる。



(a) 模擬白色層がない場合　(b) 模擬白色層がある場合

図 6.9　渦電流ループの等価回路

母材部分の抵抗R'_{rail}と、模擬白色層部分の抵抗R_{WL}の比率は、渦電流ループ長における、模擬白色層の占める割合により決まる。半径 a が模擬白色層の幅 4.4 mm よりも大きい場合について、図 **6.10** に示す。ループ上における模擬白色層の長さは、図より 2s であるから、模擬白色層の渦電流ループに占める割合wl_{ratio}は次式となる。

$$wl_{ratio} = \frac{2}{\pi}\sin^{-1}\frac{b}{a/2} \tag{6-6}$$

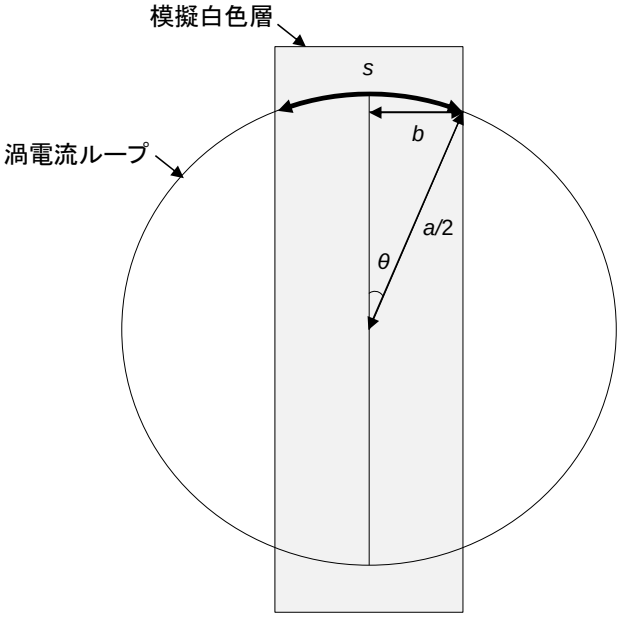


図 6.10　渦電流ループ長における模擬白色層の占める割合

R'_{rail}およびR_{WL}は、模擬白色層の抵抗率をρ_{wl}、母材の抵抗率をρ_{rail}とし、渦電流ループ長をs_t、断面積をA_tとすると、

$$R_{wl} = wl_{ratio}\,\rho_{wl}\frac{s_t}{A_t} \tag{6-7}$$

$$R'_{rail} = (1 - wl_{ratio})\rho_{rail}\frac{s_t}{A_t}$$

と表すことができるから、図 **6.10** のように片側のコイル直下に白色層が存在するとき、この渦電流ループの電流変化率は、

$$\frac{R_{rail}}{R'_{rail} + R_{wl}} \tag{6-8}$$

となる。この値は 4.5 章より、ρ_{rail} =0.24 μΩ・m、ρ_{wl} =0.34 μΩ・m であるから、渦電流ループをすべて模擬白色層が占めた場合(a = 4.4 mm)には、0.24/0.34 = 0.706 となり、レール母材に比べ模擬白色層では 7 割程度に渦電流が減少する。これより励磁コイル径を小さくしても、すでに模擬白色層の渦電流ループに占める割合は 100%であるから、渦電流は 7 割減のままである(図 **6.11**)。

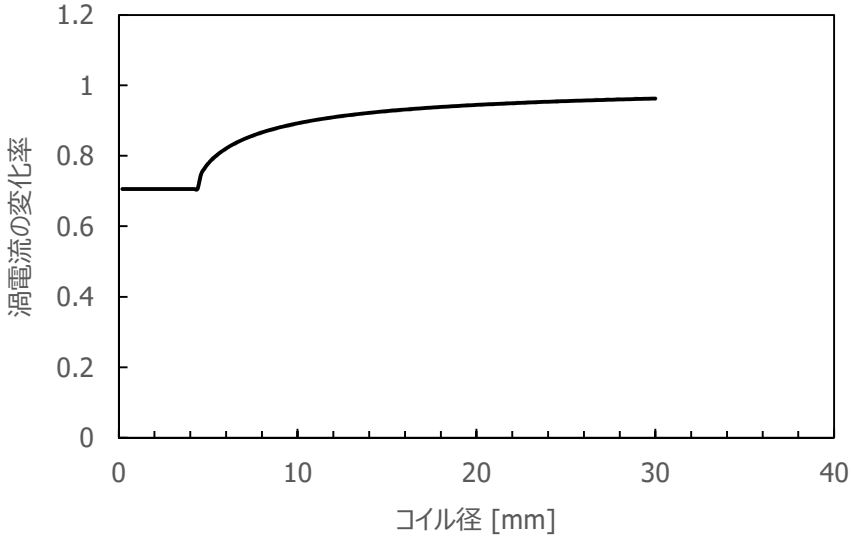


図 6.11　渦電流ループ電流変化率のコイル径依存性

SQUID とレールとの距離（リフトオフ）は、SQUID を冷却するための液体窒素保冷容器底面の厚みで決まってしまう。当初用いた保冷容器底面と SQUID の距離は 9.5 mm である。励磁コイルの厚みおよび励磁コイルと試験片の距離を合わせて、試験片表面との距離（リフトオフ）は 12.5 mm である（**図 6.12**）。**図 6.13** に、2 つの渦電流ループが SQUID 位置に作る磁場の鉛直成分について、(6-4)式により計算した結果を示す。励磁コイル径を 10 mm 程度としたときに、SQUID 位置における磁場の鉛直成分が最大値を持つことがわかる。

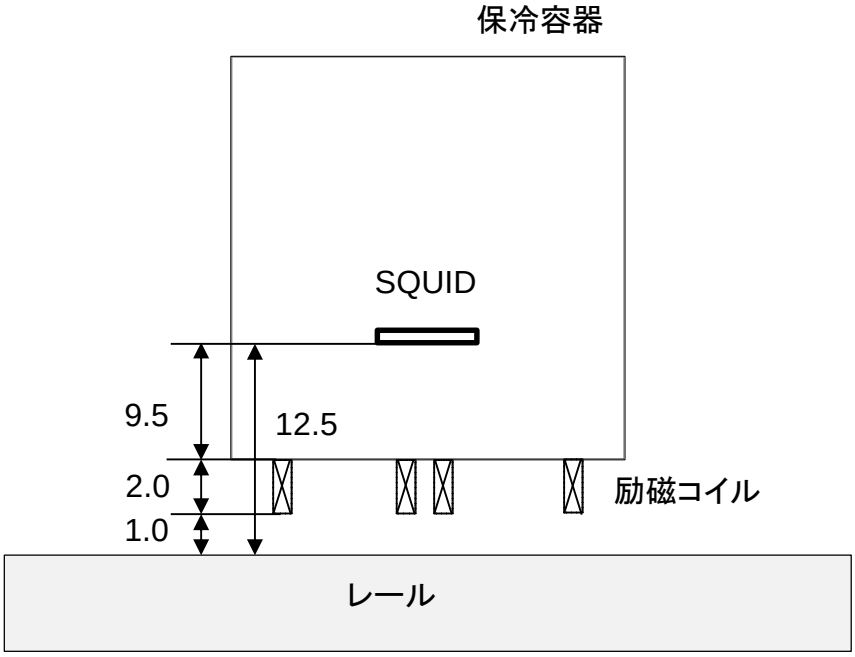


図 6.12　SQUID リフトオフと励磁コイル寸法

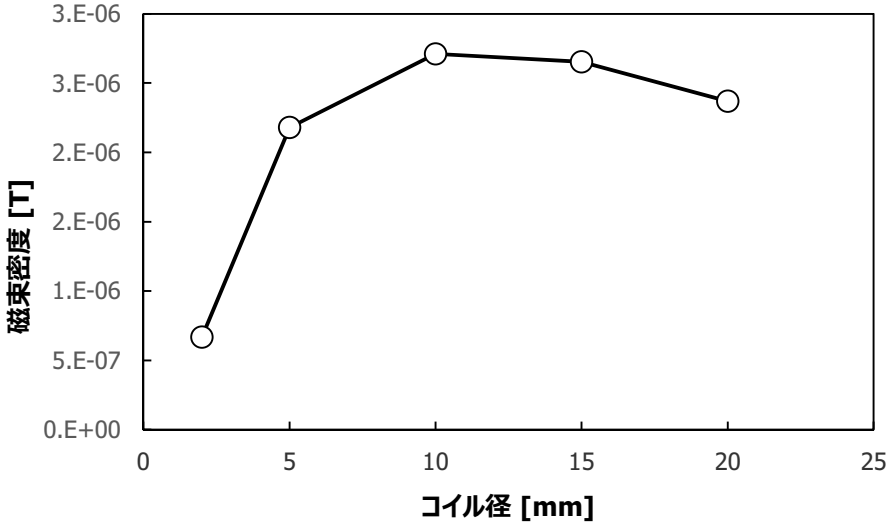


図 6.13　渦電流が SQUID 位置に作る磁場の鉛直成分の励磁コイル径依存性
(リフトオフ 12.5 mm)

6.2.2. 膜厚 100 μm の模擬白色層の検出

製作した白色層模擬試験片のうち膜厚 100 μm の試験片について、SQUID 非破壊測定を実施した。測定では試験片表面に励磁コイルを近づけて試験片を走査した。励磁コイル径とリフトオフの検討により、WD 型励磁コイルの径は 20 mm(D コイル径 10 mm)と

した。**図 6.14** に模擬白色層のスキャン方向を示す。**表 6.1** に模擬層膜厚 100 μm の測定条件を示す。

模擬白色層試験片測定結果を**図 6.15** に示す。SQUID の出力は、ロックインアンプにより振幅と位相情報が得られるが、ここではまず信号のインピーダンス平面上における *x* 軸、*y* 軸への投影、すなわち Cos 成分および Sin 成分に分けてみる。

Cos 成分については、模擬白色層位置と出力変化の位置が対応していることがわかる。一方、Sin 成分では出力が変化しているものの、模擬白色層位置との対応は Cos 成分ほど明確ではない。この結果について**図 6.16** のようにインピーダンス平面で考えてみると、次のことが言える。

- Cos、Sin 成分ともに電圧が負に変化していることから、インピーダンス平面の第 3 象限にあること
- このことから、渦電流による磁場の位相は、励磁コイルの作る磁場の位相よりも進んでいる（または遅れている）こと
- Cos 成分はインピーダンスのうち抵抗成分を表していることから、測定結果は抵抗成分をとらえていること

表 6.1　模擬層膜厚 100 μm のときの測定条件

励磁コイル	WD コイル(5 巻)
励磁コイル直径 [mm]	20
励磁コイル電流 [mA]	300
励磁周波数 [Hz]	300
リフトオフ [mm]	12.5

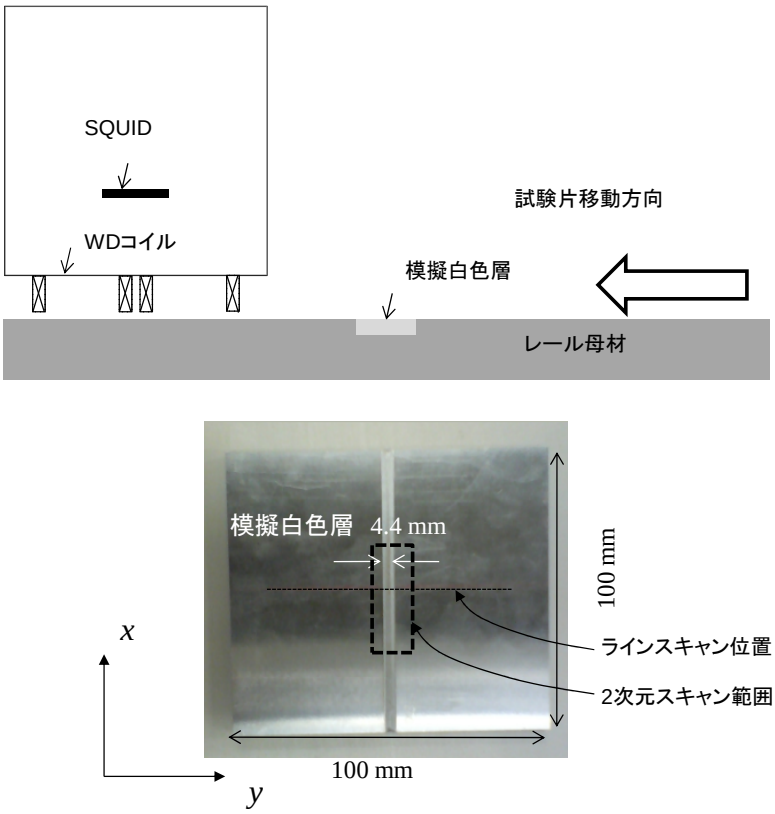


図 6.14　模擬白色層を有する試験片のスキャン位置

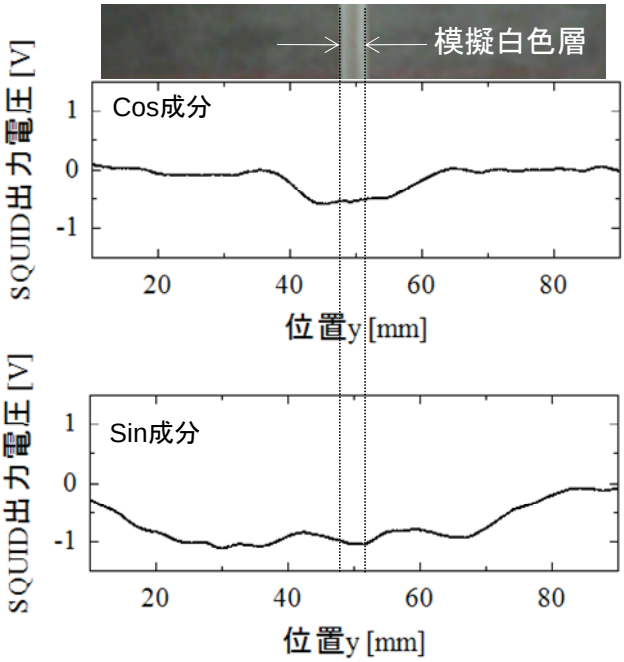


図 6.15　模擬白色層試験片膜厚 100 μm の測定結果

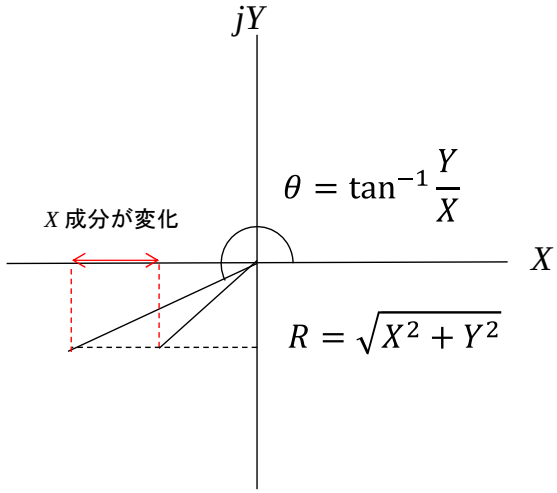
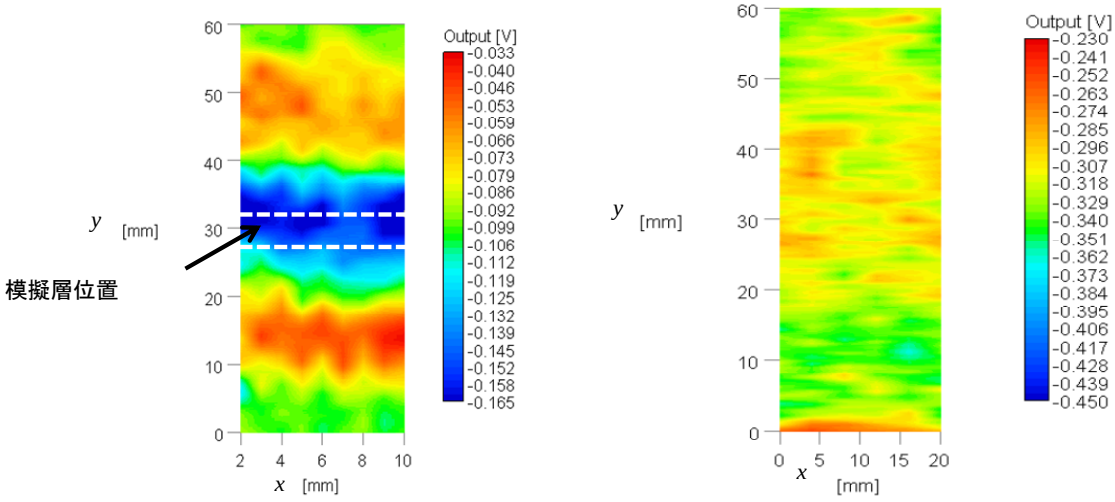


図 6.16　インピーダンス平面への投影

図 6.17 には y 方向への走査を x 方向に 2 mm ピッチで繰返し、ロックインアンプの出力の Cos 成分をマッピングすることで得られた 2 次元測定結果を示す。模擬白色層は**図 6.13(a)**の 30 mm の位置を中心に 4.4 mm の幅で分布している。図では、試験片位置 20 ~ 40 mm の 20 mm の範囲において明瞭な信号が得られていることがわかる。一方、模擬白色層のない試験片についても同一条件にて測定を行った。**図 6.13(b)**のように、模擬白色層のない試験片では、模擬白色層のある試験片のような明確な信号変化は得られなかった。



(a) 模擬白色層　有
(300 Hz)

(b) 模擬白色層　なし
(300 Hz)

図 6.17　模擬層膜厚 100 μm の測定結果(2 次元走査)

6.2.3. 励磁周波数の検討

100 μmの膜厚を有する模擬白色層について励磁周波数 300 Hz にて測定を行った結果、抵抗成分を表す Cos 成分の変化が大きいことがわかった。ところで、模擬白色層の物性評価からは、レール母材と比較して抵抗率、透磁率ともに変化することがわかっている。模擬白色層の検出では抵抗成分だけでなく、透磁率の変化もとらえることができれば、より検出感度を向上できると考えられる。そこで励磁信号の周波数を変化させ、応答信号のインピーダンス変化を調べることとした。

ただし周波数を変更した場合には、**図 6.18**（a）のように渦電流の試験片への浸透深さである表皮深さが変化する。**図 6.18**（b）、(c)に示すように、模擬白色層の膜厚が表皮深さ程度よりも薄い場合には、得られる信号強度が表皮深さの影響を受けてしまうことが考えられる。周波数 200 Hz ~ 1000 Hz で表皮深さは 1800 μm ~ 800 μmの範囲で変化することから、試験片は表皮深さの影響を極力受けないよう膜厚 1 mm と厚いものを用いた。

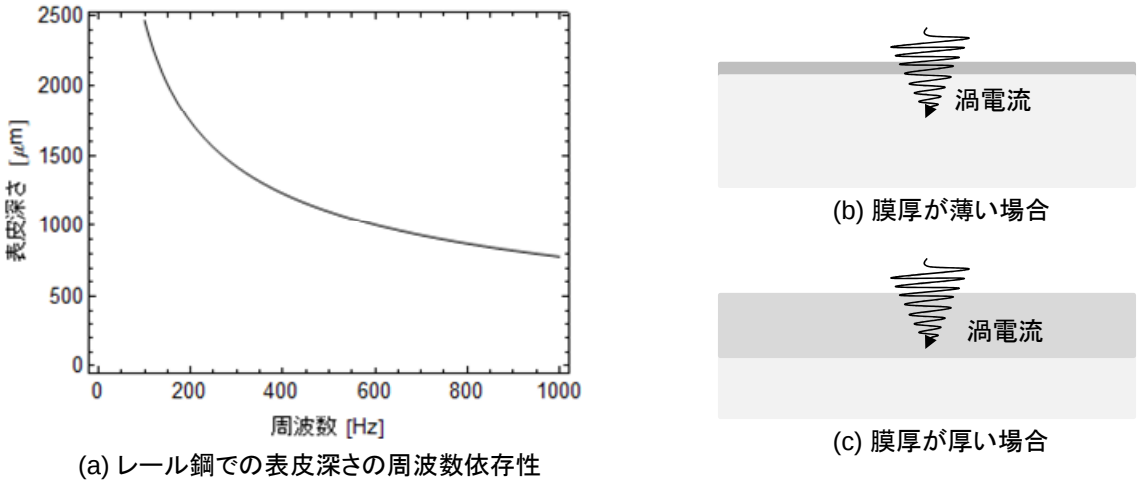


図 6.18　表皮深さと膜厚の影響
(a) レール鋼での表皮深さの周波数依存性、
(b) 膜厚が薄い場合と、(c) 厚い場合の渦電流分布のイメージ

膜厚 1 mmの試験片を y 軸方向にスキャンした結果を、励磁周波数を 200, 300, 500, 600, 900, 1000 Hz と振って測定した結果を Cos、Sin 成分ごとに一覧にした図を**図 6.19** に示す。いずれの信号分布も模擬白色層の位置の前後で正に変化し、模擬白色層位置では負に変化していることがわかる。また、Sin 成分は励磁周波数を高くするのに従って、振幅が大きくなっていることがわかる。

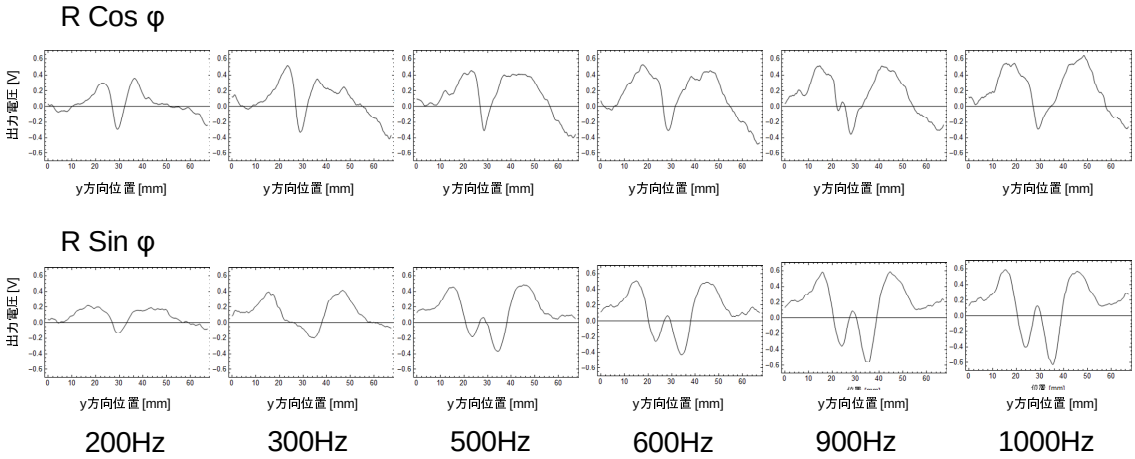


図 6.19　模擬層膜厚 1 mm の測定結果の周波数依存性

そこで、各周波数における Cos、Sin 成分の出力電圧変化のピーク値をとって励磁周波数に対してプロットしたものが**図 6.20** である。励磁周波数を高くするに伴い Sin 成分の変化幅が、Cos 成分と比較して大きくなっている様子がわかる。これを**図 6.21** のようにインピーダンス平面で見てみると、励磁周波数の上昇に伴いリアクタンス成分の変化が大きくなっていることに対応する。すなわち、励磁周波数を変化させることによって、模擬白色層の物性変化のうち抵抗成分のみでなく、透磁率の変化もとらえることができることがわかる。以上から、レール鋼のような磁性体の測定では、リアクタンス成分をとらえる周波数帯で測定することが有効であるといえる。

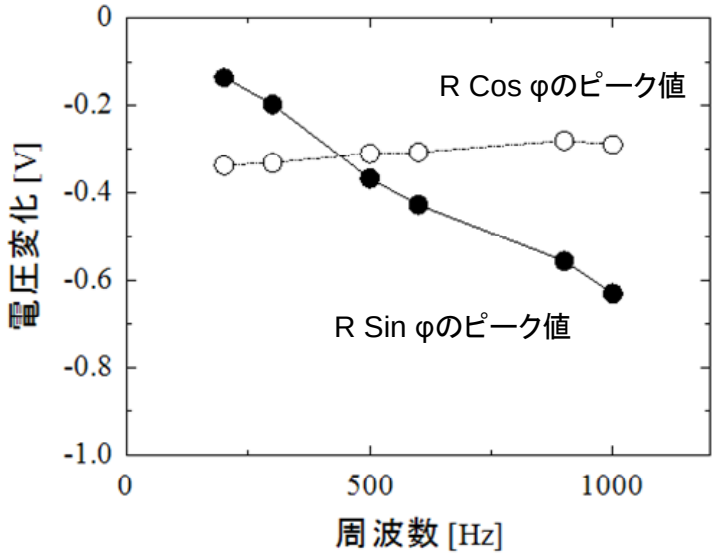


図 6.20　励磁周波数と Cos、Sin 成分の変化

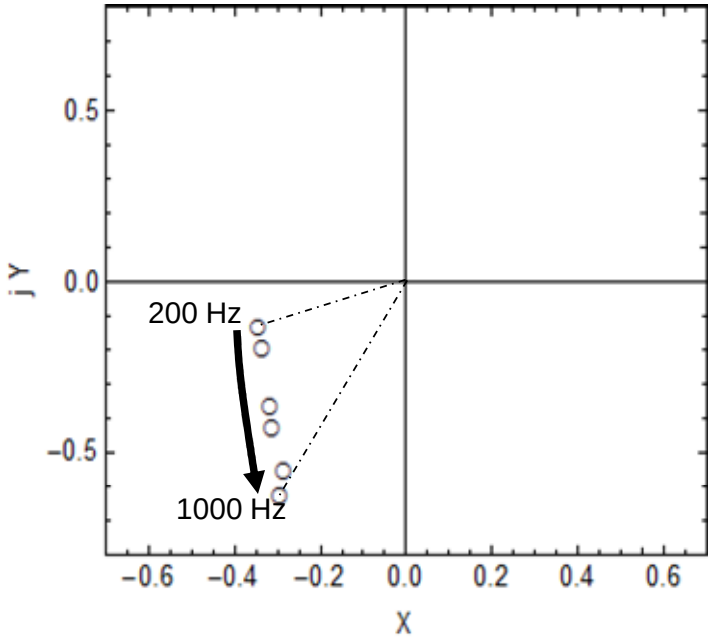


図 6.21　インピーダンス平面で見る信号変化に対応する励磁周波数の影響

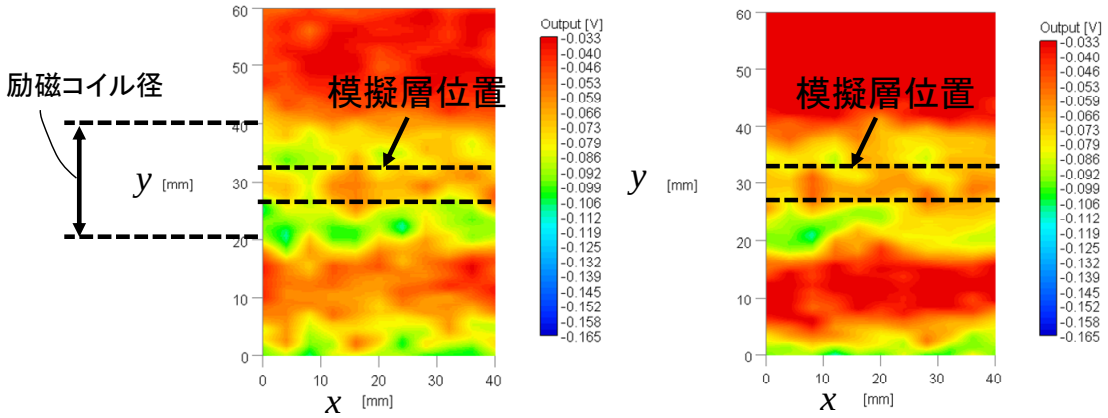
6.2.4. 膜厚 5 μm の模擬白色層の検出

膜厚 100 μm 模擬白色層の検出を踏まえ、模擬試験片における検出目標である膜厚 5 μm の検出試験を行った。その時の測定条件を表 6.2 に、試験結果を**図 6.22** に示す。励磁周波数は 400 Hz、600 Hz とした。

両者とも、模擬白色層位置で信号変化が認められるが明瞭ではなく、励磁コイル径程度の広がりを持っているように見える。模擬白色層位置での信号変化を明確にとらえるには、空間分解能の向上も必要と考えられる。そこで、次に空間分解能の検討を行った。

表 6.2　模擬層膜厚 5 μm のときの測定条件

励磁コイル	WD コイル(5 巻)
励磁コイル直径 [mm]	20
励磁コイル電流 [mA]	300
リフトオフ [mm]	12.5



(a) 励磁周波数400 Hz　　(a) 励磁周波数600 Hz

図 6.22　模擬層膜厚 5 μm 測定結果(2 次元走査)

図 6.23 に、励磁コイルと空間分解能の模式図を示した。いずれの場合も白色層の検出感度は有しているとする。(a) コイル直下に白色層が 1 つある場合と、(b) 白色層が 2 つある場合では、ほぼ同様の検出波形となると予考えられる。この 2 つの白色層を区別して検出するためには、励磁コイルの大きさは白色層の幅以下であることが必要である。模擬白色層は 4.4 mm の幅があるので、コイル径も 4.4 mm 程度にするのがよい。

ただし、6.2.1 章で検討したように、検出感度は励磁コイル径とリフトオフの関係で決まるため、励磁コイル径を変化させる場合には、リフトオフも合わせて調整が必要である。

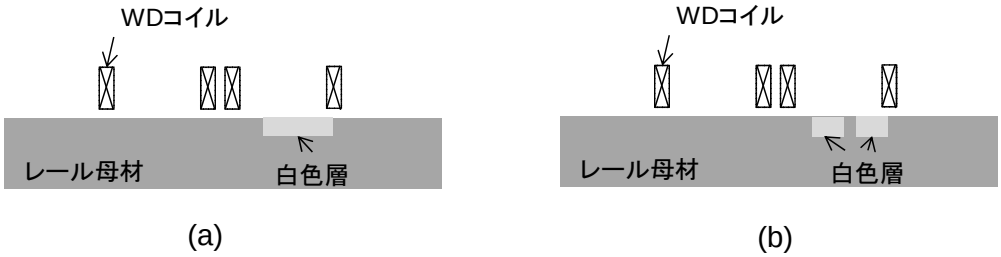


図 6.23　励磁コイルと空間分解能 (a) コイル直下に白色層が 1 つある場合 (b) 白色層が 2 つある場合

リフトオフは、SQUID の保冷容器の底面断熱距離で制約を受けている。2 つの渦電流ループが SQUID 位置に作る磁場の鉛直成分について、(6-4)式によりリフトオフを変えて計算した結果を図 6.24 に示す。励磁コイル径を 4 ~ 5 mm 程度にするには、リフトオフを 8 mm 以下にする必要があることがわかる。そこで保冷容器を改良し、リフトオフを 12.5 mm から 7 mm に低減した。以上の検討をもとに実験に用いた励磁コイル径は 4 mm とした。リフトオフとコイル径を見直した測定条件を表 6.3 に示す。

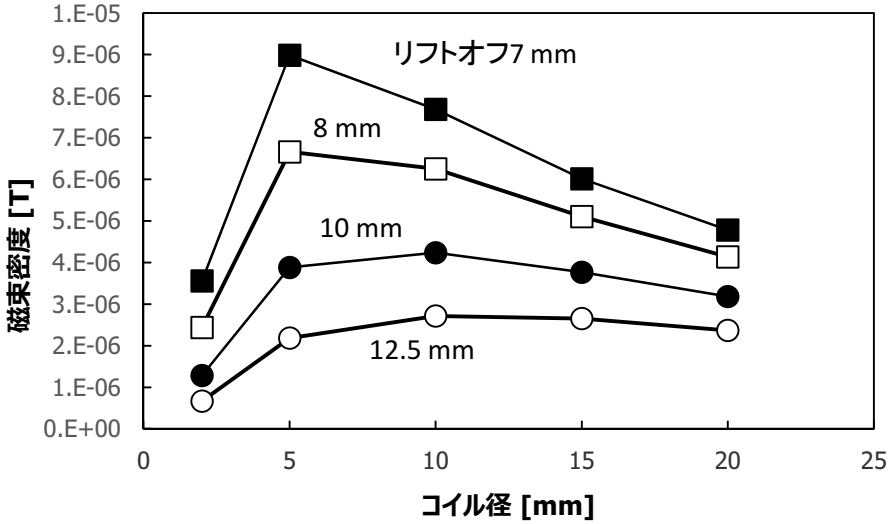


図 6.24　渦電流が SQUID 位置に作る磁場の鉛直成分の励磁コイル径依存性

表 6.3　励磁コイル径およびリフトオフを見直した測定条件

励磁コイル	WD コイル(5 巻)
励磁コイル直径 [mm]	8
励磁コイル電流 [mA]	440
励磁周波数 [Hz]	~1000
リフトオフ [mm]	7

測定条件を見直し、膜厚 5 μm の模擬白色層試験片の測定を再度行った。測定結果の 2 次元コンターを**図 6.25** に示す。励磁コイル径 8 mm の幅で、出力電圧が明確に変化していることがわかる。

以上から、SQUID による渦電流法を用いた本システムは、白色層検出に十分な感度を有することを検証し、実レール白色層検出の可能性を示した。

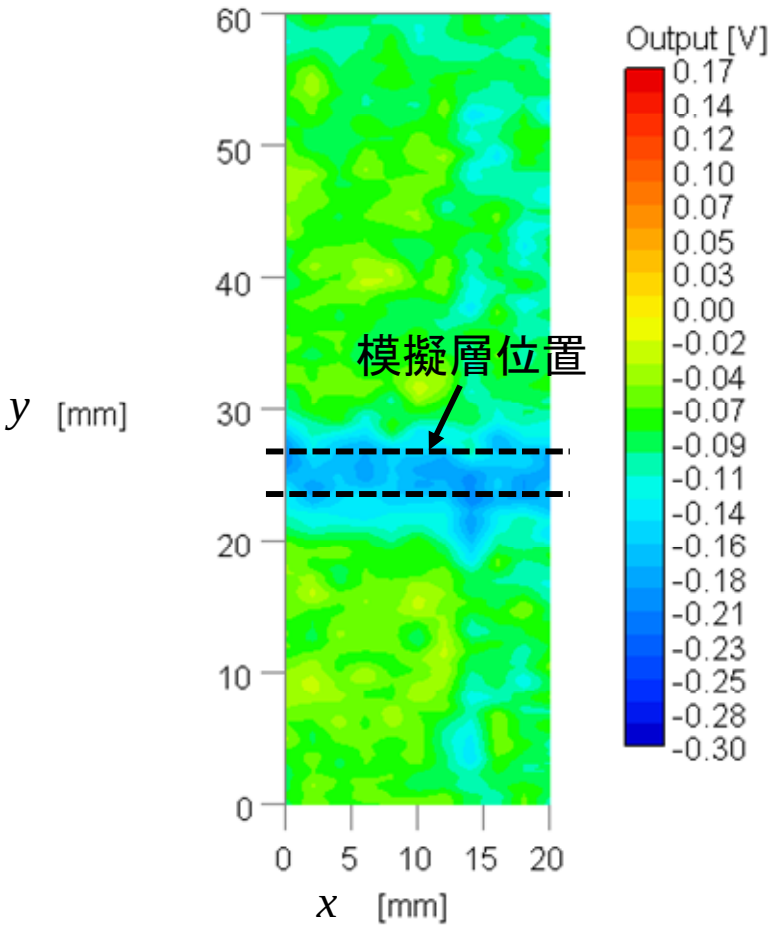


図 6.25　模擬層膜厚 5 μm の測定結果(2 次元走査)

6.3. SQUID による実レール白色層の測定

模擬白色層検出試験を通じて、SQUID 測定システムのコイル径、リフトオフ、周波数などを調整し、膜厚 5 μm の検出が行えた。実レールの白色層膜厚は 4.2 章でみたように 10 μm～40 μm に分布しており、本システムは十分にこれを検出する能力を有していると考えられる。そこで、実レール白色層の検出試験を行うこととした。

実レール白色層の測定には、レールの頭頂部を切り出し試験片として用いた。**図 6.26** に切り出したレール頭頂部の測定エリアを示す。測定は、白色層のある部位に対応する 40 mm×20 mm の範囲を実施した。なお、当該試験片の直近を切り出し、断面を観察して、白色層の膜厚は 30 μm 程度であることを確認している。

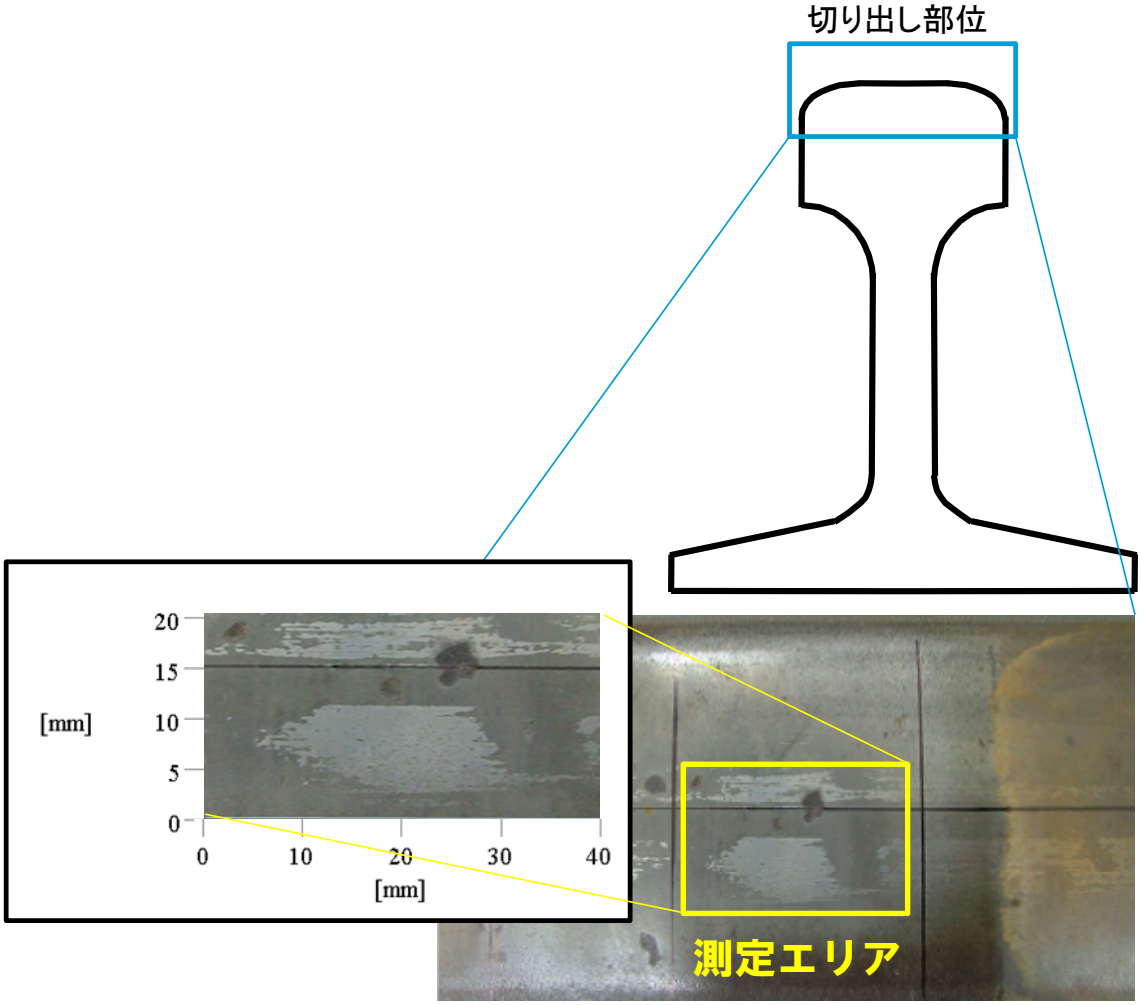


図 6.26　実レール試料の測定位置

実レール白色層の測定条件を表 6.4 に示す。条件は模擬白色層 5 μm のときと同一とした。

測定結果の 2 次元コンターを図 6.27 に示す。白色層および周辺クラックの箇所で対応する箇所に明確な信号変化が認められ、SQUID により白色層検出の原理検証に成功した。

表 6.4　実レール白色層測定条件

励磁コイル	WD コイル(5 巻)
励磁コイル直径 [mm]	8
励磁コイル電流 [mA]	440
励磁周波数 [Hz]	~1000
リフトオフ [mm]	7

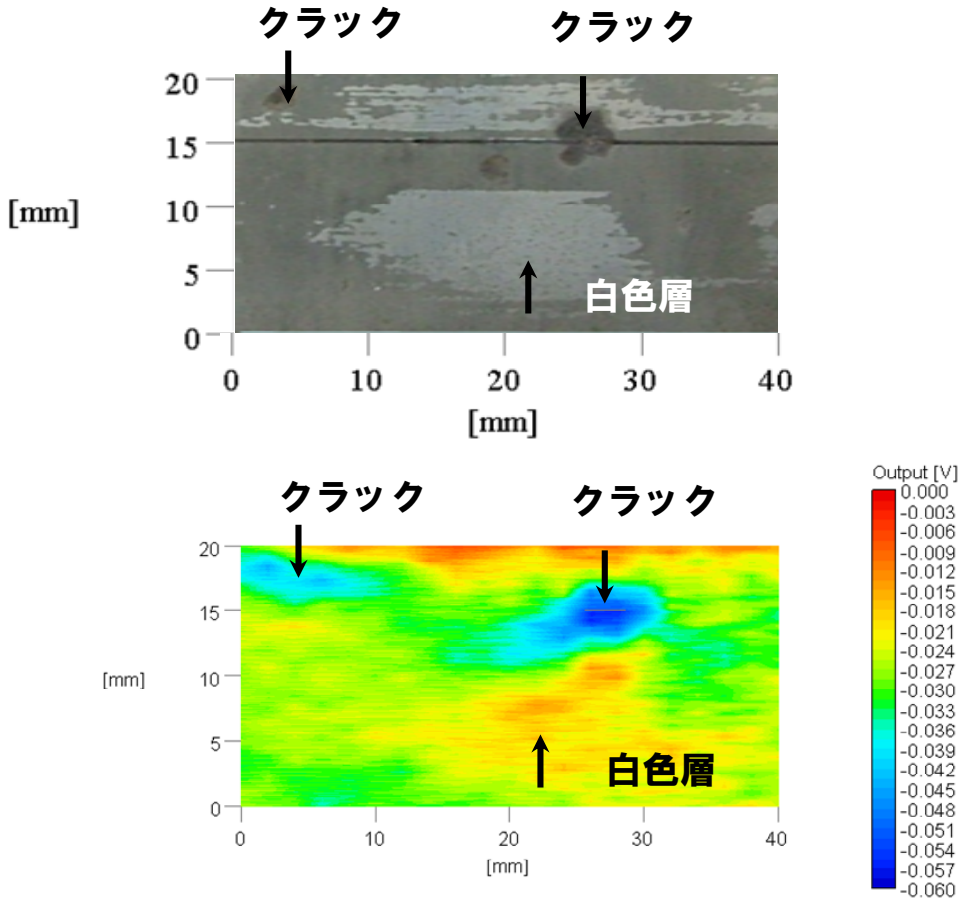


図 6.27　白色層分布と SQUID による検出結果

6.4. 本章のまとめ

白色層検出のために、SQUID を用いた渦電流検査システムを構築した。原理検証システムでは環境ノイズを低減するために大型の磁気シールドを用いた。また、SQUID 直近の磁気ノイズを十分低減するため、磁気ノイズキャンセル回路を導入した。ノイズキャンセルの範囲としては、直流~ 100 Hz までの周波数範囲とした。レール試験片はいずれも十分に消磁したものを用いた。

SQUID とレール試験片の距離と、励磁コイルの関係について検討を行い、感度が最適となる励磁コイル径を決定した。また、構築した検査システムを用い、標準試験片での原理確認試験を実施し、リアクタンス成分の変化が捉えられる周波数領域を利用するのが有効でることを確認して測定条件の最適化を行った。また、膜厚 5 μm の模擬白色層の検出において、空間分解能を向上させるため、励磁コイルとリフトオフについて見直した。その結果、模擬白色層試験片での検知試験では、膜厚 5 μm 程度まで検出可能であることが分かった。これをもとに実レールの測定を行い、ノイズ低減環境において実レール白色層検出の原理検証に成功した。

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。次章ではフィールドでの測定が可能な走行型の検査装置について検討し、発展させた内容を説明する。

7. SQUID レール検査装置の開発

はじめに

原理検証に用いた測定システムは、SQUID を大型の磁気シールドで磁気ノイズから保護するとともに、レールの残留磁気ノイズを低減するため、消磁した試験片を用いていた。しかし、フィールドでの非破壊検査を前提とした場合、ノイズ対策を十分に検討する必要がある。本章では、レールには検査プローブのみを接近させ、SQUID を小型の磁気シールドで保護して、インプットコイルから信号を得る測定システムを構成し、ノイズおよび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を構築した内容について述べる。

7.1. 屋外測定に向けた測定回路

前章の原理検証のための測定システムによって、SQUID を用いた白色層の検出が可能であることを確認することができた。しかし、実レールの検査においては SQUID をフィールドで使えるようにする必要がある。

SQUID は他センサでは到達不可能な感度を有しているが、それゆえノイズに非常に弱いという欠点を持つ。原理検証システムでは、大型の磁気シールドを用いて環境ノイズを低減し、レールをいったん消磁し、かつノイズキャンセル回路を用いることで、初めてレールの測定が可能となった。ところが、フィールドに敷設された実レールを測定する場合には、レールを消磁するなどの前処理を行うことは、検査時間が増大するため好ましくない。また、環境ノイズ対策として大型の磁気シールドを用いることもできないため、実測定環境に即した磁気ノイズ対策が必要となる（**図 7.1**）。

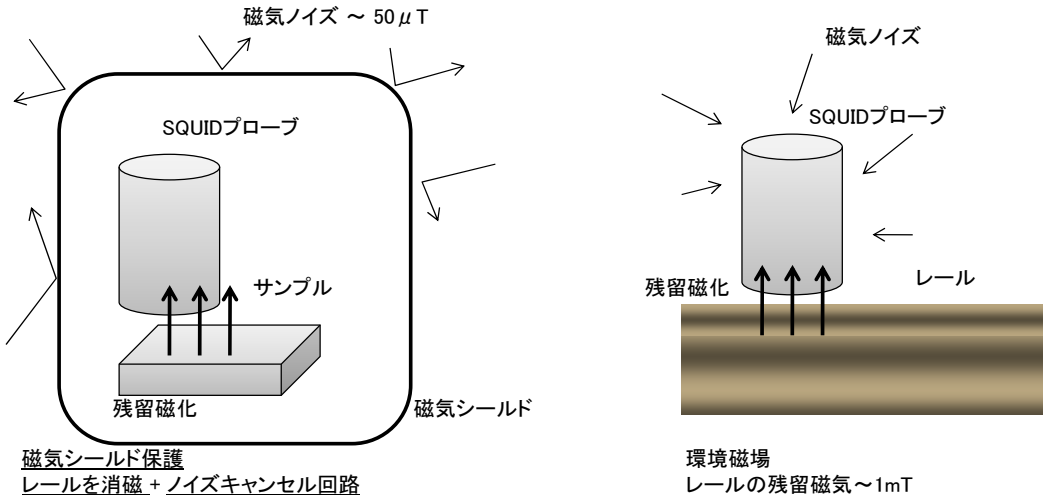


図 7.1　磁気ノイズ対策の重要性

地磁気は、環境にもよるがおよそ±50 μT 程度の揺らぎを持つ。また、周辺機器の発する電磁波はスパイク状のノイズとなって SQUID に飛び込む。これらの磁気ノイズ対策として、磁気シールドや磁気ノイズキャンセル回路の適用が考えられる。

一方、検査対象となるレール自体が残留磁気を帯びており、未使用レールで±300 μT 以上、使用レールで 1 mT と、SQUID にとっては非常に大きな磁気を持つ。このような磁場分布中を SQUID が動くと、たとえ移動速度が遅くとも、スルーレートは非常に大きなものとなり、SQUID の磁束フィードバックが追従できず、磁束ロックが外れてしまうことで、定量的な測定は困難となる。このような大きな磁気ノイズへの対策として、ノイズキャンセル回路を増強することもひとつの方法として考えられる。

しかし、将来的にレール上を走行して検査を行うツールとするためには、検査システムはユーザーユレンドリーである必要がある。フィールドでの使用を想定する場合に、プローブ部に SQUID や真空容器が配置されるシステムでは、取扱いや故障時の交換といった場合に煩雑であるとともにコストがかかる。フィールドで使用する検査システムとしては、レールに接近するプローブは堅牢なものであり、万が一故障または破損した場合にも交換容易性が求められる。

そこで、フィールドで使用可能なシステム構築を目指し、検査システムを改良することとした。改良システムのコンセプトは、プローブ部を堅牢にすること、SQUID はノイズ源から遠ざけ、安定動作を確保することである。

前章の SQUID を用いた渦電流探傷システムは、励磁コイルと SQUID を同軸上に配置する方式であった。この方式は SQUID を用いた渦電流探傷で一般的に採用されている測定方式である。しかし、本研究で測定対象とする鉄道用レールでは、頭頂面で最大 1 mT 程度の残留磁化があり、磁気シールドのない状態で SQUID を測定対象に接近させなければならないこの方式で、磁性体を安定に測定することは困難である。前章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、さらに残留磁化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場中で SQUID を動作させる方法について様々な検討がなされており、SQUID を完全に磁気シールドに格納できる SQUID ピコボルトメータについても検討されている [30]。本研究では、環境磁場およびレール残留磁化の影響を減じるために、SQUID の測定システムを**図 7.2** のように構成した。レールには、室温にある探傷プローブのみを接近させる。探傷プローブは励磁と検出を兼ねた差動型コイルとして、2 つのマイクロインダクタコイル(1 mH、 直径 5 mm)を組み合わせ、2 つのコイルをブリッジ回路の構成とした。 検出部の回路図を**図 7.3** に示す。レールにはプローブのみを接近させる。レールに白色層がない場合には、プローブ部、インプットコイルを含めた中間回路は、レールと相互インダクタンスで結合されており、レールとの結合を含め

てブリッジバランスは保たれている。そのため、この状態ではインプットコイルに電圧は発生しない。試験片の異常個所にさしかかったときに、2 つのコイルによって発生する渦電流分布が変化すると、レールとコイルの相互インダクタンスが変化するため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。この磁束を SQUID が検出することにより、白色層を検出することができる。

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、レールの残留磁気の影響を受けにくい安定的な測定システムとすることができる。開発した測定システムのプロトタイプの写真を**図 7.4** に示す。

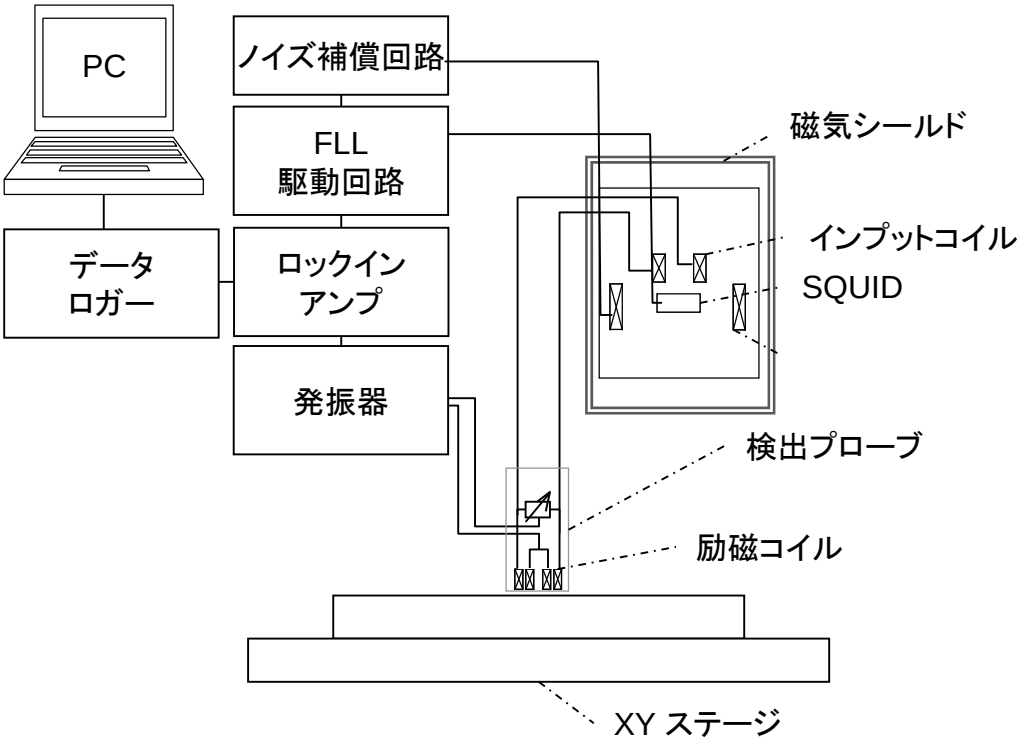


図 7.2　屋外測定に向けた測定システム

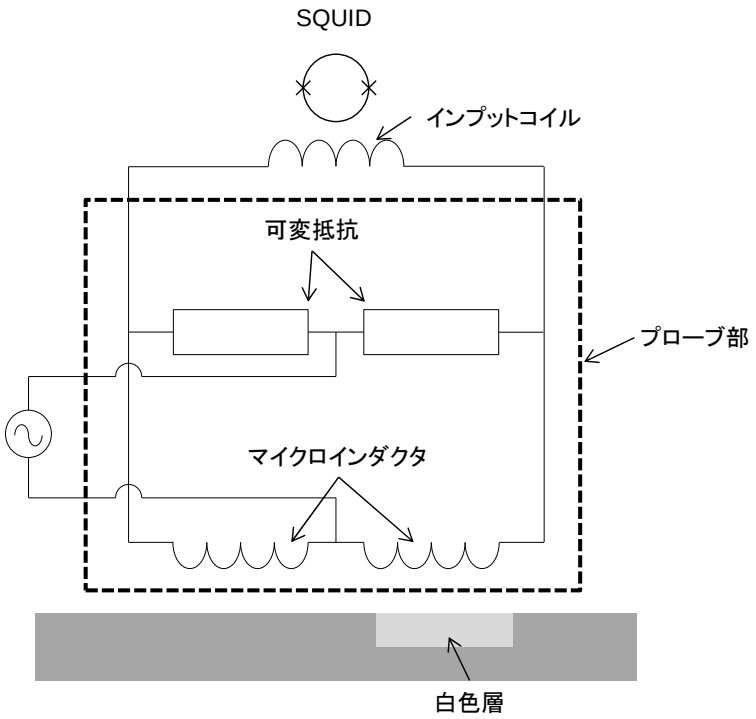


図 7.3　屋外測定に向けた測定システムの検出部の回路図

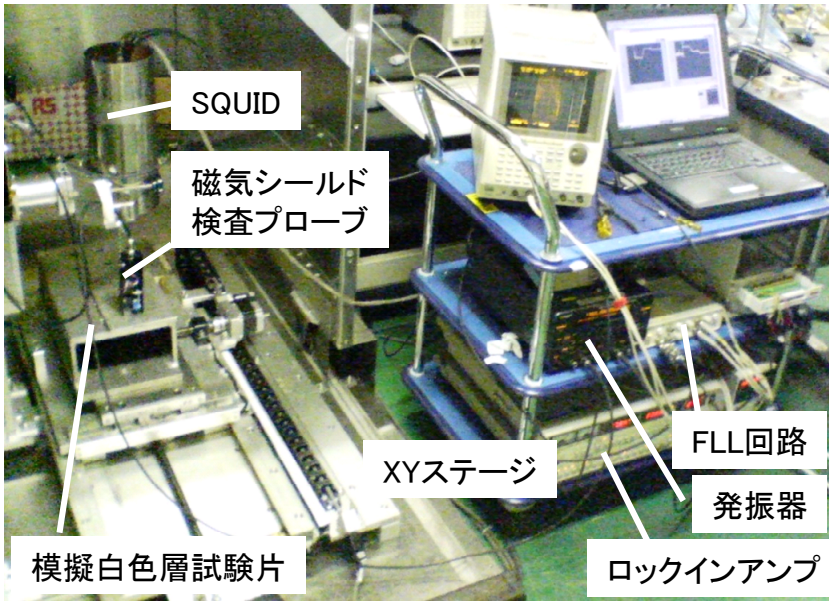


図 7.4　屋外測定に向けた改良システムプロトタイプの外観

7.1.1. 検出回路の感度特性

開発したレール検査装置の検出回路は、励磁コイルと SQUID の間に挿入された中間回路によって、SQUID で検出できる信号の周波数特性が決定される。ブリッジ部と伝送ケーブル、インプットコイルを含めた回路は、**図 7.5** のようになる。ここで、Z_{b1}, Z_{b3} はプローブとなるマイクロインダクタ、Z_{b2}, Z_{b4} は抵抗を、$Z_1 = R_1, Z_2 = L_1, Z_3 = C_1$ は伝送ケーブルの抵抗、インダクタンスおよびキャパシタンスを表す。また、インプットコイルの抵抗、インダクタンスをR_{input}, L_{input} とする。

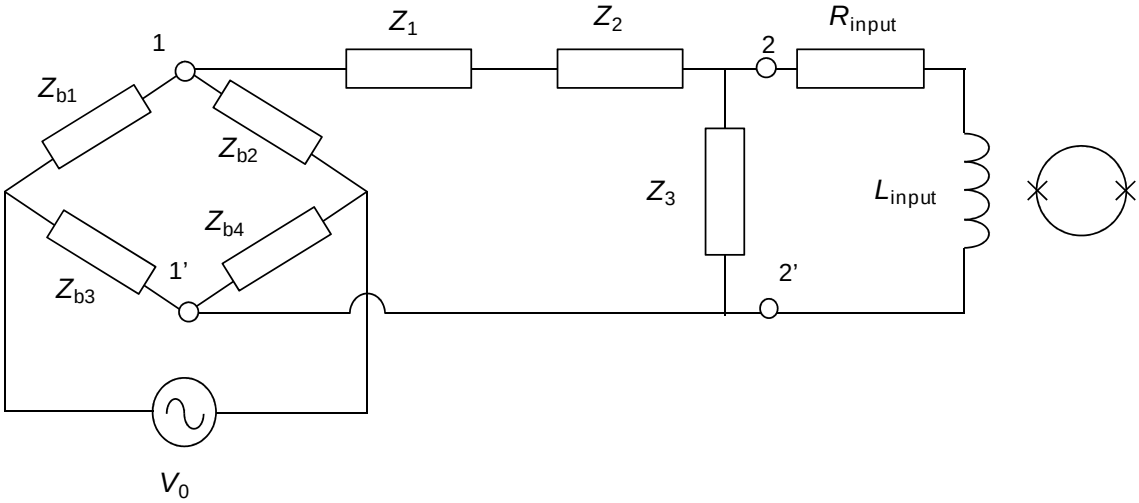


図 7.5　ブリッジ回路とインプットコイルの等価回路

ブリッジ回路の端子 1-1'間の電圧をE_{b0}、入力側のインピーダンスをZ_{b0} とおくと、

$$E_{b0} = \left(\frac{Z_{b2}}{Z_{b1} + Z_{b2}} - \frac{Z_{b4}}{Z_{b3} + Z_{b4}}\right) V_0 \tag{7-1}$$

$$Z_{b0} = \frac{Z_{b1}\, Z_{b2}}{Z_{b1} + Z_{b2}} + \frac{Z_{b3}\, Z_{b4}}{Z_{b3} + Z_{b4}} \tag{7-2}$$

同様に、端子 2-2'間の電圧および入力側のインピーダンス E_0, Z_0 は、

$$E_0 = \frac{Z_3}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3} E_{b0} \tag{7-3}$$

$$Z_0 = \frac{(Z_0 + Z_1 + Z_2) Z_3}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_3} \tag{7-4}$$

と書けるので、伝送回路は図 **7.6** の等価回路で表すことができる。

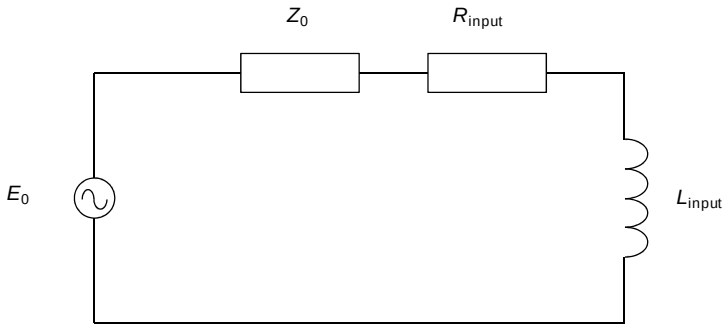


図 7.6　伝送回路の等価回路

このとき L_{input}に流れる電流は、

$$I_{input} = \frac{E_0}{Z_0 + R_{input} + j\,\omega\,L_{input}} \tag{7-5}$$

と表すことができる。

使用したコイルなどのパラメータは表 **7.1** に示す値を用いて計算した、インプットコイル電流の周波数特性を**図 7.7** に示す。2～3 kHz 程度まではフラットな周波数特性を持っているが、10 kHz あたりで-3dB の低下となっている。ノイズキャンセル回路は信号に対してはハイパスフィルタの役割をするため、実際の回路は 100 Hz ~ 10 kHz までのバンドパス特性を有するものと考えられる。

表 7.1　検出回路のパラメータ

ブリッジ回路		インプットコイル		伝送回路
インダクタンス［μH］	抵抗［Ω］	インダクタンス［μH］	抵抗［Ω］	インピーダンス［Ω］
1000	50	100	50	50

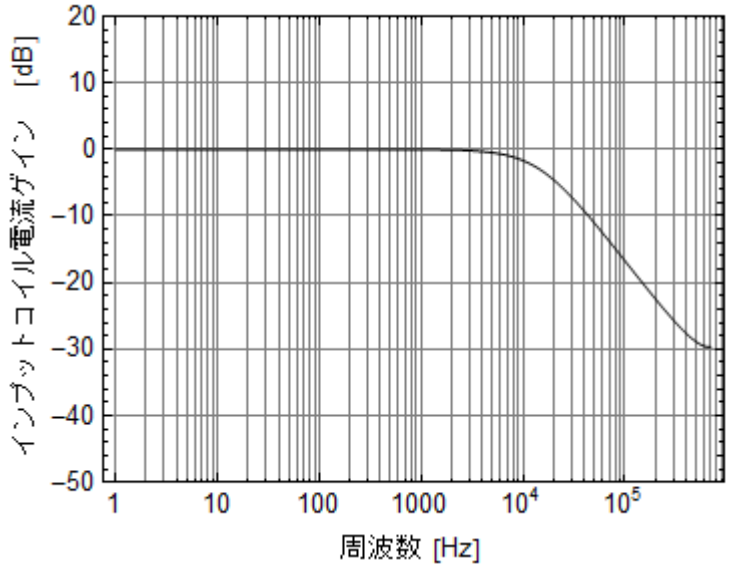


図 7.7　中間回路の周波数特性

7.2. 改良システムによる白色層模擬試験片の測定

改良した測定システムにて、模擬白色層の測定を実施した。測定は検出プローブを固定し、ステッピングモータ駆動の自動 XY ステージにより試験片を移動させて行った。

SQUID 出力は、ロックインアンプを用いて位相検波し、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。**図 7.8** に膜厚 5 μm のときの測定結果を示す。横軸はステージの移動量を示している。探傷プローブには差動コイルを用いているため、一つ目のコイルが白色層上を通過したときと、もうひとつのコイルが白色層上を通過したときに信号が発生する。グラフ中に peak to peak で示した部分が検出波形であり、膜厚 5 μm の位相変化量は 0.4 deg 程度であった。

差動コイルによる貫通孔検出時の出力波形の模式図を図 **7.9** に示す。差動コイルが孔に近づくと、一方のコイルが孔周辺に作る渦電流のループが小さくなり、渦電流分布が変化し、差分出力が生じる。その後、渦電流が孔を迂回できるまで孔に近づくと、今度はループが大きくなり、逆向きに出力が生じる。片側のコイルが孔を通過し、もうひとつのコイルが孔に近づくと、最初のコイルとは逆の順番で出力が生じることになり、孔を通過するときの波形は全体としてのようになる。白色層を通過した際の波形も、基本的にはこうしたピークをもつ出力が生じると考えられる。図 **7.8** では、比較的このような波形パターンが良好に現れている。

図 7.10 には膜厚 5、50、90、140 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示す。図より、膜厚の増加に従い位相変化も大きくなることがわかる。(5-11)式で示したように、導体中に透磁率、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が、このとき渦電流の位相は表面からの距離に比例して遅れる。測定結果から、こうした対応関係があることが実験的にも確認できた。

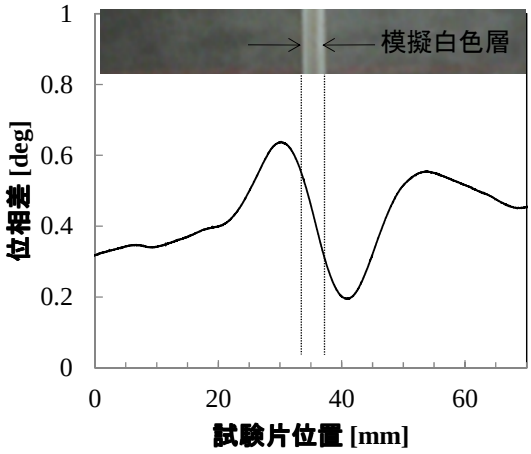


図 7.8　膜厚 5 μm の測定結果

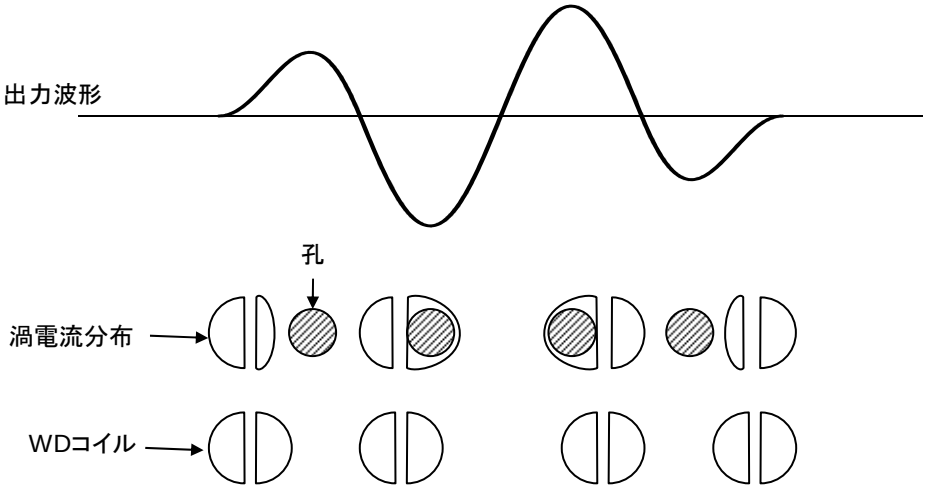


図 7.9　貫通孔通過時の渦電流分布と出力波形の模式図

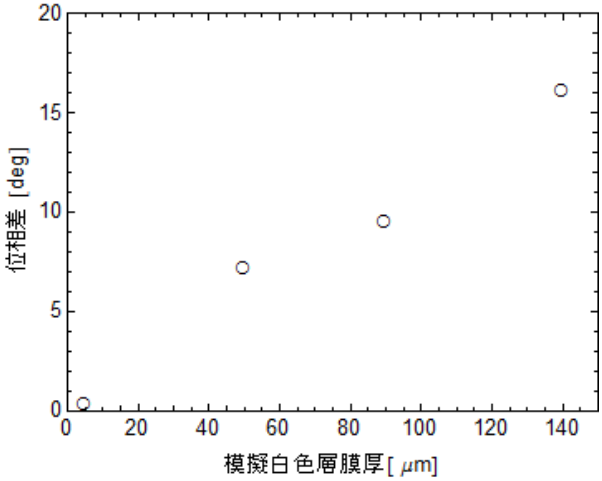


図 7.10　位相差の白色層膜厚依存性

7.3. 走行型レール検査装置の製作

屋外に敷設された状態でレールを測定するためには、レールにそって検査プローブを走査することが必要となる。そこで、レール上を走行しながら白色層の測定が可能なように、レール走行装置を製作した。**図 7.11** にレール走行装置の図面を示す。

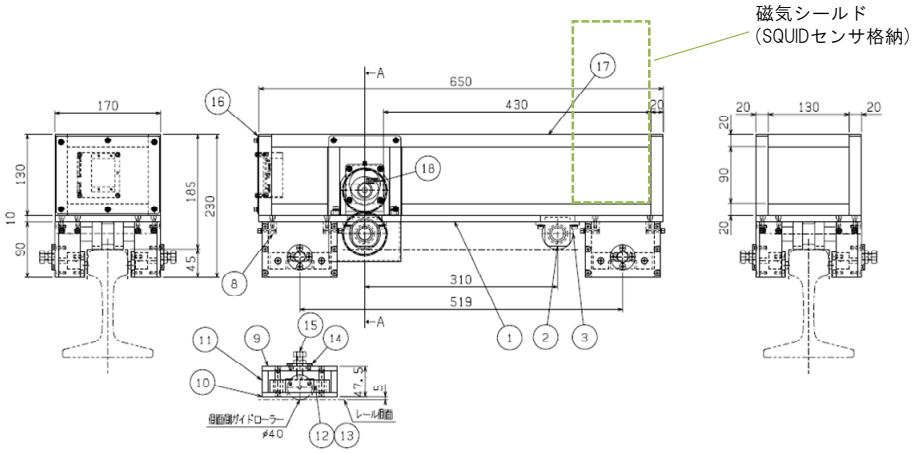


図 7.11　レール走行装置

レール検査装置は、検査プローブと SQUID、SQUID 格納デュワーを搭載し、1 本のレール上を走行することができる。レール検査装置はモータにより駆動され、速度や移動距離はプログラムにより設定することが可能である。走行時にはエンコーダ出力により、検出信号がどの位置のものかを記録することができる。

図 7.12　レール走行装置-SQUID および検査プローブ

7.4. 走行型レール検査装置による実レール白色層の検出

SQUID アンプ部、検査プローブをレール走行装置に搭載し、実レール白色層の検出試験を実施した。検査エリアを**図 7.13** の点線で示す。SQUID 検査装置はこのエリアを矢印の方向に移動する。

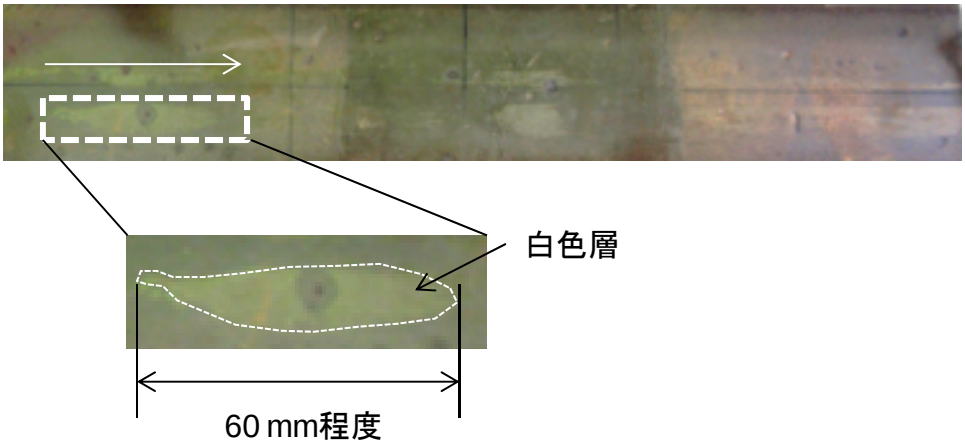


図 7.13　白色層レール

検査装置を 5 mm/sec の速度で移動しながら検査を行った結果を**図 7.14**(a)に示す。白色層のある位置を中心に位相が変化していることがわかる。

検査速度を 15 mm/sec に変更して、再度測定を行った結果を図 **7.14**(b)に示す。5 mm/sec で走査したときと同様の波形が、白色層の位置を中心にとらえられていることがわかる。また、位相の変化量は 2deg 程度であることから、**図 7.10** より膜厚は 15 μm 程度であることが示唆される。

図 **7.8** の模擬白色層の検出波形は、図 **7.9** に模式的に示した渦電流分布の変化に対応した波形が確認できたが、図 **7.14** で得られた波形ではそれが明確ではない。これは白色層の形状が複雑であること、白色層の膜厚が一定ではないであろうことが原因していると考えられる。

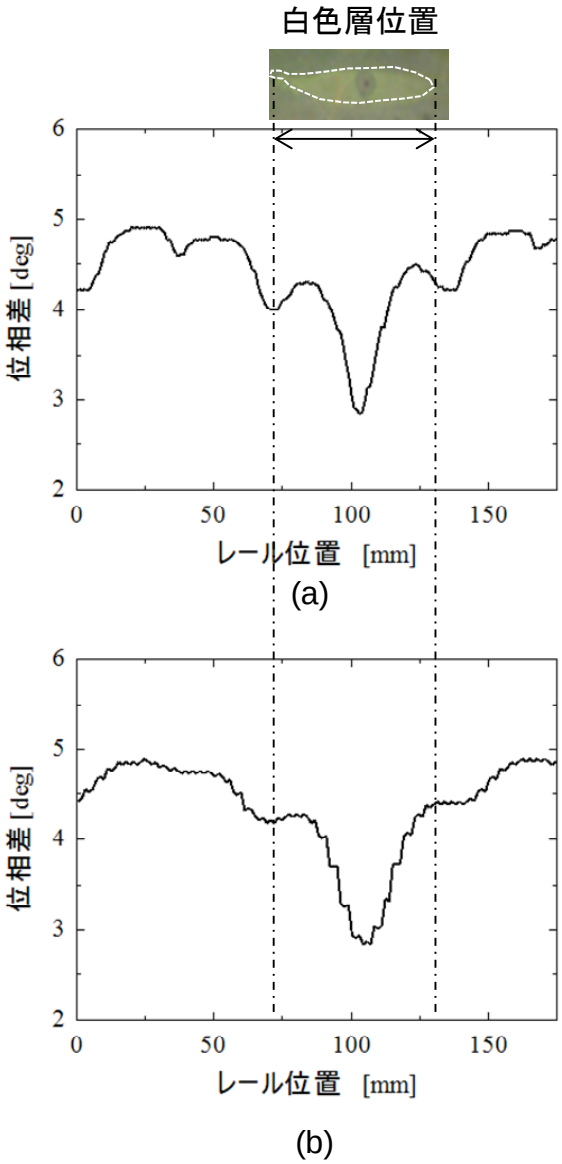


図 7.14　(a) スキャン速度 5 mm/sec (b) 15 mm/sec 検査結果

7.5. 本章のまとめ

フィールドでも SQUID による検査が行えるよう、測定回路の見直しを行った。レールには検査プローブのみを接近させ、SQUID を小型の磁気シールドで保護して、インプットコイルから信号を得る測定システムを構成し、ノイズおよび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を構築した。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なった。

改良したシステムにて模擬白色層検出試験を行った結果、膜厚 5 μm の模擬白色層も十分検出可能な感度を有することがわかった。さらに、異なる膜厚の模擬白色層を有する試験片を測定した結果において、白色層で見られた位相変化と膜厚には相関があることが示唆された。このことから、SQUID を用いた渦電流測定により、白色層の膜厚が推定できる可能性が示された。

さらに、屋外型に改良した測定システムを、レール走行装置に搭載し、実レール白色層を測定した。プローブ部にブリッジ回路(微分回路)を用いることで、走行試験においてもノイズの少ない白色層検出波形を得ることができた。5、15 mm/sec の走査速度において、実レール白色層の検出に成功した。これにより SQUID を用いたレール白色層検査の可能性を示すことができた。

8. 展望

8.1 劣化診断の可能性

適切な保守、管理計画に基づく修繕は、鉄道の安全・安定輸送を確保する上では極めて重要である。鉄道の設備は長大かつ膨大であり、維持管理コストも莫大となるため、いかに効率よくメンテナンスを行うかが、重要な課題となっている。

メンテナンスを効率よくおこなうためには、どこに、どのような修繕が必要かを知る必要がある。また、事後修繕ではなく、事前に損傷の兆候をとらえて対処する、予防保全の考え方は、メンテナンスコストの低減に有効であるといわれている。予防保全を行うためには、材料を劣化レベルで早期に発見し、その状況を把握可能な検査手法が、効率の良いメンテナンスを行う上で必要になってくる。

鉄道用レールでは、レール頭頂面に発生する白色層が、シェリングやレール内部へ進展するき裂の起点になる場合がある。また、第 3 章でみてきた空転傷やきしみ割れといったレール表層部で生じるき裂も、レール内部へ進展し、レール折損を引き起こす可能性がある。

予防保全を行うためには、検査手法はこうしたレール表層のごく浅い領域で発生する組織変化、あるいは微小き裂をとらえるのに十分な精度および感度を有している必要がある。しかし、現在実施されている検査では、疲労や劣化、損傷に至る手前での劣化診断が難しい。

本研究で開発した SQUID レール検査手法は、レールの表層で発生する白色層を検出可能な感度を有している。このような高感度なセンサを用い、劣化や微小き裂を検出したとしても、それがどのようにき裂に進展していくかといったき裂進展のメカニズムが解明されなければ、有効な判断基準をえることはできない。損傷メカニズムは、これまで材料力学や材料組織観察を中心に精力的に研究がなされているが、営業線で生じるようなレールの疲労や損傷は、現場のレールを採取する以外にサンプルの取得の方法がないこともあって、なかなか十分には観察できない。実験室レベルでのサンプル作製も、実レールに生じている応力条件や摩擦熱の条件を十分に再現することはできないことから、定量的な把握はほとんどなされていないのが現状である。SQUID レール検査装置を用いてレール頭頂面に発生する白色層の情報を広く収集できれば、シェリングや微小き裂といったレール頭頂面の損傷との相関を検討する有効な手段が得られ、鉄道用レールでも予防保全の考え方に基づいたメンテナンスを行うことが可能になるであろう。こうして収集したデータは膨大となるが、最近急速に開発されているビッグデータの解析技術を活用することができるだろう。

設備の損傷を防ぐには、損傷に至る前段階での予防に加えて、設備自体を損傷しにくくすることも有効である。鉄道用レールでは、こうした観点からレールそのものを強く

するベイナイトレールの提案もなされている [32]。このような新材料と、効率的なメンテナンス手法を組み合わせれば、鉄道の補修管理コストは飛躍的に低減されるであろう。

鉄道システムは、複数の設備が有機的に組み合わされることで、一つのシステムとして機能する。そのため、劣化、損傷といった現象についても、一つの設備で閉じた現象であるとは限らず、境界領域に発生することが多い。こういった境界領域の問題についても、高感度かつ詳細な検査で得られるデータの活用により、新たな解決手段が見いだされるかもしれない。

境界問題を検討するには、現象の相関を把握する必要があり、検査データを相互に利用可能なネットワークの構築が重要となる。これまでは、車両、レールといった境界問題を有する設備においても、個別最適化を目指してメンテナンスコストの削減努力が行われているが、それぞれの設備において、データのデジタル化を進めるだけでなく、それらのデータをネットワーク上でリンクさせることができれば、鉄道システムのメンテナンスの全体最適化が可能である。

一方で、比較的小規模な鉄道事業者においては、全体最適化に要する投資がかえってコスト増加を招くこともありうる。そのような場合にも、個別要素に対して効率的なメンテナンス手法を導入することは効果的であろう。

しかし、これまでのように画一的な保守基準が適用されるならば、鉄道事業者の保有する線区特性にあったメンテナンスができるとはかぎらない。それぞれの鉄道事業者に適したメンテナンスをするためには、それぞれの鉄道事業者の個性を、きめ細かく把握することが必要である。そのためにも線区情報を詳細に把握できる検査手法が必要であり、本研究で開発した SQUID レール検査装置は、そのような検査方法の可能性を示すことができたと考える。

8.2 SQUID 冷却に適した冷凍技術

SQUID をフィールドで用いるためには、冷凍機を用いることが望ましい。液体窒素冷却の SQUID 装置では、スタートアップの際に初期冷却の時間を要するほか、容器構造によっては閉塞防止に注意を払う必要があるなど、取扱いには知識と技術を要する。さらに屋外で使用する場合、定期的に液体窒素を補充するか、十分な量の液体窒素容器を装備する必要がある。冷凍機を用いればスイッチひとつで冷却が行えるため、こうした煩雑さから解放され、フィールド用検査装置として導入されやすくなると考えられる。

フィールド用の冷凍機としては、軽量、コンパクト、可搬性などが求められる他、効率のよい冷凍機であることも重要である。低温部に可動部を持たないパルス管冷凍機は構造が簡単であり、小型化も容易である。一般的に小型になるほど冷凍機の効率が低下するが、本稿付録 A.1 に示す並列パルス管冷凍機は、2 基のパルス管冷凍機の運転周期

に 180° 位相差を与えて圧縮機負荷を均一にすることで、COP(Coefficient Of Performance: 成績係数)向上が可能である。

付録 A.2 に取り上げた磁気冷凍は固体の吸発熱現象を利用するためエントロピー密度が高い。気体の圧縮膨張を用いないため圧縮機が不要で、コンパクトで軽量な冷凍機を構成できる可能性がある。

本章では、異なる磁気作業物質を磁気冷凍装置に搭載した場合に、システムに与える影響を検討した。磁気冷凍は、液体ヘリウム、液体水素、液体窒素など様々な温度領域において動作する磁気作業物質が研究開発されているが、磁気作業物質の物性に適した運転条件を選択することで、磁気作業物質のポテンシャルを引き出すことが可能であることを示した。

一方で、SQUID を冷凍機で冷却する場合には、磁気ノイズの問題があり、磁気ノイズ対策について研究が行われている。SQUID の冷凍機冷却には以下のような課題がある。

- 冷凍機本体内の磁性蓄冷材や磁性体モータから磁気ノイズが発生する
- 冷凍機の振動が SQUID に伝達され、SQUID が環境磁場中を振動することにより磁気ノイズを受ける
- ガスの配送・冷却に用いるコンプレッサー内の磁性体モータが磁気ノイズを発生する
- 冷凍機低温端（コールドヘッド）が環境温度の変化を受け、SQUID の感度が変化する

低温部に可動部のないパルス管冷凍機は、低温部にディスプレーサを持つ GM 冷凍機やスターリング冷凍機に比べて室温部の加速度や変位が小さく、パルス管冷凍機を搭載した計測システムは計測時のノイズを低く抑えることができる [33]。藤本ら [34]は、G-M 型パルス管冷凍機と SQUID を銅細線で接続し、センサを伝導冷却することで、センサ部の変位は±1.0 μm 以下に抑えられ、センサ部への振動の伝達を低減している。廿日出ら [35]は、環境磁気ノイズ低減性に優れた HTS-SQUID グラジオメータを用い、SQUID 設置ステージを冷凍機冷却端から分離する構造とすることで、SQUID 温度安定性を確保し、液体窒素冷却と比較しても、システム磁束ノイズのほとんど増加のない低ノイズシステムを構築した。冷凍機のコールドヘッドと SQUID の間は、銅細線により伝導冷却を行っている。また、冷凍機の材料はアルミニウム、アクリルなどの非磁性体により構成し、冷凍機本体からの磁気ノイズを低減している。

これらの先行技術を、屋外測定に向けて改良したシステムに適用した場合の冷凍機冷却構成を図 8.1 に示す。冷凍機には鉄道総研にて開発した高効率 GM パルス管冷凍機をベースに小型化した冷凍機を想定する。冷凍機からの振動伝達の抑制と、SQUID 温度安定化のため、冷凍機コールドヘッドと SQUID は直接接続せず、銅細線で製作した伝熱線と熱バッファを介在させる。

本 SQUID システムは、SQUID 素子を全方位磁気シールドで保護することができるため、上記のような磁気ノイズに対しても優れた耐性を有するシステムであると考えられる。冷凍機冷却型システムでは、SQUID とインプットコイルおよびノイズキャンセルコイル部のみを覆うことができる小型の磁気シールドを設置する。本システムの SQUID への信号伝達経路はインプットコイルのみであるため、図のように SQUID 周囲を磁気シールドで保護することによって、冷凍機や圧縮機の電磁ノイズを低減することが期待できる。また、これらのノイズは圧縮機駆動周波数（～60 Hz）、バルブ閉回（～2 Hz）程度であるため、ノイズキャンセル回路により十分キャンセルすることができることから、冷凍機冷却型システムとしても優位性を持つシステムであると考えられる。

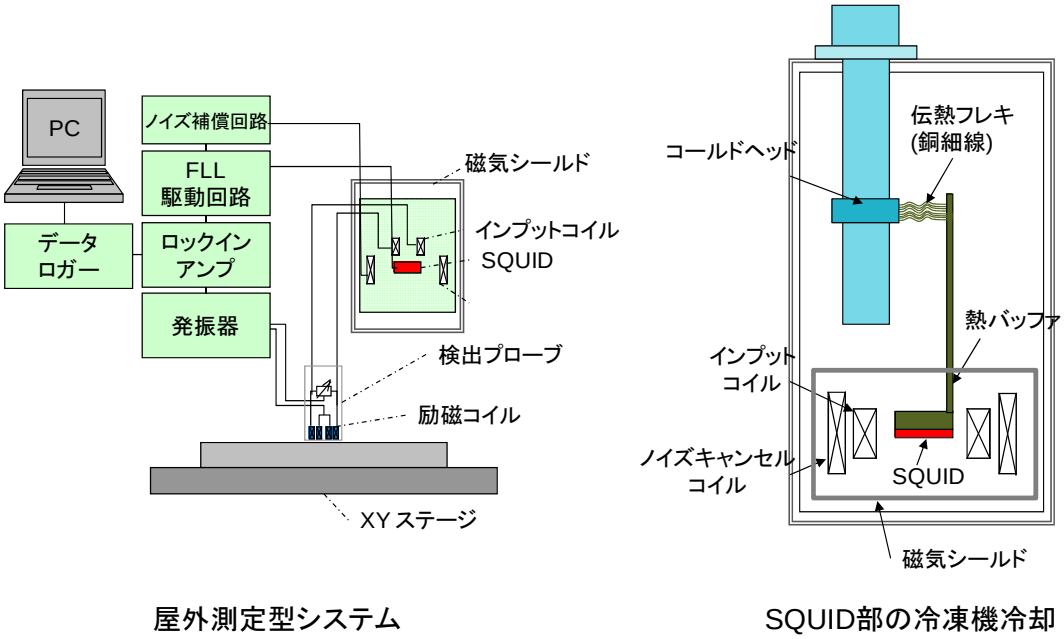


図 8.1　屋外測定型システムの冷凍機冷却構成

8.3 実用化への課題

本研究において SQUID レール検査装置により実レール白色層検出の可能性を示すことができたが、実用化へは以下のような課題について、さらなる検討が必要である。

(1) 測定信号の物理的解釈

7 章において、模擬白色層を用いた定置試験による膜厚 5 μm の検出波形、および膜厚と位相変化の相関について示した。検出波形は貫通孔などを通過した際の模式的パターンと比較的良好な対応が確認できた。また、膜厚と位相変化についても、一定の対応関係が示唆された。一方、検査装置による実レールを用いた走行試験では、白色層を通過した際に波形変化をとらえることができたが、波形パターンは理想的な状態におけるパターンとは異なるものであった。実際の白色層の波形は模式

的なピークが認められない。これは白色層の形状が複雑であること、白色層の膜厚が一定ではないであろうことが原因していると考えられる。
実レールに分布する白色層が unknown な場合に、得られた波形の判定基準をどのように設定するか、といった問題に関しては、キズ波形などとの分離も含め、波形パターンの蓄積が必要であるとともに、逆問題解析による推定手法の検討など総合的な検査手法の深度化が必要と考えられる。

(2) 高速走行時の評価

7.4 章において、レール走行装置による白色層検査速度は 15 mm/sec とした。一方、最終的に超音波探傷のように探傷車に搭載することを想定すると、探傷速度は 30~40 km/h = 8000~11000 mm/sec が必要となる。このような速度域において、本研究で行った 5-10 mm 程度の空間分解能を得ようとすると、励磁周波数を 500 倍以上に上げる必要がある。レール検査装置で用いた励磁周波数は 3.5 kHz 程度であるから、MHz 帯の周波数を上げなければならない。このような周波数帯では、伝送回路の周波数特性が低下するため、回路パラメータの検討が必要である。また、高周波回路が分布乗数を持つ領域となる場合には、伝送回路の長さなどの検討も必要である。また、SQUID についても通常帯域は数百 kHz 以下である。高周波回路への適用には、高周波向けに調整された SQUID 素子を用いる必要があるなど、回路構成が異なってくる可能性がある。どの程度の分解能が必要かといった検討も重要になってくると考えられる。

(3) 車両搭載時の機器ノイズ対策

高速走行時の振動によるノイズ増加の影響については、本研究でみた 15 mm/sec 程度であれば検出波形の S/N は良好であったが、高速走行にともない振動も大きくなることが予想される。振動はリフトオフノイズとなって現れる。ロックインアンプの同期検波の位相を、リフトオフノイズの位相と直角にすることで、信号波形と分離する手法があるが、適用可能性について検証する必要がある。

(4) 車両搭載時および冷凍機冷却時の磁気ノイズの影響評価

車両搭載時の機器ノイズや、冷凍機の磁気ノイズについても対策が必要であるが、SQUID を全方位シールドできる本方式は、磁気ノイズ対策も実施し易いと考えられる。

(5) き裂などとの区別

劣化診断のためには、白色層とき裂やシェリングの定量的な関係を把握することが必要となる。定置試験において膜厚と位相差の関係を示したが、SQUID 検査装置により走行しながら検査を行った場合についても、今後データを蓄積していく必要がある。

9. 結論

鉄道事業において、レールのメンテナンスの省力化・効率化が非常に重要な課題となっている。レールの探傷も探傷車による走行中の検査が可能であるが、走行後の手検測による確認検査が必要であるなど検査コストがかかっている。メンテナンスは、レール折損などを引き起こさないための予防保全の考えに基づくが、効率的・効果的な修繕を計画的に実施し、ライフサイクルコストを低減するためには、設備の健全度を把握した、より高度な予防保全が重要である。

このような健全度の把握には、損傷に至る前段階すなわち劣化診断が必要であるが、現在のところレール劣化診断技術は確立されていない。そこで、本研究では、レール交換要因の多くを占めるシェリングの一要因である白色層について、SQUID を用いた非破壊検査手法の開発を行った。

以下に、第 3 章から第 7 章で行った研究の成果をまとめる。

第 3 章では、レールの損傷形態について主だったものを整理した。レールの主な損傷形態には、シェリング、きしみ割れ、空転傷、摩耗などがある。これまでの調査や経験により一定の検査周期や判定基準が得られているものの、在来線への適用や個別の線区への適用などではその妥当性に依然課題が残っている。

損傷発生メカニズムの解明に向け、さまざまな検討が行われているが、まだ未解明な部分が多く残されている。特に、白色層から発生したき裂は、現状の超音波探傷などの探傷では検出が難しく、これらの定量的な関係を明らかにすることが求められていることを見た。特にシェリングについてはレール交換の主な要因となっており、シェリングの起点となる白色層の情報を広く収集できれば、シェリングや微小き裂といったレール頭頂面の損傷との相関を検討する有効な手段となりうるとともに、シェリングを未然に防止する指標を得られると考えられる。

第 4 章では、白色層の生成について、材料組織からの基本メカニズムを説明し、ビッカース硬さとの関係について整理した。また、本研究で採用した渦電流法は、電磁気的に白色層をとらえる手法であることから、基本物性である抵抗率と磁化特性と調べるため、半導体レーザーによりレール表層を急加熱・急冷することで、白色層生成過程を模擬したマルテンサイト標準試験片を作製し、電磁気的物性評価を行った。

白色層の膜厚はおおよそ 10 μm から 40 μm までに集中して分布していることが、これまでの調査でわかっている。白色層の生じたレール表層はビッカース硬さが 800 Hv と、母材に比べて非常に硬くなっている。

白色層の硬さが増すのは、主成分としてマルテンサイト相を含むためだと考えられる。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組織であり、炭素量は 0.7～0.8%である。車輪空転・滑走時の摩擦熱により、レール表面はスポット

的に急激に加熱され、加熱個所はオーステナイト領域まで温度が上昇する。このときの加熱はごく短時間であるため、レール表面からの熱浸透深さはごく浅い。加熱が終了すると今度はレールの熱容量によって急冷されることになり、生成される白色層は、炭素を過飽和に固溶したマルテンサイト相を主成分に含んでいると考えられる。炭素鋼の炭素量とマルテンサイトの硬さの関係から、95%以上がマルテンサイト相であると推察される。マルテンサイトの生成に伴い、転位(格子欠陥)密度が上昇し、体積膨張により残留応力が発生する。そのため表面が硬く、脆くなることから白色層内部および端部に微小き裂が生じやすくなっている。

電磁気的物性のうち、体積抵抗率を 4 端子法により測定した。体積抵抗率は、レール母材で 0.24 μΩ・m、模擬白色層で 0.34～0.35 μΩ・m と、模擬白色層で体積抵抗率が増加する傾向がみられた。また、磁化曲線の測定結果から、模擬白色層では、レール母材に比べて飽和磁化および残留磁化は低下し、保磁力は増加することが明らかとなった。

第 5 章では、SQUID の磁場検出原理および SQUID を用いた非破壊検査の基本原理について説明し、本研究で採用した SQUID を用いた渦電流法について、その特徴を述べた。レール鋼は残留磁化を有しているが、白色層、レール母材ともに磁気を帯びているため、その差異を自発磁化からのみでは検出することが難しい。そのため、本研究では、高温超電導 SQUID を用いたレール白色層の検出原理として、電気、磁気物性の両方をとらえられる渦電流探傷の原理を採用した。渦電流の位相は表面からの距離に比例して遅れることから、位相情報を得ることで欠陥深さの推定が行える。

第 6 章では、白色層検出の原理検証試験を行った。白色層検出のために、SQUID を用いた渦電流検査システムを構築した。原理検証システムでは環境ノイズを低減するために大型の磁気シールドを用いて環境磁気ノイズを低減し、SQUID 直近の磁気ノイズを十分低減するため、磁気ノイズキャンセル回路を導入した。さらにレール試験片はいずれも十分に消磁したものを用いて試験を行った。

SQUID とレール試験片の距離と、励磁コイルの関係について検討を行い、感度が最適となる励磁コイル径を決定した。また、構築した検査システムを用い、標準試験片での原理確認試験を実施し、リアクタンス成分の変化が捉えられる周波数領域を利用するのが有効であることを確認して測定条件の最適化を行った。

空間分解能を向上させるため、励磁コイルとリフトオフについて見直した。その結果、模擬白色層試験片での検知試験では、膜厚 5 μm 程度まで検出可能であることが分かった。これをもとに実レールの測定を行い、ノイズ低減環境において実レール白色層検出の原理検証に成功した。

第 7 章では、フィールドでも SQUID による検査が行えるよう、測定回路の見直しを行った。レールには検査プローブのみを接近させ、SQUID を小型の磁気シールドで保護して、インプットコイルから信号を得る測定システムを構成し、ノイズおよびレール

の残留磁化の影響を受けにくい安定な測定システムを構築した。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た。

改良したシステムにて模擬白色層検出試験を行い、膜厚 5 μm の模擬白色層について十分検出可能な感度を有することが確認できた。さらに、異なる膜厚の模擬白色層を有する試験片を測定した結果において、白色層で見られた位相変化と膜厚には相関があることが示唆された。このことから、SQUID を用いた渦電流測定により、白色層の膜厚が推定できる可能性が示された。

さらに、屋外型に改良した測定システムを、レール走行装置に搭載し、実レール白色層を測定した。プローブ部にブリッジ回路(微分回路)を用いることで、走行試験においてもノイズの少ない白色層検出波形を得ることができた。5、15 mm/sec の走査速度において、実レール白色層の検出に成功した。これにより SQUID を用いたレール白色層検査の可能性を示すことができた。

以上、本研究で行った超電導磁気センサによるレール検査を適用すれば、劣化診断に基づいたレールメンテナンスが行え、より高度なレールの予防保全が実施できる可能性が示された。

最後に、第 8 章では、フィールド用検査装置として、SQUID の冷凍機冷却について述べるとともに、展望として本研究の応用範囲と実用化への課題について整理した。

フィールド用の冷凍機としては、軽量、コンパクト、可搬性などが求められる他、効率のよい冷凍機であることも重要である。本稿付録 A.1 に示す並列パルス管冷凍機は高効率であり、構造が簡単で小型化も容易である。付録 A.2 に取り上げた磁気冷凍は、液体ヘリウム、液体水素、液体窒素など様々な温度領域において動作する磁気作業物質が研究開発されているが、磁気作業物質の物性に適した運転条件を選択することで、磁気作業物質のポテンシャルを引き出すことが可能であることを示した。

一方、実用化のためには、今後整理しなければならない課題がある。

本研究を実用化するためには、2 段階のステップがある。1 つはこれまで検出ができなかった白色層の「有無」が分かるレベルである。1 つ目のステップについては、波形パターンを蓄積していくことにより判定基準を設けることができ、本システムをブラッシュアップすることで、低速での検査は可能になるものと考えられる。もうひとつは、測定信号から膜厚などの情報を得ることで、白色層とき裂やシェリングの定量的な関係を把握し、劣化診断が行えるレベルである。定置試験において膜厚と位相差の関係を示したが、SQUID 検査装置により走行しながら検査を行った場合についても、今後検討が必要である。2 つ目のステップでは、特に高速走行適用可能な検出システムの検討、

白色層とき裂の関係について検討材料を得るためには、得られた波形の膜厚などの定量化について深度化する必要がある。

本研究では、これまで検査の難しかった白色層を、SQUID レール検査装置によって走行しながら検出できる可能性を示した。1 段目のステップとして、白色層の検出波形を蓄積し、パターンの判定を行うことで、本研究で開発した検査技術の白色層検査への適用が可能であると考える。

付録A.　　冷却技術

はじめに

本研究で開発したSQUIDレール検査装置は、超電導センサであるSQUIDの冷却が必要である。SQUIDを冷却する手段としては、本研究のように寒剤を用いる方法と、冷凍機により直冷する方法がある。寒剤の取り扱いには窒息や凍傷などの危険を回避するための知識を要する。また、現場では寒剤の入手は困難である場合が多く、液体窒素の必要な検査装置のままでは導入の障壁になることが予想される。フィールドで使える検査技術とするためには、従来技術と同様にユーザーフレンドリーであることが重要である。

そこで、SQUID冷却手法として冷凍機の適用可能性について検討を行った。検討にあたって、鉄道総研において研究開発を進めているパルス管冷凍機と磁気冷凍機について述べる。

A.1 パルス管冷凍機

希土類系高温超電導線材を用いた超電導コイルは、20 K～50 K付近で安定した高磁場を発生する超電導磁石として運用できる可能性があり、運転温度が上昇すれば構造のより簡単な単段冷凍機により超電導コイルを冷却することが可能である [36]。超電導磁石システムの冷却に単段冷凍機を用いることができれば、低温空間の構成も簡素化され、低コスト化も期待される。

このような単段冷凍機には、Gifford-McMahon（ギフォード-マクマホン：GM）冷凍機やスターリング冷凍機、あるいはパルス管冷凍機などがある。これらの冷凍機のうち、現在最も普及しているのはGM冷凍機であり、現在試験されている磁気浮上式鉄道用超電導磁石にもこのGM冷凍機が搭載されている。GM冷凍機は低温空間にディスプレーサと呼ばれる可動部を有する。

ディスプレーサは摺動のために定期的な交換が必要な部品であるが、交換するためには冷凍機を停止し、冷凍機部を室温まで昇温する必要がある。冷凍機のメンテナンスをするために超電導機器の運用を停止することは、高温超電導機器の運用面では大きなデメリットとなる。高温超電導機器冷却用の冷凍機として、低温部に可動部を持たないパルス管冷凍機を用いれば、メンテナンスのために昇温する必要はない。メンテナンスはガス回路切り替えバルブなど室温部分にある機器の交換のみで済むため、メンテナンス時間も短時間でよい。

一方で作動ガスの変位と圧力変化の制御をディスプレーサのような可動部品で機械的に行わないため、GM冷凍機よりも効率や冷凍能力に課題があった。しかし、アクテ

ィブバッファ型のパルス管冷凍機により、効率に関しても GM 冷凍機に匹敵する値が得られている [37]。

鉄道総研では希土類系高温超電導線材を用いた磁気浮上式鉄道用超電導磁石システムの開発を行っており、冷却システムとしてアクティブバッファ型パルス管冷凍機 2 基と、1 台の圧縮機、1 組のアクティブバッファタンクおよびガス切り替えバルブユニットの構成を提案している。浮上式鉄道車両へ車載する機器は、様々な振動を受けるため耐振動特性や耐久性が求められる。パルス管冷凍機は構造が単純なため、振動特性や耐久性に優れている。

本研究で開発した SQUID レール検査装置を。在来鉄道車両に搭載する場合には、同様の耐振動特性や耐久性、ならびにメンテナンス性が求められる。したがって、浮上式鉄道用に開発を進めてきたパルス管冷凍機は、車載用 SQUID レール検査装置の冷却システムとしても検討が可能である。

これまでに開発したパルス管冷凍機では、2 基のパルス管冷凍機の運転周期に 180°位相差を与えて圧縮機負荷を均一にすることで、冷凍機の成績係数（COP）を向上することができる [38]。このような構成とすることで、圧縮機のメンテナンスコストも最小限に抑えることが可能になるなどのメリットもある。

しかし、2 基を合わせた冷凍機の合計容積が使用する圧縮機に対して過大となり、流量の増加による蓄冷器での損失の増加や、圧縮膨張に必要な圧力振幅が低下するという問題が生じた。

そこで、パルス管容積を変更可能な冷凍機を製作し、運転条件の最適化を検討した。さらに、パルス管冷凍機の管壁を薄肉化することにより熱侵入を低減し、ガスの位相制御機構を追加することで冷凍能力の向上を試みた。

A.1.1　高温超電導磁石冷凍システム

磁気浮上式鉄道用超電導磁石は、1 つの真空断熱容器の内部に 4 つのコイルが内蔵されており、これらのコイルを均等に冷却する必要がある。現在試験されている磁気浮上式鉄道用には低温超電導線材が用いられており、冷却には液体窒素、液体ヘリウムが必要である。車載用超電導磁石にはそれらの寒剤およびリザーブタンクや窒素液化冷凍機、ヘリウム液化のための G-M /JT 冷凍機が搭載されている。

超電導磁石が高温超電導コイルで構成されれば、冷却コストの低減、構成の簡素化などが図れる。本研究で提案する並列パルス管冷凍システムを用いた高温超電導磁石の冷却の概念を**図 A.1** に示す。

並列パルス管冷却システムは、アクティブバッファ型パルス管冷凍機 2 基と、1 台の圧縮機、1 組のアクティブバッファタンクおよびガス切り替ええバルブユニットからなる。これらの要素のうち可動部を持たないパルス管冷凍機本体のみが低温空間に位置す

る。このように、4 つの高温超電導コイルを 2 つのパルス管冷凍機で冷却するシステムは、従来の低温超電導磁石と比較して真空容器内外の構成を簡素化することができる。

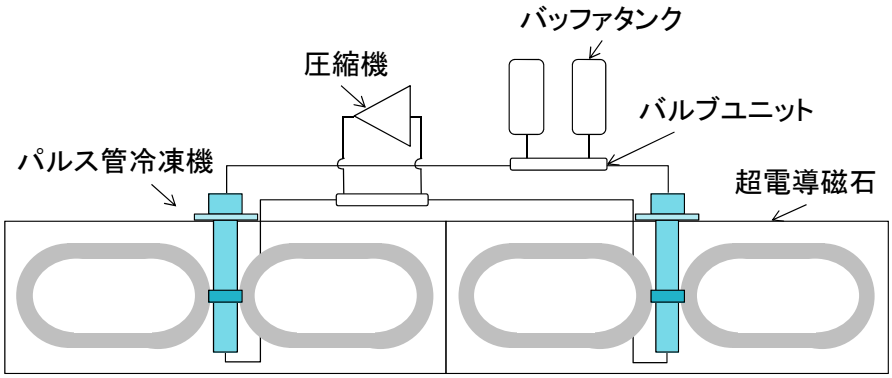


図 A.1　高温超電導磁石冷却のための並列パルス管冷却システム

A.1.1.1　パルス管冷凍機の冷凍の原理

パルス管冷凍機の基本構成を図 8.2 に示す。G-M 冷凍機の場合には、ディスプレーサが動くことで冷凍機内のガスを膨張させる。パルス管ではこのディスプレーサの役割をパルス管内のガスが担う。このガスの役割は、パルス管内に点線で示されるようなガスピストンを想定することにより、その基本的動作原理を理解することが出来る。ガスピストンとはパルス管内に常に存在しているガスのことで、あたかも伸縮する固体ピストンのように作用することから、この名前が付けられた。

圧縮機からの定常流をガス回路切り替えバルブで切り替えることにより、周期的な圧力振動が生じる。放熱器は圧縮仕事により発生した熱を系外へ放出する。蓄冷器は放熱器と低温端の間にあり、低温端で発生した冷熱を蓄積する熱交換器としての役割を果たしている。ガスピストンは圧縮機からの圧力によりパルス管内で伸縮し、圧縮→放熱→膨張→吸熱の一連の冷凍サイクルを形成する。このときガスピストンが膨張仕事をして冷凍を発生させるためには、圧力とガスピストンの位置が最適な位相をとることが必要である。**図 A.2** の方式のパルス管冷凍機は、オリフィス型と呼ばれており、バッファタンクに接続する配管にあるオリフィス(絞り)により、位相を調整している。

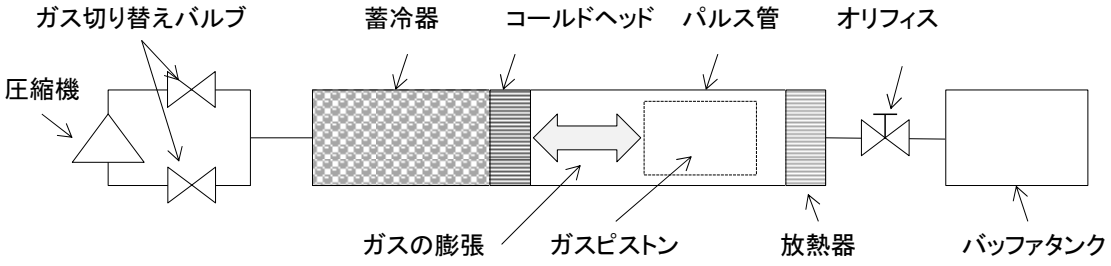


図 A.2　パルス管冷凍機の基本構成(オリフィス型)

A.1.1.2　アクティブバッファ型パルス管冷凍機の特徴

アクティブバッファ型パルス管冷凍機の基本構成を**図 A.3** に示す。アクティブバッファ型もガス回路切替バルブ（Ｈｃ、Ｌｃ）により圧縮機からの定常流を周期的な圧力振動に変換する点はオリフィス型と同じであるが、オリフィス型の位相制御がオリフィスを用いた受動的な制御であるのに対し、アクティブバッファ型はバッファを高圧、低圧の二つのバッファを持ち、それぞれに切り替えバルブを設けることで、能動的な位相制御を行っている。バッファ内圧力が圧縮機側での高低圧に近くなるように 4 つのバルブの開閉タイミングを調整することで、バルブを通過する際のガスの圧力損失を低減することができる。**図 A.4** に横軸を時間としてバルブ開のタイミングを示している。初めに高圧側の圧縮機とバッファタンクが時間差で開き、高圧と入れ替わりで低圧側の圧縮機とバッファタンクが開く。

アクティブバッファ型冷凍機が他の方式の GM 型パルス管冷凍機に比べて効率が高いのは、圧縮機側の切り替えバルブ HC が開く少し前のタイミングで、バッファタンク側のバルブ HB を開き（図の“a”の区間）、パルス管内の圧力を圧縮機側の圧力に近づけることで、圧力損失の低減ができるからである。低圧側も同様で、圧縮機の低圧バルブ LC が開く少し前のタイミングで、低圧バッファタンク側のバルブ LB を開いて（図の“b”の区間）圧力差を低減している。

パルス管冷凍機の並列運転では、一方の冷凍機のバルブシーケンスを逆転させた運転（以下、逆相運転）を行う。これにより圧縮機負荷を均一化するとともに、ガス回路切り替えバルブでの損失を低減でき、パルス管冷凍機の効率をさらに向上することができる。以下、特に断りのない場合には、パルス管冷凍機の運転モードは並列逆相運転とする。

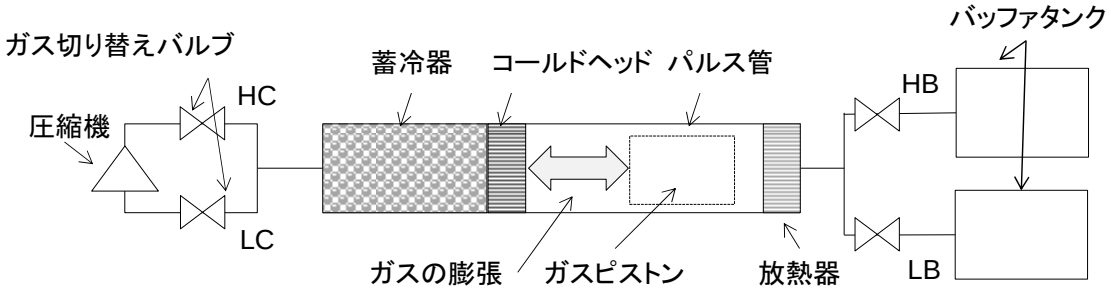
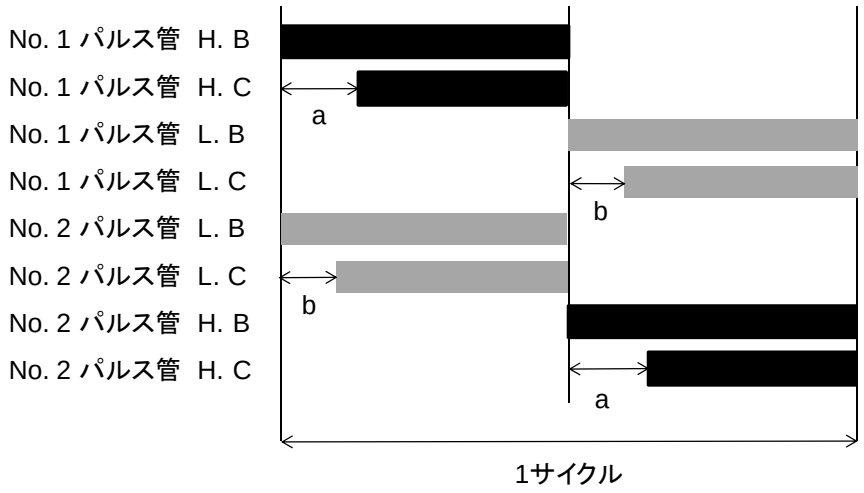


図 A.3　アクティブバッファ型パルス管冷凍機の基本構成



各ガス回路切り替えバルブ名
H. B：バッファタンク高圧側、H. C：圧縮機高圧側、L. B：バッファタンク低圧側、L. C：圧縮機低圧側

図 A.4　並列逆相運転バルブシーケンス

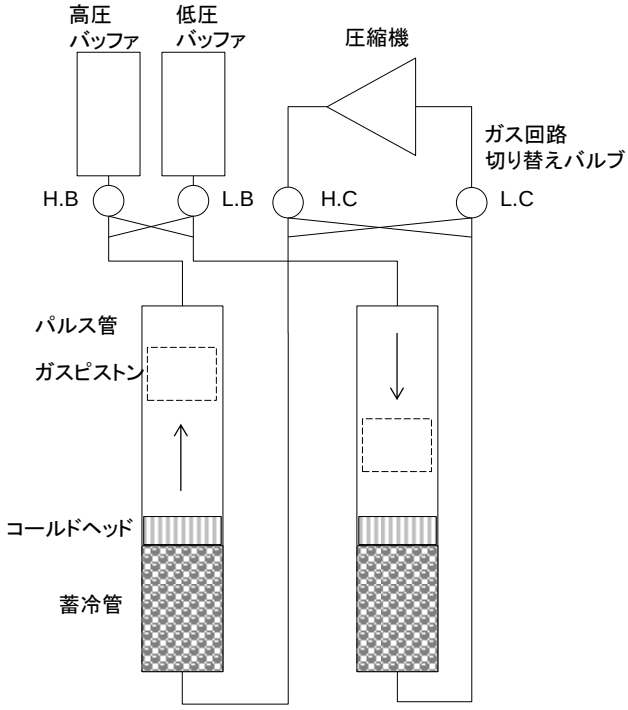
A.1.2　試験装置

A.1.2.1　試験装置と試験条件

2 基のアクティブバッファ方式パルス管冷凍機と 1 台の圧縮機で構成する高温超電導磁石冷凍システムを提案し、2 基のパルス管冷凍機の運転周期に 180°位相差を与えて圧縮機負荷を均一にすることで成績係数（COP）を向上し、初期製作機では 50 K において冷凍能力 119.1 W、 COP 0.016 を得ている。しかし、パルス管冷凍機 2 基を 1 台の圧縮機で運転する並列運転モードは、圧縮機に対して最適化された運転条件ではなく、流量の増加による蓄冷器での損失の増加や、圧縮膨張に必要な圧力振幅が低下するという問題がある。

そこで、並列逆相運転時のヘリウムガス流量ならびに圧縮比を圧縮機に対して最適化するため、パルス管の容積が変更できるアクティブバッファ型パルス管冷凍機を製作し、管容積の冷凍能力や COP への影響を評価した。

図 A.5 に逆相並列運転時のパルス管冷凍機試験装置のシステム構成ならびに写真を示す。新しく製作した冷凍機は、パルス管部の長さを 240 mm、270 mm、300 mm の 3 段階に変更が可能とし、流量を低減する目的で断面積を約 20%削減した。これに伴い管の肉厚も薄肉化している。圧縮機には住友重機械工業製 CSA-71A を用い、流路の切り替えには空圧バルブを用いた。蓄冷器内部の蓄冷材は、ステンレスメッシュ、鉛球を 50 K で最適な構成としている。



(a)

(b)

図 A.5 (a) パルス管冷凍機試験装置のシステム構成ならびに(b) パルス管冷凍機写真

コールドヘッドにはヒータが設置されており、無負荷の状態から徐々に熱を加えることにより冷凍能力を評価する。パルス管冷凍機の運転開始後、コールドヘッド温度が目的温度（50 K）付近となるようヒータにより負荷を与えて冷凍能力を測定した。ヒータ負荷は目的温度を挟んで 2 点入力し、内挿法にて冷凍能力を決定した。なお、それぞれのパルス管長さにおいて冷凍能力が最大となるよう運転周波数を調整した。**表 A.1** に試験条件を示す。

表 A.1 試験条件

	パルス管長さ [mm]	入力 [kW]	封入圧力 [MPa]
Case 1	240	5.62	1.33
Case 2	270	5.63	1.33
Case 3	300	5.58	1.33

A.1.2.2　**ガス位相制御機構**

本パルス管冷凍機において位相制御を担うのは圧縮機とバッファタンクのラインに設けられた 4 つのバルブである。冷凍に寄与しないガス流を用いる他の方式に比べ、アクティブバッファ型では位相制御に余分なガスを用いない。しかし、他方式とも組み合わせ、運転条件を最適化することで、さらなる冷凍能力向上の可能性もある。

そこで、アクティブバッファ型パルス管冷凍機にダブルインレット（蓄冷器をバイパスする“絞り”を設けた流路）を追加し、パルス管低温端での圧力振動とガス変位の位相制御性を向上させた。ダブルインレットを調整することで、質量流量あたりの冷凍能力を増大させることが可能となる。本アクティブバッファ型パルス管冷凍機にダブルインレットを追加した冷凍機の概略を**図 A.6** に示す。

一般的に、パルス管冷凍機にダブルインレットを追加した場合、位相調節が可能になる一方、ダブルインレットラインの絞りにより圧力損失が生じる。それにも関らず冷凍能力が向上するのは、蓄冷器での圧力損失の低減効果が大きいためと考えられている。そのため、実質冷凍能力に対する効率を低下させずに、冷凍能力を向上することができると考えられている。

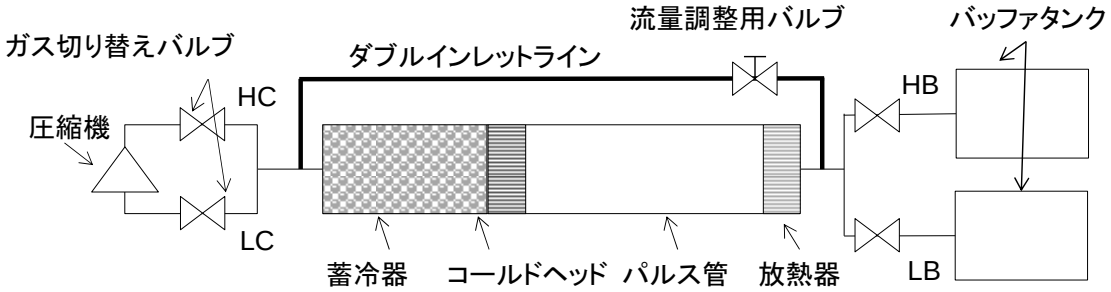


図 A.6　ダブルインレットラインを追加したアクティブバッファ型パルス管冷凍機

A.1.3　評価試験

8.2.3.1　**冷凍能力**

パルス管長さを変えて運転したときの、ヒータ負荷に対するコールドヘッド温度を**図 A.7** 示す。運転周波数は、それぞれの長さで冷凍能力が最大となるよう最適化した。この結果より算出した 50 K における冷凍能力（2 基の合計値）および COP を**表 A.2** に示す。冷凍能力、COP ともにパルス管長さを 300 mm としたときに最もよい結果となった。また、パルス管長が短い条件では、長い場合よりも最適な運転周波数が高くなっている。

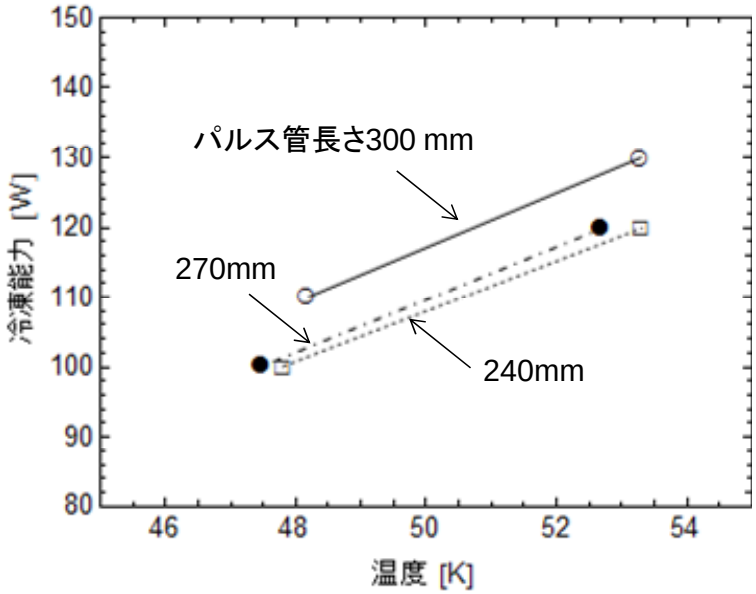


図 A.7　パルス管長さと冷凍能力

表 A.2　パルス管長さをかえたときの冷凍能力と COP

パルス管長 [mm]	運転周波数 [Hz]	圧縮機入力 [kW]	冷凍能力 [W]	COP
240	1.6	5.62	107.9	0.0192
270	1.4	5.63	109.7	0.0195
300	1.3	5.58	117.0	0.0210

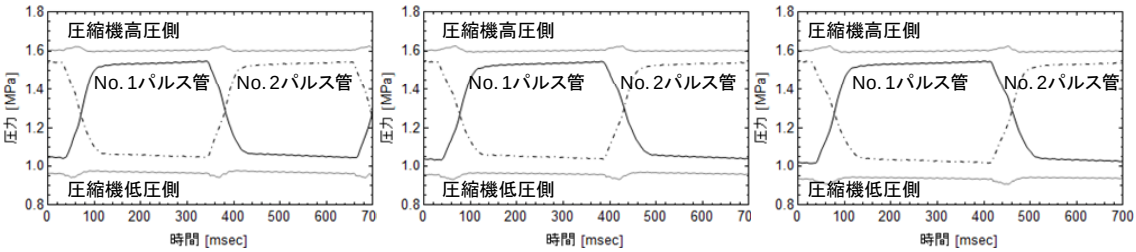
8.2.3.2　圧力波形

図 A.8 には、それぞれのパルス管長さで冷凍機を運転した際の圧力波形を示す。これらを比較すると、圧縮機の吐出圧はほぼ同一であるが、圧縮機の吸入圧は、パルス管長が長くなるに伴い低下している。パルス管の圧力波形の最大値と最低値の比、すなわち圧縮比を、パルス管長さごとに比較した結果を**図 A.9** に示す。パルス管が長くなるほど、圧縮比が大きくなる傾向がわかる。

パルス管長さ 240 mm、270 mm、300 mm のいずれの場合も、Case 1～Case 3 までは圧縮機の充填圧力はほぼ等しい条件としている。最適な運転周波数はパルス管長さが短いほど高くなる傾向を示した。これは、パルス管長さが短いほど、パルス管内の圧力上昇にかかる時間が短くてすむため最適な運転周波数が高周波側にシフトするものと考えられる。また、最適な周波数において、圧縮比はパルス管が長くなるほど増加し、それに伴い冷凍能力、COP ともに向上することがわかった。

パルス管常温端側からの入熱ロスとして、パルス管壁による伝導、ガスピストンが常温端から運ぶ熱の影響などが考えられる。パルス管長さが 300 mm のときの管壁からの熱

侵入を計算すると 1.3 W 程度であり、270 mm、240 mm にした場合にもそれぞれ 1.5 W、1.7 W 程度とそれほど大きくはない。冷凍能力への影響としては、ガスピストンの移動距離の違いによる入熱の差や圧縮比の影響が考えられる。



パルス管長さ240 mm　　パルス管長さ270 mm　　パルス管長さ300 mm

図 A.8　パルス管長さと圧力波形

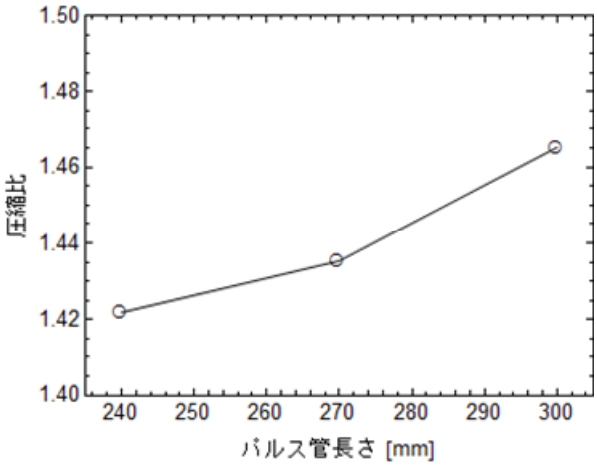


図 A.9　パルス管内の圧縮比

8.2.3.3　ガス位相制御機構の効果

パルス管長さと冷凍能力の関係を比較した試験において、最も冷凍能力が高くなったパルス管長さ 300 mm の条件で、消費電力が 7.5 kW となるよう充填圧を上げ、冷凍能力および COP について初期製作機と比較した。

ダブルインレットを使用しない場合では、50 K における冷凍能力は 146.4 W、COP は 0.02 が得られた。ダブルインレットを使用した場合は、冷凍能力 170.3 W、COP 0.023 を得ることができた(図 **A.10**)。初期製作機の冷凍能力および COP との比較を図 図 **A.11** に示す。ダブルインレットを使用した場合には、冷凍能力で 21%、COP で 17%程度の改善ができ、ダブルインレットの効果は大きいといえる。

ダブルインレット流路で消費される仕事は蓄冷器内でのエンタルピー流を減少させる効果があるが、GM 方式の場合にはダブルインレットラインにおける位相調整のた

めの流量がバルブ（図 A.6 の H.C、 L.C）での仕事損失を増加させる [39]。そのためダブルインレットは冷凍能力を向上させる一方、消費電力の増加を伴う。

一方、アクティブバッファ型パルス管冷凍機では、冷凍能力とともに COP も向上した。アクティブバッファによる圧力損失の低減効果により、ダブルインレットを導入した場合にも各バルブの損失を最小限に抑えることができるものと考えられる。アクティブバッファ型とダブルインレットの組み合わせにより、冷凍能力、COP の両方の改善が可能であることが示された。

2 基のアクティブバッファ型パルス管冷凍機と 1 台の圧縮機で構成する高温超電導磁石冷凍システムを逆相並列で運転した場合、圧縮機負荷が均一になるため単体運転と比較して COP が向上する。しかし、2 基を合わせた冷凍機の合計容積が使用する圧縮機に対して過大となり、圧縮膨張に必要な圧力振幅が低下する問題があった。

そこで、パルス管部の容積を可変構造としたアクティブバッファ型パルス管冷凍機を製作し、並列運転の最適化を検討した。

パルス管部容積、ガス回路切替えバルブ運転周波数、ダブルインレット開度を最適化させた冷凍機並列運転試験において、50 K で冷凍能力 170 W、COP 0.023 を達成した。蓄冷式小型冷凍機の 50 K 領域における冷凍能力、COP としては、非常に高い性能を有するものとなった。

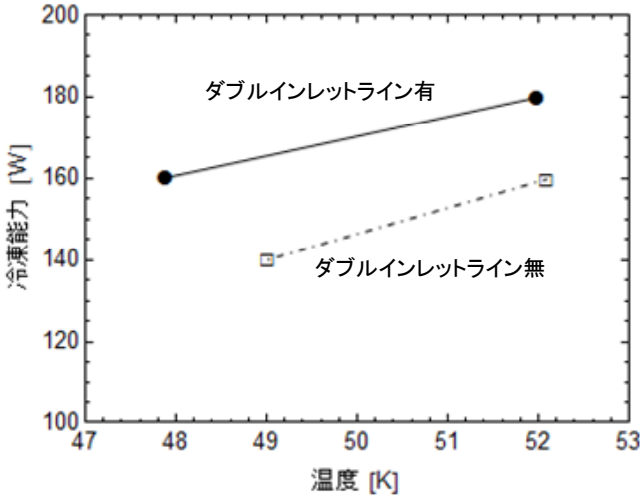


図 A.10　ダブルインレットラインの効果

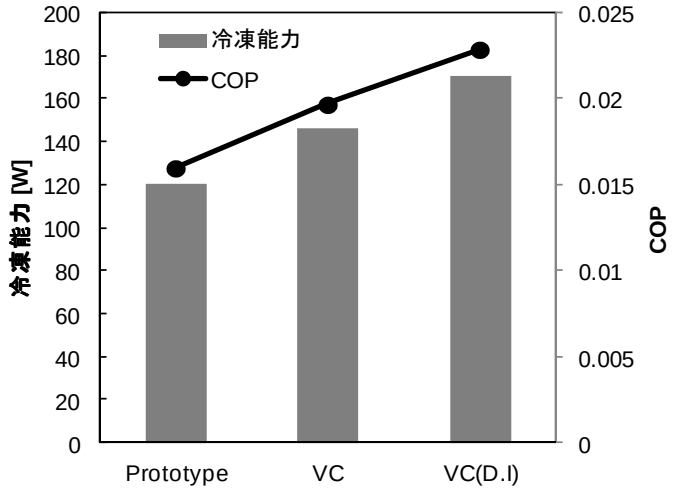


図 A.11　冷凍能力と COP の比較

A.2 磁気冷凍機

A.2.1　磁気冷凍

現在の冷房システムの主流は代替フロン等を用いた蒸気圧縮式冷凍である。 特定フロンは、オゾン層保護の観点からモントリオール議定書により、生産の段階的な廃止が義務付けられているが、温室効果ガスである代替フロン等についても、京都議定書において排出削減対象ガスに指定され、大幅に排出抑制・削減される方向である [40]。

鉄道においても運行に伴う 2030 年の消費電力量を 10 年比で 2 割削減するという新たな目標が掲げられるなど、省エネルギーなどの環境負荷低減に対する要求は一段と厳しくなっており、ノンフロンかつ高効率な冷凍システムの技術開発が急務である。 このような情勢の中、ノンフロンで高冷凍効率が期待できる磁気冷凍が注目されている。本研究では、鉄道車両空調の省エネルギーを目的とし、現行の蒸気圧縮式冷凍に変わり得る冷房技術として、磁気熱量効果を用いた冷凍技術の開発に取り組んでいる。

磁気冷凍とは、ある種の磁性体に磁場変化を与えた場合に、磁性体内部でエントロピー変化が生じる「磁気熱量効果」を利用して冷凍作用を生じさせる冷凍方式である [41]。気体冷凍では、断熱圧縮され排熱した作業流体は、断熱膨張過程で寒冷を生成する。低温となった作業流体はエントロピーを増加させながら吸熱をし、冷凍能力を発現する。一方、磁気冷凍で断熱圧縮に対応するのは断熱励磁であり、断熱膨張に対応するのは断熱消磁である。この過程で磁気系の温度が降下する。磁気冷凍システムでは、この磁気熱量効果による磁性体自身に生じる温度低下を効率よく外部へ取り出すことで冷凍を行なう。

磁気冷凍に用いられる磁性体は、「磁気作業物質」と呼ばれ、現行の圧縮膨張冷凍サイクルにおける作動ガスの役割を担う。室温域においては、磁気作業物質の熱容量が大きくなるため、磁気熱量効果によって生じる磁気系の温度変化に対し、外部に取り出し冷凍に利用することができる温度変化が小さくなる。従って、実際の冷凍に必要な低温を得るには、より強い磁場を加えることで、磁気熱量効果による磁性体の温度変化を大きくすることが必要である。

一方、永久磁石を用い、小さな磁場で大きな冷却温度を得るために考えられたのが、1981 年に Barclay らによって提案された、蓄熱および再生サイクルを用いた AMR(Active Magnetic Regenerator)と呼ばれる冷凍方式である [42]。 AMR では磁気作業物質である磁性体を蓄熱器および再生器として用い、磁気熱量効果による磁気作業物質の温度変化を蓄積させ大きな冷却温度スパンを得るものである。現在室温磁気冷凍を構成するために最も有効な方法とされており、本研究においても AMR を用いた冷凍サイクルを採用している。

また、材料に関しても室温磁気冷凍用に用いられる Gd に対して大きな磁気熱量効果を示す新規材料が提案されている。しかし、磁気作業物質の材料特性が磁気冷凍のシステム特性にどのような影響を与えるかについての検討はまだ少ない。

そこで本節では、従来から室温領域の磁気冷凍システムに多く用いられてきた Gd と、新規磁気作業物質である $La(Fe_{0.84}Co_{0.06}Si_{0.10})_{13}$(以下、LaFeCoSi と称する)を磁気冷凍システムに搭載し、冷凍能力、温度スパンおよび消費動力について測定を行い、得られた結果について両者を比較した。

A.2.2　磁気冷凍技術の変遷

磁気冷凍技術は、開発当初より気体冷凍機では到達困難な極低温を作る方法として用いられてきた。Debye（1926） [43]と Giauque(1927) [44]がそれぞれ磁気熱量効果を用いた断熱消磁により 1 K 以下の低温生成が可能であることを提案し、1933 年には Giauque と MacDougall が磁気作業物質に硫酸ガドリニウムを用いて 0.2 K を生成している [45]。一方、高い温度での磁気冷凍は磁気熱量効果による温度変化が小さいため研究開発が行われていなかったが、1976 年に Brown がガドリニウム(Gd)の薄板を磁気作業物質として用いた磁気冷凍機を試作し、室温での磁気冷凍の可能性を示した [46]。

Barclay により AMR 方式が提案されたことで、20K や室温での磁気冷凍機の可能性が高まり、マサチューセッツ工科大学、Astronautics 社などで研究開発が進められた。1990 年代までの磁気冷凍技術開発の変遷を表 A.3 に示す。

表 A.3　**磁気冷凍開発の変遷**

年代	概要
1920年代	1926年：Debey(1926）、Giauque(1927）が独立に断熱消磁による1　K以下の低温生成を提案
1930年代	1933年：Giauque と MacDougall が硫酸ガドリニウムを用い、単発（ワンショット）の冷却で0.2 K に到達
1970～1980年代	1976 年：G.V.Brown（NASA）がエリクソンサイクルの磁気冷凍機を開発し、室温での冷却を達成
	東芝、東工大研究グループによるヘリウムの液化などの実証研究が行われる
	1983年：Barclay が AMR を提案。20 K、常温での磁気冷凍研究が MIT、Astronautics 社などで進められる
80年代後半	磁性蓄冷材を用いた気体冷凍で4 K まで冷却できるようになり、極低温を生成するための磁気冷凍技術の開発は衰退
1990年代	高温超電導体の実用化を視野に入れ、20～77 K 領域の磁気冷凍研究も本格化
	1992年：Astronautics 社の Zimm らが AMR 型の室温磁気冷蔵庫を発表
	1994年：AMR を用いた液体水素製造機が Astronautics 社の Zimm らにより考案

A.2.3　磁気作業物質

A.2.3.1　磁気作業物質の開発状況

磁気熱量効果を生じる磁性体を磁気作業物質という。磁気熱量効果の大きさを表す指標はΔS_MとΔT_{ad}であり、それぞれ磁気エントロピー変化、断熱温度変化と呼ばれる。磁気冷凍機の冷凍能力はこのΔS_MとΔT_{ad}によって決まる。実用材料として用いられているGd の磁束密度 2 T におけるΔS_MとΔT_{ad}の最大値はそれぞれ 5 J/(kg K)、6 K 程度である。

これまでに磁気冷凍作業物質として研究されている主な材料のキュリー温度T_C、磁気エントロピー変化、断熱温度変化、印加磁束密度Bを表 A.4 に示す。

磁気冷凍の高効率化のためには、巨大磁気熱量効果を示す磁性体の開発が最も有効である。特に最近注目されているのは、室温近傍での磁場印加により一次相転移を引き起こす磁性体である。一次相転移の代表的な例は気液変化の際に潜熱を伴う相変化であるが、固体である磁性体においても潜熱を伴う相変化をする材料がある。

室温磁気冷凍機開発にはキュリー温度T_cが 294 K にあり、磁気エントロピー変化が比較的大きい Gd が用いられているが、T_cでの変化は潜熱を伴わない二次相転移である。

例えば、東北大の深道らは一次相転移を示す材料として $La(Fe_xSi_{1-x})_{13}$ 化合物および水素化化合物を開発している。$La(Fe_xSi_{1-x})_{13}$ は、キュリー温度T_cで強磁性－常磁性一次相転移を示し、T_c以上で磁場印加すると、常磁性から強磁性への一次相転移を示すため、大きな磁気熱量効果が期待できる [47]。

九州大学の和田は $Mn_{1+\delta}As_{1-x}Sb_x$ 系材料で大きな磁気熱量効果を有する化合物を開発している。$MnAs_{1-x}Sb_x$ は磁気熱量効果が大きい一方で、磁場を与えた場合と除去した場合の温度ヒステリシスが 6 K 程度あることが課題であったが、Mn リッチとした $Mn_{1+\delta}As_{1-x}Sb_x$ では 1 K 程度まで抑えることができるようになった [48]。

米国では、278 K で結晶構造変態に伴う強磁性－常磁性の一次相転移により、比較的大きな磁気熱量効果を有する $Gd_5Si_2Ge_2$ 化合物 [49]が開発されている。

表 A.4　**磁気作業物質の磁気熱量効果**

	T_c [K]	$\lvert\Delta S_M\rvert$ [J/(kg K)]	ΔT_{ad} [K]	B [T]
Gd	294	5	5.7	2
$Gd_5Ge_2Si_2$	278	14	7.3	2
$MnAs_{0.9}Sb_{0.1}$	282	35	10	5
$La(Fe_{0.9}Si_{0.1})_{13}H_{1.1}$	287	28	7.1	2

A.2.3.2　磁気エントロピー変化

本研究で用いた Gd および LaFeCoSi は、それぞれ 293 K、281 K にキュリー点を持つ 2 次相転移材料である。磁気作業物質として重要な物性は、磁気エントロピー変化、比熱および断熱温度変化である。以下に Gd と LaFeCoSi についてこれらの物性を比較する。なお、Gd の物性は多くの研究によって調べられており、本節では文献 [50]のデータを参照することとした。LaFeCoSi については磁化測定のデータから磁気エントロピー変化を求めた。

図 A.12 に Gd および LaFeCoSi の磁気エントロピー変化ΔSM の温度依存性を示す。Gd の磁気エントロピー変化はキュリー点である 293K 付近にピークを持ち、その値は最大-ΔSM = 5 J/(kg K)となることが分かる.一方 LaFeCoSi は、Tc において-ΔSM = 8 J/(kg K)を超える大きな磁気エントロピー変化が観測される。

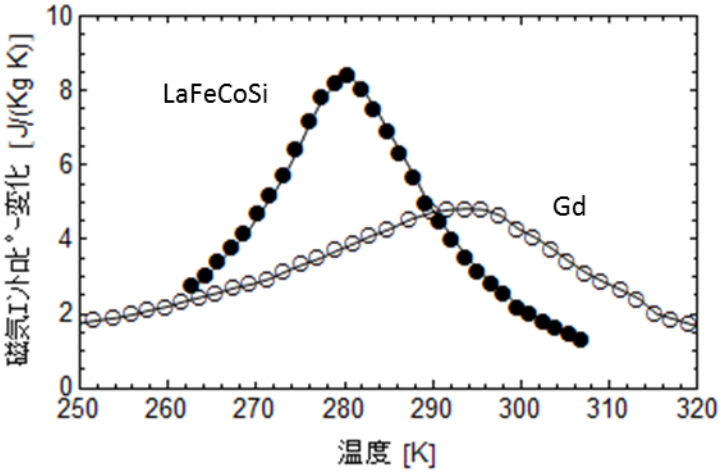


図 A.12　Gd と LaFeCoSi の磁気エントロピー変化(0-2 T)

A.2.3.3　比熱および断熱温度変化

Gd と LaFeCoSi の比熱をそれぞれ**図 A.13** に示す。LaFeCoSi は、Gd と比較して比熱も大きいことがわかる。断熱条件のもとで磁気作業物質に磁場を印加した際の、磁気作業物質の温度変化を断熱温度変化 ΔTad と呼ぶ。比熱の測定により材料のエントロピー変化がどれくらいの温度変化に対応するのか知ることができる。今回用いた装置では測定していない量で、以下の近似式(A-1)を用いて算出した。

$$\Delta T_{ad} = -\frac{\Delta S_M T}{C} \tag{A-1}$$

Gd の断熱温度変化および式(A-1)を用いて求めた LaFeCoSi の断熱温度変化を**図 A.14** に示す。LaFeCoSi の断熱温度変化は、Gd と比較して小さい値となっており、一定磁場を印加した際に得られる温度変化が小さいことを示す。これは LaFeCoSi の比熱が、Gd よりも大きいためである。

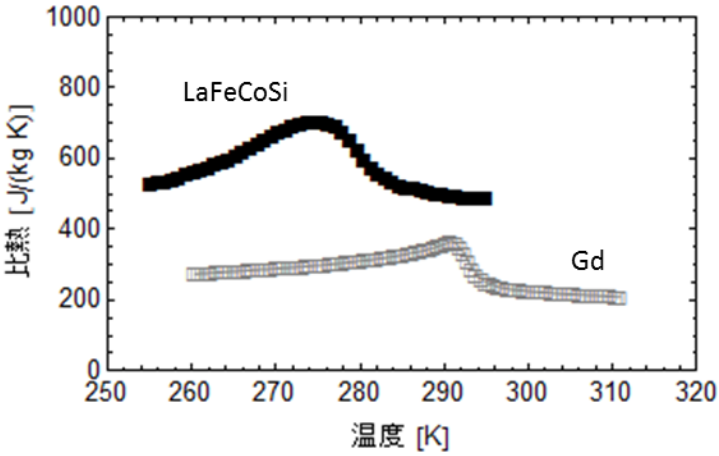


図 A.13　Gd と LaFeCoSi の比熱(0-2T)

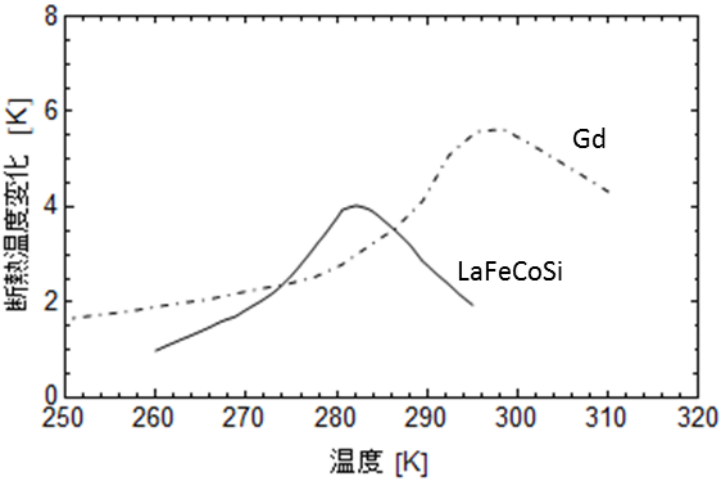


図 A.14　Gd と LaFeCoSi の断熱温度変化の算出値(0-2T)

A.2.4　磁気冷凍システム

A.2.4.1　磁気冷凍システム

1992 年には米国 Astronautics 社の Zimm らは AMR 型の室温磁気冷蔵庫を発表した [51]。さらに Zimm らは 2001 年に永久磁石を用いた磁気冷蔵庫を発表している。

室温域においては、磁性体の熱容量が大きくなるため、磁気熱量効果によって生じる磁気系の温度変化に対し、外部に取り出し冷凍に利用することができる温度変化が小さくなる。従って、実際の冷凍に必要な低温を得るには、より強い磁場を加えることで、磁気熱量効果による磁性体の温度変化を大きくすることが必要である。一方、永久磁石を用い、超電導磁石の数分の一という小さな磁場で大きな冷却温度を得るために考えら

れたのが、蓄熱および再生サイクルを用いた AMR と呼ばれる冷凍方式である。　AMR では磁気作業物質である磁性体を蓄熱器および再生器として用い、磁気熱量効果による磁気作業物質の温度変化を蓄積させ大きな冷却温度スパンを得るもので、現在室温磁気冷凍を構成するために最も有効な方法とされており、本研究においても AMR を用いた冷凍サイクルを採用している。AMR の動作原理を**図 A.15** に示す。(A)で、磁気作業物質は断熱的に励磁され、温度が上昇する。そのあと、(B)の過程で低温の熱交換媒体(たとえば水)と熱交換することにより、温度勾配が生じる。この状態で(C)のように断熱消磁を行うと、磁気作業物質の温度は勾配を保ったまま全体的に低下する。最後に(D)の過程で高温側の熱交換媒体と熱交換することにより、さらに温度勾配が拡大する。AMR システムでは、この磁気熱量効果により磁性体自身に生じる温度変化を蓄熱し、熱交換媒体により効率よく外部へ取り出すことで冷凍を行なう。AMR サイクルに用いる磁気作業物質充填槽を AMR ダクトと称する。

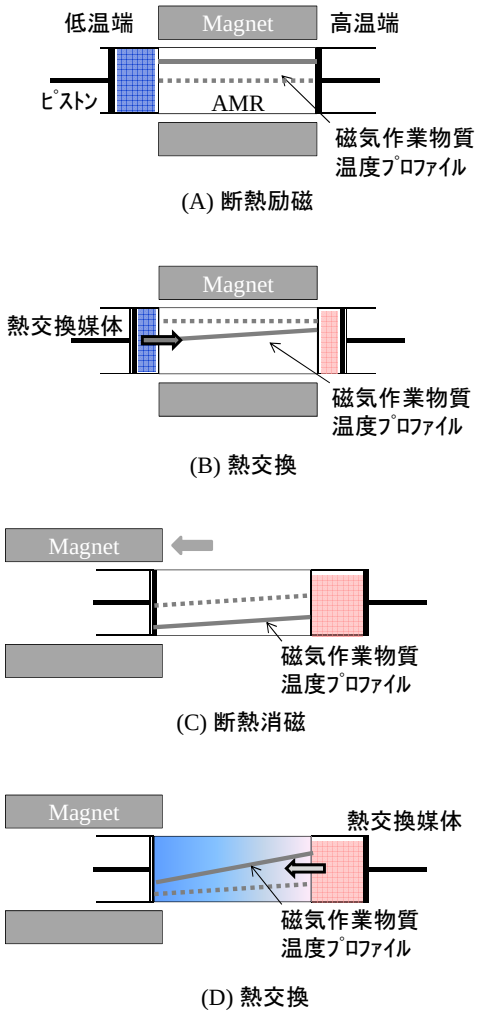


図 A.15　AMR サイクルの原理

A.2.4.2　**磁気回路**

本装置には磁気作業物質を充填する AMR ダクトが 12 組あり、**図 A.16** に示すように全体でディスク形状を有する構造となっている。磁気作業物質に磁場を与える永久磁石には NdFeB 系希土類永久磁石を用い、磁石配置をハルバッハ配列とした [52, 53]。ハルバッハ配列させた永久磁石は、径方向に N 極と S 極を配置した主磁極磁石と、この主磁極磁石の周方向に着磁された補助磁石を備え、全体で円筒状をなしている。

図 A.17 に円環状ハルバッハ配列磁石を用いた磁気冷凍システムのフロー図を示す。2 つのハルバッハ配列永久磁石は磁気作業物質を充填したディスクを挟むように対向させて配置され、回転しながら特定の AMR ダクトに磁場を印加する。図 **A.16** の励磁および消磁ダクトは、磁石の回転がちょうど図 **A.17** の位置の場合について示している。磁石配列をハルバッハ配列とすることで、特定の方向の磁場(この場合主磁極)を強めることができるため、効率的に磁気作業物質を励消磁することができる。本装置では円環状ハルバッハ配列の対に、最大エネルギー積 382 kJ/m^3 の磁石を用いている。円環状ハルバッハ磁石間のギャップは 22 mm で磁気回路間中心部における最大表面磁束密度は 1.1 T である。

熱交換媒体となる流体は初期温度 $T = T_{in}$でポンプにから消磁中の AMR ダクトへ移送され、熱交換を行うことで温度が降下する。熱交換により温度が低下した流体は、所定のヒータ熱負荷を与えられ、$T = T_{out}$ となった後、励磁中の AMR ダクトへ移送される。そこで磁気作業物質の熱を奪ったあとは、チラーにより初期温度$T = T_{in}$に調整され、再びポンプにて消磁中の AMR ダクトへ移送される。各 AMR ダクトで上記の熱交換サイクルが実現できるよう、磁石の回転に合わせてロータリーバルブを切り替える。

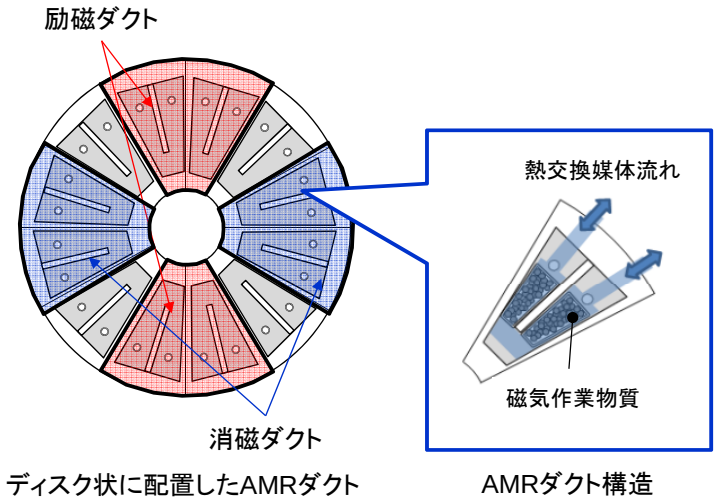


図 A.16　ディスク形状を有する AMR ダクト

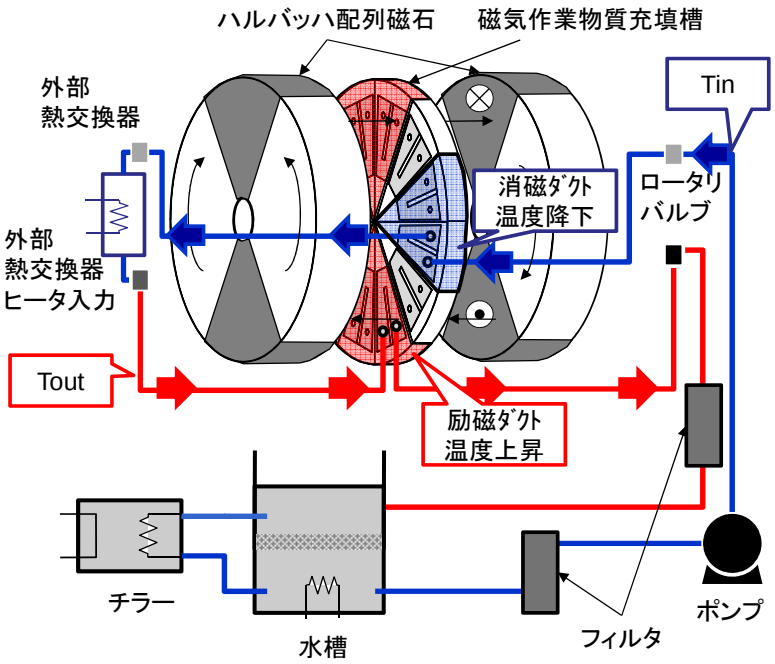


図 A.17　ハルバッハ磁気回路を用いた磁気冷凍システム

A.2.5　評価試験

A.2.5.1　冷凍能力の比較

熱交換媒体の供給温度 $T = T_{in}$を Gd の場合には 20℃、LaFeCoSi では 8℃と、それぞれキュリー点近傍に設定し、所定の温度スパン $T_{in} - T_{out}$が得られるときの、冷却部のヒータ電力を冷凍能力とした。本節では、Gd と LaFeCoSi という材料の違いによるシステム特性を評価するため、温度スパン 0 K の条件における冷凍能力を評価した。

Gd、LaFeCoSi を搭載したときの冷凍能力の熱交換媒体流量依存性について、**図 A.18**、**図 A.19** に示す。磁石の回転数が 10 rpm、 40 rpm のときには、AMR ダクトで熱交換する熱交換媒体の流量を増加するのに伴い冷凍能力が大きくなる傾向であるが、Gd の 5 rpm では流量に対して冷凍能力にピークが認められる。AMR ダクトを流動する熱交換媒体の流量が大きいほど磁気熱量効果によって作業物質に生じた吸発熱量を多く輸送できるため、ある流量までは冷凍能力が増加するが、充填した磁気作業物質の吸発熱を取りきってなお流量を増やせば、熱交換媒体の温度変化が小さくなるため、冷凍能力は低下するものと考えられ、定性的にはこの傾向はいずれの回転数でも同様であると推察される。

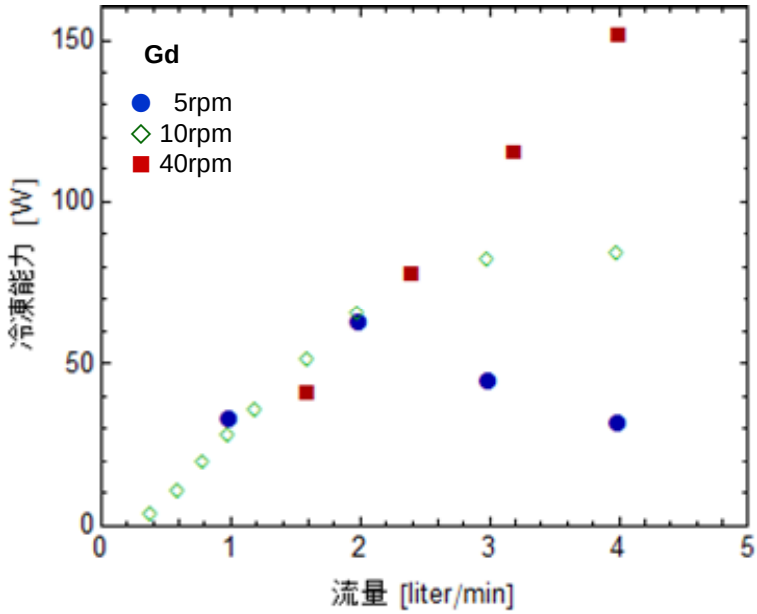


図 A.18　Gd を搭載した場合の冷凍能力の流量依存性

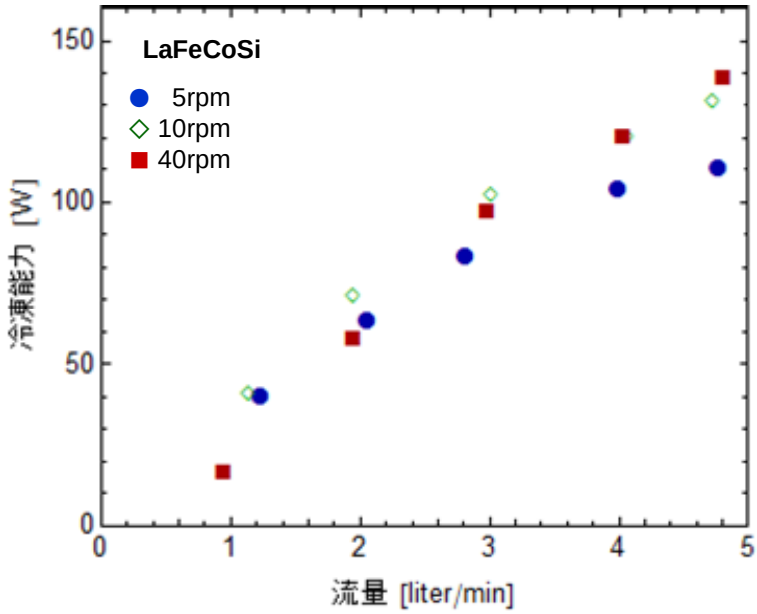


図 A.19　LaFeCoSi を搭載した場合の冷凍能力の流量依存性

LaFeCoSi については、磁石の回転数が 5、10、40 rpm のいずれの場合にも 5 liter/min の流量の範囲においては冷凍能力が増加傾向を示している。Gd の結果と比較すると、5 rpm、10 rpm のときの冷凍能力は大きいが、40 rpm では逆に Gd に比べて小さい。また、回転数を増加した際の冷凍能力の増加も、Gd に比べて小さいことが分かる。

Gd と LaFeCoSi の冷凍能力の結果は、両者の比熱を考えることで整理できる。LaFeCoSi の比熱は、Gd に比べ大きいため、5 liter/min の流量範囲では磁気作業物質の吸発熱を熱交換媒体が取りきっていないと考えられる。また、本試験装置では、磁石の回転数に合わせてロータリーバルブが同期しており、回転数を増加させれば熱交換時間が短縮される。LaFeCoSi に対しては流量が不足している領域で熱交換時間が短くなると、益々熱交換が不足する。そのため、回転数を増加してもその効果が相殺されてしまっていると考えられる。

A.2.5.2　モータ動力およびポンプ動力

10 rpm で運転した際の、磁石回転に必要なモータ動力と、熱交換媒体を流すのに必要なポンプ動力を、それぞれ駆動トルク、流量と圧力差から求め、Gd と LaFeCoSi について比較した(**図 A.20**)。回転に必要な駆動トルクは流量に依存しないため、Gd、LaFeCoSi のいずれの場合もほぼ一定値を示し、必要トルクの大きさも Gd、LaFeCoSi で変わらないことがわかる。熱交換媒体を流すのに必要なポンプ動力についても Gd、LaFeCoSi の場合で同程度であることがわかる。これは今回用いた両者の粒径が同程度であること、LaFeCoSi には熱交換媒体にエチレングリコール溶液を使用したが、粘性の影響はそれほど大きくないことがわかる。

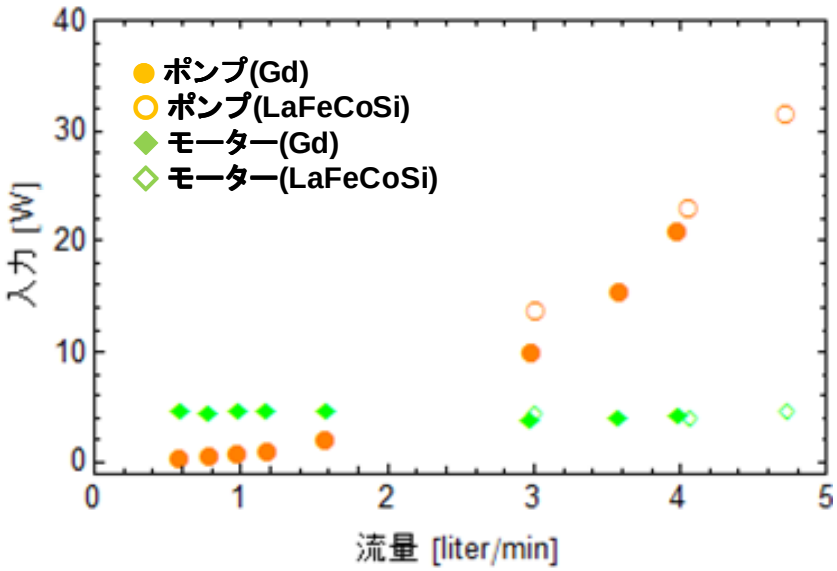


図 A.20　モータおよびポンプの所用動力

A.2.6　解析による特性把握

本試験装置は耐圧の関係から 5 liter/min 程度までしか流量をとることができず、より流量の大きな領域での冷凍能力の傾向を知ることができない。そこで、温度スパン 0 K における冷凍能力の流量依存性について数値計算を行い、Gd と LaFeCoSi を比較した。

AMR の磁気作業物質、熱交換媒体のエネルギーバランスは、以下の式で与えられる。磁気作業物質について(添え字 s)：

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = A\,\lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{A}{V_s} h\left(T_f - T_s\right) + \frac{Q_{mag}}{\Delta t\, V_s} \tag{A-2}$$

熱交換媒体について(添え字 f)：

$$\rho_f c_{pf} \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + u' \frac{\partial T_f}{\partial x}\right) = A\,\lambda_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{A}{V_f} h\left(T_s - T_f\right) \tag{A-3}$$

ρ: 密度、c: 比熱、T: 温度、λ: 熱伝導率、Δt: 熱交換時間、h: 熱伝達係数、x: 流路長、A: 伝熱面積、V: 流路体積、Qmag: 磁気熱量効果、u’: 空塔速度

表 A.5 の条件で(A-2)、(A-3)を数値的に連立して解くことにより、流量、磁石回転数に対する冷凍能力を求めた。**図 A.21** に Gd を用いたときの計算結果を示す。実験では 5 rpm のピークのみ確認できたが、10、40 rpm についても、流量に対して冷凍能力がピーク値を持つ傾向がわかる。**図 A.22** には LaFeCoSi を用いたときの計算結果を示す。LaFeCoSi は Gd に比べ比熱が大きいために、5、10 rpm の冷凍能力ピークを示す流量はいずれも Gd よりも大きい。LaFeCoSi の磁気エントロピー変化は Gd よりも大きく、冷凍能力のポテンシャルは高い。材料のポテンシャルを引き出すには流量など適切な条件で運転することが重要であることが示唆される。

表 A.5　計算条件

	磁気作業物質		熱交換媒体
	Gd	LaFeCoSi	水
充填量/ダクト[kg]	0.0625	0.0625	-
12 ダクト合計[kg]	0.750	0.750	-
密度 [kg-m^3]	7900	7900	997
熱伝導率[W/(m K)]	10.0	10.0	0.104
比熱[J/(kg K)]	310	720	4180
キュリー点における断熱温度変化 [K]	3.13	2.19	-

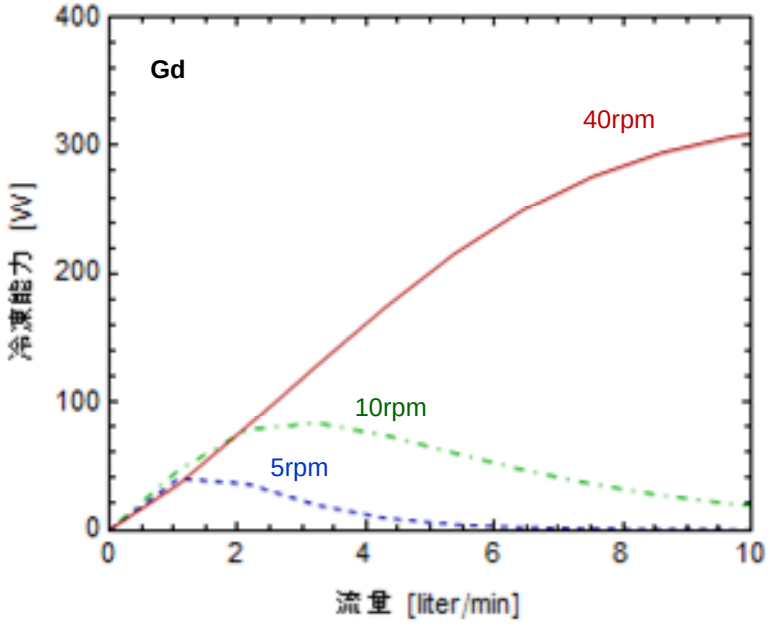


図 A.21　Gd を搭載した場合の冷凍能力(数値計算結果)

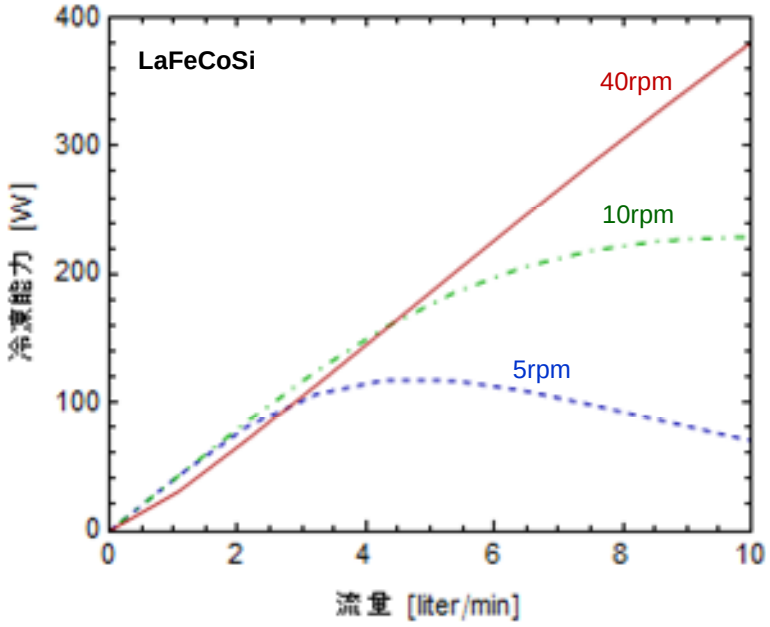


図 A.22　LaFeCoSi を搭載した場合の冷凍能力(数値計算結果)

77 K レベルの冷凍機の冷凍能力と COP について、文献や聞き取りなどを整理した結果 [54, 55, 56, 57, 58]を図 A.23 に示す。

100 W 級では、超電導モータ用などに開発が進められているスターリング冷凍機は実績があり効率も高い。パルス管冷凍機では 150 W @80 K 機の COP は 0.046 であるが、本研究で行ったようなバルブ損失を低減するなどすれば、さらに効率は向上するであろう。一方、高効率なブレイトンサイクルの小型化の動きもある。しかし SQUID に適用する冷凍機を考えた場合には、小型軽量であることが望ましく、その点で GM 冷凍機、スターリング、パルス管冷凍機などに絞られる。

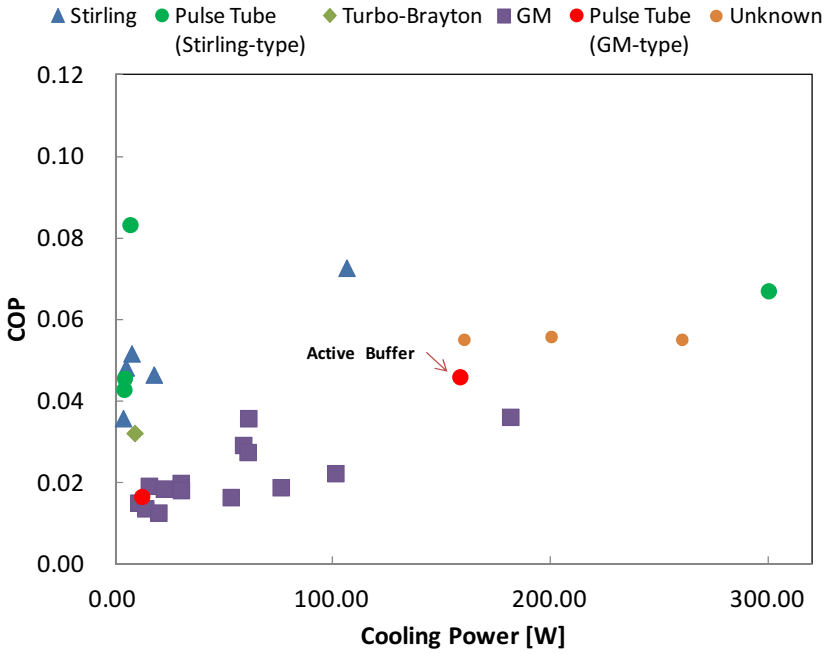


図 A.23　77 K 冷凍機の COP(~300 W)

A.3 まとめ

フィールド用の冷凍機としては、電源の確保が難しい場合も想定され、バッテリー駆動などの可能性もある。従って効率のよい冷凍機であることは重要である。一般的に小型になるほど冷凍機の効率が低下するが、本章に示す並列パルス管冷凍機は、2 基のパルス管冷凍機の運転周期に 180°位相差を与えて圧縮機負荷を均一にすることで、COP 向上が可能である。

磁気冷凍は固体の吸発熱現象を利用するためエントロピー密度が高い。本章では、異なる磁気作業物質を磁気冷凍装置に搭載した場合に、システムに与える影響を検討した。磁気冷凍は、液体ヘリウム、液体水素、液体窒素など様々な温度領域において動作する磁気作業物質が研究開発されているが、磁気作業物質の物性に適した運転条件を選択することで、磁気作業物質のポテンシャルを引き出すことが可能であることを示した。

謝辞

本研究は、平成 17 年からの大阪大学糸﨑研究室との共同研究の内容に基づくものです。SQUID については当初まったく知見のないところからスタートして今日に至るまで、多くの御指導、御教示を賜りました指導教員である糸﨑秀夫教授に深く感謝の意を表します。

本論文作成にあたって、幅広い視点から貴重なご指導とご助言を賜りました酒井朗教授、永妻忠夫教授に心より感謝の意を表します。

大阪大学大学院在学中に御指導、御教示を賜りました酒井朗教授、永妻忠夫教授、占部伸二教授、岡村康行教授、北川勝浩教授に心より感謝の意を表します。

本研究を進める上で数多くの御助言、御協力を頂きました赤羽英夫准教授、宮戸祐治助教に心より感謝いたします。

滋賀県立大学　作田健教授には、大阪大学准教授在任中に実験に関して様々なご助言を頂き、実験をフォローしていただきました。深く感謝いたします。

産業技術短期大学　牧哲朗准教授には、大阪大学の助教在任中、丁寧に御指導いただきました。深く感謝いたします。

神代万亀夫　元技術専門職員には電子回路の作製に関して御指導いただきました。心より感謝いたします。一緒に実験を進めてくれた沖田一剛さん、都築理志さん、適切なアドバイスをくださった太田剛さんに感謝申し上げます。

鉄道総研の奥村文直 理事には、浮上式時代に研究業務の基礎やテーマについて多くのご助言を頂きました。

岩松勝 企画室次長には、浮上式低温システムのテーマの立ち上げから、室長、部長時代にいたるまで、長らく本研究に関し、多大なご指導をいただきました。

長嶋賢 浮上式鉄道技術研究部長には、出向中のテーマ引き継ぎなどについて非常にお骨折りいただき、出向から戻った際にはテーマ継続および博士号取得に向けて道筋を作っていただきました。

長谷川均 低温システム室長には、論文執筆中に業務のご配慮を頂きました。執筆中の業務についてはご負担をおかけしたことと思います。厚く御礼申し上げます。

小形正文 主任研究員、山下友久 主任研究員には、浮上式鉄道用超電導磁石について、ご指導いただきました。池田和也 主任研究員、脇耕一郎 主任研究員、荒井有気 副主任研究員、水野克俊 研究員には、磁気冷凍、パルス管冷凍に関してご助言を頂きました。山田秀之 主任研究員、鈴木江利光 主任研究員、坂本泰明 主任研究員には、博士の先輩として論文執筆に関して多くのご助言を賜りました。深く感謝いたします。

名村明軌道力学室長には、鉄道用レールに生じる様々な現象やメカニズムなどに関して、丁寧にご教授いただきました。心より感謝申し上げます。

東京農工大学大学院　中村崇 産学官連携研究員には、鉄道総研在籍中に、白色層レールサンプルのご提供に始まり、軌道力学の観点からレールに関して様々なご助言を賜りました。また、公私にわたってもいろいろとお世話になりました。心より感謝申し上げます。

筑波大学　寺本徳郎 教授には、漏洩磁束法や磁気抵抗センサについてご指導頂きました。誠にありがとうございます。

産業技術総合研究所　鈴木隆之氏には、疲労損傷と材料物性の関係について、ご指導いただきました。深く感謝いたします。

北海道大学　五十嵐一教授には、白色層膜厚の逆推定に関してご指導頂きました。心より感謝申し上げます。

エア・ウォーター総合開発研究所　平井靖夫氏、高橋貞充氏には、パルス管冷凍機に関して、多くの技術的なご指導、ご助言を頂きました。心より感謝申し上げます。

中部電力　平野直樹氏には、磁気冷凍システムについて多くのご指導を賜りました。深く感謝申し上げます。

三徳　栗岩貴寛氏、高田裕章氏には、磁気作業物質に関してご指導、ご助言を頂きました。深く感謝申し上げます。

様々な面でご協力いただいた糸﨑研究室のすべてのスタッフ、学生、卒業生、鉄道総研の皆さま、ご協力頂きました企業の皆さまに心より感謝いたします。

最後に、様々なサポートをしてくれた母と妹に感謝しますとともに、本研究を遂行するにあたり、苦労、心労をともにしてくれ、日常生活でも協力を惜しまなかった妻、宮崎愛に深く感謝します。

参考文献

[1] 鈴木隆之，寺崎亮実，寺本徳郎，宮崎佳樹，岩松勝，“電磁気的手法を用いたレール鋼の非破壊損傷評価,” *日本保全学会第 5 回学術講演会, 2008-07,* 第 巻 07, 2008.

[2] 内田雅夫, "鉄道のメンテナンスに関する研究開発の現状と展望," *第 20 回鉄道総研講演会,* pp. 13-22, 2007.

[3] 国土交通省鉄道局監修, 鉄道統計年報, 2004.

[4] 稲津博章, "メンテナンスの革新～世界一のメンテナンス技術をめざして～," *JR EAST Technical Review,* vol. 2, pp. 3-6, 2003.

[5] 尾高達夫, "メンテナンス技術に関わる研究開発の取組み," *JR EAST Technical Review,* no. 25, pp. 5-8, 2008.

[6] 輿石逸樹, "鉄道施設のメンテナンス," 2013.

[7] 石田誠, "軌道のメンテナンス," *建設の施工企画,* vol. 718, pp. 24-30, 2009.

[8] 比佐隆文，金谷元就，坂井光夫 and 浜岡敬伸, "安全・安心な鉄道輸送を支える軌道・架線検測技術," *日立評論,* vol. 94, no. 6, pp. 41-45, 2012.

[9] 古川敦，神山雅子, "軌道管理の歩み," *RRR,* vol. 3, pp. 20-23, 2010.

[10] 瀧川光伸，本卓也，尾高達男, "レール探傷車の探傷技術向上," *JR EAST Technical Review,* no. 2, pp. 35-39, 2003.

[11] A. Ekberg , E. Kabo, “Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading -an overview,” *Wear,* 第 巻 258, pp. 1288-1300, 2005.

[12] 小関昌信，片岡慶太, "レールの信頼性向上を目的とした研究開発について," *JR EAST Technical Review,* no. 17, pp. 13-18, 2006.

[13] 名村明，石田誠，, "レール損傷の発生メカニズムを探る," *RRR,* vol. 68, no. 9, pp. 6-9, 2011.

[14] 金鷹, 石田誠, "レール表面に生じる白色層の実態分析," *RTRI REPORT,* vol. 19, no. 9, pp. 17-22, 2005.

[15] 石田誠，佐藤幸雄，柏谷賢治，阿部則次, "NHH レールの耐シェリング性能," *新線路,* vol. 44, no. 12, pp. 23-27, 1990.

[16] 原田久，三上剛，山本厚之，椿野晴繁, "転がりすべり接触下での白色組織形成過程における残留 γ 界面近傍での組織変化," *鉄と鋼,* vol. 91, no. 6, pp. 567-573, 2005.

[17] 平岡和彦，“転がり疲れによる白色型組織変化,” *山陽特殊製鋼技報,* 第 巻 15, 第 1, pp. 43-52, 2008.

[18] 辻江正裕，中村崇，金鷹，名村明, "レール白層周辺傷のパーライト部への影響," *日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集,* vol. 16, pp. 379-380, 2007.

[19] 中村崇，名村明，松田博之，辻江正裕，金鷹, "レール白層の対策と発生要因に関する一考察," *第 12 回鉄道力学シンポジウム,* no. 12, pp. 49-54, 2008.

[20] 打越二彌，著: *図解機械材料*, 東京電機大学出版局, 2001, p. 97.

[21] A. Lois and M. Ruch, "Assessment of martensite content in austenitic stainless steel specimens by eddy current testing," *Insight,* vol. 48, no. 1, pp. 26-29, 2006.

[22] 薬師寺輝敏, 岡茂八郎, 吉田敬志, 榎園正人, 槌田雄二, "残留磁気測定法による SUS304 鋼の疲労被害検出," *日本機械学会論文集,* vol. 72, no. 724, pp. 1970-1977, 2006.

[23] F. Melquiond, A. Mouroux, J. Jouglar, P. L. Vuillermoz and H. Weinstock, "History dependence of magnetomechanical properties of steel," *Journal of Magnetic Materials,* Vols. 157-158, pp. 571-572, 1996.

[24] H. Weinstock, "SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication, and Applications," Series E: Applied Sciences- Vol. 329, 1995, p. 65.

[25] R. Hohmann and et al., "Aircraft Wheel Testing with Machine-Cooled HIS SQUID Gradiometer System," *IEEE Trans. Appl. Supercond,* vol. 9, no. 2, p. 3801, 1999.

[26] 井澤和幸, 中山哲, 師岡利光, 池田正徳, 高木佐加枝, 茅根一夫, 登坂滋, "自走式 SQUID による磁気イメージング装置とその非破壊検査への応用," *低温工学,* vol. 39, no. 10, pp. 488-494, 2004.

[27] 井澤和幸，中山哲，池田正徳，高木佐加枝，登坂滋，“3 次元移動が可能な SQUID 非破壊検査システムの開発,” *低温工学,* 第 巻 40, 第 8, pp. 327-334, 2005.

[28] M. Kuroda, S. Yamanaka and Y. Isobe, "Detection of plastic deformation in low carbon steel by magnetometer using satistical techniques," *NDT&E International,* vol. 38, pp. 53-57, 2005.

[29] D. F. He, M. Daibo and M. Yoshizawa, "Mobile HTS rf SQUID Magnetometer," *IEEE transactions on applied superconductivity,* vol. 13, no. 2, pp. 200-202, 2003.

[30] K. Yao, Y. T. Qing, D. Yamasaki, K. Tazoh and K. Enpuku, "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.

[31] D. F. He, M. Daibo and M. Yoshizawa, "Mobile HTS rf SQUID Magnetometer," *IEEE TRANSACTIONS OF APPLIED SUPERCONDUCTIVITY,* vol. 13, no. 2, pp. 200-202, 2003.

[32] 佐藤幸雄, 辰巳光正, "ベイナイトレールによるシェリングの予防," *RRR,* vol. 66, no. 4,

pp. 18-21, 2009.

[33] C. Wang and P. E. Gifford, "Performance characteristics of a 4K pulse tube in current applications," *Cryocoolers,* vol. 11, pp. 205-212, 2001.

[34] 藤本修二，平塚善勝，森下弘之，永石竜起, "低ノイズ単段パルス管冷凍機の開発," *低温工学,* vol. 39, no. 7, pp. 322-327, 2008.

[35] 廿日出好，葛西直子，高島浩，丸野善生，石山敦士, "同軸型パルスチューブ冷凍機を用いた低磁気ノイズ SQUID 非破壊検査システムの開発," *低温工学,* vol. 38, no. 12, pp. 686-692, 2003.

[36] K. Nagashima, Y. Miyazaki, M. Ogata, T. Sasakawa and M. Iwamatsu, "Study of HTS magnet for maglev using RE-Ba-Cu-O wire –Weight estimate of superconducting magnet-," *Abstracts of CSJ Conference,* vol. 77, p. 176, 2007.

[37] 池田和也, 長嶋　賢, 岩松　勝, 宮崎佳樹, 三条大輔, 吉岡治夫, 高木直子, "65 K,1 kW 級アクティブバッファ方式パルス管冷凍機の開発," *低温工学,* vol. 43, no. 4, pp. 143-149, 2008.

[38] 水野克俊，池田和也，長嶋　賢，平井靖夫，高橋貞充, "並列パルス管冷凍機システムの開発," *低温工学,* vol. 46, no. 10, pp. 569-574, 2011.

[39] 萩原宏康　編著, "低温工学概論 超伝導技術を支えるもの," 東京電機大学出版局, 1999, p. 185.

[40] たとえば経済産業省ホームページ. [Online]. Available: http://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/ozone/law_furon_outline.html.

[41] 大塚泰一郎，橋本巍洲，“磁気冷凍,” 未踏加工技術協会, 1984, pp. 63-65.

[42] J. A. Barclay , W. A. Steyert, “Active Maghetic Regenerator”. US 特許番号: 4332135, 1981.

[43] P. Debye, "Einige Bemerkungen Zur Mgnetisierung bei tiefer Temperatur," *Annalen der Physik,* vol. 81, pp. 1154-1160, 1926.

[44] W. F. Giauque, "Low Temperature, Chemical, and Magneto Thermodynamics," Giauque Scientific Papers Foundation, 1969.

[45] W. F. Giauque , D. P. MacDougall, “Attainment of Temperatures Below 1° Absolute by Demagnetization of Gd2(SO4)3·8H2O,” *Phys. Rev.,* 第 巻 43, p. 768, 1933.

[46] G. V. Brown, "Magnetic heat pumping near room temperature," *Applied Physics,* vol. 47, no. 8, pp. 3673-3680, 1976.

[47] 藤田麻哉，深道和明, "高効率磁気冷凍用磁性体の開発と室温磁気冷凍の動向," *低温工*

学, vol. 39, no. 7, pp. 314-321, 2004.

[48] 和田裕文, "磁気熱量効果と磁気冷凍材料," *熱測定,* vol. 33, no. 3, pp. 98-103, 2006.

[49] H. TANG, A. O. PECHARSKY, D. L. SCHLAGEL, T. A. LOGRASSO, V. K. PECHARSKY and K. A. GSCHNEIDNER Jr, "Magnetic field induced phase transitions in Gd5(Si1.95Ge2.05) single crystal and the anisotropic magnetocaloric effect," *J Appl Phys,* vol. 93, no. 10, pp. 8298-8300, 2003.

[50] S. Y. Dan'kov, A. M. Tishin, V. K. Pecharsky and K. A. Gschneidner, , Jr., "Magnetic phase transitions and the magnetothermal properties of gadolimum," *PHYSICAL REVIEW B,* vol. 57, no. 6, pp. 3478-3490, 1998.

[51] C. Zimm, E. Ludeman, M. Severson and T. Henning, "MATERIALS OFR REGENERATIVE MAGNETIC COOLING SPANNING 20K TO 80K," *Advances in Cryogenic Engineering,* vol. 37, pp. 883-890, 1992.

[52] 脇耕一郎，長嶋賢，荒井有気，水野克俊，伊藤孝治，秋山慎一，池田雅史，村上雅人，“磁気冷凍装置”．特許番号: 特開 2011-226735, 2011.

[53] 脇耕一郎，宮崎佳樹，荒井有気，水野克俊，長嶋賢，川南剛, "円環状ハルバッハ配列磁気回路を用いた室温磁気冷凍機の特性," *鉄道総研報告,* vol. 26, no. 5, pp. 47-52, 2012.

[54] H. ter Brake and G. Wiegerinck, "Low-power cryocooler survey," *Cryogenics,* vol. 42, no. 11, pp. 705-718, 2002.

[55] .. T Otsuka et al., *Abstracts of CSJ Conference,* 第 巻 84, 2011.

[56] 玉田勉, "高信頼性極低温冷凍機の開発," *中部電力　技術開発ニュース,* vol. 123, no. 11, pp. 13-14, 2011.

[57] 上岡康晴　, "小型タービン方式冷凍機の開発," *超電導 Web21,* pp. 5-6, 2008 年 6 月.

[58] 大塚恭一郎，石崎嘉宏，低温の生成と応用超伝導.

[59] 松葉博則，著: *超電導工学*, 東京電機大学出版局, 1997, p. 160.

発表論文リスト

査読付論文等

[1] 宮崎佳樹，水野克俊，池田和也，長嶋賢，高橋貞充，平井靖夫
並列パルス管冷凍機を用いた車載超電導磁石冷却システムの開発．低温工学，Vol. 48， No. 7，pp. 377-381，2013

[2] 宮崎佳樹，脇耕一郎，荒井有気，水野克俊，吉澤圭祐，長嶋賢
鉄道用車両空調向け室温磁気冷凍システムの検討．日本 AEM 学会誌，Vol. 21，No. 1， pp. 28-33，2013

[3] Yoshiki Miyazaki, Yuuki Arai, Ken Nagashima, Hideo Itozaki
Detection of White Layer on Rail by Using SQUID, Materials Science Forum, Vol. 721, pp. 225-230, 2012

[4] 宮崎佳樹，清野寛，田中芳親，長嶋賢，糸﨑秀夫
SQUID による鉄道用レール白色層の検出，日本 AEM 学会誌，Vol. 17，No. 2，pp. 297-302，2009

国際会議

[1] Yoshiki Miyazaki, Yuuki Arai, Ken Nagashima, Hideo Itozaki
Detection of White Layer on Rail by Using SQUID, Japanese-Mediterranean Workshop on Applied Electromagnetic Engineering for Magnetic, Superconducting, Multifunctional and Nanomaterials 7 in Hungary, 2012

[2] Y. Miyazaki, K. Ikeda, K. Mizuno, K. Nagashima, Y. Hirai and S. Takahashi
Improvement of single-stage active buffer pulse-tube cryocooler for HTS magnet of maglev. *24th International Cryogenic Engineering Conference*, 2012

[3] M. Ogata, Y. Miyazaki, H. Hasegawa, T. Sasakawa, K. Nagashima
Basic study of HTS magnet using 2G wires for maglev train. *22nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY*, 2009

[4] Katutoshi Mizuno, Yoshiki Miyazaki, Ken Nagashima, Asumi Kawano, Tetsuji Okamura
Cold Storage Characteristics of Mobile High-Temperature Superconducting Magnet with

Ice as a Cryogen. *17th International Conference on MHD Energy Conversion*, 2009

[5] M. Ogata, Y. Miyazaki, H. Hasegawa, T. Sasakawa, K. Nagashima
Preliminary study of HTS magnet using 2G wires for maglev train. *EUCAS'09(9th European Conference on Applied Superconductivity)*, 2009

国内会議

[1] 宮崎佳樹，脇耕一郎，荒井有気，水野克俊，吉澤佳祐，池田和也， 長谷川均， 長嶋賢，平野直樹，裵相哲，高田裕章，岡村哲至 ，野口芳直，和田裕文，川南剛
kW 級磁気冷凍機の特性評価．低温工学・超電導学会講演概要集， Vol. 88，p. 68，2013

[2] 宮崎佳樹，脇耕一郎，荒井有気，水野克俊，吉澤圭祐，長嶋賢，平野直樹，高田裕章
kW 級磁気冷凍機の特性．日本冷凍空調学会年次大会 2013

[3] 宮崎佳樹，脇耕一郎，荒井有気，水野克俊，吉澤圭祐，長嶋賢
新規磁気作業物質を用いた磁気冷凍機の特性，鉄道総研報告．Vol. 27， No. 7，pp. 41-46，2013

[4] 宮崎佳樹，水野克俊，池田和也，長嶋賢
車載用超電導磁石用 50K，100W 級パルス管冷凍機の開発．低温工学・超電導学会講演概要集， Vol. 87，p. 109，2013

[5] 宮崎佳樹，脇耕一郎，荒井有気，水野克俊，吉澤圭祐，長嶋賢，平野直樹，高田裕章
La-Fe 系材料を用いた磁気冷凍システムの特性．電磁力関連のダイナミクスシンポジウム，Vol. 25，No. 13-4，p. 26-31，2013

[6] 脇耕一郎，宮崎佳樹，荒井有気，水野克俊，長嶋賢，伊藤孝治，川南剛
円環状ハルバッハ配列磁気回路を用いた室温磁気冷凍機の試験結果．電磁力関連のダイナミクスシンポジウム，Vol. 25，No. 13-4，pp. 20-24，2013

[7] 宮崎佳樹，脇耕一郎，荒井有気，水野克俊，吉澤佳祐，長嶋賢，平野直樹，高田裕章，伊藤 孝治
磁気作業物質として LaFe 系材料を用いた磁気冷凍システムの特性.

低温工学・超電導学会講演概要集， Vol. 86，p. 84，2012

[8] 宮崎佳樹，脇耕一郎，荒井有気，水野克俊，吉澤圭祐，長嶋賢，平野直樹，高田
LaFeCoSi を用いた磁気冷凍システムの研究．日本冷凍空調学会年次大会， pp. 135-136， 2012

[9] 宮崎佳樹，長嶋賢，清野寛
超電導磁気センサによるレール検査の試み，検査技術， Vol. 15, No. 11, pp. 60-66, 2010

[10] 宮崎佳樹，長嶋賢，清野寛，田中芳親，荒井有気，糸﨑秀夫
SQUID を用いたレール白色層の検出手法，鉄道総研報告，Vol. 24，No. 1，pp. 35～40，2010

[11] 宮崎佳樹，清野寛，田中芳親，長嶋賢，糸﨑秀夫
SQUID を用いたレール非破壊検査装置の開発，低温工学・超電導学会講演概要集，Vol. 80，p. 150，2009

[12] 宮崎佳樹，清野寛，田中芳親，長嶋賢，糸﨑秀夫
SQUID を用いたレール非破壊検査，電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集， Vol. 21，pp. 661-666， 2008

[13] 宮崎佳樹，清野寛，岩松勝，田中芳親，糸﨑秀夫
SQUID による鉄道用レール診断の基礎的試験，低温工学・超電導学会講演概要集，Vol. 78，pp. 182，2008

[14] 宮崎佳樹，岩松勝，田中芳親，糸﨑秀夫，都築理志
SQUID による鉄道用レール診断の基礎的検討，電磁力関連のダイナミックスシンポジウム講演論文集，Vol. 20，pp. 15-20，2008

[15] 小方正文，宮崎佳樹，長谷川均，笹川卓，長嶋賢
小型レーストラックコイルの通電特性. 低温工学・超電導学会講演概要集, Vol. 79, p. 102，2008

[16] 宮崎佳樹，岩松勝，古澤孝之
高温 SQUID を用いたレール白色層の検出, 低温工学・超電導学会講演概要集， Vol.

76,　p. 63，2007

[17] 宮崎佳樹，岩松勝，古澤孝之
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. 35-40，2007

[18] 長嶋 賢 ，宮崎 佳樹 ，小方 正文 ，笹川 卓 ，岩松 勝
RE 系線材の浮上式鉄道用高温超電導磁石への適用検討(2)：超電導磁石の重量見積り．　低温工学・超電導学会講演概要集，　Vol. 77，　p. 176，2007

[19] 古澤孝之，　宮崎佳樹，岩松勝
液体酸素をトレーサとした非破壊検査の基礎的研究．低温工学・超電導学会講演概要集，　Vol. 77，p. 62，2007

[20] 宮崎佳樹，井上明彦，岩松勝 ，長嶋 賢，小方正文，佐々木 謙，柳瀬康人，山下知久
HTS リード組込型磁場発生装置の開発(2). 低温工学･超電導学会講演概要集 Vol. 73, p. 115，2005