

在来方式鉄道への 超電導リニア技術の適用

長嶋 賢
 浮上式鉄道技術研究部
 (低温システム 研究室長)

高橋 潔
 同
 (主管研究員)

岩松 勝
 同
 (部長)



ながしま けん



たかはし きよし



いわまつ まさる

はじめに

これまで浮上式鉄道の開発を通じて、鉄道総研が培ってきた超電導およびリニアモーターなどの先端技術を、在来方式鉄道システムに応用展開することを目指しています。特に超電導については、近年、高性能な高温超電導線材の量産化やスマートグリッドへの超電導送電の導入などの話題もあり、従来いわれていたコストの問題もこれから徐々に緩和され、種々の産業分野への展開も広がることが期待されています。

そこで、2005年度から2009年度までの5年間、超電導磁気軸受を用いたフライホイールの開発、超高感度の磁気センサであるSQUID（超電導量子干渉計：Superconducting Quantum Interference Device）によるレール探傷技術の開発、リニアモーター技術によるレールブレーキの開発の3つのテーマに取り組んできました。テーマ選定にあたっての背景は下記の通りであり、各テーマは

図1に示すように、在来方式鉄道の「省エネルギー化」「メンテナンス向上」「高速化」を最終目標としています。

- (1) 超電導磁気軸受を利用したフライホイールは、瞬時パワー密度やエネルギー密度が大きく取れるなどのメリットがあり、電力貯蔵装置として長寿命でメンテナンスが少ないといった特長があります。国内ではNEDO（新エネルギー・産業技術総合開発機構）、国外では米国のボーイング社やドイツなどで開発例が報告されています。
- (2) SQUIDは、地磁気の5,000万分の1以下の磁場を検出することができる高感度の磁気センサです。高感度の磁場検出機能を非破壊検査に活用する研究が進められており、国内では電力線検査や食品への異物検出装置に、国外ではレールや航空機の主脚ホイール検査への適用検討例などがあります。
- (3) レールブレーキについては、過去の国内の研究ではレールの発熱が大きいなどの理由により、実用化に至っていない経緯があります。一方、ドイツの高速鉄道ICEでは勾配区間でのブレーキ力向上のためにレールブレーキが採用されている例があります。

以下では、各テーマの実施状況および結果について報告します。

超電導磁気軸受を用いたフライホイールの開発

鉄道用の電力貯蔵装置は、回生エネルギーリサイクルやピークカットなどを通じて省エネルギーに役立つと考えられます。図2に示します重量物を回転させ、回転エネルギーとして電力を貯蔵する超電導フライホイール電力貯蔵装置は、機械式軸受を用いるフライホイール装置に比べて非接触であるため、回転に伴う損失が少ない、メンテナンスの手間がかからない、などのメリットがあります。先に述べたとおり、これまで日本をはじめとして米国、ドイツなどにおいても超電導軸受を用いたフライホイール電力貯蔵装置の開発例は多くありますが、これらはほとんど永久磁石

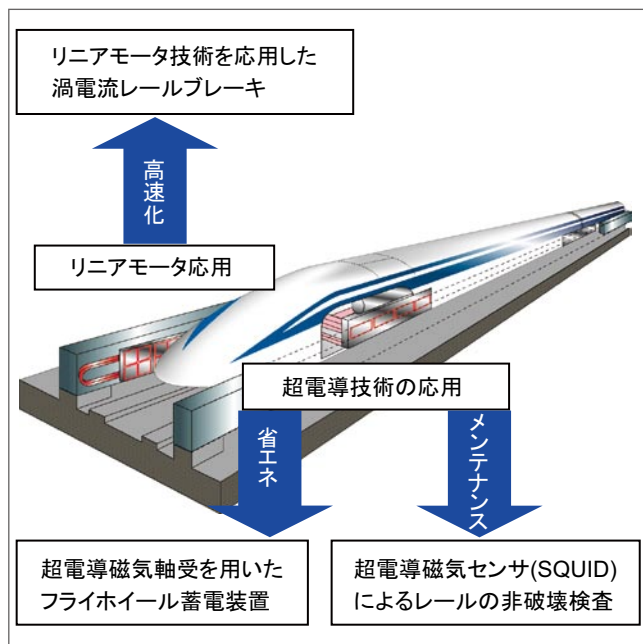


図1 超電導リニア技術の適用イメージ

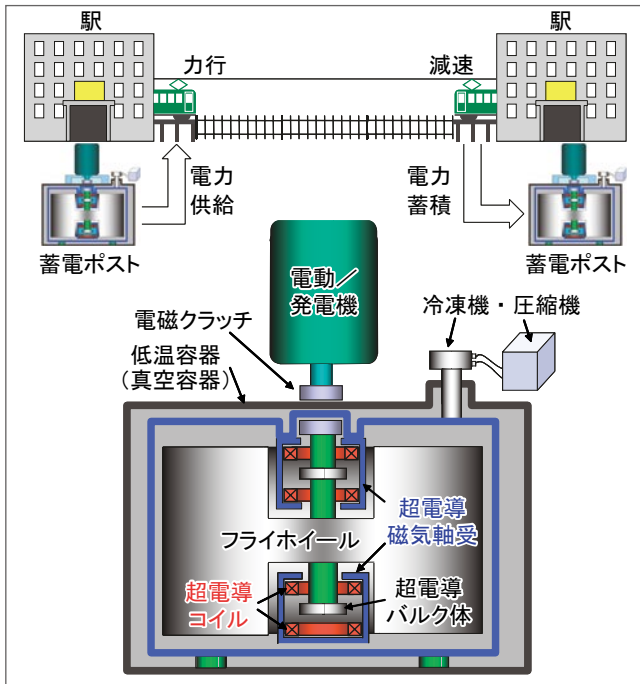


図2 超電導磁気軸受を使用したフライホイールの在来鉄道への適用イメージおよび装置構成イメージ

と超電導バルク体（以下、バルク体）を組み合わせた軸受を使用していました。これはバルク体のピン止め効果を用いて、超電導以外では実現できない、制御不要の完全非接触安定浮上を実現できるメリットがあります。しかし、永久磁石を使う限り、発生磁場には限界があるので、載荷力密度（バルク体の単位面積あたりに支持できる電磁力）は最大で 100kN/m^2 程度にとどまっていた。大きなエネルギーを蓄積するためには、重量物を回転させる必要があるため、永久磁石のかわりに超電導コイルを磁束源として用いて、載荷力密度を飛躍的に向上させようという発想が生まれました。このような超電導コイルとバルク体の組み合わせによる超電導磁気軸受を適用したフライホイール電力貯蔵装置のイメージを図2に示します。この構成では真空容器内のバルク体の冷却方法や回転エネルギーの授受方法など、いくつかの課題があるものの、載荷力密度を画期的に向上できます。なお、この方式は鉄道総研以外では研究されていませんでしたが、最近ではドイツの研究グループが研究を始めたようです。

超電導コイルとバルク体の組み合わせによる磁気軸受を実証するため、試験装置の製作と実験を実施しました。その際、軸受のステータ（固定側）の超電導コイルの配置の最適化により載荷力の増大につながる磁場分布を作り出す

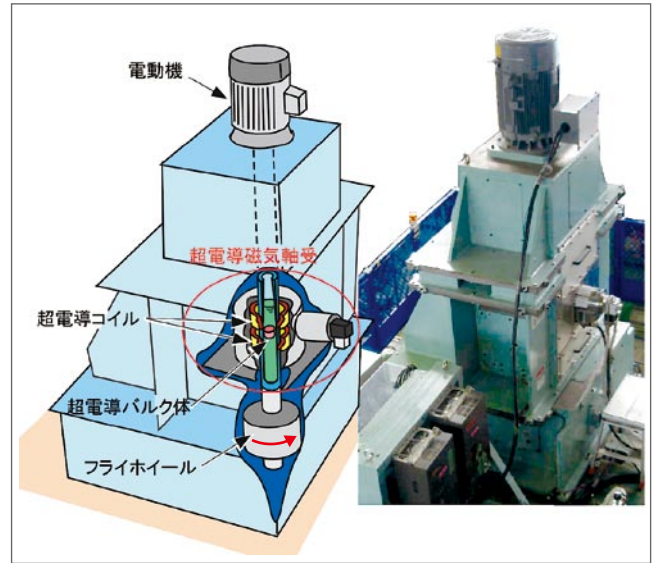


図3 超電導軸受回転試験装置

と同時に、ロータ（回転軸）に内蔵するバルク体の形状・配置を工夫することによって、軸受の荷重を2トンまで向上できました。このように開発した荷重支持性能2トンの超電導磁気軸受を、図3に示すような超電導軸受回転試験装置に組み込んで、 3600rpm までの高速回転試験に成功しました。これにより理論上、 10kWh のエネルギーを蓄積できることを確かめました。

ただ、上記の軸受はフライホイールの荷重を支える軸方向のスラスト軸受としては十分ですが、半径方向に回転軸を支持するラジアル軸受としてはまだ剛性が不十分です。現在は安全のため、ラジアル方向には機械式軸受を使用していますが、ラジアル方向にも磁気的に支持する工夫が必要です。これについては超電導コイルとバルク体の間隔を狭くすることが有効と考えており、実験と解析によりそのことを確認しました。一方、軸受のロータにバルク体を採用したことから、回転するバルク体の冷却が問題となります。そこで、いくつかの予備的な試験を行った後に、超電導コイルとバルク体の両方を同時に冷却するシステム構成を考え、これに必要な要素部品（電磁クラッチなど）の開発も進めて、小型のシステム実証モデルを製作し、回転させることに成功しました。この装置を使って、今後さらにシステム構成の最適化を推進していく予定です。

SQUIDによるレール探傷技術の開発

鉄道用レールには、車輪の空転・滑走による急熱、急冷または転がり滑り接触による応力が誘起されることなどにより、白色層と呼ばれる硬化層が発生することがあります。図4に示すように白色層付近には微小き裂が発生しやすく、き裂の進展により、レール頭頂面のはく離やレールシェリング（転がり接触疲労損傷）を引き起こすことがあります。レール交換には多大な労力がかかっていますが、現在白色層を連続的に検出する方法はありません。また、こうした白色層の連続的な分布情報が得られれば、線区情報と白色層の発生状況や白色層付近の微小き裂・損傷などとの相関を検討する有効な手段となり得ます。

そこで、レール母材と白色層の電磁気的特性の違いに着目して、レール頭頂面の連続検出が可能なシステムの開発を行いました。

白色層の検出には渦電流探傷の原理を用いました。測定対象に交流磁場を与えると、渦電流が発生します。この渦電流は対象の電磁気的特性である抵抗率や透磁率によって変化します。レールの母材と、母材が変質した白色層の抵抗率と透磁率を測定したところ、違いはあるもののそれほど大きくなく、発生する渦電流の違いも微小であることから、高感度超電導磁気センサであるSQUIDを用いた検査システムを構築することとしました。

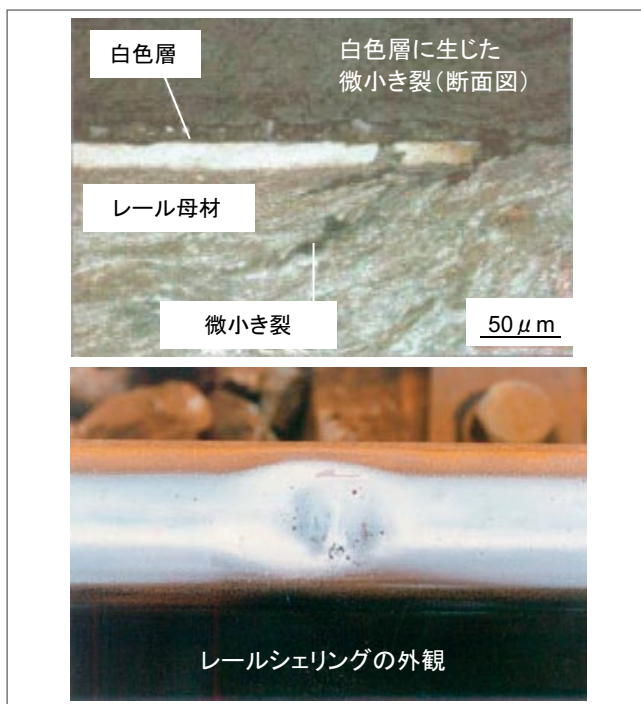


図4 レールに発生した白色層とシェリング

図5に検出装置の構成図と実際に試作した屋外用レール検査装置の写真を示します。2つの対称な形状のコイルに交流電流を流すことで、レールに交流磁場がかかります。交流磁場により渦電流が発生しますが、レールの材質が均一であれば対称性から渦電流による磁場は打ち消し合ってゼロとなるような回路構成としています。レールに白色層があれば、抵抗率と透磁率の違いから渦電流に変化が生じ、渦電流の対称性が損なわれることから磁場が打ち消し合わず、上方のSQUIDにより検出される仕組みです。SQUID本体は高温超電導体であることから、その状態を維持するため、液体窒素容器に入れています。既に、この原理によって5μmの厚さの白色層の検出に成功しているものの、屋外での測定については本装置の耐ノイズ性の向上などを進める必要があることがわかってきています。一方、白色層の厚みと出力の関係なども数値解析と実験により検証を行い、厚さの同定が可能であることを確認しました。今後、屋外で安定した測定が行えるようにさらに深度化を図る予定です。

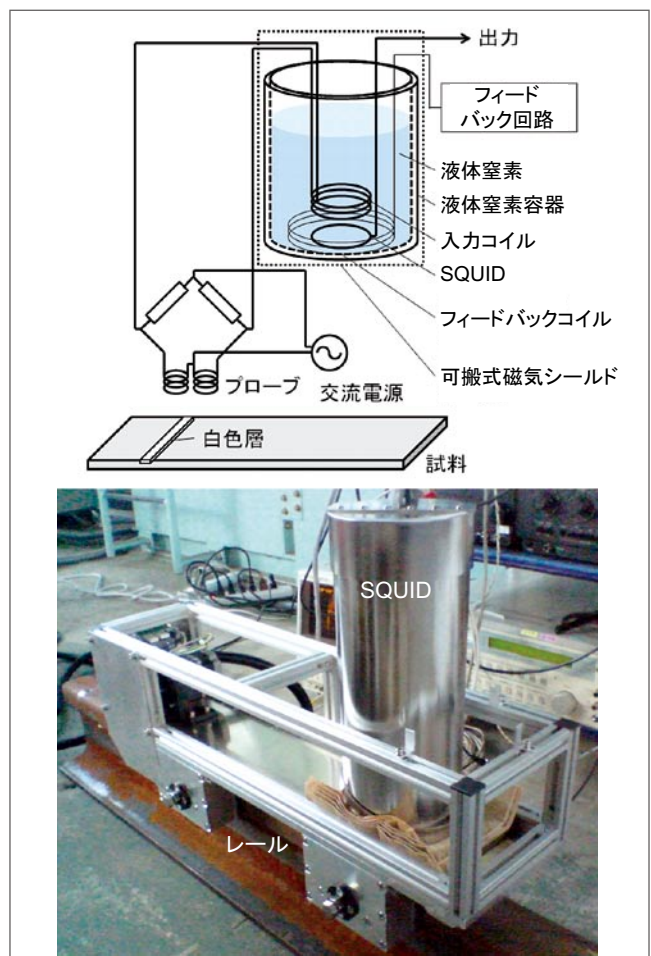


図5 屋外用レール検査装置の構成及び外観

リニアレールブレーキの開発

在来線の高速化には、気象条件などによらない安定したブレーキ力が必要です。既存のブレーキシステムにおけるブレーキ力の発生は、そのほとんどが最終的にはレールと車輪間の摩擦である粘着に依存しており、高速域で安定的に得られるブレーキ力には限界があります。渦電流型のレールブレーキは、非接触かつ高速域でも安定したブレーキ力を発生するため、既存のブレーキシステムに上積みでブレーキ力を加える事が可能と考えられます。過去に国内でも直流励磁型の渦電流レールブレーキが開発されたこともありますが、レール発熱の課題などがあり実用化には至りませんでした。

そこで、図6に示すように、台車部分に搭載する渦電流レールブレーキにリニアモータ技術を応用するリニアレールブレーキを提案しました。これは、LIM（リニアインダクションモータ）を用いるもので、車両の運動エネルギーの一部を架線を通して電力回生させるか車両に搭載した発電抵抗で消費させることにより、レール発熱を過去に開発されたレールブレーキより低減できます。さらに、自ら発電できるので、主回路などから独立した励磁動作を行うことができ、緊急時の非常ブレーキとして使うことも可能です。

はじめに予備的な検証として、図7のような静止型試験装置により、実際のレールを用いて電気的特性などを調査しました。次に、静止型試験装置で得た結果および解析検討の結果から電機子および電力変換システムを設計・製作し、製作したリニアレールブレーキを図8の軌条輪試験装置に設置して走行状態のブレーキ力、レール発熱低減効果などの測定を行いました。なお、軌条輪試験装置はブレーキ性能試験機の子車部分にレールを模擬した軌条輪を取り付けたものです。この試験の結果、軌条輪試験によって最大12kN/台車のブレーキ力を達成し、目標性能（ブレーキ力10kN/台車、発熱低減率20～50%）を実証しました。また、励磁用インバータの制御系を開発して励磁電源レスでの運転を行い、主回路などから独立させた運転が可能であることを実証しました。今後は、台車へ搭載可能な電機子の開発を行い、鉄道総研構内での走行試験を実施する予定です。

おわりに

在来鉄道への超電導リニア技術の応用については、まだ実用化に向けて緒に就いたばかりですが、様々な分野に波及効果を生み、貢献できる応用技術となることを切に願う

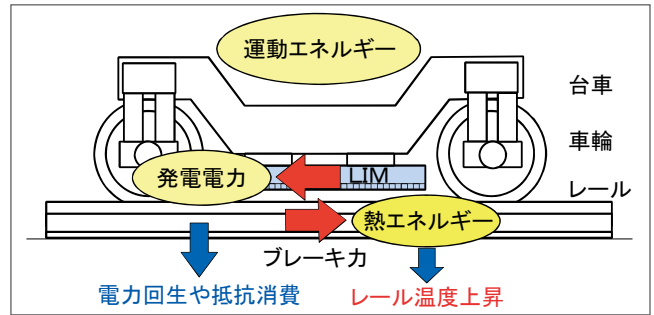


図6 リニアレールブレーキのイメージ

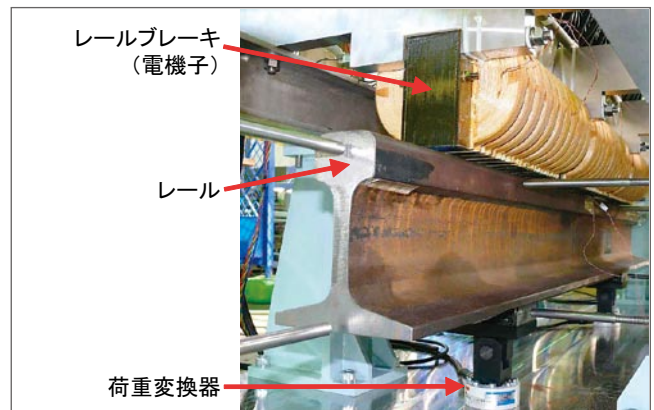


図7 静止型試験装置

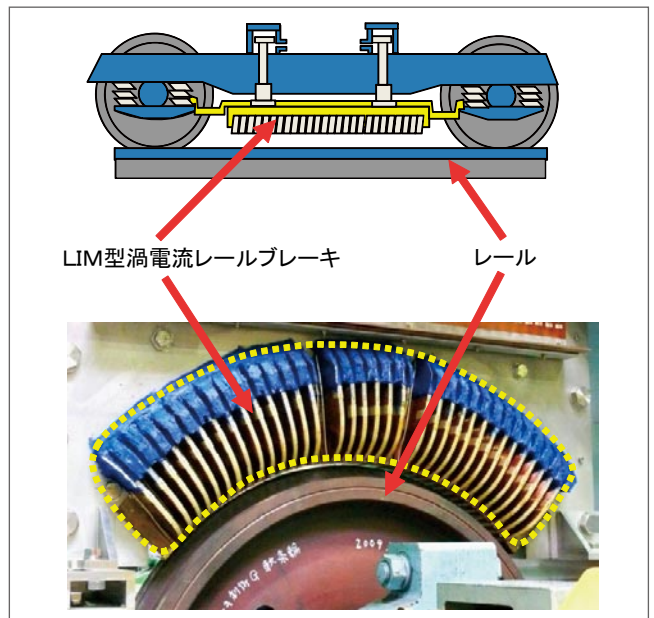


図8 軌条輪試験装置を使った動的試験装置

次第です。この研究開発の一部は、国庫補助を受けて実施しました。[RRR]