特集新たな時代を築く鉄道技術

# 山梨リニア実験線用超電導磁石および地上コイル

Superconducting Magnet and Ground Coils for Yamanashi Maglev Test Line

渡邊洋之*	Hiroyuki Watanabe	古川陽子**	Yôko Furukawa
辻本静夫*	Shizuo Tsujimoto	坂本 茂***	Shigeru Sakamoto





#### 山梨リニア実験線を走行する第一編成車両

側面に長方形に見える部分が超電導磁石であり、台車に取り付けられ、地上側に設けられた推進コイル、浮上コイルとの電磁力により、推進 力,浮上力を発生する。

山梨リニア実験線が建設され、1997年度から走行実験 が開始される。

車両に搭載される超電導磁石は,地上コイルからの変 動磁界にさらされることによって渦電流が流れるととも に、その渦電流に超電導コイルの磁界が作用して電磁力 が働き,振動が発生する。この電磁的作用と機械的振動 作用相互の連成に対する対策が, 超電導磁石設計での大 きな課題である。

極低温部での機械的振動は, 内部構造物間のフレッチ

ル損による発熱を発生させる。これらの極低温部での発 熱は液体ヘリウムの蒸発につながるため、この蒸発量が 車載冷凍機の液化能力でカバーできるかどうかが、この 超電導磁石の成否の鍵となる。

日立製作所は,数値解析を駆使しての構造最適化によ って振動の抑制と渦電流の抑制を達成し、 ヘリウム蒸発 量を所定の値に収めることに成功した。また地上コイル では,耐久性・信頼性の確保を主眼に,量産性に優れた 独自の絶縁方式を開発し,所定の性能を達成している。

#### ングや摩擦による発熱を発生させ、また渦電流はジュー

#### \*日立製作所 日立工場 \*\*日立製作所 日立研究所 \*\*\*日立製作所 機械研究所

### 1. はじめに

山梨リニア実験線用超電導磁石は,財団法人鉄道総合 技術研究所,東海旅客鉄道株式会社を中心として,メー カーが詳細設計,製作に参画する形で開発が進められて きた。

その中で日立製作所は,新たな解析手法を開発して独自の構造を採用することにより,低発熱なSCM(超電導磁石)に挑戦してきた<sup>1),2)</sup>。

ここでは,走行時の発熱低減を軸に,渦電流解析と振 動解析の手法,信頼性・耐久性検証確認に関する現在の 状況と今後の計画,および地上コイルの設計概念と信頼 性・耐久性の検証について述べる。

2. 山梨リニア実験線用SCM

2.1 SCMの概要および要求性能



#### 図1 SCMの構造

台車側から見たSCMの構造を示す。内槽を台車側外槽からだけ支持する(外槽に押出成形ハニカム材を採用)。

発での主要なポイントである。

SCMの仕様一覧を表1に示す。SCMは、レーストラック型の内槽容器(超電導コイルが収納されている。)4個 を納めた外槽容器と液だめ・冷凍機で構成しており、液 だめには液体窒素と液体ヘリウムのタンクを収納している(図1参照)。

この磁石の特徴は,地上コイルによる変動磁場(浮上コ イルによる六次高調波では100~309 Hz)の対策にある。 この変動磁場は,低速では(低周波数域では)外槽や輻射 シールド板で遮へいされず,内槽に到達して渦電流発熱 を発生させる。また,高速では(高周波数域では)外槽に 発生した渦電流とSCM磁場との相互作用によって電磁 力が発生して外槽を振動させ,外槽から支持されている 内槽を振動させることにより,内槽に機械的発熱を発生 させる。さらに,内槽,輻射シールド板,および外槽の 間が相対変位すれば内槽に渦電流が流れ,発熱が増大す ることにもなる。以上の発熱をできるかぎり抑えて,冷 凍機とのバランス運転を可能にすることがこのSCM開

#### 表1 山梨リニア実験線用SCMの主要諸元

SCMの主要諸元を示す。

42

項	目	仕 様	
SCM寸法〔長ā	5,400×1,175		
質 量	I , 400 kg		
走行時模擬最大熱侵入量		8 W以下	
SCM当たりの浮上力		108 kN	
車載冷凍機, タンク	冷凍能力	4.5 Kで 8 W以上	
	ヘリウムタンク容量	約56 L	
	窒素タンク容量	約50 L	

山梨リニア実験線用SCMに対して実走行時の地上コ イル変動磁場(浮上コイルによる六次高調波)を実験的に 与えてヘリウム蒸発量を測定した結果の一例を図2に示 す。表1に示すように,冷凍機のガスヘリウム液化能力 は8Wなので,走行域でバランス運転が可能であること がわかる。

#### 2.2 走行時のHe消費量の低減

#### 2.2.1 振動の抑制

SCMの振動,特に内槽の振動を効果的に抑制すること ができれば,2.1で述べた発熱を低減できるだけでなく, 超電導コイルの耐久性の観点からも望ましい。この内槽 振動抑制の手法について,ここでは内槽の支持体系の観 点から述べる<sup>3)</sup>。

まず,内槽は外槽の台車側からだけ支持されている (図1参照)。これは,地上コイル側外槽は電磁力が働く ので振動が大きいからである。さらに,内槽を支持する 台車側外槽には押出成形ハニカム材が使用されており, 軽量でかつ高剛性となっている。

内槽は、それぞれに機能の異なる3種類の荷重支持材 で支持されている(図3参照)<sup>3)~5)</sup>。コーン形は、鼓形状の 支持材で3方向に大きな剛性を持ち、内槽の上下の直線 部2か所に設置され、浮上力や推進力を主に受け持つと ともに、曲げモードを抑える役割を果たす。ロッド形は、 棒状の支持材で軸方向にだけ大きな剛性を持ち、内槽両 端の円弧部に垂直方向に設置され、ピッチングモードを 抑えている。シリンダロッド形は、円筒と棒の組 合せで構成し、軸方向にだけ大きな剛性を持ち、内槽コー



図2 山梨リニア実験線用SCMの走行模擬加振時発熱量 冷凍機液化能力8Wに対し,500km/hまでの領域でバランス運転 が可能であることがわかる。

ナ部8か所に設置されて内槽の面外変形を抑えている。

(2) 超電導磁石の作る強磁場中での構造物の相対振動

(3) 浮上走行時の車両動揺。)

上記要因の(1)や(2)は走行速度に対応した周波数(浮上 六次高調波100~309 Hz)で生じるが,(3)は2~4 Hzと いう低い周波数で生じる。

要因も周波数も異なるこれらの渦電流発熱を低減する ため、三次元渦電流解析技術を東海旅客鉄道株式会社と 共同で開発した<sup>7)</sup>。この技術の特徴は、有限要素法によっ て複雑な磁石構造を正確にモデル化でき、上記のさまざ まな要因による渦電流を高速・高精度に解析できる点に ある。これにより、今まで明確でなかった磁石の構造や 材質と渦電流発熱との関係が定量化でき、最適設計を可 能とした<sup>7),8)</sup>。

浮上コイル磁場変動時の解析例を図4に示す。複雑な 構造物上に多数の渦が生じている様子がわかる。これら の渦は列車速度に合わせて移動し、大きな発熱の原因と

これらの荷重支持材は、内槽の振動抑制に最も効果的 な位置に必要な剛性を持って配置しており、種々の振動 モードを抑制しているが、特にねじりモードが実使用周 波数域(時速500 km/hで309 Hz)よりも高くなるように 考慮されている<sup>3)</sup>。これは、内槽がねじれ変形したときに 機械的発熱が最も増加するので、ねじれ共振を避けるこ とが発熱低減に有効であることによる。

#### 2.2.2 渦電流発熱の低減

機械振動と並ぶ列車走行時の発熱要因として,渦電流 発熱があげられる。これは,良導体である内槽上で磁束 が変動すると電磁誘導によって渦電流が発生し,ジュー ル発熱するものである。走行時で定常的に生じる磁束変 動の要因は以下の三つである。

(1) 浮上・推進コイルからの磁場変動



なる。この解析は、実験結果を高い精度で再現する。こ の解析技術を適用し、従来のステンレス鋼製内槽に抵抗 のきわめて低い高純度アルミニウムを被覆することにより、 渦電流発熱を60 Wから0.3 Wに低減することができた。 SCMで発生する渦電流は、発熱のほかに電磁力を生 じ、構造物を振動させる。渦電流と振動を同時に抑制し、 総合的に低発熱・高信頼性磁石を得るために、渦電流と 構造振動との連成解析技術を開発し、電磁気的にも機械 的にも最適となるSCMの設計を進めている<sup>9</sup>。



図3 荷重支持材の配置 3種類の荷重支持材を最適位置に分散配置している。コーン形は 浮上・推進力を支持し、シリンダロッド形、ロッド形はコイルのピ ッチング・ローリングモードを抑制する。 図4 浮上コイル磁場変動時の渦電流分布解析例(走行速度 500 km/hの場合) 色分けは渦電流密度を,実線は渦電流の流線を表す。この解析に より,渦電流発熱の低減が可能となった。

#### 2.3 振動解析と乗り心地改善

振動と発熱の相関を明らかにするため、台車枠の影響 を考慮したSCMの振動解析手法を東海旅客鉄道株式会 社と共同して開発し、SCM設計に適用した。

まず,過去の電磁加振試験結果を詳細に分析してSCM の動的挙動を明らかにし,台車枠と結合したSCM振動を 解析するためのモデル化手法を開発した。このモデル化 手法に基づく解析結果を実測結果と比較して,手法の妥 当性を確認した。解析には日立製作所のスーパーコンピ ユータ "HITAC/S3800"を利用し,1台車システム(台 車枠とSCM2台分)の大規模な動的応答解析を可能とし た。次に,振動による発熱を最も増大させるのがコイル のねじりモードであることを明らかにし,ねじり振動成 分からSCMの発熱特性を予測する手法を確立した。

山梨リニア実験線第2編成車両では,乗り心地の改善のためにSCMを弾性支持方式とした台車も組み込まれ

台車枠により,非弾性支持方式と同様な発熱特性が期待 できる(1997年3月に実験で確認の予定)。

#### 2.4 SCMの信頼性

SCMの信頼性を考えるうえで重要な構成要素の一つ に,超電導コイルと外槽の間で電磁力を伝達する荷重支 持材がある。図3に示す3種類のタイプすべてについて, 運転走行状態を模擬したパターンの負荷を極低温で加 え,長期耐久性について十分な裕度を持っていることを 確認している(東海旅客鉄道株式会社との共同開発)。

液体ヘリウムを満たして超電導コイルを極低温に冷却 する内槽は,超電導コイル,絶縁FRP,スペーサ金具, および容器から成る締結構造体である。この締結が不十 分であると,振動によるフレッチングのために,局所的 に発熱したり部材が磨耗するおそれが生じる。

この検証のため,超電導磁石のコイルの一部を取り出 した直線モデルについて,耐久加振試験を東海旅客鉄道

る。台車枠を二重枠とし、SCMと機器枠との間に空気ば ねを入れる構成とするものであるが、乗り心地を改善す る反面、台車剛性が低下するので、SCMの振動設計は厳 しくなる。

台車枠構造のさまざまなパラメータを変えて解析し、 その結果得られた弾性支持台車枠の最適構造を図5に示 す。この台車枠は、(1)SCMどうしを直結する横ばりをコ イルの曲げモードを抑制する位置に設け、(2)SCM-横 ばり間には、コイルのねじりモードに対する制振用三角 リブを配置するとともに、(3)横ばり上下間には補強板を 設けて高強度・高剛性を図るという特徴を持つ。

この構造を持つ台車枠にSCMを結合した場合のSCM 発熱特性を解析によって予測した結果,列車の定格走行 速度の500 km/hに対応する309 Hzまでの外槽1個当た りのSCMの発熱増分は2 W以下であった。この弾性支持



株式会社と共同で実施した。液体ヘリウム中で,実際に 作用する負荷の5~10倍の曲げ加振を10<sup>9</sup>回加えても,発 熱量の変化や局部磨耗が生じないことを明らかにしてい る。さらに,レーストラックコイルについて,電磁加振 時に磁石が受けるねじりの負荷を機械的に加える装置を 東海旅客鉄道株式会社と共同して開発中である。この装 置により,超電導コイルの長期耐久性を確認する予定で ある。

#### 3. 地上コイル

#### 3.1 地上コイルの概要

地上コイルは、車両を推進させる推進コイルと、浮上 や案内を受け持つ浮上コイルから成る。地上コイルの主 要諸元を表2に、外観を図6に、また、側壁への取付構 成を図7にそれぞれ示す。

#### 3.2 高信頼性絶縁システム

#### 3.2.1 絶縁仕様の検討

地上コイルをコンクリート製パネルに取り付け、屋外

#### 表2 山梨リニア実験線用地上コイルの主要諸元 推進コイルと浮上コイルの主要諸元を示す。

項目	推進コイル	浮上コイル
使用電圧	22 kV(北線用)	600 V(誘起電圧)
中心寸法	1.42×0.6(m)	$0.35 \times 0.34(m)$
導体材質	電気用アルミニウム	電気用アルミニウム
モールド材	エポキシ樹脂	SMC

## 図5 弾性支持台車枠の最適構造 対向するSCMをはりで直結している。はりの間に機器枠を挿入し,機器枠-SCM,車体一機器枠間に空気ばねを設けることにより,

乗り心地が改善できる。

44

注:略語説明 SMC(Sheet Molding Compound)

山梨リニア実験線用超電導磁石および地上コイル 189



図6 浮上コイルと推進コイル

エポキシモールドは、大別して真空注型方式と加圧ゲ ル化方式の2方式があるが、ボイドレス化、量産性を考 慮して、真空注型方式を採用した。 (2) 浮上コイル

浮上コイルは低圧であるが,浮上反力などの電磁力を 保持する必要があるため,高強度・量産性の観点から SMCを採用した。

#### 3.2.2 信頼性評価

浮上コイル用のSMCは宮崎実験線用推進案内コイル で20年近くの使用実績があるが,推進コイル用エポキシ 樹脂については,宮崎実験線と比べて使用条件が厳しい ため,信頼性評価試験を実施した。

(1) 課電劣化特性

コイルは屋外で使用されるため,モデルコイルを用い て吸湿状態で課電劣化試験を実施した。その結果,実験 線での使用条件では十分信頼性があることを確認した。

浮上コイルは8の字形に接続したコイルが2個,推進コイルはレ ーストラック形のコイルがそれぞれモールドされている。

設置という使用条件を考慮して開発を進めた。

(1) 推進コイル

推進コイルは,線間電圧が22 kVと特別高圧で使用さ れ,また,層間短絡を起こすと超電導磁石に過大な力が 発生する。このため,層間短絡を防止する目的から,大 型回転機用固定子コイルの技術を基に,長期信頼性を考 慮して層間絶縁にマイカを用いた。一方,対地絶縁とし てエポキシ樹脂モールドとした。



(2) 耐候性

耐候性については、サンシャイン ウェザー メータを 用いてJIS A 1415に準拠した耐候性試験を5,000時間実 施し、曲げ強度で評価した結果から問題ないことを確認 した。

#### 3.2.3 部分放電特性

層間絶縁にマイカを用いる方式は,衝撃耐電圧特性が 安定しており,部分放電による劣化が少ないなど,優れ た絶縁方式である。しかし,マイカ層内の微小ボイドを 皆無にすることは困難であり,部分放電特性を安定させ るため,層間絶縁材料,処理方法などで最適化を図った。

#### **3.3 運転寿命の確認**

#### 3.3.1 樹脂強度

(1) 評価方法

実コイルでは,各種劣化要因が複合的に作用する。しかし,その影響度合いを把握することが困難なため,個々の強度低下率を求め,相乗効果を考えてそれぞれの累積を実劣化とした。

また、ピーク応力が曲げ強さ程度に達したときに破断 することから、3点曲げ強度で評価した。

(2) 樹脂強度

各樹脂の機械的特性を表3に示す。

#### 3.3.2 コイルの発生応力

#### 図7 地上コイルの取付構造 推進コイルは岩ずつずらした2層配置である。その表面に浮上コ イルが取り付けられる。

推進コイルに発生する各種応力を有限要素法で解析した。なお,残留応力については実コイルを用いて測定した。
3.3.3 コイルの強度評価
(1) 評価方法

45

#### 表3 各樹脂の機械的特性

樹脂板による機械的特性測定結果に強度低下率を乗じて応力限 度とした。

No.	I	頁	目	エポキシ樹脂	SMC	備考	
l	初期強さ(N/m <sup>2</sup> )		139.4×10 <sup>6</sup>	171.6×10 <sup>6</sup>			
2	クリープ強さ (N/m²)		100.0×10 <sup>6</sup>	135.3×10 <sup>6</sup>	5年相当		
3	疲れ強さ (N/m², 片振り)		63.7×10 <sup>6</sup>	100.0×10 <sup>6</sup>	Ⅰ.44×Ⅰ0 <sup>6</sup> 回		
4	弾性率(N/m <sup>2</sup> )		$16,103 \times 10^{6}$	$10,562 \times 10^{6}$			
5	高溫		退低下率	0.75	0.63, 0.5	平均 変動	, 応力
6	强	<ul><li>吸湿劣化率</li><li>樹脂板と実</li><li>機との相違</li><li>応力緩和率</li></ul>		0.9	0.9	-	
7	度低下			0.8	0.7	_	-
8	率			0.9			-
9		合	計	0.48	0.4, 0.31	平均 変動	, 応力
10	平均応力 限度 (N/m <sup>2</sup> )		初期強度	$66.9 \times 10^{6}$	$68.6 \times 10^{6}$	No.I×	No.9
П			クリープ 強度	48.1×10 <sup>6</sup>	54. × 0 <sup>6</sup>	No.2×	No.9
12	変動応力限度 (N/m <sup>2</sup> )		15.3×10 <sup>6</sup>	15.0×10 <sup>6</sup>	No.3×	No.9	

地上コイルに発生する電磁力や外部から受ける力は, コンクリートに対し,ボルトの締付力,一体スペーサの 接触面の摩擦力,浮上コイルの背面突起部によって保持 される。

#### 3.4.2 取付ボルトの必要軸力

取付ボルトの軸力はコイルの熱伸縮を拘束しないで, かつ電磁力では動かない大きさに設定する。このため, 電磁力で動かない最小軸力は摩擦係数から求めた初期必 要締付力に,周囲温度変化や電磁力ほかの外力による軸 力の減少分を加えた値とした。

一方,軸力の上限は使用部材の応力限度から決定し, ボルトの締付トルクを設定した。

#### 3.4.3 ボルト軸力の緩み対策

被締結部材は樹脂であり,経年的にクリープが発生し てボルト軸力が低下する。このため,各種試験を実施し, 軸力の経年変化を予測して増し締めを行うこととした。

高分子材料の応力評価方法は確立されていないため, 金属材料などで用いられている応力限度線図で評価した。 (2) 強度評価結果

各コイルの強度を評価した結果,実験線レベルでの強 度は十分である。

3.4 コイル組立技術の確立

3.4.1 一体スペーサ方式の概要

推進コイルの保持,位置決めを兼ねた一体スペーサ (SMC製)に表側,裏側各1個の推進コイルを組み込み, これに浮上コイルを固定したコイルユニットを組み立て て,コンクリートパネルにボルトで固定する一体スペー サ方式を採用した。

### 4. おわりに

ここでは、SCM(超電導磁石)の解析を主体とした設計 の概要と、その結果、所期の目標を達成したこと、また、 地上コイルでの信頼性の検証が十分行われていることに ついて述べた。

超電導磁気浮上式鉄道は,将来の大量輸送機関として 期待が高まっている。山梨リニア実験線での走行実験の 結果を踏まえ,いっそうの性能改善,信頼性向上を目指 して微力を尽くしていきたいと考える。

終わりに,この超電導磁石・地上コイルを開発するに あたり,財団法人鉄道総合技術研究所,東海旅客鉄道株 式会社,日本鉄道建設公団の関係各位から多大なご指導 をいただいた。ここに深く感謝の意を表する次第である。

#### 参考文献

- 1) 滝沢,外:高剛性超電導磁石の電磁加振試験結果,低温工学,Vol.29, No.10(1994)
- 2) 土島,外:山梨実験線用超電導磁石の熱負荷特性,低温工学,Vol.29, No.10(1994)
- 3) 坂本,外:磁気浮上列車用超電導磁石の振動特性と内槽支持方法,日本機械学会論文集,Vol.62, No.603-C(1996)
- 4) 江島,外:超電導磁石用シリンダーロッド型断熱荷重支持体,日本材料学会第5回機械・構造物の強度設計評価に関するシンポ ジウム論文集(1995)
- 5) 書山 M·初季道磁与湾上列市田FDD制荷香古特体の開発 日本機械受合論文隹(A) Vol 62 No 508-A (1006)

5)	育山, 外, 超電導磁式仔上列車用FKP裝何重文持体の開発, 日本機械子会論又集(A), V01.02, N0.398-A(1990)	
6)	古川,外:磁気浮上列車用超電導磁石の車両揺動による渦電流解析,電気学会リニアドライブ研究会資料,LD-94-76(199	4)
7)	福本,外:磁気浮上列車超電導磁石の渦電流解析,電気学会リニアドライブ研究会資料,LD-90-79(1990)	
8)	亀岡,外:リニアモーターカーにおける耐電磁応力技術,電気学会リニアドライブ研究会資料,LD-91-102(1991)	
9)	坂本、外:集中定数モデルを用いた電磁構造連成挙動解析、日本機械学会論文集、Vol.60、No.577-C(1994)	