# 山梨リニア実験線用超電導磁石および地上コイル

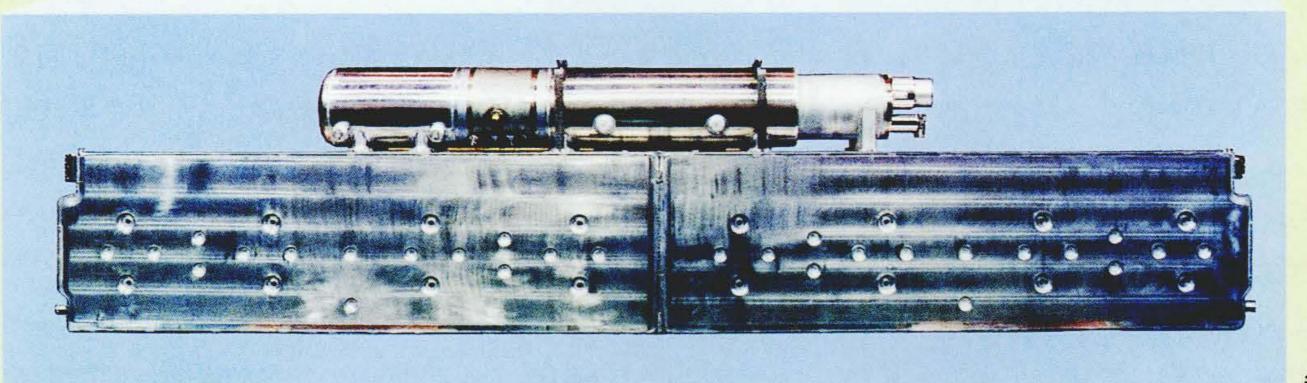
Superconducting Magnet and Ground Coils for Yamanashi Maglev Test Line

Hiroyuki Watanabe Shizuo Tsujimoto 坂本 茂\*\*\*

古川陽子\*\*

Yôko Furukawa Shigeru Sakamoto





超電導磁石

# 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 ングや摩擦による発熱を発生させ、また渦電流はジュー

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。

# 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

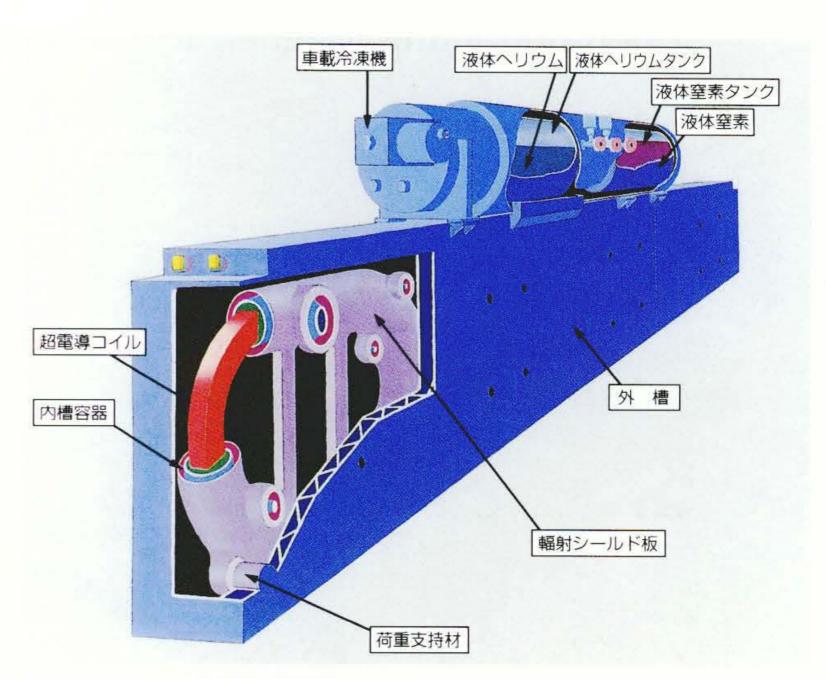
#### 2.1 SCMの概要および要求性能

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。

項	E	仕 様	
SCM寸法〔長ā	5,400×1,175		
質 量	I,400 kg		
走行時模擬最大	8 W以下		
SCM当たりの語	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	



#### 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。

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。

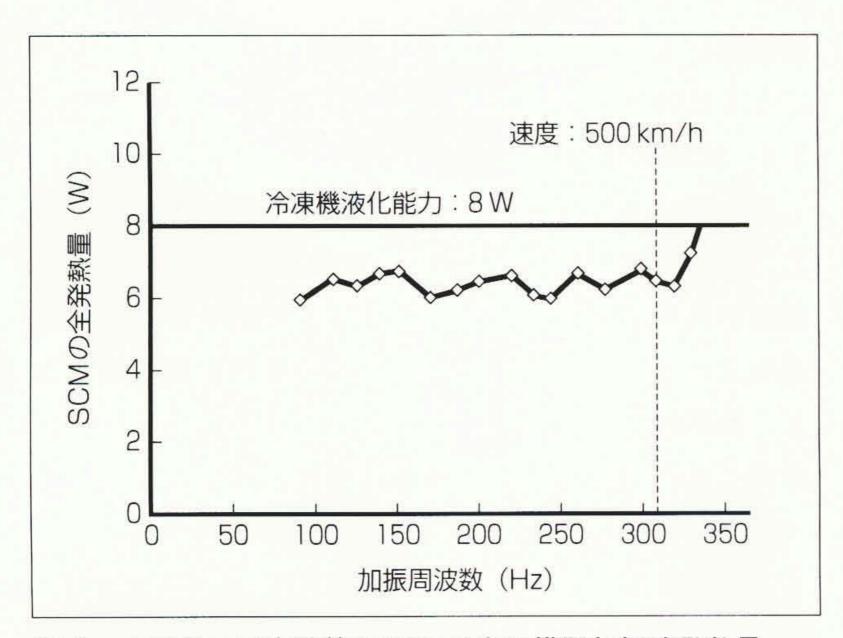
#### 2.2 走行時のHe消費量の低減

# 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)3~5)。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



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 8 Wに対し、500 km/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。 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3)。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

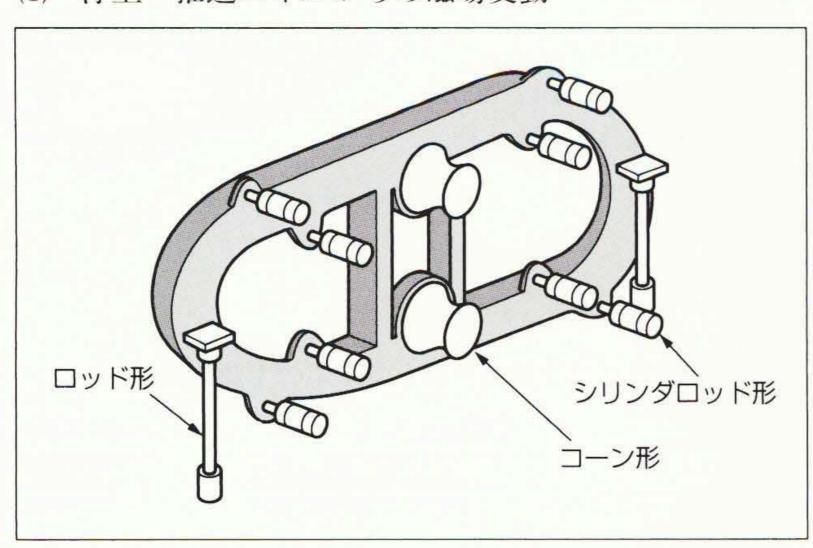


図3 荷重支持材の配置

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。

- 超電導磁石の作る強磁場中での構造物の相対振動
- 浮上走行時の車両動揺6)

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7)。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7),8)。

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 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>。

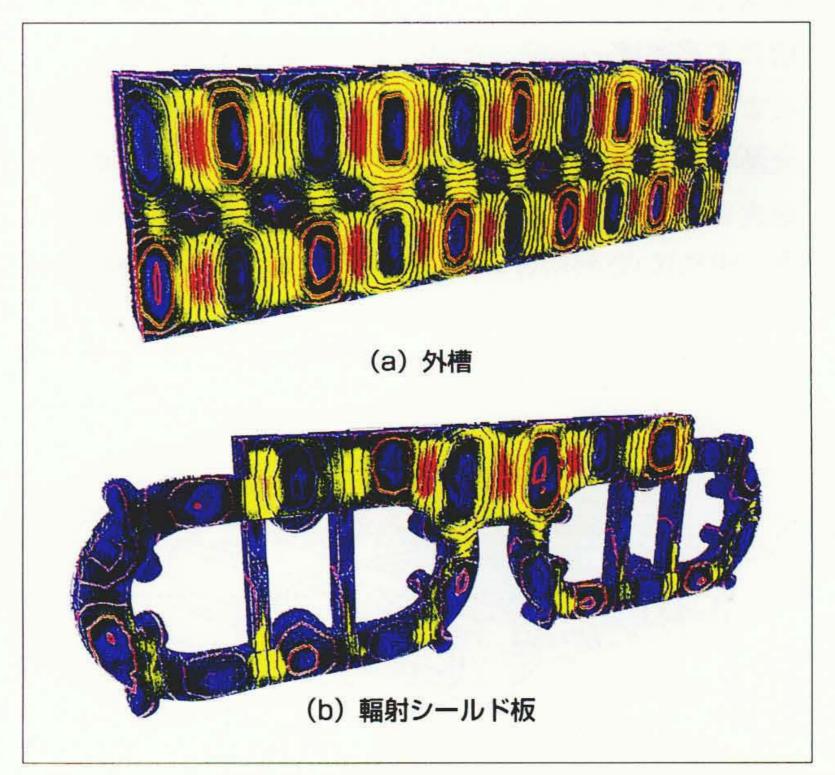


図 4 浮上コイル磁場変動時の渦電流分布解析例(走行速度 500 km/hの場合)

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ュータ "HITAC/S3800"を利用し、1台車システム(台車枠とSCM 2 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

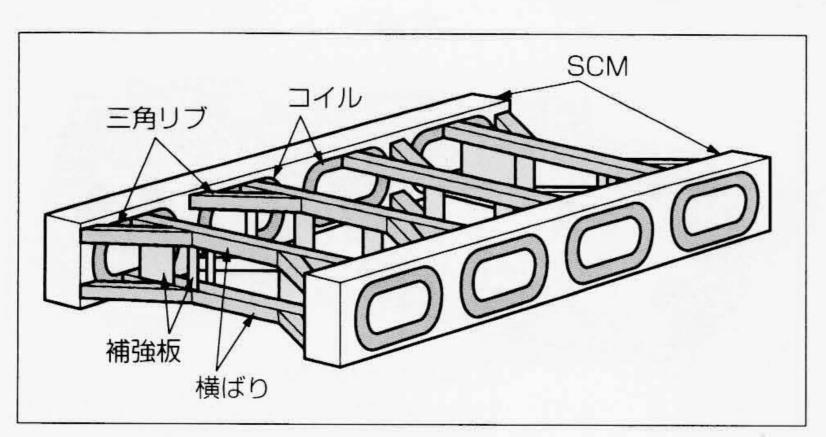


図 5 弾性支持台車枠の最適構造

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-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。

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°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)	0.35×0.34(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		

注:略語説明 SMC(Sheet Molding Compound)

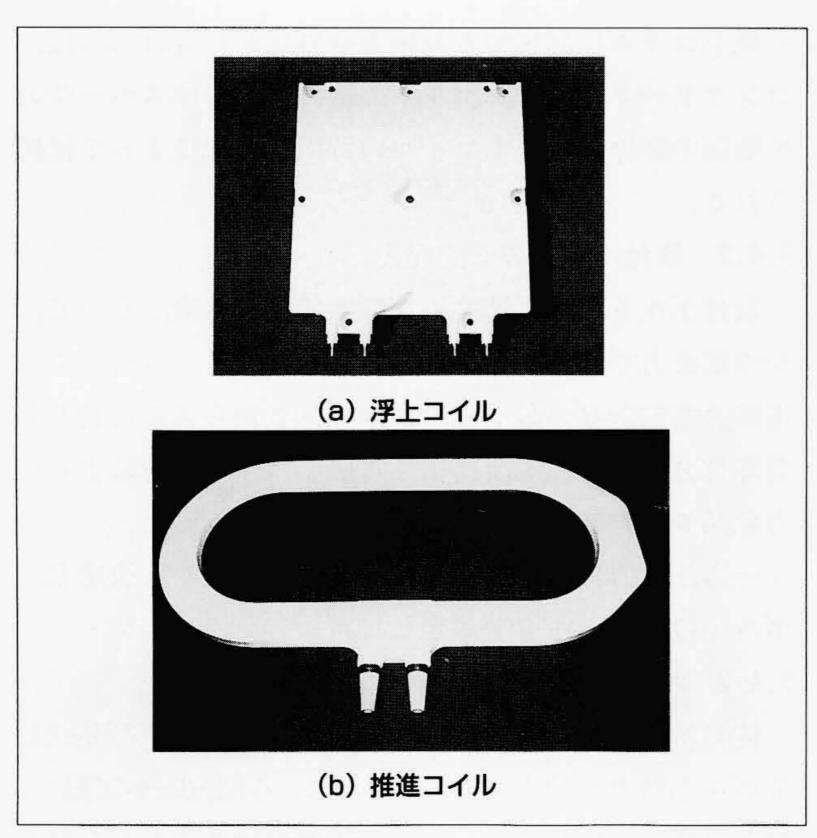


図 6 浮上コイルと推進コイル

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。

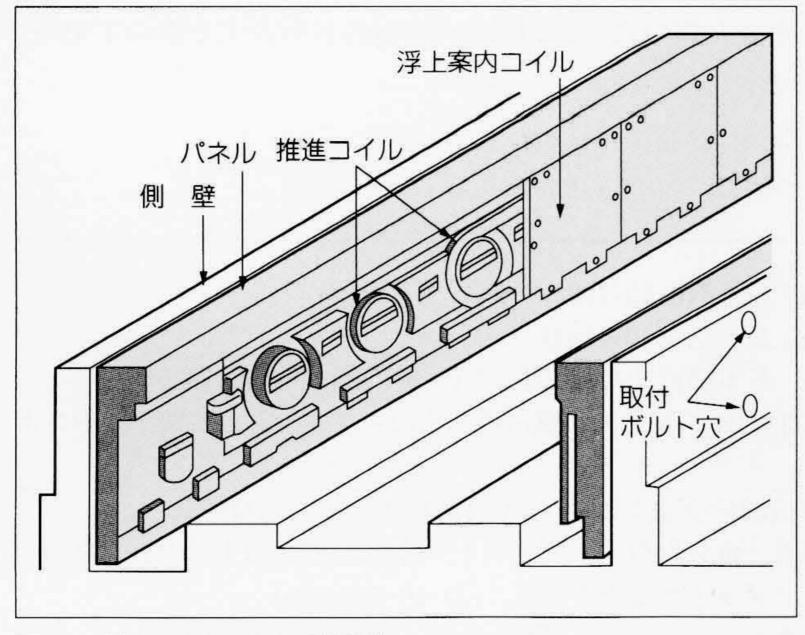


図7 地上コイルの取付構造

推進コイルは - 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。

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。

# (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

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

# 評価方法

#### 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	項目		エポキシ樹脂	SMC	備考
1	初期	J期強さ(N/m²)		139.4×10 <sup>6</sup>	171.6×10 <sup>6</sup>	
2	クリープ強さ (N/m²)		強さ	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>	1.44×10 <sup>6</sup> 回	
4	弹性率(N/m²)		$16,103\times10^{6}$	$10,562 \times 10^{6}$	<del></del>	
5	強。吸過	高温	低下率	0.75	0.63, 0.5	平均, 変動応力
6		33化率	0.9	0.9	_	
7	111		が が が が が が が が り で り り り り り り り り り り	0.8	0.7	_
8	率	応力緩和率		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/m²)		初期強度	$66.9 \times 10^{6}$	68.6×10 <sup>6</sup>	No.I×No.9
ΪΪ			クリープ 強度	48.1×10 <sup>6</sup>	54.1×10 <sup>6</sup>	No.2×No.9
12	変動応力限度 (N/m²)		15.3×10 <sup>6</sup>	15.0×10 <sup>6</sup>	No.3×No.9	

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。

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。

# 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) 青山,外:超電導磁気浮上列車用FRP製荷重支持体の開発,日本機械学会論文集(A), Vol.62, No.598-A(1996)
- 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(1994)
- 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)