

2303 超電導磁気浮上式鉄道実用型 P L G コイルの開発

Development of the Ground Coil for Practical Use by the Combined Propulsion, Levitation and Guidance System for the Superconducting Maglev

正 [電] ○饗庭 雅之 (鉄道総研) 正 [電] 村井 敏昭 (鉄道総研)

正 [電] 鈴木 正夫 (鉄道総研) 高橋 紀之 (鉄道総研)

Masayuki AIBA, Toshiaki MURAI, Masao SUZUKI, Noriyuki TAKAHASHI,
Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City

Ground coils used in the superconducting maglev system are required to reduce their cost because of a huge number of them. Therefore, we developed a ground coil for practical use by the combined Propulsion, Levitation and Guidance system (PLG coil) to reduce the cost of construction. Firstly, we calculated characteristics of a PLG coil whose upper and lower unit coils were asymmetric. Next, we performed its conceptual design. After that, we made some PLG coils on trial, and examined them to confirm various abilities. As a result, we confirmed that their initial insulation strength were satisfactory.

Keyword: maglev, ground coil, cost, PLG coil, asymmetric, insulation

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道の地上コイルは、その敷設数が莫大なものとなるため、コスト低減が求められる一方、長期間の屋外使用が前提となるために、施工性の向上ならびに高い信頼性が求められている。そこで、地上コイル数量削減による建設コスト低減策として、1つの地上コイルで、推進機能、浮上機能、案内機能の3機能を兼用するPLG方式 (combined Propulsion, Levitation and Guidance system)¹⁾を対象に、構成の簡素化を狙った120°ピッチで高耐圧の実用型PLGコイルの開発を行った。

まず、使用条件が異なる低速区間用と高速区間用に分けたPLGコイルについての最適設計を行い、その特性に関する詳細検討を行った。さらに、上下単位コイルを非対称形状として超電導磁石の左右振動低減を狙った、高速区間用PLGコイル諸元について再検討し、その特性を計算した。次に、実機コイルを試作する前段として、上記で検討したPLGコイルの基本諸元をもとにした、コイル形状、口出し構造、取付構造等の基本構成について、解析計算による概念設計を行った。さらに、PLGコイルへの適用を前提に、現地での作業性を考慮した小型かつ高信頼性化を目指したコイル間接続部を試作し、各種試験により良好な特性を確認した。

そして、これらの検討結果および試験結果を踏まえて、PLGコイルを試作して各種性能確認試験を実施し、十分に満足する初期絶縁強度等を有していることを確認した。

本稿ではこれらについて述べる。

2. PLGコイルの速度別設計検討

リニアモータの地上一次方式は、使用条件が異なる区間毎に地上コイル設計を変更することが可能であり、コスト低減および最適性能を両立させるためには、使用条件、特

に使用速度毎の設計が有効である。低速時のコイル温度上昇を考慮すると、同一仕様での高速区間と低速区間の両立は困難であると考えられる。

そこで、120°ピッチ配置のPLGコイルについて、速度毎の最適設計を最適化手法²⁾を用いて行い、その特性に関する詳細検討を行った。その際、高速区間用は誘導集電を考慮して単位コイルを上下対称形状として設計を、低速区間用は浮上開始速度の低速化を考慮して単位コイルを上下非対称形状とするとともに、コイル温度上昇を考慮して導体量を従来型浮上コイルの1.4倍として設計を行った。そして、それぞれの特性を計算により明らかにし、速度別コイル設計の有効性を確認することができた。最適設計諸元の検討結果を表1に示す。

Table 1. Specification of optimum design

	高速区間用 (250km/h~)		低速区間用 (~250km/h)
	推進系 特性重視	浮上系 特性重視	
単位 コイル 寸法	790×330mm	760×330mm	上コイル 755×260mm 下コイル 755×330mm
導体 断面	70×50mm	100×38mm	105×55mm

3. 高速区間用PLGコイル諸元の再検討

3.1 再検討の考え方

PLGコイルについて、超電導磁石の左右振動低減が要求されたため、その解決策として、高速区間用についても、単位コイルを上下非対称化した場合の諸元を再検討するこ

とした。再検討にあたっては、以下の点に留意した。

- (1)推進系特性については従来の推進コイルと同等の特性を確保する。
- (2)必要な浮上系特性、推進系特性を確保しつつ、コイルの温度上昇特性を可能な限り改善する。

3.2 検討条件

最適化手法を用いてPLGコイルの諸元を検討した。その際、幾何学的制約条件（コイル配置、導体量等）、性能上の制約条件（電磁力特性等）、および目的関数（揚抗比最大化、コイル発熱量最小化等）を考え、最適なコイル諸元およびその特性を検討した。検討にあたっては、実用を想定したシステム条件により行った。なお、PLGコイルについては表2に示す条件にて検討を行った。

Table 2. Condition of examination

ピッチ	0.9m (120° ピッチ)
導体量	従来型浮上コイル (60° ピッチ) と同等
導体占積率	80%
接続ケーブル	60mm ²
導体断面積	

3.3 検討諸元におけるコイルの特性

前項の検討により最適設計された高速区間用PLGコイルについて、その特性を計算した。

(1)浮上・案内特性

浮上・案内特性を従来型浮上案内コイルと比較したものを図1～3に示す。

図より、以下のことが明らかとなった。

- ①最大浮上力、揚抗比が低速域にて大幅に増加する。
- ②等価ばねが増加するため、浮上開始速度を低減できる。

(2)推進特性

推進特性を計算した結果、従来型推進コイルと比較して以下のことが明らかとなった。

- ①効率が2%程度増加する。
- ②力率が低下しているため、電源容量はほぼ同等である。

(3)超電導磁石への加振力

超電導磁石の左右振動の主要因となる地上コイル電磁力によるヨーモーメント3次成分について、従来型浮上案内コイルを120°ピッチとした場合、および従来型推進コイルと比較したものを図4に示す。

図より、以下のことが明らかとなった。

- ①従来型浮上コイルを120°ピッチとした場合に対して30%程度減少する。
- ②従来型推進コイルとは同等である。

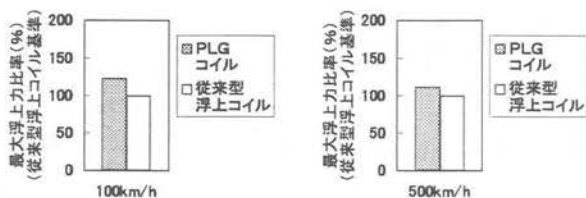


Fig.1 Maximum levitation force

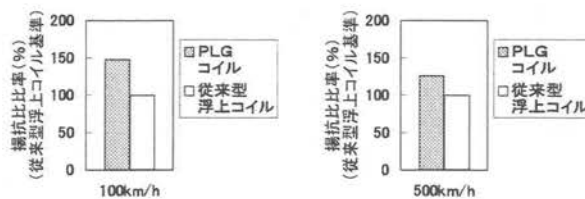


Fig.2 Lift-to-drag ratio

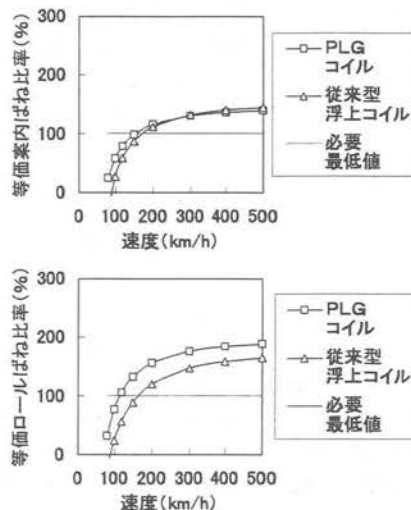


Fig.3 Equivalent magnetic spring



Fig.4 Vibrating force of superconducting coil

4. PLGコイルの概念設計

4.1 構造解析

最適設計された高速区間用PLGコイルの諸元を基に、実使用の条件により、熱応力解析、電磁力による応力解析、取付段差による応力解析を行った。解析対象モデルの形状・寸法を図5に、一例として電磁力による応力解析の結果を図6に示す。

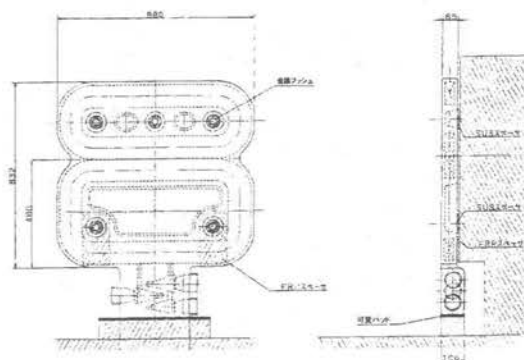


Fig.5 Shape and size of analysis model

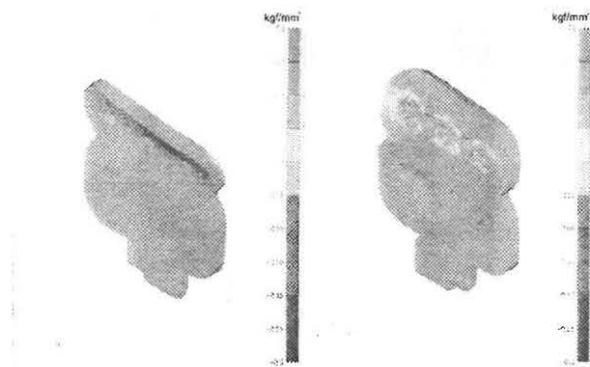


Fig.6 Result of stress analysis by electromagnetic force

各種応力解析結果を整理し、修正グッドマン線図にて評価した結果を図7に示す。

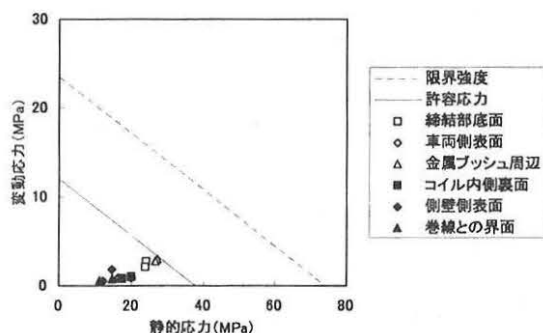


Fig.7 Revised Goodman diagram

図より、応力状態が最も厳しい金属ブッシュ周辺においても、30年の使用条件を考慮した限界強度ばかりでなく、安全率を考慮した許容応力内に存在していることを確認した。

4.2 電界解析

コイル断面、およびコイル口出し端子部について、対地電圧 19.1kV（公称電圧 33kV の $\sqrt{3}$ 分の1）の時の電界解析を行った。その結果、コイル断面については最適な素線角丸め半径および対地絶縁寸法を明らかにした。また、口出し端子部については絶縁強度上問題がないことを確認した。

5. コイル間接続部の部分モデルの試作試験

5.1 接続部の開発経緯

従来型推進コイルの接続部は、コスト、作業性等を考慮し、L型接続部を採用している。L型接続部の外形を図8に示す。また、その特徴は以下の通りである。

- (1) 小型で部品点数が少なく、低コストかつ作業性に優れる。
- (2) コイル側とケーブル側の導体接触にマルチコンタクトを採用し、ケーブル側コネクタピンの固定がねじ構造となっている。
- (3) ケーブル側にEPゴムによるアウターコーンを構成し、面圧をゴムの弾性に頼る代わりに比較的沿面距離が長い。

PLGコイルにおいては、推進系配線に加えて案内系配線が必要となるため、現地での作業性を十分に考慮する必要がある。そこで、以下の点を狙いとして開発を行うこと

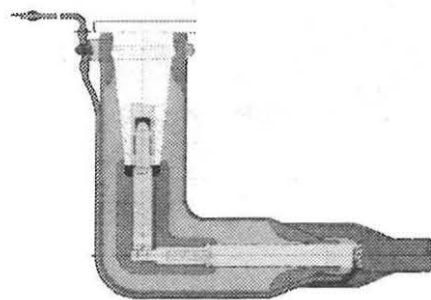


Fig.8 L shape connector

とした。

- (1) 耐振動性を向上するために直線型接続部とし、ケーブル側コネクタピンの固定を圧着接続とする。
- (2) 絶縁信頼性を改善するために、ケーブル側絶縁体にゴムによるインナーコーンを構成し、締結部のバネ構造により沿面距離が短くても一定面圧を確保できる構造とする。
- (3) 現地作業を考慮し、接続部長さ、外径を極力小型化する。

5.2 仕様

接続部の使用条件を表3に、使用条件に基づく接続部の仕様を表4に、外形を図9に示す。

Table.3 Condition for use

使用環境	環境温度	-30～50℃
	環境湿度	最高 100%，結露あり
負荷条件	浸水	一時的浸水あり
	公称電圧	33kV
	累積課電時間	10,000 時間程度(30 年使用相当)

Table.4 Specification of connector

項目		仕様
ケーブル部	導体断面積	60mm ²
	導体	電気用軟銅線
	半導電層	半導電性混和物
	絶縁体	架橋ポリエチレン
	遮蔽	銅テープ
	シース	塩化ビニル混和物
接続部	構造種別	インナーコーン型
	形状	直線型
	接続部固定方法	袋ナット締め
	導体接続方法	プラグイン接触子
	プレモールド絶縁体材質	シリコンゴム

5.3 試験結果

前項の仕様の接続部を試作し、部分放電特性試験、商用周波絶縁破壊試験、雷インパルス絶縁破壊試験、気密試験を行った。その結果、良好な絶縁特性、高い絶縁強度、ならびに気密性に問題のないことを確認した。

さらに、実使用時の長期使用を想定した耐久性を確認するために、長期課電振動試験および長期屋外課電試験をそれぞれ30日間行った。なお、課電振動試験については、60年使用相当の加振回数および30年使用相当の累積課電時間に相当する加速電圧により行った。また、長期屋外課電試験については、電気規格調査会標準規格に基づき、30年使用相当の累積課電時間に相当する加速電圧を負荷しながら、通電により8時間 on/16時間 off の1日1回のヒー

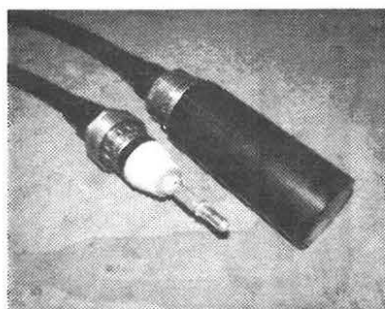


Fig.9 Outside shape of connector

トサイクルを加えながら行った。

各試験終了後に接続部の部分放電特性試験、商用周波電圧絶縁破壊試験、解体調査を行った結果、良好な特性、問題のない絶縁強度、ならびに接続部の絶縁体に異状がないことを確認することができ、十分に満足する電氣的、機械的、ならびに熱的耐久性を有していることを確認することができた。

6. PLGコイルの試作試験

6.1 基本諸元

使用条件を表 5 に、構造、形状、寸法を表 6 に、コイル外形を図 10 に示す。

Table.5 Condition for use

環境	温度	-30~50℃
	湿度	最高 100%，結露あり
	耐候性	全天候型
外力	電磁力	前後 17kN，左右 32kN， 上下 62kN
	繰り返し数	1.4×10^8 回程度
電圧	公称電圧	33kV
	累積課電時間	10,000 時間程度
通電	推進電流	390A
	通電時間	約 20 秒/300 秒 (250km/h)
	最高使用温度	80℃

Table.6 Structure, shape and size

単位 コイル	形状	矩形
	コイル中心間寸法	上 755mm×230mm 下 755mm×370mm
	導体断面寸法	約 100mm×約 40mm
	導体材質	電気用アルミニウム
コイル 本体	外形寸法 (概略)	880mm×1052mm
	上下コイル中心間隔	402mm
	絶縁種別	Y 種
	成形方法	エポキシ樹脂注型
	対地絶縁寸法	12mm (標準値)
	口出し端子数	3 (相間用 2，案内用 1)
	コイル固定方法	ボルト締結+上下支持
	締結部構成	金属ブッシュ (SUS)

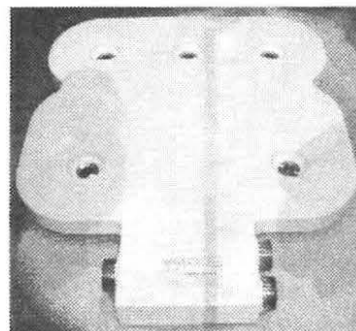


Fig.10 PLG coil

6.2 試験結果

部分放電特性測定、商用周波電圧絶縁破壊試験、雷インパルス電圧絶縁破壊試験 (端子間) 等の試験を実施した結果、以下の点において所期の性能を十分に有していることを確認した。

- (1) 公称電圧 33kV を前提とした各種電気絶縁性能試験に対して異状は見られず、初期性能を満足していた。
- (2) 商用周波破壊電圧および雷インパルス破壊電圧 (端子間) はいずれも耐電圧値の 1.5 倍以上であり、公称電圧 33kV の機器として満足できるレベルであった。

7. まとめ

本稿についてまとめると、以下の通りである。

- (1) PLG コイルについて速度別の最適設計を行い、その特性に関する詳細検討を行った。その結果、速度別コイル設計の有効性を確認した。
- (2) 上下単位コイルを非対称形状とした高速区間用 PLG コイル諸元について再検討し、その特性を計算した。その結果、従来型コイルの特性を損なうことなく超電導磁石の振動抑制が可能であることを確認した。
- (3) PLG コイルの基本諸元をもとにした、基本構成についての解析計算による概念設計を行った。その結果、実機コイルの設計製作に際する有用な知見を得た。
- (4) PLG コイルへの適用を前提としたコイル間接続部を試作し、各種試験により良好な特性を確認した。
- (5) 以上の検討結果を踏まえて PLG コイルを試作して各種性能確認試験を実施し、十分に満足する初期絶縁強度等を有していることを確認した。

以上より、PLG コイルの実用化への目処を立てることができた。

8. おわりに

今後は、PLG コイルの屋外長期課通電試験、繰り返し載荷試験等を実施し、実用化に向けた耐久性を確認していく予定である。

なお、この開発は国庫補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) FUJIMOTO Tsuyoshi, MURAI Toshiaki, SUZUKI Masao : Development of Propulsion, Levitation and Guidance Coil in EDS Maglev, Proceedings of the Maglev '2000 (The 16th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives), pp.275,277-279, 2000-6
- 2) 村井敏昭、岩松勝、吉岡博 : 超電導磁気浮上方式における 8 字型コイル諸元の最適化、電学論 D, 123, 1, pp.10-11, 2003-1