特集 超電導と応用技術

U.D.C. (621. 318. 3:538. 945):629. 439. 016. 56. 027. 34

# 浮上式鉄道用超電導磁石 Superconducting Magnet for "MAGLEV"

超電導誘導反発形浮上式鉄道の研究は、1960年代日本国有鉄道を中心として 始められ、1972年に走行実験を開始したML100以来、世界最高記録517 km/hを 達成したML500など、着実に成果を挙げてきたことはよく知られている。現在 この開発は財団法人鉄道総合技術研究所に引き継がれ、実用化への検討が進め られている。

浮上式鉄道用の超電導磁石は,磁石自身が走行するため,走行に伴う動的挙動の把握が重要な課題とされている。

そのため、超電導磁石の設計に当たっては、電磁気的特性とともに機械的特性の解析が要求される。

本稿では,最近のCAE(Computer Aided Engineering)による機械的特性の 解析技術について報告する。解析に使用する基礎データに実験により求めた値 を採用することによって,実際によく合う解析技術を確立することができた。

鈴木史男*	Fumio Suzuki
宮入公明**	Koumei Miyairi
後藤文彦***	Fumihiko Gotô

1 緒 言

超電導誘導反発方式による浮上式鉄道は,1960年代に日本 国有鉄道を中心として研究開発が始められた。

以来,1972年に走行実験を開始した実験車ML100から,宮 崎県日向市の浮上式鉄道宮崎実験線での実験車ML500の世界 最高記録517 km/hの達成,さらには有人走行車MLU001, MLU002の開発までに見られるように,着実に成果を挙げて きた。そして現在,財団法人鉄道総合技術研究所にその技術 開発が引き継がれ,浮上式鉄道実用化へ向けて最終的な検討 段階に入っている。

この間の経緯については、文献<sup>1)</sup>などに詳しいので省略する。 浮上式鉄道用超電導磁石は、超電導の応用分野では特殊な 例に当たり、超電導磁石自身が走行するところに特色がある。 当然、走行に伴って種々の動的荷重を受けるので、超電導 磁石の動的挙動の把握が重要になってくる。

このことから、浮上式鉄道用超電導磁石の設計では、電磁 気的特性とともに機械的特性の解析が要求される。

近年, CAE(Computer Aided Engineering)技術の進歩に より,構造物の静的あるいは動的機械的特性の解析が比較的 高い精度でできるようになってきたこととあいまって,浮上 式鉄道用超電導磁石の設計もCAEを駆使して行われるように くの報告がある<sup>2)</sup>ので、本稿では、超電導磁石の機械的特性解 析技術の概要と最近の成果について述べる。

### 2 課題と解析項目

浮上式鉄道用超電導磁石は,浮上走行するため軽量でなけ ればならない。したがって,最小の部材で最大の効果を発揮 するよう,構造の厳密な最適化を行うことが重要である。

具体的に各構成部品にこれを展開すると次のような項目に なる。

(1) 内槽構造の最適化

(2) コイル,内槽支持系の動的特性の最適化

(3) 外槽を含む全体系の動的特性の最適化

これらの最適化のために以下のような解析技術が必要である。

(1) コイルの応力, ひずみ解析

(2) 内槽の応力, ひずみ解析

(3) 荷重支持材の応力, ばね定数, 熱侵入解析

(4) コイル、内槽支持系の固有値および動応答解析

(5) 超電導磁石全体の固有値および動応答解析

これらの解析は, FEM (Finite Element Method:有限要素 は) た ナ (た い カ ナ い ラ く) い ス テ パ に ト い - 最 近 け 逆 主 の 画

628 日立評論 VOL. 71 No. 7 (1989-7)

もっとも重要なことは解析モデルが適正であることと,基礎 的なデータが実際に合致していることである。

以下に,具体的な解析例を示す。

## 3 解析例と結果

#### 3.1 コイルの等価剛性

超電導磁石の機械的挙動を解析するとき,もっとも基本と なるコイルの等価剛性(弾性率,ポアソン比など)は従来必ず しも明確でなかった。

しかし、コイルの応力解析にはこの基本特性の把握が不可 欠である。そこで、コイルの断面モデルによるシミュレーションを行った。その一例を図1に示す。

導体および絶縁物の実寸法と材料定数を与え,外力による 変形を計算した。図1に対応する実際のコイル断面写真を図2 に示す。

一方,実コイルから切り出した試験片を用い,この計算に

対応する実験も行い計算との突き合わせを行った。
計算値と実験値は良い一致を示し,等価弾性率は,
導体方向……74 GPa{7,500 kgf/mm<sup>2</sup>}
導体垂直方向(縦)……17 GPa{1,700 kgf/mm<sup>2</sup>}
導体垂直方向(横)……22 GPa{2,200 kgf/mm<sup>2</sup>}
であった。以下の解析にこの値を使用している。
また,レーストラック形コイルの機械的特性を把握するた

め、図3のモデルによる解析も行った。

この解析に対応する実験も行い比較したところ良い一致を示した。実験の概要を図4に示す。

3.2 内槽構造の最適化

内槽の最適化の一例として, 各部の板厚とコイルおよび内 槽の変形について解析した例を以下に述べる。

内槽の各部分を内周,外周,側面などの6個のブロックに





注:略語説明など p(等分布荷重), ……変形前, ——変形後

図 I コイル断面解析モデル 等分布荷重を与えたときの変形を計 算し、等価弾性率およびポアソン比を求める。



図2 コイルの断面写真 導体を呈ピッチずらして積み重ね、コイルのせん断強さを増している。





50



図3 レーストラック形コイル解析モデル レーストラック形コイルの面外曲げ荷重に対する変形を計算する。

#### 浮上式鉄道用超電導磁石 629

mm

51

分け,それぞれの板厚を変化させた内槽とコイルを組み合わ せた18ケースのモデルを作製した。このとき質量はどのケー スも約130kgとなるように統一した。

コイルに定格電流を流すときの電磁力によるコイルおよび 内槽の変形を計算し、コイルと内槽との間の接触点のずれ量 をパラメータとして、ずれのもっとも少ない構造を選び出し た。

これは、接触点の摩擦による発熱を最小にするための最適 化である。

これで選び出されたモデルを図5および図6に示す。

この結果,コイルと内槽とのずれ量は25 µmとなった。従来 値は約45 µmであったので,ずれ量を55%に低減することがで きた。

3.3 荷重支持材

コイル,内槽支持系の動解析のために荷重支持材の特性を 把握する必要がある。

図7に示す荷重支持材の解析モデルと、実際の荷重支持材 での実験値の対比を行った。

解析モデルでは、FRP(繊維強化プラスチック)部分の材料



特性を異方性として計算することが難しいので、等価的に弾

実験値との対比によれば、FRPの弾性率を材料の値の約0.5

性率の補正を行うことにした。

図4 超電導コイルの剛性試験 解析モデルと実験値がよく一致することを確認した。



#### 図5 内槽の応力分布図 対称性を利用して全体の量をモデル化して解析する。

630 日立評論 VOL.71 No.7(1989-7)





図 6 コイルの応力分布図 図 5 と同様に全体の るモデル化した。スペーサを断続的に配置したので、スペーサ部に力が集中している。



52





#### 荷重支持材をばね要素としてそれぞれ 図9 コイルと内槽支持系の振動解析モデル の支持点に付加し,内槽の補強効果を含めた解析を行う。

632 日立評論 VOL.71 No.7(1989-7)



ドで振動しているようすがわかる。

#### 4 結 言

浮上式鉄道用超電導磁石の機械的特性解析と最近の成果に ついて述べた。要約すると次のようになる。

コイルの等価剛性は解析モデルにより計算することがで (1)

き,実験値と一致する。

(2)内槽構造は,変形または応力をパラメータとして最適化 することができる。

(3) 荷重支持材の解析結果は, FRPの弾性率に補正係数を導 入することによって実験値と一致する。補正係数は0.5である。 (4) コイル,内槽支持系あるいは超電導磁石全体の固有振動

数解析についての最適化は今後の課題である。

最後に,解析にご協力いただいた財団法人鉄道総合技術研 究所浮上式研究室の関係各位に対し深く感謝する次第である。

#### 参考文献

- 特集:リニアモーターカー・マグレブの世界:RRR(Railway 1) Research Review), Vol.44, No.11(1987)
- 例えば、地蔵、外:浮上式鉄道宮崎実験線―新実験車MLU002 2)用超電導磁石:電気学会リニアドライブ研究会資料LD-88-8 (1988)

