

学術論文

簡略地上コイル対応超電導磁石の各種試験結果及び更なる改善

Test Results and Further Improvement of a Superconducting Magnet for Simplified Ground Coils

岩松 勝^{*1} (正員), 小方 正文^{*1}, 浅原 哲郎^{*2}, 戸来 年樹^{*2}

Masaru IWAMATSU (Mem.), Masafumi OGATA, Etsuro ASAHARA, Toshiki HERAI

In developing a superconducting Maglev system, it is important to reduce the cost for commercialization. Simplifying the structure of ground coils is effective for this purpose, but the harmonic magnetic fields caused by ground coils increase. The on-board superconducting magnets vibrate due to these harmonic fields to give rise to large heat loss. We studied a superconducting magnet for simplified ground coils. This paper reports the results of vibration and running tests and further improvement of the superconducting magnet.

Keywords: superconducting magnet, simplified ground coil, electromagnetic vibration, mechanical vibration.

1 はじめに

山梨実験線にて走行試験が進められている超電導方式磁気浮上式鉄道は、2003年12月に最高速度が581 km/hと従来の記録を更新するなど、順調な開発経緯をたどっている。2000年3月に超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会(主催:旧運輸省)にて評価を受け、課題として掲げられた3項目の技術開発について、精力的に検討を進められてきた[1]。その結果、2005年3月に開催された評価委員会において「実用化の基盤技術が確立した」との評価を受けたところである[2]。

前述の3項目の一つであるコスト低減技術開発のうち、地上のガイドウェイに配置される推進用並びに浮上・案内用コイルは全線に渡って敷設されるため、その建設コスト及び保守コストをいかに低減できるかが課題となっている。その方策の一つとして、ガイドウェイに敷設する地上コイルを簡略化することが考えられている。

一方、車上に搭載された超電導磁石は、地上コイルからの変動磁場により電磁気的な外乱を受ける。その結果として、超電導磁石は振動し、ひいては電磁気的及び機械的原因により発熱するため、地上コイルの選択は、超電導磁石の信頼性・耐久性及び車載冷凍機の負荷特性などに大きな影響を及ぼす。特に、地上コイルを簡略化した場合には、超電導磁石が受ける外乱が、

現状の地上コイル構成の場合と比較して大きくなるため、超電導磁石の性能向上が望まれる。

そこで、今回、ガイドウェイに敷設する地上コイルを簡略化して低コストを目指すために、その簡略化した地上コイルに対応できる性能をもった超電導磁石「簡略地上コイル対応超電導磁石」を開発した。

本論文では、簡略地上コイル対応超電導磁石の性能を確認するために実施した加振試験及び走行試験の結果を報告する。また、振動低減のための更なる提案として、構造解析により、台枠構造の違いによって振動特性の向上を図る可能性を見出したことから、あわせて報告する。

2 簡略地上コイル対応超電導磁石の開発の課題と効果

Fig. 1に示すように、現在、山梨実験線に敷設中の浮上コイルは電気角60度で配置されており、そのコイル形状から、俗称「田の字浮上コイル」と呼ばれている。それに対し、電気角を120度として個数を半分に簡略できる浮上コイルは、その形状から俗称「日の字浮上コイル」と呼ばれている。Fig. 2に、従来までに整理してきた簡略地上コイル対応超電導磁石の開発に向けた課題とその効果について示す。対策としては、以下の提案を行った[3]。

【超電導磁石側の対策】

- ①外槽軌道側板厚の増加
- ②上下荷重支持体剛性の強化
- ③超電導コイルの発生歪の均一化

連絡先: 岩松 勝, 〒185-8540 国分寺市光町2-8-38, 鉄道総合技術研究所低温システム研究室,
e-mail: iwamatsu@rtri.or.jp

^{*1}鉄道総合技術研究所 ^{*2}東海旅客鉄道(株)

【地上コイル側の対策】

④浮上コイルの上下非対称化

今回の試験の目的は、Fig. 2 に示した効果の確認試験と位置付けられる。具体的には、Fig. 3 に示すように、既存の超電導磁石に対して①外槽軌道側板厚の増加及び②上下荷重支持体の剛性強化 の2点の改良を加えた簡略地上コイル対応超電導磁石（以下、改良型超電導磁石と呼ぶ）について加振試験及び走行試験を実施し、振動加速度並びに蒸発量増分が予測の範囲内であったか否かを検証した。

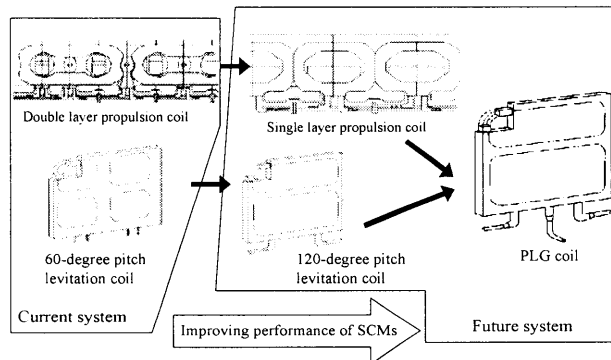


Fig. 1 Structures of ground coils.

3 試験及び解析方法

3.1 加振試験

今回の加振試験は、当研究所が有している電磁加振試験装置を用いて実施した[4]。試験装置を Fig. 4 に示す。この試験装置は、浮上式鉄道車両搭載の超電導磁石が走行する場合に受ける振動状態を停止状態の超電導磁石に加えることができる。超電導磁石の走行時の振動を模擬するため、走行速度に対応した周波数の3相交流を加振用浮上コイルに通電することによって、浮上式鉄道車両が浮上を開始する速度（約 100 km/h）から最高速度の1割増し（550 km/h 相当）程度まで、連続的に試験することができる。なお、超電導磁石が受ける振動に着目していることから、走行中の定常力である浮上力は模擬していない。今回は、日の字浮上コイルを模擬した試験を実施し、加振周波数は最大 200 Hz まで設定した。なお、日の字浮上コイル模擬試験の場合には、500 km/h 相当の加振周波数が 154 Hz となる。

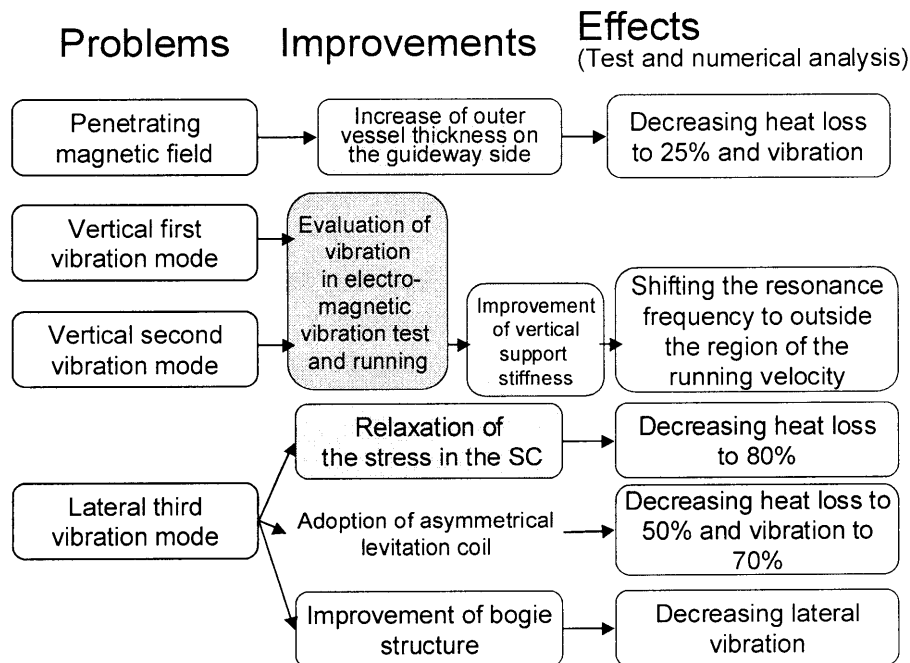


Fig. 2 Several improvements and effects for superconducting magnets for simplified ground coils.

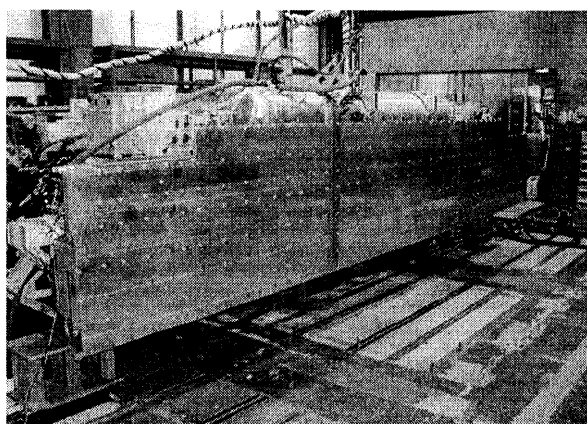


Fig. 3 Structure of the improved SCM.

3.2 走行試験

走行試験は、山梨実験線のガイドウェイに日の字浮上コイルを仮設して実施した。仮設した区間を試験条件として設定した速度で通過した際に超電導磁石に発生する振動加速度を測定し、評価した。今回の試験においては、特に上下方向の振動加速度に着目するために、超電導磁石の下面にもセンサーを取り付けて計測を行った。なお、改良した超電導磁石は1台であり、反対側に取り付けられている既存の超電導磁石にも比較のために必要な箇所にセンサーを取り付けた。

また、今回仮設した浮上コイルを Fig. 5 に示すが、上下非対称タイプとした。Fig. 2 に示すとおり、日の字浮上コイルを上下非対称化することにより、超電導磁石に対する左右及びヨーイング加振力を約 70% に低減でき、左右 3 次曲げ振動に伴う蒸発量増分を約 50% に低減できる見通しを得ている[5]。

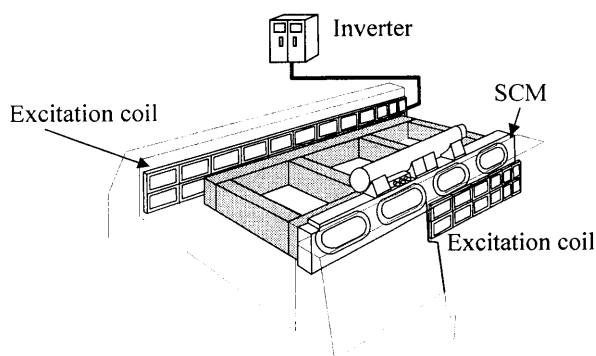


Fig. 4 Electromagnetic vibration test apparatus.

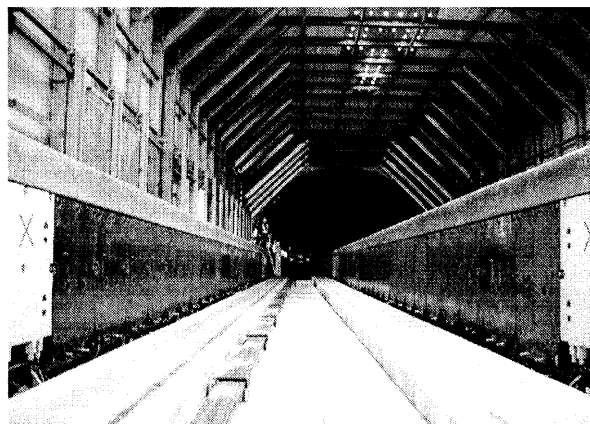


Fig. 5 120-degree pitch levitation coils.

仮設にあたっては、超電導磁石の振動特性を把握するのに必要な長さを確保した。試験最高速度は 500 km/h であった。

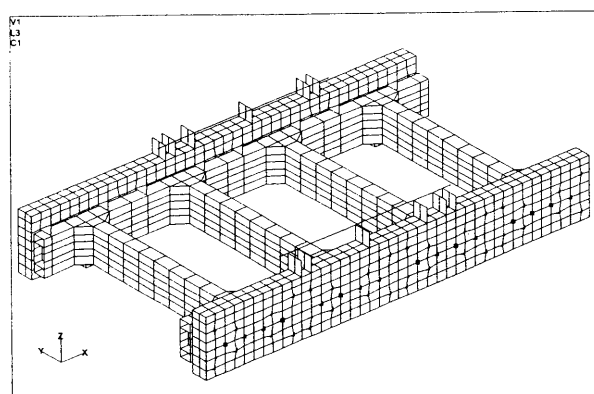
3.3 構造解析

Fig. 2 に示すように、左右 3 次曲げ振動を改善する方法として台枠構造の改善が有効であると指摘されている。今回、その効果を定量的に把握する目的で、案の一つとして、台枠の横梁を 4 本から 5 本に変更し、台枠の左右剛性を向上させた場合の構造解析を行った。横梁を 5 本とすることは、左右振動低減に効果的であるが実際の機器配置等で困難な要素が大きいことは、山梨実験線の台車構造の基本仕様を検討する段階で議論されていた。今回は、簡略地上コイル対策として改めて検討を行なった。解析モデルを Fig. 6 に示す。試験体系と同様に、超電導磁石表面に対して平行な方向を x 方向、超電導磁石表面に対して垂直な方向を y 方向、上下方向を z 方向として解析した。4 本梁が超電導磁石内部の 4 個の超電導コイルの中心部を固定しているのと比較して、5 本梁では超電導コイルの端部を固定していることとなる。最初に固有値解析を実施し、その後調和応答解析を行って振動特性を把握した。

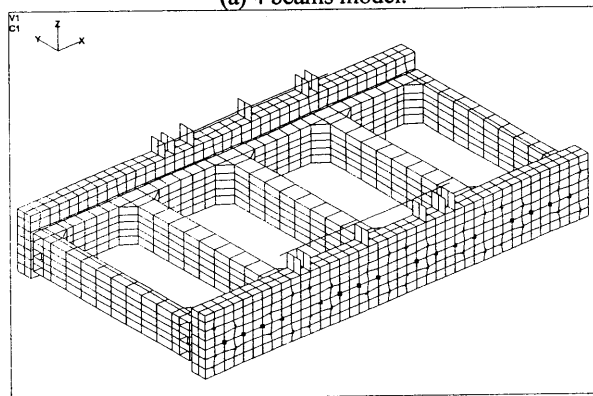
4 試験結果

4.1 電磁加振試験結果

前述した装置を用いて、日の字浮上コイル模擬電磁加振試験を実施した。なお、電磁加振試験では、上下対称型浮上コイルを模擬した浮上コイルを使用している[5]。



(a) 4 beams model.



(b) 5 beams model.

Fig. 6 SCM models.

簡略地上コイル対応超電導磁石では、従来タイプの浮上コイルと比較して過大な日字浮上コイルの高調波磁場に起因した上下方向の振動を抑制することが重要であるため、その特性に着目した。

今回の加振試験における上下方向の平均振動加速度の周波数特性を Fig. 7 に示す。なお、振幅は改良前の上下1次曲げ振動の振幅により規格化した。改良型超電導磁石の振動は、従来型超電導磁石と比較して、1次曲げ振動、2次曲げ振動とも10 Hz 程度周波数が上方へシフトしていることがわかる。また、振幅も大きく減少していることがわかる。①外槽軌道側板厚の増加、②上下荷重支持体剛性の強化の効果が予測通りであったことを裏付ける結果となった。

次に、蒸発量増分の周波数依存性について Fig. 8 に示す。なお、蒸発量増分は、車載冷凍機の冷凍余裕分にて規格化した。改良前の超電導磁石で問題となっていた透過磁界に起因した低周波数領域での発熱は、外槽軌道側板厚の増加の効果により、大きく減少していることがわかる。また、上下荷重支持体の剛性強化により上下2次曲げ振動に起因したピークは上方にシフ

トし、500 km/h までの速度領域内において、冷凍余裕分を超える発熱は認められなかった。

今回の試験条件として上下対称型浮上コイルを模擬した試験であったこと、また、超電導磁石側の発熱低減の対策としての内槽容器の歪みの均一化も今回は実施していないことから、Fig. 2 に示したすべての改良を施した際の蒸発量増分はさらに低減すると考えている。

4.2 走行試験結果

走行試験においては、振動加速度に着目して測定を実施した。

Fig. 9 に示したセンサー位置(丸印)での上下振動加速度の周波数特性を Fig. 10 に示す。Fig. 9 の図中の矢印は、進行方向を示している。したがって、比較した箇所は台車で見ると進行方向後方となる。

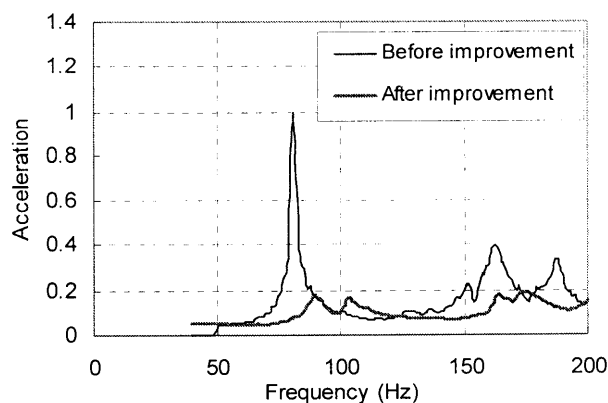


Fig. 7 Vibration response in electromagnetic vibration test.

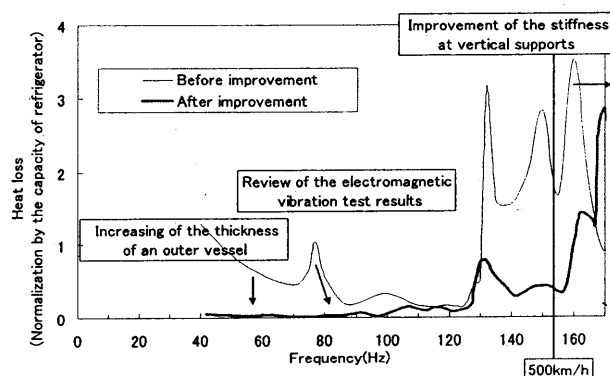


Fig. 8 Heat loss of superconducting magnets for simplified ground coils.

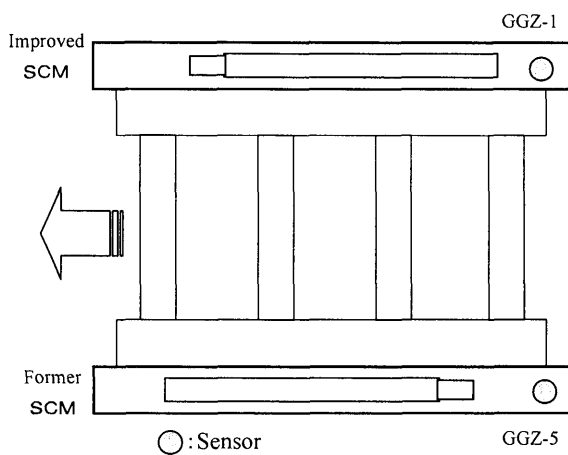


Fig. 9 Measurement points.

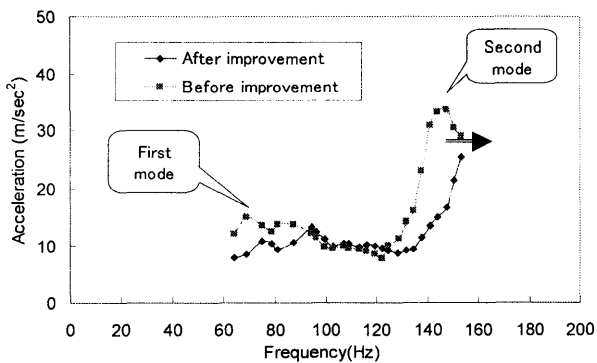


Fig. 10 Vibration response in running test.

Fig. 10 より、電磁加振試験と同様に、改良型超電導磁石において上下2次曲げ振動が 500 km/h (周波数としては 154 Hz) の走行領域外へシフトしていることがわかる。また、大きさも 40 m/s^2 以下と、問題のないレベルであることがわかった。

5 解析結果

計算は、Fig. 6 で示した解析モデルにより固有値解析を行った後、調和応答解析を行なった。調和応答解析での荷重条件は、日の字浮上コイル配置時の走行中を模擬し、z 方向及び y 方向成分を明確にするために2種類の荷重条件で解析した。

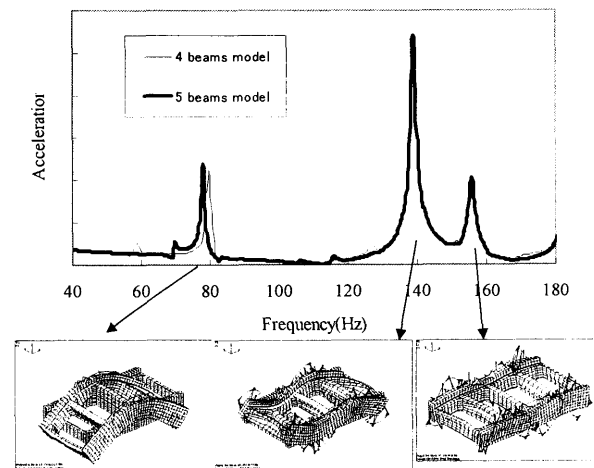
①Fz+My 加振 ……4 個ある超電導コイルの外槽位置に上下方向の振動に関係する z 方向の力及び y 方向のモーメントを印加。

②Fy+Mz 加振 ……4 個ある超電導コイルの外槽位置に左右方向の振動に関係する y 方向の力及び z 方向

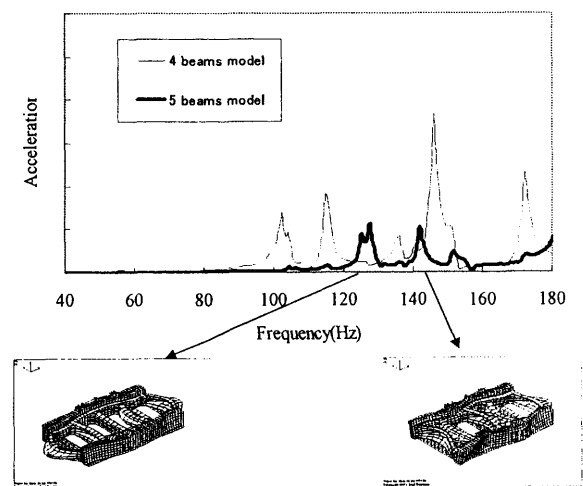
のモーメントを印加

調和応答解析結果は SCM 下部端部に着目して、双方のモデルを比較した。解析結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 (a)に示すように従来の4本梁モデルと比較して上下方向が主体となる振動モードは、周波数がほとんど変わらないが、Fig. 11 (b)に示すように左右方向が主体となる振動モードは共振周波数が高くなる傾向になることがわかった。また、上下方向加振では振動に大きな差異はなかったが、左右方向加振では、振幅が最大 1/5 程度まで低減することがわかった。

よって、台枠構造の違いによりさらなる振動特性の向上を図る可能性があることが明らかとなった。



(a) Fz+My



(b) Fy+Mz

Fig. 11 Vibration response.

6 まとめ

今回、簡略地上コイル対応超電導磁石の開発にあたり、既存の超電導磁石に対して①外槽軌道側板厚の増加、②上下荷重支持体剛性の強化の2点の改良を加えた改良型超電導磁石の性能を確認するために、電磁加振試験並びに走行試験を実施した。また更なる振動低減を図る方法として台枠の違いによる振動応答について解析を行った。その結果は以下のとおりである。

- 上下荷重支持体剛性の強化を行った結果、上下2次曲げ振動モードが500 km/hの走行領域外へと上方へシフトしたことを確認した。その振幅は、問題のないレベルであった。
 - 低周波数領域の発熱並びに振動に起因した特定周波数における発熱ともに抑制され、その発熱量は冷凍機の冷凍余裕内に収まっていることを電磁加振試験により確認した。
 - 台枠の梁の本数を変更した場合の調和応答解析を行った。左右方向の振動を抑制できる効果があることがわかった。
- 今回の試験により、簡略地上コイル対応超電導磁石

の実現可能性が明らかになった。

台枠の構造を変更することで振動抑制が可能であることを見出せたことから、台枠に搭載する機器や重量増を勘案した実現可能な構成案の検討を進めることとしたい。

なお、本技術開発は国庫補助を受けて実施した。

(2005年3月31日受付)

参考文献

- [1] 秋田, 浮上式鉄道の開発と現状, 鉄道総研報告, Vol. 17, No. 5, pp. 1-4, 2003.
- [2] 国土交通省 HP, http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/08/080311_.html
- [3] 岩松, 戸来, 浅原, 清野, 村井, 長谷川, 小方, 超電導磁気浮上式鉄道のコスト低減のための簡略地上コイル対応超電導磁石の開発, 日本 AEM 学会誌, Vol.12, No.4, pp.272-278, 2005.
- [4] 鈴木, 浮上式鉄道用超電導磁石の電磁加振に伴う発熱現象, 低温工学, Vol.29, No.10, pp.495-503, 1994.
- [5] 村井, 岩松, 吉岡, 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, 電気学会論文誌 D, Vol.123, No.1, pp.9-14, 2003.