

学術論文

## 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

### Development of a Superconducting Magnet for Simplified Ground Coils to Reduce Costs in the Superconducting Maglev

岩松 勝<sup>\*1</sup>(正員), 戸来 年樹<sup>\*1</sup>, 浅原 哲郎<sup>\*1</sup>, 清野 寛<sup>\*1</sup>,  
村井 敏昭<sup>\*1</sup>, 長谷川 均<sup>\*1</sup>, 小方 正文<sup>\*1</sup>

Masaru IWAMATSU (Mem.), Toshiki HERAI, Tetsuro ASAHARA, Hiroshi SEINO,  
Toshiaki MURAI, Hitoshi HASEGAWA, Masafumi OGATA

In the superconducting Maglev system, it is important to reduce costs to realize a commercial system. Simplifying the structure of ground coils is effective to reduce costs, but the harmonic magnetic fields caused by ground coils increase. The on-board superconducting magnets vibrate due to these harmonic fields. Excessive vibration gives rise to large heat loss. We have studied a superconducting magnet for simplified ground coils. In this paper, we report the design of the superconducting magnet, including results of bench tests and several analyses.

**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の開発は、2003年12月に最高速度が581km/hと従来の記録を更新するなど、順調に進められている。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、現在、精力的に進められているところである[1]。

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、電磁気的及び機械的に発熱するため、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へ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ているところである。

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(以下、「簡略地上コイル対応超電導磁石」と呼ぶ)について検討を行なった。

本論文では、簡略地上コイル対応超電導磁石の開発の背景、特徴について、定置試験や種々の解析結果を含めて報告する。

#### 2 磁気浮上式鉄道の基本構成

Fig.1に磁気浮上式鉄道の概略構成図を示す。U字型断面をしたガイドウェイには、車両を走行させるための推進コイル、浮上させるための浮上コイル及び車両を軌道中心に安定させるための案内コイルから構成される地上コイルが敷設されている。そのうち、案内コイルは浮上コイルと兼用されている。地上コイルと車両の台車部分に搭載された超電導磁石が発生する磁場の相互作用により、推進力、浮上力及び案内力が発生し、車両を速度500km/h域まで安定に高速走行させる。Fig.2に超電導磁石の基本構成を示す。超電導磁石は大きくタンク部とコイル部にわけられる。タンク部は、超電導コイルを冷却するための液体ヘリウムを納めたタンクと輻射熱シールド板を冷却するための液体窒素

連絡先: 岩松 勝, 〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38, 鉄道  
総研極低温技術研究室,

e-mail: iwamatsu@rtri.or.jp

<sup>\*1</sup> 鉄道総合技術研究所

を納めたタンク及びそれらが気化した際に再液化するための車載冷凍機から構成される。また、コイル部は、超電導コイルとそれを納めた内槽、輻射熱シールド板、

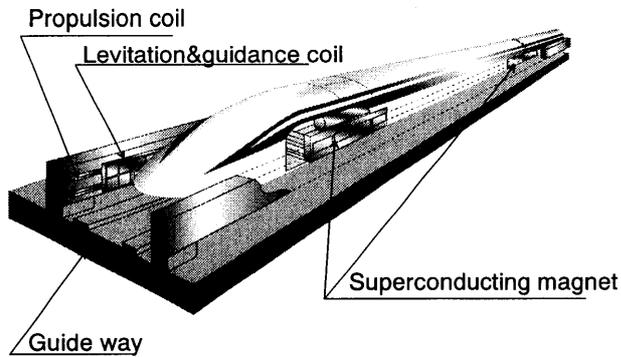


Fig. 1 Image of Maglev system.

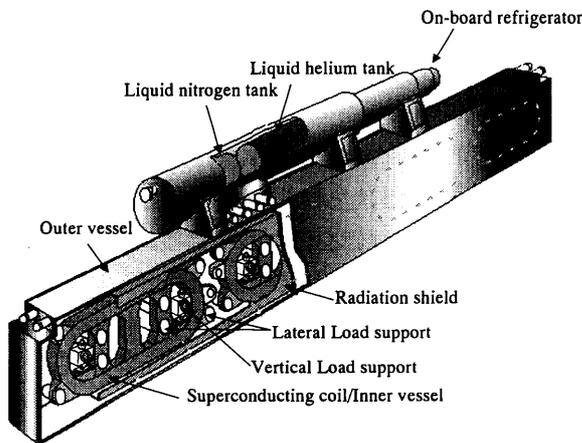


Fig. 2 Outline of the superconducting magnet.

断熱容器としての外槽及び超電導コイルが受けた推進力や浮上力を外に伝えるための荷重支持体(左右, 上下, 前後)から構成される。タンク部とコイル部は構造体の他に内部で配管により接続されている。

コイル部へは、走行の有無に係らず荷重支持体からの伝熱や輻射による熱侵入が存在し、「静置の熱侵入」と呼ばれている。この他に、走行中には前述のように地上コイルからの変動磁界による電磁氣的及び機械的発熱があり、超電導状態を維持するために車載冷凍機には静置の熱侵入と走行時の発熱の両方を上回る冷凍能力が求められる。

山梨実験線における地上コイルの構成について Fig.3 に示す。現在、山梨実験線に敷設中の浮上コイルは電気角 60 度ピッチで配置されており、2 個の 8 の字形のコイルを一体モールドしているので、その形状から、俗称「田の字浮上コイル」と呼ばれている。そ

れに対し、取付ピッチを 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。また、推進コイルとして

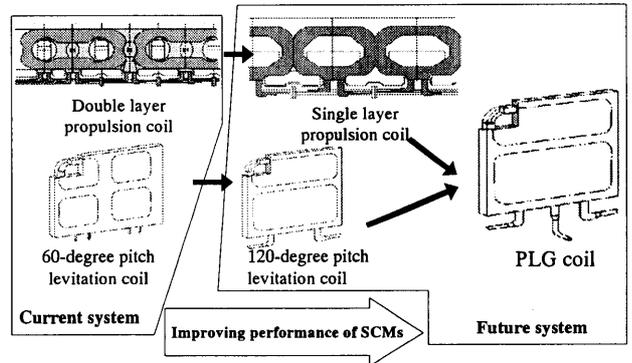


Fig. 3 Structures of ground coils.

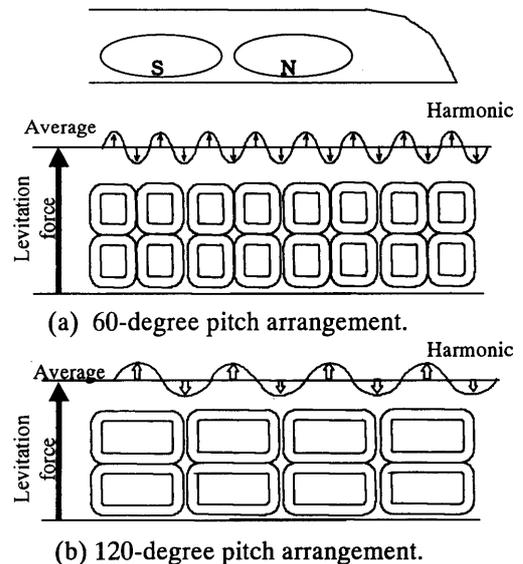


Fig. 4 Structures of 60-degree pitch coils and the 120-degree pitch coils.

は、現状の 2 層推進コイルに対し、簡略化された推進コイルとして単層推進コイルがある。さらなる将来的なシステムとしては、推進浮上案内をすべて兼用した地上コイル(PLG コイル)の開発も進められている[2]。

### 3 簡略地上コイル対応超電導磁石への影響と課題

簡略地上コイル対応超電導磁石の設計に関しては、従来の超電導磁石と比較して振動等の擾乱が大きくなることからその対策が必要となる。特に、振動力が大きくなることから、その対策に重点を置いて検討を進めた。

日の字浮上コイルの特徴について説明する。Fig.4 に各浮上コイルの形状と配置を、Table 1 に浮上コイルに

対する超電導磁石が受ける振動力の違いを示す。車両を浮上させるための定常的な浮上力は、田の字浮上コイルでも日の字浮上コイルでも、もちろん同一である。

Table 1 Comparison between the 60-degree pitch and the 120-degree pitch.

	60-degree pitch	120-degree pitch
Main harmonic field order	Sixth	Third
Frequency of excitation force(100~500km/h)	60~308Hz	30~154Hz
Amplitude of excitation force	Small	Large
Phase of excitation force between neighboring SC coils	Same	Opposite

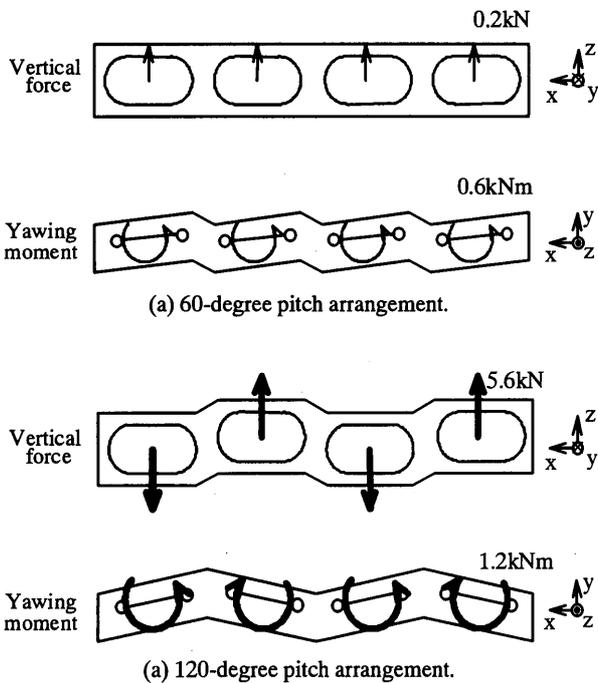


Fig. 5 Excitation force of SCs vs. coil pitch.

しかしながら、日の字浮上コイルの発生する高調波成分の周波数は速度 500km/h で 154Hz と田の字の 308Hz に比較して 1/2 であり、その加振力は Fig.5 に示すように超電導コイル 1 個あたり上下力(kN)が 5.6 : 0.2, ヨーイング力(kN・m)が 1.2 : 0.6 と大きくなる。さらに、進行長手方向における加振力の波長が長くなり、超電導コイルにとっての加振力の位相が隣接コイル間で逆相になるため、超電導磁石全体が大きく曲げられる加振力として作用することになる。結局、高調波成分の周波数が低くなることも関連して、低次の振動モードである超電導磁石全体が弾性変形する振動が発生することとなる。

また、高調波成分の周波数が半分になることから、低い速度での走行時に、従来型の地上コイルと比較して高調波磁界が軌道側外槽を透過しやすくなり、超電

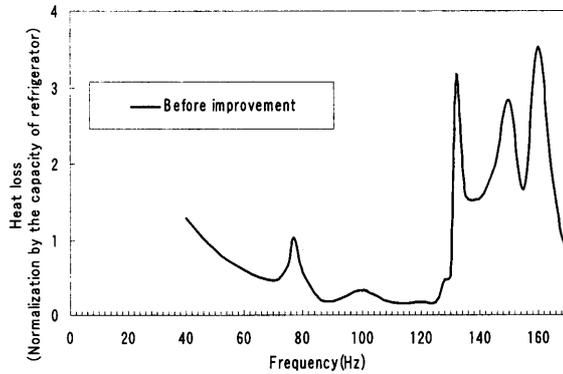


Fig.6 Heat loss by the 120-degree pitch coil electromagnetic vibration test.

導磁石内部のシールド板や内槽容器に渦電流損失を発生させることとなる。

地上コイルが簡略化された場合の超電導磁石への影響度を議論するにあたっては、従来から電磁加振試験装置[3]を活用して評価を行なっている。そこで、本検討を行うための事前検証として、簡略地上コイル模擬電磁加振試験を行い、日の字浮上コイル採用時の発熱特性を確認した。その結果を Fig.6 に示す。図は、車載冷凍機の冷凍能力から、静置の熱侵入分を除いた冷凍能力（以下、冷凍余裕と呼ぶ）で規格化してある。図より、低周波域での発熱増分が冷凍余裕分を超え、また、ある特定速度での発熱増分がその 3 倍前後と非常に大きく、現状の車載冷凍機の冷凍余裕でカバーできる発熱量ではないことが判明した。一方、単層推進コイルの影響は営業線での運用を考慮すれば比較的小さいと想定された。

そこで、最初に日の字浮上コイルに対応できる超電導磁石を検討し、最終段階で、単層推進コイルの影響分を考慮して発熱増分等の性能評価をするべく設計・開発を進めることとした。

#### 4 各種解決策とその効果

これまで検討してきた簡略地上コイル対応超電導磁石開発の課題に対する解決策（案）を系統的に示す。本論文では、電磁加振試験と走行時の新たな振動評価方法並びに従来と比較して過大となる上下方向の振動対策についての提案を行なう。他の検討結果も併せて、超電導磁石側として 3 点、地上コイル側として 1

点の対策を挙げている。解決策については、それぞれ実験及び解析を行って検証し、解決策毎にその効果を推定して、超電導磁石全体としての性能を評価した。

#### 4.1 電磁加振試験時と走行時の振動評価

超電導磁石を評価する目的で行われる電磁加振試験は、走行時の加振力をできるだけ一致させるようにして実施しているが、超電導磁石が受ける力をすべて等しくさせることは難しい。そこで、従来は超電導磁石への影響の大きい左右方向の加振力を基準にして、電磁加振試験と実走行時の等価性を評価してきた。しかしながら、日の字浮上コイル模擬電磁加振試験の結果より、超電導コイルの振動及び発熱量が上下曲げ振動と密接な関係があることがわかってきた。このことは、従来の基準に変わる新たな基準が必要となることを示唆している。そのため、新たな評価方法として、超電導磁石自身を単純な梁として振動モードを仮定し、上下曲げモード基準関数を考慮した一般化力を提案し、有限要素法を用いた調和応答解析との比較を行い、その検証を行った。

##### 4.1.1 一般化力

超電導磁石を長さ  $l$  の均一な自由端梁と考えて上下振動の固有値を求めると、それぞれの固有値に関して振動モード基準関数  $W_i(x)$  は任意点  $x$  の関数として、式(1)のように求められる。

$$W_i(x) = \cos k_i x + \cosh k_i x - \alpha_i (\sinh k_i x + \sin k_i x) \quad (1)$$

但し、

$$k_i = \lambda_i / l \quad (2)$$

$$\alpha_i = \frac{\cos \lambda_i - \cosh \lambda_i}{\sin \lambda_i - \sinh \lambda_i} \quad (3)$$

$\lambda_i$  は振動モードの固有値であり、上下1次、2次曲げモードにおける固有値は、それぞれ  $\lambda_1=4.73$ 、 $\lambda_2=7.853$  である。今回提案する一般化力  $V_{z,i}(t)$  は、この基準関数と上下方向の加振力  $F_z(x,t)$  の積を全長にわたって積分した式(4)のように表現できる。

$$V_{z,i}(t) = \int_{x=0}^l W_i(x) \cdot F_z(x,t) dx \quad (4)$$

式(4)を用いて、上下1次、2次曲げモードについて電磁加振試験と実走行のそれぞれの一般化力を求める。加振力  $F_z(x,t)$  は、電磁界解析を行って求めるがここでは省略する[4]。この結果、電磁加振試験時と実走行時

の振幅比は Table 2 のように求められた。

##### 4.1.2 調和応答解析

前項においては、超電導磁石にかかる加振力におい

Table 2 Amplitude ratio at the vertical vibration mode.

	electromagnetic vibration test / running test
First mode	3.3
Second mode	0.5

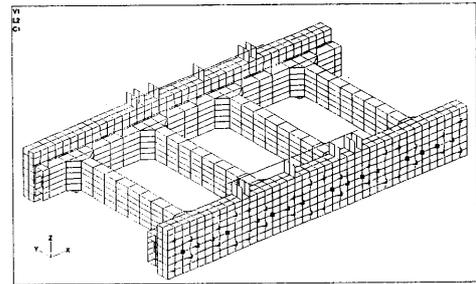


Fig. 7 SCM model.

て等価性を評価する一般化力の提案を行った。そこで、超電導磁石の構造解析により、電磁加振試験時及び実走行時の加振力を入力条件として、評価方法として一般化力が妥当であるかどうかを検証した。

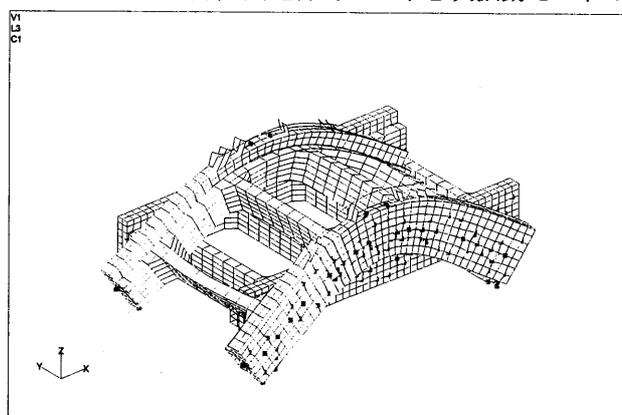
具体的には、Fig.7に示すように超電導磁石と台枠をモデル化し、4個ある超電導コイルの外槽位置に上下方向の振動に関する  $z$  方向の力及び  $y$  方向のモーメントを電磁加振試験時及び実走行時それぞれの条件においてモデルに加え、調和応答解析を行った。

最初に、調和応答解析を行うための前計算として、固有値解析を行い、Fig.8に示すような上下1次振動モードと上下2次振動モードの存在を明確にした。その結果を用いて、調和応答解析を行った。超電導磁石外槽下面端部の振動加速度の周波数特性を Fig.9に示す。なお、Table 2との比較のため、Fig.9は電磁加振試験時の上下1次振動モードの加速度で規格化してある。減衰係数については、実験結果に基づき設定した。

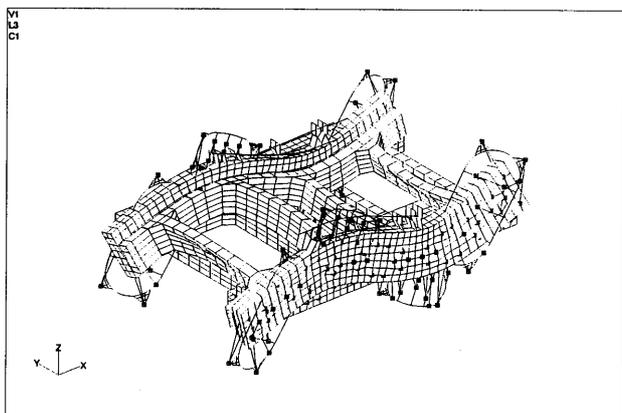
##### 4.1.3 解析結果の比較と振動評価

Fig.9に Table 2との比較を行うため、実走行時と電磁加振時の各振動モードにおける振幅比を示しているが、その結果はほぼ一致している。よって、一般化力による評価が妥当であることが検証できた。この結果、電磁加振試験の結果から実走行時の振動を推定する際には固有モードによって比率を変えて議論する必要が

あることがわかった。これらの結果より振動評価を行うと、実走行時の上下1次振動モードの振幅は、電磁加振試験時の約33%となり、特段の対策が必要ないと判断された。一方、実走行時の上下2次振動モードの



(a) First mode.



(b) Second mode.

Fig. 8 Vertical vibration modes.

振幅は、電磁加振試験時の約2倍となることがわかり、何らかの対策が必要となることが判明した。

#### 4.2 上下荷重支持体剛性の向上

前項で述べた新たな評価によって、走行時の発熱が従来値より増大することが予想される上下2次振動モードに対して、その対策方法について検討した。

Fig.7 に示した構造解析用モデルを用い、外槽の軌道側板厚を増加させた場合(外槽剛性をパラメータ)と、外槽-内槽間の上下荷重支持体のばね定数を変化させた場合の共振周波数の変化を求めた。その結果を Fig.10 及び Fig.11 にそれぞれ示す。Fig.10 より、外槽剛性を上げた場合には、上下1次振動モードの周波数は上げることができるが、上下2次振動モードの周波数は飽和傾向となる。一方、Fig.11 より、上下荷重支

持体のばね定数を上げることは、上下2次曲げ振動モードの共振周波数に有効であることがわかる。

この検討結果から、上下荷重支持体の剛性を向上さ

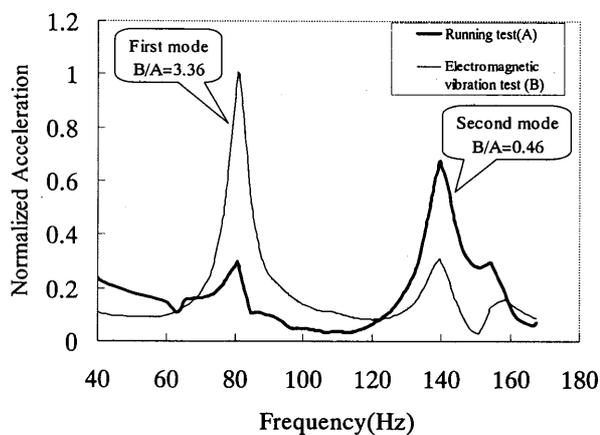


Fig. 9 Vibration response in a running test and an electromagnetic vibration test.

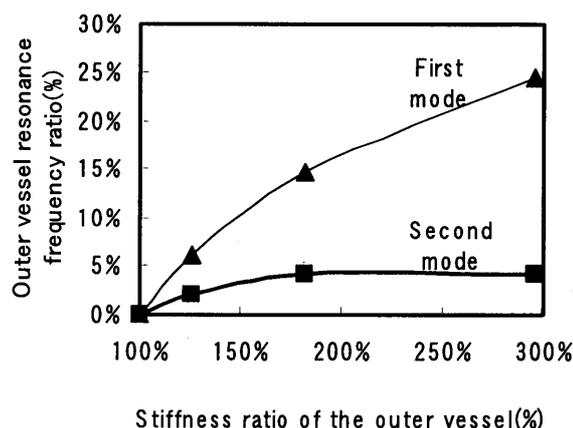


Fig. 10 Resonance frequency varying stiffness of the outer vessel.

せることにより、上下2次振動モードの共振周波数を最高走行速度 500km/h に対応した周波数以上へシフトさせることが可能であることがわかった。具体例として、上下2次振動モードの周波数を10%以上に上げる場合には、Fig.11 中◇印に示すように現状のばね定数を130%以上にすれば良いことがわかる。この場合には、静置での荷重支持体の熱侵入量は約3%増/SCMと見込まれ、熱侵入量も問題ないことがわかった。

#### 4.3 超電導コイルに発生する歪みの均一化

振動に伴う発熱箇所は、超電導コイル部(超電導コイル及び内槽)とその他(配管・タンク部)に分けられる。そのうち、超電導コイル部の発熱は、そこに発

生する歪との関連が大きく、変形しなければ発熱は非常に小さいという知見が得られている[5]。

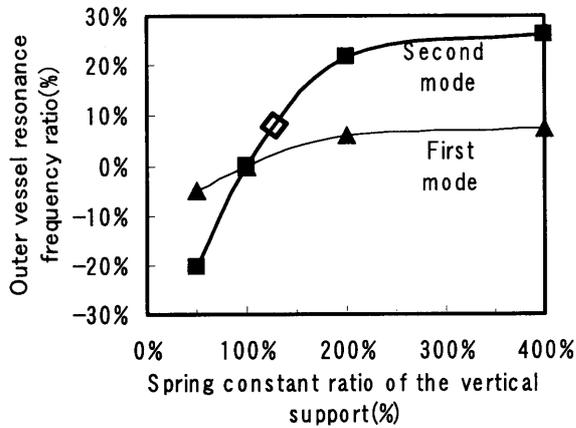


Fig. 11 Resonance frequency varying spring constant of the vertical support between the outer vessel and the inner vessel.

そこで、超電導コイル部の発熱を低減させる方法の一つとして、内槽に補強板を追加して、荷重支持部に発生していると推定される歪を内槽全体に均一化することを検討した[6-8]。この対策は超電導コイル部の上下および左右振動に起因する発熱に対し、効果があると考えている。上下方向に関しては実験によりその効果は確認されており、左右方向に関しても同様の効果を期待している。

#### 4.4 外槽軌道側板厚の増加

この方法は、透過磁界の遮断に直接効果をもたらし、低速走行時の交流損失を 1/4 に低減できる見通しを得ている[9]。また、板厚の増加は外槽剛性強化にもつながり、共振時の振動および発熱の低減にも有効な対策となる。

なお、板厚増加の対策は、重量増を伴うといった欠点がある。

#### 4.5 上下非対称日の字浮上コイルの採用

この方法は、簡略地上コイル側の対策である。これまで日の字浮上コイルに対しても提案されている上下非対称コイルは浮上走行時に超電導コイルとの電磁的結合を最適にできるため、高速時の浮上案内性能が向上し、超電導磁石への左右加振力低減に効果がある。日の字浮上コイルについても非対称型とすることによって、前述の性能向上とともに左右およびヨーイング

加振力が約 70%に低減し、左右方向の振動に伴う発熱増分は 50%に低減できる見通しを得ている[10]。

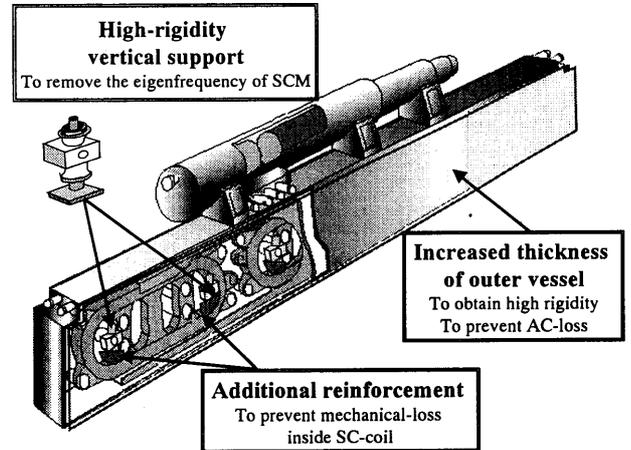


Fig.12 Superconducting magnet for simplified ground coils.

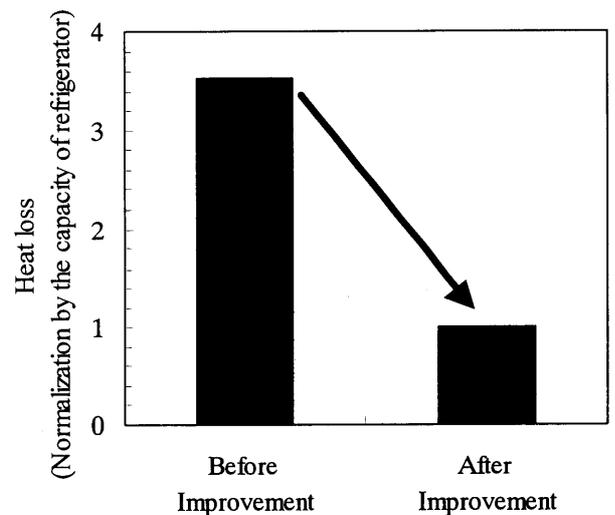


Fig. 13 Prospects of the heat loss at a certain specific frequency of a superconducting magnet for simplified ground coils.

### 5 簡略地上コイル対応超電導磁石の構成と予想熱負荷特性

4章で検討した結果を基に構成した簡略地上コイル対応超電導磁石の鳥瞰図を Fig.12 に示す。主な超電導磁石側の対策は、4.2 節、4.3 節並びに 4.4 節で述べた 3点(図中)である。また、検討結果を反映した超電導

磁石の電磁加振試験時の発熱増分予測結果について、Fig.6 の電磁加振試験において発熱が大きくなったある特定速度における発熱量予測を Fig.13 に示す。簡略地上コイル対応超電導磁石の発熱増分は速度 500km/h までの範囲で冷凍余裕分以内に抑制できると考えている[11]。また、重量についても目標値に対して 10%増以内で収まると推定している。

## 6 結言

簡略地上コイル対応超電導磁石の開発にあたり、当初想定された過大な発熱増分の問題は、走行時の振動評価方法についての新しい手法を提案して再評価を行い、かつ、上下方向振動対策の提案並びに他の検討結果を合わせて解決できる見通しを得た。

今後は、改造を施した超電導磁石の電磁加振試験や走行試験により、簡略地上コイル対応超電導磁石の開発検証を深度化していくとともに、超電導磁石の振動に伴う発熱現象の解明、配管・ベローズ等の耐久性並びに振動低減のための台車構造の基礎的検討についても研究を進めていく予定である。

なお、本技術開発は国庫補助を受けて実施した。

## 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] 村井, 推進・浮上・案内を兼用するリニア同期モータの特性, 電気学会論文誌 D, Vol.114, No.7/8, pp.746-752, 1994.
- [3] 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.
- [4] 長嶋, 戸来, 超電導磁石外槽表面の渦電流を考慮した電磁力分布, 鉄道総研報告, Vol.14, No.11, pp.11-16, 2000.
- [5] 浅原, 岩松, 剛体振動する超電導コイルの発熱特性, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-04-21, 2004.
- [6] 清野, 栗原, 戸来, 鈴木, 超電導コイルの発熱低減に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.15, No.11, pp.15-20, 2001.
- [7] H.Seino, M.Kurihara, T.Herai, E.Suzuki, Study of the mechanical heat generation inside the inner vessel installed with a superconducting coil, *Cryogenics*, Vol.42, No.6, pp.372-376, 2002.
- [8] H.Seino, M.Kurihara, T.Herai, E.Suzuki, Study of the relation between evaluation of strain distribution on superconducting coil and mechanical heat generation, *PHYSICA C*, Vol.370-381 Part2, pp.1185-1190, 2002.
- [9] 長谷川, 村井, 笹川, 分散型超電導磁石の電磁解析, 電気学会論文誌 D, Vol.121, No.7, pp.799-804, 2001.
- [10] 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.

- [11] 岩松, 戸来, 浅原, 清野, 村井, 長谷川, 小方, 簡略地上コイル対応超電導磁石の開発, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-04-30, 2004.