

# 地上コイル及び超電導磁石の設計における電気的ギャップ縮小の効果

米津 武則\*      渡邊 健\*  
 鈴木 江里光\*      笹川 卓\*\*

Effects of Electrical Gap Reduction on the Design of Ground Coils and Superconducting Magnets

Takenori YONEZU      Ken WATANABE  
 Erimitsu SUZUKI      Takashi SASAKAWA

In the case of designing the superconducting Maglev vehicle system, the electrical gap (lateral distance between the center of the conductor of the superconducting coil and that of the ground coil) has been treated as a constant value. However, by using onboard REBCO (rare-earth-barium-copper-oxide) HTS (high temperature superconducting) magnets which are being developed, the electrical gap can be reduced, and the electrical gap can be treated as a variable parameter. The vehicle system can be designed more freely than the conventional system. A fundamental study on the effects of electrical gap reduction on the design of ground coils and superconducting magnets is described in this paper.

キーワード：超電導磁気浮上式鉄道車両，電気的ギャップ，地上コイル，超電導磁石

## 1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道（以下、磁気浮上式鉄道）は、車両の浮上・案内は車上に搭載した超電導磁石と地上側に敷設した浮上案内コイルとの誘導作用によって行われる電磁誘導形磁気浮上（EDS: Electrodynamic Suspension）方式であり<sup>1)</sup>、車両の推進は車上の超電導磁石を界磁とし、地上側に敷設した推進コイルを電機子とする地上一次方式のリニア同期モータ（LSM: Linear Synchronous Motor）である<sup>2)</sup>。磁気浮上式鉄道の主な構成を図1に示す。

また、LSMは、地上側に設けられた電力供給システムによって駆動制御される<sup>3)</sup>。電力供給システムの主な構成を図2に示す。電力システムから受電した電力は、コンバータ、インバータから構成される電力変換装置で変換し、き電ケーブル（電力ケーブル）、き電区分閉器を介して推進コイルに供給される。き電区分閉器投入時に一括で給電される推進コイル群は、セクションと呼ばれる。

磁気浮上式鉄道では、超電導磁石の外槽表面と地上コイル表面間の左右距離（実ギャップ、機械的ギャップ）を大きくとることにより、高速走行時にも安定に走行が可能となる。一方、超電導コイル中心～地上コイル中心間の左右距離（電気的ギャップ）を小さくすれば、

\* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

\*\* 浮上式鉄道技術研究部

EDS, LSM の特性は向上する<sup>4)</sup>。

超電導磁石・地上コイルの構造を変更しなければ、機械的ギャップを維持したまま電気的ギャップのみを縮小

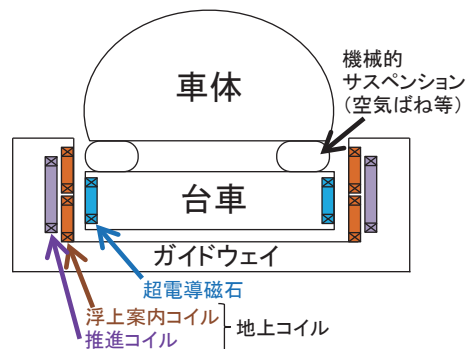


図1 磁気浮上式鉄道の主な構成

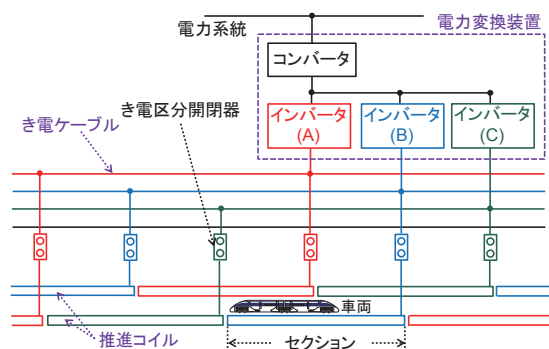


図2 磁気浮上式鉄道の電力供給システムの構成

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

することはできない。従来、磁気浮上式鉄道の設計において、電氣的ギャップは一定とされてきた。しかしながら、鉄道総研で研究開発中の希土類系高温超電導線材を用いた磁気浮上式鉄道車両用超電導磁石（以下、高温超電導磁石）<sup>5)</sup>を用いれば、機械的ギャップを維持したまま、電氣的ギャップだけを縮小することができる<sup>6)</sup>。

高温超電導磁石を磁気浮上式鉄道車両に搭載した場合に磁気浮上式鉄道車両システムの設計に与える効果に関して、これまで、電氣的ギャップ（以下、ギャップ）縮小による影響を中心に計算機シミュレーションにより検討を行ってきた<sup>4) 6) ~9)</sup>。

ギャップを縮小すると、超電導磁石の発生する磁束のうち、地上コイルと鎖交する成分（鎖交磁束）が増大するが、その鎖交磁束の増大による効果を磁気浮上式鉄道車両システムの設計におけるどの要素に用いるかによって、大きく分けて以下の3つの選択肢が存在する<sup>4)</sup>。

(Case 1) 地上コイルおよび超電導磁石の諸元は変更せず、鎖交磁束増大効果を電磁力特性の向上に用いる。

(Case 2) 地上コイルの諸元は変更せず、超電導磁石の起磁力を低減させる。

(Case 3) 超電導磁石の諸元は変更せず、地上コイルの導体量を削減させる。

これまで、地上コイル諸元の設計を目的として磁気浮上式鉄道の最適化設計計算<sup>10)</sup>等が実施されてきたが、ギャップをある程度自由に変更できれば、従来の想定を超える形で設計の自由度が高まる可能性がある。

これまで、計算機シミュレーションによる検討を(Case 1)<sup>4) 7) 8) 9)</sup>、(Case 2)<sup>4) 6) 7)</sup>、(Case 3)<sup>4)</sup>のそれぞれについて実施してきた。本報では、既報<sup>7) 8) 9)</sup>で述べた計算機シミュレーションの手法を用いて、(Case 1)と(Case 2)の場合に地上コイルおよび超電導磁石の設計に与える効果について検討した結果を述べる。

2. 計算条件

計算機シミュレーションに用いた主な諸元<sup>7) 9)</sup>を表1に示す。超電導磁石起磁力およびギャップは表1に示した従来の諸元の値を基準値とし、(Case 1)ではギャップを変更可能、(Case 2)ではギャップおよび超電導磁石起磁力を変更可能とした。また、以降、基準値の場合のギャップを基準ギャップと呼ぶ。

ギャップは基準値より25 mm<sup>6)</sup>縮小可能とした。前述のように、超電導コイル中心を地上コイル側に近づけることでギャップを縮小することとしたため、超電導コイル～浮上案内コイル間のギャップと超電導コイル～推進コイル間のギャップは基準ギャップから同じ値だけ縮小される。

表1 計算機シミュレーションに用いた主な諸元<sup>7) 9)</sup>

パラメータ	値	
編成両数	5	
台車負担質量	20000 (kg)	
超電導磁石起磁力 (基準値)	700 (kA)	
超電導コイル	幅	1.07 (m)
	高さ	0.50 (m)
	ピッチ	1.35 (m)
浮上案内コイル	幅	0.35 (m)
	高さ	0.34 (m)
	ピッチ	0.45 (m)
推進コイル	幅	0.78 (m)
	高さ	0.60 (m)
	ピッチ	0.90 (m)
ギャップ (基準値)	超電導コイル～浮上案内コイル間	0.185 (m)
	超電導コイル～推進コイル間	0.240 (m)
セクション長	453.6 (m)	
き電ケーブル長	10 (km)	

3. 計算結果 (Case 1)：地上コイル・超電導磁石の諸元を変更しない場合

3.1 (Case 1)における計算の目的

ここでは、地上コイルおよび超電導磁石の諸元を同一とした場合のギャップ縮小による電磁力特性 (EDS・LSM特性)の向上効果、および、それに伴う地上コイルの設計への効果を述べる。EDS特性として、均衡変位 (台車中心と浮上案内コイル中心の位置の上下方向の差)・磁気抗力・浮上案内コイルに作用する左右力を、LSM特性として、LSMの電圧・電流・電力の計算結果を述べる。

3.2 均衡変位・磁気抗力

基準ギャップ時および25 mmギャップ縮小時における走行速度100 km/h～500 km/hでの浮上走行の場合の均衡変位および磁気抗力 (1台車あたり)の計算結果を図3に示す。

図3より、走行速度が低下するほど均衡変位が増大する (台車が浮上案内コイル上下中心に対して沈み込む)と共に、磁気抗力も増大するが、これは、走行速度低下に伴い、EDSの効果が小さくなることに起因する<sup>1)</sup>。また、今回計算した範囲の全ての速度帯域において、ギャップ縮小に伴い均衡変位・磁気抗力は共に減少することがわかる。このことは、EDSの特性が向上したことを示す。

磁気抗力は浮上案内コイルで消費される熱エネルギーとなり<sup>1)</sup>、浮上案内コイルの温度上昇と相関を持つので、

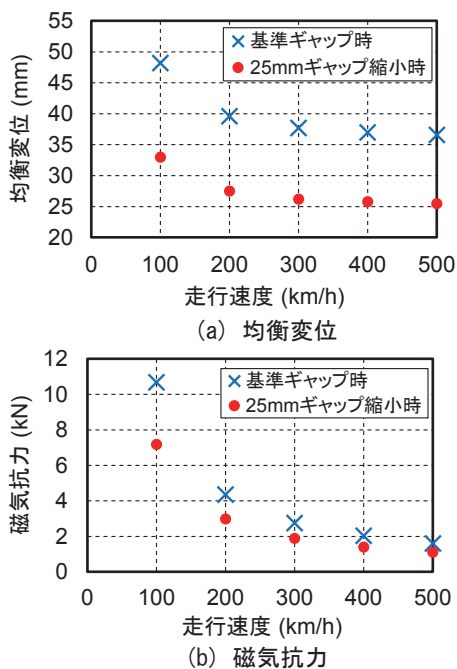


図3 均衡変位・磁気抗力

ギャップ縮小に伴う磁気抗力の減少は、浮上案内コイルの熱的制約の緩和を意味する<sup>8)</sup>。

### 3.3 浮上案内コイルに作用する左右力

EDSにより、台車の超電導コイルに電磁力が作用し、浮上・案内力が発生するが、浮上案内コイルにも電磁力が作用し、両者は作用反作用の関係にある。

浮上案内コイルの導体をモールドしている樹脂の疲労特性を決定する指標に浮上案内コイルに発生する応力があり、浮上案内コイルに作用する電磁力はコイルの耐久性と相関がある<sup>11)</sup>。耐久性の評価においては、浮上案内コイルのモールド樹脂を含めた特性で決定される<sup>11)</sup>が、本稿では、基礎検討として、ギャップ縮小と浮上案内コイルに作用する電磁力の関係について検討した。

図4に浮上案内コイル・超電導コイルの水平辺同士で作用する電磁力<sup>1)</sup>の概念図を示す。

磁気浮上式鉄道車両の浮上力は図4に示したような電磁力によって発生する<sup>1)</sup>。浮上案内コイルに作用する主要な電磁力としては左右力と上下力が存在する<sup>1) 11)</sup>が、そのうち、浮上案内コイルの耐久性評価にとって重要なのは左右力である<sup>11)</sup>。

図4からわかるように、浮上案内コイルに作用する左右力としては、上側単位コイル全体への合力としてはガイドウェイから引き剥がされる方向に力が、下側単位コイル全体への合力としてはガイドウェイに押し付けられる方向に力が作用する<sup>8) 11)</sup>。

基準ギャップ時および25mmギャップ縮小時における走行速度100km/h～500km/hの浮上走行の場合の

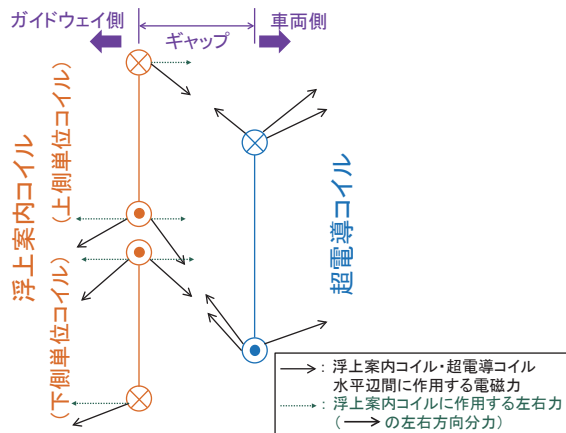


図4 浮上案内コイル・超電導コイルの水平辺に作用する電磁力の概念図

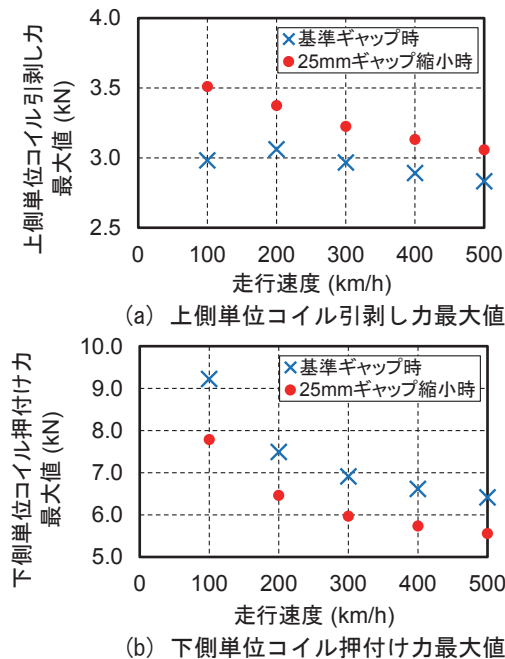


図5 浮上案内コイルに作用する左右力

上側単位コイルへの引剥し力最大値および下側単位コイルへの押し付け力最大値の計算結果を図5に示す。

図5より、ギャップの縮小に伴い、上側単位コイル引剥し力は増大し、下側単位コイル押し付け力は減少することがわかる。これは、EDS特性の向上により均衡変位が小さくなったこと、つまり、超電導コイルが上側単位コイルに近づき、下側単位コイルから遠ざかったことが一因として挙げられる<sup>8)</sup>。

一般的に、下側単位コイル押し付け力より上側単位コイル引剥し力の方が浮上案内コイルの耐久性にとって重要である<sup>11)</sup>。なお、浮上案内コイルの応力には電磁力に起因する応力の成分と熱に起因する応力の成分が含まれており<sup>11)</sup>、前述のように、ギャップ縮小に伴い磁気抗力は減少するので、熱に起因する応力は減少すると考えられる。

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

浮上案内コイルの応力評価にとって、メリットとなる要因（磁気抗力の減少）とデメリットとなる要因（上側単位（浮上案内）コイル引剥し力増大）が存在するので、本稿で述べた検討範囲では、浮上案内コイルの耐久性が向上するのか低下するのかの判断は出来ない。ギャップ縮小に伴い浮上案内コイルの耐久性に影響が出ないかどうかは、モールド樹脂を含めたコイルの機械的強度に依存し<sup>11)</sup>、設計によるところが大きい。上側単位（浮上案内）コイル引剥し力（電磁力）の増大に伴い浮上案内コイルの耐久性が低下しないかどうか、磁気浮上式鉄道車両システム設計の際には十分な検討が必要である。

3.4 LSMの電圧・電流・電力

ここでは、ギャップ縮小時のLSM特性（電圧・電流・電力）について検討した結果を述べる。本稿では、基礎検討として、変電所の電力変換装置の出力端での線間電圧・電流・電力（片側・一相あたり）で評価する<sup>9)</sup>ものとする。

基準ギャップ時および25 mmギャップ縮小時における500 km/h等速走行の場合のLSMの電圧・電流・電力を表2に示す。

表2より、ギャップ縮小に伴い、電流・電力は減少し、電圧は増大することがわかる。電流の減少は、鎖交磁束の増大の影響<sup>9)</sup>であり、LSM特性が向上しているといえる。一方、電圧の増大は、速度起電力(LSMの逆起電力)の増大に起因する<sup>9)</sup>。電圧増大の効果より電流減少の効果の方が大きい<sup>9)</sup>ので、ギャップ縮小に伴い、電力は減少している。

ギャップ縮小に伴うLSMの電力の減少は、車両の推進に伴う消費電力の削減につながる。

一方、ギャップ縮小に伴うLSMの電圧の増大は、電力変換装置を含めた電力供給系の電圧の設計上の上限値を超えないかどうかには留意する必要がある<sup>7)</sup>ことを示唆している。特に、電力供給系の電圧階級（11 kV, 22 kV, 33 kV等の特別高圧）を変更する必要がある場合、電力供給設備の大幅なコスト増につながるため、磁気浮上式鉄道車両システムの設計の際には十分な検討が必要である<sup>7)</sup>。

表2 LSMの電圧・電流・電力  
(500 km/h等速走行時)

条件	項目	値
基準ギャップ時	電圧	15.1 (kV)
	電流	495 (A)
	電力	3.66 (MW)
25 mmギャップ縮小時	電圧	15.5 (kV)
	電流	433 (A)
	電力	3.46 (MW)

3.5 (Case 1)のまとめ

ギャップ縮小により、EDS・LSM特性が向上し、EDSに関しては、磁気抗力の減少（浮上案内コイルの熱的制約の緩和）、LSMに関しては、電力の減少というメリットが得られる。

一方、EDSに関しては、上側単位（浮上案内）コイル引剥し力の増大、LSMに関しては、電圧の増大というデメリットが発生し、ギャップの縮小を検討する際には、これらのデメリットが、磁気浮上式鉄道車両システムの設計にとって許容できる範囲内であるかどうかには留意して検討する必要がある。

4. 計算結果 (Case 2)：超電導磁石の起磁力を低減させる場合

4.1 (Case 2)における計算の目的

超電導磁石の起磁力を低減させることによって、上側単位（浮上案内）コイル引剥し力・LSM電圧の増大という、ギャップ縮小に伴うデメリットが解消されるかどうかについて検討した。

超電導磁石の起磁力が全走行において一定であり、地上コイルの諸元が全区間において一定とすれば、EDS特性の評価に最も重要なのは、浮上開始直後、つまり、浮上開始速度における特性であり<sup>8)</sup>、LSMの電圧の評価に最も重要なのは、一般的に、最高速度に達する直前の加速走行時である<sup>9)</sup>。実際の磁気浮上式鉄道車両システムの最適設計においては、走行速度に応じた超電導磁石起磁力の制御<sup>7)</sup>や、走行速度に応じた区間ごとの地上コイルの設計<sup>12)</sup>等も考慮に入れて検討する必要があるが、ここでは、基礎検討として、500 km/h等速走行時の特性で評価するものとする。

4.2 均衡変位・磁気抗力

走行速度500 km/h、超電導磁石起磁力610 kA～700 kAにおける25 mmギャップ縮小時の均衡変位・磁気抗力の計算結果を図6に示す。従来の諸元であるギャップ縮小量0 mm、超電導磁石起磁力700 kAの場合の値（以下、基準値と呼ぶ。）を青の破線で図6中に示した。

図6より、超電導磁石起磁力を低減させるほど、均衡変位・磁気抗力は共に増大し、ギャップ縮小に伴うEDS特性向上効果が減少することがわかる。ただし、今回計算の対象とした起磁力610 kA～700 kAの範囲では、均衡変位・磁気抗力共に、基準値より値が小さくなっており、EDS特性が向上していることがわかる。

4.3 上側単位浮上案内コイル引剥し力

走行速度500 km/h、超電導磁石起磁力610 kA～700 kAにおける25 mmギャップ縮小時の上側単位浮上案内

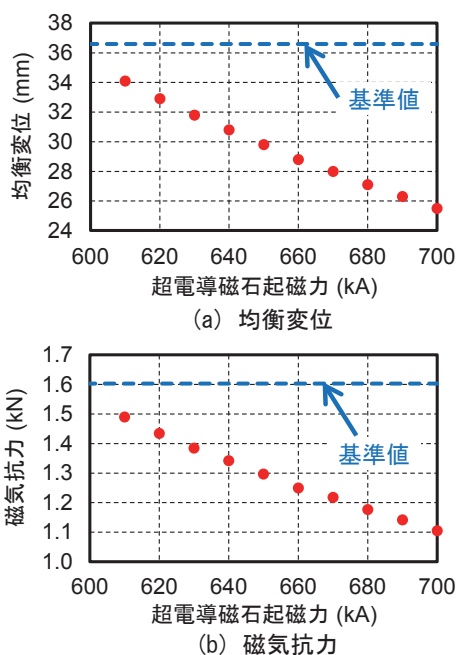


図6 超電導磁石起磁力と均衡変位・磁気抗力の関係 (25 mm ギャップ縮小時)

コイル引剥し力最大値の計算結果を図7に示す。

図7より、超電導磁石起磁力を低減させるほど、上側単位浮上案内コイル引剥し力は小さくなっていることがわかる。これは、図6 (a) に示したように、超電導磁石起磁力の低減に伴い、均衡変位が増大し、超電導コイルの位置が下降し、上側単位浮上案内コイルとの距離が大きくなるのが原因と考えられる。

また、図7より、超電導磁石起磁力 640 kA 以下の場合、上側単位コイル引剥し力が基準値より小さくなることがわかる。

浮上力と車両質量に起因する重力の均衡する位置により均衡変位が決定される<sup>1)</sup>ので、原理的には、上側単位コイルと下側単位コイルの上下力の合力はギャップ縮小・超電導磁石起磁力低減に関わらず一定である。

また、図4からわかるように、仮に、超電導コイル上下中心位置がギャップ縮小前後で同一の位置であった場

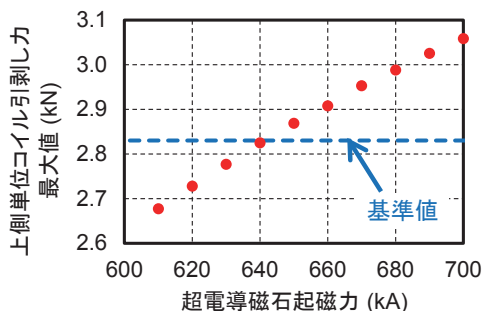


図7 超電導磁石起磁力と上側単位浮上案内コイル引剥し力の関係 (25 mm ギャップ縮小時)

合、ギャップを縮小すると、浮上案内コイルと超電導コイルの水平辺の間に作用する電磁力の向き（傾き）が、鉛直方向に近づき、（左右力）/（上下力）の値は小さくなる。

以上の理由より、一般的には、25 mm ギャップ縮小時には、上側単位浮上案内コイルに作用する引剥し力が基準値と等しくなる場合の均衡変位は、基準値における均衡変位よりも小さくなる（同一の均衡変位の場合は、引剥し力は小さくなる）と考えられる。

よって、均衡変位は基準値より減少しているにも関わらず、上側単位浮上案内コイル引剥し力は基準値より減少するという条件が存在し得る。

#### 4.4 LSM の電圧・電流・電力

500 km/h 等速走行、超電導磁石起磁力 610 kA ~ 700 kA における 25 mm ギャップ縮小時の LSM の電圧・電流・電力の計算結果を図8に示す。

図8より、超電導磁石起磁力を低減させるほど、電圧は減少し、電流および電力は増大することがわかる。こ

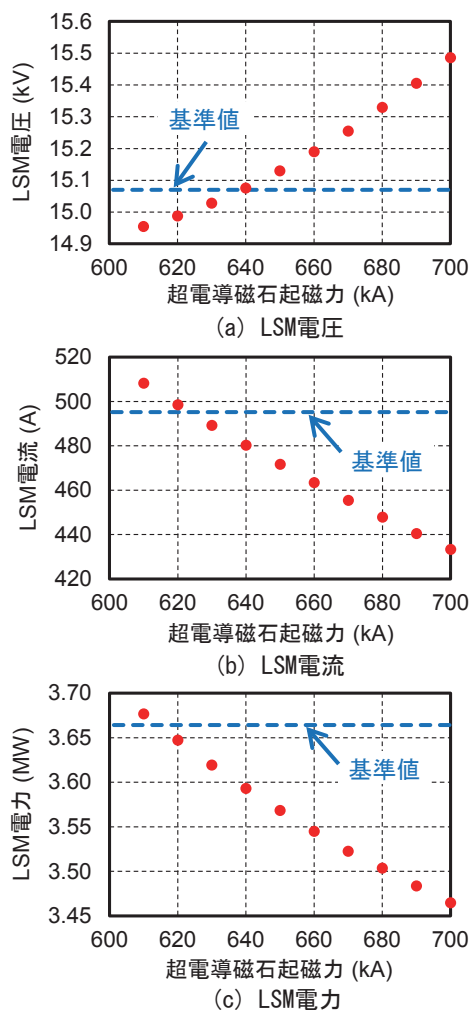


図8 超電導磁石起磁力と LSM の電圧・電流・電力の関係 (25 mm ギャップ縮小時)

## 特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

れは、超電導磁石起磁力の低減に伴う、超電導磁石～推進コイル間の鎖交磁束の減少に起因する。

また、図8より、電圧・電流・電力が基準値より小さくなるのは超電導磁石起磁力がそれぞれ630 kA以下、630 kA以上、620 kA以上の場合であり、630 kAの場合には、電圧・電流・電力の全てが基準値より小さくなることからわかる。ギャップの縮小に伴い、磁気抗力が減少し、車両の推進に必要な推力が減少した<sup>9)</sup>ことが、電圧・電流・電力の全てが基準値より小さくなる条件が存在する一因となっている。

## 4.5 (Case 2) のまとめ

ギャップ縮小と同時に超電導磁石起磁力を低減させることにより、今回の検討対象とした諸元においては、「25 mm ギャップ縮小、超電導磁石起磁力 630 kA」という条件下で、磁気抗力・LSM 電力を減少でき、かつ、上側単位浮上案内コイル引剥し力・LSM 電圧も基準値より増大しない、という計算結果が得られた。

ここで述べた結果は、超電導磁石起磁力を低減させるため、ギャップ縮小に伴う磁気抗力・LSM 電力の減少というメリットが低減することになるが、単純にギャップを縮小させる場合に想定される、上側単位浮上案内コイル引剥し力・LSM 電圧の増大というデメリットを解消する設計が可能となる場合が存在することを示した。

ただし、ここで述べた結果は、基準となる諸元が表1のような諸元であった場合の一例であり、どのような条件下でも、デメリットを完全に解消できることを示したわけではない。

## 5. まとめ

高温超電導磁石の研究開発を契機として、ギャップ縮小が磁気浮上式鉄道車両システムの設計に与える効果に関して、これまで検討を実施してきた。本稿では、地上コイル及び超電導磁石の諸元を変更しない場合、地上コイルの諸元は変更しないが超電導磁石の起磁力を低減させる場合の2ケースにおいて、ギャップ縮小が地上コイル及び超電導磁石の設計に与える効果に関して計算機シミュレーションによって検討した結果を述べた。

本稿で述べた事項以外にも、ギャップ縮小に伴う地上コイル渦電流損の増大<sup>4)</sup>等、検討すべき事項は存在するが、ギャップの縮小を考慮に入れることで、従来の想定を超える範囲で設計の自由度が高まる可能性があり、

今後も、磁気浮上式鉄道車両システムの最適設計について、多角的に検討を実施していく。

## 文献

- 1) 藤原俊輔, 藤本健: 浮上と案内を兼用する誘導反発磁気浮上の特性, 電気学会論文誌, Vol. 112-D, No. 5, pp. 459-466, 1992
- 2) 村井敏昭, 岩松勝, 藤原俊輔: 240度2層隔極配置リニア同期モータの特性, 電気学会研究会資料, No.LD-91-95, pp.53-62, 1991
- 3) 川口育夫, 加賀重夫, 中島強, 奥井明伸, 重枝秀紀, 北野淳一: 山梨実験線のインバータ駆動制御特性: 鉄道総研報告, Vol.12, No.8, pp.9-14, 1998
- 4) 藤原俊輔: 誘導式磁気浮上でのギャップの検討, 電気学会研究会資料, No.TER-94-24/LD-94-61, pp.85-92, 1994
- 5) 水野克俊, 杉野元彦, 田中実, 小方正文: 希土類系高温超電導線材を用いた起磁力700kA実機大コイルの開発, 鉄道総研報告, Vol.31, No.1, pp.5-10, 2017
- 6) 渡邊健, 鈴木江里光, 米津武則, 笹川卓, 星野宏則: 希土類系高温超電導磁石の搭載を想定した車両運動特性, 鉄道総研報告, Vol.29, No.11, pp.5-10, 2015
- 7) 米津武則, 渡邊健, 鈴木江里光: 希土類系高温超電導磁石搭載時の磁気浮上式鉄道車両の起磁力制御に関する検討, 日本AEM学会誌, Vol.24, No.3, pp.184-189, 2016
- 8) 米津武則, 渡邊健, 鈴木江里光: 超電導磁気浮上式鉄道車両のギャップと浮上案内特性の関係の検討, 電気学会研究会資料, No.LD-16-8, pp.39-44, 2016
- 9) 米津武則, 渡邊健, 鈴木江里光, 坂本泰明: 超電導磁気浮上式鉄道車両のギャップ縮小がリニア同期モータの特性に与える影響の検討, 電気学会研究会資料, No.RM-16-101/LD-16-109, pp.35-40, 2016
- 10) 村井敏昭, 藤原俊輔: 最適化手法を用いた超電導磁気浮上方式におけるコイル諸元の設計, 電気学会論文誌, Vol.117-D, No.7, pp.905-911, 1997
- 11) 松江仁, 饗庭雅之, 鈴木正夫: FRP ブッシュを適用した推進浮上案内兼用コイルの応力評価, 鉄道総研報告, Vol.22, No.11, pp.17-22, 2008
- 12) 饗庭雅之, 村井敏昭, 鈴木正夫, 高橋紀之: 超電導磁気浮上式鉄道実用型PLGコイルの開発, 第10回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 (J-Rail 2003), No.2303, pp.313-316, 2003