

浮上式鉄道車両の案内系磁気ばね特性

米津 武則* 渡邊 健*
鈴木 江里光* 笹川 卓**

Characteristics of Magnetic Springs for the Guidance of Superconducting Maglev Vehicles

Takenori YONEZU Ken WATANABE
Erimitsu SUZUKI Takashi SASAKAWA

The lateral and rolling components of the magnetic springs of superconducting Maglev vehicles are strongly coupled, and their characteristics are barometers to decide the take-off velocity of the vehicle. In order to design the Maglev vehicle effectively, it is important to understand the principles to be applied to determine the spring specifications with respect to the design parameters: the electrical gap and magnetomotive force of the superconducting magnet. In this paper, a study by computer simulations on the effect of changing the design parameters is described, referring to the principles of the electrodynamic suspension and the vehicle dynamics of the Maglev vehicles.

キーワード：浮上式鉄道車両，ギャップ，超電導磁石起磁力，浮上開始速度，曲線走行

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道（以下、浮上式鉄道）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車両の浮上・案内が行われる電磁誘導形磁気浮上（EDS: Electrodynamic Suspension）方式であり¹⁾、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。図1に浮上式鉄道の構成を示す。

浮上式鉄道車両の浮上・案内系の電磁力特性は先行研究において既に理論的に検討されており、定式化されている¹⁾。また、地上コイルの諸元の最適化を目的として非線形最適化手法を用いた設計手法が考案されてい

る²⁾。しかしながら、先行研究における最適設計は地上コイル諸元を対象とした研究であり²⁾、それ以外の設計パラメータ、例えば、ギャップ³⁾（電氣的ギャップ：超電導コイル～浮上案内コイル導体中心間左右方向距離）、超電導磁石起磁力、台車負担質量も浮上式鉄道の設計の際の検討対象とした場合、従来と比較して浮上式鉄道の設計の自由度が向上する可能性があり、詳細な検討を行う価値があると考えられる。

これまで、基礎検討として、ギャップ・超電導磁石起磁力等、地上コイル諸元以外の設計パラメータの変更が電磁力特性に与える影響を検討してきた^{3) 4)}。

浮上式鉄道の設計は、超電導磁石・地上コイル・車両のサスペンション等、個々の要素技術の詳細設計と合わせて考える必要があるため、電磁力特性のみを考慮して最適設計を考えればよいわけではない。浮上式鉄道の設計の際に検討すべき設計パラメータは多岐にわたり、また、設計の評価項目、つまり、前報³⁾で述べた磁気抗力等、設計の良し悪しを判断する指標も多種多様なものが存在する。

既報^{3) 4)}や本報における研究は、そのような、全ての設計パラメータ・設計評価項目を検討対象とするわけではなく、電磁力特性・車両運動特性に関連した事項について、基礎的検討を行うことを目的としている。

本報では、浮上式鉄道の各種の設計評価項目の中で、案内系磁気ばね特性に関して計算機シミュレーションにより検討した結果を、電磁力・車両運動の基本原理と関連付けて説明する。

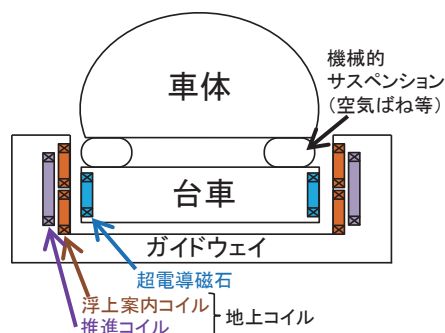


図1 浮上式鉄道の構成

* 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

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

電磁力特性に関しては、浮上式鉄道の設計パラメータであるギャップ・超電導磁石起磁力の変更が案内系磁気ばねの特性に与える影響について検討した。

車両運動特性に関しては、ギャップ・超電導磁石起磁力を変更した際に値の変わる案内系磁気ばねが、浮上式鉄道車両の曲線区間走行時の平衡位置に与える影響について検討した。

設計パラメータと電磁力特性・車両運動特性の関係を検討し、基本原理と関連付けて見通しの良い定性的な知見を得ることは、試行錯誤の手間を短縮することにも繋がる²⁾ 可能性があり、効率の良い浮上式鉄道の設計にも寄与できると考えられる。

2. 案内系磁気ばねの基本原理

ここでは、案内系磁気ばねに関連する電磁力・車両運動の基本原則について説明する。

図2に超電導コイル・浮上案内コイルの配置および座標系の定義⁴⁾を示す。台車には片側4個ずつの4極2列の超電導コイルが配置されており、台車の両側のガイドウェイに浮上案内コイルが等間隔で取り付けられている⁵⁾。座標系に関しては、車両進行方向（前後方向）を x 軸、鉛直方向（上下方向）を z 軸、左右方向を y 軸とし、 x 軸、 y 軸、 z 軸まわりの回転をそれぞれローリング ϕ 、ピッチング θ 、ヨーイング ψ とする¹⁾ ⁶⁾。

側壁浮上方式においては、前述のように、浮上と案内の機能は同じ浮上案内コイルで兼用されている¹⁾。直線区間を通常走行している時の浮上系の電磁力特性を検討する際は、台車が左右中立位置にある場合の特性を考慮すればよい。案内系の影響を考慮する必要はないが、案内系の電磁力特性を検討する際は、台車上下中心は磁気浮上による浮上力と車両の質量による重力が均衡する位置で浮上走行することを考えると、浮上系の影響と合わせて考える必要がある¹⁾。

浮上案内コイルは向かい合う1対の8の字コイルが2本のマルチフラックスケーブルで接続されて1つの閉回路を構成しており、独立した3つの閉回路に流れる電流で

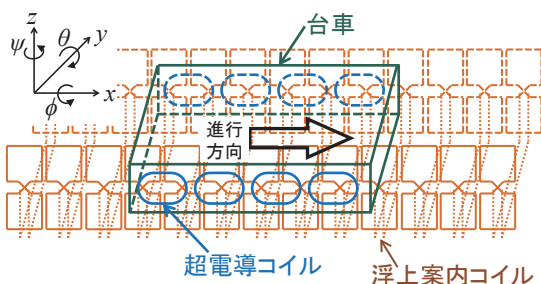


図2 超電導コイル・浮上案内コイルの配置および座標系の定義

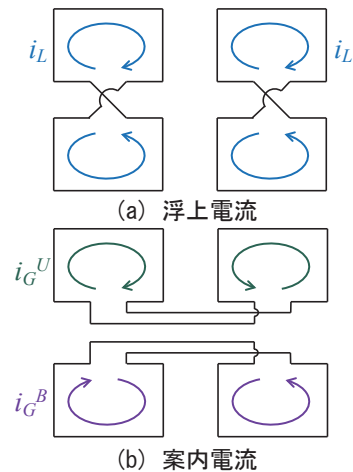


図3 浮上案内コイルの閉回路の等価回路

表すことができる¹⁾。図3に、浮上案内コイルの閉回路に流れる電流の等価回路を示す。

図3において、 i_L を浮上電流、 i_G^U を上側案内電流、 i_G^B を下側案内電流と呼び、 i_G^U と i_G^B を合わせて案内電流と呼ぶ¹⁾。浮上電流、案内電流により、超電導コイルと浮上案内コイルの間に電磁力が作用する。

浮上式鉄道車両は、高速走行時には十分な浮上力・案内力が発生して安定した浮上走行が可能であるが、低速域では浮上案内コイルに発生する誘導電流が減少し、浮上力・案内力が不足する。このため、低速域では車両の下方と左右に車輪を出して車輪走行を行う⁵⁾。

微小変位領域において、浮上式鉄道の台車に作用する電磁力は台車の変位に比例するとみなせるので、超電導コイル～浮上案内コイル間に発生する電磁力はばねの作用力で置き換えられる。電磁力を変位で除し、符号の正負を逆転させた値を「磁気ばね定数」と呼ぶ¹⁾ ⁶⁾。

側壁浮上方式においては、左右方向とローリング方向の磁気ばねは強く連成する特性を有している⁶⁾。つまり、車両が左右方向に変位した場合、左右方向の復元力以外にも、ローリング方向のモーメントも発生する。連成の影響は低速域で顕著となり、浮上式鉄道車両が車輪走行から浮上走行に移行する速度（浮上開始速度）は連成の影響も考慮したばね定数である等価左右、等価ローリングばね定数の大きさに評価される²⁾ ⁷⁾。過去の設計検討²⁾においては、浮上走行に必要な条件として、等価左右ばね定数 1MN/m 以上、等価ローリングばね定数 $3\text{MN}\cdot\text{m/rad}$ 以上という指標を用いていた。これらのばね定数の値を大きくして浮上開始速度を低減できれば、車両の支持車輪のメンテナンスの低減等の利点を得られる⁵⁾。

次に、等価左右、等価ローリングばね定数の導出方法⁶⁾ ⁸⁾について説明する。他の座標を固定した状態で、 j 方向に変位あるいは角変位させたときの i 方向に作用する力あるいはモーメントから求められるばね定数を k_{ij} と

定義する⁶⁾と、左右・ローリング方向に関して式(1)の関係が存在する。

$$\begin{pmatrix} F_y \\ N_\phi \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} k_{yy} & k_{y\phi} \\ k_{\phi y} & k_{\phi\phi} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 y, ϕ は台車重心の左右変位およびローリング角変位、 F_y, N_ϕ は台車重心に作用する左右力およびローリングモーメントである。なお、 $k_{\phi y}$ と $k_{y\phi}$ は連成ばね定数であり、同じ値となる⁶⁾。

ローリングモーメントを0として台車重心に左右力のみを与えたときの左右変位から計算した左右方向のばね定数を等価左右ばね定数 $k_{y\text{eq}}$ 、左右力を0としてローリングモーメントのみを与えたときのローリング角変位から計算したローリング方向のばね定数を等価ローリングばね定数 $k_{\phi\text{eq}}$ と定義する⁶⁾と、式(1)より式(2)が得られる。

$$\begin{cases} k_{y\text{eq}} = \begin{vmatrix} k_{yy} & k_{y\phi} \\ k_{\phi y} & k_{\phi\phi} \end{vmatrix} / k_{\phi\phi} \\ k_{\phi\text{eq}} = \begin{vmatrix} k_{yy} & k_{y\phi} \\ k_{\phi y} & k_{\phi\phi} \end{vmatrix} / k_{yy} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、連成項比 $\varepsilon = (k_{y\phi} \cdot k_{\phi y}) / (k_{yy} \cdot k_{\phi\phi})$ を用いると式(2)は式(3)のように変形できる⁸⁾。

$$\begin{cases} k_{y\text{eq}} = k_{yy}(1 - \varepsilon) \\ k_{\phi\text{eq}} = k_{\phi\phi}(1 - \varepsilon) \end{cases} \quad (3)$$

3. 計算結果：案内系磁気ばね

3.1 均衡変位

案内系磁気ばねの計算結果を述べる前に、前報³⁾でも述べた、均衡変位の計算結果を概説する。

台車負担質量20000kg³⁾、走行速度500km/hとし、直線区間走行時の均衡変位を計算した。図4にギャップ185mm, 175mm, 160mm^{3) 4)}における超電導磁石起磁力580kA～700kAの場合の均衡変位を示す。図4からわかるように、超電導磁石起磁力を増大させるほど、また、ギャップを縮小させるほど、均衡変位は小さくなる(台車重心が浮上案内コイル上下中心に対して沈み込

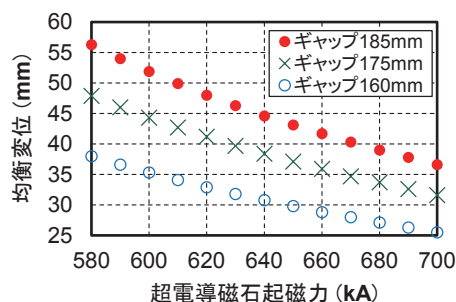


図4 均衡変位(台車負担質量:20000kg)

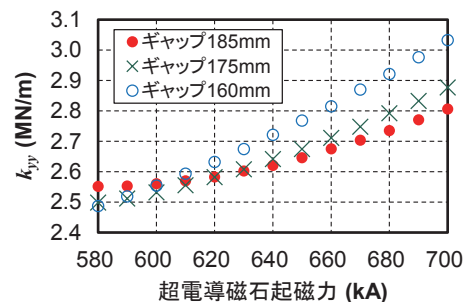
む量が小さくなる)。このことは、浮上系の電磁力特性が向上したことを表す³⁾。

3.2 左右・ローリング・連成ばね定数

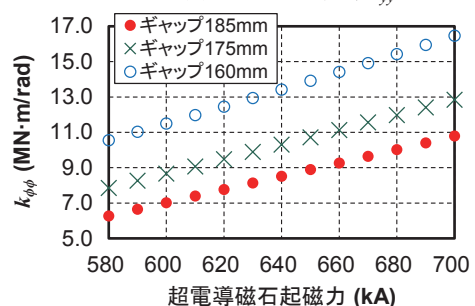
3.1節と同じ条件において、均衡変位における案内系磁気ばねのばね定数を計算した。図5に、左右ばね定数 k_{yy} 、ローリングばね定数 $k_{\phi\phi}$ 、連成ばね定数 $k_{\phi y}$ の計算結果を示す。図5に示した計算結果により、 $k_{yy}, k_{\phi\phi}$ に関して、以下のことが言える。

- (ア) 左右ばね定数 k_{yy} 、ローリングばね定数 $k_{\phi\phi}$ は超電導磁石起磁力を増大させるほど増大する。
- (イ) ローリングばね定数 $k_{\phi\phi}$ はギャップを縮小させるほど増大する。
- (ウ) 左右ばね定数 k_{yy} については、超電導磁石起磁力が大きい場合は、ギャップ縮小により増大するが、超電導磁石起磁力が小さい場合は、ギャップ縮小により減少することがある。

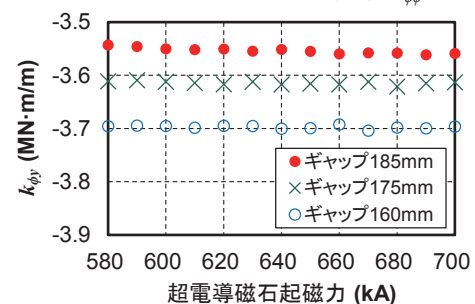
上述の(ア)～(ウ)のうち、(ア)、(イ)についてはギャップ縮小・超電導磁石起磁力増大により電磁力特性が向上することを示しており、浮上系の場合と同じ傾向である。



(a) 左右ばね定数 k_{yy}



(b) ローリングばね定数 $k_{\phi\phi}$



(c) 連成ばね定数 $k_{\phi y} (=k_{y\phi})$

図5 均衡変位における磁気ばね定数

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

(ウ)については、超電導磁石起磁力が小さい場合、ギャップ縮小により左右ばね定数 k_{yy} が減少する、つまり、電磁力特性が低下する場合があります、浮上系の場合と逆の傾向を示す場合が存在することを示している。

3.3 ギャップ縮小時に左右ばね定数が減少する要因

3.2節の(ウ)で述べた「ギャップ縮小により左右ばね定数 k_{yy} が減少する場合が存在する」ことの要因については、ギャップ縮小による均衡変位の変化で説明できる⁴⁾。

図6に、超電導磁石起磁力を700kA一定とした場合のギャップ・台車上下変位と k_{yy} 、 $k_{\phi\phi}$ の関係を示す。図6より、台車上下変位を減少させるほど、 $k_{\phi\phi}$ は増大するのに対し、 k_{yy} は減少することがわかる。

図7でギャップ縮小が左右ばね定数 k_{yy} に与える影響を説明する。ギャップを縮小すると、車上の超電導コイルの位置は浮上案内コイルに近接する(図7中「左右方向の変化」)。一方、3.1節で述べたように、浮上系の電磁力特性の向上により均衡変位が減少し、超電導コイルの位置は上下方向にも変化(図7中「上下方向の変化」)し、ギャップ縮小には左右方向の変化・上下方向の変化の2つの要素が存在する。

「左右方向の変化」要素に関しては、鎖交磁束が増大し、 k_{yy} が増大する方向に影響を及ぼす⁴⁾。一方、「上下方向の変化」要素に関しては、超電導コイルの位置が上昇する影響により、浮上案内コイルの下側単位コイルとの鎖交磁束が減少するので、浮上電流 i_L 、下側案内電流 i_G^B は減少する。また、案内力にとって最も影響が大きい成

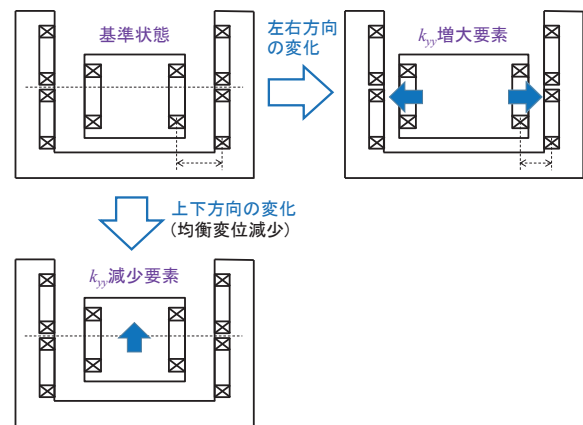


図7 ギャップ縮小が左右ばね定数 k_{yy} に与える影響の説明

分である⁵⁾、超電導コイル下辺～浮上案内コイルの最下辺間の距離が離れるので、「上下方向の変化」要素に関しては、 k_{yy} が減少する方向に影響を及ぼす⁴⁾。

ギャップ縮小により、左右ばね定数 k_{yy} が増大するか減少するかは、上述の「左右方向の変化」要素と「上下方向の変化」要素のどちらの影響が大きいかによるが、超電導磁石起磁力が小さい場合は、「上下方向の変化」要素の影響が大きくなり、3.2節(ウ)で述べたように、ギャップ縮小により k_{yy} が減少したものと考えられる。

3.4 等価左右・等価ローリングばね定数

次に、浮上開始速度を決定する指標である等価左右ばね定数 k_{yeq} 、等価ローリングばね定数 $k_{\phi eq}$ の計算結果を図8に示す。これらは、図5に示した k_{yy} 、 $k_{\phi\phi}$ 、 $k_{\phi y}$ より導出した。

図8より、 k_{yeq} 、 $k_{\phi eq}$ 共に、超電導磁石起磁力を増大させるほど、また、ギャップを縮小させるほど、ばね定数が増大することがわかる。浮上開始速度は k_{yeq} 、 $k_{\phi eq}$ の大きさによって評価されるため、結果的に、ギャップを縮小させるほど、また、超電導磁石起磁力を増大させるほど、浮上開始速度の低減に寄与できる。

4. 計算結果：曲線走行時の車両平衡位置

浮上式鉄道の車両運動特性の評価項目も多岐にわたるが、本報では、曲線走行時の車両平衡位置について計算した結果を述べる。

通常の鉄車輪・レールの鉄道車両と同様、浮上式鉄道車両においても、曲線外側に向かって車両に遠心力が作用するので、その影響を打ち消すために、外側のガイドウェイを内側のガイドウェイより高く配置する。図9に曲線走行の概念図を示す。浮上式鉄道車両においては、曲線走行時に最も近接する箇所である台車端部～ガイド

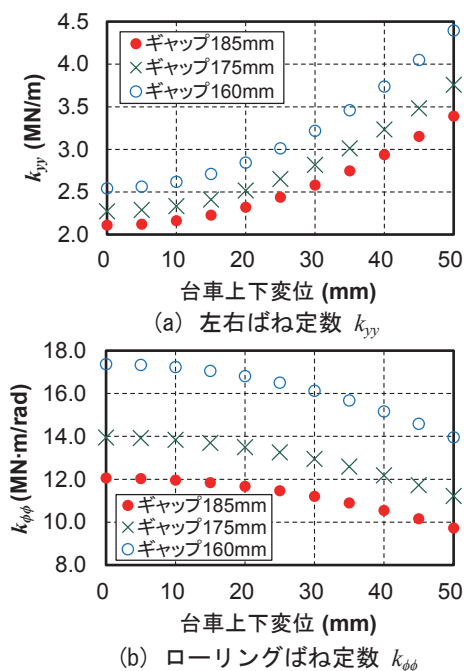


図6 台車上下変位と磁気ばねの関係
(超電導磁石起磁力: 700kA)

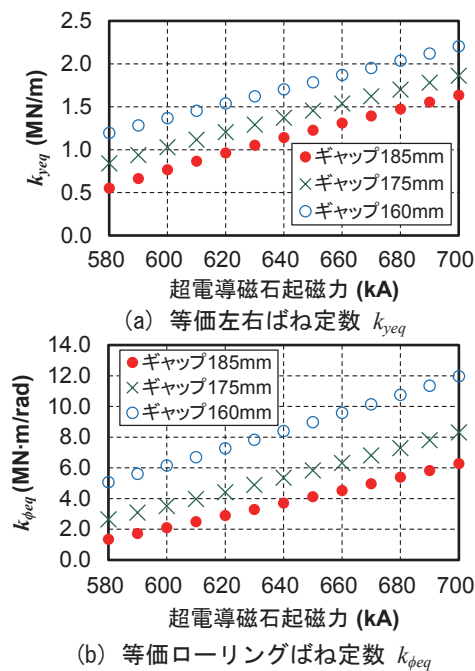


図8 均衡変位における等価磁気ばね定数

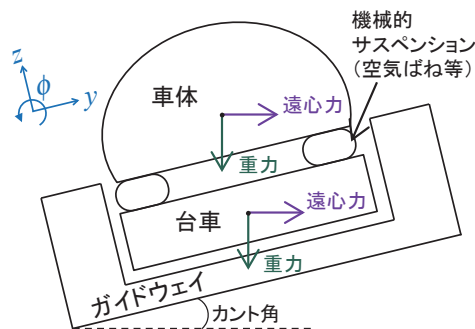


図9 曲線走行の概念図

ウェイ表面間の距離が十分に確保できるように設計している⁷⁾。

座標系は、図9中に示したように、ガイドウェイ底面に平行な方向をy軸、垂直な方向をz軸と定義した。

曲線半径は8000m、カント角は10°とした⁷⁾。この曲線線形では、遠心力と重力の左右方向分力が均衡する速度(均衡速度)は420km/hであり⁷⁾、均衡速度より低速で曲線を通過した際には曲線の内側に、高速で通過した際には曲線の外側に定常変位を生ずる。

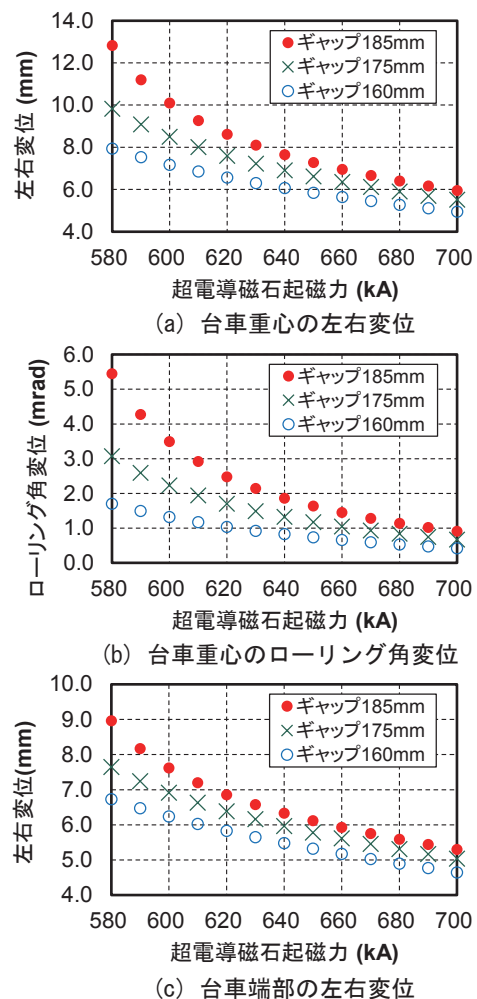
案内系磁気ばねは、本報においては、基礎的検討として、図5に示した直線区間走行時の車両平衡位置における値を用いた。浮上式鉄道車両の左右・ローリング方向の運動方程式⁹⁾に対し、外力として台車・車体重心位置に重力および遠心力^{例えば、10)}を与えて力の釣り合い位置を導出した。台車負担質量20000kgの内訳は台車質量6000kg、車体質量14000kgとした⁹⁾。また、走行速度500km/hとし、その他の運動方程式の計算に必要な

諸元も既報⁹⁾と同一とした。

図10に、ギャップ・超電導磁石起磁力と曲線走行時の平衡位置の変位・角変位の関係を示す。図10(a)(b)は台車重心の左右変位・ローリング角変位を、図10(c)は台車端部¹¹⁾の左右変位を示している。

図10より、今回計算対象範囲とした全ての条件において、ギャップを縮小させるほど、また、超電導磁石起磁力を増大させるほど、台車重心の左右変位およびローリング角変位は減少し、台車端部の左右変位も減少することがわかる。このことは、ギャップ縮小・超電導磁石起磁力増大により、曲線走行における左右方向の特性が向上することを示す。

平衡位置の値が増大するか減少するかの要因については、詳細には、台車～車体間の機械的なサスペンションや車体の運動等も考慮する必要があるが、3節で述べた、ギャップ・超電導磁石起磁力と案内系磁気ばねの関係と関連付けて簡易に説明すると、平衡位置の台車重心左右変位は、左右方向の外力を台車重心に与えた時の台車重心左右変位で評価される、つまり、台車左右変位が増大

図10 曲線区間走行時の平衡位置
(曲線半径8000m, カント角10°, 500km/h 走行)

特集：浮上式鉄道技術と在来方式鉄道への応用

するか減少するかは、等価左右ばね定数 k_{yeq} の増大・減少で概ね評価することができると考えることができる。

なお、本報で述べた検討においては、曲線走行時の平衡位置を算出するために、直線区間走行時の平衡位置における案内系磁気ばねの値を用いたが、実際には、曲線走行時は車両の平衡位置が左右にずれ、等価左右ばねの算出の際は左右・ローリングのみではなく、上下との連成も考慮に入れる必要がある⁶⁾。また、質量の大きい車両が曲線を低速走行する場合など、左右平衡位置が中央から大きくずれた場合、左右変位と左右方向の電磁力の関係の非線形性も考慮しなければならない⁶⁾。

今回の検討は、基礎理論との関連付けを目的として、上述のような簡易な手法を用いており、実際の平衡位置の詳細な算出⁷⁾を目的としたものではないことに留意されたい。

5. まとめ

浮上式鉄道を設計する際に考慮しなければならない設計パラメータや設計評価項目は多岐にわたり、多数の項目が存在するが、電磁力特性・車両運動特性に関連した事項について、基礎的研究を行うことを目的とし、これまで検討を行ってきた³⁾。本報では、案内系磁気ばね特性に関して、電磁力特性・車両運動特性の観点から検討を行った結果を述べた。

電磁力特性に関しては、設計パラメータとしてギャップ・超電導磁石起磁力を変更した際に、案内系磁気ばねに与える影響について検討した。左右ばね定数に関して、ギャップを縮小すると減少する場合が存在することを示し、電磁力特性の基本原則と関連付けてその理由を説明した。なお、ギャップ縮小・超電導磁石起磁力増大により等価左右・等価ローリングばね定数は増大するので、結果として、浮上式鉄道車両の浮上開始速度低減に寄与する。

車両運動特性に関しては、設計評価項目の一つである曲線走行時の車両平衡位置に関して、電磁力特性の検討で計算した案内系磁気ばね定数の値を用いて検討を行った。ギャップを縮小させるほど、また、超電導磁石起磁力を増大させるほど、台車左右変位は減少し、曲線走行時の左右方向の特性が向上することを示した。台車左右変位が増大するか減少するかは、等価左右ばね定数の増大・減少で概ね評価できるためであると考えられる。

先行研究²⁾において、浮上式鉄道の評価項目の一つである浮上開始速度を決定する指標として、等価左右ばね定数・等価ローリングばね定数が用いられてきており、本報で述べた知見により、その考え方が変更になること

はない。また、別の評価項目である、曲線走行時の車両平衡位置に関しても、先行研究^{6) 7)}において既に設計手法が確立されており、その手法を変更する知見が得られたわけではない。本報で述べた結果は、先行研究^{1) 2) 6) 7)}において既に確立された設計手法、設計結果を変更するものではないが、その設計手法を今一度再検討し、どうしてそうなるのか、電磁力特性・車両運動特性の基本原則と関連付けて、その詳細なメカニズムを明らかにすることを目的として、検討を行ったものである。

本研究が浮上式鉄道の詳細設計に関する原理解明の一助となることを目指し、今後も詳細な検討を重ねていく。

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, 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
- 3) 米津武則, 渡邊健, 鈴木江里光, 笹川卓: 地上コイル及び超電導磁石の設計における電氣的ギャップ縮小の効果, 鉄道総研報告, Vol. 31, No. 1, pp. 11-16, 2017
- 4) 米津武則, 渡邊健, 鈴木江里光, 笹川卓: 超電導磁気浮上式鉄道車両の案内系の電磁力特性に関する検討, 電気学会研究会資料, No. MAG-17-173/MD-17-115/LD-17-094, pp. 69-74, 2017
- 5) 村井敏昭, 藤原俊輔: 超電導磁気浮上式鉄道のための浮上技術の動向, 電気学会論文誌, Vol. 118-D, No. 5, pp. 564-567, 1998
- 6) 吉岡博, 渡邊健: 側壁浮上システムにおける車両運動特性, 鉄道総研報告, Vol. 8, No. 10, pp. 29-34, 1994
- 7) 吉岡博, 鈴木江里光, 清野寛, 阿座上雅芳, 大島浩, 中西俊勝: 山梨実験線車両 MLX01 の車両運動特性, 鉄道総研報告, Vol. 12, No. 8, pp. 21-26, 1998
- 8) 澤野英二, 佐々木拓二, 地藏吉洋, 池下浩司: 専用超電導磁石を使用した誘導集電装置の走行安定性について, 電気学会研究会資料, No. LD-92-92, pp. 45-53, 1992
- 9) 渡邊健, 吉岡博, 鈴木江里光, 遠竹隆行, 永井正夫: 超電導磁気浮上式鉄道車両の振動制御に関する研究(左右・ロール系の振動制御), 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 71, No. 701, pp. 114-121, 2005
- 10) 垂井晃一: わかりやすい保線講座② カント, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 51, No. 2, pp. 139-142, 2013
- 11) 阿座上雅芳: 山梨実験線第一編成車両用台車の開発, 鉄道総研報告, Vol. 10, No. 1, pp. 11-16, 1996