UDC 629.4.027.1:621.332.43:629.4.032:629.1.074

論文

61-B65

短一次式磁気車輪における推進系の浮上系への影響

正員 藤崎 敬介 (東京大)

正員 正田 英介 (東京大)

1. はじめに

磁気浮上鉄道は、低公害性、低保守性かつ広い速度範囲をもつため、その開発、応用が世界中で進められている⁽¹⁾。

浮上方式としての常電導吸引制御式は、超電導誘導反発式と比べて、現在の要素技術の延長線上で実用化でき、低速から高速まで適用できる、といった利点を有する。しかし、その実用化を進めるには、機器の小形・軽量化、エネルギー効率の向上およびそのための浮上ギャップ長の短縮が重要な問題点である。そのため、推進系および浮上系の機器の機能を共用し同一フレーム内に収納させる構造が考案され、その性能が推進・支持・案内といった鉄車輪と同一の機能をもって軌道に忠実に追従することができるので、こうした構造を磁気車輪と呼んでいる⁽²⁾。

推進装置としての短一次式の片側式リニア誘導電動機(以下 SLIM と略記)は、長一次式と比べて、地上設備が簡素化でき、需要に応じて線路の拡張が容易である。しかし、短一次式磁気車輪の場合、

(a) SLIM の発生する垂直力と浮上系の吸引力とが同一方向にあり、かつ浮上系のギャップ長変位と SLIM のギャップ長変位との大きさが相互に制約されること。

(b) SLIM のピッチングおよびある速度制御下での上下運動は不安定性があること⁽³⁾。

(c) 磁気車輪と軌道とが非接触であるため、両者の相対位置が走行時に変動すること。のために、SLIM の大きさが浮上系に影響を与えるだ

けではなく、磁気車輪と軌道間の相対位置変位時に SLIM の垂直力およびピッチングモーメントが変動し、浮上系に外乱を与える。従って、浮上ギャップ長を短縮し、エネルギー効率を高めるためには、SLIM の浮上系への影響を解析し、評価する必要がある。

以下では簡単のため上下方向の運動だけを考え、SLIM の左右方向の運動およびその力は無視するものとする。また、浮上系は、系を安定化し軌道への追従機能をもつように与えられているものとする。

SLIM の発生する推進力、垂直力およびピッチングモーメントは速度制御によって決まるが、それらは SLIM 一次電流一定の下ではすべり周波数の関数となっている⁽⁴⁾。そのため SLIM の速度制御には、走行時に SLIM の発生する力を一定となるように、すべり周波数一定制御を用いる⁽⁵⁾。

しかしすべり周波数の値としては、今までは、SLIM の垂直力が零となる値が用いられている⁽⁶⁾。そこでは SLIM の垂直力の大きさのみが取り上げられて、ピッチングモーメントの浮上系への影響および一次側と二次側との相対位置変動による相互作用は解析に考えられていない。更に、SLIM の垂直力が零となる点は、推進力特性にとって効率の悪い場合が多いため、効率の点で問題があるとされている⁽⁷⁾。

そこで本論文では、まず SLIM 発生力の速度依存性について述べ、その大きさをすべり周波数をパラメータとしてエネルギーの点で評価する。次に利用位置変位時の推進系と浮上系との相互作用について相対位置感度という変数を導入して解析し、その解析の妥当性を実験で検証する。実験データとの対比上短一次式磁気車輪として、HSST-03 のモジュールを具体的数値例としてとりあげる。

Influence of Traction System on Levitation System in Short-stator Magnetic Wheel. By Keisuke Fujisaki, Member & Eisuke Masada, Member (Faculty of Engineering, University of Tokyo)

藤崎敬介: 正員, 東京大学大学院工学系研究科電気工学専門課程

正田英介: 正員, 東京大学工学部電気工学科

2. 短一次式磁気車輪の構成

短一次式磁気車輪では、浮上機能としては電磁石が、推進機能としては SLIM が用いられ、それらが同一フレーム内に収納されているものとする。電磁石は軌道上のレールと対向して上下方向および左右方向の力を車輪に発生させ、SLIM は進行方向に力を発生する。構造の簡素化のため、SLIM の面は水平面上に配置させることが多く、その面に垂直な SLIM の垂直力は上下方向となり、電磁石の支持方向と一致する。

こうした構造のうち、本論文では図 1 に示す HSST-03 のモジュール構造に注目する⁽⁸⁾。そこでは 4 個の電磁石がスタガ配置されているが、左右変位がなく線形関係がなりたつ微小変位内では、各前後 2 個の電磁石は 1 個の電磁石と等価に置き換えることができる。SLIM は 1 個あり中低速用に設計され、その面は水平面に配置されている。従って、この構造の短一次式磁気車輪を取り扱っても上下動およびピッチングの相互作用の範囲内では、短一次式磁気車輪としての一般性は失われないものといえる。この配置のモジュールが左右並列に計 6 個ある。

Fig. 1. 1 module construction of HSST-03.

表 1 HSST-03 の推進系、浮上系の値

Table 1. Constant values of traction system, levitation system of HSST-03.

(a) 推進系

	記号	値	単位
《定 格》			
相間電圧 (50 Hz 運転時)		104	V
線電流		190	A
出力 (50 Hz 運転時)		15.5	kW
推力		1.86	kN
《一次側》			
モータ長	L	2831	mm
相数	m	3	
極数	p	18	
ポールピッチ	τ_p	150	mm
スロットピッチ	τ_s	25	mm
《二次側》			
鉄心厚さ	d_1	25	mm
アルミニウム厚さ	d_2	5	mm
ギャップ長 (メカニカル)	g	13	mm

(b) 浮上系

《電磁石》		スタガ配置支持案内兼用	
方 式			
浮上ギャップ長	z_s	11	mm
スタガ量	x_g	5	mm
磁石の歯幅	w	25	mm
モジュール中心から前方 (No. 1, 4)	l_1	470	mm
電磁石までの長手方向距離			
モジュール中心から後方 (No. 2, 3)	l_2	1410	mm
電磁石までの長手方向距離			
《二次サスペンションの係数》			
支持系	k_s	49400	N/m
	c_s	2310	Ns/m

(c) 慣性量 (測定値)

モジュールの質量	M_m	780.0	kg
ピッチング・モーメント	J_{pm}	870.0	kgm ²
車体の質量	M_b	7990.2	kg
ピッチング・モーメント	J_{pb}	67000.	kgm ²

表 1 に HSST-03 のモジュール構造における推進系、浮上系および実験で用いた慣性量の値を示す。

3. SLIM の速度制御

速度制御法としてすべり周波数一定を用いるが、すべり周波数は、推進力、垂直力およびピッチングモーメントといった SLIM の発生力の大きさを決める。このため、すべり周波数としては、SLIM の効率の点および浮上系との相互作用の点を考慮する必要がある。比較のため推進力を最大にするものと、垂直力を零に抑制したものとのを考える。

こうしたすべり周波数の値の導出には、磁束密度の端効果成分を無視して基本波成分だけに注目し、かつ二次電流が一次電流の大きさに等しいものとしたモデルを考える。すると、SLIM の一次電流一定での垂直力を零とするすべり周波数は、

$$SF = \frac{\pi g \rho d_2}{2 \tau_p^2 \mu_0} \sqrt{\left(\frac{\tau_p}{\pi g}\right)^2 - 1} \dots \dots \dots (1)$$

ρ : 二次導体導電率, μ_0 : 真空透磁率

他の変数は表1参照

で, また, 各電源周波数に対し最大推進力を出すすべり周波数は,

$$SF = \frac{\pi g \rho d_2}{2 \tau_p^2 \mu_0} \dots \dots \dots (2)$$

で与えられる⁽⁴⁾。(1)式で与えられるすべり周波数が従来用いられたものといえる。

4. SLIM 発生力の大きさによる相互作用

推進系の浮上系への影響のうち, 本章では SLIM 発生力の大きさについて述べ, SLIM と電磁石との全システムから望ましいすべり周波数について述べる。

(4・1) SLIM 発生力の速度特性 まず, SLIM 発生力のすべり周波数依存性を解析データで示す。

SLIM の特性解析用モデルとしては, 端効果をも考慮に入れたものを用いる。しかし本論文では, SLIM の上下動およびピッチングといった動特性を把握し浮上系との相互作用を考えているので, 横方向は無限大だが長手方向には有限な一次元モデルを用い, 一次電流は薄いシート状のもので近似する。ピッチ角変位についてはこの変位がたかだか $\pm 1 \text{ mrad}$ なので, ピッチ角変位時の SLIM 各部でのギャップ長はピッチ角の一次摂動項までで近似され, また, Maxwell の式より得られる磁束密度もピッチ角の一次摂動項までで近似されるものとする⁽⁹⁾。一次抵抗の値は実験データから得, 一次漏れリアクタンスは回転機の場合と同じように SLIM の寸法から決る計算値である⁽¹⁰⁾。

HSST-03 における計算結果を図2に示す。図中では比較のためすべり周波数一定と電源周波数一定とした曲線を入れてあり, SLIM 一次電流一定としている。

(1)式から得られるすべり周波数は 13.5 Hz となり, そこでは垂直力だけではなくピッチングモーメントも零近くに抑制されているが, 推進力は小さな値になっている。一方(2)式から得られるすべり周波数は 5.5 Hz となり, そこでは各電源周波数に対して最大推進力をだしているが, 垂直力の大きさやピッチングモーメントは $SF=13.5 \text{ Hz}$ の場合と比べて全速度域にわたって大きな値になっている。

従って, SLIM の垂直力を零となるようなすべり周波数の値で速度制御を行なうと, ピッチングモーメントも小さくなるが推進力特性は悪くなり, また, 一方推進特性を改善するようなすべり周波数の値で速度制

図2 SLIM 発生力の速度特性 (SLIM 一次電流=190 A)

Fig. 2. Velocity characteristics of thrust force, normal force and pitching moment of SLIM. (SLIM primary current=190 A)

御を行なうと, 垂直力とピッチングモーメントは大きくなる。

(4・2) SLIM 発生力の評価 SLIM の推進力と垂直力およびピッチングモーメントのトレードオフ関係を, SLIM と浮上系の一体化したシステムで考える。そこでは, 両者にエネルギーを供給して, ある距離, 速度に到達するものと考えることができる。両者

は上下方向の力によって結合され、SLIM の吸引力は電磁石の支持すべき重量を等価的に増大させ、電磁石電流を増大させることになる。

各すべり周波数に対して、出力としての推進力が一定となるように SLIM 一次電流を調整しておけば、一定時間内 SLIM を走行させた後の到達速度および到達距離は一定とすることができる。各すべり周波数に対する SLIM と電磁石への供給エネルギーの和を比較することにより、エネルギー的に望ましいすべり周波数を解析的に得ることができる。

HSST-03 を停止時から 10 秒間力行させたときの到達距離および到達速度、ならびにそのときの 1 SLIM 4 電磁石の供給エネルギーおよびその和を図 3 に示す。但し、ここでは各すべり周波数に対して、始動時の推進力を 1.86 kN となるように SLIM 一次電流を設定している。また、これらの数値は、10 秒間を

100 分割して求めている。

到達距離および到達速度は全すべり周波数に対して約 23 km/h および約 34 m に達しているの、力行 10 秒間の 1 モジュールあたりの出力性能はほぼ同じといえる。

すべり周波数が小さくなると SLIM の垂直力やピッチングモーメントが増大するので、4 電磁石の供給エネルギーは大きくなっている。一方 SLIM では、すべり周波数は小さくなるほど供給エネルギーが減少していくが、5 Hz を境に、同期速度走行であるすべり周波数零付近に近付くと、SLIM の供給エネルギーは逆に増大する。

しかし、4 電磁石の供給エネルギーの大きさは SLIM のそれよりも 3~10 倍小さいので、両者を足し合わせると電磁石の影響は小さいものとなる。従って、推進系・浮上系全体の供給エネルギーは、5 Hz 強のすべり周波数で最小になり、最もエネルギー効率が良いことがわかる。

このすべり周波数で速度制御を行なうと、従来の垂直力零となるすべり周波数 13.5 Hz のときと比べて、約 3 割の供給エネルギーの改善がなされる。また、すべり周波数が 5 Hz 以下での速度制御は、エネルギー効率の点から有用ではないことがわかる。

以上により、SLIM の吸引力増大によって電磁石電流が増大しても全体のエネルギーへの影響は定量的にほとんど無視され、SLIM にとって効率の良い点が全体的にエネルギー効率が良いことがいえた。

5. 相対位置変位時の相互作用

短一次式磁気車輪の走行時には、浮上しているため SLIM の一次側と二次側との相対位置が変位する。このとき SLIM の発生力も変動するので、SLIM が浮上系に及ぼしている垂直力およびピッチングモーメントの変動により両者の相互作用が生じる。本章では、相対位置変位時の解析法を述べ、HSST-03 に適用し、実験データで検証する。

〈5・1〉 相対位置感度の相互作用 一次側と二次側との相対位置変位時の SLIM の特性を、ここでは相対位置感度という変数を新たに導入して解析する。

SLIM の一次側と二次側との上下方向の相対位置変位は、通常の短一次式磁気車輪の大きさ内では、SLIM の中心点でのギャップ長と一次側と二次側とのピッチ角（進行方向上向きを正）で表され得る。そこでギャップ長およびピッチ角の変位時に、SLIM の発生力がどのように変動するかを表現することは重要で、その割合を相対位置感度と呼び、

図 3 SLIM 10 秒間力行時の到達距離および到達速度ならびに SLIM と 4 電磁石の供給エネルギー

Fig. 3. Reached length and velocity, and supplied energy to 1 SLIM and 4 electromagnets in 10 seconds running.

$$K_{Ab} = \frac{\partial A}{\partial b} \dots\dots\dots (3)$$

但し、 $A=T, N, P, T$: 推進力, N : 垂直力,

P : ピッチングモーメント

$b=g, t$ g : ギャップ長, t : ピッチ角

と定義する。このため相対位置感度が大きいことは、SLIM の相対位置変位時における影響を受けやすいことになり、乗り心地の点で問題があり、また浮上系への影響が大きいことになる。

(3)式の6種類の相対位置感度すべてに対して解析式を求めることは困難なので、計算上はギャップ長やピッチ角の微小変位に対する SLIM の諸特性の微小変動をギャップ長やピッチ角の変位量で割って、相対位置感度とする。ギャップ長では 1.0mm、ピッチ角では 1.0mrad の微小変化であれば、線形性および収束性は有効数字3けたまで補償される。

HSST-03 における相対位置感度の計算結果を図4, 5に示す。図4は、一次電流一定で電源周波数およびすべり周波数をパラメータとしたときのギャップ長変位に対する相対位置感度であり、図5はピッチ角変位に対する相対位置感度である。

ギャップ長変位に対する SLIM 発生力の相対位置感度の速度特性は、図2のそれぞれの速度特性と同じ傾向をもつ。つまり、推進力にとって効率の良いところでは、推進力のギャップ長変動に対する影響も大きく、垂直力およびピッチングモーメントの相対位置感度の極大値は同期速度で起こる。

従って、すべり周波数 13.5 Hz 一定の場合の方が、垂直力およびピッチングモーメントの相対位置感度に対しても抑制しているが、すべり周波数 5.5 Hz の場合は、推進力の相対位置感度においても各周波数に対して極値をとり、ギャップ長変位に対して推進力の変動が大きくなる。

ギャップ長変位に対する垂直力の相対位置感度 KN/g は、詳細に検討すると、すべりが1および-1の近くでは負の値になっているが、それ以外では正になっている。前者では垂直力が反発力になっている領域なので上下動に対して安定な動きとなることを示す⁽¹⁾。一方、後者では垂直力が吸引力になっている領域なので、吸引式電磁石の場合と同じく、上下動に対して不安定な動きとなることを示す。しかし、相対位置感度 KN/g が正から負に変わるすべりと、垂直力が反発力から吸引力に変わるすべりとを収束計算して比較すると、両者は必ずしも一致しないことがわかる。

一方、ピッチ角変位に対する相対位置感度の速度特

図4 SLIM のギャップ長変位に対する SLIM 発生力の相対位置感度の速度特性 (SLIM 一次電流=190 A 一定)

Fig. 4. Velocity characteristics of sensitivities of thrust force, normal force and pitching moment to gap length variation in SLIM. (SLIM primary current=190 A)

性は図2, 4での速度特性と異なる傾向を示し、特に推進力の相対位置感度の速度特性においては全く異なる。

推進力の相対位置感度は速度 30~40 km/h で全周

図5 SLIM のピッチ角変位に対する SLIM 発生力の相対位置感度の速度特性 (SLIM 一次電流=190 A 一定)

Fig. 5. Velocity characteristics of sensitivities of thrust force, normal force and pitching moment to pitching angle variation in SLIM. (SLIM primary current=190 A)

波数とも極大値を示しており、高周波数になるほどその影響は小さく、高速域でのピッチ角変位に対する推進力の変動はほとんど無視できることになる。垂直力の相対位置感度は、速度とともに増大するが、これは

垂直力の速度特性と逆の傾向を示す。

ピッチングモーメントの相対位置感度の符号が全速度域で正なので、ピッチ角増大とともに同じ向きに作用するピッチングモーメントも増大することになり、ピッチングに対して正帰還ループが存在することになる。

ピッチ角変位においてもすべり周波数の値が大きいほうが、相対位置感度は小さくなってピッチ角変位に対する影響は少ない。

〈5・2〉 根軌跡による相対位置感度の評価 前節では相対位置変位時の SLIM 特性として相対位置感度を導入したが、その値が浮上系に影響を与えるかどうかは、浮上系と一体化して解析する必要がある。本節では根軌跡による SLIM の相対位置感度の評価法について述べ、HSST-03 に適用する。

相対位置感度は、相対位置変位量に対する SLIM 発生力の変動分であった。短一次式磁気車輪を剛体だとすると、SLIM の一次側と二次側との相対位置変位が電磁石とそのレールとの変位量となる。従って、相対位置変位時には、SLIM 発生時の変動分が浮上系の外力外乱となるだけでなく、変位量が SLIM と電磁石とで同じになる。

いま浮上系にギャップ長の変位量に比例する外力外乱が入った場合その比例定数を K とすると、 K と SLIM の相対位置感度は比例関係にある。フィードバック制御により系を安定化させた浮上系に、ギャップ長変位に比例する外力外乱が入った場合、浮上系を線形化して軌道変位に対する浮上ギャップ長変位、電磁石電流、上下加速度の伝達関数を求めると、それらは K の関数となる。

従って、 K をパラメータとしたときの伝達関数の根軌跡を求めることにより、相対位置感度が浮上系に影響を与えるかどうか評価される。

以上の根軌跡による評価法を HSST-03 のモジュールに適用する。

外力外乱のギャップ長変位位置に対する比例係数 K と SLIM の相対位置感度とは、2 電磁石で考えると、

$$K = K N g / 2.0 \dots \dots \dots (4)$$

$$K = K P t / (l_1^2 + l_2^2) = 0.45 * K P t \dots \dots \dots (5)$$

l_1, l_2 は表 1 参照

で関係付けられる。そこでの浮上系の制御電圧は、上下方向として浮上ギャップ長の変位量、その一次微分値、一次積分値、上下加速度にそれぞれ定数を掛け合わせた値で与えられ、系を安定化させている。このとき、軌道変位に対する浮上ギャップ長変位の伝達関数

は、2次サスペンションをも考慮しているので

$$\frac{X_s}{Z_s} = \frac{S^2(1+s)B_3(s)}{B_6(s)} \dots\dots\dots (6)$$

$B_6(s)$ は K の関数であり s の6次関数であるが、

$B_3(s)$ は K の関数ではなく s の3次関数である。与えられる⁽⁶⁾。軌道変位に対する電磁石電流および上下加速度の伝達関数も得られるが、それらの特性多項式は(6)式と同じである。

K をパラメータとしたときの伝達関数(6)式の根軌跡を図6に示す。図4, 5より、速度 100 km/h になっても、 $SF=13.5$ Hz のときだけではなく $SF=5.5$ Hz のときも、 KNq および KPt の値がそれぞれ 0.25 KN/mm, 0.03 KNm/mrad 以下である。相対位置感度と K とは(4), (5)式で関係付けられているので、 K の値は 0.15 以下となる。 K が 0.15 になっても、図6より極の移動はほとんどみられない。従って、すべり周波数が 13.5 Hz のときだけではなく 5.5 Hz のときでも、速度が 100 km/h に達しても、SLIM が定格運転しているかぎりでは、このモジュールにおける SLIM が浮上系に与える浮上ギャップ長での影響は無視できることがいえる。更にすべり周波

図6 SLIM 相対位置感度をパラメータとしたときの根軌跡

Fig. 6. Root-locus in a parameter of SLIM relative position sensitivity.

数を下げると、極の推移は大きくなって推進系の浮上系への影響は大きく出ることになり、エネルギー効率の点からも望ましくない。

〈5・3〉 実験による検証 前節までの解析結果を走行特性で検証する。シミュレーションでは既にこのことは得られているので⁽¹²⁾、ここでは実験によって検証する。

相対位置変動の走行条件として、軌道が不連続に変位する軌道段差通過を取り上げ、SLIM オフ時の走行特性と SLIM オン時の走行特性とを比較検討する。測定したモジュールは一番後方のもので、ギャップセンサおよび加速度センサの車両上での位置ならびに軌道段差は、図1に示されている。

図7に、SLIM だ行時 (SLIM オフ時)、すべり周波数 5.5 Hz および 13.5 Hz のときの SLIM 力行時について、軌道段差通過時の前端浮上ギャップ長および No. 1 電磁石電流の時間応答図を定常状態になるまで示す。各走行とも軌道段差通過時の走行速度が 20~25 km/h と異なるが、図7で表示した区間内の前後加速度はほとんど無視できるため、図7の横軸は軌道上の距離となるように補正してある。

図7では途中 SLIM も軌道段差を通過してギャップ長およびピッチ角が変位し、垂直力およびピッチングモーメントが変動していることになる。しかし、浮上ギャップ長では、3種類の走行での差がたかだか

図7 軌道段差通過時の時間応答図(実験データ)
Fig. 7. Time response in running on track displacement (experimental data).

0.2 mm 以下で、ほとんど同じといえる。また、電磁石電流では、SLIM の垂直力による定常値の差はみられるが、時間波形を上下方向に平行移動させることで、波形はほとんど同じといえる。

以上より、SLIM の有無およびすべり周波数を有用な範囲内で変えたときの時間応答波形の影響を実験で調べたところ、浮上ギャップ長および電磁石電流にその影響がでていないことがわかった。このことは、相対位置変位時の SLIM・浮上系相互作用における解析結果と同じものである。更に、解析および実験によって得られたこの結果は、SLIM と浮上系にとって最も効率の良いすべり周波数での運転が可能であることを意味している。

6. おわりに

短一次式磁気車輪で問題となる SLIM の浮上系への影響を、HSST-03 の短一次式磁気車輪を例にとり、SLIM 発生力の大きさおよび軌道と磁気車輪間の相互位置変位の点から解析し評価した。その結果、次のことが得られた。

(1) SLIM 発生力の大きさを評価するのに、SLIM および電磁石全体の供給エネルギーを用いることができる。HSST-03 に適用すると、SLIM 吸引増大による浮上系の供給エネルギーの増大は、全体のエネルギーからはほとんど無視され、低すべり周波数走行のほうがエネルギー効率が良い。

(2) 相対位置変位時における SLIM と浮上系との相互作用を解析するのに、SLIM の相対位置感度の導入およびその大きさの評価として根軌跡法を提案し、解析結果が実験によって検証された。HSST-03 の場合、低すべり周波数走行においても、相対位置変位時の相互作用はみられない。

(3) そのため、HSST-03 の場合、低すべり周波数での走行が可能となり、従来の高すべり周波数の場合と比べて約 3 割のエネルギー改善効果が期待され得る。

今回の SLIM の運動は上下方向に限定したが、同じ手法が左右方向の相対位置変位時にも適用される。より短い浮上ギャップ長の実現化およびエネルギー効率の改善のために、本解析手法が、浮上系と推進系の協調設計に使用できるものと考えている。

最後に、車両のデータおよび実験設備を提供してくださった日本航空(株)の北本満雄氏および武内 浩氏ならびに住友電工(株)の川島真生氏および細田義門氏に深く謝意を表す。

(昭和 60 年 10 月 25 日、同 61 年 1 月 9 日再受付)

文 献

- (1) 正田・藤崎・田村:「新方式による鉄道の高速度化」昭 59 電気学会全大, S10-4
- (2) E. Gottstein, R. Meisinger & L. Miller: "The 'Magnetic wheel' in the suspension of high speed ground transportation vehicles", *IEEE Trans. Vehicular Technology*, VT-29, 1, 17/23 (1980)
- (3) 藤崎・正田・徐・マキス:「パラメータ変動の大きい誘導機 VVVF 形インバータ制御」電気学会半導体電力変換研究会資料 SPC-84-32 (1984)
- (4) 藤崎・正田・徐:「磁気浮上車両推進装置が発生する 3 次元力の制御」*ibid* SPC-84-14 (1984)
- (5) A. G. Wallance, J. H. Parker & G. E. Dawson: "Slip control for LIM propelled transit vehicles" *IEEE Trans. Magnetics* MAG-16, 5, 710/712 (1980-9)
- (6) S. Nakamura, Y. Takeuchi & M. Takahashi: "Experimental results of the single-sided linear induction motor" *ibid* MAG-15, 6, 1434/1436 (1979-10)
- (7) E. Masada, K. Fujisaki, Xu: "Voltage-fed inverter drive with single-sided linear induction motor for railway traction", *Proc. ICEM* 534/537 (1984)
- (8) S. Suzuki, M. Kawashima, Y. Hosoda & T. Tanida: "HSST-03, system" *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-20, 5, 1675/1677 (1984-9)
- (9) E. Masada, A. Kawamura & J. Nishimae: "On the unstable force moment of single-sided linear induction motor" *Proc. ICEM* LM 1-1 (1982)
- (10) J. Kiant: "Berechnung und Bemessung Elektrische Maschinen" *Springer* (1962)
- (11) D. Rodger & J. F. Eostham: "Dynamic behaviour of linear induction machines in the heave mode" *IEEE Trans. Vehicular Tech.* VT-31, 2, 100/106 (1982-5)
- (12) K. Fujisaki & E. Masada: "Dynamic behaviour of a magnetic wheel" *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-20, 5, 1678/1680 (1984-9)