磁気浮上走行試験車—構体強度と動的解析— Magnetically Suspended Experimental Vehicle — Strength of Structure and Dynamic Analysis —

To cope with rapid increase in demand for railroad transportation, studies in magnetically suspended high speed trains are being pushed forward at the Japanese National Railways. Recently, a special experimental vehicle has been completed at Hitachi, which will be used by JNR in the experiments concerning magnetic propulsion and suspension of magnetically suspended high speed trains. This test vehicle is provided with reaction plates of linear induction motor under the floor, at about the center of the vehicle, with super-conducting magnets for suspension on both sides. The vehicle body is made mainly of high tensile strengthened aluminium (duralmin) for weight reduction, but its strength has been made sure by the vibration analysis and load tests carried out in the suspended condition. Remote-operated from the control tower, this unmanned test vehicle will provide a key to the completion of a super-high speed magnetically suspended train.

永弘太郎*	Tarō Nagahiro
寺田勝之*	Katsuyuki Terada
笠井靖夫*	Yasuo Kasai
元永光一*	Mitsukazu Motonaga

1 緒 言

わが国では現在,激増する輸送需要に対処するため,高速

振ゴムを介して装備し、地上側の常電導浮上コイルとで浮上

列車である東海道新幹線電車が開発され,非常な成果をあげ ているが,さらに輸送効率の高い超高速鉄道開発の必要性に 迫られつつある。このため日本国有鉄道では,超高速鉄道の 実用化を図るため各種の研究が進められているが,今回,磁 気浮上走行試験装置により走行,浮上の試験研究が行なわれ ることになり,走行試験車の設計,製作を行なった。

従来の車輪とレールの粘着を利用した粘着駆動では粘着に 限界があり、310km/hそこそこまでしか速度が出せないため、 超高速鉄道としては非粘着駆動にせざるを得ない。その方法は 種々あるが、今回の試験車は駆動には地上一次リニアインダ クションモータ方式、支持には超電導磁気浮上方式が採用さ れ、そのために車体は極度の軽量化が要求された。

車体を軽量化するために、従来の車両には使用していなか った高力アルミニウムや複合材料を主材に構成し、車体構造 の設計には航空機技術をとり入れ、浮上状態における各種振 動解析を行ない、また製作に際しては材料加工技術の確立、 構体完成時においては浮上状態と同一の条件にした荷重試験 を実施して強度の確認を行ない、目的を達成した。

今後,この走行試験車は走行,浮上など各種性能試験が行なわれ,将来の超高速鉄道開発のためのデータが得られる。

本稿においては,走行試験車の車体構造,構体強度,振動 解析のほか,走行試験車に関する一般的事項について記述す る。

2 走行試験車

2.1 概 要

図1に示すように、走行試験車は流線形のスマートな形状をしており、床下中央にリニアモータ・リアクションプレー

力を生ずる。

このほか,床下には低速時に滑走するための車体支持用滑 走シューをねじりばねと板ばね,ダンパを介して装備し,ま た過走時におけるブレーキシューも防振ゴムを介して装備し ている。

車内はビニルレザー張りで、床にはじゅうたんを敷き、中 央部に4個の腰掛を設けている。車内の換気は前後と天井に 通気口を設けてある。2個の大きな窓は取りはずし可能な構 造で、各種試験が容易に実施できるように配慮してある。走 行試験車の両側には、はね上げ式の開き戸があり、ここから乗 降する。

床下設備品の保護のため,走行試験車の下部は軽量強固な



トを推進力伝達用のたわみ板を介して装備し,地上側のリニ アインダクションモーター次コイルとで推進力を得て走行す る。リアクションプレートの両側には超電導マグネットを防 図 | 走行試験車 走行試験線上の試験車で、右端の走行路中央に見え るのがリニアインダクションモーター次コイルで、手前にあるものが案内レー ルである。

37

Fig. I Magnetically Suspended Experimental Vehicle

*日立製作所笠戸工場



表 | 装置別の重量 浮上力,推進力より全体重 量は3,500kg以下にする必要があり,極度の軽量化が要求 された。

Table I Weights of Each Equipment

装置区分	重量(kg)	備考
車 体	660	構体、スカート、車体ギ装
走行装置	130	
浮上装置	2,100	-
滑 走 装 置	220	-
過走防止装置	50	
搭(とう)載物	280	腰掛, 乗客4名
その他	10	配線など
計	3,450	

図2 装置の構成図 走行試験線上で浮上走行状態の断面である。地上側と接触している部分は, 左右方向案内シューのみである。

Fig. 2 Section of Test Vehicle

スカートでおおい、各種の点検ぶたが設けてある。

図2は試験装置の全体構成図を,表1は走行試験車の装置

表 2 車体主要材料 軽量化の必要より、車体は高力アルミニウムを主体とし、炭素繊維を補強材としたFRPなど複合材料も有効に使用した。

別の重量を示すものである。

走行試験車の主要仕様は次のとおりである。

走行車寸法:長さ 7,000mm

幅 2,500mm

高さ 2,200mm

走行車重量:3,500kg(定員4名を含む)

走行速度:最高 60km/h

加 減 速 度:最高 3.5km/h/s

浮上高さ:100mm以上

浮 上 力:3,500kg以上

推 進 力:最大 950kg

2.2 車 体

走行試験車は極度の軽量化の必要性から、従来車両には使用していない高力アルミニウムを主体とし、炭素繊維を補強材としたFRP(繊維強化プラスチック)など、複合材料を有効に使用して軽量化を達成している。

したがって、構体構造は航空機と同様なモノコック構造を 採用し、走行、浮上装置など航空機と全く異なった構造とな る部分および大きな窓部の構造は、強度上特別な配慮がして ある。

また,製作に際しては高力アルミニウムの加工技術,熱処理技術,リベット技術などを確立し作業を実施した。

表2は走行試験車に使用した材料と使用場所を示すもので ある。

2.3 車体の強度

38

車体は浮上走行状態,低速滑走状態,過走状態およびクレ ーンつりあげ状態などで異なった場所,方向,大きさの力を 受ける。したがって,どのような状態においても十分な強度 を有していることが必要である。 Table 2 Materials of Test Vehicle

使用場所	材 料 名	備考
台わく主要メンバー	A2024PC 1.5t, 5t	0材にて成形後 熱処理
構体,スカート	A2024PC It, I.5t FRP I.5t (炭素繊維補強)	0材にて成形後 熱処理
リベット	A2117BR 3 ¢, 4 ¢	
床 板	アルミハニカム 10t	上下板A7075PC 0.5t
恣	アクリル樹脂 3t	
開き戸	FRP 1.5t (炭素繊維補強)	
リアクションプレート	A2014P 12t	導電率 40%
浮上計測シュー	炭素繊維強化プラスチック	

低速滑走状態においてはC点, すなわち, 支持滑走シュー で車体は支持されると同時にB点より推進力を受ける。この 区間は浮上コイルは設置してないので, A点では浮上力は発 生せず, 左右の超電導マグネット相互間の吸引力のみが働く。

過走状態においてはE点, すなわち, 過走ブレーキシュー で車体は支持される。この区間はリニアモータ, 浮上コイル とも設置してないので推進力, 浮上力は発生せず, 超電導マ グネット相互間の吸引力のみとなる。これらのほかに, 後述 の振動解析に基づいた車体の振動加速度が考慮してある。

また,浮上走行状態において万一電気系に故障を生じた場 合,走行試験車は急激に落下するが,このような状態も考慮 して振動解析,強度検討がしてある。 図3は各状態における作用力の位置を示し,表3はその大 きさを示すものである。 車体は上記作用力を考慮して十分な強度を有する軽量化車 体部材配置とした。 2.4 構体荷重試験

浮上走行状態においては、図3のA点、すなわち、超電導 マグネットで車体は支持されると同時にB点、すなわち、リ アクションプレートより推進力を受ける。さらに、この状態 において左右の超電導マグネットは相互に電磁吸引力を生ず る。

強度設計に基づいた構体の強度を確認するため構体荷重試



図3 車体各部に加わる力 車体に加わる力の位置と方向を示しており、その大きさは表3に示すと おりである。

Fig. 3 Load of Body

図3に示した力の大きさを示したものである。 表3 力の大きさ

Table 3 Dimensions of Load

機器名		力の大きさ(kg)			
		浮上時	滑走時	過走時	1 1 角 7 考
超 電 導 マグネット	前後 Ax 左右 Ay 上下 Az	670 500 1,400	0 500 2,100	0 500 2,100	慣性力 電磁吸引力 浮上力または自重
リアクション プ レ ー ト	前後 Bx 左右 By 上下 Bz	950 0 150	950 0 150	0 0 150	推進力 自 重
車体支持シュー	前後 Cx 左右 Cy 上下 Cz	0 0 0	350 0 3,500	0 0 0	摩擦力 μ=0.1 走行車自重
案内シュー	前後 Dx 左右 Dy 上下 Dz	0 1,050 0	0 1,050 0	0 1,050 0	左右動による力 0.3g
過走シュー	前後 Ex 左右 Ey 上下 Ez	0 0 0	0 0 0	1,050 0 3,500	摩擦力 μ=0.3 走行車自重
その他	上下 Fz " Gz " Hz " I z	1,060 60 280		i,060 60 280	3,500クレーンつり上げ 側構など分布 床など分布 腰掛,乗客

験を実施した。図4は荷重試験状況を示すものである。

態+3.2kg/mm², 過走状態+7.1kg/mm², 超電導マグネット吸引 試験-0.8kg/mm², リアクションプレートけん引試験+0.4kg/mm² で全く問題はなかった。

図5はこの場合における横はりの変形量を、図6は構体の 断面変形量を示すものであり,いずれも全く問題ない値であ った。

また、浮上走行状態において超電導マグネットに故障を生 じた場合。走行試験車がどのような衝撃を受けるか確認する 目的で、車体支持装置を装備したのみの状態で落下試験を実 施した。この方法はクレーンによって車体をつり上げて、そ のまま下げる方法と、つり上げたままクイックレリーズを用 いて急激に自由落下する方法とをあわせ実施した。表4はそ の結果を示すものである。

このほかに、車体支持シューの走行試験車に装備した状態 での摩擦係数の測定,走行試験車の重心測定も,今後の現地 走行試験結果の解析に使用するため測定した。



試験項目は、浮上走行状態、低速滑走状態、過走状態、超電 導マグネット吸引試験およびリアクションプレートけん引試 験を図るおよび表るに示した力の大きさで実施し、確認した。 強度計算の結果では、いずれの場合も応力値は小さいので、 変形量の測定を主体とし、測定点数はひずみ計9点、変位計 31点とした。 最大実測応力値は、浮上走行状態-2.3kg/mm²,低速滑走状

構体荷重試験状況 構体の主要部分にひずみ計および変位計を取 义 4 り付け、各状態における応力、変位の測定をした。 Fig. 4 Load Test of Body Structure

39



表 4 振動加速度および振動数 車体落下試験における振動加速度と 振動数の実測値を示す。

Table 4 Vibration Acceleration and Number of Vibrations

場所	条 1	[/] ⁴	クレーン落下 落下速度 (v≒12.5cm/s)	自由落下 落下速度 (v≒l10cm/s)		
上下振動 加速度(a)	車 体 中 央 床		±0.80	±2.75		
	腰掛取付わく		±0.50	±2.25		
	車体支持シュー上部床		±0.28	±1.82		
	唐 休 中 中 部 低次		2.7			
車体振動数 (Hz)	单体中大部	高次	23.0			
	腰掛取付わく高	低次	2.6	-		
		高次	23.1			
	車体支持シュー	低次	2.9	-		
	上 部 床 高次		25.2			

ので、移行部における浮上コイルの配置が非常に重要である。 浮上力の変動が急激に起こらないようにするため浮上コイル の配置方法として縦緩和曲線を設けた。

現地走行試験結果は、ほぼ計画どおりであり事前検討は一 応適切であったといえる。

3.1 振動に関する検討

Fig. 5 Deflection of Cross Beam



区 6 車体断面変形量 車体中央断面における各状態の断面方向の変位 を示す。

Fig. 6 Deflection of Body Section

走行試験車の動的特性の検討 3

40

走行試験車は浮上走行状態と,低速滑走状態で支持案内レ ール上を滑走するときの両状態があり、また車体と超電導マ

走行状態として浮上走行状態と滑走状態があり、さらに最 も基本的な加振源だけでも浮上コイルの上下と左右方向およ び支持案内レールの上下と左右方向の凹凸(おうとつ)による ものがあり、振動系としてはかなり複雑になっている。ここ では、振動の基本となる上下振動および左右振動について述 べる。

浮上走行状態において、浮上コイルから超電導コイルに与 えられる浮上力は、浮上コイルと超電導コイルの中心間上下 距離によって異なり、コイル間の中心距離と浮上力の関係は 図7に示すとおりである。速度が上がればコイル間の中心間 隔が増す傾向があり、振動変位が小さい範囲では上下方向の ばね定数は図7で曲線の走行試験車重量相当点の接線で表わ すことができる。ばね定数は一定として取り扱う。

浮上コイルと超電導コイルの間で中心が左右方向にずれる と、横不安定化力が生ずることになる。コイル間の横変位と 横不安定化力の関係は図8に示すようになり、横変位が小さ い範囲では左右方向のばね定数も一定として取り扱うことが でき、このばね定数は負の値となる。

上下振動に関係のあるばねとしては、浮上コイルの浮上力 によるばね特性、車体支持用滑走シューを取り付けた車体支 持装置の板ばね、車体と超電導マグネットを結合した防振ゴ ムの三つがある。減衰力もそれぞれのばねに並列に存在する ことになる。図9はこれらの関係を模型化したものであるが、 浮上走行状態は車体支持装置のばね定数と減衰係数がゼロに なり、滑走状態は浮上コイルのばね定数と減衰係数がゼロに なると考えればよい。

左右振動の検討では、車体と超電導マグネットを結合した

クネット間は防振ゴムで結合しているので、浮上走行状態と
低速滑走状態では振動系が多少違っており,両方の状態で振
動計算を行なう必要がある。
低速滑走状態から浮上走行状態へ移る場合と, 浮上走行状
態から低速滑走状態へ移る場合の両方の移行部では急激に浮
上力が加わったり, 浮上力がなくなったりすれば, 車体や超
電導マグネットの振動加速度が大きくなることが予想される

防振ゴムの横ばね定数が大きいので、車体と超電導マグネッ トが一体であると仮定した。左右振動に関係のあるばねとし ては、浮上コイルの上下と左右のばね特性および車体支持装 置の板ばね(上下)とねじりばね(左右)がある。減衰力もそれ ぞれのばねに並列に存在することになるが、浮上コイルの左 右方向については減衰がないものとして検討した。図10は左 右振動についてばね系を模型化したものであるが、本図で上下



図7 コイル中心間隔と浮上力 浮上力と走行試験車の重量が一致す るコイル中心間隔でバランスすることになり、車速が増せば浮上力が増して、 コイル中心間隔が大きくなるような特性を有している。

Fig. 7 Levitational Force to the Distance between the Coil

振動と同様に浮上走行状態は車体支持装置に関係するものが ゼロになり,滑走状態は浮上コイルに関係するものがゼロに なると考えればよい。

表5は上下振動および左右振動の諸元を示す値であり、こ れらによって振動計算を行なった。浮上コイルの減衰係数は 振動数によって異なるが、ここでは固有振動数付近のものを 使用した。

図11は浮上走行状態および滑走状態の車体の上下振動加速 度を示したものである。浮上コイルによる不規則振動も考慮 して、乗りごこち係数1を満足する範囲で浮上コイル敷設時 の凹凸精度を7mm/10mに設定した。滑走状態においては、超 電導マグネットの下部と浮上コイルの上面が接近するためと 浮上コイル取付ピッチ675mmが加振として存在するため、車体、 超電導マグネット間の結合ゴムをかたくしてあり、二次の固 有振動数が大きくなっている。また、浮上コイル取付ピッチ 間でコイル間の高低差を1mm以内にすれば、乗りごこち上間 題のないことがわかった。浮上コイルの各コイルの中間では 浮上力が弱まるので浮上力脈動率は小さくする必要があるが、 今回のものは乗りごこち係数1を保つため十分になるように 設計した。

浮上走行状態の左右振動は浮上コイルの上下逆相加振(z₀), 浮上コイルの左右加振(y₀),支持案内レールの左右加振(y₃)の

Centers



図8 横変位と横不安定化力 浮上コイル,超電導コイル間での横変 位が小さい範囲ではほとんど線形であり,ばね定数としては負の符号を有する ことになる。

Fig. 8 Non-restoring Lateral Force of the Coils to the Lateral Displacements



表5 走行試験車の諸元 動的特性の検討に使用したおもなる諸元をま とめたものであり、これらの値で図9と図10のばね系の振動計算を行なってい る。

Table 5 Performance Values for the Test Vehicle

(1両当り)

41

I	頁	目	数	値	備	考
重量	車 体	m_1g	1,500k	g		
	超電導マグネット	m_2g	2,000kg		_	
	浮上コイル(上下)	k_3	41 kg/mm		—	
ばね定数	浮上コイル(左右)	ky	-21	"		
	車体支持装置(上下)	k_1	80	"	板ばね	
	車体支持装置(左右)	k_4	44	//	トーショ	ンバー
	車体クライオスタット間(上下)k2		4,000kg/mm		防振ゴム	
減衰係数	浮上コイル(1.7Hz)	C_3	0.7kgs	/mm	上下振動	で
	車体支持装置(上下)	C_1	2	"	オイルダ	ンパ
	車体支持装置(左右)	<i>C</i> ₄	2 kgs	/ mm	オイルダ	ンパ





図9 上下振動のばね系 走行試験車はZonの加振を受ける場合と、Zo2 の加振を受ける場合の両方がある。両方同時に受ける地点は、滑走状態と浮上 走行状態の切換部だけである。

Fig. 9 The System of the Vertical Vibration



y 0

Fig. 10 The System of the Lateral Vibration

2



図II 車体上下振動周波数応答 滑走状態では車体支持装置を加振しているので、車体の上下加速度が大きく出て二次の固有振動数の位置で乗りごこちがやや悪くなるが、浮上走行状態では乗りごこち係数は1になっている。
Fig. II Frequency Response of the Vertical Vibration

三つがあり、滑走状態では支持案内レールの上下逆相加振(z_3) と左右加振(y_3)の二つがある。図12は一例として浮上走行状態 の z_0 逆相加振の場合における左右振動加速度の伝達係数を示 すものである。左右の通り狂いを浮上コイルで1ピッチあた り3mm以下および案内レールで5mm/10m以下にすれば乗りご こち係数は1程度になることがわかった。

3.2 浮上コイルの縦緩和曲線

浮上走行状態および滑走状態の移行部に設ける浮上コイル の縦緩和曲線の形としては、浮上コイルの始まりの部分で浮 上コイルを下方に押し下げることで考えた。そこで2本のこ う配直線と縦円弧によって縦緩和曲線を作り、かつ浮上コイ ルの始まりの部分で浮上コイルを185mm押し下げれば衝撃を最 小にできることがわかった。図13は浮上コイルの配置要領と 走行試験車の動きについて示したものである。

車体の上下加速度でみれば、滑走状態から浮上走行状態への移行部で片振幅0.1gであり、浮上走行状態から滑走状態への着地では片振幅0.14gとなる。さらに前記以外に上下振動分を加味しても片振幅0.3g以下となり乗りごこち上からも超電導マグネット強度上からも許容できるものである。なお、超電導マグネットは落下衝撃に対しても考慮して設計されている。

3.3 走行試験結果の概要

浮上高さ(支持案内レール上)は、現地走行試験結果の一



図12 左右振動加速度伝達係数(浮上走行状態Zo加振) 一次の固 有振動数の位置で片振幅0.03g/mmであり,左右振動加速度は小さくなることが 予想できる伝達係数である。

Fig. 12 Coefficient of Transmission of Lateral Vibrational Acceleration



例をあげれば、速度60km/h弱において、先頭ばね位置で平均 33.5mm、後部ばね位置で平均79.0mmであり、その平均浮上高 さ56.3mmならびに前傾角は計画値とほぼ一致していた。浮上 走行状態の上下振動加速度の両振幅最大値は、車体で0.14g, 超電導マグネットで0.15gであった。ただし、これには、走 行中ごくまれにしか現われないピーク値は除いてある。着地 時の上下振動加速度は特に大きくなく、スムーズな着地特性 が得られた。

浮上高さ,車体および超電導マグネットの着地時の上下加 速度,浮上走行状態の超電導マグネットの上下加速度は予測 どおりの結果であったが,浮上走行状態の車体の上下加速度 は,車体軽量化による弾性振動の影響で最大値ではあるが子 想よりも大きい値であった。

四 結 言

走行試験車は極度の軽量化の要求に対して,車両では未経 験の高力アルミニウムや,全く新しい炭素繊維などの複合材 料を使用して軽量化を達成すると同時に,強度面においても 実際の走行状態に合わせた荷重試験を実施して確認できた。

また、走行試験車に装備したリニアモータ・リアクション プレートと地上に設置したリニアインダクションモーター次 コイル、および超電導マグネットと常電導浮上コイルなど、 電磁現象に起因する振動解析による検討も走行試験によって、 現実に即したものであることが確認できた。

今後,引き続き実施される各種走行,浮上試験によって得られるデータは,さらに改良した車体構造,振動解析に役だつと同時に,将来の超高速鉄道開発に重要な役割を果たすものと考える。

図13 たて緩和曲線の浮上コイル配置と走行試験車の動き 上側 が浮上コイルの配置のたて断面図であり、下側が浮上緩和区間の走行試験車の 動的特性と浮上力の関係を示している。浮上力の増加が急激でないため、車体 上下加速度が非常に小さくなっている。

Fig. 13 The NC Coil Arrangement of the Vertical Transition Curve

42

終わりにあたり,本走行試験車の設計,製作に終始懇切な ご指導を賜わった日本国有鉄道技術開発室,車両設計事務所, ならびに鉄道技術研究所の関係者ご一同と,本試験車を製作 するに当り,ご協力いただいた三菱電機株式会社および東京 芝浦電気株式会社の関係各位に対し深く感謝の意を表する次 第である。