

## 研究展望

## 浮上式鉄道ガイドウェイの研究と技術開発

## RESEARCH AND TECHNICAL DEVELOPMENT OF MAGLEV GUIDEWAY

橋本 渉一

Shoichi HASHIMOTO

フェロー会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 基礎研究部  
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)*Key Words* : maglev, linear motor car, guideway, construction accuracy, dynamic response, magnetic drag force

浮上式鉄道ガイドウェイは車両を支持・案内・推進する意味で鉄車輪・鉄レール方式鉄道の軌道に相当するものであるが、そのシステムおよび構造は全く異なり、コンクリート等の構造部材と地上コイル等の電気部材との複合体である。現在世界では浮上式鉄道として3方式の試験走行が実施されている。本文はこの内主としてJR方式の磁気浮上式鉄道ガイドウェイを中心として、その研究と技術開発の状況について述べる。

## 1. はじめに

浮上式鉄道とは従来の鉄車輪・鉄レール方式とはシステムが全く異なり、文字通り地上と接触することなく浮上して走行する鉄道の総称である。浮上式鉄道に対してリニアモーターカーという表現を用いる場合も多いが、これはリニアモータで推進力を得ている車両の総称であり、最近東京、大阪で営業運転されたリニア地下鉄（支持案内は鉄車輪・鉄レールで行い、駆動はリニアモータによる）も含み、正確な表現ではない。

現在世界で実用化を目指して走行試験を行っている浮上式鉄道には以下の3方式があり、いずれも推進にはリニアモータを使用している。

- (1) JR方式 (日本)
- (2) TRANSRAPID (ドイツ)
- (3) HSST (日本)

これらは表-1に示すように、支持・案内・推進方式、車両の磁石等それぞれシステムが異なる。

(1)のJR方式<sup>1),2)</sup>が他の2方式と技術的に大きく異なる点は $-269^{\circ}\text{C}$ の液体ヘリウムでニオブチタン合金の車上コイルを冷却し、電気抵抗が0になる超電導現象を利用した超電導磁石を使用していることである。低速時にはゴムタイヤ走行し、高速時には誘導磁界を利用した浮上走行に移行する。超電導による強い磁力を利用することにより浮上高さが約10cmと大きく得られ、高速走行にも有利である。

(2)と(3)のシステムは常電導磁石を使い停止時から浮上することができ、浮上高さは約1cmで走行するものである。

浮上式鉄道の「ガイドウェイ」は、鉄車輪・鉄レール方式鉄道の「軌道」に相当するもので、浮上走行する車両を支持・案内・推進するための専用路をいうが、構造上「ガイドウェイ」と「軌道」は根本的に異なるものである。

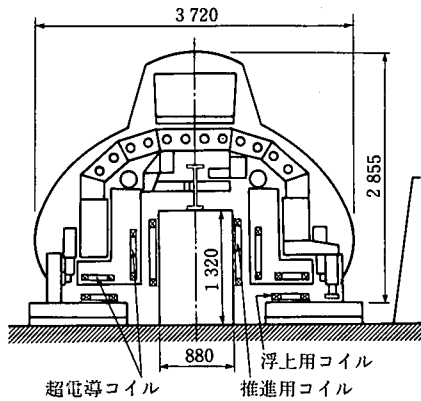
最も異なる点は、リニアモータを使用して推進力を得る場合、地上1次あるいは2次のどちらの方式であるにせよ、ガイドウェイ側に回転モータの固定子あるいは回転子に相当する部材が設置されるため、コンクリート・鋼等の構造部材とリニアモータを構成する地上コイル等の電気部材から成る複合体となることである。

ここからガイドウェイの構造部材としてのコンクリート、鋼材と、リニアモータの部品としての地上コイル、ケーブル類との組み合わせを十分に考慮した構造の設計とそれを実現する施工の問題が発生する。また従来の構造物ではほとんど問題とならなかった磁気抗力の問題もある。

本文では主として、1966年にアメリカ、ブルックヘブリン国立研究所のJ.R.パウエル博士とG.R.ダンピ博士によって提唱され、その後国鉄において開発が進められ、宮崎実験線を経て現在山梨実験線で走行試験が行われているJR方式のガイドウェイを紹介し、その研究と技術開発の現状について報告

表一 浮上式鉄道のシステム

	J R	トランスラピッド	HSST
試験線	日本・山梨	ドイツ・エムスランド	日本・名古屋
システム	支持方式 誘導反発吸引 ・磁気浮上（側壁浮上）	吸引・磁気浮上	吸引・磁気浮上，案内
	案内方式 誘導反発吸引 ・磁気案内	吸引・磁気案内	
	推進方式	地上1次 リニアシンクロナスマータ	地上1次 リニアシンクロナスマータ
磁石	超電導磁石	常電導磁石	常電導磁石
実用速度	500km/h程度	400km/h程度	100~200km/h程度
試験最高速度	550km/h	450km/h	308km/h



図一 宮崎実験線逆T形ガイドウェイ<sup>1)</sup>

することとしたい。

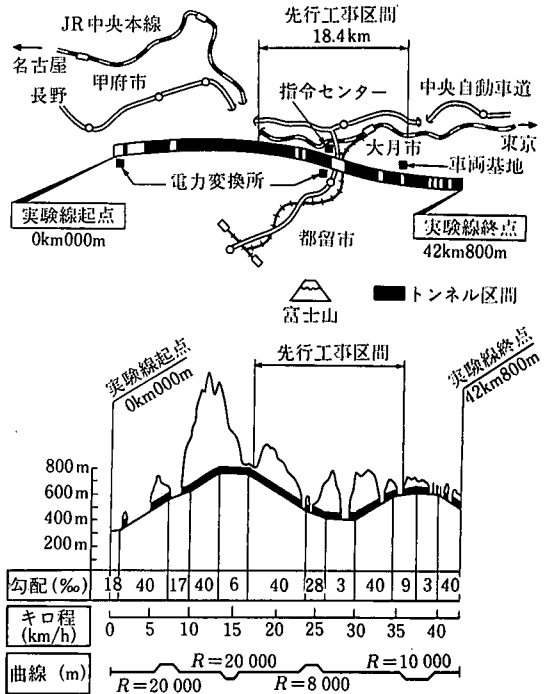
## 2. ガイドウェイ形式

### (1) JR方式

国鉄時代の1962年に研究開発が開始され、鉄道技術研究所構内の基本走行試験を経て宮崎実験線で本格的に走行試験が開始された。当初は延長7kmの図一1に示す逆T形ガイドウェイが建設され、試験車両ML-500を使って1979年に517km/hの速度記録が達成された。その後直ちにU形ガイドウェイ<sup>3)</sup>へと改造工事がなされ、当初浮上コイルを下面に設置する対向浮上方式であったが、その後側壁面に設置する側壁浮上方式へと一部変更され、試験車両も更新しながら走行試験が継続された。

1997年からは図二に示す山梨実験線<sup>4)</sup>先行区間18.4kmでの実用化試験に引き継がれ、MLX-01による550km/hの鉄道世界最高速度記録が達成され、現在各種走行試験が鉄道総研とJR東海の共同チームにより実施されている。

山梨実験線ガイドウェイは鉄道総研、JR東海、鉄道公団によって開発され、図三に示すように、左



図二 山梨実験線のルート

右のコンクリート側壁に2層の推進コイルと浮上案内兼用の浮上コイルを敷設し、案内車輪走行路は地上コイル上部に、支持車輪走行路は施工基面上部に独立した走行路を設け全体でU形に構成されている。

### (2) TRANSRAPID<sup>5),6),7),8)</sup>

ドイツ東部のエムスランドにある南北両端にループ線を有する全長31.5kmのガイドウェイで走行試験が行われており、ガイドウェイは図四に示すように非常にスレンダーなPC桁あるいは鋼桁で構成されている。

浮上高は約1cmで、ガイドウェイとの間隔を制御により常に一定に保持する吸引式で、試験最高速度は450km/hが達成されている。ベルリン～ハンブル

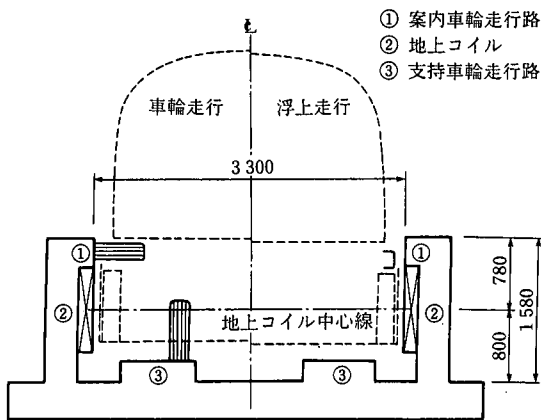


図-3 山梨実験線ガイドウェイ断面

ク間を結ぶ延長291kmの営業線の建設計画案が既に発表されている。

### (3) HSST<sup>9)</sup>

名古屋市南区に1.5kmの試験線を建設し、実用化に向けた走行試験が行われている。最高速度は100km/hおよび200km/hのシステムが提案されており、ガイドウェイは図-5に示すように非常にシンプルに構成されており、トランスラピッドと同様、浮上高はガイドウェイとの間隔を約1cmに保つ吸引式である。

平成5年4月の運輸省の調査・検討会において「最高速度100km/h程度のタイプについては、浮上・案内系、推進系、軌道・構造物、車両、電気施設における各項目の必要な条件について、名古屋実験線を用いて行った試験結果より安全性・信頼性が確認され、実用化に対して技術的には問題が無い」との結論が示されている。

なおターボジェットエンジンを併用した試験車両では、試験最高速度308km/hが記録されている。

以下主として、鉄道総研とJRで試験が実施されている超電導磁気浮上式鉄道山梨実験線ガイドウェイの計画、施工に対する研究と技術開発内容について紹介する。

### 3. ガイドウェイの精度

浮上コイルのみで案内力も発生させる浮上案内兼用方式においては、車両の超電導磁石が浮上コイルの近傍を通過した時に生じる誘導電流による磁界と、車両側の超電導磁石の磁界との吸引および反発力とによって車両の支持案内が成立する<sup>10)</sup>。すなわち浮上コイルは在来方式鉄道におけるレールの機能を有

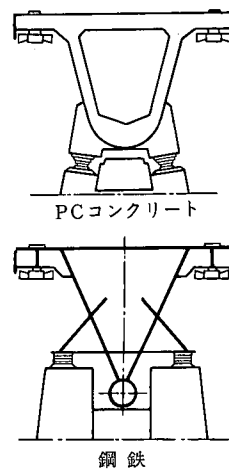


図-4 トランスラピッドガイドウェイ<sup>9)</sup>

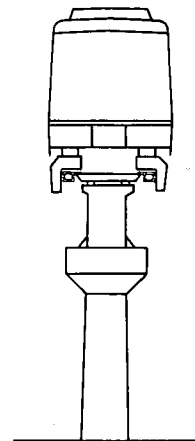


図-5 HSSTガイドウェイと車両

し、超電導磁石と浮上コイルとの間に発生する電磁力の大きさは両者の間隙量と速度により決まり、これから台車の上下左右の運動は浮上コイルとの相対位置関係に依存することとなる。このため車両の良好な乗り心地、走行安全性を確保するためには在来方式鉄道の軌道狂い管理と同様に、浮上コイルの取付位置精度の管理が重要になる。

この車両動揺<sup>11),12)</sup>に対してはガイドウェイの狂いだけではなく、超高速で走行することから空力の影響、また電磁力の影響も合わせて考慮する必要がある。

また駆動方式として地上1次リニアシンクロナスマータ方式を採用しており、車上の超電導磁石が界磁に相当し、ガイドウェイ側壁上の推進コイルは電機子に相当することを含めて、以下の4項目の観点から精度が要求される<sup>13),14),15),16)</sup>。

表一 2 ガイドウェイの施工の許容誤差

項目	許容誤差	備考
基準点測量	± 2 mm	150m波長に対する値
通り狂い	± 4 mm	浮上コイル中段における片側側壁の値
高低狂い	± 4 mm	同上
軌間狂い	± 6 mm	通り狂いの左右側壁の和
水準狂い	± 6 mm	高低狂いの左右側壁の差
側壁の水平位置	± 5 mm	基準点に対する値
側壁の傾き	± 6 mm	浮上コイル上縁と下縁の差
案内路の目違い	± 6 mm	
側壁の遊間	± 10mm	設計値に対する値

(1) 超高速鉄道の案内路としての精度

500km/h領域の超高速で走行するリニア車両を支持案内することから、長い波長の線路方向狂いに対し在来方式鉄道<sup>17)</sup>よりさらに高い精度管理が要求される。この線路方向狂いの通り、高低の他、断面内狂いの水準、地上コイル間隔、地上コイル・走行路間距離等も所定精度で管理する必要がある。

(2) リニアモータとしての精度

地上コイルはシンクロナスマータの電機子に相当し、界磁(回転子)に相当する車上の超電導磁石との間隔を一定範囲内に保つために左右の地上コイル間隔を、また線路方向に対しては推力低下を防止する観点から各コイル敷設間隔も所定精度で管理する必要がある。

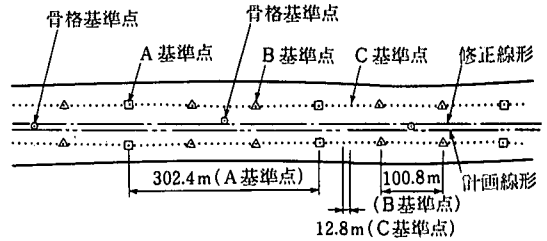
(3) 地上コイル敷設面の精度

推進コイルには対地2万ボルトの高圧電流が流れ、コイル素線周りをエポキシ樹脂で被覆していることから、取付面の不陸はコイルに面外方向の曲げを発生させ、それによる残留歪みが発生することから避けなければならない。このため1コイル当たりの取付面に対し、平面性の精度管理を規定する必要がある。

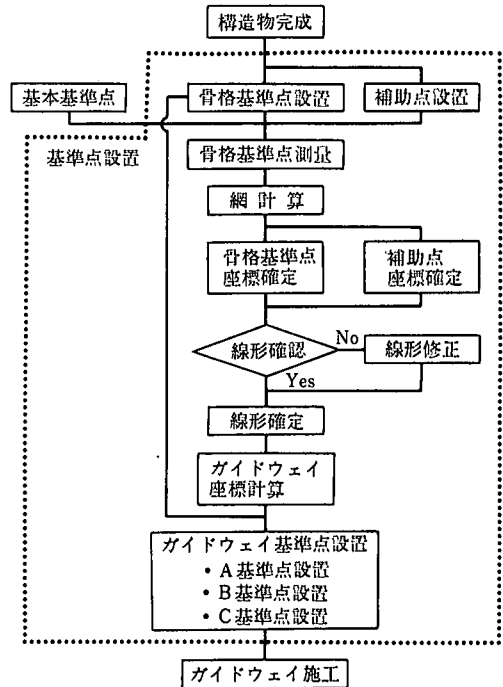
(4) 車輪走行路としての精度

停止から約150km/hまでの低速走行時には、車両はゴムタイヤを使用した支持車輪および案内車輪で支持、案内され走行する。走行路面の不陸は直接的に車両動揺の原因となるため精度が要求される。

(1)の主として高速浮上走行時の車両の乗り心地から見たガイドウェイ狂いの目標値は、最初に目標乗り心地レベルを定め、仮定したガイドウェイ狂いのパワースペクトル密度と車両の応答特性から、周波数応答計算により提案された<sup>14)</sup>。この他建築限界を含め、(1)~(4)を同時に満足するために、表一 2 に示



図一 6 基準点の配置<sup>18)</sup>



図一 7 ガイドウェイの設置手順<sup>18)</sup>

す目標値が設定された。ガイドウェイの設計のみならず施工に際しても従来の土木工事に比較してより高精度の測量、プレキャストPC部材の型枠の面処理、新たな施工機械等、多くの研究と新たな技術開発が行われた。

4. 測 量

軌道ではmm単位の所要精度が、レールの頭部の位置で達成されているが、コンクリートを主材料とする土木構造物では、通常cm単位で施工されることが多い。地上コイルを敷設するガイドウェイ側壁では、コンクリートを主材料として軌道と同等以上の精度を実現させる必要がある。

このための基本方針として、インフラは従来の新幹線構造物と同程度の精度で施工しても、軌道工事に相当するガイドウェイ側壁部の制作および現場敷

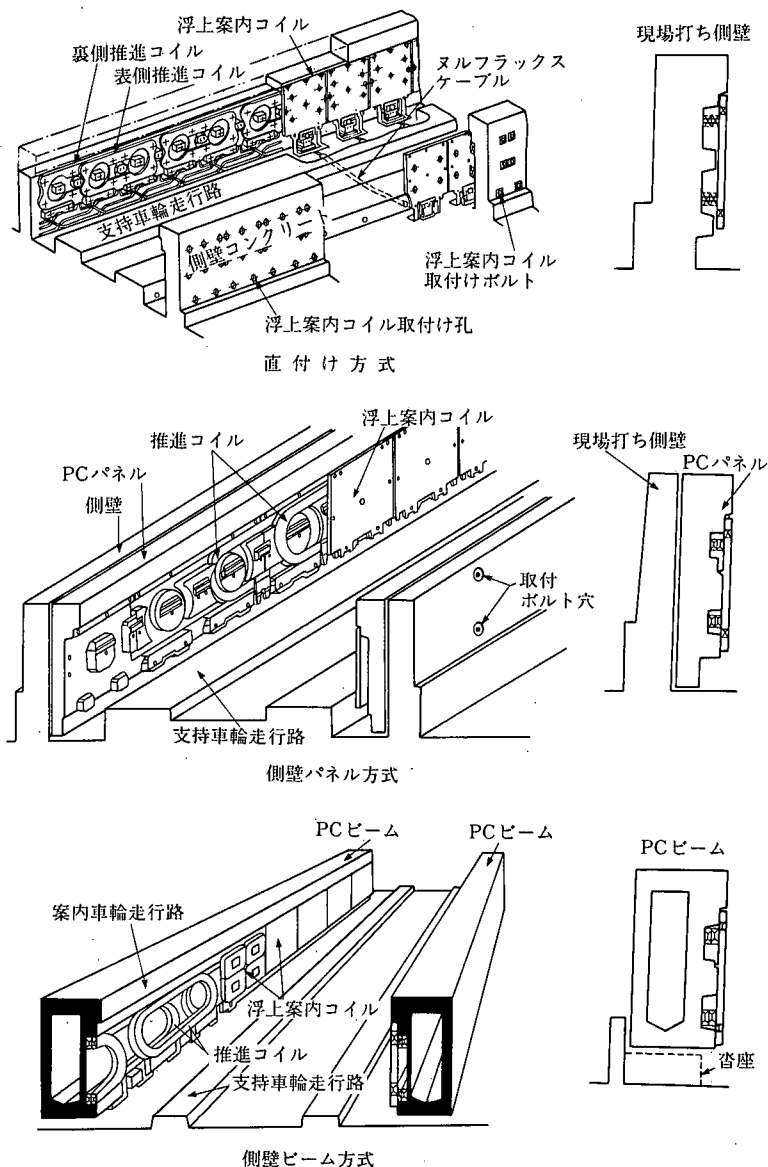


図-8 ガイドウェイ3方式

設工の段階で所要の精度を実現させることとし、ガイドウェイの中心線測量を従来と比較して高精度で行うこととした<sup>18),19)</sup>。

在来鉄道と比較し、車両速度が約2倍になることから、狂い量に対する車両動揺の応答振幅が同程度であるとしても、影響する進行方向の狂いの長さ、いわゆる狂い波長は約2倍の長さになる。また後述するガイドウェイユニット長をガイドウェイ構成上の最小基本長さとするため、計画時点から全線に渡ってすべての構造物をこの整数倍となるよう配置し、地球表面の球面形歪みまで考慮した厳密な実キロ程管理を行う必要があるため、人工衛星を用いた測量

システムであるGPS測量を行った<sup>20)</sup>。第3章に示した通り、ガイドウェイは性質の異なる4項目に対してそれぞれ精度が要求されるが、線路長手方向の波長150m程度の長波長精度を実現するために、ガイドウェイ側壁設置の手法として基準点管理方式を採用した。

この基準点管理方式とは、高精度で長波長狂いを管理したガイドウェイ基準点を予め設置し、ガイドウェイ工事の際には直近のガイドウェイ基準点のみからの相対位置を管理し施工することをいう。結果的に長波長管理された高精度のガイドウェイ設置が可能となる。

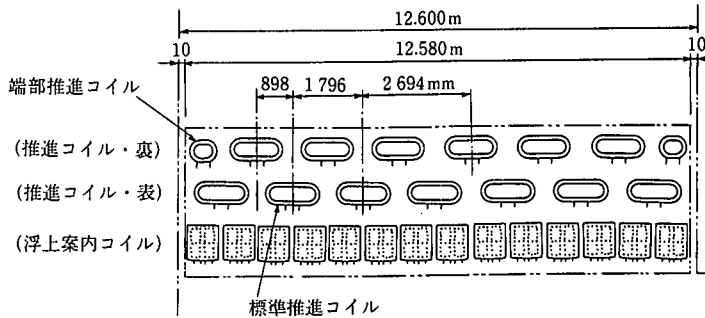


図-9 地上コイル配置

基準点は図-6に示すように、骨格基準点から順に、A、B、C基準点まで以下の手順で設置される。

### (1) 線形の確認

#### ① 骨格基準点測量

構造物の完成後、構造物中心に骨格基準点および補助点を302.4mを標準間隔として設置する。骨格基準点測量の角度・距離測定には精密級測量機材を使用し、一級水準測量を実施し、構造物の位置を確定する。

構造物と計画線形の位置関係を確認し、ガイドウェイ基準点の座標を決定する。

### (2) 通りの設定

#### ② A・B基準点の設置

A基準点は骨格基準点と同様に302.4mを標準間隔として、骨格基準点からの測角、測距により設置する。B基準点はA基準点の間に100.8mを標準間隔としてA基準点からの測角、測距により設置する。

#### ③ C基準点の設置

12.6mを標準間隔としてAまたはB基準点から、アライメントとオフセットにより直接的に行う。

### (3) 高低の設定

基準点に設けたベンチマークの縦断測量を行い、基準点の計画標高とベンチマークの標高差を算出し、所定の標高差になるよう基準標を調整し、再度縦断測量を行い、所定の標高であることを確認する。

構造物完成後から各基準点を設置しその後のガイドウェイ施工までのフローを図-7に示す。

## 5. ガイドウェイ側壁

浮上コイルを敷設し案内車輪走行路面を構成するガイドウェイ側壁は、その構造、製作法の異なる複数の方式が提案されそれぞれに特徴を有することから、検討の結果主として以下の3方式を区別別に設

置し施工性、保守性、耐久性等を比較検討することとした。

側壁の3方式とは、(1)現場打ちコンクリートで製作する直付方式、(2)現場打ち側壁にプレキャストPCパネルを取り付けるパネル方式、(3)現場製作シュー座にプレキャストPCビームを取り付けるビーム方式でありこれらを図-8に示す。

ガイドウェイ側壁はいずれの方式においても必然的にある一定長を施工単位とすることになる。この場合側壁の端部では、通常の2層推進コイルは設置出来ず、端部推進コイルと称する大きさが約半分のコイルを設置することになるが、通過時には推進力に僅かな変化が生じることから、この端部コイルと編成中の台車との重なり数を少なくすることが好ましいことと、施工性、運搬等を考慮して施工単位の長さは、12.6mを標準とした。ガイドウェイの施工単位が構造物配置の面から12.6m一種類だけでは対応しにくいと、短尺の9.0mも加え選択の幅を持たせ、この施工単位を「ユニット」と称している。標準ユニットにおける地上コイルの配置を図-9に示す。

上記のガイドウェイ3方式の製作、施工における共通の技術開発のポイントは、地上コイル敷設面の突起が複雑な凹凸形状をし、取り付けボルトが非常に多いことから、従来より高精度で剛性のある鋼製型枠を使用し、脱型時に突起を欠損させない設備の開発であった。現場敷設では構造上の違いからそれぞれ以下の個別の開発がなされた。

#### (1) 直付け方式<sup>21),22),23),24),25)</sup>

3次元測量装置と組み合わせ、所定位置へ高精度にセット可能な移動式型枠台車が開発された。

#### (2) パネル方式<sup>26),27),28)</sup>

専用のパネル運搬架設車が開発され、現場打ち側壁への取り付けには専用の3次元測定器が使用された。

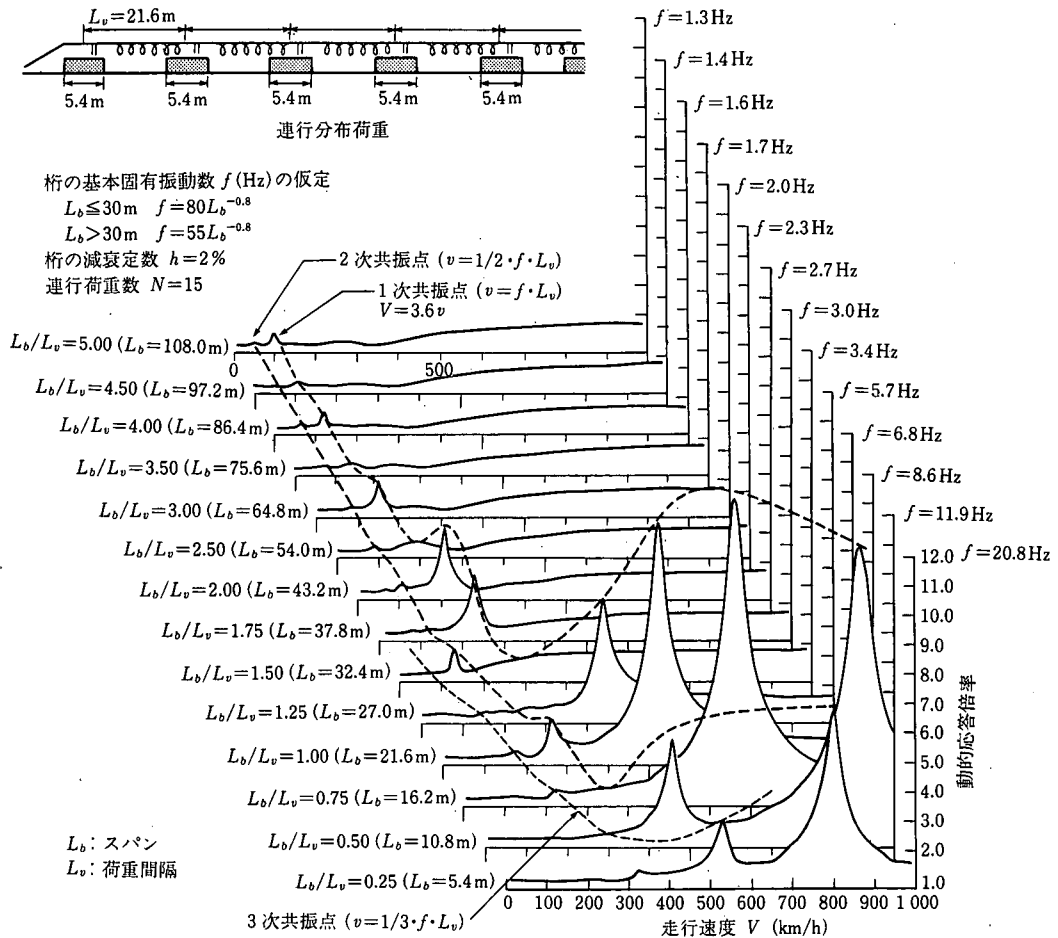


図-10 走行速度と桁スパン長が動的応答倍率に及ぼす影響<sup>39)</sup>

### (3) ビーム方式<sup>29),30),31),32),33),34),35),36)</sup>

専用のビーム運搬車・架設車が開発され、架設にはC基準点をCCDカメラで位置検知し、ビームを所定の位置に自動架設するシステムが使用された。

## 6. 地上コイル<sup>37)</sup>

地上コイルは車両の超電導磁石との間で作用する電磁力により、車両を推進および浮上案内する役割を担うものである。

推進コイルは1.8mピッチで表コイルと裏コイルが交互に2層に設置され、ユニットの両端には端部コイルが設置される。耐久性、取付施工性、保守性の観点から、(1)ボルト締結方式、(2)部分スペーサ方式、(3)一体スペーサ方式の3方式がそれぞれ施工された。

浮上コイル(浮上力と案内力を同時に発生させるコイルを称する)は浮上走行時の鉛直方向力と左右案内力を構造物に伝達する重要な役目を果たしてお

り、推進コイルは上記の3方式いずれの場合でもボルト固定で側壁に取付けられる。側壁浮上方式は、浮上力の支持のために浮上コイル背面に突起を設け、これをコンクリートの側壁面に設けた突起で支持する従来にはない支持方式である。なお直付け区間では、浮上コイル下部を下支え部材で路盤から直接支持する方式を採用している。

## 7. ガイドウェイ・構造物の動的応答

ガイドウェイおよび構造物の動的応答の検討において、連行荷重による速度効果の影響を求めるため、Bernoulli-Eulerによる粘性減衰を有する桁のたわみ変形を解析<sup>38)</sup>し、単純桁の動的応答を支配する、①走行速度、②桁の基本固有振動数、③スパン、④桁の減衰定数、⑤連行荷重数の5つの因子の影響度が明らかにされている。図-10に示すように2次、3次共振点が存在すること、スパンが荷重間隔の2倍以上の場合には動的応答倍率が小さくなること、

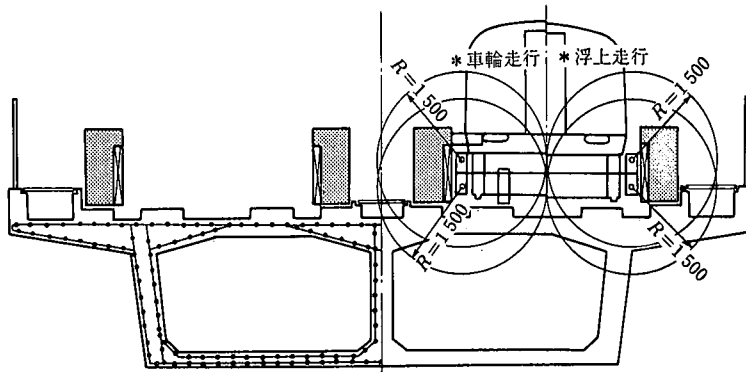


図-11 PC桁における低磁性鉄筋の使用範囲<sup>40)</sup>

1次共振ピークの消失するスパンが存在すること等が示された。また、桁の剛性が付与された場合の効果、減衰定数と連行荷重数の動的応答に与える影響が大きいことが明らかにされた。

上記の結果を踏まえ、山梨実験線におけるビーム方式ガイドウェイ、スパンの異なる各種構造物の走行試験時の応答が計測され、有限要素法によりガイドウェイ構造物を忠実にモデル化した応答解析値との比較検証<sup>39)</sup>がなされた。

この結果、高速領域での実桁の動的応答が解析結果に比較的良く一致すること、リニア車両荷重は死荷重に比較して小さいことから動的応答が大きな問題となることはなく、浮上式鉄道の構造物は十分に経済的設計が可能であることが示唆された。

## 8. 磁気抗力の検討・対策<sup>40)</sup>

超電導磁石が走行することにより、近い位置に存在する普通鋼・低磁性鋼等の鋼材には、電磁誘導作用によりループ電流あるいは渦電流が発生し、そのジュール熱損があるため、普通鋼の場合には磁化に伴うエネルギー損により、走行する車両に対して走行抵抗を及ぼすこととなる。

これらの解析手法として3次元の有限要素法を用いた電磁場解析が有効であることが示され、走行抵抗等の電磁力の計算が可能となった<sup>41),42),43)</sup>。

走行抵抗を増加させないためには、ガイドウェイ等に使用する材料に、電気抵抗が大きくかつ磁界中でも磁束の集中が少ない低磁性体あるいは非磁性体を使用すれば良い。鉄筋コンクリートに使用する低磁性鋼材としてはマンガ含有率の高い高マンガ鋼を採用することとしたが、建設コストの上昇に直結するため、低磁性鉄筋の使用範囲を限定する必要がある、実験や解析が行われた。

宮崎実験線における測定と解析<sup>44),45),46)</sup>が行われ、

超電導磁石からの磁性体の距離が検討され、1.5m以上離れた場合には磁気抗力が十分小さくなることが明らかになったため、低磁性鋼の使用範囲を超電導磁石の索線中心から図-11に示すように原則1.5mとすることが提案された。

鋼構造物としては、上記の超電導磁石に近い部分には低磁性鋼を使うほか、部材を分割<sup>47)</sup>してループ電流<sup>48)</sup>を遮断するために、部材接合部には低磁性絶縁高力ボルトを使った摩擦接合<sup>49)</sup>とすれば、十分に磁気抗力の小さい構造として浮上式鉄道へ適用可能なことが明らかにされた。

RCおよびPC構造物に使用する鉄筋は通常なまし鉄線により互いが結束されるが、鉄筋の接触点では電流が流れ易くなり、縦横に組んだ鉄筋にループ電流が発生することとなる。試験の結果、ビニール材料で被覆した鉄線<sup>40)</sup>を使用して結束することにより、十分な抵抗値が確保できループ電流を防止できることが明らかになったため、ガイドウェイの鉄筋結束にはすべてこれが使用された。

PCコンクリートに不可欠である緊張部材としては、高マンガ鋼の実績がないため、PC鋼線、鋼棒には普通鋼が使用された。また、完全非磁性体の構造物への適用の可能性についても研究がなされ、FRP部材を緊張材およびらせん状せん断補強筋として使用した側壁ビームが試作され、この使用可能性が明らかにされた。

この結果山梨実験線では、高マンガ鋼、アラミド繊維補強材、炭素繊維補強材、ステンレス鋼をそれぞれ緊張材として使用した側壁ビームも試験的に施工された<sup>50),51),52),53)</sup>。

## 9. 分岐装置

鉄道システムにおいて複数列車の運行を制御するためには分岐装置が必要不可欠である。宮崎実験線



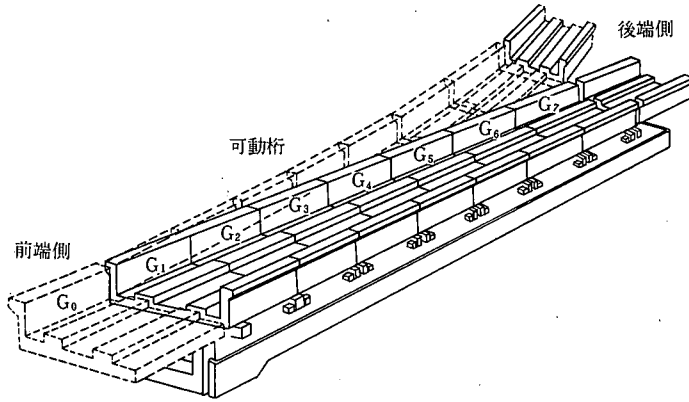


図-12 トラバーサ分岐装置

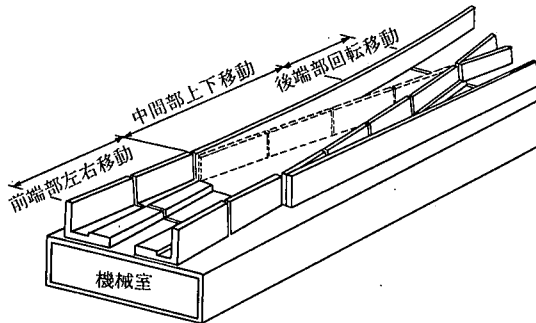


図-13 側壁移動分岐装置

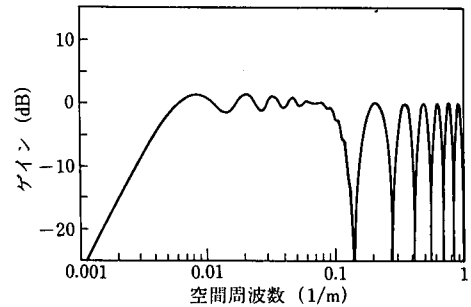


図-14 高低、通り狂いの検出特性<sup>62)</sup>

ではU形断面の台車上の下路桁を左右移動させるトラバーサ分岐装置の部分試作試験で基本的動作確認を行った後、分岐線建設と同時にトラバーサ分岐装置を設置し性能確認試験と耐久性試験が行われた<sup>54)</sup>。

山梨実験線では複線の本線、試験乗降場用の副本線、車両基地内に2ピット線が配線されることとなり4組の分岐装置が必要となった。検討の結果それぞれ方式の異なる以下の分岐装置を配置することとした<sup>55),56),57)</sup>。

- (1) トラバーサ分岐 (油圧駆動)
- (2) トラバーサ分岐 (電気駆動)
- (3) 側壁移動分岐 (油圧駆動)
- (4) ガイドレール分岐 (電気駆動)

図-12に示すトラバーサ分岐装置は基準線側通過速度が500km/h領域の高速対応分岐である。下路桁はPC桁を基本としたが、鋼構造物の磁気抗力に対する検討の成果を取り入れSRC桁<sup>58)</sup>も2連製作された。

図-13に示す側壁移動分岐装置は走行路は移動せず、側壁部のみ左右移動・上下移動・回転移動する特殊な構造を持ち、構内・基地内等の使用を想定した低速分岐である。

またガイドレール分岐装置は、在来方式鉄道分岐

器がノーズおよびクロッシングの動作のみで進行方向の振り分けが可能であるのと同様に、ガイドウェイ側壁のない車両基地内で、ガイドレールのみで切替えて進路の振り分け可能な簡易な構造を持ち、低コストを考慮した分岐装置である。

その他検討された分岐装置としては、本線から副本線を同一線直上に分岐させ、用地面積上有利になる立体分岐装置<sup>59)</sup>、磁気抗力に対しては構造配置の観点から配慮し、鋼材の可撓性を分岐桁に適用したフレックス分岐装置<sup>60)</sup>等が設計され、いずれも模型装置が製作されその基本動作確認がなされている。

## 10. ガイドウェイ検測

車両の乗り心地管理および構造物およびガイドウェイの状態を把握する手段として、その幾何学的状態、すなわちガイドウェイ狂いの経時的変化を監視することが有効である。ガイドウェイ検測車はこれを効率的に実施することを目的として開発された。

在来方式鉄道の軌道検測車あるいは宮崎実験線のガイドウェイ検測車の変位計測には、接触式あるいは光学式の変位計が使用されている。山梨実験線では側壁浮上方式が採用され、地上コイル面がガイドウェイ側壁内面と完全に同一平面を成すこととなり、

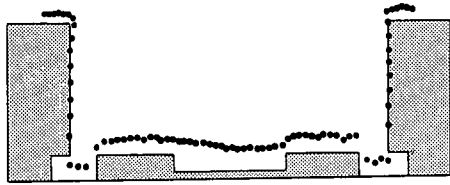


図-15 ガイドウェイ積雪深計による計測<sup>67)</sup>

従来の変位計では高低方向の検測が不可能となった。このため電磁式により浮上コイルの電磁中心を捉える新たな測定方式<sup>61)</sup>が検討された。また長波長狂い算出のため、検測車前後の計測値の差分値を元とした演算により、図-14に示すように波長10mから150mまで利得をほぼ1とする特性を有するフィルタで濾波した狂いとして出力している<sup>62),63)</sup>。

浮上車両による高速走行時の検測が将来可能となれば、常時監視を車上側から行うシステムとして有効であると考えられる。

## 11. 雪対策

新幹線の開発において試験線の段階では予想されず、開業後に明らかになったこととして雪の問題があった。これは降雪時に舞上がった雪が車両床下に付着し、それが軌道面に落下することにより道床パラストを飛散させ周辺に影響を与える事象であった。

宮崎実験線ではガイドウェイ内に降雪を模擬したおが屑を置き、高速走行時の車両床下への付着、ガイドウェイ内外への飛散状況の調査<sup>64)</sup>を行った。

実物大模型高架橋を使い、開床式を含めたU形ガイドウェイの形状と堆積状況の関係<sup>65)</sup>が検討された。また側壁上部から線路直角方向に強制空気流を送るエアーカーテン効果により雪の堆積を防止する対策<sup>66)</sup>も検討された。

山梨実験線では今までに経験のない500km/h領域の高速で走行することから、ガイドウェイ内ケーブル類や周辺等に影響をおよぼさないよう、スプリンクラーの温水散布によりガイドウェイ内の降雪を完全に除去することとした。また図-15に示すようにガイドウェイ断面全体の積雪分布形状が監視できるように、ガイドウェイ上方からの赤外線カメラを利用した積雪深計<sup>67)</sup>が開発され塩沢の実験所での機能確認試験を経て、現地設置されている。

## 12. おわりに

本文では主として、現在山梨で走行試験が行われている超電導磁気浮上式鉄道ガイドウェイの研究お

よび開発状況を紹介したが、浮上式鉄道は在来方式鉄道と基本的にシステムが異なるものであり、構造の観点から「ガイドウェイ」と「軌道」は根本的に異なるものである。

コンクリートおよび鋼等の構造部材とリニアモータを構成する電気部材の複合体であることから生ずる構造設計・施工上の問題、磁気を利用することから生じる磁気抗力の対策の問題、超高速で走行することから生じる精度管理の問題等、種々の未知の問題を一つ一つ解決することにより各浮上式鉄道の試験線が建設され、試験走行が実施されている。

今後の営業線を目指す場合に残された課題は、安全安定輸送に対する長期耐久性と保守性であり、これについて走行試験が継続され、実績を積み重ねて自ずから問題点が明らかになるとともに、その解決策も見出されることが期待される。

将来の建設の実現に対するもう一つの大きな課題は低コスト化である。ガイドウェイの低コスト化については構成部材としての、地上コイル、側壁部材等の単独について検討することも重要であるが、環境対策も考慮したガイドウェイを支える構造形式を含めて検討されることになるものと考えられる。

本文で紹介した3つの浮上式鉄道は、おのおの走行試験の実績が積まれており、営業線の実現については社会経済情勢と切り離して考えることはできないが、技術的課題が解決され新しい交通機関として実現することを期待したい。

## 参考文献

- 1) 宮田尚彦, 松浦章夫, 高木肇: 超電導磁気浮上式鉄道, 土木学会論文集, No. 415/VI-12, pp. 17-25, 1990. 3.
- 2) 宮田尚彦: 超電導磁気浮上式鉄道の技術開発の考え方, 鉄道総研報告, Vol. 8, No. 10, pp. 1-6, 1994. 10.
- 3) 村田信之: U形ガイドウェイ桁の剛性および耐力, 鉄道総研報告, Vol. 2, No. 6, pp. 2-9, 1988. 6.
- 4) 阪本謙二, 伊藤隆, 名倉隆雄: 山梨リニア実験線のガイドウェイ, J R E A, Vol. 39, No. 5, pp. 18-23, 1996. 5.
- 5) 大塚邦夫: 西独トランスラピッドMaglev, 公共投資ジャーナル社, 1989. 2.
- 6) Grossert, E.: Guideways for TRANSRAPID The guideway in its modular form, The 15th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives MAGLEV'98, pp. 158-165, 1998. 4.
- 7) Schwindt, G.: Transrapid Guideways Technical Standards, The 15th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives MAGLEV'98, pp. 166-171, 1998. 4.
- 8) Rodriguez, O.: The Steel Guideway for the Maglev Sys-

- tem TRANSRAPID, The 15th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives-MAGLEV'98, pp.172-177, 1998.4
- 9) 加藤寿, 高木進, 大野義弘, 鈴木義成: 磁気浮上式鉄道(HSST)における軌道精度管理, コンクリート工学, Vol. 31, No.4, pp.57-65, 1993.4
  - 10) 藤原俊輔, 藤本健: 浮上と案内を兼用する誘導反発式磁気浮上の特性, 鉄道総研報告, Vol.3, No.11, pp.16-21, 1989.11
  - 11) 吉岡博: 磁気浮上車両の運動モデル, 鉄道総研報告, Vol.2, No.6, pp.17-22, 1988.6
  - 12) Chabas,J., Suzuki, E., Yoshioka, H. and Fujiwara,S.: Analysis of Vehicle Dynamics In Response to Guideway Irregularities, Quarterly Report of RTRI, Vol.39, No.2, pp.88-92, 1998.6
  - 13) 富田健司, 松浦章夫: 浮上式構造物の許容変位, 鉄道総研報告, Vol.6, No.1, pp.43-50, 1992.1.
  - 14) 古川敦, 橋本渉一: ガイドウェイ狂いのパワースペクトル密度と乗り心地レベル, 鉄道総研報告 Vol.7, No.2, pp.11-18, 1993.2.
  - 15) 松浦章夫, 橋本渉一, 古川敦: 超電導磁気浮上式鉄道ガイドウェイの施工精度と乗り心地レベル, 土木学会論文集 No.482/IV-22, pp.67-76, 1994.1
  - 16) Furukawa,A. and Hashimoto,S.: Relationship Between Maglev Guideway Irregularity and Riding Quality, Quarterly Report of RTRI, Vol.35, No.3, pp.170-177, 1994.4
  - 17) 高井秀之: 新幹線の長波長軌道狂い管理, 鉄道総研報告, Vol.3, No.4, pp.13-20, 1989.4.
  - 18) 狩野弘治, 橋本渉一, 本田敦: 浮上式鉄道のガイドウェイ設置手法, 鉄道施設協会誌, Vol.30, No.12, pp.26-28, 1992.12.
  - 19) 三島研二, 狩野弘治, 乗田治己: リニアモーターカーの乗り心地と測定, 日本測量協会誌, pp.36-41, 1995.11.
  - 20) 宮林秀次, 小武海一喜, 遠藤秀雄: 山梨実験線における人工衛星を用いた測量システム, 鉄道施設協会誌, Vol.30, No.5, pp.52-54, 1992.5.
  - 21) 齊藤浩司, 梅原晋一: 直付けガイドウェイの開発, J R E A, Vol.38, No.6, pp.9-12, 1995.6.
  - 22) 高橋浩一, 早瀬邦仁, 乗田治己: 山梨リニア実験線における直付方式ガイドウェイの開発, 土木技術, Vol.50, No.7, pp.71-83, 1995.7.
  - 23) 鈴木真男, 早瀬邦仁: 超高精度の現場打設用コンクリート型枠台車の開発-山梨リニア実験線ガイドウェイの施工-, 建設の機械化, No.555, pp.39-45, 1996.5.
  - 24) 清治均, 狩野弘治, 早瀬邦仁: 直付けガイドウェイの開発(前編)-山梨リニア実験線-, 鉄道施設協会誌, Vol.33, No.1, pp.57-59, 1995.1.
  - 25) 清治均, 狩野弘治, 早瀬邦仁: 直付けガイドウェイの開発(後編)-山梨リニア実験線-, 鉄道施設協会誌, Vol.33, No.2, pp.55-56, 1995.2.
  - 26) 大石峰生, 石井拡一: 山梨リニア実験線ガイドウェイのパネル架設-高精度施工を目指して-, 鉄道施設協会誌, Vol.34, No.1, pp.60-62, 1996.1.
  - 27) 狩野弘治, 早瀬邦仁: 山梨リニア実験線におけるパネル方式ガイドウェイの施工, 鉄道施設協会誌, Vol.34, No.12, pp.57-59, 1996.12.
  - 28) 名倉隆雄, 堀田学: 山梨リニア実験線ガイドウェイの高精度施工, 土木学会誌, Vol.82, No.6, pp.10-12, 1997.6
  - 29) 涌井一: 超電導磁気浮上式鉄道のガイドウェイ構造, コンクリート工学, Vol.28, No.12, pp.4-13, 1990.12.
  - 30) Wakui,H., Tottori,S. and Matsumoto,N.: Dynamic Problems on MAGLEV Guideway Structures, IABSE SYMPOSIUM LENINGRAD 1991, pp.489-494, 1991.9.
  - 31) Wakui,H., Tottori,S., Matsumoto,N., Okuda,H. and Watanabe,T.: Structure of side-wall levitated MAGLEV Guideway System and its Dynamic Property, Quarterly Report of RTRI, Vol.32, No.4, pp.234-243, 1991.12
  - 32) 古川敦, 山住克己, 佐藤勉, 岡田勝也: ガイドウェイ用側壁ビーム運搬架設システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.8, No.10, pp.47-52, 1994.10.
  - 33) 早瀬邦仁, 古川敦: 山梨リニア実験線ガイドウェイ用側壁ビームの製作, 鉄道施設協会誌, Vol.33, No.8, pp.46-48, 1995.8.
  - 34) 狩野弘治, 村上美光, 山住克己: 山梨リニア実験線ビーム方式ガイドウェイの支承部施工法, 鉄道施設協会誌, Vol.33, No.11, pp.58-60, 1995.11.
  - 35) Sakamoto,K. and Furukawa,A.: Construction Technology of Beam Type MAGLEV Guideway, Quarterly Report of RTRI, Vol.37, No.2, pp.84-89, 1996.9.
  - 36) 古川敦, 山住克己, 橋本渉一: 超電導磁気浮上式鉄道ガイドウェイ(ビーム方式)の施工精度, 土木学会論文集, 投稿中.
  - 37) Sawada,K., Tsuruga,H. and Iida,T.: Development of Ground Coils for Yamanashi MAGLEV Test Line, Quarterly Report of RTRI, Vol.37, No.2, pp.99-103, 1996.9.
  - 38) 湧井一, 鳥取誠一, 松本信之, 奥田広之, 渡辺忠朋: 側壁ビーム方式ガイドウェイの構造と動的応答特性, 鉄道総研報告, Vol.5, No.1, pp.25-33, 1991.1.
  - 39) 曾我部正道, 四十九勇治, 松本信之, 涌井一, 梶川徹, 青木成生: 山梨実験線ガイドウェイ構造物の動的応答に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.12, No.8, pp.15-20, 1998.8.

- 40) 市川篤司：超電導磁気浮上式鉄道に於ける電磁気対策，土木学会誌，Vol.81，No.2，pp.14-17，1996.2.
- 41) 酒井謙，田中良幸，山下彰彦：リニアモーターカーにより発生する電流および磁気力に関する研究：日本機械学会論文集(A編)，Vol.58，No.551，pp.265-272，1992.7.
- 42) 酒井謙，山下彰彦：リニアモーターカー(MAGLEV)周辺の磁束密度分布に関する研究，日本機械学会論文集(A編)，Vol.58，No.553，pp.200-205，1992.9.
- 43) Tsuchimoto,M., Hashimoto,M., Yamashita,A. and Miya,K. : Experiments and numerical analysis of iron loss of a ferromagnetic thin plate, Electromagnetic Phenomena and Computational Techniques, pp.137-144, 1992.
- 44) 市川篤司，穴見源八，田村勝司，志村雄三：鋼構造物の浮上式鉄道への適用に関する研究，鉄道総研報告，Vol.4，No.8，pp.33-41，1990.8. 4
- 45) 市川篤司，穴見源八：鋼構造物と超電導磁気浮上式鉄道，橋梁と基礎，Vol.26，No.4，pp.19-26，1992.4.
- 46) 穴見源八，市川篤司，杉本一朗：浮上式鉄道のガイドウェイ鋼材のヒステリシス損と磁気抗力，鉄道総研報告，Vol.6，No.5，pp.21-29，1992.5.
- 47) 市川篤司，穴見源八，志村雄三：浮上式鉄道に用いる鉄骨鉄筋コンクリート構造物の開発，鉄道総研報告，Vol.5，No.9，pp.11-20，1991.9.
- 48) 穴見源八，市川篤司，杉本一朗：浮上式鉄道ガイドウェイに用いる鉄筋の接触抵抗と誘導ループ電流による磁気抗力，鉄道総研報告，Vol.6，No.7，pp.29-35，1992.7.
- 49) 市川篤司，穴見源八：浮上式鉄道の構造物に用いる低磁性絶縁高力ボルト継手に関する研究，鉄道総研報告，Vol.6，No.1，pp.3-10，1992.1.
- 50) 湧井一，鳥取誠一，松本信之，渡辺忠朋：側壁ビーム方式ガイドウェイとFRP補強材導入の可能性，JRE A，Vol.33，No.3，pp.54-58，1990.3.
- 51) 湧井一，鳥取誠一：FRP棒材を緊張材ならびにらせん状せん断補強筋として用いたコンクリートはりのせん断性状，鉄道総研報告，Vol.4，No.8，pp.25-32，1990.8.
- 52) 鳥取誠一，佐藤勉：連続繊維補強材を用いた側壁ビーム方式のガイドウェイの設計法に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.35，No.1，pp.59-67，1993.1.
- 53) 鳥取誠一，山住克巳，古川敦：連続繊維補強材を用いた山梨リニア実験線ビーム方式ガイドウェイの設計・施工，土木技術，Vol.51，No.12，pp.95-100，1996.12.
- 54) 吉本祥二，小野利之，柳川秀明：浮上式鉄道の分岐の安全設計について，鉄道施設協会誌，Vol.27，No.10，pp.63-66，1989.10.
- 55) 川越慎一，藤井実，小野利之，穴見源八：山梨リニア実験線の分岐装置・乗降装置について，鉄道施設協会誌，Vol.31，No.11，pp.34-36，1993.11.
- 56) 杉山兆且，若月修，小野利之，鶴田裕司，上野貞：トラバサ分岐装置(油圧駆動)の開発，鉄道総研報告，Vol.8，No.10，pp.41-46，1994.10.
- 57) 小野利之，川越慎一：山梨実験線の分岐装置，鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL'94)講演論文集，pp.139-144，1994.12.
- 58) 杉山兆且，阪本謙二：山梨実験線トラバサ分岐装置SRC桁の開発，鉄道総研報告，Vol.11，No.3，pp.11-16，1997.3.
- 59) 高木喜内，内田雅夫：立体分岐装置の開発，鉄道総研報告，Vol.6，No.3，pp.65-73，1992.3.
- 60) 市川篤司，穴見源八，杉本一朗：浮上式鉄道用鋼製フレックス分岐装置の開発，鉄道総研報告，Vol.6，No.10，pp.37-46，1992.10.
- 61) 竹下邦夫：ガイドウェイ検測車電磁式変位検出器の開発，鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL'94)講演論文集，pp.171-174，1994.12.
- 62) 竹下邦夫：ガイドウェイ検測車の開発，鉄道総研報告，Vol.10，No.1，pp.53-58，1996.1.
- 63) 竹下邦夫，高木喜内，吉田真：浮上式鉄道用ガイドウェイ検測車の開発，鉄道施設協会誌，Vol.34，No.3，pp.29-32，1996.3.
- 64) 今井俊昭，藤井俊茂，遠藤徹：浮上式鉄道MLU002浮上走行時の雪に飛散分布の推定，鉄道総研報告，Vol.3，No.1，pp.51-57，1989.1.
- 65) 藤井俊茂，今井俊昭，遠藤徹：マグレブ用高架橋の上部工形状と雪の堆積状況の関係，鉄道総研報告，Vol.3，No.10，pp.39-46，1989.10.
- 66) Fujii, T., Imai, T., Endo, T. and Kawashima, K. : Anti-snow-accumulation Effect of Artificial Air Flow Blown over U-Shaped Structure, Proceedings of the Fifth International Symposium on Cold Region Development, ISCORD'97, pp.541-544, 1997.5.
- 67) Kawashima, K., Iikura, S., Endo, T., Fujii, T. and Imai, T. : A measuring system for snow depth profiles in Maglev guideway using the light cross section method, Proceedings of the third International Conference on Snow Engineering, pp.105-108, 1996.5.

(1999. 2. 16 受付)