

# 超電導磁気浮上式鉄道ガイドウェイの施工精度と乗心地レベル

松浦章夫\*・橋本渉一\*\*・古川 敦\*\*\*

良好な乗心地の確保のため、浮上式鉄道のガイドウェイは高い精度で施工されなければならない。本論文では、単位施工長、走行速度および車両の振動特性から定まる「乗心地影響係数」を用いてガイドウェイの施工精度とガイドウェイ狂いのパワースペクトル密度および乗心地レベルとの関係を定式化し、ガイドウェイ狂いの特性について言及した。また、この関係式をもとに乗心地レベルを考慮した施工精度の決定方法を提案する。

Key Words: maglev guideway, riding quality level, construction accuracy

## 1. はじめに

わが国で開発されている超電導磁気浮上式鉄道のガイドウェイは、U型のコンクリート側壁とこの側壁に取り付けられた推進、浮上、案内地上コイルより構成される。これらの地上コイルに関しては、浮上式鉄道の開発当初は側壁に取り付けられた推進案内兼用コイルおよび床版上の浮上コイルにより構成されていたが、最近浮上と案内を兼用する地上コイルが開発され、現在のガイドウェイの構成はFig.1に示すようにコンクリート側壁に2層の推進コイルおよび浮上・案内兼用コイルを配したのとなっている<sup>1), 2)</sup>。

浮上・案内兼用方式においては、車両側の超電導磁石が浮上・案内コイルの近傍を通過したときに生じる誘導電流による磁界と車両側の超電導磁石との吸引・反発力とによって車両の支持・案内が成立する。すなわち、浮上・案内コイルは従来の鉄車輪／レール系の鉄道におけるレールに相当するものである。地上側の浮上・案内コイルと車両側の超電導コイルとの間に働く電磁力の大きさは両コイルの間隙量により定められるが、このことは車両の上下・左右の運動が浮上・案内コイルの位置に支配されることを意味する。すなわち車両の良好な乗心地を確保するためには、鉄車輪／レール系の鉄道における軌道狂いと同様に、浮上・案内コイルの取付け位置の不整（以下ガイドウェイ狂いと呼ぶ）に対して十分な配慮を施す必要がある。一方で、ガイドウェイはトンネルや橋梁等の土木構造物上にコンクリート側壁を取り付けた構造であるため、土木構造物の変状以外にガイドウェイ

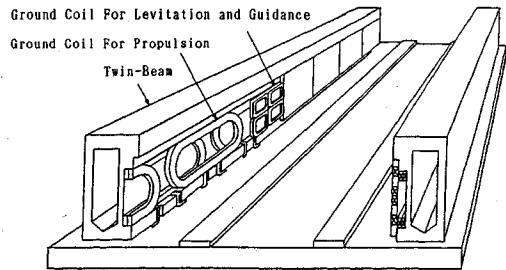


Fig.1 Twin Beam Guideway

狂いの漸進的な増大は考えにくい。また実際にガイドウェイに狂いが発生した場合、地上コイル一つ一つの取り付け位置を個々に微調整することは施工上困難な点があるため、新実験線においてはいくつかの地上コイルを取り付けた側壁パネルや側壁ビームを1群とした群管理方式を一部区間に採用し、ガイドウェイの施工・保守管理を行うこととなっている。このことから、良好な乗心地を得るためには、建設当初におけるガイドウェイの施工精度を、保守管理の行き届いた一般の軌道と同程度のレベルに確保しておくことが必要とされる。これに対し本論文は、ガイドウェイ施工精度と乗心地の関係を定量化し、合理的な施工管理の一助とすることを目的とするものである。

鉄車輪／レール系の鉄道においては軌道狂いの状態を評価する方法として、限度値超過箇所数、軌道狂い指数P値やパワースペクトル密度等(Power Spectral Density 以下PSDと記す)が用いられる。これらの評価方法は軌道狂いの保守、車両振動の解析・評価など、目的に応じて使い分けられるが、このうち本論文ではPSDを用いてガイドウェイ狂いを評価する。PSDは局所的な狂いの評価には不適當ではあるが、ある一定区間における軌道(ガイドウェイ)狂いの総合的な評価指標としては適しており、特に車両の乗心地はガイドウェイ狂いの周波数特性と密接な関係があるが、PSDはこの周波数

\*正会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 施設研究部長  
(〒185 国分寺市光町2-8-38)

\*\*正会員 工博 同上 浮上式鉄道開発本部土木部

\*\*\*正会員 工修 同上 浮上式鉄道開発本部土木部

特性を最も良く表現し得るものである。またPSDは以下に述べる乗心地レベルと密接な関係持っている。本研究では、現在想定されているガイドウェイの施工方法をもとに、ガイドウェイ狂いのPSDを理論的に推定し、施工精度と乗心地レベルとの定量的な関係式を導く。そして数値シミュレーションによりガイドウェイ狂い波形を再現し、上記関係式の妥当性を確認する。さらに乗心地レベルに及ぼす影響を施工管理の立場から考察し、乗心地を考慮した施工精度の設定方法に言及する。なお、以下に述べる施工精度とは設計値に対する施工誤差を統計量であらわしたもので、特に断わらない限り、施工誤差の標準偏差を示すものとする。

2. 乗心地レベルとガイドウェイ狂い

乗心地の評価方法として、本論文では車両の振動加速度に基づく乗心地レベルを用いる。これは1975年国際標準化機構（ISO）により提案された「全身振動暴露に関する評価指針」をもとに旧国鉄運輸局を主管とする「乗心地管理基準に関する研究委員会」により提案されたものである<sup>3)</sup>。

乗心地レベル  $L_f$  (dB) は以下の式で定義される。

$$L_f = 10 \cdot \log_{10} (\bar{a}^2 / a_{ref}^2) \quad (1)$$

ここで、 $\bar{a}$  : 乗心地補正された車両振動加速度の2乗平均の実効値 ( $m/s^2$ )  
 $a_{ref}$  : 基準加速度 ( $10^{-5} m/s^2$ )

式(1) で求められる乗心地レベルから振動区分を定めて乗心地を評価する。乗心地レベルと振動区分、乗心地の評価の関係を Table.1 に示す。

式(1) の  $\bar{a}$  は次の式で求められる。

$$\bar{a}^2 = \int_0^{\infty} |H(f)W(f)|^2 df \quad (2)$$

ここで、 $f$  : 時間周波数 (1/s)  
 $S(f)$  : ガイドウェイ狂いの PSD ( $mm^2 \cdot s$ )  
 $H(f)$  : 車両の周波数応答関数 ( $m/s^2/mm$ )  
 $W(f)$  : 乗心地処理フィルタの周波数特性  
 ガイドウェイ狂いの PSD は空間周波数  $F$  (1/m) に対して定義されるので以下の式により変数変換する。

$$f = F \cdot v \quad (3)$$

$$S(f) = S(F) / v \quad (4)$$

$v$  : 列車走行速度 (m/s)

車両の周波数応答関数は、車両の超電導磁石-台車-車体のばね-マス系 (Fig.2) により決定される関数である<sup>4)</sup>。車両の周波数応答関数は、Fig.3 の曲線に示すように凹凸の激しい関数であり、1車体の前位と後位あるいは1編成の先頭車と中間車で関数形が異なる。このため、ここでは同図の直線に示すように、これらの関数形のピークの包絡線を周波数応答関数として用いる。また、

Table.1 Riding quality level and estimation

Category	Riding Quality Level (dB)	Estimation
1	$LT < 83$	Very Good
2	$83 \leq LT < 88$	Good
3	$88 \leq LT < 93$	Normal
4	$93 \leq LT < 98$	Bad
5	$98 \leq LT$	Very Bad

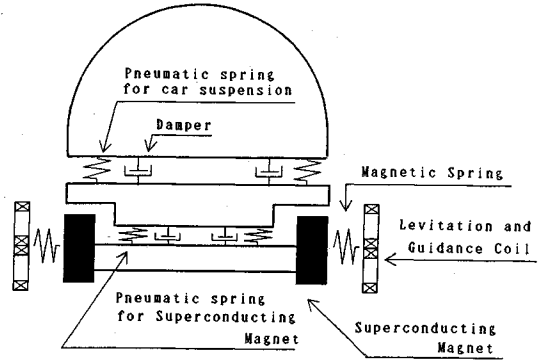


Fig.2 Truck Suspension Diagram

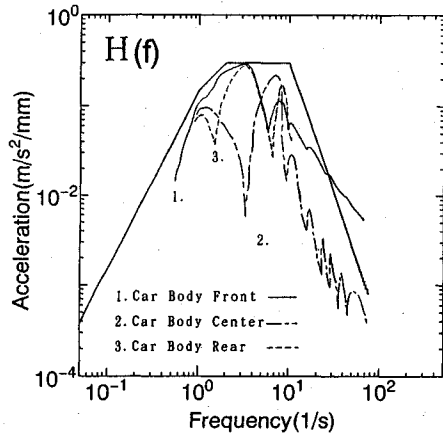


Fig.3 Resonant frequencies of MAGLEV Vehicle acceleration<sup>4)</sup>

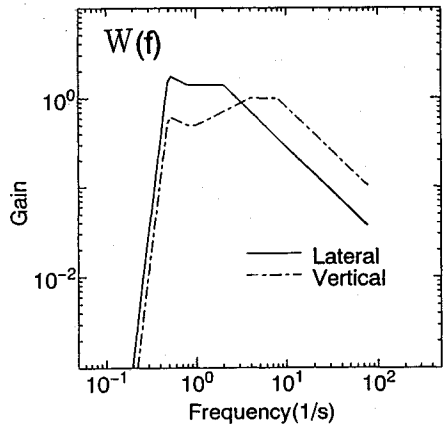


Fig.4 Riding Comfort Filter

乗心地処理フィルタは、各周波数帯の振動に対する人間の不快感の感じ方の度合を示したもので、ISOにより提案された等感覚曲線をもとに上記委員会で定めたものである。上下・左右振動に対する乗心地処理フィルタをFig.4に示す。これらの関数に対し本研究は式(2)の右辺で未知関数として残っている $S(f)$ を求めるための解析を行い、ガイドウェイ狂いのPSDと乗心地との関係を明らかにする。

### 3. ガイドウェイの施工方法

1章で述べたように、ガイドウェイ狂いはガイドウェイの施工精度に依存している。逆に言えば実際の施工手順が明らかにならないと、施工誤差によるガイドウェイ狂いを評価することは難しい。そこで、本研究ではガイドウェイが以下に示す手順で施工されるものとし、次章以下の解析を行うこととする。なお、各作業手順の後ろ側の( )内の番号は作業手順の通し番号である。

#### (1) 線形測量<sup>6)</sup>

一般に、車両の走行速度が増加するに従って、車両の共振周波数領域に対応する地上側の軌道狂い波長は長くなる。このため新幹線においては近年の営業速度向上とともに、軌道検測方法として従来の20m弦正矢法に代わり40m弦正矢法が用いられている<sup>6)</sup>。新幹線の2倍に近い速度で走行する浮上式鉄道においては、仮に弦正矢法でガイドウェイ狂いを検測する場合80m程度の弦長が必要となる。しかしこのような長波長での弦正矢法は測定自体が困難で所要の狂い管理を行うことは難しい。そこで、このような長波長領域におけるガイドウェイ狂いの保守管理のために、精密測量により設置するガイドウェイ基準点の3次元座標値を用いることが提案されている(これを「基準点管理方式」と呼ぶ)。以下、基準点管理方式による測量基準点の設置方法について概説する。

##### a) 骨格基準点測量

骨格基準点には、構造物施工のための基準点および構造物完成後の線路中心線設置のための基準点がある。構造物施工のための基準点はGPS測量によりトンネル坑口等に設置される<sup>7)</sup>。また線路中心線の骨格基準点はGPS測量により設置された基準点を既知点とした結合トラバースにより測量される。この骨格基準点により構造物の位置を確定し、必要があれば計画線形を修正する。このため骨格基準点の誤差は、ガイドウェイ狂いとしては計上しない。また、ガイドウェイ側壁部の施工はガイドウェイ基準点をもとに行うため、基準点の間隔は側壁を構成する側壁ビームや側壁パネル(以下側壁ユニットと呼ぶ)の定数倍である必要がある。側壁ユニットの長さは12.6mであるが、骨格基準点の設置間隔は測量機器の性能面を考慮して12.6mの24倍である302.4mとする。

##### b) A基準点(1)、B基準点(2)の測量

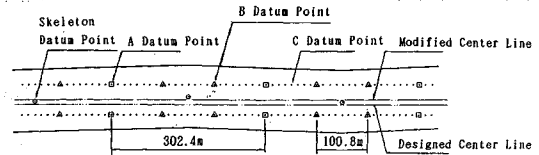


Fig.5 Guideway Survey Datum Point(image)

以下A、B、C基準点は線路中心線設置後、ガイドウェイ施工のためにガイドウェイ中心に設置される基準点である。A基準点は302.4m間隔で、骨格基準点を既知点とした結合トラバースにより測量される。またB基準点はA基準点を補間する形で100.8m(=12.6×8)間隔での設置を計画している。

##### c) C基準点測量(3)

C基準点は側壁施工のために設けられる基準点であり、B基準点を補間する形で設置される。その設置間隔は側壁ユニット長と一致させる必要があるため12.6mである。測量時に発生する誤差は、通り方向には測角誤差、高低方向には水準測量誤差であるが、C基準点設置時には実際の基準点(スラブ軌道の基準器に線路方向の調整機能を付加したもの)の設置誤差も加味される。

各基準点の設置状態のイメージをFig.5に示す。

#### (2) ガイドウェイ施工

現在ガイドウェイの側壁方式として、主として側壁ビーム、側壁パネル、直付方式の3タイプが計画されているが、本研究では鉄道総研において開発を進めている側壁ビーム方式<sup>8)</sup>を例として解析を行う(Fig.1)。

##### a) 側壁ビームの製作(4)

側壁ビームは工場製品として高精度で製作する。側壁ビームは桁長12.6mのプレテンションPC桁であり、初期変位を防ぐためにプレストレス力によるその発生を小さくする設計となっている。しかしながら、型枠自体のもつ製作寸法の誤差やコンクリート打込み時の型枠の変形により、側壁ビームのコイル取付面に凹凸が発生する。この凹凸はそのまま側壁ビームに取り付けられるコイル位置の狂いとなり、ガイドウェイの高低、通り狂いの原因となる。

##### b) 側壁ビーム支承部の施工(5)

側壁ビームは1ビームあたり2箇所の支承で支持される。この支承の高さの施工誤差は、ガイドウェイの高低方向の狂いの要因となる。

##### c) 架設機械による側壁ビームの架設(6)

側壁ビームの架設は専用の架設機械を用いて行う<sup>9)</sup>。架設機械はガイドウェイ上のC基準点および側壁ビーム上に設けた基準点の位置を基に、両者の相対位置関係が所定の値となるように側壁ビームを架設する。架設機械による架設位置誤差はガイドウェイの通り狂いに影響を

及ぼす。

(3) 地上コイルの製作・取付(7)

地上コイルは、側壁ビーム製作工場内で、側壁ビームの架設に先だってビームに取り付けられる。地上コイルはアルミニウム製の素線の外側に樹脂で成形した構造である。この外形寸法は高精度で製作されるが、素線と樹脂の相対位置には誤差が見込まれている。またコイル取付時にも側壁ビームに対する位置決め誤差が生じる。

以上(1)~(7)の施工の各段階において発生する誤差は、いずれも人為的あるいは機械的な誤差であるが、以下の議論ではこれらの誤差はすべて、ある標準偏差のもとにランダムに発生するものと仮定する。この仮定の妥当性は、上記施工に伴う誤差が、前段階における誤差の影響を受けないと考えられることに根拠をおく。また(1)~(7)の各段階で発生する7種の誤差は互いに独立であるものとする。これも上記と同様の理由から妥当な仮定であると考えられる。

4. ガイドウェイ狂いの

パワースペクトル密度

(1) 準備

Wiener-Khintchine の公式により、PSDは原波形の自己相関関数のFourier 変換により求められる。一方、互いに独立なN個のランダム波を合成したランダム波の自己相関関数 $R(\tau)$ は、各々の自己相関関数 $R_i(\tau)$ の和である。

$$R(\tau) = \sum_{i=1}^N R_i(\tau) \quad \text{----- (5)}$$

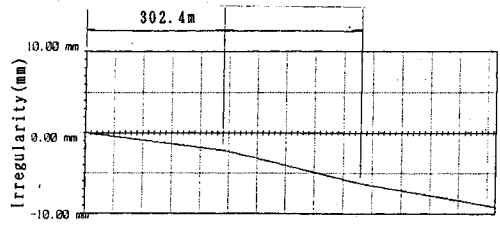
ここで、 $i$  : 前章の(1)~(7)の施工誤差を表す。

式(5)およびWiener-Khintchine の公式により、互いに独立であるランダム波のパワースペクトル密度 $S(F)$ は、各々のランダム波のパワースペクトル密度 $S_i(F)$ の和として表される。

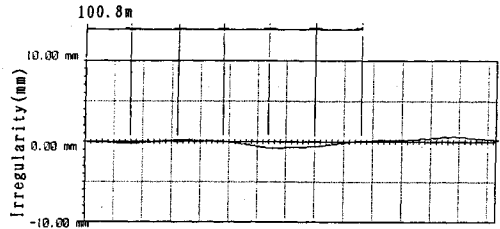
$$S(F) = \sum_{i=1}^N S_i(F) \quad \text{----- (6)}$$

すなわち、3章で示した(1)~(7)のガイドウェイ施工誤差が互いに独立であるならば、各々の施工誤差単独により定まるガイドウェイ狂い波形のPSDを足し合わせたものが最終的なガイドウェイ狂いのPSDとなる。Fig.6-(1)はA基準点の測量誤差単独による狂い、Fig.6-(2)はB基準点の測量誤差単独による狂い、Fig.6-(3)は2つの狂いを合成したB基準点測量終了後の波形である。式(6)はFig.6-(1),(2)各々の波形のPSDをとり、その和がFig.6-(3)の波形のPSDとなるということを示している。

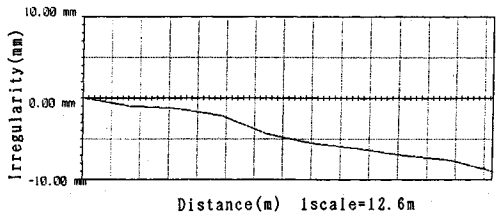
この場合乗心地レベルについても式(1),(2)より以下の関係が成り立つ。



(1) Irregularity by A Datum Point



(2) Irregularity by B Datum Point



(3) Irregularity by A and B Datum Point

Fig.6 Irregularity by Survey Datum Point

$$LT = 10 \cdot \log_{10} \{ \bar{a}^2 / a_{ref}^2 \} = 10 \cdot \log_{10} \{ \sum a_i^2 / a_{ref}^2 \} \quad \text{----- (7-1)}$$

$$= 10 \cdot \log_{10} \{ \sum 10^{LT_i/10} \} \quad \text{----- (7-2)}$$

ここで、 $\bar{a}_i$  :  $i$ 番目施工誤差単独によるガイドウェイ狂い上での車両振動加速度の実効値

$LT_i$  :  $i$ 番目施工誤差単独による乗心地レベル

以上の事柄を踏まえ、3章で述べた各施工誤差単独によるPSD; すなわち式(6)における $S_i(F)$ が各々どのような関数形となるかを次節において考察する。

(2) 各施工誤差によるパワースペクトル密度

a) A基準点の測量誤差

骨格基準点およびA基準点の測量は結合トラバースにより行われる。このこと自体は通常の路線測量と基本的には変わるところはないため、A基準点の測量誤差のみによって定まる線形のパワースペクトル密度曲線は、在来の鉄車輪／レール系軌道のパワースペクトル密度曲線の長波長領域と同様の関数形で表されると考えられる。

一般に軌道狂い波形のPSDは、両対数軸上で右下がりの曲線となることが知られている。これを式で表すと次のようになる<sup>10)</sup>。

$$S(F) = \frac{A}{(B+F)^n} \quad (8)$$

A, B, nはそれぞれ軌道の状態により異なるパラメータであるが, nの値は一般に1.5~3の間である.

骨格基準点から設置されるA基準点はガイドウェイの基本線形を決めるものであり, その測量誤差による波形のPSDも式(8)に従って表されると考えられる. ところでA基準点は302.4m間隔で設置されるため, A基準点のみの点列を離散 Fourier級数展開したときNyquist周波数は1/604.8(1/m)となる. すなわち式(8)の定義域は,  $F \leq 1/604.8(1/m)$ である. 一方このように離散的な点列からPSDを求めた場合, エイリアジングと呼ばれるNyquist周波数より高い周波数成分に起因する誤差が発生する. エイリアジングは, データ間隔が実際の波形に含まれる最も短い周期(波長)より長い場合に著しく現れるが, Fig.6-(1)に示すようにA基準点を直線補間した波形には604.8mより短い波長の波形は認められない. よって, A基準点の測量誤差によるPSDはNyquist周波数より低い周波数領域のみで定義し, それより高い周波数領域の成分は考えないことにする. 実際に直線補間した波形をFourier級数展開するとNyquist周波数より高い周波数成分は0とはならないが, これを式(6)に代入して全体のPSDを求める場合, B基準点以下のNyquist周波数がより高い施工要因によるPSDが卓越するため, A基準点の測量誤差によるPSDのうちNyquist周波数より高い周波数領域については無視して差し支えない. これはA基準点のみならずその他の施工誤差についても同様の扱いとする.

また, A基準点位置誤差の標準偏差  $\sigma_A$  とPSDの関係はParsevalの定理より以下の式で表される.

$$\sigma_A^2 = \int_0^\infty S(F) dF = \int_0^{1/604.8} \frac{A}{(B+F)^n} dF \quad (9)$$

b) B基準点の測量誤差

B基準点は, A基準点によって定まるガイドウェイ中心線の周りにある標準偏差でランダムに分布する(Fig.6-(2)). B基準点は100.8m間隔で設置されるのでNyquist周波数は1/201.6(1/m)となる. ところで, B基準点はA基準点をもとに設置され, その誤差の発生は互いに独立であるため, 各B基準点の誤差量には互いに相関はない. すなわち, N個のB基準点についてその誤差量xの自己相関係数  $\rho$  を求めると<sup>11)</sup>,

$$\rho_j = \frac{\sum x_m x_{m+j}}{\sum x_m^2} = \begin{cases} 1 & (j=0) \\ 0 & (j \neq 0) \end{cases} \quad (10)$$

ここで,  $\rho_j$ : j個隔たったB基準点同士の誤差量の自己相関係数(離散的な自己相関関数)

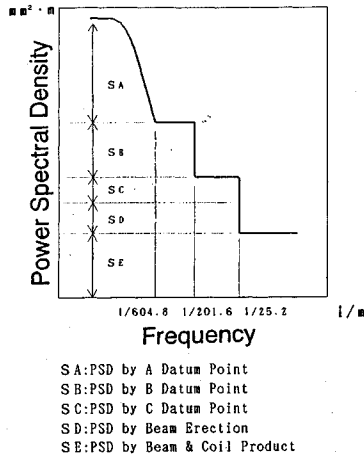


Fig.7 Power Spectral Density of Guideway Irregularity (image)

式(10)のような自己相関関数をもつ不規則変動は白色雑音であり, そのPSDは周波数に関わらず一定の値をとる. すなわち, B基準点の測量誤差のみによるPSDは, Nyquist周波数より低い周波数領域では周波数によらず一定値となる. B基準点位置誤差によるPSDの大きさ  $S_B(\text{mm}^2 \cdot \text{m})$  と, 誤差の標準偏差  $\sigma_B(\text{mm})$  の関係はA基準点の場合と同様に次の式で表される.

$$\sigma_B^2 = \int_0^{1/201.6} S_B dF = S_B / 201.6 \quad (11)$$

c) A, B基準点測量誤差以外

3章の(3)~(7)の施工誤差は全てB基準点の場合と同様互いに独立に発生するため, その波形は白色雑音となる. このため各単位施工長(C基準点間隔, 側壁ビーム長, コイル長)  $L_i(\text{m})$ , 標準偏差  $\sigma_i(\text{mm})$  とパワースペクトル密度  $S_i$  の関係は次の式で表される.

$$\sigma_i^2 = \int_0^{1/2L_i} S_i dF = S_i / 2L_i \quad (12)$$

式(9), (11), (12)が各施工精度とPSDの関係を示すものとなる. これらの式より, PSDは各施工誤差の標準偏差および単位施工長により定まることが明らかとなる.

各  $S_i(F)$  の式を基に, ガイドウェイ狂いのPSDの概念図をFig.7に示す. 同図よりガイドウェイ狂いのPSDは両対数軸上で階段状の関数となる. 式(8)で代表される鉄車輪/レール系鉄道のPSDは両対数軸上で右がりの曲線で表されるが, このことは鉄車輪/レール系鉄道の軌道狂いに対するガイドウェイ狂いの著しい特徴となっている.

(3) 乗心地レベルの推定

式(9), (11), (12) より,  $S_i(F)$  が求まればこれらを式(2)及び(7-1)に代入して, 各施工誤差と乗心地レベルの関係を求めることができる。ここでは,  $S_i(F)$  を用いて各施工誤差単独による狂いによる乗心地補正された車両振動加速度の実効値  $\bar{a}_i$  を求めることとする。

a) A基準点測量誤差による車両振動加速度

$$\begin{aligned} \bar{a}_A^2 &= \int_0^\infty |H(f)W(f)|^2 \frac{1}{v} \frac{A}{\{B+(f/v)\}^n} df \\ &< R_A \int_0^{1/604.8} \frac{A}{(B+F)^n} dF \\ &= R_A \sigma_A^2 \end{aligned} \quad (13-1)$$

ただし,  $\bar{a}_A$  : A基準点の測量誤差による波形上での乗心地補正された車両振動加速度の実効値

$$R_A = |H(v/604.8)W(v/604.8)|^2 \quad (13-2)$$

上の不等式が成立するのは, 積分区間において  $|H(f)W(f)|$  が単調増加となるためである。

$\bar{a}_A$  を大きく見積ることは安全側となるので, ここでは  $\bar{a}_A^2 = R_A \sigma_A^2$  とする。

b) A基準点測量誤差以外の施工誤差

$$\begin{aligned} \bar{a}_{i2} &= \int_0^\infty |H(f)W(f)|^2 S_i \frac{1}{v} df \\ &= R_i \sigma_i^2 \end{aligned} \quad (14-1)$$

ただし,

$$R_i = \int_0^{v/2L_i} \frac{2L_i}{v} |H(f)W(f)|^2 df \quad (14-2)$$

式(13), (14)を式(7-1)に代入して,

$$LT = 10 \cdot \log\{\sum R_i \sigma_i^2\} + 100 \quad (15)$$

式(15)が各施工精度と乗心地レベルとの関係を表す式となる。式(15)の  $R_i$  は, 各施工精度が乗心地に及ぼす影響の度合を表す係数である。以下これを「乗心地影響係数」と呼ぶことにする。式(13-2), (14-2)における乗心地影響係数の算出式から明らかなように, 乗心地レベルには, 施工精度とともに単位施工長および走行速度が影響を及ぼす。走行速度, 施工単位長と乗心地影響係数の関係を式(14-2)から計算したものをFig.8に示す。ただし,  $W(f)$ は水平方向に対するものを用いた。

乗心地を良くするためには, 各施工誤差に留意すると共にFig.8に基づき乗心地影響係数が小さくなるように単位施工長  $L_i$  を選択すべきであるのだが, 単位施工長の決定には測量機器の性能, 側壁ビームの動的振動特性,

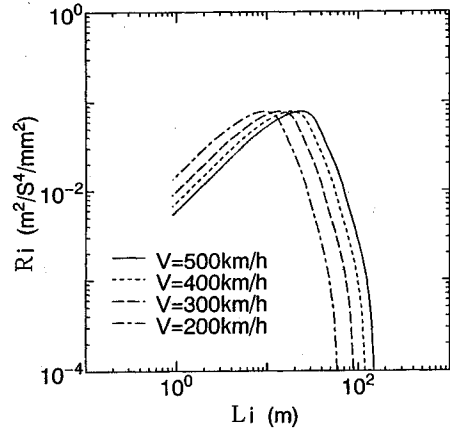


Fig.8 Relation between construction unit length  $L_i$  and Riding quality-influence coefficient  $R_i$

あるいはコイルの電磁力特性など乗心地とは別の要因をも考慮する必要があるため, 実際の施工において乗心地管理のために動かし得るパラメータは標準偏差  $\sigma_i$  ということになる。

走行速度と乗心地の関係については, 単位施工長が20mより長い領域では速度が大きくなるほど乗心地影響係数が大きくなる。すなわちその施工誤差が乗心地に及ぼす影響が大きくなる。逆に単位施工長が10mより短い領域では速度が大きくなるほど乗心地影響係数が小さくなる。すなわち単位施工長が10mより小さい施工誤差による乗心地は, 速度が増加するほどよくなることになる。また単位施工長が10m~20mの施工誤差による乗心地レベルは, 速度が200km/h~500km/hの間に極大値をもつ。

鉄車輪/レール系の鉄道では, 一般に速度が大きくなるほど乗心地は悪くなる。これはPSDが式(8)で表される単調減少関数であるため, 車両の速度向上と共に車両の共振周波数領域に対応する地上側の軌道狂いのパワーが増大するためである。これに対し, 浮上式鉄道では各単位施工長  $L_i$  およびFig.8から, 式(15)の対数部の  $\Sigma$ 内における各  $R_i \sigma_i^2$  のうち速度に対し  $R_i$  が減少するものが  $\Sigma$ 内において卓越するようにその施工内容の標準偏差  $\sigma_i$  を設定すると, 速度の増加にともない乗心地が向上することになる。これは鉄車輪/レール系の鉄道と比較した浮上式鉄道の特徴である。

## 5. ガイドウェイ狂いのシミュレーションと乗心地レベル

### (1) ガイドウェイ狂いのシミュレーション

前章で検討したPSDは, 各周波数領域におけるPSDの平均的な値を示したものであり, 実際のガイドウェイ狂い波形のPSDがFig.7に示すようなきれいな階段関数となるわけではない。また, PSDを求める際には

Table.2 Standard Deviation of Construction Errors

Error Factor of Guideway Construction		Standard Deviation	
Survey	A Datum Point	Angle	1 sec
	B Datum Point		1 sec
	C Datum Point		1 sec
			Set up
Twin Beam Erection		1 mm	
Twin Beam Produce		1 mm	
Ground Coil Produce		1 mm	

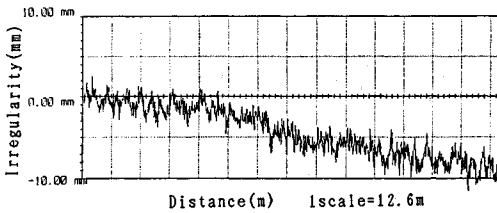


Fig.9 Guideway Irregularity Wave

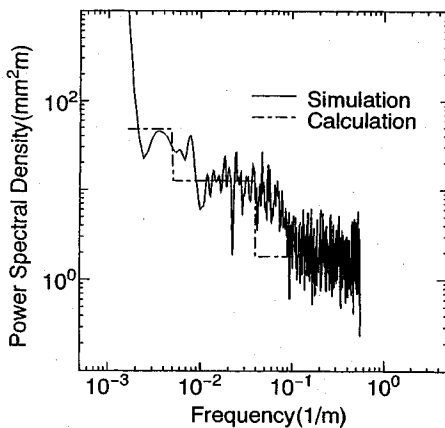


Fig.10 Power Spectral Density of Guideway Irregularity (Simulation)

Table.3 Riding Quality Level

Error Factor of Guideway Construction	Riding Quality Level		
	Simulation	by Eq. (15)	
Survey	A Datum Point	59.5 dB	
	B Datum Point	64.0 dB	67.6 dB
	C Datum Point	74.9 dB	71.2 dB
Twin Beam Erection		83.1 dB	84.9 dB
Twin Beam Product		74.1 dB	74.3 dB
Ground Coil Product		74.1 dB	74.3 dB
Total Guideway		84.6 dB	85.7 dB

Nyquist 周波数より高い周波数領域を無視しており、これが実波形への適用においてどのような影響を持つのかを知る必要がある。そこで、ここでは3章で述べた各施

工段階における施工誤差を乱数により模擬し、ガイドウェイ狂い波形をシミュレートとしてPSDを求めることにより前章での検討の妥当性を確認する。計算は通り狂いに対して行い、基準点測量誤差は測角誤差および基準点設置誤差をシミュレートした。それ以外の誤差については左右側壁毎に誤差を発生させた上で、車両の台車による平均効果を考慮し、左右側壁における誤差の平均を線形の狂いとして扱った。なお、施工誤差は正規分布するものとし、標準偏差はTable.2に示す値を用いた。最小データ間隔はコイル長に一致させ、得られた狂い波形からPSDを求める計算は、文献12)のプログラムを用いて行った。シミュレーションにより得られたガイドウェイ狂い波形をFig.9に、この波形のPSDをFig.10に示す。

シミュレーション波形のPSD曲線は非常に起伏の激しいものとなっているが、全体の傾向としては4章で得られた階段状のPSDとなる。またFig.9の中の鎖線はTable.2の標準偏差および式(11)、(12)をもとに計算したA基準点測量誤差以外の要因によるガイドウェイ狂いのPSDである。同図より両式は各周波数領域における平均的な傾向を求める算定式としては妥当なものであるといえる。

(2) 乗心地レベルの推定

Fig.8のシミュレーション波形により求めた左右振動に関する乗心地レベルをTable.3に示す。ここで走行速度は500km/hとした。この表で各施工内容に対応した乗心地レベルは、式(7-2)の $L_T$ に相当する。各施工誤差が単独に存在する場合のものである。このうち乗心地レベルの左列はシミュレーション波形により求められたものであり、右列はTable.2の標準偏差および式(15)より求めた計算値である。なおここでA基準点の測量誤差は乗心地にほとんど影響をおよぼさないため割愛した。各々の施工誤差に対応する乗心地レベルには多少のばらつきがあるが、これは実際のガイドウェイ狂いが理想的な白色雑音とはならず、Fig.10に示すような平均値の周りにばらつきをもって分布した関数となるためと考えられる。しかしながら最終的なガイドウェイ線形に対する乗心地レベルにおいてシミュレーション結果と計算値との差は1dB強であり、Table.1に従って乗心地を評価することを考えれば、式(15)は実用上十分な精度で乗心地レベルを推定できるものである。また、Table.2の標準偏差から求められた乗心地レベルはTable.1では"good"のカテゴリーにあり、Table.2の施工精度が達成されるならば、浮上式鉄道の乗心地は鉄道の乗心地として満足できるレベルにあるといえる。

6. 施工精度と乗心地レベルの関係

本章では乗心地レベルと各施工精度との関係を考える。

両者の関係は式(15)で表されるが、この両辺を $\sigma_i$ で偏微分したものが、 $j$ 番目施工誤差が乗心地に及ぼす重みとなる。

$$\frac{\partial LT}{\partial \sigma_j} = \frac{20R_j \sigma_j}{\log_e 10 \cdot \sum R_i \sigma_i^2} = \frac{20R_j \sigma_j}{\log_e 10 \cdot 10^{(LT/100)/10}} > 0 \text{ for all } \sigma_i > 0 \quad (16)$$

式(16)をさらに、 $R_j$ 、 $\sigma_k (k \neq j)$ で偏微分すると、

$$\frac{\partial^2 LT}{\partial \sigma_j R_j} = \frac{20R_j \sum_{i \neq j} R_i \sigma_i^2}{\log_e 10 \{ \sum R_i \sigma_i^2 \}^2} > 0 \text{ for all } R_i > 0 \quad (17-1)$$

$$\frac{\partial^2 LT}{\partial \sigma_j \sigma_k} = \frac{20R_j \{-2 \sum R_k \sigma_k^2\}}{\log_e 10 \{ \sum R_i \sigma_i^2 \}^2} < 0 \text{ for all } k \neq j \quad (17-2)$$

式(16)、(17-1, 2)より乗心地レベルに関して以下のような特徴が導かれる。

- 1) 誤差の標準偏差が大きくなると乗心地レベルは大きくなる。
- 2) 乗心地影響係数 $R_i$ が大きい施工誤差ほど標準偏差が変化したときの乗心地レベルの変化率が大きい。
- 3) ある施工誤差の標準偏差の増分に対する乗心地レベルの増分は他の施工誤差の標準偏差が小さいほど大きい。すなわち、乗心地レベルには乗心地影響係数および標準偏差の相対的な大小関係が影響することがなる。特に式(16)より、乗心地レベルが同じ場合乗心地レベルの変化率は、乗心地影響係数と標準偏差の積に比例する。このため、乗心地影響係数が大きい施工内容についてはその精度をより良くすることが乗心地の向上につながり、乗心地影響係数が小さいものについては多少施工精度が低くても乗心地にはそれほど影響しないことになる。

実際に乗心地を考慮して必要とされる施工精度を求めるためには、各単位施工長 $L_i$ に対応した乗心地影響係数 $R_i$ を求める必要がある。式(14-2)による $R_i$ をFig. 11に示す。(  $R_A$ は値が非常に小さいため省略する。 )

同図から各施工誤差が乗心地に与える影響について、以下の関係が導かれる。

- 1) B基準点の誤差は速度が大きくなるほど乗心地に対する寄与度が大きくなるが(図中■)、もともとその寄与度は、他の施工誤差と比較して著しく小さい。
- 2) 側壁ユニット長間隔で発生するC基準点測量・設置誤差、側壁ビーム架設誤差あるいは支承部施工誤差(図中●)が乗心地に及ぼす寄与度は最も大きく、コイル長間隔で発生する誤差(図中○)に対して5~10倍程度の違いがある。逆にいえばこれらの誤差の標準偏差は側壁ユニット長間隔で発生する施工誤差の5~10倍となって、はじめて乗心地に対して同等に寄与することになる。
- 3) 速度と乗心地の関係を考えて、B基準点測量誤差以

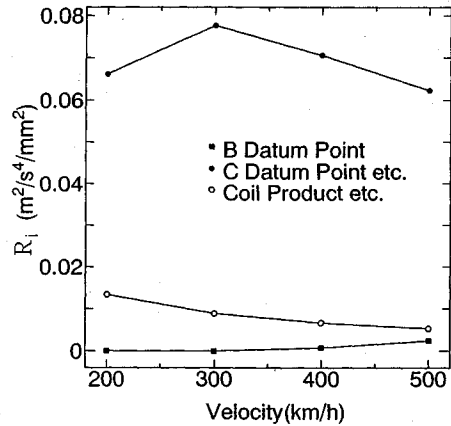


Fig. 11 Riding quality-influence coefficient  $R_i$

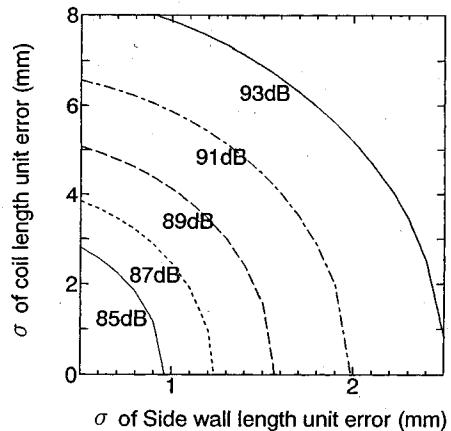


Fig. 12 Contour line of Ridig Quality

外は300km/h~500km/hで速度に対して $R_i$ が単調減少となっている。すなわち速度が高くなるほど乗心地レベルは良くなる傾向にある。

実際の施工管理業務においては、上記のことを踏まえて、目標とする乗心地レベルを達成できるように、各施工誤差の標準偏差を決定することになる。例として、側壁ユニット長単位の施工誤差とコイル長単位の施工誤差の標準偏差と乗心地レベルの関係をFig. 12に示す。ただし、同図は側壁ユニット長単位、あるいはコイル長単位のいくつかの施工誤差のうちある一つの標準偏差の変化について示したものであり、他の施工誤差の標準偏差はTable. 2の値とする。

同図の各曲線は乗心地レベルの等高線に相当するものである。乗心地レベルを考慮して施工精度を定める際はまず目標とする乗心地レベルを定めた上で、Fig. 12で対応する乗心地レベルの曲線より左下側の領域での縦軸と横軸の値の組合せの中から、実際の施工における技術的な難易、あるいは施工の経済性を考慮して適切な値を選択することになる。

ただし、実際の施工管理において誤差の標準偏差を示方することはまれで、通常は誤差の許容値を定めること



になる。この場合一般には許容値を越える誤差がほとんど発生しないという意味で標準偏差の3倍を誤差の許容値とする。これは施工誤差が標準正規分布に従う場合許容値の超過確率が0.27%以下であることを意味する。

本章での議論をまとめると、実際に施工誤差の許容値を定める手順は、まず目標とする乗心地レベルを定めた上で、各施工精度と乗心地レベルの関係を式(15)あるいはFig.12で確認し、あとは実際の施工における精度確保のための技術的・経済的な問題を考慮しつつ施工精度を定めることになる。

本論文は、主としてガイドウェイ建設時における精度管理について議論しているが、本論文で得られた知見はガイドウェイの保守時においても応用することが可能である。すなわちガイドウェイ狂い発生時において位置調整が可能であるのは側壁ユニットもしくは浮上・案内コイルであるが、Fig.11の $R_1$ から判断して、側壁ユニットの位置調整の方が乗心地の改善に寄与することになる。

## 7. まとめ

以上において、ガイドウェイの施工方法を基にガイドウェイ狂いのパワースペクトル密度を予測し、各施工精度と乗心地の関係について論じた。

本論文の特徴は、各施工誤差は互いに独立でランダムに発生するものであるとの仮定のもとに、各施工による波形のパワースペクトル密度を求め、施工誤差の標準偏差と乗心地レベルとの関係を初めて明らかにし、実際の施工に採用できるデータを提供したところにある。

このパワースペクトル密度は施工誤差の標準偏差の関数であること、また乗心地レベルもパワースペクトル密度の関数であることを利用して、施工誤差の標準偏差と乗心地レベルの関係を導くことが可能となった。

本研究により新たに得られた知見を以下に記す。

- (1) ガイドウェイ施工方法をもとに、施工誤差の標準偏差とガイドウェイ狂いのパワースペクトル密度を求めた。ガイドウェイ狂いのパワースペクトル密度は階段状の関数となり、両対数軸上で右下がりの曲線として表され鉄車輪/レール系の軌道狂いのパワースペクトル密度に対する特徴となっている。
- (2) 上記パワースペクトル密度をもとに、施工誤差の標準偏差と乗心地レベルとの関係を定量的に示した。
- (3) ガイドウェイ狂いを数値シミュレーションで再現し、(2)で求めた関係式の実用性を確認した。
- (4) 施工管理上必要となる乗心地レベルと各施工精度との関係を明らかにし、乗心地レベルを考慮した施工精度の決定方法を示した。

また、本研究で得られた新しい手法として軌道狂いのパワースペクトル密度の推定方法がある。鉄車輪/レール系鉄道の軌道狂いのパワースペクトル密度については、実際の狂い測定結果をもとに導かれた本文中の式(8)が

一般に用いられているが、その理論的背景は必ずしも明確であるとは言えない。本研究では鉄車輪/レール系鉄道とは異なる関数形ではあるものの、ガイドウェイ狂いのパワースペクトル密度を理論的に導出した。この手法の鉄車輪/レール系鉄道への適用への可能性もあり、今後の展開が期待される。

本研究は3章で述べたガイドウェイ施工方法を前提として議論を展開したが、ここで得られた成果を実際の施工に反映するために各種の施工試験、技術開発が行われている。基準点測量については日本鉄道建設公団によりA、B、C基準点の設置試験が行われており<sup>13)</sup>、所定の測量精度の達成が報告されている。また、側壁ビームを高精度で敷設するために、当研究所において側壁ビーム架設車を開発・製作し<sup>14)</sup>、架設精度確認試験を実施している。また側壁ビームについても試作および製作寸法精度の確認、地上コイル取り付け試験を行っている。これらの結果についても別の機会に報告したい。

さらに、新実験線の完成時においては、実ガイドウェイ狂いの測定を行い、本研究で得られたパワースペクトル密度の計算値と実ガイドウェイ狂いから得られる実測値とを比較し、営業線へ向けた乗心地解析の深度化を図る所存である。

## 謝 辞

本論文の執筆にあたり、宮田尚彦博士(財)鉄道総合技術研究所理事)および岡田勝也博士(同浮上式鉄道開発本部土木部長)には貴重なご意見を賜った。また日本鉄道建設公団狩野弘治氏には測量方法、および計算プログラムの作成に関しご教示いただいた。ここに記して深謝いたします。

## 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。土木学会論文集第415号，pp.17-25，1990年3月。
- 2) 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年11月。
- 3) 河野志郎：乗心地基準の見直しについて。JREA 第23巻12号，pp.6-11，1980年12月。
- 4) 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年6月。
- 5) 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方法。鉄道施設協会誌，第30巻12号，pp.26-28，1992年12月。
- 6) 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年4月。
- 7) 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，第30巻5号，pp.52-54，1992年5月。
- 8) 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年12月。
- 9) 山住克巳・佐藤勉・岡田勝也・瓶子光男：浮上式鉄道ガイドウェイ(側壁ビーム方式)の運搬架設シス

- テム, 第47回土木学会年次講演会第VI部門, pp. 306-307, 1992年9月.
- 10) 宮本俊光・渡辺偕年: 線路-軌道の設計・管理-, pp. 405-407, 山海堂, 1980年.
- 11) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, pp. 117-119, 1976年.
- 12) 同上 pp. 127-131.
- 13) 狩野弘治・高野彬・乗田治己: 浮上式鉄道におけるガイドウェイ基準点の設置試験について, 第48回土木学会年次講演会第IV部門, pp. 212-213, 1993年9月.
- 14) 例えば, 岡田勝也: リニア実験線ガイドウェイの建設, フォアマン, Vol. 4, No. 11, pp. 6-10, 1993年11月.

(1993.8.2 受付)

RELATION BETWEEN RIDING QUALITY OF MAGLEV VEHICLE  
AND GUIDEWAY CONSTRUCTION ACCURACY

Akio MATSUURA, Shoichi HASHIMOTO and Atsushi FURUKAWA

To keep good riding quality, it is necessary to construct MAGLEV guideway to a high level of accuracy. In this paper we formulate the relation between construction accuracy, power spectral density of guideway irregularity and riding quality level based on the "Riding quality-influence coefficient" which decided by construction unit length, vehicle velocity and vehicle vibration peculiarity. Finally we propose the method to decide construction accuracy taking the riding quality into consideration.