

# 羽田線 500 形モノレールカーの乗りごこち

## Riding Quality of Type 500 Monorail Car for Haneda Line

永 弘 太 郎\* 小 橋 正 人\* 岩 崎 文 雄\*

Tarô Nagahiro

Masato Kobashi

Fumio Iwasaki

### 要 旨

羽田線 500 形モノレールカーは各車に 2 台の 2 軸ボギー台車を有する 2 両固定編成車で、1 両の車長 15m は既存の跨座(こざ)式モノレールカーでは最も長く、乗客容量も大きい。一方、乗りごこちの面では案内および安定バネ系の支持点を車体から台車に移したことにより、上下ならびに左右の振動伝達率が特に高周波域で減少し、現車試験の結果でもいわゆるビビリ振動が非常に小さく、空気バネ車両としての特性が活かされた。これらの得られた成果は目下製作中の万博モノレールカーおよび 500 形の二次車にじゅうぶん反映されている。

### 1. 緒 言

最近の羽田線モノレールは経営努力と並行高速道路の混雑など情勢の変化によって乗客が漸増しており、これに対処するため車両の増備が決定され、将来の都市交通形として、また引き続き製作決定した万博モノレールカーの基本形式とする意味も含めて、乗客容量の増大と乗りごこちの向上を主眼に 2 軸ボギー台車の 2 両固定編成車とすることで設計製作され、各種の工場試験を経て現地で振動その他の特殊試験が行なわれ、安全性および性能についてじゅうぶんな確認を経て営業運転に投入された。ここでは、車両の仕様と振動について、その概要を述べる。

### 2. 車両の仕様と構造

#### 2.1 車両の仕様

車両の大形化による乗客容量の増大およびボギー台車採用による乗りごこちの改善のほかに、既納車の使用実績を参考にした改善が加えられ、表 1 および図 1 に示す仕様と形式図にまとめられた。なお、図 2 は車両の外観を示したものである。

#### 2.2 車両の構造

##### 2.2.1 車体およびぎ装

構体は軟鋼の溶接組合せで、下わくは床下機器およびスカート取り付けに必要なだけのメンバである。主荷重は台わくより上部の構体で負担し、台わくのまわりの直接空気バネを取り付ける構造になっている。固定端側の妻は左右方向の振動荷重に耐えられるようにじゅうぶんな剛性を持たす一方、側窓下面より上の方は広く開口し、2 両間が仕切られた感じを与えないように見通しをよくしている。側窓は上昇式で窓高さの約 1/3 上昇するが、たばこなどの危険物の投下を防ぐ意味で側窓下部に取り付けられている網戸もいっしょに上昇するようになっている。

腰掛けは出入台間は 2 人掛および 3 人掛の固定式クロスシートで、台車上部には 7 人掛のロングシートが背中合せの形で車両中心に、1 人掛クロスシートが反通路側にそれぞれ設置されている。編成端では台車より前方が乗務員室で左側が運転室、右側が車掌室である。

最近の室内および床下ぎ装の防火防煙対策については、地下鉄車両と同等の処置をとり、カーテン、シートなどは運輸省の船舶研究所のテストに合格したものを使用している。抵抗器まわりにはしゃ熱板、断熱材をとりつけ、CP 管を通して下側より抵抗器に配線している。また、逆引時の焼損事故防止のためにしゃ断器を追加し、事故時に車外からドアを開けられるようにドアロックも追加されている。そのほか、補助回路関係では、重連運転時に

\* 日立製作所笠戸工場

表 1 車両の一般仕様

|         |   |
|---------|---|
| 編成      | 2 両固定編成   |
| 電気方式    | 直流 750 V  |
| 軌道寸法    | 幅 0.8 m, 高さ 1.4 m   |
| 列車性能    | 平衡速度(満員時)約 90 km/h, 常用運転最高速度 80 km/h<br>浜松町-羽田空港間 約 15 分<br>直線加速度 約 2.7 km/(hs)<br>直線減速度 常用 1.4~4.5 km/(hs)<br>非常 4.5 km/(hs) } 空車-満員において |
| 乗客      | 定員 255 名(座席 119 名, 立席 136 名)/編成<br>満員 363 名(座席 119 名, 立席 244 名)/編成  |
| 自重      | 実測 501 号車 23.8 t } 46.9 t/編成<br>502 号車 23.1 t }   |
| 車体寸法    | 長さ 30.4 m/編成, 幅 3.02 m, 高さ 4.352 m  |
| 台車中心間距離 | 9.5 m-5.7 m-9.5 m   |
| 固定軸距    | 走行輪 1.5 m, 案内輪 2.5 m  |
| 構造      | 全鋼製溶接構造   |
| 出入口     | 片側 2 箇所/両, 電磁空気開閉式  |
| 側窓      | 上昇式 1 枚窓, 網戸付き  |
| 腰掛      | 客室中央部 固定式クロスシート<br>車輪上部 ロングシートおよび 1 人掛シート   |
| 乗務員室    | 片車端片側仕切, 2 箇所/1 編成  |
| 連結装置    | 編成端 密着式自動連結器, 空気連結栓, ゴム緩衝器付き<br>固定端 コンプシュ付き 棒式  |
| 台車      | 鋼板溶接構造 2 軸ボギー台車   |
| 走行輪     | ミシュリン F16 Pilot X 窒素ガス入りスチールタイヤ   |
| 案内, 安定輪 | 200-15-18 PR 空気入ゴムタイヤ   |
| 懸架装置    | 空気バネ車体締結式   |
| 駆動装置    | ヘリカル, ベベルの 2 段減速, ディスクブレーキ付き  |
| 主電動機    | 65 kW × 8 台/編成  |
| 制御装置    | 自動加減速多段式 電動機操作カム軸式  |
| ブレーキ装置  | 電磁直通式電空連動空気ブレーキ, 駐車用バネブレーキ  |
| 補助電源装置  | 5 kVA 電動発電機およびアルカリ蓄電池   |
| 暖房装置    | 600 W × 28 個/編成 電熱器式  |
| 換気装置    | 軸流ファン 8 台/編成  |
| 集電装置    | 給電軌条下面接触式 ⊕側 2 台 ⊖側 2 台/編成, 台車取付  |
| 接地装置    | 2 個/編成 台車取付   |
| 照明装置    | 前灯 150W シールドビーム, 尾灯 40W 赤色, 各 4 灯/編成<br>室内灯 40 W けい光灯 16 灯/編成   |
| 放送装置    | 航空障害灯 回転式 1 灯/編成  |
| 通信装置    | テープレコーダ付き, ソリッドステート増幅器,<br>分割放送回路付き   |
| 保安装置    | F M 式列車無線装置   |
| 速度計     | 車内信号装置, 自動列車停止装置付き, 過速検知装置付き  |
| 砂まき装置   | 電気式速度計  |
| 非常脱出装置  | 足踏操作空気吹付式 2 台/編成<br>スローダン 2 個/編成  |

1 ユニットの MG が故障しても車両が運転できるように交流並列給電回路が追加されている。

床下機器は両スカート部に 2 両で 4 分割され、主電動機、集電器、ATS 受電器は台車取り付けになっている。501 号車には片側に主として空制品、反対側に主として補助電源装置を、502 号車には片側に主制御器など、反対側に主抵抗器をそれぞれ配置して、左右、前後のバランスがうまくとられている。図 3 はこれらの機器配置を示したものである。



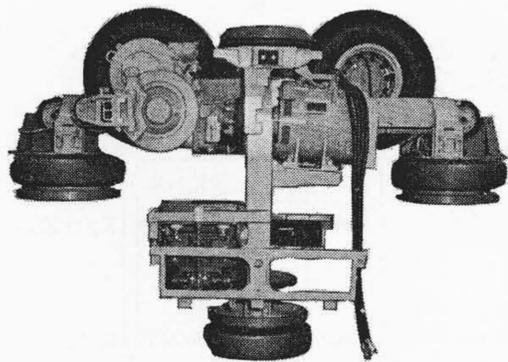


図5 台車

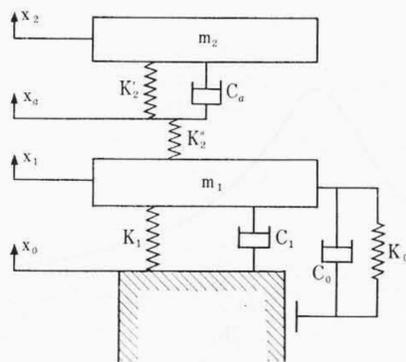


図6 500形の上下振動系

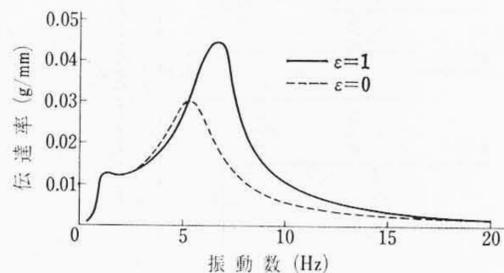


図7 500形の床の上下振動周波数特性

切り放して適切なバネ常数を選定できた。一方、将来の都市交通用としては床面が高くなるので車両の重心高さも高くなるため、ローリングに対して、案内、安定タイヤのバネ常数を大きくする必要があり、案内、安定タイヤは 200-15-18PR で内圧 10kg/cm<sup>2</sup> という高圧を用いている。上下バネ系は走行タイヤと空気バネの 2 自由度系である。このことは従来どおりであるが、案内、安定バネ系を車体からバネ間の台車わくに移したため、案内、安定タイヤの上下方向のバネ系が車体に与える影響は間接的になる。

走行タイヤは Alweg 社の試験線でテストされた F16 pilot X で従来の 13.00-20X より外径は約 200 mm 小さいが、荷重負担能力はほぼ同等である。このタイヤの交換を容易にするため走行用車軸は片持式にして台車わくに固定されている。走行輪の軸距は曲線でのスリップアングルを小さくするため、台車わくのピッチング方向の安定性および構造上の制限から許される範囲で小さくした。一方、案内輪の軸距をできるだけ大きくして、台車わくの垂直軸回りの回転を抑制し、走行輪に不要なスリップアングルがつかないようにしている。

駆動装置は主電動機と CG 形ゴムカップリングで直結され、まず、ベベルギヤで 1 段減速し、ヘリカルギヤでさらに減速しており、ディスクブレーキは 1 段減速された軸端に取り付けている。バネブレーキはその制動力を大きくして、1 両のうちの固定端寄台車の 2 両のみに装着している。台車の構成および外観は図 4、5 に示すとおりである。

### 3. 車両の振動

#### 3.1 振動の理論計算

##### 3.1.1 モノレールカーの振動系

500 形モノレールカーの台車は荷重を負担する走行車輪 4 輪と案内車輪 4 輪および安定車輪 2 輪の計 10 輪の空気タイヤが矩形断面の軌道けたにまたがり、それぞれけた面に接している。

上下方向に対しては走行車輪が台車わくに結合され、さらにこの上にある心皿および揺れまくら本体を介して空気バネにより車体をささえている。また、案内、安定車輪の上下方向の弾性によって台車わくと軌道側面との間は直接的に結合されているが、車体とはやはり空気バネを介して結合されている。

左右方向に対しては、案内、安定車輪が直接台車わくと結合しており、走行車輪の横方向の弾性によっても台車わくと軌道とは直接的に結合されている。台車わくと車体とは空気バネ自体の横方向の弾性により結合されている。

前後方向に対しては走行車輪、案内、安定車輪の前後方向の弾性により台車わくと軌道とは直接的に結合されている。また台車わくと車体とはボルスターアソカゴムの前後方向弾性により結合されている。ここでは車体を剛体とした場合の上下振動と左右振動のみを対象として検討してみる。

##### 3.1.2 上下振動の周波数特性

上下振動をモデル化すると図 6 のようになり、図中に示す使用文字の意味は下記のとおりである。

- $K_1$ : 走行輪の上下方向バネ常数 (空気タイヤの半径方向のバネ常数)
- $K_2', K_2''$ : 空気バネのバネ常数
- $K_0$ : 案内、安定車輪の上下方向のバネ常数 (空気タイヤの横剛性)
- $C_1$ : 走行車輪の減衰係数
- $C_a$ : 空気バネの絞りによる減衰係数
- $C_0$ : 案内、安定車輪の減衰係数
- $m_1$ : 台車わくなどのバネ間質量
- $m_2$ : 車体の質量
- $x_0$ : 軌道けた走行面の上下方向の変位振幅
- $x_1$ : 台車わくの上下方向の変位振幅
- $x_a$ : 空気バネを二つのバネ定数に分けた場合のその間の上下方向の変位振幅
- $x_2$ : 車体の上下方向の変位振幅

さて、運動方程式は簡単なのでその計算結果のみを示すと (1) 式に示すような連立方程式が得られる。ここに、 $\epsilon$  は空気タイヤが転動時に横方向にクリープあるいはすべりを起こすために、車輪軸側の変位がそのまま空気タイヤの横変位とはならないので、これを補正するための係数で、その値は  $1 \geq \epsilon \geq 0$  である。 $\epsilon=1$  はクリープ、すべりのない場合、 $\epsilon=0$  は完全にすべっている場合をあらわしている。

$$\begin{pmatrix} -m_2 \omega^2 + K_2' + C_a \omega_j & -(K_2' + C_a \omega_j) & 0 \\ -(K_2' + C_a \omega_j) & K_2' + K_2'' + C_a \omega_j & -K_2'' \\ 0 & -K_2'' & -m_1 \omega^2 + K_2'' + K_1 + \epsilon K_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ x_a \\ x_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \{K_1 + \epsilon K_0 + (C_1 + C_0) \omega_j\} x_0 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $j = \sqrt{-1}$   $\omega_j$ : 円振動数

案内、安定車輪のクリープおよびすべりのために低速から高速になるに従って  $\epsilon$  の値は 1 から 0 に近い状態に移行してゆくの、 $\epsilon=1$  のときと  $\epsilon=0$  のときについて実車の定員状態の諸数値を与えて (1) 式より車体床面での周波数特性を求めてみると、図 7 となる。伝達率は二次の共振点以上の周波数に対しては  $\epsilon$  の値に依存しているが、一次の共振点付近では依存しない。

一方、図 8 に示す既納車のバネ系に実車の定員状態の諸数値を与えて得られた図 9 の周波数特性によれば、 $\epsilon$  の依存性は 500 形と逆の形となる。この両者の比較で二次の共振点以上の周波数特性に差が見られるのは、バネ間質量  $m_1$  の差によるもので、500 形モノレールカーの場合のほうが  $m_1$  が大きく、したがって、ビビリ振動に対してすぐれた特性を有している。

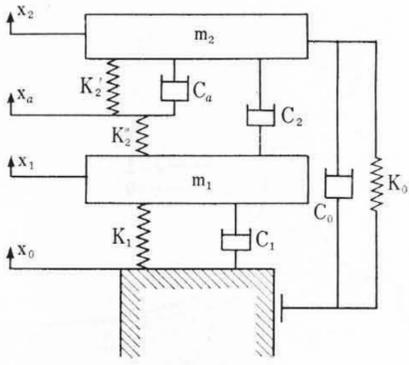


図8 既納車の上下振動系

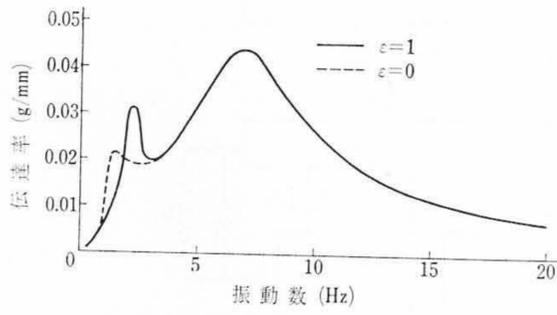


図9 既納車の床の上下振動周波数特性

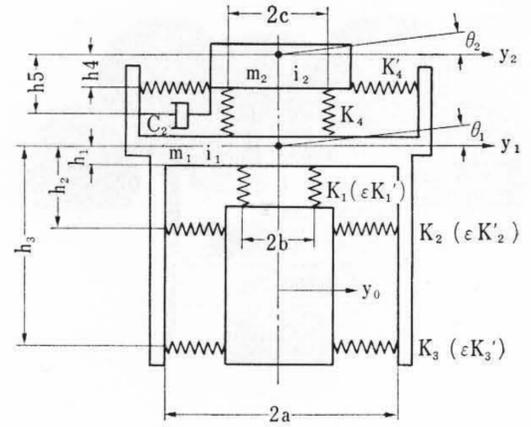


図10 500形の左右振動系

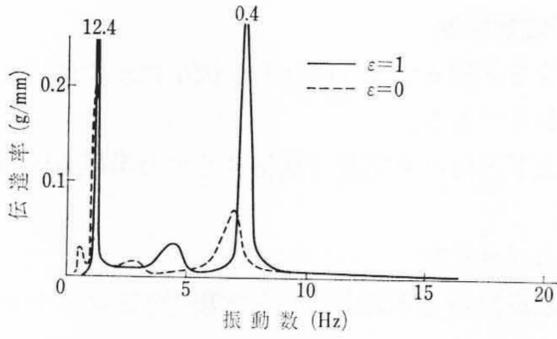


図11 500形の床の左右振動周波数特性

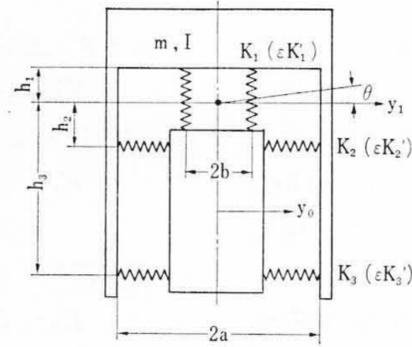


図12 既納車の左右振動系

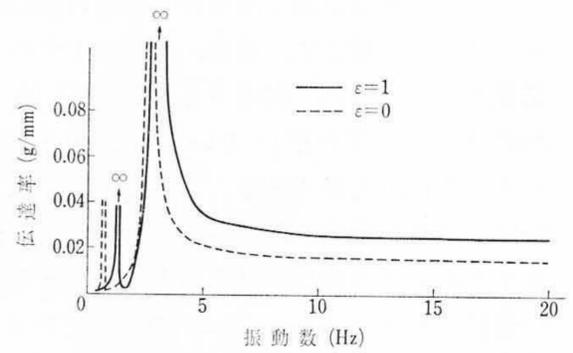


図13 既納車の床の左右振動周波数特性

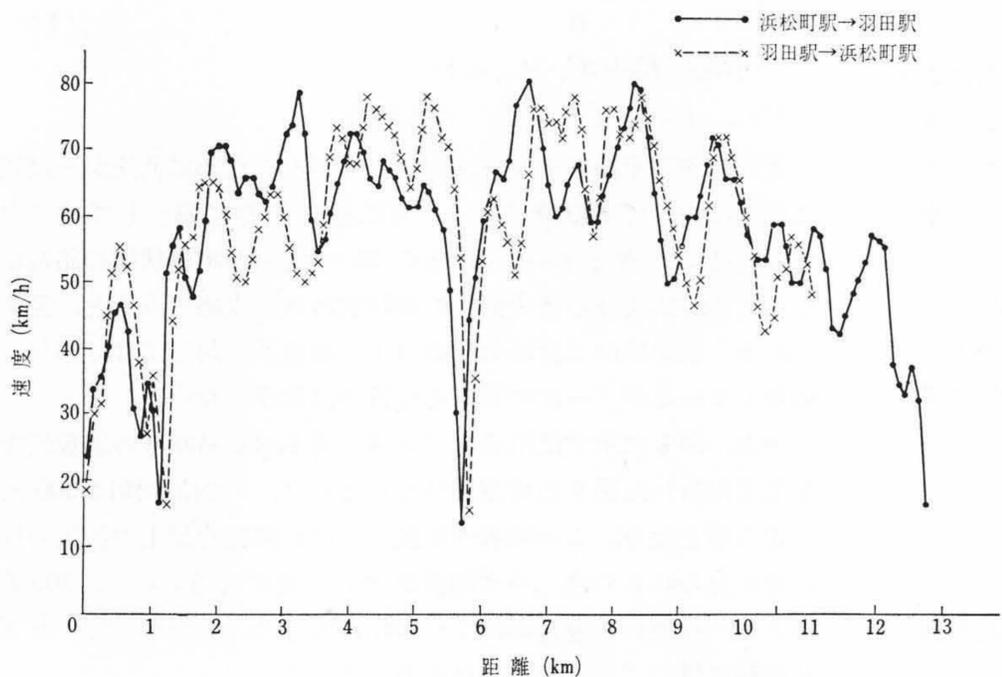
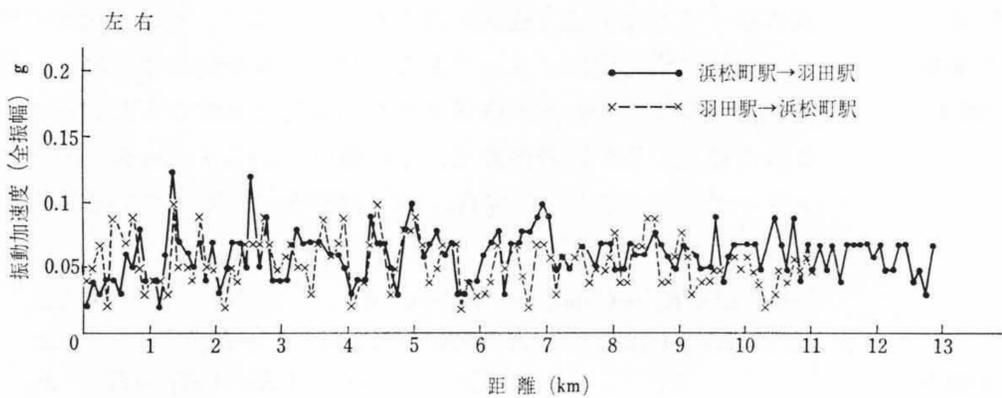
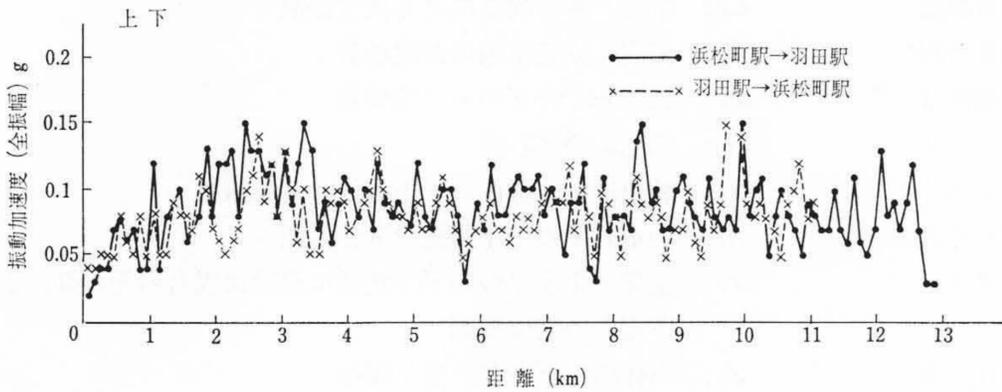


図14 車体振動加速度測定結果 (1) (浜松町駅↔羽田駅)

3.1.3 左右振動の周波数特性

左右振動系をモデル化すると図10のようになり、図中に示す使用文字の意味は下記のとおりである。

- $K_1, K_1'$ : 走行車輪の半径方向, 横方向バネ常数
- $K_2, K_2'$ : 案内車輪の半径方向, 横方向バネ常数
- $K_3, K_3'$ : 安定車輪の半径方向, 横方向バネ常数
- $K_4, K_4'$ : 空気バネの上下方向, 横方向バネ常数
- $m_1, m_2$ : 台車, 車体の質量

$i_1, i_2$ : 台車, 車体重心を通る前後軸回りの慣性半径

$C_2$ : 車体と台車間に設けられ左右動ダンパの減衰係数

$y_0, y_1, y_2$ : けた側面, 台車, 車体の横変位  
 $\theta_1, \theta_2$ : 台車, 車体の回転角変位

さて, これらについて運動エネルギー  $T$  とポテンシャルエネルギー  $U$  および散逸関数を求めると

$$2T = m_1 \dot{y}_1^2 + m_2 \dot{y}_2^2 + m_1 i_1^2 \dot{\theta}_1^2$$

$$2U = 2K_1 b^2 \theta_1^2 + 2\epsilon K_1' (y_1 + h_1 \theta_1 - y_0)^2$$

$$+ 2K_2 (y_1 + h_2 \theta_1 - y_0)^2 + 2\epsilon K_2' a^2 \theta_1^2$$

$$+ 2K_3 (y_1 + h_3 \theta_1 - y_0)^2 + 2\epsilon K_3' a^2 \theta_1^2$$

$$+ 2K_4 C^2 (\theta_2 - \theta_1)^2 + 2K_4' \{y_2 + h_4 (\theta_2 - \theta_1) - y_1\}^2$$

$$2F = C_2 \{\dot{y}_2 + h_5 (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) \dot{y}_1\}^2$$

となり, これらをラグランジュの運動方程式に代入, また強制変位を  $y_0 = A_0 e^{j\omega t}$  とし, 解を

$$y_1 = A_1 e^{j\omega t}, y_2 = A_2 e^{j\omega t}, \theta_1 = A_3 e^{j\omega t}, \theta_2 = A_4 e^{j\omega t}$$

とすれば運動方程式は複素係数4元連立一次方程式となる。これより実車の定員状態の諸数値を与えて床面での左右振動周波数特性を求めると図11のようになる。これより  $\epsilon$  が0に近づく高速域では二次および四次の共振点付近の伝達率は小さくなる。ここで0.5~1 Hzの一次, 二次の共振点は車体のローリングと左右振動によるもので4 Hz前後の三次の共振点は台車のローリング, 7 Hz前後の四次の共振点は台車の左右動に

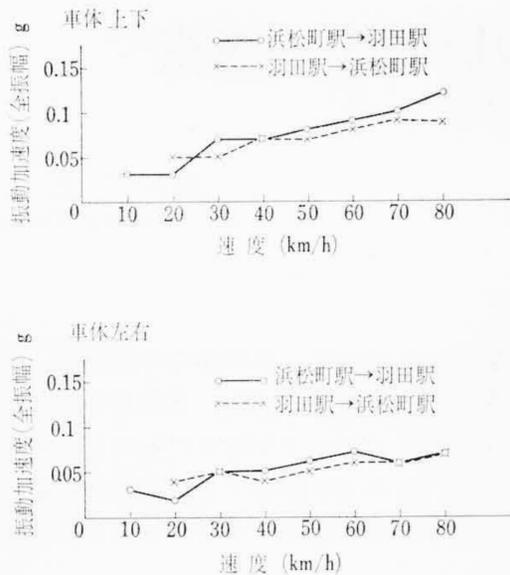


図 15 車体振動加速度測定結果 (2)

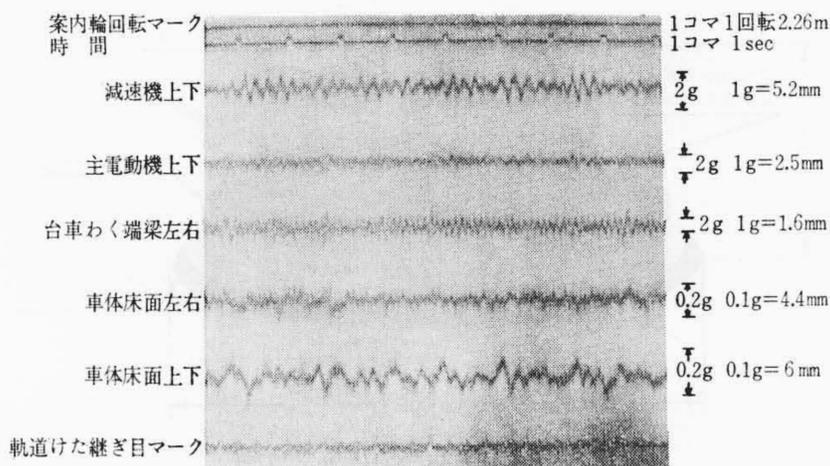


図 16 振動波形の一例

よるものである。一方、図 12 に示す既納車のバネ系に実車の定員状態の諸数値を与えて得られた図 13 の周波数特性と比較すれば、数 Hz 以上のいわゆるビビリ振動に対して 500 形のほうがすぐれた特性を有していることがわかる。これは 1 自由度系と 2 自由度系の典型的な特性の差として理解される。

3.2 現車試験の結果と検討

現車試験は、羽田線の浜松町駅と羽田駅の上りと下り全線につき、営業運転ダイヤに基づいて空車状態で行なわれた。測定位置は、先頭部台車の床面上であって、床面上の上下、左右の二方向の振動加速度の波形を、電磁オシログラフによって記録した。

振動加速度整理結果を示したのが、図 14, 15 である。図 14 は、100 m ごとの最大全振幅を読み取ったもので、実線が浜松町駅から羽田駅へ、鎖線が羽田駅から浜松町駅へ行くときの値である。

図 15 は、2 Hz 以下のいわゆる動揺を対象にして、100 m 区間ごとの各速度における振幅を読み取って平均したもので、上下および左右振動とも、速度とともにいくぶん大きくなる傾向を示している。なお振動測定波形の一例を参考のために図 16 に示した。

国鉄の台車級別基準を本モノレールカーに適用するとじゅうぶん A 級にはいる。

次に車体の上下、左右振動の丸解析を行なうと、図 17 のようになる。このうち上下振動についてみると、速度に関係なく 1~2 Hz の振動と、5.5 Hz 近くの振動が全速度域に出ている。

この振動数は、車両の一次と二次の固有振動数であることから、車体の上下振動は、軌道けたの継ぎ目とか車輪回転などに関係なく、

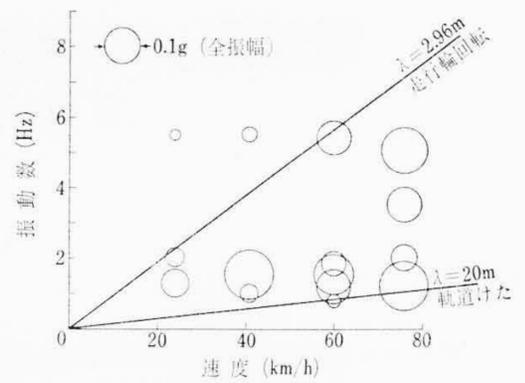


図 17 (a) 上下振動解析結果

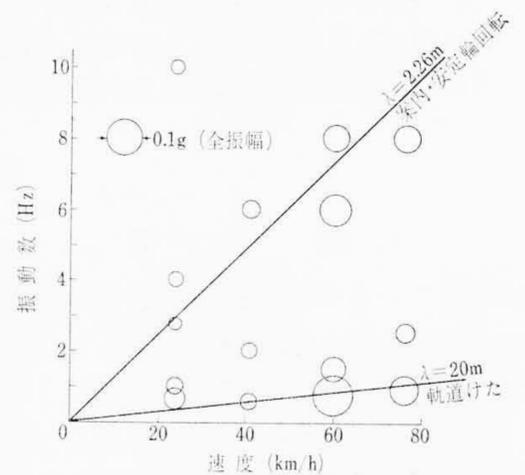


図 17 (b) 左右振動解析結果

その固有振動数でおもに振動しているものと考えられる。また高速になるに従って、二次の振動加速度の影響が大きく出ていることがわかる。一方左右振動の場合には、おもに波長 (λ) が 20 m 近くのものと、2.26 m 近くのものの 2 種類が多くあらわれている。波長が 20 m 近くの振動は、おもに軌道けたの継ぎ目により加振されるもので、車体の左右動およびローリングの振動である。また波長が 2.26 m 近くのものは、案内、安定車輪の回転だけが加振源でなく、軌道けたの不規則な凹凸も原因している。いずれにしても波長が 2.26 m 近くの振動は、台車の左右動およびローリングによる振動である。

4. 結 言

以上羽田線 500 形モノレールカーの周波数特性計算結果および現地試験結果について述べてきたが、これを要約すると次のとおりである。

- (1) 上下振動周波数特性は二次の共振点以上の振動数で、既納車よりも大幅に下がっているため、上下のビビリについても大幅な改善ができた。
- (2) 左右振動周波数特性も同様に、高サイクルでは既納車よりも伝達率が小さい。
- (3) 本モノレールカーは国鉄の台車級別基準で、じゅうぶん A 級にはいる。
- (4) 車体の上下振動は、車速に関係なく大体その固有振動数で振動しているが、左右振動は車速に依存した振動をしている傾向がある。

終わりに、現地試験にいろいろと便宜を図っていただいた日立運輸東京モノレール株式会社のかたがたに深く感謝の意を表する次第である。