

常電導磁気浮上式モデル車両の浮上制御装置

Control Equipment of Electromagnetically Levitated Model Vehicle

運輸省内に設置された低公害鉄道総合委員会が中心となって、常電導磁気浮上方式の低公害鉄道の開発が進められているが、本稿は日立製作所が社団法人日本鉄道技術協会から委託された浮上制御装置の開発について検討した結果を述べたものである。すなわち、まず理論研究とシミュレーションによる検討から浮上体の上下方向の変動の加速度を帰還すると、浮上体を安定に制御できることを解析するとともに、これを室内浮上試験装置により実験した結果、重量約1 tの浮上体を所定のギャップに安定に浮上させ得ることを確認した。

これらの結果をもとにして、重量1.8tの小形モデル車両用制御装置を試作し、神奈川県大和市郊外に設置された実験線で、ギャップを所定の15mmに保ち最高速度40 km/hで浮上走行させることに成功した。

山崎正親* Yamazaki Masachika

渡辺淳吉** Watanabe Junkichi

中村俊明*** Nakamura Toshiaki

1 緒言

最近の都市交通では、騒音と振動の低減が重要な課題となっている。そこで、運輸省内に低公害鉄道総合委員会が設置され、電磁石の吸引力で車両を浮上させるとともに、リニアモータで推進する常電導磁気浮上方式による低公害鉄道の開発が現在進められている。その基礎技術開発のため、財団法人日本船舶振興会の昭和49年から51年度の補助事業として、社団法人日本鉄道技術協会(会長・関 四郎氏)の組織内に東京大学名誉教授・山村 昌氏を委員長とする「低公害鉄道基礎的浮上推進実験委員会」が設置され、基礎実験が進められた。

その一環として小形モデル車両を実験線で浮上走行させることになり、日立製作所では東京芝浦電気株式会社、三菱電機株式会社とともにこのモデル車両用制御装置の開発の委託を社団法人日本鉄道技術協会から受けた。この常電導磁気浮上方式は、本質的に不安定であるため制御装置でそれを補償するように磁気吸引力を制御し、軌道と車両の間に一定のギャップを保って安定に浮上させる必要がある。本論文では、このモデル車両の中心となる制御装置について述べる。

2 モデル車両の構造

図1に実験線で使用されるモデル車両の構造を示す。浮上枠には軌道をかかえこむような脚をもち、脚には水平軌道に対向して浮上用電磁石が、側面軌道に対向して案内用電磁石が取り付けられている。また枠の床下には、推進用リニアインダクションモータ(LIM)が取り付けられ、更にこのLIMに対向して、リアクションプレートが軌道上に敷設される。一方、床上には浮上制御装置及びLIM用制御装置が搭載される。このモデル車両の浮上・推進用電源は、トロリー線から集電器によって集電される。

3 ギャップ制御¹⁾

3.1 浮上制御上の問題点

図1に示したモデル車両の浮上制御を行なうのに、次のような問題点がある。

(1) 吸引形電磁石は本質的に不安定な系であるため、一定のギャップに安定に制御するのは極めて困難である。

(2) 常電導磁気浮上方式は、軌道と電磁石とのギャップが小さいため軌道凹凸によって浮上車両が加振され、乗心地を悪くしたり電磁石が軌道に接触するおそれがある。

(3) 集電器の瞬時離線によって浮上車両が落下したり、ギャップ制御が不能となるおそれがある。

そこで、このような問題点を解決するためには、どのような制御方式にしたらいかにについて検討した。

3.2 ギャップ制御の動作原理

図2(a)に常電導磁気浮上制御の動作原理を示す。浮上用軌道と電磁石との間のギャップをギャップセンサで検出して、

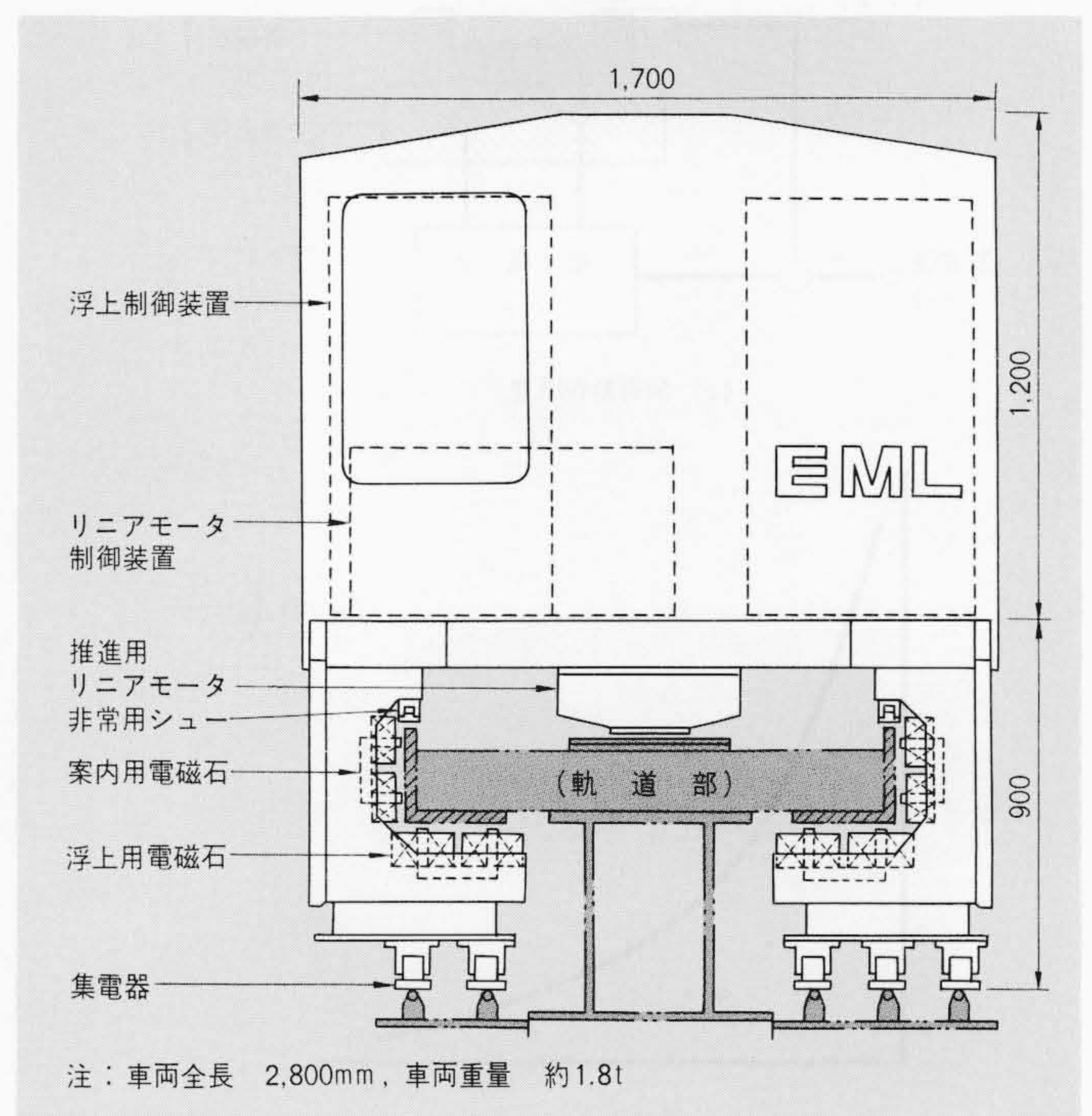


図1 実験線モデル車両構造図 電磁石の励磁電流を制御して、モデル車両を浮上案内しリニアモータで推進する。

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所水戸工場 *** 日立製作所機電事業本部交通技術本部

それを一定に保つように電磁石の励磁電流を制御する。

周知のように、電磁石の吸引力 F_M はギャップ X の2乗に逆比例して変化する。すなわち、同図(a)で電磁石の力 F_M が浮上体に働く重力 W_t より大きいときは、浮上体は持ち上がってギャップが小さくなる。そのため、吸引力は急激に大きくなりついには電磁石は軌道に吸い付いてしまう。逆に電磁石の吸引力が小さいときは、浮上体は下がってギャップが大きくなりますます吸引力は減少し、浮上体は落下してしまう。このように、この制御系は極めて不安定なものである。

3.3 ギャップ制御の解析

この動作を、ブロック図で表わすと図3(a)のようになる。すなわち、ギャップと基準値を比較増幅し電磁石の励磁電流を制御すると吸引力 F_M が発生する。この吸引力と浮上体に働く重力 W_t の差によって加速度が生じ、これを2回積分($\frac{1}{s^2}$)するとギャップとなる。ところで $F(s)$ は、一般に遅れ要素でできているので、自動制御の理論からループの中に2回積分($\frac{1}{s^2}$)のブロックが存在する場合は不安定な系となることがよく知られている。図3(a)のブロック図をベクトル線図で画くと同図(b)のようになり、ナイキストポイント $(-1, j_0)$ の上に来るので不安定となることが分かる。このような場合、基準値 X_s をステップ状に変化したときのギャップ X の応答、すなわち過渡応答波形をシミュレーションで求めると、同図(c)に示すように発散状態となった。

そこで、このような不安定な動作を改善する方法を検討した結果、図4(a)に示すように s^2 の項、すなわちギャップ X を

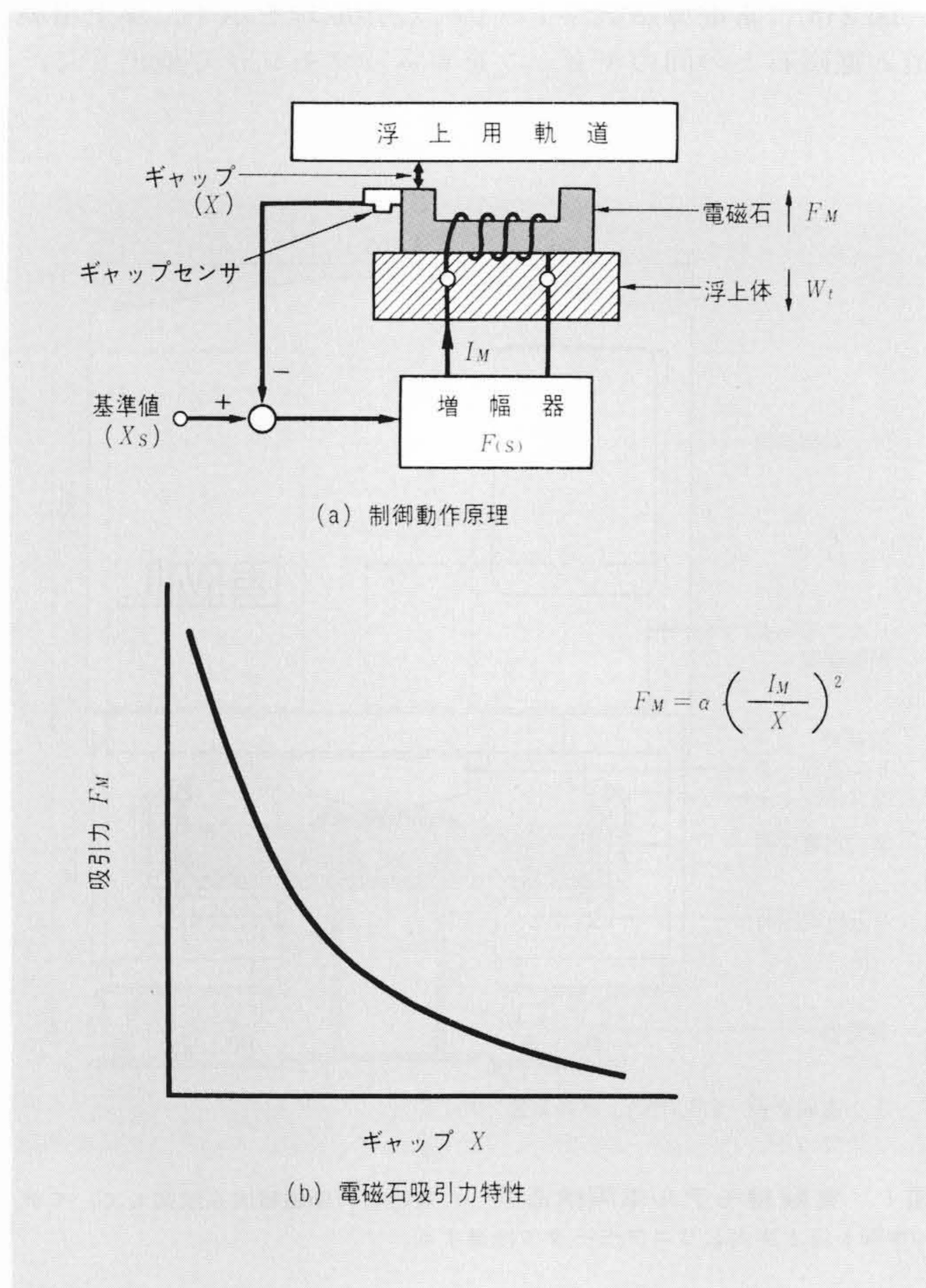


図2 常電導磁気浮上制御の動作原理 常電導磁石式浮上制御は、本質的に不安定な系である。

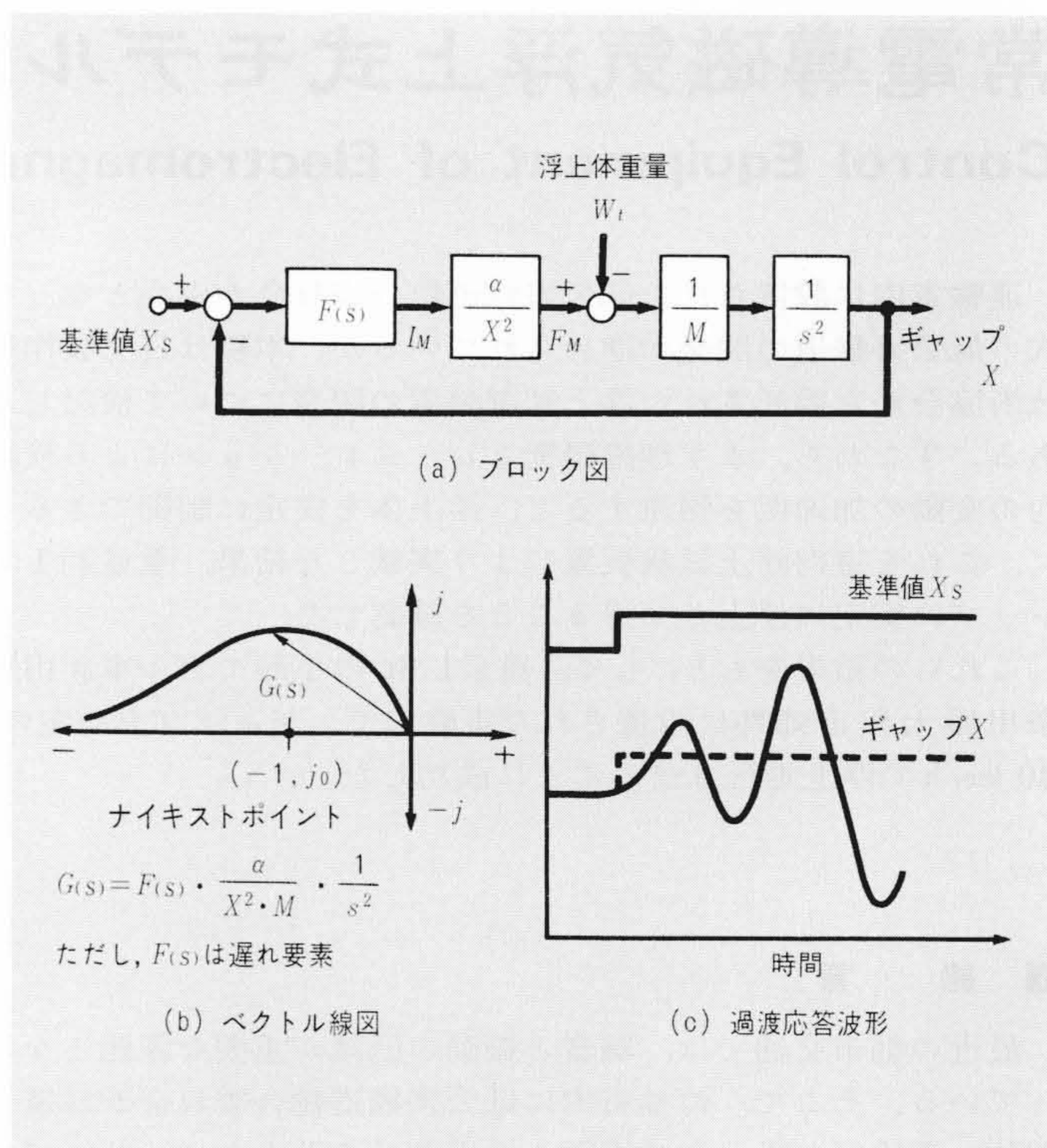


図3 図2の制御系のブロック図とその応答波形 ベクトル線図の軌跡がナイキストポイントの上側を通ると、不安定な系となることが自動制御理論からよく知られている。

2回微分したものをフィードバックすることに着目した。この場合のベクトル線図は同図(b)のようになり、ナイキストポイントの下側に来るため安定となる。また、過渡応答波形もシミュレーションの結果同図(c)のように集束した。

4 浮上試験装置による実験

モデル車両に近い規模で、車両の停止状態での浮上制御の等価実験を行なう目的で、室内に浮上試験装置を設置した。

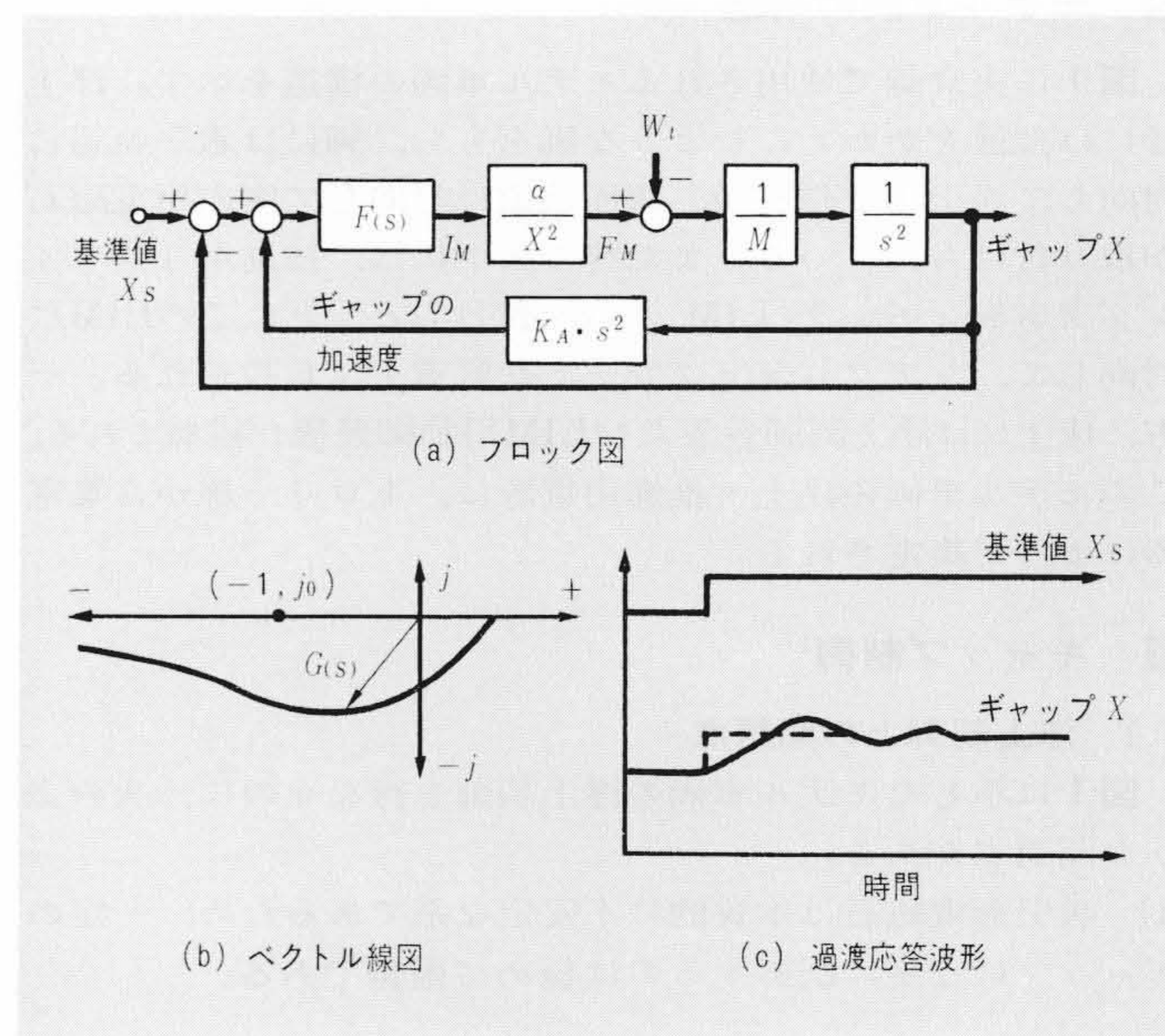


図4 ギャップの加速度も帰還制御した場合 ギャップ (X) のほか、ギャップの加速度(s^2)を負帰還して安定化することに着目した。

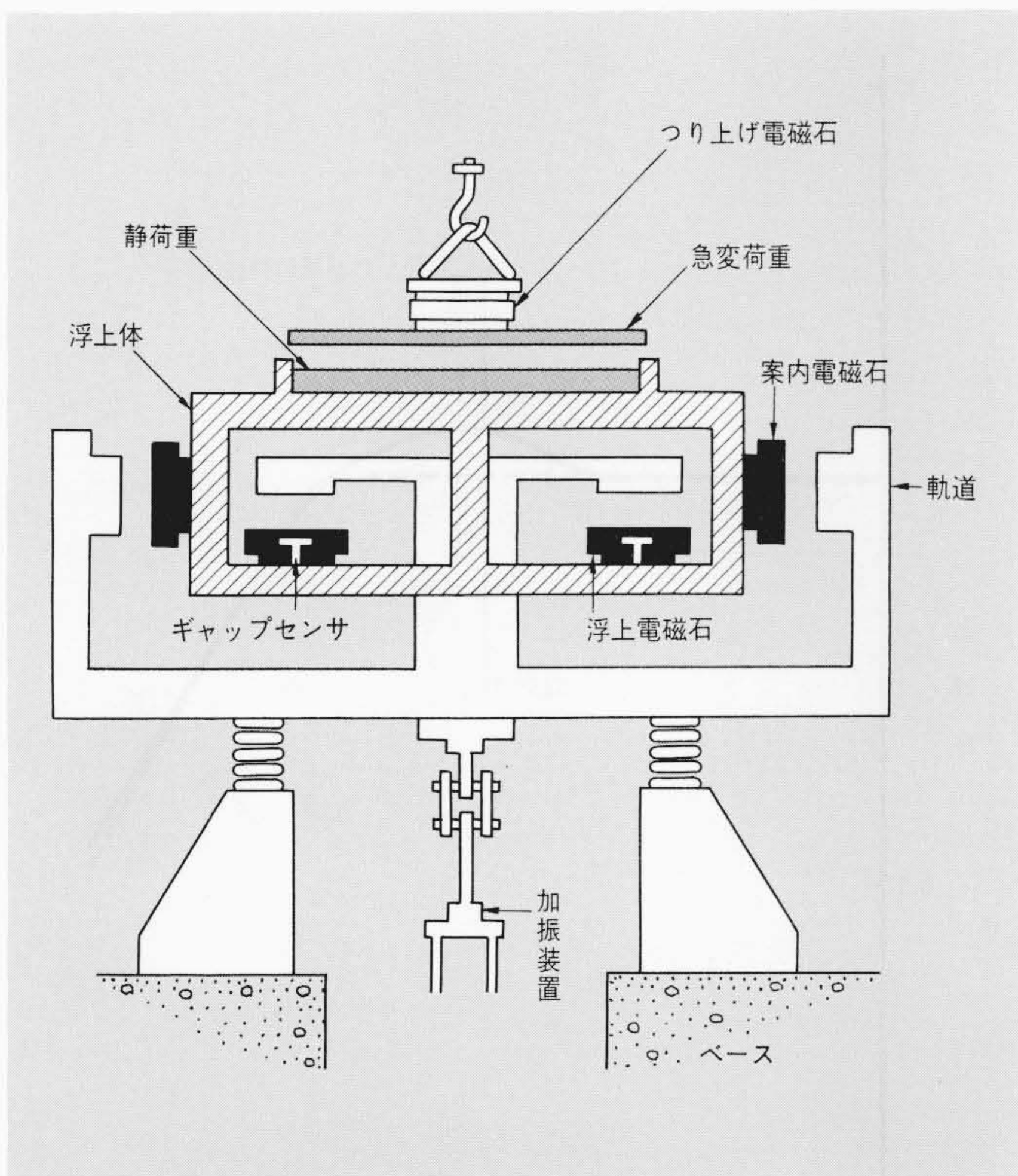


図5 浮上試験装置の構造 浮上体を浮上させた状態で、軌道急変試験及び荷重急変試験ができる。

4.1 試験装置の構造

図5は本装置の構造を示すもので、軌道部と浮上体から構成され、浮上体には水平軌道と対向して浮上用電磁石が、また内面軌道に対向して案内電磁石が取り付けられている。この浮上体重量は電磁石、静荷重を含めて約1 tであるが、そのほかに荷重を急変できるようになっている。一方、軌道はばねを介して取り付けられており、加振装置により軌道そのものを振動させることができるようになっている。

4.2 浮上制御装置の回路

図6に、浮上試験装置に組み合わせるために試作した浮上制御装置の回路を示す。200V三相交流を電源とするサイリスタ純ブリッジ回路から電磁石を励磁するようにし、サイリスタのゲートは磁気移相器で制御する。加速度及びギャップの検出信号は、ギャップ基準値と比較したのち演算増幅回路で増幅し、磁気移相器の制御巻線に加える。

4.3 ギャップ制御の実験

浮上試験装置と制御装置とを組み合わせ、ギャップ制御の実験を行なった。

(1) ギャップ基準値急変試験

図7はギャップ基準値を急変させた場合のオシログラムであり、基準値を15mmから10mmにステップ状に変化させた場合である。浮上体のギャップは、シミュレーションで求めた波形とほぼ一致する結果が得られた。したがって、ギャップ変位のほかに浮上体の上下方向の加速度を検出して、負帰還することにより安定なギャップ制御が行なわれることを確認した。

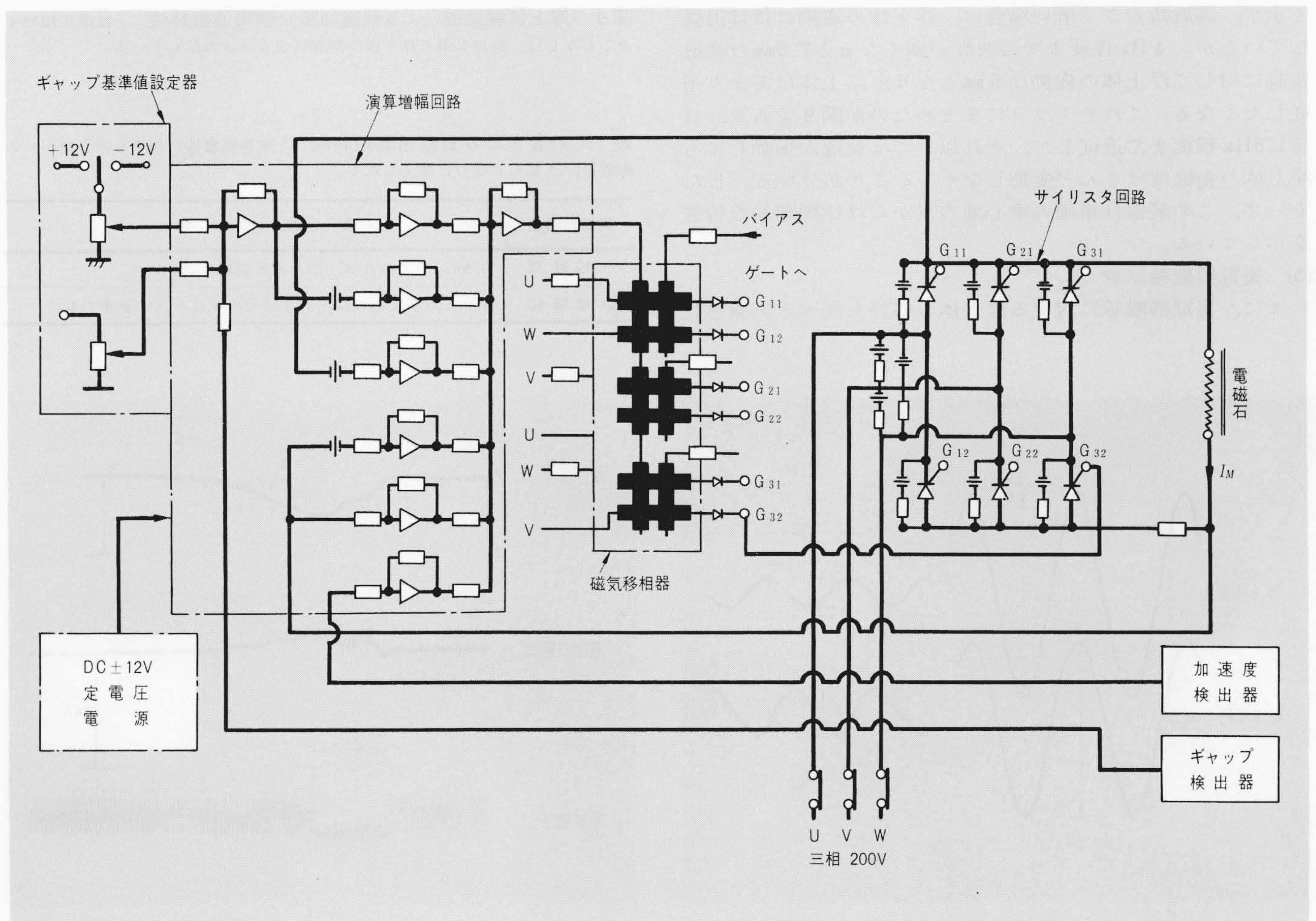


図6 浮上制御装置回路図 サイリスタのゲート制御には、電源電圧変動に強い磁気移相器を採用した。

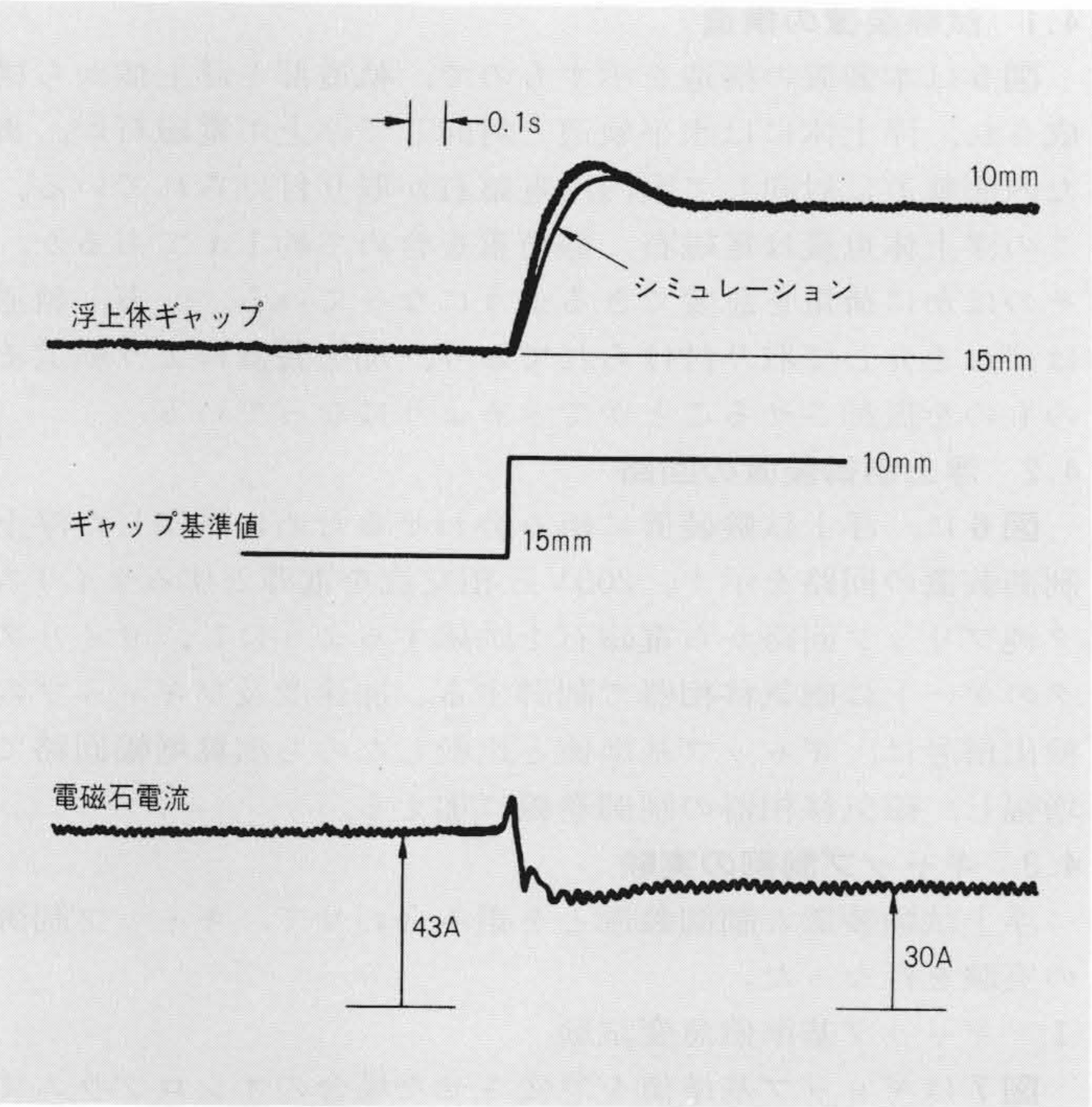


図7 浮上試験装置によるギャップ基準値急変試験 重量1tの浮上体は、安定に静止浮上した。

(2) 軌道変動試験

次に、乗心地に大きな影響のある軌道の凹凸に対する浮上体の応答を調べる実験を行なった。図8にそのオシログラムを示す。周波数がごく低い場合は、浮上体の変動にほぼ追従しているが、4Hz程度まで周波数が高くなると7.5mmの軌道変動に対して浮上体の変動は5mmとなり、浮上体はあまり追従しなくなる。これをグラフにまとめたのが図9であり、ほぼ1.5Hz程度まで追従して、それ以上では軌道が振動しても浮上体の変位はほとんど変動しなくなることが分かる。したがって、この装置は車両の乗心地の点からほぼ理想的な特性を示している。

(3) 集電器離線試験

次に、集電器離線に対する浮上体の応答を調べる実験を行

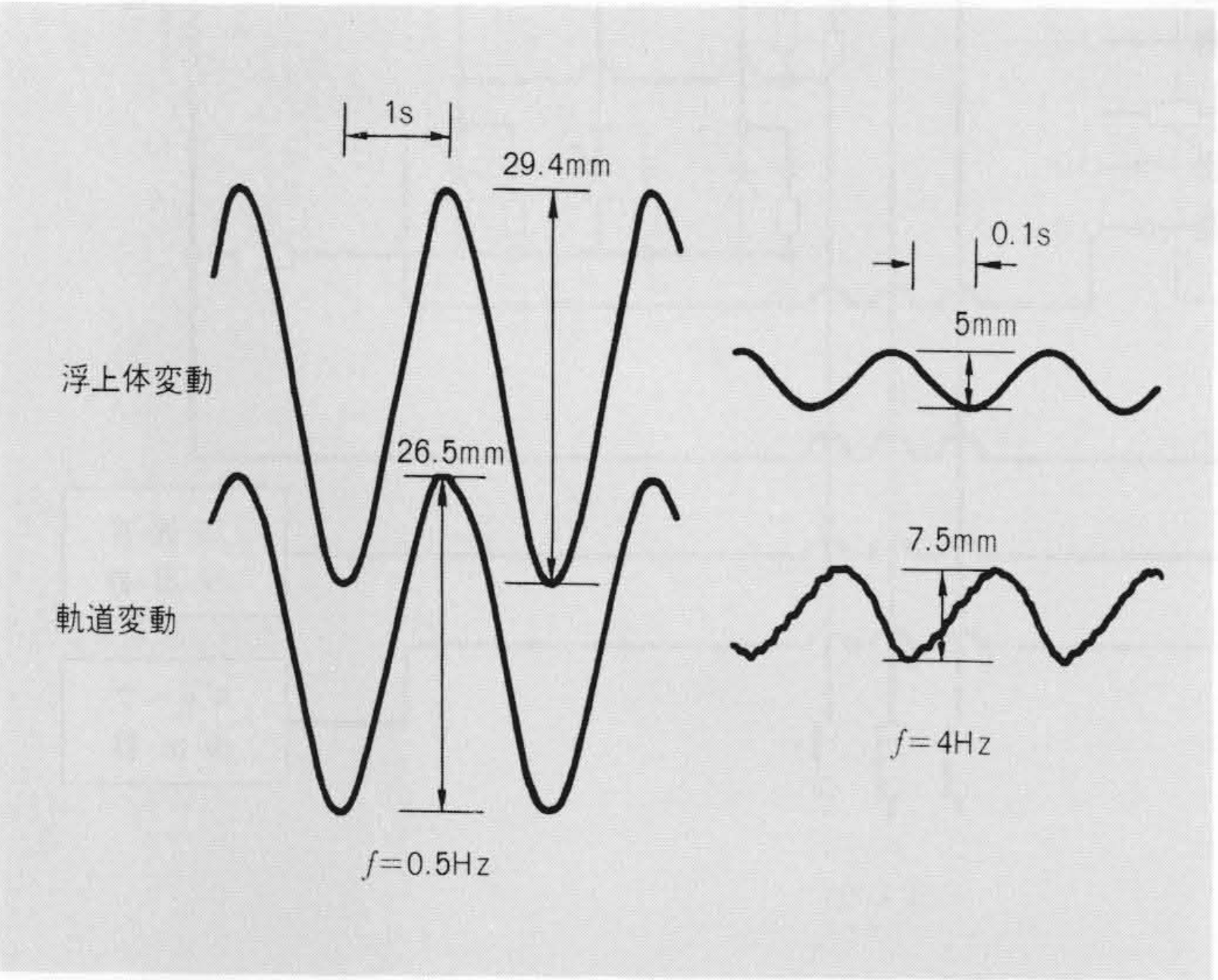


図8 浮上試験装置による軌道正弦波加振試験 軌道変動周波数が高くなるに従い、浮上体は軌道変動に追従しなくなる。

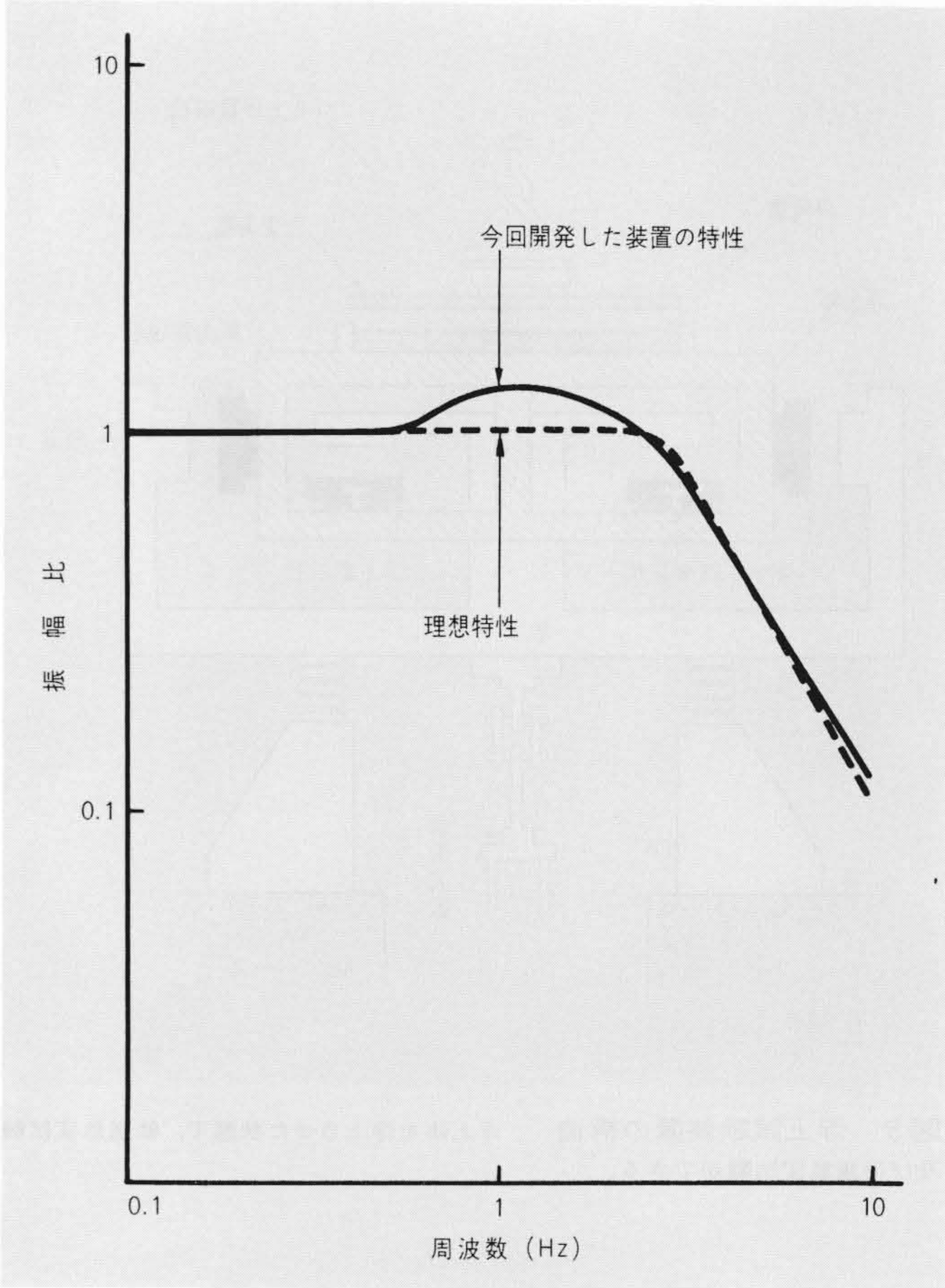


図9 浮上試験装置による軌道加振試験周波数特性 軌道に接触することなしに、良好な乗心地を保つ理想特性をほぼ満足している。

表1 許容される集電器離線時間 集電器離線に対する浮上制御への影響は、ほとんどないと考えられる。

集電器離線	離線時間
一相離線	0.5s以下であれば、ほとんど問題ない。
二相離線	15ms以下であれば、安定に元のギャップに復帰する。

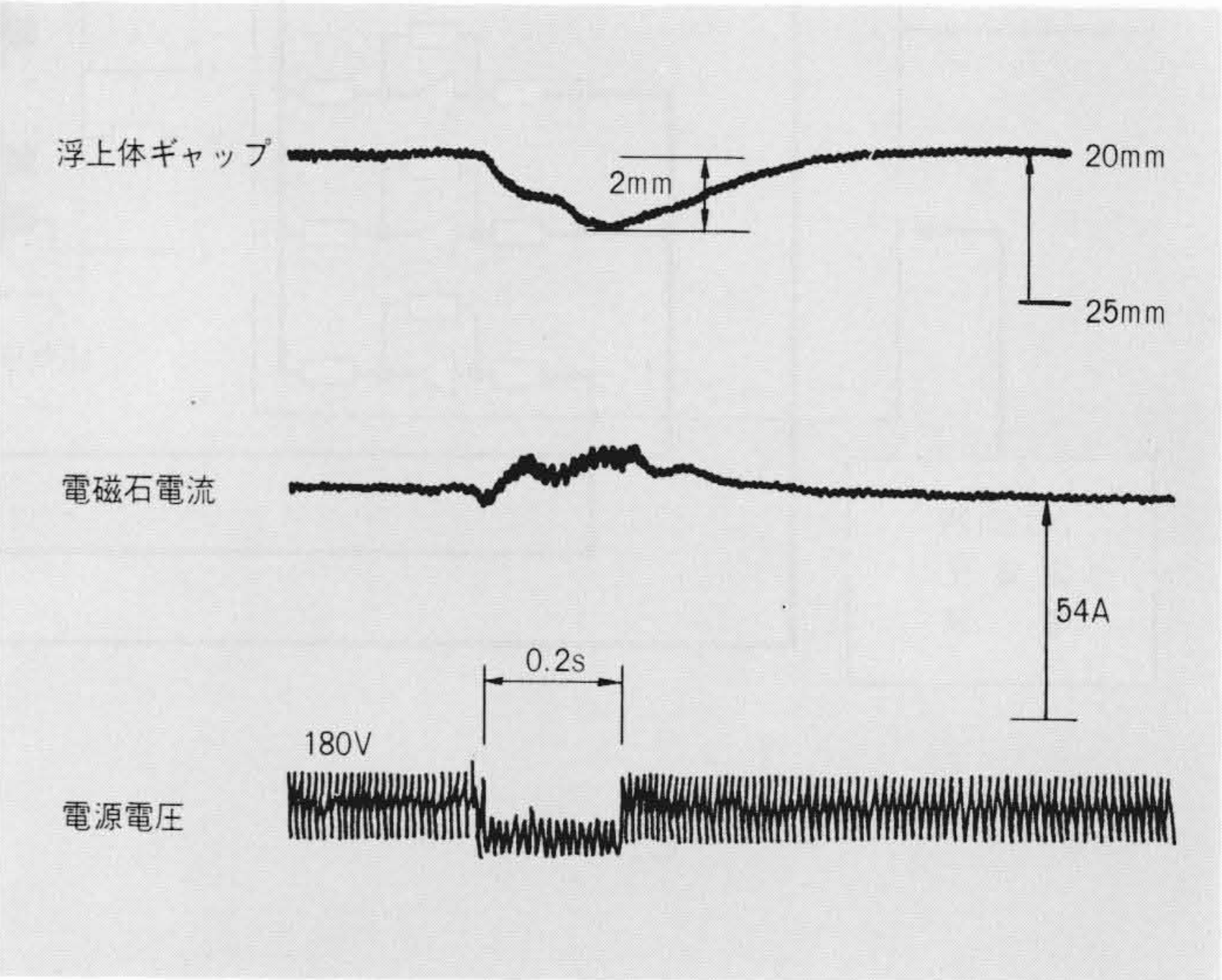


図10 浮上試験装置による集電器一相離線試験 離線時に浮上体のギャップは多少変動するが、安定に元のギャップに復帰している。



図11 実験線の全景 実験線の全長は約165m、実験車両の重量は1.8tである。

なった。図10はその実験結果の一例を示すもので、三相電源のうち一相が0.2秒間だけ離線した場合のオシログラムである。浮上体のギャップは過渡的に2mm変動するが、特に問題となることはなかった。この実験結果から、集電器離線に対する許容時間についてまとめると表1に示すようになる。この方式がこのような安定な理由は、サイリスタのゲート制御装置に電源電圧変動に強い磁気移相器を採用したことによるものである。

5 モデル車両の浮上走行試験²⁾

理論解析と浮上試験装置による実験とにより、浮上制御上の問題点を解決できたのでこの方式を適用した制御装置をモデル車両に搭載し、実験線で走行実験を行なった。

5.1 実験線

図11に、社団法人日本鉄道技術協会が神奈川県大和市郊外に設置した実験線を示す。実験線の全長は約165mであり、モデル車両の寸法は幅1.7m×高さ2.1m×長さ2.8mで、重量は

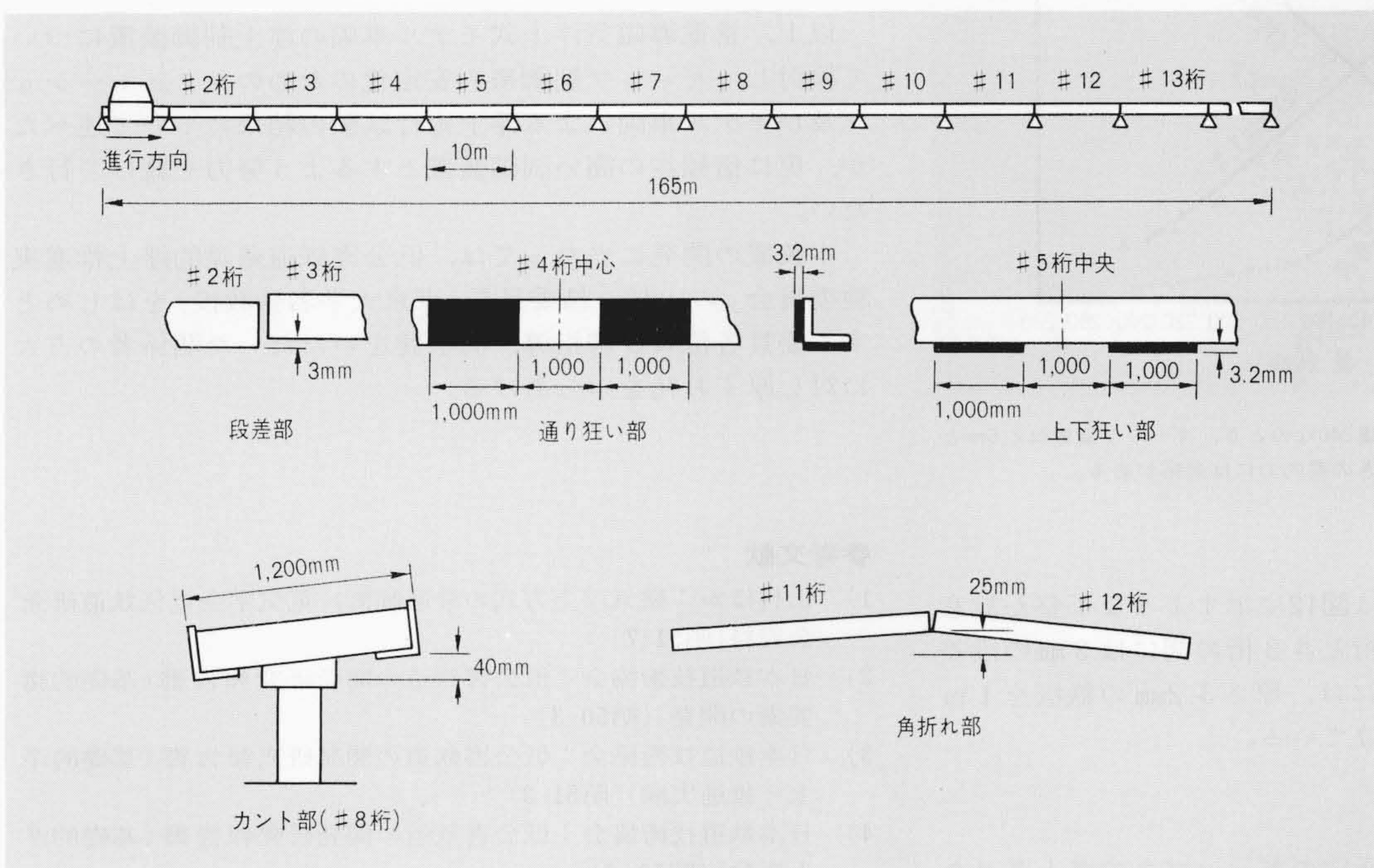


図12 実験線の軌道 実験線の軌道には、図示のような不整が付けてある。

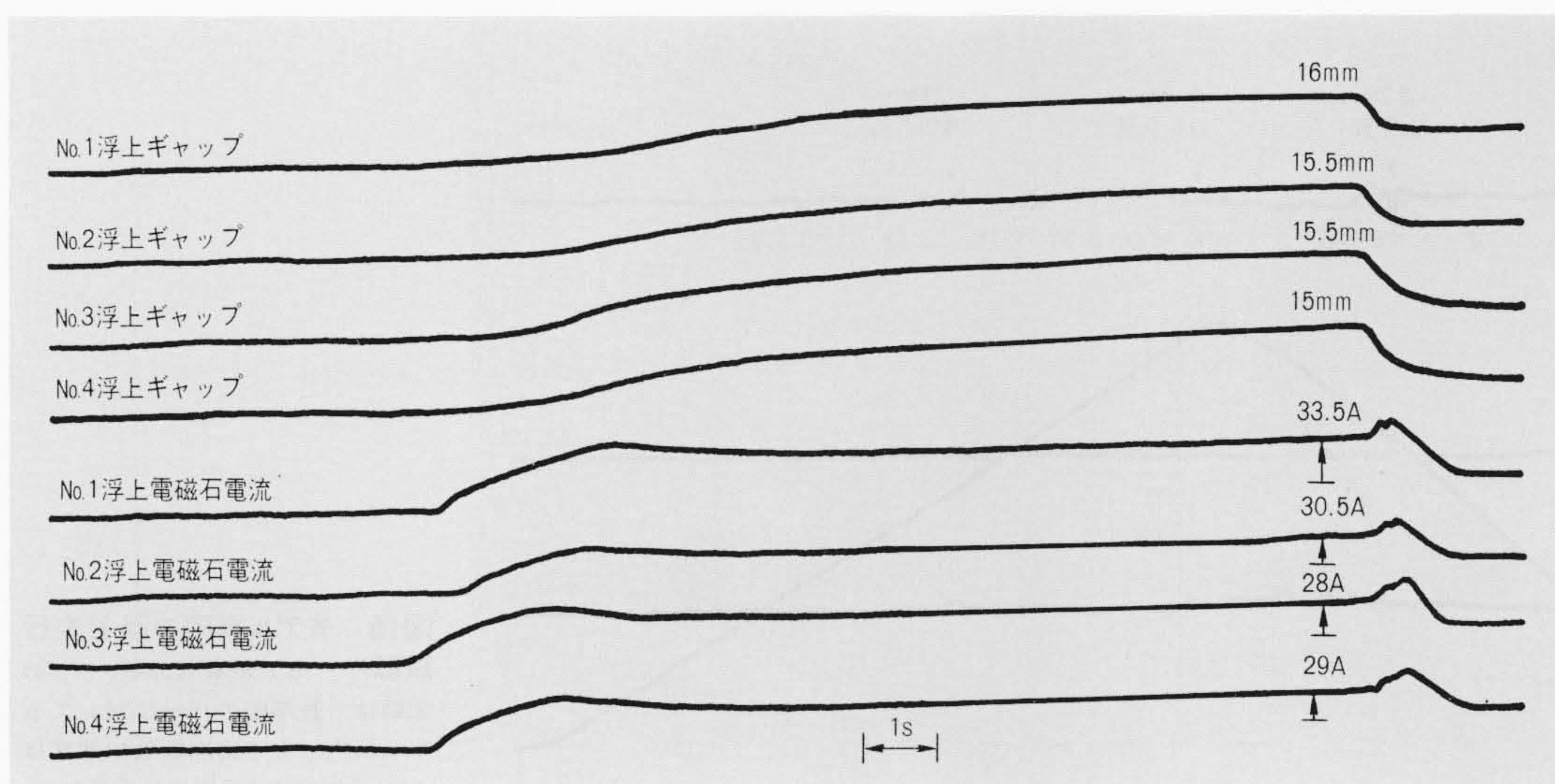


図13 モデル車両の静止浮上試験 ソフトパターンに沿って安定に浮上し、浮上後の各点のギャップ及び電磁石電流はバランスしている。

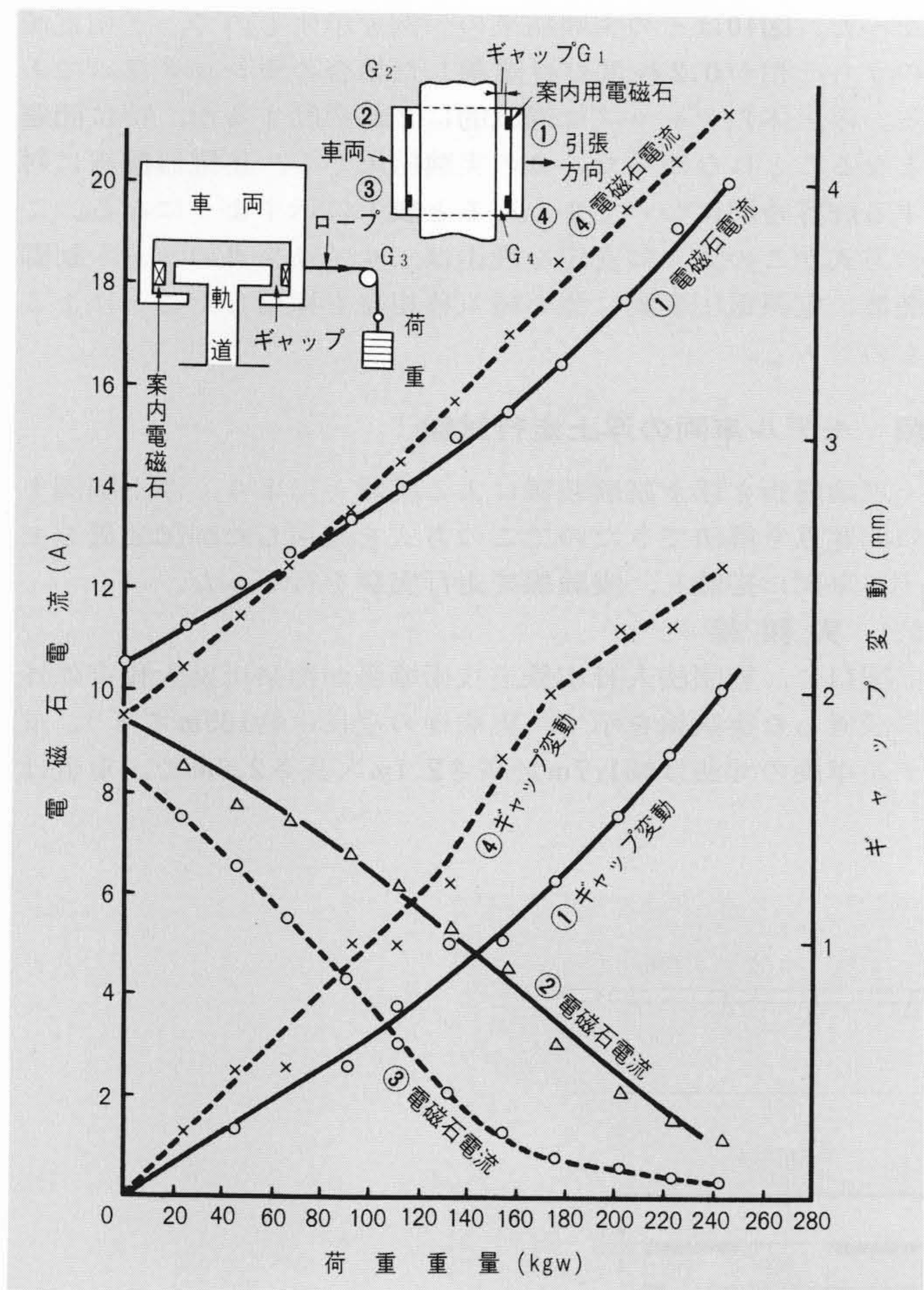


図14 案内力測定試験 最大荷重240kgのとき、ギャップ変動は2.5mmと小さく、車両がカント部を通過するときの案内力には余裕がある。

約1.8tである。また、軌道には図12に示すような不整が故意に付けてある。例えば、#2桁と#3桁の間には3mmの段差が、#4桁の中央部側面軌道には、厚さ3.2mmの鉄板を1mおきに2枚溶接して不整を付けている。

5.2 静的浮上案内試験

(1) 浮上試験

モデル車両を着地状態から所定のギャップまで浮上させた

ときの各点のギャップ、及び電磁石電流の応答を測定した。そのときのオシログラムを図13に示す。同図に示すように、ソフトパターンに沿って安定に浮上し、浮上静止後の各点のギャップ及び電流はバランスしている。

(2) 案内力測定試験

モデル車両を浮上させた状態で案内方向に外力を加え、ギャップ変動と案内用電磁石の電流とを測定した。図14に測定結果を示す。外力を0～240kgまで変化させたときのギャップ変動は0～2.5mmと小さく、車両がカント部を通過するときの案内力には余裕のあることが分かった。

5.3 走行浮上案内試験

モデル車両を使って、各種不整を付けた軌道の上を浮上走行させる実験を行なった。図15にそのオシログラムの一例を示す。走行中のギャップ変動は、上下方向、案内方向とも基準値の15mmに対し±5mm以内であり、安定に浮上走行することを知った。また、走行中の振動加速度は 1 m/s^2 以下であり、乗心地も十分満足することを確認した。

6 結 言

以上、常電導磁気浮上式モデル車両の浮上制御装置について検討し、ギャップ制御系の安定化のためのシミュレーション及びモデル車両による浮上走行試験の結果について述べたが、更に信頼性の高い制御装置とするよう努力を続けて行きたい。

本装置の開発に当たっては、「低公害鉄道基礎的浮上推進実験委員会」の山村 昌委員長(東京大学名誉教授)をはじめとする委員各位及び御指導、御鞭撻をいただいた関係者の方々に對し厚くお礼を申しあげる。

参考文献

- 1) 山村ほか：磁気浮上方式の最適制御，電気学会電気鉄道研究会資料(昭51-7)
- 2) 日本鉄道技術協会：低公害鉄道の開発研究報告書(基礎的諸要素の開発)(昭50-3)
- 3) 日本鉄道技術協会：低公害鉄道の開発研究報告書(基礎的浮上・推進実験)(昭51-3)
- 4) 日本鉄道技術協会：低公害鉄道の開発研究報告書(基礎的浮上実験)(昭52-3)

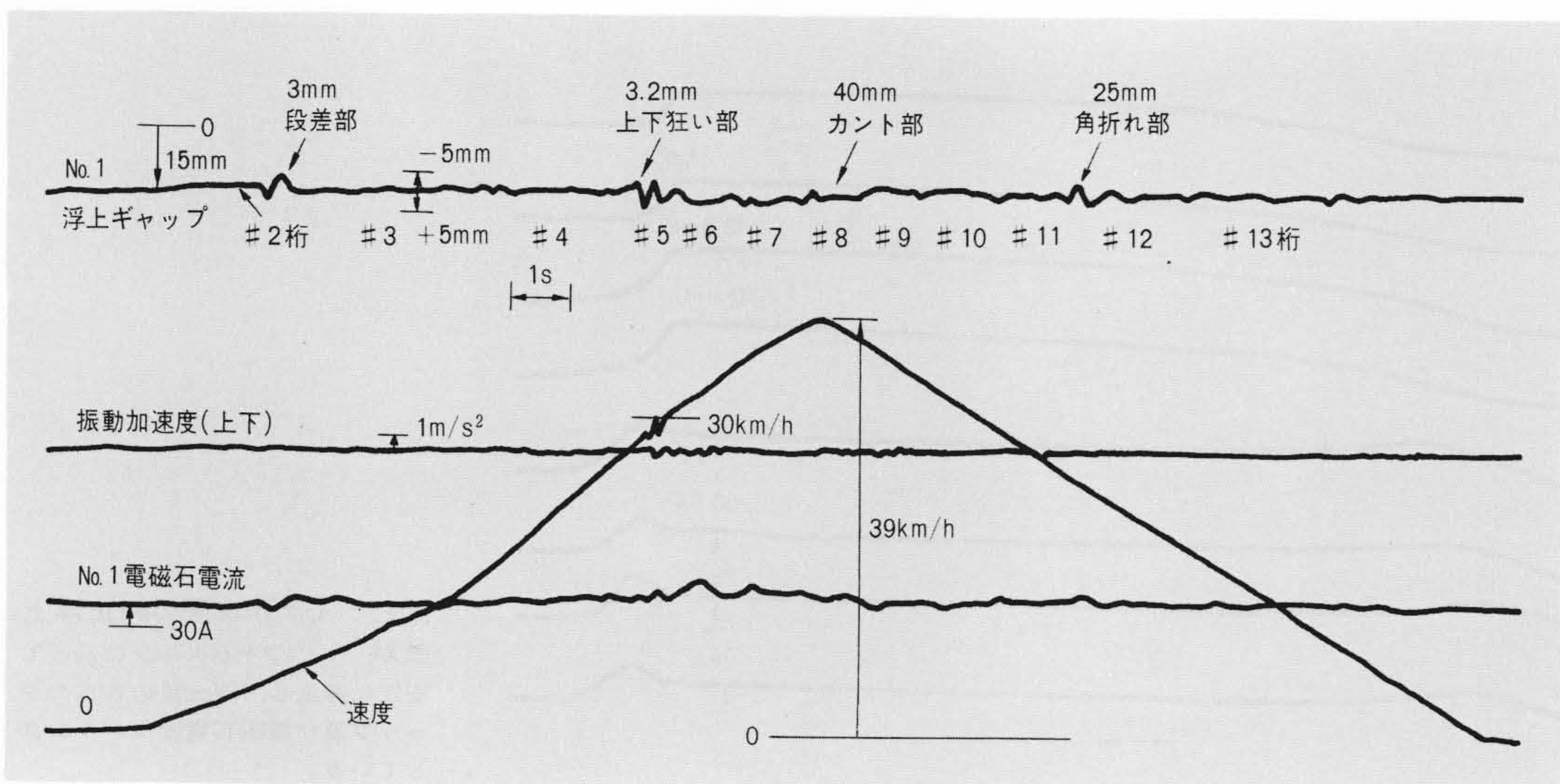


図15 モデル車両の浮上走行試験 モデル車両のギャップの変動は、基準値の15mmに対して±5mm以内、上下方向振動加速度は 1 m/s^2 以内であり安定に走行した。