

# 3次元6自由度振動台

## Three-dimensional Six-Degree Freedom Earthquake Simulator

地震国である我が国では、原子力発電設備などの耐震研究が特に重要視されている。耐震研究で、これら構造物の実物あるいはモデルを、実際の地震と同様の状態で加振する振動台が重要な役割を果たしている。3次元6自由度振動台は、水平と垂直の直角3方向の振動と各軸方向回りの回転振動を同時に再生することができる装置である。

本稿では、3次元6自由度振動台で特に重要な技術である加速度波の忠実な再生技術・多次元運動を実現する継手機構、更には試験対象の影響を補償する制御技術について紹介する。3次元6自由度振動台は、既に産業界及び国内外の各研究機関に設置され、耐震研究に利用されている。

平井洋武\* *Hiromu Hirai*  
 楯 善幸\*\* *Yoshiyuki Tate*  
 矢頭順一\*\*\* *Jun'ichi Yazu*  
 菅野正治\*\*\* *Masaharu Sugano*  
 今野隆雄\*\*\* *Takao Konno*

### 1 緒 言

原子力発電設備、高層ビル、超大橋、ダムなどの各種構造物が、地震時に破壊しないだけの十分な強度を持ち、正常な機能を保持できるかどうかを確認することが社会的に強く求められている。このため、これら構造物の実物あるいはモデルを地震と同様の状態で加振して、振動特性や耐震強度を試験する必要がある。このような試験設備として振動台が使用される。

振動試験あるいは耐震試験では、通常2次元(水平、垂直各1軸)あるいは3次元(水平2軸、垂直1軸)といった直線方向の加振が行われる。しかし、近年このような直線方向の加振だけでなく、地震によって生じる構造物のねじれや液体タンクなどのスロッシング、船舶のロッキング・ピッチング特性などの、回転運動までも含めた振動特性を試験することが可能な振動台が強く望まれてきた。3次元6自由度振動台は、このような要望に対応するために開発された装置であり、前後・左右・上下の3軸方向の直線運動に、各軸方向回りの回転運動を可能とした点を特徴としている。

3次元6自由度振動台を利用することにより、過去に発生した実際の地震と同様の状態を、水平・垂直3方向に立体的に正確に再現するのはもちろんのこと、例えば、巨大タンクのように回転振動の影響の大きい構造物の複雑な振動を忠実に再現することが可能となる。

以下に振動台の基本構成や性能をはじめ、地震波を精度よく再現するためのシステム技術について紹介する。

### 2 耐震試験設備の状況

3次元6自由度振動台の概要を図1に示す。この振動台では、試験対象は四角のテーブル上に搭載され、テーブルはX軸及びY軸方向を各々2台の加振機で、Z軸方向を4台の加振機

で駆動される。この振動台の機構的な特徴は、テーブルと加振機との結合部に静圧軸受継手を用いている点にある。この継手機構により、水平・垂直及び回転方向の運動を独立に制御することが可能となっている(4章参照)。

国内の各研究機関に設置された日立製作所が納入した主な振動台(2次元以上)の仕様を表1に示す。これらの研究機関では、原子力発電設備や巨大タンクを持つプラント類、更には基礎地盤や土木構造物に対する耐震試験が活発に実施されている。図2は、テーブル寸法4m×4m、搭載重量20tの振動台で、高層ビルの建築構造モデルを用いた耐震試験の様子を示したものである。

### 3 システムの概要

標準的な振動台システムの構成を図3に示す。本システムは試験対象を搭載するテーブルを設置した機械システムと、そのテーブルを加振するための駆動力を発生する油圧システム、耐震試験データの収録・解析及び計算機による波形補正制御などを行う計測装置並びにデジタル制御装置、更に加振機のサーボ制御系の構成とデジタルシステム、油圧システムの起動・停止をコントロールするアナログ制御装置で構成される。

なお、本システムは次のような基本的考え方に基づいて設計されている。すなわち、目標振動波形を精度よく忠実に再現する制御技術及びハードウェア技術を採用するとともに、機器の高信頼化と耐久性の向上を図っている。また、振動台の設置に当たっては、十分な安全装置を備えるとともに、環境保全対策(振動伝搬)に万全を期している。更に稼働段階では、運転操作・データ処理の自動化を図り、全体としては安全性、稼働率、省力化を高めたシステムを構成することに留

\* 日立製作所機械研究所 工学博士 \*\* 日立製作所機械研究所 \*\*\* 日立製作所土浦工場



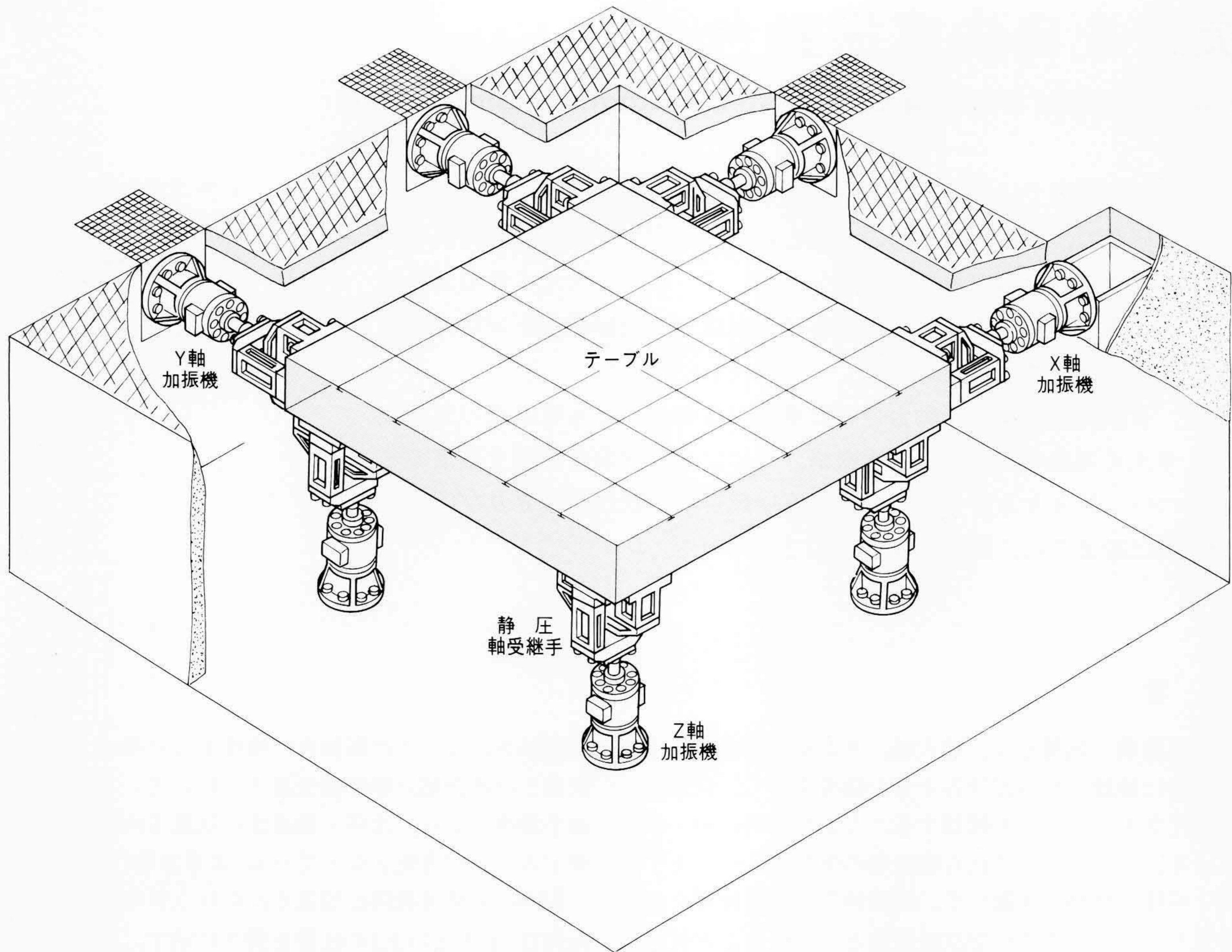


図1 3次元6自由度振動台の概要 6自由度の加振が可能な振動台の概観図を示す。

表1 振動台の主な設置機関 日立製作所が設置した2次元以上の振動台の主な機関と振動台の仕様を示す。

仕様	設置機関 電力中央研究所 土木研究所	株式会社日立製 作所機械研究所	建設省土木研究 所	東京大学生産技 術研究所	大成建設株式会 社技術研究所	株式会社奥村組 筑波技術研究所	清水建設株式会 社技術研究所
試験対象最大質量(t)	10	20	40	7	20	定格20 最大60	20
テーブル寸法(m)	3×3	4×4	4×4	3×3	4×4	4×4	4×4
加振方向	X, Z(同時)	X, Y, Z(同時)	X, Z(同時)	X, Y, Z(同時)	X, Y, Z(同時)	X, Y, Z+(回転)	X, Y, Z+(回転)

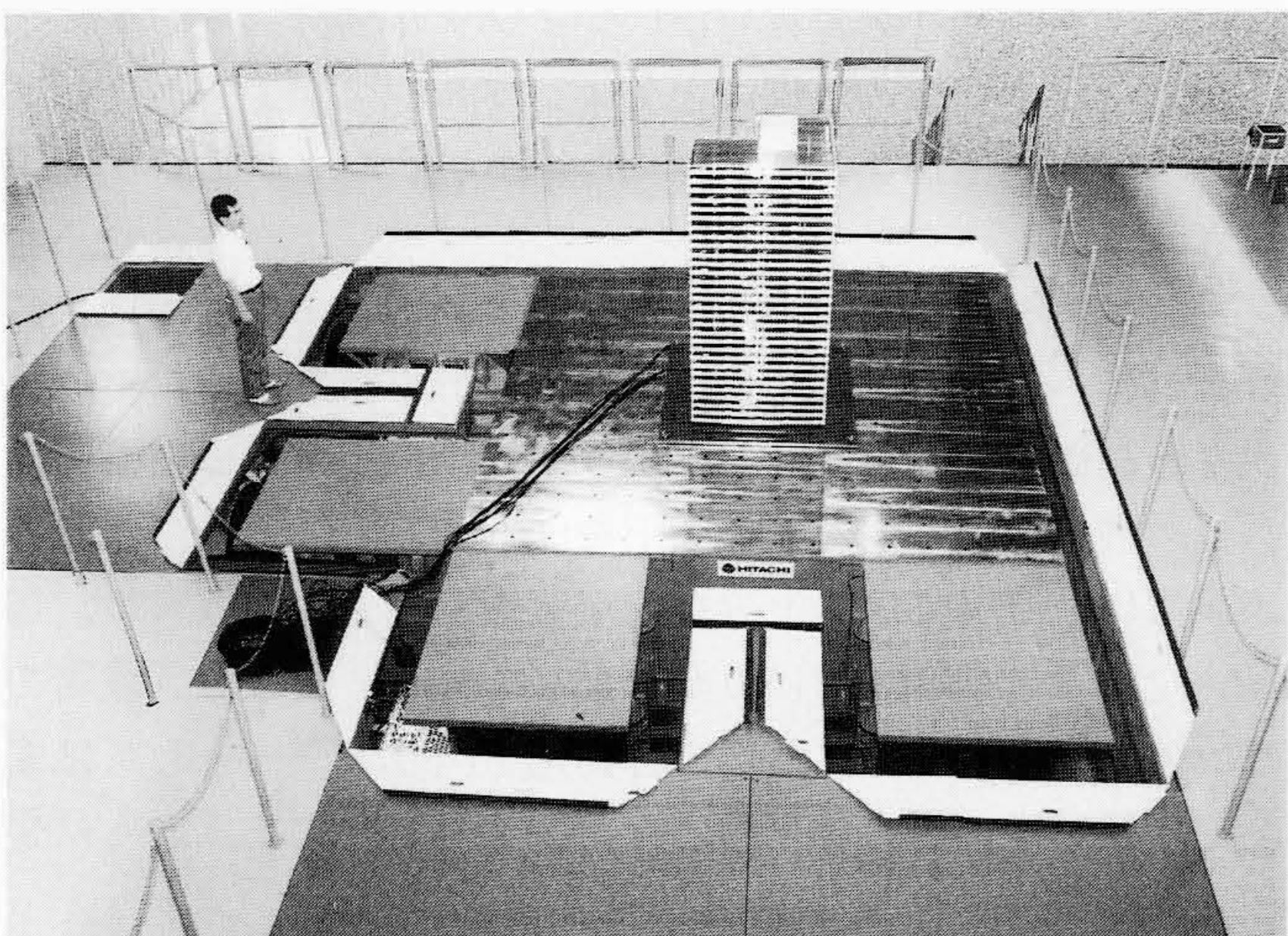


図2 耐震試験状況 建築構造物の代表例である高層ビルモデルを用いた耐震試験状況を示す。

意している。

なお、データ計測・収録・解析及びデジタル制御装置としては、パーソナルコンピュータ、ミニコンピュータ、スーパーミニコンピュータを用いたどのシステムも完備している。特にアプリケーションプログラムについては、(1)加振波形の発生、(2)各種制御、(3)データ計測・収録、(4)データ解析、(5)データの図化・編集・表示・転送といった非常に広範囲にわたるソフトウェアが完備され、しかもそれぞれ豊富な機能が用意されている。

#### 4 継手機構

振動台では、テーブルと加振機との結合方法である継手機構が重要な技術課題となる。この継手機構は、加振機の出力をテーブルへ忠実に伝達し、また加振機に対して直角方向にテーブルが運動するとき、その運動を拘束しないような機



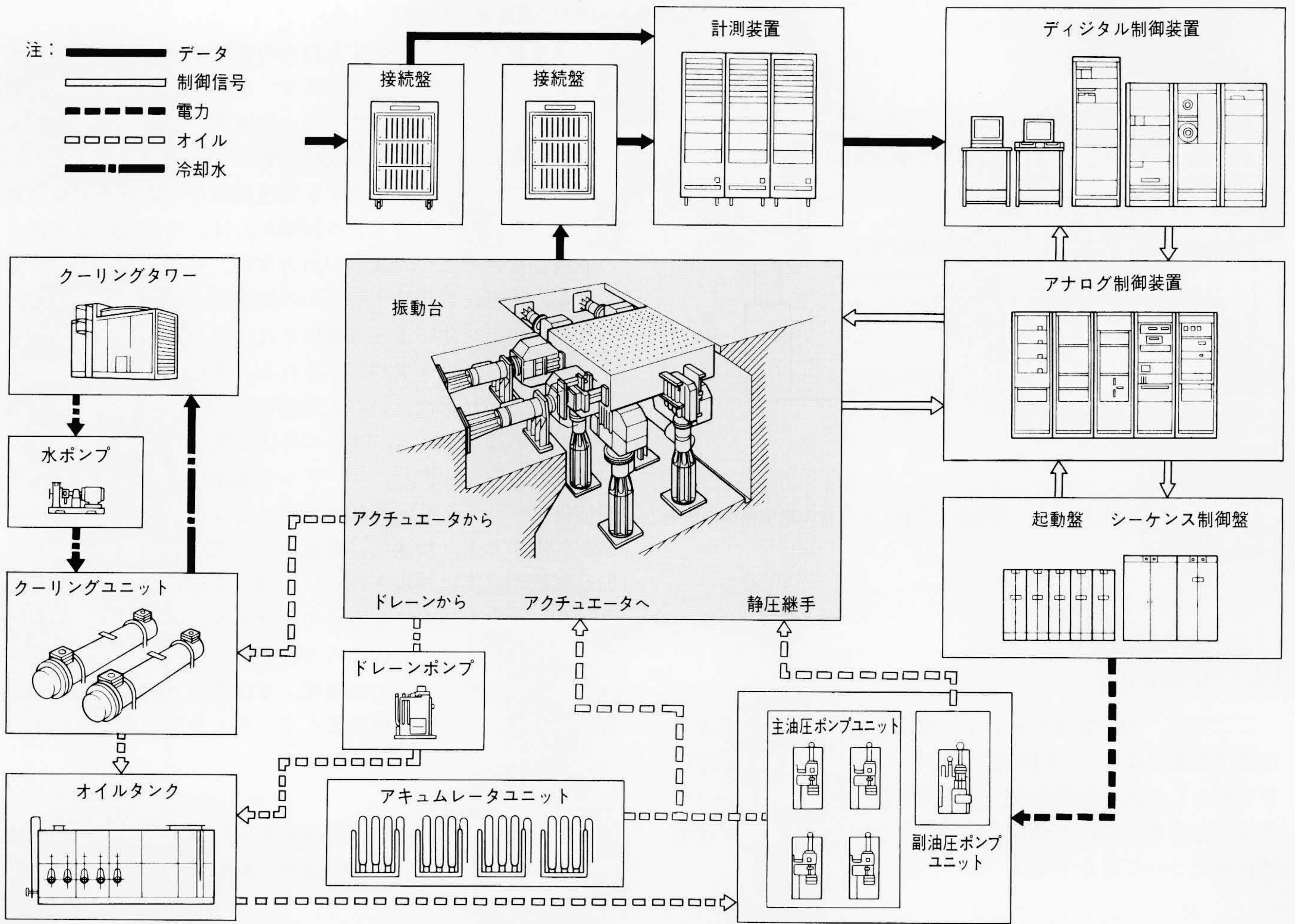


図3 振動台の基本システム 振動台が機械、制御、油圧、データ処理デジタル制御の四つのシステムによって構成されていることを示す。

構でなければならない。これまでに実用化されている方式としては、リンク機構と静圧軸受継手機構<sup>1)</sup>の二つがあるが、日立製作所では静圧継手方式を採用している。

この方式は図1の概念図で示すように、加振機とテーブルの間に静圧軸受継手機構を用いた方式である。この継手機構は、図4に示すようにテーブルに固定されたコの字形部分と加振機の先端に固定された口の字形部分から成り立っており、それらは同図(a)のように組み合わせられている。同図(b)はその断面を示しており、コの字形の中央部は口の字形部分で挟まれ、両面が対向形の軸受になっている。また、軸受面には油圧ユニットから供給された圧油により、高い剛性を持った油膜が形成され、コの字形・口の字形両部材のしゅう(摺)動では、摩擦力のほとんど発生しない極めて高精度な静圧軸受となっている。

なお、この継手機構のもう一つの特徴は、図4(b)に示したようにテーブルの回転運動を可能とするため、軸受面を持つ軸受パッドの後方を球面座として、軸受パッドが口の字形部材の中で回転可能な構造としたことにある。参考のために、テーブルの回転に伴い、継手のコの字形部材と軸受パッドが回転動作をする様子を図5に示す。

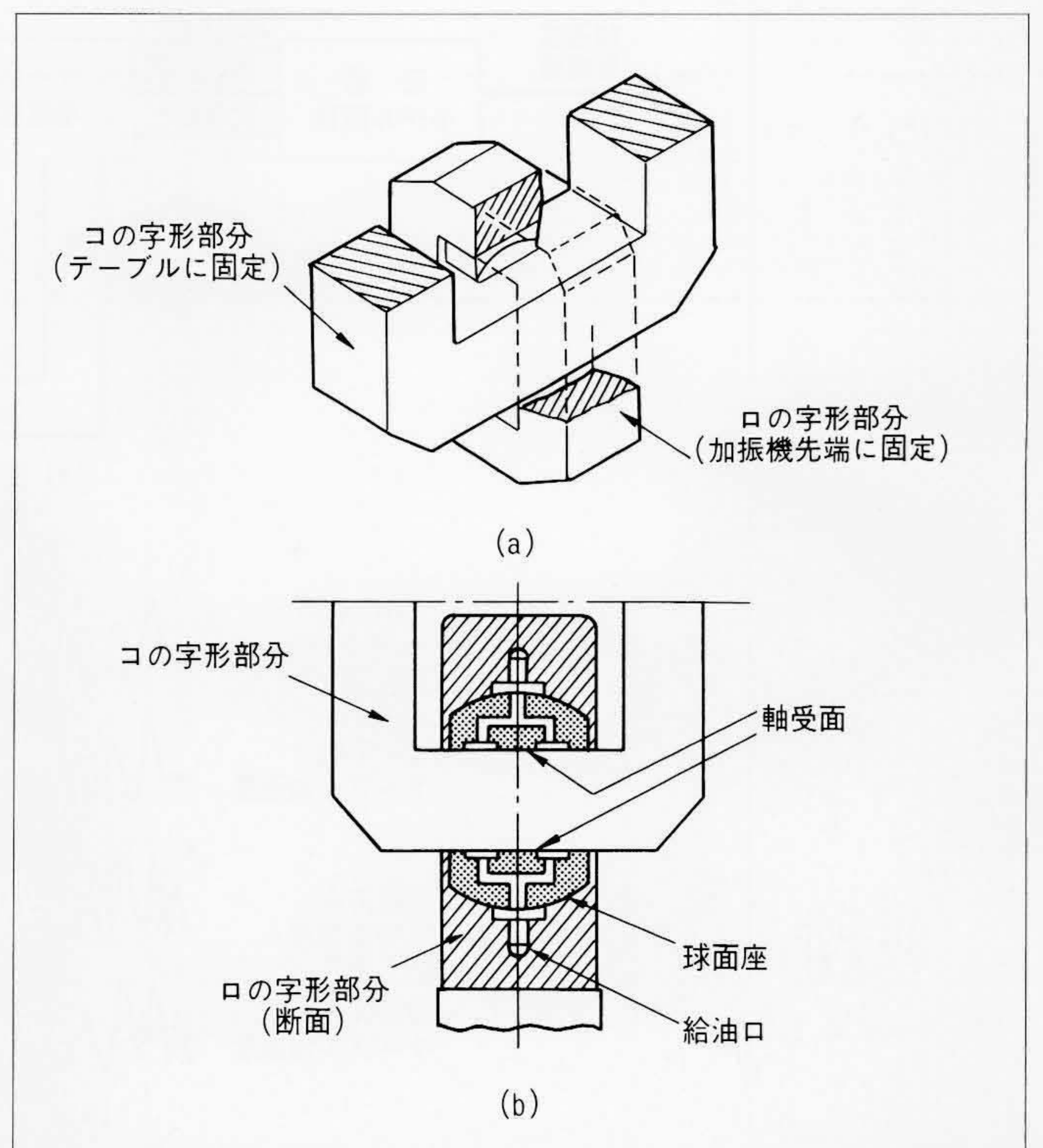


図4 静圧軸受式継手の構造 振動台と、その振動台を動かすための加振機の間を結合する継手の構造を示す。



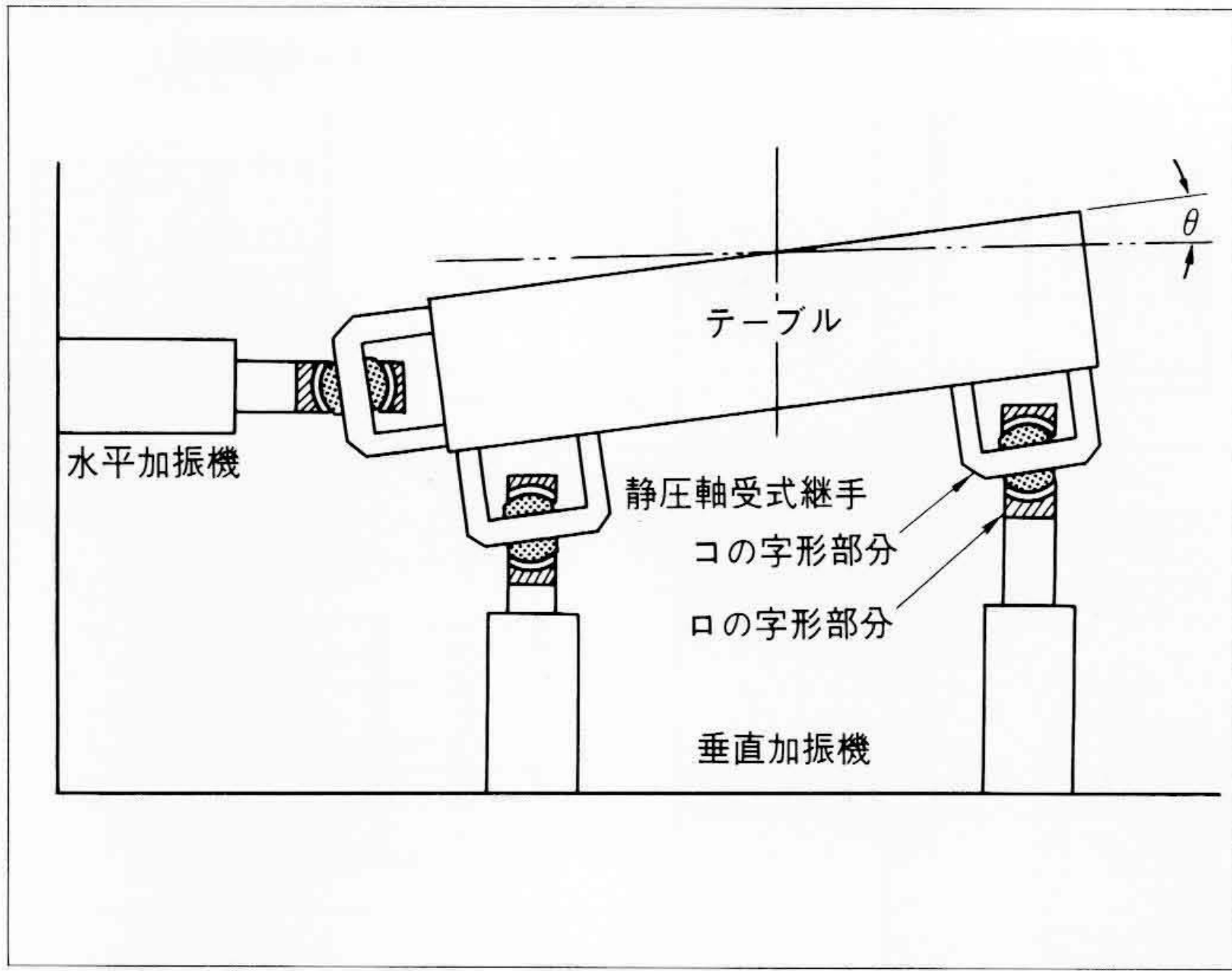


図5 振動台の回転運動 振動台が回転した場合の継手機構の様子を示す。

### 5 加振制御系

ここでは、加速度波形ひずみの補正技術として開発された加速度制御技術<sup>2)</sup>と、学習制御技術<sup>3)</sup>、振動台の6自由度制御を可能とした回転制御技術、及び試験対象の共振現象によって生じる大きな転倒モーメントの発生を防止する回転抑止制御技術について紹介する。

### 5.1 加速度制御技術

加速度波を忠実に再生するための電気油圧サーボ系の構成を図6(a)に示す。この電気油圧サーボ系の特徴は、加速度信号を直接入力としていることで、加速度の正弦波、ランダム波及び地震波を入力とした試験が簡単に実施できる点にある。テーブルの応答目標に相当する加速度信号が応答モデル回路に入力されると、応答モデル回路からは、加速度のほかにもその速度と変位の三つの波形が出力され、サーボ増幅器に入力される。一方、実際のテーブルの加速度、速度及び変位は、それぞれのセンサによって検出され、その検出信号もまたサーボ増幅器にフィードバックされる。そしてサーボ増幅器に入力されたそれぞれ三つの入力信号から偏差信号が出力されサーボ弁に印加される。サーボ弁は加振機に供給される圧油の流量と方向を制御し、テーブルを偏差信号が小さくなる方向に動かす。つまり偏差信号が常にゼロになるようにサーボ系が動作すると、加速度目標値とテーブルの応答が一致し、加速度波が忠実に再現される。同図(b)は各種入力信号のうちランダム波入力に対する応答の例である。同図(b)で、各信号の波形は上から水平方向の入力加速度、水平方向のテーブル加速度、垂直方向の入力加速度、及び垂直方向のテーブル加速度を示す。いずれも精度よくランダム波形が再現されている。

### 5.2 学習制御技術

ここでは、デジタル計算機を利用して振動台の加速度波形ひずみを補正する学習制御技術を紹介する。

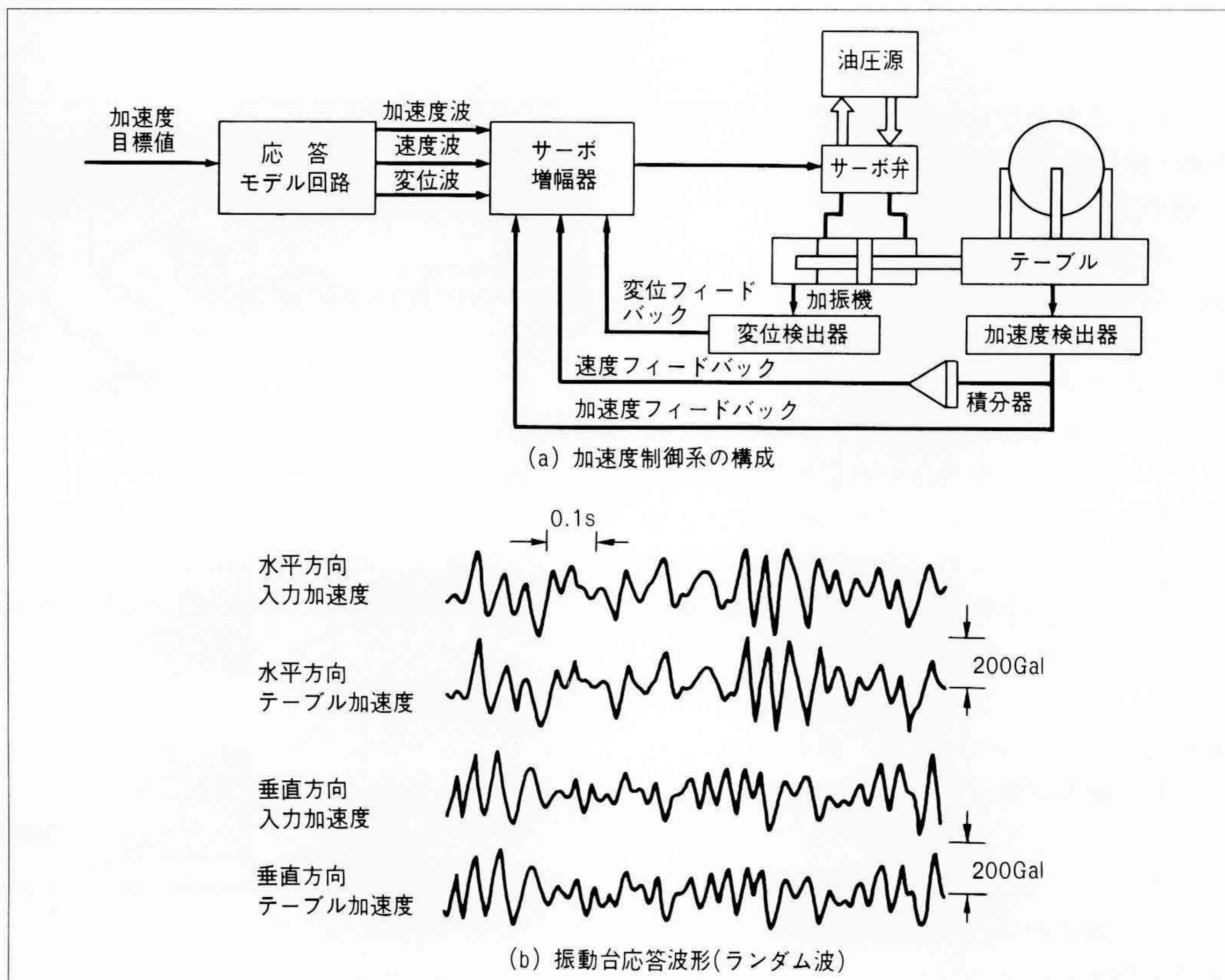


図6 加速度制御系の構成とその効果 (a)は加速度波を忠実に再生するための加速度制御系の構成を示し、(b)はその制御系での振動台の応答波形結果である。



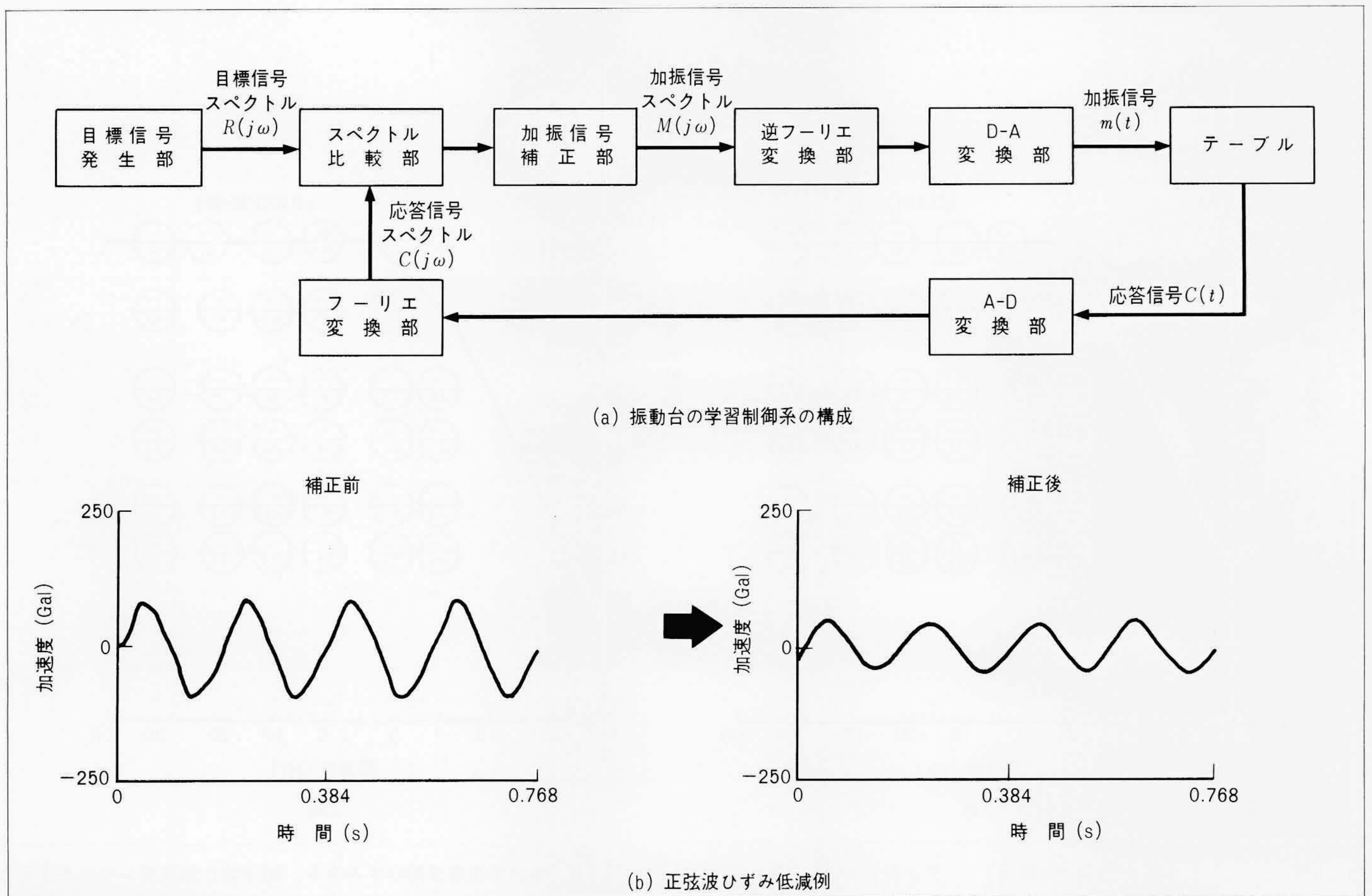


図7 学習制御系の構成とその効果 (a) デジタル計算機を利用した学習制御系の構成を示す。(b) は学習制御補正の効果の一例を示すもので、正弦波ひずみの低減例である。

振動台の応答波形ひずみは、目標信号の周波数及び振幅によってその現れ方が異なるため、あらかじめ補正信号を作ることにはできない。そのために、振動台の応答波形を評価しながら、その精度が許容値内に収束するまで加振信号の補正を繰り返す。

図7(a)は、補正機能を実現する学習制御系の構成を示したものである。同図で、テーブルの応答信号を取り込むA-D変換部から加振信号を出力するD-A変換部までが、デジタル計算機で処理する機能である。

テーブルからの応答信号スペクトルと目標信号発生部からの目標信号スペクトルにより、テーブルの応答波形精度の評価を行い、その精度が許容値内に収束するまで加振信号補正を加えた加振信号スペクトルを発生し、補正を繰り返すものである。

この学習制御技術を、正弦波ひずみの低減に適用した場合の結果の一例を図7(b)に示す。左側が補正前の応答波形、右側が補正後の応答波形である。ひずみが低減され精度の良い正弦波に補正されている。

更に試験結果の代表例として、デジタル計算機で波形補正制御を加えた場合の、加速度波形ひずみ率を図8に示す。このデータは、20t負荷に対して、周波数と加速度レベルを変えたいずれの測定点でも、補正後は良好な応答が得られている。同図中の○印の上段の数值は、ひずみ補正後の、下段の

数值は補正前の加速度波形ひずみ率を示す。

### 5.3 回転制御技術

回転運動を実現するための加振機構については、前章で述べたとおりである。ここでは、回転制御系の構成を紹介する。図9及び図10は、直線運動と回転運動とを組み合わせる加振できる制御系の全体システム構成図である。本システムは、大別すると8台の加振機のアナログサーボ制御をつかさどるアナログ制御装置と、アナログ制御系の特性を補正し制御精度の向上を図るデジタル制御装置の二つのシステムによって構成されている。このうちアナログ制御装置は、各加振機のサーボループを構成するサーボ制御部、そのサーボ制御系に与える目標信号を演算し出力する直線入力演算部及び回転入力演算部、並びにテーブルの動きの状態を表す状態量を求める状態量演算部の三つの部分から構成されている。また、デジタル制御装置は、振動台の目標信号に相当する電圧を出力するD-A変換器と、振動台の目標信号に対応する状態量を取り込むA-D変換器とを備え、閉ループでの補正制御を可能としている。

回転制御に関する本システムの特長は、回転制御に必要なとなる回転入力演算部と状態量演算部とをハードウェア化し、演算速度の高速化とソフトウェア依存度の軽減を図った点にある。



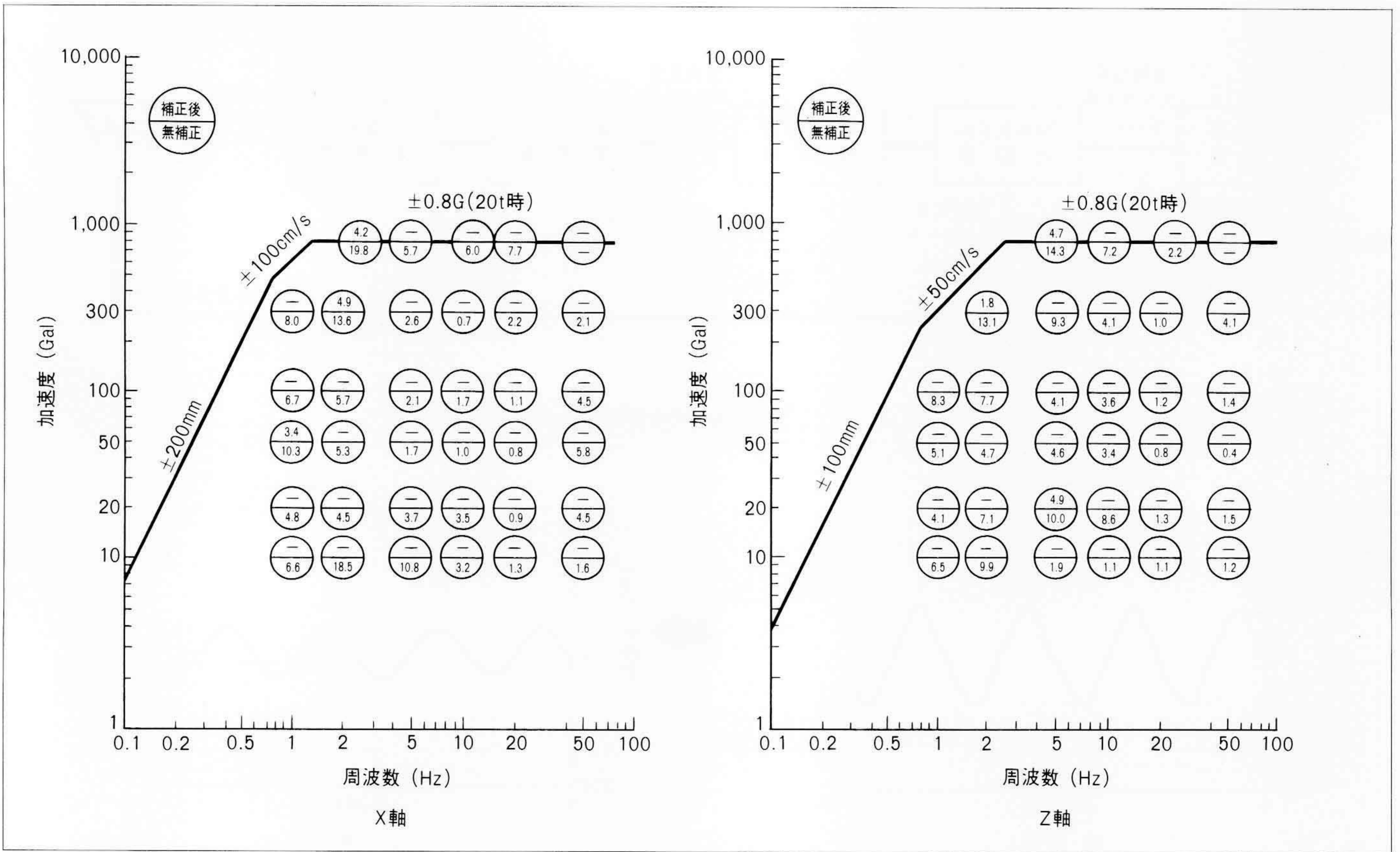


図8 加速度波形ひずみ率(20t負荷) デジタル制御装置で補正制御を加えた場合の加速度波形ひずみ率を、周波数と加速度レベルを変えた測定点で求めた。

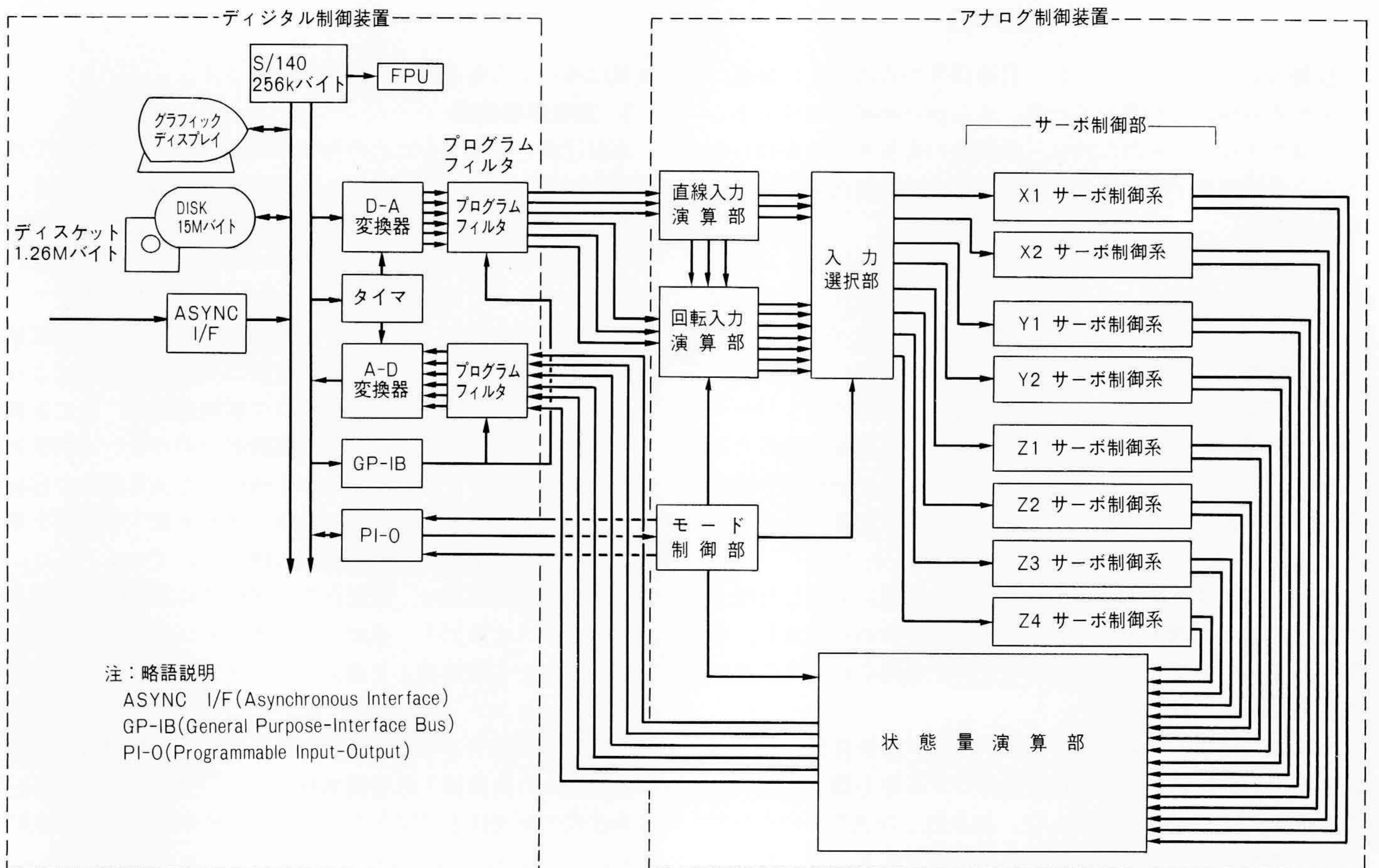


図9 振動台制御系の全体システム構成図 振動台の回転制御を実現する制御系の全体システム構成を示す。



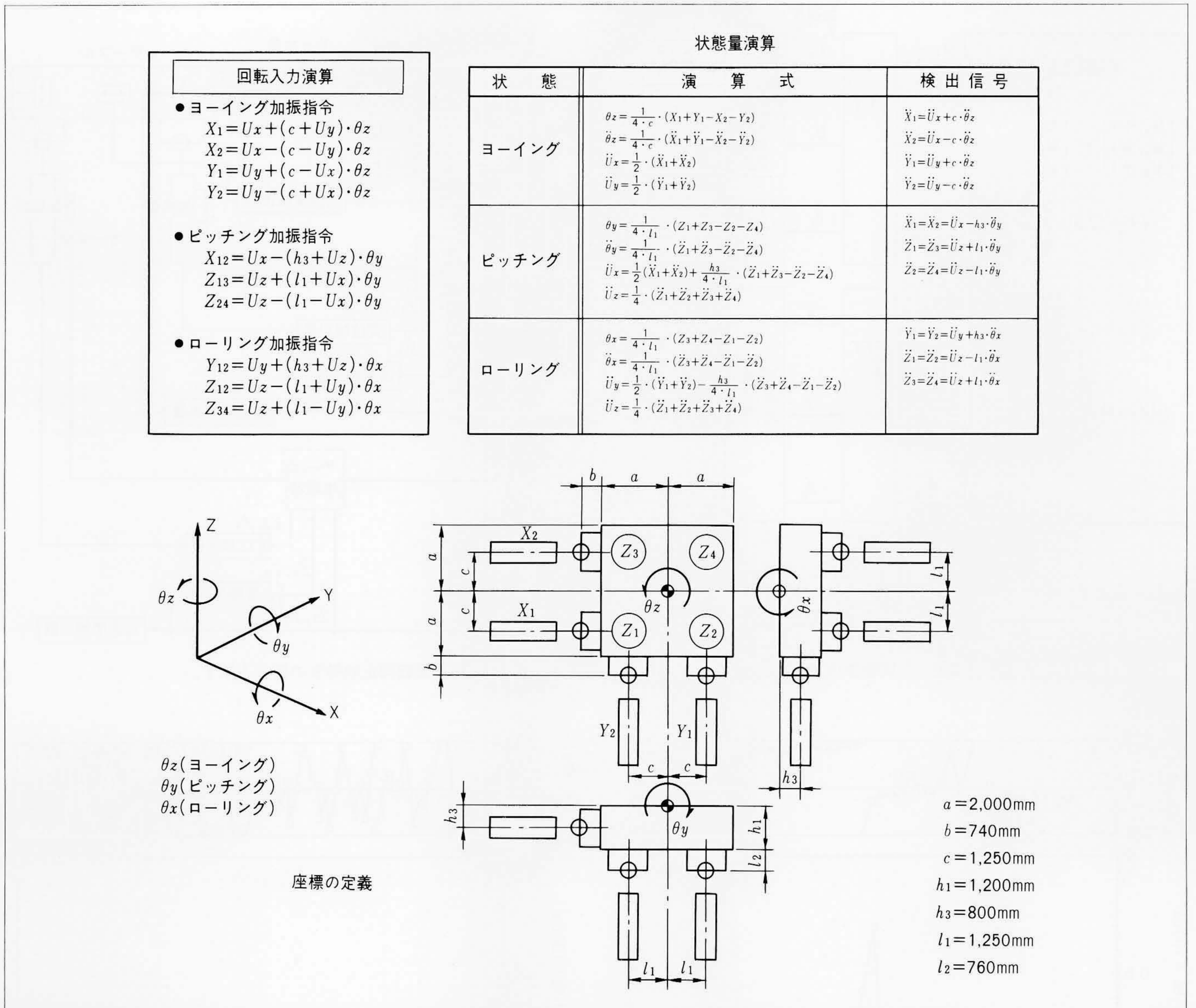


図10 振動台制御の回転入力演算，状態量演算式 図11の回転入力演算部と状態量演算部の計算式及び振動台座標の定義を示す。

### 5.4 回転抑止制御技術

テーブル上に弾性的な試験対象を載せて水平加振を行うと、試験対象の共振現象によって、大きな転倒モーメントが発生する。これに対して加振機サーボ系の剛性は有限であるため、上下方向の加振機に強制力による上下振動が発生し、テーブルに不必要な回転運動(ピッチング)が発生する。この現象が発生すると入力波形に対する追従性が悪くなり、地震波を正しく再現することが不可能となる。回転抑止制御技術は、この試験対象の共振現象からテーブルのピッチングを防止するための技術である。ピッチングを抑制するためには、上下方向の各加振機の応答を測定し、この振動を打ち消すような信号を目標信号に加える必要がある。なおピッチングは、加振信号の周波数及び振幅によりその現れ方が異なるために、あらかじめ補正信号を作ることにはできないので、5.2節で述べた学習制御機能が必要となる。

図11に回転抑止制御系の概念図を示す。基本的にはテーブルから得られる加速度の状態量を補正演算部となるディジタ

ル制御装置に取り込み、その信号を基に回転抑止制御のアルゴリズムを演算する。そして、その結果を補正を加えた加速度入力信号として計算機から出力し、アナログ制御装置に入力し、テーブルを制御するものである。

この回転抑止制御技術を用いて共振現象を補正した例を図12に示す。同図で(a)は補正がない場合の、(b)は補正を加えた場合のX軸方向のテーブルの周波数特性である。同図(a)に示すように、補正がない場合の5 Hz付近の共振が、補正をすることによって同図(b)に示すように非常によく抑制されている。

## 6 結 言

日立製作所では、昭和41年に1次元振動台を開発・製品化して以来、静圧軸受継手技術の開発による振動台の多次元化(2次元、3次元)を経て、20年後の現在では、実際の地震を忠実に再現する上で最適な3次元6自由度振動台を実用化した。現在国内の研究機関で、耐震研究設備として有効に活用されている。



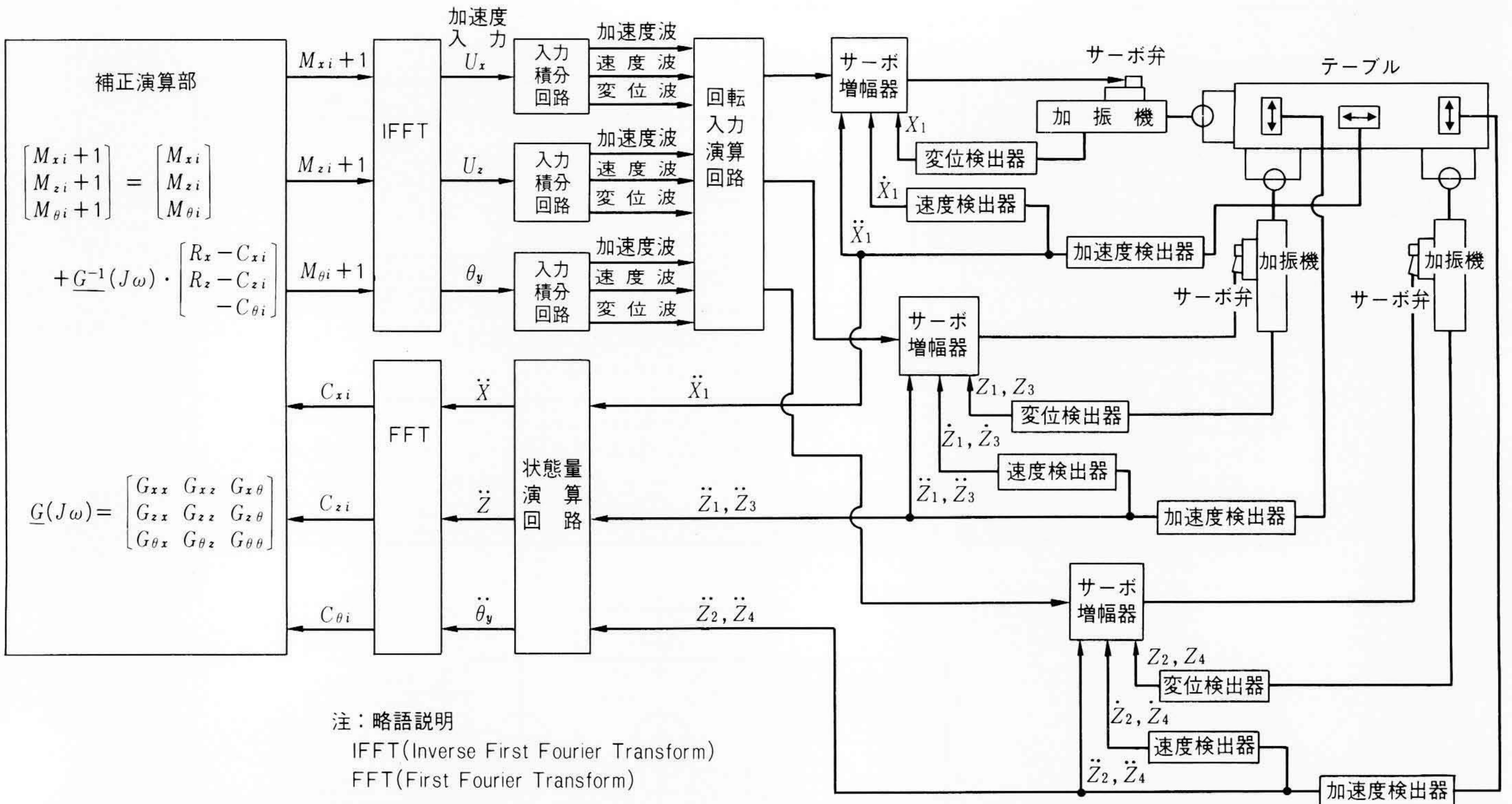


図11 回転抑止制御の概念図 試験体の共振現象によって生じる振動台の回転を防止する回転抑止制御系の構成を示す。

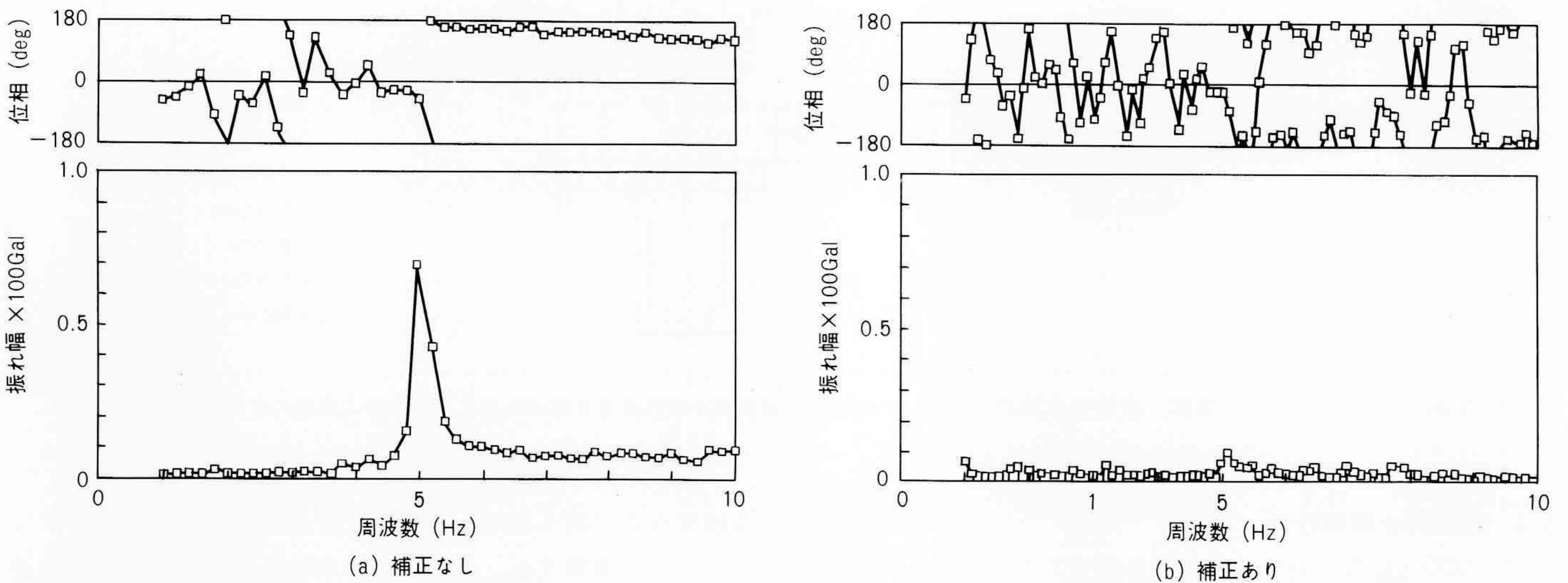


図12 回転抑止制御の効果 回転抑止制御により、試験対象の共振現象を補正した場合の効果の一例を示す。

このような振動台の変遷では、デジタル計算機やサーボ系の各構成要素の技術進歩による面もあるが、基本的には、

- (1) 加速度波の忠実な再生技術の確立
- (2) 多次元加振機構の開発
- (3) 試験対象の影響補償の確立

といった技術課題を解決し、実用化したことが大きな要因であると考えられる。

また、初期のころの振動台の設置目的は、主に振動特性を試験するものであったが、最近はいよいよ原子力発電所やビル、ダムといった土木建築物などの重要施設に関する実証試験設備としての要求が高まっている。

したがって、今後は振動・解析技術の進歩とあいまって、

3次元6自由度振動台の設置も着実に増大し、多くの研究機関で高度化・多様化した耐震研究が活発に展開されるものと期待される。

参考文献

- 1) 浜野, 外: 油圧式2次元振動試験機, 油圧と空気圧, 11-2, 77 (昭55-3)
- 2) 松崎, 外: 電気油圧式振動試験機に関する研究, 機械学会論文集, 42-353, 146(昭51-1)(関連論文2報)
- 3) 平井: 地震シミュレータの加振制御, 精密工学会, 第124回講習会, 69(昭61-1)