

# 大型高性能振動台制御システム

## Large-Scale Earthquake Simulator Control System

世界有数の地震国である我が国においては、原子力発電所の耐震性は十分検討され高い安全性信頼性を確保している。しかし広く一般の理解を得るには、原子炉格納容器などの主要大形機器を実規模に近い状態で振動させ、耐震性を実証的に明示する必要がある。このような背景のもとに、現存する振動台の約10倍の能力をもち関東大地震を上回る地震を模擬できる世界最大の振動台を、香川県多度津町の財団法人原子力工学試験センターに完成した。

この振動台は、設計用基準地震動などを精度よく再現するため微小加振から最大加振まで正確に制御する必要があり、このため制御装置は大容量でかつ高精度、高応答性のアナログ制御装置とし、そのうえ計算機による学習制御などの最高技術を追加し、いっそうの性能向上を図っている。この振動台の完成は我が国の原子力利用にかかわる国民的合意の形成に大きく貢献するものである。

海原明久\* Akihisa Kaihara  
松木 勉\* Tsutomu Matsuki  
平井洋武\*\* Hiromu Hirai  
一柳 健\*\* Ken Ichiryû  
横田秀次郎\*\*\* Hidejirô Yokota

### 1 緒 言

原子力発電用機器などの安全性、信頼性に関する実証試験などを通じ、原子力利用にかかわる国民的合意の形成の増進と我が国における原子力技術の進歩発展に資するとともに、その成果の応用、普及などを図ることで、国民経済の健全な発展と国民生活の安定的向上に寄与することを目的として、昭和51年3月1日に財団法人原子力工学試験センターが設立された。電力業界、電機工業界、建設業界など関係民間業界が、通商産業省資源エネルギー庁の積極的な指導及び学識経験者の援助を得て推進したものであるが<sup>1)</sup>、日立製作所もこの計画に当初から主要メンバーの一員として参加した。ここで計画している各種実証試験の中で最も規模の大きなものは香川県多度津町に設置された大型高性能振動台を使っての原子力発電用機器などの耐震性に関する安全性、信頼性の実証試験である。図1に15m×15mの振動台本体の外観を示す。

この振動台の主要仕様を表1に示す。参考までに公表されている世界の主要振動台仕様を表2に示す。これらの仕様を比較すれば、積載重量、加振加速度、振幅、周波数範囲、加振力、同時加振方向などを総合的に判断して他に例を見ない記録的製品であることがわかる。

この装置の製作は関係各社がそれぞれ得意とする分野を担当したが、日立製作所はその心臓部ともいべき加振制御装置を一式まとめて担当したので、ここにその内容を報告する。従来の振動台加振制御は関数発生器とサーボ制御装置から構成されるアナログ回路主体のものであるが、最近設置された中小振動台装置では制御用デジタル計算機を使っての波形解析処理機能により飛躍的性能の向上を図っている。本装置は超大形機にもかかわらず、この面でも最新技術を導入し、成功を収めた。

### 2 大型高性能振動台システム

#### 2.1 大型高性能振動台の必要性

原子炉格納容器、一次冷却系設備、炉内構造物などの主要大形構造物に対し、地震を模擬しその各部の挙動を確認するためには、大積載能力を持ち、更に大地震を模擬できる振動

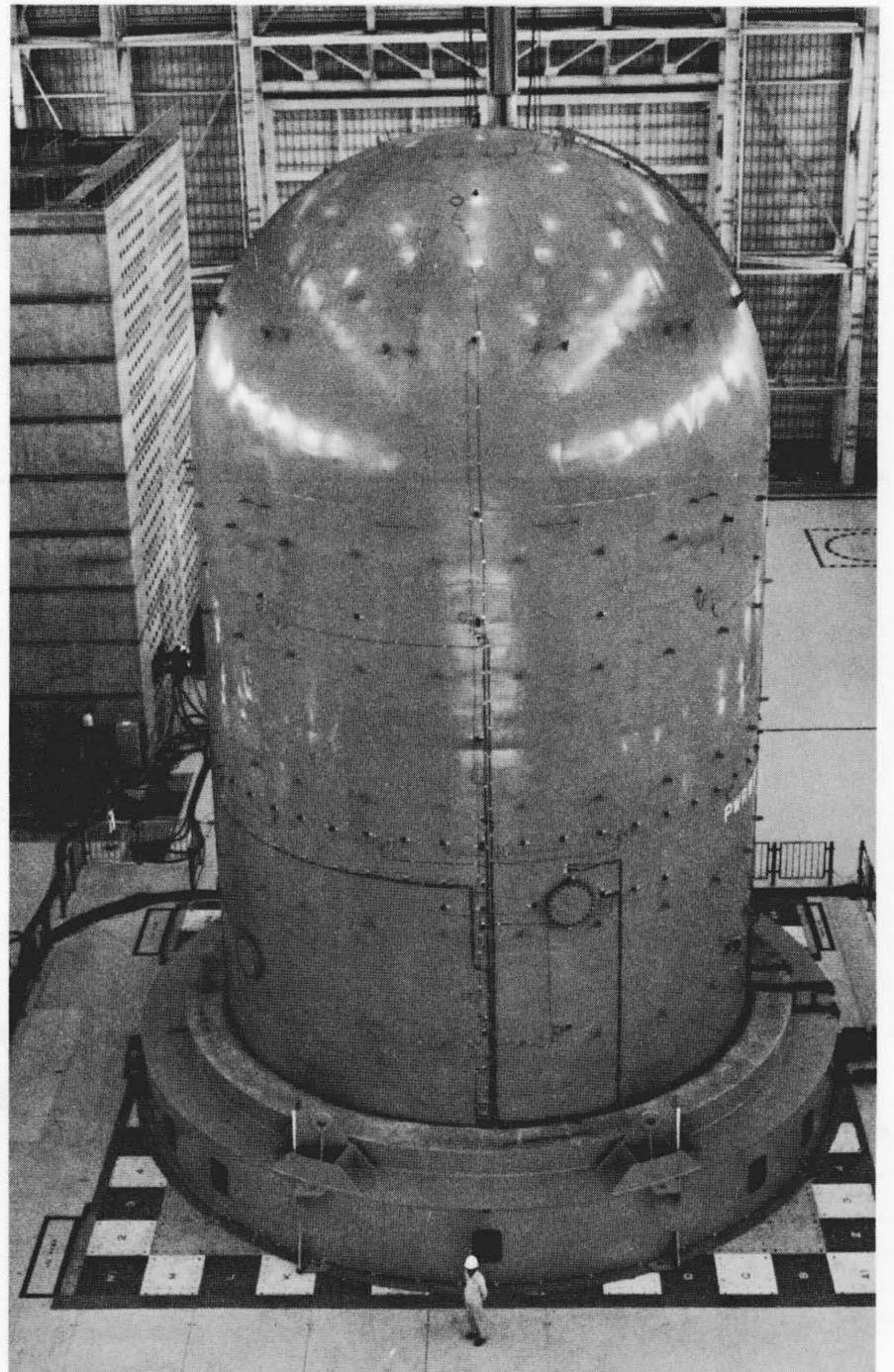


図1 大型高性能振動台外観(試験体積載時) 高さ約19m、重量約340tのPWR(加圧水型原子炉)原子炉格納容器試験体(尺度： $\frac{1}{3}$ )を積載したものであり最大1,000tまで積載可能である。

\* 日立製作所大みか工場 \*\* 日立製作所機械研究所 工学博士 \*\*\* 日立製作所原子力事業部

表1 大型高性能振動台の主な仕様 水平7軸、垂直12軸により同時加振するシステムである。

主要項目	仕様
テーブル寸法	15m×15m
最大積載重量	1,000t
最大ストローク	水平：±200mm
	垂直：±100mm
最大加速度	水平：2.72G(500t慣性負荷積載時)
	1.84G(1,000t " )
	垂直：1.36G(500t慣性負荷積載時)
0.92G(1,000t " )	
最大速度	水平：75cm/s
	垂直：37.5cm/s
周波数範囲	0～30Hz
加振方向	水平-垂直2軸同時

表2 世界の主要振動台 公表されている世界の主要振動台の仕様一覧表である。

設置機関	振動台 (m)	積載重量 (t)	加速度 (G)	振幅 (mm)	周波数範囲 (Hz)	加振力 (t×台)	加振方向
国立防災科学技術センター	12×12	X: 500 Z: 200	X: 0.55 Z: 1.0	±30	DC~50	90×4	XまたはZ (切換え)
東京大学生産技術研究所	10×2	170	0.4	±100	1~5	80×1	X
電力中央研究所	6.5×6	120	1.0	±50	0.1~20	30×4	X
三菱重工業高砂研究所	6×6	80	0.6	±50	DC~50	X: 32×2 Y: 32×2	XY同時
鹿島建設技術研究所	4×4 (アルミ製)	20	X: 1.2 Z: 2.0	X: ±150 Z: ±75	0~30	X: 10×4 Z: 20×4	XZ同時
日本国有鉄道技術研究所	10×2	100	0.4	±30	DC~20	40×1	X
カリフォルニア大 (USA)	6.1×6.1 (P.Sコンクリート製)	54.5	X: 1.0 Z: 0.67	X: ±127 Z: ±50	0.01~40	X: 22.5×3 Z: 11.3×4	XZ同時
U.S.Army (USA)	3.7×3.7 (アルミ製)	5.4	X: 2.0 Z: 4.0	X: ±100 Z: ±100	0.01~200	X: 3.4×6 Z: 4×9	XZ同時

台が必要である。また、直下型地震を模擬するためには、垂直振動と水平振動を同時に実現することが必要である。

### 2.2 制御システムの構成

本振動台の加振制御は、電気-油圧サーボ制御方式とし、油圧力でテーブルを加振する。油圧源は油圧ポンプでアキュムレータに蓄圧されたものが、水平7軸、垂直12軸の加振機に加えられ、加振機のピストンを往復動作させる。加振力は、電気信号により駆動される大形サーボ弁によって制御される。

中央操作盤は、運転操作を集中管理するもので、システム内のすべての制御装置に接続されており、一連の制御指令を与えると同時に、システム全体の監視を行なう。制御システム全体構成を図2に、中央操作盤の外観を図3に示す。

サーボ制御盤は大形サーボ弁を駆動するアナログ制御回路であり、高性能演算増幅器により、大形サーボ弁、加振機及

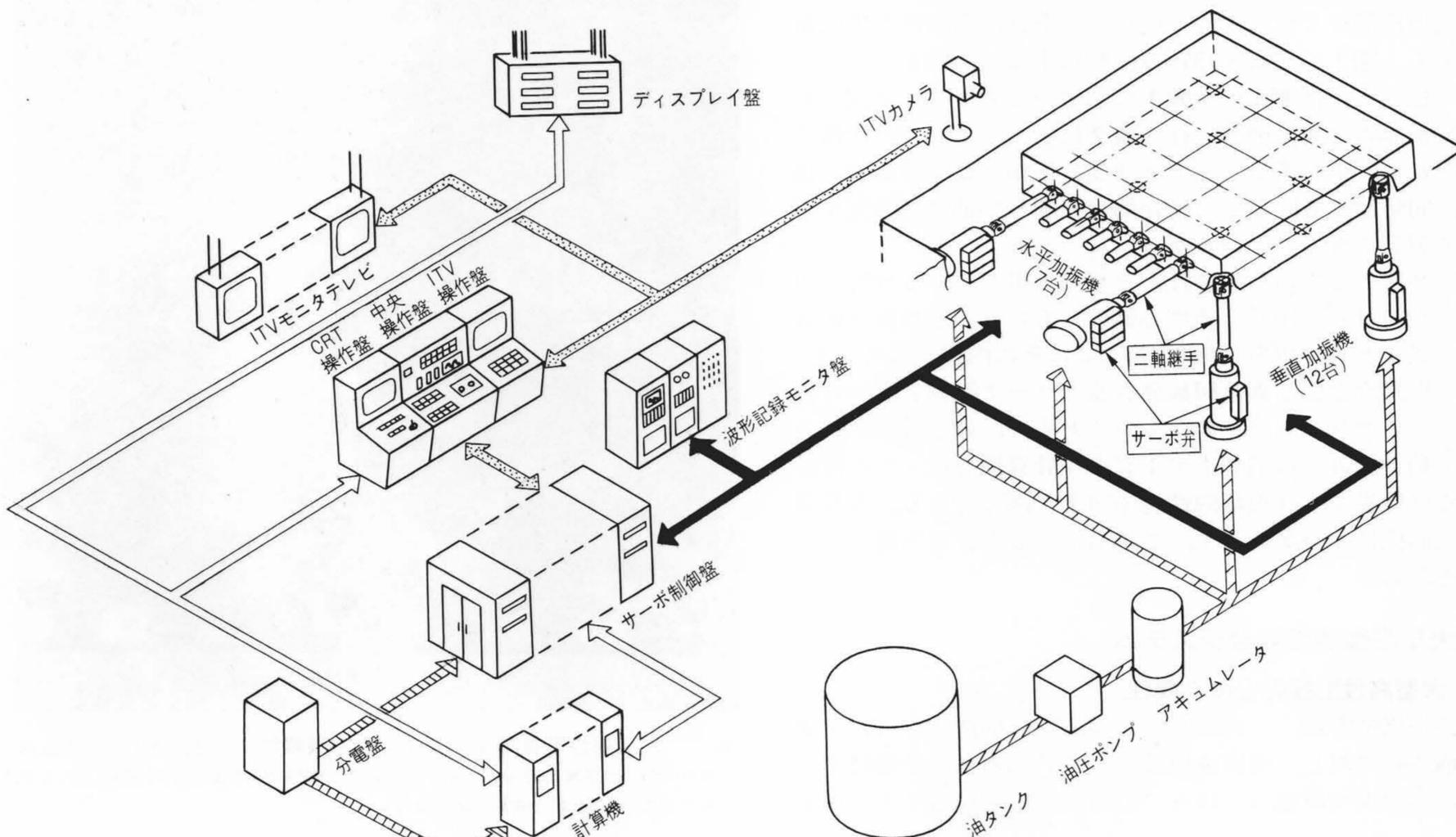


図2 制御システムの全体構成 アキュムレータから加振機に供給される油圧を、サーボ制御盤から電流信号によって制御し二軸継手を介してテーブルの加振を行なう。



図3 中央制御室 中央操作盤, CRT操作盤, ITV操作盤などにより, 運転の集中管理を行なう。

びテーブルにおける各種の状態量をフィードバックし, 精度よくサーボ制御を行なうものである。

計算機は, サーボ制御装置と直結しており, 操作盤上のCRT(Cathode Ray Tube)から制御用数式モデルの同定, 制御定数の最適化演算とリモート設定を行なう。次にアナログ制御系の伝達特性を求め, 振動台が目標加振波形をより正確に再現するように, 入力補償演算を行ない, サーボ制御盤に加振入力信号を与える。

このように制御システムは, 高応答性のアナログ制御とインテリジェントなデジタル制御をダイナミックに結合したハイブリッド構成としている。なお, 加振機及びテーブルの各部の動的状態信号は, 中央制御室に設けた波形記録モニターで監視, 記録ができる。一方, ITV操作盤により現場の主要各部に設置したカメラをリモート操作して, 運転状況を中央操作室で常時監視できる。ディスプレイ盤は, 試験内容及び運転状態を表示し運転員のほか計測員及び立会者に知らせる。

### 3 サーボ制御システム

#### 3.1 大規模サーボ制御

本装置は, 機械装置側用意の総数33台(3台/水平加振機, 1台/垂直加振機)の大形サーボ弁を同時制御するもので, 大形サーボ弁は定格流量 $3,300 \text{ l/min}$ (差圧 $70 \text{ kg/cm}^2$ )を持つ大流量制御形サーボ弁である。各大形サーボ弁は, サーボ制御部の高応答電力増幅器から出力する定格 $\pm 13 \text{ A}$ の電流信号によって駆動される。

(1) サーボ制御部は変位制御系であるが, 計算機により加速度での逆伝達関数を用いて機械系の応答遅れを補償して, 目標加速度波形を求め, それを変位波形に変換したものをサーボ制御部に入力することで, 機械系の能力を最大限に引き出して目標加速度波形どおりに振動台を動かすものである。このため高性能演算増幅器を使用している。そのシステム構成を図4に示す。

(2) 正弦波などの基本的波形は計算機を使用しなくても加振できる。入力補償部の回路切換によって関数発生器の出力波形信号を変位指令信号あるいは加速度指令信号のいずれかの信号として使用し, ユーザーの使用目的に任意に対応する。この場合入力補償部は機械系の応答遅れを補償し, より高い周波数まで振動台を制御して振動波形の再現性を向上している。

(3) サーボ制御部は, 図5に示すように大形サーボ弁の応答性向上のためサーボ弁内の1段目, 2段目, 3段目のスプール信号をフィードバックするとともに, 各種状態量を加振レベルに応じレンジ切換可能な変位, 加速度, 速度, 差圧増幅器を介してフィードバックし, サーボ制御系の周波数特性と安定性の向上を図っている。また, サーボ演算部などの主要部のゲイン(総点数:108点)は計算機によりリモート設定する方式とし, 学習制御により試験体に応じた最適化制御定数に設定する。

#### 3.2 高性能, 高信頼性

大型高性能振動台は,  $0 \sim 30 \text{ Hz}$ までの加振に対し性能の確保が必要であり, 制御装置としては各種の補償回路を挿入している。一方, 制御装置からのノイズはそのままテーブルの

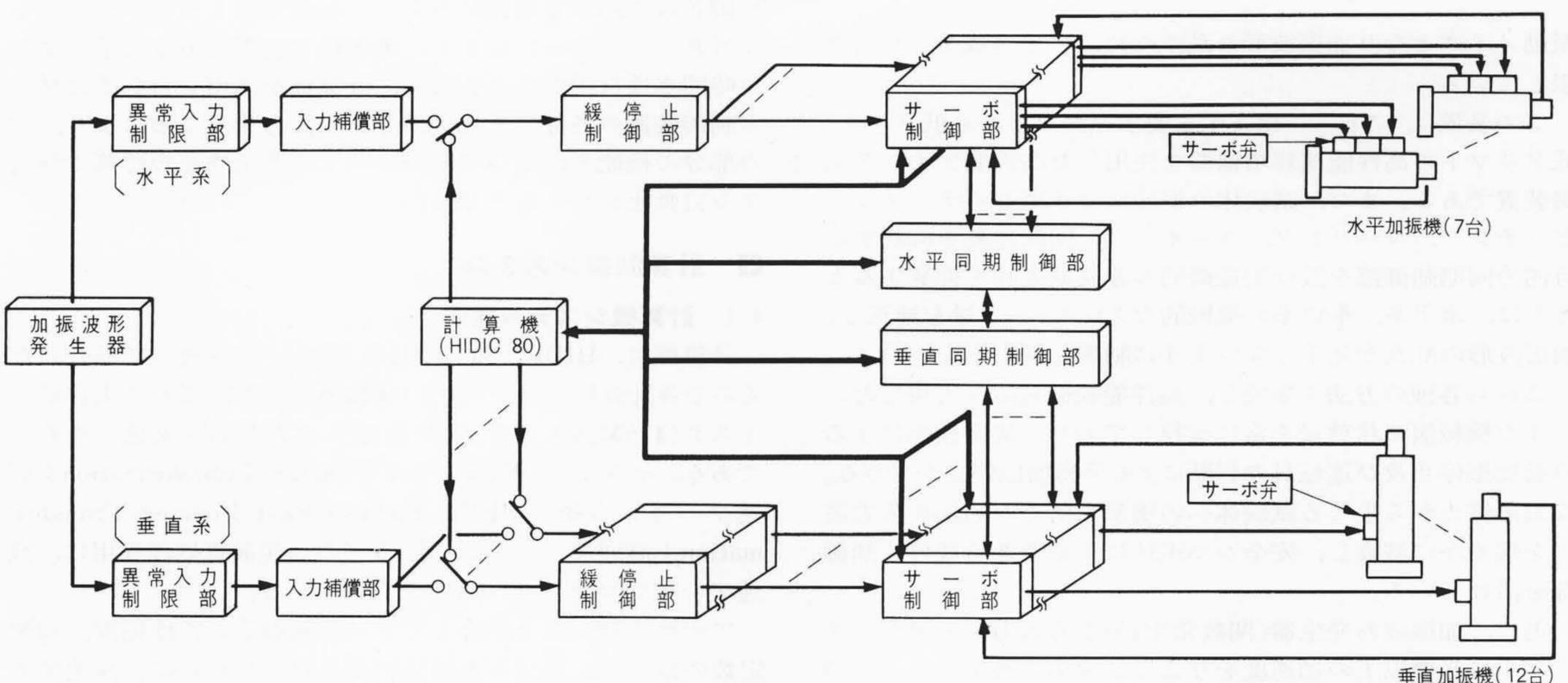


図4 サーボシステムの構成 加振波形発生器, 又は計算機からの指令を, 各サーボ制御部へ与え更に加振機間の同期制御を行ない高い周波数まで良好な制御を行なう。

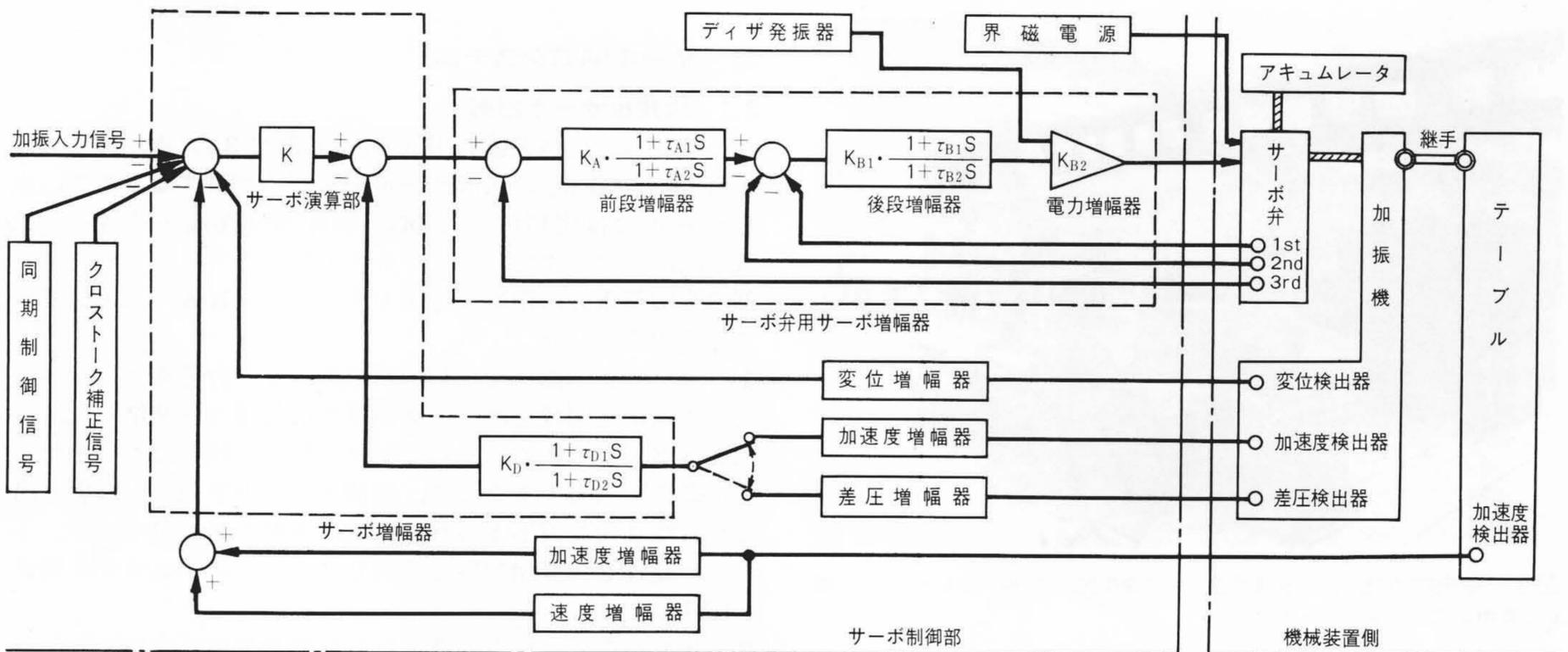


図5 サーボ制御部 加振機ごとにサーボ制御系を構成し、高性能演算増幅器などにより低ノイズ、低ドリフトで高い周波数まで安定に制御が可能である。



図6 計算制御装置 制御用計算機HIDIC 80を3台とアレイプロセッサを結合した高速演算システムである。

振動ノイズとなり加振波形を乱すため、ノイズ成分は極力制限している。

この装置は、これらの相反する要求を満たすため低ノイズ、低ドリフトの高性能演算増幅器を使用した高性能アナログ制御装置である。また、試験体の慣性により生じるテーブルのピッチング、ローリング、ヨーイングの回転運動を抑制する目的で同期制御部を設け加振機間の非同期運動を抑制するとともに、水平系、垂直系の機械的なクロストーク量を補正し、加振波形の乱れが発生しないように制御している。

これら各種の方法を駆使し、高性能制御装置を実現した。また機械側の状態量を常に監視しており、異常検出による自動加振停止及び運転員の判断による手動加振停止ができる。なお急停止から生じる試験体への衝撃を防ぐため加振入力波形を緩やかに減衰し、安全かつ迅速に停止できる緩停止制御部を設けている。

更に、加振波形発生器(関数発生器)から入力する場合、テーブルに必要な以上の加速度を与えて試験体を破損することのないよう、試験体に見合った制限値をあらかじめ設定し、加振波形の加速度成分を事前に制限するための異常入力制限部

を設けている。計算機から出力する場合は、計算機で制限動作を行ない出力する。

このように試験体に異常な衝撃が加わらないよう、多面的に検討した保護機能を設け、高い信頼性を確保している。

### 3.3 遠隔運転操作

中央操作盤からの遠隔集中運転操作は、シーケンスコントローラにより起動—加振—停止の一連の制御を行なうもので、盤面の照光式押ボタンスイッチの点灯により運転手順をガイドするとともに操作ステップごとに機器動作が完全に終了した旨を、順次運転員に知らせつつ運転を進めてゆくガイダンス操作方式としている。運転員の操作には、フレキシビリティをもたせつつもシステムが不安全側に動作しないよう、完全なインターロックを設けている。

### 3.4 サーボ制御装置の自動点検

耐震信頼性実証試験は、装置の規模からいっても大量の電力と人手を必要とするため、運転にあたっては事前にサーボ制御装置の点検を確実にしない、起動後のトラブルを防止しなければならない。しかし、大規模な装置であり人手による短時間点検は困難であるため、計算機を活用し自動的にサーボ制御装置の各部アナログ信号を入出力することにより、その部分の機能を確認して制御ループの健全性を短時間で判定する自動化システムとした。

## 4 計算制御システム

### 4.1 計算機システム構成

計算機は、HIDIC 80(3台)をグローバルメモリで結合したもので各計算機ともコアメモリ64k語を持ち、これに大容量ディスク(4.8M語×6台)及び各種入出力装置を装備したものである。そのほかにFFT(Fast Fourier Transformation: 高速フーリエ変換)、IFFT(Inverse Fast Fourier Transformation: 高逆速フーリエ変換)などの高速演算処理専用、高速アレイプロセッサ(1台)を設けている。

アナログ制御系と結合してサーボ制御系の特性把握、制御定数の最適化、及び入力補償制御を行なうために、高速アナログ入力装置(64点)及び高速アナログ出力装置(15点)を持っている。計算制御装置全体の外観を図6に示す。

計算制御システムは大きく分けて、

- (1) 加振波形発生システム
- (2) 制御系の最適化制御システム
- (3) 入力補償制御システム
- (4) 加振波形解析システム

の4つのサブシステムから構成される。

(1)は、各種波形を発生したり磁気テープ装置などの入力装置から波形を入力し、加振目標波形を設定する。

(2)、(3)は、サーボ制御系の適応制御、入力波形の修正及び学習制御処理を行なう。

(4)は、加振制御に関するデータ解析処理を行なう。

#### 4.2 制御系の最適化制御

本振動台は加振機が水平7台、垂直12台という大規模システムであり、従来の小形振動台のように手動でゲイン設定を行なうことは大変なことである。

今回の基本的手法は、試加振の応答データにより伝達特性を有理関数で近似し、制御パラメータを同定する。次に高周波域まで安定で、かつ周波数特性が向上するよう制御系のゲインを最適化する。

この手順を実施するには、まず振動台を水平1軸、垂直2軸としたいわゆる2軸1-2点モデルで近似した数式モデルの同定が必要である。同定法としては、シンプレックス法を用いている。

以上の同定で得られた伝達特性を用いて、最適ゲインをデータテーブルまたは最適化演算により決定する。最適化演算は、評価関数、ペナルティ関数を用いる修正シンプレックス法によって行っている。理論的には同時に多くのゲインを自動的に決定できるが、実用的には2~3点ずつ重要な所から定めている。このフローチャートを図7に示す。

#### 4.3 入力補償制御

制御系ゲインの最適化の次のステップは、そのゲインに対し、試加振により求めた伝達特性より逆伝達特性を作り、これで入力補償を行ない、(a)波形補正、(b)ピッチング運動抑止などを行ない、高い周波数まで正確に振動台の加振制御を行なう。

この入力補償を繰返し行ない特性改善を行なう。このアルゴリズムは、 $S(\omega)$ :目標、 $Y_i(\omega)$ : $i$ 番目の出力、 $X_i$ : $i$ 番目のアナログサーボ制御系修正入力とするとき、

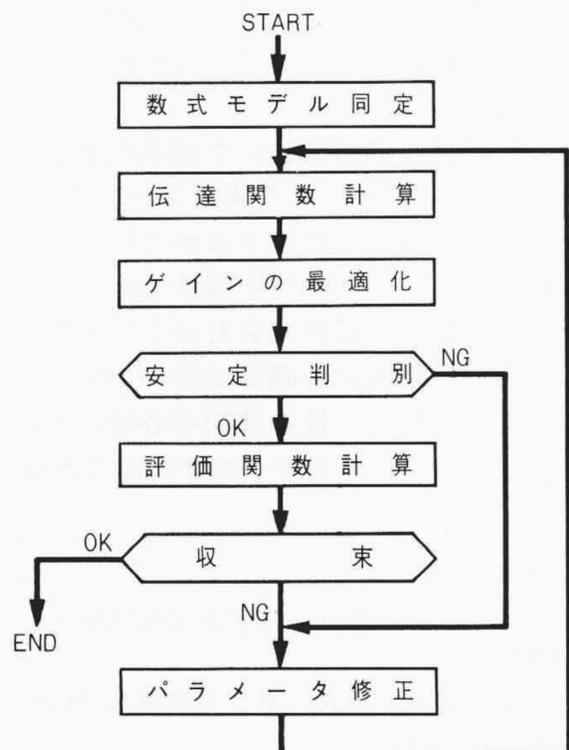


図7 最適化ルーチン シンプレックス法により数式モデルのパラメータを同定し、制御系の最適ゲインを決定することにより高応答制御を行なう。

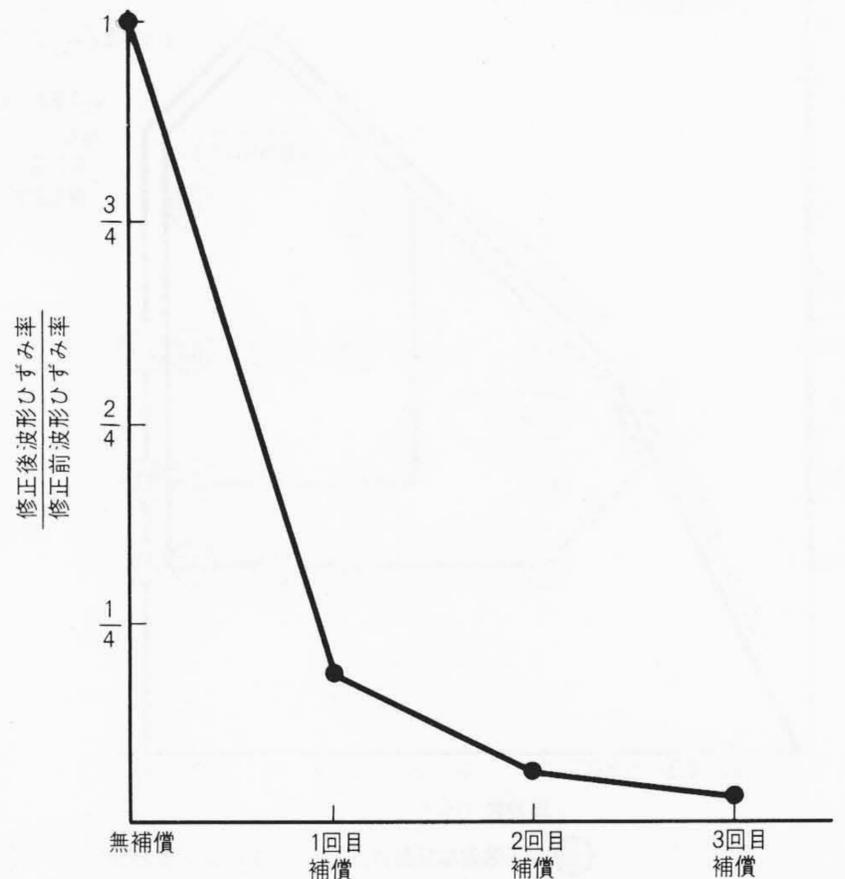


図8 加速度波形ひずみ率の改善 学習制御により加速度波形ひずみ率の改善が顕著に行なわれる。

$$X_{i+1}(\omega) = X_i(\omega) + G^{-1}(\omega)(S(\omega) - Y_i(\omega))$$

となる。すなわち、目標波形と出力波形を比較し、これにサーボ系の逆伝達関数 $G^{-1}(\omega)$ を掛け、これを修正分として前の入力波形に加え、新しい $i+1$ 番目の入力波形とする学習制御である。

2軸1-2点モデルでは、アナログサーボ制御系入力と目標出力信号を水平、垂直、ピッチングの3次元ベクトルと考え、伝達関数も $3 \times 3$ のマトリックスとしている。

この演算補償の効果は顕著であり、数回の繰返しによって収束する。正弦波加速度波形のひずみ率の改善効果の一例を図8に示す。機械装置は種々の非線形要素をもつため加速度波形がひずむが、入力補償でこれを実用上十分のレベルまで低減することができる。

ピッチングについても入力補償を数回繰返すことにより漸次補正され、実用上十分許容できるレベルまで低減させる。

### 5 現地総合調整試験結果

現地据付後、各種負荷条件にて静特性、動特性、加速度波形ひずみ試験、及び限界性能試験などを行なったが、所定の計画仕様を十分満足する性能値を得たので、その一部を報告する。

#### 5.1 正弦波加速度波形ひずみ試験

計算機を使った入力補償により中小出力レベルの加速度波形ひずみを確認したが、図9に示すように良好な結果を得た<sup>2)</sup>。

#### 5.2 ランダム波試験

ランダム波加振において計算機による入力補償繰返し回数2~3回で波形の一致度が良好な結果が得られた。その例を図10に示す。地震波も同様に良好な結果が得られている。

#### 5.3 緩停止制御動作

垂直系の緩停止時の変位指令信号の一例を図11に示す。各加振機とともにこの信号に同期してなめらかに停止している。この変位指令波形の減衰特性は二次遅れとし、減衰時の加速度成分を極力小さくしている。

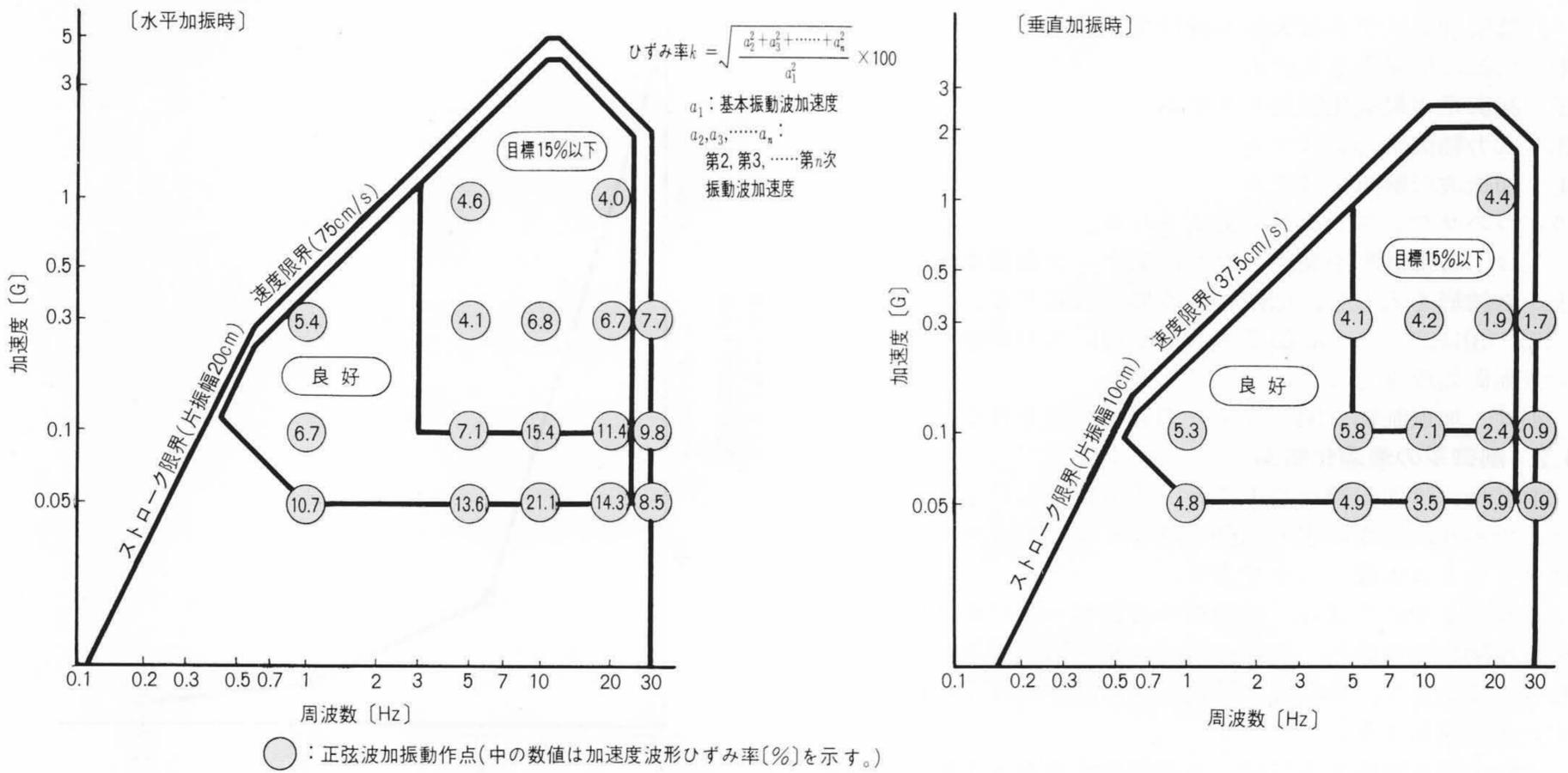
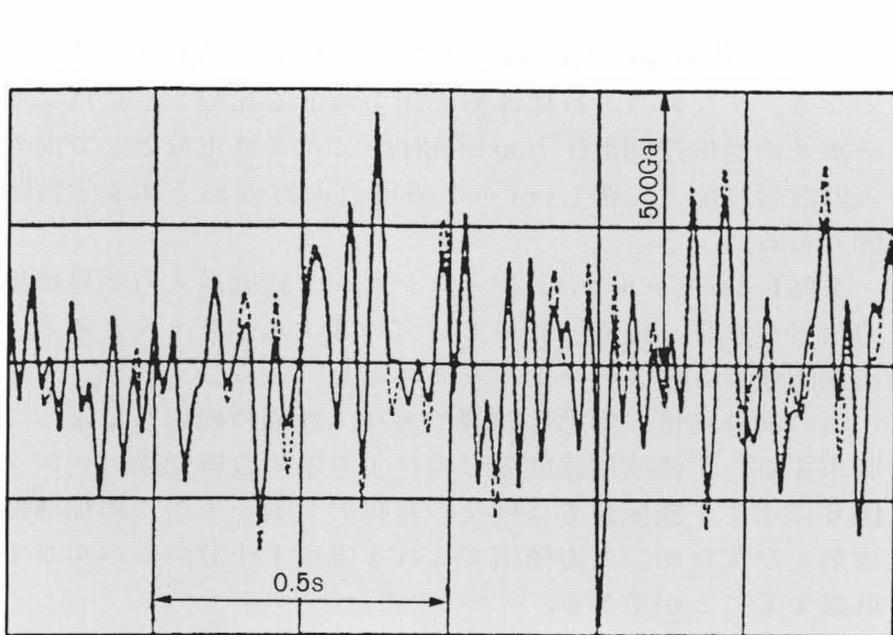
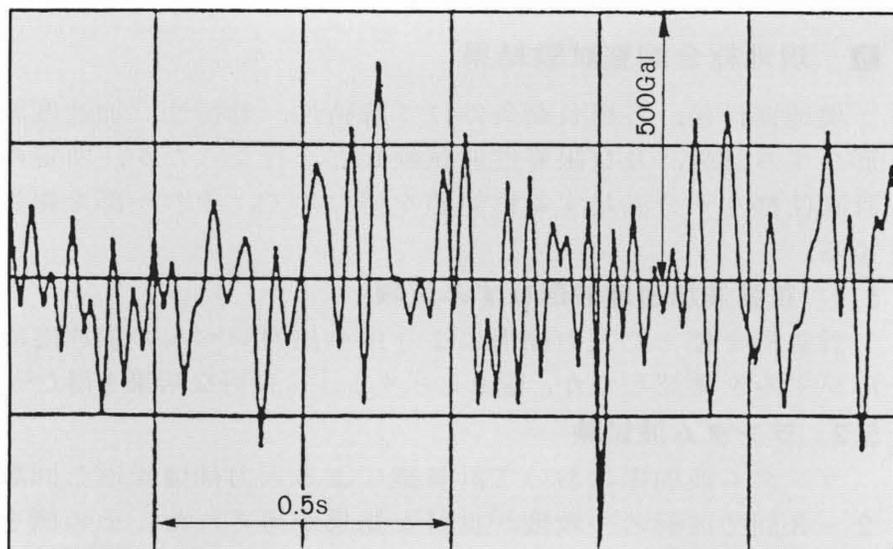


図9 加速度波形ひずみ 周波数, 加速度の組合わせをいろいろ変えて正弦波加速度波形ひずみ率を測定し, 計画目標値を十分満足することを確認した。



1回目波形補償



2回目波形補償

——: 目標加速度波形      - - - - : テーブル加速度実測波形

図10 ランダム波加振波形 慣性負荷(340t)を積載し, ランダム波形を計算機から入力した時のテーブル水平加速度波形であり, 波形補償を行なうと水平, 垂直ともに目標波形を高精度で再現可能である。

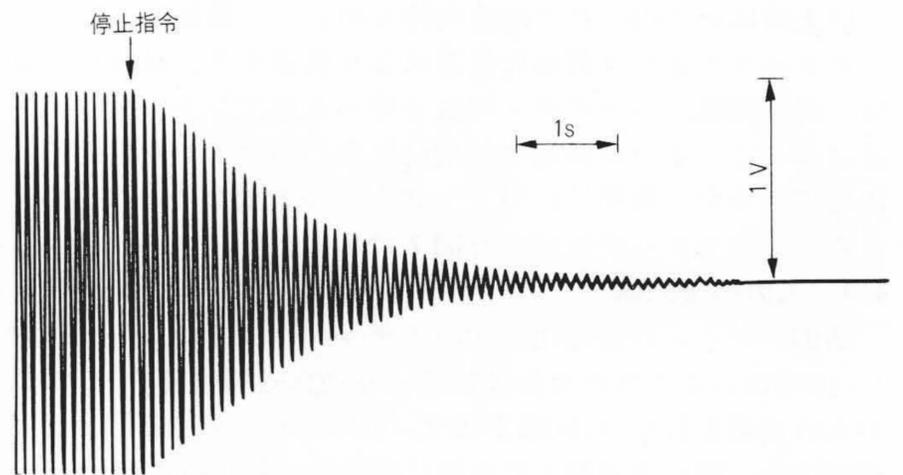


図11 緩停止制御部出力 加振停止要求により, 緩停止制御部が動作しサーボ制御部への変位指令が緩やかに減衰し振動台を安全に停止できる。

## 6 結 言

以上述べたように, 大型高性能振動台加振制御装置の製作を通じて大規模サーボ制御技術を確立した。この技術はダイナミック制御を必要とする分野に広く適用できるものであり, 特に大規模システムに効果的である。

最後に本装置の実現に積極的に御指導頂いた通商産業省資源エネルギー庁の各位, 振動台分科会ほかの関連委員会のメンバー各位, 主契約者として基本設計と全体まとめを担当された三菱重工業株式会社の各位, 各装置を分担製作された東京芝浦電気株式会社, 石川島播磨重工業株式会社及び富士電機製造株式会社関連部門の各位, 現地総合調整試験に御協力いただいた四電エンジニアリング株式会社の技術者各位, その他関係各位の御協力に対し深く感謝の意を表わす次第である。

## 参考文献

- 1) 財団法人原子力工学試験センター作成, 原子力工学試験センターの概要(昭和57年10月)
- 2) 財団法人原子力工学試験センター作成, 原子力発電施設信頼性実証試験の現状(昭和57年10月)