

大規模破壊実験における計測・処理手法の高度化

藤田 聡¹, 古屋 治², 新津 靖³, 御子柴 正⁴, 相川 慎一郎⁵, 藤村 俊⁵

¹東京電機大学工学部機械工学科 (〒101-8456 東京都千代田区神田錦町 2-2)

²東京都立工業高等専門学校機械工学科 (〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40)

³東京電機大学工学部機械工学科 (〒101-8456 東京都千代田区神田錦町 2-2)

⁴科学技術庁防災科学技術研究所防災総合研究部耐震工学研究室 (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)

⁵東京電機大学大学院工学研究科機械システム工学専攻 (〒101-8456 東京都千代田区神田錦町 2-2)

The world largest shake table is now being constructed in Japan to clarify fracturing or breakdown process of structures. However, it is difficult to measure these processes by using conventional measurement methods, because the measurement of enormously large dynamic displacement will be the key to a solution. In this study, the R&D will be carried out for the measurement method of fracturing or breakdown process by applying a motion capture technique, which has been mainly studied for modeling of human motions. This paper describes the outline of measurement method for structural fracturing or breakdown process in large three-dimensional shake table tests by applying a motion capture technique.

Key Words: Largest shake table, Fracturing process, 3-D measurement method, Non contact measurement

1. はじめに

近年の兵庫県南部地震をはじめとした都市部での強地震の経験より、そのような強地震動を想定した産業施設や各種構造物の耐震性向上を目的とした耐震基準の改定が検討されてきている。しかしながら、このような強地震時の構造物の塑性領域での挙動や崩壊過程に関しては、十分な知見が得られておらず、今後の耐震設計を考える上でこれらの解明が重要となっている。特に建物の倒壊／崩壊現象を解明するためには従来行われているような縮小モデルを用いた振動実験でなく実規模モデルを用いた振動実験による検討が有効だと考えられる。1995年より科学技術庁防災科学技術研究所を中心として兵庫県三木市に兵庫県南部地震をはじめとした強地震動を再現でき、構造物の崩壊過程を解明、実証できる大型三次元振動実験施設^{1)~5)}の建設が検討され、現在、その建設が進められている。ここでは、実大規模の橋梁、建築物、タンク、電力施設、地盤・基礎・地中構造物などを震動台に搭載し振動実験を行うことで各種構造物の崩壊過程を3次元的に検証することを目的としている。しかしながら、このような実大規模のモデルを用いた振動破壊実験において、その地震時崩壊過程を的確かつ3次元的に捉えるためにはこれまで一般的に用いられてきた接触型／非接触型変位センサーによる測定手法では困難であり、これに変わる新たな計測手法を確立する必要がある。

本研究では、近年、人体などの動的計測の分野で注目されているモーションキャプチャー技術⁶⁾、⁷⁾を応用した三次元計測手法を検討し、大型構造物崩壊現象計測に適した三次元位置計測技術の研究開発を行う。また、振動台加振実験においては、構造物の崩壊モードを評価する上で、地震による総エネルギー入力を明確にすることが重要である

ことが知られているが、これを直接精度良く計測する手法はまだ確立されていない。そこで、本研究では、振動実験時の入力エネルギー量の計測手法を検討し、構造物の崩壊モードを精度良く予測し、耐震設計手法の高度化を計ることも併せて検討する。

2. 大型三次元震動台

図1は、建設予定の大型三次元震動台である。また、表1は、その性能に関して示したものである。本震動台は、その性能設計において、三次元加振、実大規模試験モデル、破壊実験といったキーワードを含む内容となっている。振動台加振テーブル寸法は、20m×15m、加振力は1200kgf (1.18N)であり、加振実験時に想定している実規

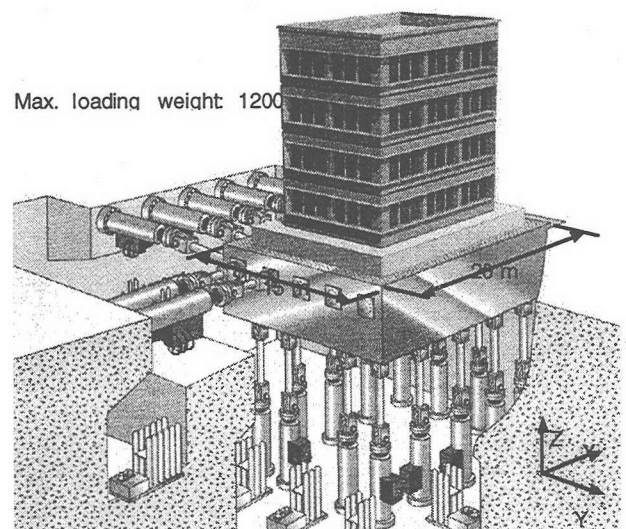


図1 大型三次元震動台

表1 大型三次元震動台の性能

項目	仕様		
最大搭載重量	1200 tonf		
搭載面積	20m×15m		
駆動方式	アキュムレータ蓄圧電気油圧制御		
加振方向	水平X	水平Y	鉛直Z
最大加速度 (最大重量搭載時)	0.9G 以上	0.9G 以上	1.5G 以上
最大速度	130cm/s	200cm/s	70cm/s
最大変位	±50cm	±100cm	±50cm
許容モーメント	X軸周り	Y軸周り	Z軸周り
	15,000tonf・m 以上 (Z軸1G加振時)	15,000tonf・m 以上 (Z軸1G加振時)	4,000tonf・m 以上 (水平1軸最大加振時)

表2 大型振動台の性能比較

機関 (場所)	実大三次元震動破壊実験施設 (兵庫県三木市)	(財)原子力発電技術機構 多度津工学試験所 (香川県多度津町)	科学技術庁 防災科学技術研究所 (茨城県つくば市)	建設省 土木研究所 (茨城県つくば市)
最大搭載重量 (tonf)	1200	1000	500	300 (定格100)
搭載面積 (m×m)	20×15	15×15	15×14.5	8×8
加振方向	三次元	二次元	一次元	三次元
最大加速度 (G)	水平0.9 鉛直1.5	水平1.84 鉛直0.92	水平0.5	水平2.0 鉛直1.0
最大速度 (cm/s)	水平200 鉛直70	水平75.0 鉛直37.5	水平75	水平200 鉛直100
最大変位 (cm)	水平100 鉛直50	水平20 鉛直10	水平22	水平60 鉛直30
完成年		1982年	1970年完成 1988年更新	1997年

模モデル、例えば、図1に示すようなSRC造4層建物モデル等の破壊実験を十分行える性能を有している。他の実験対象としては、鉄筋コンクリート橋梁モデルによる実験、木造住宅の安全性を確保するための埋め立て地盤上の木造住宅モデルの実験、そして産業施設の安全性を向上させるための液体貯槽モデルによる実験などが予定されている。なお、先に示した4層建物モデルは、5層建物とあわせて日本のSRC構造物の約80%をしめるものであり、先の阪神淡路大震災において多くの被害を受けた建物でもある。このような一般的な実大構造物を実際に加振することにより、その動的破壊過程の詳細なデータが得られるばかりでなく、制振や免震といった現在実用化が進められている振動低減装置の実用時の評価や、新たなる装置・機構の開発に極めて貴重な知見が得られるものと考えられる。表2は、他の振動台との性能を比較したものであるが、現在、建設が進められている振動台が実規模モデルを用いた破壊実験に関して有効な性能を有していることが確認できると思われる。

3. 計測手法

(1) 現状の三次元計測手法

人体のような複雑な形状や建築構造物のような大きな物体の形状計測、あるいは動的対象物の位

置・姿勢計測には、これまでに用いられていた接触型計測では対応が困難である。また、医学や工学といった分野において、物体の3次元形状・位置・姿勢をコンピュータ上で定量的に計測・解析し、独立した物体として扱えるようなシステムが望まれている。このような現状から、近年、モアレ法を用いた凹凸計測に端を発する非接触型三次元計測が、様々な分野で研究されてきている。代表的な三次元計測法を表3にまとめる^{8)~10)}。ここで、能動的手法とは三次元情報を計測するために光波、電波といったなんらかの物理的意味を持つエネルギーを計測対象物に照射する手法である。一方、受動的方法とは計測に関して先のようなエ

表3 代表的な3次元計測手法

能動的 方法	光レーダー法	時間差
		位相差
	光投影法	スポット光
		スリット光
面パターン光(傾斜光/符号化パターン/カラー)		
モアレ法		
受動的 方法	単眼視	焦点調節
	両眼視	両眼ステレオ
	多眼視	多眼ステレオ 運動ステレオ

ネルギーを計測対象物に対して利用しない手法である。いづれの手法においても鋭意研究がなされているが、これらの非接触型3次元計測の主な用途は、形状計測と位置計測に大別できると考えられる。3次元形状計測は、複雑な形状や大きな対象物の形状を正確に把握できるよう研究開発が盛んに行われている^{11)~18)}。この技術は、人体の骨格構造や表面形態の計測、建築構造物などの形状寸法計測、ロボットによる工業部品の認識などに応用されている。特に、人体を測定対象とする医療、スポーツ工学、服飾等の分野で盛んである。また、3次元位置計測に関しては、基本的に動的なものの位置・姿勢を正確かつリアルタイムに計測することを目的とした研究がなされている^{19)~27)}。この技術は、車のナビゲーションシステム、格闘系ゲーム、医療福祉機器、視覚センサー等に 응용されており、特に、3次元形状計測同様、人体の挙動を計測対象とした分野が盛んである。

(2) 3次元計測手法の概要

前述のような様々な計測手法が研究開発、あるいは実用化されているなか、本研究では、3次元計測を行うにあたり以下の条件を満たす手法を検討した。

- ・実規模構造物等の大きな計測対象の3次元計測
- ・破壊・崩壊現象までを計測できる非接触型3次元計測
- ・破壊・崩壊現象を解明し得る測定精度

これらの条件を満たす計測手法として、本研究では、ステレオ法を適用した3次元計測により大型3次元振動実験時の建物の崩壊現象を計測することを考えている。

図2は、現在検討を行っている計測手法の構想を表したものである。図が示すように、計測対象

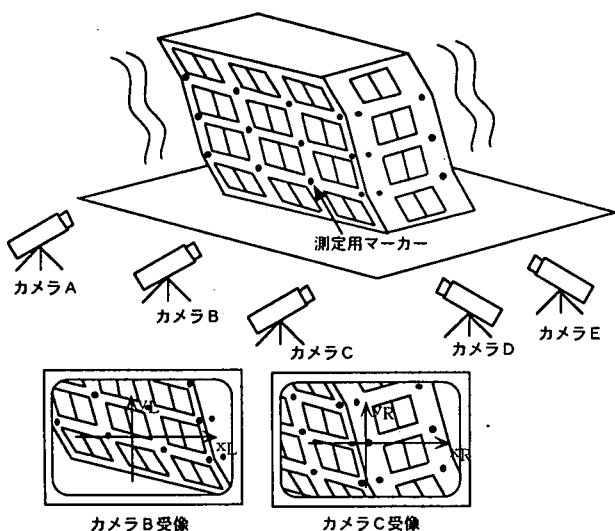


図2 3次元計測手法の構想

物に複数のマーカーを設置し、それを複数台のCCDカメラで計測する。そのカメラからの入力画像をコンピュータで処理し、マーカーの三次元座標位置を特定する。基本的に、計測対象に三点以上のマーカーを位置姿勢が既知の2台のカメラで同時に計測し、三角測量の原理を用いれば三次元位置姿勢を計算することは可能である。簡単な流れを以下に示す。

- 1) 各カメラ画像から計測対象に設置した複数のマーカーを二次元画像処理で抽出し、それぞれのカメラ画像上での二次元座標値を求める。
- 2) 複数のマーカーの幾何配置や時間的位置追跡情報等からマーカーを識別する。
- 3) 2台のカメラで捕らえた同じマーカーに対して、それぞれのカメラ画像上での二次元座標から、三角測量の原理を用いてマーカーの三次元座標位置を計算する。
- 4) 計算された三点以上のマーカーの三次元座標位置から計測対象の位置姿勢(移動量, 回転角度)を計算する。

なお、三次元座標位置は、図3のカメラ配置の場合、次式の変換で求まる。

$$x = d_c \cdot x_L / (x_L - x_R)$$

$$y = d_c \cdot y_L / (x_L - x_R)$$

$$z = -d_c \cdot d_f / (x_L - x_R)$$

ここで、

(x, y, z) : 三次元座標

(x_L, y_L) : 左カメラ画像上の二次元座標

(x_R, y_R) : 右カメラ画像上の二次元座標

d_f : カメラの焦点距離

d_c : カメラの焦点間距離

上式は、カメラが空間座標軸と平行に設置された特殊な場合であり、実際には、このような理想的状態で設置することは困難である。よって、実際の計測においては、試験体上のマーカーをカメラで測定し、カメラ校正を行う。以下に実験時の

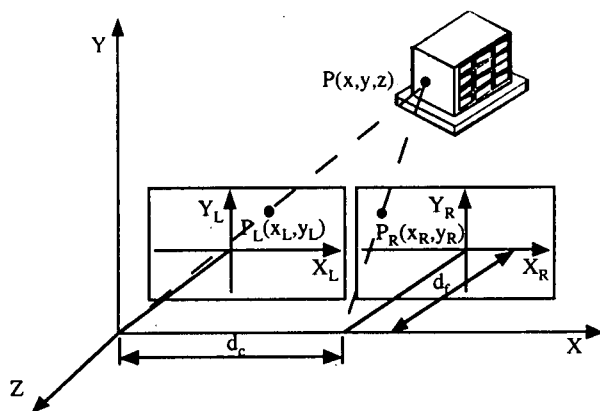


図3 2台のカメラによる特徴点の三次元座標計算

計測対象の挙動を推定する基本的な流れを示す。

- 1) 計測対象に絶対座標が既知のマーカを複数設置し、それを2台のカメラで測定して測定カメラの視点と注視点を求める。ただし、ここでは、カメラの視野角は既知、カメラは視線方向に回転しない、魚眼効果を無視することとする。
- 2) 実験時のカメラ画像上のマーカの2次元座標を先に求めたカメラの視点と注視点から、座標変換により3次元絶対座標に変換する。
- 3) 各マーカの時系列位置データより、実験時の測定対象物の振動状態を計算する。

また、計測システムとしては、カメラ間距離が長くなることや高速度カメラを使用することなどから、それぞれのカメラにデータ収録用コンピュータを割り当てる図4に示すような分散処理系を計画している。このため、複数のコンピュータを使用することとなり、計測時の同期を制御することが重要となるが、実験時では、各カメラで計測されたマーカの位置データをそれぞれのデータ収録用コンピュータで蓄積し、実験終了後にローカルネットワークで組んだメインコンピュータに転送し、3次元座標の計算を行うことを計画している。

測定精度に関しては、計測に用いる機器およびソフトに依存するが、最終的には mm オーダーを目標としている。現在計測用ソフトの開発に用いている高感度 CCD カメラの分解能は、504 (水平) × 242 (垂直) であり、cm オーダーの計測は十分可能であると考えられるが、今後、ハード面およびソフト面での研究開発により計測精度は向上できるものと思われる。なお、撮影速度に関しては、現状の高感度 CCD カメラで200FPS であり、通常地震波のサンプリングが100Hz であることを考えると撮影速度的には問題がないものと思われる。

(3) エネルギー計測

構造物の地震時の崩壊過程を明確にするためには、忠実に地震波を再現し、計測する必要がある。しかしながら、一般に振動実験において、実験供試体を想定した波形で忠実に加振することは技術的に困難である^{28)~30)}。これは、振動台上の実験供試体自体の振動が振動台の加振力に対する反力となり振動台の加振状態に影響を及ぼすためであり、このため、本研究のように加振対象が極めて大きくなるような当該実験では、極めて重要な問題となる。また、振動台上の実験供試体が塑性領域や破壊に至るような場合、つまり供試体の動特性が大きく変化するような場合でも同様の問題が生じることになる。特に、供試体の固有振動数およびその近傍の加振周波数帯では、この問題が顕著に起こる。

本研究では、これまでに述べたように、構造物の地震時崩壊過程を究明することを目的としているが、地震波を忠実に再現し、その崩壊過程を詳

細に記録することは、現状の技術では極めて困難であると考えられる。このため、本研究では、破壊・崩壊過程を現象的に計測する手法の技術開発とともに、破壊・崩壊過程の解明の一つの手法として、振動台および加振対象を含む全実験システムでのエネルギー授受関係^{31)~34)}から崩壊現象を解明することを検討している。図4は、この概念を図にしたものである。図が示すように、システム全体のエネルギーバランスは、大きく分類すると、振動台を加振するエネルギーとその結果による加振対象の振動・破壊といった応答に関するエネルギーに大別できると考えられる。この場合、前者を入力エネルギーとすると、後者は、出力エネルギーということになる。実際の計測にあたっては、入力エネルギーは、振動台情報から、出力エネルギーは、加振対象の応答計測から得られることになる。建物の応答は、通常に加振実験では、バネ要素による弾性エネルギーと、減衰要素による消費エネルギーに分解されるが、今回のような破壊実験では、構造物の塑性により生じる消費エネルギー、残留ひずみ、応力等の不確定な要素が生じる。そこで、エネルギーの授受関係より、例えば、加振対象の複雑な部

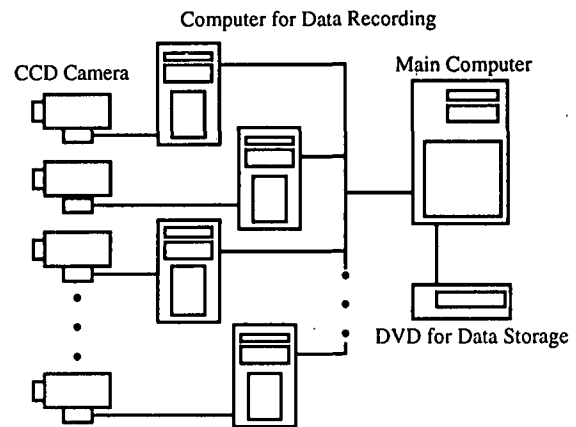


図4 三次元計測系統

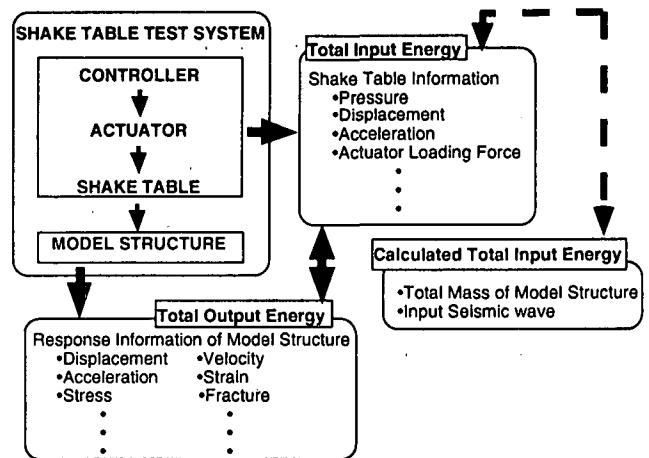


図5 エネルギー計測の概念

位での曲げ、歪み、破断をエネルギーという観点から評価することが、加振対象全体の破壊・崩壊過程を解明する一つの要因になると思われる。特に、この出力エネルギーに関する構造物の応答計測に関しては、本研究で提案・開発している計測手法が大きく役立つものと考えている。

4. 結論

本研究では、1995年より科学技術庁防災科学技術研究所を中心として検討が行われている大型三次元震動台のための計測手法について検討している。本震動台は、実規模の構造物を震動台上に搭載したうえで兵庫県南部地震クラスの大地震動を再現することにより、構造物の破壊・崩壊過程を解明することを目的としたものである。本実験は、今度の耐震設計の高度化を行う上で極めて重要な施設になると考えられるが、実際に実験で行われる構造物の破壊・崩壊過程を計測するためには、多くの課題が残されている。3次元計測においては、これまで実施されることがない実規模構造物といった巨大な実験対象の破壊過程をいかに計測するかという手法の問題とともに、計測精度の問題もある。また、エネルギー計測においては、巨大かつ大重量の実験対象物の動的破壊実験時、つまり強非線形特性時の実験システム全体でのエネルギー授受関係の計測と評価が問題である。現在、研究は第一段階にあるものの、今後、大型三次元震動実験施設に適した計測手法の研究開発を行っていく。

参考文献

- 1) 板倉 周一郎：実大三次元震動破壊実験施設について, Energy Humanit, NO.44, pp.26-30, 1998.
- 2) 小池 明士, 他 3 名：超大型三次元震動台加振機構の開発紹介, 日本機械学会関西支部定時総会講演会講演論文集, VOL.72, pp.7-43-7-44, 1997.
- 3) 梶井 紳一郎, 他 7 名：超大型三次元地震震動台の動的シミュレータの開発(その 1: モデリング), 日本機械学会講演論文集, NO.99-7, Vol.A, pp.165-168, 1999.3.
- 4) 奥田 幸人, 他 6 名：超大型三次元地震震動台の動的シミュレータの開発(その 2: 検証試験データを用いたシミュレータの検証), 日本機械学会講演論文集, NO.99-7, Vol.A, pp.169-172, 1999.
- 5) 梶井 紳一郎, 他 7 名：超大型三次元地震震動台の動的シミュレータの開発(その 3: 試験体の破壊現象に着目した性能検証シミュレーション), 日本機械学会講演論文集, NO.99-7, Vol.A, pp.475-478, 1999.
- 6) 馬場哲治：ゲームマシンでの人体のグラフィックス, 画像ラボ, VOL.9, NO.4, pp.41-44, 1998.
- 7) 片寄晴弘, 他 4 名：簡易モーションキャプチャセンサ DigitEye3D とインタラクティブシステムへの応用, インタラクシオン'98, pp.67-72, 1998.
- 8) 井口征二：三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- 9) 谷口慶治：画像処理工学, 共立出版, 1996.
- 10) 谷尻豊寿：画像処理入門, 技術評論, 1996.
- 11) 見持圭一, 他 2 名：三次元視覚センサの研究, 三菱重工技法, Vol.25, No.3, pp.241-246, 1988.
- 12) 鳥脇純一郎：三次元画像のデジタル処理, O plus E, No.67, pp.84-97, 1985.
- 13) 横井茂樹：幾何学的処理(1), O plus E, No.68, pp.120-126, 1985.
- 14) 北橋忠広：動画像処理, O plus E, No.69, pp.72-86, 1985.
- 15) 興水大和：産業応用からみた画像処理アルゴリズムの動向, O plus E, No.70, pp.107-122, 1985.
- 16) 大田友一, 池田克史：三次元情報の再構成とモデル化, O plus E, No.71, pp.86-105, 1985.
- 17) 阿部圭一：幾何学的処理(2), O plus E, No.72, pp.79-93, 1985.
- 18) 福江潔也：リモートセンシング分野における画像処理アルゴリズム, O plus E, No.73, pp.68-84, 1985.
- 19) 古結義浩, 他 4 名：画像処理を利用した三次元運動計測システムの開発, 三菱重工技法, Vol.35, No.3, pp.198-201, 1998.
- 20) 山本正信：三次元運動解析-時間的結合の手法-, 計測と制御, 第 34 巻, 第 6 号, pp.453-456, 1995.
- 21) 池内紀勝, 他 2 名：椅子からの立ち上がり動作の画像処理による解析, 平成 8 年秋季油空圧講演会, pp.73-76, 1996.
- 22) 鈴木宏, 他 2 名：自動車シュミレーションモデルと同定実験-画像解析による運動の計測-, 社団法人 自動車技法 学術講演会前刷集 975, pp.49-52, 1997.
- 23) 岩壺卓三, 他 3 名：ゴルフにおけるダウンスイングに関する研究(第一報, 三次元運動計測システムの構築とゴルフのダウンスイング解析への適用), 日本機械学会講演論文集, No.97-34, pp.38-42, 1997.
- 24) 岩壺卓三, 他 3 名：ゴルフにおけるダウンスイングに関する研究(第二報, ゴルフクラブの特性がダウンスイングに及ぼす影響), 日本機械学会講演論文集, No.97-34, pp.43-47, 1997.
- 25) 見持圭一, 他 2 名：動画像処理技術を用いた移動監視システムの開発, 三菱重工技法, Vol.36, No.2, pp.84-87, 1999.
- 26) 戸川達男：運動計測技術の展望, 計測と制御, 第 36 巻, 第 9 号, 1997.
- 27) 持丸正明：身体の運動計測技術の動向, 計測と制御, 第 36 巻, 第 9 号, 1997.
- 28) 小長井 一男：他 2 名, 構造物とその基礎の相

- 相互作用を反映させる振動台の制御, 土木学会論文
文集, NO.598, pp.203-210, 1998.
- 29) 堂蘭 美礼, 他 5 名: 振動台の実時間反力補償,
日本機械学会'99 講演論文集, NO.99-7, Vol.B,
pp.467-470, 1999.
- 30) 平井 洋武, 他 2 名: 電気油圧式振動試験機閉
ループ制御系のフィードバックゲイン自動調整,
油圧と空気圧, 11 巻, 第 7 号, pp.427-434, 1980.
- 31) 箕輪 親宏: 振動台の仕事について, 日本機械
学会東北支部地方講演会講演論文集,
VOL.1997 NO.いわき, pp.75-76, 1997.
- 32) 高圧ガス保安協会: 鋼製平底円筒形貯槽の耐
震実験報告 (第 1 回), NO.7, VOL.21,
pp.363-373, 1984.
- 33) 高圧ガス保安協会: 鋼製平底円筒形貯槽の耐
震実験報告 (第 2 回), NO.8, VOL.21,
pp.440-452, 1984.
- 34) 高圧ガス保安協会: 鋼製平底円筒形貯槽の耐
震実験報告 (第 3 回), NO.9, VOL.21,
pp.512-529, 1984.