

## 6. 揺れやすい収納家具のロッキング・転倒挙動について

岡田久志

### 1. はじめに

地震動による物体の転倒挙動に関する研究は、古くから地震動の強さを推定するために行われてきたが、近年は家具や設備機器の転倒防止の観点から注目され、実地震時の家具やオフィス家具の被害調査なども行われ報告されている。収納家具や書棚ではスチール製も多く、これらの固有振動数は1 Hz から 3 Hz 程度あり地震時には揺れながら転倒や破損を生じている。しかし、これまで報告されている多くの実験研究や解析的研究では、対象を剛体として扱っているものがほとんどである。

本報告は、振動する床に置かれた揺れやすい収納家具のロッキング・転倒挙動に注目し、解析によって家具自身の揺れがロッキングや転倒挙動に与える影響を明らかにしたものである。



写真 1.1 神戸商船大学附属図書館  
書庫の地震被害例 <http://www.lib.kobe-u.ac.jp/eqp/eqp.html>

### 2. 剛体の転倒条件

既往の研究のなかで最も良く用いられている剛体の転倒条件は、次に示す石山らの研究<sup>1)</sup>に基づく式である。

$$\text{転倒限界加速度: } a_0 = (B/H)g \quad (1)$$

$$\text{転倒限界速度: } v_0 = 0.4 \times \frac{r}{h} \sqrt{\frac{8g(r-h)}{3}} \quad (2)$$

$$\text{転倒限界変位: } d_0 = v_0^2/a_0 \quad (3)$$

なお、B、H は、剛体の高さと同幅、r は剛体の重心位置とコーナーの距離、g は重力加速度、B=2b、H=2h である。

(1) 式は、West の式と呼ばれている。(2) 式は、Mallet の式を修正したものである。(2)、(3) 式に対しては、石山ら<sup>1)</sup>によって次のような略算式も提案されている。

$$\text{限界速度: } v_0 \cong 10B/\sqrt{H} \quad (2') \quad \text{限界変位: } d_0 \cong B/10 \quad (3')$$

これらを加速度換算した転倒限界条件を図 2.1 に示す。縦軸は、転倒加速度、横軸は、床の振動周期を表している。(1)、(2)、(3) 式を満たす加速度以上で転倒を起こす。図中の太い実線は剛体の高さ H が 150cm、細い実線は 50cm のケースで、いずれも H/B = 3 の例である。H/B が同じであっても剛体の大きさが小さいほど転倒しやすくなることを示している。なお、破線は、略算式である。また、(1) 式 (2) 式の交点あるいは (2) 式 (3) 式の交点の振動周期  $T_{f0} (= 2\pi v_0/a_0 = 2\pi d_0/v_0)$  を臨界周期と呼ばれている。

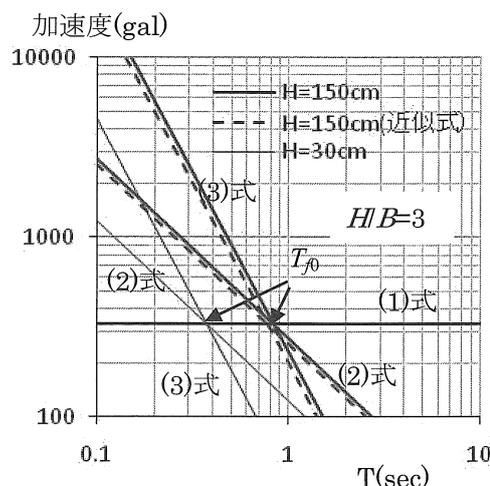


図 2.1 床の加振周期と転倒限界条件

### 3. 揺れやすい収納家具の挙動解析

#### 3.1 揺れやすい収納家具のモデル化

図 3.1 は床の置かれた家具の振動モデルを示す。本モデルでは、家具底面は剛とし家具に作用する床面からの反力は、コーナー A、B に集中力として作用すると考える。初期状態における家具の重心から下ろした垂線の

足を原点とし、底面に平行な座標軸を x 軸、垂線の軸を y 軸とする。また回転角度  $\theta$  は、時計回りを正とする。ここでは、家具の床面上の滑りは考えない。また、床の振動は水平方向のみで、上下震動はないものとする。x-y 座標の原点から家具底面 A 点 B 点までの距離を  $b_A$ 、 $b_B$ 、床面からの重心高さを  $h$  とする。

### 3.2 家具が回転を始める条件

家具が回転していない状態  $\theta = 0$  のとき、反力  $R_A$ 、 $R_B$  は、それぞれ B 点、A 点周りの力のモーメントのつり合いから、次のように与えられる。

$$R_A = mg(b_B + x_1) - mh(\ddot{x}_g + \ddot{x}_1) \quad (4a)$$

$$R_B = mg(b_A - x_1) + mh(\ddot{x}_g + \ddot{x}_1) \quad (4b)$$

反力が、 $R_A \geq 0$  かつ  $R_B \geq 0$  ならば、回転しない。したがって、回転運動を始める条件は、

$$\text{正方向の回転条件： } h(\ddot{x}_g + \ddot{x}_1) < -g(b_A - x_1)$$

$$\text{負方向の回転条件： } h(\ddot{x}_g + \ddot{x}_1) > g(b_B + x_1)$$

となる。

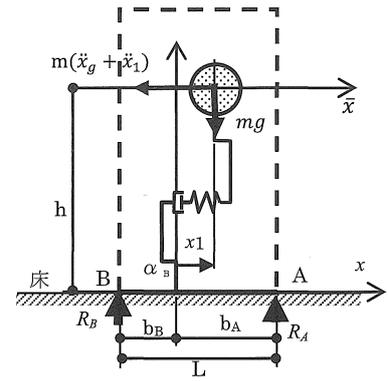


図 3.1 家具が回転をしていない状態 ( $\theta = 0$ )

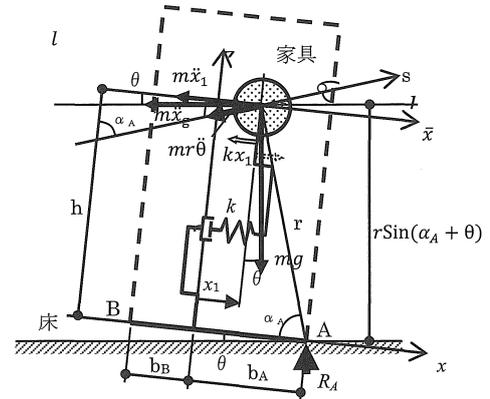


図 3.2 正方向に回転している家具の状態 ( $\theta > 0$ )

### 3.3 回転運動中の運動方程式

図 3.2 に  $\theta (> 0)$  の回転を生じている 1 質点系にモデル化された収納家具を示す。

床面が加速度  $\ddot{x}_g$  で振動し、その結果家具自体が揺れて横変形生ずるとともに回転運動をする。時刻  $t$  において、回転角は  $\theta$  であり、家具の重心は家具の底面に対して変形している。このとき、質点に、 $\ddot{x}_g$ 、 $\ddot{x}_1$ 、 $r\ddot{\theta}$ 、重力加速度  $g$  による慣性力が作用している。ここで、A 点と質点  $m$  との距離を  $r$  とし、半径  $r$  の円の質点  $m$  における接線を  $s$  とする。は x 軸を質点位置に並行移動した軸である。また、線  $l$  は質点  $m$  を通る床面と平行な線である。

質点に対する方向と回転に対する釣り合いから運動方程式は以下のように誘導される。

$$(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g \cos\theta + h\ddot{\theta} - g\sin\theta) + 2h_D\omega\dot{x}_1 + \omega^2 x_1 = 0 \quad (5a)$$

$$(r^2 + I)\ddot{\theta} + h(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g \cos\theta - g\sin\theta) + (b_r - x_1)(\ddot{x}_g \sin\theta + g\cos\theta) = 0 \quad (5b)$$

$$\text{ここで、 } b_r = \begin{cases} +b_A & \text{for } \theta > 0 \\ -b_B & \text{for } \theta < 0 \end{cases}$$

$h_D$  : 家具の横方向振動に関する減衰定数

$\omega$  : 家具の固有円振動数

### 3.4 床面との衝突後の挙動

回転運動の状態 ( $\theta \neq 0$ ) から  $\theta = 0$  となる時、家具は床面に衝突する (図 3.3)。1 質点にモデル化された質点の床面に対して法線方向の速度成分の床面衝突後の速度は、反発係数  $e$  によって変化するが、床面方向の速度成分は、衝突後も変化しないと考える。衝突前後で床面に接触しているコーナーが変わる場合には、衝突後の速度は、

$$\dot{x}' = (1 - e\phi)h\dot{\theta} + \dot{x} \quad \dot{\theta}' = e\phi\dot{\theta} \quad (6a)$$

ここで、衝突前  $\theta < 0$ 、衝突後  $\theta' > 0$  のとき、 $\phi = (b_B + x_1)/(b_A - x_1)$

衝突前  $\theta > 0$ 、衝突後  $\theta' < 0$  のとき、 $\phi = (b_A - x_1)/(b_B + x_1)$  図 3.3 家具が正方向に回転して

(') : 衝突後を表す

床面に衝突する瞬間の状態 ( $\theta > 0$ )

また、衝突前後で床面に接触しているコーナーが変わらない場合には、衝突後の速度は、

$$\dot{x}' = (1 + e)h\dot{\theta} + \dot{x} \quad \dot{\theta}' = -e\dot{\theta} \quad (6b)$$

となる。

### 3.5 妥当性の検討

本解析法の妥当性を検討するために、文献 2) に報告されている高さ (H) 15cm × 幅 (B) 5cm および高さ 20cm × 幅 5cm の木製ブロックをある角度まで傾け、そこから手を放したのちの挙動を観察する自由振動実験結果と比較する。自由振動実験では、ブロックに目印の光学反射板を貼り付け、高速カメラでブロックの挙動を撮影し、画像解析ソフトで挙動解析を行っている。この実験結果と本解析法による結果との比較を図 3.4、図 3.5 に示す。

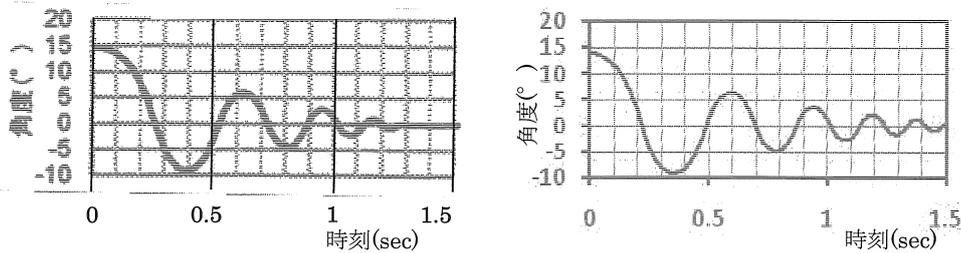
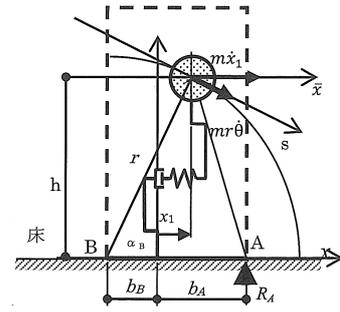


図 3.4 実験結果と解析結果との比較 (H=15 c m, B=5 c m, 初期角度 14 度)

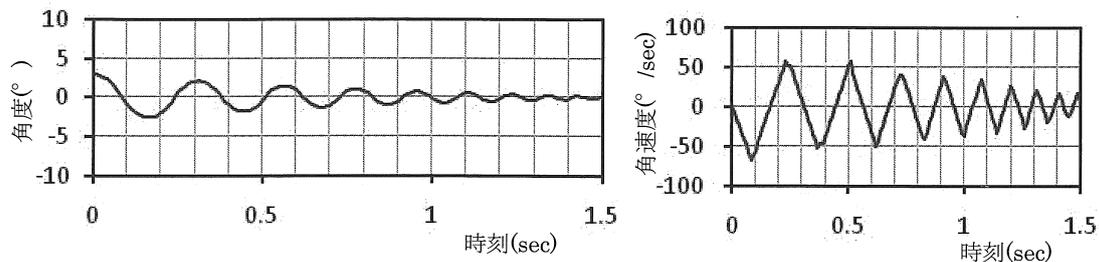
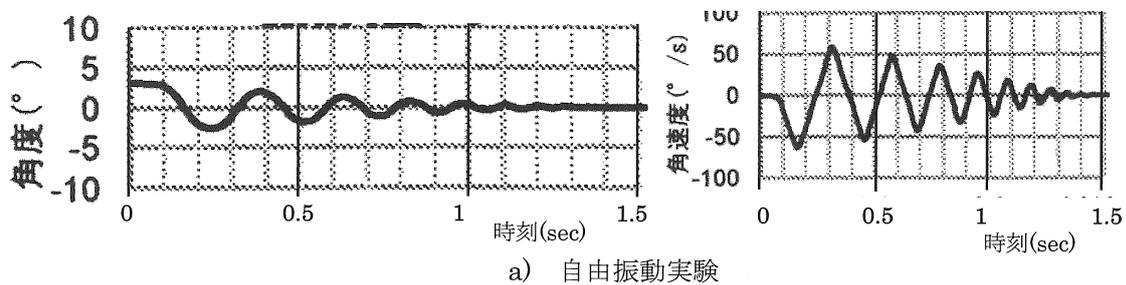


図 3.5 実験結果と解析結果との比較 (H=20 c m, B=5 c m, 初期角度 3 度)

解析では、剛体としてみなせるようブロックの固有周期を 0.01 秒とし、反発係数は文献 2) の値を用いてシミュレーションしている。すなわち、図 3.4b) は、 $H/B=3$ 、初期角度  $14^\circ$ 、反発係数 0.65、図 3.5b) は、 $H/B=4$ 、初期角度  $3^\circ$ 、反発係数 0.75 とした解析結果であり、文献 2) の角度の時刻歴、角加速度の時刻歴とも実験結果とよく一致しており、本解析法の妥当性が示されている。

#### 4. シミュレーション

床振動周期を  $T_f$  とする時、床面加速度は、図 4.1 に示すように時刻  $2 \times T_f$  から一定の加速度とし、時刻  $2 \times T_f$  までは漸増して過渡現象の影響を受けないようしている。収納家具の固有周期を  $T_i$  とし、減衰定数  $h$  は 5% としている。

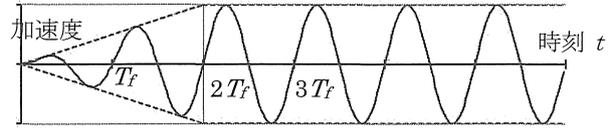


図 4.1 床加速度の時刻歴

数値解析は中央差分法で行い、時間間隔は、 $T_f/200(\text{sec})$  と  $T_i/200(\text{sec})$  の小さい方の値を採用している。また、底面の最大回転角が  $10^{-4} \text{ rad}$ . 以上の場合、ロッキングが生じたものと判断している。

##### 4.1 収納家具の固有周期がロッキング限界、転倒限界に与える影響

0.25 秒～2 秒の固有周期を有する揺れやすい収納家具についてシミュレーションを行い、固有周期  $T_i$  がロッキングを起し始める加速度（以下ロッキング開始加速度と呼ぶ）と転倒を生じはじめる加速度（以下転倒限界加速度と呼ぶ）に与える影響を検討した。図 4.2 は、アスペクト比  $H/B=3$  ( $H$  : 高さ、 $B$  : 幅)、 $B=50\text{cm}$ 、反発係数  $e=0.5$  の場合について収納家具の固有周期  $T_i$  毎にロッキング開始加速度（白丸印）ならびに転倒限界加速度（黒丸印）と床の振動周期との関係を示したものである。図中破線は、West の (1) 式と (2)、(3) 式で、臨界周期は、0.835 秒である。a) の  $T_i = 0.01$  秒のケースは剛体とみなしている。ロッキング開始加速度と転倒限界加速度で囲まれる領域（網掛け部分）は転倒せずにロッキングを起こしている領域である。

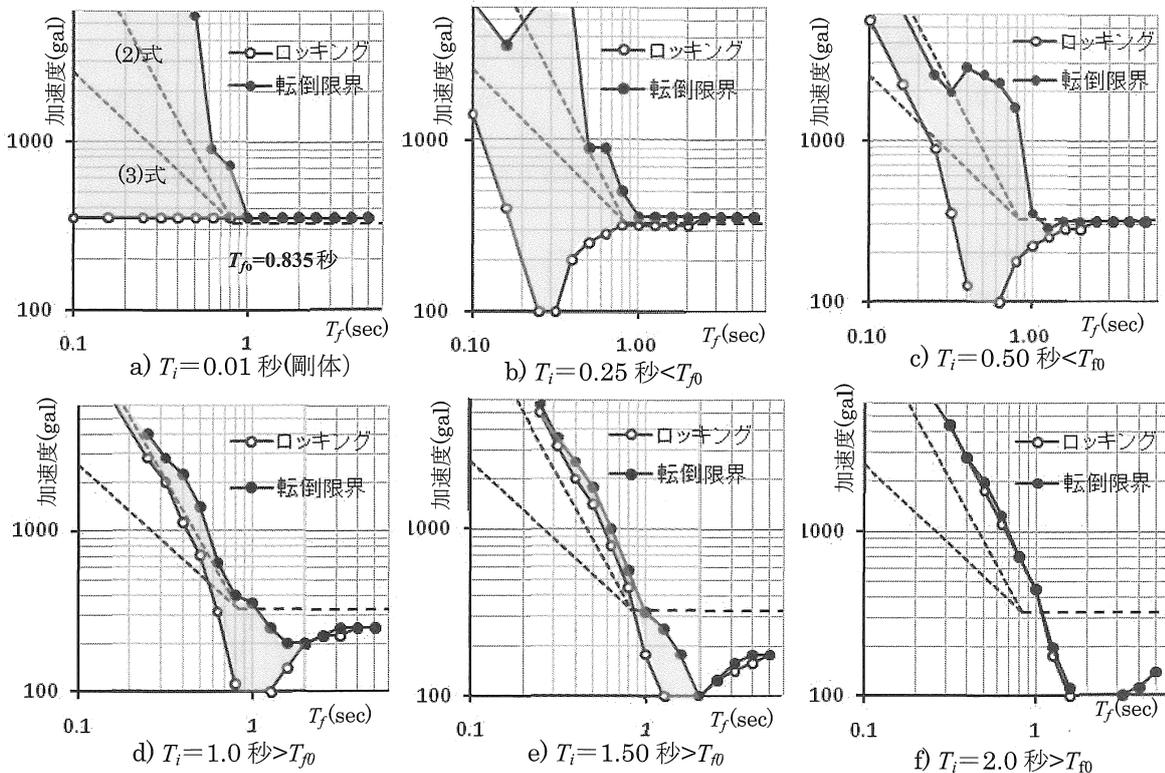


図 4.2 ロッキング開始加速度ならびに転倒限界加速度と床の振動周期との関係 ( $H/B=3$ ,  $B=50 \text{ cm}$ )

収納家具自体が揺れる場合、家具の固有周期  $T_i$  と床の振動周期  $T_f$  が近いと小さい加速度でもロッキングを起こし易いが、床の振動周期が  $T_i$  より小さくなるに従いロッキングは生じ難くなる。また、転倒については、家具の固有周期が臨界周期  $T_{f0}$  より大きい場合には West の式で与えられる加速度よりも小さい加速度で転倒を生じることが判る。一方、家具の固有周期が  $T_{f0}$  より小さい場合には転倒を起し難くなること判る。図 4.3 は、同じアスペクト比でサイズを 1/5 の場合であるが、 $T_{f0}$  が 0.375 秒となっても図 4.2 と同様のことが言え、剛体とは異なる性状である。

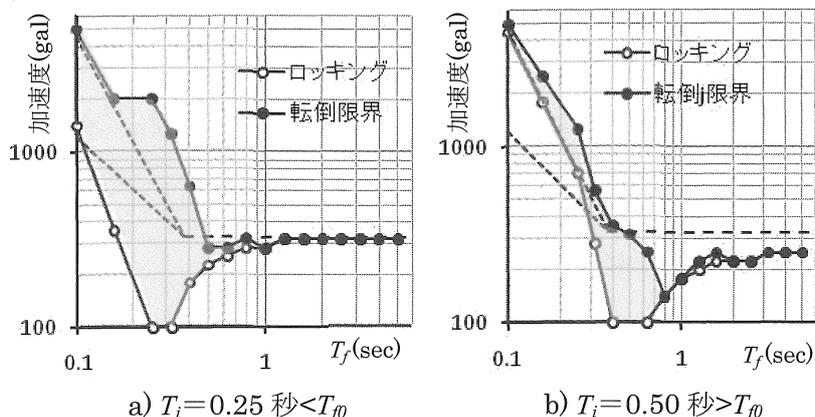


図 4.3 ロッキング開始加速度ならびに転倒限界加速度と床の振動周期との関係 ( $H/B=3$ ,  $B=10$  cm)

#### 4.2 アスペクト比、反発係数が揺れやすい収納家具のロッキング限界、転倒限界に与える影響

図 4.4 は、 $B=50$ cm、 $T_i = 1.0$  秒の収納家具についてアスペクト比  $H/B=2,3,4$  の転倒限界加速度と床の振動周期との関係を比較した図である。剛体の場合と同様に床の振動周期が臨界周期を超えた領域では、 $H/B$  の影響を受けるが、家具の固有周期が転倒限界に与える影響はアスペクト比の違いに依らないことが判る。

図 4.5 は、 $T_i = 1.0$  秒、 $H/B=3$ ,  $B=50$ cm の収納家具について反発係数の影響を示した図である。 $e=0.5$ 、 $e=0.75$  で大きな違いがなく、ロッキング開始加速度ならびに転倒限界加速度とも反発係数の影響を受けないことが判る。

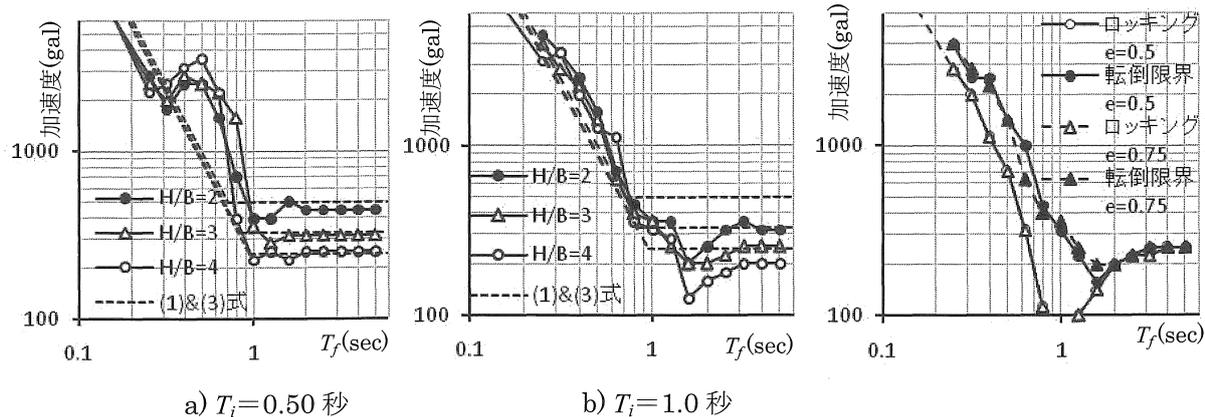


図 4.4 アスペクト比の影響 ( $B=50$  cm)

図 4.5 反発係数の影響  
( $T_i=1.0$  秒,  $H/B=3$ ,  $B=50$  cm)

## 5. 結び

本報告は、振動する床に置かれた揺れやすい収納家具のロッキング・転倒挙動に注目し、解析法を提案するとともにシミュレーションをおこなって六キングや転倒挙動に与える影響を明らかにしたものである。その結果以下のことが明らかにされた。

- (1) 剛体に比べ、揺れやすい家具の固有周期に近い振動周期で床が振動する場合には小さい加速度からロッキング挙動を起こす。
- (2) 収納家具の固有周期が臨界周期より大きい場合には、West の式で与えられる転倒限界加速度以下でも転倒する恐れがある。
- (3) 収納家具の固有周期が臨界周期より小さい場合の倒限界加速度は、(2)、(3) 式から与えられる転倒限界加速度よりも大きくなる場合がある。
- (3) アスペクト比  $H/B$  によって上記 (1) ~ (3) の性状は影響を受けない。
- (4) 床と家具間の反発係数の違いによる影響はほとんどない。

### [参考文献]

- 1) Yuji Ishiyama, CRITERIA FOR OVERTURNING OF BODIES BY EARTHQUAKE EXITATIONS、日本建築学会構造系論文集、第 317 号、S57.7
- 2) 左近竜也、原志伸、浅野清昭、森迫清貴、剛体ロッキング振動に関する基礎的研究（その 1 自由振動実験）、平成 24 年度日本建築学会近畿支部研究発表会、2012.