

一般論文

# 水平振動床上物体のすべり運動の評価について

斎藤勝彦\* 久保雅義\* 友原直人\*\* 切通祐介\*\*\*

## Evaluation of Slipping Motions of Brick on Horizontal Vibration Table

Katsuhiko SAITO, Masayoshi KUBO, Naoto TOMOHARA and Yusuke KIRITOSHI

The effect of the countermeasures against cargo shifting should be cleared by the indoor vibration tests. But the evaluation of the countermeasures can not do quantitatively by the chaotic nature of cargo motion in response to seismic motion and external vibrating forces occurring transportation. The basic physical model tests using an ABS brick on a horizontal inertia force are showed by the results. The three new parameters that can be imaged the difference of the time series of the slipping motion are proposed. The mathematical simulations are also done, the difference of the motions is calculated by the non-determinative friction factor varied on slipping velocity of the actual brick. The scattering calculated results of the chaotic time series of the slipping expressed by the proposed three parameters are almost similar to the experiment physical model ones.

**Keywords :** vibration, slipping motion, friction

パレタイズド貨物の荷崩れ防止対策の効果は、振動試験によって明確にされるべきであるものの、輸送中の振動・衝撃などによっておこる貨物の挙動には再現性がなく、定量的にその効果を評価することができない。そこで、本研究ではABS製の供試体を使用して、水平振動実験を行い、その実験より得られた時系列的に再現性のない複雑なすべり挙動を、新たに提案した3つのパラメータによって表現した。また、振動実験で用いた供試体のすべり速度に依存する摩擦力を考慮した数値計算により、実際のすべり挙動のばらつき傾向をある程度表現できることを確認した。

キーワード：振動、すべり挙動、摩擦

### 1. はじめに

段ボール箱等で構成されたパレタイズド貨物は、輸送中の振動・衝撃による荷崩れを防止するために、さまざまな対策が施される<sup>1)</sup>

が、その効果を定量的に評価するための基準は明確ではない。荷崩れ防止対策の評価試験としては、水平衝撃試験や振動試験が考えられるが、試験条件をどのように決定すべきかは定かではない。この理由は、パレタイジン

\* 神戸商船大学 (〒658-0022 兵庫県神戸市東灘区深江南町 5-1-1) : Kobe University of Mercantile Marine, 5-1-1, Fukae-minami, Higashinada, Kobe, 658-0022, Japan

\*\* 三菱電機ロジスティクス株式会社 (〒151-0073 東京都渋谷区笹塚 2-1-6) : Mitsubishi Electric Logistics Corporation, 2-1-6, Sasazuka, Shibuya, Tokyo, 151-0073, Japan

\*\*\* 神戸商船大学大学院商船学研究科博士前期課程輸送情報システム工学専攻 Division of Transportation and Information Systems Engineering, Master Course, Graduate School of Maritime Science and Technology, Kobe University of Mercantile Marine

グされたユニットロードの荷崩れ易さ、または荷崩れ難さを定量化する評価方法そのものが確立されていないためであると考えられる。

パレタイジング段ボール箱は水平振動のみが加わっている場合でも、段ボール箱が精密に直方体でなかったり、実際には摩擦力が局部的に異なっていると考えられるため、個々の段ボール箱は一方の滑りだけでなく3次元運動を起こすことがこれまでの実験によって確認されている<sup>2)</sup>。また、荷崩れを起こす箱の個々の運動には時系列的な再現性が無いので、荷崩れに要する振動回数<sup>3)</sup>がワイブル分布型の確率密度関数で表現されている<sup>4)</sup>のみで、荷崩れへ至る途中の個々の箱の荷動きを定量的に評価することはされていない。

そこで本研究では、実験的に同一条件で振動実験を行っても時系列的な再現性のない物体のすべり挙動を評価する指標を提案し、実験および数値計算により得られた物体のすべり挙動の定量化を試みる。

## 2. 振動実験概要

実験においては剛性があり、すべり運動によるすれ等の劣化の影響が少ないと考えられる、ABS樹脂製の直方体小型供試体を使用した。振動試験装置の振動は水平1方向、周波数5 Hzの単振動とし、振動加速度振幅は、0.6 G、0.8 G、1.0 Gの3種類とした。また、供試体の運動はFig. 1に示すように強制的に2次元運動に限定し、供試体の滑り挙動は2Dトラッカー<sup>2)</sup>により計測するとともに、振動試験装置に取り付けた加速度計により、試験装置の加速度を計測した。実験は9つの

同一サイズ、材料の供試体について、それぞれ同一設定振動条件で10回づつ行った。

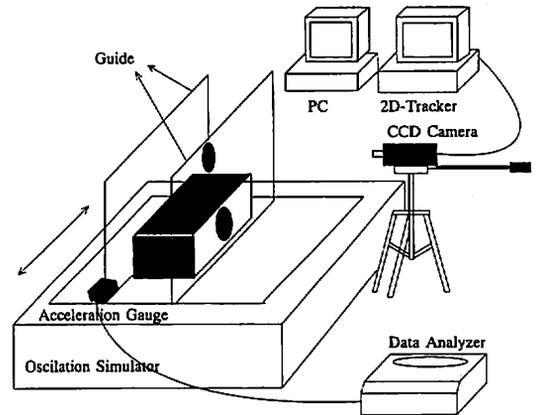


Fig.1 2-D horizontal vibration test of slipping ABS brick

Fig. 2は、同一の供試体について、同一設定振動条件での1回目から3回目までの振動試験装置の振動1波分で移動平均化された、物体のすべり挙動を示している。このように、非常に単純な実験であるにもかかわらず、物体の挙動は実験を行うたびに異なる。このようなことは、段ボール箱で構成されたパレタイズド貨物の振動による荷崩れへ至る個々の箱の運動にも言えることである。

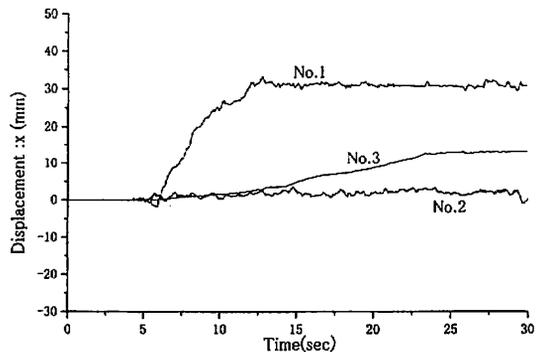


Fig.2 The examples of time series of the slipping box

### 3. 数値計算概要

本研究で対象とする物体のすべり運動について、運動方程式を解く手順を説明する。振動水平床の加速度を  $\ddot{x}_0$ 、速度を  $\dot{x}_0$ 、変位を  $x_0$  とする。また、物体の加速度、速度、変位をそれぞれ  $\ddot{x}_1$ 、 $\dot{x}_1$ 、 $x_1$ 、静止摩擦係数を  $\mu_s$ 、動摩擦係数を  $\mu$  とし、重力加速度を  $g$  とする。

このとき、次式により、物体の滑り出しが判定できる。

$$|\ddot{x}_0| > \mu_s \quad (1)$$

また、すべり出した後の物体の運動方程式は以下である。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= k\mu g \\ k &= \begin{cases} +1 : \dot{x}_1 - \dot{x}_0 < 0 \\ -1 : \dot{x}_1 - \dot{x}_0 > 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

さらに、物体の速度および位置は次式より求められる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= \int \ddot{x}_1 dt \\ x_1 &= \int \dot{x}_1 dt \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上式における積分計算では、計算時間間隔を振動周波数に対して、十分小さく設定することにより、計算誤差を無視できることを確認している。

また、水平床の振動加速度については、振動試験装置の加速度計によって測定されたデータを入力し、実験と厳密に対応した計算をおこなった。さらに摩擦係数は、次節で述べる供試体の摩擦係数計測実験により求められたすべり速度に依存性を持つ値を用いた。したがって、1 回ごとに微妙に異なる水平床の振動時系列と次節で述べる摩擦係数のばらつ

きにより、物体のすべり運動計算結果は異なってくる。

### 4. 摩擦係数の測定

過去の研究<sup>5)</sup>において、現実の物体の動摩擦係数は、物体のすべり速度に依存する変数であるという結果が実験によって得られている。一般的に、摩擦力の値を高い精度で推定することは困難であり、多くの力学の計算において摩擦の不確かさが計算全体の精度を決定する際の限定要因になることがしばしばある。これは現実の物体が滑っている場合は、その表面状態が時々刻々と変化しているために、それにより床面と物体のすべり速度によって、摩擦力が変化していると考えられる。

さて、振動実験に用いる ABS 製供試体について、すべり挙動に大きく影響する静止摩擦係数、動摩擦係数をそれぞれ求めた。これに使用した傾斜試験装置を Fig. 3 に示す。ハンドルを一定の速度で回すことで傾斜台を傾け、台上の供試体の挙動を 2-D トラッカー、傾斜台の角度を加速度計により計測した。

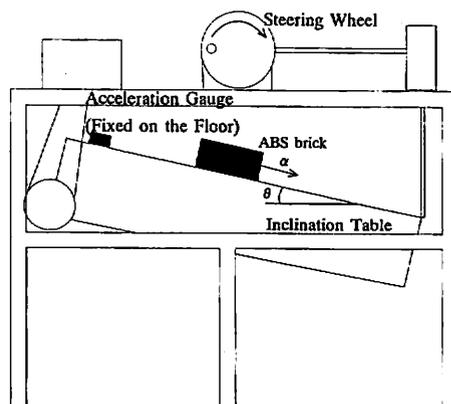


Fig.3 Measurement of friction factor by the inclination table

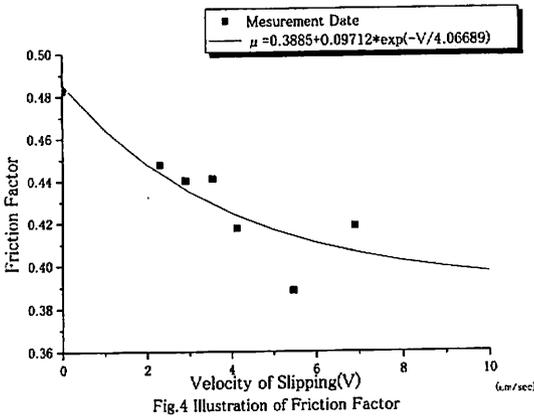
このとき、静止摩擦係数は、物体がすべり出した傾斜角  $\theta$  により

$$\mu_s = \tan \theta \quad (4)$$

となり、動摩擦係数は物体の進行方向の加速度  $\alpha$  により、次式で表される。

$$\mu = \mu_s - \frac{\alpha}{g \cos \theta} \quad (5)$$

Fig. 4 は、1 回の傾斜実験により得た、摩擦係数の計測結果を示す。このように現実の物体では、すべり速度により摩擦係数が変化することが分かる。また、材質、形状が同じ 9 つの供試体について 10 回づつ、計 90 回の傾斜実験により、1 回ごとに微妙に異なる摩擦係数の速度依存特性を求めた。



## 5. すべり挙動の評価法

Fig. 2 に示されるように、複雑な挙動を示す物体の運動を時系列表現のみで定量的に評価することは困難である。そこで本論文において新たに以下に示す 3 つのパラメータを提案する。

$$\left. \begin{aligned} S1 &= \frac{|\bar{x}(t_n)|}{N_s \max} \\ S2 &= \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |\bar{x}(t_i)| \cdot \Delta t}{N_s \max} \\ S3 &= \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |\bar{x}(t_i) - \bar{x}(t_i + \Delta t)|}{N_s \max} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 $x$ : 振動周波数で移動平均化された物体の変位、 $\bar{x} = x/a$ : 無次元変位、 $a$ : 水平床の振動振幅、 $N_s = t \cdot f$ : 振動回数、 $t$ : 時間、 $f$ : 振動周波数であり、 $N_{s \max} = t_n \cdot f$  は実験終了時間  $t_n$  (30 sec) までの振動回数であり、 $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  は、数値実験においては計算時間間隔、又は実現象実験においては計測時間間隔である。

さて、すべり運動の時系列は複雑であるが、最終的に変位が同値となる時系列をその履歴によって大別すると Fig. 5 のように、4 つの動き方のいずれかのパターンに該当する。

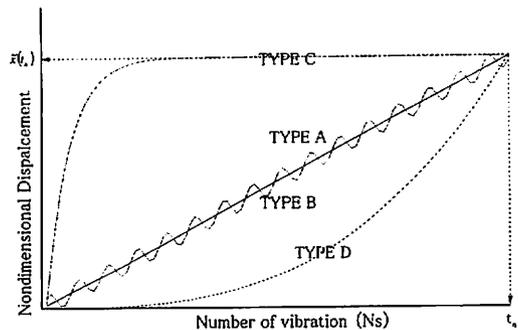


Fig.5 Typical time series of the slipping box

いま、時系列パターン A, B, C, D の最終変位は同値であるため

$$S1_A = S1_B = S1_C = S1_D \quad (7)$$

となり、特に時系列Aは直線であることから、 $S1_A$ は文献3)による、すべり率Qと同義であり、次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} \frac{S3_A}{S1_A} &= 1 \\ S3_B &> S3_A \\ S3_C &= S3_A \\ S3_D &= S3_A \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

また、 $S2$ は運動時系列の時間積分を振動回数で除算した値であることを考えれば、次式が与えられる。

$$\frac{S2_A}{S1_A} = \frac{t_n}{2} \quad (9)$$

また、それぞれについては、以下の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} S2_A &\doteq S2_B \\ S2_C &> S2_A \\ S2_D &< S2_A \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

以上の関係より、3つのパラメータ、 $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$ を用いれば、運動時系列のパターンを直感的に評価することが可能である。

## 6. 振動実験結果及び考察

Fig. 6、Fig. 7、Fig. 8は、それぞれ0.6G、0.8G、1.0Gでの実験および計算により得た運動時系列を $S1$ 、 $S2$ 、 $S3$ のパラメータで表現し、バブルマップによって示したものである。ここに実験は、9つの供試体について10回づつ行ったので計90データ、計算は、ひとつの供試体について傾斜実験で得た10通りの摩擦係数の速度依存特性それぞれに10通りの水平床の振動時系列を入力した合

計900データ分の時系列結果のばらつきを程度を示している。これらの図より、いずれの加速度でも、実験および計算による物体のすべり運動時系列結果のばらつき傾向は類似していることがわかる。また、数値計算、および実験は、ともに振動加速度の増加にしたがい、 $S1$ の分布範囲が小さくなり、その最大値もほぼ同じである。この点では数値計算によって、ばらつきの大きいすべり現象を、再現することができている。

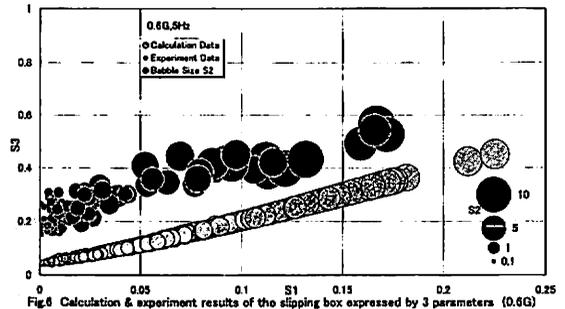


Fig.6 Calculation & experiment results of the slipping box expressed by 3 parameters (0.6G)

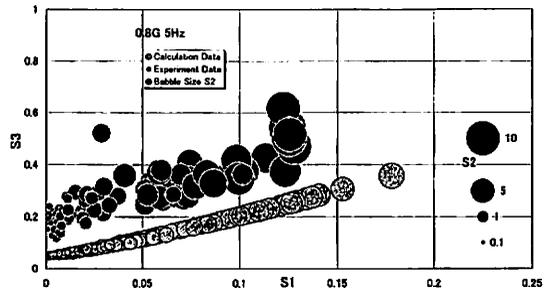


Fig.7 Calculation & experiment results of the slipping box expressed by 3 parameters (0.8G)

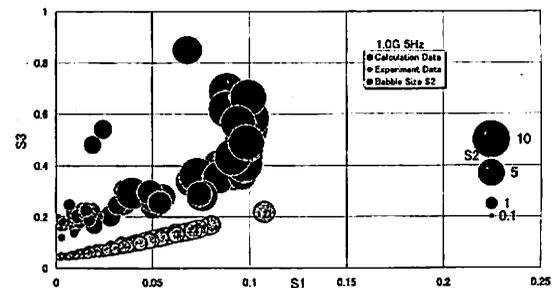


Fig.8 Calculation & experiment results of the slipping box expressed by 3 parameters (1.0G)

一方、Fig. 9、Fig. 10、Fig. 11 はそれぞれ、0.6 G、0.8 G、1.0 G での実験、計算結果を  $S2/S1$ 、 $S3/S1$  によって、あらわしたものである。これらの図が示す意味を前述の式による、すべり挙動の評価法と併せながら説明する。式(8)より、 $S3/S1 = 1$  であれば、すべり物体の時系列は直線的である。しかし、数

値計算結果について述べると  $S3/S1$  の最小値がほぼ 2 であることから、物体のすべりによる累積移動距離が直線的に動く場合の最低 2 倍であることを示している。このことは、物体は水平床の振動によって時系列的に直線的な挙動をするのではなく、移動速度が増減しながらすべっているということである。ま

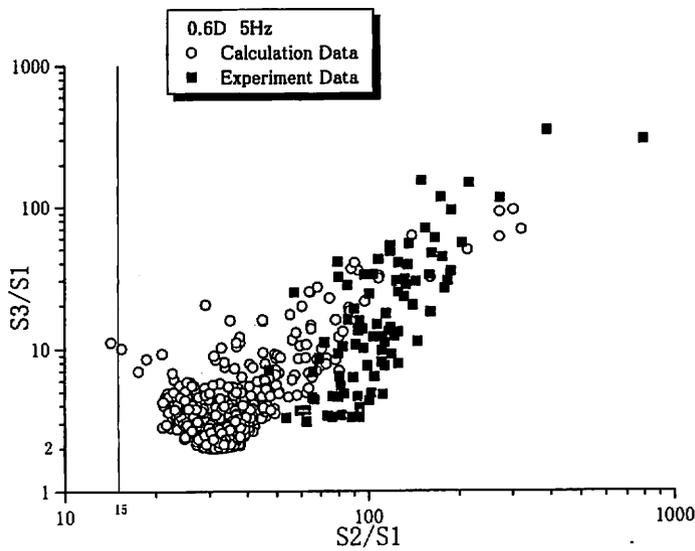


Fig.9 Calculation & experimental results of the slipping box expressed by the ratio of parameters (0.6G)

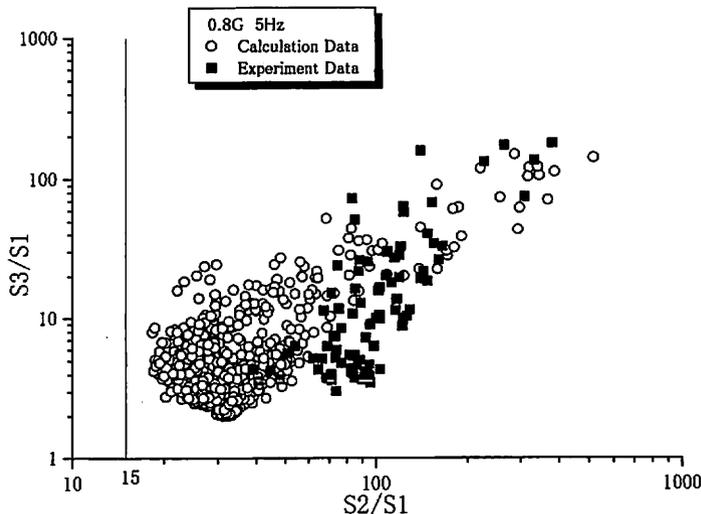


Fig.10 Calculation & experimental results of the slipping box expressed by the ratio of parameters (0.8G)

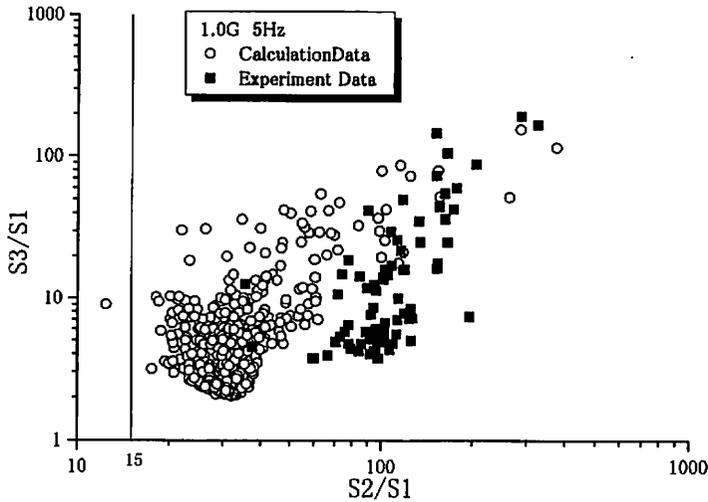


Fig.11 Calculation & experimental results of the slipping box expressed by the ratio of parameters (1.0G)

た式(9)(10)から考えれば、 $S2/S1$  の分布より、すべり出しから比較的早い段階において大きく変位するか、最終的には初期位置からほとんどずれていなくとも振動の途中では左右にすべっては元に戻るという複雑なすべり挙動をすることがわかる。

## 7. 結論

本研究は、荷崩れ問題を解決することを目的とする研究プロジェクト<sup>6)</sup>の一環として、物体のすべり挙動を数値計算により求めた。また、複雑なすべり挙動を評価する方法についても検討を行い、運動時系列の違いを直感的に評価する指標として、新たに3つのパラメータを提案した。また、摩擦係数の速度依存特性を微妙に変えた計算で、実験によるすべり挙動時系列のばらつき傾向を再現できることを確認したことは、本研究の成果である

と考える。荷崩れ防止対策の評価試験法確立のために、本研究がきっかけとなることを期待する。

### <引用文献>

- 1) (社)全国通運連盟、荷くずれ防止マニュアル (1996)
- 2) 斎藤勝彦、久保雅義、日本包装学会誌、6 (4)、201 (1997)
- 3) 斎藤勝彦、久保雅義、日本包装学会誌、7 (1)、13 (1998)
- 4) 斎藤勝彦、久保雅義、日本包装学会誌、8 (1)、19 (1999)
- 5) 斎藤勝彦、久保雅義、日本航海学会論文集、95、325 (1996)
- 6) 斎藤勝彦、久保雅義、友原直人、包装技術、37 (2)、63 (1999)

(原稿受付 2000年7月31日)

(審査受理 2000年11月6日)