

## 水平振動によるパレタイズ貨物の 荷動き挙動の計測実験

斎藤勝彦\* 久保雅義\*

### Measurements of Motions of Palletized Cargo by Horizontal Vibration

Katsuhiko SAITO\*, Masayoshi KUBO\*

There are some countermeasures against cargo shifting. But the quantitative evaluation of cargo motions in the oscillating force and the effect of the countermeasures are not cleared. This paper deals with the characteristics of cargo shifting in response to seismic motion and external oscillating forces occurring transportation. Some basic physical model tests using actual palletized corrugated cartons are carried out, and complex movements under one dimensional horizontal inertia force are showed by the results. New shifting parameters of the palletized cargo are proposed. The quantitative displacement of cargo shifting can be indicated by the area load movement parameter which is derived from the size of a corrugated carton and unit load size.

**Keywords :** Cargo shifting, Cargo motions, Oscillating force, Palletized corrugated container, Vibration tests

貨物の荷崩れを防止するために、いくつかの対策が施されている<sup>1)</sup>。しかしながら、地震動や輸送過程で発生する振動外力が作用する場合の貨物の動的挙動に関する定量的評価および荷崩れ防止対策の効果については明確にされていない。そこで本研究では、振動外力が作用する場合のパレタイズ貨物の荷崩れの基本的な特性に関する検討を行うため、実スケールの段ボール箱のパレタイズ貨物を対象にした実験を行う。本実験により、1次元の水平振動が加わっていても個々の箱は複雑な運動をすることを明らかにする。さらに、荷動き量の大きさを示す新しい荷動きパラメータを提案するとともに、面積で示されるパラメータを用いれば、すべての振動加速度で荷崩れへ至る荷動きの特性はほぼ説明できることを明らかにする。

**キーワード :** 荷崩れ、振動試験、動的挙動、荷崩れ防止策、パレタイズ貨物

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

## 1. はじめに

パレタイズ貨物は、輸送中の衝撃・振動により荷崩れを起こすことがあり、これが物流の効率化のための一貫パレチゼーションの推進に向けたハード面の課題のひとつとされている<sup>1)</sup>。また阪神・淡路大震災においては、保管中の大量の貨物が荷崩れを起こし、甚大な損害が発生している<sup>2)</sup>。

パレタイズ貨物の荷崩れを防止する方法としては、以下のような方法がある<sup>1)</sup>。

- (1) 貨物の積み付けパターンの工夫による方法
- (2) パレタイズ貨物自体を緊締する方法
- (3) 輸送車両の中でパレタイズ貨物を固定する方法
- (4) コンテナおよび貨車内に隙間なく貨物を積みつける方法

一方、倉庫内のラックレイアウトを作成するための基礎的な資料のひとつとして、スタッカークレーン上のパレタイズ貨物の荷崩れ寸法が示されている<sup>3)</sup>。ただしこれはクレーンの起動停止に伴うパレタイズ貨物の荷動き

量を示す参考値として与えられているに過ぎず、実状に即して実験等により確認する必要がある場合が多いとされている。

さらに輸送中の振動・衝撃や地震による振動外力が加わった場合の荷崩れ問題に関しては、輸送・保管方法及び荷姿が多様多様であるため、系統的な検討が行われにくく、実状は現場毎の対応に委ねられている。また、近年の環境問題が大きくクローズアップされる中で、再利用可能で効果的な荷崩れ防止対策が強く求められている。

そこで本研究においては、振動試験機によりパレタイズ貨物に水平振動を加えたときの荷崩れへ至る個々の貨物の動的挙動特性を明らかにする。これにより、現在のパレタイズ貨物の荷崩れ防止対策の効果を定量的に評価し、さらに効果的な新しい荷崩れ防止対策を考えていく際の基礎資料とするものである。

## 2. 実験方法

Fig. 1は、振動試験機によるパレタイズ貨物の荷崩れ実験の様子を示している。使用す

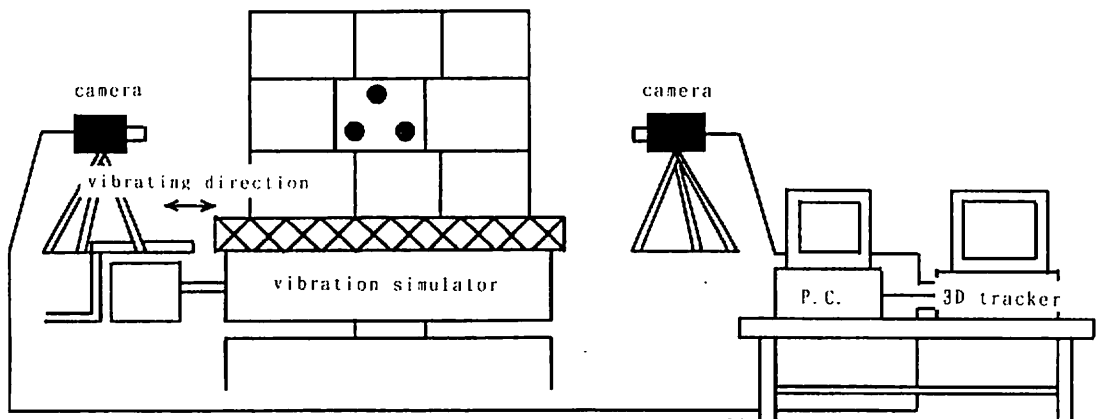


Fig. 1 Horizontal vibration test of palletized cargo

る試験機は、神戸商船大学貨物動揺損害試験装置の一部である、電気油圧方式の振動試験機である。加振方向は水平または鉛直の一方向、周波数は5Hzから100Hz、加振能力は最大重量500kg搭載時に最大変位30mm、最大速度45cm/sec、最大加速度5Gとなっている。

ところで、阪神・淡路大震災による荷崩れが本研究をはじめた動機のひとつである。地震動は卓越周波数1Hz前後の3次元的な不規則振動<sup>4)</sup>であり、本試験機で再現することは不可能である。そこで本実験では、パレタイズ貨物の荷崩れ防止対策の検討およびその効果を定量的に評価するための基礎的な資料を得るために、振動は水平方向の正弦波として、振動周波数は、本試験機で再現できる最小周波数に近い7Hzとする。従って、より高周波数の上下方向振動が卓越する輸送中の振動や衝撃的な加速度が作用する場合の荷崩れ特性については改めて検討する必要がある。

パレタイズ貨物を構成する段ボール箱は、ABフルートの複両面段ボールを形成したものの（縦44cm、横31cm、高さ20cm）で、段ボール表面には形成用として上下面にI型に布テープを接着したのみで、ペイントなどは一切施されていない。また、箱の個装重量は0.64kg、2.0kg、4.0kgの3種類とし、0.64kgの場合は空箱、2.0kgの場合は箱の中に新聞紙をくしゃくしゃにして移動しないように詰め込んだもの、4.0kgの場合はFig. 2に示す

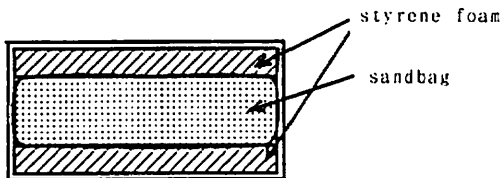


Fig. 2 Inside of 4.0kg corrugated container

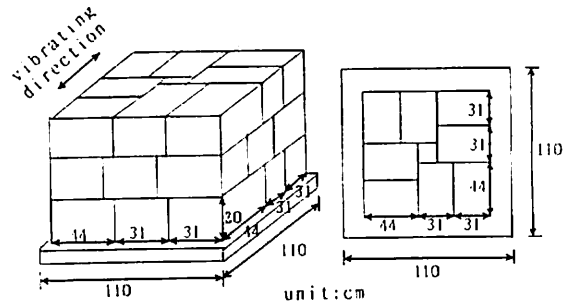


Fig. 3 Palletized pattern of tests

ように発泡スチロール製の板に砂袋をはさみこんだものとし、いずれの重心位置も箱の体積中心となるようにし、振動実験中に中身が移動し重心位置が変化しないようにした。

Fig. 3は、今回のパレタイズパターン（ピンホイール積）を示す。使用するパレットは、一般によく用いられている、サイズ110cm×110cmの樹脂製パレットで、パレット表面にはところどころに直径3cm程度のゴム製の滑り止め処理が施されている。

また実験においては、パレタイズ貨物の個々の運動を計測するために、2台のCCDカメラを用いた3Dトラッカー<sup>5)</sup>を使用している。

### 3. 個々の貨物の運動時系列特性

Fig. 4にパレタイズされた個々の段ボール箱の運動を表現する軸の定義を表している。振動方向と直角な方向をX軸、振動方向をY軸、鉛直上向きをZ軸とし、それぞれの軸の周りの回転運動をそれぞれ $\Omega_x$ 、 $\Omega_y$ 、 $\Omega_z$ とする。このように個々の箱の運動は6自由度の運動で表現される。

今回のパレタイズ貨物は、各段8個ずつ計24個の段ボール箱で構成されているが、すべての箱の運動を計測するのは手間がかかるの

で、今回は Fig. 5 に示すような位置の箱の運動を計測した。ただし、今回のパレタイズパ

ターンと振動方向から考えて、これらの箱の位置のみですべての箱の定性的運動特性を代表できるものと考えられる。

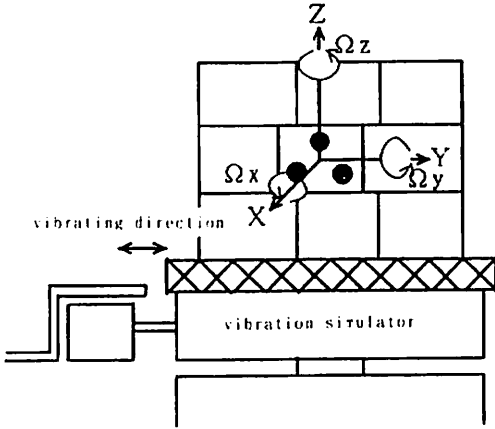


Fig. 4 Definition sketch of axes

### 3.1 運動時系列特性へおよぼす箱の上下位置の影響

Fig. 6 は、加速度振幅0.4G、個装重量0.64 kgで荷崩れ防止対策が施されていない場合の、段ボール箱個々の運動時系列の一例を示す。また図中の実線は上段、破線は中段、太線は下段を示し、対象の段ボール箱の位置は、Fig. 5 に示すA列である。運動の計測は、1個ずつの箱でしかできないので、例えば上段の各軸の運動は同時刻で比較できるが、ひ

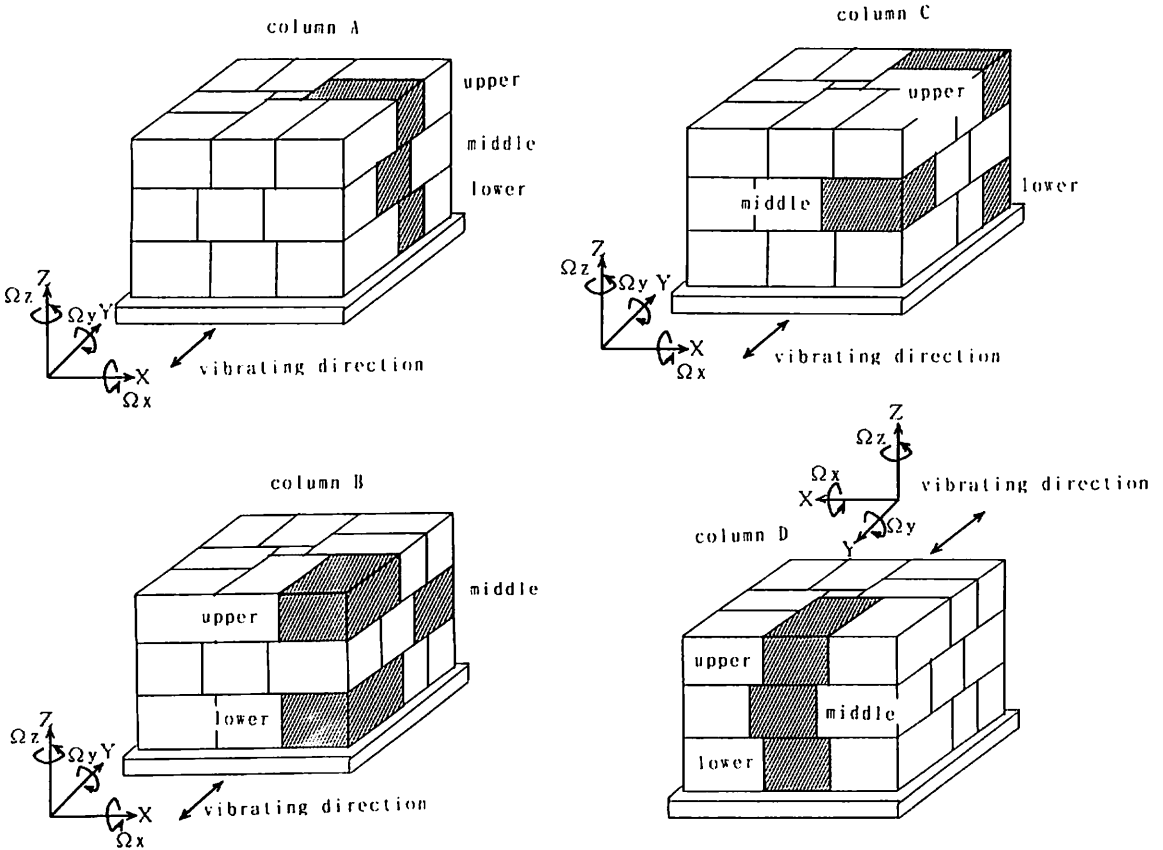


Fig. 5 Positions of measurements

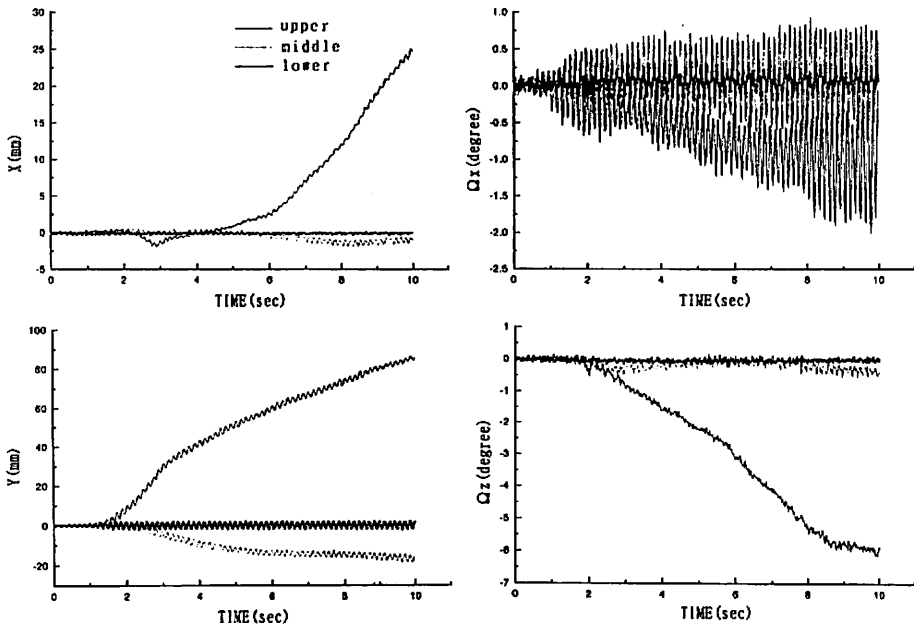


Fig. 6 Time series of motions (0.4G, 0.64kg, column A)

とつの運動モードについて段別の同時刻での運動量について厳密には比較できない。

Fig. 6より、水平振動のみが加わっているにも関わらず、段ボール箱が精密に直方体でないためや現実の段ボールでは摩擦力が局部的に異なっていると考えられるために、段ボール箱は一方向の滑りだけでなく3次元的な運動を起こしていることがわかる。変位量は上段が大きく動いて、下段はほとんどずれていない。これは、上段には底面のみ摩擦力、中段には上下面に段ボールどうしの摩擦力（摩擦係数約0.4）、下段には上面に段ボールどうしの摩擦力と底面には段ボールと滑り止め付きパレット表面の摩擦力（摩擦係数約0.6）が作用しており、各段により異なる摩擦力が一因であろう。これより、上段の段ボール箱がロッキング（ $\Omega_x$ ）をしながら、振動方向（Y）に移動しながらも、パレットから飛び

出す方向（X）に回転（ $\Omega_z$ ）しながら移動し荷崩れへ至る状況がわかる。

### 3.2 運動時系列特性へおよぼす箱の列位置の影響

Fig. 7は、加速度振幅0.4G、個装重量0.64 kgで荷崩れ防止対策が施されていない場合の、Fig. 5に示す各列それぞれ上段の段ボール箱個々の運動時系列を示す。Fig. 5より明らかのように、パレットから飛び出す方向はそれぞれ、A列では+X方向、B列では+Xおよび-Y方向、C列では+Xおよび+Y方向、D列では+Y方向である。

Fig. 7より、Y方向のみの振動が加わっているにも関わらず、各列上段の箱がそれぞれ別々に移動しており時間とともに荷割れしていった様子が見られる。Fig. 7の場合には、A列、B列、C列の上段の箱が振動方向と

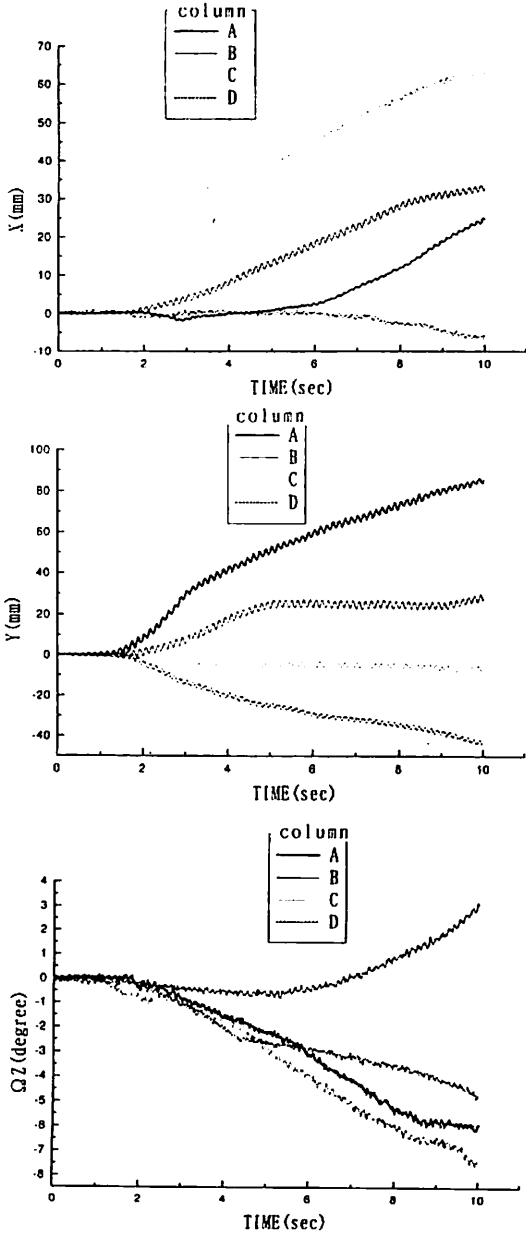


Fig. 7 The effect of column on the movements (0.4G, 0.64kg, upper)

直角な方向に移動していき、いずれはパレットから飛び出し荷崩れへ至ることがわかる。

### 3.3 運動時系列特性へおよぼす箱の個装重量の影響

Fig. 8は、加速度振幅0.4Gで荷崩れ防止対策が施されていない場合の、Fig. 5に示すA列上段の段ボール箱の運動時系列を個装重量別に示したものである。

Fig. 8より、重量2.0kgの場合にロッキング運動が顕著に大きくなって振動方向にはほとんど移動していないことがわかるが、これは2.0kgの箱が他の2つよりも若干丸みを帯びて、結果的にロッキングしやすかったためであり、重量の影響とは考えられない。また箱が飛び出す方向Xの定性的挙動は重量別に明確な特徴はない。これは重量に関わらず強制的な加速度が加わり、重量の増加に伴って慣性力も増加するためである。従って個装重量を大きくしてもすぐには荷崩れしにくいとは結論できないことは明白である。

### 3.4 運動時系列特性へおよぼす荷崩れ防止対策の影響

Fig. 9は、加速度振幅0.4G、個装重量0.64kgで荷崩れ防止対策が施されていない場合と荷崩れ防止対策を施した場合の、Fig. 5に示すA列上段の段ボール箱の運動時系列を示したものである。

Fig. 9の実線は荷崩れ防止なし、太線は荷崩れ防止対策としてパレットと下段の段ボール箱および下段と中段、中段と上段の段ボール箱の間にポリエステルフィラメントに塩化ビニール発泡を加えた網目状の荷崩れ防止シートを施した場合、極太線は荷崩れ防止対策として上段の段ボール箱に再利用可能なタイプの水平バンドを掛けて一体化させた場合を示している。

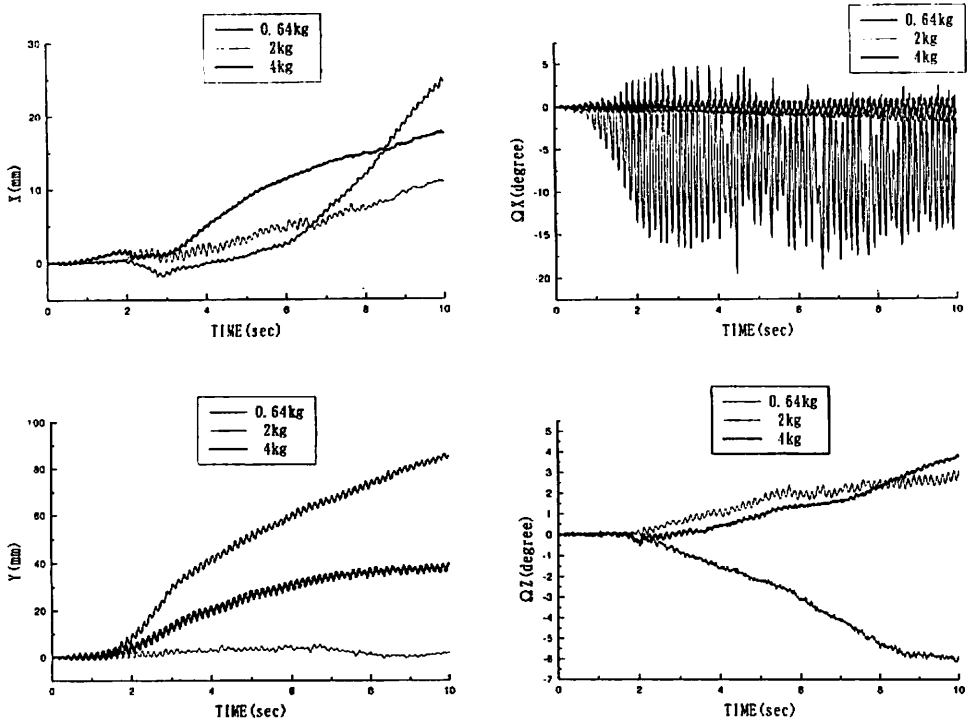


Fig. 8 The effect of weight on the movements (0.4G, column A, upper)

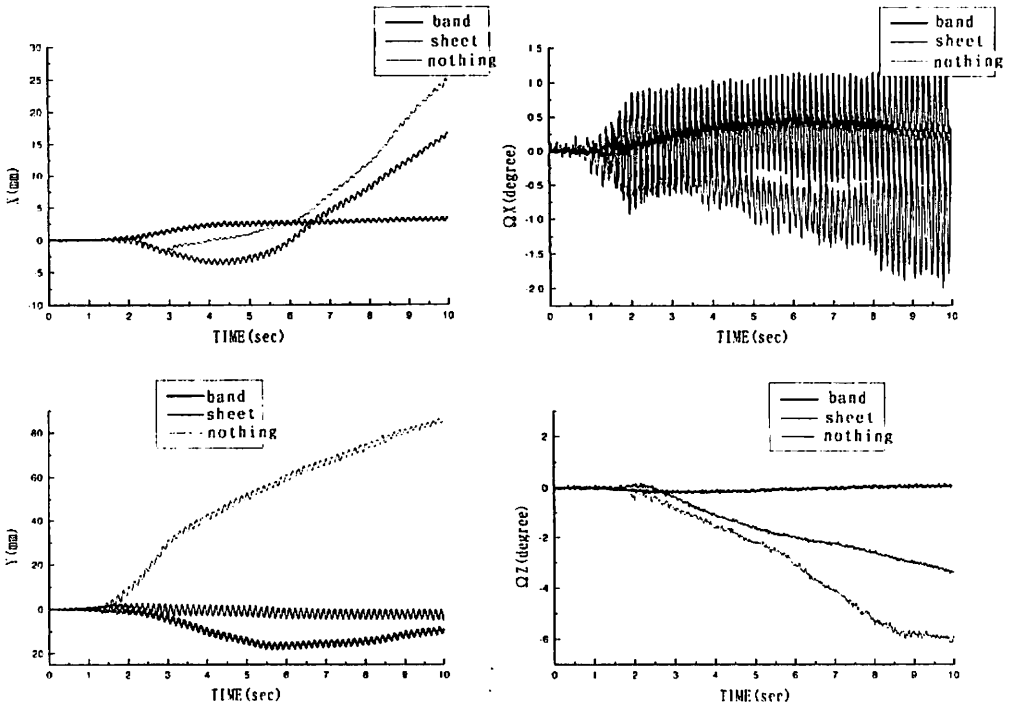


Fig. 9 The effect of countermeasure on the movements (0.4G, column A, 0.64kg, upper)

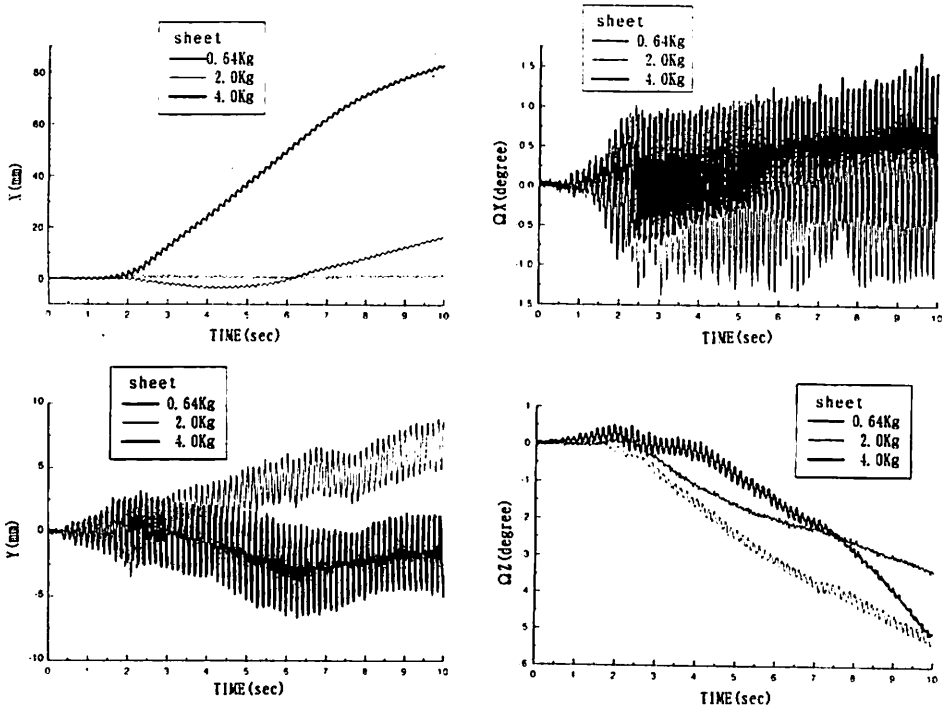


Fig. 10 The effect of weight with sheet on the movements (0.4G, column A, upper, sheet)

Fig. 9より、バンド掛けした場合には、段ボール箱の移動はほとんどなく、荷崩れ防止効果が認められる。これは、バンド掛けを行い上段の段ボール箱すべてに一体性を持たせることによって、全体としての荷動きを押さえるためである。

また段ボールどうしの最大静止摩擦係数が約0.4であるのに対して、荷崩れ防止シートを施した場合は、最大静止摩擦係数が約0.6と向上するにもかかわらず、箱の動きには荷崩れ防止対策がない場合と定性的には変化がないことがわかる。

一方Fig. 10は、加速度振幅0.4Gで荷崩れ防止対策として荷崩れ防止シートを施した場合の、Fig. 5に示すA列上段の段ボール箱の運動時系列を個装重量別に示したものである。

Fig. 10より、重くなるほどパレットから

飛び出すX方向の移動量が大きくなっているが、この原因ははっきりしない。しかしながら、箱の重量が変化した場合にもその挙動が明確に小さくなることはない。従って、荷崩れ防止対策としての荷崩れ防止シートは本試験条件の範囲内の振動外力が加わる場合に用いても荷崩れ防止効果はないことが明らかになった。ただし荷崩れ防止シートは水平バンドとの併用で用いられることが多く、紙、ポリエチレン等の袋物貨物でより効果があるとされており、他の試験条件での実験を行うことも含めて今後ともその荷崩れ防止効果について検討を加えていく予定である。

#### 4. 荷動き現象の評価

床面が振動をはじめて個々の段ボール箱



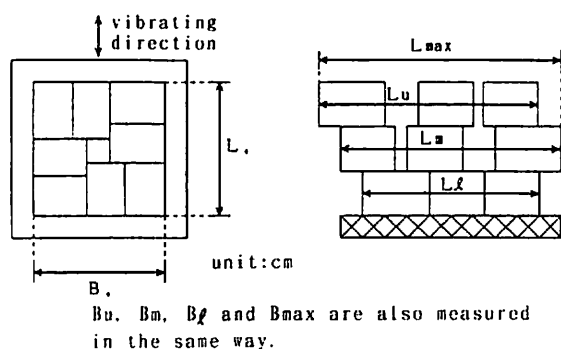


Fig. 11 Definition sketch of cargo movement parameters

は、別々に運動し荷割れを起こしながら荷崩れへ至る。したがって個々の運動をみてもパレタイズ貨物全体の荷割れの様子はイメージしにくい。そこでここではパレタイズ貨物全体が荷割れから荷崩れしていく過程を定量的に記述する方法を提案する。

Fig. 11 に示すように、振動させる前のパレタイズ貨物の振動方向の長さを  $L_0$ 、振動と直角方向の長さを  $B_0$  とし、振動しているときの各段の外寸をそれぞれ下から  $L_e$ 、 $L_m$ 、 $L_u$ 、 $B_e$ 、 $B_m$ 、 $B_u$  とし、パレタイズ貨物の全体の外寸をそれぞれ  $L_{max}$ 、 $B_{max}$  とする。ただし振動しているときの外寸は計測できないので、適当な間隔で振動試験機を止めそのときの外寸を計測している。このとき荷動きの量を示すパラメータとして、以下のような量を定義する。

・ 振動方向の拡がり量

下段： $L_e/L_0$

中段： $L_m/L_0$

上段： $L_u/L_0$

全体： $L_{max}/L_0$

・ 振動と直角方向の拡がり量

下段： $B_e/B_0$

中段： $B_m/B_0$

上段： $B_u/B_0$

全体： $B_{max}/B_0$

・ 外寸面積の拡がり量

下段： $(B_e L_e) / (B_0 L_0)$

中段： $(B_m L_m) / (B_0 L_0)$

上段： $(B_u L_u) / (B_0 L_0)$

全体： $(B_{max} L_{max}) / (B_0 L_0)$

Fig. 12、Fig. 13、Fig. 14 は、荷崩れ防止対策が施されていないパレタイズ貨物の、荷崩れへ至る荷動きパラメータの変化を示す。ここに、 $N_s$  は荷崩れを起こす振動回数であり、横軸には荷動きしているときの振動回数  $N$  を荷崩れ振動回数  $N_s$  との比で表している。ただし荷崩れの判断は、パレタイズされた1個以上の段ボール箱が落下するときと定義し、Fig. 15 にそのときの状況の一例を示す。また振動加速度として、振幅がそれぞれ  $0.2G$  (○印)、 $0.4G$  (△印)、 $0.8G$  (×印) の三種類で、それぞれの荷崩れ振動回数  $N_s$  は異なっている。

段ボールどうしの最大静止摩擦係数は、実験によれば  $0.4$  程度である。物体が滑るかどうかの限界は、単純には慣性力  $m\alpha$  と摩擦力  $\mu mg$  により、 $\mu = \alpha/g = G$  で与えられる。しかしながら図をみるかぎりでは最大静止摩擦係数  $\mu = 0.4$  以下の振動加速度  $0.2G$  であっても段ボール箱が滑り、荷崩れにまで至っていることがわかる。これは、3.で述べたように、段ボール箱は振動方向の滑りだけでなく3次元的な6自由度運動を起こしており、単純に滑り摩擦のみでは荷動き挙動を説明できないためである。また、摩擦係数を測定するための傾斜実験では物体表面に静的な摩擦力を加わるのに対して、振動実験では物体表面

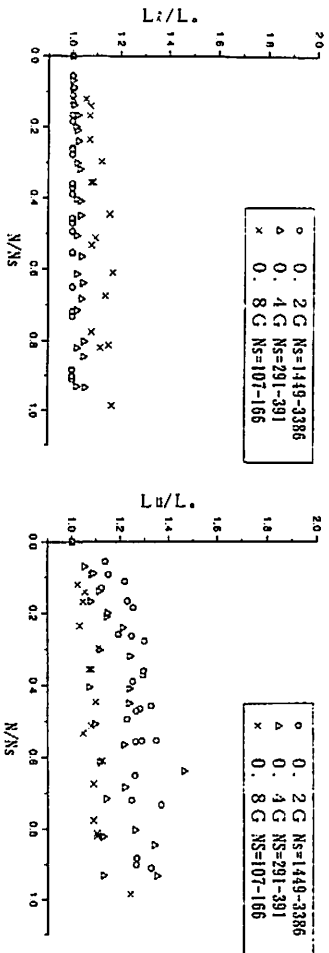


Fig. 12 Cargo movement parameters on L

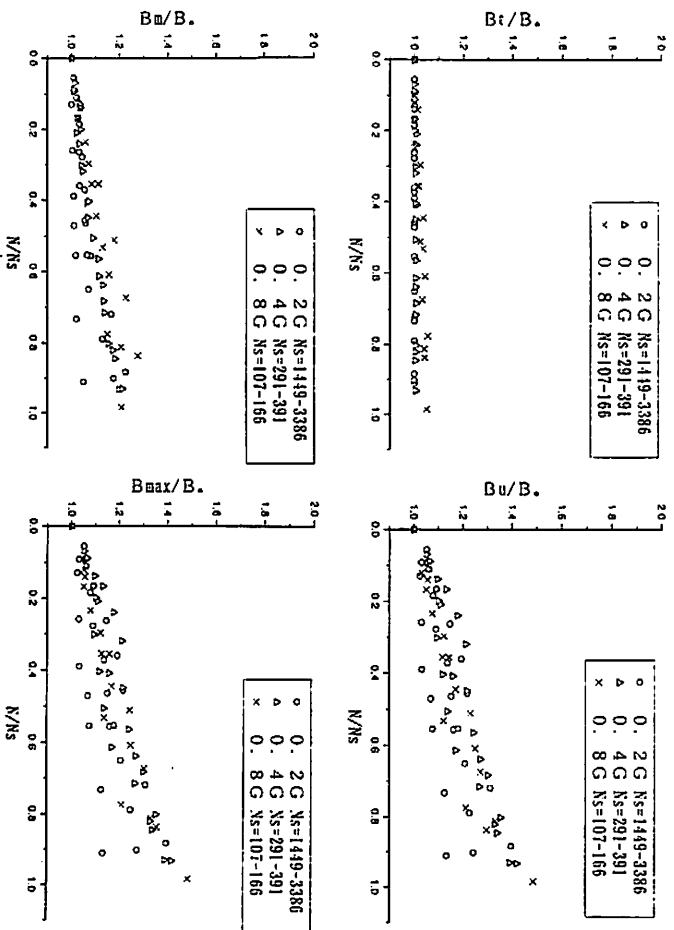


Fig. 13 Cargo movement parameters on B

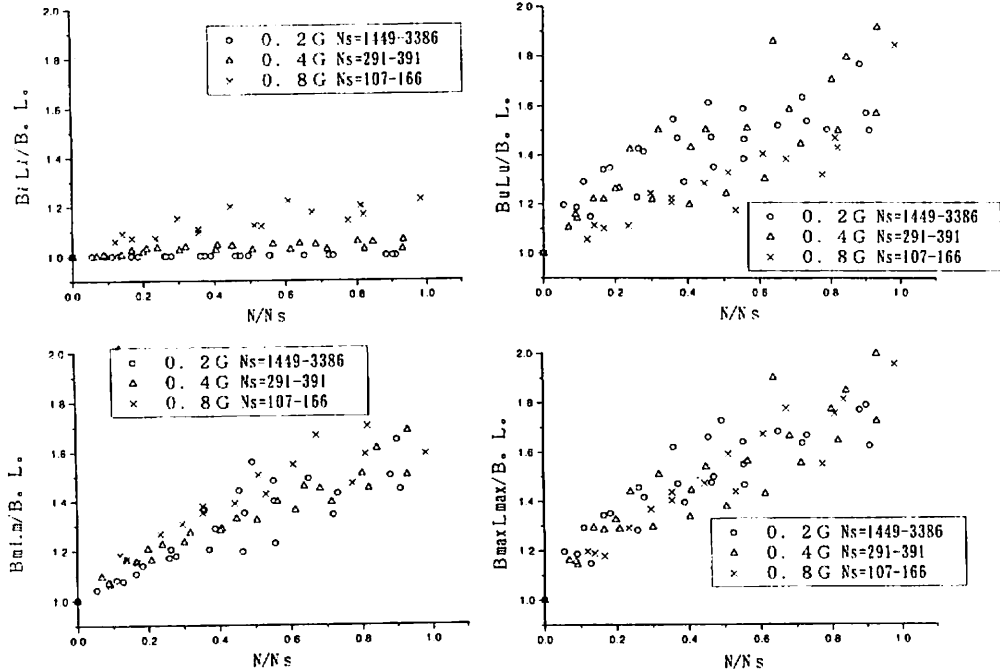


Fig. 14 Cargo movement parameters on B × L

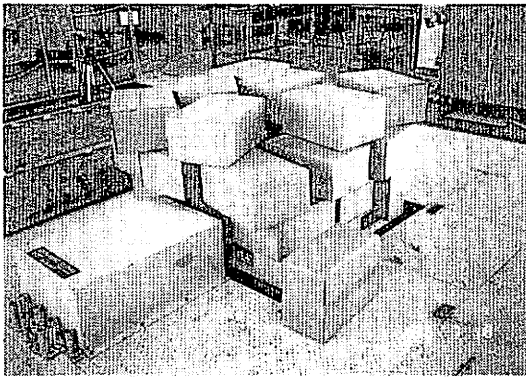


Fig. 15 Typical situation of pull down

に振動的な摩擦力が繰り返して作用し、微視的に見た場合に表面どうしがより早くはがれやすくなることも一因であると考えられる<sup>6)</sup>。

Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 より、荷崩れへ至るまで上段になるほど荷動き量が大きいことが明らかである。また振動方向の移動量が、荷崩れ振動回数の約半分の振動までは大

きくなり、その後ほぼ一定量になっているのに対して、振動と直角方向へは、荷崩れ振動回数までほぼ一定の割合で荷動き量が増大しているのがわかる。ただし、荷崩れ振動回数での荷動きパラメータの値は、いずれの方向においても 1.4 程度であり、結局面積で表される荷動きパラメータが 2 程度で荷崩れを起こしている。

さて、このときの荷崩れを模式的に考えてみる。今回のピンホイール積みの荷姿は縦、横ともに 106cm である。いま荷崩れする直前で個々の貨物の状態は各実験ケースでばらつきが多く一概に言うことは難しいが、x、y 方向への変位に回転  $\Omega_z$  の運動が加わって結果的に縦横の外寸が片側につき段ボール箱の縦の長さの半分の 22cm づつ外側へずれたとき落下すると仮定してみる。このときの荷動きパラメータは  $\{(106 + 22 \times 2) / 106\}^2 =$

2となり、実験により得られた、面積で表される荷動きパラメータに一致する。従って荷崩れの際の荷動きパラメータの値は、荷姿と個装寸法よりある程度予測可能であり、荷崩れ防止対策として何らかの強制的な方法により、個々の貨物とその長さから判断される大きさ以上に外側にずれないようにすることが考えられる。

また、各段の荷動きパラメータは振動加速度の振幅が0.8Gの場合は若干特性が異なるものの、パレタイズ貨物全体の荷動きパラメータでいえばすべての振動加速度で荷崩れへ至る途中の荷動きの特性はほぼ一致している。

## 5. おわりに

本研究では、パレタイズ貨物の荷崩れ防止対策の検討およびその効果を定量的に評価するための基礎的な研究の一部として、振動試験機によるパレタイズ貨物の荷崩れ実験を行い、以下のような結論を得た。

- (1) 水平振動のみが加わっていても、段ボール箱は一方方向の滑りだけでなく3次元的な運動を起こす。
- (2) 荷崩れへ至るまで上段になるほど荷動き量が大きく、荷姿と個装寸法の関係から荷崩れを起こす荷動きパラメータが推定できる。
- (3) パレタイズ貨物全体の荷動きパラメータを用いれば、すべての振動加速度で荷崩れへ至る荷動きの特性はほぼ説明できる。

また本実験により、荷動き量は実験ごとにはばつくことを確認しており、今後同条件下での荷崩れ特性に関する定量的評価を行う

ためにさらに多くの実験を繰り返して行う予定である。

さらに、現実の複雑な振動が作用する場合の荷動きおよび荷崩れ特性については、その都度実験を行うことは不可能である。従って、本研究のような基本的な振動が作用した場合の結果を基礎として、個々の貨物の動的応答を予測できる個別要素法<sup>7)</sup>等の数値モデルを構築し、現場での荷崩れ防止対策に役立てていきたい。

最後に本研究を行うにあたり、神戸商船大学の清水一貴学生には実験等においてご協力いただき謝意を表す。また本研究は、神戸商船大学震災研究会（文部省特定研究）の活動の一部であることを附記する。

## <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、石田廣史、日本航海学会誌 NAVIGATION、128、9 (1996)
- 3) 廣重茂延、自動倉庫の設計 (その1)、無人化技術、6、106 (1991)
- 4) 菅野高弘、三藤正明、及川研、港湾技研資料、813、207 (1995)
- 5) 斎藤勝彦、久保雅義、笹沢茂夫、土木学会海洋開発論文集、12、161 (1996)
- 6) 斎藤勝彦、久保雅義、日本航海学会論文集、95、325 (1996)
- 7) Cundall P. A., Technical Report MRD-2-74, Missouri River Division, U.S. Army Corps of Engineer, (1974)

(原稿受付 1997年3月31日)

(審査受理 1997年7月7日)