

# 段ボール貨物の重心に基づく台車運搬中の 横転荷崩れに関する研究

趙 潔\*, 渡 邊 豊\*

## Rollover of Carton Box Cargoes on a Moving Cart

Jie ZHAO\* and Yutaka WATANABE\*

本研究は、物流終端における戸口への個品配送時に、台車が路地裏等に入り込むコーナリングの遠心力により、運搬中の段ボール貨物が横転して荷崩れする現象を、実験により理論解析した。実験には、手押し台車と同型の自動走行台車を用い、実物の商品入りの異なる段ボール貨物を複数用意し、自動走行台車上に段積みした。自動走行台車は、人が普通に歩く速度(約1m/s)で走行させ、異なる三つの半径の曲路をコーナリングさせた。その結果、コーナリング中の段ボール貨物は、基本的には、遠心力と重力のモーメントのバランスが崩れた時に、コーナー外側の貨物最下端部を支点として円運動を行い横転することが分かった。しかし、同じ台車においても段ボール貨物の積載位置によって横転の有無は一樣ではなく、その現象は、台車の水平面上に原点を取った別の座標系を付加することで説明できることが分かった。

Deliveries of carton box cargoes by a cart occasionally cause rollover of the cargo in cornering of the cart. The authors assumed that the rollover was theoretically explained by the balance of moment between gravity and centrifugal force at the corner. In order to prove the assumption the authors carried out experiments of the rollover in which two different carton box cargoes loading real merchandises and an automated guided vehicle (AGV) as a moving cart were deployed. The AGV run at corners of three different radiuses. The result of the experiment fundamentally showed the rightness of the assumption. In addition, it was discovered that another centrifugal force existed on the surface of the AGV when the cargo placed at different locations on it on which occurrence of the rollover depended.

キーワード: 段ボール貨物、台車、横転、遠心力、モーメント

Keywords : Carton box cargo, Cart, Rollover, Centrifugal force, Moment of a force

### 1. はじめに

物流活動の末端では、宅配やコンビニへの納品を典型として、台車を用いた戸口へ

の個品配送が必ず発生する。このような台車による個品の運搬は、路上に駐車させたトラックから近距離にある複数以上の配送先まで、トラック運転手による人手で台車

\*東京海洋大学海洋科学技術研究科 〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6、

TEL: 03 - 5245 - 7370、FAX: 03 - 5245 - 7370 Email:ywatana@kaiyodai.ac.jp

\*Tokyo University of Marine Science and Technology Faculty of Marine Technology Etchujima 2-1-6、koto-ku135-8533, Japan TEL: 03 - 5245 - 7370、FAX: 03 - 5245 - 7370、

を押して、路地や歩道に入り込んで行かなければならない。したがって、短時間に小刻みな戸口配送が連続することとなり、ラッピングなどの工場出荷時に多用される荷崩れ防止策は、使いようがない。最近では、配達時間の指定もきめ細くなり路上駐車時間や駐車料金の制限から、無防備に個品が段積された台車を、小走りで押してゆくトラックドライバーを見かけることは日常茶飯事となった。その結果、配送貨物が台車運搬中に横転荷崩れを起こすことも常態化している。

台車運搬中の貨物が横転荷崩れを起こす原理は、積載された貨物の空間的な重心の位置に、台車がコーナリング中に遠心力が働き、重力とのモーメントの釣り合いが崩れたときに、その重心が安定状態から円運動を開始するとして説明できる<sup>1)</sup>。

そこで本研究は、自動走行台車を用いてコーナリング中に段積貨物の横転荷崩れを発生させる実験を行った。そして、段積貨物の重心の位置に起因する横転荷崩れ限界条件を力学的に構築し、当該実験結果と照合した。実験に用いる貨物としては、台車により戸口配送される個品の典型である、段ボール貨物を用いることにした。

## 2. 台車運搬中の段ボール貨物の横転荷崩れに関する既往研究

本研究は、個品の戸口配送を前提として、台車が走行を開始してごく短時間に路地裏

等へ入り、そのコーナリング時の遠心力によって段ボール貨物が横転し、荷崩れに至る現象の解明を目的とする。そこで、段ボール貨物の横転や荷崩れに関連する既往研究を下記に整理する。

まず、台車あるいはパレット上の段ボール貨物が、輸送時間の経過とともに振動が集積してゆくことにより、荷滑りや荷崩れを起こすことを研究した事例は、斎藤ら<sup>2)</sup>の研究が卓越して秀逸である。斎藤らの研究群が裏付けるように、段ボール貨物の荷滑りの問題は、物流現場において古くから対策が議論されてきており、例えば、山口<sup>3)</sup>は、段ボール貨物の荷滑り防止に効果的な各種接着剤や滑り止め防止素材を紹介している。

パレット貨物や大型貨物を一体として固縛して荷崩れを防止する事例としては、例えば、吉野<sup>4)</sup>は立体自動倉庫内で搬送されるパレット貨物が荷崩れを生じないように水平方向に凹型レールを設置して支える装置を開発した。また、菅田<sup>5)</sup>は、製鉄所内で大型製品コイルを搬送する台車で用いる、転倒防止固縛装置を開発した。

大型輸送容器内での貨物の荷崩れを防止しようとする事例としては、例えば、渡辺<sup>6)</sup>は、旧国鉄によって開発された貨車内貨物の荷崩れ防止対策を紹介している。また、永田<sup>7)</sup>は、コンテナ内貨物の荷崩れ防止のための収納方法と点検事項についてまとめている。

以上のように、段ボール貨物の荷崩れに

関する研究や事例は少なくないが、本研究が目的とする、振動が集積する間もなく横転し、荷崩れ防止材や装置に頼ることができない環境下での事例は見当たらない。

### 3. 台車運搬中の段ボール貨物の横転荷崩れ力学

#### 3.1 台車上への段ボール貨物の積載状態と重心位置に関する仮定

まず、台車が直線を定速度で走行している状態を初期状態とする。このとき、台車上には段ボール貨物が台車の形状に正対して段積されていると仮定する。つまり、台車も段ボール貨物も長方形であるので、両者の向きは左右と進行方向で同じ向きであるとする。また、段ボール貨物の中には質量が均一な貨物が収められていると仮定し、個々の段ボール貨物の重心位置は前後左右上下のそれぞれ中心にあると仮定する。したがって、台車上に段積された段ボール貨物の全体としての重心位置は、前後方向であればその高さの半分の位置となる (Fig. 1)。

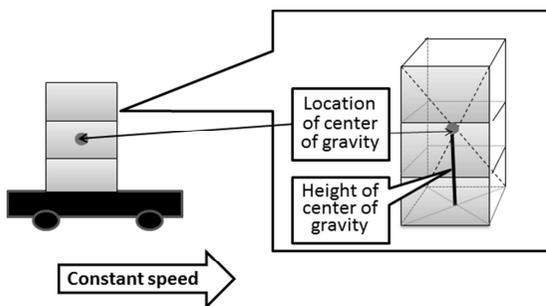


Fig.1 Center of gravity of carton box cargoes

#### 3.2 台車の中心に段ボール貨物が段積みされた場合のコーナリング中の横転荷崩れ限界速度

以上の仮定に基づいて、まず、台車の左右中心に段ボール貨物が段積みされた場合のコーナリング中の横転荷崩れ限界速度を定式化する。直線を定速度で走行している台車がコーナーに入ると、段積された段ボール貨物の全体としての重心（以後重心と記す）には、コーナーの外側に向かって遠心力が発生する。重心には、いかなる場合においても垂直下方に向かう重力も働いている (Fig.2)。

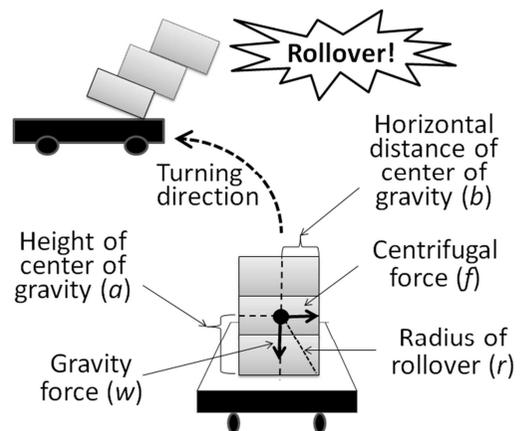


Fig.2 Rollover of cargoes on a turning cart

したがって、台車がコーナリング中には、重心に遠心力に伴うモーメント、

$$f \cos \theta r \quad (1)$$

と、重力に伴うモーメント、

$$w \sin \theta r \quad (2)$$

が同時に生じる。ここで、

$f$  : 重心をコーナーの外側に押し出そうとする遠心力

$w$  : 重心を垂直下方に押し下げようとする重力

$r$  : 台車上の段ボール貨物の最下段底面のコーナー外側端と重心を結んだ直線の長さ

$\theta$  :  $r$ と垂線がなす角である。

このとき、遠心力に伴うモーメントが重力に伴うモーメントに勝れば、重心は半径を  $r$ とした円の軌道に沿って横転を開始し、台車上の段ボール貨物は横転荷崩れを開始すると判断できる。したがって、

$$f \cos \theta r \geq w \sin \theta r \quad (3)$$

が台車上の段ボール貨物の横転荷崩れ条件となる。ここで、遠心力は質量と台車の走行速度とコーナーの半径で、また、重力は質量と重力加速度で記述することができるので、式 (3) は、

$$v \geq \sqrt{Rg \tan \theta} \quad (4)$$

と書き換えることができる。ここで、

$v$  : 台車の走行速度

$R$  : 台車が走行するコーナーの半径

$g$  : 重力加速度

である。また、 $\tan \theta$ は、台車上面から重心までの垂直高さ、重心からコーナー外側の段ボール貨物の端までの水平長さで求めることができるから、最終的に、

$$v \geq \sqrt{Rg \frac{b}{a}} \quad (5)$$

を得る。ここで、

$a$  : 台車上面から重心までの垂直高さ

$b$  : 重心からコーナー外側の段ボール貨物の端までの水平長さ

である。

### 3.3 台車の中心から左右にずれて段ボール貨物が段積された場合のコーナリング中の横転荷崩れ限界速度

次に、段ボール貨物が台車の中心から左右にずれて段積みされた場合のコーナリング中の横転荷崩れ限界速度を定式化する。この場合に注意すべきことは、台車上の段ボール貨物の積載位置によって、3.2節の定式化には表れない、もう一つ別の遠心力が存在することである。それを Fig. 3 に示す。

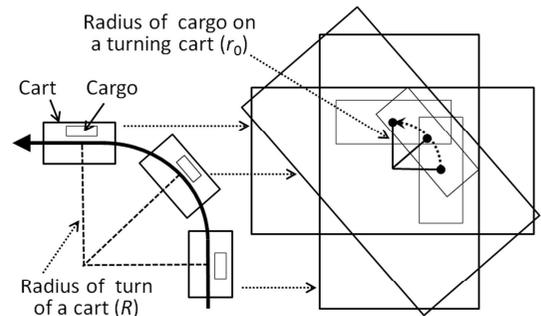


Fig.3 Radius of cargo on a turning cart

この図において、段ボール貨物は、台車の中心からコーナーの外側方向あるいは内側方向に一定の長さだけずれて積載されていると仮定する。まずここで、

$r_0$  : 段ボール貨物の台車上の積載位置と台車の中心とのずれの距離

とする。このとき、台車の中心を原点に取る座標系を考えると、コーナリング中に段ボール貨物は、台車の中心に対して半径を

$r_0$ とする円運動を生じていることになる。したがって、コーナリング中に重心に働く遠心力には、3.2 節に述べたものに加えて、台車の中心を原点に取る座標系から生ずる遠心力も加味する必要がある。

ここで、段ボール貨物が台車の中心からコーナーの外側方向に、 $r_0$ だけずれて積載されている場合の重心に働く遠心力を例にとると、それは次のようにして求めることができる。まず、台車が歩道から路地裏へと90度向きを変えるコーナリング走行を行った状態を考える。このとき重心の水平位置は台車の中心に対して、

$$\frac{2\pi r_0}{4} \quad (6)$$

の距離の円運動を行うことになる。これに要する時間は、台車の中心がコーナーを走行する距離と速度から、

$$\frac{2\pi R}{4v} \quad (7)$$

となる。したがって、台車の中心を原点とした座標系上において重心は、

$$\frac{vr_0}{R} \quad (8)$$

の速度で円運動を行う。これに伴う遠心力は、ダンボール貨物の質量を  $m$  とすれば、

$$m \frac{v^2 r_0}{R^2} \quad (9)$$

となる。したがって、台車の走行中に重心にかかるすべての遠心力は、

$$m \frac{v^2}{R} + m \frac{v^2 r_0}{R^2} \quad (10)$$

となる。これを用いて式(3)から式(5)への展開を書き換えると、

$$v \geq \sqrt{\frac{Rgb}{(1 + \frac{r_0}{R})a}} \quad (11)$$

となる。同様に、段ボール貨物が台車の中心からコーナーの内側方向に、 $r_0$ だけずれて積載されている場合は、

$$v \geq \sqrt{\frac{Rgb}{(1 - \frac{r_0}{R})a}} \quad (12)$$

となる。

#### 4. 自動走行台車を用いた運搬中の段ボール貨物の横転荷崩れ実験

##### 4.1 実験方法

本研究では、上述した台車運搬中の段ボール貨物の横転荷崩れ力学の妥当性を検証するために、自動走行台車を用いた運搬中の段ボール貨物の横転荷崩れ実験を実施した。この実験には、宅配やコンビニへの納品に多用されている人手による押し台車と同形の自動走行台車を用いた (Fig. 4)。本研究が用いた自動走行台車は、床面に張り付けた磁気テープに沿って走行するタイプであり、その仕様の概要は Table 1 に示すとおりである。

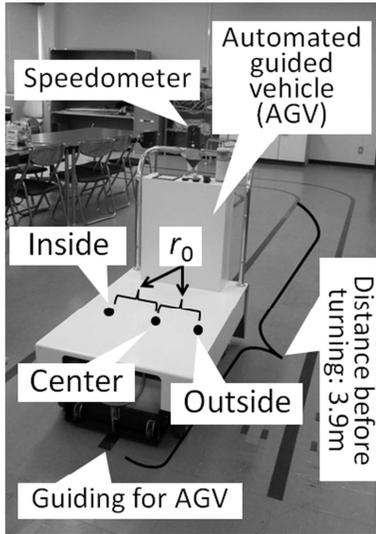


Fig. 4 Automated guided vehicle (AGV) for experiments

Table 1 Specifications of AGV for experiments

Maker	NISSAN
Model	SAV2-2LMC
Guiding system	Magnetic tape
Velocity	Less than 1.2 m/s
Minimum turning radius	600 mm
Length	954 mm
Width	600 mm
Height	975 mm
Drive	DC motor

自動走行台車が走行する走行路は、路上にて手押し台車で直線を走行の後に路地裏へと曲がりこむ状態を想定し、直線部分を3.9 m 取り、その後に90度に曲がってゆくコーナーを設置した。またコーナーには、3つの異なる半径 ( $R = 0.46 \text{ m}$ 、 $0.61 \text{ m}$ 、 $0.92 \text{ m}$ ) の曲路を用意した (Fig.5)。

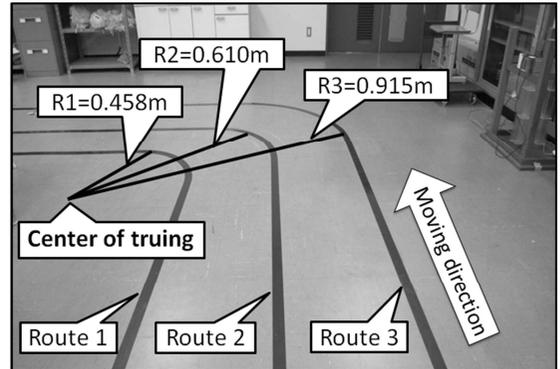


Fig.5 Guided routes for AGV of experiments

この状態で、自動走行台車には、商品入りの実物の段ボール貨物を2種類用意して (Fig. 6)、それぞれを段積みし、約1.0 m/sの速度で自動走行台車を直線走行させてコーナーに侵入させ、段ボール貨物が横転荷崩れを起こすか否かを観測した (Fig.7)。

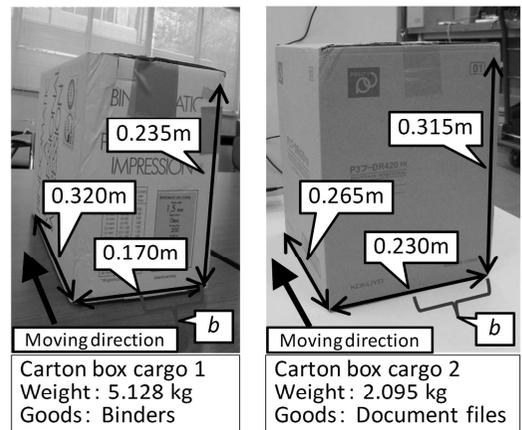


Fig.6 Carton box cargoes for experiments



Carton box cargo 1s  
on the center of AGV



Carton box cargo 2s  
on the outside of AGV

**Fig.7 Conditions of experiments**

自動走行台車への段ボール貨物の積載位置は、式 (11) と式 (12) との整合性を検証するために、自動走行台車の中央とコーナー内側と外側へ、それぞれ等間隔 (段ボール 1 :  $r_0 = 0.215$  m、段ボール 2 :  $r_0 = 0.230$  m) ずらした三か所とした (Fig.4)。

なお、自動走行台車は蓄電池によるモーター駆動のため、その走行速度は電圧変動や積載物の質量の影響を受けて微妙に変動する。そこで本研究では、自動走行台車に速度計を設置して、実験時の個々の走行ごとに自動走行台車の速度を計測した。

#### 4.2 理論上の段ボール貨物の横転荷崩れ段数

本研究では、一つの段ボール貨物の重心位置を、上下左右前後方向の中心にあると仮定した。したがって、自動走行台車上に段積した段ボール貨物全体の重心位置は、まず、高さ方向については段ボール貨物全

体の高さの半分の位置になると仮定した。同様に、水平方向についても段ボール貨物の左右方向の幅の半分の位置になると仮定した。この仮定に基づいて、式 (11) と式 (12) の  $a$  と  $b$  の値に段ボール貨物全体の重心位置を代入する。これによって求められる速度が、実験時の自動走行台車の速度以下になる限界の段数を見つけて、理論上の段ボール貨物の横転荷崩れ段数とする。具体的には、以下に基づき計算する

$$v' = \sqrt{\frac{Rgb}{(1 \pm \frac{r_0}{R})na_0}} \quad (13)$$

ここで、

$v'$  : 段ボール貨物を  $n$  段積載した場合の横転荷崩れ限界速度

$a_0$  : 一つの段ボール貨物の高さの半分の値

$b$  : 段ボール貨物の左右水平方向の幅の半分の値 (段積

段数にかかわらず不変)

$n$  : 段積段数

である。式 (13) のルート内の分母の±の符号は、+の場合が式 (11) の積載状態に、-の場合が式 (12) の積載状態に、それぞれ対応している。したがって、

$$v' \leq v_R \quad (14)$$

となるまで式 (13) の  $n$  を増加させて計算を繰り返せばよい。ここで、

$v_R$  : 実験によって段ボール貨物が横転荷崩れを生じた時の自動走行台車の速度である。

### 4.3 実験結果

4.1 節に述べた方法で行った実験結果と、4.2 節で述べた理論上の段ボール貨物の横転荷崩れ段数を比較した結果を、Table 2 に示す。また、実験において横転荷崩れを起こした瞬間の状態の例を、Fig. 8 に示す。Table 2 には、実験に用いた 2 つの異なる段ボール貨物ごとに、自動走行台車上の積載位置と横転荷崩れを起こした積載段数と、その時の自動走行台車がコーナーに進入する直前の直線走行時の速度、そして、式 (13) と式 (14) から計算される理論上の段ボール貨物の横転荷崩れ段数と横転限界速度を整理した。

これを見ると、質量の重い段ボール貨物 1 の実験結果は、理論との適合状態が良好である。例えば誤差を考慮して、実験時の横転荷崩れ段数の ± 1 段の範囲内に、理論

上の横転荷崩れ段数が合致した場合は、実験結果が理論を裏付けたと判断すると (Table 2 における背景色付きの実験結果)、その割合は、全体で 77% に及ぶ。特に走行路 2 と走行路 3 においては、100% に至った。



Fig.8 Rollover occurred on an experiment

Table 2 Results of experiments

		Route 1			Route 2			Route 3		
		Inside	Center	Outside	Inside	Center	Outside	Inside	Center	Outside
Carton box cargo 1	Theory	7	4	3	7	5	4	8	6	6
	Velocity (m/s)	0.9	0.7	0.6	1.0	0.8	0.8	1.0	1.0	0.9
	Experiment	7	7	6	7	6	5	8	6	6
	Velocity (m/s)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0
Carton box cargo 2	Theory	7	5	3	8	6	4	9	9	6
	Velocity (m/s)	1.3	0.8	0.7	1.1	0.9	0.8	1.3	1.0	1.0
	Experiment	4	5	4	6	5	5	5	6	5
	Velocity (m/s)	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0

これに対して、質量の軽い段ボール貨物 2 の実験結果は、理論との適合状態が芳しくない。その割合は、全体で 55%程度であり、この傾向は走行路の相違にも依存しない。

#### 4.4 段ボール貨物の横転荷崩れ要因に関する考察

段ボール貨物 1 と段ボール貨物 2 の実験結果が、理論との適合状態において良否に分かれた理由は、次のように考えることができる。式 (11) と式 (12) を導く仮定としては、段ボール貨物に変形しない固形物であるとの前提に基づいている (Fig. 2)。しかし、現実には段ボールは材質が紙であるため変形する。特に、内部に商品を満載した時の段ボール貨物は、内圧によって段ボールの外壁が円弧上にたわみやすい。この状態で段ボール貨物を段積すると、積載段数が多くなるにつれて不安定さが増し、台車が走行中に段ボール貨物自身が横揺れ自由振動を生じやすくなる。この現象は、段ボール貨物の質量が軽いほど、段ボール上部と下部の外壁が変形状態のまま接するので、不安定さが顕著になるはずである。逆に、質量が重たい段ボール貨物が段積されると、その自重により段ボール貨物の上面と下面が圧されて変形が相殺され、段ボール間の接地面が水平に保たれやすい。

したがって、質量が重たい段ボール貨物 1 のほうが式 (11) と式 (12) の論理に合致しやすいと言える。前節に述べたとおり

Table 2 はこれを裏付ける結果となっている。さらに、質量が軽い段ボール貨物 2 が横揺れ自由振動によって横転荷崩れを助長しているのであれば、式 (11) と式 (12) から割り出される段ボール貨物の横転荷崩れ段数より少ない段数で、実験では横転荷崩れが発生するはずである。Table 2 を見ると、段ボール 2 の実験結果は、理論と適合しなかったすべての結果において、実験時の横転荷崩れ段数は、理論の場合より少なくなっている。

ところで、段ボール貨物 1 については、走行路 1 のみが式 (11) と式 (12) の論理に合致できていない。この理由は、次のように考えることができる。走行路 1 の曲路 ( $R1 = 0.46 \text{ m}$ ) は、3つの走行路の中で半径が最も小さくなっている (Fig. 5)。本研究で用いた自動走行台車の定速走行維持可能な最小回転半径は、0.60m である。Table 2 に示した実験時の速度は、自動走行台車がコーナーに進入する直前の直線走行時の速度であるため、自動走行台車が走行路 1 の曲路に入った場合は、その速度は減速してしまう。

したがって、式 (11) と式 (12) から割り出される段ボール貨物の横転荷崩れ段数より多い段数で、実験では横転荷崩れが発生するはずである。Table 2 を見ると、段ボール 1 の実験結果において理論と適合しなかったすべての結果において、実験時の横転荷崩れ段数は理論の場合より多くなっている。

## 5. おわりに

本研究の結果から、台車運搬中の段ボール貨物の横転荷崩れは、重力と遠心力によるモーメントのバランスが崩れた時に生ずると説明できる。しかしながら、段ボール貨物は固形物ではなく変形しやすい物体であるので、特に比較的軽い貨物を段ボール内に満載に詰め込んだ状態では、本研究の理論から導き出される横転荷崩れ段数より低い段数で、段ボール貨物は横転荷崩れを起こしてしまう。本研究の実験結果は、この事実を立証した。これは、一般的な先入観である、重たい貨物の方が台車運搬中の危険性は高い、という認識と異なるものであり、物流現場における重要な問題と言える。

この問題の解決には、段ボール貨物を固形物の直方体としてではなく、その壁面が変形し不均一にたわんだ形状の物体として認識する、新たな研究のコンセプトが必要である。そのような状態で段ボール貨物を段積すれば、台車が直進中でも段ボール貨物は横揺れや自由振動を発生する恐れがある。したがって、今後は、移動中の段ボール貨物の重心の挙動を、動的に説明できる理論展開が必要である。加えて、コーナリング中の台車の減速の問題も無視できない。これらが、本研究の目指す次の課題である。

## <参考文献>

- 1) 渡邊豊、日本国特許第 4517107 号 (2010)
- 2) 斎藤勝彦、久保雅義、切通祐介、日本航海学会論文集、107、41(2002)
- 3) 山口克夫、Packpia、35 (8)、78(1991)
- 4) 吉野宮男、荷役と機械、31(7)、10 (1984)
- 5) 菅田英二、川崎重工技報、(86)、103(1984)
- 6) 渡辺正久、Japan Railway Engineer Association、24(2)、13951(1981)
- 7) 永田克明、物流技術情報、37(12)、49(1990)

(原稿受付 2011年5月25日)

(審査受理 2011年7月4日)