

4. フォークリフトの転倒災害の防止 (エアバッグ方式安全装置の開発)

深 谷 潔*
杉 本 旭*

Prevention of disaster caused by upset of forklift trucks

Kiyoshi FUKAYA*
Noboru SUGIMOTO*

A forklift truck is a useful machine. But it has a defect, i.e. it is unstable essentially. Because of the defect, upset accidents of forklift trucks occur. To protect an operator of a truck from such accidents, there is a need for safety devices.

A mathematical model of a forklift truck was made up and the degree of hazard of lateral upset during turning on the inclined ground was estimated. And the upset time was estimated to be 0.5-1.5 second.

The cab mockup with a man was inclined from 0° to 50° and the escape action of men was studied.

Several ways of safety devices were compared with each other. And one of them, i.e. air bag system was manufactured by way of trial. This system consists of air bag deploying subsystem and sensor of upset. This works in the following way. When a fork lift truck upsets, the air bag will deploy and close the sidespace of truck and prevent the operator's ejection or runaway out of the truck. The air bag also works as cushion for the operator.

To detect the upset, the pendulum-type sensors were tested. The sensors detected inclination well. The sensors picked up false signals due to the vibration of forklift truck, but these were eliminated to usable level by use of lowpass filter.

There are many ways to deploy the air bag. In this research the compressed air was used. In this method the deployment time were 0.5~1.0 second. This is comparable to the time of upset and air bag will deploy until the end of upset.

In the experiment, the air bag reduced the shock of dummy's strike on the ground to the human tolerance level.

In this research it was certified the air bag is useful to protect operator from injury.

* 機械研究部 Mechanical Engineering Research Division

4.1 はじめに

フォークリフトは、比較的狭い進路や置場所を利用して荷役・運搬ができる便利な機械である。そのため、その生産台数は、昭和40年の12000台から、昭和56年には93000台へと増加し、その普及ぶりを示している。

しかしながら、フォークリフトには、いくつかの欠点があり、そのうちとくに問題となるのは、その構造上、本質的に不安定性が存在するという点である。すなわち、カウンターバランス式のフォークリフトは、荷物を積載する部分であるフォークが、車体を支持する車軸の外側にあるという構造であるため、積載荷重が許容値を越えると、重心が車軸間の支持領域よりはみ出し転倒する。このことを考慮して積載荷重の許容値が決められているが、現実には何件かの転倒事故が起きている。

本研究においては、フォークリフトの転倒の原因とそれによる災害防止のための安全対策について検討を行い、転倒時における運転者の挙動の分析とモデル化したフォークリフトの転倒に対する静的、動的安定解析を行った後、災害防止に有効と考えられるエアバッグ方式の安全装置の試作とその効果の確認のための実験等を実施した。

4.2 転倒原因と安全対策の検討

4.2.1 転倒の危険性とその評価

フォークリフトの転倒には、前後方向の転倒と左右方向の転倒（横転）がある。前後方向の転倒は、フォークリフトの構造上、積載荷重をある程度以上オーバーした場合には必ず発生すると言える。しかしながら、転倒する程重い荷物をピックアップしようとした場合は、上昇中に後車輪が浮き上がるので、多少傾いた程度で重大事に至らないうちに転倒に気づきやすく、また、ピックアップするためにはフォークリフトを停止させねばならないので、その意味でも対策がたて易い。転倒には至らない程度の過荷重で走行中に急ブレーキをかけるとか、傾斜地に入るとかした場合には、やはり転倒の危険性がある。この場合には、運転者が座席から投げ出されることなどから災害になる可能性は高いと思われる。

次に横転について考える。フォークリフトの停止中には、横転の可能性はないものと思われる。走行中には、旋回する、地面の状態が変化する（舗装から未舗装へ変る、段差があるなど）、傾斜地を走行する、フォークを上げた状態で走る、偏荷重であるなどの安定性に不利な条件が重なる場合には、横転する可能性がある。

以上のように、フォークリフトの走行時に起きる転倒が、災害となる可能性が高いので、これらに対する対策を中心に考える必要がある。

4.2.2 安全装置の検討

従来、転倒に対する対策としては運転者の技量に頼るしか方法はなかった。しかしながら、人間のエラーは避け難いので、これを補うための機械の側での対策も必要となる。

転倒災害に対する安全装置として、転倒を防止するためのものと、転倒した場合の災害を防止するものが考えられる。前者に属するものとしては、積載荷重やフォークの高さなどを検出して、積み過ぎなどによる転倒危険性に対して警報を出すもの、半自動操縦にして、運転者の危険な操作（フォークを上げたまま速度を上げてカーブするなど）に対して応答しないもの、転倒を始めた際に支持物を張り出すなどして転倒を止めるものなどが考えられる。このうち、第1・第2のタイプのものは、既に試作ないし実用化の段階¹²⁾にある。又、第3のタイプのものは、走行中に棒を張り出すのはかえって危険であり、また強度などの面からみても、実現の可能性はうすいと思われる。

後者に属するものとして、フォークリフトが転倒を始めたならエアバッグを膨らませて運転者を保護する、シートベルトで運転者を座席に固定して転倒時に車外に投出されるのを防ぐ、ヘッドガードの横に張出を設け転倒時にヘッドガードと地面の間に隙間ができるようにするなどの方法が考えられる。このうち第2のものは、運転者をシートベルトで束縛するため、運転者の運転操作の妨げになる。また、第3のものは、平常の走行時に張出部が回りの物に当たる可能性があり、狭い場所で用いることができるというフォークリフトの利点を損う恐れがあり、いずれの方法もその使用に限界がある。これに対し第1のエアバッグ方式は、上述のような欠点は少なく、また他の運搬建設機械の転倒災害防止にも応用できる可能性がある。これらの理由により、本研究では、エアバッグ式安全装置を取り

上げた。

Tab. 1 Several ways of safety devices for protecting the operator of a forklift truck in time of upset
横転による転倒災害を防止するための安全装置の諸方式

転倒を防止する	物理的に防止する	側面に補助輪等を突き出す
	操作面で防止する 自動的に行う 運転者に警告を与えることで行う	運転者の危険なブレーキ、ハンドルなどの操作に対して、応答を変える。 運転者の危険な操作に対して警報を発する。
転倒時の災害を防止する	車輻の下敷になるのを防ぐ	ヘッドガードに張出を設ける シートベルトで運転者を保持する
	地面にたたきつけられるのを防ぐ	エアバックで運転者を守る

4.3 転倒時の運転者の挙動

4.3.1 実験のねらい

フォークリフトの転倒災害防止に関連して、フォークリフトにダミー(人体模型)を乗せて傾斜台から転倒させる実験を行ったが、この実験ではダミーがフォークリフトより先に地面に落ちるなどの現象がみられた。しかし、人間はダミーと違って能動的に動くことができるため、ハンドルにしがみついたり、逆に自分の方から積極的に運転席から飛び出すなどのことが考えられる。そのため、人間の転倒への対応の仕方によっては、装備された安全装置が役に立なかったり、かえって邪魔になったりする可能性も考えられる。有効な安全装置の開発には、転倒時の運転者の挙動を知っておくことは不可欠である。そのため次のような実験を行った。

4.3.2 実験方法及び結果

座席とハンドルよりなるフォークリフトの運転席模擬装置を作成した。座席は、現実のフォークリフトに用いられているものを使用した。ハンドルも、フォークリフトに使用されているものと同様の形状・寸法で

あるが、片手操作用のにぎりはなく、また固定されていて回転しない。また、その側面は開放されている。

この模擬装置を、傾斜台のヒンジ側の端に固定した。この傾斜台は、長さ3.5m、巾60cmの鉄製フレームの一端を高さ75cmの台上にヒンジで固定したもので、他端をクレーンで持ち上げるにより、フレーム上の物を自由に傾けることができるようになっている。

この模擬運転台に被験者を乗せて、運転台を水平位置から傾斜角50°に至るまで徐々に傾斜させて行く時、どの位の角度まで逃げ出さずにいられるかということ測定した。この際の傾斜速度は、毎秒4度である。この測定は条件を変えて、各3回づつ行った。測定の条件として、ハンドルをつかんだ場合と手を離れた場合、運転台と地面との高さを75cmの場合と0cmの場合の組合せの4種類のものを考えた。なお被験者は男子学生8名である。この測定の模様を Photo. 1 に示す。



Photo. 1 Upset Experiment of cab mockup
運転席転倒実験の様子

徐々に運転台を傾斜させて行くと被験者は、まず体を台の傾斜と反対方向に傾けるなどの対応をするが、ある程度以上傾くと、足の位置を動かし、最後に逃げ出す。この最初に、足を動かした時の角度と逃げ出した時の角度の平均値を Table 2 に示す。

Table 2 より、手をつかむところがある時の方がつかむところがない時よりも大きな角度まで頑張ることができ、台の高さが低い方が頑張ることができるということがわかる。運転席の高さが変わっても、被験者が座席に座っている限りは条件の違いはない。それにもかかわらず運転席の高さが高くなると早目に逃げ出す

Table 2 Average degree of cab mockup at the time of operator's run away
各測定条件ごとの脱出時の角度の平均

運転席の高さ	支持物	ハンドル	なし
0 cm	足を動かす	45.0°	35.0°
	逃げ出す	47.9°	37.3°
75cm	足を動かす	39.5°	31.9°
	逃げ出す	41.4°	37.2°

よくなるというのは、心理的影響と言える。すなわち、落ちるのが怖い・飛び降られるうちに降りようという気持ちが働くためと思われる。手でつかむところのあるなしによる差は物理的な差で、座席が傾いてくると臀部がずれ出すので、つかまるところがないと座席から落ちそうになる。被験者は座席から落ちる前に自分から逃げ出すのであるが、Table 2 より、その限界は、37°前後と思われる。

実際のフォークリフトでは、ハンドルがあり、運転席も高いところにあるので、この実験のハンドルあり、75cmのものが一番条件として近いが、この場合35°~45°の範囲で逃げ出している。従って、その以前に転倒を検出して運転者保護のための安全装置を起動しないと、安全装置が動作した時には運転者が逃げ出した後ということも考えられる。したがってエアバック式安全装置の仕様を決める際にはこのことも考慮する必要がある。

4.4 フォークリフト転倒のモデル化

4.4.1 静的モデル

フォークリフトの旋回時の安定性に影響する要因を調べるため数学的なモデルを作成して検討した。

まず、Fig. 1 に従って最も単純化したモデルを考える。これはフォークリフトを正面から見て、長方形と見なしたもので、遠心力による転倒モーメント M_f と重力による復元モーメント M_G の関係で決まる。転倒しないためには、

$$M_f < M_G$$

でなければならない。 M_f 、 M_G は図より、それぞれ、

$$M_f = (MV_0^2/r) \cdot h, \quad M_G = Mg d$$

なので、半径 r で旋回するときの許容最大速度 V_0 は、

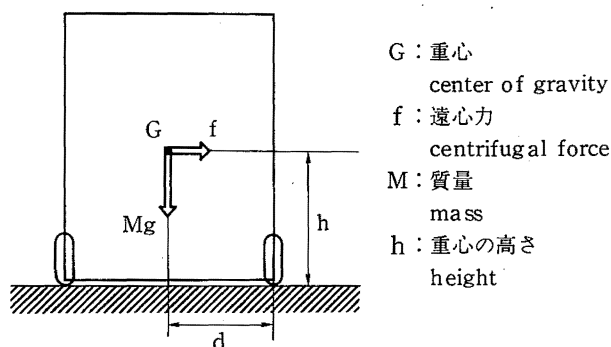


Fig. 1 rectangle model
長方形モデル

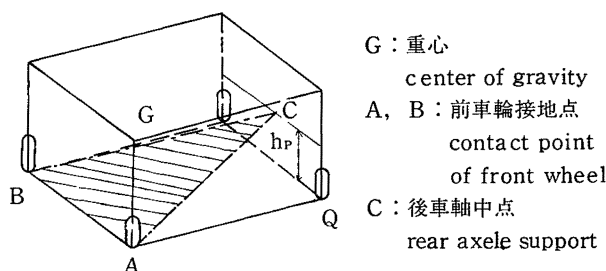


Fig. 2 Stability triangle of forklift truck
フォークリフトの荷重支持面

$$V_0^2 < rgd/h \tag{4.1}$$

で求められる。

現実のフォークリフトに近づけるため、もう少し詳しく検討する。Fig. 2 に示すようにモデル化³⁾を行う。2つの前輪と後車軸中央の3点で車体が支持されている。3輪式のフォークリフトは、この特別な場合として $h_p = 0$ として取扱える。

このような構成のものが半径 r で旋回するときの遠心力による転倒モーメントと重心に働く重力による復元モーメントの関係について考える。

Fig. 3 に示す AC 軸に関するモーメントを考える。転倒、復元のモーメントに寄与するのは、それぞれの力の分力である。転倒に寄与するのは遠心力 f のうち平面 ACC' に直交する成分 f_k であり、その転倒モーメント M_T は、

$$M_T = f_k \cdot h' \tag{4.2}$$

となる。ここで、

$$f_k = f \cdot \cos(\epsilon - \alpha)$$

また、Fig. 4 に示すように

$$h' = \{h - l \cdot \tan \gamma + (l - e) \cos^2 \alpha \cdot \tan \gamma\} \cos \gamma$$

である。また、復元に寄与するのは、重力 w の成分 w_k

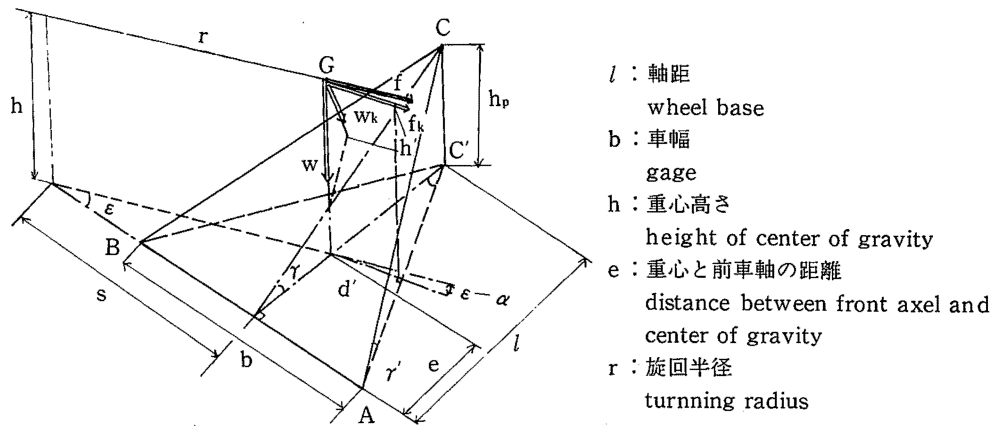


Fig. 3 The forces acting at the center of gravity of a forklift truck
フォークリフトの重心に働く力

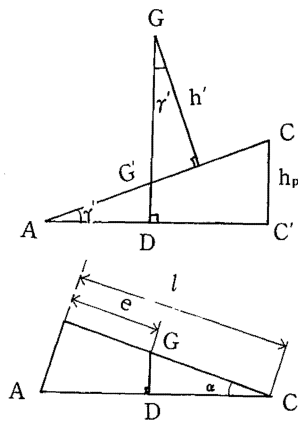


Fig. 4 Calculation of h', d'
h', d' の計算

$$\begin{aligned} h' &= GG' \cdot \cos \gamma \\ GG' &= GD - G'D \\ GD &= h \\ G'D &= AD \cdot \tan \gamma \\ AD &= \frac{l}{\cos \alpha} - (l - e) \cos \alpha \\ \tan \gamma &= \frac{CC'}{AC'} = \frac{l}{AC'} \cdot \frac{CC'}{l} \\ &= \cos \alpha \cdot \tan \alpha \\ d' &= GD \end{aligned}$$

である。

w_k は G を通り $\triangle ACC'$ に平行な面 (w を含む面) と G を通り直線 AC に直交する面 (f_k を含む面) の交線上にある。平面 ABC' に平行な遠心力の分力 $f \cdot \sin(\epsilon - \alpha)$ も復元モーメントに寄与する。これらによる復元モーメント M_H は、

$$M_H = \{w \cdot \cos \gamma' + f \cdot \sin(\epsilon - \alpha) \cdot \sin \gamma'\} \cdot d' \quad (4.3)$$

となる。但し

$$d' = (l - e) \sin \alpha$$

である。転倒しない条件は、

$$M_T < M_H \quad (4.4)$$

である。 $f = MV_0^2/r$ などを代入して整理すると、

$$\frac{V_0^2}{rg} < \frac{\cos \gamma' \cdot \frac{d'}{h}}{\cos(\epsilon - \alpha) - \sin(\epsilon - \alpha) \cdot \sin \gamma' \cdot \frac{d'}{h}} \quad (4.5)$$

となる。

次に Fig. 5 に示す後輪が浮くタイプの転倒を考える。C 点に、遠心力・重力によるモーメントが働く。転倒しない条件は、

$$f_c \cdot h_p < w_c \cdot \frac{b}{2}$$

である。 f_c , w_c はそれぞれ、Fig. 6 からわかるように、

$$w_c = w \cdot \frac{e}{l}$$

$$f_c = f_k \cdot \frac{AD}{AC} \cdot \cos \alpha$$

である。これらの値を代入すると転倒しない条件は、

f_c : C 点に働く遠心力の分力
Component of centrifugal force acting at C point
 w_c : C 点に働く重力の分力
Component of gravity acting at C point

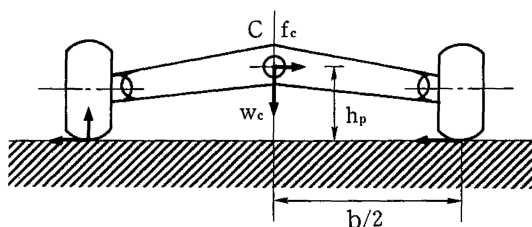


Fig. 5 Stability of C point
C 点の安定性

$$\frac{V_0^2}{rg} < \frac{\frac{e \cdot b}{l} \cdot \frac{h_p}{l}}{\cos(\epsilon - \alpha) \cdot \cos \alpha \left\{ 1 - \left(1 - \frac{e}{l} \right) \cos^2 \alpha \right\}} \quad (4.6)$$

となる。これが、点Cが浮上らないための条件である。前輪も後輪も浮上らずに速度 V_0 で半径 r の旋回をするためには、(4.5)および(4.6)を満たさなければならない。なお、 h_p が小さい(h_p/l が0.2~0.3)ときは、(4.5)式の方が大きい。すなわち、旋回の走行速度を上げると、まず前輪が浮く。 h_p が大きく($h_p/l > 0.35$)、 e が小さい(重い荷を積載したため重心が前にくる)と後輪の方が先に持ち上ることもある。

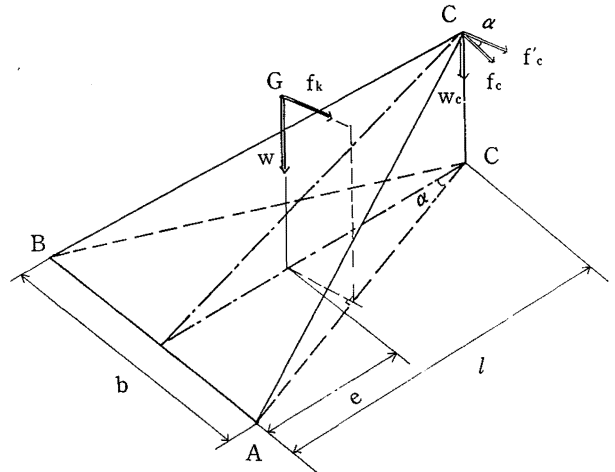


Fig. 6 Components of forces acting at C-point
C点に働く重力 w 、遠心力 f_k の奇与分

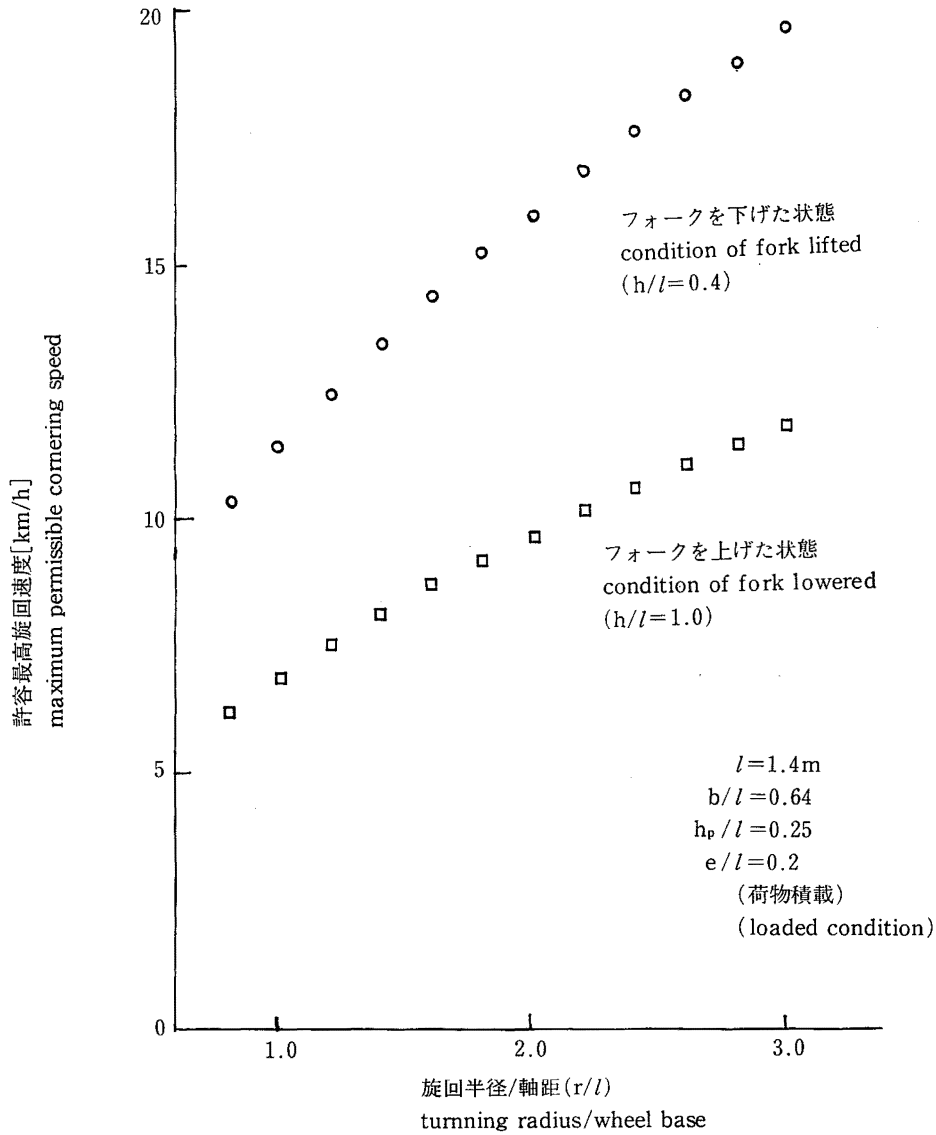


Fig. 7 Stability of forklift truck
フォークリフトの安定性

(4.6)式で計算した数値例を Fig. 7 に示す。フォークリフトの最高速度が14.5~19.0 [km/h] であるので、運転の仕方によっては転倒することがわかる。なお、これらの速度の値は、長方形モデルを用いた(4.1)式の85%~95%程度の大きさになる。

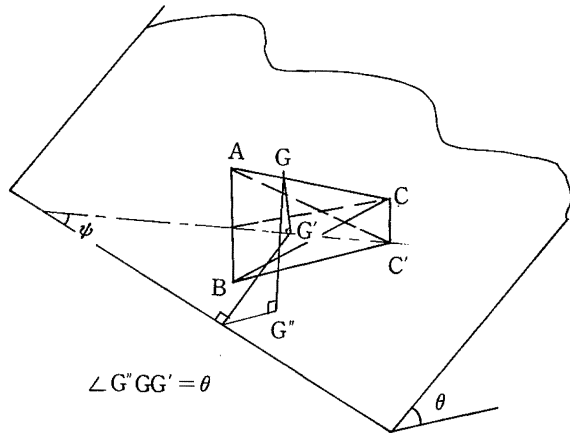


Fig. 8 Model of running on inclined ground
傾斜地走行のモデル

次に同一のモデルを用いて、傾斜地を走行する場合の安定性を考える。Fig. 8 に示すように、水平面より θ だけ傾いた斜面上を走行し、車輛が水平線より φ の方向を向いている時を考える。この時、遠心力は地面に平行なので、遠心力に関する部分は、水平の時と変わらない。重力の地面に垂直な成分は $w \cos\theta$ であり、これは地面が水平な時の w と置き換えられる。重力の地面に平行な成分 $w \sin\theta$ は、遠心力と同様に扱える。以上の各項をまとめると、転倒モーメントは、

$$M_T = \{f \cdot \cos(\varepsilon - \alpha) + w \cdot \sin\theta \cdot \cos(\varphi + \alpha)\} h'$$

となり、復元モーメントは、

$$M_H = [w \cdot \cos\theta \cdot \cos\gamma' + \{f \cdot \sin(\varepsilon - \alpha) + w \cdot \sin\theta \cdot \sin(\varphi + \alpha)\} \sin\gamma'] d'$$

となる。転倒しない条件(4.4)式に代入して整理すると、傾斜地での許容最高速度は、

$$\frac{V^2}{rg} < \frac{\text{分子}}{\cos(\varepsilon - \alpha) - \sin(\varepsilon - \alpha) \cdot \sin\gamma' \cdot \frac{d'}{h}}$$

$$\text{分子} = [\{\cos\theta \cdot \cos\gamma' + \sin\theta \cdot \sin(\varphi + \alpha) \cdot \sin\gamma'\} \cdot \frac{d'}{h} - \sin\theta \cdot \cos(\varphi + \alpha)]$$

となる。車輛の向き φ に関して一番転倒しやすいのは、 $\varphi = -\alpha$ の時で、この時、最高速度は

$$\frac{V^2}{rg} < \frac{\cos\theta \cdot \cos\gamma' \cdot \frac{d'}{h} - \sin\theta}{\cos(\varepsilon - \alpha) - \sin(\varepsilon - \alpha) \cdot \sin\gamma' \cdot \frac{d'}{h}} \quad (4.7)$$

となる。

4.4.2 動的モデル

転倒時間等の転倒の動的過程を調べるために、動的モデル化を行った。モデルは、基本的には Fig. 3 の静的モデルと同じであるが、前車輪 B において働く抗力も含めて考えた。また、後車輪に対して、車体は車輪の中点を中心に自由に回転できるが、ある程度以上傾くと、ジョイントと車体が接触してしまい、車体と車輪はいっしょに傾くようになる。この範囲では、Fig. 1 の直方形モデルのようにふるまう。これを式で表すと、

$$0 \leq \theta < \theta_0 \text{ のとき}$$

$$I_1 \ddot{\theta} = M_T + M_g + M_b$$

$$\theta_0 \leq \theta \text{ のとき}$$

$$I_2 \ddot{\theta} = M_T + M_g + M_r$$

となる。ただし、 I_1 は車体の AC 軸回りの慣性モーメント、 I_2 は車体の AQ 軸回りの慣性モーメント (Fig. 2 参照) である。また、 M_T は遠心力によるモーメント、 M_g は重力によるモーメント、 $M_b \cdot M_r$ はそれぞれ前輪・後輪に働く抗力によるモーメントである。

この微分方程式を計算機による数値計算により解いた。ただし、初期条件としては、時間 $t = 0$ で $\theta = 0$ 、 $\dot{\theta} = 0$ とした。これは、直進して来たフォークリフトが $t = 0$ でハンドルを切り、半径 r の旋回を始めるという状況に対応する。

計算結果の一例を Table 3 に示す。これは、ある条件下でフォークリフトが転倒する時にある角度 (20°, 30°) を過ぎてから転倒するまで (90° になるまで) の時間である。これより、回転半径が小さい程、また速度が速い程転倒しやすく転倒に要する時間も短くなることわかる。また、重心が高い (フォークを上げている) 程転倒しやすいが、転倒に要する時間はむしろ遅くなる傾向にあることがわかる。これは倒立振子が重心が高い程ゆっくり倒れるのと同じ原理と思われる。なお、転倒に要する時間は、20°からは0.46~1.48秒、30°からは0.37~1.09秒となり、安全装置の動作時間は、この時間より少なくなければならない。

Table 3 Upset time in various condition
種々の条件における転倒時間

走行速度 旋回半径 フォーク 高さ(m)		7.2km/h		10.8km/h			14.4km/h			
		1	2	1	2	3	1	2	3	4
角度 20° から 90° まで	0.2	0.0	0.0	1.060	0.0	0.0	0.530	0.0	0.0	0.0
	0.4	0.0	0.0	0.869	0.0	0.0	0.458	0.847	0.0	0.0
	0.6	0.0	0.0	0.824	0.0	0.0	0.534	0.800	0.0	0.0
	0.8	0.0	0.0	0.786	0.0	0.0	0.558	0.711	1.213	0.0
	1.0	0.0	0.0	0.662	1.296	0.0	0.481	0.745	1.123	0.0
	1.2	1.416	0.0	0.675	1.320	0.0	0.587	0.734	1.089	1.386
	1.4	1.483	0.0	0.682	1.176	0.0	0.649	0.751	1.045	1.360
	1.6	1.397	0.0	0.717	1.080	0.0	0.613	0.733	0.954	1.244
	1.8	1.331	0.0	0.889	1.147	1.711	0.727	0.919	0.969	1.291
	2.0	1.288	0.0	0.922	1.097	1.576	0.750	0.953	0.975	1.283
	2.2	1.319	0.0	1.001	1.082	1.642	0.611	1.013	0.991	1.224
	2.4	1.228	0.0	1.031	1.144	1.624	0.792	1.099	1.062	1.214
2.6	1.258	0.0	1.057	1.157	1.631	0.830	1.106	1.263	1.203	
角度 30° から 90° まで	0.2	0.0	0.0	0.739	0.0	0.0	0.450	0.0	0.0	0.0
	0.4	0.0	0.0	0.588	0.0	0.0	0.371	0.661	0.0	0.0
	0.6	0.0	0.0	0.537	0.0	0.0	0.425	0.494	0.0	0.0
	0.8	0.0	0.0	0.469	0.0	0.0	0.448	0.594	0.848	0.0
	1.0	0.0	0.0	0.549	0.916	0.0	0.391	0.628	0.716	0.0
	1.2	1.039	0.0	0.561	0.857	0.0	0.479	0.592	0.827	0.967
	1.4	0.985	0.0	0.549	0.712	0.0	0.510	0.614	0.801	0.859
	1.6	1.068	0.0	0.581	0.883	0.0	0.496	0.612	0.783	0.986
	1.8	1.044	0.0	0.694	0.955	1.055	0.515	0.738	0.771	0.943
	2.0	1.065	0.0	0.751	0.918	1.209	0.560	0.760	0.794	1.017
	2.2	1.088	0.0	0.770	0.880	1.261	0.492	0.771	0.807	0.974
	2.4	0.991	0.0	0.792	0.949	1.240	0.627	0.769	0.878	1.003
2.6	1.048	0.0	0.824	0.957	1.281	0.622	0.849	0.985	0.978	

0.0は転倒しない場合を示す

4.5. エアバッグ式安全装置

フォークリフトの転倒時にエアバッグを膨ませて運転者を保護する安全装置は、センサーサブシステムと、エアバッグサブシステムからなる。センサーサブシステムはフォークリフトの転倒を検出ないし予知し、エアバッグのトリガー信号、運転者への警報を出す。エアバッグサブシステムは、トリガー信号によりエアバッグを膨ませて運転者を保護するものである。

4.5.1 転倒検出センサー

転倒を検出するための手段として種々のものが考えられるが、それらは基本的な方式として次の3つに分類される。第1の方式は、車輪が地面から離れたことを検出して、転倒か否かを判定するものであり、第2の方式は、車体が水平面よりある程度以上傾いたことで転倒を検出するものである。第3の方式は、転倒したことを検出するよりもむしろ転倒を予知するもので、積載荷重、車速、ハンドル角などから4章に示したようなモデル式を用いて計算を行い転倒条件を満たすかどうかの判定する方式である。この方式においても、

第1の方式のセンサー、第2の方式のセンサーの一方または両方をそのセンサー群の一つとして必要とするので、1と2の複合又は拡張型と考えられる。

これらの3方式には、それぞれ長所・短所がある。平らな地面を走行する場合を考えると、車輪接地方式が有利で、転倒の早い段階で検知できる。しかし、車輪が浮いても必ずしも転倒するわけではなく元に戻る可能性があるため、単に車輪が浮くという条件だけでなく、浮いた距離や浮き始めてからの時間なども含めないと確実な転倒の判定はできない。一方車体傾斜方式によれば、ある程度転倒が進んだ段階で検出するため検出が車体接地式より遅れるが、そのかわり転倒の判定は容易と言える。車体がある程度以上傾いた時には、その後に車体が復元する条件にあっても、オペレータ保護のためにエアバッグを開くことが必要になる。傾斜台上で、ダミーを乗せたフォークリフトを転倒させて行つた実験では、車体の転倒の前にダミーがフォークリフトから投げ出された例も見られたからである。演算方式は、転倒限界までの余裕を計算する（限界の90%など）とか、変化率を計算することによって転倒の予知ができるので、前以っての転倒への対処も可能になる。しかし、転倒に関係するパラメータが多いの

で、必要とするセンサーの種類も多くなる。また、水平な地面と傾いた地面では転倒限界も異ってくるので、車速やハンドル角などの他に、車体傾斜角などの情報も必要となる。なお、近年、運転操作の簡略化などのために各種のマイコンフォークが登場してきている。これらのフォークリフトには、荷役の便のため、積載荷重の計量機能やら、フォークの揚高の位置センサーを持つものがある。これらにおいては、多少のセンサーとソフトウェアの追加により、容易に転倒予知警報を出すようにできると思われる。

これら各方式の長所・短所、各方式の具体的なセンサー例などについて、Table 4に示す。表中「後付」とあるのは、既存のフォークリフトに、その種のセンサーを後から加工して取付ける可能性であり、「動力」とはセンサーを駆動するのに要する動力の大きさである。

本研究においては、振子式センサーを用いて転倒検出の実験を行つた。

4.5.2 転倒検出センサーの実験

車体角検出センサーとして、市販のポテンショメータ式傾斜計（PMP-45-U）とポテンショメータと振子によるものを用いた。それぞれのセンサーの仕様を

Table 4 Several ways of detecting upset
転倒検出の諸方式

方式名	原理	長所	短所	センサー	説明	後付	動力
車輪接地方式	車輪が地面から離れることで、転倒を検出する。	転倒の早い段階で検出できる。	車輪が浮いても、元に戻る場合がある。溝などを車輪の浮きと誤判定する。	リミットスイッチ	車体から地面にリミットスイッチのレバーを下ろす。	○	○
				超音波	超音波で車体と地面との距離を測る	○	○
				荷重計	各車輪にかかる荷重を検出する	×	○
車体傾斜方式	車体が傾斜したことで転倒を検出する。	地面の傾斜突出部などによらない。	転倒の進んだ段階でしか検出できない。	ジャイロ	水平面からの傾きを検出する。高価	○	×
				振子 加速度計 水準器	重力と遠心力の合力の方向を検出する。	○	○
演算方式	車速などのパラメータより安定度を計算する	転倒の予知が可能である。	多種のセンサーが必要となる。	車速センサー ハンドル角センサー 積載荷重センサー 揚高センサー 車体傾斜センサー等		△	○

Table 5 Characteristics of pendulum-type sensor
振子式センサーの仕様

	センサー1	センサー2
傾斜角感度 (ヒステリシスを含む) 加振時0.1°以下	0.25°以下	2.0°
傾斜角	±45°	±50°
ダンパー	シリコンオイル(100CS)	—
共振周波数	2.5Hz	1.36Hz
重量	220g	2100g
出力電圧比*	2.5%Vin以上/10°	2.9%Vin/10°

Table 5 に示す。両者とも基本的構成は同じで、振子のふれ角をポテンショメータで検出する構成になっている。両者の違いは振子の長さの差で、そのため個有振動数が異なる。センサーの静的特性を Fig. 9 に示す。ただし、傾斜しないときの出力が零になるように、加算器を用いてオフセットの調節を行い、また、2つのセンサーの出力が同一になるように増巾している。センサー2では約2°の不感帯があるため、多少ズレが見られる。

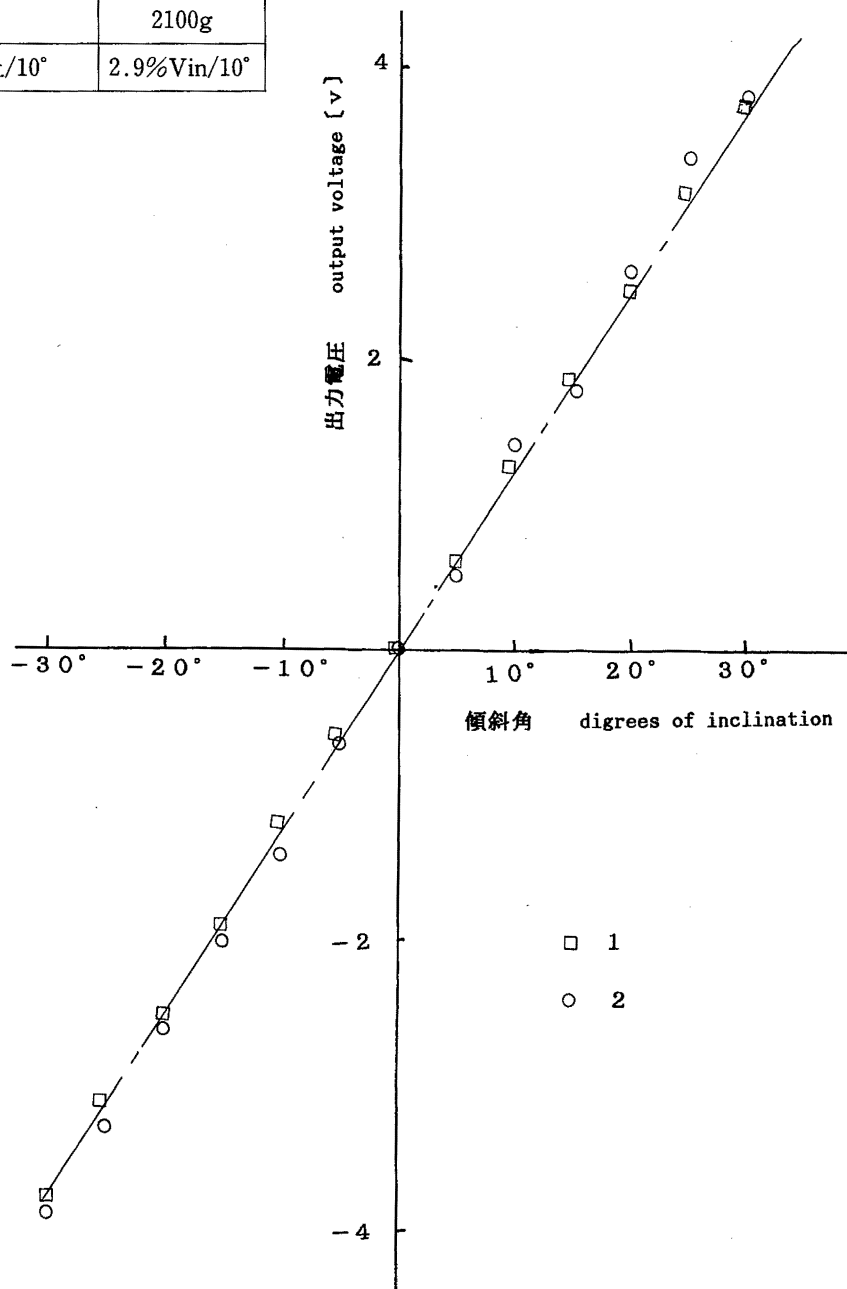


Fig. 9 Characteric curve of pendulum-type sensors
振子センサーの静的特性

振子式センサーでは、静的条件下では傾きを検出するのに十分であるが、車輻の振動などの動的条件の下では共振して役に立たないことも考えられる。そのため、フォークリフトにセンサーを取付けて、走行時の出力をデータレコーダで記録した。その一例を Fig. 10～Fig. 12に示す。Fig. 10は舗装道路上を走行したものであるが、水道管理設後の凹凸や舗装が悪くて空車時にはパレットが踊るような場所もある。Fig. 11は、フォークリフトを一定の半径で旋回走行させた場

合のものである。Fig. 12は、平地に障害物（高さ7 cm, 巾60cm）のものを置いて、それを片側の車輪で乗り越えたときのものである。Fig. 10, Fig. 11では、センサー1の方が感度が良いためか、車輻の振動をよく拾う。Fig. 12ではセンサー2の方が振動が大きくまた減衰も遅い。振動のピークでは、実際の傾きの10倍にもなる。センサー1でも、6～7倍になる。もちろん、物に乗上げた時などは、単に車体が傾くだけでなく転倒方向の角速度を持つので、静的に傾けた状態ならば

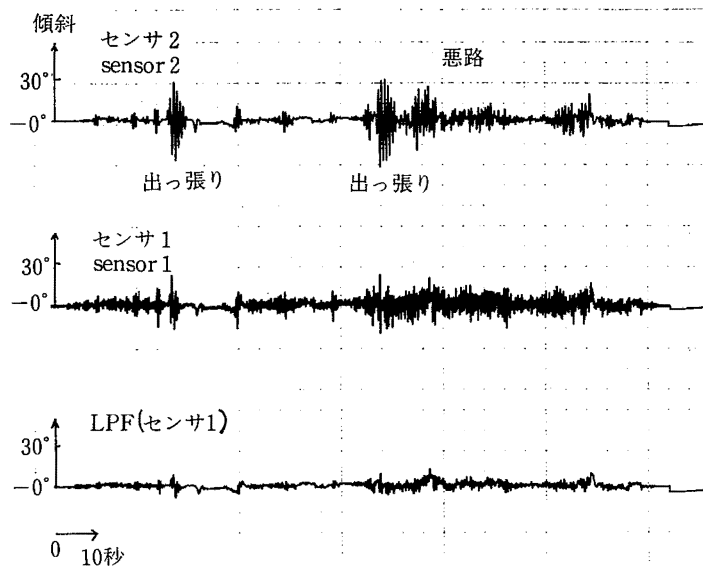


Fig. 10 Output of sensors during running on road
道路走行時のセンサー出力

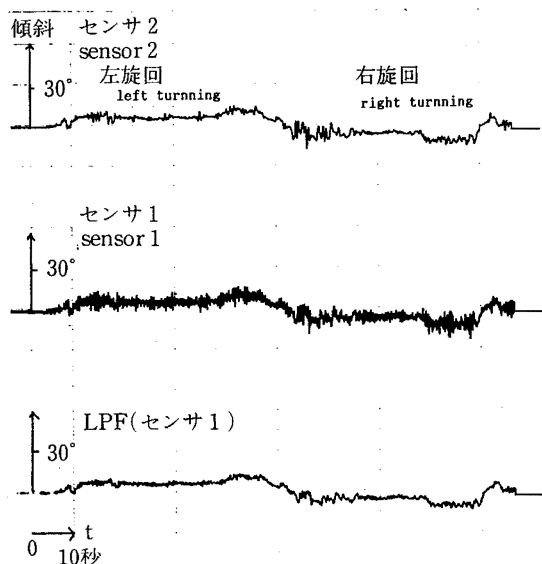


Fig. 11 Outputs of sensors during stationary turning
定常旋回時のセンサー出力

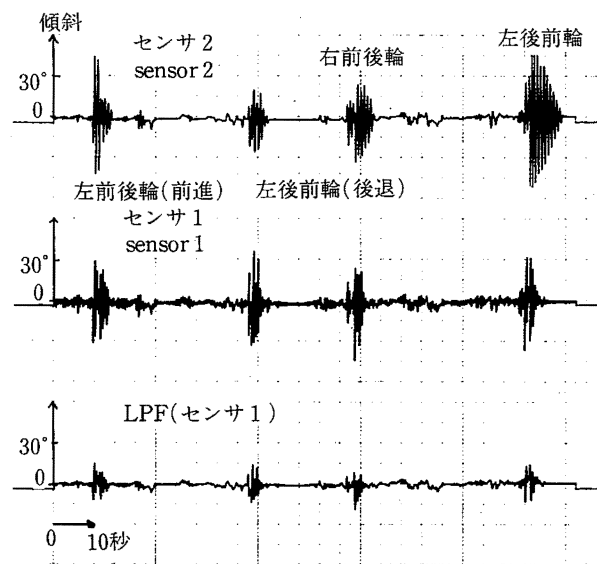


Fig. 12 Output of sensors when the truck run over the obstacle
障害物ご乗り越えた時のセンサー出力

転倒しない角度でも転倒する。その意味では静的な傾斜角以上の値を示すのは必ずしも不都合ばかりとは言えないが、それも程度の問題であろう。この振動成分を落とすために、センサーの出力を折点角周波数0.5 Hzのローパスフィルターに通した。それを Fig. 10~Fig. 12に合せて示した。振動成分が小さくなっているのがわかる。振動が大きくなる障害物を乗り越えた時も、 $\pm 15^\circ$ 程度である。これは実用上十分小さいと言えよう。

振り式センサーでは定常旋回時に傾きが出力されるが、これは水平面に対する傾きではない。遠心力と重力の合力の方向を検出しているわけだが、実際に遠心力がある程度以上になると転倒するわけだから、転倒に対するセンサーとしてはむしろ好都合と言える。

ところで、傾斜台によるフォークリフトの転倒実験では、約 30° で転倒を始めた。また、モデルによって計算した場合も同程度の値が示されている。従って、前述のセンサーの出力が $\pm 30^\circ$ を越えた場合に転倒と見なしてもよいと思われる。この時、エアバッグを膨らませれば、運転者を保護できよう。

4.5.3 エアバッグの方式の検討

エアバッグを膨らませる方式としていくつかのものが考えられる。第1のものは、化学反応を用いて気体を発生させるものである。その実例としては、消化器や、救命ボートなどがあげられる。これらの反応では気体の発生が遅くて、転倒災害防止用のエアバッグには使えない。しかし、化学反応には、ロケットやダイナマイトなどに見られる単時間に反応が進むものもある。実際、自動車の衝突災害防止用のエアバッグには火薬による反応が用いられている。実験によれば、70lのエアバッグを膨らませるのに40msec⁴⁾しか要しない。これは、転倒災害防止用としても十分な速度であるが、逆に、必ずしもこのような速い速度は必要としない。

第2の方式としては機械的に行うものが考えられる。ポンプや送風器を用いて空気を送り込むとかエンジンの排ガスを用いるわけである。後者について見積ると、エンジンの排気量が1500ccで毎分の回転数が2000 r.p.m.とすると、4サイクルエンジンでは2回転に1回排気が行われるので、排気ガスの量は毎秒25lとなる。この速度では70lのエアバッグを膨らませるのに約3秒かかることになり、十分な速さとは言えないが、

排気量や回転数によつては間に合う可能性がある。

第3の方式としては、物理的手段による方式がある。すなわち、圧縮空気を利用して膨張させるもの、気体に熱を加えて膨張させるもの、液体の蒸発、固体の昇華を利用することなどが考えられる。本研究においては、フォークリフトへの適用を考え、比較の実用性が高いと思われる圧縮空気を利用する方式を用いたエアバッグの機能、効果について評価を行うこととした。

4.5.4 エアバッグの実験

エアバッグの期待される効果として、フォークリフトの側面を塞ぎ運転者がフォークリフト外に飛び出すのを防ぐことと、転倒したときに地面に当たる時の衝撃を緩和するということが考えられる。そのためには、エアバッグが十分早く展開し、転倒するまでに厚み方向にも膨らまねばならない。

実験には、容積約100lのものと約60lのものの2種類のエアバッグを用いた。その寸法・形状を Fig. 13に

Table 6 Deploying time of air bag

エアバッグが膨らむまでの時間

エアバッグ	タンク圧力	膨らみ方	時間(平均±標準偏差)
小	4 気圧	80%	0.77±0.09秒
		100%	1.08±0.10秒
	5 気圧	80%	0.65±0.05秒
		100%	1.15±0.11秒
大	6 気圧	80%	0.99±0.08秒
		100%	1.26±0.10秒

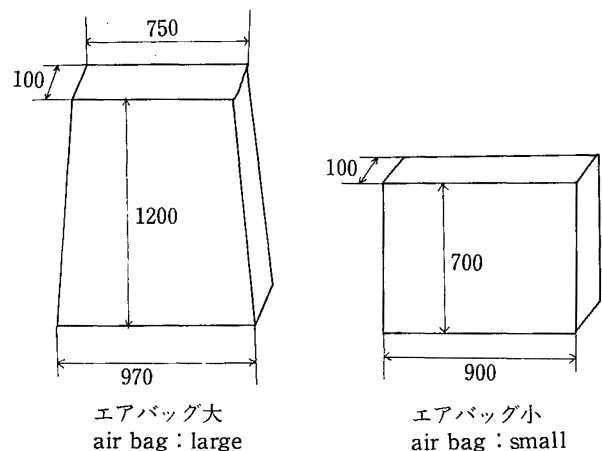


Fig. 13 size and form of air bags
エアバッグの寸法・形状



Photo. 2 The air bag which is deploying
エアバックの膨張中の様子



Photo. 3 The deployed air bag on a forklift truck
フォークリフト上のエアバック

示す。ただしこれはエアバックの材料の布を縫い合わせる時の寸法で、空気を入れると丸く膨らむ。また、圧縮空気源としては容量30lの円筒形タンクを用いた。空気の制御は電磁弁を用いた。Table 6にエアバックが膨らむまでの時間を示す。またエアバックが膨らむ途中の様子を Photo. 2 にフォークリフトに取付けて膨らませた様子を Photo. 3 に示す。Photo. 3 に見られるように、側面は十分塞がれていると思われる。また、その拡がる過程をみると、まず横に拡がり、次に厚さ方向に拡がっている。これは転倒防止用として望ましい順序と言える。エアバックが膨らむ時間は約1秒で、フォークリフトの転倒の時間0.4~1.5秒と同程

Table 7 Deceleration in the moment of the impact of the dummy's head against ground
ダミー転倒時の衝撃加速度

地面の状態	衝撃加速度の平均値	標準偏差
コンクリート	307g	210g
マ ッ ト	208g	117g
エアバック	57g	15g

度であるが、転倒の条件(高速で走行中に1 m程度の小さい半径で旋回する)によっては、間に合わない場合も出てくる。タンクとエアバックをつなぐ配管を太くする、電磁弁を大きくするなどの対応が必要となる。

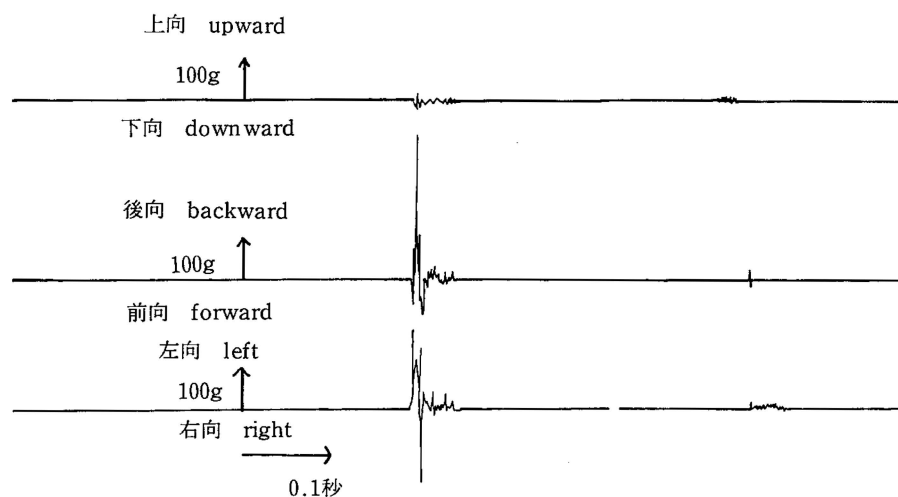


Fig. 14 Impulse acceleration at the time of dummy's falling down on the mat
ダミー転倒時の波形例(マット)

また、エアバッグの緩衝効果を確認するためダミーを用いて実験を行つた。頭部に3軸加速度計を取付けたダミーを直立させた状態から支持を止めることで自然に地面に倒れさせた。地面はコンクリート、体操用マット、エアバッグの3種類とし、倒れた時のダミー頭部に作用する加速度を測定した。その波形の一例をFig. 14に示す。加速度のピーク値を地面の状態ごとに平均したものをTable 7に示す。表に見られるように、エアバッグ上に倒れた時は衝撃加速度がかなり小さくなっていることがわかる。人間の+Gx方向(体の前方から後方へ向う方向)の許容加速度は、Fig. 15⁹⁾に示すように、持続時間が0.01秒の時には、60~70g程度あるので、エアバッグの場合の57gでは傷害を受けることはないと思われる。

4.6 むすび

フォークリフトの転倒災害を防止するための安全装置について種々の検討を加えた。それらのなかで、転

倒時にエアバッグを膨らませ、運転者の飛出し・地面との衝突より保護する方式を取り上げ、試作したエアバッグについて各種の実験を行つた。その結果、この方式の安全装置が転倒時において運転者の保護に有効であることを明らかにした。

参考文献

- 1) 宮田武弘, マイコンフォークリフト, 産業車輛 1982. 2月
- 2) 小川降希, フォークリフトのマイコンの応用, 産業車輛, 1981.10月
- 3) Xaver Bonfeld, Bestimmung der Quer-Kippstabilitat von Flurförderzeugen, f+h, P442, 1981
- 4) 福田成男他, 小型車におけるエアバッグシステムの研究, 日産技報, P72, 1975
- 5) James H. McElhaney 他, Handbook of Human Tolerance, JARI, P295, 1976

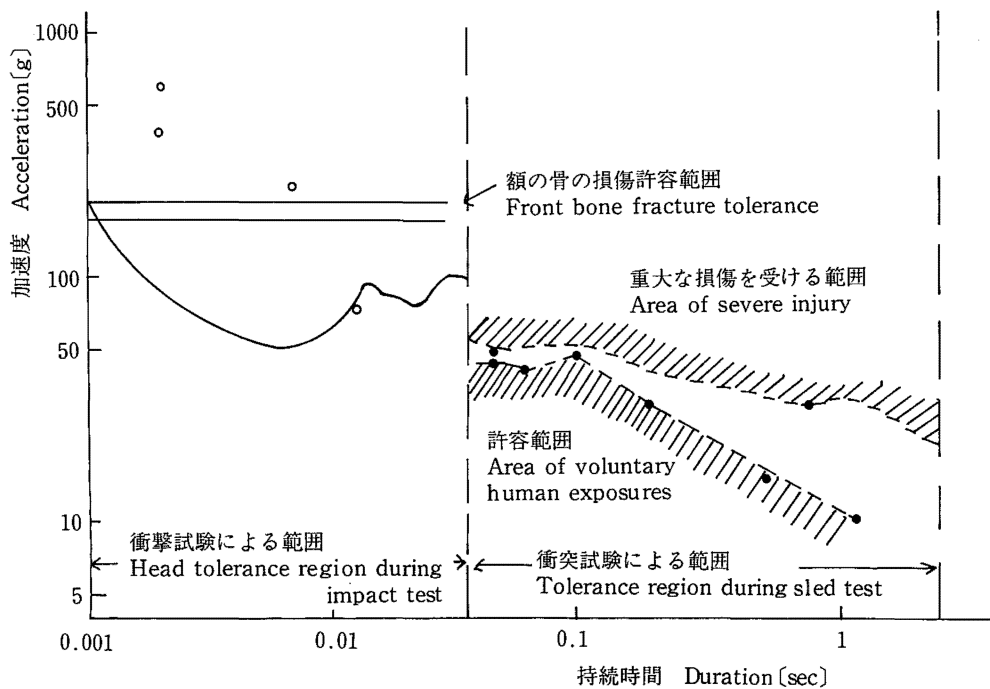


Fig. 15 Human tolerance curves
 人体の耐加速度曲線(+Gx)