Research Reports of the National Institute
of Industrial Safety, NIIS-RR-98 (1999)
UDC 614.821:614.89

墜落防護用エアバッグの墜落防護性能の評価

深谷　潔*

An evaluation of fall protection performance of an air bag system

by Kiyoshi FUKAYA*

Abstract: In general there are two ways in safety measures: one is prevention of the accident and another is reduction of damage by the accident. The former is necessary and the latter is important, too. An air bag system for personal protection against falls, which was evaluated in this research, is an example of the latter. The air bag system consists of an air bag that expands in case of fall, a fall sensor system that detects fall, an air filler that supply gas and a vest that contains other components. The expanded air bag covers the neck, backbone and waist and absorbs the shock of the impact to the ground and reduces the injury of the worker who falls.

In order to evaluate the shock absorbing performance of the air bag, fall tests of dummy with/without the air bag were conducted and deceleration of impact on to the ground were measured. The fall tests were conducted in various conditions such as fall height and fall angle of the dummy. In case of horizontal fall the maximum deceleration is reduced by the air bag remarkably.

The criterion of the car crash test and the criteria of protective helmets for vehicular users were applied to the estimation of the shock absorption performance. In case of higher fall height an injury is unavoidable. Mechanical analysis showed that thicker air bag is needed.

Fall sensor is also important. There is similar phenomenon as fall such as jump, and a distinction is necessary.

Keywords; Air bag, Fall protection, Shock absorbing performance, Fall sensor

1. はじめに

事故に対する対策の第一のものは，事故の発生を防止することであることはいうまでもない。しかし事故の発生を完全に防止することは困難であり，その場合には，事故の被害の拡大を防止するという対策も必要となる。例えば，消火器やスプリンクラーは，出火という事故に対して被害の拡大を防ぐ手段であるが，この例でも分かるように，被害の拡大防止という方式も重要な事故対策の一つである。

墜落についていえば，足場や手すりの整備等により墜落を事前に防止することが基本である。それが不十分なとき墜落が発生する。その場合でも，安全帯や安全ネットを用いることによって途中で墜落阻止が可能となる。しかし，その安全帯も使用できない場合，例えばフックをかける場所がないとか，フックのかけ替え中であるとかの場合には墜落が起きることがある。

一般に墜落事故は死亡災害等の重篤な災害となることが多いが，軽微な災害ですむこともある。例えば，子供がアパートの4，5階から落ちても下に植え込みがあったので助かったというような事例である。このように墜落が発生した場合にも，途中で緩衝するものがあれば災害を軽減できる。本研究で取り扱うエアバッグは，墜落時の衝撃を緩和することでその被害を軽減するという方式の事故対策の手段の一つである。現在，このようなエアバッグ式墜落防護装置の共同研究を行っているが，その中で筆者を中心に行ったエアバッグの評価について報告する。

*機械システム安全研究部　Mechanical and System Safety Research Division

2. 試験したエアバッグの概要

2.1 エアバッグシステム

評価を行なったエアバッグシステムは，常時着用していて，墜落時に展開して地面との衝突を緩和するものである。着用するためのベスト状の装着用システム，墜落時に展開するためのエアバッグ本体，空気充填装置，墜落検知システムからなる。人が着用した状態を **Photo 1** に，それを展開させた状態を **Photo 2** に示す。

エアバッグは，**Photo 2** に示すように展開時に後頭部，背中，腰部をカバーする。頭部を防護するのは，頭部の障害が死亡に最も結びつき易いと考えられるからであり，背中を防護するのは，前方への落下と異なり手によって緩衝しにくいと考えられるからである。このように，本エアバッグは，人間が自分で緩衝することが困難である後方に防護範囲を限定することで，軽量化や着用性の向上を図り，使用者に過度の負担を強いることなく使用できるものを目指している。

2.2 エアバッグ本体

エアバッグ本体は，C 字型の腰部，後頭部と I 字形の背部からなり，各々は同形の 2 枚の布の端を縫い合わせ，かつ空気もれ防止措置を施している。これらは相互に接続されていて，腰の部分から空気を充填することで全部が膨らむようになっている。その容積は約 33ℓである。

Photo 1　A worker with air bag system.
エアバッグ装置を着用した作業者

2.3 空気充填システム

エアバッグを展開させるためにガスを充填する必要がある。

そのための手段として自動車用のエアバッグでは火薬を使用している。これは，短時間で大きく膨らませることができるが，逆に速く膨らむために人間を打撃

Photo 2　An air bag in extended condition.
エアバッグが展開した状態

Photo 3　Gas cylinder in vest.
チョッキの中に設置したガスボンベ

する場合もある。また，火薬であるためにそれ自身の安全性も問題となる。

本研究で評価したものは，高圧ガスのボンベを使用し，雷管でボンベの口金を打ち破り，中のガスでバッグを膨らませるという方式を用いている。単にボンベの口金に穴を開けるだけの場合は，ガスが噴出するときに断熱膨張のため温度が低下するので流出速度低下のおそれがあるが，この場合は，雷管の爆発ガスの熱でガスが暖められるので，大きな流出速度が得られ，容積が33ℓのバッグを膨らませるのに約0.2秒という結果を得ている。空気充填装置を **Photo 3** に示す。

2.4 墜落検知システム

墜落の検知には，接触センサーと加速度センサーを使用している。接触センサーは両足の裏と尻に設置し，両足および尻のいずれにも荷重がかかっていないことをもって墜落としている。また，加速度センサーは，体に取り付け，無重力状態，すなわち自由落下状態を検知している。これらのいずれか，あるいは両者を併用して墜落を検知する予定である。

2.5 装着用システム

着用の便利のために，エアバッグ本体，ガスボンベ等の空気充填システム，センサ出力判定装置や電池等をチョッキの中に一体化している。また，靴に仕掛けた両足のセンサや尻のセンサとは，ズボンを通して電線によって接続する構成である。

3. エアバッグの緩衝性能の評価実験

3.1 実験方法

エアバッグの緩衝効果を評価するための実験（**Photo 4** 参照）を行なった。加速度センサーを取り付けた人体ダミーを落下させ地面との衝突時の衝撃加速度を測定する実験を，エアバッグを着用したときと，着用していないときの2つの条件で行ない，その結果を比較した。なお，いずれの場合にも墜落防護用の安全帽は着用していた。

人体ダミーとしては，救難訓練用のもの（以下ダミーAと呼ぶ）を使用した。安全帯の落下試験に 85 kg のダミーを用いるので，救助訓練用ダミー（体重 76 kg，身長 163 cm）に重り付チョッキ（9 kg）を着用させて 85 kg にして用いた。

衝撃加速度は，ダミー顔面と腹部にピエゾ式の3軸加速度計（大きさ $7 \times 8 \times 5.5$ mm）を貼り付けて測定した。なお，加速度計を体内でなく表面に貼り付けることの影響を調べるため，自動車の衝突実験用のダミー

Photo 4 Fall test of the bag.
エアバッグの落下試験

（体重 60.6 kg，身長 166.7 cm 頭の内部に加速度計をねじ止めする。以下ダミーBと呼ぶ。）の頭内部と顔面に加速度計を取り付けて落下試験を行い両者がほぼ同様な加速度波形が得られることを確認した。

また，加速度の記録は，サーマルのメモリー記録計（サンプリング 10 kHz/ch, 8 bit）と計算機処理用のA/D変換器（サンプリング 2 kHz/ch, 12 bit）を用いた。

さらに落下の様子を毎秒 200 コマの高速度ビデオで撮影した。

落下実験は以下の手順で行った。まず，ダミーにエアバッグを着用させクレーンでつり上げ適当な姿勢をとらせ，ボンベからガスを充填した直後に，落下させた。放置するとガスは抜けるので，落下のたびにガスを充填し直した。

3.2 実験内容

落下時の姿勢によっては，エアバッグの防護範囲を外れるので，地面とエアバッグが当たらない場合がある。このような場合には，エアバッグの効果は期待できないが，頭からの斜め落下と足からの真下への落下試験を行った。

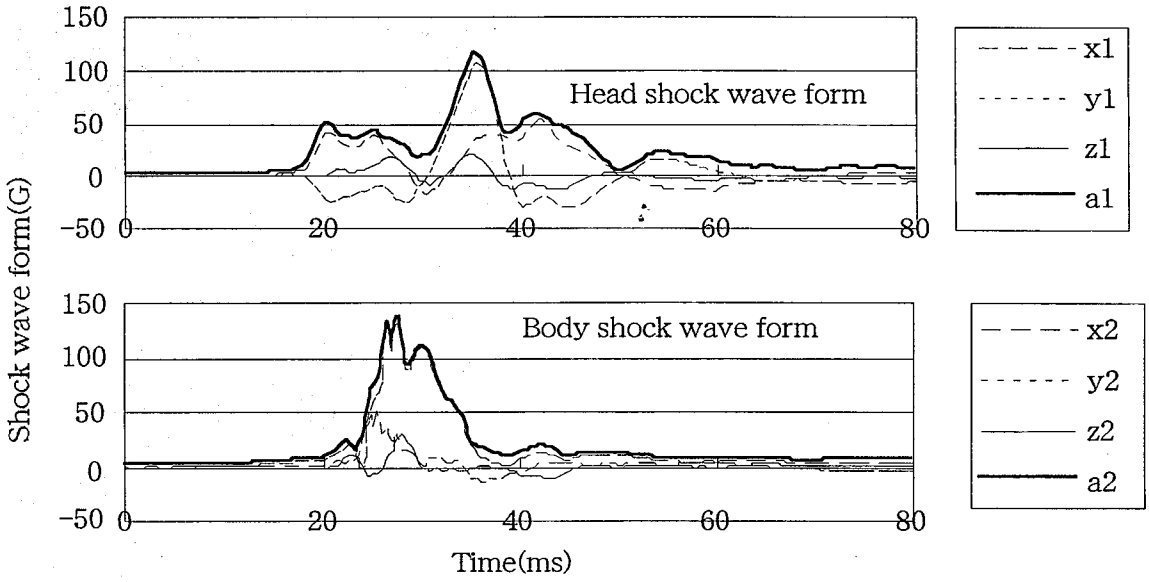

Fig. 1　An example of the wave form of deceleration.
加速度の測定波形の一例

ダミーBを用い，頭の高さを2mにして大きな傾斜となるよう腰をそれより高くして，エアバッグのあるときとないときの落下実験を行った。

また，ダミーAの体を真直ぐに立てた姿勢からの，転倒（足が接地）あるいは落下（足が地面から離れている）の実験を行った。

さらに，エアバッグの防護範囲であっても腰から落ちるか頭から落ちるかかによって衝撃の配分や緩衝効果が変わると思われるが，その影響を調べるため水平仰向きの姿勢を基準として，頭をやや高く，あるいは腰をやや高くした位置から落下させた。このときの落下高さは1.5mでエアバッグを装着して行った。

以上の予備的測定を基に，エアバッグの効果が頭部と腰部に均等になると思われる水平仰向きの姿勢において，落下高さによる緩衝性能の違いを調べるために，1.5mから8mまで落下高さを4種類に変えて測定を行った。

3.3 実験結果

測定結果の一例を **Fig. 1** に示す。$x1$, $y1$, $z1$ はそれぞれ頭部の x, y, z方向の加速度（測定値）を示し，$a1$ はそれを合成した加速度（計算値）の大きさを示す。同様に，$x2$, $y2$, $z2$, $a2$ は腹部の x, y, z方向の加速度とその合成加速度を示す。なお，細かい振動成分を除去するため，4点づつの移動平均をとった。$a1$, $a2$ から最大衝撃加速度，衝撃継続時間やHIC（頭部に対する衝撃の影響の大きさの指標。詳細は後述）を求めた。

落下角度（**Fig. 2** 参照）を大きく変えた時の落下角度と最大衝撃加速度の関係を **Fig. 3** に示す。傾斜がある程度以上大きくなると，エアバッグのないところで地面と接触するため，エアバッグのあるときとないときで違いがなくなることが読みとれる。

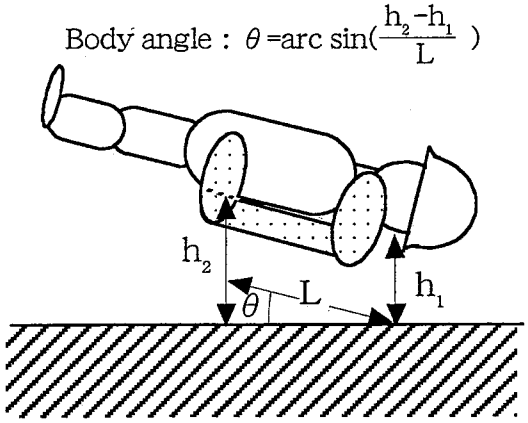

Fig. 2　Definition of body angle of dummy.
落下角度の定義

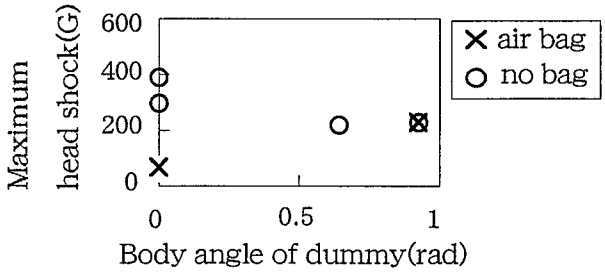

Fig. 3　Body angle of the dummy and Maximum head shock.
落下姿勢と最大頭部衝撃加速度

立位姿勢での落下試験の結果を **Fig. 4** に示す。頭部

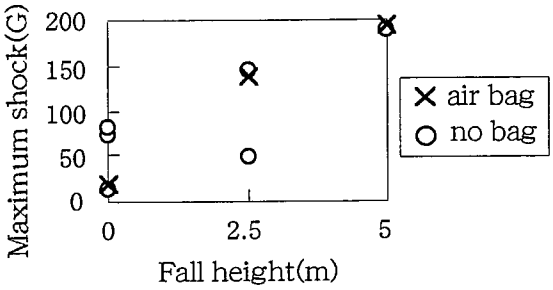

Fig. 4 Fall of standing figure.
立位姿勢での落下

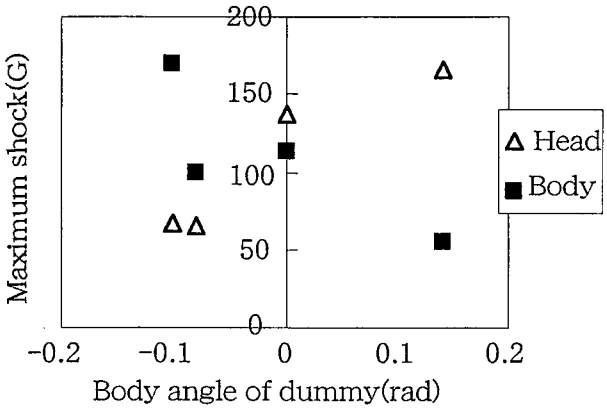

Fig. 5 Body angle of the dummy and difference between head shock and body shock.
落下姿勢による頭部衝撃と腹部衝撃の差

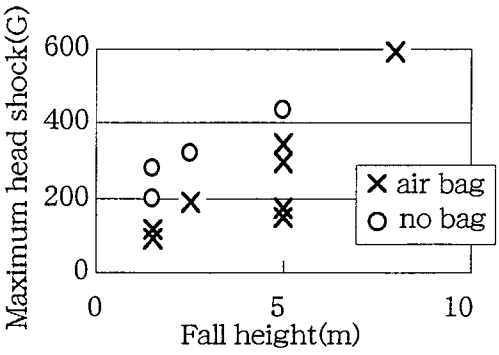

Fig. 6 Fall height and head shock.
落下高さと頭部衝撃

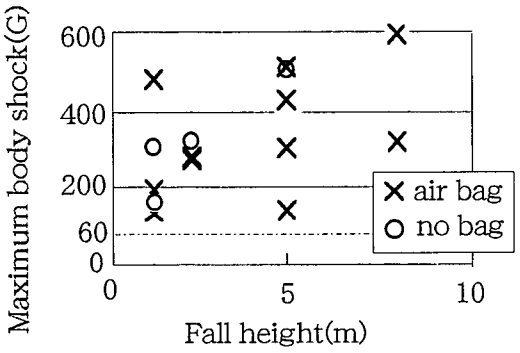

Fig. 7 Fall height and body shock.
落下高さと腹部衝撃

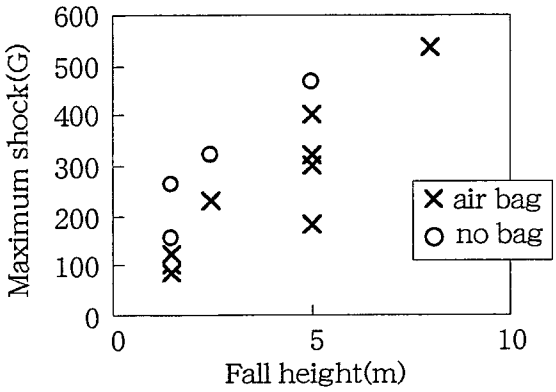

Fig. 8 Fall height and shock.
落下高さと衝撃（頭部と腹部の平均）

と腹部の最大加速度を平均したものを，落下高さに対してプロットした。地面との衝突時には当然エアバッグの有無は関係ないが，その後で倒れるときにエアバッグで緩衝できると考えられるが，データの上では違いは見られない。なお，後述の **Fig. 8** と比較すると足によって緩衝していることが分かる。

落下時の姿勢の傾きの違いによる頭部と腹部の最大衝撃加速度の違いを **Fig. 5** に示す。下側になっていて先に地面と接触した方の衝撃が大きくなっていることが読み取れる。

落下高さに対してそれぞれ，頭部と腹部の最大加速度をプロットしたものを，**Fig. 6**, **Fig. 7** に示す。また，落下高さに対して，頭部と腹部の最大衝撃加速度を平均したものを，**Fig. 8** に示す。**Fig. 5** に示したようにダミーの傾きの小さな差でも腹部と頭部にかかる衝撃の割合が変わるので，**Fig. 7** ではエアバッグの効果が明確に現れていない。頭部と腹部の衝撃加速度を平均した **Fig. 8** で見ると，エアバッグのないときに比べ，エアバッグのあるときの方が衝撃が小さくなっていることがわかる。

3.4 実験結果の分析方法

今回の実験結果のエアバッグがあるときとないときの衝撃荷重を比較すれば，エアバッグが一定の緩衝効果をもつことは明白であるが，それが十分な防護性能といえるかどうかは必ずしも明らかでない。一般に，落下衝撃が加わったときにどの程度の障害を受けるかということは，衝撃値のみからは決定できない。同一の衝撃でも，衝撃の加わる位置が頭部であるか腰部であるかということや，衝撃の位置が同じでもその方向によっても影響は異なる。さらに，衝撃を受ける側の人間の条件によっても異なってくる。

Table 1　Criteria of vehicular safety helmet.
乗車用安全帽の評価基準

種類	A 種	B 種／C 種
用途	原動機付自転車，総排気量 0.125 cc 以下自動二輪	乗用車，総排気量 0.125 cc 以上の自動二輪
最大値	3920 (m/s^2) {400G}	2940 (m/s^2) {300G}
200G	2 ms 以下	—
150G	4 ms 以下	4 ms 以下

しかしながら，自動車事故に関していえば，衝突試験における衝撃波形から人間に被害があるかどうかを推定する判定基準が確立している[1]。そのなかの一つは，胸部に対する衝撃加速度の最大値を評価するもので，それが 60 [G] 以下であることを要求している。今回の測定においては，ぴったりこれに対応するものはないが，腹部にかかる衝撃加速度の大きさを評価する一つの目安にはなると思われる。

もう 1 つは HIC (Head Injury Criterion) と呼ばれるもので，頭部に対する傷害の程度を推定するものであり，次ぎの式で表される。

$$\mathrm{HIC} = \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} a\,dt}{(t_2 - t_1)} \right]^{2.5} \cdot (t_2 - t_1)$$

ただし，a は衝撃加速度波形（単位は G：重力加速度）であり，t_1, t_2は HIC が最大となるようにとった任意の時刻である。この式から分かるように HIC は平均加速度の 2.5 乗とその時間間隔の積であり，平均加速度が大きくなると急激に大きくなる。傷害を受けないためには，HIC が 1000 を超えないことが要求されている。例えば，100G の大きさで，継続時間が 0.01 秒の方形波では HIC が 1000 になる。

また，オートバイや自転車での事故の防止のために，乗車用安全帽[2]というものがあり，この性能基準が今回の実験と類似した落下衝撃試験における衝撃加速度によって評価されている。すなわちダミーヘッドに乗車用安全帽を装着し，一定高さを落下させて地面と衝突したときの衝撃加速度の最大値と特定の加速度における衝撃の継続時間によって評価している。その評価基準を **Table 1** に示す。

3.5 解析結果

頭部の衝撃加速度に対して HIC を計算した。それと落下高さの関係を **Fig. 9** に示す。エアバッグなしの場合には，落下高さが最も低いときから傷害限界を超えている。エアバッグのある場合でも，2m を超えると傷害限界の 1000 を超える。**Fig. 8** からも明らかなようにエアバッグの緩衝効果が認められ，HIC が半分以下になるが，HIC の基準が墜落時にも妥当性を持つとすれば，無傷で済むというわけにはいかない。

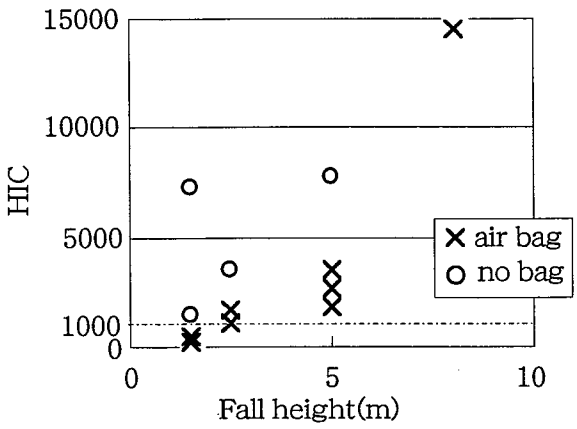

Fig. 9　Fall height and HIC
落下高さと HIC

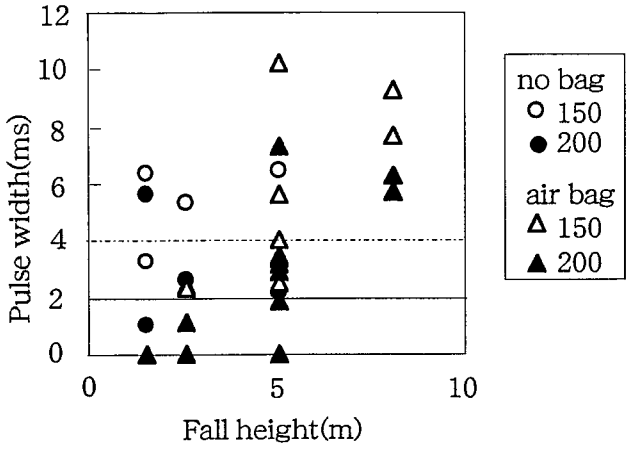

Fig. 10　Fall height and pulse width of fixed G level.
落下高さと衝撃継続時間

また，頭部の衝撃加速度を乗車用安全帽の評価基準に当てはめるため，150G と 200G における衝撃加速度の継続時間を求めた。それを **Fig. 10** に示す。ただし，試験基準で測定系の周波数特性が 10 kHz 以上であることを要求しているので，それに近付けるため移動平均をとる前のデータから継続時間を求めた。この評価方法では，HIC のときより高所まで基準を満たす。この基準をこえる場合を傷害として，同一の落下高さで基準に不合格になる割合を不合格率として求めた。これを，**Fig. 11** に示す。落下高さが低い場合には，エアバッグによって，乗車用安全帽の評価水準まで衝撃加速度が緩和されていることが見てとれる。

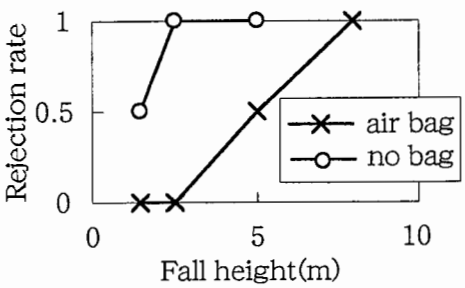

Fig. 11 Fall height and rejection rate.
落下高さと不合格率

3.6 緩衝限界の考察

エアバッグはその防護範囲において明確な緩衝効果を示したが，落下高さによっては障害は免れない。今後防護性能を向上する上で何が性能を規定する上での基本的要件であるかを明らかにするため，力学的な考察を行った。

質量 m[kg] のものが高さ h[m] だけ落下するときの位置エネルギーの変化は，mgh[J] である。ただし，gは重力加速度である。この物体が落下するとき位置エネルギーが運動エネルギーに変わり地面との衝突時には v_0 [m/s] の速度となるが，地面との衝突時に s[m] だけたわみ，その間に f[N] の力で上方向に力を受け停止する。一般的には，f は時間（あるいは距離 s）の関数であるが，話を簡単にするために，fを平均した一定の力 f_0で代表させると，エネルギー保存則により

$$mgh = 1/2 \cdot m{v_0}^2 = f_0\, s \qquad (1)$$

である。衝撃力を衝撃加速度 a[G] で表すと，(1) 式より

$$a = f_0/mg = h/s$$

となる。すなわち，衝撃を小さくするためには，s を大きくする必要がある。エアバッグは，地面の微小なたわみの代わりにエアバッグの厚み分まで力のかかる距離を大きくすることで緩衝するものといえる。

エアバッグの厚さを 10 cm とすると，自動車衝突における胸部の衝撃加速度の限界値である 60[G] を満たし得るのは，落下高さが 6m までである。

一方，衝突を力積 f_0Tで表すと，これは運動量変化に等しくなる。従って，

$$f_0T = (k+1) \cdot mv_0 \qquad (2)$$

となる。ただし，kは反発係数であり，完全弾性衝突のときの 1 と完全非弾性衝突のときの 0 の間の値をとる。また，(1) 式より v_0は$\sqrt{2gh}$である。これらの式からHIC を計算すると，

$$\mathrm{HIC} = \sqrt{2}h^2/g \cdot (k+1)/s^{1.5}$$

となる。HIC を小さくするには，バッグの厚さを増やして，跳ね返らせないようにする（kを小さくする）ことが必要であることが分かる。

4. システムの評価

4.1 墜落検知のための方法

エアバッグによる緩衝性能については，前述の通りであるが，墜落防護システムとして考えた場合には，そのほかに検討すべき問題も少なくない。その幾つかについて以下に検討を加えた。

エアバッグを墜落防護手段として用いるときに難しいのは，どうやって誤りなく墜落したかということを検知するかということである。誤りには 2 種類あって，墜落したときにそれが検知できない誤りと，墜落でない時墜落と検知する誤りである。安全装置としては，前者はあってはならないのは当然であるが，後者もできる限り避けたい。

センサである事象の発生を検知するためには，その事象に伴う何らかの物理現象を通して検知するしかないが，誤りがないためには，その現象が他の事象では起きないその事象に特有な現象であることが必要である。ただし，安全装置のセンサとしては，墜落を検知できないことはあってはならないので，検出すべき現象は，墜落時に必ず伴うものであれば，墜落以外のときにあってもかまわない。その場合には，墜落でないのに墜落とする誤検知が発生する。

墜落に伴う現象としては，体がどこにも支持されていない，位置が急速に下がる等の現象がある。前者をより詳細に見れば，構造物と接触していないとか，体が宙に浮いている（自由落下状態）という現象となる。これらを検知するためには，例えば接触という現象を用いれば，体の支持は，立っているときには足で行い，座っているときには尻で行うので，両方の足裏と尻に接触センサを設け，両足及び尻のいずれも接触していないということで，墜落を検知できる。自由落下という現象は，加速度のセンサによって無重力状態（加速度がゼロ）になるということから検出できる。位置の急速な低下を検出しているものとしてはリトラクタ（安全ブロックと呼ばれることが多い。建物側にロープの巻取り装置を設け，ロープの一端を人間に接続する。ロープのくり出し速度が一定速度を超えたらロープのくり出しをロックする安全装置）がある。

しかし，これらの現象は墜落に特有な現象というわけではない。例えば，50 cm 程度のところから飛び下りることは少なくないと思われるが，この場合にも，同様な現象が発生する。また，センサの種類によっては，

つま先立ち（足の接触センサ）や，着席（重力センサ）等の動作時にも墜落時と同様な状態になる。

これらに対する1つの対処法は，墜落と紛らわしい動作をしないようにすることである。少なくとも飛び下りは不安全行動に入るので，禁止することはおかしくはない。また，安全上からも健康上からも急激な動作を避けることが望ましく，これによって無重力を検知することが減らせる。このようにある程度であれば，使用者の行動を規制することで，墜落でないのに墜落と判定することは避けられる。しかしながら，作業に伴う動作は千差万別であり，人間のみでの対処は実用的とはいえない。

センサでの対処法としては，時間的な区別がある。すなわち，飛び下りや着席は極短時間でその状態が終了するが，墜落ではこの時間が相対的に長い。識別のためには，判断時間を長く取ったほうがよいが，防護の観点からはなるべく早く開かせたい。システムとしての検討が必要である。次にこれについて検討する。

4.2 動作速度の評価

本装置は墜落による被害を防護するためのものであるが，通常はエアバッグは畳まれた状態にあり，墜落防護のためには地面との衝突以前に展開する必要がある。そのために必要な時間は，墜落したということを判定するまでの時間t_sと展開するための時間t_oである。従って，地面との衝突までの時間をtとすると，

$$t > t_s + t_o$$

であれば良い。落下時間t[sec]は，落下高さh[m]，重力加速度gで決まり，

$$t = \sqrt{2h/g} \qquad (1)$$

である。ただし，初速度は0として，体の回転は考えず，質点として扱った。いくつかの高さについて落下時間を計算すると，**Table 2** のようになる。通常の作業において，50 cm程度の高さを飛び下りることはままある。従って，墜落と飛び降りを識別するためには墜落の判定に0.32秒以上かける必要がある。一方，落下距離が少ない場合にはたとえ墜落しても重篤な災害となることは少ないということを考えれば，落下距離が1m以下ならエアバッグの必要性は低い。転倒程度のものであるなら，墜落防護用の安全帽の守備範囲と考えられる。法令上，墜落防護措置が必要とされるのは，2m以上であることを考えれば，エアバッグでの防護は2m以上の落下距離の場合として良いと思われる。この場合，展開に要する時間が0.2秒であるので，墜落の判定に要する時間を0.35秒としても，2m落下する前に展開は終了していることになる。

Table 2　Falling Time and Fall Height.
落下高さと落下時間

height	0.5	1	2	5	10
time	0.32	0.45	0.64	1.01	1.43

5. おわりに

共同研究で開発中の墜落防護用のエアバッグの評価を行った。開発は，共同研究者が行い，本研究所は評価を主に担当した。

ダミーにエアバッグを装着して落下させ，エアバッグのあるときとないときの衝撃加速度を比較した。エアバッグが有効である背面からの水平落下においては，衝撃加速度の最大値は顕著に小さくなり，衝突加速度より計算される評価指標が半分以下になる等の有効性が確認できた。

しかしながら，頭から落ちたり，足から落ちたりしてエアバッグと地面が接触しない場合には当然効果はない。また，エアバッグが有効な場合にも，無傷で済むというわけにはいかない。

改善すべき点を明確にするため力学的解析を行い，緩衝するためには，緩衝力が作用する距離を増やすことと，エネルギーの内部消散が必要であることを示した。エアバッグでは，エネルギーの消散が十分でなくかなり跳ね返るので，この点の改善が望まれる。

また，システムとしての検討を行った。墜落検出時の展開速度や展開したエアバッグの緩衝性能は実用化のレベルに達している。しかし，墜落したということを検出する手段については，飛び降り動作などによって墜落していないのに墜落したと誤認する可能性が少なくなく，まだまだ研究の余地がある。

可搬性を考えればエアバッグに完全な防護性能を求めることには無理があり，エアバッグが，元々傷害をなくすことをめざすものではなく，傷害を軽減することをめざすものである以上，障害が出ることも避けられない。しかしながらユーザの気持ちとしては傷害がないことを望むのは当然である。そのため，今後とも防護性能を向上させるための努力が必要である。

参考文献

1)　FMVSS208 Occupant crash protection.
2)　JIS T8133–1997 乗車用安全帽

(平成11年2月5日受理)