

## エア・マットを使用した救助器具の研究

加 藤 勝 文\*  
 島 光 男\*  
 阿 川 道 男\*\*  
 安 達 佳 男\*

### 1. ま え が き

当研究室ではビル火災時等における中高層階からの緊急避難用具、あるいは各種救助器具の開発研究を進めているが、その一つとして、ビル火災で中高層階から飛び降り脱出しなければならない状況に置かれた人を、エア・マットで安全に地上に着地させるための用具を検討してきた。

空気等ガス体の弾性を応用したエア・マットが、非常にすぐれた衝撃緩衝効果を有することは広く知られている。しかしエア・マットの形状、構造、空気圧など十分に検討されたものでなければ、飛び降り脱出者の姿勢、重量等が常に変化する状況下において、安全に救出することは不可能で、底ずき、はじき返し等の2次の傷害を発生する危険が大きい。

危険を排除し、安全に救助するためにエア・マットは如何なる形状、構造のものがすぐれているか、さらには着地時の衝撃が人体へ及ぼす影響、さらにはエア・マットの使用限界などを求めるため、新たに試作したエア・マットと現在使用中のエア・マットを使用して一連の実験をおこない、各種資料を得た。

### 2. 実 験 方 法

#### 1 供試エア・マット

##### (1) 送気式エア・マット (3種類)

使用したエア・マットはビニロンターポリンで縫製した巾6m、奥行3m、厚さ1m及び1.5m、内容積18 $\text{m}^3$ と27 $\text{m}^3$ の2種類で、これを単独の場合と、1m物を下に2段重ねとした場合とで実験をおこなった。

マットの構造概略は第1図に示すように、両側面に直径90cmの空気送入と排出用のチューブ、さらに両側面各2ヶ所に直径15cmの空気排出用チューブが設けられている。又マットを展張した際空気圧でマットが円

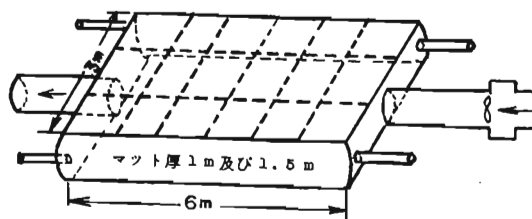
筒状に変形しないように、マット内の上下方向に1m間隔で吊り索が取り付けられている。

マットの展張は、大型送風機で空気送入手用チューブから空気を送り込み、空気排出用チューブを調節してエア・マットの内圧を任意に調整する。

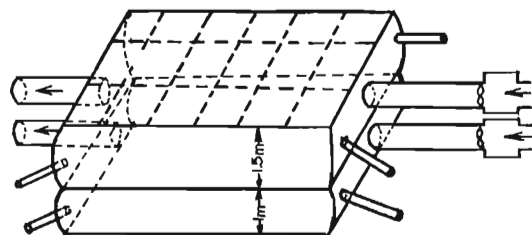
このエア・マットはマット展張後も連続的に送風し続けるため、物体が落下してもマットは短時間に所定の形状に復元する。又物体の落下による急激な内圧力の上昇は、排出口からの空気の放出で抑制され、落下物体のはじき返しを防止する。

使用した送風機は厚さ1.5mのエア・マット用には風量210 $\text{m}^3/\text{min}$ 、風圧100 $\text{mmAq}$ のプロペラファンを、1

第1図 送気式エアマット概略図



2段重ねにした場合



mマットには風量30 $\text{m}^3/\text{min}$ 、風圧136 $\text{mmAq}$ のプロペラファンを使用した。送風量の調節はファンの吸込側開閉口部の面積を可変しておこなった。

(2) F製空気式救助マット (SL-27)

ゴム引ナイロン布地で縫製し、現在実用に供されているエア・マットである。形状、構造は第2図に示すとおり円形で、エア・マットの上面周囲の把手を8人で保持し、マットを持ち上げ、数回「あおる」ことによりマット内空気室に底部の吸排気口から空気を吸入し、エア・マットが形成される。

マット内は加圧せず大気圧に等しいが、落下時のマットのしずみで内圧が上昇し加速度は緩衝される。空気室内部に設けられた隔壁及び底面吸排気口の構造が緩衝効果を大ならしめるよう工夫されている。

このマットは直径2.7m、高さ1.1mである。

2 供試ダミー及び計測

(1) 予備実験用砂袋の落下

本実験前に各エア・マット共落下高さを変えて予備実験を行ない、概略を観察した。この予備実験に砂袋(重量60kg、φ26cm、h60cmの円筒型)を使用した。実験は砂袋をクレーンで吊り上げ、砂袋下端と地面との距離を所定の高さに設定する。落下は吊り下げ用ロープを切断し、地上に展張したエア・マットの中央に落下させる。なお予備実験は観察が主で、計測は行わ

ない。

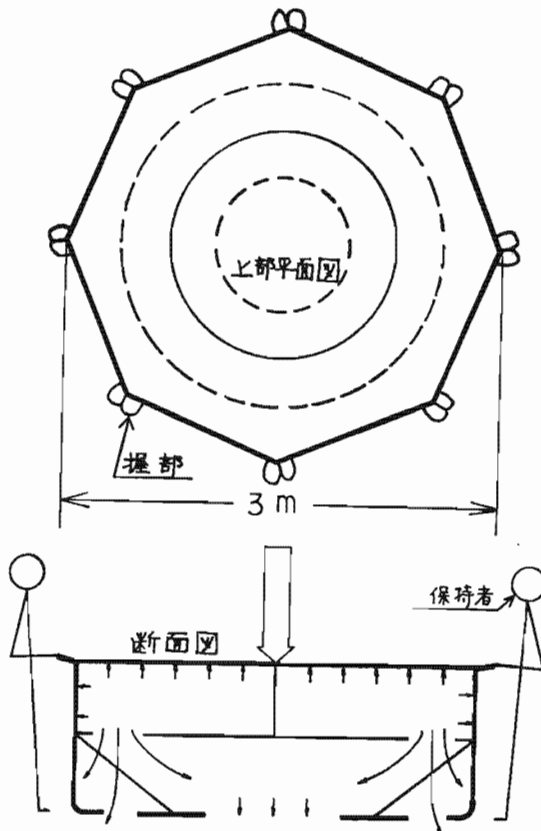
(2) 本実験用人体ダミーの落下

本実験用落下物として計測用人体ダミー(身長168cm、体重63kg)を使用した。落下時のダミーの姿勢は第3図に示すように、躯幹部と大腿部、および大腿部と下腿部がほぼ直角になるように腰と膝の関節を曲げて固定する。このダミーの肩部と膝部にロープを掛けて臀部が下方に、腹部を上方に向けて吊り下げ、臀部下端と地面の距離を所定の高さになるようクレーンで吊り上げる。

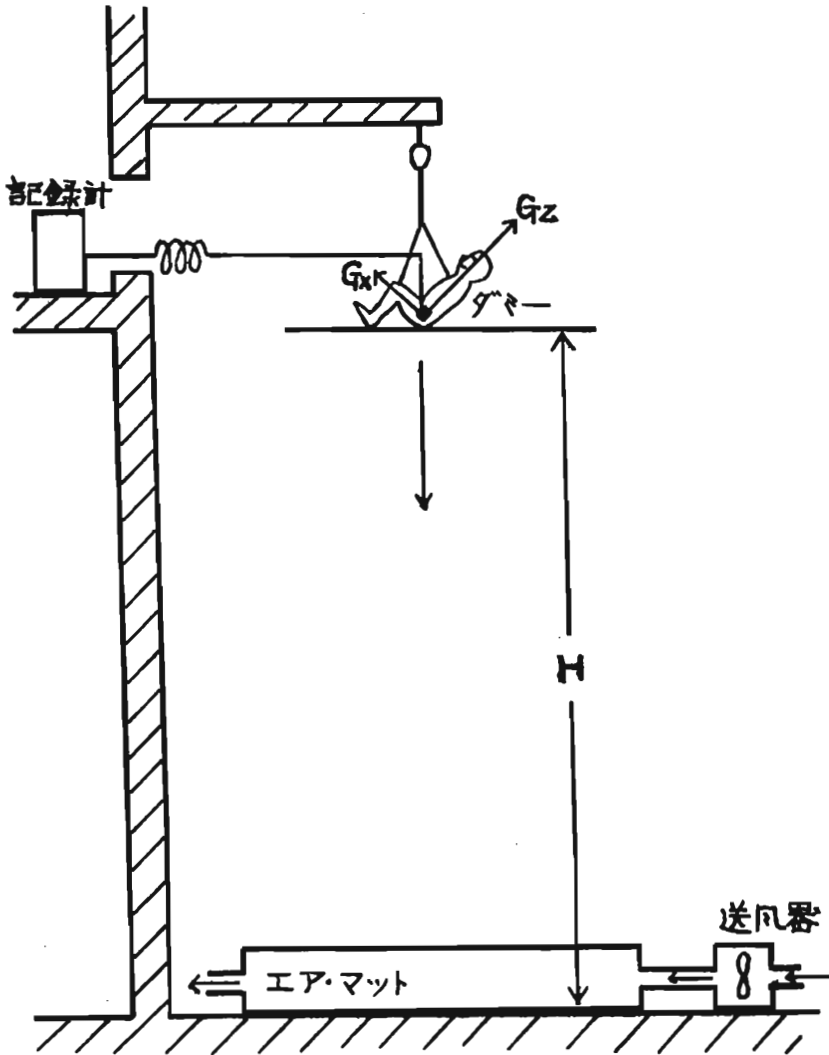
吊り下げ用ロープを切断すると、ダミーはそのままの姿勢で地上に設置したエア・マットの中央に落下する。その時のダミーの加速度Gを測定する。

加速度計はダミーの骨盤部に3軸加速度計を固定し、ダミーの臀部、頭方向( $G_z$ )、膝、臀部方向( $G_x$ )、ダミーの左右方向( $G_y$ )の三方向を測定する。ダミーがマットに接触後から、受ける加速度は三方向に分解されて計測されるから、真の値は $G_x$ 、 $G_y$ 、 $G_z$ の三方向の合成値で求めなければならないが、 $G_y$ 方向の影響は非常に小さいのでここでは $G_x$ 、 $G_z$ の二方向の合成Gを近似的に計算により求めた。

第2図 F製空気式救助マット(直径2.7m)



第3図 人体ダミー及びマットのセット状況



(3) 本実験用砂ダミー

F製空気式救助マットの本実験には、人体ダミーの代わりに加速度計をセットした第4図に示す構造の砂ダミー（重量62kg、φ26cm、h60cm）を使用した。

実験は砂ダミーをクレーンで吊り上げ、ダミー底部と地面の距離を所定の高さに設定する。ダミー吊り下げ用ロープを切断するとダミーはそのままの姿勢で地上に設定したエア・マットのほぼ中央に落下する。加速度計は砂ダミー中央下部に1軸加速度計を固定し、ダミーの上下方向（垂直方向）のみを測定する。

(4) マット内圧の測定

エア・マット内部に小型圧力変換器をセットし、ダミーの落下によるエア・マット内部の圧力変化を加速度と同時に電磁オシログラフで記録する。

(5) 高速度カメラによる撮影

ダミーの落下、着地等の状況を高速度カメラ(500コマ/sec)で撮影し、ダミーの最終落下速度、落下姿勢などの解析を行なう。

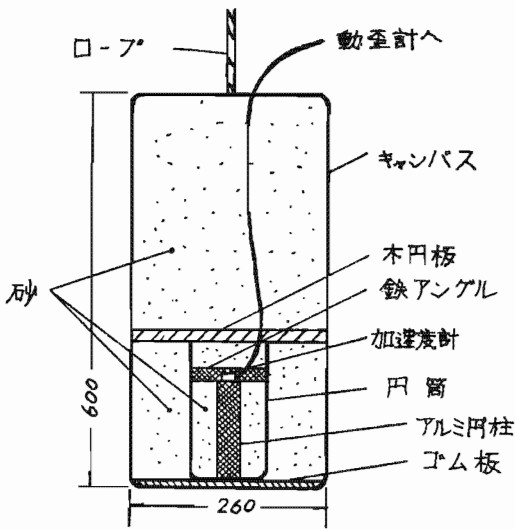
3 人体ダミー直接落下実験

地面に置いた厚さ2cmの堅い合板上に人体ダミーを、2、(2)と同じ姿勢で臀部から直接落下させ、その時の衝撃力（加速度G）を測定し、マット上に落下した際に受ける衝撃力との強さを対比する。ダミーの落下高さは10cm、20cm、30cmとし、加速度とその持続時間を測定する。

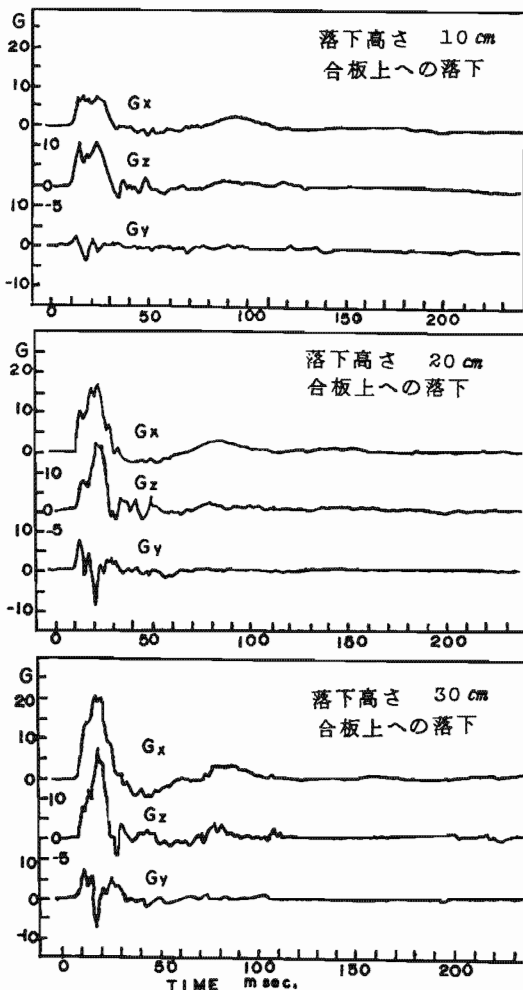
3. 実験結果及び考察

1 人体ダミー直接落下実験

第4図 本実験用砂袋



第5図 人体ダミー直接落下時の加速度曲線



合板上10cm, 20cm, 30cmから臀部を下に人体ダミーを落下させた。落下時に受けた加速度 $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$ 及び合成Gの各最大値とその持続時間を第1表に、加速度の記録チャートを第5図に示す。

結果をみると、エア・マット等の緩衝材がないためダミーが木板に接触した瞬間からGレベルは急激に立ち上がり、同様な角度で減衰し、衝撃力は短時間に集中しGの立ち上がり速度が大きくなっている。落下高さ10cmの場合には最大Gは7.4 $G_x$ , 12.0 $G_y$ , 合成Gは13.6Gと比較的小さく、全加速度持続時間も約0.104secと短い。

20cmでの最大値は13.8 $G_x$ , 16.8 $G_y$ , 合成Gは23.3Gで全加速度持続時間は0.10 sec, 20G以上の加速度持続時間は0.025secである。30cmでは21.0 $G_x$ , 23.6 $G_z$ , 合成Gは31.6Gと20cmの場合より当然大きい、20G以上の加速度持続時間は0.007secと逆に短くなっている。

これら測定された $G_x$ ,  $G_y$ , 合成Gの値が、人体に及ぼす影響については、G値とその作用時間、加速度の作用する方向、立ち上がりの割合、体の位置及び方向などが大きな因子となるので、G値のみで判断するのは危険である。しかし一応の目安として自衛隊航空医学実験隊で示されている人間の耐衝撃性に関する資料から引用させてもらおうと、人間の衝撃G耐性は、頭から腰、臀部に至る $G_z$ 方向は約15G以下で、持続時間は0.05sec以下、膝から臀部に至る $G_x$ 方向は約35 $G_x$ 以下で、0.1sec以下を安全域とされている。又航空機用エジェクションシート設計の限界Gはさらにきびしく、持続時間0.005sec以上では20 $G_z$ を越えないこととされている。

さらに衝撃波の作用時間に対してGの立ち上がり速度の変化は、人間の応答性に著しい影響を与えるといわれている。例えば45G(持続時間0.09sec)で立ち上がり速度500G/secの加速度は何らのショック症状を引き起さないが、38G(0.03sec)で立ち上がり速度1300G/sec以上の加速度は、はっきりしたショック症状を示す。以上のようにGの立ち上がり速度も人体に大きな影響を与える。

上記資料を基に、人体ダミー直接落下時の測定値から人体に対する影響を検討すると、高さ10cmからの落下では、合成G13.6Gで20G以上には上昇せず安全限界内、20cmの高さでは23.3G, 20G以上の作用時間0.025secで安全域と中等度傷害域の境界付近、30cmの高さでは31.6G, 0.007secで中等度傷害域にあるといえる。

2 送気式エア・マット(厚さ1m, 内圧40mmAq)

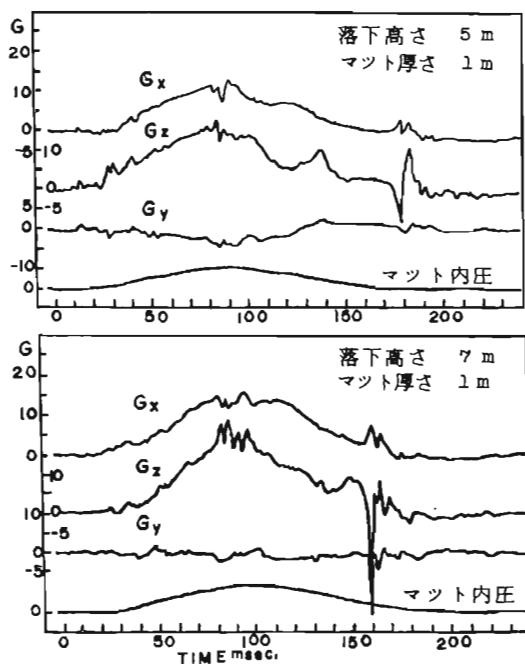
地上高さ5mと7mから砂袋及び人体ダミーを落下

第1表 救助器具と加速度データ集

救助器具	落下高さ	G <sub>x</sub> 最大	G <sub>z</sub> 最大	合成G最大	合成G, 20G以上の接続時間(sec)	加速総作用時間(sec)
送気式エア・マット (1m)	5m	+12.3	+18.5	20.6	0.008	0.218
	7m	+16.0	+24.6	26.6	0.039	0.183
送気式エア・マット (1.5m)	7m	+15.2	+11.6	18.6	0	0.146
	10m	+16.4	+16.0	22.4	0.025	0.169
	13m	+21.5	+16.0	25.6	0.051	0.162
送気式エア・マット2段重 (1m+1.5m)	10m	+11.0	+10.0	14.9	0	0.249
	13m	+14.2	+9.8	17.3	0	0.225
	20m	+19.0	+14.0	22.5	0.025	0.185
木板上に落下	10cm	+7.4	+12.0	13.6	0	0.104
	20cm	+13.8	+16.8	23.3	0.025	0.100
	30cm	+21.0	+23.6	31.6	0.007	0.100

させた。人体ダミーが受けた加速度とその持続時間等は第1表に、加速度及びマット内圧変化の記録チャートは第6図に示す。

第6図 送気式エア・マット(厚さ1.0m)へのダミー落下時の加速度曲線



肉眼及び写真撮影による観察では、砂袋を7mから落下させた実験で、砂袋はエア・マット上1.5m位の高さまではじき返しを受け、エア・マット外に飛び出してしまった。

人体ダミーの場合は5m、7mいずれからの落下共、マットに数10cm沈み込んだのちはいじき返しを受け、5mではマット上20cm位で垂直に逆立ちしてマット上に頭から落下した。7mでは約50cmはずんで宙返

りし、腹部からマット上に落下した。以上のようにエア・マットの状態によっては、ダミーのはじき返しによる転落といったような二次的障害の危険が大きい。内圧を低くすればダミーのはじき返しは無くなるが沈み深さは大きくなり、底ずきの危険性が大になる。逆に内圧を高くするとダミーのはじき返しが大となり転落の危険が生ずる。

ダミーがマット上で受けた各方向の加速度は、G<sub>y</sub>はいずれも大きな値を示さなかったが、G<sub>x</sub>、G<sub>z</sub>はダミーがマットに接触した瞬間から上昇し、落下高さ5mの最大値は12.3G<sub>x</sub>、18.5G<sub>z</sub>、合成Gは20.6Gに達し、以後は次第に減衰している。又加速度の全持続時間は0.218sec、20G以上の持続時間は0.008secと短かった。落下高さ7mの最大値は16.0G<sub>x</sub>、24.6G<sub>z</sub>、合成Gは26.6Gで、加速度全持続時間は0.183sec、20G以上の持続時間は0.039secと5mの場合より長くなっている。

ダミーが落下時に受けた加速度Gを前記航空医学実験隊資料を基に人体に対する影響として検討すると、高さ5m、7mの場合とも、G<sub>z</sub>方向はやや安全限界を越えている。しかもはじき返しの如何によっては、致命的な2次衝撃を起す可能性を否定出来ない。

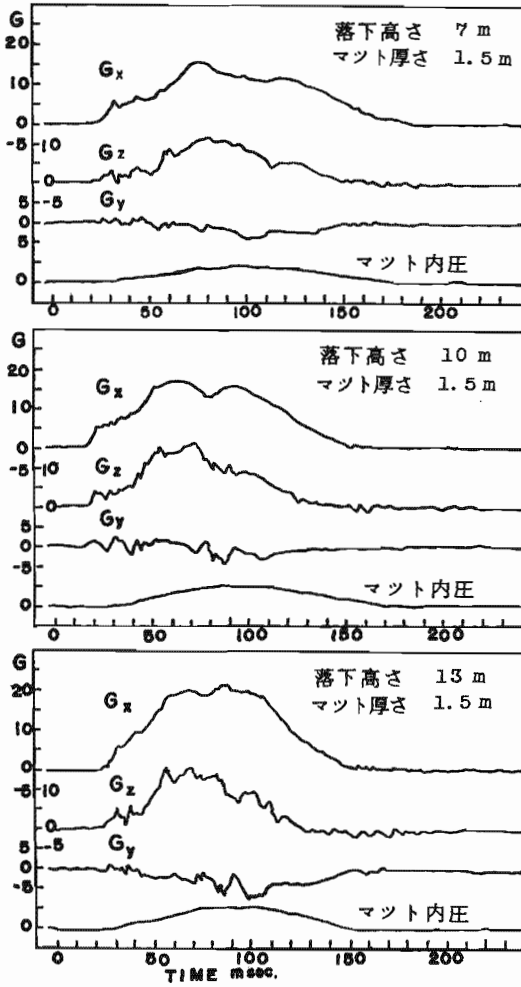
底ずきの有無については肉眼あるいは高速度カメラでは確認されなかったが、G<sub>x</sub>、G<sub>z</sub>の加速度曲線を見ると、7mでは最大加速度を過ぎた時点で一つのピークを記録している。これは軽い底ずきを起したものと考えられる。

以上の結果から、厚さ1mのエア・マットは、5m以上の高さから飛び降りるのには安全であるとはいえない。なお測定したG値と、ダミー直接落下実験時の値を比較すると、5mの高さから厚さ1mのエア・マット上に落下した際に受ける衝撃は、20cmの高さから堅い合板上に尻もちをつくよりも軽微であるといえ

る。

3 送気式エア・マット(厚さ1.5m, 内圧40mmAq)  
地上高さ7m, 10m, 13mから砂袋及び人体ダミー  
を落下させた。人体ダミーが受けた $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$ , 合  
成 $G$ の各最大値とその持続時間, 及び加速度とマット  
内圧の記録チャートを第1表と第7図に示す。

第7図 送気式エア・マット(厚さ1.5m)への  
ダミー落下時の加速度曲線



肉眼及び写真撮影による観察では, 高さ7m, 10  
m, 13mでは, 砂袋, 人体ダミー共にほとんどはじき  
返はなく, 着地後そのままの姿勢で静止した。ダミ  
ーのマットへの沈み深さは10mの場合約20cm, 13mの  
場合約1mで, いずれも底ずきは認められなかった。  
又加速度曲線でも底ずきは確認されていない。

ダミーが落下時に受けた加速度 $G$ 値の人体への影響  
を航空医学実験隊資料で判断すると, 7mでの合成 $G$   
は18.6Gで何ら影響なく安全限界, 10mも16.4G,

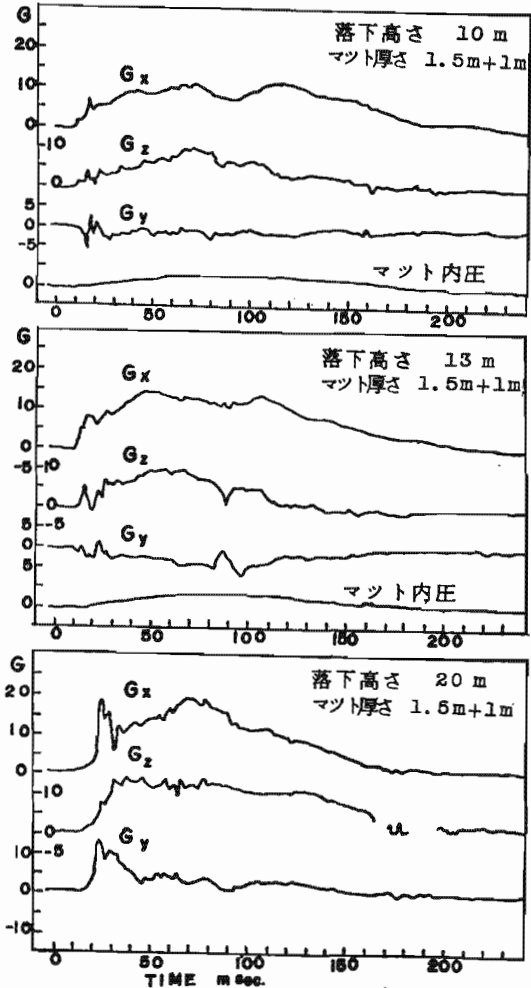
16.0Gz, 合成 $G$ 22.4Gでは安全であるが, 13mに  
なると, 合成 $G$ 25.6G, 及び20G以上の作用時間0.051  
secと, 中等度の傷害を受ける領域にはいつてくる。

上記データーを堅い木板上へダミーを直接落下させ  
た場合の衝撃力と比較すると, 厚さ1.5mのエア・マ  
ット上へ10mの高さから落下した場合の衝撃は, 20cm  
の高さから直接尻もちをつく様に落ちた場合よりも軽  
微であるといえる。

以上の結果から, 厚さ1.5mのエア・マットは, 10  
m以下の高さから実験条件と同一姿勢で飛び降りる場  
合には, ほぼ安全であるといえる。

4 送気式エア・マット(厚さ1.5m(上段)+1.0m(下  
段)の2段重ね。内圧, 上段10mmAq, 下段40mmAq)  
前記実験2及び3で使用したエア・マットを2段重  
ねにして使用し, 高さ10m, 13m, 20mから砂袋及び  
人体ダミーを落下させた。

第8図 送気式エア・マット(厚さ1m+1.5  
mの2段重ね)上へのダミー落下時の  
加速度曲線



人体ダミーが受けた  $G_x$ ,  $G_y$ ,  $G_z$ , 合成  $G$  の各最大値, 合成  $G$  が 20G 以上の加速度持続時間, および全持続時間を第 1 表に, 加速度  $G$  とマット内圧の記録チャートを第 8 図に示す。

肉眼及び写真観察では高さ 10m 及び 13m までは砂袋, 人体ダミー共にマットへの沈み込みも少なく, 底ずきは勿論, はじき返しもほとんどなく安定したソフトランディングであった。

高さ 20m で砂袋を落下させると, 砂袋がマットに沈み込む際に上段のマットの両端が V 字型にはね上り, マットの形状が大きく乱れた。人体ダミーの場合も, マット自体が若干移動した。しかし, ダミーに大きなはじき返し, 底ずき等危険な現象は生じなかった。

人体ダミーが落下時に受けた加速度  $G$  の人体に対する影響を, 航空医学実験隊資料に基づいて検討すると, 10m, 13m からの落下共,  $G_z$  方向の最大値は約 10G, 最大合成  $G$  は 20G 以下で完全に安全限界内にはいっている。落下高さ 20m では合成  $G$  22.5G, 20G 以上の持続時間 0.025sec では安全域と中等度傷害域の境界にあるといえる。なお 20m からの人体ダミーの落下で, ダミーがマットに接触した瞬間に  $G_x$  に大きなピークがみられるが, これは自由落下距離が長いから, ダミーの最終落下スピードが大きくなり, マット表面とダミーの接触衝撃力が大きくなって生じた現象と解釈される。

厚さ 1m あるいは 1.5m のマットを単独で使用し, 5m あるいは 7m の高さから落下した場合に受ける加速度より, 2段マットで 13m から落下した際の  $G$  レベルの方がより小さく, 2段重ねマットの効果が確認された。

2段重ねマットの実験で計測された加速度  $G$  値と, ダミーを直接堅板上へ落下させた時の値を比較すると,  $G_z$ , 合成  $G$  共, 13m の高さからエア・マット上に落下した場合の衝撃力の方が, 20cm の高さから戻もちを付いた時の衝撃よりも軽微であるといえる。20m の高さからマット上に落下した時の  $G_x$ , 合成  $G$  値及び 20G 以上の持続時間の数値が, おおむね 20cm の高さから堅板上に戻もちをついた時の衝撃力に相当している。

以上の結果から 2段重ねエア・マットは, 実験条件と同一姿勢で飛び降りれば, 13m まではほぼ安全であるといえる。将来マットの材質等を検討すれば, さらに高い位置からの使用にも耐えられるようになると思われる。

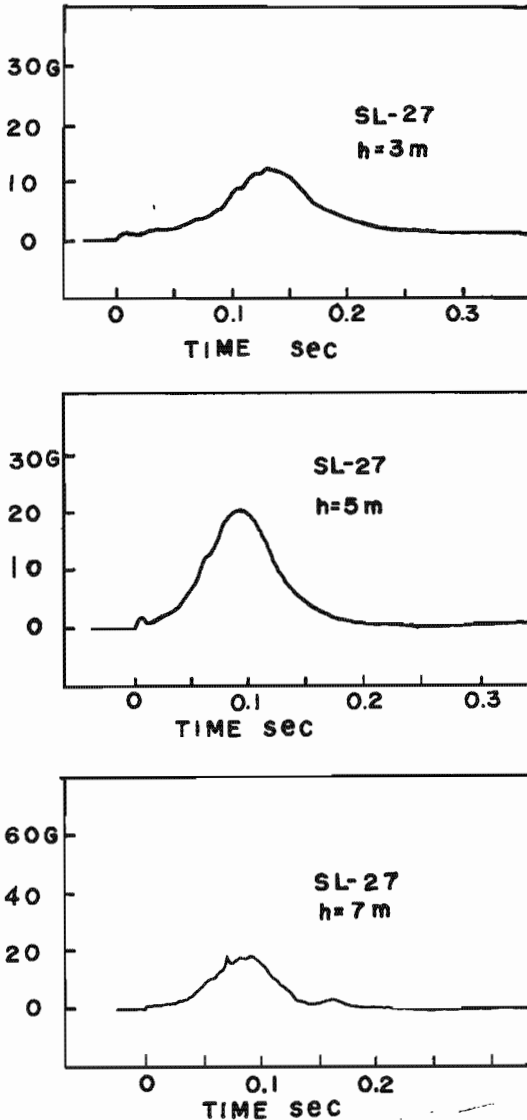
5 F 製空気式救助マット(直径 2.7m, 内容積 6.3 $\text{m}^3$ )  
地上高さ 3m, 5m, 6m, 7m から加速度計を取り付けた砂ダミー(本実験用砂ダミー)を落下させた。砂ダミーが受けた加速度とその持続時間等は第 2 表に, 記録チャートの一例を第 9 図に示す。

各落下高さ毎に数回の実験を行なったが, 加速度  $G$

第 2 表 F 製救助マットデータ集(直径 2.7m)

落下高さ	最大 $G$	20G 以上 持続時間 (sec)	加 速 総 作用時間 (sec)	マット内 最大内圧 (mmAq)	底 ず き	備 考
3 m	12	0	0.24	—	なし	
	11	0	0.21	60	なし	
	12	0	0.25	75	なし	
	13	0	0.22	95	なし	
5 m	21	0.028	0.189	100	なし	
	21	0.021	0.210	90	なし	底部荷重変換器に接触
	23	0.023	0.205	80	なし	
	21	0.010	0.231	105	なし	
	21	0.013	0.221	95	なし	
	20	0	0.189	120	なし	マット上面から約 50cm 飛び上る
6 m	25	0.028	0.241	85	なし	
	22	0.032	0.256	115	なし	
	23	0.044	0.210	110	なし	
	23	0.025	0.179	130	なし	マット上面から約 50cm 飛び上る
	24	0.026	0.256	105	なし	回転しながらマット外へ飛び出す
7 m	23	0.009	0.215	155	なし	マット面ではずみ回転
	20	0	0.189	135	なし	マット外へ飛び出す
	20	0	0.185	190	なし	回転しながらマット外へ飛び出す

第9図 F製空気式救助マット(直径2.7m)への  
ダミー落下時の加速度



値は各実験共近似した値を示し、測定値の信頼性は高いものと考ええる。

ダミーがマット上で受けた加速度Gと、その全持続時間をみると、落下高さ3mで約12G、平均0.15sec、5mで約21G、0.095sec、6mで約25G、0.085secと加速度Gは落下高さと共にほぼ直線的に上昇しているが、7mでは逆に約21G、0.113secと減少の傾向を示した。理論的には落下高さが高くなるほど加速度は増すはずであるから、理由については再検討の要がある。一方加速度の全持続時間は、3mから6mまで衝撃力とは逆に減少している。

ダミーが落下時に受けた加速度Gと、それが人体に

及ぼす影響を航空医学実験隊資料で検討すると、3mでは完全な安全限界内、5mから7mの間は安全域から中等度傷害域付近にあるといえる。

堅い木板上へ直接落下させた場合の衝撃力と比較すると、3mの高さから落下した場合はほぼ10cmから直接戻もちをついた際の衝撃力に相当し、5m~7mの値いがおおむね20cmから戻もちをついた値に近くなっている。

しかし、この実験は落下物体が砂ダミーであるため、ダミー自体の緩衝効果が期待出来なかったが、人間が足から飛び降りた場合には、足首、膝、腰の緩衝効果が大きいので、Gレベルは実験値よりさらに低下するものと思われる。

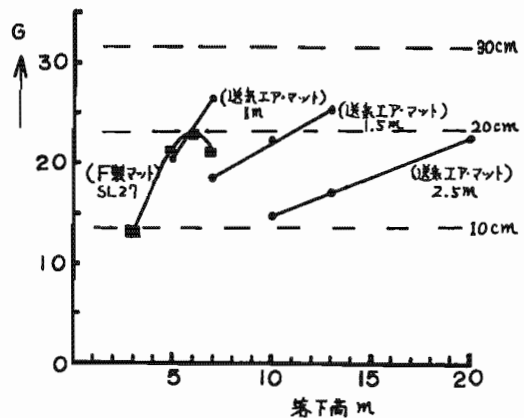
はじき返しは、落下5mの場合に1/6回、6mで2/5回、7mで3/3回確認され、マット外への飛び出しも6mで1/5回、7mで2/3回みられ、はじき返しによる2次衝撃の危険は落下距離に比例して大きくなる傾向にある。

底ずきの危険性については、底ずき確認のためマット底部に入れた高さ約15cmの荷重変換器、盛砂等に軽く接触する例が2~3回みられた程度で、これらの突起物との接触以外底ずきはなかった。しかし高さ1.1mのマット一杯の深さで緩衝している傾向がみられるので、落下姿勢あるいはマットの保持状況の如何によっては底ずき等危険も心配されるので、その取扱いについては十分な配慮が必要である。

#### 6 その他

実験2~5で得られた加速度のデータを、各種マット別に、落下高さとの関係として第10図にまとめてみた。又衝撃力の一応の目安とするため、人体ダミーを高さ10cm、20cm、30cmから直接堅板上へ落下させた場合の加速度Gを目安軸として記入した。

第10図 落下高さとの衝撃力





#### 4. あ と が き

今回の実験は救助用エアマットの開発資料を得るための貴重なデータとなった。本資料を基にさらに研究を重ね、マットの大きさ等の形状、構造、材質、内圧等を検討し、中層階位いからの使用に耐えられる、より信頼性の高いエア・マットを開発していきたいと考えている。

最後に本実験を実施するに際しての各種指導，ならびに報告書作成に対する資料の提供，さらには示唆をいただくなど，御指導，御協力を載いた、自衛隊航空医学実験隊第三部長，万木博士，同部の岩根博士，緒方昭二の各氏，並びに自治省消防研究所前避難安全研究室，鳥崎室長，同渡辺研究員の両氏に敬意と謝意を表す。