



空間に張ったクッション材料の衝撃緩衝効果

山本, 博昭

小松, 義弘

(Citation)

神戸大学農学部研究報告, 16(1):237-243

(Issue Date)

1984

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCOI)

<https://doi.org/10.24546/00225536>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00225536>



空間に張ったクッション材料の衝撃緩衝効果

山本博昭*・小松義弘**

(昭和58年8月10日受理)

SHOCK ABSORBING EVALUATION OF CUSHIONING MATERIALS STRETCHED IN THE SPACE

Hiroaki YAMAMOTO and Yoshihiro KOMATSU

Abstract

The wooden ball in which two accelerometers were buried was dropped on various cushioning materials stretched in the space and the shock absorbing characteristics and absorbed energy of their materials were discussed in this paper.

- 1) The peak acceleration occurred in collision and the energy absorbed by cushioning material are depended on the maximum deformation of its material and therefore the shock absorbing evaluation of cushioning material is decided by the maximum deformation of it.
- 2) In the results of the experiment on the effect of absorbed energy for the stretching strength of cushioning material, the employed materials could be grouped in two; one was affected considerably by its stretching strength and the other was scarcely affected by that. In use of the same materials stretched in the space, the energy absorbed during collision was increased in proportion to the reduction of the thickness of their materials.
- 3) To improve the shock absorbing performance of cushioning materials stretched in the space, urethane foam and canvas sheet should be used in loose stretching strength (in degree of not sagging) and vinyl sheet should be used in the tight stretching condition with sufficient tension.
- 4) Urethane foam has the high effect of shock absorption in comparison with other test materials but it has the weakpoints in its poor strength and durability.

緒言

果実又は蔬菜類の収穫、収納、運搬、選別、貯蔵等の農作業を機械化する場合、それらの生産物に静的又は動的な力が作用する機会が多くなるが、一般にこれらの生産物は個々の形状が大きく、不均一でしかも軟らかく、物理的、機械的操作に対して極めて傷つき易いのが特徴である。また国内生産の果菜類は、生食用の占める割合が極めて高く、収穫又はその後の処理行程の際、それらの商品価値及び品質維持に対し十分な配慮がなされるべきで、特に動的な外力を緩衝させる機構及び材料の研究が重視される。

筆者が行ってきた果実用振動収穫機の開発研究においても、落下してくる果実をキャッチする捕果材料の選定が一つのポイントとなるが、これに関連して果実又はクッション材の粘弾、塑性的特性や衝突時のエネルギー吸収^{1-3, 5, 8)}についての理論的、実験的研究がかなり報告されている。

本研究は、空間に張った種々の布状緩衝材に加速度計を埋設した木球を落下させ、布の張力(張り強さ)をパラメータとしたそれらの緩衝特性、エネルギー吸収特性を明らかにし、主としてキャッチングフレーム捕果面材料選定の基礎資料を得ようとしたものである。

実験装置及び方法

本実験では、衝突機構中最も簡単でしかも基本となる自然落下物体の衝突作用を採用した。落下物体には、第1図に示すように桜材を加工して造った半球(球φ 80 mm)と円柱(φ40×80 mm)からなる倒立こけし状の物体(以下木球と称する)を使用した。半球の中心部をくりぬいて2個の加速度計を両者とも鉛直方向に埋設し、接着剤で固定して衝突時の加速度(衝突方向の加速度)検出を行った。円柱部は、自然落下する木球がその落下線に対して揺動することなく鉛直に落下するための案内ガイドの役割を果し、落下時の摩擦を最小限にとどめるために、その中心部に内径6 mmの直線運動用ころが

* 農業動力学研究室

** タキロン(株)、元農業動力学研究室

り軸受（リニアボール）2個を埋めこみ，この木球の全重量は 280 gr となった。

実験に使用した落下試験装置の写真を第2図に示す。中央のスライドアームを上下することにより，落下高さは 0～2 m の範囲で調節でき，木球はこのアーム先端に取付けた交流マグネット（第1図参照）により設定高さで保持され，スイッチ操作で落下する。また落下線上に案内棒（φ 6 mm のみがき棒鋼）を設け，落下時はもとより衝突後のリバウンド時にも，木球が衝突面に対して垂直に運動するようにした。

クッション材料には，身近かで容易に入手できるウレタンフォーム，帆布，発泡ポリエチレン，ビニール等を用い，一辺 450 mm の正六角形に整形し，第2図の如く地表面から約 30 cm の高さで水平に張って実験に供した。水平張力を持たせるため6点で支持し，ストレングジを貼ったOリング3個を介して3方向の初期引張り張力及び木球衝突時の張力変動を検出した。

衝突時の加速度及びクッション材の張力変動波形はオシログラフにより記録し，同時に高速カメラ（72コマ/秒）によるフィルム撮影によって，衝突時の木球及びクッション材の運動を観察した。

衝突時の機構と理論計算式

1) 衝突機構

木球がクッション材に衝突しリバウンドして再び衝突するまでのデータ例を第3図に示す。図中， $T_1 \sim T_3$ はクッション材の張力変動波形， A_1, A_2 は木球の衝

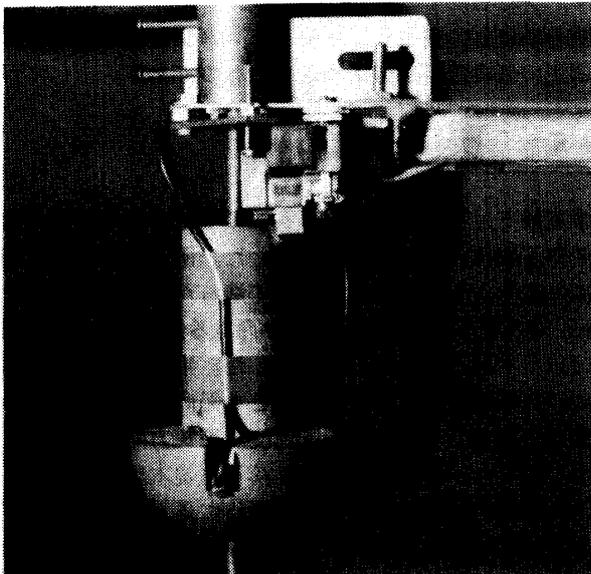


Fig. 1. Falling object (Wooden ball)

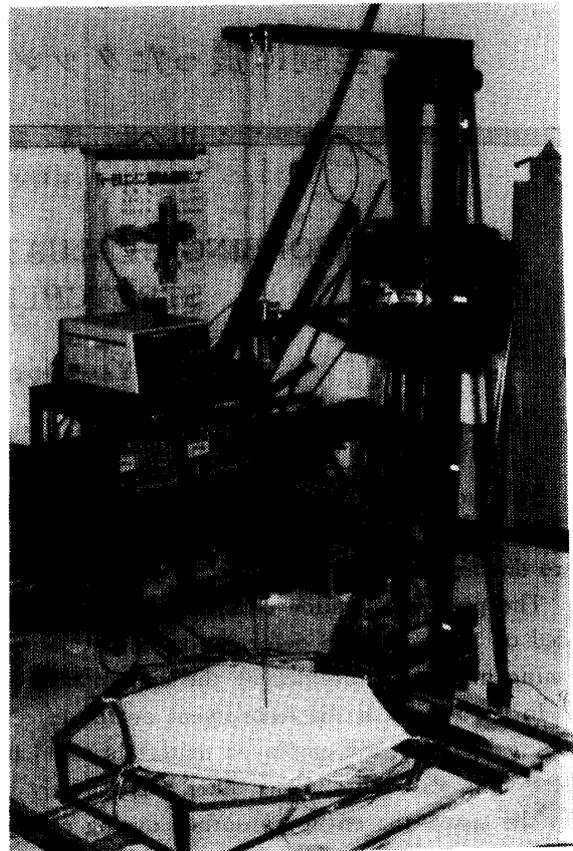


Fig. 2. General view of drop test apparatus

撃加速度波形を示し，横軸は時間である。木球は高さ H_1 から自然落下し①，クッション材と衝突②後，上向きの衝撃加速度が増大して最大値③となる。以後木球は跳返されて上昇し，加速度は減少し跳返り高さ H_2 に達し⑥，再び落下して緩衝材に衝突⑦する。緩衝材は，

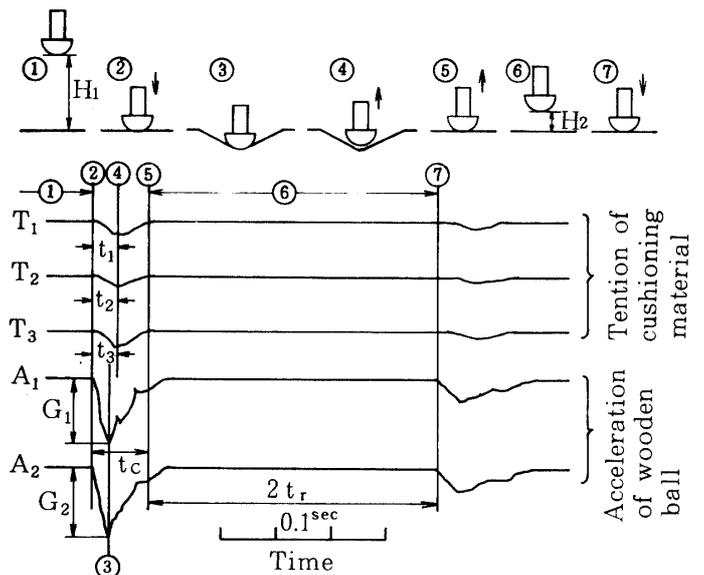


Fig. 3. An example of experimental data and impact mechanics

木球が衝突後その張力が最大④となった後に復元⑤する。③と④の点が一致しないのは、衝突中の木球とクッション材の運動に差が生じるため、木球はクッション材が最大変形を起こす直前に上昇し始め、両者が接触したままで運動しないことが8ミリフィルムからも観察できた。

衝突後クッション材の張力が最大となるまでの時間、即ちクッション材が最大変形を生じるまでの時間は、図中の $t_1 \sim t_2$ の平均値（実験中には張力の測定方向によってそれらに若干のばらつきが現われたため）をもって表わし、また最大加速度の値は、2個の加速度計によって検出された G_1, G_2 の平均値をとった。

跳返り高さは、スケールを入れて撮影した8ミリフィルムからも測定できるが、第3図の⑤から⑦の間、即ち⑥の跳返りに要する時間を $2t_r$ とおき次式からも算出できる。

$$H_2 = \frac{1}{2} g t_r^2 \quad (1)$$

また、反発率は落下高さ H_1 と跳返り高さ H_2 の比をとって、

$$e = \frac{H_2}{H_1} \times 100 (\%) \quad (2)$$

と定義した。ここで

H_1 ; 落下高さ H_2 ; 跳返り高さ
 g ; 重力加速度 t_r ; 跳返りに要した時間の $\frac{1}{2}$
 e ; 反発率

である。

2) クッション材の最大変形量

7,10)

2個の球形物体の衝突にはヘルツの接触理論の応用が考えられ、この理論は果菜類の接触及び衝突時の物性を考察した文献^{4,6,8)}にも多く採用されている。今回の実験では、接触面が一方では球形で他方は平面となるので、上記の理論を適用すると両者の最大変形量及び接触時間は次式で示される⁶⁾。

$$D = \left[\frac{15 V^2 A m_1 m_2}{16 (m_1 + m_2)} \right]^{\frac{2}{5}} \left[\frac{1}{R} \right]^{\frac{1}{5}} \quad (3)$$

$$t_c = 4.53 \left[\frac{A m_1 m_2}{\pi (m_1 + m_2)} \right]^{\frac{2}{5}} \left[\frac{1}{VR} \right]^{\frac{1}{5}} \quad (4)$$

上式において、

D ; 最大変形量 t_c ; 接触時間
 V ; 相対衝突初速度 m_1, m_2 ; 2物体の質量
 R ; 木球の半径
 A ; 2物体の弾性係数とポアソン比から決定される定数

この理論はすでに指摘されている通り⁷⁾、元来フックの

法則に依存する弾性体の接触理論であり、またこの実験で使用されたクッション材は、いわば薄膜に属し理論上で仮定される半無限平面体とは異ってくる。ここでは、クッション材の有する粘弾性的定数を、実測される接触時間 t_c の中で近似的に統合して考えるものとし、(4)式中の定数 A を t_c の関数で表わすと、

$$A = \frac{\pi (m_1 + m_2) (VR)^{\frac{1}{2}} t_c^{\frac{5}{2}}}{4.53^{\frac{5}{2}} m_1 m_2} \quad (5)$$

となる。(5)式を(3)式へ代入すると、

$$D = \frac{1}{4.53} \left[\frac{15\pi}{16} \right]^{\frac{2}{5}} V t_c \quad (6)$$

さらに本実験の場合、 V は木球が衝突する直前の速度であるから、落下高さ H_1 によって決定され、

$$V = \sqrt{2gH_1} \quad (7)$$

したがって、最大変形量 D は落下高さ H_1 と接触時間 t_c の関数で表わされ、次式となる。

$$D = \frac{1}{4.53} \left[\frac{15\pi}{16} \right]^{\frac{2}{5}} \left[2gH_1 \right]^{\frac{1}{2}} t_c \quad (8)$$

今回の実験では、第3図に示した如く木球とクッション材は③で一端離れるが、クッション材の復元速度が木球の上昇速度より速く、図中⑥の手前で再度接触 (A_1, A_2 の波形がほぼ水平となる区間) し、クッション材が水平に復元した⑤で再び離れる。したがって、みかけの接触時間として図中の t_c を採用し、(8)式へ代入して求めた最大変形量 D と8ミリフィルムより観察測定されたクッション材の最大変形量とはほぼ一致したため、以下の変形量はオシログラフより読取った t_c の値より(8)式を用いて算出した。ただし、本実験における木球の変形量は、クッション材の変形に比べて極めて微小であるため、無視することにした。

3) クッション材の吸収エネルギー

木球とクッション材が接触(衝突)した瞬間を原点とし、外力を P 、衝撃力を F 、変形を x とすれば、運動方程式は次式で表わされる⁹⁾。

$$m \ddot{x} = P - F \quad (9)$$

上式の両辺を変形量 0 から x までの区間で積分すれば、

$$\frac{1}{2} m (v_0^2 - v^2) + \int_0^x P dx = \int_0^x F dx \quad (10)$$

となり、左辺第1項は運動体の運動エネルギーの減少分、第2項は外力が運動体になした仕事、右辺はクッション

材の吸収エネルギーを表わす。また v_0, v はそれぞれ時刻 0 と t における速度である。

前述した如く、本実験ではクッション材が最大変形量に達する直前に木球は離れてしまうが、近似的に両者がその間同じ運動をするものと仮定すると、変形量が最大値 D となる時木球の速度が停止 ($v=0$) すると考えられるから、(10) 式は次式となる。

$$\frac{1}{2} m v_0^2 + \int_0^D P dx = \int_0^D F dx \quad (11)$$

さらに、外力 P は自然落下であるので、 $P=mg=$ 木球の重量、またエネルギー保存則から $\frac{1}{2} m v_0^2 = mgH_1$ 、したがって、クッション材の吸収エネルギー E は、次式で近似される。

$$E = \int_0^D F dx = mg H_1 + mg D = mg (H_1 + D) \quad (12)$$

実験結果及び考察

1) 最大衝撃加速度と吸収エネルギー

各クッション材及び地表面に木球が衝突した時に生じる最大加速度の値を比較して第4図に示した。図はクッション材の張り強さが支持点における張力 1 kg で一定となるように調節した場合の例である。横軸に示した落

下高さに比例して加速度値が増加するのは当然であるが、木球がクッション材上に落下する時の方が直接地表面に落下するよりも、その衝撃加速度が極めて小さくなるのが明らかである。衝突時の加速度が最も小さくなるのはウレタン類で、次に帆布、発泡ポリエチレン、ビニールの順となるが、ビニールは周囲の温度条件によりその物性が変化するので、環境条件を含めた詳細な検討が必要となる。

ウレタンフォームを硬いプレート上に敷いた場合の衝撃緩和は、その厚さが厚いほど良いとされているが、^{1,5)} 本実験の如く空間に張った場合には、厚みが薄いほど衝突時のバネ定数が軟かくなって緩衝効果が高くなる。

これらの緩衝効果は、衝突時に生じるクッション材の最大変形量に左右される。それらの最大変形量と最大衝撃加速度及び吸収エネルギーとの関係を第5図に示した。図中の各印は第4図と同じであるが、クッション材を張る張力を 1 kg から 5 kg まで 1 kg 間隔で増加させ実験を行ったため、同一材料でも衝突時のデータが異ってくる。最大変形量を横軸にとると、クッション材の種類に関係なく加速度値及び吸収エネルギーとの間に相関があり、前者は双曲線、後者は直線関係で近似された。即ち、衝突時に起こるクッション材の変形が大きくなるほど衝撃加速度は減少し、クッション材が吸収するエネルギーは大きくなる。換言すれば、衝撃加速度値が小さ

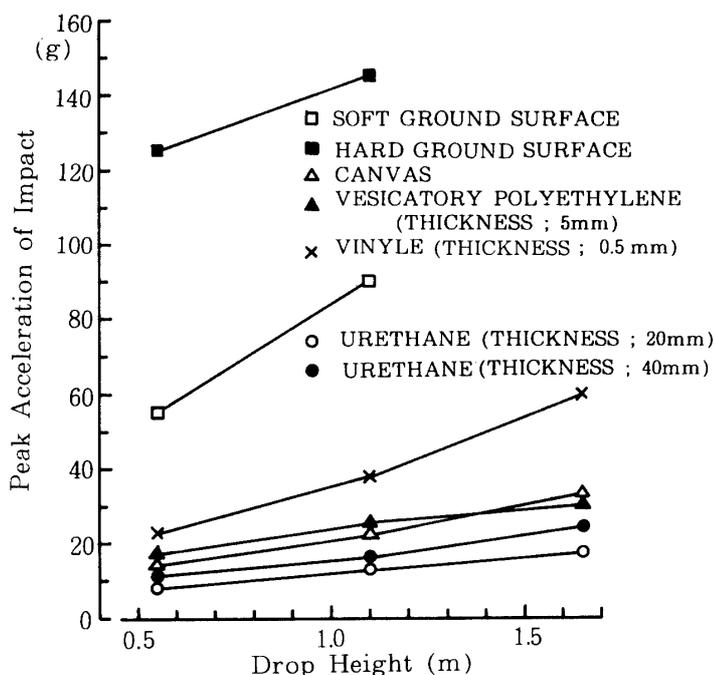


Fig. 4. Impact acceleration for ground surfaces and cushioning materials ; initial stretch is constant 1 kg.

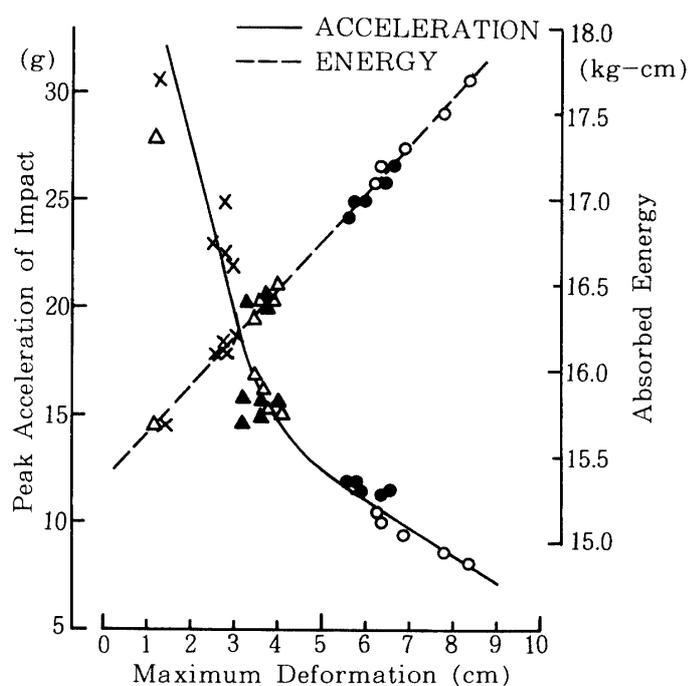


Fig. 5. Impact acceleration and absorbed energy for maximum deformation of cushioning materials ; drop height is constant 0.55m

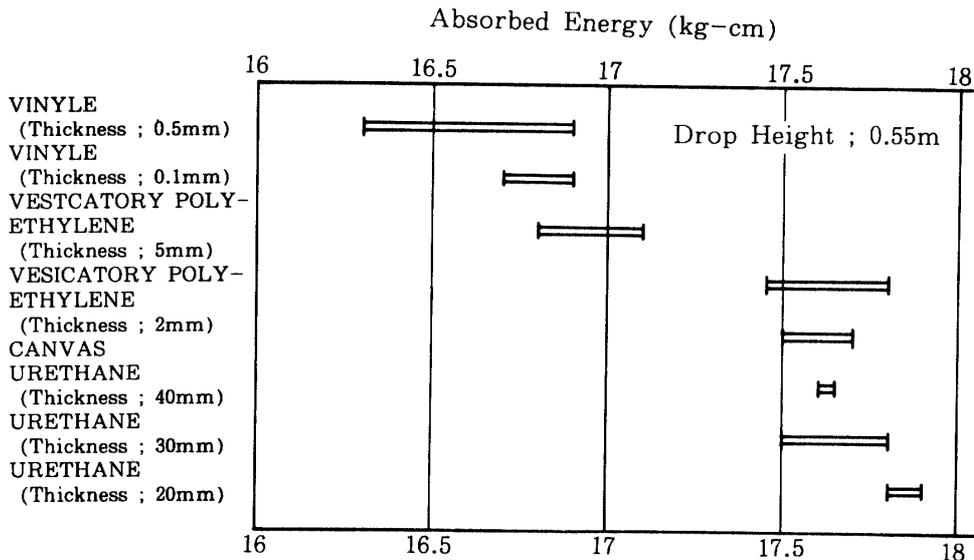


Fig. 6. Comparison of absorbed energy of cushioning materials

力の強さに大きく影響される材料と、さほど影響を受けないものがあり、また同一材料であれば、一般にその厚みが厚いほど張力による影響は少ない。前述した如く、エネルギー吸収の観点からもウレタン類が最も優れ、その厚みが比較的薄いほど効果は高いが、材料の持つ強度、使用に対する耐久性等の点に問題がある。他の材料はほぼ同じようなエネルギー吸収値となるが、厚手のビニールは若干劣る傾向にある。

くなることは、吸収されるエネルギーが大きくなることを意味する。

さらに落下高さを 0.55 m で一定とし、実験に使用したすべてのクッション材料の吸収エネルギーの値を比較して第6図に示した。各クッション材の張り強さを 1 kg から 5 kg まで変えた時に生じる吸収エネルギーの範囲をもって表わしたが、吸収されるエネルギーは、その張

2) 各クッション材の緩衝特性

実験に使用した材料について、その張り強さに対する反発率、最大変形量、吸収エネルギー及び最大衝撃加速度の変化をまとめて第7～9図に示した。正六角形状のクッション材を6点で支持することによって生じた3方

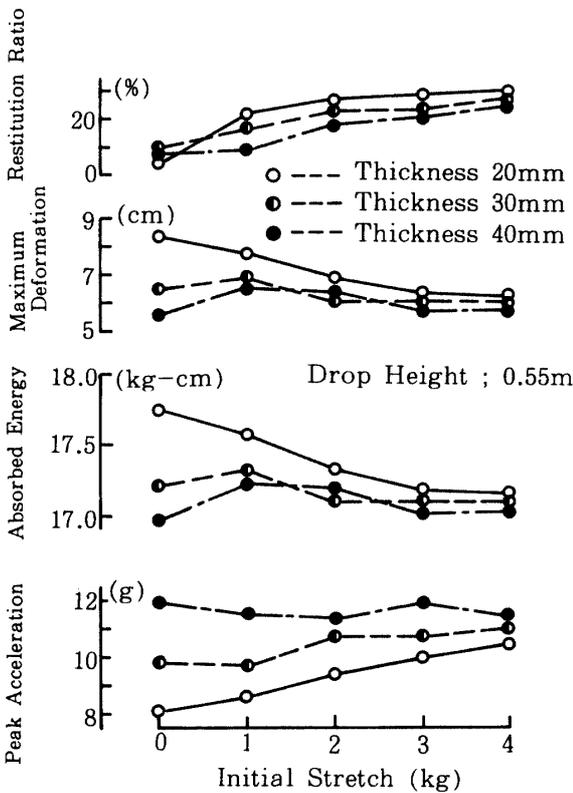


Fig. 7. Shock absorbing characteristics of urethanes for their initial stretches

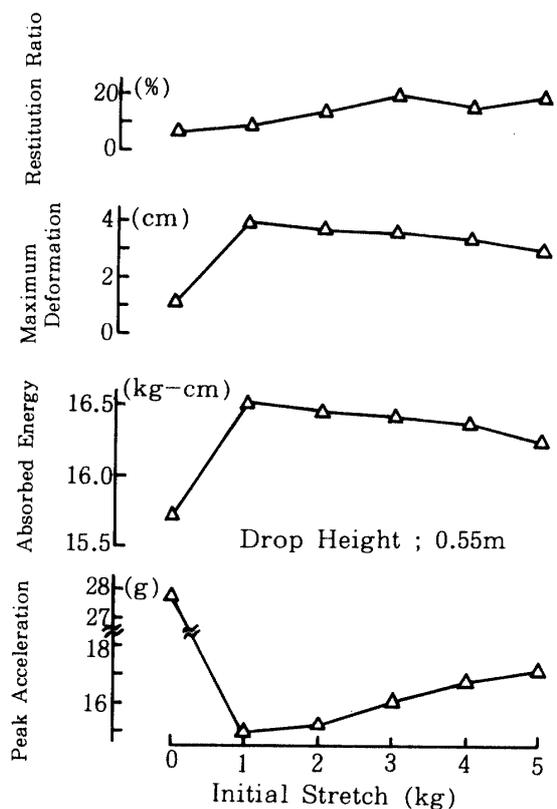


Fig. 8. Shock absorbing characteristics of canvas for its initial stretch

向の張力（3方向とも同一の張力となるように調節）を横軸にとり、厚さの異なる3種のウレタンの実験結果を第7図に、帆布に対する結果を第8図、厚手（0.5 mm）のビニールを対象とした結果を第9図に示す。

ウレタンの場合、張力を増すほど、即ち強く張るほど衝突時の最大変形量が減少するため、最大加速度値が増加して吸収されるエネルギーは減少し、また反発率も大きくなって跳返りが激しくなる。したがって第7図から判断すると、厚さ 30, 40 mm のウレタンは、張力 1 kg 程度でゆるやかに張って使用するのが理想的で、20 mm 厚さのウレタンでは、さらに張りぐあいをゆるくする方が有利である。

帆布の場合、ウレタンと同じような傾向が認められ、衝撃緩和の観点から判断するとあまり強く張るべきではないが、たるんだ状態（張力 0 kg）では極端に緩衝効果が悪化するため、ウレタン同様ゆるやかに張って、例えば張力 1 ~ 2 kg 程度で使用すべきであると思われる。

第9図に示すビニールの場合、前二者とは傾向が逆で、シートを強く張るほど最大変形量が増加する傾向にあり、したがって衝撃加速度は低下して吸収されるエネルギーが大きくなる。即ち厚手のビニールの場合、かなりの張力を持たせ、強く張って使用の方が衝撃緩和の効果があると判断され、ウレタン、帆布とは異った特性を有する。落下してくる果菜類を受ける場合、反発率は低い方が有利であると考えられるが、ビニールは張力の変化に関係なくこの値がほぼ一定で、しかも比較的低い値となる。反発率の値が最も高いのはウレタンで、次に帆布、ビニールの順となる。なお、発泡ポリエチレンは、シートの張り強さに対する各要因の変化がほとんど認められなかった。

摘要

空間に張った種々のクッション材料に加速度計を埋設した木球を落下させ、シートの張り強さをパラメータとしてそれらの緩衝特性、エネルギー吸収特性を明らかにした。

- 1) 衝突時に励起される最大衝撃加速度及びクッション材が吸収するエネルギーは、その時生じるクッション材の最大変形量の関数で表わされる。したがってクッション材の緩衝効果は、この変形量によって判断することができる。
- 2) 衝突時にクッション材が吸収するエネルギーは、その張り強さに大きく影響される材料と、そうでない材料がある。同一材料を空間に張って使用した場合、吸

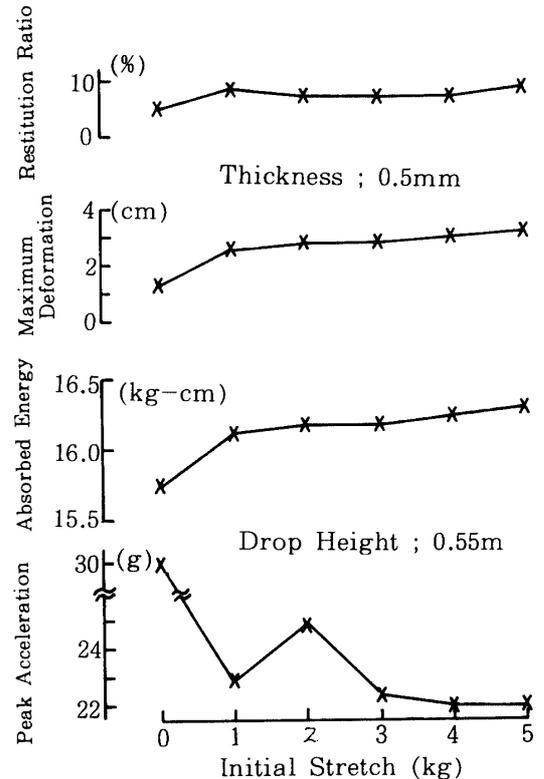


Fig. 9. Shock absorbing characteristics of vinyl for its initial stretch

収されるエネルギー量は、一般にその厚みが厚いほど小さく、またその値は張り強さにはさほど影響されなくなる。

- 3) 緩衝効果を高めるためには、ウレタン及び帆布はたるまない程度にゆるやかに張って使用し、ビニールは逆にかなり強く張り、十分な張力を持たせて使用の方が有利である。
- 4) ウレタンフォームは、他の試験材料に比べると緩衝効果は高いが、材料強度や耐久性の面で問題がある。

引用文献

- 1) BITTNER, D. R., H. B. MANBECK and N. N. MOHSENN : *Trans. ASAE*, 10 (6), 711 - 714, 1967.
- 2) DIENER R. G., K. C. ELLIOTT, P. E. NESSELROAD, M. INGLE, R. E. ADAMS and S. H. BLIZZARD : *Trans. ASAE*, 22 (2), 287 - 290, 1979.
- 3) GENGE, R. A., W. K. BILANSKI and D. R. MENZIES : *Trans. ASAE*, 21 (2), 249 - 252,

- 1978.
- 4) HAMANN, D.D.: *Trans. ASAE*, 13 (6), 893 - 899, 1970.
 - 5) HEMMAT, A., P. CHEN and W.J. CHANCELLOR: *Trans. ASAE*, 23(3), 558 - 561, 1980.
 - 6) HORSFIELD, B.C., R.B. FRIDLEY and L. L. CLAYPOOL: *Trans. ASAE*, 15 (4), 746 - 750, 1972.
 - 7) MOHSENIN, N.N.: *Physical Properties of Plant and Animal Materials*, 278 - 286, Gordon and Breach Science Publisher, Inc., New York, 1978.
 - 8) MOHSENIN, N.N., V.K. JINDAL and A. N. MANOR: *Trans. ASAE*, 21 (3), 594 - 600, 1978.
 - 9) 日本鉄道車両工業会: 防振ゴム, 65-69, 現代工学社, 東京, 1975.
 - 10) TIMOSHENKO, S.P. and J.N. GOODIER: *Theory of Elasticity*, 372 - 384, McGraw-Hill, Inc., New York, 1970.