

高強度ポリエチレン織布の衝撃貫通特性Ⅰ：吸収エネルギーの衝撃速度依存性

高橋，清
九州大学応用力学研究所：教授

小松，治男
九州大学応用力学研究所

安田，浩
(株)東洋紡，総合研究所

<https://doi.org/10.15017/4743898>

出版情報：応用力学研究所所報. 68, pp.261-272, 1989-10. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



高強度ポリエチレン織布の衝撃貫通特性 I.

—吸収エネルギーの衝撃速度依存性—

高橋 清* 小松 治男†
安田 浩‡

概 要

高強度ポリエチレンヤーンから織られた布の衝撃貫通特性を調べた。直径約 10 mm の鋼球の 50 m/s~200 m/s の入射速度に対する織布の耐衝撃特性は 2 つのタイプに分れ、それは織り構造に依存することがわかった。また上記入射速度に対しては貫通時の吸収エネルギーは入射速度に依存することが示されている。

Key words : Polyethylene fabrics, Ballistic impact, Perforation

1. 緒 言

高強度の合成繊維でつくられた織布は産業やレジャーなどで多様な用途を開発しつつある。これを耐衝撃材料と考えたときには鉱山の発破現場や廃ビルの爆発倒壊処理現場、あるいは事故による飛散物の危害が予想されるその他の産業現場などでは作業員の安全のために高強度織布のカーテンなどが利用に供せられる。また、宇宙飛行士の宇宙空間での活動中にミスによって紛失する工具類の相対飛行速度は多くの場合、秒速で 500 m 以下といわれ、この研究で扱う速度域に入っている。飛行士の飛行服の浮遊工具類に対する耐衝撃特性を知ることは安全上重要なことであろう。その他各種の“防弾”用途に供せられる場合にもその性能を向上させるうえで衝撃特性を基礎的な立場から知っておく必要がある。

織布に樹脂を含浸させれば複合材料となる。そのような複合材料の耐衝撃特性を知るうえでも、未含浸の織布の状態の特性は参考になるであろう。

従来は上述のようなバリスティックな衝撃に対する防護用織布にはケブラー29, 49 などのアラミド系繊維が用いられてきた。一方、その後開発された高強度ポリエチレンはより低い密度とより高い繊維強度を有するものがあり、この種の用途には有利な場合があると考えられる。

この種の研究に関してこれまでの発表例は意外に少いようである。Montgomery はノースカロライナ大学において学位文論で飛行体の形状が織布の衝撃吸収エネルギーにどのように影響するかを扱ってい

* 九州大学教授, 応用力学研究所

† 文部技官, 九州大学応用力学研究所

‡ (株) 東洋紡, 総合研究所

る¹⁾²⁾。その他に実験的な研究の例としては Wilde ら³⁾⁴⁾ の高速度撮影にもとづく研究がある。最近の例では Morrison ら⁵⁾ はアラミドラミネートの貫通に及ぼす諸条件を実験的に調べている。また Leech ら⁶⁾ は織布およびネットによる飛行体の阻止挙動を理論的に解析してそのモデルを提案している。一方国内では景山ら⁷⁾ が秒速数百 m の入射速度域でアラミド織布の耐弾性およびセラミックス板でこれを補強したときの効果について広範な実験を行っている。以上の研究では多くの場合飛行体の速度としては秒速数百 m 程度を用いている。一方この研究においては秒速 200 m 以下の比較的低い速度で鋼球が織布に衝突する場合を扱い、ポリエチレン織布（以下クロスと呼ぶ）貫通吸収エネルギーの速度依存性を中心にして研究を行った。

2. 実 験 法

2-1 ガ ス 銃

実験には多目的衝撃試験用ガス銃を製作し、これを使用した。図 1 に装置の写真を示す。

ガス銃は高圧室、ランチャーバレル、低圧（試料）室より構成され、全長 4,000 mm である。高圧室へはエアークンプレッサーあるいは高圧ガスポンペを用いて最高 150 気圧の高圧ガスが 5 l 充填できる。ランチャーバレルは内径 25 mm、長さ 2,000 mm である。低圧室は直径 600 mmφ、長さ 1,100 mm で、ロータリーポンプで 10^{-2} TORR 程度に減圧される。これは 2 組の観察窓を有する。

ガス銃の発射方式を図 2 に示す。高圧室①とランチャーバレル⑤のあいだのラプチャーディスク③は高圧室とランチャーバレルを遮断し、高圧室へのガスの充填を可能にする。所定の圧力まで充填した後ニードル②を作動させラプチャーディスクを破壊する。高圧室に充填された高圧ガスは飛しょう体(サポー)④をランチャーバレル⑤内で加速する。なおラプチャーディスクは直径 40 mmφ で、高圧室の圧力に応じてその厚さ、材質を選定する必要がある。また今回の実験に使用した飛しょう体はポリエチレン製でその形状を図 3 に示した。

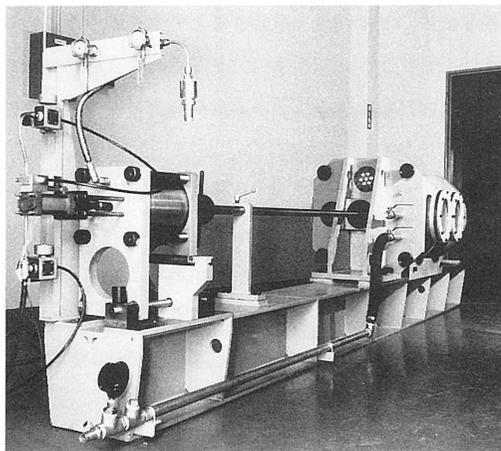


図 1 多目的衝撃試験用ガス銃

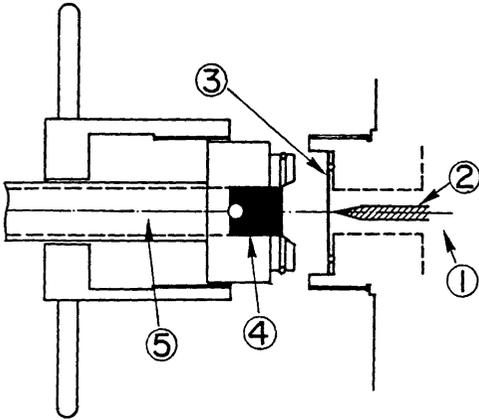


図2 ガス銃の発射方式

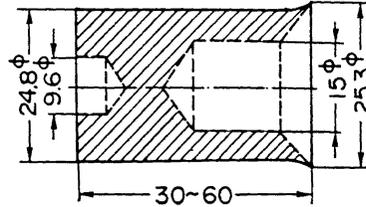


図3 飛しょう体（サボ）の形状

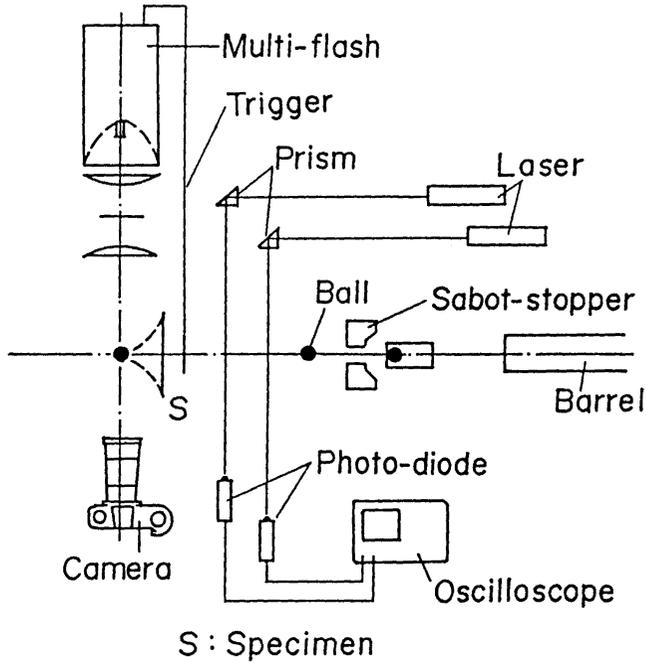


図4 鋼球の速度計測・撮影システム

2-2 鋼球の速度計測と高速写真撮影

装置の概要を図4に示す。

前部に鋼球を取り付けたサボは、バレルの出口に設置したサボーストッパーで停止させられる。その結果サボと鋼球が分かれ、鋼球(直径9.5mm, 質量3.55g, クロム鋼)のみが飛しょうし試料に衝

突する。

クロス (S) に衝突する前の鋼球の速度 V_i は図のように一定の距離でセットされた 1 対のレーザー光路を球がよぎるときの時間差を計測することにより測定した。また鋼球がクロスに衝突した後のクロスの変形ならびにクロスを貫通した後の鋼球の速度 V_o は光輝時間が半値幅で $0.5 \sim 1.5 \mu\text{s}$ のマルチフラッシュ装置からあらかじめセットされた時間間隔で発せられる数個の光パルスを用いて、透過光による多重撮影法により求めた。これは貫通がどのようにして行われるかを瞬間写真により観察するためである。ちなみに田中ら⁹⁾は金属薄板の貫通実験におけるたわみプロファイルの計測のために多重露光撮影を Xe ランプを用いて行っている。

2-3 貫通吸収エネルギー

いま V_i の速度で鋼球がクロスに衝突し、貫通後それが V_o に減速したとする。この時のクロスに吸収エネルギーは、貫通前後における鋼球の運動エネルギー(それぞれを E_i , E_o とする)の差であらわされる。すなわち

$$E_i - E_o = \frac{1}{2} m (V_i^2 - V_o^2) \quad (1)$$

である。 m は鋼球の質量を示す。

2-4 クロス試料の固定

クロス試料はメス型、オス型を 1 組とした治具を用い、周辺部を 8 カ所のボルトで固定した。クロス試料は鋼球の飛行方向に対しすべて垂直とし、試料中心に鋼球が衝突するよう固定した。図 5 に固定治具 (1) と実験後治具から取り外した試料の様子 (2) を示した。また同図には未貫通クロス A の衝撃前後における伸びの 2 次元的分布を半定量的に示した写真 ((3), (4)), ならびに未貫通および貫通したクロス A の実験直後の側方からの写真 ((5), (6)) も示した。試料取付時の張力を一定にするため試料厚さと固定治具のクリアランスを一定に保った数種のを固定治具として製作したが、そのいずれもクロスの変形域 (ゲージ部) は点線で示した直径 $75 \text{ mm} \phi$ の部分であった。

3. 貫通試験

3-1 供試クロス

実験に用いた高強度ポリエチレンクロスの詳細を表 1 に示す。供試クロスは経糸、緯糸は試料 B, B', C を除いてヤーンの太さ、織り密度、撚り数とも同じであった。表中の精錬、未精錬の違いは前者が製糸工程中に使用するオイルを除去したもの、すなわちオイル抜きしたものであり、後者はその処理を行っていないものである。また目付は 1 m^2 あたりのクロスに重量を kg 重で表したものである。

代表的なクロス表面写真および織り組織の模式図を図 6 に示す。クロス原糸の力学的性質は次の通りである：密度 0.98 g/cm^3 , 引張強度 2.92 GPa (298 kg/mm^2) 引張弾性率 137 GPa ($1.4 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$)。

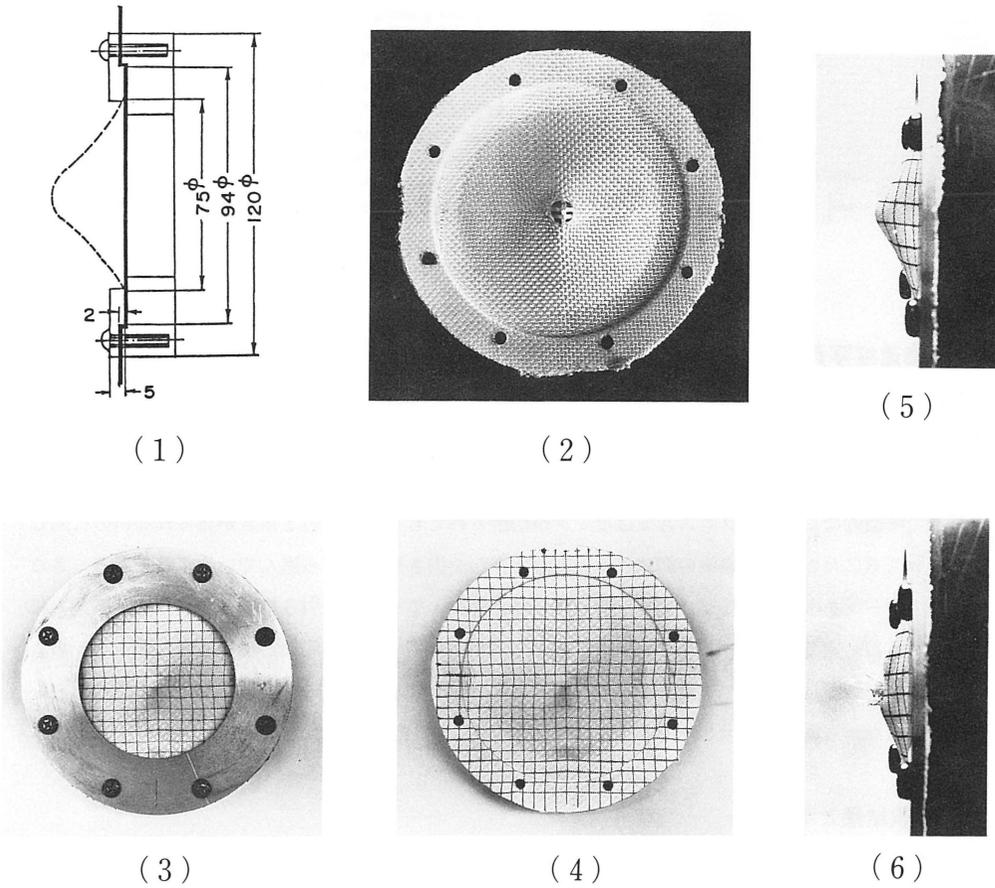


図5 試料固定治具(1), インパクト後の試料(2), 59.9 m/sの V_i に対する未貫通試料の変形(3, 4, 5), 76.8 m/sの V_i に対する貫通試料

表1 供試クロスの特徴

試料	ヤーン		打込密度 本/in	撚数 回/m	織組織	目付	後処理	織厚 mm
	デニール	フィラメント				kg/m ²		
A	300	300	50	160	平織	0.146	未精練	0.27
A'	300	300	50	160	平織	0.146	精練	0.27
B	1160	960	35	80(経)0(緯)	2×2バスケ	0.411	未精練	0.71
B'	1160	960	35	80(経)0(緯)	2×2バスケ	0.411	精練	0.75
C	800	795	36	70(経)90(緯)	平織	0.280	未精練	0.50
D	300	280	50	80	平織	0.144	未精練	0.29
E	600		34	45	平織	0.215	未精練	0.39

*注 織厚はマイクロメータでの計測値

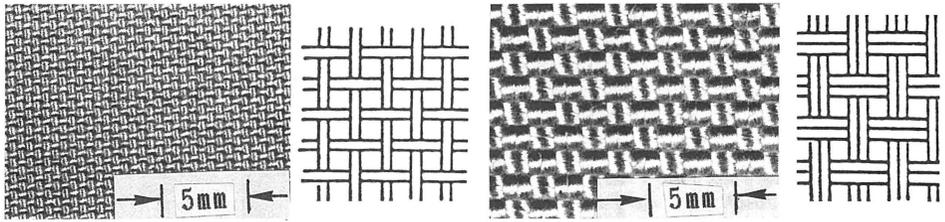


図6 代表的な試料クロスの表面写真とその模式図

3-2 高速度写真撮影

今回の実験で撮影された代表的な例をクロス A, B につきそれぞれ図 7 の (a), (b) に示した. 図の説明中の PI は光パルスの点灯間隔を示す. クロス A, B とも (1) は鋼球がクロスを通るかしないかの限界に近い速度での撮影である. 貫通はしていない. (2)~(4) は貫通した場合の例である. これらの写真で特徴的なことは, クロス A ではヤーンが切断されてもヤーンの引き抜きが見られないのに対して, クロス B においては貫通後の鋼球がヤーンの何本かを引き抜きながら進んでいることである. さらに数本のヤーンを引き抜きながら鋼球が貫通する場合においても, その引き抜きパターンは図 7 (b) に示したように一定ではなく, それぞれ異なる様相を示す. 今回の実験に用いた試料のうち図 7 (a) のようにヤーンを切断して鋼球が貫通したのはクロス A, A', D であった. 一方, 図 7 (b) のようにヤーンを引き抜きながら鋼球が貫通したのはクロス B, B', C, E であった.

4. 実験結果と考察

4-1 貫通限界速度と貫通限界吸収エネルギー

試料に鋼球が衝突する場合, 鋼球の衝突速度がある限界値より低いときは鋼球はクロスを通せず, 変形を与えるのみである. しかし限界値以上の衝突速度に達すると貫通する. この値を貫通限界速度 (V_{ic}), この時のクロスの吸収エネルギーを貫通限界吸収エネルギー (E_c) とよぶ. 各クロスの V_{ic} を図 8 に, E_c を図 9 に示した. 図 8, 図 9 の結果はそれぞれのクロスがどの程度の鋼球の速度(エネルギー)まで貫通を阻止できるかを知るうえで重要である. しかしながら, この値のみではヤーンの太さ, 撚り条件, 織り組織, さらに原糸そのものなどの条件の異なるクロス相互の吸収エネルギーの比較を行ううえでは不十分である. ここでは比吸収エネルギー (E_R) を次のように定義する.

$$E_R = \frac{E_c}{W_R} \quad (2)$$

W_R は 1m^2 あたりのクロスの重量 (目付) を示す. 図 9 および後に述べる各クロスの吸収エネルギーの V_i 依存性の測定結果から求めた E_R の値を図 10 に示した. E_R はヤーンの太さや撚り, 打込密度, 織り組織等のパラメータがクロスの吸収エネルギーに与える影響を個々に反映してはいないが, これらを総合的にとらえてクロスの吸収エネルギーをおおまかに評価するうえで一つの簡便な方法と考えられる.

各クロスの比吸収エネルギーについてはつぎのようなことがいえる.

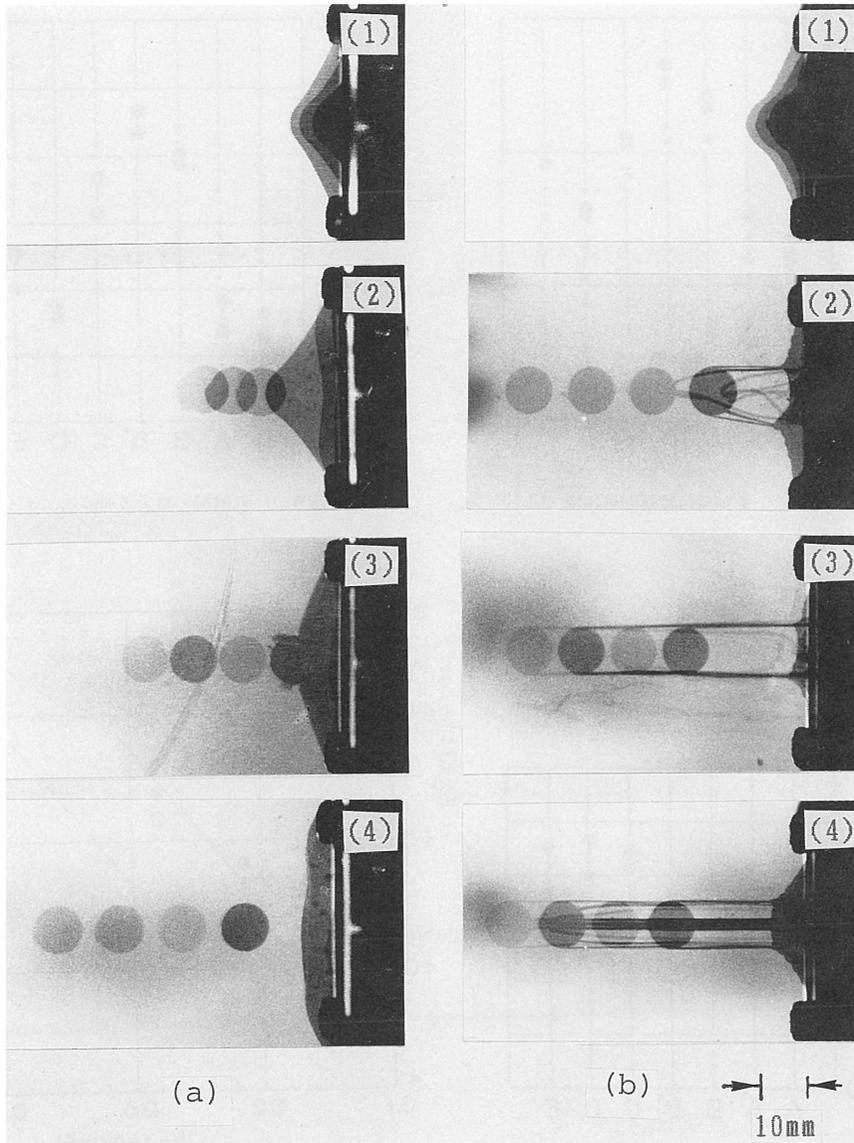


図7 (a) クロスAの変形, 貫通形態 ((1) $V_i = 59.9 \text{ m/s}$, $PI = 150 \mu\text{s}$, (2) $V_i = 90.7 \text{ m/s}$, $V_o = 37.7 \text{ m/s}$, $PI = 150 \mu\text{s}$, (3) $V_i = 136.5 \text{ m/s}$, $V_o = 100.3 \text{ m/s}$, $PI = 100 \mu\text{s}$, (4) $V_i = 147.5 \text{ m/s}$, $V_o = 122.7 \text{ m/s}$, $PI = 100 \mu\text{s}$). (b) クロスBの変形, 貫通形態 ((1) $V_i = 105.1 \text{ m/s}$, $PI = 150 \mu\text{s}$, (2) $V_i = 134.3 \text{ m/s}$, $V_o = 82.7 \text{ m/s}$, $PI = 150 \mu\text{s}$, (3) $V_i = 160.0 \text{ m/s}$, $V_o = 107.6 \text{ m/s}$, $PI = 100 \mu\text{s}$, (4) $V_i = 172.8 \text{ m/s}$, $V_o = 112.3 \text{ m/s}$, $PI = 100 \mu\text{s}$)

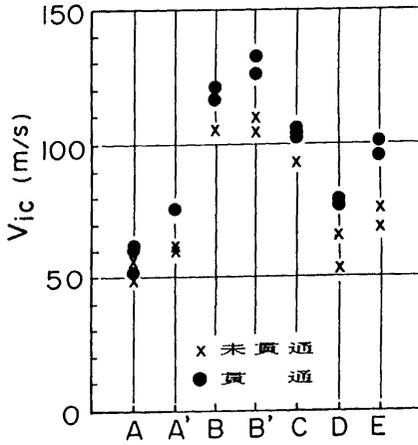


図8 各試料の貫通限界速度

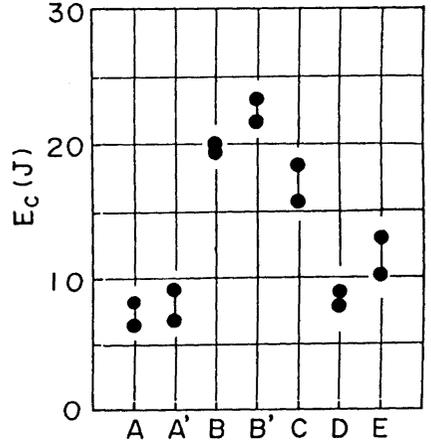


図9 各試料の貫通限界吸収エネルギー

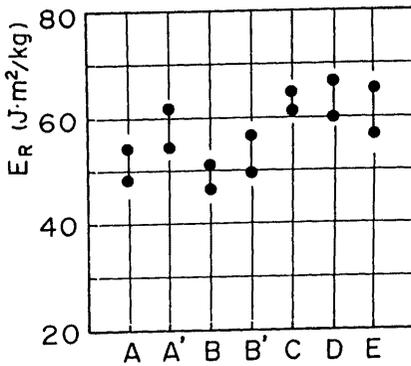


図10 各試料の比吸収エネルギー

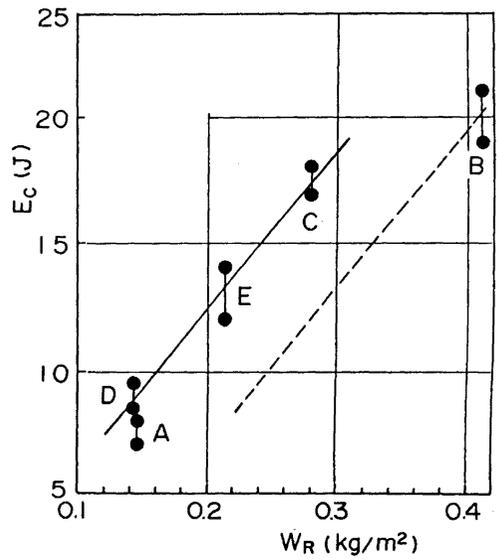


図11 各試料の W_R-E_c の関係

(1) 精錬効果

ヤーンの太さ、撚り数、織り組織、目付がすべて同じクロスであっても精錬したクロスの吸収エネルギーが未精錬クロスの吸収エネルギーより大きくなる。これは製糸工程中に使用したオイルを除去したためヤーン相互の摩擦力が未精錬クロスのそれより大きくなったためであると考えられる。

(2) 単位面積あたりのクロスの重量と吸収エネルギーとの関係

平織り、未精錬ポリエチレン繊維クロスについてみるとその比吸収エネルギーは、クロスAが他のクロスC, D, Eと比較していくぶん低い値を示す(図10)。その差は平均値で約10 J/kg/m²程度である。またこれらクロスの貫通限界吸収エネルギーを単位面積あたりのクロスの重量 W_R で整理するとほぼ直線関係で近似できる(図11)。しかし W_R がほぼ等しいAとDを比較した場合Aの E_c がいくぶん低い。撚り数を除く他の条件がほぼ同じであることを考慮した場合、この結果は一応撚り数の効果と解釈されよう。すなわち160回/mよりも80回/mの方が高目の E_c を与えることが予想される。

一方、バスケット織り未精錬ポリエチレンクロスBの値は前述の平織り未精錬クロスが与える直線の外挿値よりも約20%少ない。この場合バスケット織りクロス群も別の直線上に E_c の値が乗り、しかもその直線は平織りクロスの直線より下方に(例えば約20%程)位置することが考えられる。この点については次の(3)で考察する。

(3) 織り組織の違いと吸収エネルギーとの関係

前述のようにバスケット織りクロス(クロスB)と平織りクロスの比吸収エネルギーを比較した場合平織りクロスのそれが大である。これは織り組織(図6)を考えると理解できる。いま同じ大きさのヤーンを同じ打込み密度で織ったクロスと比較すると、平織りクロスの場合、経糸、緯糸が上下に交錯する点はバスケット織りの4倍となり、それだけヤーン相互の摩擦力が大きくなり、 E_c を増加させるものと思われる。

4-2 吸収エネルギーの V_i 依存性

貫通限界速度をこえ V_i が200 m/s以下の比較的低速域で鋼球がクロスに衝突する場合、クロスの吸収エネルギーの V_i 依存性がどのように変化するかは興味ある問題である。

図5に示した試料固定法を用いた場合におけるクロスの吸収エネルギーの V_i 依存性の計測結果を図12(b~h)に示した。ちなみに各図で用いられているマークの分類を図12(a)に示した。同図(b), (c), (g)は鋼球がヤーンを切断して貫通する例で、一方(d), (e), (f), (h)は鋼球がヤーンを引き抜きながら貫通する例である。これらの実験結果から得られる吸収エネルギーの V_i 依存性については次のようなことがいえる。

(1) ヤーン引き抜きパターンの違いと吸収エネルギーの関係

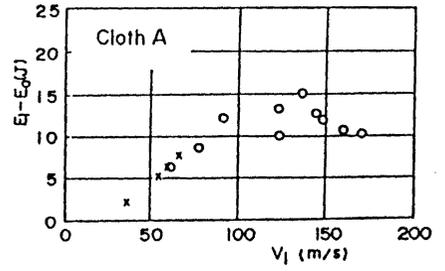
ヤーンを引き抜きつつ鋼球が貫通する場合は、図7(b)に示した貫通パターンすなわち、何本のヤーンを引き抜くかによってクロスの吸収エネルギーは異なる。一般に引き抜くヤーンの数が多いほど吸収エネルギーが大きくなる。

(2) 吸収エネルギーの V_i 依存性

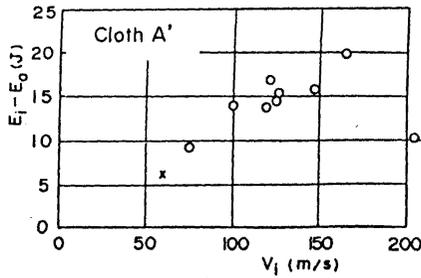
ポリエチレンクロスの吸収エネルギーの V_i 依存性は、貫通限界速度からある範囲の V_i に対して増加傾向を示し、その後減少する。ただし、クロスB(図12(d)), E(図12(h))はヤーン引き抜き方に依存して吸収エネルギーが変わるために大きなバラツキをもち、全体として増加傾向の段階にある。これら図12(d), 図12(h)においては鋼球の速度が200 m/sを超えてクロスに衝突する場合の吸収エネル

	記号	貫通の形態
未貫通	x	
貫通	○	
	●	
	●	
	◎	

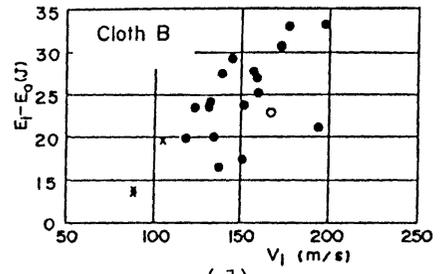
(a)



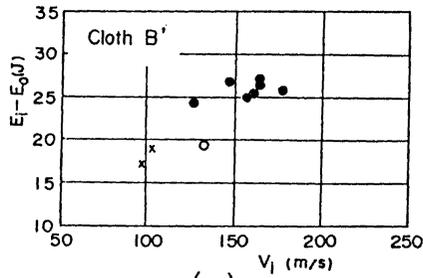
(b)



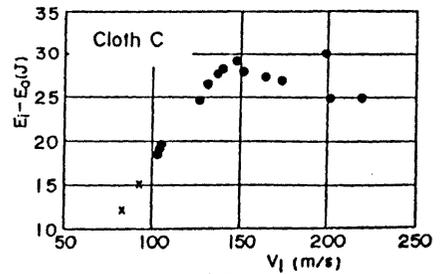
(c)



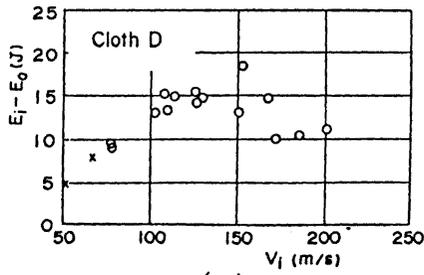
(d)



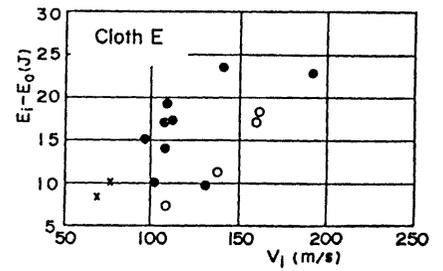
(e)



(f)



(g)



(h)

図12 吸収エネルギーの V_i 依存性

ギーの変化がどのようになるかは明らかでない。この点については他のクロスの吸収エネルギーの V_i 依存性から判断してクロス B, E も $V_i > 200$ m/s で吸収エネルギーはいったん減少に向かった後に一定値に近づくものと予想される。この V_i 依存性は飛行体の形状、大きさならびにその速度領域などに依存することが考えられる²⁾。

クロスに鋼球が衝突する場合におけるクロスの吸収エネルギーは、一般にクロスの支持方法やクロス原糸の力学的性質の違いなどによるほかクロスを構成するヤーンの引き抜き抵抗、鋼球が衝突した点を中心にヤーンが外側に移動する現象すなわち織り密度の変化および熱的影響を含めたヤーン、フィラメントのマイクロ損傷の形態などによって様々に影響されるものと考えられる。これらの問題についても今後さらに検討を進めたいと考えている。

5. 結 論

高強度ポリエチレン繊維クロスに 200 m/s までの速度で直径が 9.5 mm の鋼球による衝撃を加えて貫通試験を行い次のような結論を得た。

- (1) ポリエチレン繊維クロスの貫通に要するエネルギーの V_i 依存性については金属板のそれと異なり貫通限界速度を超えたある値の V_i に対して増加し、その後減少する傾向を示す。
- (2) クロスを鋼球が貫通する場合その貫通パターンは、一部のヤーンを引き抜きながら貫通する場合とヤーンを切断し貫通する場合とがある。ヤーンを引き抜きつつ鋼球が貫通するケースについては引き抜くヤーンの数によってクロスの吸収エネルギーに差がある。
- (3) 精練、未精練クロスの吸収エネルギーを比較すると精練クロスのそれが大であり精練効果が認められた。
- (4) 撚数の影響については 160 回/m よりも 80 回/m の方が吸収エネルギーが高い傾向を示している。

謝 辞

本装置の製作にあたっては京都大学航空工学科の黒川知明助教授、(株)トーヨー製作所の尾崎 仁氏 (現在 (株) ジーエムエンジニアリング) に大変有益な助言をいただいた。マルチフラッシュ装置は本研究所の計測流体力学部門のご好意により借用させていただいた。また、本研究所の肥山 央、浜野百合松の各氏には技術面での助言をいただいた。本研究部門の馬田俊雄、江藤真智子の各氏にも実験ならびに論文の取りまとめに協力いただいた。記して謝意を表する。

文 献

- 1) T. G. Montgomery, Dr. Thesis, 1980, North Carolina State University.
- 2) T. G. Montgomery, P. L. Grady and C. Tomasino, Textile Research Journal, 52 (1982) 442.
- 3) A. F. Wilde, Textile Res. J. 44 (1974) 772.
- 4) A. F. Wilde, J. J. Ricca, J. M. Rogers and L. M. Cole, Polym. Eng. Sci. 12 (1972) 41.

- 5) C. E. Morrison and W. H. Bowyer, Proc. ICCM 2 (1980) 233.
- 6) C. Leech, J. W. S. Hearle and J. Mansell, J. Text. Inst., 70 (1979) 469.
- 7) 景山昭二, 田代 泰, 白井俊央, 宍戸義世, 寺井正芳, 田中秀穂, 木村寿孝, 防大理工学研究報告 24 (1986) 97.
- 8) 田中吉之助, 黒川知明, 米田 洋, 安達圭一, 日本航空宇宙学会誌 33 (1985) 476.
(平成元年6月5日 受理)