



使用された。これらの実験では比較的長い試料が用いられ、またガラス繊維等の弾性率の大きな糸では破断応力のみが求められている。すなわちスーパー繊維のような破断伸びが小さい糸に対してより大きなひずみ速度で引張試験を行うためには他の手法を開発する必要がある。筆者らは高弾性率繊維の動的な応力—ひずみ曲線を求めるため、衝撃引張試験機を開発し、パラ型アラミド繊維の応力—ひずみ曲線に及ぼすひずみ速度の影響を明らかにしてきた<sup>4)~6)</sup>。本研究ではPAN系炭素繊維に対して、ひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ のオーダーでの応力—ひずみ曲線を求め、炭素繊維の機械的性質に及ぼすひずみ速度の影響について検討する。

## 2. 実験

### 2.1 試料

糸試料には4種類のPAN系炭素繊維糸(東邦レーヨン社製ベスファイト炭素繊維)中間弾性率・高強度タイプのHTA-12K, 中間弾性率・高強度タイプのUT500-12K, 高弾性率・超高強度タイプのUM40-12K, 中間弾性率・超高強度タイプのIM600-12K(以後それぞれHTA, UT, UM, IMと略記)を用いた。試験機のコンプライアンスや試料のチャッキングの問題を考慮して400~800texの糸から数百本程度の繊維を抜き出し、およそ8texの繊維束を糸試料として用いる。試料の正確な織度はマイクロ天秤(メトラ製MT5型)を用いて、引張試験に供する前の一定長の試料の質量を測定することによって求めた。引張試験には20°C, 65%RHの恒温恒湿室内に12時間以上放置した試料を用いた。

### 2.2 実験装置

実験は以下に示すような3種類の引張試験装置を用いて $3.3 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ の範囲の6種類のひずみ速度で行った。

ひずみ速度 $4.0 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ の衝撃引張試験に用いた圧縮空気式引張試験装置の概略図を図1(a)に示す。このひずみ速度の範囲での引張試験では、 $\mu\text{s}$ (マイクロ秒)オーダーでの荷重と伸びを測定するため、瞬時に所定の引張速度に達する必要があるのはもちろんのこと、試験装置内での応力波の伝播等についても考慮する必要がある(詳細は文献5または6参照)。装置は主に試料YSに荷重を伝達する入力棒IB, 2個のロードセルLC, ストライカSTからな

る。STはエアガンAGによって加速され、IBに衝突して入力波を発生させる。図1(a)A部(試料取付部付近)の詳細を同図(b)に示す。IBは直径20mmの鋼製丸棒で、その右側はYSの径路を一定にするための浅い溝がつけてあり、さらに図1(b)平面図に示すように、YSとスムーズに接触させるため、少し丸み(R3mm程度)をつけてある。YSはIBの右端を経由させ、楔形の半割治具によって直接LCに取り付ける(特に接着などはしない)。YSの試料長はIBの両側でそれぞれ50mmで、1回の引張試験で2個のデータを得る。YSはIBの運動方向に対して $\theta=11.5^\circ$ の角度を持って取り付けられるためIBが右方向へ1mm移動した場合のYSの伸びは0.98mmである。この点から、本研究における引っ張りは繊維軸方向に沿った厳密なものではなく、繊維軸に対してやや傾きを持った引張試験をしていることになる。

YSに生じる荷重はLCに貼付した半導体ゲージGVによって検出する。LCの固有振動数は100kHzを越えるため、荷重—時間曲線にLCの振動による影響を及ぼすことはない。また、糸に加わる荷重はたかだか数十NであるのでLCを固定端とみなすことができる。試料の伸びは非接触変位計(ヤーマン製OPT FOLLOW MODEL 1100)NDを用いてIBの変位を測定することによって求めた。

GLによって得られた荷重—時間波形はブリッジボックスBB, 動ひずみ計(共和電業製CDV-230C)PAを経て、NDからの変位—時間波形とともにウェブメモリ(岩崎通信機製DM-7100)DMに取り込まれる。おのおののデータはDMからパーソナルコンピュータ(NEC製PC9801DX)PCへデジタル値として転送され、PC上で時間項を消去して応力—ひずみ曲線が求められる。

ひずみ速度 $8.0 \text{ s}^{-1}$ および $4.0 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ では回転円板型の引張試験機を用いた。その主要部を図2に示す。試料YSをロードセルLCとテーパーブロックTBとの間に楔型治具WBによって固定する。LCとTBの内のが試料長50mmである。突起ITを持った回転円板RDが所定の回転数になると電磁石の作用によってTBがITの回転経路へと降りてきてITがTBを打突する。その結果、YSが一定の速度で引っ張られる。試料に生ずる荷重はLCに貼付されたひずみゲージGLによって検出され、圧縮空気式の試験機の場合と同様に荷重—時間曲線が求められる。試料の伸びはRDの回転数とITの回転半

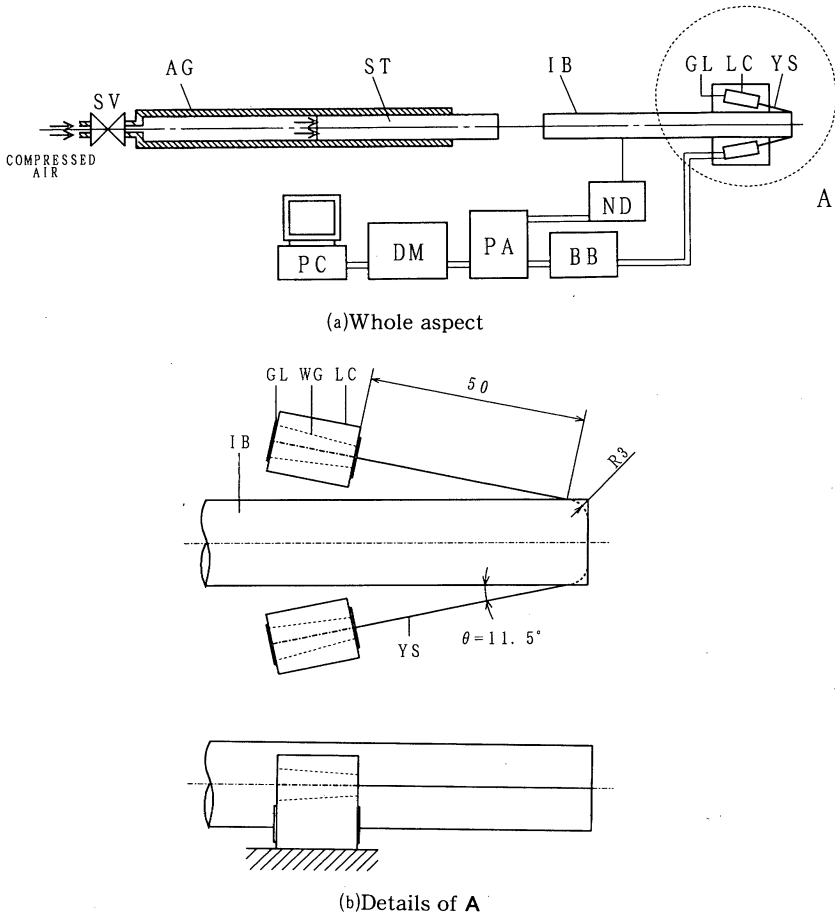


Fig. 1 Schematic diagram of pneumatic testing apparatus  
 IB : Input bar ST : Striker AG : Air gun  
 LC : Load Cell YS : Yarn specimen GL :  
 Guage to measure load ND : Displacement  
 follower SV : Solenoid valve BB : Bridge  
 Box PA : Pre-amp. DM : Wave memory  
 PC : Personal computer

径から求めた。この機構では引っ張りの方向を繊維の軸方向と一致させることが可能であるため、すべての引張試験をこの方式で行うことが望ましいが、 $10^2 \text{ s}^{-1}$  を越えるひずみ速度での試験は図1のような装置によらなければ不可能であるため、本研究の回転円板型引張試験機では、繊維の軸と引張方向とが  $10^\circ$  程度傾くように TB の位置を定めた。

$3.3 \times 10^{-3}$ ,  $3.3 \times 10^{-2}$ ,  $3.3 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  の各ひずみ速度では図3に示すようにインストロン型試験機（東洋ポールドウィン製テンシロン UTMIII）の送りねじによって入力棒を一定速度で押し下げ、試料 YS を引っ張った。引っ張りの形態を衝撃試験の場合と

同様にするため、入力棒の先端形状およびロードセルは圧縮空気式の試験機と同じものを用いた。荷重-時間曲線の求め方は衝撃試験の場合と同様である。試料の伸びは送りねじの送り速度から求めた。

### 3. 実験結果および考察

本研究では試料として単繊維ではなく、繊維の束を用いているため、得られた応力-ひずみ曲線は通常の引張試験結果とはやや異なる（機械的性質において劣る結果を示す）ものであった。さらに何度実験を繰り返しても図4に測定曲線（Measured Curve）として示すように、フィラメントの弛みに

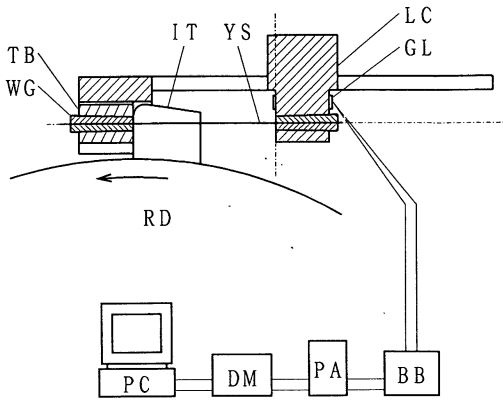


Fig. 2 Schematic diagram of rotating disc testing apparatus  
 YS : Yarn specimen LC : Load Cell GL : Gauge to measure load RD : Rotating disc  
 WG : Wedge-shaped gripping attachment IT : Impact tooth TB : Taper block BB : Bridge Box PA : Pre-amp. DM : Wave memory PC : Personal computer

起因すると考えられる、極端に下に凸の曲線しか得られない条件もあった。例えば図4にIMのひずみ速度  $3.3 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$  における応力-ひずみ曲線を示した。このような条件に対しては、他の条件の応力-ひずみ曲線から類推して図4に破線で示したように、応力-ひずみ曲線のほぼ直線に近い部分から直線を延長し、横軸と交わった点が原点になるように曲線全体を水平移動し、修正曲線 (Modified

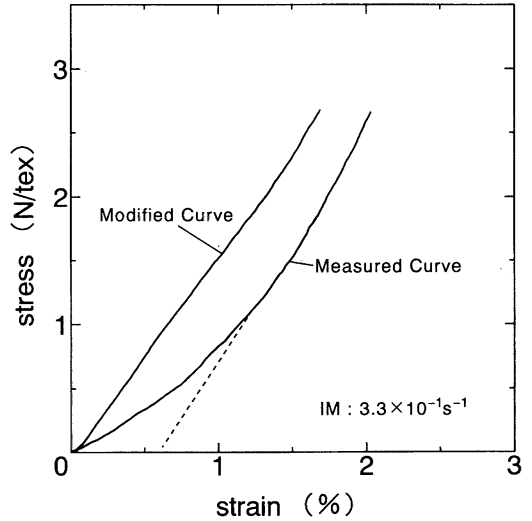


Fig. 4 Modification of stress-strain curve

Curve) を求めた。

4種類の試料、6種類のひずみ速度の大部分の実験では試料を構成する数十本の繊維に弛みが生じないように注意を払い、ほぼ直線状に近い応力-ひずみ曲線を得た。各試料に対して種々のひずみ速度において得られた5個の応力-ひずみデータをパソコン上で数値平均し、5個のデータの破断応力までプロットした応力-ひずみ曲線を図5~8に示す。各曲線の右上点は各試料、各ひずみ速度における5個の測定結果から得られた破断応力値を平均した点で

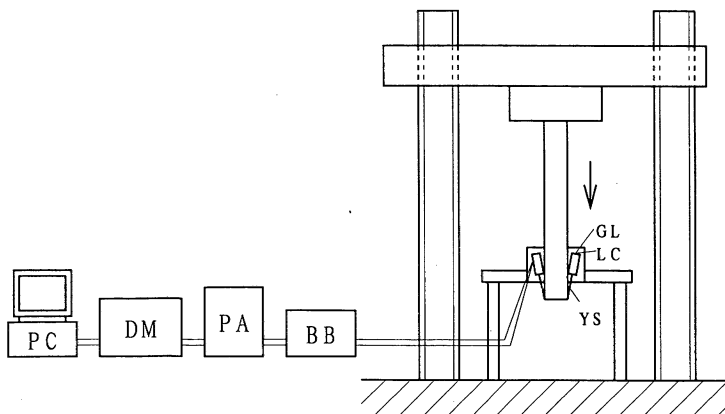


Fig. 3 Schematic diagram of screw testing apparatus  
 YS : Yarn specimen LC : Load Cell GL : Gauge to measure load BB : Bridge Box  
 PA : Pre-amp. DM : Wave memory PC : Personal computer

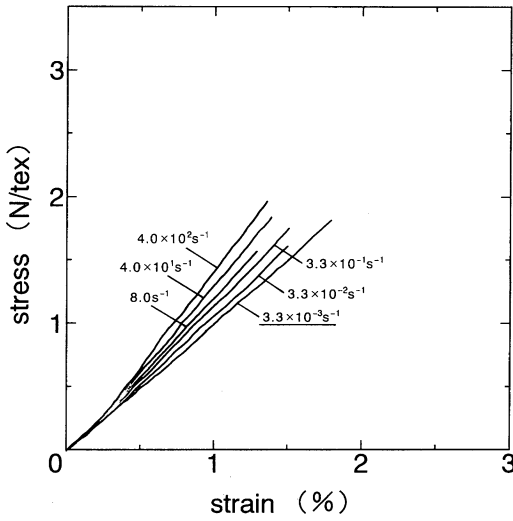


Fig. 5 Stress-strain curves at strain rates ranging from  $3.3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$  to  $4.0 \times 10^2 \text{s}^{-1}$  in HTA yarn

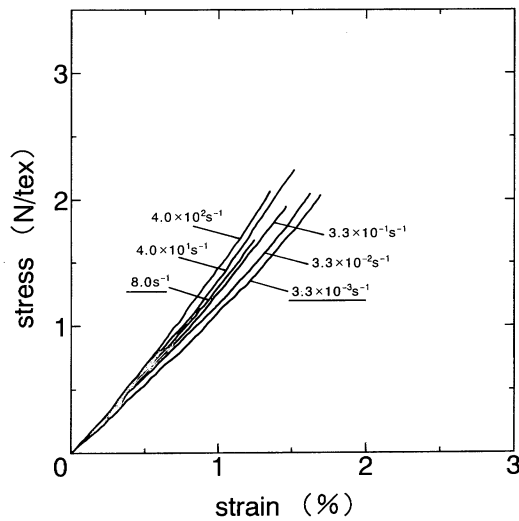


Fig. 6 Stress-strain curves at strain rates ranging from  $3.3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$  to  $4.0 \times 10^2 \text{s}^{-1}$  in UT yarn

ある。図5~8中のひずみ速度にアンダーラインを施した曲線は図4のような修正をした曲線である。各曲線(修正曲線を除く)は小ひずみにおいて下に凸であり、ひずみが大きくなると直線に近い形状を示す。降伏に類するような上に凸の部分はみられない。またひずみ速度の増加に伴って勾配が急になっている。

応力-ひずみ曲線から得られる代表的な機械的性

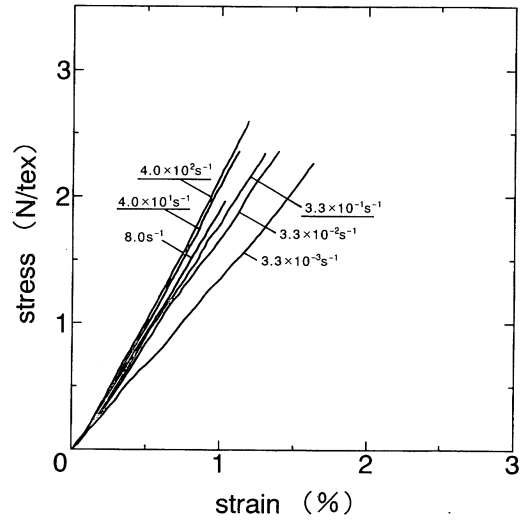


Fig. 7 Stress-strain curves at strain rates ranging from  $3.3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$  to  $4.0 \times 10^2 \text{s}^{-1}$  in UM yarn

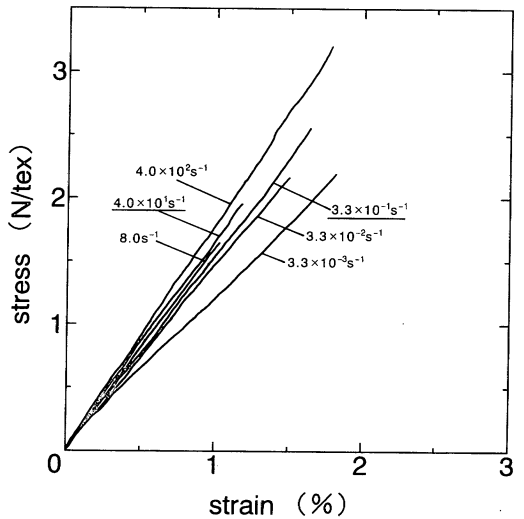


Fig. 8 Stress-strain curves at strain rates ranging from  $3.3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$  to  $4.0 \times 10^2 \text{s}^{-1}$  in IM yarn

質として、引張弾性率、破断強度、破断ひずみについて検討する。ひずみ速度の変化による引張弾性率の変化を検討するため、文献7の引張弾性率の求め方を準用して、各試料、各ひずみ速度における引張弾性率を求め、図9に示した。引張弾性率Eに対するひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の影響を定量的に把握するため、各試料に対して各ひずみ速度での引張弾性率をひずみ速度の常用対数に対して直線近似し、次のような実験式を得た。

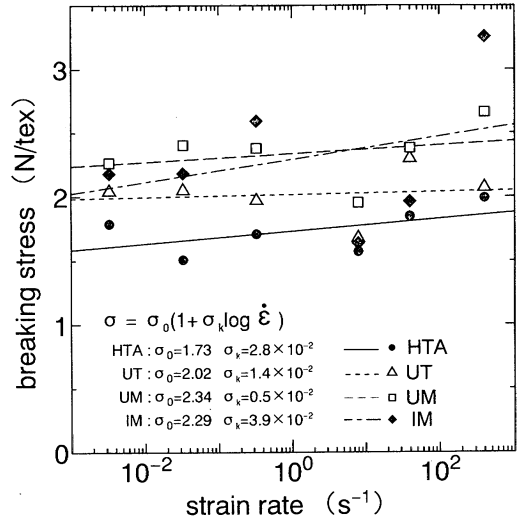
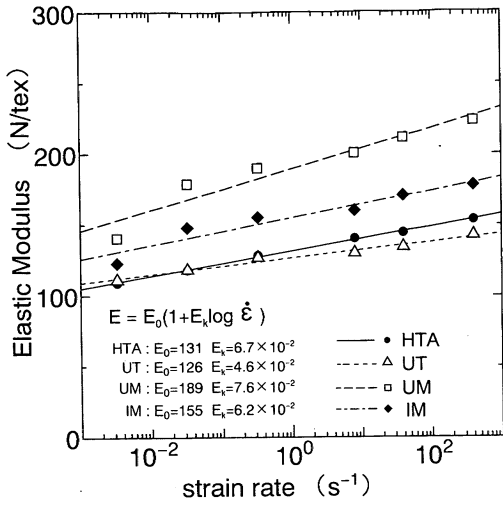


Fig. 9 Relation between elastic modulus and strain rate

Fig. 11 Relation between breaking stress and strain rate

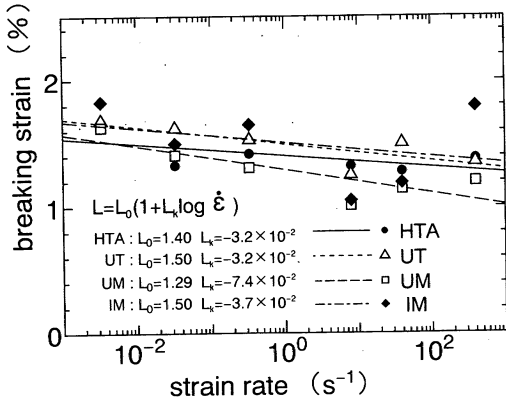


Fig. 10 Relation between breaking strain and strain rate

のような実験式を得た。

$$L = L_0 (1 + L_k \log \dot{\epsilon}) \quad (2)$$

ここで  $L_0$  はひずみ速度  $1s^{-1}$  における破断ひずみ、 $L_k$  はひずみ速度依存の程度を表す係数である。  $L_0$  および  $L_k$  の値を図10中に示す。 図10より実験に用いた炭素繊維の破断ひずみは1けたのひずみ速度の増加により、3~7%程度減少することが分かる。

ひずみ速度の変化による破断応力の変化について、図9、10の場合と同様に図11に示した。破断応力  $\sigma$  に対するひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  の影響を(1)、(2)式の場合と同様に図には示しているが、引張弾性率や破断ひずみの場合ほど各破断応力値は近似直線上に載っておらず、ひずみ速度による傾向があまりはっきりしていない。一例としてHTAについて図5を求めるために用いた各ひずみ速度での5個の破断応力を○で(データが接近して○が5個見えない条件もあるが)、また各ひずみ速度における平均値(図11に●で示した値)を●でプロットし図12に示した。これを見ると各測定におけるばらつきも大きく、1回1回の測定による破断応力値の差がひずみ速度の変化による応力値の差を大きく上回っている。他の試料においても同様にひずみ速度による応力値の変化よりは各試験でのばらつきの方が大きかった。以上のことから破断応力はひずみ速度の増加によってわずかに増加する傾向は見られるものの、その変化の程度は各測定のばらつきよりは小さいことが分かつ

$$E = E_0 (1 + E_k \log \dot{\epsilon}) \quad (1)$$

ここで  $E_0$  はひずみ速度  $1s^{-1}$  における引張弾性率、 $E_k$  はひずみ速度依存の程度を表す係数である。  $E_0$  および  $E_k$  の値を図9中に示す。 図9よりひずみ速度  $10^{-3} \sim 10^3 s^{-1}$  オーダーという広い範囲にわたって、実験に用いた炭素繊維の引張弾性率は1けたのひずみ速度の増加により、5~8%程度増加することが分かる。

次にひずみ速度の変化による破断ひずみの変化について、図9の場合と同様に図10に示した(1)式と同様に各試料に対して各ひずみ速度での破断ひずみ  $L$  をひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  の常用対数に対して直線近似し、次

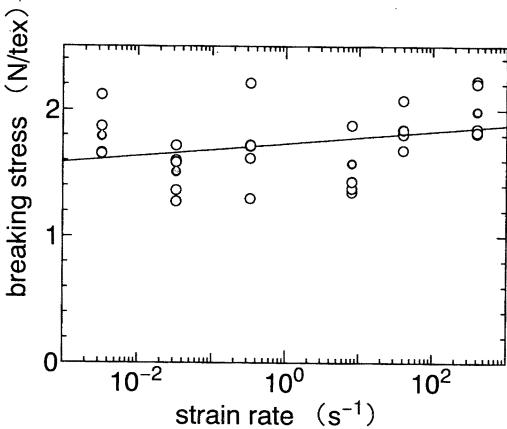


Fig. 12 Breaking stress distribution for HTA yarn

た.

### 4. 結論

4種類のPAN系炭素繊維について、 $3.3 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$  ~  $4.0 \times 10^2 \text{s}^{-1}$ の範囲の6種類のひずみ速度において8tex程度の繊維束に対して引張試験を行い、各ひずみ速度における応力—ひずみ曲線を得た。いずれの試料、ひずみ速度においても炭素繊維束の応力—ひずみ曲線は厳密な直線よりはやや下に凸の形状を示し、特に降伏現象がみられずに破断した。引張弾性率はひずみ速度の対数に対して直線的に増加し

た。また破断ひずみはひずみ速度の対数に対してほぼ直線的に減少した。一方、破断応力は実験ごとにかなりのばらつきを示し、ひずみ速度の影響は小さかった。

本研究を進めるに当たり、有益なご助言を頂いた金沢大学工学部 茶谷明義教授並びに放射性明廣教授に感謝する。また実験装置作成にご協力頂いた金沢大学工学部工作センター久保栄氏、和布浦和夫氏に感謝する。さらに、試料を提供頂いた東邦レーヨン(株)に謝意を表する。

本研究の一部は平成6年度日本繊維機械学会北陸支部研究発表会(平成6年12月金沢)で発表した。

### 文献

- 1) J. C. Smith, F. L. McCrackin, H. F. Schiefer, W. K. Stone, K. M. Towne; *Text. Res. J.*, **26**, 821 (1956)
- 2) W. J. Lyons In; *Impact phenomenon in textiles*. M. I. T. press, Cambridge (1963)
- 3) W. D. Freeston, M. M. Platt, R. J. Coskren; *J. Text. Inst.*, **63**, T239 (1972)
- 4) T. Kinari, A. Hojo, A. Chatani, S. Shintaku, I. Arai; *Proc. 33rd Japan Congress on Materials Research*, 87 (1990)
- 5) T. Kinari, A. Hojo, S. Shintaku, N. Iwaki; *Proc. 6th International Conference on Mechanical Behaviour of Materials*, **1**, 331 (1991)
- 6) 喜成, 放生, 新宅, 岩木; *日本機械学会材料力学講演会講演論文集*, **B**, 48 (1991)
- 7) JIS R 7601 (1986)