

ラケット・ストリングスの反発性能の評価*

鮑 力 民^{*1}, 桜井正幸^{*1}, 小山恭史^{*2}
中沢 賢^{*1}, 篠原 昭^{*1}

Evaluation of the Restitution Characteristics of the Strings for Racket

Limin BAO^{*3}, Masayuki SAKURAI, Yasufumi KOYAMA,
Masaru NAKAZAWA and Akira SHINOHARA^{*3} Faculty of Textile Science and Technology, Shinshu University,
3-15-1 Tokida, Ueda-shi, Nagano, 386-8567 Japan

The restitution characteristic of fiber string in axial direction was analyzed with considering the visco-elasticity of yarns. An impact test was developed that one side of string was fixed in load cell, the other side was fixed in hammer. The hammer moves along the slide rail. When the hammer was struck, the impact speed of hammer was measured with the laser sensor, and the restoration ratio was obtained. In experimental range for all samples, the restoration ratio became small with the impact speed. A dynamic restitution model considering tensile non-linear visco-elasticity of materials was suggested. The good agreement was obtained between the experimental and the theoretical values. It was also shown that the repulsion of tennis strings could be evaluated with the parameter of the proposed model.

Key Words: Spots Engineering, Impact, Restitution, Strings, Measurement and Evaluation

1. 緒 言

繊維集合体を利用したラケット・ストリングスなどの反発性能の評価は人間の感性に多く頼っている。その反発性能を客観的に評価することはメーカーの新製品の開発と消費者の商品選択として必要である。

現在ラケットとボールの衝突解析はFEMなどを用い継続的に行われており、有効な結果が得られている^{(1)~(4)}。

著者らはこれまで、張力を負荷し、両端を固定した糸状の試料にハンマを衝突させて、反発挙動が測定できる装置を作製した。この装置を利用して、いくつかのストリングスの反発係数-衝突速度、反発係数-初期張力の関係と衝突時の加速度を測定した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。また、ストリングスの直径方向の粘弾性をVoigtモデルで近似し、反発挙動のシミュレーションを試み、実験結果との比較的良い一致を得た。しかし、実験では固体のハンマがストリングに横方向から衝突するため、測定した反発性能には、ストリングの直径方向における

力学特性が多く影響している。テニスボールのような柔軟材料の物体が衝突する際に、影響が大きい糸軸方向の反発性能はこの実験では検討できなかった。

本研究ではストリングスの軸方向の反発性能を調べるために、ストリングの軸方向に直接衝撃を与えられる実験装置を新たに提案し、製作する。この装置を利用して、材質、構造が異なる各種のストリングスについて衝撃引張性能を測定する。また、ストリングスの軸方向の衝撃引張性能に対して、非線形粘弾性を考慮した理論式を利用し、シミュレーションを行い、実験結果と比較検討を行う。この衝撃引張性能を利用してストリングスの反発性能の評価を試みる。

2. 理 論

2.1 ストリングスの衝撃引張モデル ストリングスの軸方向の反発挙動を議論するために、図1のような、一端固定、一端におもりを付けているストリングスの衝撃引張性能に注目する。おもりを直接加速させ、入力速度を与える。ストリングが原長になるまで、引張剛性と比べて曲げ剛性の影響は小さく、応力は零とする。ストリングは衝撃エネルギーで伸長し、おもりの速度は V_{in} から零になる。その後、ストリングのひずみエネルギーでおもりが V_{in} と反対方向に運動

* 原稿受付 2001年4月20日。

^{*1} 正員, 信州大学繊維学部(☎ 386-8567 上田市常田3-15-1)。^{*2} 信州大学大学院。

E-mail: baolimi@giptc.shinshu-u.ac.jp

し、やがて最大の速度 V_{out} に達する。ストリングに対しておもりの影響はなくなっておもりは慣性運動をしていく。

ここでストリングスの衝撃引張性能を示しているストリングの回復比(Restoration ratio) R は次のようにする。

$$R = \frac{V_{out}}{V_{in}} \dots\dots\dots (1)$$

2.2 ストリングスの力学特性 ラケット・ストリングスは、主に高分子の繊維の集合体であり、特に反発性能とスピン性能を両立させるために、積層構造をしている。

ここで、ストリングを図1のように弾性を表すスプリングと粘性を表すダッシュポットを並列した粘弾性力学モデルで近似する。繊維による積層構造になっているストリングスは、粘性力が単純に速度に比例しない場合が多いので、本研究では粘性力がひずみ速度の指数関数である Gupta の非線形粘性⁽⁷⁾を用いる。

$$\begin{cases} \sigma_1 = E\varepsilon \\ \sigma_2 = c \cdot \text{sgn}\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) \left|\frac{d\varepsilon}{dt}\right|^n \dots\dots\dots (2) \end{cases}$$

ただし、 ε : ストリングスのひずみ、 E : ストリングスのヤング率、 c : ストリングスの粘性を表すパラメータである。

式(2)において、 $n=1$ のとき、線形粘性の Voigt モデルになる。

2.3 衝撃引張挙動の理論解析 テニスラケットに時速 100 km のボールが衝突する際、ストリングスのひずみ速度は、 $10\varepsilon/s$ 以下なので動的荷重問題として扱い(応力波の伝ばを考慮しない)、サンプル全体のひずみ速度を考慮する。図1において、式(2)の Gupta 粘性モデルを考慮した衝撃運動方程式は次の

ようになる。

$$\frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + \frac{Ac}{ml} \text{sgn}\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) \left|\frac{d\varepsilon}{dt}\right|^n + \frac{AE}{ml} \varepsilon = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$: ストリングにかかる応力、 A : 弦の断面積、 l : 弦のスパン、 m : おもりの質量である。

境界条件は、 $t=0: x=0, dx/dt = V_{in}$ とする。

式(3)を四次 Runge-Kutta 法により、ストリングとおもりの振動半周期に関して、時間と変位、速度の関係を解析でき、ストリングスの衝撃引張挙動が求められる。

3. 実験および試料

3.1 実験装置と方法

ストリングスの軸方向の衝撃引張挙動を測定するために図2のような装置を試作した。図2では、試料長 500 mm となるように試料を固定する。上部のチャックはロードセル [共和電業(株)LU-100 KSB 34 D] に直接接続され、衝突時の荷重をアンプ [共和電業(株)SA 600] と A/D 変換ボードを介しパーソナルコンピュータで読み込む。下部固定用のチャックはユニットを含めて 75.6 g のおもりを持つチャックであり、スライドレール上に設置されてスライド可能であり、衝突前後でスライド以外の方向に移動することはない。下部のチャックの終端にはレーザー変位計(KEYENCE LB-1000)で測定できるように小形の反射板が取り付けられている。レーザー変位計はおもりの変位を測定している。レーザー変位計の測定値もパーソナルコンピュータに取り込み、ロードセルと 2ch でパーソナルコンピュータによって処理を行う。下部のチャック兼おもりの加速には $\phi 148$

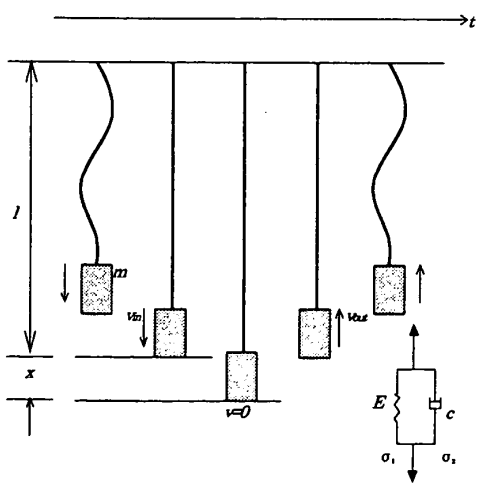


Fig. 1 Geometry of the impact test for axial direction model

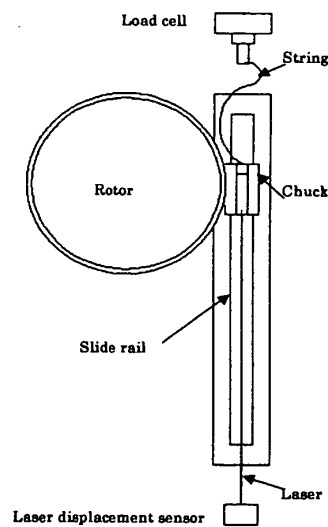


Fig. 2 Experimental apparatus

Table 1 Details of samples

Sample name	Object	Trade code	Trade name	Yarn diameter (mm)	Structure
Nylon(Bad)	Badminton	TECGUT 2000	TECGUT	0.75	Multi
Nylon(Soft)	Soft Tennis	TECGUT 5000	TECGUT	1.40	Multi
Nylon1	Tennis	TECGUT 6000	TECGUT	1.30	Multi
Nylon2	Tennis	TECGUT 7000	UMISHIMA	1.40	Mono+Mono
Nylon3	Tennis	HY-O-SHEEP 2900VL	VIBLESS	1.33	Mono+Mono
Nylon4	Tennis	OG-SHEEP 2700MCS	MICRO SUPER	1.30	Mono+Mono
Nylon5	Tennis	OG-SHEEP 3800MR	CARBON MICRON	1.10	Mono+Mono
Kevlar	Tennis	OG-SHEEP 5800PRO	ARAMMIX	1.10	Multi+Multi

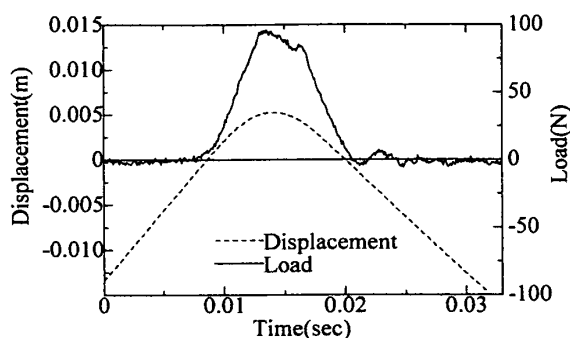


Fig. 3 Relationship between displacement, load and time for Nylon 1 (TECGUT 6000)

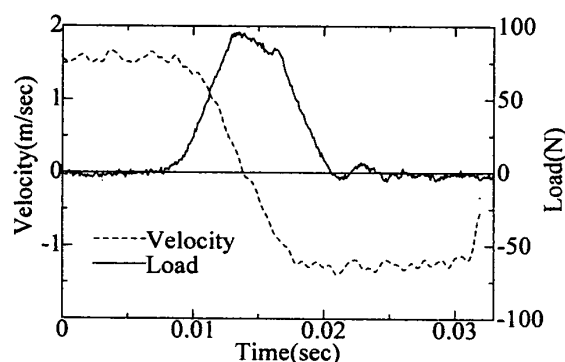


Fig. 4 Relationship between velocity, load and time for Nylon 1 (TECGUT 6000)

mmのロータを設け、ロータ回転の力を利用した。ロータで下端部チャックを加速させる際に金属同士の滑りが生じ、回転力伝達ロスが大きい。そのため、ロータ外周に円形のラバーを接着し、滑りを軽減させた。

軸方向の衝撃引張実験を以下の手順で行う。

- (1) 図2に示す実験装置の上,下チャックより試料をつなぐ。全長500mmになるように試料を装着する。
- (2) 自由長でレーザ変位計およびロードセルを零に設定する。
- (3) おもりをスライドに添うようにロータの上まで持ち上げ保持する。
- (4) ロータを定めた速度で回転させる。
- (5) 手を放しロータによって加速されたおもりでストリングに衝突を加える。
- (6) レーザ変位計で衝突時のストリングの変位を、ロードセルで荷重を測定する。

以上の手順で実験を10回ごとに、速度を変化させて行う。

衝撃引張実験に用いる各試料のヤング率を引張試験[島津(株)AG-20 kND]によって求める。測定試料の-spanはすべて200mmとし、チャック部の滑りが考えられるため標点伸び計[島津(株)ST 50-50-25]

を用い、ストリングスのひずみを測定する。引張速度は $0.2\epsilon/s$ で、サンプルごとに5回実験した。線形弾性材料のケブラーやピアノ線はひずみ-応力の曲線の初期傾きをヤング率とする。大変形する際、非線弾性材料のナイロンは軸方向衝撃引張実験で最大速度時に生ずるひずみ(0.3)時の傾きをヤング率として用いた。

3.2 試料 利用分野、材質、構造の変化が実験結果にどのように影響するかを調べるために表1に示したバドミントン用ストリング：Nylon(Bad)、軟式テニス用ストリング：Nylon(Soft)、構造の違う5種類の硬式テニス用ストリング：Nylon1~5、Kevlarを用いた。OG-SHEEP 5800 PRO(材質はケブラーである)を除いて材質はすべてナイロンである。すべて市販品である。

4. 実験結果および考察

4.1 各速度の測定 一例として、変位をレーザ変形計で、荷重をロードセルで測定したサンプル(試料：Nylon 1, $V_{in} : 1.5 \text{ m/s}$)の荷重と変位の時間変化曲線を図3に示す。図3のデータより、単位時間に対する変位の割合から速度を求めることができる。平滑

処理をした結果が図4である。荷重立上り点における微小範囲(0.004 s)の速度の平均を V_{in} 、また速度が負の最大値の微小範囲(0.004 s)の速度平均を V_{out} として、回復比を求める。

荷重曲線の頂点付近の凹凸は、チャック部のすべりの影響かと考え、チャック部付近のストリングに標線を付け調べた結果、すべりの影響はなかった。ストリングの波動のシミュレーションをした結果、反射応力波の影響を示している。反発との関係は深くないと考えているので、理論式として式(3)の振動運動式を用いて解析する。

4.2 回復比について 図5は軸方向の回復比を測定する実験装置で求めた試料 Nylon 1 の衝突速度に対する最大荷重および最大応力である。最大応力は最大荷重とストリングの断面積の比である。図5からわかるように衝突速度が増加するに従い、最大荷重と最大応力は増加していく。すべてのサンプルでは、このような傾向を示している。

図6はすべての試料の衝突速度に対する回復比を示している。横軸は衝突速度 V_{in} で、縦軸は回復比である。材質がナイロンの場合、衝突速度が増加するに従い回復比は減少する傾向にある。また試料の直径が小

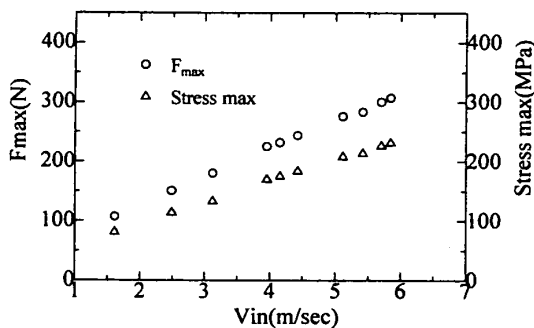


Fig. 5 Relationship between maximum load (maximum stress) and velocity for Nylon 1

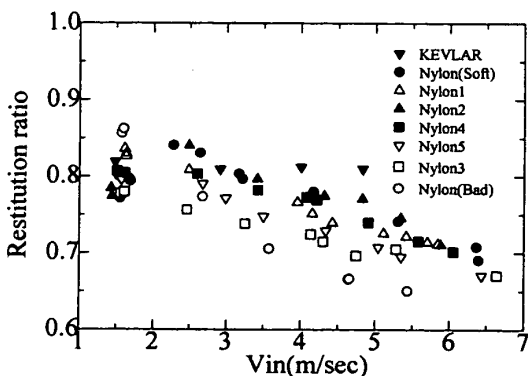


Fig. 6 Relationship between restitution ratio and velocity for all samples

さいほど応力が大きくなるため、回復比は急激に減少することがわかった。ナイロンに比べ、はるかにヤング率が大きいケブラーでは、衝突速度の増加に対する回復比の減少は極めて少なく、ほとんど一定の値を示している。また、ケブラーはナイロンに比べ衝突速度が最大まで上げられない。それはチャック部で糸の破壊が起こりケブラー本来の回復比が求められるためである。試料によっては速度が自由落下に近い領域で回復比が通常より小さな値を示している。これは市販のストリングス自体が円形の束になって長時間保管されているため、衝突速度が小さい領域ではストリング軸方向の伸びの力ではなく、保管状態の円状に戻ろうとする力が生じているためだと推測される。また、直径が大きな試料ほどこの影響が強いことが確認できた。

4.3 シミュレート値との比較 引張実験で求めたストリングスのヤング率を用いて、式(3)を利用して軸方向の衝撃引張シミュレーションを試みた。図7は Nylon 1 と Kevlar の軸方向の衝撃引張実験における衝突速度-回復比の実験値と理論式のシミュレーションの比較を示す。線形粘性の Voigt モデルを用いた場合、衝突速度によらず回復比は一定を示すはずである。ケブラーは線形粘弾性モデルで近似できる($n=1$)が、ナイロンでは大きな差が生じ、近似できなかった。ここでは Gupta の非線形粘性モデルを用いて、 n の値をバドミントン用ストリングス [Nylon (bad)] は $n=2.0$ 、それ以外のナイロンストリングス (Nylon 1~Nylon 5) は $n=1.5$ とすると実験結果と比較的良好一致が得られた。

おもりを載せたスライダとレールの摩擦を測定し、レール摩擦の影響を考慮したシミュレーションの結果では、1/1000 程度の誤差しかなかった。いろいろな固体、液体潤滑油を試みたが、顕著な差は見られなかった。ナイロンのストリングスでは衝突速度が増加す

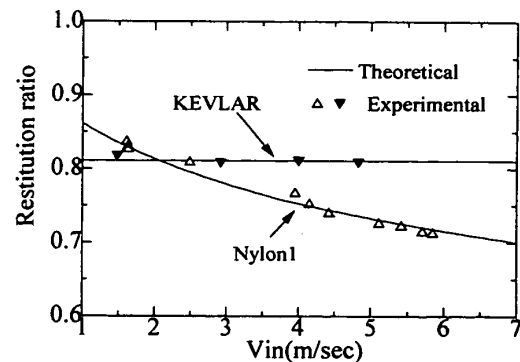


Fig. 7 Comparison of the experimental data and the theoretical prediction for impact test (Nylon 1 and KEVLAR)

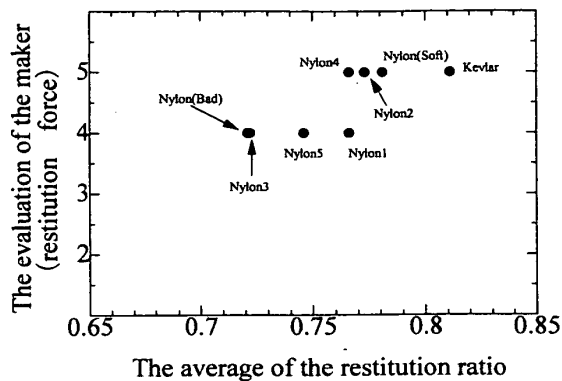


Fig. 8 Relationship between evaluation value of the maker and experimental value for the repulsion ability of strings

るに従い回復比が減少することは、材料の非線形粘弾性特性と考えられる。

4.4 メーカ評価との比較 ストリングスを製造しているメーカーではいろいろストリングスに対してプロ選手の感性評価を始め、いろいろなユーザの感性評価をまとめて、メーカー評価値とし、カタログに載せている⁽⁶⁾。ストリングの反発能力としてメーカーは「反発力」を採用し、ストリングの振動減衰性能は「振動吸収性」を採用している。

本研究で提案した衝撃引張実験で求めた各衝突速度の回復比の平均値とメーカー評価値の一つの「反発力」との関係を図8に示した。縦軸は「反発力」で、実質上は三段階しか使っていないので(3~5で評価している)、あまり細かくしない。回復比の平均値とメーカー評価値「反発力」との関係はほぼ比例している。実験装置で求めた回復比はメーカーの「反発力」とほぼ同一の特性値と思われる。

ストリングスの振動減衰性能として、衝撃引張実験では振動減衰性能を評価できる減衰比(ξ)を用いる。線形粘弾性モデルでは式(4・a)を使う。非線形粘性モデルに対しては、減衰比 ξ は $n=1.5$ を用いた Nylon (Soft), Nylon 1~Nylon 5を式(4・b)で、また、 $n=2.0$ を用いた Nylon (bad)を式(4・c)で、最大ひずみ速度(V_{max})を用いることにより、すべての試料を相対的に評価する。

$$\xi_{1.0} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{A}{lmE}} \quad \dots \dots \dots (4 \cdot a)$$

$$\xi_{1.5} = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{A V_{max}}{lmE}} \quad \dots \dots \dots (4 \cdot b)$$

$$\xi_{2.0} = \frac{c}{2} V_{max} \sqrt{\frac{A}{lmE}} \quad \dots \dots \dots (4 \cdot c)$$

図9は衝撃引張実験で求めた減衰比とメーカー評価値の一つの「振動吸収性」との関係である。反発能力と同

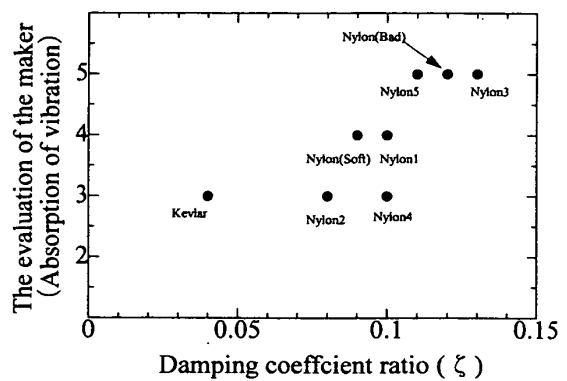


Fig. 9 Relationship between evaluation value of maker and experimental value for the damping of strings

様に、「振動吸収性」についてもメーカーでは実質上三段階しか使っていない。図9に示したように、両者はほぼ線形な関係を示し、メーカーの振動吸収性の評価と同一のものと思われる。

5. まとめ

スポーツ分野で用いられるストリングスの反発特性を検討するために、糸の衝撃引張性能を測定する装置を考案し、製作した。測定装置のガイドの摩擦、応力波などの影響も検討し、何種類かのストリングスを用いて、衝撃引張性能を測定した結果、衝突速度が増加するほど回復比が減少することを見出した。その現象については Gupta の非線形粘性理論を用いてシミュレーションすることにより衝撃引張現象の説明ができた。本実験で測定した試料の回復比はメーカーの反発評価値と線形な関係を持ち、試料の粘性を表すパラメータはメーカー評価との相関があり、実験装置の有用性が確認できた。

なお、測定方法等に関し、有益な助言をいただいた信州大学繊維学部の飯田 一先生にお礼を申し上げる。

本研究は文部科学省科学研究費補助金(COE 形成基礎研究費；10 CE 2003)の補助を受けた。

文 献

- (1) 川副嘉彦, 機論, 59-558, C(1993), 521-528.
- (2) 川副嘉彦, 機論, 59-562, C(1993), 1678-1685.
- (3) 川副嘉彦・神田芳文, 機論, 59-563, C(1993), 2116-2123.
- (4) 川副嘉彦・神田芳文, 機論, 59-566, C(1993), 3108-3115.
- (5) 鮑力民・高寺政行・飯田一・岩本大栄・篠原昭, 機論, 65-630, C(1999), 580-586.
- (6) 鮑力民・高寺政行・飯田一・小山恭史・篠原昭, 機論, 65-632, C(1999), 1319-1324.
- (7) 井本立也, 概説レオロジー(上), (1963-2), 24, (株)東京化学同人.
- (8) GOSEN CATALOG 1999, (1999-4), (株)GOSEN.