

衝突現象を考慮したテニスラケットのCAE*
(ストリングス張力と衝突挙動)川 副 嘉 彦*¹CAE of Tennis Rackets with Impact Phenomena
(The Effect of Strings Tension on a Ball-Racket Impact)

Yoshihiko KAWAZOE

There are a number of unclarified points concerning the impact phenomena and the optimum design of tennis rackets. This paper investigates the effect of string tension on the impact phenomena on the basis of a simple impact model where the contact duration is determined by the natural period of a whole system composed of the mass of the ball, the stiffness of ball and strings, and the reduced mass of racket at the impact point on the racket face considering the strong nonlinearity of the restoring force of the ball and strings. It also deals with the effect of string tension on the structural vibration of the racket frame, which is supposed to reduce the coefficient of restitution of the tennis racket due to the energy loss of the frame vibration. The calculated results explain fairly well the experimental results.

Key Words: Sports Engineering, Impact, CAE, Modal Analysis, Natural Frequency, Strings, Nonlinear Restoring Force, Tennis Racket, Restitution, Contact Duration

1. 緒 言

スポーツ用具は、素材の複合化により設計・製造の自由度が大きくなり、身体的条件や技術的条件の異なる使用者との整合を考慮したきめの細かい設計を目指す段階に至り、理論武装したテニスラケットも現れ始めた。しかし、人間系と機械系(用具系)が複雑に絡んでいるためにラケットの性能やインパクト現象について不明な点が多い。

ラケットの性能は、ボールとラケットの衝突現象と密接に関連している。

ラケットの質量分布、フレームの剛性分布、ストリングスの張力、ラケットの外形寸法などの物理特性に対して、ボールがある速度とある角度でラケットに衝突した瞬間から離れるまでの間(接触時間)にラケットがどのように挙動するか、また、ボールの速度とスピン(回転)がどうなるかが明らかにできればラケットの性能が評価できることになる。

しかし、ボールとラケットの衝突現象は、瞬時の大

変形を伴う複雑な非線形現象であり、解析は極めてやっかいである。

一方、従来から多くの衝突実験が行われているが、インパクトの複雑さを示しているだけで、ストリングスとフレームとボールの相互作用については、ほとんど解明されていない。たとえば、ストリングス張力の重要性については従来からしばしば指摘されており、ボールの飛び(ラケットの反発力)への影響についても考察がなされている。“ストリングスを緩く張ればボールの飛びは良くなる”というのが一般的な定説である。しかし、ミッドサイズのラケットの場合、ナイロンストリングスでは、50 lb のとき反発係数(跳ね返り速度/入射速度)が最大、天然シープのストリングスでは、60 lb で最大という実験結果もあり、また、反発係数が最大になる張力はフレームのサイズ(打球面積)でも異なっている⁽¹⁾。

“ボールを剛体壁に衝突させた場合にボールのつぶれによりエネルギーが消散して反発が悪くなるように、強く張ったストリングスにボールが衝突する場合も、ラケット面が壁のように作用してボールの飛びが悪くなる”などというもっともらしい理由も挙げられているが、反発は衝突する素材の組合せによっても異なるから、この説明もあやしい。

* 平成4年4月2日 第69期総会講演会において講演、原稿受付 平成4年4月24日。

¹ 正員、埼玉工業大学 (☎369-02 埼玉県大里郡岡部町普濟寺1690)。

このようにストリングス張力とボールの飛びおよびコントロールとの関係についてさまざまなことが言われているが、ほとんどの議論は“確証はないが”という条件付きである。

前報⁽²⁾では、ボールとストリングスの非線形復原力およびラケットの打撃点における換算質量を考慮した衝突モデルによりラケットの応答を予測する方法を示し、ラケットの反発力(飛び)の評価指針を与えた。

この論文では、前報に基づいて、ボールとラケットの衝突速度およびストリングスの張力が衝突現象およびラケットの反発性能に及ぼす影響について考察する。ボールとラケットの斜め衝突におけるボールの回転(スピン)は、コントロール性を問題にする場合は重要であるが、反発性能に関するモデリングをできるだけ簡単にするために、本論文では衝突におけるボールの回転(スピン)はないものとする。

2. 反発性能評価のための衝突モデルの概要⁽²⁾

衝突における力積と接触時間はラケットの応答に大きく影響する。

テニスボールとストリングスとの接触時間(衝突時間)に関しては、ボールとラケット・フレームの質量分布とボールとストリングスの大変形の影響が支配的で、ラケットの剛性の影響は小さく、フレームの振動は二次的にしか影響しない。

また、振動学の知識によると、固有周期に関しては、減衰特性(エネルギー損失)は二次的な影響しか持たない。

したがって、力積と接触時間を求めるときには、フレームの振動を無視して、ボール・ストリングス複合系の非線形ばねを介して、重心に質量をもつボールとラケットとが衝突するモデルを考える。すなわち、ボールとラケットの衝突時間(接触時間)がボール・ラケット系の最低次の固有周期の1/2と仮定した衝突モデルにより、まず力積と接触時間を求め、次にこの力積と接触時間を使って実際に近く近似した衝撃力波形をコンピュータ援用により実験的に同定したラケットの振動モデルに適用し、ラケットの応答を計算する。

ボールとラケットの衝突は偏心衝突だから、ラケットが回転することによるエネルギー損失を考慮して打撃点に換算した換算質量 M_r を導入すると、ボール・ストリングス複合系の非線形ばねを介して、重心に質量 m_b をもつボールと換算質量 M_r のラケットとが衝突すると考えることができる。グリップ位置を支点としてラケットが回転する(打撃点が縦の中心線上にある)場合は、ラケットの換算質量 M_r は質量分布、すな

わち打撃点の位置と慣性モーメントから求めることができる。

また、ストリングス周りのラケット・ヘッドを固定してボールをストリングスに衝突させた場合のボールの衝突前の速度(入射速度)に対するボールの跳ね返り速度の比、すなわち反発係数 e_{BG} の測定値は、図1のようにボールの入射速度およびストリングスの張力(30 lb と 60 lb)を変えてもほとんど一定の値約0.83を示す。この反発係数の測定値を、フレーム質量が無限に大きい場合のボールとストリングスの衝突における素材に固有の反発係数、すなわちボールとストリングスの衝突におけるエネルギー損失に相当すると見なす。

衝突におけるフレームの振動によるエネルギー損失は、衝突速度と打撃点の位置で決まる。ラケットの基本の振動モードの節の一つはほぼラケット面の中心にあるので、センタ打撃では、振動は小さく、フレームの振動によるエネルギー損失はほとんどない。一方、先端や根元で打撃した場合はフレーム振動が大きく、特に衝突速度が大きいとフレーム振動によるエネルギー損失は大きい。

センタ打撃の場合の反発係数の実測値は、ラケットフレームの振動を無視した場合の計算値に極めて近く、センタを外れた場合の実測値は振動を無視した場合の計算値より低下する。これは、フレーム振動によるエネルギー損失の割合が大きいほど、反発係数が低下することを示している。反発係数は衝突におけるエネルギー損失と密接に関係しているため、これら三つのエネルギー損失を計算すれば反発係数が予測できることになる。ラケット・ハンドル(グリップ)を手で握った場合は、グリップ解放(自由)の場合に比べて減衰はかなり大きくなるが、インパクトの瞬間のラケット

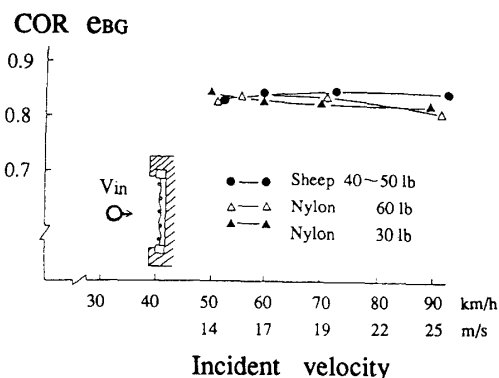


図1 ストリングス周りのフレームを固定した場合のボールとストリングスの衝突における反発係数(ボールの跳ね返り速度/入射速度)実測値

振動の最大振幅の大きさはグリップ自由の場合と大きくは変わらない。これは、インパクトの時間が非常に短いことによるからであろう。インパクト諸量の具体的な計算法は3章以降に述べる。

3. スtrings張力を変えた場合の Strings・ボール複合系の 非線形復原力特性

中心に質量を集中させたボールが、Stringsに接触する片側だけ変形すると仮定し、ボールの復原力特性 F_B 、Stringsの復原力特性 F_C 、ボール・Strings複合系の復原力特性 F_{CB} を実測値に基づいて求め、さらに復原力 F_C 、 F_B 、 F_{CB} の変位 X に関する微分をばね剛性 K_C 、 K_B 、 K_{CB} とする。ボールもStringsも変形量の増大、すなわち衝突速度の増大にともなって急激に硬くなり、強い非線形ばねの特性を示す⁽²⁾。

図2は、Stringsを張力55 lbで張った場合を標準値1.0として、張力を標準値の0.7倍から1.4倍まで変えた場合のStrings、ボール、Strings・ボール複合系それぞれの変位(変形量)に対する非線形復原力特性を示す。図2の左の曲線群は、Stringsの初張力を標準値の0.7倍から1.4倍まで変えた場合の復原力およびボールの復原力であり、右の曲線群はそれぞれの初張力におけるStringsの変位とボールの変位の和、すなわち、複合系の複合変位に対する復原力を表す。

図3は、Strings初張力を変えた場合のStringsとボールそれぞれの変位に対する非線形復原ばねこわさであり、復原力を変位 X に関して微分した

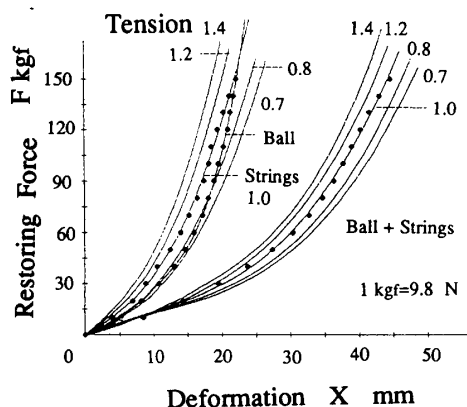


図2 Strings初期張力を変えた場合(標準張力を1.0とする)のStrings、ボール、Strings・ボール複合系の非線形復原力特性(ボールが片側のみ変形すると仮定)

ものである。ボールはゴムと空気から構成されているために、変位が小さい場合と大きい場合とではばねの特性が大きく異なる。Strings曲線の横の数字は標準張力との比である。

図4は、Stringsの初張力を標準値の0.7倍から1.4倍まで変えた場合のStrings・ボール複合系の複合変位に対する非線形復原ばねこわさを示す。ボールとStringsの特性が異なるので、両者の組合せにより複合系は複雑な特性を示す。

4. ラケット・フレームの振動を 無視した場合の衝突諸量の計算法⁽²⁾

Strings周りのフレームを固定した場合のボールとStringsの反発係数 e_{BC} は、ラケットの質量が無限に大きい場合に相当するから、ボールの質量を m_B 、振動を無視したラケットの打撃点における換算質量を M_r 、衝突直前のボールとラケットの速度をそ

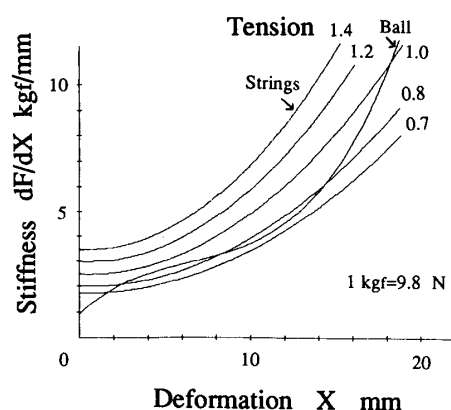


図3 Strings初期張力を変えた場合のStringsおよびボールの変位に対する非線形復原ばねこわさ(標準張力を1.0とする)

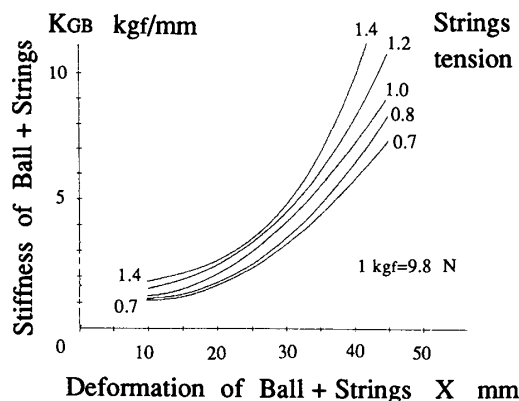


図4 Strings張力を変えた場合のStrings・ボール複合系の複合変位に対する非線形復原ばねこわさ(標準張力を1.0とする)

それぞれ V_{Bo} , V_{Ro} とすると、運動量保存則と反発の式から、フレームの振動を無視した場合のボールの衝突後の速度 V_B を求めることができる。

ボールが静止したラケットに衝突する場合 ($V_{Ro} = 0$) の反発係数 (跳ね返り速度/入射速度) は

$$e_1 = -V_B/V_{Bo} = (e_{BC} - m_B/M_r) / (1 + m_B/M_r) \quad \dots\dots\dots (1)$$

衝突における力積は、

$$\int F(t) dt = (V_{Bo} - V_{Ro})(1 + e_{BC})m_B / (1 + m_B/M_r) \quad \dots\dots\dots (2)$$

のようになる。

ボール・ストリングス複合系のばね剛性 K_{CB} の値を一定とすれば、接触時間は

$$T_c = \pi \sqrt{m_B} / \sqrt{K_{CB}(1 + m_B/M_r)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表せる。しかし、 K_{CB} は非線形ばねであり、その値はインパクトの間刻々と変わる。

解析を簡単にするために、力積の値は変えないで、等価的な一定の衝突力 F_{MEAN} が接触時間 T_c の間作用すると考え、 F_{MEAN} に対応するばね剛性を K_{CB} とすると、力積と接触時間、すなわち式(2)と(3)から、衝突速度 ($V_{Bo} - V_{Ro}$) に対する F_{MEAN} と対応する K_{CB} の関係は、衝突速度をパラメータとして次のように求めることができる。

$$F_{MEAN} = (V_{Bo} - V_{Ro}) \times (1 + e_{BC}) \sqrt{m_B} \sqrt{K_{CB}} / \pi \sqrt{(1 + m_B/M_r)} \quad \dots (4)$$

一方、ボール・ストリングス複合系の復原力 F_{CB} (図2) および剛性 K_{CB} の特性 (図3) から、 F_{CB} と K_{CB} の関係を求めることができる。たとえば、標準張力 55 lb (246 N) の場合の最小二乗近似式は

$$F = -55.2 + 65.2K_{CB} - 16.6K_{CB}^2 + 2.29K_{CB}^3 - 0.103K_{CB}^4 \quad \dots\dots\dots (5)$$

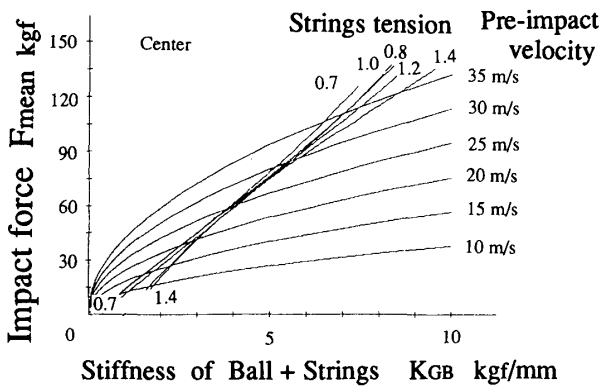


図5 インパクトにおける衝突速度に対する等価的衝突力とボール・ストリングス複合系の復原ばねこわさの決定法

と表せる。ただし、荷重: $F(\text{kgf})$, $1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N}$, ばね剛性: $K(\text{kgf/mm})$, $1 \text{ kgf/mm} = 9.8 \times 10^3 \text{ N/m}$ である。

初期張力を標準張力の 0.7 倍から 1.4 倍まで変えた場合のそれぞれの復原力 F_{CB} とばね剛性 K_{CB} の関係式と衝突速度をパラメータとした式(4)とを図5のように連立させると、衝突速度 ($V_{Bo} - V_{Ro}$) に対するそれぞれの初期張力の場合の等価的な衝突力 F_{MEAN} とボール・ストリングス複合系の復原ばねこわさ K_{CB} が決まる。 K_{CB} が求まると、衝突速度に対する接触時間 T_c も決まる。さらにボールとストリングスの変形量なども計算できることになる。

ラケットの振動を計算するときには、力積と接触時間を変えないで、衝突力波形を実測波形に近く正弦半波などで近似する⁽³⁾。

5. ストリングスの張力を変えた場合の衝突諸量の予測

図6~8は、それぞれ衝突速度が与えられた場合の、ストリングス初期張力に対するボール・ストリングス複合系の復原ばねこわさ、等価的な衝突力 F_{MEAN} 、接触時間の計算例である。衝突点はラケット打撃面の中央であり、横軸はストリングス初張力の標準張力との比である。ラケットは全長 680 mm, 打球面積 606 cm², 質量 360 g, 重心位置はグリップ端から 308 mm である。ラケット・ハンドル(グリップ)上の握りの中心をグリップ端から 70 mm と想定し、この点を支点としてラケットが回転するとしている。任意の打撃点あるいは、任意のグリップ位置における衝突諸量を同様に求めることができる。

衝突力波形を実測波形に近く正弦半波で近似する

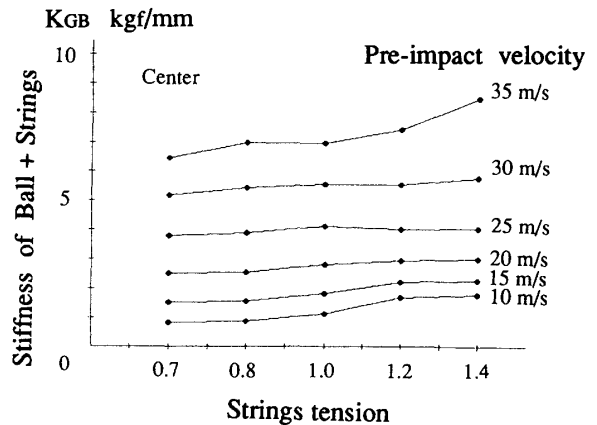


図6 ボール・ストリングス複合系の復原ばねこわさに及ぼすストリングス初期張力の影響(ラケット面中心での衝突速度が与えられた場合の計算値)

と、衝突力の最大値 F_{MAX} は

$$F_{MAX} = \pi F_{MEAN} / 2 \dots\dots\dots (6)$$

となる⁽³⁾。

図6~8の計算結果は、衝突速度が小さい10 m/sでは、ストリングスの張力が大きいほどボール・ストリングス複合系の復原ばねこわさおよび衝突力は大きく、接触時間は短くなるが、これらの差異は初期張力の差ほど大きくはないことを示している。また、一般プレーヤーの衝突速度に相当する25 m/sにおいて、初期張力の違いが複合系の復原ばねこわさ、衝突力、および接触時間にほとんど影響しないという結果は興味深い。さらに、衝突速度が35 m/sになると、ストリングス張力が標準張力の1.4倍の場合、標準張力の場合に比べてばねこわさおよび衝突力が大きくなるが、初期張力の接触時間に及ぼす影響は小さい。

すなわち、接触時間に関しては、衝突速度が15 m/s以下では張力の違いによる差異があるが、20 m/s以上になると、ストリングスの初期張力の違いによる影

響はあまり大きくない。

以上の結果は、ストリングスの初期張力の大小よりは衝突速度の大小のほうがはるかに大きく接触時間などの衝突諸量に影響することを示している。また、衝突速度によっては必ずしも初期張力が大きいから衝突力も大きいとは限らないことを示している。

接触時間はラケットの固有振動数と関連してフレームの応答に大きく影響するので、ラケットの物理特性がラケット性能に及ぼす影響を議論する場合には、衝突速度は重要なパラメータである。接触時間や反発性能に関する従来の多くの実験において矛盾する結果が見られるのは、衝突速度がパラメータとして考慮されていないことが原因であろう。

図9は、ストリングス張力が異なるラケットの接触時間の測定結果⁽⁴⁾を衝突速度に対してプロットしたものである。グリップを固定した中厚ラケットの面のほぼ中心部にボールを衝突させた場合の結果である。衝突速度が10 m/sに近いとき、ストリングス張力55 lbの場合の T_c の実測値約4.7~5.3 msに対して計算値は5.4 msであり、張力75 lb(1.36倍)の場合の実測値約4.3~4.7 msに対して計算値は5.1 msである。衝突速度20 m/sのときは、張力55 lbの場合の実測値約4 msに対して計算値は約3.85 ms、張力75 lb(1.36倍)の場合の実測値約3.7 msに対しては計算値も約3.7 msである。実測と計算に用いたラケット・フレームのシルエット(打球方向のフレームの形状)が多少異なること、実測値は万力でグリップを固定した場合であること(グリップ固定とグリップ解放の場合の反発係数は打球面中心近くでは大きくは変わらない⁽²⁾)、また、測定の分解能が0.3 msであることや実測値のばらつきを考慮すると、計算値は接触時間に関する特徴をかなり良く近似している。

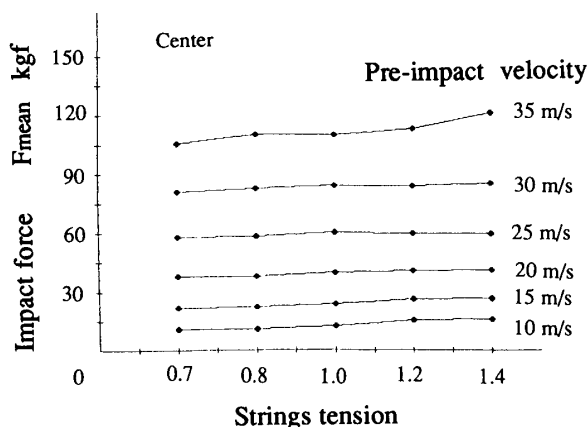


図7 衝突力に及ぼすストリングス初期張力の影響 (ラケット面中心での衝突速度が与えられた場合の計算値)

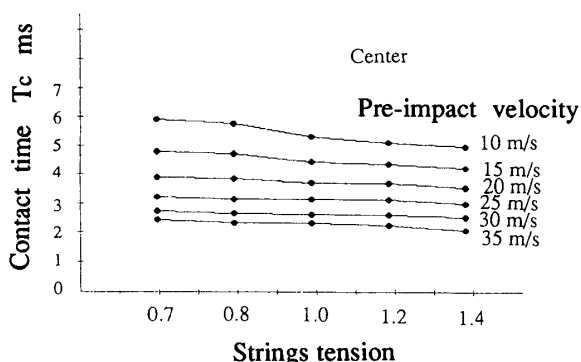


図8 接触時間に及ぼすストリングス初期張力の影響 (ラケット面中心での衝突速度が与えられた場合の計算値)

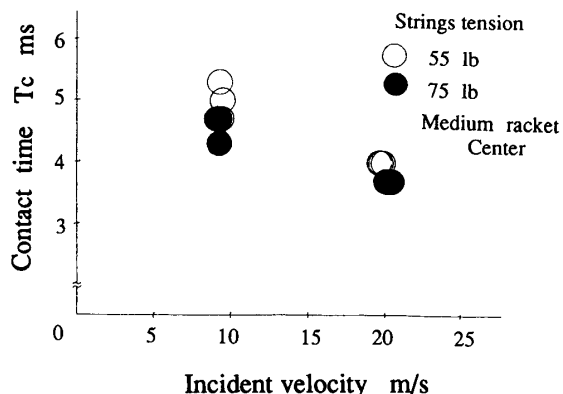


図9 ストリングス初期張力が異なるラケットとボールとの衝突における衝突速度と接触時間の測定値例

図10は、フォアハンド・ストローク実打における接触時間の実測値(5000コマ/秒)⁽⁶⁾と計算値を比較したものである。衝突速度26.1 m/s(未熟練者のフラット)のとき接触時間の実測値は3.4 ms, 衝突速度36 m/s(熟練者のフラット)のとき2.3 msであり, 計算値と良く合っている。

図11は、フォアハンド・ストローク実打におけるラケット・ハンドル(グリップ)の加速度の実測波形である。圧電形の小型加速度計の取付け位置はグリップ端から210 mmである。ストリングス張力の大きく異なるラケット(張力35 lbと60 lb)について比較したものであり, 上級プレーヤーが普通のスイング速度(強打ではない)ストリングス面の中心(センタ)で打撃した場合である。この両ラケットの仕様はストリングス張力以外は全く同じである。

ラケットの基本振動モード(2節曲げ)の節はほぼラケット面のセンタにあるから, センタで打撃した場合のフレーム振動は小さく, インパクトの瞬間の最大加速度はおもに衝撃(衝突の力積)によるものである。ストリングス張力60 lbで張ったラケットと35 lbで張ったラケットのインパクトの瞬間の衝撃加速度振幅の差はほとんどない。

この実打における結果は, 図7の計算結果, すなわち衝突速度が同じなら, ストリングス初期張力の違いほどボールとストリングスの間に作用する衝撃力の差異は現れないという結果とよく一致している。

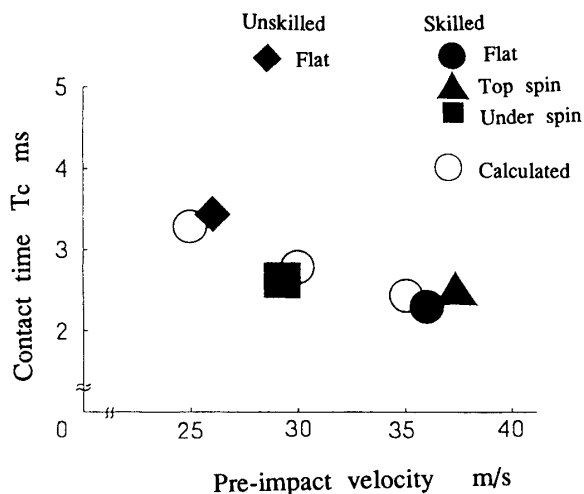


図10 フォアハンド・ストローク実打における接触時間の実測値と計算値の比較

6. ストリングス初期張力の異なるラケットの振動とフレーム振動によるエネルギー損失

ラケットとボールとの衝突力波形と打撃点(接触領域)を与えると, コンピュータ援用により実験的に同定したラケットの振動モデルを用いてラケットの任意の点の応答をシミュレーションできる⁽²⁾⁽³⁾⁽⁶⁾。

ラケットの振動の大きさには, 力積の大きさだけでなく, ラケットの固有振動数と関連して接触時間と衝突力波形が影響する。したがって, 衝突におけるフレームの振動によるエネルギー損失は, 衝突速度と打撃点の位置で決まることになる。振動モードの節との関連で, センタ打撃では, フレームの振動によるエネルギー損失はほとんどないが, 先端や根元で打撃した場合はエネルギー損失は大きい。

センタ打撃の場合の反発係数の実測値は, ラケットフレームの振動を無視した場合の計算値に極めて近く, センタを外れた場合の実測値は振動を無視した場合の計算値より低下する。これは, 振動によるエネルギーの損失の割合が大きいほど, 反発係数が低下することを示している⁽²⁾。

図12は, ストリングス張力が異なる2本のラケッ

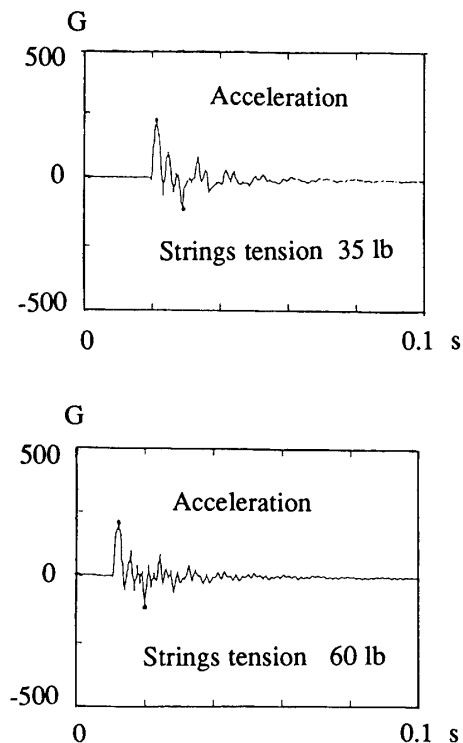


図11 フォアハンド・ストローク実打におけるラケット・ハンドルの加速度波形(ストリングス初期張力の異なるラケットのセンターで打撃した場合)

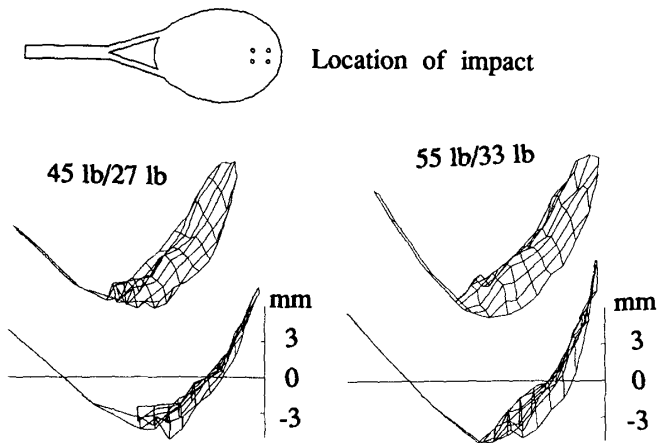


図 12 スtrings張力が異なるラケットの先端打撃における応答振幅予測(ラケット質量 366 g, 全長 685 mm, 重心位置はグリップ端から 325 mm, 衝突速度 30 m/s)

トについて、ボールが衝突速度 30 m/s でラケット面のかかなり先端に衝突した場合のラケットの振動振幅を予測したものである。ラケットを斜めから見た 3 次元的な図と側面からみた図を示している。Strings張力が縦 45 lb/横 27 lb の場合と縦 55 lb/横 33 lb の場合とを比較したものである。両ラケットの打球面積は約 688 cm², 質量 366 g, 全長 685 mm, 重心位置はグリップ端から 325 mm である。中心を外れて先端で衝突した場合は、Stringsを強く張ったラケットのほうが緩く張ったラケットより、インパクトにおける応答変位振幅は大きい。

図 13 は、衝突速度 (30 m/s) と打球面上の打撃点を与えて、Strings張力が異なるラケット (図 12 のラケットと同じ) のフレーム振動によるエネルギー損失を計算した結果を示す。縦軸は衝突前の運動エネルギーに対するフレーム振動によるエネルギー損失の割合を示し、横軸は打撃点の位置を示す。ラケット面の中心付近で打撃する場合は、フレームの振動によるエネルギー損失に及ぼすStrings初期張力の影響はほとんどなく、打撃点が中心を大きくはずれるとStringsを強く張ったラケットのエネルギー損失が大きいことを示している。

衝突におけるエネルギー損失と反発係数は密接に関連するので、ボールとStringsの衝突、衝突におけるラケットの回転によるエネルギー損失、フレームの振動によるエネルギー損失を考慮すれば反発係数分布の予測が可能になる。反発係数分布の計算値が実測値によく一致する⁽⁷⁾ という結果を得ているが、その解析については統報に述べる。

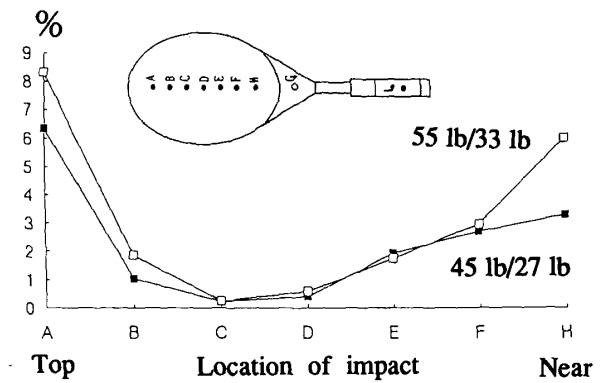


図 13 Strings初期張力が異なるラケットのフレーム振動によるエネルギー損失(横軸は打撃点, 衝突速度 30 m/s の場合)

7. 結 論

Strings張力が衝突挙動や反発性能にどのように影響するのかというメカニズムは従来ほとんど不明であったが、ボールとラケットの非線形衝突現象に支配的な諸因子を考慮した近似モデルを用いて、衝撃力と接触時間などの衝突諸量およびラケットの振動応答におよぼすStrings張力の影響を予測し、実測値とも比較した。おもな結果を要約すると、以下のようになる。

(1) Stringsもボールも変形が増大すると硬くなるという非線形復原力特性により、Stringsの初期張力が衝突力や接触時間などの衝突諸量に及ぼす影響は複雑であり、Stringsの初期張力の大小よりも衝突速度の影響のほうが大きい。

(2) 衝突速度が非常に小さい場合は、Strings張力が大きいほど衝突力は大きく、接触時間も短くなるが、張力に単純には比例しない。

(3) 一般のプレーヤーのプレー時に相当する衝突速度では、Strings張力は衝突力と接触時間に微妙に影響するが、張力の違いによる差は小さい。このことは実打における結果からも確かめられた。

(4) 衝突速度が非常に大きい場合は、Strings張力を非常に強く張ると衝突力は大きくなり、接触時間もやや短くなるが、標準張力 (55 lb) の 1.2 倍以下では張力の影響は小さい。

(5) ラケット面の中心 (センタ) で打撃した場合は、ラケット・フレームの振動は小さく、Strings張力の強弱はフレームの振動の大小にほとんど影響しない。

(6) しかし、ラケット面の中心を外れて (オフ・センタで) 打撃した場合は、Stringsを強く張るほ

どラケット・フレームの振動は大きく、振動によるエネルギー損失も大きい。

(7) すなわち、ストリングス張力の強弱は、ボール・ストリングス間に作用する衝撃力にはあまり影響せず、フレームの基本振動モードの節を外れたオフセントラ打撃の場合のラケットの振動に大きく影響する。

上記の結果は、経験的あるいは実験的事実をよく説明する。

終りに一部資料の提供をいただいたヤマハ(株)スポーツ事業部および日本テニス研究会の諸氏、そして日頃ご討論いただいている日本スポーツ産業学会スポーツ工学分科会、精密工学会スポーツ用具のダイナミッ

クス専門委員会の諸氏に厚くお礼申し上げます。また、実験にご助力いただいた卒研生諸君に深く感謝する。

文 献

- (1) Groppe J. L., ほか 3 名, *Int. J. Sport Biomech.*, 3(1987), 40.
- (2) 川副, 機論, 58-552, C(1992), 2467.
- (3) 川副, 第 69 期全国大会講論集 Vol. C, No. 910-62(1991), 187.
- (4) 三浦・ほか 6 名, 日本テニス研究会第 2 回テニス研究会, (1991), 17.
- (5) 永田, *J. J. Sports Sci.*, 2-4(1983), 245.
- (6) 川副, 機論, 56-526, C(1990), 1511.
- (7) 川副, 1992 年度精密工学会春季大会シンポジウム資料, (1992), 14.