

テニスのインパクトにおけるラケット・ハンドルと 手首関節の振動*

川 副 嘉 彦*¹, 友 末 亮 三*²

Impact Vibrations of a Racket Handle and the Wrist Joint in Tennis

Yoshihiko KAWAZOE and Ryoso TOMOSUE

The performance of a tennis racket concerning the shock vibrations of the racket handle during impact is one of the important factors for the optimum design of rackets. This paper investigates the mechanism of shock vibrations caused by the impact between a ball and a racket on the basis of the approximate nonlinear impact model and the vibration model of the racket, identified using the experimental modal analysis, and gives physical explanations for the recorded waveform of measured acceleration of the racket handle and the wrist joint when a male tournament player hits flat forehand drives. The results show that the shock vibrations at the racket handle are composed of the reaction force and the vibrations of the racket frame when the ball hits the strings, and also show that there is no reaction force when the ball hits the center of percussion on the racket face. Furthermore, the reaction force due to ball-racket impact and the vibrations at the racket handle are rather small when the ball hits near the center of the racket face with the normal grip position.

Key Words: Sports Engineering, Tennis Racket, Impact, Shock, Vibrations, Experimental Modal Analysis, Center of Percussion, Nonlinear Restoring Force, Wrist Joint, Tennis Elbow

1. 結 言

人間の腕によるスイングとラケットのフレーム・ストリングス、およびボールの間の相互作用は非線形衝突を伴う力学系として興味ある対象である。従来このような問題について工学的な取り組みは少なく⁽¹⁾、物理現象として不明な点が多い。ラケットの性能は、ボールとラケットの衝突現象(インパクト)と密接に関連しており、設計の観点からもラケットの物理特性とラケット性能との関係については不明な点が多い。

著者の一人は前報までに^{(2)~(6)}、衝突におけるボールの回転(スピンの)がない場合のラケットの反発性能に関して、ボールとストリングスの非線形復原力を考慮した近似衝突モデルによりラケットの応答を求め、フレームの振動モードを考慮したラケットの反発係数の予測法を示した。

本論文では、反発性能とともに重要なラケット・ハンドルの衝撃と振動のメカニズムを明らかにし、実打実験におけるラケット・ハンドルおよび手首関節の振

動加速度の測定波形に物理的説明を与える。

テニスボールとラケットの衝突(インパクト)において、接触しているボールとストリングス間に衝撃力が作用し、ラケットを支えている手あるいは、腕に伝わる。

ラケットを支えることによる衝撃反力のほかに、ラケット・フレームは衝撃により振動するから、振動による力が手に伝わる。

プレイヤーとラケットを結んでいるのは、手で支えたラケットのグリップの部分だけだから、プレイヤーはグリップに伝わる衝撃と振動によりインパクトを感じることになる。グリップの衝撃振動は、打球感やテニス肘などの傷害とも関連するはずである。

ボールとストリングスが接触している時間は非常に短く(衝突速度20 m/sのとき約4 ms, 衝突速度30 m/sのとき約3 ms程度)、ボールが離れた後は、残留振動が残る⁽²⁾が、本論文ではおもにインパクトの瞬間の衝撃振動を考察する。手に伝わる衝撃・振動の大きさは、ラケットの特性のほかに打撃点とグリップを握る位置により違ってくる。

* 平成3年11月15日 第4回計算力学講演会において講演、原稿受付 平成4年8月26日。

*¹ 正員、埼玉工業大学(〒360-02 埼玉県大里郡岡部町普濟寺1690)。

*² 東京大学教養学部(〒153 東京都目黒区駒場3-8-1)。

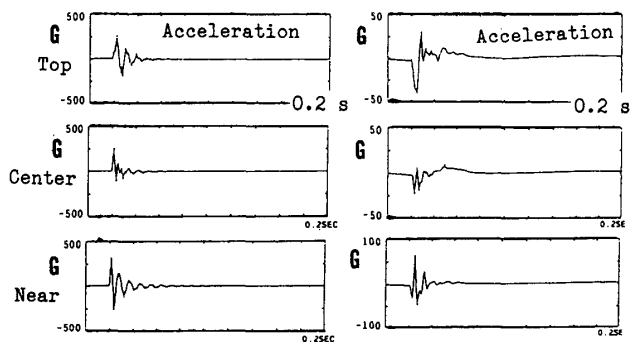
2. 実打におけるラケット・ハンドルと手首の 衝撃振動加速度波形

図1(a), (b)は, ある上級プレーヤーがフォアハンド・ストロークでボールを打撃した場合の, ラケット・ハンドル(グリップ)と手首関節の加速度波形の実測値である。実打の場合は握ったところのラケットの加速度を測定するのが難しいので, ラケットの首部(スロート)に近い位置(グリップ端から約210 mm)の加速度を測定している。したがって, この場合のグリップの測定値は, ラケットを握った部分の加速度とは多少異なる。ラケットは質量: 342 g, 全長: 685 mm, 重心位置はグリップ端から310 mm, 重心まわりの慣性モーメント: 0.014 kgm², 打球面積: 100 in² (645 m²), フレーム厚さ: 約30 mm, スtrings張力60 lb (267 N), 2節曲げ固有振動数: 142 Hzである。

図1(a), (b)の波形において, 加速度の最初のピークのところが衝突の瞬間で, 衝突による衝撃反力によるものとフレームの振動によるものが重なっている。そして, これに続く振動は, ボールが離れた後の残留振動である。手首の加速度波形にはスウィングによるゆっくりとした小さい変動もみられる。

図1(a)において, ラケット面中心で打撃した(センター打撃)の場合は中心をはずれた先端と根元で打撃した(オフ・センター打撃)場合に比べて, ラケット・グリップ(グリップ端から210 mmの位置)の振動加速度は小さいが, インパクトの瞬間の最大値は先端打撃の場合とあまり変わらない。また, 加速度の最初のピーク値(最大値)は, 根元打撃の場合の方が先端打撃の場合より大きい。

次に図1(b)において, 手首の加速度の方向はラケ



(a) ラケット・ハンドル

(b) 手首

図1 フォアハンド・ストローク実打におけるラケット・ハンドルと手首関節の衝撃振動加速度波形(ラケット面の先端, 中心, 根元で打撃した場合)

ット・グリップ [図1(a)] の場合と逆になっており, 波形はグリップの波形とかなり似ている。これは, 明らかにラケットの衝撃振動が手首に伝わっていることを示している。先端打撃の場合, 手首の衝撃加速度のピークとピークの差(最大変動幅)は, 重力加速度の約70倍である。

素振りの(ボールを打撃しないでラケットを振る)場合の手首やひじの加速度の実測値は非常に小さく, インパクトに伴う衝撃振動はテニス肘などの傷害とも関連しているはずである。実測波形については, 後に考察する。

3. インパルス・ハンマで打撃した場合の ラケット・グリップの衝撃振動波形

図2(a), (b)は, インパルス・ハンマでラケットのストリングス面を打撃したときのハンマとストリングス間に作用する衝突力とグリップ(グリップ端から70 mm)の衝撃・振動加速度の実測波形である。図2左半の番号は打撃点を示す。両ラケットとも全長: 680 mm, 公称打球面積: 626 cm² (97 in²), スtrings張力: 55 lbである。図2(a)はフレームの剛性が大きいラケット(厚ラケ)であり, 質量: 370 g, 素材: 高弾性カーボン, 基本固有振動数: 215 Hzである。図2(b)は標準的な剛性のラケット(ノーマル・ラケット)であり, 質量: 360 g, 素材: ファイバガラス・グラフィット・ケブラ, 基本固有振動数: 122 Hzである。図2(a)のラケットは図2(b)のそれの約4倍近くの剛性を持っている。加速度計を取付けた位置(グリップ端から70 mm)は, グリップを握ったときの手の大きさを100 mmとすると, ストロークのときの標準的な握りの位置のほぼ中心に相当する。

ハンマでストリングス面を打撃した場合は, ラケットでボールを打撃した場合に比べて, 衝突時間(インパクト・タイム)が長くなるので, 振動の振幅は小さめになっている⁽³⁾。固有振動数が高いラケットの振動は特に小さめに出るので, ボールとストリングスが接触している間のグリップの衝撃が, 打撃点によりどう違うかが図2(a)の場合はよくわかる。

インパクトの瞬間のグリップ(グリップ端から70 mmの位置)の衝撃は, 中心から約40 mmだけ根元側の点No. 49を打撃したとき最も小さく, ほとんど衝撃はない。これがいわゆる打撃の中心である。この打撃の中心から打撃点が離れるほど衝撃は大きい。

また, 先端で打撃した場合と根元で打撃した場合とは, 実打実験における手首(グリップ端から70 mmの位置に近い)の衝撃波形と同じく, グリップの衝撃

の向きが逆になっている。

オフセンタ打撃では、衝突の衝撃とフレームの振動が重なって、波形が複雑である。ハンマ打撃では実打の場合より接触時間が長いために、特に固有振動数の高い厚ラケ[図2(a)]の振動は小さい。しかし、衝突速度が大きくなり、接触時間が短くなると、厚ラケの方がノーマルより振動加速度が大きくなる。これについては後に改めて考察する。

グリップ端から70mmの位置の振動加速度は、基本の2節曲げ振動の節に相当する点No.43を打撃したとき最も小さい。先端や根元で打撃した場合は2節曲げ振動の腹に近いので、グリップの振動も大きい。厚ラケおよびノーマル・ラケットの顕著な振動数は2節曲げ振動である。

また、打撃面上の2節曲げの節をはずれてオフセンタで打撃しても、グリップを握る位置がグリップ上のもう一つの節に近ければ、振動は小さくなる。図2(a)のラケットのグリップ上の節は、グリップ端から204mm、図2(b)のラケットの節は129mmの位置にある(図10参照)。グリップ上の振動の節が手の位置に近いほどグリップの振動に関しては望ましいということになる。

2節曲げの節に相当するセンタで打撃したときは、打撃点は3節曲げとストリングスの振動の腹になるが⁽²⁾、3節曲げとストリングスの振動モードの影響は小さい。しかし、衝突速度が大きくなると、接触時間が短くなるのでこれらのモードの加速度振幅に及ぼす影響は無視できなくなる。

4. インパクトの瞬間にラケットを支えた手に作用する衝撃反力の解析

4.1 ラケット面上の衝撃に対するグリップの衝撃反力

図3の下半はボールとストリングスの衝突における衝撃 S とラケットを支える点に作用する衝撃反力 S_R を示している。衝突においてボールとストリングスとが接触時間 T_c の間お互いに作用しあう力を $F(t)$ 、 t を時間とすると、衝撃 S は、いわゆる力積

$$S = \int F(t) dt \dots\dots\dots (1)$$

であり、衝突解析⁽³⁾から求めることができる。

いま、ボールと静止したラケットが正面衝突し、打撃点に衝撃 S が作用するとして、ラケットの重心と打点の距離を a 、重心と支点(グリップ位置)の距離を b 、ラケットの質量を M_R 、ラケットの重心まわりの慣性モーメントを I_G 、衝突直後の重心位置の並進速度を V_G 、衝突直後の角速度を ω とすれば、ラケットに対する並進運動の運動量および重心まわりの角運動量の釣合いは以下のように表せる。

$$S - S_R = M_R V_G \dots\dots\dots (2)$$

$$Sa + S_R b = I_G \omega \dots\dots\dots (3)$$

さらに、幾何学的関係から

$$V_G = b\omega \dots\dots\dots (4)$$

と表せる。式(2)~(4)から V_G と ω を消去すると、衝撃反力 S_R と衝突点における衝撃力 S の比は以下のように表せる。

$$S_R/S = (I_G - M_R ab) / (I_G + M_R b^2) \dots\dots\dots (5)$$

図3上半は、図2のラケットについてグリップ端から70mmの位置の衝撃反力が、打撃点によりどう違うかを式(5)を用いて計算したものである。縦軸はストリングス面上の衝撃力 S に対する握りの位置(グリップ)での衝撃反力 S_R の比であり、横軸は、ストリングス面上の打撃点の位置である。ノーマル・ラケットは打撃面の幾何学的中心(センター)から約50mm、厚ラケはセンターから約40mmだけ根元側の打撃点において衝撃力 S_R/S が最小(零)となり、この点から離れるほど S_R/S は大きくなる。衝撃反力 S_R/S が零となる点が、いわゆる打撃(衝撃)の中心であり、この点で打球すると、手に衝撃反力は作用しないことになる。現実のストロークでは、打撃点も手の位置も点ではなく領域だから、手が受ける衝撃反力は零にはならない。

また、図1(b)の手首(グリップ端から70mmに相当するとみなす)における衝撃加速度および図2のハンマ打撃による実験における衝撃加速度は、先端での

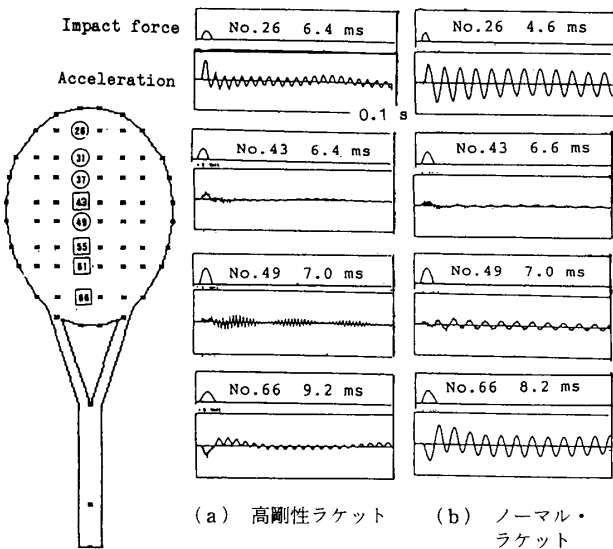


図2 インパクト・ハンマでストリングス面を打撃した場合のグリップの衝撃振動加速度波形

衝突と根元での衝突とで向きが逆になっていた。これは、先端で打撃すると、手はボールがはね返る方向に衝撃反力を受け、根元で打撃すると、手はボールに押されるような衝撃反力を受けることを意味していることが図3からわかる。

図4は、ラケット・ハンドル（グリップ）を握る位置と打撃の中心位置の関係を求めたものである。グリップ端からの距離70mmに対する打撃の中心位置は、センタから約40mm根元側にある。したがって、グリップを拘束されていない静止ラケットにボールがラケット面のセンタから約40mmの位置で衝突すると、ラケットはグリップ端から70mmの位置を中心として回転することになる。逆に、ラケット面の中心（センタ）を打撃したときに衝撃反力を感じないグリップ位置は、グリップ端から約110mmの位置になる。センタで打撃した場合は、グリップを握る位置がこの110mmの位置から離れるほど衝撃反力は大きくなる。

図5は、ラケット面の先端、中心、根元で打撃する場合に、グリップの位置の違いが衝撃反力の大きさにどう影響するかを計算したものである。先端で打撃する場合はラケットを短く持つほど、根元側で打撃する場合はラケットを長く持つほど、センタで打撃する場合は、やや短めに持つと衝撃反力は小さいことになる。標準的なグリップ位置70mmでは、センタ近くで打撃する限り、衝撃反力は大きくない。

図3~5とラケット・フレームの1次（2節曲げ）振

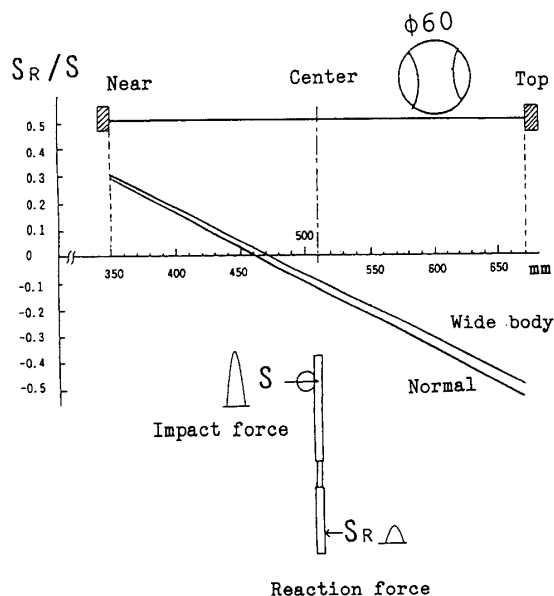


図3 ラケットを支えた手に作用する衝撃反力の計算値（打撃点の衝突力に対するグリップ端から70mmの位置の衝撃反力の比）

動から図1(a), (b)の実打における波形の特徴を説明することができる。

図1(a)では、インパクトの瞬間のグリップの衝撃・振動の最大値が、先端打撃とセンタ打撃であまり変わらず、また根元打撃で最も大きかった。図1(a)のラケット・グリップの加速度は、グリップ端から約210mmの位置で測定している。図5を見ると、この位置では、インパクトの瞬間のグリップの衝撃は根元打撃、センタ打撃、先端打撃の順で大きい。フレーム振動はセンタ打撃で小さく、先端打撃で大きい⁽²⁾⁽³⁾から、結

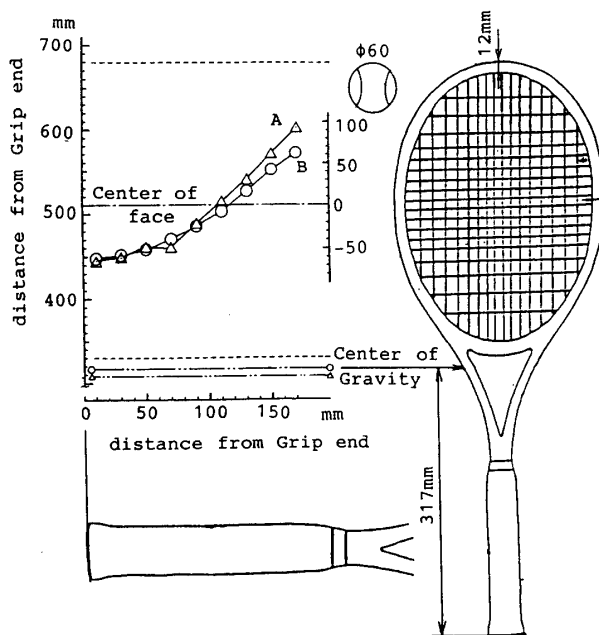


図4 グリップ位置に対する打撃の中心（△：ノーマルラケット、○：高剛性ラケット）

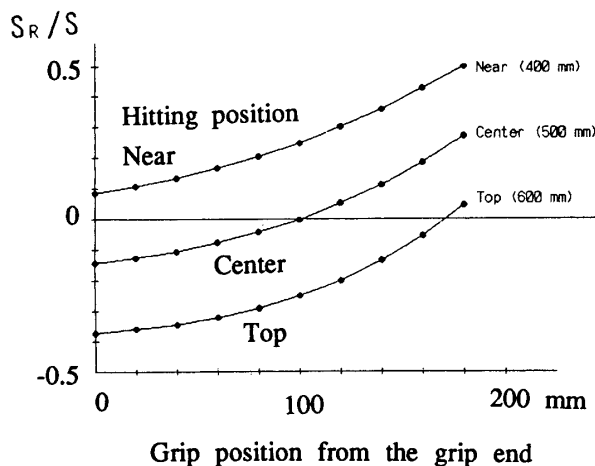


図5 手に作用する衝撃反力の計算値（グリップ位置の衝撃反力とラケット面の先端、中心、根元での衝突力の比）

果として先端打撃とセンタ打撃の場合のグリップの最大衝撃振動が同じ程度になっていると理解できる。

また、図1(b)においてラケットを握っている手の中心位置がおおよそグリップ端から70mmとみなすと、センタで打撃したときは衝突による衝撃反力もフレームの振動による加速度も、手首の位置では小さいはずであり、現実に図1(b)の波形はそのようになっている。

4.2 ラケット面上の衝撃力⁽³⁾⁽⁶⁾ 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換算した換算質量を 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とラケットそれぞれの衝突後の速度 V_B 、 V_R 、衝突における力積 $\int F(t)dt$ を求めることができる。

また、ラケット・フレームの剛性と振動系の減衰が接触時間に及ぼす影響は非常に小さいから、接触時間 T_c は、 m_B 、 M_r およびボール・ストリングス複合系の非線形ばね剛性 K_{CB} の関数とみなせる。ばね剛性 K_{CB} の値はインパクトの間刻々と変わるが、衝突速度と衝突点に対する力積と接触時間は変えないで、接触時間 T_c 間の等価的な力 F_{MEAN} を考え、 F_{MEAN} に対応するばね剛性を K_{CB} とすると、力積と接触時間から、衝突速度に対する等価的衝撃力 F_{MEAN} と対応する K_{CB} の関係を求めることができる。

一方、ボール・ストリングス複合系の復原力 F_{CB} およびばね剛性 K_{CB} の変形量に関する特性から、 F_{CB} と K_{CB} の関係を求めることができる。

復原力 F_{CB} とばね剛性 K_{CB} の関係式と、衝突速度 ($V_{Bo} - V_{Ro}$) および K_{CB} の両者の関数である F_{MEAN} を与える式とを連立させると、衝突速度 ($V_{Bo} - V_{Ro}$) が与えられた場合の等価的な衝撃力 F_{MEAN} とボール・ストリングス複合系の復原ばね剛さ 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。

図6は、ラケット面中心で衝突した場合の衝突速度に対する上記の等価的衝撃力 F_{MEAN} と複合系の等価的ばね剛性 K_{CB} の決定法を図式的に示したものであり、交点が各衝突速度における F_{MEAN} と K_{CB} に相当する。

図7は、衝突速度が与えられた場合の、ストリングス初期張力(標準張力55lbを1.0とする)に対する等価的衝撃力 F_{MEAN} の計算例である。この場合は、衝突点はラケット面のほぼ中心であり、ラケット・ハンドル上の握りの中心はグリップ端から70mmとしているが、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。衝撃力

波形を実測波形に近く正弦半波パルス

$$F(t) = F_{MAX} \sin(\pi t / T_c) \quad (0 \leq t \leq T_c) \quad \dots (6)$$

で近似すると、衝突力の最大値 F_{MAX} は

$$F_{MAX} = \pi F_{MEAN} / 2 \quad \dots (7)$$

となる⁽⁶⁾。

図7の計算結果において重要なことは、衝突速度が小さい10m/sでは、ストリングスの初期張力が大きいほど衝撃力はやや大きくなるが、一般プレーヤーの衝突速度に相当する25m/sでは、初期張力の違いは衝撃力にほとんど影響しないということである。これは、前報⁽³⁾に示したように、ボールとストリングスの強い非線形復原力特性によるものである。

図8は、フォアハンド・ストローク実打においてス

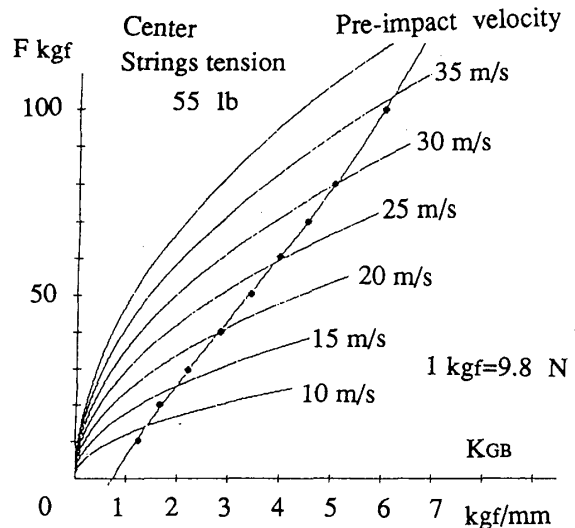


図6 インパクトにおける衝突速度に対する等価的衝撃力とボール・ストリングス複合系の復原ばね剛さの決定法(ラケット面中心で打撃した場合)

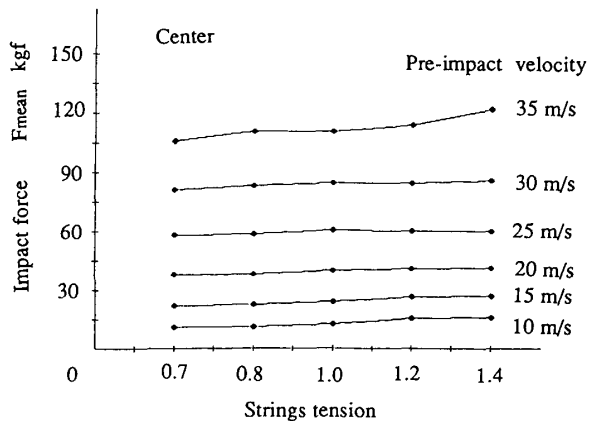


図7 衝撃力に及ぼすストリングス初期張力の影響(ラケット面中心での衝突速度が与えられた場合の計算値)

トリングス張力の大きく異なる2本のラケット（張力35 lbと60 lb）のグリップの加速度波形を比較したものである。上級プレーヤーが普通のスイング速度（強打ではない）で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初期張力以外は全く同じであり、応答加速度の測定位置はグリップ端から210 mmの位置である。

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。これは、従来理由が不明であったことであり、一般に誤解されていることでもある。

センタをはずれて打撃した場合は、ストリングス張力が大きいほどフレームの振動は大きい⁽⁵⁾ので、グリップの振動も大きくなる。詳細な検討は別報に述べる。

図9は、フォアハンド・ストローク実打における接

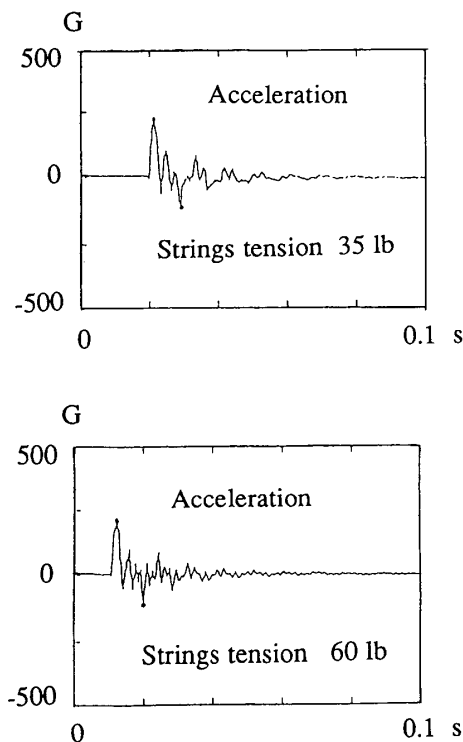


図8 フォアハンド・ストローク実打におけるラケット・ハンドルの加速度波形（ストリングス初期張力の異なるラケットのセンタで打撃した場合）

触時間の実測値（5 000 コマ/秒）⁽⁷⁾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、接触時間に関しても計算値は実測値と良く合っている。

5. ラケットの振動とグリップの振動加速度

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振幅を予測できる⁽²⁾⁽³⁾⁽⁶⁾。

式(6)の実フーリエ変換（ f は振動数 Hz）は式(8)のようになり、正弦半波パルスで近似した衝突力の最大値 F_{MAX} 、接触時間 T_c の場合の周波数領域での衝撃力成分を表す。

$$S(f) = \frac{2F_{MAX}T_c}{\pi} \left| \frac{\cos(\pi f T_c)}{1 - (2f T_c)^2} \right| \dots\dots\dots(8)$$

したがって、ラケット面上の点 j に $S_j(\omega_k)$: $\omega_k = 2\pi f_k$ なる衝撃力が作用した場合のラケット上の点 i における応答変位振幅の和 X_{ij} は、

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^n |r_{ijk} * S_j(\omega_k)| \dots\dots\dots(9)$$

と近似できる。ただし、 k : モード ($1 \sim n$)、 r_{ijk} は、任意の点 i と j の間の k 次の振動モードのレジデュール（留数）、 $S_j(\omega_k)$ はラケット面上の点 j に作用する k 次のモードに対する衝撃力成分である。正弦波振動を仮定すれば、加速度振幅が予測できる。

プレーヤーのスイングをラケットの境界条件としてどう与えるかということも未解決の問題であるが、手

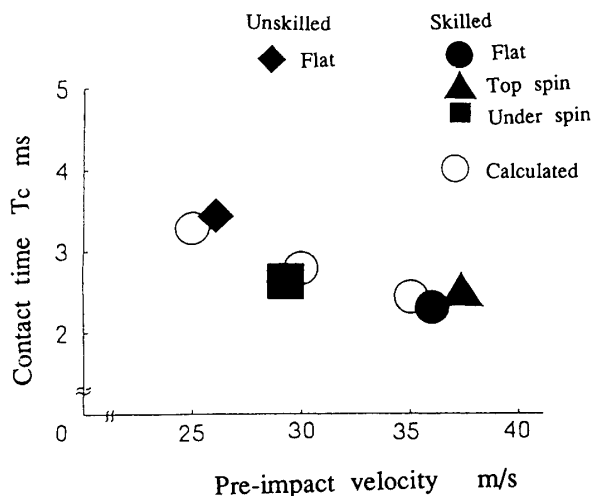


図9 フォアハンド・ストローク実打における接触時間の実測値と計算値の比較

でラケットを支えた場合の振動モードには、万力固定のとき現れる低い振動数の片持ちモードは現れず、グリップ解放(自由)の振動モードによく似ている。手持ちの場合はグリップ解放に比べて固有振動数が少し下がるが、グリップを腕で支えた場合とグリップを解放した場合とでは、振動モードのラケット面上の節の位置はほとんど変わらない⁽²⁾⁽⁴⁾。グリップ解放(自由)の状態および手でしっかりラケット・ハンドルを握った状態での標準的ノーマル・ラケットと剛性を高めた厚ラケについて実験モード解析により求めた基本振動モードを図10と図11に示す。白と黒の境界が振動の節を表す。節にボールが当たった場合は、振動は非常に小さい。

図12は、衝突速度が10, 20, 30 m/sの場合について、極端な先端で打撃したときの(ラケットは手首周りに回転)振動加速度振幅の大きさを計算したものである。ラケットはノーマルと厚ラケである。衝突速度が速くなると、ラケットを握るところの振動加速度も大きくなる。また、衝突速度が大きくなるほど、剛性の高いラケットのほうがグリップの振動加速度は大きくなる。衝突速度30 m/sのとき、グリップの加速度振幅は、ノーマルは重力加速度(9.8 m/s²)の約150倍、厚ラケは約250倍である。

グリップ端から約200 mmのところではノーマルのほうが大きく、重力加速度の約300倍、厚ラケは約150倍である。図1(a)の実打波形において先端で打撃した場合のグリップ(グリップ端から210 mm)の加速度は、重力加速度の約250倍になっている。図5を見ると、先端打撃の場合、グリップ端から約200 mmの位置ではインパクトの瞬間の衝撃反力は小さいから、先端で実打した場合の図1(a)の加速度のピーク値は、おもにフレームの振動によると推測できる。

6. 手が感じる打球感

フレーム剛性の高い厚ラケは、ボールとストリングスの接触時間が短いように感じるとか、球離れが良い

と感じるとかよく言われる。また、ストリングスをゆるく張ると、接触時間が長くなるから衝撃力も小さくなるという説明も見かける。しかし、これらのことは実証されてはおらず、現実のストローク程度の衝突速度における実測結果や計算結果と矛盾する⁽³⁾⁽⁵⁾。

グリップの衝撃加速度の実測波形を見ると、明らかに衝突による衝撃とフレームの振動が重なっており、したがって、手が感じる接触時間の長短や衝撃振動の大小は、実際の接触時間や打球面上の衝撃力の大きさとは異なるはずである。剛性の高い厚ラケは接触時間が短いように感じるのは、剛性の高いラケットはフレームの振動周期が短いからであり、また、ストリングスを強く張ったラケットは衝撃力が大きいように感じるのは、ストリングスを強く張ったラケットはセンタをはずれた打撃においてフレームの振動が大きいからであろう。センタで打撃した場合は、フレームの振動は小さいので、フレーム剛性やストリングス初期張力

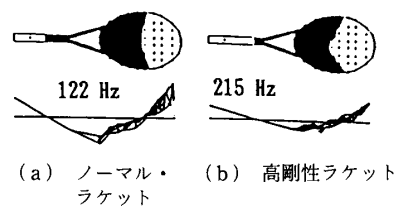


図10 グリップ解放(自由)のラケットの基本振動モード、(a)ノーマル・ラケット、(b)高剛性ラケット

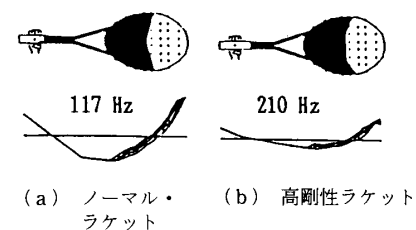


図11 グリップを手でしっかり支えた場合のラケットの基本振動モード、(a)ノーマル・ラケット、(b)高剛性ラケット

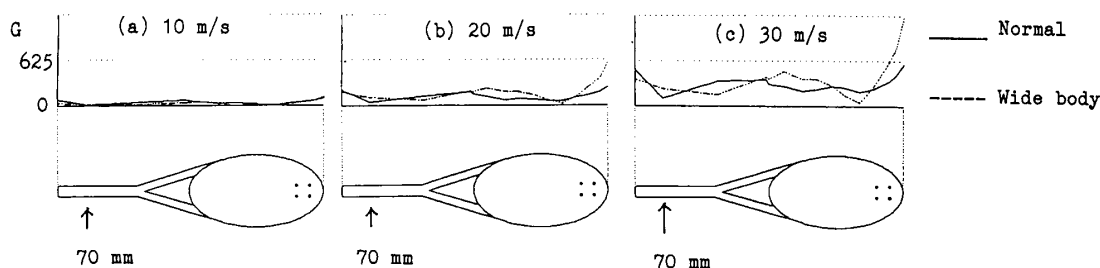


図12 先端で打撃した場合のフレームの振動加速度振幅分布の計算例(衝突速度30 m/s, ノーマル・ラケットと高剛性ラケット)

の影響は小さい。

7. 結 論

ラケットハンドル(グリップ)の握りの位置の衝撃・振動のメカニズムを明らかにし、上級プレーヤーの実打におけるラケットおよび手首の加速度の実測波形に物理的説明を与えた。おもな内容を要約すると以下のようになる。

(1) インパクトの瞬間のグリップの衝撃振動は、衝突による衝撃反力とフレームの振動によるものが重なっている。

(2) 通常の標準的グリップ位置に対する打撃の中心は幾何学的中心よりやや根元側にあり、打撃の中心で打撃したときインパクトの衝撃反力はほとんどない。

(3) 先端で打撃したときと根元で打撃したときでは、衝撃反力は反対向きに作用する。

(4) 衝突速度が増すと、ボールとストリングスは硬くなるので、ストリングス面上の衝撃力は急激に大きくなり、センタ打撃ではストリングス初期張力やフレーム剛性が衝撃振動に及ぼす影響は小さい。

(5) 標準的な質量分布(バランス)をもつラケットでは、先端で打撃する場合はラケットを短く持つほど、根元で打撃する場合はラケットを長く持つほど衝撃は小さく、センタで打撃する場合は、やや短めに持つと衝撃は小さい。センタ近くで打撃する限り、標準

的なグリップ位置では衝突による衝撃反力は小さい。

(6) グリップの振動加速度振幅は振動モードとの関連でセンタで打撃する場合は小さい。

(7) フレーム剛性を高めたラケットのグリップ振動加速度は、衝突速度が小さい場合は振幅が小さいが、衝突速度が大きくなると、むしろ振幅は大きくなる。

実打実験に関しては、さらに物理特性の異なるラケット数種について詳細な検討をしているので別の機会に報告する。

終わりに実打実験に多大な尽力をいただいた日本テニス研究会の諸氏に厚くお礼申し上げる。また、日頃ご討論いただいているヤマハ(株)スポーツ事業部の諸氏、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クス専門委員会および実験にご助力いただいた埼玉工大・平成3年度4年生 前川智之、緑川透、松田洋尚、宮川康弘、風晴慶吾の各君に深謝する。

文 献

- (1) 国枝, 機誌, 90-818 (1987), 38.
- (2) 川副, 機論, 56-526, C (1990), 1511.
- (3) 川副, 機論, 58-552, C (1992), 2467.
- (4) Kawazoe, Y., *Theoretical and Applied Mechanics*, 41 (1992), 3.
- (5) 川副, 機論, 59-558, C (1993), 521.
- (6) 川副, D & D シンポジウム 講論集, No. 920-55(I) (1992), 77.
- (7) 永田, *J. J. Sports Sci.*, 2-4 (1983), 245.