

特集 素材とスポーツ

テニスラケットの素材・構造と性能

川副 嘉彦

KAWAZOE Yoshihiko: 埼玉工業大学工学部

Key words: テニスラケット, 素材, 構造, パワー, 安定性, 打球感

1. ラケットとパフォーマンス

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めざす段階に至っている。

ラケットの進歩がテニスのプレイ・スタイルを変えたと言われている。しかし, ラケットの性能評価は, 現状では, 経験の深いテスターやプレイヤーを介して行われており, 性能評価に関する用語や表現には物理的定義が与えられていない場合が多い。

プレイは用具で変わる。逆に, 用具の性能はプレイヤーによって変わる。したがって, 用具とプレイヤーの相互作用によってスポーツとしてのパフォーマンスが向上する。図1は, プレイの状況・環境によってもパフォーマンスは異なってくることを示すスポーツ用具性能評価が難しい理由である。

ラケットに求められる基本的な性能は, パワー, コントロール, 打球感と一般にいわれている。またこれらの他に, 「玉離れが良い」, 「ホールド感がある」, 「面の安定性が良い」など, 微妙な性能の違いを評価する表現がいろいろある。一方, テニス肘をはじめとする障害と用具の問題がある。肘の痛みの原因は複雑であり, ほとんど未解明であるが, テニス肘になりやすいラケットが存在することは, 多くのプレイヤーが経験的に認めている。

しかし, 用具の性能評価に関してプレイヤーやテスターが用いる感覚用語とラケットの物理特性との関係については不明な点が多く, メーカーのカatalogやテニス専門誌の記事などにも誤解や矛盾がみられる。一般ユーザーにとっては, コートの上でボールを打ってみてはじめて性能がわかるというのが現実である(川副, 1991; 1993; 1994; 2001; 2002e; 2003)。

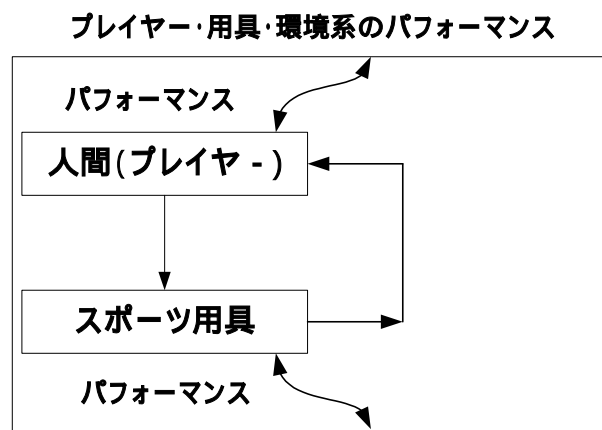


図1 プレイヤー・用具・環境の相互作用によって発現するパフォーマンス(川副, 2003b)

2. ラケットはどう変わってきたか

テニスの源流は13世紀にフランスで行われていた「ジュ・ド・ボーム」という手でじかにボールを打つ競技にさかのぼると言われている。テニスは手の代わりにラケットという用具を手で持ってボールを打つ競技である。

テニスラケットは1960年代前半までは木製でフェイス(打球面)面積が 68 in^2 (平方インチ)のレギュラーサイズと決まっていたが, 1967年にスチール製, 1968年にアルミ製の金属ラケットが現れ, 1974年には複合材のラケットが登場した。過去30数年の間にラケットは大きく変わってきたが, 1976年に現れた 110 in^2 の「デカラケ」, 1987年の「厚ラケ」, そして1995年の「長ラケ」は最も革新的なラケットだと言われている。

「デカラケ」は, 打球面が広いラケットである。最近のラケットの打球面サイズは $95 \text{ in}^2 \sim 115 \text{ in}^2$ が主流であるが, 130 in^2 のセレス選手の大きなラケットや

137 in² という超大型サイズが話題になったこともある。

「厚ラケ」は、フレーム剛性を高めたラケットである。従来のラケットの4倍近くまで剛性を高めたラケットが当初は主流であったが、次第に剛性をやや落とした軽量の厚ラケが主流になってきた。従来のフレーム厚 19mm に対して 30mm 以上まで、フレーム厚（剛性）の異なる多くの機種が市販されている。最近では、フレームをあまり厚くしないで剛性の高い機種も開発されており、フレーム厚さと剛性は必ずしも比例しない。また、剛性はフレーム形状や打球面サイズ（フェイス面積）にも依存するから、素材の硬さとは異なるものである。

ラケットは経験の産物であり、木製ラケットの時代からラケットの全長は 27 インチで変わることはなかった。長ラケは、従来のラケット全長 27 インチ（約 685 mm）を小刻みに長くしていったラケットである。上記の 137 in² の超大型サイズの全長は 32 インチ（812mm）である。国際テニス連盟は、プロの試合では 1997 年の 1 月から、一般の試合では 2000 年の 1 月から全長が 29 インチ以上のラケットの使用を禁止した。しかし、最近では従来の 27 インチに近いラケットに逆戻りしている。長ラケは改良の余地がある。

最近のラケットの特長は軽量化である。ラケットの質量は（ストリングスを張った状態で）木製の時代は 370 g ~ 400 g、複合材ラケットの初期の頃は 360 g から 375 g、さらに軽量化が進み超軽量ラケットと呼ばれる 300 g を切るラケットが現れた。最近の最も軽いラケットは 220 g に達している。

図 2 は、木製ラケットと最近のハイテク・ラケットの代表例を示す。

3. 感覚的性能評価とスポーツ工学による性能予測

3.1 パフォーマンスに与える用具の物理的影響と心理的影響

スポーツは体験により修得するものだから、きわめて主観的なものである。したがって、スポーツ用具が実際のプレイにどのように影響するかを客観的に評価することは難しい。しかし、最近のスポーツ工学の成果により多くの謎が少しずつ明らかになりつつあるが、ボールとストリングスの性質については以下の例のような誤解が多い。

1999 年にフレンチ・オープンと US オープン、2000 年と 2001 年に全豪オープンに優勝したアガシ選手が 2002 年ウィンブルドンで 2 回戦でパドーン・スリシャパという選手に敗れた。この試合に関するインタビュー（ホームシ、2002）においてアガシ選手は次のようなことを語っている。「ラケットのストリングに技術的な問題がいくつか生じた。ストリングを変えてクレイ（土の）コートではうまくいったが、芝（のコート）では悪夢を見る

結末になってしまった。ボールをうまく捕らえることができなかった。そしてどんどん悪い方向へと進んだ。」さらに、「ストリングを変えてローマ（5 月初旬に優勝したマスターズシリーズ、クレイコート）ではうまくいった。そして、芝での練習のときは大丈夫だと思った。しかし、試合でボールを打ったら、自分でもどうしてなのかよく分からないが、ボールを捕らえるポイントがつかめず、うまくコントロールができなかった。そしてコントロールができるようになったら、今度はあまりにもスピニングがかりすぎて、ネットを越えなかった。」

この場合のアガシ選手のストリングスとパフォーマンスの関係についての発言は、非常に大きな誤解を招きやすい。ストリングスの物理的影響とメンタル的な影響の両方が含まれているからである。結論から言うと、ストリングスの物理特性の違いがボールに直接与える影響は小さいのである。しかし、ボールがストリングスを離れた後のストリングスの残留振動や音などの微妙な挙動にはストリングスが直接的に影響する。ストリングスの変形が小さい場合はストリングスの違いが大きく影響するが、インパクトの瞬間のように大変形ではストリングスの影響は小さい。

3.2 プレイの状況で変わるストリングスの性能

ラケットの素材・構造と性能について述べる前に、ボールとストリングスの性質について少し述べたい（川副、1992a; 2003c）。

プレイにおけるボールとラケットの衝突速度は 20 ~ 30 m/s 程度、最高速度サーバーのラケット・ヘッド速度は 40 m/s 程度である。

テニスボールと剛壁の反発係数は、衝突速度の増大とともに低下する。衝突速度 20 m/s では 0.48 程度である。一方、ラケット・ヘッドを固定して、ストリング面にボールを衝突させたときの反発係数は衝突速度 14 ~ 25 m/s の範囲ではほぼ 0.83 程度であり、ボールの入射速度、ストリングスの種類や張り方・テンション（初張力）にあまり影響しないのが特長である。ボールとストリングスの反発係数は高い値を示す。鉄のボールをストリングスに衝突させたときの反発係数は完全弾性衝突に近い（インパクトにおけるストリングスのエネルギー損失はほとんど無い）。このストリングスの優れた弾性によって楽にボールが打てるのである。

「ストリングスを緩く張ると、ボールがよく飛ぶ」と言われる。しかし、実験結果によると、衝突速度 20 m/s の場合、テンションを 44 % 増減しても、反発係数は 1.4 % しか増減しない。衝突速度 30 m/s の場合はテンションを変えても反発係数はほとんど変わらない。反発係数におよぼすテンションの影響は非常に小さいのである。理論的にも説明できる。

「ストリングスを緩く張るとテニス肘防止になる」と言われる。ストリングスの「面圧」（たわみ剛性）は衝突速度（たわみ量）に比例して高くなり、衝突速度により



(a) 木製(ウッド)ラケット WILSON (68 in^2 , 375 g)



(e) 標準的軽量ラケット EOS120A (120 in^2 , 292 g)



(b) 従来型高剛性ラケット PROTO-02 (100 in^2 , 370 g)



(f) 最軽量ラケット TSL (115 in^2 , 224 g, 全長: 28 in)



(c) 標準的軽量ラケット EOS100 (100 in^2 , 290 g)



(g) 可動ストリングス ROLLER (115 in^2 , 268 g, 全長: 27.75 in)



(d) 標準的軽量ラケット EOS110 (110 in^2 , 283 g)



(h) インテリ・ファイバー I.S10 (114 in^2 , 241 g, 全長: 27.75 in)

図2 ラケットの変遷(木製ラケットと最近のハイテク・ラケット, 質量はストリングスを含む.)

10 倍近く変化する。面圧がテンションに左右されるのは、衝突速度がきわめて小さい場合である。また、「テンションが低いほどインパクト・タイム（ボールとストリングスの接触時間）が長い」と言われる。米国の著名なテニス専門書に載っている 12m/s 以下のデータはそうになっている。しかし、衝突速度が 20 m/s を超えるとテンションの差の影響はほとんどなくなり、むしろわずかであるが逆転する。理論的にも説明できる。テンション 45 lbs と 65 lbs の場合のサーブにおけるラケット・ハンドルの衝撃振動の実測波形は、ゆるいテンションの衝撃振動の方がやや大きい場合もあるということを示した（Kawazoe et al. 1992; 2002c; 2002d; 2003）。

ストリングスのスピン（ボールの回転）への影響については、テンションを変えた実験はデータのばらつきの方が大きい。衝突速度にほぼ比例してボールの回転数が増し、摩擦が大きいストリングスほど回転数が増す。

図 3 は、(a)ボールおよび(b)ボール・ストリングス複合系の荷重試験の概略図であり、図 4 は、その結果である。実用範囲においてボールもストリングスも変形量の増大とともに急激に硬化する硬化ばね特性を示す。図 5 は、インパクトによる変形によって発生する張力 S と復原力 F を示す。変形の増大とともに復

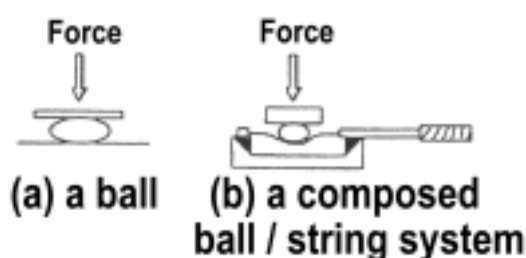


図 3 ボールとストリングスの荷重試験

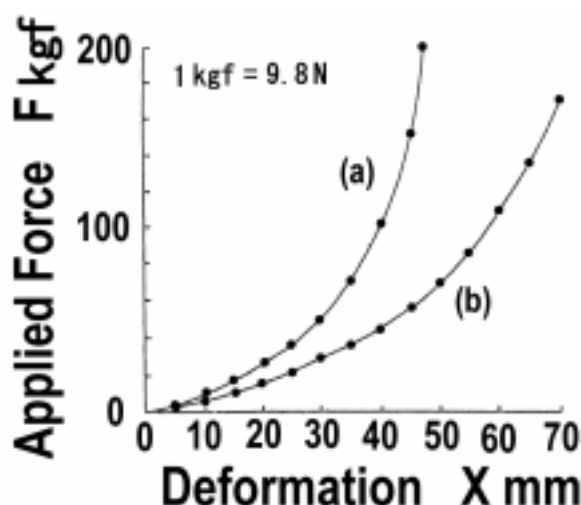


図 4 ボールとストリングスの荷重試験結果（ボールとストリングスの変形と復原力特性）

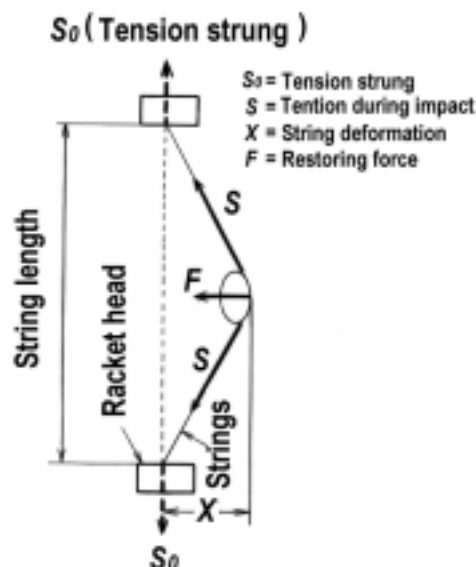


図 5 インパクトにおけるストリングスの変形，張力，復原力

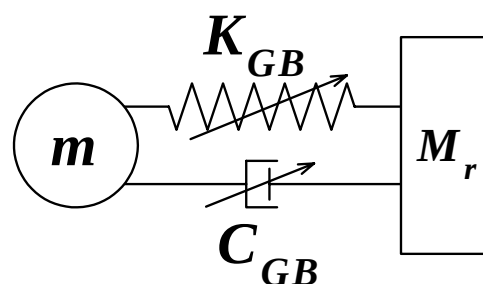


図 6 ボール・ストリングス複合系の衝突モデル

原力は急激に大きくなり、初張力 S_0 よりも変形量 X の影響の方が大きくなる。

3.3 インパクトのシミュレーションとラケットの性能予測

ボールとラケットの衝突モデルおよび反発係数の導出法について簡単に述べる（川副，1992b; 1995; 1997; 1999; 2000a; 2002a）。

ボール・ストリングス系の非線形復原力特性および減衰特性は実験的に 1 自由度の等価系に同定し（図 6），さらにラケットあるいはラケット・腕系の剛体運動特性および振動特性を実験的に同定する（図 7，図 8）。ラケットのグロメットの（ストリングスを支える）部分や人間のモデルなど理論的扱いが難しい部分は実験的に同定すれば、詳細な特性が理論的にわかっていなくても、使用状況におけるラケットの性能を客観的に評価することができる。ただし、ボールのスピンは考えない。プレイヤーがボールを打撃した瞬間に腕系に伝わる衝撃力を計算するための図 8 のモデルにおいて、インパクトの瞬間には重力や筋力は衝突力にくらべて

小さいとみなし、ハンドルの握りの位置と手首関節の位置の距離を無視している．図9はボールの飛びに関するラケット性能を予測するためのフォアハンド・グランド・ストローク（バウンドしたボールを打つ）のスイング・モデルである．肘と手首の関節角度を一定にして，肩関節トルク N_s を与え，90度回転したときのラケット・ヘッド速度 V_{Ro} で V_{Bo} で飛んでくるボールを打撃する．女子トップ・プロのラリーにおけるフォアハンド・グランド・ストローク（バウンドしたボールを打つ）のインパクト速度を想定すると，おおよそ $N_s = 56.9 \text{ N}\cdot\text{m}$ ， $V_{Bo} = 10 \text{ m/s}$ である．

図10は，ラケットのストリング面の中心にボールが衝突したときの力積波形の予測例であり，正弦半波で近似している．ストリング面のボールの衝突位置が極端に中心から外れる場合を除くと腕系の重量はほとん

ど影響しない．衝突速度が増すと接触時間が短くなり，衝突力は急激に大きくなる．図11は，ボールとラケットの接触時間の実測値（黒）と計算値（白）の例である．接触時間は，熟練者・未熟練者の差，あるいはスピンの差による影響は小さく，ほとんど衝突速度に依存することを示す．

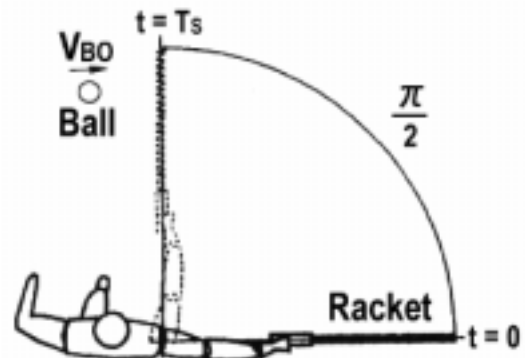


図9 スイング・モデル（グランド・ストローク）

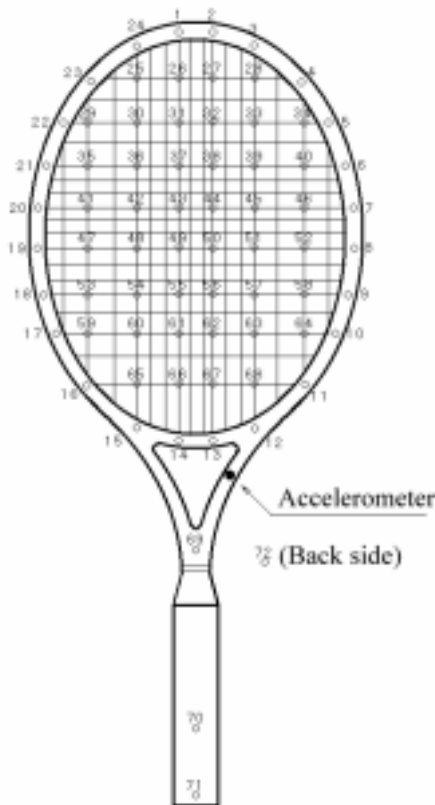


図7 スtrings・メッシュ（String上での4点でボールと接触するとして同定する）

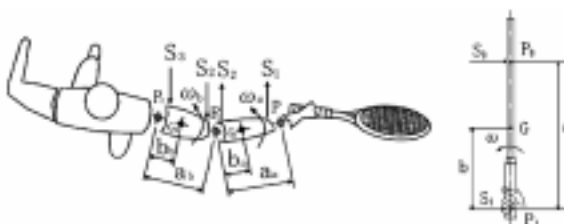


図8 衝撃力予測のための腕系モデル

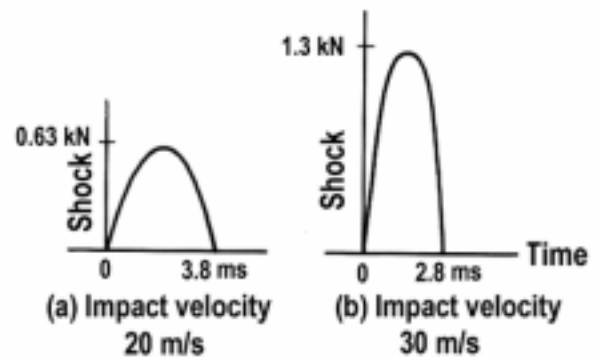


図10 ボールとラケットの衝突力の計算例，衝突位置：ストリング面中心，衝突速度 (a) 20 m/s および (b) 30 m/s⁽⁷⁾

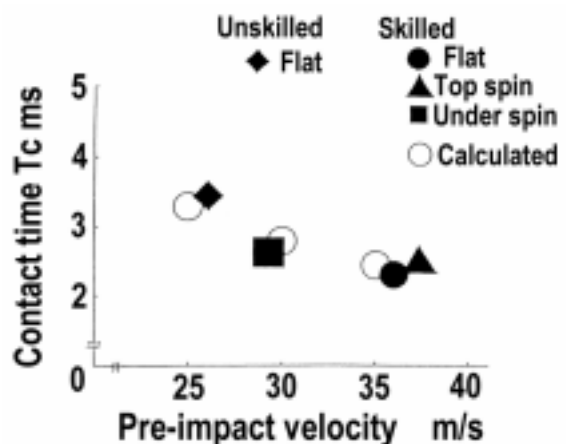


図11 ボールとラケットの接触時間の実測値と計算値の例

ボールとラケットの衝突により、ボールとストリングスは変形し、ラケットは剛体運動をしながら振動する。図12は、ボールがストリング面の中心および中心を外れた位置で衝突したときのラケットの初期振動振幅を予測した例である。ストリング面の中心で衝突するとラケット・フレームの振動は小さい。

ボールとラケットの反発係数 (COR) e_r は、インパクトにおけるエネルギー損失と密接に関係しており、ボ

ールの変形によるエネルギー損失およびラケット・フレームの振動によるエネルギー損失が少ないほど反発係数が高い。ラケットによって多少差があるが、ストリング面の中心近くで最も反発係数が高い。図13は、木製ラケット (図2(a)) と初期の厚ラケPROTO-02 (図2(b))、重量が木製に近い) の反発係数 e_r の予測結果である。

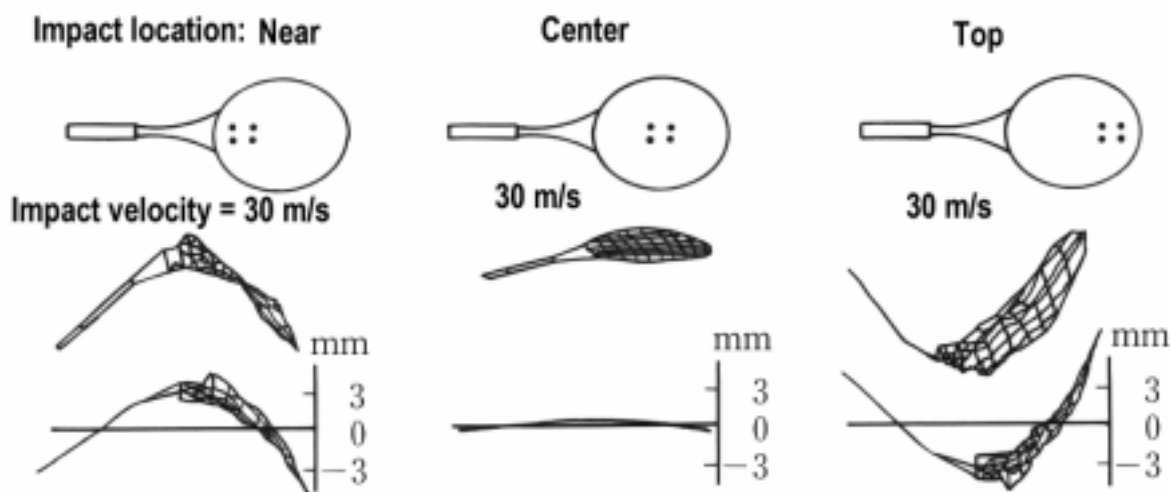


図12 インパクトの瞬間のラケットの初期振動振幅計算値, 衝突速度: 30 m/s, 衝突位置: 左からストリング面の根元側, 中心, 先端側

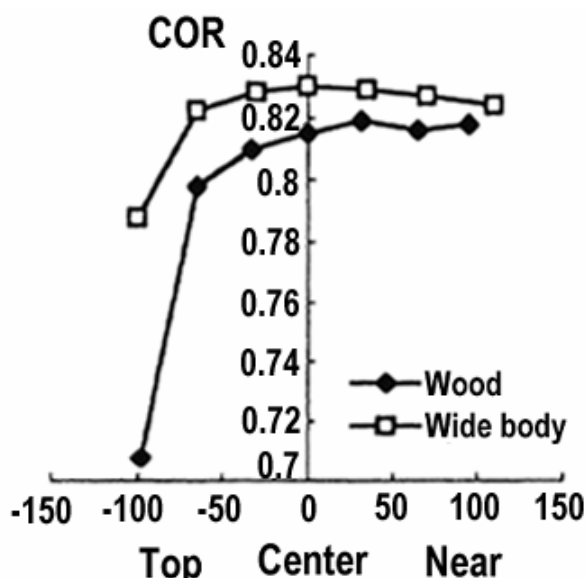


図13 木製ラケットと初期の厚ラケPROTO-02の反発係数の予測

3.4 ボールの飛びに関連するラケット性能

3.4.1 球離れの良さと反発係数

感覚的な性能評価の一つに「玉離れが良い」、あるいは、これと反対の性質として「ボールのホールド感がある」という表現がある。経験的には「厚ラケは玉離れが良い」と言われている。しかし「玉離れが良い」というのは、物理的にはどういうことであろうか。

テニス専門誌などには、「玉離れが良い」のは「接触時間が短い」からだという記述がみられるが、この説明は正しくない。なぜなら、厚ラケの特長であるフレームの高剛性は、「接触時間」にはほとんど影響しないからである。

一方、厚ラケのもうひとつの特長は「反発係数」が高いことである。ボールとラケットの反発係数 e_r は、インパクトにおけるエネルギー損失と密接に関係しているから、ボールの変形によるエネルギー損失およびラケット・フレームの振動によるエネルギー損失が少ないほど、反発係数が高いことになる。「反発係数」が高いということは、ボールとラケットの両者がお互いに弾かれやすいという

ことを意味する。

したがって、「玉離れが良い」ラケットは、「反発係数が高い」ラケット、「ホールド感がある」ラケットは「反発係数が低い」ラケットということになる。したがって、厚ラケは「球離れ」が良く、木製ラケットは「ホールド感」があることになる。

3.4.2 はじきの良さと反発力係数

一般には「ラケットの反発性能が良い」、「反発力がある」、「弾きが良い」といった性能評価が、ほぼ同じ意味で用いられている。

図14は、宙づりの静止ラケット（ヘッド速度 $V_{R0}=0$ ）にボールを衝突させたときのボールの跳ね返り速度 V_B と入射速度 V_{B0} の比 e の実測値と予測値である。この比 e の実測値が、メーカーなどではラケットの反発性能の評価によく使われる。横軸はストリング面上の衝突位置である。この係数 e は、衝突位置における反発係数 e_r 、ラケットの換算質量 M_r 、およびボールの質量 m により決まり、比 e の値が大きいほどボールの跳ね返りの良さ、あるいはラケットのはじきの良さを表す。これを反発係数 e_r と区別して「反発力係数」 e と著者は定義している。

「反発力がある」と「反発係数が高い」という表現が混同して使われることが多い。「反発係数」が高いから「反発力がある」という説明がなされるが、「反発力がある」と「反発係数が高い」とは直接対応するものではない。非常に軽い厚ラケのように反発係数が高くても、ボールの跳ね返りの悪いラケットもある。

「はじきの良いラケット」とは、ラケットを振らないでボールを当てただけのときにボールが良く跳ね返るラケットと考えたらわかりやすい。ラケットを速く振らなくてもボールが良く飛ぶという意味である。スイング速度が遅いプレーヤーにとって、あるいはボレーの（ネットの近くで相手のボールがバウンドする前に打つ）ときには、この反発性能が打球の速さに直接に影響する。

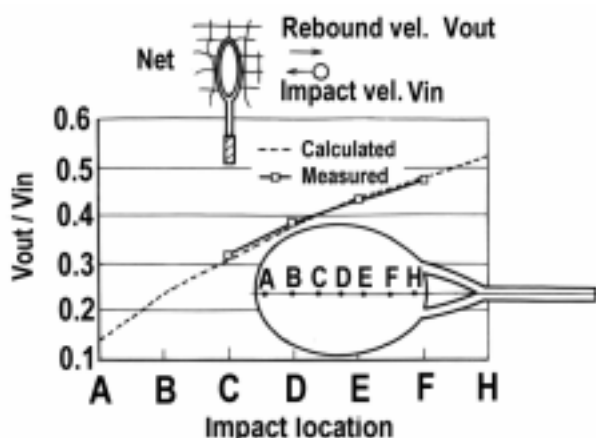


図14 反発特性の実測値と予測値

反発係数が高くて、打点に換算したラケットの換算質量が大きいラケットほど、反発性能（跳ね返りの良さ）は高いことになる。慣性モーメントが大きくて、打点とバランス位置（重心）の距離が近いほど、ラケットの換算質量は大きい。したがって、反発性能は、ラケット面の根元側ほど高く、長手方向の中心線から横に外れるほど小さくなる。

フェイス面積の大きいデカラケは、ラケット面中心位置をバランス（重心）位置に近づけることにより、反発力を増したラケットと言える。

グリップを手で握ったときの反発力係数の値は、極端なオフセンター打撃を除くと、宙づりラケットの場合と大きな違いはない。

3.4.3 ボールの飛びとラケットのパワー

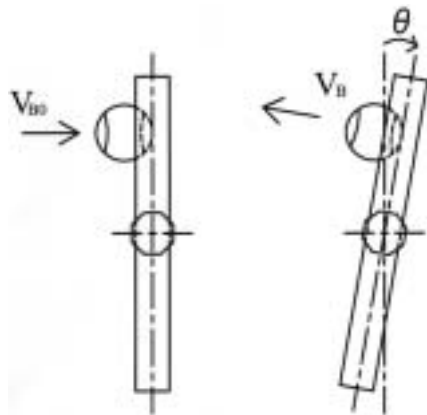
ラケットでボールを打撃する場合は、衝突直前のボール速度を V_{B0} とすると、打球速度 V_B は、飛んでくるボール速度による反発速度成分 $e \cdot V_{B0}$ とプレイヤーのスイングによる速度成分 $(1+e) \cdot V_{R0}$ との和になる（Kawazoe et al. 2000a）。たとえば、ラケット面中心近くで打撃する場合は、たとえば $e=0.4$ として、打球速度 $V_B=0.4 V_{B0} + 1.4 V_{R0}$ になる。サーブの場合は、 $1.4 V_{R0}$ の打球が飛んでいくことになる。

一般に反発力係数の高いラケットはヘッドの速さが遅く、反発力係数の低いラケットはヘッドの速さが速い。したがって、ボールの飛びは「反発力係数」と「振りやすさ」の両者のかね合いで決まる。

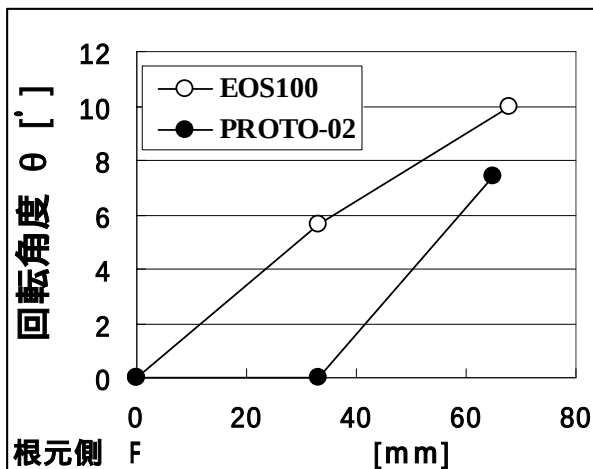
3.5 コントロールと面安定性

コントロール性能は、ねらったところにボールを打てるという意味で使われる。実際のプレイにおけるラケットのコントロール性能には、ボールの回転（スピン）が関係し、ボールに適度なスピンを与えたときに、コントロールされた鋭いボールが相手の足下に飛んでいく。どのようなラケットがスピンの関連したコントロール性能に優れているかについてはわかっていないが、面安定性もコントロールを良くする一つの要素であろう。

図15は、オフセンター打撃においてボールがストリング面に接触してから離れるまでにインパクトによりラケット面が傾く回転角の計算例である。長手軸から横のオフセンターで打撃した場合であり、横軸は長手軸からの距離である。ラケット面の長手軸から外れた横のオフセンター打撃では、先端側ではラケットは長手軸まわりに回転しないが、面の中心から根元側では、超軽量型のラケット面はインパクトで瞬間的に10度近く傾く。このようにインパクトの瞬間（約3/1000秒間）にラケット面が傾くと、ボールの方向が意図した方向とずれることになる。したがって、面安定性という意味でのラケットのコントロール性は、従来重量バランス型の方が多少良いということになる。



(a) オフセンター打撃でのラケット面の回転



(b) オフセンター打撃でのラケットの長手軸まわりの回転角(横軸は根元側における長手軸からの距離)
図15 オフセンター打撃での面安定性

3.6 テニス肘とラケット性能

1980年代に行われたテニス肘やスポーツ障害に関するいくつかのアンケート調査報告に基づいて、ラケットとテニス肘の関係についてまとめた報告(友末ら, 1988)がある。この報告は、ラケットの材質、打球面の大きさ、ラケットの重さ、ストリングスの張力などとテニス肘発生率との関係を考察している。

これによると、ラケット材質とテニス肘発生率との間には、一定の傾向は認められていない。すなわち、木、金属、複合材(コンポジットと呼ばれている)の3種類の素材に差があるという報告もあれば、複合材が高いという報告もあれば、逆に木と金属の方が発生率が高いという報告もあることを紹介している。

また、硬いラケットがテニス肘になりやすいという報告があるが、自分のラケットが硬いかどうかの判断は主観的であり、「素材が硬い」、「剛性が高い」および「動的に硬い(振動数が高い)」ということが混同されているようである。

面の大きさに関しては、従来のレギュラーサイズ(現在のラケットに比べると打球面がかなり狭い)から、セ

ミラージ、ラージに変えた際に痛みが生じたという報告を紹介している。これに対しては材質やガット張力が変わったためであろうという推測がなされている。この時点では、ラージサイズは、オフセンターで打球した際のねじれが少なく、スイート・スポットが広く、肘に負担の少ないラケットであると考えられている。しかし、最近の軽量ラケットについての調査はない。

ラケットの重さとテニス肘発生率との関係は、アンケート対象者の筋力などがチェックされていないので、はっきりした傾向は出ていない。ラケットは重すぎても軽すぎても駄目で、男子の場合は 350 g、女子の場合は 330 g 程度のラケットが推奨されている。これも最近の軽量ラケットについては調査されていない。

ストリングス(俗称ガット)に関しては、ストリングスをラケットに張るときの初張力(テンション)が高すぎるとテニス肘になりやすいと考えられており、55ポンド(25 kgf, 244 N)以下で張ることが推奨されている。しかし、ラケットの打球面サイズにより異なるはずである。また、メーカーで指定した適性テンションの最低値で張ることも奨められているが、適正テンションの根拠は明らかではない。3.2節で述べたように、むしろテンションを低くしてもテニス肘防止にはならないと考えた方がよさそうである。

ラケットは、その急速な進歩により「非常に使いやすくなった」と言われている。しかし、そうした進歩によってもたらされたマイナス面が存在することも見逃すことはできない。

たとえば、トップ・プレイヤーの場合は、ラケットの性能とプレイヤーの技術の向上によって打球が速くなり、インパクトで腕に伝わる衝撃が大きくなっていると言われている。一般プレイヤーの場合は、基本ができていなくても比較的容易にテニスが楽しめるようになったが、その反面、プレイ頻度の高いプレイヤーや中高年のプレイヤーに、テニスエルボーや手首・肩などの傷害を持つ人が多くなったと言われている。

また、筋力の弱い中高年プレイヤーは、必ずしも衝撃振動吸収性の良いラケットではなく、ボールの良く飛ぶラケットを求めているケースも多いようである。そのため、メーカーの開発の方向も、そちらの方向に偏りがちになる。

こうした問題に関わってくるのが、ボールを打ったときに手に伝わるラケット・ハンドル(グリップ)の衝撃や振動であり、これもラケット性能の一側面である。こうした衝撃・振動特性は、人間が感じる打球感に直接影響するとともに、テニスエルボーなどの傷害とも関連している。

3.7 スウィート・スポットとハイテク・ラケット

一般に、心地良い打球感が得られ、軽い感じでボールが飛んだときに、スウィート・スポットに当たったという言い方をする。ラケットのスウィート・スポットが広いとか狭いとかいう言い方もある。しかし、実は「スウ

「sweet・スポット」というのは、とくに定義や測定の方法が決まっているわけではないのである。では、sweet・スポットとは何を意味しているのだろうか。一般にsweet・スポットとして、次の3つの要素を考えることができる。

(1) ボールがストリングスから飛び出す速度、あるいはラケットのパワーが最大となる点

(2) 手に伝わる初期の衝撃が最小となる点、

(3) 手や腕が感じる不快な振動が最小となる点

これらの3つのsweet・スポットは、それぞれラケット面上の異なる点に存在する。ただし、この3つは、それぞれラケット面のほぼ中心近くに存在する。そのため、あるレベル以上にsweetな感覚が得られる範囲という意味で「sweet・エリア（領域）」という表現が使われることも多い。

現場のコーチやプレイヤーは、ラケット面の中心という意味で気軽に「sweet・スポット」という言葉を使うことが多い。また、ラケット・メーカーのいう「sweet・エリア」は、これまではボールの飛びが良い、あるいは反発性の高い領域という意味の場合が多かった。しかし、最近では、第2、第3の意味 - すなわち、衝撃や振動に関するsweet・スポットが重視される方向にある。

滑車でストリングスを支える「ローラーズ」(Wilson) やグロメット (ストリングスを通す小穴に取りつけた鳩目のようなもの) の部分でストリングスが滑らない構造にした「マッスルパワー」(ヨネックス) などの最近のラケットがグロメットの部分を重要視したり、圧電素子をフレームに組み込んだ「インテリジェント・ラケット」(ヘッド) が制御装置を組み込むことにより積極的な振動低減を試みたりしているのも、手に伝わる振動を低減しようという発想である。軽量ラケットのグリップエンドに錘 (おもり) を装着したラケットも手に伝わる衝撃を小さくする。

3.8 手首に伝わる衝撃振動とラケットの特性

手に伝わる衝撃振動の大きさは、ラケット面上の打点の位置とグリップの握りの位置で異なることになる。手に伝わる衝撃・振動は複雑だが、インパクトの瞬間にボールとラケットの衝突により発生した力 (図9) が手に伝わったものが「衝撃成分」であり、ボールとラケットの衝突力により発生したフレーム振動 (インパクト後も残る) が手に伝わったものが「振動成分」だと考えるとわかりやすい。

フォアハンド・グランド・ストロークを想定して、プレイヤーのモデルを設定すると、ラケットと手首関節の衝撃振動波形を衝撃成分と振動成分との合成により計算することができる。グランド・ストローク (フラット) 打撃における手首関節の衝撃振動 (加速度) 測定波形と予測波形を図16に示す。ラケット面先端側のオフセンターで打撃した場合の例である。図17は衝撃振動 (加速度) の測定位置を示す。最初のピークがインパクトの瞬間で、

残留振動が残る。予測波形は実測波形に比べてよりやや大きめであるが、実測波形の特徴をよく表している (Kawazoe et al. 2000a; 2000c)。

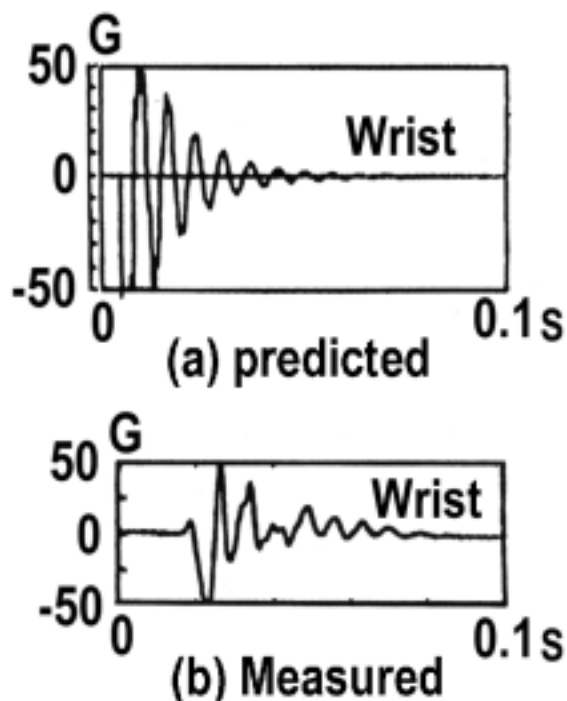


図16 グランド・ストロークにおける手首関節の衝撃振動 (加速度) 波形の予測, 先端側のオフセンターで打撃した場合: (a) 計算値 (b) 実測値



図17 手首関節と肘関節の衝撃振動の測定

4. ラケットの素材・構造と性能

4.1 木製ラケットから複合材ラケットへ

図18は、木製ラケット (図1(a), WILSON 製) と標準

的な軽量・高剛性・複合材ラケット EOS100 (図 1(c)) の反発係数 e_r の予測値である。反発係数 e_r は玉離れの良さに相当する。図 19 は反発力係数 e 、図 20 はラケット・ヘッド速度、図 21 はボールの飛びを示す。横軸はラケット面中心から長手軸方向打点までの距離を示す。複合材ラケットは面先端での反発係数 e_r が著しく向上している。反発力係数 e は向上していない。打球速度 $V_B = e \cdot V_{B0} + (1+e) \cdot V_{R0}$ 。だから、ラケット・ヘッド速度 V_{R0} の増大により軽量・高剛性ラケットの打球は速くなっている。

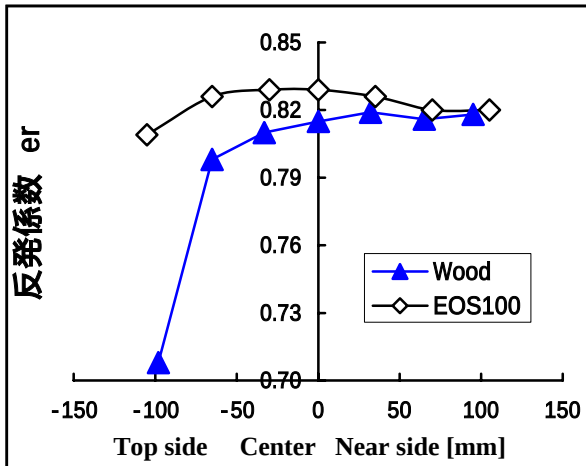


図 18 木製(WILSON 製)と軽量・高剛性 EOS100 の反発係数 e_r (横軸はラケット面の長手方向の打点位置)

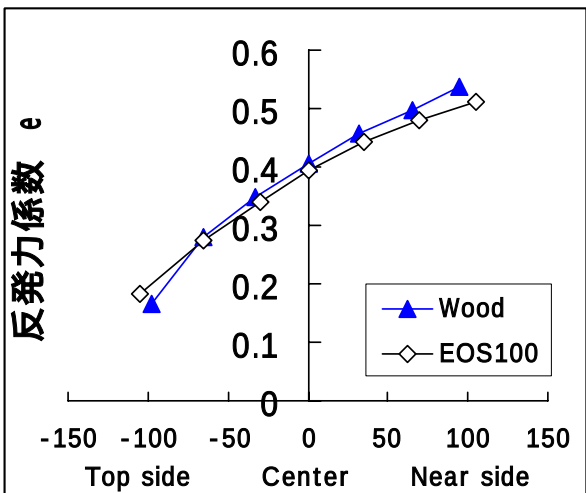


図 19 木製(WILSON 製)と軽量・高剛性 EOS100 の反発力係数 e : ラケットが静止していると見なしたときの (ボールの跳ね返り速度) / (ボールの入射速度) (横軸はラケット面の長手方向の打点位置)

4.2 厚ラケットとノーマル(薄ラケット)のボールの飛び

厚ラケットの登場により、従来の薄ラケットに対して中間の剛

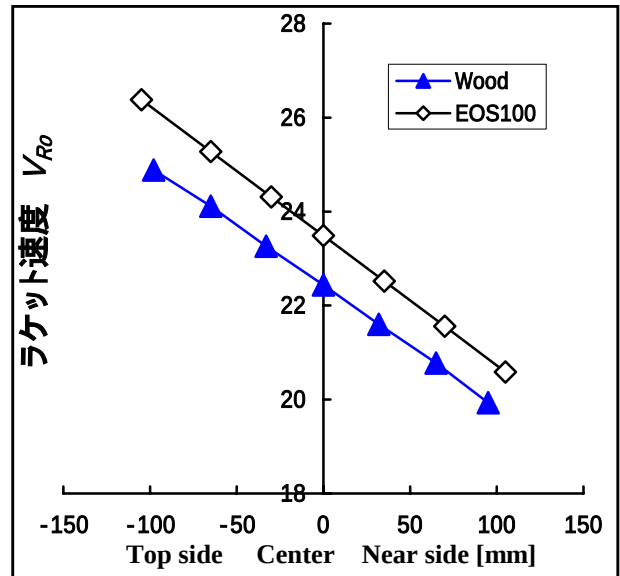


図 20 木製 WILSON と軽量・高剛性 EOS100 のラケットヘッド速度 V_{R0}

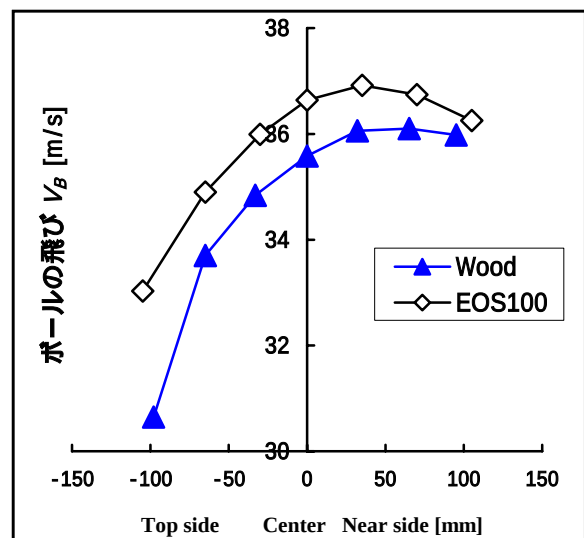


図 21 木製 WILSON と軽量・高剛性 EOS100 (図 22(b)) のボールの飛び V_B (グランドストローク)

性をもつ中厚と呼ばれるラケットも現れた。

図 22 は、超軽量・厚ラケット (EOS100, スtrings を含む重量 290 g) と従来重量型バランスの薄ラケット (EX-11, Strings を含む重量 360 g) についてボールの飛びを予測した例である。String 面上の数値は打球速度を表しており、飛びの良い領域 (飛びに関するスイートエリア) を濃淡で示している。両ラケットのフェース面積は 100 平方インチである。超軽量ラケットの場合は、バランスをトップにする (グリップを軽くする) ことで、反発力係数の低下を止めているため、従来重量バランス型よりも「飛びの良さ」を実現している。

肩から手までの腕系はグリップ位置に等価的に換算す

ると約1キロの重さになる．この腕系の重量がグリップ位置の最大衝撃加速度を十分の一に低減することが計算によってわかった．また、ラケットのグリップの振動が手のダンパー（振動減衰器）としての機能により吸収され、残留振動成分が大きく低減し、手首に伝わる振動が小さくなっていることもわかった．すなわち、腕の重量と手の役割はとても重要で、これらが手首に伝わる衝撃振動をかなり絶縁していることになる．

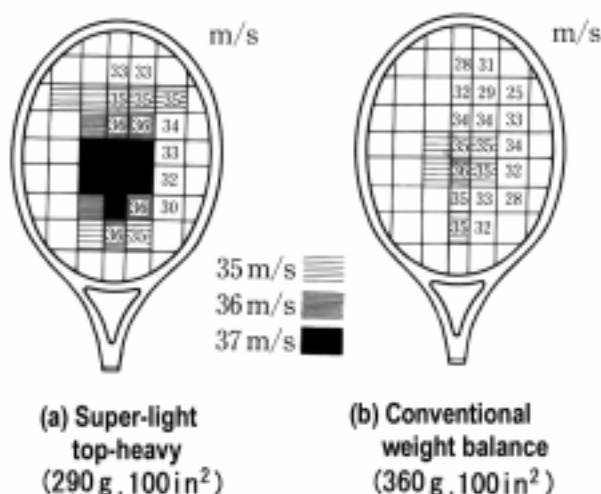


図 22 軽量高剛性ラケット(厚ラケ、フレーム厚 25mm)と従来重量バランス型ラケット(薄ラケ、フレーム厚 19mm)のボールの飛びとスイートエリア

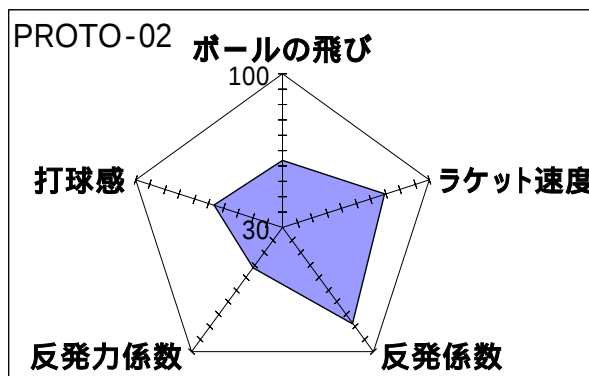
4.3 超軽量型ラケットと従来重量型ラケットの性能

今では標準的なフェース面積である 100 平方インチのラケットについて、従来重量バランス型と最近の軽量型のオフセンター打撃・ストロークでの総合的な性能予測・評価結果の例を図23に示す．面積の広い方が総合的な評価が高い．両ラケットとも「全長」27インチ，軽量型「フレーム重量」は 274グラム（ストリングスを含めた重量は290グラム），従来重量バランス型はフレーム重量 354グラム（ストリングスを含めた重量は 370グラム）である．打球感や振動といった感覚的な要素を除いて言えば，軽量型は，ラケット速度が速いのでボールの飛びは良く，反発力係数に関しては従来型のほうが良い．

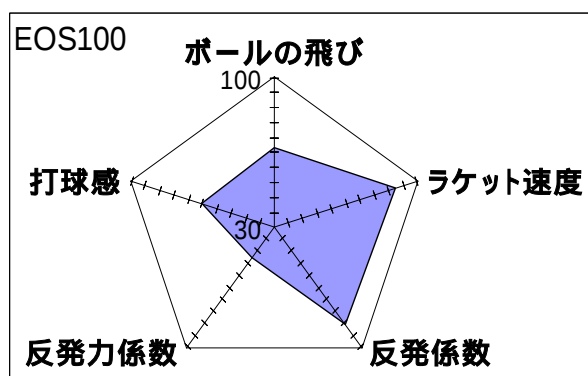
スイング速度の速いサーブやグラウンド・ストロークでは，軽量型のほうが有利であるが，リターンではほぼ同等で，逆にスイング速度が遅いボレーでは，従来重量型が有利になることも予測できる．

4.4 打球面サイズと性能

超デカラケに超ハイ・テンションでストリングスを張ったモニカ・セレス選手のラケット SRQ1000 (250 g) が数年前に話題になったことがある．フェイス（打球面）



(a) 従来重量型ラケットの性能評価



(b) 軽量型ラケットの性能評価

図 23 従来重量型と軽量型のラケット性能評価(ストローク, $N_s = 56.9 \text{ N} \cdot \text{m}$, $V_{Bo} = 10 \text{ m/s}$, ラケット面先端側での打撃の例)

面積 130 in²，全長 28.5 in というレギュレーションの限界値に近い大きなラケットにテンション 90 lbs という限界の強さで張ったラケットである．若手のパワーテニス台頭に対抗するために彼女が経験から選んだラケットだという．新しい材料の開発がこのような大きなラケットの実現を可能にした（川副，2003a）．

彼女がこのラケットを選んだ理由は，スポーツ工学からはどう説明できるであろうか．

図 24 は，打球面サイズ（フェイス面積）が 100, 110, 120 in² の 3 本の軽量ラケット（図 2(c),(d),(e)），どれもストリングスを含む重量が約 290g）でボールを打撃したときの反発係数の予測値 e_r である．図 25 は反発力係数 e の予測値であり，図 26 はボールの飛びの予測値 V_B である．打球面が広くなるほど，オフセンター打撃でフレーム振動によるエネルギー損失が大きいために，反発係数 e_r は低下するが，反発力係数が高いから，ボールの飛びは良くなる．特に先端側のオフセンターでのボールの飛びが向上する．

図 27 は，ボールを打撃したときの手首関節加速度振幅（初期ピーク値）予測値を示す．横軸はラケット面中心から打点位置までの距離である．打球面サイズが 120 in² になると急激にオフセンター打撃での衝撃振動が大きく

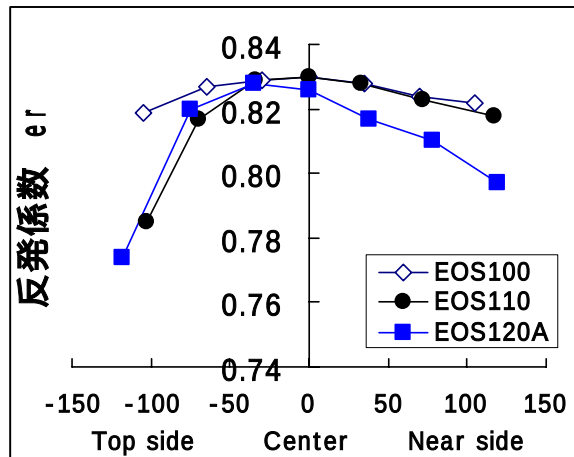


図24 打球面サイズ(面積)と反発係数 e_r
(質量・フレーム剛性のほぼ等しい軽量ラケット)

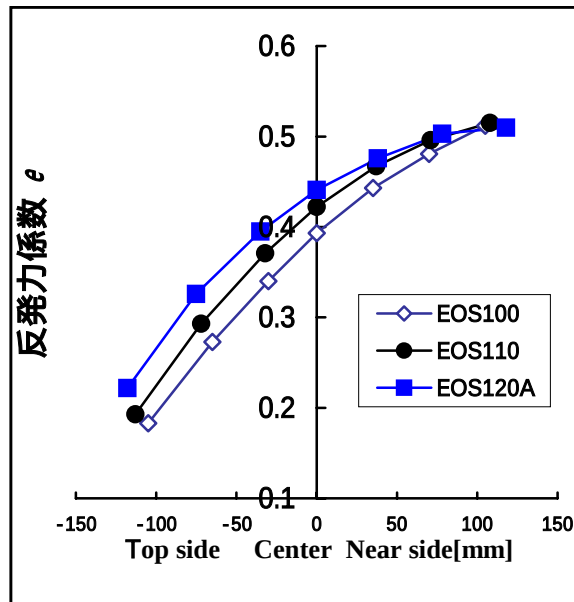


図25 打球面サイズ(面積)と反発力係数 e
(質量・フレーム剛性のほぼ等しい軽量ラケット)

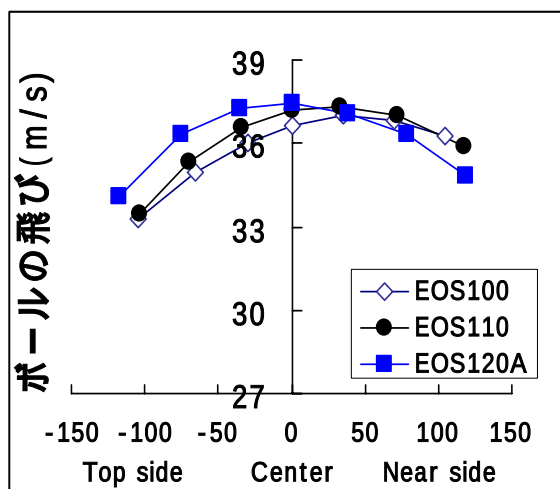


図26 打球面サイズ(面積)とボールの飛び



ピーク値:最大値と最小値の差

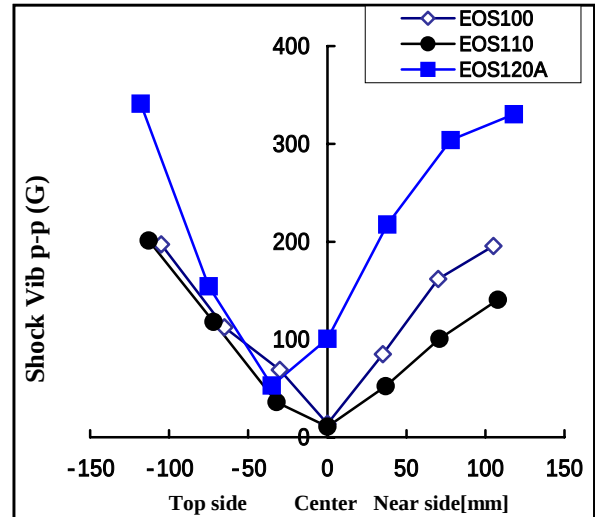


図27 手首関節加速度振幅(初期ピーク値)におよぼすラケット・フェイス面積の影響(予測値),横軸は打点位置

なっている。

フェイス面の大きいセレス選手のラケットは反発性を重視したためであり、ストリングスの超ハイ・テンションは超デカラケの打球感の悪さとコントロール性の弱点をカバーするためである。彼女の強打を考えると、強度的に厚ラケ(約 30 mm)にならざるを得ない。また、デカラケの操作性の悪さは 250 g という軽量化によってカバーされ、ヘッド速度が落ちるというデカラケの弱点は、軽量化と長ラケ化によってカバーされている。しかし、彼女はこの大きなラケットの使用をまもなくやめた。その理由は説明されていないが、重量バランスとシング・ウェイトがやや小さめで反発性が十分でないこと、さらに、軽量の超デカラケは手に伝わる衝撃振動が大きいことがスポーツ工学から予測される理由である。

4.5 軽量化の限界

図 28 は、もっとも軽量の市販ラケット TSL (最軽量ラケット, 図 2 (e), 224g) の反発係数 e_r の予測結果をパワーに優れている軽量ラケット 120A (292g) および従来重量バランス型 120H (354g) と比べたものである。図 29 はボールの飛びの予測結果である。ラケット・ヘッド速度は速いが、反発係数および反発力係数が低下するために、ラケット面中心から先端側で飛びが悪くなる。また、図 30 に示すように、最軽量ラケット TSL で打撃したときの手首関節の衝撃振動ピーク値は著しく大きく、軽量化の行きすぎを示している。

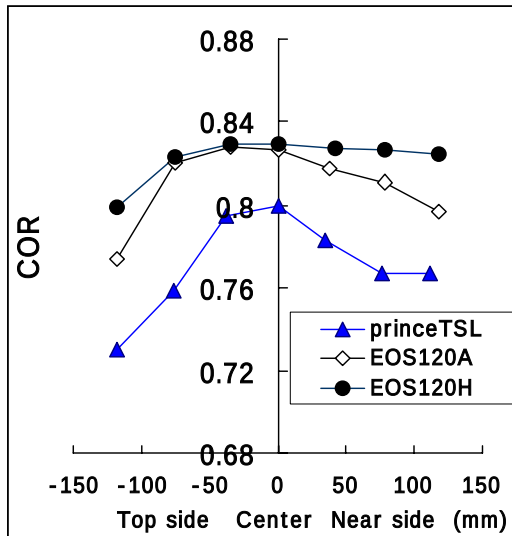


図 28 市販最軽量 TSL (図 2(e)) の反発係数 e_r

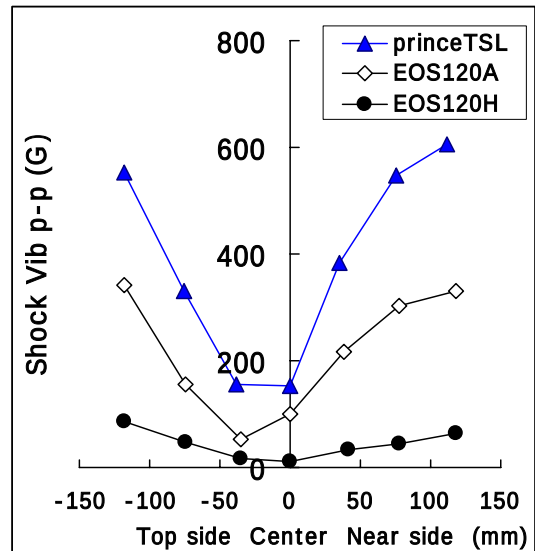


図 30 市販最軽量ラケット TSL (図 2(e)) の手首関節の衝撃振動ピーク値 (加速度 $G: 9.8 \text{ m/s}^2$)

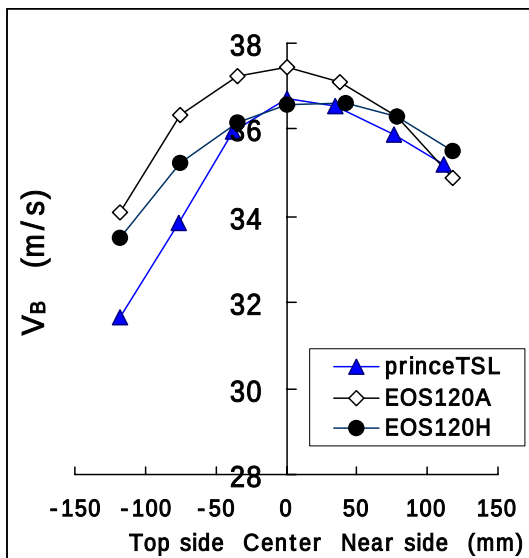


図 29 市販最軽量ラケット TSL (図 2(e)) のボールの飛び

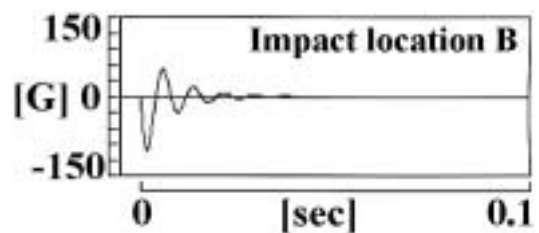
5. ハイテク素材・構造による打球感の改善

図 31 は、熱可塑性樹脂 (サーモプラスチック, ナイロン系) を採用したラケット FX110TP (110 in^2) と標準的な複合材を採用したラケット PROTO-EX110 (110 in^2) でボールを打撃したときの手首関節衝撃振動の予測波形である。ラケット面の先端側で打撃したときの例である。

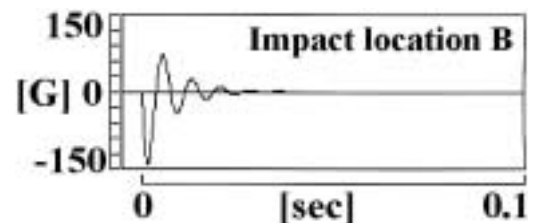
図 32 は、手首関節衝撃振動ピーク値の予測結果の比較であり、横軸はラケット面中心から打点位置までの距離である。素材によって手に伝わる衝撃振動が低減された例である。ボールの飛びもほとんど低下しない。

図 33 は、滑車 (ローラー) でストリングスを支える軽量ラケット (ROLLER2.6, 図 2(g)) の制振効果の予測 (手首関節の衝撃振動加速度ピーク値) 結果である。最軽量

ラケット TSL (図 2(f)) および標準的の軽量型でボールの飛びに優れているラケット 120A (図 1(e)) に比べて、ROLLER2.6 はラケット面全体の打撃点で手首関節の衝撃振動がかなり抑制されている。図 34 は、ラケットのパワー (打球速度) の比較である。ラケット面中心から先端側では最軽量ラケットと同程度であり、パワーがやや不足している。



(a) サーモプラスチック FX110TP



(b) 従来型複合材 PROTO-EX110

図 31 サーモプラスチック (熱可塑性) と従来型複合材の手首関節衝撃振動の予測 (ラケット面の先端側で打点)

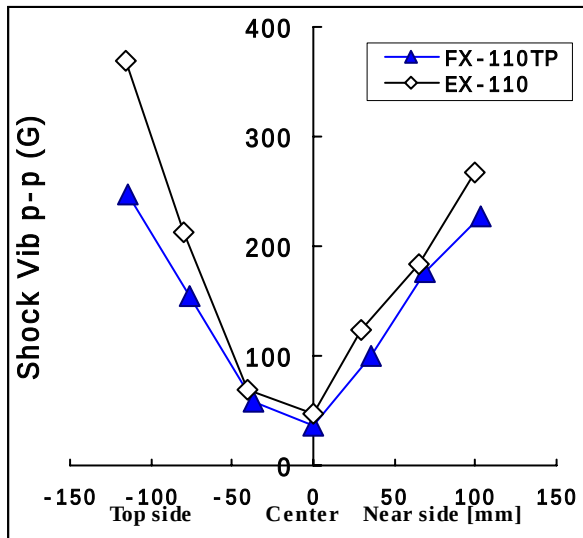


図32 サーマンプラスティック（熱可塑性）と従来型複合材の手首関節衝撃振動ピーク値の予測（横軸はラケット面の打点位置）

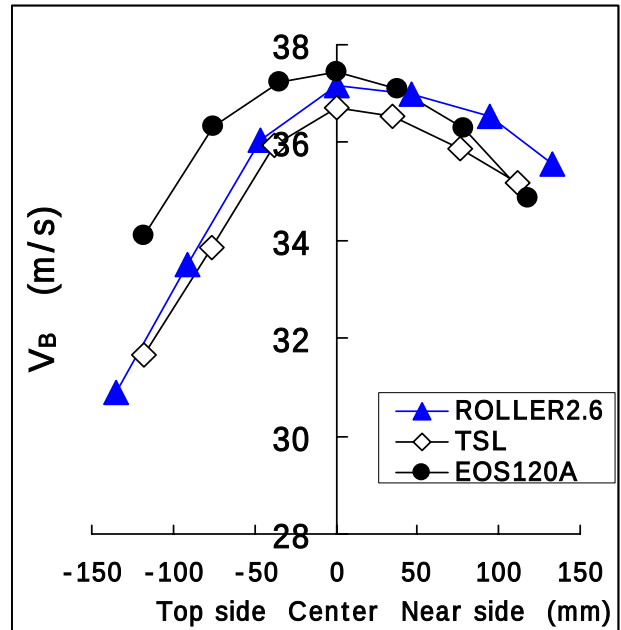


図34 滑車（ローラー）でストリングスを支えるラケット（ROLLER2.6）のパワー（打球速度 V_B ）の予測

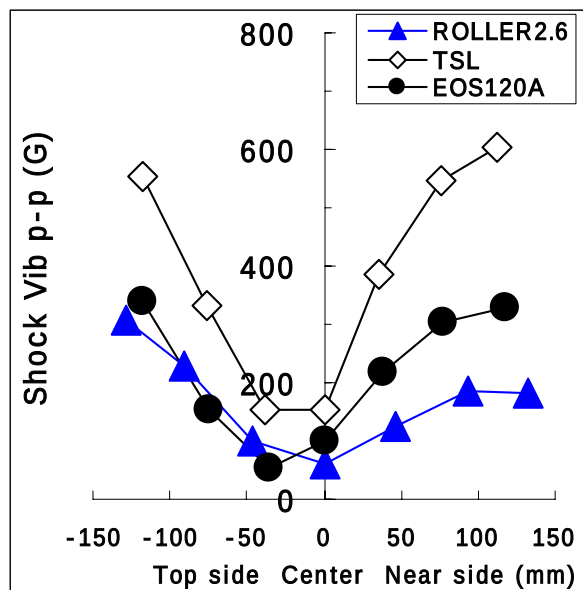


図33 滑車（ローラー）でストリングスを支えるラケット（ROLLER2.6）の制振効果の予測（手首関節の衝撃振動加速度ピーク値）

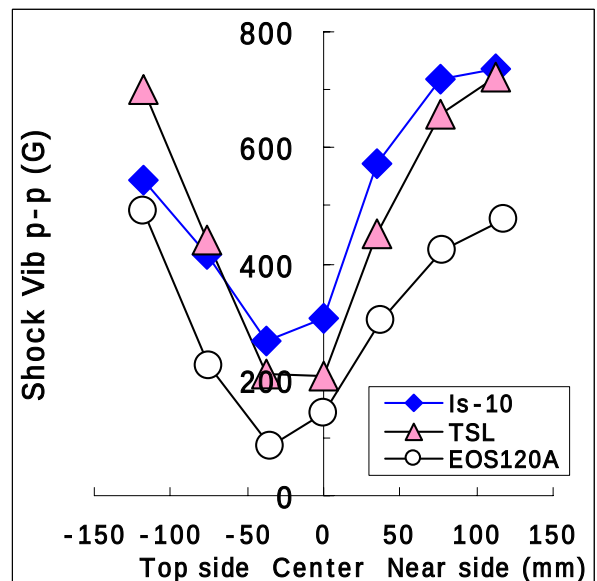


図35 インテリジェント・ラケット（IS-10）の制振効果の予測（手首関節の衝撃振動加速度ピーク値）

図35は、圧電素子をラケット首部に組み込んだ軽量「インテリ・ファイバー」ラケット IS-10（図2(h)）の制振効果を予測した結果である。「インテリ・ファイバー」の衝撃振動は、最軽量ラケット TSL (224g) に比べるとラケット面先端でやや低減されているが、全体的には低減されておらず、根元側ではむしろ衝撃振動が大きくなっている。図36は、ラケットのパワー（打球速度）の比較である。「インテリ・ファイバー」ラケットは、衝撃振動の改善はみられないが、パワーに非常に優れている。サー

ブでは他のラケットに比べてさらにボールの飛びがよくなる。

6. 長ラケの性能と理想の長ラケ

木製ラケットの時代から、ラケットはすべて 27in であった。そういう意味で長尺ラケット（長ラケ）の登場は

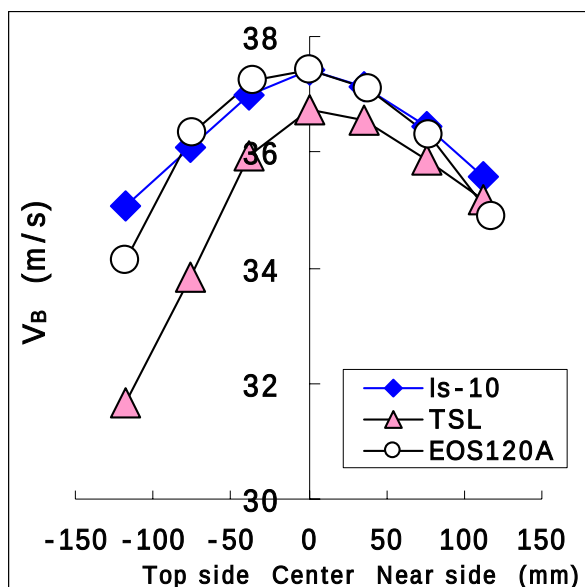


図 36 インテリジェント・ラケット (IS-10) のパワー (ストロークにおける打球速度 V_B) の予測

画期的であった。一時は 29in のラケットがテニスショップでは主流であったが、最近では 27 インチに近い長ラケットがよく使われている。しかし、これでは長ラケットと言えない。

図 37 は、有限要素法衝突シミュレーション計算 (川副ら, 2000d) により、29in 長ラケット EOS100-L50 (290g) と 27in ラケット EOS100 NORMAL (290g) の打球速度予測値の

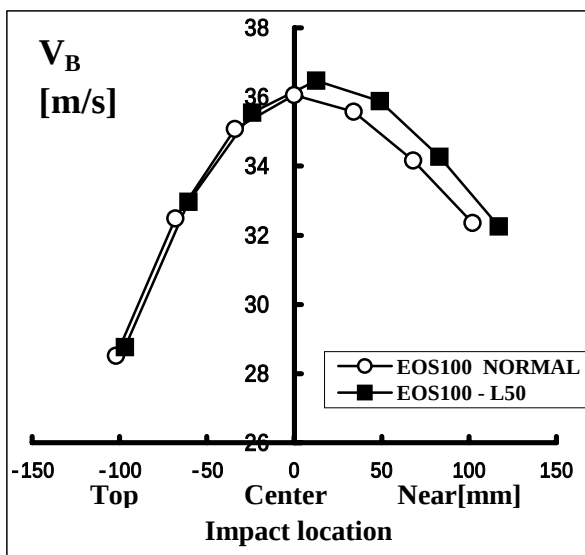


図 37 従来の 29in 長ラケット (EOS100-L50) と 27in ラケット (EOS100 NORMAL) のフォアハンド・ストロークにおけるボールの飛び V_B の予測、横軸はラケット面中心からの衝突位置 (先端側マイナス、根元側プラス)。

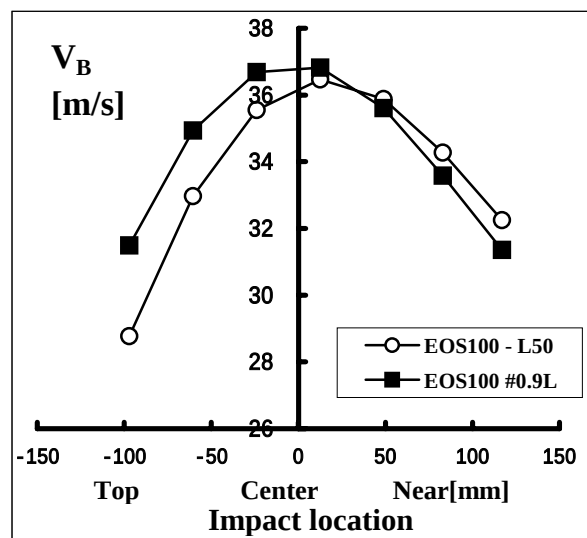


図 38 理想の長ラケット (EOS100-L50#0.9L) と従来型長ラケット (EOS100-L50) のフォアハンド・ストロークにおけるボールの飛び V_B の予測、横軸はラケット面中心からの衝突位置。

比較である。横軸はラケット面中心から打点までの距離 (先端側マイナス、根元側プラス) である。27 インチラケットをそのまま長ラケット化しても、(1) 反発係数および反発性が低下し、(2) ラケット面の中心および先端側寄りの打点では、ボールの飛びはほとんど向上しないから長ラケットの意味がない。

図 38 は、シミュレーション結果に基づいて提案した理想の長ラケット EOS100-L50#0.9L (重量 311g、バランス 391 mm、重心まわり慣性モーメント 13.7 gm^2) の性能予測である。反発性とボールの飛び (打球速度) を同時に向上させる。また、手首の衝撃力も低減される。

7. おわりに

最近多くなってきた超軽量型のラケットは、全体重量の軽さによって扱いやすさを実現しつつ、バランスをトップ寄り (先端側) にすることで、パワー不足を補おうとするコンセプトで作られており、アマチュア・プレイヤーの間では広く受け入れられている。だが、プロの世界ではどうかというと、まだまだ従来タイプの方が主流となっている。世界のプロが使っているラケット重量は全体的にけっこう重い (川副, 2001)。どういうラケットを選ぶかという問題に関しては、やはり身体的な条件、技術的な条件、プレイスタイルなどの違いを考慮したラケット選びが重要である。

参考文献

川副嘉彦 (1991): ラケットの科学, 月刊テニスジャーナル, 第 10 巻 7 号 ~ 第 10 巻 11 号, 130-135.

- 川副嘉彦 (1992a): テニスのインパクトのシミュレーション, シミュレーション (日本シミュレーション学会誌), 11-3, pp.167-173.
- Kawazoe, Y (1992b): Impact phenomena between racket and ball during tennis stroke. *Theoretical and Applied Mechanics*, **41**, 3-13.
- Kawazoe, Y (1993): Coefficient of restitution between a ball and a tennis racket. *Theoretical and Applied Mechanics*, **42**, 197-208.
- 川副嘉彦 (1993, 1994): ラケットの科学, 月刊テニスジャーナル, 第12巻8号~第13巻3号, 101-106.
- Kawazoe, Y (1994): Computer aided prediction of the vibration and rebound velocity characteristics of tennis rackets with various physical properties. In *Science and Racket Sports* (edited by T. Reilly, M. Hughes and A. Lees), pp.134-139. London: E & FN Spon.
- 川副嘉彦 (1995): 手で支持したテニスラケットの実験的同定とボールとの衝突における振動振幅の予測, 日本機械学会論文集, 61-584C, pp.1300-1307
- Kawazoe, Y (1997): Experimental Identification of Hand-held Tennis Racket Characteristics and Prediction of Rebound Ball Velocity at Impact. *Theoretical and Applied Mechanics*, **46**, 165-176.
- 川副嘉彦 (1999): テニスにおける衝突現象の解析とラケットの性能予測・評価, 計測と制御, 第38巻第4号, pp.268-273.
- Kawazoe Y (2000a): Mechanism of Tennis Racket Performance in terms of Feel. *Theoretical and Applied Mechanics*, **49**, 11-19.
- Kawazoe, Y and Tomosue, R (2000b): Sweet Area Prediction of Tennis Racket Estimated by Power: Comparison between Two Super Large Sized Rackets with Different Frame Mass Distribution. *Tennis Science & Technology* (Edited by Haake S. & Coe A.), pp.75-82. Oxford: Blackwell Science.
- Kawazoe, Y and Yoshinari, K (2000c). Prediction of the Impact Shock Vibrations of the Player's Wrist Joint: Comparison between Two Super Large Sized Rackets with Different Frame Mass Distribution. In *Tennis Science & Technology* (edited by S.J. Haake S. and A. Coe), pp.91-99. Oxford: Blackwell Science
- 川副嘉彦・神田芳文 (2000d): 超軽量・長尺テニスラケットの性能向上に関する研究 (重量付加による反発性とボールの飛びの簡略有限要素法モデルによる検討), 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集, No.00-38, pp.120-124.
- 川副嘉彦 (2001): 新テニスの科学, 月刊テニスジャーナル, 第20巻3号~第20巻6号, pp.54-58.
- Kawazoe, Y, (2002a): Mechanism of High-Tech Tennis Rackets Performance. *Theoretical and Applied Mechanics*, **51**, pp.177-187
- 川副嘉彦 (2002b): テニスラケットの性能予測に基づく軽量化の限界について, 日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集 No.02-9, CD-ROM 版, pp.1-6.
- Kawazoe, Y, Tomosue, R, Muramatsu, T, Yoshinari, K and Yanagi, H (2002c): Experimental Study of the Larger Tennis Ball Effects on the Comfort of the Wrist and the Elbow. In *The Engineering of Sport 4* (edited by S. Ujihashi and S. Haake), pp.192-199. Oxford: Blackwell Science.
- Kawazoe Y and Tanahashi R (2002d): Prediction of Various Factors Associated with Tennis Impact: Effects of Large Ball and Strings Tension. In *The Engineering of Sport 4* (edited by S. Ujihashi and S. Haake), pp.176-184. Oxford: Blackwell Science.
- 川副嘉彦 (2002e): テニスのプレイとラケットのマッチング (カタログには載っていないラケット選びの秘訣), 市民フォーラム「スポーツ用品と材料力学」, 日本機械学会・材料力学部門講演会講演論文集, No.02-05, pp.31-34.
- 川副嘉彦 (2003a): 材料が変えてきたスポーツ用具とパフォーマンス - テニスを例にして -, 日本機械学会誌, 106-1010, pp.13-15.
- 川副嘉彦 (2003b): テニスにおけるシミュレーションとラケット性能の予測, シミュレーション (日本シミュレーション学会誌), 22-1, pp.3-9.
- Kawazoe, Y, Tanahashi, R and Casolo, F (2003c): Experimental and theoretical criticism of the effectiveness of looser strings for the reduction of tennis elbow. *Tennis Science & Technology 2*. Blackwell Science. in print
- Kawazoe, Y, Tomosue, R, Yoshinari, K and Casolo, F (2003d): Prediction of the shock vibrations at the wrist joint with the new large ball compared to the conventional ball impacted to the tennis racket during forehand stroke. *Tennis Science & Technology 2*. Blackwell Science. in print
- ジョルジュ・ホームシ (井上球美子翻訳) (2002): アンドレ・アガシ ロングインタビュー, T. Tennis, 21巻10号, pp.52-57.
- 友末亮三・武藤芳照 (1988): 用具による安全対策 - ラケットとテニス肘 -, 臨床スポーツ医学, Vol.3, No.6, pp.631-635.