

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

川副嘉彦*

ABSTRACT At the current stage, the terms used in describing the performance of a tennis racket are based on the feel of an experienced tester or a player. However, the optimum racket depends on the physical and technical levels of each user. Accordingly, there are many unknowns regarding the relationship between the performance estimated by a player and the physical properties of a tennis racket. This paper predicts racket performance in terms of the coefficient of restitution, the rebound power coefficient, and the post-impact ball velocity relevant to the power of the racket. It also predicts racket performance in terms of the impact shock vibrations of player's wrist joint, which might be related to the feel or comfort. It is based on the experimental identification of the racket-arm dynamics and the simple nonlinear impact analysis, clarifying the mechanism of a difference in performance between the rackets.

1. テニスラケットの性能と性能評価の現状

テニスは体験により修得するものだから主観的なものである。したがって、ラケット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。現状では、ラケットの性能評価は、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、人間の評価が優先する。一般プレイヤーにとっては、コート上でボールを実際に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。

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。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。すなわち、用具とプレイヤーの相互作用によりスポーツとしてのパフォーマンスが向上する。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。スポーツのパフォーマンスは複雑系の世界である(図1)。ここにスポーツ用具性能評価の難しさがある。

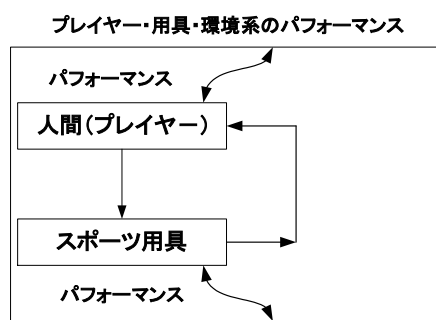


図1 プレイヤー・用具・環境の相互作用によって発現するパフォーマンス

一般にラケットに求められる基本的な性能は、ボールの飛び(ラケットのパワー)、コントロール、打球感といわれている。「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もある。一方、障害と用具の問題は複雑であるが、テニス肘になりやすいラケットが存在することを多くのプレイヤーは経験的に認めている。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」と言われているが、マイナス面も存在する。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振動が大きくなる。一般プレイヤーの場合は、テニスの基本ができていなくても軽量化のおかげでラケットを容易に振り回せるようになったため、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。滑車でストリングスを支えるラケットROLLER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」、圧電素子をフレームに組み込んだ「インテリ・ファイバー」などは手に伝わる振動を低減しようという試みである。

2. 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

日本シミュレーション学会誌に「テニスにおけるインパクトのシミュレーション」という記事¹⁾を書かせていただいたのは1992年であった。10年前である。衝突モデルのポイントおよびボールとラケットの反発係数の導出法についてはそこで述べた。すなわち、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2)、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3、図4)。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

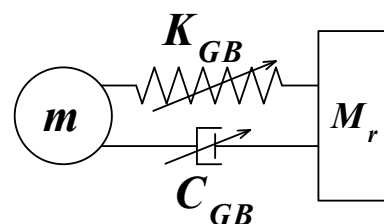


図2 ボール・ストリングス複合系の衝突モデル

伝わる衝撃力を計算するための図4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²⁾。

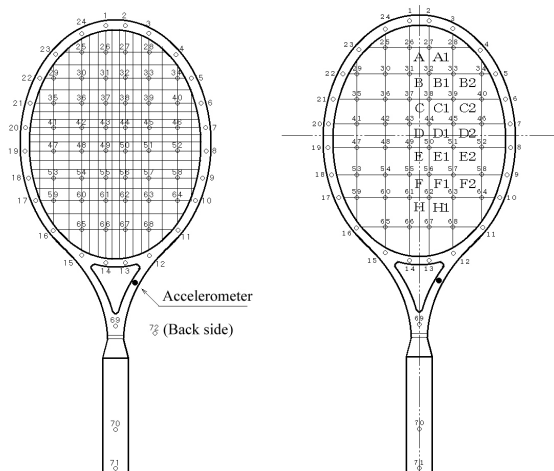


図3 スtrings・メッシュと打点
(Strings上の4点でボールと接触するとして同定する)

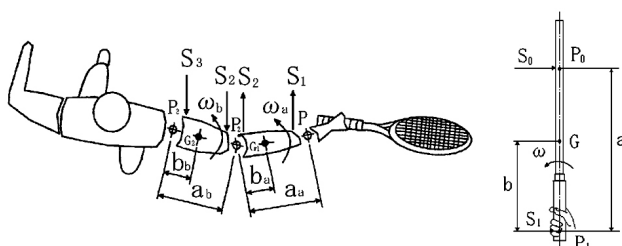


図4 衝撃力予測のための腕系モデル

ここでは、スイングモデルを与えてボールを打撃したときのラケットの性能予測および腕系衝撃振動の予測について述べる^{2)~4)}。また、同定したラケットの物理特性をベースにして有限要素法・衝突シミュレーションを行うことにより構造変更した場合の性能を予測することができる。スイングモデルを与えて理想のラケットを求めることになる^{5), 6)}。

図5はスイング・モデルである。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）を想定して、肘と手首の関節角度を一定にして、肩関節トルク $M_s = 56.9 \text{ N} \cdot \text{m}$ を与えたときのラケット・ヘッド速度 V_R で $V_{R0} = 10 \text{ m/s}$

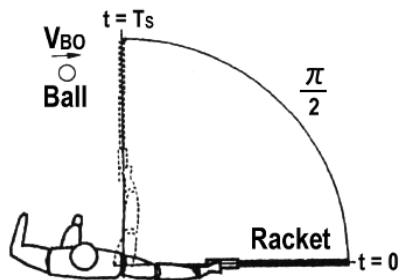


図5 スイング・モデル（グランド・ストローク）

で飛んでくるボールを打撃する。

グランド・ストローク打撃において、図6の手首関節の衝撃振動（加速度）を測定した波形と予測した波形を図7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である。計算波形はやや大きめであるが、実測波形の特徴を表している。

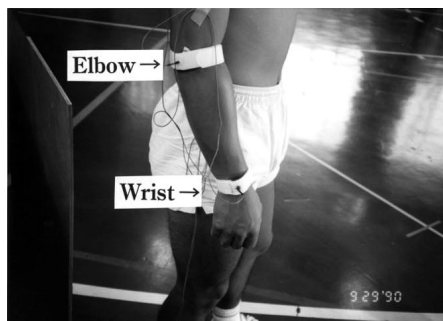


図6 手首関節と肘関節の衝撃振動の測定

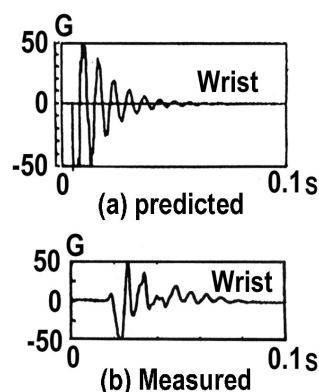


図7 グランド・ストロークにおける手首関節の衝撃振動（加速度）波形の予測，先端側のオフセンターで打撃した場合：（a）計算値 （b）実測値

3 誤解だらけのラケットの常識

3.1 Stringsを緩く張るとボールはよく飛ぶか

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かなり低下する。衝突速度 10 m/s では 0.68 、 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、Strings面にボールを衝突させたときの反発係数は衝突速度 $14 \sim 25 \text{ m/s}$ の範囲ではほぼ 0.83 程度であり、高い値を示す。ボールの入射速度、Stringsの種類や張り方、テンション（初張力）にあまり影響されないのが特長である。鉄のボールをStringsに衝突させたときの反発係数は完全弾性衝突に近い。このStringsの優れた弾性によって楽にボールが打てるのである。しかし、「Stringsを緩く張ると、ボールがよく飛ぶ」と言われる。

図8は、Strings・テンションを $25, 45, 65$ ポンドと大きく変えたときの反発性への影響を詳細に調べた実験結果である。Strings・テンションの実用範囲は、 $45 \text{ lbs} \sim 65 \text{ lbs}$ 、横軸はボールの入射速度である。また、平均的衝突速度領域は一般プレイヤーでは $20 \sim 30 \text{ m/s}$ 、上級者では $25 \sim 35 \text{ m/s}$ 、世界最高

速度サーバーのヘッド速度は40 m/s程度である。衝突速度20m/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 30m/s の場合はテンション（初張力）を変えても反発係数はほとんど変わらない。ラケット・ヘッドが固定されている（ラケットの重さが無限大に近い）条件での結果だということを考え合わせると、テンションを 10% 程度増減してもボールの飛びに大きな違いはないことは容易に想像できる。衝突シミュレーション結果による現象の説明は後に述べる。

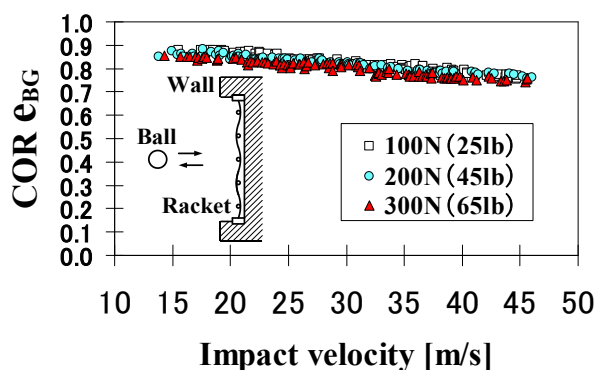


図8 スtringsとボールとの反発係数 e_{BG} におよぼすテンションの影響（ミラノ工科大学 F. Casolo 教授提供のデータを書き改めたもの）

3.2 Stringを緩く張るとテニス肘防止になるか

Stringを緩く張るとテニス肘防止になるとよく言われる。

図9は、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（加速度）の実測波形である⁷⁾。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ている。衝突解析による説明は後に述べる。

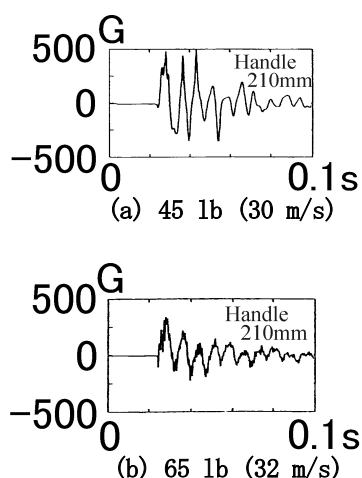


図9 ラケット・ハンドルの衝撃振動とテンション（初張力）

3.3 「Stringを緩く張ると接触時間が長くなるか

「テンションが低いほどインパクト・タイム（ボールとString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⁸⁾に載っている12m/s以下のデータはそうになっている。

図10は、String・テンション（初張力）55 lbsと75 lbsの場合の衝突速度に対する接触時間の実測結果）である。衝突速度 20 m/sではテンションの差の影響はほとんどなくなる。衝突解析による理論的説明は後に述べる。

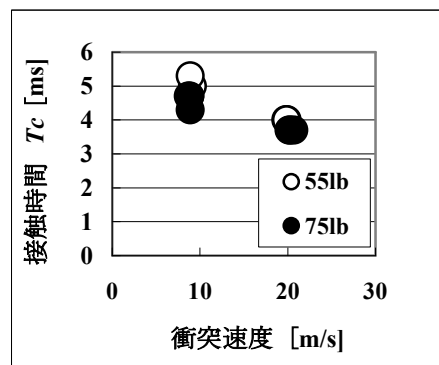


図10 接触時間におよぼすString・テンション（初張力）の影響（実測値）

3.4 ボールとStringの誤解を解く

図11のように、(a)ボールおよび(b)ボール・String複合系の復原力・変形特性を測定すると、図12のようになる。実用範囲においてボールもStringも変形量の増大とともに強い非線形の硬化ばね特性を示す。

Stringの面圧（たわみ剛性のこと）を%で表示する市販の面圧計測器がある。ただし、この%表示の数値の根拠は不明である。Stringの張替えのとき面圧を指定するユーザーは、プロのStringヤーでも手に負えない。この面圧とテンション（張るときの張力）の関係についても誤解が多い。

図13は、ボールを打撃したときの衝突速度に対するString面の面圧（等価ばね剛性）を衝突解析により予測した例である。衝突速度に対応する接触時間が等しくなるような等価ばね剛性を考えている。Stringの「面圧」（たわみ剛性）は衝突速度にほぼ比例して高くなり、衝突速度により10倍近く変化する。図12のように、Stringは変形が増すほど次第に変形しにくくなるからである。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。図14は、横軸をStringの変形量（たわみ量）にとったものである。面圧は、張り上がりテンションにほとんど依存せず、変形量で決まる。

図15は、衝突速度に対するStringの変形量（たわみ量）の解析結果である。Stringを緩く張るほど衝突におけるStringの変形量は大きい。一方、図16はボールの変形量（つぶれ）である。Stringを緩く張っても、硬化ばね特性のためにボールの変形量はほとんど変わらない。打球速度におよぼすString・テンションの影響が小さいのは、ボールの変形量の差が小さいからである。

衝突速度の増大とともに図2のボール・

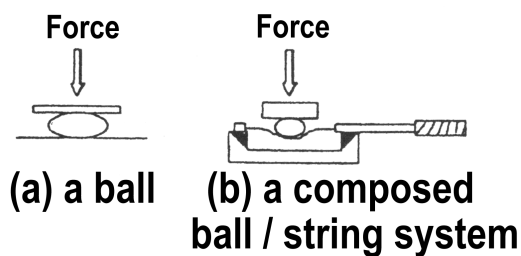


図11 復原力・変形特性の測定

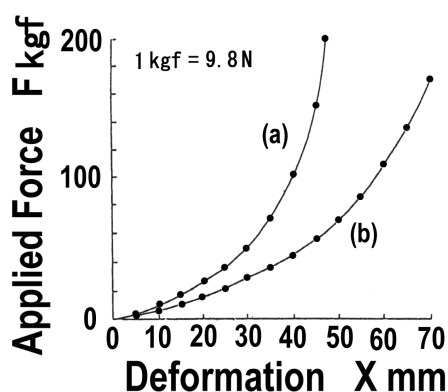


図12 ボールとストリングスの変形と復原力特性

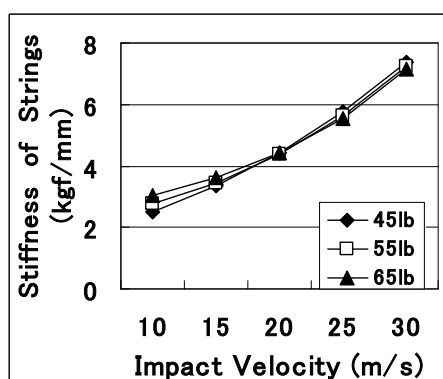


図13 ストリングス面圧（たわみ剛性）におよぼすテンションの影響（予測値）：縦軸：面圧，横軸：衝突速度，ラケット：Prince SG

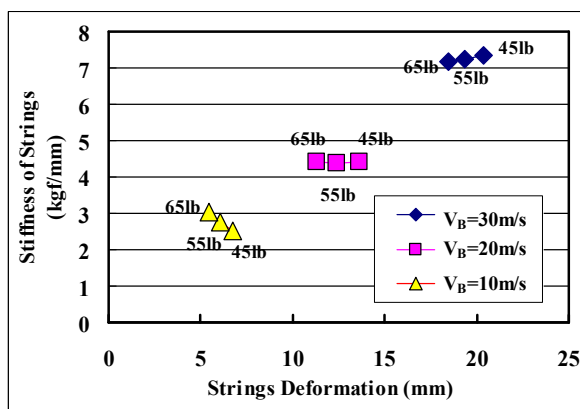


図14 ストリングス面圧（たわみ剛性）におよぼすテンションの影響（予測値）：縦軸：面圧，横軸：変形量， V_B は衝突速度。

ストリングス複合系の減衰係数 C_{GB} は大きく増大するが、ばね剛性 K_{GB} が増大するために減衰比がほぼ一定になる。衝突速度が増してもボールとストリングスの反発係数が大きくは低下しない理由である。

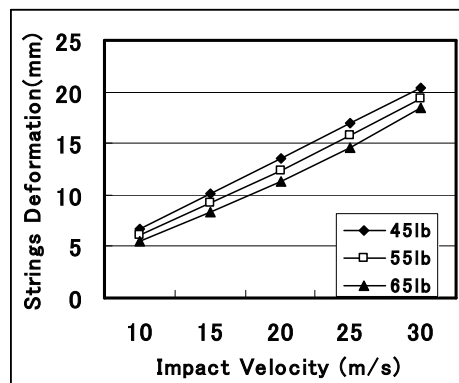


図15 ストリングスのたわみ量におよぼすテンションの影響（予測値），横軸：ボールとラケットの衝突速度（打点：ストリングス面中央）

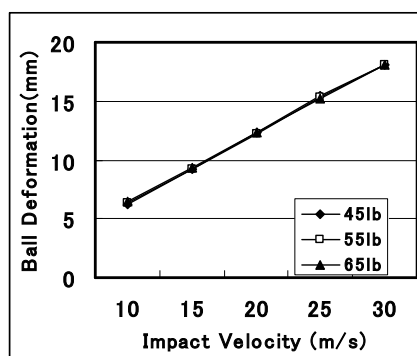


図16 ボールのつぶれとテンション（予測値），縦軸：ボールの変形量（つぶれ），横軸：ボールとラケットの衝突速度（打点：ストリングス面中央）

図17は、接触時間におよぼすテンションの影響を示す解析例である。「テンションが低いほどインパクト・タイムが長い」というのは、衝突速度が15m/s以下の遅い速度のときしか成り立たない。

ボールとストリングス面との間に作用する衝突力にも、実際のプレイでは、テンションはほとんど影響しない。したがって、ラケット・ハンドルの衝撃振動の実測値（図9）も説明できる。

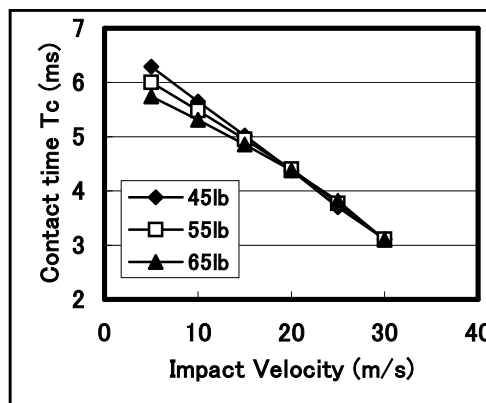


図17 接触時間におよぼすテンションの影響（予測値）

4. セレス選手の大きなラケット

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）が数年前に話題になったことがある。フェイス（打球面）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であった。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のである。

なぜ彼女がこのラケットを選んだかという理由は、スポーツ工学の成果から次のように説明できる。

フェイス面の大きさはラケットの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、重量バランスとスイング・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理由として考えられる。図18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（重量約290g）で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。横軸は打点位置、衝突速度は30m/s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振幅が大きくなっている。この結果から、フェイス面積130 in²のラケットの衝撃振動が大きくなることは十分予想される。

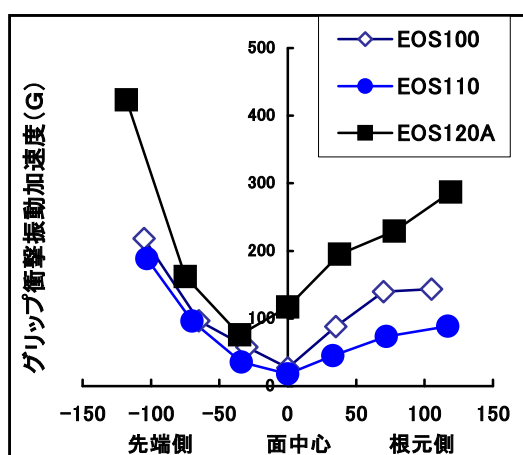


図18 手首関節加速度振幅（初期ピーク値）におよぼすラケット・フェイス面積の影響（予測値），横軸は打点位置

5. 軽量化の限界の予測

市販の最軽量ラケット（TSL, 224g）のボールの飛び

を平均的な軽量ラケット（120A, 292g）、従来型重量バランス（120H, 354g）と比べると、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⁹⁾。また、図19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（図6）の衝撃振動ピーク値が著しく大きい。軽量化の行きすぎである。

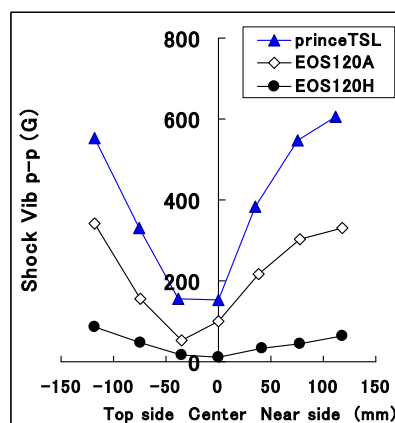


図19 市販最軽量ラケットTSLと手首関節の衝撃振動ピーク値（加速度 G: 9.8 m/s²）

6. 理想の長尺ラケットの性能予測

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）の登場は画期的であり、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。しかし、長ラケの客観的な性能評価は明らかではなく、ユーザーの評価もまちまちであり、最近では、むしろ 27 インチに近いラケットがよく使われている。これでは長ラケと言いがたい。

図20は、有限要素法衝突シミュレーション計算により、29in長ラケ(EOS100-L50, 290g)と27inラケット(EOS100 NORMAL, 290g)の打球速度予測値の比較である。横軸はラケット面中心からの距離（先端側

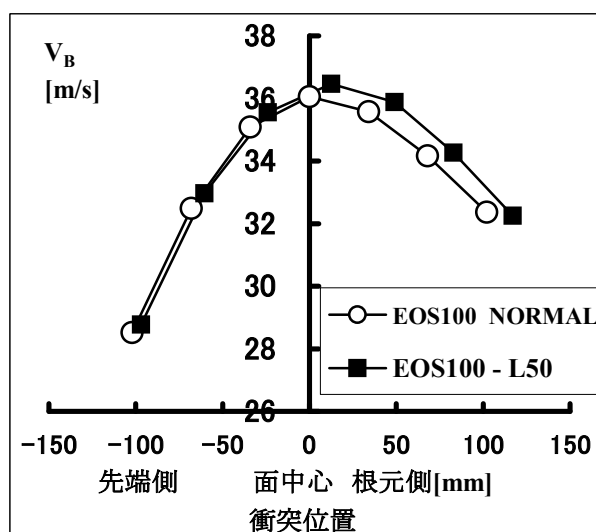


図20 従来の29in長ラケ(EOS100-L50)と27inラケット(EOS100 NORMAL)のフォアハンド・ストロークにおけるボールの飛び V_B の予測、横軸はラケット面中心からの衝突位置（先端側マイナス、根元側プラス）。

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。

図21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(重量 311g, バランス 391 mm, 重心周り慣性モーメント 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。グリップ位置の衝撃性も改善される⁶⁾。

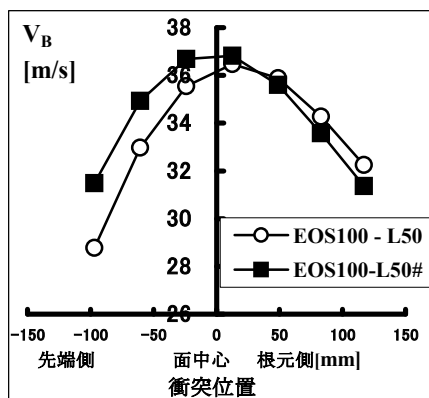


図21 理想の長ラケ EOS100-L50#と従来型長ラケのフォアハンド・ストロークにおけるボールの飛び V_B の予測、横軸はラケット面中心からの衝突位置(先端側マイナス、根元側プラス)。

7. 先端構造によるラケットの打球感の改善効果

滑車(ローラー)でストリングスを支えるラケット(ROLLER2.6)の制振効果を予測した結果が図22である。ラケット面全体の打撃点で手首関節の衝撃振動が抑制されている。

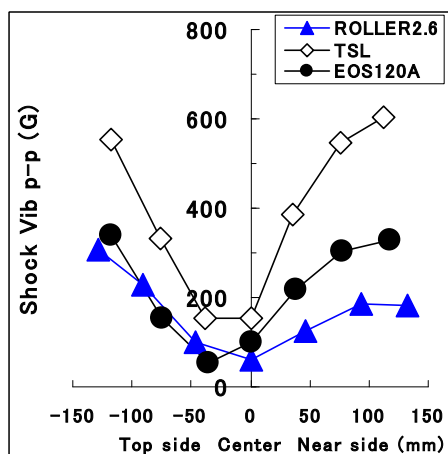


図22 滑車(ローラー)でストリングスを支えるラケット(ROLLER2.6)の制振効果の予測(手首関節の衝撃振動加速度ピーク値)

圧電素子をラケット首部に組み込んだ「インテリ・ファイバー」ラケット(図23)の制振効果を予測した結果が図24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側で振動が低減されているが、まだ十分に

はない。



図23 インテリ・ファイバー・ラケット I.S10 (114 in^2 , 241g, 27.75 in)

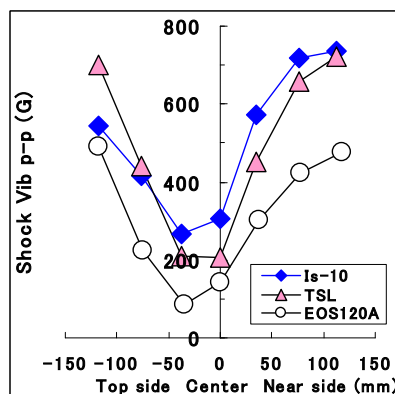


図24 インテリ・ラケット (IS-10) の制振効果の予測(手首関節の衝撃振動加速度ピーク値)

8. おわりに

プレイヤーは用具の小さな変化をきわめて敏感にセンスする。これが、メンタル的にプレイヤーに大きな影響を与え、パフォーマンス向上のトリガーになっているように筆者には見える。用具のわずかな進歩がプレイヤーを大きく進化させるのである。たとえば、ストリングスが打球に与える直接的な影響は小さくても、ストリングスが変わると、たわみ挙動、残留振動、打球音などに影響する。これが、プレイヤー、特にトップ・プロのパフォーマンスにはかなり影響するようである¹⁰⁾。メンタルな部分のシミュレーションは難しい。

おわりに、図8の実験データを提供いただいたミラノ工科大学 F. Casolo 教授に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 川副嘉彦, 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(1992), pp. 167-173.
- 2) Y. KAWAZOE, Mechanism of Tennis Racket Performance in terms of Feel, Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 49, (2000), pp. 11-19.
- 3) 川副嘉彦, 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, 1300/1307 (1995)
- 4) 川副嘉彦, 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(1999), pp. 268-273.
- 5) 川副嘉彦・神田芳文, テニスにおけるボール・ラケット系の衝突現象の解析(フレーム振動の影響とラケ

ットの最適設計), 日本機械学会論文集, 59-563, C, 2116/2123(1993).

6) 川副嘉彦・神田芳文, 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, 120/124(2000)

7) Y. Kawazoe et al, Are Looser Strings Really Effective for the Tennis Elbow?, The Book of the 4th International Conference on the Engineering of Sport, pp.52-57(2002)

8) H. Brody, Tennis Science for Tennis Player, 12, University of Pennsylvania Press(1987)

9) 川副嘉彦, 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Dynamics & Design Conference 2002 講演論文集No. 02-9, CD-ROM版, 1/6(2002)

10) 川副嘉彦, 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, 13/15(2003)