

テニスのデカラケ，厚ラケでコントロールとスピードがよくなるのはなぜ 川副嘉彦^{*1}

Why do ball control and power improve with large-sized and wide-body rackets

Yoshihiko KAWAZOE

Key words: Sports engineering, Dynamics, Tennis Racket, Impact, Spin, Performance

1 テニスラケットと性能

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・ポーム」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。テニスはそ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 in²（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。面サイズは平方インチで表示されることが多い。

ラケットは大きく変わってきたが，1976 年に現れた 110 in²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 in²～115 in²が主流であるが，セレス選手の大きなラケット 130 in²や超大型サイズ 137 in²ラケット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。当初は従来ラケットの 4 倍近くまで剛性を高めたラケットが主流であったが，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。

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。

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，最近の最も軽いラケットは 220 g に達している。しかし，軽量化は限界に達した感があり，最近のラケットの特長は打球感の改善である。

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



図1 ラケットの変遷（木製と厚ラケ，デカラケ）

^{*1} 埼玉工業大学

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。

2 ボールとストリングの特性

図1は、(a)ボールおよび(b)ボール・ストリングス複合系の復原力・変形特性の実測結果である。図2の K_G , K_B , K_{GB} はたわみ量 X に対するストリング、ボール、ボール・ストリングス複合系の等価ばね剛性 (K_G は一般に面圧と呼ばれている) であり、図1から導いた結果である。実用範囲ではボールもストリングスも変形量の増大ともなって強い非線形の硬化ばね特性を示すのが特徴である。

図3は、硬い壁にボールをぶつけたときのボールの入射速度（衝突直前の速度）に対する跳ね返り速度の割合、いわゆるボールと壁の反発係数実測値である。横軸はボール入射速度である。入射速度が増すほど、ボールの変形（つぶれ）によるエネルギー・ロスの割合が大きくなり、反発係数が下がっていく。

一方、図4は、ラケットヘッドを壁に固定して、ストリング面にボールをぶつけたときの反発係数実測値であり、ボールとストリングスの反発係数 e_{BG} と呼ぶ。ストリングス・テンションを 25, 45, 65 ポンドと大きく変えている。

ストリングス・テンションの実用範囲は 45 lbs～65 lbs, 平均的衝突速度領域は一般プレイヤーでは 20～30 m/s, 上級者では 25～35 m/s, 世界最高速度

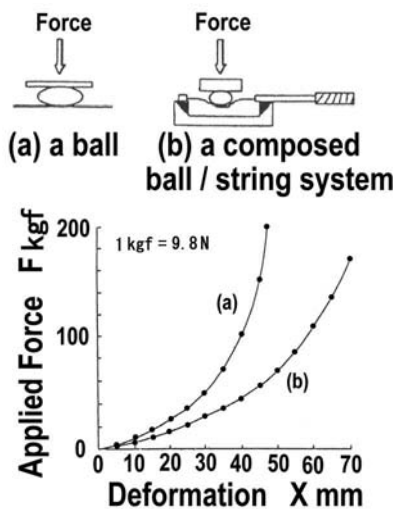


図1 ボールとストリングスの荷重試験

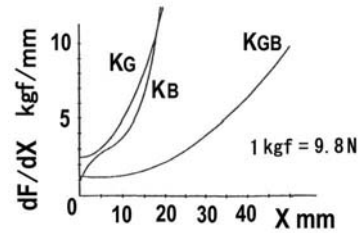


図2 ボールとストリングスの荷重試験結果(ボールとストリングスの変形と復原力特性) (1)(2)

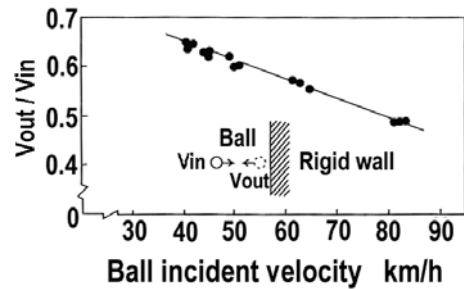


図3 ボールと剛体壁の衝突におけるボールの反発特性：縦軸はボールの入射速度（衝突直前の速度）に対する跳ね返り速度の割合、横軸はボール入射速度

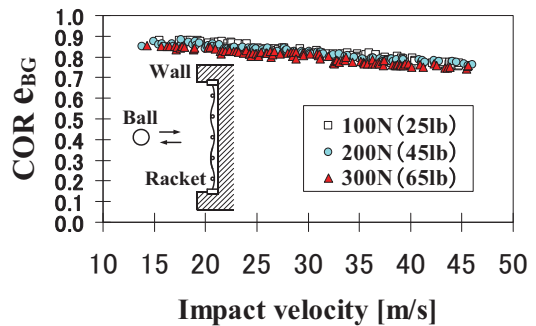


図4 ストリングスとボールとの反発係数 e_{BG} におよぼすテンションの影響 (縦軸：反発係数 e_{BG} , 横軸：衝突速度) (5)

サーバーのヘッド速度は 40 m/s 程度である。図3と図4を比較すると、反発性に関するストリングスの重要性が理解できる。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 100%に近い。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。図4からテンション毎の反発係数 e_{BG} の平均値を求めると、衝突速度 20m/s の場合、テンションを 44% 増減しても、ボールとストリングスの反発係数 e_{BG} 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を変えても反発係数 e_{BG} はほとんど変わらない。

「ストリングスを緩く張るとテニス肘防止になる」

と言われることがあるが、これは誤解である。通常テンションと称しているのは、ストリングスを張ったときのテンション（初張力）であり、ボールを打撃したときのテンション（張力）は張り上がりテンション（初張力）に比べてはるかに大きくなる。ストリングスの「面圧」（たわみ剛性）は、図5に示すように、たわみ量（あるいは衝突速度）に比例して高くなり、衝突速度により10倍近く変化する。したがって、初期張力の違いはインパクトに大きくは影響しないのである。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」とも言われることがあるが、これも誤解である。現実的な衝突速度（20 m/s以上）では、図5と同じ理由により、テンション（初張力）の影響はほとんどなくなる。

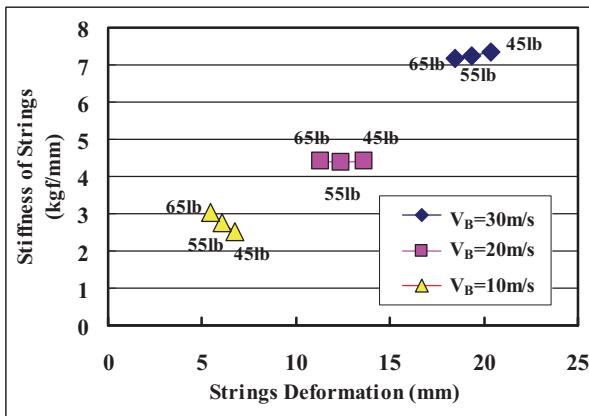


図5 ストリングス面圧（たわみ剛性）におよぼすテンションの影響（計算値）：縦軸：面圧，横軸：変形量， V_B は衝突速度。

3 ラケットのパワーのメカニズム

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を実験的に図6のように1自由度の等価系に同定し、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も実験的に同定することができる。

図7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、 V_{B0} で飛んでくるボールをラケット・ヘッドが90度回転したときの速度 V_{R0} で打撃

する。図8は宙吊りラケットのストリング面の中心および中心を外れた位置にボールが30 m/s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・フレームの振動が小さく、反発係数が高い。図9は、宙ぶりの静止ラケット ($V_{R0}=0$) 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 （反発係数と定義する）の実測値と予測値であり、ラケットの反発性能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。

インパクトにおける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小さいほど、ボールとラケットの反発係数 e_r が高いことになる。衝突位置での反発係数 e_r が高く、衝突位置に換算したラケットの換算質量 M_r が大きいほど（慣性力モーメントが大きいほど）反発係数 e は大きい。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_B とすると、

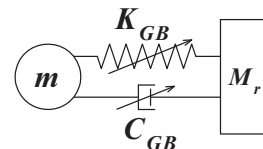


図6 ボール・ストリングス複合系の衝突モデル

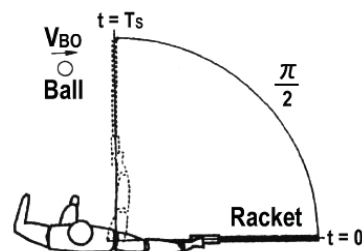


図7 スイング・モデル（グランド・ストローク）

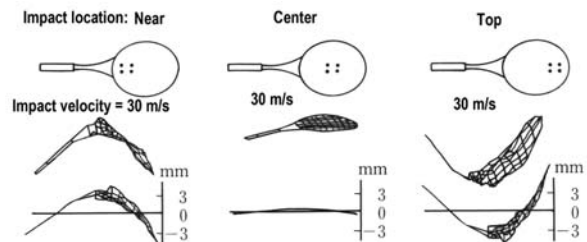


図8 インパクトの瞬間のラケットの初期振動振幅計算値，衝突速度：30 m/s，衝突位置：左からストリング面の根元側，中心，先端側。

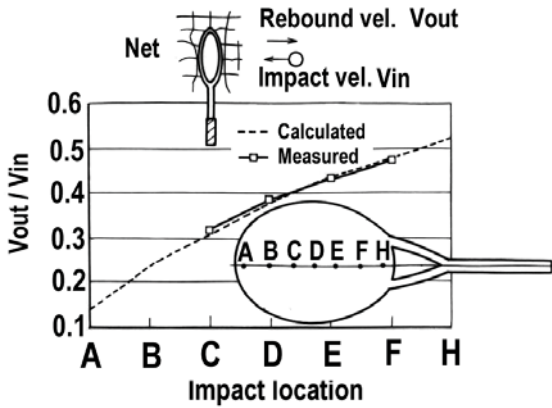


図9 反発特性（反発力係数） e の実測値と予測値

打球速度 V_B は、反発速度成分 eV_{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。

4 ボールのコントロールとラケットの面安定性

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。実際のプレイではボールの回転（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。

図10は、ラケット面の長手軸から外れた横の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ラケット面が傾く回転角度 θ を示す。ラケット面の先端側では長手軸周りには回転しにくいですが、面の中心から根元側では、軽量型ラケットは接触時間約 3/1000 秒間に約 10 度程度傾く。ラケット面が長手軸周りに傾くと、打撃後のボール速度 V_B の方向が意図した方向とずれることになる。面安定性もコントロールを良くする一つの要素である。長手軸周りの慣性モーメントが大きいほど面安定性が良い。

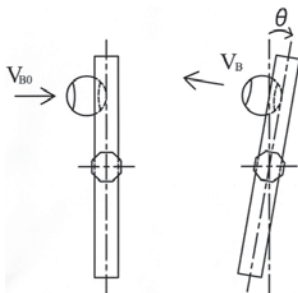


図10 オフセンター打撃における面安定性

5 デカラケ、厚ラケでコントロールとスピードがよくなるのはなぜ

図11は、打球面サイズ（フェース面積）が 100, 110, 120 in² の3本の軽量ラケット（図1(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12は反発力係数 e の予測値であり、図13は図7のスイングによるボールの飛びの予測値 V_B である。

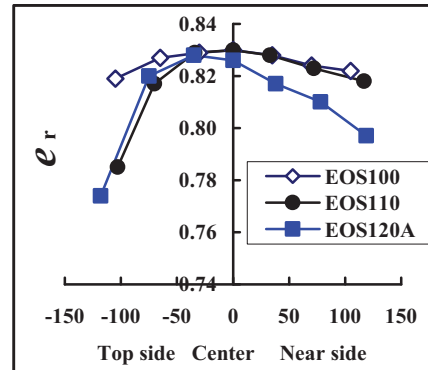
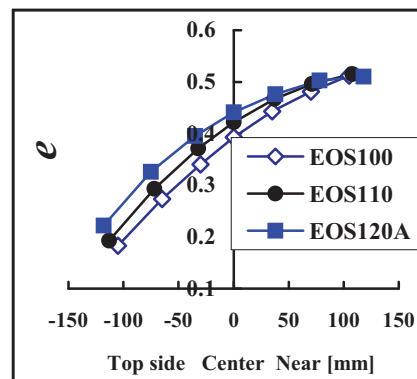
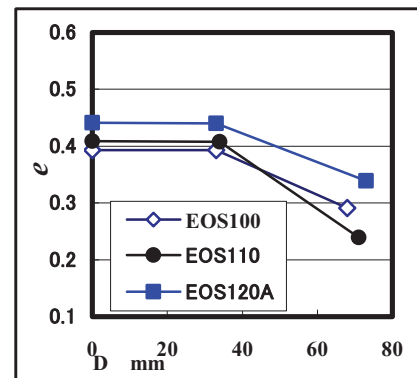


図11 打球面サイズ（面積）と反発係数 e_r （質量・フレーム剛性のほぼ等しい軽量ラケット）



(a) along the longitudinal line



(b) off the longitudinal line near the center

図12 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）

打球面が広がるほど、オフセンター打撃でのフレーム振動によるエネルギー損失が大きく、反発係数 e_r は低下するが、反発力係数 e 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や長手軸中心線を外れたオフセンターでボールの飛びが向上する。デカラケの反発力係数が高いのは、同一質量でも慣性力モーメントが大きくなり、打点に換算した換算質量が大きいためである。デカラケは、長手軸周りの慣性モーメントも大きいので、インパクトでの面安定性も良い。

図 14 は、木製ラケット（図 1(a)）と初期の厚ラケ PROTO-02（図 1(b), 重量が木製に近い）の反発係数 e_r の予測結果である。木製に比べて、厚ラケの方が反発係数は高いが、差異が大きいのはラケット面の極端な先端で打撃した場合であり、通常の打撃では一般に言われるほどの大きな違いはない。厚ラケのパワーが大きい理由は、オフセンター打撃におい

てフレーム振動が小さく、したがって、反発係数が高いからである。

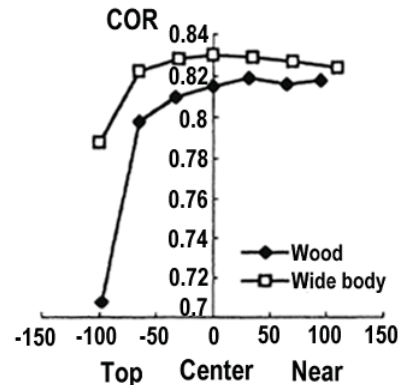
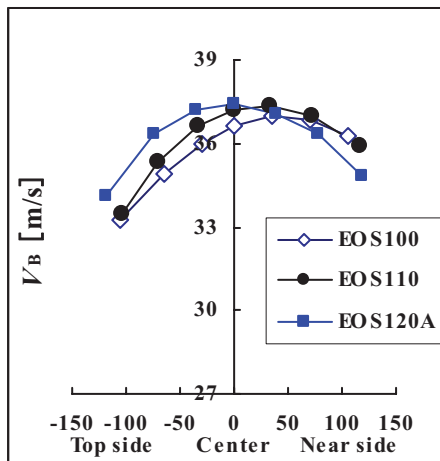
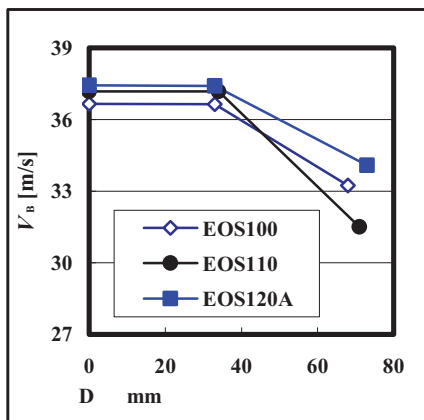


図 14 木製ラケットと初期の厚ラケ PROTO-02 の反発係数の予測



(a) along the longitudinal line



(b) off the longitudinal line near the center

図 13 打球面サイズ（面積）とボールの飛び

6 スピンのメカニズムとラケットのスピン性能

打球面のラージサイズ化と軽量化により、ラケットの操作性がよくなるとともに一般プレイヤーでもトップスピン打法が一般的になり、ラケットのスピン性能に関心が集まる一方で、ラケットやストリングの種類とスピン性能の関係は複雑であり、長い間ほとんど謎であった。ストリングの摩擦が大きいほどスピンのかかりやすいという仮説に基づいて、ヘッドを固定したラケットにボールを斜めに衝突させたときのスピン量（時間当たりの回転数）の実験室での測定が重ねられてきたが、ラケットやストリングの違いによるスピンの違いは明確にできなかった。

高速ビデオ画像解析技術の進歩によって、ごく最近、トップスピン打撃におけるラケットのスピン性能のメカニズムが明らかになった。すなわち、ストリングの摩擦が大きいほどスピンのかかりやすいというのが従来の仮説であったが、これとは反対に、摩擦が小さいほど縦糸と横糸がお互いに滑ってボールがストリングに食いつきやすく、また縦糸が元に戻りやすいので横に伸びた縦糸が元に戻るときの復原力によりスピンのかかりやすい（図 15）。新品のストリングほどスピンのかかりやすく、ストリングを張ってから時間が経過するほど縦糸と横糸の交差点にノッチ（溝）ができやすいため、スピンのかかりにくくなるが、ノッチ（溝）ができたストリングでも交差点を潤滑すると、スピン量が増すことがわかった。ス

ピン量が増すとインパクトによる直接的な衝撃力も低減し、接触時間が長くなり、ラケットや手に伝わる衝撃振動も低減する。

コート上ででのテスターによるトップスピン打撃（図 16）における高速ビデオ画像解析結果（図 17）によると、ストリングを張ってから 1 日 3 時間、1 週間ほど使用したラケットの場合、新品のストリングと比べるとスピンの量は平均 40% 低減する。しかし、すでに市販されている潤滑剤（世界特許取得）を塗るとスピンの量は平均 30% 増し、接触時間は平均 16% 長くなる。直線的な打球速度は、スピンのエネルギーに食われるので、平均 6% 低減する。スピンのかかりやすくと、コントロール性とホールド感が増す。潤滑剤がルールに適合することは国際テニス連盟（ITF）により認められている。

スピン・ガットと呼ばれる表面の摩擦が大きいナイロン系より、摩擦が少ないポリエステルのようなストリングの方が、スピンのかかりやすいことになる。すでに、ナイロン系に代わってポリエステル系が主流になっており、世界のほとんどのトッププロがポリエステル系を使用している。



図 15 ストリングの縦糸が横にずれやすくして戻りやすいほど、ボールの食いつきが良く、スピンのかかる。



図 16 テスターによるトップスピン打撃（1 万コマ/秒）

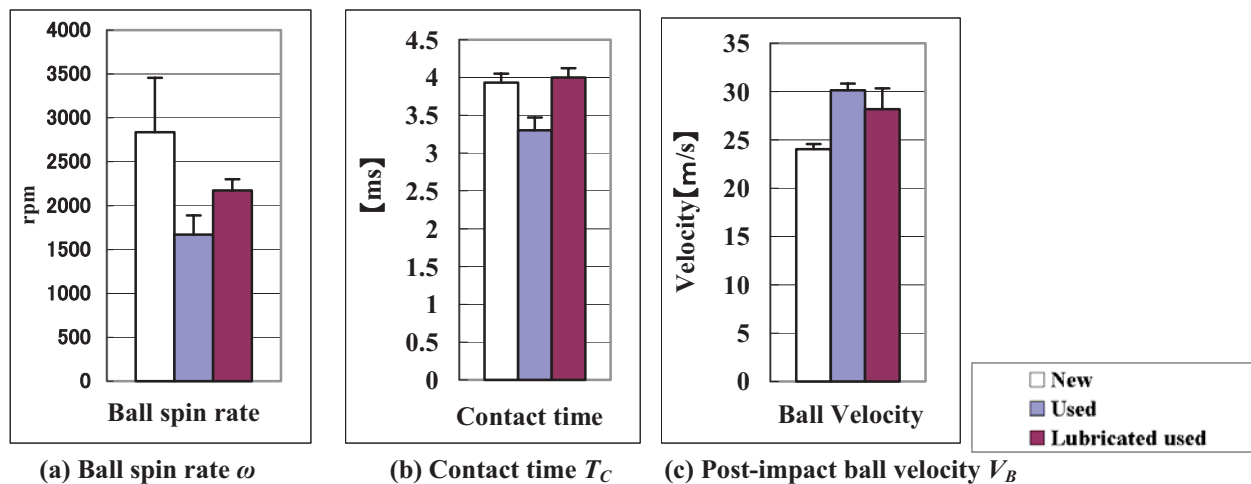


図 17 ストリングの状態とスピン性能（3 回平均値と標準誤差）

7 おわりに

アガシ選手がウィンブルドン 2002 の 2 回戦でパラドン・スリシャパという選手に敗れたとき、インタビューでストリングの技術的な問題を指摘した。

現代の名工に選ばれたバット造り職人・久保田五十一氏は、かつてプロ野球の衣笠選手に「握りが細かい」と指摘され、計測すると 0.2 mm 細かったとい

う。グリップの直径が 0.2 mm 細いだけでバットの性能は変わるはずがない。

用具の微妙な変化がパフォーマンスに大きく影響するのである。

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。ラケットが実際のプレー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。