

実験とシミュレーションに基づくテニスラケット変遷の性能論的考察

— 今、なぜ、フェイス面積100平方インチ、全長27インチ、重量300グラム、ポリエステル・ストリングか —

川副嘉彦 (川副研究室)

1. はじめに

テニスラケットは、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プレイヤーとの整合を考えたきめの細かい設計をめざす段階に至っている。しかし、メーカーのカatalogやテニス専門誌の記事などでは、スポーツ工学の進展にも関わらず、主観的な性能評価が多く、物理現象との矛盾や先入観による誤解も多い。したがって、一般ユーザーにとっては、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。本研究では、ラケットの仕様・物理特性と性能の変遷について実験とシミュレーションに基づいて吟味し、現在の標準的ラケットに至った理由を考察する。

2. ラケット重量、バランス、スイングウェイト（慣性モーメント）を統合したストリング面の打撃位置に換算した重量の重要性

ラケット重心位置と衝突位置との距離、および慣性モーメント（グリップまわりおよびストリング縦方向中心線まわり）が与えられれば、ラケット面の衝突位置に換算した換算質量 M_r を角運動量保存則から導くことができる。換算質量を導入すると、インパクトにおけるラケットの剛体運動をラケットの質点運動として扱うことができる。重力や筋力に比べて、インパクトの瞬間における衝撃力は1桁以上大きいとして、ラケットはプレイヤーの前腕（肘から手首まで）に自由ピン結合され、前腕は腕にピン結合され、腕は胴体にピン結合されていると考えると、上肢系の慣性効果を手に集中させた質量 M_r に帰することができる。したがって、質量 M_r をラケットハンドル（グリップ）上の手の握りの位置に付加し、グリップ端から手の位置までの距離 L_H を与えれば、ラケット・腕系についても換算質量 M_r を算出できる。表1は、超軽量型と従来重量バランス型の代表的ラケットの仕様・物理特性の例であり、図1は代表的ラケット2種のフェイス面・打撃位置における換算質量（換算重量）（：フェイス面中心では左：180g、右：200g）である。⁽¹⁾⁽²⁾

3. 実験とシミュレーションに基づくラケットのパワー、グリップ衝撃振動、ボール・コントロール性能のメカニズム

ボールとラケットの反発係数 e_r (COR) は、ラケット振動によるエネルギー損失 E_1 とボールとストリングスの変形によるエネルギー損失 E_2 を考慮することにより算出できる。ボールとラケットの衝突において、ストリング面を基準として、ボールの入射速度に対する跳ね返り速度の比 e を、反発係数と区別して、反発力係数 (the rebound power coefficient) と定義している。反発係数 e_r が高く、ラケット換算質量（重量） M_r が大きいほど、反発力係数 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_{B0} とすると、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。

図2は表1に示した代表的ラケット2種のフェイス面・打撃位置における反発力係数の例を示す。図3はインパクトにおけるフェイス面上の打撃位置とラケット面の安定性（白の部分はグリップ周りに回転、斜線部分は縦の中心線周りに回転）を示す。図4は面のグリップ周り回転と縦中心線周り回転の模式図である。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、面の中心から根元（スロート）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。ボールとラケットが接触している間にラケット面が傾くと、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。回転する方向は、縦と横の換算質量の小さい方に回転する。図7は大型サイズの代表的ラケット2種の主要な振動の節（白黒の境界線）を示す。軽量型ラケット（図7右）のグリップ上の節の位置は手の握りの位置から離れているために、ストリング面中心から外れたオフセンター打撃において、手に伝わる振動が大きい。⁽¹⁾⁽²⁾

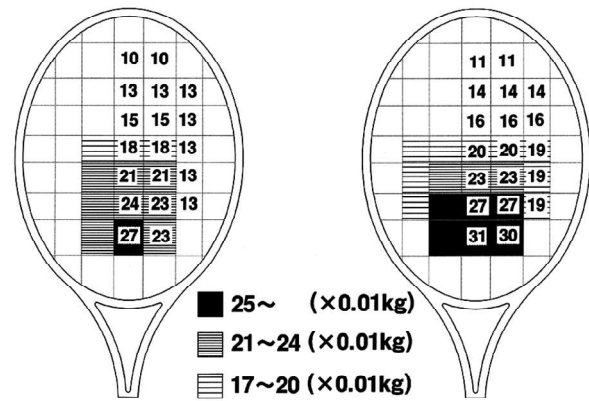
4. 結論

- (1) 市販ラケット重量225g～370g（フレーム210g～355g）のストリング面中心換算重量（厳密には質量）は175g～200g程度であり、プレイヤーの身体的・技術的条件が異なっても、重量は約300g(290g～315g)（フレームのみ重量：275g～300g）あれば十分である。
- (2) ストリング面中心付近でボールを打撃する場合は、フェイス面積の違いは小さく、フェイス面積115in²以上の軽量（290g以下、フレームのみ重量275g以下）の大型ヘッドは、オフセンターで打撃したときの手首関節に伝わる衝撃振動が非常に大きい。
- (3) 過去の全長29inラケット（長ラケ）は、ストリング面中心から根元側（スロート側）で性能が良いが、長ラケの意味がない。
- (4) 薄ラケでもフレーム剛性は十分であり、厚ラケとの違いが出るのは、フレームショットに近い場合である。ストリング面中心付近で打撃する場合、フレームは振動（変形）しない。
- (5) ストリングの反発性能と衝撃振動には素材による違いが小さい。ポリエステルは、ガット、ナイロンと比べて、スピン量が20%以上多く、ボール・コントロール性に優れ、ノッチがでにくいのでスピン性能の寿命も長く、スピン打撃では衝撃振動が少ない。

現場への提言：ラケット重量、バランス値、スイングウェイトのカatalog表示だけでは、ラケットの性能を予測するのは難しい。これらを統合したストリング面中心換算重量のカatalog表示をテニスラケット全メーカーへ要望する。

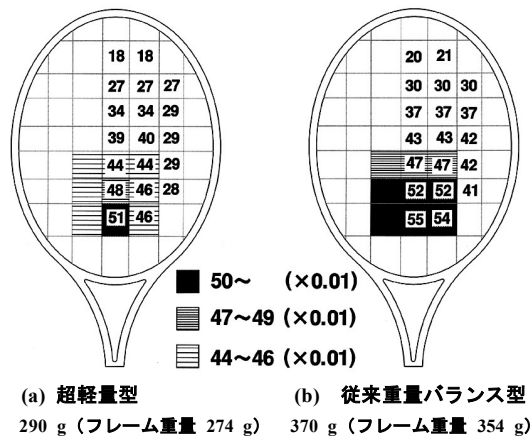
表1 超軽量型と従来重量バランス型の仕様(例)

ラケット	超軽量型 EOS100	従来重量バランス型 PROTO-02
ラケット全長	680 mm	680 mm
フェース面積	606 cm ² 100 平方インチ	606 cm ² 100 平方インチ
重量(ストリングス含む)	290 g	370 g
重量(フレームのみ)	274 g	354 g
バランス(張り上がり) (グリップ端からの距離)	350 mm	317 mm
重心まわり慣性モーメント I_{GY}	11.4 gm ²	14.0 gm ²
グリップまわり慣性モーメント I_{GR}	34.1 gm ²	36.6 gm ²
ラケット面長手軸まわり 慣性モーメント I_{AX}	1.12 gm ²	1.62 gm ²
ラケット面中心換算重量	175 g	196 g
フレーム基本曲げ振動数	171 Hz	215 Hz
ストリング・テンション	55 lb	55 lb



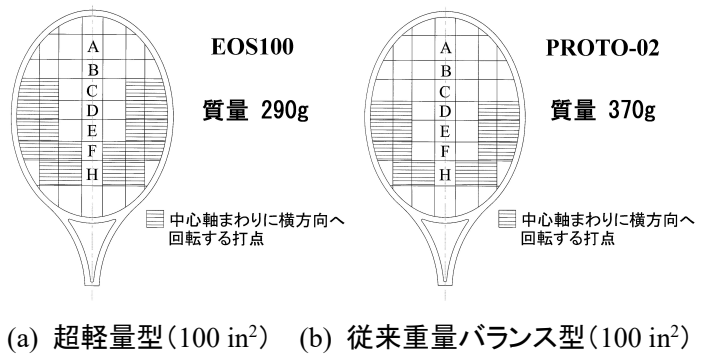
(a) 超軽量型 (b) 従来重量バランス型
290 g(フレーム重量 274 g) 370 g(フレーム重量 354 g)

図1 代表的ラケット2種のフェース面・打撃位置における換算質量(換算重量):(フェース面中心では左:180g, 右:200g)



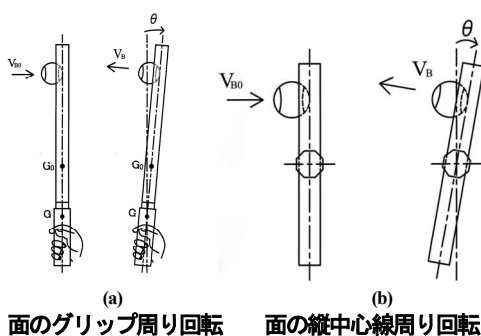
(a) 超軽量型 (b) 従来重量バランス型
290 g(フレーム重量 274 g) 370 g(フレーム重量 354 g)

図2 フェース面・打撃位置における反発力係数



(a) 超軽量型(100 in²) (b) 従来重量バランス型(100 in²)
290 g(フレーム重量 274 g) 370g(フレーム重量 354 g)

図3 フェース面上の打撃位置と面安定性(白の部分はグリップ周りに回転, 斜線部分は縦の中心線周りに回転)



(a) 面のグリップ周り回転 (b) 面の縦中心線周り回転
図4 インパクトにおけるラケット面の安定性

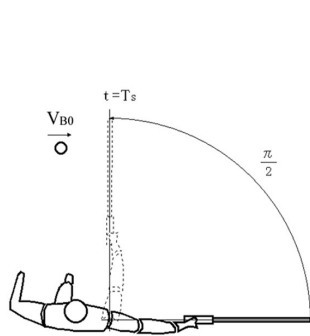
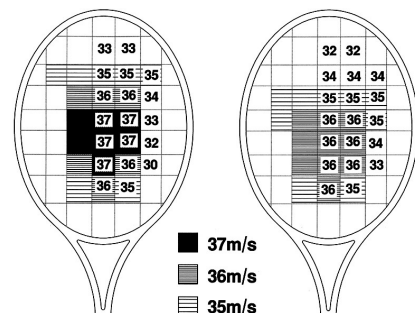
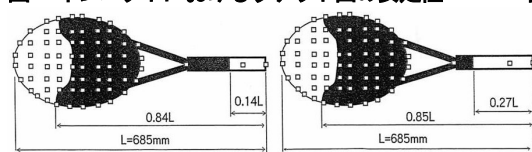


図5 スイング・モデル



(a) 超軽量型 (b) 従来重量バランス型
290 g(フレーム重量 274 g) 370 g(フレーム重量 354 g)

図6 フェース面・打撃位置における打球速度



(a) 従来重量型大型サイズ (b) 軽量大型サイズ
120 in², 349 g(フレーム 334 g) 120 in², 292 g(フレーム 275 g)

図7 ラケット2種の振動の節(白黒の境界線)

参考文献

- (1) Y. Kawazoe et al., Performance Prediction of Active Piezo Fiber Rackets in Terms of Tennis Power, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol.4, No.1, 2010, p.77-90.
- (2) Y. Kawazoe et al., Prediction of Impact Shock Vibrations at Tennis Player's Wrist Joint Comparison between Conventional Weight Racket and Light Weight Racket with Super Large Head Size, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol.4, No.2, 2010, p.331-347. (他は省略)