

# テニスラケットの性能予測・評価システム

Computer Aided Prediction and Estimation System for Racket Performance in Tennis

川副嘉彦\*

ラケットは軽量化によりパワーに関する性能を向上させてきたが、限界も明らかになってきた。一方、打球感の改善をめざした新しい発想・試みのラケットが次々と市販されている。従来、人間の感覚により評価されていたラケット性能を予測し、客観的に評価するシステムの開発とデータベースの構築例を紹介する。

## 1. はじめに

世界の元トッププレーヤー数人が国際テニス連盟 (ITF) に対して、最近のラケットの影響力を抑える対策をとるよう要求した。すなわち、

「プレーヤーはグラファイト、ケブラー、チタンなどから作られた最近のラケットを使って、以前では考えられなかった時速 240 キロメートルというスピードでボールが打てる」

「グリップ内部にチップを埋め込んでボールに当たった瞬間にラケットが硬くなるようなものまである」(図 1)

「ラケットの長さは 27 インチ以下、幅は 9 インチ以下にすべきだ。そうすればボールを打つ面がかなり狭くなり、もっとおもしろい試合をせざるをえなくなる」

「プロ野球では木製バットが使われている」

「ほとんどのトッププレーヤーは、どんな道具を使ってもいいプレーヤーであり続ける」

と主張した<sup>2)</sup>。「テニスにおける技術と伝統の調和」は ITF の関心事でもあり、彼らの要求に対応した形で、ITF では実験装置を開発してラケットの反

発性能測定が精力的に進められている。ただし、テニスラケットの性能はこの実験装置で得られるほど単純ではない。ラケットが変わればプレーヤーのスイングが変わる。スイングが変われば、ラケット性能も変わる。

ラケットは経験の産物であり、1960 年代前半までは木製で、フェース (打球面) 面積  $68 \text{ in}^2$  (平

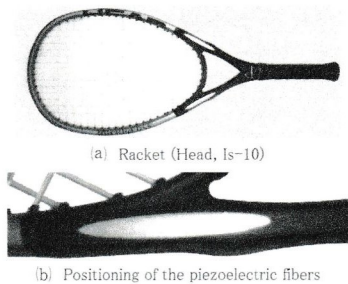


図 1 アクティブ・ピエゾ・インテリファイバー・ラケット  
ラケット首部の左右表裏 4 カ所にインテリファイバーを搭載し、ハンドル部には制御回路を組み込み、外部エネルギーは使わない<sup>3)</sup>。Head 社製、フェース面積:  $114 \text{ in}^2$ 、張上がり質量: 241 g。

\*Yoshihiko Kawazoe 埼玉工業大学 大学院 システム工学専攻 教授

方インチ)、全長 27 in (インチ) のレギュラーサイズが定着していた。1967年にスチール製、68年にアルミ製の金属ラケットが現れ、74年には複合材のラケットが登場した。その後、ラケットは大きく変わってきたが、76年に現れた 110 in<sup>2</sup> の「デカラケ」、87年の「厚ラケ」、そして95年の「長ラケ」は最も革新的なラケットだといわれている。

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が、スポーツは体験により修得するものだから主観的な面が大きく、用具の性能には人間系が複雑に絡んでくるため、スポーツ用具の性能評価は現在でも経験の深いテスターやプレー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。

テニス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。またこれらのほかに、「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感覚的な表現がいろいろある。一方、テニスひじをはじめとする障害と用具の問題がある。ひじの痛みの原因は複雑であり、ほとんど未解明であるが、テニスひじになりやすいラケットが存在することを多くのプレーヤーが経験的に認めている。

最近のラケットの特徴は軽量化であり、軽量化によりラケットはパワーに関する性能を向上させてきたが、軽量化の限界が明らかになってきた<sup>3,4)</sup>。一方、手に伝わる衝撃振動に関する打球感の改善をめざした新しい発想・試みのラケットが次々と市販されるようになってきた<sup>5)</sup>。

本稿では、人間のスイングによる運動およびラケットとボールとの衝突現象を考慮して、従来人間の感覚により評価されていたラケット性能(反発性能、操作性、ボールの飛び、打球感など)を予測し、客観的に評価するシステムの開発とデータベースの構築例を紹介する。

## 2. テニスラケットの性能予測・評価システム

ラケットとボールの衝突現象は、ボールとストリングスの大変形およびフレームの振動を伴う非線形の力学であり、接触時間および反発係数はストリング面上の衝突位置および衝突速度に依存する。現実の打撃ではさらに人間系が絡んでくるので、現象は複雑である。

ここでは、大変形を伴うボールとストリングスの特性は非線形として扱い、振幅が比較的小さいラケットフレームの振動モデルは線形系として実験的に同定し、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。

ボール・ストリングス系の非線形復元力特性は、圧縮試験における荷重-変位特性実測値を用いて同定する。衝突におけるボールとストリングスのエネルギー損失は、ラケットヘッド固定でボールをストリングスに衝突させたときの反発係数実測値  $e_{BG}$  を用いて求める。ラケットおよび上肢系の剛体特性および振動特性は実験的に同定し、ラケットの各打点に換算した換算質量  $M_i$  を導入して、衝突速度に依存するボール・ストリングス複合系の等価ばね  $K_{GB}$  と等価減衰係数  $C_{GB}$  からなる 1 自由度振動モデルを仮定すると、フレーム振動を無視したときの衝突の力積波形が近似的に得られる。打撃法による実験モード解析を適用してラケットの振動特性を同定し、ラケット面上の各打撃領域における力積波形を与えると、ラケット上の点  $i$  における  $k$  次モードの応答振幅成分(固有振動数  $f_i$ ) が近似できる。フレーム振動の速度振幅分布とフレーム質量分布から、フレーム振動によるエネルギー損失  $E_1$  が衝突速度の関数として求まり、ボールとストリングスのエネルギー損失  $E_2$  との和からボールとラケットの反発係数分布  $e_i$  が収束計算により求まる<sup>6)</sup>。ラケットフレームの剛性が高いほど反発係数は大きく、反発係数  $e_i$  を用いると、衝突力、衝突後のボール速度、宙ぶりラケットおよび手持ちラケットのハンドル部の衝撃振動、さら

に手首関節の衝撃振動などの諸量が求まる。

図2は、プレーヤーのスイングモデル（フォアハンド・グランドストローク）の例である。

図3は、(a)ラケット面上のストリングメッシュ（番号は実験モード解析におけるハンマリング打点位置）と(b)ボールとの衝突位置（アルファベット記号）を示す。図4は、コンピューター支援によるテニスラケットの性能予測・評価システムの概略を示す。

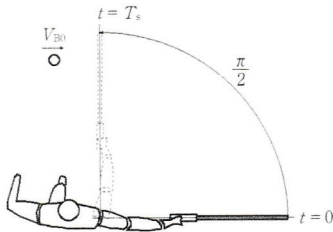


図2 プレーヤーのスイングモデル例

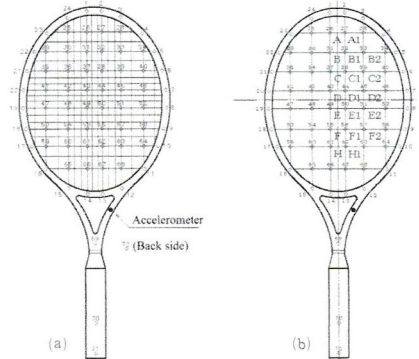


図3 ラケット面上の(a)ストリングメッシュと(b)ボールの衝突位置

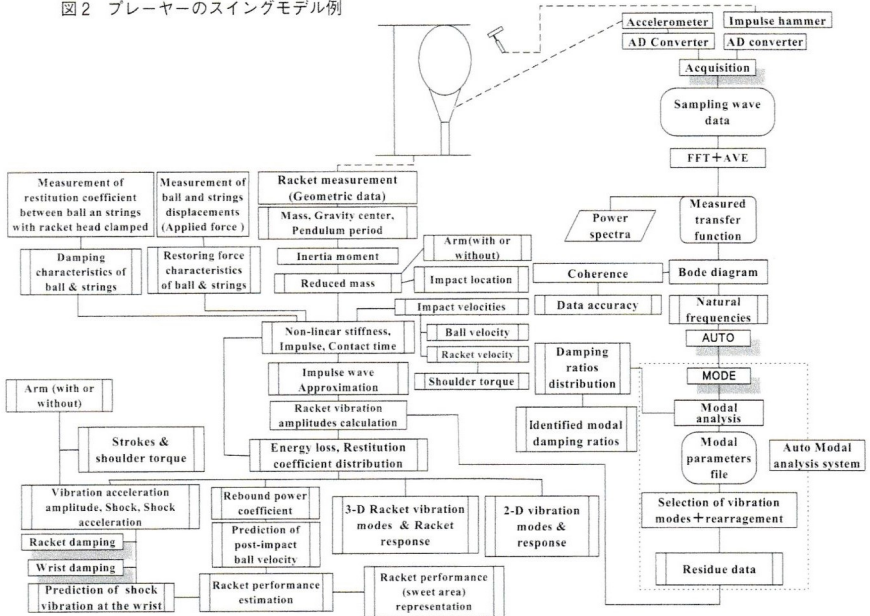


図4 コンピューター支援によるテニスラケットの性能予測・評価システムの概略

### 3. テニスラケットの性能予測・評価例

図5は、種々のラケットでボールを打撃したときの打球速度  $V_B$  (ラケットのパワー) に関するスイートエリアの予測結果の例である<sup>5)</sup>。図6は、衝撃振動を予測する手首関節と手首関節に取り付けた加速度センサーの位置

た加速度センサーの位置であり、図7は、フラット打撃における手首関節の衝撃振動ピーク値の予測結果である<sup>3,4)</sup>。図8は、ラケット面先端でボールを打撃したときのラケット性能予測結果に基づく性能評価の例である<sup>7)</sup>。

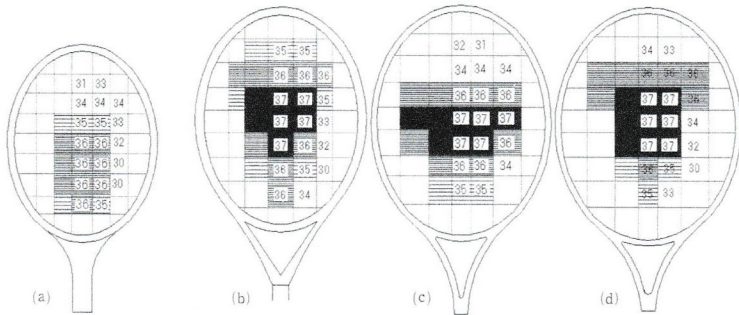


図5 種々のラケットでボールを打撃したときの打球速度  $V_B$  (ラケットのパワー) に関するスイートエリアの予測結果  
 ■ 37 m/s, ▨ 36 m/s, ▩ 35 m/s, (a) Wood Jack Kramer Autograph (68 in<sup>2</sup>, 375 g), (b) Intelligent fiber Is-10 (114 in<sup>2</sup>, 241 g), (c) Lightest racket TSL (115 in<sup>2</sup>, 224 g), (d) Super large sized EOS120A (120 in<sup>2</sup>, 292 g)  
 肩関節トルク  $N_s = 56.9$  Nm, 打撃前ボール速度  $V_{B0} = 10$  m/s

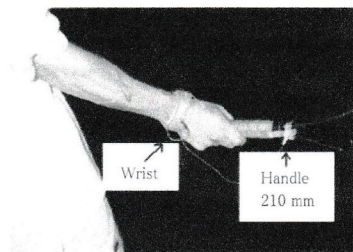


図6 衝撃振動を予測する手首関節と手首関節に取り付けた加速度センサーの位置

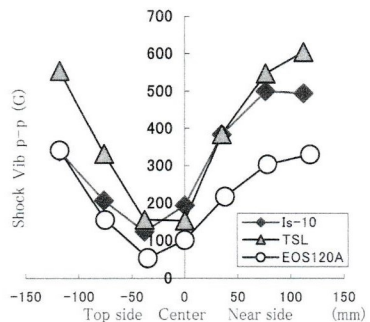


図7 フォアハンド・グランドストロークによるフラット打撃における手首関節の衝撃振動ピーク値の予測結果

ラケット面の長手方向中心線上の先端側から根元側での打撃

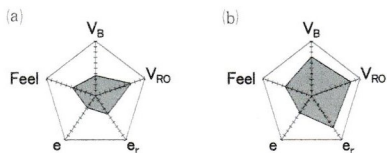


図8 フォアハンド・ストロークによりラケット面先端でボールを打撃したときのラケット性能予測結果に基づく性能評価の例

(a) Wood racket: Jack Kramer Autograph (68 in<sup>2</sup>, 375 g), (b) Super large sized racket: EOS120A (120 in<sup>2</sup>, 292 g)

$e_r$ : 反発係数,  $e$ : 反発力係数,  $V_{RO}$ : ラケットヘッド速度,  $V_B$ : 打球速度 (ラケットのパワー), Feel: 打球感: 手首の衝撃振動

#### 4. おわりに

スピン性能については誌面の都合により省略するが、表面摩擦の大きいスピニングと呼ばれるナイロン系より、摩擦が少ないポリエステルのようなストリングのほうが、スピニングがかりやすいことが最近明らかになり、すでに、数年前から世

界のテニスにはナイロン系に代わって硬くてつるつるのポリエステル系が主流になっており、天然ガットをも凌駕している<sup>8)</sup>。

#### 文 献

- 1) J. Kotze *et al.*, *Tennis Science & Technology*, **2**, 55-60 (2003)
- 2) M. McClusky *et al.*, *Wired.com.*, August 26 (2003)
- 3) Y. Kawazoe *et al.*, *Tennis Science & Technology*, **2**, 105-112 (2003)
- 4) Y. Kawazoe *et al.*, *J. System Design & Dynamics*, **4** (2), 331-347 (2010)
- 5) Y. Kawazoe *et al.*, *J. System Design & Dynamics*, **4** (1), 77-90 (2010)
- 6) 川副嘉彦, 日本機械学会論文集, **61** (584) C, 1300-1307 (1995)
- 7) Y. Kawazoe *et al.*, *Theor. & Appl. Mech.*, **51**, 177-187 (2002)
- 8) 川副嘉彦ほか, 日本機械学会論文集, **72** (718) C, 1900-1907 (2006)