

テニスにおけるハイテク・ラケットの性能とメカニズム

Mechanism of High-Tech Rackets Performance

川副嘉彦(埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology
FAX: 048-585-6717, E-mail: ykawa@sit.ac.jp

With sport equipment, engineering technology has advanced to enable manufacturers to discover and synthesize new materials and new design. There are rackets of all compositions, sizes, weights, shapes and string tension. At the current stage, very specific designs are targeted to match the physical and technical levels of each user. However, ball and racket impact in tennis is an instantaneous phenomenon creating vibrations and large deformations of ball/strings in the racket. The problem is further complicated by the involvement of humans in the actual strokes. Therefore, there are many unknown factors involved in the mechanisms explaining how the specifications and physical properties of the high-tech rackets influence the racket capabilities. This paper has investigated the physical properties of various high-tech rackets, predicting racket performance in terms of the coefficient of restitution, the rebound power coefficient and the post-impact ball velocity. It is based on the experimental identification of the racket dynamics and the approximate nonlinear impact analysis with a simple forehand swing model. The predicted results could explain the mechanism of high-tech racket performance in terms of power and the difference in performance between the rackets with different physical properties.

1. 緒言

ラケットの進歩がテニスの技術やプレイスタイルに影響してきたと言われている。テニスラケットは1960年代前半までは木製でフェイス面積はほぼ 68 in^2 (レギュラーサイズ)であったが、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。これまでの30数年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。

最近のラケットの主要な素材はすべて複合材である。

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 $95 \text{ in}^2 \sim 110 \text{ in}^2$ (平方インチ)が主流である。厚ラケは、フレーム剛性を高めたラケットである。木製ラケットの時代はラケット全長は27インチ(約685mm)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685mm)を29インチ(約735mm)まで長くしたラケットである。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。

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。最近は軽量化が進んでいる。

一般に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。しかし、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り、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。

本論文では、実験的同定に基づく衝突解析によりハイテク・ラケットの性能予測を試みる。ボールとラケットの反発係数、ラケットの反発性能、ラケットの操作性、ボールの飛び(ラケットのパワー)の違いのメカニズムを、フォアハンド・ストロ

ークを想定した場合について明らかにする。

2. ラケットとボールの実験的同定と衝突解析の概要

ボール・ストリングス系の非線形復原力特性は、圧縮試験における荷重-変位特性実測値を用いて、最小二乗法により同定する。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⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。剛体特性は、重心まわり慣性モーメントと長手方向軸まわり慣性モーメントを実験的に算出し、打点に換算した質量 M_r として同定する⁽⁸⁾。

ラケットの振動特性は実験モード解析に基づいて同定し、線形性を仮定して、任意の打点 i に単位衝撃力が作用したときの応答点 j の k 次振動モード成分 r_{ijk} を求める⁽⁷⁾。

一方、ラケットの各打点の換算質量 M_r を用いて、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1自由度振動モデルを用いると、フレーム振動を無視したときの衝突の力積波形近似が式(1)のように数値計算により得られる。ただし、時間 t 、衝突力の最大値 F_{MAX} 、接触時間 T_C である。

$$F(t) = F_{MAX} \sin(\pi t / T_C) \quad (0 \leq t \leq T_C) \quad (1)$$

式(1)のフーリエ・スペクトルを $S(f)$ (f : 振動数 Hz) とすると、ラケット面上の点 j での衝突によるラケット上の点における k 次モードの応答振幅成分(固有振動数 f_k) X_{ijk} は、以下のように近似できる。

$$X_{ijk} = r_{ijk} * S_j(f_k) \quad (2)$$

式(2)から得られ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 が求まり、ボールとストリングスのエネルギー損失 E_2 に対応する反発係数 e_{BG} を用いると、 E_2 が衝突速度の関数として求まる。 E_1 と E_2 との和からボールとラケットの反発係数分布 e_r が求まる。反発係数 e_r を用いると衝突諸量が求まる。

3. ボールの飛びに関する性能評価

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

$$e = -V_B / V_{B0} \quad (3)$$

を実測し、反発性能を評価することが多い。この係数 e を反発力係数と定義する。反発力係数 e は、ラケットでボールを打撃

する場合は、インパクト直前のラケット・ヘッド速度を V_{Ro} 、衝突直前と直後のボール速度を V_{Bo} 、 V_B とし、ボール質量を m_B とすると、

$$e = -(V_B - V_{Ro}) / (V_{Bo} - V_{Ro}) \quad (4)$$

$$= (e_r \cdot m_B / M_r) / (1 + m_B / M_r) \quad (5)$$

のように求まる⁽⁶⁾。

反発力係数 e を用いると、打球速度 V_B は以下のように書ける⁽⁶⁾⁽⁷⁾

$$V_B = -V_{Bo} \cdot e + V_{Ro}(1 + e) \quad \dots(6)$$

図1は、フォアハンド・グランドストローク・モデルであり、肩関節トルク $N_s = 56.9 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、インパクト直前のボール速度 $V_{Bo} = 10 \text{ m/s}$ を与えた場合のラケット（表1）の性能を予測した。表1において、ラケットHは木製でsり、他は複合材である。

図2は、予測結果から性能を評価したものであり、反発係数分布 e_r 、反発力係数 e 、ラケット速度（ラケットの操作性） k_0 、ボールの飛び（ k_b ）、さらに打球感⁽¹⁰⁾も示している。従来型重

量バランスのラケットに比べて超軽量ラケットのボールの飛び（ k_b ）が良い。これはラケット速度 k_0 が増したことによる。

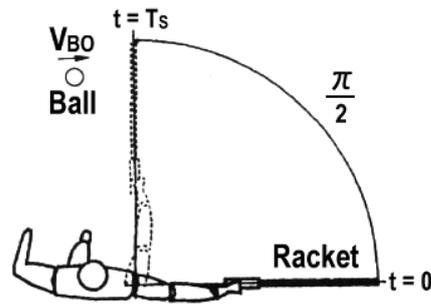


Fig.1 Forehand stroke model ($N_s = 56.9 \text{ N}\cdot\text{m}$, $V_{Bo} = 10 \text{ m/s}$)

Table 1 Physical properties

Racket	A	B	C	D	E	F	G	H
Face area	100 in ²	100 in ²	100 in ²	110 in ²	110 in ²	120 in ²	120 in ²	68 in ²
Total length	27 in 680 mm	27 in 680 mm	27 in 680 mm	27 in 685 mm	27 in 685 mm	27 in 685 mm	27 in 690 mm	27 in 685 mm
Mass (+Strings)	360 g	370 g	290 g	366 g	283 g	349 g	292 g	375 g
Center of Gravity	308 mm	317 mm	350 mm	325 mm	361 mm	323 mm	363 mm	335 mm
I_{GY}	13.1 g \cdot m ²	14.0 g \cdot m ²	11.4 g \cdot m ²	16.9 g \cdot m ²	12.0 g \cdot m ²	16.0 g \cdot m ²	14.0 g \cdot m ²	14.8 g \cdot m ²
I_{GR}	33.5 g \cdot m ²	36.6 g \cdot m ²	34.1 g \cdot m ²	40.7 g \cdot m ²	35.9 g \cdot m ²	38.0 g \cdot m ²	39.0 g \cdot m ²	41.2 g \cdot m ²
I_{GX}	1.29 g \cdot m ²	1.62 g \cdot m ²	1.12 g \cdot m ²	1.68 g \cdot m ²	0.99 g \cdot m ²	2.21 g \cdot m ²	1.78 g \cdot m ²	0.94 g \cdot m ²
1st freq	122 Hz	215 Hz	171 Hz	132 Hz	176 Hz	142 Hz	137 Hz	103 Hz
Strings tension	55 lbs	55 lbs	55 lbs	63 lbs	50 lbs	79 lbs	79 lbs	50 lbs
Reduced mass	170 g	196 g	175 g	220 g	183 g	205 g	206 g	188 g

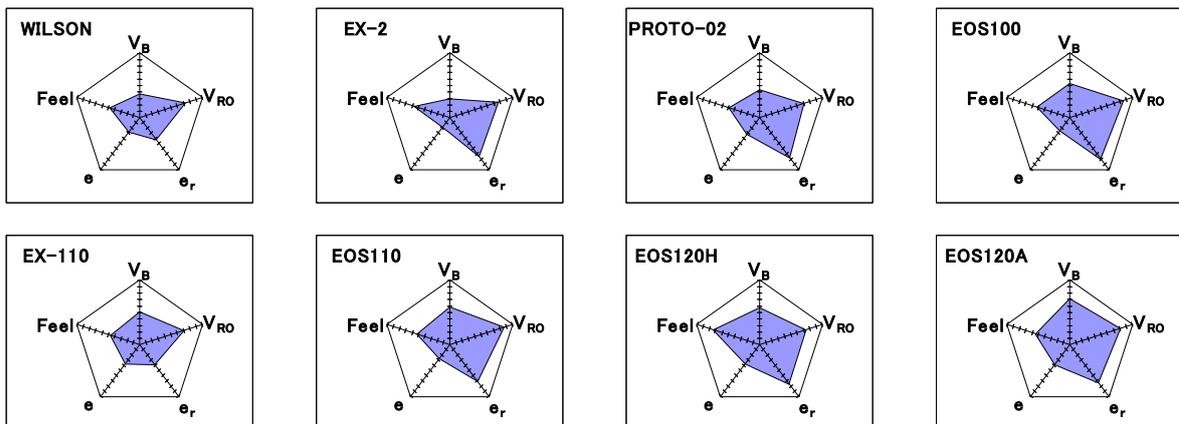


Fig.2 Estimation of racket performance

4. 結論

ハイテク・ラケットのパワー増大は、軽量化によるラケットの反発性の低下をラケット・ヘッドの速度増大が上回ることによる。速いサーブを受けるときのレシーブやボレーでは「反発力係数」の高い従来型重量バランスのラケットの方が、サーブや速いスイング

では、振りやすい超軽量型の方が「ボールの飛び」が良い。なお、本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究Bおよび基盤研究Cの援助および埼玉工業大学ハイテクリサーチセンターの援助によって行われた。
(文献省略)