

テニスのインパクトにおける木製ラケットと 超軽量・高剛性ラケットの性能予測 (ボールの飛びに関する違いのメカニズム)

Performance Prediction of Tennis Rackets with Materials of
the Wood and the Super-light/High Rigidity
(Mechanism of the Difference in terms of the Post-impact Ball Velocity)

正 川副嘉彦 (埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Inst. of Tech., 1690 Okabe, Saitama

At the current stage, the terms used in describing the performance of a tennis racket are based on the feeling of an experienced tester or a player. However, the optimum racket depends on the physical and technical levels of each user. Accordingly, there are a number of unclarified points regarding the relationship between the performance estimated by a player and the physical properties of a tennis racket. This paper investigates the physical properties of a wooden conventional weight balanced racket and a super light/high rigidity racket, predicting racket performance in terms of the post-impact ball velocity. It is based on the experimental identification of the racket dynamics and the simple nonlinear impact analysis. The predicted results could explain the mechanism of difference in performance between the wooden racket and the super-light racket.

Key Words: Dynamics of Machinery, Sports Engineering, Impact, Tennis Racket, Coefficient of Restitution, Rebound Power Coefficient, Post-Impact Ball Velocity, Performance Wooden Racket, Composite

1. 緒言

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」などの微妙な性能評価もある。本研究では、標準的なフェース面積(100 in²)の超軽量・高剛性ラケットと従来型重量バランスの木製ラケットの物理特性を実験的に調べ、ボールの飛びに関連する性能を物理特性に基づいて予測し^{(1)・(8)}、両者の違いのメカニズムを明らかにする。

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、打点に換算した換算質量 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、線形性を仮定すれば、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} が求まる⁽⁷⁾。

一方、ラケットの各打点に換算した換算質量 M_r を導入し、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式(1)のように数値計算により得られる。ただし、時間を t 、衝突力の最大値を F_{MAX} 、接触時間を T_c と

する。

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

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 における衝突によるラケット上の点 i における k 次モードの応答振幅成分(固有振動数 f_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、エネルギー損失に対応する反発係数 e_{BG} を用いてボールとストリングスのエネルギー損失 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。ラケット・フレームの剛性が高いほど反発係数は大きい。反発係数 e_r を用いると衝突諸量が求まる。

3. ラケットの反発性とボールの飛びの予測

3.1 ラケットの物理特性 表1に超軽量 EOS100 と木製ラケットの WILSON の仕様およびおもな物理特性を示す。

図1は、ラケット単体の実験モード解析結果である。横軸と交わる点がフレームの振動モードの節になっている。また、白と黒の境界線はストリングス面上の節の線を示している。超軽量高剛性複合材ラケット EOS100 は、振動数の低い方からフレームの2節曲げ、2節ねじり、3節曲げ、ストリングスの膜の振動モードを示し、木製(WILSON)は、フレームの2節曲げ、3節曲げ・2節ねじり混合、ストリングスの膜振動、フレームの4節曲げの振動モードを示している。

Table 1 Physical properties

Rac ket	EOS100	WILSON
Total length	680mm	685mm
Face area	606cm ²	440cm ²
Mass	290g	375g
Center of gravity from grip end	350mm	335mm
Moment of inertia I _G about Y axis	34.1gm ²	41.2gm ²
Moment of inertia I _G about X axis	1.12gm ²	14.8gm ²
1st frequency	171Hz	103Hz

3.2 反発係数

図2はラケットフレーム振動によるエネルギー損失、図3は反発係数 e の予測結果を示す。図4のように手首と肘の関節角度を一定に保って肩関節だけに一定の回転トルク NS を与え、腕・ラケット系が肩関節まわりに $1/2$ 回転したところでボールとラケットが衝突するモデルを使っている。この場合の肩関節回転トルクは $NS=56.9 \text{ Nm}$ 、インパクト直前のボール速度は $V_{B0}=10 \text{ m/s}$ である。肩関節トルクとインパクト直前のボール速度は競技者レベルのグランド・ストロークを想定した。ラケット面中心から先端側で木製ラケットのフレーム振動によるエネルギー損失が大きく、先端側では超軽量高剛性ラケットの反発係数が木製に較べてかなり高い。

3.3 ラケットの反発性の予測

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 を本論文では反発力係数と呼んで区別する。

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・ヘッドの速度を V_{R0} 、衝突直前と直後の

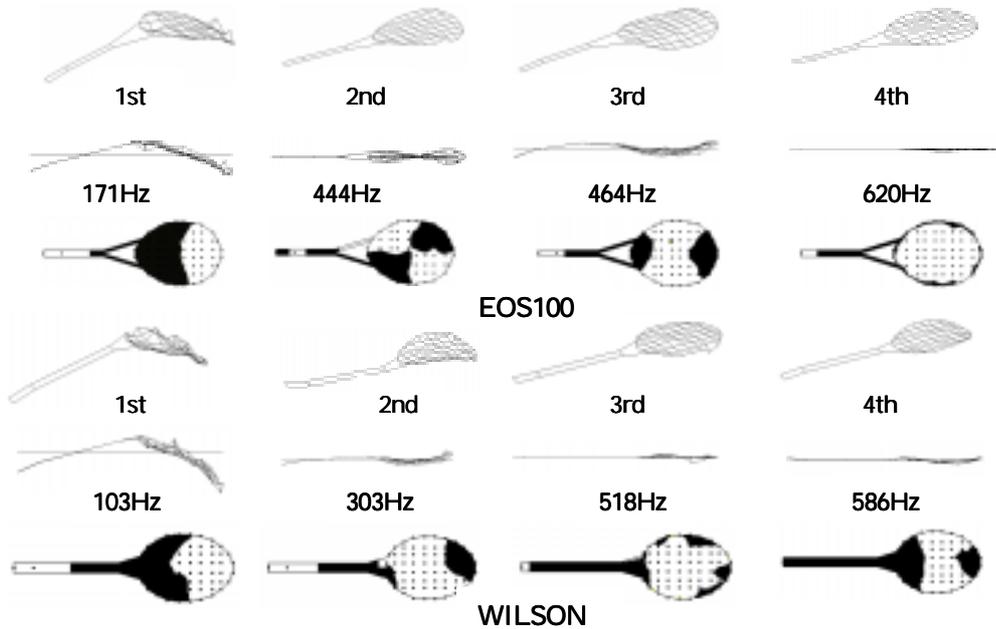


Fig.1 Vibration modes

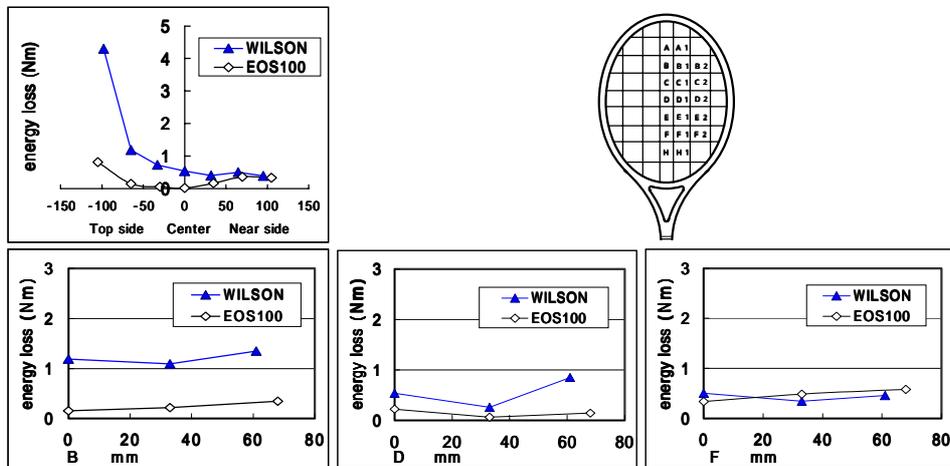


Fig.2 Predicted energy loss due to racket vibrations ($NS = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)

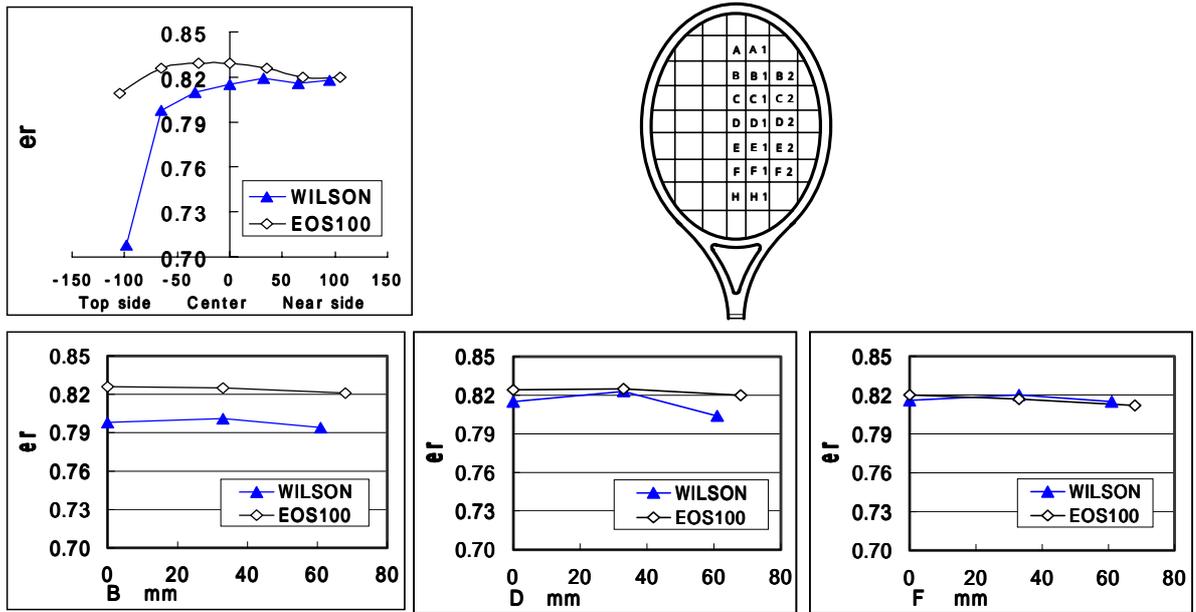


Fig.3 Predicted Restitution Coefficient e_r ($N_s=56.9Nm, V_{B0}=10m/s$)

ボール速度を V_{B0}, V_B とすると,

$$e = (-V_B - V_{R0}) / (V_{B0} - V_{R0}) \quad (4)$$

と表せる. ボール質量を m_B とすると,

$$e = (e_r - m_B / Mr) / (1 + m_B / Mr) \quad (5)$$

のように求まる⁽⁶⁾.

図5は, ラケット面中心から長手方向に外れた打点での打撃および長手方向から横に外れたオフセンタでの打撃における反発力係数 e の予測結果である. ラケット面の根元側で高い値を示すのは換算質量が大きいためである. 先端側では超軽量ラケット EOS100 がわずかに高い値を示し, 根元側では木製ラケット WILSON がわずかに高い値を示している. 縦の中心線から大きく外れた位置で両ラケットの反発力係数が大きく低下するのは, ラケットが長さ方向の軸まわりに回転し, 換算質量が小さくなるからである.

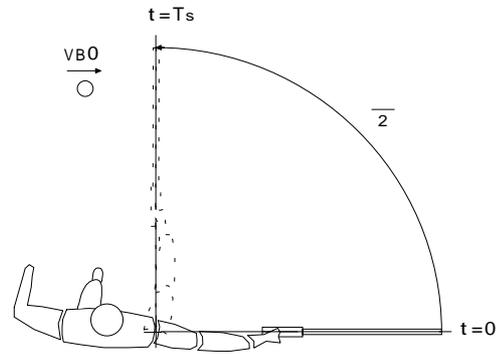


Fig.4 Player's swing model.

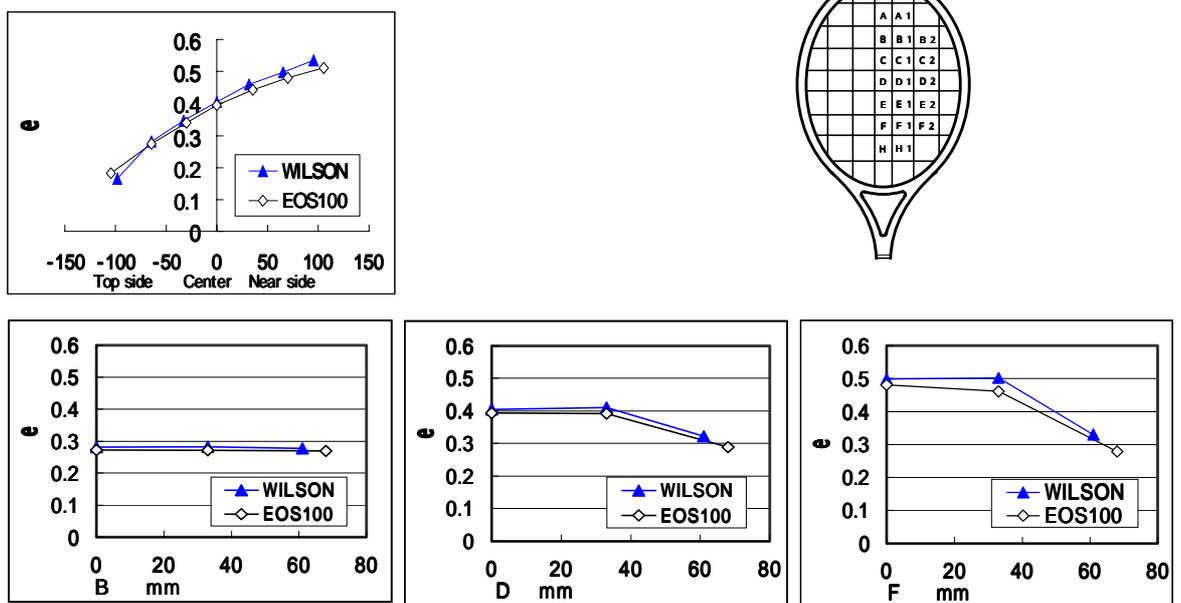


Fig.5 Predicted rebound power coefficient e ($N_s=56.9Nm, V_{B0}=10m/s$)

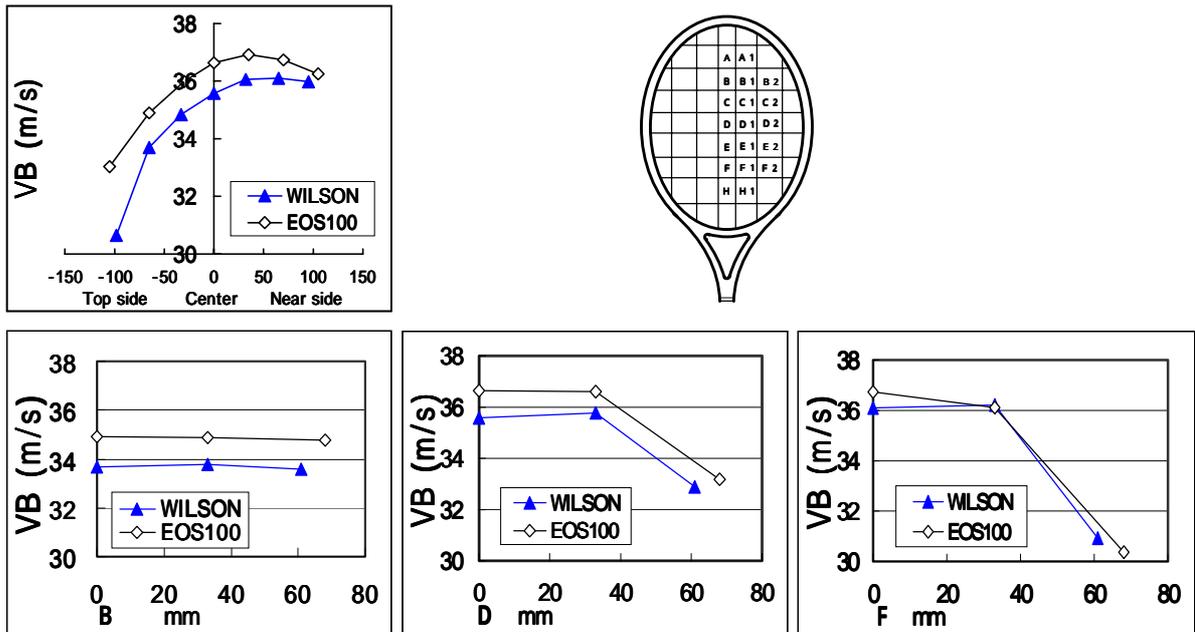


Fig.6 Predicted post-impact ball velocity V_B ($N_s=56.9\text{Nm}$, $V_{B0}=10\text{m/s}$)

3.4 ボールの飛び(打球速度)の予測

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⁾

$$V_B = -V_{B0} e + V_{R0}(1+e) \quad \dots(6)$$

図6は、ラケット面中心から長手方向に外れた打点での打撃および長手方向から横に外れたオフセンタでの打撃におけるボールの飛び V_B の予測結果である。ラケット面先端から根元側まで超軽量ラケットの打球の方が速い。横に外れたオフセンタでも同様である。

4. 結論

超軽量・高剛性ラケットは木製ラケットに較べて、

- (1)反発係数は、ラケット面先端側で特に高く、根元側では大きな差はない。
- (2)反発力係数は、先端側ではわずかに高く、根元側ではわずかに低いが、大きな差はない。中心から根元側の縦の中心線から横に大きく外れた場合は両者とも大きく低下する。
- (3)ボールの飛び V_B は、ラケット面の全面で速い。

おわりに、図表作成にご助力いただいた埼玉工大・平成10年度4年生 飯島淳一君に深謝する。なお、本研究の一部は平成8,9,10年度文部省科学研究費 基盤研究(B)の援助を受けてなされたものであることを付記する。

文献

- (1)川副, 機論, C,56-526(1990),1511-1517.
- (2)川副, 機論, C,58-552(1992),2467-2474.
- (3)川副, 機論, C,59-558(1993),521-528.
- (4)川副, 機論, C,59-562(1993),1678-1685.
- (5)川副, 機論, C,61-584(1995),1300-1307.
- (6)川副, 機械学会 D&D'97 スポーツ工学シンポジウム講演集, No.97-10-2(1997),66-73.
- (7)川副・友末, 機論, C,64-623(1998),2382-2388.
- (8)川副・杉浦, 75期通常総会講演集, No.98-1(1998),541-542.
- (9)川副・友末・吉成・Casolo, 機械学会シンポジウム講演集, No.97-34(1997),28-32.
- (10)川副, 75期通常総会講演集, No.98-1(1998),539-540.
- (11)川副・荻原, 75期通常総会講演集, No.98-1(1998), 543-544.