重量および重量配分の異なるラージサイズ・ テニスラケットのパワーに関連する性能予測

Performance Prediction of Large Face Size Tennis Rackets with Different Mass and Mass Distribution in terms of Power

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 conventional weight balanced racket and a super light racket with large face area, predicting racket performance in terms of the coefficient of restitution, the rebound power coefficient, and the post-impact ball velocity, that is the performance relevant to the power of the racket. 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 conventional and the super light racket with large face area.

Key Words: Dynamics of Machinery, Sports Engineering, Impact, Tennis Racket, Coefficient of Restitution, Rebound Power Coefficient, Power of Racket, Performance

1. 緒言

ラケットの進歩がテニスのプレイ・スタイルを変えたと言われている。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ーにどのように影響するかを客観的に評価することはきわめて難しい。

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、ラージサイズ・ラケットと呼ばれるフェース面積(打球面の面積)110 in²、全長 27in のラケットについて、(1) 最近の超軽量タイプ (283g. 超軽量グリップ・ライト型とよぶ) と(2)従来型重量バランスタイプ (365g、従来重量バランス型とよぶ) のパワーに関連する性能の違いのメカニズムを衝突解析 $^{(1)}$ $^{-}$ $^{(8)}$ の結果に基づいて明らかにする.

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ー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Mr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 Mr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.

$$F(t) = F_{MA} \times \sin(\pi t/T_c) \quad (0 \le t \le T_c)$$
 (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 f における衝突によるラケット上の点 f における f における f にかける f にかりまうに近似できる.

$$X_{ijk} = r_{ijk} * S_j(f_k)$$
 (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損失 E_1 が求まり、エネルギ損失に対応する反発係数 e_B を用いてボールとストリングスのエネルギ損失 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_1 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_1 を用いると衝突諸量が求まる.

3. ラケットの物理特性

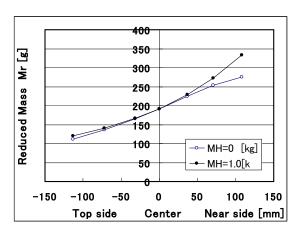
ラケットの仕様および物理特性を表 1 に示す. 打球面積は公称110 in^2 (ラージサイズ) である. ラケット EOS 11 0は超軽量型、EX-110は従来型重量バランス型である. 質量はストリングスの質量を含み、 I_{GY} は重心(バランス点)まわりの慣性モーメント、 I_{GX} は長手方向軸周りの慣性モーメントである. 図 1 は両ラケットの換算質量 Mrにおよぼす腕系の影響を示す. グリップ端から 70mm の位置に腕系の等価質量 $M_H=1.0$ kg を付加している (6). 横軸はラケット面中心から長手方向の距離である.

ラケット面中心付近の打点では腕系の影響は小さいが、ラケット面根元側の打点では換算質量が増す。ラケット面の長手方向(縦方向)軸から外れた打点でのMrにおよぼすグリ

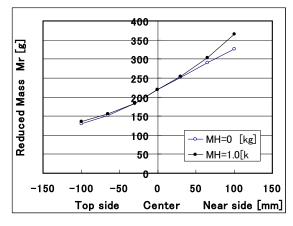
ップの握りの影響は、ハンドルと手の間に滑りがある場合と滑りがない場合で異なるが、滑り力の概算値から現実のインパクト速度では滑りがあると推測し、ここではラケットが重心まわりに回転するときの換算質量と長手方向軸まわりに回転するときの換算質量の小さい方をインパクトにおける換算質量とした(®). 一方、実験モード解析により同定したラケットの基本モード(2節曲げ)振動数は、超軽量ラケットEOS110が176Hz、従来型EX-110が132Hzであり、両ラケットとも振動数の低い方からフレームの2節曲げ、2節ねじり、3節曲げ、ストリングスの膜の振動モードである。図2左は、

Table 1 Physical properties

Racket	EOS110	EX-110
Total length	685 mm	685 mm
Face area	705 cm ²	705 cm ²
Mass	283 g	366 g
Center of gravity from grip end	361 mm	325 mm
Moment of inertia I_{GY} about Y axis	35.9 gm ²	40.7 gm ²
Moment of inertia I_{GY} about X axis	0.99 gm ²	1.68 gm ²
1st frequency	176 Hz	132 Hz
Strings tension	50 lb	45 lb



(a) EOS110 (Super light)



(b) EX-110 (Conventional balance) Fig.1 Reduced mass of racket-arm system

ラケット面上のストリングスの網目と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する場合の打撃点を示す。図2右はボールとの衝突を計算する位置A~H1を示し、ボールは4つの打撃点で接触するとしている。

図3は、打撃力と加速度応答実測データから求めたラケット単体の伝達関数(コンプライアンス)の例である.

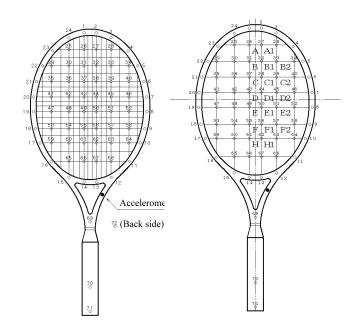


Fig.2 String mesh and impact location on the racket face

4. 反発係数

「高剛性ラケットは玉離れが良い」と経験的に言われており、「接触時間が短い」からだと解釈されることが多いが、接触時間にはフレーム剛性はほとんど影響しない⁽²⁾から、「玉離れが良い」という表現は物理的には「反発係数が高い」と解釈できる⁽¹⁰⁾.

図4は、両ラケットの反発係数 e、の予測結果であり、図5に示すように、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 N_S を与え、腕・ラケット系が肩関節まわりに $\pi/2$ 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。 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、フレーム振動によるエネルギ損失は2節曲げ、2節ねじり、3節曲げ振動、およびストリングスの振動による成分の4つのモードを考慮している。 肩関節回転トルクは N_S =56.9 Nm、インパクト直前のボール速度は V_{Bo} =10m/s である.

5. ラケットの反発性の予測

静止ラケット (V_{RO} =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_{BO} の比

$$e = -V_B/V_{BO} \tag{3}$$

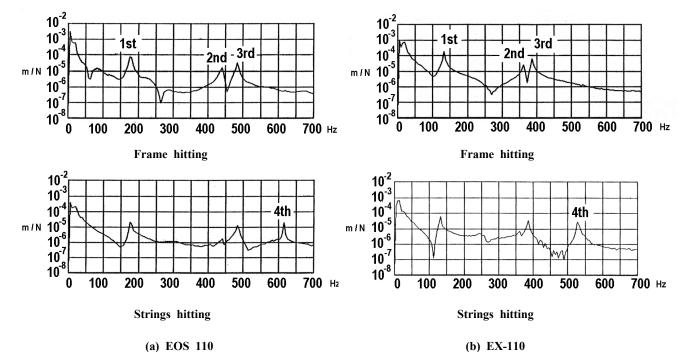
を実測し、反発性能を評価することが多い. この係数 e を 本論文では反発力係数と呼ぶ.

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_{RO} 、衝突直前と直後のボール速度を V_{BO} 、 V_{B} とすると、

$$e = - (V_B - V_{RO})/(V_{BO} - V_{RO})$$
 (4)

と表せる.ボール質量をmBとすると,

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



(b) E

Fig.3 Frequency response function of racket

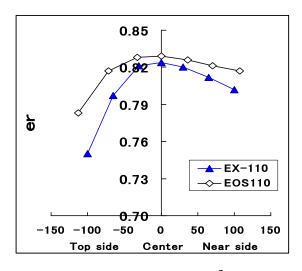


Fig.4 Predicted Restitution coefficient \mathfrak{C} r (Ns = 56.9Nm, $V_{B0} = 10 \text{m/s}$)

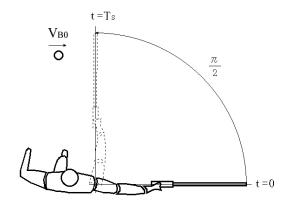


Fig.5 Player's swing model.

のように求まる (6)

図7は、ラケット面中心から長手方向に外れた場合および長手方向から横に外れたオフセンタでの反発力係数 e、およびラケット面上の反発力係数の高い領域を示す。全体に従来型ラケット EX=110 の方が値は大きく、根元側ほど高くなっている。

6. 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).

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

= $(V_{B0} + V_{R0}) \ e + V_{R0}$ (6)

ラケットのパワーは打球速度VBで評価できる.

図8は、インパクト直前のラケット打点速度 V_{R0} を示す。 超軽量ラケットの速度が大きい。

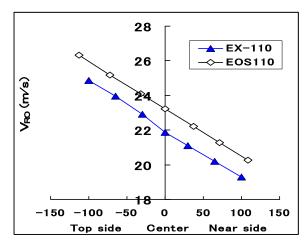
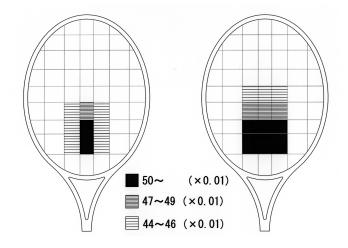
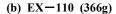
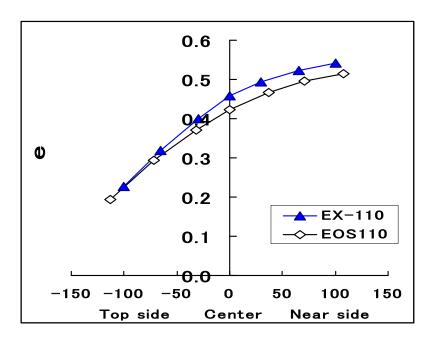


Fig.8 Predicted Pre-impact racket head velocity V_R (Ns = 56.9Nm, $V_{B0} = 10$ m/s)









0.6 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1 0.0 0 20 40 60 80 Center D mm

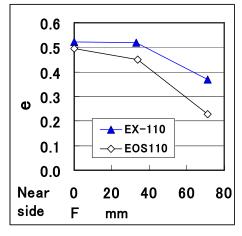


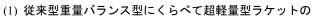
Fig.7 Predicted rebound power coefficient ℓ (VBO = 10m/s, Ns = 56.9Nm)

図 9 は、ラケット面中心から長手方向に外れた場合および長手方向から横に外れたオフセンタでのボールの飛び V®の予測結果である。 ラケット面中心から根元側の横のオフセンターを除くと、超軽量ラケットの打球の方が速い、しかし、従来重量バランス型のラケットの方がラケット面全体では安定な飛びを示す。

図10は、インパクト直前のボール速度が零($V_{BO}=0$ m/s)、肩関節トルクが $N_S=56.9$ Nm の場合のインパクト直後のボール速度の予測結果である。 超軽量の方が従来型重量バランスのラケットよりボールの飛びがかなり良い.

7. 結 論

ラージサイズ・ラケットと呼ばれるフェース面積 110 in², 全長 27 in のラケットについて、最近の超軽量型と従来型重量バランス型のパワーのメカニズムの違いを衝突解析の結果に基づいて明らかにした。



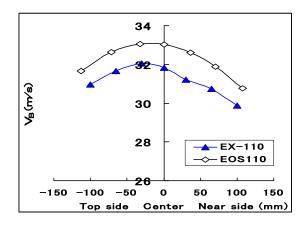
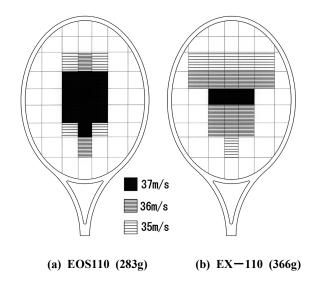
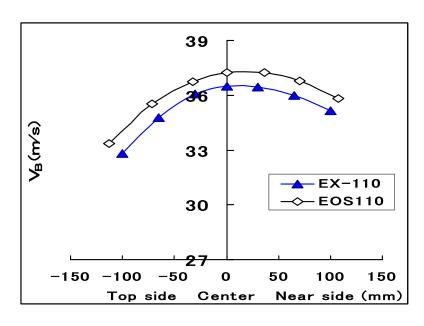
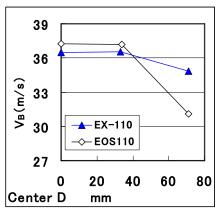


Fig.10 Predicted post-impact ball velocity V_B (Ns = 56.9Nm, V_{BO} = 0m/s)







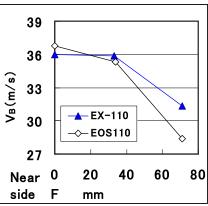


Fig.9 Predicted post-impact ball velocity V_B (Ns = 56.9Nm, V_{BO} = 10m/s)

フレーム振動によるエネルギー損失が小さく, 反発係数は高い値を示す.

- (2) ラケットの反発性については、従来型重量バランス型にくらべて超軽量型ラケットはやや低く、特に長手方向中心線から横に大きく外れた衝突位置で大きく低下する.
- (3) 同一肩関節トルクを与えた場合,従来型重量バランス型にくらべて超軽量型ラケットのヘッド速度はかなり速い.
- (4) グランドストロークでフラットに打撃したときの 打球速度は、ラケット面中心から根元側の横のオフセンター を除くと、 超軽量ラケットの方が速い(ボールの飛びが良い.)

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、平成11年度 吉田孝史・米山寛行の両君、および平成12年度山田裕昭・大野浩行の両君に深謝する。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ことを付記する。

汝 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スポーツエ学シンポジウム講論集, No.97-10-2(1997), 66-73.
- (7)川副・友末、機論, C, 64-623(1998), 2382-2388.
- (8)川副、機械学会ジョイントシンポジウム講論集、No.98-31 (1998), 44-48.
- (9)川副・友末・吉成・Casolo, 機械学会ジョイントシンポジウム 講論集, No.97-34(1997), 28-32.
- (10)川副, 75期通常総会講論集, No.98-1(1998), 539-540.
- (11)川副·荻原,75期通常総会講論集, No.98-1(1998), 543-544.