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.

ー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-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 rijk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.

 $F(t) = F_{MA} x \sin(\pi t/T_c) \quad (0 \le t \le T_c) \quad (1)$

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.

X11 k= r11 k*S1(fk) (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E1が求 まり、エネルギ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損失E2が衝突速度の関数として 求まる. E1 と E2 との和からボールとラケットの反発係 数分布 e1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 e1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 = 1.0kg 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

['00-11-9~11, 高知市, ジョイント・シンポジウム2000(スポーツ工学シンポジウム)(シンポジウム:ヒューマン・ダイナミクス)]

日本機械学会[No.00-38]シンポジウム講演論文集 pp.110-114

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⁽⁸⁾.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、

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

Table 1 Physical properties







(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Nsを与え、腕・ラケット系が肩関節 まわりに π/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Ns =56.9 Nm, インパクト直前のボール速度は VBo =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}
(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m_Bとすると,

$$\boldsymbol{e} = (\boldsymbol{e}_{r} - \boldsymbol{m}_{B}/Mr)/(l + \boldsymbol{m}_{B}/Mr)$$
(5)

日本機械学会[No.00-38]シンポジウム講演論文集 pp.110-114

[' 00-11-9~11, 高知市, ジョイント・シンポジウム2000(スポーツ工学シンポジウム)(シンポジウム:ヒューマン・ダイナミクス)]







Fig.4 Predicted Restitution coefficient e r (Ns = 56.9Nm, V_{B0} = 10m/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 VR0 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, $V_{B0} = 10m/s$)

日本機械学会[No.00-38]シンポジウム講演論文集 pp.110-114

['00-11-9~11, 高知市, ジョイント・シンポジウム2000(スポーツ工学シンポジウム)(シンポジウム:ヒューマン・ダイナミクス)]







Fig.7 Predicted rebound power coefficient e (V_{BO} = 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_a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(*VBO* = 0 m/s), 肩関節トルクが Ns = 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.

(1) 従来型重量バランス型にくらべて超軽量型ラケットの





日本機械学会[No.00-38]シンポジウム講演論文集 pp.110-114

[' 00-11-9~11, 高知市,ジョイント・シンポジウム2000(スポーツ工学シンポジウム)(シンポジウム:ヒューマン・ダイナミクス)]



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.

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'977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.

日本機械学会[No.00-38]シンポジウム講演論文集 pp.110-114

[' 00-11-9~11, 高知市, ジョイント・シンポジウム2000(スポーツ工学シンポジウム)(シンポジウム:ヒューマン・ダイナミクス)]