

アクティブ・ piezo・ファイバー・テニスラケットのパワーに関する性能予測

Performance Prediction of Tennis Racket with Active Piezoelectric Fibers in Terms of Power

川副 嘉彦(埼玉工大)

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

This paper investigated the physical properties of a new type of racket with active piezoelectric fibers appeared in the market, predicting racket performance in terms of the coefficient of restitution, the rebound power coefficient, and the post-impact ball velocity relevant to the power of the racket. It is based on the experimental identification of the racket-arm dynamics and the simple nonlinear impact analysis. The predicted results could explain the difference in mechanism of performance between the new type racket with active piezoelectric fibers and the two conventional lightweight rackets. This new type racket provides higher coefficient of restitution on the whole area of string face. It also gives large rebound power coefficients at the topside and big power on the whole area of string face.

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」、「面の安定性が高い」などの微妙な性能評価もある⁽¹⁾⁻⁽¹⁰⁾。最近の特長は軽量化であり、軽量化によりテニスラケットはパワーに関する性能を向上させてきたが、反発係数、反発特性、およびオフセンター・インパクトにおける手首関節の衝撃振動に関する軽量化の限界が明らかになった⁽¹¹⁾。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るようになってきた⁽¹²⁾。本研究では、圧電素子と制御装置をフレームに組み込んだ「インテリ・ファイバー・ラケット」⁽¹³⁾のパワーに関連する性能を衝突解析⁽¹⁾⁻⁽¹⁰⁾に基づいて予測し、もっとも軽量の(最軽量と呼ぶ)ラケットおよび反発性能にすぐれた平均的軽量の軽量ラケットと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_r 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図1のように仮定すると、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⁽¹⁾⁻⁽¹⁰⁾。

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

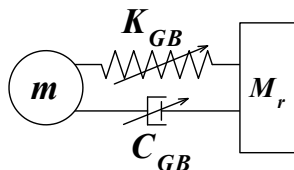


Fig.1 Non-linear Impact model of a ball-string system.

図2(a)は、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(ストリングの交差点)を番号で示している。図2(b)は、ボールとの衝突計算における衝突位置(四辺形)A~H1を示し、ボールとストリング面は衝突位

置(四辺形)の4つの角(ストリング交差点)で接触する。

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。

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

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 および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。エネルギー損失 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 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 を用いると衝突諸量が求まる。

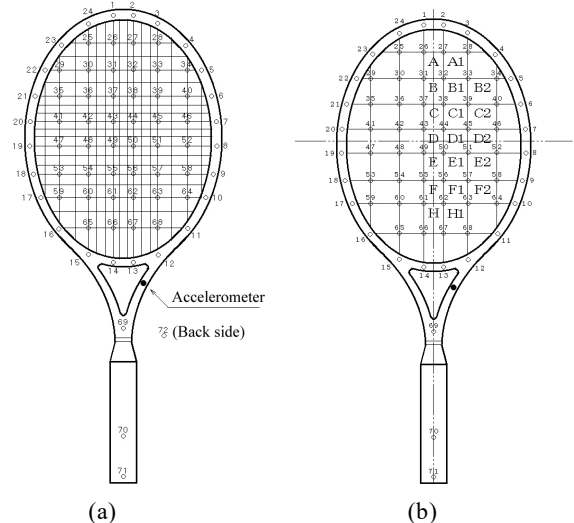


Fig.2 String meshes and impact locations on the racket face.

3. ラケットの物理特性

図3は、piezo・インテリ・ファイバーを搭載した軽量ラケット IS-10(Head社製、フェース面積 114 in^2 、張り上がり質量 241 g)を示す。ラケット首部の左右表裏4箇所インテリ・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⁽¹³⁾。このラケットの性能予測結果を最軽量ラケット Prince Thunder Super Lite(TSL)(115 in^2 , 224 g)および平均的な重量を持ち反発性能が優れている軽量型ラケット EOS120A (120 in^2 , 292 g)の性能予測結果と比較した。腕系の質量分布はハンドル上の手の握りの位置に換算することができる^{(5)-(10),(14)}。

図4は振動モード形状である。ラケットの基本モード(2節曲げ)振動数は、ラケット IS-10: 205 Hz , TSL: 200 Hz ,

EOS120A: 137 Hzである。インテリジェントIs-10の2次以上の固有振動数は最軽量ラケットTSLより低い、1次(曲げ振動)はTSLより高い。これはラケット首部に搭載された圧電素子の効果によるものと推測される。また減衰比は、1次および4次(ストリングスの1次振動モード)の値が他の2本のラケットに比べて大きい⁽¹⁴⁾。



Fig.3 Racket with active piezoelectric fibers.

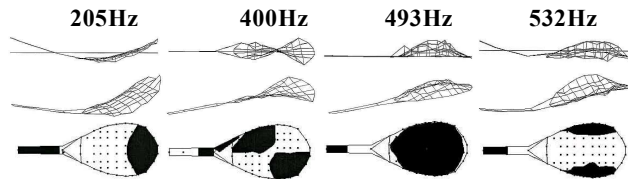


Fig.4 Experimentally identified vibration modes (Is-10)

4. 反発係数

図5 はフォアハンド・ストロークを想定したスイング・モデルである。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。図6 は、競技者レベルのラリーを想定して、肩関節回転トルク $N_S=56.9$ Nm、インパクト直前のボール速度 $V_{Bo}=10$ m/s を与えたときの反発係数 e_r の予測結果である。「反発係数」は「玉離れの良さ」に対応すると考えられる⁽⁹⁾⁽¹²⁾。ラケットIs-10 の反発係数は、ラケット面のどの打撃位置でもほぼ一定で高い値を示し、先端側や根元側のオフセンターおよび長手軸から離れたオフセンターでも低下しない。これは1次のフレーム振動モードによるエネルギー損失が小さいことによる。

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 $e = -V_B/V_{Bo}$ を実測し、反発性能を評価することが多い。係数 e を反発力係数と呼ぶ⁽⁵⁾⁽¹⁵⁾。ボール質量を m_B とすると、次のように求まる⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾。

$$e = (e_r - m_B/Mr)/(1 + m_B/Mr) \quad (3)$$

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⁽⁷⁾⁻⁽¹²⁾。

$$V_B = -V_{Bo} e + V_{RO} (1+e) \quad (4)$$

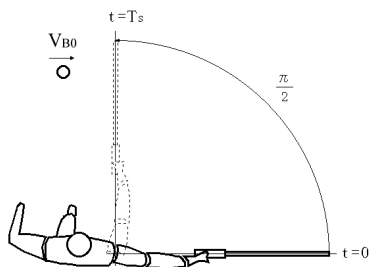


Fig.5 Player's forehand stroke swing model.

ラケットのパワー(ボールの飛び)は打球速度 V_B で評価できる。図7 は、ボールの飛び V_B に関するスイートエリアの予測値を示す。図8 はラケット面中心から長手方向の予測結果である。

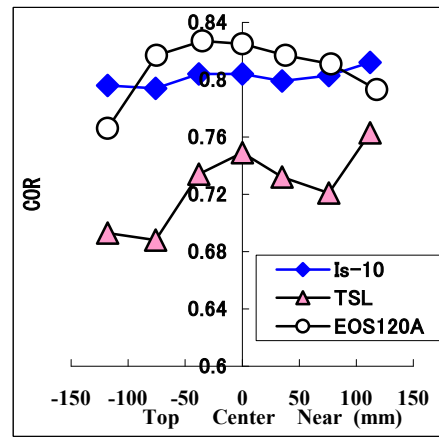


Fig.6 Predicted coefficient of restitution e_r ($N_s = 56.9$ Nm, $V_{Bo} = 10$ m/s)

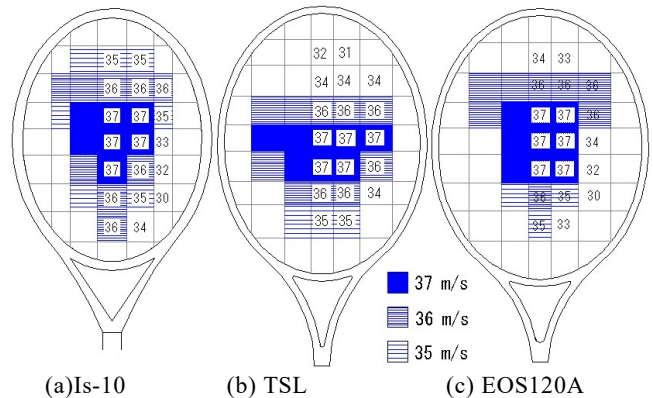


Fig.7 Predicted sweet area in terms of post-impact ball velocity V_B ($N_s = 56.9$ Nm, $V_{Bo} = 10$ m/s)

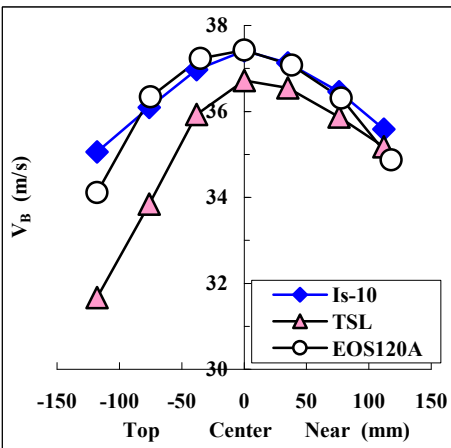


Fig.8 Predicted post-impact ball velocity V_B ($N_s = 56.9$ Nm, $V_{Bo} = 10$ m/s)

7. 結論

piezo-fiberと制御回路を装着したインテリジェント・ラケット Is-10 のストロークにおけるボールの飛びに関する性能は、反発係数およびパワーがストリング面全体で高く、先端側での反発力係数も高い。Is-10の1次固有振動数は静的剛性の高いラケットよりも高い値を示した。なお、本研究の一部は平成13,14年度科学研究費基盤研究(C)、平成13,14,15年度科学研究費基盤研究(B)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。(文献省略)