

33S 滑車でストリングスを支持したテニスラケットの パワーに関連する性能予測と評価

Prediction and Estimation of Power of a Tennis Racket with Wheels Replacing Conventional Grommets on the Sides

正 川副嘉彦 (埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, 1690 Okabe, Saitama

Currently, the terms used in describing the performance of a tennis racket are still based on the feel 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 unknowns regarding the relationship between the performance estimated by a player and the physical properties of a tennis racket. The lightweight racket with head-heavy configuration is recent tendency of high-tech rackets, increasing power with an increasing racket swing speed. Racket frames as light as 200 grams have appeared in the market. However, the predicted results showed that the lightest racket at present in the market has advantageous for racket head speed, but disadvantageous for coefficient of restitution, rebound power, and post-impact velocity for ground stroke, and it has also large shock vibrations at the racket handle compared to the ordinary super-light weight racket. This means a limit to the weight lightening of tennis racket from the viewpoint of performance. The engineers and racket designers at the racket companies seem to be under intense pressure to keep pumping out new and better technologies every year. This paper investigated the physical properties of a new type of racket appeared in the market with wheels replacing conventional grommets on the sides, 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 dynamics and the simple nonlinear impact analysis. The predicted results could explain the difference in mechanism of performance between the new type racket and the conventional lightweight racket. Although this new type racket provides higher coefficient of restitution at the nearside of string face than any racket currently in the market, it needs more improvement in topside performance relevant to the power. Nevertheless, it may have a more comfortable feel at the racket handle than the conventional, which will be reported in a separate paper.

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

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⁽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、ストリングス周りのフレームの一部にグロメットの代わりにローラー(滑車)を取りつけたラケットのパワーに関連する性能を予測し、市販ラケットではもっとも軽量の(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比較し、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⁾⁻⁽¹⁰⁾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⁽¹⁾⁻⁽¹⁰⁾

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。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。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。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。

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

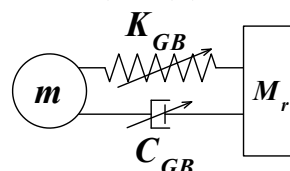


Fig.1 Non-linear Impact model of a ball-string system..

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。

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

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(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。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_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。

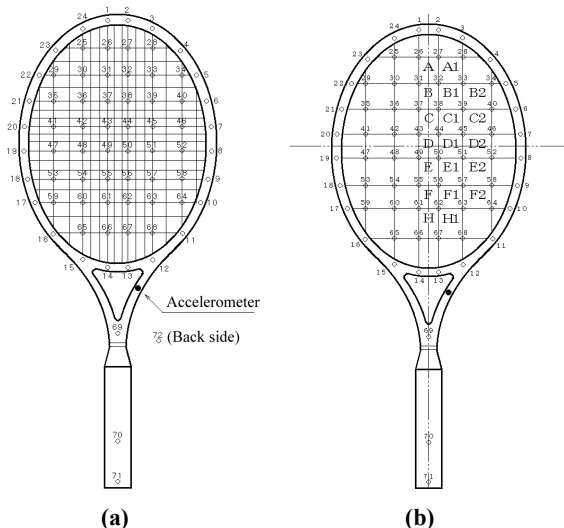


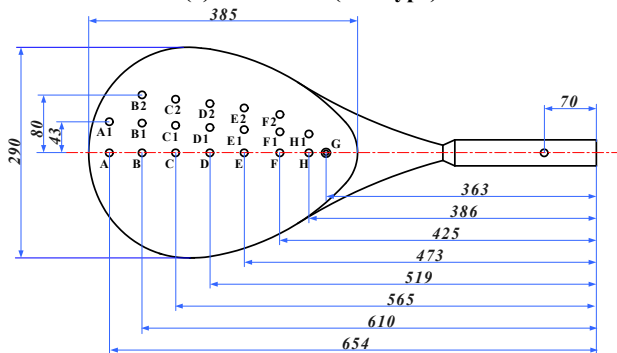
Fig.2 String mesh and impact location on the racket face.

3. ラケットの物理特性

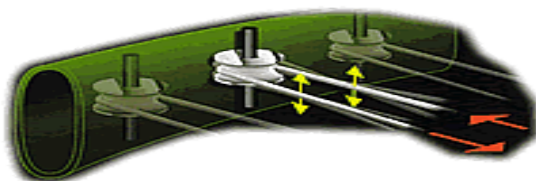
図3は、ストリングス面の横の両サイドにグロメットの代わりにローラー(滑車)を取りつけた軽量ラケット Rollers 2.6 (Wilson 社製、ファン・タイプ、張り上がり質量 268 g)を示す。性能予測結果によると、ファン・タイプ Rollers 2.6 の方がラウンド (round) ・タイプ Rollers 3.1 よりやや優れ



(a) Rollers 2.6 (Fan type)



(b) Racket geometry



(c) Wheels replacing conventional grommets
Fig.3 Racket with wheels replacing conventional grommets on the sides.

Table 1 Physical property

Racket	ROLLER2.6	TSL	EOS120A
Total length	705mm	710 mm	690 mm
Face area	742 cm ²	742 cm ²	760 cm ²
Mass	268g	224 g	292 g
Center of gravity from grip end	363mm	379 mm	363 mm
Moment of inertia I_{GY} about Y axis	13.2 gm ²	11.0 gm ²	14.0 gm ²
Moment of inertia I_{GR} about grip	36.2 gm ²	32.4 gm ²	39.0 gm ²
Moment of inertia I_{GX} about X axis	1.50 gm ²	1.21 gm ²	1.78 gm ²
1st frequency	205 Hz	200 Hz	137 Hz
Strings tension	58/53 lb	55 lb	79 lb
Reduced mass (center)	0.18 Kg	0.15 Kg	0.21 Kg

ていた。ここではラケット Rollers 2.6 の性能予測結果を市販の最軽量ラケット Prince Thunder Super Lite (TSL) (115 in², 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 in², 292 g) の性能予測結果と比較する。3本のラケットの仕様および物理特性を1に示す。ラケット質量はストリングスの質量を含み、 I_{GR} は握りの位置(グリップ端から70mm)まわりの慣性モーメント、 I_{GX} は長手方向軸まわりの慣性モーメントである。

図4は、ラケット面の打撃位置に換算したラケットの換算質量 M_r (横軸はラケット面中心から長手方向の距離)を示す。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⁽⁵⁾⁻⁽¹⁰⁾。腕系を考慮した場合 ($M_H=1.0$ kg) と吊り状態 ($M_H=0$ kg) の換算質量を示す。ストリングス面のスロート側で差があるが、中心から先端側ではほとんど差がない。長手軸から外れたオフ・センター打撃点における換算質量も同様

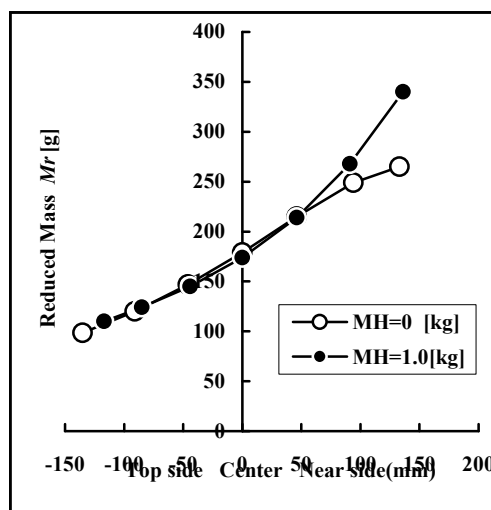


Fig.4 Reduced mass at impact locations (ROLLERS2.6) with and without an arm.

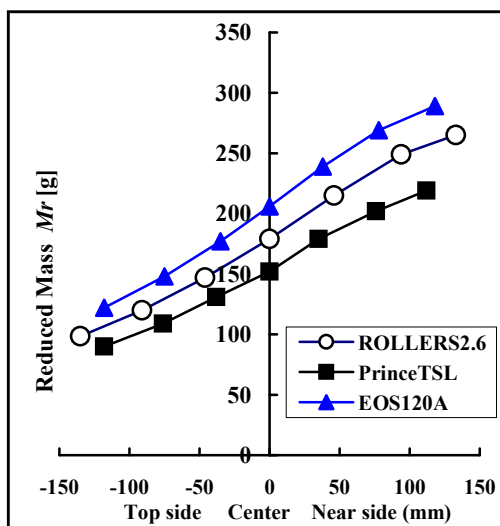


Fig.5 Reduced mass at hitting locations of freely suspended racket.

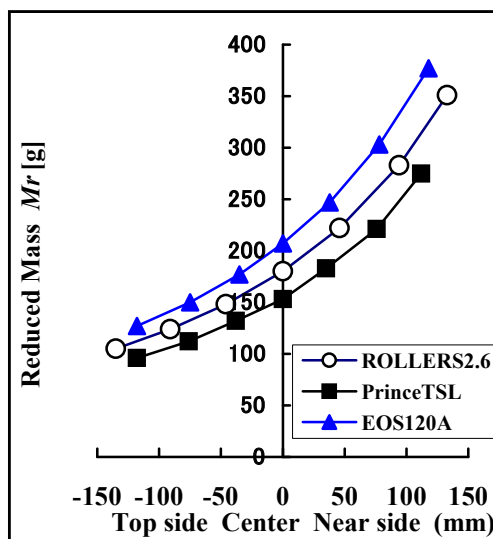


Fig.6 Reduced mass of racket at hitting locations with arm.

Table 2 Frequencies of vibration modes of 3 rackets (Hz).

	ROLLER2.6	princeTSL	EOS120A
1st	205	200	137
2nd	425	474	322
3rd	508	562	391
4th	527	586	605

Table 3 Damping ratios of vibration modes of 3 rackets.

	ROLLER2.6	princeTSL	EOS120A
1st	0.011	0.011	0.008
2nd	0.008	0.011	0.013
3rd	0.006	0.005	0.006
4th	0.005	0.004	0.002

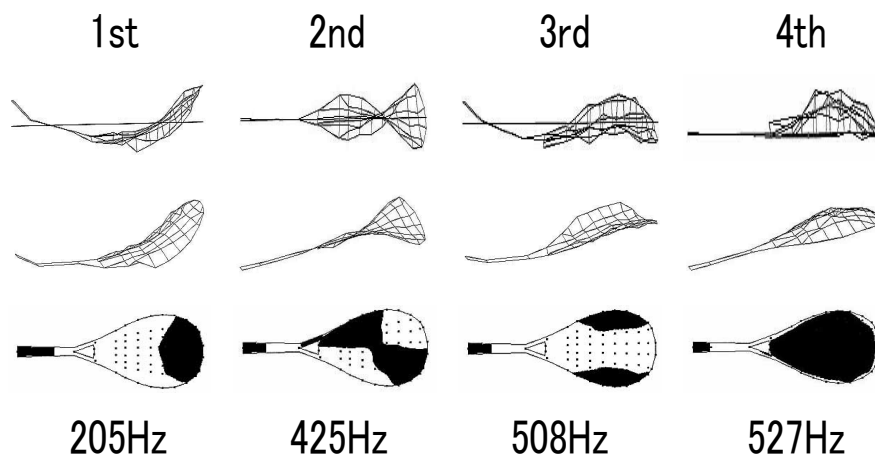


Fig.7 Experimentally identified vibration modes (Racket ROLLERS 2.6)

に求まる。現実のインパクト速度でラケット面が長手方向軸まわりに回転するときのハンドルと手の滑り力の概算値はかなり大きいので、オフセンター・インパクトでは滑りがあると推測し、ラケットが短軸まわりに回転するときの換算質量と長手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⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。図5は3本のラケットの宙づり状態での比較、図6は腕系を考慮した場合の比較を示す。

表2、表3はそれぞれ、実験モード解析により同定した3本のラケットの主要な固有振動数と減衰比を示す。図7はROLLERS2.6の振動モード形状である。フレームの2節曲げ、2節ねじり、3節曲げ、ストリングスの膜振動1次を示す。ラケットの基本モード（2節曲げ）振動数は、ラケット ROLLERS2.6 : 205 Hz, TSL: 200 Hz, EOS120A: 137 Hzである。フェース面積が同じ場合、固有振動数は一般に質量の軽い方が高い傾向があるが、1次（曲げ振動）は最軽

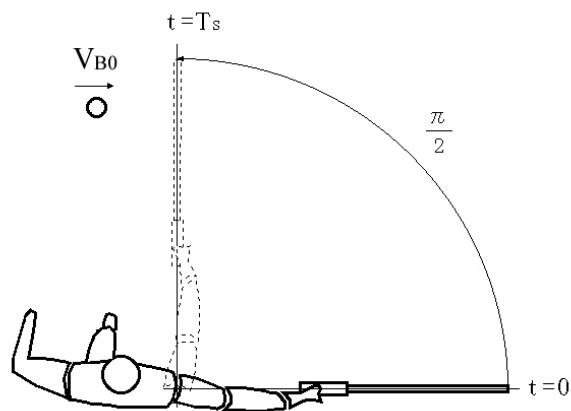
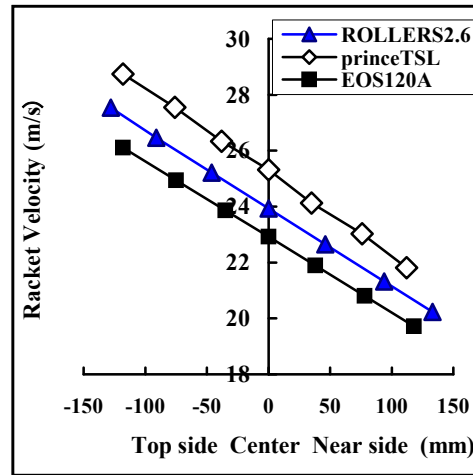


Fig.8 Player's forehand stroke swing model.

量 TSL より高い。減衰比は、1次の値がやや大きく、4次（ストリングスの振動モード）の値も他の2種より大きい。

4. 反発係数

図8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。フレーム振動によるエネルギー損失は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た。図9は、インパクト直前のボール速度は競技者レベルのラリーを想定して、肩関節回転トルク $N_S = 56.9 \text{ Nm}$ 、インパクト直前のボール速度 $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$ を与えたときのインパクト直前のラケット・ヘッド速度である。「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、接触時にはフレーム剛性はほとんど影響しない⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾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⁽⁹⁾⁽¹²⁾。図10は、グラウンド・ストロークの場合



Fi.9 Predicted Pre-impact racket head velocity V_{Ro} ($N_S = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)

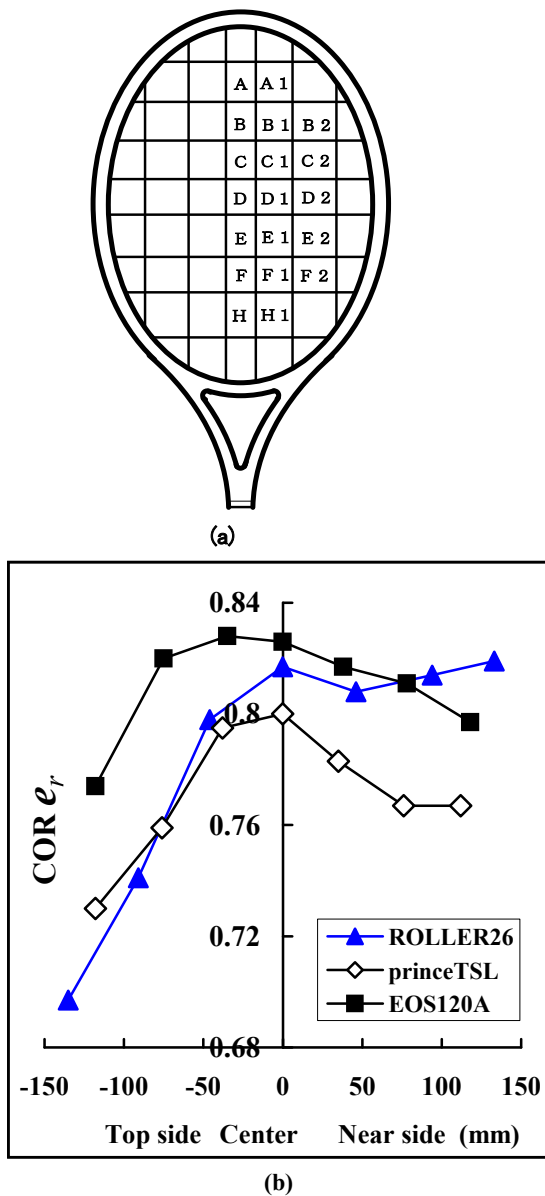
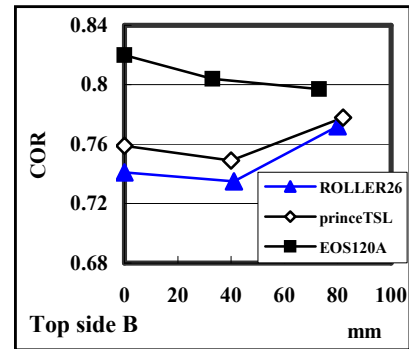
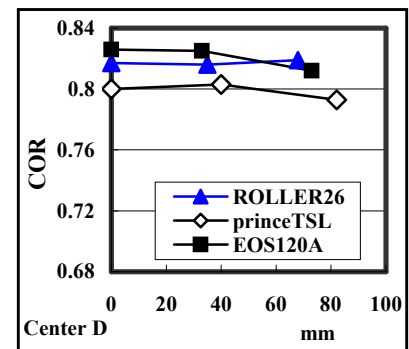


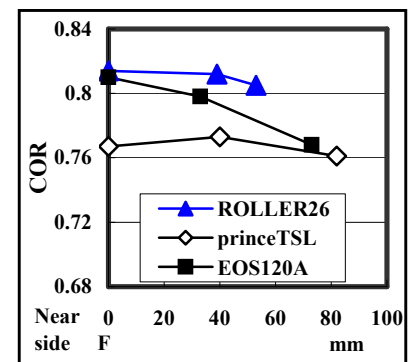
Fig.10 Predicted Restitution coefficient e_r ($N_S = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)



(c)



(d)



(e)

の反発係数 e_r の予測結果である。ラケット面のスロート側の打撃位置では高い値を示すが、重要な先端側打撃ではかなり低下する。

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

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

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、

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

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⁽³⁾⁻⁽¹⁰⁾。図11は、ラケット面中心から長手方向に外れた場合の反発力係数 e を示す。

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⁾。

$$\begin{aligned} V_B &= -V_{BO} e + V_{RO} (1+e) \\ &= (V_{BO} + V_{RO}) e + V_{RO} \end{aligned} \quad (6)$$

ラケットのパワーは打球速度 V_B で評価できる。

図12は、パワー（打球速度 V_B ）に関するスイートエリアの予測結果を示す。図13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_B を示す。

7. 結 論

ラケット Rollers2.6は、反発性は最軽量ラケットTSLに比べて向上しているが、パワーは先端側での向上がみられない。先端側での反発係数が低いからである。打球感に関連した手に伝わる衝撃振動については別報に述べる。

おわりに、図表作成にご助力いただいた埼玉工大・平成13年度4年生・江原将充および平成14年度・高橋一仁の両君に感謝する。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

- (1) Y. Kawazoe, Proc. Int. Symposium on Advanced Computers for Dynamics and Design'89, Japan Society of Mechanical Engineers, pp.243-248. (1989)
- (2) Y. Kawazoe, Impact Phenomena between Racket and Ball during Tennis Stroke, Theoretical and Applied Mechanics, 41, pp.3-13. (1992).
- (3) Y. Kawazoe, Coefficient of Restitution between a Ball and a Tennis Racket, Theoretical and Applied Mechanics, 42, pp.197-208. (1993).
- (4) Y. Kawazoe, Effects of String Pre-tension on Impact between Ball and Racket in Tennis. Theoretical and Applied Mechanics, 43, pp.223-232. (1994).
- (5) Y. Kawazoe, Experimental Identification of Hand-held Tennis Racket Characteristics and Prediction of Rebound Ball Velocity at Impact, Theoretical and Applied Mechanics, 46, 165-176. (1997).

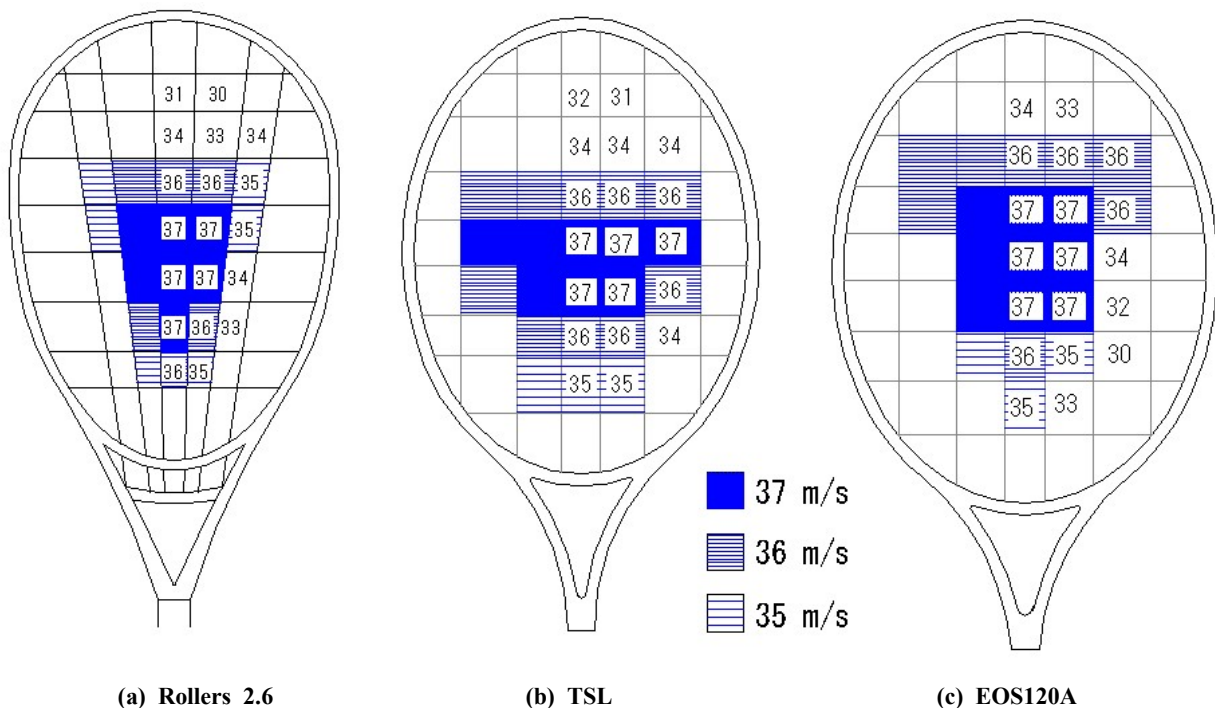


Fig.12 Sweet area in terms of power

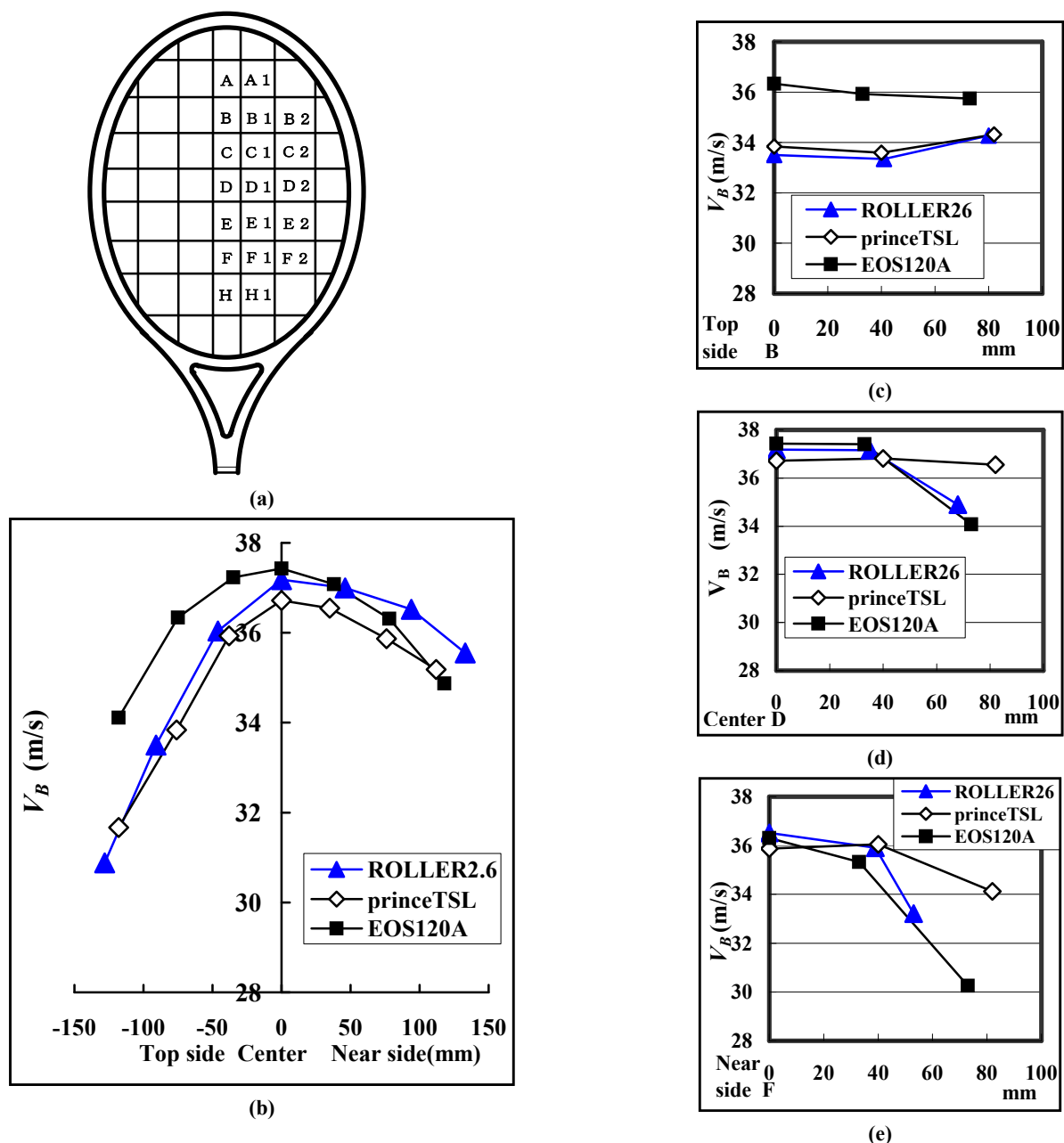


Fig.13 Predicted post-impact ball velocity V_B ($N_s = 56.9\text{Nm}$, $V_{B0} = 10\text{m/s}$)

- (6) Y. Kawazoe, Computer Aided Prediction of the Vibration and Rebound Velocity Characteristics of Tennis Rackets with Various Physical Properties, Science and Racket Sports (Edited by T.Reilly,M.Hughes and A.Lees), (1994), pp.134-139. Science and Racket Sports, E & FN SPON.
- (7) Y. Kawazoe, Performance Prediction of Tennis Rackets with Materials of the Wood and the Modern Composites, 5th Japan Int.SAMPE Symposium, Tokyo, (1997), pp.1323-1328.
- (8) 川副嘉彦, 重量および重量バランスの異なる標準的フェース面積の高剛性テニスラケットの性能予測 (ラケットの反発性とボールの飛びに関する性能), 日本機械学会ジョイントシンポジウム講論集, No.98-31 (1998), pp.44-48.
- (9) 川副嘉彦, テニスにおけるラケット性能の予測と評価についての考察 (パワー, 面安定性, 打球感, コントロール), 日本機械学会75期通常総会講論集, No.98-1(1998), 539-540.
- (10) Y. KAWAZOE and R.TANAHASHI, Prediction of Contact Forces, Contact Times, Restitution Coefficients and Racket Stabilities During Tennis Impact with the Effect of Racket Mass and Mass Distribution, Sports Dynamics: Discovery and Application (Edited by Subic A. & Trivailo P., Alam F.), (2003), pp.51-56. RMIT University Publishing.
- (11) 川副嘉彦, テニスラケットの性能予測に基づく軽量化の限界について, 日本機械学会Dynamics & Design Conference 2002 講演論文集No.02-9, CD-ROM版, (2002), pp.1-6.
- (12) 川副嘉彦, テニスラケットの素材・構造と性能, パイオメカニクス研究(特集)素材とスポーツ, 7-2, (2003), pp. 136-151.