

世界最大のテニスラケットBIG-BUBBAの ボールの飛びに関連する性能予測と評価

Prediction and Estimation of Power of Tennis Racket with the Biggest Sizes

○川副嘉彦（埼玉工大） 高橋利昌（埼玉工大） 友末亮三（安田女大）

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, 1690 Okabe, Saitama
Toshimasa TAKAHASHI, Saitama Institute of Technology
Ryoso TOMOSUE, Yasuda Women's College

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 the biggest racket appeared in the market that was banned by ITF rules several years ago, 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 the biggest racket and the recent representative racket. The biggest racket provides higher coefficient of restitution particularly at the topside of string face, higher racket head speed and higher post-impact velocity compared to the recent representative racket. Prediction and estimation of feel will be reported in a separate paper.

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

1. 緒言

テニスラケットは1960年代前半までは木製でフェイス（打球面）面積が 68 in^2 のレギュラーサイズと決まっていたが、1967年にスチール製、1968年にアルミ製の金属ラケットが現れ、1974年には複合材のラケットが登場した。ラケットは大きく変わってきたが、1976年に現れた 110 in^2 の「デカラケ」、1987年の「厚ラケ」、そして1995年の「長ラケ」は最も革新的なラケットだと言われている。

「デカラケ」は、打球面が広いラケットである。過去にはセレス選手の大きなラケット 130 in^2 や 137 in^2 の超大型サイズラケット BIG-BUBBA が話題になったこともあるが、最近のラケットの打球面サイズは $95 \text{ in}^2 \sim 115 \text{ in}^2$ が主流である。

ラケットは経験の産物であり、木製ラケットの時代からラケットの全長は 27 in (約685 mm) で変わることはなかったが、長ラケは、ラケット全長 27 in を小刻みに長くしていったラケットであり、数年間は長ラケが主流の時期もあったが、最近では再び従来の 27 in に近いラケットが主流である。上記の超大型サイズラケット BIG-BUBBA 137 in^2 の全長は 32 in である。

国際テニス連盟は、プロの試合では1997年の1月から、一般の試合では2000年の1月から全長が 29 in 以上のラケットの使用を禁止した。

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。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。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⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。

本研究では、世界最大(全長、フェイス面積)の市販ラケット BIG-BUBBA 32 in (806mm、287g) のボールの飛びに関連する性能予測・評価を行い、最近の標準的な市販ラケット V-CON17 27.5 in (698.5mm、300g) 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⁾⁻⁽⁹⁾に基づいて明らかにする (Fig.1)。



(a) Old wooden (b) Recent representative (c) Big-Bubba
Fig.1 Racket sizes compared to the size of a player

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。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 Fig.2 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⁾。

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

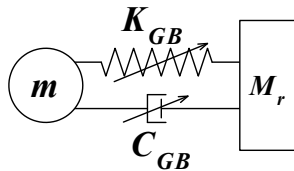
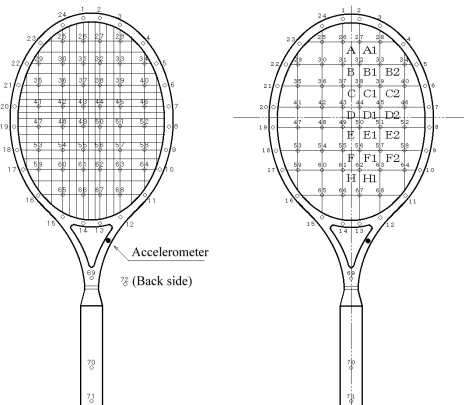


Fig.2 Non-linear Impact model of a ball-string system..

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⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。

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

Fig.3(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。Fig 2 (b)は、ボールとの衝突計算における衝突位置(四角形) $A \sim H1$ を示し、ボールとストリング面は衝突位置(四角形)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_i 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_i 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⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。



(a) String mesh (b) Impact locations

Fig.3 String mesh and impact locations on the racket face.

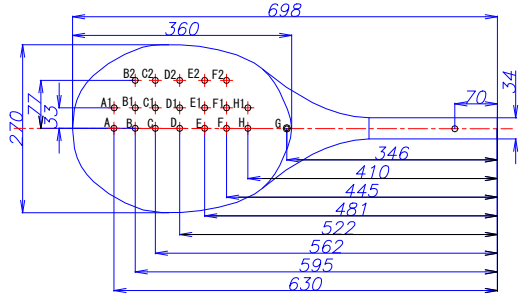
3. ラケットの物理特性

Fig.4とFig.5は、それぞれラケットBIG-BUBBA 32 in (806mm、287g) とラケット V-CON17 27.5 in (698.5mm、300g) の形状を示し、Table 1 は仕様および物理特性である。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。

Fig.6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⁾⁻⁽⁹⁾。長手軸から外れたオフ・センター打撃点に



(a)



(b)

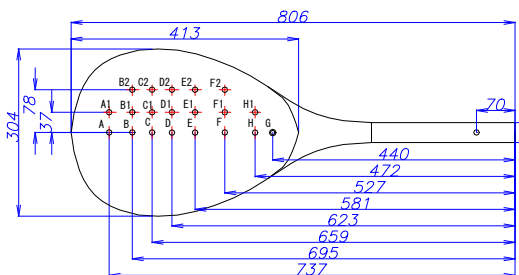


(c)

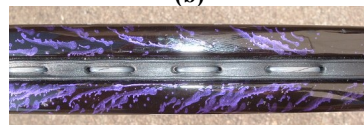
Fig.4 Geometry of Racket V-CON17



(a)



(b)



(c)

Fig.5 Geometry of Racket BIG-BUBBA

Table 1 Physical property of tennis rackets

Racket	V-CON17	BIG-BUBBA
Total length	699 mm	806 mm
Face area	690.3 cm ²	884.8 cm ²
Mass	300 g	287 g
Center of gravity from grip end	345 mm	440 mm
Moment of inertia I_{GY} about Y axis	13.73 gm ²	17.95 gm ²
Moment of inertia I_{GR} about grip	36.42 gm ²	57.25 gm ²
Moment of inertia I_{GX} about X axis	1.383 gm ²	2.118 gm ²
1st frequency	161 Hz	122 Hz
Strings tension	55 lb	58 lb
Reduced mass (center)	190 g	160 g

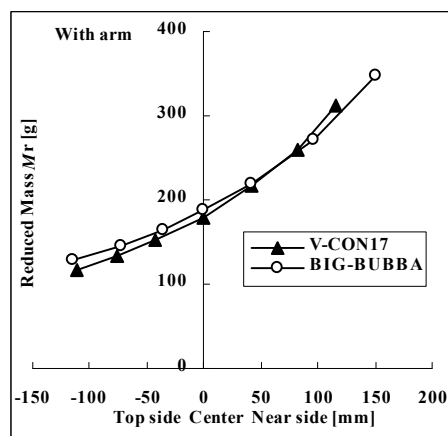


Fig.6 Reduced mass of racket at hitting locations with arm.

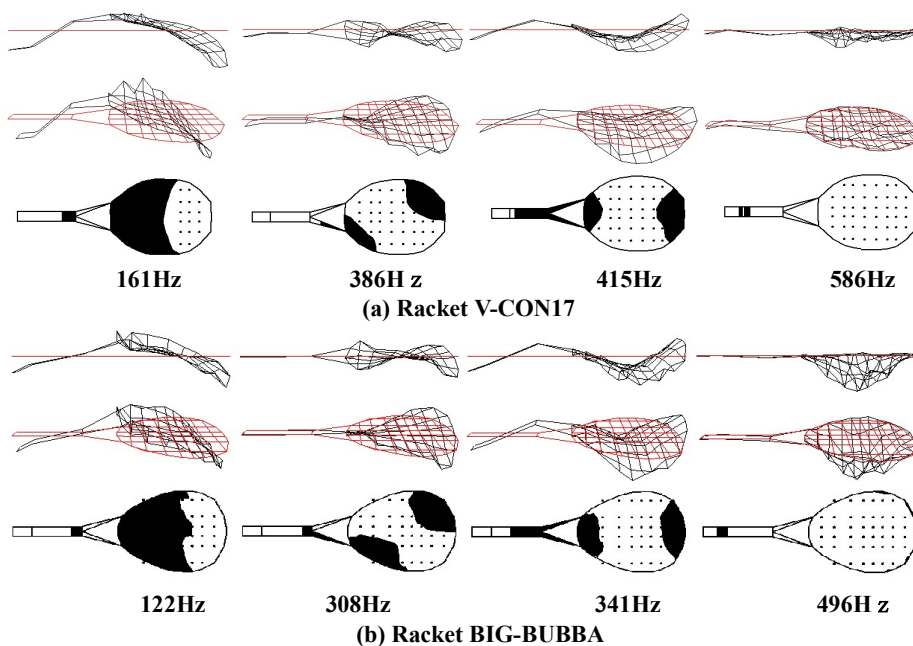


Fig.7 Experimentally identified vibration modes

おける換算質量も同様に求まる. 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).

Fig.7は, はそれぞれ, 実験モード解析により同定した振動モード形状である. 低次からフレームの2節曲げ(基本モード, 1次), 2節ねじり(2次), 3節曲げ(3次), スtringsの膜振動1次(4次)を示す. 全長が長く, フェース面積が大きいラケット BIG-BUBBA は, 軽量であるが, どの固有振動数も低い.

4. グランドストロークにおけるボールとラケットの反発係数分布の予測

Fig.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stringsの振動による成分の4つのモードを考慮して反発係数を算出した⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾.

Fig.9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 を与えたときのインパクト直前のラケット・ヘッド速度である. ラケット BIG-BUBBA のラケット・ヘッド速度が速い.

Fig.10は, ラケットフレーム振動の速度振幅(基本振動)であり, 振幅が大きいほどエネルギー損失が大きく, 反発係数が低下する.

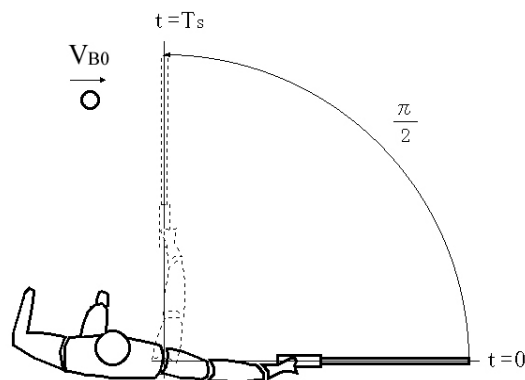


Fig.8 Player's forehand stroke swing model.

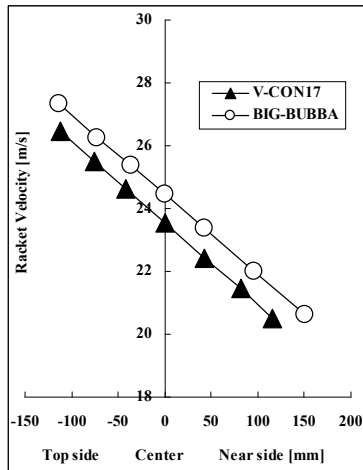


Fig.9 Predicted Pre-impact racket head velocity V_{R0} ($N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)

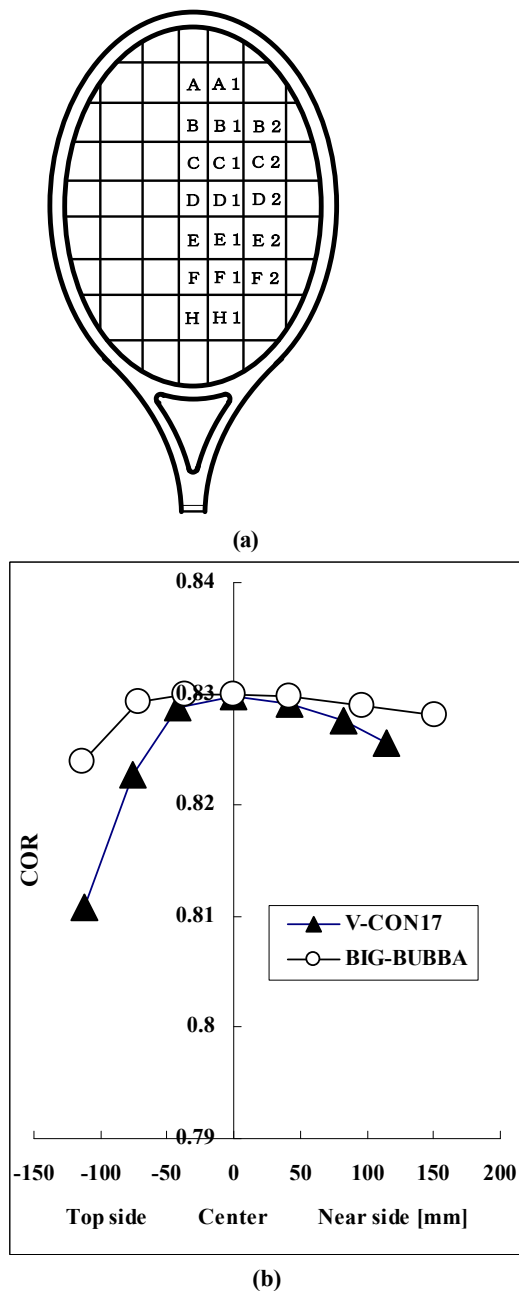


Fig.11 Predicted Restitution coefficient e_r ($N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)

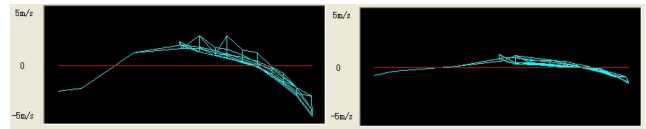
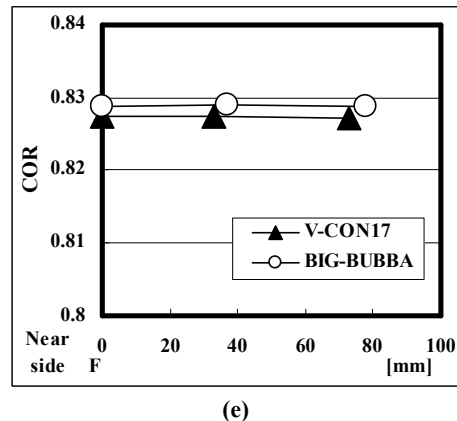
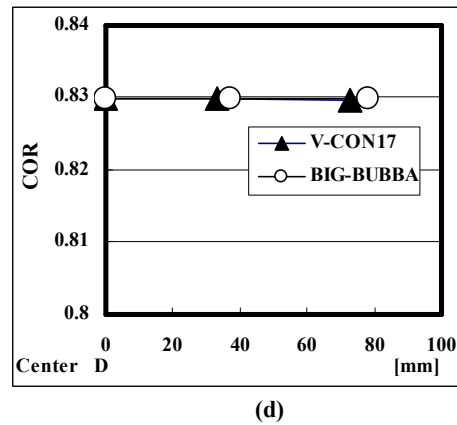
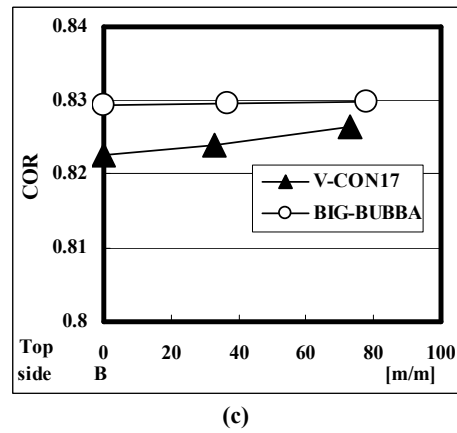


Fig.10 Velocity component amplitudes of 1st mode of racket vibrations affecting the energy loss related to the coefficient of restitution between a ball and a racket (hitting location: Top side B on the string bed).

Fig.11は、グランド・ストロークの場合の反発係数 e_r の予測結果であり、ラケットBIG-BUBBAは、V-CON17に比べて、先端・根元部分で大きく、特に先端部分で差が著しい。Fig.12は、反発係数の高い領域を示したものである。



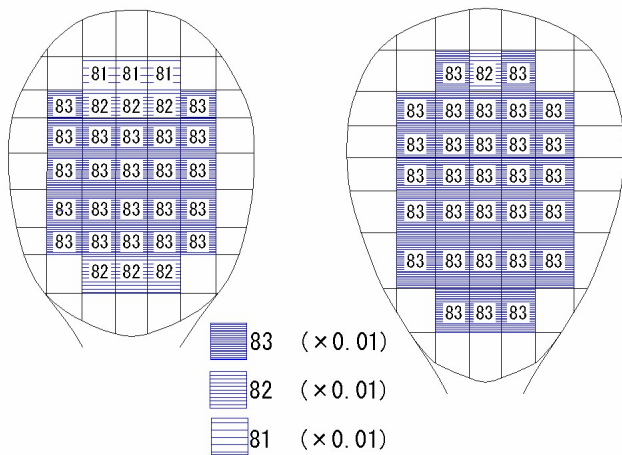


Fig.12 Predicted sweet area in terms of coefficient of restitution

5. グランドストロークにおけるラケットの反発係数分布の予測

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⁾⁻⁽⁹⁾。

Fig.13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。Fig.14は、反発力係数に関するスイートエリア (反発性の良い領域) を表示したものである。

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

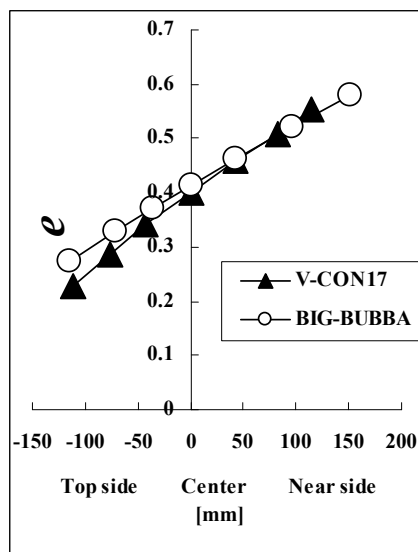


Fig.13 Predicted rebound power coefficient e ($N_s = 56.9Nm$, $V_{BO} = 10m/s$)

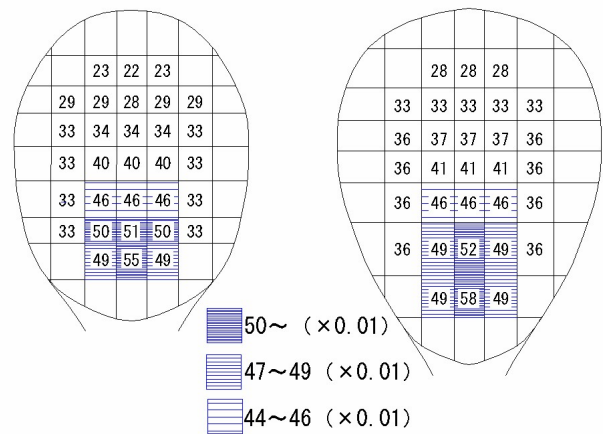


Fig.14 Predicted sweet area in terms of rebound power coefficient e ($N_s = 56.9Nm$, $V_{BO} = 10m/s$)

書ける⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾。

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

ラケットのパワーは打球速度 V_B で評価できる。

Fig.15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。Fig.16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。ラケットBIG-BUBBAで打撃した場合の方が全打点領域でボールのとびが良い。

Fig.17は、オフセンター打撃におけるラケット回転角 (根元側での打撃の例) の比較である。ラケットBIG-BUBBAの方が回転角が小さく、面安定性がよいことを示す。

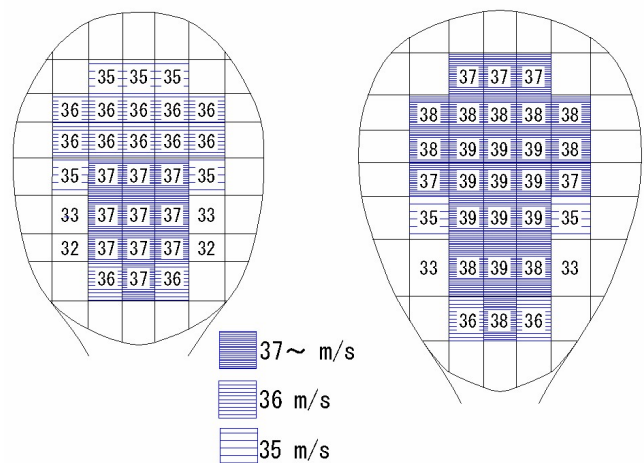


Fig.15 Sweet area in terms of power (post-impact ball velocity V_B) for ground stroke.

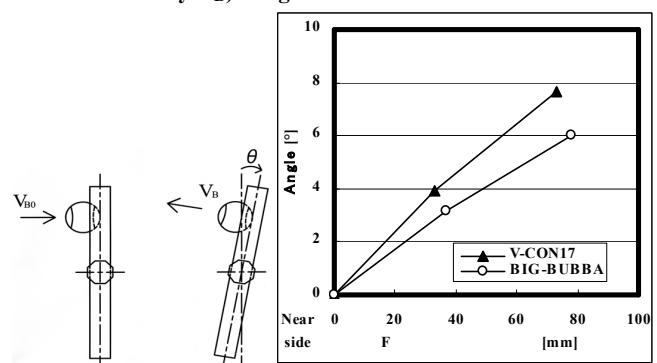


Fig.17 Racket face stability (Rotational angle due to off-center impact)

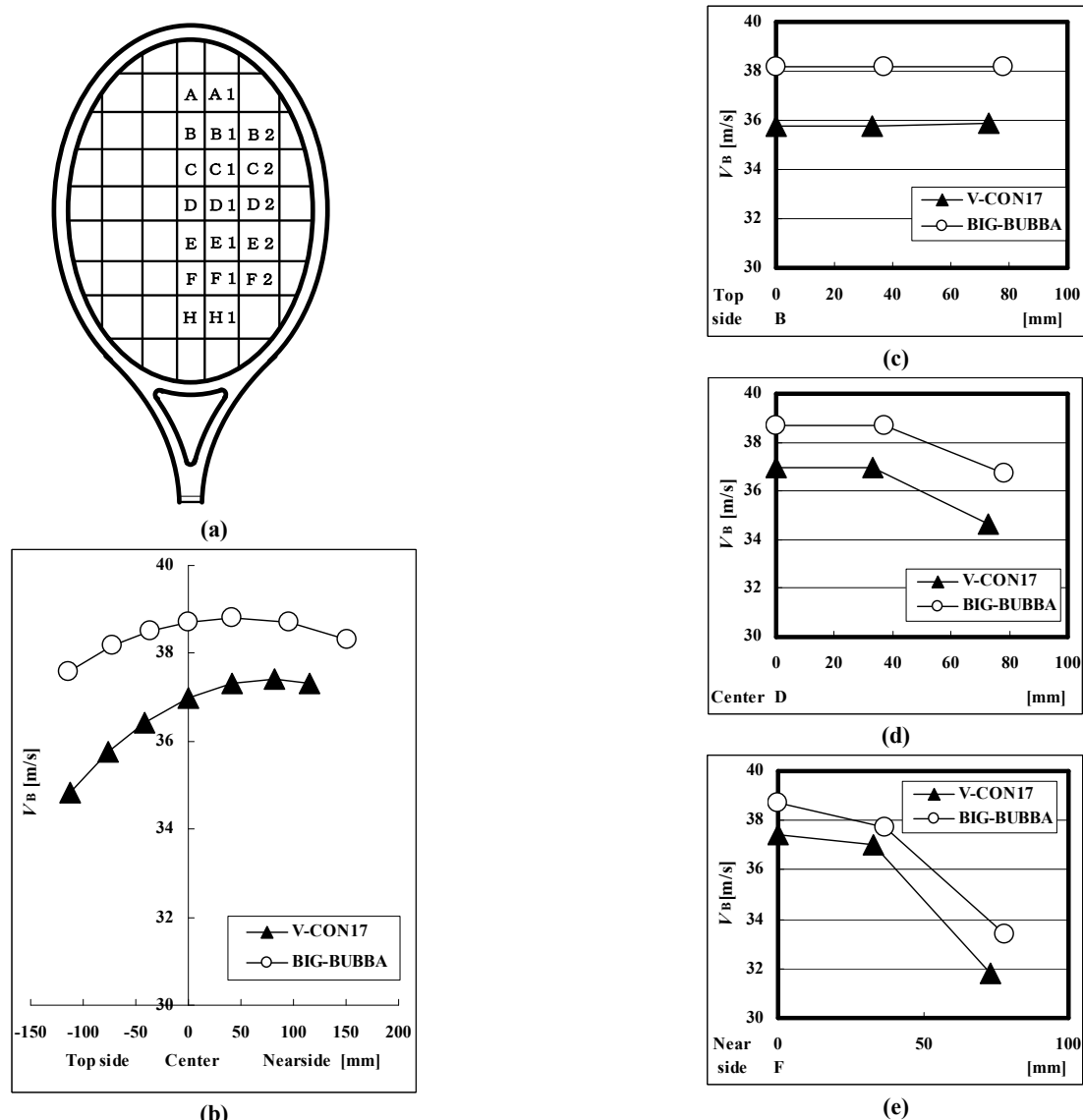


Fig.16 Predicted post-impact ball velocity V_B ($N_s = 56.9\text{Nm}$, $V_{B0} = 10\text{m/s}$)

7. 結論

最大市販ラケットBIG-BUBBAの性能予測結果は、最近の代表的ラケットV-CON17に比べて、フォアハンドストロークを想定した打撃において、予想外に振動振幅が小さく、反発係数が高く、ラケット面先端側で打撃した時に特に高い。ヘッド根元側に取り付けてあるダンパーが多少は効いているのかもしれない。全長が長くてフェース・エリアが大きいので、軽量にもかかわらず打点に換算した換算質量はわずかであるが大きく、インパクト直前のラケット速度およびインパクト直後の打球速度が速かった。また、オフセンター打撃における面安定性もよい。しかし、プレイヤーの身体操作による技術向上やラケットの操作性の観点からは性能の差異は十分大きいとは言いがたく、テニスのパフォーマンスの向上は、ラケットそのものの性能向上によるというより、ラケットの変化がプレイヤーのパフォーマンスの変化のトリガーになっているとみなすべきであろう。

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, Theor. and Appl. Mecha., 41, pp.3-13. (1992).
- (3) Y. Kawazoe, Coefficient of Restitution between a Ball and a Tennis Racket, Theor. and Appl. Mecha., 42, 197-208. (1993).
- (4) Y. Kawazoe, Effects of String Pre-tension on Impact between Ball and Racket in Tennis. Theor. and Appl. Mecha., 43, 223-232. (1994).
- (5) Y. Kawazoe, Experimental Identification of Hand-held Tennis Racket Characteristics and Prediction of Rebound Ball Velocity at Impact, Theor. and Appl. Mecha., 46, 165-176. (1997).
- (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), 134-139. Science and Racket Sports, E & FN SPON.
- (7) 川副嘉彦・友末亮三, テニスのインパクトにおけるラケットのスイートエリアの予測 (反発係数, 反発力, ボールの飛び), 日本機械学会論文集 (C編), 64-623, 2382-2388 (1998).
- (8) 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D&D 2002講義集No.02-9, (2002), pp.1-6
- (9) 川副嘉彦, テニスラケットの素材・構造と性能, バイオメカニクス研究 (特集) 素材とスポーツ, 7-2, (2003), 136-151.