

A14 フレーム・ストリング・一体化構造テニスラケットの  
パワーに関連する性能予測と評価

Prediction and Estimation of Power of Tennis Rackets with  
Clamped Strings Compared to those with Wheels 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 new type of rackets appeared in the market with wheels or with clamped strings by contraries 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 two new type rackets. Although the racket with clamped strings provides higher coefficient of restitution around the center of strings face than the racket with wheels on the sides, there is no big difference in the performance relevant to the power. The shock vibrations at the wrist joint relevant to the comfort or feel will be reported in a separate paper.

Key Words: Dynamics of Machinery, Sports Engineering, Impact, Tennis, Racket with Wheels on the Sides, Racket with Clamped Strings, Performance, Coefficient of Restitution, Rebound Power Coefficient, Power

1. 緒言

最近のラケット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<sup>(1)-(7)</sup>。

本論文では、ストリングスのグロメット部でストリングス動きにくく（滑りにくく）したフレーム・ストリング・一体化構造テニスラケットのパワーに関連する性能を衝突解析<sup>(1)-(6)</sup>に基づいて予測し、逆の発想でストリングス周りのフレームの横側にローラー（滑車）を取りつけてストリングスが滑るラケットと比較する。

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元力特性は、圧縮試験における荷重-変位特性実測値から同定する。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、打点に換算したラケット・腕系の換算質量  $M_r$  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。

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

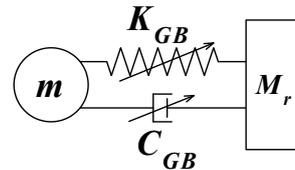


Fig.1 Non-linear Impact model of a ball-string system.

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。

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

ボールとストリング面は4つのストリング交差点で接触するとし、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、ボールとストリングスのエネルギー損失  $E_z$  との和からボールとラケットの反発係数分布  $e_i$  が求まる。反発係数  $e_i$  を用いると衝突諸量が求まる。図2にラケットのパワーに関連する性能予測・評価システムの流れを示す。



### 3. ラケットの物理特性

図3は、ストリングスのグロメット部でストリングスを動きにくく（滑りにくく）したフレーム・ストリング・一体化

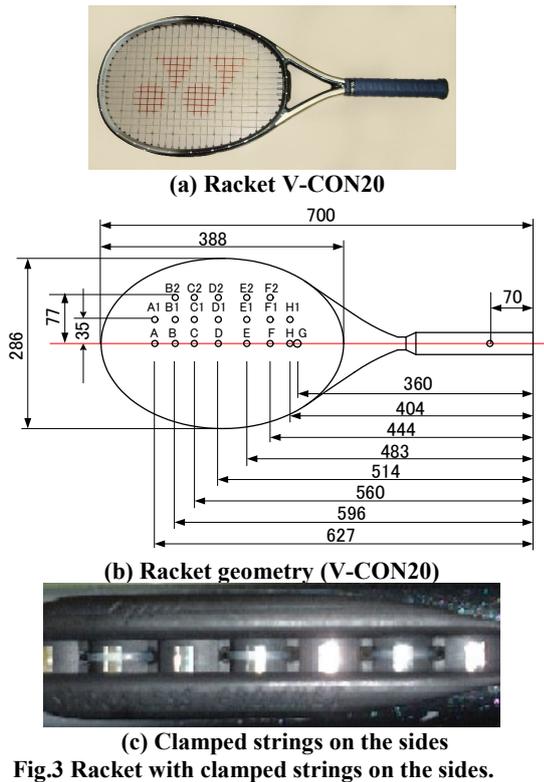
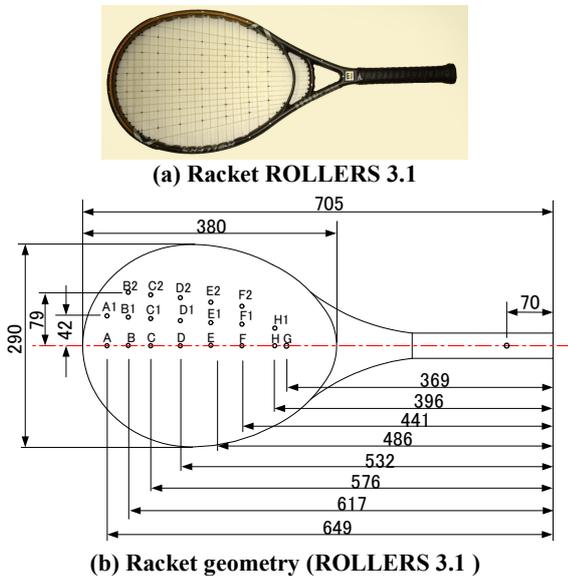


Fig.3 Racket with clamped strings on the sides.



(c) Wheels replacing conventional grommets  
Fig.4 Racket with wheels on the sides.

Table 1 Physical property

Racket	V-CON20	Rollers3.1
	Vibration Control	Rollers
Total length	700 mm	705 mm
Face area	755 cm <sup>2</sup>	742 cm <sup>2</sup>
Mass	275g	268 g
Center of gravity from grip end	360 mm	369 mm
Moment of inertia $I_{GR}$ about Y axis	12.2 gm <sup>2</sup>	13.2 gm <sup>2</sup>
Moment of inertia $I_{GR}$ about grip	35.3 gm <sup>2</sup>	37.2 gm <sup>2</sup>
Moment of inertia $I_{GX}$ about X axis	2.049 gm <sup>2</sup>	1.913 gm <sup>2</sup>
1st frequency	170 Hz	205 Hz
Strings tension	55lb	58/53 lb
Reduced mass (center)	0.18 kg	0.17 kg

構造テニスラケットを示す。図4は、逆にストリングス周りのフレームの横側にローラー(滑車)を取りつけてストリングスが滑るラケットを示す。表1に物理特性を示す。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5は、宙ぶり状態での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。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腕系を考慮した場合も同様に求まる<sup>(3)-(5)</sup>。

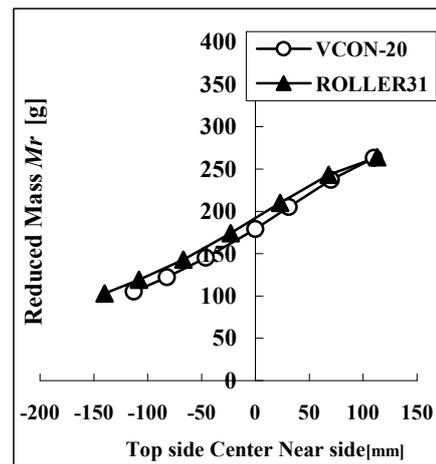


Fig.5 Reduced mass at hitting locations of freely suspended racket

実験モード解析により同定した主要な固有振動数と振動モードであり、低い方からフレームの2節曲げ、2節ねじり、3節曲げ、ストリングスの膜振動1次を示す。

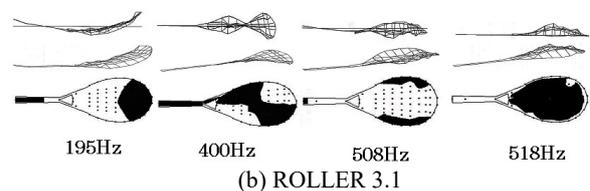
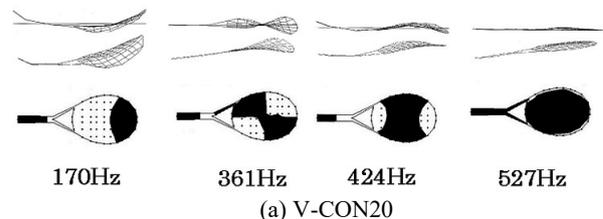


Fig.6 Experimentally identified vibration modes

#### 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。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、インパクト直前のボール速度 $V_{B0}=10$  m/s, 肩関節回転トルク $N_S=56.9$  Nmを与えたグラウンド・ストロークの場合の反発係数 $e_r$ の予測結果である。図10に、

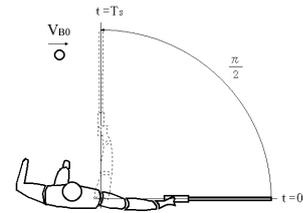


Fig.8 Player's forehand stroke swing model.

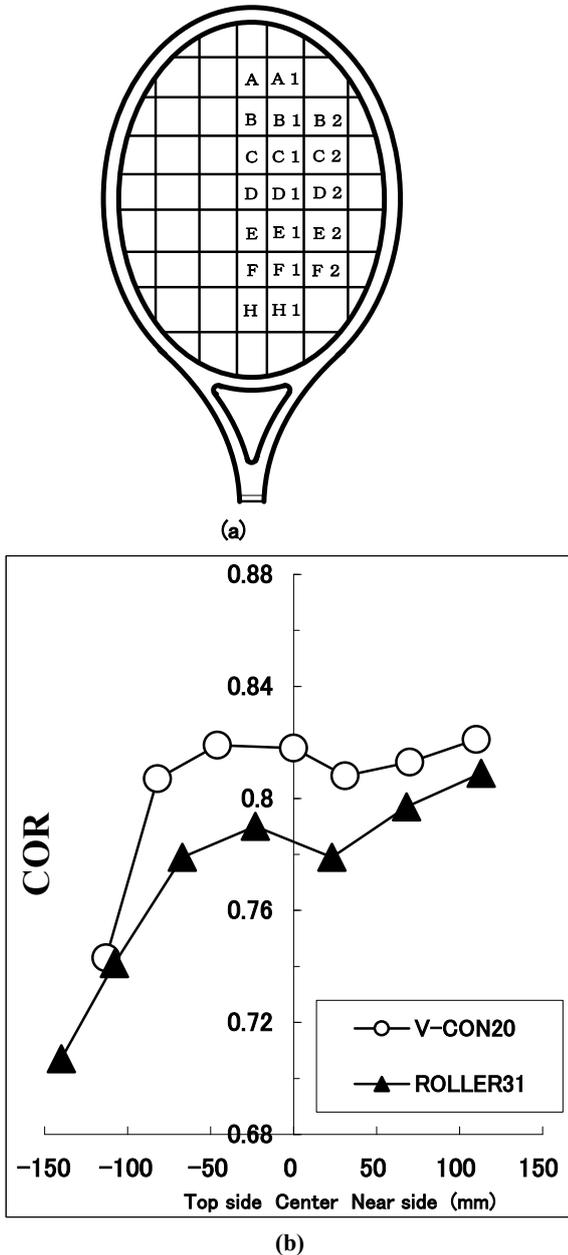


Fig.9 Predicted Restitution coefficient  $e_r$  ( $N_S = 56.9$  Nm,  $V_{B0} = 10$  m/s)

ラケット面先端側で打撃したときのフレーム振動速度振幅例を示す。図11は、この場合のインパクト直前のラケット・ヘッド速度である。

#### 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  $V_{B0}$  の比

$$e = -V_B/V_{B0} \quad (3)$$

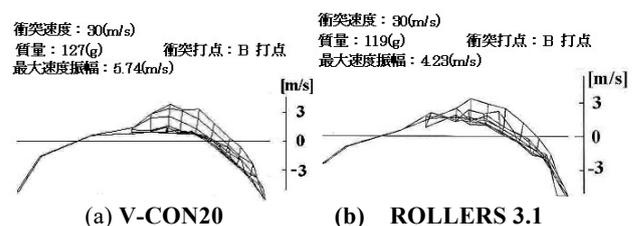
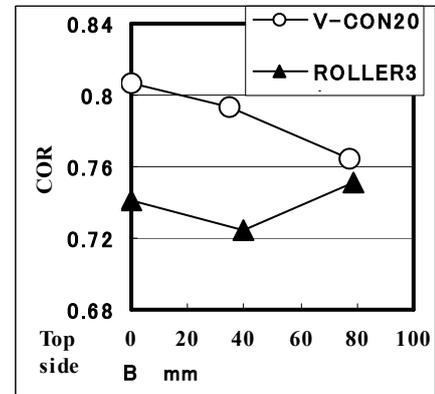
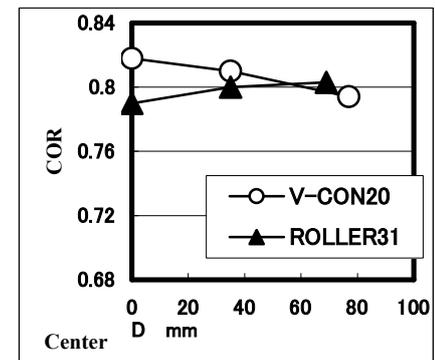


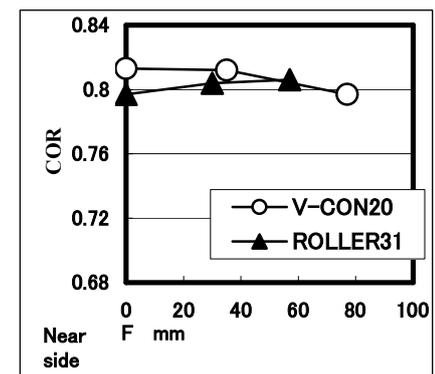
Fig.10 Velocity amplitude of 1st mode racket vibration.



(c)

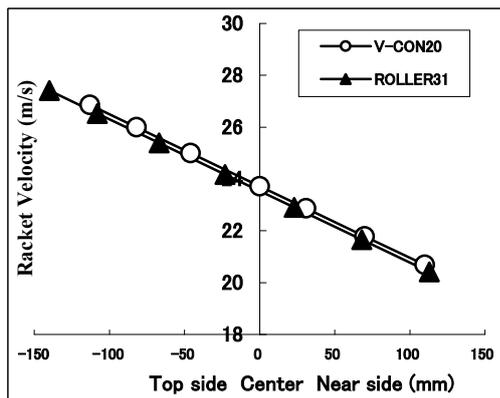


(d)



(e)

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



Fi.11 Predicted Pre-impact racket head velocity  $V_{R0}$  ( $N_s = 56.9 \text{ Nm}$ ,  $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$ )

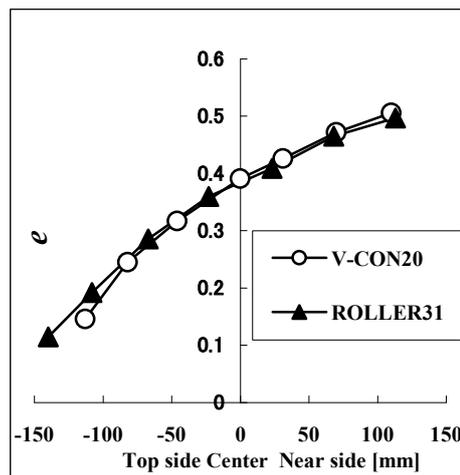
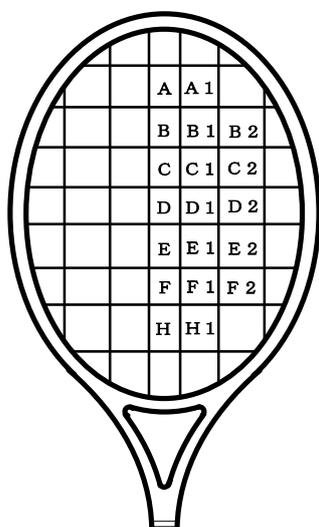
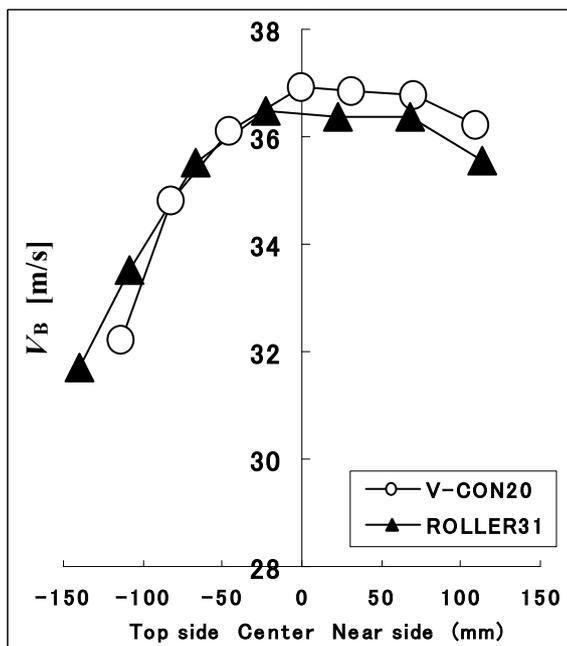


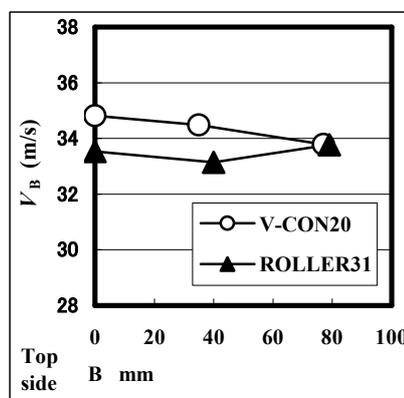
Fig12 Rebound power coefficient  $e$  ( $N_s = 56.9 \text{ Nm}$ ,  $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$ )



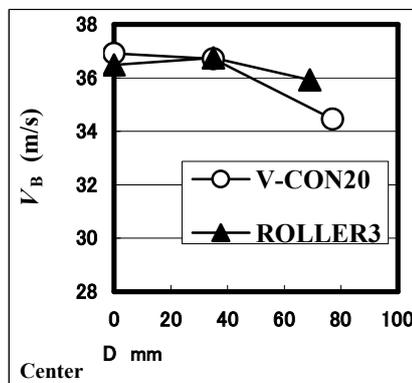
(a)



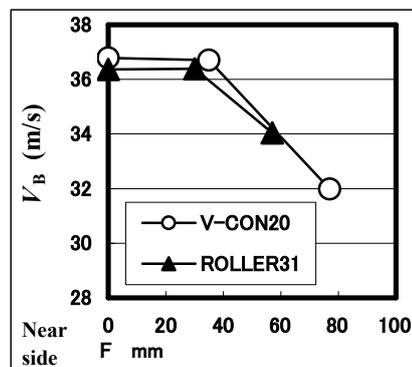
(b) Impact on the longitudinal axis



(c) Top side off-center



(d) Center off-center



(e) Near side off-center

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

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、

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

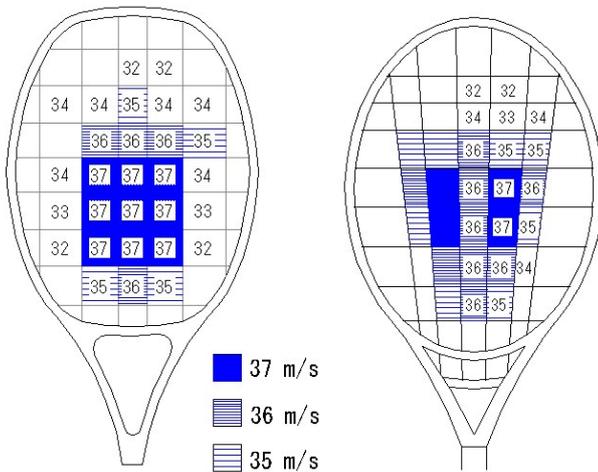
のように求まる<sup>(1)-(6)</sup>。図12は、ラケット面中心から長手方向の反発力係数 $e$ の分布を示す。

## 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<sup>(1)-(6)</sup>。ラケットのパワーは打球速度 $V_B$ で評価する。

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

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。図14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。



(a) ROLLERS 3.1 (b) V-CON20  
Fig.12 Sweet area in terms of power

## 7. コントロールと面安定性

図15は、ボールがストリング面に接触してから離れるまでにラケット面が傾く回転角の計算例<sup>(6)</sup>である。面の中心から根元側で面が傾きやすく、打球の方向がずれる。

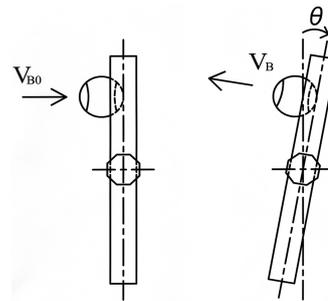
## 8. 結論

ストリングスを動きにくくしたフレーム・ストリング・一体化構造ラケットは、動きやすくしたローラー（滑車）付ラケットに比べて、反発係数は面中心付近でやや高く、打球速度も面中心付近ではやや速いが、先端側ではやや遅く、ストリングス拘束条件はパワーには大きくは影響しない。打球感に関連した衝撃振動については別報に述べる。

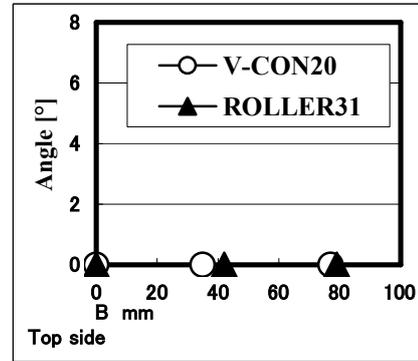
おわりに、図表作成にご助力いただいた埼玉工大・平成13年度4年生・江原将充および平成15年度・都雄樹の両君に感謝する。なお、本研究の一部は科学研究費基盤研究(B), (C), および埼玉工業大学ハイテクリサーチセンターの援助によって行われたことを付記する。

## 文献

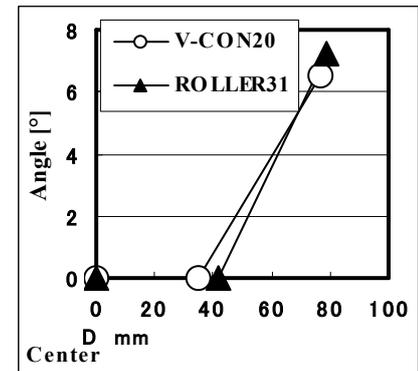
- (1) Y. Kawazoe, *Theoretical and Applied Mechanics*, 41, pp.3-13. (1992).
- (2) Y. Kawazoe, *Theoretical and Applied Mechanics*, 42, pp.197-208. (1993).



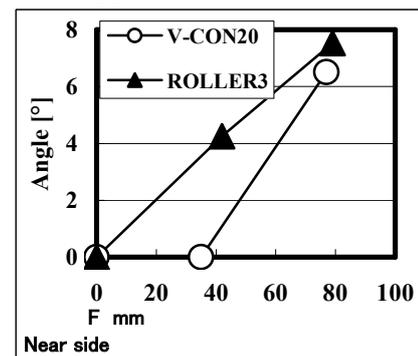
(a) Stability



(b) Top side off-center



(c) Center off-center



(d) Near side off-center  
Fig.13 Racket stability

- (3) Y. Kawazoe, *Theoretical and Applied Mechanics*, 43, pp.223-232. (1994).
- (4) Y. Kawazoe, *Theoretical and Applied Mechanics*, 46, pp.165-176. (1997).
- (5) KAWAZOE, Y., *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.49, (2000), pp.11-19.
- (6) KAWAZOE, Y., *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.51, (2002), pp.177-187.
- (7) 川副嘉彦, *バイオメカニクス研究*, 7-2, (2003), pp.136-151.