

世界最大のテニスラケットBIG-BUBBAの 打球感に関連する性能予測と評価

Prediction and Estimation of Shock Vibrations of Handled Tennis Racket with Biggest Sizes

○川副嘉彦（埼玉工大） 池崎 悠（埼玉工大） 吉成啓子（白百合女大）

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, 1690 Okabe, Saitama
Yuu IKEZAKI, Saitama Institute of Technology
Keiko YOSHINARI, Shirayuri Women's College

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 impact shock vibrations of player's wrist joint, which might be related to the feel. It is based on the experimental identification of the racket-arm dynamics and the simple nonlinear impact analysis. The result showed that the magnitude of shock vibration at the handle and the wrist joint with the biggest racket is rather small compared to the recent representative racket. Prediction and estimation of power will be reported in a separate paper.

Key Words: Dynamics of Machinery, Sports Engineering, Impact, Biggest Tennis Racket, Shock Vibrations, Feel, Wrist Joint, Racket Handle, Performance Prediction

1. 緒言

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⁾⁻⁽¹⁴⁾。

本研究では、全長およびフェース面積が世界最大の市販ラケット BIG-BUBBA 32 in (806mm、287g)⁽¹⁾でボールを打

撃したときに手首に伝わる衝撃振動を予測する。実験的に同定したラケット・腕系とボールの特性に基づく衝突解析によりボールを打撃したときのラケット・ハンドルと手首の衝撃振動波形を予測し⁽²⁾⁻⁽¹⁴⁾、最近の標準的な市販ラケット V-CON17 27.5 in (698.5mm、300g) との比較により打球感に関連する性能の違いのメカニズムを明らかにする (Fig.1)。



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

2. インパクトにおけるラケットと手首関節の衝撃振動の予測法⁽²⁾⁻⁽¹⁴⁾

Fig.2はプレイヤーがボールを打撃した瞬間に手に伝わる

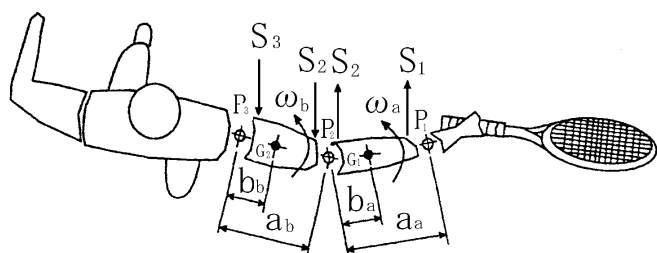


Fig.2 Model for the prediction of the shock force transmitted to the arm joint from a racket.

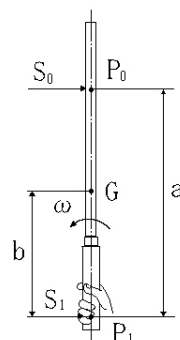


Fig.3 Location of wrist joint

衝撃力を求めるためのモデルを示す。Fig.3は手首関節の加速度予測位置を示す。ラケットと手首関節の衝撃振動波形を剛体運動成分と振動成分との合成により導く。腕系の衝撃振動はインパクトの瞬間には重力や筋力は衝撃力にくらべて小さいとし、腕関節はピン結合として扱い、ハンドルの握りの位置と手首関節の位置の距離を無視し、肩関節に作用する力 S_3 は肩関節の速度には影響しないと仮定し、ボールとストリングスに作用する衝撃力を S_0 、プレイヤーの手首関節 P_1 、肘関節 P_2 、肩関節 P_3 に作用する力をそれぞれ S_1 , S_2 , S_3 とすると、手首関節、肘関節、肩関節の衝撃力成分および衝撃加速度成分を求めることができる。手で支持したラケットの実験モード解析および実打実験の加速度実測波形から減衰を同定することにより、ラケット面上の任意の打点でボールと衝突したときのラケットの握りの位置の振動加速度成分を求めることができる。

フォアハンド・グランド・ストロークにおいてラケットで打撃したときの手首関節の実測加速度波形と予測波形は、衝撃成分とフレーム振動の2節曲げ、3節曲げ、2節ねじり、ストリングス面振動1次の4つの振動モード成分を考慮するとかなり一致する。Fig.4は、手首の衝撃振動加速度の実測波形と予測波形の例と実打実験状況とを示す。

衝撃振動加速度波形 A_{grip} は以下のように衝撃加速度成分（第1項）、振動加速度成分（第2項）の和で表せる。

$$A_{grip} = A_{nv} \sin \left(\frac{\pi t}{T_c} \right) + \sum_{i=1}^4 A_{vi} e^{-\sigma_i t} \sin 2\pi f_i t$$

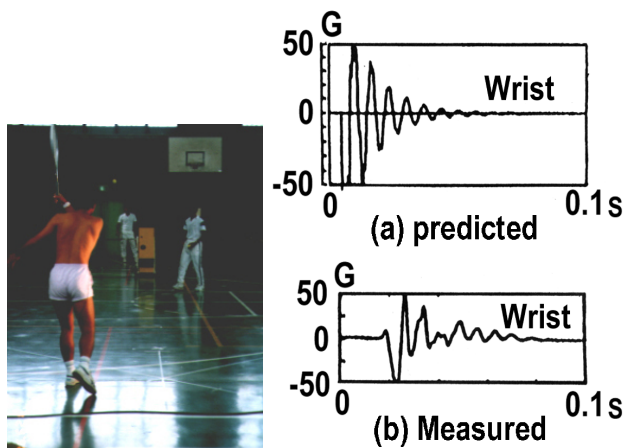


Fig.4 Predicted shock vibrations of a wrist joint compared with the experimental.

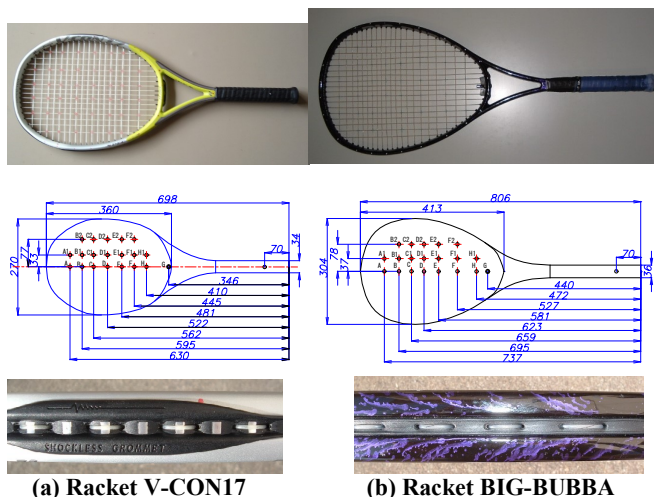


Fig.5 Geometry of rackets

3. ラケットで打撃したときの手首関節の衝撃振動の予測

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、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）、ストリングスの膜振動1次（4次）を示す。

Fig.7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。インパクトにともなう手首関節の衝撃振動加速度の大きさをFig.8に示すように波形のピーク値（最大最小の絶対値の和）で評価する。

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

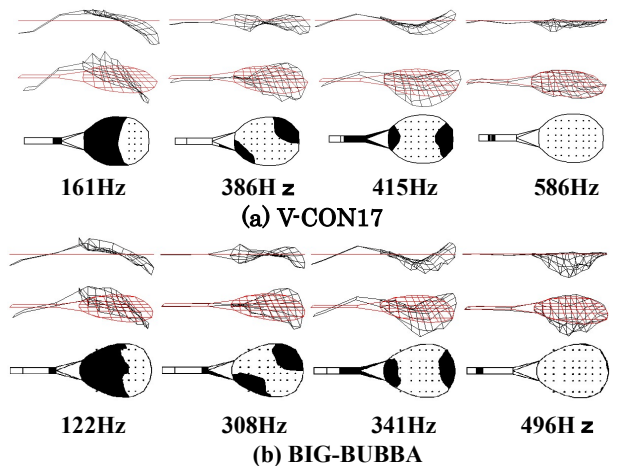


Fig.6 Experimentally identified vibration modes

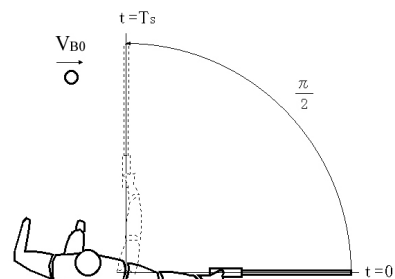


Fig.7 Player's forehand stroke swing model.

Fig.9, Fig.10, Fig.11, それぞれ, ストリング面の打撃位置 A (先端), D (ほぼ中心), F (手前側, 根元側) でボールを打撃したときの衝撃・振動成分とその合成波形を示す. 上から振動 1次成分, 2次成分, 3次成分, 4次成分, 衝撃成分と合成加速度波形である. ラケットBIG-BUBBAのストリング面先端で打撃したときの手首の衝撃振動が小さいのが目立つ (Fig.9, Fig.10). 先端打撃で通常大きい 1 次の 2 節曲げ振動成分が小さいからである. また, ストリング面中心打撃で通常小さい 3 次の 3 節曲げ振動成分が大きい (Fig.12). ストリング面手前側 (根元側) 打撃では, 手首の衝撃振動は小さい (Fig.13, Fig.14).

Fig.15は, グランド・ストロークで打撃したときのインパクトにおける手首関節の衝撃振動の予測波形である. ストリング面の全範囲の打点で打撃したときの手首・衝撃振動を比較することができる. 全長およびフェース面積が最大の市販ラケット BIG-BUBBA は, ラケットV-CON17に比べて, 長尺・軽量大型サイズにもかかわらず, 手首に伝わる衝撃・振動が小さく, 衝撃振動の減衰も大きい. 特にストリング面先端や手前側で打撃したときの手首の衝撃振動が小さいのが目立ち, 通常スイートスポットと言われるストリング面中心打撃では, 3 次の 3 節曲げ振動成分が大きいためにやや大きい.

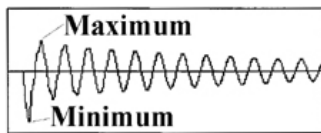
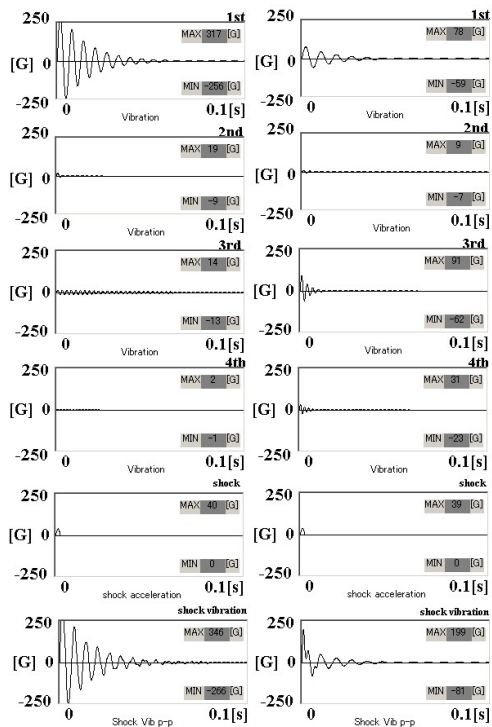
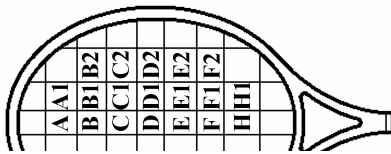
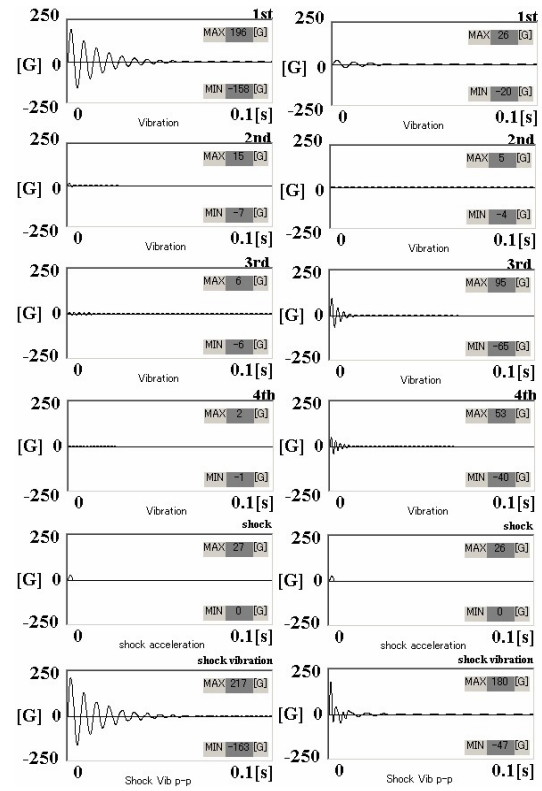


Fig.8 Peak-peak value



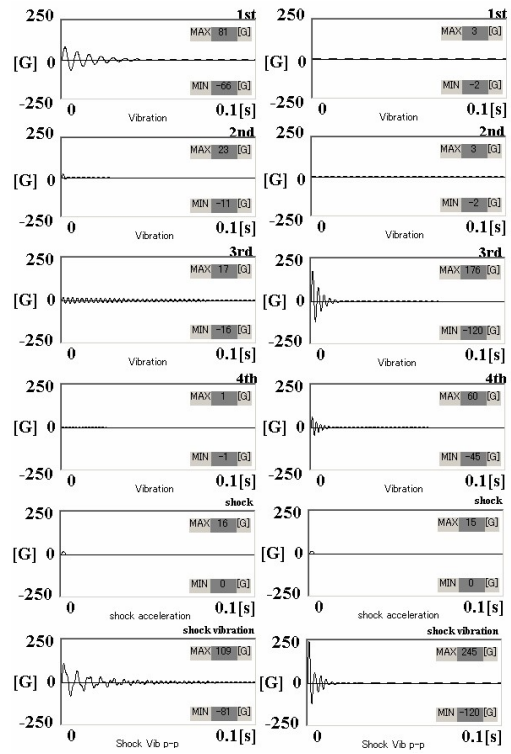
(a) V-CON17 (b) BIG-BUBBA
Impact Vel.: 36.5m/s Impact Vel.: 37.3m/s
(Impact location: Top side A)

Fig.9 Predicted shock vibrations components and its summation at the wrist joint (impact: $N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)



(a) V-CON17 (b) BIG-BUBBA
Impact Velocity : 35.5m/s Impact Velocity : 36.3m/s
(Impact location: Top side B)

Fig.10 Predicted shock vibrations components and its summation at the wrist joint (impact: $N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$).



(a) V-CON17 (b) BIG-BUBBA
Impact Velocity : 34.6m/s Impact Velocity : 35.4m/s
(Impact location: Top side C)

Fig.11 Predicted shock vibrations components and its summation at the wrist joint (impact: $N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$)

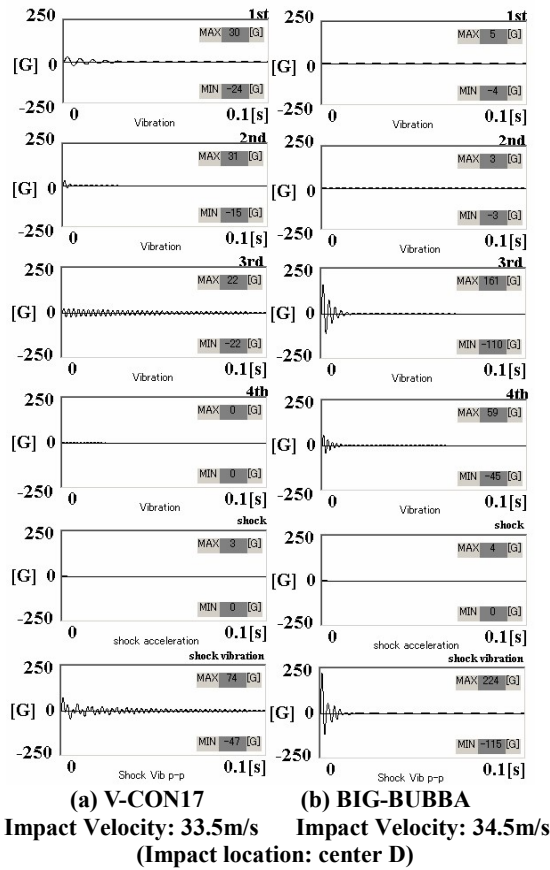


Fig.12 Predicted shock vibrations components and its summation at the wrist joint (impact: $N_s = 56.9$ Nm, $V_{B0} = 10$ m/s)

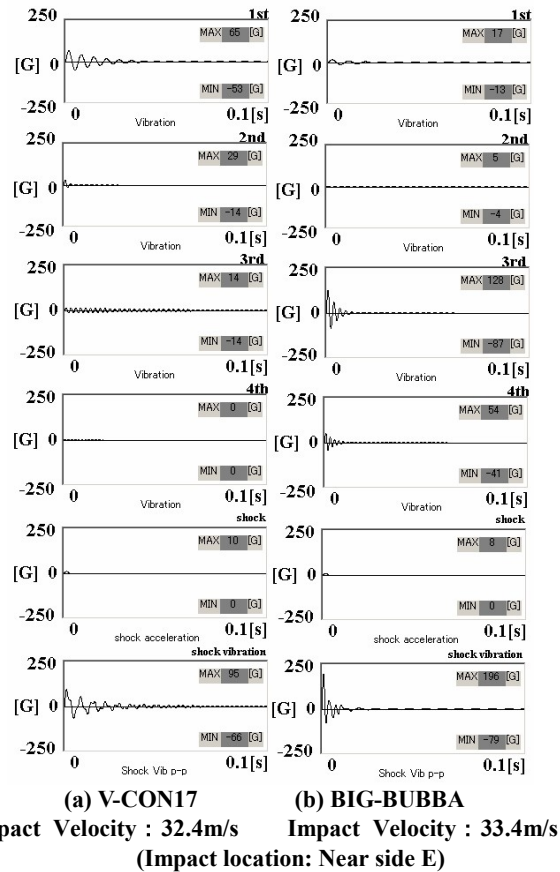


Fig.13 Predicted shock vibrations components and its summation at the wrist joint (impact: $N_s = 56.9$ Nm, $V_{B0} = 10$ m/s)

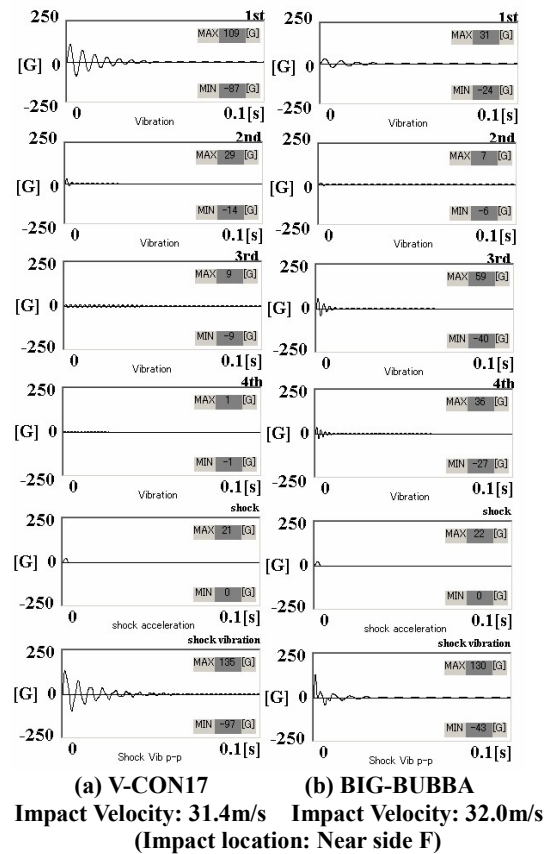


Fig.14 Predicted shock vibrations components and its summation at the wrist joint (impact: $N_s = 56.9$ Nm, $V_{B0} = 10$ m/s)

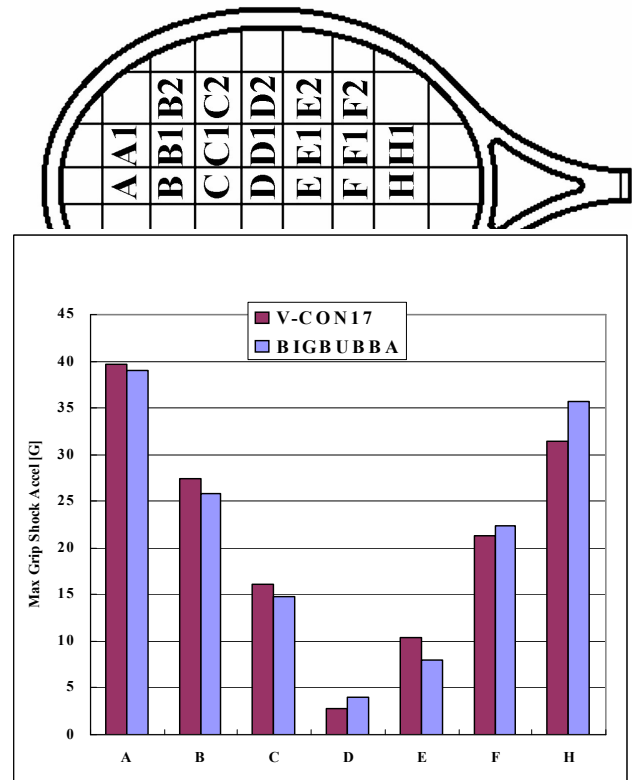


Fig.16 Predicted maximum shock acceleration at the wrist joint when hitting a ball with flat forehand drive at the various impact locations of string bed (impact: $N_s = 56.9$ Nm, $V_{B0} = 10$ m/s).

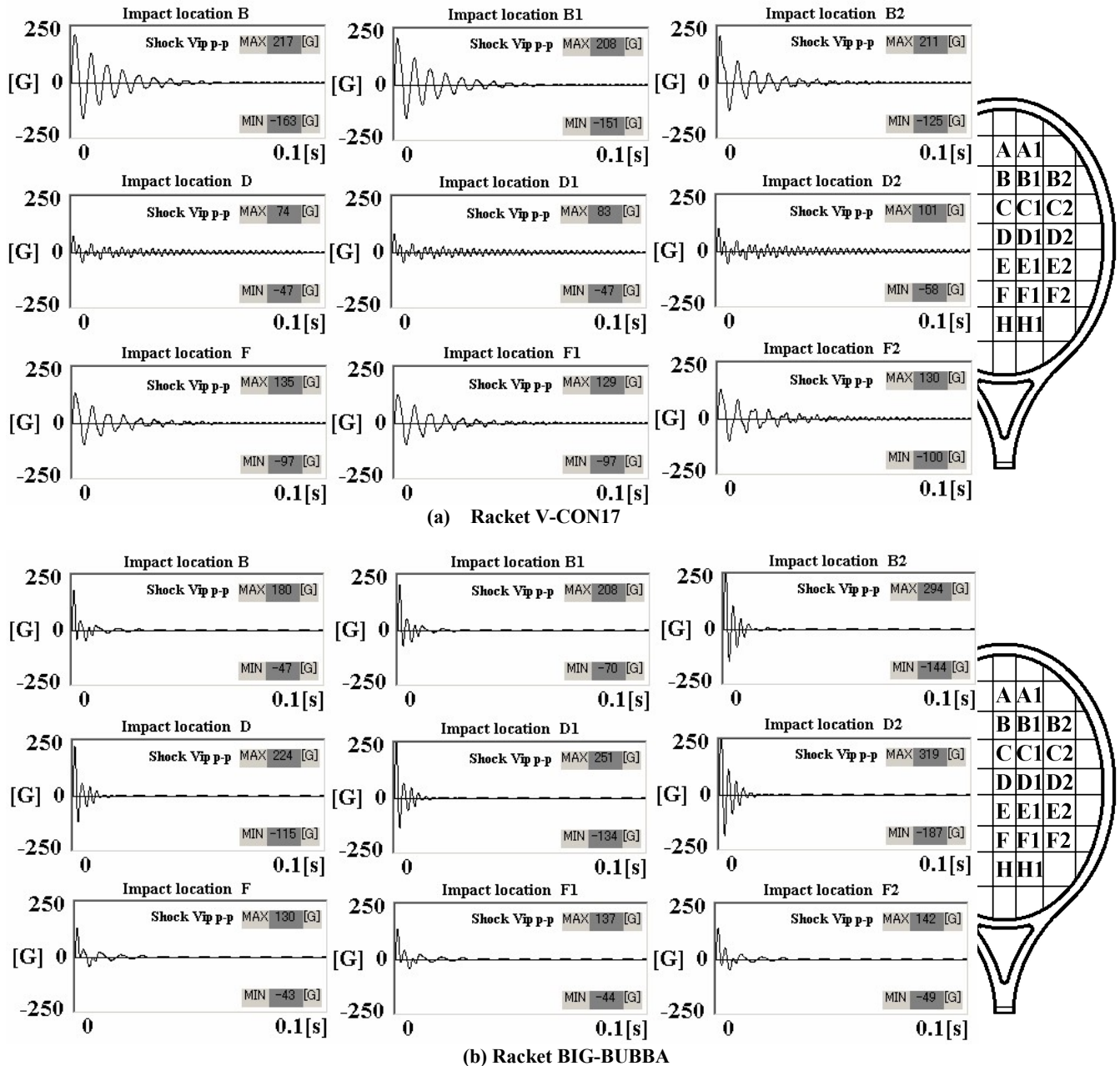


Fig.15 Predicted shock vibrations at the wrist joint when hitting a ball with flat forehand drive at the various impact locations of racket face (impact: $N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$).

Fig.16は、手首の衝撃加速度成分のみであり、Fig.17の衝撃振動の大きさに比べると、腕系の質量分布の影響により、衝撃成分は小さいことを示している。腕系の減衰はインパクト直後の振動振幅ピーク値にはあまり減衰効果がない。

Fig.17は、Fig.9～Fig.14で見たように、ラケットBIG-BUBBAは、ラケットV-CON17に比べて、長尺・軽量大型サイズにもかかわらず、手首に伝わる衝撃・振動が小さく、衝撃振動の減衰も大きい。手首の衝撃振動は、特にストリング面先端や手前側で打撃したときに小さいが目立ち、ストリング面中心打撃ではやや大きい。

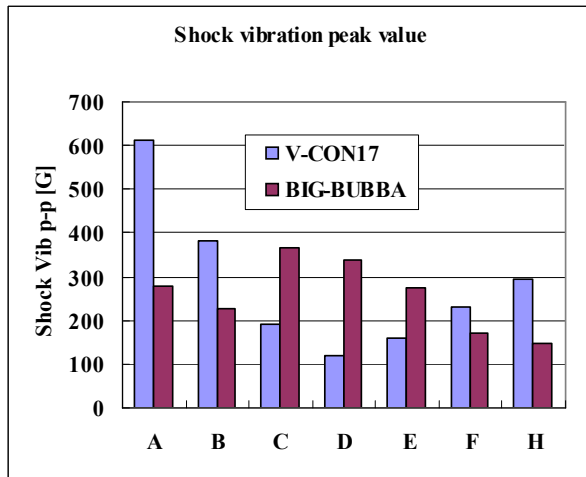
4. 結論

全長およびフェース面積が最大の市販ラケットBIG-BUBBAは、ラケットV-CON17に比べて、長尺・軽量大型サイズにもかかわらず、手首に伝わる衝撃・振動が小さく、

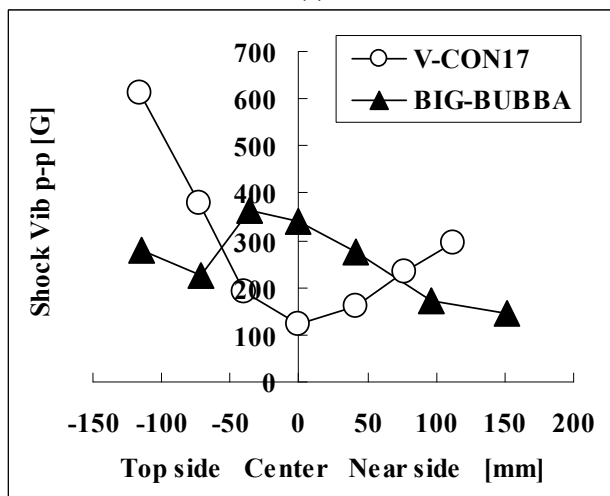
衝撃振動の減衰も大きかった。特にストリング面先端や手前側で打撃したときの手首の衝撃振動が小さいが目立ち、ただし、通常スイートスポットと言われるストリング面中心打撃では、3次の3節曲げ振動成分が大きいため、手首の衝撃振動はやや大きいという興味深い結果になった。

文献

- (1) 川副嘉彦・高橋利昌・友末亮三，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，日本機械学会ジョイントシンポジウム講論集，No.07-，(2007)，掲載予定
- (2) 川副嘉彦，テニスラケットの動力学とコンピュータ援用設計（モード特性におよぼす諸因子の影響と設計への指針），機論，C，56-526(1990)，1511-1517.
- (3) 川副嘉彦・友末亮三，テニスのインパクトにおけるラケ



(a)



(b)

Fig.17 Predicted shock vibrations components at the wrist joint vs. representative impact locations of string bed (impact: $N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$).

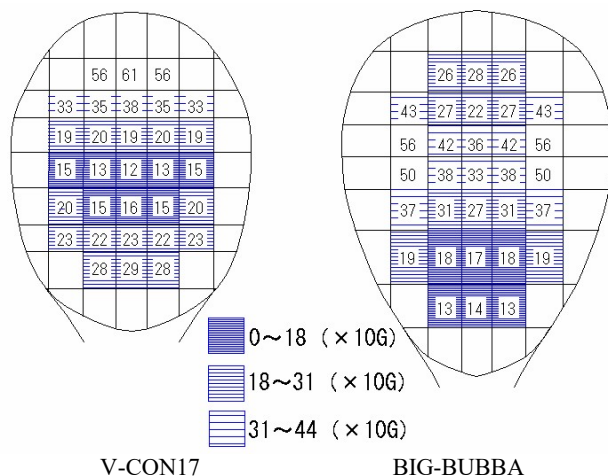


Fig.18 Predicted sweet areas in terms of shock vibrations at the wrist joint (impact: $N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$).

ット・ハンドルと手首関節の振動, 日本機械学会論文集, 第59巻560号C編 (1993), pp.1001-1008.

(4) 川副嘉彦・友末亮三・吉成啓子, テニスのフォアハンド・ドライブにおけるラケット・ハンドルの衝撃振動のメカニズム, 日本機械学会・機械力学・計測制御講演論文集, Vol.A, No.96-5(I), (1996), pp.501-504.

(5) 川副嘉彦・友末亮三・吉成啓子・F. Casolo, テニスのフォアハンド・ドライブにおけるラケット・グリップと手首関節の衝撃振動, 機械学会ジョイントシボシム講演集, No.97-34, (1997), 28-32.

(6) 川副嘉彦・友末亮三・吉成啓子, テニスのインパクトにおけるラケット・グリップと手首関節の衝撃振動の予測 (打球面サイズの異なる従来型質量バランス・ラケットの場合), 機械学会・機械力学計測制御講演集, No.98-8, Vol.B, pp.133-136.

(7) 川副嘉彦・友末亮三・吉成啓子, テニスのインパクトにおけるラケット・グリップと手首関節の衝撃振動の予測 (打球面サイズの異なる超軽量ラケットの場合), 日本機械学会・機械力学・計測制御講演論文集(Vol.B), No.98-8(I), (1998), pp.137-140.

(8) Y. Kawazoe, R. Tomosue & A. Miura, Impact Shock Vibrations of the Wrist and the Elbow in the Tennis Forehand Drive: Remarks on the Measured Wave Forms Considering the Racket Physical Properties, Proc. of Int. Conf. on New Frontiers in Biomechanical Engineering (Edited by K. Tanishita & M. Sato), Japan Society of Mechanical Engineers, Tokyo, (1997), pp.285-288.

(9) 川副嘉彦・荻原史浩, テニスにおける木製ラケットと複合材ラケットの性能予測 (ラケットと手首関節の衝撃振動), 日本機械学会75期通常総会講演集, No.98-1(1998), 543-544.

(10) Kawazoe Y. (2000). Mechanism of Tennis Racket Performance in terms of Feel. Theoretical and Applied Mechanics, Vol.49, pp.11-19.

(11) Kawazoe, Y. & Yoshinari, K. (2000). Prediction of the Impact Shock Vibrations of the Player's Wrist Joint: Comparison between Two Super Large Sized Rackets with Different Frame Mass Distribution. In Tennis Science & Technology (Edited by Haake S. & Coe A.), pp.91-99. Blackwell Science.

(12) Kawazoe, Y., Tomosue, R., Yoshinari, K. and Casolo, F. (2003). Prediction of the shock vibrations at the wrist joint with the new large ball compared to the conventional ball impacted to the tennis racket during forehand Stroke. In Tennis Science & Technology (Edited by S. Miller), pp.105-112. International Tennis Federation.

(13) Y. Kawazoe, R. Tanahashi and F. Casolo, Experimental and theoretical criticism of the effectiveness of looser strings for the reduction of tennis elbow, In Tennis Science & Technology, (Edited by S. Miller), pp.61-69. International Tennis Federation.

(14) Y. KAWAZOE and R. TANAHASHI, Sweet Spots Prediction in Terms of Feel with the Effect of Mass and Mass Distribution of a Tennis Racket, Sports Dynamics: Discovery and Application (Edited by Subic A. & Trivailo P., Alam F.), (2003), pp.57-62. RMIT University Publishing.