

# インテリ・ファイバー・テニスラケットの 手に伝わる衝撃振動特性の予測と評価

## Prediction and Estimation of Shock Vibrations of Handled Tennis Racket with Active Piezo Fibers

正 川副嘉彦（埼玉工大） 吉成啓子（白百合女大）

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

This paper investigated the physical properties of a new type of racket with active piezo fibers, predicting racket performance in terms of the 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 active piezo fibers are not so effective on the performance of the shock vibration of the racket handle and the wrist joint as it is advertised. Although this new type racket provided higher coefficient of restitution on the whole area of string face and large rebound power coefficients at the topside and big power on the whole area of string face in the preceding paper, there is room for improvement in the shock vibration transmitted to the racket handle and the arm joint relevant to the feel or comfort.

**Key Words:** Dynamics of Machinery, Sports Engineering, Tennis Racket, Active Piezo Fibers, Impact, Shock Vibration, Feel, Vibration Mode, Node, Wrist Joint, Racket Handle, Performance Prediction

### 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。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<sup>(1)</sup>。

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」<sup>(13)</sup>の衝撃振動伝達特性を予測する<sup>(2)-(14)</sup>。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、最軽量のラケットおよび反発性能にすぐれた平均的な軽量ラケットとの比較により打球感の評価を試みる。

### 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<sup>(2)-(14)</sup>

図1はプレイヤーがボールを打撃した瞬間の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突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突力を  $S_0$ 、プレイヤー

一の手首関節  $P_1$ 、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。

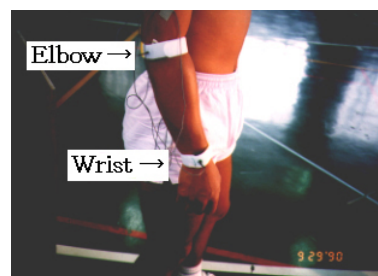


Fig.1 Location of wrist joint

### 3. 宙づりラケットにボールが衝突したときのハンドル衝撃振動の比較

ピエゾ・インテリ・ファイバーを搭載した軽量ラケット Is-10（図2、Head社製、フェース面積  $114 \text{ in}^2$ 、張り上がり質量  $241 \text{ g}$ ）の性能予測結果を最軽量ラケット Prince Thunder Super Lite (TSL) ( $115 \text{ in}^2$ ,  $224 \text{ g}$ ) 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 ( $120 \text{ in}^2$ ,  $292 \text{ g}$ ) の性能予測結果と比較した。3本のラケットの仕様および物理特性を1に示す。



(a)



(b) positioning of the intellifibers

Fig.2 Racket with active piezo fibers.

Table 1 Specification and physical properties

Racket	IS-10	TSL	EOS120A
Total length	700 mm	710 mm	690 mm
Face area	740 cm <sup>2</sup>	742 cm <sup>2</sup>	760 cm <sup>2</sup>
Mass	241 g	224 g	292 g
Center of gravity from grip end	382 mm	379 mm	363 mm
Moment of inertia $I_{GY}$ about Y axis	11.2 gm <sup>2</sup>	11.0 gm <sup>2</sup>	14.0 gm <sup>2</sup>
Moment of inertia $I_{GR}$ about grip	36.7 gm <sup>2</sup>	32.4 gm <sup>2</sup>	39.0 gm <sup>2</sup>
Moment of inertia $I_{GX}$ about X axis	1.51 gm <sup>2</sup>	1.21 gm <sup>2</sup>	1.78 gm <sup>2</sup>
1st frequency	205 Hz	200 Hz	137 Hz
Strings tension	55 lb	55 lb	79 lb
Reduced mass (center)	0.18 Kg	0.15 Kg	0.21 Kg

図3は、宙づりラケットのハンドル（グリップ端から70 mm）の衝撃振動の予測波形である。ストリングス面上の各打点位置を英数字の打点名称で示している<sup>(1)</sup>。衝撃振動は、衝撃加速度成分と4次までの振動加速度成分の和である。ボールとラケットの衝突速度は30m/sである。図4は、衝撃振動波形のピーク値（波形のmaximumとminimum差、絶対値の和）の取り方を示す。図5は、宙づりラケットのハンドル・衝撃振動予測波形のピーク値である。Is-10の値は中心から根元では大きい、先端側では小さい。

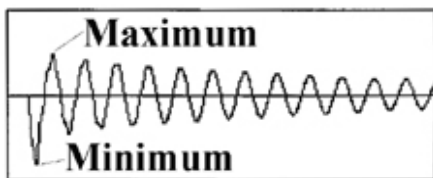
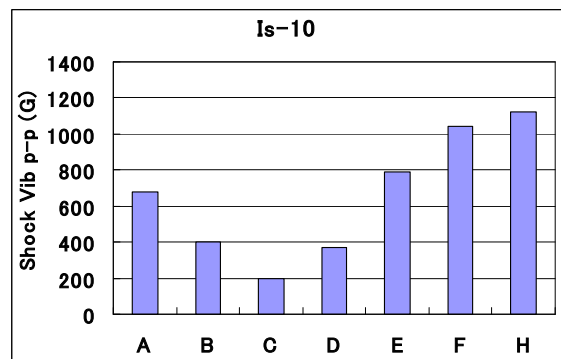
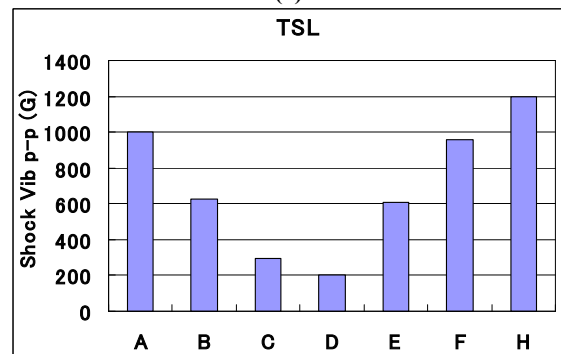


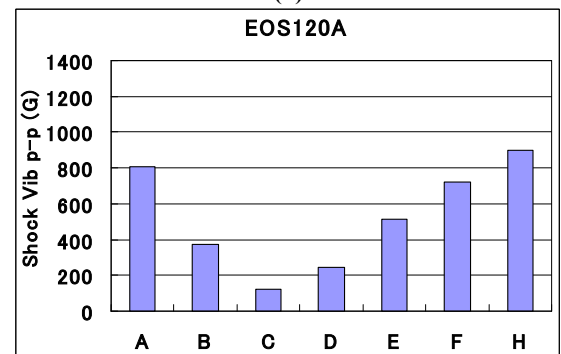
Fig.4 Peak-peak value.



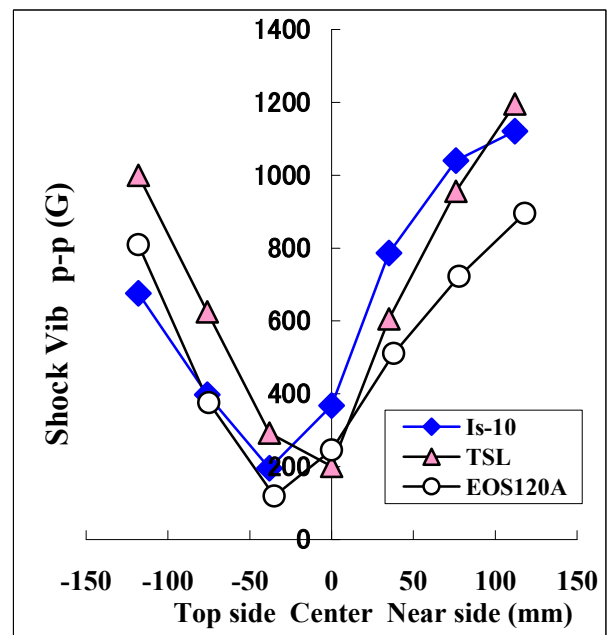
(a)



(b)

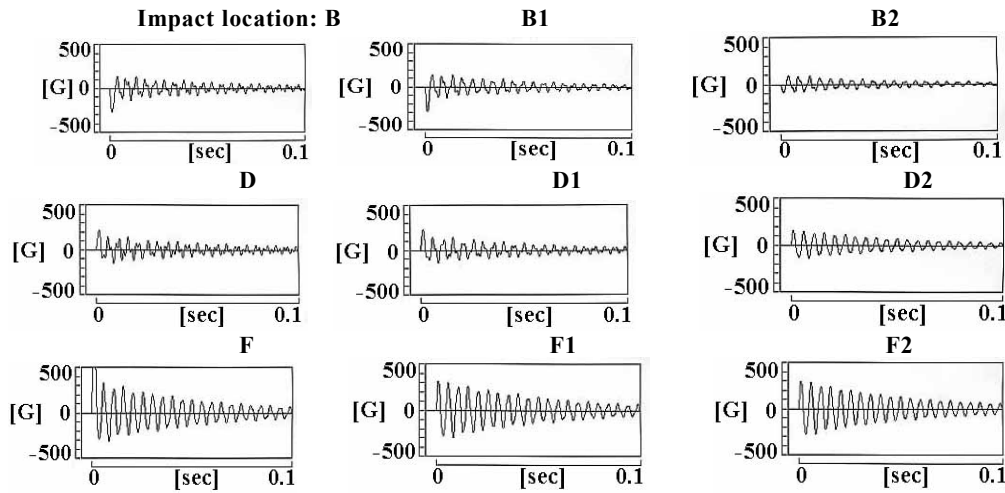


(c)

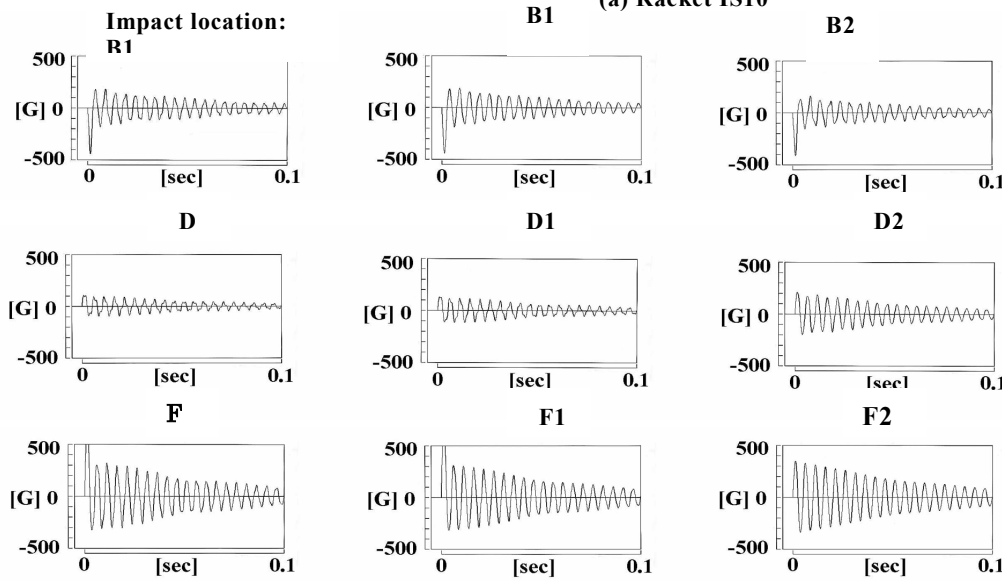


(d)

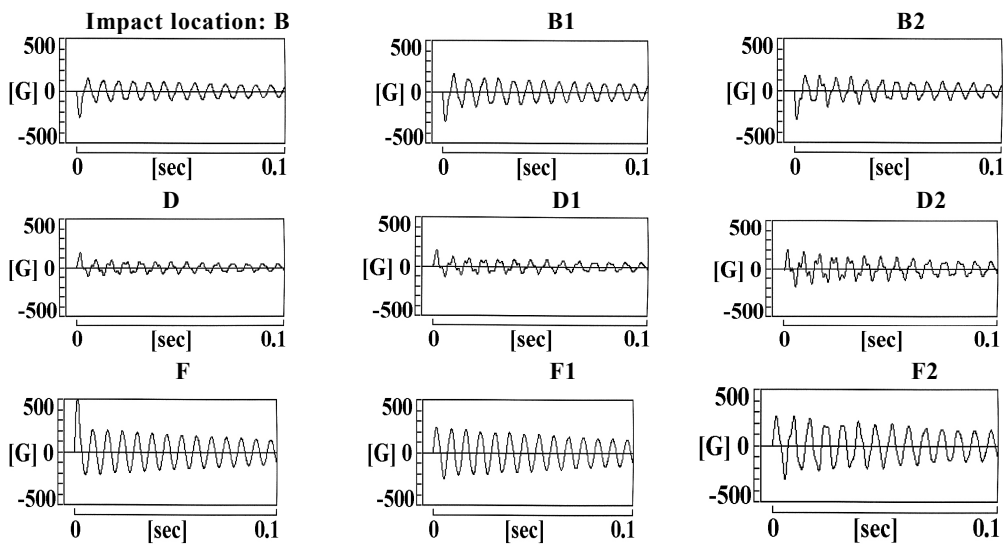
Fig.5 Predicted shock vibrations at the grip 70 mm from the grip end when hitting a ball with flat forehand drive (impact velocity: 30 m/s).



(a) Racket IS10



(b) Racket TSL



(c) Racket EOS120A

Fig.4 Predicted shock vibrations at the grip 70 mm from the grip end when a ball strikes the suspended racket (impact velocity: 30 m/s).

#### 4. ラケットで打撃したときのハンドルの衝撃振動

図6は、グランド・ストロークで打撃したときのハンドル（グリップ端から70mmの位置）の衝撃振動予測波形のピーク値である。インテリジェント・ラケット Is-10の値はストリング面中心から先端側では小さいが、根元側で大きい。

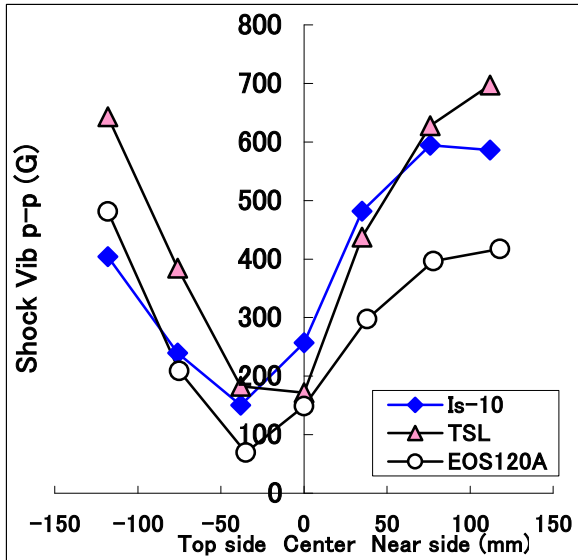


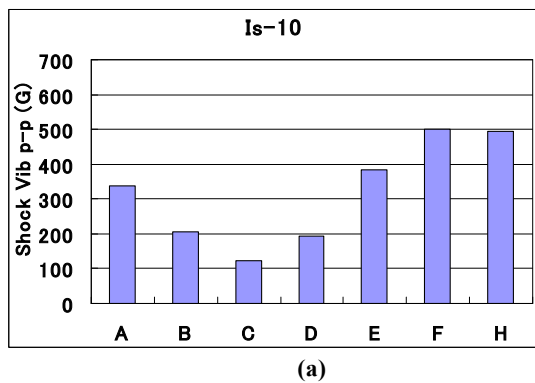
Fig.6 Predicted shock vibrations at the grip 70 mm from the grip end when hitting a ball with flat forehand drive (impact velocity: 30 m/s).

#### 5. ラケットで打撃したときの手首関節の衝撃振動の予測

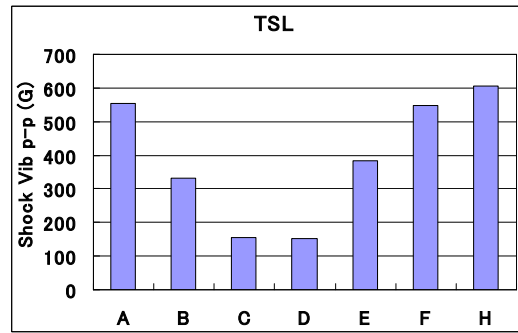
図7は、グランド・ストロークの場合のインパクトにおける手首関節の衝撃振動の予測波形の比較である(ボールとラケットの衝突速度は 30m/s. IS-10 の縦軸目盛が異なることに注意)。

図8は、手首関節・衝撃振動予測波形のピーク値である。インテリジェント・ラケット Is-10ストリング面中心から先端側では小さいが、根元側で大きい。

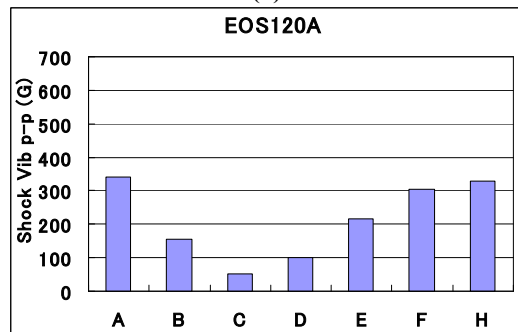
図9は、ツア・プロのサービス（衝突速度 40 m/s）における手首関節の衝撃振動の予測結果である。ストリング右面中心から先端側でも EOS120Aに比べてかなり大きくなる。最軽量ラケット TSL と比べると、先端側で振動が低減されている。



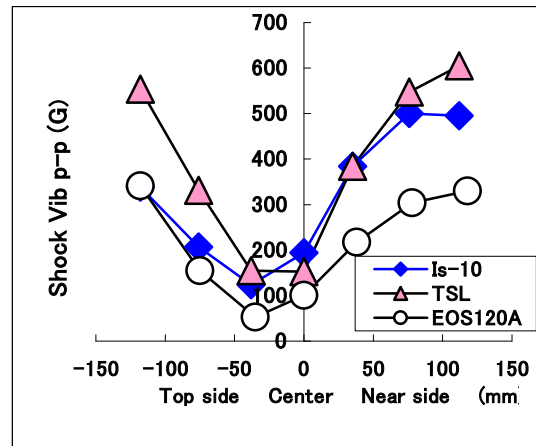
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.8 Predicted shock vibrations at the wrist joint when hitting a ball with flat forehand drive at the various impact locations of racket face (impact velocity: 30 m/s).

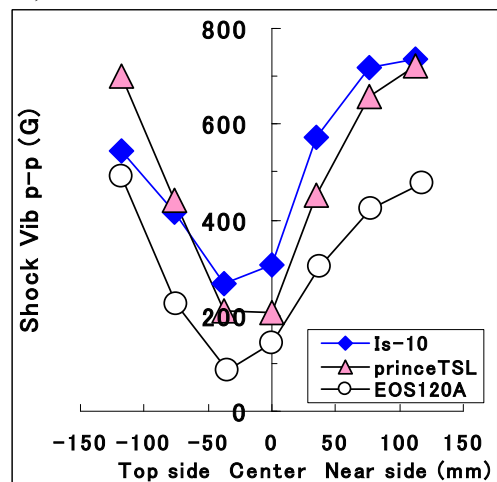
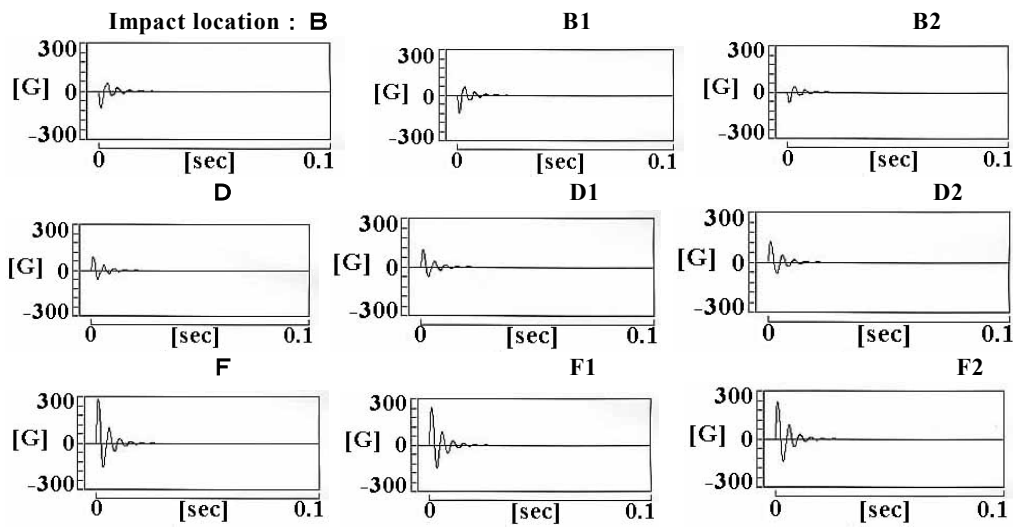
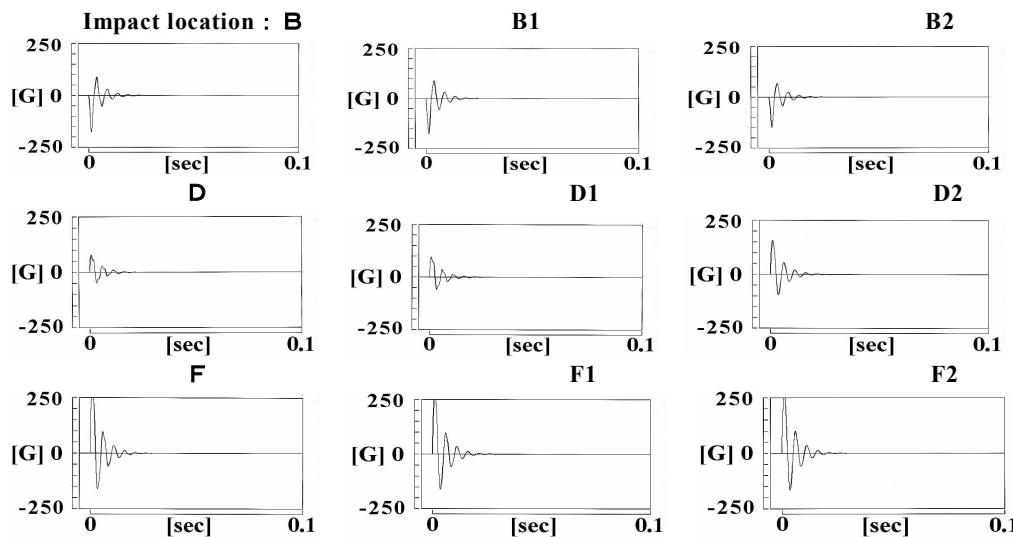


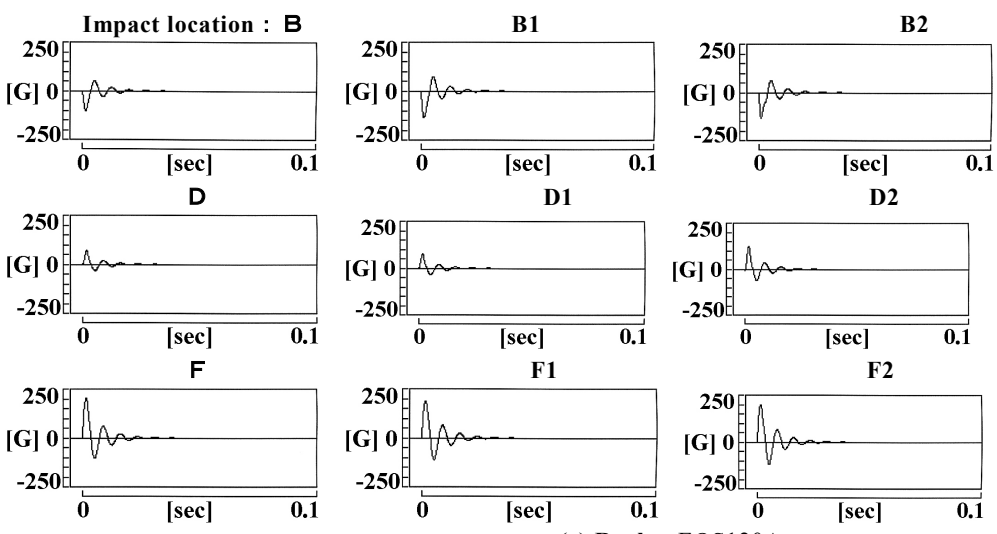
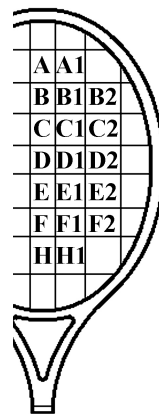
Fig.9 Predicted shock vibrations at the wrist joint at service stroke (impact velocity: 40m/s)



(a) Racket Is-10



(b) Racket TSL



(c) Racket EOS120A

Fig.7 Predicted shock vibrations at the wrist joint when hitting a ball with flat forehand drive at the various impact locations of racket face (impact velocity: 30 m/s).

## 6. 結論

ピエゾ・インテリ・ファイバーを搭載した軽量ラケットのインパクトにおける手首関節・衝撃振動の予測結果は、上級者のグランドストローク・ラリーを想定したインパクトでは、ストリング面中心から先端側で小さかった。ストリング面の根元側（スロート側）では衝撃振動が大きかった。また、ツアー・プロのサーブを想定したインパクト速度では、ストリング面のやや先端側でもかなり衝撃振動が大きくなった。

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・江原将亮および平成14年度・奥田茂貴の両君に感謝する。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) 川副嘉彦, 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, 機械学会ジョイントシンポジウム講論集, No.03-12, (2003), 掲載予定
- (2) 川副嘉彦, インテリ・ファイバー・テニスラケットのパワーに関連する性能予測と評価, 機械学会ジョイントシンポジウム講論集, No.03-12, (2003), 掲載予定
- (3) 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・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ンポジウム講論集, 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.