

## ピエゾ・インテリ・ファイバーを採用した テニスラケットのパワーに関連する性能予測\*

川副 嘉彦<sup>\*1</sup>, 武田 幸弘<sup>\*2</sup>, 中川 慎理<sup>\*2</sup>

### Performance Prediction of Active Piezo Fiber Rackets in Terms of Tennis Power

Yoshihiko KAWAZOE<sup>\*1</sup>, Yukihiro TAKEDA and Masamichi NAKAGAWA

<sup>\*1</sup> Saitama Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering  
1690, Fukaya, Saitama, 369-0293 Japan

Several former top players sent a letter to the International Tennis Federation (ITF) encouraging the governing body to revisit the question of rackets. In the letter, the players wrote that racket technology has led to major changes in how the game is played at the top level. This paper investigated the physical properties of a new type of racket with active piezoelectric fibers appeared recently in the market, and predicted the various factors associated with the frontal impact, such as impact force, contact time, deformation of ball and strings, and also estimated the racket performance such as the coefficient of restitution, the rebound power coefficient, the post-impact ball velocity and the sweet areas relevant to the power in tennis. It is based on the experimental identification of the dynamics of the ball-racket-arm system and the approximate nonlinear impact analysis with a simple swing model. The predicted results with forehand stroke model can explain the difference in mechanism of performance between the new type racket with active piezoelectric fibers and the conventional passive representative rackets. It showed that this new type racket provides higher coefficient of restitution on the whole area of string face and also gives larger rebound power coefficients particularly at the topside and bigger powers on the whole area of string face but the difference was not so large. It seems that the racket-related improvements in play are relatively small and the players themselves continue to improve, accordingly there is a gap between a perception and reality.

**Key Words** : Sport Engineering, Performance Prediction, Tennis Racket, Active Piezoelectric Fibers, Impact Analysis, Experimental Modal Analysis

### 1. 緒 言

マッケンローらテニスの元トッププレーヤー数人が国際テニス連盟 (ITF) に対して、最近のラケットの影響力を抑える対策を要求する書簡を送付した (Mark McClusky, Tennis Swaps Grace for Strength, Aug.26,2003, Wired News). 試合のあまりにも大きな部分をラケットが左右しているのではないかと疑問を抱いたのである. この書簡の中で彼らは、テニスが「バランスを失い、表面的」になってしまったと嘆いている。「テニスはなにかを失ってしまったのだと思う. なにか微妙なもの、戦略面、ちょっとしたニュアンスを失ってしまった」、 「プレーヤーは最近のラケットを使って、以前では考えられなかった時速 240 キロメートルというスピードでボールが打てる」、 「変化が起こった理由は明白だ. ここ数年間、現代のラケット技術によって、木製ラケットよりも使いやすく、効率的で、広い打球面を持ち、強力で軽量の幅の広いラケットが開発されている」。 「このようなラケットはグラファイト、ケブラー、チタンや耳慣れない合金で出来たハイテクの武器だ. グリップ内部にチップを埋め込んで

\* 原稿受付 2013 年 2 月 6 日, Journal of System Design and Dynamics, Vol.4, No.1(2010), pp.77-90  
(原稿受付 2009 年 8 月 16 日)

<sup>\*1</sup> 正員, フェロー, 埼玉工業大学 (〒369-0293 埼玉県深谷市普濟寺 1690)

<sup>\*2</sup> 埼玉工業大学 工学部

E-mail: kawazoe.yoshihiko@gmail.com



ボールに当たった瞬間にラケットが堅くなるようなものである。このようなハイテク技術によって、トップレベルのプレーヤーたちの試合方法が大きく変わった。」

スポーツは体験により修得するものであるからきわめて主観的な面が大きく、用具の性能には人間系が複雑に絡んでくるためスポーツ用具の解析と評価は難しい<sup>(1)・(8)</sup>。

最近のハイテク・ラケットの特長はハンドル部を軽くすることによる軽量化であり、軽量化によるプレーヤーのスイング速度の増大によりパワーに関する性能（打撃による打球速度）を向上させてきた。しかし、市販ラケットのうち最軽量のラケット（最軽量ラケットと呼ぶことにする）は、ボールとラケットの反発係数、ラケットの反発力特性（ラケットに対するボールの跳ね返りの良さ）、グランドストロークにおける打球速度が低減し、オフセンター・インパクトにおける手首関節の衝撃振動も増大することを示し、軽量化の限界が明らかになってきた<sup>(9)</sup>。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。

本論文では、「グリップ内部にチップを埋め込んでボールに当たった瞬間にラケットが堅くなるようなものである」とマッケンローが指摘した圧電素子と制御装置をフレームに組み込んだ新しいタイプの「インテリ・ファイバー・ラケット」<sup>(10)</sup>のパワーに関連する性能を予測する。すなわち、正面衝突を仮定したインパクトにおけるボールとラケットの衝突力、接触時間、ボールとストリングの変形を予測し、グランドストロークのスイング・モデルを用いて、ラケットのパワーに関連する反発係数、反発力係数、打球速度、スイートエリアを評価する。設計開発者<sup>(10)</sup>によるとテニスエルボー対策として振動低減を意図して開発されたラケットであるが、まず、本論ではラケットの反発性やパワー（打球速度）について検討することにして、ラケットとプレーヤー上肢系の衝撃振動については別報に述べる。

大変形をとまなうボールとストリングスは実験的に同定して非線形として扱い、振幅の小さいラケット・フレームの振動モデルは線形系として実験的に同定する<sup>(3)・(11)・(14)</sup>。ラケット・腕系の減衰特性は、実際のフォアハンドストロークによるフラット打撃における手首関節とラケットハンドルの衝撃振動波形から同定した値を使ったインパクトにおけるボールとラケットの衝突力と接触時間などの衝突諸量および同定したラケットの振動モデルを用いて、ラケットの応答を予測する。さらに、ボールとストリングスの衝突によるエネルギー損失、フレームの振動によるエネルギー損失からボールとラケットの反発係数を予測し、衝突におけるラケットの回転によるエネルギー損失を考慮して、ラケットの反発力性能とパワー（打球速度）を評価する。ボールの回転（スピン）は無いものとする<sup>(3)・(8)</sup>。この方法の特長は、種々の仕様と物理特性をもつ種々のラケット、たとえば、本論のアクティブ・ピエゾ・ファイバー・ラケットのように内部構造が複雑な最近の先進的なラケットの場合でも、ラケットの性能を定量的に予測できることである。

図1は、メーカーのカタログによると、ボールとの衝突時にラケットの剛性を増大させるピエゾ・インテリ・ファイバーを搭載した軽量ラケット Is-10（Head 社製、フェース面積 114 in<sup>2</sup>、質量 241 g）を示す。ラケット首部の左右表裏4箇所インテリ・ファイバーを搭載し、ハンドル部には制御回路を組み込み、外部エネルギーは使わない<sup>(10)</sup>。このラケットの性能予測結果を、軽量化による性能向上を追求して市販ラケットではもっとも軽量である最軽量ラケット Prince Thunder Super Lite (TSL) (115 in<sup>2</sup>、224 g) および軽量型ラケットとして平均的な重量を持ち市販ラケットのなかでは反発性能にきわめて優れているラケット EOS120A (120 in<sup>2</sup>、292 g) の性能予測結果と比較する。ただし、ラケット質量はストリングスの質量を含む値である。



(a) Racket : Is-10( made by Head Company)



(b) Piezoelectric fibers

Fig.1 Racket with active piezoelectric fibers.

アクティブ・piezo・ファイバー・ラケットの技術的な背景の詳細は文献<sup>(10)</sup>にあるが、ラケットの振動低減をめざし、外部エネルギーを使わないでアクティブ減衰システムを採用して振動をアクティブに減衰させる。開発されたpiezo・セラミック (Intellifibers<sup>TM</sup>) をインテリジェンスラケットに導入した。ファイバーは、壊れやすいので、機械的な破損を避けるために二つのポリイミドフィルム層に挟まれている。piezo・セラミック (Intellifibers<sup>TM</sup>) は、ラケットハンドル部に配置された回路基盤に接続されている。インパクトの間、振動はpiezo・セラミック (Intellifibers<sup>TM</sup>) に高電圧の低電流を発生させ、リアルタイムで回路基盤のコイルに蓄え、最も効果的な減衰特性になるように最適の位相と波形にしてpiezo・セラミック (Intellifibers<sup>TM</sup>) にフィードバックさせる。すなわち、蓄えられたエネルギーは、振動方向と反対方向に機械的な力を作用させて振動を低減させるような位相で、piezo・セラミック (Intellifibers<sup>TM</sup>) に戻される。ラケットの最も重要な1次固有振動数 (2節曲げ振動数) に対して調整されており、2節曲げ振動のみを減衰させることになる。

2. ラケットとボールの実験的同定に基づく衝突解析<sup>(3)-(9),(11)-(14)</sup>

衝突解析を簡単にするためにラケット面の衝突位置に換算した換算質量  $M_r$  を導入すると、重心位置と衝突位置との距離と慣性モーメントが与えられれば、 $M_r$  は角運動量保存則から以下のように導くことができる。

いま、ボールがラケットに速度  $V_{B0}$  で正面衝突するとして、ラケットが重心周りに回転すると仮定すると、力積  $S$  は、以下の式で記述できる。ただし、 $m_B$  はボールの質量、 $V_B$  はボールの衝突後の速度、 $M_R$  はラケットの質量、 $V_G$  は重心の衝突後の速度である。式の展開を簡単にするために、ラケットの衝突前の速度  $V_{G0}=0$  の場合 (静止) を考える。

$$S = m_B (V_{B0} - V_B) \tag{1}$$

$$S = M_R \cdot V_G \tag{2}$$

角運動量保存則を適用すると以下の式が成り立つ。ただし、ラケットの重心と衝突位置の距離を  $b_0$ 、重心周りの慣性モーメントを  $I_{G0X}$ 、衝突直後の角速度を  $\omega$  とする (衝突前の角速度  $\omega_0=0$ )。

$$S \cdot b_0 = I_{G0X} \cdot \omega \tag{3}$$

幾何学的関係から、衝突後のラケットの衝突位置速度  $V_R$  は以下のように表せる。

$$V_R = V_G + \omega b_0 \tag{4}$$

角速度  $\omega$  と重心速度  $V_G$  を消去すると、以下のよう表せる。

$$S = \left( \frac{I_{G0X} M_R}{I_{G0X} + M_R b_0^2} \right) V_R = m_B (V_{B0} - V_B) \tag{5}$$

したがって、以下のように直線運動の運動量保存則として表すことができる。

$$m_B V_{B0} = m_B V_B + M_r V_R \tag{6}$$

ただし、

$$M_r = \frac{I_{G0X} M_R}{I_{G0X} + M_R b_0^2} \tag{7}$$

この  $M_r$  が、宙吊りラケットの衝突位置における換算質量に相当する。換算質量を導入すると、ラケットの剛体運動をラケットの質点運動として扱うことができる。慣性モーメント  $I_{G0X}$  は、物理振子の振動周期の実測値  $T_X$ 、重力加速度  $g$ 、ラケットを物理振子とみなしたときの支点と重心の距離  $a$  を用いて以下のように算出できる。

$$I_{GoX} = \{T_X/(2\pi)\}^2 M_R \cdot g \cdot a - M_R \cdot a^2 \tag{8}$$

インパクトの瞬間における衝撃力は、重力や筋力に比べて1桁以上大きいとして、ラケットはプレーヤーの前腕（肘から手首まで）に自由ピン結合され、前腕は腕にピン結合され、腕は胴体にピン結合されていると考えると、腕と前腕の慣性効果を手集中させた質量  $M_H$  に帰することができる。したがって、質量  $M_H$  をラケットハンドル（グリップ）上の手の握りの位置に付加すれば、ボールとラケットの衝突解析はラケットが宙に浮いている（周辺自由の境界条件）として解析できる。ラケット・腕系のボールとの衝突位置における換算質量  $M_r$  は、以下のように書ける。

$$M_r = \frac{I_{GMX}(M_R + M_H)}{I_{GMX} + (M_R + M_H)b^2} \tag{9}$$

ただし、

$$b = b_o + (L_{Go} - L_H)M_H / (M_R + M_H) \tag{10}$$

$$I_{GMX} = I_{GoX} + M_R \Delta G^2 + M_H(L_{Go} - L_H - \Delta G)^2 \tag{11}$$

$$\Delta G = (L_{Go} - L_H)M_H / (M_R + M_H) \tag{12}$$

また、 $L_{Go}$  はラケットのグリップ端と重心との距離、 $I_{GoX}$  はラケットの重心周りの慣性モーメント、 $b_o$  はラケットの衝突位置と重心との距離、 $L_H$  はグリップ端から手の位置までの距離、 $I_{GMX}$  はラケット・腕系の重心周りの慣性モーメント、 $b$  はラケット・腕系の衝突位置から重心までの距離である。

図2は、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を  $K_{GB}$ 、等価減衰を  $C_{GB}$  としたときの1自由度振動モデルである。

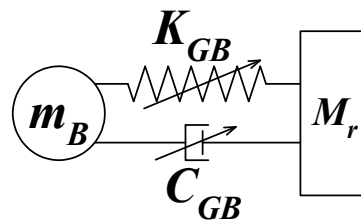


Fig.2 Non-linear impact model of a ball-string system.

ストリングス周辺のラケット・ヘッドを固定してボールを衝突させた場合のボールとストリングスの反発係数実測値<sup>(11)</sup>  $e_{GB}$  を用いると、運動量保存則と反発の式から、ラケットフレームの振動を無視したときの力積  $\int F(t) dt$  は以下のように書ける。ただし、 $m_B$  はボールの質量、 $M_r$  はラケット・腕系の衝突位置の換算質量、 $V_{Ro}$  は衝突前のラケットヘッド速度である。反発係数実測値  $e_{BG}$  は衝突におけるボールとストリングスのエネルギー損失を評価するためであり、図2において衝突速度により変わる等価減衰係数に相当する。

$$\int F(t) dt = m_B V_{Bo} - m_B V_B = (V_{Bo} - V_{Ro})(1 + e_{GB})m_B / (1 + m_B/M_r) \tag{13}$$

力積波形を実測波形に似た正弦半波に近似して、図2の1自由度系の固有振動の半周期を接触時間とすれば<sup>(14)</sup>、接触時間  $T_c$  は振動理論から以下のようになる。

$$T_c = \pi m_B^{1/2} / [K_{GB}(1 + m_B/M_r)]^{1/2} \tag{14}$$

解析を簡単にするために、接触時間  $T_c$  の間作用する近似的な等価衝撃力  $F_{mean}$  を導入すると以下のように書ける。

$$\int_0^{T_c} F(t) dt = F_{mean} \cdot T_c \tag{15}$$

したがって、等価衝撃力  $F_{mean}$  と対応する等価復原ばね  $K_{GB}$  との関係は、以下のように与えられる。

$$F_{mean} = (V_{BO} - V_{Ro})(1 + e_{GB}) m_B^{1/2} K_{GB}^{1/2} / [\pi (1 + m_B/M_r)^{1/2}] \tag{16}$$

一方、実験的に求めたボール・ストリングス系の変位に対する復原力  $F_{GB}$  (図3) および変位に対するばね剛性  $K_{GB}$  (図4) の両非線形特性を最小二乗法により多項式近似し、変位を消去して復原力  $F_{GB}$  と複合ばね剛性  $K_{GB}$  の関係を数値的に求めて  $F_{mean} = F_{GB}$  とおくと、以下のような形に表せる<sup>(11)</sup>。

$$F_{mean} = f(K_{GB}) \tag{17}$$

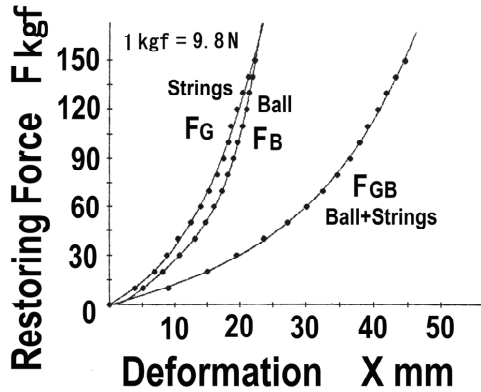


Fig.3 Restoring forces vs. deformation of a ball, strings, and a composed ball/string system assuming that a ball deforms only at the side in contact with the strings<sup>(11)</sup>.

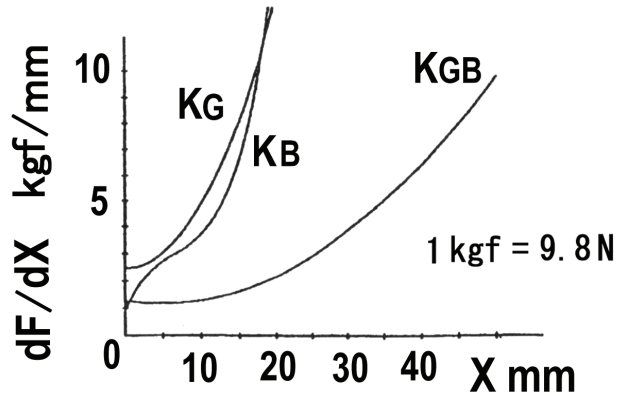


Fig.4 Stiffness vs. deformation of a ball, strings, and a composed ball/string system assuming that a ball deforms only at the side in contact with the strings<sup>(11)</sup>.

したがって、衝突前の速度が与えられると、 $K_{GB}$  と  $F_{mean}$  が求まり、さらに、衝突時間  $T_c$  も得られる。

ボールがラケットのストリング面中心に衝突したときの接触時間計算値は、フォアハンドストロークで打撃したときの接触時間実測値とよく一致する<sup>(11)</sup>。

衝突における力積波形は、ラケットフレーム振動の振幅に影響するから、時間を  $t$ 、衝突力の最大値を  $F_{MAX}$  として実測波形に似た正弦半波に近似すると、数学的には以下のように記述できる。

$$F(t) = F_{max} \sin(\pi t / T_c) \quad (0 \leq t \leq T_c) \tag{18}$$

ただし、 $F_{max} = \pi F_{mean} / 2$ 。

$F(t)$  のフーリエ・スペクトラムは、振動数を  $f$  とすると、以下のように書ける。

$$S(f) = 2F_{max} T_c \left| \cos(\pi f T_c) \right| / \left[ \pi \left| 1 - (2f T_c)^2 \right| \right] \tag{19}$$

ラケット振動特性は実験モード解析により同定し<sup>(3),(4),(7),(14)</sup>、同定したラケット振動モデルのラケット面衝突位置に力積波形を適用すると、ラケット応答振動が予測できる。ラケット面上の衝突位置  $j$  にインパクトの力積  $S_j(2\pi f_k)$  を適用すると、 $k$  次振動モード成分の振幅  $X_{ijk}$  は以下のように書ける。

$$X_{ijk} = r_{ijk} S_j(2\pi f_k) \tag{20}$$

ただし、 $r_{ijk}$  は任意の点  $i$  と  $j$  の間の  $k$  次振動モードの留数、 $S_j(2\pi f_k)$  は  $k$  次振動数  $f_k$  の衝突力成分である。

図5(a)はラケット面上のストリングスの網目を示す。図5(b)はストリング面上のボールとの衝突計算対象位置 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つ角(ストリング交差点)で接触するとして同定する。図6はボールが20 [m/s] および30 [m/s] でストリング面上の中心 D に衝突したときの衝突力波形の計算例である。

インパクトにより励起されるラケット振動によるエネルギー損失は、ラケットフレームの振動速度振幅分布と質量分布から算出することができる。ボールとラケットの反発係数  $e_r$  (COR) はラケット振動によるエネルギー損失  $E_1$  と反発係数  $e_{BG}$  に対応するボールとストリングスの大変形によるエネルギー損失  $E_2$  を考慮することにより算出することができる。

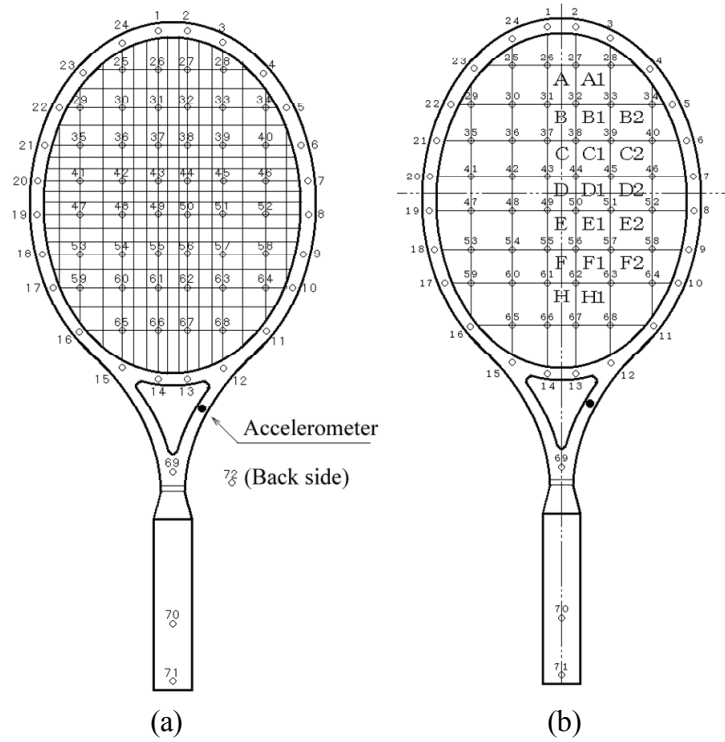


Fig.5 String meshes for vibration model and impact locations for impact simulation.

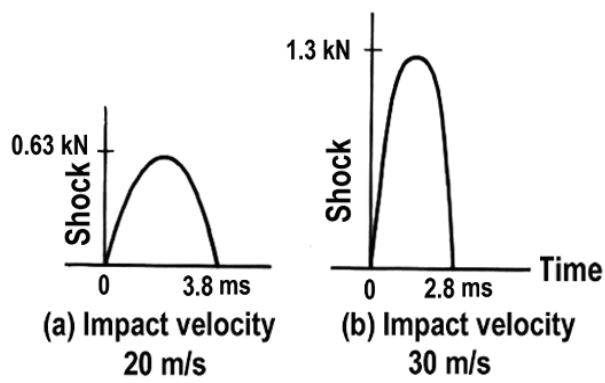


Fig.6 Calculated shock shape when a ball strikes the center on the String face.

ボールが静止ラケット( $V_{Ro} = 0$ )に衝突する場合は、全エネルギー損失  $E (= E_1 + E_2)$  に対応する反発係数  $e_r$  は以下のよう  
に書ける。

$$e_r = (V_R - V_B) / V_{BO} = [1 - 2E / (m_B + M_r) / (m_B M_r V_{BO}^2)]^{1/2} \tag{21}$$

メーカーなどでは実験的に宙吊りラケット ( $V_{Ro} = 0$ )にボールを衝突させて入射速度に対する跳ね返り速度の割合を反  
発性能として評価することが多いので、これを反発力係数  $e$  として定義すると、以下のように書ける。

$$e = -(V_B - V_{RO}) / (V_{BO} - V_{RO}) = -V_B / V_{BO} = (e_r - m_B / M_r) / (1 + m_B / M_r) \tag{22}$$

ボールが速度約 30 [m/s]で宙吊りラケットに衝突したときの反発力係数  $e$  の実測値と予測値とはよく一致した<sup>(11)</sup>。

ラケットのパワーは、プレーヤーがボールを打撃したときの打球速度  $V_B$  により、反発力係数  $e$  を用いて以下の様に  
評価することができる。

$$V_B = -V_{Bo} e + V_{Ro} (1 + e) \tag{23}$$

図7はフォアハンド・グランドストロークにおける簡単なスイングモデルを示す<sup>(5), (6)</sup>。衝突直前のラケット速度  $V_{RO}$  は  $L_X(\pi N_S / I_S)^{1/2}$  で与えられる。ただし、 $L_X$  はラケット面上の衝突位置（打点）とプレーヤーの肩関節との距離、 $N_S$  は肩関節周りの一定トルク、 $I_S$  はラケット・腕系の肩関節周りの慣性モーメントである。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。

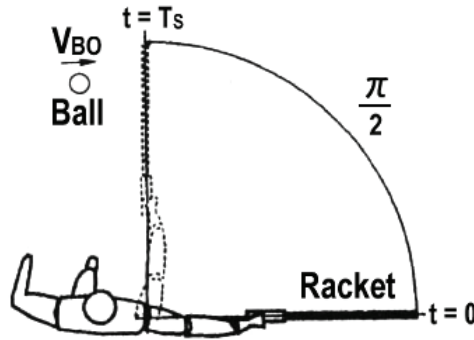


Fig.7 Forehand stroke model

### 3. 能動型ピエゾファイバー・ラケットと従来型受動ラケットのパワーに関する性能評価

ボールとラケットの衝突速度あるいはプレーヤーのスイング・モデルとラケット面上のボールとの衝突位置が与えられると、インパクトに関連する諸因子を予測することができる。さらに、異なる物理特性を持つ各種ラケットの性能も予測することができる。

図8はインテリジェント・ファイバー・ラケット (Intelligent fiber racket) Is-10 の幾何学的形状を示す。

表1は3本のラケットの仕様および物理特性実測値を示す。ラケット質量はストリングスの質量を含み、 $I_{CY}$  は重心まわりの慣性モーメント、 $I_{GR}$  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。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9は振動モード形状である<sup>(3), (11)-(14)</sup>。ラケットの基本モード（2節曲げ）振動数は、ラケット IS-10: 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、インテリジェント Is-10 の1次（曲げ振動）は最軽量 TSL より高い。これはラケット首部に搭載された圧電素子の効果により剛性が高くなっているものと考えられる。また インテリジェント IS-10 の減衰比は、1次の値が他の2本のラケットに比べて大きく、4次（ストリングスの1次振動モード）も3倍以上大きくなっている。

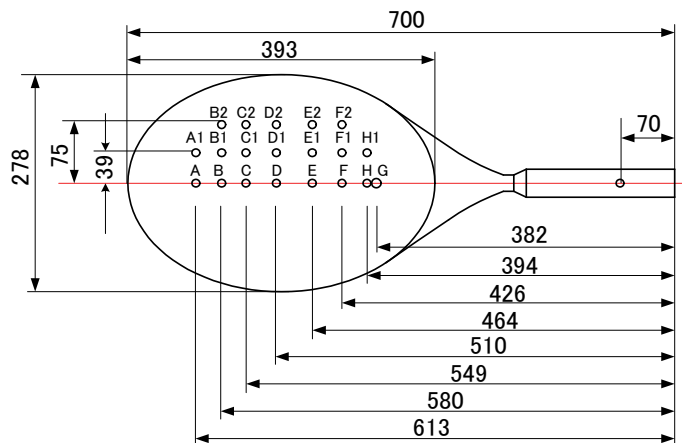


Fig.8 Geometry of of Intelligent fiber Racket Is-10.

Table 1 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)	179 g	152 g	206 g

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

	Is-10	TSL	EOS120A
1st	205 Hz	200 Hz	137 Hz
2nd	400 Hz	474 Hz	322 Hz
3rd	493 Hz	557 Hz	391 Hz
4th	532 Hz	581 Hz	605 Hz

Table 3 Damping ratios of vibration modes of 3 rackets.

	Is-10	TSL	EOS120A
1st	0.014	0.011	0.008
2nd	0.012	0.011	0.013
3rd	0.003	0.005	0.006
4th	0.013	0.004	0.002

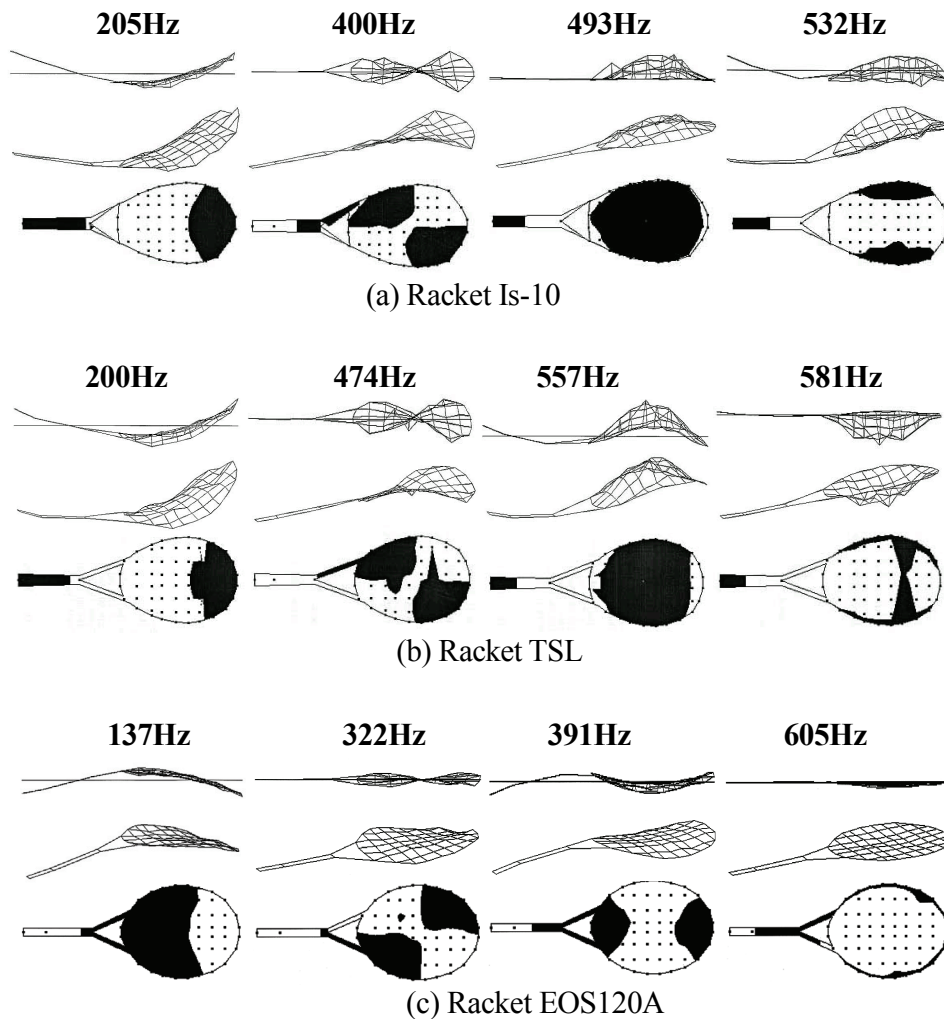


Fig.9 Experimentally identified vibration modes



図 10 はストリング面上の打撃位置に換算した宙ぶり状態での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同様に求まる。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ことができる。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く、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。腕系の質量分布は軽量トップヘビーの (ハンドルが軽い) ラケットでは、ストリング面のスロート側で影響するが、中心から先端側ではほとんど影響しない。

図 11 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] 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。

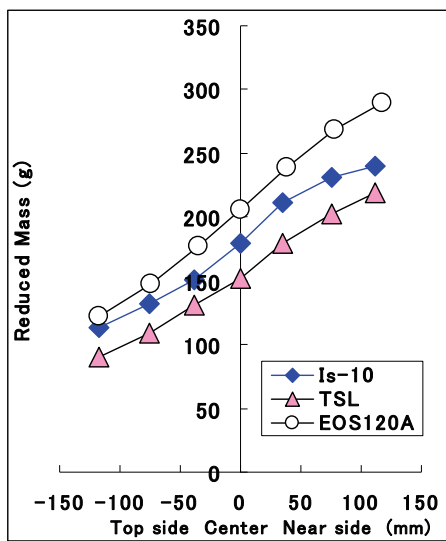


Fig.10 Reduced mass  $M_r$  of racket at the hitting locations.

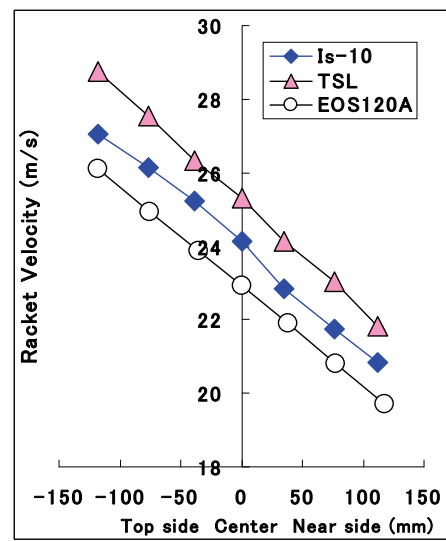


Fig.11 Predicted pre-impact racket head velocity  $V_{Ro}$  ( $N_s=56.9$  Nm,  $V_{B0}=10$  m/s)

図 12 はフォアハンドストロークにおける (b) ラケット面中心から長手方向および (c) (d) (e) 長手方向軸から横に外れたオフセンターでの反発係数予測値  $e_r$  の比較である。ラケット Is-10 の反発係数は、ラケット面のどの打撃位置でもほぼ一定で高い値を示し、先端側や根元側のオフセンターおよび長手軸から離れたオフセンターでも低下しない。これは 1 次のフレーム振動モードによるエネルギー損失が小さいことによる。

図 13 は、(b) ラケット面中心から長手方向および (c) (d) (e) 長手方向軸から横に外れたオフセンターでの反発力係数  $e$  の予測値の比較である。換算質量 (図 10) の影響が大きく、ラケット Is-10 の反発力係数  $e$  の値がラケット面先端で高いのは、反発性係数 (図 12) が高いことによる。

図 14 は、ボールの飛び  $V_B$  (打球速度、ラケットのパワーの評価) の予測値を示す。換算質量 (図 10) とラケットヘッド速度 (図 11) の影響が大きく、ラケット Is-10 の  $V_B$  がラケット面の先端および根元で大きいのは反発性係数 (図 12) が高いことによる。図 15 はボールの飛び  $V_B$  に関するスイートエリアの予測値であり、過去の木製ラケット (ストリング張り上がり 375 g) の場合も参考のために載せている。ラケット面上の数値は、その位置で打撃したときの打球速度  $V_B$  を示す。ラケット Is-10 の打球速度  $V_B$  は、最軽量ラケット TSL のそれよりも大きく、木製ラケットに比べて、ラケット Is-10 の  $V_B$  は、ラケット面の中心での打撃の場合 5% 大きく、先端側のオフセンターでは 14% 大きい。

インテリジェント・ラケット Is-10 の反発係数はラケット面全体で高く、ボールの飛び (パワー) も長手方向軸方向中心線上、特に先端および根元の打撃点で大きい。他の 2 者との差はそれほど大きくはない。ラケットの進歩が直接プレーに与える影響はそれほど大きいとは言えず、感覚と実際との間にギャップがあるが、ラケットの進歩によりプレーヤーのパフォーマンスが大きく向上すると考えられる。

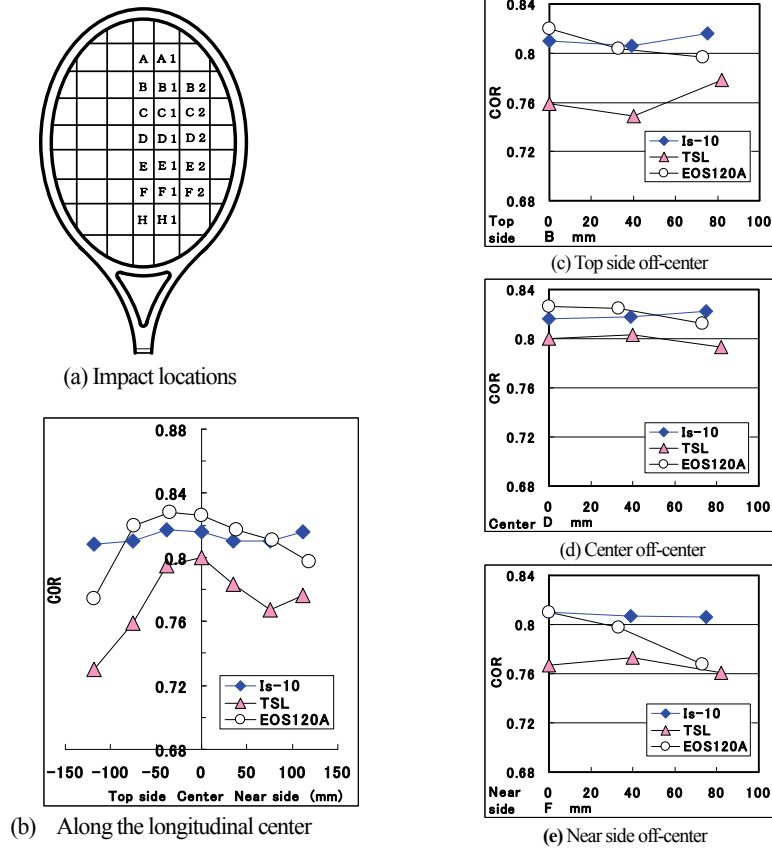


Fig.12 Predicted Restitution coefficient  $e_r$  ( $N_s = 56.9\text{Nm}$ ,  $V_{BO} = 10\text{m/s}$ )

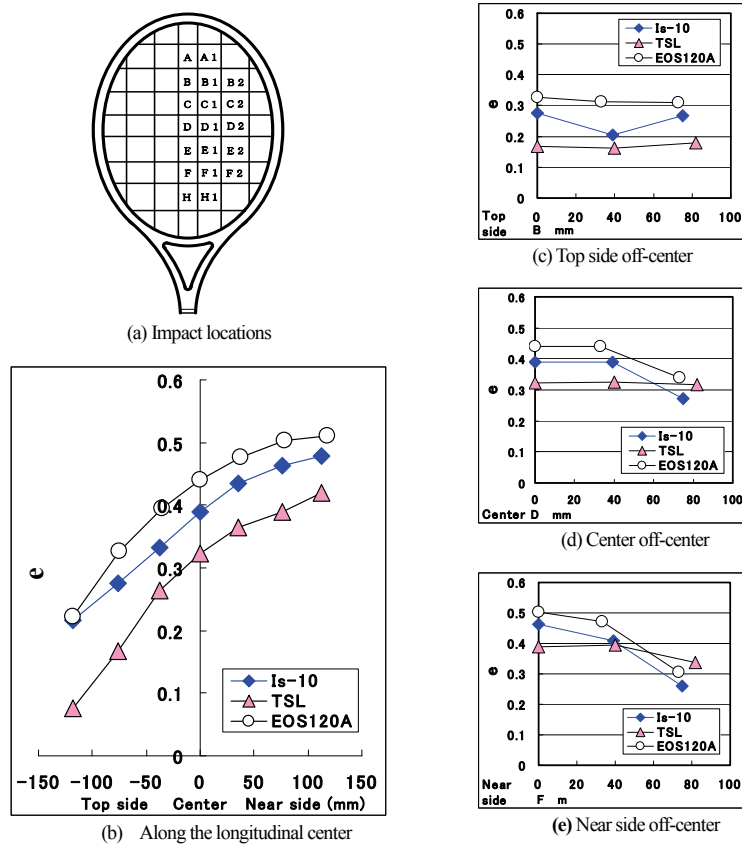


Fig.13 Predicted rebound power coefficient  $e$  ( $N_s = 56.9\text{Nm}$ ,  $V_{BO} = 10\text{m/s}$ )

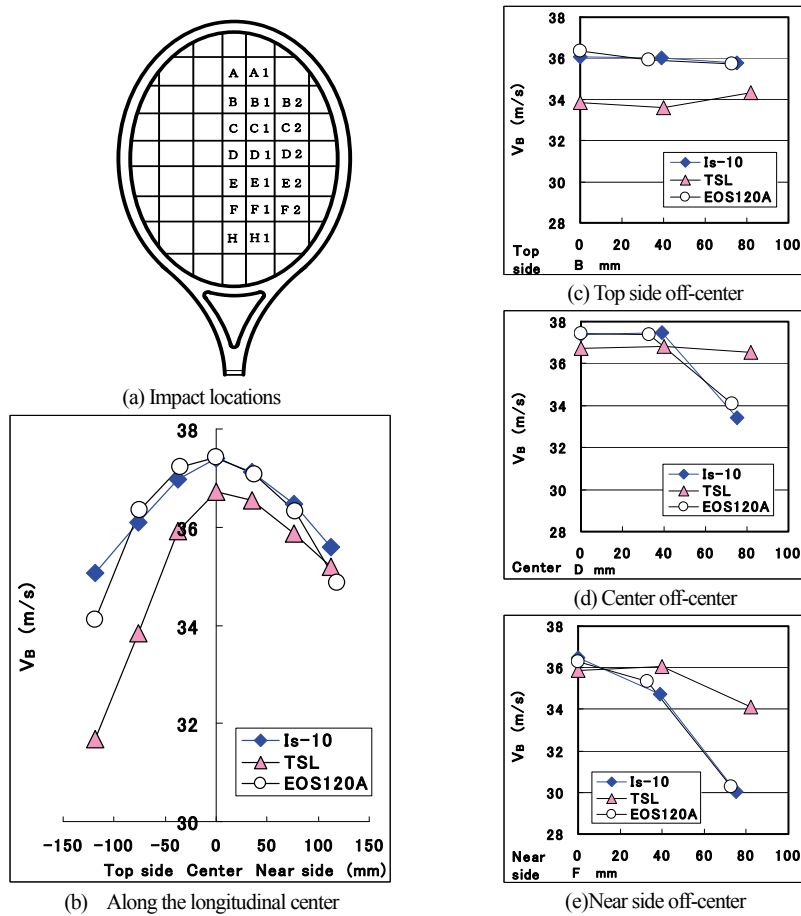


Fig.14 Predicted post-impact ball velocity  $V_B$  ( $N_s = 56.9Nm$ ,  $V_{BO} = 10m/s$ )

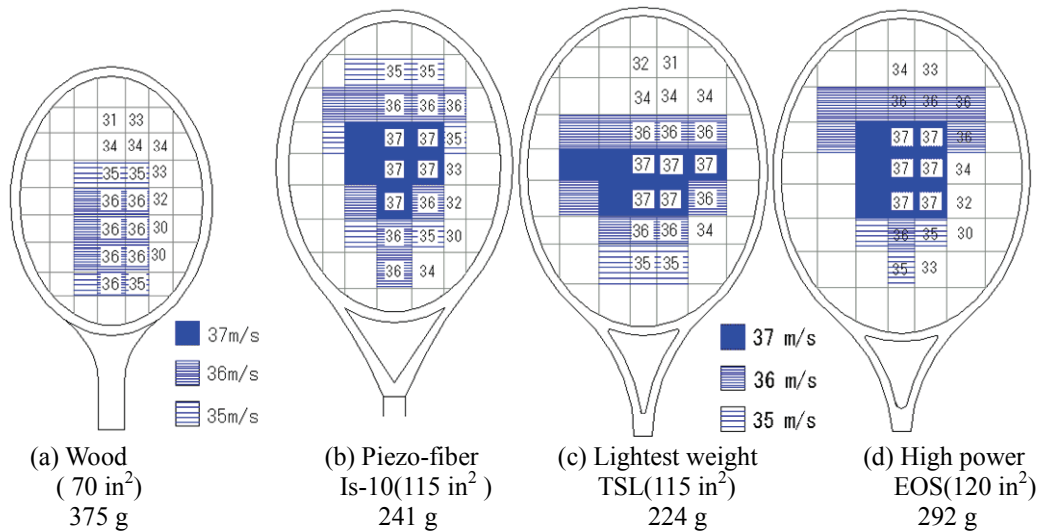


Fig.15 Predicted sweet area in terms of post-impact ball velocity  $V_B$  (Shoulder torque  $N_s = 56.9Nm$ , coming ball velocity  $V_{BO} = 10m/s$ )

#### 4. 結論

外部エネルギーを使わないでラケット 1 次振動をアクティブに減衰させるために piezo-fiber と制御回路を装着したラケット Is-10 のボールの飛びに関する性能を予測し、最も軽い市販ラケット TSL および最も反発性能に優れている市販ラケット EOS120A の性能予測結果と比較した。その内容を要約すると以下ようになる。

- (1) インテリジェント・ラケット Is-10 の 1 次固有振動数は、フレーム剛性の高いラケットに比べて、振動の腹（ラケットの首部）に装着したピエゾファイバーの効果により高い値を示した。
  - (2) ラケット Is-10 の反発係数は、他の 2 本のラケットと比べて、ラケット面全体で高く、ボールの飛び（打球速度  $V_B$ 、ラケットのパワー）も長手方向中心線上、特に先端および根元の打撃点で大きい。差はそれほど大きくはない。打球速度  $V_B$  は、木製ラケットに比べて、ラケット面中心での打撃の場合 5 % 大きく、先端での打撃では 14 % 大きい。
  - (3) したがって、ラケットの進歩が直接プレーのパフォーマンスに与える影響はそれほど大きいとは言えず、感覚と実際との間にギャップがある。「ハイテク技術によって、トップレベルのプレーヤーたちの試合方法が大きく変わった」というテニスの元チャンピオン・マッケンローらの指摘は、ラケットの進歩による操作性の向上によりプレーヤーのパフォーマンスが大きく向上した結果と考えられる。打球感については別報に述べる。
- おわりに、長年に渡ってご討論いただいている棚橋良次博士（元ヤマハ（株）スポーツ事業部）および実験と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・奥田茂貴の両君に深謝する。また、本研究の一部は平成 15 年度科学研究費基盤研究(B)の援助によって行われたことを付記する。

## 文 献

- (1) Ashley, S., "High- Tech Rackets Hold Court", *Mechanical Engineering*, Vol. 115, No.8, (1993), pp. 50-55.
- (2) Davis, S., "Racket Science Applied to Golf", *Challenging to Advanced Materials and Processing Technology Aiming for New Industrial Applications* (1997), pp.1329- 1334, Society for the Advancement of materials and process Engineering.
- (3) Kawazoe, Y., "Dynamics and Computer Aided Design of Tennis Racket", *Proc. Int. Symposium on Advanced Computers for Dynamics and Design'89*, Japan Society of Mechanical Engineers, (1989), pp.243-248.
- (4) Kawazoe, Y., "Impact Phenomena between Racket and Ball during Tennis Stroke", *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.41 (1992), pp.3-13.
- (5) Kawazoe, Y., "Performance Prediction of Tennis Rackets with Materials of the Wood and the Modern Composites", *Challenging to Advanced Materials and Processing Technology Aiming for New Industrial Applications* (1997), pp.1323-1328, Society for the Advancement of materials and process engineering.
- (6) Kawazoe, Y. and Kanda, Y., "Analysis of impact phenomena in a tennis ball-racket system", *JSME International Journal, C*, Vol.40, No.1, (1997), pp.9- 16.
- (7) Kawazoe, Y., "Mechanism of Tennis Racket Performance in terms of Feel". *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.49,(2000), pp.11-19.
- (8) Kawazoe, Y. and Tanahashi, R., "Prediction of Contact Forces, Contact Times, Restitution Coefficients and Racket Stabilities", *Sports Dynamics: Discovery and Application* (Edited by Subic A. & Trivailo P., Alam F.), (2003), pp.51-56.
- (9) 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", 日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会 2002 論文集, (2002), pp.726-731.
- (10) Kotze, J., Lammer H., Cottey R. & Zirngibl, W., "The effects of active piezo fibre rackets on tennis elbow", *Tennis and Science Technology 2* (2003), pp.55-60, International Tennis Federation.
- (11) Kawazoe, Y., "Coefficient of Restitution between a Ball and a Tennis Racket", *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.42, (1993), pp.197-208.
- (12) Kawazoe, Y., "Effects of String Pre-tension on Impact between Ball and Racket in Tennis, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.43, (1994), pp.223-232.
- (13) Kawazoe, Y., "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, E & FN SPON, London.
- (14) Kawazoe, Y., "Experimental Identification of Hand-held Tennis Racket Characteristics and Prediction of Rebound Ball Velocity at Impact", *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.46, (1997), pp.165-176.