

3-6-2 スポーツ用具

川副 嘉彦*

1. スポーツ工学

スポーツ用具は、素材の複合化により設計・製造の自由度が大きくなり、身体的条件や技術的条件の異なる使用者との整合を考慮したきめ細かい設計を目指す段階に至っている。しかし、スポーツ用具の性能評価は、現状では、経験の深いテスターやプレーヤーを介して行われており、性能評価に関する用語や表現には物理的定義が与えられていない場合が多い。一般ユーザーにとっては、実際に使用してみて初めて性能がわかるというのが現実である。

プレイは用具で変わる。逆に、用具の性能はプレーヤーによって変わる。スポーツ用具の性能評価がむずかしい理由である。スポーツは体験により修得するものだから、用具が実際のプレイにどのように影響するかを客観的に評価することはむずかしい。しかし、最近のスポーツ工学の成果により、多くの謎が少しずつ明らかになりつつあり、たとえばテニスでは、ボールとラケットの正面衝突に関しては、ラケットの反発性能（ラケットが静止していると見なしたときのボールの跳ね返り速度と入射速度との比）、ボールの飛び（打球速度）、手に伝わる衝撃振動などが予測できるようになった^{1)~21)}。ここではテニスラケットの例について、その展開を紹介する。

2. ラケットはどう変わってきたか

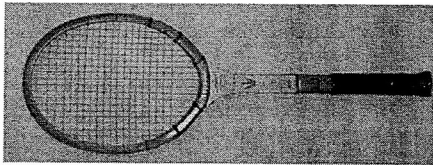
テニスラケットは、1960年代前半までは木製でフェイス（打球面）面積が 68in^2 のレギュラーサイズと決まっていたが、1967年にスチール製、1968年にアルミ製の金属ラケットが現われ、1974年には複合材のラケットが登場した。過去30数年の間にラケットは大きく変わってきたが、1976年に登場した 110in^2 の「デカラケ」、1987年の「厚ラケ」、そして1995年の「長ラケ」は最も革新的なラケットだといわれている。

「デカラケ」は、打球面が広いラケットである。最近のラケットの打球面サイズは、 $95\sim115\text{in}^2$ が主流である。「厚ラケ」は、フレーム剛性を高めたラケットである。最近では、フレームをあまり厚くしないで剛性の高い機種も開発されており、フレーム厚さと剛性は必ずしも比例しない。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 $\frac{1}{2}$ （約685mm）で変わることはなかった。長ラケは、従来のラケット全長から小刻みに長くしていったラケットである。国際テニス連盟は、全長29 $\frac{1}{2}$ 以上のラケットの使用を禁止したが、最近では再び従来の27 $\frac{1}{2}$ に近いラケットがよく使われている。長ラケは改良の余地がある。

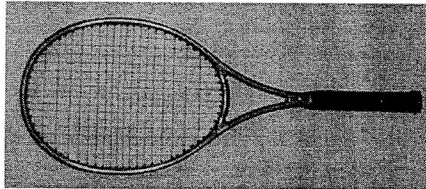
最近のラケットの特徴は軽量化である。ラケットの質量は（ストリングスを張った状態で）、木製の時代は370~400g、複合材ラケットの初

* Yoshihiko Kawazoe 埼玉工業大学工学部 機械工学科 教授

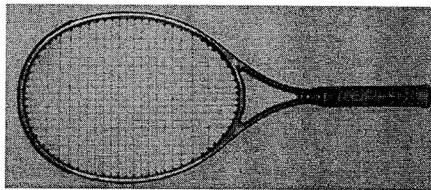
(a)木製ラケット WILSON (68in², 375g)



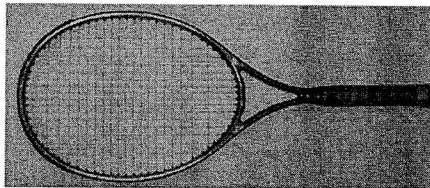
(b)軽量ラケット EOS100 (100in², 290g)



(c)軽量ラケット EOS120A (120in², 292g)



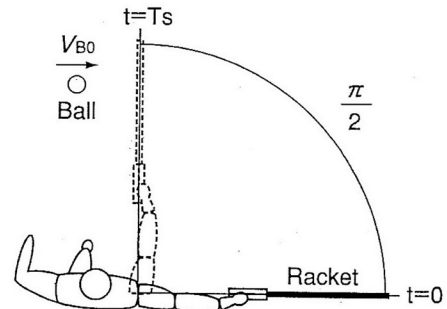
(d)最軽量ラケット TSL (115in², 224g, 28in)



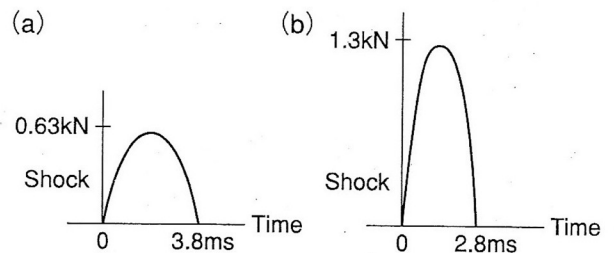
〔写真－1〕 ラケットの変遷

(木製ラケットと最近の複合材ラケット, 質量はストリングスを含む)

期の頃は360～375g, さらに軽量化が進み超軽量ラケットと呼ばれる300gを切るラケットが現われた。最近の最も軽いラケットは220gに達している。写真－1は, 木製ラケットと最近の複合材・ラケットの代表例を示す。



〔第1図〕 スイング・モデル (グランド・ストローク)



〔第2図〕 ボールとラケットの衝突力の計算例

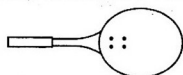
- ・衝突位置：ストリングス面中心
- ・衝突速度：(a)20m/s および(b)30m/s⁽⁷⁾

3. ラケットの性能予測

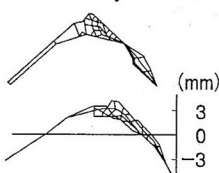
第1図は, ボールの飛びに関するラケット性能を予測するためのフォアハンド・グランド・ストローク (バウンドしたボールを打つ) のスイング・モデルである。肘と手首の関節角度を一定にして, 肩関節トルク N_s を与え, V_{B0} で飛んでくるボールをラケット・ヘッドが90° 回転したときの速度 V_{R0} で打撃する。

第2図は, 衝突における力積波形の予測値であり, 第3図は宙吊りラケットのストリングス

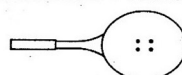
Impact location : Near



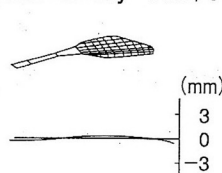
Impact velocity=30m/s



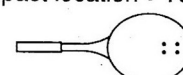
Impact location : Center



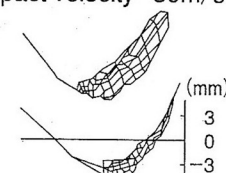
Impact velocity=30m/s



Impact location : Top



Impact velocity=30m/s



〔第3図〕 インパクトの瞬間のラケットの初期振動振幅計算値

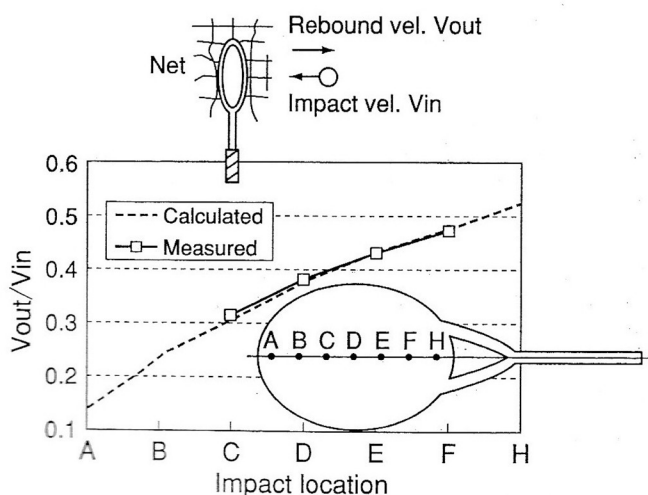
- ・衝突速度：30m/s
- ・衝突位置：左からストリングス面の根元側, 中心, 先端側

面の中心および中心を外れた位置にボールが30 m/sで衝突したときのラケットの初期振動振幅を予測した例である。ストリングス面の中心で衝突するとラケット・フレームの振動は小さい。

「球離れが良い」ラケットは、「反発係数が高い」ラケットであり、「ホールド感がある」ラケットは「反発係数が低い」ラケットといえることができる。厚ラケは「球離れ」が良く、木製ラケットは「ホールド感」がある。

第4図は、宙吊りの静止ラケット（ヘッド速度 $V_{R0}=0$ ）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 の実測値と予測値である。この比 e の実測値が、メーカーなどではラケットの反発性能の評価によく使われる。横軸はストリングス面上の衝突位置である。この e を反発係数 e_r と区別して「反発力係数」と定義すると、 e は、衝突位置における反発係数 e_r 、ラケットの衝突位置の換算質量 M_r 、およびボールの質量 m により決まり、値が大きいほどボールの跳ね返りが良い。ハンドルを手で握ったときの反発力係数の値は、極端なオフセンター打撃を除くと、宙吊りラケットの場合と大きな違いはない。

ラケットでボールを打撃する場合は、衝突直前のボール速度を V_{B0} とすると、打球速度 V_B



【第4図】 反発特性の実測値と予測値

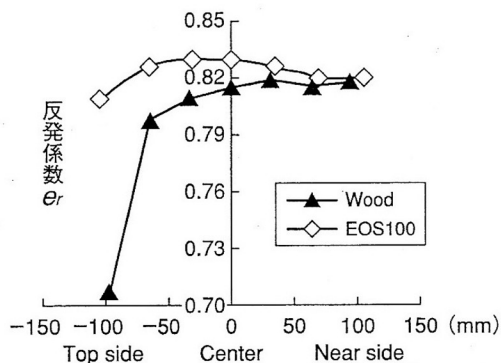
は、飛んでくるボール速度による反発速度成分 $e \cdot V_{B0}$ とプレーヤーのスイングによるラケット・ヘッド速度成分 $(1+e) \cdot V_{R0}$ との和になる。一般に反発力係数の高いラケットはヘッドの速さが遅く、反発力係数の低いラケットはヘッドの速さが速い。したがって、ボールの飛びは「反発力係数」と「振りやすさ」の両者のバランスで決まる。

コントロール性能は、ねらったところにボールを打つことができるという意味で使われる。実際のプレイにおけるラケットのコントロール性能には、ボールの回転（スピン）が関係し、ボールに適度なスピンを与えたときに、コントロールされた鋭いボールが相手の足下に飛んでいく。オフセンター打撃においてボールがストリングス面に接触してから離れるまでにインパクトの力によりラケット面が傾く角度が大きいと、打撃したボールの方向が意図した方向とずれることになる。面安定性という意味でのコントロール性は、重めの従来重量バランス型の方が良い。

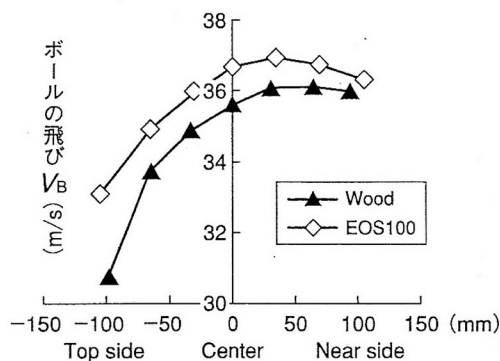
手に伝わる衝撃・振動は、インパクトの瞬間にボールとラケットの衝突により発生した力（第2図）が手に伝わった「衝撃成分」とボールとラケットの衝突力により発生したフレーム振動（第3図、インパクト後も残る）が手に伝わった「振動成分」との和と考えるとわかりやすい。

4. 木製ラケットから複合材ラケットへ

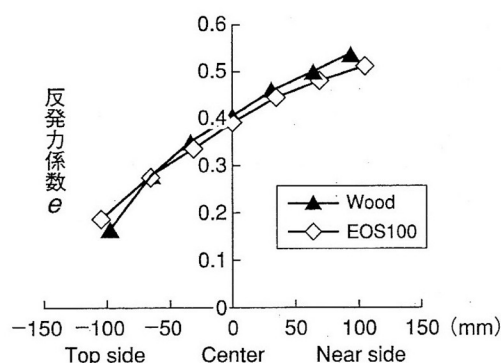
第5図は、木製ラケット WILSON（写真-1(a)）と標準的な軽量・高剛性・複合材ラケット EOS100（写真-1(b)）の反発係数 e_r の予測値である。第6図は反発力係数 e 、第7図はラケット・ヘッド速度 V_{R0} 、第8図はボールの飛び V_B を示す。横軸はラケット面中心から長手軸



〔第5図〕 木製 (WILSON 製) と軽量・高剛性 EOS 100の反発係数 e_r
(横軸はラケット面の長手方向の打点位置)

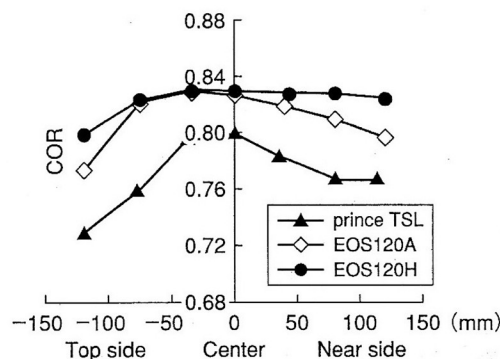


〔第8図〕 木製 (WILSON 製) と軽量・高剛性 EOS 100 (写真-1(b)) のボールの飛び V_B (グランドストローク)

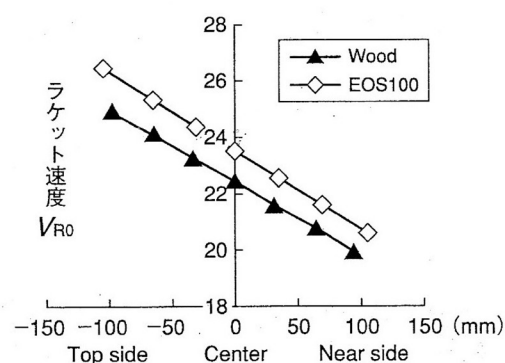


〔第6図〕 木製 (WILSON 製) と軽量・高剛性 EOS 100の反発力係数

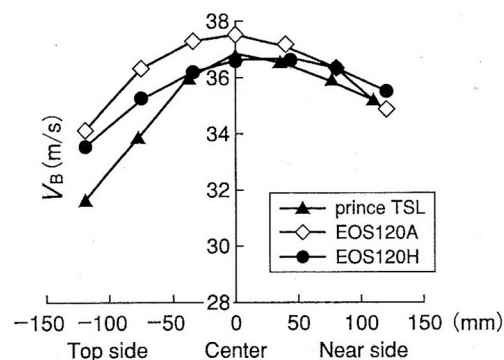
e : ラケットが静止しているとき、(ボールの跳ね返り速度) / (ボールの入射速度)。横軸はラケット面の長手方向の打点位置。



〔第9図〕 世界最軽量ラケット TSL (写真-1(d)) の反発係数 e_r



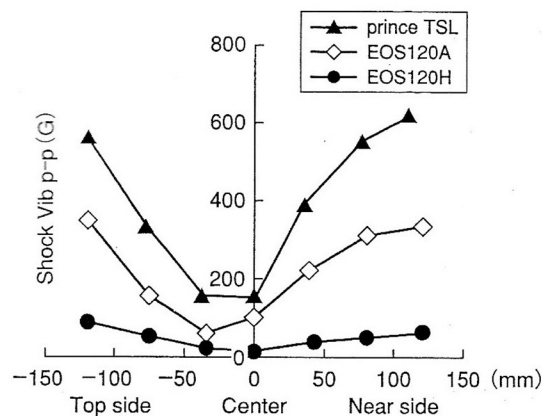
〔第7図〕 木製 (WILSON 製) と軽量・高剛性 EOS 100のラケットヘッド速度 V_{R0}



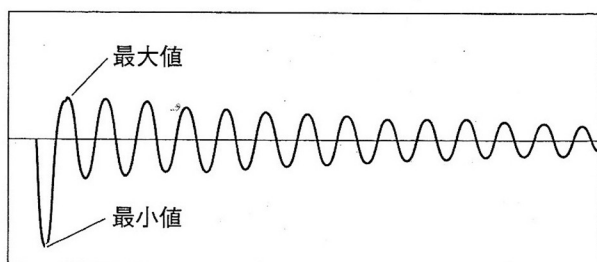
〔第10図〕 最軽量ラケット TSL (写真-1(d)) のボールの飛び

方向打点までの距離である。複合材ラケットは面先端での反発係数 e_r が著しく向上している。反発力係数 e は向上していない。軽量・高剛性ラケットの打球速度 V_B はラケット・ヘッド速度 V_{R0} の増大により速くなっている。

第9図は、世界最軽量の市販ラケット TSL (写真-1(d), 224g) の反発係数 e_r の予測結果をパワーに優れている軽量ラケット120A (292g) および従来重量バランス型120H (354g) と比べたものである。第10図は、ボールの飛びの予測結果である。ラケット・ヘッド速度は速いが、反発係数および反発力係数が低下するために、ラケット面中心から先端側で飛びが悪くな



〔第11図〕 最軽量ラケット TSL の手首関節の
衝撃振動ピーク値
(加速度 $G: 9.8\text{m/s}^2$)



〔第12図〕 ピーク値：最大値と最小値の差

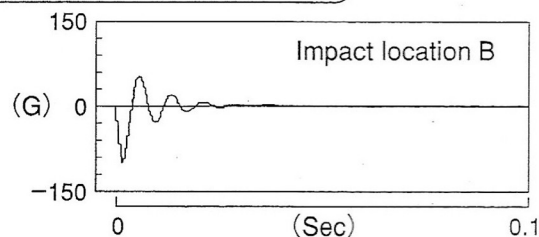
る。また、第11図に示すように、手首関節の衝撃振動ピーク値（第12図）は著しく大きく、軽量化の行き過ぎを示している。

5. ハイテク素材・構造による打球感の改善

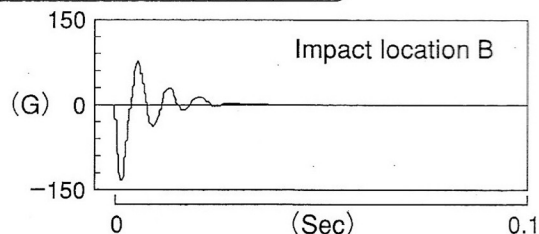
第13図は、熱可塑性樹脂（サーモプラスチック、ナイロン系）を採用したラケット FX110TP (110in²) と標準的な複合材（高弾性カーボン）を採用したラケット PROTO-EX110 (110in²) のラケット面先端側で打撃したときの手首関節衝撃振動の予測波形である。第14図は、手首関節衝撃振動ピーク値の予測結果の比較であり、横軸はラケット面中心から打点位置までの距離である。素材によって手に伝わる衝撃振動が低減された例である。ボールの飛びもほとんど低下しない。

写真-2 は、圧電素子をラケット首部に組み込んでテニス肘対策として開発された軽量「イ

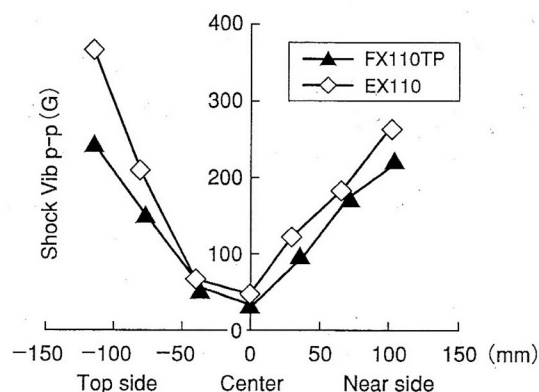
(a) サーモプラスチック：FX 110TP



(b) 従来型複合材：PROTO-EX110

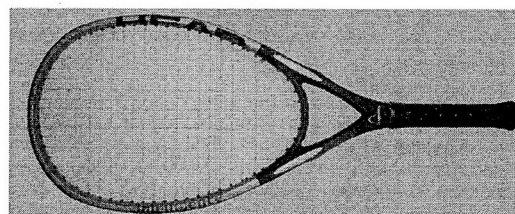


〔第13図〕 サーモプラスチック（熱可塑性）と従来型複合材（高弾性カーボン）の手首関節衝撃振動の予測
(ラケット面の先端側で打点)

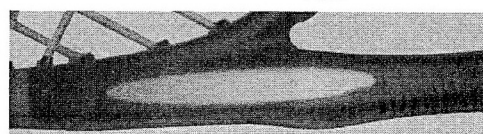


〔第14図〕 サーモプラスチック（熱可塑性）と従来型複合材（高弾性カーボン）の手首関節衝撃振動ピーク値の予測
(横軸はラケット面の打点位置)

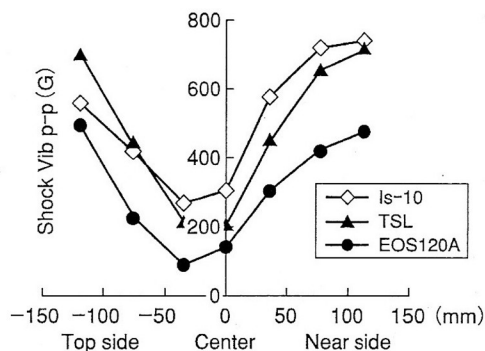
(a) ラケット全体



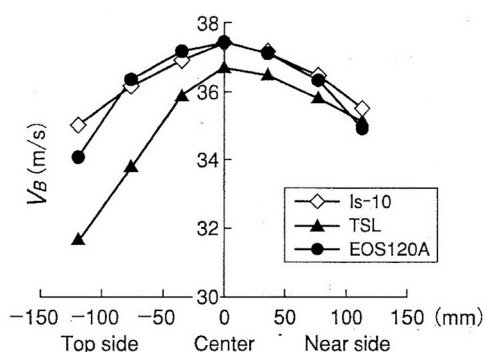
(b) 圧電素子を内蔵したラケット首部



〔写真-2〕 「インテリジェント・ファイバー」ラケット (IS-10) (114in², 241g, 27.75in)



〔第15図〕「インテリジェント・ファイバー」ラケット (IS-10) の制振効果の予測 (手首関節の衝撃振動加速度ピーク値)



〔第16図〕「インテリジェント・ファイバー」ラケット (IS-10) のパワー (ストロークにおける打球速度 V_B) の予測

「インテリジェント・ファイバー」ラケット IS-10 (241g) である。第15図は、手首関節に伝わる衝撃振動に関する制振効果を予測した結果である。「インテリジェント・ファイバー」は、最軽量ラケット TSL (224g) に比べるとラケット面先端打撃でやや低減されているが、全体的には低減されておらず、根元側ではむしろ衝撃振動が大きくなっており、改善の余地がある。パワーは、第16図に示すように、TSL (224g) に比べると改善されており、飛びの良い軽量ラケット120A (292g) と同じ程度である。

6. スtringsの設計

インパクトにおけるボールのスピンの極めて重要なテニスの要因であり、Stringsの種類・材料・張力・ゲージ (素線直径) などがど

のようにスピンに影響するかという問題は古くから興味深い研究テーマであったが、ラケットやStringsの物理特性とスピン性能の関係は現象の複雑さから不明であった。しかし、最近、高速ビデオ画像解析によってラケットのスピン性能が次第に明らかになり、詳細は省略するが、以下のような結果が得られた。すなわち、Stringsの摩擦が大きいほどスピンのかかるという従来の仮説とは反対に、摩擦が小さくて縦糸と横糸がお互いにすべって交差点がずれ、縦糸が横に伸びて戻るときの復原力によりスピン量が増す。Strings交差点を潤滑すると、ボールにスピンがかかりやすくなる。スピン量が増すと接触時間が長くなり、ラケットや手に伝わる衝撃振動も低減する。スピン・ガットと呼ばれる表面の摩擦が大きいナイロン系より、摩擦が少ないポリエステルのようなStringsの方が、スピンがかかりやすい可能性がある。すでに、ナイロン系に替わってポリエステル系が主流になってきており、従来のStringsの設計概念が大きく転換する可能性がある^{22), 23)}。

— 参考文献 —

- 1) 川副嘉彦；ラケットの科学，月刊テニスジャーナル，10(7)～10(11)，130-135 (1991)
- 2) 川副嘉彦；シミュレーション，日本シミュレーション学会誌，テニスのインパクトのシミュレーション，11-3，167-173 (1992)
- 3) Y. Kawazoe；Impact phenomena between racket and ball during tennis stroke, *Theoretical and Applied Mechanics*, 41, 3-13 (1992)
- 4) Y. Kawazoe；Coefficient of restitution between a ball and a tennis racket, *Theoretical and Applied Mechanics*, 42, 197-208 (1993)
- 5) 川副嘉彦；ラケットの科学Ⅱ，月刊テニスジャーナル，12(8)～13(3)，101-106 (1993～1994)
- 6) Y. Kawazoe；Computer aided prediction of the vibration and rebound velocity characteristics of tennis rackets with various physical proper-

- ties, *Science and Racket Sports*, eds.: T. Reilly, M. Hughes and A. Lees, pp. 134-139, London: E & FN Spon (1994)
- 7) 川副嘉彦; 手で支持したテニスラケットの実験的同定とボールとの衝突における振動振幅の予測, 日本機械学会論文集, 61-584C, pp. 1300-1307 (1995)
- 8) Y. Kawazoe; Experimental Identification of Hand-held Tennis Racket Characteristics and Prediction of Rebound Ball Velocity at Impact, *Theoretical and Applied Mechanics*, 46, 165-176 (1997)
- 9) 川副嘉彦; テニスにおける衝突現象の解析とラケットの性能予測・評価, 計測と制御, 38(4), 268-273 (1999)
- 10) Y. Kawazoe; Mechanism of Tennis Racket Performance in terms of Feel, *Theoretical and Applied Mechanics*, 49, 11-19 (2000)
- 11) Y. Kawazoe and R. Tomosue; Sweet Area Prediction of Tennis Racket Estimated by Power: Comparison between Two Super Large Sized Rackets with Different Frame Mass Distribution, *Tennis Science & Technology*, eds.: S. Haake and A. Coe, pp. 75-82, Oxford: Blackwell Science (2000)
- 12) Y. Kawazoe and K. Yoshinari; Prediction of the Impact Shock Vibrations of the Player's Wrist Joint: Comparison between Two Super Large Sized Rackets with Different Frame Mass Distribution, *Tennis Science & Technology*, eds.: S. Haake and A. Coe, pp. 91-99. Oxford: Blackwell Science (2000)
- 13) 川副嘉彦; 新テニスの科学, 月刊テニスジャーナル, 20(3)~20(6), 54-58 (2001)
- 14) Y. Kawazoe; Mechanism of High-Tech Tennis Rackets Performance, *Theoretical and Applied Mechanics*, 51, 177-187 (2002)
- 15) 川副嘉彦; 日本機械学会, 材料が変えてきたスポーツ用具とパフォーマンスーテニスを例にして, 106-1010, 13-15 (2003)
- 16) 川副嘉彦; テニスにおけるシミュレーションとラケット性能の予測, シミュレーション, 日本シミュレーション学会誌, 22-1, (2003), 3-9
- 17) Y. Kawazoe, R. Tanahashi and F. Casolo; Experimental and theoretical criticism of the effectiveness of looser strings for the reduction of tennis elbow, *Tennis Science & Technology* 2, ed.: S. Miller, pp. 61-69, London: International Tennis Federation (2003)
- 18) Y. Kawazoe, R. Tomosue, K. Yoshinari and F. Casolo; 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, *Tennis Science & Technology* 2, ed.: S. Miller, pp. 105-112, London: International Tennis Federation (2003)
- 19) 川副嘉彦; 特集: 素材とスポーツ “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, 日本バイオメカニクス学会誌, 7(2), 136-151 (2003)
- 20) Y. Kawazoe, F. Casolo, R. Tomosue and K. Yoshinari; Performance prediction and estimation system for tennis racket in terms of player's wrist joint shock vibrations, *The engineering of Sport* 5, ed.: M. Hubbard, 11, 393-399. ISEA (2004)
- 21) Y. Kawazoe; Computer aided performance prediction and estimation system for a tennis racket in terms of power and stability, *The engineering of Sport* 5, ed.: M. Hubbard, 2, 633-640, ISEA (2004)
- 22) Y. Kawazoe and K. Okimoto; Super High Speed Video Analysis of Tennis Top Spin and Its Performance Improvement by String Lubrication, *The Impact of Technology on Sport*, eds.: A. Subic and S. Ujihashi, pp. 379-385, ASTA Publishing (2005)
- 23) Y. Kawazoe; Solution to the Mystery of the Effect of String Tension on the Actual Impact between a Tennis Ball and Racket, *The Impact of Technology on Sport*, eds.: A. Subic and S. Ujihashi, pp. 156-162, ASTA Publishing (2005)