

J231024

新・テニスの物理学
(ストリングとスピン打法によるパフォーマンス向上と障害低減)

川副 嘉彦*¹, 中川 慎理*², 上杉 昭二*³

New Physics of Tennis
(Improvement of Performance and Injury Prevention with Proper String and Spin by a player)

Yoshihiko KAWAZOE, Masamichi NAKAGAWA and Shoji UESUGI

Saitama Institute of Technology, Graduate School of Engineering
Fusaiji 1690, Fukaya-si, Saitama, 369-0293 Japan

There has been no question that some strings do provide a better grip than others, but that did not guarantee that the ball will produce more spin. Furthermore, experiments with hand-held rackets has been needed to solve the difficult question of how players can tell the difference between different strings when laboratory tests indicate that they should play the same. The previous paper performed an experiment measuring the spin rates of used, notched strings in both their natural condition and after applying a lubricant to the string intersections to facilitate tangential string movement. It found that the lubricated notched strings produced 30% more spin than the unlubricated notched strings. The lubricant materials are effective to the notched strings, because the lateral movement and snap-back of the main strings increase spin. It also showed that the more spin results in the reduction of shock vibrations of the wrist joint during impact. Furthermore, it was shown that the used natural gut with notches decrease 70 % of spin rate compared to the new natural gut without notches in the another experiment, which has remained to be seen whether the same results will be obtained. Recently, International Tennis Federation researchers reported that the same movement that was observed with lubricated strings occurs with copoly as well. Copoly strings—slippery and stiff—generate more spin not because of more friction, but because of less. The old argument was that the better the grip between the strings and the ball, the more spin we would get, but that was not true. Many experiments has started to investigate whether the lateral movement and snap-back of the main strings increase spin, which strings generate the most spin, and so on. This paper discussed the improvement of performance and injury prevention with proper string and proper body movement of a player.

Key Words : Sport Engineering, Tennis, Racket, Impact, Top Spin, Strings, Feel, Eco Ball, Physical Movement

1. 緒 言

コポリエステル・ガットと呼ばれる硬くて滑りやすいポリエステル系のストリングスは非常に強いスピンを生み出す効果があるため、「新しいガット世代」と名付けられた今日のトップのプロ選手達は、かつては考えられなかったドライブショットや角度をつけたウィナー、あるいはパッシングショットを打つことができる。しかし、選手の間ではコポリエステル・ガットがゲームを変えたという見方が広く浸透していたにもかかわらず、最近まで、ガットの材質、厚さ、テンション、あるいはテクスチャーがスピンの発生に実際の変化をもたらした証拠を見つけた研究はなかったと言われている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

川副ら^{(4)・(5)}は、超高速カメラを使用し、使用してノッチ（溝）の出来たナイロン・ガットの交差点に潤滑剤

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

*² 埼玉工業大学 工学部

*³ (株) ゴーセン 研究開発センター (〒673-1311 兵庫県加東市揖鹿谷 306)

E-mail: kawazoe@sit.ac.jp

を塗布すると、ガットの縦糸がボールとともに横糸の上を滑りやすく、ボールが離れるときに元の位置に戻ることを確認した。さらに、天然ガットについても実験し、ガットのノッチの有無がスピンの影響を確認した⁽⁷⁾。横にずれたメインの縦糸が元の状態に戻る際、ガットのエネルギーがラケットの面に平行な接線方向にボールに伝えられ、より強力なスピンを生み出すというスピンの謎を明らかにした。その後、国際テニス連盟 (ITF) は、潤滑剤を塗布したガットで川副らが確認したのと同じ動きがコポリエステルでも発生するという研究結果を報告し⁽¹⁾、滑りやすく、剛性の高いコポリエステル・ガットが強いスピンを生み出すのは、摩擦が大きいためではなく小さいためであることを認めた。さらに、コポリエステル・ガットがスピンを発生させる力がナイロンのガットよりも 20 パーセント大きく、天然ガットよりも 11 パーセント大きいことを示す研究結果が発表された。これらの差が、ラファエル・ナダルのような現代の強豪がなぜ過去のアンドレ・アガシのスピンよりも 2 倍も強いスピンのかかったボールを打てるのかを説明する一助になると報告している。

30 年前、急進的な革新技術である「スパゲッティ・ガット」が同じ原理を利用して、縦糸と横糸のガットを編まないでガット面でのガットの動きの自由度を増し、ほぼ 2 倍の強さのスピンを生み出したために ITF は使用を禁止したと言われている^{(5),(8)}が、「すべてのガットは編まれていなければならない」とした 1978 年の規定は、ラケットあるいはガットに関して規制した初めてのルールであった。ITF は、「試合の性質を根本的に変える、あるいはスピンの発生に大胆な変化をもたらす可能性がある」と我々が考える」ものを探し出すために、ITF は市場に出されるガットを一つひとつテストするつもりである、と述べている。しかし、大胆な変化をもたらす 2 つの技術、すなわち 3 世代の技術革新を経てようやくスピン能力を有するに至った頭の大きなラケット (デカラケ) と、スピンを増大させるコポリエステル・ガットは、これまでのところ規制を免れている⁽¹⁾。

本論文では、テニスにおける技術と伝統の調和の観点から、適切なテニス用具と適切な身体操作はどうあるべきかについて若干の考察と提案を行いたい。

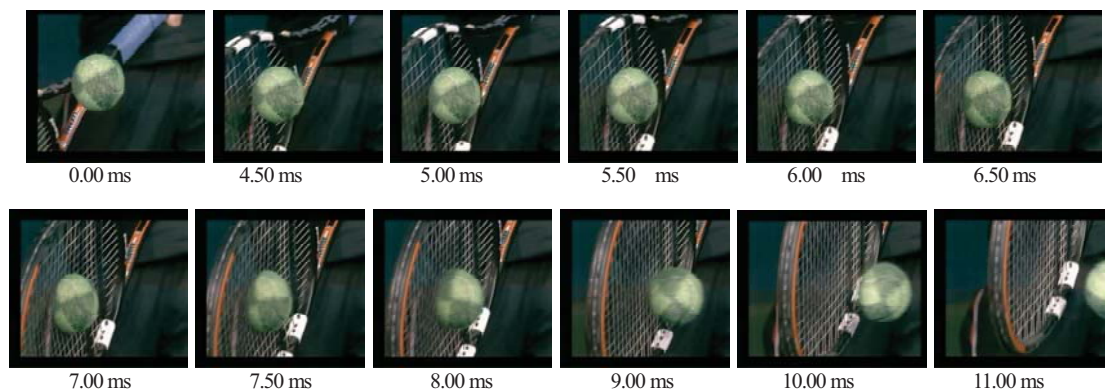


Fig.1 Tennis top spin behavior with natural gut (20000 fps)

2. スtring研究開発の新しい展開

String・メインの縦糸の横移動とスナップバック (元の位置に戻る) がスピンを増大させるのか、また、どのStringが最もスピンのかかるのかなどについて数多くの実験が進められており⁽⁹⁾、潤滑剤として手に入りやすいWD-40を用いて多くの種類のラケットについて実験した結果によると、潤滑剤を塗った場合の方が 14-58% ほどスピンの増大している。図 2 は実験の映像から作成したコマ写真である。

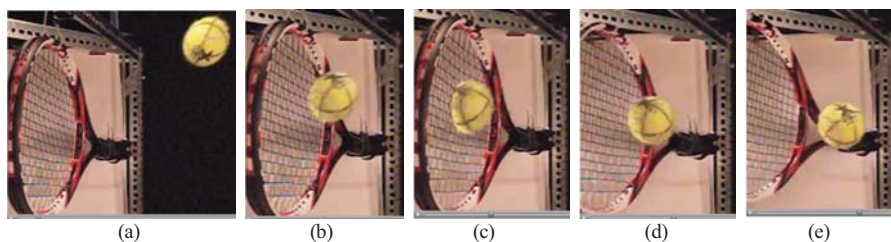


Fig.2 Experimental Setup for measurement of spin⁽⁹⁾ (courtesy of Crawford Lindsey [Tennis Warehouse, San Luis Obispo, CA, 93401]. Balls fired by ball machine at a stationary but free-swinging racquet rotating about an axis 3.5 inches from the end of the racquet and about its longitudinal axis.

3. スtring・テンションと反発性・接触時間はなぜ誤解されるのか

実際のプレー（現実的な衝突速度）におけるボールとストリングスとの衝突挙動を線形理論（微小変形）で考えるとその本質を見失うことが多い。非線形はスポーツの本質的な特長である。一般にテンションと呼ばれる用語は、ラケットにストリングスを張るとき（ストリング面がたわんでいないとき）の初張力（弦楽器）の意味で使われていて、インパクトにおける実際（武器）の張力ではない。著名なBrody⁽¹⁰⁾や平野⁽¹¹⁾の著書は良書であるが、テニスラケットに関しては引用文献が古くて実際とは異なる部分が多い⁽¹²⁾⁻⁽²⁰⁾。また、掲載されているシミュレーション結果は実際とは異なることも多い。たとえば、図3は、ボールとラケットの衝突速度と変形量および面圧の関係を示す。また、図4は、世界中のテニス関係者に知られているBrody⁽¹⁰⁾のテンションと接触時間の関係図であるが（平野⁽¹¹⁾にも引用されている）、これは衝突速度が 12 m/s 以下のデータであり、現実的な衝突速度 20 m/s 以上ではテンション（初張力）は接触時間にほとんど影響しない⁽¹²⁾⁻⁽²⁰⁾。図5に実測結果の例を反発係数とともに示している。ストリングスを緩く張っても、接触時間は長くなり、インパクトにおける実際の張力も小さくはない。

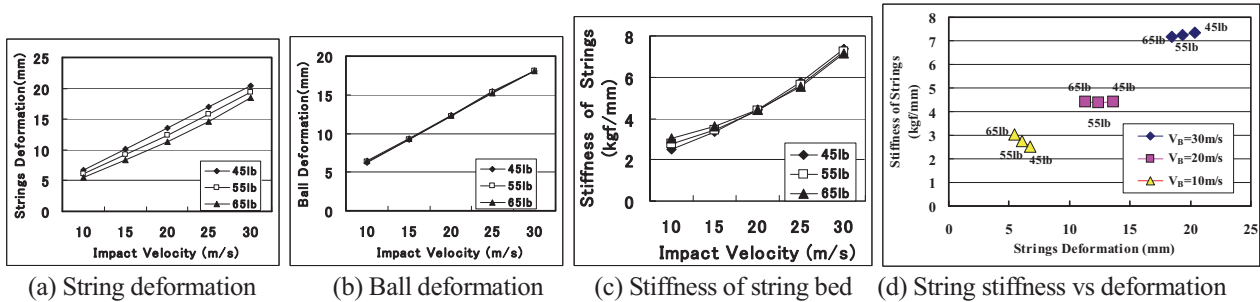


Fig.3 Predicted stiffness and deformations of ball and strings against impact velocity relative to the string tension as a parameter.

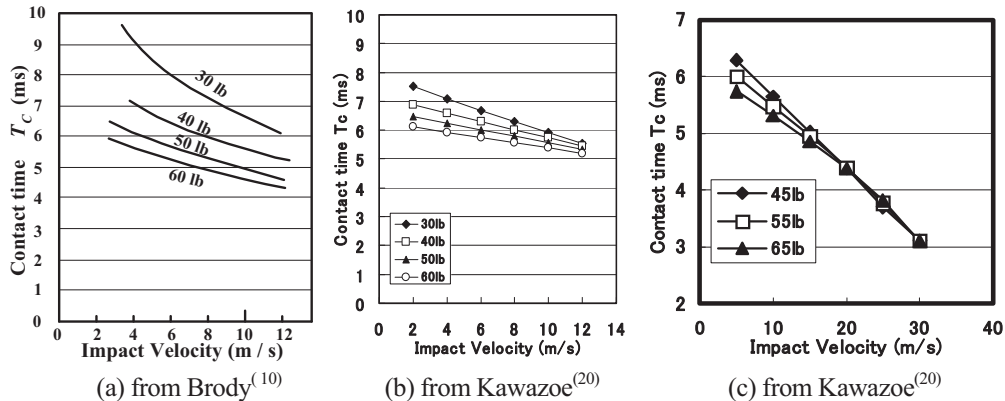


Fig.4 Contact time vs. impact velocity relative to the string tension as a parameter.

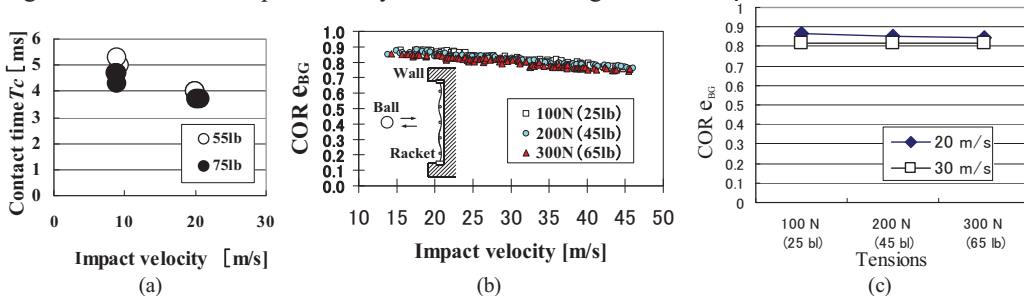


Fig.5 Measured Contact Time and Restitution Coefficient relative to String Tensions and Impact Velocities.

4 動きを阻害する過剰駆動力の制御と状態遷移による巧みな動きの発現

図6は、昔のテニスプレーヤー・ローズウォール選手のバックハンド・ストロークにおける流れるような横移動（サイド・ステップ）のスタート直後の挙動を示す⁽²¹⁾。図7は、テニスのレシーブにおいて鈴木貴男選手がノータッチ・エースを取られたときの右への横移動の様子を示す⁽²²⁾。動き始めるときに左足で蹴る動作が残っており、スタートが少し遅れている。図8は、（習熟していないが）筆者が提案するテニスのフォアハンドである。過剰駆動力の制御と状態遷移により身体全体を浮かせて同時並列的に動かすと、手打ちになりやすく、非力でもス

イングが鋭く速く、安定しやすい⁽²²⁾。図9は、最近のクルム伊達公子選手がレシーブでリターン・エースを取ったときのフォアハンドである。図8のフォアハンドに近いように見える。最近のテニスの現場では、足裏を浮かせて空中で仕事をする選手が多く見られる。

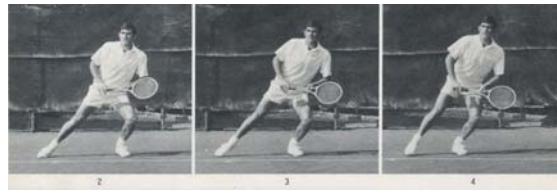
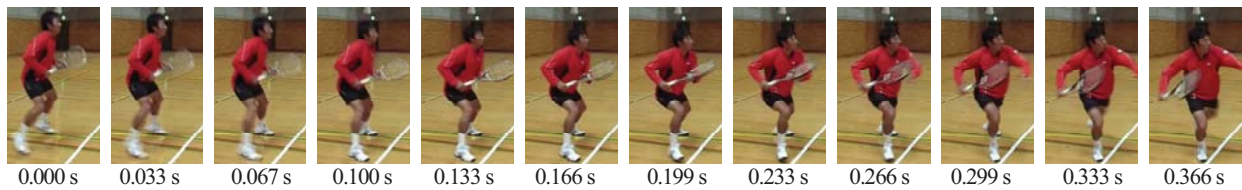
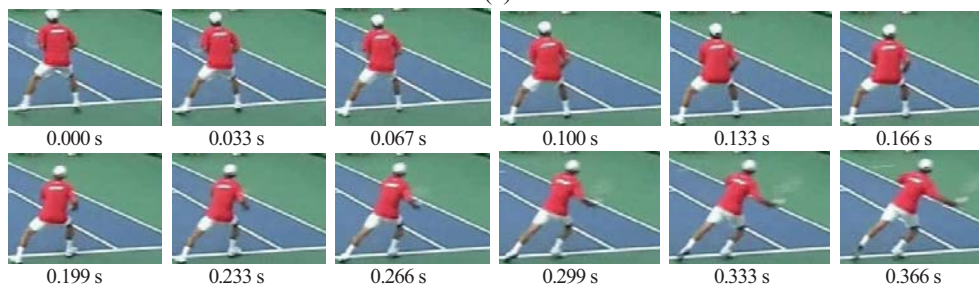


Fig.6 Side step without kick during backhand stroke by K. Rosewall¹⁵⁾



(a)



(b)

Fig.7 Side step during receive a served ball by T. Suzuki.



Fig.8 Robust instantaneous NANBA forehand-stroke utilizing instability, which uses only small active power.

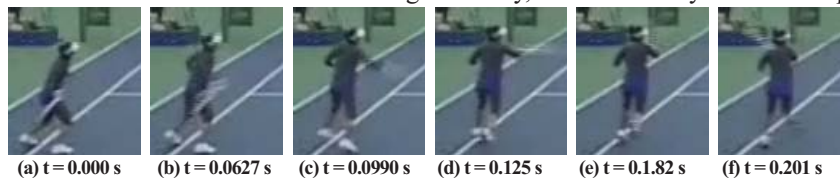


Fig.9 Forehand-stroke during receive a served ball by K. Date Krumm.

5. 使い古した硬式テニスボールを新品同様によみがえらせる「エコボール」の開発と普及

毎日、相当な数のテニスボールが生産され、相当な数が廃棄されている。沖本らが使用済みテニスボールを再生する技術を開発した⁽²³⁾⁽²⁴⁾ (図10)。図11はテスト風景である。ITFのルール仕様に合わせるのは難しいが、ゲームにおける打球感や耐久性などの改善を含めて今後の重要なテーマと考えている。

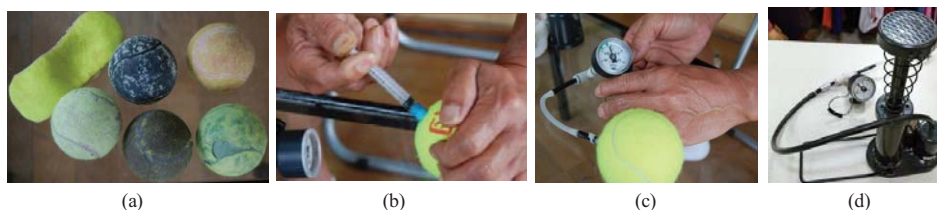


Fig.10 Development of eco balls that utilize used balls.



Fig.11 Practice test on eco balls that utilize used balls.

6 打球感が重視される最近のラケット設計：打球感とは何か

競技レベルが高いプレーヤーほど、ラケットに打球感の良さを求めることがアンケートなどで知られている。手に伝わる衝撃振動の大きさは、図 12 や図 13 のように予測出来るようになったが⁽²⁵⁾、打球感は衝撃振動の大小だけで判断できるほど単純ではなく、手に伝わる衝撃振動がインパクトの状況を知る情報源になっているようである。打球感の良さと物理特性の関係も古くて新しい研究テーマである。

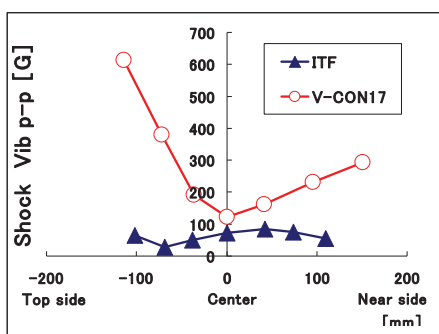


Fig.12 Predicted shock vibrations maximum peak-peak values at the wrist joint vs. impact locations of string bed (impact: $N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$).

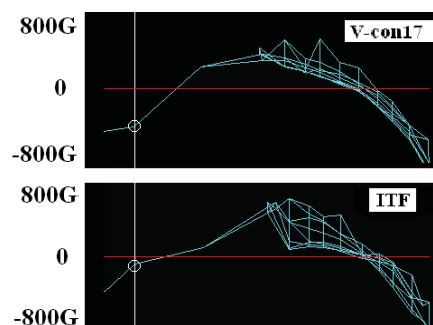


Fig.13 Initial acceleration amplitude of 1st vibration mode component of racket frames (Impact location: A, $N_s = 56.9 \text{ Nm}$, $V_{B0} = 10 \text{ m/s}$).

7. おわりに

テニスにおける技術と伝統の調和の観点から、適切なテニス用具と適切な身体操作はどうあるべきかについて若干の考察と提案を行った。テニスも環境問題やエネルギー問題とは無関係ではなく、たとえば、ボールの生産や使用済みボールの処理なども今後重要な検討課題であり、再生ボールでは、ボール挙動におよぼすボール毛羽の影響なども重要な研究テーマである。テニスやテニス用具は経験の産物だから、新しい目で視ると、古くて新しいチャレンジしがいのある研究テーマが数多くあるように思われる。

おわりに、ローズウォールの写真の掲載を快諾いただいた日本テニス協会副会長・川廷栄一氏と講談社、および写真を掲載させていただいた鈴木貴男選手、クルム伊達公子選手、日本テニス協会に厚くお礼申し上げます。ご協力いただいた日本放送協会・丸山裕孝氏、(株)ドキュメンタリジャパン・松山功氏および佐藤雅俊氏およびプロテニスプレーヤー・宮崎雅俊氏ほかの諸氏に厚くお礼申し上げます。また、大学院および学部の卒業研究として熱心な協力をいただいた研究室の学生諸氏にも深く感謝する。

文 献

- (1) Speckman, J., "The New Physics of Tennis: Unlocking the mysteries of Rafael Nadal's killer topspin", The Atlantic Magazine, January/February 2011, <http://www.theatlantic.com/magazine/archive/2011/01/the-new-physics-of-tennis/8339/> (2011年7月25日確認)
- (2) Macdonald, G., "Racket Strings and Topspin, Straight Sets (Tennis Blog of The New York Times)", January 22, 2011 (2011) <http://straightsets.blogs.nytimes.com/2011/01/22/racket-strings-and-topspin/> (2011年7月25日確認)
- (3) Strawn, T., "The Kawazoe Study", GSS Alliance: International Alliance of Racket Technicians, January 10, 2011 (2011), <http://www.gssalliance.com/2011/the-kawazoe-study/> (2011年7月25日確認)
- (4) Kawazoe, Y. & Okimoto, K., "Super High Speed Video Analysis of Tennis Top Spin and Its Performance Improvement By String Lubrication", The Impact of Technology on Sport (ed. A. Subic, S. Ujihashi), ASTA Publishing, 2005, pp.379-385.

- (5) 川副嘉彦, 沖本賢次, 沖本啓子, “テニスラケットのスピンの性能のメカニズム (ストリング交差点潤滑によるスピン性能向上の超高速ビデオ画像解析)”, 日本機械学会論文集, 第 72 卷 718 号 C 編(2006), pp.1900-1907.
- (6) Kawazoe, Y. & Okimoto, K., Tennis Top Spin Comparison between New, Used, and Lubricated Used Strings by High Speed Video Analysis with Impact Simulation, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 57, 2008, pp.511-522
- (7) 川副嘉彦, 武田幸宏・中川慎理, “テニスラケットのスピンの性能におよぼすガット・ノッチの影響 (スピン量・接触時間・打球速度の超高速ビデオ画像解析)”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.770(2010), pp.2646-2655.
- (8) Goodwill, S & Haake, S., “Why were ‘spaghetti string’ racket banned in the game of tennis?”, The engineering of Sport 4 , pp.231-237. Blackwell Science, (2002) Oxford.
- (9) Lindsey, C., String Lubrication & Movement in Spin, Tennis Warehouse University (TWU) Web Pages, http://twu.tennis-warehouse.com/learning_center/spinandlube.php (2011 年 7 月 25 日確認)
- (10) Brody, H., “Tennis Science for Tennis Players. Philadelphia Pennsylvania”, University of Pennsylvania Press, (1987), pp.5-22.
- (11) 平野裕一編, 打つ科学, 大修館書店, (1992), pp.92-102.
- (12) Kawazoe, Y., “Impact phenomena between racket and ball during tennis stroke, Theoretical and Applied Mechanics, Vol.41 (1992), pp.3-13.
- (13) Kawazoe, Y., “ Coefficient of restitution between a ball and a tennis racket, Theoretical and Applied Mechanics, Vol.42,(1993), pp.197-208.
- (14) 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.
- (15) Kawazoe, Y., “ Mechanism of Tennis Racket Performance in terms of Feel”, Theoretical and Applied Mechanics, Vol.49, (2000), pp.11-19.
- (16) Kawazoe, Y., “ Mechanism of High-Tech Tennis Rackets Performance, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol.51, (2002), pp.177-187.
- (17) Kawazoe, Y., Tanahashi, R. and Casolo, F., “Experimental and theoretical criticism of the effectiveness of looser strings for the reduction of tennis elbow”, Tennis Science & Technology 2 (edited by S. Miller), pp.61-69. (2003). London: International Tennis Federation.
- (18) Kawazoe, Y., Tomosue, R., Yoshinari, K. and Casolo, F., “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 (edited by S. Miller), International Tennis Federation (2003), . pp.105-112.
- (19) 川副嘉彦・太田智洋, テニスのインパクト諸量におよぼすラケット物理特性の影響 (ラケット面サイズとストリングス初張力についての考察), 日本機械学会ジョイント・シンポジウム 1997 (スポーツ工学シンポジウム, シンポジウム・ヒューマンダイナミクス) 講演論文集, No.97-34(1997.10), pp.23-27.
- (20) 川副嘉彦, (小特集: スポーツ工学におけるシミュレーション) 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), 第 22 卷 1 号, (2003), pp.3-9.
- (21) ケン・ローズウォール (構成・写真: 川廷栄一), ローズウォールのテニス, 65-68, 講談社, (1975).
- (22) 川副嘉彦, 高野悠人, 満岡将樹, 中川慎理, “スポーツとロボットにおける巧みな動きの生成原理への構成論的アプローチ”, 日本機械学会 D&D 2011, CD-Rom 論文集, No.11-2, (2011), 302: pp.1-16.
- (23) 地球環境新聞, “使い古しのテニスボールを新品同様に再生 サンアイ”, 2010 年 7 月 8 日木曜日.
- (24) 南野泰造, “千葉県テニス協会の取り組み”, JTA 環境レポート 2011,(2011), p.11.
- (25) 川副嘉彦, 武田幸宏, 中川慎理, “国際テニス連盟性能試験用ラケット ITF の打球感に関連する性能予測と評価”, 日本機械学会スポーツ工学& ヒューマン・ダイナミクス 2009 講演論文集, No.09-45, (2009), pp.130-135.