

解説

テニスに関する実験力学的研究：目に見えないものを見る － ラケットのスピン性能の謎を解く－

川副 嘉彦 *

Experimental Mechanics on Tennis: See the Invisible － Solve a Mystery of Racket Spin Performance－

Yoshihiko KAWAZOE

Players often say that some strings provide a better grip and more spin than others, but ball spin did not depend on string type, gauge or tension in the past laboratory experiment. There was no research work on the spin to uncover what is really happening during actual tennis impact owing to difficult experiment. Recent experiment has made clear the mechanism of top spin and its improvement by lubrication of strings according to the high speed video analysis. As the main strings stretch and slide side ways more, the ball is given more spin due to restoring force parallel to the string face when the main strings spring back and the ball is released from the strings. Furthermore, it has shown that the more spin results in the reduction of shock vibrations of the wrist joint during impact.

Key words: Sport Engineering, Tennis, Impact, Ball Spin, Strings, High Speed Video Analysis, Tennis Elbow, Shock Vibrations

1. はじめに

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の細かい設計をめざす段階に至っている。しかし、ラケットの性能評価は、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。用具の性能評価に関してプレーヤーやテスターが用いる感覚用語とラケットの物理特性との関係については不明な点が多く、メーカーのカタログやテニス専門誌の記事などにも誤解や矛盾がみられる。一般ユーザーにとっては、コートの上でボールを打ってみてはじ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、用具の性能はプレイヤーによって変わる。スポーツ用具性能評価が難しい理由である。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、打球感と一般にいわれている。またこれらの他に、「玉離れが良い」、「ホール感がある」、「面の安定性が良い」など、微妙な性能の違いを評価する表現がいろいろある。一方、テニス肘をはじめとする障害と用具の問題があるが、肘の痛みの原因は複雑であり、ほとんど未解明である^{1)~3)}。

テニスは体験により修得するものだから、ラケット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難しい。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、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^{4)~18)}。

ボールに食いつきの良いストリングスが存在すること

を多くのプレーヤーが経験的に認めている¹⁹⁾。ボール・コントロールには適切なスピン（回転）が必要であり、スピンの良くなかったボールはバウンドしてから鋭く跳ねて伸びてくる。インパクトにおけるボールのスピンはきわめて重要なテニスの要因であり、ストリングスの種類・材料・張力・ゲージ（素線直径）などがどのようにスピンの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、ラケットやストリングス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。従来からボールとストリングスの摩擦が大きいほどスピンのかかりやすいという仮説が立てられることが多いが、ラケット・ヘッドを固定した斜め衝突の最近の研究^{20), 21)}においても、摩擦特性、あるいはストリングの種類や張り上がりテンション（初張力）とスピン性能の間には明確な関係は見られない。

本稿では、ボールとラケットの実験的同定に基づくラケットの性能予測例について簡単に述べ、ついで高速ビデオ画像解析によって最近明らかになったボールのスピンに関する研究²²⁾について紹介する。

2. インパクトの非線形と実験的同定に基づくラケット性能の予測

Fig.1は、(a)ボールおよび(b)ボール・ストリングス複合系の復原力・変形特性の実測結果である。Fig.2の K_G , K_B , K_{GB} はたわみ量 X に対するストリング、ボール、ボール・ストリングス複合系の等価ばね剛性（ K_G は一般に面圧と呼ばれている）であり、Fig.1から導いた結果である。実用範囲ではボールもストリングスも変形量の増大にともなって強い非線形の硬化ばね特性を示すのが特徴である。変形の増大とともに復原力 F は急激に大きくなり、初張力 S_0 （ストリングをラケットに張るときの張力）よりも変形量 X の影響の方が大きくなる。

Fig.3 はボールとストリングスの接触時間におよぼすストリング初張力（テンション）の影響を調べた実測値である。一般の認識とは異なり、衝突速度が 20 m/s 程度になると、初張力 55 lbs (25.0 kgf, 245 N) と 75 lbs (34.1 kgf, 334 N) のテ

原稿受付 2005 年 9 月 12 日

* 非会員 埼玉工業大学工学部 (〒369-0293 埼玉県大里郡岡部町普濟寺 1690)

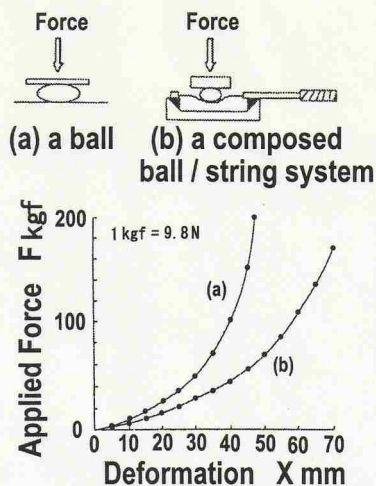
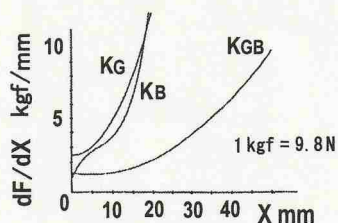


Fig.1 Applied force- deformation test and the results.

Fig.2 Stiffness vs. deformation of a ball K_B , strings K_G , and a composed ball/string system K_{GB} assuming that a ball deforms only at the side in contact with the strings⁽¹⁾⁽²⁾.

ンションの差よりも衝突速度の影響がはるかに大きくなる。

Fig.4 は、テンションの実用範囲 45 lbs ～ 65 lbs に対して広範囲に 25, 45, 65 lbs と大きく変えたときの反発性への影響を詳細に調べた実験結果である。横軸はボールの入射速度である。衝突速度の実用範囲は 40 m/s 以下であり、常用の衝突速度は 20 m/s～30 m/s である。衝突速度 20 m/s の場合、テンションを 44 % 増減しても反発係数平均値は 1.4 % しか増減しない。衝突速度 30 m/s の場合はテンション（初張力）を変えても Fig.5 のように反発係数はほとんど変わらない。反発係数には、ボールの変形量が影響し、ストリングの変形量はほとんど影響しない。実用衝突速度ではテンションがボールの変形量にほとんど影響しないために反発係数にも影響しないのである。

ボール・ストリングス系の非線形復原力特性および減衰特性は実験的に Fig.6 のように 1 自由度の等価系に同定し、さらにラケットあるいはラケット・腕系の剛体運動特性お

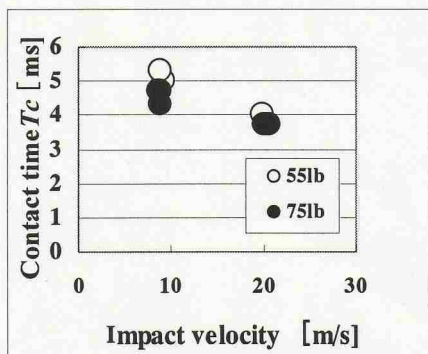


Fig.3 Measured contact time with different string tensions and different impact velocities.

よび振動特性を Fig.7 および Fig.8 のように実験的に同定することができる。

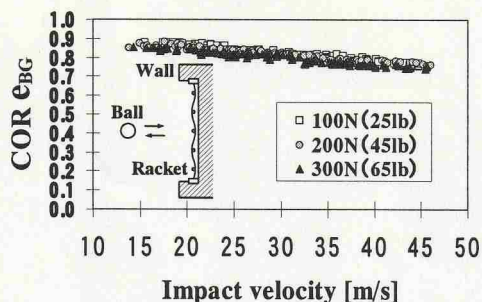
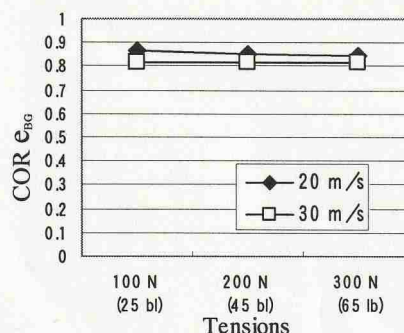
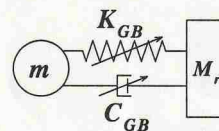
Fig.4 Measured coefficient of restitution e_{BG} between a ball and strings vs. impact velocity showing the effect of string tensions.Fig.5 Averaged coefficient of restitution e_{BG} between a ball and strings vs. string tensions at the impact velocities of 20 m/s and 30 m/s.

Fig.6 Impact model of a ball-strings system.

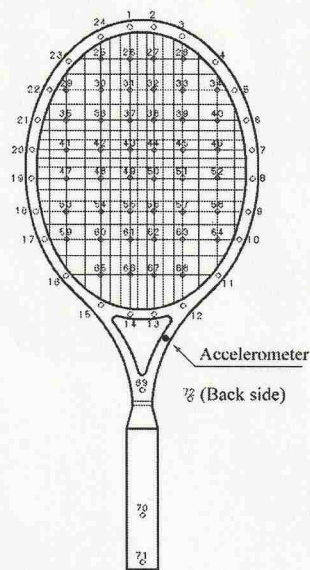


Fig.7 String meshes for vibration model

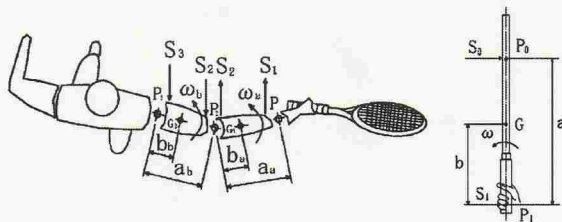


Fig.8 Impact model for the prediction of the shock force transmitted to the arm joints from a racket.

ラケットのグロメットの（ストリングスを支える）部分や人間のモデルなど理論的扱いが難しい部分は実験的に特定すれば、詳細な特性が理論的にわかっていなくても、使用状況におけるラケットの性能を客観的に評価することができる。プレーヤーがボールを打撃した瞬間に腕系に伝わる衝撃力を計算するための Fig. 8 のモデルにおいて、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みなし、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ている。Fig. 9 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_{BO} で飛んでくるボールをラケット・ヘッドが 90 度回転したときの速度 V_R で打撃する。

図 10 は衝突における力積波形の予測値であり、図 11 は宙吊りラケットのストリング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。

ボールとラケットの「反発係数が高い」ラケットは「玉離れが良い」ラケット、「反発係数が低い」ラケットは「ホールド感がある」ラケットと解釈されている。したがって、剛性の高い厚ラケは「球離れ」が良く、木製ラケットは「ホールド感」がある。Fig.12 は、宙ぶりの静止ラケット（ヘッド速度 $V_R=0$ ）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_{BO} 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。横軸はストリング面上の衝突位置である。

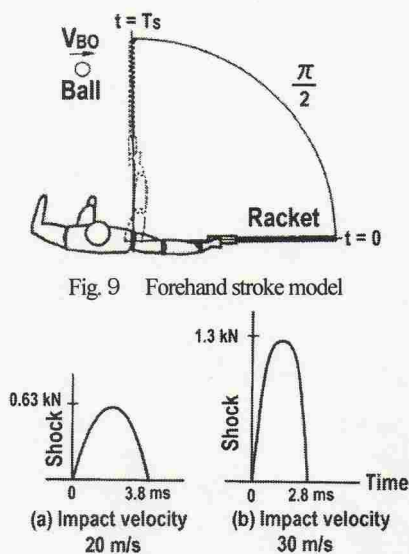


Fig.9 Forehand stroke model

Fig.10 Calculated shock shape when a ball strikes the center on the String face.

Fig.13 は、圧電素子をラケット首部に組み込んだ軽量「インテリ・ファイバー」ラケット IS-10 であり、Fig.14 は、ラケットのパワー（打球速度）を世界最軽量ラケット TSL

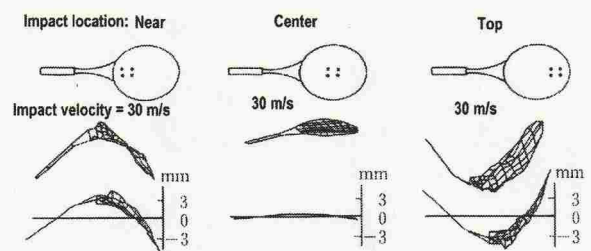


Fig.11 Predicted initial amplitude of 1st mode component of racket frame vibrations.

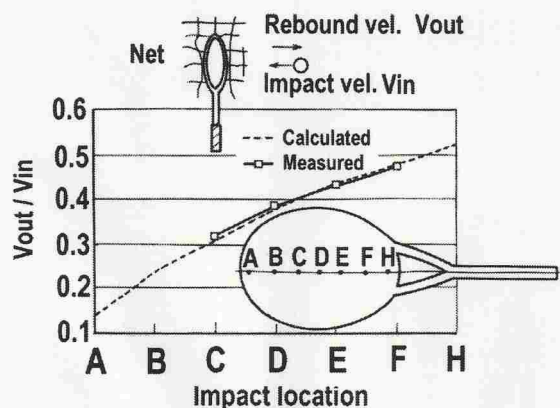


Fig.12 Comparison between the measured rebound power coefficient e and the predicted rebound power coefficient.

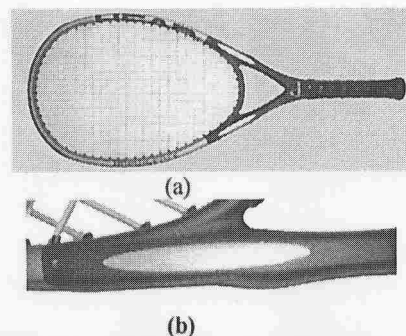


Fig.13 Racket with active piezo-intellifibers.

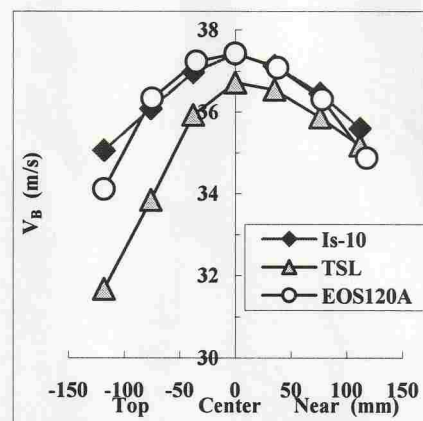


Fig.14 Predicted post-impact ball velocity V_B ($N_s=56.9\text{Nm}$, $V_{BO}=10\text{m/s}$)

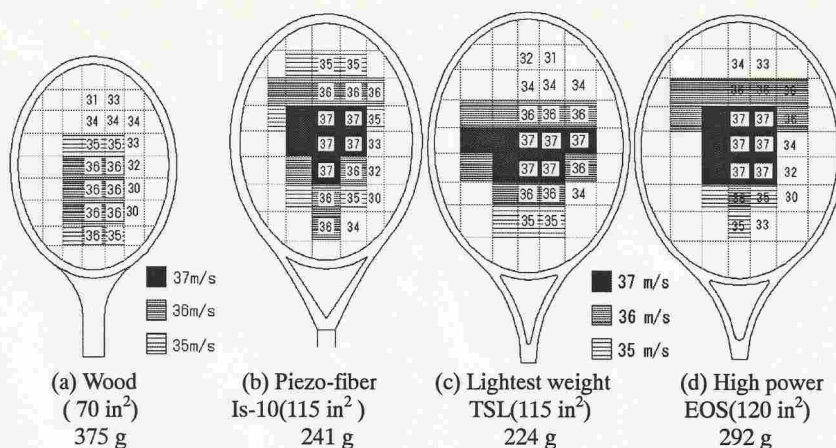


Fig.15 Predicted sweet area in terms of post-impact ball velocity V_B (Shoulder torque $N_s = 56.9\text{Nm}$, coming ball velocity $V_{BO} = 10\text{m/s}$).

(224g) およびパワーに優れている軽量ラケット EOS120A (292 g) と比較したものである。「インテリ・ファイバー」ラケットはパワーに優れており、最軽量ラケットには軽量化の限界が見える。Fig.15 は、上記の 3 者のパワーに関するスイートエリアを木製ラケットのそれと比較したものである。

フォアハンド・グランド・ストロークを想定して、プレーヤーのスイング・モデルを設定すると、ラケットと手首関節の衝撃振動波形を衝撃成分と振動成分との合成により計算することができる。Fig.16 は衝撃振動（加速度）の

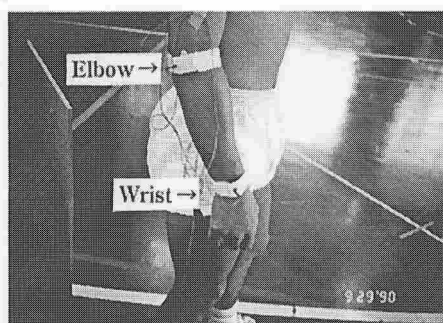


Fig.16 Accelerometers attached at the wrist and the elbow.

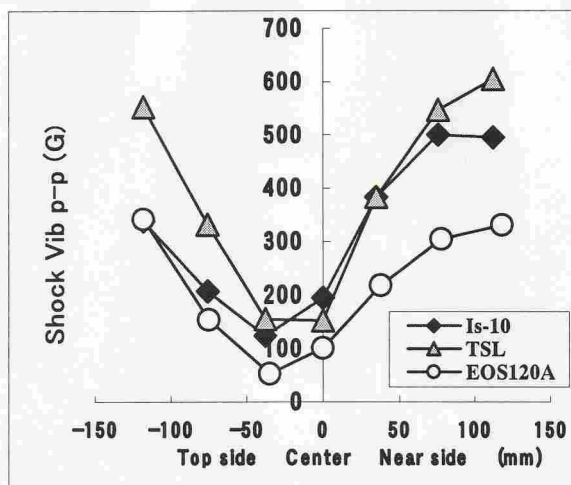


Fig.18 Predicted shock vibrations at the wrist joint when hitting a ball with flat forehand drive at the various impact locations of racket face (impact velocity: 30m/s).

測定位置であり、ラケット面先端側のオフセンターで打撃した場合の手首関節の衝撃振動（加速度）測定波形と予測波形が Fig.17 である。予測波形は実測波形に比べてやや大きめであるが、実測波形の特徴をよく表している。

Fig.18 は、「インテリ・ファイバー」で打撃したときの手首関節衝撃振動のピーク値を世界最軽量ラケット TSL (224g) およびパワーに優れている軽量ラケット EOS120A (292g) の場合と比較したものである。世界最軽量ラケット TSL の衝撃振動は大きく、軽量「インテリ・ファイバー」も十分な衝撃振動低減がなされているとはいいがたい。

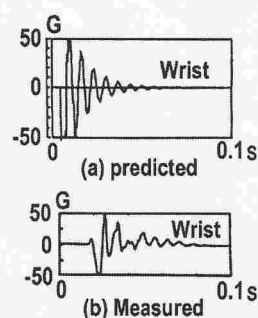


Fig.17 Predicted shock vibrations of a wrist joint compared to the measured.

3. スtring交差点潤滑によるラケットのトップスピン性能向上の超高速ビデオ解析

Fig.19 は、ボールを打撃したときのテスターのトップスピン打法を示す。毎秒 10,000 コマで斜めから撮影した高速ビデオ画像であり、Fig.19 (a), (b) はインパクト前、Fig.19(c), (d) はボールとストリングスが接触している期間（今回のトップスピンの場合約 $3\sim 4\text{ms}$ ）、Fig.19(e), (f) はボールがストリングス面から離れた後の代表的なフレームを示す。ボールとラケットが接触している間のラケット面の角度の変化はほとんどなく、この間のラケットによるスピン操作が不可能であることを示している。

Fig.20 は、スピン挙動を解析するための高速ビデオ画像である。Fig.20(a) はインパクトの瞬間にラケットが真横になるような撮影であり、おもにボールがストリングスから離れた直後のボールのスピン（回転）速度と直線速度の解析に用いる。Fig.20(b) はインパクトの瞬間にラケットの真後になるような撮影であり、おもにボールとストリングスが接触してから離れるまでのボールとストリングスの動きを観察し、ボールとストリングスの接触時間の算出に使用

する。

Fig.21 は、インパクトで真横になるように撮影した毎秒 10,000 コマの高速ビデオ画像であり、スイングにおけるラケット・ヘッドのおおよその軌道とインパクトの角度がわかる代表的なフレームを示す。

Fig.22 は、インパクトで真後ろになるように撮影した 1 万コマ/秒の画像の代表的なフレームであり、(a) は通常のストリングス、(b) は同じストリングスに潤滑剤を塗った場合であり、プロストリンガーにより 50 lbs で張った。(a) と (b) のインパクトの瞬間のラケット位置およびラケット面上のボールの位置はほぼ一致している。ボールとストリングスが接触して離れるまでの時間、すなわち、接触時間は、Fig.21(a) では 3.4 ms、Fig.21(b) では 4.1 ms であり、潤滑剤を塗ると (ストリングの縦糸と横糸の交差点にしみこむ)、縦糸が直角方向へ大きくずれ、ボールが離れるときには元に戻っているのが見える。通常の塗らない場合(a) では、ボールが離れても縦糸がまだ一部横にずれたままになっている。Fig.23 は、Fig.22(b) の一部を拡大したものであり、潤滑剤を塗ったラケットでトップスピン打撃したときの挙動を示す。Fig.23(b) はボールとストリングスが接触した直後であり、Fig.23(c): 接触後 1.7 ms に示すように、潤滑剤を塗らない通常のストリングスの場合に比べて、縦糸が直角方向へ大きくずれやすくなり、ボールが離れるときには元に戻っており (Fig.23(d): 接触後 4.1 ms), ボールとストリングスが接触して離れるまでの時間 (接触時間) が長い。潤滑剤を塗らない通常のストリングスの場合は、Fig.22(a)に示したように、縦糸が直角方向へずれる量が少なく、ボールが離れても縦糸がまだ一部横にずれたままになることが多い。縦糸と横糸がすべりやすい

ほどボールがストリングスに食い込み、ストリングス面内の縦糸の復原力 (Fig.23(c)の矢印) も大きく、ずれた縦糸が元にもどるときにボールに回転がかかりやすくなると考えられる。

Fig.24は、ストリングス交差点潤滑の効果が最もみられた試行 (Fig.21, Fig.22, Fig.23) における (a) ストリングを離れた直後のボールのスピンの速度 (2.1倍増), (b) ボールとストリングスの接触時間 (23 % 増), および (c) ストリングスを離れた直後のボールの直線速度 (23 % 減) を潤滑しない通常の場合と比較したものである。Fig.25 は、3 回の試行の平均値と標準誤差であり、標準誤差は標準偏差を $\sqrt{n}$ (n : 標本数) で割ったもので、標本平均値から真値がどの範囲にあるかを示す。平均値についても潤滑した場合のスピンの量は 30 % 増し、接触時間は 16 % 長くなり、打球速度は 6 % 低減する。

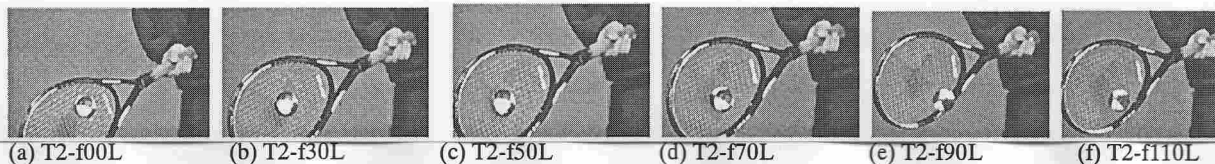
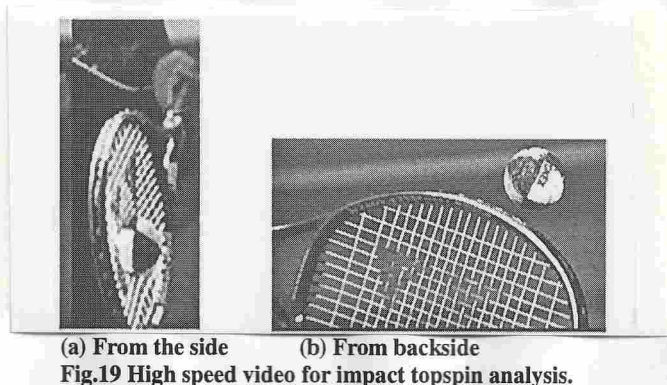


Fig.20 Oblique view of topspin impact of a tester in this experiment

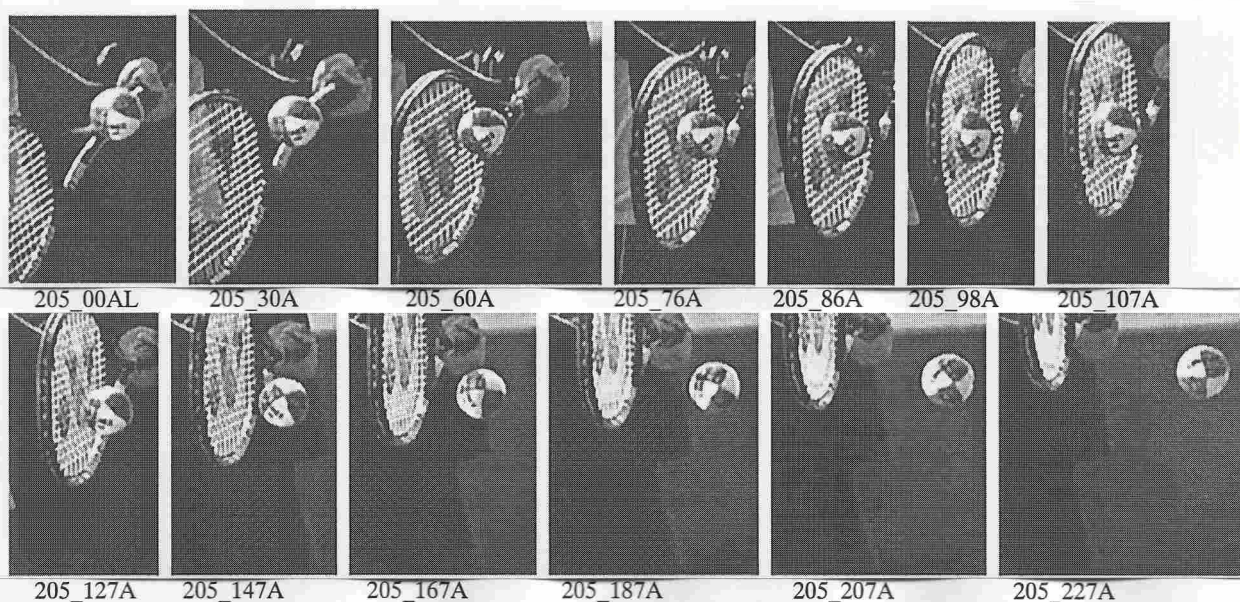


Fig.21 Side angle view of topspin impact of a tester in this experiment, where 205: Trial No. and number with A means a frame per 10^{-4} s. Pre-impact: 00AL~76A, contact: 86A~107A, post-impact: 127A~

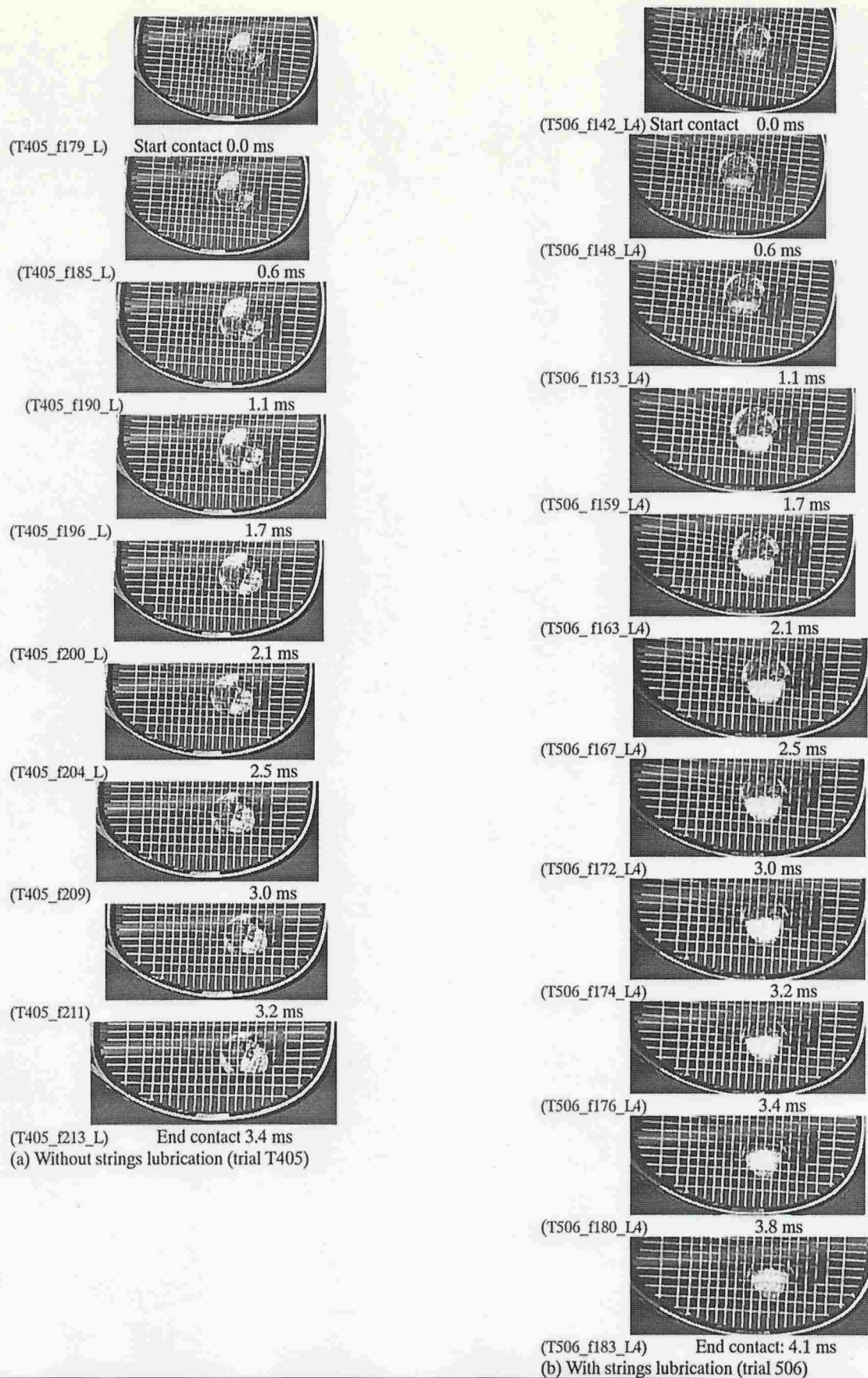


Fig.22 Effect of strings lubrication on the ball spin behaviors (impact views from back side direction with frames per 10^{-4} s). (a) Without strings lubrication (b) With strings lubrication

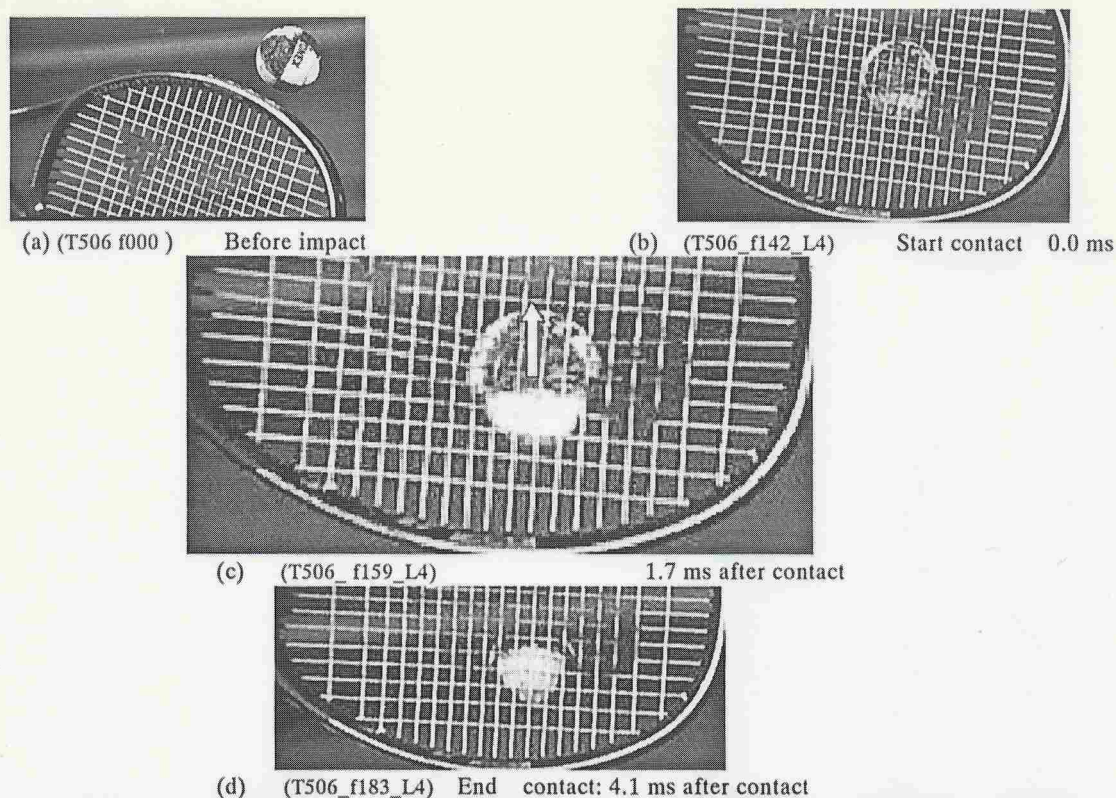


Fig.23 Ball spin behavior and mechanism of spin rate increase by lubrication of string intersections. Main strings stretch and slide side ways and spring back when the ball is released from the strings. (Impact views from back side direction).

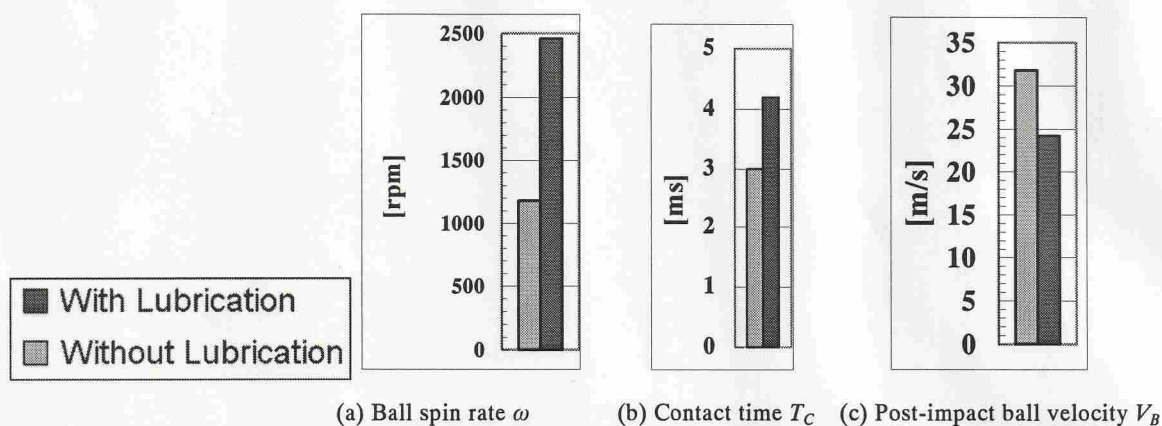


Fig.24 Typical Example of Effect of strings intersections lubrication on the ball spin rate and contact time.

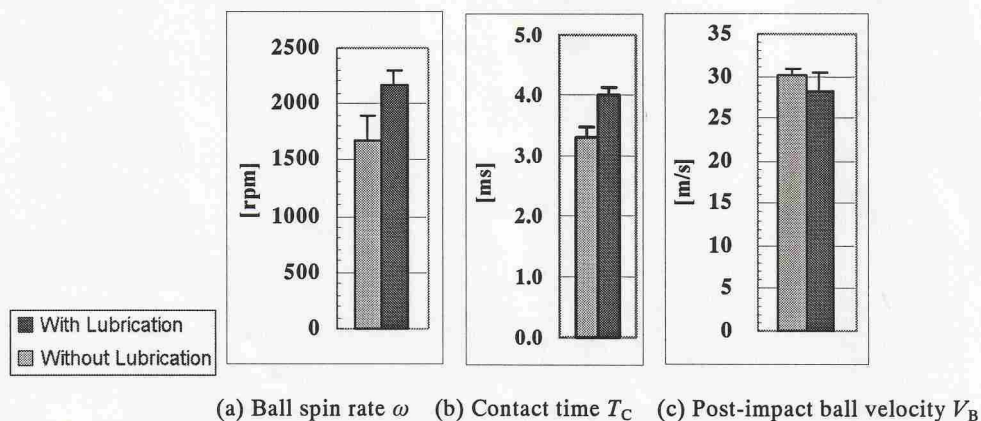


Fig.25 Effect of string intersections lubrication on the ball spin performance (Average and standard error).

紙面の都合で詳細は省略するが、接触時間が長くなるとラケットや手に伝わる衝撃振動も低減することがボールとラケットの実験的同定に基づくシミュレーションにより明らかになり、アンケート結果やラケット・テスターの打球感と対応する。また、プラスチックのチューブを使って摩擦を減らして過度のスピンがかかるようにした理由で過去に使用が禁止された「スパゲッティ」ラケット^{23),24)}とストリングス交差点潤滑ラケットはスピンのメカニズムが良く似ている。さらに、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ストリングの方が、スピンがかかりやすい可能性がある。最近スピンを多用するプロテニスプレーヤーの間でポリエステルが主流になってきたということは、従来のスピン・ガット設計概念が今後大転換する可能性があり、世界のテニスがさらに面白くなることも期待できる。

4. 結 論

全体重量の軽さによって扱いやすさを実現しつつ、バランスをトップ寄り（先端側）にすることで、パワー不足を補おうとするコンセプトで作られている最近の超軽量型ラケットについて実験的同定に基づく衝突解析による性能予測例を示し、さらに超高速ビデオ画像解析により、従来不明であったスピン性能の謎を解明した例を紹介した。以下のようなスピンに関する新しい知見が得られた。

(1) ストリングの摩擦が大きいほどスピンがかかるという従来の仮説とは逆に、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。

(2) ストリングス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。

(3) スピン量が増すと接触時間も長くなる。

なお、紙面の都合で省略したが、接触時間が長くなるとラケットや手に伝わる衝撃振動も低減することがボールとラケットの実験的同定に基づくシミュレーションにより明らかになり、アンケート結果やラケット・テスターの打球感と対応する。また、プラスチックのチューブを使って摩擦を減らして過度のスピンがかかるようにした理由で過去に使用が禁止された「スパゲッティ」ラケットとストリングス交差点潤滑ラケットはスピンのメカニズムが良く似ていることもわかった。さらに、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ストリングの方が、スピンがかかりやすい可能性がある。

参 考 文 献

- 1) Kawazoe, Y., Tennis Equipment and Performance – Transformation Through Material Evolution (in Japanese), *Journal of The Japan Society of Mechanical Engineers*, **106**-1010(2003), 13-15.
- 2) Kawazoe, Y.: Analysis on Tennis Impact with Prediction and Estimation of Racket Performance, *J. of The Society of Instrument and Control Engineers*, **38**-4(1999), 268-273.
- 3) Kawazoe, Y.: Prediction of Racket Performance Based on the Tennis Impact Simulation, *J. of The Japan Society for Simulation Technology*, **22**-1(2003), 3-9.
- 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.: Coefficient of restitution between a ball and a tennis racket, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. **42** (1993), 197-208.
- 6) 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), E & FN Spon (1994), 134-139.
- 7) Kawazoe, Y.: Effects of String Pre-tension on Impact Between Ball and Racket in Tennis, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. **43** (1994), 223-232.
- 8) 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), 165-176.
- 9) Kawazoe, Y.: Mechanism of Tennis Racket Performance in terms of Feel, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. **49**, (2000), 11-19.
- 10) Kawazoe, Y. and Tomosue, R.: Sweet Area Prediction of Tennis Racket Estimated by Power: Comparison between Two Super Large Sized Rackets with Different Frame Mass Distribution. *Tennis Science & Technology* (Edited by Haake S. & Coe A.), Blackwell Science (2000), 75 - 82.
- 11) Kawazoe, Y. and Yoshinari, K.: 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* (edited by S.J. Haake S. and A. Coe), Blackwell Science (2000), 91-99.
- 12) Kawazoe, Y., Tomosue, R., Muramatsu, T., Yoshinari, K. and Yanagi, H.: Experimental Study of the Larger Tennis Ball Effects on the Comfort of the Wrist and the Elbow. *The Engineering of Sport 4* (edited by S. Ujihashi and S. Haake), Blackwell Science (2002), 192-199.
- 13) Kawazoe Y. and Tanahashi R.: Prediction of Various Factors Associated with Tennis Impact: Effects of Large Ball and Strings Tension. *The Engineering of Sport 4* (edited by S. Ujihashi and S. Haake), Blackwell Science (2002), 176-184.
- 14) Kawazoe, Y.: Mechanism of High-Tech Tennis Rackets Performance. *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. **51** (2002), 177-187.
- 15) 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**, International Tennis Federation (2003), 105-112.
- 16) 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**, International Tennis Federation (2003), 61-69.
- 17) Y. Kawazoe, F. Casolo, R. Tomosue & K. Yoshinari: Performance prediction and estimation system for tennis racket in terms of player's wrist joint shock vibrations. *The engineering of Sport*, **5**-1, International Sports Engineering Association (ISEA) (2004), 393-399.
- 18) Y. Kawazoe: Computer aided performance prediction and estimation system for a tennis racket in terms of power and stability. *The engineering of Sport*, **5**-1, International Sports Engineering Association (ISEA) (2004), 633-640.
- 19) Lindsey, C.: Did you Hear What the Ball Said to the Strings? – “BITE ME !”, *Racquet Tech* (The Official Publication of the United States Racquet Stringers Association), October 2003, p.2.
- 20) Cross, R.: Oblique impact of a tennis ball on the strings of a tennis racket, *Sport Engineering*, **6** (2003), 235-254.
- 21) Goodwill, S & Haake, S.: Effect of string tension on the impact between a tennis ball and racket, *The engineering of Sport*, **5**-2, International Sports Engineering Association. (2004), pp.3-9.
- 22) Kawazoe, Y. & Okimoto, K.: Super High Speed Video Analysis of Tennis Top Spin and Its Performance Improvement by String Lubrication, Proc of Asia-Pacific Congress on Sports Technology (APCST2005) (2005), Tokyo, Japan (in press)
- 23) ITF, <http://www.itftennis.com/technical/equipment/strings>
- 24) Goodwill, S & Haake, S.: Why were 'spaghetti string' rackets banned in the game of tennis?, *The engineering of Sport*, **4**, Blackwell Science (2002), 231-237.