

テニスラケットのスピン性能のメカニズム* (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)

川 副 嘉 彦 *¹, 沖 本 賢 次 *², 沖 本 啓 子 *²

Mechanism of Racket Spin Performance in Tennis (Spin Performance Improvement by Lubrication of String Intersections with Super High Speed Video Analysis)

Yoshihiko KAWAZOE *⁴, Kenji OKIMOTO and Keiko OKIMOTO

*4 Department of Mechanical Engineering, Saitama Institute of Technology, 1690, Okabe, Saitama, 369-0293, Japan

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. This paper made clear the mechanism of top spin and its improvement by lubrication of strings according to the high speed video analysis. It also provided the more detailed explanations of spin behavior by comparison between a lubricant string racket and a famous 'Spaghetti string racket' which was banned in 1978 by the International Tennis Federation since it used plastic spaghetti tubing over the strings to reduce friction resulting in the excessive spin on the ball. 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 showed that the more spin results in the reduction of shock vibrations of the wrist joint during impact.

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

1. 緒 言

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⁽¹⁾。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,スピンの良くか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,現在数百種類も市販されている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。しかし,現象の複雑さから,従来の研究はほとんどが正面衝突に関するもの⁽²⁻³⁾であり,したがって反発性に関しては多くのことが明らかになったが,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^{(4),(5)}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。

世界のトップ・プロをはじめとして多くのプレーヤーがストリングの違いによるプレイの差を感じるという経験的事実が存在すること,また,ラケットの軽量化とともにトップスピン(順回転)打法が一般的になったこともあり,ストリングの違いがスピンにおよぼす影響を明らかにするために,プレーヤーが打撃したときのボールのスピンの挙動の測定が求められていた⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし,プレーヤー(テスター)のスイング,インパクトの瞬間のラケットの位置,ラケット面上のボールの位置などの再現性の実験的困難さもあって,実際のテニスのインパクトにおけるスピン挙動についての報告は皆無であった。

*原稿受付 2005年8月22日。

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

*²(有)サンアイ(〒731-0123 広島市安佐南区古市1-34-7)
Email: kawazoe@sit.ac.jp

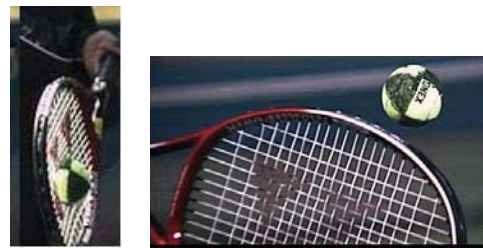
本論文では、毎秒1万コマの高速ビデオ画像解析によりラケットのスピンの性能の謎を初めて明らかにする。すなわち、ストリングの摩擦が大きいほどスピンのかかるという従来の仮説とは逆に、摩擦が小さくて縦糸と横糸がお互いにすべって交差点がずれ、縦糸が横に伸びて戻るときの復原力によりスピンがかかることを明らかにする。ストリングス交差点をシリコン系オイルで潤滑（沖本が世界特許出願、国際テニス連盟 IITF 公認申請）すると、縦糸が横方向へずれやすく・戻りやすくなり、結果として回転がかかりやすくなる。スピン量が増すと接触時間も長くなった。さらに接触時間が長くなるとラケットや手に伝わる衝撃振動も低減することをボー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示し、アンケート結果やラケット・テスターの打球感との対応についても考察する。一方、「スパゲッティ・ストリング」と呼ばれたラケット（1977年に特許出願）^{6),(7)}は、スパゲッティのようなプラスチックのチューブを使って摩擦を減らしたためにスピンがかかりすぎるという理由で1978年に国際テニス連盟（ITF）により禁止された（図12(a)参照）。縦糸と横糸を交互に織らないラケットはルールで禁止されている。この「スパゲッティ・ラケット」の高速ビデオ画像解析によるスピンの測定結果^{(6),(7)}と著者らのストリング交差点潤滑ラケットを対照し、その結果から、スピン・ガットと呼ばれて市販されている表面摩擦の大きいストリングよりポリエステルのような表面摩擦の小

さいストリングの方がスピンのかかりやすい可能性を指摘する。これは従来のスピン摩擦論・設計論を覆すことになる。

2. ストリング交差点潤滑によるトップスピン性能向上の超高速ビデオ解析

図1は、手で投げられた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、図1(a), (b)はインパクト前、図1(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3~4ms）、図1(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。

図2は、スピン挙動を解析するための高速ビデオ



(a) From the side (b) From backside
Fig.2 High speed video for impact topspin analysis.



Fig.1 Oblique view of topspin impact (trial T2) of a tester in this experiment

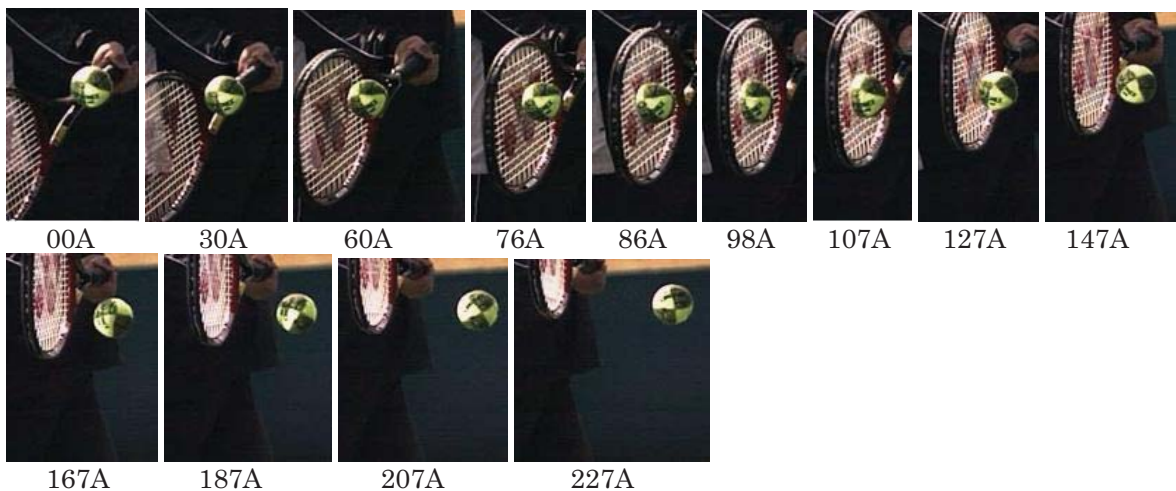


Fig.3 Side angle views of topspin impact (trial 205) of a tester with frames per 10^{-4} s. Pre-impact: 00A~76A, contact: 86A~107A, post-impact: 127A~

オ画像である。図 2(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ニング速度と直線速度の解析に用いる。図 2(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。

図 3 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。

図 4 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 で張って、3 hrs/day で 7 日間使用後に実験した。(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、図 4(a) では 3.4 ms、図 4(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。図 5 は、図 4(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。図 5(b) はボールとストリングスが接触した直後であり、図 5(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（図 5(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、図 4(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、3 章に述べるようにストリングス面内の縦糸の復原力（図 5(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。

図6は、ストリングス交差点潤滑の効果が最もみられた試行（図3, 図4, 図5）における (a) ストリング

を離れた直後のボールのスピニング速度（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。図7 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ニング量は 30% 増し、接触時間は 16% 長くなり、打球速度は 6% 低減する。

3. ボールに与えられる接線力と回転トルク

テニスボールを球殻とみなすと、回転の慣性モーメントは $I_B = (2/3) R_B^2 m_B = 431.7 \text{ cm}^2 \text{ g}$ である。ただし、テニスボール直径 $D = 2 R_B \doteq 6.7 \text{ cm}$ 、質量 $m_B \doteq 57.7 \text{ g}$ 。ストリング交差点を潤滑した場合 (Trial 205) の打球速度 $V_B = 24.2 \text{ m/s}$ 、回転速度 $\omega = 2460 \text{ rpm}$ を与え、投げられたボールの速度（入射速度）は遅いので $\omega_0 \doteq 0$ とし、ボールにかかる回転トルクを τ （平均トルクを τ_{MEAN} ）、ボールにスピニングを与える接線力を $F_{T, \text{MEAN}}$ とすると、 $F_{T, \text{MEAN}} = \int \tau \, dt / (R_B T_c) = 7.9 \text{ N}$ となる。接線力は大きくはないが、ボールの直線運動に対して直角だから容易に回転がかかる。潤滑しない場合 (Trial 103) は、 $F_{T, \text{MEAN}}$ は 5.3 N となる。

4. スピニングによる打球感向上のメカニズム

力積波形を式 (1) のように近似し、ストリング面の打撃位置と衝突速度を与えると、図8（ストリング面中心での打撃）のように波形を予測することができる。そのフーリエ・スペクトルは式 (2) となる。

$$F(t) = F_{\text{max}} \sin(\pi t / T_c) \quad (0 \leq t \leq T_c) \quad (1)$$

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

ラケット面上の点 j での衝突によるラケット上の点 i における k 次モードの応答振幅成分 X_{ijk} は、以下のように近似できる。ただし、 f_k は固有振動数である。

$$X_{ijk} = r_{ijk} S_j(f_k) \quad (3)$$

任意の打点 i に単位衝撃力が作用したときの応答点 j の k 次振動モード成分 r_{ijk} は、実験モード解析に基づいて同定する。接触時間 T_c が長くなると衝突力のフーリエ・スペクトルの値が低減する^{(8)・(12)}。

図9 は使用したラケットの形状である。図10 は、ラケットの基本振動振幅におよぼすストリング交差点潤滑の影響を予測^{(12)・(15)}した結果である。図11は手首関節の衝撃振動波形の予測^{(13)・(15)}結果であり、ボールと



Fig.4 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

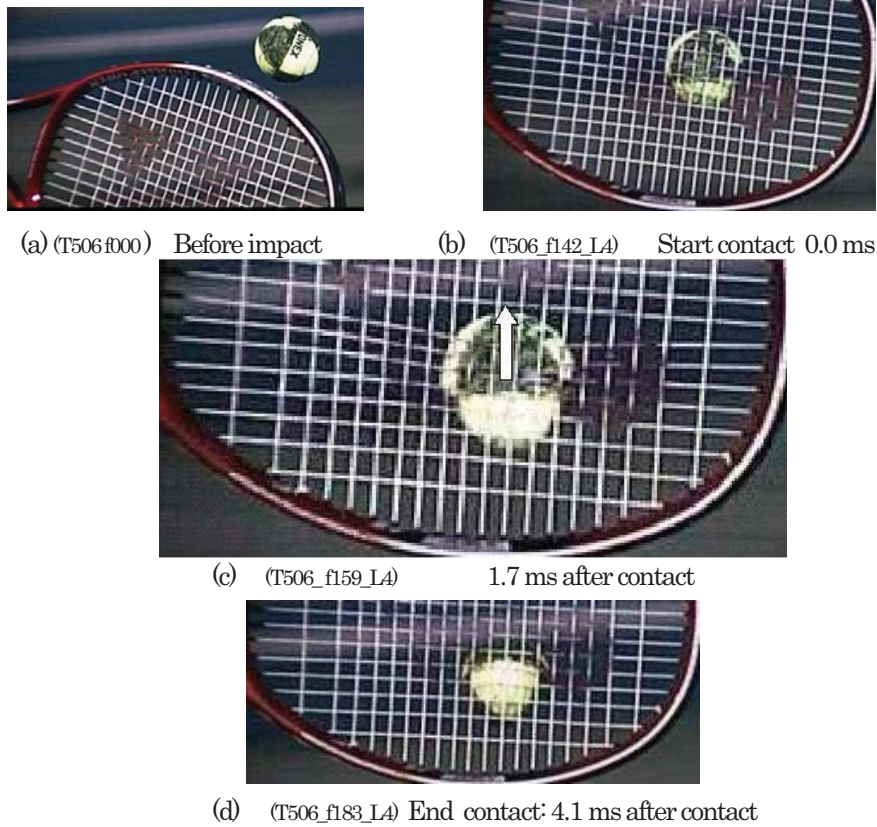


Fig.5 Ball spin behavior and mechanism of spin rate increase by lubrication of string intersections. Main strings stretch and slide side ways and spring back when the ball is released from the strings. (Impact views from back side direction).

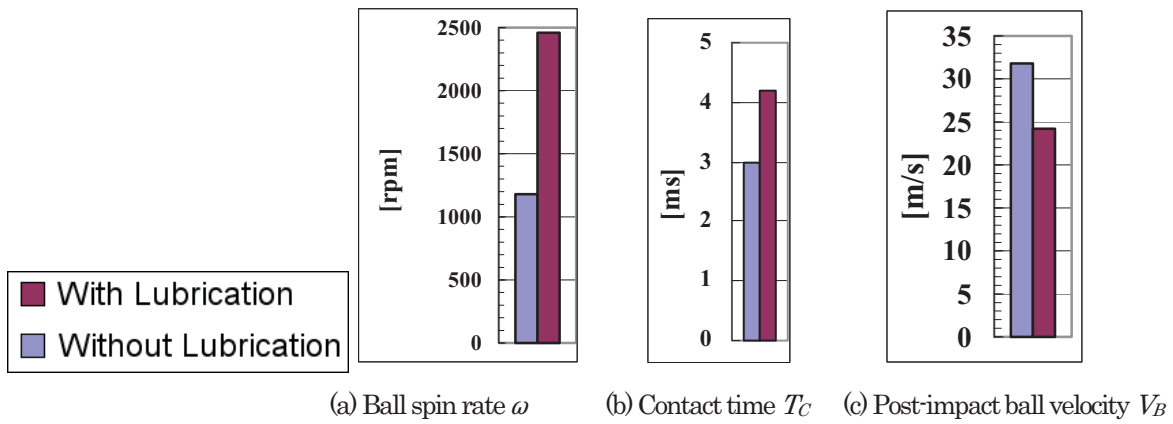


Fig.6 Typical Example of Effect of strings intersections lubrication on the ball spin rate and contact time.

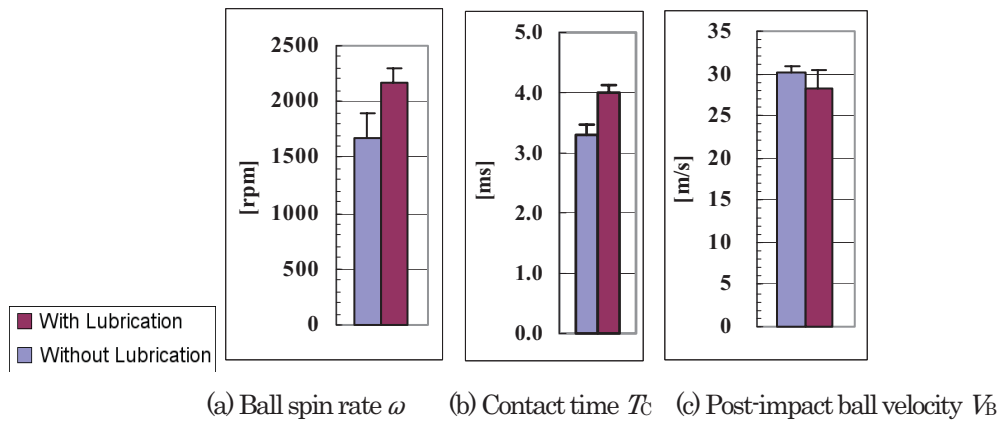


Fig.7 Effect of string intersections lubrication on the ball spin performance (Average and standard error).

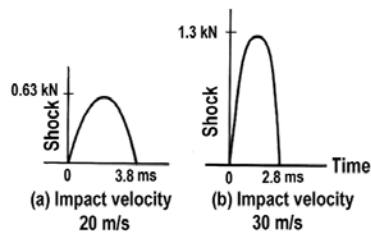


Fig.8 Calculated shock shapes when a ball strikes the center on the string face of the racket at a velocity of (a) 20 m/s and (b) 30 m/s, respectively.

の衝突位置はラケット面先端側 (図9 の打点B) である。図10と図11の (a) は、衝突速度 30 m/s でフラットに正面衝突する場合であり、図(b), (c)では、画像解析から算出した接触時間と力積 $\int f(t) dt = F_{\text{MEAN}} \cdot T_C = 2F_{\text{MAX}} \cdot T_C / \pi = m_B (V_B - V_{B_0})$ の値を与えた。図(b), (c) の力積はそれぞれ図 (a) の0.85倍, 0.65倍である。

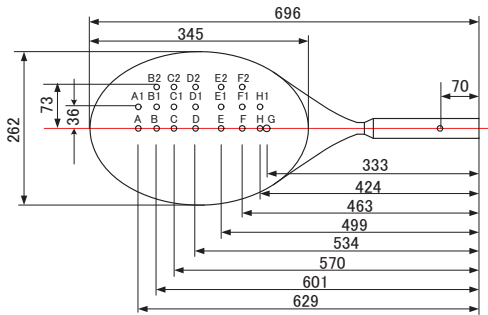
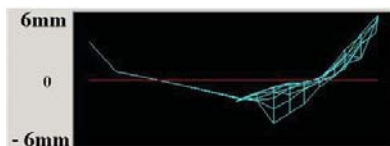
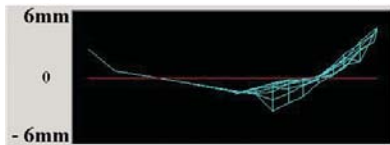


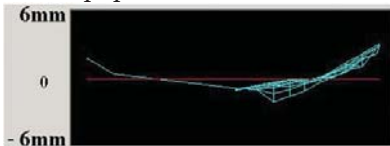
Fig.9 Geometry of Racket MP-1.



(a) Contact time $T_C = 2.6$ ms (Flat drive without lubrication)

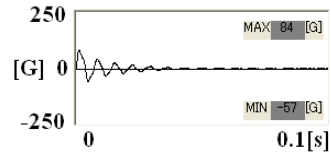


(b) Contact time $T_C = 3.4$ ms (Top spin without lubrication)

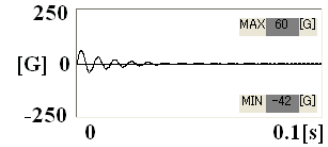


(c) Contact time $T_C = 4.1$ ms (Top spin with lubrication)

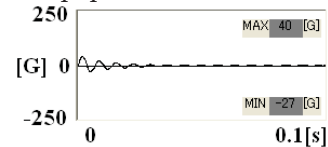
Fig.10 Calculated effect of contact time on the racket vibration. Impact velocity: 30 m/s, hitting location: top side 95 mm from the tip of racket (B in Fig.9).



(a) Contact time $T_C = 2.6$ ms (Flat drive without lubrication)



(b) Contact time $T_C = 3.4$ ms (Top spin without lubrication)



(c) Contact time $T_C = 4.1$ ms (Top spin with lubrication)

Fig.11 Calculated effect of contact time on the wrist joint shock vibrations. Impact velocity: 30 m/s, hitting location: top side 95 mm from the tip of racket (B in Fig.9).

縦糸が横にずれてストリング面に平行な復原力によりスピンの量が増大し、接触時間が長くなると、フレーム振動が低減し、ボールとストリングスのたわみも減少してボールに接触した部分だけが窪んでいるように見える。これらが、「ボールをくわえる感覚が高まる」「ホールド感が増す」「打球感がマイルドになる」などのテスターの打球感に対応すると考えられる。

5. ストリング交差点潤滑とスパゲッティ・ストリングのスピンの増大の類似性

スパゲッティ・ラケットを使って、ランキング200位の選手が4位の選手を破ったり、全米・全仏・全豪で優勝したビラス選手がスパゲッティを使っていたナスターゼ選手との決勝で途中棄権したことから論争が起こり、スパゲッティ・ラケットの使用が禁止された。縦糸と横糸が交互に織られていないラケットはルール違反である⁽³⁾。図12(a),(b)がスパゲッティ・ラケットの例であり、グロメット(ストリングスを通す)穴に2本ずつ縦糸各16本を通して、さらにそれぞれをプラスチックの中空ローラーを通して太い横糸(5本)を両面からはさむ形(3面)に張られている。ラケット・ヘッドを固定してボールをストリング面に斜め衝突させてスピンの測定を行った Goodwill, S & Haake, S. の結果が図12(c)であり、通常ストリングに比べてスピンの量が約2倍に増す。ローラーがベアリングの

ように動いて縦糸が横糸面上で滑りやすくなる。横軸のマイナスはバックスピンを意味する⁽⁶⁾。また、天然ガットとシンセティックそれぞれ 40 lbs と 70 lbs の計 4 種類のストリングスはバラツキが大きく、スピン量の差はほとんど無い⁽⁷⁾。スピン量増大は縦糸と横糸が滑りやすいことが原因ということになる。

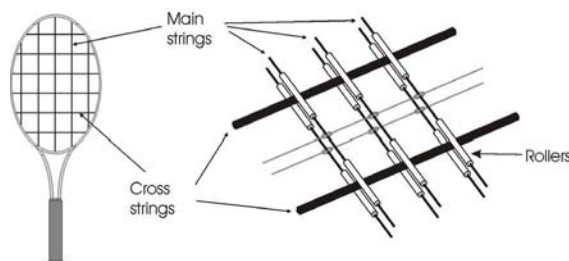
6. ストリング・テンションとスピンについての考察

図13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 , K_B , K_{GB} であり、ボールおよびボール・ストリングス複合系の復原力・変形特性の測定値から導いた結果である。ばね剛性 K_G は一般に面圧と呼ばれる。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硬化ばね特性を示し、ボール・とストリングスの衝突モデルは図14のように表せる⁽⁸⁾・⁽¹²⁾。図15に示すように、ストリングを張るときのテンションの高低は、同一のストリングスをあらかじめ強めに張るか弱めに張るかという初張力の違いであり、衝突速度 20 m/s 以上の現実的なインパクトでは、ボールとストリングスの間に作用する衝突力も接触時間もほとんど変わらない⁽²⁾・⁽³⁾。したがって、テンション（初張力）の違いが大きくても縦糸と横糸の摩擦力には大きな違いは無いから、スピンにも大きな違いは無いことになる。

7. スピン・ガット原論：ストリングの摩擦が小さいほどスピンがかかる

ポリエステル・ガットは、硬くて他のファイバーと接着が難しいためにモノフィラメントしかできず、耐久性はあるが張りにくくて弾力がなくて衝撃が大きいと言われ、長い間市場に出回ることはなかった。しかし、切れにくいという経済的な理由からヨーロッパのジュニア選手がアンツーカーのコートで使い始め、トップ・プロになっても使い続けたことや強打しても飛び過ぎないというイメージもあって人気が出始め、ポリエステルを使用した選手の活躍もあって最近主流になった。鋭いスピンの打球で知られている世界のトップ・ナダル選手が使用しているのは、スピン・ガットではなく、ポリエステルである。

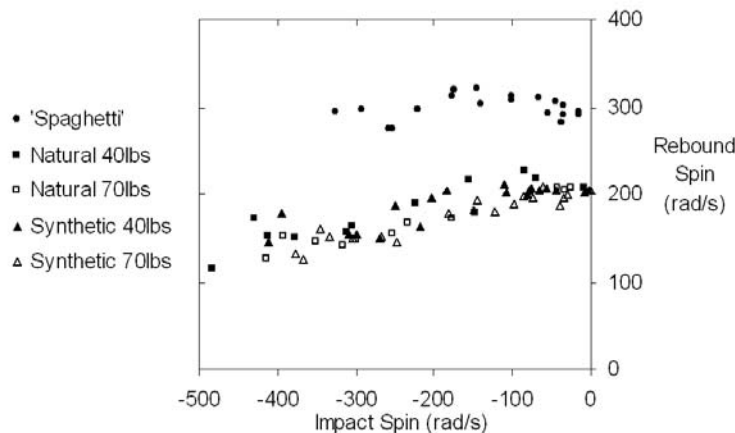
ストリングス・潤滑ラケットやスパゲッティ・ラケットのスピン増大の理由は縦糸がすべりやすいことである。したがって、従来の常識とは逆に、表面に凹凸をつけた摩擦の大きいナイロン系のスピン・ガットよりも、表面が滑らかで硬いポリエステル・ガットの方がスピン性能に優れている可能性がある。硬質感があったとしてもスピンを生かせば、ボールの飛びが抑えられ、コントロール性に優れ、実際に手に伝わる衝撃振動は少ないことになる。ポリエステル系が主流になってきたということは、従来のスピン・ガット設計



(a) Illustration of a 'Spaghetti' strung racket.



(b) Picture of a 'Spaghetti' strung racket.



(c)

Fig.12 Comparison of the spin generated by rackets conventionally strung using natural gut and synthetic gut, and those strung using 'Spaghetti' stringing system (reprinted by permission of Goodwill, S. & Haake, S. ⁽⁷⁾).

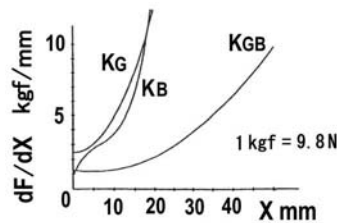


Fig.13 Stiffness vs. deformation of a ball, strings, and a composed ball/string system assuming that a ball deforms only at the side in contact with the strings⁽¹⁾⁽²⁾.

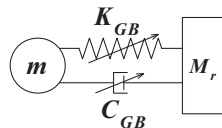


Fig.14 Impact model of a ball-strings system.

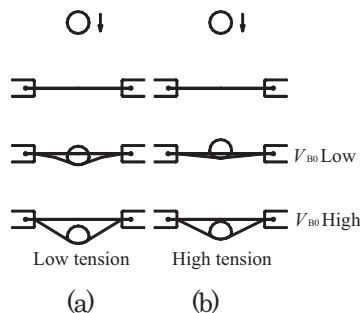


Fig.15 Stiffness of the string bed vs. impact velocity relative to the string tension as a parameter.

概念が大転換する可能性がある。高速ビデオ画像解析により各種ストリングスのスピン性能を明らかにするのが今後の課題である。

8. 結論

- (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ことを明らかにした。
- (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ことを見出した。
- (3) スピン量が増すと接触時間も長くなる。
- (4) 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を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示した。
- (5) プラスティ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。

(6) 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を指摘した。

世界のテニスがポリエステル主流になってきたということは、従来のスピン・ガット設計概念が大転換する可能性がある。本研究から得られた知見がラケット・ストリングの設計やプレーヤーの用具選びと使い方に役立つことを期待したい。

おわりに、図 12 の掲載を快諾いただいた Dr. Haake, S. と Dr. Goodwill, S および International Sports Engineering Association に厚くお礼申し上げる。(株) ナック・平岡憲義、浜口正之・田口春樹・山本昌樹の諸氏のご協力を得た。また、日本テニス学会・友末亮三(安田女大)、ヨネックス・米山修一、テニスジャーナル・松尾高司、テスター・谷口勇美雄、日本プロストリンガー協会・榊木徹の諸氏および広島県産業振興会のご助力に深謝する。なお本研究の一部は平成 16 年度科学研究費基盤研究(C)の援助によって行われたことを付記する。

文 献

- (1) Lindsey, C., *Racquet Tech*, the United States Racquet Stringers Association), October 2003, p.2.
- (2) Kawazoe, Y., *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.43, (1994), pp.223-232.
- (3) Kawazoe, Y., Tanahashi, R. and Casolo, F., *Tennis Science & Technology* 2, pp.61-69. (2003). ITF.
- (4) Cross, R., *Sport Engineering*, (2003) 6, 235-254.
- (5) Goodwill, S & Haake, S., *The engineering of Sport* 5, Vol.2, pp.3-9. International Sports Engineering Association (ISEA) (2004)
- (6) ITF, <http://www.itftennis.com/technical/equipment/strings>
- (7) Goodwill, S & Haake, S., *The engineering of Sport* 4, pp.231-237. Blackwell Science, (2002) Oxford.
- (8) Kawazoe, Y., *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.41 (1992), pp.3-13.
- (9) Kawazoe, Y., *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.42, (1993), pp.197-208.
- (10) Kawazoe, Y., *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.51, (2002), pp.177-187.
- (11) Kawazoe, Y., *The engineering of Sport* 5, Vol.2, pp.633-640. ISEA, (2004)
- (12) Kawazoe, Y., *Theoretical and Applied Mechanics*, 46, 165-176. (1997).
- (13) Kawazoe, Y., *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.49, (2000), pp.11-19.
- (14) Kawazoe, Y., Tomosue, R., Yoshinari, K. and Casolo, F., *Tennis Science & Technology* 2, 105-112. (2003). International Tennis Federation (ITF).
- (15) Kawazoe, Y., Casolo, F., Tomosue, R. & Yoshinari, K., *The engineering of Sport* 5, 1, 393-399. (2004), International Sports Engineering Association (ISEA)