

テニスにおけるストリング潤滑ラケットと スパゲッティ・ストリング・ラケットのスピンの性能に関する類似性

Similarity in Tennis Spin Performance between a Lubricant String Racket and a Spaghetti String Racket

○正 川副嘉彦(埼玉工大) 赤石武章(埼玉工大)
沖本賢次(サンアイ)

Yoshihiko KAWAZOE, *Saitama Institute of Technology*, Fusaiji 1690, Okabe-machi, Saitama
Takeaki AKAISHI, *Saitama Institute of Technology*
Kenji OKIMOTO, *Sanai Co., Ltd*

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. The previous paper made clear the mechanism of top spin and its improvement by lubrication of strings according to the high speed video analysis. This paper 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. 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, Impact, Tennis, Ball Spin, Strings, Lubrication, High Speed Video Analysis, Contact Time, Shock Vibrations, Wrist Joint, Feel, Spaghetti String Racket, Lubricant String Racket.

1. 研究の背景と目的

テニスはコート内にボールをコントロールするスポーツであり、コントロールにはボールにスピン(回転)を与えることが重要である。また、スピンのかかりやすさ、打球速度はやや遅くなるが、バウンドしてから鋭く弾んでボールが伸びてくる。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さ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における実験では摩擦特性とスピン性能、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)の間にはバラツキが大きくて明確な関係は見られず、打球感との関連も不明であった。プレーヤーは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打法が一般的になったこともあり、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必要とされていた。しかし、プレーヤー(テスター)のスイングとインパクトの瞬間のラケットの位置、およびラケット面上のボールの位置などの再現性的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なかった⁽¹⁾。プレーヤーが打撃したときのボールのトップスピン挙動を高速ビデオ画像解析に基づいて著者らは前報^{(1),(2)}で初めて明らかにした。すなわち、ストリングスの縦糸と横糸の交差点に潤滑剤を塗ると(沖本が世界特許出願)、通常のストリングスの場合に比べて、ストリング面上で縦糸が横に著しくずれやすくなり、結果としてボールの回転角速度が著しく増すことから、摩擦が大きいほどスピンのかかりやすさという従来のスピンの仮説とは異なり、縦糸と横糸がお互いにすべりやすさほど回転がかりやすくなることを示した。

一方、スパゲッティ・ラケットと呼ばれたラケットを使って、ランキング200位の選手が4位のシード選手を破ったり、全米・全仏・全豪で優勝したピ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トーナメント決勝でバウンドが予測しにくいという理由で途中棄権したことからスパゲッティ論争が起り、1978年にITFはその使用を禁止したという歴史がある⁽³⁾。プラスチックの中空ローラーを通した2セットのメイン(縦糸)がクロス(横

糸)を両面からはさむ形の3面をもつスパゲッティ・ラケットのヘッドを固定してボールを斜め衝突させて S. Goodwill, S & Haake, S.⁽⁴⁾ は、スピンの測定を行い、縦糸が横糸面上で滑りやすく、約2倍のスピンの量があるという結果を示した。

また、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、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、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により、飛び過ぎないというイメージもあって上級パワープレーヤーにも人気が出始め、ポリエステルを使用した選手の活躍で最近一気にメジャーになったようである。

本報では、ストリング交差点潤滑ラケットとスパゲッティ・ラケット^{(3),(4)}とのスピン性能の類似性に着目して、スピンの高速ビデオ画像解析結果を考察し、さらにポリエステルが主流になった理由を物理現象としての視点から考察し、ストリングスの縦糸と横糸がすべりやすさほど、ボールがストリングスに食い込み、ずれた縦糸が元にもどるときの復原力でボールに回転がかりやすくなり、スピンの量が増し、ボールの飛びが抑えられ、結果としてコントロール性が増すこと、したがって、従来の常識とは異なり、表面がギザギザの市販のスピンのガットよりも表面がツルツルの硬いポリエステル・ガットの方が縦糸のずれによるストリング面に平行の復原力によりスピンの量が増し、手に伝わる衝撃振動も大きくはなくて実際はむしろ小さい可能性があることを示す。

2. ストリング交差点を潤滑したラケットの トップ・スピン挙動とスピン・トルクの発生

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カメラによる例であり、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がほとんどないことは、この間のラケットによるスピン操作は不可能であることを示している⁽¹⁾。

図2は、インパクト後のスピン角速度と直線速度を解析するために毎秒10,000コマで真横から撮影した高速ビデオカメラによる例であり、スイングにおけるラケットヘッドのおおよその軌道がわかる。スピンのかかるほど、接触時間が長くなって打球が遅くなる。この場合は、プロストリンガーに依頼してナイロン製ストリングス(ヨネックス850)を50 lbsで張ったラケットを3hrs/dayで1週間使用後にストリングスの交差点に潤滑剤を塗ってテスターによりトップスピンで打撃したときのボール挙動であり、ボールの回転速度は2460 rpm、接触時間はおおよそ4.2 ms、打球速度は24.2 m/sである。潤滑剤を塗る前に比べてスピン量が著しく増している⁽¹⁾。

図3は、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を算出するために毎秒10,000コマで真後から撮影した画像の代表的なフレームである⁽¹⁾。図2と同様に、潤滑剤を塗ったラケットを用いてトップスピンで打撃したときの挙動を示す。図3(a)はボールとストリングスが接触した直後であり、図3(b)：接触後1.7 msに示すように、ストリングの縦糸と横糸の交差点に潤滑剤がしみこんで、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3(c)：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)は長くなる⁽¹⁾。潤滑剤を塗らない通常のストリングスの場合は、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⁽¹⁾。

ストリングスの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、ずれた縦糸のストリングス面内の復原力(図3(b)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。

図4は、ストリングス交差点潤滑の最も効果があった場

合(図2および図3)の(a)ストリングを離れた直後のボールの回転速度(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例であり、図5は、3回の試行の平均値と標準偏差であり、標準偏差は標準偏差を \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ストリングスの場合のスピン量は30%増し、接触時間は16%長くなり、打球速度は6%低減する⁽¹⁾。

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 $I_B = (2/3)R_B^2 m_B$ である。テニスボール直径 $D = 2R_B \approx 6.7$ cm (規格2.5 inches ~ 2(5/8) inches, 6.54 cm ~ 6.86 cm)、質量 $m_B \approx 57.7$ g (規格56.0 g ~ 59.4 g) のように数値を与えると、テニスボールのスピン慣性モーメント $I_B = 431.7$ cm²g となる。

ストリング交差点・潤滑(Trial 205)の打球速度 $V_B = 24.2$ m/s、回転速度 $\omega = 2460$ rpm $= 41.0$ s⁻¹ $= 257.5$ rad/s を与えると以下のようになる。ボールにかかる回転トルクを τ (平均トルクを τ_{MEAN}) とすると、投げられたボールの速度は遅いので $\omega_0 \approx 0$ とし、ボールにスピンを与える接線力を $F_{T,MEAN}$ とすると、角力積は $\int \tau dt = \tau_{MEAN} \cdot T_C = F_{T,MEAN} R_B \cdot T_C = I_B (\omega - \omega_0) = 0.11116$ N·cm·s。したがって、 $F_{T,MEAN} = \int \tau dt / (R_B T_C) = 7.9$ N となる。通常のストリングス(Trial 103)では、角力積は $\int \tau dt = 0.05340$ N·cm·s。したがって、ボールのストリングス面方向接線力は $F_{T,MEAN} = 5.3$ 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方向だから容易に回転がかかる。

4. スピン増による打球感向上のメカニズム

図6は、ラケットのストリング面の中心にボールが衝突したときの力積波形の予測例であり、正弦半波で近似している。衝突速度が増すと接触時間が短くなり、衝突力は急激に大きくなる。

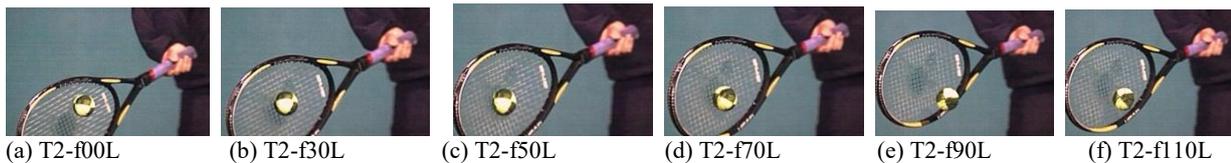


Fig.1 Oblique view of topspin impact of a tester in this experiment

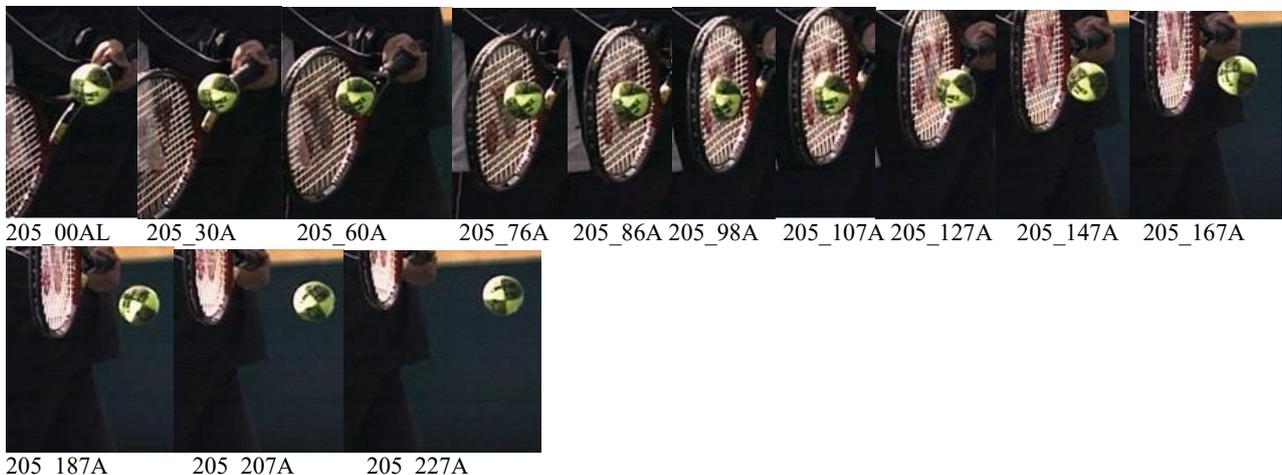


Fig.2 Side angle view of topspin impact of a tester in this experiment, where 205: Trial No. and number with A means a frame per 10⁻⁴ s. Pre-impact: 00AL~76A, contact: 86A~107A, post-impact: 127A~

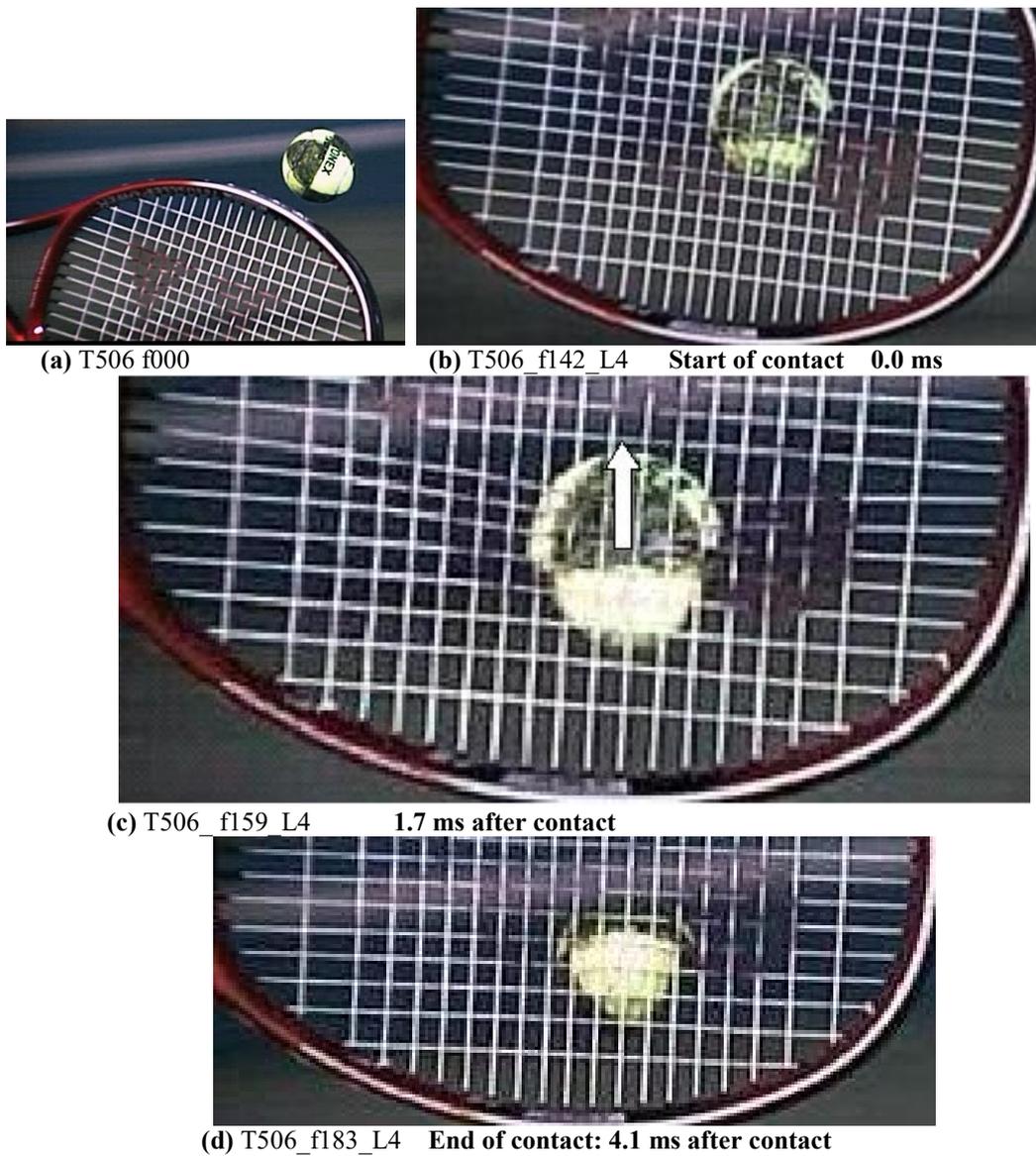


Fig.3 Ball spin behavior and mechanism of spin rate increase by lubrication of string intersections. Main strings stretch and slide side ways and spring back when the ball is released from the strings. (Impact views from back side direction).

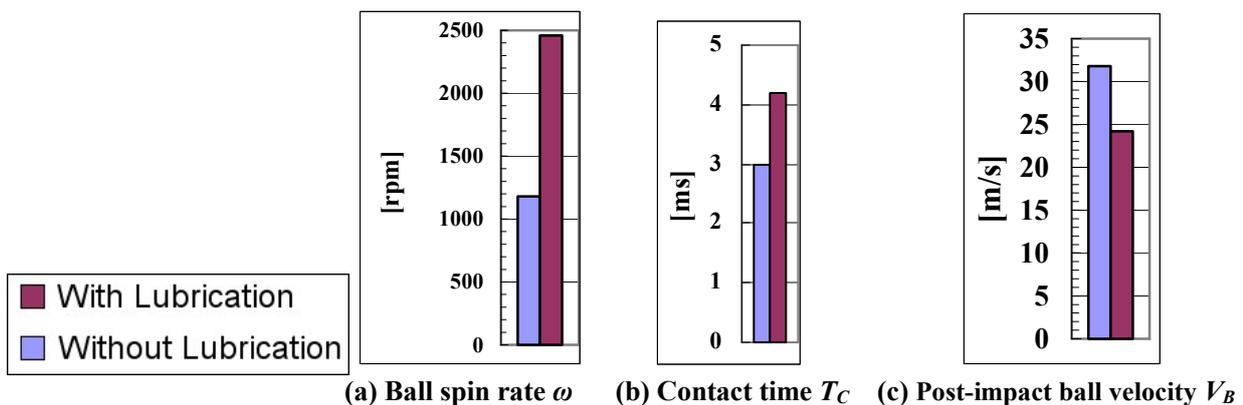


Fig.4 Typical Example of Effect of strings intersections lubrication on the ball spin rate and contact time.

力積波形を式(1)のように表すと、そのフーリエ・スペクトルは式(2)のようになる。

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

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

ラケット面上の点 j での衝突によるラケット上の点における k 次モードの応答振幅成分(固有振動数 f_k) X_{ijk} は、

以下のように近似できる。

$$X_{ijk} = r_{ijk} S_j(2\pi f_k) \quad (3)$$

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⁽⁵⁾⁻⁽¹³⁾。

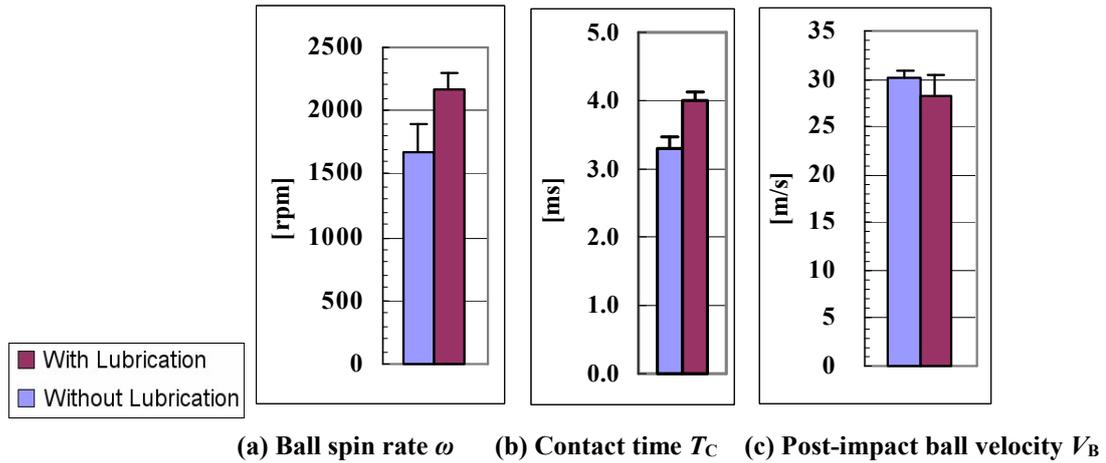


Fig.5 Effect of string intersections lubrication on the ball spin performance (Average and standard error).

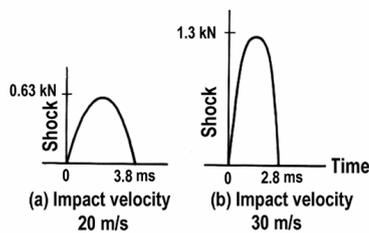


Fig.6 Calculated shock shapes when a ball strikes the center on the string face of the racket at a velocity of (a) 20 m/s and (b) 30 m/s, respectively.

図7は使用したラケットの形状である。図8は、ラケット振動振幅（基本振動）におよぼすストリング交差点潤滑の影響を予測した結果である⁽⁵⁾⁻⁽¹³⁾。図9は手首関節の衝撃振動波形の予測結果であり、ボールとの衝突位置はラケット面先端側（図7の打点B）である。図8と図9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、(b)(c)では、画像解析から算出した接触時間と力積 $\int f(t)dt = F_{MEAN} \cdot T_c = \pi F_{MEAN}/2 = m_B (V_B - V_{B_0})$ の値を与えた。(b)(c)の力積はそれぞれ(a)の 0.85倍、0.65倍である。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」などの感覚的打球感の理由である。

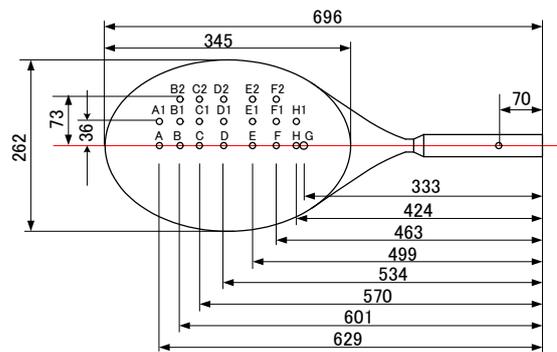


Fig.7 Geometry of Racket MP-1.

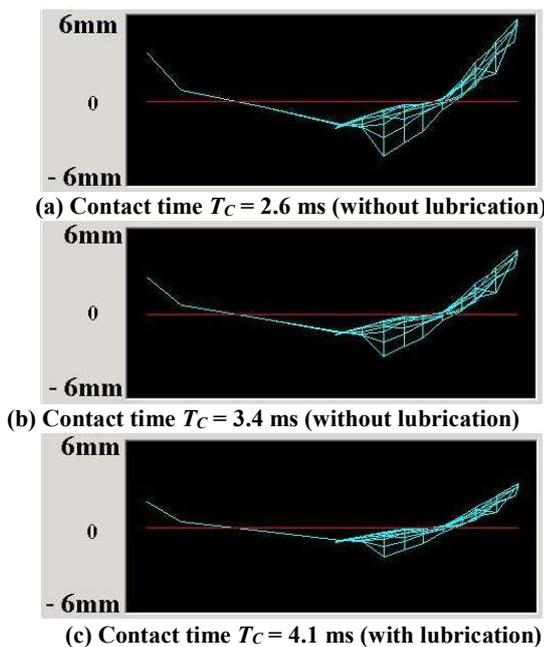


Fig.8 Effect of contact time on the racket vibration. Impact velocity: 30 m/s, hitting: Top (B), Racket: MP-1.

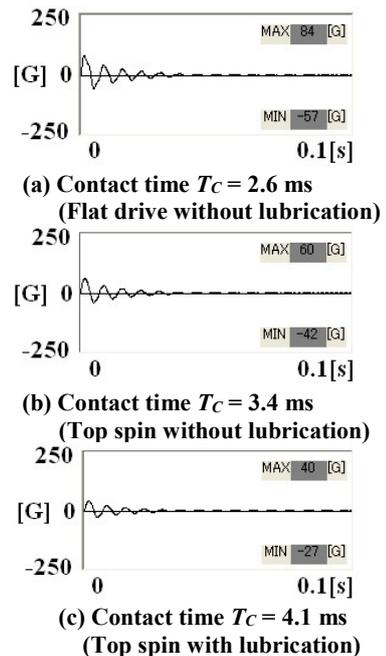
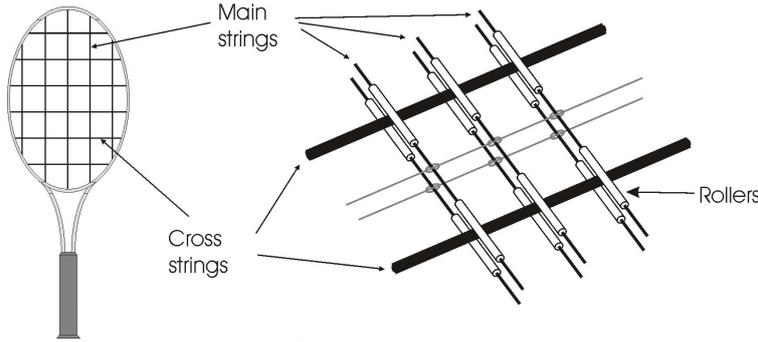


Fig.9 Effect of contact time on the wrist joint shock vibrations. Impact velocity: 30 m/s, hitting: Top (B), Racket: MP-1)

5. スtring交差点潤滑とスパゲッティ・StringのSpin増大の類似性

スパゲッティ・ラケットと呼ばれたラケットを使って、ランキング200位の選手が4位のシード選手を破ったり、全米・全仏・全豪で優勝したピ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トーナメント決勝で途中棄権したことからスパゲッティ論争が起こり、1978年にITFはその使用を禁止した。縦糸と横糸が織られていないので、ルールに違反する(3)。図10(a),(b)がスパゲッティ・ラケットの例であり、グロメット穴に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)に張っ

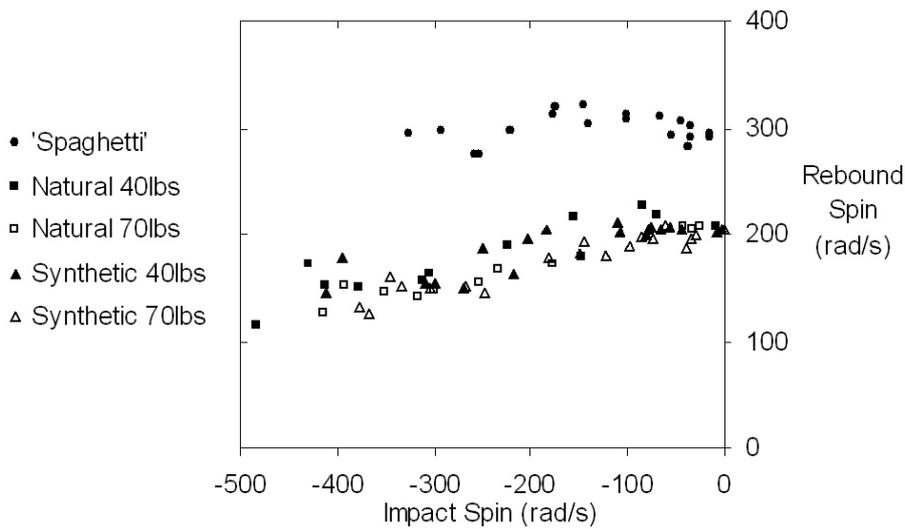
ている。ラケット・ヘッドを固定して、ボールをString面に斜め衝突させて、Goodwill, S & Haake, S. はSpinの測定を行った。その結果が図10(c)であり、通常のStringに比べてSpin量が約2倍に増すことを示している。ローラーがベアリングのように動いて縦糸が横糸面上で滑りやすくなる。ただし、バックSpinである(3),(4)。また、図10(c)は、シンセティック 40 lbs と 70 lbs および天然ガット 40 lbs と 70 lbs の計4種類のStringのSpin量はバラツキが大きく、差はほとんど無いことを示している(4)。したがって、Spin増大は縦糸と横糸が滑りやすいことが原因ということになる。



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



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



(c)

Fig.10 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.).

6. String・テンションとSpinについての考察

図11は、たわみ量 X に対するString, ボール, ボール・String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・String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ている。インパクトによる変形によって発生する張力 S と復原力 F は変形の増大とともに急激に大きくなり、初張力 S_0 よりも変形量 X の影響の方が大きくなる。したがって、実用範囲ではボールもStringも変形量の増大とともに強い硬化ばね特性を示し、ボール・とStringの衝突モデルは図12のように表せる。

図13に示すように、Stringを張るときのテンションの高低は、同一のStringをあらかじめ強めに張るか弱めに張るかの違いであり、強めに張ったStringは

すでに伸びが大きい状態だからインパクトでは伸びがやや少なく、緩く張ったStringは伸びが少ない状態だからインパクトでは伸びがやや大きいという違いであり、衝突速度 20m/s 以上では、ボールとStringの間に

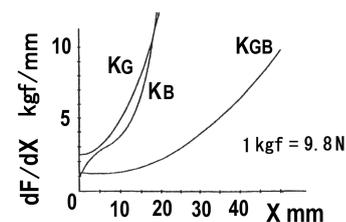


Fig.11 Stiffness vs. deformation of a ball, strings, and a composed ball/string system assuming that a ball deforms only at the side in contact with the strings⁽¹⁾⁽²⁾.

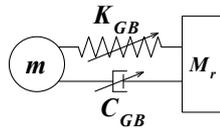


Fig.12 Impact model of a ball-strings system.

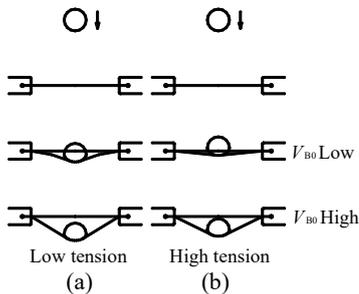


Fig.13 Stiffness of the string bed vs. impact velocity relative to the string tension as a parameter.

作用する衝突力も接触時間も大きくは変わらない^{(2),(7),(10)}. 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：摩擦が少ないほどスピンのかかる（ポリエステル・ガットとスピン性能）

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にはなかった。しかし、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により、飛び過ぎないというイメージもあって上級パワープレーヤーにも人気が出始め、ポリエステルを使用した選手の活躍などもあって一気にメジャーになった。ナダル選手の打球は鋭いスピンで知られているが、彼が使用しているストリングスは、市販スピン・ガットではなく、ポリエステルである。

ポリエステルが主流になった理由を物理現象としての視点から考察すると以下のようになる。

ストリングスをオイル潤滑すると、スピンをかけたときに縦糸がずれてもどりがやすく、縦糸が戻るとききの復原力がストリングに食い込んだボールにスピンを与えること、また、スピンのかかりすぎるという理由で過去にITFにより禁止された「メインとクロスを織らないスパゲッティ・ラケット」も縦糸がすべることがスピン増の理由であることをすでに述べた。したがって、従来から摩擦の大きいストリングスの方がスピンのかかりやすくなると言われていたが、実際は摩擦が少ないほどスピンがかかるということになる。

表面がツルツルで硬いポリエステル・ガットは、耐久性に優れているだけではなく、従来の常識とは異なり、表面がギザギザの市販スピン・ガット（ナイロン系）よりもスピン性能に優れていることが十分予想できる。スピン性能が増せば、ボールの飛びが抑えられ、コントロール性に優れ、インパクトでの硬質感があったとしても実際に手に伝わる衝撃振動は少ないことになる。

摩擦が少ないほどスピンがかかるということは、従来のスピン・ガット概念が180度変わることを意味する。

8. 結論

ストリング交差点潤滑ラケットとスパゲッティ・ラケットとのスピン性能の類似性に着目し、ストリング・テンションとスピンの関係についても考察し、さらにポリエステルが主流になった理由を物理現象としての視点から考察

した結果、ストリングスの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、ずれた縦糸が元にもどるときの復原力でボールに回転がかかりやすくなり、スピン量が増し、ボールの飛びが抑えられること、したがって、摩擦が大きいほどスピンがかかるという従来の常識とは異なり、表面がギザギザの市販のスピン・ガットよりも表面がツルツルの硬いポリエステル・ガットの方がスピン量が増し、手に伝わる衝撃振動も大きくはなくて実際はむしろ小さい可能性があることを示した。

おわりに、図10の掲載を快諾していただいた Dr. Haake, S. と Dr. Goodwill, S. に厚くお礼申し上げる。インパクト画像解析用高速ビデオカメラは、(株) ナック製 EMRECAM fx6000 を使用し、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、友末亮三(安田女子大)、米山修一(ヨネックス)、松尾高司(KAI Project)、谷口勇美雄(BTL)、橋木徹(フォレストヒルズ)、広島県産業振興会・ベンチャー企業支援のご助力に深謝する。

文献

- (1) 川副嘉彦・沖本賢次・沖本啓子, ストリング・クロス部潤滑によるテニスのトップスピン性能向上の超高速ビデオ解析, Dynamics and design Conference 2004, CD-ROM論文集 No.04-5, 716, (2004.9). pp.1-6.
- (2) 川副嘉彦・沖本賢次・沖本啓子, テニスラケットのトップスピン性能と性能改善のメカニズム, ジョイントシンポジウム(スポーツ工学& ヒューマン・ダイナミクス)講論集, No.04-26, pp.60 - 65. (2004).
- (3) ITF, <http://www.itftennis.com/technical/equipment/strings>
- (4) Goodwill, S & Haake, S., Why were 'spaghetti string' rackets banned in the game of tennis?, *The engineering of Sport 4* (Edited by Ujihashi & Haake), pp.231-237. Blackwell Science, (2002)
- (5) KAWAZOE, Y., Impact phenomena between racket and ball during tennis stroke, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.41 (1992), pp.3-13.
- (6) KAWAZOE, Y., Coefficient of restitution between a ball and a tennis racket, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.42, (1993), pp.197-208.
- (7) 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.
- (8) KAWAZOE, Y., Mechanism of Tennis Racket Performance in terms of Feel", *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.49, (2000), pp.11-19.
- (9) KAWAZOE, Y., Mechanism of High-Tech Tennis Rackets Performance, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.51, (2002), pp.177-187.
- (10) 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.
- (11) 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), pp.105-112. (2003). London: International Tennis Federation.
- (12) 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* (Edited by M. Hubbard), Vol.1, pp.393-399. ISEA, (2004)
- (13) Y. Kawazoe, Computer aided performance prediction and estimation system for a tennis racket in terms of power and stability. *The engineering of Sport 5* (Edited by M. Hubbard), Vol.2, pp.633-640. ISEA, (2004)