

Mechanism of Tennis Top Spin Improvement by Lubrication of String Intersections

正 川副嘉彦(埼玉工大) 沖本賢次 沖本啓子(サンアイ)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusaiji 1690, Okabe-machi, Saitama

Kenji OKIMOTO, Sanai

Keiko OKIMOTO, Sanai

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 study made clear the mechanism of top spin and its improvement by lubrication of strings according to the previous paper with high speed video analysis of the authors. As the main strings stretch and slide side ways more, the ball is given more spin when the main strings spring back and the ball is released from the strings. This paper provided the detailed explanations that the more spin produce longer contact time between ball and strings, resulting in the reduction of shock vibrations of the wrist joint during impact. This paper.

Key words: Sport Engineering, Impact, Tennis, Ball Spin, Strings, Lubrication, High Speed Video Analysis, Contact Time.

1. はじめに

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イヤーが経験的に認めている。テニスのようにコート内にボールをコントロールするスポーツでは、ボールにスピン(回転)を与えることが重要であり、また、スピがかかると、ボールの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。しかし、従来の研究は正面衝突に関する研究がほとんどであり、テニスラケットのスピン性能のメカニズムは謎であった。すなわち、ストリングスの食いつきのよさという感覚的性能評価がスピンと関係があるかどうかについては不明であった。テニスの場合、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がかかりやすいという仮説が立てられることが多い。しかし、実験室における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)の間には明確な関係は見られず、打球感との関連も不明であった。実験室ではストリングスの違いによるスピンの差が出ないのに、プレイ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、プレイヤーが打撃したときのボールのスピン挙動の測定が必要とされていた。しかし、スピン挙動の測定において、プレイヤー(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なかった。

我々は、ラケット性能評価のテスターとして経験の豊かなテスターを得て、プレイ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前報⁽¹⁾で初めて明らかにした。すなわち、従来の摩擦説とは異なり、縦糸と横糸がお互いにすべって、縦糸が長さ方向と直角の方向に伸びて交差点がずれること、さらに、ストリングスに潤滑剤を塗ると(沖本が世界特許出願)、ストリングス表面はすぐに剥がれるがストリングス・クロス部に潤滑剤がしみこんで縦糸の直角方向へのずれが大きくなって、結果として回転がかかりやすくなり(ボールの回転角速度が増す)、接触時間も長くなることを示した。

本論文では、スピンの高速ビデオ画像解析結果を理論的に考察し、ラケットの振動、手首関節の衝撃振動などの打球感におよぼすスピン性能の影響を調べる。また、ストリングスを緩く張った場合(低いテンション)の衝突挙動を

吟味し、ストリングス・クロス部を潤滑した場合とストリングスを緩く張った場合の衝突挙動は本質的に異なることを示す。

2. トップスピン挙動とトップスピン性能向上の超高速ビデオ解析結果の概要

図1はテスターのトップスピン打法を示す。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、スピがかかると、打球が遅くなって、接触時間が長くなる)、図1(e)(f)はボールがストリングス面から離れた後のラケット面の角度を示す。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い。したがって、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⁾。

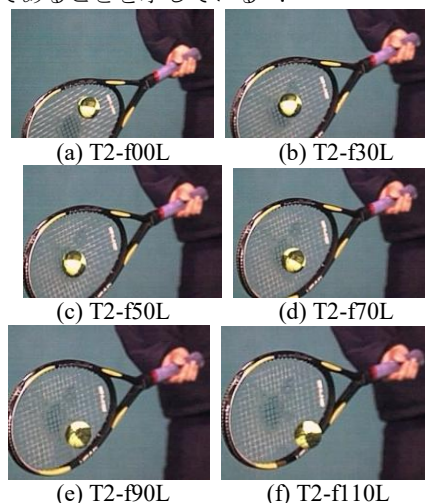


Fig.1 Topspin impact of a tester in this experiment.

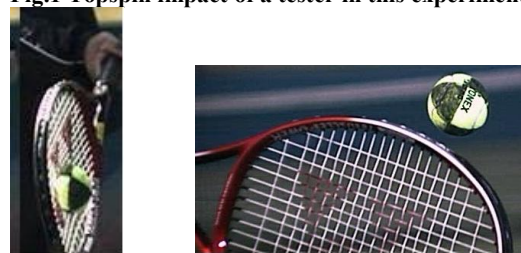


Fig.2 High speed video for impact topspin analysis.

図2は、スピン挙動を解析するための高速ビデオカメラによる撮影例である。図2(a)は真横からの撮影であり、おもにボールがストリングスから離れた直後のボール・スピン（回転）速度とボール速度の解析に用いる。接触時間の算出値は参考値とする。図2(b)は真後からの撮影であり、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⁽¹⁾。

図3は、真後ろから1万コマ/秒で撮影した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

ガーに依頼して 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に大きな違いはない。潤滑剤を塗ると（図3(b)）クロス部にしみこんで、縦糸が直角方向へ大きくずれ（接触後 1.7 ms）、ボールが離れるときには元に戻っている。通常塗らない場合（図3(a)）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。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3(a)では 3.4 ms、図3(b)では 4.1 ms であり、潤滑剤を塗ると接触時間がかなり長くなる⁽¹⁾。

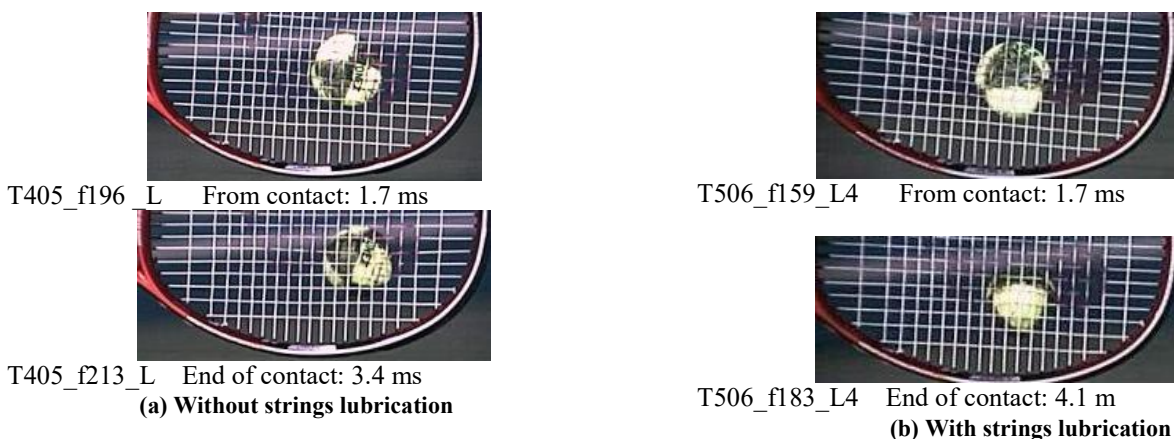


Fig.3 Effect of strings lubrication on the ball spin behaviors (Impact views from back side direction)

図4は、真横から1万コマ/秒で撮影した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、ボールがストリングスに接触してから離れるまでのボールの回転の様子を示す。図4(a)におけるボールの回転速度は 1180 rpm、図4(b)は 2460 rpm である。接触時間と打球速度は、図4(a)ではおおよそ 3.0 ms、31.8 m/s、図4(b)ではおおよそ 4.2 ms、24.2 m/s である。潤滑剤を塗るとスピニング量が著しく増す。縦のストリングが横にずれるまではほとんど回転はなく、ずれると回転を始めるようである⁽¹⁾。

図5は、3回の試行の平均値と標準偏差であり、(a)ストリングを離れた直後のボールの回転速度、(b)ボールとストリングスの接触時間、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である。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ニング量はかなり増している。接触時間も長くなり、打球速度は少し低減する⁽¹⁾。

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 $I_B = (2/3)R_B^2 m_B$ であり、ボールの並進運動とスピンの運動エネルギーはそれぞれ、 $m_B V_B^2/2$ 、 $I_B \omega^2/2$ となる。テニスボール直径 $D \approx 6.7$ cm (規格 2.5 inches $\sim 2(5/8)$ inches, 6.54 cm $\sim$ 6.86 cm)、テニスボール半径 $R_B \approx 3.35$ cm、質量 $m_B \approx 57.7$ g (規格 56.0 g $\sim$ 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 $I_B = (2/3)R_B^2 m_B = 431.7$ cm²g となる。通常 (Trial 103) の打球速度 $V_B = 31.8$ m/s、回転速度 $\omega = 1180$ rpm $= 19.7$ s⁻¹ $= 123.7$ rad/s、クロス部・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 を与えると以下ようになる。

通常のストリングスの場合は、並進運動エネルギー $m_B V_B^2/2 = 29.17$ Nm、スピン運動エネルギー $I_B \omega^2/2 = 0.330$ Nm、潤滑したストリングスの場合は、並進運動エネルギー $m_B V_B^2/2 = 16.90$ Nm、スピン運動エネルギー $I_B \omega^2/2 = 1.431$

Nm である。潤滑した場合のスピンのエネルギーは全体の 8 % である。

打撃のスイングがフラット打法（ボールを前に押し出すようなスイング）の場合は、通常 (Trial 101) のストリングスでは打球速度 $V_B = 37.4$ m/s、回転速度 $\omega = 60$ rpm、クロス部・潤滑 (Trial 201) では $V_B = 33.7$ m/s、 $\omega = 318$ rpm であった。フラット打法では回転は少ないが、トップスピン打法の場合と同様のストリング・クロス部潤滑の効果が見られる。

3. ラケットのスピン性能と性能向上のメカニズム

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。図7は、ボールがストリング面の中心および中心を外れた位置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。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。

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

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

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⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。図8は、 $f = 146$ Hz の場合の $S(f)$ と力積の比 $S(f) / 2F_{\max} T_c$ と接触時間 T_c の関係を示し、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。

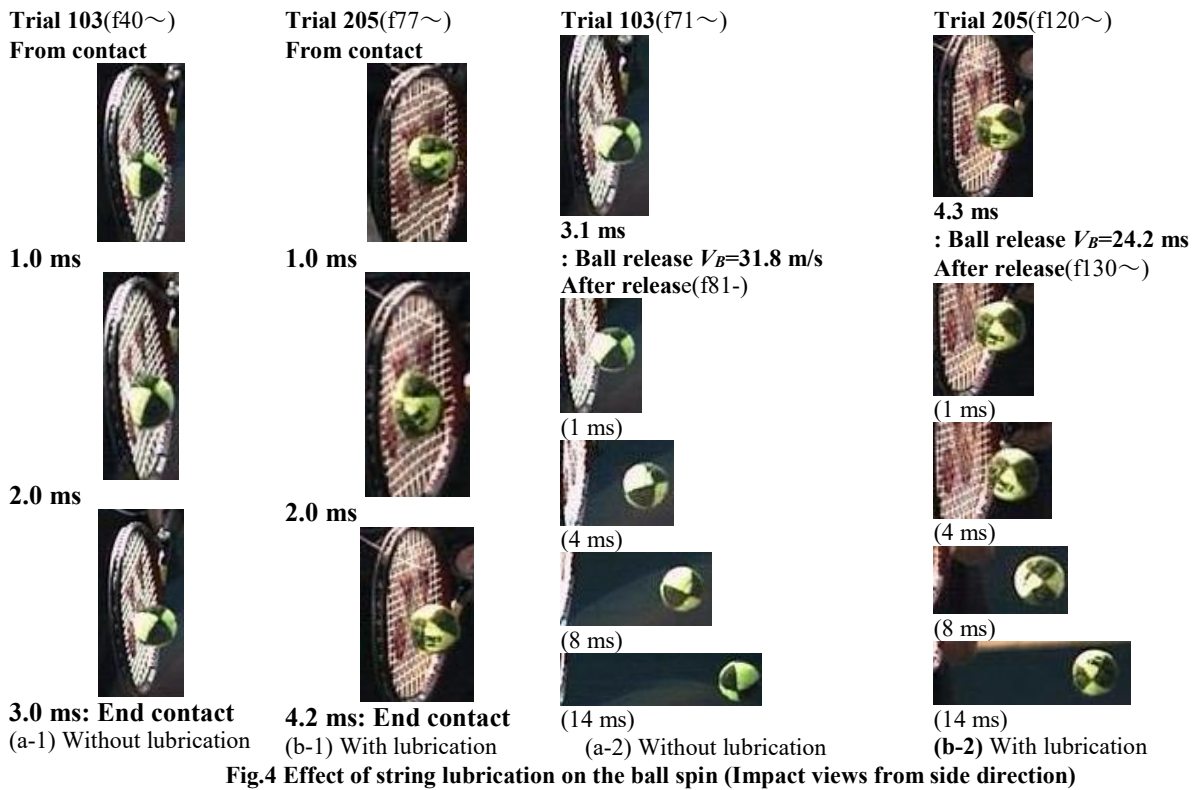
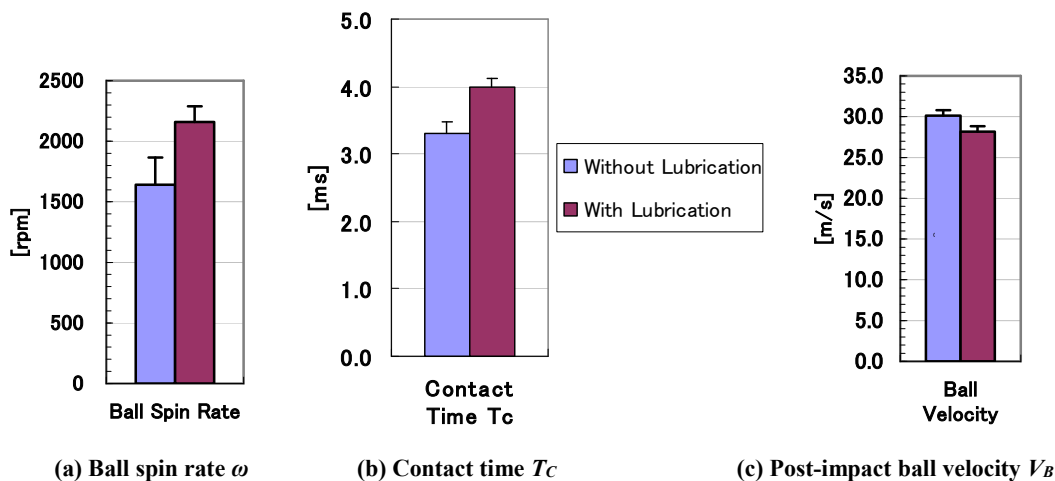


Fig.4 Effect of string lubrication on the ball spin (Impact views from side direction)



(a) Ball spin rate ω (b) Contact time T_c (c) Post-impact ball velocity V_B

Fig.5 Effect of strings lubrication on the ball spin rate and contact time (Average and standard error).

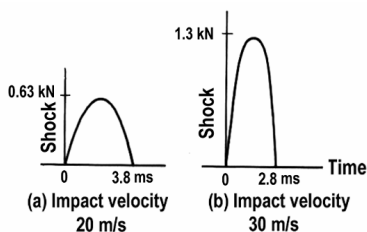


Fig.6 Calculated shock shapes when a ball strikes the center on the string face of the racket at a velocity of (a) 20 m/s and (b) 30 m/s, respectively.

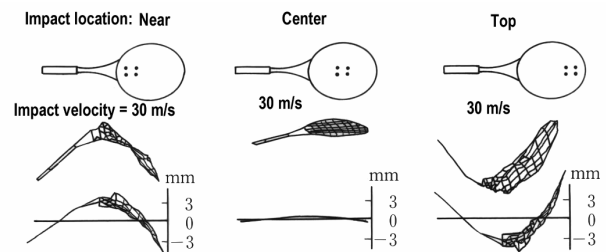


Fig.7 Predicted initial amplitude of 1st mode component of racket frame vibrations.

図9 と図10はラケット面の先端のオフセンターで打撃したときのラケットと手首関節におよぼす接触時間のみの影響を予測した結果である⁽²⁾⁻⁽⁵⁾。接触時間は、図3(a), (b)の場合の値を与えた。ボールとラケットは正面衝突とし、衝突速度は 30 m/s (テニスにおける実際的な速度) である。図9 はラケットの2 節曲げ振動の変位振幅、図10

は手首関節の衝撃振動波形である。接触時間が長くなると振動が大きく低減する⁽¹⁾。これらが、50人以上のアンケート結果やテスターの「いい感じ」「ホールド感が増す」「ボールをくわえる感覚が高まる」「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。

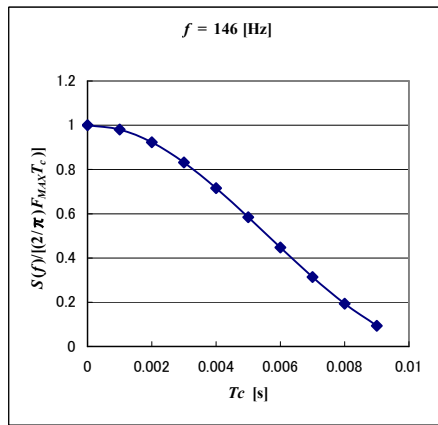


Fig.8 Contact time vs. impact spectrum with 1st mode 146 Hz of racket MP1).

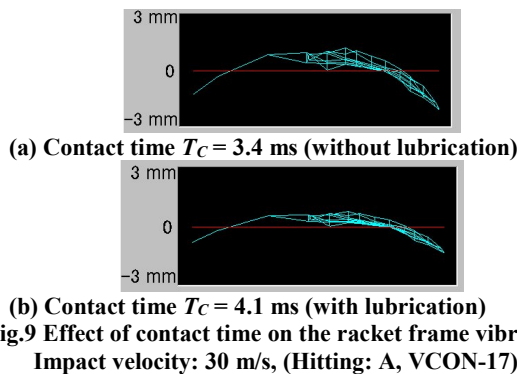


Fig.9 Effect of contact time on the racket frame vibration. Impact velocity: 30 m/s, (Hitting: A, VCON-17)

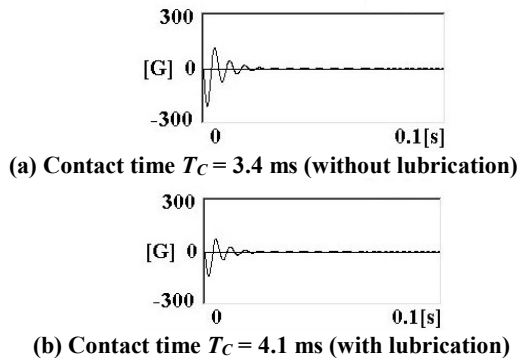


Fig.10 Effect of contact time on the wrist joint shock vibrations. Impact velocity: 30 m/s, (Hitting: A, VCON-17)

4. スtrings・テンションとインパクト挙動

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⁽²⁾⁽⁶⁾。ストリングスを緩く張った場合とストリングス潤滑の違いを以下に考察する。一般にテンションと呼ばれる用語は、インパクトにおける実際の張力ではなく、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）の初張力の意味で使われているのに、これがインパクトにおいてストリングスが大きく伸びたときの張力と誤解されやすいのである。

図11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・変形特性の測定結果である。図12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（一般に面圧と呼ばれている）であり、図11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。図13は、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 を示す。変形の増大とともに復原力は急激に大きくなり、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、ボール・とストリングスの衝突モデルは図14のようになる。

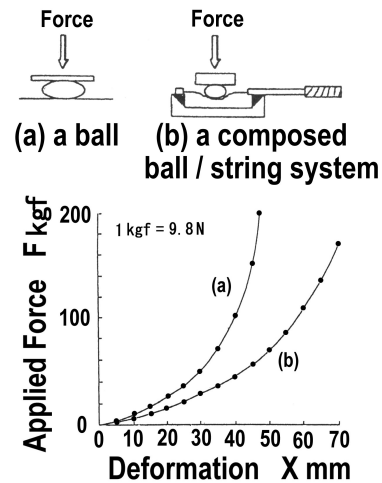


Fig.11 Applied force- deformation test and the results.

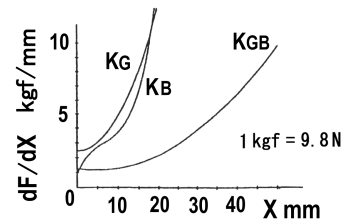


Fig.12 Stiffness vs. deformation of a ball, strings, and a composed ball/string system assuming that a ball deforms only at the side in contact with the strings⁽¹⁾⁽²⁾.

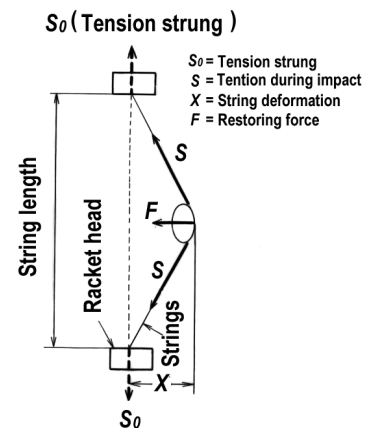


Fig.13 Deformation, tension, and restoring force of the string during impact with string pre-tension⁽³⁾.

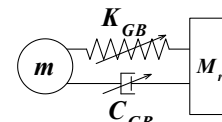


Fig.14 Impact model of a ball-strings system.

図15は、ボールを打撃したときの衝突速度に対するストリングス面の面圧（等価ばね剛性）を衝突解析により予測した例である。ストリングスの「面圧」（たわみ剛性）は衝突速度にほぼ比例して高くなり、衝突速度により10倍近く変化する図16は、横軸をストリングスの変形量（たわみ量）にとって書き直したものである。ストリングスの「面

圧」(たわみ剛性)は、張り上がりテンションにはほとんど影響されず、変形量で決まる。

図17は、テンションをパラメータとしたストリングスの変形量(たわみ量)と衝突速度の解析結果である。ストリングスを緩く張るほど衝突におけるストリングスの変形量は大きい。一方、図18はボールの変形量(つぶれ)である。ストリングスを緩く張っても、硬化ばね特性のためにボールの変形量はほとんど変わらない。衝突力(図は省略)もテンション(初張力)にはほとんど影響されない。

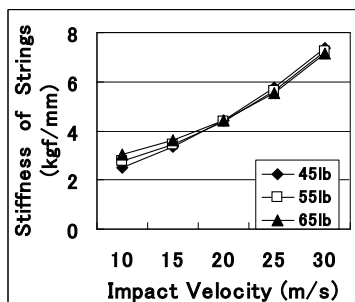


Fig.15 Predicted stiffness of the string bed vs. impact velocity relative to the string tension as a parameter.

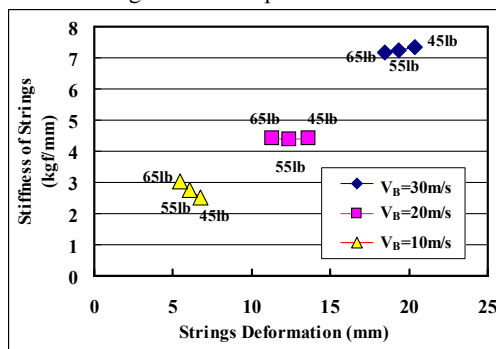


Fig.16 Predicted stiffness of the string bed vs. string deformation relative to the string tension.

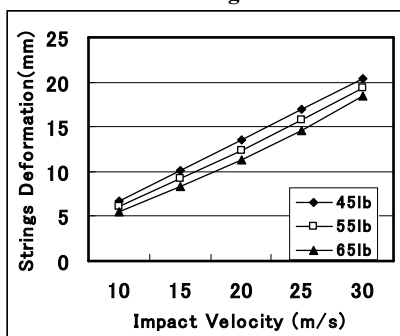


Fig.17 Predicted string deformation vs. impact velocity.

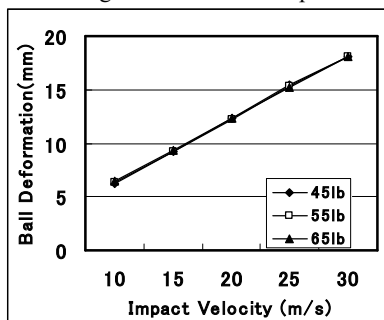


Fig.18 Predicted ball deformation vs. impact velocity.

図19に示すようにストリングスを緩く張っても、伸びが増せば硬化ばね特性のために復原力も増すから、ボールの変形量には初期テンションはほとんど影響しないのである。テンションが反発性にほとんど影響しない理由である。

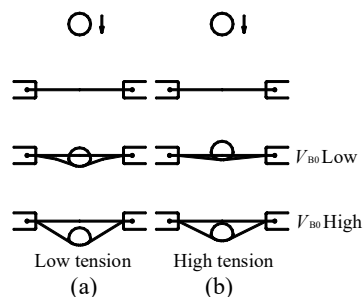


Fig.19 Stiffness of the string bed vs. impact velocity relative to the string tension as a parameter.

これについては後で触れる。次に接触時間について述べる。

図20は、米国のテニス専門書⁽⁷⁾に載っているテンションをパラメータとした接触時間と衝突速度の関係を示す(著者書き改め)。多くのプレーヤーが信じているように、テンションが低いほど接触時間が長くなっている。しかし、

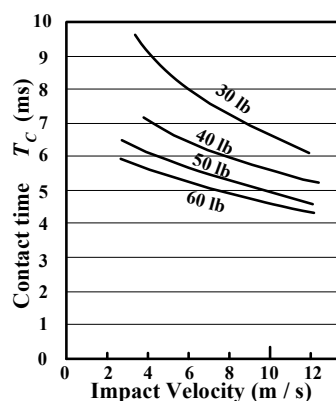


Fig.20 Contact time vs. impact velocity relative to the string tension as a parameter.

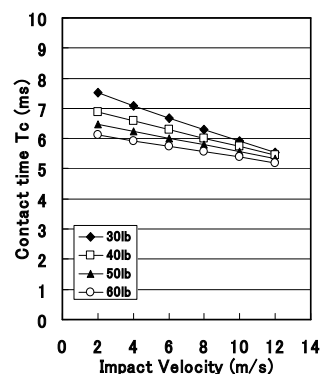


Fig.21 Predicted contact time vs. impact velocity relative to the string tension as a parameter.

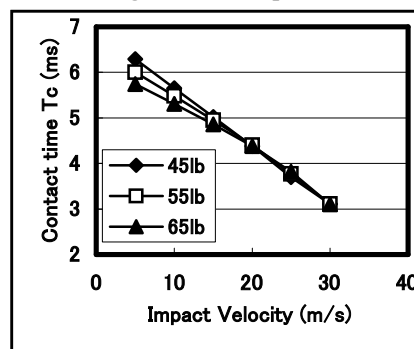


Fig.22 Predicted contact time vs. impact velocity relative to the string tension as a parameter.

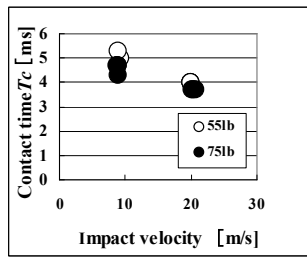


Fig.23 Measured contact time with different string tensions and different impact velocities.

このデータは 12 m/s 以下である。著者の計算結果 (図21) も 12 m/s 以下で同様である。しかし、図22のように、現実的な衝突速度 20 m/s 以上では接触時間にテンション (初張力) はほとんど影響しない。図23は実測結果であるが、衝突速度 20 m/s では、55 lbsと75 lbsのテンションの差は接触時間にほとんど影響していない。ストリング・テンションは、ボールとストリングスが接触した直後やボールがストリングスを離れるときのように、小変形のときはストリングスの振動や音に大きく影響するが、大変形になるとテンション (初張力) の影響は小さくなり、接触時間には影響しないのである。

図24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ポンド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⁽⁸⁾⁽⁹⁾。横軸はボールの入射速度である。衝突速度20m/s の場合、テンションを 44 % 増減しても、反発係数は 1.4 % しか増減しない。衝突速度 30m/s の場合はテンション (初張力) を変えても反発係数はほとんど変わらない。反発係数に最も影響するのは、ボールの変形量であるが、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。

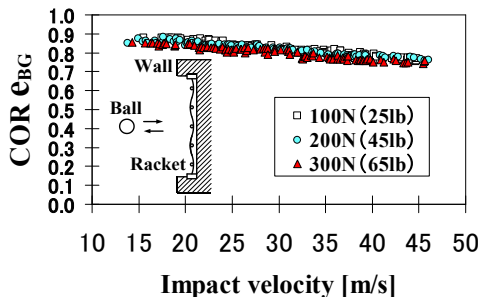


Fig.24 Measured coefficient of restitution e_{BG} between a ball and strings vs. impact velocity showing the effect of string tensions.

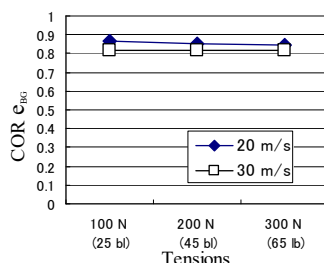


Fig.25 Averaged coefficient of restitution e_{BG} between a ball and strings vs. string tensions at the impact velocities of 20 m/s and 30 m/s.

以上から、ストリングスを緩く張っても、接触時間は長ならず、インパクトにおける実際の張力も小さくはならないから、ストリングスの縦糸も横にずれやすくなる

いのである。これがストリングスを緩く張ってもスピン量が増さない理由である。

5. 結論

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。毎秒 1 万コマの高速ビデオ画像解析により、ラケットのトップ・スピン性能と性能向上の謎を初めて明らかにした。すなわち、従来の摩擦説とは異なり、縦糸と横糸がお互いにすべること、さらに、ストリングスをオイル潤滑すると、縦糸の直角方向へのずれが大きくなって、ボールが食い込み、結果としてボールの回転がかかりやすくなり、接触時間も長くなるという画像解析結果を考察した。さらに接触時間が長くなるとラケットや腕系の振動が低減することを理論的にも明らかにし、「ホールド感が増す」「ボールをくわえる感覚が高まる」「打球感がマイルドになる」などのアンケート結果やラケット・テスターの打球感の理由を示した。また、ストリングスを緩く張った場合 (低いテンション) の衝突挙動を吟味し、ストリングス・クロス部を潤滑した場合とストリングスを緩く張った場合の衝突挙動は本質的に異なることを示した。

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)、梶木徹 (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, 日本機械学会Dynamics and design Conference 2004講論アブストラクト集, p.337.CD-ROM 論文集 No.04-5, 716, (2004.9). pp.1-6.
- (2) KAWAZOE, Y., Impact phenomena between racket and ball during tennis stroke, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.41 (1992), pp.3-13.
- (3) KAWAZOE, Y., Coefficient of restitution between a ball and a tennis racket, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.42, (1993), pp.197-208.
- (4) 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.
- (5) KAWAZOE, Y., Mechanism of Tennis Racket Performance in terms of Feel", *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.49, (2000), pp.11-19.
- (6) KAWAZOE, Y., Mechanism of High-Tech Tennis Rackets Performance, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.51, (2002), pp.177-187.
- (7) Brody, H. (1987), *Tennis Science for Tennis Players*. Philadelphia Pennsylvania: University of Pennsylvania Press.
- (8) 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.
- (9) 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.