

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

Tennis Top Spin Improvement by Lubrication of String Intersections with Super High Speed Video Analysis

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 with high speed video analysis. 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. More spin produce longer contact time between ball and strings, resulting 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.

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世界で初めて明らかにした。すなわち、従来の仮説とは異なり、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、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(Fig.A1, Fig.A2)。さらに接触時間が長くなると振動も大きく低減することを示した。これらがアンケート結果やラケット・テスターの「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」などの打球感の理由である。これらの知見が世界のテニスに大きなインパクトを与えることを期待したい。

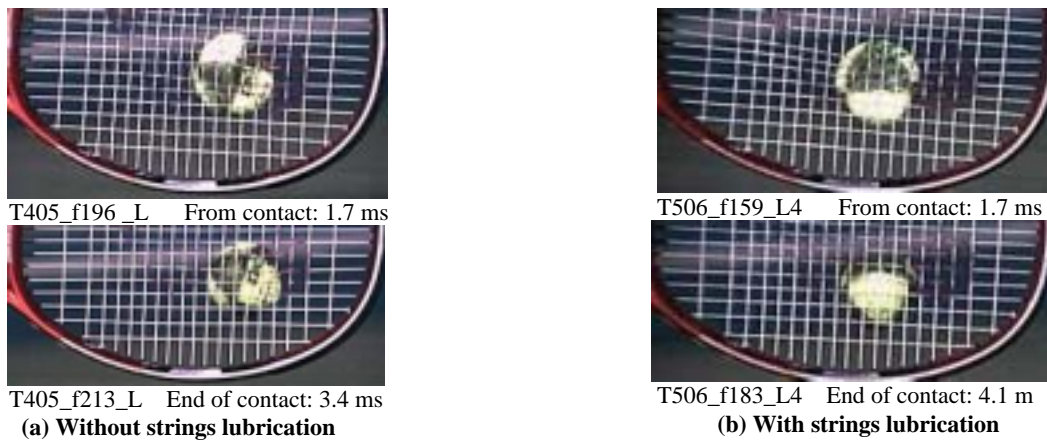


Fig.A1 Effect of strings lubrication on the ball spin behaviors (Impact views from back side direction)

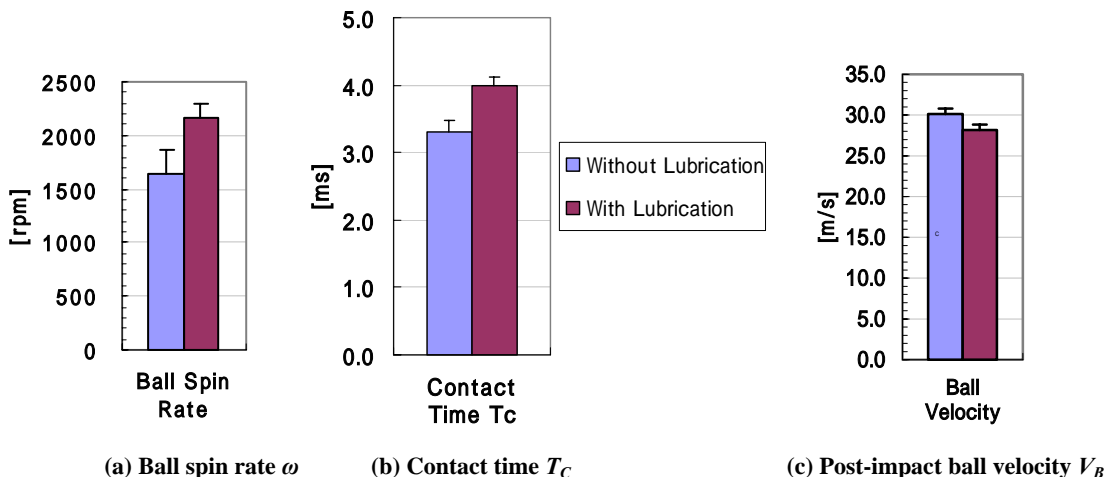


Fig.A2 Effect of String lubrication on the ball spin rate and the contact time (Average and standard error).

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、実験の難しさもあって、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。

本論文では、高速ビデオ画像解析に基づいて我々が世界で初めて明らかにしたラケットのトップスピン性能と性能向上のメカニズムについて述べる。すなわち、従来の仮説とは異なり、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、ストリングスをオイル潤滑すると（沖本が世界特許出願）、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す。さらにラケットの振動、手首関節の衝撃振動など打球感に関連する性能におよぼすスピンの影響について考察する。

2. 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

プレイヤー（テスター）が打撃したときのボールのスピン挙動の測定において最も難しい問題のひとつは、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である。今回の実験では、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、同一条件で3回の試行を行い、かなり再現性のある結果が得られた。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。

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。

図3および図4は、それぞれ真後ろと真横から1万コマ/秒で別々に撮影した画像の代表的なフレームであり、それぞれの(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。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（クロス部にしみこむ）、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4は、ボールがストリングスに接触してから離れるまでと離れてからのスピンの様子を示す。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ン量が著しく増している。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。

図5は、3回の試行の平均値と標準誤差であり、(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。標準誤差は標準偏差を n (n : 標本数)で割ったもので、標本平均値から真値が

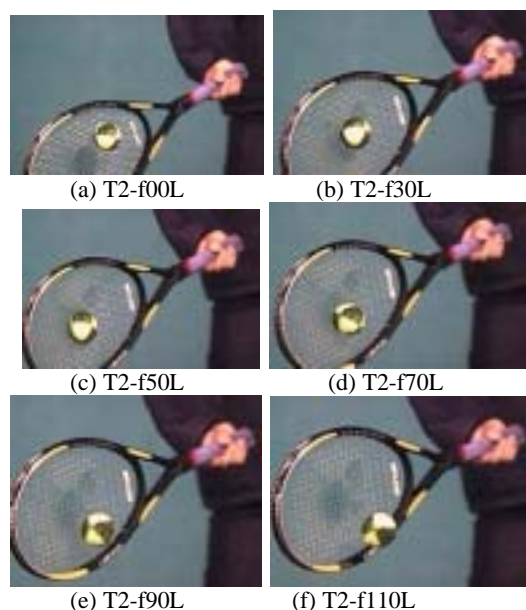
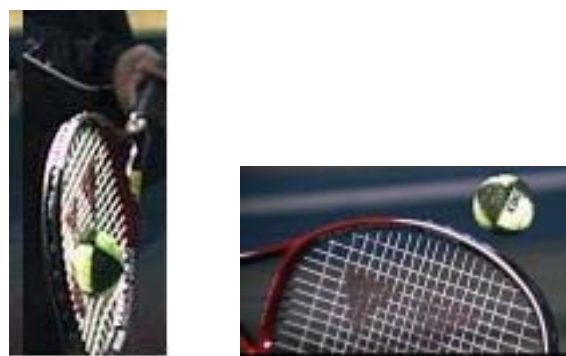


Fig.1 Topspin impact of a tester in this experiment.



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



T405_f179_L Start of contact 0.0 ms



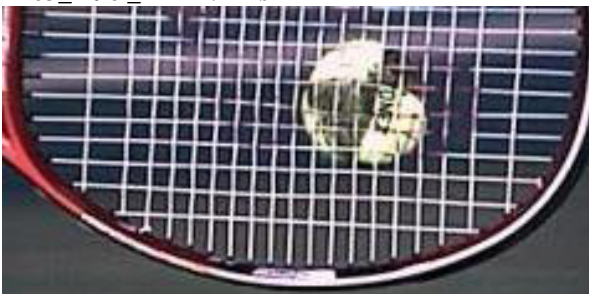
T405_f185_L 0.6 ms



T405_f190_L 1.1 ms



T405_f196_L 1.7 ms



T405_f200_L 2.1 ms

(a-1) Without strings lubrication (Trial 405)
(to be continued)



T506_f142_L4 Start of contact 0.0 ms



T506_f148_L4 0.6 ms



T506_f153_L4 1.1 ms



T506_f159_L4 1.7 ms



T506_f163_L4 2.1 ms

(b-1) With strings lubrication (Trial 506)
(to be continued)

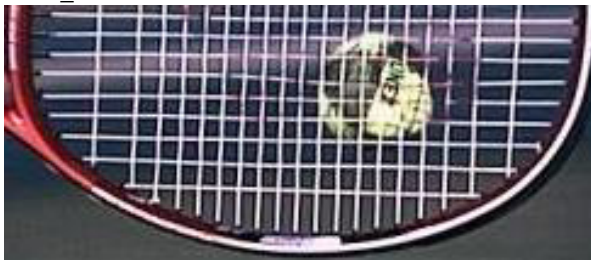
Fig.3-1 Effect of strings lubrication on the ball spin behaviors (Impact views from back side direction)



T405_f204_L 2.5 ms



T405_f209 3.0 ms



T405_f211 3.2 ms



T405_f213_L End of contact 3.4 ms

(a-2) Without strings lubrication



T506_f167_L4 2.5 ms



T506_f172_L4 3.0 ms



T506_f174_L4 3.2 ms



T506_f176_L4 3.4 ms



T506_f180_L4 3.8 ms



T506_f183_L4 End contact: 4.1 ms

(b-2) With strings lubrication

Fig.3-2 Effect of strings lubrication on the ball spin behaviors (Impact views from back side direction)

Trial 103(f40 ~)



**0.0 ms
: Start contact**



1.0 ms



2.0 ms



3.0 ms: End contact

(a-1) Without lubrication

Trial 205(f77 ~)



**0.0 ms
: Start contact**



1.0 ms



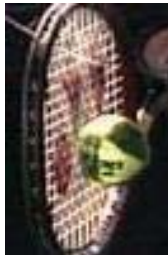
2.0 ms



3.0 ms



4.0 ms

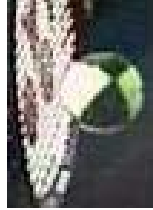


4.2 ms: End contact
(b-1) With lubrication

Trial 103(f71 ~)



**3.1 ms
: Ball release $V_B=31.8$ m/s
After release(f81-)**



(1 ms)



(2 ms)



(4 ms)



(6 ms)



(8 ms)



(10 ms)



103 191 (12 ms)



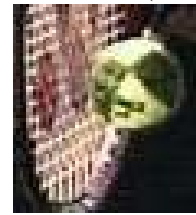
(14 ms)

(a-2) Without lubrication

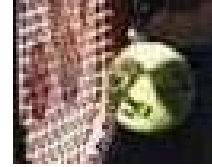
Trial 205(f120 ~)



**4.3 ms
: Ball release $V_B=24.2$ m/s
After release(f130 ~)**



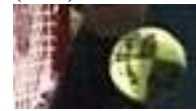
(1 ms)



(2 ms)



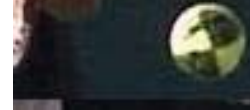
(4 ms)



(6 ms)



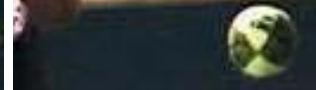
(8 ms)



(10 ms)



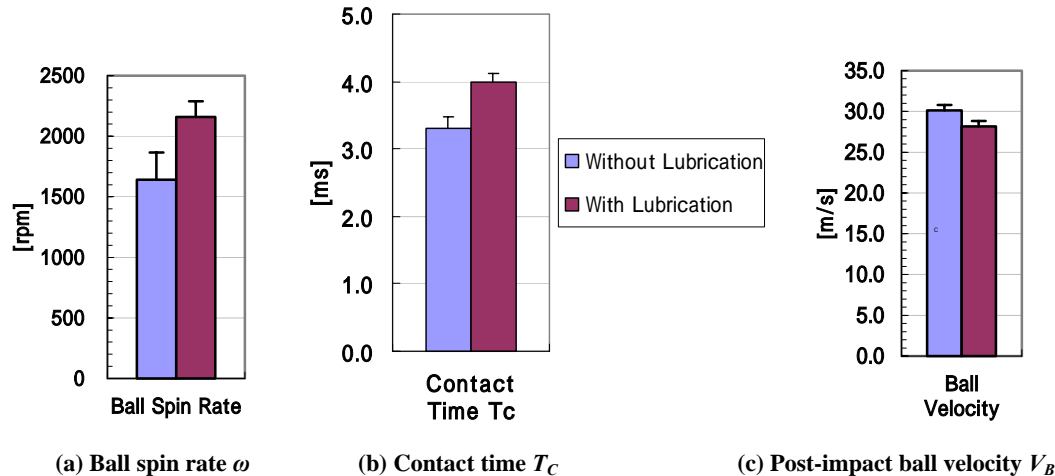
(12 ms)



(14 ms)

(b-2) With lubrication

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).

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の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。

3. ラケットのスピン性能と性能向上のメカニズム

スピンが増し、接触時間が長くなり、打球速度が低減すると、インパクトの最大衝突力も低減し、手に伝わる衝撃振動も小さくなる⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。詳細な計算は別報に述べるとして、図6と図7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⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。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6はラケットの2節曲げ振動の変位振幅、図7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。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。

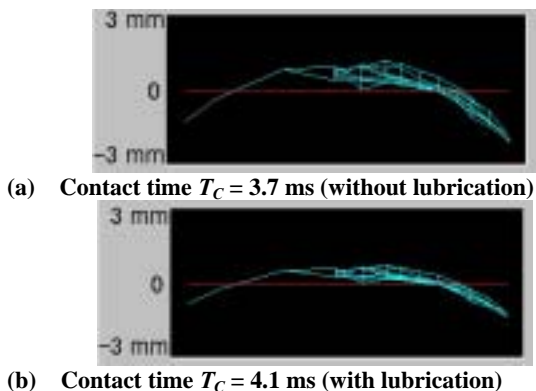
4. 結論

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、従来の仮説とは異なり、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、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。さらに接触時間が長くなると振動も大きく低減することを示した。これらがアンケート結果やラケット・テスターの「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」などの打球感の理由である。これらの知見が世界のテニスに大きなインパクトを与えることを期待したい。

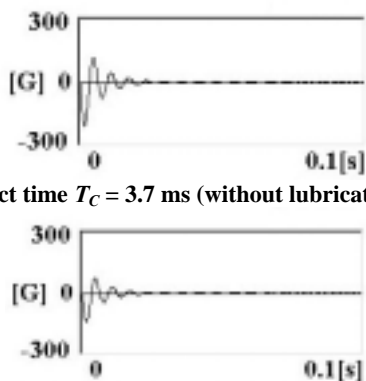
インパクト画像解析用高速ビデオカメラは、(株)ナック製 EMRECAM fx6000 を使用し、平岡憲義、浜口正之、田口春樹、山本昌樹の諸氏のご協力を得た。また、友末亮三(安田女子大)、米山修一(ヨネックス)、松尾高司(KAI Project)、谷口勇美雄(BTL)、梶木徹(フォレストヒルズ)のご助力に深謝する。

文献

- (1) KAWAZOE, Y., *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.41 (1992), pp.3-13.
- (2) KAWAZOE, Y., *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.42, (1993), pp.197-208.
- (3) KAWAZOE, Y., *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.43, (1994), pp.223-232.
- (4) KAWAZOE, Y., *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.49, (2000), pp.11-19.



(a) Contact time $T_C = 3.7$ ms (without lubrication)
 (b) Contact time $T_C = 4.1$ ms (with lubrication)
 Fig.6 Effect of contact time on the racket frame vibration.
 Impact velocity: 30 m/s, (Hitting: A, VCON-17)



(a) Contact time $T_C = 3.7$ ms (without lubrication)
 (b) Contact time $T_C = 4.1$ ms (with lubrication)
 Fig.7 Effect of contact time on the wrist joint shock vibrations. Impact velocity: 30 m/s, (Hitting: A, VCON-17)