

## 超高速ビデオ画像によるテニスラケットのトップスピン性能解析 - バウンドしたボールの伸び、ホールド感、打球感を格段に高めるメカニズム -

川副嘉彦(埼玉工業大学) 沖本賢次(サンアイ) 沖本啓子(サンアイ)

### 【1. トップスピンの謎を解く】

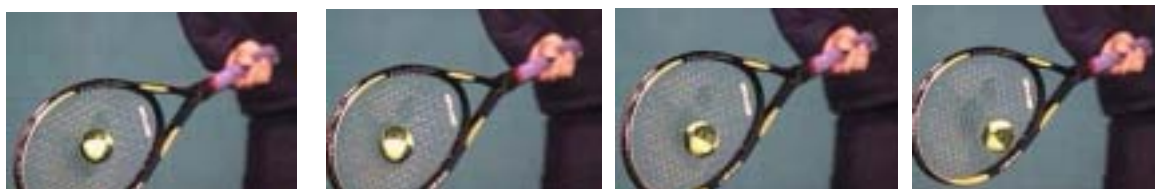
ボールに食いつきの良いストリングスが存在することを多くのプレイヤーが経験的に認めている。ボールをコントロールするには、ボールに適切なスピン(回転)を与えることが重要であり、スピがかかると、打球速度はやや落ちるが、バウンドしてから鋭く弾んでボールが伸びてくる。しかし、従来の研究は正面衝突に関する研究がほとんどであり、ストリングスの食いつきのよさという感覚的性能評価がスピンと関係があるかどうかについては不明であった。

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が、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の存在、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挙動の測定が必要とされていた。しかし、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という実験の難しさもあって、プレイヤーがスピをかけて打撃したときのスピ挙動についての報告はこれまでになかった。

本研究では、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のメカニズムとトップスピン性能を格段に高める方法(川副ほか,2004)について述べる。

### 【2. 超高速ビデオ画像によるテニスラケットのトップスピン性能解析】

図1はテスターのトップスピン打法を示す。図1(a)はインパクト前、図1(b)(c)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、スピがかかると接触時間が長くなる)、図1(d)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操作は不可能であることを示している(川副ほか,2004)。



(a)インパクト直前(2-f30L) (b) 接触始(f50L) (c)接触終(f70L) (d)インパクト直後(f90L)

図1 トップスピン打撃実験におけるインパクト挙動

### 【3. スtring潤滑によるラケットのトップスピン性能向上】

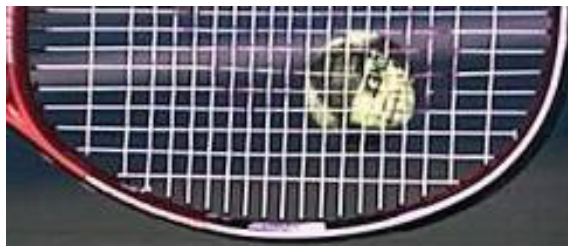
図2は、インパクトを真後ろから1万コマ/秒で撮影した高速ビデオカメラ画像の代表的なフレームであり、図2(a) (左) は通常のスリングス、図2(b) (右) は同じスリングスに潤滑剤を塗った場合 (沖本が世界特許出願) である。潤滑剤を塗ると (図2(b)) クロス部にしみこんで、縦糸が直角方向へ大きくずれ (接触後 1.7 ms)、ボールが離れるときには元に戻っている。通常の場合 (図2(a)) は、ボールが離れても縦糸がまだ一部横にずれたままになっている。ボールとスリングスが接触して離れるまでの時間、すなわち、接触時間は、図2(a)では 3.4 ms、図2(b)では 4.1 ms であり、潤滑剤を塗ると接触時間がかなり長くなっている。



接触後 1.7/1000 秒 (405\_f196\_L)



接触後 1.7/1000 秒(506\_f159)



接触後 3.4/1000秒(405\_f213\_L); 接触終  
(a) 通常のスリングス



接触後 4.1/1000秒 (506\_f183\_L): 接触終  
(b) スリングス潤滑して滑りやすくした場合

図2 スリングスの横糸がずれてボールが食い込むことによりスピンのかかる。スリングスを潤滑して滑りやすくすると、大きくずれて、スピンがかかりやすくなる。ズレは元に戻っている。

図3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、スリングスに潤滑剤を塗った場合である。ボールがス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。ボールの回転速度は2460 rpm であり、通常のスリングス (画像は省略) の2倍近くになっている。接触時間は3.0 ms に対して 4.2 ms であった。潤滑剤を塗るとスピン量が著しく増す。縦のスリングス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 (川副ほか, 2004)。図4は、3回の試行の平均値と標準誤差であり、図4(a)はスリングスを離れた直後のボールの回転速度、図4(b)はボールとスリングスの接触時間である。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どの範囲にあるかを示す。平均値についても潤滑したスリングスの場合のスピン量はかなり増している。バウンドしたときの摩擦がないとしてボールのスピンのエネルギーを単純に全部直線速度に換算すると、バウンド後に7 m/s (時速 25 km/h) だけボールの勢いが増すことになる。接触時間も長くなり、打球速度はやや低減する (図は省略)。接触時間が長くなると衝突力が低減し、ラケットや手に伝わる衝撃・振動も低減する (川副ほ

か,2004) . これらがアンケート結果やラケット・テスターの「バウンドしてからボールが伸びてくる」「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 .

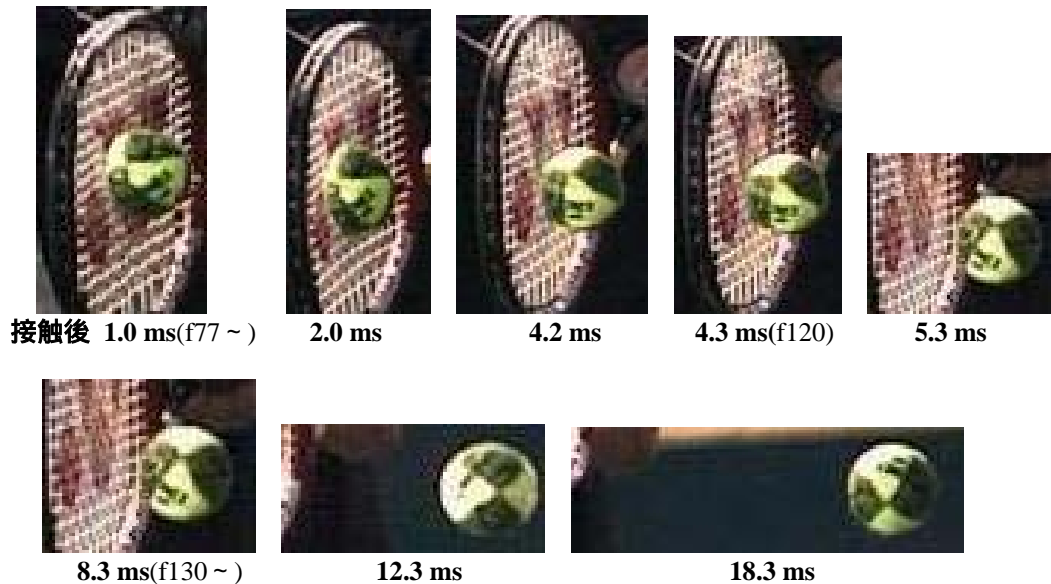
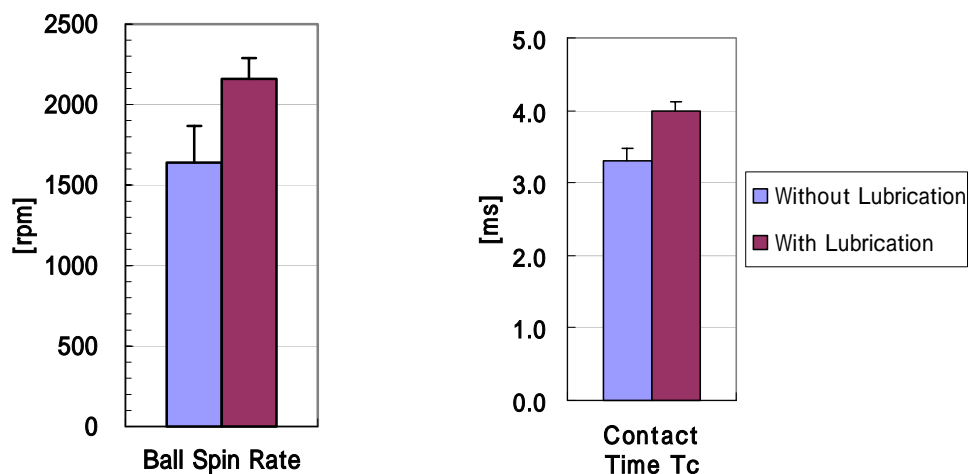


図3 スtrings潤滑により滑りやすくした場合のスピンの回転速度：2460 rpm (Trial 205)



(a) ボール・スピンの回転速度  $\omega$  (b) 接触時間  $T_c$   
 図4 Strings潤滑によるスピンと接触時間の増加 (3回の試行平均値と標準誤差)

【4. Strings・テンションを変えてもスピンは変わらない】

実際のプレー (現実的な衝突速度) におけるボールとStrings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 (Kawazoe, 1992, 1993, 1994, 2000, 2004) . Stringsを緩く張った場合とStrings潤滑した場合のインパクト挙動は本質的に異なる . 一般にテニスラケットの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Stringsを張るとき (Strings面がたわんでいないとき) の初張力である . これがインパクトにおける張力 (張り上が

リテンションの10倍近くになる)と誤解されやすい。ボールとラケットの衝突速度に対するストリング面圧、接触時間、衝突力は20 m/s以上の現実的な衝突速度では(張り上がり)テンションに依存しない。ストリング面圧と衝突力は衝突速度に比例する。ボールとストリングの接触時間は衝突速度に反比例する。ストリングのたわみはテンションが低いほど大きい。ボールのつぶれ量はテンションに依存しない。ストリング・テンション40 lbsと70 lbsでボールを斜めからストリング面に衝突させたときのスピンの回転速度には違いは見られなかったという最近の実験結果もある(Goodwill & Haake, 2004)。

## 【5. 結論】

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、従来のボールとストリング面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。

## 【参考文献】

- 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) 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 (ITF).
- 8) 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 (ITF).

9) Kawazoe, Y., 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. (2004). International Sports Engineering Association (ISEA).

10) Goodwill, S.R. and Haake, S.J., Effect of string tension on the impact between a tennis ball and racket, *The engineering of Sport 5* ( Edited by M. Hubbard), Vol.2, pp.3-9. (2004), International Sports Engineering Association (ISEA).