

# テニスのトップスピン性能のメカニズム (高速ビデオ画像解析と衝突シミュレーションによる考察)

## Mechanism of Top Spin Performance in Tennis: High Speed Video Analysis with Impact Simulation

川副 嘉彦(埼玉工大)

沖本賢次(サンアイ)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology

Kenji OKIMOTO, Sanai Co., Ltd.

FAX: 048(585)6717 E-mail: kawazoe@sit.ac.jp

This paper showed that the spin rate of newly strung tennis racket without notches is much larger than that of used racket with notches. It made clear the mechanism of top spin performance in tennis and its improvement by lubrication of strings according to the high speed video analysis. 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. Since the notches of strings decrease spin rate, the lubricant materials are effective to the notched strings. Furthermore, it showed that the more spin results in the reduction of shock vibrations of the wrist joint during impact.

### 1. 緒言

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、ボール・コントロールにはボールにスピンを与えることが最も重要である。十分なスピんがかかると、強打してもボールがコート内に収まり、バウンドしたボールは鋭く弾んで伸びてくる。

打球面のラージサイズ化と軽量化により、ラケットの操作性がよくなるとともに一般プレイヤーでもトップスピン打法が一般的になり、ラケットのスピん性能に関心が集まる一方で、ラケットやストリングの種類とスピん性能の関係は複雑であり、長い間ほとんど謎であった。ストリングの摩擦が大きいほどスピんがかかるという仮説に基づいて、ヘッドを固定したラケットにボールを斜めに衝突させたときのスピん量(時間当たりの回転数)の実験室での測定が重ねられてきたが、ラケットやストリングの違いによるスピんの違いは明確にできなかった。

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ん性能の謎を明らかにする。すなわち、ストリングの摩擦が大きいほどスピんがかかるというのが従来の仮説であったが、これとは反対に、摩擦が小さいほど縦糸と横糸がお互いに滑ってボールがストリングに食いつきやすく、また縦糸が元に戻りやすいので横に伸びた縦糸が元に戻るときの復原力によりスピんがかかりやすい。新品のストリングほどスピんがかかりやすく、ストリングを張ってから時間が経過するほど縦糸と横糸の交差点にノッチ(溝)ができやすいため、スピんがかかりにくくなるが、ノッチ(溝)ができたストリングでも交差点を潤滑すると、スピん量が増す。さらに、スピん量が増すとインパクトによる直接的な衝撃力も低減し、接触時間が長くなり、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測定に基づくシミュレーションにより示す。

### 2. 高速ビデオによるスピん性能解析

図1は、コート上でボールを打撃したときのラケット・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ん操作が不可能であることを示している。図2は、スピん挙動を解析するための高速ビデオ画像である。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ん(回転)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、新品のストリングス、1週間毎日3時間使用したストリングス、および1週間使用したこのストリングスをシリコン系オイル(すでに世界特許を取得し市販されている)で潤滑した場合の高速ビデオ画像解析結果である。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 $n^{1/2}$ ( $n$ : 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。トップスピン打撃では、ストリングを張ってから1週間ほど毎日3時間使用したラケットの場合、新品のストリングと比べるとスピん量は平均40%低減する。しかし、使用したストリングに潤滑剤を塗るとスピん量は平均30%増し、接触時間は平均16%長くなる。直線的な打球速度の低減は平均6%である。

図4は、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。ボールとストリングスが接触してから1.7ms後であり、通常のストリングスの場合に比べて(画像は省略)、縦糸が直角方向へ大きくずれている。ボールが離れるときには元に戻っており、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(4.1ms)。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。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、ストリングス面内の縦糸の復原力(図4の矢印)も大きく、ず



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

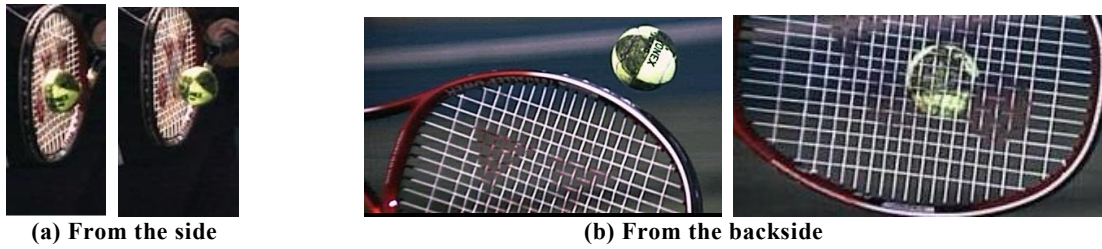
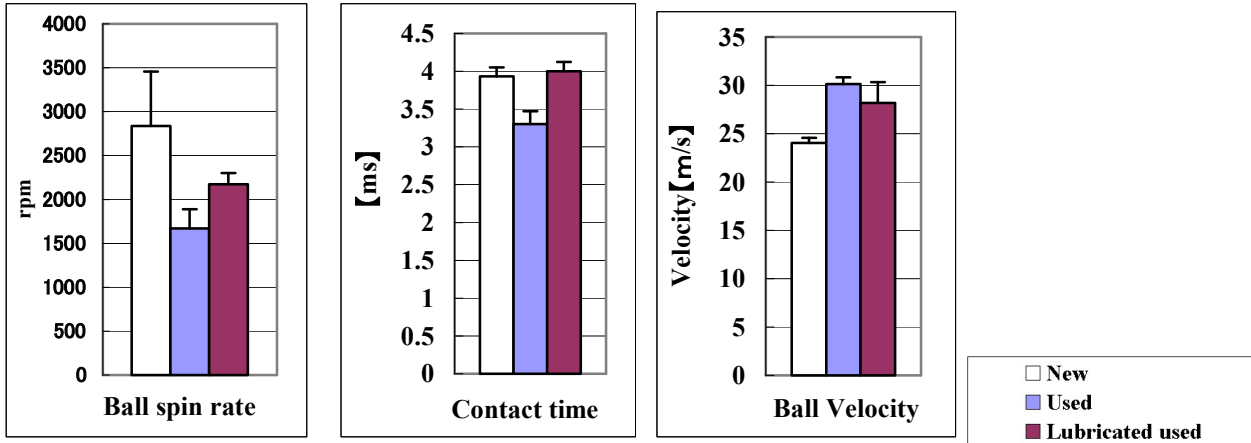


Fig.2 High speed video for impact topspin analysis.



(a) Ball spin rate  $\omega$  (b) Contact time  $T_c$  (c) Post-impact ball velocity  $V_b$   
 Fig.3 Spin performance vs. string conditions with average and standard error.

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[2].



(T506\_f159\_L4) 1.7 ms after contact

Fig.4 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).

### 3. スピン増による打球感向上のメカニズム

ボール・ストリングス系の非線形復原力特性は、圧縮試験における荷重-変位特性実測値を用いて同定し、衝突におけるボールとストリングスのエネルギー損失は、ラケット・ヘッド固定でボールをストリングスに衝突させたときの反発係数実測値  $e_{BG}$  を用いて求め、ラケットの剛体特性および振動特性は実験的に同定し、ラケットの各打点に換算した換算質量  $M_i$  を導入して、衝突速度に依存するボール・ストリングス複合系の等価ばね  $K_{GB}$  と等価減衰係数  $C_{GB}$  からなる 1 自由度振動モデルを仮定すると、フレーム振動を無視したときの衝突の力積波形が数値計算により得られる。ただし、時間を  $t$ 、衝突力の最大値を  $F_{MAX}$ 、接触時間を  $T_c$  とする。したがって、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  $X_{ijk}$  が近似できる。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。

図5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である。(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)

は通常のトップスピン、図(c)は潤滑剤を塗ったストリングスでのトップスピンに相当する。図(b)、図(c)の垂直成分力積はそれぞれ図(a)の0.85倍、0.65倍である。縦糸が横にずれてストリングス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。

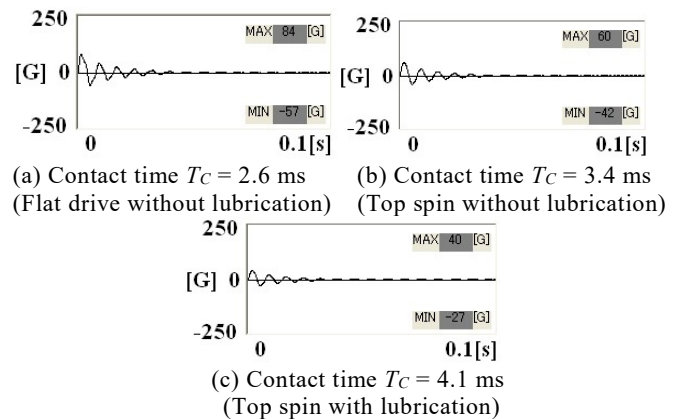


Fig.5 Calculated effect of contact time on the wrist joint shock vibrations. Impact velocity: 30 m/s, hitting location: top side 95 mm from the tip of racket.

### 4. 結論

ストリングスの摩擦が小さいほど縦糸と横糸がお互いにすべってボールがストリングスに食いつきやすく、横に伸びた縦糸が元に戻りやすいので元に戻るときに復原力によりスピンの量が増すとインパクトにおける直接的な衝突力も低減し、接触時間が長くなり、ラケットや手に伝わる衝撃振動も低減する。(文献省略)