

テニスのトップスピンとアンダースピンのボール挙動 におよぼすボール毛羽の影響 (超高速ビデオ画像解析と流れの可視化)

Effect of Ball Felt on Spin Behavior in Tennis with Ultra-high-Speed Video Analysis and Flow Visualization

○川副嘉彦(埼玉工大) 武田幸宏(埼玉工大) 中川慎理(埼玉工大) 青木克巳(東海大学)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusaiji 1690, Fukaya-si, Saitama, Japan
Yukihiro TAKEDA, Saitama Institute of Technology
Masamichi NAKAGAWA, Saitama Institute of Technology
Katsumi AOKI, Tokai University

The previous papers of the authors made clear the mechanism of top spin performance in tennis and its improvement by lubrication of string intersections 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 was shown that the top spin rate of newly strung tennis racket without notches is much larger than that of used racket with notches in the case of the nylon strings and the natural gut. It was also shown that the more spin results in the reduction of shock vibrations of the wrist joint during impact. This paper showed the underspin behavior when a pro and an amateur hits a ball. Furthermore, it also showed the comparison of the spin behavior between a tennis ball and a smooth surface ball without felt and made clear the mechanism of ball control by using high speed video camera and flow visualization.

Key Words: Dynamics, Sport Engineering, Tennis Racket, Impact, Tennis Ball, Gut, Spin, Top-Spin, Under-Spin, Friction, Notch, Felt, Smooth Surface ball, Ultrahigh-Speed Video Analysis, Flow Visualization

1. はじめに

プレイヤーのラケットを振る動作(スイング)およびラケット・ボールの衝突現象を考慮して、従来人間の感覚により評価されていたラケット性能を客観的に評価するシステムの開発やデータベースの構築が進められており、反発性能、操作性、ボールの飛び、打球感などについては、多くのことが明らかになってきた⁽¹⁾⁻⁽¹⁰⁾。

打球面のラージサイズ化と軽量化により、テニス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(順回転)打法が一般的になってきた。しかし、ラケットのスピニング性能のメカニズムは長い間謎であった。ストリングスの摩擦が大きいほどスピニングがかかるという従来からの仮説に基づいて実験室でのスピニング測定が重ねられてきたが、ラケットやストリングスの種類との関係は明確に現れなかった。

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ながら⁽¹¹⁾、ラケット・ヘッドを固定した斜め衝突による最近の詳細な実験^{(12),(13)}においても、摩擦特性あるいはストリングスの種類や張り上がりテンション(初張力)とスピニング性能の間に明確な関係は見られなかった。

著者らは既報^{(14),(15)}においてコート上でのラケット・テスターおよびプロとアマチュアのプレイヤーによるトップスピン打撃におけるインパクトの超高速ビデオ画像解析(10,000 fps)によりラケットのスピニング性能の謎を初めて明らかにした。すなわち、

(1) 従来の仮説とは逆に、ストリングスの摩擦が小さいほど縦糸と横糸の交差点がずれてボールが食い込み、縦糸が戻る時のストリング面内復原力によりボールのスピニング量が増す。

(2) ノッチ(溝)のできた使用中のストリングスでも交差点を潤滑するとボールのスピニング量が増し、接触時間も長くなる。

(3) 接触時間が長くなるとラケットや手に伝わる衝撃振動も低減する。

(4) プラスティックのチューブを使ってストリングの縦糸と横糸の摩擦を減らし、ストリングがすべることにより過度のスピニングが妨げられるようにした「スパゲッティ」ラケット⁽¹⁶⁾(使用禁止になった)とストリングス交差点潤滑ラケットはスピニングのメカニズムが良く似てい

る。

(5) スピン・ガットと呼ばれる表面の摩擦が大きいナイロン系より、摩擦が少ないポリエステルのようなストリングの方が、スピニングがやりやすい。

(6)すでにプレイヤーの間では、強烈なトップスピンで有名なナダル選手をはじめとする世界のトッププロからアマチュアまで、ツルツルで硬いポリエステルが主流になっている。

(7) 張ってから1週間ほど毎日3時間使用したナイロン・ストリングの場合は、新品と比べるとスピニング量は約40%低減し、接触時間は約8%短くなった。

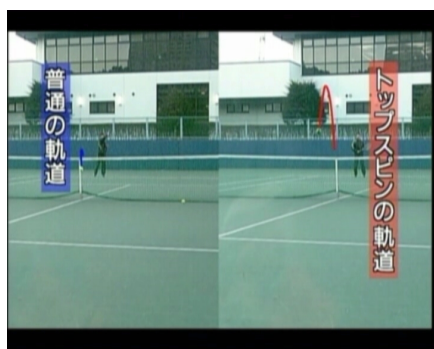
(8) プロ・テニスプレイヤーが試合に使った後の天然ガットの場合もストリング交差点には深いノッチ(溝)ができており、スピニング量は約70%低減し、接触時間は約15%短くなった。

(9) また、プロの打撃では、アマチュアに比べて、打球速度の差は少ないが、スピニング量が平均1.6倍、接触時間が1.3倍であった。

(10) 接触時間が長いことは、強打してもインパクトの衝撃力、手に伝わる衝撃振動が低減することを意味する。

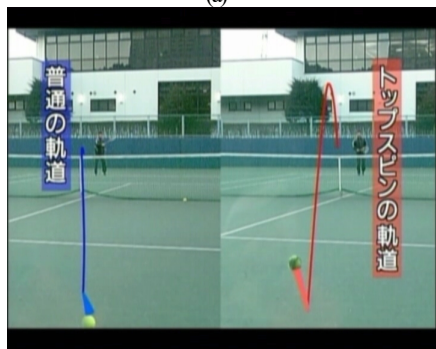
(11) ストリングスあるいはガットが古くなっても反発性はほとんど低下しないが⁽¹⁷⁾、試合で使った後のラケットのスピニング性能は大きく低下する。

本論文では、まず、前報⁽¹⁵⁾に述べたトップスピン(図1)とともに試合でよく使われるアンダースピン(スライス)打撃について、プロ・テニスプレイヤーとアマチュア・プレイヤーのスピニング挙動を超高速ビデオ画像解析により定量的に解析する。次に、テニスボールと毛羽(フェルト)なし(滑面)ボールについてトップスピンとアンダースピンでプロが打撃したときのスピニング性能を超高速ビデオカメラにより測定・解析し、ボールの毛羽(フェルト)のスピニング量におよぼす影響を明らかにする。さらに、流れの可視化によりボール・コントロールにおよぼす毛羽の影響を考察し、テニスボールの毛羽とスピニングとボールコントロールの関係を実験により定量的に初めて明らかにする。



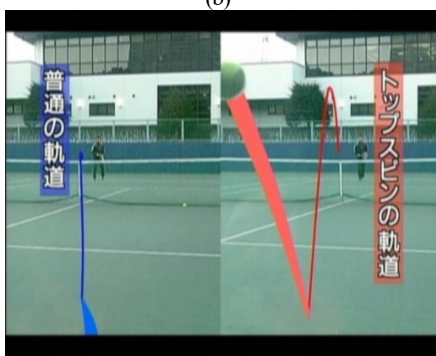
Flat Top spin

(a)



Flat Top spin

(b)



Flat Top spin

(c)

Fig.1 Trajectories of a flat shot ball and a top spin shot ball.
(from NHK TV broadcasting)

2. 超高速ビデオカメラによるテニスのアンダースピン (スライス) 挙動解析

アンダースピン (スライス) は、トップスピンとは反対で、ボールにバックスピンをかけることである。そのため、ボールはフラット・ショット (正面衝突に近い。実際には多少のトップスピンがかかっている) の場合よりもゆっくり進み空中に長くとどまるようになる。バウンドすると、ボールはコート表面を低くすべり、もしベースライン (コート一番後ろの線) 近くでバウンドした場合は、相手にとっては大変むずかしいボールとなる。

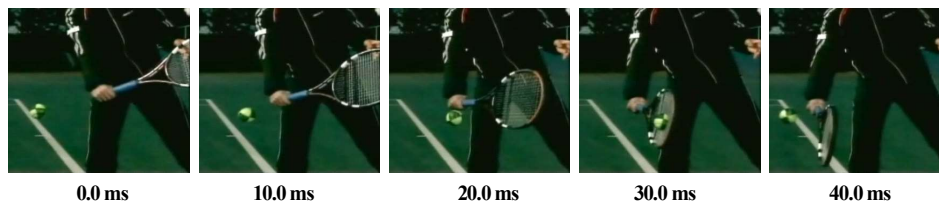
ボールにスライスをかけるためには、(ラケットを普通のフラットショットの場合より高く引き、) ラケット面を上向きにしてボールに向かい、ラケットを飛んでくるボールの軌道に対して、下方に横切るように振る。ガットはボールの下部にくい込み、バックスピンがかかる。コントロールを増すためにラケットは打ったあとも、下方前方に振り続けられる。

図2は、プロのスライス (アンダー・スピン) 打法とボールの軌道を示す。図3は、スライスのインパクト前後のボールとラケットの軌道を示す。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ン操作は不可能であり、ボールが勝手に跳ね返るというイメージである。図4は、ボールとストリングスが接触している期間 (この場合は約 4 ms) のスライス (アンダースピン) の掛かり始めの様子を示す。図5は、インパクト直後のスライスのスピン挙動である。

図6は、アマのスライス (アンダー・スピン) 打法とボールの軌道を示す。図7は、インパクト前後のボールとラケットの軌道を示す。この場合も、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。

プロのスライス打法 (図2) とアマのそれ (図6) を比べると、プロの方が打点が身体前方にあり、身体が前方に傾斜して身体重心が打点に近い。

図8は、プロとアマがスライス (アンダー・スピン) でボールを打撃した場合のスピン挙動の比較であり、新品ガットを使用している。プロの打撃では、アマチュアに比べて、トップスピンほどの違いはないが、スピン量が多く (平均 1.3 倍)、打球速度も速く (平均 1.25 倍)、ボールとガットの接触時間も長い (平均 1.1 倍)。ボールとガットの接触時間が長いことは、インパクトの衝撃力および手に伝わる衝撃振動の低減も意味する。



(impact)

Fig.2 Under-spin (Slice) swing (1) by a pro tennis player.

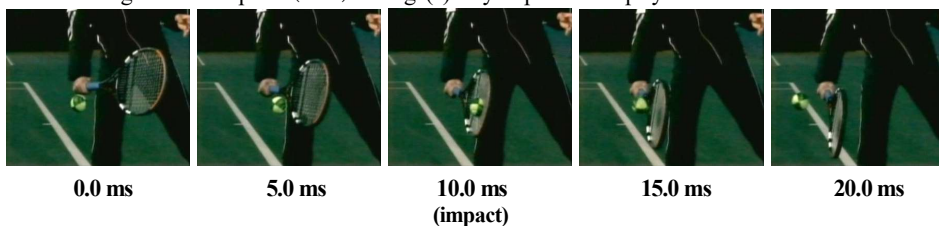
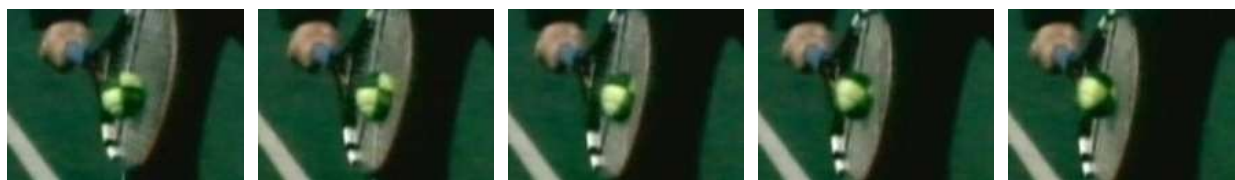


Fig.3 Under-spin (Slice) swing (2) by a pro tennis player: swing trajectory around the impact.



0.0 ms

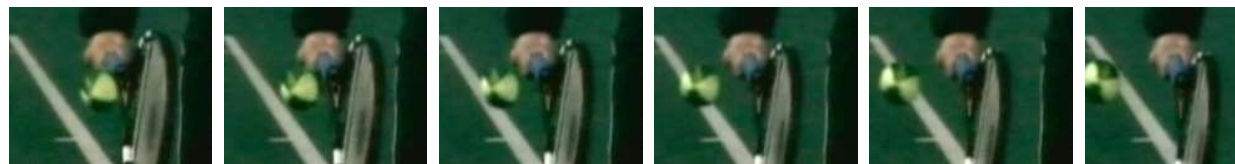
1.0 ms

2.0 ms

3.0 ms

4.0 ms

Fig.4 During impact of under-spin (Slice) by a pro tennis player.



0.0 ms
after release

1.0 ms

2.0 ms

3.0 ms

4.0 ms

5.0 ms

Fig.5 Side view of under spin behavior after release of a ball by a pro tennis player.



0.0 ms

10.0 ms

20.0 ms

30.0 ms

40.0 ms

(impact)

Fig.6 Under-spin (Slice) swing (1) by an amateur player.



0.0ms

5.0ms

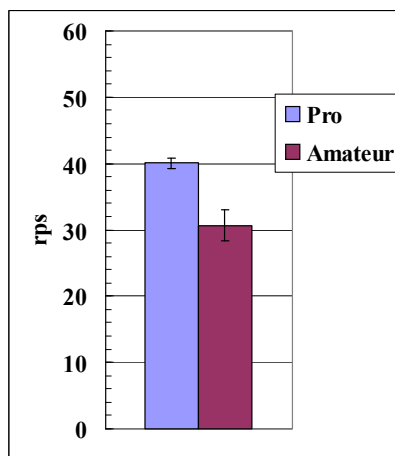
10.0ms

15.0ms

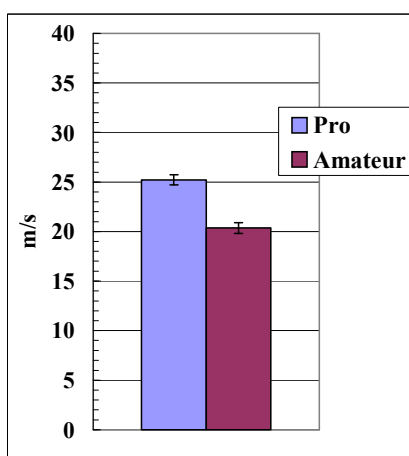
20.0ms

(impact)

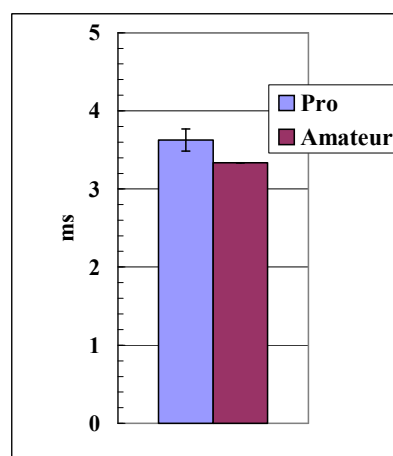
Fig.7 Under-spin (Slice) swing (2) by an amateur player: swing trajectory around the impact.



(a) Ball spin rate ω



(b) Post-impact ball velocity V_B



(c) Contact time T_C

Fig.8 Under-spin (Slice) performance vs. pro and amateur player with average and standard error.

3. テニスボールのスピニング性能によぼすボール毛羽の影響

図9は、テニスボール (右) と毛羽 (フェルト) なしの滑

面ボール (左) である。図10, 図11は、それぞれプロテニスプレーヤーの打撃におけるテニスボール (図10) と毛羽なしボール (図11) のインパクト後のスピニング挙動である。毛羽な

しボールのインパクト後の挙動（図11）にはボールの固有振動（ボールの飛びに関連するエネルギー損失）が見られるが、テニスボールには見られない。

図12は、プロのトップスピン（順回転）打撃におけるテニスボールと毛羽なし（滑面）ボールのスピニング性能測定値である。毛羽なし（滑面）ボールは、スピン量（図a）が顕著に低減し（平均 50 %）、接触時間（図c）も短く（平均 23 %）、スピン量が大きく減少するためにインパクト直後の打球速度（図b）は速い（平均 42 %）。したがって、トップスピンでも、毛羽なし（滑面）ボールの場合は、強打するとボールがコート内に収まらないでコート外に飛び出てしまうことが図12からも容易に想像できる（実験では実際にそうなった）。

図13は、プロのアンダースピン（スライス、逆回転）打撃の場合である。アンダースピンの場合は、トップスピンの場合ほど違いは大きくないが、毛羽なし（滑面）ボールは、スピン量（図a）が平均 18 %低減し、接触時間（図c）も平均 17 %

短く、インパクト直後の打球速度にはほとんど違いが無い。



Fig.9 Tennis ball (right) and a smooth surface ball without felt (left).

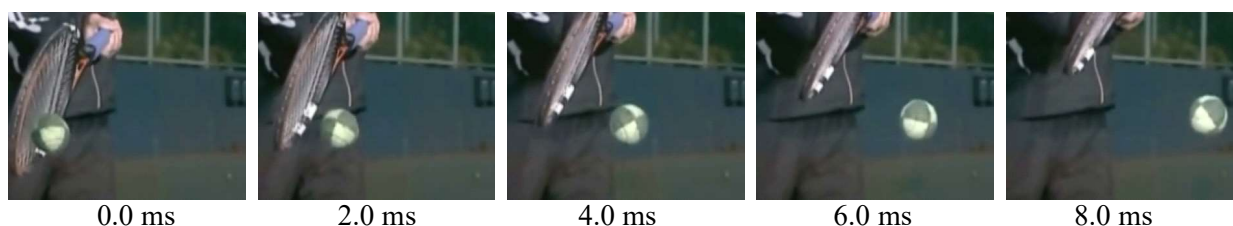


Fig.10 Top-Spin performance of a pro tennis player with a tennis ball. There does not seem to be ball vibrations after impact .

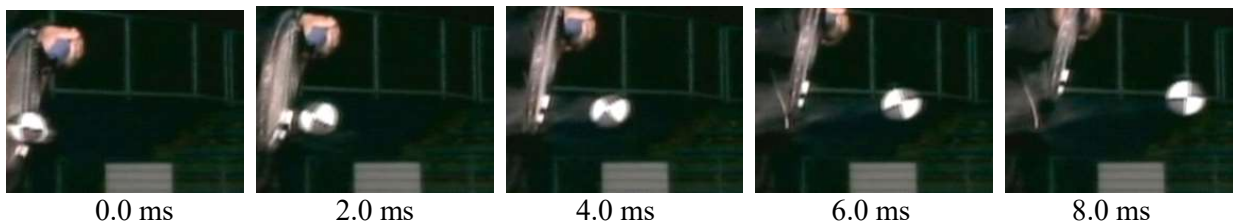


Fig.11 Top-Spin performance of a pro tennis player with a smooth surface ball without felt. There seems to be ball vibrations after impact.

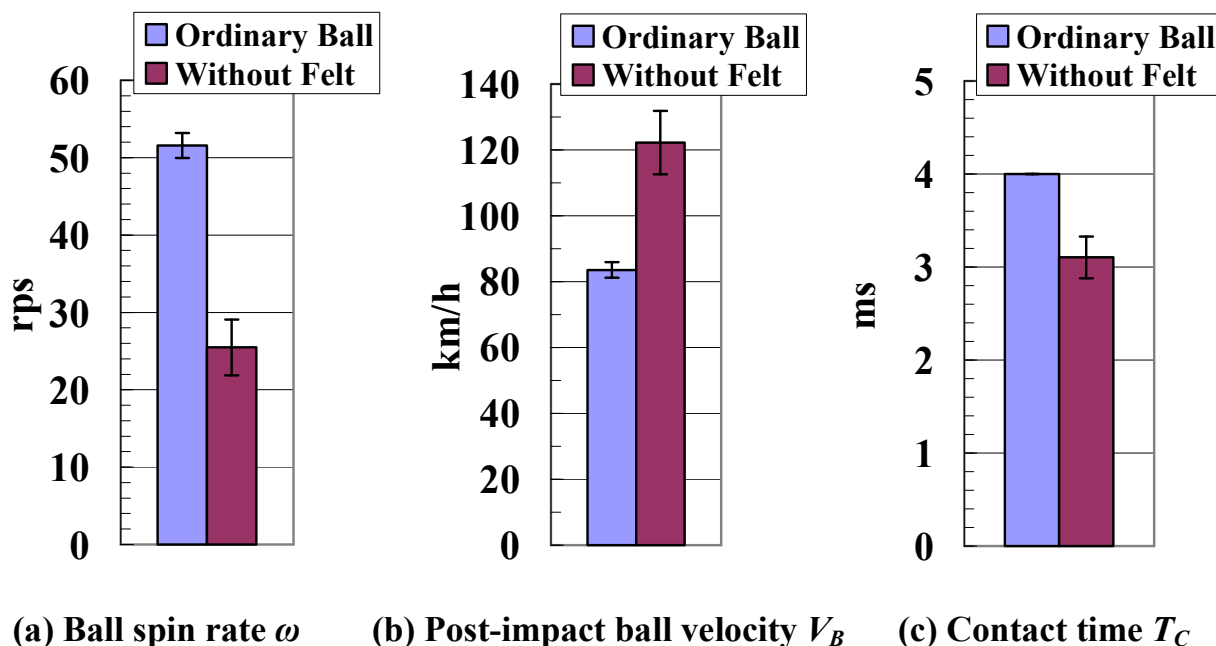


Fig.12 Top-Spin performance of a pro tennis player vs. tennis ball and smooth surface ball without felt with average and standard errors.

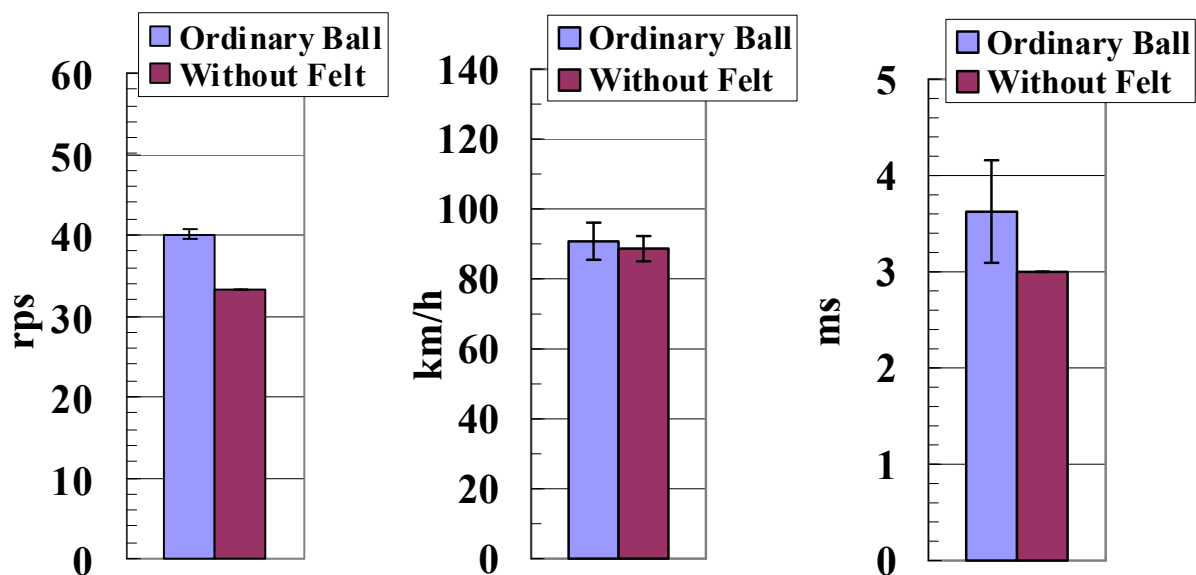


Fig.13 Under-Spin performance of a pro tennis player vs. tennis ball and smooth surface ball without felt with average and standard errors.

4. 回転するボール周りの流れの可視化とスピンによるボールコントロールについての考察 (テニスボールと毛羽なしボールの比較)

図14は、(a) 毛羽なしボール (滑面ボール) と (b) テニスボールが30m/sで飛びながら3500 rpmで回転 (反時計方向: トップスピン) している場合に相当するボール周りの流れを火花追跡法により可視化したものである。タイムラインの間隔により速度の大小が分かる。また、火花はボールに沿って流れ、ある位置で剥がれが生じているのがよく分かる。

一般に物体が回転しながら飛翔する場合にはマグヌス力により飛翔方向に垂直な力が発生する (揚力) ことが知られている。

テニスボール (図14(b)) においては回転側 (下側) の剥離点は上側の剥離点より下流にあり、また、下側の流れが上側の流れよりも加速されるため揚力は図のように下向きに働き、ボール周りの流れは左下がりで飛んでいるようになる。

すなわち、テニスボールにトップスピンを掛けるとボールは飛翔しながら下向きの力が働きコート内の狙ったところ

に確実に落とすことができる。

これに対して、滑面ボールの場合は同じ条件にもかかわらず、図14(a)のように、上側の剥離点は下側より下流に移動しておりテニスボールの剥離点とは異なり、飛翔の向きは飛ぶ方向に頭を上げて飛んでいる形となる。また、ボールの上側の速度は下側の速度より速まることにより、上側の圧力は下側の圧力より低下するため図(a)のように揚力 (逆マグヌス力の発生) が発生する。

したがって、プレイヤーが同じ条件で滑面ボールにトップスピンをかけて打つとコートをお超したり、方向性が定まらないことも多い (ビデオ映像省略)。滑面球の場合は回転速度比 α = ボールの回転速度 / ボールの飛び速度との比により逆マグヌス力の発生する場合と正のマグヌス力が発生する領域とがある。ゴルフボールをドライバーで200mの飛距離をだすプレイヤーがゴルフボールのデインプルを滑面ボールにした場合は、同じ条件でせいぜい80m程度しか飛距離は伸びないことと同じである (逆マグヌス力による)。しかも、打球の方向性が全く定まらなくなる。

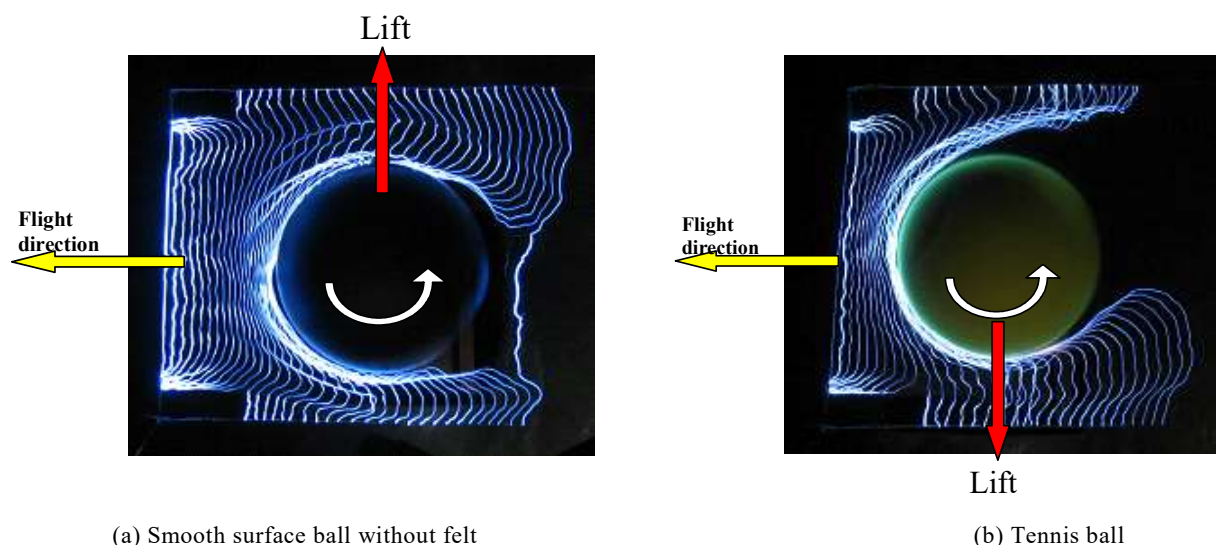


Fig.14 Spin Behavior of tennis ball and smooth surface ball without felt by flow visualization. Ball velocity: 30m/ s , Spin rate: 3500rpm (Top spin)

5. 結 論

(1) 前報⁽¹⁵⁾に述べたトップスピンとともに試合でよく使われるスライス（アンダー・スピン）打撃について、プロ・テニスプレイヤーとアマチュア・プレイヤーのスピン挙動を超高速度ビデオ画像解析により定量的に解析した。プロの打撃では、アマチュアに比べて、トップスピンほどの違いはないが、スピン量が多く（新品の天然ガット：平均 1.3 倍）、打球速度も速く（平均 1.25 倍）、ボールとガットの接触時間も長かった（平均 1.1 倍）。ボールとガットの接触時間が長いことは、インパクトの衝撃力および手に伝わる衝撃振動の低減も意味する。

(2) 毛羽なし（滑面）ボールのプロによるインパクト後の挙動にはボールの固有振動（エネルギー損失）が見られ、トップスピン打撃では、毛羽なしボールは、スピン量が平均 50 %低減し、接触時間も平均 23 %短く、スピン量が大きく減少するためにインパクト直後の打球速度は平均 42 %速い。スライス（アンダー・スピン）打撃の場合も、トップスピンの場合ほどの違いはないが、同様の傾向を示した。

(3) トップスピンの場合、ボールの毛羽により揚力は下向きに働き、強打してもボールをコート内の狙ったところに落としやすくなるが、毛羽なしボールの場合は、揚力は上向きに働き、ボールコントロールが非常に難しくなる。テニスボールの毛羽（フェルト）は、スピン性能、特に強打するときのボールコントロールに極めて重要であることが流れの可視化を併用することにより明らかになった。

謝 辞

本研究は、おもに NHK テレビ番組の制作過程での実験データをまとめたものであり、ご助力いただいた日本放送協会および同放送技術研究所・丸山裕孝氏、(株)ドキュメンタリジャパン・松山功氏および佐藤雅俊氏、日本テニス協会およびプロテニスプレイヤー・宮崎雅俊氏ほかの諸氏に厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) 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.
- (2) 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, pp.61- 69. (2003). London: International Tennis Federation.
- (3) Kawazoe, Y., Impact phenomena between racket and ball during tennis stroke, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.41 (1992), pp.3-13.
- (4) Kawazoe, Y., Coefficient of restitution between a ball and a tennis racket, *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.42, (1993), pp.197-208.

- (5) Kawazoe, Y., Mechanism of High-Tech Tennis Rackets Performance, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.51, (2002), pp.177-187.
- (6) Y. Kawazoe, Computer aided performance prediction and estimation system for a tennis racket in terms of power and stability. *The engineering of Sport* 5, Vol.2, pp.633-640. ISEA, (2004)
- (7) Y. Kawazoe, Experimental Identification of Hand-held Tennis Racket Characteristics and Prediction of Rebound Ball Velocity at Impact, *Theoretical and Applied Mechanics*, 46, 165-176. (1997).
- (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., 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, pp.105-112. (2003). London: International Tennis Federation.
- (10) 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, Vol.1, pp.393-399. ISEA, (2004)
- (11) Lindsey, C., Did you Hear What the Ball Said to the Strings? —“BITE ME !”, *Racquet Tech* (The Official Publication of the United States Racquet Stringers Association), October 2003, p.2.
- (12) Cross, R., Oblique impact of a tennis ball on the strings of a tennis racket, *Sport Engineering*, (2003) 6, pp.235-254.
- (13) Goodwill, S & Haake, S., Effect of string tension on the impact between a tennis ball and racket, *The engineering of Sport* 5, Vol.2, pp.3-9. International Sports Engineering Association. (2004)
- (14) Kawazoe, Y., Okimoto, K. and Okimoto, K., "Mechanism of Racket Spin Performance in Tennis: Spin Performance Improvement by Lubrication of String Intersections with Super High Speed Video Analysis", *Trans. JSME*, Vol.72, No.718, (2006), pp.1900-1907. (in Japanese)
- (15) Kawazoe, Y., Takeda, Y. and Nakagawa, M., Effect of String Notches on Tennis Racket Spin Performance (Ball Spin Rate, Contact Time and Post-Impact Ball Velocity with Ultra-high-Speed Video Analysis), *Trans. JSME*, (in Japanese) (submitted)
- (16) Goodwill, S & Haake, S., Why were 'spaghetti string' rackets banned in the game of tennis?, *The engineering of Sport* 4, pp.231-237. Blackwell Science, (2002) Oxford.
- (17) Cross, R., Properties of tennis equipment: balls that bite, rackets that don't vibrate and strings don't make any difference, *Tennis Science & Technology* 2, pp.17-29. International Tennis Federation, (2003).