2646
日本機械学会論文集（C 編）
76 巻 770 号(2010-10)
論文 No. 09-0741

テニスラケットのスピン性能におよぼすガット・ノッチの影響（スピン量・接触時間・打球速度の超高速ビデオ画像解析）

川副嘉彦 *1, 武田幸宏 *2 中川慎理 *3

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)

Yoshihiko KAWAZOE *4, Yukihiro TAKEDA and Masamichi NAKAGAWA

*4 Department of Human-Robotics, Saitama Institute of Technology,
1690, Fusaiji, Fukaya, Saitama, 369-0293 Japan

There has been no question that some strings do provide a better grip than others, but that did not guarantee that the ball will produce more spin. Furthermore, experiments with hand-held rackets has been needed to solve the vexed question of how players can tell the difference between different strings when laboratory tests indicate that they should play the same. The previous paper of the authors made clear the mechanism of top spin performance in actual tennis and its improvement by lubrication of notched nylon strings according to the high speed video analysis on the court for the first time. It succeeded in an experiment showing that 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. This paper showed that the ball is given less spin rate (40 % decrease) with the notched used strings compared to that with the new strings in the case of the nylon in this experiment, which has remained to be seen which gives more spin between new strings and the lubricated used strings, and it showed that the ball is given more extra spin (30 % increase) by oil lubrication at the string intersections compared to that with the notched used nylon strings. Furthermore, it also showed that the used natural gut with notches decrease 70 % of spin rate compared to the new natural gut without notches in the another experiment, which has remained to be seen whether the same results will be obtained. It also showed the difference of the topspin behavior when a pro and an amateur hits a ball.

Key Words: Sport Engineering, Contact Problem, Human Vibration, Tennis Racket Strings, Impact, Ball, Top-Spin, Notch, Ultrahigh-Speed Video Analysis

1. 緒 言

テニスラケットは，素材の複合化により設計・製造の自由度が大きくなり，現在は，身体的条件や技術的条件の異なる使用者との整合を考慮したきめの細かい設計を目指す段階に至っている．打球感の改善をめざして圧電素子をラケット首部に組み込んだものやグロメットに滑車を使用したものなど，種々のラケットが市販されている．

ラケットを振るプレーヤーの動作（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)]．

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，コントロールには適切なスピン（回転）が必要である．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上がるので，打ち返すのが難しい．

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良くなるとともに，一般プレーヤーでもトップスピン打法が一般的になり，ラケットやストリングスの種類とスピン性能の関係に関心が集まる一方で，長い間の研究にもかかわらず，現在数百種類も市販さ

*原稿受付 2009 年 8 月 日.
*1 正員，フェロー，埼玉工業大学工学部（〒369-0293 深谷市普済寺 1690）
*2 埼玉工業大学大学院工学研究科
*3 埼玉工業大学工学部
E-mail: kawazoe@sit.ac.jp

れているストリングスの種類・材料・ゲージ（素線直径）・張力などがどのようにスピンに影響するかは不明である．

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ー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の種類や張り上がりテンション（初張力）とスピン性能の間には明確な関係は見られなかった．したがって，プレーヤーが打撃したときのスピン挙動がどうなるかが残された問題であった．すなわち，実験室ではストリングの違いが出ないのに，プレーヤーはストリングの違いを感じるという長い間議論されてきた問題を解決するために，インパクトの再現性が難しい実験であるが，プレーヤーによる実打実験が必要とされている．

そこで,著者らは前報[14]において，コート上でのテスターによるインパクトの超高速ビデオ画像解析（10,000 fps）と衝突シミュレーションによりラケットのスピン性能の謎を初めて明らかにした．すなわち，

(1) ストリングの摩擦が大きいほどスピンがかかるという従来の仮説とは逆に，摩擦が小さくて縦糸と横糸がお互いにすべって交差点がずれ，縦糸が横に伸びて戻るときの復原力によりスピン量が増す（図1）．

(2) ストリングス交差点を潤滑すると，ボールにスピンがかかりやすくなる．

(3) スピン量が増すと接触時間も長くなる．

(4) 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．

(5) プラスティックのチューブを使って摩擦を減らして過度のスピンがかかるようにした理由で過去に使用が禁止された「スパゲッティ」ラケット[15]とストリングス交差点潤滑ラケットはスピンのメカニズムが良く似ている．

(6) 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，スピンがかかりやすい．

(7) 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．

この[14]実験では，ラケットを１週間毎日３時間使用してノッチ（溝）のできたナイロン・ストリングス（ヨネックス AERON SUPER 850 ）をシリコン系オイル（国際特許取得，ITF のルールにも適合）で潤滑した場合，トップスピン打撃においてスピン量は平均 30%回復し，接触時間は平均 16%長くなり，直線的な打球速度の低減は平均 6%であった[14]．

本論文では，まず，ノッチ（溝）のできたナイロン・ストリングス（ヨネックス AERON SUPER 850 ）とノッチのない新品について，トップスピン性能を比較する．ノッチのできたストリングスの交差点に潤滑剤を塗布したラケットのスピン量が著しく増大するという前報[14]の結果が国際テニス連盟（ITF）の Technical Commission の議題になり，提出した潤滑剤のサンプルは現在のルールには違反しないが，ストリングスのスピン発生剤に関するルールを確立するプロジェクトが始まっており，将来はルール変更もありうるという通知がきたのがこの課題を設定した理由である．前報[14]同様の一連の実験であり，ノッチのできたストリングスに潤滑剤を塗布してもノッチの無い新品のストリングスのスピン性能にはおよばないことを実証する．

本論文は，ストリングスのノッチの程度あるいはストリングスの消耗の程度とスピン量の関係を定量的に調べることが目的ではなく,ストリング交差点のノッチの存在がスピン性能を著しく低減させること，インパクトにおいて縦糸と横糸が滑りやすいほどスピンがかかりやすいこと，従来の仮説とは逆に（カタログのスピンガットの説明とは異なって），従来ほとんど使用されなかった固くて磨耗しにくいポリエステル[14]を，トップスピンを得意とするプロだけではなく，ほとんどのプレーヤーが最近使っていることが示すように，摩擦の少ないストリング素材ほどスピンがかかりやすく，したがってボールコントロールが容易になる可能性が大いにあることを指摘し，従来のストリングス設計概念に新風を吹き込み，新しいフロンティアを切り拓きたいというのが主目的である．

次に，ガット（天然ストリングス）の場合について，

1.7 ms after contact (T506_f159_L4)

Fig.1 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.

ノッチの出来たガットと新品のガットをプロテニスプレーヤーがトップスピン打撃したときのスピン挙動を比較し，ノッチの出来たガットのスピン性能の低下を超高速ビデオ画像解析により定量的に調べる．多種多様なストリングスが市販されており，天然ガットの性能は多くのプレーヤーの関心事である．ノッチのできた天然ガットのスピン性能が，新品ガットと比べて，どの程度低下するのかは極めて興味深い．

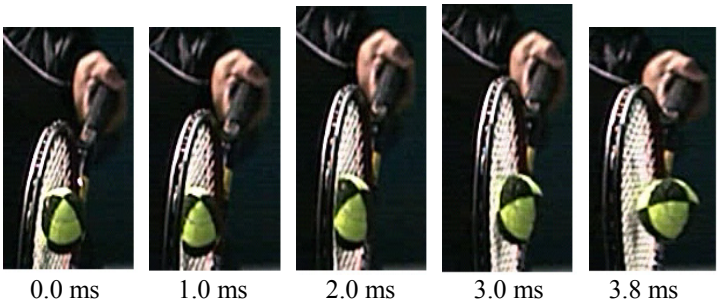
さらにプロとアマチュアのプレーヤーによるスピン挙動を比較し，定量的に評価する．テニス（一般にスポーツ）は体験により修得するものであるから主観的な面が大きく，用具の性能もプレーヤーによって変わる．プロとアマチュアがトップスピン打撃したときのボールのスピン挙動の違いも極めて興味深い．

2. ナイロン・ストリングスのスピン性能におよぼすノッチの影響

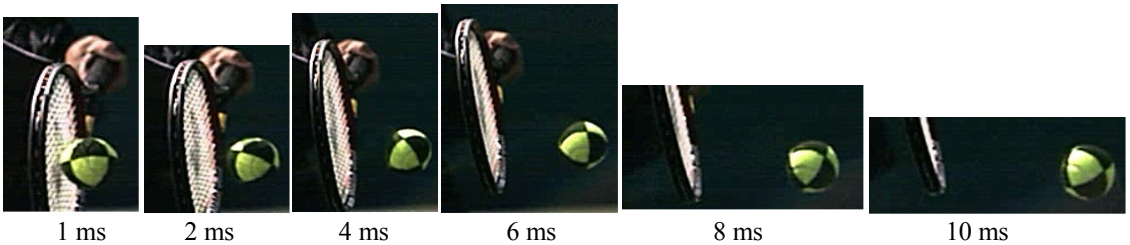
ノッチのできたストリングスの交差点に塗布することによりスピン量を著しく増大させる潤滑剤（共同研究者が国際特許取得）[14] が国際テニス連盟（ITF）のルールに現在は違反しないが，スピン発生剤についてのルールを確立するプロジェクトが始まっており，将来はルール変更もありうるという通知が来たので,本章ではノッチのできたストリングスに潤滑剤を塗布してもノッチの無い新品のストリングスのスピン性能にはおよばないことを実証する．前報 [14] と同様の一連の実験の一部であり，テスターや測定条件は同一である．

図 2 は，新品のナイロン・ストリングス（ヨネックス AERON SUPER 850 ）を張ったラケットでトップスピン打撃したときのスピン挙動を 10,000［fps］で横から撮影したコマ写真の例である．図 2(a)は，ボールとストリングスが接触している接触時間内のスピン挙動であり,スピンが生まれる様子がわかる．図 2(b)はボールがストリングスを離れてからのボールの回転の様子がわかる．

図 3 は，前報[14] と同様に，図 2 のようにインパクトの瞬間にラケットが真横になるような撮影とラケットの真後ろになるような撮影の両方により，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週間使用したストリングスをシリコン系オイル（国際特許取得，ITF のルールにも適合）で潤滑した場合のトップスピン打撃の高速ビデオ画像解析結果をまとめたものである．3 回の試行の平均値と標準誤差であり，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ン量は平均 40 % 低減し，接触時間は平均 8 % 短くなる．しかし，潤滑剤を塗るとスピン量は平均 30% 回復し，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[14]．ノッチのできたストリングスに潤滑剤を塗布するとスピン量は大きく回復するが，ノッチの無い新品のストリングスのスピン量には及ばない．

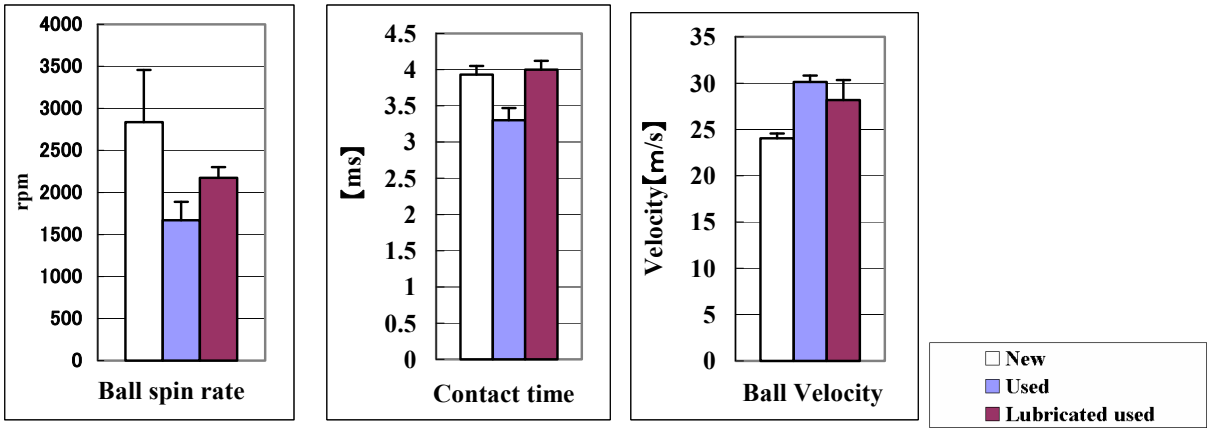


(a) Contact time **: Ball release V_B=24.8 m/s**



(b) **After release**(f77-)

Fig.2 Top spin behavior with a newly strung tennis racket　(Trial 003:f39～)



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

Fig.3 Spin performance vs. string conditions with average and standard error.

図 4 は，プレーヤーがボールを打撃した瞬間に手に伝わる衝撃力を求めるためのモデルを示す．図 5 は手首関節の衝撃振動加速度の予測位置を示す[2][8][10]．

前報[14]では,衝撃振動加速度の算出方法を省略したので，以下にその概要を述べる．

インパクトの瞬間には重力や筋力は衝突力にくらべて小さいとし，腕関節はピン結合として扱い，ハンドルの握りの位置と手首関節の位置の距離を無視し，肩関節に作用する力 S_3 は肩関節の速度には影響しないと仮定し，ボールとストリングスに作用する衝突力を S_o，プレーヤーの手首関節 P1，肘関節 P2，肩関節 P3 に作用する力をそれぞれ S_1，S_2，S_3 とすると，手首関節，肘関節，肩関節の衝撃力成分および衝撃加速度成分を求めることができる．手で支持したラケットの実験モード解析および実打実験の加速度実測波形から減衰を同定することにより，ラケット面上の任意の打点でボールと衝突したときのラケットの握りの位置の振動加速度成分を求めることができる．フォアハンド・グランド・ストロークにおいてラケットで打撃したときの手首関節の実測加速度波形と予測波形は，衝撃成分とフレーム振動の２節曲げ，３節曲げ，２節ねじり，ストリングス面振動１次の４つの振動モード成分を考慮するとかなり一致する．衝撃振動加速度波形 A_{grip} は，以下のように，衝撃加速度成分（第１項）と振動加速度成分（第２項）の和で表せる[2][8][10]．

$$A_{grip} = A_{mv} \sin\left(\frac{\pi t}{Tc}\right) + \sum_{i=1}^{4} A_{vi} e^{-\sigma_i t} \sin 2\pi f_i t$$

ただし，

$$A_{nv}(t) = S_0(t)\,[\,1/(M_R + M_H) - (a/I_G)\,X\,],$$

$$A_{vi}(t) = -(2\pi f_i)^2 r_i\, S_0\,(2\pi f_i),$$

$$\sigma = 2\pi f_i \zeta_i ,$$

である． M_R はラケット質量，M_H は腕系のグリップ位置における換算質量， X は腕・ラケット系の重心位置とグリップ位置との距離，a は腕・ラケット系の重心位置とラケット面上衝突位置との距離， I_G は

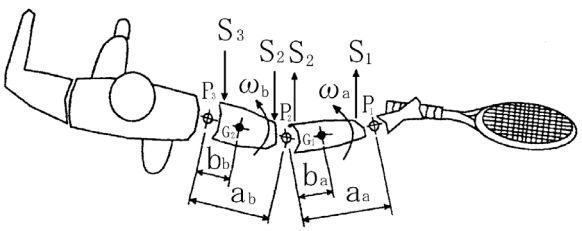
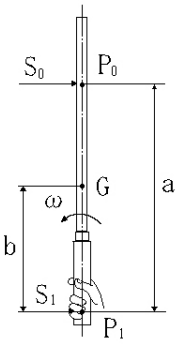


Fig.4 Model for the prediction of the shock force transmitted to the arm joint from a racket.



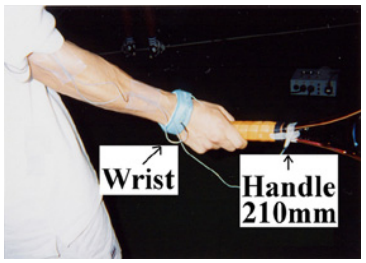
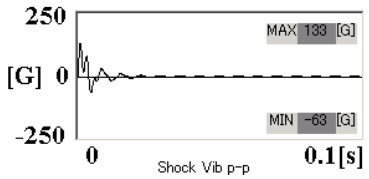


Fig.5 Location of accelerometers at the wrist joint in forehand ground stroke and the racket handle.

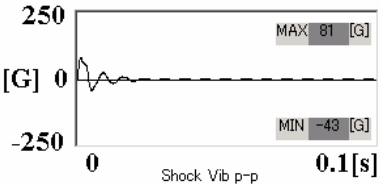
腕・ラケット系の重心位置まわりの慣性モーメント，r_i はグリップ位置とラケット面上の打撃位置との間の留数，手に伝わる最大衝撃力 $S_{1\max}$ は最大衝突力 $S_{0\max}$ に対応する．$A_{vi}(t)$ はグリップ端から 70 [mm]の位置の初期振動加速度振幅の i 次モード成分である[8].

図 6 は，テニスラケットの性能予測・評価システム[17][18] による手首関節の衝撃振動波形の予測結果のディスプレイ画面ハードコピーである．インパクト直後から 0.1 [s] を表示しており，ボールとの衝突位置はラケット面先端側（先端から内側 95 mm）である．記号 G は重力加速度であり，加速度のピークピーク値（MAX と MIN）も表示する．図 6(a) は，衝突速度 30 m/s でスピンのない場合であり，衝撃振動が大きく，振動数の高いストリングの振動も目立つ．図 6(b)はノッチの出来たストリングでのトップスピン,図 6(c)は潤滑剤を塗ったストリングでのトップスピンに相当する．図 6(b), 図 6(c) の垂直成分力積はそれぞれ図 6 (a) の 0.85 倍，0.65 倍である．図 6(d) は，新品のストリングの場合であり，接触時間は潤滑剤を塗ったストリングよりも少し短いが，衝撃振動はほぼ同じ程度である．

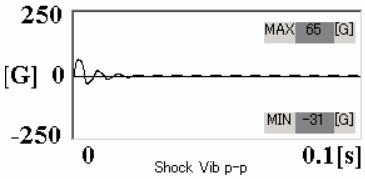
縦糸が横にずれてストリング面に平行な復原力によりスピン量が増大し，接触時間が長くなると，衝突力の垂直成分が低減するので，ボールとストリングスのたわみ変形も減少し，映像（省略）でも，ストリング面全体のたわみが少なく，ボールに接触した部分だけが窪んでいるように見える．また，ラケットのフレーム振動も低減する．これらが，「ボールをくわえる感覚が高まる」「ホールド感が増す」「打球感がマイルドになる」などの新品のストリングスについてのテスターの主観的な打球感に対応すると考えられる．



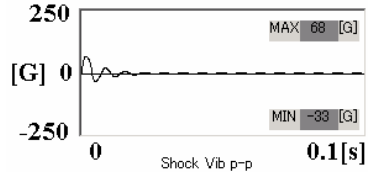
(a) Contact time T_C = 2.6 [ms]
(Flat impact)



(b) Contact time T_C = 3.4 [ms]
(Top spin with used strings)



(c) Contact time T_C = 4.1 [ms]
(Top Spin with lubricated used strings)



(d) Contact time Tc=3.9 ms
(Top Spin with new strings)

Fig.6 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. The horizontal axis shows the time from the impact to 0.1 seconds.

3. ガット（天然ストリングス）のスピン性能におよぼすノッチの影響

多種多様なストリングスが市販されており，天然ガットは高価であるが，多くのプレーヤーの関心を引く．ノッチのできた天然ガットのスピン性能が，新品ガットと比べて，どの程度低下するのかも極めて興味深いテーマである．

この章では,天然ガット（天然のストリングス）の場合について，第一線のプロのテニスプレーヤーによるトップスピン打撃におけるボールのスピン挙動を調べ，ガットにノッチができた場合のスピン性能の低下を超高速ビデオ画像解析により定量的に調べる．

実際のプレーヤーのインパクトを超高速度カメラで鮮明に撮影することは，第 1 章でも述べたように，非常に難しい課題であり，固定された超高速カメラのフレーム内でインパクトできる再現性の高いプロのボール出し技術とスピン打撃技術が必要である．たとえば，現在の市販のボールマシンでは，定められた場所にボールを再現性良く出すことは非常に難しく，ボールが相当にばらつく．球出しも全日本トップクラスのプレーヤーに依頼した．今回の撮影は，日本放送協会と日本テニス協会の協力により難しい条件を乗り越えて実施できた結果である．

以下の実験データは，テレビ番組の制作過程においてプロ・テニスプレーヤーの打撃におけるスピン挙動を超高速ビデオ映像解析により得たものである．

図 7(a) はスピン挙動を横から撮影するためのカメラの設定風景であり，図 7(b) は真正面からスピン軌

道を撮影するためのカメラとボールを跳ね返すための透明の反射板装置の設定の様子を示す．カメラは，第2章の実験で使用した（株）ナックイメージテクノロジー製・高速カラーカメラ MEMRECAMfx 6000（最高 210,000 コマ/秒）のほかに，超高速カラーカメラ ULTRA Cam HS-106E（1,250,000 コマ／秒，最短 100ns の超高速シャッタ）を使用した．HS-106E は，NHK 放送技術研究所と近畿大学江藤剛治教授が共同開発した ISIS(In-situ Image Storage)-CCD イメージセンサーを採用し，（株）日立国際電気が製品化し，（株）ナックイメージテクノロジーがシステム化・販売している．第2章の実験と同様に，リモート制御ソフト fxLINK を使用した．

図8は，プレーヤーがボールを打撃したときのトップスピン挙動の解析画面例である．画像解析には，第2章の実験と同様に，おもに運動解析ソフトウェア nac MOVIAS Pro-LAA を使用し2次元解析を行った．写真では見にくいが，図 8(a)のように時間当たりのボールの回転角度からスピン（回転）速度と図 8(b)のように時間当たりの直線距離から直線速度を求めることができる．

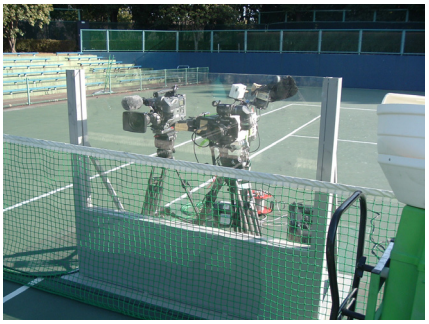
図9は，おもにボールとストリングス（第3章では，天然ガット：牛の腸を使用）が接触してから離れるまでのボールとガットの接触時間や動きを解析するために真後ろから撮影した映像の1コマであり，縦糸が横にずれている様子が見える．今回の実験では，真横からの撮影と真後ろからの撮影は同期させないで別々に試行した．第2章では，ボールとストリングスの接触時間のほかに接触面積も解析したが，本論文は細かい数値を詳細に測定することが目的ではなく，ストリングスの設計概念に新風を吹き込み，新しいフロンティアを切り拓きたいというのが主目的であるので，接触面積やストリングスのズレの量などの数値の算出は省略した．

図 10 は，実験に使用した試合後の使用ガットの顕微鏡写真であり，動画からのコマ写真なのでコントラストがよくないが，ノッチ（溝）は明瞭に見える．

図 11 は，日本のトッププロ・テニスプレーヤーによるトップスピン打撃におけるインパクト前後のスイング軌道の概略を示し，図 12 は，ボールとガットが接触している期間中のトップスピン挙動を示す．　図 13 は，インパクト後にボールがストリングスを離れてからのスピン挙動であり，回転が分かりやすいようにボールに印をつけている．

図 11～図 13 のコマ写真を解析してボールのスピン角速度および直線速度を算出した．

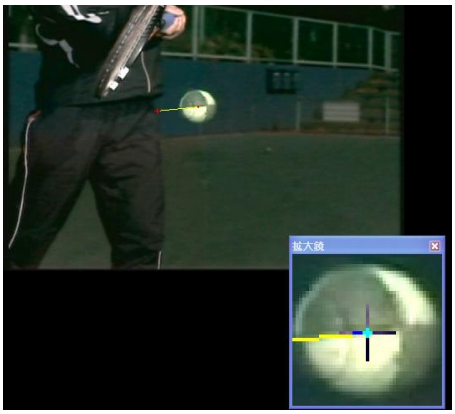
(a)



(b)

Fig.7 View of the experimental setting.

(a) Analysis of spin rate



(b) Analysis of ball velocity

Fig.8 View of impact and spin behavior analysis.

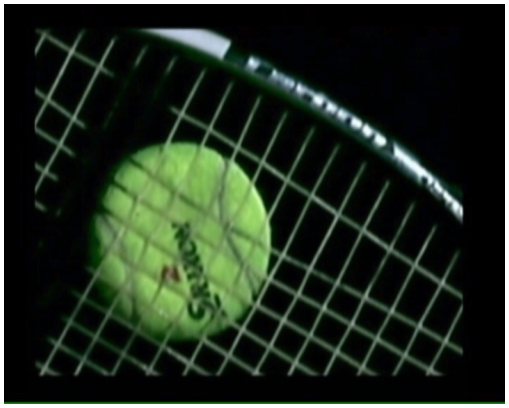


Fig.9 Ball spin behavior and the mechanism of spin rate increase by stretching and sliding sideways and springing back of main strings at the string intersections when a ball is released from the string bed in the case of new Gut.

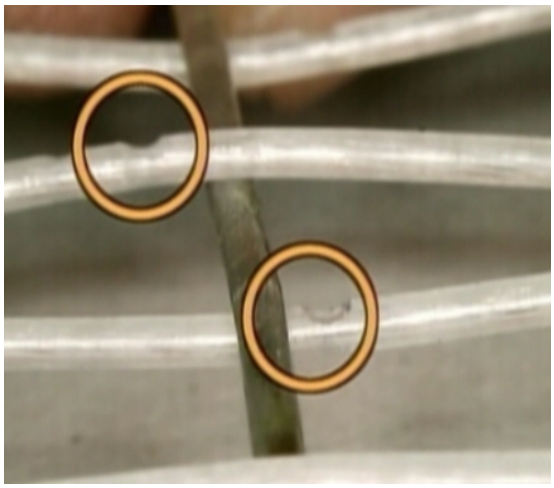
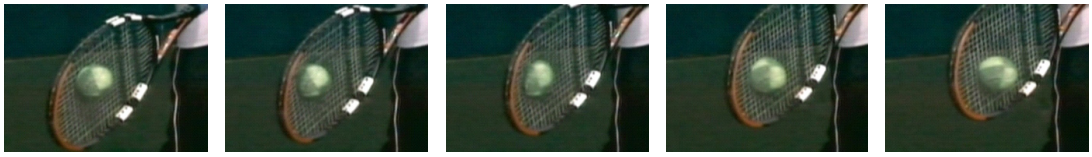


Fig.10 Used Gut with notches at the intersections.

0.0 ms **7.5 ms** **15.0 ms** (impact) **22.5 ms** **30 ms**

Fig.11 Top-spin swing by a pro tennis player.



0.0 ms **1.0 ms** **2.0 ms** **3.0 ms** **4.0 ms**

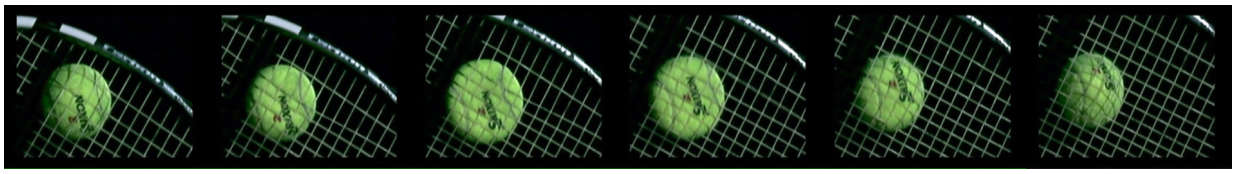
contact **release**

Fig.12 During Impact of the top-spin by a pro tennis player.

0.0 ms **1.0 ms** **2.0 ms** **3.0 ms** **4.0 ms** **5.0 ms**

after release

Fig.13 Side view of ball top spin behavior by a pro tennis player in the case of new Gut (about 50 rps).



0ms 0.6ms 1.4ms 2.2ms 3.0ms 3.8ms

contact **release**

Fig.14 Top-Spin behavior and the mechanism of spin rate increase by stretching and sliding sideways and springing back of main strings at the string intersections in the case of new Gut.

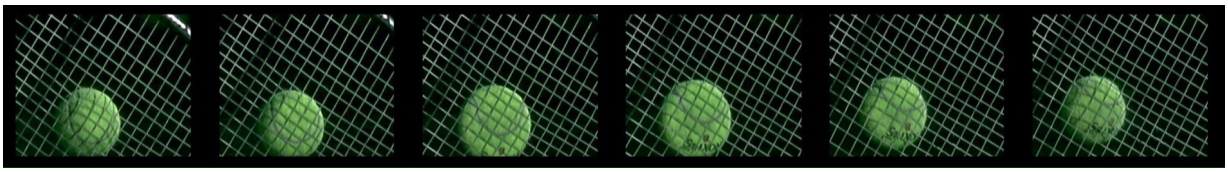
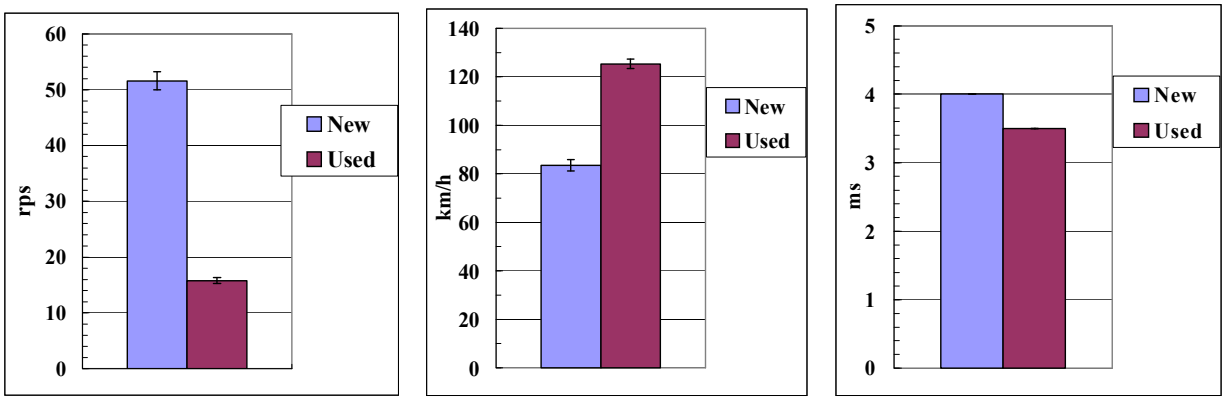


Fig.15 Top-Spin behavior in the case of used gut.



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

Fig.16 Top-Spin performance of a pro tennis player vs. new and used Guts with average and standard errors.

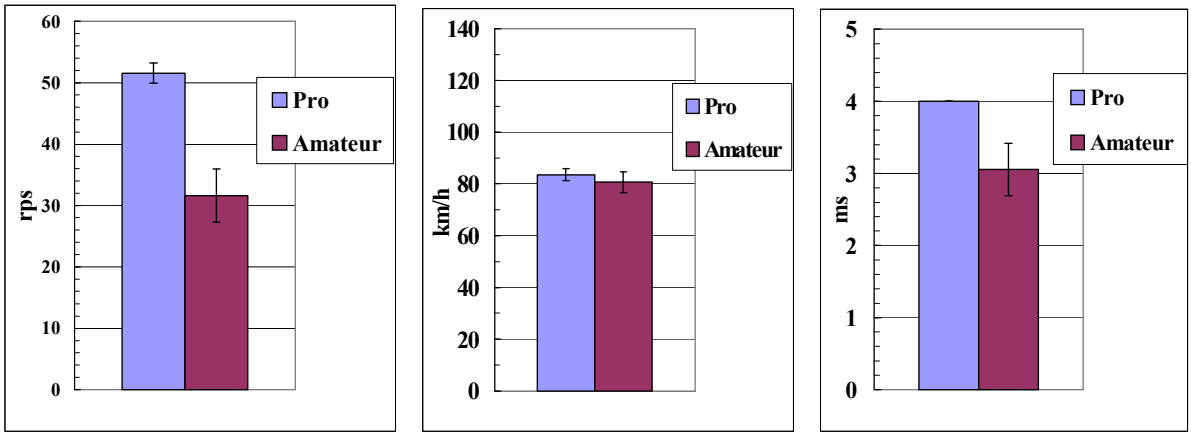
Fig.17 Top-spin swing by an amateur tennis player.

図 14 は，新品ガットを張ってプロが打撃したときのラケットの後側から撮影したインパクト挙動（接触始めから接触終わりまで）である．ラケットの縦糸が横にずれてボールが食い込み，縦糸が戻るときに回転が掛かる様子が見れる．

図 15 は，プロが試合で使った後のノッチのできたガットを使用してトップスピン打撃したときのインパクト挙動（接触始めから接触終わりまで）である．ノッチのできたラケットを使用した場合は，縦糸の横への「ずれ」が小さい．

図 16 は，図 11～図 13 に示したコマ写真から算出したスピン角速度および直線速度と図 14，図 15 から算出したボールとガットの接触時間とを表示したものであり，ノッチのできた試合後のガットおよびノッチの無い新品ガットでプロが打撃したときのトップスピン挙動解析結果の比較である．試合後のガットには交差点に深い溝ができており，トップスピン打法で打撃したとき，縦糸の横方向への「ずれ」と戻りによる面内復原力が少ないために，スピン量が顕著に低減し（70 % 低減），接触時間も短く（13 % 低減），前報[14]で明らかにしたトップスピンのメカニズムを裏付ける結果であった．

新品ガットでプロ・テニスプレーヤーが打撃した場合のトップスピンは毎秒約 50 回転であり，別報に述べるが，ボールがバウンドした後に相手のラケットが届かないくらいに跳ね上がる．インパクト直後の打球速度は，スピン量が大きく減少するためにノッチのあるガットの方が速くなっている（50 % 増大）．ビデオ映像によると，試合後のガットの場合はスピン量が新品ガットの場合の 30 % であり，新品ガットの場合



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

Fig.18 Gut top-spin performance comparison between a pro and an amateur player with average and standard error.

のバウンド後のボールが身長よりはるかに高く弾むのに比べて，バウンド後のボールの勢いは小さい．

図 17 は，アマチュア・テニスプレーヤーによるトップスピン打撃におけるインパクト前後のスイング軌道の概略を示す．

図 18 は，図 16 と同様にして算出した結果であり，新品ガットでトップスピン打撃した場合のプロとアマチュア・プレーヤーの比較である．プロの打撃では，アマチュアのそれに比べて，打球の直線速度の差は少ないが，スピン量は 1.6 倍（60 %）大きい．また，スピン量が大きいためにボールとガットの接触時間が 1.3 倍（30 %）も長く，一般にトップスピンで強打すると上肢に伝わる衝撃振動は大きいというイメージがあるが，スピン量が多いと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になる．

4. 結　言

ナイロン・ストリングスおよびガット（天然ストリングス：牛の腸）について，ノッチ（交差点にできる溝）のトップスピン性能におよぼす影響を超高速ビデオ画像解析により定量的に明らかにした．

(1) ナイロン・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ン量は平均 40 % 低減し，接触時間は平均 8 % 短くなった．ノッチのできたストリングスに潤滑剤を塗布するとスピン量は大きく回復するが，ノッチの無い新品には及ばない．

(2) ガットの場合は，プロ・テニスプレイヤーが試合に使った後のノッチの出来たラケットでは，スピン量が平均 70 % 低減し，接触時間は平均 13 % 短くなり，前報 [14] で明らかにしたトップスピンのメカニズムを裏付ける結果であった．

(3) 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，スピン量が平均 1.6 倍，接触時間が 1.3 倍であった．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になる．

(4) 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という実験結果[16]は周知されつつあるが，スピン性能は極端に低下する．

「スピンガット」と称されるものが市販されている．通常のガットの丸い断面に対して，角がある異形な断面を持つタイプや通常のガットの周囲に細い繊維を配置してガット表面に凸形状を形成するものなどがあり，ガット表面にある角もしくは凸形状にボールをひっかけて摩擦を増やすことでスピンの掛かりやすさをねらい,スピン量を増大するという発想である．したがって，ストリングスのスピン特性の研究もこの線上で行われてきた．しかし，ガット（ストリングス）はメイン（縦）とクロス（横）を交互に裏表になるように編んで張られている（規則）ので，ガット面には十分な突起がすでに形成されており,スピンガットの突起形状がゲージ径（ガットの直径）の 10 分の 1 にも満たないのに対して，メインとクロスによって作られる凸凹はゲージ径の大きさそのままであり，ボールを捕らえた時の摩擦力はどちらが支配的なのかは明らかであるといった指摘は，一般プレーヤーにも従来から少なからず存在する．

一方，硬くて摩擦の少ないポリエステルのストリングは，切れにくいだけではなく，飛び過ぎない（強打してもコート内に収まる）というのがプレーヤーの経

験的な評価であり，スピンがかかるほど直線速度は減少するという本論文の実験結果とも一致している．メーカーの設計思想とトッププレーヤーの感覚は矛盾しており，一般のプレーヤーには混乱が見られる．従来のスピン・ガットの設計概念を質的に変える必要があることを指摘したい．なお,張りあがりの新品ストリングでも放置しておくとストリング交差点にノッチができるので，スピン性能は低下することになる．

アンダースピン（スライス）の場合のスピン挙動およびスピンとボールコントロールにおよぼすボールの毛羽の影響については別報に述べる．

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，ご協力いただいた日本放送協会・丸山裕孝氏，㈱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ーヤー・宮崎雅俊氏ほかの諸氏に厚くお礼申し上げる．また，Prof. Howard Brody（ペンシルベニア大学名誉教授，テニス殿堂入り）からの以下のメッセジに勇気付けられたことを付記する．

Dear Prof Kawazoe
Thank you for sending your two papers on spin to me. I have forwarded them to Stuart Miller (ITF), Rod Cross, and Steve Davis (Prince). Several years ago, Rod Cross and I figured out how and why SPAGHETTI stringing gave more spin. We never did an experiment to test our theory. You have now done a very nice experiment that proves that low friction leads to more spin. Keep up the good work and I hope you are feeling well.
Howard Brody

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) Kawazoe, Y., 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) Kawazoe, Y., 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) Kawazoe, Y., Casolo, F., Tomosue, R. and Yoshinari, K., 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) 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.
(16) 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).
(17) Kawazoe, Y., Takeda, Y., Nakagawa, M., Casolo, F., Tomosue, R. and Yoshinari, K., Prediction of Impact Shock Vibrations at Tennis Player's Wrist Joint: Comparison between Conventional Weight Racket and Light Weight Racket with Super Large Head Size, Journal of System Design and Dynamics, Japanese Society of Mechanical Engineers, Vol.4, No.2, pp.331-347.(2010)
(18) Kawazoe, Y., Takeda, Y. and Nakagawa, M., Performance Prediction of Active Piezo Fiber Rackets in Terms of Tennis Power, Journal of System Design and Dynamics, Japanese Society of Mechanical Engineers, Vol.4, No.1, (2010), pp.77-90.