

テニスラケットのストリング性能論 2 (ボールコントロールとスピンにおよぼす諸因子の影響)

川副 嘉彦^{*1}

Practical String performance theory 1 of the tennis racket (Effects of Various Parameters on Ball Control and Spin)

Yoshihiko KAWAZOE^{*1}

^{*1} Kawazoe Laboratory
Kaga 2-3-1-904, Itabashi-ku, Tokyo, 173-0003 Japan

Recently, International Tennis Federation researchers reported that the same movement that was observed by Kawazoe with lubricated strings occurs with copoly as well. Copoly strings—slippery and stiff—generate more spin not because of more friction, but because of less. The old argument was that the better the grip between the strings and the ball, the more spin we would get, but that was not true. Many experiments has started to investigate whether the lateral movement and snap-back of the main strings increase spin, which strings generate the most spin, and so on. The research has also started to investigate the effect of a inter-string friction upon the main strings movement against the cross strings. Furthermore, the research has started to investigate how tennis strings “Go Dead”. This paper clarified a mechanism for impact that is able to account for the effects of various parameters on ball control, spin performance and string performance life , which is seen in the literature with laboratory experiment compared with experiment by the author who paid its attention to string-to-string friction in player tests.

Key Words : Sport Engineering, Tennis, Racket, Impact, Spin, Strings, Feel, Performance, Going Dead of Strings, Performance Life.

1. 緒 言

1・1 ラケットとプレーヤーの心理の問題

テニスラケットとプレーヤーの心理について、Cross, R. と Lindsey, C. は、2005 年発行（常盤泰輔訳は 2011 年発行）の著書⁽¹⁾で以下のように述べている。

「ラケットの性能に関するいくつかのパラメーターを測定して、実験室で『最良のラケット』を選定することは可能である。しかし、そのラケットが誰か特定のプレーヤーに最適であるということではない。実験でわかるのは、特定のストロークとプレースタイルをもつプレーヤーがそのラケットを使った場合、どんな感触を得る可能性が高いかにすぎない。」、「たとえば、プレーヤーの中に『ストリングの材質はスピンのかかり方に影響する。硬いポリエステル製のストリングを使えば、柔らかいナイロンより強くスピンのかかり方が強くなる』と主張する人がいる。しかし、ストリングの材質もテンションも太さも、スピンにはほとんど影響しないことが、実験で明らかになっている。ポリエステルなどの硬いストリングを使用すると、ラケットのパワーが低下する。このためプレーヤーはより強くスイングするようになり、スイングが速くなってスピンのかかりが強くなる。プレーヤーが主張するように、『硬いストリングを使えば、強いスピンがかかる』のではなく、実際は、低下したパワーを補うためにスイングを速くするから、強いスピンがかかるのである。強いスピンがかかるという結果は事実だが、プレーヤーが述べている因果関係は正しくない。」。

^{*1} 正員, フェロー, 川副研究室 (〒173-0003 東京都板橋区加賀 2-3-1-904)
E-mail: kawazoe.yoshihiko@gmail.com

さらに、以下のような事例⁽¹⁾をあげている。

「ストリングをラケットに張って一定の期間を過ぎると、『ストリングが死んだ』というプレーヤーがいる。確かに、どんなストリングも時間が経てばテンションは低下する。しかし、テンションが下がればストリング面は軟らかくなるから、ボールは速くなるが、遅くはならない。このため、プレーヤーはボールをコートに入れるために、無意識にスイングを遅くするようになる。それとともに、『バサッ』という音がして、ショックが小さくなるから、プレーヤーは打球が弱くなったサインだと感じる。こうした認識はプレーヤーのストロークやショットや作戦に波及する。スイングが遅くなると、スピンのかかり方が弱くなる。さらに、ストリング面が軟らかいとボールとストリングの接触時間が長くなるので、ボールを打ち出す角度が大きくなって、ゆるやかな軌道になるから、ますます、『パワーが下がった』と感じる。しかし、繰り返しになるが、ボールの速度が遅くなったのは、プレーヤーが認識したサインに対して、自ら反応した結果である。皮肉なことに、これはテンションの低下によりストリング面が軟らかくなって、ボールが速くなったために起こった現象である。」

また、ラケットの性能が客観的なものであると同時に、心理的なものでもあることを示した古典的な事例として以下⁽¹⁾をあげている。

「ストリングのテンションが 20 ポンドも違う、あとはまったく同じラケット A と B を比較して、どちらのテンションが高いか当てる実験をしたところ、ツアープロを含むほとんどのプレーヤーが明確に判別できないことがわかった。実験の条件として、プレーヤーはストリング面に触れることを禁止され、ストリング面には衝撃音を抑える振動止が装着された。はじめにラケット A で 4 球打ち、その後でラケット B で 4 球打って両者を比較する実験の結果、両者の違いを感じ取ったプレーヤーでも、どちらのテンションが高いか低いかわからなかった。ラケット A のテンションが高いという人もいたが、ラケット B のテンションが高いという人もいた。要するに、ラケットのパワーとコントロールは、直接明確に感じとることができないのである。プレーヤーによるラケットの評価は、自分が感じたことに対する解釈にもとづいて形成されるのであり、その解釈は、たとえば、ストリング面の衝突音のようなラケットの実際の性能にはほとんど影響しない些細なことに依存することもある。ある意味で、プレーヤーがどんなふうにラケットを評価すべきかを、衝撃音が示唆しているのである。」

最後に、打ったボールが実際は速くないのに、速いボールを打ったようにプレーヤーが錯覚する場合の事例⁽¹⁾を紹介している。

「飛び出すボールの速度が同じでも腕に加わる衝撃が小さくなれば、実際にはパワーの変化がまったくない場合でも、一見ラケットのパワーが大きくなったように感じられる可能性がある。これを検証する唯一の方法は、(a) ラケットの速度、(b) ストリングの打点、(c) 飛んでくるボールの速度、および (d) 打ったボールの速度を測定することであるが、これを検証した者はまだ誰もいない。」

1・2 ストリングと現代のゲームの関係

「超高価なハイテクラケットを使ってもボールはストリングにしか触れない」というテニス雑誌掲載の有名な広告を紹介して、Brody, H.⁽²⁾が古くから重要性を指摘しているストリングについて、Cross, R. と Lindsey, C.⁽¹⁾は、ストリングと現代のゲームの関係について以下の事例を挙げている。

「1990 年ぐらいまで、多くのプロは天然ガットを愛用していた。一般プレーヤーの大半は、天然ガットが効果であり、雨に弱く、耐久性に劣るので、ナイロンのストリングを愛用していた。しかし、現代のほとんどのプロは、天然ガットからポリエステルストリングに切り替えた。その理由は明らかではないが、現代のプロのゲームのスタイルにポリエステルストリングが適しているからだ。しかし、ポリエステルのストリングが一般のプレーヤーに最適とは限らない。」、「ポリエステルは他の素材のストリングより早くテンションが下がる。多くのプレーヤーは、ポリエステルの方がナイロンより長い間テンションを維持するといっているが、実験では、その逆であることが実証されている。ラケットにナイロンのストリングを 60 ポンドのテンションで張り、そのラケットをもってテニスコートに出たとき、テンションは 55 ポンド前後に低下していると思われる。ナイロンのストリングを張ると、最初の 30 分間でテンションが急速に低下し、たとえボールを打たなくても数週間後さらに低下する。ボールを打つ回数が多ければ、テンションはいっそう低下する。しばらくラケットを使っていると、プレーヤーはストリング面が『死んだ』ように感じる。ストリング面から引き締まった新しい感覚が失われ、弛んだように感じ始めるからである。それとともに、実際にはストリング面のパワーが低下していなくても、パワーが低下し

たように感ずることがある。その理由は、ストリングが弛むと感触が軟らかくなり、打球感が弱く感じられるからである。しかし、実際には、ストリングのテンションが低下すると、ストリングのパワーはわずかに増加する。」

一方、「ラケットにポリエステル製のストリングを 60 ポンドのテンションで張った場合、最初の 30 分でテンションが 50 ポンド前後に低下する。しかしながら、ポリエステルは非常に硬いので、テンションが低くてもストリング面が硬く感じられる。この理由は、ポリエステル製のストリングにボールが当たってストリングが数 mm 伸びたとき、ボールが接触している間にテンションが急激に上昇するからである。」

1・3 実験室での測定結果とプレーヤーの感触の不一致の問題

ラケットの本質がコントロールとパワーにあるのに対して、ストリング面の本質は主にコントロールと打球感にあると Cross, R. と Lindsey, C. ⁽¹⁾ は指摘している。すなわち、「ストリングに関する通説は無数にあり、これらは 100 年に及ぶテニスの伝統や経験や神話の蓄積である。科学がこの問題にメスを入れ始めたのはたかだか 10 年前からに過ぎない。今でも、実験室でストリングを測定した結果と、プレーヤーの感触がしばしば一致しない理由がよくわかっていない。また、プレーヤーがよく口にしている、たとえば、『このストリングは、すごくパワーがあってスピニングがよくかかる』という言葉が、物理的に何を意味しているのかは不明である。プレーヤーもコーチもストリンガーも、ストリングの特性がパワーとスピニングに重大な影響を及ぼしていると強く信じているが、ストリングの特性は、これらに対してほとんど影響を及ぼさず、コントロールと打球感に大きな影響を与えている。」

「近年になって科学的に判明したことの多くは、従来の一般的な考え方とは正反対であることだ。どうしてそうなるのかは、それ自体興味深い、その一方で、新たに判明した事実を説明しても理解してもらおうのが難しい。」ということを経験したこととして述べている。

1・4 ストリング・テンションの低下と「寿命 (Going Dead)」の問題

ストリングのテンション低下と「寿命 (Going Dead)」に関して、「ストリングは、いかなる定量的な意味においてもパワーや弾力性を失うことはないし、「寿命」がつかえることもない」、「本来ストリングというものは弾力性を失うことはない。ストリングはいつでも 100% の弾力性を有している」、「何年間も使い古されたストリングは、新品の状態よりも伸びる量が小さい。しかしそれにもかかわらず、ボールと衝突して吸収した弾性エネルギーの 95% を再放出する。」、「ストリングのテンションが低下した場合、あるいは『ストリングが死んだ』とプレーヤーがいう場合でも、ストリングのパワーが低下して再放出するエネルギーが減少することはない。ストリングのパワーは同じである」、「したがってテンションの低下は、『パワー』（ボールの速度）が『死ぬ』という意味ではなく、ショットの衝撃や反応が小さくなること、すなわち『打球感』が『死ぬ』という意味になる」⁽¹⁾ と言われている。

1・5 ストリング・テンションの低下と打球感の問題

テンションの低下がプレーヤーの打球感にどのように影響を及ぼすかについては、(1) プレーヤーが最適だと思うストリング面の硬さのレベル、(2) ストリング面の硬さの変化に対するプレーヤーの感度と、ストリング面の硬さが違うときの感触をプレーヤーがどう解釈するか、などの要因に依存する⁽¹⁾ と言われている。「テンションが低下したラケットでボールを打つと、テンションテンションが高いときと同じ『パンチ』の迫力が得られない。ボールは速くなって遠くへ飛ぶかもしれないが、ショットの快感は低下する。ボールの飛距離が伸びて（狙いが外れて）、実際に『コントロール』が落ちれば、プレーヤーはストロークの速度を下げるから、ショットの快感がいつそう低下する。すなわち、プレーヤーはパワーを失うのではなく、パワーを供給する快感と、コントロール、およびラケットでパンチするときの手応えを失うことになる。要するにショットの衝撃は小さくなるが、パワーは低下するわけではない。ボールを打つ衝撃が小さくなれば、『手応え』も弱くなる。」⁽¹⁾、「打球感の変化をプレーヤーがどう解釈するかは別として、テンションが低くなれば打球感が変化するのは事実であるが、テンションの低下自体は、必ずしも良いことでも悪いことでもない」⁽¹⁾ と言われている。

1・6 ストリング・テンションの低下とコントロールの問題

テンションの低下がコントロール（あるいは、コントロールの感覚）におよぼす影響として、(1) テンションが低下するとストリングからボールに戻されるエネルギーが大きくなるので、スイングの速度が同じ場合、ボールの速度が速くなる、(2) テンションが低下するとボールとラケットの接触時間が長くなるので、スイングの速度が同じ場合、ボールがスイングの弧に沿って運ばれる距離が水平方向、垂直方向ともに長くなって、両方向のショットの角度に影響する、(3) ラケットの中心軸を外してショットした場合、ラケットをねじる力が長い時間

作用するので、ショットの角度のずれが大きくなる、(4) テンションが低下したとき、ボールを打ち出す角度が高くなる現象、⁽¹⁾の4つが挙げられている。

1・7 ストリング・テンションとスピンの関係

「テンションを強くすれば、強いスピンがかかる」という昔からの言い伝えがある一方、「ストリングのテンションは(または太さや、素材は)、ほとんどスピンに影響しない」ことが実験により示されているにもかかわらず、強いスピンがかかるとプレーヤーが主張するのはなぜであろうかという疑問に対しては、(1) ストリングのテンションが強いと、ボールの飛距離が短くなるので、プレーヤーはスイングを速くして飛距離を伸ばす。スイングを速くすればスピンがより強くなる、(2) 強くスピンがかかるという錯覚である。もし、テンションが強いために、ラケットから飛び出すボールの速度が遅くなれば(すなわち、プレーヤーがスイングを速くして飛距離を飛距離を補正しない場合)、スピンの回転速度が同じでも、スピンの回転速度とボール速度の比率は大きくなる。したがって、ボールは、あたかもスピンが強かかったときと同じようにバウンドする、という2通りの答え⁽¹⁾が挙げられている。

1・8 ボールとラケットの接触時間に関する誤解

ストリングのテンションが弱いほど、ボールとストリング面の接触時間が長くなり、テンションが一定の場合、ボール(またはラケット)の速度がかなり速いと、接触時間はわずかに短くなる⁽¹⁾と書かれているが、これは、ハンマーでストリングを叩いたときの実験結果のようであり、実際は、接触時間はボールとラケットの衝突速度に大きく影響され、衝突速度が20 m/sを超えると、テンションの違いがほとんどなくなる。また、スピンがかかるほど接触時間は長くなる⁽²⁾。

「コントロールに関して接触時間が重要な理由は、ボールを打つ瞬間に一部のコーチが主張するように接触時間の最中にプレーヤーがショットをコントロールして方向を確定できるからではなく、ボールを運ぶ距離、すなわち、ラケットがボールと接触している時間に動く距離である」⁽¹⁾とされている。

1・9 ストリングとスピンの関係(スピンに対するストリング面の摩擦の強さの影響)

現代のトップレベルのテニスの試合は、スピンの強さに支配されている。トップスピンが好まれる理由は、かなり強くボールを打っても相手のベースラインを超えないからである。2005年発行のCross, R. と Lindsey, C. の著書⁽¹⁾には、「どんなストリングを使用してもスピンは同じようにかかる。ストリングが軟らかくても硬くても、粘着性があっても、太くても細くても、すべて同じである。スピンの強さは、唯一ストリング面と平行なラケットヘッドの速度に依存する。」⁽¹⁾と書かれている。この部分は、改訂版では書換えられる運命にある。

また、「どうしたら摩擦をもっと大きくして、より強くスピンをかけられるようになるか?」というようなプレーヤーの疑問に対して、「よくあるテニスの通説が与える回答はいくつかあるが、摩擦力を強めることにより、ストリング面とボールの密着の度合いを高めて、ボールに強いスピンをかける、という考え方であり、実際は、どんなストリング面を用いても、スピンのかかり方に関する効果はだいたい同じであり、強いスピンをかけるのはストリング面の特性ではなく、ストロークのテクニックだけである」⁽¹⁾と書いている。

1・10 本研究の目的

第1・1節～第1・9節までの事例は、物理学の基本法則をテニスに当てはめ、コンピュータでシミュレーションし、実験室で検証され、可能な限りテニスコートで確認され、2005年の時点での従来のテニス界の通説に反する新しい考え方も紹介されており、ストリング性能論の本質を考える上で数少ない貴重な資料であるが、テニスのプレーにおける実際のインパクトに近い実験が難しいために、消去法による推測の部分も多く、現時点における最新の考え方に反するものや矛盾する部分もある⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。Lindsey, C. の論文^{(4),(5)}は、これらの不明な部分を可能な限り解明しようという意図である⁽³⁾。

現代のほとんどのプロテニスプレーヤーは、従来の天然ガットやナイロンから、硬くて表面が滑りやすいポリエステルに切り替えた。

本研究では、1本のストリングに(ラケットに張らない状態で)一定のテンションをかけ、それを変形しないハンマーで繰り返し打撃する方法、ストリングを張ったラケットに鉄の錘を繰り返し落下させる方法、テーブル上でラケットの首部と先端部を支えて鉄のロッドで打撃するラケット杭打ち機による方法などを用いたストリング性能の寿命に関するLindsey, C. による実験データ、特にスピン性能に優れたポリエステル系ストリングのデータ^{(4),(5)}を参照して、実験の手法が実際のテニスのプレーを模擬できているかについても吟味しながら、スト

リングの性能と「寿命 (Going Dead)」(張替えの意味と時期の目安) について吟味し、プレーヤーによる実験とも対照して、強打してもボールコントロールができるスピン性能へのストリング諸因子の影響を考察する。

2. ストリングのテンション低下とストリングのバネ剛性

表1は、単一のストリングについて、120 - 140 mph 相当の振り子型ハンマーで繰り返し打撃し、テンション、剛性、最大衝突力、たわみ、接触時間を測定したストリング一覧⁽⁴⁾である。

図1は、打撃回数に対してテンションがどのように低下するかを示す。図2はパーセント表示である。ストリングは、張ってから1分後には最大15ポンド程度低下する。ポリエステルが最もテンションの低下(テンション・ロスと呼ばれる)が大きい。しかし、数分で安定する。さらに、最初の数回の打撃でテンションは大きく低下し、20回の打撃で20ポンドも低下する。その後は、ある程度安定する。62ポンドで張ったストリングを100回打撃した後の初期テンションの差は約30ポンド、10,000回後の外挿値は約40ポンドであり、同じテンションで張ったのに、異常に大きい差異である。しかし、プレーの前に20 - 35ポンド低下した後でさえ、硬いポリエステルは、数ポンドしか低下しない柔らかいナイロンよりも硬いストリング面を形成することができる⁽⁴⁾。前報⁽³⁾に述べたように、ポリエステルは、ナイロンに比べて、ストリングの長手方向バネ剛性が非常に大きく、直角方向バネ剛性は非常に小さく、テンション低下が大きいほど、ストリングは横にずれやすい。テンションが低下しても、ストリング面はたわみにくい、ストリングは横にずれやすいことになる。また、ポリエステルのテンションは大きく低下する(テンションロスが大きい)が、剛性、衝突力ピーク値、接触時間、たわみ量などのパラメーターには違いが少ない。

3. ラケットに張ったストリングについてのケトルベル落下実験と宙吊りラケットへのボール衝突実験

Lindsey⁽⁴⁾は、ラケット Wilson Pro Staff Six. One 100 に4種類のポリエステル・ストリング: Dunlop Black Widow 16, Polyfibre TCS 16, Solinco Tour Bite 16, および Tourna Big Hitter Black 717を、ラケット Wilson Steam 105S にポリエステル・ストリング: Solinco Tour Bite 16を52ポンドで張って、20ポンドのケトルベル(ヤカン型ダンベル)を約10インチから繰り返し落とし、ストリングメイン(縦糸)の横方向のずれを模擬して、ハサ

Table 1 Strings Tested with Pendulum Hammer

Brand	String	Material	Reference Tension (lb)	Number of Hits
Babolat	RPM Team 16	Polyester	62	800
Dunlop	Black Widow 16	Polyester	62	800
Gamma	TNT Touch 16	Nylon	62	800
Gamma	TNT2 16	Nylon	62	4000
Kirschbaum	Pro Line X 16	Polyester	62	800
L-Tec	Premium 3S 17 (1.25)	Polyester	62	800
Luxilon	4G 16L	Polyester	62	7000
Luxilon	Big Banger 16	Polyester	62	4000
MSV	Focus Hex 17L (1.18)	Polyester	62	5500
Polyfibre	TCS 1.30	Polyester	62	2000
Prince	Syn Gut Original 16	Nylon	62	4000
Prince	Tour 16	Polyester	62	3000
Solinco	Tour Bite 16	Polyester	62	9000
Tecnifibre	NRG2 16	Nylon	62	2000
Tourna	Big Hitter Black 7 17	Polyester	62	3000
Wilson	NXT 16	Nylon	62	3500

⁽⁴⁾ (Courtesy of Crawford Lindsey, Tennis Warehouse, Canada)

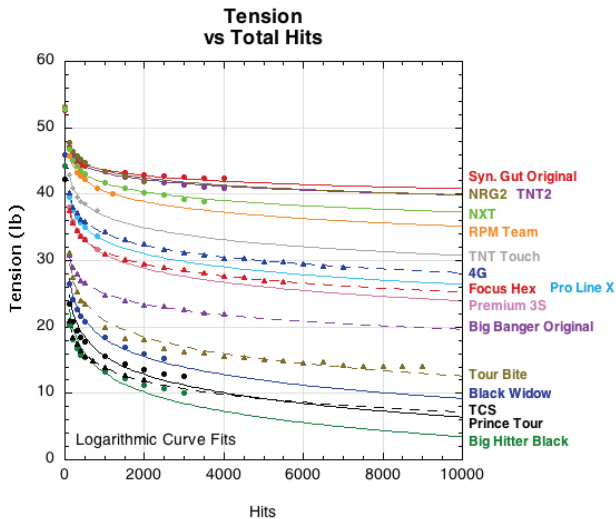


Fig. 1 Absolute change in tension after first 100 hits. Reference tension for all strings was 62 pounds. Each string was at a different tension after the 100 hit break-in period.⁽⁴⁾ (Courtesy of Crawford Lindsey, Tennis Warehouse, Canada)

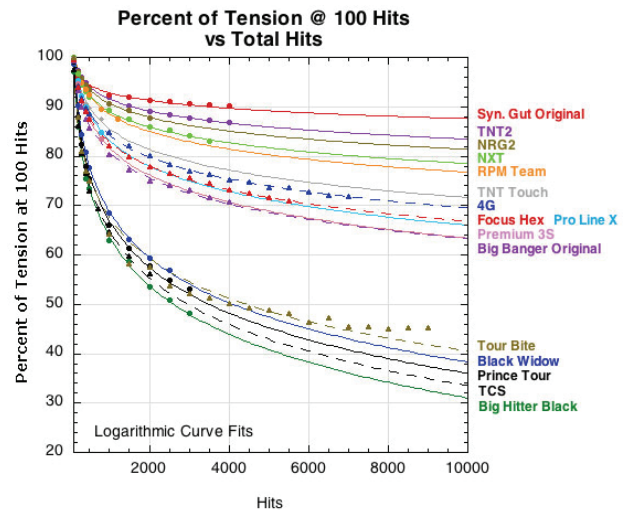


Fig. 2 Percentage change in tension after stringing and break-in.⁽⁴⁾ (Courtesy of Crawford Lindsey, Tennis Warehouse, Canada)

ミを利用してメイン2本を左右に広げて動かし、その後、ボールマシンを使ってボールを宙吊りラケットに衝突させ、15回の衝突実験の速度、スピン、跳ね返り角度の平均値を求めた。しかし、この実験結果からは、繰り返し使用によるストリング性能の変化はほとんど見られなかった。

Lindsey⁽⁴⁾は、次に、宙吊りラケットでの衝突実験では接触時間を測っていないので、接触時間がほんとうに増大するのか、最大衝突力が変化するのかを調べるために、ラケット杭打ち機による実験を行った。テーブル上で、ラケットの首部と先端部を支え、8ポンドの鉄のロッドで打撃（ケトルベル打撃と同じく、ラケット先端から11.5 cmの位置を14 cm上から打撃、約5 Joulesに相当）、ラケットはWilson Pro Staff Six. One 100、ストリングはPolyfibre TCS 16のみである。ケトルベル落下打撃の後に測定された。最初の2000回のケトルベル打撃に対しては、最大衝突力は減少し、接触時間は増大した。これは、単一のストリング実験結果と同様に、テンションが低減することによるものであり、予想できることであるが、4000回落下打撃の後の結果は、最大衝突力が増大し、接触時間は減少した。もっと打撃回数を増やし、これらの値が特性を示しているのか異常値なのか、あるいは外れ値なのかを調べる必要があるとしている。なお、4000回のケトルベル落下打撃の後、測定したラケット振動数に変化が無いことを示している⁽⁴⁾が、約150 Hzという値は、フレーム2節曲げの振動数であろう。

4. ストリングの繰り返し打撃と弾性的変化

Lindsey⁽⁴⁾によると、ポリエステルの特徴のひとつは、メイン・ストリング（縦糸）の横への動き（sideway movement）とスナップ・バック（snap-back）である。繰り返し打撃に対する静摩擦および動摩擦係数の変化はカオス的で複雑であるが、動摩擦が増すにつれて、ストリングの縦糸、横糸は相互に停止・再始動を繰り返し、ストリングが硬くなってパワーが低下したと感させるのではないかと推測している。定量的な測定はできていない。

図3は、繰り返し打撃によりストリングが弾性を失うのかどうかを調べた実験⁽⁵⁾である。参照テンション10 kg (22 lb)で張った単一ストリングを、テンションがゼロに近くなるまで、振り子型ハンマーで繰り返し打撃し、テンションがゼロに近くなったら、再度10 kg (22 lb)までテンションをあげて打撃を繰り返す。ラベルは引っ張った回数であり、6回繰り返している。同じ再張力回数のグループごとの打撃回数に対するエネルギー・リターン（復帰）を示す。再張力かける回数が多いほど、エネルギー・リターンは大きい。同じ再張力回数グループでは、打

撃回数を重ねていくと、エネルギー・リターンは減少する傾向があるが、再張力をかける回数が多いほど減少はゆるやかで、一定に近づく。

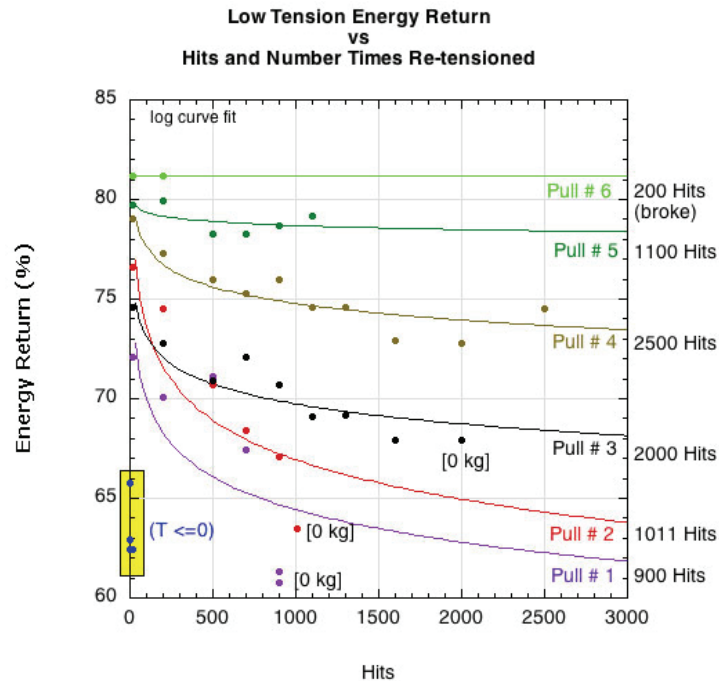


Fig.3 Low tension energy return. String reference tension was 10 kg (22 lb) and hit until tension declined to zero or as low as patience allowed. After reaching the lowest tension measured, the string was re-tensioned to 10 kg and the test repeated (labeled as "pull number"). This was repeated 6 times.⁽⁴⁾ (Courtesy of Crawford Lindsey, Tennis Warehouse, Canada)

5. ボールコントロールとスピンにおよぼすストリング諸因子の影響 (オンコート実験)

5・1 ストリング潤滑によるスピン性能⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾

図4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5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。

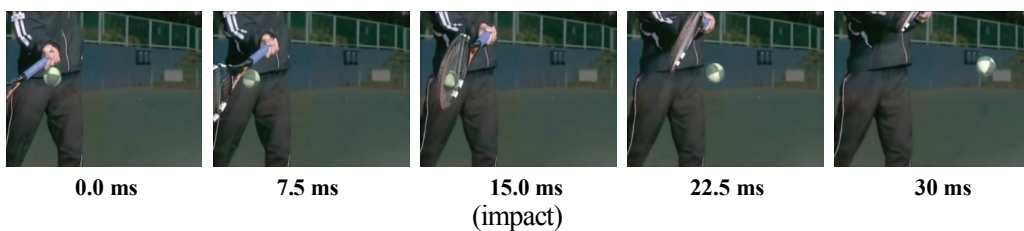


Fig.4 Top-spin swing by a pro tennis player.

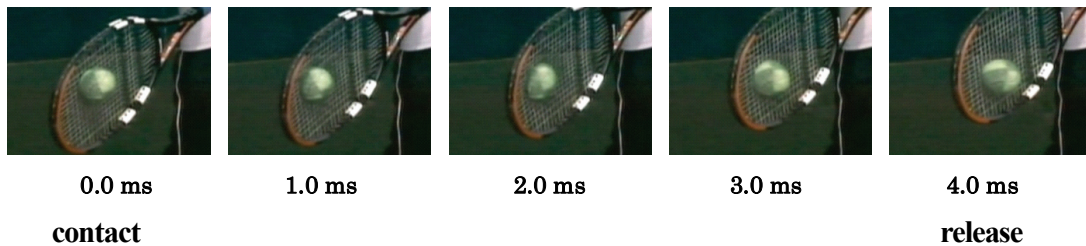


Fig.5 During Impact of the top-spin by a pro tennis player.

図6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の量は平均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。スピンの量が少ない場合は、打球速度が速く、接触時間も短い。

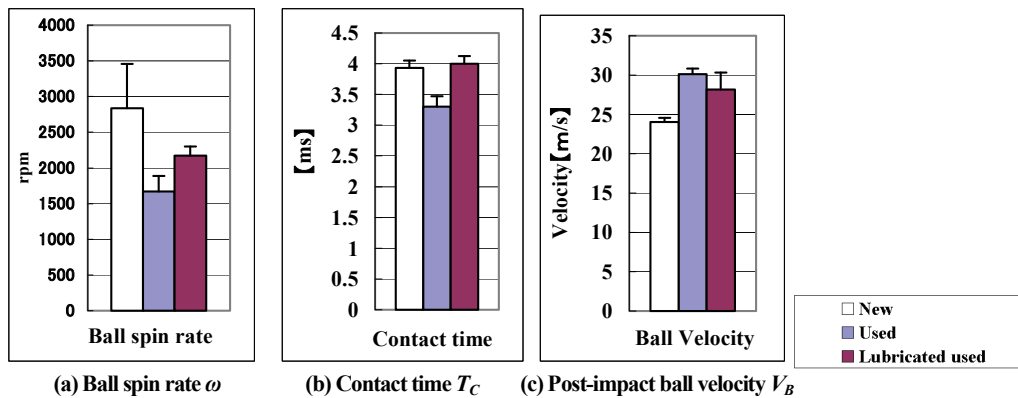


Fig.6 Spin performance of new, used and lubricated used nylon strings with average and standard error.

5・2 天然ガットの新品と使用後のスピン性能⁽⁹⁾

図7は、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、スピンの量が顕著に低減し(70%低減)、接触時間も短い(13%低減)。打球速度は、ノッチのできたガットの方が速い(50%増大)。

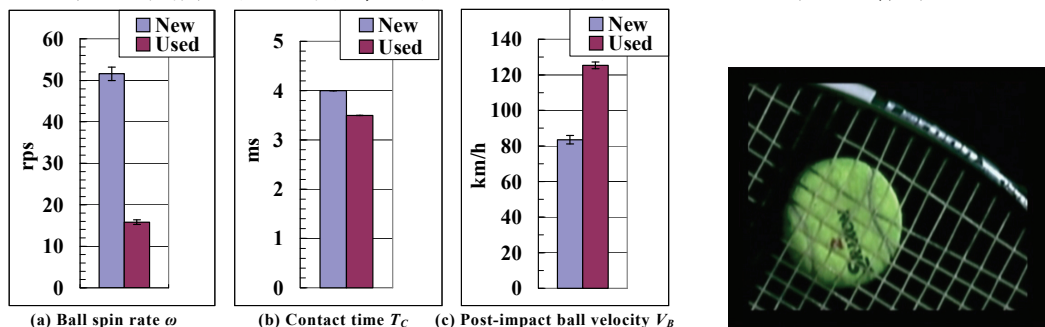


Fig.7 Top-Spin performance of a pro tennis player vs. new and used Guts with average and standard errors.

5・3 プロとアマチュアのトップスピンにおける天然ガットのスピン性能(新品使用)⁽⁹⁾

図8は、プロとアマチュア・プレーヤーの比較である(新品天然ガットでトップスピン打撃した場合)。プロの打撃では、アマチュアのそれに比べて、スピンの量が1.6倍(60%)大きい。打球の直線速度の差は少ない。また、スピンの量が多いため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、スピンの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。

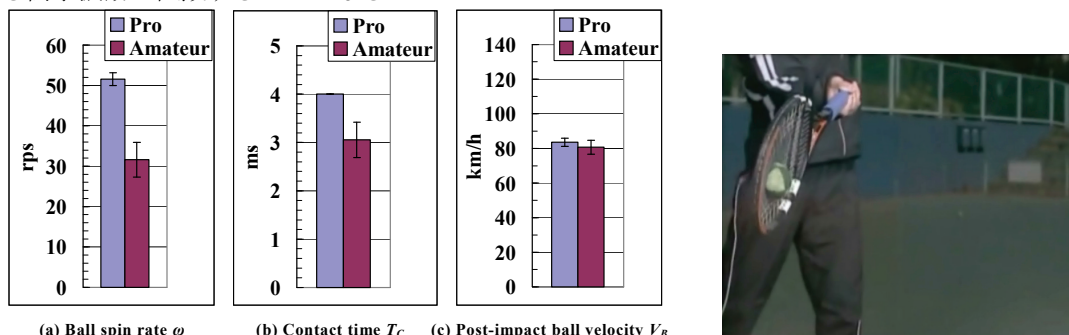


Fig.8 Natural gut top-spin performance comparison between a pro and an amateur player with average and standard error.

図9 は、実験に使用した試合後の使用ガットの写真であり、深いノッチ（溝）が見える。
 図10 は、横にずれたストリング縦糸が元に戻るときの復原力によるスピン加速を示す。

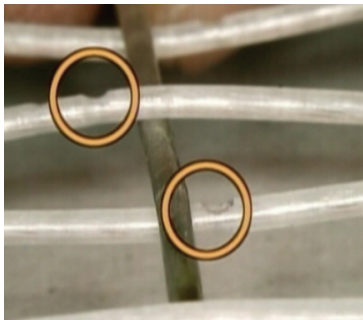
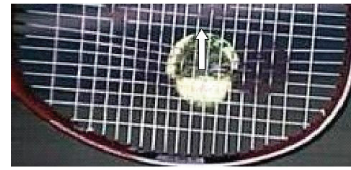


Fig.9 Used Gut with notches at the intersections.



1.7 ms after contact (T506_f159_L4)

Fig.10 Ball spin behavior and mechanism of spin rate increase by lubrication of string intersections. Main strings stretch and slide side ways and snap-back when the ball is released from the strings.

5・4 トップスピン打撃における打球感とストリング (6)-(8)

図11 は、ラケット面先端側オフセンターで打撃した場合（衝突速度 30 m/s）の手首関節・衝撃振動のシミュレーション波形である。図(a) は使用後ストリングスでフラット打撃、(b)は同じストリングスでトップスピン打撃、(c) は潤滑剤を塗った使用後ストリングでトップスピン打撃、(d) は新品ストリングスでトップスピン打撃の場合に相当する。図(b), 図(c) のインパクトにおける力積・垂直成分はそれぞれ図 (a) フラット打撃の 85 %, 65 % であり、インパクトの衝撃力はそれぞれ図 (a) の 65% , 41% 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、ラケット・フレームの振動が低減し、ボールとストリングスの変形量（つぶれ）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」などの打球感に対応すると考えられる。

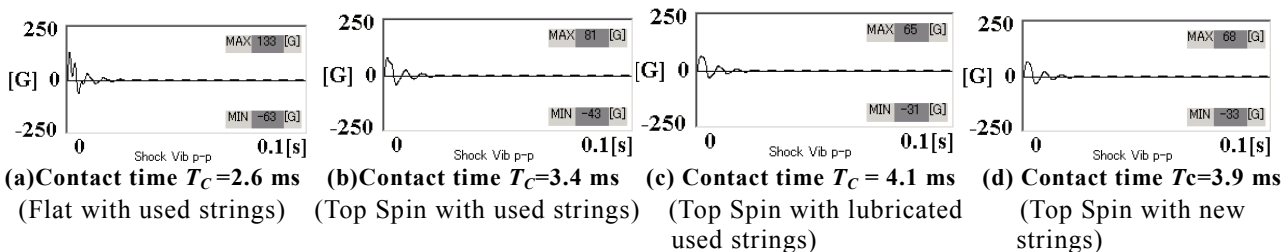


Fig11 Calculated effect of contact time on the wrist joint shock vibrations. Impact velocity: 30 m/s, hitting location: top side 95 mm from the tip of racket.

5・5 テフロン加工、コーティング、扁平、多角形などのストリングとスピン性能 (10)

国内外の多くのストリング・メーカーからは、テフロン加工したもの、断面を扁平形状にしたもの、滑りやすくコーティングしたものなど、従来とは異質のガットが市販されるようになってきた。国際テニス連盟 (ITF) や米国ストリガー協会 (USRSA) は、過度のスピンを制限するルール変更も視野に入れて、多くの種類のガットについて固定面にボールを斜め衝突させる実験を行っている。ポリエステルではないが、扁平型ストリング (Gosen FG) の実験結果は、従来型の円形断面ストリングスに比べて、縦糸が横に滑りやすく、スピン量も大きかった。視野角が狭いためにボールが当たった直後の加速初期段階の評価しかできなかったが、扁平型は従来型の 1.24 倍であった⁽¹⁰⁾。上記の各種ストリングも、ノッチが出来にくいという点でスピン性能は良いと考えられる。

6. 結 論

硬くて滑りやすいポリエステル系のストリングスは、非常に強いスピンを生み出すという理由でツアープロに人気がある。男子プロテニス協会 (ATP)の世界のトップ選手のほぼすべてのラケットで、従来の天然ガットやナイ

ロンなどのストリングがポリエステル系に取って代わられた。ポリエステルは、切れにくいですがテンション維持が難しく（テンション・ロス：張力低下）、特に日本では、飛びが悪い、手首・肘・肩などを痛めるなどの理由で薦めないコーチも多い。スピン量増大の原因は、ストリングのメイン（縦糸）とクロス（横糸）の摩擦が小さく、縦糸の横移動とスナップバック（snap-back, 元の位置に戻る）によるというのが有力である。テンションの低下（ストリングの死：Going Dead）がどのようにストリング性能を低下させるかについては不明である。ストリングの選択は今でも試行錯誤で行われている。本研究の内容を要約すると以下のようになる。

(1) 市販ストリングのエネルギー（パワー）損失は非常に小さく、それをさらに0%まで改善したとしても、ラケットの全エネルギーの1%以下の増大にしかならず、打球速度にはほとんど影響しない

(2) インパクト前のストリング・テンションあるいは面圧（バネ剛性）が低下しても、インパクト時の値は、衝突速度、ストリング素材、ゲージ太さ、パターンなどによって大きく異なるので、低いとは限らない。

(3) 硬いポリエステルは、プレーの前に大きく低下していても、低下の少ないナイロンよりも硬いストリング面を形成する。

(4) ポリエステルは、ナイロンに比べて、ストリングの長手方向バネ剛性（したがって打球方向の面剛性も）、が非常に大きく、面に平行な直角方向バネ剛性は非常に小さい。したがって、テンションが低下しても、ストリング面はたわみにくく、ストリングは横にずれやすい。剛性、衝突力ピーク値、接触時間、たわみ量などのパラメーターの変化は少ない。

(5) ストリング潤滑によるスピン性能向上、天然ガットのスピン性能と寿命、プロとアマチュアのスピンの違い、スピン打撃による打球感の改善など、実打実験における結果を補足する知見が得られた。

(6) 切れるまでストリングの反発性能は低下しない。スピン性能（コントロールと打球感）の低下は、ストリングを張ったときから始まる。10年前に張ったストリングは、ボールが飛びすぎてバックアウトしやすい。

おわりに、一部の図表を掲載させていただいた Crawford Lindsey 氏に深謝する。

文 献

- (1) Cross, R. and Lindsey, C., “*Technical Tennis*”, Racquet Tech Publishing, USA, (2005), 常盤泰輔（訳）, “テクニカル・テニス”, 丸善プラネット, (2011), p.87.
- (2) Brody, H., “*Tennis Science for Tennis Players*”, University of Pennsylvania Press, USA, (1987), 常盤泰輔（訳）, “テニスの法則”, 丸善プラネット, (2009).
- (3) 川副嘉彦, “テニスラケットのストリング性能論 1（パワー, コントロール, 打球感と性能の寿命に関する考察）”, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2013 講演論文集, No.13-34 (2013), pp.1-10.
- (4) Lindsey, C., “How Tennis Strings “Go Dead” — Part 1: The Change in String Properties with Repeated Impacts”, *Tennis Warehouse University*, (2013), March 21, 2013, http://twu.tennis-warehouse.com/learning_center/deadstrings.php (2013年9月20日確認)
- (5) Lindsey, C., “How Tennis Strings “Go Dead” — Part 2: Do Strings Lose Elasticity with Repeated Impacts?”, *Tennis Warehouse University*, (2013), April 17, 2013, http://twu.tennis-warehouse.com/learning_center/deadstringsPart2.php (2013年9月20日確認)
- (6) Kawazoe, Y. and Okimoto, K., “Super High Speed Video Analysis of Tennis Top Spin and Its Performance Improvement By String Lubrication”, *The Impact of Technology on Sport* (ed. A. Subic, S. Ujihashi), ASTA Publishing, (2005), pp.379-385.
- (7) 川副嘉彦, 沖本賢次, 沖本啓子, “テニスラケットのスピン性能のメカニズム（ストリング交差点潤滑によるスピン性能向上の超高速ビデオ画像解析）”, 日本機械学会論文集, Vol. 72, No. 718, C, (2006), pp. 1900-1907.
- (8) Kawazoe, Y. and Okimoto, K., Tennis Top Spin Comparison between New, Used, and Lubricated Used Strings by High Speed Video Analysis with Impact Simulation, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, 57 (2008), pp. 511-522.
- (9) 川副嘉彦, 武田幸宏・中川慎理, “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）”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.770, C, (2010), pp.2646-2655.
- (10) 川副嘉彦, 中川慎理, “テニスにおけるスピンガットの変革とラケット性能についての考察”, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2010 講演論文集, No.10-53, (2010), pp.147-152.