

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)

川副 嘉彦^{*1}

Practical String performance theory 1 of the tennis racket (Power, Control, Feel and Performance Life)

Yoshihiko KAWAZOE^{*1}

^{*1} Kawazoe Laboratory
Kaga 2-3-1-904, Itabashi-ku, Tokyo, 173-0003 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 difficult question of how players can tell the difference between different strings when laboratory tests indicate that they should play the same. The previous paper performed an experiment measuring the spin rates of used, notched strings in both their natural condition and after applying a lubricant to the string intersections to facilitate tangential string movement. It found that the lubricated notched strings produced 30% more spin than the unlubricated notched strings. The lubricant materials are effective to the notched strings, because the lateral movement and snap-back of the main strings increase spin. It also showed that the more spin results in the reduction of shock vibrations of the wrist joint during impact. Furthermore, it was shown 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. Recently, International Tennis Federation researchers reported that the same movement that was observed 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 wide range of string performance seen in the literature.

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

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、コントロールには適切なスピンの（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れているストリングの種類・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明らかではない。

コポリエステル・ガットと呼ばれる硬くて滑りやすいポリエステル系のストリングは非常に強いスピンを生

^{*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

み出す効果があるため、「新しいガット世代」と名付けられた今日のトップのプロ選手達は、かつては考えられなかったドライブショットや角度をつけたウィナー、あるいはパッシングショットを打つことができる。しかし、選手の間ではコポリエステル（ポリエステル系）ガットがゲームを変えたという見方が広く浸透していたにもかかわらず、最近まで、ガットの材質、厚さ、テンション、あるいはテクスチャーがスピンの発生に実際の変化をもたらした証拠を見つけた研究はなかった⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。ガットという名称は、ストリングの俗称であり、本来は羊や牛の腸で作った天然ガットのことであるが、プレーヤーは一般に合成繊維で作られたシンセティック・ストリングのこともガットと呼ぶことが多い。

川副ら⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾は、ノッチ（溝）の出来た使用済ナイロン・ストリングの交差点に潤滑剤を塗布すると、ストリングの縦糸がボールとともに横糸の上を滑りやすく、ボールが離れるときに元の位置に戻ることを超高速カメラを用いて確認した。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（ヨネックス AERON SUPER 850）をシリコン系オイル（沖本賢次が国際特許取得、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。さらに、天然ガットについても実験し、ガットのノッチの有無がスピンに与える影響を確認した⁽⁸⁾。すなわち、プロ・テニスプレーヤーが試合に使った後のラケットのノッチの出来たガットでは、スピン量が平均70%低減し、接触時間は平均13%短くなった。横にずれたメインの縦糸が元の状態に戻る際、ストリングのエネルギーがストリング面に平行な接線方向にボールに伝えられ、より強力なスピンを生み出すというスピンの謎が明らかにされた。その後、国際テニス連盟（ITF）は、潤滑剤を塗布したストリングで川副らが確認したのと同じ動きがコポリエステルでも発生するという研究結果を報告し^{(1),(2)}、滑りやすく、剛性の高いコポリエステル・ストリングが強いスピンを生み出すのは、摩擦が大きいためではなく小さいためであることを認めた。さらに、コポリエステル・ストリングがスピンを発生させる力がナイロンのストリングよりも20パーセント大きく、天然ガットよりも11パーセント大きいことを示す研究結果が発表された。これらの差が、ラファエル・ナダルのような現代の強豪がなぜ過去のアンドレ・アガシのスピンよりも2倍も強いスピンのかかったボールを打てるのかを説明する一助になると報告している⁽⁹⁾⁻⁽¹²⁾。

30年前、急進的な革新技术である「スパゲッティ・ストリング」が同じ原理を利用して、縦糸と横糸のストリングを編まないでストリング面でのストリングの動きの自由度を増し、ほぼ2倍の強さのスピンを生み出したためにITFは使用を禁止したと言われている^{(6),(13)}が、「すべてのストリングは編まれていなければならない」とした1978年の規定は、ラケットあるいはストリングに関して規制した初めてのルールであった。ITFは、「試合の性質を根本的に変える、あるいはスピンの発生に大胆な変化をもたらす可能性がある」と我々が考える」ものをチェックするために、ITFは市場に出されるストリングを一つひとつテストするつもりである、と述べている^{(1),(9)-(12)}。しかし、大胆な変化をもたらす2つの技術、すなわち3世代の技術革新を経てようやくスピン能力を有するに至った頭の大きなラケット（デカラケ）と、スピンを増大させるコポリエステル・ストリングは、これまでのところ規制を免れている^{(1),(2)}。

ストリングのメイン（縦糸）の横移動とスナップバック（snap-back、元の位置に戻る）がスピンを増大させるのか、また、どの市販ストリングが最もスピンのかかるのかなどについて数多くの実験が進められており⁽¹⁴⁾、一般の潤滑剤として手に入りやすいWD-40を用いて多くの種類のラケットについて実験した結果によると、潤滑剤を塗った場合の方が14 - 58%スピンが増大した。ストリングの縦糸と横糸の摩擦のスピン量に及ぼす影響⁽¹⁵⁾、ストリングのスナップバック（snap-back）とスピン量の関係⁽¹⁶⁾、ストリング・パターンとスピン量の関係⁽¹⁷⁾⁻⁽¹⁹⁾などについての研究が進められており、横糸の本数を減らして摩擦を低減することによりスピン量を増すというコンセプトのラケットもWilson社から市販されている⁽¹⁹⁾。大きなトーナメントでもラケットのストリングにシリコン・スプレーをかけるプロのテニス選手も現れており、ジョン・マッケンロー、イワン・レンドルなど過去のチャンピオン達は、シリコン・スプレーをストリングに塗ることを禁止すべきだとITFに主張している⁽²⁰⁾⁻⁽²²⁾。ほとんどすべてのトッププレーヤーが使用しているコーポリ（ポリエステル系）と呼ばれる新しいストリングが、これまでよりもはるかに強力なスピンの得られるということで話題になっている⁽²³⁾⁻⁽²⁷⁾。

ポリエステル・ストリングは、もともとは切れにくいということを目的にしたものであり、テンション維持が難しいという理由により普及に時間がかかったと言われている⁽²⁸⁾。ただし、ストリング・テンションの低下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明らかではない。ポリエステルは、ボールにトップスピン

がかかりやすく、コントロール性能がよいと多くのプレーヤーが感じており、特に強烈なトップスピンのかかりやすいので、ツアープロに人気がある⁽²⁸⁾。また、ポリエステル・ストリングによるトップスピン量増大は、対照実験（コントロール実験）で確かめられている⁽²⁹⁾。スピン量増大の正確な原因はわかっていないが、縦と横のストリング間の摩擦が小さいことが要因であるという有力な証拠がある⁽¹⁶⁾。

男子プロテニス協会（ATP：Association of Tennis Professionals）のツアーで使用されるほぼすべてのラケットで、従来の天然ガットや他の合成樹脂製ストリングがコーポリ素材（ポリエステル系）に取って代わられるようになった⁽²³⁾⁻⁽²⁷⁾。また、ATPのトップ100選手の72%、女子テニス協会（WTA: Women's Tennis Association）のトップ100選手の48%がルシロン社というポリエステル・ストリングの専門メーカーのストリングを使用している⁽³⁰⁾。正確にはコポリマー（copolymers）と表記されるこのストリングは、滑りの良い様々な化学添加物を含んだポリエステルで作られており、沈み込むような特徴的な軌跡を描く強いトップスピンは「ルシロンショット」と呼ばれ、今やプロ選手によるゲームの1つの特徴になっており、テニスの歴史における装備の面で最も重要な革新技術の1つとしての地位を占めるに至ったと言われている⁽²³⁾⁻⁽²⁷⁾。

一方、テニスショップやストリンガーなどの専門家による一般ユーザー向けの解説では、ナイロンガットの寿命は張り上げ後使用しなくても1ヶ月で性能が落ちるので3ヶ月が限界点、ナチュラル（天然ガット）は半年～1年、そしてポリエステルガットは張り上げ1～2週間でテンションが落ちてしまうので1ヶ月が限界点、などと言われることが多い。いわゆる、「ストリングが死ぬ」という表現である。また、ポリエステルのガットは硬いので衝撃が大きく、ボールを飛ばすために強い筋肉（力）を必要とし、それが腕への負担になると言われることも多い。しかし、何年間も使い古されたストリングでも、テンションの低下によるパワーや弾力性の低下はないという結果もある⁽³¹⁾。古くはBrody, H.⁽³⁴⁾、最近ではCross, R. とLindsey, C.⁽³¹⁾によりテニスの物理に関する啓蒙的な良書が出版され、ストリングの重要性も指摘されているが、パワー、コントロール、打球感などの性能とストリングの関係にはいまだに不明な点が多く、現状では、ストリングに関する通説・俗説は無数にあり、ストリングの選択は今でも試行錯誤で行われている。

ストリングの寿命（Going Dead）に関する注目すべき研究がLindsey, C.によって始められている^{(32),(33)}。なぜ、プレーヤーによってしばしば矛盾する報告があるのか？ ストリングが緩み、パワーが減少し、コントロールを失うと考える者もあれば、他方、緩くなり、パワーが減少し、スピンの潜在性を失うと考える者もあるからである。この研究は、ストリングを繰り返し使用することを模擬していろいろな方法で実験し、操作性低下の知覚がどのような要因に拠るものかを研究している。現時点の結論として、ストリングの繰り返し使用によりテンション・ロス（低下）と摩擦の増大が起こり、この2つの要因の割合によって、パワーが増大してコントロールを失う場合もあるし、スピンのかかりにくく、パワーも低下し、いわゆるストリングが死ぬと感じる場合もあると結んでいる。プレーヤーによって感覚が異なるのは、パワーを失うのとパワーを得るのが、あるいは、剛性が増大するのと剛性が減少するのが同時に起こっているからだ結論付けている。

本研究では、ストリング性能の寿命に関するLindsey, C.による実験データ^{(32),(33)}、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（張替えの意味と時期の目安）について考察し、パワー、コントロール、打球感という基本的なストリング性能とその寿命について明らかにすることを目指す。

2. テニスラケットのストリング性能論と問題点の所在

実際にプレーを見ながら身体に合うラケットを探し出すラケットフィッティングというサービスをしている日本のテニス専門店Tのホームページには、ストリングについてのアドバイスとして、「周りの影響でポリ（ポリエステル系素材のストリング）を選んでしまうケースが多いようですが、初心者のうちはポリを使うのは避けたほうが安全」、「ポリ系ストリングは切断耐久性が高いのがメリットですが、反発力が低くて打球衝撃が強いため、最初からポリでスタートすると無用な力みが生まれやすい」、「ナイロン系ストリングでは1ヶ月以内で切れてしまう、というような状態になったら、ポリ系ストリングを検討するということが良い」、「ポリ系ストリングが3ヶ月以上切れない場合は、切れていない状態でも3ヶ月で張り替えて、季節毎の気温に合わせて硬さを調整した

ほうが良い」,「ポリの使用を一般的なプレイヤーにはあまりお勧めしていません. その理由は『飛びが悪い』ことにあります.」という記述が見られる.

また, スポーツ用品を網羅する WEB 最大規模の日本のショッピングサイト E の「ガットの豆知識」には, 「ガットの寿命は切れない場合, プレイ時間で 20~30 時間とされています. 中級プレイヤーで週に 1 度, 2 時間程度のプレイで約 3 ヶ月が張り替えの目安とされています.」, 「ゆるんでしまったガットでは, せっかくスイートスポットに当たってもコントロール性が劣ってしまい, 打球感もいまひとつという状態になります.」と書かれている.

さらに, C インドアテニススクールのホームページには, 「ガットはラケットに張られた瞬間から, プレイをする, しないに関わらず性能劣化が始まります.」, 「プロの場合はかなりシビアで, 試合直前に張らせるのが常識です. 元プロのジム・クーリエ選手は 1 日に 3 本は張り替えていました. 前日に張る様な場合は, 約 2 ポンド強アップして張らせていたそうです. また, ガブリエラ・サバティーニ選手は, 『70 ポンドで張ってちょうだい』とラケットを差し出した事があるそうです. 理由を聞いてみると, 『これから 2 週間休みがあるから, 休み明けには丁度良くなっているでしょ』との事. プロというのは, それぐらいガットに気を使っているかと感心したお話でした.」とある.

また, 「週 1~2 回プレイする人でも 3 ヶ月でテンションは下がり, (中略), ガットがゆるんでいる分, 最初より力を入れて打っているか, 飛距離が短くなっているはずです.」, 「力を入れる為に手首や肘, 肩を痛めることにも繋がります.」というテニススクール経営 20 年, テニスコーチ歴 25 年, ガット張り歴 35 年以上, テニスショップ運営, テニスギア商品アドバイザーでもある経験豊富な YO コーチの解説もある.

低いテンションと高いテンションではどのような違いがあるかという質問に対して国内最大の総合テニス専門サイト T のホームページには, 「低いテンションの場合: ボールの飛びが良く, 非力な方にお勧めです. ラケットとボールの接地 (接触かと思われる) 時間が長くとれるので, スピンをかけ易く, タッチショットの得意なネットプレイヤーにもお勧めです. だだ, ラケット面の何処で打っても良く飛ぶので打球感が鈍くなってしまいます. 高いテンションの場合: ボールの飛びを抑えることができ, 打球感がシャープになります. 積極的にボールを打ち抜くハードヒッターにお勧めです.」という回答がある. しかし, すべてのラケットに振動止めを取り付けて上級プレイヤー 41 名を対象にして実験したところ, 11 ポンド以下の違いを識別できたのは 11 名 (27%) にすぎず, 15 名 (37%) が 22 ポンドもテンションが違う 2 本のラケットを正しく認識できなかったという論文もある^{(31),(35)}.

上記はどれもストリングのパワー, コントロール, 打球感と性能の寿命に関する興味深い記述であり, それぞれ事実に近い一面もあるように思われるが, 十分な説明とは言いがたく, 理屈・理由付けには大きな疑問が残る. ポリ系ガットは飛びが悪いと言われているが, インパクト時の面圧 (バネ剛性) を同じにすれば, 飛びは変わらないはずであり, 接触時間も衝突力も同じになるはずである. テンションの代わりにストリングベッド面圧 (バネ剛性) を使ったわかりやすい説明も見られるが, 張りあがり, あるいはインパクト前の (Pre-impact) のテンションあるいは面圧と, インパクト時とは大きな違いがあることが理解されていない. インパクト時のテンションや面圧は, 衝突速度で大きく異なり, ストリング素材のほか, ゲージ太さ, ストリングパターンなどによっても値は大きく異なる. ポリエステルのテンション・ロスが大きくてインパクト前のテンションが低下しても, インパクト時のテンションが低いとは限らない.

図 1 は, ボールとラケットの衝突速度とボールの変形量, ストリングスの変形量, および面圧 (ストリング面バネ剛性) の関係を示す例である. 図 2(a) は, Brody⁽³⁴⁾ によるテンションと接触時間の関係図であるが, これは衝突速度が 12 m/s 以下のデータであり, 図 2(b),(c)のように, 現実的な衝突速度 20 m/s 以上ではインパクト前のテンション (pre-tension) は接触時間にほとんど影響しない. 図 3 に実測結果の例を反発係数とともに示している. 触時間は長くならず, インパクトにおける張力も小さくはならない. ストリングス・テンション (張り上がり) 55 lbs と 75 lbs の場合の衝突速度に対する接触時間の実測結果は, 衝突速度 20 m/s ではインパクト前のテンションの影響はほとんどなくなる. 図 1 において, ストリング・テンションを変えてもボールの変形量に違いがない. したがって, ストリングのエネルギー損失を無視すると, ボールの反発係数はテンションに影響されないことになる. これが, 図 3(b)においてテンションを極端に大きく変えても, 反発係数に大きな違いがない理由である.

図 4 は、硬い壁にボールをぶつけたときのボールの反発係数の実測結果である。横軸は衝突前の速度（入射速度）、縦軸は跳ね返り速度と入射速度との比、いわゆる反発係数である。入射速度の増大とともにボールの変形量が大きくなり、ボールのつぶれによるエネルギー・ロスの割合が大きくなって直線的に反発係数が低下することを示している。図 3(b) と図 4 を比較すると、ストリング・テンションを変えてもボールの変形量には違いがなく、したがって、ストリングのエネルギー損失は非常に小さいので、ボールの反発係数はテンションに影響されないことになる。ストリングの重要性がよくわかる。図 5 は、変形量（変位 X ）に対するボール、ストリング（俗称ガット）、ボール・ストリング複合系それぞれのバネ剛性 K_B 、 K_G 、 K_{GB} を示す。これらのばね剛性は、変形量の増大とともに硬化ばね特性を示す。ストリング面バネ剛性 K_G が面圧に相当する。

ストリングを緩く張るとテニス肘防止になるなど、従来の主張の中の誤りがスポーツ工学の分野で指摘されても、このような専門的な情報を把握している指導者・医師は少ない^{(36),(37)}という指摘がある。また、国際テニス連盟 (ITF) のコーチ向け機関紙には「市販されているほとんどすべてのストリングのエネルギー損失は 5 % 以下であり、0 % まで改善したとしても、ラケットの持っている全エネルギーの 0.7 % の増大にしかならず、打球速度にはほとんど影響しないから、ストリングのエネルギー問題に関しては改善の余地がないのであるが、プレーヤー

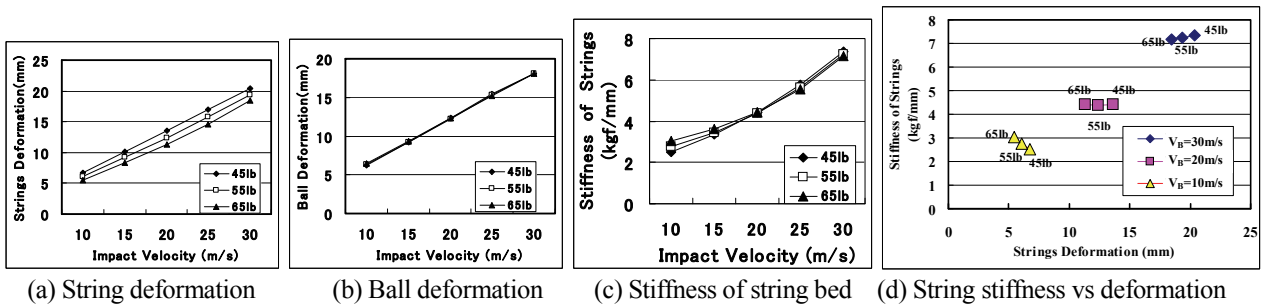


Fig.1 Predicted stiffness and deformations of ball and strings against impact velocity relative to the string tension as a parameter.

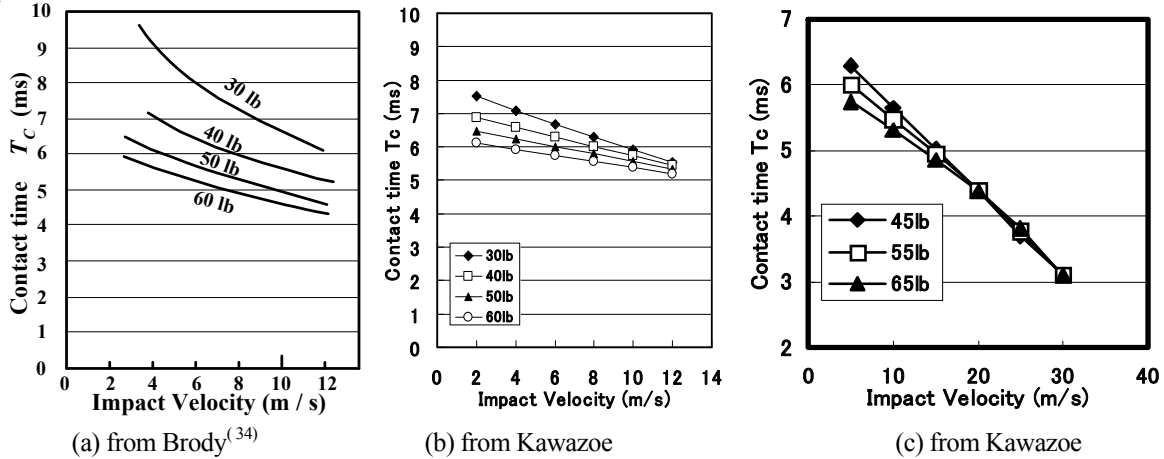


Fig.2 Contact time vs. impact velocity relative to the string tension as a parameter.

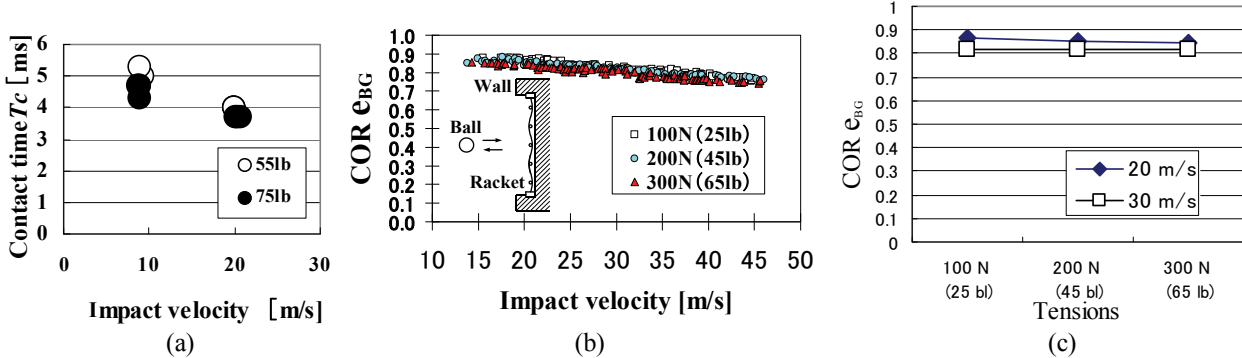


Fig.3 Measured Contact Time and Restitution Coefficient relative to String Tensions and Impact Velocities.

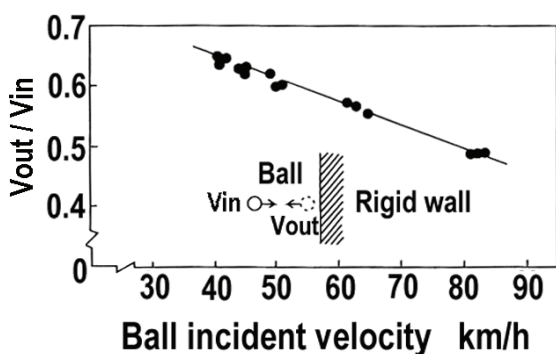


Fig. 4 Measured coefficient of restitution between a ball and a rigid wall.

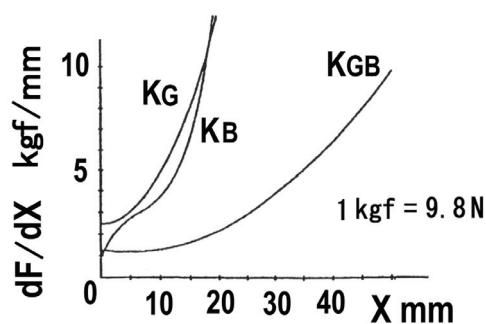


Fig.5 Stiffness vs. deformation of a ball, strings, and a composed ball/string system assuming that a ball deforms only at the side in contact with the strings.

を初めとするテニス専門家にもほとんど認識されておらず、ラケットのカタログなどにも矛盾するような記述が多く見られる⁽³⁸⁾。」という報告もある。

一方、テニスラケットに関する健康と安全基準について産業界あるいは政府からの調査報告はこれまでなかったとして、米国消費者製品安全委員会 (The U.S. Consumer Product Safety Commissions) では、最近、テニスラケットに関する研究論文なども参照して、テニス肘などの障害に関して、ストリング面のサイズが大きい軽量ラケットの振動が従来のラケットに比べてはるかに大きいことを指摘して、たとえば、ラケットの振動が 0.2 秒以上残留しないようなラケットの安全特性基準をメーカーに要望している。基準を満たさない場合はリコールの対象になるようである^{(39)・(40)}。米国には 2700 万人以上のレクリエーション・テニスプレーヤーが存在しており、米国テニス産業協会 (Tennis Industry Association of America) の Keith, S. によると、その 22 % が 2011 年にテニス肘などの腕系の障害のためにテニスを離脱した。ITF のウェブサイトによると、選手の半数は肘に障害がある。テニス肘はテニスプレーヤーによく知られており、最も痛みを伴う障害である。テニス選手の 50 % がテニス肘を経験しており、特に 35 歳以上は特に危険である⁽³⁹⁾。

最近是一般のテニス愛好家も web 上でテニス用具の研究成果を多少は見れるようになったが、メーカーのカタログ、ラケット販売専門店、テニスコーチなどのテニス関係者にはラケットやストリングの研究成果はほとんど周知されていない。

3. ストリング性能論の新しい展開と性能寿命についての研究

ストリングを繰り返し使用することを模擬して、各種の実験手法による膨大な実験データに基づく Lindsey, C. のストリングの寿命 (Going Dead) に関する論文^{(32)・(33)}の現時点での結論は、1 章でも述べたように、ストリングの繰り返し使用によりテンションロス (テンションが低下する) と摩擦の増大が起こり、この 2 つの要因の割合によって、ストリングの急速なテンション低下はあるが滑りやすさは低下しない、すなわち、パワーが増大してコントロールを失う場合もあるし、テンションが低下しないが摩擦が増大して、スピんがかかりにくく、パワーも低下し、いわゆるストリングが死ぬと感ずる場合もあると結んでいる。プレーヤーによって感覚が異なるのは、パワーを失うのとパワーを得るのが、あるいは、剛性が増大するのと剛性が減少するのが同時に起こっているからだと結論付けている。

すなわち、ポリエステルストリング面に平行なバネ剛性が低減し、触時間を長くし、変形量を大きくし、これは、ストロークにおいてボールが長い時間ラケット軌道に乗っていることになるので、目標よりも、飛び出すボールがより深く、より広い角度、より高い角度になり、パワーの問題を生じさせる⁽³²⁾。さらに、ポリエステル・ストリングは、テンションがゼロでも十分な反発力があり、長さや弾力性を維持するのに十分な固有のストリング剛性をもっている⁽³³⁾という興味深い結果を示しているが、現段階では、推測の部分もあり、結論への道筋がわかりにくいので、重要な実験データについて次節で吟味する。

4. TWHにおけるストリングの寿命に関連する実験結果についての吟味

TWH(Tennis Warehouse)のLindseyは、「ポリエステル・ストリングが死んだ」というときの顕著な特徴は、硬い、ボールをよりつぶす、エネルギー損失が大きいという表現にほとんどのプレーヤーが同感し、ストリングが寿命に近づいていくと、パワーが増し、あるいは、少なくとも、ボールは飛びすぎるし、左右に広く散りやすく、コントロールを失い、そしてストリングを交換することになり、ストリングがもはや機能していないとプレーヤーが言うとき感じるものとは、むしろ、逆であると述べている⁽³²⁾。

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である。

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

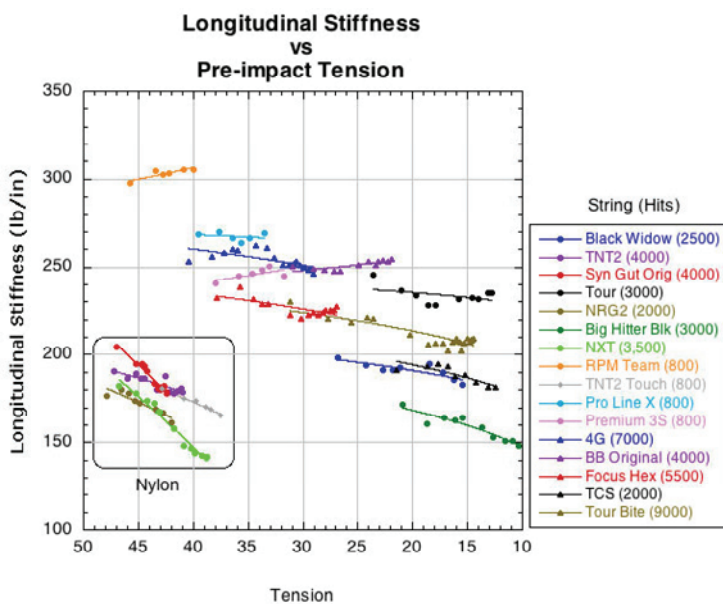


Fig.6 Change in longitudinal stiffness as tension decreases (i.e., as hits increases). (courtesy of Crawford Lindsey [Tennis Warehouse, CA])

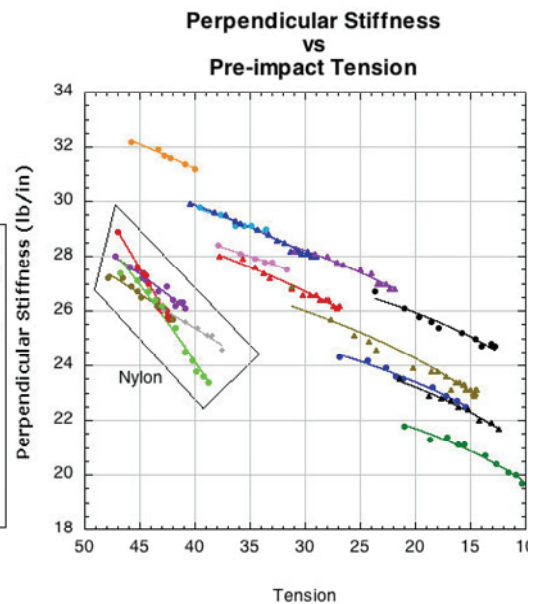
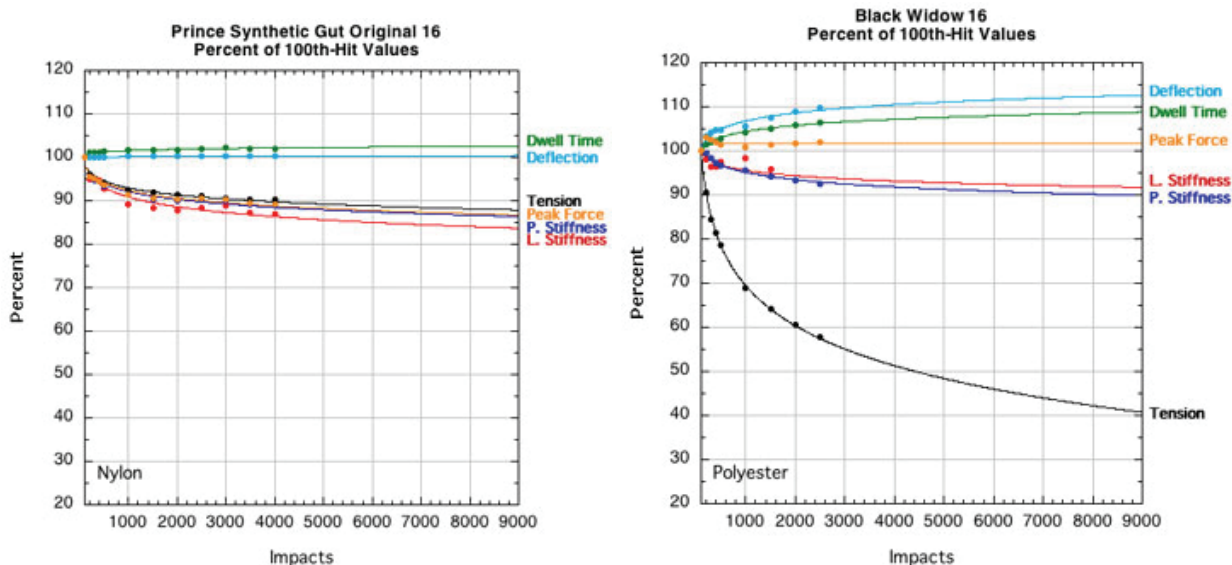


Fig.7 Change in perpendicular stiffness as tension decreases (i.e., as hits increases). [Tennis Warehouse, CA]



(a) NYLON STRING

(b) POLYESTER STRING

Fig. 8 Change in performance parameters: Nylons and polyesters. Each graph is to the same scale with all logarithmic curve fits extrapolated to fit the axis limits of the extreme cases tested — 9000 hits and 20 percent of the starting tension after 100 hits. (courtesy of Crawford Lindsey [Tennis Warehouse, CA])

図6は、長手方向バネ剛性とテンションの低下の関係を示す。ポリエステルは、死ぬと表現されることの無いナイロンに比べて、縦方向に硬い。

図7は、ストリングの直角方向バネ剛性とテンションの低下の関係を示す。ポリエステルは、ナイロンに比べて、小さい力でストリングを横にずらすことができることになる。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。

図8は、100回打撃した後の初期テンションを基準として繰り返し打撃に対するナイロンとポリエステルの性能パラメータの変化を%表示したものである。ポリエステルのテンションは大きく低下するが、剛性ほかの性能パラメータには違いが少ない。

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複雑であるが、結論としては、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が、ラケットに張られたストリングについての研究がさらに必要である。

ストリングの繰り返し使用によるパワーの低下はなく、メイン（縦糸）の動きが悪くなることによるスピン性能の低下がコントロール性と打球感の低下をもたらすと考えられる。実打実験との対応については続報に述べる。

5. 結 論

- (1) 単一ストリングについての実験によると、ナイロン・ストリングに比べて、ポリエステルは長手方向に硬い。
- (2) ナイロンに比べて、ポリエステルは小さい力でストリングを横にずらすことができる。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。
- (3) 繰り返し打撃に対して、ポリエステル・ストリングのテンションは大きく低下するが、テンションが低下しても剛性ほかの性能パラメータは違いが少ない。
- (4) 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が、ラケットに張られたストリングについての研究がさらに必要である。

ストリングの繰り返し使用によるパワーの低下はなく、メイン（縦糸）の動きが悪くなることによるスピン性能の低下がコントロール性と打球感の低下をもたらすと考えられる。実打実験との対応と張替え時期については続報に述べる。

おわりに、論文の一部の図表を掲載させていただいた Crawford Lindsey 氏および Tennis warehouse University に厚くお礼申しあげる。

文 献

- (1) Speckman, J., “The New Physics of Tennis: Unlocking the mysteries of Rafael Nadal's killer topspin”, *The Atlantic Magazine*, (2011), <http://www.theatlantic.com/magazine/archive/2011/01/the-new-physics-of-tennis/8339/> (2013年9月20日確認)
- (2) ジョシュア・スペックマン, 川副嘉彦 (訳), “なぜ? ポリ系のガットが人気なのか!?”, 月刊スマッシュ, 第40巻3号(2013), pp.56-57.
- (3) Macdonald, G., “Racket Strings and Topspin”, *The New York Time*, (2011), <http://straightsets.blogs.nytimes.com/2011/01/22/racket-strings-and-topspin/> (2011年7月25日確認)
- (4) Strawn, T., “The Kawazoe Study”, *GSS Alliance: International Alliance of Racket Technicians*, (2011), <http://www.gssalliance.com/2011/the-kawazoe-study/> (2011年7月25日確認)
- (5) 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.
- (6) 川副嘉彦, 沖本賢次, 沖本啓子, “テニスラケットのスピンの性能のメカニズム (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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) “Spin”, *ITF Tennis - Technical*, International Tennis Federation, <http://www.itftennis.com/technical/rackets-and-strings/research.aspx> (2013年9月20日確認)
- (10) Simon Goodwill, Jamie Douglas, Stuart Miller, Stephen Haake, “Measuring Ball Spin Off a Tennis Racket”, *The Engineering of Sport 6*, (2006), pp 379-384
- (11) Kelley, J., Goodwill, S., Davies, J. C. and Haake, S., “Ball Spin Generation at the 2007 Wimbledon Qualifying Tournament” *The Engineering of Sport 7*, (2008), pp. 571-578.
- (12) “ITF says slippery strings give more spin”, (2009), *Talk at Tennis Warehouse University*, <http://tt.tennis-warehouse.com/showthread.php?t=275155> (2013年9月20日確認)
- (13) Goodwill, S and Haake, S., “Why were ‘spaghetti string’ racket banned in the game of tennis?”, *The engineering of Sport 4*, pp.231-237. Blackwell Science, (2002) Oxford.
- (14) Lindsey, C., “String Lubrication & Movement in Spin”, *Tennis Warehouse University*, (2011), http://twu.tennis-warehouse.com/learning_center/spinandlube.php (2013年9月20日確認)
- (15) Haake, S., Allen, T., Jones, A., Spurr, J. and Goodwill, S., “Effect of inter-string friction on tennis ball rebound”, *Journal of Engineering Tribology*, Vol. 226, No. 7 (2012), pp. 626-635.
- (16) Lindsey, C., “String ‘snap-back’ and spin”, *Tennis Warehouse University*, (2011), http://twu.tennis-warehouse.com/learning_center/stringmovementPart2.php (2013年9月20日確認)
- (17) Lindsey C., “Spin and string pattern”, *Tennis Warehouse University*, (2011), http://twu.tennis-warehouse.com/learning_center/stringpattern.php (2013年9月20日確認)
- (18) Rod Cross, Crawford Lindsey, “Spin and String Patterns Old, New, and Illegal: Spaghetti, Diagonal, Open and Closed Patterns”, *Tennis Warehouse University*, (2013) http://twu.tennis-warehouse.com/learning_center/spinpatterns.php (2013年9月20日確認)
- (19) Strauss, B., “Latest Advances to Tennis Racket Put New Spin on the Game”, *New York Times*, (2012), <http://www.nytimes.com/2012/08/27/sports/tennis/latest-advances-to-tennis-racket-put-new-spin-on-the-game.html?> (2013年9月20日確認)

- (20) Flatman, B., “The use of silicone strings in effect turns racquet into a mini-trampoline”, *The Australian*, (2012), June 25, 2012, <http://www.theaustralian.com.au/sport/tennis/the-use-of-silicone-strings-in-effect-turns-racquet-into-a-mini-trampoline/story-fnbe6xeb-1226407028315> (2013年9月20日確認)
- (21) Flatman, B., “Silicon volley killing tennis”, *The Sunday Times*, (2012), 24 June 2012, http://www.thesundaytimes.co.uk/sto/news/uk_news/Society/article1067444.ece (2013年9月20日確認)
- (22) “Players Are Concerned About Spraying Racquet Strings”, 10sBalls.com, (2012), <http://www.10sballs.com/2012/06/25/players-are-concerned-about-spraying-racquet-strings/> (2013年9月20日確認)
- (23) Speckman, J., “Copoly Strings: How Do They Really Work?”, *Tennisplayer.net*, Online Article, Vol.7, No.2, (2011), <http://www.tennisplayer.net/indexpublic.html> (2013年9月20日確認)
- (24) Speckman, J., “Spaghetti Strings: The Original Spin Strings and the Delayed Transformation of Tennis”, *Tennisplayer.net*, Online Article, Vol.7, No.4, (2011), <http://www.tennisplayer.net/indexpublic.html> (2013年9月20日確認)
- (25) Speckman, J., “Strings and Spin: Applying What We Know About Copoly”, *Tennisplayer.net*, Online Article, Vol.7, No.5, (2011), <http://www.tennisplayer.net/indexpublic.html> (2013年9月20日確認)
- (26) ジョシュア・スペックマン, 川副嘉彦 (訳), “ストリングとスピン (前編)”, 月刊スマッシュ, 第40巻8号(2013), pp.58-59.
- (27) ジョシュア・スペックマン, 川副嘉彦 (訳), “ストリングとスピン (後編)”, 月刊スマッシュ, 第40巻9号(2013), pp.58-59.
- (28) Polyester, *Wikipedia, the free encyclopedia.*: [http://en.wikipedia.org/wiki/Strings_\(tennis\)#Polyester](http://en.wikipedia.org/wiki/Strings_(tennis)#Polyester) (2013年9月20日確認)
- (29) Cross, R. and Lindsey, C., “Which String Generates the Most Spin?”, *Tennis Warehouse University*, (2010), http://twu.tennis-warehouse.com/learning_center/stringmovementPart2.php (2013年9月20日確認)
- (30) LUXILON テニスを変えた世界基準のポリエステルストリング, *Tennis365*, <http://tennis365.net/cp/1106luxilonpr/application.php> (2013年9月20日確認)
- (31) 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.
- (32) 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)
- (33) 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)
- (34) 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).
- (35) Bower, R. and Cross, R., “Player Sensitivity to Change in String Tension in a Tennis Racquet”, *Journal of Science and Medicine*, 6 (2003), pp. 120 - 131.
- (36) 友末亮三, 村松 憲, “競技特性とスポーツ障害の予防 テニスと肘関節障害”, *臨床スポーツ医学*, Vol.24, No.12 (2007), pp. 1269-1273.
- (37) 吉田正弘 (取材), “テンションやダンパーがプレーに及ぼす影響は? 第34回テニス・メディカルセミナー: 田中利和 (講演), テニスストリング及びバットが手関節・肘関節に与える影響, (日本テニス協会主催)”, 月刊スマッシュ, Vol.40, No.1 (2013), pp. 58-59.
- (38) Lindsey, C., “New Technologies and Racquet Power”, *ITF Coaching & Sport Science Review*, 45 (2008), pp.13-14.
- (39) “Federal Consumer Safety Product Commission Brief on Tennis Arm Injuries Epidemic”, *U.S. Consumer Product Safety Commission*, (2010), pp. 1- 12.
- (40) 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*, Vol.4, No.2 (2010), pp. 331 - 347 .