

スピンと ストリングの 密な関係



解説 川副 嘉彦

かわぞえ、よしひこ(1944年、
長崎県生まれ、工学博士(東京
大学)、日本機械学会フェロー、
元埼玉工業大学教授、木製に
代わって複合材製のテニスラ
ケットが出現した頃から、趣
味と実益を兼ねてラケットの
研究を始め、「手で支持したテ
ニスラケットの実験的固定と
ボールとの衝突における振動
振幅の予測」で1995年度日
本機械学会賞(論文賞)受賞。
2012年、大学教授を定年退
職後に「川副研究室」を開設。
スポーツ工学(テニス、卓球、
ヒューマンダイナミクス(直
立二足歩行・二足走行)など
の研究に従事している。 motto
ーは「我あり、故に、われ思
う!」(デカルトさんには悪い
けど、命あっての知識!)

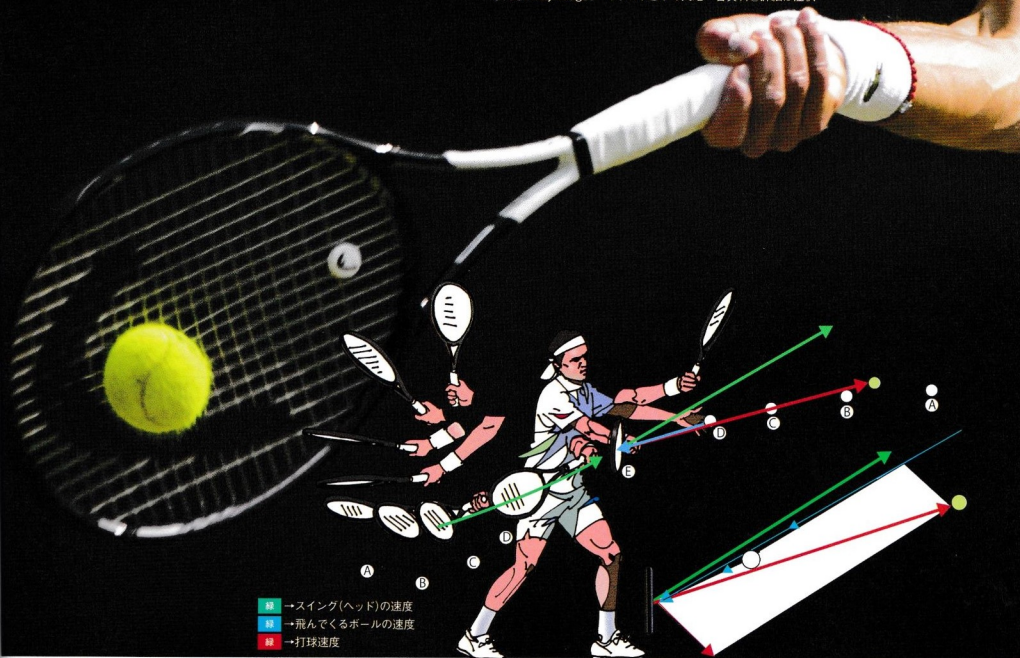
PART

1

ラケットとボールがぶつかるとき、
ストリングに何が起きているのか?

前号で「ラケット」と「ストリング」と「ボール」と「スイング」が
どのように関係し「スピン」は生まれているのか、
「スピンの実際」について解説しました。
今月号は、より深く「スピンとストリング」の
関係を知る機会をご提供します。

写真©Getty Images イラスト©サキ大地 各資料©詳細は注釈



- →スイング(ヘッド)の速度
- →飛んでくるボールの速度
- →打球速度

このイラストは高速カメラで実打を撮影した連続写真から作成したもので、
関連する詳細記事は前号「スピンの実際」に掲載

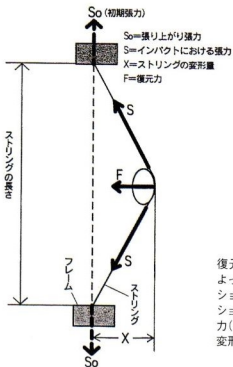
テーマ 1

ボールとストリングの反発係数

テンションを変えても ボールとストリングの反発係数が 変わらない原理

私たちはこういう実験をしています(図2)。硬い壁にテニスボールを衝突させる実験では、衝突速度が増すにつれて反発が悪くなります(ボールの反発係数が低下)。また、ラケットヘッドを固定したストリング面にテニスボールを衝突させている実験も行っていますが、それによると衝突速度が大きくなっても、ボールとストリング面は比較的高い反発係数を確保することがわかっています。また、鉄球(変形によるエネルギーロス

図1
インパクトによる変形によってストリングが発生するエネルギーを簡略に示したものです



スはゼロ)をストリング面に衝突させた場合は、鉄球は入射速度とほぼ同じ速度(95%程度)ではね返ります。これらのことは、ストリング面はボールとの衝突エネルギーを吸収し、吸収したエネルギーとほぼ同じだけのエネルギーを復元することを意味しています。すなわち、ボールとストリングの衝突におけるエネルギーロスは、ほとんどすべてがボールの急速変形によるものだとということになります。(張り上がりの)テンションを25ポンド、45ポンド、65ポンドと変えても、ボールとストリング面の反発係数の違いはほとんどありません。テンションを変えると、インパクトにおけるストリング面の変形量(たわみ)は変わりますが、ボールの変形量は変わらないからです。

図2 硬い壁にテニスボールをぶつける実験

図2 硬い壁にテニスボールをぶつける実験

図2 硬い壁にテニスボールをぶつける実験

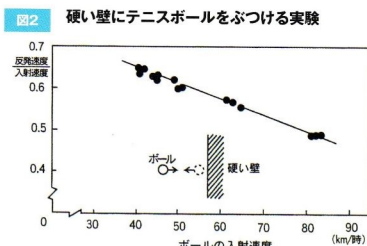


図2 硬い壁にテニスボールをぶつける実験

テーマ 2

面圧とテンションの関係

誤解が多いインパクトにおける ストリング面の硬さと テンションの関係

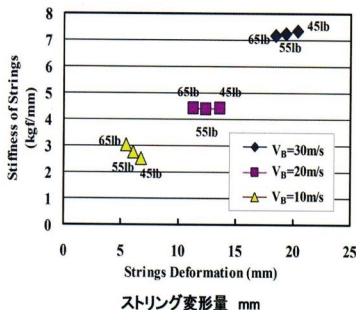
ストリング面の硬さ(バネ剛性、俗称/面圧)は、衝突速度(すなわち変形量)にほぼ比例して高くなり、衝突前の硬さの数倍まで変化します。張り上がりテンションに左右されるのは、衝突速度が極めて小さい場合だけです。

図3で45ポンド、55ポンド、65ポンドの場合を比較すると、衝突速度が10m/sでは65ポンドがもっとも硬く(変形量は最小)、20m/sでは3者の硬さはほぼ同じで(45ポンドは変形量が最大、65ポンドは変形量は最小)、30m/sでは45ポンド(変形量は最大)が65ポンド(変形量は最小)よりわずかに剛性が高くなります。

したがって、ストリング面の硬さに逆比例する接触時間は、衝突速度が(15m/s ~) 20m/s以上の実用範囲では張り上がりテンションの違いによる影響はありません。

図3 ストリング面の硬さ(面圧)とストリング変形量を3つのテンションで測る

(ストリング面の硬さ:面圧)



ストリング素材は
ツルツルで滑りやすいほど
スピンがかかる

1987年(邦訳 2009年)に発行されたHoward Brodyの著書以来、「ストリング素材の摩擦が大きいほど、テンションが強い(高い)ほどスピンのかかる」というのが従来の仮説でした(その仮説がいつの間にか通説、常識になってしまいました!)

しかし、ボールがストリング面を転がったり滑ったりすれば摩擦は働きようがありますが、ストリング面上でボールがつぶれ、それが次第に復元しながらボールがストリング面を離れるとしたら、ストリングとボールの間の摩擦がスピンの影響するとは考えられません。

また、丸い断面のストリング素材に対して、表面に凸形状を形成して摩擦を増やすことでスピンの量を増大するという発想の「スピンガット」と称されるものが市販されてきました。しかし、ストリングはメイン(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ので、ストリング面にはゲージ径の大きさそのままの十分な突起がすでに形成されており、ゲージ径の10分の1にも満たないギザギザの突起形状が摩擦に支配的であるというのでも考えにくいのです。

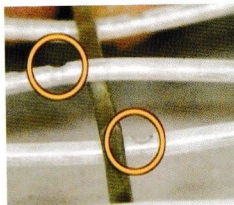
ノッチ(溝) (図4) のできたナイロンストリング面の交差点にストリング潤滑剤(String Lubricant、サンアイの沖本賢次氏が開発、国際特許取得)を塗布したラケットで、フォアハンド・トップスピン打撃実験を行いました。

塗布しないラケットに比べると塗布したラケットはスピンの量が回復し、接触時間が長くなるという実験結果が得られたので、表面がギザギザしたストリングよりツルツルしたストリン

グのほうがボールに回転がかりやすいこと、ストリング表面の摩擦が小さいほどトップスピン打撃において縦糸と横糸の交差点がずれてボールが食い込み、縦糸が戻るときのストリング面内の復原力によりボールのスピンの量が増すこと、したがって「スピンガット」の設計指針が180度変わるだろう、という内容を以前(2005年)にスポーツ・テクノロジー国際会議で発表しました。

トップスピン打撃において縦糸と横糸の交差点がずれてボールが食い込み、縦糸が戻るときのストリング面内の復原力によりボールのスピンの量が増す現象(Spring backと表現しました)が、のちに海外で「スナップ・バック(Snap back)現象」と呼ばれるようになりました。

図4 ラケット使用後にストリングの縦糸と横糸の交差点にできたノッチ(溝)



様々なデータを紹介

参考資料©Yoshihiko KAWAZOE and Kenji OKIMOTO, "Super High Speed Video Analysis of Tennis Top Spin and Its Performance Improvement by String Lubrication", The Impact of Technology on Sport, ASTA Publishing, (2005), pp.379-385. The New Physics of Tennis, Joshua M. Speckman 2011-01-04 /String Theory

図5 トップスピン打撃における
ノッチを潤滑したナイロンストリングとスナップバック現象

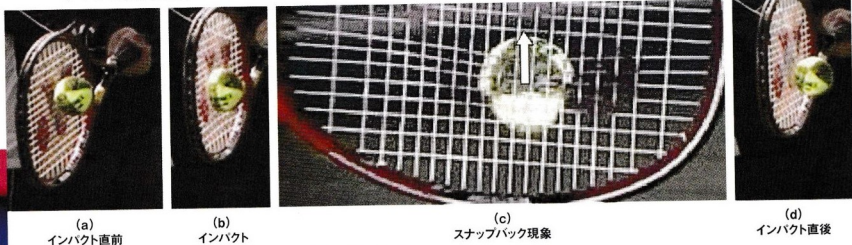
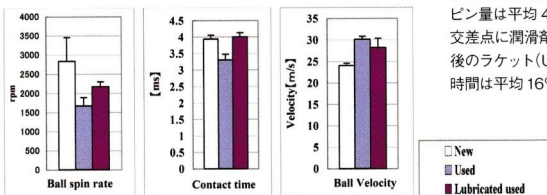


図5は、ナイロンストリングを張ってから一日3時間、一週間ほど使用してできたラケット・ストリング面のノッチを潤滑したラケットでトップスピン打撃をしたときの、(a)インパクト直前および(b)インパクトでのラケットとボールの関係、(c)スナップバック現象、(d)インパクト直後のラケットとボールの関係を示した写真です。この場合のボールとストリングの接触時間は1000分の4.1秒です。

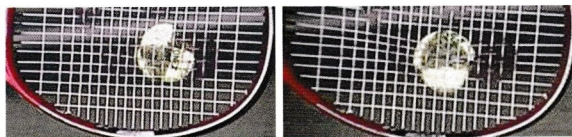
図6 ナイロンストリング(新品New、使用后Used、使用後潤滑Lubricated Used)とスピン性能(3回平均値と標準誤差表示)



(a) Ball spin rate ω (b) Contact time T_C (c) Post-impact ball velocity V_2

図6は、その実験結果をまとめたグラフです。ストリングの縦糸と横糸の交差点にノッチ(溝)ができた使用後のラケット(Used)の場合、新品のストリング(New)の場合と比べるとスピ量は平均40%低減しています。ところが、縦糸と横糸の交差点に潤滑剤を塗ったラケット(Lubricated Used)は、使用後のラケット(Used)と比べスピ量が平均30%回復し、接触時間は平均16%長く、打球速度の低減は平均6%という実験結果になっています。打球速度が低減しているのは、スピ量が增大したことによって、インパクトにおけるエネルギーのうちスピンのエネルギーの割合が増加しているためです。スピ量が増すと接触時間が長くなり、打球速度はわずかに低減します。

図7 トップスピン打撃によるインパクトにおいて、テニスボールがストリング面に接触しているときのボールとストリングの挙動



(a) 通常のラケット

(b) 潤滑剤を塗ったラケット

図7は、トップスピン打撃によるインパクトにおいて、テニスボールがストリング面に接触しているときのボールとストリングの挙動を示しています。通常のラケットの場合(a)に比べて、潤滑剤を塗ったラケットの場合(b)のほうが縦に張ったストリングの横ずれが大きいことを示しています。

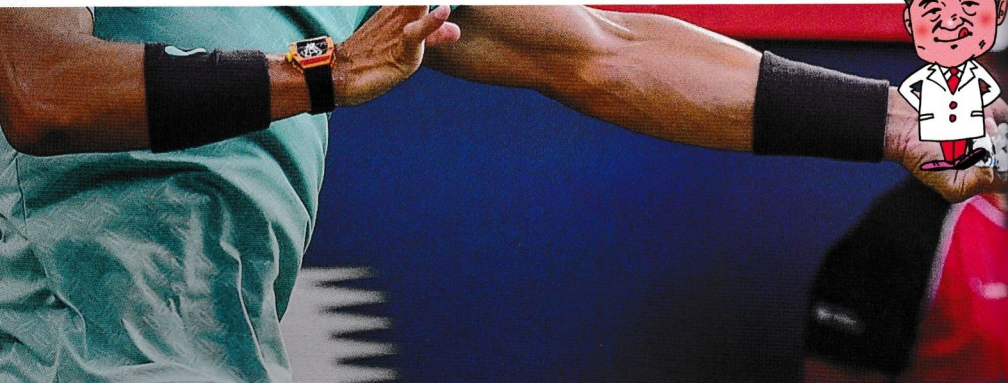
ラケットのストリングにシリコンスプレーをかけたプロ

海外の新聞記事(例えばThe Sunday Times, 24 June 2012)などに、ラケットのストリングにシリコンスプレー(潤滑剤)をかけたプロが取り上げられ、話題になりました。それに対してジョン・マッケンロー、イワン・レンドルなど過去のチャンピオンたちは、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国際テニス連盟(ITF)に主張しました。ITF科学技術研究所長のスチュアート・ミラー氏は、「現在はルール違反にはならない。スナックバック効果は認めているが、過去に禁止されたスパゲッティ・ラケット(二重のストリング構造/後述)を超えないように厳密に監視している」と答えています。

市販潤滑剤を用いたラケットとボールの衝突実験

一般の潤滑剤として手に入りやすい「WD-40」を用いて、ラケットはグリッパ位置を支点に、自由に回転できるように設置し、ボールをラケットのストリング面にマシンで衝突させたときのスピ量(ボールの回転速度)を測定した報告があります(Lindsey, Tennis Warehouse, 2011)。

ノッチのできた使用済みナチュララケット、ノッチのできた使用済みポリエステルストリング、1時間前に張った新品のポリエステルストリング、未使用の1ヵ月経ったナイロンストリング(シンセティック)の4種類のラケットで実験した結果、一般潤滑剤WD-40を塗った場合は、14(19%?)~58%スピ量が增大したという報告です。



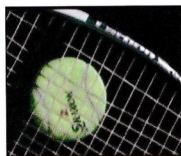
ストリングが新しいほど
スピンはかかりやすい

図8は、ナチュラルガットを張ったラケットで、プロが球出しされたボールをトップスピン打撃したときのインパクトの実験解析結果です。新品(New)の場合と試合後の使用済み(Used)の場合を比較しています。

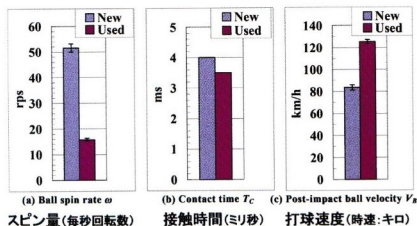
試合後のストリングには縦糸と横糸の交差点に深い溝ができており、トップスピン打撃において、縦糸の横方向へのズレと戻りによる面内の復原力(スナップバック効果)が少ないために、スピン量が顕著に低減し(70%低減)、接触時間も短くなっています(13%低減)。スピン量が大幅に低減しているだけで、打球速度(打球速度)は50%増大しています。

一方、新品の場合は、使用後の場合に比べると打球速度は遅くなりますが、スピン量がかかるかに大きいため、(ビデオ映像によると)バウンドしたボールが鋭く高く跳ね上がります。そうするとコントロールがしやすく、打球の威力も増すことが予想されます。

図8 ナチュラルガットについて、プロがトップスピン打撃した実験(※NHKとの共同実験)



スナップバック現象



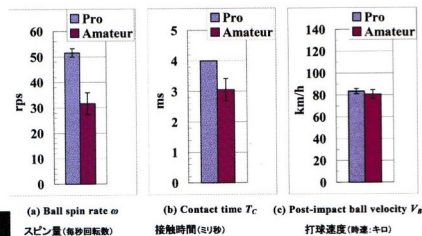
プロとアマが
トップスピン打撃した実測例

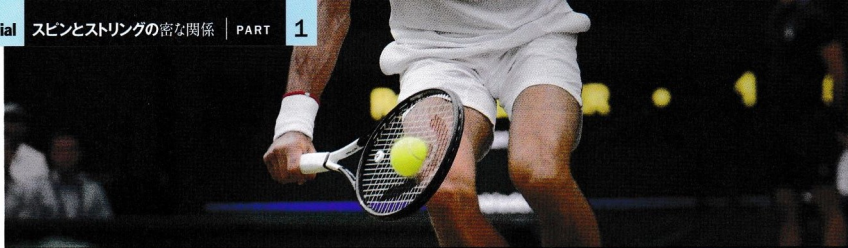
図9は、新品のナチュラルガットを張ったラケットで、プロとアマチュアのプレーヤーが球出しされたボールをトップスピン打撃したときのインパクト挙動を比較した結果です。この実験では、プロのトップスピン打撃はアマチュアのトップスピン打撃に比べて、スピン量は60%、打球速度は4%(ほとんど同じ)、接触時間は33%と大きな値を示しています。

プロのトップスピン打撃では、アマチュアに比べてスピン量がかかるかに大きいのが特徴的で、バウンドしたボールは鋭く高く跳ね上がります。また、トップスピン打撃後のボールの飛びがプロとアマチュアで差が少ないのも特徴的です。

打球速度にほとんど違いが見られないのは、プロのほうがスピンの割合が大きいからです。プロはハードヒットしてもボールにスピンがよくかかっているため、コントロール性が低下せず、打球速度も抑えられるため、インパクトにおける衝撃も大きくなり、関節の負担が増大しないことを示唆しています。

図9 新品ナチュラルガットでトップスピン打撃
プロとアマのスピン挙動の比較





プロとアマがアンダースピン (スライス) 打撃した実測例

図10 aはプロのアンダースピン打撃、図10 bはアマチュアのアンダースピン打撃の様子を示しています。プロのほうがやや前方(ネット側)でインパクトしています。

図11は、プロとアマがアンダースピン(スライス)で球出しされたボールを打撃した場合のスピンの挙動の比較です。ラケットには新品のナチュラル(天然)ガットを張っています。

プロの打撃では、アマチュアの打撃に比べてトップスピンの場合ほどの違いはありませんが、スピン量が多く(平均1.3倍)、打球速度も速く(平均1.25倍)、ボールとストリングの接触時間も長い(平均1.1倍)という結果を示しています。この場合のアンダースピン打撃におけるボールとラケット(ストリング面)の接

触時間は、プロの場合は平均1000分の3.6秒、アマチュアの場合は平均1000分の3.3秒です。相手のボールが速いと、ボールとストリング面の接触時間はもう少し短くなります。

打球速度が速いのに接触時間がやや長くなっているのは、スピン量が多いからです。ボールとストリングの接触時間が長いことは、インパクトでの衝突力の低減、および手に伝わる衝撃振動の低減も意味します。

スピンを強くかけると衝撃が大きいと誤解されがちですが、スピン量が増すと正面衝突力が減って、ボールを回転させる成分が増えるので、腕へ伝わるインパクトの衝撃振動は低減します。

試合の場合(対人)は相手の打球速度とスピン量が関係してきますので、インパクト諸量の値は図11とは多少異なります。

図10 a プロのアンダースピン打撃

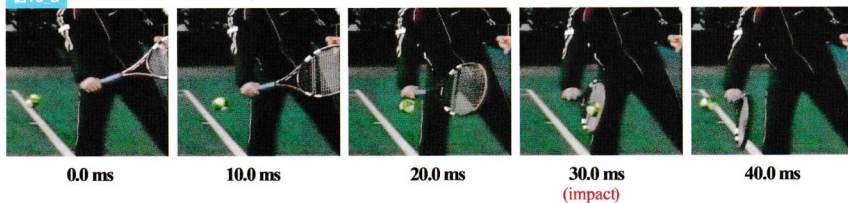


図10 b アマチュアのアンダースピン打撃

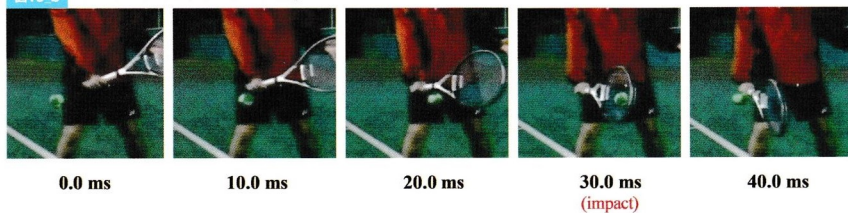
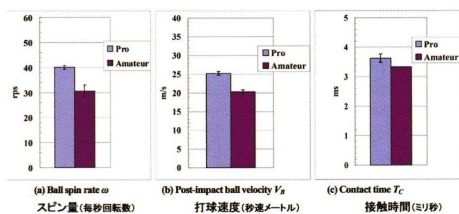


図11 アンダースピン打撃におけるプロとアマチュアプレーヤーのインパクト諸量の比較



※毎分回転数 [rpm] = 毎秒回転数 [rps] x60
 ※ミリ秒 [ms] = 1/1000 秒

参考文献◎KAWAZOE Y., OKIMOTO K., "Mechanism of Tennis Racket Spin Performance [Ultra-High-Speed Lubrication of String Intersections]", Journal of System Design and Dynamics, Vol.6, No.2,(2012) pp.200-212. Yoshihiko KAWAZOE, Yukihiko TAKEDA and Masamichi NAKAGAWA, "Effect of Notched Strings on Tennis Racket Spin Performance: Ultra-high-Speed Video Analysis of Spin Rate, Contact Time, and Post-Impact Ball Velocity", Journal of System Design and Dynamics, Vol.6, No.2, (2012), pp.213-226. ほか



ストリング素材は硬いほど
スピンのかかりやすい
ポリエステルが主流

ポリエステルストリングは、ヨーロッパのジュニア選手がアンツォカのコートで使い始め、彼らがトッププロになっても使い続けたこと、飛び過ぎないというイメージもあって上級バドプレーヤーたちに人気が出始めました。そしてポリエステルストリングを使用した選手の活躍によって、一気にメジャーになったと言われています。

鋭いスピンを打つことで知られるラファエル・ナダルもポリエステルストリングを使用しています。表面摩擦が大きい「スピンガット」と呼ばれるようなナイロン系ストリングを使用しているわけではありません。

全米ラケットストリンガー協会の機関誌に掲載されたデータによると、USオープンでの世界ランク上位20名の男子選手が使用したストリングの種類は、1995年はナチュラルが69%、ナイロンが26%でしたが、2004年にはナチュラルが11%、ナイロンが5%、ポリエステル(縦系にポリエステルのハイブリッドを含む)が84%で、今から15年前に、すでにポリエステルが主流になっています。

ポリエステルストリングの張り上がり後のテンション低下(テンションロスと言われる)が欠点として指摘されることが多いのですが、テンションは張った直後から低下していくもので、ポリエステルに限ってのことではありません。試合のときは一球ごとに低下していきます。

ナチュラル、ナイロン、ポリエステル
ストリングの違いとスピニング量

図12は、ボールとラケットの斜め衝突実験におけるストリング素材、テンションとスピニング量(回転速度)の実測値(平均値)です。

図13は、ストリング素材、テンションと反発係数の実測値(平均値)です(Rod Crossらの2010年論文にあるデータをグラフ化しました)。

マシンから発射するボールの衝突角度は、ストリング面(正面)に対してスピンの発生しやすい斜め40度です。ストリング・テンションは、52ポンドと62ポンド。ストリング素材は、ナイロン1、ナイロン2、ナチュラル、ポリエステル1、ポリエステル2、ポリエステル3、ポリエステル4で行いました。

図12において、ストリング素材の違いによるスピニング量(平均値)は、ナイロンが122rad/s(2330rpm)、ナチュラルが143rad/s(2731rpm)、ポリエステルが153rad/s(2922rpm)です。ポリエステル→ナチュラル→ナイロンの順にスピンがかかりやすい結果になっています。割合でいうと、ナイロンに比べてポリエステルのスピニング量が25%大きいという結果です。

テンションのスピニング量への影響はほとんどなく、ばらつきの範囲とみなせます。ボールとストリング面の斜め衝突におけるスピニング量は、微妙な引っかかり具合によって本質的に多少はばらつきます。

図13では、ナイロン、ナチュラル、ポリエステルというストリング素材の違いによる反発係数の差は見られません。またテンションの違いによる反発係数の差も見られません。

したがってこれらのデータから見ると、ストリング素材の違いは打球に関して、スピン性能のみに影響するということになります。

2005年以前の出版物には反発係数にテンションの影響があるという記述が多く見られ(時代によって影響の仕方が正反対の説明も見られます)、いまだに誤解されることが多いのですが、研究者の世界では今やテンションは反発係数にほとんど影響しないというのが常識になっています。

図12 ストリング素材別 | スピニング量

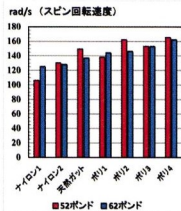
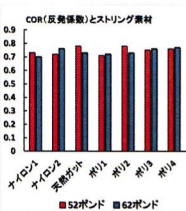


図13 ストリング素材別 | 反発係数



参考資料①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)」、シンポジウム講演論文集2013(DVD)、313, pp.1-10. 日本機械学会 / 川副嘉彦「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的影響)」、シンポジウム講演論文集2013(DVD)、314, pp.1-10. 日本機械学会ほか

ITFもストリング素材別の
スピン実験結果を公表

国際テニス連盟(ITF)はポリエステルストリングでも、潤滑剤を塗布したストリングがスピニング量を増すと同様の結果を確認し、滑りやすく剛性の高いポリエステル系ストリングが強いスピンを生み出すのは「摩擦が小さいため」であることを認めました。ポリエステルは、ナイロンよりも20%、ナチュラルよりも11%ほどスピンが大きいという実験結果を発表しました(2013年)。

ITFテクニカル・センター所長のミラー氏は、ポリエステルは現時点で、過去に使用禁止となった「スバゲッティ・ストリング(二重のストリング/別枠参照)」のスピニングには到底及ばない、しかし、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語っています。



「スパゲッティ・ストリング」と「滑りやすいストリング」のスピニング性能の類似性

かつて「スパゲッティ・ストリング」ラケットを使って、世界ランク200位の選手が4位の選手を破ったことや、全米、全仏、全豪で優勝したギレルモ・ピラスがスパゲッティ・ラケットを使っていたイリー・ナスターゼとの決勝を途中棄権したことなどから論争が起こり、1978年にITFはその使用を禁止したという歴史があります。

その後、ルールが改正されて、縦系と横系が交互に編まれていないラケットはルール違反になりました。

図14(a)、(b)は「スパゲッティ・ストリング」ラケットの模式図と写真です。グロメット穴に2本ずつ縦系各16本を通して、さらにそれぞれをプラスチックの中空ローラーに通して太い横系(5本)を両面から挟む形に張っています。

S.GoodwillとS.HaakeはITFの協力を得て、スパゲッティ・ラケットのヘッドを固定して、ボールをストリング面に斜め衝突させてスピンの測定を行いました(40ポンド、70ポンドのナイロンストリング、ナチュラルストリングとの比較)。入射ボールはバックスピニング量を変化させています。その結果が図15です。「スパゲッティ・ストリング」ラケットは、ローラーがヘアリングのように動いて縦系が横系面上で滑りやすく、通常のストリングを張ったラケットに比べてスピニング量が約2倍になっています。

また、図15はナイロン40ポンドと70ポンド、ナチュラル40

ポンドと70ポンドの計4種類のストリング・テンションの場合を比較したもので、スピニング量の差はほとんどなく、バラツキの範囲であることも示しています。

したがって、この実験結果からもスピン増大はストリング面の縦系と横系が滑りやすいことが主な要因ということになります。

図14 「スパゲッティ・ストリング」ラケット

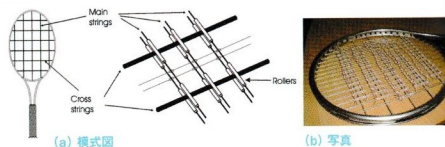
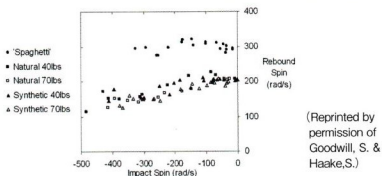


図15 ナチュラルとナイロン(各40ポンドと70ポンド)、スパゲッティ・ストリングのスピニング性能の比較



(Reprinted by permission of Goodwill, S. & Haake, S.)

テーマ 6 スピンが手に伝える感覚

スピニングがかかるほど手に伝わる衝撃振動は小さいマイルドな打球感

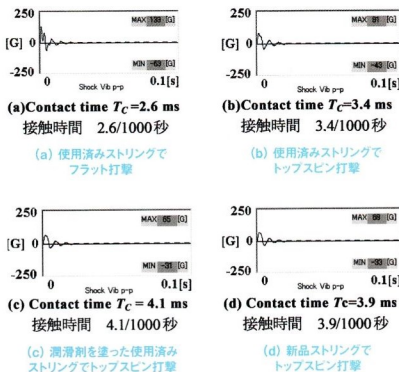
図16は、振動の大きいラケット面の先端側オフセンターで打撃した場合(衝突速度30m/s)の手首関節・衝撃振動のシミュレーション波形です。横軸は時間、縦軸は加速度(力に比例する)です。(a)は使用済みストリングでフラット打撃、(b)は使用済みストリングでトップスピニング打撃、(c)は潤滑剤を塗った使用済みストリングでトップスピニング打撃、(d)は新品ストリングでトップスピニング打撃の場合に相当します。

(b)と(c)のトップスピニング打撃の場合、インパクトにおける力積(打撃力)のラケット面に垂直な成分は、それぞれ(a)のフラット打撃の85%、65%、インパクトによる手首関節の衝撃力はそれぞれ(a)の65%、41%です。

縦系が横にずれて、ストリング面に平行な復原力によりスピニング量が增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くぼんでいるように見えます。これらが

「ボールをつかむ感覚が高まる」「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のかもしれませんが。

図16 ラケット面先端から95mm手前でボールを打撃したときの手首関節衝撃振動(衝突速度30m/s)



参考資料©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, Vol.57, (2009), pp.511-522.