

トライボロジスト

Journal of Japanese Society of Tribologists

テニスのトライボロジー

川副嘉彦

“トライボロジスト” 第54巻 第7号 別刷

2009年 7月15日 発行

社団法人 日本トライボロジー学会



テニスのトライボロジー

原稿受付 2009年2月6日

“トライボロジスト” 第54巻 第7号 (2009) 452-457

1. テニスラケットの性能とボールのスピンの

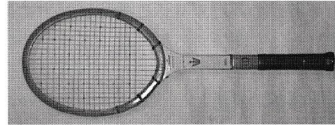
テニスラケットは、素材の複合化により設計・製造の自由度が大きくなり、現在は、身体的条件や技術的条件の異なる使用者との整合を考慮したきめの細かい設計を目指す段階に至っている。打球感の改善をめざして圧電素子をラケット首部に組み込んだものやグロメットに滑車を使用したものなど、種々のラケットが市販されている。図1は、過去の木製ラケットと最近のハイテクラケットの代表例を示す。

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^{1,2)}。

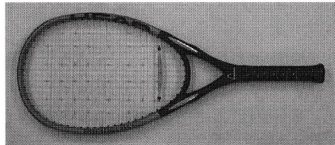
テニスはコート内にボールをコントロールするスポーツであり、コントロールには適切なスピン(回転)が必要である。スピンの良かかったボールはバウンドしてから鋭く跳ね上がるので、打ち返すのが難しい。

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、スピン性能のメカニズムは謎であった。

しかし、最近、毎秒1万コマの超高速ビデオ画像解析によってスピンのメカニズムが明らかにな



(a) 木製ラケット：フェイス面積 68 in^2 (439 cm^2)、質量 375 g 、全長 27 in (68.6 cm)



(b) インテリジェントファイバーラケット：フェイス面積 114 in^2 (736 cm^2)、質量 241 g 、全長 27.75 in (70.5 cm)

図1 過去の木製ラケットと最近のハイテクラケット

った^{3,4)}。すなわち、(1)ストリングスの縦糸・横糸の滑りが重要な役割をすること、(2)縦糸・横糸の交差点にできたノッチ(溝)がスピン性能を低減させること、(3)ノッチができたストリングス(図2)を潤滑することによりスピン性能が回復すること、(4)縦糸と横糸がお互いに滑ってボールがストリングスに食い込みやすいほど、ボールが離れるときに横に伸びた縦糸が元に戻りやすく、元に戻るときのストリングス面内復原力も大きいので、スピンのかかりやすい、などがわかってきた。

本稿では、最近のテニスに特徴的なトップスピンとストリングスの摩擦特性の関係について紹介したい。

Tribology in Tennis

By Yoshihiko KAWAZOE, Dept. of Human-Robotics, Faculty of Engineering, Saitama Institute of Technology (1690, Fusaiji, Fukaya-shi, Saitama 369-0293, E-mail : kawazoe@sit.ac.jp)

Key Words : tribology, friction, tennis racket, strings, spin

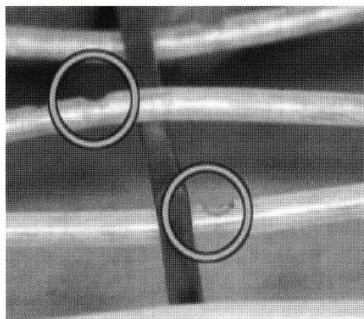


図2 ラケット使用後にストリングス縦糸・横糸の交差点にできたノッチ(溝) [出典:文献4]]

2. テニスボールとストリングスの特性

図3は、(a)ボールおよび(b)ボール・ストリングス複合系の復原力・変形特性の実測結果である。たわみ量 X に対するストリングス、ボール、およびボール・ストリングス複合系の等価ばね剛性(ストリングス剛性は一般に面圧と呼ばれる)は、変形量の増大に伴って強い非線形の硬化ばね特性を示す。

硬い壁にボールをぶつけたときのボールと壁の反発係数実測値は、入射速度が増すほど、ボールの変形(つぶれ)によるエネルギーロスの割合が大きく、反発係数が下がっていく。一方、図4は、ラケットヘッドを固定して、ストリングス面にボールをぶつけたときの(ボールとストリングスの)反発係数実測値 e_{BG} である。鉄のボールをストリングスに衝突させたときの反発係数は100%に近く、ストリングスの優れた弾性によって楽にボールを打つことができるのである。テンションと呼ばれる初張力の实用範囲は45~65 lbs (200~300 N) であり、反発係数に及ぼすテンションの影響は小さい。「ストリングスを緩く張るとテニス肘防止になる」というのは誤解である。ストリングスの「面圧」(たわみ剛性)は、図5に示すように、たわみ量(横軸)に比例して高くなり、衝突速度(この場合は V_B)が増すと10倍近くまで変化する。テンションが影響するのは、衝突速度10 m/s以下の線形(非实用)範囲での

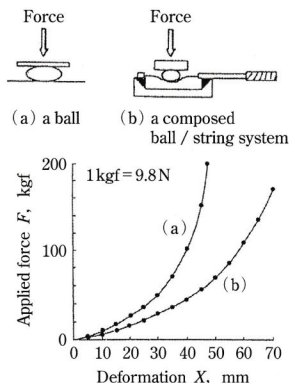


図3 ボールとストリングスの荷重-変形試験 [出典:文献1]]

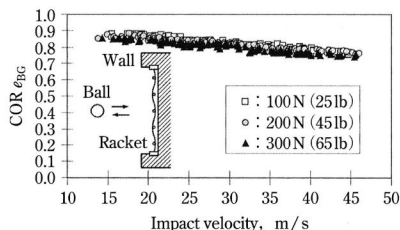


図4 ストリングスとボールとの反発係数 e_{BG} に及ぼす衝突速度とテンション (lb: ポンド) の影響 [出典:文献2]]

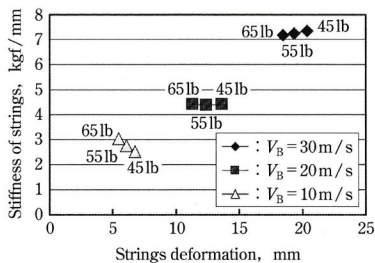


図5 ストリングス面圧(たわみ剛性)に及ぼす衝突速度 V_B とテンション (lb: ポンド) の影響 [出典:文献2]]

話である。

3. テニスラケットの反発性能予測

ボール・ストリングス系の非線形復原力特性および減衰特性を実験的に 1 自由度の等価系に同定し (図 6), さらにラケットあるいはラケット・腕系の剛体運動特性および振動特性も実験的に同定することができる。

図 7 は宙吊りラケットのストリングス面の先端側, 中心, および根元側の位置にボールが 30 m/s で衝突したときのラケットの初期振動振幅を予測した例である。ストリングス面の中心で衝突するとラケットフレーム振動が小さく, 反発係数が高い。

図 8 は, 宙ぶりの静止ラケット ($V_{Ro}=0$) の先端側から根元側まで位置を変えてボールを衝突させたときの跳ね返り速度 V_B と入射速度 V_{Bo} の比 e (反発力係数と定義する) の実測値と予測値であり, ラケットの反発性能評価に使われる。

インパクトにおけるボールの変形によるエネルギー損失およびラケットフレームの振動によるエネルギー損失が少ないほど, ボールとラケットの反発係数 e_r が高い。衝突位置での反発係数 e_r が高く, 衝突位置に換算したラケットの換算質量 M_r が大きいほど反発力係数 e は大きい。

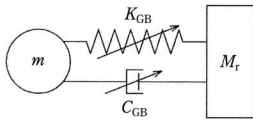


図 6 ボール・ストリングス複合系の衝突モデル (出典: 文献 1))

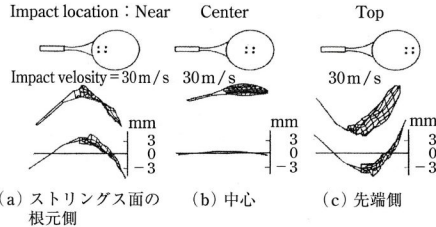


図 7 インパクトの瞬間のラケットの初期振動振幅予測値 (衝突速度: 30 m/s, 衝突位置) (出典: 文献 1))

図 9 は, ボールの飛びに関するラケット性能を予測するためのスイングモデル例である。肘と手首の関節角度を一定にして, 肩関節トルク N_s を与え, V_{Bo} で飛んでくるボールをラケットヘッドが 90 度回転したときの速度 V_{Ro} で打撃する。ラケットでボールを打撃する場合は, 衝突直前のボール速度を V_{Bo} とすると, 打球速度 V_B は, 反発速度成分 eV_{Bo} とプレーヤーのスイングによる速度成分 $(1+e) \cdot V_{Ro}$ との和になる。

図 10 は, ラケット面の長手軸から外れた横の

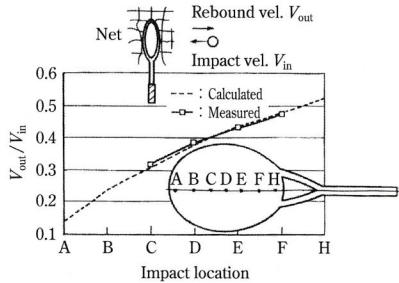


図 8 反発特性 (反発力係数) e の実測値と予測値 (出典: 文献 1))

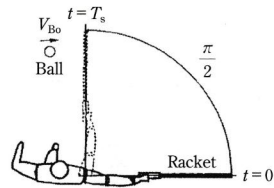


図 9 スイングモデル例 (グランドストローク) (出典: 文献 1))

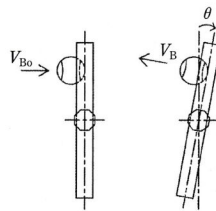


図 10 オフセンター打撃における面安定性 (出典: 文献 1))

オフセンター打撃において、ボールがストリングス面に接触してから離れるまでにラケット面が傾く回転角度 θ (面安定性) を示す。ラケット面の先端側では回転しにくい、面の中心から根元側では、軽量型ラケットは接触時間約 3/1000 秒間に約 10 度程度傾く。ラケット面が傾くと、打撃後のボール速度 V_B の方向が意図した方向とずれてしまう。

図 11, 図 12 は、それぞれラケットのフェイス(打球面)面積が 100, 110, 120 in² の軽量ラケット(ストリングスを含む重量が約 290 g) でボールを打撃したときの反発係数 e_r 、スイングによるボールの飛びの予測値 V_B (紙面の都合で長手軸中心線上のみ表示) の例である。打球面が広がるほど、反発係数 e_r は低下するが(図 11)、反発力係数 e が高いために(図は省略)、

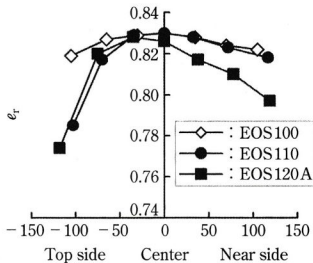


図 11 フェイス面積と反発係数 e_r (質量・フレーム剛性のほぼ等しい軽量ラケット) (出典: 文献 1))

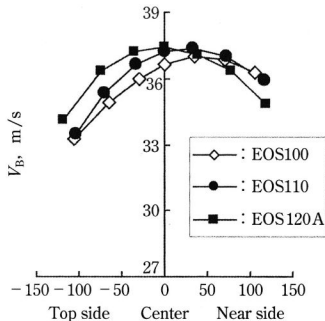


図 12 フェイス面積とボールの飛びの予測値 V_B (質量・フレーム剛性のほぼ等しい軽量ラケット)

(出典: 文献 1))

ボールの飛びは良い(図 12)。デカラケは面安定性(図 10)も良い。

4. スピンのメカニズムとストリングス交差点潤滑による性能向上

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るながら、現在数百種類も市販さ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の影響するかは不明であった。ストリングスの摩擦が大きいほどスピンのかかるというのが従来の仮説であったが、最近、実際は逆に、摩擦が小さいほど縦糸と横糸が互いに滑って縦糸が横にずれやすいので、ボールがストリングスに食い込みやすく、また横に伸びた縦糸が元に戻るときの復原力によりスピンのかかりやすいことが高速ビデオ画像解析により明らかになった。

図 13 は、ボールを打撃したときのテスターのトップスピン打法を示す。斜めから撮影した高速ビデオ画像(毎秒 1 万コマ)の一部であり、(a)はインパクト直前、(b)はボールとストリングスが接触している期間(約 3~4 ms)、(c)はボールがストリングス面から離れる瞬間のフレームを示す。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る。

インパクトでラケット面が真後ろになるように撮影したビデオ画像(1 万コマ/秒)の代表的なフレーム(コマ写真)について、(a)ストリングスを張ってから 1 週間ほど毎日 3 時間使用したラケットの場合(使用後ストリングス)と(b)使用後ストリングス交差点に潤滑剤(シリコーン系オイル)を塗った場合を比較すると、潤滑剤を塗った(b)の場合は、縦糸が直角方向へ大きくずれ、ボールが離れるときには元に戻っているのに対し



(a) 0.000 (b) 0.002 (c) 0.004

図 13 トップスピン打撃(撮影: 1 万コマ/秒)

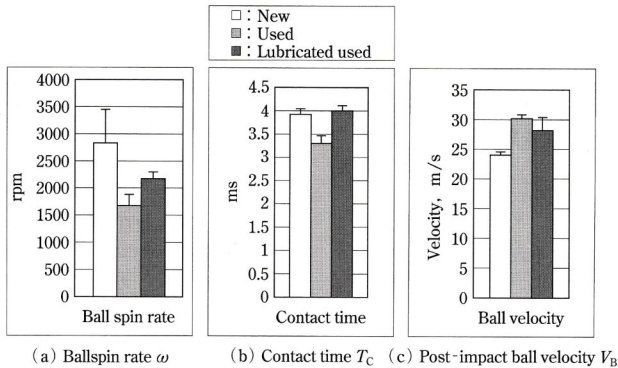


図 14 スtrings とスピニング性能 (3 回平均値と標準誤差) (出典: 文献4)

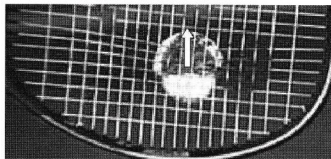


図 15 横にずれたStringス縦糸が元に戻るときの復原力によるスピニング (出典: 文献4)

て、(a) の場合は、縦糸のずれが少なく、ボールが離れた後も縦糸がまだ一部横にずれたままになっている。

図 14 は、トップスピニング打撃 (図 13) における高速ビデオ画像解析結果である。

String 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String と比べるとスピニング量は平均 40% 低減する。縦糸と横糸の交差点にノッチ (溝) ができて滑りにくくなるからである。ノッチのできたString でも潤滑剤 (国際特許) を塗るとスピニング量は平均 30% 回復し、接触時間は平均 16% 長くなる。スピニングの回復によって、打球速度は平均 6% 低減する。図 15 は、String の縦糸が横にずれやすくて戻りやすいほど、ボールの「食いつき」が良く、戻るときの復原力によりボールにスピニングがかかる様子を示す。

スピニング量が多いとインパクトによる直接的な衝撃力も低減し、接触時間が長くなり、ラケットや手に伝わる衝撃振動も低減する。コントロール性

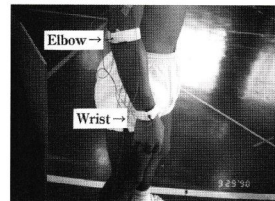


図 16 手首関節と肘関節の衝撃振動の測定 (出典: 文献4)

とホールド感が増し、バウンド後のボールが高く跳ね上がるので、対戦相手は打ちづらい^{2,3)}。

図 16 は、手首関節と肘関節の衝撃振動の測定位置を示す。図 17 は手首関節の衝撃振動波形の予測結果であり、ボールとの衝突位置はラケット面先端側である。図 17(a) は、衝突速度 30 m/s でフラットに正面衝突する場合であり、図 17(b) は通常のトップスピニング、図 17(c) は潤滑剤を塗ったString でのトップスピニングに相当する。図 17(b)、図 17(c) の垂直成分・力積はそれぞれ図 17(a) の 0.85 倍、0.65 倍である。縦糸が横にずれてString 面に平行な面内復原力によりスピニング量が増大し、接触時間が長くなると、フレーム振動が低減し、ボールとString のたわみ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」などのテスターの打

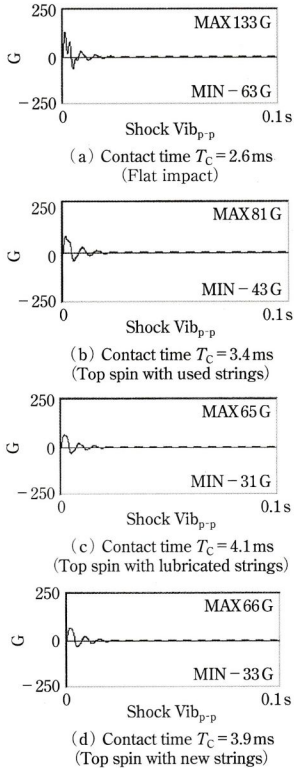


図17 ラケット面先端から95 mm手前の位置でボールを打撃したときの手首関節衝撃振動予測波形(衝突速度:30 m/s)【出典:文献4】

球感に対応すると考えられる。

5. 硬くてツルツルのポリエステルが主流に

表面摩擦の大きいスピニングと呼ばれるナイロン系より、摩擦が少ないポリエステルのようなストリングスの方が、スピニングがかりやすい。すでに、数年前から世界のテニスは、ナイロン系に代わって硬くてツルツルのポリエステル系が主流になっており、天然ガットでさえ凌駕している。

6. おわりに

その後、テレビ番組の製作過程においてスピニングの超高速ビデオ映像解析の機会を得た。この実験においても、試合後の天然ガット(牛の腸)には交差点に深い溝ができており(図2)、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、スピニング量が顕著に低減し、接触時間も短く、本稿のトップスピニングのメカニズムを裏付ける結果であった。また、アマチュアに比べてプロのトップスピニング打撃では、打球速度の差は少ないが、スピニング量ははるかに大きかった。アンダースピニング(スライス)に関しても、アマチュアに比べてプロの打撃では、スピニングが多く、打球速度も速く、ボールとガットの接触時間も長かった。テニスボールの毛羽(フェルト)なしボールとの比較についても興味深い結果を得たが、これらについては別の機会に紹介したい。

文 献

- 1) 川副嘉彦: テニスラケットの素材・構造と性能, バイオメカニクス研究, 7, 2 (2003) 136.
- 2) 川副嘉彦: テニスのデカラケ, 厚ラケでコントロールとスピードがよくなるのはなぜ, スポーツ工学, 2 (2007) 23.
- 3) 川副嘉彦・沖本賢次・沖本啓子: テニスラケットのスピニング性能のメカニズム(ストリング交差点調滑によるスピニング性能向上の超高速ビデオ画像解析), 日本機械学会論文集(C編), 72, 718 (2006) 1900.
- 4) Y. KAWAZOE & K. OKIMOTO: Tennis Top Spin Comparison between New, Used and Lubricated Strings by High Speed Video Analysis with Impact Simulation, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 57 (2008) 511.

■■■■■■■■■■ 著者プロフィール ■■■■■■■■■■

川副 嘉彦 1944年生まれ。東京大学工学系研究科博士課程単位取得退学。現在、埼玉工業大学工学部教授。工学博士(東京大学)。日本機械学会フェロー。専門は機械工学、スポーツ工学、ヒューマン・ロボット学。日本機械学会賞受賞(1995年度)。第4回21世紀連合シンポジウム-科学技術と人間-シンポジウム賞受賞(2005年度)。主研究テーマは、スポーツとロボットにおける身体の同時並列・自律分散制御。

