

5. Advanced topics

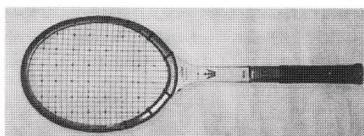
テニスと卓球における衝撃と振動

川副 嘉彦*

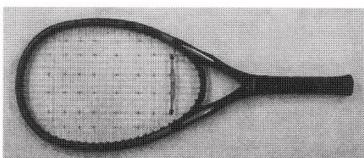
1. テニスラケットと性能

ラケットに求められる基本的な性能は、パワー、コントロール、打球感と一般にいわれている。またこれらのほかに、「玉離れがよい」、「ホールド感がある」、「面の安定性がよい」など、微妙な性能の違いを評価する表現がいろいろある。一方、テニス肘をはじめとする障害と用具の問題がある。肘の痛みの原因は複雑であり、ほとんど未解明であるが、テニス肘になりやすいラケットが存在することは、多くのプレイヤーが経験的に認めている^{1)~3)}。

テニスラケットは、1960年代前半までは木製で、フェイス面積はほぼ 68 in^2 であったが、1967年にスチール製、1968年にアルミ製の金属ラケットが現れ、1974年には複合材のラケットが登場した。これまでにラケットは大きく変わってきた



(a) 木製ラケット (Wilson 製, 68 in^2 , 375g, 全長 27in)



(b) インテリファイバーラケット I.S.10 (Head 製, 114 in^2 , 241g, 全長 27.75in)

図1 過去の木製ラケットと最近のハイテクラケット

が、1976年に現れた 110 in^2 のデカラケ (打球面が広い)、1987年の厚ラケ (フレーム剛性が高い)、そして1995年の長ラケ (ラケット全長が従来より長い) は最も革新的なラケットだといわれている。最近のラケットの主要な素材は複合材であり、軽量化が特長である。図1は、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^{1)~3)}。

2. テニスのインパクトのシミュレーションとラケットの性能予測

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は、実験的に1自由度の等価系に同定し(図2)，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を実験的に同定する(図3, 図4)。

プレイヤーがボールを打撃した瞬間に腕系に伝わる衝撃力を計算するための図4のモデルにおいて、インパクトの瞬間には重力や筋力は衝突力に比べて小さいとし、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ている。図5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である。衝突速度が増すと、ボールとストリングスの硬化ばね特性により、ボールとストリングスの接触時間が短くなり(図6)，衝突力は急激に大きくなる。ボールとラケットの衝

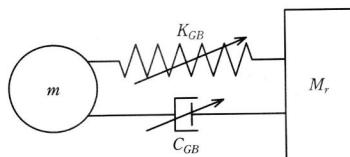


図2 ボール・ストリングス複合系の衝突モデル

*埼玉工業大学 工学部
ヒューマン・ロボット学科 教授
(Yoshihiko Kawazoe)

突により、ボールとストリングスは変形し、ラケットは剛体運動をしながら振動する。

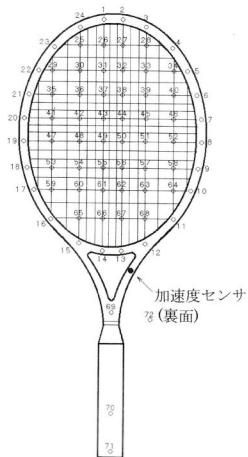


図3 ストリングスメッシュ
(ストリングス上の4点で
ボールと接触するとして
同定する)

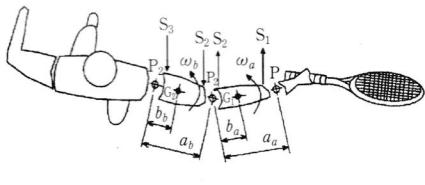


図4 衝撃力を予測のための腕系モデル

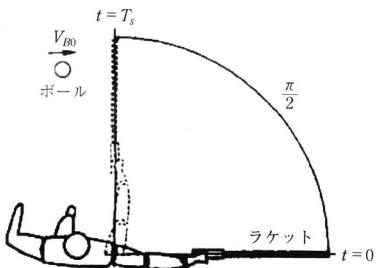


図5 スイングモデル(グランドストローク)

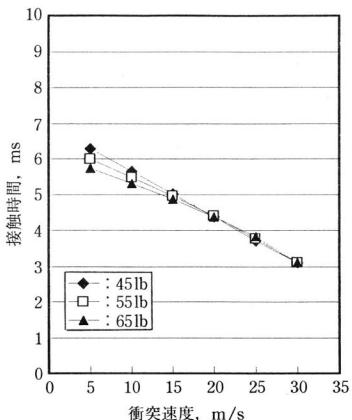


図6 ストリング張力を変えた場合のボールとラケットの接触時間と衝突速度

図7は、ボールがストリング面の中心および中心を外れた位置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。

ボールとラケットの反発係数(COR) e_r は、ボール・ストリングス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いほど高く、ストリング面の中心近くで衝突するとフレーム振動が小さいので高い値を示す^{3)~8)}。ボールの跳ね返りのよさは、静止ラケット(ヘッド速度 $V_{R0} = 0$)にボールを衝突させたときのボールの入射速度 V_{B0} に対する跳ね返り速度 V_B の割合で表すことが多く、反発係数 e_r と区別して「反発力係数」 e と定義する。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_{B0} とすると、打球速度 V_B は、飛んでくるボール速度による反発速度成分 $e V_{B0}$ とプレイヤーのスイングによる速度成分 $(1+e) V_{R0}$ との和になる。一般に、反発力係数の高いラケットはヘッドの速さが遅く、反発力係数の低いラケットはヘッドの速さが速い。したがって、ボールの飛びは「反発力係数」と「振りやすさ」の両者のかね合いで決まる^{3)~8)}。

人間が感じる打球感に直接影響し、テニスエル

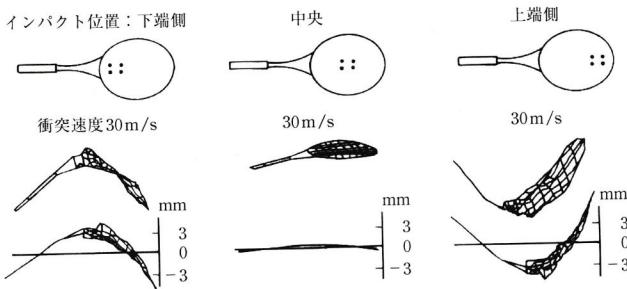


図7 インパクトの瞬間のラケットの初期振動振幅予測値（衝突速度 30 m/s,
衝突位置：左からストリング面の根元側、中央、先端側）

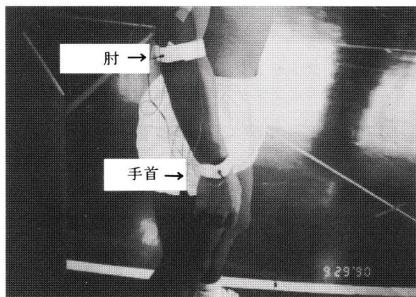


図8 手首関節と肘関節の衝撃振動の測定

ボーン（肘）などの傷害とも関連するラケットと手首関節の衝撃・振動特性は、衝撃成分と振動成分との合成により予測することができる。図8は、衝撃振動（加速度）の測定位置を示す。予測波形は実測波形に比べてやや大きめであるが、実測波形の特徴をよく表す^{3)~8)}。

3. テニスラケットの軽量化の限界とハイテク素材・構造による衝撃振動の低減

図9は、市販ラケットの中で最軽量の「TSL（ストリング込みで224g）」の反発係数 e_r の予測値をパワーに優れている軽量ラケット120A（292g）および衝撃振動の小さい従来重量バランス型「120H（354g）」と比べたものである。ただし、フォアハンドグランドストロークモデルにおいて、 $V_{B0}=10\text{ m/s}$ 、肩関節トルク $N_s=56.9\text{ N}\cdot\text{m}$ を与えた場合である。インパクトにおけるフレー

ム振動が大きいために反発係数がほかより低い。ヘッド速度は速いが、反発係数および反発力係数が低下するために、ラケット面中心から先端側ではボールの飛びもほかより悪くなる。また、図10に示すように、手首関節の衝撃振動ピーク値が著しく大きく、軽量化の行きすぎを示している。

従来も、手に伝わる衝撃振動を低減させた熱可塑性樹脂（ナイロン系）を採用したラケット「FX 110TP（ヤマハ）」もあったが、最近は、滑車でストリングスを支える「ローラーズ（ウイルソン）」やグロメット（ストリングスを通す小穴に取りつけた鳩目のようなもの）の部分でストリングスが滑らない構造にした「マッスルパワー（ヨネックス）」、圧電素子と制御装置をフレームに組み込んだ「インテリジェント ファイバー（ヘッド）」な

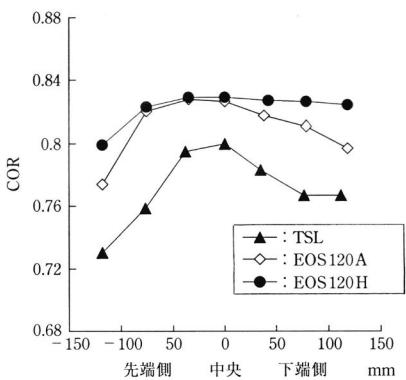


図9 市販の最軽量ラケット TSL の反発係数 e_r

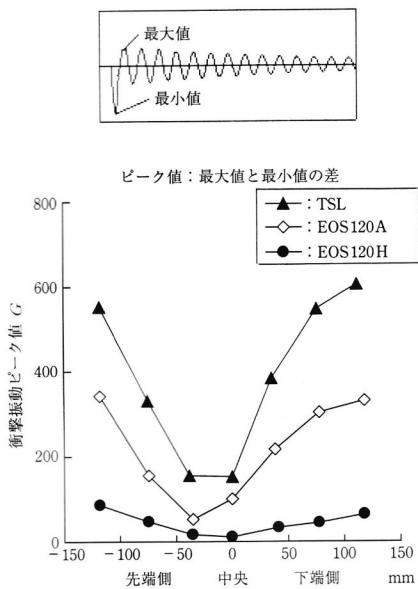


図10 市販の最軽量ラケットTSLの手首関節の衝撃振動ピーク値(加速度G = 9.8m/s²)

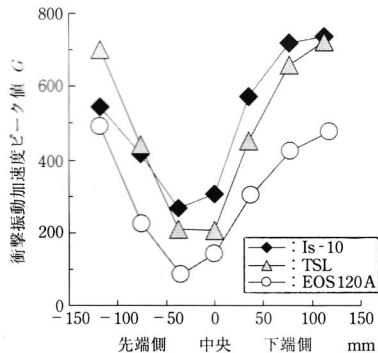


図11 インテリジェントラケット「IS-10」の制振効果の予測(手首関節の衝撃振動加速度ピーク値, G = 9.8m/s²)

ど、積極的な振動低減を試みるラケットが市販されている。軽量ラケットのグリップエンドに錘を装着したラケットも手に伝わる衝撃を小さくする。

図11は、「インテリ ファイバー IS-10」[図1

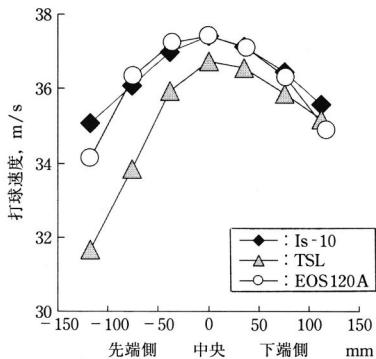


図12 インテリジェントラケット「IS-10」のパワー(ストロークにおける打球速度V_B)の予測

(b)]の制振効果を予測した結果である。手首関節の衝撃振動は、最軽量ラケット「TSL(224g)」に比べるとラケット面先端でやや低減されているが、全体的には低減されておらず、根元側ではむしろ衝撃振動が大きくなっている。ただし、図12に示すように、ラケットのパワー(打球速度)は優れている。サーブでは、さらにパワーが増す。ハンドル上の振動の節の位置が握りの位置と離れているために手首関節の衝撃振動が低減していないが、ラケット全体の振動は小さくなっているのである。衝撃振動に関しては改善の余地がある³⁾。

長ラケの登場は画期的であったが、全長をそのまま長くしても、振動が大きく、反発係数および反発性が低下し、ラケット面の中心および先端側寄りの打点ではボールの飛びはほとんど向上しない。これも改善の余地がある³⁾。

4. テニスにおけるスピンのメカニズムと衝撃振動の低減効果

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よくなるとともに、一般プレイヤーでもトップスピン打法が一般的になり、ラケットのスピン性能に関心が集まる一方で、ラケットやストリングの種類とスピン性能の関係は複雑であり、長い間ほとんど謎であった。ストリングの摩擦が大きいほどスピンがかかるという仮説に

基づいて、ヘッドを固定したラケットにボールを斜めに衝突させたときのスピンドル量(時間当たりの回転数)の実験室での測定が重ねられてきたが、ラケットやストリングの違いによるスピンドルの違いは明確でなかった。

高速ビデオ画像解析技術の進歩によって、ごく最近、トップスピンドル打撃におけるラケットのスピンドル性能のメカニズムが明らかになった。すなはち、ストリングの摩擦が大きいほどスピンドルがかかるというが従来の仮説であったが、これとは反対に、摩擦が小さいほど縦糸と横糸が互いに滑ってボールがストリングに食いつきやすく、また縦糸が元に戻りやすいので、横に伸びた縦糸が元に戻るときの復原力によりスピンドルがかかりやすい(図13)。新品のストリングほどスピンドルがかかるやすく、ストリングを張ってから時間が経過するほど縦糸と横糸の交差点にノッチ(溝)(図14)ができるやすいため、スピンドルがかかりにくくなるが、

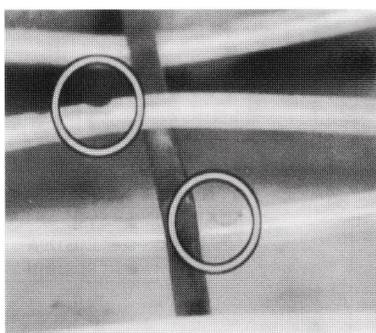


図 14 ラケット使用後にストリング縦横交差点にできたノッチ(溝)

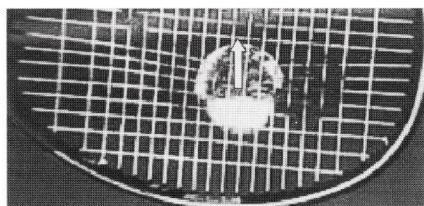


図 13 ストリングの縦糸が横にすれやすくて戻りやすいほど、ボールの食いつきがよく、スピンドルがかかる

ノッチ(溝)ができたストリングでも交差点を潤滑すると、スピンドル量が増すことがわかった。スピンドル量が増すと、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。

コート上でのテスラによるトップスピンドル打撃(図15)における高速ビデオ画像解析結果(図16)によると、ストリングを張ってから1日3時間、1週間ほど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ドル量は平均40%低減する。しかし、既に市販されている潤滑剤(世界特許取得)を塗ると、スピンドル量は平均30%増し、接触時間は平均16%長くなる。直線的な打球速度は、スピンドルのエネルギーに食われる所以で、平均

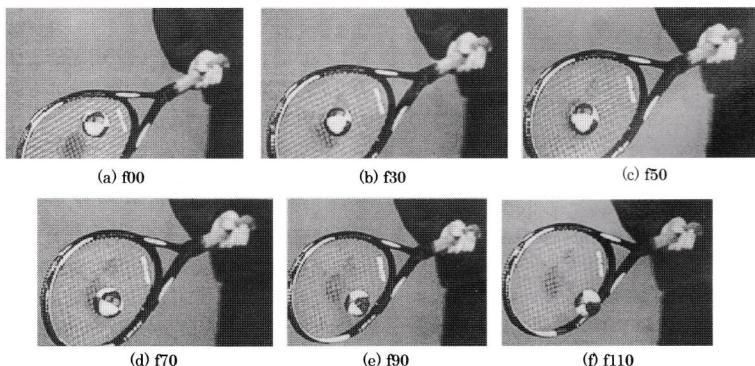


図 15 テスラによるトップスピンドル打撃(毎秒 10000 コマ)

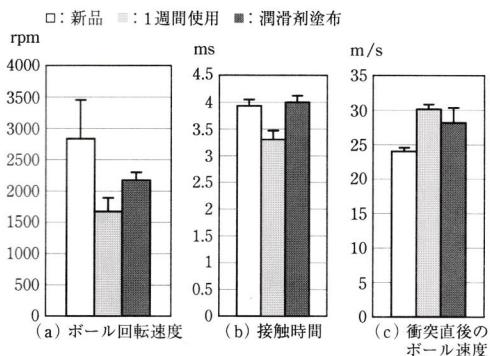
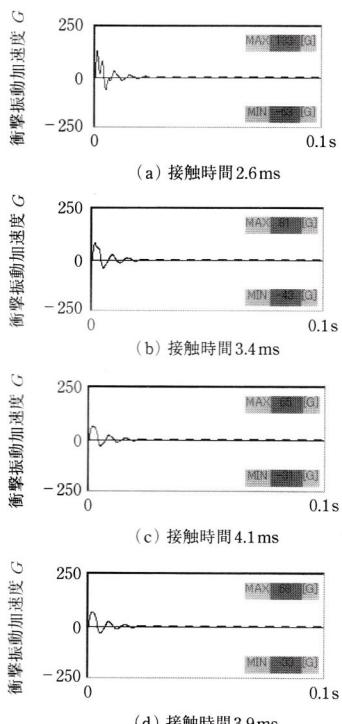


図 16 ストリングの状態とスピンドル性能 (3回平均値と標準誤差)

図 17 手首関節の衝撃振動波形の予測結果 (ボールとの衝突位置はラケット面先端側先端から 95 mm の位置側、衝突速度 30 m/s、G = 9.8 m/s²)

6% 低減する。スピンドルがかかりやすいと、コントロール性とホールド感が増す。潤滑剤がルールに適合することは国際テニス連盟 (ITF) により認められている。

スピンドル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チレンのようなストリングの方が、スピンドルがかかりやすくなることになる。

図 17 は、手首関節の衝撃振動波形の予測結果である。ボールとの衝突位置はラケット面先端側、衝突速度は 30 m/s である。図 (a) は、フラットに正面衝突する場合であり、図 (b) は通常のトップスピン、図 (c) は潤滑剤を塗ったストリングでのトップスピン、図 (d) は新品のストリングス (張りあがり) でのトップスピン打撃に相当する。図 (b)、図 (c) の垂直成分力積は、それぞれ図 (a) の 0.85 倍、0.65 倍である。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ドル量が増大し、接触時間が長くなると、フレーム振動が低減し、ボールとストリングス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」などのテストの打球感に対応すると考えられる⁹⁾。

5. 卓球におけるラケット性能と衝撃振動のセンサとしての役割

卓球のボール、ラバー、およびラケット板の実験的同定に基づく衝撃解析により、ボールとラケットの反発係数 e_r 、接触時間、変形量、ラケットの反発性、グリップ部の衝撃振動などを予測することができる。インパクトにおけるボールとラバーの変形によるエネルギー損失とラケットの振動によるエネルギー損失が小さいほど反発係数 e_r は高い値を示す。ラケットとボールとの接触時間予測値は実測値にはほぼ近い値を示した。

(1) 卓球ラケットの打撃位置に換算した質量に及ぼす腕系の影響は極めて大きいが、ボールの質量が非常に小さいために、ラケットの反発性能におよぼす腕系の影響は小さいこと

(2) 衝突速度が増大すると、主にラバーの衝撃

振動によるエネルギー損失により、ボールとラバーの反発係数 e_{RB} (図18) あるいはボールとラケットの反発係数 e_r が大きく低減すること

(3) ラケットの振動が反発性能へ及ぼす影響は少ないこと (図19)

が明らかになった。

図19の反発力係数 e は、ボールを静止ラケットに衝突させたときの入射速度に対する跳ね返り速度の割合であり、ラケットの反発性のよさを表す。ラケットの振動の影響は小さい^{10)~13)}。

図20は、ボールの衝突位置とラケットハンドルの最大衝撃加速度と最大振動加速度振幅の予測値を示す。振動加速度は、衝撃加速度に比べて、どの衝突位置でも大きく、振動に関するスイートスポットが明瞭である。ハンドル部の振動の大きさそのものは非常に小さいが、プレイヤーが振動

を気にすることを考えると、振動はラケットのどの位置で打球したかを判断するセンサとしての役

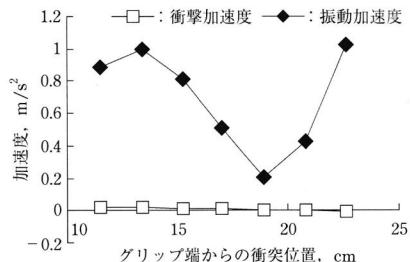


図20 ボールの衝突位置(グリップ端からの距離)とラケットハンドル(グリップ端から50mmの位置)の最大衝撃加速度と最大振動加速度振幅の予測値(衝突速度20m/s)

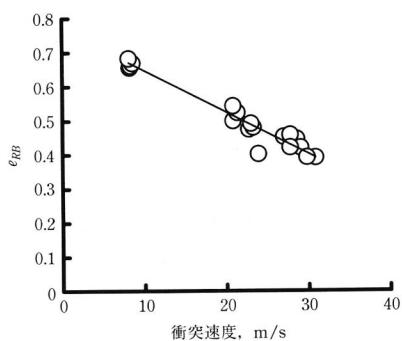


図18 ボール(直径38mm)とラバー(剛体壁に固定)の反発係数の実測値 e_{RB}

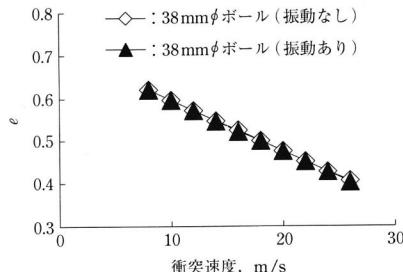


図19 反発力係数の予測値 e 、横軸は衝突速度(ボールの衝突位置はラケット面の先端側オフセンター)

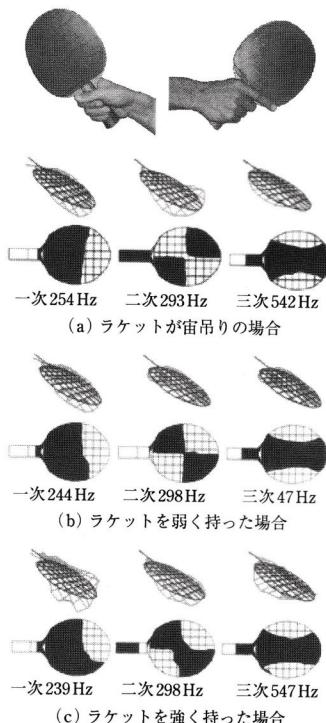


図21 グリップ把持条件の振動モード特性への影響(ラケット「BISIDE」、ラバー「SRIVER」)

割が考えられる。

図21は、グリップ把持条件（宙吊りラケット、ゆるく握った場合、強く握った場合）と実験モード解析結果を示す。宙吊りに比べて、振動の節（黒と白の境目）の移動は少ないが、ゆるく握った場合および強く握った場合の1次振動モードの減衰比は、それぞれ2.1倍および2.5倍になり、振動振幅も小さくなる。

6. 新しい展開へ

超軽量型のテニスラケットは、全体重量の軽さによって扱いやすさを実現しつつ、バランスをトップ寄り（先端側）にすることでパワー不足を補おうとするコンセプトでつくられており、アマチュアプレイヤーの間では広く受け入れられている。しかし、世界のプロが使っているラケット重量は全体的に重い¹⁾。市販の最軽量ラケットの性能予測結果は、振動の増大による反発係数の低下と手首関節衝撃振動ピーク値の増大を示した。一方、振動低減を目指したラケットが次々に市販されている。能動的な制振ラケットも現れたが、まだ改善の余地がある。

テニスラケットのストリングスは、摩擦が小さいほど縦糸と横糸が互いに滑ってボールがストリングスに食いつきやすく、横に伸びた縦糸が元に戻りやすいので、元に戻るとの復原力によりスピンドルがかかりやすい。スピンドル量が増すと、インパクトにおける直接的な衝突力も低減し、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。既に、天然ガットやナイロン系に代わってポリエチレン系が主流になっており、世界のほとんどのトッププロがポリエチレン系を使用している。従来のスピンドルの設計概念が大転換するところが予想される。

卓球ラケットのインパクトにおけるハンドル部の衝撃振動の大きさは非常に小さい。しかし、叩

いて振動の様子を見てラケットの板を選ぶプレイヤーが多い。卓球における衝撃振動は、ラケットのどの位置で打球したかを判断するセンサとしての役割が考えられる。ハンドルを強く握ると、センサとしての能力が鈍感になる。スポーツ用具の微妙な変化がパフォーマンスに大きく影響する例である。

ここでは、テニスと卓球のラケットの例について衝撃と振動に関する一つのアプローチの方法を紹介した。スポーツは体験により修得するものだから、極めて主観的な面が大きく、用具の性能には人間系が複雑に絡んでくるため、スポーツ用具の解析は厄介であるが、他の多くのスポーツについても同様な工学的研究が盛んに行われている。

参考文献

- 1) 川副嘉彦：「ラケットの科学」、月刊テニスジャーナル、第10巻7号～第10巻11号(1991)；第12巻8号(1993)～第13巻3号(1994)；第20巻3号～第20巻6号(2001)。
- 2) 川副嘉彦：日本機械学会誌、**106**, 1010 (2003a) pp.13-15.
- 3) 川副嘉彦：バイオメカニクス研究、**7**, 2 (2003) pp.136-151.
- 4) 川副嘉彦：シミュレーション、日本シミュレーション学会誌、**11**, 3 (1992) pp.167-173.
- 5) 川副嘉彦：日本機械学会論文集(C編)、**61**, 584 (1995) pp.1300-1307.
- 6) 川副嘉彦：計測と制御、**38**, 4 (1999) pp.268-273.
- 7) 川副嘉彦：モード解析ハンドブック、コロナ社(2000) pp.454-461.
- 8) 川副嘉彦：「シミュレーション」、日本シミュレーション学会、**22**, 1 (2003) pp.3-9.
- 9) 川副嘉彦・沖本賢次・沖本啓子：日本機械学会論文集(C編)、**72**, 718 (2006) pp.1900-1907.
- 10) Y. Kawazoe and D. Suzuki : Theoretical and Applied Mechanics, **52** (2003) pp. 163-174.
- 11) Y. Kawazoe and D. Suzuki : Science and Racket Sports III , Routledge (2004) pp. 134-139.
- 12) Y. Kawazoe and D. Suzuki:Science and Racket Sports III , Routledge (2004) pp. 140-145.