

## 解説

## 材料が変えてきたスポーツ用具とパフォーマンス

## — テニスを例にして —

## Tennis Equipment and Performance

## — Transformation Through Material Evolution —

## スポーツ用具性能評価の難しさ

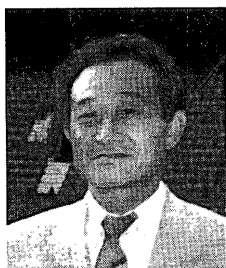
ラケットの進歩がテニスのプレイ・スタイルを変えたといわれている。プレイは用具で変わる。逆に、用具の性能はプレイヤーによって変わる。すなわち、用具とプレイヤーの相互作用によりスポーツとしてのパフォーマンスが向上する。プレイの状況・環境によってもパフォーマンスは異なってくる。複雑系の世界である。ここにスポーツ用具性能評価の難しさがある。

## テニスラケットの変遷

テニスラケットは1960年代前半までは木製でフェース面積はほぼ68in<sup>2</sup>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。これまでの30数年間にラケットは大きく変わってきたが、1976年に現れた110in<sup>2</sup>のデカラケ、1987年の厚ラケ、そして1995年の長ラケ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すべて複合材である。

デカラケは、打球面が広いラケットである。最近のラケットの打球面サイズは95in<sup>2</sup>～110in<sup>2</sup>が主流である。厚ラケは、フレーム剛性を高めたラケットである。長ラケは、従来のラケット全長27in(約685mm)を29in(約735mm)まで長くしたラケットである。国際テニス連盟は、全長が29in

## 執筆者プロフィール

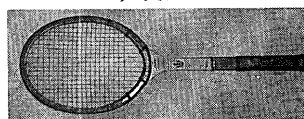
川副 嘉彦  
Yoshihiko KAWAZOE

◎1944年11月生まれ  
東京大学大学院工学系研究科修了，工学博士  
(東京大学)，埼玉工業大学工学部講師，助教  
を経て1990年現職  
◎研究・専門テーマは機械力学，スポーツ工学，  
人間支援システム工学  
◎正員，フェロー，埼玉工業大学教授 機械  
工学科および大学院システム工学専攻  
(〒369-0293 埼玉県大里郡岡部町普濟寺  
1690/E-mail: ykawa@sit.ac.jp)

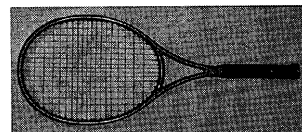
以上のラケットの使用を禁止した。しかし、現実には従来の27inに近いラケットが再び使用されている。

最近のラケットの特長は軽量化である。ラケットの質量(ストリングスを張った状態)は、木製の時代は370～400g、複合材ラケットの初期のころは360gから375g、さらに軽量化が進み超軽量ラケットと呼ばれる300gを切るラケットが現れた。最近の最も軽いラケットは220gに達している。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。

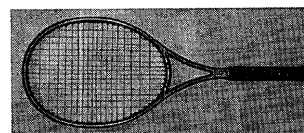
図1 ラケットの変遷(木製ラケットと最近のハイテク・ラケット，質量はストリングスを含む。)



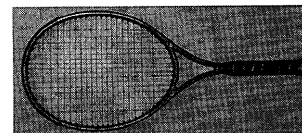
(a) 木製(ウッド)ラケット WILSON  
(68in<sup>2</sup>, 375g)



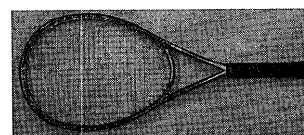
(b) 標準的軽量ラケット EOS100  
(100in<sup>2</sup>, 290g)



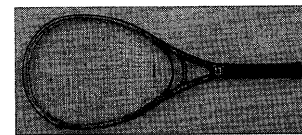
(c) 標準的軽量ラケット EOS110  
(110in<sup>2</sup>, 283g)



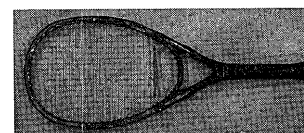
(d) 標準的軽量ラケット EOS120A  
(120in<sup>2</sup>, 292g)



(e) 最軽量ラケット Prince TSL  
(115in<sup>2</sup>, 224g, 28in)



(f) 可動ストリングス ROLLER2.6  
(115in<sup>2</sup>, 268g, 27.75in)



(g) インテリ・ファイバ I.S10  
(114in<sup>2</sup>, 241g, 27.75in)

## 誤解されているボールとストリングスの性能

ボールとストリングスの性質について少し述べたい。

テニスボールと剛壁の反発係数は、衝突速度の増大とともにかなり低下する。衝突速度20m/sでは0.48程度である。一方、ラケット・ヘッドを固定して、ストリング面にボー

ルを衝突させたときの反発係数は衝突速度14~25m/sの範囲ではほぼ0.83程度であり、ボールの入射速度、ストリングスの種類やテンションにあまり依存せず、反発係数は高い値を示す。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完全弾性衝突に近い、このストリングスの優れた弾性によって楽にボールが打てるのである。

「ストリングスを緩く張ると、ボールがよく飛ぶ」といわれる。しかし、実験結果によると、衝突速度20m/sの場合、テンションを44%増減しても、反発係数は1.4%しか増減しない。衝突速度30m/sの場合はテンションを変えても反発係数はほとんど変わらない。プレイにおける衝突速度は20~30m/s程度、最高速度サーバーのヘッド速度は40m/s程度である。反発係数に及ぼすテンションの影響は非常に小さいのである。理論的にも説明できる。

「ストリングスを緩く張るとテニス肘（ひじ）防止になる」といわれる。ストリングスの「面圧」（たわみ剛性）は衝突速度（たわみ量）に比例して高くなり、衝突速度により10倍近く変化する。面圧がテンションに左右されるのは、衝突速度がきわめて小さい場合である。「テンションが低いほどインパクト・タイム（ボールとストリングスの接触時間）が長い」といわれる。アメリカの著名なテニス専門書に載っている12m/s以下のデータはそうになっている。しかし、衝突速度が20m/sを超えるとテンションの差の影響はほとんどなくなり、むしろ、わずかであるが逆転する。理論的にも説明できる。テンション45lbsと65lbsの場合のサーブにおけるラケット・ハンドルの衝撃振動の実測波形は、緩いテンションの衝撃振動のほうがやや大きい場合もあるということを示した。

ストリングスのスピン（ボールの回転）への影響については、テンションを変えた実験はデータのばらつきの方が大きい。衝突速度にほぼ比例してボールの回転数が増し、摩擦が大きいストリングスほど回転数が増す。

### 材料が変えてきたラケットとパフォーマンス

一般にラケットに求められる基本的な性能は、ボールの飛び（ラケットのパワー）、コントロール、打球感といわれている。「球離れが良い」、「ホールド感がある」、「面の安定性が高い」など、微妙な性能の違いを評価する表現もある。一方、障害と用具の問題は複雑であるが、テニス肘になりやすいラケットが存在することを多くのプレイヤーは経験的に認めている。

静止ラケット（ヘッド速度 $V_{RO}=0$ ）にボールを衝突させたときのボールの跳返り速度 $V_B$ と入射速度 $V_{Bo}$ の比 $e$ を実測し、反発性能を評価することが多い。この係数 $e$ は、衝突位置における反発係数、ラケットの換算質量、およびボールの質量により決まり、値が大きいほどボールのはね返りの良さ、あるいはラケットのはじきの良さを表す。これを反

発力係数と定義する。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 $V_{Bo}$ 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 $e \cdot V_{Bo}$ とプレイ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。

女子トップ・プロのラリーにおけるフォアハンド・グランド・ストロークを想定して、肘と手首の関節角度を一定にして、肩関節トルク $N_s=56.9\text{N}\cdot\text{m}$ を与えたときのラケット・ヘッド速度 $V_{Ro}$ で $V_{Bo}=10\text{m/s}$ で飛んでくるボールを打撃する場合のラケット性能を予測する。

図2は、木製ラケット〔図1 (a)〕と標準的な軽量・高剛性・複合材ラケット〔図1 (b)〕の反発係数 $e_r$ である。横軸はラケット面の長手方向打点位置を示す。ラケット面先端での反発係数が著しく向上している。反発係数は玉離れの良さに相当する。図3は、ボールの飛びを示す。反発力係数 $e$ はほとんど向上しないが、ヘッド速度の増大により軽量・高剛性ラケットの打球は速くなっている。

同一重さで打球面サイズ（面積）が異なる軽量ラケット〔図1 (b)~(d)〕のボールの飛びは、打球面が広がるほど、反発係数 $e_r$ はオフセンタ打撃で特に低下し、ヘッド速度もやや遅くなるが、反発力係数が高いから打球はやや速くなる。

最軽量ラケットTSL〔図1 (e)〕のボールの飛びを標準的な軽量ラケット120A〔図1 (d)〕、従来型重量バランスEOS 120H（120in<sup>2</sup>、354g）と比べると、ヘッド速度は大きいですが、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飛びが悪くなる。図4は、最軽量ラケットTSLで打撃したときの手首関節（図5）の衝撃振動ピーク値が著しく大きいことを示す。軽量化の行きすぎである。

滑車でストリングスを支えるROLLER〔図1 (f)〕やグロメット（ストリング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」、圧電素子をフレームに組み込んだ「インテリ・ファイバ」〔図1 (g)〕は手に伝わる振動を低減しようという試みである。ラケットROLLERと「インテリ・ファイバ」の衝撃振動は、最軽量ラケットTSL〔図1 (e)〕に比べると低減されたが、標準的な軽量ラケット120A〔図1 (d)〕と同程度であり、十分には低減されていない。

### スポーツ用具と選手のマッチング

超デカラケに超ハイ・テンションでストリングスを張ったモニカ・セレス選手のラケット（SRQ1000）が数年前に話題になったことがある。フェース面積130in<sup>2</sup>、全長28.5inというレギュレーションの限界値に近い大きなラケットにテンション90lbsという限界の強さで張ったラケットである。若手のパワーテニス台頭に対抗するために彼女が経験から選んだラケットであった。

新しい材料の開発がこのような大きなラケットの実現を

図2 木製WILSONと軽量・高剛性EOS 100の反発係数 $e_r$  (横軸はラケット面の長手方向の打点位置)

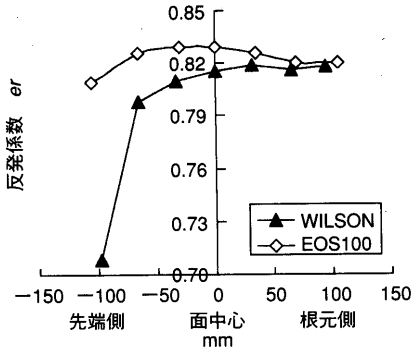


図3 木製WILSONと軽量・高剛性EOS100 [図1 (b)]  $V_B$

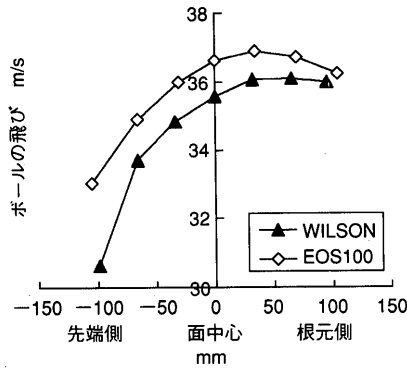
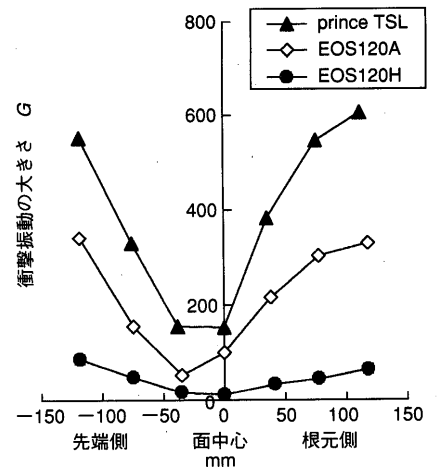


図4 最軽量TSL [図2 (e)] と手首関節の衝撃振動ピーク値 (加速度 $G: 9.8m/s^2$ )



可能にしたのである。なぜ彼女がこのラケットを選んだかという理由は、次のように説明できる。

フェース面の大きさはラケットの反発性を重視したためであり、ストリングスの超ハイ・テンションは超デカラケの打球感の悪さとコントロール性の弱点をカバーするためである。彼女の強打を考えると、強度的に厚ラケ (約30mm) にならざるを得ない。また、デカラケの操作性の悪さは250グラムという軽量化によってカバーされ、ヘッド速度が落ちるというデカラケの弱点は、軽量化と長ラケ化によってカバーされている。

しかし、彼女はこの大きなラケットの使用をまもなくやめた。その理由は説明されていないが、重量バランスとスイング・ウェイトがやや小さめで反発性が十分でないこと、さらに、軽量の超デカラケは手に伝わる衝撃振動が大きいことが考えられる。

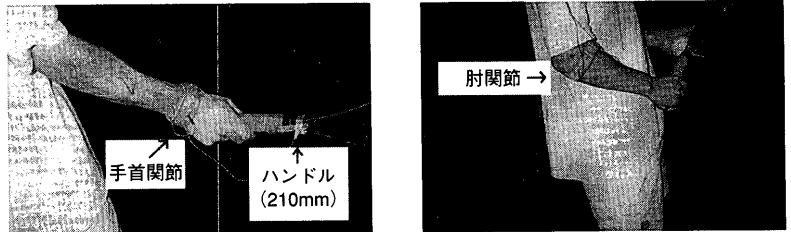
### 用具が進歩するほど人間の要素が大きくなる

プレイヤーは用具の小さな変化をきわめて敏感にセンスする。これが、メンタル的にプレイヤーに大きな影響を与え、パフォーマンス向上のトリガーになっているように筆者には見える。用具のわずかな進歩がプレイヤーを大きく進化させるのである。たとえば、ストリングスが打球に与える直接的な影響は小さくても、ストリングスが変わると、たわみ挙動、残留振動、打球音などに影響する。これが、プレイヤー、特にトップ・プロのパフォーマンスにはかなり影響するようである。メンタルな部分のスポーツ工学についてはほとんどわかっていない。

テニスの基本ができていない中高年の一般プレイヤーでも軽量化のおかげでラケットを容易に振り回せるようになった。しかし、世界のトップ・プロは、ラケットを自在に操作することにより、パフォーマンスをさらに向上させる。ラケットの進歩を十分に活かす体力・技術があるからである。

45歳を過ぎてから、筆者はシニアのダブルスに徹している。けがをしなくて末永くテニスを楽しむためである。目

図5 手首関節と肘関節の衝撃振動



標は省エネ・テニスである。足下に打たれたボールと頭上にあげられたボールの処理をできるだけ練習して、遅いサーブで時間を稼いでネットにでて、なんとかコートの半ばまでたどり着く。レシーブもできるだけ緩いボールを沈めてネットにつく。ここは安住の地である。若者の強打に対してはボレーが楽である。若者のエネルギーを利用することができる。このようなプレイに向いているのは最新の軽量ラケットではない。張上がり重量365g、重量バランス325mm、グリップ周りの慣性モーメント41g.m<sup>2</sup>、フェース面積110in<sup>2</sup>がベストである。スイング・ウェイトが大きくてヘッド速度は遅い。しかし、反発性能は抜群である。ラケット面を早めに準備するだけでボールが飛んでいく。相手のボールが速いほど、鋭いボールが返っていく。スマッシュもラケットの重量を利用することができる。体力の占める割合が少ないのである。シニアのダブルスには軽すぎるラケットは向いていない。

(原稿受付 2002年10月15日)

#### ●文献 (さらに興味のある人のために)

- (1) 川副嘉彦, テニスにおける衝突現象の解析とラケットの性能予測・評価, 計測と制御, 38-4 (1999), 268-273.
- (2) 川副嘉彦, ラケットの科学, 10-7~11 (1991), 130-135, 月刊テニスジャーナル.
- (3) 川副嘉彦, ラケットの科学Ⅱ, 12-8 (1993)~13-3 (1994), 101-106, 月刊テニスジャーナル.
- (4) 川副嘉彦, 新テニスの科学, 20-3~6 (2001), 54-58, 月刊テニスジャーナル.