

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

川 副 嘉 彦*

* 埼玉工業大学工学部機械工学科 埼玉県大里郡岡部町普濟寺 1690
 * Department of Mechanical Engineering, Saitama Institute of Technology 1690, Okabe, Saitama, Japan
 * E-mail: ykawa@sit.ac.jp

キーワード：テニス (tennis), ラケット (racket), 衝突 (impact), ボールの飛び (power), 打球感 (feel).
 JL0004/99/3804 0268 © 1999 SICE

1. はじめに

テニス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。これらの他にも、「玉離れが良い」、「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がいろいろある。さらに、テニス肘をはじめとする障害とラケットの問題がある。

テニスラケットは1960年代前半までは木製で68 in² (平方インチ) のレギュラーサイズと決まっていたが、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。過去30年の間にラケットは大きく変わってきたが、1976年に現れた110 in² 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言われている。

「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95 in²~110 in² が主流であるが、最近137 in² という超大型サイズも現れた。「厚ラケ」は、フレーム剛性を高めたラケットである。従来のラケットの4倍近くまで剛性を高めたラケットが当初は主流であったが、最近では剛性をやや落としたラケットが主流である。従来のフレーム厚19 mmに対して30 mm以上まで、フレーム厚(剛性)の異なる多くの機種が市販されている。

木製ラケットの時代からラケットの全長は27インチ(約685 mm)で変わることはなかった。全長27インチから約半インチ(約12~13 mm)刻みで全長を長くしたラケットが市販されるようになり、「長ラケ」とよばれている。上記の超大型サイズ137 in² のラケット全長は32インチ(812 mm)である。ただし、国際テニス連盟は、プロの試合では1997年の1月から、一般の試合では2000年の1月から全長29インチ(約735 mm)以上のラケットの使用を禁止した¹⁾。

ラケットの進歩がテニスのプレー・スタイルを変えたと言われている。しかし、テニスは体験により修得するものだから主観的なものであり、ラケットが実際のプレーにどのように影響するかを客観的に評価することは難しい。一般プレーヤーにとっては、コートの上でボールを実際に打ってみてはじめて性能がわかるというのが現実である。

しかし、最近ではスポーツ工学という言葉が定着すると

ともにラケット性能に関する工学的研究も盛んになってきた²⁾。ここではボールの飛びと打球感に関連するラケット性能を衝突解析に基づいて予測・評価する著者らの方法^{2)~6)}を紹介したい。

2. ラケット性能の予測

2.1 ボールとラケットの反発係数の予測

図1は、ボールが硬い壁にぶつかるときの反発係数の実測結果であり、横軸はボールの入射速度、縦軸は跳ね返り速度と入射速度の比である。衝突速度が大きいほど反発が悪くなり、ボールの衝突前の運動エネルギーに対してボールのつぶれによるエネルギー損失の割合が大きくなることを示している。

図2は、ラケット・ヘッドを固定した状態でボールがストリングスにぶつかるときの反発係数の実測結果である。衝突前のエネルギーに対してボールとストリングスの変形によるエネルギー損失の割合が、一般のプレーヤーの衝突速度の範囲では、あまり変わらないことを示している。図1と

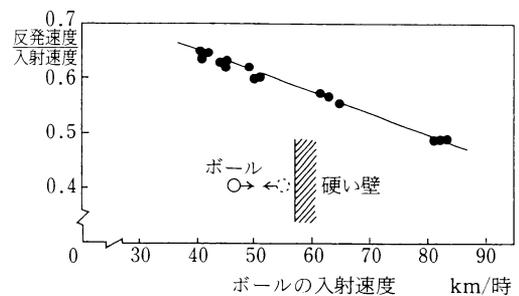


図1 ボールが硬い壁に衝突するときの反発係数

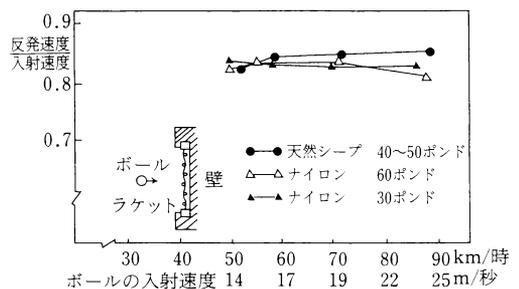


図2 ラケット・ヘッドを固定した状態でのストリングスにボールが衝突するときの反発係数

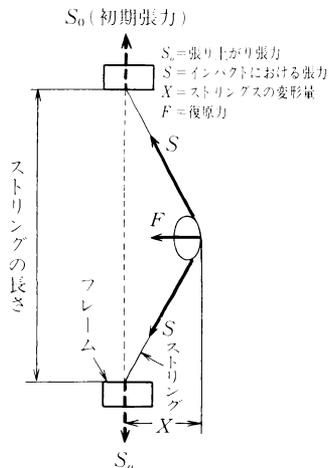


図3 インパクトにおけるストリングスの変形, 張力, 復原力

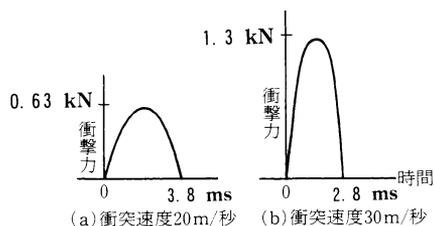


図4 インパクトの衝撃力と接触時間の予測例

図2をくらべると、ストリングスの重要性がよくわかる。

図3は、インパクトによる変形によって発生する張力 S と復原力 F を簡略に示したものである。変形の増大とともに復原力は急激に大きくなり、初張力 S_0 よりも変形量の影響の方が大きくなる。ボールもストリングスも変形が大きいほど急激に硬くなり、復原力特性は強い非線形性を示す。

図4は、ラケットのストリング面の中心にボールが衝突したときの力積波形の予測例であり、正弦半波で近似している。衝突位置が極端に中心から外れる場合を除くと腕系はほとんど影響しない。衝突速度が増すと接触時間は短くなり、衝撃力は急激に大きくなる。

ボールとラケットの衝突により、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5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基本振動成分の初期変位振幅を予測した例である。ラケットの振動特性は実験モード解析により同定している。ストリング面の中心で衝突するとラケット・フレームの振動変位振幅は小さい。

ボールとラケットの反発係数は、インパクトにおけるエネルギー損失と密接に関係しており、ボールの変形およびラケット・フレームの振動によるエネルギー損失が少ないほど反発係数が高いことになる。

図6は、木製ラケットと厚ラケの反発係数の予測例である。ラケット重量はほぼ等しいものを選んである。横軸は、

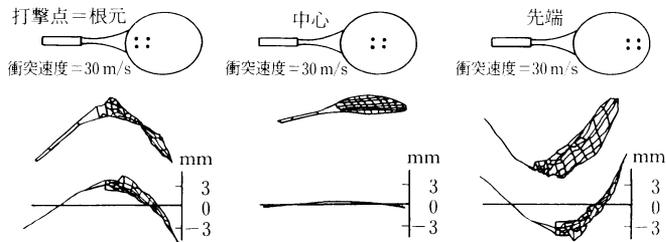


図5 ボールが30 m/sで衝突するときのラケット振動変位振幅の予測 (基本振動成分)

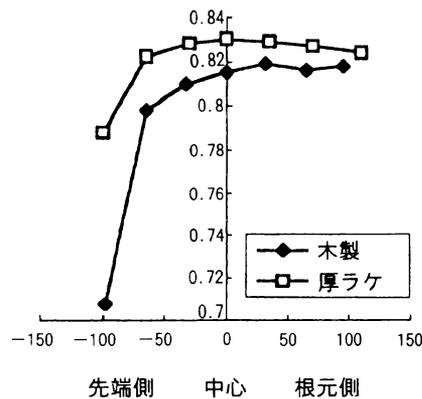


図6 反発係数の予測

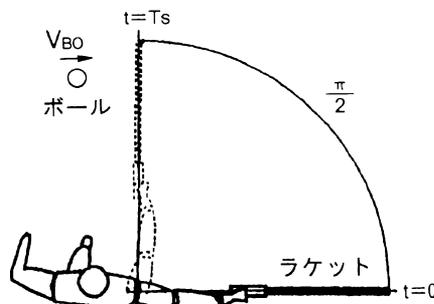


図7 スイグ・モデル

ラケット面中心から測った先端側と根元側の打点までの距離である。スイグ・モデルは図7であり、グランド・ストローク (パウンドしたボールを回転をかけないで打撃) を想定している。手首と肘の関節角度を一定に保って肩関節だけに一定の回転トルクを与え、腕とラケットが肩関節まわりに90度回転したところでボールを打撃する。飛んでくるボールの速度は10 m/sであり、スイグ速度は女子トッププロのラリーにおける速度に近い。厚ラケの反発係数は先端側での打撃でもあまり低下しない。縦方向の中心線から横に大きく外れたオフセンターでも同様である。「反発係数」は、ラケット面のほぼ中心で最も高く、中心を外れるほど低下する。また、ボールとラケットの衝突速度が大きいほど「反発係数」は低下するが、ラケット面の中心近くで打撃すれば「反発係数」はあまり低下しない。したがって、ボールをラケット面の中心近くで打つときは厚ラ

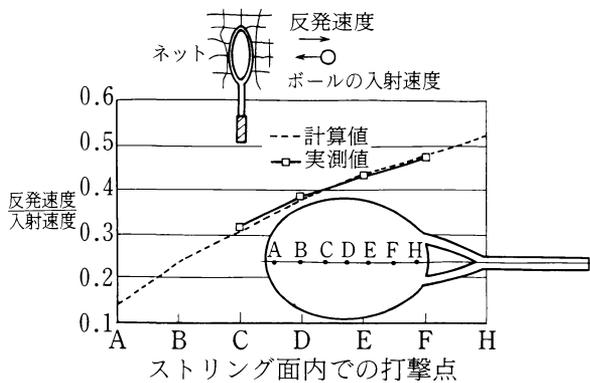


図8 宙ぶりラケットにボールが衝突するときの跳ね返り速度(反発力係数)の予測

ケのメリットはほとんどなく、中心を大きくはずれたときに違いがあらわれる。「反発係数」の大小はいわゆる「球離れの良さ」、あるいは、「ホールド感」に関係すると著者は考えている。

2.2 ラケットの反発力の予測

図8は、宙ぶりラケットにボールを衝突させたときのボールの跳ね返り速度(反発速度)を示している。横軸はストリング面上の衝突位置、縦軸はボールの入射速度に対する跳ね返り速度の割合を示している。反発係数と区別して著者はこれを反発力係数と呼んでいる。この反発力係数の実測値がラケットの反発性能の評価にメーカーなどでよく使われる。反発力係数は、衝突位置における反発係数と衝突位置に換算したラケットの質量から求めることができる。反発力係数の予測値は実測値の特長をよく表している。グリップを手で握ったときの反発力係数の予測値は、宙ぶりラケットの場合と大きな違いはなかった。接触時間の予測値も実打における測定値の傾向をよく表し、接触時間におよぼす腕系の影響は小さかった。

2.3 ボールの飛びの予測

ボールの飛びは、相手の打球速度と自分のラケット・ヘッドの速度、およびラケットの反発力係数とで決まる。一般に反発力係数の高いラケットは操作性が悪く、ラケット速度は低くなる。

図9は、超軽量トップヘビー(290g)と従来型バランス(360g)のラケットについてボールの飛びを予測した例である。ストリング面上の数値は打球速度を表しており、飛びの良い領域を濃淡で示している。両ラケットの打球面積は100平方インチである。スイング・モデルは図7である。重心が先端側寄りの超軽量ラケットの方が打球は速い。ボールの飛びは、サーブ、レシーブ、ボレーなどプレーの種類によって、あるいはスイング速度が十分に確保できるか、あるいは確保できないかという状況によっても違ってくる。

2.4 グリップと手首関節の衝撃振動の予測

手首に伝わる衝撃振動の大きさは、ラケット面上の打点

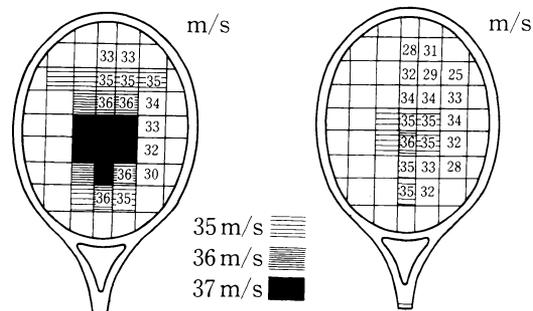


図9 飛んでくるボール($V_{Bo}=10\text{ m/s}$)を打撃したときのボールの飛びの良い打点領域の予測

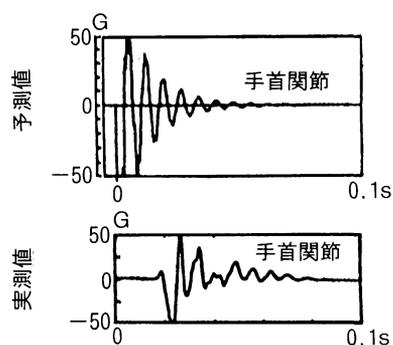


図10 フォアハンド・グランド・ストロークにおいてラケット面先端側で打撃したときの手首関節の衝撃振動実測波形と予測波形(衝突速度30 m/s)

の位置とグリップの握りの位置で異なる。衝撃成分は、ボールとラケットの衝突力が手に伝わることによるものであり、振動成分は衝突力により励振されたフレーム振動が手に伝わることにより発生するものと考えるとわかりやすい。

衝撃がグリップ上の握りの位置にほとんど伝わらない打点がラケット面中心近くにあり、これを打撃の中心、または衝撃中心と呼んでいる。打点が衝撃中心から離れるほどグリップの衝撃が大きい。

振動成分に関しては、ラケットの振動が非常に小さい打点がラケット面上にあり、これをラケット面上の「振動の節」という。また、フレームが振動しても、その振動が手に伝わらないグリップ上の握りの位置があり、グリップ上の「振動の節」という。ラケット面中心近くの振動の節で打撃するとグリップの振動は小さく、グリップ上の振動の節が握りの位置に近く設計されたラケットでは、オフセンター打撃によるフレーム振動が大きくても手に伝わる振動は小さい。

図10は、フォアハンド・グランド・ストロークにおいてラケット面先端側で打撃したときの手首関節の実測加速度波形と予測波形を示す⁹⁾。グリップ位置はグリップ端から70 mmの位置である。予測波形は実測波形の特徴をよく表

している。手首関節に伝わる衝撃成分を腕系の質量が大きく低減し、手の減衰が残留振動成分を大きく低減する。

3. 性能予測に基づくテニスラケットの評価

タイプの異なる7種類のラケットについて、たとえば図7の簡単なスイング・モデルを用いてボールを打撃したときの基本的な性能評価が以下のようにできる。詳細な物理特性は省略するが、ラケットAはフェース面積(打球面の面積)100平方インチ、質量360g(ストリングスを含む、従来型質量バランス、フレーム剛性普通)、ラケットBは100平方インチの典型的な厚ラケ(従来型質量バランス、370g、高剛性の重いフレーム)、ラケットCは100平方インチの超軽量ラケット(290g、高剛性で軽い)、ラケットDは110平方インチのデカラケ(剛性は普通、従来型質量バランス、365g)、ラケットEは120平方インチの大型(剛性普通、従来型質量バランス、349g)、ラケットFは120平方インチの大型・超軽量のラケット(剛性普通、292g)、ラケットGは木製(68平方インチ、375g)である。

図11は反発係数 e_r の予測結果である。

ラケット面中心でボールを打つ場合は、木製のラケットGの反発係数が他に比べて低いことを除けば、反発係数のラケットによる違いはあまりない。ラケット面の先端側で打撃すると、ラケットDと木製のラケットGは反発係数が大きく低下する。一方、ラケットCは、オフセンターでも反発係数がほとんど低下せず、球離れが良いことがうかが

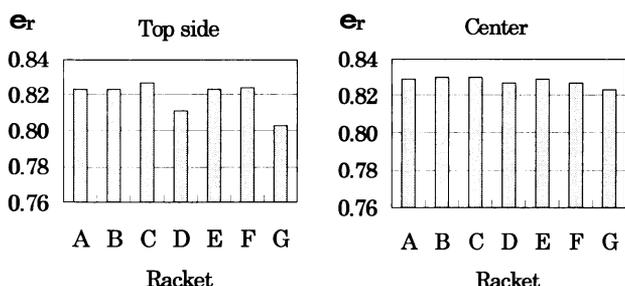


図11 ラケットのタイプと反発係数 e_r の予測値
(ラケット面先端側と中心での打撃)

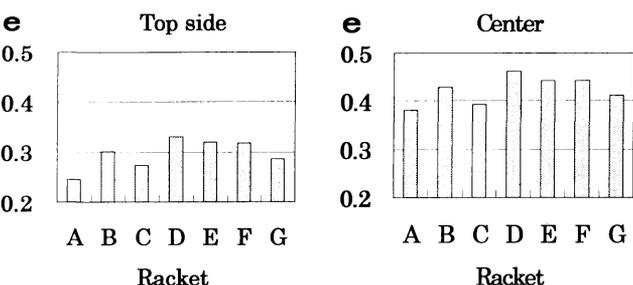


図12 ラケットのタイプと反発力係数 e の予測値
(ラケット面先端側と中心での打撃)

える。

図12は、反発力係数(反発性能)の予測結果である。ラケットを振らないでボールを当てただけのときに(ボレーに近い)良く跳ね返るラケットと考えたらわかりやすい。ラケットを速く振らなくてもボールが良く飛ぶという意味である。「はじきの良いラケット」とも表現される。ラケット面中心では、ラケットDが最も反発が良い。打球面サイズが大きいほど、重量が重いほど、トップヘビーほどラケットの反発力は高い。ラケット面先端側での打撃ではラケットFが最も反発性能が良い。ラケットCは、反発係数は最も高いが、反発力は劣る。

図13は、インパクト直前のラケット・ヘッド速度の予測結果である。ラケット面中心でも先端側でも、ラケットCの速度が速く、最も振りやすいということになる。

図14は、「ボールの飛び」、すなわち「パワー」の評価である。スイングしたときの[ラケット・ヘッドの速さ]と「反発力係数」とで決まる。ラケット面中心で打撃したときにボールの飛びが良いのはラケットFである。ラケット面先端側の打撃でも、やはりラケットFが1位である。グランド・ストロークを想定したスイング・モデルでは、超軽量・トップヘビー・大型ラケットFが、全体的に最もボールの飛びがよいが、中心から横に大きく外れたオフセンターではかなり飛びが悪くなる。

「反発力係数」が低くても、振りやすいラケットは「ボールの飛び」が良い。逆に、振りにくくても「反発力係数」が高いラケットも「ボールの飛びが良い」。一般に高反発の

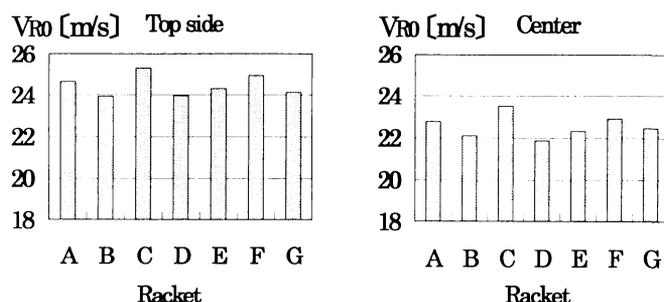


図13 ラケットのタイプとヘッド速度 VR_o の予測値
(ラケット面先端側と中心での打撃)

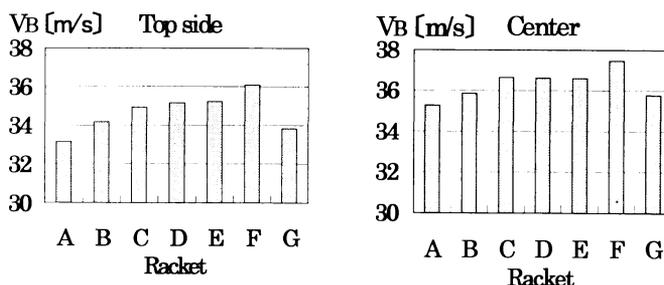


図14 ラケットのタイプとボールの飛び VB の予測値
(ラケット面先端側と中心での打撃)

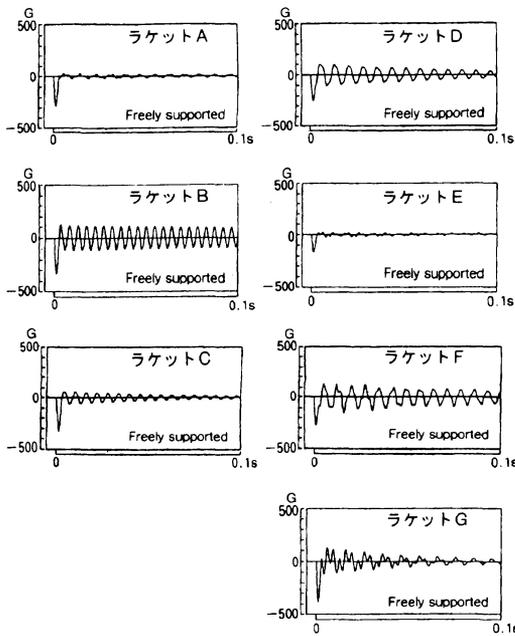


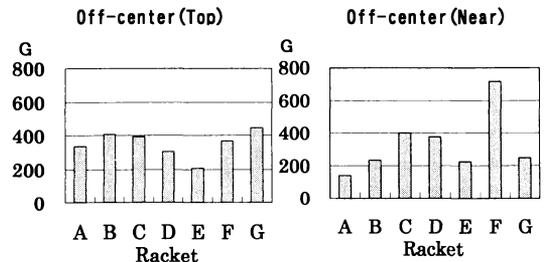
図15 宙づりラケットにボールが衝突するときのグリップ部の衝撃振動の予測(衝突位置:ラケット面中心から先端側で横に外れたオフセンター,衝突速度:30 m/s)

ラケットは振りにくい。したがって、飛んでくるボールの速さとスイングの速さの兼ね合いで、同じラケットでも「ボールの飛び」に関する性能は変わってくる。速いサーブを受けるときの当てるだけのレシーブやスイングの小さいボレーでは、「反発力係数」の高いラケットがボールの飛びが良く、サーブでは振りやすくスイングの速いラケットが「ボールの飛びが良い」。また、スイングの遅いプレーヤーは「反発力係数」の高いラケット、スイングの速いハードヒッターは「振りやすい」ラケットを使った方が、ボールの飛びは良い。

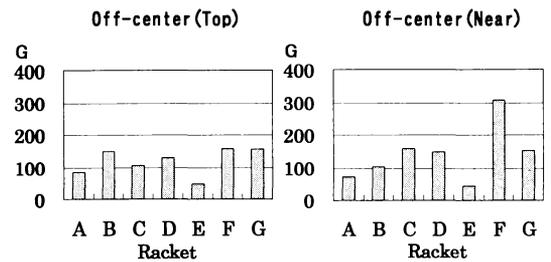
ラケット面上のいろいろな打点で打撃したときのボールの飛び(打球速度)を予測すると、たとえば大型・超軽量のラケットF(292g)と同じサイズのラケットE(349g)を比べると、ラケットFは非常に飛びの良い領域(飛びに関するスイートエリア)は広いがオフセンターではボールの飛びがかなり悪くなる。一方、ラケットEは非常に飛びの良い領域は狭いが、オフセンターでも大きくは飛びが悪くならず、広い打点領域で安定な飛び(面安定性)を示す。

一般に大型で重いラケットの方が面安定性は増す。しかし、面安定性の良いラケットは一般に操作性が悪い。

コントロール性能は、ねらったところにボールを打てるという意味で使われる。実際のプレーにおけるラケットのコントロール性能には、ボールの回転(スピン)が関係し、ボールに適度なスピンを与えたときに、コントロールされた鋭いボールが相手の足下に飛ぶ。どのようなラケットがコントロール性能がよいかについてはほとんどわかっていない。



(a) 宙づりラケットのグリップ端から70mm



(b) 手首関節

図16 グリップおよび手首関節の衝撃振動の評価とラケットのタイプ(ラケット面先端側と根元側での衝突における加速度のピーク値,衝突速度:30 m/s)

図15は、宙づりラケットのラケット面の先端側・横のオフセンターにボールを衝突させた場合のグリップ部の衝撃振動波形を予測した結果である。ラケットの特徴が良くでている。最初のピークがインパクトの瞬間であり、残留振動が残る。図16は、宙づりラケットのグリップ部と手首関節の衝撃振動波形のピーク値を比較したものである。120平方インチの従来型バランスのラケットEが先端側でも根元側でもグリップおよび手首関節の衝撃振動が小さい。最もボールの飛びの良い超軽量120平方インチのラケットFの衝撃振動が根元側で大きいのが目立つ。スイングの速くない非力なプレーヤーにとってはラケットFは楽にボールがとばせるラケットであり、インパクト速度が大きいプレーヤーにとってはラケットFは敬遠すべきラケットであろう。

「長ラケ」については比較の対象にしなかったが、既存のラケットのシャフト部分をただ長くしただけの「長ラケ」では、筋力に余裕のあるプレーヤーの場合を除くと、性能はほとんど向上しない。「長ラケ」の本質的な欠点は、(1)フレーム振動が大きくなり、「反発係数」が低下する。(2)ラケット重量を増やさないかぎり、「反発力係数」(跳ね返りの良さ)は低下する。したがって、特にボレーでのボールの威力が低下する。(3)グランド・ストロークでのラケット・ヘッド速度は増すが、ボールの飛びが良くなるのはラケット面の中心から根元側の打点であり、先端側ではほとんど変わらない。(4)サーブではボールの飛びは良くなるが、差が顕著な打点はラケット面の中心から根元側であり、先端寄りの打点では改善されない。(5)スイングのス

タートからインパクトまでの時間が長くなる。

したがって、現時点でボールの飛びという観点から長ラケを選ぶとしたら、超軽量・トップヘビーで打球面の狭い厚ラケということになる。サーブでは有利であるが、ボレーでは不利というプレーヤーの経験的な評価と一致する。また、打球面の狭い(100平方インチ以下の)ラケットの方が手にやさしいという点からも望ましい。

我々が振り回せる程度のラケット重量でも速いボールを打つことができるのは、反発性の良いストリングスが存在するからであり、ストリングスの役割はきわめて重要である。最近では多くの種類のストリングスが市販されるようになり、ストリングスへの関心も高まっているが、ストリングスの種類やテンションの違いがプレーにどう影響するかについてはよくわかっていない。

4. おわりに

高齢化社会の到来、余暇の増加などによりスポーツの重要性が認識されつつあり、用具・設備・施設の安全性および性能の向上が国民の関心を集めている。従来経験的に評価されてきたスポーツ用具の性能を人間の身体的条件や技術的条件を考慮して予測・評価するシステムの研究開発例を紹介した。多くの課題が残されているが、ボールの飛びと打球感に関連する基本的な性能とラケットの物理特性との関係を明らかにした。

素材や設計・製造技術の進歩により異なるタイプの種々のラケットやストリングスがつぎつぎと市販されている。しかしプレーの種類、技術レベル、身体的条件、プレーの状況によりラケットの性能は異なってくるので、ラケット選びはますます難しくなる。たとえば、飛びの良くないラケットの方がプレーヤーへの依存度が高いので意志が用具によく伝わってボールのコントロールが容易であるというユーザーもあれば、飛びの良くないラケットを使うことによってよく飛ぶようなスイングへの改善を試みるユーザーもある。逆にこれが負担になりすぎてテニス傷害に至ることもある。用具選びはプレーヤーにとって永遠の課題の一つである。スポーツ工学⁷⁾の成果は、学協会誌だけではなく広くスポーツ雑誌⁸⁾やインターネット⁹⁾で公開され、テニスショップ、ストリンガー、およびユーザーによる議論や

情報交換も試みられている^{10),11)}。

おわりに実験用ラケットと一部資料の提供をいただいたヤマハ(株)に厚くお礼申し上げます。

(1999年3月1日受付)

参考文献

- 1) 川副嘉彦：ラケットの性能評価とテニス肘：スポーツ工学からのアプローチ，製品と安全，68，2/9，(1998)
- 2) 川副嘉彦：テニスに関する工学的研究，日本機械学会創立100周年記念スポーツ工学シンポジウム講演論文集，10-2，17/21 (1997)
- 3) 川副嘉彦：テニスのインパクトの謎を解く，日本機械学会・メカライブ，44，28/30 (1996)
- 4) 川副嘉彦・友末亮三：テニスのインパクトにおけるラケットのスイート・エリアの予測（反発係数，反発力，ボールの飛び），日本機械学会論文集，64-623，2382/2388，(1998)
- 5) Y. Kawazoe, R. Tomosue and A. Miura: Impact Shock Vibrations of the Wrist and the Elbow in the Tennis Forehand Drive, Proc. Int. Conf. on New Frontiers in Biomechanical Eng., 285/288 (1997)
- 6) Yoshihiko Kawazoe, Ryosho Tomosue and Keiko Yoshinari: Performance Prediction of Tennis Rackets with Different Racket Head Size: Impact Shock Vibrations of a Racket Grip and a Player's Wrist Joint, The Engineering of Sport, Edited by S. J. Haake, 325/332, Blackwell Science (1998)
- 7) 三浦公亮，宇治橋貞幸：スポーツ工学事始め，日本機械学会誌，95-888，967/970 (1992)
- 8) 川副嘉彦：ラケットの科学II，月刊テニスジャーナル，13-4，101/106 (1994)
- 9) 川副研究室ホームページ (<http://www.sit.ac.jp/user/kawazoe/index.html>)
- 10) コートサイドテニス専門店 (<http://www.courtside.co.jp/>)
- 11) テニスヲタクML (<http://www.geocities.co.jp/Colosseum/1058/wotaku-reg.html>)

[著者紹介]

かわ ぞえ よし ひこ 君 (正会員)



1944年11月6日生。67年九州工業大学機械工学科卒業。74年東京大学大学院博士課程単位修得退学。工学博士。現在、埼玉工業大学工学部教授、工学系研究科システム工学専攻教授兼任。機械のダイナミクスと制御、スポーツ工学/ヒューマン・ダイナミクスなどに関する研究に従事。日本機械学会、日本ロボット学会、自動車技術会、日本スポーツ産業学会などの会員。