

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

埼玉工業大学機械工学科教授

川副 嘉彦

1. はじめに

スポーツ用具は、素材の複合化により設計・製造の自由度が大きくなり、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めざす段階に至っている。

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、ラケットの性能評価は、現状では、経験の深いテスターやプレーヤーを介して行われており、性能評価に関する用語や表現には物理的定義が与えられていないのがほとんどである。

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。またこれらの他に、「玉離れが良い」、「ホールド感がある」、「面の安定性が良い」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ということは、多くのプレーヤーが経験的に認めているようである。軟らかいラケットを使うこと、ストリングスをゆるく張ること、振動の少ないラケットを使うことなどがコーチの勧める一般的なテニス肘対策である。

しかし、用具の性能評価に関してプレーヤーや

テスターが用いる感覚用語とラケットの物理特性との関係については不明な点が多く、メーカーのカタログやテニス専門誌の記事などにも誤解や矛盾がみられる。一般ユーザーにとっては、仕様に与えられる情報が少ないこともあって、店頭にならんだ山ほどの機種の中から自分に合った1本を選ぶのはきわめて難しい。コートの上でボールを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。

ここでは、感覚用語による性能評価と物理特性の関係を明らかにするための著者らのアプローチ例を紹介し、安全性に関連してどのような用具が手にやさしいかを探してみる。体験で多少知っているという著者の都合でテニスラケットの例を挙げるが、ゴルフクラブや野球のバットなどの打具、あるいはヘルメットなどの衝突を伴う用具についても同様なアプローチが可能なはずであり、安全な製品の評価につながっていくことを期待したい。

2. ラケットはどう変わってきたか

テニスの源流は13世紀にフランスで行われていた「ジュ・ド・ポーム」という手でじかにボールを打つ競技にさかのぼると言われている。テニスは手の代わりにラケットという用具を手で持ってボールを打つ競技である。

テニスラケットは1960年代前半までは木製で、 68in^2 (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。これまでの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 110in^2 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。

初期の複合材ラケットは強度不足で重かったが、1990年代になると軽量で剛性の高いラケットが市販されるようになった。最近のラケットはすべて主要な素材として複合材を使っている。

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 $95\text{in}^2 \sim 110\text{in}^2$ (平方インチ) が主流であるが、最近 137in^2 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、最近はやや落としたラケットが主流である。従来のフレーム厚 19mm に対して 30mm 以上まで剛性の異なる多くの機種がある。最近、フレームをあまり厚くしないで剛性の高い機種も開発されており、フレーム厚さと剛性は必ずしも比例しない。また、剛性はフレーム形状やサイズに依存するから、素材の硬さとは異なるものである。

ラケットは経験の産物であり、木製ラケットの時代からラケットの全長は27インチで変わることはなかった。長ラケは、従来のラケット全長27インチ (約 685mm) を29インチ (約 735mm) まで長くしたラケットである。約半インチ刻みで全長を長くしたラケットが市販されている。上記の 137in^2 の超大型サイズの全長は32インチ (812mm) 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

全長が29インチ以上のラケットの使用を禁止したようである。

現在は、フレームの質量と質量分布 (質量バランス)、剛性分布、打球面サイズと形状、ラケット全長などの異なる多くの機種が市販されている。さらに素材や太さの異なるストリングスも数多く市販されており、ラケットにはストリングスの適性テンション (どのくらいの強さで張れば良いか) が表示されるようになった。

ラケットの質量はひじょうに重要な要素であるにもかかわらず、カタログ記載値がストリングスの質量を含んでいるのかいないのかを明示していないものが多い。

3. ラケットとテニス肘

1980年代に行われたテニス肘やスポーツ障害に関するいくつかのアンケート調査報告に基づいて、ラケットとテニス肘の関係についてまとめた報告¹⁾がある。この報告は、ラケットの材質、打球面の大きさ、ラケットの重さ、ストリングスの張力などとテニス肘発生率との関係を考察している。

これによると、ラケット材質とテニス肘発生率との間には、一定の傾向は認められていない。すなわち、木、金属、複合材 (コンポジットと呼ばれる) の3種類の素材に差があるという報告もあれば、複合材が高いという報告もあれば、逆に木と金属の方が発生率が高いという報告もある¹⁾。

また、硬いラケットがテニス肘になりやすいという報告があるが、自分のラケットが硬いかどうかは主観的であり、素材が硬いということ、剛性が高いということ、動的に硬い (振動数が高い) ということが混同されているようである¹⁾。

面の大きさに関しては、従来のレギュラーサイズ (現在のラケットに比べると打球面がかなり狭

い) から、セミラージ、ラージに変えた際に痛みが生じたという報告に対しては材質やガット張力が変わったためであろうという推測がなされている。ラージサイズは、一般的にボールの飛びがよく、オフセンターで打球した際のねじれが少なく、スイート・スポットが広く、肘に負担の少ないラケットであると考えられている¹⁾。

ラケットの重さとテニス肘発生率との関係は、アンケート対象者の筋力などがチェックされていないので、はっきりした傾向は出ていない。ラケットは重すぎても軽すぎても駄目で、男子の場合は350g、女子の場合は330g程度のラケットが推奨されている¹⁾。

ストリングス(俗称ガット)に関しては、張力(ストリングをラケットに張るときの力)が高すぎるとテニス肘になりやすいと考えられており、55ポンド(25 kgf、244 N)以下で張ることが推奨されている。ただし、ラケットの打球面サイズとの関係については明らかではない。メーカーで指定した適性テンションの最低値で張ることも奨められている¹⁾。

最近のラケットに関しては、メーカーの立場から、肘への負担を軽減するラケットについての解説がある²⁾。これによると、トッププレイヤーの場合は、ラケットの機能と技術の向上により打球が速くなり、インパクト時の衝撃が大きくなっている。一般のプレイヤーの場合は、テニスの基本ができてなくても楽しめるようになり、練習量の多いプレイヤーや中高年齢のプレイヤーにテニス肘や手首・肩の障害を持つ人が多くなったと言われている²⁾。

また、メーカーの話では、筋力の弱い中高年齢プレイヤーが求めているラケットは、軽い力で楽にボールが飛ぶ厚ラケ系統が主流であり、衝撃吸収性の良いラケットが必ずしもユーザーのニーズ

に合うものではない。プレー頻度の高い競技者の場合は、ノーマルラケットの使用が主流になっている²⁾。

現在は、中高年齢プレイヤーを想定して厚ラケの衝撃吸収性を高めるための研究開発が進められており、フレームサイズ的大型化や四角化によるスイートスポットの拡大、フレーム材料やグロメット(ストリングを通す部品)材料の工夫が図られている。ストリング面に装着する振動止めも、心地よい打球音・打球感を犠牲にするが、効果が期待できると考えられている。このような最近の研究開発によりテニス肘は減少傾向にあると推定されている²⁾。

4. 感覚的性能評価とスポーツ工学

4. 1 ラケットの性能を予測する

スポーツは体験により修得するものだから、きわめて主観的なものである。したがって、スポーツ用具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。しかし、最近のスポーツ工学の成果により多くの謎が少しずつ明らかになりつつある。

ここでは、テニスラケットの性能予測と評価についての著者らの研究成果³⁾⁴⁾を紹介し、ボールの飛びが良く、しかも腕への負担を軽減するラケットについて考えてみる。

4. 2 玉離れが良いラケットとは

「玉離れが良い」という感覚的な性能評価がある。一般に「高剛性ラケットは玉離れが良い」と経験的に言われている、また、これと反対の性質として「ボールのホールド感があるラケット」という表現もある。テニス専門誌などでは、「玉離れが良い」ことは「接触時間が短い」と解釈さ

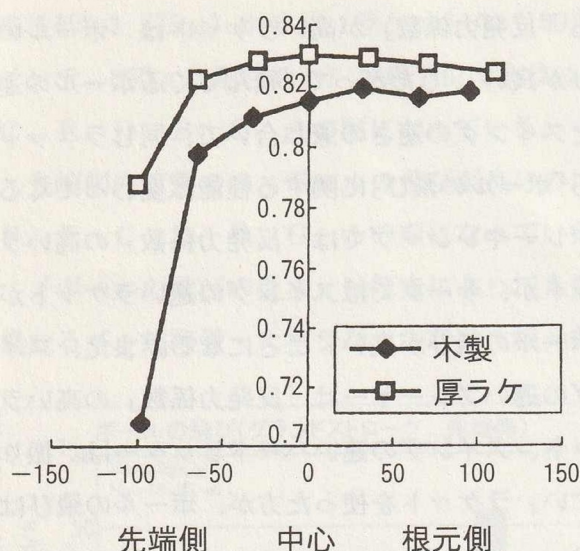


図1 玉離れの良さの予測

れることが多い。しかし、実験結果や予測結果によると、接触時にはフレーム剛性はほとんど影響しない。さらに、ラケット・フレームの剛性が高いほど反発係数は大きい。したがって、これらのことから、「玉離れが良い」という表現は物理的には「反発係数が高い」と解釈できる。

図1は、木製ラケットと厚ラケの反発係数を予測した例である。この場合のスイング・モデルが図2であり、グランド・ストローク（バ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10m/sであり、スイング速度は20年前の女子トッププロのラリーにおける速度に近い。図1の横軸は、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り、厚ラケの反発係数は先端側でもあまり低下しない。

図1は縦方向（長手方向）の中心線上の打点の場合であるが、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厚ラケの反発係数は木製に

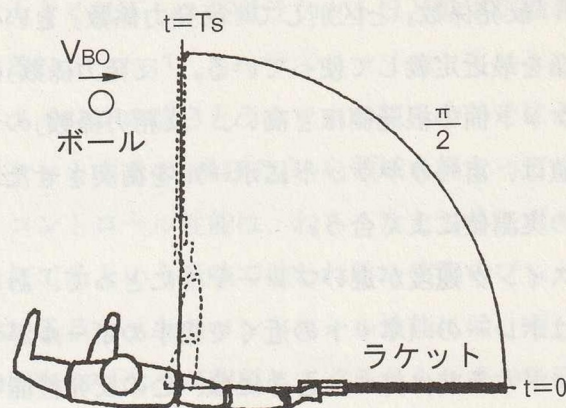


図2 スイング・モデル

比べて低下が少ない。

ラケットにより多少異なるが、「反発係数」はラケット面のほぼ中心で最も高く、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。ラケット面の中心近くで打撃すれば、衝突速度が大きくても「反発係数」は大きくは低下しない。

4.3 はじきの良いラケットとは

「ラケットの反発性能が良い」、「反発力がある」、「はじきが良い」という表現が同じ意味で用いられている。

しかし、これらの表現と「反発係数が高い」という表現が混同して使われることが多い。「反発係数」が高いから「反発力がある」という説明がなされるが、「反発力がある」と「反発係数が高い」とは直接対応するものではない。

ひじょうに軽い厚ラケのように反発係数が高くても、ボールの跳ね返りの悪いラケットもある。

「はじきの良いラケット」とは、ラケットを振らないでボールを当てただけのときに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。

著者は「反発性能」（跳ね返りの良さ）の評価には、「反発係数」と区別して「反発力係数」という用語を最近定義して使っている。「反発力係数」はラケット面の根元側ほど高い。「反発力係数」の予測値は、宙づりラケットにボールを衝突させたときの実測値によく合う。

スイング速度が遅いプレーヤーにとって、あるいはボレーの（ネットの近くで相手のボールがバウンドする前に打つ）ときには、この反発性能を表す「反発力係数」が打球の速さに影響する。

「反発係数」が高くて、打点に換算した換算質量が大きいラケットほど、反発性能を表す「反発力係数」は高いことになる。

反発性能（「反発力係数」）には、反発係数よりも換算質量（一般に先端側が重いトップヘビーのラケットが大きい）の方が効く。

4. 4 ボールの飛び

「ボールの飛びが良い」あるいは「パワーがある」という感覚的な性能評価が一般になされている。これらの意味は同じであり、ラケットの「パワー」は、「ボールの飛びの良さ」で評価できる。これらの表現も、「反発力が良い」や「はじきが良い」、あるいは「反発係数が高い」という表現としばしば混同して使われる。

しかし、「ラケットの反発性能が良い」、「反発力がある」、「はじきが良い」などの反発性能に関する表現に対応する「反発力係数」と「ボールの飛び」とは、直接対応するものではない。

ボールの飛びは、スイングしたときのラケット・ヘッド（衝突直前のラケットの打点位置の速度）と「反発力係数」とで決まる。

「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」が高いラケットは「ボールの飛びが良い」。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。

ボレーやレシーブでは「反発力係数」の高いラケットが、サーブではスイングの速いラケットが「ボールの飛びが良い」ことになる。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。

図3は、図2のスイング・モデルを用いてグランド・ストロークにおけるボールの飛びを予測した例である。ラケット面の先端側と中心で打撃したときの7種類のラケットの比較である。ラケットAは100平方インチ、ストリングスを含めて360gの従来型質量バランスのラケット（剛性低い）、ラケットBは100平方インチの典型的な厚ラケ（剛性がひじょうに高い、従来型質量バランス、370g）、ラケットCは100平方インチの超軽量ラケット（剛性高い、290g）、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は大型・超軽量のラケット（120平方インチ、剛性ふつう、292g）、ラケットGは木製（68平方インチ、375g）である。

ラケット面中心でボールの飛びが良いのは、ラケットF（120平方インチ、剛性ふつう、292g）が1位であり、ラケットC（100平方インチ、剛性高い、290g）が2位、ラケットE（120平方インチ、剛性ふつう、349g）が3位、ラケットD（110平方インチ、剛性ふつう、365g）が4位、ラケットB（100平方インチ、剛性がひじょうに高い、370g）が5位、ラケットG（68平方インチ、木製、

剛性低い、375 g) が6位、ラケットA (100平方インチ、360 g、剛性低い) が最下位である。F、C、E、D、B、G、Aの順になっている。

先端側の打撃では、ボールの飛びが良いのは、F、E、C、D、B、G、Aの順になっている。

「ボールの飛びの良さ」は打点によっても多少異なるが、超軽量・大型ラケットFは、根元側の

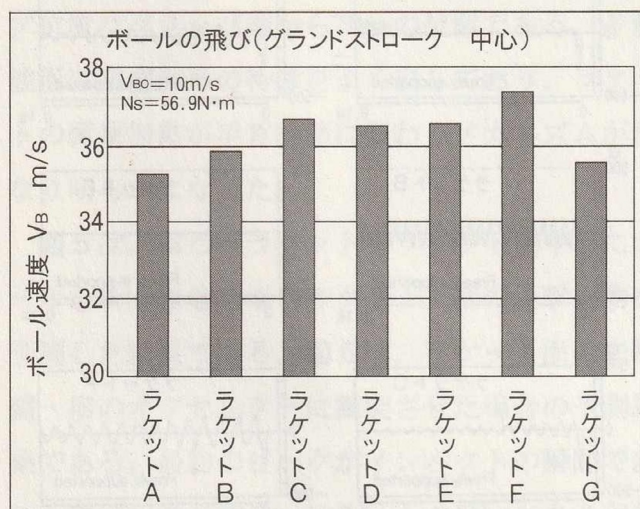
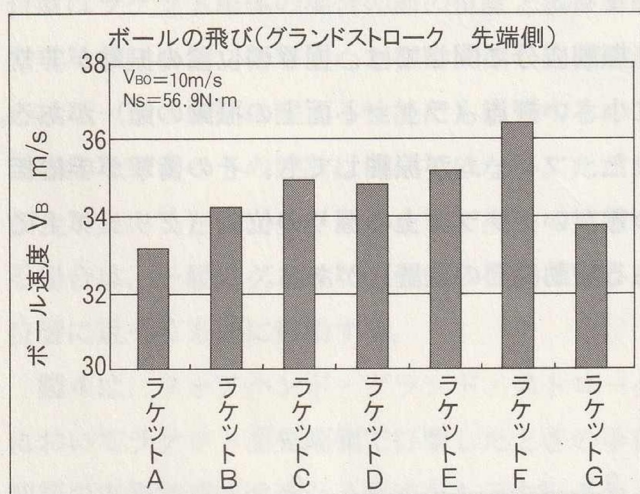


図3 ボールの飛びの予測

横のオフセンターを除くと、上級レベルのグランド・ストロークのラリーを想定したスイング・モデルでは、最もボールの飛びがよい。

4. 5 面安定、コントロール

「反発力係数」はラケット面の根元側ほど高く、

ラケット速度は先端側ほど速い。また、ラケット面の縦の中心線を大きく外れると「反発力係数」は大きく低下し、軽量ラケットほど低下が顕著である。

スイングの速さとラケットの組み合わせにより、ラケット面上の「飛びの良い」領域も異なってくる。

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)が関係してくるから、その予測・評価は難しいが、面安定性も一つの要素であろう。

ラケット面上のボールの飛びの良い領域を予測すると、たとえば大型・超軽量のラケットF (292 g) は、同じサイズのラケットE (349 g) よりも最も飛びの良い領域(飛びに関するスイートエリア)は広いが、ラケットEの方がオフセンターで打撃しても安定な飛び(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が、面安定性が増すと操作性は悪くなる。

さらに、インパクトにおいてボールがラケット面から離れるときのフレームの変形状態もボールのコントロールに関与する可能性がある。

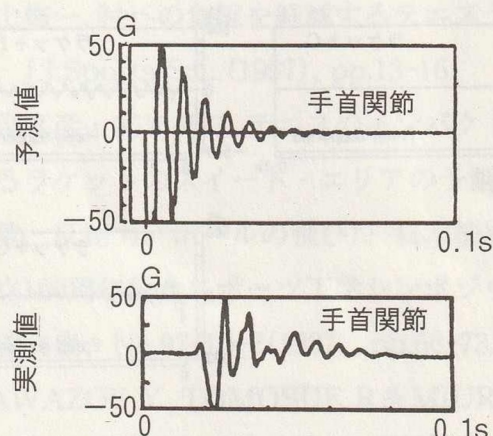


図4 フォアハンド・グランド・ストロークにおいてラケット面先端側で打撃したときの手首関節の衝撃振動波形と予測波形(衝突速度30m/s)

ラケットのコントロール性能の評価は未解明であり、今後の重要な研究課題である。

4. 6 手首に伝わる衝撃振動とラケットの特性

手首に伝わる衝撃振動の大きさは、打点の位置とグリップの握りの位置で異なる。

衝撃成分は、ボールとラケットが衝突して接触しているとき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の振動が手に伝わることにより発生すると考えるとわかりやすい。フレームが全く変形しなければ衝撃成分だけであるが、現実のラケットは剛性の非常に高い厚ラケでも振動が発生する。厚

ラケの振動変位（変形量）は小さいが、手を感じるのは加速度であり、厚ラケは振動数が高いので振動の加速度振幅は大きい。

握りの位置が決まれば、握りの位置に衝撃がほとんど伝わらない打点（打撃の中心、または衝撃中心と呼ばれる）が決まってくる。逆に、打点が決まれば衝撃がほとんど伝わらない握りの位置が決まる。

振動成分に関しては、握りの位置の振動が非常に小さい打点（ラケット面上の振動の節）がある。また、フレームが振動しても、その衝撃が手に伝わらないグリップ上の握りの位置（グリップ上にある振動の節の位置）がある。

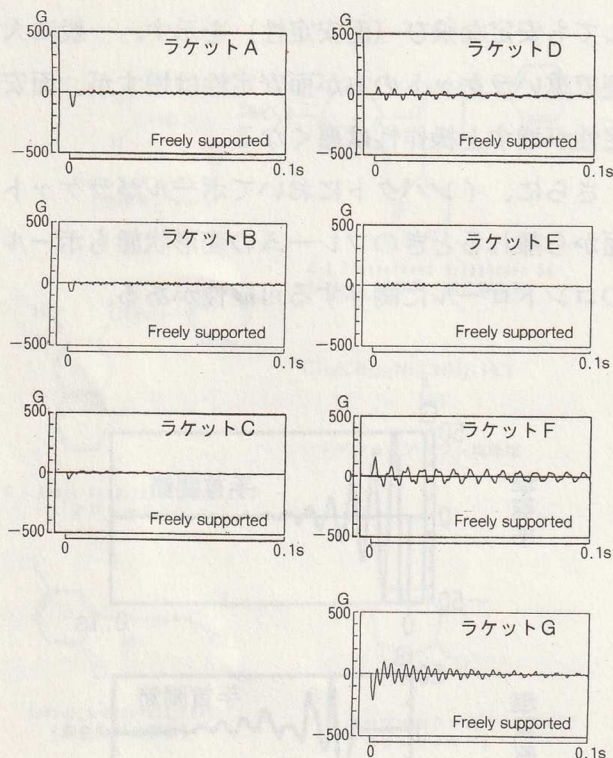


図5 宙づりラケットにボールが衝突するときのグリップ部の衝撃振動の予測（衝突位置：ラケット面中心、衝突速度：30m/s）

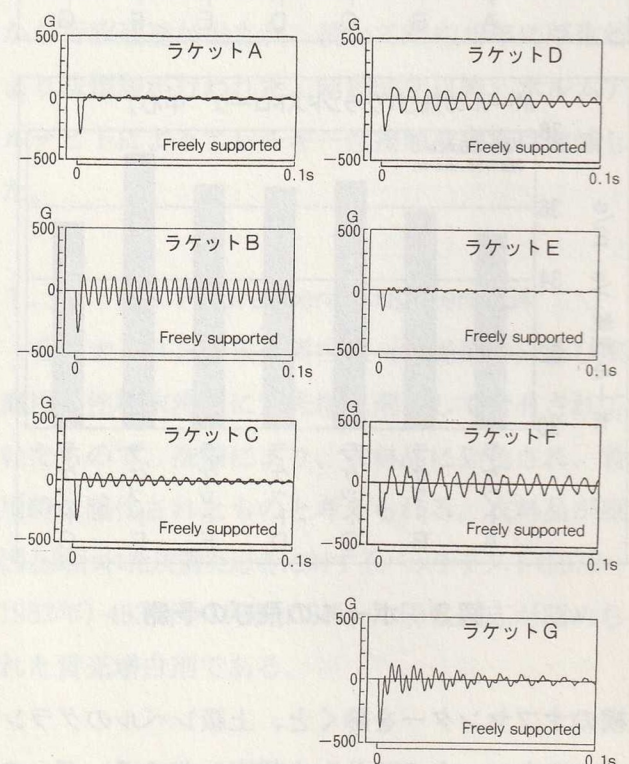


図6 宙づりラケットにボールが衝突するときのグリップ部の衝撃振動の予測（衝突位置：ラケット面中心から先端側で横に外れたオフセンター、衝突速度：30m/s）

すなわち、グリップの握りの位置が決まれば、ラケット面上の打撃領域に衝撃中心と振動の節があり、握りの位置に近いところにグリップ上の振動の節があれば、手に伝わる衝撃振動は小さいことになる。

衝撃中心と振動の節の位置は通常異なる位置にあり、ラケットを手で握って打撃した場合の節の位置はラケット単体の場合の節の位置と多少異なってくる。また、衝撃中心と振動の節の位置の違いはボールの飛びに関する性能にも影響するので、理想的なラケットの設計は簡単ではない。ただし、都合が良いことに、ラケットを手で握って打撃する場合は、一般にグリップ上の節の位置は握りの位置に近づく方向に移動する。

図4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⁴⁾。グリップ位置はグリップ端から70mmの位置である。予測波形は実測波形の特徴をよく表しており、ラケットの衝撃振動が手首関節に伝わるメカニズムがかなり明らかになった。

図5は、宙づりラケットのラケット面中心にボールを衝突させた場合のグリップ部の衝撃振動を予測した結果である。図6は、ラケット面の先端側・横のオフセンターに衝突させた場合の予測結果である。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。ラケットの違いが良く現れている。

ラケット面中心での衝突では、オフセンターでの衝突に比べてグリップ部の衝撃振動は小さいが、剛性の低い木製のラケットGと最もボールの飛びが良い大型・超軽量ラケットFの衝撃振動が大きい。

オフセンター（中心から先端側の横方向に外れた位置）での衝突では、もっとも飛びの良くない

ラケットAとやや重めの大型ラケットDの場合がグリップの衝撃振動が小さく、ラケットB（ひじょうに剛性の高い厚ラケ）とラケットF（最もボールの飛びが良い大型・超軽量）の場合が大きい。

5. おわりに

テニス肘になりやすいラケットが存在するということは、多くのプレーヤーにより経験的に認められているにもかかわらず、肘の痛みの原因は複雑であり、テニス肘をはじめとする障害と用具の関係はほとんどわかっていない。用具の性能評価に関してプレーヤーやテスターが用いる感覚用語とラケットの物理特性との関係を明らかにすることをめざして、特に用具の安全性に関連してスポーツ工学からのアプローチ例を紹介した。今後、スポーツ工学が安全なスポーツ用具の製造や製品の安全性評価などにつながっていくことを期待したい。

《文 献》

- 1) 友末亮三・武藤芳照、用具による安全対策－ラケットとテニス肘－、臨床スポーツ医学、Vol. 3、No.6(1988)、pp. 631-635.
- 2) 米山修一、肘への負担を軽減するテニスラケット、J.J.Sports Sci.,(1997)、pp.13-16.
- 3) 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)、日本機械学会創立100周年記念スポーツ工学シンポジウム講演論文集、No.97-10-2(1997)、pp.66-73.
- 4) KAWAZOE, Y., TOMOSUE, R & MIURA, A., Impact Shock Vibrations of the Wrist and the Elbow in the Tennis Forehand Drive, Proc. Int. Conf. on New Frontiers in Biomechanical Eng.,(1997)、pp.285-288.