J.J. SPORTS SCI.

特集：ラケット・スポーツ

テニスのバイオメカニクス

——動作分析と用具開発の将来——

友末　亮三※　川副　嘉彦※※

研究結果が数多く蓄積された'80年代のテニスのバイオメカニクス。その多くは、実践の後追い、つまり、経験論の確認作業という色彩の濃いものであった。

さて、'90年代。やはり同じように後追いを続けていくことになるのか？　それとも、理論が先行するような役に立つデータが得られるようになるのか？

ここでは、焦点を絞りやすくするために、研究対象をヒト（生体）とラケット（用具）とに分離し、それぞれを研究していく際の課題と問題点をはっきりさせることによって、役に立つ研究が行われる可能性というものを、探ってみることにしたい。

ストロークの習熟過程を分析する

よい動きとは何かを客観化してゆこうというとき、よく行われるのは、熟練者と未熟練者とを比較するという形の研究である。しかし、こうした形の研究は、よい動きがどういうものかを分析者があらかじめ理念的にとらえおり、その理念に合いそうな要素に着目して分析を進めていくため、事前に予想した通りの結果しか得られないことが多い。

もちろん、このような研究は、現象の確認という意味で大いに意義のあるものなのであるが、結果を予測することが困難な問題について、経験的理念にとらわれないで研究を行っていくことはできないものであろうか。このような考えのもとに筆者らは、全くの初心者に対してテニスサーブの指導を1年間行い、その間に何がどう変わっていくのかを追跡研究しようと試みた。

習熟過程に対する理念というものがないわけではなかったが、練習に伴う動作の変化の順序や、その変化と指導内容との関係といったテーマについては、経験豊かなコーチといえども結果を予想することが困難だったからである。

では、その追跡研究によって何が分かったのか、また、得られた結果は現場にとって役に立つものだったのかどうかなどについて、データの有用性と

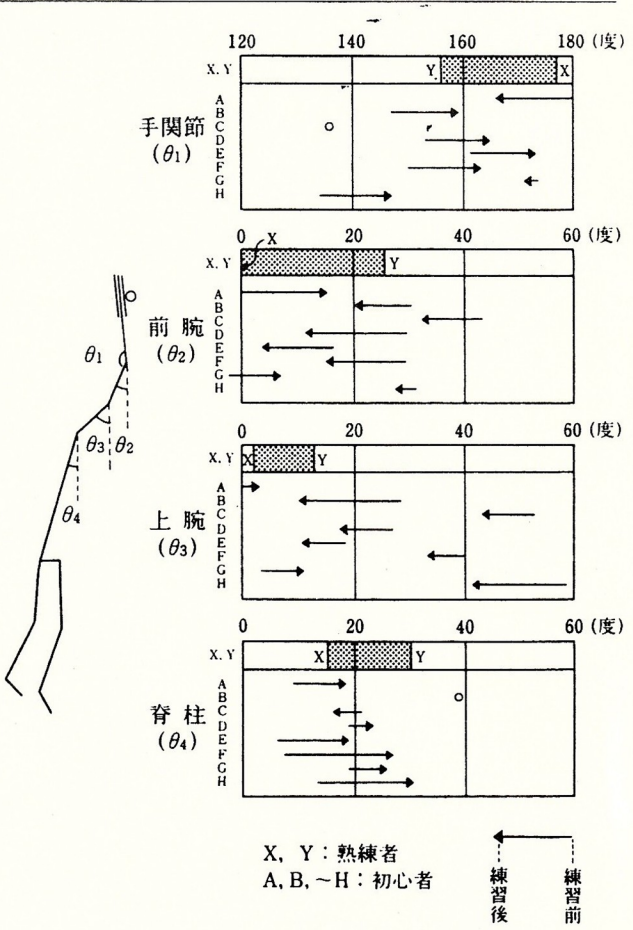


図1　サービスのインパクト時における身体とラケットの位置

※Ryoso Tomosue——東京大学教養学部

※※Yoshihiko Kawazoe——埼玉工業大学機械工学科

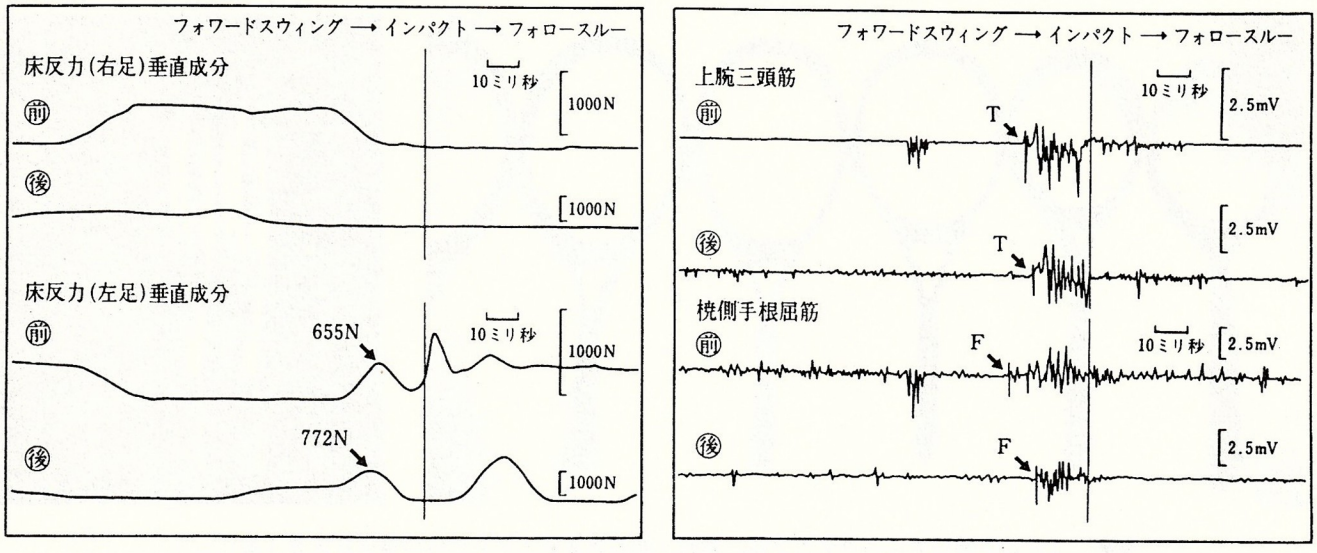


図2　サービスの際の床反力および筋電図を練習前後で比較する（友末ほか，1987）

いう点にポイントをおいて話を進めていきたいので、指導内容や実験手順についての細かな説明は省き、いきなりデータの解説に入らせていただく。

まず図1。

これは、インパクトの瞬間の各関節角度と各segment傾斜角度で、高速度ビデオによる画像から求めたものである。上のX、Yの間の黒い部分は、2名の熟練者が示した範囲であり、下のAからHは、8名の初心者が練習を行うことによって値をどう変化させていったかを、矢印で示してある。

ごらんの通り、初心者群の練習前の状態は個人差が大きく、代表例を捜し出すことが困難な状況にある。しかし、練習をすることによって、いずれの角度についても、熟練者より小さい値を示していた者は大きい値へ、逆に、熟練者より大きい値を示していた者は小さい値へ変化している。

もし、ここの2名の熟練者が示すように、手関節（θ_1）をわずかに後傾させ、身体全体（$\theta_2 \sim \theta_4$）をやや前傾させた状態でインパクトを行うのが理想的な動作であると仮定するならば、このデータは、初心者それぞれが望ましい動作に近づきつつあるということの、ひとつの傍証として利用できるのではないだろうか。

一般に、テニスのストロークは、初心者ならずとも、熟練者もひとりひとり違った動作をしているものである。したがって、ただ単に技術レベルの異なるグループ間の動作の比較という形の研究にとどまることなく、そうした個人差を認めた上で分析を進めていくという形の研究も、今後もっと行われてもよいのではないか…その点、練習効果を検討したり、習熟過程を分析することは、多様な動作からよい動きを導き出すための、有力な解析手段になるのではなかろうか。

さて、次は図2を見ていただきたい。

これは同時に測定した床反力波形と筋放電パターンの一部である。床反力については、練習後にスウィング直前の左足の垂直成分のピーク値が大きな値を示すようになること、筋電図については、上腕三頭筋と橈側手根屈筋の放電開始時期（それぞれT，Fとする）が練習前はF→Tの順であったものがT→Fに逆転したことなど、望ましい動作に近づきつつあるということを確認することができる。

もちろん、これだけでは理念に左右される従来からの研究となんら変わりがないわけであるが、そこで確認された変化を指導内容と関連させながら論ずることができるという点は、長期に渡る追跡研究の大きな利点である。

今回の追跡研究では残念ながら、データの収集を1年間の練習前後の2回に限ったこと、また、指導方法を一通りで統一したことなど、いろいろネックになる点があって、指導内容の是非までは判定することができなかったが、役に立つデータということにこだわるのであれば、必ずしも長期に渡るデータを収集する必要はない。

例えば、試合開始早々のフォームと疲れのみえる試合後半のフォームを比較するとか、故障者のリハ

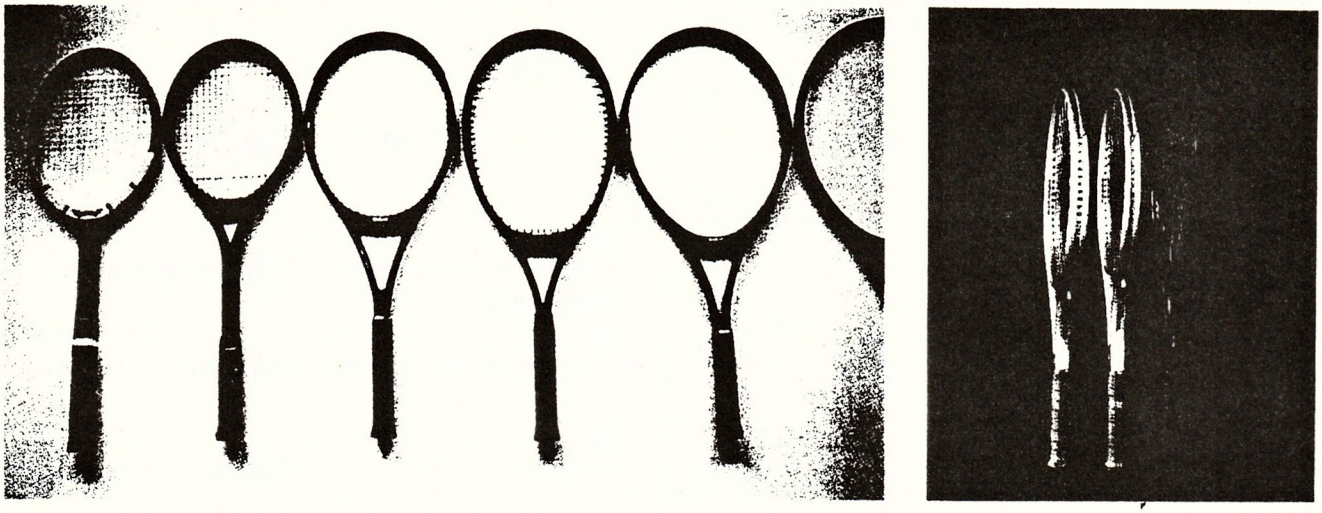


写真　この20年間にテニスラケットは，素材・面の大きさ・フレームの厚さが大きく変化した
（写真提供：テニスジャーナル）

ビリ前後のフォームを比較するという形のデータ収集…これらは、ただ単によい動きを明らかにしていくだけなく、体力面や臨床面のアドバイスも可能にしていくであろう。

'90年代は、こうした一個人の動作の変化を明らかにしていくような“実践研究”あるいは“事例報告”に属するタイプの研究が増えていくのではないだろうか。

ラケットの機械的特性を分析する

テニスラケットは、これまで3回、革命的な変化を遂げてきた。すなわち、'70年代の新素材の出現、'80年代のデカラケの流行、そして今、フレームの厚いアツラケの登場である。

こうした用具開発の分野は、長い歴史をもつ工学的理論が背景に存在しているので、理論が先行するような研究もいくつかみることができる。

例えば、デカラケの発明。これがテニスとは全く無縁であったひとりの工業デザイナーの手によってなされたというのは、有名な話である。

現在でも、より良いラケットを造るため、あるいは、ラケットを選択しやすくすることを目指して、ラケットそのものの分析が盛んに行われている。ここでは、スポーツ工学の分野で最近注目を集めている“モード解析”に基づくラケット評価法を紹介しておきたい。

モード解析（modal analysis）…バイオメカニクスの分野ではなじみの薄い用語かも知れないが、一言でいえば、総合的な振動解析法のことである。モードとよばれる構造体の振動の形は質量分布と剛性分布により決まり、複数の固有モードのそれぞれが異なる特有の固有振動数で振動することに基づいて、動特性を表現し解析する。実験モード解析の一般的手順は、次のごとくである。

①まず、対象構造物を加振し、加振力と応答の測定結果から、振動伝達特性（周波数スペクトル）を求める。

②その構造体にみられる特有な振動を伝達関数を使ってモードと呼ばれる振動様式の重ね合わせの形で同定する。

③コンピュータ上で、振動モードのアニメーションや外力に対する応答および構造変更の振動シミュレーションなどを行う。

ラケットを分析する場合の手順を図示すると図3のようになる。

具体的に説明すると…ラケットには振動を検出するための振動ピックアップというものが取りつけてあり、この設置点は簡単に移動することができる。ラケットを打撃するのは、インパルスハンマと呼ばれる力センサーを備えたハンマで、打撃する地点はもちろん任意に選ぶことができる。打撃力と応答の波形データは、2チャンネルFFT（高速フーリエ変換）解析装置に取り込まれ、伝達特性が求められる。これに接続されたパーソナルコンピュータにより固

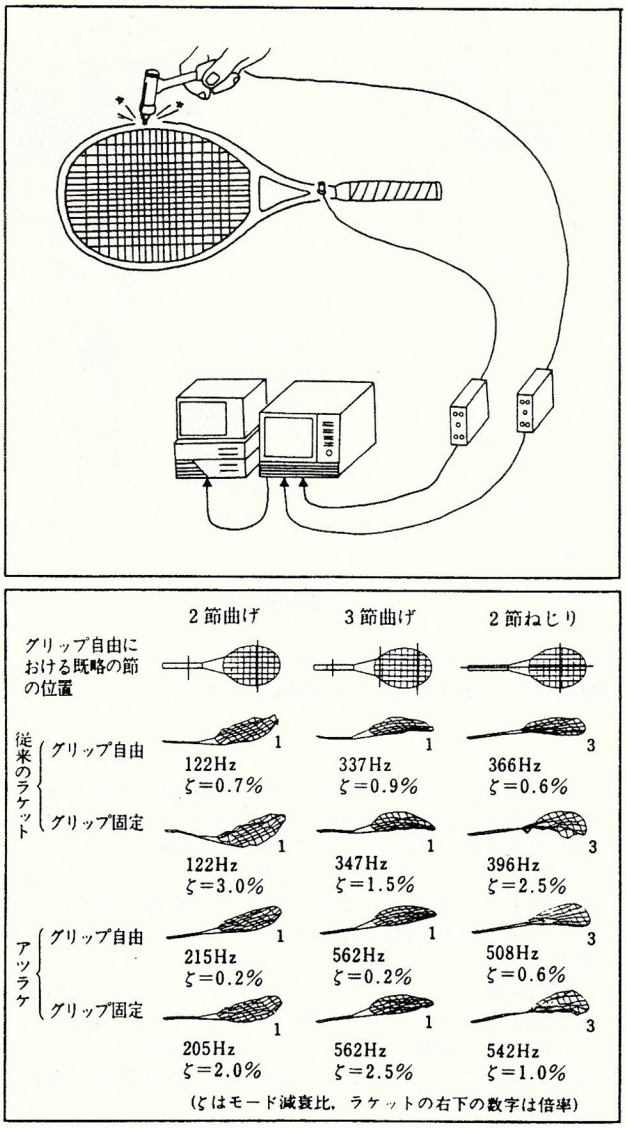


図3　モード解析の実験と同定されたラケットの振動モード（川副，1990）

有モード，固有振動数，モード減衰比などのモードパラメータの同定が行われる。

いろいろな実験条件において解析された振動モード形状・振動数・減衰比が、図3下部に示してある。

アツラケは、従来のラケットと比較すると、モード形状はあまり変わらないものの、振動数は1.4から1.8倍と、大きくなっていることがわかる。減衰比はアツラケの方が小さいが、振動数が高いので、時間的減衰率はほぼ等しい。

ある振動モードの節にボールが衝突すれば、そのモードは励振されず、腹に近い位置に衝突するほど励振されやすい。したがって、節の位置を衝突点に近づければ振動は減少するはずであるが、現実には複数のモードが存在し、しかも、打撃力が作用するのは点ではなくボールとストリングが接触する領域であるから、振動を消滅させるのはそう簡単ではない。

中央打撃の場合は、3節曲げのモードが励振されやすく、先端打撃の場合は、2節曲げのモードが励振されやすい。

図4は、グリップ自由の状態で、面の中央部と先端部を打撃した場合の、両ラケットのインパルス応答変位振幅を比較したものである。ボールの大きさを考慮してラケット面上の4つの小さい○印の点を打撃領域と仮定し、ラケット各点の振動振幅の大きさを6段階の濃度で表示している（濃い方が振幅が小さい）。採用したモードは、2節曲げ・3節曲げ・2節ねじりの3つである。

中央を打撃した場合は、振幅は小さく、しかも両ラケットの差異も小さい。先端打撃の場合は、振幅は大きくなるが、従来のラケットと比べるとアツラケの振幅がはるかに小さい。また、標準的グリップ位置の振動は、中央を打撃した場合は非常に小さいこともわかる。

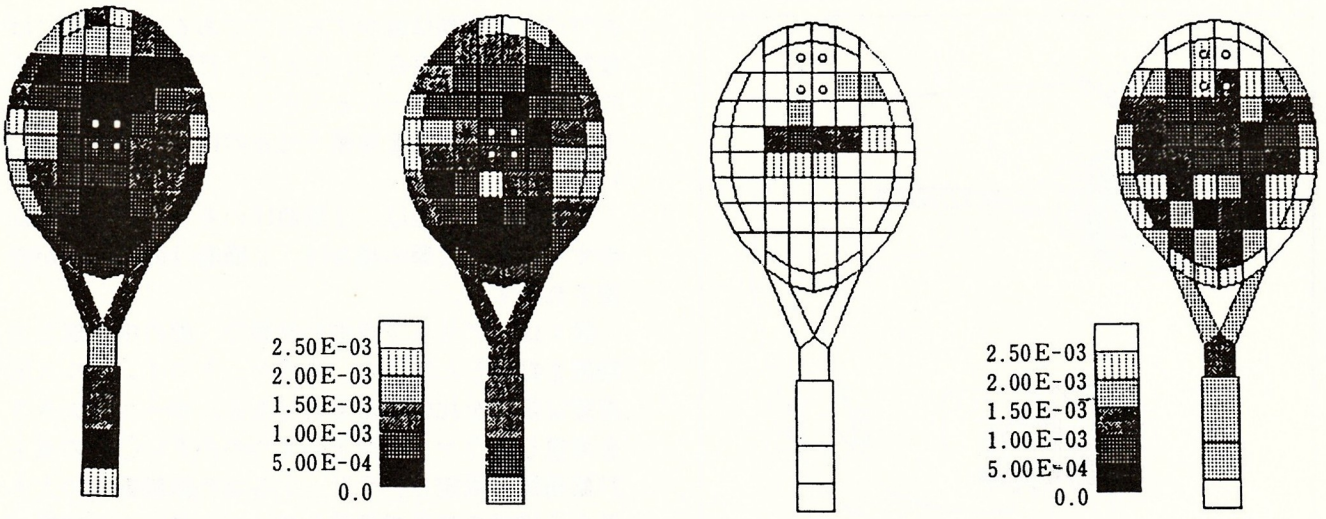
このように現在、モード解析に基づく研究は、ラケットそのものを評価するための基礎資料を拾っている段階であり、後追いの研究に逆戻りした感を与えるかもしれない。しかし、インパクトの瞬間に腕が感じる衝撃、打球のパワーや安定感など、人間が微妙に、しかも明確に識別する感覚を評価していくためには、避けて通ることのできない重要な研究分野であろう。

当初の目的は、役に立つ研究が行われる可能性を探ってみる、というものであった。

しかし、こうして課題と問題点を整理してみると、必ずしもアプリケーションばかりに目を向ける必要もないという気になってきた。

というのも、バイオメカニクスという境界領域の科学が「科学としての市民権」を獲得するためには、やはり、基礎研究を充実させ、研究の方法論を確立することが先決だと思うからである。

では、基本的には何をしていけばよいのか？　それが問題なのだが、とりあえずは、バイオメカニクスの研究者が工学をはじめとする他の研究分野の人たちともっと積極的に交流を深めていくというのはどうだろう。



従来のラケット　　アツラケ　　従来のラケット　　アツラケ

(a) 中心部を打撃　　(b) 先端部を打撃

図4　グリップ自由におけるラケットのインパルス応答変位振幅（川副，未発表資料）
ラケット面上の4つの小さい○印の点は打撃領域を示し，濃度が濃いほど振幅は小さい

先日、あるスポーツ工学系の研究会に参加した筆者らは、同じスポーツの研究をしているにもかかわらず、このＪＪＳＳを知らない人があまりにも多いのに、驚いてしまったのである。

テニスサーブの習熟過程の追跡研究は、昭和61年度科学研究費総合研究Ａ（研究代表者：浅見俊雄）の助成によって行ったものの一部である。

文　献

1）加川幸雄，石川正臣：モーダル解析入門．オーム社，東京，1989.
2）*Kawazoe, Y.*：Dynamaics and computer aided design of tennis racket. Proc. Advanced Computers for Dynamics and Design '89：243-248, 1989.
3）川副嘉彦：テニスラケットの動力学とコンピュータ援用設計（モード特性におよぼす諸因子の影響と設計への指針）．日本機械学会論文集．第56巻526号C編，1990.（印刷中）
4）川副嘉彦：テニスラケットのダイナミックス．日本機械学会講演論文集（Vol. C）No. 900-14：15-17, 1990.
5）永田　晟：運動サイバネティックスと調整力．二十一世紀の体育・スポーツ（宮下・高石編），杏林書院，東京，1982, pp. 147-153.
6）友末亮三ほか：ビデオ・システムを用いたテニス・ストロークの初心者指導――フォームの評価の信頼性とビデオフィードバックの効果――．体育の科学，38：363-367, 1988.