

■ 特集 新分野創設者によるスポーツ工学研究レビュー

私のテニス研究遍歴 5 話

—知は現場にあり—

川副嘉彦*

Five stories on my career as tennis researcher

- Wisdom on the site -

Yoshihiko Kawazoe

生きている状態を最も明白に表す現象の一つが運動である。われわれが日常何気なく行っている動作からスポーツ選手や音楽家が見せる超人的な動きまで、運動には限りない多様性がある。運動はどのようにして獲得されるのであろうか。本稿では、筆者の試行錯誤のテニス研究遍歴を紹介した。結論として、実世界は何が起こるかわからない、研究テーマは向こうから勝手にやってくるというのが印象である。複雑精妙な身体運動は古典的な運動制御理論では説明できず、人間の動きの研究には生命や人間を含めた系の運動制御に関する広く深い発展が必要であろう。

Key words: Sports, Tennis, Motion, Performance, Research

1 運動はどのように獲得されるのか

生きている状態を最も明白に表す現象の一つが運動である。しかし、運動がどのように獲得されるのかは難しい。われわれが日常何気なく行っている動作からスポーツ選手や音楽家が見せる超人的な動きまで、運動には限りない多様性がある¹⁾⁻⁶⁾。

図1は、筆者の(a)赤ちゃんの写真と(b)テニス大会デビューの写真である。

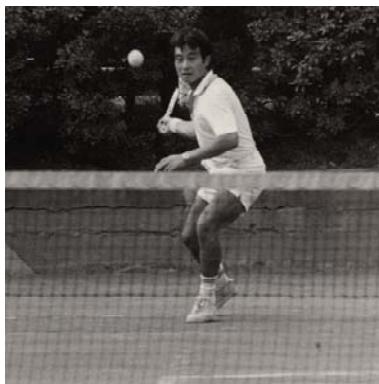
「秩序からの秩序」と「無秩序からの秩序」というテーマを物理学者シュレーディンガーが著書「生命とは何か」⁷⁾で指摘してから50年の間に、分子生物学の驚くべき成功として「秩序からの秩序」の方はその謎（遺伝子）が解明された（図1(a)）。 「無秩

序からの秩序」（図1(b)）の方は周囲からは重要視されなかつたが、生物系はエントロピー増大法則のような無秩序とは正反対であり、無秩序から創出された驚くほど高いレベルの秩序を生物は示しているというのが彼の主張であった。現在では、無秩序からの秩序の形成によって生命が生まれ、秩序から秩序をつくりだすことによって生命が継続（再生産）すると理解されるようになってきた。無秩序状態を表現するエントロピーの外部への放出が内部に秩序を保つ条件であり、生命体は外部から取り込んだエネルギーを消費することにより生じた不要なエントロピーを排出して生命体としての状態を保つ。「無秩序からの秩序」（テニスの技術はどのようにして獲得できるか）は、これから重要なテーマであると言わわれている⁸⁾。

図2は人間オペレータによる台車上の倒立棒の安定化制御の例であり、手で台車を移動させて倒立棒が倒れないように制御する。図3はその習熟過程を示す。倒れないという意味の安定化制御が練習により可能になる。倒立棒を常に垂直に立てようとする傾向のあるオペレータは長時間の安定化操作に習熟しない。人間オペレータによる安定化制御挙動には、カオス性（最大リアップノフ数が正）と無秩序さ（エントロピーの割合が大きいこと）が見られ、試行回数を重ねて習熟していくと運動の自由度が増大し、無秩序さの程度が低減する⁴⁾⁻⁶⁾。



(a) 秩序からの秩序



(b) 無秩序からの秩序

図1 巧みさの生まれるメカニズム



図2 人間による台車上の倒立棒の安定化制御

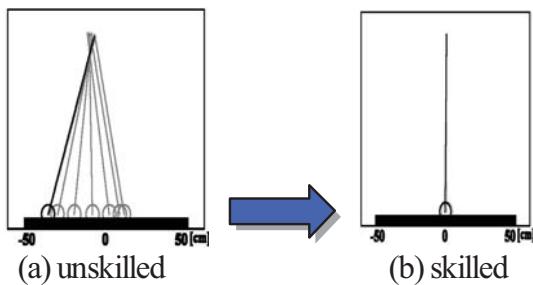


図3 人間による倒立棒の安定化制御における習熟過程

甲野⁹⁾によると、「人間にとて自然とは何か」という問い合わせが武術に志した動機であり、武術の稽古と研究に駆り立てる。「人間の運命は初めから完璧に決まつていて、しかも自由だ」というのが体感・実感として得た答えの一つだという(図4)。生命の継続・再生産(図1(a))は運命であり、無秩序からの秩序の形成(図1(b))によってテニスという自由が生まれてくると理解できる。

図5、図6は筆者がテニスにのめりこんでいた頃の記録の一部であり、図7は当時の筆者の独学の教科書である^{12), 13)}。ローズウォールの動物のような動きと川廷栄一の写真の美しさに魅せられた。運動神経の悪さは運命だから完璧に決まっている。無秩序なテニスから秩序のあるテニスが生まれることを期待するしかない。ただし、物理や数学の問題と違って、身体の運動は身体についての脳の記憶と根強く結びついており、やったことがないような動きを要請されると、そこで思考も止まってしまうと甲野⁹⁾は指摘する。武術的な身体運用法を用いると、逆風を利用して走るヨットの原理のように、ウェイトトレーニング等を行って走り込みをするという一般的に知られている方法とは違った身体運用の訓練法が存在する。森(図4)の「エンジンなしで川をさかのぼる船」と同じ原理である。



図4 ロボコン博士の森政弘先生と古武術研究者の甲野善紀先生に学ぶ研究室メンバー(2007年)

図5 テニスの実践研究：スマッシュ杯(1979年)¹⁰⁾図6 テニスの実践研究：テニスマガジン杯(1980年)¹¹⁾図7 テニスの実践研究:筆者のテニス教科書例^{12), 13)}

2 不確実性への適応

ロボットの定義を生体（人間・動物）に似た運動機能を持つもの、あるいは運動機能に加えて知的機能を備えているものとし、（工場や人工的環境以外での）オープンな実環境で自律的に動くロボットの開発では、要素行動と呼ばれる単純なモジュールを並列的に積み上げていき、研究者も開発対象も次第に能力が向上していくという包摂構造（Subsumption Architecture）を基本とすると、上位レベルの行動（高次機能）が失敗しても、下位レベルの行動が実行され、致命的な失敗を防ぐことができる。現実世界で動くロボットが次第に能力を向上させていく形で実現できる。ロボットが現場で遭遇した課題を設計者がオンラインで試行錯誤により学習させ、その結果を要素行動として積み上げていくと、半ば規則的、半ばランダムな複雑系の世界で機能できるようなロボットが生まれてくる（図8）^{14), 15)}。

図9は、ローズウォールのバックハンド・ストロークにおける横移動のスタート直後の挙動を示す¹²⁾。

図10は、図9と移動方向が逆であるが、脚部10関節の2足歩行ロボットによる地面を蹴らない俊敏な横移動（ナンバ・サイドステップ）である。右膝を曲げて右脚を上げながら右脚を開くと、身体の重心が右へ倒れ込むことになり、右へ横移動する。体重をできるだけ支点（左足）に残さないで転倒力を利用して右横へ移動している。支点となる足関節の負担が少なく、動き始めが早く、足裏の摩擦の影響が少ないので回転が生じにくく真横の方向に移動しやすい¹⁶⁾。図9と図10の動きには共通性が見られ、ローズウォールの動きの美しさの秘密がロボットの動きから理解できる。

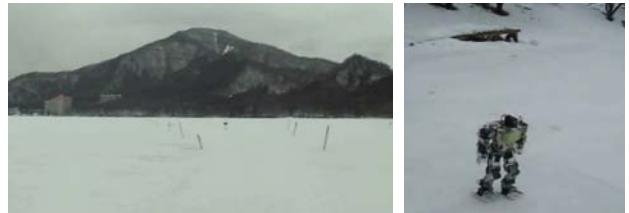


図8 棚名湖の氷雪を走る二足歩行ロボット

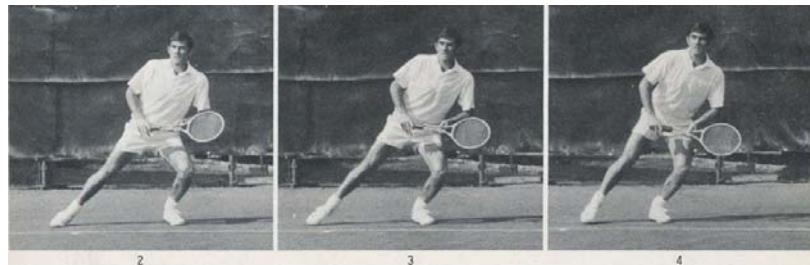


図9 ローズウォールのバックハンド・ストロークにおける横移動¹²⁾

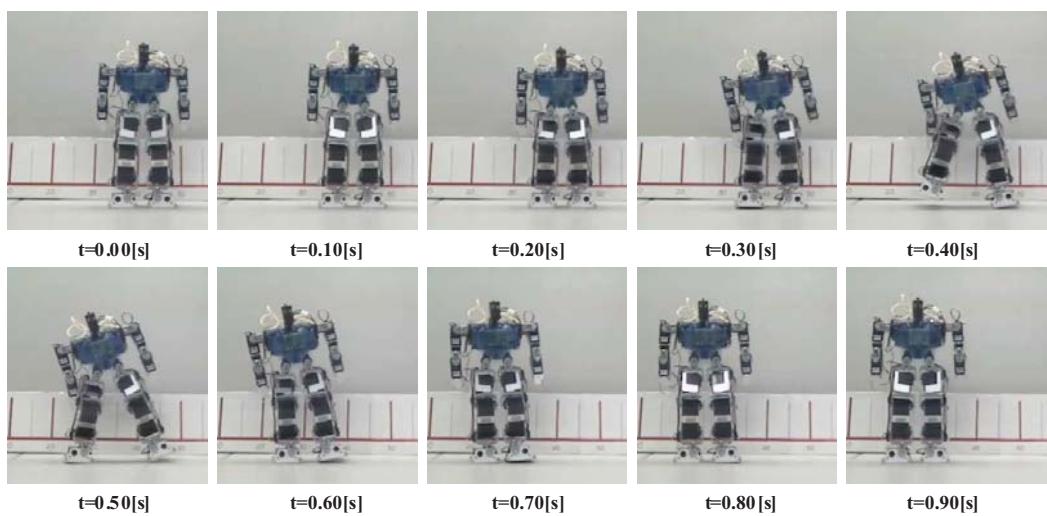
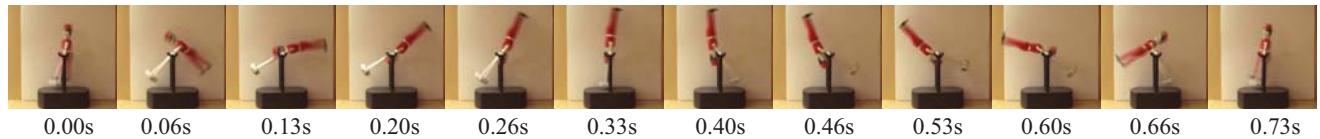


図10 二足歩行ロボットの地面を蹴らない俊敏な横移動（表示 0.1 s ごと、撮影：250fps）



(a) An example of rotational Period: 0.51 s



(b) An example of rotational Period: 0.70s

図 11 二重振り子の強制振動（模型の鉄棒人形の大車輪）におけるカオスと無秩序さ

図 11 は二重振子（2自由度）の強制振動（電磁石と永久磁石の反発により強制力を与える）の例であり、模型の鉄棒人形が大きい初期角度を与えられて大車輪を行うときのほぼ 1 回転の間のコマ写真である。強制力が一定であるのに周期（この例では 0.51 秒と 0.70 秒）も振幅も毎回微妙に異なり、周期性と無秩序さが同居する複雑系である⁶⁾。すなわち、大振幅の振動や回転運動になるとカオス挙動がみられる。2 リンクモデルでもカオスになる鉄棒運動の力学と制御は未解決であり、2 リンクモデルでの最近の研究があるが、まだ計算機シミュレーションの段階であり、実験との対照はない¹⁷⁾。理論と実応用のギャップを埋めるために頑健なロバスト制御の研究が 20 年余り盛んに行われてきたが、非線形性が線形モデル集合で取り扱われているための限界があり、物理的な特性を十分考慮した超ロバストな展開が期待されている¹⁸⁾。

3 テニスラケットの性能予測（その 1）

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（規則ではなく経験的に）決まっていたので、自分に合ったラケットも経験的に自然と決まつくるものであった。しかし、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。1976 年に 110 in² のデカラケ、1987 年に従来の 4 倍近くまでフレーム剛性を高めた厚ラケ

図 12 筆者愛用の晩年の木製ラケット(68 in², 375 g)

図 13 最初に使用した複合材製ラケット 2 種

などの革新的なラケットが現れた。

図 12 は、木製ラケット時代晩年の筆者の愛用品である。図 13(a)は筆者が最初に使ってみた複合材ラケット 2 種であり、左が厚ラケ（図 13(b)）、右が標準的なフレーム厚のラケット（図 13(c)）である。

木製と違って複合材製ラケットの選択は難しく、自分で調べてみようと思い立ったのがラケット性能研究のスタートであった。衝突の理論とハンマリン

グ法によるボール・ラケット系の実験モード解析(図14)により剛体運動と振動特性を調べ、動力学・設計のための高度コンピュータ利用に関する国際シンポジウム1989で動的設計指針を発表した。さらに、1989年に友末亮三先生(現、安田女子大学)が中心になって立ち上げた第1回日本テニス研究会に参加する機会があり(図15)、テニスラケットの共同実験、さらにプレーヤー上肢系に伝わる衝撃振動の研究に進展した(図16)。テニス研究会は1994年にはテニス学会へと発展した。

試行錯誤でラケット研究にのめり込み始めた頃、棚橋良次氏(当時、ヤマハ(株)スポーツ事業部研究室長)と出会うことになる。これまでの研究を振り返ってみると、これが決定的に好運だったことに気づかされる。貴重な情報や用具類の提供、奨学金の形での援助をいただいたうえ、以下のような極めて貴重な研究テーマを設定していただいた。結局、私は、このアドバイス通りにやったに過ぎないことが最近になってよくわかった。参考のために棚橋氏のメモ(手紙)を無断で以下に簡単に紹介したい。

『一般論としては、①ラケット外形寸法、②質量分布、③フレームの剛性分布、④ガットの面圧分布(メッシュの粗さとガットテンション)、⑤ポールの変位一カ特性(非線形)、などの物理特性に対して、ボールがある速度とある角度でラケットと衝突した瞬間からリリースする迄の間にラケットがどのように挙動するか、またボールの速度とスピンドラゴンかがクリアになれば、これは理想であり期待されるところもあるが、何と云つても挙動にかかるFactorが多く、莫大な実験と歳月を要することになることが予想される。

当社の力で色々進めてきた苦い経験から、例えば以下のような絞り込んだテーマにした方が、研究としての成果が出易いのではないかと思い書いてみます。

課題1. 飛びをよくするにはどのような物理特性を最適化すればよいか?

条件: ボールガット系の非線形性を考慮の上に考える。物理特性は、質量分布、剛性分布、ガット面圧分布等で振動モード絡みでスイートエリア(反発係数分布)、打撃の中心、スイートスポットの位置がど

う定まるか。

課題2. 打球感と物理特性の関係について

人間系を含めると、振動が大きくクローズアップしてくる。

課題3. ボールのコントロール性能と物理特性の関係について

スピンドラゴンが研究の課題としてクローズアップしてくる。

等が考えられます。』

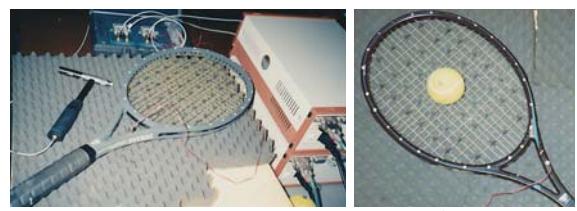


図14 ハンマリング法によるラケット系の実験モード解析

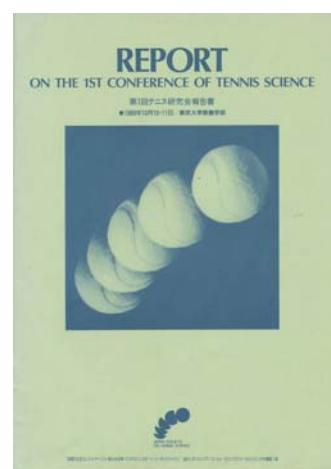


図15 第1回日本テニス研究会(1989年10月)

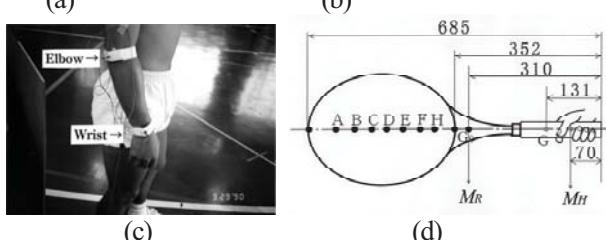
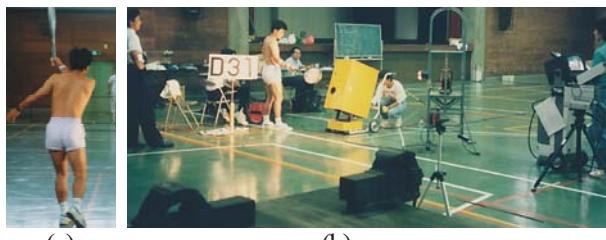


図16 日本テニス研究会での共同実験(1990年)

上記の課題 1 と課題 2 については、運良く比較的早い段階で、それなりの結果が出たように思う¹⁹⁻²²⁾。テニスの研究で日本機械学会賞（論文）¹⁹⁾もうれしい誤算だった。高塚政則氏（当時、ヤマハ（株）の同研究室）にはラケットの手配、議論など、大変お世話になった。また田中喜八郎先生（当時、埼玉大学）の著書²³⁾において「テニスラケットの特性を長い間研究され、初めて手で握ったラケットの境界条件を明らか（フリーフリー、空間に浮いた境界条件）にしました」と筆者の研究が紹介されたことも大変うれしかった。ラケットハンドルを万力などで固定してボールを衝突させると、実用速度以下でもラケットは破損する。神田芳文先生（成蹊大学）には共同研究としてハンドル部の境界条件の影響について計算機シミュレーションによりさらに詳細に検討²⁴⁾してもらった。この論文には大変興味深い結果が示されているが、英文ではないために、外国の研究者には十分に知られていないのが残念である。

課題 3 は難問であり、この問題の結論が出るのは、2004 年にテニスを愛する街場の発明家の沖本賢次氏（（有）サンアイ）との偶然の出会いまで待たなければならなかった。ヤマハ（株）は 1997 年にテニスラケット製造から撤退したので、課題 3 については、役に立つことはできなかった。

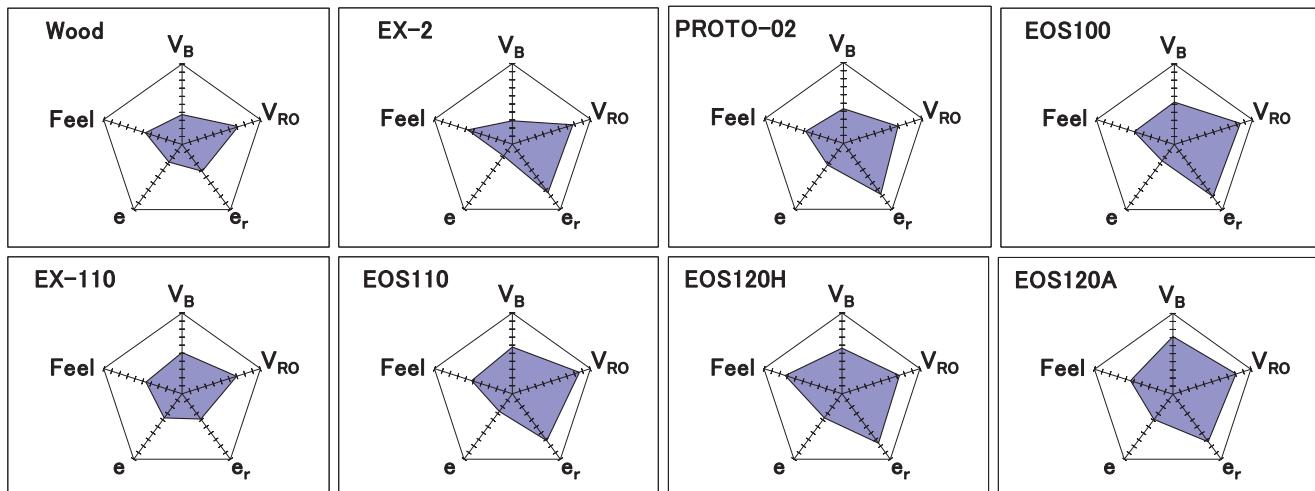


図 18 物理特性の異なる種々のラケットの性能予測と相対評価（中心を外れたラケット面先端側でフォアハンド打撃したとき）、 e_r : 反発係数、 e : 反発力係数、 V_{RO} : ラケット・ヘッド速度、 V_B : 打球速度、Feel: 手に伝わる低衝撃振動。

図 17 は、ラケット性能予測に用いているフォアハンドグランドストロークモデルであり、図 18 は、木製ラケット時代の女子トッププロのラリーにおけるヘッドスピードを参考にして、肩関節トルク $N_s = 56.9 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、インパクト直前のボール速度 $V_{BO} = 10 \text{ m/s}$ を与えた場合のラケット性能を相対評価した例である²⁵⁾。反発係数分布 e_r 、反発力係数 e 、ラケットヘッド速度 V_{RO} 、ボールの飛び V_B 、さらに打球感も示している。従来型重量バランスのラケットに比べて超軽量ラケットのボールの飛びが良い。これはラケット速度が増したことによる。オフセンター打撃では厚ラケのパワー（打球速度）の向上が見られるが、図 13(b)の筆者のラケットに見える中心付近の打点領域では厚ラケのメリットはほとんどない。

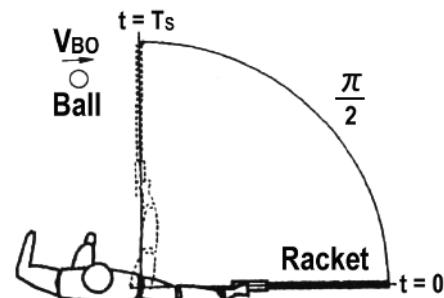


図 17 スイング・モデル（グランド・ストローク）

2003年、マッケンローら元トッププレーヤー数人が国際テニス連盟(ITF)に対して、最近のラケットのプレーへの影響力を抑える対策を要求した。「グリップ内部にチップを埋め込んでボールに当たった瞬間にラケットが堅くなるようなものまである」と彼が指摘した圧電素子と制御回路を組み込んだラケットが図19(インテリファイバラケット IS10)である。図20の(a)が木製、(b)がIS10のパワー(打球速度)に関するスイートエリアであるが、差異はそれほど大きくない。簡単なスイングモデルによるハイテクラケットのパワー予測結果は、木製ラケットと比較して、プロの打撃でも、ラケット面センターで打撃したとき5%, ラケット面の極端な先端寄りで打撃したとき14%高い程度である。ラケット性能の変化よりプレーの変化の方がはるかに大きいように見える。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ていることになる²⁶⁾。

4 テニスラケットの性能予測(その2)

ITF主催のテニスの科学技術に関する第1回国際会議(TTS)が2000年8月にロンドン郊外のRoehamptonで開催された。全英(ウィンブルドン)テニス選手権予選が行われる町である。講演者70数名を含む250名の研究者やテニス協会関係者が15

カ国以上から参加した。用具、スポーツ科学、施設、ゲームの4つのセッションが元世界チャンピオンの名前にちなんだAgassi, Becker, Connorsという3会場で行われ、活発な討論が行われた。話題の中心は、世界各国のスポーツ・レジャーの現状を調査した研究と新しく公認されたラージボールの影響についての研究であった。これらの研究にはITFや全米テニス協会(USTA)が助成しており、ITFのCoe氏による基調講演「テニスにおける技術と伝統の調和」は、今後のスポーツ工学の社会への寄与を考えるときに多くの示唆を与えてくれた。

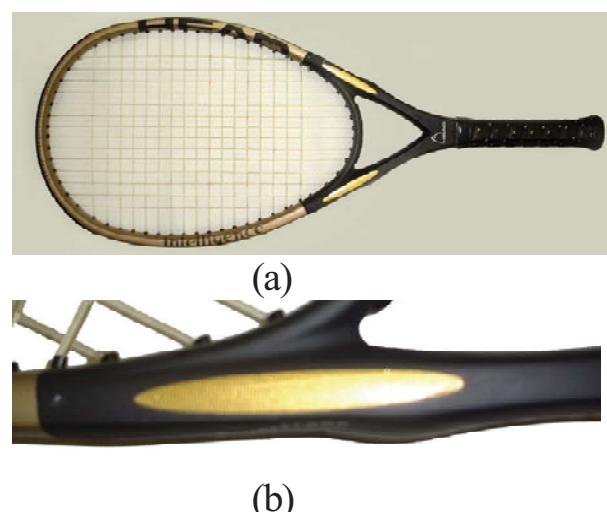


図19 ラケット首部に圧電素子を内蔵したインテリファイバーIS10(115 in², 241 g, 27.75 in)

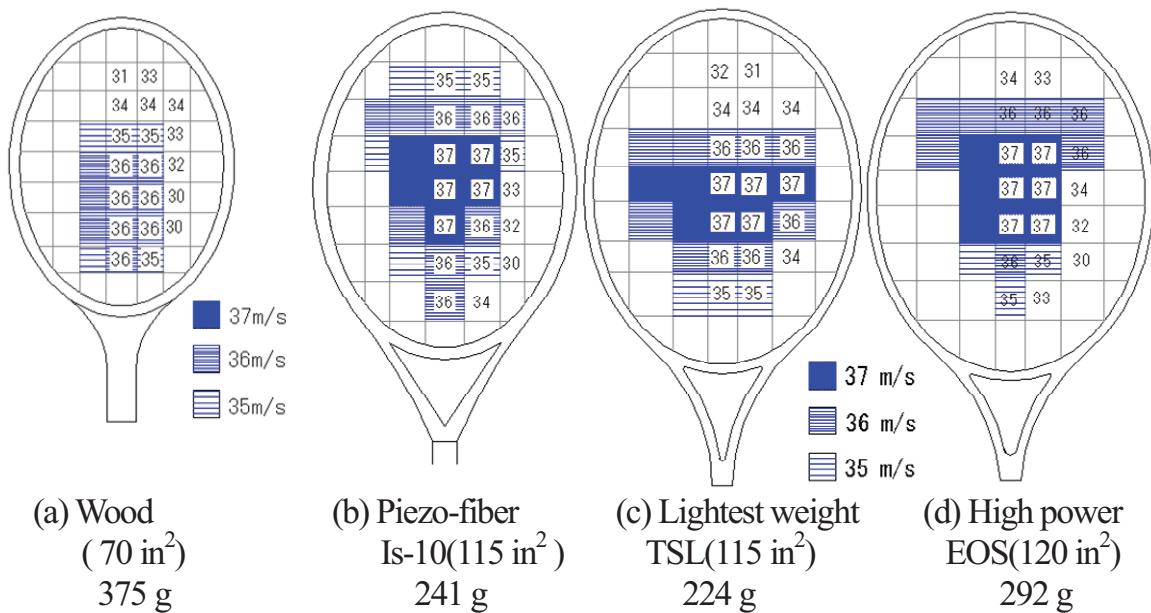


図20 パワー(打球速度)に関するスイートエリアの予測(肩関節トルク: $N_s = 56.9 \text{ Nm}$, インパクト直前のボール速度 $V_{BO} = 10 \text{ m/s}$)

ラージボールの導入は、男子のテニスがスピード化が進んでラリーが続かなくてつまらないという状況に対する歯止めであり、プレーヤにとっても観客にとってもテニスの魅力と楽しみを増そうという意図である。我々もITFの依頼でプレーヤーの上肢の衝撃振動への影響に関して研究報告を提出した。会議の運営は完璧だった。会場の隣のコートでいつでもテニスができるし、温ブロードン前哨戦大会が開催されるテニスクラブでの参加者によるデビスカップ（国別対抗）テニス大会、No.1コートが見える温ブロードン大会会場での晩餐会など、スポーツの会議らしくて楽しかった（図21）。

ラージボールは、質量や反発係数の規定は変えずに、従来のボールより直径を約8%大きくしたものであり、ITF主導によりラージボール導入の影響に関する一連の研究が世界の数カ所で行われた。（財）スポーツ医・科学研究所において友末、村松憲（慶應義塾大学）、吉成啓子（白百合女子大学）、柳等（現、北見工業大学）の諸先生の協力を得て我々も実験を行い（図22）、プレーヤーの上肢に加わる衝撃振動におよぼす影響を実験および衝突解析により定量的に明らかにした²⁷⁾。オフセンタ打撃でもセンタ打撃でも、また、ストリングス初張力が異なる場合も、ラージボールとノーマルボールには大きな違いがないという実験結果を理論的に裏付けることができた。ラージボールは、ノーマルボールの場合に比べて、衝突力はわずかに小さく、接触時間はやや長い。したがって、ラリーにおけるラージボールは空気抵抗の増大により速度が低減し、その結果、インパクト条件が同じであれば、腕系の衝撃振動も低減することになる。

ラージボールは、クラブルベルの試合から国別対抗のデビスカップ、フェドカップの地域グループなどで試験的に使用されたり、日本でも引退直後の伊達公子選手が朝日BS開局記念番組i-SPORTSの初回放送で取り上げてくれたりしたが、温ブロードン大会のような大きいトーナメントではまだ使用されていない。卓球の場合は比較的スムーズに導入されたが、テニスの場合は、ラージボールは重いという先入観もあり、特に米国女子プロの反対が強いと

言われている。



(a) Visit Wimbledon Tennis Court



(b) with Italian racket craftsman and his son in the congress banquet



(c) in the Tennis Researcher Devis-Cup tournament with Prof. Casolo

図21 国際テニス連盟（ITF）1st Tennis Science & Technology 2000

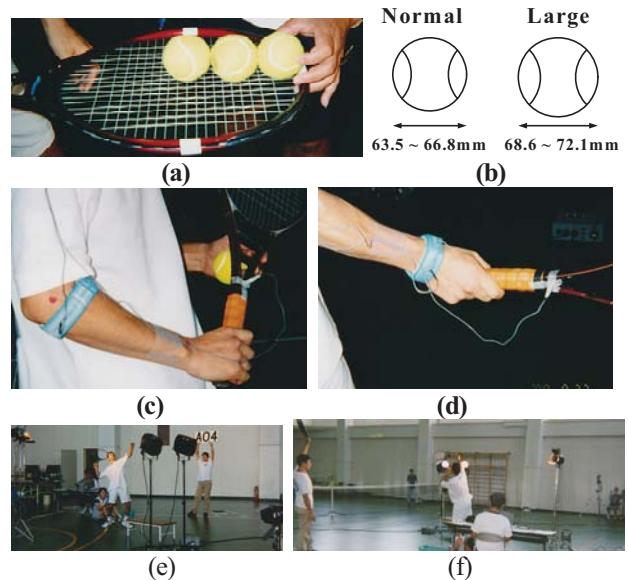


図22 ITFからの委託研究：ラージボールのインパクト実験（スポーツ医・科学研究所にて）

5 トップスピンの謎を解く：非デカルト的展開

表面がギザギザしたテニスラケットのガット（ストリング）よりツルツルしたガットの方がボールに回転がかかりやすことを 2005 年のスポーツ国際会議で発表した。従来のスピニ仮説とは逆に、ストリング表面の摩擦が小さいほど、トップスピン打撃において縦糸と横糸の交差点がずれてボールが食い込み、縦糸が戻るときのストリング面内復原力によりボールのスピニ量が増すこと（図 23），縦糸と横糸の交差点にノッチのできたストリングスでも交差点を潤滑するとボールのスピニ量が回復し、接触時間も長くなること、接触時間が長くなるとラケットや手に伝わる衝撃振動も低減すること、すでに世界のトップ・プレーヤーは天然ガットよりもツルツルで硬いポリエチレンを使っていていることを示し、従来のスピニガット設計概念を 180 度転換すべきことを主張した²⁸⁾⁻³²⁾。

これがトリガーとなって、ITF³³⁾、The United States Racket Stringers Association³⁴⁾などで議論や実験がなされ、最近、テフロン加工、扁平形状断面、コーティングなど、滑りやすいメカニズムの利点を活かしたガットが国内外メーカーにより次々に市販され始めた。最近の新しいガットが極端なスピニの変化をもたらすとしたらルール違反とすることを ITF は明言している³³⁾が、現時点ではむしろ単調な試合を面白くし、プレーヤーの障害防止に貢献しているはずである。

この研究は、沖本賢次・啓子夫妻のテニスの現場から始まった。テニスのプレー中にしばしばガットがずれる。ズレを直すのがめんどくさいねと奥さんが旦那に言ったら、エンジンオイルでも塗つとけと旦那が言ったことが国際特許となる潤滑剤開発の始まりである。奥さんが実際に試してみたところが偉

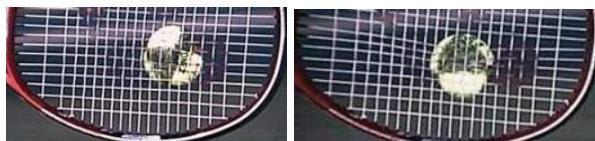


図 23 テニスボールがガットに接触したときの様子。

通常のラケット（左）より潤滑剤を塗ったラケット（右）の方が、縦に張ったガットの横ずれが大きい。

い。過去に旦那が工場でバイクの組み立ての仕事をしていたこともエンジンオイルの発想につながる。物語の詳細は省略するが、スポーツの研究にはこのような側面が多い。

実験ではばらつきも多く、必ずしもそのようにならないのに、ストリング表面の摩擦が大きい方がスピニがかかるというのがそれまでのストリング・メーカーと研究者の常識であった。先入観や一般常識にとらわれない沖本夫妻の好奇心が新しい発見を生んだのである。

筆者の尊敬するプロテニスプレーヤ鈴木貴男選手のテニスのプレーにも、元プロテニスプレーヤ杉山愛選手のプレシャーのかかるときのショットにも、素人だからこそ見える研究テーマがある。ロボットを使った実験から、身体に負担の少ない（腰を痛めにくい）プロテニスプレーヤのクルム伊達公子選手の鋭い打法の合理性が理解できる。

ロボティクスの分野でも「ロボティック・サイエンス」という特集が組まれ、従来の学術論文の典型的な記述形式では表現しきれない論文の新しい方法論や形式などが模索されている³⁵⁾。複雑精妙な身体運動は、古典的なロボティクスの運動制御理論では説明できず、ロボティクスの教科書を 1 ページ目からすべて書き換えなければいけないのではないかと考えているというロボット研究者もいる³⁶⁾。

スポーツ等の身体の運動というものが、音楽や絵画といった芸術と同じく、実に多くの微妙な感覚によって成り立っており、それらについて現代の科学では解説することが不可能であると甲野が指摘している³⁷⁾。さらに、「科学」とはいったい何なのか、その本質的な問い合わせがなされないまま、その重要性を声高に叫んでいるが、「科学」とは本来、方法論の一つにすぎないはずのものであり、「身体各部に同時に並列で起こる運動を、より有効に組み合わせて行う動きを的確に把握し、認識することは、原理的にはきわめて難しいと思う」と、ロボットや身体性認知科学で著名なファイファー（チューリッヒ大学）のコメントを添えて書かれている³⁸⁾。

人間の動きの研究には生命や人間を含めた系の運動制御に関する広く深い今後の発展が必要であろう。

100 年前には飛行機もなく、50 年前にはコンピュ

ータもなかった。研究生活も店じまいの時期に、突然、共同研究が始まったりする。実世界は何が起こるかわからない。研究テーマは向こうから勝手にやってくる。もうしばらく、科学技術・文明・文化の価値をエントロピー的視点で考えながら研究を楽しみたいと思う。

おわりに、ローズウォールの写真の掲載を快諾いただいた日本テニス協会副会長の川廷栄一氏と講談社および雑誌の表紙および写真の掲載を許可いただいたベースボールマガジン社と日本スポーツ企画出版社に感謝する。

文献

- 1) Gesell, A., *The embryology of behavior*, Harper, New York, 1945.
- 2) Newell, K.M., van Emmerik,R.E.A., The acquisition of coordination: preliminary analysis of learning to write, *Hum Mov Sci.*, Vol.8, 1989, pp.17-32.
- 3) 多賀巖太郎, 脳と身体の動的デザイン, 金子書房, 2002.
- 4) 川副嘉彦 他, 人間オペレータの個人差と習熟度のカオス・エントロピ解析とニューラル制御による獲得, 日本機械学会論文集 C 編, 74(741), 2008, pp. 1355-1363.
- 5) 川副嘉彦 他, 人間オペレータの技量のカオス・エントロピ解析とファジィ制御による獲得(倒立振子の安定化制御における時系列データからの個人差の同定), 日本機械学会論文集 C 編, 75(753), 2009, pp.1412 - 1420.
- 6) 川副嘉彦 他, 人間オペレータの個人差と習熟度のカオス・エントロピ解析とファジィ制御による獲得, 日本機械学会論文集 C 編, 76(765), 2010, pp.1362-1371.
- 7) シュレーディンガー (岡小天・鎮目恭夫訳), 生命とは何か, 岩波書店, 1994 (訳 2008)
- 8) Murphy, M. & O'Neill, L. (堀 裕和 他訳), 生命とは何か それからの 50 年, 培風館, 1995 (訳 2008)
- 9) 養老孟司・甲野善紀, 古武術の発見, 光文社, 2003, pp.269-270
- 10) 第 8 回スマッシュ杯, スマッシュ, 6(66), 1979, pp.10-12, p.208.
- 11) ふくろうバード・テニス・トーナメント, テニスマガジン, 11(125), 1980, pp.84-85.
- 12) ケン・ローズウォール (構成・写真:川廷栄一), ローズウォールのテニス, 講談社, 1975.
- 13) ケン・ローズウォール (訳:川角絢子, 写真:川廷栄一), ローズウォールのゲーム, 講談社, 1976.
- 14) 川副嘉彦 他, 「ヒューマン・ロボット学」事例研究 (移動ロボットと二足歩行ロボットの包摂構造化), 日本機械学会 2006 年度年次大会講演論文集(7), No.06-1, 2006, pp.29-30.
- 15) 川副嘉彦 他, 氷雪を走る人間型二足ロボット「源兵衛」のロバスト性のメカニズム, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, No.08-1, Vol.5, 2008, pp.165-166.
- 16) 川副嘉彦・伊倉良明, ねじらない・うねらない・踏ん張らない「ナンバ・テニス」の研究 —「軸を消す・軸を作らない」不安定が速さ・威力・ロバスト性を生む—, テニスの科学, 17, 2009, pp.32-33.
- 17) 劉 大生, 山浦 弘, 遅延フィードバック制御を用いた 2 リング鉄棒ロボットの大車輪運動の実現, 日本機械学会論文集 C 編, 76(767), 2010, pp.1700- 1707.
- 18) 原 辰次, 制御における(超)ロバスト性, 21世紀 COE 情報科学技術戦略コア:超ロバスト設計原理プロジェクト WS「超ロバストを探る」, 2005, pp.1-10.
- 19) 川副嘉彦, 手で支持したテニスラケットの実験的同定とボールとの衝突における振動振幅の予測, 日本機械学会論文集 C 編, 61(584), 1995, pp.1300-1307.
- 20) Kawazoe, Y. & Tanahashi, R., Prediction of Contact Forces, Contact Times, Restitution Coefficients and Racket Stabilities during Tennis Impact with the Effect of Racket Mass and Mass Distribution, *Sports Dynamics: Discovery and Application* (Edited by A.Subic, P. Trivailo & F.Alam), RMIT Publishing, Melbourne, 2003, pp.51-56.
- 21) Kawazoe, Y. & Tanahashi, R., Sweet Spots

- Prediction in Terms of Feel with the Effect of Mass and Mass Distribution of a Tennis Racket, *Sports Dynamics: Discovery and Application*, (Edited by A.Subic, P. Trivailo & F.Alam, RMIT Publishing), Melbourne, 2003, pp.57-62.
- 22) Kawazoe, Y., et al. , Experimental and theoretical criticism of the effectiveness of looser strings for the reduction of tennis elbow. *Tennis Science & Technology* 2 (edited by S. Miller), International Tennis Federation, 2003, pp.61-69.
- 23) 田中喜八郎, 観察とモデリング, 丸善, 2004, p.170.
- 24) 神田芳文, 川副嘉彦, テニスにおけるボール・ラケット系の衝突現象の解析 (ラケットハンドル部の境界条件の影響), 日本機械学会論文集C編, **61**(582), 1995, pp.597-605.
- 25) Kawazoe, Y., Mechanism of High-Tech Tennis Rackets Performance. *Theoretical and Applied Mechanics*, Vol.51, 2002, pp.177-187.
- 26) 川副嘉彦, マッケンローのラケット・ハイテク化批判をどう理解すべきか—テニスラケットのハイテク化とテニスのパフォーマンス), テニスの科学, **13**, 2005, pp.18-21.
- 27) Kawazoe, Y. et al., Experimental Study of the Larger Tennis Ball Effects on the Comfort of the Wrist and the Elbow, in *The Engineering of Sport 4* (eds Ujihashi, S. & Haake, S.), Blackwell Science, Oxford, 2002, pp.192-199.
- 28) Kawazoe, Y. & Okimoto, K., Super High Speed Video Analysis of Tennis Top Spin and Its Performance Improvement By String Lubrication, *The Impact of Technology on Sport* (ed. A. Subic, S. Ujihashi), ASTA Publishing, 2005, pp.379-385.
- 29) Kawazoe, Y. & Okimoto, K., Tennis Top Spin Comparison between New, Used, and Lubricated Used Strings by High Speed Video Analysis with Impact Simulation, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, **57**, 2008, pp.511-522
- 30) 川副嘉彦, テニスラケットのガット インタビュー・取材協力), 日刊工業新聞, 2006年1月20日掲載, p.27
- 31) 川副嘉彦, アインシュタインの眼 : テニスを科学する (番組作成協力・監修), NHK-BS-hi, 2008年2月26日放映.
- 32) 川副嘉彦, 武田幸宏・中川慎理, テニスラケットのスピンドルの影響 (スピンドル量・接触時間・打球速度の超高速ビデオ画像解析), 日本機械学会論文集 C 編, **76**(770), 2010, pp.2646-2655.
- 33) Speckman, J., *The New Physics of Tennis:Unlocking the mysteries of Rafael Nadal's killer topspin*, The Atlantic, <http://www.theatlantic.com/magazine/archive/2011/01/the-new-physics-of-tennis/8339/> (2011年3月31日確認)
- 34) Lindsey, C., *String Lubrication & Movement in Spin*, Tennis Warehouse University (TWU) Web Pages, http://twu.tennis-warehouse.com/learning_center/spinandlube.php (2011年3月31日確認)
- 35) 國吉康夫, ロボティック・サイエンスとは何か, 日本ロボット学会誌, **28**(4), 2010, pp.370-374.
- 36) 甲野善紀・内田樹, 身体を通して時代を読む, 文藝春秋, 2010, pp.310-313.
- 37) 甲野善紀, 武術とスポーツの身体操法の違い, 科学, **74**(6), 2004, pp.772-773.
- 38) 甲野善紀, 卷頭エッセイ : 本質的で深い研究を, 科学, **79**(5), 2009.