

テニスラケットの把持およびコントロール動作 に関する生体力学的解析*

高野 剛^{*1}, 原 利昭^{*2}

Biomechanical Analysis for the Grip-Firmness in Tennis Stroke Production and Impact

Tsuyoshi TAKANO and Toshiaki HARA

It has been generally accepted that biomechanical analysis is an important factor in the prevention of sports injuries and improvement of sports skill. In all sports in which the players use rackets, the first problem all prospective players must address is the manner in which the racket is held. Tennis players continually seek added power, control and a reduction in the unpleasant vibrations produced by offcenter impacts. It is believed that a grip-firmness on the racket at impact is one of the most important factors in determining the effectiveness of the return and that ball control of skilled players is significantly dependent on the level of grip pressure. In this study, a contact pressure measurement system using electric conductive rubber sensors was developed to study the manner of how a player can get to the ball as quickly as possible while maintaining an optimal level of grip pressure to give control and power for the stroke. The direct linear transformation technique was also applied to the motion analysis of the upper extremity during the forehand stroke. It was found that skilled players hold the racket with three fingers and clasp it gently in the palm of their hand during strokes.

Key Words: Biomechanics, Sports, Tennis, Racket, Grip Pressure, Pressure Sensor

1. 緒 言

スポーツを科学的に解析することは、スポーツ技術の客観的評価やプレーヤ技術の向上にとって重要であるだけでなく、スポーツ傷害のメカニズムを解明し、その防止法を考慮する上でも極めて重要である。特に、テニス、ゴルフおよび野球に代表されるように人間が用具を手に握り、ボールを打つスポーツでは、インパクトに伴うコントロールがスポーツの上手下手を決定する要因の一つといわれている。従来、この種の用具を使用するスポーツでは、用具単体の機械的特性を調べた報告⁽¹⁾やプレーヤの動作に関する報告例⁽²⁾などが数多く見られる。しかし、テニスをはじめとするこれらのスポーツでは、コーチもプレーヤも用具をいかに握るかが極めて重要な点と認識しているが、握りにおけるグリップ感覚は脳の情報処理メカニズムに関係するため測定は極めて困難であり、いまだ未知の部分が多いようである。したがって、握り部の状態を科学的に究明した研究例は少なく、特に、ボールコン

トロールに深く関連性を有するテニスラケット、ゴルフクラブ、バット等のグリップ圧力および把持について用具コントロール動作的観点から詳細に検討した研究例は極めて少ない。

そこで本研究では、テニスにおいてプレーヤはラケットを「どのように握り」、ボールを「どのように制御」しているのか、すなわち「ラケット把持およびコントロール動作」を生体力学的に解析することを研究目的としている。ここでは、ストローク動作時のラケット把持に深く関係するラケットを握るグリップ圧力に着目し、ストローク動作に伴うそれらの動的変化を感圧導電ゴムセンサを用いた測定システムにより定量的かつ連続的に測定した。熟練プレーヤのフォアハンドストローク動作におけるボールコントロールのためのラケット把持およびコントロール動作を生体力学的に解析するためグリップ圧力を詳細に検討し、さらに、ラケットおよび上肢の動きを三次元的に測定した。

2. 実験方法

2.1 グリップ圧力測定システム グリップ圧力の測定に用いた圧力センサは感圧導電ゴムシートを利用して作製した。感圧導電ゴムは作用圧力の増加に伴って電気抵抗値が減少する特性を有しており、厚さは

* 原稿受付 1996年10月18日。

^{*1} 正員, 新潟大学大学院 (〒950-21 新潟市五十嵐2ノ町8050)。

^{*2} 正員, 新潟大学工学部。

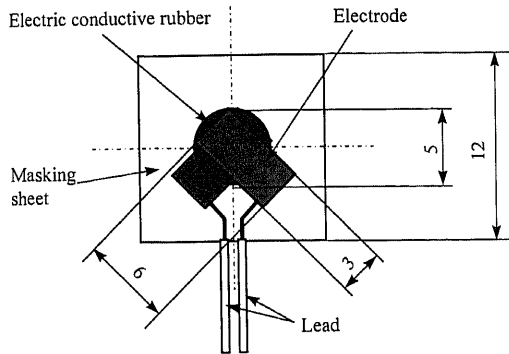


Fig. 1 Geometry of pressure sensor

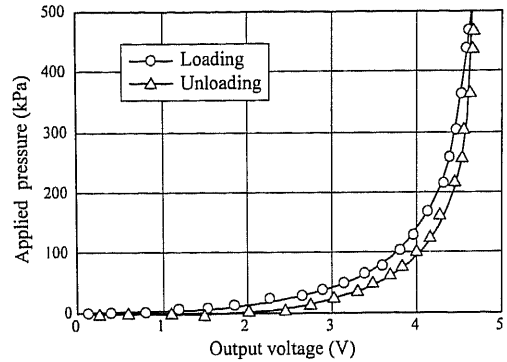


Fig. 3 Output characteristics of pressure sensor

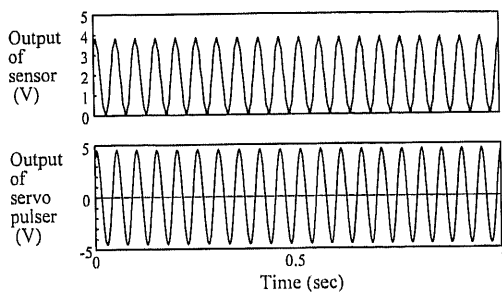


Fig. 2 Response characteristics of pressure sensor (frequency = 20 Hz)

約 0.5 mm である。図 1 はセンサの概略である。感圧導電ゴムシートを、厚さ約 0.08 mm の銅はく電極 2 枚で挟んだサンドイッチ構造である。センサを保護し、表面での摩擦力を減少するために厚さ約 0.05 mm のビニール製シートにより全面を被覆した。圧力センサの厚さは約 0.8 mm と比較的薄く、柔軟性に富み、手指掌への貼付、配置が容易である等、グリップ圧力を測定する上で最良の圧力センサと思われる。

グリップ圧力測定システムの概略は、各圧力センサの作用圧力による電気抵抗の変化を圧力センサと直列接続した固定抵抗の電圧変化として出力し、データレコーダに記録した。A/D コンバータを介してパーソナルコンピュータに入力し、圧力値に変換した。

本研究では、動的圧力を計測する必要があるためサイクリックな変動荷重が作用した場合のセンシング追従性、すなわち、周波数応答性を確認しておく必要がある。そこで、コンピュータ制御電気油圧サーボ式材料疲労試験機 [Computer Control System Shimadzu Servopulser : (株) 島津製作所製] によりサイクリックな変動荷重を圧力センサに与え、疲労試験機のロードセル出力信号に対する圧力センサの出力信号を計測

した。図 2 は、サイクリック変動負荷周波数が 20 Hz の場合の周波数応答特性を示す結果の一例である。ここで使用した感圧導電ゴムセンサは、約 20 Hz 程度までの変動負荷に対して十分な応答特性を有しており、テニスラケットを把持したときのグリップ圧力を測定する上で十分と思われる。また、個々の圧力センサの基本特性の作用圧力と出力電圧の関係を求めるにあたってはインストロン型万能試験機 [Shimadzu Autograph AG-25 TD : (株) 島津製作所製] により荷重速度 ($V=10 \text{ mm/min}$) 一定条件下で圧縮荷重を各圧力センサに与えた。図 3 は、圧力センサの作用圧力と出力電圧特性の一例である。感圧導電ゴムセンサは、わずかではあるが、負荷時と除荷時で出力特性が異なるヒステリシス (履歴現象) 特性を有している。本研究ではこれらの特性を忠実に考慮するために、以下のような手法を用いた。すなわち、センサ出力の電圧値を圧力値に変換する際、各サンプリング間のセンサ出力電圧の変化が上昇を示すときには負荷時の、下降を示すときには除荷時の作用圧力-出力特性曲線をそれぞれ利用した。

2.2 ストローク動作測定 表 1 に示すようにテニス経験歴 6~12 年を有する男子熟練プレーヤ 6 名を被験者として考慮した。図 4 に示すように、各圧力センサ 16 個を各被験者の手指掌表面に伸縮自在の医療用テープ [Steri-Drape 1050 : 住友スリーエム (株) 製] であり付けた。また、ラケットフレームのスロート部内側にひずみゲージをはり付け、これから得られる出力波形によりボールのインパクト時を確認した。インパクトに伴うラケット把持およびコントロール動作は、図 4 に示すように、ラケットフレームとグリップエンドの 5 箇所および被験者の左右の肩関節と股関節、右肘と手関節の 6 箇所にマーカを取付けて測定した。実験では、同一のラケット [RD-7 Mid-Size

Table 1 Subjects (male performer)

Subject	Age	Skilled level
A	28	9 years
B	24	9 years
C	26	11 years
D	27	12 years
E	23	8 years
F	24	6 years

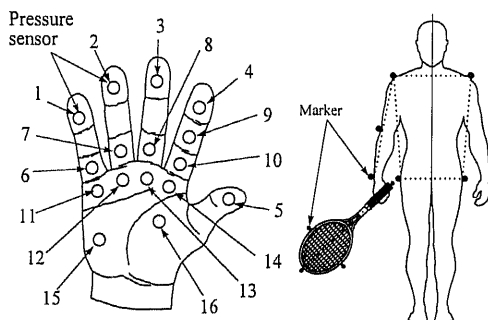


Fig. 4 Location of pressure sensors and markers

Plus: ヨネックス(株)製] を使用し、握り方をイースタングリップスタイルに統一した。また、対面コートのベースライン中央から約 10 m/s の初速度で打ち出したボールをフォアハンドストロークのフラット、トップスピンおよびスライスによって返球する場合を測定した。なお、ストローク動作は 8 mm ビデオカメラを用いて 4 方向より同時撮影した。これによって得られた映像を基に DLT 法(Direct Linear Transformation Technique)を適用してラケットおよび上肢関節部の運動を三次元的に求めた。また、ストローク動作中のグリップ圧力変化も同時に連続測定した。

3. 結果および考察

3・1 ラケットの把持 グリップ圧力の一例を図 5～7 に示す。すなわち、硬式テニス経験歴 9 年の熟練プレーヤー A のフォアハンドストロークのフラット、トップスピンおよびスライスの各動作におけるグリップ圧力の時間的変化をこれらの図に示した。

フラットの場合には、ストローク全般にわたって小指、環指、中指、示指、拇指の各末節骨、示指の中節骨と基節骨、第 2 中手骨頭および拇指球の各掌側面でのグリップ圧力は比較的小さく、ラケットのグリップを柔らかく包むように把持していることがわかる。また、フォワードスイングにおいてインパクトの約 0.2 秒前から小指、環指、中指の各末節骨および拇指球の

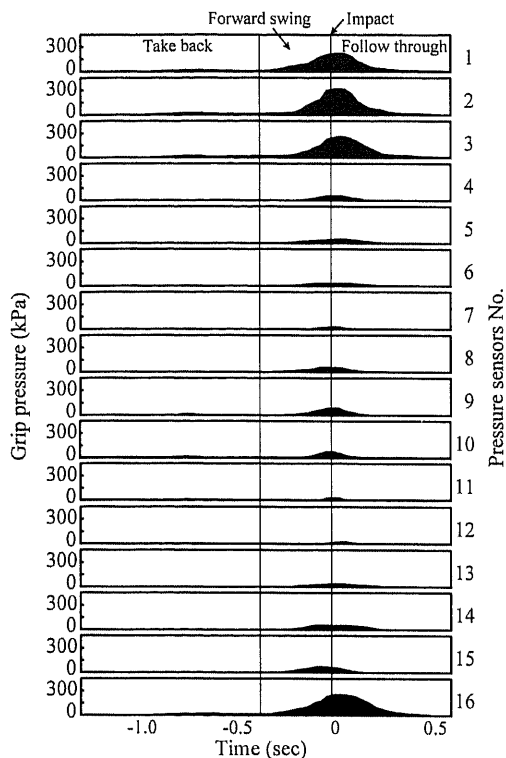


Fig. 5 Grip pressure characteristics during flat forehand stroke

掌側面で主としてグリップ圧力の急激な上昇が確認された。また、インパクトの約 0.1 秒後にグリップ圧力は最高となり、その後、低下してインパクトの約 0.3 秒後のフォロースルーにはほとんど零となった。このことから、インパクト時にグリップに伝わる衝撃力に備えて小指、環指および中指の末節部によってラケットを把持し、堅固な握り方に移行することが確認された。また、トップスピンおよびスライスの場合もフラットの場合と同様に、ストローク全般にわたりグリップを手指掌で包み込むように握り、インパクトに備えて小指、環指および中指の末節部によって堅固な握り方に移行することが確認された。

これらの握り方の結果から、プレーヤーはラケットスイングとインパクトを考慮して把持をコントロールしていると思われる。そこで、図 5～7 の場合と同じ被験者 A によるフラット、トップスピンおよびスライスの全測定点におけるグリップ圧力の総和から求めた把持力およびラケット先端部の速度を図 8 に示す。ラケット把持は、ストローク動作におけるスイングに伴うラケットヘッド速度に対応するように把持力をコントロールしていると思われる。また、インパクトの瞬

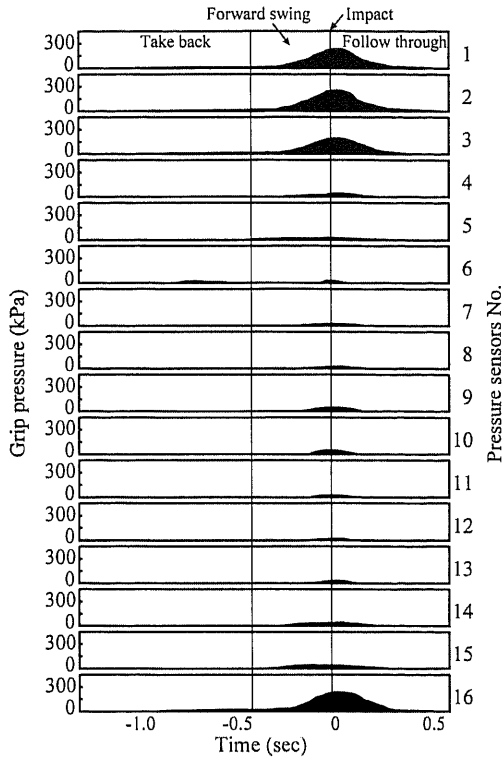


Fig. 6 Grip pressure characteristics during topspin forehand stroke

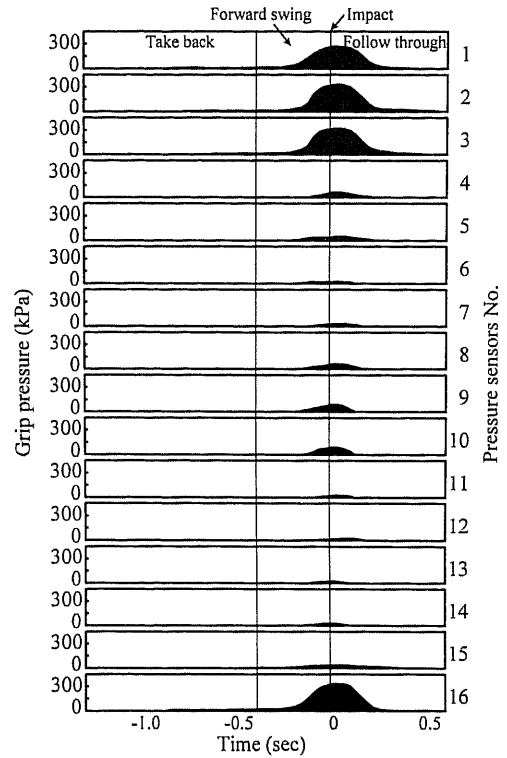


Fig. 7 Grip pressure characteristics during slice forehand stroke

間を想定してグリップに伝わる衝撃力に耐えるように把持力を急激に増加させていると考えられる。

他の被験者においてもこれらのストローク動作中のグリップ圧力変化特性は、同様であり、このことから、熟練プレーヤーのラケット把持は、ほぼ同じであると思われる。

3.2 ラケットのコントロール動作 図9にボールをコントロールするためのラケットの動きを示した。縦軸には、同一被験者Aのストロークにおけるラケット先端、右肘関節、右肘関節および右肩関節の各部位の高さ変化と被験者の身長により除した高さ変化の無次元量をそれぞれ示した。また、図10には上肢の各関節角度変化と体幹の回旋を示した。なお、各関節部の角度は以下のように考慮した。すなわち、ラケット先端とグリップエンドのマークを結ぶ直線および手関節と肘関節のマークを結ぶ直線のなす角度を手関節角度、手関節と肘関節および肩関節のマークを結ぶ直線がなす角度を肘関節角度、さらには肘関節、肩関節および股関節のマークを結ぶ直線がなす角度を肩関節角度とそれぞれ定義した。また、左右の肩関節のマークを結ぶ直線と左右の股関節のマークを結ぶ直線

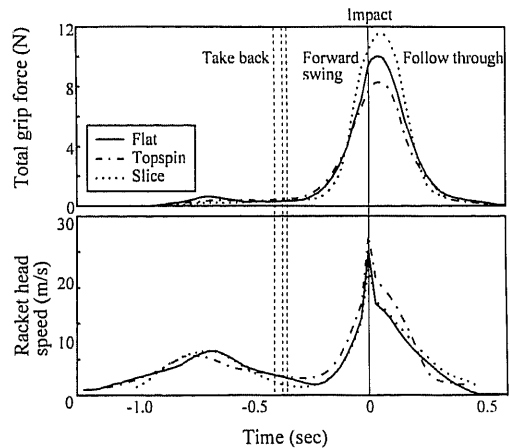
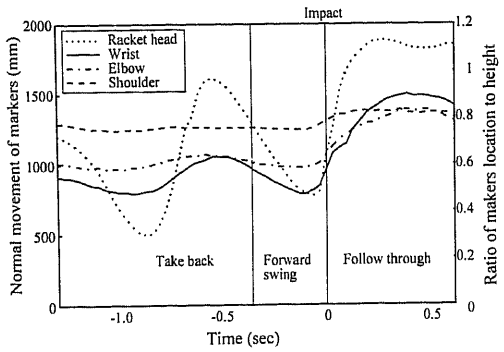


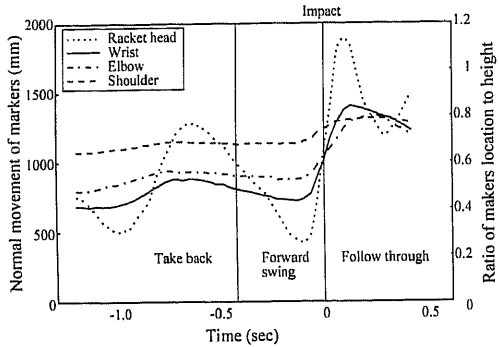
Fig. 8 Relationship between total grip pressure and racket head speed

がなす角度を体幹の回旋角度とした。

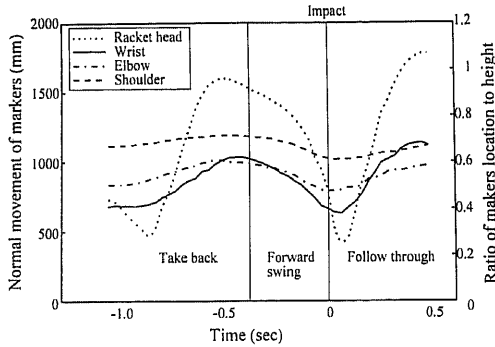
図9(a)に示すフラットの場合には、インパクトの約0.1秒前のフォワードスイング後半から、ラケット先端と手関節はともに下から上に移動し、これら二つには高低差がなく、ほぼ同じ移動であり、ラケット軸



(a) Flat



(b) Topspin



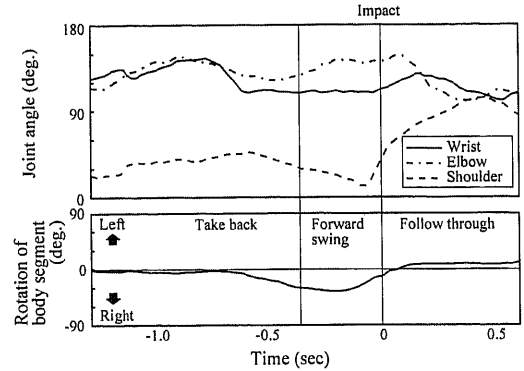
(c) Slice

Fig. 9 Racket control characteristics for forehand stroke

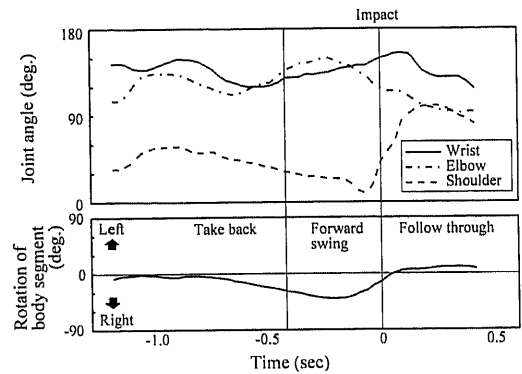
を水平に維持してスイングしていると思われる。

図9(b)に示すトップスピンの場合には、インパクトの約0.1秒前のフォワードスイング後半から、ラケット先端は手関節より低い位置に移動した後、急激に振り上げられるようなスイングでインパクトしていると思われる。

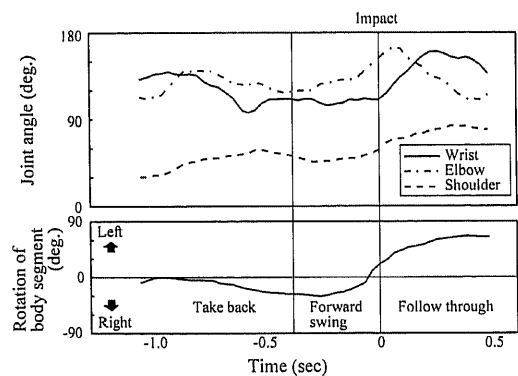
スライスの場合は、図9(c)に示すように、インパクトの約0.5秒前のテイクバックから約0.1秒前のフォワードスイング後半まで、ラケット先端は肩関節を



(a) Flat



(b) Topspin



(c) Slice

Fig. 10 Characteristics of joint angle for forehand stroke

越える位置からインパクトの約0.1秒後まで下降を続けた後、上昇する。すなわち、急激にラケットを振り下してインパクトしていると思われる。

図10(a)に示すフラットの場合には、インパクトの約0.6秒前のテイクバック後半からインパクトの間まで、手関節角度は約 110° を維持し、また、インパクトの約0.2秒前のフォワードスイング後半からは、肘関節角度も約 140° を維持することから、ラケット軸

を水平に維持し、体幹を回旋しながら上肢を振り上げていると考えられる。また、インパクト後のフォロースルーにおいては、肘を伸ばしながらラケットを振り上げるスイングを行っていることがわかる。

図 10(b) に示すトップスピンの場合には、インパクトの約 0.1 秒前のフォワードスイング後半から、手関節を尺屈させながら肘関節を屈曲させる顕著な特徴が見られた。また、フォロースルーでは、フラットの場合と同様の傾向が見られるが、急激にラケットを振り上げていることがわかる。

スライスの場合には、図 10(c) に示すように、インパクトの約 0.1 秒前のフォワードスイングから手関節角度を約 110° に維持しながら肘関節を急激に伸展している。フラットおよびトップスピンの場合とは異なり、インパクトに向けてラケットを急激に振り下ろし、フォロースルーでは、肩関節の外転・水平屈曲よりもむしろ体幹の大きな回旋が顕著であった。

以上の結果より、フラットの場合には、手関節を固定し、ボールを回転させることなく水平に打ち出すようなスイングしている。このとき、インパクトに向けてラケット軸を水平になるようコントロール動作していることがわかる。トップスピンの場合には、ボールにドライブ回転を与えるためにインパクト前後で下方より上方へラケットを急激に振り上げるコントロール動作が見られることがわかる。スライスの場合には、ボールに逆ドライブ回転を与えるためにインパクト前後でラケットを上から下に急激に振り下ろし、体幹を回旋させるコントロール動作であることがわかる。

他の被験者においてもこれらのストローク動作中の

ラケットおよび身体各部位の動きの変化特性は同様な傾向を有し、熟練プレーヤーは、ほぼ同じようにラケットコントロール動作をしていると考えられる。

4. 結 言

熟練プレーヤーによるフォアハンドストロークにおけるラケット把持およびコントロール動作をグリップ圧力および三次元的動作解析により調べ、以下の結論を得た。

(1) 熟練プレーヤーは、ストローク動作全般にわたりグリップを小指、環指、中指および手掌で柔らかく包むように握り、インパクト時には、堅固で安定した握り方をしている。

(2) フラットの場合には、手および肘関節角度を一定に維持し、インパクトに向けてラケット軸を水平になるようなコントロールを行っている。

(3) トップスピンの場合には、肘関節を屈曲させてラケットを下から上へ急激に振り上げるようなコントロールを行っている。

(4) スライスの場合には、肘関節を伸展させてラケットを上から下に急激に振り下ろすようなコントロールを行っている。

文 献

- (1) 例えば、松久 寛・ほか 5 名、モード解析によるテニスラケットの最適設計、機論, 60-577, C(1994), 189-194.
- (2) 例えば、Springs, E., ほか 3 名、A three-dimensional kinematic method for determining the effectiveness of arm segment rotations in producing racquet-head speed, *J. Biomech.*, 27-3 (1994), 245-254.