

# テニスのサーブ動作におけるキネティックチェーンの解明

平島雅也

東京大学大学院情報理工系研究科特定有期雇用教職員

## 1. 緒言

野球のピッチング動作やテニスのサーブ動作では、下肢や体幹で発生した力学的エネルギーが上肢の遠位部へ向けて次々と伝達されると考えられてきた。しかし、各関節の角速度が生じる順序は必ずしも近位一遠位の順ではないことがわかってきた(Marshall and Elliott 2000)。特に、球速に大きく貢献することが知られている肩関節の内旋が、肘関節の伸展よりも後に生じることは注目に値する。つまり、従来の「近位から遠位への連鎖」という力学的解釈は不十分であり、各関節回転が生じる力学的要因をより詳細に検討することが必要である。

多数の関節が同時に回転するヒトの身体運動では、関節の回転を引き起こす力学的要因として、①重力トルク、②筋トルク（その関節に作用する筋及び靭帯などにより生じるトルク）、③相互作用トルクがある(Hollerbach and Flash 1982)。相互作用トルクは、他の関節回転によって生じるトルクであり、多関節動作における力学的連鎖を調べるために広く用いられてきた(Dounskaia et al. 1998, 2005; Sainburg 2002; Putnam 1991; Zatsiorsky 2002)。例えば、歩行遊脚期の膝関節伸展は、股関節屈曲に依存した相互作用トルクによって生じるという知見が得られている。これまで、3次元動作における相互作用トルクの分析は困難であったが、最近、著者らによってその分析法が開発された(Hirashima et al. 2007a)。そこで、本研究では、テニスのサーブ動作を対象として、a) 肩関節の内旋、b) 肘関節の伸展、c) 手関節の屈曲において相互作用トルクが働いているかどうかを解明することを目的とする。さらに、相互作用トルクの影響が顕著であった場合には、どの関節回転が相互作用トルクの要因であるのかを明らかにする。

また、相互作用トルクは、スキルレベルと関係があることも示唆されている。Sainburgらは、利き手の方が非利き手よりも相互作用トルクを有効に利用できることを報告している(Bagesteiro and Sainburg 2002; Sainburg 2002)。この知見を拡張すると、テニスサーブの熟練者は、未熟練者よりも相互作用トルクを有効に利用しているという仮説を立てることができると考えられる。そこで、本研究では、プロ選手のような熟練者だけでなく、未熟練者、中級者など幅広いレベルの被験者を対象として分析を行うこととする。

## 2. 研究方法

### 2.1 被験者

様々なレベルの被験者を分析するため、幅広い年齢層から被験者を募集した。その結果、被験者は、12歳から70歳までの50名（男性28名、女性22名）となった。年齢、性別の内訳を図1に示した。50名のうち3名はプロ選手である。被験者の大部分はテニス経験者である。テニスラケットでサーブを打つのが初めての被験者は2名であった。ヘルシンキ宣言にもとづき、被験者は、実験に参加する前に実験の目的や手順の説明を受け、その後、実験参加同意書を提出してから実験に参加した。

## 2.2 実験装置・実験動作

動作計測は、東京大学大学院情報理工学系研究科に所在するサイバービヘイビアスタジオ内で行った。テニスサーブの計測には MAC3D System (Motion Analysis 社) を使用した。高速度ビデオカメラ (Eagle デジタルカメラ) 10 台を使用し、200Hz で計測を行った。スタジオの天井は、サーブを打つのに十分な高さを有しているが、床面積はテニスコートほどの広さはない。そこで、部屋の一壁面を覆うネットを天井から吊るし、被験者にはそのネットへボールを打つよう教示した。被験者とネットの距離は約 5 m であった。被験者には、テニスのサーブ動作を 3 種類の速度 (Slow, Middle, Fast) で打ち分ける課題を行わせた。それぞれの速度を 5 試行以上行ってもらった。ボールに回転をかけず、フラットサーブを打つよう教示した。

被験者の全身に 39 個の反射マーカを貼付し、それらの 3 次元座標を計測した。そのうち分析に使用したのは、左右の大転子、頸切痕、第一胸椎、肩峰、肘外側、肘内側、手首尺側、手首橈側、中指 MP 関節、ラケット上の 3 点、ボールであり、合計 15 個である。

## 2.3 分析方法

### 2.3.1 運動学的解析

ボールの球速を決定する大きな要因は、インパクト時のラケット (スイートスポット) 並進速度である。まず、ラケット並進速度が、どの関節の回転に依存しているのかを検討するため、ラケット並進速度を、体幹、肩、肘、手首の角速度で書きあらわした (式(1))。

$$\begin{aligned}
 |\mathbf{v}_f| = & \mathbf{v}_C \cdot \mathbf{u}_f \\
 & + (\boldsymbol{\omega}_{0-AP} \times \mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{u}_f + (\boldsymbol{\omega}_{0-ML} \times \mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{u}_f + (\boldsymbol{\omega}_{0-TW} \times \mathbf{r}_0) \cdot \mathbf{u}_f \\
 & + (\dot{\boldsymbol{\theta}}_{1-IE} \times \mathbf{r}_1) \cdot \mathbf{u}_f + (\dot{\boldsymbol{\theta}}_{1-ED} \times \mathbf{r}_1) \cdot \mathbf{u}_f + (\dot{\boldsymbol{\theta}}_{1-k} \times \mathbf{r}_1) \cdot \mathbf{u}_f \\
 & + (\dot{\boldsymbol{\theta}}_{2-EF} \times \mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{u}_f + (\dot{\boldsymbol{\theta}}_{2-PS} \times \mathbf{r}_2) \cdot \mathbf{u}_f \\
 & + (\dot{\boldsymbol{\theta}}_{3-FE} \times \mathbf{r}_3) \cdot \mathbf{u}_f + (\dot{\boldsymbol{\theta}}_{3-UR} \times \mathbf{r}_3) \cdot \mathbf{u}_f
 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで、 $\mathbf{v}_f$  はラケット並進速度、 $\mathbf{u}_f$  は  $\mathbf{v}_f$  の単位ベクトル、 $\mathbf{v}_C$  は頸切痕の並進速度、 $\boldsymbol{\omega}_0$  は体幹の角速度 (AP, 前後; ML, 左右; TW, 回旋)、 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_1$  は肩関節の角速度 (IE, 内旋外旋; ED, 上下; k, 第 3 軸周りの回転)、 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_2$  は肘関節の角速度 (EF, 伸展屈曲; PS, 回内回外)、 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_3$  は手首関節の角速度 (FE, 屈曲伸展; UR, 尺屈橈屈)、 $\mathbf{r}_i (i=0,1,2,3)$  は各関節からラケットスイートスポットまでのベクトルである。これらの角速度の求め方は、Hirashima et al. (2007a) を参照されたい。

### 2.3.2 動力学的解析

従来、3 次元動作のトルクの解析では、逆力学計算で求めた筋トルクベクトルを、互いに直交する 3 つの関節座標軸に分解する方法が一般的である (Fleisig et al. 1995, 1999; Elliott et al. 2003)。しかしながら、この方法では、筋トルクが関節回転に与える影響を知ることはできない (Hirashima et al. 2007a,b)。なぜなら、3 次元空間では、ある関節軸まわりのトルクは、その軸まわりの回転だけでなく、他の 2 軸まわりの回転も引き起こすからである。この現象は、関節回転軸と、その関節よりも遠位部全体の慣性主軸が、3 次元動作では一般的にずれるという事実に起因している。従って、筋トルクベクトルが関節回転に与える影響を調べるためには、

その筋トルクベクトルによって引き起こされた角加速度ベクトルを計算する必要がある。筋トルクによって生じる角加速度ベクトル( $\ddot{\theta}^{MUS}$ )は、筋トルクベクトル( $\tau^{MUS}$ )に、その関節よりも遠位部全体の慣性テンソル( $I$ )の逆行列を左からかけることによって求められる。例えば、肩の筋トルクによって生じた肩の角加速度ベクトルは、式(2)のようにして計算することができる。

$$\ddot{\theta}^{MUS} = \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_{IE}^{MUS} \\ \ddot{\theta}_{ED}^{MUS} \\ \ddot{\theta}_k^{MUS} \end{pmatrix} = I^{-1} \tau^{MUS} \quad (2)$$

$I$ が単一セグメントの慣性テンソルでないことに注意が必要である。 $I$ の求め方は、Hirashima et al. (2007a)を参照されたい。相互作用トルクによって生じた肩の角加速度ベクトルも同様に、式(3)のように計算することができる。

$$\ddot{\theta}^{INT} = \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_{IE}^{INT} \\ \ddot{\theta}_{ED}^{INT} \\ \ddot{\theta}_k^{INT} \end{pmatrix} = I^{-1} \tau^{INT} \quad (3)$$

重力トルクによって生じた肩の角加速度ベクトルも同様に、式(4)のように計算することができる。

$$\ddot{\theta}^{GRA} = \begin{pmatrix} \ddot{\theta}_{IE}^{GRA} \\ \ddot{\theta}_{ED}^{GRA} \\ \ddot{\theta}_k^{GRA} \end{pmatrix} = I^{-1} \tau^{GRA} \quad (4)$$

ここで、肩内旋の角加速度 ( $\ddot{\theta}_{IE}$ ) に影響を与える要因として  $\ddot{\theta}_{IE}^{MUS}$ 、 $\ddot{\theta}_{IE}^{INT}$ 、 $\ddot{\theta}_{IE}^{GRA}$  の3つしか存在しないため ( $\ddot{\theta}_{IE} = \ddot{\theta}_{IE}^{MUS} + \ddot{\theta}_{IE}^{INT} + \ddot{\theta}_{IE}^{GRA}$ )、この3つを検討することによって、肩内旋が生じる力学的要因を特定することができる。肩関節の他の2軸 (ED、k) についても同様である。また、肘関節、手関節についても同様の方法を適用することができる。

### 3. 結果

#### 3.1 球速

これまでのところ、50名のうち36名(プロ選手3名を含む)のFast条件の分析が終了している。36名の球速のヒストグラムを図2に示す。70 km/h 台から180km/h 台まで幅広い分布が得られた。本報告書では、球速105 km/h 未満の未熟練者群(10名)と、150km/h以上の熟練者群(7名)の違いについて述べる。

#### 3.2 運動学的解析

インパクト時のラケット並進速度は、式(1)のように、各関節の角速度であらわすことができ

る。図3Aは、熟練者のインパクト時のラケット並進速度に対する各角速度の貢献を示している。例えば、熟練者のインパクト時のラケット速度約 33 m/s のうち約 17m/s が肩関節内旋によってもたらされていることがわかる。熟練者は、主に、肩関節内旋、手関節屈曲、体幹左回旋を利用していることが明らかとなった。熟練者に比べ、未熟練者は、肩関節内旋、手関節屈曲の割合が比較的少なく、肘関節伸展の貢献が比較的多いことが明らかとなった（図3B）。

### 3.3 動力学的解析

次に、両被験者群において、球速に大きく貢献していた肩関節内旋、肘関節伸展、手関節屈曲が生じる力学的要因を検討した。

#### 3.3.1 熟練者

図4A左は、肩内旋の角速度がインパクト時刻（0ms）に向けて大きくなっていることを示している。この角速度の増加は、図4B左の角加速度（ $\ddot{\theta}_{IE}$ 、太線）によってもたらされている。その角加速度は、筋トルクによって生じた角加速度（ $\ddot{\theta}_{IE}^{MUS}$ 、実線）、相互作用トルクによって生じた角加速度（ $\ddot{\theta}_{IE}^{INT}$ 、点線）、重力トルクによって生じた角加速度（ $\ddot{\theta}_{IE}^{GRA}$ 、この項は他の2つに比べて非常に小さいので図では省略してある）の和である。図4B左は、-90ms～-30msでは筋トルクが、-30ms～0msでは相互作用トルクが肩内旋角加速度に貢献していることを示している。図4C左は、角速度が 0m/s を超えてからインパクトまでの間（図4A左の灰色で示した区間）に、筋トルク、相互作用トルクそれぞれが作り出した肩内旋の角速度を示している。また、図4C左では、熟練者7名の平均値と標準偏差を示している。つまり熟練者は、筋トルク、相互作用トルクの両方を用いて、インパクト時の大きな肩内旋角速度を作り出していることが明らかとなった。

熟練者群では、肘伸展角速度は球速にはほとんど貢献がなかったが（図3A）、その時系列変化を見てみるとインパクト直前に非常に大きな角速度を持つが、その後急激に減速することがわかった（図4A中央）。また、角加速度（図4B中央の実線）は、相互作用トルク（点線）とほぼ重なっており、肘伸展の加速、減速ともに、相互作用トルクによって引き起こされていることがわかる。

手屈曲の加速度も主に相互作用トルクによって生じており（図4B右）、インパクト付近での大きな角速度につながっている（図4A右）。熟練者7名のデータを見てみても（図4C右）、筋トルクではなく、相互作用トルクがインパクト時の手屈曲角速度に貢献していることがわかる。

#### 3.3.2 未熟練者

未熟練者の肩内旋では、相互作用トルクが内旋に働くことはほとんどなく（図5B左）、むしろ内旋を阻害する方向へ作用することがわかった。未熟練者10名のデータを見てみても（図5C左）、未熟練者の肩内旋角速度は、相互作用トルクではなく筋トルクによって引き起こされていることがわかる。

一方、肘伸展、手屈曲に関しては、相互作用トルクは少ないながらもプラスに貢献することが明らかとなった（図5Cの中央と右）。

### 3.4 熟練者の相互作用トルクの内訳

熟練者は、肩内旋、肘伸展、手屈曲において、相互作用トルクを利用して大きな角速度を得ていることが明らかになった。しかし、それらの相互作用トルクが、どの関節回転によって生じているのかは明らかではない。そこで、相互作用トルクをいくつかの成分に分け、その内訳を検討した。

図6A左の黒点線は、相互作用トルクによって生じた肩内旋の角加速度（図4B左の点線と同じ）である。他の12本の線は、その内訳を示している。各成分の貢献を調べるため、インパクトより前で、かつ、相互作用トルクがプラスに作用している区間において、各成分を積分し、全体に対する割合を計算した。図6Bは、熟練者7名の平均値と標準偏差を示している。肩内旋の相互作用トルクは、主に、5, 6, 9, 12番によって生じていることがわかる。ここで重要なのは、6, 9, 12番が手の角速度や角加速度に依存した成分（緑色）であるということである。つまり、上肢の近位部に位置する肩関節の相互作用トルクは、遠位に位置する手の動きに影響を受けているのである。

次に、肘伸展を見てみると、その相互作用トルクは、主に、1番（肩の並進加速度）、2番（上腕の角速度）によって生じていることがわかる。つまり、肘に関しては、近位から遠位への影響があることがわかった。

最後に、手屈曲の相互作用トルクは、主に3番（前腕の角速度）によって生じていることがわかる。つまり、手首に関しても、近位から遠位へ影響が認められた。

## 4. 考察

### 4.1 熟練者のキネティックチェーン

本研究によって、テニスサーブの熟練者は、肩内旋、肘伸展、手屈曲において、相互作用トルクを利用していることが明らかとなった。また、相互作用トルクの内訳を検討することによって、テニスサーブにおける運動連鎖を解明することができた。具体的な連鎖は以下のようにまとめることができる。まず、時刻-150ms~-50msの体幹及び上腕の回転運動（図6A中央の①②）が、肘伸展の相互作用トルクを生み出す（図4Bの中央）。この肘伸展の相互作用トルクが、時刻-80ms~-30msの大きな肘伸展角速度を生み出す（図4Aの中央）。このとき、前腕は地面に対して大きな角速度を持っており、これが、手屈曲の相互作用トルクを生み出している（図6右の③）。この手屈曲の相互作用トルクが、時刻-20ms~0msの大きな手屈曲角速度を生み出す（図4A右）。このとき、手セグメント（ラケットを含む）は地面に対して大きな角速度を持っており、これが、肩内旋の相互作用トルクを生み出している（図6左の⑥と⑨）。また、この時間帯には、肘の屈曲（マイナス）方向への大きな角加速度が生じている（図4B中央）。このとき、手は地面に対して大きな角加速度を持っており、これも、肩内旋の相互作用トルクを生み出している（図6左の⑩）。このように、テニスのサーブでは、単純に近位から遠位への連鎖だけではなく、遠位から近位への連鎖も存在することが明らかとなった。

### 4.2 野球ピッチングとテニスサーブの違い

野球ピッチングにおいても、熟練者は、肩内旋、肘伸展、手屈曲において、相互作用トルクを利用していることが明らかとなっている（Hirashima et al. 2007b）。また、近位から遠位へ

の連鎖だけではなく、遠位から近位への連鎖も存在することがわかっている(平島・大築 2006)。このように野球ピッチングとテニスサーブは非常に似ているが、1点だけ違うところがある。それは、肩内旋の相互作用トルクの生じるメカニズムである。肩内旋の相互作用トルクを引き起こしているのは、野球ピッチングでは、主に⑤番(平島、大築 2006 を参照)であるが、テニスのサーブでは、主に⑫番である(図6左)。⑤番は、運動方程式ではもともと  $m_3 a_{g3}$  に含まれるもので、並進加速度依存性であると言える。一方、⑫番は、運動方程式ではもともと  $I_3 \dot{\omega}_3$  に含まれるもので、角加速度依存性であると言える。このように、相互作用トルクを利用しているという点で同じであっても、相互作用トルクを生み出すメカニズムが異なる場合がある。つまり、コーチがスポーツ選手の動作の相互作用トルクを増やしたいと考えた場合に、野球とテニスでは着目すべき動作が変わってくるのである。

#### 4.3 熟練者と未熟練者の違い

未熟練者は、肘伸展、手屈曲で相互作用トルクを利用できていたものの、熟練者に比べると値はかなり小さい。また、肩内旋では相互作用トルクを利用することができない。どのようにすれば、未熟練者は熟練者に近づくことができるのだろうか? 4.1 でまとめたように、一旦どこかの関節が回転すれば、その影響は相互作用トルクを通じて次々と他の関節へ及んでいく。つまり、連鎖の一番大元になる動きをしっかりと行うことが何よりもまず大事であると考えられる。テニスサーブにおける連鎖の大元は、体幹及び上腕の大きな角速度であるから、まずここを修正すべきである。

次に重要なのは、上肢全体の形(姿勢)である。相互作用トルクの式には角速度ベクトルとセグメント長軸ベクトルの外積計算を多く含んでいる(例えば  $\omega_3 \times L_{g3}$ 、Hirashima et al. 2007a の式(15)を参照)。つまり、大きな角速度を得たとしても、セグメントの向きが適切でなければ、大きな相互作用トルクを得ることはできないのである。逆に、角速度が比較的小さい場合であっても、姿勢が適切であれば、比較的大きな相互作用トルクを得ることも可能かもしれない。この観点からの運動指導は、リクリエーションでテニスを楽しむ中高年者など、筋力が少ない人に最適のものであろう。

以上より、3次元相互作用トルク分析法を用いて、1) 角速度の大きさと2) 上肢の姿勢の両観点から各被験者の特徴を捉えることによって、各個人にあわせた適切なアドバイスが可能になると考えられる。このようなコーチングは、未熟練者だけではなく、中級者、さらにはプロ選手への動作改善にも応用可能である。本研究は、横断的な研究により個人間の差を検討したが、今後はこの分析結果に基づいた指導を実践し、個人内での学習過程を検討する縦断的な研究が必要であろう。

## 5 謝辞

まず、研究を遂行する上で必要な経費を助成して頂いた財団法人ミズノスポーツ振興会に厚く御礼申し上げます。本研究の測定は、東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻に所在するサイバービヘイビアスタジオで行いましたが、テニスサーブ測定のために優先的にスタジオを使用させて下さった中村仁彦教授、山根克講師に深く感謝申し上げます。また、本研究では幅広いレベルの被験者を必要としましたが、被験者募集に多大なご協力を頂いた日本プロテニス協会公認インストラクターの大滝一弘様、大隅楨太郎様、またパインヒルズテニスアカデミー校長の榊原太郎様に深く御礼申し上げます。最後に、測定に参加して下さった被験者の皆様、測定補助をして下さった皆様、ご協力本当にありがとうございました。

## 6 参考文献

**Bagesteiro LB and Sainburg RL.** Handedness: dominant arm advantages in control of limb dynamics. *J Neurophysiol* 88: 2408-2421, 2002.

**Dounskaia N.** The internal model and the leading joint hypothesis: implications for control of multi-joint movements. *Exp Brain Res* 166: 1-16, 2005.

**Dounskaia NV, Swinnen SP, Walter CB, Spaepen AJ, and Verschueren SM.** Hierarchical control of different elbow-wrist coordination patterns. *Exp Brain Res* 121: 239-254, 1998.

**Elliott B, Fleisig G, Nicholls R, and Escamilla R.** Technique effects on upper limb loading in the tennis serve. *J Sci Med Sport* 6: 76-87, 2003.

**Fleisig GS, Andrews JR, Dillman CJ, and Escamilla RF.** Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. *Am J Sports Med* 23: 233-239, 1995.

**Fleisig GS, Barrentine SW, Zheng N, Escamilla RF, and Andrews JR.** Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development. *J Biomech* 32: 1371-1375, 1999.

**Hirashima M, Kudo K, and Ohtsuki T.** A new non-orthogonal decomposition method to determine effective torques for three-dimensional joint rotation. *J Biomech* 40: 871-882, 2007a.

**Hirashima M, Kudo K, Watarai K, and Ohtsuki T.** Control of 3D limb dynamics in unconstrained overarm throws of different speeds performed by skilled baseball players. *J Neurophysiol* 97: 680-691, 2007b.

平島雅也、大築立志. 3次元相互作用トルク分析法を用いた投球動作のキネティックチェーンの解明. 第19回 日本バイオメカニクス学会.

**Hollerbach JM and Flash T.** Dynamic interactions between limb segments during planar arm movement. *Biol Cybern* 44: 67-77, 1982.

**Marshall RN and Elliott BC.** Long-axis rotation: the missing link in proximal-to-distal segmental sequencing. *J Sports Sci* 18: 247-254, 2000.

**Putnam CA.** A segment interaction analysis of proximal-to-distal sequential segment motion patterns. *Med Sci Sport Exer* 23: 130-144, 1991.

**Sainburg RL.** Evidence for a dynamic-dominance hypothesis of handedness. *Exp Brain Res* 142: 241-258, 2002.

**Zatsiorsky VM.** *Kinetics of Human Motion*, Champaign: Human Kinetics, 2002.



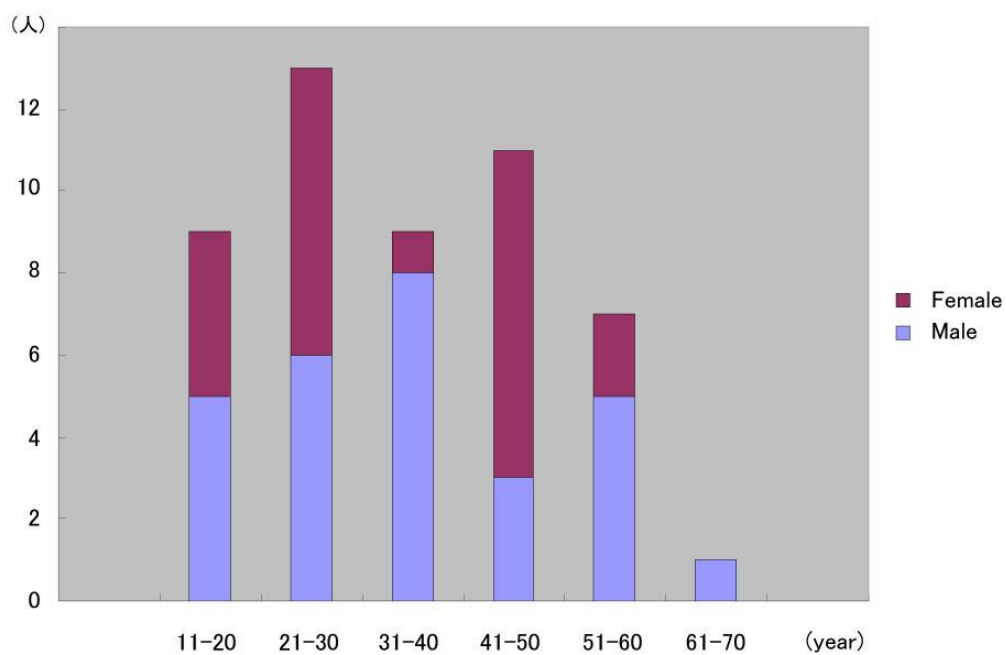


図1 被験者の年齢のヒストグラム

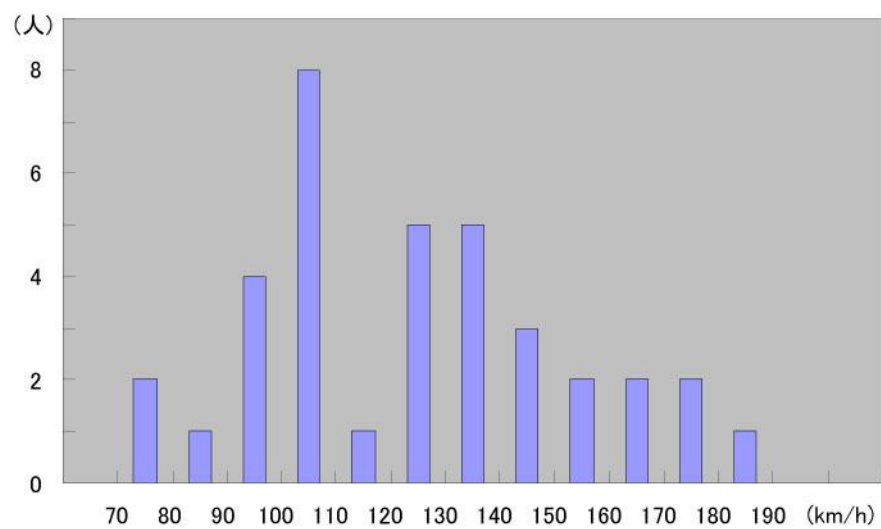


図2 被験者の球速のヒストグラム

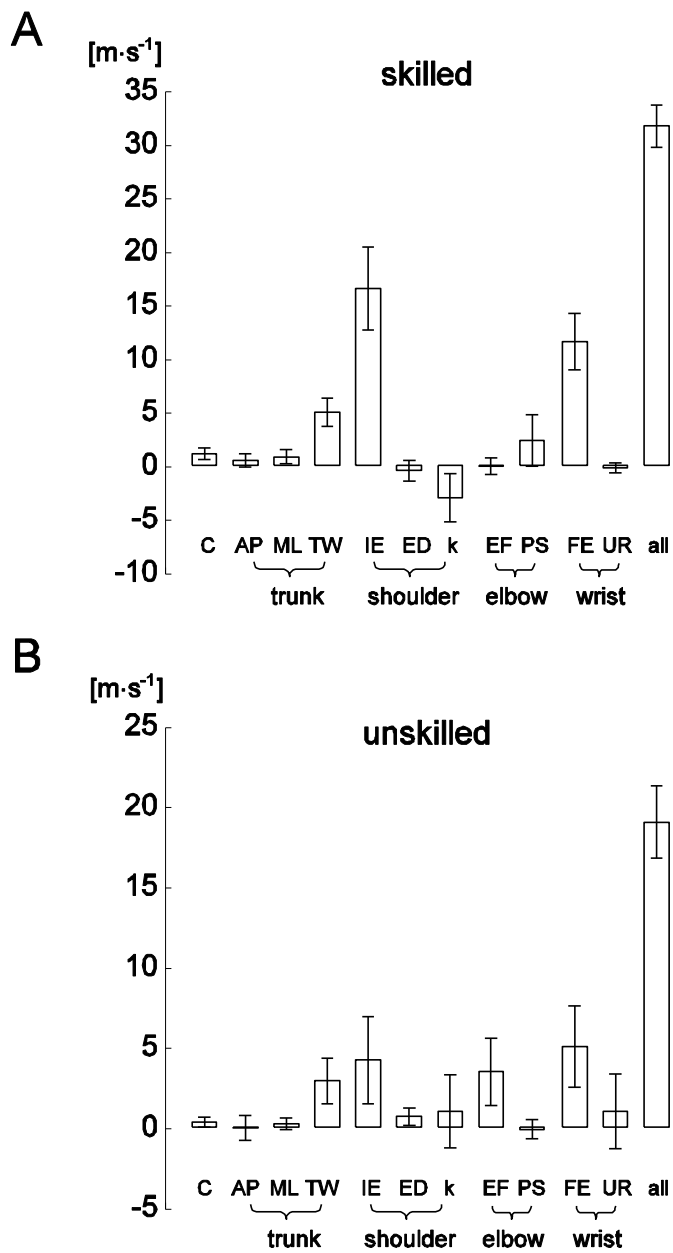


図3 各角速度のインパクト時のラケット並進速度への貢献度。  
A、熟練者；B、未熟練者

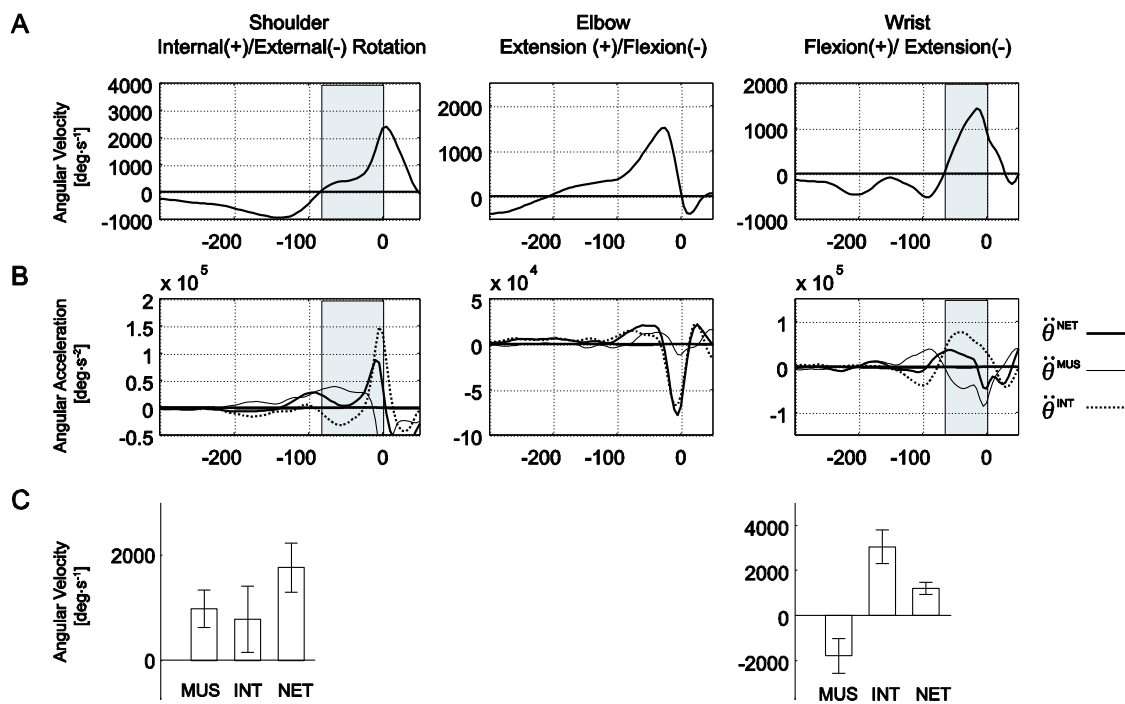


図4 熟練者の肩内旋、肘伸展、手屈曲の運動学データ及び動力学データ。A：角速度時系列の典型例。B：角加速度時系列の典型例。角加速度（太線）、筋トルクによって生じた角加速度（細線）、相互作用トルクによって生じた角加速度（点線）。C：熟練者7名の平均値と標準偏差。

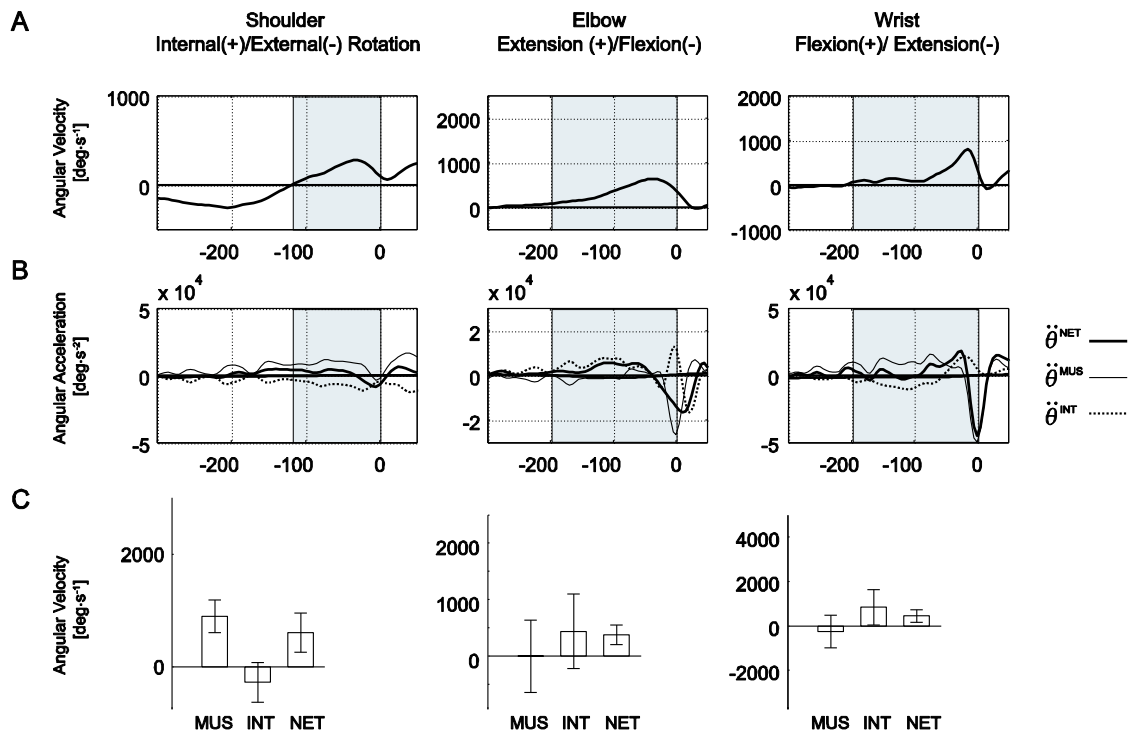


図5 未熟練者の肩内旋、肘伸展、手屈曲の運動学データ及び動力学データ。A：角速度時系列の典型例。B：角加速度時系列の典型例。角加速度（太線）、筋トルクによって生じた角加速度（細線）、相互作用トルクによって生じた角加速度（点線）。C：未熟練者10名の平均値と標準偏差。

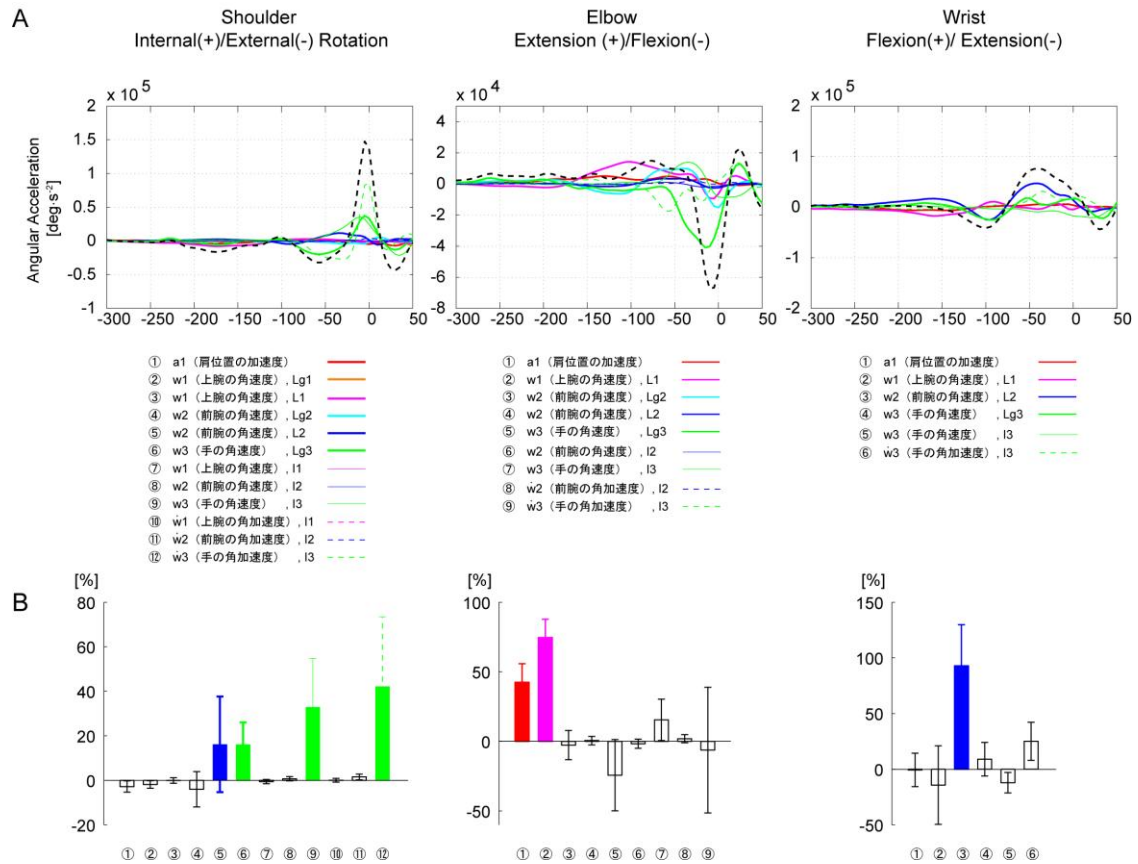


図6 熟練者の相互作用トルクの内訳。A：相互作用トルク時系列の典型例。B：熟練者7名の平均値と標準偏差