

テニスサービスの打球数増加による体幹および上肢関節運動の変化がラケット速度へ及ぼす影響について

田 邊 智[†]

Effect of the Changes in the Upper Torso and Upper Limb Joint Movements by Repeated Tennis Service on the Racket Velocity

TANABE Satoru[†]

Abstract

The purpose of this study was to clarify the effect of the changes in the upper torso and upper limb joint movements by repeated tennis service on the racket velocity. One male collegiate tennis player participated in the study. The three-dimensional coordinates of reflective markers attached to the subject and his tennis racket were obtained from images acquired at 250 fps using a 12-camera motion capture system while the subject executed tennis serves. The findings are summarized as follows:

1. Racket head velocity significantly decreased as the tennis serves were repeated.
2. This decrease in racket head velocity with repeated tennis serves resulted from a reduction in the angular velocity of the wrist palmar flexion, which decreased the wrist joint-force-power that was transferred from the forearm to the hand.
3. After fatigue, the radius of the shoulder internal rotation was increased by wrist flexion, and, as a result, the racket head velocity was improved by internal rotation.
4. The elbow flexion caused by the increase of elbow flexion torque and the reduction of positive mechanical work produced by the shoulder joint force caused the racket head velocity to decrease at ball impact.

要 約

本研究の目的は、打球数の増加による体幹および上肢関節運動の変化がラケット速度へ及ぼす影響を明らかにすることであった。大学テニス選手1名が本研究に参加した。被験者の身体各部位とラケットに貼付した反射マーカの3次元座標を12台のカメラを用いた

[†] 大阪産業大学 人間環境学部スポーツ健康学科教授

草 稿 提 出 日 11月30日

最 終 原 稿 提 出 日 2月2日

モーションキャプチャーシステムを使って得た(250fps)。その結果を次のようにまとめた。

- 1) 打球数の増加にともなうラケット速度は有意に減少した。
- 2) 打球数の増加にともなうラケット速度の低下の主な原因は掌屈角速度の低下であった。また、掌屈角速度の低下は前腕から手部へと流れ込んでくる関節力パワーが減少したことによるものであった。
- 3) 疲労後、手首の屈曲が内旋の回転半径を大きくし、結果的に、内旋によって生み出されたラケット速度を増加させていた。
- 4) インパクト時の肘の屈曲は肘の屈曲トルクの増加と肩の関節力による正の仕事の減少が原因で、結果として、それがラケット速度を減少させていた。

キーワード：掌屈，内旋，肘の伸展

Keywords : palmar flexion, internal rotation, elbow extension

1. 緒言

テニスとは、ネットを挟んだコートの上で様々な戦略を駆使し、相手コートへ1球でも多くボールを打ち返してポイントを奪い合うスポーツである。テニスにはサービスやグランドストローク、ボレー、スマッシュなどのショットがあるが、その中で、サービスはすべてのポイントの始まりであり、攻撃の起点となるショットである。そのため、より攻撃的なサービスを打つことが試合の展開を決定するために要求される。攻撃的なサービスの要素としては、ボールのスピード、スピン、コントロールなどが挙げられるが、特に速いサービスを打つことができると、相手の体勢を崩してチャンスボールを打たせることができると考えられる。足立(1999)はグランドスラム大会に出場している選手のサービス速度と試合の勝敗との関係を調べたところ、試合に勝った選手の方が負けた選手に比べてサービス速度が有意に大きかったと述べている。また、トーナメントを勝ち進む選手のファーストサービスの速度は、大会を通して高い値を維持していたとも報告している。つまり、第1ゲームから最終ゲームまで1試合を通して、終始速いサービスを打ち続けることは、試合を有利に進めるために非常に重要であると考えられる。しかし、テニスの試合では3時間を超えてゲームが行われることもしばしばあるため、試合中、疲労によってサービス速度が低下してしまう可能性がある。したがって、サービス速度を如何に低下させずに打ち続けるかが、試合に勝つための大きな課題と言えよう。

これまでテニスサービスに関するバイオメカニクスの研究は数多く行われてきており、速いサービスを打つための関節運動や、その運動のメカニズムが明らかにされてきた(Elliott et al., 1995; Marshall and Elliott, 2000; Tanabe and Ito, 2007; 田邊・伊藤, 2008)。

テニスサービスの打球数増加による体幹および上肢関節運動の変化がラケット速度へ及ぼす影響について (田邊 智)

Tanabe and Ito (2007) は技術レベルの異なるテニス選手のサービス中の上肢関節運動を調べ、サービス速度の高い選手ほど肩の内旋と手首の掌屈動作を使ってサービスを打っていることを報告している。また、Tanabe and Ito (2007) は肘を屈曲した方が内旋動作の回転半径を大きくすることができるので、ラケット速度の高い選手ほどラケット速度に対する内旋の効果を高めるために、肘をより屈曲してサービスを打っていたとも述べている。また、田邊・伊藤 (2008) は肘の伸展動作がフォワードスイング前半には並進運動を高めるために働き、フォワードスイング後半では並進運動を回転運動へ変換して、効果的にラケット速度を増加させる役割を持っていたことを明らかにした。しかしながら、これらの研究ではラケット速度を高めるための関節運動については調べているものの、疲労によって、それらの関節運動がどのように変化するかについて明らかにしていない。

同じオーバーヘッドの動きとして、これまで野球のピッチングで投球数の増加が投動作にどのような変化をもたらすのかを調べた研究がいくつかある (Escamilla et al., 2007; 平山ほか, 2010)。Escamilla et al. (2007) は先発ピッチャーを務める大学野球選手10名に対し、1 イニングあたり15球を7から9 イニング投げさせ、投球数の増加が体幹および上肢関節運動に与える影響を動作学的側面と動力的側面から調べている。その結果、筋疲労によって有意に変化した測定項目はボール速度と体幹の前傾角度だけで、それ以外の測定項目については有意な変化が見られなかったと報告している。平山ほか (2010) は Escamilla et al. (2007) の研究で2つの測定項目にしか有意差が認められなかった理由について、筋疲労に対する適応が被験者によって異なる可能性があることを挙げ、個人内の変化を詳細に分析することが重要であると述べている。そして、ひとりの被験者の個人内の変化に着目し、多数の試技を詳細に分析することによって、投球数の増加が関節運動に与える影響を調べている。

そこで本研究では、男子大学テニス選手1名を対象に、テニスサービスを100本打たせ、打球数の増加による体幹および上肢関節運動の変化を調べるとともに、それがラケット速度に対してどのような影響を与えるのかを明らかにしようとした。

2. 方 法

2. 1 被験者

被験者はテニススクールでインストラクターとしても活動している男子大学テニス選手1名 (身長: 1.72m; 体質量: 76kg; 年齢: 21歳; 経験年数: 8年) であった。被験者にはあらかじめ本研究の目的と内容を十分に説明し、協力の同意を得てから実験を行った。

2. 2 実験方法

被験者に十分なウォーミングアップをさせた後、20秒間隔でサービスを全力で100球打つように指示した。実験の直前に反射マーカを被験者の身体各部位およびラケットに18個を貼付し、サービス動作中のマーカの3次元座標を、3次元リアルタイムモーション計測システムVENUS 3D (Nobby Tech社製、カメラ12台)を用いて測定した(250fps)。なお、分析の対象とした試技は1球目から10球目までの10球(以下、「疲労前」とする)と、91球目から100球目までの10球(以下、「疲労後」とする)であった。なお、本研究ではセンターマークを原点とし、ベースラインに平行で相手コートに向かって右方向へX軸の正を、鉛直上方へZ軸の正をとり、Z軸とX軸との外積によって得られた方向をY軸の正とし、これらX軸、Y軸、Z軸からなる座標系を静止座標系と定義した。

2. 3 データの平滑

得られた3次元座標から残差分析法(Yu et al., 1999)を用いて、各部位の3軸方向の最適遮断周波数を求め、4次のButterworth Digital Filterを使って3次元座標を平滑した。

2. 4 部分座標系の定義

図1は上腕、上腕、前腕、そして手部に固定した右手系の部分座標系を示している。図中の添字のut, ua, fa, hdはそれぞれ上腕、上腕、前腕、そして手部を表している。上腕座標系について、上腕の長軸を表すRRIBとLRIBの midpoint から、RSHFとRSHBの midpoint とLSHFとLSHBの midpoint を結んだ線分の midpoint へ向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{ut} とし、LRIBからRRIBへ向かうベクトルを \mathbf{x}'_{ut} とした。そして \mathbf{z}_{ut} と \mathbf{x}'_{ut} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{ut} とし、 \mathbf{y}_{ut} と \mathbf{z}_{ut} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{x}_{ut} とした。上腕座標系に関しては、上腕の長軸を表すRELMとRELLの midpoint からRSHFとRSHBの midpoint へ向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{ua} とし、RELMからRELLへ向かうベクトルを \mathbf{x}'_{ua} とした。そして \mathbf{z}_{ua} と \mathbf{x}'_{ua} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{ua} とし、 \mathbf{y}_{ua} と \mathbf{z}_{ua} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{x}_{ua} とした。前腕座標系では、前腕の長軸を表すRWRMとRWRLの midpoint からRELMとRELLの midpoint へ向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{fa} とし、RWRMからRWRLへ向かうベクトルを \mathbf{x}'_{fa} とした。そして \mathbf{z}_{fa} と \mathbf{x}'_{fa} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{fa} とし、 \mathbf{y}_{fa} と \mathbf{z}_{fa} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{x}_{fa} とした。そして最後に手部座標系については、手部の長軸を表すRHNDからRWRMとRWRLの midpoint へ向かう単位ベクトルを \mathbf{z}_{hd} とし、RWRMからRWRLへ向かうベクトルを \mathbf{x}'_{hd} とした。そして \mathbf{z}_{hd} と \mathbf{x}'_{hd} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを \mathbf{y}_{hd} とし、

テニスサービスの打球数増加による体幹および上肢関節運動の変化がラケット速度へ及ぼす影響について (田邊 智)

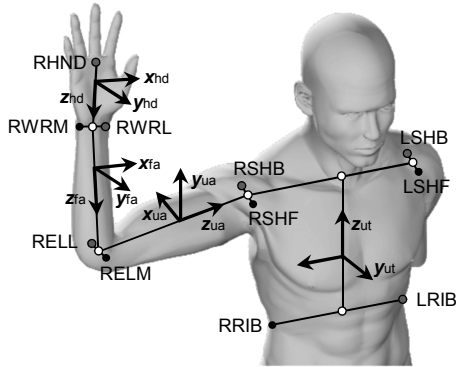


Figure 1. Definitions of the segment reference frame fixed on the lower torso, the upper torso, the upper arm, the forearm and the hand.

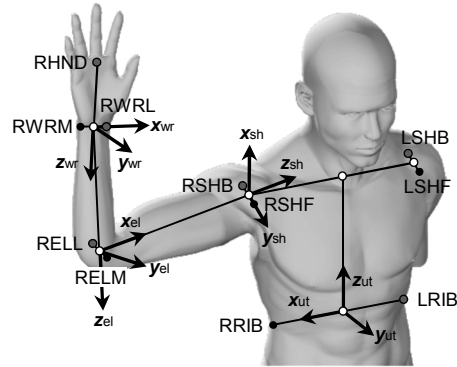


Figure 2. Definitions of the joint reference frame fixed on the upper torso, the shoulder, the elbow and the wrist.

y_{hd} と z_{hd} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを x_{hd} とした。

2. 5 関節座標系の定義

図2は上腕関節，肩関節，肘関節，そして手関節に固定した右手系の関節座標系を示している。図中の添字のut, sh, el, wrはそれぞれ上腕関節，肩関節，肘関節，そして手関節を表している。上腕関節座標系では，上腕の長軸を表すRRIBとLRIBの midpoint から，RSHFとRSHBの midpoint とLSHFとLSHBの midpoint を結んだ線分の midpoint へ向かう単位ベクトルを z_{ut} とし，LRIBからRRIBへ向かうベクトルを x'_{ut} とした。そして z_{ut} と x'_{ut} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを y_{ut} とし， y_{ut} と z_{ut} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを x_{ut} とした。肩関節座標系では，上腕の長軸を表すRELMとRELLの midpoint からRSHFとRSHBの midpoint へ向かう単位ベクトルを z_{sh} とし，RRIBとLRIBの midpoint から，RSHFとRSHBの midpoint とLSHFとLSHBの midpoint を結んだ線分の midpoint へ向かう単位ベクトルを x'_{sh} とした。そして z_{sh} と x'_{sh} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを y_{sh} とし， y_{sh} と z_{sh} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを x_{sh} とした。肘関節座標系では，前腕の長軸を表すRWRMとRWRLの midpoint からRELMとRELLの midpoint へ向かう単位ベクトルを z_{el} とし，RELMとRELLの midpoint からRSHFとRSHBの midpoint へ向かうベクトルを x'_{el} とした。そして z_{el} と x'_{el} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを y_{el} とし， y_{el} と z_{el} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを x_{el} とした。そして最後に手関節座標系においては，手部の長軸を表すRHNDからRWRMとRWRLの midpoint へ向かう単位ベクトルを z_{wr} とし，RWRMからRWRLへ向かうベクトルを x'_{wr} とした。そして z_{wr} と x'_{wr} との外積によって得られる方

向の単位ベクトルを y_{wr} とし、 y_{wr} と z_{wr} との外積によって得られる方向の単位ベクトルを x_{wr} とした。なお、本研究で定義した上腕関節座標系のx軸は後傾 (+) / 前傾 (-), y軸は右側屈 (+) / 左側屈 (-), z軸は左回旋 (+) / 右回旋 (-), 肩関節座標系のx軸は水平内転 (+) / 水平外転 (-), y軸は内転 (+) / 外転 (-), z軸は内旋 (+) / 外旋 (-), 肘関節座標系のx軸は内反 (+) / 外反 (-), y軸は伸展 (+) / 屈曲 (-), z軸は回内 (+) / 回外 (-), 手関節座標系のx軸は掌屈 (+) / 背屈 (-), y軸は尺屈 (+) / 撓屈 (-), z軸は回内 (+) / 回外 (-) を表している。また、肘関節および手関節は2軸性の関節のため、本研究では後述する関節角速度、関節角速度によって生み出されたラケット速度、関節トルクパワー、そして関節トルクによる力学的仕事についての肘関節座標系のx軸 (内反 / 外反) および手関節座標系のz軸 (回内 / 回外) の結果は示さない。

2. 6 関節角速度の算出

本研究では上腕、上腕、前腕、そして手部の角速度ベクトルを部分座標系の各軸方向の単位ベクトルから算出した (和達, 1983)。つまり、部分*i*の角速度ベクトル ω_i の各軸周りの成分 ($\omega_{ix}, \omega_{iy}, \omega_{iz}$) は次式から求められる。

$$\omega_{ix} = z_i \cdot \frac{dy_i}{dt}, \quad \omega_{iy} = x_i \cdot \frac{dz_i}{dt}, \quad \omega_{iz} = y_i \cdot \frac{dx_i}{dt} \quad (1)$$

ここで x_i, y_i, z_i は部分*i*に定義した座標系の単位ベクトルを示している。その後、座標変換行列 (和達, 1983) を用いて各部分座標系における角速度ベクトルを静止座標系における角速度ベクトルに変換した。そして、上腕に対する上腕の相対角速度、上腕に対する前腕の相対角速度、前腕に対する手部の相対角速度をそれぞれの関節座標系の各軸に射影し、肩、肘、そして手関節の角速度を算出した。

2. 7 各関節運動によって生み出されたラケット速度の算出

先行研究 (Springings et al, 1994; 宮西ほか, 1996) を参考に、関節角速度ベクトルと関節中心点からラケットヘッドまでの位置ベクトルとを外積し、各関節運動によって生み出されたラケット速度ベクトルを求めた。これら各関節運動によって生み出されたラケット速度ベクトルの方向は、実際のラケット速度ベクトルの方向と異なる。そのため、本研究では各関節運動によって生み出されたラケット速度ベクトルを実際のラケット速度の合成ベクトル方向へ射影して、合成ベクトル方向への速度成分を求め (宮西ほか, 1996), それを各関節運動によって生み出されたラケット速度とした。

2. 8 関節トルク, 関節トルクパワー, 関節力パワー, 力学的仕事量の算出

本研究では, 上腕関節, 肩関節, 肘関節, そして手関節に作用する関節力および関節トルクを, 各部分における並進および回転の運動方程式を解くことで算出した (藤井ほか, 1997; 宮西ほか, 1997; Winter, 2009)。つまり, 部分*i*の末梢端に作用する関節力ベクトルおよび関節トルクベクトルを f_{di} および T_{di} とすると, 中枢端に作用する関節力ベクトル f_{pi} および関節トルクベクトル T_{pi} は次式から求められる。

$$f_{pi} = m_i a_i + m_i g + f_{di} \quad (2)$$

$$T_{pi} = M_i + T_{di} + r_{cgi, di} \times f_{di} - r_{pi, cgi} \times f_{pi} \quad (3)$$

ここで m_i とは部分*i*の質量を, a_i は部分*i*の重心加速度ベクトルを, g は重力加速度ベクトルを指し, M_i は部分*i*の重心まわりに働く外部トルクベクトルを, $r_{cgi, di}$ および $r_{pi, cgi}$ はそれぞれ部分*i*の末梢端から重心へ, また部分*i*の重心から中枢端へ向かう位置ベクトルを表している。なお, 身体部分慣性パラメータについては, 阿江 (1996) の身体部分慣性係数を用いて被験者ごとに推定した。

また, 関節*j*に作用する関節力パワー FP_j および関節トルクパワー TP_j は次式から求めた。

$$FP_j = f_{pi} \cdot V_j \quad (4)$$

$$TP_j = T_{pi} \cdot \omega_j \quad (5)$$

ここで V_j とは関節*j*の線速度ベクトルを, ω_j は関節*j*の角速度ベクトルを指している。なお, 本来であれば関節トルクパワーとは関節トルクベクトルと関節角速度ベクトルとの内積であるため, 軸成分同士の積の和として求められるが, ここでは関節座標系の軸成分ごとに分けて算出することで, それらを考察の対象とした。

さらに, 関節力パワーおよび関節トルクパワーを符号の正負別に時間積分することで, 関節力および関節トルクによる正および負の力学的仕事 (以下, 単に「仕事」とする) を算出した。

2. 9 分析区間と標準動作の算出

本研究では, 先行研究 (田邊・伊藤, 2008) を参考にして, インパクトへ向けてラケットが上方へ速度をもった瞬間をフォワードスイング開始とし, フォワードスイング開始からインパクト時までをサービス動作の分析区間とした。そして, その区間の時間を100%となるように, 3次のスプライン関数を用いた内挿補間によって規格化した。また, Ae et. al. (2007) の方法を参考に, 規格化した3次元座標値から股関節中点に対する相対座

標を算出し、それを被験者の身長で除したものを平均することで、疲労前および疲労後の標準動作を求めた。

2. 10 統計処理

統計処理について、疲労前と疲労後のラケット速度、関節角速度、各関節運動によって生み出されたラケット速度、関節トルク、関節力パワー、関節トルクパワー等の時系列データの差について、規格化時間の1%ごとに対応のないt検定を使って調べた。また、疲労前後の仕事の差を対応のないt検定を用いて分析した。なお、本研究では統計的有意水準を5%とした。

3. 結果

3. 1 ラケット速度について

図3に疲労前および疲労後のフォワードスイング開始からインパクト時までにおける実際のラケット速度の平均変化曲線を示した。図の横軸は規格化された時間を、実線は疲労前を、点線は疲労後を、そしてスティックピクチャーは疲労前の標準動作を表している。また、疲労前後で有意差が認められた時点には記号(x)を示した。なお、視認性を考慮して標準偏差の表記は省略した。

ラケット速度は疲労前後ともにフォワードスイング開始後、低い値を維持していたが、55%付近からインパクトへ向けて上昇し、ピーク値でインパクトを迎えていた。疲労前と疲労後での比較では、フォワードスイング開始から35%付近まで疲労後の方が疲労前よりもラケット速度は有意に高く、50%付近から80%付近までと、85%付近からインパクト時まででは疲労前の方が疲労後よりも有意に大きかった。

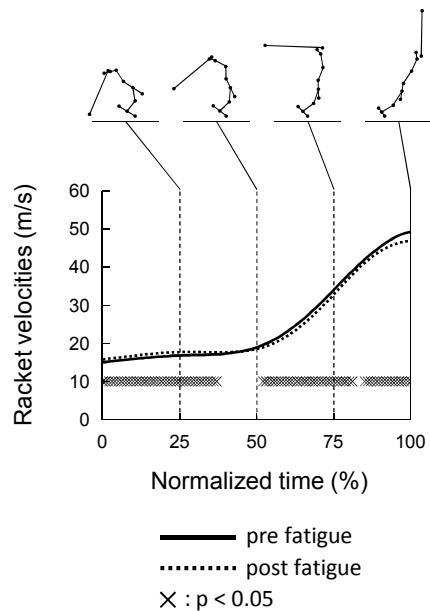


Figure 3. Changes in mean racket velocities from beginning of forward swing to ball impact in the pre and post fatigue.

3. 2 上腕および上肢関節角速度について

図4に疲労前および疲労後におけるフォワードスイング開始からインパクト時までの上腕および上肢関節角速度の平均変化曲線を示した。なお、図の線および記号等の仕様は図3と同様である。

上腕関節について、疲労前後ともにフォワードスイング開始からインパクト時まで低い前傾角速度が確認された。疲労前後の差を検討した結果、45%付近から55%付近までは疲労前の方が疲労後よりも前傾角速度が有意に高かったが、75%付近からインパクト時までは疲労後の方が疲労前よりも前傾角速度は有意に大きかった。上腕の右側屈および左側屈では、疲労前および疲労後ともに終始大きな運動は観察されなかった。疲労前および疲労

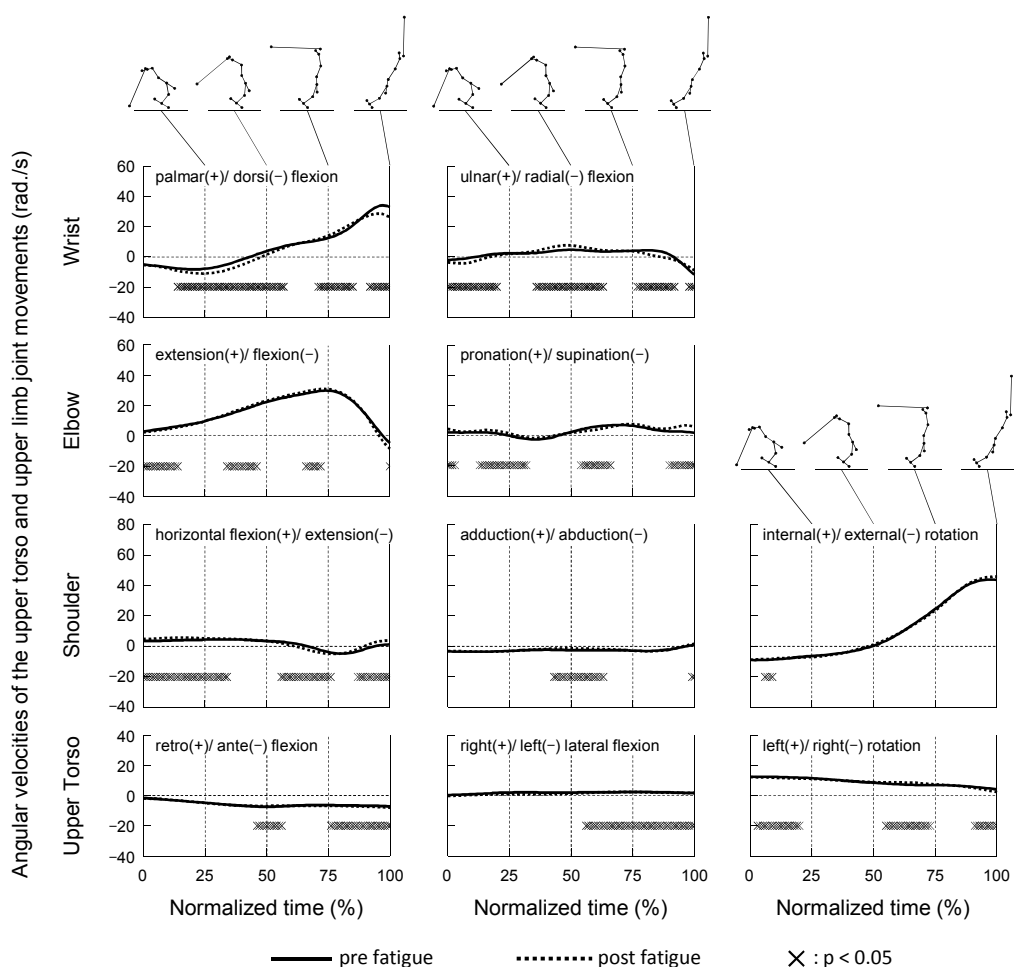


Figure 4. Changes in mean angular velocities of the upper torso and upper limb joint movements from beginning of forward swing to ball impact in the pre and post fatigue.

後を比較したところ、55%付近からインパクト時までの間で有意差が認められた。疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始時からインパクト時まで左回旋角速度が確認された。差の検討の結果、5%付近から20%付近までは疲労前の方が疲労後よりも左回旋角速度が有意に高く、55%付近から75%付近までは疲労後の方が疲労前よりも左回旋角速度は有意に大きかった。そして90%付近からインパクト時までは疲労前の方が疲労後よりも左回旋角速度は有意に高かった。

肩の水平内転および水平外転について、疲労前後ともにフォワードスイング開始から低い水平内転角速度が観察されたが、65%付近から水平外転運動に切り替わり、また90%付近からは再び水平内転運動に転じていた。疲労前後の比較では、フォワードスイング開始から35%付近までは疲労後の方が疲労前よりも水平内転角速度が有意に大きかったが、55%付近から65%付近までは疲労前の方が疲労後よりも水平内転角速度は有意に高かった。また、65%付近から75%付近までは疲労後の方が疲労前よりも水平外転角速度が有意に大きく、85%付近からインパクト時までは疲労後の方が疲労前よりも水平内転角速度が有意に高かった。肩の内転および外転動作では、疲労前後ともにフォワードスイング開始からインパクト直前まで低い外転角速度を維持していた。疲労前および疲労後の差を検討したところ、45%付近から65%付近までと、インパクト直前において有意差が確認された。疲労前後ともにフォワードスイング開始時には低い外旋角速度が観察されたが、45%付近から内旋動作に切り替わり、その後、加速しながらほぼピーク値でインパクトを迎えていた。疲労前後を比較した結果、5%付近から10%付近において有意差が観察された。

肘関節について、疲労前後ともにフォワードスイング開始からインパクトへ向けて伸展角速度が高まったが、75%付近をピークに伸展速度は減少し、インパクト直前には低い屈曲角速度が観察された。疲労前および疲労後を比較した結果、フォワードスイング開始から15%付近までは疲労前の方が疲労後よりも伸展角速度が有意に高かったが、35%付近から45%付近までと、65%付近から70%付近までは疲労後の方が疲労前よりも伸展角速度は有意に大きかった。そして、インパクト時には疲労後の方が疲労前よりも屈曲角速度が有意に高かった。回内および回外動作では、疲労前後ともに45%付近から低い回内角速度が観察された。差の検定では、フォワードスイング開始から5%付近までと、15%付近から25%付近までは疲労後の方が疲労前よりも回外角速度が有意に大きかったが、25%付近から30%付近までは疲労前の方が疲労後よりも回外角速度は有意に高かった。そして55%付近から65%付近までは疲労前の方が疲労後よりも回内角速度が有意に大きかったが、90%付近からインパクト時まで疲労後の方が疲労前よりも回内角速度は有意に高かった。

手首の掌屈および背屈動作について、疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始から低い背屈角速度が確認されたが、45%付近から掌屈動作に切り替わり、そのままインパクトへ向けて掌屈角速度は上昇した。疲労前後を比較したところ、15%付近から45%付近までは疲労後の方が疲労前よりも背屈角速度が有意に大きく、45%から55%付近までは疲労前の方が疲労後よりも掌屈角速度が有意に高かった。そして70%付近から85%付近までは疲労後の方が疲労前よりも掌屈角速度が有意に大きかったが、90%付近からインパクト時までは疲労前の方が疲労後よりも掌屈角速度は有意に高かった。尺屈および橈屈動作では、疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始直後から低い尺屈角速度が観察されたが、インパクト直前から橈屈運動へ切り替わり、そのままインパクトを迎えていた。疲労前後の差を検定した結果、フォワードスイング開始から15%付近までは疲労後の方が疲労前よりも有意に橈屈角速度が大きく、15%から20%付近までは疲労前の方が疲労後よりも有意に尺屈角速度が高かった。そして、35%付近から65%付近までは疲労後の方が疲労前よりも尺屈角速度が有意に大きかったが、75%付近から90%付近までは疲労前の方が疲労後よりも尺屈角速度は有意に高く、そしてインパクト直前では疲労前の方が疲労後よりも橈屈角速度が有意に大きかった。

3. 3 上腕および上肢関節運動によって生み出されたラケット速度について

図5に疲労前および疲労後におけるフォワードスイング開始からインパクト時までの上腕および上肢関節運動によって生み出されたラケット速度の平均変化曲線を示した。なお、図の線および記号等の仕様は図3と同様である。

上腕関節について、疲労前後ともに30%付近からインパクトへ向けて上腕の前傾動作によって低いラケット速度を発揮していた。疲労前および疲労後の比較では、フォワードスイング開始から65%付近までは疲労前の方が疲労後よりも前傾動作によって生み出されたラケット速度は有意に高かったが、85%付近からインパクト時までは疲労後の方が疲労前よりも有意に大きかった。一方、上腕の右側屈および左側屈動作では、疲労前および疲労後ともに、これらの運動によってラケット速度を高めることはほとんどなかった。差の検定の結果、55%付近からインパクト時までの間で有意差が確認された。また、疲労前後ともにフォワードスイング開始からインパクト時まで終始、上腕の左回旋動作によって低いラケット速度を発揮していた。疲労前および疲労後を比較したところ、フォワードスイング開始から20%付近までは疲労前の方が疲労後よりも左回旋動作によって生み出されたラケット速度は有意に高かったが、45%付近から70%付近までは疲労後の方が疲労前よりも有意に大きかった。また、90%付近からインパクト時までは疲労前の方が疲労後よりも左

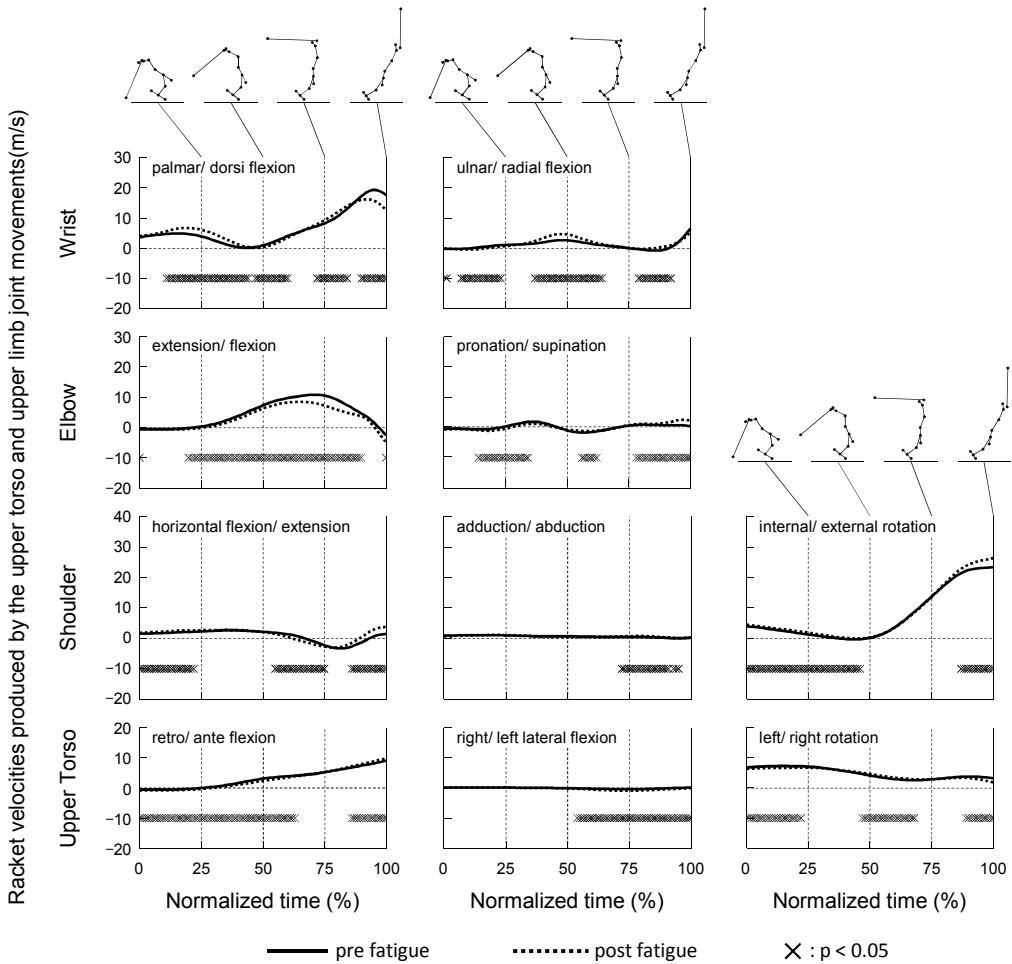


Figure 5. Changes in mean racket velocities produced by upper torso and upper limb joint movements from beginning of forward swing to ball impact in the pre and post fatigue.

回旋動作によって発揮されたラケット速度は有意に高かった。

肩関節の水平内転および水平外転動作について、疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始から65%付近までは水平内転動作によって低いラケット速度を発揮していたが、65%付近から90%付近までは反対に水平外転動作によってラケットは減速し、そして、その後は再び水平内転動作によって低いラケット速度を生み出していた。疲労前後の差を検定した結果、フォワードスイング開始から20%付近までは水平内転動作によって発揮されたラケット速度は疲労後の方が疲労前よりも有意に高かったが、55%付近から65%付近までは疲労前の方が疲労後よりも有意に大きかった。また、65%付近から75%付近までは

疲労後の方が疲労前よりも水平外転動作によって有意に減速していたが、85%付近から90%付近までは疲労前の方が疲労後よりも有意に減速していた。そして、90%付近からインパクト時までは疲労後の方が疲労前よりも水平内転動作によって生み出されたラケット速度を有意に大きかった。肩の内転および外転動作では、疲労前後ともにフォワードスイング開始からインパクト時まで終始、これらの運動によってラケット速度を生み出すことはほとんどなかった。疲労前および疲労後の比較では、70%付近から95%付近までの間で有意差が認められた。疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始から45%付近まで外転動作によって低いラケット速度を生み出していたが、45%付近からインパクトへかけて内転動作によって急激にラケットは加速していた。疲労前後の差を検定したところ、疲労後の方が疲労前よりもフォワードスイング開始から45%付近までは外転動作によって、85%付近からインパクト時までは内転動作によって生み出されたラケット速度は有意に高かった。

肘関節では、疲労前後ともに20%付近からインパクトへ向けて、肘の伸展動作によってラケットは加速していたが、65%付近をピークにラケット速度は減少し、95%付近からは反対に屈曲動作によってラケットは減速していた。疲労前および疲労後を比較した結果、フォワードスイング開始時は疲労前の方が疲労後よりも伸展動作によって有意にラケットは減速し、20%付近から95%付近までは疲労前の方が疲労後よりも伸展動作によって有意に高いラケット速度を生み出していた。また、インパクト時には疲労後の方が疲労前よりも屈曲動作によって有意にラケットは減速していた。回内および回外動作について、疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始からインパクト時まで、大きくラケット速度を増減させることはなかった。疲労前後の差では、15%付近から35%付近までと、55%付近から60%付近までと、そして80%付近からインパクト時までの間で有意差が見られた。

手関節において、疲労前後ともにフォワードスイング開始から45%付近まで背屈動作によって低いラケット速度を生み出していたが、45%付近からは掌屈動作によってラケット速度を發揮し、インパクトへ向けて急激に加速していた。疲労前および疲労後を比較したところ、10%付近から45%付近までは疲労後の方が疲労前よりも背屈動作によって生み出されたラケット速度は有意に高く、45%付近から60%付近までは疲労前の方が疲労後よりも掌屈動作によって發揮されたラケット速度は有意に大きかった。そして、70%付近から85%付近までは疲労後の方が疲労前よりも掌屈動作によって生み出されたラケット速度は有意に高かったが、90%付近からインパクト時までは疲労前の方が疲労後よりも有意に大きかった。尺屈および橈屈動作では、疲労前および疲労後ともに30%付近から65%付近まで尺屈動作によって低いラケット速度を生み出していたが、90%付近からインパクト時に

かけて橈屈動作によって低いラケット速度を発揮していた。疲労前後の差を検定した結果、フォワードスイング開始時と、5%付近から25%付近までの間で有意差が認められた。また、35%付近から65%付近までと、80%付近から90%付近までは疲労後の方が疲労前よりも尺屈動作によって生み出されたラケット速度が有意に高かった。

3. 4 上腕および上肢関節トルクについて

図6に疲労前および疲労後におけるフォワードスイング開始からインパクト時までの上腕および上肢の関節トルクの平均変化曲線を示した。なお、図の線および記号等の仕様は図3と同様である。

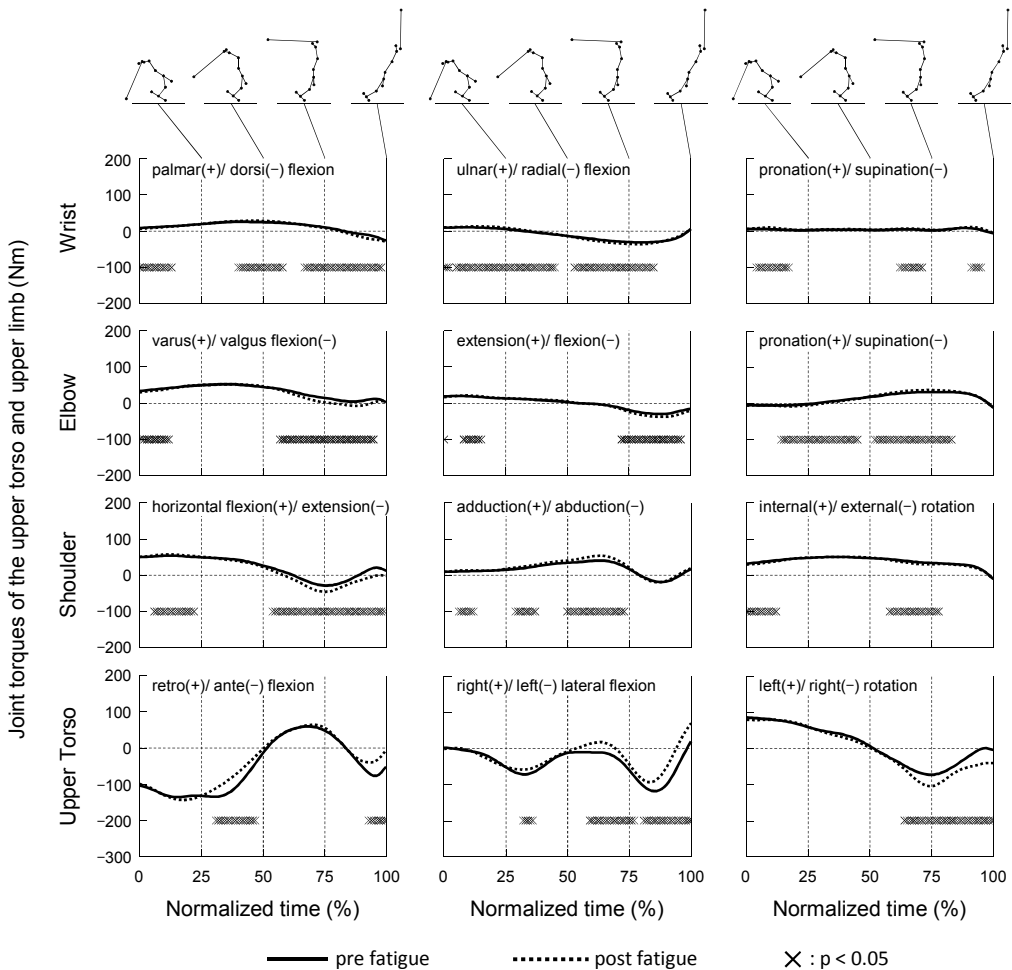


Figure 6. Changes in mean joint torque of the upper torso and upper limb from beginning of forward swing to ball impact in the pre and post fatigue.

上腕の後傾および前傾トルクについて、疲労前後ともにフォワードスイング開始から前傾トルクが観察されたが、20%付近から減少し、50%付近から後傾トルクに転じていた。そして、85%付近から再び前傾トルクが見られ、そのままインパクトを迎えていた。疲労前および疲労後の比較では、30%付近から45%付近までと、95%付近からインパクト時まで疲労前の方が疲労後よりも前傾トルクが有意に大きかった。疲労前および疲労後ともにフォワードスイング直後から左側屈トルクが確認されたが、30%付近を第一のピークとして一旦減少した。その後、70%付近から再び左側屈トルクが観察され、85%付近を第二のピークとして減少し、インパクト直前には右側屈トルクに転じていた。疲労前後の差を検定したところ、30%付近から35%付近までと、60%付近から75%付近まで、そして、80%付近からインパクト直前までは疲労前の方が疲労後よりも左側屈トルクが有意に高く、インパクト直前では疲労後の方が疲労前よりも右側屈トルクが有意に大きかった。疲労前後ともにフォワードスイング開始から左回旋トルクが確認されたが、50%付近から右回旋トルクに切り替わり、そのままインパクトを迎えていた。疲労前および疲労後を比較した結果、65%付近からインパクト時まで疲労後の方が疲労前よりも右回旋トルクが有意に高かった。

肩関節について、疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始から水平内転トルクが見られたが、60%付近から水平外転トルクに切り替わった。疲労後は、そのまま水平外転トルクを維持したままインパクトを迎えたが、疲労前では90%付近から再び水平内転トルクが確認された。疲労前後の差では、5%付近から20%付近までは疲労後の方が疲労前よりも水平内転トルクが有意に大きかったが、55%付近から60%付近までは疲労前の方が疲労後よりも水平内転トルクが有意に高かった。また、60%付近からインパクト時までには疲労後の方が疲労前よりも水平外転トルクが有意に大きかった。疲労前後ともにフォワードスイング開始から内転トルクが観察されたが、80%付近から外転トルクに転じ、95%付近から再び内転トルクが見られた。疲労前および疲労後の比較したところ、5%付近から10%付近までと、30%付近から35%付近までと、そして50%付近から75%付近までで疲労後の方が疲労前よりも内転トルクが有意に高かった。疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始からインパクト直前まで内旋トルクが観察された。疲労前後の差を検定した結果、フォワードスイング開始から10%付近までと、60%付近から80%付近までで疲労前の方が疲労後よりも内旋トルクが有意に大きかった。

疲労前後ともにフォワードスイング開始からインパクト時まで内反トルクが観察された。疲労前および疲労後の比較では、フォワードスイング開始から10%付近と、55%付近から95%付近まで疲労前の方が疲労後よりも内反トルクが有意に大きかった。疲労前およ

び疲労後ともにフォワードスイング開始から伸展トルクが確認されたが、55%付近から屈曲トルクに切り替わり、そのままインパクトを迎えた。疲労前後の差を検定したところ、フォワードスイング開始時は疲労前の方が疲労後よりも伸展トルクが有意に大きかったが、10%付近から15%付近までは疲労後の方が疲労前よりも有意に高かった。また、70%付近から95%付近までは疲労後の方が疲労前よりも屈曲トルクが有意に大きかった。疲労前後ともにフォワードスイング開始から回外トルクが見られたが、30%付近から回内トルクに転じていた。疲労前および疲労後の比較の結果、15%付近から30%付近までは疲労後の方が疲労前よりも回外トルクが有意に高かった。また、30%付近から45%付近までは疲労前の方が疲労後よりも回内トルクは有意に大きかったが、50%付近から85%付近までは疲労後の方が疲労前よりも有意に高かった。

疲労前および疲労後ともにフォワードスイングスイング開始から掌屈トルクが見られたが、85%付近から背屈トルクに切り替わり、そのままインパクトを迎えていた。疲労前後の差では、フォワードスイング開始から15%付近まで疲労前の方が疲労後よりも掌屈トルクは有意に高かったが、40%付近から60%付近までは疲労後の方が疲労前よりも有意に大きかった。また、65%付近から85%付近までは疲労前の方が疲労後よりも掌屈トルクが有意に高く、85%付近からインパクト直前までは疲労後の方が疲労前よりも背屈トルクが有意に大きかった。疲労前後ともにフォワードスイング開始から尺屈トルクが観察されたが、35%付近から撓屈トルクに転じ、そのままインパクトを迎えた。疲労前および疲労後を比較したところ、フォワードスイング開始直後と、5%付近から35%付近までは疲労後の方が疲労前よりも尺屈トルクが有意に大きかった。また、35%付近から45%付近までは疲労前の方が疲労後よりも撓屈トルクが有意に高かったが、55%付近から85%付近までは疲労後の方が疲労前よりも有意に高かった。疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始からインパクト時まで手首の回内および回外トルクはほとんど観察されなかった。疲労前後の差の検定の結果、5%付近から15%付近までと、60%付近から70%付近までと、そして90%付近から95%付近までの間で有意差が確認された。

3. 5 上腕および上肢関節力パワーについて

図7に疲労前および疲労後におけるフォワードスイング開始からインパクト時までの上腕および上肢の関節力パワーの平均変化曲線を示した。なお、図の線および記号等の仕様は図3と同様である。また、正の関節力パワーは末梢側の分節へのパワー流入を、負の関節力パワーは中枢側の分節への流出を表している。

上腕において、疲労前ではフォワードスイング開始から正の関節力パワーが観察された

が、30%付近をピークに減少し、45%付近から負の関節力パワーに転じていた。そして、60%付近から再び正の関節力パワーが見られた。一方、疲労後はフォワードスイング開始からインパクト直前まで、正の関節力パワーが観察された。疲労前および疲労後の比較では、35%付近から70%付近までは疲労後の方が疲労前よりも正の関節力パワーが有意に高かったが、85%付近からインパクト時まで疲労前の方が疲労後よりも有意に大きかった。

肩関節では、疲労前後ともにフォワードスイング開始から正の関節力パワーが観察されたが、55%付近から負の関節力パワーに切り替わり、80%付近から再び正の関節力パワーが見られた。疲労前後の差を検定したところ、フォワードスイング開始から20%付近までと、30%付近から45%付近までは疲労前の方が疲労後よりも正の関節力パワーが有意に高く、65%付近から80%付近までは疲労前の方が疲労後よりも負の関節力パワーが有意に大きかった。また、80%付近から85%付近までは疲労後の方が疲労前よりも正の関節力パワーは有意に高かったが、インパクト時では疲労前の方が疲労後よりも有意に大きかった。

肘関節に関しては、疲労前後ともにフォワードスイング開始から正の関節力パワーが観察されたが、75%付近から負の関節力パワーに転じ、そして90%付近から再び正の関節力パワーに切り替わっていた。疲労前および疲労後を比較した結果、フォワードスイング開始からインパクト時までどこにも有意差は見られなかった。

手関節において、疲労前ではフォワードスイ

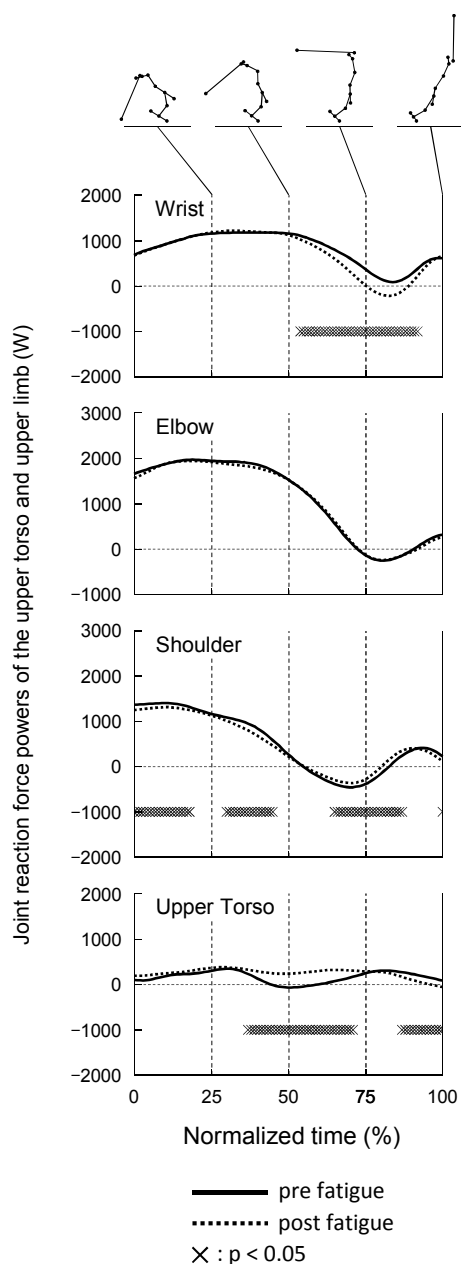


Figure 7. Changes in mean joint force powers of the upper torso and upper limb from beginning of forward swing to ball impact in the pre and post fatigue.

ング開始からインパクト時まで正の関節力パワーが観察された。一方、疲労後では、はじめは疲労前と同様に正の関節力パワーが見られたが、75%から負の関節力パワーに切り替わり、90%付近から再び正の関節力パワーが観察された。疲労前後の差を検定したところ、55%付近から90%付近まで疲労前の方が疲労後よりも正の関節力パワーが有意に大きかった。

3. 6 上腕および上肢関節トルクパワーについて

図8に疲労前および疲労後におけるフォワードスイング開始からインパクト時までの上腕および上肢の関節トルクパワーの平均変化曲線を示した。なお、図の線および記号等の仕様は図3と同様である。また、正の関節トルクパワーは短縮性筋収縮を、負の関節トルク

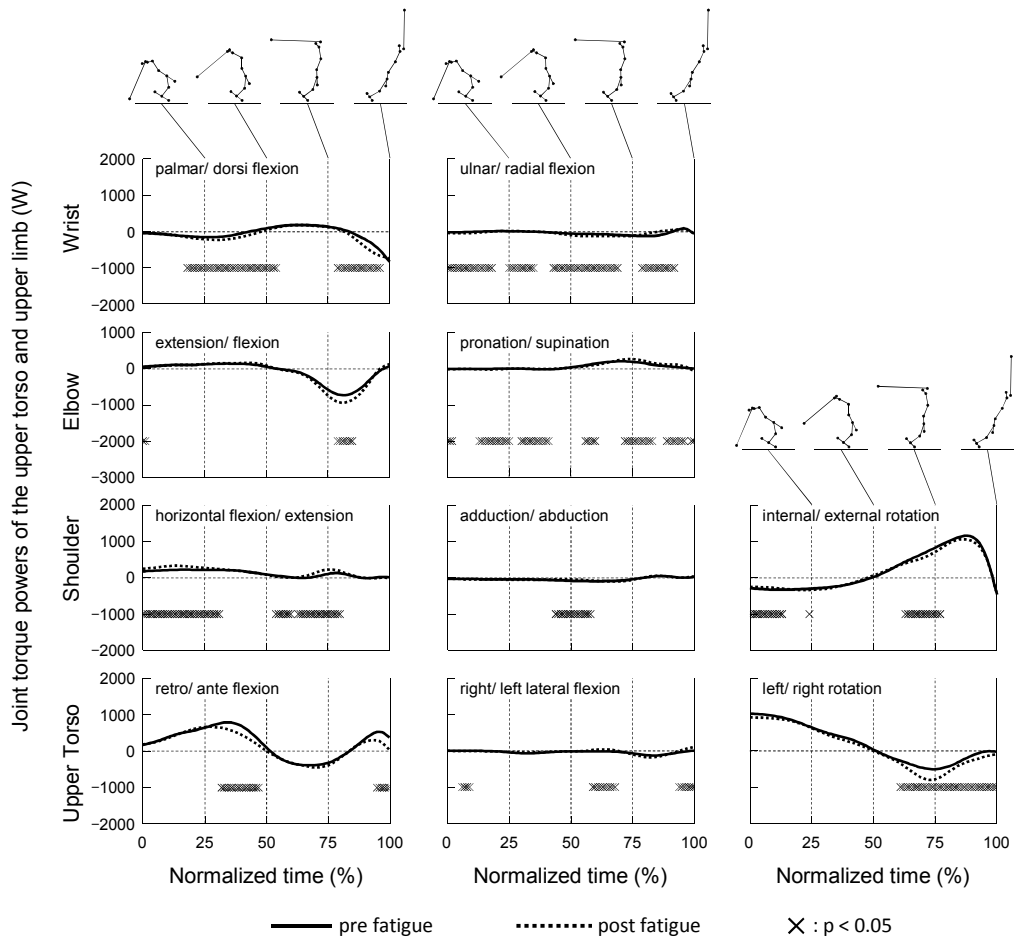


Figure 8. Changes in mean joint torque powers of the upper torso and upper limb from beginning of forward swing to ball impact in the pre and post fatigue.

テニスサービスの打球数増加による体幹および上肢関節運動の変化がラケット速度へ及ぼす影響について (田邊 智)

クパワーは伸張性筋収縮を表している。さらに、関節力パワーと同様に、正の関節トルクパワーは末梢側の分節へのパワーの流入を、負の関節トルクパワーは中枢側の分節への流出を示している。

上腕の後傾および前傾動作では、疲労前後ともにフォワードスイング開始から正の関節トルクパワーが観察されたが、50%付近から負の関節トルクパワーに切り替わり、85%付近から再び正の関節トルクパワーが見られた。疲労前および疲労後の比較では、30%付近から45%付近までと、95%付近からインパクト時まで疲労前の方が疲労後よりも正の関節トルクパワーが大きかった。右側屈および左側屈動作について、疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始からインパクト時まで関節トルクパワーはほとんど観察されなかった。疲労前後の差を検定した結果、5%付近から10%付近までと、60%付近から70%付近までと、そして95%付近からインパクト時までの間で有意差が確認された。左回旋および右回旋動作においては、疲労前後ともにフォワードスイング開始から正の関節トルクパワーが観察されたが、50%付近から負の関節トルクパワーに転じ、そのままインパクトを迎えていた。疲労前および疲労後を比較したところ、60%付近からインパクト時まで疲労後の方が疲労前よりも負の関節トルクパワーが有意に大きかった。

肩の水平内転および水平外転動作について、疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始からインパクト時まで正の関節トルクパワーが観察された。疲労前後の差では、フォワードスイング開始から30%付近まで疲労後の方が疲労前よりも正の関節トルクパワーが有意に大きかった。また、55%付近から60%付近までは疲労前の方が疲労後よりも正の関節トルクパワーが有意に高かったが、60%付近から80%付近までは疲労後の方が疲労前よりも有意に大きかった。肩の内転および外転動作では、疲労前後ともにフォワードスイング開始からインパクト時まで関節トルクパワーはほとんど観察されなかった。疲労前および疲労後を比較した結果、45%付近から60%付近までの間で有意差が認められた。内旋および外旋動作においては、疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始から負の関節トルクパワーが観察されたが、50%付近から正の関節トルクパワーに切り替わり、インパクト直前まで続いた。疲労前後の差を検定したところ、フォワードスイング開始から15%付近までは疲労前の方が疲労後よりも負の関節トルクパワーが有意に高かったが、25%付近では疲労後の方が疲労前よりも有意に大きかった。また、65%付近から80%付近まで疲労前の方が疲労後よりも正の関節トルクパワーが有意に高かった。

肘の伸展および屈曲動作について、疲労前後ともにフォワードスイング開始から正の関節トルクパワーが観察されたが、55%付近から負の関節トルクパワーに転じ、そのままインパクトを迎えた。疲労前および疲労後の比較について、フォワードスイング開始直後で

は疲労前の方が疲労後よりも正の関節トルクパワーが有意に高く、80%付近から85%付近までは疲労後の方が疲労前よりも負の関節トルクパワーが有意に大きかった。回内および回外動作では、疲労前および疲労後ともに45%付近から正の関節トルクパワーが観察された。疲労前後の差を検定した結果、フォワードスイング開始直後と、15%付近から25%付近までと、そして30%付近から40%付近までの間で有意差が認められた。また、55%付近から60%付近まででは疲労前の方が疲労後よりも正の関節トルクパワーが有意に高かったが、70%付近から85%付近までと、90%付近からインパクト時まででは疲労後の方が疲労前よりも有意に正の関節トルクパワーが有意に大きかった。

手首の掌屈および背屈動作について、疲労前後ともにフォワードスイング開始から負の関節トルクパワーが確認され、45%付近で正の関節トルクパワーに切り替わったが、85%付近から再び負の関節トルクパワーが観察された。疲労前後の比較では、20%付近から45%付近までは疲労後の方が疲労前よりも負の関節トルクパワーが有意に高く、45%付近から55%付近までと、80%付近から85%付近までは疲労前の方が疲労後よりも正の関節トルクパワーが有意に大きかった。そして、85%付近から95%付近までは疲労後の方が疲労前よりも負の関節トルクパワーが有意に高かった。尺屈および撓屈動作では、疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始からインパクト時まで関節トルクパワーはほとんど観察されなかった。疲労前および疲労後の差を検定したところ、フォワードスイング開始から20%付近までと、25%付近から35%付近までと、45%付近から70%付近まで、そして80%付近から90%付近までの間で有意差が認められた。

3. 7 上腕および上肢関節力による仕事について

表1は疲労前後の上腕および上肢関節力による仕事を表している。上腕では、正の仕事は疲労後の方が疲労前よりも有意に大きかったが、負の仕事については疲労前の方が疲労後よりも有意に高かった。また、肩関節においては、正の仕事および負の仕事ともに、疲

Table 1. Positive and negative mechanical works by joint force in the pre and post fatigue.

	positive work (J)		negative work (J)	
	pre fatigue	post fatigue	pre fatigue	post fatigue
wrist	91.1 ± 5	81.9 ± 4.0 *	-0.1 ± 0	-2.0 ± 1.0 *
elbow	125.0 ± 5	122.2 ± 8	-3.2 ± 2	-3.1 ± 1
shoulder	66.3 ± 3	61.2 ± 5 *	-8.9 ± 2	-6.3 ± 2 *
upper torso	19.7 ± 4	28.4 ± 5 *	-1.6 ± 1	-0.4 ± 1 *

* p < 0.05

Table 2. Positive and negative mechanical works by joint torque in the pre and post fatigue.

	positive work (J)		negative work (J)	
	pre fatigue	post fatigue	pre fatigue	post fatigue
wrist				
palmar/ dorsi flexion	5.1 ± 1	4.3 ± 1 *	-11.3 ± 1	-16.1 ± 1 *
ulnar/ radial flexion	0.6 ± 0	0.8 ± 0	-4.7 ± 1	-5.4 ± 1 *
elbow				
extension/ flexion	6.5 ± 1	7.3 ± 1	-16.7 ± 2	-20.8 ± 2 *
pronation/ supination	6.3 ± 1	7.5 ± 1 *	-0.5 ± 0	-0.7 ± 0
shoulder				
horizontal flexion/ extension	13.3 ± 1	17.5 ± 1 *	-0.1 ± 0	-0.2 ± 0
adduction/ abduction	0.6 ± 0	0.6 ± 0	-4.9 ± 1	-4.7 ± 1
internal/ external rotation	35.1 ± 3	32.0 ± 3 *	-14.1 ± 1	-13.8 ± 2
upper torso				
retro/ ante flexion	35.4 ± 4	28.3 ± 3 *	-9.8 ± 4	-10.9 ± 5
right/ left lateral flexion	0.4 ± 1	0.8 ± 1	-4.6 ± 2	-4.2 ± 1
left/ right rotation	35.0 ± 5	31.9 ± 4.0	-14.2 ± 4	-21.9 ± 3 *

* p < 0.05

労前の方が疲労後よりも有意に大きかった。肘関節については、正の仕事および負の仕事ともに、疲労前の方がわずかに高かったが、疲労前後で有意差は認められなかった。そして、手関節に関しては、正の仕事は疲労前の方が疲労後よりも有意に大きかったが、負の仕事は疲労後の方が疲労前よりも有意に高かった。

3. 8 上腕および上肢関節トルクによる仕事について

表2に疲労前後の上腕および上肢関節トルクによる仕事を示した。上腕関節について、疲労前の方が疲労後よりも前傾および後傾トルクによる正の仕事は有意に大きく、疲労後の方が疲労前よりも左回旋および右回旋トルクによる負の仕事が有意に高かった。肩関節において、水平内転および水平外転トルクによる正の仕事は疲労後の方が疲労前よりも有意に大きかったが、内旋および外旋トルクによる正の仕事は疲労前の方が疲労後よりも有意に高かった。肘関節では、伸展および屈曲トルクによる負の仕事は疲労後の方が疲労前よりも有意に大きく、回内および回外トルクによる正の仕事も疲労後の方が疲労前よりも有意に高かった。手関節の掌屈および背屈トルクによる正の仕事は疲労前の方が疲労後よりも有意に大きかったが、負の仕事は疲労後の方が疲労前よりも有意に高かった。そして、尺屈および橈屈トルクによる負の仕事は疲労後の方が疲労前よりも有意に大きかった。

4. 考 察

本研究では、男子大学テニス選手1名を対象にテニスサーブを100本打たせ、打球数の増加による体幹および上肢関節運動の変化を調べるとともに、それがラケット速度へどのような影響を与えるのかを明らかにしようとした。その結果、疲労後のラケット速度は疲労前と比べて50%付近から有意に低下しており、インパクト時においては疲労前に49.3m/sであったのに対し、疲労後では46.9m/sと、2.4m/sも減少していた(図3)。このラケット速度が減少した原因を調べるため上腕および上肢関節運動によって生み出されたラケット速度について見てみると、手首の掌屈動作によって生み出されたラケット速度が最も顕著に減少していた(図5)。つまり、掌屈動作によって発揮されたラケット速度は90%付近からインパクト時にかけて疲労後の方が疲労前よりも有意に低く、インパクト時においては疲労前が17.2m/sであったのに対し、疲労後では12.4m/sと4.8m/sも低下していたのである。この掌屈動作によって生み出されたラケット速度は掌屈角速度ベクトルと手首からラケットヘッドまでの相対位置ベクトルとの外積によって求められる。そこで、疲労前後の掌屈角速度について調べてみると、90%付近からインパクト時にかけて疲労後の方が疲労前よりも掌屈角速度は有意に低い値を示し、インパクト時では疲労前に32.6rad/sであったが、疲労後では25.9rad/sと、6.7rad/sも減少していた。一般的に、野球の投球のリリースやテニスサーブインパクト直前に観察される掌屈動作は掌屈トルクによるものではなく、中枢から末梢部へ流れ込んできた関節力パワーによって生み出されると考えられている(宮西ほか, 1997; 村田ほか, 2015)。本研究においても手関節では、疲労前後ともにインパクト直前から掌屈トルクではなく背屈トルクが観察されている(図6)。また、前腕から手部へと流れ込んでくるパワーは、関節トルクパワーに比べ関節力パワーの方が顕著に大きく(図7, 8)、手首の関節力による正の仕事は疲労後の方が疲労前よりも有意に小さかった(表1)。以上の結果から、打球数の増加にともなうラケット速度の低下の主な原因は掌屈角速度の低下であり、掌屈角速度の低下は前腕から手部へと流れ込んでくる関節力パワーが減少したことが原因であると考えられた。

本研究では当初、打球数の増加にともなうすべての関節運動によって生み出されるラケット速度が減少すると考えていた。しかし、手首の掌屈動作によって生み出されたラケット速度はインパクト時において疲労後、有意に低下したものの、肩の内旋や水平内転、前腕の回内動作によって生み出されたラケット速度は逆に疲労後、有意に増加していた。特に、内旋動作によって生み出されたラケット速度は、85%付近からインパクト時まで疲労後の方が疲労前よりも有意に大きく、特にインパクト時においては疲労前が23.4m/sであっ

たのに対し、疲労後は26.4m/sと、3.0m/sも増加していた。Tanabe and Ito (2007) はラケット速度と上肢関節角速度との相関関係を調べ、ラケット速度の高い選手ほど内旋動作を使ってラケット速度を高めていたと述べている。また内旋は上腕の長軸まわりの運動であるため慣性モーメントが小さく、小さい筋力で効果的に関節を動かすことができると考えられている。岩佐ほか (2011) は中学野球選手を対象に投球数の増加が肩関節可動域と肩関節筋力に与える影響について調べ、肩関節の疲労度は投球前後において増加したものの、肩関節内旋外旋筋力に差は見られなかったと報告している。本研究においても、疲労前および疲労後において内旋トルクに顕著な差は認められず (図6)、内旋角速度についても疲労前後でどこにも有意差は認められなかった (図4)。Tanabe and Ito (2007) はインパクトの瞬間に肘が屈曲している選手ほど、内旋動作によってより大きなラケット速度を生み出していたことを明らかにし、肘を屈曲した方が内旋動作の回転半径を大きくすることができるので、ラケット速度の高い選手ほどラケット速度に対する内旋の効果を高めるために肘をより屈曲していたと報告している。内旋を効果的に高めるには肘関節だけではなく、手関節の屈曲角度も関係があると考えられるため、疲労前後のフォワードスイング開始からインパクト時までの肘関節および手関節の屈曲伸展角度を調べた (図9)。その結果、肘の屈曲伸展角度については、疲労前および疲労後ともにフォワードスイング開始からインパクトへ向けて伸展し、インパクト直前でピークに達した後、少し屈曲しながらインパクトを迎えていた。疲労前後の差の検定の結果、フォワードスイング開始からインパクト時までどこにも有意差は認められなかった。一方、手首の屈曲伸展角度では、フォワードスイング開始から一度屈曲したが、45%付近からインパクトへ向けて伸展していくのが確認された。疲労前および疲労後を比較したところ、フォワードスイング開始から25%付近までは疲労前の方が疲労後よりも有意に屈曲

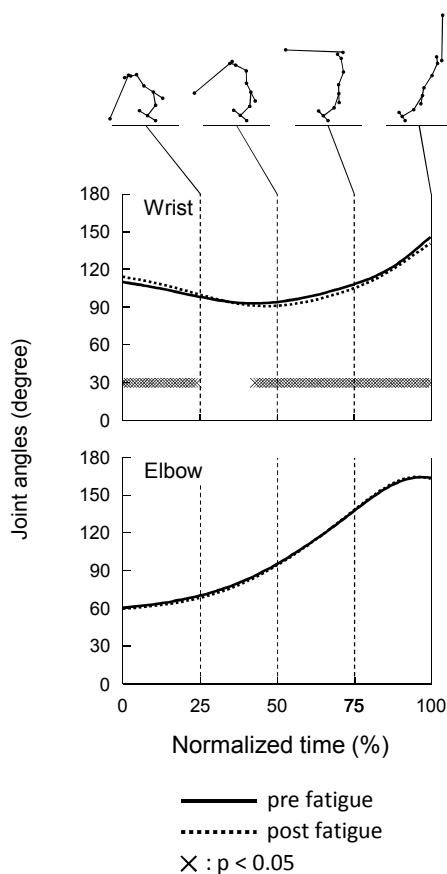


Figure 9. Changes in mean joint angles of elbow and wrist from beginning of forward swing to ball impact in the pre and post fatigue.

位にあったが、45%付近からインパクト時までは疲労後の方が疲労前よりも有意に屈曲位にあった。なお、ここでいう手首の屈曲伸展角度とは掌屈／背屈角度と尺屈／橈屈角度を合わせた前腕と手部の3次元的な角度を示している。45%付近以降、疲労後の方が疲労前よりも手首がより屈曲位にあった理由としては、打球数の増加にともない手首の掌屈角速度が低下したため、疲労後の方がより背屈位にあったからではないかと推察された。これらの結果から、疲労後は手首の掌屈角速度が低下することで、掌屈動作によるラケット速度は減少するものの、掌屈角速度の低下によって手首がより屈曲位でスイングしていたため、それが内旋の回転半径を高め、結果的に、内旋によって生み出されたラケット速度が増加したと考えられた。

本研究では、肘の伸展動作によって生み出されたラケット速度は20%付近から95%付近まで疲労後の方が疲労前よりも有意に小さく、インパクト時には疲労前が -2.6m/s であったのに対し、疲労後は -5.0m/s と、ラケットを 2.4m/s も有意に減速させていた(図5)。この原因を調べるため肘の伸展角速度について見てみると、インパクト時において疲労前は -4.7rad/s であったが、疲労後では -8.4rad/s と有意に低下していた(図4)。なお、この肘伸展角速度のマイナスは肘が屈曲していることを意味する。つまり本研究の被験者は疲労後、インパクトの瞬間に肘をより屈曲させることで、ラケットを減速させていたことを示している。このようにインパクト時にラケットを減速させる働きをしていた関節運動は肘の伸展屈曲動作だけであった。Marshall and Elliott (2000)が行ったテニスサービスに関する研究においても、本研究の結果と同様にインパクトの瞬間に肘の屈曲角速度が観察され、インパクトの瞬間のラケット速度に対する貢献度が -14.2% と、ラケットを減速させる働きをしていたことが報告されている。小池ほか(2009)は順動力学的分析方法を用いて、テニスサービス時のラケット速度を生み出している関節運動や、それぞれの関節運動を引き起こしている要因について詳しく調べ、肘関節の伸展は伸展トルクによって生み出されているものではなく、肩の関節力や運動依存力によって生成されるものであると報告している。本研究においても、55%付近からインパクトへかけて伸展トルクではなく屈曲トルクが観察され、70%付近から95%付近までにおいて疲労後の方が疲労前よりも屈曲トルクが有意に大きい値を示した(図6)。また、疲労後の方が疲労前よりも肩の関節力による正の仕事が有意に減少していた(表1)。本研究の結果からは、疲労後に肘の屈曲トルクが増大した原因を明らかにすることはできなかったが、打球数の増加にともない肘の屈曲トルクが高まったことに加え、肩の関節力による正の仕事が減少したことから、インパクト時に肘は伸展されずに反って屈曲してしまい、その結果、ラケット速度を減少させることになったと推察された。

まとめ

本研究では、男子大学テニス選手1名を対象に、テニスサービスを100本打たせ、打球数の増加による体幹および上肢関節運動の変化を調べ、それがラケット速度に対してどのような影響を与えるのかを明らかにしようとし、次のような結果が得られた。

- 1) 打球数の増加にともなうラケット速度は有意に減少した。
- 2) 打球数の増加にともなうラケット速度の低下の主な原因は掌屈角速度の低下であった。また、掌屈角速度の低下は前腕から手部へと流れ込んでくる関節力パワーが減少したことによるものであった。
- 3) 疲労後、掌屈角速度の低下による手首の屈曲が内旋の回転半径を大きくし、結果的に、内旋によって生み出されたラケット速度を増加させていた。
- 4) インパクト時の肘の屈曲は肘の屈曲トルクの増加と肩の関節力による正の仕事の減少が原因で、結果として、それがラケット速度を減少させていた。

参考文献

- 阿江通良 (1996) 日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. *Japanese Journal of Sports Sciences*, 15: 155-162.
- Ae, M., Muraki, Y., Koyama, H., and Fujii, N. (2007) A biomechanical method to establish a standard motion and identify critical motion by motion variability: With examples of high jump and sprint running. *Bulletin of institute of health and sport sciences, University of Tsukuba*, 30: 5-12.
- 足立長彦 (1999) テニスの試合における勝敗に関する一考察：サーブの分析を中心として. *武庫川女子大学紀要, 人文・社会科学編*. 47 : 57-63.
- Elliott, B.C., Marshall, R.N., and Noffal, G.J. (1995) Contributions of upper limb segment rotations during the power serve in tennis. *Journal of Applied biomechanics*, 11: 433-442.
- Escamilla, R.F., Barrentine, S.W., Fleisig, G.S., Zheng, N., Takada, Y., Kingsley, D. and Andrews, J.R. (2007) Pitching biomechanics as a pitcher approaches muscular fatigue during a simulated baseball game. *American Journal of Sports Medicine*, 35 (1) : 23-33.
- 藤井範久・宮下憲・阿江通良 (1997) ハードル走における下肢3次元関節トルクおよび関節トルクパワー. *バイオメカニクス研究*, 1 (1) : 41-50.
- 平山大作・藤井範久・小池関也・阿江通良 (2010) 野球投手の投球数の増加による下肢関節の力学的仕事量の変化. *体力科学*, 59 (2) : 225-232.

- 岩佐知子・菅沼一男・知念紗嘉・丸山仁司 (2011) 投球数が肩関節機能に及ぼす影響－中学生野球選手において－. 理学療法科学, 26 (1) : 23-26.
- 小池関也・石川達也・阿江通良 (2009) テニスサーブ動作における上肢のラケット速度生成メカニズム：競技レベルの違いが順動力学的貢献に与える影響. ジョイント・シンポジウム講演論文集：スポーツ工学シンポジウム：シンポジウム：ヒューマン・ダイナミックス, pp.76-81.
- Marshall, R.N. and Elliott, B.C. (2000) Long-axis rotation: The missing link in proximal-to-distal segmental sequencing. *Journal of Sports Sciences*, 18 (4) : 247-254.
- 宮西智久・藤井範久・阿江通良・巧刀靖雄・岡田守彦 (1996) 野球の投球動作におけるボール速度に対する体幹および投球腕の貢献度に関する 3 次元的研究. *体育学研究*, 41 (1) : 23-37.
- 宮西智久・藤井範久・阿江通良・巧刀靖雄・岡田守彦 (1997) 野球の投球動作における体幹および投球腕の力学的エネルギー・フローに関する 3 次元解析. *体力科学*, 46 (1) : 55-68.
- 村田宗紀・藤井範久・鈴木雄太 (2015) 硬式テニスサーブにおけるエネルギー形態に着目したラケット保持腕の力学的エネルギーフロー. *体育学研究*, 60 (1) : 177-195.
- Sprigings, E., Marshall, R, Elliott, B., and Jennings, L. (1994) A three-dimensional kinematic method for determining the effectiveness of arm segment rotations in producing racket-head speed. *Journal of Biomechanics*, 27 (3) : 245-254.
- Tanabe, S. and Ito, A. (2007) A three-dimensional analysis of the contributions of upper limb joint movements to horizontal racket head velocity at ball impact during tennis serving. *Sports Biomechanics*, 6 (3) : 418-433.
- 田邊智・伊藤章 (2008) テニスサーブ時のラケットヘッド速度へのラケット並進運動と回転運動の貢献. *大阪体育学研究*, 46 : 11-25.
- 和達三樹 (1983) 物理のための数学. 岩波書店, pp.49-54, pp.98-110.
- Winter (2009) *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. Wiley.
- Yu, B., Gabriel, D., Noble, L., and An, K. (1999) Estimate of the optimum cutoff frequency for the butterworth low-pass digital filter. *Journal of Applied Biomechanics*, 15 (3) : 318-329.