

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500726

研究課題名(和文)筋の収縮様式を考慮したスポーツ動作の動力的分析

研究課題名(英文)Dynamic contribution analyses of sport motion considering muscle contraction mode

研究代表者

小池 関也 (KOIKE, Sekiya)

筑波大学・体育系・准教授

研究者番号：50272670

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：高速・高加速なスポーツ動作における筋の収縮様式を考慮した機能を定量化した結果、踵接地タイプのランナーの定速走動作では、筋張力の動作に対する変換率の大きさは筋毎に様ではなく、水平前後方向成分よりも鉛直方向成分の方が大きいこと、特に鉛直方向成分においては、短縮性収縮時に比べて伸張性収縮時において変化率が大きいという特徴が示された。テニスサーブにおけるラケットスピード獲得メカニズムについては、上半身筋群において、表層筋と同様に、深層筋群もラケットスピード獲得に寄与していることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to determine the dynamic functional roles of muscles in consideration with muscle contraction modes during high-speed and/or high-acceleration sports motion. The results obtained from the analyses of the heel strikers' running motion under constant speed pace condition indicate that (1) the dynamic conversion ratios of horizontal components were larger than those of vertical components among all the muscles, and (2) muscle relative loads with eccentric muscle activities were larger than those with concentric muscle activities for the muscles whose force contribute braking. The results obtained from the analyses of the flat serve motion in tennis indicate that the deep muscles, such as teres minor and subscapularis were great contributors as well as outer muscles, such as deltoid and pectoralis major.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：動力的貢献 筋の収縮様式 走動作 テニスサーブ動作 スポーツ動作 系の運動方程式 筋の機能抽出 運動依存項

1. 研究開始当初の背景

スポーツ動作は非常に高速あるいは高加速であることに加え、人体は多くの節が関節によって連結された多節構造であることから、運動時には、慣性力、コリオリ力、遠心力、ならびに重力が複雑に作用する。さらに、動きの動力源となる筋では、その収縮様式である短縮性および伸張性収縮において、筋の力発揮特性が異なると報告されている。しかしながら、このような筋の収縮様式を考慮して、スポーツ動作生成に対する各筋張力の動力的な貢献についての分析を行ったものはなく、その解明が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、スポーツ動作生成において必要となる各種機能（例えば、身体重心の加減速、身体支持、体幹の姿勢制御、身体末端あるいは打具打点部の加速など）に対して、短縮性や伸張性といった筋の収縮様式を考慮した動力的分析を行うことによって、力の発生源である筋によるスポーツ動作の生成メカニズムを明らかにすることを目的とする。具体的には、定速走動作における支持脚筋群、ならびにテニスサーブ動作における上半身筋群の各機能の定量化を行う。

3. 研究の方法

(1) 走動作の分析法

骨格モデリングソフトウェア (SIMM, MusculoGraphics 社製) を用いて、3 関節 5 自由度、33 の Hill タイプの筋腱複合体を有する支持脚筋骨格モデル (図 1) を構築した。筋の分配問題を解決するため、目的関数を活性化の 3 乗和、制約条件を逆力学演算による関節トルクと、その関節を跨ぐ筋の筋トルクの総和が一致するという等式制約条件、ならびに各筋の活性化に関する不等式制約条件 ($0 \leq q_i \leq 1$) として、各時点において最適化計算を行うことにより、筋張力 F_{mssl} を算出した。そして、筋 i の関節 j に対するモーメントアーム $r_{mssl,j,i}$ と筋張力 $F_{mssl,i}$ の積から、関節 j 周りの筋による筋トルク $T_{mssl,j,i}$ を算出した。

$$T_{mssl,j,i} = r_{mssl,j,i} \times F_{mssl,i} \quad (i)$$

なお、筋張力と同様に推定した筋腱複合体の長さ変化 $\dot{l}_{MTC,i}$ を元に、各時点における各筋の収縮様式を決定した。

・各筋群の動力的指標

身体を 15 セグメントからなる剛体リンクモデルと仮定し、各セグメントの運動方程式、セグメント間の連結方程式、解剖学的関節自由度を考慮するための幾何学拘束式を連立することにより、全身の運動方程式を導出する。

$$\dot{V} = A_{Ta} T_{Ta} + A_V + A_G G \quad (ii)$$

ここで、 V は各セグメントの重心速度および角速度ベクトルからなる一般化速度ベクトル、 T_{Ta} は能動的関節トルクからなるベクトル、 G は重力を示すベクトルをそれぞれ示している。また、 A_{Ta} は能動的関節軸トルクの係数行列、 A_V はコリオリ・遠心力やジャイロ効果によるモーメント等の運動依存トルクに関するベクトル、 A_G は重力ベクトルの係数行列をそれぞれ示している。

そして、身体重心への変換行列である S を用いることにより、身体重心加速度 \ddot{x}_{cg} に対する関節トルク項、運動依存項、重力項の各貢献式を下式として得ることができる。

$$\ddot{x}_{cg} = SA_{Ta} T_{act} + SA_V + SA_G G \quad (iii)$$

式(i)で示す各筋の筋トルクを用いて、支持脚における筋 i の身体重心加速度に対する貢献 $C_{mssl,i}$ は、下式として表すことができる。

$$C_{mssl,i} = SA_{Ta,i} \sum_{j=1}^5 T_{mssl,j,i} \quad (iv)$$

さらに、各筋張力の身体重心速度変化に対する貢献を、方向成分（鉛直方向および前後方向）毎、および収縮様式（伸張性および短縮性）毎に、符号を考慮して時間積分することにより、各筋張力の身体重心速度変化に対する貢献を算出する。例えば、筋 i の伸張性収縮 (ec) による筋張力の身体重心の鉛直方向の上向き成分 ($v(+)$) は下記の通りとなる。

$${}^{ec}C_{\Delta V, v(+), mssl,i} = \int \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^{ec}C_{mssl,i} dt, \quad \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^{ec}C_{mssl,i} > 0 \right) \quad (v)$$

本研究では、各筋張力がどれだけ効果的に身体運動に変換されているかを定量化するため、各筋の身体慣性力に対する動力的変換率を算出する。例えば、筋 i の伸張性収縮による筋張力の動力的変換率の鉛直方向の上向き成分は下記の通りとなる。



図 1 支持脚筋モデル

$${}^{ec}R_{v(+),m_{sl},i} \equiv \frac{\int |{}^{ec}C_{\Delta V,v(+),m_{sl},i} \cdot m_{body}| dt}{\int {}^{ec}F_{m_{sl},i} dt} \quad (vi)$$

(2) テニスサーブ動作の分析法

ラケットおよび上半身を 12 の剛体セグメントへと分割し、各セグメント(単体)の運動方程式、隣接セグメントの連結拘束式、解剖学的関節軸拘束式の 3 式を連立することによって、系の運動方程式を次式として得る。

$$\dot{V} = A_{F_{ext}} F_{ext} + A_{T_{act}} T_{act} + A_V V + A_G G \quad (vii)$$

・筋張力を入力とした動力学的分析

式(vii)の右辺第二項の能動的関節軸トルク項はラケット操作腕の関節軸トルクベクトル T_{Ra} 、およびラケット操作腕以外の部位の関節軸トルクベクトル T_{else} を用いて、次式のように表記できる。

$$T_{act} = \begin{bmatrix} T_{Ra}^T & T_{else}^T \end{bmatrix}^T \quad (viii)$$

$$A_{T_{act}} = \begin{bmatrix} A_{T_{act,Ra}} & A_{T_{act,else}} \end{bmatrix}$$

ここで各変数の添字、Ra はラケット操作腕の関節、else はラケット操作腕以外の関節を表す。

さらに、 T_{Ra} は、各関節軸トルク T_{iAxis} から構成され、これら各関節軸トルクは、その関節軸トルクに参与する筋トルク $T_{m_{sl},iAxis}$ の和として次式のように表すことができる。

$$T_{Ra} = \begin{bmatrix} T_1 \dots T_{jAxis} \dots T_{nAxis} \end{bmatrix} \quad (ix)$$

$$T_{jAxis} = \sum_{iMsl}^{nMsl} T_{m_{sl},iMsl,jAxis}$$

ここで $nMsl$ は筋の数、 $nAxis$ は関節軸の数を示している。式(viii)、(ix)から、式(vii)は次式となる。

$$\dot{V} = A_{M_{sl,Ra}} T_{M_{sl,Ra}} + A_{T_{act,else}} T_{else} + A_{F_{ext}} F_{ext} + \bar{A}_V V + A_G G \quad (x)$$

つぎに、式(x)の右辺第四項の運動依存項を他項へと変換するために、離散時間系で表現した式(x)と加速度の差分近似式とを連立することによって一般化速度ベクトルに関する漸化式を得る。この漸化式を利用して、評価時刻 (k_{eval}) における貢献を、分析初期時刻まで遡ってまとめると、以下ようになる。

$$V(k_{eval}) = \Delta t \sum_{h=1}^{k_{eval}-1} \left[\prod_{j=k_{eval}-h}^{k_{eval}-1} \Psi_V(j) \right] A_V(h-1) + \left[\prod_{j=0}^{k_{eval}-1} \Psi_V(j) \right] V(0) \quad (xi)$$

$$\Psi_V(k) = E + \Delta t \bar{A}_V(k) \quad (xii)$$

ここで、 A_V は、外力項 ($A_{F_{ext}} F_{ext}$)、ラケット操作腕筋トルク項 ($A_{T_{act,Ra}} T_{Ra}$)、ラケット操作腕以外の能動的関節軸トルク項 ($A_{T_{act,else}} T_{else}$)、重力項 ($A_G G$) によって構成される入力項である。なお、この式は、評価時刻の評価量(例えば、インパクト時のラケットスピード)に対する各時刻の入力項による貢献を定量化可能としている。

・関節トルク・筋張力の発揮様式の考慮

式(xi)において、関節トルクおよび筋張力の各時刻の発揮様式毎にそれぞれの貢献を区別して計上する。各関節軸トルクは、関節トルクと関節角速度の内積によって求められる関節トルクパワーに符号を用いて、また、筋張力は、各筋の筋腱複合体の長さ変化の符号を用いて、伸張性成分と、短縮性成分へとその発揮様式を区別する。これにより、異なる発揮様式による関節トルクおよび筋張力の動力学的贡献が定量化可能となる。

・関節トルクの伸張性成分の発生要因の特定

関節トルクパワーが負値を示す時刻において、関節トルクの作用方向と逆方向の関節角速度によって伸張性成分が生成されている。そこで、式(xi)において関節角速度を評価量とすることによって、どの関節トルクによって伸張性成分が、発生しているかを特定可能としている。

・サーブ動作中の筋張力の推定

三次元筋骨格モデリングソフトウェア SIMM (MusculoGraphics, Inc.社製)を用いて、144 の Hill タイプ筋腱複合体を有する上半身の筋骨格モデルを構築した(図2)。筋張力の推定には、各筋の筋活性度の二乗和を最小とする目的関数を設定した最適化計算を用いた。なお、筋張力の推定に用いる関節中心等の座標値と、実験で得られた動作データとはやや異なるため、筋張力を推定した筋骨格モデルにおける各骨頭の座標値を用い、剛体リンクモデルを再構築して動力学的分析を行った。その際、推定した筋トルクは平滑化処理を行って分析に用いた。

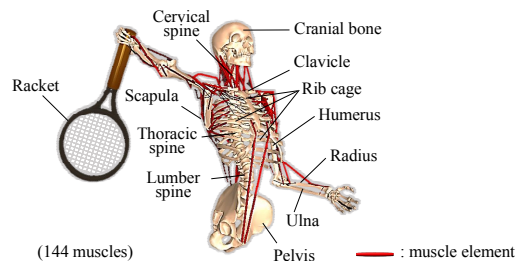


図2 上半身筋モデル

大学硬式庭球部に所属する男性テニス競技者 14 人を対象として、サーブエリアに設定した 1m 四方のターゲットエリアに向けての、デュースサイドからの全力のサーブ動作を行わせた。その際、被験者の身体およびラケットに貼付した反射マーカーの 3 次元座標値を、光学式三次元自動動作分析装置 (Vicon Motion System 社製, VICON-MX, 250Hz) を用いて計測したデータを分析に用いた。

4. 研究成果

[走動作の分析に対して]

走動作の分析については、得られた知見が多いため、箇条書きにて示すこととする。

(1) 踵接地タイプのランナーの定速走動作支持期における支持脚各筋群の役割

腸腰筋および内転筋群では収縮様式に関わらず、身体の並進運動に対する貢献が小さい。

殿筋群は、踵接地後の制動局面において、伸張性収縮により股関節の過度な屈曲を抑制し、身体を支持することによって衝撃を吸収する。

ハムストリングスは、主に制動局面における短縮性収縮により身体の支持と前方への推進に貢献する。

広筋群は、制動局面においては伸張性収縮、推進局面においては短縮性収縮によって、また、大腿直筋は支持期を通して伸張性収縮によって、それぞれ身体の支持と制動に貢献する。

下腿三頭筋は、制動局面においては主に伸張性収縮、推進局面においては主に短縮性収縮により、身体の支持および前方への推進に大きく貢献する。

背屈筋群は、踵着地直後における衝撃緩和の役割を、伸張性収縮により発現する。

(2) 動力学的変換率および張力発揮負担度について (図 3)

動力学的変換率は、水平前後方向成分に比べて、鉛直方向成分が大きいこと、筋張力発揮負担度は、身体の制動に貢献する筋群において、短縮性収縮時に比べて、伸張性収縮時に大きいことが明らかとなった。

動力学的変換率の大きな大腿四頭筋、下腿三頭筋、および背屈筋群では、その筋張力の伸張性収縮成分が、特に鉛直上方への身体慣性力に対して効果的に変換されることが示された。

(3) 動力学的変換率および張力発揮負担度からみた下肢筋群の動的な特徴

殿筋群では筋張力の発揮量が大き

いが、発揮能が非常に大きいため、筋張力発揮負担度は小さい。また、動力学的変換率が小さいことから、その筋張力の身体慣性力への変換は効果的とは言えない。

大腿四頭筋である広筋群では、その張力が伸張性収縮局面においては身体の支持に、短縮性収縮局面においては身体の制動に対して効果的に変換され、大腿直筋では、広筋群に比べて、伸張性収縮において、鉛直方向成分に対する動力学的変換率が小さく、水平方向成分に対する動力学的変換率は大きい。

下腿三頭筋は他の筋群に比べて筋張力発揮負担度が大きく、腓腹筋では張力が推進に、ヒラメ筋では張力が身体支持に、それぞれ効果的に変換される。

背屈筋群では、筋張力の発揮量、および筋張力発揮負担度はともに小さいが、動力学的変換率が非常に大きいため、特に着地直後における身体の支持、および制動に対して、その張力が効果的に変換される。

[テニスサーブ動作の分析に対して]

(1) 関節軸トルクによるスピード獲得メカニズム

図 4 に、ボールインパクト (IMP) 時のラケットスピードに対する、各関節軸トルクの発揮様式別の貢献の全被験者の平均と標準偏差を示す。各軸の色付き棒が伸張性トルクの貢献を示し、白棒が短縮性トルクの貢献を示す。IMP 時のラケットスピード獲得に最も大きな貢献を示したのは、内外旋トルク項の伸張性成分であり、IMP 時のラケットスピードの約 80% を生成していた。伸張性の手関節トルクの貢献も若干みられた。さらに、内外旋トルク項においては、肩関節最大外旋位

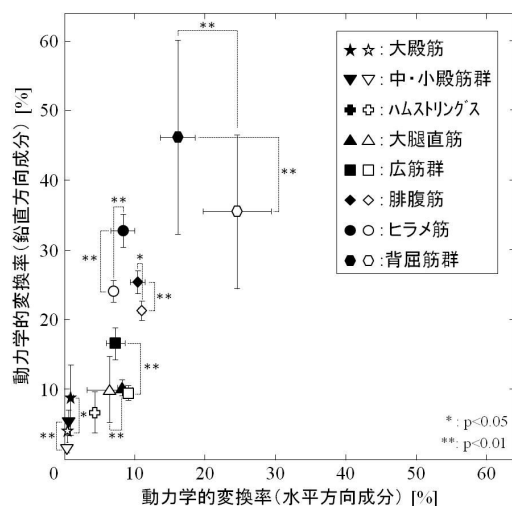


図 3 動力学的変換率における鉛直方向成分と水平方向成分との関係 (中実印: 伸張性収縮, 中空印: 短縮性収縮)

(MER)時までの内旋トルクの伸張性成分による貢献が大きかった。

(2)内旋トルクの伸張性成分の発生要因

MER 時までの内旋トルクの伸張性成分の発生要因を検討する。図 5 は、MER 時の内外旋角速度に対する各関節軸トルク項の貢献を示している。正の値が外旋角速度への、負の値が内旋角速度への貢献を示している。この結果から、内旋トルクの伸張性成分を発生している外旋角速度は、肩関節水平内外転トルク項の主に短縮性成分によって生成されていることがあきらかとなった。

(3)肩関節内外旋軸まわりの筋張力の役割

ラケットスピード獲得において重要である肩関節内外旋軸まわりに、各筋が発揮した筋トルクの IMP 時のラケットスピードに対する動力学的貢献の典型例の結果を図 6 に示す。下線で示す筋は深層の筋を、その他の筋は表層の筋を示している。大胸筋や上腕二頭筋といった大きな筋と同様に、小円筋や棘下筋といった小さな筋もラケットスピード獲得に対して貢献しており、パフォーマンスに大きな影響を与えていることがわかった。

なお、この結果から、競技現場において、肩関節の関節安定性の向上や障害予防を目的に行われているインナーマッスルの強化トレーニングには、ボールスピードを増大する効果もあることが示唆される。

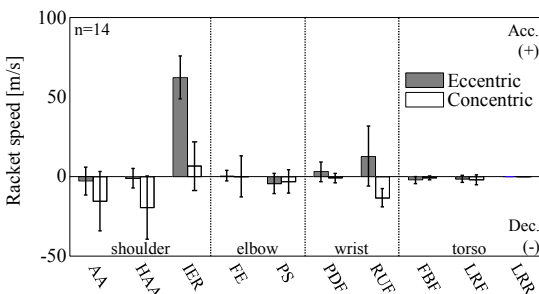


図 4 インパクト時のラケットスピード生成に対する各軸トルクの発揮様式別貢献 (14 名の平均および SD)

記号の説明：

R: right-side, L: left-side;

sh: shoulder, elb: elbow, wri: wrist, sc: scapula, ne: neck, tor: torso;

AA: adduction/abduction, HAA: horizontal adduction/abduction, IER: internal/external rotation, FE: flexion/extension, PS: pronation/supination, PD: palmar/dorsal flexion, RU: radius/ulnar flexion, ED: elevation/depression, LR: left/right flexion

この分析により、ラケットヘッドスピードがどの関節軸トルクのどの発揮様式によって生成されているかを判断することが可能となる。

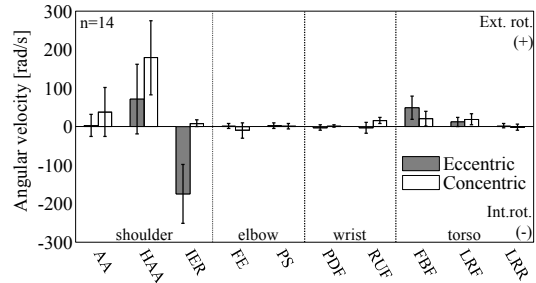


図 5 ラケット腕の肩最大外旋時における肩内外旋角速度に対する各関節軸トルクの貢献 (被験者 14 名の平均および SD)

この分析により、肩内旋トルクの伸張性成分が、どの関節軸トルクによって生成されているかが定量化可能となる。

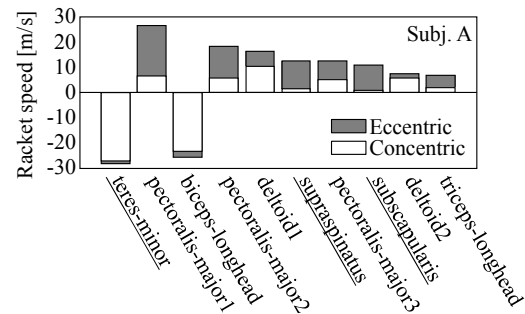


図 6 インパクトにおけるラケットスピードに対する肩内外旋軸トルクを介しての各筋張力の貢献例 (被験者 A)

以上、テニスサーブ動作の分析により得られた知見を簡単にまとめると下記となる。

インパクト時点のラケットスピードの生成に大きく貢献する、肩関節最大外旋位時点までの肩関節内旋トルクの伸張性成分は、主に肩関節水平内転トルクの短縮性成分によって引き起こされていた。

筋骨格モデルを用いて、ラケットスピード獲得メカニズムを検討した結果、三角筋や大胸筋のようなアウターマッスルと同様に、肩甲下筋や棘下筋のようなインナーマッスルもラケットスピード獲得に貢献していた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 9 件)

仲谷政剛, 小池関也: 筋張力の動力学的変換率および発揮負担度からみた定速走における支持脚筋群の動的特徴. バイオメカニズム学会誌, 38 (3), 207-217, 2014. 査読有.

Sekiya KOIKE and Yuhei HARADA: Dynamic Contribution Analysis of Tennis-serve-motion in Consideration of Torque Generating Mode, Procedia

Engineering, Vol.72, 97-102, 2014. 査読有 .<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814005360>
仲谷政剛, 小池関也: 収縮様式を考慮した定速走動作における支持脚筋群の動力学的な役割. バイオメカニズム学会誌, 38(1), 61-73, 2014. 査読有.

[学会発表](計8件)

Sekiya KOIKE and Yuhei HARADA: Dynamic Contribution Analysis of Tennis -serve -motion in Consideration of Torque Generating Mode, The 2014 Conference of the International Sports Association, 2014.7.17, Sheffield(UK).

小池関也, 原田悠平: 筋の収縮様式を考慮したテニスサーブ動作の動力学的分析の定式化. 日本機械学会シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2013, 2013.11.1, 工学院大学(東京都・新宿区).

仲谷政剛, 小池関也: 筋張力の発揮能および動作変換率からみた定速走における支持脚筋群の動的特性. 日本機械学会シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012, 2012.11.16, 愛知大学(愛知県・豊橋市).

仲谷政剛, 小池関也: 筋の収縮様式を考慮した定速走動作に対する支持脚筋張力の動力学的変換率. 第22回日本バイオメカニクス学会大会, 2012.9.12, 北翔大学(北海道・札幌市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小池 関也 (KOIKE, Sekiya)

筑波大学・体育系・准教授

研究者番号: 50272670