

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K01651

研究課題名(和文) 負荷の異なる体幹の回転動作における下肢筋群の役割と筋特性の影響

研究課題名(英文) Role of the lower limb muscles and effects of the muscle properties during trunk rotational movements with different loads

研究代表者

飯野 要一 (Iino, Yoichi)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：50345063

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、1kgから8kgまでの質量(負荷)の異なるメディシンボールサイドスローについて、骨格筋モデルにおける筋の等尺性最大筋力と無負荷最大短縮速度を一定割合で変化させたときに推定される下肢の筋活動水準の変化が、負荷によって異なるかを明らかにすることを目的とした。まず、メディシンボールサイドスロー中の下肢筋力が、一定の妥当性をもって筋骨格モデルと最適化を用いて推定可能であることを筋電図と比較することにより確かめた。結果より、両パラメータを変化させたときの筋活動水準の変化には、負荷により有意な差はないことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

卓球のストロークから砲丸投げまで体幹の回転動作は様々な負荷に対して行われる。負荷の異なる体幹の回転動作を含むスポーツにおいて重要となる筋特性が異なるかどうかは明らかになっていなかった。本研究の結果からは、最大筋力や短縮速度を高めることは、負荷の大きさにかかわらず、同じようにその動作を小さい筋活動レベルで行うことを可能にすることが示唆された。したがって、体幹の回転動作だけに着目すれば、動作を楽に行えるようにするために効果的な下肢の筋力トレーニングは種目による大きな差はないことが示唆された。差があるとするれば、体幹の回転動作以外の動作に起因する可能性が考えられた。

研究成果の概要(英文)：This study aims to investigate whether the changes in the lower limb muscle activations depend on the load when the isometric maximum muscle force and the maximum shortening speed were changed in the musculoskeletal model during the medicine ball side throw with mass from 1kg to 8kg. First, a comparison with EMG data suggests that the lower limb muscle forces during the medicine ball side throw can be estimated using the musculoskeletal model and static optimization with a certain degree of validity. The results suggest that the changes in muscle activations when changing both parameters did not significantly depend on the load.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：体幹 回転動作 筋骨格モデル 筋活動水準 筋張力推定 筋特性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

野球のバッティング、テニスや卓球のストローク、砲丸投げ、ハンマー投げなど多くのスポーツにおいて体幹の回転動作が見られる。これらの動作には、スポーツ固有の目的に合わせた動作の明確な違いがあるものの、下肢の力発揮から始まる運動連鎖によって上肢の末端につながった用具に力を作用させて加速する点で共通している。このような共通点に着目してみた場合、残る違いは末端につながった用具の質量の違いである。一般に、高負荷の筋力トレーニングは力-速度関係における等尺性に近い領域の筋力を向上させ、低負荷・高速で行うスピードトレーニングは無負荷最大短縮速度を向上させることが知られている。負荷の異なる体幹の回転動作について、どのような筋特性が重要となるかが負荷によって異なるかどうかは明らかにされていない。体幹を回転させる打動作や投動作には様々あるが、上肢の動作形態が大きく異なるためこれらの動作を比較しても負荷の違いが下肢の筋力発揮の様相に与える影響を見ることは難しいと考えられる。そこで本研究は、上肢の動作形態が同じで負荷だけを変えた、重さの異なるメディシンボールサイドスローを対象とした。

ヒトの動作中に発揮された筋力を直接測定することは、侵襲性が高く一般的に非常に困難である。そのかわりの手段として筋骨格モデルを用いて動作中の筋力を推定する研究が、歩行やランニングを中心に数多く行われている。ある動作について筋力発揮の仕方には冗長性があるため、一般的になんらかの最適化の基準を用いて筋力は推定される。歩行やサイクリングなどの最大下で行われる熟達した運動においては、筋疲労を最小とする基準によっておおよそ筋電図波形と一致する活動水準を推定できることがわかっているが、腰の回転を伴う3次元的な動きでかつ最大努力で行う動作で、同じ筋疲労最小の基準を用いて筋活動水準を推定できるかは不明であり、検証が必要である。まずこの点を明らかにしたうえで、負荷の異なる体幹の回転動作において筋特性が筋活動水準に及ぼす影響について検討する。

得られた結果から、それぞれスポーツに有効なトレーニング方法の開発やタレント発掘に役立つ知見が得られることが期待される。

2. 研究の目的

(1)メディシンボールサイドスローは、打動作・投動作のトレーニングとして用いられている。筋の役割を明らかにするために、その活動水準を定量することは有効と考えられる。歩行では筋骨格モデルを用いて筋活動水準をおおよそ推定できることが報告されているが、瞬発的な回転動作について推定の妥当性は調べられていない。筋骨格モデルを用いて、メディシンボールサイドスロー中の下肢筋の活動水準を推定し、筋電図と比較することによりその妥当性を検討することを目的とした。歩行についても筋活動水準を推定し、検討の材料として用いた(実験1)。

(2)負荷の異なるメディシンボールサイドスローにおいて、筋特性を表す等尺性最大筋力と無負荷最大短縮速度の2つのパラメータの変化が、筋活動水準に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。同じ運動について、異なる値のパラメータを持つ筋骨格モデルを用いて筋の活動水準や筋張力を推定することで、これらの変化をもたらすような筋力トレーニングを行うことにより、同じ運動をどの程度少ない筋活動レベルで行うことができるかを評価できると考えられる(実験2)。

3. 研究の方法

(1)実験1の被験者は体幹の回転動作を含むスポーツ経験者である健常男性9名であった。左右のそれぞれの下肢の8筋(中殿筋、大殿筋、大腿直筋、外側広筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、ヒラメ筋、腓腹筋)について筋電図を計測した。被験者の課題は、通常歩行と質量3kgのメディシンボールを用いた最大努力のサイドスローであった。モーションキャプチャーシステムを用いて、200Hzで体表面に貼付した反射マーカの3次元座標を取得した。モーションキャプチャーシステムと同期して、2台のフォースプレートを用いて、床反力を2,000Hzで測定した。無線の筋電計を用いて2,000Hzで筋電図データを取得した。

筋活動水準の推定には、筋骨格モデルシミュレーションソフトウェアOpenSim ver.3.3を用いた。筋骨格モデルとしてLai et al.(2017)の下肢筋モデルを膝の自由度を1から3に拡張したものをを用いた。このモデルは各下肢に40の筋腱コンパートメントをもち、体幹および上肢はトルクアクチュエータで駆動するものであった。各被験者のセグメント長と体重に合わせて、genericモデルをスケールした後、Inverse Kinematicsツールを用いて、被験者の動作中のマーカの軌跡を最も再現するような全身の関節角度データを算出した。その関節データと床反力データを入力としてStatic Optimizationツールを用いて下肢筋の活動水準と筋張力を推定した。その際、コスト関数として筋活動水準の2乗和を用いた。

筋電図信号(電圧)は、全波整流後6HzのButterworthローパスフィルターによって包絡線を得た。Electro-Mechanical Delayを考慮して、0-150msの範囲での遅れについて相互相関係数を算出し、相関係数の最大となるときの係数の値とそのときの時間遅れを算出した。

(2)実験2の被験者は、体幹の回転動作を含むスポーツの経験者である健常男性8名であっ

た。1kg、2kg、3kg、5kg、8kgのメディシンボールについて、全力のサイドスローを行った。全身の体表面に貼付した反射マーカの3次元座標をモーションキャプチャーシステムを用いて200Hzで取得した。各足に作用する床反力を2台のフォースプレートを用いて2,000Hzで計測した。

(1)と同様にLai et al.(2017)の下肢筋モデルを膝の自由度を1から3に拡張したものをを用いた。各被験者のセグメント長と体重に合わせて、genericモデルをスケールした後、Inverse Kinematics ツールを用いて、計測された動作中のマーカの軌跡を最も再現するような全身の関節角度データを得た。

スケールしたモデルについて、下肢のすべての筋の等尺性最大筋力をgenericモデルの2倍にした。これは、この実験の被験者がスポーツ経験を有する成人男性で一般成人男性と比較して筋力が大きいと推定されることおよびgenericモデルのままでは得られた筋活動水準のピーク値が1となる時刻が続き筋電図波形と一致しないこと、Static Optimizationの仮定で用いられる予備(reserve)アクチュエータのトルク値が高くなることから現実を反映していないと考えたためである。なお、すべての被験者の等尺性最大筋力を2倍としたため各被験者の最大筋力を反映していないが、分析と議論では筋活動コストの相対的变化のみを扱うこととした。その上で、筋骨格モデルの等尺性最大筋力と無負荷最大短縮速度の値をそれぞれ $\pm 10\%$ させた計4つのモデルを作成した。

値を変化させないモデル(基準モデル)を含め5つのモデルを用いて、それぞれの質量のメディシンボールサイドスローについて下肢筋の活動水準を推定した。動作開始(ボールが投球方向と反対向きに動き出す時刻)からボールリリースまでの下肢のすべての筋の活動水準の2乗和をサンプル時刻について和をとったものを筋活動コストと定義した。さらに基準モデルを用いて算出された筋活動コストを1として筋特性を変化させた4つのモデルを用いて算出された筋活動コストの変化を相対値で評価した。

4. 研究成果

(1)メディシンボールサイドスローにおいて、相互相関係数が0.5以上であった筋は6つあり、後脚の腓腹筋、大腿二頭筋、大殿筋および前脚のヒラメ筋、外側広筋、大腿直筋であった。一方、後脚の外側広筋と大腿直筋および前脚の中殿筋の相互相関係数は0.3未満であった。残りの6筋の相互相関係数は0.3から0.5の範囲にあった。相互相関係数が0.3未満であった3つの筋は、動作中の相対的な活動水準が低く、筋活動コストを評価する意味で、重要性が高いとは言えなかった。したがって、メディシンボールサイドスローにおいても、Staticな最適化によって一定の妥当性をもって下肢筋力を推定可能であることが示唆された。

同じ実験で測定した歩行中の下肢筋の相互相関係数は、8つの筋のうち6つの筋で0.5以上であった。したがって、メディシンボールサイドスロー中の下肢筋の活動水準の推定精度は、歩行より若干低いことが示唆された。この理由として、特に股関節で歩行では見られない矢状面以外の運動が行われたことで、その姿勢で筋骨格モデルの推定するモーメントアームに系統誤差があった可能性が挙げられる。もう一つの理由としては、前脚の中殿筋において共収縮が見られた可能性である。前脚の中殿筋のリリース前の活動はモデルからはほぼないことが推定されたが、筋電図は活動していることを示唆した。この間、前脚の股関節は内転トルクを発揮しており、測定していないが内転筋群が、股関節外転筋である中殿筋とともに活動していたことを示唆する。今後は、被験者固有の筋骨格モデルの構築や提案されている共収縮を考慮した筋活動水準の推定法の適用可能性の検討が期待される。

(2)1kgから8kgの質量のメディシンボールサイドスロー動作について、下肢3関節の関節トルク発揮は、後脚の股関節外転トルクの後、股関節伸展トルク発揮がみられること、前脚において股関節屈曲トルクが発揮されること、後脚膝関節は屈曲トルクからリリース直前に伸展トルク発揮に変わることは質量に関わらず観察された。これらの下肢の力発揮は、テニスや卓球のストローク、ソフトボールのバッティングとも共通していた。これらの結果は、本研究の結果の多くがほかのスポーツに適用可能であることを示唆する。

等尺性最大筋力を10%増加させたときの筋活動コスト減少率は、メディシンボールの質量に関わらず16%程度であり、質量の有意な影響はなかった(図1A)。無負荷最大短縮速度を10%増加させたときの筋活動コストの減少率は3-4%であり(図1B)、質量の有意な影響があったが($P=0.28$)、実質的影響はないと判断された。

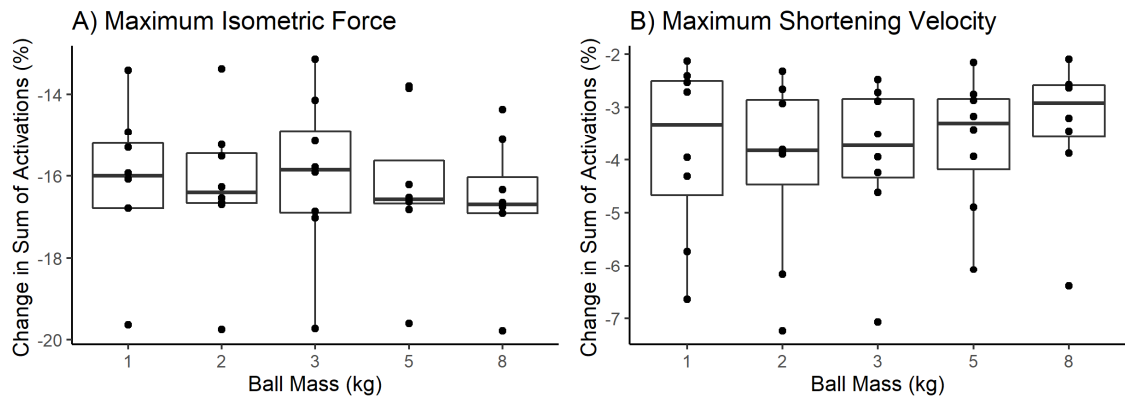


図 1 等尺性最大筋力 (A) と無負荷最大短縮速度 (B) を 10% 増加させたモデルを用いて推定された筋活動のコスト変化率 (マイナスの値は筋活動コストが減少したことを示す)

上記両パラメータを 10% 減少させたときの筋活動コストの変化率は、質量の影響は見られず、等尺性最大筋力で 20-22%、無負荷最大短縮速度で 4% 程度であった (図 2)。

この理由としては、たとえ負荷の小さい場合でも下肢筋の活動が比較的低い短縮速度の領域で行われていたであろうことが考えられる。これらの結果から、筋活動コストの減少という観点では、体幹の回転動作を含むスポーツにおいて、その負荷の大小にかかわらず、筋力トレーニングの効果は変わらないことが示唆された。より高い短縮速度で収縮すると考えられる上肢の筋についてはこの知見が当てはまらない可能性があることに注意が必要である。

この研究の限界として、等尺性最大筋力を変化させたときにセグメント質量は変化しないと仮定したことにある。筋力は筋横断面積だけで決まるわけではないので、筋力と筋重量の関係は様々に考えられるが、等尺性最大筋力の増大に伴って筋重量が増加し、セグメント質量が増加する場合、筋コストの変化率はここで得られた値より低下するだろう。この点については、さらに検討すべき課題である。また、この研究では、これらのパラメータの値の変化によって運動自体が変化し、パフォーマンス指標の一つとなる末端の速度がどの程度の向上するかについては明らかにできていない。この問いに答えるにはフォワードダイナミクスを用いたシミュレーションなど別の手法を用いた研究が必要であろう。

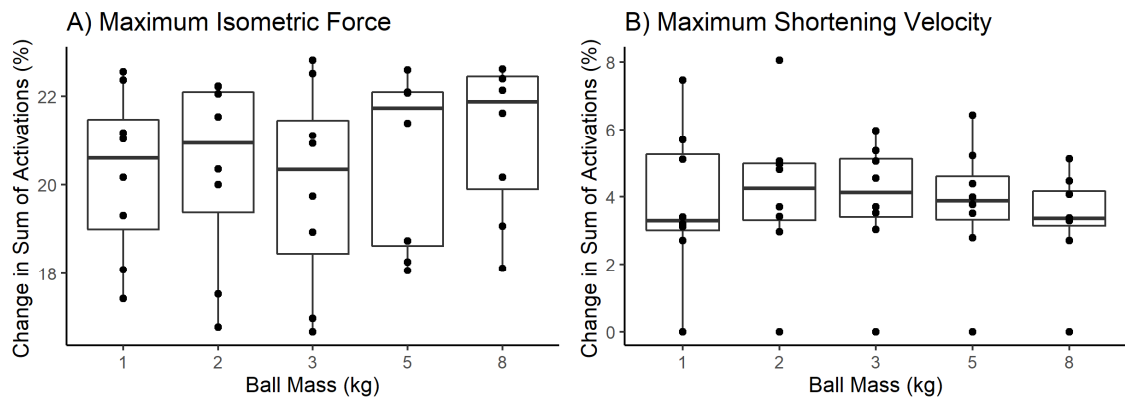


図 2 等尺性最大筋力 (A) と無負荷最大短縮速度 (B) を 10% 減少させてモデルを用いて推定された筋活動コストの変化率

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 飯野要一、吉岡伸輔、深代千之
2. 発表標題 筋の力 速度関係のパラメータが歩行中の下肢の筋活動レベルに及ぼす影響
3. 学会等名 日本バイオメカニクス学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯野要一、吉岡伸輔、深代千之
2. 発表標題 メディシンボールサイドスローにおける筋活動水準の推定の妥当性
3. 学会等名 日本体育学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Iino Y., Yoshioka S., Fukashiro S.
2. 発表標題 Validation of estimation of lower limb muscle activation during the table tennis forehand
3. 学会等名 The 16th ITTF Sports Science Congress (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----