

博士学位論文審査要旨

2019年2月4日

論文題目： さまざまな肩関節運動に対応可能な肩甲骨姿勢の新しい推定方法の開発：肩甲骨エクササイズが投球動作中の肩甲骨運動に与える即時効果の検証への応用

学位申請者： 松村 葵

審査委員：

主査： スポーツ健康科学研究科 教授 中村 康雄

副査： スポーツ健康科学研究科 教授 井澤 鉄也

副査： スポーツ健康科学研究科 教授 北條 達也

要 旨：

肩関節は、広い可動域を持つため、投球動作においてダイナミックな運動が可能となる。その反面、不安定性も持つため傷害が発生しやすい。肩関節障害においては、肩甲上腕関節だけでなく胸郭に対する肩甲骨の運動も減少することが多い。投球動作においては、肩関節最大外旋（MER）時の肩関節運動は、球速に関連すると報告され、肩甲骨運動が減少するなどの異常運動は、投球障害や競技パフォーマンスの評価においても重要である。また、肩甲骨運動の減少は、肩関節に障害が無いアスリートにも高頻度で存在すると報告されている。したがって、リハビリテーションだけでなく、パフォーマンス向上のためのトレーニングにおいても、肩甲骨運動の適切な増加は、上肢の運動を改善するために非常に重要である。しかし肩甲骨の運動は、軟部組織の影響により体表から測定することが困難である。また、肩甲骨に対する運動介入として、肩甲骨周囲筋の筋力トレーニングやストレッチが数多く報告されているが、これらの運動介入が実際のスポーツ動作中の肩甲骨運動を変化させたという報告はみられない。そのため、肩甲骨の運動を正確に測定し、肩甲骨運動を拡大する効果的な運動介入を明らかにする必要がある。そこで本論文の目的は、体表から肩甲骨運動を測定する新たなキャリブレーション方法を開発することとした（研究1）。さらに、その推定方法の有用性を評価するため、MER時の姿勢に相当する上腕姿勢において、肩甲骨の後傾運動を拡大するエクササイズを明らかにすることと（研究2）、そのエクササイズが実際の投球動作中の肩甲骨運動に与える即時的な効果を評価することとした（研究3）。

研究1では、肩峰上の皮膚に貼付したマーカ群から肩甲骨姿勢を推定する従来の推定方法の精度を向上するために、新たなキャリブレーション法を開発した。誤差を非線形に近似することで、特定の姿勢だけでなく、より広い範囲の上腕姿勢においても誤差5°未満で肩甲骨の姿勢を推定できることを明らかにした。

研究2では、対象とする肩関節を水平外転させることで肩甲帯を後退させる肩甲骨 retraction エクササイズに、対象とする肩関節と同側方向の体幹回旋を同時に組み合わせることで、肩甲骨の後傾をより大きく誘導できることを定量的に示した。

研究3では、体幹運動を加えた肩甲骨 retraction エクササイズと、肩甲骨後傾に関与する僧帽筋下部に対する一般的な筋力トレーニングの2種類をそれぞれ運動介入した。それぞれの運動介

入前後において、投球動作のコッキング期における肩甲骨運動を測定した。それぞれの運動介入による即時効果を評価した結果、体幹運動を加えた肩甲骨 retraction エクササイズにより、コッキング期における肩甲骨の最大後傾角度を即時的に増加できることが明らかとなった。

本研究で得られた成果として、広い範囲の上腕姿勢に対して体表から肩甲骨姿勢を測定できる新たなキャリブレーション法が開発できた。加えて、体幹運動を加えた肩甲骨 retraction エクササイズによって肩甲骨後傾運動を増加できることが明らかとなった。これらは、肩甲骨運動の改善のためのアプローチ方法に対して重要なエビデンスを提供するものであり、高く評価できる。以上のことから、博士（スポーツ健康科学）（同志社大学）の学位論文として十分に価値あるものと認める。

総合試験結果の要旨

2019年2月4日

論文題目： さまざまな肩関節運動に対応可能な肩甲骨姿勢の新しい推定方法の開発：肩甲骨エクササイズが投球動作中の肩甲骨運動に与える即時効果の検証への応用

学位申請者： 松村 葵

審査委員：

主査： スポーツ健康科学研究科 教授 中村 康雄

副査： スポーツ健康科学研究科 教授 井澤 鉄也

副査： スポーツ健康科学研究科 教授 北條 達也

要 旨：

本論文提出者は、2016年4月より本学大学院スポーツ健康科学研究科スポーツ健康科学専攻博士課程（後期課程）に在学している。修了に必要な単位取得としては、授業科目において「スポーツ・バイオメカニクス深論」「スポーツ健康科学特殊演習」の2科目4単位を、そして研究指導科目において「スポーツ健康科学特殊研究Ⅰ～Ⅵ」の6科目12単位を履修しており、必要単位数を満たしている。また各年度において優れた研究成果を挙げ、英語の語学試験にも合格しており十分な能力を有すると認定されている。

博士論文の内容の一部は *Journal of Electromyography and Kinesiology* に筆頭著者として掲載された。他の知見に関しては投稿準備中である。

2019年1月30日15時30分より約50分にわたり提出論文に関する学術講演会（博士学位論文公聴会）が開催され、種々質疑討論がなされたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。また、審査委員により論文内容ならびにこれらに関連する諸問題について約2時間にわたり口頭試問を実施した結果、本論文提出者は研究者として十分な学力を有することが認められた。

よって、総合試験の結果は合格であると認める。

博士學位論文要旨

論文題目： さまざまな肩関節運動に対応可能な肩甲骨姿勢の新しい推定方法の開発：肩甲骨エクササイズが投球動作中の肩甲骨運動に与える即時効果の検証への応用

氏名： 松村 葵

要旨：

肩関節は、広い可動域をもつため、投球動作などのダイナミックな運動が可能となる。その反面、不安定性も併存するため傷害が発生しやすい。肩関節障害においては、肩甲上腕関節だけでなく肩甲骨運動の減少といった異常がある場合が多い。また肩甲骨運動の減少は、肩関節に障害のないアスリートにも高頻度で存在すると報告されている。リハビリテーションだけでなく、競技パフォーマンス向上のためのトレーニングにおいても、肩甲骨に対する運動介入は、上肢の運動を改善するための主要なターゲットとなる。しかし肩甲骨運動は、軟部組織の影響により体表からの測定が困難である。さらに肩甲骨周囲筋の筋力トレーニングやストレッチの方法は数多く報告されているが、これらの運動介入が実際のスポーツ動作中の肩甲骨運動を変化させたという報告はみられない。そのため、肩甲骨運動を正確に計測し、肩甲骨運動を拡大する効果的な運動介入を明らかにする必要がある。そこでこの博士論文の目的は、体表から無侵襲に肩甲骨運動を測定する方法を確立すること（研究1）、肩甲骨運動を拡大する運動介入としての肩甲骨エクササイズを明らかにすること（研究2）、その肩甲骨エクササイズが実際の投球動作中の肩甲骨運動に与える即時的な効果を検討することとした（研究3）。

研究1 Acromion marker cluster 法を用いた肩甲骨姿勢の新たな無侵襲測定法の開発

肩甲骨運動の測定は、肩関節障害の診断や、ADL（日常生活動作）やスポーツにおける上肢の運動を評価する上で非常に重要である。しかし肩甲骨運動の計測は筋や皮膚といった軟部組織の影響を強く受けるため、体表上から測定することが困難であった。そこで、軟部組織の影響が少ない肩峰上に貼付したマーカ群から肩甲骨姿勢を推定する Acromion marker cluster 法（AMC法）が提案された（van Andel CC, 2009）。しかしこの手法は、上肢挙上 120° 以上では推定精度が低下する。これを改善するため、近年、事前に計測した複数の姿勢から肩甲骨姿勢を線形回帰式でモデル化する方法が提案された（回帰法, Rapp EA, 2017）。しかし、回帰法は上腕骨姿勢から肩甲骨の姿勢を推定するため、その時点の肩甲骨姿勢を計測していない。そこで、AMC法を用いて肩甲骨姿勢を測定し、軟部組織の影響による誤差を適切に補正することができれば、推定精度をさらに向上できる可能性がある。そこで研究1の目的は、AMC法を改良し非線形近似を用いた新しい肩甲骨姿勢の推定方法を開発することとした。その推定精度は、代表的な従来法である AMC法と回帰法の2つと比較した。

健常男性13名の右上肢を光学式3次元動作解析装置によって測定した。肩峰上に AMC、上腕骨と胸郭には反射マーカを貼付した。肩甲骨特徴点は、治具を用いて触診により同定し、精度評価の基準値とした。測定姿勢は、挙上姿勢として挙上面 0° （前額面）、 30° 、 60° 、 90° （矢状面）において、それぞれ挙上角度 $0\sim 180^{\circ}$ の範囲で 30° 毎に静止させた25個の異なる挙上姿勢とした。また ADLを模した機能的な姿勢として結髪位、前方リーチ位、側方リーチ位、触口位、挙上 45° 位、挙上 135° 位も測定した。本推定方法では、皮膚の動揺による AMC 姿勢と肩甲骨姿勢のズレを薄板スプラインにより補正することで、AMC 姿勢から肩甲骨姿勢を推定した(TPS

法). TPS 法と AMC 法, 回帰法のそれぞれに対して触診から求めた肩甲骨姿勢との誤差を二乗平均平方根誤差 (RMSE) で算出した.

TPS 法は, AMC 法, 回帰法と比較して, 特定の姿勢だけでなく, より広い範囲の上肢挙上姿勢においても誤差 5° 未満で推定できることが明らかとなった. この TPS 法を用いることで, エクササイズ介入による上肢動作やスポーツ動作中の肩甲骨運動の変化を検出できると考えられる.

研究 2 体幹運動を加えた肩甲骨 retraction エクササイズが肩甲骨運動に与える影響

野球投手の肩関節は, 高頻度でスポーツ障害が発生する. 肩関節痛が発生する場面は, コッキング期から肩関節最大外旋 (MER) 時, 加速期が多いとされている. MER における肩関節の外旋は, 肩甲上腕関節の外旋だけでなく, 肩甲骨後傾によっても形成される. 適切な肩甲骨後傾運動が制限されると, MER において肩甲上腕関節への依存が強くなり力学的ストレスが増加し, 障害の発生につながると考えられる. 加えて, 肩甲骨後傾運動の制限は, 体幹と上腕をつなぐ運動連鎖も制限することになり, 投球パフォーマンスが低下すると考えられる. これを改善するため, 肩甲骨後傾の拡大を目的に肩甲骨 retraction エクササイズがよく用いられる. しかし, 投球動作中の肩甲骨後傾運動を拡大するためには, 単独の肩甲骨 retraction エクササイズだけでなく, 体幹などの運動を組み合わせた応用的肩甲骨エクササイズが必要であると考えられる. 研究 2 の目的は, MER 時における肩甲骨運動を拡大するエクササイズ方法を検討するために, 肩甲骨 retraction エクササイズに 2 種類の体幹運動を加えた際の肩甲骨運動を計測し, 単独の肩甲骨 retraction エクササイズと比較した.

健常男性 12 名の右上肢を対象に光学式 3 次元動作解析装置により測定した. 肩峰上に AMC, 上腕骨と胸郭に反射マーカを貼付した. 測定したエクササイズは, 単独の肩甲骨 retraction エクササイズ (肩甲骨単独条件) と肩甲骨 retraction エクササイズに体幹屈伸を加えたエクササイズ (肩甲骨+屈伸条件), 肩甲骨 retraction エクササイズに体幹回旋を加えたエクササイズ (肩甲骨+回旋条件) の 3 種類とした. この 3 種類のエクササイズを, 座位, 立位, 測定側と同側下肢ステップ位, 測定側と反対側下肢ステップ位の 4 姿勢で実施した. 肩甲骨姿勢は, 測定対象とする上腕姿勢に近い姿勢を基準とした AMC 法を用いて肩甲骨の姿勢を推定した. 運動方法と姿勢による肩甲骨運動の変化を検討するために, 反復測定二元配置分散分析を用いて比較した.

肩甲骨上方回旋において, 主効果である運動方法と姿勢にそれぞれに有意差が認められたが, 交互作用には有意差が認められなかった. 多重比較の結果, 運動方法について, 肩甲骨+屈伸条件は肩甲骨+回旋条件よりも上方回旋が有意に大きかった. また姿勢について, 反対側ステップ位と比較して同側ステップ位は, 有意に上方回旋が大きかった. 肩甲骨内旋において, 2 つの主効果と交互作用に有意差は認められなかった. 肩甲骨後傾において, 運動方法に関する主効果に有意差が認められた. 多重比較の結果, 肩甲骨+回旋条件は, 他の 2 つの運動方法と比較して有意に肩甲骨後傾角度が大きかった.

本研究において, 体幹を測定側と同側に回旋させながら肩甲骨 retraction エクササイズを行うことで, 肩甲骨単独での retraction エクササイズよりも肩甲骨後傾運動を大きく誘導することができることが明らかとなった.

研究 3 体幹運動を加えた肩甲骨 retraction エクササイズが投球動作中の肩甲骨運動に与える即時効果

投球動作のコッキング期 (非投球側接地時から MER 時) における肩甲骨後傾運動の拡大は, 障害予防の観点からも投球パフォーマンス向上の観点からも重要であると考えられる. しかし研究 1 で述べたように, 体表から肩甲骨姿勢を精度よく推定することは困難であり, 投球動作の肩甲骨運動に関する研究も非常に限られている. さらに, 肩甲骨後傾運動の拡大を目的とした運動

介入が、実際の投球動作中の肩甲骨運動に与える影響はいまだ報告されていない。研究3の目的は、研究2で有効性を確認した体幹運動を加えた肩甲骨 retraction エクササイズと、肩甲骨後傾に関与する僧帽筋下部に対する一般的な筋力トレーニングの2種類のエクササイズを評価対象として、投球動作のコッキング期から MER 時における肩甲骨運動を測定し、それぞれのエクササイズの即時効果を評価することとした。

大学硬式野球部所属の投手 11 名の投球側上肢を対象として、光学式 3 次元動作解析装置を用いて投球動作を計測した。対象者の肩峰上に AMC、上腕骨と胸郭に反射マーカを貼付した。肩甲骨姿勢は、TPS 法を用いて推定した。介入した応用的肩甲骨エクササイズは、体幹屈伸と体幹回旋を加えた肩甲骨 retraction エクササイズとした。さらに、筋力トレーニングとして、2kg のダンベル持って実施した肩関節 90° 外転位・90° 外旋位の肩関節水平外転運動と肩関節 135° 外転位の肩関節水平外転運動を導入した。各エクササイズは 10 回 3 セット実施し、それぞれのエクササイズは 3 日以上の間隔をあけてランダムな順で実施した。評価対象とした投球動作は、各エクササイズ介入前後に測定した。コッキング期における肩甲骨角度の最大値と MER 時の肩甲骨角度を算出した。エクササイズ介入による肩甲骨運動の変化を比較するために、肩甲骨姿勢の 3 軸についてそれぞれエクササイズ条件と評価時期を要因とする反復測定二元配置分散分析を実施した。交互作用に有意差が認められた場合には、各エクササイズ条件内で評価時期に関する単純主効果を検定した。さらに各エクササイズ条件内で介入前に対する介入後の肩甲骨角度の変化率をウィルコクソン符号付順位和検定によって比較した。

MER 時の肩甲骨角度に有意差は認められなかったが、コッキング期の最大肩甲骨後傾角度において交互作用に有意差が認められた。応用的エクササイズは、介入前と比較して介入後に後傾角度が 2.3° 有意に増加しており、最大後傾角度の介入前に対する介入後の変化率は 10.3% と有意に筋力トレーニングよりも大きかった。

体幹運動を加えた肩甲骨 retraction エクササイズにより、投球動作のコッキング期における肩甲骨後傾角度を即時的に増加できることが明らかとなった。本研究の結果は、運動介入によって肩甲骨運動を変化させられることが明らかとなり、肩甲骨運動の改善のためのアプローチ方法にとっての重要なエビデンスになると考えられる。