

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

2016 年度入学

4F160001 松村 葵

指導教員：中村 康雄

目次 (1/3)

はじめに		1-3
<hr/>		
第1章 序論		4-14
<hr/>		
1.1	スポーツパフォーマンスに必要な肩甲骨の役割	4-6
1.2	肩甲骨機能不全	6-7
1.3	肩甲骨機能不全に対する介入方法	
1.3.1	肩甲骨周囲筋に対する筋力トレーニング方法	8-9
1.3.2	肩甲骨周囲筋に対するストレッチ方法	9
1.3.3	競技特異的な肩甲骨の動きをつくるエクササイズとしての 応用的肩甲骨エクササイズ	9-10
1.4	肩甲骨機能に対する運動介入の効果	10-11
1.5	本研究の目的	11
	図表	12-14
<hr/>		
第2章 Acromion marker cluster 法を用いた肩甲骨姿勢の新たな無侵襲推 定方法の開発		15-45
<hr/>		
2.1	はじめに	15-17
2.2	新しい肩甲骨姿勢の推定方法	17-18
2.3	実験方法	
2.3.1	対象	18
2.3.2	測定手順	19
2.3.3	測定課題	19
2.3.4	肩甲骨姿勢の推定方法	19-20
2.3.5	精度評価	20-21
2.4	結果	
2.4.1	挙上姿勢	22
2.4.2	機能的姿勢	22-23
2.5	考察	
2.5.1	挙上姿勢について	24-26
2.5.2	機能的姿勢について	26-28
2.5.3	TPS 法の特徴	28-29
2.5.4	本研究の限界	29
2.6	結論	30

目次 (2/3)

図表	31-45
第3章 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	46-61
3.1 はじめに	46-47
3.2 方法	
3.2.1 対象	48
3.2.2 測定手順	48
3.2.3 測定課題	48-49
3.2.4 データ解析	49-50
3.2.5 統計解析	50
3.3 結果	
3.3.1 上方回旋	51
3.3.2 内旋	51
3.3.3 後傾	51
3.4 考察	52-54
3.5 結論	55
図表	56-61
第4章 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	62-95
4.1 はじめに	62-63
4.2 方法	
4.2.1 対象	64
4.2.2 測定手順	64
4.2.3 キャリブレーション測定	64
4.2.4 測定課題	64-65
4.2.5 エクササイズ介入	65
4.2.6 データ解析	66
4.2.7 統計解析	66-67
4.3 結果	

目次 (3/3)

4.3.1	測定期間内における測定開始時の肩甲骨姿勢	68
4.3.2	静止立位姿勢	68
4.3.3	上肢挙上動作	68-70
4.3.4	投球動作	70-71
4.4	考察	72-74
4.5	結論	75
	図表	76-95
第5章 総括		96-97
謝辞		98
参考文献		99-106

はじめに

肩関節は、その構造上、非常に大きな可動域を持つ。これにより投球動作などダイナミックな運動が可能となる。肩関節を構成する肩甲上腕関節は、上腕骨頭に対して関節窩が非常に小さいため、不安定性も併せて持っている。そのため肩関節に関して不調を訴える人は多い。厚生労働省による平成 26 年度患者調査の傷病分類によると、「肩の傷害」の総患者数は 27 万人と推定されている¹。一般的に多く存在すると考えられる腰痛症が約 30 万人であり、これと比較しても肩関節になんらかの傷害のある人の数は非常に多いと考えられる。とくに肩関節障害に対する治療法としては、保存療法（リハビリテーション）が主体となっている。より効果的なリハビリテーションを行うためには、肩関節の機能を理解することが理学療法士やアスレティックトレーナーにとって重要である。

リハビリテーションの実施においては、筋力や関節可動域など個々の運動機能に焦点があてられることが多い。しかし、その後の日常生活動作（ADL）やスポーツ場面への復帰、さらに競技パフォーマンスの向上を目指すにあたって、個々の機能改善のみでは不十分であり、肩甲上腕関節の単独の機能だけでなく、肩甲上腕関節と肩甲骨（肩甲骨）や体幹、下肢との協調的な運動の獲得が重要となる²。特に投球動作などのオーバーヘッドスポーツ動作では、下肢・体幹より作られたエネルギーを効率よく上肢に伝達することが重要であるため、体幹と上腕骨をつないでいる肩甲骨の機能が重要であるとされている²。肩関節疾患をもつアスリートや特に症状のないアスリートのどちらにおいても、肩甲骨運動に制限が見られることが報告されている^{3,4}。したがって、リハビリテーションにおいても、競技パフォーマンスの向上を目的とする場合においても、肩甲骨運動をターゲットとすることが多い。そのため、肩甲骨運動を正確に評価する方法を確立することと、制限された肩甲骨運動を拡大するための効果的な介入方法を明らかにすることが重要であると考えられる。そこで、この博士論文では、無侵襲に肩甲骨運動をより正確に推定する新しい方法を提案し、特に野球の投球動作をターゲットとした肩甲骨運動を拡大するエクササイズを提案する。

本論文は全 5 章にて構成される（図 1）。まず第 1 章では、スポーツパフォーマンスの向上やスポーツ障害予防のために必要な肩甲骨機能とそれに対する介入方法について文献レビューした。次に第 2 章ではエクササイズ介入による肩甲骨運動の変化をより正確に評価するために、無侵襲に肩甲骨の姿勢を推定する新しい推定方法を開発した。第 3 章では、肩甲骨運動を拡大するエクササイズ方法を明らかにするために、体幹運動を組み合わせた肩甲骨エクササイズの肩甲骨運動を比較し検討した。第 4 章では、第 3 章で検討したエク

ササイズを野球投手に介入することで、投球動作や上肢挙上動作中の肩甲骨運動にあたえる即時的効果を、第 2 章で開発した肩甲骨姿勢推定方法を用いて検討した。そして、第 5 章では、本研究を総括した。

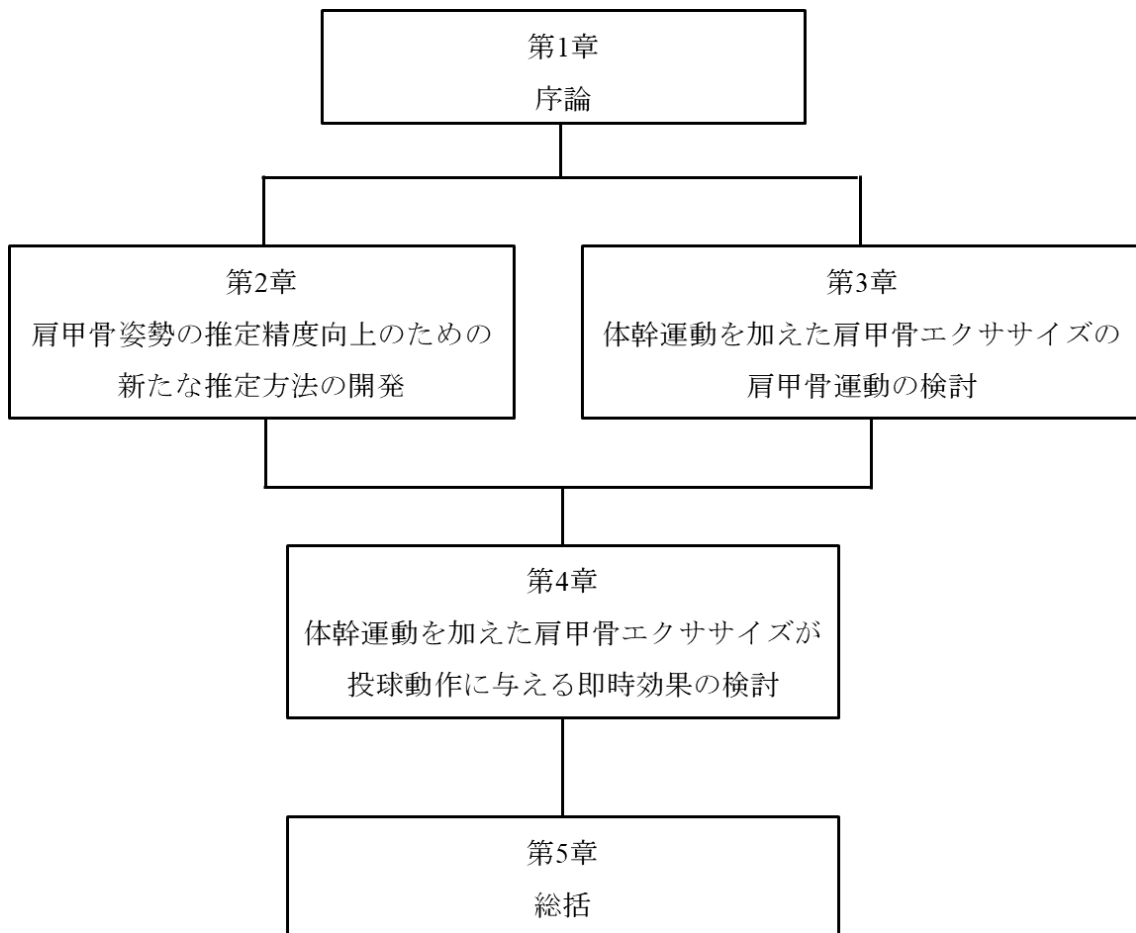


図1 本論文の構成

第1章

序論

1.1 スポーツパフォーマンスに必要な肩甲骨の役割

肩関節は前述したように、投球動作のようにダイナミックな運動が可能である一方、不安定な構造となっている。それを補うために、関節の安定化機構として静的安定化機構と動的安定化機構の2つが存在する。静的安定化機構は関節包と靭帯、関節唇などの軟部組織により構成され、動的安定化機構は肩甲骨周囲筋と腱板構成筋によって構成される^{5,6}。このうち肩甲骨は肩甲骨周囲筋の協調的な筋活動によってコントロールされている。つまり、僧帽筋や前鋸筋といった肩甲骨周囲筋がバランスよく活動することで肩甲骨のスムーズな運動を誘導し、正常な肩関節運動が達成される。また腱板構成筋は、その筋活動によって上腕骨頭の求心位を保持し、関節の安定化を図る役割を担っている^{7,8}。

Kiblerらは⁹、オーバーヘッドスポーツ選手における肩甲骨の重要な機能について、以下の5項目をあげている。

- ・肩甲上腕関節の関節面として安定した土台となる。
- ・肩関節複合体として肩関節の前進と後退運動を行う。
- ・肩峰を挙上する。
- ・肩関節周囲筋の起始部の土台となる。
- ・体幹から上肢へと力を伝達するための機能的連結。

これらをまとめると、

- (1) 肩関節周囲筋の起始部として安定した土台となる、
- (2) 上腕骨のスムーズな運動を行うため3次元的に運動する、
- (3) 体幹から上腕骨に力を伝達するため機能的に連結する。

そこで、この3点から肩関節における肩甲骨の役割を概説する。

(1) 肩関節周囲筋の起始部としての安定した土台

肩甲骨は、上腕骨に作用する筋である三角筋や腱板筋（棘上筋、棘下筋、小円筋、肩甲下筋）、上腕二頭筋、上腕三頭筋などの起始部となっている。これらの筋の筋力発揮により上腕骨が運動するためには、その反作用に抗するために肩甲骨の安定性が重要となる。Kebaetseらは¹⁰、肩甲骨の過度な内旋位（肩甲骨の安定性が低下している状態）では腱板筋の筋力発揮が約20%低下すると報告している。またKiblerらは¹¹、肩甲骨を徒手的に固定することで棘上筋の筋力が13~24%増加すると報告している。すなわち、肩甲骨の固定性

が高ければ、腱板筋力が向上することを示している。腱板は上腕骨頭のスムーズな運動に関して重要な役割をもっているため、肩甲骨の安定性の低下による腱板筋力の制限は、2次的に肩関節の運動を制限する要因となりうる。よって肩甲骨の安定性は、肩甲上腕関節の運動に重要な機能であるといえる。この肩甲骨の安定性は、僧帽筋や前鋸筋、菱形筋といった肩甲骨周囲筋の筋機能によって確保されている。そのため肩甲骨安定性向上を目的として、リハビリテーションの現場やスポーツの現場において、これらの筋に対する筋力トレーニングを実施することが多い。

(2) 上腕骨のスムーズな運動に関与する肩甲骨の3次元運動

関節や軟部組織への機械的なストレスを軽減し、肩関節のスムーズな運動を達成するために、肩甲骨は上腕骨と協調的な3次元運動を行う必要がある¹²。上腕骨の運動に対して肩甲骨が協調的な運動を行うことは古くから知られており、Codmanは¹³、上肢挙上に伴い一定の割合で肩甲骨が上方回旋する現象を「肩甲上腕リズム」として提唱した。その後、肩甲骨の3次元運動に関して、諸家の報告によると、上肢挙上にともない肩甲骨は上方回旋と後傾し、前方挙上（屈曲）にともない肩甲骨は内旋し、側方挙上（外転）にともない肩甲骨は外旋するとされている¹⁴⁻¹⁶。例として、肩甲骨の上方回旋と後傾は、肩峰と上腕骨との間に腱板や滑液包が通過するためのスペースを確保するために重要である^{17,18}。そのため、上肢の運動、とくに上腕骨のスムーズな運動を評価するためには、上腕の動きにとまなう肩甲骨の運動も詳細に評価する必要がある。

(3) 体幹から上肢へと力を伝達するリンク

投球動作やテニスのサーブなど、全身の動きを用いて上肢末端のスピードを増加させる動作においては運動連鎖が重要となる。オーバーヘッド動作における運動連鎖は、より大きな身体セグメントによってエネルギーが生み出され、そのエネルギーが下肢・体幹を介して上肢に伝達することを指す¹⁹。これを達成するためには、近位部から遠位部へと身体セグメントを順序よく協調的に運動させることが重要である²⁰。Kiblerらは²¹、投球動作やテニスのサーブなどのオーバーヘッド動作における運動連鎖の機能を、以下のように定義している。

- 1) 複数のセグメントで一つの機能的な運動を達成するための統合された筋活動。
- 2) 上腕・前腕・手といった末梢セグメントの運動のための下肢・体幹といった中枢セグメントの安定化。
- 3) 中枢セグメントの大きな筋でつくられた力を最大限に手へと伝達。

4) 末梢セグメント単独の力発揮やエネルギー産生を減少させることによる，末梢セグメントのストレス軽減.

5) 末梢セグメントを減速させる力の減少.

オーバーヘッド動作において，肩甲骨は中枢セグメントと末梢セグメントを機能的に連結する役割を担っている．他の先行研究によると，体幹部による運動エネルギーを 20%低下させると，低下させる前と同じ運動を行うためには，末梢セグメントに必要とされる速度が 33%増加すると報告されている²²．また Nagai らは²³，上肢挙上動作に体幹回旋運動を加えた際の肩甲骨運動を調査した．その結果，体幹正中位と比較して，体幹を回旋させた側と同側の肩甲骨の上方回旋角度と外旋角度が増加したと報告している．このことから体幹運動は，肩甲骨運動に影響を与えられられる．したがって，大きな力とエネルギーを生み出す必要があるオーバーヘッドスポーツ動作において，中枢セグメントと末梢セグメントの間をつなぐ肩甲骨の運動や安定性が不十分（肩甲骨機能不全）であると，力と運動の伝達が効率的に行われずパフォーマンス低下と障害発生のリスクが増加すると考えられる．

1.2 肩甲骨機能不全

肩関節障害を有する患者は，肩甲骨の位置異常や異常運動など肩甲骨機能不全とよばれる所見が高頻度で存在すると報告されている^{3,24}．肩甲骨機能不全に関して Burkhart らは²，肩甲骨位置の異常（Scapular malposition），肩甲骨内側下縁の突出（Inferior medial border prominence），烏口突起の疼痛と位置異常（Coracoid pain and malposition），肩甲骨異常運動（dysKinesis of scapular movement）の 4 つをもつものを肩甲骨機能不全とし，この状態を表すために SICK-scapula という概念を提唱した．このうち肩甲骨異常運動は，Kibler らによって肩甲骨運動の正常なコントロールを失った状態として定義されている²⁵．肩甲骨機能不全において，特にこの異常運動が主要な問題となることが多い．特徴的な異常運動としては，肩甲骨上方回旋や後傾，外旋の減少が報告されている^{14,15,26}．オーバーヘッドスポーツ選手においても，この肩甲骨の異常運動は高頻度にみられる所見である．Myers らは⁴，高校生野球選手において肩甲骨異常運動は 246 名の対象者中 122 名(約 50%)に存在したと報告している．メタアナリシスにおいて，肩甲骨機能不全を有するオーバーヘッドスポーツ選手は肩甲骨機能不全を有さないものと比較して，肩関節障害発生リスクが 43%高まると報告されている²⁷．そのため肩関節障害に至っていないとしても，肩甲骨機能不全が存在することは障害予防の観点からすると無視できず，肩甲骨機能不全を解消する運動介入が必要であると考えられる．

オーバーヘッドスポーツにおける肩関節傷害のうち特徴的な病態として、インターナルインピンジメントと上関節唇損傷（SLAP 損傷）などが挙げられる。投球動作においてインターナルインピンジメントや SLAP 損傷は、コッキング期や加速期において（図 1.1）肩甲骨の外旋と後傾が減少することによって、肩甲上腕関節の過剰な外旋と水平外転が強制され、関節窩と上腕骨との間で腱板が挟まれる（インターナルインピンジメント）、上腕二頭筋長頭腱のねじれ・牽引ストレスを受ける等により関節唇が損傷すること（SLAP 損傷）により発生するとされている^{2, 28, 29}。また Merolla らは³⁰、オーバーヘッドスポーツ選手における肩甲骨の運動異常は、腱板筋の筋力低下よりも先に発生していると報告している。従って肩甲骨の異常運動により肩甲上腕関節における過剰なストレスや 2 次的な腱板筋力の低下が生じることで傷害発生リスクが高まると考えられる。また上記のようなオーバーヘッドスポーツに関連する肩関節障害が発生していなくても、肩甲骨機能不全を有することで、体幹と上腕骨をつなぐ肩甲骨という重要なリンクが欠落してしまう。その結果、体幹と下肢でつくられたエネルギーを上肢に十分に伝達することができず、競技パフォーマンスが低下すると考えられる。よって、リハビリテーション終了後、再受傷をふせぎ、さらなる競技能力の向上を図るためには、肩甲骨機能に注目した運動介入とその評価を実施していく必要がある。

1.3 肩甲骨機能不全に対する介入方法

肩甲骨機能不全における肩甲骨運動の異常は、肩甲骨周囲筋の筋活動と柔軟性の変化に起因すると考えられる³¹。肩甲骨周囲筋の筋活動に関して、筋電図を用いた先行研究によると、肩関節疾患患者は、僧帽筋下部と前鋸筋の筋活動が低下し、さらに僧帽筋上部の過剰な筋活動が生じていると報告されている¹⁴。また野球選手やテニス選手、水泳選手に関しても同様な報告がなされており、Cools らは³²、肩関節インピンジメントの症状があるオーバーヘッドスポーツ選手の肩甲骨周囲筋の筋活動と筋力を調査し、インピンジメント側では僧帽筋下部の筋活動の低下と肩甲帯の内外転の筋力比が内転に有意に大きくなっていると報告している。また柔軟性の低下に関しては、肩甲骨を下方回旋や前傾させる作用をもつ肩甲挙筋や小胸筋、大・小菱形筋の柔軟性が低下する。先行研究において、特に小胸筋の伸張性が低下しているものは、肩甲骨の内旋と前傾が大きいことが報告されている^{33, 34}。

肩甲骨機能不全に対する介入として、主に肩甲骨周囲筋への筋力トレーニングとストレッチが行われている。Ellenbecker らは³⁵、肩甲骨機能不全患者の日常生活やスポーツ復帰のためのリハビリテーションアルゴリズムを考案し、肩甲骨周囲筋の筋力低下と柔軟性の低下、日常生活・競技復帰に関するアプローチの考え方をまとめている。それによると、肩

肩甲骨周囲筋の筋力低下や柔軟性の低下に対する運動介入（エクササイズ）として、肩甲骨周囲筋の筋力低下に対しては特に僧帽筋中部，下部，前鋸筋の筋活動を高める筋力トレーニングが重要であり，また柔軟性の低下に関しては肩甲挙筋や小胸筋，菱形筋に対して個々の筋を選択的にストレッチすることが重要であると述べている．それに加えて，肩甲骨周囲筋の筋力と柔軟性が確保された後には，競技特異的な運動における肩甲骨運動が重要であり，この段階においてはエクササイズに，肩甲骨運動だけでなく体幹と下肢の運動を組み合わせた運動連鎖の要素を加え，より競技特異的なエクササイズを行う必要があると述べられている．スポーツ競技動作の再獲得やスポーツパフォーマンスを向上させるにあたって，肩甲骨運動は自動的にコントロールされ，体幹・下肢の運動と統合することが重要である³⁶．したがって肩甲骨機能に対する運動介入を総称して肩甲骨エクササイズ (scapular exercise)と定義すると，肩甲骨エクササイズには肩甲骨の安定性を確保するための肩甲骨周囲筋の筋力を改善するための「筋力トレーニング (resistance training)」と肩甲骨運動を制限する筋の柔軟性を改善するための「ストレッチ (stretch)」，さらにスポーツ特異的な肩甲骨運動を獲得するための「動きをつくる肩甲骨エクササイズ」に分けることができる (図 1.2-1.3)．本論文ではこの「動きをつくる肩甲骨エクササイズ」を「応用的肩甲骨エクササイズ (advanced scapular exercise)」と呼ぶこととする．以下に肩甲骨周囲筋に対する筋力トレーニングとストレッチ，さらに応用的肩甲骨エクササイズに関する報告をまとめる．

1.3.1 肩甲骨周囲筋に対する筋力トレーニング方法

・僧帽筋中部，下部

僧帽筋中部と下部の作用はおもに肩甲骨の外旋であり，僧帽筋下部はさらに上方回旋と後傾の作用を有している^{14,15}．これらの作用によって肩甲骨は棘下筋や小円筋，肩甲下筋の起始部として胸郭に対して安定化することができる．

筋電図を用いた先行研究では，Open kinetic chain (OKC) によるエクササイズにおいて，肩甲骨が外旋，後傾する運動である肩関節水平外転運動で，僧帽筋中部，下部の筋活動が高まると報告している^{37,38}．線維別では，僧帽筋中部は肩関節 90°外転位での水平外転運動で筋活動が高まり，僧帽筋下部は 135°外転位における水平外転運動や 90°外転・外旋位における水平外転運動により，効果的に筋力トレーニングができるとされている．このほかの運動として，Cools らは³⁹，上記の運動に加えて肩関節伸展運動，側臥位における肩関節屈曲運動，そして側臥位肩関節屈曲 0°における肩関節外旋運動で，僧帽筋上部の筋活動を抑制して僧帽筋中部，下部の選択的な筋活動を引き出すことができると報告している．さら

に De Mey らは⁴⁰, 肩甲骨外旋と後傾を意識させるような簡単なエクササイズを実施した後
に前述した Cools らのエクササイズを実施することで, より僧帽筋中部, 下部の筋活動が増
加すると報告している. また Closed kinetic chain (CKC) におけるエクササイズに関して,
Kibler らは⁴¹, 上肢下垂位において肩関節の伸展と肩甲帯内転と下制を伴いながら手掌にて
後方の台を押すような Low row exercise にて僧帽筋下部の選択的トレーニングができると報
告している.

・前鋸筋

前鋸筋の作用は, 肩甲骨の上方回旋と外旋である^{14,15}. この前鋸筋の作用によって三角筋
や棘上筋の起始部として肩甲骨の安定化を図ることができる. 筋電図を用いた先行研究に
よると, 前鋸筋の筋活動は肩甲帯の前方突出運動や Scapular punch, military press で大きく
なると報告されている^{37,42}. これらの OKC での運動のほかに, CKC を用いた運動での筋活
動を報告した研究では, Push up や wall slide といった運動で筋活動が高めると報告されてい
る⁴³⁻⁴⁵.

1.3.2 肩甲骨周囲筋に対するストレッチ方法

・小胸筋

小胸筋は肩甲骨の前傾と内旋に作用する. 従って小胸筋が短縮することによって肩甲骨
の後傾と外旋が制限される^{34,46}.

Borstad らは⁴⁷, 小胸筋に対する3種類のストレッチによる小胸筋の伸長度を調査した.
その結果, 肩関節 90°外転・外旋位から他動的に肩関節を水平外転させる Corner stretch が最
も効果が高かったと報告している. また Muraki らは⁴⁸, 遺体を用いて小胸筋が伸長される
肢位を検討した結果, 肩関節 30°屈曲位から他動的に肩甲骨を後傾させることで小胸筋が最
も伸長されたと報告している.

肩甲骨周囲筋に対するストレッチに関する研究は非常に数が少なく, 渉猟しえる限りで
は小胸筋に関してのみであった. 従って, 菱形筋などのその他の筋に対するストレッチ方
法の効果は明確とはなっていない.

1.3.3 競技特異的な肩甲骨の動きをつくるエクササイズとしての応用的肩甲骨エクササイ ズ

McMullen らは⁴⁹, 肩関節疾患患者に対するリハビリテーションの競技復帰場面や肩関節
周囲のコンディショニングのためのエクササイズ方法として, 運動連鎖を用いたエクササ
イズを考案した. 彼らの報告した運動連鎖エクササイズ (kinetic chain exercise) は, 肩関節

運動にあわせて体幹や股関節運動を組み合わせ、肩甲上腕関節と肩甲骨、その他の体幹、下肢の協調的な運動を行うエクササイズである。このようなエクササイズによって、身体中枢側から末梢側への運動を誘導することで、実際の上肢挙上動作やスポーツ動作における肩関節機能の向上を目的としている⁴⁹。また、De mey らは⁵⁰、他関節の運動を組み合わせた肩甲骨 retraction エクササイズ (scapular retraction exercise) によって、運動連鎖が肩甲骨エクササイズ中の肩甲骨周囲筋の筋活動に与える影響を調査した。しかし、これらの報告では特に肩甲骨運動の運動学的データは示されておらず、体幹や下肢の運動を組み合わせることで、実際のエクササイズ中の肩甲骨運動がどのように変化したかどうかは不明であり、これらの応用的肩甲骨エクササイズによって肩甲骨運動を拡大することができるかは明らかとなっていない。

1.4 肩甲骨機能に対する運動介入の効果

肩甲骨に対する筋力トレーニングやストレッチを一定期間介入した研究の多くは、筋力や肩関節機能スコアの変化について報告している。Van de Velde らは⁵¹、健常水泳選手を対象として肩甲骨周囲筋に対する筋力トレーニングを 12 週間介入し、肩甲骨周囲筋力と筋持久力が有意に増加したと報告している。また Merolla らは⁵²、肩関節痛と肩甲骨の異常運動をもつオーバーヘッドスポーツ選手に対して肩甲骨周囲筋に対する筋力トレーニングと肩関節後方組織に対するストレッチを 6 ヶ月介入した。その結果、腱板筋力と関節可動域は増加し、さらに肩関節痛も減少したと報告している。De Mey らは⁵³、肩関節インピンジメント症候群を有するオーバーヘッドスポーツ選手に対して 6 週間の肩甲骨エクササイズ介入を実施したところ、肩甲骨周囲筋の筋活動のバランス不良が改善され、疼痛と機能スコアが改善されたと報告している。

一方で、肩甲骨に対する運動介入による肩甲骨運動の変化を調査した研究は数少ない。Hibberd らは⁵⁴、NCAA Division IIに所属する水泳選手に対して肩甲骨周囲筋に対する筋力トレーニングとストレッチを 6 週間介入したところ、介入群とコントロール群の肩甲骨運動の変化に有意な差は認められなかったと報告している。また、Lin らは⁵⁵、健常者に対して 4 週間の肩甲骨と腱板に対する筋力トレーニング介入を実施し、介入前後における肩甲骨運動と筋活動を比較したところ、介入前後で有意な変化は認められなかったと報告している。唯一、肩甲骨運動が変化したという報告として、Umehara らは⁵⁶、小胸筋に対するストレッチによる肩甲骨運動への即時的な効果を比較し、肩甲骨面挙上運動における肩甲骨外旋角度が 4.5°、後傾角度が 3.7°増加し、また外転運動において外旋角度が 4.8°、後傾角度が 3.3°増加したと報告している。このように肩甲骨周囲筋に対する筋力トレーニングやストレッチ

チ介入によって、肩甲骨運動が変化するかどうかは、関連する先行研究が少ないことや相反する結果が報告されていることもあり明確にはなっていない。そのため、さらなる検証が必要であると考えられる。

以上の報告をまとめると、肩甲骨周囲筋に対する筋力トレーニングやストレッチによる運動介入によって肩関節機能や疼痛が改善することは間違いないが、筋力トレーニングやストレッチなどの運動介入が肩甲骨運動に与える効果は明確ではない。また運動連鎖を用いた応用的肩甲骨エクササイズのような他関節の運動を組み合わせることで肩甲骨運動を拡大することを目的としたエクササイズにおいても、そのエクササイズ中に肩甲骨運動がどのように変化するか明確になっていない。さらに上肢挙上動作やオーバーヘッドスポーツ動作中の肩甲骨運動に与える効果の検証もなされておらず、不明である。

1.5 本研究の目的

以上のことから、肩関節運動において肩甲骨の機能は重要であり、スポーツ障害やパフォーマンスに影響を与えることが明らかである。それに対する筋力トレーニングやストレッチ方法は、多数報告されている。しかし肩甲骨機能の重要性が認知されているにもかかわらず、実際に肩甲骨機能不全に対する筋力トレーニングやストレッチが、日常生活動作やスポーツ動作における肩関節の運動に与える影響は不明である。特に、肩関節障害が発生しやすいオーバーヘッドスポーツ動作に対しても、肩甲骨エクササイズが、そのスポーツ動作中の肩関節運動に与える効果のエビデンスも十分ではない。従って、オーバーヘッドスポーツ選手のためのより効果的な競技復帰プロトコルやパフォーマンス向上のためのトレーニングプログラムを作成するために、体幹、下肢の運動を組み合わせた応用的肩甲骨エクササイズ中の肩甲骨運動を定量評価し、どのようなエクササイズが肩甲骨運動を拡大させることができるのかを明らかにする必要がある。さらに、このようなエクササイズの実際の上肢運動やスポーツ動作中の肩甲骨運動に与える効果を明らかにする必要がある。このようなエクササイズによる肩甲骨運動の変化を正確に捉えるために、第一に肩甲骨姿勢のより正確な推定が必要となる。

そこで、本博士論文の目的は、体表から肩甲骨エクササイズや投球動作など肩甲骨運動を測定できる手法を確立すること（研究 1）、肩甲骨エクササイズをバイオメカニクス的に分析し、肩甲骨運動を拡大することができるエクササイズを検討すること（研究 2）、研究 2 で検討した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効果を検討することとした（研究 3）。

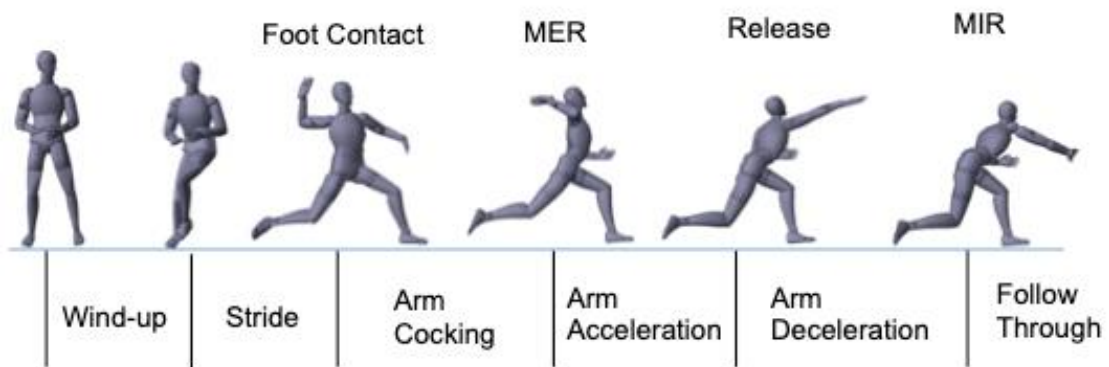


図 1.1 投球動作の相分け

Wind-up : ワインドアップ期, Stride : ストライド期, Arm Cocking : コッキング期,
 Arm acceleration : 加速期, Arm Deceleration : 減速期, Follow-through : フォロースルー期,
 Foot Contact : 非投球側下肢接地, MER : 肩関節最大外旋位, Release : ボールリリース,
 MIR : 肩関節最大内旋

肩甲骨エクササイズ
(肩甲骨機能に対する運動介入)

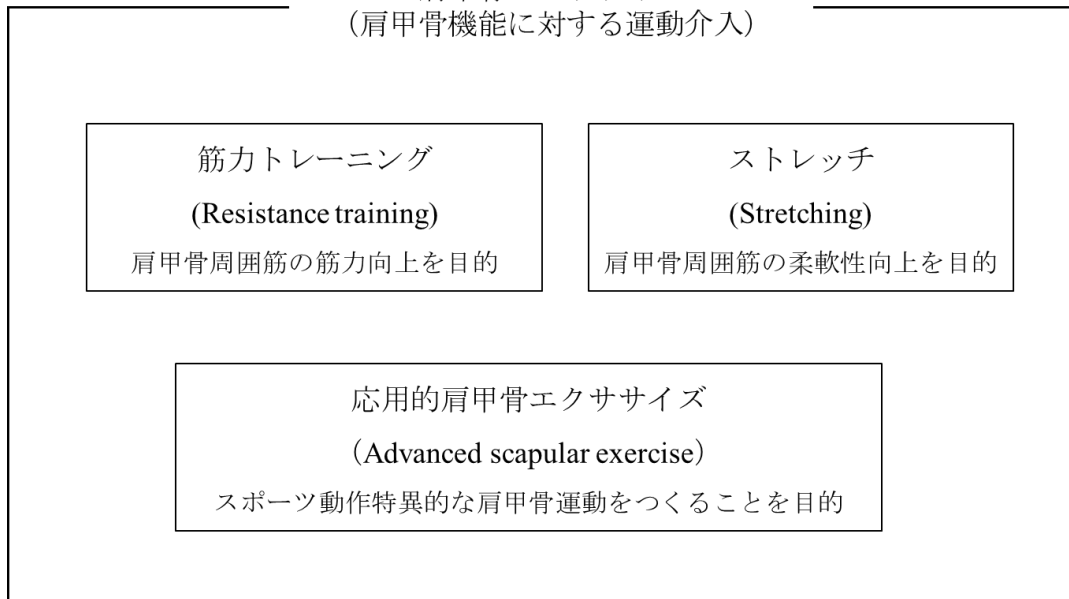


図 1.2 肩甲骨エクササイズ

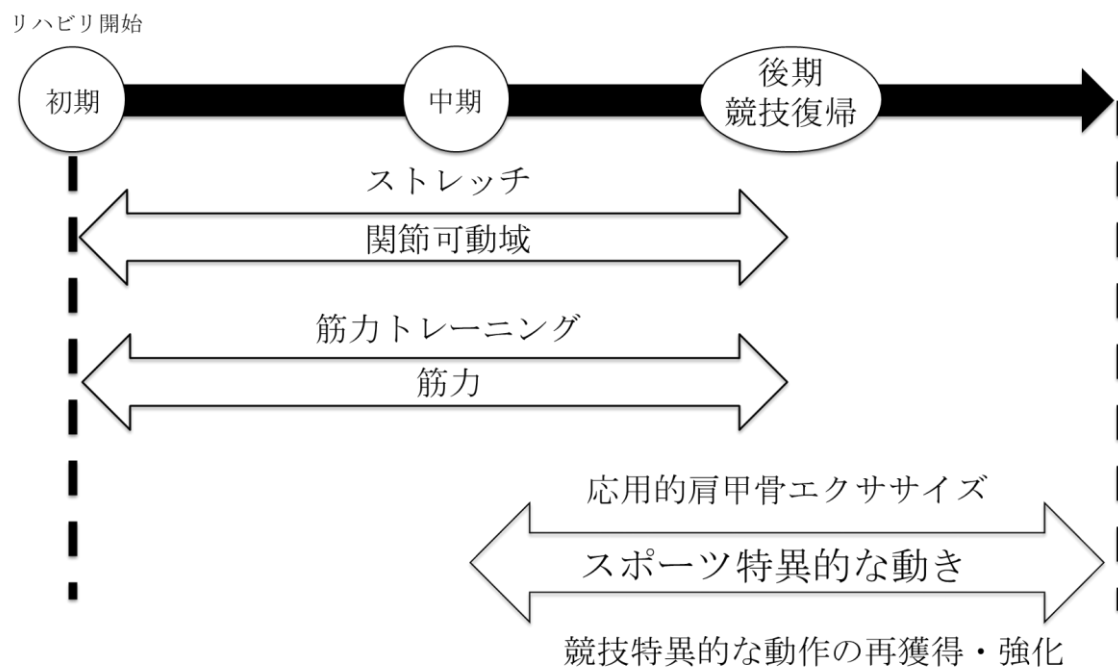


図 1.3 肩甲骨機能不全に対する運動介入のイメージ

第2章

研究1

Acromion marker cluster 法を用いた肩甲骨姿勢の新たな無侵襲推定方法の開発

2.1. はじめに

肩甲骨姿勢（胸郭に対する肩甲骨の運動角度）を測定することは、肩関節障害における診断や、日常生活動作（ADL）とスポーツパフォーマンスにおける上肢の動作を評価するうえで重要な情報となる。

肩甲骨の動作解析は、古くはX線写真を使用して2次元上で評価されてきた^{57, 58}。その後、骨にワイヤを挿入し、そのワイヤにマーカやセンサを貼付することで、侵襲的ではあるが、肩甲骨運動を3次元で測定する研究がなされてきた^{15, 16, 59}。しかし、この方法は、骨に直接ワイヤを挿入するため被験者に対する負担が非常に大きい。そのため、現在では倫理的な配慮を含めて、ほとんど実施されていない。現在では無侵襲な測定を実現するために、体表から肩甲骨の動きを間接的に計測することで肩甲骨の動作を推定する方法へと変化してきた。

肩甲骨姿勢の無侵襲測定において、肩甲骨が平たく幅広い形状であり皮下組織下を滑動することが測定誤差の要因となる。Matsuiらは⁶⁰、上肢最大挙上位において肩甲骨内側縁に貼付した体表マーカは実際の肩甲骨位置と比較して87mmものズレが生じていたと報告している。よって体表に貼付したマーカは肩甲骨姿勢を十分に反映できず、体表からの肩甲骨姿勢の測定は誤差が大きいという問題があった。そこでMcQuadeらは⁶¹、体表と肩甲骨のズレが最も少ない肩峰上にセンサを貼付し、そのセンサ姿勢から肩甲骨の姿勢を間接的に推定するAcromial methodを考案した。この手法は電磁センサを使用することで幅広く用いられている手法である^{38, 62-66}。しかし電磁センサは、一般的に機器の制約上無線ではなく、センサが制御機器と有線につながれておりスポーツ動作などのダイナミックな運動の測定が困難であった。また、有線か無線に関わらず、スポーツ用具に金属を使用している場合、磁場が乱れることにより測定精度が低下することも問題であった。これらの問題を解決するために、Acromial methodは、磁場の影響を受けずマーカと制御機器をワイヤで接続しない光学式モーションキャプチャ・システムを用いる方法へと改良されてきた。

近年ではAcromial methodを応用して、肩峰上に貼付したベースプレートの上に設置した複数の反射マーカ（Acromion marker cluster : AMC）から肩甲骨姿勢を推定する方法が考案されている（図2.1）⁶⁷。この方法はAMCに設定した座標系から、あらかじめ測定した肩甲骨特徴点から構築した肩甲骨座標系への座標変換を求める。この座標変換を肩甲骨テンプ

レートと呼ぶ。この肩甲骨テンプレートと測定した AMC の姿勢から、肩甲骨の姿勢を推定する。多くの報告では、肩甲骨テンプレートは上肢下垂位のみで作成されている⁶⁷⁻⁷⁰。AMC 法もしくは AMC 法を応用して推定した肩甲骨姿勢の精度を検討した研究を表 2.1 に示す。上肢下垂位にて肩甲骨テンプレートを作成した場合、その推定精度は胸郭上腕関節挙上 120°まで保証されているが、それ以上の挙上角度では誤差が大きくなると報告されている⁷¹。そこで 120°以上の挙上位に関して推定精度を向上させるために、Brochard らは Double calibration 法を考案した⁶⁸。この方法は、上肢下垂位と最大挙上位において AMC と肩甲骨骨特徴点を測定し、その間の挙上角については、肩甲骨テンプレートを線形補間する。そのため挙上角度に応じて肩甲骨テンプレートを変更することが可能となり、ひとつの挙上面における肩甲骨姿勢の推定精度を向上させた。しかし、この方法は上肢下垂位から最大挙上位までの一平面でのみで補正するため、特定の一平面内の運動にしか対応できない。そのためトレーニングやスポーツ動作、ADL などの複雑な動作における肩甲骨姿勢の推定には対応できない。そこで Nicholson らは⁷²、胸郭上腕関節姿勢（挙上面、挙上角度、回旋）と肩峰マーカの位置（上下、左右）を入力変数とした線形回帰式を作成し、その式を用いて肩甲骨姿勢を推定した。これを以下、回帰法と呼ぶ。この推定した肩甲骨姿勢を Fluoroscopy と比較し、精度を評価した。その結果、回帰法は、上方回旋・下方回旋と前傾・後傾において Fluoroscopy による推定結果と高い相関があり、内旋・外旋において中等度の相関が得られたと報告されている。さらに回帰法による肩甲骨姿勢の推定誤差は、約 8°以下であったと報告している。Rapp らは⁷³、Nicholson らの方法と同様の手法を用いて線形回帰式を作成し、前述の AMC 法と回帰法による肩甲骨姿勢の推定精度を比較した。その結果、回帰法による推定誤差は 4~8°であり、すべての姿勢で AMC 法よりも推定誤差が小さかったと報告した。2018 年現在のところ、Rapp らの方法は、最新かつ、高精度に肩甲骨の姿勢を推定できるリーズナブルな方法と考えられる。

Double calibration 法や回帰法の結果から、肩甲骨テンプレートの作成に複数の胸郭上腕関節姿勢を用いることで肩甲骨姿勢の推定誤差を減少させることができると考えられる。この肩甲骨姿勢の測定前に実施される複数の任意姿勢の計測とその測定データを元に補正モデルを作成することを、本論文ではキャリブレーションと呼ぶ。回帰法におけるキャリブレーションでは線形回帰式を用いる。そのため、上腕の運動にともなう肩甲骨姿勢の推定誤差が非線形に変化するならば、非線形で補正することでより精度良く肩甲骨の姿勢を推定できる可能性があると考えられる。

そこで研究 1 の目的は、第一章で述べた肩甲骨エクササイズを介入した際の変化を検出できる精度を持つ、肩甲骨姿勢の推定方法を開発することとした。そのため、非線形近似

による新しい肩甲骨姿勢推定のためのキャリブレーション方法を開発し、その推定精度を従来から用いられている AMC 法と近年報告された回帰法と比較した。

2.2 新しい肩甲骨姿勢の推定方法

本研究では、肩甲骨の姿勢を間接的に測定することができる AMC 法を用いて、その推定精度を向上させる新たなキャリブレーション方法を提案する。AMC 法を用いて肩甲骨姿勢を推定するために、AMC と肩甲骨、上腕骨、体幹の位置関係を決定する必要がある。これらを計算するために、国際バイオメカニクス学会が提唱する方法に従い、肩甲骨座標系 (Σ_S) と上腕骨座標系 (Σ_H)、胸郭座標系 (Σ_T) を定義する⁷⁴ (図 2.2)。肩甲骨座標系は棘三角 (TS) から肩峰後角 (AA) へ向かうベクトルを Z_S 軸とし、TS から AA に向かうベクトルと TS から下角 (AI) に向かうベクトルでつくる平面に対して垂直で前向きのベクトルを X_S 軸、さらに X_S 軸と Z_S 軸で作る平面に対して垂直で上向きのベクトルを Y_S 軸と定義する。胸郭座標系は、第 7 頸椎棘突起 (C7) と頸切痕 (SN) を結んだ線の中点と剣状突起 (XP) と第 8 胸椎棘突起 (Th8) を結ぶ線の中点を結び上方に向かうベクトルを Y_T 軸とし、C7 と SN を結ぶベクトルと C7 と Th8 を結ぶベクトルで作る平面に対して垂直で右向きのベクトルを Z_T 軸、さらに Y_T 軸と Z_T 軸で作る平面に対して垂直で前向きのベクトルを X_T 軸と定義する。上腕骨座標系は上腕骨内側上顆 (ME) と上腕骨外側上顆 (LE) を結ぶ線の中点から上腕骨頭に向かうベクトルを Y_H 軸とし、上腕骨頭と ME, LE で作る平面に対して垂直で前向きのベクトルを X_H 軸、さらに X_H 軸と Y_H 軸で作る平面に対して垂直に右向きのベクトルを Z_H 軸と定義する。AMC 座標系 (Σ_{AMC}) は AMC 上のマーカを用いて図 2.3 のように定義する。

前述の座標系を用いることで任意の姿勢 i における、胸郭に対する肩甲骨の姿勢 R_{Si} を以下の式で表すことができる (図 2.4)。

$$R_{Si} = R_{Ai} R_{S-Ai}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i) \quad (1)$$

ここで、 R_{Ai} は、任意の姿勢 i における胸郭座標系に対する AMC 座標系の座標変換とする。また、 $R_{S-Ai}(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ は、肩甲骨座標系に対する AMC 座標系の座標変換である。 α_i と β_i , γ_i は、それぞれ肩甲骨座標系の X_S 軸と Y_S 軸、 Z_S 軸に対する AMC の姿勢を表すオイラー角とする。なお、胸郭に対する肩甲骨姿勢はオイラー角を用いて、Y 軸 (内旋/外旋) → X 軸 (上方回旋/下方回旋) → Z 軸 (前傾/後傾) の順で算出する⁷⁴

従来の AMC 法では、推定したい測定姿勢とは別に、事前に上肢下垂位 ($i = 0$) の肩甲骨骨特徴点 (ランドマーク) と AMC を測定する。上肢下垂位のみでの測定データから、 R_{S-A0} を決定する。これが、従来の AMC 法のキャリブレーションとなる。従来の AMC 法は、 R_{S-A0} を一定の値としたキャリブレーション・テーブルを用いて以下のように任意の肩甲骨姿勢

を推定している。

$$R_{Si} = R_{Ai} R_{S-A0} (\alpha_0, \beta_0, \gamma_0) \quad (2)$$

しかし実際には軟部組織のズレの影響により R_{S-A} の値は一定の値とはならない。そのため従来の AMC 法では R_{S-A} の値の変動を考慮していないため、軟部組織の影響が大きくなる上肢挙上位にて推定誤差が大きくなるという問題点があった⁶⁶。そこで、肩甲骨姿勢の推定精度を向上するためには、AMC 座標系と肩甲骨座標系の位置関係を一つに固定するのではなく、上腕の姿勢変化にともなう皮膚の同様によるズレを広範囲に補正できるキャリブレーション・テーブルを設定する必要がある。そこで、式 (1) の $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ は、肩甲骨座標系に対する AMC 座標系の姿勢を表すが、上腕の姿勢により皮膚の動揺が異なるため、上腕の挙上面 θ_i と挙上角 φ_i を変数とした関数 $f_x(), f_y(), f_z()$ を用いて表すこととした。

$$\alpha_i = f_x(\theta_i, \varphi_i), \quad \beta_i = f_y(\theta_i, \varphi_i), \quad \gamma_i = f_z(\theta_i, \varphi_i) \quad (3)$$

本研究で提案する新しい推定方法では、複数の上肢挙上姿勢において肩甲骨骨ランドマークと AMC を測定し、非線形に補間できる薄板スプライン(TPS; Thin-plate spline)を用いて⁷⁵、キャリブレーション・テーブルを作成する。このキャリブレーション・テーブルを用いて、任意の胸郭上腕関節姿勢 i における R_{S-A} を決定する。以下、TPS 法とする。

TPS 法は、任意の姿勢 i における肩甲骨姿勢 R_{Si} を AMC から推定するために、軟部組織による誤差を非線形補間によって補正する。この TPS 法による肩甲骨姿勢の推定精度を評価するために、次節にて精度評価のための実験について述べる。目標とする推定精度は 5° 以下とする。これは、肩関節疾患患者における肩甲骨運動の変化は $4\sim 6^\circ$ と報告されており¹⁴、運動介入によって同程度の肩甲骨角度の改善を検出できる推定方法を確立することを目標としているためである。

2.3. 実験方法

2.3.1 対象

健常男性 13 名(年齢 21.1 ± 2.4 才; 身長 174.4 ± 7.0 cm; 体重 72.1 ± 10.9 kg)の右上肢を対象に測定を実施した。なお、本研究において右側の肩関節に整形外科的、神経学的疾患を有するもの、また測定時の右肩関節に安静時と運動時の疼痛を有するものは除外した。対象者は日常的にレクリエーションレベルからアスリートレベルで野球、体操、アーチェリーのいずれかを実施していた。すべての対象者には研究内容を十分に説明し、書面にて同意を得た。本研究は同志社大学「人を対象とする研究」に関する倫理審査委員会の承認を得て実施した (16028)。

2.3.2 測定手順

光学式 3 次元動作解析装置(MAC3D system; Motion Analysis Corporation, USA)を用いて運動学的データを測定した。サンプリング周波数は 240Hz とした。肩甲骨姿勢を体表から測定するために、自作した AMC を肩峰上の平らな面に貼付した (図 2.1)。AMC は 3 つの直径 4mm マーカを三角形の形に配置し、その重さは約 0.4g であった。さらに上肢と胸郭の姿勢を測定するために、国際バイオメカニクス学会が推奨している方法に基づき、直径 12mm の反射マーカを頸切痕 (SN), 剣状突起 (XP), 第 7 頸椎棘突起 (C7), 第 8 胸椎棘突起 (Th8), 上腕骨内側上顆 (ME), 外側上顆 (LE) に貼付した⁷⁴。肩甲骨姿勢評価のために、肩甲骨骨ランドマークを触診し Scapular locator (SL)を用いて肩甲骨姿勢を測定した。SL は 4mm マーカを先端に貼付したピン先を肩峰後角 (AA), 棘三角 (TS), 下角にそれぞれ接触させて肩甲骨骨ランドマーク位置を測定できる治具とした (図 2.5)。

2.3.3 測定課題

・ 挙上姿勢

上肢挙上姿勢の変化にともなう肩甲骨姿勢の推定誤差分布を評価するために、上肢下垂位と上肢挙上面 0° (前額面) ~90° (矢状面) で挙上 30°~180°位において AMC と SL, その他の骨ランドマークの測定を行った。挙上面と挙上角度はそれぞれ 30°毎に設定した (図 2.6)。これら全部で 25 個の異なる姿勢を挙上姿勢とする。対象者は椅子座位にて自作したガイドにそって挙上面と挙上角度を設定し、指定されたポイントに中指を合わせて上肢挙上位を保持した (図 2.7)。

・ 機能的姿勢

次に、ADL やスポーツ場面を想定した姿勢における推定精度を評価するために、結髪位、前方リーチ位、側方リーチ位、触口位、挙上面 45°で 45°挙上位 (45°挙上位)、挙上面 45°で 135°挙上位 (135°挙上位) の 6 つの姿勢において測定を実施した (図 2.8)。これらを機能的姿勢とする。

さらに後述する回帰法に用いるデータのために、結帯位、肩関節下垂位最大外旋位、肩関節最大伸展位も測定した⁷⁵。

2.3.4 肩甲骨姿勢の推定方法

・ TPS 法

TPS 法のキャリブレーションを実施し、キャリブレーション・テーブルを作成するため

に、複数の上腕姿勢における肩甲骨ランドマークと AMC を測定した。そのため、上肢下垂位、挙上面 0°、30°、60°、90°における挙上 90°位と 150°位、挙上面 30°における挙上 180°位の合計 10 姿勢で事前測定した (図 2.9)。これらの姿勢を事前に測定する姿勢とした理由は、先行研究にて AMC 法で推定精度が低下するとされている 120°以上の大きな挙上角度における推定精度の向上を目標としたからである⁶⁶。しかし、事前測定に要する姿勢が多くなれば、事前計測の時間が増加する。そのため対象者の時間的拘束が増加し、正確な測定姿勢の保持が困難となる可能性がある。そこで、比較対象としている回帰法と同等の 10 姿勢を事前測定する姿勢の上限とした。上記の 10 姿勢におけるデータを元に、2.2 節で述べた TPS を用いて肩甲骨姿勢を推定した (以下、TPS 法)。

・従来法

比較対象として、前述した従来の AMC 法を用いて肩甲骨姿勢を推定した⁶⁷。キャリブレーション・テーブルは、2.2 節で述べたように、上肢下垂位($i=0$)の測定データを用いて作成した。したがって、 $R_{S-A0}(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ を一定の値とし測定対象とする上腕姿勢における肩甲骨姿勢を AMC より推定した (以下、従来法)。

・回帰法

比較対象として、Nicholson ら⁷²と Rapp ら⁷³の方法をもとに、肩甲骨姿勢の 3 つの運動軸 (X_s, Y_s, Z_s) に関して、それぞれ重回帰式を作成して肩甲骨姿勢を推定した。重回帰式は胸郭上腕関節姿勢 (挙上面, 挙上角, 回旋) と AMC の重心の位置 (上下方向と前後方向) の 5 つを入力変数とした。キャリブレーション・テーブルとなる重回帰式を作成するための事前測定の姿勢は Rapp らの方法をもとに、上肢下垂位, 外転位, 外旋位, 伸展位, 屈曲位, 挙上面 30°での挙上 30°位, 触口位, 結髪位, 前方リーチ位, 結帯位の 10 姿勢を用いた⁷³。これらの事前に測定した姿勢から作成された肩甲骨姿勢の 3 つの軸に対応する 3 つの重回帰を用いて、測定姿勢における肩甲骨姿勢を推定した (以下、回帰法)。

触診法

本研究において、精度評価の基準とする肩甲骨姿勢は、SL を用いて計測した肩甲骨ランドマーク位置から直接作成した肩甲骨座標系から算出される胸郭に対する肩甲骨姿勢とした (以下、触診法)⁶⁷。

すべての計算は MATLAB (MATLAB R2018a; MathWorks, U.S.A) にて行った。

2.3.5 精度評価

挙上姿勢と機能的姿勢において、TPS 法と従来法、回帰法に対してそれぞれ触診法との誤差を評価した。その検定には、フリードマン検定を用いた。フリードマン検定が有意であった場合は、事後検定としてボンフェローニ補正を用いたウィルコクソン符号付順位和検定を用いて、触診法に対して TPS 法と従来法、回帰法をそれぞれ比較した。すべての統計解析は SPSS version 24 (IBM, U.S.A) を用いて実施し、有意水準は 0.05 とした。

すべての評価姿勢において、肩甲骨のそれぞれの運動軸に関して、触診法とそれぞれの推定方法から算出した角度の誤差を算出した。この誤差からそれぞれの推定方法の二乗平均平方根誤差 (RMSE) を算出して比較した。

2.4. 結果

2.4.1 挙上姿勢

挙上姿勢における各推定方法による肩甲骨姿勢の平均値を表 2.2 に記載した。また表 2.3 に挙上姿勢におけるそれぞれの推定方法の RMSE を記載した。X 軸は上方回旋(+)/下方回旋(-), Y 軸は内旋(+)/外旋(-), Z 軸は後傾(+)/前傾(-)と定義した。

挙上姿勢に関して、事後検定の結果、TPS 法と触診法の間には挙上面 30°における挙上 30°位と 150°位、挙上面 90°位における挙上 30°位に関して有意差が認められた。さらに従来法と触診法では、挙上面 0°における挙上 120~180°位、挙上面 30°位における挙上 150°と 180°位、挙上面 60°位における挙上 180°位、挙上面 90°位における挙上 60°と 150°、180°位で有意差が認められた。そして、回帰法と触診法との比較において、下垂位、挙上面 0°における挙上 0~60°と 150°と 180°位、挙上面 30°位における挙上 60°と 90°位、挙上面 60°位における挙上 60°と 90°、180°位、挙上面 90°位における挙上 90°位において有意差が認められた。

挙上姿勢において、TPS 法における最大 RMSE は X 軸 : 7.8°, Y 軸 : 8.1°, Z 軸 : 6.5°であり、25 姿勢中 20 姿勢において 5°未満であった。従来法における最大 RMSE は X 軸 : 12.7°, Y 軸 : 14.2°, Z 軸 : 10.4°であった。従来法の RMSE は挙上 30°位から 90°位の間では、おおむね 5°から 8°程度であったが、挙上 120°以上では RMSE は大きく増加し、10°以上となった。回帰法における最大 RMSE は X 軸 : 8.0°, Y 軸 : 7.6°, Z 軸 : 7.4°であり、25 姿勢中 8 姿勢で 5°未満となった。

2.4.2 機能的姿勢

機能的姿勢におけるそれぞれの推定方法の肩甲骨姿勢の平均値と標準偏差を図 2.10 に示した。また RMSE は図 2.11 に示した。

機能的姿勢において、事後検定の結果、TPS 法と触診法を比較すると結髪位と前方リーチ位において有意差が得られた。また従来法と触診法を比較すると側方リーチと触口位で有意差が得られた。さらに回帰法と触診法を比較すると、結髪位、前方リーチ位、触口位において有意差が得られた。

TPS 法における RMSE は X 軸 : 4.7~6.6°, Y 軸 : 3.5~8.4°, Z 軸 : 3.0~5.9°であった。一方、従来法における RMSE は X 軸 : 5.9~11.6°, Y 軸 : 3.1~11.6°, Z 軸 : 3.1~8.0°であった。さらに回帰法の RMSE は X 軸 : 3.1~11.2°, Y 軸 : 3.0~9.8°, Z 軸 : 2.0~6.2°であった。TPS 法と回帰法は従来法と比較して、TPS 法では 6 姿勢中 4 姿勢で、回帰法では 6 姿勢中 3 姿勢で RMSE が減少していた。TPS 法は特に結髪位や側方リーチ位、135°挙上位といった上腕挙上角度が大きい姿勢において誤差が少なかった。しかし TPS 法は、前方リーチ位において回

帰法と比較して RMSE が大きかった。さらに触口位と 45° 挙上位においては、TPS 法と従来法、回帰法との間に明らかな差はみられなかった。回帰法における RMSE は、結髪位と前方リーチ位において TPS 法よりも小さかった。一方で TPS 法は、側方リーチ位と 135° 挙上位において回帰法よりも明らかに小さかった。

2.5. 考察

様々な肩関節姿勢における肩甲骨姿勢を推定するために、本研究では、AMC法による推定誤差を曲面近似（薄板スプライン：TPS（Thin-plate spline））を用いて補正する新しい推定方法を開発し、肩甲骨姿勢の推定精度を向上させた。この方法は、軟部組織によって生じるAMCと肩甲骨の位置関係の誤差を、胸郭上腕関節の挙上面と挙上角度の変化に応じて非線形に補正する方法である。誤差の評価として触診より計測した肩甲骨姿勢に対して、本研究で新たに開発したTPS法、従来から用いられているAMC法、そして近年報告された最新の回帰式により肩甲骨姿勢を推定する方法と比較した。様々な胸郭上腕姿勢における肩甲骨の推定精度を評価した結果、TPS法は従来法と回帰法と比較して、挙上姿勢では全体的に推定精度が向上していた。特に挙上角度が120°以上の姿勢において推定精度が向上した。さらにADL動作などの機能的姿勢では、TPS法のRMSEは3~8°であり、これは回帰法と同程度であった。これらの結果より、新たに開発したキャリブレーション法により、様々な肩関節姿勢における肩甲骨姿勢の推定精度を向上できた。

先行研究では肩甲骨に直接骨ピンを挿入して、肩甲骨の姿勢を測定していた^{14,15}。この手法は肩甲骨の姿勢を測定するにあたって最も正確な方法であったが、骨ピンを刺入するため被験者にとって非常に侵襲的であることから、今日では用いられていない。その代用として、非侵襲的に肩甲骨姿勢を測定するために、多くの先行研究では触診とScapular locatorを併用することで肩甲骨姿勢の測定していた^{67,68,76}。このScapular locatorは高い推定精度を有していると報告されており⁷⁷、多くの先行研究において種々の肩甲骨姿勢推定方法の比較対象として用いられている^{67,68,76}。本研究においてもScapular locatorによって測定した肩甲骨姿勢を比較の基準値とした。Scapular locatorを用いた先行研究では、肩関節屈曲運動や外転運動を測定している⁷⁸。本研究においてScapular locatorを用いた触診法における挙上面0°と90°の肩甲骨姿勢は、先行研究におけるこれらの挙上面に相当する屈曲と外転の角度を比較したところ同程度の値であった^{67,68,76}。そのため、本研究の触診法は比較対象として十分な精度を有していると考えられる。

2.5.1 挙上姿勢について

Lempereurらは⁷⁸、従来法である下垂位のみキャリブレーションによるAMC法の推定精度をレビューした。上腕の挙上角度0~120°の範囲において、肩甲骨姿勢のRMSEは3~9°であったと報告されている。しかし、他の先行研究において、従来のAMC法は、胸郭上腕関節の挙上角度が120°以上になると推定誤差が増加すると報告されている⁶⁶。これは挙上角度が大きくなる三角筋の筋収縮や皮膚の動きなどの軟部組織による誤差（Soft tissue

artifact ; 以下, STA) が生じるためと考えられている. この問題を解決するために, Brochard らは Double calibration 法を考案した⁶⁸. しかし, この Double calibration 法は, 特定の挙上面に沿った胸郭上腕関節の挙上運動のみキャリブレーションを行っているため, 挙上面が変化した場合の肩甲骨姿勢の推定誤差に関しては考慮されていない. Rapp らの報告によれば, ADL 姿勢において, Double calibration 法による肩甲骨姿勢の推定誤差の最大 RMSE は 11.8°であった⁷³. このことから, 単一の挙上面によるキャリブレーションでは, ADL やスポーツ動作といった複雑な運動に対応できないと考えられる. この STA による誤差を軽減するために, Nicholson らは⁷², 挙上面と挙上角が異なる複数の姿勢を事前に計測することで, 挙上角度だけでなく挙上面も変化させた姿勢を用いて重回帰式を作成し, 肩甲骨の姿勢を推定した. その結果, Fluoroscopy により測定した肩甲骨姿勢と比較したところ回帰法による推定誤差は 8°以下であった⁷². さらに, Rapp らは⁷³, Nicholson らの方法と同様の方法を用いて種々の ADL 姿勢を想定した機能的姿勢を対象として, 肩甲骨姿勢の推定精度を Double calibration 法と比較した. その結果, どの測定姿勢においても重回帰式を用いた推定方法のほうが誤差は小さかったと報告されている⁷³. このことから, 胸郭上腕関節の挙上角度だけでは, 補正が不十分であり, 挙上面を変えた複数姿勢データも加えることで, 肩甲骨姿勢の推定精度が向上できると考えられた. そこで, 本研究では, AMC 法の推定精度を向上させるため, そのキャリブレーションにおいて, 複数の異なる上腕挙上面と上腕挙上角度における姿勢を事前に測定した. ただし, 事前測定に要する時間を軽減し, かつ, 先行研究において用いられている事前測定の姿勢数と一致させるために, 本研究では 10 個の異なる姿勢を事前測定した. 事前測定した姿勢は, 上肢下垂位に加えて STA の影響を強く受ける挙上 90°以上かつ複数の挙上面における上肢挙上姿勢を選択した. これらの 10 姿勢から, AMC 座標系と肩甲骨座標系の位置関係である式 (3) を, 挙上面と挙上角度の変化に合わせて薄板スプライン補間によって補正した (TPS 法). その結果, TPS 法は, 挙上姿勢における最大 RMSE は 8.1°となり, 約 8 割の姿勢で RMSE が 5°未満であった. 一方で, 従来法では最大 RMSE は 14.2°であった. Lempereur のレビューにおける肩関節屈曲姿勢と外転姿勢における従来法による肩甲骨姿勢の推定精度と比較すると, 胸郭上腕挙上 0~120°に関して, 本研究における従来法の RMSE は先行研究と同程度であった⁷⁸. 具体的には, 推定精度が大きく低下するとされている挙上 120°以上では, 先行研究と同じく本研究の従来法においても誤差が増加し, 25 姿勢中 7 姿勢で RMSE が 10°以上であった. 挙上姿勢において, 本研究における回帰法の最大 RMSE は 8.0°であり, 先行研究の報告通り, 従来法と比較して推定誤差は小さかった. しかし, 新たに開発した TPS 法は, RMSE が 5°以上となった挙上姿勢は 25 姿勢中 6 姿勢であったのに対して, 回帰法は 25 姿勢中 17 姿勢におい

て RMSE が 5°以上であった。TPS 法のキャリブレーションに用いた 10 姿勢を除いても、TPS 法は 6 姿勢、回帰法は 10 姿勢で RMSE が 5°以上であった。

以上の結果より、TPS 法と回帰法のどちらも胸郭上腕関節挙上角度が 90°以上の姿勢において肩甲骨姿勢の推定精度が向上していた。このことから、キャリブレーション・テーブルを作成するとしても Double calibration 法のような挙上角度のみでは補正データが不十分であり、その他の胸郭上腕関節姿勢を考慮に入れる必要があることが示唆された。また図 2.12 は、TPS 法のキャリブレーション・テーブルの代表例を示す。挙上面と挙上角度の変化にともなう式(3)の α , β , γ を薄板スプラインにより補間した。挙上面と挙上角度の変化にともなう STA によって、 R_{S-A} の変化が線形でなくより複雑であることが分かる。また従来法における挙上姿勢 25 姿勢の誤差の変化から、誤差は挙上角度の増加にともない増加するが、その誤差は挙上面の変化によって非線形に変化していた。よって、TPS 法では挙上面と挙上角度を入力変数として曲面近似によって補正したことで、回帰法と比較して挙上姿勢の多くの姿勢において推定精度が向上したと考えられる。今回新しく提案した TPS 法は、回帰法と比較してより広い範囲で RMSE が減少しており、挙上姿勢の 76%で 5°以下と従来法 (24%)、回帰法 (32%) と比較して良好な精度を有していた。先行研究において健常者と肩関節疾患患者の肩甲骨運動角度の差は 4~6°と報告されており¹⁵、また肩甲骨姿勢の推定精度は RMSE で 5°以下が望ましいとされている⁷⁹。このことから本研究で開発した TPS 法は十分な推定精度を有していると考えられる。

2.5.2 機能的姿勢について

ADL やスポーツ動作を想定した上腕姿勢における推定精度を評価するために、挙上角度が大きくなる結髪やリーチング、135°挙上位を機能的姿勢として評価した。

結髪姿勢において TPS 法の肩甲骨姿勢の推定誤差の RMSE は 4.7~5.1°、従来法では 5.3~8.6°、回帰法では 2.5~4.2°であった。これらの結果より、TPS 法と回帰法はいずれも従来法と比較して推定精度が向上することが明らかとなった。TPS 法と回帰法を比較すると、回帰法は、わずかではあるが推定精度が良好であった。これはキャリブレーションで事前に測定した姿勢（キャリブレーション姿勢）の違いによると考えられる。回帰法はキャリブレーション姿勢に結髪位を含んでいるため、この姿勢について回帰法の推定精度がよくなることは当然と考えられる。しかし、TPS 法の RMSE もおおよそ 5°以下であるため、十分な推定精度をもつと考えられる⁷⁹。TPS 法でも回帰法と同様に測定したい動作によってキャリブレーション姿勢を選択することが可能であるため、結髪位をキャリブレーション姿勢として測定し TPS により肩甲骨テンプレートを作成することで、TPS 法においてもこの

姿勢での精度をより向上できる可能性がある。

さらに 135° 挙上位における RMSE はそれぞれ TPS 法で 3.0~5.1°，従来法で 5.9~8.9°，回帰法で 3.1~6.9°であった。この姿勢においても TPS 法と回帰法は，従来法と比較してどちらも推定精度が向上したが，TPS 法は回帰法よりもわずかに誤差が少なかった。これは，TPS 法は大きな挙上角度に対して複数の姿勢を用いて事前計測を実施し，キャリブレーション・テーブルとなる曲面近似を行っていたため，135° 挙上位でより効果的に補正できたと考えられる。

側方リーチの RMSE は，TPS 法で 3.6~6.3°，従来法で 7.3~9.1°，回帰法で 5.9~11.0°であった。Rapp らは⁷³，側方リーチにおける Double calibration 法を用いて補正した AMC 法による RMSE は 8~11°，回帰法の RMSE は 6~9°であったと報告している。本研究においても，補正のない AMC 法である従来法と回帰法の RMSE は，Rapp らの先行研究で示されている結果と同程度であった。回帰法は，回帰式の入力変数として，胸郭上腕関節姿勢に加えて肩峰の上下方向（頭尾側方向）と前後方向（腹背側方向）の 5 つの変数を用いている。しかし，肩峰の内側方向（左右方向）への移動は，入力変数には選択されていない。側方リーチにおいて，肩甲骨は外方への並進運動が主であると考えられるため，回帰法は側方リーチ姿勢における推定精度が低下したと考えられる。対照的に TPS 法は，AMC と肩甲骨の位置関係を曲面近似によって補正していることに加えて，評価の対象とする肩甲骨の側方への並進を含んだ姿勢変化を肩峰に取り付けた AMC から間接的ではあるが計測している。したがって，AMC を用いた TPS 法は，回帰法と異なり，肩甲骨の姿勢変化をより直接的に測定しているため，TPS 法はより良い推定精度を示したと考えられる。実際の ADL やオーバーヘッドスポーツ動作では，上腕挙上位においてより広い範囲で運動を行うため，TPS 法を用いることで，より精度よく肩甲骨姿勢を推定できると推察される。

前方リーチにおける各推定方法の RMSE は，TPS 法で 6.0~7.8°，従来法で 4.9~7.3°，回帰法で 2.0~7.4°であった。TPS 法と従来法の間には有意差は認められず，前方リーチに関して TPS 法は推定精度の向上は得られなかった。回帰法は，推定精度が向上していた。これは結髪位と同様に，回帰法のキャリブレーション姿勢として前方リーチを含んでいたためと考えられる。先行研究の前方リーチにおいて，AMC による肩甲骨姿勢の RMSE は，骨ピンを用いた肩甲骨の姿勢測定と比較して 4.2~6.0°であったと報告されている⁸⁰。TPS 法の RMSE は，6.0~7.8°であり，先行研究と比較すると推定誤差はやや大きくなっていた。前方リーチは，肩関節屈曲運動と比較して肩峰が皮下を大きく前方に滑動するため，AMC と肩甲骨との間のずれが大きくなり，TPS ではこのずれを完全には補正できなかったことが要因と推察される。そのため，他の姿勢と比較して精度が低下したと考えられる。このよう

な姿勢における推定精度を向上させるためには、TPS のキャリブレーション姿勢として前方リーチ姿勢を加えることが効果的であると考えられる。

触口位と 45° 挙上位において、従来法、TPS 法、回帰法の RMSE に明らかな差は認められなかった。これらの姿勢は、胸郭上腕関節の挙上角度が比較的小さい姿勢である。下垂位のみでキャリブレーションする従来法でも、胸郭上腕関節挙上 0~120° までの範囲であればその推定精度は保証されている⁶⁶。また、本研究は挙上角度が大きい姿勢の推定精度の向上を目的とした。測定姿勢を必要以上に増加させないため、上肢下垂位以外の低い挙上角度を TPS 法のキャリブレーション姿勢に加えなかった。そのため TPS 法は、これらの姿勢に対する補正効果が少なかったと考えられる。しかし TPS 法と従来法の RMSE の差はほとんどなく、TPS 法は低い挙上角度の姿勢においても適応可能であると考えられる。

2.5.3 TPS 法の特徴

AMC 法は、肩峰上に作成した AMC 座標系の姿勢変化を測定することで、より直接的に肩甲骨姿勢を評価できるが、胸郭上腕関節の挙上角度が 120° 以上になると STA によって推定誤差が大きくなる。そのため、STA の影響が大きい姿勢では AMC を用いて肩甲骨姿勢を推定することが困難となる。そこで本研究では、軟部組織による誤差の影響が大きいとされる挙上 120° 以上の上腕姿勢において肩甲骨姿勢の推定精度を向上させた。そのため本研究では、挙上 90° 位以上の複数の姿勢を中心に事前計測し、TPS 法を用いてキャリブレーション・テーブルを作成した。その結果、TPS 法は挙上面 0~90°、挙上角度 0~180° の範囲で RMSE が 5° 以下と十分な推定精度を有していたことが明らかとなった。

回帰法は、3 個以上のマーカが必要とされる AMC の姿勢変化ではなく、肩峰上の 1 個のマーカ位置のみを肩甲骨姿勢の決定に使用している。肩甲骨に関連したマーカ数を減らすことで、STA の影響を受けにくいという特徴がある。一方で回帰式の作成後、肩甲骨の姿勢推定には、その瞬間の肩甲骨姿勢を必要としない。つまり、上腕骨の姿勢と肩峰の位置のみで、肩甲骨の姿勢が決定される。肩甲骨の姿勢が変わったとしても、上腕の姿勢と肩峰の位置が変わらなければ、推定される肩甲骨姿勢も変わらない。したがって、STA による誤差を十分に補正できるならば、AMC を用いる手法は、その瞬間の肩甲骨姿勢を精度よく推定できる可能性がある。実際に本研究の結果から、TPS 法は STA の影響による推定誤差を著明に軽減することができた。

TPS 法は STA による影響が大きくなる姿勢を事前に測定し、STA の影響を非線形に補正した。そのため、TPS 法は STA による影響を可能な限り軽減しつつ、AMC の姿勢も計測することで、その瞬間の肩甲骨姿勢を推定できた。以上から、より広い範囲の上腕姿勢にお

いて肩甲骨の姿勢を推定できたと考えられる。しかし、前方リーチ姿勢は、TPS 法によって推定精度を向上させることができなかった。前方リーチのように肩甲骨の回転よりも変位が大きい運動は、回帰法のように肩峰位置も補正データとして利用することが効果的といえる。しかし、TPS 法においても、解析対象とする姿勢や動作に応じて、事前に測定するキャリブレーション姿勢を変更することで、特定の上腕姿勢の推定精度を向上できる可能性がある。これに関しては、今後さらなる検討が必要である。

2.5.4 本研究の限界

本研究の限界として、TPS 法は、事前測定した挙上面と挙上角度の範囲外の上腕姿勢の肩甲骨姿勢の推定が困難であることが挙げられる。これは、範囲外の姿勢に対しては、補間でなく補外となるため、精度が低下すると考えられる。そのため TPS 法は、キャリブレーション姿勢の範囲外となる結帯位や最大水平内転位、水平外転位において推定精度が悪化する可能性が考えられる。これらの姿勢に対応するためには、事前計測する姿勢について、より広い範囲で挙上面と挙上角度を設定するか、対象とする特定の姿勢を加えることで対応できると考えられる。

次に、回帰法と同様に、TPS 法も、実際の測定前に、前処理としてキャリブレーションを実施する必要がある。いくつかの姿勢を事前に計測する必要がある。本研究は、10 姿勢からなる事前測定を完了するのにおよそ 3~5 分の時間を要している。事前測定に長時間かかることは対象者に加わる時間的拘束が大きくなるため、対象者への負担を増加させることとなり可能な限り避けるべきである。事前測定のキャリブレーション姿勢を減らせば、この手順に要する時間を減らすことが可能である。しかし、推定精度と事前に測定する姿勢数（測定時間）はトレードオフの関係にあると考えられる。TPS 法で用いた事前測定の姿勢数は、測定時間が 3~5 分であり対象者に加わる時間的な拘束は少なく対象者への身体的ストレスが少ないこと、その上で前述した推定精度が得られていることから、適切であったと考えられる。

最後に、本研究の対象者は、若年健常男性のみであった。高齢者や肩関節疾患患者では肩甲骨周囲筋の筋ボリュームや皮膚の動揺が本研究で対象とした健常者と異なる。そのため、本研究の対象者の AMC と肩甲骨の位置関係の変化も異なってくると考えられる。しかし TPS 法は、対象者個人の身体属性を考慮したキャリブレーション方法を用いているため、このような対象者に対しても有効であると考えられる。今後は肩関節疾患患者や高齢者やなどのさまざまな対象として、TPS 法の推定精度を評価、検証する必要がある。

2.6. 結論

本研究では、10 個の異なる上腕姿勢を事前計測し、非線形補間を用いた新しい肩甲骨姿勢推定方法（TPS 法）を開発した。その推定精度を 25 個の挙上姿勢と 6 個の機能的姿勢において評価した。その結果、新しく開発した TPS 法は、特に大きな挙上角度となる上腕姿勢において、より広範囲に肩甲骨姿勢の推定精度が向上した。また、低い上腕挙上角度に対する肩甲骨姿勢の推定精度は従来法と回帰法と同程度の推定精度であった。本研究の結果から、TPS 法を用いて肩甲骨姿勢を推定することで、機能的姿勢だけでなくより広い範囲の上肢挙上姿勢において誤差 5°未満で推定できることが明らかとなった。そのため、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。

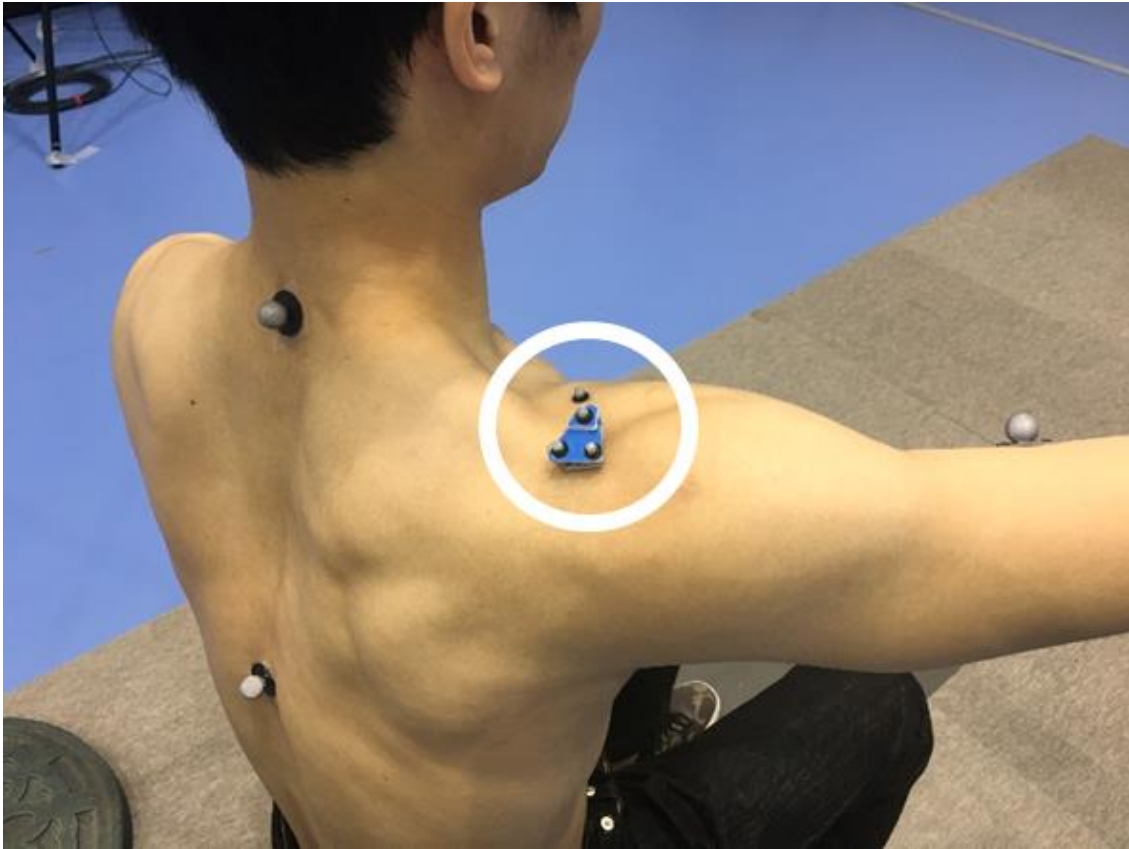


图 2.1 Acromion marker cluster

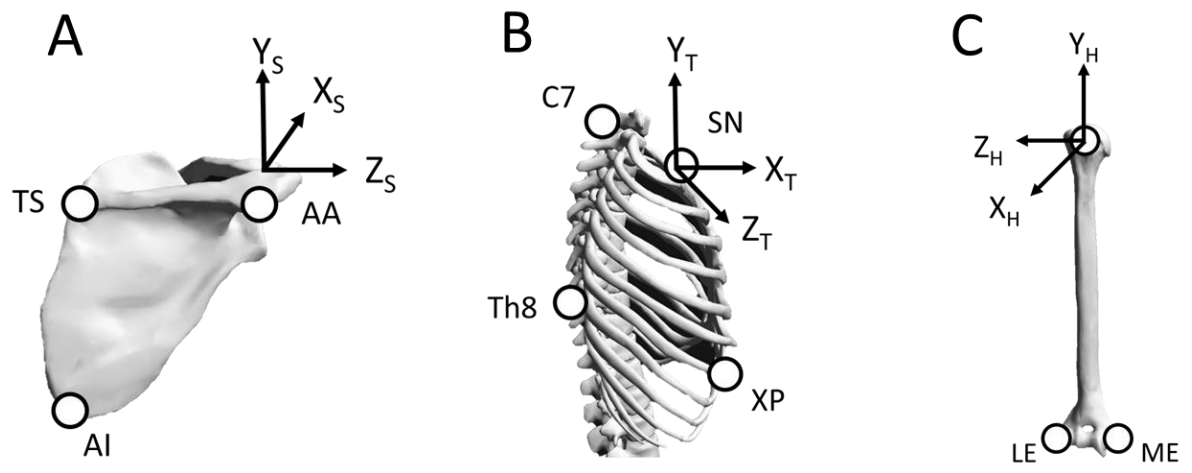


図 2.2 局所座標系の定義
 A : 肩甲骨座標系 Σ_S B : 胸郭座標系 Σ_T C : 上腕骨座標系 Σ_H

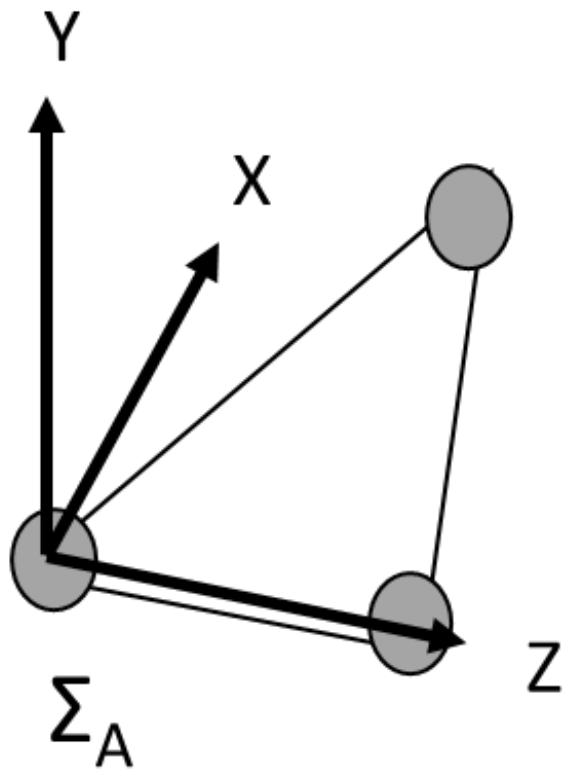


図 2.3 AMC 座標系の定義

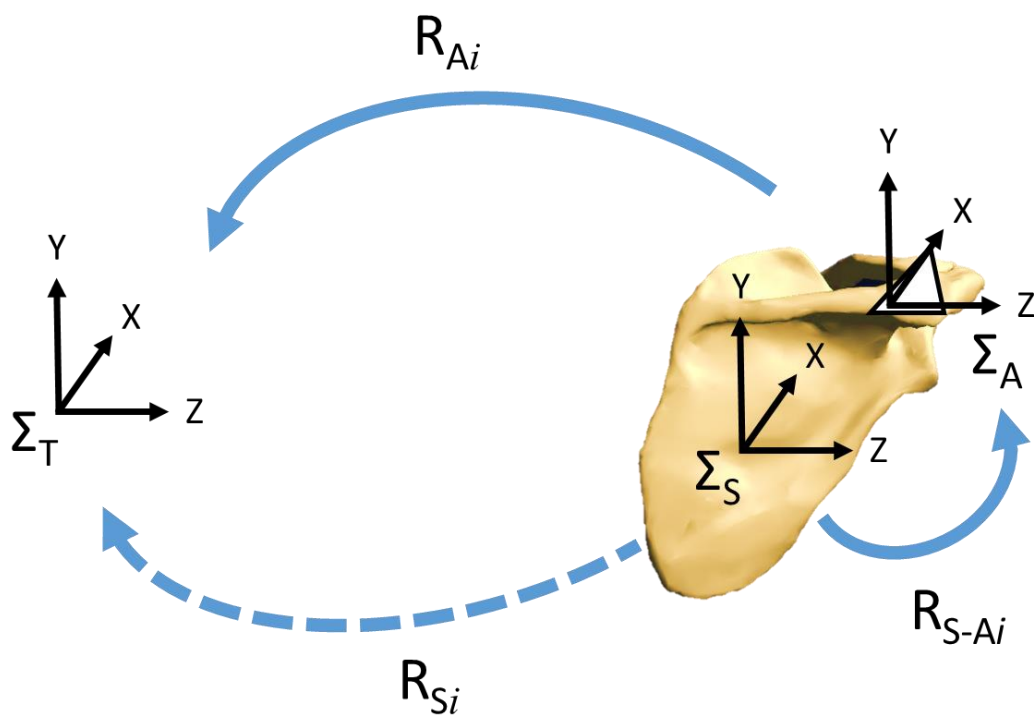


図 2.4 AMC 姿勢を用いた肩甲骨姿勢の推定方法

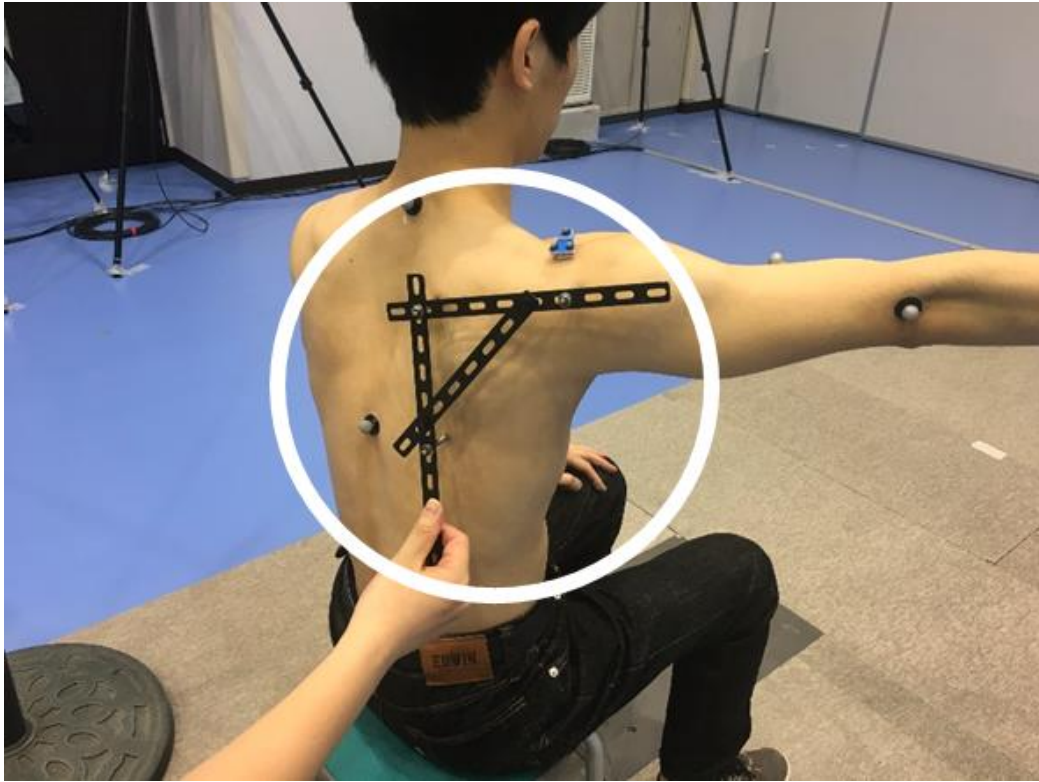


图 2.5 Scapular locator

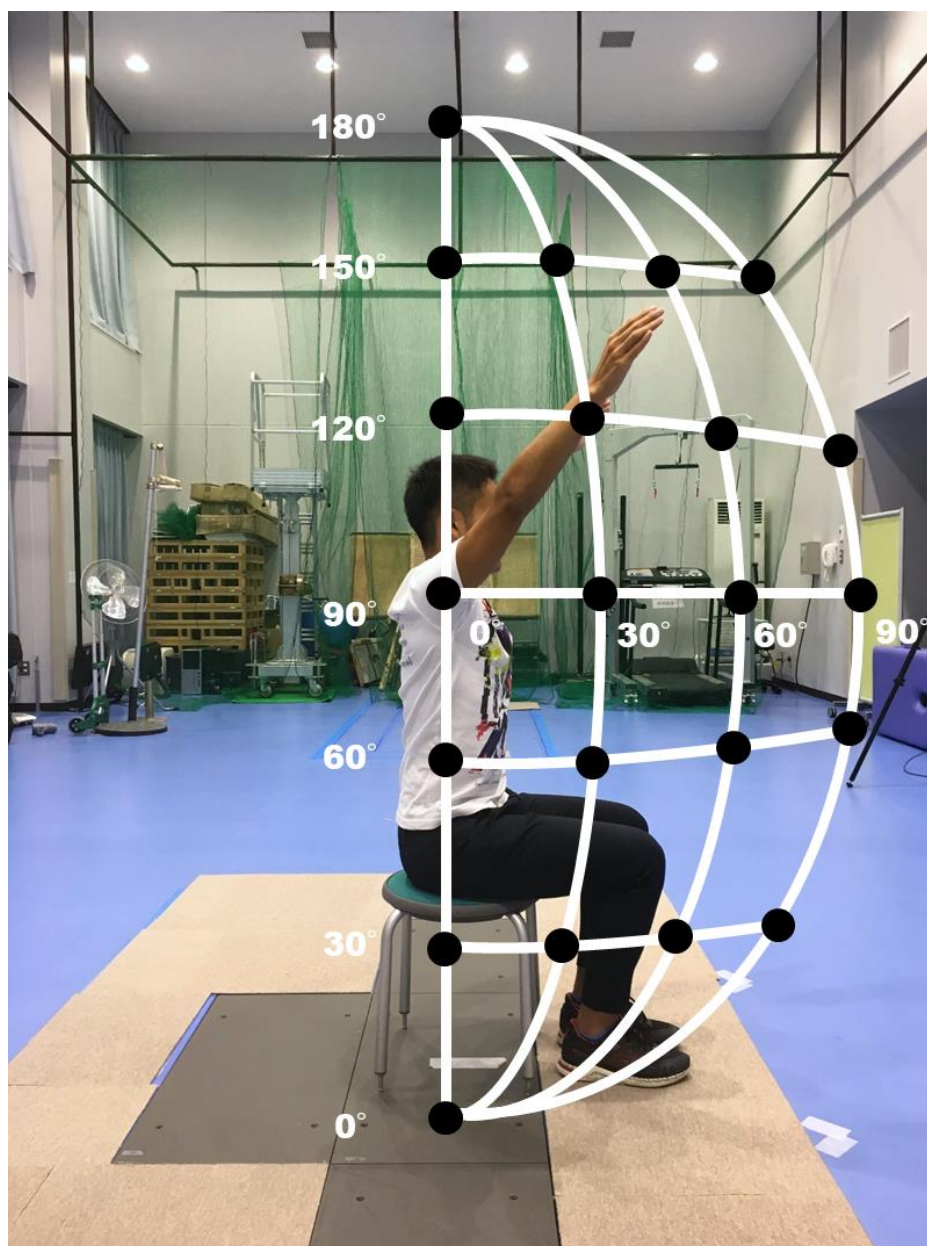


図 2.6 挙上姿勢における挙上面と挙上角の設定



图 2.7 測定風景

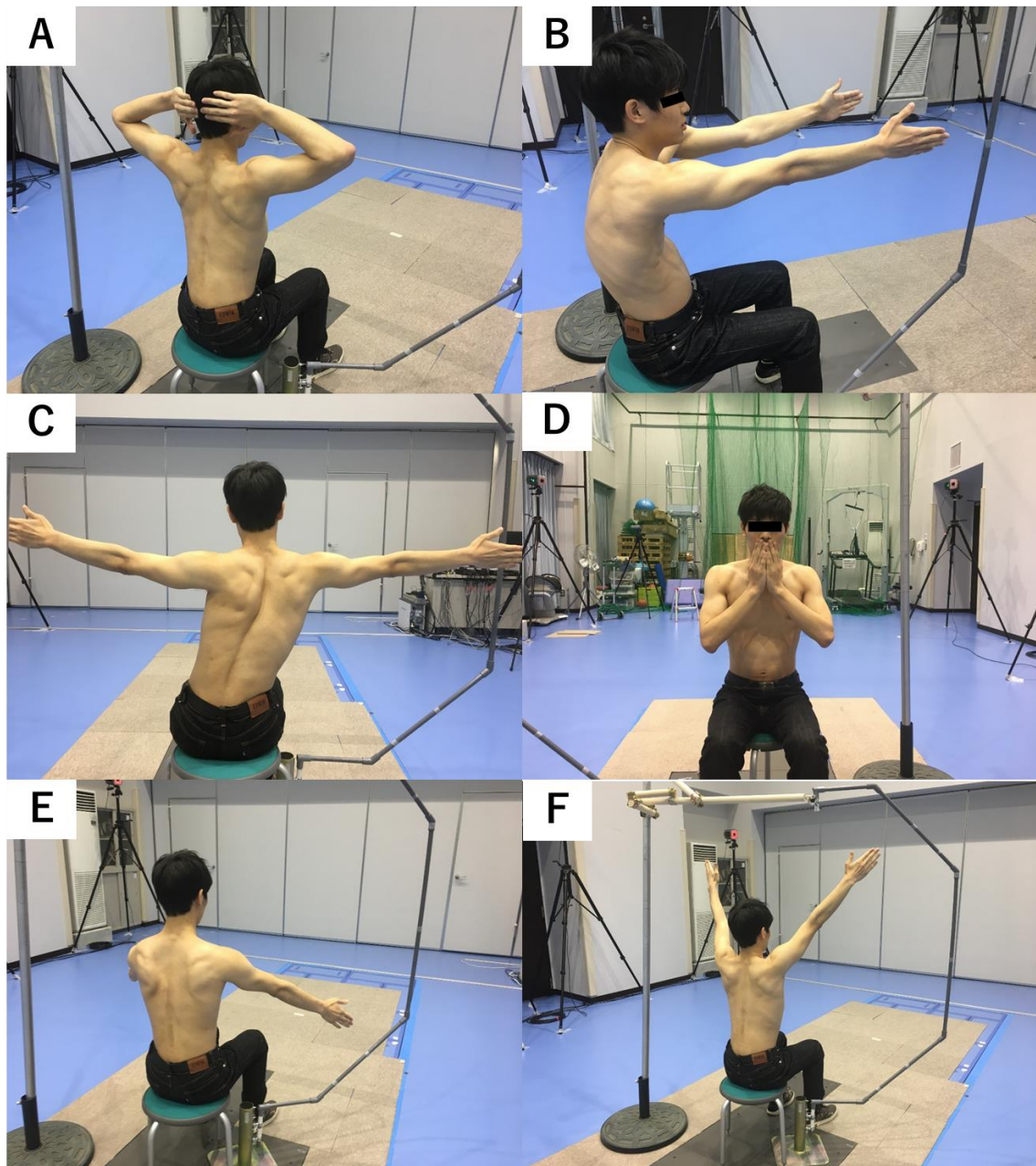


図 2.8 機能的姿勢

A : 結髪位, B : 前方リーチ位, C : 側方リーチ位
 D : 触口位, E : 45°挙上位, F : 135°挙上位

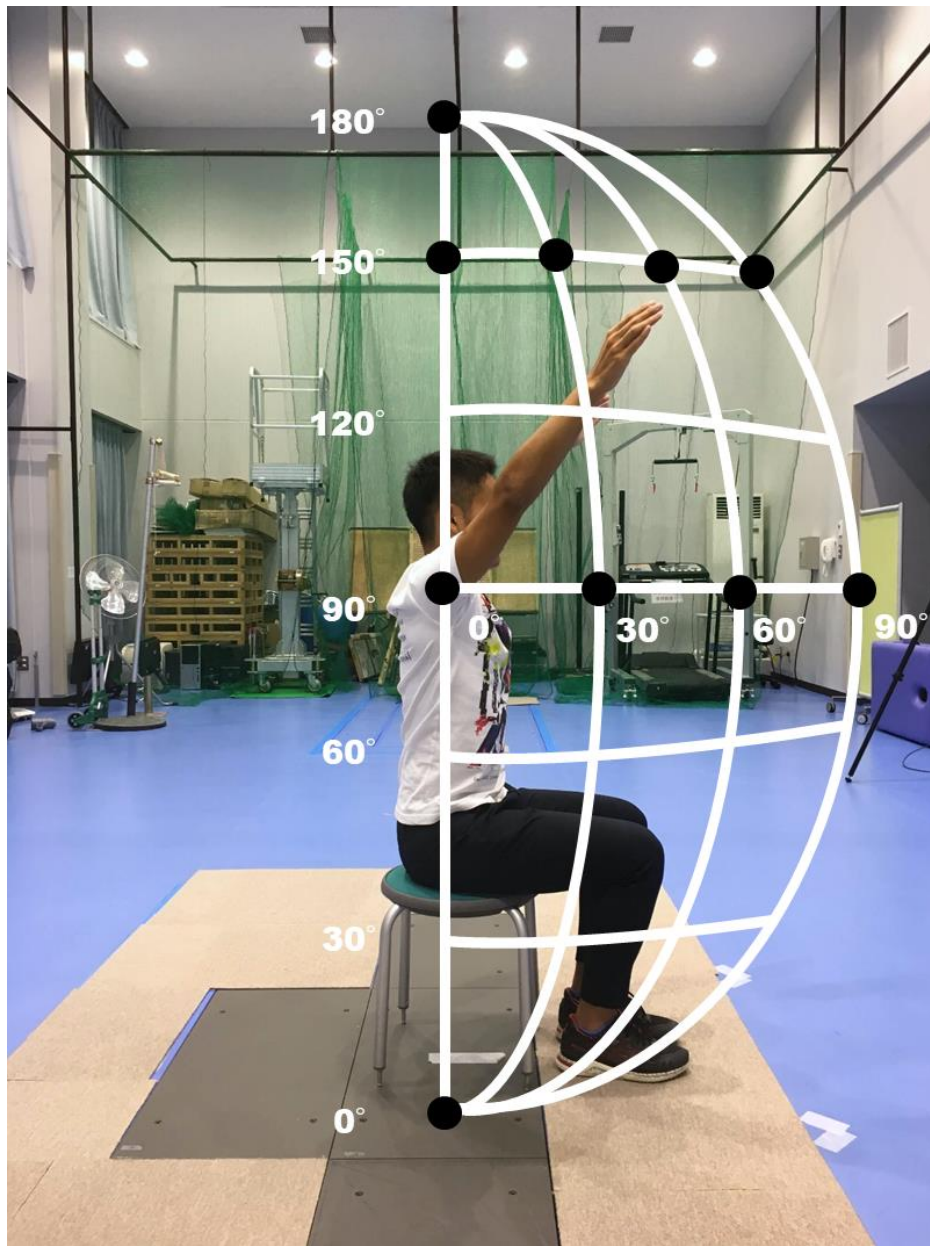


図 2.9 TPS 実施のためのキャリブレーションに用いた上腕挙上面と挙上角

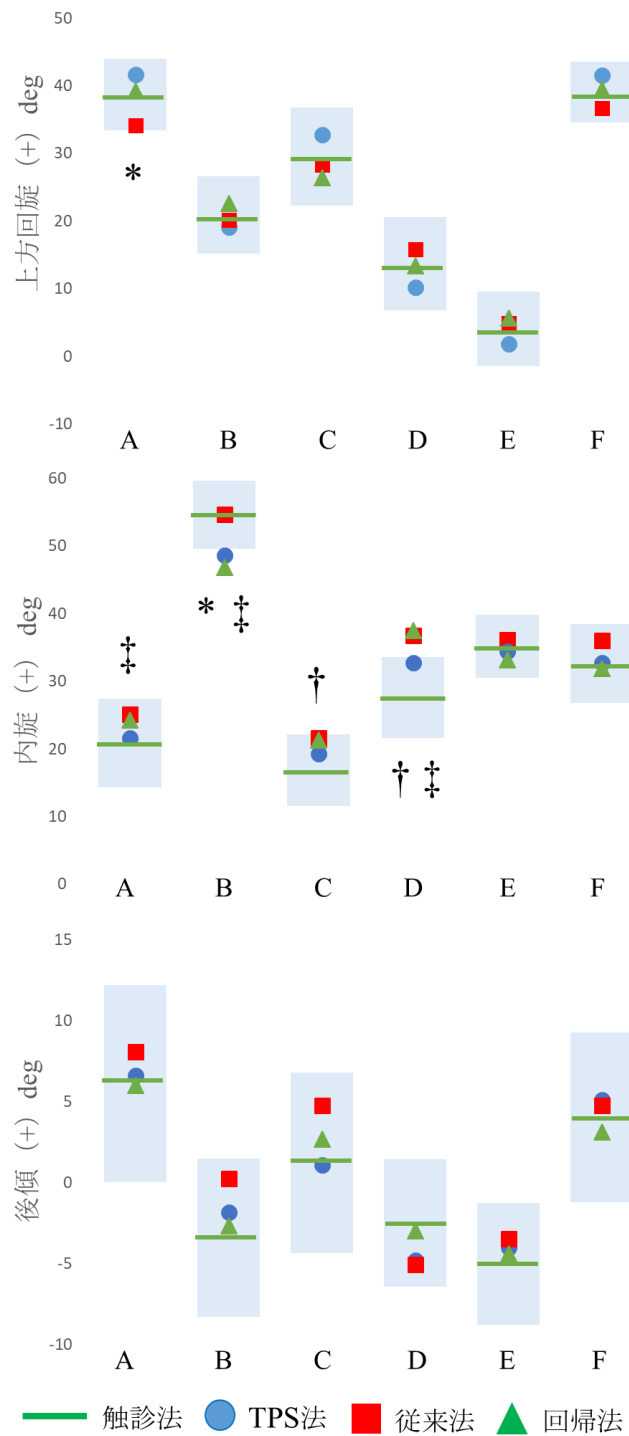


図 2.10 機能的姿勢における各推定方法の肩甲骨姿勢
 青い棒グラフは触診法の平均値±1SDを示す
 A：結髪位，B：前方リーチ位，C：側方リーチ位，
 D：触口位，E：45° 挙上位，F：135° 挙上位
 *：TPS法と触診法間に有意差あり (p<0.05)
 †：従来法と触診法間に有意差あり (p<0.05)
 ‡：回帰法と触診法間に有意差あり (p<0.05)

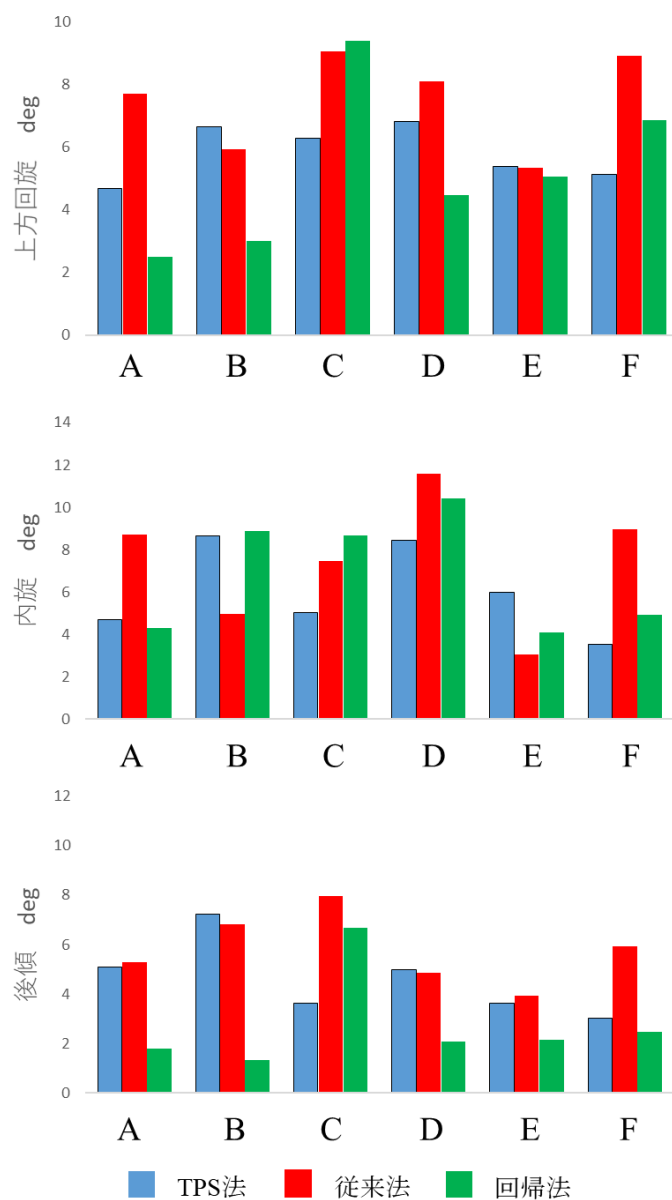


図 2.11 機能的姿勢における各推定方法の RMSE
 A : 結髪位, B : 前方リーチ位, C : 側方リーチ位,
 D : 触口位, E : 45° 挙上位, F : 135° 挙上位

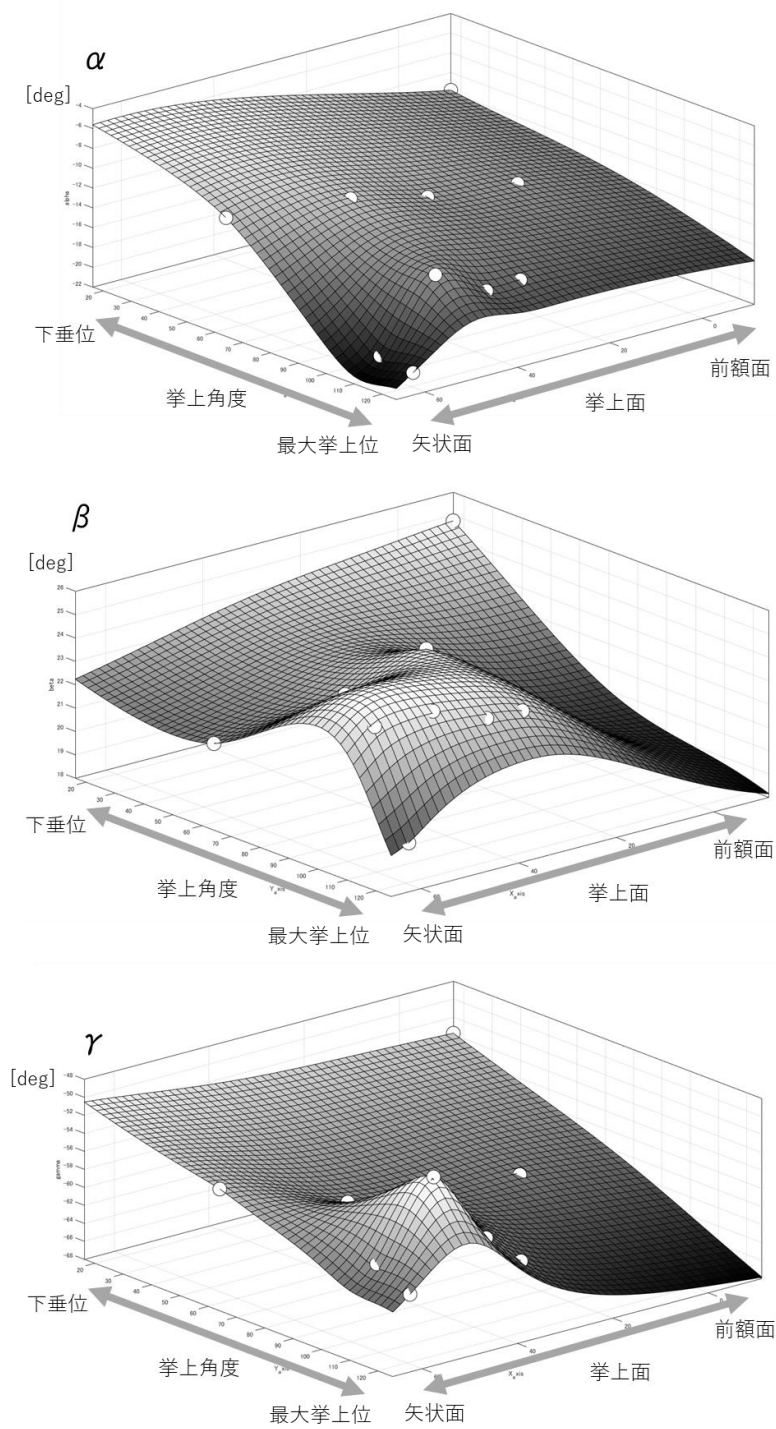


図 2.12 R_{S-A} の举上面と举上角度の変化によるズレ

表 2.1 AMC 法とそれを応用した方法による肩甲骨姿勢の推定精度

筆者 報告年	キャリブレーション姿勢 比較対象	評価姿勢	結果
Van Andel ら (2009)	上肢下垂位でキャリブレーション Scapular Locator と比較	屈曲 (20-100°) 外転 (20-100°)	RMSE X 軸 : 3-6° Y 軸 : 4-8.4° Z 軸 : 5-6°
Brochard ら (2011)	上肢下垂位と最大挙上位 でキャリブレーションし 線形補間を実施 Scapular Locator と比較	屈曲 (30-120°) 外転 (30-120°)	最大 RMSE X 軸 : 6.0° Y 軸 : 6.9° Z 軸 : 9.2°
Prinold ら (2011)	上肢挙上 30, 60, 90, 120° 位のそれぞれの姿勢でキ ャリブレーション実施 Scapular Locator と比較	肩甲骨面挙上 (30-120°)	30°でキャリブレーション RMSE : 4-7.8° 60°でキャリブレーション RMSE : 3.7-7° 90°でキャリブレーション RMSE : 3.2-6° 120°でキャリブレーション RMSE : 4.8-6.1
Janes ら (2012)	上肢下垂位でキャリブレーション 触診と比較	屈曲, 肩甲骨面挙上, 外転 (下垂位-最大挙上位)	触診と比較すると AMC では推 定角度を 12-20°過大評価する
Warner ら (2012)	上肢下垂位でキャリブレーション Scapular Locator と比較	屈曲, 肩甲骨面挙上, 外転 (0-120°)	最大 RMSE X 軸 : 6.1° Y 軸 : 4.4° Z 軸 : 7.3°
Nicholson ら (2017)	異なる 10 個の姿勢から重 回帰式を作成 Fluoroscopy と比較	下垂位や挙上姿勢, 内旋位, 外旋位, リーチ位など 10 姿 勢	上方・下方回旋と前・後傾にお いて Fluoroscopy と高い相関, 内・外旋で中等度の相関あり
Rapp ら (2017)	Nicholson らと同様の手法 Scapular Locator と比較	挙上位やリーチ位, 結帯位な どの機能的姿勢	RMSE で X 軸 : 5-8° Y 軸 : 6-9° Z 軸 : 4-7°

表 2.2 挙上姿勢における各推定方法の肩甲骨姿勢

上方回旋 (+) / 下方回旋 (-)		挙上角度						
挙上面	推定方法	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
0°	触診法	0.0 (3.5)	1.2 (4.8)	10.0 (6.3)	24.4 (7.1)	40.0 (4.8)	49.6 (4.9)	56.1 (3.7)
	TPS法	-0.1 (3.5)	0.9 (4.5)	9.8 (5.4)	24.3 (7.0)	40.2 (5.0)	49.6 (5.0)	54.8 (6.2)
	従来法	0.0 (3.6)	1.9 (4.8)	9.8 (3.5)	22.8 (4.6)	33.3 (5.5)	39.9 (7.1)	45.1 (8.3)
	回帰法	-2.4 (2.4)	6.1 (4.9)	14.5 (5.4)	26.4 (6.2)	39.5 (5.3)	47.3 (5.0)	54.3 (6.6)
30°	触診法		2.5 (5.7)	10.2 (7.3)	21.9 (4.7)	36.9 (5.1)	44.9 (4.3)	54.5 (4.3)
	TPS法		-0.1 (4.9)	9.9 (5.7)	22.0 (4.7)	37.4 (4.3)	44.9 (4.2)	54.4 (4.4)
	従来法		2.9 (4.3)	12.2 (3.6)	22.0 (3.8)	33.1 (5.4)	38.9 (6.8)	45.0 (8.3)
	回帰法		3.1 (5.7)	13.1 (6.3)	25.7 (5.9)	37.4 (6.4)	44.1 (6.2)	53.5 (6.3)
60°	触診法		1.9 (4.6)	7.6 (5.6)	18.7 (4.7)	33.4 (4.0)	43.3 (4.2)	53.4 (3.3)
	TPS法		-3.0 (7.6)	7.1 (5.5)	18.7 (4.7)	33.8 (6.3)	43.4 (4.2)	54.2 (5.1)
	従来法		1.6 (6.8)	10.2 (4.2)	20.4 (3.6)	31.1 (5.2)	37.9 (6.9)	44.3 (7.8)
	回帰法		2.0 (5.7)	12.1 (6.3)	24.6 (6.1)	34.9 (6.9)	42.6 (7.4)	52.7 (5.6)
90°	触診法		2.4 (4.2)	6.8 (5.6)	19.4 (5.9)	34.1 (4.7)	44.0 (3.9)	53.5 (4.3)
	TPS法		-2.7 (5.7)	4.2 (4.7)	19.4 (6.0)	34.6 (5.0)	43.9 (3.8)	54.4 (5.7)
	従来法		2.5 (4.8)	8.1 (4.1)	20.9 (5.2)	32.1 (3.8)	39.0 (6.6)	44.2 (6.9)
	回帰法		2.0 (6.7)	11.2 (5.1)	25.2 (6.3)	36.0 (6.1)	43.9 (4.4)	53.4 (4.6)
内旋 (+) / 外旋 (-)		挙上角度						
挙上面	推定方法	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
0°	触診法	31.5 (4.3)	27.1 (4.9)	24.9 (4.5)	20.0 (5.7)	19.0 (5.5)	22.4 (6.8)	24.4 (6.9)
	TPS法	31.6 (4.1)	25.5 (5.2)	23.3 (4.2)	19.8 (5.9)	19.8 (6.9)	22.5 (6.9)	24.7 (8.1)
	従来法	31.6 (4.3)	25.2 (6.1)	23.7 (5.5)	21.2 (6.6)	22.0 (6.8)	26.6 (9.0)	34.5 (10.0)
	回帰法	29.1 (7.0)	25.0 (6.9)	23.8 (6.1)	21.4 (7.3)	20.3 (5.8)	21.9 (6.7)	28.9 (7.6)
30°	触診法		33.5 (4.7)	33.5 (5.3)	31.7 (5.1)	29.5 (5.4)	28.4 (5.8)	27.3 (8.1)
	TPS法		30.3 (4.8)	32.9 (6.2)	31.7 (5.0)	30.8 (5.1)	28.6 (5.8)	27.3 (8.4)
	従来法		32.3 (4.7)	34.4 (6.2)	32.8 (6.6)	33.0 (6.8)	32.3 (6.8)	36.3 (10.2)
	回帰法		31.6 (4.9)	30.6 (4.0)	29.9 (5.1)	27.6 (6.1)	27.7 (6.1)	30.1 (6.4)
60°	触診法		37.1 (3.7)	39.1 (4.0)	38.2 (5.0)	35.9 (5.3)	34.9 (4.4)	28.0 (6.3)
	TPS法		35.1 (6.5)	37.6 (5.5)	38.1 (4.9)	37.8 (4.0)	35.0 (4.2)	28.8 (8.8)
	従来法		38.4 (3.8)	40.5 (4.0)	40.9 (4.4)	40.8 (5.8)	39.7 (6.5)	37.3 (8.5)
	回帰法		36.8 (4.2)	38.0 (4.4)	35.4 (5.4)	33.8 (6.7)	32.2 (6.4)	30.8 (6.3)
90°	触診法		39.1 (3.9)	42.3 (4.3)	42.4 (5.3)	41.7 (3.9)	37.5 (3.5)	29.3 (5.4)
	TPS法		34.7 (8.6)	41.8 (8.8)	42.4 (5.4)	41.3 (5.1)	37.4 (3.4)	29.4 (7.2)
	従来法		38.4 (5.3)	46.4 (4.9)	47.6 (5.1)	48.2 (6.5)	45.0 (7.1)	39.0 (9.1)
	回帰法		40.1 (6.4)	42.3 (6.3)	39.8 (7.0)	38.5 (6.2)	36.0 (4.6)	30.7 (6.9)
前傾 (-) / 後傾 (+)		挙上角度						
挙上面	推定方法	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
0°	触診法	-6.2 (4.3)	-5.5 (3.0)	-4.1 (3.9)	-0.8 (3.5)	4.8 (5.1)	8.9 (6.3)	13.6 (7.8)
	TPS法	-6.2 (4.2)	-5.8 (3.2)	-3.9 (3.9)	-1.1 (3.3)	5.8 (6.1)	9.0 (6.3)	12.7 (9.5)
	従来法	-6.2 (4.2)	-5.1 (3.7)	-1.3 (4.1)	3.3 (6.8)	9.5 (8.3)	10.5 (10.1)	11.3 (12.0)
	回帰法	-8.8 (4.0)	-4.0 (3.5)	-1.9 (3.8)	1.1 (4.7)	5.2 (5.0)	7.9 (6.3)	10.1 (6.9)
30°	触診法		-5.5 (4.0)	-3.1 (4.3)	-0.1 (4.5)	3.9 (5.7)	7.1 (5.9)	10.7 (9.4)
	TPS法		-3.8 (3.9)	-3.4 (3.8)	-0.1 (4.5)	3.9 (6.3)	7.0 (5.8)	10.7 (9.4)
	従来法		-4.1 (3.5)	-1.3 (5.2)	2.2 (7.5)	6.2 (8.8)	7.9 (8.4)	9.4 (10.6)
	回帰法		-4.3 (4.0)	-2.0 (4.3)	0.9 (4.6)	3.7 (5.5)	5.5 (5.8)	9.1 (7.0)
60°	触診法		-4.9 (4.4)	-3.1 (3.5)	-1.3 (4.5)	1.9 (5.0)	5.8 (5.1)	12.2 (6.8)
	TPS法		-4.5 (4.5)	-3.6 (5.7)	-1.4 (4.4)	3.0 (5.7)	5.9 (5.0)	10.5 (9.6)
	従来法		-3.9 (4.7)	-2.5 (4.7)	1.2 (7.3)	3.5 (9.3)	5.0 (8.4)	9.4 (9.2)
	回帰法		-5.1 (4.7)	-2.8 (4.7)	0.4 (5.3)	2.3 (5.6)	4.4 (5.4)	8.6 (6.5)
90°	触診法		-4.8 (3.6)	-3.2 (3.8)	-0.2 (4.5)	1.2 (5.1)	4.2 (5.3)	11.2 (6.8)
	TPS法		-3.8 (7.0)	-3.6 (5.4)	-0.3 (4.4)	2.2 (5.9)	4.2 (5.1)	9.8 (9.2)
	従来法		-5.0 (5.1)	-3.2 (5.5)	0.2 (8.4)	2.6 (9.7)	4.3 (9.9)	7.8 (10.8)
	回帰法		-4.9 (4.9)	-2.4 (4.6)	1.1 (5.7)	2.1 (5.9)	4.6 (5.0)	8.8 (6.3)

値は平均値 (deg) (標準偏差)

太字は触診法とのあいだに有意差あり (p<0.05)

表 2.3 挙上姿勢における各推定方法の RMSE

上方回旋/下方回旋		挙上角度						
挙上面	推定方法	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
0°	TPS法	0.3	3.2	4.4	0.4	3.7	0.3	4.8
	従来法	0.1	4.5	6.7	7.0	9.8	11.8	12.7
	回帰法	4.1	6.0	6.1	6.7	3.3	3.2	4.7
30°	TPS法		4.6	3.9	0.2	2.6	0.3	0.3
	従来法		3.4	5.9	5.2	6.9	8.3	12.0
	回帰法		3.2	4.7	5.6	4.2	3.6	4.8
60°	TPS法		7.8	3.3	0.2	3.9	0.5	5.2
	従来法		4.7	5.2	5.9	5.9	8.8	11.8
	回帰法		4.1	6.4	7.5	6.2	6.9	5.8
90°	TPS法		7.5	4.6	0.3	3.2	0.2	4.0
	従来法		3.3	4.6	6.4	7.3	8.1	11.1
	回帰法		5.0	6.9	8.0	5.9	2.8	2.7
内旋/外旋		挙上角度						
挙上面	推定方法	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
0°	TPS法	0.3	3.6	4.1	1.7	2.7	0.7	4.7
	従来法	0.1	4.8	4.7	4.9	6.2	8.3	13.6
	回帰法	4.7	5.3	5.7	6.2	2.9	3.1	7.6
30°	TPS法		4.5	3.9	0.2	2.8	0.5	0.6
	従来法		4.3	3.8	5.8	7.5	8.1	14.1
	回帰法		3.3	4.3	5.3	4.3	5.4	6.9
60°	TPS法		6.0	4.5	0.4	3.8	0.5	5.7
	従来法		4.7	5.1	6.4	9.8	9.0	11.7
	回帰法		4.2	4.5	6.2	6.6	5.2	7.1
90°	TPS法		8.1	6.2	0.2	3.5	0.5	4.2
	従来法		3.8	4.8	9.0	10.5	10.8	14.2
	回帰法		5.1	4.3	6.4	7.2	4.2	6.9
前傾/後傾		挙上角度						
挙上面	推定方法	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
0°	TPS法	0.2	3.1	3.9	0.6	4.0	0.6	3.8
	従来法	0.1	2.7	4.7	7.2	8.1	8.9	9.4
	回帰法	3.2	3.1	3.6	3.4	1.6	2.0	6.2
30°	TPS法		5.1	3.0	0.4	4.5	0.4	0.6
	従来法		3.4	3.2	5.2	7.7	6.0	10.4
	回帰法		2.0	2.2	2.2	1.8	3.1	7.4
60°	TPS法		4.1	5.4	0.3	3.4	0.4	5.8
	従来法		3.2	3.9	5.6	7.0	6.1	7.0
	回帰法		2.7	2.4	3.7	2.3	3.2	5.1
90°	TPS法		6.5	5.2	0.2	3.2	0.6	3.1
	従来法		3.2	4.0	6.0	6.9	6.5	9.1
	回帰法		3.1	3.5	5.1	4.7	2.4	6.2

値は RMSE (deg) (標準偏差)

太字は RMSE が 5°以上を示す

第3章

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

3.1. はじめに

野球投手の肩関節は、高頻度でスポーツ障害が発生する。Fleisig らは^{81,82}、投球動作を評価するために、投球動作をワインドアップ期 (wind up) とストライド期 (stride) コッキング期 (arm cocking), 加速期 (arm acceleration), 減速期 (arm deceleration), フォロースルー期 (follow through) の6相に大別した (図 3.1)。野球の投球における疼痛が発生する場面として、コッキング期から肩関節最大外旋時 (MER), 加速期が多いとされている⁸³。瀬戸口は⁸⁴、投球動作における投球側肩関節の外旋角度は肩甲骨上腕関節の外旋だけでなく、肩甲骨の後傾や体幹の伸展など全身運動の総和であると述べている。Miyashita らは⁸⁵、投球動作時の肩甲骨運動と肩甲骨上腕関節運動、胸椎運動を測定し、MER 時の肩関節外旋角度は 145.5°であり、そのうち肩甲骨後傾角度は 23.5°であったと報告している。適切な肩甲骨後傾運動が制限されると、MER における肩甲骨上腕関節外旋角度への依存が強くなり、肩甲骨上腕関節へのストレスが増加し障害発生につながると考えられる²。

投球動作は、適切な運動連鎖によってエネルギーをボールまで伝える動作であり⁸⁶⁻⁸⁸、運動連鎖の中間にある肩甲骨運動が制限され十分にエネルギーを伝達できなければ、パフォーマンスが制限される可能性がある⁸⁴。実際に、肩関節障害をもたないオーバーヘッドスポーツ選手においても、利き腕側の肩甲骨が非利き腕側と比較して前傾位であると報告されており^{89,90}、このような姿勢の特徴をもつ選手は、投球動作中においても肩甲骨後傾運動が制限されている可能性がある。よって障害予防のためにも、パフォーマンス向上のためにも肩甲骨後傾運動を拡大することが重要であると考えられる。第1章で示したように、肩甲骨周囲筋の筋力や可動域を向上させるために、各筋に対する筋力トレーニング法やストレッチ法は数多く報告されている^{37-39, 42, 43, 48, 91}。とくに上肢挙上位における肩甲骨後傾運動と安定性を確保するために重要とされる僧帽筋下部に対するトレーニングとして、肩関節を水平外転させることで肩甲骨帯を後退させる Scapular retraction exercise (肩甲骨 retraction エクササイズ) がよく用いられる^{37, 38, 91, 92}。

Oyama らは、異なる6種類の肩甲骨 retraction エクササイズ中の肩甲骨運動と肩甲骨周囲筋の筋活動を3次元動作解析装置と表面筋電計を用いて測定した³⁸。その結果、肩関節外転 120°位かつ外旋位を保持したまま肩関節水平外転運動を行うことで、僧帽筋下部の筋活動が増加し肩甲骨後傾運動が大きくなったと報告されている³⁸。このことから上肢挙上位かつ肩

関節外旋位で肩甲骨 retraction エクササイズを行うことによって、エクササイズ時に肩甲骨後傾を引き出すことができると考えられる。しかし肩甲骨に対する種々の筋力トレーニングやストレッチを介入した研究において、実際の動作中の肩甲骨運動が改善したという報告は限られている。唯一、Umehara らは⁵⁶、小胸筋に対する他動的ストレッチを実施し即時的に上肢挙上動作時の肩甲骨後傾角度が増加したと報告している。

理学療法の臨床場面において、肩甲上腕関節や肩甲胸郭関節に関連する筋力や可動域を十分に有していたとしても、投球動作などターゲットとする実際の動作に対して肩甲骨が適切に運動しないという問題が生じることが多い。肩甲骨周囲筋に関して、単純に個別の筋力を向上させる筋力トレーニングや筋の伸張性を向上させるストレッチだけでは、実際の上肢運動時の肩甲骨運動を変化させるには不十分であると考えられる。これは上肢挙上動作や ADL、スポーツ動作は、肩甲骨を含む肩関節だけの運動ではなく、体幹や下肢の運動も併用することで、対象とする動作を実現しているためと思われる。本研究で対象とする投球動作において肩甲骨後傾運動を拡大するためには、体幹などの運動を組み合わせることで、目的とする肩甲骨運動を誘導する肩甲骨 retraction エクササイズが必須であるといえる。

体幹姿勢と肩甲骨運動の関係について、Finley らは⁹³、体幹直立位と体幹屈曲位の 2 姿勢に関して上肢挙上動作中の肩甲骨運動を比較した。その結果、体幹直立位は、体幹屈曲位に比べて肩甲骨外旋角度と後傾角度が大きくなったと報告している。また Nagai らは²³、体幹回旋中間位と測定側上肢と同側回旋位、測定側上肢と反対側回旋位の 3 姿勢における上肢挙上動作中の肩甲骨運動を比較した。その結果、体幹同側回旋位は体幹回旋中間位と比較して肩甲骨上方回旋と外旋角度が増加したと報告している。以上のことから体幹の屈伸角度と回旋角度の変化は、肩甲骨運動に影響を与えることがわかる。これらのことから、肩甲骨エクササイズにおいて肩甲骨運動を拡大するために、体幹回旋運動を加えることが有効であると考えられる。

そこで研究 2 の目的は、投球動作を対象として、MER 時点における肩甲骨運動を拡大できる運動方法を検討する。そのために、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、通常の上肢挙上エクササイズと比較して、肩甲骨運動をより大きく引き起こすことができる運動を明らかにすることとした。

3.2 方法

3.2.1 対象

健康男性 12 名(年齢 21.1 ± 2.4 才; 身長 174.4 ± 7.0 cm; 体重 72.1 ± 10.9 kg)の右上肢を対象に測定を実施した。よって、本研究では右上肢を測定側とした。なお、本研究において右側の肩関節に整形外科的、神経学的疾患を有するもの、また測定時点で、右肩関節に安静時と運動時の疼痛を有するものは除外した。対象者は日常的にレクリエーションレベルからアスリートレベルで野球、バスケットボール、体操のいずれかを実施していた。すべての対象者には研究内容を十分に説明し、書面にて同意を得た。本研究は同志社大学「人を対象とする研究」に関する倫理審査委員会の承認を得て実施した (16028)。

3.2.2 測定手順

光学式 3 次元動作解析装置(MAC3D system; Motion Analysis Corporation, USA)を用いて運動学的データを測定した。サンプリング周波数は 240Hz とした。肩甲骨姿勢を体表から測定するために、前章で述べた AMC を肩峰上の平らな面に貼付した。さらに上肢と胸郭の姿勢を測定するために、国際バイオメカニクス学会が推奨している方法に基づき、直径 12mm の反射マーカを頸切痕 (SN), 剣状突起 (XP), 第 7 頸椎棘突起 (C7), 第 8 胸椎棘突起 (Th8), 上腕骨内側上顆 (ME), 外側上顆 (LE) に貼付した (図 2.2) ⁷⁴。またキャリブレーションにおいて、肩甲骨ランドマーク (肩峰後角 (AA), 棘三角 (TS), 下角 (AI)) を触診し Scapular locator (SL) を用いて、肩甲骨姿勢を測定した。

3.2.3 測定課題

本研究では、投球動作時の MER 時点において、肩甲骨運動を拡大するためのエクササイズを検討する。そのため、MER 時点の姿勢に類似した、上肢姿勢を挙上させた姿勢における肩甲骨の運動を評価対象とした。

研究 2 では、肩甲骨の姿勢を推定するために従来型の AMC 法を用いた。研究 1 では上肢挙上動作や ADL 動作、スポーツ動作など幅広い肩関節姿勢における肩甲骨姿勢を推定するための方法を開発した。Prinold らは ⁹⁴、測定対象とする肩甲骨姿勢に対して、その肩関節挙上角度に近い上腕姿勢でキャリブレーションすることで推定精度が向上すると報告している。研究 2 で測定する運動は、MER 時点の姿勢に類似した上肢姿勢において、主に肩甲帯の内外転 (内転: 鎖骨の前方並進と肩甲骨の内旋・前傾の複合運動, 外転: 鎖骨の後方並進と肩甲骨の外旋・後傾の複合運動) とした。そのため肩甲上腕関節そのものの運動範囲が小さく、肩甲骨が主体となる運動である。したがって、この運動は、上肢挙上動作

や投球動作と比較して運動範囲が非常に限定されているため、従来法によるキャリブレーションで十分な精度を保持できると考えられる。さらに MER 時点の姿勢に類似した上肢挙上姿勢をキャリブレーション姿勢とすることで、従来法であっても必要とする精度が確保可能であると考えられる。そのため研究 2 における肩甲骨姿勢の推定方法は、従来法とした。以上の理由から、キャリブレーション姿勢は、評価する姿勢に近い両上肢挙上位を設定した。椅子座位にて両手を頭部後頭隆起上で組み体幹を直立させた姿勢を 3 秒間保持し、第 2 章の実験と同様に AMC と身体の骨ランドマーク、SL を用いて姿勢を測定した。

次に、評価の対象とするエクササイズとして、肩甲骨 retraction エクササイズのみ（以下、肩甲骨単独条件）、応用的肩甲骨エクササイズとして肩甲骨 retraction エクササイズに体幹屈伸を加えたエクササイズ（以下、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（以下、肩甲骨＋回旋条件）の合計 3 種類で実施した。肩甲骨単独条件は、体幹直立位を保持したまま肩甲骨のみを 4 秒かけて最大まで前方突出させ、その後 4 秒かけて最大まで後退させる運動とした。次に肩甲骨＋屈伸条件では、4 秒で肩甲骨帯を前方突出させると同時に体幹を最大まで屈曲し、4 秒で肩甲骨帯を後退すると同時に体幹を最大まで伸展する運動とした。そして肩甲骨＋回旋条件では、4 秒で肩甲骨後退する際に体幹を測定側と同側に最大まで回旋させ、4 秒かけて反対側へ回旋させながら肩甲骨帯を後退させる運動とした。測定姿勢の変化による影響を検討するために、上記の 3 種類のエクササイズに対して、座位、立位、測定側と同側ステップ位（同側ステップ位）、測定側と反対側ステップ位（反対側ステップ位）の 4 種類の姿勢を設定した（図 3.2）。なお、上肢位置を規定するために、両手を頭部後頭隆起上で組んだ状態を維持させた。

各エクササイズはそれぞれ 3 回ずつ実施した。また各エクササイズ間には十分な休憩をはさみながら測定を実施した。

3.2.4 データ解析

AMC より肩甲骨姿勢を推定するために、国際バイオメカニクス学会が提唱する方法に従い、肩甲骨座標系 (Σ_S) と上腕骨座標系 (Σ_H)、胸郭座標系 (Σ_T) を定義した⁷⁴。肩甲骨座標系と胸郭座標系、上腕座標系、AMC 座標系は第 2 章と同様に定義した（図 2.2）。AMC 座標系と肩甲骨座標系の位置関係を決定するために、2.3.4 節の従来法を用いた。前節で示したキャリブレーション姿勢における AMC 座標系と SL から算出した肩甲骨姿勢の座標変換を算出した。肩甲骨角度は、胸郭に対する肩甲骨姿勢とし、オイラー角を用いて、Y 軸（内旋／外旋）、X 軸（上方回旋／下方回旋）、Z 軸（前傾／後傾）の順で算出した。各エクササイズの肩甲骨姿勢データは 3 回のデータを平均化して算出した。本研究では肩甲骨

retraction エクササイズにおける肩甲骨の後傾運動に着目しているため、以後の解析は、肩関節が最大まで水平外転した時点（最大 retraction 時点）のデータを使用した。運動学的データの解析は MATLAB (MATLAB R2018a; MathWorks, USA.)にて行った。

3.2.5 統計解析

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、運動方法（3条件）と測定姿勢（4条件）を要因とする反復測定二元配置分散分析を用いて比較した。交互作用が有意であった場合には、各要因に関する単純主効果の検定を行い、単純主効果が有意であった項目に関してボンフェローニの方法による多重比較を行った。また主効果のみが有意であった場合、有意であった要因内でボンフェローニの方法による多重比較を行った。すべての統計解析は SPSS version 24(IBM, U.S.A)を用いて実施し、有意水準は 0.05 とした。

3.3 結果

それぞれの運動と姿勢における肩甲骨の上方回旋，内旋，後傾の運動角度の最大値を表 3.1 と図 3.3~3.5 に示す.

3.3.1 上方回旋 (図 3.3)

分散分析の結果，肩甲骨上方回旋において，姿勢と運動方法において，それぞれ主効果に有意差が認められた (姿勢 : $F_{3,33} = 3.6, p=0.023$, 運動方法 : $F_{2,22} = 11.9, p<0.01$). 交互作用に有意差は認められなかった. 有意差が認められた主効果に関して，それぞれの水準に対して多重比較を行った. 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，上方回旋が有意に大きかった. また運動方法について，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.

3.3.2 内旋 (図 3.4)

分散分析の結果，肩甲骨内旋において，主効果と交互作用に有意差は認められなかった.

3.3.3 後傾 (図 3.5)

分散分析の結果，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 ($F_{2,22} = 6.5, p<0.01$). 姿勢に関する主効果と交互作用に有意差は認められなかった. 運動方法における多重比較の結果，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.

3.4 考察

本研究は、投球動作時の MER 時点において肩甲骨後傾運動を拡大するためのエクササイズを明らかにすることを目的とした。肩甲骨後傾運動を拡大するためには肩甲骨 retraction エクササイズを用いるが、単なる肩甲骨 retraction エクササイズよりも、姿勢の変更や他の運動を加えることで、肩甲骨運動をより拡大できるかを評価した。そこで、肩甲骨 retraction エクササイズに体幹運動を加えた場合と、肩甲骨 retraction エクササイズを異なる姿勢で実施した場合の肩甲骨運動を評価した。著者が渉猟しりえる範囲であるが、肩甲骨 retraction エクササイズに体幹運動を加えたこと、もしくは、肩甲骨 retraction エクササイズを実施する姿勢を変えたことが、肩甲骨運動に及ぼす影響を評価した研究は見られない。

先行研究において肩甲骨の運動は、肩甲骨機能不全を有する肩関節疾患患者や、傷害をもたないオーバーヘッドスポーツ選手においても、安静時に下方回旋と前傾が増加していること⁸⁹、さらに運動時の肩甲骨上方回旋と後傾が減少していると報告されている^{15,95}。これらの肩甲骨の姿勢異常や運動異常は、肩甲上腕関節に対する力学的ストレスが増加することや、下肢・体幹で作られたエネルギーを上肢に十分に伝達することができないといったデメリットにつながると考えられる^{86,87}。とくに投球動作といったオーバーヘッドスポーツは、肩関節最大外旋位において肩甲骨上方回旋と後傾角度を増加させることが重要であると考えられている²。そこで本研究では既存の後傾運動の拡大を目的とした肩甲骨 retraction エクササイズに体幹運動を加えることで、肩甲骨単独での肩甲骨 retraction エクササイズよりも肩甲骨後傾の運動角度を大きく増加できることを明らかにした。

肩甲骨 retraction エクササイズは、肩関節挙上角度や回旋角度の設定にさまざまなバリエーションがあるものの、僧帽筋中部と下部に対する筋力トレーニングとして広く用いられている^{37,92,96}。肩甲骨 retraction エクササイズ中の肩甲骨運動に関する報告は数少ないが、Oyama らは³⁸、肩関節挙上角度や回旋の有無を変化させた 6 つの肩関節姿勢における肩甲骨 retraction エクササイズ中の肩甲骨運動を比較した。どのエクササイズにおいても肩甲骨は、上方回旋、外旋、後傾運動していた。さらに肩関節外転 120°位かつ外旋位における肩甲骨 retraction エクササイズは、肩甲骨上方回旋角度と後傾角度がより増加したと報告されている。本研究における肩甲骨単独条件における上腕姿勢は、肘関節の屈曲角度が異なるものの、Oyama らの肩関節外転 120°位・外旋位におけるエクササイズと同様の姿勢であり、そのときの肩甲骨の姿勢も同程度であった。一方で、Oyama らの報告において肩甲骨の後傾角度は最大 8.5°であるが、本研究の肩甲骨＋回旋条件における肩甲骨後傾角度は最大 20.9°であった。このことから、肩甲骨 retraction エクササイズに測定側と同側方向への体幹回旋を加えることで肩甲骨後傾角度が大きく増加したと言える。健常者の上肢挙上動作に

における肩甲骨の最大後傾角度は約 30°と報告されており^{15,61}、本研究で得られた後傾角度は解剖学的な肩甲胸郭関節の可動域の範囲内である。また投球動作時の MER 時における肩甲骨後傾角度は 23.5°と報告されているため⁸⁵、本研究の肩甲骨+回旋条件による肩甲骨 retraction エクササイズによって投球動作に必要な後傾角度まで運動させることができることが示唆された。

Yamauchi らは⁶⁵、種々の肩関節エクササイズに対して体幹回旋運動を加えた際の肩甲骨運動を比較した。しかし、肩甲骨 retraction エクササイズに測定側と同側方向への体幹回旋を加えても肩甲骨運動は増加しないと報告されており、本研究の結果と異なる結果であった。これは、Yamauchi らの研究における肩甲骨 retraction エクササイズがベッド上の腹臥位で実施されているため、体幹の回旋運動が制限された可能性がある。一方、本研究では、座位もしくは立位において肩甲骨 retraction エクササイズを実施しているため体幹運動は制限されない。そのため体幹は、拘束されることなく自然に回旋できたため、肩甲骨の動作に影響を与えることができたと考えられる。実際、Yamauchi らの研究においても、立位における肩甲骨面挙上と肩関節外旋運動に関しては、体幹の測定側方向への回旋によって肩甲骨後傾角度が増加していた。よって、肩甲骨 retraction エクササイズを用いて肩甲骨運動を拡大するためには、第一に体幹運動を制限しないことが重要であると考えられる。

肩甲骨 retraction エクササイズの姿勢に関して、本研究では、唯一、肩甲骨上方回旋における同側ステップ位と反対側ステップ位において有意差が得られた。それ以外では、姿勢変化による肩甲骨運動の変化は認められなかった。また有意差が認められた肩甲骨上方回旋に関しても、上方回旋角度は同側ステップ位で 39.6°、反対側ステップ位で 37.3°、各姿勢間での差は 2.3°とこの運動における上方回旋角度の約 5%であり、上方回旋の運動角度の大きさから考えるとこの差は非常に小さい値であった。そのため上方回旋に関して、統計学的に有意差が認められているが、肩甲骨運動の大幅な改善が期待されるほどの差はなかったといえる。De may らは⁹⁷、座位や立位、スクワット位、測定側と反対側のランジ位、測定側と反対側の片脚スクワット位において肩甲骨 retraction エクササイズを行った際の肩甲骨周囲筋の筋活動を比較した。その結果、各姿勢間において、僧帽筋上部と僧帽筋下部の筋活動はほとんど変化しなかったと報告している。僧帽筋上部と下部はいずれも肩甲骨上方回旋に作用する。そのため、肩甲骨上方回旋に作用するこれらの筋の筋活動は大きく変化しなかったと推察されることから、前述したように肩甲骨 retraction エクササイズの姿勢変化が肩甲骨の運動に与える影響もわずかであったと考えられる。

投球動作などのスポーツ動作では体幹運動と協調した肩関節運動が必要とされている⁹⁸。そのためオーバーヘッドスポーツへの競技復帰やコンディショニングにおいて、体幹運動

を加えることで肩甲骨運動を誘導し、スポーツ特異的な動作の中で肩甲骨運動を向上させていくことが重要であると考えられる²。本研究では投球動作の特に MER 時における肩甲骨運動の拡大に有効なエクササイズを明らかにすることを目的とした。先行研究において、Wang らは⁹⁹、MER 時の肩関節外旋角度が大きいほど球速は速くなると報告している。また Matsuo らは¹⁰⁰、球速の速い群は遅い群と比較して MER 時の肩関節外旋角度が大きかったと報告している。この 2 つの先行研究において肩関節外旋角度は、側方から見た体幹に対する前腕のなす角度として算出されている。この外旋角度は、肩甲上腕関節の外旋角度だけでなく肩甲骨後傾角度も含まれていると考えられる。MER 時の肩関節外旋角度を増加させるために肩甲上腕関節の貢献度が大きくなると肩甲上腕関節に加わる力学的ストレスが増加すると考えられ、投球障害肩を受傷するリスクが高まると考えられる²。よって MER 時の肩甲骨後傾角度を増加させることは、球速の増加による投球パフォーマンス向上と投球障害肩を予防するために重要であると考えられる。また MER 時において、体幹は投球側と同側に回旋していると報告されている¹⁰¹。本研究における肩甲骨+回旋条件での肩甲骨 retraction エクササイズは、投球動作の MER に近似した体幹姿勢で肩甲骨後傾を誘導できるエクササイズであり、このエクササイズを実施することで特異的に MER 時の肩甲骨後傾運動を拡大し、投球パフォーマンスの向上を図ることができる可能性がある。

3.5 結論

本研究は、投球動作の MER 時の肩甲骨運動拡大を目的として、肩甲骨 retraction エクササイズを評価した。その結果、体幹を投球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角度が大きく増加することが明らかとなった。

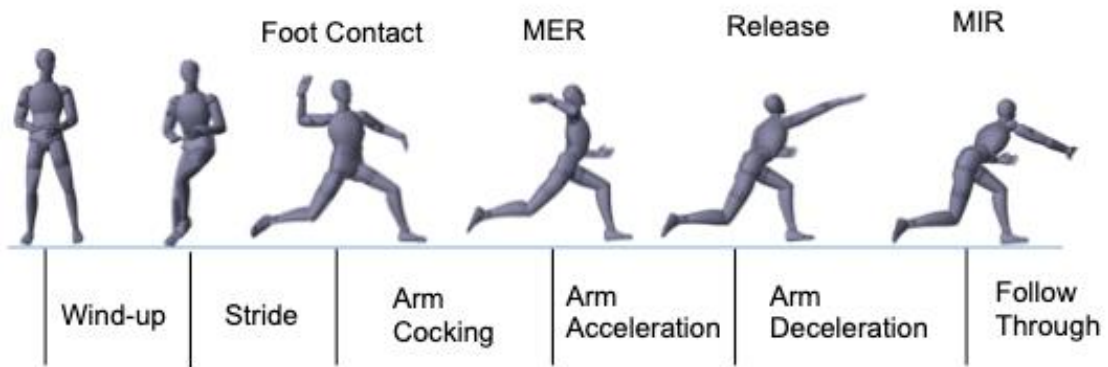


図 3.1 投球動作の相分け

Wind-up : ワインドアップ期, Stride : ストライド期, Arm Cocking : コッキング期, Arm acceleration : 加速期, Arm Deceleration : 減速期, Follow-through : フォロースルー期, Foot Contact : 非投球側下肢接地, MER : 最大外旋位, Release : ボールリリース, MIR : 最大内旋位

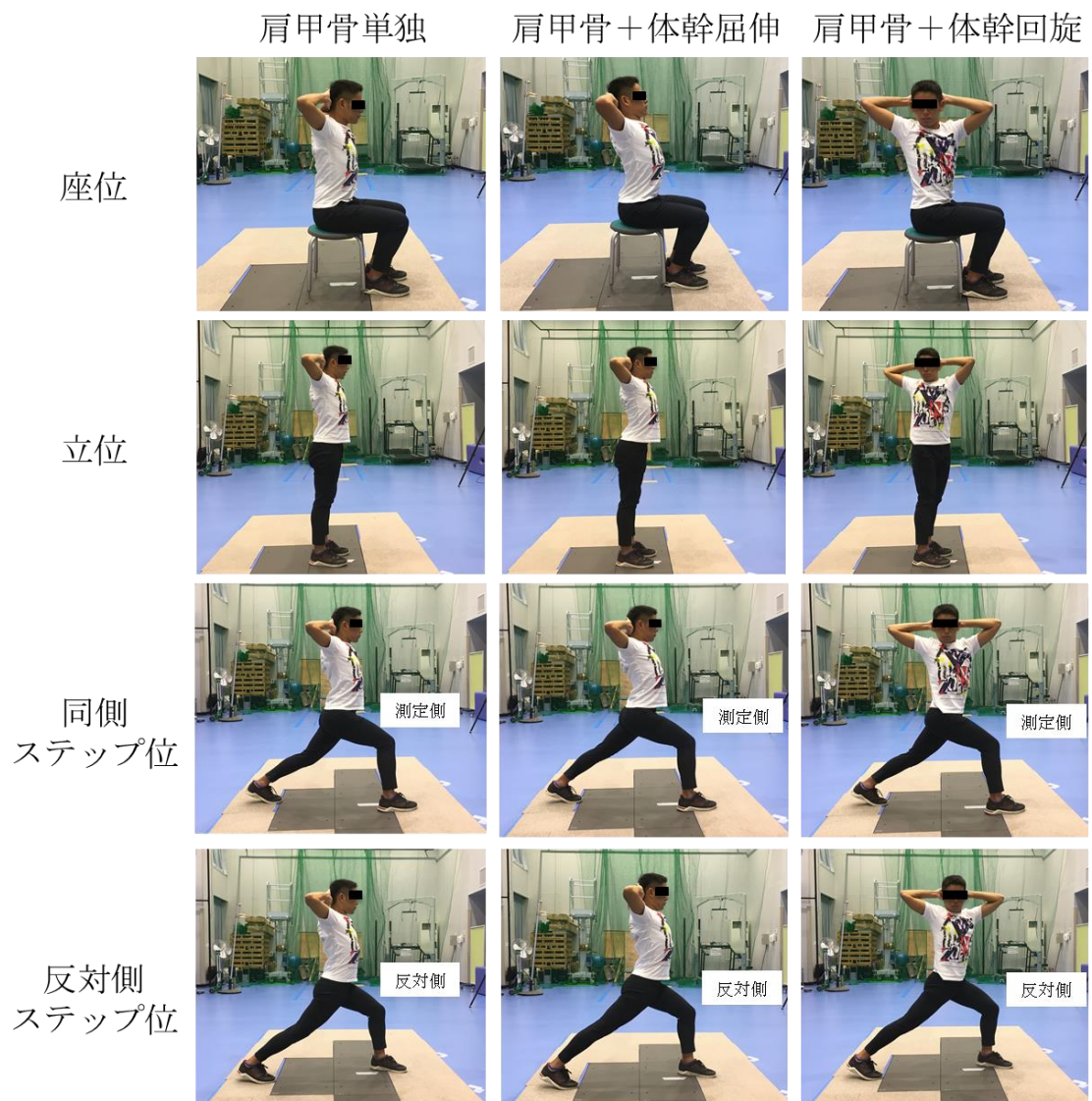


図 3.2 測定条件と姿勢

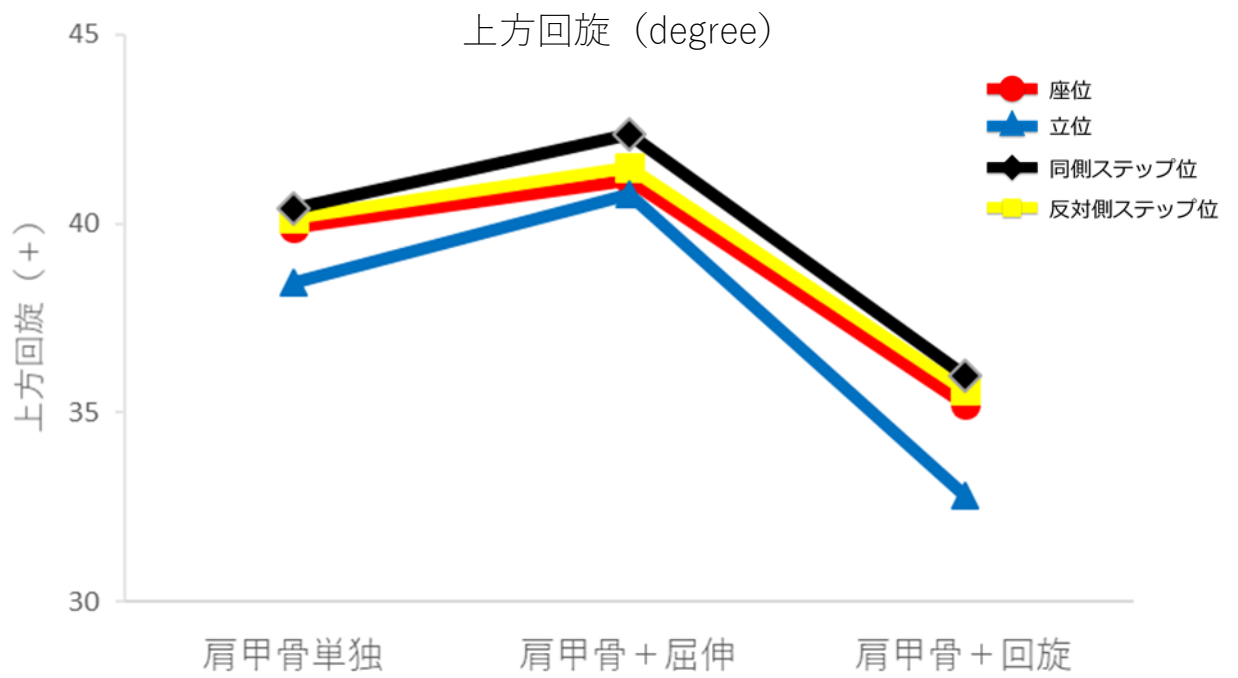


図 3.3 各運動と各姿勢における上方回旋角度
値は平均値 (n = 12)

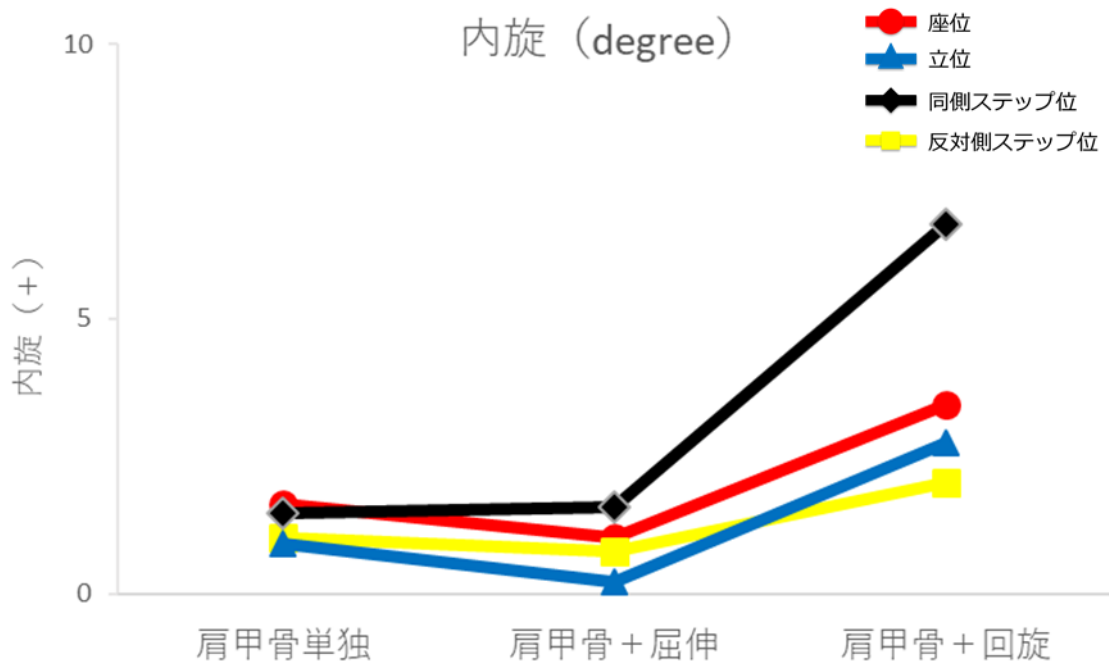


図 3.4 各運動と各姿勢における内旋回旋角度
値は平均値 (n = 12)

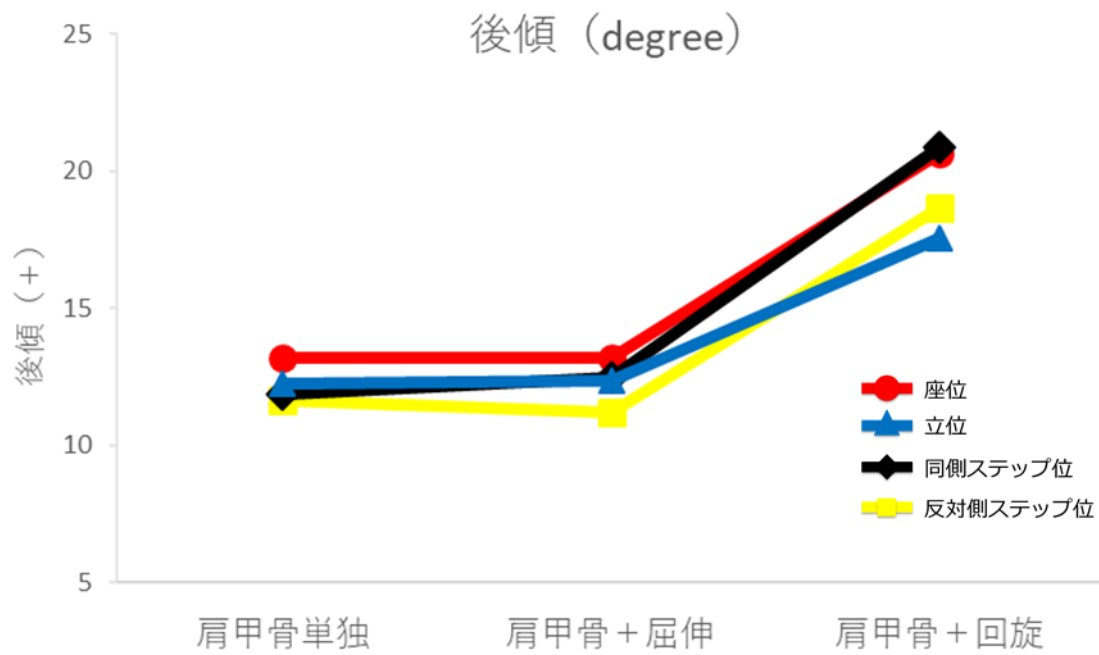


図 3.5 各運動と各姿勢における後傾角度
値は平均値 (n = 12)

表 3.1 各エクササイズ方法における肩甲骨角度

上方回旋 (+) deg	肩甲骨単独	肩甲骨+屈伸	肩甲骨+回旋 [†]
座位	39.9 (7.8)	41.1 (7.4)	35.2 (10.8)
立位	40.1 (8.3)	41.5 (7.0)	35.6 (8.0)
同側ステップ位 [‡]	40.4 (8.2)	42.4 (7.1)	36.0 (8.6)
反対側ステップ位	38.4 (9.2)	40.8 (7.2)	32.8 (10.7)

内旋(+) deg	肩甲骨単独	肩甲骨+屈伸	肩甲骨+回旋
座位	1.6 (11.3)	1.0 (8.9)	3.4 (9.1)
立位	1.0 (7.5)	0.8 (7.2)	2.0 (7.4)
同側ステップ位	1.5 (7.1)	1.6 (6.8)	6.7 (5.8)
反対側ステップ位	0.9 (10.1)	0.2 (7.0)	2.7 (9.3)

後傾(+) deg	肩甲骨単独	肩甲骨+屈伸	肩甲骨+回旋 ^{*†}
座位	13.2 (10.6)	13.2 (10.1)	20.7 (10.2)
立位	11.6 (9.0)	11.2 (9.5)	18.7 (11.8)
同側ステップ位	11.9 (9.1)	12.4 (9.8)	20.9 (10.1)
反対側ステップ位	12.3 (12.4)	12.4 (8.1)	17.6 (10.3)

値は平均値（標準偏差）（n = 12）

*：肩甲骨単独条件との間に有意差あり（p<0.05）

†：肩甲骨+屈伸条件との間に有意差あり（p<0.05）

‡：反対側ステップ位との間に有意差あり（p<0.05）

第4章

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

4.1 はじめに

投球動作に関する動作解析は、投球側上肢に関する報告だけでなく^{82, 99, 100, 102-104}、体幹^{98, 105, 106}や下肢^{107, 108}に関する解析まで、これまで数多く報告されてきている。球速は、投球動作において重要なパフォーマンス指標のひとつと考えられるが、先行研究において球速とMER時の肩関節外旋角度が関連するとされている^{99, 100}。MER時における肩関節の外旋角度は150~180°^{82, 99, 100}に至ると報告されている。一方で、MERに近い肢位（肩関節90°外転位）における肩甲骨上腕関節の外旋可動域は、野球選手の投球側において100~140°と報告されている^{109, 110}。この投球動作時と関節可動域測定時の肩関節外旋角度の差は、関節可動域測定時は肩甲骨を徒手的に固定して測定しているため、おもに肩甲骨上腕関節のみの外旋可動域を測定していると考えられる。瀬戸口は⁸⁴、MERにおける肩関節外旋は肩甲骨上腕関節だけでなく肩甲骨後傾や胸椎伸展によって形成することが重要であると述べている。そのためMER時の肩関節外旋角度を増加させるためには、肩甲骨後傾角度を拡大することが有効であると考えられる。しかし肩甲骨の運動は、第2章で述べたように体表から正確に測定することが困難であることから、投球動作のような肩関節の運動が大きい動作における肩甲骨運動の計測は非常に困難である。そのため、投球動作中の肩甲骨運動に関する報告は限られている。Meyerらは¹¹¹、ゆっくりとした投球動作における肩甲骨運動を、3次元磁気式動作解析装置を用いて測定した。その結果、MERにかけて肩甲骨は上方回旋、外旋、後傾し、その後、加速期において肩甲骨は内旋、前傾したと報告している。Miyashitaらは⁸⁵、大学生投手を対象に全力投球中の肩甲骨運動を光学式3次元動作解析装置により測定した。その結果、MERにおける肩甲骨後傾角度は23.5°であり、肩甲骨後傾運動のピークはMERよりも早く出現すると報告している。このことからコッキング期からMERまでの肩甲骨後傾角度を拡大することが重要であると考えられるが、前述のように投球動作時の肩甲骨運動を測定した研究が少ない。さらに運動介入による投球動作中の肩甲骨運動の変化に対する定量的な評価は、著者が渉猟しえるかぎり報告が無かった。

第1章において肩甲骨エクササイズのうち、小胸筋などの短縮しやすい筋に対するストレッチや、筋力低下が生じやすい僧帽筋下部や前鋸筋に対する筋力トレーニング、そして実際の動作に特異的な「動きをつくる」応用的肩甲骨エクササイズについて述べた。これ

らの筋力トレーニングやストレッチによる運動介入が与える影響については、主に上肢挙上動作に関して比較、検討がなされてきた⁵⁴⁻⁵⁶。このうち、ストレッチによって上肢挙上動作中の肩甲骨運動が即時的に変化するという報告⁵⁶がある一方で、一定期間ストレッチとトレーニングを導入しても肩甲骨運動は変化しないという報告もある^{54,55}。このように運動介入による上肢挙上動作中の肩甲骨運動の変化に関しても一定した見解はなく、運動介入が上肢挙上動作に与える影響も明確にはなっていない。さらに、投球動作など、実際の上肢運動中の特異的な肩甲骨運動を習得するための応用的肩甲骨エクササイズの介入効果についても検討されていない。

第3章では、肩甲骨 **retraction** エクササイズに体幹回旋運動を加えることで、単独の肩甲骨 **retraction** エクササイズよりも、肩甲骨後傾運動を大きく誘導できることを明らかとした。また、第1章から第3章にかけて、投球動作中の肩甲骨運動、特にコッキング期から MER 時において肩甲骨の後傾を拡大することの必要性を述べてきた。コッキング期は、上肢が挙上位にあり、かつ肩甲骨が後傾するため、僧帽筋下部の筋力が重要であると考えられる。そのため、一般的には上肢挙上位で肩関節を水平外転させる肩甲骨 **retraction** エクササイズを実施することが多い¹¹²。そこで本研究では、第3章で有効性が確認できた体幹運動を組み合わせた肩甲骨 **retraction** エクササイズと肩甲骨後傾に強く関与する僧帽筋下部に対する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する。これらのエクササイズが、実際の投球動作のコッキング期から MER 時および単純な上肢挙上動作中の肩甲骨運動、静止立位時の肩甲骨アライメントに与える影響を評価することを目的とし、それぞれ15分程度のエクササイズを1セッション実施し、その即時効果を明らかにすることとした。

4.2 方法

4.2.1 対象

大学硬式野球部所属の健常男性11名(年齢 20.1 ± 0.9 才; 身長 177.4 ± 3.5 cm; 体重 78.0 ± 7.8 kg)を対象に測定を実施した。ポジションは全員投手とした。なお、対象者はすべて右投げで投球フォームはオーバースローであった。表4.1に対象者の肩関節関節可動域と僧帽筋中部、下部の筋力を示す。本研究において投球側の肩関節と肘関節に整形外科的、神経学的疾患を有するもの、また測定時点で、投球側上肢に安静時と投球時の疼痛を有するものは存在しなかった。対象者は、日々実施している野球のトレーニング以外に、測定前に上肢に対して肩甲骨エクササイズを実施していない者を対象とした。すべての対象者には研究内容を十分に説明し、書面にて同意を得た。本研究は同志社大学「人を対象とする研究」に関する倫理審査委員会の承認を得て実施した(18032)。

4.2.2 測定手順

光学式3次元動作解析装置(MAC3D system; Motion Analysis Corporation, USA)を用いて、後述する測定課題における身体動作を測定した。サンプリング周波数は240Hzとした。両側の肩甲骨姿勢を体表から測定するために、AMCを両側の肩峰上の平らな面にそれぞれ貼付した。さらに上腕骨と胸郭の姿勢を測定するために、国際バイオメカニクス学会が推奨している方法に基づき、直径12mmの反射マーカを頸切痕(SN)、剣状突起(PX)、第7頸椎棘突起(C7)、第8胸椎棘突起(Th8)、上腕骨内側上顆(ME)、外側上顆(LE)に貼付した⁷⁴。またキャリブレーション測定において、肩甲骨ランドマーク(肩峰後角、棘三角、下角)を触診しScapular locator(SL)を用いて、肩甲骨姿勢を測定した。

4.2.3 キャリブレーション測定

第2章のTPS法を用いて左右の肩甲骨姿勢を推定した。そこでAMCから肩甲骨姿勢を推定するためのキャリブレーションとして、第2章と同様に椅子座位にて上肢下垂位、上肢挙上角度 90° で挙上面 0° 位、 30° 位、 60° 位、 90° 位、挙上角度 150° で挙上面 0° 位、 30° 位、 60° 位、 90° 位、最大挙上位の計10姿勢をキャリブレーション姿勢として事前に計測した(図2.9)。その計測においてAMCとScapular locator、その他の体表マーカを測定した。

4.2.4 測定課題

エクササイズ介入前と介入後の評価課題として、静止立位と上肢挙上動作(肩関節屈曲、肩甲骨面挙上、外転)、投球動作を測定した。

静止立位は足幅を肩幅に設定し、上肢下垂させリラックスした状態で 3 秒間立位を保持させ測定を実施した。次に上肢挙上動作として、対象者は背もたれのない椅子座位にて、両肘を完全伸展させた状態で 2kg のダンベルを把持して肩関節屈曲 (図 4.1)、肩甲骨面挙上 (図 4.2)、外転 (図 4.3) をランダムな順でそれぞれ 3 回ずつ実施した。屈曲の挙上面は前額面から 90°前方とし、肩甲骨面挙上の挙上面は前額面から 30°前方、外転の挙上面は前額面上とした。運動時間は 4 秒間で上肢最大挙上させ、4 秒間で上肢下垂位まで下制するよう設定した。投球動作として、十分なウォーミングアップの後に、セットポジションから 8m 先の的に向かって直球を全力投球させる試技を 3 回実施した。

4.2.5 エクササイズ介入

以下の「応用的エクササイズ」と「筋力トレーニング」の 2 条件を介入した。それぞれの条件は 3 日以上の間隔をあけてランダムな順で実施した。

応用的エクササイズ

応用的エクササイズ条件として、第 3 章で肩甲骨運動を拡大できることが明らかとなった体幹運動を加えた肩甲骨エクササイズを介入した。実施したエクササイズは、体幹屈伸を加えた肩甲骨 retraction エクササイズと体幹回旋を加えた肩甲骨 retraction エクササイズとした (図 4.4)。姿勢は、投球腕と同側の足を前に出す同側ステップ位とした。この姿勢としたのは、第 3 章において上方回旋に関して測定側と同側ステップ位のほうがわずかに反対側ステップよりも大きかったこと、また統計学的に有意ではなかったが後傾に関しても同側ステップ位で大きくなっていたためである。それぞれのエクササイズは 10 回ずつ 3 セット実施した。なおエクササイズを実施に要した時間は 15 分程度であった。各セット間には 3 分以上休息を与えながら実施した。

筋力トレーニング

応用的エクササイズと比較する介入運動として、一般的によく行われる肩甲骨周囲筋に対する筋力トレーニングを比較対照とした。先に述べたように投球動作の MER 時においては、僧帽筋下部の筋力が重要視されている。これらの筋に対するトレーニングとして、肩関節の 90°外転・90°外旋位における肩関節水平外転運動と肩関節 135°外転位における肩関節水平外転運動を実施した^{38, 113} (図 4.5)。それぞれのトレーニングは 2kg のダンベルを把持して 10 回ずつ、3 セット実施した。セット間は 3 分以上の休息を与えた。

4.2.6 データ解析

肩甲骨姿勢の推定は第2章で開発したTPS法を用いた。肩甲骨角度は、胸郭に対する肩甲骨姿勢とし、オイラー角を用いて、Y軸（内旋／外旋）、X軸（上方回旋／下方回旋）、Z軸（前傾／後傾）の順で算出した。

上肢挙上動作（屈曲、肩甲骨面挙上、外転）は、3回の挙上運動のうち、データが安定している1回を解析に使用し、胸郭上腕角度10°毎に肩甲骨角度を算出した。解析範囲は、胸郭上腕関節挙上10°から150°までとし、挙上角度140°以上で150°未満の対象者に関しては最大挙上時点までとした。

投球動作は、介入前と介入後に、それぞれ3回ずつ計測した。それらの試技のうちデータの安定している1回の試技を解析に使用した。本研究では、肩関節最大外旋位（MER）時の肩甲骨運動に着目しているため、MER時の肩甲骨角度とコッキング期（非投球側下肢着地（FC）～MER）における肩甲骨角度の最大値を算出した。運動学的データの解析はMATLAB (MATLAB R2018a; MathWorks, USA.)にて行った。

4.2.7 統計解析

本研究の実施において、2つのエクササイズ条件間（応用的エクササイズと筋力トレーニング）で測定日が異なっている。そのため、第一に、2つのエクササイズ条件間において、ベースラインとなる介入前の上肢挙上動作や投球動作中の肩甲骨運動に違いが生じていないかを確認した。そのベースラインに差が生じているか否かを確認するため、すべての測定課題に関して、2つのエクササイズ介入条件の介入前の肩甲骨姿勢を対応のあるt検定で比較した。

第二に、静止立位時の肩甲骨アライメントの左右差の有無を評価するために、それぞれの対象者の初回測定時における介入前の肩甲骨姿勢について左右差を評価した。オーバーヘッドスポーツ選手の肩甲骨アライメントの左右差を検討した先行研究において^{89,90}、投球側の肩甲骨は非投球側と比較して上方回旋4°⁹⁰、内旋4°⁸⁹、前傾2°⁸⁹の左右差が存在したと報告されている。そこで、上記の角度以上の差があるものの人数を算出した。また、この初回測定時の介入前の左右の肩甲骨姿勢を対応のあるt検定で比較した。さらにエクササイズ介入による静止立位時の肩甲骨姿勢の変化を明らかにするために、肩甲骨姿勢（上方回旋、内旋、後傾）において介入条件（応用的エクササイズと筋力トレーニング）と評価時点（介入前後）を要因とする反復測定二元配置分散分析を行った。交互作用に有意差が認められた場合は単純主効果の検定を実施した。

第三に、上肢挙上運動に関して、立位姿勢と同様に、初回測定時の介入前の各挙上動作

について、左右差を評価した。各挙上動作の肩甲骨の各軸において測定側（投球側と非投球側）と挙上角度（10~150°の 10°毎）を要因とする反復測定二元配置分散分析を行った。測定側に関して交互作用に有意差が認められた場合には、各挙上角度内で介入条件に関する単純主効果の検定を行った。さらに、エクササイズ介入が上肢挙上動作中の肩甲骨運動に与える影響を検討するために、肩甲骨姿勢の各軸においてそれぞれのエクササイズ条件内で挙上角度と評価時期を要因とする反復測定二元配置分散分析を行った。評価時期に関する主効果や交互作用に有意差が認められた場合は、各挙上角度内で評価時期に関する単純主効果の検定を行った。

第四に、投球動作の MER 時の肩甲骨角度とコッキング期の最大肩甲骨角度に関して、肩甲骨姿勢の各軸において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の検定を行った。さらに各エクササイズ条件の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。

すべての統計処理は SPSS version 24(IBM, U.S.A)を用いて実施し、有意水準は0.05とした。

4.3 結果

4.3.1 測定期間内における測定開始時の肩甲骨姿勢

測定期間内において、各エクササイズの前介入前に、肩甲骨の姿勢が変化していないことを確認した。その結果、静止立位時、上肢挙上動作時、投球動作時の肩甲骨角度に関して、各エクササイズ条件の前介入前の肩甲骨角度間に有意な差は認められなかった。

4.3.2 静止立位姿勢

表 4.2 に各被験者の初回測定時における静止立位時の肩甲骨姿勢（肩甲骨アライメント）の左右差を示す。その結果、初回測定時の前介入前において、投球側と非投球側の肩甲骨姿勢は、3つの運動軸に関して有意な差は認められなかった。なお、従来の報告で、オーバーヘッドスポーツ選手の投球側の肩甲骨は非投球側と比較して、上方回旋 4° ⁹⁰、内旋 2° ⁸⁹、前傾 2° ⁸⁹の差があると報告されている。本研究において、これ以上の角度差をもつ被験者数は、非投球側に対して投球側の肩甲骨が 4° 以上上方回旋しているものは、11名中2名であった。同様に非投球側よりも投球側が 4° 以上内旋していたものは3名であり、 2° 以上前傾していたものは3名であった。いずれかの左右差をもつ、対象者の人数は、重複もあり11人中5人であった。

次に表 4.3 にエクササイズ条件別に介入前後の静止立位時の肩甲骨アライメントを示す。各エクササイズ条件と評価時期（介入前後）に関する分散分析の結果、後傾に関して、交互作用に有意差が認められた ($F_{1,10}=12.1, p<0.01$)。しかし事後検定の結果、どちらのエクササイズ条件に関しても介入前と介入後の後傾角度に有意な差は認められなかった。上方回旋と内旋については2つの主効果と交互作用に有意差が認められなかった。

4.3.3 上肢挙上動作

上肢挙上動作として、屈曲と肩甲骨面に沿った挙上、外転の3つの動作にともなう肩甲骨の動作（上方回旋、内旋、後傾の3軸）を評価した。図 4.6 に示すように、第一に、介入前において、上肢の屈曲運動にともなう肩甲骨運動の左右差は、分散分析の結果、上方回旋に関して主効果である挙上角度（ 10° 刻みで $10\sim 150^{\circ}$ ）に有意差 ($F_{14,140}=325.4, p<0.01$) が認められたが、もうひとつの主効果である測定側（投球側の肩甲骨と非投球側の肩甲骨）と交互作用には有意差が認められなかった。内旋に関しては、挙上角度 ($F_{14,140}=34.5, p<0.01$) と交互作用 ($F_{14,140}=2.2, p<0.01$) に有意差が認められた。各挙上角度における測定側の単純主効果を検討した結果、有意差は認められなかった。後傾に関しては、挙上角度 ($F_{14,140}=41.0, p<0.01$) に有意差が認められたが、測定側と交互作用には有意差が認められなかった。第二

に、図 4.7 に示すように、肩甲骨面にそった挙上における肩甲骨運動の左右差は、分散分析の結果、上方回旋に関して挙上角度 ($F_{14,140}=452.2, p<0.01$) に有意差が認められたが、測定側と交互作用には有意差が認められなかった。内旋に関して挙上角度 ($F_{14,140}=7.0, p<0.01$) に有意差が認められたが、測定側と交互作用には有意差が認められなかった。後傾に関して挙上角度 ($F_{14,140}=21.6, p<0.01$) に有意差が認められたが、測定側と交互作用は有意差が認められなかった。最後に、図 4.8 に示すように、外転の肩甲骨運動の左右差に関して、分散分析の結果、上方回旋に関して挙上角度 ($F_{14,140}=570.0, p<0.01$) と交互作用 ($F_{14,140}=4.2, p<0.01$) に有意差が認められた。各挙上角度内における測定側の単純主効果を検討した結果、外転 20~40°と外転 90~110°において単純主効果が有意であった (外転 20° : $F_{1,10}=5.9, p=0.035$; 外転 30° : $F_{1,10}=12.5, p<0.01$; 外転 40° : $F_{1,10}=11.6, p<0.01$; 外転 90° : $F_{1,10}=7.4, p=0.021$; 外転 100° : $F_{1,10}=8.2, p=0.017$; 外転 110° : $F_{1,10}=12.0, p<0.01$)。外転 20~40°において、投球側は、非投球側よりも有意に上方回旋が小さく (2.8~3.8°), 外転 90~110°においては投球側のほうが非投球側よりも有意に上方回旋が大きかった (5.3~5.5°)。内旋に関して挙上角度 ($F_{14,140}=2.1, p=0.018$) に有意差が認められたが、測定側と交互作用は有意差が認められなかった。後傾に関しては 2 つの主効果と交互作用に有意差が認められなかった。

次に、応用的エクササイズを導入した結果を示す (図 4.9~図 4.11)。まず、上肢の屈曲動作にともなう肩甲骨運動において、上方回旋は、分散分析の結果、主効果である挙上角度に関して有意差が認められたが ($F_{14,140}=260.6, p<0.01$)、もう一つの主効果である評価時期と交互作用には有意差が認められなかった。内旋に関して、挙上角度 ($F_{14,140}=27.3, p<0.01$) と交互作用 ($F_{14,140}=2.9, p<0.01$) に有意差が認められた。各挙上角度内における評価時期の単純主効果を検討した結果、屈曲 60° ($F_{1,10}=5.6, p=0.040$) と屈曲 90° ($F_{1,10}=5.5, p=0.040$) において有意であった。屈曲 60°と屈曲 90°において、介入後は介入前と比較して有意に内旋角度が大きかった (屈曲 60° : 2.1°, 屈曲 90° : 1.9°)。後傾に関して、挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=34.4, p<0.01$)、評価時期と交互作用には有意差が認められなかった (図 4.9)。上肢の肩甲骨面挙上にともなう肩甲骨運動において、上方回旋は、分散分析の結果、挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=258.1, p<0.01$)、評価時期と交互作用には有意差が認められなかった。内旋に関しては、挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=9.9, p<0.01$)、評価時期と交互作用には有意差が認められなかった。後傾に関しては、挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=20.5, p<0.01$)、評価時期と交互作用には有意差が認められなかった (図 4.10)。肩関節の外転動作にともなう肩甲骨運動において、上方回旋は、挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=241.0, p<0.01$)、評価時期と交互作用は有意差が認められなかった。内旋に関しては、挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=1.9, p=0.034$),

評価時期と交互作用には有意差が認められなかった。後傾に関しては、挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=15.4$, $p<0.01$)、評価時期と交互作用には有意差が認められなかった。

次に、筋力トレーニングを介入した結果を示す (図 4.12~図 4.14)。まず、上肢の屈曲動作ともなう肩甲骨運動において、上方回旋は、分散分析の結果、主効果である挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=107.9$, $p<0.01$)、もうひとつの主効果である評価時期と交互作用には有意差が認められなかった。内旋は、挙上角度に ($F_{14,140}=20.3$, $p<0.01$) と交互作用 ($F_{14,140}=2.0$, $p<0.023$) に有意差が認められた。各挙上角度における評価時期の単純主効果について、屈曲 10° ($F_{1,10}=6.4$, $p=0.030$) と屈曲 120° ($F_{1,10}=5.6$, $p=0.040$) で有意であった。介入前と比較して介入後では、屈曲 10° において介入後のほうが 5.1° 大きく、屈曲 120° において介入後のほうが 2.1° 大きかった。後傾は、挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=28.0$, $p<0.01$)、評価時期と交互作用には有意差が認められなかった (図 4.12)。上肢の肩甲骨面挙上ともなう肩甲骨運動において、上方回旋は、挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=247.4$, $p<0.01$)、評価時期と交互作用には有意差が認められなかった。内旋は、挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=7.3$, $p<0.01$)、評価時期と交互作用には有意差が認められなかった。後傾は、主効果である評価時期 ($F_{1,10}=7.0$, $p=0.024$) ともう一つの主効果である挙上角度 ($F_{14,140}=24.2$, $p<0.01$) に有意差が認められた。しかし交互作用に有意差は認められなかった (図 4.13)。上肢の外転動作ともなう肩甲骨運動において、上方回旋は、挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=262.3$, $p<0.01$)、評価時期と交互作用には有意差が認められなかった。内旋に関して、2つの主効果と交互作用には有意差が認められなかった。後傾は、挙上角度に有意差が認められたが ($F_{14,140}=27.4$, $p<0.01$)、評価時期と交互作用には有意差が認められなかった (図 4.14)。

4.3.4 投球動作

エクササイズの介入前後において、投球動作の MER 時点における肩甲骨の姿勢とコッキング期における肩甲骨姿勢変化の最大値を評価した。表 4.4 に示すように、MER 時点において、上方回旋は、分散分析の結果、主効果である評価時期に有意差が認められたが ($F_{1,10}=5.8$, $p=0.036$)、もう一つの主効果であるエクササイズ条件と交互作用には有意差が認められなかった。内旋と後傾に関しては、2つの主効果と交互作用ともに有意差が認められなかった。

次に表 4.5 に示すように、コッキング期における肩甲骨角度の最大値に関して、上方回旋と内旋には、分散分析の結果、2つの主効果と交互作用には有意差が認められなかった。後傾に関しては、分散分析の結果、評価時期に有意差 ($F_{1,10}=7.1$, $p=0.024$) が認められ、交互

作用 ($F_{1,10}=5.1$, $p=0.048$) にも有意差が認められた。各エクササイズ条件内の単純主効果を検討した結果, 応用的エクササイズにおいて単純主効果が有意であった ($F_{1,10}=11.4$, $p<0.01$)。応用的エクササイズでは介入前と比較して介入後に 2.3° 後傾角度が増加していた。また介入前に対する介入後の後傾角度の増加率について, 応用的エクササイズ条件は 10.3% と, 筋力トレーニングよりも有意に大きい値を示した。

4.4 考察

本研究では、第3章にて肩甲骨の後傾運動を大きく誘導できると明らかになった体幹運動を加えた肩甲骨 retraction エクササイズを実施した後に、実際の投球動作と上肢挙上動作において肩甲骨の運動がどのように変化するかを評価した。そのため、一般的な肩甲骨周囲筋の筋力トレーニングを比較対象として、静止立位時の肩甲骨アライメントと上肢挙上動作中の肩甲骨運動、さらに投球動作時の肩甲骨運動に与える即時的効果をそれぞれ比較した。その結果、体幹運動を加えた肩甲骨 retraction エクササイズは投球動作時の肩甲骨後傾運動を即時的に拡大できることが明らかとなった。

先行研究では、MER における肩関節外旋角度は、投球パフォーマンスの中でも球速と関連すると報告されている^{99,100,114}。Wang らは⁹⁹、MER 時の肩関節外旋角度が大きいほど球速が速くなると報告している。また Matsuo らは¹⁰⁰、球速が速い群は遅い群と比較して MER 時の肩関節外旋角度が大きかったと報告している。これらのことから、球速を向上させることを目的とする場合、肩関節外旋角度を拡大することは、有効な手段の一つであると考えられる。一方で、投球動作中に痛みを訴える場面として、信原は⁸³、コッキング期から MER を含む加速期において発生すると報告している。これは MER 時点において肩甲上腕関節に強い力学的ストレスが加わるためと考えられる¹¹⁵。

コッキング期や加速期において肩甲上腕関節に加わる力学的ストレスは、関節唇や腱板、上腕二頭筋長頭腱といった軟部組織の損傷につながると考えられており²、そのため MER 周辺で肩関節に疼痛の発生が多くなると考えられる。このような投球動作にともなう疼痛を減少させるためには、肩甲上腕関節に加わる力学的ストレスを減少させることが有効であると考えられる。瀬戸口は⁸⁴、MER における肩関節外旋は肩甲上腕関節のみの運動ではなく、肩甲上腕関節の外旋と肩甲骨の後傾、体幹の伸展によって形成されると述べている。したがって投球障害肩に対する治療や予防のために、コッキング期から MER にかけて肩甲骨の後傾運動を拡大することが有用であると考えられる。

本研究では、第3章で有効性を確認した体幹運動を組み合わせた肩甲骨 retraction エクササイズを導入することで、コッキング期における肩甲骨最大後継角度を10%増加させることができた。投球障害をもつ選手に対するリハビリテーションの場面において、肩甲骨周囲の受動的可動域や筋力が十分獲得されていても、自ら肩関節外旋運動を行ったときに肩甲骨後傾運動が不足するような問題は非常に多くみうけられる。本研究の結果から、このような問題に対しては、一般的に実施される肩甲骨周囲筋に対する筋力トレーニングを実施するよりも、応用的肩甲骨エクササイズといった肩甲骨後傾運動を大きく誘導し、投球動作に特異的な「動きをつくる」エクササイズを導入することが有効であると考えられる。

本研究の応用的エクササイズにおいて、MER 時点では肩甲骨後傾角度は変化しなかったが、MER に至るまでのコッキング期において肩甲骨最大後傾角度が増加した。Miyasita らは⁸⁵、投球動作中の肩甲骨後傾角度の最大値は MER よりも早く出現すると報告している。本研究においても MER 時点よりも先に肩甲骨後傾角度の最大値が生じ、先行研究と同様の結果を得ている（図 4.15）。これは遠位関節である肩甲上腕関節の最大外旋よりも近位関節である肩甲骨胸郭関節の後傾が先に最大となることを示している。このような現象は投球動作において運動連鎖を利用できていることを示唆している²⁰。したがって、本研究の結果から、応用的肩甲骨エクササイズによって MER 以前の肩甲骨後傾角度を拡大することができることから、投球動作中の適切なタイミングにおける肩甲骨後傾運動の誘導に有効なエクササイズであることが示唆された。

応用的エクササイズによって投球動作中の肩甲骨運動を即時的に変化させることができた一方で、上肢挙上動作中の肩甲骨運動はほとんど変化しなかった。またエクササイズ介入による肩甲骨運動の変化が統計学的に有意であった姿勢に関しても、応用的エクササイズにおいて屈曲、肩甲骨面挙上、外転の3種類の挙上運動の10°刻みで10~150°までの45姿勢のうち2姿勢であり、また筋力トレーニングにおいても45姿勢中2姿勢であった。このことから挙上運動の可動域全体において肩甲骨運動が変化した姿勢はわずかであった。これは、本研究で介入したエクササイズは、投球動作中のMERにおける肩甲骨運動を拡大することを目的としたエクササイズであった。したがって、MERの姿勢に近い上腕挙上位で実施したエクササイズであったため、挙上動作全体の肩甲骨運動に与える影響がわずかであったと考えられる。上肢挙上動作では挙上面を問わず、挙上後期から最終域において肩甲骨上方回旋運動と後傾運動が増加する^{15, 116}。そのため、一部の上腕挙上姿勢だけでなく、挙上角度が小さいところからより大きい姿勢においてもretractionエクササイズを行うことで、上肢挙上運動中の肩甲骨運動に影響を与えることができるかもしれない。

オーバーヘッドスポーツ選手の肩甲骨アライメントの左右差に関して、Oyama ら⁸⁹とRibeiro らは⁹⁰、特に肩関節障害をもたないオーバーヘッドスポーツ選手においても利き腕側は、非利き腕側と比較して肩甲骨がより上方回旋、内旋、前傾していたと報告している。またオーバーヘッドスポーツ選手の上肢挙上動作に関して、Myers らは¹¹⁷、野球選手の利き腕側は日常的に投球動作を行わないコントロール群と比較して、肩甲骨面挙上運動中の上方回旋と内旋が大きかったと報告している。本研究において、初回測定時の肩甲骨アライメント評価を実施した結果、先行研究と同程度の肩甲骨姿勢の左右差を投球側にもっていたものの人数は11人中、下方回旋に関して2人、内旋に関して3人、後傾に関して3人となり、いずれかの左右差を持つものは合計5名と少なかった。また統計学的に、静止立

位時の肩甲骨姿勢の 3 つの運動軸においても、それぞれ有意な差は認められなかった。また、上肢の外転動作に関して、上方回旋には有意な左右差が認められたが、それ以外の屈曲と肩甲骨面にそった挙上には有意な左右差が認められなかった。以上のことから、本研究の対象者には、肩甲骨の位置異常や運動異常といった明らかな肩甲骨機能不全をもつものは少なかったといえる。

本研究の限界として、本研究で対象とした応用的肩甲骨エクササイズは、投球動作における MER 時の肩甲骨の後傾角度を拡大すること目的としたものであり、エクササイズも一回限りの短期的な介入であった。したがって、上肢挙上動作と投球動作の肩甲骨運動に対する即時的な効果を検討した研究であるため、このエクササイズをある程度の長期間介入することによる効果は不明である。この点に関しては、長期間の介入を実施することで明らかとなると考えられる。次に本研究は、対象者として肩甲骨機能不全をもつものだけを対象とはしていない。そのため、肩甲骨機能不全に対する今回の応用的エクササイズの明確なエビデンスとはならない。これに関しては、今後、対象者を肩甲骨機能不全の有る者と無い者のグループに分けて、さらなる研究が必要であると考えられる。

最後に、本研究は肩甲骨の姿勢変化という運動学解析にとどまっている。そのため、肩関節に加わる関節間力や関節モーメントなどの運動力学的解析を行っていない。肩甲骨を含む動力学解析を実施するためには、肩甲上腕関節を上肢の動力学解析モデルに加えた新たな解析モデルを作成する必要がある。しかしながら、現時点では、肩甲上腕関節の動力学解析モデルに関して一定した見解はない。したがって、今後はこのモデル作成を行い、運動力学的解析を実施していくことが課題である。またパフォーマンスの指標としての球速への関与も検討していない。しかし、球速は肩甲骨運動だけでなく下肢、体幹の運動などによっても影響すると考えられ、肩甲骨運動の変化のみでは、球速を向上させるには不足している可能性が考えられる。今後、肩甲骨運動と他の関節の運動との関係性や上記のような運動力学的な解析を進めていくことで、球速に関与する因子をより詳細に検討することができると考えられる。

4.5 結論

本研究は、体幹運動を加えた肩甲骨 retraction エクササイズを導入することで、投球動作中のMER時点における肩甲骨姿勢とコッキング期の肩甲骨運動が即時的に変化するかを評価した。また、立位姿勢と上肢の挙上動作における肩甲骨姿勢の変化も評価した。比較対象とするエクササイズは、一般的な肩甲骨周囲筋に対する筋力トレーニングとした。

その結果、15分間実施した筋力トレーニングは、さまざまな上腕運動に対する肩甲骨の運動に即時的な変化を与えなかった。しかしながら、体幹運動を組み合わせた肩甲骨 retraction エクササイズを15分間実施することで、投球動作のコッキング期における肩甲骨最大後傾角度が10%増加した。このことから、実際の投球動作における肩甲骨の姿勢を変化させるためには、投球動作といった特異的な運動の中で肩甲骨運動を大きく誘導できるようなエクササイズを行うことが有効であると考えられる。今後はこれらのエクササイズと肩甲上腕関節に加わる力学的ストレスを定量的に評価するために運動力学的解析を実施することと、一定期間介入することによる長期的な効果を検討する必要がある。



図 4.1 肩関節屈曲

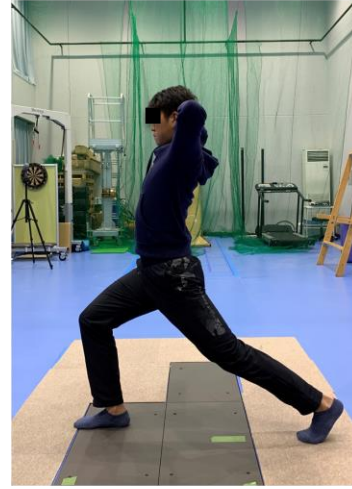


图 4.2 肩甲骨面举上



図 4.3 肩関節外転

A



B



図 4.4 応用的エクササイズ

A : 体幹屈伸運動を組み合わせた肩甲骨 retraction エクササイズ

B : 体幹回旋運動を組み合わせた肩甲骨 retraction エクササイズ

A



B



図 4.5 筋力トレーニング

A : 肩関節 90°外転位・90°外旋位水平外転運動

B : 肩関節 135°外転位水平外転運動

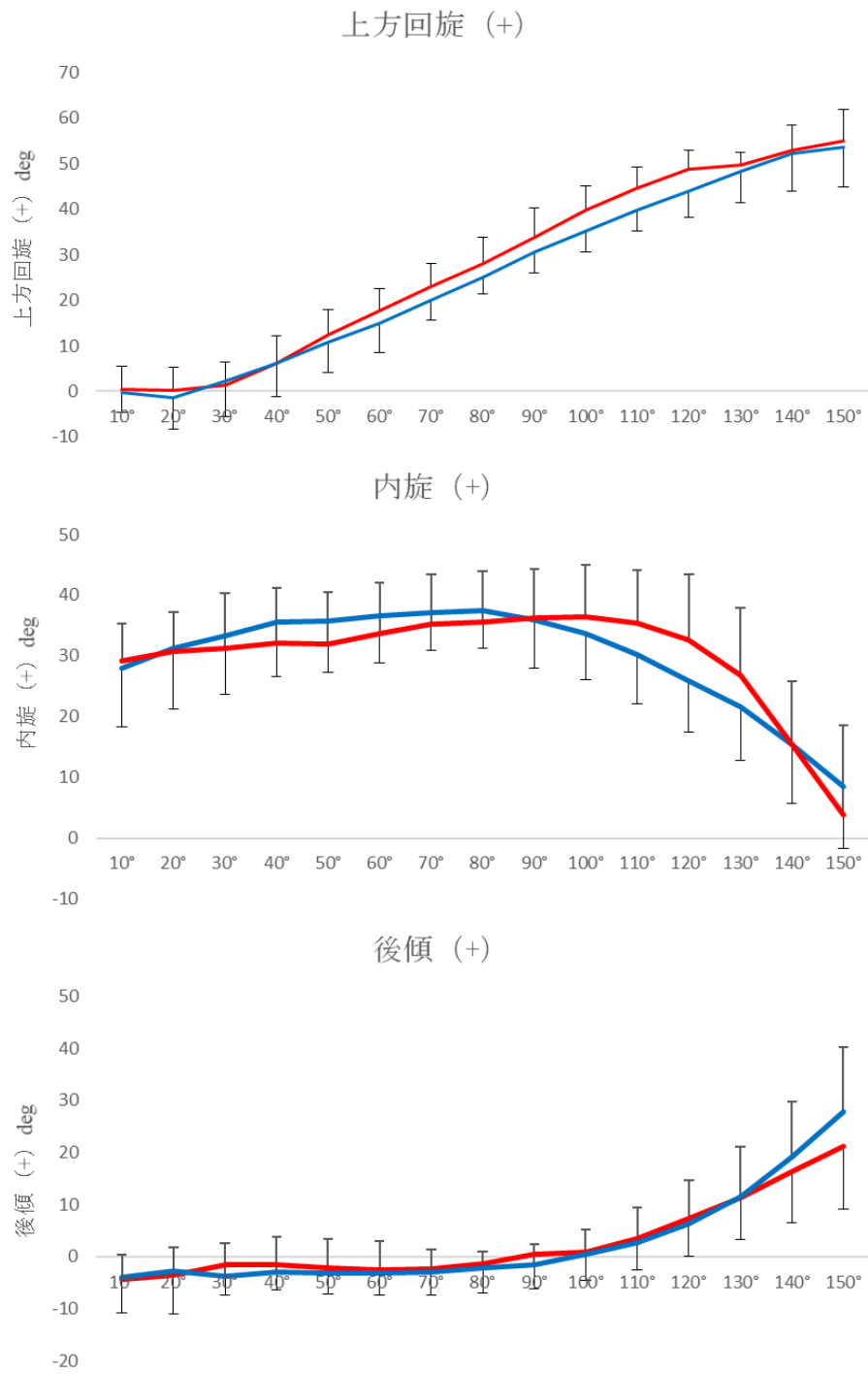


図 4.6 初回測定における屈曲時の肩甲骨運動
赤：投球側，青：非投球側

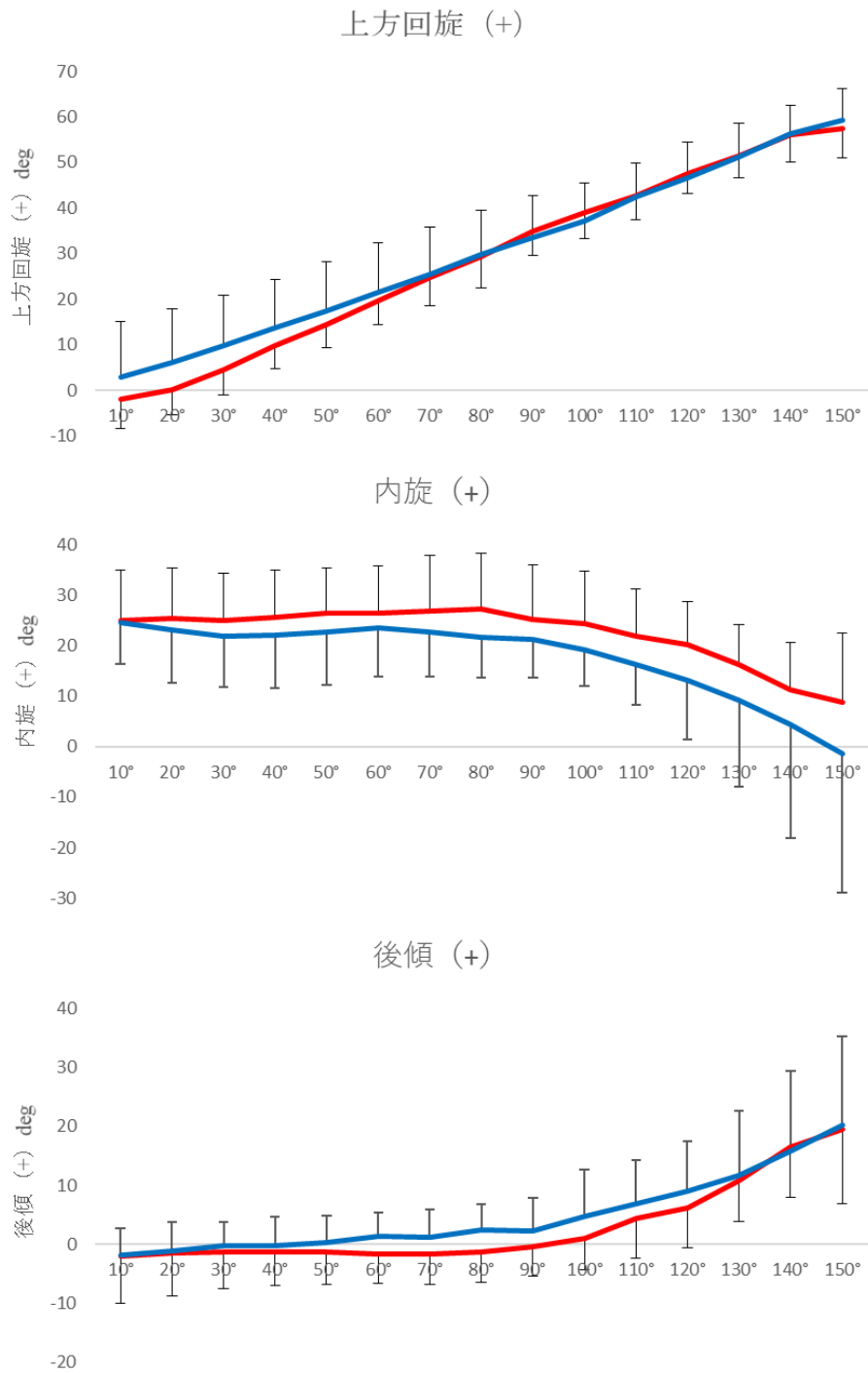


図 4.7 初回測定における肩甲骨面挙上時の肩甲骨運動
赤：投球側，青：非投球側

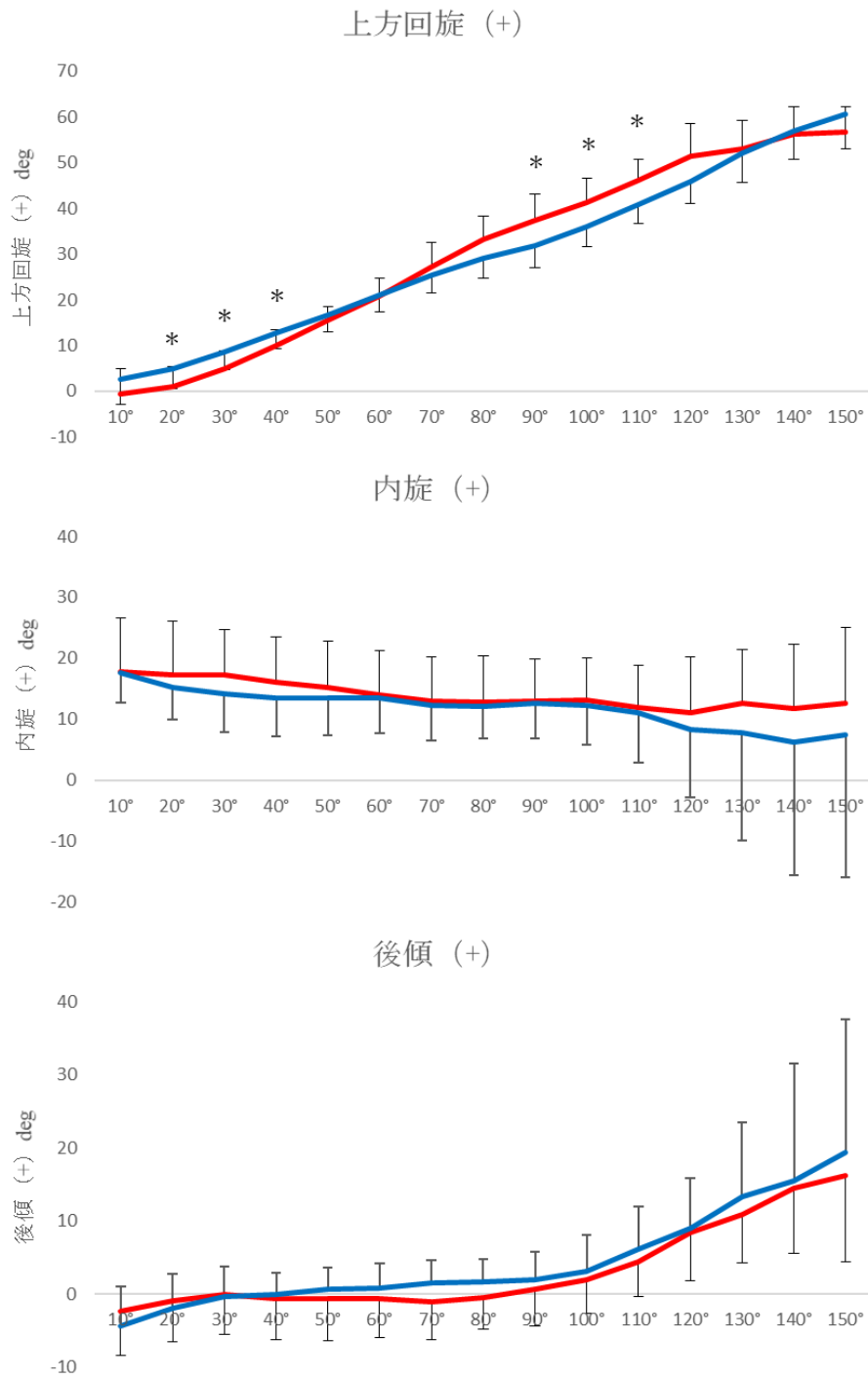


図 4.8 初回測定における外転時の肩甲骨運動
 赤：投球側，青：非投球側
 *：投球側と非投球側間に有意差あり (p<0.05)

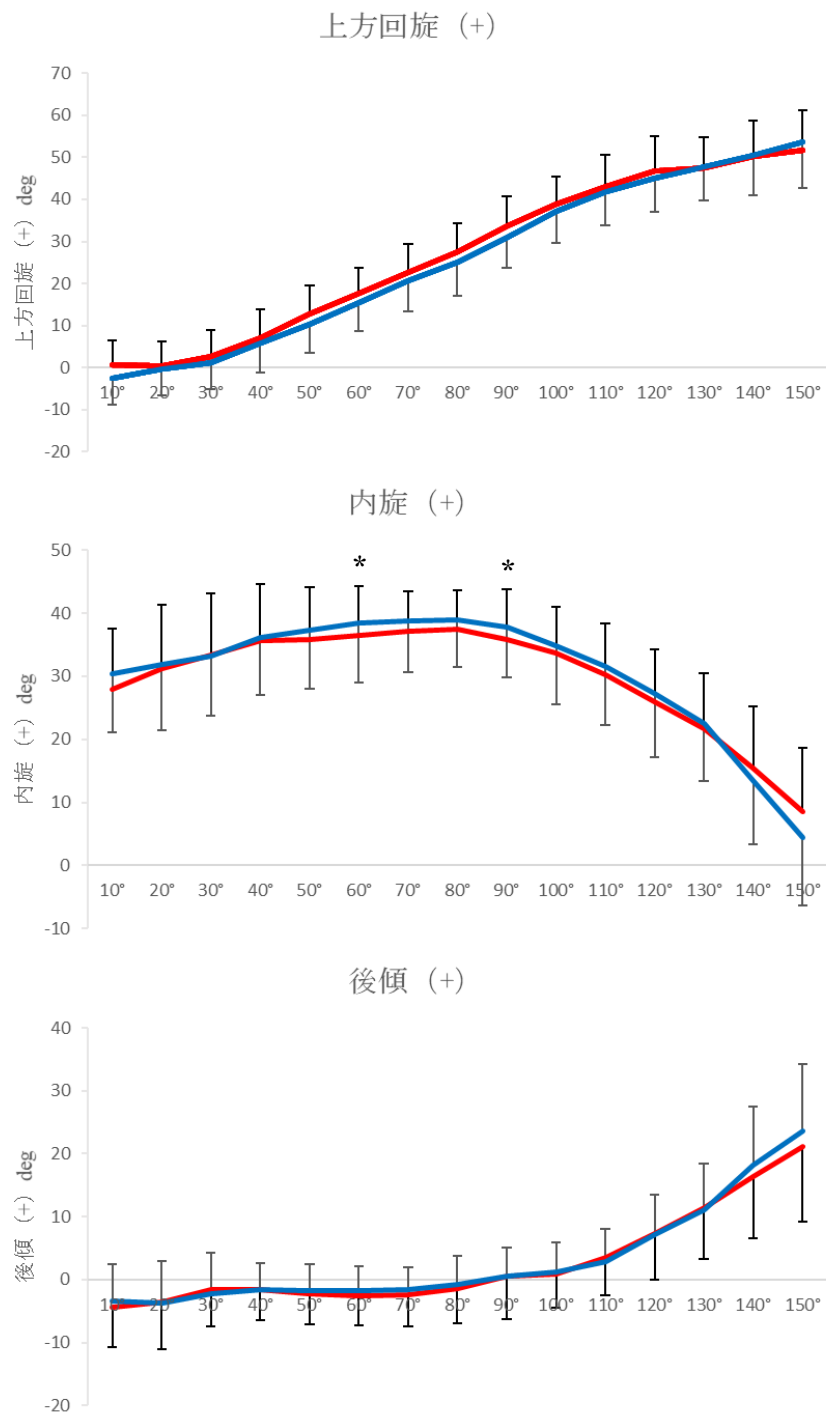


図 4.9 応用的エクササイズ条件における屈曲時の肩甲骨運動
 赤：介入前，青：介入後
 *：介入前と介入後に左右差あり (p<0.05)

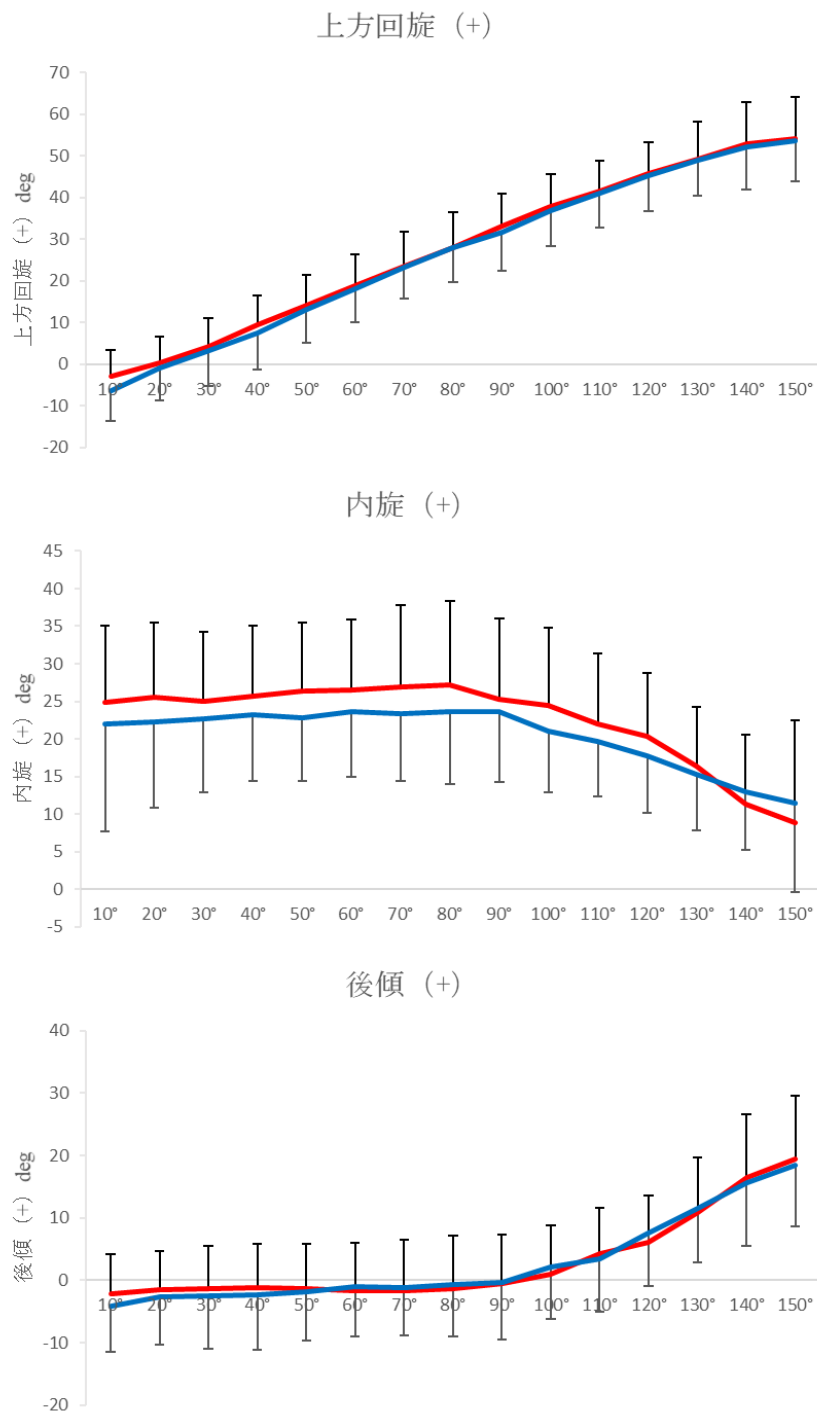


図 4.10 応用的エクササイズ条件における肩甲骨面挙上時の肩甲骨運動
赤：介入前，青：介入後

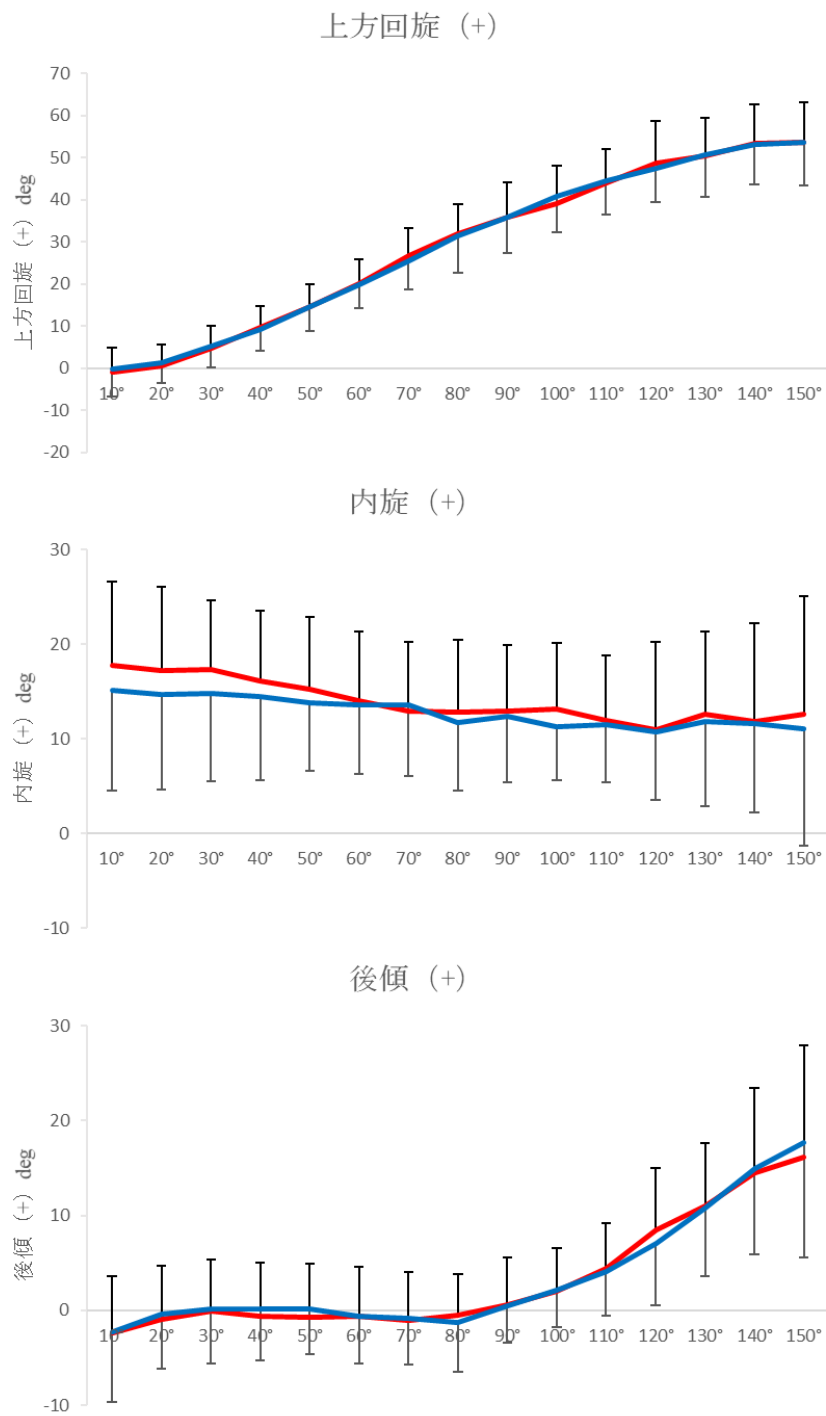


図 4.11 応用的エクササイズ条件における外転時の肩甲骨運動
赤：介入前，青：介入後

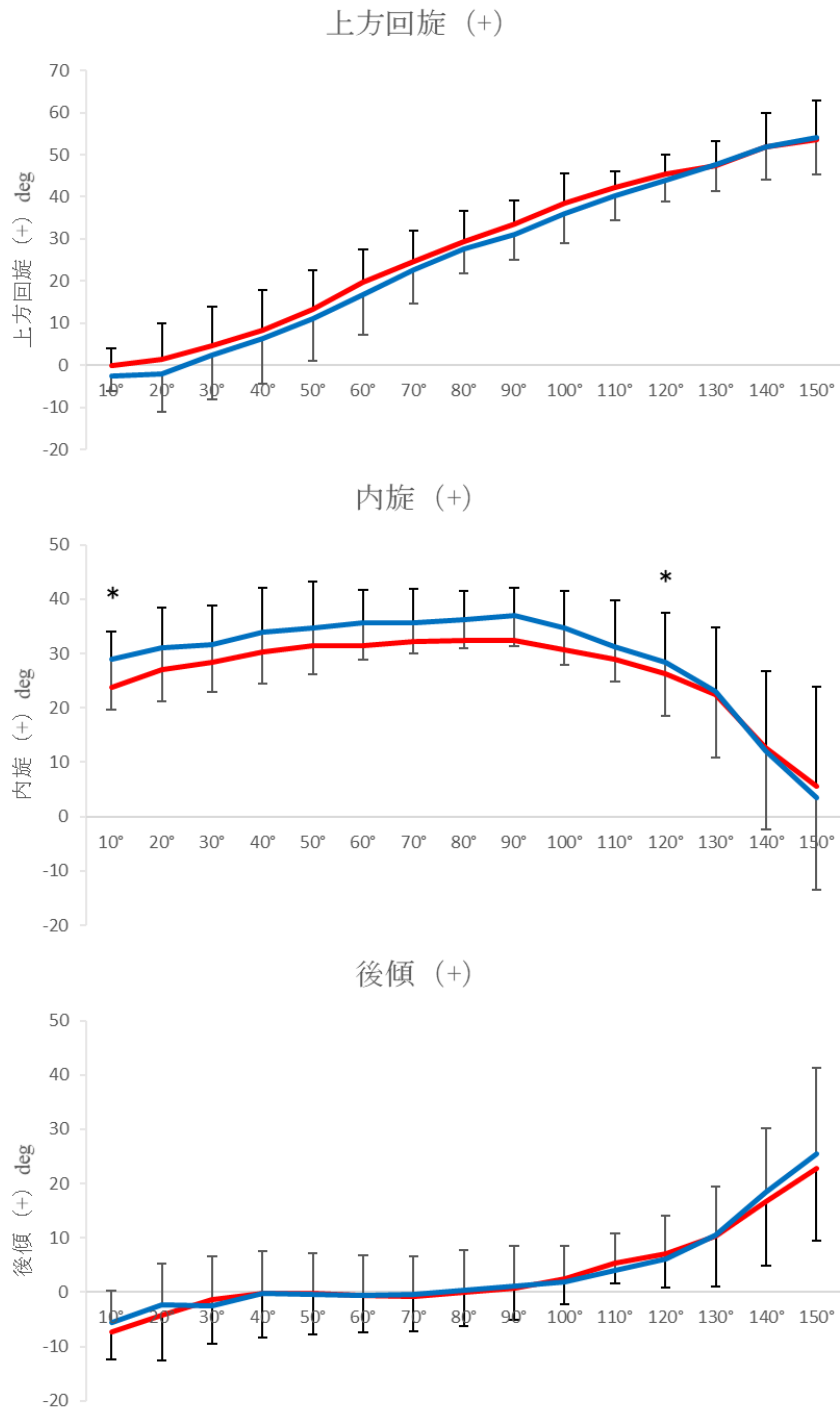


図 4.12 筋力トレーニング条件における屈曲時の肩甲骨運動
 赤：介入前，青：介入後
 *：介入前と介入後の間に左右差あり ($p < 0.05$)

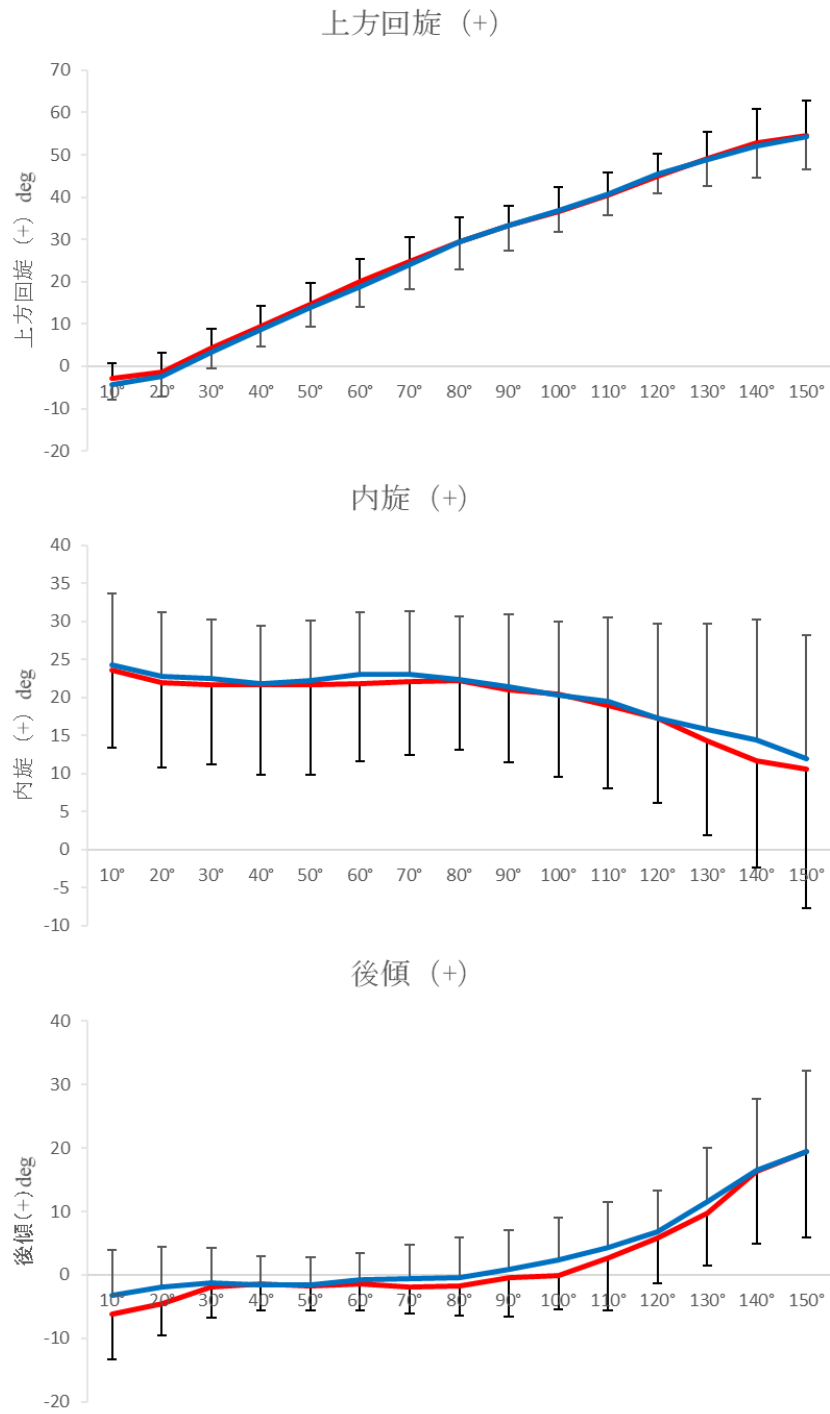


図 4.13 筋力トレーニング条件における肩甲骨面挙上時の肩甲骨運動
赤：介入前，青：介入後

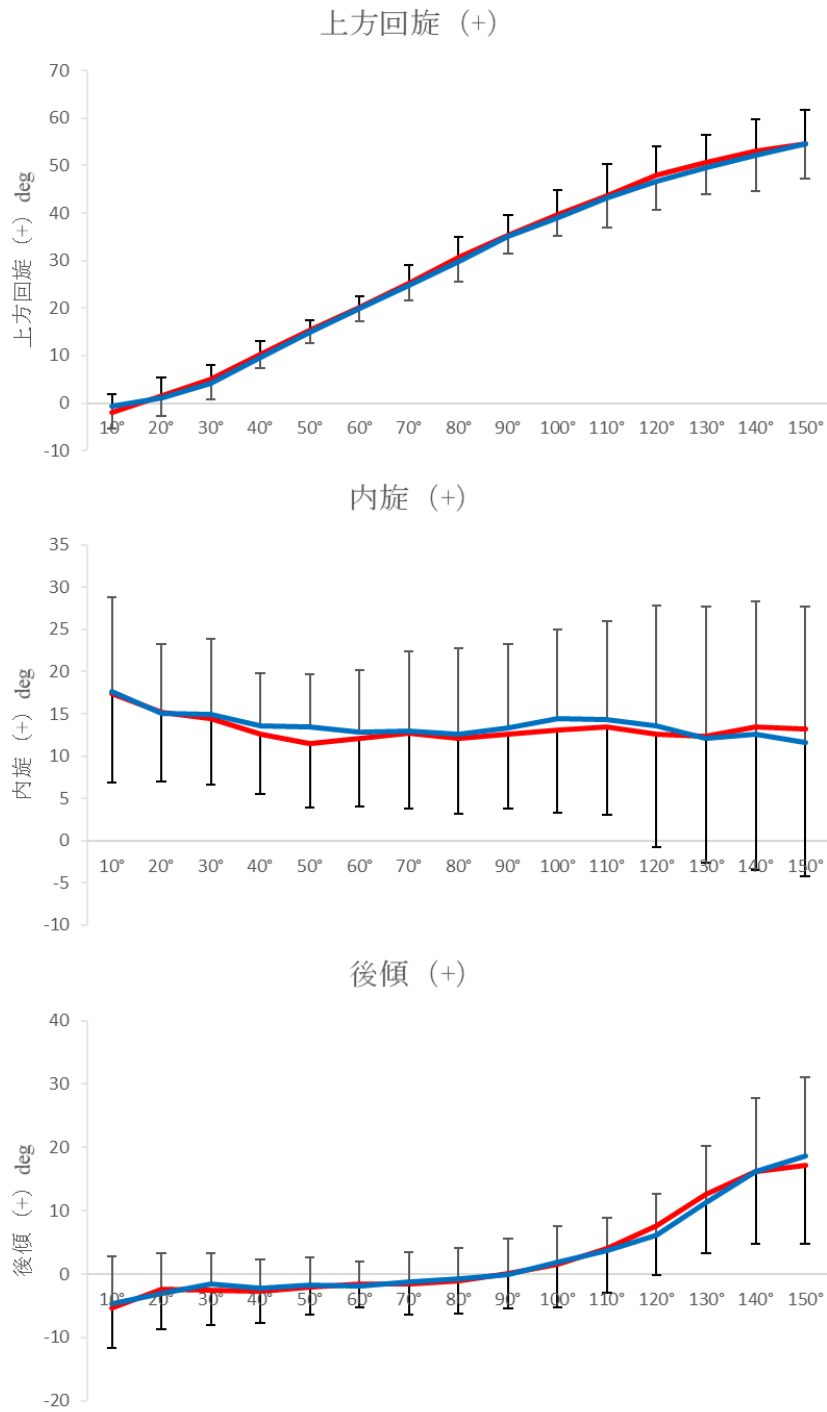


図 4.14 筋力トレーニング条件における外転時の肩甲骨運動
赤：介入前，青：介入後

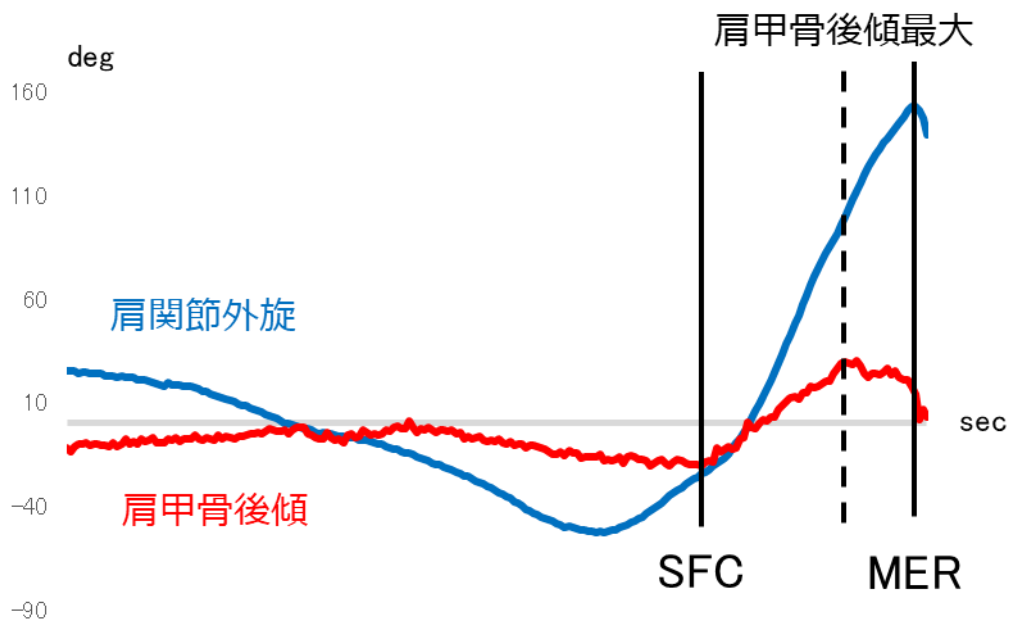


図 4.15 代表的な投球動作中の肩関節外旋角度と肩甲骨後傾角度
 青線は肩関節外旋角度，赤線は肩甲骨後傾角度，SFC は非投球側下肢接地，
 MER は肩関節最大外旋位，破線は肩甲骨最大後傾時点を示す。

表 4.1 対象者の関節可動域と筋力

関節可動域(deg)	投球側	非投球側	有意差
外旋	106.8 (9.8)	100.5 (12.3)	n.s
内旋	51.4 (14.2)	63.0 (14.6)	*
水平外転	30.5 (9.9)	30.9 (10.9)	n.s
水平内転	108.2 (9.0)	118.2 (6.0)	*

筋力(Nm)	投球側	非投球側	
僧帽筋中部	62.2 (9.2)	63.8 (13.8)	n.s
僧帽筋下部	53.2 (12.8)	49.3 (12.5)	n.s

*は対応のある t 検定における有意差 ($p < 0.05$) をしめす.

n.s: no significance

内外旋の可動域は肩関節外転 90° 位にて他動的に測定した.

僧帽筋中部の筋力は腹臥位にて肩関節 90° 外転位にて徒手筋力計 (Mobie MT-100, 酒井医療株式会社) を上腕遠位にあてて測定した. また僧帽筋下部の筋力は腹臥位にて肩関節外転 135° 位にて徒手筋力計を上腕遠位にあてて測定した.

表 4.2 初回測定時の静止立位における肩甲骨アライメント

	投球側		非投球側		左右差	
上方回旋 (+) deg	1.3	(5.4)	4.2	(3.7)	-2.9	(5.5)
内旋 (+) deg	28.2	(10.5)	29.8	(4.1)	-1.6	(9.3)
後傾 (+) deg	-4.0	(6.9)	-5.4	(6.6)	1.4	(7.2)

値は平均値 (標準偏差)

左右差 : (投球側) - (非投球側)

表 4.3 介入前後の静止立位の肩甲骨アライメント

応用的エクササイズ		介入前	介入後
上方回旋 (+) deg	投球側	0.7 (5.8)	0.0 (5.7)
	非投球側	3.3 (4.4)	2.8 (4.0)
内旋 (+) deg	投球側	27.4 (10.5)	28.5 (9.1)
	非投球側	30.4 (6.0)	30.5 (7.2)
後傾 (+) deg	投球側	-3.4 (6.3)	-4.8 (5.7)
	非投球側	-5.2 (6.3)	-3.3 (6.4)
筋力トレーニング		介入前	介入後
上方回旋 (+) deg	投球側	0.6 (4.9)	-1.3 (5.1)
	非投球側	3.3 (7.0)	2.5 (6.0)
内旋 (+) deg	投球側	30.7 (9.3)	31.1 (8.4)
	非投球側	28.6 (9.9)	28.9 (5.3)
後傾 (+) deg	投球側	-8.4 (3.8)	-6.3 (4.9)
	非投球側	-4.8 (8.7)	-4.8 (7.4)

値は平均値 (標準偏差)

表 4.4 MER 時の肩甲骨角度

応用的エクササイズ				
	介入前		介入後	
上方回旋 (+) deg	36.4	(11.0)	36.0	(10.6)
内旋 (+) deg	5.8	(13.4)	7.2	(13.1)
後傾 (+) deg	17.3	(10.4)	19.3	(12.2)
筋力トレーニング				
	介入前		介入後	
上方回旋 (+) deg	41.2	(11.2)	39.0	(13.1)
内旋 (+) deg	7.4	(16.4)	7.9	(15.6)
後傾 (+) deg	19.9	(15.7)	18.4	(15.0)

値は平均値 (標準偏差)

表 4.5 コッキング期の肩甲骨角度の最大値

応用的エクササイズ条件						
	介入前		介入後		増加率	
上方回旋 (+) deg	38.4	(11.1)	38.8	(9.7)	3.0%	(14.6)
内旋 (+) deg	-16.1	(13.8)	-17.1	(12.1)	19.1%	(30.7)
後傾 (+) deg	23.1	(9.5)	25.4*	(11.0)	10.4%†	(10.4)

筋力トレーニング条件						
	介入前		介入後		増加率	
上方回旋 (+) deg	43.0	(9.7)	40.7	(11.6)	-6.9%	(10.1)
内旋 (+) deg	-16.3	(15.2)	-16.8	(16.0)	7.8%	(12.1)
後傾 (+) deg	23.8	(14.8)	23.6	(13.9)	-2.4%	(12.1)

値は平均値 (標準偏差)

* : 介入前と比較して有意差あり (p<0.05)

† : 筋力トレーニング条件と比較して有意差あり (p<0.05)

第5章

総括

肩関節は、大きな上腕骨頭に対して関節窩が非常に小さい関節構造により、大きな可動域をもつ。そのため投球動作などのダイナミックな肩関節運動が可能となる。その反面、肩関節は、不安定性も併存しているため日常生活やスポーツ活動において傷害が発生しやすい関節である。肩関節障害において、肩甲上腕関節だけでなく肩甲骨運動に異常がある場合が多い。また肩甲骨運動の異常は、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おり、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、上肢運動を改善するための運動介入において重要なターゲットとなる。しかし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。さらに肩甲骨運動は軟部組織の影響により体表から測定が困難であるため、運動介入前後による肩甲骨運動の変化を検出することが困難であった。これを改善するため、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介入方法を明らかにすることが重要となる。そこで本論文は、体表から肩甲骨姿勢を無侵襲に推定する従来法である AMC 法を大幅に改良することで肩甲骨運動をより精度良く測定する方法を確立した(研究1)。次に、体幹運動を組み合わせることで肩甲骨エクササイズ中の肩甲骨運動を拡大するエクササイズを検討した(研究2)。そして、研究2で肩甲骨運動を拡大できることが明らかとなった応用的肩甲骨エクササイズを実施することで、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した(研究3)。

まず研究1では健常男性13名を対象とした。従来法 AMC 法の誤差を補正する新たなキャリブレーション・テーブルは、異なる胸郭上腕関節の挙上面と挙上角度の10姿勢を事前に測定し、Thin plate spline によって皮膚の動揺によるずれを非線形に補正することで作成した。これにより AMC と上腕の姿勢を測定し、新たなキャリブレーション・テーブルを用いて皮膚の動揺を非線形に補正することで肩甲骨姿勢を推定する方法を開発した(TPS法)。この方法を用いて、挙上面0~90°、挙上角度0~180°からなる25個の挙上姿勢と、結髪位やリーチ姿勢などからなるADL動作を模した機能的姿勢における肩甲骨姿勢を推定した。TPS法で推定した肩甲骨姿勢は、従来から用いられている一般的なAMC法(従来法)と、近年報告された線形の重回帰式を利用して肩甲骨姿勢を推定する方法(回帰法)を比較対象として、その推定精度を評価した。その結果、TPS法は従来法や回帰法と比較して、挙上姿勢では特に挙上120°以上の姿勢で推定精度が向上し、評価した挙上姿勢の約8割でRMSEが5°未満と高い精度を有していた。さらに機能的姿勢においても良好な推定精度で

あった。以上から本研究で開発した TPS 法を用いることで、挙上角度が大きくなるスポーツ動作中の肩甲骨姿勢を正確に測定することが可能となった。さらに、TPS 法の利用により、運動介入により、上肢挙上動作やスポーツ動作における肩甲骨運動の変化を検出できると考えられる。そのため本研究の結果は、今後の肩甲骨運動に関する研究のさらなる発展のための重要な知見と考えられる。

次に研究 2 において、野球の投球動作における MER 時の肩甲骨後傾運動を拡大する肩甲骨エクササイズを検討した。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、投球障害やパフォーマンスの評価においても重要である。研究 2 では、健常男性 12 名を対象とした。介入運動は、肩関節を水平外転することで肩甲骨を後退させる肩甲骨 retraction エクササイズ、肩甲骨 retraction エクササイズに体幹回旋運動を組み合わせたエクササイズと、肩甲骨 retraction エクササイズに体幹屈曲運動を組み合わせたエクササイズの 3 条件とした。その結果、肩甲骨 retraction エクササイズに測定側と同側方向への体幹回旋運動を加えることで、肩甲骨後傾運動を拡大できることが明らかになった。これまで、肩甲骨周囲筋に対する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、特定のスポーツ動作を対象とした特異的な動作肩甲骨運動の拡大を目的とするエクササイズにおける肩甲骨運動そのものの詳細は不明であった。本研究の結果、より肩甲骨運動を誘導することができる肩甲骨エクササイズが明確になったことにより、競技復帰のためのリハビリテーションにおいて、個々の筋の筋力や柔軟性が獲得されたのちの、実際の競技動作中の肩甲骨運動の拡大を目的とした局面におけるエクササイズ種目の選択に科学的根拠を与えるため、重要な知見となると考えられる。

そして研究 3 において、大学硬式野球投手 11 名を対象に、研究 2 で肩甲骨運動を誘導できると明らかになった体幹運動を組み合わせた肩甲骨 retraction エクササイズを導入し、特に投球動作中のコッキング期と MER 時の肩甲骨運動と、一般的な上肢挙上運動中の肩甲骨運動に与える即時効果を評価した。その結果、体幹運動を組み合わせた肩甲骨 retraction エクササイズによって、一般的な上肢挙上動作の可動域において肩甲骨運動が変化した挙上角度はごくわずかであったが、投球動作のコッキング期における肩甲骨最大後傾角度が介入前と比較して 10%増加することが明らかになった。これまでエクササイズ介入によりスポーツ動作中の肩甲骨運動を評価した研究はみられない。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。

謝辞

本研究の計画から測定，学会発表，論文投稿，博士論文作成までの過程において，多くのご支援と指導と賜りました指導教員である同志社大学スポーツ健康科学部中村康雄教授に厚く御礼申し上げます。また，この博士論文に対して数多くの貴重なご助言を賜りました同志社大学スポーツ健康科学部井澤鉄也教授と北條達也教授にも厚く御礼申し上げます。測定等において，大変ご尽力をいただいた同志社大学大学院スポーツ健康科学研究科博士後期課程植田篤史氏にも深く感謝いたします。そして，この研究に関する貴重なご助言を賜りました同志社大学スポーツ健康科学部の教員の皆様，実験にご協力いただいたすべての被験者の皆様とスポーツバイオメカニクス研究室の皆様に，心より感謝申し上げます。

参考文献

1. 厚生労働省 . 平成 26 年患者調査 (傷病分類編) . 2014;
<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/kanja/10syoubu/index.html>.
2. Burkhart SS, Morgan CD, Kibler WB. The disabled throwing shoulder: spectrum of pathology Part III: The SICK scapula, scapular dyskinesis, the kinetic chain, and rehabilitation. *Arthroscopy*. Jul-Aug 2003;19(6):641-661.
3. Burkhart SSS. Shoulder injuries in overhead athletes. The "dead arm" revisited. *Clinics in sports medicine*. 01 2000;19(1):125-158.
4. Myers JB, Oyama S, Hibberd EE. Scapular dysfunction in high school baseball players sustaining throwing-related upper extremity injury: a prospective study. *J Shoulder Elbow Surg*. Sep 2013;22(9):1154-1159.
5. Apreleva M, Hasselman CT, Debski RE, Fu FH, Woo SLY, Warner JJP. A dynamic analysis of glenohumeral motion after simulated capsulolabral injury: A cadaver model. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*. 1998;80(4):474-480.
6. Wilk KE, Arrigo CA, Andrews JR. Current concepts: the stabilizing structures of the glenohumeral joint. *J Orthop Sports Phys Ther*. Jun 1997;25(6):364-379.
7. Sharkey NA, Marder RA. The rotator cuff opposes superior translation of the humeral head. *Am J Sports Med*. May-Jun 1995;23(3):270-275.
8. David G. EMG and strength correlates of selected shoulder muscles during rotations of the glenohumeral joint. *Clinical biomechanics (Bristol)*. 2000;15(2):95-102.
9. Kibler WB. The role of the scapula in athletic shoulder function. *Am J Sports Med*. Mar-Apr 1998;26(2):325-337.
10. Kebaetse M, McClure P, Pratt NA. Thoracic position effect on shoulder range of motion, strength, and three-dimensional scapular kinematics. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 1999/08/01 1999;80(8):945-950.
11. Kibler WB, Sciascia A, Dome D. Evaluation of apparent and absolute supraspinatus strength in patients with shoulder injury using the scapular retraction test. *Am J Sports Med*. Oct 2006;34(10):1643-1647.
12. Mihata T. Effect of scapular orientation on shoulder internal impingement in a cadaveric model of the cocking phase of throwing. *J Bone Joint Surg Am*. 09 2012;94(17):1576-1583.
13. Codman EA, Akerson IB. THE PATHOLOGY ASSOCIATED WITH RUPTURE OF THE SUPRASPINATUS TENDON. *Annals of surgery*. Jan 1931;93(1):348-359.
14. Ludewig PMP. Alterations in shoulder kinematics and associated muscle activity in people with symptoms of shoulder impingement. *Phys Ther*. 03 2000;80(3):276.
15. McClure PW, Michener LA, Sennett BJ, Karduna AR. Direct 3-dimensional measurement of scapular kinematics during dynamic movements in vivo. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2001;10(3):269-277.
16. Ludewig PMP. The association of scapular kinematics and glenohumeral joint pathologies. *J Orthop Sports Phys Ther*. 02 2009;39(2):90-104.
17. Graichen HH. Three-dimensional analysis of the width of the subacromial space in healthy subjects and patients with impingement syndrome. *American journal of roentgenology (1976)*. 04 1999;172(4):1081-1086.

18. Kijima T, Matsuki K, Ochiai N, et al. In vivo 3-dimensional analysis of scapular and glenohumeral kinematics: comparison of symptomatic or asymptomatic shoulders with rotator cuff tears and healthy shoulders. *J Shoulder Elbow Surg.* Nov 2015;24(11):1817-1826.
19. Ellenbecker TS, Wilk K. *Sport Therapy for the Shoulder: Evaluation, Rehabilitation, and Return to Sport.* Human Kinetics; 2016.
20. Putnam CA. Sequential motions of body segments in striking and throwing skills: Descriptions and explanations. *Journal of Biomechanics.* 1993/01/01/1993;26:125-135.
21. Kibler WB, Kuhn JE, Wilk K, et al. The Disabled Throwing Shoulder: Spectrum of Pathology—10-Year Update. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery.* 1// 2013;29(1):141-161.e126.
22. Kibler WB. Biomechanical analysis of the shoulder during tennis activities. *Clin Sports Med.* Jan 1995;14(1):79-85.
23. Nagai K, Tateuchi H, Takashima S, et al. Effects of trunk rotation on scapular kinematics and muscle activity during humeral elevation. *Journal of Electromyography and Kinesiology.* 6// 2013;23(3):679-687.
24. Paletta GAG. Shoulder kinematics with two-plane x-ray evaluation in patients with anterior instability or rotator cuff tearing. *Journal of shoulder and elbow surgery.*6(6):516-527.
25. Kibler WB, Ludewig PM, McClure P, Uhl TL, Sciascia A. Scapular Summit 2009: introduction. July 16, 2009, Lexington, Kentucky. *J Orthop Sports Phys Ther.* Nov 2009;39(11):A1-A13.
26. Huang TS, Ou HL, Huang CY, Lin JJ. Specific kinematics and associated muscle activation in individuals with scapular dyskinesis. *J Shoulder Elbow Surg.* Aug 2015;24(8):1227-1234.
27. Hickey D, Solvig V, Cavalheri V, Harrold M, McKenna L. Scapular dyskinesis increases the risk of future shoulder pain by 43% in asymptomatic athletes: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med.* Jan 2018;52(2):102-110.
28. Mihata T, Jun BJ, Bui CN, et al. Effect of scapular orientation on shoulder internal impingement in a cadaveric model of the cocking phase of throwing. *J Bone Joint Surg Am.* Sep 5 2012;94(17):1576-1583.
29. Burkhart SS, Morgan CD, Kibler WB. The disabled throwing shoulder: spectrum of pathology Part I: pathoanatomy and biomechanics. *Arthroscopy.* Apr 2003;19(4):404-420.
30. Merolla G, De Santis E, Sperling JW, Campi F, Paladini P, Porcellini G. Infraspinatus strength assessment before and after scapular muscles rehabilitation in professional volleyball players with scapular dyskinesis. *J Shoulder Elbow Surg.* Dec 2010;19(8):1256-1264.
31. Meister K, Andrews JR, Batts J, Wilk K, Baumgarten T. Symptomatic thrower's exostosis. Arthroscopic evaluation and treatment. *Am J Sports Med.* Mar-Apr 1999;27(2):133-136.
32. Cools AM, Witvrouw EE, Declercq GA, Vanderstraeten GG, Cambier DC. Evaluation of isokinetic force production and associated muscle activity in the scapular rotators during a protraction-retraction movement in overhead athletes with impingement symptoms. *Br J Sports Med.* Feb 2004;38(1):64-68.
33. Borstad JD, Ludewig PM. The effect of long versus short pectoralis minor

- resting length on scapular kinematics in healthy individuals. *J Orthop Sports Phys Ther.* Apr 2005;35(4):227-238.
34. Borstad JD. Resting position variables at the shoulder: evidence to support a posture-impairment association. *Phys Ther.* Apr 2006;86(4):549-557.
 35. Ellenbecker TS. Rehabilitation of shoulder impingement syndrome and rotator cuff injuries: an evidence-based review. *Br J Sports Med.* 2010;44(5):319-327.
 36. Cools AM. Rehabilitation of scapular dyskinesis: from the office worker to the elite overhead athlete. *Br J Sports Med.* 04 2014;48(8):692-697.
 37. Ekstrom RA, Donatelli RA, Soderberg GL. Surface electromyographic analysis of exercises for the trapezius and serratus anterior muscles. *J Orthop Sports Phys Ther.* May 2003;33(5):247-258.
 38. Oyama S, Myers JB, Wassinger CA, Lephart SM. Three-dimensional scapular and clavicular kinematics and scapular muscle activity during retraction exercises. *J Orthop Sports Phys Ther.* Mar 2010;40(3):169-179.
 39. Cools AM, Dewitte V, Lanszweert F, et al. Rehabilitation of scapular muscle balance: which exercises to prescribe? *Am J Sports Med.* Oct 2007;35(10):1744-1751.
 40. De Mey K, Danneels LA, Cagnie B, Huyghe L, Seyns E, Cools AM. Conscious correction of scapular orientation in overhead athletes performing selected shoulder rehabilitation exercises: the effect on trapezius muscle activation measured by surface electromyography. *J Orthop Sports Phys Ther.* Jan 2013;43(1):3-10.
 41. Kibler WB, Sciascia AD, Uhl TL, Tambay N, Cunningham T. Electromyographic analysis of specific exercises for scapular control in early phases of shoulder rehabilitation. *Am J Sports Med.* Sep 2008;36(9):1789-1798.
 42. Myers JB, Pasquale MR, Laudner KG, Sell TC, Bradley JP, Lephart SM. On-the-Field Resistance-Tubing Exercises for Throwers: An Electromyographic Analysis. *J Athl Train.* Mar 2005;40(1):15-22.
 43. Ludewig PM, Hoff MS, Osowski EE, Meschke SA, Rundquist PJ. Relative balance of serratus anterior and upper trapezius muscle activity during push-up exercises. *Am J Sports Med.* Mar 2004;32(2):484-493.
 44. Hardwick DH, Beebe JA, McDonnell MK, Lang CE. A comparison of serratus anterior muscle activation during a wall slide exercise and other traditional exercises. *J Orthop Sports Phys Ther.* Dec 2006;36(12):903-910.
 45. Andersen CH, Zebis MK, Saervoll C, et al. Scapular muscle activity from selected strengthening exercises performed at low and high intensities. *J Strength Cond Res.* Sep 2012;26(9):2408-2416.
 46. Borich MR, Bright JM, Lorello DJ, Cieminski CJ, Buisman T, Ludewig PM. Scapular angular positioning at end range internal rotation in cases of glenohumeral internal rotation deficit. *J Orthop Sports Phys Ther.* Dec 2006;36(12):926-934.
 47. Borstad JD, Ludewig PM. Comparison of three stretches for the pectoralis minor muscle. *J Shoulder Elbow Surg.* May-Jun 2006;15(3):324-330.
 48. Muraki T, Aoki M, Izumi T, Fujii M, Hidaka E, Miyamoto S. Lengthening of the pectoralis minor muscle during passive shoulder motions and stretching techniques: a cadaveric biomechanical study. *Phys Ther.* Apr 2009;89(4):333-341.

49. McMullen J, Uhl TL. A kinetic chain approach for shoulder rehabilitation. *J Athl Train*. Jul 2000;35(3):329-337.
50. De Mey K, Danneels L, Cagnie B, Van den Bosch L, Flier J, Cools AM. Kinetic chain influences on upper and lower trapezius muscle activation during eight variations of a scapular retraction exercise in overhead athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 1// 2013;16(1):65-70.
51. Van de Velde A, De Mey K, Maenhout A, Calders P, Cools AM. Scapular-muscle performance: two training programs in adolescent swimmers. *J Athl Train*. Mar-Apr 2011;46(2):160-167; discussion 168-169.
52. Merolla G, De Santis E, Campi F, Paladini P, Porcellini G. Supraspinatus and infraspinatus weakness in overhead athletes with scapular dyskinesis: strength assessment before and after restoration of scapular musculature balance. *Musculoskeletal surgery*. Dec 2010;94(3):119-125.
53. De Mey K, Danneels L, Cagnie B, Cools AM. Scapular muscle rehabilitation exercises in overhead athletes with impingement symptoms: effect of a 6-week training program on muscle recruitment and functional outcome. *Am J Sports Med*. Aug 2012;40(8):1906-1915.
54. Hibberd EE, Oyama S, Spang JT, Prentice W, Myers JB. Effect of a 6-week strengthening program on shoulder and scapular-stabilizer strength and scapular kinematics in division I collegiate swimmers. *Journal of sport rehabilitation*. Aug 2012;21(3):253-265.
55. Lin YL, Karduna A. A four-week exercise program does not change rotator cuff muscle activation and scapular kinematics in healthy subjects. *J Orthop Res*. Mar 21 2016.
56. Umehara J, Nakamura M, Nishishita S, Tanaka H, Kusano K, Ichihashi N. Scapular kinematic alterations during arm elevation with decrease in pectoralis minor stiffness after stretching in healthy individuals. *J Shoulder Elbow Surg*. Jul 2018;27(7):1214-1220.
57. Inman VT, Saunders JB, Abbott LC. Observations of the function of the shoulder joint. *The Journal of bone and joint surgery*. 1944;26:1-30.
58. Freedman L, Munro RR. Abduction of the arm in the scapular plane: scapular and glenohumeral movements. A roentgenographic study. *J Bone Joint Surg Am*. Dec 1966;48(8):1503-1510.
59. Koh TJ, Grabiner MD, Brems JJ. Three-dimensional in vivo kinematics of the shoulder during humeral elevation. *Journal of Applied Biomechanics*. 1998;14(3):312-326.
60. Matsui K, Shimada K, Andrew PD. Deviation of skin marker from bone target during movement of the scapula. *Journal of Orthopaedic Science*. 3// 2006;11(2):180-184.
61. McQuade KJK. Dynamic scapulohumeral rhythm: the effects of external resistance during elevation of the arm in the scapular plane. *J Orthop Sports Phys Ther*. 02 1998;27(2):125-133.
62. Fayad F. 3-D scapular kinematics during arm elevation: effect of motion velocity. *Clinical biomechanics (Bristol)*. 2006;21(9):932-941.
63. McClure PWPW. Shoulder function and 3-dimensional scapular kinematics in people with and without shoulder impingement syndrome. *Phys Ther*. 08 2006;86(8):1075-1090.
64. Ichihashi N, Ibuki S, Otsuka N, Takashima S, Matsumura A. Kinematic characteristics of the scapula and clavicle during military press exercise and

- shoulder flexion. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 5// 2014;23(5):649-657.
65. Yamauchi T, Hasegawa S, Matsumura A, Nakamura M, Ibuki S, Ichihashi N. The effect of trunk rotation during shoulder exercises on the activity of the scapular muscle and scapular kinematics. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 6// 2015;24(6):955-964.
 66. Karduna ARA. Dynamic measurements of three-dimensional scapular kinematics: a validation study. *Journal of biomechanical engineering*. 04 2001;123(2):184-190.
 67. van Andel CC. Recording scapular motion using an acromion marker cluster. *Gait & posture*. 01 2009;29(1):123-128.
 68. Brochard S, Lempereur M, Rémy-Néris O. Double calibration: An accurate, reliable and easy-to-use method for 3D scapular motion analysis. *Journal of Biomechanics*. 2/24/ 2011;44(4):751-754.
 69. Janes WE, Brown JM, Essenberg JM, Engsborg JR. Development of a method for analyzing three-dimensional scapula kinematics. *HAND*. 2012;7(4):400-406.
 70. Bet-Or YY. Reliability and Validity of an Acromion Marker Cluster for Recording Scapula Posture at End Range Clavicle Protraction, Retraction, Elevation and Depression. *Journal of applied biomechanics*. 05 2017:1-19.
 71. Meskers CGM, Vermeulen HM, de Groot JH, van der Helm FCT, Rozing PM. 3D shoulder position measurements using a six-degree-of-freedom electromagnetic tracking device. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 1998/06/01/ 1998;13(4):280-292.
 72. Nicholson KF, Richardson RT, Rapp EA, Quinton RG, Anzilotti KF, Richards JG. Validation of a mathematical approach to estimate dynamic scapular orientation. *J Biomech*. Mar 21 2017;54:101-105.
 73. Rapp EA, Richardson RT, Russo SA, Rose WC, Richards JG. A comparison of two non-invasive methods for measuring scapular orientation in functional positions. *Journal of Biomechanics*. 2017/08/16/ 2017;61:269-274.
 74. Wu G, van der Helm FCT, Veeger HEJ, et al. ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion—Part II: shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*. 2005;38(5):981-992.
 75. Bookstein FL. *Morphometric tools for landmark data : geometry and biology*. Cambridge [England]; New York: Cambridge University Press; 1997.
 76. Warner MB, Chappell PH, Stokes MJ. Measuring scapular kinematics during arm lowering using the acromion marker cluster. *Human Movement Science*. 4// 2012;31(2):386-396.
 77. Johnson GR, Stuart PR, Mitchell S. A method for the measurement of three-dimensional scapular movement. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 1993/09/01/ 1993;8(5):269-273.
 78. Lempereur M, Brochard S, Leboeuf F, Rémy-Néris O. Validity and reliability of 3D marker based scapular motion analysis: A systematic review. *Journal of Biomechanics*. 7/18/ 2014;47(10):2219-2230.
 79. MacLean KFE, Chopp JN, Grewal T-J, Picco BR, Dickerson CR. Three-dimensional comparison of static and dynamic scapular motion tracking techniques. *Journal of Electromyography and Kinesiology*. 2// 2014;24(1):65-71.

80. Bourne DA, Choo AMT, Regan WD, MacIntyre DL, Oxland TR. Three-dimensional rotation of the scapula during functional movements: An in vivo study in healthy volunteers. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2007/03/01/ 2007;16(2):150-162.
81. Fleisig GS, Escamilla RF, Andrews JR, Matsuo T, Satterwhite Y, Barrentine SW. Kinematic and kinetic comparison between baseball pitching and football passing. *Journal of Applied Biomechanics*. 1996;12(2):207-224.
82. Fleisig GS, Barrentine SW, Zheng N, Escamilla RF, Andrews JR. Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development. *Journal of Biomechanics*. 1999/12/01/ 1999;32(12):1371-1375.
83. 信原 克. 肩：その機能と臨床. 第4版 ed: 医学書院; 2012.
84. 瀬戸口 芳. 投球フォームと肩・肘障害 臨床スポーツ医学. 2013;30(9):831-839.
85. Miyashita K, Kobayashi H, Koshida S, Urabe Y. Glenohumeral, scapular, and thoracic angles at maximum shoulder external rotation in throwing. *Am J Sports Med*. Feb 2010;38(2):363-368.
86. Feltner ME, Dapena J. Three-Dimensional Interactions in a Two-Segment Kinetic Chain. Part I: General Model. *International Journal of Sport Biomechanics*. 1989;5(4):403-419.
87. Feltner ME. Three-Dimensional Interactions in a Two-Segment Kinetic Chain. Part II: Application to the Throwing Arm in Baseball Pitching. *International Journal of Sport Biomechanics*. 1989/11/01 1989;5(4):420-450.
88. Miyanishi T, Fujii N, Ae M, Kunugi Y, Okada M. A THREE-DIMENSIONAL ANALYSIS ON MECHANICAL ENERGY FLOWS OF TORSO AND ARM SEGMENTS IN BASEBALL THROW. *Japanese Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*. 1997;46(1):55-67.
89. Oyama S, Myers JB, Wassinger CA, Daniel Ricci R, Lephart SM. Asymmetric resting scapular posture in healthy overhead athletes. *J Athl Train*. Oct-Dec 2008;43(6):565-570.
90. Ribeiro A, Pascoal AG. Resting scapular posture in healthy overhead throwing athletes. *Man Ther*. Dec 2013;18(6):547-550.
91. Reinold MM, Escamilla R, Wilk KE. Current concepts in the scientific and clinical rationale behind exercises for glenohumeral and scapulothoracic musculature. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*. 2009;39(2):105-117.
92. Escamilla RF, Yamashiro K, Paulos L, Andrews JR. Shoulder muscle activity and function in common shoulder rehabilitation exercises. *Sports Med*. 2009;39(8):663-685.
93. Finley MA, Lee RY. Effect of sitting posture on 3-dimensional scapular kinematics measured by skin-mounted electromagnetic tracking sensors. *Arch Phys Med Rehabil*. Apr 2003;84(4):563-568.
94. Prinold JAI, Shaheen AF, Bull AMJ. Skin-fixed scapula trackers: A comparison of two dynamic methods across a range of calibration positions. *Journal of Biomechanics*. 7/7/ 2011;44(10):2004-2007.
95. Huang TS, Huang CY, Ou HL, Lin JJ. Scapular dyskinesis: Patterns, functional disability and associated factors in people with shoulder disorders. *Man Ther*. Dec 2016;26:165-171.
96. Ekstrom RA, Soderberg GL, Donatelli RA. Normalization procedures using maximum voluntary isometric contractions for the serratus anterior and trapezius muscles during surface EMG analysis. *J Electromyogr Kinesiol*.

- Aug 2005;15(4):418-428.
97. De Mey K. Kinetic chain influences on upper and lower trapezius muscle activation during eight variations of a scapular retraction exercise in overhead athletes. *Journal of science and medicine in sport*. 01 2013;16(1):65-70.
 98. Oliver GD, Keeley DW. Pelvis and torso kinematics and their relationship to shoulder kinematics in high-school baseball pitchers. *J Strength Cond Res*. Dec 2010;24(12):3241-3246.
 99. Wang YT, Ford HT, 3rd, Ford HT, Jr., Shin DM. Three-dimensional kinematic analysis of baseball pitching in acceleration phase. *Perceptual and motor skills*. Feb 1995;80(1):43-48.
 100. Matsuo T, Escamilla RF, Fleisig GS, Barrentine SW, Andrews JR. Comparison of Kinematic and Temporal Parameters between Different Pitch Velocity Groups. *Journal of Applied Biomechanics*. 2001/02/01 2001;17(1):1-13.
 101. Kageyama M, Sugiyama T, Kanehisa H, Maeda A. Difference between adolescent and collegiate baseball pitchers in the kinematics and kinetics of the lower limbs and trunk during pitching motion. *Journal of sports science & medicine*. Jun 2015;14(2):246-255.
 102. Pappas AM, Zawacki RM, Sullivan TJ. Biomechanics of baseball pitching. A preliminary report. *Am J Sports Med*. Jul-Aug 1985;13(4):216-222.
 103. Fleisig GS, Andrews JR, Dillman CJ, Escamilla RF. Kinetics of baseball pitching with implications about injury mechanisms. *Am J Sports Med*. Mar-Apr 1995;23(2):233-239.
 104. 宮西 智, 藤井 範, 阿江 通, 功力 靖, 岡田 守. 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*. 1996;41(1):23-37.
 105. Oyama S, Yu B, Blackburn JT, Padua DA, Li L, Myers JB. Effect of excessive contralateral trunk tilt on pitching biomechanics and performance in high school baseball pitchers. *Am J Sports Med*. Oct 2013;41(10):2430-2438.
 106. Oyama S, Yu B, Blackburn JT, Padua DA, Li L, Myers JB. Improper trunk rotation sequence is associated with increased maximal shoulder external rotation angle and shoulder joint force in high school baseball pitchers. *Am J Sports Med*. Sep 2014;42(9):2089-2094.
 107. Holt T, Oliver GD. Hip and upper extremity kinematics in youth baseball pitchers. *Journal of sports sciences*. 2016;34(9):856-861.
 108. Kageyama M, Sugiyama T, Takai Y, Kanehisa H, Maeda A. Kinematic and Kinetic Profiles of Trunk and Lower Limbs during Baseball Pitching in Collegiate Pitchers. *Journal of sports science & medicine*. Dec 2014;13(4):742-750.
 109. Meister K, Day T, Horodyski M, Kaminski TW, Wasik MP, Tillman S. Rotational motion changes in the glenohumeral joint of the adolescent/Little League baseball player. *Am J Sports Med*. May 2005;33(5):693-698.
 110. Downar JM, Sauers EL. Clinical Measures of Shoulder Mobility in the Professional Baseball Player. *J Athl Train*. Jan-Mar 2005;40(1):23-29.
 111. Meyer KEKE. Three-dimensional scapular kinematics during the throwing motion. *Journal of applied biomechanics*. 02 2008;24(1):24-34.
 112. Escamilla RF, Andrews JR. Shoulder muscle recruitment patterns and related biomechanics during upper extremity sports. *Sports Med*.

- 2009;39(7):569-590.
113. Escamilla RF. Shoulder Muscle Recruitment Patterns and Related Biomechanics during Upper Extremity Sports. *Sports medicine (Auckland)*. 07 2009;39(7):569-590.
 114. Hirashima M, Yamane K, Nakamura Y, Ohtsuki T. Kinetic chain of overarm throwing in terms of joint rotations revealed by induced acceleration analysis. *Journal of Biomechanics*. 2008/09/18/ 2008;41(13):2874-2883.
 115. Werner SL, Gill TJ, Murray TA, Cook TD, Hawkins RJ. Relationships between throwing mechanics and shoulder distraction in professional baseball pitchers. *Am J Sports Med*. May-Jun 2001;29(3):354-358.
 116. Ludewig PM, Cook TM, Nawoczenski DA. Three-dimensional scapular orientation and muscle activity at selected positions of humeral elevation. *J Orthop Sports Phys Ther*. Aug 1996;24(2):57-65.
 117. Myers JB. Scapular position and orientation in throwing athletes. *Am J Sports Med*. 02 2005;33(2):263-271.