

上肢への外的負荷が上肢挙上および降下時における 肩甲骨の3次元運動に与える影響

Effect of External Load on Three-dimensional Scapular Orientation
during Humeral Elevation and Lowering in the Scapular Plane

井上 恒 (早稲田大学大学院人間科学研究科)
矢内 利政 (早稲田大学スポーツ科学学術院)
鈴木 秀次 (早稲田大学人間科学学術院)

I 緒言

上肢の挙上および降下において、肩甲骨の回転は必要不可欠である。Inman et al. (1944) が報告したように、上腕を下垂位の状態から挙上していく過程において、肩甲骨の上方回旋は上腕の挙上に対して低挙上位から連続的に貢献している。また、Johnson et al. (1993) の報告に示されているように、単純な肩関節外転動作（前額面での上腕挙上）においても肩甲骨の姿勢は上方回旋だけでなく3次元的に複雑に変化する。このような肩甲骨と上腕骨の協調的な動きは日常生活やスポーツ活動での上肢の運動においても重要であり (Amasay and Karduna, 2009; Bourne et al., 2007; Meyer et al., 2008; Miyashita et al., 2010; Rundquist et al., 2009; Sheikhzadeh et al., 2008)、肩に障害のある患者では肩甲骨の動きが健常者と異なると報告されている (Borstad and Ludewig, 2002; Lukasiewicz et al., 1999; Ludewig et al., 2000)。しかし、このような差が現れるメカニズムについては未だ明確にされていない部分が多い。それには、Codman (1934) によって導入された「肩甲骨上腕リズム」という概念に代表されるような肩甲骨と上腕骨の動作の協調性が、健常者においても、上腕の動作速度や外的負荷に対してどのような性質を持っているか十分に明らかになっていないことが原因の一つに挙げられる。

これまで、肩甲骨上腕リズムのような肩甲骨の機能については、上腕の動作速度や外的負荷を変化させることで検討されてきている。動作速度に関しては、X線による上方回旋を対象にした研究があり (de Groot et al., 1998; Michiels and Grevenstein, 1995; Sugamoto et al., 2002)、電磁ゴニオメータを用いたものでは、肩甲骨の3次元運動の観察をした Fayad et al. (2006) の研究がある。Sugamoto et al. (2002) 以外のこれらの研究では、統計的な有意差が

あった場合でもその差は無視できるくらい小さく、動作速度は肩甲骨の動きに意味のある影響を与えないと結論付けられている。また、外的負荷に関しては、X線や電磁ゴニオメータによる上方回旋を対象とした研究がある (Kon et al., 2008; Michiels and Grevenstein, 1995; McQuade and Smidt, 1998)。3次元評価としては電磁ゴニオメータを用いて de Groot et al. (1999) や Pascoal et al. (2000) が静的な姿勢を検討した。これらの研究では、外的負荷の程度や測定および評価方法によって肩甲骨の方位や運動が影響を受けるかどうかの結論は分かれ、統一した見解は導かれていない。いずれにしても、日常生活やスポーツ活動における上肢の動作の多くは動的なものであり、肩甲骨は3次元的に運動する。したがって、外的負荷においても3次元かつ動的な影響を検討することの必要性は高い。

先行研究における肩甲骨の動きに関する研究では、上腕の挙上に関するものが大半を占めており、降下に関する研究の数は限られている。しかし、外的負荷のない状態では挙上時と降下時に肩甲骨の動きに差は小さいが存在するとの報告がある (Bourne et al., 2007; McClure et al., 2001)。さらに、Borstad and Ludewig (2002) は肩に障害のある患者は上腕の挙上時よりも降下時に疼痛を訴えるとして述べており、降下時の肩甲骨の機能解明もまた重要であると考えられる。以上のことから、本研究の目的は、上肢への外的負荷が上肢挙上および降下時の肩甲骨3次元運動に与える影響を検討することとした。

II 方法

1. 実験参加者

右肩に既往歴のない健常な成人男性13名 (平均±標準偏差：年齢 22.9 ± 2.4 歳、身長 1.73 ± 0.04 m、体重 67.2

$\pm 12.9\text{kg}$) が本研究に参加した。参加者には、文章および口頭で実験の目的、方法、安全性等を十分に説明した上で、実験参加の同意を得た。なお、本研究は早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理委員会」の承認を受けて行われた。

2. 実験手順

右上肢の肩甲骨、上腕骨、胸郭の動きを電磁ゴニオメータ (Liberty, Polhemus 社製) を用いて計測した。トランスミッター (磁界発生装置, TX2 Source - Standard 2 inch) は実験参加者が座る椅子の後方 (約 10cm) に設置し、磁気センサー (RX2 Receiver - Standard) は両面テープで肩峰、上腕、胸骨、に貼付した。ペン型センサー (Stylus - 8 inch) を用いて各骨特徴点と各センサーの相対的な位置を記録し、移動座標系を胸郭、肩甲骨、上腕骨に設定した (図1)。これらの座標系の設定は国際バイオメカニクス学会が推奨する基準 (Wu et al., 2005) に基づいて行われた (図1)。

外的負荷に使用したウェイトディスクは金属製のため、電磁ゴニオメータの測定に影響することが懸念された。そのため、実験時のトランスミッター、センサー、ウェイトディスクの位置関係を模した環境でウェイトディスク (2.5kg : H-9150, 5.0kg : H-9155, TOEI LIGHT 社製)

の影響を確認した結果、誤差は 0.02° 以下であった。

実験参加者が行う運動課題は、3種類の外的負荷条件の下、肩甲骨面 (前額面より 30° 前方) での上肢挙上および降下とした。上肢挙上および降下動作は肘を完全伸展の状態で行い、掌の方向が動作面と同じになるようにした。外的負荷としてウェイトディスク (ディスクなし, 2.5kg, 5.0kg) を使用し、ウェイトディスクは握らなくても保持できるように、掌にマジックテープで固定した。運動課題は全て両側同時に行い、試技中は肩甲骨の動きを妨げない背もたれのある木製椅子に腰かけて試技を行った。動作時間はメトロノームを用いて調整し、挙上を約 6 秒 (100bpm で 10 拍)、最挙上位での静止を約 1.8 秒 (3 拍)、降下を約 6 秒 (100bpm で 10 拍) で行った。以下の条件を満たしたものを成功試技として採用した。① 9 拍以上 11 拍未満でスムーズに挙上および降下を行っていること、② 左右対称に動作を行っていること、③ 体幹に捻り等の動きが生じていないことであった。十分な練習の後、成功試技が 3 回になるまで行った。試技を行う際の外的負荷条件の順番は無作為に行った。

3. データ解析及び統計処理

電磁ゴニオメータを用いて胸郭および右側の肩甲骨と上腕骨の動作を 240Hz で記録した。国際バイオメカニク

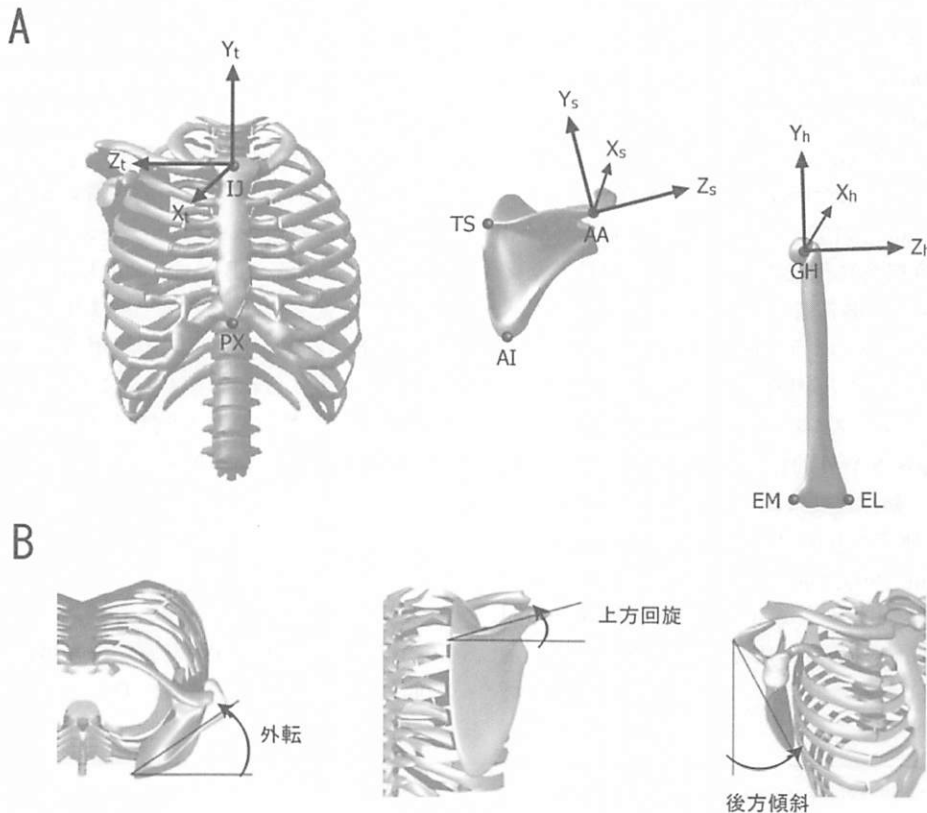


図1 座標系の設定(A)および肩甲骨の方位(B)

ス学会推奨のオイラー角の基準 (Wu et al., 2005) で肩甲骨と上腕骨の3次元姿勢を表記した。肩甲骨の姿勢を表すオイラー角は、胸郭と肩甲骨の座標系が一致している状態から、第1の回転をYt軸周りの回転、第2の回転をXs軸周りの回転、第3の回転をZs軸周りの回転とした。この第1の回転を外転角、第2の回転を上方回旋角、第3の回転を後方傾斜角とした (図1)。また、上腕骨の姿勢を表すオイラー角は、胸郭と上腕骨の座標系が一致している状態から、第1の回転をYt軸周りの回転、第2の回転をXh軸周りの回転、第3の回転をYh軸周りの回転とした。この第2の回転を挙上位とした (図1)。本研究におけるオイラー角の定義では、肩甲骨の上方回旋は負の値として算出されるため、-1をかけて正の値にした。得られたデータは6Hzの遮断周波数で4次のバターワースフィルターを用いて、位相ずれの無いように平滑化した。Karduna et al. (2001) によって上腕骨の挙上位が120°以下の場合、肩峰に貼付したセンサーによる計測の妥当性が確かめられている。そのため、本研究では肩甲骨の方位は上腕の挙上位が20°から120°の20°毎で解析した。さらに、オイラー角の各成分の変化量を挙上位が20°から120°の20°毎の5段階の区間において算出した。

肩甲骨の方位を表す外転角、上方回旋角、後方傾斜角とそれぞれの変化量を従属変数として、外的負荷 (3) × 挙上位 (6又は5) × 局面 (挙上・降下) (2) の3元配置分散分析を行った。外的負荷および局面に影響がみられた場合、Bonferroniの方法で多重比較を行った。全ての統計的検定の有意性は危険率5%未満で判定した。

III 結果

1. 方位 (オイラー角)

a) 外転角

分散分析の結果、外的負荷の影響は統計的に有意ではなかった。挙上、降下の局面と挙上位には交互作用がみられた ($p < 0.001$)。多重比較の結果、挙上位120°と100°以外の挙上位では局面による統計的有意差がみられた (図2)。降下時の挙上位20°で外転角が $4.2 \pm 4.0^\circ$ (平均 ± 標準偏差) 減少していた。

b) 上方回旋角

外的負荷 × 挙上位 × 局面の交互作用があり ($p < 0.001$)、局面によって外的負荷と挙上位の交互作用のパターンが異なることが示された (図2)。挙上時にはみられなかったが、降下時には外的負荷なしよりも5.0kgの方が挙上位20°で上方回旋角が $5.9 \pm 2.5^\circ$ 減少した。また、挙上位60°と40°では外的負荷に伴う局面の差がみられ、その差は外的負荷5.0kgにおける挙上位40°で降下時に $4.8 \pm 3.6^\circ$ 減少していた。

c) 後方傾斜角

外的負荷 × 挙上位 × 局面の交互作用 ($p < 0.001$) があった (図2)。挙上時は外的負荷の増大に伴い高挙上位で後方傾斜角の減少がみられ、挙上位100°で外的負荷なしよりも5.0kgの方が $4.6 \pm 1.8^\circ$ 減少していた。また、降下時は、外的負荷によってほぼ一定の後方傾斜角の減少がみられた。

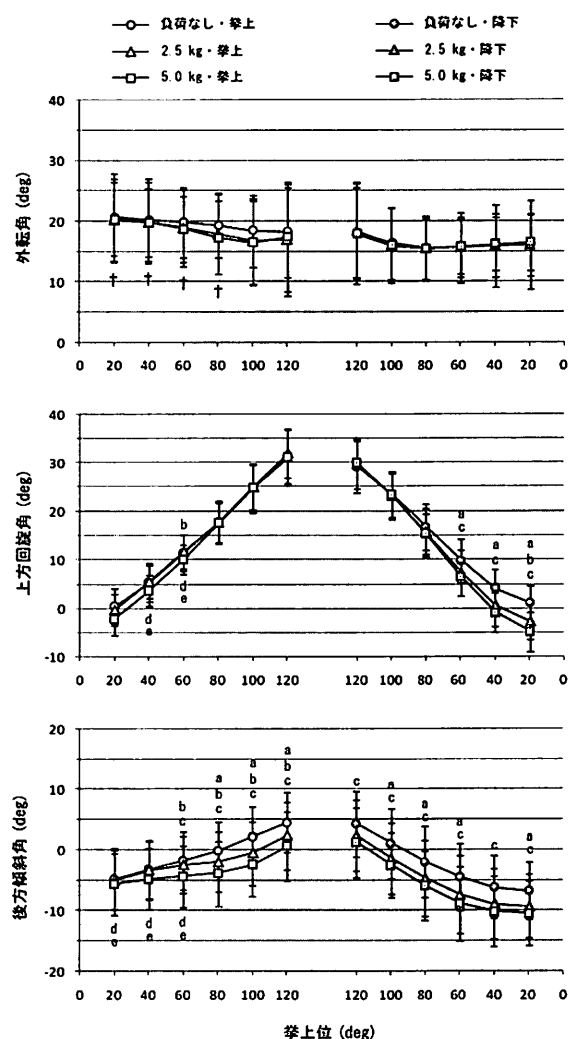


図2 上腕挙上および降下時の肩甲骨の方位
平均および標準偏差。†は外転角における局面間の差を表す。aは負荷なしと2.5kg、bは2.5kgと5.0kg、cは負荷なしと5.0kgの差を表す。dは2.5kg、eは5.0kgの局面間の差を表す。

2. オイラー角の各成分の変化量

a) 外転角

挙上位 × 局面に交互作用 ($p = 0.01$) があったが、外的負荷の影響は有意ではなかった (図3)。挙上位80-100°と100-120°の外転角の変化量に局面の差がみられた。

b) 上方回旋角

外的負荷 × 局面 ($p < 0.001$) と挙上位 × 局面 ($p < 0.001$) に交互作用がみられた。挙上時は挙上位60-80°に

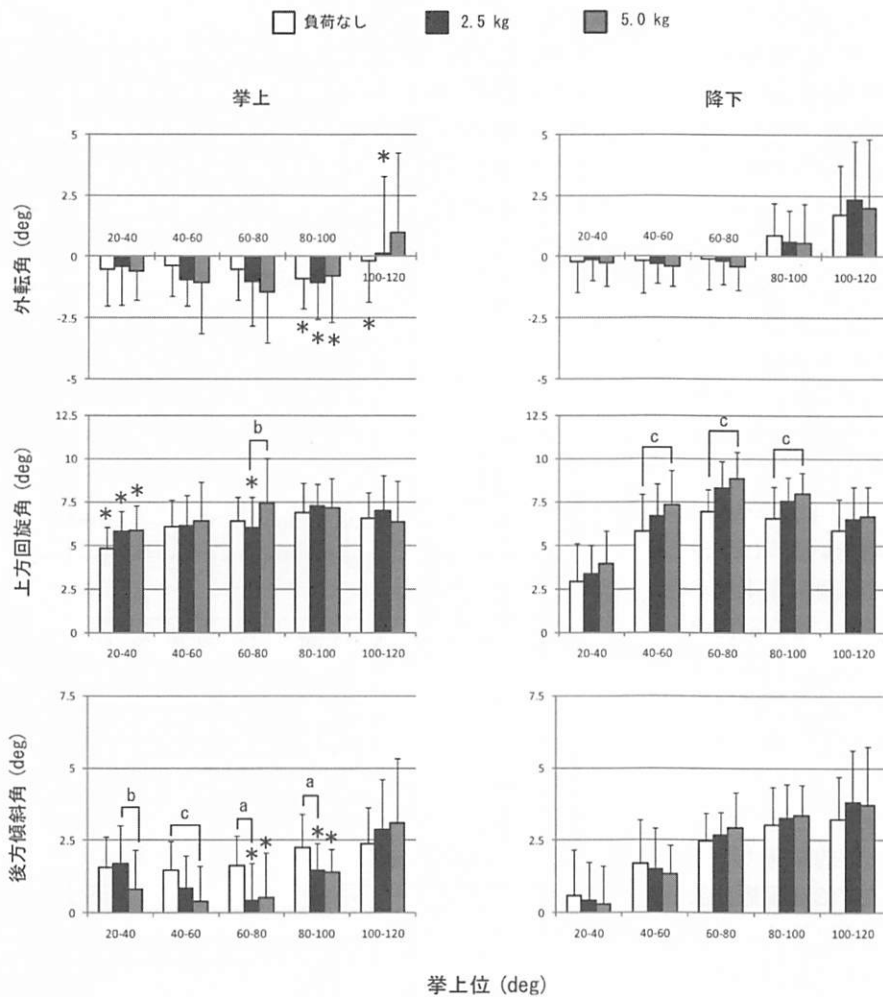


図3 オイラー角の各成分の変化量

平均および標準偏差。aは負荷なしと2.5kg、bは2.5kgと5.0kg、cは負荷なしと5.0kgの差を表す。

*は局面間の差を表す。

のみ外的負荷による上方回旋角の変化量の増大があったが、降下時では挙上位40-60°～80-100°に増大がみられた。上方回旋角に差が現れるよりも前に変化量の差が現れた。

c) 後方傾斜角

外的負荷×挙上位×局面の交互作用があり ($p = 0.04$)、局面によって外的負荷と挙上位の交互作用のパターンが異なることが示された(図3)。挙上時は挙上位20-40°～80-100°に負荷による変化量の減少がみられた。降下時では負荷による差はなかったが、挙上位60-80°と80-100°に挙上時よりも負荷による変化量の増大がみられた。

IV 考察

本研究の目的は、上肢への外的負荷が上腕挙上および降下時の肩甲骨3次元運動に与える影響を検討することであった。上腕挙上時では外的負荷により肩甲骨の後方

傾斜の変化量が減少し、それに伴い、高挙上位で後方傾斜角が減少した。また、降下時では外的負荷によるほぼ一定の後方傾斜角の減少が観察された。さらに、低挙上位で外的負荷の増加に伴い上方回旋角の減少がみられ、これよりも高い挙上位で外的負荷により下方回旋量が増大していた。以上のように、本研究において肩甲骨の3次元運動に対する外的負荷の影響が検討され、外的負荷や動作局面によって3次元的に変化する肩甲骨腕リズムが観察された。

挙上時に後方傾斜角に外的負荷の影響が最も顕著にあらわれたのは挙上位100°のときであった。肩甲骨は僧帽筋上部や肩鎖靱帯、烏口鎖骨靱帯等に吊られるように存在している(Inman et al., 1944)。外的負荷が増加した上腕挙上では、外転筋群の活動増加に起因する圧縮力が肩甲骨腕関節に作用すると考えられるが³⁾(van der Helm, 1994)、関節窩が肩甲骨面に対して前方に向いているため、この圧縮力が肩甲骨の前方傾斜モーメントを生じさせると考えられる。重力方

向の力が最大に作用する姿勢であるため、この前傾モーメントが最大になるのは挙上位90°付近であると考えられる。さらに烏口突起に起始を持つ烏口腕筋や上腕二頭筋短頭は肩関節屈曲に作用するモーメントアームを持っている(Itoi et al., 2004; van der Helm, 1994)。これらの筋に活動があれば肩甲骨に前方傾斜モーメントが生じる可能性があり、前方傾斜モーメントは外的負荷によって増大する。外的負荷によって肩甲骨の後方傾斜角やその変化量が減少したことは、この前傾モーメントを打ち消すのに十分な後方傾斜モーメントが生み出せなかった可能性がある。肩甲骨の回転は複数の筋の協調的な作用でもたらされる(Bagg and Forrest, 1986)。Ludewig et al. (2000)の報告から、僧帽筋下部や前鋸筋の活動が肩甲骨の後方傾斜モーメントの産出には必要であると示唆される。しかし、前方傾斜モーメントを生み出すのに貢献するであろう、僧帽筋上部や三角筋が外的負荷の増大に比較的応答しやすいのに対し(Alpert et al., 2000)、僧帽筋下部や前鋸筋は応

答しにくい (Ludewig et al., 2000). それは、前鋸筋や僧帽筋下部の大きな活動にはある程度の上腕の挙上が必要なことや (Ekstrom et al., 2003), それらの筋の随意的な制御は上肢が低挙上位にある場合では難しいことが原因として考えられる (Holtermann et al., 2010). 本実験の結果において、外的負荷により後方傾斜の変化量が最も減少しているのは挙上位 60-80° であった。筋によって生じる後方傾斜モーメントから外的負荷によって生じる前方傾斜モーメントを差し引いた場合、もっとも小さくなるのが挙上位 60-80° だったと考えられる。その結果生じる後方傾斜角の減少は、外的負荷の増大に伴い大きくなった。これは肩甲帯の関連筋群の機能および制御の特徴が外的負荷により顕在化したと示唆される。

de Groot et al. (1999) は前額面での挙上における肩甲骨の方位を静的に検討しているが、そこでは外的負荷の影響はみられなかった。上腕の挙上によって肩甲骨に生じると考えられる前方傾斜モーメントは、上腕の挙上により前方 (屈曲) に向かうと大きくなり、側方 (外転) では小さくなると推察される。したがって、動的と静的の違いがあり、単純な比較は難しいが、上肢を挙上する方向は前方傾斜モーメントの大きさに関係する可能性がある。

短縮性と伸張性では協働筋群の活動のパターンが異なるという報告 (Nakazawa et al., 1993) や、僧帽筋上部、三角筋、前鋸筋の協調性に挙上と降下で違いがあるとの報告がある (Faria et al., 2009). 本実験での上肢挙上と降下における肩甲骨の動きの違いにも同様の現象が肩甲帯の筋群で起こったと考えられ、本実験における挙上時と降下時の姿勢や変化量の差は、各筋の発揮している張力が挙上時と降下時で異なる可能性が示唆される。そして、降下時の上方回旋角の減少に関しては、僧帽筋や前鋸筋よりも三角筋の張力発揮に有利な条件で降下した可能性が示唆される。肩甲骨に対して 60° 程度外転しているときの三角筋の外転トルクおよびモーメントアームは最大付近に達する (Otis et al., 1994; Yanagawa et al., 2008) ことが知られており、本実験の挙上位 80° 付近の上方回旋角とその変化量は上記の可能性を十分示している。さらに、Fayad et al. (2006) の報告によると、挙上位 90° 以下で上肢降下時に静的挙上に差がある。本実験では、静的な挙上は測定していないが、方位に局面間の差があったのは全て挙上位 80° 以下であった。後方傾斜角の変化量は降下時の挙上位 60-80° および 80-100° で外的負荷によって挙上時よりも増加している (図 3)。これらのことから、肩甲帯の筋群の協調的機能に顕著な違いが生じてくるのは挙上位 80° 以下であることが示唆された。随意的な制御が難しい前鋸筋等を伸張性に制御しなければならないことが原因として推測される (Holtermann et al., 2010)。また、外転角に局面の差が生じたのも同様の原因と考えられる。

僧帽筋上部や中部の作用が前鋸筋や僧帽筋後部よりも相対的に大きくなったと推測される。

V まとめ

本研究の目的は、上肢への外的負荷が上腕挙上および降下時の肩甲骨3次元運動に与える影響を検討することであった。上腕挙上時では外的負荷により肩甲骨の後方傾斜の変化量が減少し、それに伴い、高挙上位で後方傾斜角が減少した。また、降下時では外的負荷によるほぼ一定の後方傾斜角の減少が観察された。さらに、低挙上位で外的負荷の増加に伴い上方回旋角の減少がみられ、これよりも高い挙上位で外的負荷により下方回旋量が増大していた。以上のように、本研究において肩甲骨の3次元運動に対する外的負荷の影響が検討され、外的負荷や動作局面によって3次元的に変化する肩甲上腕リズムが観察された。また、低挙上位での上方回旋の減少から、肩甲上腕関節の主働筋の張力発揮を優位にして上腕降下を行うような関連筋群の協調作用があった可能性が示唆された。

引用文献

- Alpert, S.W., Pink, M.M., Jobe, F.W., McMahon, P.J., and Mathiyakom, W. (2000) Electromyographic analysis of deltoid and rotator cuff function under varying loads and speeds. *J. Shoulder Elbow Surg.*, 9: 47-58.
- Amasay, T. and Karduna, A.R. (2009) Scapular kinematics in constrained and functional upper extremity movements. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 39: 618-627.
- Bagg, S.D. and Forrest, W.J. (1986) Electromyographic study of the scapular rotators during arm abduction in the scapular plane. *Am. J. Phys. Med.*, 65: 11-124.
- Borstad, J.D. and Ludewig, P.M. (2002) Comparison of scapular kinematics between elevation and lowering of the arm in the scapular plane. *Clin. Biomech.*, 17: 650-659.
- Bourne, D.A., Choo, A.M.T., Regan, W.D., MacIntyre, D.L., and Oxland, T.R. (2007) Three-dimensional rotation of the scapula during functional movements: An in vivo study in healthy volunteers. *J. Shoulder Elbow Surg.*, 16: 150-162.
- Codman E.A. (1934) *The shoulder*. Thomas Todd: Boston, pp. 32-64.
- de Groot, J.H., Valstar, E.R., and Arwert, H.J. (1998) Velocity effects on the scapulo-humeral rhythm. *Clin. Biomech.*, 13: 593-602.
- de Groot, J.H., van Woensel, W., and van der Helm, F.C. (1999) Effect of different arm loads on the position of the scapula in abduction postures. *Clin. Biomech.*, 14: 309-314.

- Ekstrom, R.A., Donatelli, R.A., and Soderberg, G.L. (2003). Surface electromyographic analysis of exercises for the trapezius and serratus anterior muscles. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 33: 247-258.
- Faria, C.D.C.d.M., Teixeira-Salmela, L.F., and Gomes, P.F. (2009) Applicability of the coactivation method in assessing synergies of the scapular stabilizing muscles. *J. Shoulder Elbow Surg.*, 18: 764-772.
- Fayad, F., Hoffmann, G., Hanneton, S., Yazbeck, C., Lefevre-colau, M.M., Poiraudau, S., Revel, M., and Roby-Brami, A. (2006) 3-D scapular kinematics during arm elevation: effect of motion velocity. *Clin. Biomech.*, 21: 932-941.
- Holtermann, A., Mork, P.J., Andersen, L.L., Olsen, H.B., and Søgaard, K. (2010) The use of EMG biofeedback for learning of selective activation of intra-muscular parts within the serratus anterior muscle. A novel approach for rehabilitation of scapular muscle imbalance. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 20: 359-365.
- Inman, V.T., Saunders, J.B., and Abbott, L.C. (1944) Observations on the function of the shoulder joint. *J. Bone Joint Surg. Am.*, 16: 1-30.
- Itoi, E., Lee, S.-B., Berglund, L.J., Schultz, F.M., Neale, P.G., and An, K.-N. (2008) Moment arms of the arm muscles at the glenohumeral joint using the tendon excursion method. *J. Musculoskelet. Res.*, 11: 45-53.
- Johnson, G.R., Stuart, P.R., and Mitchell, S. (1993) A method for the measurement of three-dimensional scapular movement. *Clin. Biomech.*, 8: 269-273.
- Karduna, A.R., McClure, P.W., Michener, L.A., and Sennett, B. (2001) Dynamic measurements of three-dimensional scapular kinematics: a validation study. *J. Biomech. Eng.*, 123: 184-190.
- Kon, Y., Nishinaka, N., Gamada, K., Tsutusi, H., and Banks, S.A. (2008) The influence of handheld weight on the scapulo-humeral rhythm. *J. Shoulder Elbow Surg.*, 17: 943-946.
- Ludewig P. M. and Cook T.M. (2000) Alterations in shoulder kinematics and associated muscle activity in people with symptoms of shoulder impingement. *Phys. Ther.*, 80: 276-291.
- Lukasiewicz A. C., McClure P., Michener L., Pratt N., and Sennett B. (1999) Comparison of 3-dimensional scapular position and orientation between subjects with and without shoulder impingement. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 29: 574-586.
- McClure, P.W., Michener, L.A., Sennett, B.J., and Karduna, A.R. (2001) Direct 3-dimensional measurement of scapular kinematics during dynamic movements in vivo. *J. Shoulder Elbow Surg.*, 10: 269-277.
- McQuade K.J. and Smidt G.L. (1998) Dynamic scapulohumeral rhythm: the effects of external resistance during elevation of the arm in the scapular plane. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 27: 125-133.
- Meyer, K.E., Saether, E.E., Soiney, E.K., Shebeck, M.S., Paddock, K.L., and Ludewig, P.M. (2008) Three-dimensional scapular kinematics during the throwing motion. *J. Appl. Biomech.*, 24: 24-34.
- Michiels, I. and Grevenstein, J. (1995) Kinematics of shoulder abduction in the scapular plane. On the influence of abduction velocity and external load. *Clin. Biomech.*, 10: 137-143.
- Miyashita, K., Kobayashi, H., Koshida, S., and Urabe, Y. (2010) Glenohumeral, scapular, and thoracic angles at maximum shoulder external rotation in throwing. *Am. J. Sports Med.*, 38: 363-368.
- Nakazawa, K., Kawakami, Y., Fukunaga, T., Yano, H., and Miyashita, M. (1993) Differences in activation patterns in elbow flexor muscles during isometric, concentric and eccentric contractions. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 66: 214-220.
- Otis, J.C., Jiang, C.-C., Wickiewicz, T.L., Peterson, M.G.E., Warren, R.F., and Santner, T.J. (1994) Changes in the moment arms of the rotator cuff and deltoid muscles with abduction and rotation. *J. Bone Joint Surg. Am.*, 76: 667-676.
- Pascoal, A.G., van der Helm, F.F.C.T., Pezarat Correia, P., and Carita, I. (2000) Effects of different arm external loads on the scapulo-humeral rhythm. *Clin. Biomech.*, 15 (SUPPL. 1): S21-S24.
- Rundquist, P.J., Obrecht, C., and Woodruff, L. (2009) Three-dimensional shoulder kinematics to complete activities of daily living. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, 88: 623-629.
- Sheikhzadeh, A., Yoon, J., Pinto, V.J., and Kwon, Y.W. (2008) Three-dimensional motion of the scapula and shoulder during activities of daily living. *J. Bone Joint Surg. Am.*, 17: 936-942.
- Sugamoto, K., Harada, T., Machida, A., Inui, H., Miyamoto, T., Takeuchi, E., Yoshikawa, H., and Ochi, T. (2002) Scapulo-humeral rhythm: relationship between motion velocity and rhythm. *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 401: 119-124.
- van der Helm, F.C.T. (1994) Analysis of the kinematic and dynamic behavior of the shoulder mechanism. *J. Biomech.*, 27: 527-550.
- Wu, G., van der Helm, F.C.T., Veeger, H.E.J., Makhsous, M., Van Roy, P., Anglin, C., Nagels, J., Karduna, A.R., McQuade, K., Wang, X., Werner, F.W., and Buchholz, B. (2005) 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. J. Biomech., 38: 981-992.

Yanagawa, T., Goodwin, C.J., Shelburne, K.B., Giphart, J.E., Torry, M.R., and Pandy, M.G. (2008) Contributions of the individual muscles of the shoulder to glenohumeral joint stability during abduction. J. Biomech. Eng., 130 (2), art. no. 021024.

連絡責任者

住所：埼玉県所沢市三ヶ島2-579-15

早稲田大学人間科学研究科

運動制御・バイオメカニクス研究室

氏名：井上 恒

メールアドレス：k.inoue@ruri.waseda.jp