

[原 著]

MRIを用いた回旋腱板筋の筋体積の評価

長谷川 伸*

Assessment of rotator cuff muscle volumes using magnetic resonance imaging

Shin HASEGAWA*

Abstract

The purpose of this study was to compare three methods for estimation of rotator cuff muscle volumes.

We performed MR scans of 30 shoulders and determined the cross-sectional areas of rotator cuff muscles with three methods. In Method 1, the cross-sections were determined on a single image (Y-shaped image). In Method 2, the cross-sections were calculated from two images: Y-shaped image and an image located medially, twice the distance from the glenoid articular surface compared to the Y-shaped image. In Method 3, the cross-sections were calculated from three images at the borderline of the lateral fourth, at midpoint, and at the medial fourth of the muscle. We compared the results of these three methods with the volume of the multiple MRI image reconstruction.

Pearson's correlation coefficient for Method 1 were 0.569, 0.823, 0.748, for Method 2, 0.855, 0.907, 0.817 and Method 3, 0.894, 0.930, 0.820 for the supraspinatus, infraspinatus/teres minor and subscapularis muscle volume when compared with the volumes determined by the multiple image reconstruction method. The Bland-Altman method showed better agreement with multiple MRI image reconstruction, using Method 3, to determine supraspinatus, infraspinatus/teres minor, and subscapularis muscle volumes.

All methods can be used for quantitative assessment of rotator cuff muscle volumes. However Method 3 is more accurate for the evaluation of supraspinatus, infraspinatus/teres minor and subscapularis muscle.

KEY WORDS: rotator cuff muscle, muscle volume, MRI.

*九州共立大学スポーツ学部

*Kyushu Kyoritsu University Faculty of Sports
Science

1. 緒言

腱板断裂による筋萎縮やトレーニングによる筋肥大など回旋腱板筋を対象とした筋量の評価がMR画像を用いて行なわれている。回旋腱板筋の筋体積を最も正確に測定するためにはMR法により撮影された起始から停止までの筋断面積を3次的に再構築する方法が用いられ^{1, 2, 3)}、その際にスライス厚、スライス間隔は薄く設定することによりも妥当性の高い測定ができるとされている^{1, 2)}。

一方で、スライス厚やスライス間隔を薄くすることはスライス枚数を増やすことにつながり、筋体積の算出に要する時間を増大させることから、簡易で時間がかからず、しかも正確に筋体積を求める方法が検討されている^{2, 3)}。

Thomazeauら⁴⁾は斜位矢状面において肩甲棘が烏口突起と接し「Y」字型を示す画像のうち最も外側のもをY-shaped positionと呼び、同部位における筋断面積から棘上窩における棘上筋の占有率を求め、棘上筋の筋萎縮の評価を行った。また、同研究ではY-shaped positionでは再現性の高い測定ができることが示されている。また、Zanettiら⁵⁾はY-shaped positionにおける棘下筋・小円筋と肩甲下筋の筋断面積に関する研究を行なっている。しかし、これら2つはいずれも筋断面積を対象とした研究であり、筋体積については検討されていない。

MR法を用いた回旋腱板筋の筋体積の算出法についてはTingartら¹⁾により検討されており、10体の屍体を用いた研究からMR法の妥当性と再現性は高いことが報告されている。Lehtinenら²⁾は屍体を用いた研究によりY-shaped positionの1枚だけの画像における棘上筋、棘下筋・小円筋、肩甲下筋の筋断面積と筋体積の相関を求めるとともに、Y-shaped positionとさらに内側の画像の2枚を用いた方法から筋体積との相関について検討を行っている。どちらの方法ともに回旋腱板筋の筋体積の評価に用いることはできるが、2枚の画像を用いた場合の方が棘上筋、棘下筋・小円筋、肩甲下筋の筋体積をより正確に求めることができると報告している。また、Juul-Kristensenら³⁾は棘上筋、棘下筋・小円筋、肩甲下筋の筋長の25%、50%、75%の3枚の画像の筋断面積と筋長から筋体積の推定を行なっている。

これまでにさまざまな回旋腱板筋に関する筋体積の推定法が検討されているが、いずれも推定式は示されていない。本研究ではゴールドスタンダードとされて

いる筋体積と先行研究にみられる筋体積の推定法を比較し、最も妥当性の高い方法について検討することを目的とした。

2. 方法

1) 被験者

被験者は肩関節に既往歴をもたない成人男性15名(平均年齢 25.3 ± 3.2 歳、平均身長 172.4 ± 5.6 cm、平均体重 69.7 ± 8.6 kg)である。全ての被験者には事前に本研究の主旨、安全性について十分に説明し、実験参加の同意を得た。なお、本研究は早稲田大学スポーツ科学学術院研究倫理委員会の承認を得て実施した。

2) 筋体積の測定

筋断面積の撮影には1.5TのMRI (Signa, GE社)を用いた。被験者の測定姿勢は仰臥位とし、肩関節内転位、回旋中間位をとらせた。撮像範囲は肩上部(肩峰上皮表面)から肩甲骨下角まで、さらに肩外側から肩甲骨内側縁までとした。

MRI撮影は両肩を片方ずつ行い、水平断面像において上腕骨頭の中心から関節窩中央、肩甲棘内側縁を通る線を設定し、これに直交する斜位矢状面を決定した後、肩甲棘内側縁より外側方向へスライス厚5 mm、スライス間隔0 mmの連続的なT1強調画像(TR: 500 msec, TE: 15 msec, matrix: 256×256 ピクセル, field of view : 25cm)を取得した。本研究において解析の対象としたのは被験者15名の両側の肩(計30肩)であり、スライス枚数は被験者により異なるがいずれも23~31枚の範囲であった。

撮影された画像はDICOMファイル形式で解析用コンピュータに取り込み、画像解析ソフト(MEDx, エルエイシステムズ)を用いて、棘上筋、棘下筋・小円筋、肩甲下筋の輪郭をトレースすることにより筋断面積を算出した。その際、画像上において棘下筋と小円筋の両筋を起始部から停止部まで明確に区別することが困難であることから、先行研究^{2, 3)}と同様に1つの筋として分析した。

各筋の筋体積は各スライスの筋断面積とスライス厚(0.5cm)の積を起始部から停止部まで合算することにより求めた。全スライスから算出した筋体積はそれぞれの筋の基準値として扱い、以下に示す方法1から方法3により求められた筋体積との比較に用いられた。

3) 筋体積の推定法

本研究において比較する回旋腱板筋の筋体積の推定法は以下の3通りである。

方法1 [Thomazeauら⁴⁾の方法]: 斜位矢状断面において肩甲骨の肩甲棘が鳥口突起と接しY型を形成するスライス (Y-shaped image) のうち最も内側に位置する1スライスの筋断面積から筋体積を推定する方法 (Fig1-A)。

方法2 [Lehtinenら²⁾の方法] 上記のY-shaped imageと同画像と関節窩までの距離の2倍の位置の画像の2つのスライスの筋断面積合計から筋体積を推定する方法 (Fig1-1, 2)。

方法3 [Juul-Kristensenら³⁾の方法]: 棘上筋, 棘下筋・小円筋, 肩甲下筋の各筋の筋長の25%, 50%, 75%の3部位のスライスにおける筋断面積合計から筋体積を推定する方法 (Fig1-C, D, E)。

方法1では1スライスの筋断面積, 方法2では2スライスの筋断面積の合算値, 方法3では3スライスの筋断面積の合算値と筋体積の基準値との単回帰式を求めた。

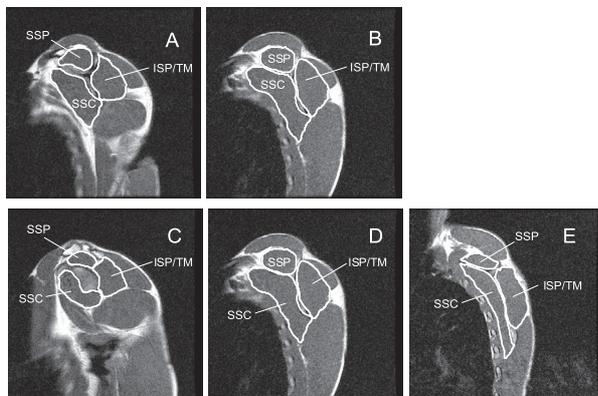


Fig. 1. An example of a sagittal-oblique shoulder MRI scan.

A : Y-shaped position (Method 1), B : More medial from Y-shaped position (Method 2),
C : Lateral 1/4 (Method 3), D : Mid 1/2 (Method 3), E : Medial 1/4 (Method 3)
SSP : Supraspinatus, ISP/TM : Infraspinatus and teres minor,
SSC : Subscapularis

4) 統計処理

各測定値は平均値と標準偏差で示した。全てのスライスから求めた筋体積の基準値と方法1~3により求められた筋断面積 (方法2, 方法3については合計) から, 筋断面積を独立変数, 筋体積を従属変数とする回帰式を求めた。また, 方法1~3により求められた筋体積と基準値の間の一致性についてはブランド・アルトマン法による分析を行なった。なお, 有意水準は

$p < 0.05$ とし, 全ての統計処理には統計ソフトウェア (StatView for Windows) を用いて行なった。

3. 結果

Y-shape positionを基準とした各スライスの棘上筋 (SSP), 棘下筋・小円筋 (ISP/TM), 肩甲下筋 (SSC) における筋断面積をFig.2に示した。各筋の最大筋断面積が示される部位 (筋腹部) は棘上筋では内側 1.3 ± 0.6 cm, 棘下筋・小円筋では内側 2.6 ± 0.8 cm, 肩甲下筋では内側 1.3 ± 0.6 cmであり, いずれの筋においても筋腹部はY-shaped positionよりも内側に位置していた。

また, 各測定方法において分析に用いられたスライスの位置について見てみると, 方法2で用いられた関節窩とY-shaped positionの距離の2倍のスライス (Fig1-B) はY-shape positionから内側 2.3 ± 0.2 cmに位置し, 棘上筋, 肩甲下筋では筋腹部よりも内側, 棘下筋・小円筋では筋腹部に位置していた。

方法3で用いた筋長の25%, 50%, 75%のスライスは, 棘上筋では外側 1.9 ± 0.5 cm, 内側 1.1 ± 0.5 cm, 内側 4.1 ± 0.6 cm, 棘下筋・小円筋では外側 2.2 ± 0.4 cm, 内側 1.4 ± 0.5 cm, 内側 5.0 ± 0.7 cm, 肩甲下筋では外側 1.4 ± 0.5 cm, 内側 1.8 ± 0.6 cm, 内側 5.1 ± 0.6 cmであった。いずれの筋においても25%部位はY-shaped positionよりも外側, 50%, 75%部位はY-shaped positionよりも内側に位置していた。

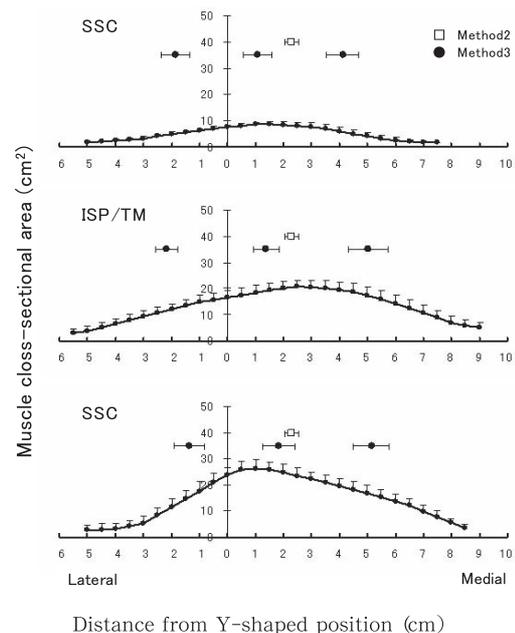


Fig. 2 Distribution of rotator cuff muscles cross-sectional area.

SSP : Supraspinatus, ISP/TM : Infraspinatus and teres minor,
SSC : Subscapularis

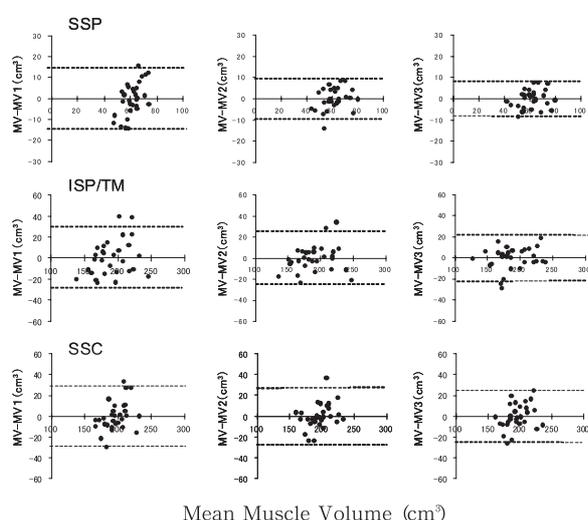
全てのスライスから算出した筋体積の平均値は棘上筋が $61.9 \pm 10.6 \text{ cm}^3$ 、棘下筋・小円筋が $187.6 \pm 32.4 \text{ cm}^3$ 、肩甲下筋が $193.1 \pm 23.0 \text{ cm}^3$ であった。

筋体積の基準値と方法1～3により求められた筋断面積の間の回帰直線と相関係数をTable1に示した。Y-shaped positionの筋断面積を用いた方法1については棘上筋が $r=0.569$ 、棘下筋・小円筋が $r=0.823$ 、肩甲下筋が $r=0.748$ であった。また、2つの筋断面積の合算値を用いた方法2については、棘上筋が $r=0.855$ 、棘下筋・小円筋が $r=0.907$ 、肩甲下筋が $r=0.817$ であった。3つの筋断面積の合算値を用いた方法3については、棘上筋が $r=0.894$ 、棘下筋・小円筋が $r=0.930$ 、肩甲下筋が $r=0.820$ であった。これらの相関係数はいずれの場合においても統計的に有意なものであり ($p < 0.001$)、いずれの筋においても回帰式の有意性が認められたが、使用するスライス数が増加するほど筋断面積と筋体積の相関は高くなることが示された。

Table 1. The predicted equations of the muscle volume of rotator cuff muscles.

Muscle	Method	Equations	r
SSP	Method1	$Y=6.312X_1+13.161$.569 ***
	Method2	$Y=4.311X_2+6.812$.855 ***
	Method3	$Y=3.667X_3+10.357$.894 ***
ISP/TM	Method1	$Y=10.227 X_1+19.016$.823 ***
	Method2	$Y=6.159 X_2+39.795$.907 ***
	Method3	$Y=4.793 X_3+43.093$.930 ***
SSC	Method1	$Y=5.067 X_1+75.887$.748 ***
	Method2	$Y=3.587 X_2+24.361$.817 ***
	Method3	$Y=3.096 X_3+17.12$.820 ***

SSP: supraspinatus, ISP/TM: infraspinatus and teres minor, SSC: subscapularis.
 Y =Muscle volume (cm^3), X_1 =Muscle cross-sectional area in Y-shaped position (cm^2), X_2 =Sum of muscle cross-sectional areas in Y-shaped position and more medial position (cm^2), X_3 =Sum of muscle cross-sectional areas in 25%, 50%, and 75% muscle length (cm^2).
 *** $p < 0.001$.



方法1～3により求められた筋断面積を用いた回帰式から推定された筋体積と筋体積の基準値の間の関係についてブランド・アルトマン法により分析を行い、妥当性を検証した (Fig.3)。同法は両方法による測定値の誤差と測定値の大きさに一定の傾向が認められるか否かを検討するものである。いずれも全スライスを用いた筋体積との関係から導き出された回帰式であることから両方法の差の平均値は0となり、95%信頼区間はスライス数の多い方法ほど小さくなり、誤差範囲は小さくなった。

4. 考察

本研究ではY-shaped positionを基準にそれぞれの筋の筋断面積をFig.2に示した。一般に筋肥大が生じたときに最も顕著な変化がみられるのは筋腹部であることから^{6,7,8)}、筋量の変化をとらえる際には筋腹部からのサンプリングにより評価を行うことが望ましいと考えられる。しかし回旋腱板筋の研究において用いられることの多くなったY-shaped positionが筋長のどこに位置するのかという点については明らかにされていない。そこで筋の起始部を0%、停止部を100%として筋腹の位置、分析に用いるスライスの位置について検討を行なった。

棘上筋では筋腹は $52.1 \pm 4.1\%$ 、方法1のY-shaped positionは $39.7 \pm 5.1\%$ 、方法2における追加スライスは $61.3 \pm 5.9\%$ であった。

方法1は棘上筋の筋萎縮を評価する目的でThomazeauら⁴⁾により考案された方法であり、Y-shaped positionという骨性のランドマークを用いることにより、術前、術後において再現性の高い評価を行うことができるとされている。すなわち重視されているのは筋断面積を評価するに当たって複数回のデータを比較する際に同

Fig. 3. Bland-Altman analysis illustrating the volume, based on Method 1, Method2, and Method3, compared to the MRI of rotator cuff muscles.

SSP: Supraspinatus, ISP/TM: Infraspinatus and teres minor, SSC: Subscapularis MV: muscle volume, MV1: muscle volume (method1), MV2: muscle volume (method2), MV3: muscle volume (method3)

一部位のスライスであるかどうかという点であり、その点においてY-shaped positionは優れている。しかし、Fig.2に示したように棘上筋におけるY-shaped positionは筋腹からは離れており、この部位のスライスだけで筋量を評価するのは難しいと考えられる。この点については、棘上筋体積との相関も最も低かったことから裏付けられる。方法2はこの点を改善すべく関節面からY-shaped positionまでの2倍の距離のスライス数を1枚増やした方法である。しかし、追加したスライスも棘上筋の場合には筋腹を反映したものとはなっていない。Lehtinenら²⁾は方法1、方法2を用いて筋断面積と筋体積の相関を求め、方法1では $r=0.96$ 、方法2では $r=0.96$ と改善がみられないことを報告している。しかし、本研究においては1枚のスライスを追加することにより、相関係数は高くなった。また、方法3では筋腹に相当するスライス（筋長の50%部位）が含まれることにより3つの方法の中で最も高い相関が得られた。

棘下筋・小円筋では筋腹は $59.0 \pm 6.9\%$ 、方法1のY-shaped positionは $38.9 \pm 3.0\%$ 、方法2における追加スライスは $56.4 \pm 3.9\%$ であった。

Zanettiら⁵⁾はY-shaped positionでは棘下筋・小円筋の筋断面積についても再現性の高い測定ができることを示している。しかし、棘上筋の場合と同様に方法1のY-shaped positionは棘下筋・小円筋の筋腹を反映しておらず、筋腹に対して外側に位置している。Lehtinenら²⁾は方法1、方法2を用いて筋断面積と筋体積の相関を求めているが、棘下筋・小円筋は、方法1が $r=0.94$ 、方法2が $r=0.97$ と1枚のスライスを追加することにより相関が高くなることを示している。本研究においても同様の結果が示された。この原因としては方法2において追加したスライスが筋腹に位置しており、全体の筋量に強い影響を持っていたことが考えられる。

肩甲下筋では筋腹は $44.0 \pm 5.6\%$ 、方法1のY-shaped positionは $33.0 \pm 4.9\%$ 、方法2における追加スライスは $52.9 \pm 6.1\%$ であった。

肩甲下筋は他の2つの筋よりも筋腹が外側に位置しており、方法1、2、3のいずれにおいても筋腹に相当する部位は含まれていなかった。Zanettiら⁵⁾はY-shaped positionでは肩甲下筋の筋断面積についても再現性の高い測定ができることを示しているが、方法1のY-shaped positionは肩甲下筋の筋腹とは一致せず、筋腹よりも外側に位置している。Lehtinenらは方法1、方法2を用いて筋断面積と筋体積の相関を求

めているが、肩甲下筋は、方法1が $r=0.75$ 、方法2が $r=0.93$ と1枚のスライスを追加することにより大幅に相関係数が高くなることを示している。本研究においても同様の傾向がみられた。また、方法3に示されるようにさらに1スライス追加することにより、さらに相関は高くなることが示された。

次に各筋における回帰式により算出された筋体積について、基準値の筋体積との誤差を検証するためブランド・アルトマン法による分析をおこなった。ブランド・アルトマン法は最も妥当性の高いとされる測定法から求められた測定値と新しい測定法による測定値の比較を行なう際に用いられ、それぞれの方法と筋体積の間の実際の一致を推測するものである。本研究では基準値となる筋体積を基にして回帰式を作成したため、誤差平均は常に0となったが、測定法間の誤差には特定の偏りや、筋体積の平均値と誤差の大きさの間に有意な相関は見られなかった。また、測定値間の誤差の平均値の範囲を示す95%信頼区間は解析に用いるスライス枚数が多いほど狭くなり、回帰式により算出された筋体積が基準値と一致しやすくなることが示された。

5. 結語

棘上筋、棘下筋・小円筋、肩甲下筋からなる回旋腱板筋については、これまでにいくつかの筋体積を推定する方法が提案されている。本研究ではThomazeauらによる1枚のスライスから推定を行なう方法（方法1）、Lehtinenらの推奨する2枚のスライスから推定を行なう方法（方法2）、Juul-Kristensenらによる3枚のスライスから推定を行なう方法（方法3）について比較を行なった。

全てのスライスから算出された筋体積を基準値として、方法1～3を用いて算出された筋体積との相関を見たところ、方法3において棘上筋 $r=0.894$ 、棘下筋・小円筋 $r=0.930$ 、肩甲下筋 $r=0.820$ と全ての筋において最も高い相関が示された。

また、ブランド・アルトマン法による妥当性の検討においても方法3により推定された筋体積が基準値に最も近似していることが示された。

これらの結果から、3つの方法の比較においてMR法により筋体積を推定する際にはJuul-Kristensenら³⁾の方法が最も妥当性の高い方法であることが示唆された。しかし、3つの筋の全てにおいて筋腹部のスライスをを用いた方法は採用されておらず、より妥当性の高い推定法の開発は可能であると考えられる。

引用文献

- 1) Tingart, M. J. Apreleva, M., Lehinén, J. T., Capell, B., Palmer, W. E., and Werner, J. J. P. (2003): Magnetic resonance imaging in quantitative analysis of rotator cuff muscle volume. *Clin Orthopedics and related research*. 415, 104-110.
- 2) Lehtinen, J. T., Tingart, M. J., Apreleva, M., Zurakowski, D., Palmer, W., and Warner, J. J. P. (2003): Practical assessment of rotator cuff muscle volumes using shoulder MRI. *Acta Orthop Scand*. 74, 6, 722-729.
- 3) Juul-Kristensen, B., Bojsen-Møller, F., Finsen, L., Eriksson, J., Johansson, G., Ståhlberg, F., and Ekdahl, C. (2000): Muscle sizes and moment arms of rotator cuff muscles determined by magnetic resonance imaging. *Cell Tissues Organs*. 167, 214-222.
- 4) Tomazeau, H., Rolland, Y., Lucas, C., Duval, J. and Langlais, F. (1996): Atrophy of the supraspinatus belly. *Acta Orthop Scand*. 67, 3, 264-268.
- 5) Zanetti, M., Gerber, C., and Hodler, J. (1998): Quantitative assessment of the muscle of the rotator cuff with magnetic resonance imaging. *Investigative radiology*. 33, 3, 163-170.
- 6) Roman, W. J., Fleckenstein, J., Stray-Gundersen, A., Always, S. E., Peshock, R. and Gonea, W. J. (1993): Adaptation in the elbow flexors of elderly male after heavy-resistance training. *J. Appl. Physiol*. 74, 750-754.
- 7) Akima, H., Kuno, S., Inaki, M., Shimojo, H. and Katsuta, S. (1997): Effect of sprint cycle training on architectural characteristics, torque-velocity relationship, power output in human skeletal muscles. *Adv. Exerc. Sports Physiol*. 3, 9-15.
- 8) Akima, H., Kuno, S., Suzuki, Y., Gunji, A. and Fukunaga, T. (1997): Effect of 20 days bed rest on physiological cross-sectional area of human thigh and leg muscles evaluated by magnetic resonance imaging. *J. Gravitant. Physiol.*, 4, 15-22.