

[原著]

## 拡散テンソル画像を用いた肩腱板筋の質的評価の試み

尾道市立市民病院 整形外科

迫間 巧将, 本村 賢信, 石原 聖也, 清水 健志,  
佐藤 浩平, 藤井 淳一, 廣岡 孝彦

**要 旨** 本研究では、肩関節 MRI の拡散テンソル画像(DTI)によって得られた fractional anisotropy (FA) および apparent diffusion coefficient (ADC) の値と、腱板筋の脂肪浸潤との関連性を調査し、筋実質の質的評価が可能かどうかを検討した。対象は 56 例である。拡散強調画像上で腱板筋の内部に 11 ヶ所の ROI を設定し、拡散テンソル画像から FA および ADC を計測した。それぞれの筋群について Goutallier 分類も計測し FA, ADC との関連を調べた。また、症例を正常群、腱板断裂群、腱板不全損傷群、および腱板修復後良好群の 4 群に分類し、各群間の FA, ADC を比較検討した。その結果、Goutallier 分類と FA との間には 3 ヶ所で有意差がみられ、Goutallier grade 0 群と比較して grade 1-4 群では FA 値が低値を示した。ADC は 1 ヶ所のみ有意差がみられ、grade 0 群と比較して grade 1-4 群で ADC 値が有意に低値を示した。4 群間の比較では、不全損傷群において SSP-P の FA 値が正常群と断裂群よりも有意に高値であった。本研究は、DTI が従来の評価法では捉えられない筋実質の変化を捉える有用な手法である可能性を示すものであり、今後の研究の発展が期待される。

**Key words** : 腱板, 拡散強調画像, 拡散テンソル画像

### はじめに

拡散強調画像 (diffusion-weighted imaging : DWI) は、組織内における水分子の拡散運動を非侵襲的に可視化する MRI 技術であり、主に脳梗塞や白質病変の早期診断に利用されてきた。さらに、その発展形である拡散テンソル画像 (diffusion tensor imaging : DTI) は、拡散の方向性情報も解析可能であり、神経線維の描出や脊髄、筋組織などへの応用が進んでいる。近年、整形外科領域でも筋損傷や筋萎縮の評価に DTI を応用する報告が増

えており、筋線維の構造的変化を定量的に評価する手段として注目されている<sup>1,2,3)</sup>。

DTI では、fractional anisotropy (FA) と apparent diffusion coefficient (ADC) という 2 つの主要指標を用いて、筋線維構造の整合性および水分子の拡散の強さを定量的に評価することができる<sup>4)</sup>。FA は異方性、すなわち筋線維が一定方向に配列している程度を示し、筋線維の配列異常や変性で低下するとされる。一方、ADC は組織内での水分子の自由拡散の度合いを表し、線維構造の崩壊

---

Qualitative assessment for rotator cuff muscle using diffuse tensor image.

Department of Orthopaedic Surgery, Onomichi Municipal Hospital

Yoshimasa SAKOMA, Kenshin MOTOMURA, Seiya ISHIHARA, Kenji SHIMIZU,

Kouhei SATOU, Junichi FUJII, and Takahiko HIROOKA

や浮腫などで上昇する傾向にある。

肩関節の腱板筋群は、肩の安定性と運動において重要な役割を担っており、腱板断裂に伴う筋萎縮や脂肪変性は、手術適応や術後成績に直結する重要な因子である。従来、腱板筋の質的評価にはMRIを用いたGoutallier分類やStump分類などが広く用いられているが、これらは主観的評価であり、再現性や定量性に課題が残る。これまでに、下肢筋群や腰部筋群を対象としたDTIによる筋評価は報告されている<sup>1,2,3)</sup>ものの、肩関節における腱板筋への応用報告は極めて少ない<sup>5)</sup>。特に、腱板断裂や修復術後における筋実質変化の定量的評価は未解明な点が多い。

本研究では、DTIを用いて腱板筋の定量的評価を試み、従来のMRI評価法との相関性や病態ごとの変化を解析することで、臨床的有用性とその限界点を明らかにすることを目的とした。

対象と方法

2023年8月から2024年8月までの1年間に肩

関節の症状を訴えて来院し、肩関節のMRI画像を撮像した患者を対象とした。拡散強調画像は通常のルーチンMRI検査に追加して行った。追加での撮像時間は10分以内で非侵襲的な検査であり、患者さんへの不利益が生じないように行った。本研究は、当院の倫理委員会の承認を得た。(承認番号:24-3)

対象患者は、男性33例、女性23例の計56例(26歳～84歳、平均66歳)であった。MRI検査は、Philips社 Ingenia CX 3.0Tを使用し、同ソフトウェア上で画像解析を行った。撮像条件は表1のとおりであった。拡散強調画像を3D-T2画像と重ね合わせた後、斜位矢状断画像における肩甲骨Yビュー画像で腱板筋の内部にROIを設定(図1)し、fiber tracking法を用いて拡散テンソル画像を得た(図2)。その際、fiberが各ROIあたり10本以上検出できるようにROIを調整し、各ROIにおけるFA値およびADC値を計測した。ROIは、棘上筋2か所(SSP-A, P)、棘下筋3か所(ISP-DS, DI, S)、小円筋2か所(TMi-S, I)、肩甲下筋4か所(SSC-S, MS, MI, I)とした。さらに、それぞれの筋群の

表1 MRI 拡散強調画像の撮像条件

|                 |         |
|-----------------|---------|
| TR              | 4000    |
| TE              | 62      |
| FOV             | 190     |
| Matrix          | 64 × 64 |
| Slice thickness | 3       |
| gap             | 0       |
| Slices          | 35      |
| b-value         | 500     |
| Number of MPG   | 15      |

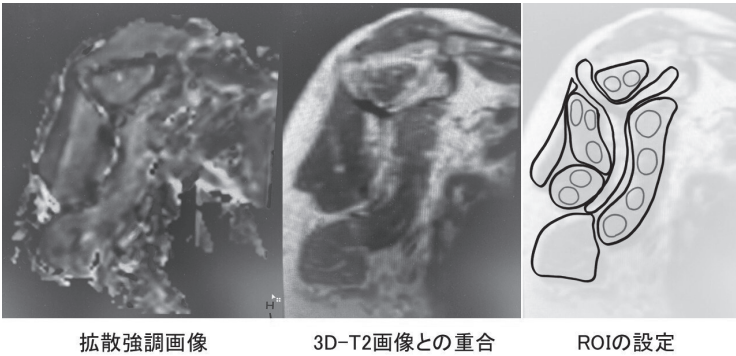


図1 拡散強調MRI画像とROIの設定

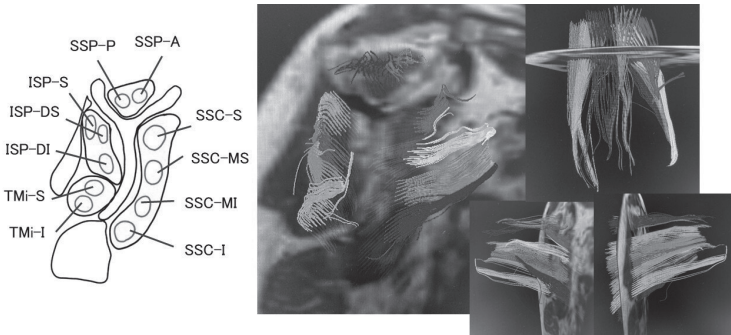


図2 ROI設定と拡散テンソル画像

ROIは、棘上筋は前後の2か所、棘下筋は表層と深層の上下の3か所、小円筋は上下の2か所、肩甲下筋は上部・中央上下・下部の4か所とし、計11か所について拡散テンソル画像を描出した。

Goutallier 分類を T2 斜位矢状断像で評価し、Goutallier 分類とそれぞれの ROI における FA 値、ADC 値との関連を調べた。Goutallier 分類は grade 0 から grade 4 までの分類であるが、今回の対象症例では grade 2 以上の症例が非常に少なかったため、検討は Goutallier grade 0 と grade 1-4 の 2 群間での比較とした。

また、症例を正常群 (N 群) 12 例、腱板断裂群 (T 群) 17 例、腱板不全損傷群 (P 群) 11 例、および腱板修復後良好群 (G 群) 16 例の 4 群に分類し、各群間の FA 値、ADC 値を比較検討した。

統計学的検討は STATMATE III (Ver3.16) を用いて行い、Goutallier 分類と FA 値、ADC 値と

の関連は student-t 検定を用いて評価した。4 群間の FA、ADC 比較は Tukey の分散分析を用いて評価した。有意水準は  $p < 0.05$  とした。

## 結 果

Goutallier 分類と FA 値との関連は表 2 の如くであった。有意差は ISP-DS, ISP-DI, および SSC-MS に認め、いずれも Goutallier grade 0 群と比較して grade 1-4 群では FA 値が低値を示した (表 2)。Goutallier 分類と ADC 値との関連については、SSC-S のみ有意差が検出され、grade 0 群と比較して grade 1-4 群で ADC 値が有意に低値を示した (表 3)。

表 2 Goutallier 分類と FA 値との関連

|        | Goutallier 分類        |                        |            |
|--------|----------------------|------------------------|------------|
|        | grade 0<br>平均 ± 標準偏差 | grade 1-4<br>平均 ± 標準偏差 |            |
| n      | 33                   | 23                     |            |
| SSP-A  | 0.34 ± 0.05          | 0.35 ± 0.05            | ns         |
| SSP-P  | 0.23 ± 0.06          | 0.32 ± 0.04            | ns         |
| n      | 43                   | 13                     |            |
| ISP-DS | 0.32 ± 0.05          | 0.29 ± 0.03            | $p < 0.05$ |
| ISP-DI | 0.31 ± 0.04          | 0.28 ± 0.03            | $p < 0.05$ |
| ISP-S  | 0.31 ± 0.04          | 0.29 ± 0.03            | ns         |
| n      | 50                   | 6                      |            |
| TMi-S  | 0.29 ± 0.03          | 0.29 ± 0.05            | ns         |
| TMi-I  | 0.28 ± 0.03          | 0.27 ± 0.05            | ns         |
| n      | 43                   | 13                     |            |
| SSC-S  | 0.32 ± 0.05          | 0.31 ± 0.07            | ns         |
| SSC-MS | 0.29 ± 0.04          | 0.27 ± 0.05            | $p < 0.05$ |
| SSC-MI | 0.28 ± 0.04          | 0.26 ± 0.04            | ns         |
| SSC-I  | 0.27 ± 0.04          | 0.26 ± 0.05            | ns         |

表 3 Goutallier 分類と ADC 値との関連

|        | Goutallier 分類        |                        |            |
|--------|----------------------|------------------------|------------|
|        | grade 0<br>平均 ± 標準偏差 | grade 1-4<br>平均 ± 標準偏差 |            |
| n      | 33                   | 23                     |            |
| SSP-A  | 1.67 ± 0.14          | 1.63 ± 0.15            | ns         |
| SSP-P  | 1.69 ± 0.15          | 1.66 ± 0.12            | ns         |
| n      | 43                   | 13                     |            |
| ISP-DS | 1.75 ± 0.18          | 1.82 ± 0.16            | ns         |
| ISP-DI | 1.80 ± 0.14          | 1.84 ± 0.15            | ns         |
| ISP-S  | 1.73 ± 0.15          | 1.80 ± 0.15            | ns         |
| n      | 50                   | 6                      |            |
| TMi-S  | 1.84 ± 0.12          | 1.80 ± 0.19            | ns         |
| TMi-I  | 1.84 ± 0.12          | 1.84 ± 0.36            | ns         |
| n      | 43                   | 13                     |            |
| SSC-S  | 1.63 ± 0.20          | 1.51 ± 0.26            | $p < 0.05$ |
| SSC-MS | 1.66 ± 0.18          | 1.64 ± 0.21            | ns         |
| SSC-MI | 1.69 ± 0.14          | 1.63 ± 0.11            | ns         |
| SSC-I  | 1.74 ± 0.11          | 1.75 ± 0.14            | ns         |

4 群間の比較では、P 群において SSP-P の FA 値が N 群と T 群よりも有意に高値であった (図 3). ADC 値については、4 群間で差はみられなかった (図 4).

### 考 察

本研究では、拡散テンソル画像を用いて肩腱板筋群の FA および ADC を定量的に測定し、Goutallier 分類との関連性および各病態群間での違いを検討

した. その結果、FA 値は一部の筋群において Goutallier 分類 grade 0 群と 1 以上の群との間に有意差を認めたものの、全体としては明確な傾向を示さなかった. また ADC についても、有意差が認められたのは肩甲下筋上部 (SSC-S) のみであり、限定的であった.

FA 値と ADC 値は、それぞれ異なる組織特性を反映する指標である. FA の低下は筋線維の配列異常や筋内構造の乱れ、ADC の上昇は筋内の浮腫や

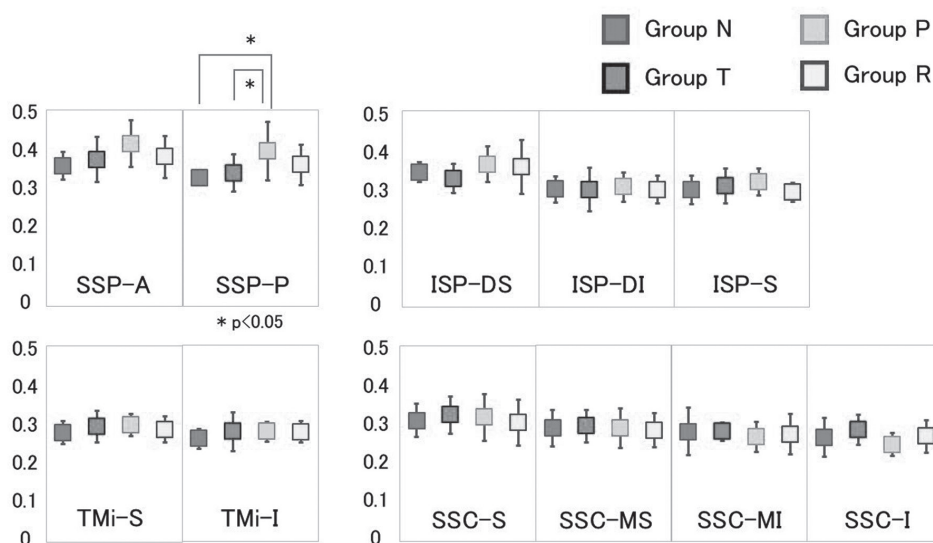


図 3 FA 値における 4 群間の比較

SSP-P において、P 群が N 群、T 群と比較して有意に高値を示した。

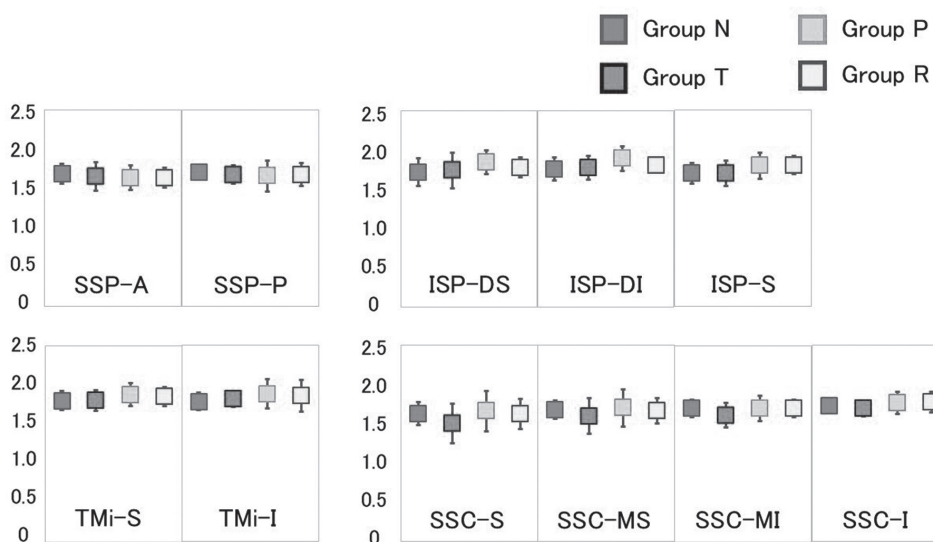


図 4 ADC 値における 4 群間の比較

ADC 値については、4 群間に有意差は見られなかった。

脂肪化などを反映する可能性があると考えられる。したがって、腱板断裂や慢性変性が進行した症例では、一般的に FA 低下と ADC 上昇が期待されるが、本研究においてその傾向は棘下筋の一部でしか明瞭に認められなかった。その要因として、以下の点が考えられる。今回の対象には Goutallier 分類 grade 2 以上の高度変性例が少なく、筋実質に明確な構造変化を伴う症例が限られていた。そのため、定量的な指標で差が現れにくかった可能性がある。また、DTI は MRI 撮像条件に非常に影響を受けやすく、筋組織に適した b 値、解像度、トラッキング条件の選定が重要である。今回は既存のプロトコルに基づいた撮像であったため、腱板筋という比較的小さな筋群には適切でなかった可能性がある。

また、DTI においては肩の肢位の違いにより FA 値、ADC 値が変化することが報告されている<sup>6)</sup>。本研究でも、被験者の肩の位置の微細な差異が画像に影響を与えた可能性がある。特に fiber tracking においては、ROI の設定や筋肉の走行方向の微妙なズレがデータの質に影響する。当院では、肩関節の MRI は腱板の評価のために標準化されており、同様の肢位で撮像するようにしているため、一方で、不全断裂群 (P 群) において SSP-P の FA 値が正常群・断裂群に比して有意に高値を示した点は興味深い結果である。これは、部分的断裂が筋実質の一部において緊張を保つ、または代償的な線維再構成が生じる可能性を示唆しており、完全断裂とは異なる病態生理を反映している可能性がある。

今後は、症例数の拡大とともに、撮像プロトコルの最適化、高度脂肪浸潤例の積極的収集、術後経過の縦断的評価などを行うことで、DTI による腱板筋評価の臨床的意義をさらに明確化できると考える。

## 結 語

拡散テンソル画像による腱板筋の評価では、部分的に脂肪浸潤の指標との関連が認められた。今後の症例数の拡大と撮像条件の最適化により、臨床応用の可能性が広がると考えられる。

## 参考文献

- 1) Cermal NM, et al: Diffusion tensor MRI to assess skeletal muscle disruption following eccentric exercise. *Muscle&Nerve* 46: 42-50, 2012.
- 2) Oudeman J, et al: Techniques and Applications of Skeletal Muscle Diffusion Tensor Imaging: A Review. *J Magn Reson Imaging* 43:773-788, 2016.
- 3) Zaraiskaya T, et al: Diffusion tensor imaging in evaluation of human skeletal muscle injury. *J Magn reson imaging* 24:402-408, 2006.
- 4) 青木茂樹, 他: これでわかる拡散 MRI. 第 3 版. 秀潤社, 東京. 2013.
- 5) Kälén PS, et al: Quantitative MRI of Visually Intact Rotator Cuff Muscles by Multiecho Dixon-Based Fat Quantification and Diffusion Tensor Imaging. *J Magn Reson Imaging* 49:109-117, 2019.
- 6) 青野聡, 他: 肩腱板の拡散テンソル解析: 固定肢位の違いによる影響. *日放技学誌* 74:335-343, 2018.

