

特集

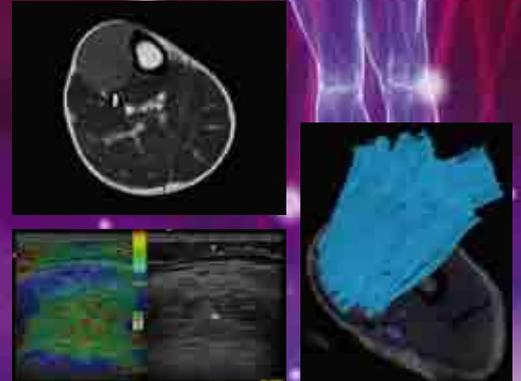
骨格筋の画像評価

最前線

—生涯を通じた アクティブライフのために—

企画協力：新津 守 埼玉医科大学放射線科教授
柳澤 修 早稲田大学スポーツ科学学術院助教

近年、環境の利便性の向上や食生活の欧米化、および超高齢社会などを背景としたライフスタイルの変化により、生涯を通じたアクティブライフ（運動）への関心が高まっています。運動は、全世代における運動機能低下や肥満・糖尿病等の生活習慣病の予防対策、および認知症・うつ病の予防策として注目されています。その運動機能に欠かすことができない全身の骨格筋は、アスリートの運動能力の維持・向上のためだけでなく、日常生活の質を維持・向上させるためにも必要なものです。そこで本特集では、リハビリテーションやスポーツ医学などの領域を中心に、従来より研究されてきた骨格筋の非侵襲的な画像評価をテーマに、MRI、MRS、MRエラストグラフィ、US、USエラストグラフィなどを利用した骨格筋の多角的な評価法について、臨床面での有用性および将来的な利用法の可能性を模索した研究状況をご報告いただきます。



骨格筋の
画像評価
最前線

I 総論

骨格筋の測定法としての 画像評価の有用性と展望

柳澤 修 早稲田大学スポーツ科学学術院
新津 守 埼玉医科大学放射線科

現代社会における 骨格筋の重要性

筋組織は、その構造と収縮特性の違いによって、骨格筋、心筋、平滑筋の3種類に分類される。なかでも、骨格筋は体重の40～45%を占めており、人体の中で最大の組織と言える。骨格筋の多くは、関節をまたいで骨と骨に付着しており、その収縮は関節の運動を引き起こすだけでなく、関節の安定性にも貢献

している。人体にとって、骨格筋は身体活動の原動力であるとともに、姿勢を保持するためのよりどころでもある。加えて、骨格筋は、筋ポンプ作用を通じて全身循環をサポートするとともに、体熱の産生などにも役立っている。それゆえ、われわれの生活の質（quality of life：QOL）は、骨格筋の量や機能に強く依存すると言っても過言ではない。しかしながら、現代社会は利便性や自動性を追求するあまり、われわれの日常生活から徐々に身体活動を奪っていく。その

ため、われわれの骨格筋は知らず知らずのうちに脆弱化し、生涯を通じてアクティブライフを支える能力を喪失していく。

現代社会において、高齢者の体力問題は、超高齢社会を迎えたわが国における重要な健康政策課題の1つである。高齢者は、加齢に伴う運動意欲の減退や、さまざまな運動器疾患を原因として、日常の身体活動量を大きく減らしていく。その結果、高齢者の骨格筋は急速に衰え、最悪の場合、高齢者は運動不足をきっかけとして寝たきりや要介護（支援）の

状態に陥る可能性もある。最近では、日本整形外科学会より、運動器の障害による要介護の状態や要介護リスクの高い状態を表す言葉として「ロコモティブシンドローム（運動器症候群）」が提唱されている。しかしながら、骨格筋の脆弱化は、高齢者に限ったことではなく、身体活動量の減少した中年世代でも問題視されている。加えて、子供の体力・運動能力も1985（昭和60）年代以降、低下傾向にあり、現代社会における遊びやスポーツの機会の減少が、子供たちの筋の発育・発達に悪影響を及ぼしていると指摘されている。要するに、あらゆる世代において、身体活動量の減少に伴う骨格筋の脆弱化が危惧されている。

その一方で、骨格筋は可塑性に富む組織であることから、日常の身体活動量を意識的に増やすことで、骨格筋の量を増加させ、その機能を向上させることは十分に可能である。それゆえ、多くの自治体では、高齢者を対象とした運動教室などを広く開催し、高齢者の自立した生活を積極的に支援している。加えて、昨今の健康志向ブームは、中高年者のさまざまな生活習慣病の予防・改善につながるとともに、加齢に伴う骨格筋量の減少や機能の低下を防ぐ上でも役立つ。わが国の成人の運動・スポーツの非実施者は、2006年の調査で31.7%であったが、2010年の調査では24.1%に減少している¹⁾。さらに、アクティブ・スポーツ人口（週2回以上、1回30分以上、運動強度で“ややきつい”以上の条件で運動・スポーツを実施している人）は、2010年の調査で推計人口1910万人と過去最大を記録している。とりわけ、ここ数年は高齢者層の運動・スポーツへの積極的な参加がうかがえる調査結果となっている。また、一流スポーツ選手の活躍は、子供たちのスポーツ参加への意欲を喚起し、子供たちの日常的なスポーツ活動の実施に役立っている。学童・思春期における運動の習慣化は、子供たちの骨格筋の健全な発育・発達に貢献するだけでなく、将来にわたる運動習慣の継続化につながることが期待されている。

以上のように、高齢者から子供まで、運動・スポーツを定期的実施している

人は少なくなく、とりわけ成人以上では運動・スポーツ参加への関心が年々高まっている。これには、運動・スポーツを楽しむこと以外に、快活な日常生活を送るために良好な骨格筋の状態を手に入れたらという願望も関係しているだろう。

現在、QOLとの深いかわりから、骨格筋の重要性に対する国民の認識は高まっていると考えられる。それゆえ、臨床ならびに研究現場は、骨格筋の形態や機能を詳細に、かつ、定量的に評価できる高度な生体計測技術を必要とする。なかでも、MRI（磁気共鳴撮像法）をはじめとした画像評価技術は年々進化しており、骨格筋の診断や研究において大きな期待を集めている。

骨格筋の画像評価

近年、MRIやUS（超音波法）に代表される画像評価技術は、目覚ましい進歩を遂げている。これらの撮像技術は、骨格筋の形態、機能、そして損傷（疾患）の非侵襲的な評価を可能にすることから、医療現場や研究活動で積極的に活用されている。また、直接的な画像評価法ではないが、MRI装置を用いたMRS（磁気共鳴分光法）も、¹H（プロトン）や³¹P（リン）、¹³C（炭素）に基づいた骨格筋代謝を非侵襲的に評価できる生体計測法として活用されている。

以下に、MRI、MRS、およびUSを用いた骨格筋評価について簡単に紹介する（図1）。

1. MRIを用いた骨格筋評価

われわれは、MRIを用いて人体の生理的および病態生理的状态を反映した画像を任意の断面で得ることができる。現在では、ハード面とソフト面の技術革新により、得られる画像の解像度は格段に向上している。しかも、時間分解能の向上により、高品質な画像を短時間で撮像することも可能になってきている。また、MRIは、撮像条件によりさまざまなコントラストの画像を生成できるので、われわれは評価したい項目に応じて適切な画像を選択すればよい。

骨格筋領域においては、従来使われてきた撮像法にT1強調像とT2強調像

がある。T1強調像は、主に筋形態（筋横断面積や筋体積）の評価に用いられ、加齢^{2), 3)}や発育⁴⁾に伴う筋形態の変化や、スポーツ選手特有の筋形態の評価^{5), 6)}、さまざまな疾患による筋萎縮^{7), 8)}、そして、トレーニング⁹⁾やリハビリテーション¹⁰⁾に伴う筋肥大（筋形態の回復）などをテーマに活用されてきた。一方、T2強調像は、筋内の水分レベルを反映するため、主として、運動に対する筋の生理的な応答（運動による筋内水分量の上昇を利用した活動筋の評価）^{11), 12)}や肉離れ¹³⁾、多発性筋炎¹⁴⁾などの損傷（疾患）の評価に用いられてきた。

最近では、筋内水分子の拡散を評価する拡散強調画像、水拡散の異方性を評価する拡散テンソル画像、そして水の拡散情報から筋線維を可視化する拡散テンソルトラクトグラフィなどが、骨格筋領域において活躍の場を広げている。これらの画像は、水分子の動きを反映することから、従来のT1強調像やT2強調像とは異なる画像情報を提供する。拡散強調画像は、細胞内外の水分子の動きに加えて、毛細灌流も反映することから、筋内水分子の動きの変化に対して高い感度を有している。そのため、拡散強調画像は、運動^{15), 16)}はもちろんのこと、冷却や温熱^{17), 18)}などの生体刺激に対する筋内水分子の動きの評価に活用されている。また、拡散強調画像は非常に短い撮像時間で取得できることから、筋の力発揮中や運動後の急性期における筋の生理的応答を優れた時間分解能でとらえることができる。さらに、拡散強調画像や拡散テンソル画像は、筋内水分子の動きやすさだけでなく、その方向性も評価可能である。骨格筋は、関節角度や圧迫などの外部刺激、および損傷などによって内部構造（羽状角や筋束長など）を変化させる。いくつかの先行研究では、筋の内部構造の変化と筋内水分子の動きの関係が報告されている^{19), 20)}。拡散テンソルトラクトグラフィは、骨格筋線維を三次元的に描出できる能力を有している^{21), 22)}が、将来的には、その精度と解像度を向上させることが必要不可欠であろう。

そのほかにも、いまだ研究段階であるが、組織の弾性を評価するMRエラスト