

超音波画像テクスチャ解析を用いた 筋内の非収縮要素定量化法の確立と応用

Establishing Foundation for Assessing Muscle Quality: Ultrasonic Texture Analysis of Non-Contractile Elements in Skeletal Muscles

身体運動科学研究領域

5022A060-8 渡真利 知輝

研究指導教員：川上 泰雄 教授

第一章 緒言

骨格筋は筋線維の集合体であり、その力発揮能力（筋力）は筋線維の太さ（横断面積）の合計値としての「筋量」と深く関係する。筋量の指標として筋横断面積（Ikai and Fukunaga, 1968）や筋厚（Miyatani et al., 2004）が挙げられる。しかし、筋量と筋力の関係には個人差が存在する。その原因として、最大随意収縮時の神経系の興奮水準（Moritani and deVries, 1979）といった、持ち得る筋線維を全て動員し、最大収縮させられる能力が指摘されている。しかし、骨格筋は筋線維以外にも数多くの構成要素を含み、これらは主に収縮要素（筋組織など）と非収縮要素（筋内脂肪組織や結合組織など）に分類される。力発揮に貢献しない筋内の非収縮要素は加齢や不活動に伴い増加し（Hogrel et al., 2015）、この増加が筋量と筋力の関係の個人差に関連することが予想される。また、骨格筋は生体における主要な水分源であり（Bartok and Dale, 2004）、筋線維内外の水分は筋線維横断面積や筋横断面積の規定因子であると考えられる。

骨格筋の収縮による力発揮には（非収縮/弾性要素である）腱組織との相互作用（Fukunaga et al., 2001）や構造的（膜性結合組織の入りこみの度合いなど）要素も関連することが知られている。これまで主に筋内の収縮要素が筋力と関連しうる「筋質」の指標として注目されてきた。しかし、非収縮要素も考慮した包括的な「筋質」（収縮要素と非収縮要素の割合）の検討が必要である。そのため、筋内の非収縮要素定量化は骨格筋の「筋質」を評価するうえで重要となる。

これまで MR 法や超音波法による筋内の非収縮要素定量化が行われている。特に、B モード超音波法では、組織の音響特性の違いから収縮要素は黒

く、非収縮要素は白く映る。グレースケールの平均値は筋輝度と呼ばれ、非収縮要素との関連（Pillen et al., 2009）が報告されており、簡便な筋の質の評価指標としての応用が試みられている。しかし、筋輝度は組織厚による超音波の減衰など限界点が指摘されている（Stock and Thompson., 2021）。

一方、超音波画像のパターンを抽出し、組織分類を行うテクスチャ解析が、新たに提案されている（Molinari et al., 2015）。テクスチャ解析は空間分布情報を基に定量化しており、超音波の減衰による影響を排除しうることが示唆されている（Watanabe et al., 2017）。現時点では、健常者と（Martinez-Paya et al., 2017）筋萎縮を伴う疾病（ALS）を有する患者間のテクスチャパラメタの差異が報告されている。また、ハムストリングスのテクスチャパラメタ平均値は膝関節屈曲筋力と関連することが報告されている（Sahinis and Kellis, 2023）。しかし、テクスチャパラメタが筋内の非収縮要素を定量化しうるのかは明らかとなっていない。

そこで本研究では、超音波画像テクスチャ解析による筋内の非収縮要素定量化法に着目し、筋内の非収縮要素の増加はテクスチャパラメタによる不均質性の特徴と関連すると仮説立てた。この仮説を検証するため、超音波画像テクスチャ解析の妥当性の検証と生体計測での個人差の検討を行い、新たな筋の質的特性評価方法の確立と応用の基盤を構築することを目的とした。

第二章 超音波画像テクスチャ解析の妥当性検証 [方法]

組成の異なる二つの肉塊（筋肉質・脂肪質）を対象とし、①肉眼レベル、②MR 法、③超音波法に

よって横断面の観察を行った。各測定で得られた画像データを二値化処理し、組織構造を確認した。超音波法において、組織厚による減衰の影響を検討するため、関心領域を四分割 (1cm 間隔) しテクスチャパラメタ (Contrast, Correlation, Entropy) の変化を確認した。

[結果および考察]

筋肉質肉塊の超音波画像において、組織構造は横断面画像や MR 画像と類似していることが確認された。一方で脂肪質肉塊においては、超音波画像上での組織構造の見え方は横断面画像や MR 画像と異なっていた。脂肪質肉塊では、筋内脂肪の浸潤によって超音波の強い散乱が生じていたことが原因と考えられる。

テクスチャパラメタは深部にかけて低下することが確認された (図 1)。超音波画像テクスチャ解析は組織厚による超音波減衰の影響を受けることが示された。減衰の影響が少ない表層部でのテクスチャパラメタを比較すると、脂肪質肉塊では Correlation が高い (筋肉質平均 0.797; 脂肪質平均 0.847) ことが確認され、Kim ら (1998) の結果と一致した。筋内脂肪浸潤の割合が高いほど Correlation パラメタは高くなることが観察された

第三章 生体計測におけるテクスチャパラメタの個人差と非収縮要素との関連

[方法]

健康な成人男女 15 名 (24.1[21-27]歳、167.7±5.3cm、62.8±9.9kg) を対象とした。右脚の大腿二頭筋長頭中間位、遠位 (大腿長 50%・70% 部位) の横断面を超音波法と MR 法を用いて撮像した。超音波画像から組織厚、横断面積、筋輝度、テクスチャパラメタ (二章と同様) を算出した。MR データより筋内脂肪浸潤度、テクスチャパラメタを算出した。最大努力における等尺性膝関節屈曲トルクを測定した。最大トルクは、大腿部の最大筋厚より推定した大腿後面筋体積で除すことにより、筋量あたりのトルクを算出した。それぞれの測定項目の差異と、相関関係を検討した。

[結果および考察]

Correlation パラメタは、中間位で有意に高かった

($p < 0.05$)。大腿二頭筋長頭は、部位によって羽状角が異なることが報告されている (Kellis et al., 2010)。骨格筋の構造的特徴は、超音波画像の見え方に影響を及ぼす。Correlation パラメタの差異は、中間・遠位の構造的特徴によるものが予想される。

水画像 (Dixon) のテクスチャパラメタと筋内脂肪浸潤度には有意な負の相関が見られた (図 2)。水画像において非収縮要素は低信号となるため、筋内の非収縮要素が少ないほど Correlation パラメタは高値 (均質性) を示すことが考えられる。超音波画像テクスチャ解析では、筋内脂肪浸潤度との相関は見られなかったが、Correlation パラメタは皮下脂肪厚の影響を受けることが示された ($p < 0.05$, $\rho = 0.584 - 0.665$)。このことから、超音波法による生体計測では皮下脂肪厚の個人差が非収縮要素の定量化に影響を及ぼすことが示された。

第四章 総括論議

本研究では、超音波画像テクスチャ解析を用い、妥当性や個人差、非収縮要素との関連を検討した。本研究の結果から、テクスチャ解析は筋内の非収縮要素を反映しうることが示された。しかし、超音波法を用いた生体計測では、組織厚による個人差が存在し、今後の更なる検討が必要である。

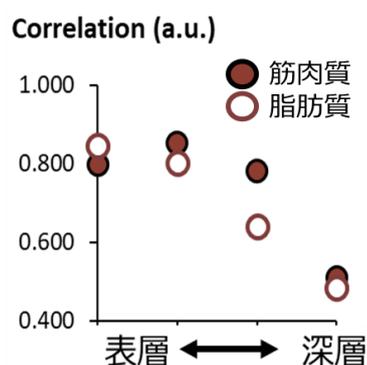


図 1. 表層から深層でのパラメタ変化

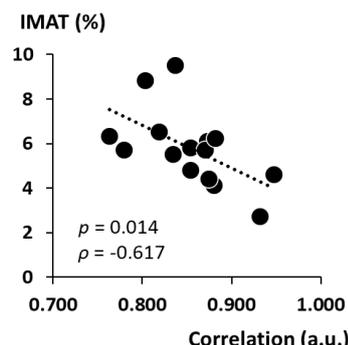


図 2. Correlation と筋内脂肪浸潤度の関係