

超音波法および CT 法を用いた地域在住高齢者における 下肢骨格筋の量的, 質的評価 —高体力者と低体力者の比較—

渡邊 裕也^{1,2}, 池永 昌弘³

Quantitative and qualitative evaluation of lower limb skeletal muscles in community-dwelling older adults using ultrasound and computed tomography: Comparison between high and low physical fitness groups

Yuya Watanabe^{1,2}, Masahiro Ikenaga³

This study evaluated lower-limb muscles in older adults using ultrasound (US) and computed tomography (CT) and compared the quantitative and qualitative indices of skeletal muscles. The participants were 31 community-dwelling older adults, divided into high physical fitness (HIGH: n = 15, 9 men and 6 women) and low physical fitness (LOW: n = 16, 9 men and 7 women) groups.

The right thigh of each participant was evaluated using both imaging systems. US used the front-thigh muscle thickness (MT) as a quantitative index and echo intensity (EI) as a qualitative index. CT used the muscle cross-sectional area (CSA) as a quantitative index and the mean skeletal muscle CT value and percentage of low-density muscle area (%LDMA) as qualitative indices. Physical function parameters (e.g., isometric knee-extension strength) were measured.

Concerning the US indices, the HIGH group had significantly higher MT and lower EI than the LOW group. Concerning the CT indices, CSA was significantly higher in the HIGH group, while the mean CT value tended to be lower in the HIGH group ($P = 0.071$). There was no significant difference in %LDMA between the groups. Knee extension strength was significantly more in the HIGH group than in the LOW group.

Multiple regression analyses revealed that MT ($P = 0.018$) and EI ($P = 0.062$) were associated with muscle strength among the US indices after adjustment for sex and age. A significant association of CSA was also observed ($P = 0.004$) among the CT indices. The impact on muscle strength was greater when using US than when using CT.

US, which can easily evaluate muscle quantity and quality, can be used as a tool to assess sarcopenia and frailty.

[Key words] Echo intensity, Muscle composition, Sarcopenia, Frailty, Physical function

本研究は高体力高齢者と低体力高齢者の大腿部を超音波法と Computed Tomography (CT) 法で評価し, 両手法で得られた量的, 質的指標を比較することを目的とした。対象者は地域在住高齢者 31 名とし, 高体力群 15 名 (男性 9 名, 女性 6 名) および低体力群 16 名 (男性 9 名, 女性 7 名) に群分けした。

測定部位は右大腿部中央とし, 超音波法では大腿前部筋組織厚を量的指標, 筋輝度を質的指標とし, CT 法では骨格筋横断面積を量的指標, 骨格筋平均 CT 値ならびに低密度骨格筋領域の割合 (% LDMA) を質的指標とした。身体機能として, 等尺性膝伸展筋力等を測定した。

超音波指標では, 高体力群で筋組織厚が有意に高値, 筋輝度が有意に低値であった。CT 指標では, 高体力群で筋横断面積が有意に高値を示したが, 骨格筋平均 CT 値は高体力群で低い傾向が観察されるにとどまった ($P = 0.071$)。なお, % LDMA に有意な群間差はなかった。また, 等尺性膝伸展筋力は高体力群で有意に高値であった。

性および年齢を調整し, 膝伸展筋力を従属変数とした重回帰分析を行ったところ, 超音波指標では, 筋組織

1 同志社大学 スポーツ健康科学部 (Faculty of Health and Sports Science, Doshisha University)

2 京都先端科学大学 アクティブ支援機構 (Organization for Supporting Active Health, Kyoto University of Advanced Science)

3 福岡大学 身体活動研究所 (Central Research Institute for Physical Activity, Fukuoka University)

厚の有意な関連 ($P = 0.018$) および筋輝度の傾向性 ($P = 0.062$) が確認された。一方、CT 指標では筋横断面積の有意性のみが認められた ($P = 0.004$)。また、筋力に対する説明力は超音波法で強いという結果が得られた。

骨格筋の量的、質的な加齢変化を簡便に評価できる超音波法は、サルコペニアやフレイルの関連指標としての活用が期待される。

【キーワード】筋輝度, 筋内組成, サルコペニア, フレイル, 身体機能

I. 緒言

身体機能は加齢とともに低下する。これには、身体活動の根源的な要素である骨格筋量の減少が関与している。筋の萎縮、つまり量的な減少は骨格筋に生じる主要な加齢変化であるが、その一方で質的な変化も生じる。具体的には、筋線維数の減少、Type II 線維の選択的萎縮、骨格筋内の脂肪組織や結合組織の増加、相対的な細胞外液量の増加などが挙げられる (Lexell et al., 1988; Rice et al., 1989; Overend et al., 1992; Lexell, 1995; Yamada et al., 2010)。このような筋の質的变化は骨格筋組織に含まれる収縮要素の割合低下を意味しており、筋機能を論じる上で極めて重要である。しかしながら、コンピュータ断層装置 (Computed Tomography: CT)、磁気共鳴画像装置 (Magnetic Resonance Imaging: MRI)、超音波画像診断装置等を用いた一般的な画像法による骨格筋量評価法では、筋の質の状態を考慮することができない。

骨格筋の質的要素、すなわち骨格筋内組成を評価する手法として、MRI の信号強度 (Kent-Braun et al., 2000) や CT 画像における骨格筋平均 CT 値 (Goodpaster et al., 2001) を用いた手法が知られている。ところが、これらの手法は設備の面で測定そのものが容易ではないことや放射線被曝などの問題も生じるため、一般的な検査には適さない。一方近年、骨格筋超音波画像から画像処理ソフトを用いて算出する平均ピクセル輝度 (筋輝度) が筋内組成を非侵襲的にかつ簡便に推定できる方法として注目されている。骨格筋の超音波画像を撮影すると、高齢者の筋は若齢者に比べやや白く映し出される。超音波画像には均質性の高い組織を低輝度に、均質性の低い組織を高輝度に映し出す性質があるため、高齢者における高輝度な骨格筋超音波画像は、筋の構成要素に生じた何らかの加齢変化を反映していると予想される。エコーの反射を増強し、画像の輝度を高める因子としては、非収縮要素 (脂肪や結合組織) の増加 (Rice et al., 1989; Overend et al., 1992)、細胞外マトリクスなど筋線維の構造的な変性 (Kragstrup et al., 2011)、筋線維の走行の均一性の低下 (Galbán et al., 2007) などが考えられる。

筋輝度の上昇は骨格筋組織における収縮要素の含有割合の低下を意味しており、身体機能に影響を及ぼ

すものと推測される。健康な高齢者を対象とした先行研究では、筋輝度 (筋の質) は筋組織厚 (筋の量) とは独立した筋力の説明変数であること (Fukumoto et al., 2012; Watanabe et al., 2013) や垂直跳びのピークパワー、椅子立ち上がり能力など多くの身体機能と関連することが報告されている (Rech et al., 2014; Wilhelm et al., 2014)。これらの情報を総合すると、骨格筋の質は量とともに筋の機能に貢献していると解釈できる。

筋輝度の筋内組成指標としての妥当性はすでに確認されている。筋バイオプシーを用いた研究や動物実験では、筋輝度が骨格筋内の脂肪組織および結合組織を反映していることが示されている (Reimers et al., 1993; Pillen et al., 2009)。加えて、筋輝度と MRI 法あるいは CT 法を用いた従来の筋内組成評価指標との関連性も複数の研究グループが報告している (Young et al., 2015; Akima et al., 2016; Watanabe et al., 2018)。Akima ら (2016) は、若齢者 15 名 (20.9 ± 0.3 歳) と高齢者 15 名 (70.7 ± 3.8 歳) の外側広筋と大腿二頭筋における筋輝度、MRI 法で評価した筋内脂肪量、プロトン磁気共鳴分光法で評価した細胞内および細胞外脂肪量の関連を検討した。その結果、筋輝度と筋内脂肪量および細胞外脂肪量との間に中程度の有意な正の相関関係が観察された。その一方で、筋輝度と細胞内脂肪量には有意な相関関係は観察されなかった。つまり、筋輝度の増強は筋細胞外脂肪量の増加を反映していると考えられる。また、Watanabe ら (2018) は、若齢者 19 名 (22.7 ± 1.5 歳) と高齢者 21 名 (70.6 ± 4.8 歳) の大腿部を超音波法と CT 法で評価し、両者の関連を検討した。両手法により得られた大腿部骨格筋の質的指標の関連をみると、筋輝度は骨格筋平均 CT 値と有意な相関関係を有することが確認された。こういった知見に基づいて、筋輝度は骨格筋の質を反映した指標として活用されている。しかしながら、これらの報告は若齢者と高齢者を比較することで筋輝度の筋の質的指標としての妥当性を検討している点に注意が必要である。当該の先行研究では、健康な高齢者と身体機能が低い高齢者との比較はされていないため、筋輝度のサルコペニアあるいはフレイル関連指標としての応用可能性には議論の余地が残る。そこで本研究では、高体力高齢者と低体力高齢者の下肢骨格筋を超音

波法とCT法で評価し、両手法で得られた量的、質的指標の関連を比較することを目的とした。また、両手法により得られる量的、質的指標が筋力に及ぼす影響を検討した。

II. 方法

1. 対象者

本研究では、地域在住高齢者31名（男性18名、女性13名、69～83歳）を対象者とした。この31名は、事前測定における下肢骨格筋量および膝伸展筋力の値に基づいて高体力群と低体力群に分類された。高体力群は15名（男性9名、女性6名）、低体力群は16名（男性9名、女性7名）であった。

本研究は、京都学園大学（現 京都先端科学大学）ならびに福岡大学の研究倫理審査委員会の承認を得て実施した（承認番号:27-2, 11-04-01）。募集に際して、研究概要、目的、研究手順、リスク等を説明し、測定開始前にすべての対象者から自署署名付きの同意書を得た。

2. 体格測定

体格の指標として身長および体重を測定した。体重を身長の二乗で除してBody mass index (BMI) を算出した。

3. 超音波法による骨格筋評価

超音波測定装置 (Sonosite180 Plus, Sonosite社, 日本) を用いて、大腿前部のB-モード超音波画像を取得し、筋の量的指標である筋組織厚、脂肪量の指標である皮下脂肪厚、筋の質的指標である筋輝度を評価した。測定手法は先行研究 (Watanabe et al., 2013, 2018) に準拠した。超音波画像の撮影は立位にて右脚に対して行い、測定位置は大腿長の50%（上前腸骨棘と大腿骨外側上顆の中間点）とした。なお、ゲインはすべての測定で一定に保たれ、対象者間での変更はなかった。取得した超音波画像上で筋組織厚（大腿直筋・中間広筋）ならびに皮下脂肪厚を評価した。撮影は2回繰り返し（2mm以上の差が出た場合は3回撮影）、その中央値を測定値として採用した。本研究グループの筋組織厚測定における級内相関係数 (ICC) および変動係数 (CV) はそれぞれ0.991, 1.0%で、皮下脂肪厚測定のICCおよびCVはそれぞれ0.987, 3.6%であった (Watanabe et al., 2018)。

記録した単一超音波画像から画像処理ソフト (Adobe Photoshop Elements 11, Adobe Systems社, アメリカ) を用いて大腿直筋の筋輝度を算出した (Watanabe et al., 2013, 2018)。筋輝度算出のための超音波画像上の選択

領域は大腿直筋を可能な限り含めた範囲とし、大腿直筋以外の部分、すなわち骨や筋膜は除外した。選択領域内の筋輝度は0（黒）～255（白）の数値で表示した。なお、本研究グループの筋輝度評価におけるICCおよびCVはそれぞれ0.869, 5.4%であった (Watanabe et al., 2018)。

4. CT法による骨格筋評価

CTスキャナー (Toshiba Multi-CT Aquilion TSX-101A Scanner, Toshiba Medical Systems社, 日本) を用いて対象者の大腿部中央における骨格筋の量および質を評価した (Yoshimura et al., 2011, 2014; Watanabe et al., 2018)。撮影条件は管電流400mA, 管電圧135kVpであった。CTの撮影は両脚に対して実施したが、右脚のデータのみを解析に用いた。前腸骨稜と膝蓋骨の上縁の中間点からの6枚の画像（それぞれ2mm厚）のデータを重ね合わせて、10mmのボリュームデータを作成した。対象者は測定前の最低3時間は絶食としたが、水の摂取は許可された。CTの撮影はすべて福西会病院のスタッフによって行われた。

撮影されたCT画像データからCT画像分析ソフト (OsiriX ver.3.3, OsiriX Foundation社, スイス) を用いて、骨格筋横断面積、骨格筋平均CT値 (Hounsfield Unit: HU) を計算した。その際、0～100HUを骨格筋と判断した。また、低密度骨格筋領域 [Low-density muscle area (LDMA): 0～29 HU] と高密度骨格筋領域 [High-density muscle area (HDMA): 30～100HU] を算出した。本研究では、骨格筋横断面積を筋の量的指標、骨格筋平均CT値および筋横断面積に対するLDMAの割合 (%LDMA) を筋の質的指標とした。

5. 身体機能の評価

1) 等尺性膝伸展筋力

等尺性膝伸展筋力は下肢筋力の指標とした。片脚用筋力測定台 (TKK.5715, 竹井機器工業社, 日本) を用いて、右脚の等尺性膝伸展筋力を測定した (Kimura et al., 2012; Watanabe et al., 2013, 2018, 2020)。測定は座位にて膝関節90°屈曲位置（完全伸展0°）で行われた。対象者は測定手順の説明を受けた後、練習として最大努力の50%および70%で力発揮を行った。測定は60秒の休息を挟んで2回行われ、高値を測定値として採用した。

2) 垂直跳び指数

垂直跳び指数は下肢筋パワーの指標とした。垂直跳び高はジャンプメーター (TKK. 5406, 竹井機器工業社, 日本) を用いて測定した (Yamada et al., 2010,

2013; Kimura et al., 2012; Watanabe et al., 2019, 2020). 対象者は測定器のベルトを腰に巻き、床に固定したゴム板の中央に立って待機した。軽く跳躍し動作確認を行った後、対象者は自身のタイミングで真上に可能な限り高く跳躍した。測定は短い休息を挟んで2回実施し、高値を測定値として採用した。垂直跳び指数は垂直跳び高に体重を乗じて計算された (Boussuge et al., 2006)。

3) Timed Up & Go (TUG) テスト

総合的な歩行能力の指標として TUG テストを実施した。対象者が椅子から立ち上がり、3m 前方のミニコーンまで歩行し、ミニコーンを折り返して再び椅子に座るまでの所要時間をストップウォッチで測定した (Podsiadlo and Richardson, 1991; Watanabe et al., 2020)。測定の際、可能な限り速く歩くよう指示した。また、折り返す方向は自由であること、走ってはいけないことを伝えた。測定は短い休息を挟んで2回実施し、低値を測定値として採用した。

6. 統計処理

統計解析は IBM SPSS Statistics Ver. 26.0 を用いて行った。各測定から得られたデータの代表値と散布度は平均±標準偏差で示した。得られたデータの群間比較は対応のない *t* 検定を用いて検定した。群間の男女比率はカイ二乗検定で比較した。

超音波法および CT 法で評価した骨格筋の量的、質的指標が身体機能に及ぼす影響を検討するため、性および年齢を調整し、身体機能を従属変数とした重回帰分析を行った (モデル 1: 性別, 年齢; モデル 2: モデル 1 に筋の量的指標および筋の質的指標を追加)。すべての検定で $P < 0.05$ を有意とした。

Ⅲ. 結果

表 1 に高体力群および低体力群における身体的特性、超音波法ならびに CT 法により得られた各種指標、身体機能をまとめた。女性割合は高体力群 40.0%、低体力群 43.8% であり、有意な群間差は認められなかった ($P = 0.833$)。また、図 1 に両群の超音波画像なら

表 1 対象者のデータ一覧

	All			Men			Women		
	High (<i>n</i> = 15)	Low (<i>n</i> = 16)	<i>P</i> -value	High (<i>n</i> = 9)	Low (<i>n</i> = 9)	<i>P</i> -value	High (<i>n</i> = 6)	Low (<i>n</i> = 7)	<i>P</i> -value
Age (year)	73.3 ± 3.7	76.0 ± 4.0	0.060	73.2 ± 4.3	75.9 ± 4.2	0.203	73.3 ± 3.0	76.1 ± 4.1	0.196
Height (cm)	159.6 ± 8.0	157.9 ± 9.0	0.594	164.4 ± 5.7	164.1 ± 6.6	0.919	152.4 ± 5.0	150.1 ± 4.2	0.368
Weight (kg)	60.8 ± 9.0	53.0 ± 9.2	0.024*	65.6 ± 8.2	58.1 ± 7.8	0.066	53.8 ± 4.4	46.5 ± 6.4	0.041*
BMI (kg/m ²)	23.8 ± 1.9	21.2 ± 2.7	0.004**	24.2 ± 2.3	21.6 ± 2.7	0.040*	23.1 ± 0.8	20.7 ± 2.8	0.064
MT (mm)	47.4 ± 8.5	36.5 ± 5.2	<0.001**	48.5 ± 9.0	38.1 ± 5.7	0.010**	45.7 ± 8.1	34.4 ± 3.8	0.007**
FT (mm)	8.4 ± 2.7	9.1 ± 4.7	0.612	6.9 ± 1.4	6.3 ± 2.6	0.539	10.6 ± 2.8	12.7 ± 4.5	0.346
EI	20.9 ± 4.5	26.2 ± 7.0	0.018*	18.0 ± 2.5	23.5 ± 7.5	0.054	25.1 ± 3.3	29.6 ± 4.7	0.079
CSA (cm ²)	110.5 ± 22.3	85.2 ± 14.5	<0.001**	124.8 ± 14.7	94.0 ± 12.6	<0.001**	89.2 ± 11.7	73.8 ± 6.6	0.012**
HDMA (cm ²)	94.7 ± 19.1	75.6 ± 13.9	0.003**	107.5 ± 10.7	84.3 ± 11.9	<0.001**	75.6 ± 10.0	64.3 ± 5.8	0.028*
LDMA (cm ²)	15.8 ± 6.6	9.6 ± 4.1	0.004**	17.3 ± 7.7	9.8 ± 4.2	0.021*	13.6 ± 4.3	9.4 ± 4.3	0.109
CT value (HU)	51.7 ± 3.7	55.0 ± 5.9	0.071	52.6 ± 3.9	56.8 ± 5.5	0.083	50.3 ± 3.1	52.7 ± 5.9	0.381
%LDMA (%)	14.2 ± 4.6	11.3 ± 4.9	0.105	13.5 ± 5.0	10.4 ± 4.4	0.165	15.2 ± 4.2	12.6 ± 5.6	0.378
KES (kg)	40.9 ± 11.7	29.6 ± 8.6	0.004**	45.7 ± 10.6	35.2 ± 5.7	0.019*	33.7 ± 10.0	22.3 ± 5.8	0.026*
VJI (mkg)	14.5 ± 5.2	11.4 ± 4.2	0.105	17.0 ± 5.0	13.1 ± 4.1	0.099	10.6 ± 2.7	8.6 ± 3.0	0.289
TUG (s)	6.2 ± 0.8	7.2 ± 0.9	0.005**	6.1 ± 0.7	7.1 ± 1.1	0.036*	6.4 ± 1.0	7.3 ± 0.8	0.086

BMI: Body Mass Index; MT (Muscle Thickness): 筋組織厚; FT (Subcutaneous Fat Thickness): 皮下脂肪厚; EI (Echo Intensity): 筋輝度; CSA (Cross-Sectional Area): 筋横断面積; HDMA (High-Density Muscle Area): 高密度骨格筋領域; LDMA (Low-Density Muscle Area): 低密度骨格筋領域; CT: Computed Tomography; HU: Hounsfield Unit; KES (Knee Extension Strength): 等尺性膝伸展筋力; VJI (Vertical Jump Index): 垂直跳び指数; TUG: Timed Up & Go

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

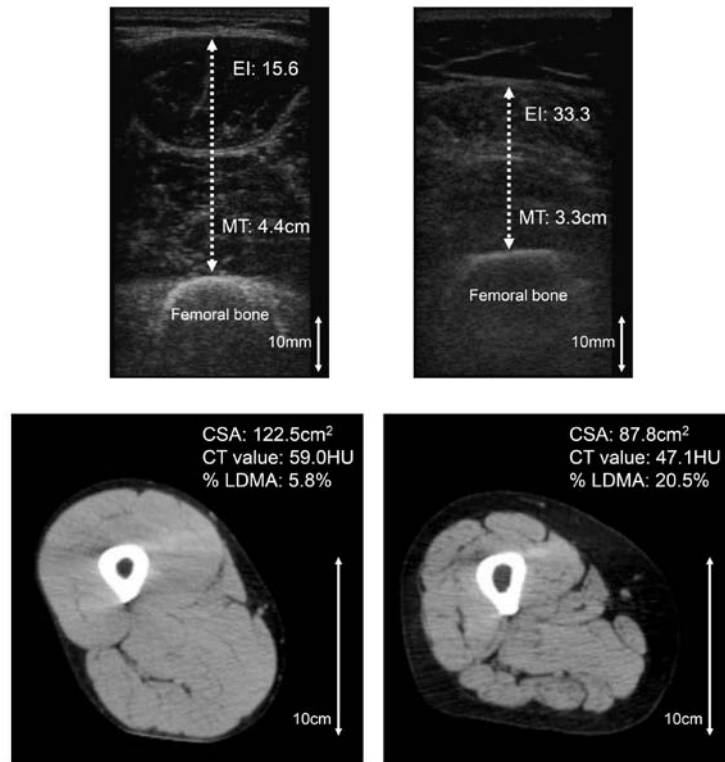


図1 超音波画像と CT 画像の典型例 (左 高体力男性；右 低体力男性)

MT (Muscle Thickness): 筋組織厚; EI (Echo Intensity): 筋輝度; CSA (Cross-Sectional Area): 筋横断面積; CT: Computed Tomography; HU: Hounsfield Unit; LDMA (Low-Density Muscle Area): 低密度骨格筋領域

びに CT 画像の典型例 (男性) を示した。

高体力群は低体力群に比べ体重 ($P=0.024$) および BMI ($P=0.004$) が有意に高値で、高齢である傾向が認められた ($P=0.060$)。男女別では、年齢および身長に有意な群間差は観察されなかったが、体重は女性で高体力群が有意に高値であり ($P=0.041$)、男性で高体力群が高い傾向が認められた ($P=0.066$)。BMI は男性で高体力群が有意に高値であり ($P=0.040$)、女性で高体力群が高い傾向が認められた ($P=0.064$)。

超音波指標においては、高体力群で筋組織厚が有意に高値 ($P<0.001$)、筋輝度が有意に低値 ($P=0.018$) を示した。一方、皮下脂肪厚は有意な群間差が検出されなかった。男女別でも、筋組織厚は高体力群で有意に高値を示した (男性 $P=0.010$; 女性 $P=0.007$) が、筋輝度は傾向性が観察されるにとどまった (男性 $P=0.054$; 女性 $P=0.079$)。皮下脂肪厚は全体と同様の結果であった。

CT 指標においては、高体力群で筋横断面積が有意に高値 ($P<0.001$) を示した。また、HDMA ($P=0.003$) および LDMA ($P=0.004$) とともに高体力群で有意に高値であった。骨格筋平均 CT 値は高体力群で低い傾向が観察されるにとどまった ($P=0.071$)。なお、

%LDMA に有意な群間差は認められなかった ($P=0.105$)。男女別でも、筋横断面積および HDMA は高体力群で有意に高値を示した (筋横断面積 男性 $P<0.001$, 女性 $P=0.012$; HDMA 男性 $P<0.001$, 女性 $P=0.028$)。一方、LDMA の有意な群間差は男性のみで観察された (男性 $P=0.021$; 女性 $P=0.109$)。骨格筋平均 CT 値は男性で高体力群が低い傾向があった ($P=0.083$) が、女性では有意な差が認められなかった ($P=0.381$)。%LDMA は全体と同様の結果であった。

身体機能においては、等尺性膝伸展筋力が全体および男女別ともに、低体力群に比べ高体力群で有意に高値を認めた (全体 $P=0.004$; 男性 $P=0.019$; 女性 $P=0.026$)。TUG は、全体および男性で高体力群が有意に低値を示したが、女性では低い傾向が認められるにとどまった (全体 $P=0.005$; 男性 $P=0.036$; 女性 $P=0.086$)。一方、垂直跳び指数は、男性において高体力群が高い傾向が観察されるだけで、全体および女性では有意な群間差は確認されなかった (全体 $P=0.105$; 男性 $P=0.099$; 女性 $P=0.289$)。

身体機能を従属変数とし、性別および年齢を調整した重回帰分析の結果を表 2 にまとめた。等尺性膝伸展筋力と超音波指標との関連をみると、筋組織厚で有

表2 身体機能を従属変数とした超音波法とCT法の重回帰分析

Dependent variables	Independent variables	β	t-value	P-value
KES				
Ultrasoubnd indices Adjusted R ² = 0.618 (P<0.001)	Sex	-0.314	-2.309	0.029*
	Age	-0.093	-0.712	0.483
	MT	0.356	2.519	0.018*
	EI	-0.320	-1.954	0.062
CT indices Adjusted R ² = 0.549 (P<0.001)	Sex	-0.060	-0.285	0.778
	Age	-0.124	-0.853	0.402
	CSA	0.694	3.155	0.004**
	CT value	0.175	1.088	0.287
VJI				
Ultrasoubnd indices Adjusted R ² = 0.651 (P<0.001)	Sex	-0.403	-2.982	0.007**
	Age	-0.237	-1.766	0.091
	MT	0.361	2.639	0.015*
	EI	-0.211	-1.321	0.200
CT indices Adjusted R ² = 0.607 (P<0.001)	Sex	-0.246	-1.214	0.237
	Age	-0.293	-2.022	0.055
	CSA	0.512	2.370	0.027*
	CT value	0.007	0.041	0.967
TUG				
Ultrasoubnd indices Adjusted R ² = 0.193 (P=0.047)	Sex	-0.073	-0.371	0.714
	Age	0.226	1.196	0.242
	MT	-0.205	-1.000	0.326
	EI	0.279	1.175	0.251
CT indices Adjusted R ² = 0.145 (P=0.088)	Sex	-0.180	-0.620	0.541
	Age	0.272	1.359	0.186
	CSA	-0.429	-1.417	0.168
	CT value	-0.070	-0.318	0.753

MT (Muscle Thickness) : 筋組織厚 ; EI (Echo Intensity) : 筋輝度 ; CSA (Cross-Sectional Area) : 筋横断面積 ; CT : Computed Tomography ; KES (Knee Extension Strength) : 等尺性膝伸展筋力 ; VJI (Vertical Jump Index) : 垂直跳び指数 ; TUG : Timed Up & Go

* P<0.05, ** P<0.01.

意な関連が確認されたが (P=0.018), 筋輝度は傾向性が認められるにとどまった (P=0.062). 一方, CT指標では筋横断面積の有意性のみが観察され (P=0.004), 骨格筋CT値は非有意であった (P=0.287). 垂直跳び指数は, 超音波指標では筋組織厚 (P=0.015), CT指標では筋横断面積 (P=0.027) で有意な関連が認められたが, 筋の質の関連は観察されなかった (筋輝度 P=0.200, 骨格筋CT値 P=0.967). TUGは両指標ともにすべての項目で有意な関連は認められなかった (筋組織厚 P=0.326, 筋輝度 P=0.251 ; 筋横断面積 P=0.168, 骨格筋CT値 P=0.753).

モデル1と2の調整済みR²値の変化量を確認したところ, 等尺性膝伸展筋力および垂直跳び指数では, 両指標ともに有意性が認められた (等尺性膝伸展筋力超音波指標 21.3%, P=0.001 ; CT指標 14.4%, P=0.010 ; 垂直跳び指数 超音波指標 15.3%, P=0.006 ; CT指標 10.9%, P=0.023). 一方, TUGでは, 両指標ともに非有意であった (超音波指標 6.2%, P=0.146 ; CT指標 1.4%, P=0.311).

IV. 考察

本研究は高体力高齢者と低体力高齢者の下肢骨格筋を超音波法とCT法の2つの手法で評価し、両手法で得られた量的、質的指標の関連を比較することを目的とした。解析の結果、以下の3点が明らかになった。

- ・超音波法とCT法で評価された下肢骨格筋の量的指標はともに高体力群で有意に高値であった(表1)。
- ・一方、質的指標の群間比較では、筋輝度(超音波法)で有意な差が検出されたものの骨格筋平均CT値(CT法)では傾向が認められるにとどまった。なお、%LDMAにおいては傾向性も観察されず、非有意であった(表1)。
- ・身体機能に対する量的、質的指標の影響を2つの評価手法で比較すると、超音波法で説明力が強いという結果が得られた(表2)。

これらの結果は、筋輝度が対象者の体力レベルに応じた筋の質的状況をより的確に反映していること、身体機能に対する影響は量的要素で大きいこと、ならびに質的要素においては、従来指標である骨格筋平均CT値よりも筋輝度の影響がやや大きいことを意味している。比較的簡便に取得できる超音波指標はサルコペニアやフレイルのサロゲートマーカーとして活用できるかもしれない。

本研究と同様の超音波画像診断装置を用いて地域在住高齢者の大腿前部骨格筋を量的、質的に評価した研究では、男性の平均筋組織厚は $44.4 \pm 6.9\text{mm}$ 、筋輝度は 21.2 ± 4.9 (Watanabe et al., 2013)で、女性の平均筋組織厚は $39.8 \pm 6.1\text{mm}$ 、筋輝度は 24.6 ± 6.3 (渡邊ほか, 2014)であった。要介護等認定高齢者を対象とした報告では、男性の平均筋組織厚は $40.1 \pm 6.2\text{mm}$ 、筋輝度は 22.6 ± 4.4 で、女性の平均筋組織厚は $36.5 \pm 6.5\text{mm}$ 、筋輝度は 28.1 ± 6.1 であった(渡邊, 2019)。また、本研究と全く同様の手順(装置および測定スタッフ)で評価した自立高齢者のCTデータでは、男性の大腿部筋横断面積は $111.5 \pm 16.9\text{cm}^2$ 、骨格筋平均CT値は $52.1 \pm 4.3\text{HU}$ 、女性の大腿部筋横断面積は $83.8 \pm 7.0\text{cm}^2$ 、骨格筋平均CT値は $49.6 \pm 3.9\text{HU}$ であった(Watanabe et al., 2018)。さらに、同様の筋力測定装置を用いた研究における等尺性膝伸張筋力は、自立高齢男性で $39.7 \pm 11.4\text{kg}$ 、自立高齢女性で $31.1 \pm 5.6\text{kg}$ 、要介護等認定を受けた男性で 28.7 ± 7.0 、女性で $19.4 \pm 6.3\text{kg}$ であった(渡邊ほか, 2020)。これらの先行研究の値と本研究の値を比較すると、高体力群は男女とも先行研究の一般高齢者よりも筋機能、筋の状態(量および質)に優れ、低体力群は一般高齢者に比べやや劣ることがわかる。なお、本研究の低体力群は要介護等認定高齢者のデータ

と比べ、筋力が高いものの筋の状態は量と質の双方でやや劣っていた。これには対象者の体重が影響していると推測される〔本研究低体力群 男性 $58.1 \pm 7.8\text{kg}$ 、女性 $46.5 \pm 6.4\text{kg}$ ；要介護等認定高齢者男性 $64.6 \pm 7.1\text{kg}$ 、女性 $49.5 \pm 8.5\text{kg}$ (渡邊, 2019)〕。

本研究で得られたCTデータを細かく観察すると興味深いことがわかる。骨格筋横断面積では有意な群間差が認められたが、HDMAおよびLDMAともに同様の結果であった。CT法では質が高い筋と低い筋を分離して評価できるが、低体力群では両方の質の筋がともに減少していることがわかる。ただし、身体機能の低下に伴う減少割合はLDMAで大きいことから、質の低い筋の含有割合を示す%LDMAは高体力群で高値となる(表1)。したがって、骨格筋の質的指標としての%LDMAの活用には問題があると考えられる。また、男女別でみると、女性のLDMAでは有意な群間差が認められなかった。高齢女性においてはLDMAの変化は比較的小さいのかもしれない。なお、筋組織厚と骨格筋横断面積の群間比較の結果は一致していた。つまり、量的指標においては、超音波法およびCT法ともに同様の結果が得られたと解釈できる。他方、筋内組成の従来指標である骨格筋平均CT値を群間で比較すると、低体力群で高い傾向が認められた(表1)。この値を男女別でみると、男性では全体と同様に傾向性が観察されたが、女性では差が検出されなかった。この結果は筋輝度の群間比較とは異なる。超音波法で評価した骨格筋の質は、男女とも高体力群に比べ低体力群で高い傾向を示し、全体では有意差を認めた(表1)。すなわち、超音波法およびCT法で評価した質的指標は一致しないことになる。2つの骨格筋の質的指標に影響する因子は異なると推測される。

Goodpasterら(2000)は、骨格筋平均CT値と筋生検により得られた筋内脂肪量の間に関連関係($r = -0.58, P = 0.02$)があることを示しており、骨格筋平均CT値が筋内脂肪量の評価指標として使われている。加齢とともに骨格筋平均CT値が低下することは古くから知られているが、解釈には注意を要する。骨格筋平均CT値は、筋内の脂肪($-30 \sim -190\text{HU}$)の増減のみに依存して変化する指標ではなく水分(0HU)の影響も受ける。Yamadaら(2010)は、加齢に伴い筋細胞外液量の割合が増加することを報告している。以上のことから、高齢者の骨格筋のCT値は水分の影響を強く受けていると考えられる。本研究で筋輝度および骨格筋平均CT値の群間比較の結果が一致していなかったのは、加齢に伴う筋内水分量の変化の影響かもしれない。測定誤差の問題はあるにせよ、水分の影響を受けることなく筋内の非収縮要素(脂肪や結合組織)の様子を評価できるという観点から、筋輝度

はCTを用いた従来法よりも優れている可能性がある。

本研究では、超音波法ならびにCT法で評価した筋の量的、質的指標が身体機能に及ぼす影響を比較するため、年齢および性別を調整した重回帰分析を実施した。等尺性膝伸展筋力および垂直跳び指数では、得られたモデルが2つの評価手法ともに有意であった。等尺性膝伸展筋力における調整済み R^2 値は超音波法で0.618、CT法で0.549、垂直跳び指数における調整済み R^2 値は超音波法で0.651、CT法で0.607であった。調整済み R^2 値から2つの身体機能項目に対する説明力は超音波指標がやや優れていると解釈できる。一方、TUGについては超音波法のみでモデルの有意性が認められるにとどまった。総合的な歩行能力に対する下肢骨格筋の量および質の貢献度は小さいものと考えられる。等尺性膝伸展筋力においては、超音波法による筋の量的指標である筋組織厚の有意性および質的指標である筋輝度の傾向性が確認されたが、CT法では量的指標である筋横断面積のみが有意であった。また、垂直跳び指数においては、両評価手法ともに量的指標のみで有意性が確認された。先行研究では、筋輝度が筋力などの身体機能と有意な関連を持つことが指摘されているが (Fukumoto et al., 2012; Watanabe et al., 2013; Rech et al., 2014; Wilhelm et al., 2014; 渡邊, 2019)、高齢期以降の変化は、質に比べ量で著しいのかもしれない。実際に各種身体機能と大腿前部筋組織厚および筋輝度の関連を検討した研究では、筋組織厚の方が多くの機能と関連することが報告されている (渡邊ほか, 2020)。その点から、本研究は先行研究を指示する結果といえる。

本研究では、モデル1および2の変化を比較することで、超音波法およびCT法における量的、質的指標が身体機能にもたらす実質的な影響力を確認した。その結果、超音波指標を投入することで6.2～21.3%、CT指標を投入することで1.4～14.4%の説明力増強が認められた。身体機能への影響の観点から、超音波指標がより有効と判断できる。また、測定の簡便さという点も超音波法の大きな利点と考えられる。

本研究には、以下に示す研究の限界が含まれている。第一に、本研究はサンプルサイズが小さいため、超音波法およびCT法による骨格筋の量的、質的指標と身体機能の関連を十分に評価できなかつた可能性がある。第二に、超音波法とCT法の測定部位が異なる点である。両手法の測定部位は大腿部中央であるが、若干異なる。また、CT指標には膝伸展筋群だけでなく膝屈曲筋群や股関節内転筋群が含まれていることに注意する必要がある。第三に、対象者の選択バイアスが考えられる。本研究は測定会に参加の意思を持つ者を対象者とした。そのため、低体力群であっても健康に

関心や意欲の高い集団であった可能性が高く、一般的な低体力者に該当しないかもしれない。今後、明確な基準で判定したサルコペニア該当者あるいはフレイル該当者を対象とした研究が必要と考えられる。

V. 結論

地域在住高齢者を高体力群と低体力群に分け、下肢骨格筋を超音波法ならびにCT法で量的、質的に評価し、群間比較を行ったところ、量的指標は一致した結果が得られた。質的指標においては、超音波法 (筋輝度) で有意な群間差が得られた一方、CT法 (骨格筋平均CT値) は傾向が認められるにとどまった。また、身体機能に対する説明力はCT法に比べ超音波法で強いという結果が得られた。

簡便、安全、安価であることに加えて骨格筋の量的、質的な加齢変化を適切に評価できる超音波法 (筋組織厚および筋輝度) は、サルコペニアやフレイルの関連指標として活用できると考えられる。

謝辞

本研究の測定に参加いただいた皆様に心より感謝申し上げます。また、測定に多大な協力をいただいた那珂川スタディグループおよび福西会病院の皆様、同志社大学スポーツ健康科学部の武田大貴氏に深謝いたします。なお、本研究はJSPS 科研費 18K10873 [基盤研究C (YW)], 26882056 [研究活動スタート支援 (MI)], 公益財団法人明治安田厚生事業団 [第32回若手研究者のための健康科学研究助成 (YW)] の助成を受けて実施されたものである。

参考文献

- Akima H, Hioki M, Yoshiko A, Koike T, Sakakibara H, Takahashi H, Oshida Y. Intramuscular adipose tissue determined by T1-weighted MRI at 3T primarily reflects extramyocellular lipids. *Magn Reson Imaging*. 2016; 34(4): 397-403.
- Boussuge PY, Rance M, Bedu M, Duche P, Praagh EV. Peak leg muscle power, peak VO_2 and its correlates with physical activity in 57 to 70-year-old women. *Eur J Appl Physiol*. 2006;96:10-16.
- Fukumoto Y, Ikezoe T, Yamada Y, Tsukagoshi R, Nakamura M, Mori N, Kimura M, Ichihashi N. Skeletal muscle quality assessed from echo intensity is associated with muscle strength of middle-aged and elderly persons. *Eur J Appl Physiol*. 2012; 112(4): 1519-1525.
- Galbán CJ, Maderwald S, Stock F, Ladd ME. Age-related changes in skeletal muscle as detected by diffusion tensor magnetic resonance imaging. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*. 2007 Apr; 62(4): 453-458.
- Goodpaster BH, Kelley DE, Thaete FL, He J, Ross R. Skeletal

- muscle attenuation determined by computed tomography is associated with skeletal muscle lipid content. *J Appl Physiol.* 2000 Jul; 89(1): 104-110.
- Goodpaster BH, Carlson CL, Visser M, Kelley DE, Scherzinger A, Harris TB, Stamm E, Newman AB. Attenuation of skeletal muscle and strength in the elderly: The Health ABC Study. *J Appl Physiol.* 2001; 90 (6): 2157-2165.
- Kragstrup TW, Kjaer M, Mackey AL. Structural, biochemical, cellular, and functional changes in skeletal muscle extracellular matrix with aging. *Scand J Med Sci Sports.* 2011 Dec; 21 (6): 749-757.
- Kent-Braun JA, Ng AV, Young K. Skeletal muscle contractile and noncontractile components in young and older women and men. *J Appl Physiol.* 2000; 88(2): 662-668.
- Kimura M, Mizuta C, Yamada Y, Okayama Y, Nakamura E. Constructing an index of physical fitness age for Japanese elderly based on 7-year longitudinal data: sex differences in estimated physical fitness age. *Age (Dordr).* 2012; 34(1): 203-214.
- Lexell J, Taylor CC, Sjöström M. What is the cause of the ageing atrophy? Total number, size and proportion of different fiber types studied in whole vastus lateralis muscle from 15- to 83-year-old men. *J Neurol Sci.* 1988; 84(2-3): 275-294.
- Lexell J. Human aging, muscle mass, and fiber type composition. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 1995; 50: 11-16.
- Overend TJ, Cunningham DA, Paterson DH, Lefcoe MS. Thigh composition in young and elderly men determined by computed tomography. *Clin Physiol.* 1992; 12(6): 629-640.
- Pillen S, Tak RO, Zwarts MJ, Lammens MM, Verrijp KN, Arts IM, van der Laak JA, Hoogerbrugge PM, van Engelen BG, Verrips A. Skeletal muscle ultrasound: correlation between fibrous tissue and echo intensity. *Ultrasound Med Biol.* 2009 Mar; 35(3): 443-446.
- Podsiadlo D, Richardson S. The timed "Up & Go": a test of basic functional mobility for frail elderly persons. *J Am Geriatr Soc* 1991; 39(2): 142-148.
- Rech A, Radaelli R, Goltz FR, da Rosa LH, Schneider CD, Pinto RS. Echo intensity is negatively associated with functional capacity in older women. *Age (Dordr).* 2014; 36(5): 9708.
- Reimers K, Reimers CD, Wagner S, Paetzke I, Pongratz DE. Skeletal muscle sonography: a correlative study of echogenicity and morphology. *J Ultrasound Med.* 1993; 12(2): 73-77.
- Rice CL, Cunningham DA, Paterson DH, Lefcoe MS. Arm and leg composition determined by computed tomography in young and elderly men. *Clin Physiol.* 1989; 9(3): 207-220.
- Watanabe Y, Yamada Y, Fukumoto Y, Ishihara T, Yokoyama K, Yoshida T, Miyake M, Yamagata E, Kimura M. Echo intensity obtained from ultrasonography images reflecting muscle strength in elderly men. *Clin Interv Aging.* 2013; 8: 993-998.
- Watanabe Y, Ikenaga M, Yoshimura E, Yamada Y, Kimura M. Association between echo intensity and attenuation of skeletal muscle in young and older adults: a comparison between ultrasonography and computed tomography. *Clin Interv Aging.* 2018; 13: 1871-1878.
- Watanabe Y, Yamada Y, Yoshida T, Matsui T, Seo K, Azuma Y, Hiramoto M, Miura Y, Fukushima H, Shimazu A, Eto T, Saotome H, Kida N, Morihara T. Relationship between physical fitness at the end of pre-season and the in-season game performance in Japanese female professional baseball players. *J Strength Cond Res.* 2019 Jun; 33(6): 1580-1588.
- Watanabe Y, Yamada Y, Yoshida T, Yokoyama K, Miyake M, Yamagata E, Yamada M, Yoshinaka Y, Kimura M; for Kyoto-Kameoka Study Group. Comprehensive geriatric intervention in community-dwelling older adults: a cluster-randomized controlled trial. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2020 Feb; 11(1): 26-37.
- Wilhelm EN, Rech A, Minozzo F, Radaelli R, Botton CE, Pinto RS. Relationship between quadriceps femoris echo intensity, muscle power, and functional capacity of older men. *Age (Dordr).* 2014; 36(3): 9625.
- Yamada Y, Schoeller DA, Nakamura E, Morimoto T, Kimura M, Oda S. Extracellular water may mask actual muscle atrophy during aging. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci.* 2010; 65(5): 510-516.
- Yamada Y, Watanabe Y, Ikenaga M, Yokoyama K, Yoshida T, Morimoto T, Kimura M. Comparison of single- or multifrequency bioelectrical impedance analysis and spectroscopy for assessment of appendicular skeletal muscle in the elderly. *J Appl Physiol.* 2013; 115(6): 812-818.
- Yoshimura E, Kumahara H, Tobina T, Ayabe M, Matono S, Anzai K, Higaki Y, Kiyonaga A, Tanaka H. A 12-week aerobic exercise program without energy restriction improves intrahepatic fat, liver function and atherosclerosis-related factors. *Obes Res Clin Pract.* 2011; 5(3): e249-e257.
- Yoshimura E, Kumahara H, Tobina T, Matsuda T, Ayabe M, Kiyonaga A, Anzai K, Higaki Y, Tanaka T. Lifestyle intervention involving calorie restriction with or without aerobic exercise training improves liver fat in adults with visceral adiposity. *J Obes.* 2014; 2014: 197216.
- Young HJ, Jenkins NT, Zhao Q, McCully KK. Measurement of intramuscular fat by muscle echo intensity. *Muscle Nerve.* 2015; 52(6): 963-971.
- 渡邊裕也, 山田陽介, 吉中康子, 木村みさか. 高齢女性における超音波画像から算出した筋輝度と運動機能との関連性. 京都学園大学経営学部論集. 2014; 24 (1) : 95-105.
- 渡邊裕也. 要介護等認定高齢者における下肢骨格筋の量および質と運動機能の関係. 同志社スポーツ健康科学. 2019; 11 : 16-23.
- 渡邊裕也, 山縣恵美, 木村みさか. 自立高齢者と要支援・要介護認定高齢者における下肢骨格筋の量, 質, 運動機能の比較. 応用老年学. 2020; 14 (1) : 58-68.