〈研究報告〉

荷重超音波装置を用いた上腕及び大腿における筋硬度の年齢差と性差の検討

Examination of Age Difference and Sex Difference of Muscle Hardness in Upper Arm and Thigh Using Load Ultrasonic Device

柴田　景子（日本女子体育大学大学院スポーツ科学研究科）
田中　寿志（株式会社グローバルヘルス）
沢井　史穂（日本女子体育大学）

【目的】これまでヒトの骨格筋の量的特性に関する研究は数多く行われてきたが，筋の硬さ（筋硬度）などの質的特性に関する研究はまだ少なく，基礎的データが十分に蓄積されていないのが現状である．本研究は，Bモード超音波装置のプローブに圧力計が内蔵され，加えた圧力に対する筋厚の変位量を経時的に計測できる荷重超音波装置を用いて評価した上腕前部及び大腿前部の筋硬度の年齢差と性差について検討することを目的とした．【方法】定期的なトレーニング習慣のない健常な若齢者107名(男性51名，女性56名)，高齢者128名(男性50名，女性78名）を対象として，上腕前部及び大腿前部の筋硬度を測定した．筋硬度は，超音波装置のプローブ圧と筋厚との間に直線関係が認められる区間の一次回帰式の傾きによって評価した．【結果】筋硬度の年齢差は，男性の上腕を除いて認められ，高齢群の方が若齢群よりも有意に筋が硬かった．筋硬度の性差は，高齢群の大腿のみでみられ，女性の方が男性よりも有意に筋が硬かった．

Ⅰ．緒言

これまで，ヒトの骨格筋の構造特性については，CT（Computed Tomography）法，MRI（Magnetic Resonance Imaging）法，超音波法などの画像診断技術を用いて研究されてきた．その結果，筋厚や筋横断面積には年齢差（若齢者の方が高齢者よりも有意に高値を示す）（久保ほか，2003；Lexell et al., 1988，宮谷ほか，2003）や性差（男性の方が女性よりも有意に高値を示す）（金久，1988；久保ほか，2003；宮谷ほか，2003）があること，また筋厚や筋横断面積と筋力との間には高い相関関係（r=0.59 ～ 0.93）（Fukunaga et al., 2001；金久，1988）があることが明らかにされている．

しかし，筋厚や筋横断面積といった筋の量的特性が同じあっても，筋線維組成や筋線維を取り巻く結合組織や筋内脂肪などの影響により筋の質的特性は異なることが考えられる．

例えば，遅筋線維の方が速筋線維よりも筋周膜や筋内膜が厚い構造をしており，コラーゲン濃度が高くコラーゲン結合も豊富なため，硬い性質であることが示されている（Gosselin et al., 1994；Kovanen et al., 1984）．また，速筋線維のサイズの性差が筋全体のサイズの性差をもたらしているという指摘もある（金久，2012）．Akima et al.（2017）は，高齢者男女を対象に骨格筋内の脂肪組織の量（筋内脂肪量）と筋厚に負の相関関係（男性：r=−0.73，女性：r=−0.57）があったこと，また男女ともに筋厚と椅子座り立ち時間（脚筋力）が筋内脂肪を予測する要因であったことを報告している．

これまで筋の質的特性を示す指標として，スポーツや医療現場では，筋の硬さ（筋硬度）が用いられてきた．Murayama et al.（2000）は，運動介入後に筋損傷が起き，筋硬度が変化することから，筋線維の構造変化による要因と筋内水分量や血流量の増加といった筋の腫脹による組織容積の増大の要因が筋硬度に複合的に関わっていることを報告している．筋硬度を定量化する方法としては，古くから押圧型筋硬度計が用いられてきた．押圧型筋硬度計は，小型軽量で簡便に計測することができるが，皮膚表面から押圧をかけていくものなので皮下組織全体の硬さを反映しており，筋組織そのものの硬さを測定しているとはいえないことが指摘されている（村木ほか，2009）．これに対し，超音波エラストグラフィは，組織の硬さ分布を画像化することで硬さの位置情報を数値化できるため，多くの研究に応用されている．Edy et al.（2015）は21 ～ 94歳までの成人男女133名の上腕二頭筋の筋硬度を検討し，60歳以上になると男女ともに年齢が上がるにつれ筋硬度が高くなること，どの年代においても女性の方が男性よりも筋硬度が高い傾向があったことを報告している．一方，川道ほか（2017）は，健常な男女71名（平均年

Keiko SHIBATA (Graduate School of Sports Science, Japan Women's College of Physical Education)
Hisashi TANAKA (Global Health Co. Ltd.)
Shiho SAWAI (Japan Women's College of Physical Education)
受付日：2019/7/10　受理日：2020/1/6

齢39.0 ± 13.5歳）の大腿直筋と腓腹筋内側頭の筋硬度について検討し，筋硬度は年齢と相関関係がなく，性差も認められなかったことを報告している．このように，筋硬度は年齢や性別，部位によっても異なることが考えられるが，これらを総合的に検討した研究は見当たらない．

一般的に硬さとは，他の物体によって変形を与えられた際に呈する抵抗の大小と定義されている（寺沢・岩崎，1981）ことから，筋硬度も応力と歪みの関係から定量的に評価できると考えられる．そこで近年，押圧型筋硬度計と超音波画像装置の長所を融合した，荷重超音波装置が開発された．荷重超音波装置は，Bモード超音波装置のリニア型プローブ（6MHz）に圧力計を内蔵しており，1gf単位で押圧をかけていく過程の筋厚の変位量を確認しながら0.1mm単位で筋厚を計測することが可能である．プローブは，内部ケースと外部ケースの二重構造になっており，そのケース間に圧力計が装着されている（図1）．プローブ振動子は64素子，取得される画像データの画素数は113 × 320dot（0.325mm/dot），有効測定深度は80mmである．測定部位に，プローブを当て圧力をかけていく間の皮下組織の超音波画像をサンプリング周波数8Hzでパーソナルコンピュータに取り込むことができる．藤田ほか（2015）は，硬さの異なるファントムゲルを用いた実験により，この荷重超音波装置が物体の硬度を客観的かつ定量的に精度よく評価できる（r=0.99）こと，そして上腕屈曲筋の筋硬度の値は筋力発揮レベルと正の相関関係（r=0.97）を示すことを検証している．また，本装置は小型軽量であるため，フィールドワークでの使用が容易であり，多くのデータを収集することが可能である．そこで本研究は，この荷重超音波装置を用いて評価した上腕及び大腿の筋硬度の値に年齢差や性差があるか否かを検討することを目的とした．荷重超音波装置はこれまでのデバイスと測定原理は異なるものの，藤田ほか（2015）の報告を踏まえると，筋硬度を定量的に評価する上での妥当性を備えていると考えられ，筋硬度の年齢差・性差についても先行研究の結果と同様の結果が得られるのではないかと予想される．

Ⅱ．方法

（1）被験者

被験者は，定期的なトレーニング習慣のない健常な18 ～ 22歳の若齢者と61 ～ 87歳の高齢者とした．被験者数は，若齢男性51名，若齢女性56名，高齢男性50名，高齢女性78名の計235名であった．サンプルサイズについては，効果量を中程度以上と見込み，効果量を0.25，αを0.05，検出力0.8としてG*powerにより算出したところ，必要数は128名であり，各群32名であったことから，本研究の標本数は必要数を充足していることが確認された．

各群の年齢，身長，体重，Body Mass Index（BMI）の平均値と標準偏差を表1に示す．若齢群と高齢群ともに男女間の平均年齢に有意差はなかった．

研究の実施に先立ち，被験者に対して事前に本研究の趣旨と倫理的配慮に関して口頭及び書面にて十分な説明

表1．被験者特性

	若齢群		高齢群	
	男性（n=51）	女性（n=56）	男性（n=50）	女性（n=78）
年齢（歳）	20.2 ± 0.9	19.8 ± 1.0	74.3 ± 6.7	75.2 ± 5.7
身長（cm）	169.9 ± 7.2	158.4 ± 5.9	165.3 ± 4.8	151.8 ± 6.1
体重（kg）	62.4 ± 9.4	54.5 ± 7.8	63.8 ± 7.2	52.4 ± 7.7
BMI(kg/m^2)	21.6 ± 2.7	21.7 ± 2.5	23.4 ± 2.5	22.7 ± 3.0

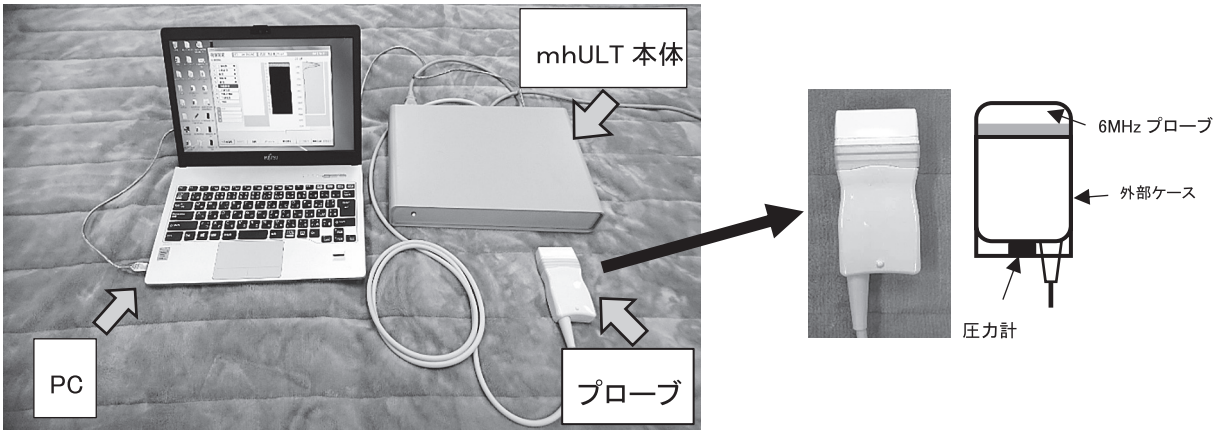

図1．荷重超音波装置本体，プローブの拡大版と構造図（内部ケース）
荷重超音波装置本体は小型軽量のため，フィールドでの使用が容易である．
プローブには，圧力計が内蔵されており，1gf単位で圧力を感知することができる．

を行い，書面にて研究参加の同意を得た．

なお，本研究は，日本女子体育大学研究倫理委員会の承認（承認番号2017-21）を得て実施した．

(2) 測定項目

測定項目は，上腕前部及び大腿前部の筋硬度，筋厚とし，先行研究（藤田ほか, 2015；沢井ほか, 2017）に倣い，右側のみを測定した．上腕前部は上腕二頭筋と上腕筋，大腿前部は大腿直筋と中間広筋を合わせた筋の硬さと厚さを評価した．筋硬度及び筋厚は，荷重超音波装置（みるキューブ；グローバルヘルス社製）を用いて測定した．

(3) 筋硬度と筋厚の測定・評価法

上腕前部及び大腿前部の筋硬度の測定位置は，安部・福永（1995）の手法に倣い，上腕前部は上腕長近位60％部位，大腿前部は大腿長近位50％部位とし，スチール製メジャー（ムラテックKDS（株）社製）を用いて，立位姿勢で計測した．筋硬度の測定時の被験者の肢位は仰臥位とし，上腕前部の測定は肩関節外転90度位，肘関節伸展0度位，前腕回外位とし，大腿前部の測定は膝関節伸展位で，両脚を楽に伸ばした状態とした．被験者には，全身の筋を十分に弛緩するよう指示した．測定部位の皮膚表面に荷重超音波装置のプローブを筋の長軸方向に対して垂直に当て，0～1000gfを超えるまで60bpmのメトロノーム音に合わせて一定のリズムで押圧をかけた．得られた画像データから，専用解析ソフト（mirucubeY ver.1.0：グローバルヘルス社製）を使って，プローブ圧の増加に伴う筋厚の変位量を計測した（図2）．そして，藤田ほか（2015）の手法に倣い，プローブ圧と筋厚との間に直線関係が認められる区間（プローブ圧100～600gf）の一次回帰式を求め，その傾き，すなわち“荷重/変位量”（図3）を筋硬度の指標とした．この値が高いと筋が硬く，低いと筋が柔らかいことを意味している．本研究で筋硬度測定を行った検者は測定法に熟練した1名であり，同一被験者に対し10回測定を行ったときの変動係数は4.6％を示した．また本研究では，すべての被験者において上腕前部及び大腿前部ともに，分析区間内の一次回帰式直線の決定係数は0.9以上であったことを確認している．

筋厚の測定肢位も筋硬度と同様とし，プローブを皮膚表面に当て，圧力をかけないときの画像から測定した．

(4) 統計処理

すべての測定値は，平均値と標準偏差で示した．各測定項目について，年齢（若齢群・高齢群）と性（男性・女性）を要因とする対応のない2×2の二元配置分散分析を用いて検定を行った．また，各測定項目の相関については，Pearsonの相関係数を用い，$r \leqq 0.30$を弱い相関，$0.30 < r < 0.60$を中程度の相関，$r \geqq 0.60$を強い相関として評価した．すべての統計処理には，統計ソフトSPSS Statistics 23（IBM社製）を使用し，有意水準は危険率5％未満とした．

Ⅲ．結果

(1) 筋硬度の年齢差及び性差

上腕前部の筋硬度については，年齢と性の要因に交互作用がみられなかった（$p=0.052$）が，年齢の要因に主効果がみられた．事後検定の結果，女性のみに年齢差が認められ，高齢群の方が若齢群よりも有意に高い値を示した（$p<0.0001$）．大腿前部の筋硬度についても，年齢と

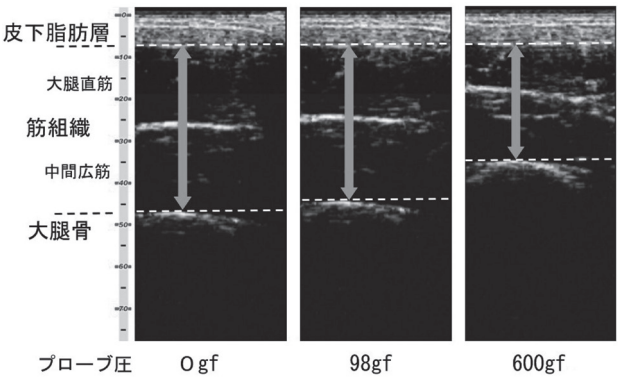

図2．プローブ圧の増加に伴う大腿前部の筋厚の変化の様子

プローブの圧力を増すことで，筋厚が圧縮する様子を確認しながら測定ができ，その動画をPCに保存することができる．

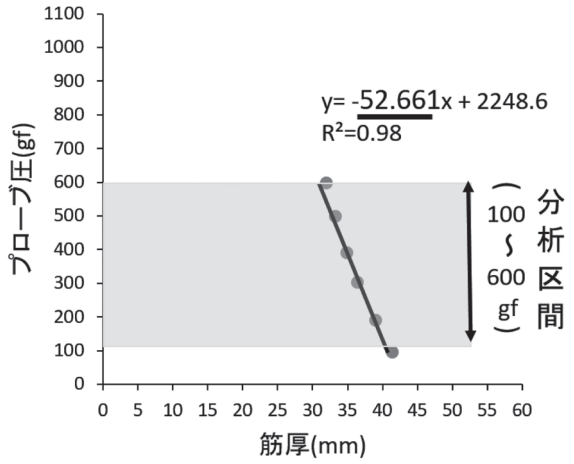

図3．プローブ圧の変化に伴う大腿前部の筋厚の変化（gf/mm）

荷重/変位量の一次回帰式の傾きを筋硬度の指標とした．この値が高いと筋が硬く，低いと筋が柔らかいことを意味している．

性の要因に交互作用はみられなかった（p=0.29）が，年齢と性の要因それぞれにおいて主効果がみられた．事後検定を行った結果，男女ともに有意な年齢差が認められ，高齢群の方が若齢群よりも高い値を示した（p<0.0001）．一方，性の要因については，高齢群のみに有意な性差が認められ，女性群の方が男性群よりも高い値を示した（p=0.01）（表2）．

(2) 筋厚の年齢差及び性差

上腕前部の筋厚についてみると，年齢と性の要因に交互作用はみられなかった（p=0.97）が，年齢と性の要因それぞれについては主効果がみられた．事後検定を行った結果，女性において有意な年齢差が認められ，若齢群の方が高齢群よりも高い値を示した（p=0.04）．男性においても，若齢群の方が高齢群より高い値を示す傾向にあった（p=0.054）．一方，性差については，若齢群，高齢群ともに男性の方が女性よりも高い値を示した（p<0.0001）．大腿前部の筋厚では，年齢と性の要因に交互作用はみられなかった（p=0.42）が，年齢と性の要因それぞれ主効果がみられ，事後検定の結果，男女ともに若齢群の方が高齢群よりも有意に高い値を示し（p<0.0001），若齢群及び高齢群ともに男性の方が女性よりも有意に高い値を示した（p<0.0001）（表3）．

(3) 筋厚と筋硬度との相関関係

上腕前部及び大腿前部における全被験者の筋厚と筋硬度の関係をみたところ，上腕前部については弱い負の相関関係（r=−0.27，p<0.0001），大腿前部については強い負の相関関係（r=−0.74，p<0.0001）がみられた．また，群別に筋厚と筋硬度との関係をみると，上腕前部については，若齢女性群を除いて筋厚と筋硬度との間に有意な相関関係がみられ，若齢男性群では中程度の負の相関関係（r=−0.48，p<0.0001），高齢男性群，女性群ではそれぞれ弱い負の相関関係（高齢男性群r=−0.29，p<0.0001 高齢女性群r=−0.30，p=0.01）がみられた（図4）．一方，大腿前部では全ての群において筋厚と筋硬度との間に有意な負の相関関係がみられ，若齢男性群は中程度の負の相関関係（r=−0.43，p<0.0001）であったが，その他の群では強い負の相関関係（若齢女性群r=−0.64，p<0.0001，高齢男性群r=−0.64，p<0.0001　高齢女性群r=−0.75，p<0.0001）（図5）がみられた．

Ⅳ．考察

筋硬度の年齢差を検討したところ，上腕前部では女性にのみ有意差がみられ，高齢群の方が若齢群よりも筋が硬かった（表2）．超音波エラストグラフィを用いた先行研究（Edy et al., 2015）では，男女とも上腕二頭筋の筋硬度は60歳を過ぎると年齢に伴い高くなることが示されているが，本研究では男性において年齢差は認められなかった．また，大腿前部の筋硬度については，本研究では男女とも有意な年齢差が認められ，高齢群の方が筋が硬かった（表2）．しかし，川道ほか（2017）の報告では，年齢と筋硬度との間に有意な相関関係は認められていない．その理由として，先行研究では平均年齢が39歳であり，60歳以上の高齢者の被験者数が少なかったためではないかと考えられる．本研究では，筋硬度に年齢差がみられた部位は筋厚にも有意な年齢差がみられ（表3），大腿前部においては全ての群において筋厚と筋硬度との間に有意な負の相関関係がみられた（図5）ことから，筋硬度は筋厚の影響を受けており，筋厚が薄い高齢者は筋が硬いことが示唆された．男性の上腕前部の筋硬度に年齢差が

表2．上腕前部及び大腿前部の筋硬度における年齢差及び性差

	若齢群		高齢群		二元配置分散分析		
	男性（n=51）	女性（n=56）	男性（n=50）	女性（n=78）	年齢	性	交互作用
上腕前部筋硬度（gf/mm）	105.1 ± 16.4	99.7 ± 13.6	109.9 ± 17.2	113.2 ± 18.7	*	*	n.s.
大腿前部筋硬度（gf/mm）	63.1 ± 11.0	69.5 ± 15.6	88.3 ± 24.4	102.8 ± 42.7	*	*	n.s.

*;p<0.05

表3．上腕前部及び大腿前部の筋厚における年齢差及び性差

	若齢群		高齢群		二元配置分散分析		
	男性（n=51）	女性（n=56）	男性（n=50）	女性（n=78）	年齢	性	交互作用
上腕前部筋厚（mm）	22.5 ± 3.0	17.7 ± 2.5	21.4 ± 3.4	16.5 ± 3.1	*	*	n.s.
大腿前部筋厚（mm）	38.1 ± 5.0	32.3 ± 5.5	27.9 ± 5.3	23.4 ± 6.5	*	*	n.s.

*;p<0.05

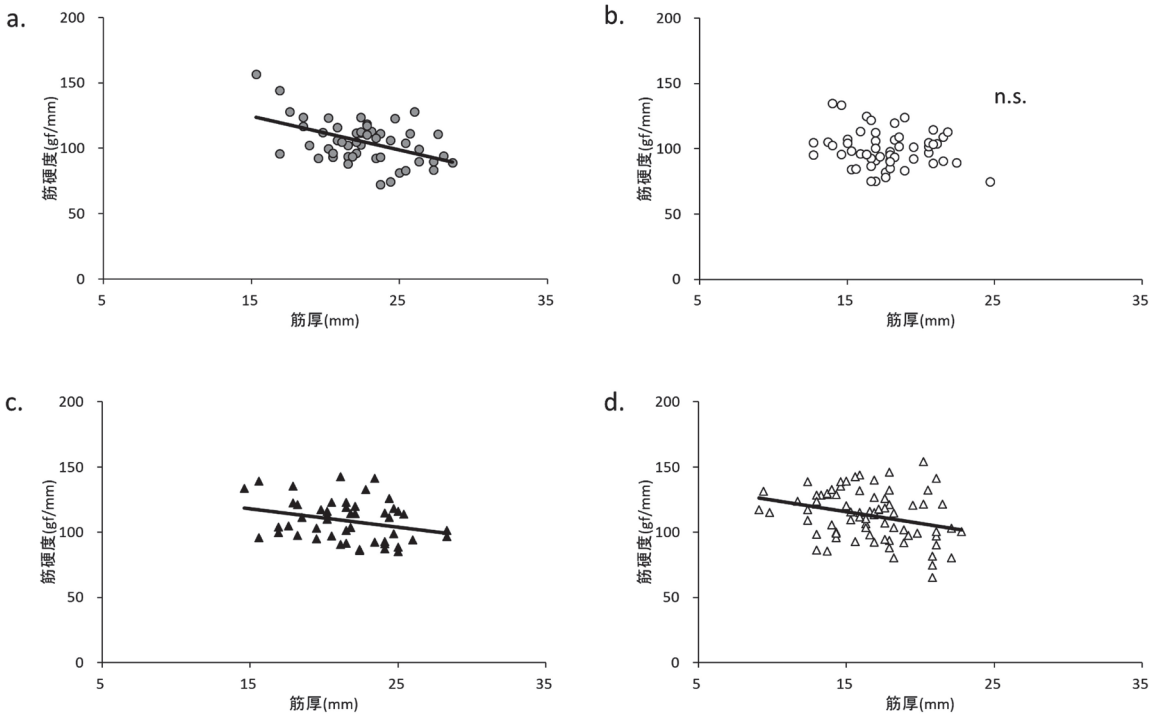

図4. 上腕前部の筋厚と筋硬度との関係

a. 若齢男性群 y = −2.57x+162.98　r = −0.48　p < 0.05　　b. 若齢女性群 y = −0.91x+115.73　r = −0.17　p = 0.21

c. 高齢男性群 y = −1.44x+139.78　r = −0.29　p < 0.05　　d. 高齢女性群 y = −1.84x+143.43　r = −0.30　p < 0.05

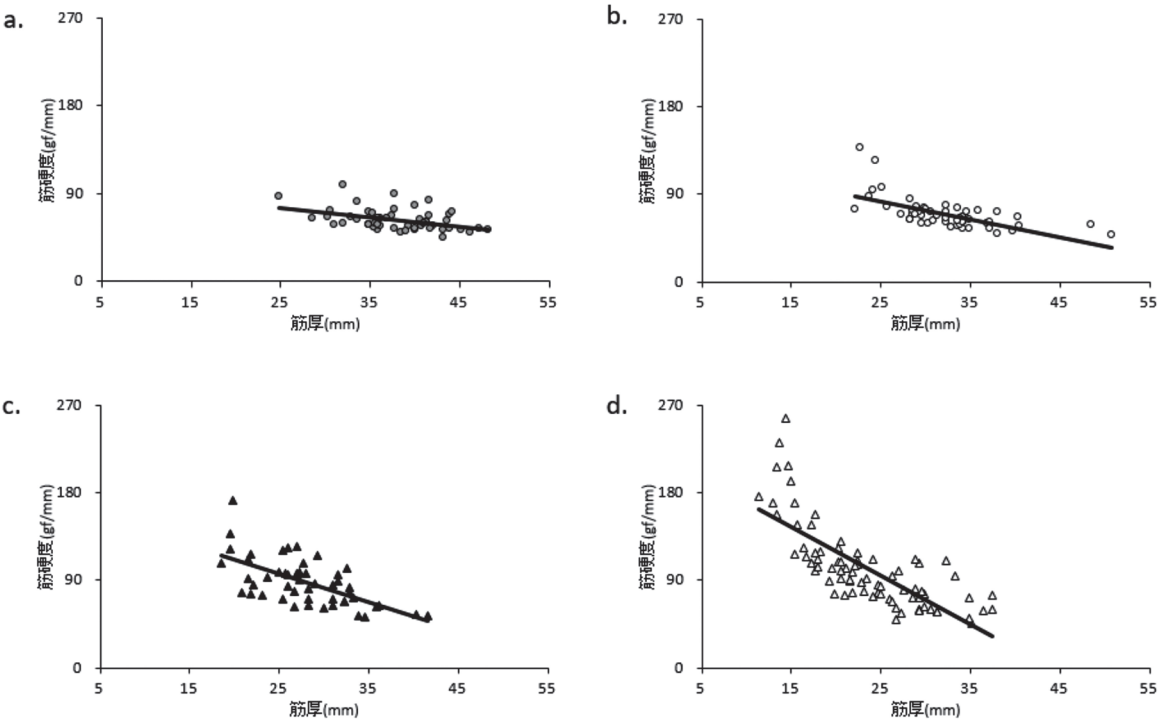

図5. 大腿前部の筋厚と筋硬度との関係

a. 若齢男性群 y = −0.93x+98.55　r = −0.43　p < 0.05　　b. 若齢女性群 y = −1.83x+128.78　r = −0.64　p < 0.05

c. 高齢男性群 y = −2.95x+170.74　r = −0.64　p < 0.05　　d. 高齢女性群 y = −4.98x+219.44　r = −0.75　p < 0.05

みられなかったのは，筋厚に差がみられなかったためではないかと考えられるが，筋厚以外にも，筋形状や筋線維組成といった要因も筋硬度の年齢差に影響している可能性が考えられる．上腕前部の筋は平行筋であるが，大腿前部の筋は羽状筋であるため羽状角が存在し，それが筋硬度に影響している可能性（筋の短軸方向から押圧をかけた際の筋線維の走行方向が異なる）がある．高齢群の方が若齢群よりも筋厚が薄かったことから，高齢群の方が若齢群よりも羽状角が小さいと考えられる．先行研究（Inami et al., 2017）では，筋収縮時において羽状角の増大に伴い硬度が上昇したという報告があるが，本研究の結果に基づけば筋の安静時と収縮時では，筋硬度と羽状角の関係は異なる可能性が考えられる．

また，筋線維組成は，速筋線維と遅筋線維に大別されるが，遅筋線維は速筋線維に比べ，硬い性質（Gosselin et al., 1994；Kovanen et al., 1984）であること，加齢に伴う筋萎縮は速筋線維において顕著であり，遅筋線維は比較的加齢の影響を受けにくい（Lexell et al., 1988）こと，特に大腿前部では速筋線維の割合が多い（Johnson et al., 1973）ことが報告されている．したがって，高齢群の方が加齢により速筋線維の萎縮が進んでいるために若齢群より大腿前部の筋が硬かったのかもしれない．

さらに，筋内の結合組織や脂肪組織の影響も考えられる．加齢に伴い筋線維が萎縮する際，結合組織や脂肪組織への置換が起こる（Csapoet al., 2014；Rice et al., 1989）ことや加齢により結合組織のコラーゲン線維が架橋することで筋の硬さが増し，筋の弾性が低下（Avery et al., 2005）することが示唆されている．一方，川道ほか（2017）は，大腿直筋における筋硬度について年齢差は認めていないものの，筋硬度は筋厚と正の相関関係，筋輝度（筋内脂肪量を評価する指標）とは弱い負の相関関係がみられ，筋厚が増加すると筋内脂肪が減少し，筋硬度は増加するとしており，本研究とは逆の結果を示している．本研究とは対象筋や筋硬度及び筋厚を測定する装置が異なっていることから比較は難しいが，今後は筋硬度と筋内脂肪との関係についても検討する必要があろう．

筋硬度の性差の有無については，高齢群の大腿前部のみ有意差が認められ，女性の方が男性よりも筋が硬かったが，それ以外には有意な性差はみられなかった（表2）．高齢群の大腿前部の筋硬度に性差がみられた理由として，先行研究（金久, 1988；久保ほか, 2003；宮谷ほか, 2003）同様，男性の方が女性よりも筋が厚く，さらに筋厚と筋硬度との間に強い負の相関関係がみられたことから，筋厚の性差を反映しているのではないかと考えられる．一方，高齢女性の中で筋厚が極端に薄い者は骨の影響を受けて筋硬度が過大評価された可能性もある．

筋線維組成については性差は認められないという報告がある（Sale et al., 1987）が，多くの研究において男性の方が女性よりも速筋線維のサイズが大きいことが報告されており（Bell et al., 1990；Simoneau et al., 1985；Staron et al., 2000），金久（2012）は筋全体のサイズ（筋厚，横断面積，筋体積，筋量など）の性差は，特に速筋線維のサイズの差によることが大きいと考えられると述べている．このような筋線維における性差が筋硬度に影響を与える可能性も考えられる．

筋内脂肪の影響については，からだの部位によって筋内脂肪量に性差がある部位とない部位があることを報告しているもの（川道ほか, 2017；中川ほか, 2003）と，性差を認めていない報告（Hwang et al., 2001）とがあり，一致した結果は得られていない．また，Kumagai et al.（2018）は肉離れの発生頻度には性差が存在し，女性ホルモンであるエストロゲンの働きが関与しているのではないかとの考えから，エストロゲン受容体遺伝子の個人差の1つであるT/C遺伝子多型（SNP）とハムストリングの筋との関係を検討した結果，SNPのT/C多型のCの塩基を有する者は筋スティフネスが低い，すなわち筋が柔らかいことを報告している．このことから，女性ホルモンが筋硬度に関与している可能性もあり，今後，若齢女性については月経周期についても検討する必要があると考えられる．

しかしながら，本研究では，高齢群の大腿前部を除いて筋硬度の性差は認められなかった．

先行研究においても，安静時における上腕二頭筋（中野ほか, 1995）や前腕筋（小宮ほか, 1994），大腿直筋（川道ほか, 2017），腓腹筋内側頭（川道ほか, 2017）の筋硬度に性差は認められていない．一方，Edy et al.（2015）は上腕二頭筋の筋硬度を測定し，女性の方が男性よりも筋が硬い傾向があることを報告しているが，年齢によって人数に大きな偏りがあり，性差を検討するには標本数が十分とは言い難い．Chino et al.（2016）は，男女各26名を対象に背屈，底屈，中間位における受動的足関節剛性と腓腹筋内側頭の筋硬度の性差を検討している．その結果，受動的張力が大きくなる背屈及び中間位では関節剛性に性差がみられたが，筋硬度には性差はみられなかったと報告している．

本研究においては，高齢群の大腿前部においてのみ筋硬度の性差が認められたが，果たして本当に筋の質的特性に性による差があるのか，あるいは年齢や部位によって差があるのか否かについては，今後さらに検討を進める必要があるだろう．

本研究の限界として，測定方法論上，筋線維タイプや筋内組織の違いを評価することができないため，筋硬度に影響を及ぼす要因を特定することが難しいこと，また，筋厚が極端に薄い者では，同じ圧力を筋組織に加えたとしても骨の影響を受けて，反力が相対的に大きくなって

しまう可能性があることが挙げられる．また，本研究は横断的研究であったため，今後は縦断的研究を行い，加齢による筋硬度の変化を検討していく必要があるだろう．

引用文献

安部孝，福永哲夫 監（1995）日本人の体脂肪と筋肉分布．杏林書院，95-97.

Akima H, Yoshiko A, Tomita A, Ando R, Saito A, Ogawa M, Kondo S, Tanaka NI (2017) Relationship between quadriceps echo intensity and functional and morphological characteristics in older men and women. Arch Gerontol Geriatr, 70: 105-111.

Avery NC, Bailey AJ (2005) Enzymic and non-enzmic cross-linking mechanisms in relation to tumoover og collagen: relevance to againg and exercise. Scand J Med Sci Sports, 15(4): 231-240.

Bell DG, Jacobs I (1990) Muscle fibre area, fibre type & capillarization in male and female body builders. Can J Sport Sci, 15(2): 115-119.

Chino K, Takahashi H (2016) Measurement of gastrocnemius muscle elasticity by shear wave elastography: association with passive ankle joint stiffness and sex differences. Eur J Appl Physiol, 116(4): 823-830.

Csapo R, Malis V, Sinha U, Du J, Sinha S (2014) Age-associated differences in triceps surae muscle composition and strength — an MRI-based cross-sectional comparison of contractile, adipose and connective tissue. BMC Musculoskelet Disord, 15: 209.

Edy SF, Cloud BA, Brandenburg JE, Giambini H, Song P, Chen S, LeBrasseur NK, An KN (2015) Shear wave elastography of passive skeletal muscle stiffness: influences of sex and age throughout adulthood. Clin Biomech, 30(1): 22-27.

藤田英二，沢井史穂，田中寿志，福永哲夫（2015）圧力計を搭載した超音波装置によるヒト筋硬度の評価．理学療法学，42(3): 255-261.

Fukunaga T, Miyatami M, Tachi M (2001) Muscle volume is a major determinant of joint torque in humans. Acta Physiol Scand, 172: 249-255.

Gosselin LE, DA Martinez, AC Vailas, GC Sieck (1994) Passive length-force properties of senescent diaphragm: Relationship with collagen characteristics. J Appl Physiol, 76(6): 2680-2685.

Hwang JH, Pan JW, Heydari S, Hetherington HP, Stein DT (2001) Regional differences in intramyocellular lipids in humans observed by in vivo 1H-MR spectroscopic imaging. J Appl Physiol, 90: 1267-1274.

Inami T, Tsujimura T, Shimizu T, Watanabe T, Lau Wing Yin, Nosaka K (2017) Relationship between isometric contraction intensity and muscle hardness assessed by ultrasound strain elastography. Eur J Appl Physiol, 117: 843-852.

Johnson MA, Polgar J, Weightman D, Appleton D (1973) Data on the distribution of fiber types in thirty-six human muscles. An autopsy study. J Neurol Sci, 18(1): 111-129.

金久博昭（1988）筋力のトレーナビリティー．体育の科学，38：446-455.

金久博昭（2012）骨格筋量および筋力における性差．体育の科学，62(12): 905-913.

川道幸司，山口鉄生，宮脇鈴子，岡本和久，植村直子，髙田信二郎（2017）健常者の下肢骨格筋における筋硬度の特性：―超音波エラストグラフィを応用した筋硬度の解析―．Jpn J Rehabil Med, 54(10): 800-807.

小宮秀明，前田順一，竹宮隆（1994）安静時および最大収縮時における男女の筋硬度比較．日本体育学会第45回大会号：308.

Kovanen V, Suominen H, Heikkinen E (1984) Collagen of slow twitch and fast twitch muscle fibres in different types of rat skeletal muscle. Eur J Appl Physiol and Occup Physiol, 52(2): 235-242.

久保啓太郎，東香寿美，金久博昭，久野譜也，福永哲夫（2003）加齢に伴う筋厚，羽状角および筋束長の変化．体力科学，52: 119-126.

Kumagai H, Miyamoto-Mikami E, Hirata K, Kikuchi N, Kamiya N, Hoshikawa S, Zempo H, Naito H, Miyamoto N, Fuku N (2019) ESR1 rs2234693 polymorphism is associated with muscle injury and muscle stiffness. Med Sci Sports Exerc, 51(1): 19-26

Lexell J, Taylor CC, Sjöström M (1988) 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, 84(2-3): 275-94.

宮谷昌枝，東香寿美，金久博昭，久野譜也，福永哲夫（2003）下肢筋厚における加齢変化の部位差および性差―20歳代と70歳代の比較―．体力科学，52: 133-140.

村木里志，福田修，福元清剛（2009）筋の厚さ（量）と硬さ（質）から筋力を推定する方法の開発．第24回健康医科学研究助成論文集，24: 126-133.

Murayama M, Nosaka K, Yoneda T (2000) Change in hardness of the human elbow flexer muscles after eccentric exercise. Eul J Appl Physiol, 82(5-6): 361-367.

中川喜直，服部正明，原田邦明，板東道夫，岡野五郎（2003）1H-MRS法によるヒト骨格筋内の脂肪量と性差，体組成，

全身持久力との関係. 体育科学, 52: 149-158.
中野雅之, 角田直也, 西山一行, 佐藤三千雄, 堀川浩之, 久光正（1995）長距離走者の筋硬度からみた性差. 国士舘大学体育研究所報, 14: 53-56.
Rice CL, Cunningham DA, Paterson DH, Lefcoe MS (1990) A comparison of anthropometry with computed tomography in limbs of young and aged men. J Gerontol, 45(5): M175-179.
Sale DG, MacDougall JD, Alway SE, Sutton JR (1987) Voluntary strength and muscle characteristics in untrained men and women and male bodybuilders. J Appl Physiol, 62(5): 1786-93.
沢井史穂, 藤田英二, 福永哲夫（2017）超音波法を用いたヒトの筋硬度の定量的評価：―異なるスポーツ活動を実施している女子大学生の上腕及び大腿の筋硬度比較―. 日本女子体育大学紀要, 47: 39-47.
Simoneau JA, Lortie G, Boulay MR, Thibault MC, Thériault G, Bouchard C (1985) Skeletal muscle histochemical and biochemical characteristics in sedentary male and female subjects. Can J Physiol Pharmacol, 63(1): 30-35.
Staron RS, Hagerman FC, Hikida RS, Murray TF, Hostler DP, Crill MT, Ragg KE, Toma K (2000) Fiber type composition of the vastus lateralis muscle of young men and women. J Histochem Cytochem, 48(5): 623-629.
寺沢正男, 岩崎昌三（1981）硬さの周辺―硬さのおはなし―. 日本規格協会, 東京（第1版）：29-52.

連絡責任者
住所：東京都世田谷区北烏山8-19-1
氏名：柴田　景子
電話番号：03-3300-2207
E-mail：shibata.keiko@jwcpe.ac.jp