

令和 4 年 9 月 1 日現在

機関番号：34448

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K10874

研究課題名(和文) 超スマート社会実現に向けた高齢者の骨格筋調整メカニクスの解明

研究課題名(英文) Skeletal muscle-tendon mechanics for the elderly during dynamic movement

研究代表者

佐野 加奈絵 (SANO, Kanae)

森ノ宮医療大学・保健医療学部・講師

研究者番号：30762273

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究プロジェクトでは、加齢に伴って骨格・筋腱の形態的・機能的变化が起こるとされている高齢者に着目し、高齢者の身体運動中の骨格筋調整機序を明らかにすること、また、身体運動のパフォーマンスに影響を及ぼす膝大腿骨軟骨の厚さが加齢に伴って変化するのかを明らかにすることを目的とした。本研究結果より、高齢者特有の共縮筋活動による筋腱の振る舞いは、高齢者特有の現象ではなく、筋力低下を補って走運動を行うための補償作用としての、腱の弾性を巧みに利用するための現象であった可能性が考えられた。また、健康な一般高齢者よりも運動強度の高いマスターズ陸上アスリートの膝大腿骨の軟骨厚が太いことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

以上の成果より、これまでの高齢者に対する運動処方、メカニカルストレスの少ない有酸素運動が主流であったが、様々な身体レベルの高齢者が存在することも踏まえ、それぞれの形態や機能の状態に合わせた運動を実施することで、腱や筋、膝軟骨のような軟部組織の健康維持が可能となる可能性がある。今後、歳を重ねてもさらに身体能力を向上させるなど、健康寿命延伸のためには、年齢指標ではなく、それぞれの身体症状に合わせたトレーニングによって、筋骨格系の形態の維持や身体運動における動作の機能的改善を目指すことが必要で、高齢者においても簡易なホッピングジャンプや走運動などダイナミックな身体運動も重要であることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：With aging, the changes of architectural, mechanical and neural properties in skeletal muscle can affect muscle-tendon interaction during SSC exercises. It has been reported that the muscle activation profiles during SSC exercises can be different between healthy young and elderly adults. The present study project examined the behavior of gastrocnemius muscle (MG) fascicles and Achilles tendon (AT) during dynamic movement in elderly adults and to clarify age-specific neuromuscular-tendon interaction. The MG and TA coactivation in ELD were great already before contact and following braking phases. The MG fascicles measured by ultrasonography was shorter and AT was longer in ELD than in YOUNG before contact. However, the AT stretch amplitudes were longer in ELD. These results suggest that the age-specific muscle activation and AT behavior may be the strategy to utilize tendon elasticity effectively during movement.

研究分野：健康科学，スポーツバイオメカニクス

キーワード：加齢 SSC アキレス腱 腓腹筋筋束 膝 軟骨厚 超音波

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国は世界一の長寿国であるが出生率は減少し、超少子高齢化社会へと突入している(世界保健機構, 2016)。今後はこれまでの高い教育や経済水準, 保険や医療に支えられてきた平均寿命の延伸に合わせ, 日常生活(生活習慣)の改善や身体活動によって, より長く健康で自立した生活を送ることができる健康寿命の延伸が重要な課題である。

ヒトの身体運動は, 骨に付着している様々な筋肉の活動を介した関節運動によって行われ, 特に, 走る・跳ぶなどのダイナミックな身体運動では, 神経系の調整による筋肉内の筋・腱の相互作用が高い運動効率や大きなパワー発揮に重要な役割を果たすことが提唱されている(Alexander & Bennet-Clark. Nature, 1977)。

一般的に, 加齢に伴い筋萎縮が引き起こされて筋力が低下する(Narici et al. J Appl Physiol, 2003)。また, 腱の材質低下や上位中枢や末梢の運動神経の欠損や遅筋線維化(Hortobagyi & De Vita, J Electrom Kinesiol, 2000)も起こるとされ, 高齢者は歩行などの身体運動中に若年者とは異なる, 筋の同時収縮(共縮)活動や筋の収縮様式で振る舞うことなどが明らかとなってきている(Mian et al., 2007, Hoffren et al. 2007, 2011)。しかしながら, このような身体運動中の筋動態や活動は, 競泳選手など, 高齢者のみでみられる振る舞いではないことから, これまで, 加齢に伴って起こると考えられていた筋の共縮活動と振る舞いは, 加齢に伴って起こった能力の低下(ネガティブな現象)ではなく, 身体活動量の減少に伴い低下した筋力の機能を補償するための適応であった可能性が考えられる。

2. 研究の目的

本研究プロジェクトでは, (1) 加齢に伴って骨格・筋腱の形態的・機能的変化が起こるとされている高齢者に着目し, さまざまな身体活動レベルの高齢者が, 様々な身体運動を実施している際, どのように骨格筋を調整してそれに付着する腱を巧みに利用することで, 身体運動を可能にしているのかを明らかにすることと, (2) 身体運動のパフォーマンスに影響を及ぼす膝大腿骨軟骨の厚さが加齢に伴って変化するのかを明らかにすることを目的とした。そこから, 高齢者特有と言われる動作(例えば, ペタペタ・歩幅が狭いなど)の動作の出現機序についても明らかにすることを旨とする。

3. 研究の方法

本研究プロジェクトでは, 様々な身体活動レベルの高齢者と, その対照群となる若年者を対象として, 身体運動中の筋腱動態と筋活動, 動作解析の同時測定を行い, 身体活動レベルが運動中の筋活動や筋腱動態, 身体運動動作に及ぼす影響について調査することを目指したが, covid-19 のリスク回避の観点から, 身体活動レベルや身体運動習慣の異なる高齢者の形態的特徴の違いについても同時並行で調査を進めた。

(1)

歩行ができる身体活動レベルの高齢者(n=11, 年齢 66 ± 3 歳, 身長 1.59 ± 0.77 m, 体重 55.1 ± 8.7 kg), 一般若年者(n=11, 年齢 21 ± 1 歳, 身長 1.63 ± 0.84 m, 体重 59.7 ± 7.4 kg)を対象として, キャリパーとメジャー, 超音波装置を用いた下肢の骨格・筋・腱の形態測定と, 安全に走行可能な速度による走運動中の表面筋電図による筋活動, ハイスピードカメラで動作を測定し, 形態的・機能的特徴の違いが運動中の筋腱動態に及ぼす影響について明らかにする。

上記身体活動レベルの高い高齢者(n=12), 一般若年者(n=12)を対象として, 下肢の骨格・筋・腱の形態測定と, 足関節のみでジャンプを繰り返すホッピングジャンプ運動中の筋活動, 動作, 呼気ガスを測定し, 形態的・機能的特徴の違いが運動効率に及ぼす影響について明らかにする。

歩行ができる身体活動レベルの高齢者(n=0), 一般若年者(n=10)を対象として, 2~4週間のホッピングジャンプトレーニングの介入実験を行い, 筋活動, 動作, 地面反力, 呼気ガスを測定することで, トレーニングによって下肢筋腱の形態や機能に及ぼす影響について明らかにする。

(2)

40歳から86歳までの身体活動の強度が高い男性(マスターズ陸上アスリート, n=40), 歩行ができる健康な男性(n=179)を対象として, 超音波装置を用いて膝の大腿骨軟骨の厚さを測定することで, 身体運動と軟骨厚との関係について明らかにする。

4. 研究成果

(1)

安静立位時における腓腹筋筋腱複合体, アキレス腱, 腓腹筋筋束の長さについて, 若年者と高齢者と比較したところ, 下腿長, 筋腱複合体, アキレス腱長は両群間で違いは認められなかったものの, 先行研究同様, 本研究でも高齢者の腓腹筋筋束は若年者よりも有意に短い値を示した ($p < 0.01$).

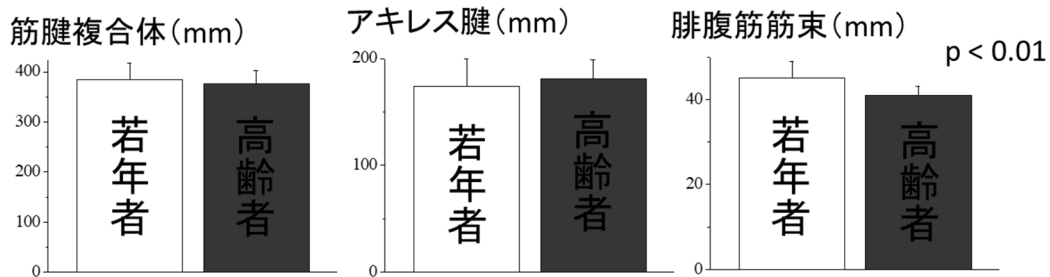


Figure1. 安静立位時の腓腹筋の筋腱複合体長、アキレス腱長、腓腹筋筋束長

高齢者, 若年者の安全に走行可能な速度は, それぞれ, 高齢者で $2.8 \pm 0.2 \text{m/s}$, 若年者で 3.1 ± 0.4 であった. その走運動の接地中, 高齢者と若年者の筋腱複合体はどちらも伸張 短縮と変化した, 筋腱複合体内部のアキレス腱と腓腹筋筋束の動態においては両群で異なる変化を示した. 走運動中, 高齢者は若年者よりもアキレス腱をすでに伸張させた状態で接地をし, 続く接地期の筋腱複合体最大伸張時 (重心が脚の真上に来ている状態の時) や離地時においても同様に, 若年者よりもアキレス腱を伸ばした状態で, 伸張 短縮させていることが明らかとなった. それにより, 高齢者は, 筋腱複合体を短縮させる際に腱の短縮量を増やし腱の貢献度を高めて短縮させていたことが分かった. また, その際の筋活動と筋動態の結果より, 高齢者は接地前から腓腹筋を活動させ, 接地期前半には前脛骨筋と共縮活動させており, それによって筋束を若年者よりも短縮させて接地し, 接地から筋腱複合体最大伸張時にかけて筋束の長さを変化させずに活動することを可能としていたことが示唆された. つまり, 高齢者特有の共縮筋活動による筋腱の振る舞いは, “高齢者特有の現象” ではなく, 筋力低下を補って走運動を行うための補償作用としての, “腱の弾性を巧みに利用するための現象” であった可能性が考えられる.

走運動中と同様に, 高齢者では, ホッピングジャンプの接地前と接地中, 腓腹筋と前脛骨筋の共縮活動が確認され, 接地期後半における腓腹筋の筋活動も認められた. しかしながら, 筋腱動態は走運動中とは異なっており, 接地直後に筋は短縮位へと変化したものの, その後, 伸張位を経て, 短縮位へと変化した. そのため, 筋腱複合体の短縮に対する腱の利用率は若年者よりも低下する傾向を示した.

covid-19 の影響で高齢者への長期介入トレーニングの実施が出来なかったため, 比較対象として測定した, 若年者へのホッピングジャンプトレーニング介入の結果をここで示す. その結果, トレーニング介入前・後において, 一般若年者の筋活動は, 接地前の筋活動を増加させた傾向と, 接地期後半から前半へシフトする傾向, 接地期後半の共縮活動の減少が確認された. 酸素摂取量および, 酸素摂取量測定区間内における筋活動の IEMG についても, トレーニング前・後で減少する結果が得られた. 測定中における地面反力の鉛直成分の最大値や跳躍高はトレーニング介入前・後で変化させないように指示していたことから, トレーニング介入によって腱の材質の変化や, ホッピングジャンプ運動を実施することに対する神経系の改善が行われ筋出力の効率が高まった可能性が考えられる. 本研究に関しては, 一般若年者の被験者数も少なく, 高齢者へのトレーニング介入実験も実施できなかったため, 今後も検証を続けていくが, 今回の結果で, 一般若年者でもホッピングジャンプトレーニングによって筋腱動態やその調整活動が変化し, エネルギー効率が向上したことから, 一般的に, 歩行や走運動実施中, 若年者よりもエネルギー効率が劣り, 筋腱形態やその機能が低下しているとされる高齢者においても, このホッピングジャンプトレーニングは筋腱形態の維持やエネルギー効率向上に対して有効である可能性が高いと考える.

(2)

ウォーキングイベントに参加するような健康な一般高齢者とマスターズ陸上アスリートの膝大腿骨軟骨の厚さの違いを超音波画像から分析し比較した結果, マスターズ陸上アスリートが最も軟骨厚が太い結果が得られ, 一般高齢者と運動習慣のない若年者では違いは認められなかった. また, 本研究で測定した 40 から 86 歳の測定対象者内では, 40 代, 50 代, 60 代, 70 代, 80 代以上の群間で軟骨厚に違いが見られず, 加齢が軟骨厚に及ぼす影響については確認できなかった. ただし, 今回測定を実施した全ての測定対象者においては, 膝や下肢に関する既往歴,

膝の痛みはなかったことを確認して測定をおこなったため、先行研究とは異なる結果が出た可能性は考えられる。

以上の成果より、これまでの高齢者に対する運動処方は、様々な身体レベルの高齢者が存在するのにも関わらず、メカニカルストレスの少ない有酸素運動が主流であったが、腱や筋、膝軟骨のような軟部組織の健康維持や、運動中の神経活動の調整を若年者に近づけるためには、ホッピングジャンプや走運動などのようなダイナミックな身体運動を取り入れることの重要性も示唆された。

< 引用文献 >

- (1) 世界保健機構, 2016. World health organization life expectancy and healthy life expectancy data by country.
(<https://apps.who.int/gho/data/view.main.SDG2016LEXv?lang=en>)
- (2) Alexander & Bennet-Clark. Storage of elastic strain energy in muscle and other tissues. *Nature*, 265:114-117, 1977.
- (3) Narici et al. Effect of aging on human muscle architecture. *J Appl Physiol*. 95(6):2229-2234, 2003.
- (4) Hortobagyi & De Vita, Muscle pre- and coactivity during downward stepping are associated with leg stiffness in aging. *J Electromyogr Kinesiol*. 10(2):117-126, 2000.
- (5) Mian et al. Gastrocnemius muscle-tendon behaviour during walking in young and older adults. *Acta Physiol*. 189:57-65, 2007.
- (6) Hoffren et al. Age-related neuromuscular function during drop jumps. *J Appl Physiol*. 103:1276-1283, 2007.
- (7) Hoffren et al. Neuromuscular mechanics and hopping training in elderly. *J Electromyogr Kinesiol*. 21 (3):483-491, 2011.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 小田啓之, 佐野加奈絵, 信江彩加, 国正陽子, 石川昌紀.	4. 巻 60
2. 論文標題 アキレス腱断裂経験者における断裂経験脚のアキレス腱の弛みと力学的特性.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 大阪体育学研究	6. 最初と最後の頁 29-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐野加奈絵, Nicol Carolin, Komi Paavo V, 石川昌紀
2. 発表標題 高齢者特有の走運動中における筋腱相互作用
3. 学会等名 第33回計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------