

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：82632

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24700770

研究課題名(和文)姿勢調節能力と下腿の筋特性の加齢変化に関する研究

研究課題名(英文)The study of postural ability and the muscle properties of the lower leg with aging

研究代表者

加藤 えみか (Kato, Emika)

独立行政法人日本スポーツ振興センター国立スポーツ科学センター・スポーツ科学部・契約研究員

研究者番号：90586439

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)：下腿の筋特性とバランス能力の関連を明らかにすることを目的として以下の研究を実施した。(1)筋のステイフネスは筋収縮の有無にかかわらず、下腿に発生する張力が同等であれば同じであった。このことから、筋形状は筋のステイフネスには影響しないことが示された。(2)バランス能力に関わる下腿の筋特性と方策を明らかにするために、静止立位の保持と被験者が自ら任意の範囲で姿勢動揺を行った。筋線維の長さ変化と筋放電の結果から、共働筋であっても立位姿勢時の重心位置に伴う収縮活動のタイミングが異なることが示された。(3)高齢者を対象に下肢を中心としたトレーニングにより、筋力は向上してもバランス能力は変化しなかった。

研究成果の概要(英文)：Three main experiments were performed to clarify the relationships between the muscle properties of lower leg and postural ability. (1) The tension would be equal inside lower leg, muscle stiffness will not be different with or without muscle activity. Muscle architecture will not effect on muscle stiffness. (2) To clarify muscle properties of lower leg and strategies for postural ability, subjects performed quiet standing and voluntary sway on the force platform. From the results of the change of muscle fiber and muscle activity, the timing of muscle activities were different even synergists. (3) The elderly people completed strength training for eleven weeks to improve muscle strength of their leg. After training period, muscle strength increased significantly, but postural ability was not change significantly.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：姿勢調節 筋硬度 ステイフネス 加齢

1. 研究開始当初の背景

高齢者における姿勢調節の低下は、歩行能力やバランス能力の低下によって転倒リスクを増加させる。また、転倒は骨折など外傷の原因となるだけではなく、転倒への不安や恐怖感から行動制限を引き起こし、ADL、QOLの低下を招くことが示されている。転倒に関わる運動機能に関しては下肢の筋力低下、関節可動域の低下、静的・動的なバランス能力の低下など様々な項目が報告されている(星ら 1995)。これらの転倒の原因にあげられる身体的要因については筋力やバランス能力などの運動機能の低下に対する運動介入が行われることで改善もみられている(加藤ら 2008)。

前方への転倒を防ぐため、立位時に下腿後面の筋(腓腹筋・ヒラメ筋)がある一定の長さ以上に伸張されると筋活動が生じて短縮する(伸張反射)。ヒトが任意の範囲で前後動揺した際に、筋線維の長さ変化を超音波法で定量した報告では、前方への動揺で下腿後面(腓腹筋・ヒラメ筋)の筋線維が短縮し、反対に後方への動揺では筋線維が伸張したことから、これらの筋線維の長さ変化が必ずしも足関節の角度変化と一致しなかったことが観察されている(Loram et al. 2004)。また、足関節角度変化がほとんどみられない($\geq 1^\circ$)開眼での安静立位姿勢を保持する施行であっても、筋活動に応じた筋線維の長さ変化が報告されている(Loram et al. 2005)。これらの知見から、ヒトが立位姿勢を安定させるためには、筋線維と腱組織のそれぞれの長さ変化が複雑に調節し合っていることが予想される。

筋線維や腱組織の力学的特性(スティフネスなど)は、関節の柔軟性や随意で発揮される関節トルクと関連することが知られており(Abellaneda et al. 2008; Kubo et al. 2001; Morse et al. 2008)、身体運動中の関節の力学的特性を説明するための指標として用いられる。これまでに安静立位姿勢を保持する際の関節トルクや関節スティフネスに関する報告は散見されるものの(Sasagawa et al. 2009)、筋腱複合体(筋線維と腱組織とを合わせた解剖学的単位)の力学的特性と合わせた観点から説明している報告はみられない。筋腱複合体の力学的特性は加齢変化を受けることから(川上ら 2003)、若年者と比較して高齢者では柔軟性や随意で発揮される関節トルクが低下する要因としてあげられている(Grimston et al. 1993)。以上から、加齢による姿勢調節能力の変化には関節スティフネスの影響と合わせて、関節スティフネスを構成する筋腱複合体の力学的特性の変化も影響を及ぼすことが予想される。

2. 研究の目的

本研究では、下腿の筋特性とバランス能力、さらにはバランス能力に影響を及ぼすと考えられる要素との関連について明らかにすることを目的とした。

- (1) 筋特性の一つとして筋のスティフネスについて、下腿の筋が同じ張力を発生させている状態で、筋収縮の有無により筋のスティフネスが変わるかどうかを明らかにするために(1)筋収縮を行わずに、関節の角度変化で受動的に張力を発生させる状態と、(2)最大下での筋収縮を行わせた能動的な張力を発生させた状態とで比較した。
- (2) バランス能力に関わる下腿の筋特性と生理学的な方策を明らかにするために、静止立位の保持と被験者が自ら任意の範囲で姿勢動揺を行った。それらの際に、筋線維(腓腹筋・ヒラメ筋)の長さ変化、及び下腿の筋放電(腓腹筋・ヒラメ筋・前脛骨筋)がどのように作用仕合、姿勢を安定させているかを明らかにすることを目的とした。
- (3) バランス能力とバランス能力に影響を及ぼすと考えられる要素について、高齢者を対象としたトレーニングによる効果を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

上記の目的について、以下の方法で研究を実行した。

- (1) 健康な男性 10 名 (27.6 ± 60 歳、 169.0 ± 5.1 cm、 61.8 ± 9.9 kg) を対象とした。被験者は足関節用の筋力計(VTF-002、VINE、日本)のシート部分に膝関節完全伸展で椅座位をとり、受動的な足関節の背屈と(受動試行)、随意での足関節底屈トルク発揮(能動試行)を行った。受動試行では、被験者は足関節用の筋力計のシート部分に座位をとり、股関節角度 30° 伸展、膝関節完全伸展で右足の足関節を筋力計のフットプレートに固定された。その際に被験者の腓腹筋内側頭(Gastrocnemius Medialis: MG)の下腿長近位 30% 部位に超音波装置(Aixplorer, SuperSonic Imagine, フランス)のプロブを固定した。筋力計のフットプレートは手で底屈 30° から背屈 20° まで 10° ずつ変えることができたため、全ての被験者で 6 つの角度の際の受動トルク、筋束長(Fascicle Length: FL)、羽状角(Pennation Angle: PA)、筋スティフネスを取得した。

能動試行では、被験者は受動試行と同様の姿勢で右側の足関節を筋力計のフットプレートに 0° (解剖学的正位) で固定された。被験者は任意のタイミングと強度で充分なウォーミングアップを行い、等尺性足関節底屈トルクを最大努力で 2 回発揮した。疲労などによる影響を考慮して 2 回の測定には 2 分間の休憩を設けた。また、2 回の測定値に 10% 以上の隔たりがある場合には 3 回目の測定を行った。次に上記で得られた足関節底屈トルクの 20% に相当するトルク発揮を行い、この試行を能動試行とした。モニタを被験者の眼前 1m に設置し、被験者が十分に認視できることを確認してターゲットトルクを提示した。受動試行と同様に被験者の足関節底屈トルク、MG の FL, PA, 筋硬度を取得した。

受動試行および能動試行で得られたトルクを条件間で揃えるために腱張力に換算した。その際に用いた足関節のモーメントアームの値は Maganaris et al. (2000) で報告されているものを用いた。能動試行で得られた腱張力の値に最も近い値を示したのが受動試行での足関節角度背屈 10° の値であったため、本研究では受動試行での FL, PA, 筋ステイフネスは足関節角度背屈 10° の値を用いて能動試行のそれらと比較した。

- (2) 健康な成人男性 13 名 (26.2 ± 3.9 歳) を対象として安静時の静止立位 (Quiet Standing: QS) 試行と、低速 (0.2 Hz) での随意的な前後動揺 (Voluntary Sway: VS) 試行をそれぞれ床反力計上で 60 秒間行った。QS 試行は 1 m 前方に設置されたモニタを注視して 60 秒間の安静立位を保持し、VS 試行はモニタ上に提示された信号を被験者が随意で行う前後動揺により追従する試行であった。その際の筋活動をヒラメ筋 (SOL)、腓腹筋内側頭 (MG)、前脛骨筋 (TA) から 1000Hz で導出した。また、筋束長変化を取得するために超音波 B モード法で SOL と MG を 30Hz で撮像した。床反力計から算出された足圧中心 (Center of Pressure: COP) と底屈筋群から導出された EMG 信号について相互相関関数 (Cross-Correlation Function: CCF) 解析を行い、両変数の波形の類似性を検討し、各々の時間差を求めた。
- (3) 東京都 N 市在住の中高齢者女性 12 名 (年齢 58 ± 7 歳, 身長 158 ± 6 cm, 体重 55 ± 6 kg) を対象として、週に 1 回、120 分のトレーニングセッションを 11 週間にわたり行った。トレーニングは、自

体重を負荷として下肢を中心とした筋群を対象として、バランス能力を向上させることを意図されたものであった。

11 週間のトレーニングの前後で体幹および下肢骨格筋の解剖学的筋横断面積、静的、動的下肢筋力および日常生活動作の遂行能力を測定した。測定は体操教室とは別日に行った。

筋横断面積の測定は右大腿部、右下腿部 (エコー時間 10 ms, 繰り返し時間 520 ms, マトリックス 256×192 , 撮像野 240 mm, スライス厚 1 cm) および体幹部 (エコー時間 15.6 ms, 繰り返し時間 860 ms, マトリックス 256×192 , 撮像野 450 mm, スライス厚 1 cm) を対象として、T1 強調磁気共鳴 (MR) 画像により実施した。得られた画像から、大腿長 (大転子から膝窩皺) の 50% 部位における大腿四頭筋、ハムストリングス、内転筋群の筋横断面積を算出した。下腿部においては、下腿長 (膝窩皺から外果) における近位 30% 部位における下腿三頭筋および前脛骨筋の筋横断面積を算出した。体幹部においては、腰椎 4-5 番目における大腰筋の筋横断面積 (左右の合計値) を算出した。

膝関節伸展・屈曲筋力は、最大努力における等尺性膝関節伸展トルク (MVC_{KE} トルク) および膝関節屈曲トルク (MVC_{KF} トルク) を測定し、全ての被験者において右脚を対象とした。被験者を筋力計 (VTK-002, VINE, Japan) 上のシートに座らせて、膝関節角度を 70° 、股関節角度を 80° (それぞれ完全伸展位を 0° とする) に固定した。膝関節の関節中心と筋力計の回転中心が一致するように留意し、非伸縮性のストラップを用いて骨盤を座面に固定した。最大下努力における数回の練習を実施した後、最大努力で膝関節を伸展および屈曲させ、 MVC_{KE} トルクおよび MVC_{KF} トルクを測定した。測定はそれぞれ 2 回行い、2 回の測定値の差が 10% 以上離れていた場合は 3 回目の測定を行った。疲労の影響を考慮するため、試行間には十分な休息をとった。2 回の測定値のうち、優れた値を分析対象とした。

足関節底屈・背屈筋力は、最大努力における足関節底屈トルク (MVC_{PF} トルク) および足関節背屈トルク (MVC_{DF} トルク) を測定した。全ての被験者において右脚を対象とした。被験者を筋力計 (VTF-002, VINE, Japan) 上のシートに座らせた。膝関節角度を 0° 、股関節角度を 80° に固定した。足関節角度

については、底屈トルク測定時には 0° (解剖学的正位)、背屈トルク測定時には底屈 10° とした。足関節の関節中心と筋力計の回転中心が一致するように留意して、非伸縮性のストラップを用いて足部を筋力計のプレートに固定した。最大下努力における数回の練習を実施した後、最大努力で足関節を底屈および背屈させ、 MVC_{PF} トルクおよび MVC_{DF} トルクを測定した。測定はそれぞれ 2 回行い、2 回の測定値の差が 10% 以上離れていた場合は 3 回目の測定を行った。疲労の影響を考慮するため、試行間には十分な休息をとった。2 回の測定値のうち、優れた値を分析対象とした。

脚伸展パワーは、脚伸展パワー計測マシン (Anaeropress 3500, Combi Co., Japan) を用いて、最大努力における両脚での脚伸展パワーを測定した。負荷は被験者の体重に設定した。被験者をマシン上のシートに座らせ、骨盤と足部を非伸縮性ストラップで固定した。数回の練習の後、全力かつ出来るだけ速く脚を伸展させた。測定は 5 回行った。最大値と 2 番目に大きい値の平均値をその後の分析に用いた。2 回の測定値における変動係数は $3.4 \pm 2.3\%$ であり、級内相関係数は 0.988 であった。

歩行時間は被験者に対して、11 m の区間を普段通り、あるいは出来るだけ速く歩くように指示した。ストップウォッチを用いて、区間のうち、中央の 5 m を歩いた時の時間を測定した。測定はそれぞれ 2 回行い、優れたタイムを分析対象とした。

椅子の座り立ち時間は、被験者に対して椅子の座り立ちを全力で行わせた。両脚を肩幅程度に広げた状態で胸の前で腕を組み、出来るだけ速く座り立ちを行うように指示した。10 回の座り立ちを行い、ストップウォッチを用いて、その時に要した時間を測定した。

動的なバランス能力を評価するために、ファンクショナルリーチを実施した。ホワイトボードの左横に被験者を安静立位にさせた。肩甲骨を外転させないように指示した状態で右手にペンを握らせ、ボード上に印をつけた。その後、出来るだけ前方へ印をつけるように指示した。その際、前のめりに動いてしまわないように指示した。2 つの印の水平距離を評価対象とした。測定は 2 回行い、優れた値を分析対象とした。

全ての測定項目は平均値 \pm 標準偏差で表した。統計処理には、統計解析

ソフトウェア (IBMSPSS 22.0, IBM, Japan) を用いた。体操講座の効果を検証するため、各測定項目について対応のある t 検定を用いた。体操実施期間中の歩数、身体活動量と各種測定項目の変化率との関係を検討するために、ピアソンの積率相関係数を算出した。危険率 5% 未満をもって統計的に有意とした。

4. 研究成果

- (1) 受動試行で得られた足関節角度底屈 30° から背屈 20° までの 6 角度における腱張力と筋ステイフネスの関係を図 1 に、腱張力と筋束長の関係を図 2 に、腱張力と羽状角との関係を図 3 に示す。いずれも有意な正の相関関係が得られており、各被験者の個人値においても全体のデータとほぼ同様の傾向を示した。

被験者の随意で行った最大努力での足関節最大底屈トルクは 185.2 ± 43.5 Nm であり、能動試行ではその 20% に相当する 36.7 ± 15.3 Nm を発揮した。能動試行中に発揮された足関節底屈トルクを腱張力に換算すると 638 ± 270 N であった。受動試行で得られた足関節角度背屈 10 度での腱張力は 614 ± 252 N であり大きな隔たりはなかった。

受動試行で得られた FL は 63.0 ± 6.4 mm で、能動試行で得られた FL の値である 49.4 ± 7.1 mm と比較して有意に高値を示した ($p < 0.05$)。同様に、受動試行で得られた PA は $19.5 \pm 2.0^\circ$ で、能動試行で得られた PA の値である $26.7 \pm 5.5^\circ$ と比較して有意に低値を示した

($p < 0.05$)。しかし、超音波エラストグラフィで測定した筋ステイフネスは受動試行では 158.4 ± 33.8 kPa であり、能動試行で得られた 152.5 ± 42.9 kPa と有意な差はみられなかった。

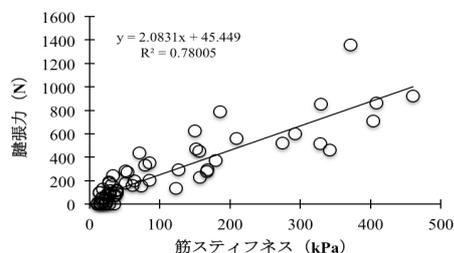


図 1 : 受動試行での腱張力 - 筋ステイフネス (底屈 30° から背屈 20° まで 6 角度のデータ)

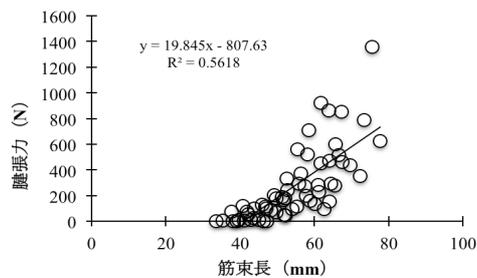


図 2：受動試行での腱張力 - 筋束長
(底屈 30°から背屈 20°まで 6 角度のデータ)

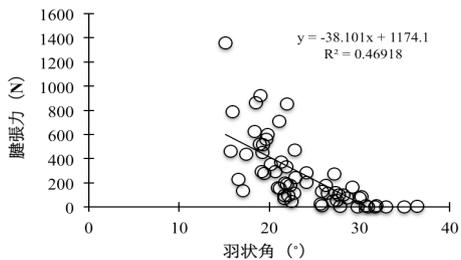


図 3：受動試行での腱張力 - 筋束長
(底屈 30°から背屈 20°まで 6 角度のデータ)

(2) 試行中の筋束長の結果を図に示す。SOL, MG 共に QS 試行と比較して VS 試行で有意に低値を示した ($p < 0.05$)。また、両試行で COP が前方へ移動する際に SOL, MG とともに筋放電が増加して、筋束長が短縮する傾向がみられた。COP と筋放電の各試行での相関係数は全ての組み合わせで有意であった (表)。QS 試行での COP と筋放電のピーク値の時間差は SOL で 243.3 ± 40.5 秒であり、MG で 201.3 ± 37.8 秒であった。VS 試行では SOL で 189.7 ± 50.6 秒であり、MG で 230.9 ± 50.3 秒であった。COP が前方へ移動する際の SOL の筋放電の開始は QS 試行において MG よりも早く ($p < 0.05$)、VS 試行では MG の方が SOL よりも早かった ($p < 0.05$)。

SOL, MG とともに、VS 試行で QS 試行よりも筋束長が短かったことは VS 試行で常に筋活動が生じて、それに応じた筋収縮が生じたためであると考えられる。COP が前方に移動する際に筋束長は SOL, MG とともに短縮する傾向にあった。これは筋活動に由来する Paradoxical muscle movement (Loram et al. 2004) と呼ばれる現象であり、足関節は背屈するにも関わらず底屈筋群の筋束長が短縮し、腱組織がその長さ変化を補うものである。また、両試行において COP と SOL, MG のピーク値の時間ずれが有意にみられた。これは、共働筋であっても立位姿勢時の重心位置に伴う収縮活動のタイ

ミングが異なることを示すものであった。

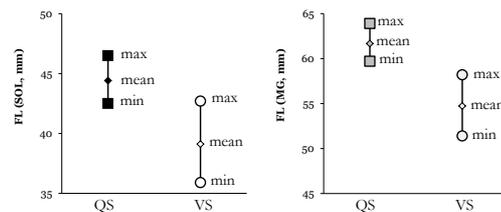


図 QS試行とVS試行中の筋束長の最大値, 最小値, 平均値 (n=13)

表 QS試行とVS試行中のCoPと筋放電の相関係数

	QS	VS
SOL	0.453	0.764
MG	0.512	0.823

(3) 体操教室の前後において、身長および体重に有意な変化はみられなかった。大腿四頭筋、ハムストリングス、下腿三頭筋および前脛骨筋の筋横断面積に有意な増加がみられた。増加量の平均値は、いずれにおいても、Typical error の 2 倍を上回っていた。増加率は、それぞれ $2.8 \pm 3.8\%$ (大腿四頭筋), $4.1 \pm 5.1\%$ (ハムストリングス), $3.8 \pm 5.0\%$ (下腿三頭筋) および $5.8 \pm 5.9\%$ (前脛骨筋) であった。内転筋群および大腰筋については有意な変化がみられなかった。

MVC_{KE} トルク, MVC_{PF} トルク, MVC_{DF} トルクおよび脚伸展パワーが有意に増加した。一方、 MVC_{KF} トルクについては有意な変化がみられなかった。

通常の方法での歩行時間および全力で歩いた時の歩行時間ともに、有意な変化はみられなかった。11 週間の体操教室の実施により、10 回の椅子の座り立ちにかかる時間が有意に改善された。

ファンクショナルリーチテストの結果に有意な変化はみられなかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ・ 地域性を考慮した体操の実施が中高齢女性の筋量および身体機能に及ぼす効果, 江間諒一, 加藤えみか, 川上泰雄, トレーニング科学, 26 (4), 197-209, 2015
- ・ The Effect of Hamstring Stretching on Muscle Hardness and Isokinetic Muscle Performance. Kato E., Takahashi H. Journal of Sports Science. 2 (2), 90-97, 2014

- Applicability of Ultrasound Muscle Thickness Measurements for Predicting Fat-Free Mass in Elderly Population. Takai Y., Ohta M., Akagi R., Kato E., Wakahara T., Kawakami Y., Fukunaga T., Kanehisa H. Journal of Nutrition Health and Aging. 18 (6), 579-585, 2014
- Combined affects of stretching and resistance training on ankle joint flexibility. Kato E., Kurihara T., Kanehisa H., Fukunaga T., Kawakami Y. Physiology Journal, Vol. 2013, Article ID 171809, 1-8, 2013, doi: 10.1155/2013/171809. 2013
- Validity of ultrasound muscle thickness measurements for predicting leg skeletal muscle mass in healthy Japanese middle-aged and older individuals. Takai Y., Ohta M., Akagi R., Kato E., Wakahara T., Kawakami Y., Fukunaga T., Kanehisa H. Journal of Physiological Anthpology. 32 (1), doi: 10.1186/1880-6805-32-12. 2013
- Differences in Spring-Mass Characteristics between One- and Two-Legged Hopping. Hobara H., Kobayashi Y., Kato E., Ogata T. Journal of Applied Biomechanics. 29(6), 785-89, 2013

[学会発表] (計 5 件)

- Comparison of muscle elasticity between passive and active condition. Kato E., Chino K., Takahashi H. 20th Annual Congress of European College of Sport Science, Malmö, Sweden, 24-27 June, 2015
- ハムストリングのストレッチが筋硬度と発揮トルクに及ぼす影響 一時間経過に着目して— 加藤えみか, 高橋英幸 第23回日本バイオメカニクス学会大会 2014年9月13日～15日, 国立スポーツ科学センター
- The effect of hamstring stretching on muscle hardness and isokinetic muscle performance. Kato E., Takahashi H. 19th Annual Congress of European College of Sport Science, Amsterdam, Netherland, 2-5 July, 2014
- 立位姿勢における随意的な前後動揺中のヒラメ筋・腓腹筋間の振舞い 一筋放電と筋束長変化に着目して— 加藤えみか, 井原壽一, 緒方徹, 河島則天 第22回日本バイオメカニクス学会大会 2012年9月11日～13日, 北翔大学
- The architectural and mechanical properties of paralyzed triceps surae muscles in patients with spinal cord injury and post stroke. Kato E., Negishi D., Niimi M, Ogata T., Kawashima N, 17th Annual Congress of European College of Sport Science, Bruges, Belgium, 4-7 July, 2012

[図書] (計 1 件)

- SEBI・SEI のためのストレッチングエクササイズ指導理論「第2章 ストレッチングに関する基礎知識」加藤えみか, 川上泰雄, 「SEBI・SEI のためのストレッチングエクササイズ指導理論」(沢井史穂 編著) 公益社団法人日本フィットネス協会発行 2014年7月

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 出願年月日：
 国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
 発明者：
 権利者：
 種類：
 番号：
 取得年月日：
 国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

加藤 えみか (KATO, Emika)
 国立スポーツ科学センター・スポーツ科学部・契約研究員
 研究者番号： 90586439

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：