

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：37102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22770248

研究課題名（和文）陸上移動運動中の下肢協働筋活動の相補作用：その生理的多型性と機能的潜在性について

研究課題名（英文）Anthropological research of synergetic muscle activities in the leg extremities during human land locomotion: its physiological polymorphism and functional potentiality

研究代表者

安陪 大治郎 (ABE DAIJIRO)

九州産業大学・健康・スポーツ科学センター・講師

研究者番号：10368821

研究成果の概要（和文）：現存する陸上生物の中で、直立二足移動が可能な生物はヒトだけである。しかしながら、ヒトが進化の歴史の中で直立二足移動を獲得するにあたって、腰痛や痔、立ち眩み、低い最大疾走速度など、幾つかの生物的な不利益を併せ持つことになった。一方、直立二足移動によって巨大な頭部重量を支えることが可能になったことや、極めて高い運動効率（＝エネルギー消費量の節約）を獲得したことなどの利点がある。

代表的な直立二足移動形態である歩行動作や走動作を遂行するための下肢筋群には、類似した機能解剖学的役割を果たす協働筋群がある。一見、生物学的には無駄に見える協働筋の存在意義として、例えば筋疲労や加齢などによる筋力低下を相補的に補い合う機能があるのかもしれない。そこで本研究では、1) 高強度等尺性運動における大腿部協働筋群の筋活動様相、2) 高強度ダイナミック運動時における大腿部協働筋群の筋活動様相、3) 歩行運動中の下肢協働筋群の筋活動様相、について生理人類学的な視点から検討した。

研究成果の概要（英文）：Bipedalism, being substantially related to the human land locomotion, involves several critical disadvantages, such as back pain, hemorrhoids, dizziness when standing up, and relatively lower maximal running speed. In spite of those biological disadvantages, bipedal locomotion takes some advantages such as higher locomotion economy that can save energy expenditure and relatively larger head volume that results in an intellectual growth as human beings. Leg extremities for executing bipedal locomotion involve several sets of synergists. From a biological viewpoint, the existence of synergist in the leg extremities seems to be a biological vain, but it may play a compensatory role in a case that a part of synergetic muscle is fatigued. The present study examined muscle activities of the synergists in the leg extremities during human locomotion and dynamic/static knee extension exercises for examining its physiological polymorphism and functional potentiality.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：人類学・応用人類学

キーワード：歩行、ランニング、ロコモーション、機能的潜在性、生理的多型性、生理人類学

1. 研究開始当初の背景

地球上で唯一、直立二足歩行が可能な生物であるヒトの脚筋には、類似した役割を果た

す「協働筋群」があり、機能解剖学的にもユニークな特徴を有する。例えば、足関節を協働的に制御するヒラメ筋と腓腹筋を軽負荷

に抗して持続的に収縮させると、時間経過に伴って大きな筋活動を示す時点と、休止や低下を示す時点が観察されることが知られている。このような相補的な筋活動は活動交代や生理的振戦と呼ばれている。

ところが、このような相補的な筋活動は、運動様式が等尺性であるときや、低強度長時間であるときしか出現しないとされてきた。しかも先行研究の殆どは下腿三頭筋を対象としており、運動強度も最大筋力の30%までに限定されている。また、このような相補的な筋活動は、動的運動の代表例である歩行動作や歩行動作中の筋機能にも何らかの影響を及ぼしていることが考えられる。

2. 研究の目的

(1)問題点1：高強度等尺性収縮における大腿部協働筋群の筋活動様相

下腿三頭筋と同様に、ヒトの運動遂行に関わる主要な協働筋群として、大腿四頭筋が挙げられる。大腿四頭筋は膝関節屈伸の機能を担っており、表層筋である内側広筋、外側広筋、大腿直筋に加えて深層筋である中間広筋という4つの協働筋によって構成されている。大腿部協働筋群にも下腿部と同じように、機能解剖学的、生化学的な違いが存在するが、下腿三頭筋と比較して大きく異なる点は、筋自体のサイズが大きいことである。

これまでの報告から、活動交代や生理的振戦のような相補的筋活動は、筋疲労に対する合目的な適応現象であると考えられてきたが、同筋群に関するこれまでの報告は、先に述べた通り極めて少なく、運動強度も最大筋力の30%までに限定されている(Kouzaki et al. 2004)。

そこで本検討課題では、高強度かつ静的な単関節運動に焦点を当て、下肢協働筋間における相補的筋活動について検討することを目的とした。

(2)問題点2：高強度ダイナミック運動時における大腿部協働筋群の筋活動様相

(1)問題点1では、高強度かつ静的な単関節運動を対象としたため、ここでは、高強度かつ動的な単関節運動に焦点を当て、下肢協働筋間における相補的筋活動について検討することを目的とした。

(3)問題点3：歩行中の協働筋間における筋弾性発揮のコーディネーション

この検討課題では、複合関節運動である歩行動作に焦点を当て、下腿部協働筋群および大腿部協働筋群の筋弾性機能発揮の調節について、sedentary（座位作業）な生活を行

っている人々と、日常的に脚を使った運動を行っているアスリートの筋電図を比較検討することによって、運動が筋弾性に及ぼす影響を検討した。

3. 研究の方法

(1)問題点1：高強度等尺性収縮における大腿部協働筋群の筋活動様相

本検討課題では、10名の男子学生を対象に、最大筋力の40%で大腿部協働筋群を等尺性収縮させた時の筋活動と平均周波数を観察した。筋電図は次のように区分した。「前半」は運動開始から2-10秒までの8秒間、「中間」は運動時間全体の中間点の前後4秒（計8秒間）、「後半」は運動終了2-10秒前の8秒間とした。実際の運動継続時間は平均73秒（51～121秒）であった。筋電図の平均周波数は、ハミングウィンドウを用いた高速フーリエ変換で算出した。

(2)問題点2：高強度ダイナミック運動時における大腿部協働筋群の筋活動様相

10名の男子学生を対象に、最大筋力の30%に相当する強度（30%MVC）で膝伸展運動を行った。この運動では、2秒に1回のペースで膝関節を90度から180度に伸ばす動作を連続で行わせた。運動回数は20回とし、測定したデータを前半10回と後半10回に分けて解析を行った。筋活動量は各10回の試技で得られたデータを平均化し1回あたりのデータで表した。また、対象とした3筋で得られた総筋放電量を100としたときの各々の筋の筋放電量を筋放電比率として表した。筋電図の平均周波数は、ハミングウィンドウを用いた高速フーリエ変換で算出した。

(3)問題点3：歩行中の協働筋間における筋弾性発揮のコーディネーション

被験者は、サッカーおよび陸上競技を専門とする男子大学生11名（運動選手群）と過去2年間以内に習慣的な運動を行っていない男子大学生11名（非運動選手群）を対象とした（本報告には、この年度までに解析が終了した運動選手群11名と非運動選手群4名の結果を報告する）。実験室内のトレッドミル上にて、速度3条件（3km/h（ゆっくり）、4.5km/h（普通）、6km/h（早歩き））、および傾斜角度3条件（平地、下り（-5%）、登り（+5%））の合計9条件の自由歩行を行った。

下肢協働筋（腓腹筋内側頭、同外側頭、ヒラメ筋）および大腿部協働筋（内側広筋、大腿直筋）にアンプ内蔵型筋電図電極を取り付けた。また、各々の筋から得られた筋電図信号を、膝関節および足関節角度情報から伸張

期 (Ecc) と短縮期 (Con) に分類し、それぞれの積分筋放電量の比 (Ecc/Con 比) を求め、筋弾性の指標とした。さらに各被験者の平地 4.5km/h における Ecc/Con 比を元に各条件の測定値を規格化した (図 1)。各条件の解析歩数は約 20 歩とした。

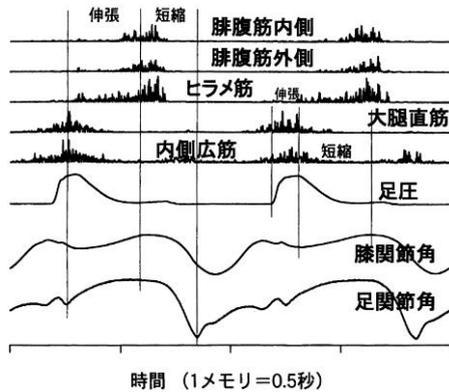


図 1. 表面筋電図による歩行中の筋弾性評価

4. 研究成果

(1) 問題点 1 : 高強度等尺性収縮における大腿部協働筋群の筋活動様相

一連の測定では、各時間帯において大腿直筋の筋放電量が内側広筋および外側広筋より少ないことを観察した (図 2)。

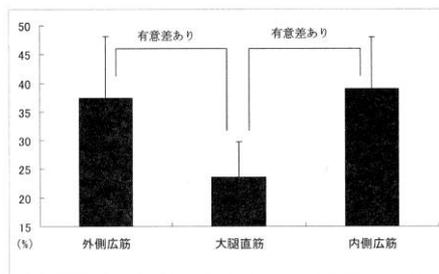


図 2. 「前半」における筋放電量の比率

この結果は、大腿直筋だけが複合関節筋であることに関係していると考えられる。複合関節筋である大腿直筋は、離れた体節間でのエネルギーやパワーを伝達する役目を担っており、同筋の疲労は大腿部前面における唯一の複合関節筋の利点を失うことを意味する。このため、単関節筋である内側広筋と外側広筋が大腿直筋の疲労を抑制するように力発揮調節を行っているものと考えられる。

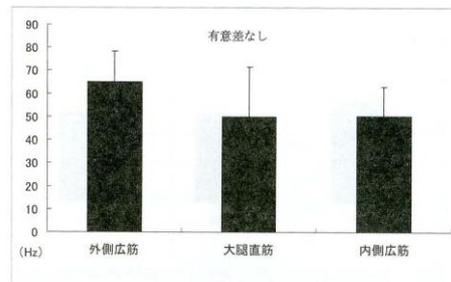
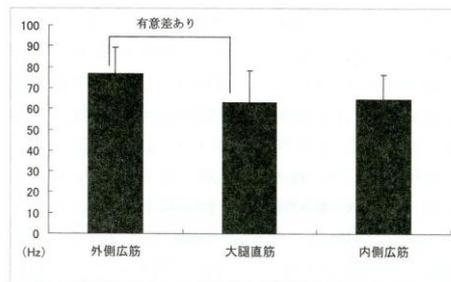
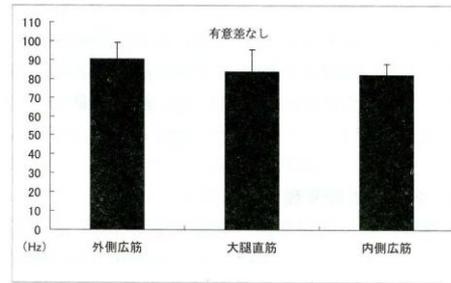


図 3. 上から「前半」「中間」「後半」の各時間帯における平均周波数の比較

次に、時間経過に伴う平均周波数の低下が全筋で観察された。このことは、対象とした全ての筋が十分に「筋疲労」したことを意味する。時間毎に検討すると「中間」における外側広筋の平均周波数が大腿直筋より高い傾向を示した (図 3 中)。さらに時間が経過すると、全筋間の平均周波数に有意差はみられなくなった (図 3 下)。これらの結果は、協働筋間で稼働される筋線維が変化していることを意味している。また、高強度等尺性収縮でも協働筋間並びに協働筋内で相補的筋活動が行われていることを示唆するものである。

(2) 問題点 2: 高強度ダイナミック運動時における大腿部協働筋群の筋活動様相

これらの測定の結果、主に次のような測定結果を得た。

- ① 全ての対象筋の筋放電量は、前半 10 回より後半 10 回の方が高かった (図 4)。
- ② 大腿直筋において筋放電比率の低下がみ

られた (図 5)。
 ③外側広筋の平均周波数は前半 10 回より後半 10 回の方が低かった (図 6)。

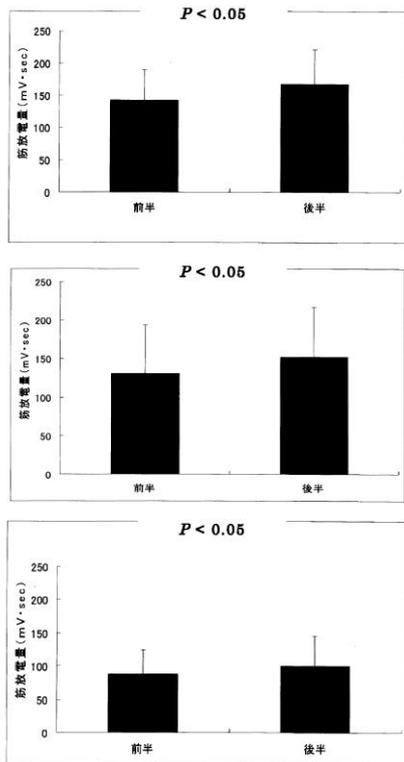


図 4. 大腿部協働筋群の筋放電量の比較 (上/外側広筋, 中/内側広筋, 下/大腿直筋)

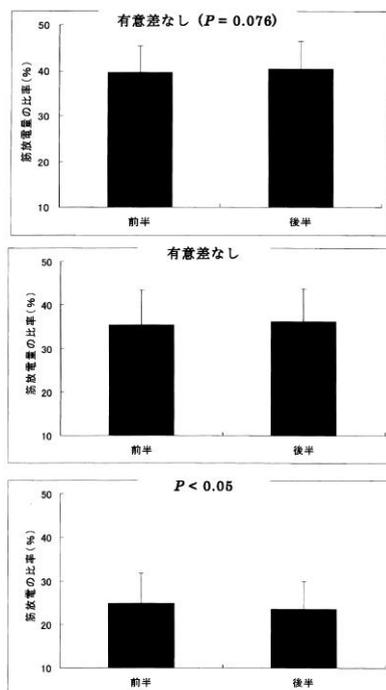


図 5. 大腿部協働筋群の筋放電比率の比較 (3筋の総筋放電量に対する比率を示す。上/外側広筋, 中/内側広筋, 下/大腿直筋)

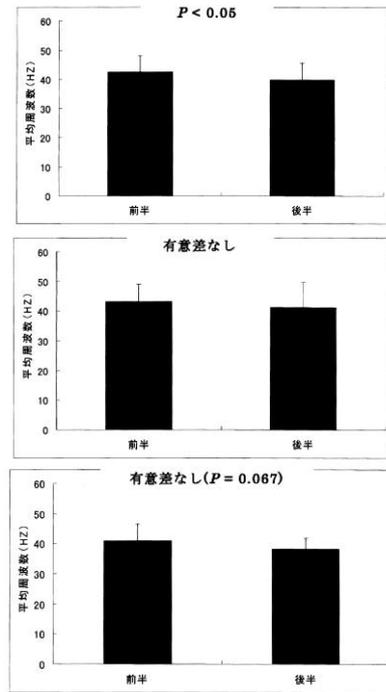


図 6. 大腿部協働筋群の平均周波数の比較 (上/外側広筋, 中/内側広筋, 下/大腿直筋)

随意的な筋収縮を動的、静的に持続した場合、疲労した筋の筋力発揮の低下を補償するため、同一強度の運動継続において筋放電量が時間経過に伴って漸増する。このとき関連する運動単位では、動員と発火頻度を調節するが、30%MVC以下の筋出力では運動単位の動員が、30%MVC以上の運動強度では発火頻度が優位となって制御していると言われている。このときの制御機構の違いが活動交代 (30%MVC以下) と生理的振戦 (30%MVC以上) を分けていると考えられるが、いずれにせよ、神経筋活動に参画している運動単位に機能低下が生じた場合、その低下分を運動単位の動員や発火頻度調節によって補償する以外に発揮筋力を維持する方法はない。

しかしながら、このような一義的な運動の神経系調節機構に合致しない調節様式を示す筋活動も確実に存在し、冒頭で説明した生理的振戦 (または活動交代) はこの典型例と言える。先行研究において、主に等尺性収縮が解析の対象とされてきた経緯は、筋電図の視認性の問題であると考えられる。静的運動から得られた筋電図を解析対象とする場合は容易である。しかしながら動的な運動を対象とした場合、相補的筋活動の有無を視認性に頼ることは実際上不可能であり、積分筋電図を比較検討することによって協働筋どうしの相補的筋活動を評価するしかない。本研究では、30%MVCにおける膝伸展運動を対象課題としたが、図4で示したように全ての対象筋において筋放電量の有意な増加を認め

ており、神経-筋における末梢性疲労を招来していたことが判明した。しかしながら、図 5 に示すように、筋放電量の変化の仕方は協働筋間で一様ではなく、特に大腿直筋では筋放電比率(対象3筋の総筋放電量に対する比率)の有意な低下を認めている。また、この大腿直筋における筋放電比率の低下を補うように、外側広筋において(統計的に有意ではなかったが)筋放電比率の増加傾向を認めた。これらの結果は、これまで報告されてはいない「高強度」で、しかも「動的な運動」においても活動交代が現れる可能性を示している。この結果を説明する機能解剖学的な理由として次のようなことが考えられる。膝関節伸展の機能を持つ大腿四頭筋には、外側広筋、内側広筋、大腿直筋、中間広筋という4つの協働筋があるが、これらの協働筋群のうち、大腿直筋だけは複合関節筋で、ほかの外側広筋、内側広筋、中間広筋は単関節筋である。複合関節筋である大腿直筋は、筋横断面積が小さいかわりに関節から関節へと力を速く伝達する能力に優れている。一方、外側広筋や内側広筋は単関節筋なので強大な力を発揮することに優れている。本研究の結果は、運動の継続で協働筋群に疲労が蓄積していくことによって、筋径が大きい外側広筋の負担を増加させ、筋径が小さい大腿直筋の負担を減じた神経生理的な補償作用であったと解釈するのが妥当であろう。

相補的な筋活動に関する多くの先行研究は、ほとんどの場合、下腿部協働筋群を対象としてきたが、本研究のように膝伸展に関わる大腿部協働筋群は、下腿部協働筋群に比べて筋のサイズが格段に大きいことから、より高強度の運動負荷に耐えうることを期待される。事実、本研究でも全ての被験者が20回連続の膝伸展運動を完遂しており、仮に筋内圧の上昇によって運動筋周辺での疎血が発生したとしても、一般健常人ならば20回の運動課題を問題なく遂行できるであろう。ちなみに、大腿部協働筋群を対象とした数少ない先行研究では、極めて劇的な全筋レベルでの相補的な筋活動を観察しており、本研究で得られた筋放電比率の変動を支持するものであった。

また、得られた筋電図に対する周波数解析については、全対象筋において低下傾向が見られた。しかしながら、統計的に有意な低下傾向を示したのは外側広筋だけで、他の大腿直筋や内側広筋については有意ではなかった(図6)。一般的に筋電図周波数の低下は筋疲労の指標とされているが、これまで述べてきた相補的な筋活動によって、疲労を遅延させる神経生理学的な補償作用が発生していると考えられる。しかしながら筆者の知る限りにおいて、先行研究で相補的な筋活動の観察時に筋電図の周波数解析を行ったものはな

く、比較検討できる資料がないことは残念である。さらなる検討が必要であろう。

(3)問題点3: 歩行中の協働筋間における筋弾性発揮のコーディネーション

下腿筋群については、両群全ての傾斜条件において、歩行速度の増大に対応してEcc/Con比が有意に低下する傾向がみられた(表1-2)。また、下腿部協働筋間にEcc/Con比の有意差は見られなかった。これらの結果は、歩行速度増大に伴って下腿筋群の弾性が低下している(足関節の剛性が高くなっている)ことを意味しているが、速度増大に伴う着地衝撃の増加から足関節を守る生理学的利点があると考えられる。

一方、大腿筋群は下腿筋群とは異なり、Ecc/Con比は速度増加に伴って有意に増加した。エネルギー消費を最小化するためには、脚筋の弾性を高める必要があると考えられるが、下腿筋群で低下した筋弾性を大腿筋群が補っていることが示唆された。

表1 運動選手群のEcc/Con比

	下腿筋			大腿筋	
	腓腹筋内側	腓腹筋外側	ヒラメ筋	内側広筋	大腿直筋
L50	2.07	2.20	2.55	0.68	0.70
L75	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
L100	0.41	0.39	0.49	1.37	1.63
D50	3.70	2.20	2.61	0.82	0.86
D75	2.82	1.99	2.37	1.19	1.21
D100	0.73	0.59	0.72	1.81	1.82
U50	1.26	1.33	1.71	0.74	0.80
U75	0.83	0.85	0.95	1.32	1.20
U100	0.44	0.42	0.69	1.75	1.88

表2 非運動選手群のEcc/Con比

	下腿筋			大腿筋	
	腓腹筋内側	腓腹筋外側	ヒラメ筋	内側広筋	大腿直筋
L50	1.74	1.90	1.44	0.88	0.66
L75	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
L100	0.53	0.49	0.65	0.85	1.05
D50	2.45	1.52	2.10	0.89	0.95
D75	1.59	1.31	1.70	1.31	1.54
D100	0.65	0.69	0.90	1.46	1.09
U50	0.90	1.14	0.99	0.64	0.59
U75	0.52	0.54	0.60	0.84	0.68
U100	0.41	0.38	0.51	0.88	0.71

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)

- ① Takayoshi Yoshida, Daijiro Abe, Yoshiyuki Fukuoka. Phosphocreatine resynthesis during recovery in different muscles of the exercising leg by 31P-MRS.

Scand J Med Sci Sports, 2013 (in press) 査読有

- ② 安陪大治郎. 高強度等尺性収縮における大腿部協働筋群の筋活動様相. *健康・スポーツ科学研究*, Vol.15 pp.1-6, 2013 査読無
- ③ Daijiro Abe, Yoshiyuki Fukuoka, Satoshi Muraki, Akira Yasukouchi, Yasushi Sakaguchi, Shigemitsu Niihata. Effects of load and gradient on energy cost of running. *J Physiol Anthropol*, Vol.30 No.4 pp.153-160, 2011 査読有
- ④ 安陪大治郎. 歩行中の下肢協働筋群に発生する筋弾性機能の評価: 座位作業者と運動選手の比較検討. *中富健康科学振興財団研究助成業績集*, Vol.22 pp.41-43, 2011 申請時に査読有
- ⑤ Daijiro Abe, Norio Hotta, Yoshiyuki Fukuoka, Yoko Ohta, Keiko Hamasaki. Biomechanical analysis of gait and sit-to-stand patterns using a specially made knee supporter in healthy young and elderly individuals. *J Physiol Anthropol*, Vol.29 pp.65-70, 2010 査読有
- ⑥ 安陪大治郎. 高強度ダイナミック運動時における大腿部協働筋群の筋活動様相. *健康・スポーツ科学研究*, Vol.12 pp.45-49, 2010 査読無

[学会発表] (計 1 件)

- ① 安陪大治郎. 現在の生理人類学の研究視点と今後の動向. 第 63 回日本生理人類学会シンポジウム「生理人類学の体系—あれから. そして, これから—」. *日本生理人類学会誌*, Vol.15 特別号(2), pp.14-15, 2010

[図書] (計 3 件)

- ① 人間科学の百科事典 第七章・ヒトの営み (中村晴信・安陪大治郎 編集)「動作経済の法則」日本生理人類学会編, 丸善出版, 2014 出版 (予定/入稿済)
- ② 人間科学の百科事典 第二章・カラダの構造 (下村義弘・工藤奨 編集)「足」日本生理人類学会編, 丸善出版, 2014 出版 (予定/入稿済)
- ③ 人間科学の百科事典 第八章・健康と福祉 (小林宏光・甲田勝康 編集) 日本生理人類学会編, 丸善出版, 2014 出版 (予定/入稿済)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安陪 大治郎 (ABE DAIJIRO)
九州産業大学・健康・スポーツ科学センター・講師
研究者番号: 10368821

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: