

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：32309

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K14804

研究課題名(和文) ヒトとテナガザルの二足歩行における体幹運動の類似性検証

研究課題名(英文) Commonality in trunk kinetics between bipedalism of human and gibbon

研究代表者

後藤 遼佑 (Goto, Ryosuke)

群馬パース大学・リハビリテーション学部・講師

研究者番号：00755788

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトの二足歩行では体幹の直立位が常に維持される点において他の霊長類が時折行う二足歩行とは異なる。本研究では、ヒトと他の霊長類で共有される特徴とヒト固有の特徴を明らかにすることを目的として、3種霊長類(ヒト、シロテナガザル、ニホンザル)の傍脊柱筋の活動を分析した。本研究から3つの知見が得られた。(1)本研究の3種霊長類はみな、傍脊柱筋が二足歩行時の同質的な力学的変化に対して活動するが、(2)ヒトだけがその変化に予期的に活動する可能性がある。また、(3)ヒト上科に属するヒトとシロテナガザルでは傍脊柱筋が非常に特徴的な様式で協調的に活動し、その様式はニホンザルには見られない。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は体幹直立性の進化についてこれまで提唱されてきた仮説を新たな視点から支持するものである。これまでの研究から、ヒトの体幹直立性はヒト固有の特徴というよりもむしろ、ヒト上科全体に存在する多様性の一端に位置付けられると考えられてきた。この主張は主に霊長類の筋骨格系に関する形態的研究から構築された仮説である。本研究は筋活動等の生理的指標を分析した場合においても、ヒトと類人猿に類似した体幹直立基盤が存在することを明らかにした。すなわち、ヒトと類人猿では筋骨格系だけでなく、筋活動を調節する神経系にも体幹直立に適応した動物群である可能性を新たに提示した。

研究成果の概要(英文)： Human bipedalism differs from the occasional bipedal locomotion of other primates in that the upright trunk posture is maintained. In this study, we analyzed the activity of paraspinal muscles in three primate species (human, white-handed gibbon, and Japanese macaque) with the aim of identifying traits shared by humans and other primates as well as traits unique to humans.

Three findings were obtained from this study. (1) All the primates we used have paraspinal muscles that are active in response to homogeneous mechanical changes during bipedal walking; (2) only paraspinal muscles of the humans may activate being anticipatory to the mechanical changes. In addition, (3) the paraspinal muscles activate in a unique manner in the humans and gibbon, and this manner is not found in the Japanese macaque.

研究分野：生物人類学

キーワード：直立二足歩行 ヒト シロテナガザル ニホンザル 脊柱起立筋 筋電図 体幹 進化

1. 研究開始当初の背景

二足歩行はヒトの重要な生物学的特徴の一つである。非ヒト霊長類は二足歩行を一時的に行う場合があるが、他の移動様式を常習的に用いる。ヒトの二足歩行と非ヒト霊長類の二足歩行には大きなギャップがあると考えられており、ヒトの二足性が生じる上で、非ヒト霊長類とヒトの二足歩行の間を埋める中間的段階が想定されてきた。しかし、現生類人猿が自然下で二足歩行を行う場合があるとするフィールド研究成果を無視してはならない。現生類人猿が行う二足歩行はヒト的二足歩行の萌芽的段階に相当する移動様式であるかもしれない。もし現生類人猿が行う萌芽的な二足歩行にヒトの二足歩行の起源があるのなら、ヒトと現生類人猿の二足歩行の間に共通性が存在するはずである。

ヒトの二足歩行は直立二足歩行といわれ、現生類人猿が一時的に行う二足歩行とは区別される。直立二足歩行を特徴づけるのは、ヒト二足歩行における下肢関節の大きな伸展角度であるが、体幹の直立性も直立二足歩行を特徴づける形質といえる。しかしながら、体幹は身体の中でもっとも質量の高い部位であるが、多数の分節の集合で構成される複雑な形態さゆえ、これまでの運動解析では単純化された一つの剛体として扱われてきた。その背景から、二足歩行の体幹運動は近年研究が行われ始めたばかりである。本研究では、詳細な機能解析が可能な筋活動電位を指標として、ヒトを含む3種霊長類の体幹運動を解析する。

2. 研究の目的

これまで詳細な解析が行われなかったヒトと類人猿(シロテナガザル)、サル類(ニホンザル)の体幹、特に体幹の直立姿勢にかかわる傍脊柱筋を対象として、二足歩行における当該筋の活動電位から種間の共通点と相違点を明らかにする。種間の共通点は3種霊長類が共通の祖先からその形質を引き継いだことを示唆する。また、種間の相違点は3種霊長類の系統が分岐した後、それぞれに獲得した固有の運動適応を示唆する。それらの結果を総合して、ヒトの直立二足歩行における体幹運動制御の進化を推測する。

3. 研究の方法

ヒト、シロテナガザル、ニホンザルの二足歩行において、頭部と骨盤の変位、傍脊柱筋の筋活動電位を計測した。

・ヒトを対象とする実験と解析

8名の健常男性成人を対象とした。実験協力者の身体に表面電極と赤外線反射マーカを皮膚表面貼付し、三次元動作解析システム、床反力計測システム、筋電図計測システムが同期した環境下で二足歩行を行わせた。移動速度は各実験参加者の自然な歩行速度とした。赤外線反射マーカはVicon社が提案するPlug-in gaitに準じて貼付し、本研究独自のランドマークとして、眼窩外側端、耳珠、第7頸椎、第4胸椎、第8胸椎、第12胸椎、第4腰椎棘突起を追加した。表面電極は第7頸椎、第4胸椎、第8胸椎、第12胸椎、第4腰椎の高さにおいて傍脊柱筋直上の皮膚に貼付し、傍脊柱筋の活動を多分節で同時記録した。なお、本実験は群馬パース大学研究倫理審査委員会の承認(PAZ20-4)を得て、実験協力者への説明と同意のもとに行われた。

・シロテナガザルとニホンザルを対象とする実験と解析

それぞれ1個体のシロテナガザルとニホンザルを対象とした。頭部と骨盤においてヒトと相同な部位に塗料で標識を施し、二足歩行を行わせた。ニホンザルは本来は四足歩行で移動する動物であるが、本研究のために二足歩行訓練を受けた個体を使用した。身体ランドマークの標識に加え、各動物の最長筋に第7頸椎、第4胸椎、第8胸椎、第12胸椎、第4腰椎の高さでファインワイヤ電極を挿入し、ヒトと同様に筋の活動を多分節で同時計測した。本実験は大阪大学大学院人間科学研究科動物実験倫理審査委員会の承認を得て実施された。シロテナガザル実験の承認番号は動人科26-10-2、ニホンザル実験の承認番号は動人科27-3-2である。

・データ解析

すべてのデータは一歩行周期(筋活動を計測した身体左側の下肢もしくは後肢の着地から次の着地まで)に該当する時系列データとして生データから切り出した。それらの一歩行周期データから3つの指標を算出した。

- (1) 傍脊柱筋の活動プロファイル：一歩行周期のどの相で傍脊柱筋が活動するのかを表す時系列データ
- (2) 頭部と骨盤の前方加速度プロファイル：一歩行周期のどの相で頭部や骨盤が前方へ加速、もしくは後方へ加速するのかを表す時系列データ。さらに本研究では頭部と骨盤の前方加速度の差を算出し、頭部の相対的な加減速を数値化した。
- (3) 傍脊柱筋各分節における活動の時間関係：頭側と尾側の脊椎分節における傍脊柱筋活動タイミングのずれ。第4腰椎における活動を基準として、それより頭側の分節(C7、T4、T8、

T12)がL4よりも早く活動するのか、遅いタイミングで活動するのかを表す指標であった。

4. 研究成果

本研究から3つの知見が得られた。

(1) 3種霊長類において二足歩行時の傍脊柱筋の活動パターンはおおむね類似する。

ヒト、シロテナガザル、ニホンザルの傍脊柱筋は一歩行周期において2回の活動を示し、その2回の活動のタイミングは3種で類似した。2回の活動のピークは二重支持期（二足歩行時の左右両側の後肢が着地している時期）に見られた。

この傍脊柱筋が活動するタイミングは頭部の前方加速度が骨盤の前方加速度を上回る時期にあたった。3種霊長類において傍脊柱筋は頭部の相対的な前方加速を制動する機能を果たすと考えられる。二重支持期には身体重心の前後に後肢が着地するため、身体は前後から支持基体反力を受ける。二重支持期は前方に後肢が着地した時点から開始するが、その後肢の着地により後ろ向きの支持基体反力が身体に作用し、骨盤は後方へ加速し始める。一方、この時、体幹の上端に位置する頭部は未だ前方への加速を続けており、二重支持期において頭部が相対的に骨盤に対して前方へ加速する時期が生まれる。傍脊柱筋が活動し頭部を後方へ引くことでこの頭尾の前方加速度差を緩衝し、頭部を安定させると考えられた。

注目すべき点は二足歩行の常習性に拘らずニホンザルを含む3種において同様のパターンを示した点である。この結果から、一歩行周期に2回あるそれぞれの二重支持期において傍脊柱筋の活動がピークとなるパターンは各種の適応というよりも、二足歩行というロコモーションに内在する力学への対応として生じる可能性が考えられた。

(2) ヒトの傍脊柱筋は予期的に活動する。

(1)で述べた様に3種霊長類の傍脊柱筋の活動は概ね類似したが、頭部と骨盤の加速度差と第4腰椎における傍脊柱筋の活動を時間的に詳細に分析すると、ヒト固有の特徴が明らかとなった。相互相関係数を用いて、頭部と骨盤の加速度差の変化と傍脊柱筋の筋電図の時間的なずれを数値化すると、ヒトでは傍脊柱筋の活動が加速度差の変化をわずかに先行しており、一方、テナガザルとニホンザルでは傍脊柱筋は加速度差の変化にわずかに遅れて活動することが多かった。この結果は、常習的二足歩行者であるヒトは予期的に傍脊柱筋を活動させて、体幹のスティネスを高め、頭尾の加速度差の増加に予測的に対処するが、非ヒト霊長類は頭部と骨盤の加速度差が増加するとそれに追従する形で筋の活動が増大することを示唆した。前者のヒト様パターンは予測的活動、後者の活動様式は反射的な活動と言えた。

(3) ヒトとテナガザルの傍脊柱筋は特徴的な協調的様式で活動する。

多分節で計測した傍脊柱筋の筋電図から、ヒトとシロテナガザルでは傍脊柱筋が頭側から活動を始め、その活動が逐次尾側へ伝播してゆくことが分かった。一方、ニホンザルでは分節の間で傍脊柱筋の活動が協調的でなく、分節間の時間的關係に統制が取れていなかった。

ヒトとテナガザルには傍脊柱筋を分節間で協調させる神経基盤があると考えられた。傍脊柱筋は脊髄の各髄節に存在する運動神経細胞によって支配される。傍脊柱筋は骨盤から頭部まで脊柱に沿って走る大きな筋であり、それらを支配する運動神経細胞が頸部から尾部まで分節的に脊柱内に分布するので、運動神経細胞の間に何らかの連絡がなければ、筋全体を協調して一斉に収縮させることが難しいと考えられる。仮に、傍脊柱筋を支配する運動神経細胞群が何らかの形で連絡されていれば、ある分節での活動が筋全体に伝播され、筋全体として協調的な収縮が可能にあると考えられる。筋の活動電位から正確な神経回路の構造は推定できないものの、ヒトとテナガザル、すなわちヒト上科のなかでも体幹直立姿勢に適応した動物では体幹直立性の基盤となる神経回路が存在する可能性が考えられた。

(4) まとめ

本研究結果を統合すると、二足歩行時の体幹を直立させる生体機構について三段階が考えられる。

まず、体幹直立姿勢の常習性に拘らず、二足歩行は二重支持期に頭部と骨盤の加速度差が生じる移動様式であると考えられる。その加速度差に対して傍脊柱筋が活動し、歩行が安定する。この傍脊柱筋の活動パターンがニホンザルにも認められたことから、二足歩行に特異的な適応を必ずしも要求する訳ではないことが分かった。二足歩行の前段階の移動様式に適応していた祖先においても、一時的な二足歩行時には傍脊柱筋は頭部と骨盤の加速度差を緩衝するように活動していた可能性がある。

次に、体幹直立姿勢に適応したヒト上科のヒトとテナガザルでは、二足歩行時の体幹姿勢を維持する類似した神経基盤を持つ可能性が示唆された。今後の課題はヒトとテナガザルがヒト上科の共通祖先からこの形質を引き継いだのか、各系統で独自に獲得されたのかを明らかにすることである。そのためには研究対象とする類人猿を増やす

必要があるが、実際には現実的とは言えない。今後、化石研究などの成果と照らし合わせ考察を進めるしかない。

さらに本研究では、ヒトに固有である可能性が高い傍脊柱筋の活動が確認された。ヒトの傍脊柱筋は頭部と骨盤の加速度差の変化に対して予期的に活動する。この点においてもチンパンジー等、テナガザルよりもヒトに近縁な類人猿のデータが必要であるが、先行研究からチンパンジーの傍脊柱筋の活動パターンがテナガザルのそれに非常に類似することを考慮すると、予期的活動はヒトの二足歩行特有の形質である可能性がある。仮にそうだとすれば、ヒトの傍脊柱筋は活動パターンや分節間協調の点では他類人猿に類似するが、頭部と骨盤の加速度差を緩衝する「予期的な」制御を行う点で他種の「反射的な」体幹制御戦略とは異なる適応を遂げていると考えられた。予期的な制御が二足歩行をヒト的直立二足歩行とする適応戦略である可能性がある。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 後藤遼佑	4. 巻 44
2. 論文標題 二足歩行の霊長類基盤--類人猿筋電図研究からの考察--	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 バイオメカニズム学会誌	6. 最初と最後の頁 96-104
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 後藤遼佑
2. 発表標題 ヒト上科における二足歩行時の体幹動態とその制御メカニズム
3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤遼佑、岡健司、Neysa Grider-Potter、設樂哲弥、中野良彦
2. 発表標題 シロテテナガザルがおこなう複数のロコモーション様式における最長筋活動について
3. 学会等名 第73回日本人類学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤遼佑、岡健司、Neysa Grider-Potter、設樂哲弥、中野良彦
2. 発表標題 二足歩行における最長筋の分節間活動位相シフト：シロテテナガザルとニホンザルの場合
3. 学会等名 第40回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2019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
---------	---------