

ヒト、テナガザル、ニホンザル二足歩行時の 矢状面内における体幹運動の比較

安富 祐人

直立二足歩行はヒトと他の動物を隔てる重要な特徴である。ヒト以外の霊長類や、鳥類もロコモーション(移動運動)のレパートリーとして二足歩行を行うが、体幹が前方へ傾斜している点でヒトの二足歩行とは大きく異なる。すなわち、体幹の直立性こそがヒトの特徴であり、食料の運搬や、走行、狩猟、料理など多様なヒトの行為の根幹には、上肢をロコモーションから開放させることが存在し、それを可能にする体幹直立の起源解明はヒトの起源解明の大きな手がかりとなるといえる。これまで直立二足歩行を実現する形態的基盤のひとつは腰部前弯であると一般的に受け入れられてきた。その背景には多くの形態研究や立位姿勢での検証があり、主に静的状況下における直立姿勢の維持に役立つと考えられてきた。たしかに、歩行は姿勢が連続したものであるが、移動に伴う外力に対処しなければならない点で大きく異なる。そのため、直立姿勢(静的状況下)への適応から、直立二足歩行(動的状況下)への適応を議論するには、飛躍が介在する。この飛躍の補完は、ヒトを対象とした動的状況下における先行研究の知見の蓄積によりなされつつある。ヒトの腰部前弯は、直立姿勢の維持のみならず、効率的な二足歩行の生成に寄与する可能性が示唆されている。一方、これまでの非ヒト霊長類を用いた運動研究において、体幹運動の分析は限定的であり、特にヒトの進化史において直立という重要な姿勢変化を直接的に反映する矢状面内の運動は詳細に分析されていなかった。そのため、この腰部形態と直立二足歩行の関連がどのような進化過程を経て獲得されたのかは明らかになっていない。この問題を解決するためには、腰部前弯を獲得する以前の二足歩行者と、腰部前弯を有する現生のヒトを比較する必要がある。しかし、前二足歩行者は現存していないため、近縁種のモデルと比較し腰部形態と二足歩行の関係性を推察しなければならない。そこで本研究ではヒト、テナガザル、ニホンザルを用いて、矢状面内における二足歩行時の体幹運動を比較した。体幹形態が特殊化していない、より原始的な腰部形態を有する種の二足歩行を比較することで、腰部形態と二足歩行時の体幹運動との関係性を明らかにすることを目的とした。

【方法】

ヒト5名、テナガザル1個体、ニホンザル2個体を対象とし、二足歩行時の矢状面内における体幹運動を計測した。本研究では、体幹内部の運動を解明するために、体幹を胸郭、上位腰椎、下位腰椎、骨盤の4セグメントにわけ定義し、マーカーを描画した。ヒトは光学式モーションキャプチャシステムを用い、テナガザルおよびニホンザルはビデオベースで二足歩行中のマーカー位置変化を記録し、二足歩行中のマーカー三次元座標値を得た。得られた三次元座標値は時間正規化、平滑化した後に、傾斜角度の算出に用いた。体幹傾斜角度は、セグメント上のマーカーを結ぶベクトルと計測空間の垂直軸とのなす角度として算出した。また、セグメントの運動範囲を算出し、ボンフェローニ補正したWilcoxonの順位和検定を用い比較した。さらに、各セグメント間の位相差および運動パターンの種間類似性を相互相関分析により比較した。

【結果、考察】

ヒトは100試行、テナガザルは10試行、ニホンザルは18試行を解析対象とした。その結果、三種に共通して上位腰椎と下位腰椎は同位相で運動しており(ヒト, $r = 0.93$, $\text{lag} = 0\%$; テナガザル, $r = 0.70$, $\text{lag} =$

-4%; ニホンザル, $r = 0.82$, $\text{lag} = 1\%$)、特にヒトとニホンザルは二足歩行中に腰椎内の変形はほとんど生じていないことが明らかとなった。また三種に共通して、歩行中に胸郭が骨盤に対して周期的に前後傾を繰り返すことが明らかとなったが、その運動パターンはヒトと他の二種で異なっていた。具体的に、ヒトでは胸郭が下肢接地の直前から後傾し、下肢の接地後も二重支持期の終わりまで後傾し続けることにより体幹が伸展していた。一方で、テナガザルとニホンザルでは下肢の接地とほぼ同時に胸郭が立脚中期まで前傾し、その後、蹴り出しにかけて後傾することにより体幹が伸展していた。基本的に接地時には、下肢にブレーキ方向の力が作用する一方で、体幹は慣性によって前方に倒れようとする。ヒトと比較して体幹をより前傾させて二足歩行を行うテナガザルやニホンザルは、体幹セグメントの重心が股関節の前方に位置すると予想され、接地時の腰部周りの屈曲モーメントが増大したために、胸郭が前方へと倒れるように運動していたと考えられる。一方で、ヒトでは接地時の慣性が体幹に対して作用するにも関わらず、胸郭を接地前から二重支持期の終わりにかけて後傾させることにより、体幹が前方に倒れるのを防ぐような運動が生じていた。腰部が前弯しているヒトでは、胸郭が骨盤の直上に配置されることにより、体幹の前後傾によって生じる腰部周りのモーメントを減少させることが可能であり、効率的に二足歩行中の体幹姿勢制御が実現されていることが示唆された。また、ニホンザルとテナガザルを比較すると、ニホンザルでは下肢接地後にわずかに胸郭が後傾する様子が確認され、これはニホンザルが有する比較的長い腰椎や、特徴的な椎間関節形状が、二足歩行時の体幹姿勢制御に適応的であることが示唆された。また、三種で共通して骨盤と胸郭の運動の間には位相差が確認され、(ヒト, $r = 0.74$, $\text{lag} = -15\%$; テナガザル, $r = 0.84$, $\text{lag} = -6\%$; ニホンザル, $r = 0.67$, $\text{lag} = 5\%$)、種によって筋活動による体幹姿勢制御方法が異なることが示唆された。

【総合論議】

本研究は、腰部前弯が直立二足歩行への適応であることを運動学的側面から支持するものであり、効率的な直立二足歩行の実現には、腰部前弯という形態的基盤が重要であると考えられる。(生物人類学)