

# 体幹運動の機能形態学



研究ノート

熊倉博雄\*

Functional morphology of the trunk motion

Key Words : primate adaptation erector spinae muscle locomotion EMG

## はじめに

ヒトをほかの動物から区別する最も明確な特徴は、常態的な直立二足歩行という行動である。この特徴はおそらく750-800万年前に獲得された。当時の人類の脳容量は現生の類人猿と同程度であったのだが、約200万年前にHomo属が成立して以降、急速な脳の拡大が起こる。現生人類の適応戦略は、脳の機能に依拠するところが大きく、身体構造の変革によることなく環境に適応することが可能となった。現代人についてみれば、むしろ適応可能な環境を人工的に作り上げ、その中で生活していると捉えた方が正確であるかもしれない。人工環境を創造するにあたっては、脳の機能が大きく貢献していることは言うまでもない。脳の機能は、言語とそれを基盤にした社会を作り上げる源泉ともなるので、その進化過程について興味を持たれることは当然のことである。しかしこうした脳の拡大は常態的な直立二足歩行というロコモーション様式を身につけた後から始まっているので、人類学において二足歩行の成立とそれがもたらす身体機構の変化が研究の焦点の一つとなることは当然であり、日本の人類学者も非ヒト霊長類の直立二足歩行能を実験的に検討することから、この問題を追及してきた(Kondo, ed., 1983)。私たちもこの流れの中で、非ヒト霊長類の二足歩行実験からその特徴を見出し、歩行能の進化の問題を久し

く取り扱ってきた(Hirasaki and Kumakura, 2004など)。

## 体幹の運動

霊長目は、大きく原猿類と真猿類という2亜目に分かたれる。このうち、真猿亜目というグループが一般的に「サル(Monkey)」として了解される動物群であるが、その中でヒト上科と呼ばれるグループについては「サル」ではなく類人猿(Ape)と呼ぶ。ヒト上科に属する現生種は、テナガザル、オランウータン、ゴリラ、チンパンジー、ボノボである。

サルと類人猿のロコモーション(位置移動運動)様式のレパートリーは多様である。ヒトの直立二足歩行はこれらの多様性を前提に成立したものであるといえる。サル類の中でも四足歩行を行うものは、前肢・後肢の4本の体肢すべてを移動運動に利用するため、樹上性のものでも地上性のものでも、水平方向への身体移動中の体幹は水平に保たれる。但し、休息時や垂直方向への身体移動時(すなわち「木登り」)には、体幹は垂直位をとることもある。これに対して、一部のサル類と類人猿では身体移動において懸垂型の姿勢を基本とするため、体幹は直立位をとることが多い。ゴリラやチンパンジーは樹上ではなく、地上に滞在することもあるが、彼らの前肢はぶらさがりに対する適応として極端に長くなっているために、四足立位をとっても、体幹が傾斜した独特の姿勢となる。



\*Hiroo KUMAKURA

1955年9月生  
大阪大学・人間科学研究科・博士前期  
(人間学専攻)(1982年)  
現在、大阪大学 人間科学研究科 生物  
人類学研究分野 教授 医学博士 人類  
学・解剖学  
TEL: 06-6879-8056  
E-mail: kumakura@hus.osaka-u.ac.jp

## 脊柱起立筋

ヒトの体幹直立に関係する筋として脊柱起立筋がある。脊柱起立筋とは、腸骨及び椎骨の肋骨相当要素の間に配置された腸筋、椎骨の横突起相当部分間に配置された筋束のうちで長い経過をとるものである最長筋、横突起と棘突起の間に配置された筋束

のうちで長い経過をとるものである棘筋の3つの筋の総称である。これらの筋は系統発生的に古い由来を持つもので、非常に複雑な構成をとる。そのため、この筋についての比較解剖学的研究は意味がないとまで言われてきた (Swindler and Wood, 1973)。それにも拘わらず、体幹直立という姿勢にはこの筋群が重要な意義を持つことから、筆者はこれらの筋群に関する比較解剖学的研究を実施した (Kumakura and Inokuchi, 1991; Kumakura, Inokuchi and Matano, 1994; Kumakura et al., 1996; 熊倉, 1996)。その結果、多様なロコモーション様式を示す霊長類の各種で比較すると、脊柱起立筋の構造がロコモーション様式を敏感に反映することを明らかにすることができた。特に、樹上性の位置移動を行うものと、地上性の位置移動を行うものとの間に顕著な差を認めることができた。

地上性で四足歩行型のロコモーションを示す動物においては、高速に移動する際に両側の前肢と両側の後肢がそれぞれ同期的に動くギャロップ・バウンディグ型の走行が採用される。この運動は体幹の屈曲・伸展 (屈曲・伸展とは、側方からみたときにおこる体幹の前後方向への動きである) によって遂行される。こうした動きは、体幹の伸展時に左右の脊柱起立筋が同期的に収縮することによって実現される。ヒトの脊柱起立筋については、左右の脊柱起立筋は交代性に活動することが知られている (Basmajian, 1978)。神経制御の観点からいえば、直立二足歩行を遂行するために地上型四足ロコモーションではあまり必要とされない、左右交代型の神経機構がどこかで導入されなくてはならない。

進化のどの段階でこうした神経機構が獲得されたのだろうか。この点を明らかにするために、地上性の傾向が強いニホンザルの脊柱起立筋について、走行ではなく歩行時の筋活動を筋電図法によって調べてみた。実験においては、赤外線反射マーカータを付けた動物の運動変位を CCD 方式の 3 次元変位計測器 (Elite system, BTS) で計測しつつ、同計測器の A/D コンバーターに、テレメトリー (ZB701J、日本光電) によって記録した筋電図を入力することで、運動と筋活動を同期的に記録した。その結果、通常速度の歩行では脊柱起立筋の活動はほとんど現れなかった (図1)。高速歩行などで左右の脊柱起立筋が同期的に活動する場合以外の四足歩行では脊柱起

### Japanese macaque's Quadrupedal Walking

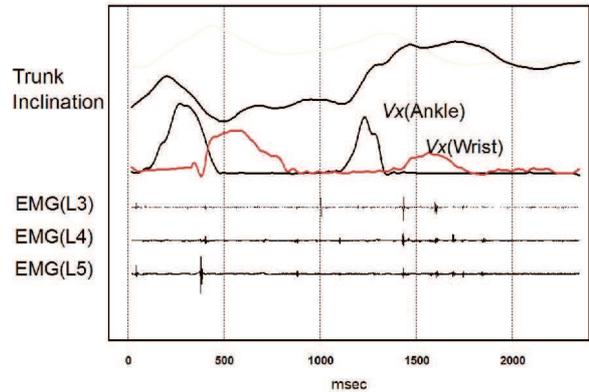


図1 ニホンザルの四足歩行  
ニホンザルに水平方向の四足歩行を遂行させた際の脊柱起立筋筋活動。第3腰椎 (L3)、第4腰椎 (L4)、第5胸椎 (L5) の棘突起の高さにおいて微小針金電極 (Basmajian, 1978) を刺入して記録した。最上部の Trunk Inclination は、肩峰 (肩甲骨上の部位) と大転子 (大腿骨上の部位) を結ぶ直線が空間でどのような角度を占めているかを表していて、上方へいくほど伸展している。1000m 秒以後には姿勢がくずれていることがわかる。Vx とした 2 つの曲線は手根 (テクビ) と腓骨外果 (外くるぶし) の進行方向への速度を示していて、速度が 0 にとどまっているときは動きが停止していることを示す。筋活動は認められない。姿勢が崩れ始めたところでわずかな放電が見られる。

立筋は顕著な機能を発揮していない。しかし、同じニホンザルに直立二足歩行を負荷してみたところ、脊柱起立筋は終始強い筋活動を示し、体幹直立を維持するために動員されていることがわかった (図2)。ニホンザルにおいては、体幹を直立させることにこの筋が動員されていて、相的な活動様相は認められ

### Japanese macaque's Bipedal Walking

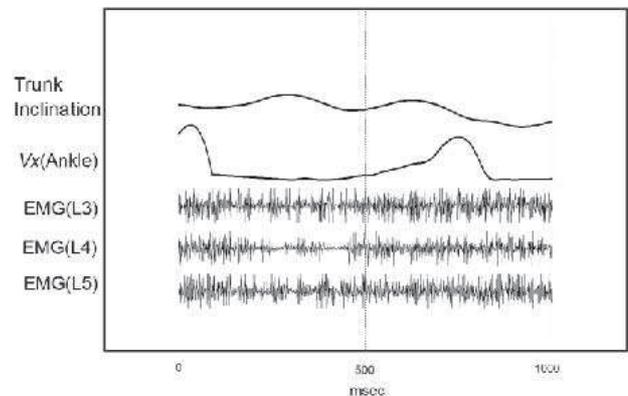


図2 ニホンザルの二足歩行  
ニホンザルに直立二足歩行を負荷した際の脊柱起立筋筋活動。図1と同様であるが、前肢は使用していないため手根の Vx は示していない。終始、強い筋放電が認められる。

ない。これに対して、懸垂型ロコモーションのエキスパートであるシロテナガザル (*Hylobates lar*) について、同様に二足歩行遂行中の脊柱起立筋の筋活動を調べてみたところ、ヒトで知られているのと同様の左右交代性の相的な活動を記録することができた (図3)。テナガザルは、前肢が極度に長いため、地上では二足歩行ないし二足走行を行うことが野外研究などから知られている (Tuttle, 1986)。しかしこの動物は基本的に樹上を生活場所としており、地上に降りてくることはきわめて稀である。そこでテナガザルについては、ブラキエーション時の運動解析 (Oka et al., 2012) と筋活動分析を行うことにした。筋活動については未公開であるので、簡単に触れるだけにとどめるが、ブラキエーションにおいても左右の脊柱起立筋が交代性に活動しているという所見が得られている。すなわち、ヒトの直立二足歩行を実現している左右交代性の筋活動を制御するメカニズムは、懸垂型の運動様式が重要な運動レパートリーとなった時点で導入されたものであろう。

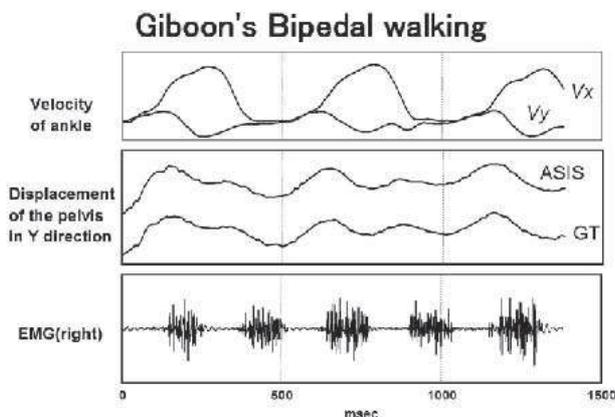


図3 テナガザルの二足歩行  
テナガザルに直立二足歩行を负荷した際の脊柱起立筋筋活動。最上部に示したのは腓骨外果 (外くるぶし) の速度で、 $V_x$  は進行方向への速度、 $V_y$  は上下方向への速度である。これによって足の接地タイミングを示している。中段は骨盤の運動変位を示している。ASISは上前腸骨棘、GTは大転子の動きを示している。最下段に第3腰椎棘突起の高さで微小針金電極を刺入して記録した脊柱起立筋の筋活動を示す。ニホンザルと異なり、明確な相的活動を示す。活動期は、1完歩に2度あり、それぞれ左右の足が地面から離れたときに活動している。

## おわりに

脊柱起立筋の機能を明らかにするために、我々が乗り越えられていない壁がある。それは、体幹の回

旋運動 (回旋運動はヒトの身体でいえば上下軸まわりの動きをいう) を捕捉できていないことである。近年ではすぐれた3次元運動解析装置が数多く提案されている。その中には、野外などでも簡便に利用できるビデオベースのシステムもある。しかしながら体幹の回旋運動については解剖学的理由から正確な補足が不可能である。せめて相対的な運動を記録しようとして、左右の肩峰突起 (肩甲骨の部位) を結ぶ直線と骨盤の左右軸との相対的な位置関係の利用を試みたこともあるが、頑丈な骨構造をなす骨盤はともかく、肩甲骨は体幹背側面において上下左右に動くため、正確な運動が捕捉できない。この点を乗り越えるための形態学的アプローチを試みようとしても、直列多関節系である脊柱の正規な配置を解剖体で再現することが困難であるため、直接的な形態学的アプローチもモデル構成もこの問題に対しては非力である。現状の運動解析では身体上の特定点の運動変位を記載することで実施しているが、体幹運動についてはこのアプローチに限界があるのだ。将来的に、身体の表面形状の動きを記録することができれば、このような点も解決すると思われるが、それはヒトの身体の場合である。動物の場合、体毛が存在するためこのようなアプローチでは、身体表面が、体毛の先端部の集合としてしかとらえられないため、さらなる工夫が求められる。体幹運動の実相がわからないと、脊柱起立筋活動の本当の機能的意義を明らかにすることはできないので、引き続きこの問題を追及していきたい。

1. Basmajian (1978) *Muscle Alive: Their Functions Revealed by Electromyography*. 4th ed. Williams and Wilkins, Baltimore.
2. Hirasaki E and Kumakura H (2004) Head movements during locomotion in a gibbon and Japanese macaques. *Neuroreport*. 22:643-7.
3. Kondo S (eds) (1985) *Primate Morphophysiology, Locomotor Analyses and Human Bipedalism*. University of Tokyo Press, Tokyo.
4. Kumakura H. and Inokuchi S. (1992) Morphological diversity of the loroid epaxial muscles. In: *Topics in Primatology, Vol. III* (eds. S, Matano et al.) pp.83-92. University of Tokyo

- Press, Tokyo.
5. Kumakura H., Inokuchi S. and Matano S. (1994) Functional morphology of the epaxial muscles of chimpanzee. In: Thierry, B. et al.(eds.) Current Primatology Vol. I :Ecology and Evolution. pp.223-230. TT4 Promotion,Bischheim.
  6. Kumakura H, Hirasaki E and Nakano Y. (1996) Organization of the epaxial muscles in terrestrial and arboreal primates. *Folia Primatol.* 66:25-37.
  7. 熊倉博雄 (1996) 樹上運動様式と固有背筋形態. *霊長類研究* 12:89-112.
  8. Oka K, Hirasaki E, Hirokawa Y, Nakano Y, Kumakura H. (2010) Brief communication: Three-dimensional motion analysis of hindlimb during brachiation in a white-handed gibbon (*Hylobates lar*). *Am J Phys Anthropol.* 142:650-4.
  9. Tuttle RH (1986) *Apes of the World*. Noyes Publications, Park Ridge.
  10. Wood CD and Swindler DR. (1973) *Atlas of Primate Gross Anatomy*. University of Washington Press., Washington.

