

平成21年5月26日現在

研究種目：若手研究 (A)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18687017  
 研究課題名 (和文) 霊長類における三次元再構築手法と解剖学手法を用いた骨と筋の定量複合解析  
 研究課題名 (英文) Quantitative multi-analyses of muscle and bone using 3-D reconstruction methods and anatomical methods in primates.  
 研究代表者 菊池泰弘  
 (KIKUCHI YASUHIRO)  
 佐賀大学・医学部・助教  
 研究者番号：70325596

## 研究成果の概要：

霊長類・肩関節周辺の筋付着部の骨の厚さと筋力指標値との相関関係に関する定量分析の結果から、ぶらさがり行動をする霊長類の骨形態および筋形態は、他の霊長類に比べ、大きく異なる特徴をもつことが判明した。つまり、テナガザルやオマキザルの肩関節筋に関連する部分は、上腕骨上部の筋付着部における骨の厚さが相対的に大きく、また、筋の収縮を担う構造よりも張力に耐え得る構造を多く持つことが示された。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	15,900,000	4,770,000	20,670,000
2007年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	19,000,000	5,700,000	24,700,000

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：人類学・自然人類学

キーワード：霊長類、骨、筋、三次元再構築、定量分析

## 1. 研究開始当初の背景

アウストラロピテクスにおける足跡化石の定量化を計り、形状の定量化・数値化に興味を持つ。同時に、ニホンザルを対象にした重量負荷実験を施し、pQCT (末梢部定量的 X 線断層撮影装置) を用いて体肢骨格の内部変化を調査し、運動による骨形態変化を探る。

その後、解剖学的手法を学ぶことで、

骨形態と骨周囲の主要軟部組織の筋・腱との密接な関係を学ぶ。一般認識では、骨形態と運動と筋・腱の三角関係は、運動により筋・腱が発達し、更に、筋・腱の発達により骨表面が変化し粗面や隆起が目立つことで骨形状が変化すると考えられている。しかし、後者の定量的な実証は非常に乏しく、形状の定量化が非常に困難であることを理由に、先行

研究においては皆無に等しい。一方で、先行研究においては、骨だけに着目し、PC上の二次元・三次元構築や肉眼観察により、化石骨形態復元・運動シミュレーションに関わる研究がなされている。ただ、同様の骨形態・形状でも周囲の筋・腱組織の発達程度に差が認められる可能性も否定できず、骨のみを考慮に入れた研究は、実際の形態の動向を再現しているとは言い難い。そこで本研究を思いついた。

## 2. 研究の目的

1) PC上での三次元再構築と解剖学的手法を組み合わせることで、骨形態と筋量・腱の大きさの関係を定量的かつ詳細に調査し、個体差を検討する。

2) 近縁の霊長類種内で歩行様式の異なる種間の比較を行うことにより、機能形態学的観点から骨と筋の関係の差異を明らかにする。

3) 更に、行動様式の類似している系統学的に隔たった霊長類種間の比較分析から、系統学的観点に立った骨と筋の関係の差異を明確にする。

4) これらの調査より、化石霊長類の骨における復元基礎データを蓄積させる。

## 3. 研究の方法

骨の筋付着部において、筋力負荷の影響を一番受けやすいと考えられる皮質骨厚に着目した。筋力に耐えるためには一定以上の皮質骨厚が必要であり、もし不足する場合は剝離骨折してしまうと考えられる。

ヒト以外の霊長類種を対象に、上腕骨に停止する筋の付着部について皮質骨厚を求め、生理的筋断面積との相関関係を調査した。機能形態学的観点から骨と筋の相関関係の新たな知見を見出すことを目的とした。

資料：チンパンジー、テナガザル、アカ

ゲザル、カニクイザル、シロガオオマキザル、リスザル、フランソアルトンの一頭体8種について調査した。これらの個体はすべてオトナで骨疾患、骨変形、筋の異常は認められなかった。対象としたのはチンパンジーを除き左の上腕骨で、三角筋、肩甲下筋、棘上筋、棘下筋について調査した。

皮質骨厚の算出方法その①：骨の筋付着部周囲にCTに感光する薬品を塗布後、pQCTで撮像し、Intage Volume Editorにて三次元再構築した。閾値のアルゴリズムはHalf Maximum heightを用いた。使用機器はpQCT, XCT 2000 Research SA+, Voxel sizeは0.1~0.2mm、マトリックス数は201~403でサイズに応じて変更した。



撮像後、三次元再構築したのちに可視化し、薬品を塗布した部分が盛り上がりが見えるので筋付着部が同定可能になる。

皮質骨厚の算出方法その②：三次元データから筋付着部の表面積と体積（皮質骨）を求め、得られた体積を表面積でわることによって筋付着部の皮質骨厚を算出した。表面積の場合、AVS Express ソフトで Surface rendering で表面形状を抽出し、表面のみの面積を求めます。体積の場合、Intage volume Editor を用いてボリュームデータ上で関心領域の Voxel 数からその体積を算出した。

### 皮質骨厚の算出方法②

三次元データから筋附着部の表面積と体積（皮質骨）を求める。求めた体積を表面積で除算し、筋附着部の皮質骨厚を算出。

表面積：  
Avs ExpressソフトにてSurface rendering後、関心領域の表面積を算出



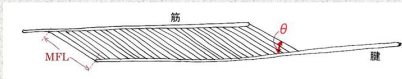
体積：  
Intage Volume Editorソフトにて関心領域のVoxel数からその体積を算出



生理的筋断面積（以下 PCSA）の算出方法：筋重量と筋羽状角のコサインを掛け合わせたものを筋密度と筋線維長を掛け合わせたもので割った値になる。同じ筋重量の場合、PCSA が大きい場合は筋力があることを意味し、小さい場合は筋力はないが、速い動きに適していると考えられる。

### 生理的筋断面積（PCSA）算出法 (Physiological cross-sectional area)

$$PCSA = \frac{\text{筋重量 (g)} \times \cos(\text{筋羽状角})}{\text{筋密度 (g/cm}^3\text{)} \times \text{筋線維長 (cm)}}$$



MPL：筋線維長  
θ：筋羽状角度

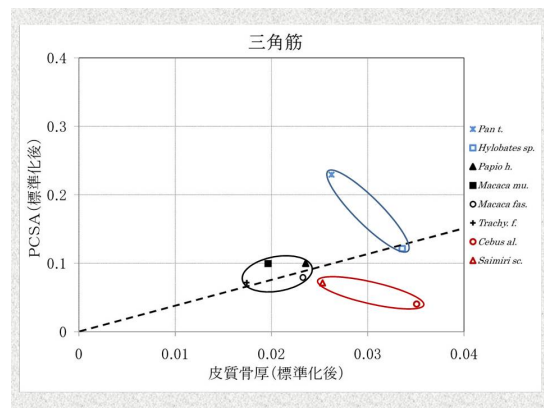
分析方法：各筋附着部別に、全個体を対象に皮質骨厚と上肢の総筋重量との回帰分析を対数変換にて行った。この分析により、算出された皮質骨厚が妥当かどうか検証した。

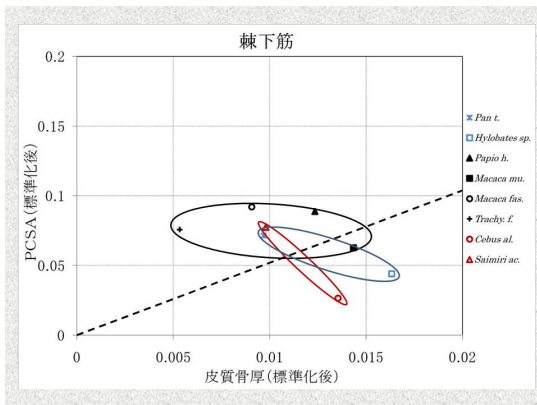
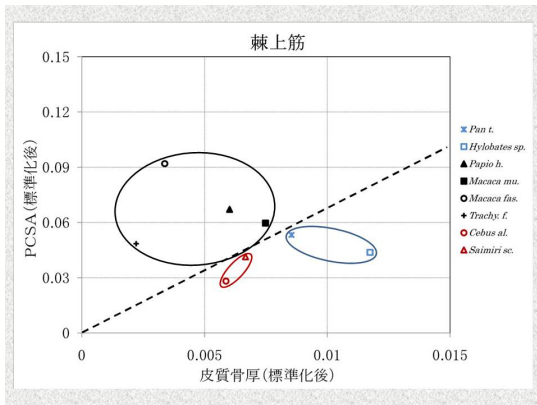
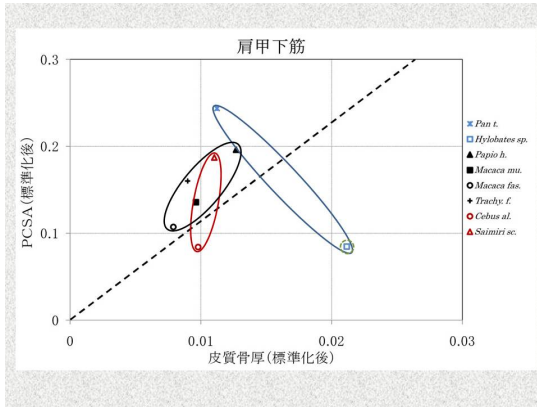
次に各筋附着部における皮質骨厚と PCSA を、ともに上肢の総筋重量を用いて標準化（それぞれ 1/3 乗と 2/3 乗で除算）し、2 変量の散布図を作成して各霊長類種の分布を調査した。種数・個体数が少ないので 0 を通る最少二乗法の回帰直線を引き、各霊長類種の傾向を見た。

#### 4. 研究成果

チンパンジーは、三角筋と肩甲下筋において皮質骨厚は比較的平均的だが、PCSA が非常に大きい。棘上筋については、旧世界ザルにやや近い傾向をみせ、棘下筋については旧世界猿に包括される傾向を示した。テナガザルについてはどの筋でも厚い皮質骨を持つ反面、PCSA が小さい。オマキザルでは、肩甲下筋や棘上筋では旧世界猿に若干近い傾向を見せたものの、おおよそどの筋でも附着部の皮質骨が相対的に厚く、PCSA が相対的に小さい傾向を持っていた。旧世界猿とリスザルはその反面、皮質骨が相対的に薄く、PCSA が相対的に大きい傾向を示し、旧世界猿では棘上筋で顕著にその特徴が現れた。

チンパンジーは、ぶらさがりを行動様式に含む霊長類よりはむしろ四足歩行が主な移動手段の霊長類の相互関係に類似した特徴をもつと言える。ただ、三角筋や肩甲下筋が他の霊長類とはややかけ離れた結果は、ナックルウォーキングという特殊な行動様式に関連しているのかもしれない。

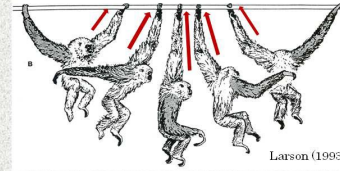




テナガザルはブラキーエーションという特殊な行動様式をもち、上腕骨の筋付着部は及び筋は受動的な張力を強いられる。これは四足歩行の場合にかかる張力より大きいと考えられ、テナガザルにおいて相対的な皮質骨が厚い要因の一つであると示唆された。オマキザルも若干ではあるがぶらさがり行動をすることが、今回の結果を反映しているのではないかと考えられる。

### 考察

テナガザルはブラキーエーションという特殊な行動様式をし、上腕骨の筋付着部、及び肩周辺の筋は受動的な張力を強いられる。これは四足歩行の場合にかかる張力より大きいと考えられ、テナガザルにおいて相対的に皮質骨が厚い要因の一つであると示唆される。オマキザルも若干ではあるが、ぶらさがり行動をすることが、今回の結果を反映している可能性がある。



また、筋が受動的な力を受けやすいならば、その張力に耐えるために、筋実質よりもむしろ筋内部の腱膜の比率が大きいと考えられる。筋を分解して実際に筋重量に対する停止部腱膜の重量比を求めてみると、どの筋でもテナガザルとオマキザルで大きくなっていることがわかった。この事実はテナガザルやオマキザルの PCSA が相対的に小さいことと関連している可能性が示唆された。

筋重量に対する停止部腱膜の重さの比

	肩甲下筋	棘上筋	棘下筋
<i>Pan t.</i>	0.054	0.075	0.065
<i>Hylobates sp.</i>	<b>0.139</b>	<b>0.093</b>	<b>0.152</b>
<i>Papio h.</i>	0.062	0.045	0.068
<i>Macaca mu.</i>	0.058	0.043	0.060
<i>Macaca fas.</i>	0.120	0.074	0.137
<i>Trachy f.</i>	0.054	0.037	0.069
<i>Cebus al.</i>	<b>0.129</b>	<b>0.093</b>	<b>0.157</b>
<i>Saimiri sc.</i>	0.114	0.115	0.115

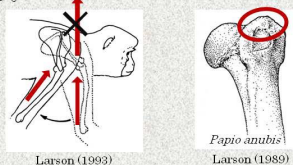


筋が受動的な張力を受けやすいのであれば、張力に耐えるために、筋実質よりもむしろ筋内部の腱膜の比率が大きいと考えられる。実際に停止部腱膜の重量比をみると、テナガザルやオマキザルで、どの筋でも大きいことがわかる。この事実はテナガザルやオマキザルの PCSA が相対的に小さいことと関連しているのかもしれない。

旧世界ザルとリスザルは四足歩行が主な行動様式であり、筋付着部に張力がかかることは比較的少ないため、皮質骨厚は相対的に薄いと考えられる。特に、旧世界ザルの棘上筋において、他種に比べ比較的薄い皮質骨厚と大きな PCSA をもつ結果は、旧世界ザル（特に地上性）の大結節が大きい、つまり付着面積が相対的に大きいことと関連している可能性がある。

### 考察

旧世界ザルとリスザルは四足歩行が主な行動様式であり、筋付着部に張力がかかることは比較的少ないため、皮質骨は相対的に薄いと考えられる。特に、旧世界ザルの棘上筋において、他種に比べ比較的薄い皮質骨と大きなPCSAをもつという結果は、旧世界ザル（特に地上性）の大結節が大きい、つまり付着面積が相対的に大きいことと関連している可能性がある。



本研究は、今後、人類学の化石復元に大いに役立つと考えられ、実験的な実証で裏付けることで、より厚みのある研究に発展することが望まれる。

今後、さらに種数を増やして検証していく必要があると考えている。

(資料提供協力事業者：(株)三和化学研究所  
チンパンジー・サンクチュアリ宇土、獨協医科大学解剖学(マクロ)教室、到津の森公園、  
医薬基盤研究所霊長類医科学研究センター)

(データ処理ソフト提供：国際電気通信基礎技術研究所 認知情報科学研究所 竹本浩典博士)

### 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3件)

- ① Kikuchi Y. Quantitative analysis of variation in muscle internal parameters in Crab-eating macaques (*Macaca fascicularis*). Anthropological Science, (in press) 査読有
- ② Kikuchi Y., Hamada Y. Geometric characters of the radius and tibia in *Macaca mulatta* and *Macaca fascicularis*. Primates, 50, 169-183, 2009 査読有
- ③ 菊池泰弘、濱田穰、アカゲザルおよびカニクイザルにおける橈骨遠位部断面形状の定量分析、霊長類研究、23(1)、3-15、2007、査読有。

[学会発表] (計7件)

- ① 菊池泰弘、霊長類における筋付着部の大きさと生理的筋断面積の相関関係に関する定量分析、第62回日本人類学会大会、於愛知学院大学、2008年11月1日～2日。
- ② 菊池泰弘、カニクイザルにおける筋付着部の大きさと生理的筋断面積の相関関係に関する定量分析、第24回日本霊長類学会大会、於明治学院大学、2008年7月4日～6日。
- ③ 菊池泰弘、生理的筋断面積(PCSA)算出に必要な計測値における腕の固定状況による変化について、第113回日本解剖学会総会、於大分大学医学部、2008年3月27日～29日。
- ④ 菊池泰弘、カニクイザルにおける生理的筋断面積(PCSA)の種内個体変異について(予報)、第61回日本人類学会大会、於日本歯科大学新潟生命歯学部、2007年10月6日～8日。
- ⑤ 菊池泰弘、霊長類種における筋付着部の大きさと筋重量の相関関係に関する定量分析、第23回日本霊長類学会大会、於滋賀県立大学、2007年7月14日～16日。
- ⑥ 菊池泰弘、霊長類における筋付着部の骨形態から探る形態適応、第112回日本解剖学会総会、於大阪国際会議場、2007年3月27日～29日。
- ⑦ 菊池泰弘、濱田穰、マカク属7種における橈骨及び脛骨の骨断面特性、第60回日本人類学会大会、於長崎大学、2006年11月3日～5日。

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

菊池泰弘 (KIKUCHI YASUHIRO)  
佐賀大学・医学部・助教  
研究者番号：70325596

#### (2) 研究分担者

なし