

氏名	やま なか あつ し 山 中 淳 之
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2556 号
学位授与の日付	平成 14 年 5 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科動物学専攻
学位論文題目	Biomechanical Investigation of Anthropoid Limb Bone Morphology in Terms of Bending Strength (曲げ強度に注目した真猿類四肢骨形状の力学的検討)
論文調査委員	(主 査) 教授 石田 英 實 教授 西田 俊 貞 教授 堀 道 雄

論 文 内 容 の 要 旨

運動中の地上性四足哺乳類の四肢骨には、曲げ応力が非常に強く生じることが知られている。したがって、その四肢骨は運動時に発生する曲げ応力を一定以下に抑えなければならない。霊長類は、さまざまな樹上運動適応を果たしているが、その四肢骨の曲げ強度に関する研究は不十分である。本研究では、運動様式が異なる、旧世界ザル、新世界ザル、テナガザルを含む真猿類 6 属の大腿骨と上腕骨の理論的曲げ強度を計算し、運動との関連を考察した。

強度計算のため、骨長、骨の弯曲、断面の幾何学的特性値(断面示数)を計測した。計測は、連続 CT 画像から再構築した 3 次元の全骨形状データから行った。骨の弯曲は用いる基準軸に非常に強く依存するため、資料間での計測方法の共通性を厳密に定義する必要がある。そのため、本研究では全骨の質量分布に依存した基準軸に注目し、最小固有値を持つ慣性主軸を骨の長軸とする座標系を採用した。これにより、四肢骨の弯曲を厳密かつ量的に記載することが可能になり、旧世界ザルにおいて上腕骨同様、大腿骨の弯曲が強いことが初めて示された。また、この座標系は解剖学的標点の空間分布を系統内で縮小、系統間で拡大させるという結果も得られた。

これら計測値を対数変換し、体重に対するスケーリング解析を行った。断面示数は系統群にかかわらずほぼ同一の直線上に収斂され、直線の傾きはおよそアイソメトリーな関係を示した。このことは断面示数が運動あるいは系統群の違いをあまり表さないことを意味した。一方、骨長、とりわけ骨の弯曲は、系統や運動の違いを強く反映した。旧世界ザルに比べ、新世界ザル、特にテナガザルは、体重に比較して上腕骨と大腿骨が長く、弯曲が弱い。荷重値を体重比と仮定し、理論的曲げ強度を計算すると、地上性傾向の強い旧世界ザルでは、体のサイズにかかわらずほぼ一定の曲げ強度が認められた。この結果は、地上性哺乳類一般で認められる傾向と一致した。新世界ザルとテナガザルでは、旧世界ザルと比較して長い骨長と弱い弯曲が影響し、横荷重による曲げ強度は低いが軸方向荷重の曲げ強度は非常に高い。この結果は、樹上での四足運動や懸垂運動が、地上四足運動とは異なる力学的特性を四肢骨に求めることを示唆した。

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

霊長類におけるロコモーション適応の研究は、ホミニゼーションの根幹をなす直立二足歩行の起源と関連することからその重要性は高く、様々な方法で研究されてきた。その一つが力学的視点に立つバイオメカニクスである。これまで四肢骨の力学的特性の分析においては断面形状と骨長を取り扱うことが主体であったが、申請者は断面形状と骨長に加え骨の弯曲を同時に考慮して、四肢骨の曲げ強度の推定を行った。

申請者は、まず連続 CT 画像から再構築した 3 次元骨形状の座標系を提案した。これは緻密骨と海綿骨の密度分布に基づいて定まる骨の慣性主軸を骨の長軸とする座標系である。この座標系は、従来の座標系と比較して、骨表面に設けた解剖学的標点の空間分布に関する系統内変異を低減し、系統間変異を拡大させる傾向を持つことが認められた。従って、この座標系によって、形状の異なる様々な霊長類の四肢骨を共通の基準で比較可能なことが示された。

申請者は、この座標系を採用して、真猿類霊長類6属の大腿骨と上腕骨の弯曲を計測した。霊長類の四肢骨の弯曲パターンを定量的に記載、解析した研究はこれまでにない。厳密な定量的分析の結果、テナガザルやクモザルなどのぶら下がり運動を行う霊長類において、それらの上腕骨の弯曲が弱いというこれまでの主張を確認するとともに、大腿骨においてもその弯曲が弱い点を初めて明らかにした。さらに、旧世界ザルの大腿骨と上腕骨は、新世界ザルとテナガザルのものと比べて、強い弯曲を持つことを示した。霊長類四肢骨のバイオメカニクスの分析において、断面形状や骨長による検討に加えて、骨の弯曲が重要な要素であることを示した点において本研究の意義は大きい。

また、申請者は骨の理論的な曲げ強度を計算し、系統群の間で比較を行った。これまで、地上性四足哺乳類については、骨の曲げ強度はからだのサイズにかかわらずほぼ一定であることが知られていたが、旧世界ザルにもそれが当てはまることが初めて示された。一方、新世界ザルやテナガザルでは、長い骨長と弯曲の程度が弱いことが影響し、系統群ごとに、異なる曲げ強度を持つことが明らかにされた。野外でのポジショナルビヘイビアの研究や実験室内での運動学的解析から、樹上での四足歩行やぶら下がり運動は、地上四足歩行とは異なる力学的負荷を四肢骨に与えていると考えられているが、これに対して本研究は形態学的立場から根拠を与えたものである。

本研究における骨強度の解析は、四肢長骨の軸方向と横方向からの荷重に注目した簡潔なモデルに基づくため、野外観察や実験室内での運動学的データと容易に関連づけられる結果を提示している。この点で、本研究における分析手法とその結果は、総合的な霊長類のロコモーション研究を推進する上で、非常に有用である。

以上の理由より、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値があるものと判断された。なお、論文内容とそれに関連する研究分野について口頭試問を行った結果、合格と認定した。