動物の大腿骨頭径と体重のアロメトリ*

馬 渕 清 資^{*1}, 藤 江 裕 道^{*2}, 佐 納 義 久^{*3}

Allometry of Femoral Heads of Animals with Their Body Weight

Kiyoshi MABUCHI, Hiromichi FUJIE and Yoshihisa SANOU

In the present study, the relationship between the femoral head diameter and the body weight of animals is shown. The diameter of femoral heads of fifteen terrestrial mammalian animals were measured directly from their skeletons. The body weight of these animals was referred from literature. Additionally, both the mean values of the femoral head diameters and the body weights of Japanese adult men and women were referred from the literature. The logarithm of femoral head diameter of these animals were plotted against the logarithm of body weight. The positive correlation was significant ($p < 0.01$). The gradient of the regression line was 0.29. It showed that femoral head diameter is proportional to (body weight)^{0.29}. By analysis, we showed that this relationship can be deduced from the condition of uniform contact pressure or uniform performance of squeezed-film lubrication.

Key Words: Biomechanics, Tribology, Bearing Strength, Allometry, Femoral Head

1. 緒 言

動物の体の、大きさと形の因果関係を最初に指摘したのは、Galileo Galilei(1638)である⁽¹⁾。彼は、生活形態が類似した動物を比べると、体格の大きい動物ほど足の骨が太短かくズングリしている、と述べている。

もし、異種の動物の体がすべて相似形であれば、その底面すなわち足の裏に加わる圧力は、背の高さに比例して一義的に決まる。足の支える圧力には限界があるので、高さにも限界が生じる。しかし、実際の動物の体には支持する部分、四肢、と支持される部分、く幹、頭部、頸部、という機能分担がある。よって、支持する部分のみ、つまり、四肢の骨の断面積を広げることにより体格の向上が可能となる。その場合、図1のように、足が太短くなる。

このような大きさと形の因果関係の考察は、アロメトリと呼ばれる⁽²⁾。アロメトリは、工学分野のスケールリングと類似している。ただし、スケールリングは、設計方針を立てるのに用いられるのに対して、アロメトリ

は、動物の体の設計方針を探るために用いられるという相違がある。

従来、運動器官のアロメトリに関して、鳥の体重と

図1 動物の体の役割分担
(大きな体を支えるには太い足が必要となる)

* 原稿受付 平成3年12月2日。

^{*1} 正員, 北里大学医学部(●228 相模原市北里1-15-1)。

^{*2} 正員, University of Pittsburgh(M 272 Scaife Hall, 3550 Terrace Street, Pittsburgh, PA 15261, USA)。

^{*3} 学生員, 東京工業大学大学院総合理工学研究科(●227 横浜市緑区長津田町4259)。

はばたき周期の関係⁽²⁾、四肢の骨の周囲長と体重の関係⁽³⁾などが、調べられている。これらの研究の成果から、体重の大き過ぎる鳥は、はばたけないとか、ブラキオサウルスの体重は、70 t 程度であったといった結果が、示されている。

本研究のテーマ、関節部分のアロメトリについては、Simon(1970)が、数種の動物の軟骨の厚さおよび接触圧力について調べている⁽⁴⁾。そして、接触圧力がアロメトリの因子だと推定している。しかし、調査対象が少なく結果のバラツキも大きいため、明確な結論を示すにはいたっていない。

関節の摩擦は、極めて低いので⁽⁵⁾、運動方向に沿ったねじりや曲げのモーメントが、外力として骨頭に加わることはない。そのため、運動自由度の大きな股関節や肩関節の骨頭部分は、すべての方向の曲げやねじりを受けないという特殊な力学環境に置かれている。一方、接触圧力や潤滑の問題が関節のサイズに関係する。また、下肢の関節は、ヒトの直立二足歩行の特殊性を考察する上で、重要な部分になる。こうした理学的な興味以外に、関節のサイズの問題は、その代替材料である人工関節の設計という実用上の問題に大きく関わっている。

本研究では、股関節の大腿骨頭径を実測し、文献および実測で求めた体重との相関を求めた。その結果を基に、関節の大きさを決定する因子を推定した。そして、以上に述べた理学的、実用的な諸問題について考察した。

2. 諸因子の推定

あらかじめ、関節のアロメトリに関係する力学的因子について考察しておく。ただし、股関節に加わる荷重は、動物の体重 w に比例すると考え、比例定数を、 k とした。

2.1 構成材料の物性 関節の構成材料である海綿骨や軟骨の物性は、それを表現する方法そのものが模索されている状態であり⁽⁶⁾、簡単な定量は困難である。しかし、海綿骨の構造は、カルシウムアパタイトが骨梁構造をなしている点⁽⁷⁾で、すべての動物種に共通である。また、軟骨についても材質に種差はなく⁽⁸⁾物性の実測⁽⁹⁾でも、種差は明確にされていない。さらに、皮質骨の圧縮強度の種差はわずかであることが示されている⁽¹⁰⁾。これらのことから、本研究では、材料強度、弾性係数に動物種による差異はないとした。

2.2 圧縮、せん断に対する強度 圧縮強度やせん断強度は、断面積に比例して増大する。よって、これらを因子とすれば、大腿骨頭径は、体重の平方根に比

例するはずである。骨頭直径を d と置くと、次式が成り立つ。

$$d \propto (kw)^{1/2} \propto w^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

2.3 関節面の接触圧力 接触圧力は、必ずしも見掛けの接触面積によっては決まらない。一般に、二次曲面同志の弾性接触の場合、接触圧力はだ円体形に分布し、その最大値は次式で求められる⁽¹¹⁾。

$$p_{\max} = 1/\pi \cdot (1.5 \cdot E^2 \cdot kw/R^2)^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 E は等価弾性係数、 R は等価半径⁽¹²⁾である。等価半径 $(1/r_1 + 1/r_2)^{-1}$ は、股関節のようなほぼ同じ半径の球 ($r_1 = r$) と球窩 ($r_2 = -r - c$) の接触ではおよそ半径 r の 2 乗に比例し半径すきま (半径差) c に反比例する。よって、半径すきまが一定であれば、

$$p_{\max} \propto (w/r^4)^{1/3} \dots\dots\dots (3)$$

となる。よって、接触面での破壊強度一定の条件では次式が成立する。

$$d \propto w^{1/4} \dots\dots\dots (4)$$

2.4 潤滑性能 関節摩擦面の潤滑は、スクイズ流体潤滑と境界潤滑の混合潤滑により構成されていると考えられている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。ただし、そのいずれが支配的かは、明らかにされていない。支配的な因子が異なると、骨頭径に要求される大きさは、異なる。

スクイズ流体潤滑は、流体を介して摩擦面が押付られる際に、粘性抵抗に由来する圧力が発生し、固体表面の接触を防ぐというメカニズムである。一般に、一定荷重 kw を受ける球と球窩の接近において、ある厚さ h までの潤滑膜のスクイズに要する時間は、次式で表わされる⁽¹⁵⁾。

$$t = -\frac{3\pi\mu r^4}{kwc^2} \cdot \text{function}(h/c) \dots\dots\dots (5)$$

この式で、 t はスクイズ時間、 μ は、粘性係数である。スクイズ時間は、それが長いほど潤滑膜厚さが厚いという関係で潤滑膜厚さに 1 対 1 で対応するため、スクイズ潤滑効果がこのスクイズ時間で代表できる。よって、半径すきまが一定ならば、潤滑性能は r^4/w に比例する。もし、同一のスクイズ潤滑性能を期待するのであれば、 r は、 w の 1/4 乗に比例するはずである。よって、次式が成立する。

$$d = 2r \propto w^{1/4} \dots\dots\dots (6)$$

一方、境界潤滑が支配的な場合、Coulomb の摩擦法則により、摩擦係数は、速度や見掛けの接触面積に依存せず一定である。摩擦モーメントは、テコの腕の長さ、すなわち骨頭径に比例し、骨頭が大きいほど、関節部の運動抵抗が大きくなる⁽¹³⁾。また、Holm の乾燥摩擦の法則により、摩耗量は摩擦距離に比例するので同じ関節運動による摩擦距離は骨頭径に比例して長く

なり、摩耗量は増大する⁽¹³⁾。つまり、境界潤滑が支配的であれば、骨頭径は必ずしも体重に正相関しない。

以上のように、流体潤滑と境界潤滑で、骨頭径に要求されるサイズは異なる。よって、骨頭径と体重の関係をj知することは、潤滑状態を考察する上で有用となる。

2.5 その他 これ以外の外力、すなわちねじりや曲げは、緒言で述べたように股関節部分には作用しないと考えられる。よって、考慮の対象からはずす。

3. 測定方法

国立科学博物館に保管されている哺乳類の乾燥骨格標本の実測により、哺乳動物13種類、インドゾウ、クロサイ、カバ、ウマ、キリン、バイソン、スイギュウ、ラクダ、ライオン、トナカイ、シェトランドポニー、オランウータン、チンパンジーの大腿骨頭径を求めた。これらは、生前、いずれも上野動物園で飼育されていた動物である。図2に示すようにスケールを横に置いて、写真を撮影し、図3のように差し渡しの長さを読み取った。

測定した各動物の体重については、これらの骨格標本の生前のデータがないので、文献⁽¹⁶⁾から動物の平均体重を求めた。

ブタ、イヌ各2頭については、新鮮大腿骨を採取して、軟骨を除いた大腿骨頭径を実測した。同じ個体の体重も実測した。

ヒトの体重については厚生省の資料⁽¹⁷⁾から、我国の国民の平均体重：20才以上男性で 63 ± 9 kg、女性で 52 ± 8 kgを引用した。また、ヒトの乾燥骨の骨頭径について、慈恵医科大学の研究グループの実測結果⁽¹⁸⁾：20才以上の日本人の男性で 46 ± 3 mm、女性で 41 ± 2 mmを、引用した。

図2 大腿骨頭径の計測の様子（インドゾウの大腿骨頭の計測）

4. 結果

以上に求めた各種の動物の骨頭の半径と体重を表1にまとめた。両者のべき乗関係を考察するために図4のように、両対数グラフにプロットした。対数グラフ上では、体重と股関節骨頭径の間に、明白な正の相関があった（相関係数0.98、1%検定で有為）。

四足獣と二足獣の相違は重要と考えられるので、ヒトを除外して回帰直線（実線）およびデータの95%信頼限界（点線）を求めて図示した。求めた両対数グラフ上での回帰直線は、次式となった。

$$d = 7.4w^{0.29} \dots\dots\dots (7)$$

図4に示されるように、ヒトは、男性女性ともに信頼限界の外側にデータが分布した。これにより、ヒトの大腿骨頭径は、四足獣より有為に大きいことが示された。

5. 考察

四足哺乳動物の大腿骨頭径は体重の0.29乗に比例していることを示した。これは、式(1)の0.5乗の関係から遠く、式(4)や式(6)の1/4乗の関係に近い。よって、関節のサイズを決定する条件は、関節面の接触圧力、あるいは、スクイズ流体潤滑性能であると推論できる。また、骨頭径と体重に明白な正の相関があることから、関節の潤滑機構において境界潤滑が支配的でないことが推論できる。

接触圧力や、スクイズ流体潤滑性能一定の条件から1/4乗の関係を導くには式(2)、(5)において、半径すきまを一定と仮定しなければならない。動物の関節は、図5のように、海綿骨の上に、軟骨が分布する構造となっている。軟骨の弾性係数は、海綿骨の約10分の1であることから、接触の問題を考える時は、軟骨

図3 骨頭径読取りの図解

の厚さと同等のすきまがあると考えるのが妥当である。

Simon(1970)は、マウス、ラット、イヌ、ヒツジ、ウシにおいて関節軟骨の厚さと体重のアロメトリを調べ、両者の相関を主張している⁽⁴⁾。しかし、彼のデータにおいてイヌ以上の体格の動物では、その相関は明確でない。また、彼自身、軟骨が厚くなると掘り起しの摩擦抵抗 plowing が増大するので、厚さに限界があるはずだと述べている。一方、軟骨内部には血管が存在し

ないので、軟骨細胞への栄養補給が、専ら骨と関節液からの拡散により行われる⁽⁸⁾。そのため、ヒトの軟骨の厚さ 3 mm は、栄養の代謝にとってかなり厳しい条件と考えられている⁽⁸⁾。ヒトなみの大きさの動物で、すでに限界の厚さであるなら、大きな動物種では当然これと同等の厚さと考えられ、同時に、接触問題の解析の上では半径すきまは一定と考えられる。

イヌ、ブタでは、我々の実測した軟骨の厚さが、それぞれ約 0.5, 0.9 mm であった。このような小動物では、以上の推論は成立しない。むしろ、 d/c が、一定に近いと考えられる。その場合、式(4)、(6)の関係より回帰直線の傾きは、大きくなる。その影響により、本研究の結果が、0.25 より大きくなったと考えられる。

力学的条件からは、大きさの最小限のみが導かれる。よって、大きさが一義的に決まらず、因子を探ることの意味がなくなる可能性がある。幸い、これについては以下に述べる生理的条件が、大きさの上限を規定すると考えられる。

関節の軟骨面は、生体内の不連続面である。神経や血行はもとより、あらゆる点で、体内の巨大な亀裂となっている。その結果、関節の滑り面の周辺は、栄養補給や免疫反応の弱点となる。実際に、関節腔内で感染を起こすと治癒し難い。また、大腿骨頭はいろいろな原因で壊死しやすい。できれば、関節面の面積は小さい方が生理的な状態が良好と考えられる。この考察から、骨頭径は、力学的な要請から決まる最低限の大きさになっていると考えられる。

表 1 各種哺乳動物の大腿骨頭径 d と体重 w

Species	d , mm	w , kg
Indian elephant	95	4,500
Black rhinoceros	75	1,100
Hippopotamus	63	2,500
Horse	60	750
Giraffe	55	500
Bison	52	780
Water buffalo	52	1,000
Camel	50	570
Lion	38	170
Reindeer	32	135
Shetland pony	32	250
Chimpanzee	28	60
Orangutan	25	54
Pig	26	60
Pig	21	31
Dog	15	12
Dog	16	11
Men	63 ± 9	46 ± 3
Women	52 ± 8	41 ± 2

図 4 両対数表示した各種哺乳動物の体重と大腿骨頭径の関係

図5 股関節の構造の概略断面図

関節摩擦面を軟骨が覆い、その下部に海綿骨、さらに、それを支えるように皮質骨が分布する

哺乳類13種の骨格標本は、体格からみて幼弱個体の可能性が高かった。よって、体重の推定値が、実際より大きい可能性があった。ただし、これらの体重の推定値を、表1の体重の70%と補正した場合、両対数グラフ上の回帰直線の傾きは、0.31に増加したに過ぎなかった。これは、補正したデータが大部分を占めており、それは、図4の上で左に平行移動するのみであるから、全体への影響が小さかったためである。

この原因以外の、平均値を個々の体重としたことによる誤差は、統計的なバラツキによるものである。それは、方向性がないので図4の関係に影響を与えることはない。

ヒトの股関節骨頭径は、有為にほかの動物より大きいことが示された。これは、直立二足歩行により発揮された特異性と考えられた。

人工股関節の骨頭径は、現在、22 mm から 36 mm のものが臨床で実用されている⁽¹³⁾。その中で、大きい方がよいのか小さい方がよいのかが、議論されている。筆者は、潤滑性能の向上を目指すには、接触圧力を下げる必要があると主張して、周囲の骨の掘削の条件が許す限り、できるだけ大きな骨頭を用いるべきだと主張している⁽¹⁹⁾⁽²⁰⁾。動物股関節のアロメトリの因子に関する本研究での推論は、この主張を支持するものである。また、ヒトの股関節骨頭径が、ほかの動物と比較して有為に大きいという事実も、二足歩行の力学条件

の厳しさと同時に、大きなサイズの人工股関節の必要性を示唆している。

6. 結 言

現生動物15種およびヒトについて大腿骨頭径と体重の関係を調べた。その結果、四足動物の骨頭径は、体重の0.29乗に比例することがわかった。この関係は、関節摩擦面の接触圧力あるいはスクイズ流体潤滑性能を一定とする条件から説明できると推論した。また、ヒトの骨頭径は、ほかの四足動物と比較して有為に大きく、二足歩行による特殊化のためと推論した。

動物大腿骨頭径の測定に協力いただいた、国立科学博物館主任研究官吉行瑞子博士および京セラ(株)滋賀蒲生工場上野 勝君に深謝する。また、本研究に貴重な助言をいただいた、富士写真フイルム(株)足田伸治君に感謝する。

文 献

- (1) Galilei G., (今野, 日田訳), 新科学対話 (原題, *Discorsi e dimostrazioni matematiche*), (1638: 原書年号), (1937), 183, 岩波.
- (2) Alexander, R. M., *Size and shape*, (1971), 1, Edward Arnold.
- (3) Anderson, J. F., *J. Zool. Lond.*, **207** (1985), 53.
- (4) Simon, W. H., *Arthritis Rheum.*, **13** (1970), 244.
- (5) Charnley, J., *Symp. Biomech. Inst. Mech. Engrs.*, Lond., (1959) 12.
- (6) たとえば, 森田・馬淵・塚本, 整形外科バイオメカニクス, **7** (1985), 161.
- (7) たとえば, 立石・白崎, 機械技術研究所報告, **130**, (1984), 7.
- (8) たとえば, Freeman, M. A. R., *Adult articular cartilage*, (1973), 3, 277, Pitman Medical.
- (9) Simon, W. H., *Arthritis Rheum.*, **14** (1971), 493.
- (10) 山田, 人体の強度と老化, (1979), 16, 日本放送出版協会.
- (11) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N., *Theory of elasticity*, 3rd Edit. (1970), 414, McGraw-Hill Kogakusha Ltd.
- (12) Christensen, H., *ASME J. Lub. Tech.*, **92F**, (1970), 145.
- (13) 笹田・ほか2名, バイオトライボロジー, (1988), 60, 83, 84, 産業図書.
- (14) Unsworth, A.・ほか2名, *ASME J. Lub. Tech.*, **97F**, (1975), 369.
- (15) Moore, D. F., *The friction and lubrication of elastomer*, (1972), 122, Pergamon Press.
- (16) たとえば, Meinertzhagen, C. R., *Proc. Zool. Soc. Lond.*, **A 108**, (1938), 433.
- (17) 厚生省保健医療局健康増進栄養課監修, 平成2年版国民栄養の現状, (1990), 117.
- (18) 伊丹, 日整外会誌, **43** (1969), 1087.
- (19) 馬淵・笹田, 潤滑, **23-7**, (1978), 512.
- (20) 馬淵・ほか2名, 生体材料, **8-4** (1990), 184.