

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：12201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25871180

研究課題名(和文) 骨端はなんのためにあるか？ - 哺乳類の進化を探る -

研究課題名(英文) What is the role of the epiphysis?

研究代表者

栗原 望 (Kurihara, Nozomi)

宇都宮大学・農学部・講師

研究者番号：40456611

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：哺乳類の骨は、両端あるいは片側に「骨端」と呼ばれる小骨を形成するが、その意義については明らかにされていない。本研究では、骨端に関する諸説を検証するとともに、骨端の意義について考察した。

鯨類の椎骨では、骨端の癒合後(骨端と骨幹の間の成長軟骨消失後)に、成長が起こっていた。このことは、骨端が骨成長の制御因子であるという説を否定する。また、成長段階に関わらず、骨端は骨幹よりも緻密で硬いことが分かった。つまり、骨端の存在が、成長に関係なく、丈夫な関節を形成し、激しい運動を可能にする。したがって、骨端は、出生後直ぐに歩行や走行を行わなければならない哺乳類において、独自に獲得された形質であるといえる。

研究成果の概要(英文)： In mammals, it is known that bones except skull and clavicle have an epiphysis on the edge. However, the significance on the epiphysis is unknown. In present study, we verified some hypotheses and discussed the significance on the epiphysis.

We found that the vertebrae of cetaceans continued growing up after the epiphyses fused to the diaphyses (after the epiphyseal cartilage as a growth factor disappeared). This fact rejected the hypothesis 'epiphysis controls bone growth'. In addition, the epiphyses are denser and harder than the diaphysis through all growth stage, indicating that the epiphyses always form the articulations, which is capable of resisting against loads, and enable strenuous movement. In most mammals, newborns have to stand up and walk as soon as possible to protect themselves from predators. Therefore, the epiphyses have developed with the progress of evolution in life history.

研究分野：形態学

キーワード：形態 骨端 骨幹 椎骨 成長 進化 哺乳類

1. 研究開始当初の背景

哺乳類の骨は、骨幹の両端あるいは片側に、すなわち関節部分に、「骨端」と呼ばれる小骨を形成する(図1)。骨端は、ヒトを含む哺乳類が進化の過程で獲得した特有の構造であることから(Cave, 1934)、哺乳類特有の運動様式、成長様式、生活史などに関わる極めて重要なものであると考えられる。

骨端に関する研究は、1800年代末~1900年代初頭に行われており、その役割や進化学的意義について諸説が提唱された。例えば、哺乳類の骨では、骨端と骨幹の間に長軸方向の成長が起こり、骨端が骨幹に癒合すると成長は停止することから、「骨端は骨の成長を制限するもの」とする説がある(Harris, 1933, Bone Growth in Health and Disease, p.75)。一方、骨端を持たない鳥類でも成長は停止することから、Flower (1885, Osteology of the Mammals, p.24 footnote)は「骨端は骨の成長を制限するものではない」と述べている。また、骨端は、特定の関節(膝関節、肘関節など)に形成されることから、「関節運動を制御する」とする説もある(Flower, 1885; Parsons, 1903, J. Anat. And Phys., 37, p.315)。しかし、骨端を持たない魚類や爬虫類、鳥類でも十分に制御された運動機能を有する点で、この説も矛盾を抱えている。この他、動物の系統関係や生活様式から骨端を解釈しようとした研究があるが(Moodie, 1908, Amer. J. Anat., 7, p.443; Dixon, 1920, J. Anat., 1v, p.38) いずれも脊椎動物全体に適用できる解釈ではない。つまり、骨端の役割や進化学的意義については、ほとんど何も明らかにされていないのである。

2. 研究の目的

本研究は、哺乳類の骨について発生・成長・内部構造の基礎知見を収集、骨端に関する諸説を検証するとともに骨端の真の役割を明らかにする。さらに、哺乳類の直接の祖先である爬虫類と哺乳類で生活史や運動様式を比較し、哺乳類の進化史における骨端の意義を考察する。

3. 研究の方法

椎骨の成長は骨幹と骨端の間にある成長軟骨で起こるため、骨端の骨幹への癒合が成長の完了を示す。このことから、「骨端は骨の成長を制限する」という仮説が生まれた。そこで、骨端の骨幹への癒合時期と大きさの成長様式を比較することにより、上記の説を検証する。本研究では、国立科学博物館に所蔵されている、年齢が既知のカズハゴンドウ(*Peponocephala electra*) 36個体の椎骨を用いた。用いた標本は、2001年に種子島の中種子町にマス・ストランディングした同一集団の個体である。

椎体が互いに癒合している第1~3頸椎を除く全ての椎骨について、骨端の骨幹への癒合状態と大きさ(椎体高・椎体幅・椎体長)

を調べた。

椎骨の内部構造は、マイクロCTを用いて観察した。

4. 研究成果

(1) 本種の椎骨における基礎的知見を収集するため、椎骨の数を調べた。その結果、頸椎7個、胸椎13~15個、腰椎15~20個、尾椎36~45個(尾柄部27~32個、尾びれ内部8~13個)の計76~83個であった。椎骨数には変異が見られたが、年齢との相関関係はなかった。つまり、成長に伴って椎骨数が変化することはなかった。また、椎骨数に雌雄差はなかった。

(2) 年齢0~34歳のカズハゴンドウ36個体の椎骨について、骨幹と骨端の癒合の程度を調べたところ、頸椎・胸椎・腰椎・尾椎のそれぞれで骨端の癒合する時期が異なっていた。最初に、尾びれ内部の尾椎において(遅くとも4歳)、続いて頸椎(6歳)、尾柄部の尾椎(9歳)、その後頸椎、腰・胸椎(15歳)の順で、骨端の骨幹への癒合が完了した。

鯨類は水中で一生涯を過ごす、遊泳の際には尾で推進力を得る。生まれてすぐに遊泳を開始する鯨類にとって、オールブレードと同じ機能を持つ尾びれは、真っ先に完成させたい部位であろう。そのため、尾びれ内部の尾椎は、もっとも早い時期に骨端の骨幹への癒合が完了すると考えられる。また、尾びれを背腹方向に振るための尾柄も同様に早期に完成させる必要があるだろう。したがって、尾びれ内部の尾椎に続き、尾柄部の尾椎において骨端の癒合が完了したと考えられる。頸椎の骨端が早期に癒合したことも遊泳と関係するであろう。遊泳時にプレを生じさせる頸部を必要としない鯨類では、頸椎の成長を早く停止するため、骨端の骨幹への癒合が早期に起こったと考えられる。一方で、胸腰部の椎骨の成長は、胸腔および腹腔の大きさと関連があるだろう。胸腔および腹腔は、少なくとも臓器の成長期間中、容量を増す必要があるため、胸椎と腰椎は比較的遅い時期まで成長を停止しないと考えられる。以上のことから、椎骨の骨幹への骨端への癒合は、運動様式と骨以外の部位の成長様式と関係していることが示唆された。

(3) 椎体の大きさを調べたところ、胸椎、腰椎、および尾柄部の尾椎では、5歳前後までに急速に長さが増し、10歳前後で長さの成長が停止した(図1)。一方、尾びれの尾椎では、緩やかな成長が15歳前後まで続いた(図1)。体長は10歳前後で停止した(図1)。なお、椎骨と体長の成長様式に雌雄差はみられなかった(図1)。

椎体の長さの成長と骨端の骨幹への癒合時期を比較すると、胸・腰椎では、長さの成長が停止した後、骨端の骨幹への癒合が完了した(図1)。尾柄部の尾椎では、長さの成長の停止と骨端の癒合がほぼ同時期、尾びれ内部の尾椎では、骨端の骨幹への癒合が完了し

その後 11 年間は、長さの成長が続いた(図 1)。尾びれ内部の尾椎において、骨端の癒合後に成長が起こっていたことは、極めて興味深い。なぜなら、哺乳類の骨では、長軸方向の成長は、骨端と骨幹の間に存在する成長軟骨によって起こるため、理論上、骨端と骨幹が癒合した後に骨が伸長することはないからである。現時点で、骨端の癒合後の椎骨の成長について、説明することはできないが、骨端の癒合後に椎骨の長軸方向の成長が起こっていたことは、仮説「骨端は骨の成長を制限する」という説を否定する。

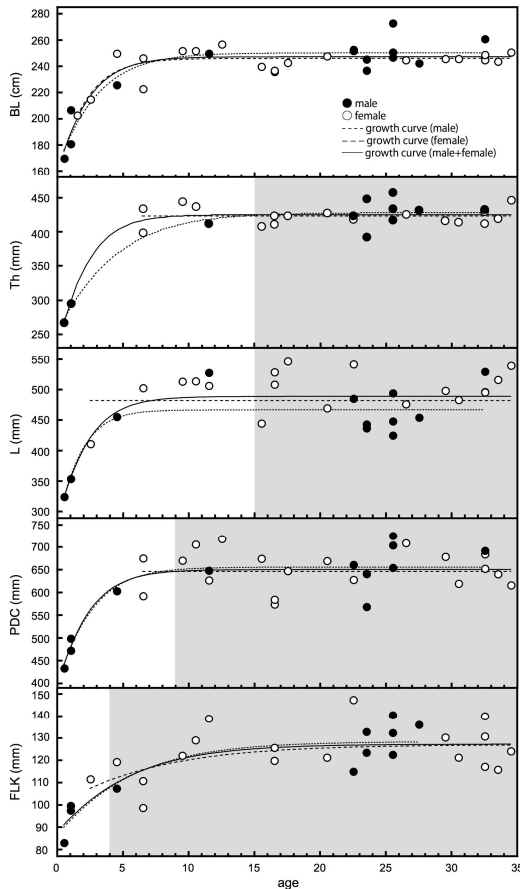


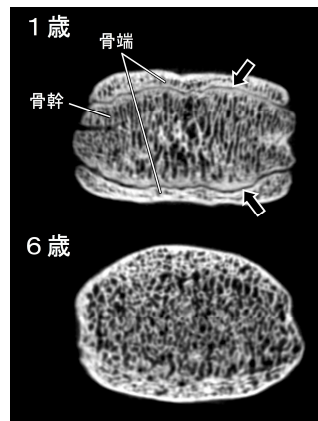
図 1 体長および椎骨の長さの成長様式。上から順に、体長 (BL)、胸椎 (Th)、腰椎 (L)、尾柄部の尾椎 (PDC)、尾びれ内部の尾椎 (FLK) の成長様式。灰色の編みかけ部分は、骨端が骨幹に完全に癒合している時期を示す。黒丸、オス；白丸、メス。

(4) 骨端の骨幹への癒合後に起こる成長について、その要因を明らかにするため、マイクロ CT を用いて、尾びれ内の尾椎の内部構造を調べた。骨端が未癒合で、成長過程にある 1 歳齢の個体の尾椎では、骨幹と骨端の間に軟骨 (成長軟骨) のためのスペースが存在していた (図 2)。また、骨端の方が骨幹よりも海綿骨の密度が高く、緻密骨も厚かった (図 2)。つまり、骨端は骨幹よりも硬いことが示唆される。一方、骨端の骨幹への癒合が完了しているが、成長過程にある 6 歳齢の個体では、成長軟骨のためのスペースは存在しなかった (図 2)。また、骨幹と骨端の境界が不明

瞭で、骨端と骨幹は完全に癒合し、ひとつの骨を形成していた (図 2)。海綿骨の骨密度は、骨端であったと考えられる部分で高く、緻密骨も骨端部で厚かった (図 2)。

骨の内部構造から、骨端の癒合した尾椎では、骨内部に成長の起こる部位は存在しないことが示唆された。骨端の癒合した骨において成長が起こるとしたら、骨の最外側部で起こるとしか考えられない。本研究では、骨端癒合後の椎骨のどの部位で成長が起こるのかが明らかにすることはできなかったが、骨の太さを増すメカニズム、つまり緻密骨の外側への成長によると推察される。今後、この点について検討する余地がある。

図 2 尾びれ内部の尾椎の CT 画像。上図は 1 歳齢の個体、下図は 6 歳齢の個体の尾椎を示す。矢印は、成長軟骨のある部位を示す。



(5) 以上の結果から、骨端は骨の成長を制限するというよりも機能的な意義が強いと考えられる。動物の基本的な運動と関連し、より重要な部分から骨端の癒合が完了することが明らかになった。また、成長段階に関わらず、骨端 (あるいは以前骨端であった部位) の骨密度が高いことは、成長過程にある骨であっても、強い負荷に耐えうる丈夫な関節を維持するために骨端が形成されることを示唆する。

では、哺乳類以外の動物では、どうであろうか。魚類や両生類、爬虫類の多くは、緩やかな成長を一生続ける。これは、カズハゴンドウの尾椎の成長と類似する成長である。緩やかな成長は、丈夫な骨を形成した後も続けられるため、魚類や両生類、爬虫類では骨端を必要としないのであろう。一方、鳥類は、哺乳類と同様、出生後の限られた期間で急速に成長し、その後成長は停止する。哺乳類と似た成長様式を示す鳥類において骨端は存在しないことは、鳥類の生活史と関係するかもしれない。哺乳類の多くは、出生後すぐに走行したり、遊泳したりする必要があるが、鳥類の多くは、生まれた後しばらくの期間は巣の中で過ごす。巣立ちするのは、成鳥と同じ大きさになってからである。つまり、成長過程にある幼鳥は、激しい運動をすることはなく、丈夫な関節も必要ないため、骨端が存在しないのであろう。骨端は、成長過程にある個体が成獣と同様の運動をしなければならぬ哺乳類において、独自に獲得された形質であるといえる。

<引用文献>

- Dixon, A. F. 1920. Note on the vertebral epiphyseal discs. *Journal of Anatomy*, 55: 38–39.
- Flower, W. H. 1885. *Osteology of the Mammalia*. 3rd ed. Macmillan, London.
- Harris, H. A. 1933. *Bone growth in health and disease*. Oxford University Press, London.
- Moodie, R. L. 1908. Reptilian Epiphyses. *American Journal of Anatomy*, Volume 7 (4): 443–467.
- Parsons, F.G. 1903. On the meaning of some of the epiphyses of the pelvis. *Journal of Anatomy and Physiology*, 37: 315–323.

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 8 件)

- 栗原望・大池辰也・川田伸一郎・子安和弘・織田銑一. 2013. 三河湾におけるスナメリ (*Neophocaena phocaenoides*) の漂着ならびに混獲に関する記録. *哺乳類科学*, 査読有, 53 巻, 2013, pp. 99–106.
- Kurihara, N. and Kawada, S. Inconsistencies between morphological and genetic subspecies in Grant's gazelle (*Nanger granti*). *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances*, 査読有, 2013, Vol. 8, No. 4, pp. 683–690.
- Kurihara, N. Utility of hair shafts from study skins for mitochondrial DNA analysis. *Genetics and Molecular Research*, 査読有, 2013, Vol. 12, 5396–5404.
- Kurihara, N. and Kawada, S. A case of vertebral malformation in a slow loris. *Bulletin of the National Museum of Nature and Science Series A (Zoology)*, 査読有, 2014, Vol. 40, pp. 111–116.
- Kawada, S., Kurihara, N., Tominaga, N., Endo, H. The first record of *Anourosorex* (Insectivora, Soricidae) in western Myanmar, special reference of the identification and karyological characters. *Bulletin of the National Museum of Nature and Science Series A (Zoology)*, 査読有, 2014, Vol. 40, pp. 105–109.
- 田中浩・松尾大輝・栗原望. 捕獲調査により確認された小型哺乳類. *山口県の自然*, 査読無, 2016, 76 巻, pp. 45–50.
- Kurihara, N., Amano, M., Yamada, T. K. Decrease in tooth count in melon-headed whales. *Journal of Zoology*, 査読有, 2016, Vol. 300, 8–17.
- Kurihara, N., Tajima, T., Yamada, T. K., Matsuda A., and Matsuishi, T. Description of the karyotypes of Stejneger's beaked whale (*Mesoplodon*

stejnegeri) and Hubbs' beaked whale (*M. carlhubbsi*). *Genetics and molecular Biology*, 査読有, accepted.

[学会発表](計 10 件)

- 栗原望・天野雅男・山田格. カズハゴンドウにみられた歯の脱落傾向. 2013. 5. 25–26. 日本セトロロジー研究会 2013 年度大会. 富山市科学博物館 (富山県・富山市).
- 栗原望. カズハゴンドウに見られる歯の脱落. ミニシンポジウム「鯨蹄類(げいっているい)の生物学」. 日本哺乳類学会 2013 年度大会. 2013. 9. 6–9. 岡山理科大学 (岡山県・岡山市).
- 吉住健吾・石橋敏章・立川利幸・山田格・栗原望・和田直己. スナメリとハセイル力の遊泳運動の理解を目的とした解剖. 日本哺乳類学会 2013 年度大会. 2013. 9. 6–9. 岡山理科大学 (岡山県・岡山市).
- 栗原望・一澤圭・田島木綿子・山田格. 漂着個体を用いたオウギハクジラの核学的研究. 日本セトロロジー研究会第 25 回 (松山) 大会. 2014. 5. 24–25. 愛媛大学 (愛媛県・松山市).
- 郡司芽久・栗原望. 体骨格の適応進化を考える—分類学・機能形態学・古生物学の観点から—. 日本哺乳類学会 2014 年度大会. 2014. 9. 4–7. 京都大学 (京都府・京都市).
- 栗原望・川田伸一郎・山田格. オウギハクジラ属鯨類の核型について. 日本哺乳類学会 2014 年度大会. 2014. 9. 4–7. 京都大学 (京都府・京都市).
- 栗原望・藪崎茜・田島木綿子・山田格. カズハゴンドウ (*Peponocephala electra*) の核型について. 日本セトロロジー研究会第 26 回(あきた白神)大会. 2015. 7. 18–19. あきた白神体験センター (秋田県・山本郡).
- 田尻理恵・栗原望. 脂肪を多く含む動物組織の薄片作製と観察. 日本地質学会第 122 年学術大会. 2015. 9. 11–13. 信州大学 (長野県・松本市).
- 栗原望・立川利幸・原田孝一. 山口県に漂着したスナメリの核型について. 日本セトロロジー研究会第 27 回(寺泊)大会. 2016. 6. 25–26. 長岡市寺泊文化センター (新潟県・長岡市).
- 栗原望. スローロリスにみられた脊椎の形成異常. 自由集会「記載のすゝめ—奇形と破格からみる生物学—」. 日本哺乳類学会 2016 年度大会. 2016. 9. 23–26. 筑波大学 (茨城県・つくば市).

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
無し。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗原 望 (Kurihara, Nozomi)
宇都宮大学・農学部・講師
研究者番号：40456611

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

山田 格 (Yamada, Tadasu K.)
川田 伸一郎 (Kawada, Shin-ichiro)