

チーター (*Acinonyx jubatus*) における 半規管の配置と直交性について

Orientation and Orthogonality of the Semicircular Canals in the Cheetah (*Acinonyx jubatus*)

大石 元治¹, 荻原 直道², 宇根 有美³, 藤田 道郎⁴,
添田 聡⁵, 尼崎 肇⁵, 市原 伸恒¹

¹ 麻布大学獣医学部解剖学第一研究室, 神奈川県相模原市中央区淵野辺 1-17-71

² 慶應義塾大学理工学部機械工学科, 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

³ 麻布大学獣医学部病理学研究室, 神奈川県相模原市中央区淵野辺 1-17-71

⁴ 日本獣医生命科学大学獣医学部放射線学研究室, 東京都武蔵野市境南町 1-7-1

⁵ 日本獣医生命科学大学獣医学部獣医解剖学研究室, 東京都武蔵野市境南町 1-7-1

Motoharu OISHI¹, Naomichi OGIHARA², Yumi UNE³, Michio FUJITA⁴,
Satoshi SOETA⁵, Hajime AMASAKI⁵, Nobutsune ICHIHARA¹

¹Laboratory of Anatomy 1, School of Veterinary Medicine, Azabu University,
1-17-71 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 252-5201, Japan

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Science and Technology, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8522, Japan

³Laboratory of Veterinary Pathology, School of Veterinary Medicine, Azabu University,
1-17-71 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagamihara, Kanagawa 252-5201, Japan

⁴Department of Veterinary Radiology, School of Veterinary Medicine, Nippon Veterinary and Life Science University,
1-7-1 Kyonancho, Musashino, Tokyo 180-8602, Japan

⁵Department of Veterinary Anatomy, School of Veterinary Medicine, Nippon Veterinary and Life Science University,
1-7-1 Kyonancho, Musashino, Tokyo 180-8602, Japan

Abstract: The purpose of this study was to clarify the spatial orientation of the semicircular canals in the cheetah (*Acinonyx jubatus*) using computed tomography (CT). CT scan was performed on the skull of a cheetah. Scanning data were reconstructed into the cross-sectional images, and then the landmark coordinates were determined to define the planes of the semicircular canals and the cross-sections of the skull. In the cheetah, the lateral semicircular canal was parallel to the base of the skull. The angles between the anterior and posterior semicircular canals was larger than 90 degrees, and each canal showed the similar angle with the sagittal cross-section of the skull, although these planar directions were different. One limitation of this study is that here we provided only one specimen, and thus the present results need to be confirmed by examining a larger number of cases in future studies. However, the method outlined in this study provided quantitative descriptions of orientations and orthogonalities of the semicircular canals of the cheetah. This is potentially useful for indentifying the morphological features of the semicircular canals in felids.

Key words: Orientation, Semicircular canals, Cheetah

1. はじめに

半規管はバランス感覚を担う器官であり、側頭骨岩様部内に存在している。哺乳類においてリング状の3つの半規管は頭部に加わるあらゆる方向の回転の加速度（角加速度）を感知するために、それらが互いに90度で交わることで最も効率的に機能することができると考えられている⁸⁾。しかし、実際には半規管の直交性 orthogonality は動物種によって異なり、系統発生の意義や機能的意義が議論されている^{4,6,8,9)}。

チーター (*Acinonyx jubatus*) は最も速く走ることができる陸上哺乳類として広く知られており、他のネコ科動物とは異なる身体の構造をもつ^{1,5,7,10)}。チーターは毎秒約30 mまで加速することができ¹¹⁾、安定した走行のために優れたバランス感覚を持っていると推測される。すなわち、チーターは高速走行に適応した動物のひとつであり、彼らの半規管の特徴を理解することは高速走行時の姿勢制御の進化を理解することにつながる。しかし、チーターの半規管の特徴については報告されていない。

そこで本研究では、ネコ科動物のなかでも特異的なロコモーションを示すチーターにおける半規管の直交

性と、頭蓋骨基準断面となす角度について数値化して、半規管の頭蓋骨における空間的配置を明らかにする。

2. 材料と方法

2-1 材料

麻布大学所蔵の1個体のチーター（成体、性別不明）の頭蓋骨を用いた。本個体は動物園の飼育個体である。

2-2 CT撮影

日本獣医生命科学大学附属動物医療センターにおいて頭蓋骨のCT撮影（東芝CT, Aquilion Prime 5, 120kV, 150 mA, スライス厚 0.5 mm）を行った。

2-3 三次元座標の取得と角度の算出

OsiriX (Pixmeo) の3D MPR (3D Multi-Planar Reconstruction) によって互いに直交する3断面を再構成し、断面に作成した参照点の三次元座標を取得した。参照点 (A1 ~ 4, P1 ~ 4, L1 ~ 4, Do1 ~ 3, Sa1 ~ 3, Tra1 ~ 4) の詳細については表1, 図1 ~ 3に示す。

表1 参照点の定義と略語

半規管を定義の点	
A1	前半規管の頂点
A2, A3	前半規管の外側点
A4	前半規管の湾曲から推測される根元の点
P1	後半規管の頂点
P2, P3	後半規管の外側点
P4	後半規管の湾曲から推測される根元の点
L1	外半規管の頂点
L2, L3	外半規管の外側点
L4	外半規管の湾曲から推測される根元の点
断面を定義する点	
Do1	大(後頭)孔の腹側端, Sa1と相同の点
Do2	頭蓋骨水平断面(Do断面)における頬骨弓の左頭側端, Tra2と相同な点
Do3	頭蓋骨水平断面(Do断面)における頬骨弓の右頭側端, Tra4と相同な点
Sa1	大(後頭)孔の腹側端, Do1と相同の点
Sa2	頭頂点, Tra3と相同な点
Sa3	硬口蓋の正中点, Tra1と相同な点
Tra1	頭蓋骨横断面(Tra断面)における硬口蓋の正中点, Sa3と相同な点
Tra2	頭蓋骨横断面(Tra断面)における左側頬骨弓の端, Do2と相同な点
Tra3	頭蓋骨横断面(Tra断面)における頭頂点, Sa2と相同な点
Tra4	頭蓋骨横断面(Tra断面)における右側頬骨弓の端, Do3と相同な点

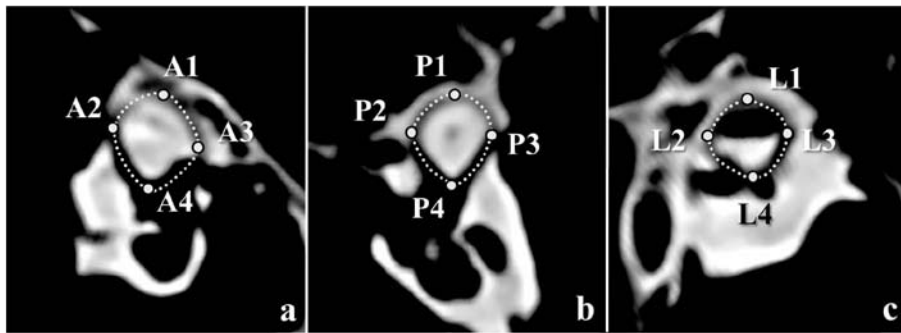


図1 再構成された半規管（左側）と参照点の位置
 a: 前半規管, b: 後半規管, c: 外半規管
 点: 参照点を示す。点線: 半規管の仮想輪郭を示す。略語については表1を参照

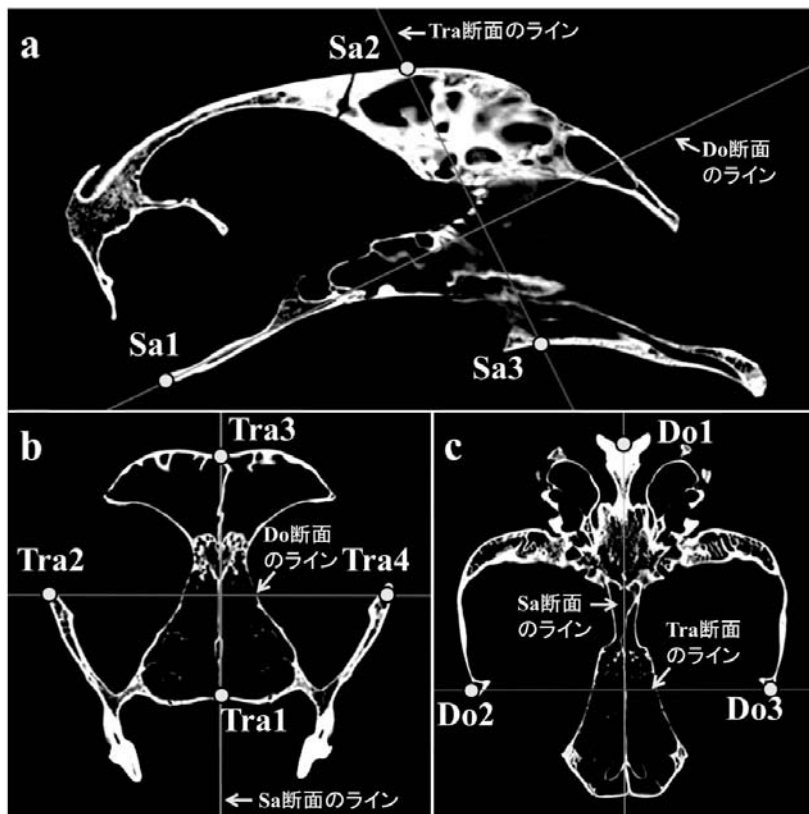


図2 再構成された頭蓋骨基準断面と参照点の位置
 a: 正中矢状断面 (Sa 断面), b: 横断面 (Tra 断面), c: 水平断面 (Do 断面)
 点: 参照点を示す。略語については表1を参照

これらの参照点から前半規管平面 (A), 後半規管平面 (P), 外半規管平面 (L) と, 頭蓋骨基準断面として水平断面 (Do 断面), 矢状断面 (Sa 断面), 横断面 (Tra 断面) を定義し, それぞれの平面の法線ベクトルから各平面のなす角度を算出した。左右の半規管から得られた角度から平均値を求めた。

2-4 平面の再構築

得られた参照点の三次元座標を Metasequoia4 (Tetraface, Inc.) に挿入して, 参照点を頂点とする平面を作成した。さらに, これらの平面を Geomagic XOS2014 (3D Systems, Inc.) によって再構築することで, それぞれの平面がなす角度の方向性を確認した (図3~7)。

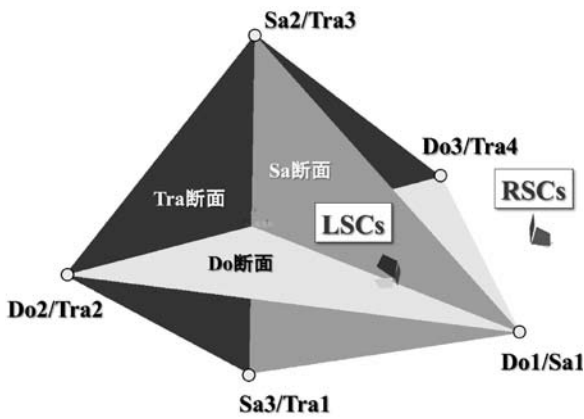


図 3 再構築された半規管と頭蓋骨基準断面（左後背側観）
LSCs: 左半規管, RSCs: 右半規管
その他の略語については表 1, 図 2 を参照

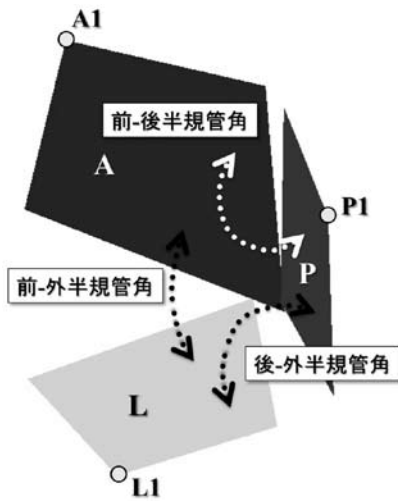


図 4 左半規管（左後背側観）のなす角度
A: 前半規管, L: 外半規管, P: 後半規管。
その他の略語については表 1 を参照

3. 結果

各平面のなす角度を表 2, 3 に示す。前半規管と後半規管は 106 度, 前半規管と外半規管は 92 度, 後半規管と外半規管は 99 度の角度をなし, それぞれ直角からは 16 度, 2 度, 9 度ほど変位していた。

頭蓋底と平行な頭蓋骨水平断面に対しては, 前半規管は前背側方向に 85 度, 後半規管は後背側方向に 101 度, 外半規管は後腹側方向に 4 度ほど傾いていた (図 5)。頭蓋骨矢状断面に対して前半規管は前外側方向に 35 度, 後半規管は後外側方向に 39 度, 外半規管は外側方向に 91 度ほど傾いていた (図 6)。頭蓋骨横

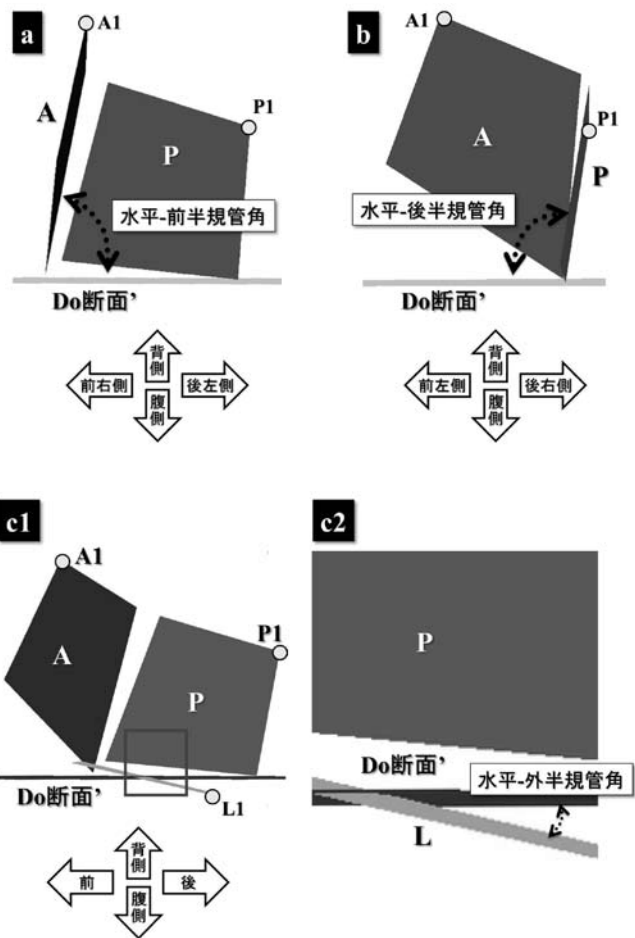


図 5 頭蓋骨水平断面と半規管（左側）のなす角度
a: 前半規管と頭蓋骨水平断面のなす角度（前左側観）, b: 後半規管と頭蓋骨水平断面のなす角度（後左側観）, c1: 外半規管と頭蓋骨水平断面のなす角度（左側観）, c2: c1 において枠で示された部位の拡大図
Do 断面': 水平断面 (Do 断面) を水平断面, 矢状断面, 横断面に沿って並進移動させた断面。その他の略語については表 1, 図 4 を参照

断面に対しては, 前半規管は矢状断面に沿って前方に 56 度, 後半規管は矢状断面に沿って後方に 53 度, 外半規管は水平断面に沿って前方に 86 度ほど傾いていた (図 7)。

すなわち, チーターの外半規管は頭蓋底とほぼ平行であり, 前半規管と後半規管は頭蓋底からそれぞれ前背側と後背側に伸びていた。さらに, 前半規管と後半規管は頭蓋骨矢状断面に対して方向性は異なるもののほぼ等しい角度をなしていた。

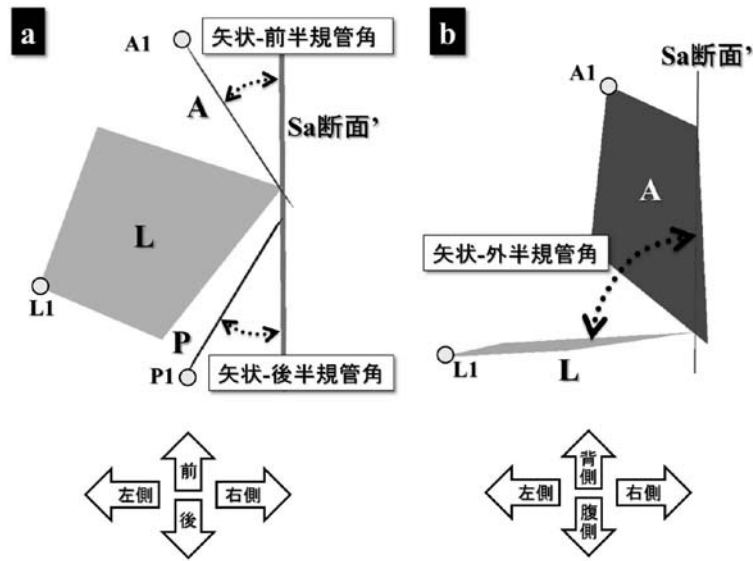


図6 頭蓋骨矢状断面と半規管（左側）のなす角度
 a: 前半規管，後半規管と頭蓋骨矢状断面のなす角度（背側観），b: 外半規管と頭蓋骨矢状断面のなす角度（後側観）
 Sa断面': 矢状断面（Sa断面）を水平断面，矢状断面，横断面に沿って並進移動させた断面。その他の略語については表1，図4を参照

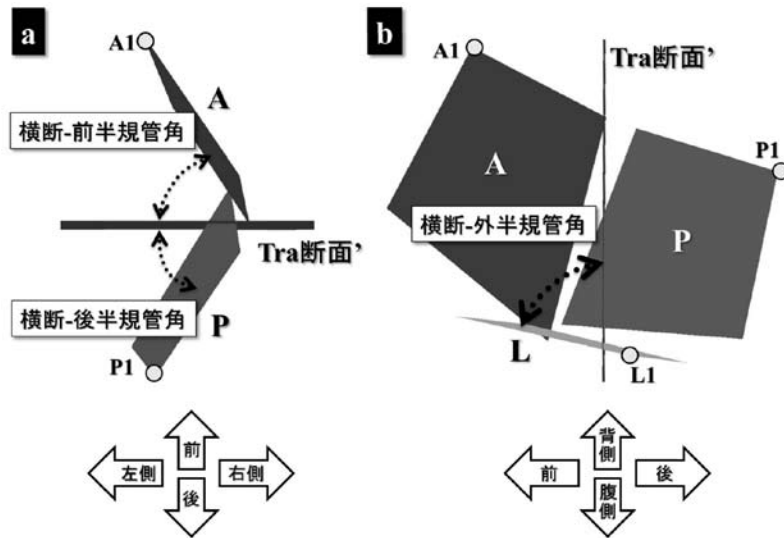


図7 頭蓋骨横断面と各半規管（左側）のなす角度
 a: 前半規管，後半規管と頭蓋骨横断面のなす角度（背側観），b: 外半規管と頭蓋骨横断面のなす角度（左側観）
 Tra断面': 横断面（Tra断面）を水平断面，矢状断面，横断面に沿って並進移動させた断面。その他の略語については表1，図4を参照

表2 チーターにおける各半規管のなす角度（度）

前-後半規管角	前-外半規管角	後-外半規管角
106	92	99

表3 チーターにおける頭蓋骨基準断面と各半規管のなす角度(度)

水平断面(Do断面)			矢状断面(Sa断面)			横断面(Tra断面)		
前半規管	後半規管	外半規管	前半規管	後半規管	外半規管	前半規管	後半規管	外半規管
85	101	4	35	39	91	56	53	86

4. 考察

チーターの3つの半規管のうち、前半規管と外半規管、後半規管と外半規管はほぼ直交していたが、前半規管と後半規管は16度ほど直角から変位していた。3つの半規管が直交していることは全方向に対して角加速度を効率的に感知することに有利であると考えられている⁸⁾。しかし、動物の半規管は必ずしも直交しておらず、それぞれのロコモーションに適応した半規管の方向性を示すことが報告されている^{4,6,8,9)}。すなわち、直交していないチーターの半規管もまた特定の方向に特殊化していることが示唆された。

チーターにおける前半規管と後半規管のなす角度は106度であった。ネコ科動物において唯一報告されているイエネコ(*Felis catus*)における前半規管と後半規管はほぼ直交(90度, 91度)しており^{2,4)}、本研究におけるチーターの両半規管のなす角度はイエネコよりも大きかった。さらに、チーターの前半規管と後半規管は頭蓋骨矢状断面とそれぞれ35度, 39度とほぼ等しい角度をなしていた。すなわち、チーターの両半規管はイエネコよりも矢状断面に沿って前後方向に広がっていると考えられた。チーターは最も足が速い陸上哺乳類として広く知られており、その加速は毎秒約30mに達する¹¹⁾。高速走行時、馬やグレイハウンドなどは異なり、チーターでは頭部の上下運動・回転運動がほとんど認められない^{3,12)}。すなわち、チーターの比較的前後方向に広がっている前半規管と後半規管は、頭部矢状断面に沿って大きな角加速度がかかっている状態で頭部の上下運動・回転運動の制御に有利なのかもしれない。

本研究で扱った頭蓋骨はチーター1個体に限定されており、今後さらに標本数を増やす必要がある。しかし、本研究において提示された方法により、中型ネコ科動物であるチーターにおける半規管の配置と直交性を数値化して定量的に記述することができた。中型から大型ネコ科動物には、サバンナで生活するライオン、森林に生息し木登りが得意とされるジャガー、高い跳躍

能力を持つと考えられているユキヒョウなど多様な運動特性が認められるが、それらの運動特性と半規管の関係についての報告はない。ネコ科動物における半規管の特徴を機能的観点から議論する上で、本研究で示された手法は有用であると考えられる。

5. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、チーターの頭蓋骨を作成していただいた麻布大学病理学研究室のスタッフ、またCT撮影にご協力をいただいた日本獣医生命科学大学獣医放射線学研究室のスタッフに深く感謝致します。

文献

- 1) Andersson K. Elbow joint morphology as a guide to forearm function and foraging behaviour in mammalian carnivores. *Zool. J. Linn. Soc.* 142, 91-104 (2004).
- 2) Blanks R. H. I., Curthoys I. S., Markham C. H. Planar relationships of semicircular canals in the cat. *Am. J. Physiol.* 223, 55-62 (1972).
- 3) Dunbar D. C., Macpherson J. M., Simmons, R. W., Zarcades A. Stabilization and motility of the head, neck and trunk in horses during overground locomotion: comparisons with humans and other primates. *J. Exp. Biol.* 211, 3889-3907 (2008).
- 4) Ekdale E. G. Comparative anatomy of the bony labyrinth (inner ear) of placental mammals. *PLoS ONE* 8, e66624 (2013).
- 5) Gonyea W. J. 1978. Functional implications of felid forelimb morphology. *Acta Anatomica* 102, 111-121 (1978).
- 6) Grohe C., Tseng Z. J., Lebrun R., Flynn J. J. Bony labyrinth shape variation in extant Carnivora: a case study of Musteloidea. *J Anat.* 228, 366-383 (2015).
- 7) Künzel W., Probst A. Anatomic features of the carpal joint of the cheetah (*Acinonyx jubatus*), compared with the domestic cat (*Felis catus*). *Anat. Histol. Embryol.* 28, 177-182 (1999).

- 8) Malinzak M.D., Kay R.F., Hullar T.E. Locomotor head movements and semicircular canal morphology in primates. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 109, 17914-17919 (2012).
- 9) Mazza D., Winterson B. Semicircular canal orientation in the adult resing rabbit. *Acta Otolaryngol* 98, 472-480 (1984).
- 10) Ohale L. O., Groenewald H. B. The morphological characteristics of the antebrachiocarpal joint of the cheetah (*Acinonyx jubatus*). *Onderstepoort J. Vet. Res.* 70, 15-20 (2003).
- 11) Sharp N (1997) Timed running speed of a cheetah (*Acinonyx jubatus*). *J. Zool.* 241, 493-494.
- 12) 和田直己. 「走る」—チーター (*Acinonyx jubatus*) の高速走行—. *哺乳類科学* 52, 95-101 (2012).