



## 蝸牛の種差に関する鋳型樹脂標本を用いた研究

城戸大樹, 高橋直紀, 広瀬拓哉, 福富彰, 植田弘美†, 白石治恵††, 竹花一成

酪農学園大学獣医学群獣医組織解剖学ユニット

酪農学園大学獣医学群獣医解剖学ユニット†

酪農学園大学農食環境学群英語表現・科学英語研究室††

責任著者: 高橋直紀 [s21003132@g.rakuno.ac.jp](mailto:s21003132@g.rakuno.ac.jp)

## Morphological differences in the cochlea of various species by using resin cast

Taiki Kido, Naoki Takahashi, Takuya Hirose, Akira Fukutomi, Hiromi Ueda†, Harue Shiraiishi††, Kazushige Takehana

Laboratory of Veterinary Microanatomy, Veterinary Anatomy†, Department of Veterinary Medicine, Laboratory of Literary and Scientific English††, Department of Food Science and Human Wellness, Rakuno Gakuen University

Corresponding Author: Naoki Takahashi [s21003132@g.rakuno.ac.jp](mailto:s21003132@g.rakuno.ac.jp)

### 要 旨

蝸牛の形態学的特徴と動物種差との関係を明らかにするため、樹脂鋳型にて走査型電子顕微鏡を用いて16種の哺乳動物を観察した。蝸牛の回転方向はどの種においても相違はなく、蝸牛頂から蝸牛底に向け、右側では時計回り、左側では反時計回りであった。蝸牛の回転数は多くの種で2-3回転で、モルモットが3.75回と最大であった。外耳道間の距離を基準とし蝸牛直径を比較すると、リスザルで最も大きく、ウマで最も小さかった。蝸牛の高さはモルモットで最も高く、ウシで最も低かった。蝸牛の全長はブタで最も長く、ウマで最も短かった。

蝸牛直径と全長は、体の大きさとの関連はなかったが、蝸牛の高さは大きな動物で低く、小さな動物で高い傾向が認められた。蝸牛内腔の断面積はほとんどすべての動物種において最初の1回転目における減少割合が基底部の3割程度であることも明らかとなった。

これらの結果より、蝸牛の形態は動物種によって異なり、体の大きさによる相関が認められ、ほとんどの動物種で蝸牛内腔の断面積の減少率は最初の1回転までは類似することが明らかとなった。

## 1. 背景, 目的

耳は聴覚と平衡覚を司る解剖学的構造を有し、外耳、中耳および内耳の3部位より構成され、音の受容のためにはこれらの3つの部位が協調して働く。

外耳は耳介および外耳道で構成される。耳介は軟骨と軟組織よりなり、柔軟でありながらもいわゆる「耳」としての形を保持するような特徴を有する。音の振動は耳介によって集められ、外耳道へと伝達され中耳へと達する。中耳は外耳道の終わりにある鼓膜から始まり、耳小骨と呼ばれる3つの小さな骨を有する。この3つの骨により鼓膜で受け取った振動が内耳へと伝えられる。この際、音の振動は鼓膜と耳小骨によって機械的振動に代わり、またその強度が増強される。内耳は側頭骨岩様部に存在し、骨質の中の空洞（骨迷路）とその中にある膜性の管系（膜迷路）からなる。骨迷路は前庭、骨半規管および蝸牛から成り、膜迷路は卵形嚢、球形嚢、半規管および蝸牛管から成る。両者の間は外リンパ液、膜迷路の中は内リンパ液で満たされている。前庭は卵形嚢、球形嚢、半規管を収容して平衡覚を、蝸牛は蝸牛管を収容して聴覚を担う[17, 18]。蝸牛管内部にはラセン器（コルチ器）が存在し、聴覚刺激を大脳へ伝える神経と有毛細胞を介して繋がる。この蝸牛は魚類から両生類、爬虫類、鳥類、哺乳類へと進化する過程で大きくその形態を変化させてきた[7-9]。蝸牛の形態を明らかにすることは系統発生学の立場からも意義がある。魚類から爬虫類の段階では内耳

にはラゲナ(laguna)という音波をとらえる聴覚部分があり、鳥類ではラゲナは長大化し蝸牛という直線の管状の構造に、哺乳動物において蝸牛はらせん構造を呈するようになる。

内耳の形態に関し光学顕微鏡および電子顕微鏡による微細構造の観察は多く報告されている[4, 5, 16]。しかし、その多くは細胞レベルの研究であり、立体構造に関する研究は十分になされていない。これは内耳が側頭骨岩様部の内部にあり、極めて小さく壊れやすいことに由来する。近年、コンピュータ断層撮影法により内耳の構造を非破壊的に調べた研究も報告されている[2, 7, 13]。しかし、多くは骨迷路を中心とした3次元再構築で、蝸牛内腔に注目している報告が少なく、十分な形態学的情報は得られていない。今回の鋳型標本を用いた解析は解剖学的基礎データの蓄積に重要と考える。

以上のことから、本研究では各動物の蝸牛の鋳型標本を主に走査型顕微鏡を用いて、観察し、過去の報告[2, 6, 13, 15]も参考にして動物の体の大きさと蝸牛の形態および動物種との関係について検討した。

## 2. 材料および方法

### 2.1. 供試動物

16種48例を用いた(表1)。性別、年齢は野生個体を用いたため、判別不能な検体が多く存在し、記載していない。

表1 使用した動物種とその数

名称	学名	目	科	頭数	備考
リスザル	<i>Saimiri sciureus</i>	サル目	オマキザル科	3	
ラット	<i>Rattus norvegicus</i>	ネズミ目	ネズミ科	5	系統不明
モルモット	<i>Cavia porcellus</i>	ネズミ目	テンジクネズミ科	2	系統不明
エゾモモンガ	<i>Pteromys volans</i>	ネズミ目	リス科	1	
エゾリス	<i>Sciurus vulgaris</i>	ネズミ目	リス科	6	
ユキウサギ	<i>Lepus timidus</i>	ウサギ目	ウサギ科	8	
アナウサギ	<i>Oryctolagus cuniculus</i>	ウサギ目	ウサギ科	1	ロップイ
アライグマ	<i>Procyon lotor</i>	ネコ目	アライグマ科	2	
タヌキ	<i>Nyctereutes procyonoides</i>	ネコ目	イヌ科	2	
キツネ	<i>Vulpes vulpes</i>	ネコ目	イヌ科	2	
ブタ	<i>Sus scrofa</i>	鯨偶蹄目	イノシシ科	5	
ウシ	<i>Bos taurus</i>	鯨偶蹄目	ウシ科	5	
エゾシカ	<i>Cervus nippon</i>	鯨偶蹄目	シカ科	2	
ヒツジ	<i>Ovis aries</i>	鯨偶蹄目	ウシ科	2	
ウマ	<i>Equus caballus</i>	鯨偶蹄目	ウマ科	1	
オリイオオコウモリ	<i>Pteropus dasymallus</i>	コウモリ目	オオコウモリ科	1	

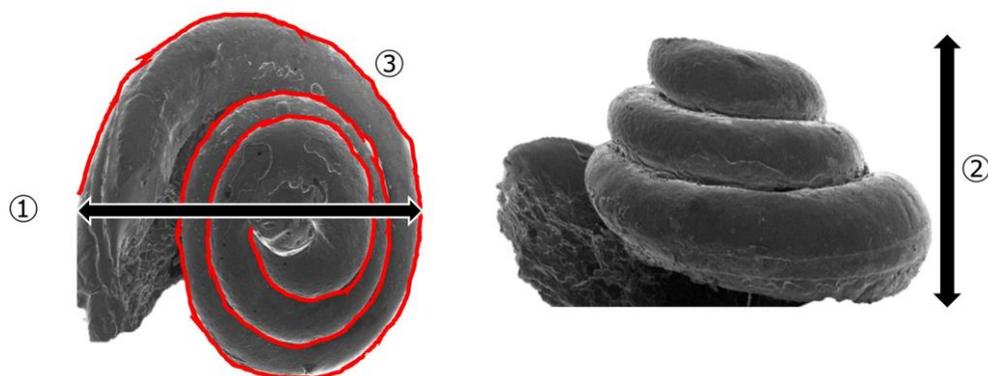
## 2.2. 鋳型作製方法

頸部より後頭部を剥皮し、環椎後頭関節より頭部を切り離した。側頭骨岩様部を注意深く解剖し、内耳領域を取り出し、60度のオープンに入れて内耳内のリンパ液を乾燥させた。その後、蝸牛窓および前庭窓よりメタクリレート樹脂(Mercox, Ladd Research, Williston, VT)を注入し硬化させた。骨組織を融解させるためにHCl溶液中に一晩浸漬し、十分に水洗し乾燥後、鋳型標本を得た。

## 2.3. 走査型電子顕微鏡による観察方法

得られた鋳型標本はマグネトロンスパッタリング装置(JUC-5000; 日本電子、東京)を用いて白

金でイオンコーティングを施した後、走査型電子顕微鏡(JSM-5200; 日本電子、東京)にて加速電圧5kvで観察した。測定項目は蝸牛内腔の回転数、直径、高さおよび全長とした(図1)。回転数は4分の1回転を最小単位とし、直径は鋳型標本の最大径、高さは鋳型標本の最大高、全長は完成した鋳型を用いて、実測値を求めた。左右外耳口縁の距離は生後の成長による成長率が比較的低いと報告されている[12]。動物種間の比較はそれを基準(100)としてそれに対しての蝸牛の直径、高さおよび全長の比率として比較を行った。それぞれの値は、平均値を使用した。



① : width, ② : height, ③ all length (red line)

Fig. 1. Measurement method of cochlear cast.

## 2.4. 鋳型標本による蝸牛の断面積の観察

作製した鋳型標本の中から11種13検体を用いた(ラット、ユキウサギは2検体ずつ)。作製した蝸牛の鋳型標本を電子顕微鏡包埋樹脂(Quetol 812 Mix; 日新EM、東京)に包埋し、これを歯科用糸ノコギリにて蝸牛頂から蝸牛底に向け垂直に切断した。試料の横断面を撮影し、得られた写真より

蝸牛鋳型標本の各回転における断面積を計測した(図2)。計測した値から各回転における断面積の減少率を算出し、動物種間の比較を行った。計測値は平均値を使用した。計測には画像解析ソフト(Image J, version 1.45s; National Institutes of Health, U.S.A)を用いた。

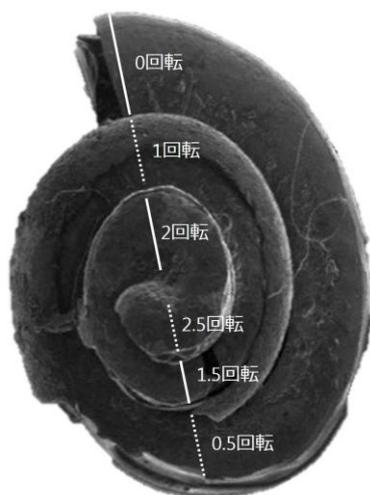


Fig. 2. Position of each rotation of the cochlear cast.

The cross-sectional area of each rotation was measured.

### 3. 結果

#### 3.1. 走査型電子顕微鏡による観察

蝸牛の回転方向はどの種においても蝸牛頂から蝸牛底に向けて右側では時計回り、左側では反時計回りであった。蝸牛内腔の形はどの種においても蝸牛底から蝸牛頂に向かうにつれ細くなっていた。蝸牛内腔はモルモット(図 3)やブタ(図 4)などでは各階層は接した状態で、密な螺旋構造を呈していた。一方、ウマ(図 5)やウシなどでは各階層は接する事なく疎な螺旋構造を呈していた。蝸牛内腔の外観はウマ(図 5)などの蝸牛は扁平な円錐型であり、モルモット(図 1)などの蝸牛は細長い円錐型を呈していた。

蝸牛の回転数はモルモット(図 3)が 3.75 回転と

最大で、オライオオコウモリ(図 6)が最小で 2 回転に達していなかった。モルモット(図 3)、ブタ(図 4)、オライオオコウモリ(図 6)を除き多くの動物種で 2~3 回転の間にあり大きな差はなかった。外耳道間の距離を基準にした相対比較では、直径はリスザルが最大で、ウマで最小であった。高さはモルモットとエゾモモンガが最大で、ウシとヒツジで最小であった。モルモットやラットなど体の小さな動物種で蝸牛の高が高く、ウシやウマなど体の大きな動物種で高さは低い傾向が認められた。全長はブタが 40.1 と最大で、ウマ(図 5)で 13.8 と最小であった。

結果を表にまとめた(表 2)。

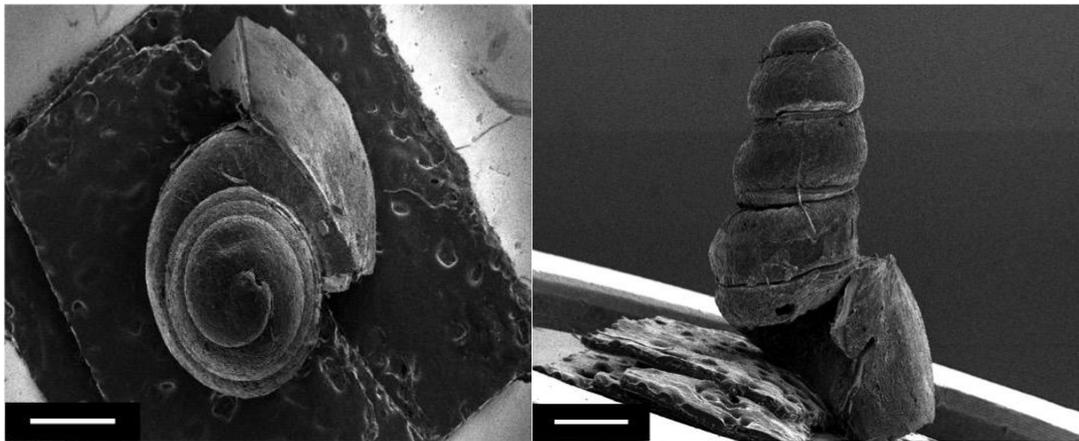


Fig. 3. Dorsal view (left) and lateral view (right) of the cochlea in the guinea pig using scanning electron microscopy. Bar = 1 mm

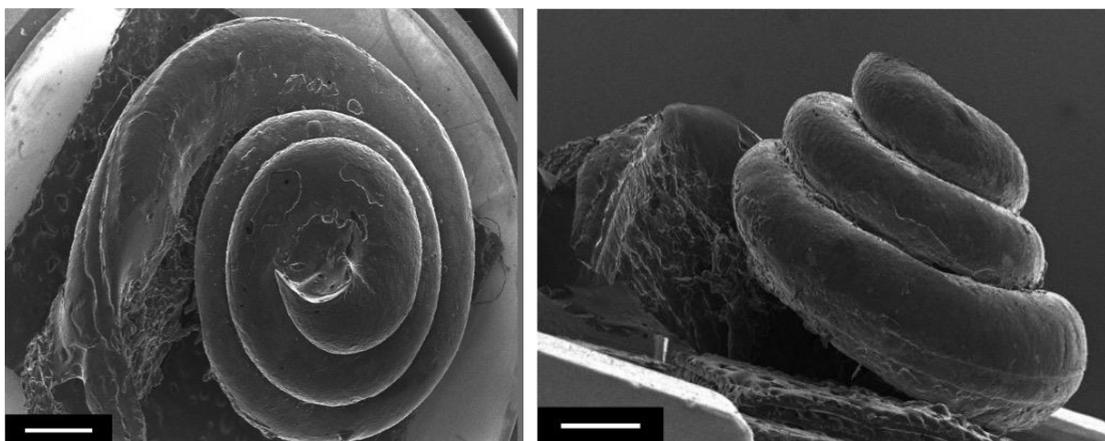


Fig. 4. Dorsal view (left) and lateral view (right) of the cochlea in the pig using scanning electron microscopy. Bar = 1 mm

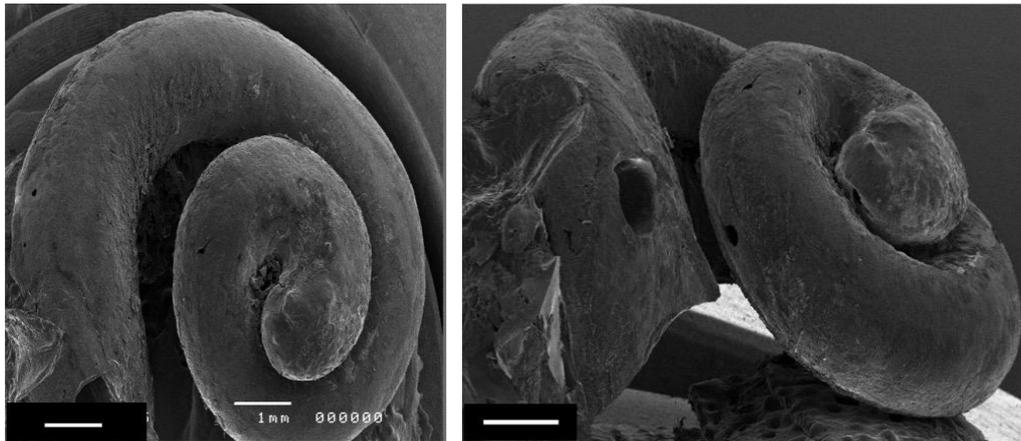


Fig. 5. Dorsal view (left) and lateral view (right) of the cochlea in the horse using scanning electron microscopy. Bar = 1 mm

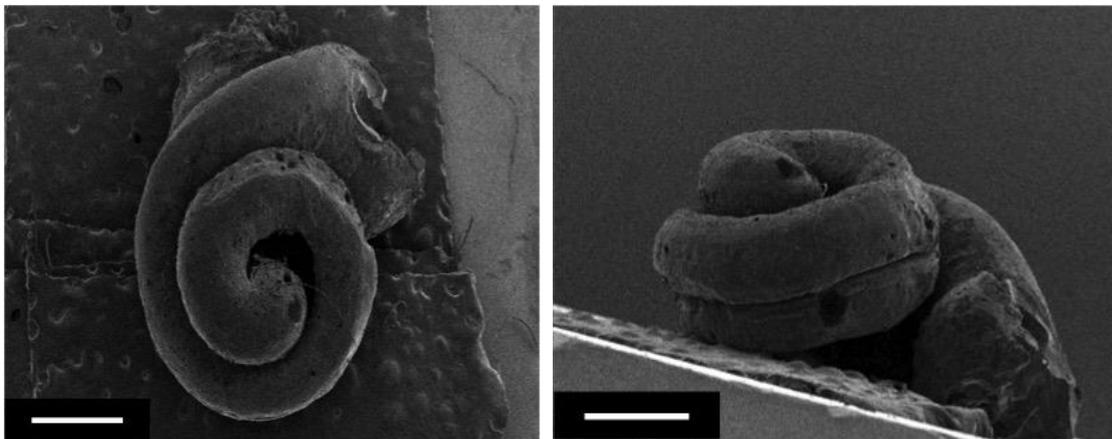


Fig. 6. Dorsal view (left) and lateral view (right) of the cochlea in the Orii flying fox using scanning electron microscopy. Bar = 1 mm

表2 蝸牛鑄型標本外観の計測結果

名称	回転数 (回転)	直径*	高さ*	全長*
リスザル	2+3/4	7.6	4.4	37.0
ラット	2+1/2	6.7	5.7	34.8
モルモット	3+3/4	4.7	6.3	34.6
エゾモモンガ	2	6.6	6.3	×
エゾリス	2+1/2	4.6	4.5	25.1
ユキウサギ	2	6.3	5.3	30.1
アナウサギ	2+1/2	3.8	2.8	18.3
アライグマ	2+1/2	4.2	2.8	17.4
タヌキ	2+3/4	5.5	4.1	28.8
キツネ	3	4.7	4	26.0
ブタ	3+1/2	6.6	3.8	40.1
ウシ	3	3.8	2.1	20.4
エゾシカ	2+1/2	4.4	2.3	×
ヒツジ	2+1/2	4	2.1	×
ウマ	2	3.7	1.9	13.8
オリイオオコウモリ	1+3/4	5.8	3.3	20.6

\*左右外耳口縁の距離を基準(100)として求めた。  
×：計測不能

### 3.2. 鋳型標本による蝸牛の断面積の観察

蝸牛頂から蝸牛底に向けて垂直に切断した鋳型標本の各回転の断面積を 0 回転目(回転起始部)の面積を 1 とし、各回転目の面積を算出し表にまとめた(表 3)。

蝸牛内腔の断面積は回転数の増加と共に全ての動物で減少した。断面積の減少率では、0 回転目から 1 回転目までの間が動物種により大きく異なっていた。すなわち、0.5 回転目における断面積の割合で大きく 3 つのタイプに区別することができた。1 つ目は、アナウサギ、ラットおよびリスザルの様な断面積の割合が 6 割以上のグループ、2 つ目は、ユキウサギ、モルモットおよびブタなど

の断面積の割合が 4 割以上 6 割以下のグループ、そして 3 つ目は、アライグマ、キツネ、タヌキ、ウシおよびウマの様な断面積の割合が 4 割以下のグループである。この事より、体の小さい動物は蝸牛が回転していく際、断面積減少率が低く、一方、体の大きい動物は蝸牛が回転していく際、断面積減少率が高いという傾向が明らかになった。また、0 から 0.5 回転目までの断面積減少率は動物種によって異なったが、ほぼ全ての動物で 1 回転目における断面積割合は 0 回転目の約 3 割程度となった。しかし、リスザルではそれらと異なる減少率を示し、1 回転目での減少率が 5 割ほどで、その後の減少率は小さかった。

表 3 動物種別蝸牛標本における各回転数での断面積割合

動物種	0 回転	0.5 回転	1 回転	1.5 回転	2 回転	2.5 回転
リスザル	1	0.62	0.55	0.44	0.43	0.30
ラット	1	0.66	0.43	0.27	0.13	0.09
モルモット	1	0.56	0.30	0.19	0.18	×
ユキウサギ	1	0.43	0.29	0.20	0.12	×
アナウサギ	1	0.66	0.28	0.21	0.19	×
アライグマ	1	0.28	0.33	0.18	0.12	×
タヌキ	1	0.39	0.30	0.16	0.14	0.08
キツネ	1	0.34	0.32	0.22	0.11	0.09
ブタ	1	0.51	0.32	0.25	0.25	0.24
ウシ	1	0.32	0.24	0.20	0.15	0.13
ウマ	1	0.36	0.31	0.24	0.23	×

×：観察不能

## 4. 考察

蝸牛の螺旋構造は空間的に制限のある側頭骨岩様部の中に効率よく収まり、血液供給の効率を向上させるため、低音に対する受容能を高めている [14]。蝸牛の幾何学的な構造は低周波エネルギーを集約させていることに関係しているという報告もある [11]。よって、蝸牛の密や疎な巻き方、扁平や細長い円錐型を呈しているという回転様式は形態的に低周波の音に対する受容に適するためと考えられている [10]。

走査型電子顕微鏡による蝸牛鋳型標本の観察において、蝸牛の回転数が最も多かったのはモルモットであった。一般的にげっ歯類において回転数が多いことは知られており、今回の結果も過去の

報告と一致していた [2, 13, 15]。蝸牛の回転は遺伝子によって決められているという報告もある [1, 7]。しかし、今回多くの動物種で回転数は 2~3 回転の間にあり大きな差はなかったということから、回転数のみで種を判断することはできないことも明らかになった。回転数に関し過去の教科書的な記載に比べ、全てで 0.5 回転ほど少なかった。このことは、蝸牛の起点をどこにとるかによって生じたものと考えた。蝸牛標本を用いた高さの相対比較では、モルモットとエゾモモンガで最大で、ウシで最小であった。モルモットやラットなど体の小さな動物で蝸牛標本の高さが高く、ウシやウマなど体の大きな動物で高さは低い傾向にあったため、蝸牛標本の高さと体の大きさの間には負の

相関関係があることが示唆された。動物の体重と蝸牛の体積に相関があることは既に報告されており [3]、それを支持する結果であった。すなわち体の大きい動物は大きな蝸牛を有し、その蝸牛は低く扁平で、一方、体の小さい動物は小さい蝸牛を有し、その形態は高く細長いものであることがより明らかになった。聴力など生理学的な特徴として体の小さなモルモットなどは、鳴き声をコミュニケーションとして用いており、これらの動物の鳴き声は一般的に周波数が高いとされ、それを反映する構造であると考えられる事が出来た。

蝸牛標本の直径および全長は、同一科であるユキウサギでは直径 6.3、全長が 30.1 であるのに対し、アナウサギでは直径 3.8、全長 18.3 であるように、同じ科の動物でも値が異なっており、体の大小との関連もなかったため、蝸牛の直径は動物科で異なると考えた。

蝸牛鋳型標本断面において、0 回転から 0.5 回転目の蝸牛鋳型標本断面積の減少割合によって 3 タイプに分けることができた。体の小さい動物ほど減少率が低く、体の大きい動物ほど減少率が高いという傾向が認められ、体の大きさが減少率に比例するということが明らかになった。0.5 回転目における断面積は動物種により異なっていたが、ほぼ全ての動物種で 1 回転目における断面積に対し約 3 割程度となった。この結果は過去に報告されていない新たなものである。

以上より、蝸牛の形態は動物種によって異なり、体の大きさに対する相関性があることは、過去の報告と同様であった。しかし、ほとんどの動物種で蝸牛内腔の断面積の減少率は 0 から 1 回転までは類似である事が今回の研究で初めて明らかとなった。

## 5. 謝辞

研究に必要な動物を快く提供くださった札幌市円山動物園の関係諸氏、酪農学園大学獣医解剖学ユニット、獣医生理学ユニット、獣医栄養生理学ユニット、獣医生化学ユニット、獣医寄生虫学ユニットおよび動物生殖学ユニットの方々に深く感謝します。

## 6. 参考文献

1. Cantos, R., Cole, L. K., Acampora, D., Simeone, A. and Wu, D. K. 2000. Pattering of the mammalian cochlea. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 97:11707-11713.
2. Ekdale, E. G. 2013. Comparative anatomy of the bony labyrinth (inner ear) of Placental Mammals. *PLoS. Curr.* 8: e66624.
3. Horst Erich König・Hans-Georg Liebich (2009). *Veterinary Anatomy of Domestic Mammals* Schattauer GmbH. (九郎丸正道・市原伸恒・神谷新司・佐々木基樹・福田勝洋(訳) (2010). カラーアトラス獣医解剖学 増補改訂版 上巻 チクサン出版社)
4. Jacob C. M. Low, Thomas J. Ober, Gareth H. McKinley, and Konstantina M. Stankovic. 2015. Quantitative polarized light microscopy of human cochlear sections. *Biomed. Opt. Express.* 6(2): 599-606.
5. Kawamoto, K., Ishimoto, S., Minoda R., Brough, D. E., and Raphael, Y. 2003. Math1 Gene Transfer Generates New Cochlear Hair Cells in Mature Guinea Pigs In Vivo. *J. Neurosci.* 23(11): 4395-4400.
6. Kirk, E.C., Gosselin-Ildari, A. D. 2009. Cochlear labyrinth volume and hearing abilities in primates. *Anat. Rec. (Hoboken).* 292:765-776.
7. Luo, Z.-X, Ruf, I., Schultz, J. A. and Martin, T. 2011. Fossil evidence on evolution of inner ear cochlear in Jurassic mammals. *Proc. Biol. Sci.* 278: 28-34.
8. Manley, G. A. 2000. Cochlear mechanisms a phylogenetic viewpoint. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 97:11736-11743.
9. Manley, G. A. 2012. Evolutionary paths to mammalian cochleae. *J. Assoc. Res. Otolaryngol.* 13:733-743.
10. Manoussaki, D., Chadwick, R. S., Ketten, D. R., Arruda, J., Dimitriadis, E. K. and O'Malley, J. T. 2008. The influence of cochlear shape on low-frequency hearing. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 105: 6162-6166.
11. Manoussaki, D., Dimitriadis, E. K. and Chadwick, R. S. 2006. Cochlea's graded curvature effect on low frequency waves. *Phys. Rev. Lett.* 96:

- 088701.
12. Nobuyuki, T., Mikio, S., Makoto, S., Yoshitaka, S., 1982. ニホンカモシカ骨格の計測形態学的研究. 岐阜大学農学部研究報告 第 46 号 215-221.
  13. Wannaprasert, T., Jeffery, N. 2015. Variations of Mammalian Cochlear Shape in Relation to Hearing Frequency and Skull Size. *Tropical Natural History* 15: 41-54.
  14. West, C. D. 1985. The relationship of the spiral turns of the cochlea and length of the basilar membrane to the range of audible frequencies in ground dwelling mammals. *J. Aud. Res.* 5: 139-144.
  15. 福富彰. 1996. ウシ、ウマ、ブタの蝸牛の比較形態学的研究. 酪農学園大学獣医学部獣医学科 1996 年度卒業論文.
  16. 小坂直也. 1970. 走査電子顕微鏡による蝸牛膜迷路の形態学的研究. *日耳鼻*73:1465-1473.
  17. 大森治紀. 2006. 神経と筋の生理学. 小澤瀨司, 福田康一郎, 本間研一, 大森治紀, 大橋俊夫 (編). 標準生理学第 6 版. 医学書院. pp.239-248.
  18. 吉田薫. 2006. 神経と筋の生理学. 小澤瀨司, 福田康一郎, 本間研一, 大森治紀, 大橋俊夫 (編). 標準生理学第6版. 医学書院. pp.262-263.

### Summary

To clarify the relationships between morphological parameters of the cochlea and species difference of animal, we performed a resin cast morphometrical study on 16 species of mammal by using scanning electron microscopy. The rotational direction of the cochlea was the same in all species: from the bottom to the apex, clockwise on the right side and anticlockwise on the left. The number of cochlear rotations was 2-3 revolutions in many species, and the number of rotations was largest with 3.75 revolutions in guinea pigs. For a morphometrical comparison between species, the distance from the right external auditory canal (EAC) to the left was used as a standard. The cochlear diameter was largest in squirrel monkey and smallest in horse. The cochlear height was largest in guinea pig and smallest in cow. The total length of the cochlea was largest in pig and smallest in horse. There was no correlation between diameter or total length of the cochlea and body size, but cochlear height tended to be small in large animals and to be large in small animals. Moreover, the reduction ratio in the first revolution was about 30% of the whole cochlea in all animals. These results suggest that the morphology of the cochlea varies with species, the height of the cochlea correlates with body size of animals, and in almost all animal species, the reduction ratio of the cross-section area in cochlea lumen is similar in the first revolution.