

## 特集：放射光利用の広がり(2)

## 壺囊耳石中の磁性元素とその機能

原田康夫

広島市病院事業局\*

## Magnetic Elements in Otoliths of Lagena and their Function

Yasuo HARADA

Hiroshima City Hospital Affairs Bureau

## Abstract

The mystery of pigeons' homing abilities has been the subject of much interest, and it is widely believed that information from the earth's magnetic field may be involved. However, no specific magnetic sensory organ has yet been identified. The recent finding of magnetic materials in the lagenal otolith of fishes and birds raises the possibility that these structures might be key elements in the elusive magnetic sensor system.

For the elemental analysis inside materials, x-ray fluorescence method (Synchrotron radiation) is one of the most powerful techniques. BL4A beam line of Photo factory of KEK at Tsukuba was used for analysis of the otolith.

Comparing the compositions of the three different kinds of otolith among several species of sea fishes and birds, we found that the saccular and utricular otolith rarely contain detectable levels of Fe (iron), but that Fe is present in significant quantities in the lagenal otolith of the birds. The lagenal otolith is tiny crystal that contains magnetic elements and is sensitively displaced by imposed magnetic fields, providing the animal with geomagnetic sensory input, from which the brain would infer navigational information.

Behavioral experiments of the homing abilities of the pigeons involving sectioning the lagenal nerves and the magnetic interfere to their lagena were done using 30 controlled birds and 21 treated birds from the same loft of the racing pigeons. The result of homing test of the control and treated pigeons clearly indicates the magnetic influence and lagenal function to pigeon's navigation ability, and the treated pigeons were either lost or significantly delayed, while the controls returned within 30 minutes after the release. Thus the birds' lagena is unique organ, and it may be concluded that the lagena is a key element to magnetic sensory system for birds.

## 1. はじめに

耳石器は下等動物のクラゲから哺乳類の内耳に存在し、重力、直線加速、遠心力の感覚器である。耳石器を構成するものに耳石、耳石膜、感覚上皮、と神経がある。

耳石器の一構成成分である耳石の組成は炭酸カルシウムであり、魚類は一ヶの塊である。

両生類から鳥類、哺乳類までの耳石は $0.2\mu\sim 25\mu$ の結晶形で、組成は同じく炭酸カルシウムである。

結晶の形より冷血動物の両生類、魚類の耳石は霏石 Aragonite で鳥類、哺乳類などは方解石 Calcite である<sup>1)</sup>。

耳石は単なる炭酸カルシウムで代謝は考えられておらず、むしろ魚類などは年輪の存在により、成長の指標とされていた<sup>2,3)</sup>。

私は、動物に硫酸ストレプトマイシンを投与したところ、耳石膜上の耳石の減少、崩壊などが起こることより耳石代謝障害が起こることに気づき、耳石は代謝し、哺乳類ではかなり早い速度で耳石の turn over が行われていることを発見した<sup>4,5)</sup>。単なる炭酸カルシウムの結晶の耳石も外界の影響で Fe, マンガン, 亜鉛など微量の金属が環境から、また飼料からも取り込まれる。

今回、瀬戸内海の有機錫の汚染に関して魚類の耳石への取り込みについて研究を思い立ち、瀬戸内の硬骨魚類の耳

石を放射光蛍光 X 線分析装置を用いて分析した。

その結果、船舶の塗料に使われた有機錫はすでに海水中に残存してなく、魚の耳石の中には検出できなかった。しかし、耳石の中には大量のストロンチウムが含まれており<sup>6)</sup>、はじめはこのストロンチウムと水爆実験が関係あるかと、第五福龍丸以前の魚の耳石の分析を行ったがストロンチウムは同じように存在していたので、文献を検索し海水中に常在することが判った<sup>7)</sup>。

所が、魚の耳石器である球形囊、卵形囊、壺囊の夫々の耳石を分析した所、一番小さい壺囊耳石の中に Fe, マンガン, 亜鉛が大量に含まれることを発見した<sup>6)</sup>。

壺囊のこの磁性物質の存在について考えているうちに、壺囊の機能はということになり、哺乳類に存在しない壺囊は第三の耳石器と呼ばれ、三次元の感覚器と考えられ、鳥類、魚類、両生類などに存在する。従って、空中、水中で飛行したり、泳いだりする時の高度、水深などの三次元の感覚器であると考えられていたが、もう一つ地磁気を感じる感覚器と考えると、鳥、魚の帰巢、渡り、回遊などの機能の解明につながると思ったのである<sup>6)</sup>。

\* 広島市病院事業局 〒730-8586 広島県広島市中区国泰寺町 1-6-34  
TEL: 082-504-2660 FAX: 082-504-2674 E-mail: harada-y@city.hiroshima.jp

## 2. 耳石の放射光蛍光 X 線分析

### 2.1 実験材料並びに実験方法

瀬戸内硬骨魚のボラ(Mugil cephalus), マサバ (Scomber japonicus), タチウオ(Trichiurus Japonicus), マアジ (Trachurus Japonicus), メバル (Sebastes inermis), ひらめ(Paralichthys olivaceus), ハヤ(Maroco steindachmeri), アユ (Plecoglossus altivelis), 鳥類はハト, カル

ガモ (Anas poecilorhyncha), ニワトリ, ダチョウ (struthio camelus) などの耳石の放射光蛍光 X 線分析を行った。

標本の摘出は動物を断頭後, 頭蓋を正中面で二分し, 脳を除去後, 2%グルタルアルデヒド内に浸漬した。1日後に蒸留水で半切された頭部を洗浄し, 全迷路を摘出し, 三つの耳石器を取り出した。魚類の球形囊, 卵形囊, 壺囊の耳石は夫々一個の塊で摘出は容易であり, 球形囊耳石がもっとも大きく, 次いで卵形囊耳石, 壺囊耳石は小さく, 1 mm 前後の大きさである (Fig. 1)。

これらの耳石を各囊からはずして, 蒸留水の中で何度か洗浄し, 最後には超音波洗浄装置を用いて蒸留水中で洗浄した。

鳥類の耳石器は同じく固定後蒸留水中で夫々摘出し, 球形囊, 卵形囊, 壺囊の囊を開放し, 充分耳石層を露出し, アルコール脱水後常温で空気乾燥した。開放された囊は X 線ビームが直接試料にあたるようにした。

### 2.2 元素分析方法

元素分析にはシンクロトロン蛍光 X 線分析を用いた。この手法は, 物質の内殻電子が励起された後で発生する元素固有の特性 X 線のエネルギー分布を観測することで組成を調べるものである。蛍光 X 線を用いて微小な組成分析を行う場合, 強力な X 線が必要とされるが, 放射光による X 線分析は微小元素分析に最も適している。

実験は高エネルギー加速器研究機構物質構造研究所放射光実験施設(フォトンファクトリー; PF)の二結晶分光器ビームライン BL4A で行われた。BL4A からのエネルギー 18 keV でビームサイズ  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$  の X 線を励起光として利用した。試料からの蛍光 X 線は半導体検出器により計測された。

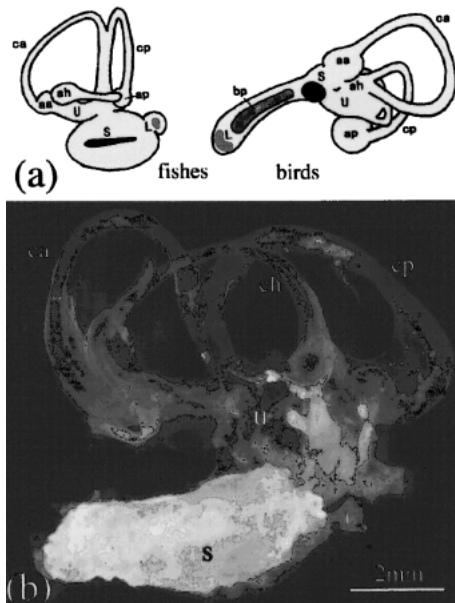


Figure 1. Position of the lagenal otolith in the inner ear. (a) Schematic illustrations of the inner ear of fish and birds. L indicate the lagena. (b) Photograph of the inner ear of the mullet. The white part is the saccular otolith. S=saccule; u=utricle; bp=basilar papilla; ca=anterior canal; cp=posterior canal; ch=horizontal canal; L=lagena.

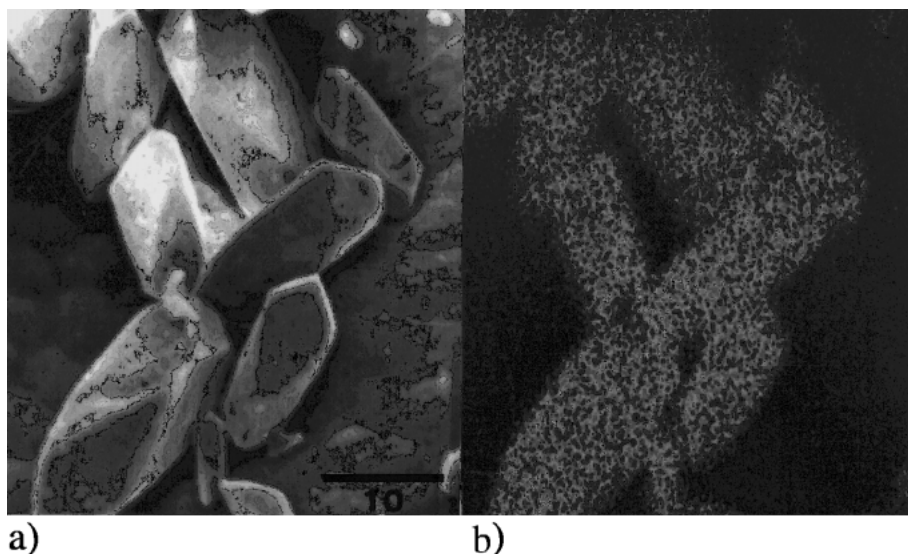


Figure 2. a: The otolith of the frog, b: Secondly Ca X ray image of the otolith.

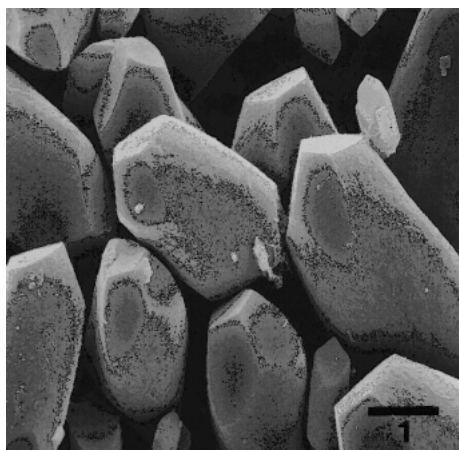


Figure 3. The otolith of the guinea pig.

尚、耳石のX線分析はこれまで走査型電子顕微鏡にエネルギー分散型のX線分析装置を付属装置としてつけ、炭酸カルシウムのCaを面分析、点分析、線分析する方法で、従来は分析して来た。この方法では微量元素の観察は精度が低く、ビームのスポットも放射光蛍光X線のように絞れない。

はじめに走査型X線分析装置による耳石の形態に関し従来の成績につき示す。

### 2.3 実験成績

#### A) 耳石のX線分析

耳石は炭酸カルシウムであるが、動物の種類により、形や大きさが種々である。一般的な形は魚類では一ヶの塊であり、球形囊、卵形囊、壺囊ではその大きさ形とも異なる。

両生類から哺乳類に至るまで炭酸カルシウムの結晶であるが、両端が三面体をなしており、蛙はその角度が90°Cでモルモットやヒトではその角度が約110°Cである (Fig. 2, Fig. 3)。

ハトの耳石では (Fig. 4a) にみられるように米粒状で両端が他の動物の耳石のようにピラミッド状というよりは両端が鈍角になっている<sup>8)</sup>。

#### i) 耳石と標準方解石のX線分析

モルモット耳石と標準方解石のCaを含量分析を行った所、どちらも図の如く、40%のCaを含有し、あと60%はCO<sub>3</sub>の量ということになる (Fig. 5)。

私はCaが前庭暗細胞上で吸収されることを発見したが、前庭暗細胞上では結晶形の形のよいものはCa含有量が多く、Caが吸収されると耳石の結晶形は変形し、Fig. 6の如く形も小さく、収縮したような形となり、Caの含有%が極単に少なくなる<sup>4,5)</sup>。

#### ii) 魚類耳石の蛍光X線分析

魚類は球形囊、卵形囊、壺囊に夫々一個の耳石を持ち、これらをX線分析した所、CaK $\alpha$ 、SrK $\alpha$ 、K $\beta$ が認められた。壺囊耳石にはCa、Srの他にFeとZnK $\alpha$ のピークが認められた (Fig. 7)。

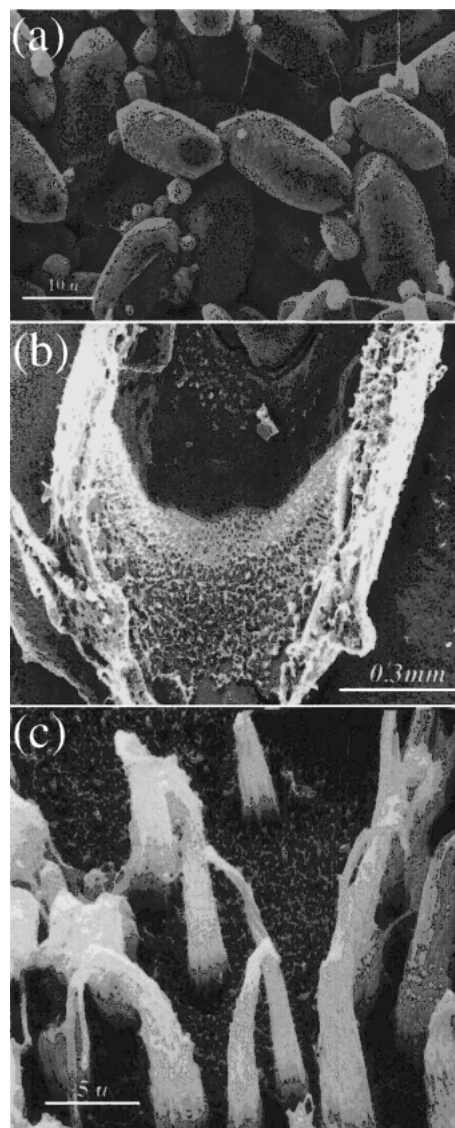


Figure 4. SEM images of the inner ear of the pigeon: (a) lagenal otolith; (b) lagenal sensory epithelium with >12,000 sensory cells; (c) lagenal sensory epithelium at high power resolution.

魚類耳石の蛍光X線スペクトルで球形囊耳石にCaK $\alpha$ 線、K $\beta$ 線、SrK $\alpha$ の線、K $\beta$ 線が、いずれの試料からも検出された。特にメバルでは壺囊耳石にFeK $\alpha$ が高い値を示し、ZnK $\alpha$ 線も検出された (Fig. 8)。

Figure 8, Table 1 に示すようにアユ、ハヤなども壺囊耳石にFeの含有が多く、メバルの耳石内にも球形囊耳石にはFeが検出できないのに、壺囊にFeK $\alpha$ 、ZnK $\alpha$ のピークが見られた。

海水魚のメバル、マアジ、マサバ、タチウオ、ヒラメ、ボラ等の耳石内Feの分析では、メバルは他の魚よりも壺囊耳石にFeが多く含まれていた。

メバルの耳石の放射光蛍光分析では球形囊耳石内にFeは含まれないのに、壺囊耳石内にFe、Znが含まれるピークが認められた (Fig. 7)。

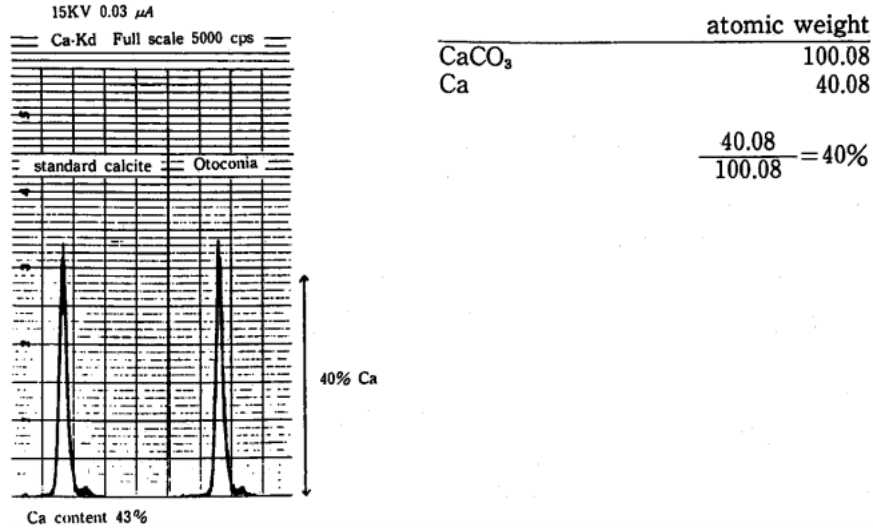


Figure 5. Microanalysis of the otolith (guinea pig) and standard calcite.

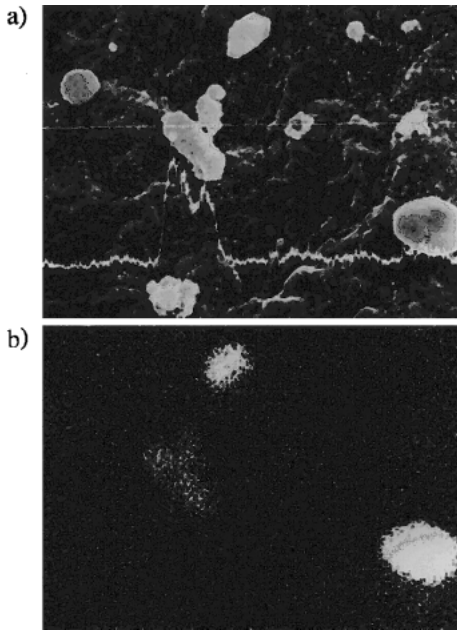


Figure 6. Calcium analysis of the otolith on the utricular dark cell area. a) Line analysis reveals a peak on line. b) Plane analysis of Fig. (a). White dots accumulate in the otolith with high amounts of calcium.

同じく海水魚のハヤ、アユにおいても、壺囊内のFeは海水魚よりも多く含まれているようであるが、これは更に多くの試料の観察を重ねるべきである。

iii) 鳥類耳石の蛍光X線分析

鳥類の壺囊耳石の分析を行った所、ニワトリ、ハト、ダチョウ、カルガモ共に壺囊耳石内にFeが検出され (Table 1), ハトは魚類の10倍, カルガモは100倍のFeが%表示で検出された (Fig. 9, Fig. 10)。

Figure 11はカモの内耳の蛍光X線のマッピングをあら

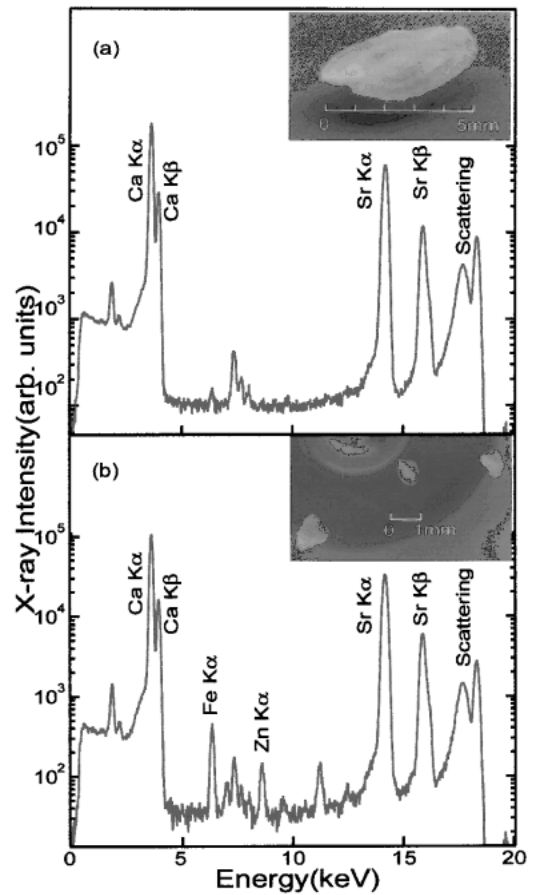


Figure 7. X-ray fluorescence spectra of the otolith of the rockfish: (a) saccule; (b) lagena.

わす。入射X線のサイズは200 μm × 200 μmで、試料位置50 μm 移動させ2次元的な蛍光X線の分布を測定しハトも同様の成績を示した。

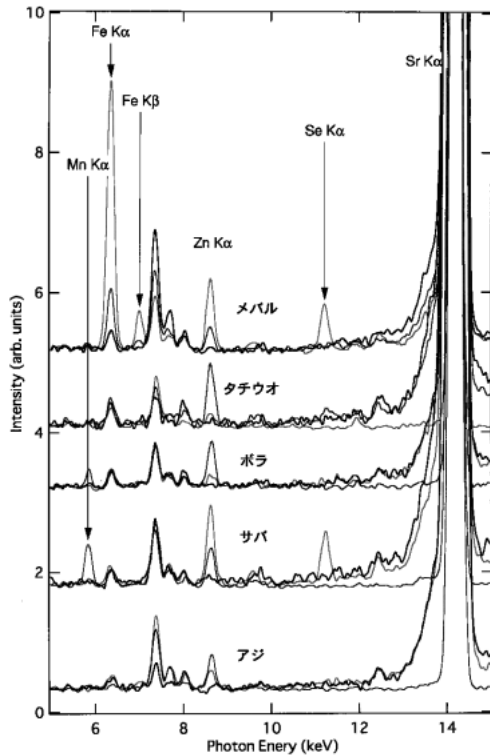


Figure 8. X-ray fluorescence analysis of fishes otoliths.

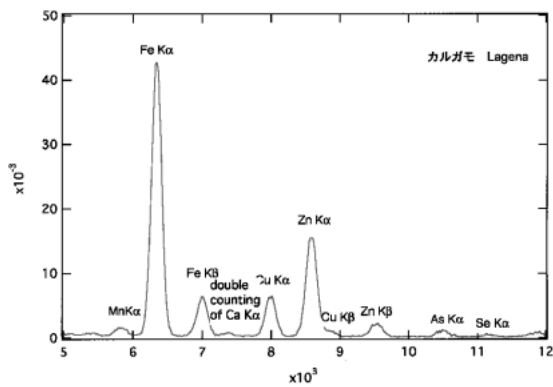


Figure 9. X-ray fluorescence spectrum of the lagena of the spot-billed duck.

**Figure 11(f)** の写真で白く見える部分が壺囊に対応する。耳石の主成分が Ca であるため、Ca の分布と写真の白い部分がよく対応している。散乱 X 線の強度分布 (e) は耳石の密度分布に対応している。(b) の Fe の分布は壺囊に集中している。(b) は蛍光 X 線スペクトルを表しており、Ca, Fe, Zn, Sr のピークが見られる。

**Figure 8, 9** は、魚類、カルガモの耳石の蛍光 X 線スペクトルを表している。耳石による蛍光 X 線の強度の比較を容易にするために、 $\text{CaK}\alpha$  線のピーク強度で規格化されている。Fe と Zn のピークがそれぞれ 6.7 keV, 8.6 keV に見られる。Fe の強度は魚類に比べ鳥類で強く、特にカモが顕著である。 $\text{CaK}\alpha$  線と  $\text{FeK}\alpha$  線の強度比はカモの場

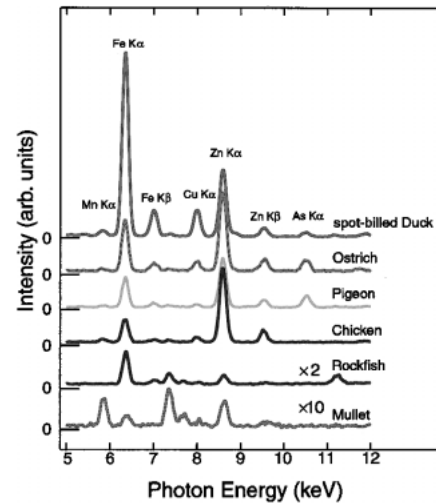
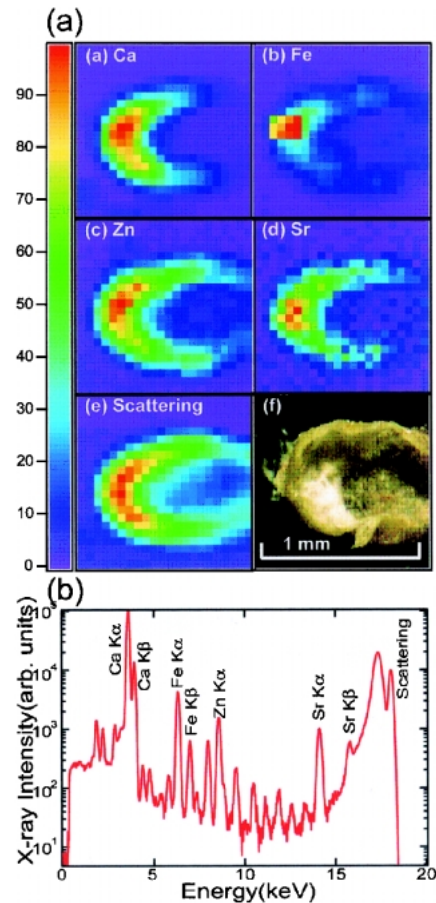


Figure 10. Fluorescence spectra of the lagenal otolith of several birds and fish.



**Figure 11.** (a) X-ray fluorescence mapping of the lagena of the spot-billed duck. Parts a-e show the mapping of the Ca, Fe, Zn and Sr fluorescences. The color indicates the intensity of the X-ray normalized with respect to the maximum intensity. Part f is a photograph of the sample, the white part being the powdery otolith. The scale bar denotes 1 mm. (b) X-ray fluorescence spectrum of the lagena of the spot-billed duck.



Table 1. Concentrations (%) of magnetic elements (Fe, Mn, Zn) in the lagenal otoliths of birds and fish determined using synchrotron X-ray fluorescence analysis

	球形囊	卵形囊	壺囊
鳥類	%	%	%
ダチョウ			1.2
カルガモ			4.3
ハト			0.7
ニワトリ			0.5
魚類			
ハヤ		0.03	0.07
アユ		0.04	0.16
メバル	0.02	0.08	0.4
マアジ	0.03	0.03	0.03
マサバ	0.05	0.05	0.05
タチウオ	0.05	0.05	0.05
ヒラメ	0.05	0.05	0.05
ボラ	0.05	0.05	0.05

合4.3%でカモの壺囊には非常に多くの Fe が含まれていることを示している (Table 1)。

鳥の場合、ニワトリ、ハト、カモの順に Fe のピーク強度が高くなっている。また、鳥では Zn のピークも魚類に比べ高い値を示していた。

#### iv) マイクロ硬 X 線による耳石の蛍光 X 線分析

SPring-8 では、高輝度放射光源の特徴を活かし、マイクロ X 線ビームを励起光源とした微小領域の蛍光 X 線分析が可能となっている。このマイクロ X 線ビームで一個の耳石の磁性元素の分布を測定することにした。

SPring-8 蛍光 X 線ビームライン BL39XU の蛍光 X 線分析装置を使用して X 線ビームの径  $3\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$  にビームラインからの X 線をスリットで微小な形に切り出し、数ミクロン×ミクロンのマイクロビームを試料に照射した。微小な X 線ビームは試料の一点に当たり、その部分から蛍光 X 線が放射されることとなる。X 線ビームは固定されているため、試料の位置をずらしながら蛍光 X 線を測定した。壺囊の任意の一個の耳石からのスペクトルを励起 X 線エネルギー 10 KeV で測定した、カルガモの壺囊から Ca や Fe の高いピークがみられ、図のように Ca や Fe の他に Mn, Se などでも僅かではあるが存在することがわかった (Fig. 12, Fig. 13)。

### 3. ハトの帰巢実験

#### A) 実験方法

実験用22羽とコントロール30羽のレーシングハトを使用した。同じ鳩舎で生れ飼われて、訓練を受けたハトを用いた。ハトは広島平和とレーシングハト協会会長より提供を受け、鳩舎より20 K 以内の半径の地より放鳥し、帰巢の訓練を20回以上受けたハトを用いた。ハトは4群にわけ

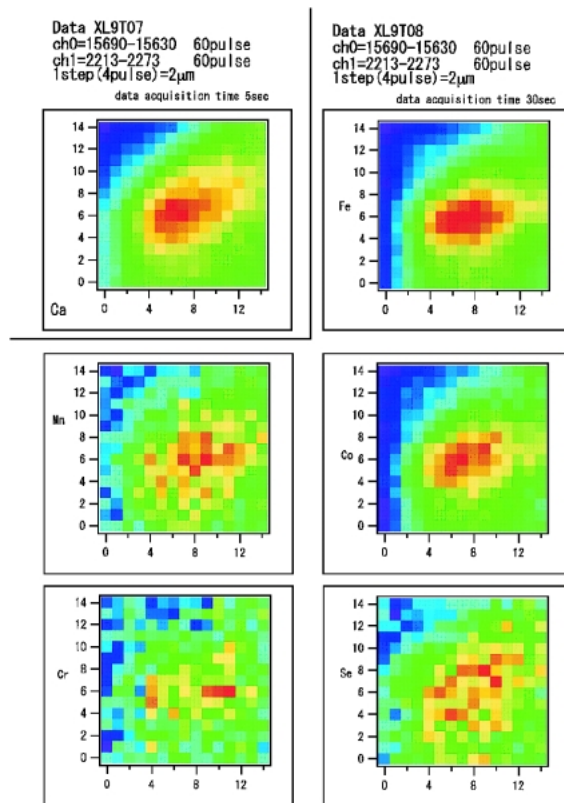


Figure 12. X-ray fluorescence spectrum of the single lagenal otolith of the spot-billed duck.

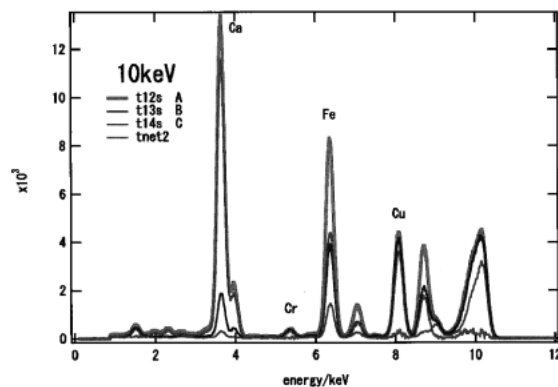


Figure 13. X-ray fluorescence analysis of the single lagenal otolith of the spot-billed duck.

て実験に供した。ハトの手術は広島大学医学部動物実験施設でケタミン麻酔下で行った。

1 群、一側の壺囊神経 (左側) を側頭骨内で切断した 8 羽。

2 群、一側側頭骨内左壺囊にネオジウム磁石を接着した 3 羽。

3 群、側頭骨外壺囊部にネオジウム磁石を接着した 7 羽。

4 群、帰巢後磁石を取り外した 5 羽。

プラセボとして非磁化ネオジウムを側頭骨外壺囊部に

接着した1羽。側頭骨手術をしたが壺囊神経を切断せずに皮膚を縫合した擬似手術の1羽。

予備実験に800ガウスの市販の磁石球を左側と両側に接着したハトをそれぞれ1羽を実験に供した。

尚、これらのハトはコントロールとして無処置のレーシングバトを30羽、処置したハトと共に飛ばした。コントロールのハト30羽になったのは神経切断バトの放鳥前5分前と5分後に8羽ずつコントロールとして飛ばしたので、コントロールが30羽となった。

#### B) 手術方法

壺囊は側頭骨内、鼓膜の下前方に位置し、ハトの聴器 basilar papilla 先端より1 mm 迷路側に超極細ダイヤモンドバーで孔をあけ、この部より、電気焼灼の針を挿入し通電して壺囊神経を切断した。

側頭骨手術に際しては8羽のハトを用いた。左側外耳道後方に7 mm の切開を加え (Fig. 14), 側頭骨を露出させ、時計用ピンセットで側頭骨を開放し、含気化した骨を除去すると上半規管があらわれ、これを傷つけることなく鼓膜輪前方に削開すると前庭部が出て来る。前庭部の前方に basilar papilla が白くすいてみえ、その先端に壺囊が位置する、壺囊の直径は約1 mm である (Fig. 15)。

マグネットを直接に側頭骨内に挿入した3羽と、マグネットを左外耳道前下方に接着した群は7羽である。

またマグネットを接着して帰巢したハト5羽は、マグネットを除去して再び放鳥し帰巢の時間を測定した。

#### C) マグネット作製

Neodymium-iron-boron 磁石は広島大学医学部保健学科、弓削類講師の研究室で電磁コイル1.5 T を通電することにより、定量的に Neodymium 磁石を作製してもらった。Tesla meter (Tokyo Jiki Ind., Tokyo) で0.05 mT, 0.1 mT, 0.2 mT, 0.25 mT, 0.5 mT の磁石を作製し、これをハトの側頭骨内3羽、側頭骨外外耳道前下方にオブラードで包み、アロンアルファで接着した。磁石の重さは1 G (ガウス) は0.025 g, 5 G は0.125 g でハトの頭に接着しても行動に影響を与えるほどの重さではない。

#### D) 実験成績

##### a) 一側壺囊神経切断と帰巢実験

8羽のハトの左の壺囊神経を切断し、1ヶ月間休養させた後、Table 2 のように2001年4月7日に広島大学キャンパス、体育グラウンドから放した (Fig. 16)。

この時、偽手術を受けた (同様に側頭骨の手術を行なったが壺囊神経切断を行っていない) 1羽と、神経切断の8羽と、同数の無処置 (コントロール) のハトが実験バトの放鳥前5分、あと5分に8羽ずつに放たれた。

鳩舎は15 km 離れた安芸中野の広島平和レーシングバト協会会長宅にあり、実験日の4月7日は、太陽が出ており春の日差しの暖かい日が選ばれた。

コントロールのハト16羽と側頭骨内の偽手術を受けた1羽は、いずれも30分以内に帰巢したが、壺囊神経の



Figure 14. Magnetic interference of the treated pigeons: (a) an incision was made 0.7 cm posterior and inferior to the left outer ear; (b) magnetic particles were glued to the anterior and inferior parts of the ear canal.

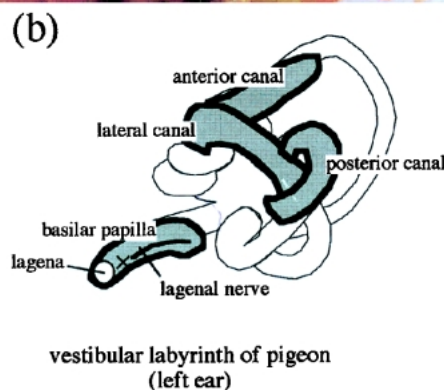


Figure 15. Temporal bone of pigeon: (a) microscopic view of pigeon labyrinth; (b) sketch of the parts of the left inner ear visible in (a).

切断手術を受けたハトの8羽のうち6羽は帰巢せず、1羽は10日後、もう1羽は3日後に帰巢した (Fig. 17, 18, Table 2)。

##### b) 壺囊に磁石をつけての帰巢実験

ハト番号10番から12番の3羽は、側頭骨手術を行ない、壺囊神経は切断することなく、側頭骨内で壺囊にネオジミウム磁石を貼りつけた。

Table 2. Results of homing tests using treated and control pigeons

No	費消式番号	神経切断, 磁石	処置側	帰巢実験日	帰巢	日数	時間
a	3867	側頭骨外磁石貼付	左 800 G		×		
b	3849		左右 800 G		×		
1	7963	神経切断	左	4月7日	×		
2	3974	"	"	"	×		
3	3952	"	"	"	×		
4	3968	"	"	"	○	10日	
5	3804	"	"	"	×		
6	3764	"	"	"	×		
7	6580	"	"	"	○	3日	
8	3975	"	"	4月7日	×		
9	3897	擬似手術	"	"	○		30分
10	3952	側頭骨内磁石留置	左 1 G	4月7日	○	4日	
11	3935	"	" 5 G	5月10日	○	1.5日	
12	3925	"	" 1 G	"	○	1日	
13	3964	"	左 5 G	5月10日	×		
14	3889	"	" 2.5 G	"	×		
15	3959	"	" 2 G	"	×		
16	7391	"	" 2.5 G	5月20日	○	1日	
17	3897	"	" 0.5 G	"	○	1.4日	
18	3989	"	" 1 G	"	○	1日	
19	4515	"	" 0.5 G	"	○	1.3日	
10	3952	磁石除去	" 1 G	5月10日	○	2.4日	
16	7391	"	" 2.5 G	6月1日	○		30分
17	3897	"	" 0.5 G	"	○		7.5時間
18	3989	"	" 1 G	"	○		7.5時間
19	4515	"	" 0.5 G	"	○		7.5時間
20	3878	placebo	" 0 G	"	○		30分

G : ガウス × : 帰巢せず

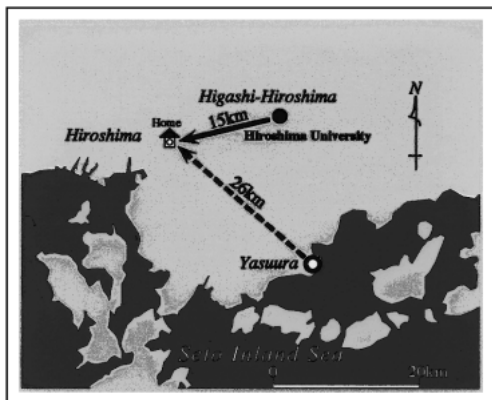


Figure 16. Map of the area in which the experiments were made. The preliminary release test was done from Yasuura.

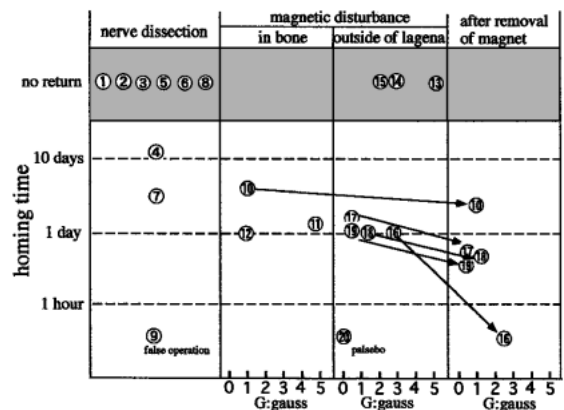


Figure 17. Results of homing tests using the control and treated pigeons.

これらのハトは、5月10日に側頭骨外に磁石を取り付けた番号13番から15番までの3羽と、コントロール6羽と共に放った。また5月20日には、側頭骨外で壺囊部に磁石を貼り付けた16番から19番の4羽とコントロール4羽が、広島大キャンパスグラウンドから放たれた。

側頭骨内に磁石を留置した3羽のハト番号10番と12番の1Gと11番の5Gは、1日以上たって帰巢した。側頭骨外壺囊部に磁石を貼り付けた番号13番(5G)、14番(2.5G)、15番(2G)の3羽は帰巢せず、16番から19番までの弱い磁石を付けた4羽は1日して帰巢した。



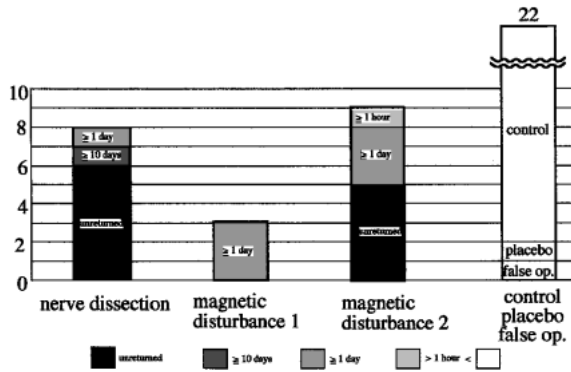


Figure 18. Homing times of the pigeons in each group.

これらのハトと磁石の強さとの関係を見ると、いずれも地磁気の強さ0.5 G以上の磁石によって強い影響をうけ、ハト番号13, 14, 15番の2 G以上では帰巢していない3羽があり、2 G以上ではかなり壺囊機能を乱すものと思われた。

側頭骨内に磁石を留置しても、側頭骨外に磁石を貼り付けても、壺囊に近いので同じ結果が保たれ、手術をして側頭骨内に磁石を入れる必要はないと考えられた。

とくに番号13, 14, 15の2 G以上の群は3羽とも帰らず、地磁気に近い0.5 Gと1 Gの磁石をつけたハトはいずれも24時間以上経って帰巢している。

帰巢したハト番号16番から19番の4羽から磁石を取り除き、ハト番号10は側頭骨を再手術して磁石を取り除き、これらを同じく広島大キャンパスから放した。外耳道の前下外側に磁石をつけ、これを取り除いたものは7時間半以内に帰った。

前回4日かかって帰ったハトで側頭骨内から磁石を取り除いたものは、2日で帰巢した。

磁石を取り除くといずれも早く帰って来るが、この時放った4羽の正常コントロールやプラセボ磁石のゼロ Gをつけたハトの帰巢時間30分には及ばず、前回つけた磁石の影響が残るのか帰巢は遅れるが、1日以内に帰ることが出来た (Fig. 17, 18, Table 2)。

#### 4. 考察

##### (1) 耳石器の構造

内耳は聴器と平衡器より構成され、平衡器の方が系統発生的には古い。聴器は蝸牛又は basilar papilla (基底乳頭; 両生類, 鳥類) であり聴覚を司る。一方平衡器は、耳石器と三半規管よりなり、耳石器は卵形囊, 球形囊, 壺囊よりなるが、哺乳類は地球上で生活するようになり壺囊を失っている。卵形囊は水平, 球形囊は垂直の直線加速, 遠心力, 重力の感覚器である。壺囊は鳥類, 魚類, 両生類などに存在し、三次元の感覚器といわれ、鳥では高度, 魚では水深などの感覚器であろうと云われているが、哺乳類には存在しないため研究論文は少ない<sup>9,13)</sup>。

鳥類には basilar papilla の先端に壺囊が存在し、平衡器とは離れている。魚類では球形囊に隣接して存在する<sup>9)</sup>。

耳石器である球形囊, 卵形囊, 壺囊共に耳石, 耳石膜, 感覚毛と感覚細胞, 支持細胞, 神経などで構成され、身体の移動に際し、耳石にかかる慣性が感覚毛の傾きを起させ、これが神経電位を誘発し、脳で前後, 左右, 上下などの垂直の直線加速度を感知するための受容器となっている。

壺囊は魚類, 両生類, 鳥類に存在するが、哺乳類には存在せず、地球上での二次元生活で退化したものと考えられている。ただこれの遺残と考えられる macula neglecta は、ヒトでは500の側頭骨の検索で一例あったと報告されており<sup>10)</sup>、モルモット, マウスではその遺残がより多く存在するものと思われる<sup>11,12)</sup>。

耳石は炭酸カルシウムの結晶で Carlström Engström によれば哺乳類や温血動物は方解石 Calcite であり、冷血動物では霜石 Angonite であると報告されている<sup>1)</sup>。

##### (2) 鳥類壺囊の形態

鳥類の壺囊は聴器の basilar papilla の先端に存在し、その直径は1 mm程度で球形囊, 卵形囊に比べて小さい。しかし球形囊, 卵形囊と同様に耳石膜, 感覚上皮, 神経という構造をしており、ハトもカルガモもほぼ同様の形態を示している。

壺囊の感覚上皮は半規管の crista のような形をしており、囊の底部に感覚上皮が Fig. 4b) のように広がっており、その感覚細胞は Fig. 4c) の如くで、1本の Kinocilium と多くの stereocilia を有している。尚、Kinocilium の位置から細胞感覚上皮の極性は球形囊斑と同様に Kinocilium が striola より外方に位置していた。

感覚上皮上の感覚細胞の数はハトで計測した Ishiyama<sup>13)</sup> によると約12,000個である。

この12,000個の感覚細胞の上に耳石がのっており、壺囊の直径が小さいだけにこれらの耳石はちょうど感覚細胞の上に浮いたように位置し、慣性を受けるより、むしろ地磁気, 重力などを感ずるのに都合がよい。

##### (3) 耳石の X 線分析

放射光 X 線を用いて魚類, 鳥類の耳石の分析を行った。Ca 以外に微量ではあるが Sr, Fe, Se, Mn などが測定され、特に壺囊内に Fe, Mn, Zn などが多く含まれ、Fe の量が特に多く検出された。

壺囊は極めて小さく、水平, 垂直の直線加速に比することよりも、地磁気に反応する磁石の様に耳石内の Fe を含む磁性体が地磁気に反応し、感覚上皮上の感覚毛に巢の方向を知らしめるナビゲーターの役目をするのではないかと推測した。

魚類の Fe 含有% (FeK $\alpha$ , intensity%) が0.05で、ハトがその10倍の0.7%, カルガモの壺囊耳石には100倍近くの4.3%も含まれていた (Fig. 10, Table 1)<sup>6)</sup>。

これまでこの小さな壺囊の役目は空間における三次元、更には空中における高度, 水中における深度の感覚器では

ないかというくらいに考えられていたが、哺乳類にはない器官であるだけにめまいに関係がなく耳鼻咽喉科の研究者、解剖学者にもあまり注意をひかず、研究報告も日本では私の壺囊の進化に関する研究を含めても4編のみである<sup>9,13)</sup>。

#### (4) ハトの帰巢に関して

サケが生れた川に帰る、魚が回遊する、渡鳥が巣に帰るなど、彼等の特殊な能力や「本能」は今も謎に包まれている。また地震の前にナマズやボラが騒ぐ、海鳥が一気に飛び立つなど、動物の行動には不思議なことが多い<sup>14)</sup>。特に伝書バトが何百キロも離れた所からなぜ帰ることが出来るのかは、今までミステリーであった。ハトが自分の位置を定めるのに、太陽をコンパスとして利用すると考えられて来た。しかしこれまで地磁気<sup>15-17)</sup>や気圧の微妙な差、太陽の偏光、匂い、視覚、網膜内のマグネタイトなど帰巢のメカニズムについて多くの説が出されている<sup>18-21)</sup>。

地磁気説に対しては、棒状の磁石を背中につけたり、頭の上に帽子のようにコイルをのせ、磁場をつくってハトの定位について調べたり、ハトの眼に不透明のコンタクトをつけて飛ばしても鳩舎近くまで帰って来るという実験などから<sup>2)</sup>、磁気的情報が航路決定に役立っており、ハトは地磁気を感じて飛んでいるということには多くの研究者が一致している。しかし Keeton は、地磁気を感じる感覚器がどこにもみつけられていないと報告している<sup>23)</sup>。そのほか1編だけ内耳摘出とハトの帰巢の報告がある。これでは内耳摘出しても帰巢するという報告で<sup>24)</sup>、内耳の研究者の実験でなく実験方法が正しいかどうかは不明である。

#### (5) 壺囊こそ地磁気のセンサー

ハトが地磁気を感じて帰巢するという多くの報告や不透明なコンタクトを装置して視覚を遮断しての帰巢実験をしても巣の近くまで帰って来るハトがあるなどのこれまでの多くの実験がある。そこで私は壺囊が地磁気を感じるセンサーだという仮説を立てて、ハトの行動実験を壺囊神経切断と壺囊の地磁気感受能を阻害する為に磁石を壺囊部に付ける実験をした。

壺囊の耳石内 Fe が地磁気により微小な動きをし、これを壺囊感覚上皮の12,000個の感覚細胞<sup>13)</sup>がキャッチして興奮を脳に伝える。脳は鳩舎の方向を計算し、帰る方向を指令して、ハトは帰巢することが出来るものと推測したのである。

今回の実験で、一側の壺囊神経を切断したものは、8羽のうち6羽は帰巢せず、2羽が10日後、3日後に帰巢した。

一方、ハトの側頭骨内に磁石をつけたもの、側頭骨外から磁石をつけたものでは、共に0.5 G 以上で影響がみられ、いずれも1日以上帰れなくなったが、これを取り除くと7時間半以内に帰って来た。また1 G の磁石を側頭骨内壺囊に接着して放鳥し4日後に帰ったハトから手術して磁石を取り除いても2日後に帰って来たハトがおり、磁石をつけることにより、耳石内の Fe の配列に影響

があって、帰巢するがコントロールの30分以内よりは遅く帰巢したものと考えられた。

帰巢したハトは何度もこのルートで帰巢の訓練をうけており、一側の壺囊のナビゲーター機能が落ちてても、眼による地形の判断が可能のため、迷い迷い15 km の鳩舎に帰るのに10日、4日、3日という長い日時をかけて帰って来たものもあった。

尚、5 G を側頭骨内につけたハト11番は帰っているが、側頭骨外壺囊部に2 G 以上の磁石をつけた13番(5 G) 14番(2.5 G) 15番(2 G) のハトはいずれも帰巢せず、2 G 以上の磁石をつけたハトは帰巢に大きい影響があるようであった。

地磁気は約0.5 G であり、1 G 以上の磁石を取り付けるとかなり強い影響があり帰らなくなり、かえっても1日以上かかるようである。磁石を取り外すと早く帰れることから、壺囊がやはり地磁気のセンサーであるということは、ほぼ間違いないと思われた

さて地震の時の動物の異常行動については多くの言い伝えや多くの著書などもある。これは地震の前兆には電磁気現象が関連しているのは周知の事実であり、地磁気の変動が動物に感知されて異常行動をすると考えられている。しかし、どこでそれを感知するかに関しては未だにその場所が不明であった。昨年芸予地震の際にハト小屋を掃除していた広島レーシングハト協会の一人は、突然のハトのパニック状態で何が起こったのだろうかと思ってぼう然とハトの状態を見ていた所、地震が来たと私に話してくれた。このことも地磁気の変動が壺囊に感知され、あたかも人間のめまいの様にハトの内耳内での異常電位が脳に伝えられ、ハトはパニックになったものと思われる。

魚が驚く、跳ねるとい地震の前兆も同じように、いつも慣れた磁場での生活に突然の地磁気変動は動物の壺囊に異常電位が発生して魚や鳥が驚くこととなり、それが異常行動としてとらえられるものと考えれば理屈があうように思われる。

哺乳類は進化して壺囊がなくなったのも、地上での二次元の生活に慣れて数万年又はこれ以上の進化の過程で壺囊を失ってしまったが、macula neglecta として遺残している。macula neglecta はヒトでは極めて珍しいが、モルモット、マウスではより多く遺残しており、卵形囊の近くに同じく耳石を持って感覚毛も存在する<sup>26)</sup>。

哺乳類の中で空飛ぶコウモリ、海の中のイルカ、クジラなどは壺囊を失ったために海水中の三次元の感覚は超音波を自らが出して前方の障害物などを感知しており、エサの位置を知ったりするとされている。超音波を感知するのは内耳の蝸牛の感覚細胞であるわけであるが、壺囊は鳥類では basilar papilla (蝸牛の前身) の先端に存在し、魚類では球形囊の近くで、カメでは球形囊と未発達の前 basilar papilla の近くに存在し、いずれも内耳の一部として壺囊は機能している。

これまで壺囊が内耳の研究家を多く持つ耳鼻咽喉科医や感覚器を研究する解剖学者にあまり興味を持たれなかったのは、あまりにも小さく且つ機能が不明で、めまいと関係ない耳石器として聴覚器の近くに存在したことなどが原因したものと思われる。

近年大きな日米間の国際問題となった、「えひめ丸事件」も米潜水艦が超音波を出しておれば回避出来た事であり、哺乳類が失った壺囊の代替にコウモリ、クジラ、イルカなどは超音波を用いていて、これを聴覚器で感受し、身体の制御に使っている点と、聴覚器と隣接して壺囊が存在し、これが地磁気を感じて魚は回遊、鳥は渡り、帰巣に使っておると思えば、動物の本能として扱われていた、これまでのミステリーも感覚器の存在のもとにこの行動が制御されていると考えれば極めて合理的であると思うのである。

今後は強磁場内に入れたあとのハトの行動についての実験や、更に多くの動物の壺囊内の磁性体の分析なども行いたく、多くの追試者との共同研究が行えればと思っている。

#### 謝詞

広島レーシングバト協会会長 三戸鷹則氏の無償の協力に心から感謝いたします。Neodymium 磁石を作っていたいただいた広島大学医学部保健学科 弓削類講師、広島大学医学部動物実験施設の皆様、広島大学放射光研究施設 谷口雅樹教授、生天目博文教授に感謝いたします。

尚、この論文のもととなったものは廣大放射光施設センター長と共同発表した論文番号6と25、ミクروسコピア vol. 18 No. 4 である。

#### 参考文献

- 1) D. Carlström and H. Engström: The ultrastructure of statoconia. *Acta Otolaryngol* **45**, 14 (1955).
- 2) G. Pannella: Fish otoliths: daily growth patterns and periodical patterns. *Science* (Washington, DC) **173**, 1124 (1971).
- 3) K. Tsukamoto and T. Kajihara: Age determination of ayu with otolith. *Nippon Suisan Gakkaishi* **53**(11), 1935 (1987).
- 4) Y. Harada, et al.: Morphological changes of totoconia after streptomycin intoxication. *Pract. Otol. Kyoto* **70**, 1943 (1977).
- 5) Y. Harada and Y. Sugimoto: Metabolic disorder of otoconia after streptomycin intoxication. *Acta Otolaryngol.* **84**, 65 (1977).
- 6) Y. Harada, M. Taniguchi, H. Namatame and A. Iida:

- Magnetic materials in otoliths of bird and fish lagena and their function. *Acta Otolaryngol* **121**, 590 (2001).
- 7) 北野康, 金森暢子, 大森保, 吉岡小夜子, 渡久山章: 海の生物の石灰質殻中の微量元素含有量を規定する因子について. *地質学雑誌* **77**, 535 (1971).
  - 8) Y. Harada: Atlas of the ear. Lancaster, UK: MTP Press (1983).
  - 9) Y. Harada, S. Kasuga and S. Tamura: The comparison and evolution of the lagena in the various animals species. *Acta Otolaryngol.* **121**, 355 (2001).
  - 10) H. F. Schucknecht: Pathology of the ear. 56. Harvard University Press (1974).
  - 11) R. Gacek: The macula neglecta in the feline species. *J. Comp. Neurol.* **116**, 317 (1961).
  - 12) P. Montandon, R. Gacek and R. Kimura: Crista neglecta in the cat and human. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* **79**, 105 (1970).
  - 13) K. Ishiyama: Ultrastructure and peculiarities of the otolith lagena in pigeons. *J. Otolaryngol. Jpn.* **98**, 781 (1995).
  - 14) 池谷元伺: 地震の前, なぜ動物は騒ぐのか NHK Books (1998) 822.
  - 15) W. T. Keeton: Orientation by pigeons: Is the sun necessary? *Science* **165**, 922 (1969).
  - 16) W. T. Keeton: The orientational and navigational basis of homing in birds. *Adv Study Behav* **5**, 47 (1974).
  - 17) W. T. Keeton: Normal fluctuations in the earth's magnetic field influence pigeon orientation. *J Comp Physiol* **95**, 95 (1974).
  - 18) R. Wiltschko: Magnetic orientation in birds. In Johnson RF, ed. *Current Ornithology*, Vol. 5, New York: Plenum Press, 67 (1988).
  - 19) C. Walcott and R. P. Green: Orientation of homing pigeons altered by a change in the direction applied magnetic field. *Science, N.Y.* **184**, 180 (1974).
  - 20) J. E. Gould: The map sense of pigeons. *Nature* **296**, 205 (1982).
  - 21) W. Wiltschko: Compasses used by birds. *Comp Biochem Physiol.* **176A**, 709 (1983).
  - 22) K. Schmidt-Koenig and H. J. Schlichte: Homing in pigeons with reduced vision, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.* **69**, 2446 (1972).
  - 23) W. Keeton: The mystery of pigeon homing, *Scientific American* **231**, 96 (1974).
  - 24) H. G. Wallraff: Homing of pigeons after extirpation of their cochleae and lagena. *Nature New Biology* **236**, 224 (1972).
  - 25) Y. Harada: Experimental analysis of behavior of homing pigeons as a result of functional disorder of their lagena. *Acta Otolaryngol*, 122: 132 (2002).
  - 26) Y. Harada: The vestibular organs. —S.E.M. atlas of the inner ear— Nishimura Kugler & Chedini Publications (1988).