紅鮭頭部における磁性微粒子の分布について

Distribution of Magnetic Particles in the Head of Sockeye Salmon

青山亮一・榊 陽・小倉末基*・加藤 守*

千葉大学工学部, 千葉市稲毛区弥生町 1-33 (〒263)

*水産庁遠洋水産研究所, 清水市折戸 5-7-1 (〒424)

R. Aoyama, Y. Sakaki, M. Ogura* and M. Kato*

Faculty of Engineering, Chiba Univ., 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263

*Far Seas Fisheries Res. Lab., Japan Fishery Agency, 5-7-1 Orido, Shimizu, Shizuoka 424

This paper describes a study on the distribution of magnetite particles in the head of sockeye salmon. The magnetite particles are found not only in ethmoid tissues but in whole tissues in the head. Further, the magnetite particles are highly distributed near the brain. This suggests that a new magnetic sense organ may exist near the brain.

Key words: sockeye salmon, biomagnetic substance, biogenic magnetite, magnetoreceptor

1. ま え が き

鮭の母川回帰に際して、沿海部では、嗅覚によるという説が決定的である¹⁾が、広大な海中の回遊では、太陽コンパスまたは磁気コンパスが用いられているのではないかと仮説が古くから唱えられている。最近、数種の鮭の体内からマグネタイト微粒子の鎖や、マグネタイト微粒子を含んだ器官が見いだされ、磁気コンパス仮説に有力な根拠を与えるものではないかと注目されている^{2)~5)}。しかし、その磁性物質がどこに存在しているのか、また、それが磁気感知器としてどのような形状で存在しているのか特定するには至っていない。今回筆者らは、磁性物質が従来から言われていた組織とは異なり、頭部の各組織に広く存在しており、中でも脳付近の組織に多く存在していることを確認した。また、磁気感知器と思われる幾つかの新たな形状の器官を見いだした。本論文ではベニザケの頭部における磁性物質の存在およびその分布、さらに磁気感知器と思われる器官の観察結果およびその考察について述べる。

2. 磁性物質の抽出方法および電子顕微鏡試料の作成⁴⁾

セラミックナイフを用い、紅鮭成魚の頭部の表皮を取り去り、後述する分割方法に従い切断する。分割した

各々の部位を蒸留水でよく洗浄した後、市販のカビキラー（次亜塩素酸ナトリウム、水酸化ナトリウムおよび界面活性剤の混合液）を加え溶解する。さらに、ジェチルエーテルを加えることにより、脂肪分を取り込む。この溶液を遠沈管に移し遠心分離器にかけた後、上澄みを取り除き新しいカビキラーと置換する。溶けるべきものが完全に無くなるまでこの作業を繰り返す。十分溶解した後、カビキラーを蒸留水に置換する。次に、磁性物質を含む組織を、SmCo 磁石で遠沈管の壁面に集め、その量を目視により判定する。

透過形電子顕微鏡 (TEM) 用試料の作製では、遠沈管壁面の磁性物質をピペットで吸い取り別の試験管に移す。これに少量の界面活性剤を加え、超音波で懸濁する。懸濁液を、白金ループにより TEM 用試料台に移し、自然乾燥させる。

磁性物質の成分分析を行うには多量の試料が必要のため、上述の試料とは別に 5 匹の頭部全体を溶かして同様の方法で磁性物質を抽出した。抽出された磁性物質を走査形電子顕微鏡 (SEM) 用の試料台に移して自然乾燥した。この試料では集められた磁性物質が薄茶色をしているのを肉眼で認めることができる。しかし、これでも X 線回折分析における実験には、量が不足であった。

3. 結果および考察

3.1 磁性物質の分布

磁性物質の含まれている組織を特定するために、予備実験として初め頭部を大まかに前後左右 4 分割し、磁性物質が多く含まれている部分を見定め、次に別の試料を 8 分割して大よそどの組織に多いかを確認した。最終的に Fig. 1 に示す 21 個の組織に分けそれぞれについて前章の方法で抽出を行った。最後の試料として成魚 3 匹分の頭部を用いている。

図中の番号は以下の組織に対応している。

Fig. 1 Illustration of tissues in the head of sockeye salmon.

Table 1 Distribution of magnetic substance in the head of sockeye salmon

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
●	●	●	○	○	△	●	○	△	●	●	△	△	○	△	×	×	×	△	○	×

Where the marks in the Table 1 have meaning as follows,

● . . . A good many ○ . . . Many △ . . . A few × . . . Nothing

1. 中篩骨	2. 前頭骨	3. 蝶耳骨
4. 上前頭骨	5. 前頂骨	6. 翼耳骨
7. 上耳骨	8. 上後頭骨	9. 外後頭骨
10. 基後頭骨	11. 前耳骨	12. alisphenoid
13. 眼窩蝶形骨	14. 副蝶形骨及び鋤骨	
15. 主上顎骨	16. 表皮	17. 鼻孔
18. 眼球	19. 頬脂肉	20. 脳室内
21. 脳後脂肉		

以上の分割方法に基づく抽出結果を Table 1 に示す。この結果から、磁性物質はベニザケの頭部の骨部全体に亘り広く存在していると考えられる。その中でも、従来報告されていた²⁾篩骨以外に、前頭骨と脳付近の領域に顕著に磁性物質が確認された。また、骨部以外の表皮、眼球、脂肉、鼻孔には磁性物質は存在していないと推定されるが、唯一脳室内からのみ磁性物質が確認されている。ここで、脳室内の溶解について詳述すると、脳組織そのものだけに限らず、脳室内の薄い膜やその付近の細胞組織も含め溶解している。これまでの報告²⁾では脳組織自体からの磁性物質の抽出もなく、その磁化測定の結果においても残留磁化がほとんど認められない。これらを考慮すると、脳自体よりもその周囲の組織に磁性物質が存在している可能性が強いと考えられる。

3.2 TEM による観察結果

Fig. 2～Fig. 5 に TEM を用いて観察した結果を示す。Fig. 2 は、上耳骨より抽出したもので、楕円状の組織を

数個ずつ固まった黒い粒子がほぼ等間隔に周囲を囲んでいる器官である。さらにその中心には白く丸い部分が見られる。この楕円状の組織の長径、短径は、それぞれ 970 nm, 850 nm である。

これまでに筆者らは、磁性微粒子が楕円状の組織を取り囲んだほぼ同じ大きさの器官を報告している^{3), 4)}。Fig. 2 の器官は、これまでのものに比べ、黒い粒子がかなり離れた位置で組織を取り囲んだものであり、従来のものと同様のものと断定はできないが、磁気感覚器官の一部ではないかと考えられる。

Fig. 3 は、Fig. 2 と同じ上耳骨より抽出されたもので、大小 2 系統の大きさの黒い粒子が楕円状の組織の周辺を取り囲んでいる器官である。また、中心には大きく黒い核のようなものが見られる。この組織の大きさは長径短径がそれぞれ 6 μ m, 5 μ m であり、その周囲の黒い粒子の大きさは 100～150 nm, 400～600 nm の二つの範囲に分かれる。Fig. 3 の像は、はっきりしていないが、Fig. 2 のものと比較してみると、大きさや形状は異なるにもかかわらず、1) 微粒子が楕円状の組織を取り囲んでいること、2) 中心に（核のような）丸い部分があること、3) どちらも同じ組織（上耳骨）から抽出された器官であることから同じような動作機構を持つものではないかと推定される。

Fig. 2 および Fig. 3 の組織を囲む黒い粒子詳（Fig. 3 は小さい方の黒い粒子）は、ほぼ 2 個対になっているこ

Fig. 2 A candidate for biomagnetic sense organ extracted from occiput-1.

Fig. 4 Twin magnetic particles.

Fig. 3 A candidate for biomagnetic sense organ extracted from occiput-2.

Fig. 5 A magnetic chain of magnetite.

とが分かる。これと同じ形状をした物質を Fig. 4 に示す。これは、主上顎骨から抽出したもので、Fig. 2, Fig. 3 の抽出場所とは異なる。その大きさは 160 nm で、Fig. 2, Fig. 3 の対粒子の大きさと比べるとやや大きめである。しかし、その似たような形状から、この粒子対が

磁気感知器の一部として何らかの働きを持つものと考えられる。

Fig. 5 は磁性粒子が鎖状に連なったもので、alisphe-noid より抽出された。それぞれの粒子の大きさは 10～50 nm の範囲にあり単磁区として存在できる適当な大きさである。これまで鎖状に連なった粒子は、篩骨組織より抽出されてきたが²⁾、他の組織にも存在することが

Fig. 6 SEM image of magnetic sphere extracted from sockeye salmon.

Fig. 7 EDX spectrum for the magnetic sphere.

確認された。

3.3 SEMによる観察結果

Fig. 6 に SEM を用いて観察した結果の一例を示す。図は、球状物質を示しており、その直径は、ほぼ $6.6\ \mu\text{m}$ である。その周囲には幾つかの微粒子が付着しており、その大きさは $150\sim 300\ \text{nm}$ の範囲にある。この球状物質を EDX により元素分析した結果を Fig. 7 に示す。その結果、球状物質の主成分は Fe であった。

このような球状磁性物質は、カメの脳硬膜から抽出されているが⁶⁾、ベニザケでは初めて見いだされた。どちらも同じように磁気を感じるのでないかと言われる生

物なので、同じような球状物質が確認されたことは興味深い。他の $100\ \text{nm}$ 前後の微粒子に比べ極めて大きい粒子なので、磁気感覚器官候補としてこれまで報告したものとは別の器官があるのではないかと考えられる。

さらに、他の部分の微粒子集合体について EDX 分析をしたところ、その主成分も Fe を示し、その他、わずかながら Ti, Mn, Cr などの金属イオン元素も確認された。マグネタイトは、 $(\text{Fe}^{3+}(\text{Fe}^{2+})\text{O}_4)$ の化学式で示されるように Fe^{3+} と Fe^{2+} を含んでおり、そのうち、三価鉄 (Fe^{3+}) が Ti, Mn, あるいは Cr と置換されることがある。このことから、ベニザケから抽出された磁性物質はマグネタイト、あるいは、一部の Fe が Ti, Mn, または Cr で置換されたものではないかと推定される。

4. ま と め

紅鮭の体内磁性物質は、従来報告されていた篩骨以外に前頭骨や脳付近の組織など頭部全体に広く存在していることを確認した。また、脳付近の上耳骨より抽出された器官および SEM 観察で見いだした球状磁性物質は、磁気感知機能に何らかの関係があるのではないかと推定される。今後これらと神経系との結びつきを解明する必要性があろう。さらに、得られた磁性物質の分布結果を踏まえて、組織別に組織固定して鉄染色を行い、それを TEM によって観察することにより、その存在位置および組織形状を特定することも検討している。

謝 辞 本研究の遂行に当たり文部省科学研究費（一般研究 C: 萌芽的研究）および農林水産省の Biocosmos Program からの補助を受けたことを記し謝意を表する。また、SEM 試料および TEM 試料の撮影に御協力戴いた三井石油化学工業(株)の弘中文明氏、松岡 孝氏、本学画像工学科阪口富彌教授（現名誉教授）、大学院生古沢孝樹氏（現朝日新聞社勤務）に感謝致します。

文 献

- 1) 川本信之編:「魚類生理」, 恒星社厚生閣, 東京 (1970), pp. 415~419.
- 2) S. Mann *et al.*: *J. Exp. Biol.*, **140**, 35 (1988).
- 3) A. Moore *et al.*: *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.*, **329**, 11 (1990).
- 4) 榑, 他: 第 13 回日本応用磁気学会学術講演会, 25aC-9 (1989).
- 5) Y. Sakaki *et al.*: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-26**, 1554 (1990).
- 6) A. Perry *et al.*: "Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms: A New Biomagnetism", ed. by J. L. Kirschvink, D.S. Jones and B.J. MacFadden, Plenum Press, New York (1985), pp. 439~453.

1992 年 2 月 18 日受理, 1992 年 3 月 23 日採録