展望

生体磁気

“ハト”と“ミツバチ”とフェライト磁石 Pigeons and Honey Bees have Oriented Ferrites Magnets

杉本光男 埼玉大学工学部
Mitsuo Sugimoto Saitama University

A review is given of the fascinating topics concerning biomagnetics which has found out recently in birds, insects and fishes. Honey bees orient to the earth's magnetic field using the magnetized magnetites in the front of their abdomen. Pigeons are likely to return to their own nest from a long distance depending on the magnetite in their brain. The single crystals of magnetite have been also found out in a kind of bacteria and shellfish.

1. ま え が き

よく知られているように鳥や魚には興味深い本能がある。たとえばハトが遠く離れた所から自分の巣へ間違えずに帰ってきたり、渡り鳥が季節ごとに一定の2つの場所を往復したり、また鮭が遠洋航海のあとに故郷の河に帰ってくる習性などである。そしてこれらの不思議な本能は科学の進歩に伴って次第にその神秘性が明らかにされつつある。

特殊な鳥カゴに入れられたヨーロッパ・コマドリは、“渡り”の季節になるとその鳥カゴが示す磁界の方向に従って自分が飛び立つ方向を決めるといわれている。つまり鳥カゴを回転すると、その中のコマドリもその向きを変える。ハトも地磁気の利用して飛ぶらしいことが数年前に確かめられている。ごく最近、ニューヨーク州立大学の生物学教室でハトの頭の中にマグネタイト(Fe_3O_4)が発見されて、これがハトの帰巣本能を解明する重要な手掛りになるものとみられている¹⁾。そして、このマグネタイトがハトの方向感知の能力とどのように関連しているのかも間もなく解明されることであろう。しかしハトの頭に小さな永久磁石を付けてはなすと、曇

の日には自分の巣に帰ることができなくなるが、晴れた日には間違いなく帰ってくるようである。このことからハトは地磁気だけを頼りにしているのではないらしい。すなわち好天の場合は太陽の位置などから方向を定めていると言われている。

一方ミツバチについても約10年ほど前から、地球の磁場を利用して飛ぶ方向を決めているらしいと言われている。

たとえば、(1)ミツバチは「太陽に対して何度の方向にエサがあるか」を巣箱の仲間に知らせる時に、独得のダンスをしてその角度を教える。しかしその角度には地磁気の向きが主な原因とみられる規則的なズレが時々認められる。(2)巣箱を横に倒すと、それまでに水平にダンスしながら飛んでいたハチは重力の手掛りを失って、その大部分がダンスを止めてしまう。そして少数のハチはいかにも方向が定まらないようにダンスを続ける。しかし数週間経つと全部のハチが東西か南北の方向に向かってダンスしながら飛び交うようになる。もし彼らを地磁気から完全に隔離すると、もはや彼らは再び定まった方向に向かってダンスすることができなくなる。(3)ハチは何時も地球の磁界を基準にして六角形の巣をつくるが、彼らの群れを円筒状のカラの巣に入れ、しかも地磁気の手掛りを奪ってしまうと、彼らは仕方なくもとの巣と同じ向きに巣を作るようになる。(4)ハチは地磁気の弱い毎日毎日の変化に従って生活のリズムを営んでいるようであり、もし異常に強い磁界の変化を与えると彼らの生活のリズムが完全に破壊されてしまう、などである。

ここではプリンストン大学生物学科のJ. L. KirschvinkとK. S. Deffeyes²⁾がハチの磁性を追求した興味深い実験などを中心にして紹介する。

2. 動物と地磁気

陸棲の動物が地球の磁界の向きを感知しているらしいことは今まで多くの研究者によって報告されている。そしてその感知の機能について従来次の3つの考えが披露されてきた。

(1) 動物の体内には電導性の良い輪のようなものがあり、動物が地球の磁界の中を急速に動くとその輪の中に誘導電流が流れ、それによって磁気を感知することができるのだという考えである。この考えはハトに磁界を印加して種々の研究を行なった研究者達に強く支持されてきた。しかし先述のようにハトの頭の中にマグネタイトが発見されたのでこれからさきはこの考えはどうなるのであろうか。またこの考え方ではハトの頭の上に小さな磁石を付けて飛ばした時のあの実験結果をうまく説明することができない。さらに非常にゆっくり動く山椒魚も地磁気を感じているらしいが³⁾、これもうまく説明することが難しい。

(2) 動物は常磁性的な物質からできている磁気検知器を持っているので、磁界内を動き廻ったとき感應する磁気の変化を神経系統を通じて知ることができるという考えもある。この考え方は蜜バチの研究者達に長い間支持されてきた。そして彼らは『何故、蜜バチは地磁気から完全に隔離されたあと約45分の間はその飛び方やダンスの様子に大きな変化を起こさないのか』その理由をこの考え方で説明しようとした。しかし一般に常磁性物質は磁気の変化に瞬間的に感應するもので、彼らは蜜バチの磁気検知器の常磁性物質を特殊のものと考えざるを得なかった。つまり特殊な形と大きさをもち、しかも磁気緩知を伴う超常磁性物質からできている或る磁気検知器を想定した。それでも蜜バチのいろいろの動作を納得ゆくように説明することができなかった。しかし多くの動物の器官は常磁性物質からできているから、この考え方を軽視することはできない。

(3) 最近になって動物は強磁性物質から成る検知器を持っているのではないかと考えるようになった。すなわ

ち、体内に整列したいくつかの永久磁石をもっていて地磁気との間に働くトルクを感知しているに違いないと云うのである。もし永久磁石が十分に強いものであれば動物が動くとき起こる誘起電流の検出から、これを実証することができる。もし永久磁石の磁性が弱い場合には液体ヘリウム温度で動作する超伝導干渉装置を用いなければならない。

3. 蜜バチの磁性

空気中で2ヶ月間乾燥した18匹の死んだ蜜バチの成虫のうち8匹について磁性を測定したところ、強い磁性を示すものが全くなかった。そこで700 Oeの磁界を印加して測定したところ、18匹中の15匹に 2.7×10^{-6} emuの磁化の強さが測定された。これは 0.1μ の大きさのマグネタイトの単磁区を1,500万倍した磁化の強さに匹敵する。磁性の源を見つけるために非磁性の道具を用いて2匹のハチを解剖したところ、磁性物質が腹の前面にだけあることが確かめられた。

12匹の生きているハチ、あるいは新しく殺した若干のハチの磁性を測定したところ、平均して 1.2×10^{-6} emuの値を示した。700 Oeの磁界で測定したところ表1に示すように平均 1.7×10^{-6} emuの磁化の強さであった。そして死んだハチと違って磁化され易い方向がはっきりとしており、また印加磁界の方向の軌跡が僅かに残った。つまりこのことは磁区が強い形状異方性かあるいは高い抗磁力を持っていることを示している。2匹の生きたハチを細分割して調べた結果、磁性物質は腹部の前面の3分の1を占めていることが明らかになった。そしてこれらの磁性物質は消化器系には全く存在しなかった。

5匹の古い蛹について試験したところ、表1に示すように横方向に 1.5×10^{-6} emuの磁性が測定された。そして成虫の時と同じように腹部の水平方向に存在する磁性物質のNとS極性は左右ばらばらであった。1匹の若い蛹と2匹の幼虫と1つの卵について試験したが、いずれも非常に弱い磁性しか示さなかった。

確証のために第2グループの生きているハチと蛹の磁

試料	外部磁界を印加しないで測定した磁化の強さ ($\times 10^{-6}$ emu)	測定回数	外部磁界 700 Oe を印加して測定した磁化の強さ ($\times 10^{-6}$ emu)	測定回数
空の試料箱	0.2 ± 0.2	2	0.3 ± 0.1	6
死んだハチ	0.2 ± 0.03	7	2.7 ± 0.2	41
生きているハチ	1.2 ± 0.2	12	1.7 ± 0.2	17
年 老 いた 蛹	1.5 ± 0.4	4	1.5 ± 0.2	11
若い蛹, 幼虫, 卵	0.4 ± 0.1	2	0.5 ± 0.1	10

表1 ハチの磁化の強さ。

ハチのからだの軸の方向とこれと垂直方向にそれぞれ700 Oeの外部磁界を印加して測定した場合の最も大きな磁化の強さは 5.1×10^{-6} emuであった。外部磁界を印加しない場合の最大値は 2.1×10^{-6} emuであった。

性を測定したところ、第1グループと同じ結果が得られた。すなわち、蛹と若いハチには磁性はなく、年老いた成虫には 0.5×10^{-6} emu 程度の弱い磁性しか認められなかった。以上の実験から、成虫の蜜パチと年老いた蛹は磁性物質をもっていることが明らかになった。それではこの磁性物質は果たして何であろうか。

100匹のハチを乾燥して頭と胸と腹とに分け、粉碎してそれぞれを磁気分離器にかけた。そして腹部からだけ磁性をもった粉末が沢山集まった。その粉末は蛋白質状のもので明るいオレンジ色を呈していた。磁気天秤を用い真空中でそのキュリー温度を測定したところ 580°C であった。またその磁化の強さは約 1.8×10^3 Oe の磁界まで直線的に増大することがわかった。さらに液体窒素を用い低温の磁性を測定したところ、 -196°C に磁気の変態点を認めた。以上の実験結果から、ハチの腹に存在する磁性物質はマグネタイトに間違いないと判定された。

4. ハチの磁性物質の生成機構

ハチの磁性物質がどのようにしてできるのか不思議である。ハチには Fe^{3+} を貯えるフェレドキシンと呼ばれる1種の蛋白質があり、これがいろいろな中間的な物質変化を経てマグネタイトの核が生成されるのであると考えられている。そして磁気を安定に保持するためにマグネタイトの核が磁区まで成長し、さらに磁区が何個か集合してマグネタイトの単結晶まで成長したと考えられている。またこのマグネタイトの磁区の大きさは0.1ミクロン程度と推定されている。

ハチの腹にあるマグネタイトは、その体の軸と直角方向、すなわち横方向に強い磁気異方性をもっている。これは蛹がじっと巣の中で静止している間にマグネタイトの結晶が成長し、また地磁気の方向にマークされるのであると考えられている。ハチは巣の中でそのからだの軸が東西方向に向くように横たわる。したがって蛹の時から成虫に生長する間に横方向に磁化され極性がマークされる。そして巣の中における向きによって、腹のマグネタイトの極性が、たとえばその左側がNであったりSであったりする。このようにして成長したハチが巣をつくる時は、また南北の方向に整列された巣をつくるようになる。

死んだハチの磁性が次第に弱くなりやがて消滅するのは、乾燥してゆく過程で結晶の方位がでたらめになること、死後の化学的環境の変化によってマグネタイトの大きさ、形状、あるいは物質そのものの変化が起こること、生物的制御が解除されるなどが主な原因であると考えられる。

また先に述べたように、成虫のハチに強い磁性が検出できないときがある。これはハチが超常磁性検知器を作っているためか、あるいは環境が強磁性のマグネタイトを作ることを抑制しているのか、のいずれかと考えられている。

5. あとがき

(ひざら貝と磁性バクテリア)

鳥や昆虫のからだの中に磁性体が発見されたことは大変興味深い。ハトやハチや山椒魚の他に、ひざら貝にも磁性体が発見されている。すなわち、すべてのひざら貝の歯は規則正しく配列した単磁区のマグネタイトの結晶からできている。また或る種のバクテリア⁴⁾には0.1~0.15ミクロンの大きさのマグネタイトの単結晶が何個か連結して体内に存在することが報告されている。そしてこのバクテリアには極性があり、N極に集まってくるものとS極に寄ってくるものがそれぞれあるらしい。

このバクテリアは普通、微量のこはく酸と硝酸ソーダを含む沼や湿地帯に生棲している。そしてこのバクテリアを人工培養するときは、微量の酸素を含むこはく酸溶液中で育成すればよい。ただし、時々 1.6 mg/l 程度の鉄を含む液の中に入れてやらないと、磁性を持ったバクテリアに成長してくれない。この場合に鉄は硫酸鉄あるいはキニン酸鉄の形で与えればよい。このバクテリアは平均して全体重(乾燥状態)の1.5%に相当する鉄分をもっている。また、このバクテリアを多量育成するときは液温を 30°C 程度に保ち、ある時間経過してから遠心分離(15,000回転/分)してやると、毎分0.2~0.5gのバクテリアを液から分離し収獲することができる。

このバクテリアの磁気飽和値は 1.3×10^{-12} emu 程度であることから、地磁気に十分に感應するだけの磁性をもっていることになる。

これからますます生体の中の磁性体の物性研究、生体内の磁性物質の生成機構、生体内の磁性物質の役割の解明、生体内の磁性物質の工業的利用方法などについての仕事が目白く展開してゆくのではないかと楽しみに思っている。

〔参考文献〕

- 1) R. B. Frankel: 1979 ICM (München) で講演発表。
- 2) J. L. Gould, J. L. Kirschvink, K. S. Deffeyes: Science, **201** (1978) 15 September, 1026.
- 3) J. Philips: J. Comp. Physiol. **121** (1977) 273.
- 4) R. B. Frankel, R. P. Blakemore, R. S. Wolfe: Science, **203** (1979) 30 March, 1355.