

メバルの磁気感覚

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者	西, 隆昭 川村, 軍蔵
巻/号	72巻1号
掲載ページ	p. 27-33
発行年月	2006年1月

メバルの磁気感覚

西 隆昭,* 川村軍蔵

(2005年4月11日受付, 2005年8月9日受理)

鹿児島大学水産学部

Magnetosensitivity in the darkbanded rockfish *Sebastes inermis*

TAKA AKI NISHI* AND GUNZO KAWAMURA

Faculty of Fisheries, Kagoshima University, Kagoshima 890-0056, Japan

Magnetosensitivity of the darkbanded rockfish *Sebastes inermis* was examined by conditioning and electrocardiography. It had earlier been demonstrated that the transported and released fish do not home properly when they have a magnet bar inserted in the stomach. The fish were conditioned to an imposed magnetic field of 192,473 nT parallel or vertical to the fish body placed along the earth's west-east axis. After 10-20 conditioning runs, the fish exhibited a significant conditioned response (i.e., slowing of the heart beat) to a 192,473 nT magnetic field and even to a 2,533 nT magnetic field that combined with the geomagnetic field (horizontal component 31,690 nT, vertical component 32,816 nT) at our laboratory to produce a resultant magnetic field of 5° horizontally or 44° vertically. These results indicate that the fish have high magnetosensitivity. It is suggested that the fish can find their home using a geomagnetic sense.

キーワード：回帰, 磁気感覚, 心拍条件付け法, メバル

個体, 群, あるいは個体群を単位とした動物の水平移動には様々な形態がある。鳥の渡りや魚の大回遊は古来から多くの研究者の興味の対象であり, 動物の移動を追跡する実験機器などの進歩に伴って種々の動物で移動経路が明らかになってきた。¹⁾ 一方, 保護の目的で短距離移送したにもかかわらず, その動物が比較的短時間で元の捕獲場所に戻る例が知られるようになった。²⁻⁷⁾ そのため, 動物の移動・回帰の行動生理学的機構は, 科学的な興味の対象であるだけでなく, 動物保護技術を確立するためにも欠かせない知識である。⁸⁾

魚類についても移送放流魚の数 km や数十 km の距離からの短期間回帰が知られており,⁹⁻²⁴⁾ 回帰のための方位決定や位置決定の機構が興味をもたれている。三田村他^{25,26)}はメバル *Sebastes inermis* が移送放流地点から棲み場に回帰することを報告し, さらに磁力 3×10^8 nT の小磁石を体内に挿入したメバルの追跡によって回帰の方向あるいは到達地点の情報は地磁気によっている可能性を示した。メバルは九州から北海道まで広く岩場や藻場に生息し, 3-4 km 程度の範囲の地域的回遊をする。²⁵⁾ 地磁気情報にもとづく魚の方位決定 orientation

や定位・位置決定という過程を含む航行 navigation は, その魚が磁気感覚を持つことを証明することが前提となる。

本研究は短距離回帰をするメバルが磁気感覚をもつことを明らかにすることを目的とし, 心拍条件付け法により, 水平的な人工的磁気と鉛直的な人工的磁気に対して条件反応を示すことを確認することを試みた。心拍条件付け法は感度の良い実験方法であるため, 動物の種々の感覚を調べる目的で用いられており, 魚の磁気感覚の確認にも用いられている。²⁷⁻³¹⁾

材料および方法

供試魚 メバル 11 尾 (全長 13.5-20.0 cm, 性別未判定) を東町漁業協同組合から実験の 3 日前に入手し, 鹿児島大学水産学部付属海洋資源環境教育センター東町ステーションの網生簀に搬入して実験に供した。実験は同ステーションの屋内飼育棟で行い, 2004 年 5 月に実験を実施した。

実験装置 屋内飼育棟はコンクリート水槽 (7.9×5.0 m) と隣室の機械制御室 (3.0×3.0 m) で構成され, 全

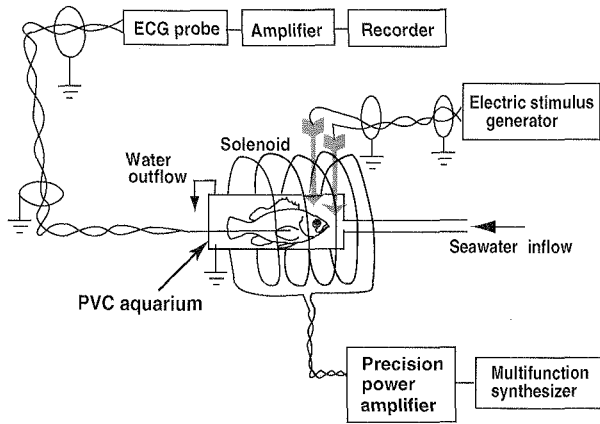


Fig. 1 Experimental apparatus used for conditioning the darkbanded rockfish *Sebastes inermis* to artificial magnetic fields.

ての窓ガラスにアルミ箔を貼って遮光し（室内照度 2.5 lx）、水槽室を白熱灯で照明した。コンクリート水槽の中央にソレノイドを置き、実験機器が発生する磁気ノイズの影響を避けるために機械制御室に精密電力増幅器（エヌエフ回路設計ブロック, 4502）、信号発生器（エヌエフ回路設計ブロック, WF1946A）、レコーダ（YOKOGAWA, DL750）、電気刺激装置（三州理化計器）を置いて、心電図記録、電撃制御、および付加工磁気の制御を行った。これらの装置の概要を Fig. 1 に示した。

人工磁気を発生させたソレノイドは直径 35 cm で、魚体に均質な磁気を付加するためにテフロン・コートの銅線（0.3 mm²）の一層 74 回巻とし、流す直流電流の極性と大きさにより、条件刺激として付加する磁気の東-西の向きと強さを制御した。人工磁気の発生と極性の確認は、ソレノイドの外に置いた磁気コンパス（LEMON, LUMINOUS COMPASS 330260）で行った。

磁気の強さ 付加磁気の大きさはソレノイドに流す直流電流を 0.01 A から 0.76 A まで変えることにより 2,533 nT から 7,598 nT, 12,663 nT, 25,325 nT, 48,118 nT, 192,473 nT と段階的に変化させた。1 回巻きのコイルで生成される磁気の強さはビオ・サバールの式³²⁾により計算でき、ソレノイド内の磁気の強さは、個々のコイルにより生成された磁気を重畳した結果になるので下式で計算した。

$$B = \mu_0 \times I r^2 / 2R^3$$

ここで、 B は磁束密度 (T), μ_0 は真空中の透磁率 ($4\pi \times 10^{-7}$), I は電流 (A), r はソレノイドの半径 (m), そして R は任意のコイルからソレノイド中心の観測点までの距離 (m) である。

実験地の全地磁気は 45,6019 nT (伏角 46°), 水平分力 31,690 nT, 鉛直分力 32,816 nT (オーバーハウザー

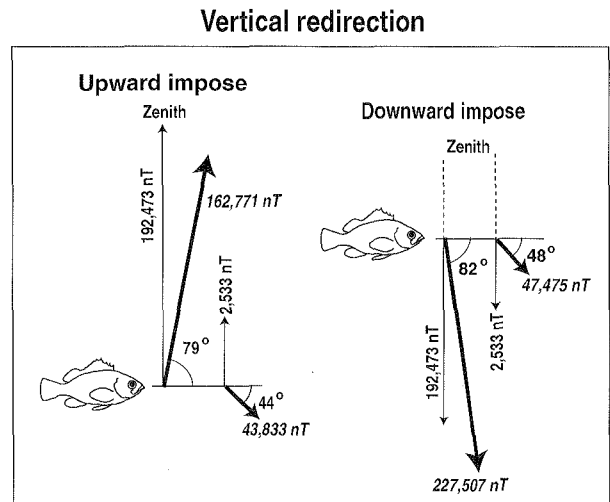
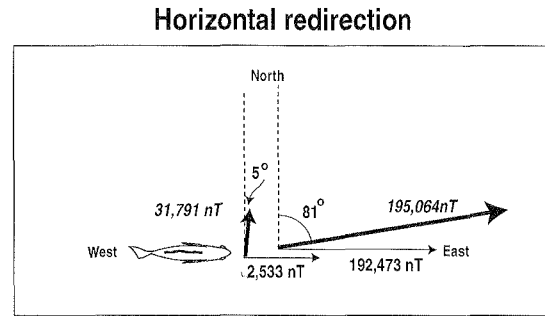


Fig. 2 The experimental apparatus produced a resultant magnetic field due to the combination of the geomagnetic field and the imposed magnetic field. The darkbanded rockfish *Sebastes inermis* is placed in a west-east direction and the solenoid is placed horizontally or vertically. The magnitude of the resultant field is shown by oblique letters. Top, when the artificial magnetic field is set horizontally at 192,473 nT, the resultant field is 195,064 nT redirected 81° easterly or westerly. When the magnetic field is set horizontally at 2,533 nT, the resultant field is 31,791 redirected 5° easterly or westerly. Bottom, when the magnetic field is set upward at 192,473 nT, the resultant field is 162,771 nT redirected 79° above the horizon. When the magnetic field is set upward at 2,533 nT, the resultant field is 43,833 nT redirected 44° below the horizon. When the magnetic field is set downward at 192,473 nT, the resultant field is 227,507 nT redirected 82° below the horizon. When the magnetic field is set downward at 2,533 nT, the resultant field is 47,475 nT redirected 48° below the horizon.

型磁力計; GSM-19-MC; GEM Systems Inc. で測定) であるので、付加した水平人工磁気の強さは水平分力の 0.08 倍から 6.07 倍、鉛直人工磁気では鉛直分力 0.08 倍から 5.87 倍に相当する。

人工磁気を水平（ソレノイドを水平に置いた場合）あるいは鉛直（ソレノイドを鉛直に置いた場合）に付加した場合のソレノイドの中央に置かれた魚に加わる合成磁

気の方向と強さを Fig. 2 に示した。

心電図記録と条件付け ソレノイドの内部中央に心電図記録用水槽 (PVC 容器, 幅 4.7×長さ 17.8×高さ 7.9 cm) を置き, その中に頭部が東向き (体軸が地磁気水平成分と直角) になるように塩ビ板と発泡スチロール片を使ってメバルを半固定して入れ, 容器内に海水を流入させて実験魚の呼吸を確保した。

心電図記録用の電極として, 直径 0.3 mm のエナメル被覆の銅線で作製した銅線電極を左右の胸鰭基部付近から腹腔内の心臓付近に刺入固定して信号を取り出し, アースとともに生体増幅器 (日本光電, AB-601G, SEN-6102) に取り込みレコーダ (YOKOGAWA, DL750) に保存した。

電極刺入個体を PVC 容器に 1 時間以上置いて心電図をモニタし, 魚が取扱の影響から回復して心拍 (連続した QRS 波の間隔) が安定してから, 人工磁気を条件刺激, 電撃を無条件刺激として条件付けを行った。人工磁気 (192,473 nT) の付加開始 5 秒後に DC10V の電撃を 1 秒間 1 回だけ与え, その 4 秒後に人工磁気の付加を停止した (実験個体は人工磁気に 10 秒間さらされたことになる)。これを乱数表を使って 1~5 分の不規則な間隔で 10 回繰返して 1 セットとし, 5 セット繰返した。各セットの条件付け後に条件付けが成立したか否かを確認するために, 無条件刺激を与えずに条件刺激に対する条件反応 (心拍間隔の変化) テストを行った。このテストでは, 付加する人工磁気の強さを 192,473 nT から 2,533 nT まで段階的に小さくして条件反応の有無を確認した。

実験期間中の海水温は 17.0~21.0°C (平均 19.8°C) であった。

データ解析 条件反応の有無の確認は, 条件刺激付加による有意な心拍間隔の伸びを指標にし, 条件刺激開始直後の連続 3 つの心拍間隔 (T1, T2, T3 とする) を計測し, 条件刺激付加直前の 10 拍平均心拍間隔 (Tr) およびその 99% 信頼区間と比較検定した (Fig. 3)。検定は *t* 検定であるため, 心拍間隔を Nishi *et al.*²⁹⁾ に従って下式によって対数変換して正規化した。

$$\text{正規化された間隔} = \text{Log}_{10}(1 + T)$$

ここで *T* は心拍間隔 (秒) である。

人工磁気の強さによって条件反応の大きさが変わる可能性をみるために, Northmore and Yagar³³⁾ にしたがって条件反応の強さを心拍感間隔の伸び率によって評価し, 伸び率と条件刺激の強さとの関係を, 人工磁気の付加方向ごとに調べた。伸び率は, 有意な心拍間隔 T1, T2, T3 の内の最大値の Tr に対する比で計算し, 心拍間隔はすべて対数値で計算した。

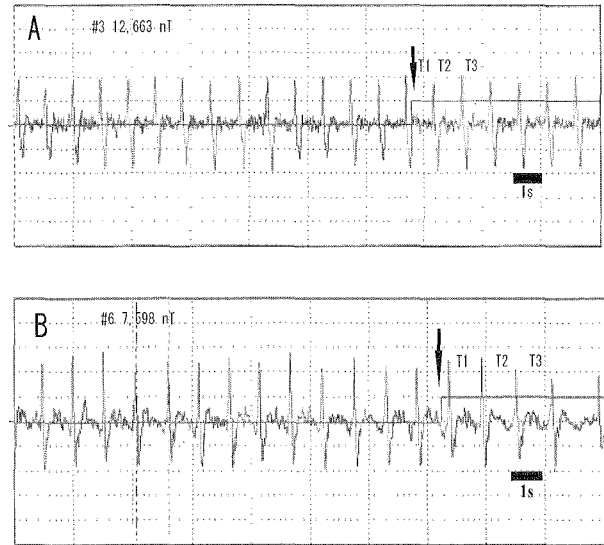


Fig. 3 Typical electrocardiograms showing the conditioned response of the darkbanded rockfish *Sebastes inermis* during tests following fifty conditioning runs. Arrows mark the application of the magnetic field stimulus. (A) T1, T2, and T3 are the heartbeat intervals of rockfish #3 during the test at 12,663 nT horizontal; (B) T1, T2, and T3 are the heartbeat intervals of rockfish #6 during the test at 7,598 nT downward.

結 果

12,663 nT の水平人工磁気を東向きに付加した場合の条件反応テストの心電図記録の例で, ある個体では T3 が 99% 信頼区間を越えており (Fig. 3A), 別の個体では 7,598 nT の鉛直人工磁気を下向きに付加した時の 5 セット目の記録で T1, T2, T3 いずれも 99% 信頼区間を越えている (Fig. 3B)。

供試個体 11 尾の内, PVC 容器内での条件付け中に衰弱し心拍が弱くなったために条件付けを中止した 3 尾を除き, 残る 8 尾の条件反応結果を付加磁気条件ごとに Table 1 に示した。個体 #1, #4, #9 および #11 のように, 1 セット目の最大人工磁気 192,473 nT で条件反応が見られなくても, 付加磁気を弱めると条件反応が認められた場合があった。また, 192,473 nT と最小の 2,533 nT で条件反応が認められたが, それらの中間の強さの磁気には条件反応が認められなかった例 (#1 の 5 セット目など) があった。これらの例ため, #9 の上向き磁気付加では 192,473 nT から 7,598 nT までは条件反応が認められたがいずれのセットでも最小の 2,533 nT で条件反応が認められなかった結果だけから閾値を求めすることはできなかった。

各条件反応テストで得られた有意な心拍間隔の最大値と付加人工磁気の強さの関係を見たところ, 付加した人

Table 1 The conditioned response (significant at $\alpha=0.01$ by t-test) to geomagnetic stimulus (at the given magnetic flux density) was seen either in the first (T1), second (T2), or third (T3) interbeat interval following the test stimulus applied after each conditioning set

Magnetic Field redirection	Rockfish	Magnetic flux Density (nT)	Conditioned response seen after respective conditioning set					
			Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	
Easterly horizontal redirection	#1	192,473	ns	ns	T1, T2	ns	T2	
		48,118	T1	ns	ns	ns	ns	
		25,325	T1, T2	ns	ns	T2	ns	
		12,663	ns	ns	ns	T1	ns	
		7,598	ns	T1	T3	ns	ns	
		2,533	ns	T1	T2	ns	T2	
	#3	192,473	T1	ns	T2	ns	T2	
		48,118	T1, T2, T3	ns	T3	T3	ns	
		25,325	T3	T1, T3	T1	T2	T3	
		12,663	ns	ns	T2	ns	T3	
		7,598	T1	ns	ns	T1	ns	
		2,533	ns	T3	ns	ns	T1, T3	
	#4	192,473	ns	ns	—	T2	ns	
		48,118	T1	ns	ns	T2, T3	T2, T3	
		25,325	ns	ns	ns	T3	T1	
		12,663	T3	ns	ns	T1, T3	ns	
		7,598	T3	ns	ns	T3	ns	
		2,533	ns	ns	T1	ns	T1, T2, T3	
	#11	192,473	ns	ns	ns	—	—	
		48,118	ns	ns	ns	—	—	
		25,325	ns	T2	ns	—	—	
		12,663	T3	ns	ns	—	—	
		7,598	T1, T2	ns	ns	—	—	
		2,533	ns	T2	T1	—	—	
	Westerly horizontal redirection	#9	192,473	ns	—	—	—	—
			48,118	ns	—	—	—	—
			25,325	ns	—	—	—	—
12,663			T3	—	—	—	—	
7,598			ns	—	—	—	—	
2,533			T2	—	—	—	—	
#10		192,473	T1, T2	T1, T2	ns	ns	T3	
		48,118	T3	ns	T2, T3	—	ns	
		25,325	ns	T1, T2	T3	—	ns	
		12,663	ns	ns	ns	—	T1	
		7,598	ns	T2	T2	—	ns	
		2,533	T1, T2, T3	ns	—	T2	ns	
Upward vertical redirection	#6	192,473	T2	ns	T2	T2	ns	
		48,118	T1	—	ns	ns	ns	
		25,325	ns	ns	ns	T1	ns	
		12,663	ns	ns	T2	T2	—	
		7,598	T3	ns	ns	—	ns	
		2,533	T1, T2	ns	T1	—	ns	
	#9	192,473	ns	ns	T1	T2	T1	
		48,118	—	ns	ns	ns	ns	
		25,325	—	T2, T3	ns	T3	ns	
		12,663	—	ns	T1, T2	ns	ns	
		7,598	—	ns	T1, T2, T3	ns	T2	
		2,533	—	ns	ns	ns	ns	
Downward vertical redirection	#6	192,473	—	T1	ns	T1	ns	
		48,118	—	ns	ns	ns	T3	
		25,325	—	T3	ns	T1	ns	
		12,663	—	T1	T3	ns	T1, T2, T3	
		7,598	—	ns	ns	T2	T1, T2, T3	
		2,533	—	T1, T3	ns	T1	T2, T3	
	#7	192,473	T2	ns	ns	—	T1	
		48,118	T1	ns	ns	—	ns	
		25,325	ns	ns	ns	—	T3	
		12,663	ns	ns	ns	—	T2	
		7,598	ns	T1	T3	—	ns	
		2,533	ns	ns	T2	—	ns	

ns, response not significant; —, test was not made due to irregular heart beats.

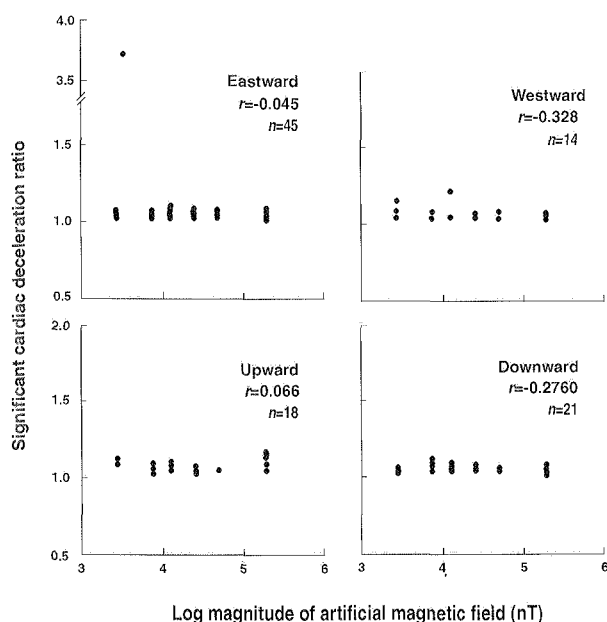


Fig. 4 Relation between intensity of magnetic field imposed and maximum cardiac deceleration of the dark-banded rockfish *Sebastes inermis*. r , correlation coefficient; n , number of conditioning tests in which significant cardiac deceleration was recorded.

工磁気の向きにかかわらず、相関係数 r の絶対値は 0.045~0.328 で統計的に有意なものではなかった ($P > 0.05$) (Fig. 4)。また、それら 4 方向の全てを込みにした場合でも相関は認められなかった ($r = 0.046$, $n = 98$, $P > 0.05$)。

考 察

魚に大きな人工磁気を付加すると、誘導された電流が体内に流れ、それが刺激となり心拍間隔に変化が起こる可能性が考えられる。磁気の誘導により、ヒトでは体に電流が流れることによって、先ず網膜に閃光が見え、次に中枢神経が興奮すると言われる。³⁴⁾ ヒトの場合では磁気閃光の閾値は 20 G (Gauss; 1 G = 10^6 nT) である。^{34,36)} ヒト以外の動物では電氣的に測定が困難なためこのようなデータはないが、本実験でメバルに付加した人工磁気の強さは最大 192,473 nT (1.92 G) で、条件反応テストで付加した磁気の強さの最小値は 2,533 nT (0.002 G) であった。付加した人工磁気の強さの点から、誘導電流が刺激になって心拍変化が起こる可能性は考えにくい。

次に、生体組織の電氣的性質は付加する電気信号の周波数により大きく変化し、周波数が低くなると電流は流れにくくなる。^{34,35)} また、60 Hz 交流信号の 1,000 サイクル (波) 目と 1 サイクル (波) 目では、1 サイクルの生体閾値が 100 倍高い。³⁶⁾ 本実験では心電図記録中の

磁気変化は、付加時の立ち上がりだけで、1/2 サイクルしか変化しない。したがって、刺激の周波数の点からも、本実験結果への誘導電流の影響を考慮する必要がない。すなわち、人工磁気の強さと周波数の両面から、誘導電流による心電図反応はないと結論され、本研究の実験方法には問題がないといえる。

通常、刺激の強さと感覚器の応答の大きさは一定の関係があり、一定の範囲内で両者の対数値は正比例する関係にある。したがって、両者の関係を下方に補外することによってある程度の閾値推定が可能である。心電図条件付け法は感度の良い実験方法として知られているが、条件刺激としての人工磁気の強さと条件反応である心拍間隔の伸びの大きさの対数値に相関は認められなかった。同様なことはニホンウナギでも報告されており、²⁹⁾ 心電図を指標とした条件反応は all-or-none といえる。本研究では、付加人工磁気の強さに対する条件反応に一貫性 (規則性) が認められなかったため、磁気感覚の閾値を得ることができなかった。しかし、本研究で得られた地磁気の水平分力と鉛直分力の 0.08 倍という弱い人工磁気に対して魚が反応したという結果は他に例をみない。魚類の行動実験で初めて人工磁気への条件付けが成功したキハダ *Thunnus albacares* の場合では地磁気鉛直分力の 1.67 倍の人工磁気が付加された。³⁷⁾ また、Walker *et al.*³⁸⁾ がニジマス *Oncorhynchus mykiss* の訓練に用いた摂餌装置に付加した人工磁気は水平分力で 1.27 倍、鉛直分力で 2.05 倍であった。

メバルのように定住地を拠点とした回帰はホンペラ *Halichoeres tenuispinis*,¹⁴⁾ タウエガジ科の *Ulvaria subbifurcata*,¹⁵⁾ パーチ科の *Stizostedion vitreum*,¹⁷⁾ タイセイヨウイサキ属の *Haemulon flavolineatum*,¹⁸⁾ ナガニザ *Acanthurus nigrofuscus*²³⁾ などでも知られている。また、ニシキベラ属の *Thalassoma bifasciatum* は決まった場所に集まって繁殖行動をし、その場所は世代が代わっても変わらない。²⁰⁾ このような魚の地域的回遊の生物学的機構に関する研究は、古くは嗅覚による回帰が提唱され、³⁹⁾ 近年では学習行動の群内における伝達や世代間の継承という social learning の視点から研究されている。⁴⁰⁾ 魚の地域的回遊の感覚的手掛りとして地磁気の可能性を移送放流によって示した例はメバル^{25,26)} が最初である。

本研究でメバルが磁気感覚をもち、磁気の水平的変化と鉛直的变化のいずれにも高感度で感応することが明らかになった。この結果は、メバルの局所的回遊は地磁気情報を手掛りの一つとしていることを強く示唆するものである。地磁気を三次元的に検出することができれば、高い精度で定住地に回帰できるであろう。この場合、地磁気情報は方位と位置のいずれかが考えられる。トランスポンダを装着して移送放流されたニジマスは直ちに飼

育されていた生簀地点に戻り,¹³⁾ 定置網で捕獲された後に沖合で放流されたクロダイ *Acanthopagrus schlegelii* は定置網近くの岩礁域に直進移動した。²²⁾ このような放流魚の移動追跡から定位か航法のいずれであるかは決め難い。Ibrahim *et al.*²¹⁾ は移送放流した魚が捕獲場所である碇固定型の浮き魚礁 (unjam) に直進回帰することから魚が地図をもつ可能性を示唆した。しかし、浮き魚礁から 130 m 以上離れた地点で放流された魚は回帰せず、地磁気地図による回帰ではなく地形記憶による回帰の可能性がある。浮標物に付いた魚が浮標物を拠点とした生活をするとはよく知られており、⁴¹⁾ 流木に付いたカツオ *Katsuwonus pelamis* は流木を拠点として移動回帰する。¹¹⁾ 海流にのり移動する流木に魚が回帰できることは、地磁気情報だけを手掛りにしているとはいえない。定位と航法のいずれであっても、複数の環境情報を利用した複雑な回帰行動の可能性があり、メバルの場合でも複数の環境情報の利用を否定できない。

謝 辞

実験に際して種々の便宜を図って下さった鹿児島大学水産学部付属海洋資源環境教育センター東町ステーションの加世堂照男氏と尾上敏幸氏に深謝申し上げる。本研究は、平成 15、16 年度科学研究補助金 (基盤研究 (C) (2))、課題番号 15560043 の補助により実施された。

文 献

- 1) Wiltschko R, Wiltschko W. *Zoophysiology 33 Magnetic Orientation in Animals*. Springer Verlag, Berlin. 1995.
- 2) Bonadonna F, Chamaille-Jammes S, Pinaud D, Weimerskirch H. Magnetic cues: are they important in black-browed albatross *Diomedea melanophris* orientation? *Ibis* 2003; **145**: 152-155.
- 3) Moore FR. Influence of solar and geomagnetic stimuli on the migratory orientation of herring gull chicks. *The Auk* 1975; **92**: 655-664.
- 4) Fischer JH, Freake MJ, Borland SC, Phillips JB. Evidence for the use of magnetic map information by an amphibian. *Anim. Behav.* 2001; **62**: 1-10.
- 5) Phillips JB, Freake MJ, Fisher JH, Borland SC. Behavioral titration of a magnetic map coordinate. *J. Comp. Physiol. A* 2002; **188**: 157-160.
- 6) Phillips JB, Adler K, Borland SC. True navigation by an amphibian. *Anim. Behav.* 1995; **50**: 855-858.
- 7) Jenssen TA. Spatial awareness by the lizard *Anolis cristatellus*: Why should a non-ranging species demonstrate homing behavior? *Herpetologica* 2002; **58**: 364-371.
- 8) Groombridge JJ, Massey JG, Bruch JC, Malcom T, Brosius CN, Okada MM, Sparklin B, Fretz JS, Vanderwerf EA. An attempt to recover the Po'ouli by translocation and an appraisal of recovery strategy for bird species of extreme rarity. *Biol. Conservation* 2004; **118**: 365-375.
- 9) Aronson LR. Orientation and jumping behaviour in the gobiid fish *Bathygobius soporator*. *Amer. Mus. Novitates* 1951; **1286**: 1-22.
- 10) Hasler AD, Horrall RM, Wisby W, Braemer W. Sun orientation and homing in fishes. *Limnol. Oceanogr.* 1958; **3**: 353-361.
- 11) Yuen HSH. Behavior of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, as determined by tracking with ultrasonic devices. *J. Fish. Res. Bd. Can.* 1970; **27**: 2071-2079.
- 12) De Veen JF. On the orientation of the plaice (*Pleuronectes platessa* L.) I. Evidence for orienting factors derived from the ICES transplantation experiments in the years 1904-1909. *J. Cons. int. Explor. Mer.* 1970; **33**: 192-227.
- 13) Kuroki T, Kawaguchi K, Sakamoto W, Watanabe H. A new telemetric apparatus to detect fish location and its surrounding water temperature. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1971; **37**: 964-972.
- 14) 中園明信, 塚原 博. 海底の砂場で放流されたホンベラ, *Halichoeres tenuispinis* (Gunter), の移動方向について. 九大農附属水産実験所業績 1971; **88**: 1-7.
- 15) Green JM, Fisher R. A study of homing and orientation to the home site in *Ulvaria subbifurcata* (Pisces: Stichaeidae). *Can. J. Zool.* 1977; **55**: 1551-1556.
- 16) Goff GP, Green JM. Field studies of the sensory basis of homing and orientation to the home site in *Ulvaria subbifurcata* (Pisces: Stichaeidae). *Can. J. Zool.* 1978; **56**: 2220-2224.
- 17) Olson DE, Schupp DH, Macins V. A hypothesis of homing behaviour of walleyes as related to observed patterns of passive and active movement. *Amer. Fish. Soc. Spec. Publ.* 1978; **11**: 52-57.
- 18) Helfman GS, Meyer JL, McFaland WN. The ontogeny of twilight migration patterns in grunts (Pisces: Haemulidae). *Anim. Behav.* 1982; **30**: 379-384.
- 19) Warner RR. Traditionality of mating-site preferences in a coral reef fish. *Nature* 1988; **335**: 719-721.
- 20) Warner RR. Male versus female influences on mating-site determination in a coral fish. *Anim. Behav.* 1990; **39**: 540-548.
- 21) Ibrahim S, Kawamura G, Ambak MA. Effective range of traditional Malaysian FAD as determined by fish-releasing method. *Fish. Res.* 1990; **9**: 299-306.
- 22) Kawamura G. Simple techniques for fish behaviour study at sea. In: Soemodihardjo S, Tuskamoro K, Romimohtarto K (eds) *Proceedings Fourth LIPI-JSPS Joint Seminar on Marine Science*. Indonesian Institute of Science (LIPI), Jakarta. 1995; 101-106.
- 23) Mazeroll AI, Montgomery WL. Structure and organization of local migrations in brown surgeonfish (*Acanthurus nigrofuscus*). *Ethology* 1995; **99**: 89-106.
- 24) Lamothe PJ, Gallagher M, Chivers DP, Moring JR. Homing and movement of yellow-phase American eels in freshwater ponds. *Environ. Biol. Fish.* 2000; **58**: 397-399.
- 25) 三田村啓理, 新井修亮, 光永 靖, 阪上雄康, 坂本 亘. 関西空港ポートターミナルにおける魚類の行動測定 2 地磁気がメバルの固執行動に及ぼす影響. 日本水産学会講演要旨集, 2003; 378.
- 26) 三田村啓理, 光永 靖, 岡野 奨, 中村憲司, 阪上雄康, 荒井修亮, 坂本 亘. パイオテレメトリーによる水圏生物情報の取得と応用 6~地磁気がメバルの回固執行動に及ぼす影響. 日本水産学会講演要旨集, 2004; 470.
- 27) McCleave JD, Rommel SA, Cathcart SL. Weak electric and magnetic fields in fish orientation. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1971; **188**: 270-282.
- 28) Rommel SA Jr, McCleave JD. Sensitivity of American eels (*Anguilla rostrata*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) to

- weak electric and magnetic fields. *J. Fish. Res. Board Can.* 1973; **30**: 65-663.
- 29) Nishi T, Kawamura G, Matsumoto K. Magnetic sense in the Japanese eel *Anguilla japonica* as determined by conditioning and electrocardiography. *J. Exp. Biol.* 2004; **207**: 2965-2970.
- 30) Nishi T, Kawamura G, Sannomiya S. Anosmic Japanese eels *Anguilla japonica* can no longer detect magnetic fields. *Fish. Sci.* 2005; **71**: 101-106.
- 31) Nishi T, Kawamura G. The Japanese eel *Anguilla japonica* is already magnetosensitive at the glass eel phase. *J. Fish. Biol.* 2005; **67**: 1213-1224.
- 32) Jackson JD. *Classical Electrodynamics*. 3rd ed. John Wiley & Sons, New York. 1999.
- 33) Northmore DP, Yagar D. Psychophysical methods for investigation of vision in fishes. In: Ali MA (ed) *Vision in Fish*. Plenum, New York. 1997; 689-704.
- 34) 雨宮好文. ELF 電磁界の健康影響と防護指針. 電子情報通信学会誌 2001; **84**: 227-232.
- 35) 金井 寛, 中山 淑. 生体の電気特性. 医用電子と生体工学 1986; **24**: 220-225.
- 36) Bernhardt JH. Evaluation of human exposures to low frequency fields. *AGARD Lecture Series* 1985; **138**: 8/1-8/18.
- 37) Walker MM. Learned magnetic field discrimination in yellowfin tuna, *Thunnus albacares*. *J. Comp. Physiol. A* 1984; **155**: 673-679.
- 38) Walker MM, Diebel CE, Haugh CV, Pankhurst PM, Montgomery JC. Structure and function of the vertebrate magnetic sense. *Nature* 1997; **390**: 371-376.
- 39) Gunning GE. The sensory basis for homing in longer sunfish, *Lepomis megalotis megalotes* (Rafinesque). *Invest. Indiana Lakes Streams* 1959; **5**: 103-130.
- 40) Brown C, Laland KN. Social learning in fishes: a review. *Fish and Fisheries* 2003; **4**: 280-288.
- 41) Hunter JR, Mitchell CT. Field experiments on the attraction of pelagic fish to floating objects. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer* 1968; **31**: 427-434.