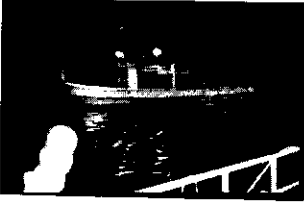


## 連載



まき網の灯船

## 魚類の生態からみた漁法の検討

## ② 魚はどうして光に集まるのか (上)

有元 貴文\*

## 1. はじめに

魚類の生活に光は重要な意味をもっている。もちろんこれは魚類に限ったことではなく、植物、動物を問わず、あらゆる生物の生活に光はさまざまな形で関与し、生理的にも生態的にも大きな作用を及ぼしている。一般に植物では光のエネルギーを利用して光合成を行ない、多くの動物の場合も昼と夜の生活のリズム、あるいは季節的なリズムが光周期によって決定されている。また視覚は光があってはじめて機能できるし、十分な光がなければ色彩も見分けられない。ホタルやある種の水産動物にみられる生物発光についても興味深い問題が多い。

一方、植物の花が太陽の方向を向き、根が地中に向かうように、動物の空間的な定位の問題として光に集まる動物と避ける動物とがある。このうち光源に向かう性質を利用したものに、身近なものとしては誘蛾灯がある。「飛んで火に入る夏の虫」の例えどおり、昆虫を光源に集めるための照明装置である。

漁業でも漁具の操作範囲内に対象生物を集め、漁獲の効率を高めるために「集魚灯」が使われている。刺激と生物の反応という基本を考える魚群行動学にとって、漁獲技術への応用が最も成功した例といえよう。

それでは魚はどうして光に集まるのだろうか。いつものように「なぜ？」と「どのようにし

て？」という2つの問いかけに答えながら、集魚灯漁法の集魚効果と漁獲過程を検討していきたい。

## 2. 魚はなぜ光に集まるのか

「魚に訊いてみなければわからない」とするのは私達の立場ではない。また「魚が光に集まるのは本能だ」という答えも、現代においては科学的なものとは認められない。「本能」という言葉は動物の行動に興味をもち、科学的な探偵の役割を果たそうとする者にとっては禁断の麻薬といえよう。すなわち、本能という概念は薄っぺらな看板でしかなく、その裏にはもっとつきつめた科学的な説明が必要となる。言い換えれば、本能という言葉であらゆる現象が説明できたと思えるのは間違いで、真理に近づくためには別の問いかけを設定する必要がある。

前章で述べたように「なぜ？」という設問自体がつきつめた解答を得るには遠回りな道になってしまう。しかし、魚が光に集まることの生態的意義、適応的意義という形であれば、これまでに多くの解釈が試みられてきている。そのなかから、集魚灯に魚が集まる現象を説明する理論をいくつか紹介してみたい。

索餌集群説：生態学の食物連鎖に基づく考えで、光に集まってきたプランクトンや小魚を餌としてカマスやイカ、アジ、サバのような高次捕食者が集まるという説明。

条件反射説：日出・日没時の照度が急激に変化

\*Arimoto Takafumi 東京水産大学助教授

する時間帯に水面近くでプランクトンが密集し、これを餌とする魚に照度変化を刺激とする条件反射が形成される。また、稚魚が光によく集まることから、餌料プランクトンと光刺激を結びつけた条件反射が成魚になってからも発現しているとする考えもある。

探求反射説：本能説，好奇心説を行動学的に言いかえたもので、見なれぬ新しい刺激が提示されたときの探求反射（なんだろう反射）によって光源に接近するという説。

好適照度説：生理的あるいは生態的に最も適した明るさがあり、その明るさの光域に集まるという説。日中の遊泳層の明るさと、夜間に集魚灯に集まったときのその遊泳層の明るさが同じであれば絶対的な好適照度があると決定できる。しかし、明順応時と暗順応時では反応も異なる筈で、暗域から明域までの広い範囲のなかで、相対的な好適照度域に集群すると考える説もある。

惑い説：太陽や月を光源とする自然光線は地上に、そして水中に平行に入射している。一方、集魚灯による人工光線は光源が太陽にくらべて近距離にあるため、発散光として入射する。自然光による水中の照度変化に対して魚類は適当な照度環境を選択できるが、人工光の場合には定位ができずに光源に向かって接近してしまうという説。

これらのうち、索餌集群説や好適照度説は「何のために魚が光に集まるのか」を説明する理論であり、ある魚種について、ある条件のもとでは確かにそういった現象が認められている。一方、条件反射説や探求反射説、惑い説では「どのようにして光に集まるのか」という問いに対する解答にもなっている。こういった考えの基礎となるのが走光性という定位運動の機構である。

### 3. 刺激に対する反応—走性と定位

走性 (Taxis) とは生物が外界からの刺激に反応して一定の方向性をもった行動をとることで、刺激に対して定位する運動と定義されている。ここで定位 (Orientation) とは生物が体の向きを能動的に定めることで、特に移動運動である必要はなく、ある方向に体の向きを変えるだけで成立する。走性は刺激源に対する移動運動を意味するため、定位という大きなカテゴリーのなかに含まれることになる。かつては趨性 (Tropism) と呼ばれたこともあったが、その後、植物の移動性をともなわない性質を屈性あるいは向性と呼び、移動性のある動植物の性質を走性とする考えが一般的になっている。

走性是对应する刺激の特性によって分類される。例えば光が行動を制御している場合を走光性 (Phototaxis)、水流に対しては走流性 (Rheotaxis)、化学物質に対しては走化性 (Chemotaxis) などである。いずれの場合も、刺激源に向かって接近するものを正の走性、遠去かるものを負の走性という。

走性についての説明が長くなったが、魚が光に集まるのは正の走光性によるものであるとし、「なんのために？」という心理的なあいまいさを除き、「どのようにして？」という行動の仕組み、あるいは機構を説明してみたい。

もちろん魚の光に対する反応をすべて機械論的に説明するのは困難である。過去の経験や周囲の環境によって反応は変化するし、また光だけではなく複数の外的刺激に反応している場合もあり、高次中枢に基く動物の行動を単純に解釈するのはある意味では危険なことでもある。しかし、プランクトンや稚魚の光に対する反応のように、単一刺激に単純に反応する場合を基礎として走光性の仕組みを考えてみよう。

### 4. 魚はどのようにして光に集まるのか

走光性の機構については近代生物学の始まりとともに研究が進められ、19世紀後半から半世紀の間に趨性学、走性学として完成され、動物の行動に関する研究の重要な位置を占めていた。現在出版されている動物行動学に関する多数のテキストでも先ず最初に走性についての記述があり、以下の4つの説明があげられている。なお、ここで光あるいは光源としたものを、刺激、刺激源という言葉に置き換えれば、走流性や走化性といった他の走性についても適用できることはいうまでもない。

**屈曲走性 (Klinotaxis, 偏走性) :** 動物が体を振り動かして感覚器に受ける光の強度を比較し、左右の刺激を等しくする方向に運動する性質。ハエの幼虫(ウジ)の負の走光性について、ジグザグに曲がった経路で光源から遠去かる例が知られている。

**転向走性 (Tropotaxis, 刺激相称性) :** 光を左右の感覚器で同時に受けて比較し、両側から等しい強度を受けるように体軸を光源に向け、直線的に運動する性質。単一光源の場合は光に向かって直進し、2つあるときはその中間に向かう。また、一方の感覚器を使えなくした場合には、光源に対して円運動をとる。

**目標走性 (Telotaxis, 保目標性) :** 左右からの光の強度が等しくなるように直線的に光源に向かう性質。単一光源に対しては転向走性と変わらないが、2つの光源に対するときどちらか一方の光源を目標に定めて接近する。網膜の一点に目標を定め、それがずれないように移動することで説明される。片側の感覚器を使えなくしても、転向走性のように円運動とはならず、一直線に光源に向かう。

**保留走性 (Menotaxis, 対刺激性) :** 光源に対して体軸と一定の角度を保ちながら接近していく

性質。体軸と光源のなす角度によって直線運動、円運動、あるいはうずまきを描くようにらせん状に接近する。

動物が光に集まる機構としては、これら4つの走性についての説明のほかに、無定位運動性(Kinesis)と呼ばれるもっと単純な刺激源への反応もある。これは刺激の方向と体軸の向きに一定の関係がなく、刺激の強弱または変化に対して一定の運動を示す性質で、運動の速度が変わる変速無定位運動性(Orthokinesis)と運動の方向が変わる変向無定位運動性(Klinokinesis)の2つが知られている。

走性についての研究は主に単細胞の原生動物を用いた実験結果をもとに進められてきており、その成果としてここに述べたような走性と無定位運動性についての詳細な分類が確立されてきた。しかし、魚が光に集まる機構としてこのなかのどれがあてはまるのかはまだ難しい問題を含んでいる。種によって、環境条件によって、そして光の性質に応じてそれぞれつきとめていく努力が必要かもしれない。

## 5. 走光性理論の限界とこれから

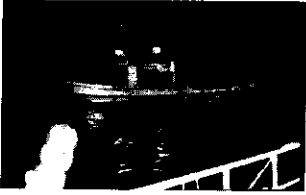
魚は正の走光性によって光に集まる。これは一見科学的な説明であるようで、実は本能とか好奇心という言葉で別の説明概念で言い直したに過ぎないという見方もある。しかし同じ説明概念であっても、本能や好奇心という概念は数量化になじまないのに対し、走性はもう少し理論的な内容を含んでいる。すなわち、刺激に対する動物の行動を現象として観察し、その機構を解明するために緻密な実験が行われてきたのであり、現代科学の世界でも十分な妥当性を含んでおり、これからの研究の発展も期待できる。

例えば、刺激源に対して接近していく過程につ

いて、左右の刺激を同一にし、あるいは体軸が刺激源となす角度を一定にするといった幾つかの仮定をもとに数学モデルをたてることができる。このモデルで時間経過や刺激の強さを変えて、動物の動きをコンピュータのなかで再現させることも可能である。このようなシミュレーション（数値実験）の結果と実際の動物の行動を比較することで、モデル式の妥当性を検討し、パラメータの決定を行っていけば、魚が光に集まる機構について新しい見方がひらけてくるであろう。

実際に集魚灯に集まってきた魚の行動を観察すると、ある明るさのところに滞留したり、直線的に光源に近づいてきたものが途中で円運動に変わったり、または光源近くで行動性を失って漂い始めたり、空中に跳ねたりする。このような行動の多様性に対応した解釈を行うためには、複雑な現象を単純化し、走性という基礎的な考えに戻ることが近道であろう。そして、こういった行動を起こすときの生理学的な裏付けを説明することも必要となってくる。（つづく）

## 連 載



まき網の灯船

## 6. 魚の光感覚とその機能

水界にすむ動物の形態や生理は多種多様であり、光感覚器官も例外ではない。イカ・タコは人間とはほぼ同レベルのよく発達した眼球をもち、魚類でも若干の機能的な差異はあるものの視覚情報の入力装置として眼球が重要な役割を果たしていることは同様である。一方、他の動物の場合は眼球に相当する入力装置をもたないものもある。これらは光の有無、強弱などを受ける分散光覚や皮膚光覚といわれるもので、眼球のように形態視覚や運動視覚、そして色彩視覚といった発達した機能はもっていない。しかし、単純に光の強弱だけを感じ取るナマコやフジツボ、あるいは二枚貝の仲間でも、体を縮めたり殻を閉じるといった防御反応や活動リズムの上昇または低下、そして走光性といった様々な光に対する反応を示し、生活のなかでの光感覚の重要性が認められる。そして、光感覚器官が体表全体に分散しているものから、体のある部分に局在し、さらに光感覚器官としての眼点と呼ばれる形態へと分化が進んでいく。また甲殻類は人間の眼とは構造の異なる眼球をもち、十数個から数百個の個眼が集まって構成されていることから複眼と呼ばれる。

人間の眼は光学系として最も進化がすすんだものとされ、イカ・タコといった頭足類や魚類をはじめとする脊椎動物に共通な特徴としてカメラの構造に例えることができる。すなわち、レンズに

## 魚類の生態からみた漁法の検討

## ④ 魚はどうして光に集まるのか (下)

有元 貴文\*

相当する水晶体で物体を像としてとらえ、フィルムに相当する網膜上に焦点を合わせて結像する。ただし、哺乳動物の多くはレンズの曲率半径を変えて焦点距離を調節するが、魚類ではレンズを前後に移動させて遠近調節を行なっている。

このように、魚類は一般に発達した構造の眼をもち、光の波長の違いから色を見分ける色彩感覚、物体の形態や構造を識別する形態視覚、そして動いている物体に対して運動の速度や方向を見定める運動視覚といった複雑な機能をもち、餌をとり、あるいは敵から逃げるという多様な生活の中で活用されている。更に光の強さについては明暗視覚という別の機能があり、明るさを見分け、または光源の位置を知り、光に対する様々な

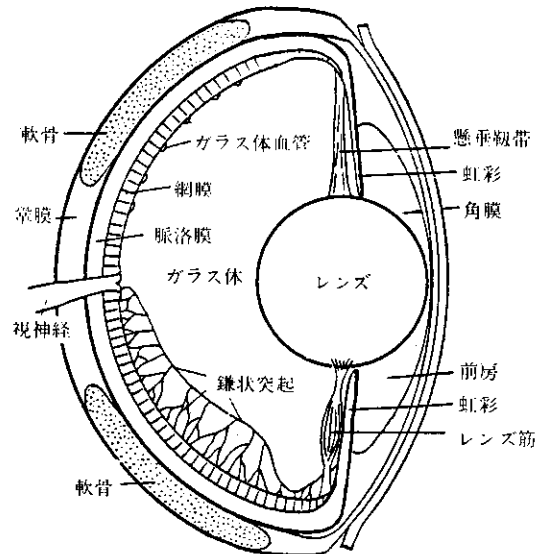


図1 硬骨魚の眼の断面模式図

\* Arimoto Takafumi 東京水産大学助教授

反応を起こす上での重要な役割を果たしている。

### 7. 魚の網膜の構造とはたらき

魚類が明るさを感じ受する器官としては眼以外にも上生体（松果体）という間脳の背側に位置する器官が知られている。両眼を除去した魚の光に対する反応についての実験結果からこれが光を感じ受する器官としてはたらいていることは古くから認められていたものの、実際の機能と特性について詳しいことは分かっていない。そこで、魚類の明暗感覚について眼球の網膜の構造とその変化に話をしぼっていきたい。

網膜上の光受容器には錐体（cone）と桿体（rod）の2種があり、それぞれ構造と機能が異なっている。錐体は明るいときに働き、色彩弁別能力があり、視精度がすぐれている。一方、桿体は暗い条件で働き、色彩弁別能力がなく、視精度が劣る。そして、外界の明るさによってこのどちらの光受容器が働くかが変化する。これは網膜運動反応と呼ばれ、明るい条件では錐体が光の入射する側に一列に並び、暗い条件では後方に移動する。桿体はその逆の変化を示し、明るいときと暗いと

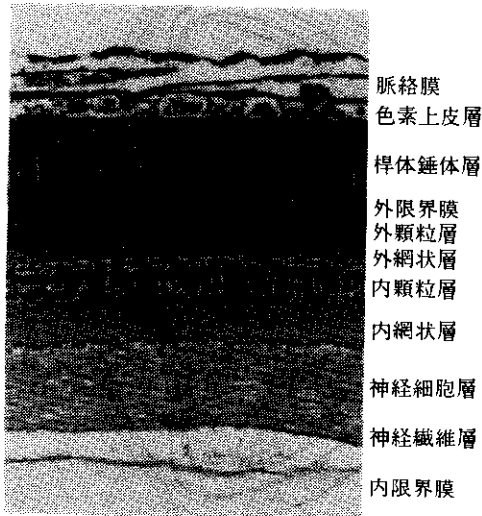
きでこの2種類の視細胞が網膜上での位置を交替し、それぞれの明るさの条件にあった機能を発揮する。これと同時に色素顆粒の移動も観察され、光を遮断するフィルターの役目をつとめている。

この反応は一日のなかでの環境照度の変化に対応しており、昼に明順応状態、夜には暗順応状態となる。また、昼間に暗黒状態においても網膜の完全な暗順応状態は得られないことから、生物の体内時計による日周期性を示すことも知られている。このような網膜の順応状態を観察するためには、眼球を摘出してホルマリンで固定し、これをパラフィンで包埋した後に厚さ4～5μmの薄い組織切片を作り、染色を施してから顕微鏡で錐体と桿体の位置や色素顆粒の移動状態を調べて判定する。

それでは、集魚灯のように夜間に人工的に作り出された明るさに対しては対象生物の網膜はどのような変化を示すのだろうか。また、このような生理学的知見を基に、集魚灯の適正光力や漁具操作方法のガイドラインを決定できないだろうか。

集魚灯漁法の漁獲過程との関連で網膜運動反応を研究した例はそれほど多くはないが、これまでにゴマサバ、マアジ、スルメイカについての研究の成果が報告されている。これらは網膜運動反応についての水槽実験と、漁獲物の網膜の順応状態の判定という2段階の方法からなっている。集魚灯漁法で漁獲の成否を決定する要素は対象魚群がどのような時間経過で集魚灯の近くに集まってくるのか、そして水中でどのような明るさのところ集まっているのかであり、これを漁獲された個体の網膜の順応状態から明らかにしようとするものである。すなわち、夜間に暗順応の状態にあったものが集魚灯に集まってくる過程でどのように明順応に移行するかを調べることになる。そのため第一段階として水槽実験により網膜の明順応過程の基準となるものさしを作る必要がある。

まず、暗室内においた水槽に実験魚を収容する。



↑  
光の入射方向  
写真1 明順応時のマアジの網膜組織。

実験に先立って、網膜が完全な暗順応状態にあるよう順応時間や実験時刻を設定し、次いで照明を点灯してその後の時間経過を追いながら実験魚をとりだし、眼球を固定する。これを明るさの条件別に行ない、どれだけの明るさであれば点灯後何分間で明順応に至るのか、また暗順応から明順応へ移行していく過程を時間的な変化として把握しておく。この水槽実験での結果を基に、第二段階として実際に集魚灯に集まって漁獲された個体の網膜の順応状態を比較、検討していくことになる。

もちろん、集魚灯漁法の漁獲過程解明のためには生理学的な実験だけでは不十分である。集魚灯を点灯したときの水中の明るさと、それに対応した対象魚群の分布状態や行動特性についての現場での観察が必要であり、これらを水槽実験、生理実験と有機的に統合してはじめて漁獲過程の全貌が解明されてくるであろう。さらに集魚灯漁法のなかでも旋網や敷網のような網漁法と釣り漁法とでは漁具の操作範囲が異なり、集魚灯の利用方法にも当然違いが見られる。これらの全体を見渡して比較検討し、最適化を追求していく努力が今後ますます必要な時代になってくるであろう。

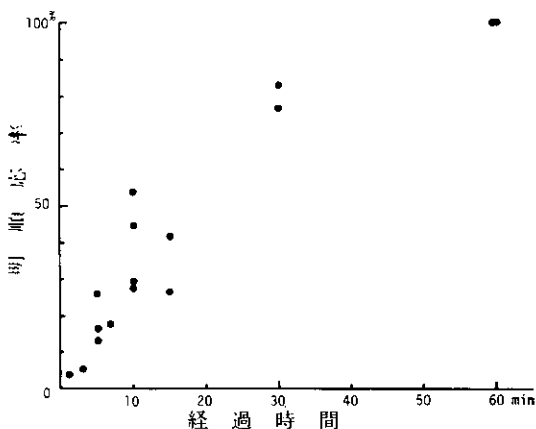


図2 夜間、高照度点灯後の経過時間とマアジ網膜の明順応率

## 8. 集魚灯漁業の現状と将来

現在、集魚灯を利用した漁法としてはイカ釣り、サンマ棒受網を含む各種の敷網、イワシ・アジ・サバの旋網といったところが代表選手と言えるだろう。このほかにも沿岸での釣り漁法で集魚灯を使うものは多い。

このような現在行なわれている操業方法はすでに完成されたもので、ずいぶん昔から定着していたかのように考えがちである。しかし、これはあらゆる漁業についていえることであるが、実際には漁具漁法が現在の姿におちついたのはせいぜい数十年という時代の流れでしかなく、サバのタモ抄い漁法のようにほんの十数年前に跳ね釣り漁法から転換したばかりのものもある。特に集魚灯漁法については電灯照明の発達と漁船の動力化が進



写真2 イカ釣り漁船の集魚灯配置



写真3 出港前のサンマ棒受網漁船

むなかでやっと戦後になってから本格化したものであり、それ以前は手漕ぎの漁船で作業灯を転用しただけのわずかな光力で魚を集め操業していた時代が長くつづいていたことを忘れてはならない。

集魚灯光源の歴史を振り返ってみると、江戸時代から松明等のかがり火を使ったイカ釣りやイワシの敷網が行なわれており、その後明治後半になってからは石油ランプ、アセチレンランプ、そして大正から昭和にかけてバッテリーや小型発電機を使った電球へと技術革新が進められた。現在生活のなかで普通に使われているタングステン・フィラメントの電球が開発されたのは明治39年のことであり、これをいちやく漁業に応用しようとした先人の努力は今でいえば最先端技術の導入といってもよいだろう。

もちろん現在も周辺技術を漁業に導入し、漁具や操業方法を改良していく努力が続けられている。現在一般的に使われている電球は白熱灯、ハロゲン灯といったタングステン・フィラメントを燃焼させて発光させる方式のものであるが、近年になって放電灯(HID)と呼ばれる高出力、長寿命の電灯が急速に普及してきた。これは道路照明等に使われている方式の電灯で、同じワット数であれば白熱灯の数倍の発光効率をもち、省エネルギー性が高いとされた。そのため、オイルショック当時の燃費節減が呼ばれた時代に注目を集め、

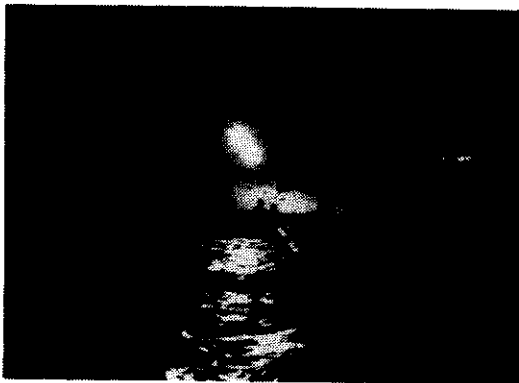


写真4 放電灯の水中照度測定実験

大型のイカ釣り漁船を中心に普及が進んでいった。

しかし、新技術の導入は新しい難題を生み出していく。放電灯の普及は少しでも他船より明るい光を使いたいとする漁船間の光力競争に拍車をかけ、省エネルギーという本来の目標は忘れられていった。その当時、宇宙衛星からの夜間撮影で日本海のまんなかには東京並の大都市に相当する不夜城が出現しているといった記事が新聞を賑わせたのも記憶に新しい。

集魚灯の基本に戻って考えてみると、効率よく漁獲するために船体周辺に魚群を濃密に集めることが大事であり、このためには遠方、深層からの広範囲集魚と、船体周辺への滞留という2つの条件を同時に満足させなければならない。これはある意味では相反する条件であり、遠方まで光を届かせるためにはどうしても船体周辺では過剰なまでの明るさになってしまい、これが滞留効果を妨げる可能性がある。今後、集魚効果と滞留効果についての詳細な検討があらためて必要になってくるだろう。水中の魚群の行動を観察するための方法として水中テレビカメラやソナーの近年の発達著しく、これらの機器類を駆使した研究が進み、魚はどうして光に集まるのかが解明されれば、集魚灯の利用方法についての新しいガイドラインを設定することも可能となってくるであろう。

さらに、漁獲行為を対象生物の行動制御の結果であるとする原点にかえてみれば、色灯や偏光、そしてレーザー光、ストロボ光や光ファイバーの利用というこれまで漁業技術のなかで成功していなかった各種の光刺激についても新しい側面がみえてくるかもしれない。これらが次の時代の操業技術を確立するための新しい光となる日も近いかもしれない。