

【報 文】

## 光を利用した魚群制御技術

有 元 貴 文\*

### Fish Behaviour Control by Use of Light

Takafumi ARIMOTO\*

#### 1. はじめに

人類の開発してきた生物生産の技術のなかで、動物の行動を制御することで達成されてきたものは多い。それは狩猟技術としての猟犬の利用や鷹狩りであり、あるいは牧畜業のなかでの牧羊犬の役割である。また、農業においても牛馬を使った耕作作業はかつては日本でも当たり前前の風景であった。このように人間の活動を補助する目的で動物を利用するものとしては、漁業の分野でも鵜飼<sup>1)</sup>のような例があり、イヌやカワウソを訓練して魚を獲らせていた地方もある<sup>2)</sup>。

これとは別に対象生物に直接働きかけて、その行動を制御しようとする手法もある。狩猟の例を挙げれば、勢子による鳥や獣の追込みや追出し、餌を使って誘き寄せたり、通り道に罟や罨み網を仕掛けたり、といったさまざまな技術があり、これらは漁獲技術のなかでもそのままに、あるいはやや形を変えて見られる行動制御の手法である。

ここで漁業とは水圏の生物生産を人間が利用する唯一の具体的な手段であり、植物採取や狩猟と並んで人類の歴史と同じだけの古くからの技術であった。しかし、植物採取が農業へ、そして狩猟業が今は産業としての牧畜業に取って代られたように、漁業生産技術も次の段階に進む可能性<sup>3)</sup>があり、その一つの方向として増養殖技術を包含した海洋牧場の構想があげられている。それは広い海洋の生産力を局地的に増大させるだけのものではあるが、少なくとも可能性を広げるものとして近年注目を集めている。また、漁獲(Fishing, Fish Capturing)という技術が21世紀に向けて収穫(Harvesting)という他の生物生産産業と同じ段階に進む道でもあろう。そのための技術発展の要となる魚類の行動制御技術について「光による制御技術」として話題提供し、魚類の行動研究につ

いての基礎をもとに、視覚による行動制御、光による行動制御の実験例、そして現在実際に漁獲技術として利用されている集魚灯漁業に見られる制御技術と論を進め、その上で今後の可能性追求のための問題点を考えてみたい。

#### I 動物の行動とは何か？

動物の行動とは外環境を刺激として認知する感覚作用であり、さらにその刺激に対する反応としての外環境への働きかけであると定義される。刺激に対する反応として行動が観察されるが、その場合、いわゆる動きを伴う反応だけでなく、体色の変化やホルモン分泌といった体内で起こる反応も含めて考えるべきである。刺激を受け入れる感覚器官としては視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚(皮膚感覚、側線感覚)が挙げられ、その機能として光受容体、音受容体、化学受容体、熱受容体、平衡受容体といった分類、あるいは遠隔受容器、近接受容器という分類がある。

次に、動物の行動を分類する際の考えかたとして、その動物が生れながらにもっている行動(生得的行動)と生まれてからの経験によって身に付けた行動(後天的行動、獲得的行動)の2つに分けることができる。Fig. 1に示すように生得的行動としては反射(Reflex)、走性(Taxis)、本能(Instinct)の3通り、獲得的行動としては学習(Learning)と知能(Intelligence)の2通りに分類される。ここで「本能」とは鳥類の渡りや魚類の回遊、あるいは営巣行動や繁殖行動といった複雑な行動をさす。しかし「本能」という用語については単に説明概念として使うのではなく、その仕組みを「刺激-一反応系」から明らかにし、生得的解発機構(Innate Releasing Mechanism)として解明する姿勢が大事である。また、動物の系統分類のなかで進化の低次の存在から高次へと進む過程で行動様式も発達し、例えば原生動物では反射と走性だけが見られ、魚類や爬虫類ではこれに本能や学習による行動も現われるが、知能行動は哺乳類のみに見られる行動とされる。一方、学習行動についてはさまざまな概念が包

平成3年7月5日受理

\* 東京水産大学 〒108 東京都港区港南4-5-7 (Tokyo University of Fisheries, Konan 4-5-7, Minato, Tokyo 108, Japan)

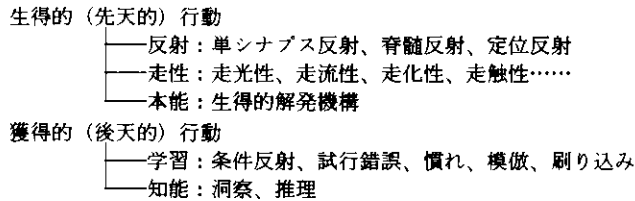


Fig.1 動物の行動分類

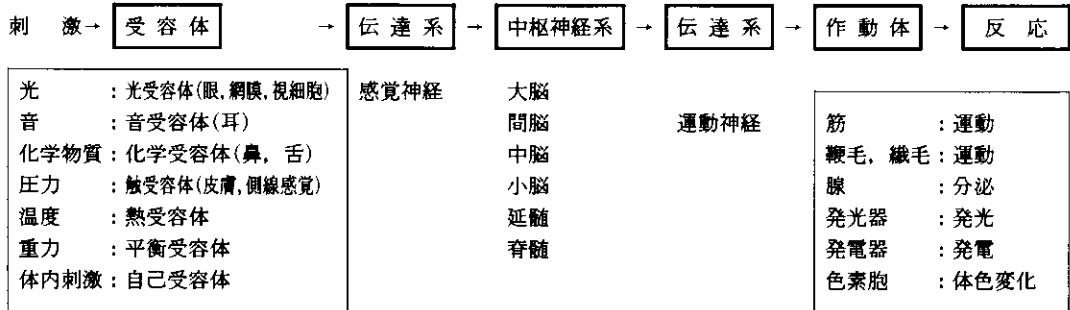


Fig.2 行動の機構としての刺激-反応系

含まれているために定義も複雑であるが、現在では条件反射、試行錯誤、慣れ、模倣、刷り込みの5つの行動様式に分類するのが一般的である。これらの動物行動の全体は Fig.1 のようにまとめらる。

## II 行動の機構とその制御

行動を「刺激-反応系」としてとらえる考え方のなかで、生体の内部で起こっている事象について、かつてはブラックボックスとして隠された状態にあった。言葉を換えれば、そのブラックボックスに近付かないように避けて通ってきたと言っても良い。しかし、現在の動物行動学の研究の主流はその内部の仕組みを解明することに向けられてきている。それは、刺激を受け取る感覚器官（受容器）の生理学であり、神経系による興奮の伝達過程、そして情報処理機構としての神経中枢の生理学、さらに反応出力系としての作動体の生理学である (Fig.2)。行動の制御も、これらの基礎を踏まえて、人為的な各種刺激を与えることでどういう反応を解発するか、あるいは、より大きな反応を解発できるかという問題に帰結されなければならない。

## III 行動制御の目的

それでは行動の制御とは何を意味し、その目的とするところはどこにあるのだろうか。漁獲技術としての行動制御について言えば、希望する水域に、希望する状態で魚群を導き、その行動特性や行動範囲を掌握しながら漁具の漁獲条件に適合させることである。各種漁具の漁獲過程を漁具刺激による対象生物の行動制御と考えるとき、その手法としては威嚇、誘導、遮断、陥穽の4つの要素に

まとめることができる<sup>49)</sup>。これを方法論として考えるとき、以下のような他の技術分野への応用が期待できる。

- ・資源管理への応用：魚種・魚体の選択漁獲技術
- ・養殖技術への応用：代謝、繁殖の制御、及び沖合生け簀養殖
- ・増殖技術への応用：種苗育成、放流の管理
- ・品質管理への応用：漁獲物鮮度保持、蓄養、活魚の技術

さらに、これらを総合した新分野として、海洋牧場による資源の育成、管理、収穫といった統合システム技術への応用も考えられつつある。

## IV 視覚による行動制御

光による成長や成熟の制御は、農業、園芸、そして畜産に始まり、今は魚類養殖でも一般的な技術となっている<sup>7)</sup>。一方、行動の制御という点では長い研究の歴史にもかかわらず実験的なレベルにあるものが多く、漁獲技術としての集魚灯の利用が日本で過度なまでに発達している現状のなかで、ギャップは大きい。そこで、まず視覚による行動制御、光による行動制御の実験例、そして集魚灯漁業に見られる制御技術と論を展開し、その上で今後の可能性追求のための問題点を考察することとする。

空気中と比べて水中では視覚情報の質、量は劣るといわれる。それでも餌を取り、仲間を見つけ、また外敵から逃れるといった生存のための活動を主に視覚機能に依存する魚種は多い。もちろんあらゆる場面で他の感覚器官も併用されており、その意味では視覚だけによる行動を分離して取り上げるのが難しいのは確かである。

しかし、網漁具や集魚灯、そして人工魚礁といった装置や施設が遮断、威嚇、駆集、誘導、誘引といった行動制御に実際に成功し、漁獲技術として採用されている。これらの手法の多くが視覚刺激としての機能に多かれ少なかれ依存していると考えるのは妥当なところであろう。

例えば、障害物に対する反応として魚は当然それを回避する。その際にUターンをするのか、抜け道を探すのか、それとも障害物に添って移動するのかという問題がある。これは定置網の垣網に対する行動のモデルといえるが、最初に障害物の存在を感知するのは聴覚によるものと考えられている。視覚が機能するのは、水中では好条件下であっても100mを越えない筈であり、逆に言えばかなり接近した状態で始めて視覚による反応が見られる。定置網の垣網について、実際に垣網で遮断し、そして身網方向に誘導できるのは来遊群のうち数割とされるが、それでも漁獲手段としては有効な行動制御技術であり続けてきた。これが刺し網の場合であれば、障害物に気づかずに刺さり、あるいは絡んでしまうことで畏にかけられていることなる。

気泡幕について、聴覚、側線感覚といった機械的感覚と視覚を同時に刺激し、行動の遮断や威嚇による駆集効果が認められている。視覚の機能しない夜間の実験や、盲目魚でも気泡幕に反応することから機械的感覚が主に働くと考えられるが、それでも視覚の重要性を否定することはできない。

視覚による行動制御のなかで最も研究の進んでいる分野として視覚運動反応 (Optomotorreaction) が挙げられる。これは網膜上に移動する視覚目標を保とうとする反応で、流れのなかでの定位、あるいは移動目標に対する追従反応として水槽のなかでも簡単に観察できる。そのため、群れ行動、遊泳行動の研究といった分野で利用され、また網内での行動としてトロール漁獲過程の解析や、さらにこの反応をもっと積極的に応用して魚群誘導の手段とする研究が行なわれた<sup>9)</sup>。

## V 光による行動制御の実験例

光によって魚群を集めることを目的とした実験は数多く行なわれている。また、どのようにして光に集まるのか、そしてどのような明るさの条件に集まるのかを解明するための実験はそれにもまして多い。これらは光の集魚過程を問題とするものではあったが、実際には漁獲技術の方が先行しており、新しい光源が導入されるとき効果判定としての研究が多かった。それとは別の観点の研究としては、光による魚群誘導の問題がある。それはFig. 3のように定置網の垣網に光源を配置して、それを順次点灯、消灯して魚群を身網方向へ誘導しようとする考えであった<sup>9, 10)</sup>。これは集魚と誘導の2つの行動制御を組合せたもので、実際の漁業での例としては旋網や敷



Fig.3 集魚灯配列による定置網への魚群誘導<sup>9, 10)</sup>

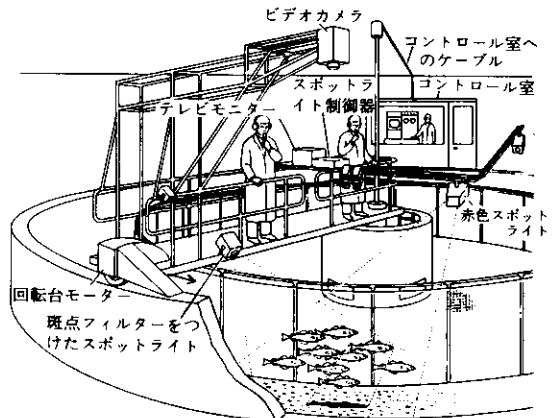


Fig. 4 移動照射模様による魚群行動の制御<sup>14)</sup>

き網に対して複数の灯船の集魚結果を集約するためにゆっくりと移動する方法が取られる<sup>11)</sup>。ここで検討しなければならないのは静止光と移動光の刺激としての違い、そしてある間隔を置いて設置された光源間で点灯、消灯によって群れの移動を行なわせることの意味であろう。この考えで水槽内で光源の移動<sup>12)</sup>、あるいは光の点滅によるみかけの移動<sup>13)</sup>を刺激として魚の反応を調べた実験もある。また、同じく水槽実験で、Fig. 4のようにあるパターンの模様を底面に照射し、それを移動させることで視覚運動反応による追従遊泳を解発することが可能であり、遊泳能力や群れ行動の研究を目的として利用さ

れている<sup>14)</sup>。

これらの集魚、誘導のための実験とは異なり、威嚇刺激により遮断、あるいは駆集を試みた研究も多い。これらは振り回し光束<sup>15)</sup>、移動光幕<sup>16)、17)</sup>、断続光<sup>18)</sup>、ストロボ光<sup>19)、20)</sup>など短い周期での明暗の差を刺激として与えるものであり、詳細な実験的検討が行なわれている。この応用性としては水域の遮断や、発電所等の用水口への接近防止といった分野で期待されている。この他に、実際の漁業現場での実験として、トロールの網口に光源を付け、漁獲組成の変化をもとに魚種別の反応を調べた実験も行なわれている<sup>21)</sup>。

このような光を刺激として用いた行動実験の際にもっとも問題となるのは、光条件による水中の明るさの把握である。過去の実験の多くはLux照度(Illuminance)による測定を行っているが、これはヒトの明所視の視感度特性に対応した測光量であり、波長別に放射照度(Irradiance,  $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ )を測定するべきであるとの指摘もなされている<sup>22)</sup>。しかし、実際には計測機器の問題、並びに現場での測定の困難さ等から分光放射照度の測定を行動との関連で実施した例は少ない。その意味で、明るさの目安としてのLux照度の測定は依然として人気があるが、この場合にも $10^{-3}\text{Lux}$ 以下の暗い条件についてはLux単位で測定することに実際の意味は認められない。

## VI 集魚灯漁業の魚群制御技術

集魚灯漁業<sup>23)、24)</sup>の歴史は大変古く、篝火、松明の時代から現在の電気照明までの道程は非常に長く、先端技術を導入しようとする先人達の苦勞がしのばれる。戦後、漁船の動力化が進んでからは光力増大競争が進み、その過程で白熱灯から放電灯への転換が見られた。

集魚灯の目的は漁具の作用範囲へ対象生物を集めることで、遠方、あるいは深層から船体近傍へ短時間内にという必須条件がある。各種の集魚灯利用漁業のなかではイカ釣りや旋網、敷き網では光の利用方式が比較的単純であり、船上灯あるいは水中灯で船体周辺に集め、滞留させる。これに対してサバ跳ね釣りでは舷側すぐ近くに集めて釣り上げるために撒き餌も併用しており、これが進んで手網抄いや棒受網による漁法が使われる。光の利用という意味で最も興味ある漁法はサンマ棒受網で、その集魚灯配置の例をFig. 5に示した。このように探照灯、集魚灯、誘導灯、捕獲灯(赤灯)と機能分化した光源を用いて、Fig. 6のように集魚舷に集めた群れを投網舷に誘導するという行動制御をおこなっている<sup>25)</sup>。

このような集魚灯技術の発達については漁業者の努力によるところが大きく、その技術的要求が照明装置の開発を推進し、あるいは新型光源の導入を促進してきたとの趣も強い。しかし、現在実用的であるといってもそこに科学的な裏付けが十分にあるわけではない。例えば、

イカ釣りや旋網で操業過程に応じて集魚灯の明るさを調節し、より船体近くに、長時間滞留させるための調光装置が普及しつつある。このように現状の技術について将来の質的転換を図るためには、水中での光の特性とそれに対する魚類の反応、特に視覚生理学から見た網膜順応状態や神経興奮の過程といった基礎を確立し、その上で集魚灯を副漁具として考えて配置や操作方法を主漁具との関連で検討する必要性は大きい<sup>25)、26)</sup>。

## VII 行動制御の方法論と応用

行動制御の基本は「刺激-反応系」の解明にあり、魚類の行動について「魚はどうして……?」の問題提起が不可欠である。これは現象把握に対する基本的な問いかけであり、刺激の意味と反応の意味を考えることである<sup>28)</sup>。現在注目を集めている行動制御のアイデアはほとんどが戦後の早い段階で提唱され、試みられてきたものといっても過言ではない。しかし、残念なことにその当時は技術がそれらのアイデアを支えきれなかった。そして21世紀に手の届こうという今の時代に、手近に利用できる周辺技術が開花している。しかし、単にハード技術の発達に乗っただけの行動制御技術の展開は、「刺激-反応系」の基礎が欠如した形での発達として、漁獲技術がたどったと同じ袋小路に陥る可能性が高い。この方向を避けるためには、いわゆる「魚の行動」からの卒業、すなわち、行動生物学を基礎とした刺激についての理念と、行動の種特異性の科学的把握が必要なのは言うまでもない。

特に漁獲技術との対比で新しい分野の行動制御技術を考えるとき、漁業のなかではさまざまな規模の漁法で、さまざまな魚種を対象として、毎日の繰り返しのなかで技術が確立され、普遍化され、そして洗練されてきたこ

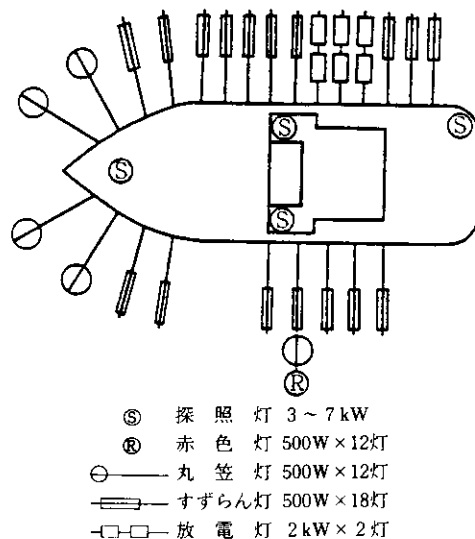


Fig. 5 64トン級サンマ漁船の集魚灯配置例

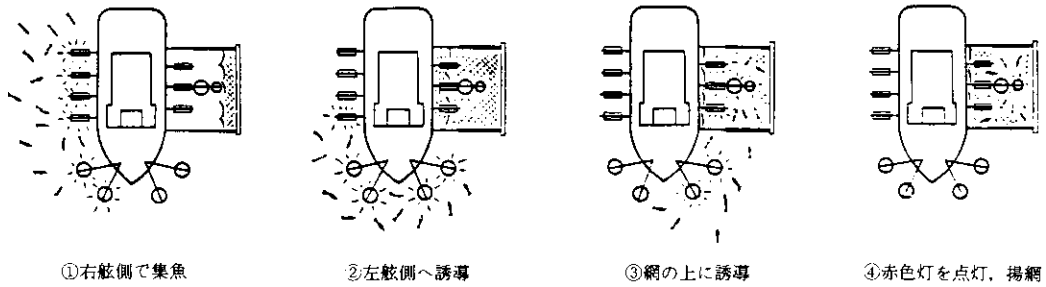


Fig. 6 サンマ棒受網漁法における集魚灯による魚群の誘導

とを忘れてはならない。これに相当するだけの実験の繰り返しを実行することは実際には不可能といつてよい。ならばこそ、行動学を基礎とした理論的な詰め込みの必要性は大きい。

それでは、具体的な行動制御の方法論としてどのようなものが考えられるだろうか。それは、行動の2つの方向性、すなわち、ストロボ光や断続光といった威嚇刺激による発散性の行動と、集魚灯のような誘引刺激による収束性の行動をまず解発することであり、次いで方向性のある行動を遮断する技術、あるいは罾にかける形の陥穽技術を組合せて考えることとなろう。特に行動遮断については漁獲技術を海域遮断技術に発展させる可能性が最も高く、網地のもつ物理的遮断作用と感覚的遮断作用を刺激反応系から応用し、無定形スクリーンやバリアーへの発展を期待したい。そのためには、幾つかの刺激を複合させた方式で用いること、そして威嚇、誘導といった他の行動制御技術との併用を考える必要がある。

ここで、研究の基礎としての水槽実験を実海域での実用化に結びつけるためには、行動の種特異性、機能集合体としての群れの行動特性を考慮し、さらに時間・空間スケールについての普遍化をめざす必要がある。これとは逆に魚種による反応性の違いを魚種選択へ、成長段階による違いを魚体選択性へ発展させることも夢ではないだろう。また、行動制御がしばしば実験室レベルでしか成立しない多くの理由は完全性を追求しすぎるからであり、漁業のように粗放的に、1割が期待どおりに行動してくれれば良しとする考えも必要で、それで満足できるシステムの構築をめざすべきであろう。このためにはハードを開発するための技術力に溺れず、漁業の歴史に培われた行動制御技術の方法を理解し、これをどのように発展させて行くことができるかにかかってくるであろう。

#### 文 献

- 1) 可兒弘明：鵜飼，中公新書，pp. 180, 1966.
- 2) A. von Brandt: Fish catching methods of the world (3rd ed.). Fishing News Books Ltd., pp. 25-33, 1984.
- 3) 井上喜洋：“漁”の近代化への模索，研究ジャー

ナル，12(2)，pp.9-14, 1989.

- 4) 今村 豊：漁法学Ⅰ，日仏海洋学会誌，13(4)，pp. 183-190, 1975.
- 5) 今村 豊：漁法学Ⅱ，日仏海洋学会誌，14(1)，pp. 31-46, 1976.
- 6) 今村 豊：漁法学Ⅲ，日仏海洋学会誌，14(2)，pp. 85-95, 1976.
- 7) 照明学会：光放射の応用(Ⅰ)，照明普及会，pp. 33-104, 1985.
- 8) 井上 実：視覚運動反応と魚類の行動，日仏海洋学会誌，13(2)，pp. 79-95, 1975.
- 9) 佐々木忠義：水中光源に関する研究，日本海洋学会誌，5(2-4)，pp. 1-14, 1950.
- 10) T.Sasaki: The use of light attraction for traps and setnets, Modern Fishing Gear of the World, Fishing News Book Ltd. pp. 556-558, 1959.
- 11) 井上 実：8そう張網操業中に観察される集魚灯による魚群の誘引，日本水産学会誌，29(19)，pp. 925-929, 1963.
- 12) 井上 実：円形水槽による魚の遊泳速度の測定—Ⅲ. 光によるカタクチイワシの遊泳速度，日仏海洋学会誌，8(2)，pp. 69-77, 1970.
- 13) 有元貴文，柴 宏有，井上 実：魚の視覚運動反応と漁法—Ⅴ. 点滅光に対するニジマスの行動，東京水産大学研究報告，66(1)，pp. 37-46, 1979.
- 14) B.L.Partridge：魚はどのように群れを維持するか，サイエンス，1982(8)，pp. 28-38, 1982.
- 15) 黒木敏郎・中馬三千雄：漁業用嫌忌灯光の研究—Ⅰ. 振廻し光束について，日本水産学会誌，18(10)，pp. 26-29, 1953.
- 16) 高橋 正：移動光膜の魚類行動に及ぼす影響について，日本水産学会誌，44(8)，pp. 869-874, 1978.
- 17) 宮崎千博：灯火と騒音の魚群の行動に及ぼす影響，水産海洋研究会報，32，pp. 100-107, 1978.
- 18) 小池 隆：断続光に対するマアジの行動反応に関する研究，三重大学生物資源紀要，2，pp. 23-53, 1989.
- 19) P.H.Patrick・A.E. Christie: Responses of fish to a strobe light/air-bubble barrier, Fisheries Research, 3, pp. 157-172, 1985.
- 20) D.R.Sager・C.H.Hochtt: Estuarine fish responses to strobe light, bubble curtains and strobe light/bubble-curtain combinations as influenced by water flow rate and flash frequencies, Fisheries research, 5, pp. 383-399, 1987.
- 21) M.R.Clarke・P.L.Pascoe: The influence of an electric

- light on the capture of deep-sea animals by midwater trawl. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, 65, pp. 373-393, 1985.
- 22) 稲田博史：いか釣り操業船下の水中分光放射照度について, 東京水産大学研究報告, 75(2), pp. 487-498, 1988.
- 23) 佐々木忠義：集魚灯, イデア書院, 東京, 1953.
- 24) Ben Yami: Fishing with light, Fishing News Books Ltd., London, pp. 121, 1976.
- 25) 有元貴文：魚類の生態からみた漁法の検討-14 サンマと集魚灯, 水産の研究, 4(1), pp. 33-40, 1985.
- 26) 有元 貴文：魚類の生態からみた漁法の検討-23 魚はどうして光に集まるのか(上), 水産の研究, 7(6), pp. 33-36, 1988.
- 27) 有元 貴文：魚類の生態からみた漁法の検討-23 魚はどうして光に集まるのか(下), 水産の研究, 8(1), pp. 39-42, 1989.
- 28) 有元 貴文：魚類の生態からみた漁法の検討-20 魚群行動学研究事始め, 水産の研究, 6(3), pp. 35-38, 1987.

本報文は、平成2年11月6日に開催された平成2年度日本水産工学会シンポジウム「水産増養殖への新技術導入の現状と問題点」で話題提供された内容を取りまとめたものである。