

小型水槽内における気泡幕の魚類駆集効果

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者	秋山, 清二 有元, 貴文 井上, 実
巻/号	57巻7号
掲載ページ	p. 1301-1306
発行年月	1991年7月

小型水槽内における気泡幕の魚類駆集効果^{*1}

秋山清二, 有元貴文, 井上 実

(1990年12月13日受付)

Fish Herding Effect by Air Bubble Curtain in Small Scale Experimental Tank^{*1,*2}

Seiji Akiyama,^{*3} Takafumi Arimoto,^{*3} and Makoto Inoue^{*3}

In order to develop a new method for the control of fish behaviour, the authors observed the response of fishes to an air bubble curtain by laboratory experiments. An annular trough set up in a small scale test tank was intercepted by the air bubble curtain, which was rotated along the trough. The response toward the air bubble curtain of Japanese parrotfish *Oplegnathus fasciatus*, jack mackerel *Trachurus japonicus*, and threeline grunt *Parapristipoma trilineatum* were observed with the variation of moving speed (11.0-31.7 cm/s) and air flow (3-12 l/min).

The results show the typical herding effect of the moving air bubble curtain, as the fish keep swimming in escaping from the bubbles with a possible herding time of one hour in some specific conditions. The herding effect, however, varies with experimental species and conditions, and is lowered with the habituation of fish kept in an air bubbled tank.

近年、光^{1,2)} や電流³⁻⁵⁾ 音響⁶⁾ などの人為的刺激を以て魚群の行動を制御する試みが盛んに行われている。これらの試みは網地に代わる新たな行動制御手法の確立を意図するものであり、その一手段として気泡幕の利用についても検討がなされてきた。気泡幕とは水中に気泡を幕状に発生させたものであり、1960年代初頭にはこれをシン漁業に利用した際の試験結果が Smith^{6,7)} によって報告されている。以降、気泡幕の魚群制御効果に関する研究は、海洋牧場などの海域遮断⁸⁾ 漁具としての利用⁹⁻¹⁴⁾ 各種用水への魚類の迷入防止^{15,16)} などを目的として幅広く行われてきた。

しかし、これらはいずれも研究段階あるいは構想段階の域を脱し得ず、実用化に至った事例はみられない。これは、Smith 以降の研究の多くが水槽内での基礎的な実験にとどまり、実用化に直結する実際的な検討がなされなかったこと、あるいは、その用途を長時間にわたる魚群の行動遮断においたことに起因するものと考えられる。気泡幕は網地のように絶対的な遮断効果を有するものではなく、時間経過にともなう魚類の慣れによってその効果が減退するという問題は避けられない。

そこで本研究では、短時間内で目的を達成し得る用途での気泡幕の利用を想定し、気泡幕を移動させて魚類に積極的に働きかけた場合の駆集効果について検討を行うこととした。これに基づき、著者らは実海域での気泡幕の駆集効果を確認することを目標として、これまでに小型水槽内での基礎実験、大型水槽内での応用実験、さらに定置網箱網内での実用化に関する実験を実施してきた。ここではまず、魚類が移動する気泡幕に対して示す基本的な行動を把握することを目的として行った小型水槽内での魚類駆集実験の結果について報告する。

実験方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。実験には直径 1 m、高さ 1 m の透明アクリル製円型水槽を用い、水槽内には黒色の硬質ポリエチレン製網地を用いて円型水路を作成した。水路は外径 90 cm、内径 40 cm、幅 25 cm のドーナツ型とし、水槽底面との間に 10 cm の間隙を設けて設置した。この間隙に外径 10 mm、内径 6 mm、全長 30 cm の気泡発生管 (ユニホース製、空気分散器 FT 45) を水路と直行する状態で配し、駆動装置により水槽中心点を

*1 本論文の要約は平成 2 年度日本水産学会春期大会において発表した。

*2 気泡幕による魚群の行動制御に関する研究—I (Studies on Fish Behaviour Control by Air Bubble Curtain-I)

*3 東京水産大学海洋生産学科 (Department of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108, Japan).

*4 黒木敏郎: 昭和 53 年度科学研究費補助金研究成果報告書, 音響による魚類の大規模制御駆集効果の研究, 1979, pp. 1-189.

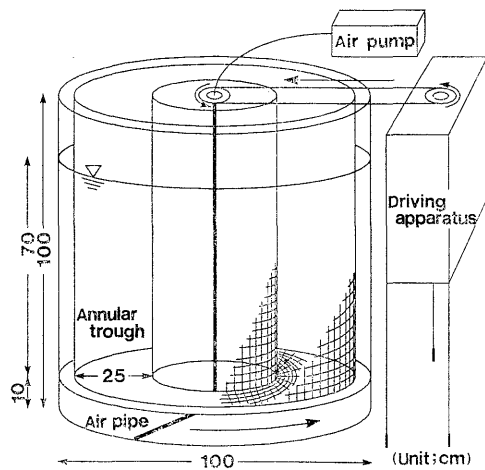


Fig. 1. Experimental apparatus.

軸とする回転運動をさせた。ここで用いた気泡発生管は、従来の穿孔した細管とは異なり、素材にスポンジ状の特殊ゴム材料が使われているため、管全体から微細な気泡を隙間なく均一に吐出させることができる。また、気泡発生管を実験水路の外部に配したことにより、発生管自体の動きによる実験魚への威嚇効果を抑えることができた。気泡発生管への送気は最大流量 13 l/min, 最大圧力 1.0 kgf/cm² のエアポンプ (レイシー製, AP-115RN) で行った。実験装置は暗室に設置し、上部より 40 W 白色蛍光灯 4 器で照明することにより水槽内の明るさを均一に保った。実験時の水深は 80 cm とし、このときの水路底面における水中照度は約 300 lx であった。

実験魚には千葉県館山湾内の小型定置網で採捕したインダイ *Oplegnathus fasciatus* (全長 101-128 mm), マアジ *Trachurus japonicus* (88-113 mm), イサキ *Parapristipoma trilineatum* (161-187 mm) を用いた。実験魚は採捕後、流水式の飼育水槽 (1400×600×400 mm) に搬入し、二日間以上飼育したものを実験に供した。当該期間中は気泡に対する慣れを防止するため、エアレーションを施さずに飼育した。ただし、インダイについては気泡に対する慣れが駆集効果に及ぼす影響を検討する目的で、二種類の飼育状態を設定した。すなわち、一方は上記条件のもとで実験魚を飼育し、他方は吐出力 12 l/min の気泡幕で中央部を遮断した水槽内で飼育を行い、実験魚がこれを自由に通過して遊泳するようになった時点で実験に供した。ここでは前者を対照群、後者を気泡飼育群とする。

実験は次の手順で行った。まず水路に実験魚を 3 尾收容し、行動が安定するまで数分間静置した。次に気泡発生管を停止した状態で送気を開始し、気泡幕によって水路を遮断した。送気開始直後は実験魚の行動が一時的に

不安定となるため、送気したままの状態再度 60 秒間の静置時間を設けた。その後、気泡発生管を任意の方向へ移動させ、気泡幕に対する実験魚の行動を水槽側面から目視により観察した。1 回の実験は実験魚 3 尾のうちいずれか 1 尾が気泡幕を完全に通過した時点で終了とし、気泡幕移動開始時から気泡幕通過時までの経過時間を駆集時間とした。ただし、本実験は短時間内で目的を達成し得る用途を想定して行ったので、1 回の実験時間は最長 60 分までとした。したがって、実験時間内に実験魚が気泡幕を通過しなかった場合には駆集時間 60 分とした。

本実験では気泡幕の移動速度ならびに気泡の吐出量を段階的に変化させ、各条件下での駆集効果を比較した。この場合、二種類の条件のうち一方を固定し、他方を変化させて実験を行うものとした。ここで、気泡幕の移動速度は水路中央における気泡発生管の移動速度とし、11.0, 16.3, 22.5, 31.7 cm/s の 4 段階に、また気泡の吐出量は気泡発生管への送気量とし、3, 6, 9, 12 l/min の 4 段階とした。このとき、気泡発生管 1 cm 当りの吐出量はそれぞれ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 l/min となる。実験に先立ち実施した予備観察の結果、各実験魚種において平均的に良好な駆集効果が得られた条件は、吐出力 9 l/min, 移動速度 22.5 cm/s であった。したがって、実験は吐出力 9 l/min のもとで移動速度を変える実験を上記 3 魚種について、また移動速度 22.5 cm/s のもとで吐出量を変える実験をインダイとマアジの 2 魚種について行った。なお、吐出量を変える実験については、予備観察の際にマアジとイサキの結果がよく似た傾向を示したため、マアジについての実験結果を中心にまとめることとした。

実験はそれぞれの魚種ごとに各条件のもとで 9 回ずつ実施した。この際、同一個体の使用は 3 回以下にとどめ、また連続して実験に供することのないように配慮した。駆集効果の優劣は 9 回の試行によって得られた駆集時間ならびに駆集距離 (駆集時間×気泡幕の移動速度) の最大値と平均値によって評価した。

実験は 1989 年 10 月から 12 月に東京水産大学坂田実験実習場で行った。実験期間中の水温は 16.5~18.3°C であった。

結 果

気泡幕に対する実験魚の行動 水路に実験魚を收容したのち、3 尾が群れを成して安定した行動を開始するまでに各魚種とも 5~10 分間を要した。この間の行動は魚種により異なり、インダイは底層部を 10 cm/s 程度の速度でゆっくりと周回し、マアジ、イサキは 3 尾がまとまった状態で任意の箇所定位した。

気泡発生管を停止した状態で送気を開始すると、実験

魚は瞬間的に群れを分散して気泡幕から遠ざかるが、すぐに再び成群して遊泳あるいは一箇所に定位するようになった。それまで水路内を周回していた場合は、水路を遮断している気泡幕の直前で遊泳方向を逆転し、これを通過することはなかった。ただし、インダイの気泡飼育群に対する遮断効果は全く認められなかった。

送気開始 60 秒後より気泡幕の移動を開始すると、いずれの魚種も気泡幕に対して逃避行動を示し、気泡幕に駆集される状態でその前方を遊泳した。実験魚は気泡幕の移動速度とほぼ同じ速度で遊泳したが、両者の間隔は時間の経過とともに縮まり、気泡幕を通過する直前には尾鰭を気泡幕に接触させて遊泳する状態が続いた。気泡幕通過時の行動はその移動速度により異なり、速度が遅い場合には気泡幕前方で急速に遊泳方向を転じて頭部から通過し、逆に速度が速い場合には遊泳方向を変えずに遊泳速度を減じ、気泡幕に追いつかれる状態で尾部から通過する割合が多かった。また、実験魚の遊泳層は通常底層付近であったが、気泡幕の移動が高速となり気泡幕が後方に大きく傾斜した状態のときには、実験魚はこの斜面に沿って上層部へ浮上して遊泳を続け、その後気泡粒の分布が疎らな水面付近から通過することもあった。なお、いずれの魚種も気泡幕の発生を止めると水路内を自由に遊泳し、気泡発生管自体の移動による影響を受けることはなかった。

移動速度と駆集効果 気泡幕の移動速度による駆集時間の変化を Fig. 2 に示す。駆集効果はインダイよりもマアジやイサキで顕著にみられた。駆集時間の変化は魚種

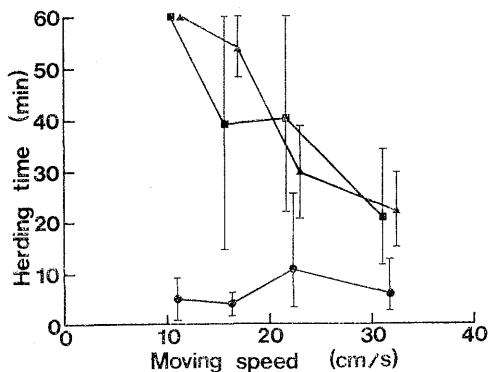


Fig. 2. Variation of herding time according to moving speed of air bubble curtain with constant air flow of 9 l/min. Vertical bars and symbols indicate range (max.-min.) and mean values of following species.

- ; Japanese parrotfish *Oplegnathus fasciatus* (Control group)
- ; Jack mackerel *Trachurus japonicus*
- ▲; Threeline grunt *Parapristipoma trilineatum*

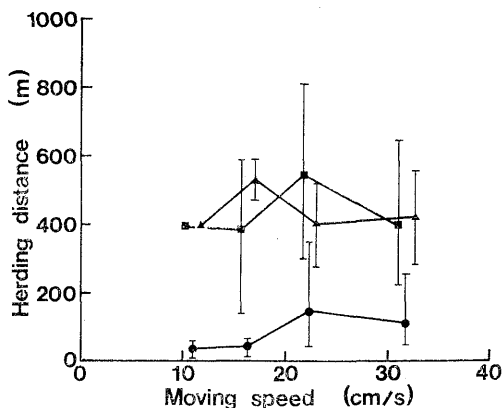


Fig. 3. Variation of herding distance according to moving speed of air bubble curtain with constant air flow of 9 l/min. Vertical bars and symbols indicate range (max.-min.) and mean values of following species.

- ; Japanese parrotfish (Control group)
- ; Jack mackerel
- ▲; Threeline grunt

により異なり、インダイでは高速時において駆集時間がやや長くなる傾向がみられた。一方マアジやイサキでは低速時ほど駆集時間が長く、最低速の 11.0 cm/s のときには全ての試行において 60 分間の駆集が可能であった。

ここでは、気泡幕の駆集効果を駆集時間で表したが、これに気泡幕の移動速度を乗じて駆集距離を求め、移動速度との関係を示すと Fig. 3 のようになる。マアジ、イサキの駆集距離は気泡幕の移動速度に関わりなくほぼ一

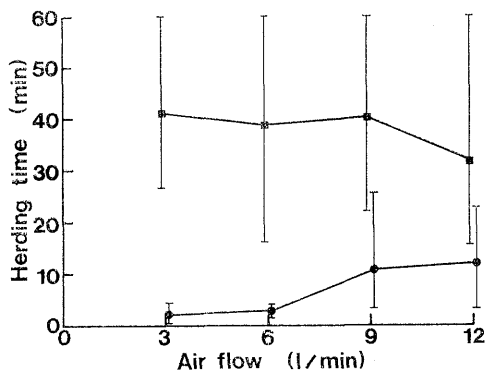


Fig. 4. Variation of herding time according to air flow with constant moving speed of 22.5 cm/s. Vertical bars and symbols indicate range (max.-min.) and mean values of following species.

- ; Japanese parrotfish (Control group)
- ; Jack mackerel

定であり、その平均値は概ね 400~600 m の範囲内にある。すなわちこれらの魚種では、気泡幕の移動速度が遅い場合には駆集効果が長時間持続し、逆に速度が速い場合には効果が短時間で消滅したが、気泡幕に駆集されて遊泳した距離は速度に関わりなくほぼ一定であった。

吐出量と駆集効果 気泡の吐出量による駆集時間の変化を Fig. 4 に示す。インダイでは全般的に駆集効果が低いものの、吐出量の増加にともない駆集時間が長くなる傾向がみられた。これに対してマアジでは全般的に駆集効果が高く、いずれの吐出量においても 9 回の実験での最長駆集時間は 60 分に達した。また、吐出量の増加による駆集効果の変動は小さく、3~9 l/min では平均 40 分前後まで駆集効果が持続した。しかし吐出量が 12 l/min に達すると気泡幕周辺の上昇流が強くなり、実験魚がこれに巻き込まれて通過することが多く、駆集効果が

わずかながら低下した。

慣れと駆集効果 インダイの気泡飼育群が飼育水槽内の気泡幕を自由に通過して遊泳できるようになるまでには 2~3 日間を要した。気泡飼育群は実験水路に収容した後も静止状態の気泡幕に対して全く嫌忌的な反応を示さず、60 秒間に 1~3 回の割合で気泡幕を通過して遊泳した。しかし気泡幕の移動を開始するとこれに対し逃避行動を示し、短時間ではあるが駆集される状態で遊泳を続け、駆集時間は最長 13 分に達した。気泡飼育群と対照群の駆集効果について駆集時間をもとに比較した結果を Fig. 5 に示す。気泡幕の移動速度を変えた場合および気泡の吐出量を変えた場合のいずれにおいても、気泡飼育群と対照群の駆集時間はほぼ同様の傾向で変動している。しかし気泡飼育群の駆集効果は対照群に比べて有意に低く、特に高速時ならびに吐出量が多い条件下では両者の差が拡大した。以上より、気泡に対する慣れによって駆集効果が低下することが確認された。

考 察

気泡幕の駆集効果について調べるため、インダイ、マアジ、イサキを用いて小型水槽内で実験を行った。その結果、いずれの魚種も気泡幕に対して逃避行動を示し、顕著な駆集効果が認められた。しかしその効果は気泡幕の移動速度や吐出量により異なり、また魚の慣れによって減退した。これらの結果について各項目ごとに考察する。

最初に気泡幕の移動速度について述べる。気泡幕の駆集効果はその移動速度により大きく異なるため、これを運用漁具として用いる場合には対象魚種に見合った適正な移動速度を求めることが必要となる。この際に重要な要素となる魚類の遊泳速度について、Beamish¹⁷⁾ は巡航速度は体長の 2~3 倍、突進速度は体長の約 10 倍であるとした。巡航速度より高速で遊泳する場合には時間の経過とともに筋肉に疲労が生じ遊泳不能におちいる。本実験における気泡幕の移動速度と実験魚の全長 T. L. (cm) との関係は、インダイで 0.9~3.1 T. L./s、マアジで 1.0~3.6 T. L./s、イサキで 0.6~2.0 T. L./s であり、全長を体長に換算するとこれらの値はさらに大きくなる。しかし、イサキでは気泡幕の移動速度が巡航速度を超えることはなく、またインダイとマアジについても巡航速度を超えるのは気泡幕の移動速度が最も速い 31.7 cm/s のときに限られた。すなわち、気泡幕の移動速度が対象魚の巡航速度を超える場合には、気泡幕通過の原因が疲労の蓄積によるものとも推測できるが、そのほかの場合については疲労によるものではなく、それ以外の要因で気泡幕を通過したと考えられる。ただし、本実験で用いたような狭小な水路内では、実験魚の正常な遊泳行

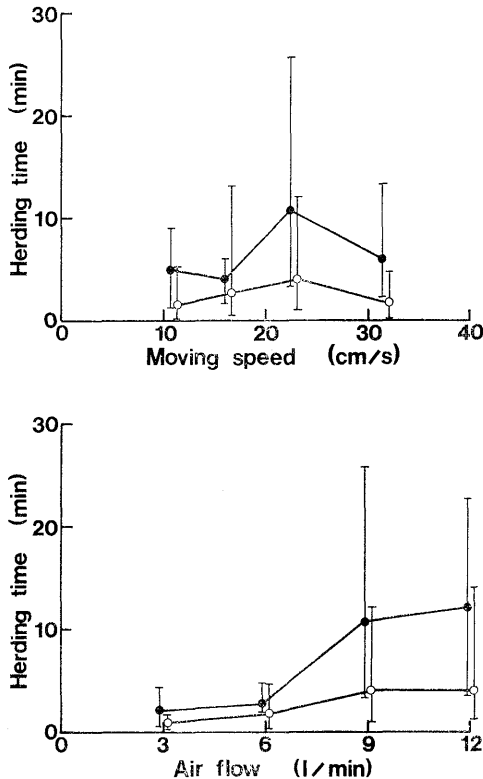


Fig. 5. Comparison of herding time in relation to the keeping condition for Japanese parrotfish. Upper and lower figures show the variation of herding time according to moving speed and air flow, respectively. Vertical bars and symbols indicate range (max.-min.) and mean values of following conditions.

●; Control group.

○; Habituated group to air bubbles in a keeping tank.

動が妨げられる可能性もあり、この点については今後、空間的規模を拡大した実験により確認する必要がある。

また、気泡幕を移動させて用いる場合には、流水抵抗に伴う形状変化が駆集効果に大きな影響を与えることが考えられる。気泡幕が十分な効果を発揮するためには、濃密な気泡粒によって隙間のない完全な幕を形成する必要がある。しかし気泡幕を高速で移動させた場合にはこれが後方に大きく傾斜し、上層部では気泡粒の分布が疎らになるため完全な幕の形成が困難になる。流水中の気泡幕の形状について述べた小林ら¹³⁾の報告によると、流速が 4.5~12.5 cm/s、気泡発生管 1 cm 当りの吐出量が 0.13 l/min または 0.26 l/min のときに、吹かれ角（静水中での気泡幕の上昇方向と流水中での気泡幕の上昇方向とのなす角）は約 25~35° であった。本実験では気泡幕の移動速度が 31.7 cm/s、気泡発生管 1 cm 当りの吐出量が 0.4 l/min のとき、停止時に対する傾斜角度は 66° に達した。刺激源の移動速度と魚類の遊泳速度について、黒木* は「遊泳魚群よりも高速度で海中を移動する光源、音源はその魚群に大きな威嚇効果をもたらす」という仮説を述べている。ここで、魚群の遊泳速度を巡航速度と解釈すると、例えば体長 30 cm の魚を駆集するためには少なくとも 60~90 cm/s 以上の速度で気泡幕を移動させる必要がある。しかし運用時の気泡幕の形状を考慮すると、このような条件下での気泡幕の利用は困難といえよう。このように気泡幕の形状変化はその移動速度を決定するうえでの限定要因となる可能性が大きい。

次に気泡の吐出量について検討する。気泡幕によって魚群の行動を制御し、これを漁業に利用するためには、対象魚に応じた適正な気泡吐出量を決定する必要がある。川村ら¹⁸⁾の生理学的研究によると、魚類が気泡幕からの刺激を知覚する感覚は視覚と側線感覚であるとされる。ここで、気泡吐出量の増大はこれらの感覚に対する刺激量の増大をもたらすものと考えられる。また、しきい刺激と最大刺激の間においては刺激量の増大にともない反応量も増大することが知られている。¹⁹⁾ 従って、この間においては気泡吐出量の増大にともない駆集効果が高くなることが期待される。本実験ではインダイでこのような傾向がみられたが、マアジでは吐出量が少ない場合にも駆集効果が高く、また吐出量を増しても駆集効果に変化はみられなかった。これは両者の刺激に対する感受性の相違を示唆するものである。すなわち、インダイでは本実験の吐出量範囲がしきい刺激と最大刺激の間に相当し、マアジでは吐出量範囲が最大刺激を超えていたものと考えられる。しかし、このような刺激と反応の関係は実験環境に大きく影響されることが考えられるた

め、漁業への応用という観点からは、より実際に即した実験の結果をもとに再検討する必要があると認められる。また過剰な吐出量による駆集効果の低下については江波^{9,10)}も報告しており、適正な吐出量を求める際には気泡幕周辺の流れの状況と対象生物の遊泳能力について十分に吟味する必要がある。

最後に気泡幕に対する魚の慣れについて考察する。慣れ (habituation) とは、同じ刺激が繰り返し与えられるとき、反応の大きさがしだいに減少し、ついには反応が消失する現象をいう。¹⁹⁾ 気泡幕によって魚群の行動を遮断し海洋牧場等からの魚類の逸脱を防ぐ構想があるが、このためには半永久的な時間的規模で遮断効果を持続させる必要がある。従来の網地による遮断法は目が適正であれば対象生物に慣れが生じても目的は達成される。しかし気泡幕による遮断法は刺激に対する対象生物の反応を利用する感覚的遮断法²⁰⁾であるため、網地による物理的遮断法と比べ効果の持続性は期待できない。気泡幕に対する慣れの形成を抑制するためには、刺激の質的、量的な変化を対象生物に与えることが必要である。本実験における気泡飼育群は、長時間にわたる同一刺激の供与により気泡幕に対する反応が低下あるいは消失し、気泡幕を自由に通過して遊泳するようになったものと考えられる。しかし一旦消失した気泡幕の遮断効果が、気泡幕を移動させることにより駆集効果として再現したことは、静止状態の気泡幕と移動状態の気泡幕とでは、刺激としての質に違いがあることを示唆するものである。

以上、小型水槽内における気泡幕の魚類駆集効果について報告したが、これを実際の漁業へ応用するためには解決すべき課題が多く残されている。今後は本実験の結果を踏まえ、時間的・空間的規模を拡大させた実験を実施すると共に、漁業現場への応用方法について具体的な検討を進める必要がある。

文 献

- 1) D. R. Sager, C. H. Hocutt, and J. R. Stauffer, Jr.: *Fish. Res.*, **5**, 383-399 (1987).
- 2) 小池 隆: 三重大生物資源紀要, **2**, 23-53 (1989).
- 3) P. A. M. Stewart: *Fish. Res.*, **1**, 3-22 (1981).
- 4) 前畑英彦, 荒井造成, 大工博之, 大谷誠二, 浜田盛治: 水産土木, **24**, 1-9 (1988).
- 5) 前畑英彦, 荒井造成, 塚原正徳, 大工博之, 大谷誠二, 浦本武郎: 水産土木, **26**, 5-12 (1990).
- 6) K. A. Smith: *Comm. Fish. Rev.*, **23**, 1-14 (1961).
- 7) K. A. Smith: in "Modern Fishing Gear of the World 2", Fishing News (Books) Ltd., Surrey,

* 黒木敏郎: 昭和 53 年度科学研究費補助金研究成果報告書, 音響による魚類の大規模制御駆集効果の研究, 1979, pp. 1-189.

- 1964, pp. 540-544.
- 8) 道津喜衛: 水産増殖, **9**, 23-28 (1961).
 - 9) 江波澄雄: 鹿児島大学水産学部紀要, **8**, 140-144 (1960).
 - 10) 江波澄雄: 日水誌, **26**, 269-272 (1960).
 - 11) 小林喜一郎, 五十嵐脩蔵, 安孫子勇治, 林浩司: 北大水産彙報, **10**, 222-228 (1959).
 - 12) 五十嵐脩蔵: 北大水産彙報, **14**, 23-29 (1963).
 - 13) 小林喜一郎, 五十嵐脩蔵, 見上隆克, 菅原幸夫, 岩崎寿一: 北大水産彙報, **27**, 91-95 (1976).
 - 14) Y. A. Kuznetsov: in "Fish Behavior and Fishing Techniques" (ed. by A. P. Alekseev), Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1971, pp. 103-110.
 - 15) 小林哲夫, 佐々木正夫: 北海道さけますふ化場研究報告, **19**, 33-41 (1964).
 - 16) J. T. Lieberman and P. H. Muessig: *Estuaries*, **1**, 129-132 (1978).
 - 17) F. W. H. Beamish: in "Fish Physiology" (ed. by W. S. Hoar and D. J. Randall), Vol. 7, Academic Press, New York, 1978, pp. 101-178.
 - 18) 川村軍蔵: 日水誌, **56**, 699 (1990).
 - 19) 山岸 宏: 行動の生物学, 講談社, 東京, 1980, pp. 11-28.
 - 20) 今村 豊: 日仏海洋学会誌, **14**, 31-46 (1976).