

水産生物の音響による行動制御と可視化技術の開発

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者名	赤松,友成
発行元	日本水産學會
巻/号	81巻3号
巻号補足	
掲載ページ	p. 389-392
発行年月	2015年5月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



平成 26 年度水産学進歩賞

水産生物の音響による行動制御と可視化技術の開発

赤 松 友 成

(株)水産総合研究センター水産工学研究所

Development of behavioral control and visualization of fisheries species using acoustic technique

TOMONARI AKAMATSU

National Research Institute of Fisheries Engineering, Fisheries Research Agency, Kamisu, Ibaraki 314-0408, Japan

1. はじめに

漁業被害や環境影響評価のため、水産生物の行動を制御することが求められている。漁獲物や漁網に被害を与えるイルカやトドの対策には、非致死的な威嚇手法が必要である。¹⁾ 巨大な海上構造物である国際空港や瀬戸内海をまたぐ橋梁建設が盛んに行われた際、水産生物への影響を抑えることが大きな課題となった。²⁾

いずれの問題に対しても、水産生物の感覚能力や物理刺激に対する反応行動およびその観察が必要であるが、大気中と異なり水中では生物を直接見ることが難しい。電磁波が透過しない海中で生物の行動制御と可視化を行うには、音波が有力な手段の一つであることは広く認められているが、水産生物がどのように音波を感知し、それにより行動をどのように変化させたのかを知ることは容易ではない。また、反応行動を定量化するための手法も陸上に比べ大きく遅れをとっていた。

2. 水産生物の聴覚感度と騒音影響評価

海洋開発や海上交通で発せられる水中音による影響評価には、対象生物の聴覚特性の計測が不可欠である。音波による行動制御を行うためにも、まず受け手である水産生物の聴覚特性を把握しなければならない。我が国の主要水産資源であるマイワシは、実験室での飼育の困難さのためその聴覚特性が測られていなかった。そこで、聴性脳幹反応という脳波を利用した魚類聴覚計測方法³⁾を用いマイワシの聴覚感度特性を明らかにした。頭頂部に誘発される聴性脳幹反応を5尾のマイワシで計測し、聴覚閾値曲線を得た。⁴⁾ 最高感度を与える周波数は1024 Hzであった。マイワシのウキブクロは聴覚能力を增強していると考えられていたため、魚体の音波吸収特

性も計測し、最大吸収が1 kHzで起こることを確認した。X線写真から得られたウキブクロの大きさから、その音響共振点も1 kHz付近にあることが示された。多くの海の魚は数百Hz程度の周波数で感度がよいが、マイワシは1 kHzという比較的高い周波数で高感度であり、音波をウキブクロで受信していると考えられた。聴性脳幹反応は、これまでの条件付けによる方法に比べ極めて効率的に聴覚感度曲線を測定することができるため、魚類だけでなく⁵⁾ 小型鯨類にも適用された。⁶⁾ また同一個体の騒音暴露前後における聴覚感度差の計測⁷⁾ にも用いられるなど幅広い応用が見られる。

航空機を想定した騒音影響評価をカタクチイワシを対象に行い、水中騒音に対する本種の反応行動が誘発される音圧レベルを明らかにした。⁸⁾ 生け簀に畜養した自由遊泳中のカタクチイワシに100 Hzから1 kHzまでの音波を放射し、暴露音圧レベルを変えながら驚愕反応を計測した。その結果、カタクチイワシは300 Hzでの反応音圧レベルが146.8 dBと最も小さく、反応行動が見られた上限周波数は500 Hzであった。これらの結果は、魚類に対する騒音影響評価指標として現在でも海洋工事や船舶・航空機の音響アセスメントに活用できる。

近年、海洋は新たな資源供給源として注目を集めている。たとえば洋上風力発電や潮流発電のようなエネルギー資源、レアメタルなどの鉱物資源である。これらを効率的に利用することができれば、これまでの常識を覆して我が国が資源大国となるかもしれない。しかしこうした海洋の利用や開発に伴って発せられる音波が、水産生物に影響を及ぼすのではないかと懸念が生じている。この問題に関しては、国際標準化機構 (ISO) や国際海事機構 (IMO) あるいは生物多様性条約 (CBD) で真剣な議論が始まっている。海の生き物の聴覚と騒音

影響評価は、国際的に重要なテーマになりつつある。⁹⁾ EU 圏では、騒音レベルの高い船舶の入港制限が検討される動きがある。国際標準化機構においては、深い水域における船舶騒音の物理計測基準の策定が終了した (ISO/DIS16554)。温暖化に伴う北極海航路の開通期間の延長により、これまで静穏であった同海域に生息する海洋生物への影響が議論されはじめ、海運に強制力を持つ国際海事機構もこの問題を認識している。このような情勢のもと、我が国の生命線である海運を維持し海洋資源を確保していくためには、海洋生物への騒音影響評価は避けて通れない。水産資源を中心に、騒音暴露評価や聴覚計測を行い、信頼できるデータの蓄積を行う必要が増している。

3. 水産生物の行動制御

音波による影響評価からさらに一步進んで、対象生物の行動が制御できれば、水産業への応用範囲が広がる。これまでも捕獲や殺傷が難しい生物を音波で追い払う多くの試みがなされてきた。稲の収穫期になると定期的に爆音を響かせるスズメ脅しなどは、その最も身近な例である。漁業の現場でも、竹竿で水面を叩いたり石を投げ込んだりする追い込み漁が、魚やイルカを対象に行われてきた。

今日の水産の現場で要請されるのは、より対象生物種を絞った行動制御技術である。たとえば、養殖クロマグロの計画的な生産支援のため、水中に特殊な音波を発して生け簀の上部に魚を浮上させ釣り上げることが試みられた。¹⁰⁾ マグロ類は国際的な資源管理が最も進んでいる魚種であり、我が国はその消費大国でもある。クロマグロは完全養殖に成功した。捕獲した幼魚を養殖し成長させて出荷する生産流通過程もすでに産業化されている。このような高付加価値の養殖魚の安定的な供給のためには、きめ細かな生産調整が必要である。養殖クロマグロは釣りで水揚げされる。このとき生け簀内の個体密度が低下してくると釣獲効率が下がる。また、餌食いが悪いときはマグロが浮上せず、所期の匹数を得るのに時間がかかる。

餌以外の刺激を用いて魚群行動を制御する試みは、音響馴致を行ったマダイの養殖などですで行われている。そこで、養殖マグロの釣獲効率の改善のため、音を用いた行動制御を試みた。スペクトルが既知の7種類の音をマグロの養殖生け簀で放音し、反応行動をスキニングソナーで観察した。音響馴致を行っていない養殖クロマグロにおいて集魚効果の期待できる音は、餌船のエンジン音と給餌中の水中音が考えられる。この音は餌と結びついており結果的に馴致を行った状態になっている。また、生得的に威嚇効果があると思われる音に、潜在的な捕食者であるハクジラ類の鳴音がある。他に、人

工的で供試マグロが経験したことのない単一の周波数成分の音2種のほか、伝統魚法で使用されているものと似た金属の打撃音を使用した。体長50 cmのキハダマグロの聴覚特性は300–600 Hz付近で感度がよく、その域値は90 dBである。¹¹⁾ シャチおよびイルカ鳴音を除く5種の音の周波数成分も多くエネルギーが1 kHz以下の魚類の聴覚感度のよい領域に集中している。本実験で使用した音波は、マグロ類が感知できる周波数帯域のものを選択した。

給餌に伴う音の集魚効果は顕著であった。放音直後から魚群が表層に浮き、生け簀網に沿って回遊する通常の遊泳行動とは容易に区別できた。エンジン音は採餌音とはまったく違うスペクトルを持っているが、やはり集魚効果があった。また、給餌船以外の船が生け簀近くを通った時もマグロの浮上がみられた。マグロは幼魚から養殖されているため、これらの給餌にともなう音は、餌と関連して条件付けされていると考えられる。一方、音響馴致で集魚によく使われている単一周波数成分の音は、逆に魚群を拡散させる効果があった。300 Hzの単一周波数音の場合、水中での音波の波長は5 mとなり、魚体長よりかなり大きくなる。このため位相差を聞き分けて音源方向を定位するためには2つの内耳の距離が必要である。魚に方向定位¹²⁾をさせるためには単一周波数音は不向きと考えられる。一方、多くの周波数成分を含んだ音波の方は定位しやすく、採餌音やエンジン音はこの条件を満たしている。鯨類の鳴音によるマグロの反応行動は、そのほかの人工音と同じで魚群を拡散させた。しかし、その反応域値は118 dBで、人工音と変わらなかった。天然魚と異なり、鯨類との遭遇がない養殖魚の場合には、音と捕食者の関連づけが行われる機会がないのかもしれない。

長期飼育されている養殖マグロは、給餌にともなう音により餌が存在することを条件づけられている。従って、特別な馴致を行っていない魚群でも、このような音を表層付近への集魚の補助手段として利用することが考えられる。音源音圧や音源の位置の制御により、広い生け簀の一部に魚群を誘致する効果が期待される。

混獲や漁業被害の防止においても行動制御が要請されている。北太平洋においては、日本をはじめとして韓国や台湾の漁船によるサケ・マスを対象とする大規模な流し網に、毎年数千頭ものイシイルカが混獲されていた。これが北太平洋漁業国際委員会 (INPFC) の海産哺乳動物特別小委員会科学分科会で問題化され、1981年以降、混獲がイシイルカの資源水準に影響を及ぼさないこと、混獲を減少させる努力を行うこと、などを発給条件に、許可書の保持がINPFC参加各国に義務づけられることとなった。日本は、イルカ類の対網行動実験¹³⁾や超音波ソナー能力であるエコーロケーションによる流し

網の認知可能距離の算定,¹⁴⁾ 超音波鳴音の特性計測¹⁵⁾を行ったが、1989年には国連総会に「公海流し網漁業の全面禁止」を求める決議案が提出され、公海における流し網漁業の操業をモラトリアムとすることなどを骨子とする国連決議が採択された。漁業活動のみならず、海運においても鯨類との共存が問題になった。各国に導入された高速船は後部から水を噴き出して推進力を得る。回転するプロペラからの雑音がないため、水中は意外なほど静かな船舶である。旅客船の運航速度は時速 80 km を越え、まれにではあるが鯨類と衝突する事故が発生した。

こうした背景のもと、超音波威嚇装置によるアクティブな行動制御と、超音波反射体を用いたパッシブな警告標識手法が開発された。魚類にほとんど感知されない高周波にイルカの聴覚が高感度であることを利用し、様々な変調パターンの超音波を生け簀に確保したオキゴンドウに放射して反応行動を調べた。¹⁶⁾ オキゴンドウ二頭に対し、行動観察を和歌山県太地港内に設置した 40 m × 20 m、深さ 6 m の長方形の生け簀で行った。クジラの行動は水面上 6 m の檣の上から観察した。また同じ場所からビデオ撮影も行った。本種は通常、秒速 1 m 以下のゆっくりしたスピードで直径 10 m から 20 m の円を描いて泳いでいた。音波に対する反応行動でもっとも顕著なものは、放音と同時にオキゴンドウが音源と反対の方向にまっすぐ泳ぐものであった。反応行動を決める主要な要因は、音圧と実験回数であると考えられた。実験初期には、音源からまっすぐ遠ざかる反応行動を引き起こす音圧レベルは 170 dB であった。実験回数が増えるに従って、定常的なパルス音では反応音圧レベルが 180 dB まで上昇したこれはクジラの音に対する慣れを示している。複数の定常的なパルスを混合すると反応が敏感になった。また、周波数や発射間隔に変調を加えたパルス音は、実験回数が増えても反応音圧レベルは 170 dB 付近で変化がなかった。以上のことから、混合したあるいは変調をかけた複雑な音は慣れが少ないと考えられた。水中火薬の単発のパルス音は、音圧が大きくてもクジラの行動に影響を及ぼさなかった。連続音に対してはイルカは上下左右方向で約 2° の音源定位能力を持っているが¹⁷⁾、単発では音源方向の定位が難しい。このためオキゴンドウは音源と反対の方向に泳ぐという反応行動をとれなかったのではないかと推測された。音波による本種の威嚇を行うためには、暴露音圧レベルが 170 dB 以上必要である。威嚇効果範囲を 100 m に設定し、音波の球面拡散を仮定すると、威嚇放音装置の音源音圧レベルは 210 dB でなければならない。これは一般的な魚群探知機の製作技術で実現できる音源音圧レベルである。音種は対象鯨種の可聴域に主なエネルギーをもち、周波数または振幅変調をかけるのが望ましい。威嚇音の

使用にあたっては、放音時間を短くし同じ海域で 1 日に何度も使用しないことが重要である。その海域に生息している鯨類の慣れを防ぐためである。また、背景雑音レベルが高いところでは、可聴閾値が高くなる。海況が荒れているときや海上交通量の多いところでは背景雑音レベルが高く、反応行動がみられる音圧も高くしなければならぬだろう。

イルカ類の混獲防止対策として、流し網に音響反射器を取り付けて、エコーロケーションで認知されやすくする方法が提案されている。^{18,19)} イルカ類は超音波ソナー能力であるエコーロケーションを有し、遠隔的に海中物体を感知できる。そこで、水とインピーダンスの異なる浮子に似た音響反射体を複数の垂直線上に吊し、エコーロケーションによってイルカ類にだけ特異的に認知可能な実験状況を設定した。²⁰⁾ 飼育下のネズミイルカがこの間を通過する回数を計測したところ、間隔 1 m までは通過が認められたものの、0.8 m 以下になると接近のみで吊した反射体の間を通過することはなかった。観察者が視認可能な照度で実験が行われたことに留意する必要があるが、音響的「視認性」強化のための反射体配置に関する基礎的な知見が得られた。

底刺し網へのトドの漁具被害の低減にも音響威嚇法が検討された。一頭の成熟雄を含む 10 個体の飼育下のトドに一定周波数音・周波数変調音・広帯域打撃音を水中で聴かせ、反応行動を調べた。²¹⁾ 広帯域打撃音に対しては、上陸するなどの顕著な逃避反応を示した。しかし放音回数が増えるにつれ、上陸個体数が減少した。餌をとりつけた刺し網を提示しながら同様の放音実験を行った場合、成熟雌と未成熟個体は広帯域打撃音の逃避反応が認められたが、成熟雄は放音中も餌に接近する行動が確認された。

4. 水産生物の可視化

水産生物の発する鳴音を受信することで資源を可視化する受動的音響観測技術の発達が近年著しい。ステレオロギング方式によって超音波の音源方位を記録できる A-tag と呼ばれる装置により、小型鯨類の個体数を計数する手法を確立した。²²⁻²⁵⁾ この装置の最初の応用例は関門海峡におけるスナメリのモニタリングであった。²⁶⁾ 本種は水産資源保護法に指定される海洋生態系の重要種である。背びれがなく小型であることから目視ではまったく発見できなかったが、音響観測では夜間に潮の流れによって海峡を往来していることが明らかになった。

開発した A-tag は小型鯨類の数を野外で長期間モニタリングができることから、これまで 14 カ国で 100 台以上が利用され、生態観察から環境アセスメントまで様々な分野に応用されている。たとえば、経済産業省の主導で我が国初の本格的洋上風力発電施設が建設された銚子

および北九州沖では、建設前後における当該海域の小型鯨類の出現パターンの観測に用いられた。

謝 辞

ここに挙げた水産生物に対する音波の影響評価と威嚇反応行動の研究は、水産庁水産工学研究所漁業生産工学部の畠山良己氏、日本大学農獣医学部の添田秀男教授によって開始され、多大なご指導のもとに筆者が研究を引き継いだ。魚類の聴性脳幹反応を用いた聴覚計測においては、その開発者である米ケンタッキー大学の Hong Y. Yan 博士より懇切丁寧な手ほどきを受けた。音響による水産生物の可視化においては、中国科学院水生生物研究所の王丁博士と京都大学大学院情報学研究科の木村里子博士らとの地道な観測が基礎技術をつくりあげた。実験や調査は、数え切れないほど多くの研究者の方々や学生諸氏の熱意と努力によりはじめて実施できたものばかりであり、今回の水産学進歩賞はこれらすべての方々に与えられたものと考えている。また、関係諸機関からの様々な支援にも心より感謝申し上げる（所属はすべて研究当時）。

文 献

- 1) 畠山良己, 石井 憲, 武富 一, 徳永武雄. 昭和 56 年～60 年度イルカ類駆逐技術, 漁業公害 (有害生物駆除) 対策調査委託事業調査報告書 1986; 229-268.
- 2) 航空機騒音等が魚類の行動に及ぼす影響に係る資料収集等調査報告書. 社団法人日本水産資源保護協会, 1988; 1-113.
- 3) Kenyon TN, Ladich F, Yan HY. A comparative study of hearing ability in fishes: the auditory brainstem response approach. *J. Com. Physiol.* 1998; **182**: 307-318.
- 4) Akamatsu T, Nanami A, Hong Y Yan, Spotlined sardine *Sardinops melanostictus* listens to 1-kHz sound by using its gasbladder. *Fish. Sci.* 2003; **69**: 348-354.
- 5) Kojima T, Ito H, Kodama T, Taniuchi T, Akamatsu T. Measurements of auditory sensitivity in common carp *Cyprinus carpio* by the auditory brainstem response technique and cardiac conditioning method. *Fish. Sci.* 2005; **71**: 95-100.
- 6) Beedholm K, Miller LA, Blanchet MA. Auditory brainstem response in a harbor porpoise show lack of automatic gain control for simulated echoes. *J. Acoust. Soc. Am.* 2006; **119**: 41-46.
- 7) Scholik AR, Yan HY. Effects of underwater noise on auditory sensitivity of a cyprinid fish. *Hearing Research* 2001; **152**: 17-24.
- 8) Akamatsu T, Matsushita Y, Hatakeyama Y, Inoue Y. Startle response level of Japanese anchovy *Engraulis japonicus* to underwater pure tone signals. *Fish. Sci.* 1996; **62**: 648-649.
- 9) Boyd I, Frisk G, Urban E, Tyack P, Ausube J, Seeyave S, Cato D, Southall B, Weise M, Andrew R, Akamatsu T, Dekeling R, Erbe C, Farmer D, Gentry R, Gross T, Hawkins A, Li F, Metcalf C, Miller JH, Moretti D, Rodrigo C, Shinke T. An international quiet ocean project. *Oceanography* 2011; **24**: 174-181.
- 10) 赤松友成, 畠山良己. 7 種の水中音に対する養殖クロマグロの反応行動, 水産工学研究所技報 (漁業生産) 1995; **6**: 1-8.
- 11) Miyake I. Observation on sound production and response in tuna. *U.S. Fish Wildl. Serv. Spec. Sci. Rep. Fish.* 1952; **91**: 59-68.
- 12) 畠山良己. 魚の聴覚能力. 水産工学 1992; **28**: 111-119.
- 13) Hatakeyama Y, Ishii K, Akamatsu T, Soeda H, Shimamura T, Kojima T. A review of studies on attempts to reduce the entanglement of the Dall's porpoise, *Phocoenoides dalli*, in the Japanese salmon gillnet fishery. *Rept. Int. Whal. Commn.* 1994; **15**: 549-563.
- 14) Hatakeyama Y, Soeda H. Studies on echolocation of porpoises taken in salmon gillnet fisheries. In: Thomas J. A. and Kastelein R. A. (eds), Sensory abilities of cetaceans: laboratory and field evidence. Plenum Press, 1990; 269-281.
- 15) 畠山良己, 石井 憲, 武富 一. ベーリング海におけるイシイルカのため・マス流網への羅網の防止に関する音響的研究 (第 1 報). 水産工学研究所研究報告 1985; **6**: 264-288.
- 16) Akamatsu T, Hatakeyama Y, Takatsu N. Effects of pulse sounds on escape behavior of false killer whales. *Nippon Suisan Gakkaishi* 1993; **59**: 1297-1303.
- 17) Au WWL. The sonar of dolphins. Springer-Verlag, 1993, 1-277.
- 18) Goodson AD. Developing deterrent devices designed to reduce the mortality of small cetaceans in commercial fishing nets. *Mar. Fresh. Behav. Physiol* 1997; **29**: 211-236.
- 19) Goodson AD, Mayo RH. Interactions between free-ranging dolphins (*Tursiops truncatus*) and passive acoustic gill-net deterrent. In: Kastelein R. A., Thomas J. A. and Nachtigall P. E. (eds), Sensory systems of aquatic mammals, 1995; 365-379.
- 20) Nakamura K, Akamatsu T, Goodson AD, Kagoshima K, Shimazaki K. Gillnet passive acoustic deterrents: investigating inter-reflector spacings with a harbor porpoise *Phocoena phocoena*. *Fish. Sci.* 1998; **64**: 648-649.
- 21) Akamatsu T, Nakamura K, Nitto H, Watabe M. Effects of underwater sounds on escape behavior of Steller sea lions. *Fish. Sci.* 1996; **62**: 503-510.
- 22) Kimura S, Akamatsu T, Dong L, Wang K, Wang D, Shibata Y, Arai N. Acoustic capture-recapture method for towed acoustic surveys of echolocating porpoises. *J. Acoust. Soc. Am.* 2014; **135**: 3364-3370.
- 23) Kimura S, Akamatsu T, Wang D, Li S, Wang K, Yoda K. Variation in the production rate of biosonar signals in freshwater porpoises. *J. Acoust. Soc. Am.* 2013; **133**: 3128-3134.
- 24) Dede A, Amaha-Ozturk A, Akamatsu T, Tonay AM, Ozturk B. Long-term passive acoustic monitoring revealed seasonal and diurnal presence patterns of cetaceans in the Istanbul strait. *J. Mar. Biol. Assoc.* 2014; **94**: 1195-1202.
- 25) Kimura S, Akamatsu T, Li S, Dong L, Wang K, Wang D, Arai N. Seasonal changes in the local distribution of Yangtze finless porpoises related to fish presence. *Mar. Mamm. Sci.* 2012; **28**: 308-324.
- 26) Akamatsu T, Nakazawa I, Tsuchiyama T, Kimura N. Evidence of nighttime movement of finless porpoises through Kanmon Strait monitored using a stationary acoustic recording device. *Fish. Sci.* 2008; **74**: 970-976.