

受賞者総説

魚群探知機を用いた水産資源量計測に関する基礎的研究*1

(平成 11 年度日本水産学会賞田内賞受賞)

飯田 浩二*2

北海道大学大学院水産科学研究科

1. はじめに

水中音波は光や電磁波に比べて減衰が少なく、また伝搬速度も比較的速いので、広域、迅速、連続な海中探査の媒体として有効である。戦後、軍用から民生用に解放された水中音響技術は、いち早く魚群探知機として実用化されて急速に普及し、近代漁業に技術革新をもたらした。音響資源調査法は、この魚群探知機の利点を活かした水産資源量の推定手法として、欧米や日本を中心に発展してきた。特に近年、わが国においても、国連海洋法条約批准に伴う TAC (漁獲可能量) 制が施行され、漁獲量の規制による資源管理が行われるようになり、漁業実績によらない資源量の直接推定法として、音響資源調査法に対する期待が高まっている。

本稿では、著者らがこれまで取り組んできた魚群探知機を用いた資源量計測に関する研究の成果を総括し、今後の音響資源計測技術を展望する。

2. 資源調査用計量魚群探知機の開発と改良

調査用計量魚群探知機が通常の魚群探知機と異なるところは、対象である水産資源の存在を見つけるだけでなく、その位置、魚種、体長、魚数、密度などを定量的に測定する機能を持つことである。当初の記録式魚群探知機は魚群エコーの振幅に比例させて放電発色させていたが、これを資源量推定に利用しようという試みがすぐに現れた。Cushing¹⁾は記録紙上のニシン魚群の数を数え、黒木・中馬²⁾は池田湖でヒメマス³⁾の魚の数を数え、漁獲量との間に比例関係を見出した。これらの定量化の考えは電子計数器を用いた計数方式の計量魚探へと発展していった。これに対し、記録紙上で数えられないほど濃密で大きな魚群に対しては、記録された魚群の面積を測定し、その濃度を加味して集計する方法が考案され、これが後の積分方式の計量魚探へと発展していった。積分方式の計量魚探は Dragesund et al.³⁾のアナログエコー積分器の開発に始まる。当初は積分器出力と魚群密度の間

の線形性に議論が集中したが、⁴⁾ やがてデジタルエコー積分器を搭載した科学魚探が開発され、本格的な資源調査が行われるようになった。

計量魚探に求められる機能は、資源量の推定、体長の推定、そして魚種の判別である。生け簀に入れた魚の数とそのエコー強度との相関を調べるケージ実験が繰り返され、魚のターゲットストレングスが測定されて、理論、実験の両面から音響資源調査法の有効性が証明された。さらに、デュアルビーム法やスプリットビーム法を用いた自然状態における魚のターゲットストレングス (*in situ* TS) の測定技術が開発されると、⁵⁾ 魚の体長推定も現実的になってきた。魚種判別については、*in situ* TS や周波数特性の利用が有効ではあるが、今なお多くの課題を残し、今後発展が期待される技術である。

計量魚群探知機の開発や基礎実験には、現場における実験が不可欠である。そこで、ヒメマスが生息する北海道倶多楽湖において、魚群探知機を用いたさまざまな調査、実験を行った。まずヒメマスが夜間、単体エコーとして魚群探知機に記録されることを見つけ、⁶⁾ この自動計数を目的としてデュアルビーム式魚群探知機を試作した。そしてパターン認識技術を用いた単体エコーの自動計数法を考案するとともに、*in situ* TS を測定して、これらが資源量の推定と体長推定に有効なことを示した。⁷⁾

単体エコーの検出には、高い分解能が要求される。しかし、分解能を向上させるためにビームを細くすると探知範囲が狭まるという矛盾が生ずる。そこで、広い探知範囲を確保しつつ高分解能を実現するために、ファンビーム方式の魚群探知機⁸⁾ を考案した。さらにクロスファンビーム技術を用いて分割ファンビーム式の魚群探知機を開発し、後にスキヤニングソナー画像の三次元解析⁹⁾ に道を開いた。また、前後左右に斜交させた四本のビームを用いて、魚の三次元位置と同時に *in situ* TS を測定し、体長推定と単体の遊泳経路の追跡を行うことのでき

*1 Basic Studies on Fish Resource Estimation Using Echo Sounder.

*2 Kohji Iida (Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Minato, Hakodate 041-8611, Japan).

る、四ビーム式魚群探知機¹⁰⁾を考案し、魚の行動研究に有効なことを示した。

3. ソナーによる海中魚群観察手法の高度化と資源調査への応用

海中における魚群の正確な分布や形状を知ることは、魚類の資源量推定や生態の研究において極めて重要である。しかしながら、海中において、光を用いた観測は至近距離に限られるので、これらの用途には水中音響技術が用いられる。¹¹⁾ 船底から下方に向けて超音波を送受波し、魚群からのエコーを可視化する魚群探知機は、水中観測技術の代表例であるが、通常の魚群探知機では自船真下付近の魚群しか探知できない。これに対し、近年性能向上の著しい、スキャニングソナーは電子的に音響ビームを高速に旋回させ、自船周囲の海中を可視化することができるので、より広範囲の魚群を探知することが可能である。

一般にスキャニングソナーは周囲遠方の魚群探索を目的としているため、ソナービームは水平に近い状態で使用する。ところが、いま、ソナービームを船の進行方向と直角に、下方に向けて発射すると、船下の断面画像が得られる。これを船の進行とともに、連続的に観測すると、連続した多数の断面画像が得られ、これを解析することにより魚群の三次元的な情報を得ることが可能である。この三次元情報には、魚群の空間分布や立体形状などがあるが、これらを解明することにより、音響資源調査や魚群行動研究など、様々な分野への応用が期待できる。¹²⁻¹⁴⁾

ソナー画像の三次元解析の実験は、北海道噴火湾湾口部において、北海道大学調査船うしお丸を用いて行われた。用いたソナーは半周型スキャニングソナーであり、ビームを船の進行方向へ向け、俯角を90度に設定し、船速約10ノットで航走した。ソナーのパルスレートは約60回/毎秒なので、1秒に1回でソナー画像をコンピュータにサンプリングした。ソナー画像は連続に数100枚サンプルメモリ上に保存した。三次元画像処理ソフトを用いて、ボリュームレンダリングによる補完を行い、立体的な魚群分布を見たのが図1である。通常の魚群探知機では知り得ない情報を有したエコーグラムであることがわかる。さらに、遭遇した魚群を切り出して立体視したのが図2である。魚群の三次元形状が手にとるように分かる他、魚群の体積や密度を計算することができるので、表層魚種の資源量調査に有効なのはもちろん、魚種判別や魚群行動の解析手法として極めて有効である。残念ながら現在の技術では、これらの三次元画像は事後解析によって初めてわかるので工夫が必要である。現在、魚群の計数や強度積分による

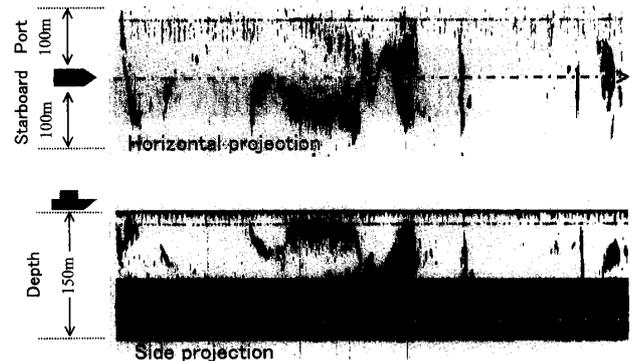


図1 連続した多数のソナー画像から作成した魚群の立体分布
上は水平投影図、下は垂直投影図を表す。

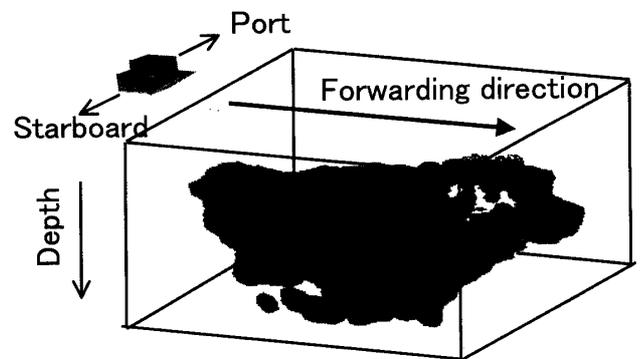


図2 連続した多数のソナー画像から切り出した魚群の立体形状
縦150 m、横140 m、厚さ47 mの板状魚群を表す。

定量化の研究を進めているが、将来、表層を広範囲に探査できるソナーの利点を活かした計量ソナーの開発が期待される。

4. 活魚のターゲットストレングスの測定

近年発達した著しい音響資源調査法による資源量推定の原理は、水塊の音響後方散乱強度を対象魚のターゲットストレングスで割って個体数を求めるものである。¹⁵⁾ 水塊の音響後方散乱強度は計量魚群探知機とエコー積分器を用いて測定されるが、ターゲットストレングスはユーザーが与えなければならない。ターゲットストレングスは体長、魚種、姿勢、周波数によって変化するので、より高精度なターゲットストレングスの推定には、現場における活魚を用いた測定が不可欠である。そこで、サンプルの入手や実験環境に恵まれた北海道大学白尻水産実験所において、ネットケージ(網かご)を用いた活魚のターゲットストレングスの測定装置を製作し、様々な魚種、体長、周波数のターゲットストレングスを測定して

いる。

一般に、魚の音響散乱の主要因は鰭(うきぶくろ)によると考えられ、そのターゲットストレングスは体長の2乗に比例する。したがって、稚魚の音響散乱の寄与はとるに足りないものと考えがちである。しかしながら、稚魚の持つ小さな鰭は、魚群探知機の使用する周波数の音波長と同程度か小さく、これらの周波数帯域では音響共振などの特異な現象を呈する可能性がある。

そこで鰭を持つ幼稚魚の音響散乱特性を詳しく研究することが重要と考えた。実際には稚魚のターゲットストレングスの研究は次の2つの点で重要である。1つは音響資源量調査における対象種と他魚種との分離、あるいは体長の判別である。他の1つは資源加入量を推定するための、稚魚そのものの生物量の推定である。

現在までに、スケトウダラ、マダラ、ニシンなど10種程度の稚魚のターゲットストレングスの特性を6周波数について測定した。^{16,17)} さらに近年、スルメイカがTAC対象種に指定されるなど、無鰭魚の音響資源調査も急務となったことから、スルメイカ、ホッケ、オオナゴ、オキアミなどのターゲットストレングスの測定も行っており、その体長、魚種、周波数特性などが明かにされつつある。

5. 北海道周辺のスケトウダラの音響資源調査

1996年の海洋法批准に伴い、わが国でもTAC制に基づく漁獲量規制による資源管理の方策が求められる中、大学や国公立試験研究機関による魚類の音響資源調査が実施されるようになった。特に北海道3水試(稚内、中央、函館)と北大との共同研究による、「北海道西部日本海のスケトウダラ産卵群の来遊資源量予測基礎調査」においては、最新のスプリットビーム方式の計量魚群探知機を用いて、組織的な音響資源調査を毎年、定期的実施している。これまでの研究で、スケトウダラの分布、移動と海洋環境との関係、魚群エコーの昼夜間変動、¹⁸⁾ スケトウダラのターゲットストレングスの特性、魚種判別、航走ノイズ、航走減衰特性などが次々と明かにされ、ターゲットストレングスの測定法やキャリブレーション手法の改善など技術的にも進歩した。^{19,20)} 現在、信頼性の高い現存量の推定、予測が可能となり、北海道の産業的重要種であるスケトウダラの資源管理に大きく貢献している。

6. おわりに

わが国の魚群探知機に関する研究は、日本水産学会をはじめ、電子情報通信学会、日本音響学会、海洋音響学会、日本航海学会、水産海洋学会などにおいて、装置の開発研究、音響理論的研究、応用的研究などが、互いに

連絡を取り合うこともなくおこなわれてきたが、1986年に水産工学研究所の主催による「水産音響シンポジウム」が開かれたのを契機に、国内の魚探研究者が一同に会して情報交換を行おうという機運が高まり、「音響水産資源調査研究会」が発足した。

まず水産学会において、新たに「音響・計測」という発表会場を設け、研究発表を集中させる努力がなされた。本研究会は現在も続いており、水産学会の一般講演の後、会場を別会場に移して質疑、討論を補い、研究者間のよい情報交換の場となっている。同研究会はさらに水産音響研究の啓蒙のため、いくつかのシンポジウムを企画し、1993年春の水産学会で「水産資源の音響調査手法の現状と展望」と題するシンポジウムを開催し、わが国における水産音響研究の現状分析と将来展望を行った。²¹⁾ その後国際学会を含む水産音響に関連した多くの学会、シンポジウムが開かれ、今日に至っている。

この間、わが国の漁業調査船等には多くの計量魚群探知機が装備されるようになり、海区水産研究所や県水産試験場等による本格的な音響資源調査が実施されるようになった。しかしながら、音響資源調査は担当調査員の努力だけで為し得るものでなく、機器の開発・製造、調査船の建造・取付け、調査計画、データ解析、調査船の運行、ターゲットストレングスの測定などに関わる多くの研究者の協力が必要である。音響資源調査研究会などの研究ネットワークを利用して、さらに多くの研究者が水産音響研究に参加し、基礎研究も充実して、音響資源調査法が将来の資源評価法の要として発展していくことを願って止まない。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、ご指導いただいた北海道大学名誉教授石田正巳先生、同鈴木恒由先生、同佐野典達先生に心から感謝申し上げます。また本研究における調査、実験にご協力いただき、また労苦を共にした練習船、調査船の船長他乗組員各位、水産研究所、水産試験場の研究員各位、同僚、卒業生諸氏、ご討論いただいた音響水産資源調査研究会各位、ならびに音響計測機器メーカー各位に深く感謝する。

文 献

- 1) D. H. Cushing: Echo survey of fish. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, 18, 45-60 (1952).
- 2) 黒木敏郎, 中馬三千雄: 水平魚群探知に関する研究 I — 池田湖における魚群量の推定. 鹿児島大紀要, 3, 56-64 (1953).
- 3) O. Dragesund and S. Olsen: On the possibility of estimating year-class strength by measuring echo-abundance of 0-group fish. *Fiskeridir. Skr. Ser. Havunders.*, 13, 48-75 (1965).

- 4) K. G. Foote: Linearity of fisheries acoustics, with addition theorems. *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**, 1932-1940 (1983).
- 5) J. E. Ehrenberg: Two applications for a dual-beam transducer in hydroacoustic fish assessment systems. *Proc., 1972 IEEE Conf. on Engineering in the Ocean Environment*, **1**, 152-155 (1974).
- 6) K. Iida and T. Mukai: Behavior of kokanee (*Oncorhynchus nerka*) in Lake Kuttara observed by echo sounder. *Fisheries Sci.*, **61**, 641-646 (1995).
- 7) K. Iida, T. Mukai, and K. Ishii: Application of a dual beam echo sounder to measuring fish length. *Nippon Suisan Gakkaishi*, **57**, 623-627 (1991).
- 8) 飯田浩二, 鈴木恒由: ファンビームを用いた高分解能魚群探知機. 北大水産学部研究彙報, **38**, 384-392 (1987).
- 9) Y. Aoki, T. Sato, P. Zeng, and K. Iida: Three-dimensional display technique for fish-finder with fan-shaped multiple beams. *Acoustical Imaging*, **18**, 491-499 (1991).
- 10) 飯田浩二, 鈴木恒由: 四ビーム法による個体位置計測とターゲットストレングスの *in situ* 推定. 北大水産学部研究彙報, **38**, 375-383 (1987).
- 11) 飯田浩二: 水産研究における音響計測技術「水産研究の最前線」(平野禮次郎編), 恒星社厚生閣, 東京, 1994, pp. 77-105.
- 12) K. Iida, T. Mukai, Y. Aoki, and T. Hayakawa: Three-dimensional interpretation of sonar image for fisheries research. *Acoustical Imaging*, **22**, 583-588 (1996).
- 13) 飯田浩二, 向井 徹, 堀内則孝: スキャニングソナーを用いた表中層魚群の三次元分布と形状の解析. 海洋音響学会誌, **25**, 240-249 (1998).
- 14) K. Iida, T. Mukai, and N. Horiuchi: Three dimensional visualization of fish schools using sector scanning sonar. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **32**, 729-734 (1998).
- 15) 飯田浩二: 音響資源調査法の基礎. 月刊海洋, **26**, 602-610 (1994).
- 16) K. Iida, T. Mukai, and D. J. Hwang: Acoustic backscattering characteristics of swimbladdered juvenile fish derived from cage experiments. *Fisheries Sci.*, **64**, 929-934 (1998).
- 17) K. Iida, T. Mukai, and D. J. Hwang: Target strength measurement of live fish using a net cage. *Proceedings of the 3rd JSPS International Seminar on Sustainable Fishing Technology in Asia towards the 21st Century*, 214-219 (2000).
- 18) 安部幸樹, 飯田浩二, 向井 徹: スケトウダラの音響資源調査における面積後方散乱係数SAの昼夜変動, 日本誌, **65**, 252-259 (1999).
- 19) 三宅博哉, 金田友紀, 水野政巳, 吉田英雄, 石田良太郎, 夏目雅史, 飯田浩二, 向井 徹: 計量魚群探知機を用いたスケトウダラ産卵群の来遊予測. 水産海洋研究, **62**, 30-32 (1998).
- 20) 三宅博哉, 高柳志朗, 石田良太郎, 金田友紀, 武藤卓志, 飯田浩二, 向井 徹, 安部幸樹: 計量魚群探知機を用いた道西日本海におけるスケトウダラ産卵群の来遊資源量予測基礎調査, 平成8年度~10年度共同研究報告書, 北海道立中央水産試験場, 北海道立稚内水産試験場, 北海道立函館水産試験場, 北海道大学水産学部, 177p. (1999).
- 21) 梨本勝昭, 飯田浩二: 特集「水産資源の音響調査手法の現状と展望」について. 月刊海洋, **26**, 599-601 (1994).