

広帯域スプリットビームソナーと音響的標識再捕による魚群の尾数および体長分布計測

誌名	水産工学
ISSN	09167617
著者名	赤松,友成 今泉,智人 西森,靖 王,勇 小河,慎二 伊藤,雅紀 松尾,行雄
発行元	日本水産工学会
巻/号	54巻3号
巻号補足	
掲載ページ	p. 203-207
発行年月	2018年2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



【報 文】

広帯域スプリットビームソナーと音響的標識再捕による 魚群の尾数および体長分布計測

赤 松 友 成^{1*}・今 泉 智 人²・西 森 靖³・王 勇³・
小 河 慎 二³・伊 藤 雅 紀³・松 尾 行 雄⁴

Counting and Measurement of Body Size Distribution in a Fish School by Broadband Split-beam Echosounder

Tomonari AKAMATSU^{1*}, Tomohito IMAIZUMI², Yasushi NISHIMORI³, Young WANG³,
Shinji OGAWA³, Masanori ITO³ and Ikuo MATSUO⁴

Abstract

Broadband echo sounders are known to provide fine spatial image of each target fish in a dense group. The total number of fish in an acoustic beam can be estimated by counting the number of separated echograms. The target strength of an individual fish and beam attack angle to the fish body provided the body length of each fish. However, counting the total number of fish and body size distribution in a net enclosure or in the wild is difficult mission. Because double counting and missing are unavoidable. Here we propose the acoustic re-capture method to count the number of fish including missed ones in a net enclosure. The mark recapture is well known method for fisheries resource management. An idea is to use Sonar Bell as an individual tag. The Sonar Bell has extremely high target strength comparing with its size. Once it will be introduced in several tuna for example, high spatial resolution sonar will be used to count the number of tagged and intact individuals in the sonar beam remotely. The numbers of tagged and intact fish provide the virtual capture rate, which can be used to calculate the total number of individuals including missed fish. Multiple acoustic recaptures such as every 10 minutes will provide precise estimation of total number of fish in a net enclosure.

1. 広帯域スプリットビームソナーの現状

魚の数と体長の計測は古くからある挑戦しがいのある課題である。本特集に掲載されているように、これまでも多くの映像・音響・捕獲手法が試されてきた。なかでも音響手法は非侵襲的で光を必要としないため、海中の探査には広く用いられてきた。しかし、従来の魚群探

知機では密な群れにおける個々の魚からの反射音の分離に難点があった。スプリットビーム手法を用いて空間分解能を上げる工夫はなされてきたが、送信波が狭帯域で一定のパルス幅をもっているため、深さ方向あるいは水平設置の場合は送波器から遠方方向への空間分解能には限界があった。

近年、水中音響探査で広帯域技術が広く使われるよう

2017年11月27日受付, 2017年11月29日受理

キーワード: 広帯域ソナー, 標識再捕, ソナーベル, 体長計測

Key words: broadband sonar, mark recapture, Sonar Bell, body size measurement

¹ National Research Institute of Fisheries Science, Fisheries Research and Education Agency, 2-12-4 Fukuura, Kanazawa, Yokohama, Kanagawa 236-8648, Japan (国立研究開発法人 水産研究・教育機構 中央水産研究所 〒236-8648 神奈川県横浜市金沢区福浦2-12-4)

² National Research Institute of Fisheries Engineering, Fisheries Research and Education Agency, 2-12-4 Fukuura, Kanazawa, Yokohama, Kanagawa 236-8648, Japan (国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産工学研究所 〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7)

³ Furuno Electric Co. Ltd. 9-52 Ashihara, Nishinomiya, Hyogo 662-8525, Japan (古野電気株式会社 〒662-8580 兵庫県西宮市芦原町9-52)

⁴ Tohoku Gakuin University, 2-1-1 Tenjinsawa, Izumiku, Sendai-shi, 981-3193, Japan (東北学院大学 〒981-3193 仙台市泉区天神沢2-1-1)

* Tel: 045-788-7698, akamatsu@affrc.go.jp

になってきた。広帯域信号の利点は、高い空間分解能を得られ、対象物体の判別に適している点である。音響探査で空間分解能を上げる手法は、すでによく知られており、パルス圧縮技術といわれる。特性のわかっている広帯域音を送信した場合、受信側でその特性にあわせたフィルタを装備すれば、複数ターゲットからの反射波が時間的に重なってもこれを分離できる。受信波形を送信波形で畳み込み、相関係数の高い時点を信号の到来時刻とすればよい。もちろんイルカのソナーのように実際のパルス幅を短くし、実空間で8 cm程度とする方法もあるが¹⁾、音波としてのエネルギーが小さく遠距離探査には向かない。いずれにしても高い時間分解能を得ることで、

精細な空間イメージを再現できる (Fig. 1)。変調の方法はなんでもよく、たとえばM系列を用いた位相変調は有効である。ただし実用的には計算能力と送波器の送信特性に依存する。もっとも簡単なチャープ音の場合、送信パルスの周波数を時間的に線形に変調しておき、受信側でこの波形にあわせた変調カーブの信号と相互相関を計算する。

生物系特定産業技術研究支援センターの援助を受けてすすめられた「イルカ型対象判別ソナーの開発」(2007-2011)では、広帯域型と従来の狭帯域型の差は一目瞭然であり、カタクチイワシの密な魚群中でもエコグラムが一尾ずつ分離してみえた (Fig. 2)。このような高精細

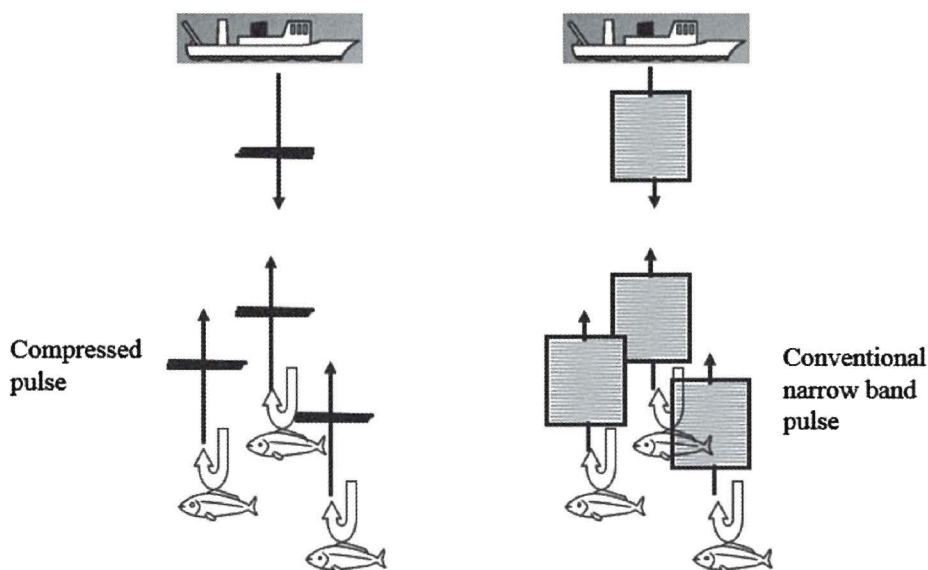


Fig. 1 Schematic view of SURF-BRD for shrimp trawl.

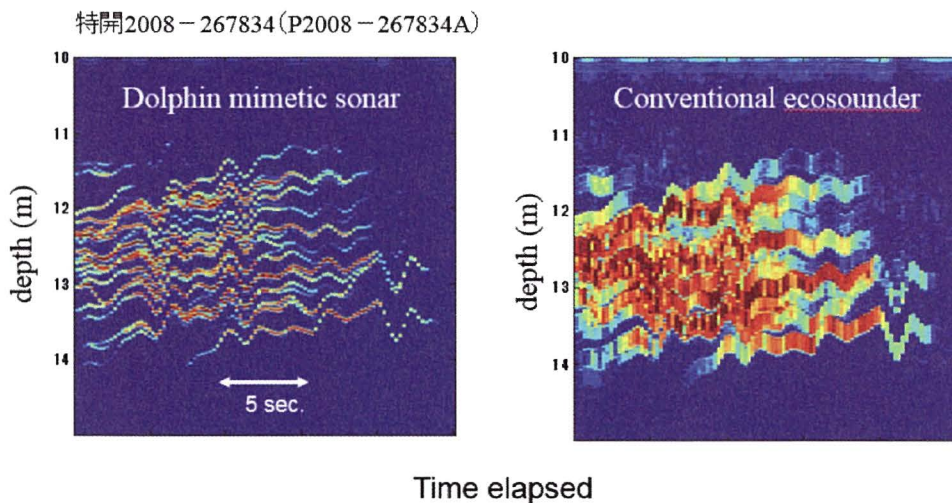


Fig. 2 Chain of front weight (left) and wheel of front weight (right) for shrimp trawl.

魚群探知機は研究用途だけでなく、すでに商用として普及し始めている。2016年の夏、古野電気(株)が広帯域スプリットビームシステム(FCV-2100)を発売した。また本稿では触れないが、広帯域散乱では反射強度いわゆるターゲットストレングス(TS)の周波数応答を計測することができる。すなわち、対象の大きさだけでなく、形やインピーダンス差を反映した応答スペクトルが得られると示唆される。これを魚種判別に用いる試みがなされており³⁾、懸垂状態の水槽実験ではよい成果を挙げているが、野外への応用にはまだいくつかハードルが存在する。

広帯域技術は、研究段階から応用段階に入り、その精細なイメージと反射スペクトルの特性から、いかにして役立つ情報を取り出すかが今後の焦点である。本稿ではとくに養殖業への展開を踏まえて、現段階で利用可能な広帯域技術の応用について述べる。

2. 魚群中の個々の魚の体長計測

これまで音響手法による魚体長の計測は、魚の背方向からの散乱強度いわゆるターゲットストレングスを計測し、対象とする種の規準化TSを元に反射率が体長に比例するとの仮定をおいて推定している。養殖魚の場合は種は既知であるから、規準化TSを入手することは可能である。たとえばFCV-2100では、任意の魚群をマウスで選択し、その中にいるマイワシの魚体長分布を表示する(Fig. 3)。問題は、魚の個体ごとにちょうど真上から背方向に音響ビームを当てられるか否かにある。

ターゲットストレングスは、音響ビームが魚に対してどの方向から当たったかによって同一種あるいは同一個体でも大きく異なる。たとえばタチウオは名前のとおり鉛直に姿勢を保つことが知られており、上から音響ビームをあててこれを捉えることは困難である。魚の主要な音響反射体はウキブクロである。種によって形や大きささらには有無も異なるが、おおむね回転楕円体で近似される。ウキブクロは頭方向に向かって若干上に傾いてい

るため、最大の反射効率が見られるのは魚が頭を少し下げたときである。しかし、野外でこの状況での反射音を取り出すのは難しい。

これを解決するのがスプリットビーム方式である。一つの送波器に対して4つの受信器を用意し、2つの受信器の組み合わせと反射音の到達時間からターゲットまでの相対角度と奥行きを計算して、音響ビーム内の三次元的な位置を計測する²⁾。パルス音を多く発すれば、対象となる魚の水中での軌跡を計測できる。音響ビームが背方向、可能であれば頭を若干下に向けたときの反射強度を測れば、基準となるターゲットストレングスと比較することで体長を推定できる。ところが、先述のように従来型の魚群探知機では、とくに養殖環境のような密な魚群中における個々の魚からの反射音を分離することが難しかった。

高い分解能の広帯域スプリットビームシステムを用いることで、音響ビーム内での個体の軌跡を計測することができる。これを利用することで、より精確な背方向散乱強度を推定できる。先述のFCV-2100は、演算の複雑さから個々の魚への音の入射角度を勘案していないが、原理的にはこうした補正は可能である。高い空間分解能をもつ広帯域技術を用いると、尾数の直接計測もできる。一つ一つの魚からの反射音で再構成された軌跡の数を数えることにより、そのビーム内を通過した延べ個体数がわかる。最近接位置をつなげ、魚の遊泳速度からはあり得ない運動を示す軌跡を排除することで、個体の音響的な軌跡を同定する(Fig. 4)⁴⁾。

3. 養殖業における魚の計数方法

養殖業の場合、限られた生け簀のなかでの全尾数を求めればよい。しかも、投入尾数と漁獲尾数により、正解

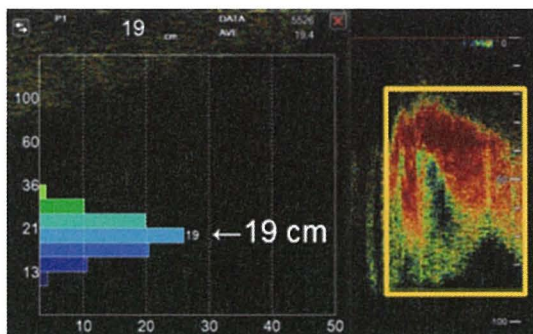


Fig. 3 Fish mover and wheel for Dredge net that minimize impacts on *Zostera* bed.

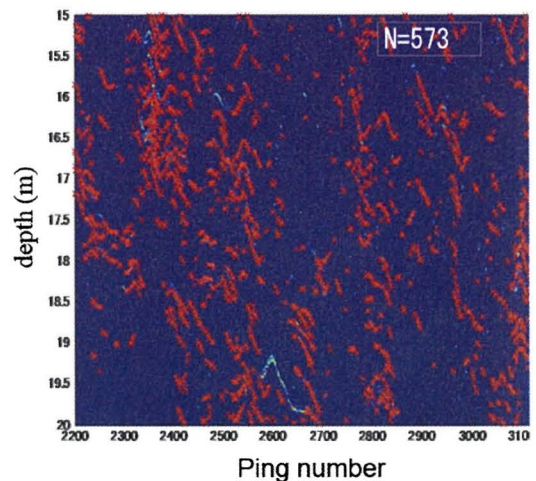


Fig. 4 Direction of water current around fish mover.

となる全尾数が最初と最後はわかっている。これは動く船から回避する魚の数を数えることに比べれば、大きな利点である。ただし、許される誤差が小さいという点が難しい。需要にあわせて出荷調整を行う場合、ほんとうにこのような間接的な方法で生け簀の中の尾数がわかるのかどうかは不明である。そこで、直接法による魚の計数方法の開発が求められている。

これまでに紹介した広帯域スプリットビームを使えば簡単そうに見えるが、現実的には見逃し率と同一個体のダブルカウント率の算定が重要である。これは音響手法に限らず、映像・ピンガー・ゲノムなどあらゆる手法に共通するハードルである。これに解を与える手法はすでに水産資源学から提案されている。標識再捕法である⁵⁾。標識再捕とは、対象となる資源から個体をランダムに採取し、リボンタグなどで標識し、野外で同種と完全に混じったあと再び捕獲することで、捕獲しなかったものも含めた全資源量を推定する手法である。単純ランダムサンプリングの場合、100尾捕まえて標識して放流し、後に再捕された個体が100尾であった場合、その資源状態は危機的である。全数捕獲している可能性が高く、見逃された個体がないため、再捕率が100%である。すなわちまったく薄まっていない。一方、100尾捕まえて標識し、あらためて100尾捕まえたところ1尾しかリボンがついていなかった場合、資源は100倍に薄まっている。すなわち、資源量は1万尾と推定される。薄まり具合が大きいほど、捕獲されていないつまり見逃された個体数が多く、再捕率が減る。

これが成り立つためには多くの仮定がある。捕獲のされやすさに個体差がないこと、リボンの装着がその後の生残率に影響を及ぼさないこと、再捕獲までの間に同種と完全に混じり合うこと、再捕のされやすさにも個体差がないことである。野外で現実にはこの条件を満たすのは難しい。単一種だけが漁獲されることは希で、漁獲効率は体長によっても大きく変わる、装着のストレスがまったく影響がないと証明することも難しい。なぜなら、死亡個体は再捕されず、その原因も不明なためである。養殖生け簀であれば、これらの厳しい条件をある程度克服できると考えられる。

開発しなければならない標識は、次の条件を満たす必要がある。生け簀内の魚にまったくランダムに標識できること、取り付けても個体の行動に影響を及ぼさないこと、すなわち生残率や再捕率が標識魚と非標識魚で同じであること。標識魚と非標識魚が空間的にも時間的にも生け簀の中で完全に混じり合うこと。つまり、生け簀内のどこを観測しても一定の割合で標識魚が観測できると仮定できることである。

本シンポジウムにおける濱野らの発表は、これらを解決するための重要な方法を提案している。濱野らは、餌

の魚に超音波ピンガーを埋め込み、養殖魚に食べさせて標識した。これならば装着にともなうハンドリングの影響を回避でき、装着後の行動への影響も最小限に抑えられる。残念ながら体内にとどまる時間は長くないため、その間に計測を終了しなければならないが、十分に実施可能な方法である。かれらはこの方法で得られた遊泳速度情報から生け簀内での魚の周回周期を算出し、マルチビームソナーによる延べ個体数の直接計数結果を補正する手法を提案している。

魚に食べさせるものをピンガーではなく音響反射体としてはどうかというのが本稿での提案である。ソナーベル⁶⁾という商品があり、小型ながら極めて効率の良い音響反射体である。これを濱野らの方法で魚に食べさせる。食べさせた数はわかっているので、そのあとは広帯域スプリットビームでもマルチビームでもかまわないが、ソナーベルを食べた魚が音響ビーム内を何回通過したかを計数する。ソナーベルの反射強度は極めて大きく、空間分解能に優れた探査装置であれば個体のターゲットストレングスを比較することで容易に装着個体を識別できる。同時に、ソナーベルを食べていない魚の延べ通過数も計数する。食べた魚の遊泳深度や速度あるいは生け簀中心からの距離に、食べていない魚との差異がないことを検証する。差異があった場合にはそれぞれの観測領域ごとにその偏差係数を求め補正する。ソナーベルを食べた魚の数と食べていない魚の数の比は、まさに先述した薄まり具合であり、生け簀内の全個体数を推定できるという提案である。

この手法にはいくつかのメリットがある。個々の魚の遊泳行動を測る必要はなく、統計的な均一性のみ担保すればよい。短時間で多くの尾数計測ができるため、たとえば10分を1観測間隔として薄まり具合を求め、これを何十回も繰り返すことで平均値を安定させることができる。さいころを数多く振ったときの目の出方に見られるように、計測回数が増えれば増えるほど、その平均値は収束する。あとは必要とされる精度が達成されるまで、計測を繰り返せばよい。体内から排出されたソナーベルは生け簀の底から回収し再利用する。

現場での実際の応用にはいろいろな工夫が必要となると考えられるが、本稿での提案が、養殖生け簀内での精密な魚の係数の議論のきっかけとなれば幸甚である。

謝 辞

本研究は生物系特定産業技術研究支援センター「イカ型対象判別ソナーの開発」(2007-2011) および科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業「海洋生物の遠隔的種判別技術の開発」JPMJCR11A1の援助により実施された。

参 考 文 献

- 1) WWL Au: The sonar of dolphins, Springer, 1993.
- 2) T. Imaizumi *et al.*: Visualization of fish movement and size estimation of the fish by using broadband split-beam echo sounder. Techno-Ocean (Techno-Ocean). IEEE, 552-555, 2016.
- 3) M. Ito *et al.*: Target strength spectra of tracked individual fish in schools, Fisheries Science, 81 : 621-633, 2015.
- 4) M. Ito *et al.*: Tracking Individual Fish in a Dense School with a Broadband Split-beam System. The Journal of the Marine Acoustics Society of Japan 41 : 169-182, 2014.
- 5) 北田修一. 標識再捕に基づく種苗放流効果の評価に関する統計学的研究. 日本水産学会誌 60 : 443-447, 1994.
- 6) Islas-Cital, Alan, et al. Performance of an enhanced passive sonar reflector SonarBell: A practical technology for underwater positioning. Underwater Technology 31 : 113-122, 2013.