



Title	音響的手法を用いた仔稚魚及び動物プランクトンを対象とした曳網採集具の採集効率の推定に関する研究
Author(s)	呂, 振; Zhen, Lu
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(水産科学)
Dissertation Number	甲第13533号
Issue Date	2019-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k13533
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91692
Type	doctoral thesis
File Information	Zhen_Lu.pdf



音響的手法を用いた
仔稚魚及び動物プランクトンを対象とした
曳網採集具の採集効率の推定に関する研究

**(Study on Estimating Sampling Efficiency
of Framed Midwater Trawl and Ring Net
Using an Acoustic Method)**

北海道大学大学院水産科学院
海洋生物資源科学専攻
Hokkaido University
Graduate School of Fisheries Sciences
Division of Marine Bioresource and
Environmental Science

呂 振
Zhen Lu

平成 31 年 (2019)

音響的手法を用いた仔稚魚及び動物プランクトンを対象とした 曳網採集具の採集効率の推定に関する研究

目次

第1章 緒言	1
1-1 研究の背景	1
1-2 研究の目的	6
1-3 論文の構成	7
第2章 曳網採集具の採集効率の推定法	8
2-1 採集効率の定義	9
2-2 理論モデルによる入網率の推定	13
2-3 採集試験による網内残存率の推定	16
2-4 他の観測手法を用いた採集効率の推定	18
2-5 音響的手法を用いた採集効率の推定	20
第3章 音響的手法を用いたフレーム型中層トロール (FMT) の 採集効率の推定	24
3-1 方法	25
3-1-1 生物採集と解析	25
3-1-2 音響データの収録と解析	29
3-1-3 音響情報による採集効率の推定	30
3-1-4 スケトウダラ稚魚のターゲットストレンジス	34
3-2 結果	35
3-2-1 生物採集	35
3-2-2 体積後方散乱強度と採集個体数密度の関係	39
3-2-3 音響情報により推定した採集効率	41

3-3	考察	44
3-3-1	採集効率の体長依存性	44
3-3-2	音響情報により推定される採集効率の推定誤差	48
3-3-3	異なる周波数による採集効率の検討	53
3-3-4	本研究による採集効率の妥当性	60
第4章 採集条件が曳網採集具の採集効率に与える影響		64
4-1	方法	66
4-1-1	生物採集	66
4-1-2	音響データの収録と解析	68
4-2	結果	69
4-2-1	異なる光環境と網地色による採集生物の特徴	69
4-2-2	曳網速度の違いによる採集生物の特徴	80
4-2-3	異なる採集条件で推定した採集効率	88
4-3	考察	93
4-3-1	光環境がスケトウダラ稚魚の採集効率に与える影響	93
4-3-2	網地色がスケトウダラ稚魚の採集効率に与える影響	94
4-3-3	曳網速度がスケトウダラ稚魚の採集効率に与える影響	95
第5章 音響的手法を用いたプランクトンネットの採集効率の推定		96
5-1	方法	99
5-1-1	リングネットとFMTを用いた生物採集	99
5-1-2	音響データの収録と解析	103
5-1-3	種別採集効率の推定	104
5-1-4	理論モデルによる動物プランクトンのTSの推定	106
5-2	結果	108
5-2-1	生物採集	108
5-2-2	種別に推定された採集効率	115
5-3	考察	122
5-3-1	プランクトンネットの種別採集効率の推定について	122
5-3-2	動物プランクトンの定量採集について	127

第 6 章 総合考察	129
6-1 曳網採集具の採集効率と影響要因	129
6-2 音響的手法により推定した採集効率の信頼性	132
6-3 曳網漁具を用いた資源調査への応用	136
結論	141
謝辞	143
参考文献	145

第 1 章 緒言

1-1 研究の背景

日本を取り巻く広大な海は、豊かな水産資源に恵まれている。その恩恵を受け、日本人は古くから魚介類を獲り、多種多様の水産物を摂取してきた。その魚食文化は、今や世界でも認知され、例えば、魚介類を使用する寿司は、そのまま「Sushi」と呼ばれている（水産白書，2017）。

しかしながら、世界で水産物需要が大きな伸びをみせている中で、日本の漁業は、いわゆる 200 海里時代の到来による遠洋漁業の縮小や資源の変動による漁獲量の減少などにより厳しい状況に直面している。2017 年度の日本周辺水域の資源評価結果によれば、資源評価の対象となった 50 魚種 84 系群のうち、資源水準が高位にあるものが 14 系群（17%）、中位にあるものが 31 系群（37%）、低位にあるものが 39 系群（46%）と評価された。

さらに、今後、日本の漁業人口も減少すると見込まれる中で、日本の水産業は、最新の技術を駆使して、水産資源を適切に管理しつつ、消費者ニーズに応じた水産物を効率的に生産し、安定的に供給することが求められている。

そのため、水産研究所・大学を中心に、市場での漁獲物の調査、調査船による海洋観測及び漁獲調査等を通じて必要なデータを収集するとともに、漁業によるデータも活用して、日本周辺水域の主要な水産資源について資源評価を実

施している。海洋法に関する国際連合条約（国連海洋法条約）が 1994 年に発効し、日本は 1996 年に批准した。この条約では、沿岸国は自国の排他的経済水域（Exclusive Economic Zone, 以後、EEZ とする）における生物資源の漁獲可能量（Total Allowable Catch, 以後、TAC とする）を設定し、水産資源の保全と有効利用の義務を有することになり、TAC 制度による資源管理が実施されている。TAC の設定は生物学的根拠に基づく望ましい漁獲量（Allowable Biological Catch, 以後、ABC とする）を算定し、社会的及び経済的な要因を加味して決定される（原, 2000）。水産資源量の評価には、現存量推定と加入量の予測が不可欠である。このうち、前者は漁獲量の情報を用いた資源統計学的手法とトロール調査や音響調査といった漁業から独立した情報を用いて資源現存量を推定しており（日本水産資源保護協会, 2001）、後者は加入前の卵仔稚魚の分布状況を調べる産卵調査により加入資源量を予測している（渡部, 1983）。しかしながら、加入資源量を推定するためには、卵から加入直前の未成魚の資源量を把握することが重要である（大関, 2000）。

一方、対象とする水産資源を中心とした調査・研究とは別に、水産資源を生態系ピラミッド、すなわち対象資源を、生息する環境における低次の生物から高次の生物に至る生物層の一部として捉える必要性が指摘されるようになってきた（Gislason *et al.*, 2000 ; Eletheriou, 2000）。したがって、低次の生物であるプランクトンから大型魚類までの各栄養段階の生物の定量的な評価が重要となっている（Thomas and Kirsch, 2000）。

これらのことから、水産資源の評価手法の発展には、卵やプランクトンなど遊泳性の低い小型の生物、稚魚を含むマイクロネクトンレベルの生物、さらに成魚クラスの生物といった各栄養段階での生物の定量的な評価が不可欠である。現状では、これらの生物採集にはそのサイズに応じて異なる採集技術が用いられるが、マイクロネクトンレベルの生物の採集、計測の定量性はまだ十分ではなく、定量採集技術の確立が急務となっている。

資源調査のための生物の採集具や採集方法については、1980年代に既に完成したと考えられていたが、その後の音響調査や深海観察技術等の一般化により、既存の採集結果は必ずしも定量的ではないことが明らかとなってきた。さらに、新規加入量の推定においても、既存の稚魚採集具では稚幼魚の定量採集は難しいことがわかってきた。そこで、新たに仔稚魚の定量採集に適した採集具である、MOHT (Matuda-Oozeki-Hu Trawl) やフレーム型中層トロール (Framed Midwater Trawl, 以後、FMT とする) が開発された (Methot RD, 1986 ; 青木ら, 2000 ; Hu *et al.*, 2001 ; Itaya *et al.*, 2001 ; Oozeki *et al.*, 2004)。これらの採集具の開発は、これまで困難であった定量的な採集結果に基づく食物網の解明や、音響観測機器などを併用した採集具の採集効率の推定といった新たな研究分野を切り開いた (大関, 2007)。

FMT などの採集具の定量性を確保するために重要な指標として、採集効率がある (藤森ら, 2008)。採集具で得られた生物のサイズ組成や密度情報は、採集効率の違いによって母集団から偏ることが知られている (Wileman *et al.*, 1996 ;

Godø *et al.*, 1998)。そのため、定量採集を行うためには、対象とする生物に対して、使用する採集具の効率が把握されている必要がある。

採集効率は、網口が通過した水柱の体積に対して実際に濾過した水の体積の割合（濾水効率）、網前に存在した生物量に対して入網した生物量の割合（入網率）、および網内に入った生物に対して網目から抜け出さずに残った割合（網内残存率）の積で表される（中村，1989）。このうち、濾水効率と網内残存率は、使用する網地の網目サイズに直接影響を受ける。したがって、遊泳能力を持つ仔稚魚を主な対象とした場合、FMTのように網目サイズがプランクトンネットに比べて十分大きい採集具では、対象生物が逸出しない網目サイズを用いることで、その採集効率は単純に採集対象となる生物量（濾水体積中の生物量）と採集された生物量の比となる（Godø, 1998 ; Itaya *et al.*, 2007 ; 藤森, 2007）。一方、Barkley (1972) は、円形網口を持つ曳網の入網率を曳網条件や魚の回避能力に関するパラメータを用いてモデル化し、入網率が、網口面積や曳網速度の他、対象生物の視認能力、遊泳能力などにも影響されることを示した。しかし、採集具の前方に存在する生物量は一般には未知である。これを知るためには、他の調査手段を利用する必要がある。

これに対して、計量魚群探知機（以後、計量魚探機とする）を用いた音響資源調査法では、対象生物に忌避されることなくその生物量を推定することが可能である（Ona and Godø, 1990 ; 飯田, 1995 ; 安部ら, 1999）。計量魚探機は、船から水中に向けて超音波パルスを発射し、魚群や海底等からのエコーを受

信・測定するシステムである。しかしながら、エコーの強度のみからは魚群を構成する魚の種類や体長は分からない。そこで、対象魚群の一部をトロール網等によって漁獲し、魚群を構成する魚種や体長分布を調べる。それらが分かれば、魚群中の「魚1個体当たりの反射強度（ターゲットストレングス、以後 TS とする）」が求められるため、魚群全体から跳ね返ってきた反射強度の総量をこの値で除することによって、魚群に含まれる魚の個体数密度が分かる。

したがって、音響情報により推定した生物密度が現場の生物密度を正しく表していると仮定するならば、その現場の生物密度と採集具により採集される生物密度の比を採集効率の推定値と考えることができる。

1-2 研究の目的

計量魚探機の音響情報を用いて曳網採集具の採集効率の推定を試みた既往の研究は少ない (O'Driscoll, 2002)。さらに、仔稚魚を対象とした採集具の採集効率を推定した研究は見当たらない。そこで、本研究は、主に仔稚魚や動物プランクトンの採集を目的とした FMT などの曳網採集具の採集効率を、音響的手法を用いて推定する方法を提案する。

採集効率には複数の要因が影響している。その主な要因は対象生物の遊泳速度、視認能力などの生物的特性、曳網速度、網地色、採集具の規模などの物理的特性、光条件、潮流などの環境的特性が挙げられる。採集具の定量性を保証するためには、これらの要因の影響を解明する必要がある。そこで、スケトウダラ稚魚を対象として、複数の実験条件の組み合わせの下で、光条件と網地の色、および曳網速度が曳網採集具の採集効率に与える影響を明らかにする。

一方、動物プランクトンの採集に用いられるプランクトンネットは調査海域における微小生物の定性的な評価はできても、定量性は担保されていない。そこで、リングネットと FMT を同時に使用し、生物種や体長に対する採集特性を調べ、動物プランクトンに対するプランクトンネットの採集効率を求める。

1-3 論文の構成

本論文は本章を含め 6 章で構成される。

第 2 章では、曳網採集具の採集効率を求めるための既存の方法と研究例を紹介した。また、音響的手法を用いた採集効率の推定の原理を述べた。

第 3 章では、北海道噴火湾周辺海域において、仔稚魚や動物プランクトンを対象とした曳網採集具である FMT を用いてスケトウダラ稚魚を採集するとともに、計量魚探機を用いて現場の音響情報を取得し、これらの比較から FMT の採集効率を推定した。

第 4 章では、実験条件が曳網採集具の採集効率に与える影響を明らかにするため、スケトウダラ稚魚を対象として、昼夜毎に、黒色網地と青白色網地の 2 種類の FMT を用い、さらに 3 段階の曳網速度で比較採集試験を行い、光環境、網地色、および曳網速度が FMT の採集効率に与える影響を考察した。

第 5 章では、音響的手法を用いて、小型動物プランクトンの採集に用いられるリングネットの生物種や体長に対する採集効率を明らかにするとともに、中大型動物プランクトンであるオキアミ類の採集に用いられる FMT の採集特性を明らかにした。

第 6 章の総合考察では、音響的手法を用いた採集効率の推定の問題点と意義、および漁業資源調査における応用や将来性について議論した。

第 2 章 曳網採集具の採集効率の推定法

トロール網など曳網採集具を用いた資源調査では、対象生物種や体長を確認できるほか、CPUE を用いた資源量の相対評価に広く用いられている。もし、採集具の採集効率が明らかになれば、漁獲試験の豊富なデータが、CPUE による相対値ではなく、生物密度の絶対値として表現することが可能になる。

そこで、本章では曳網採集具の採集効率を推定するために行われてきた様々な実験手法や理論モデルをレビューし、特に本論文で提案している、音響的手法を用いた曳網採集具の採集効率の推定原理を紹介し、その可能性や意義について考察した。

2-1 採集効率の定義

採集具を用いた調査では、生物種や体長選択性などの採集特性が既知であるものを使用することが理想的である。さらに、定量採集を行うためには、対象とする生物に対して使用する採集具の採集効率が正確に把握されている必要がある。この採集効率は、採集対象となる生物総量と実際に採集された生物量の比率と定義される。

中村（1989）は曳網採集具の採集効率 q を入網率 p ，網内残存率（網目選択性） s ，濾水効率 f を用いて以下のように定義した。

$$q = psf \quad (2.1)$$

また、1 曳網当たりの採集個体数 $C(\text{ind.})$ は、生物の真の個体数密度 ρ (ind.m^{-3})，曳網距離と網口面積の積から求めた見かけの水柱の体積 V (m^3) を用いて、以下のように表される。

$$C = \rho V q \quad (2.2)$$

さらに、単位体積当たりの採集個体数 a は以下のように表される。

$$a = \frac{c}{v_f} = psp \quad (2.3)$$

したがって、単位体積当たりの採集個体数は、入網率 p 、網内残存率 s 、および対象生物の分布密度 ρ の積となる。

曳網採集具では、曳網速度を大きくすると網口回避の低減が期待できるものの、網にかかる抵抗が大きくなり、このためにやむなく網目を拡大することになり、小型の個体で網目からの逸出が生じる。東海（2007）は、十分に広い体長範囲を持つ対象生物に対する二つの採集具による採集の特徴を Fig. 2-1 のように示している。一つは網目の小さな採集具 A であり、もう一つは網口回避を避けるために高速で曳網できるようにやや網目を大きくした採集具 B である。採集効率においては、小型個体は主に網目からの逸出が生じる残存率、大型個体は網口回避が生じる入網率により影響を受ける。

本来は、この網口回避と網目選択は同じ採集で起きる現象ではあるが、一般的に別々に推定する。入網率については、逃避する生物の反応開始距離や逃避の遊泳速度などのパラメータを含めた理論式が提案されている（Barkley, 1964 ; Barkley, 1972 ; 中村, 1989）。残存率は網目の大きさだけでなく曳網速度などにも依存することが知られている（Murphy and Clutter, 1972 ; Munk, 1988）。この残存率を調べるためには、調べたいネット外側をさらに細かな網目のネットで履うカバーネット法（Saville, 1958 ; 齋浦・東海, 2005）や、十分

小さな網目の採集具を対象とした比較実験からの推定 (Murphy and Clutter, 1972 ; 上野, 1986) が試みられ, その解析には, 従来から漁具選択性の解析方法, 例えば刺網の選択性曲線推定法などが応用されてきた (Lenarz, 1972)。

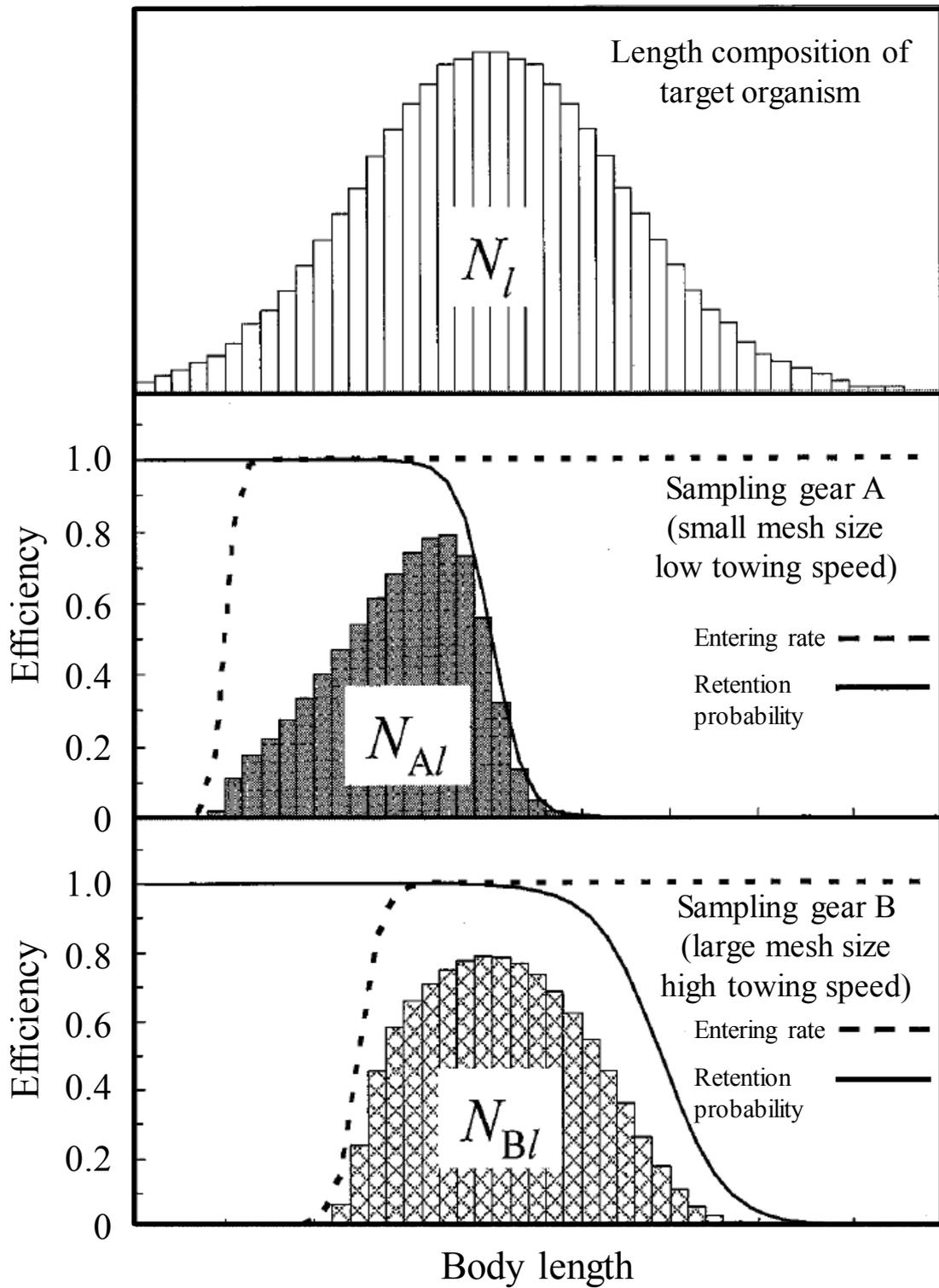


Fig. 2-1 Comparison of length composition in different sampling gear (Tokai, 2007).

2-2 理論モデルによる入網率の推定

卵や仔魚など遊泳能力がきわめて低い生物は、網口前方に存在するものが全て入網すると考えられる。しかし、遊泳能力のある生物は採集具からの回避行動を行うため全ての生物が入網するわけではない。

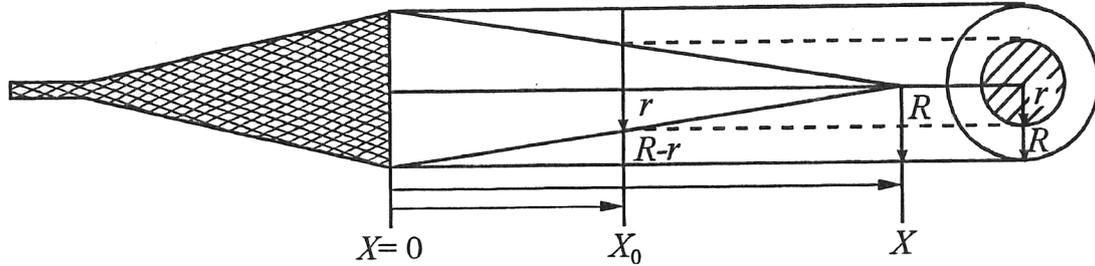
Barkley (1972) は円形網口枠を持つネットを対象として、網と魚の位置関係から、生物が接近する網を最短の経路で逃避すると仮定し、最小の入網率 p を次式で表した。

$$p = \left(1 - \frac{X_0 U_e}{R \sqrt{U^2 - U_e^2}} \right)^2 \quad (2.4)$$

ここで、 R は網口半径 (m)、 U は網の対水速度 (ms^{-1})、 U_e は魚が網を回避する遊泳速度 (ms^{-1})、 X_0 は魚が網を視認してから行動を起こす時の網からの距離 (m) (以後、反応距離とする) である (Fig. 2-2-a)。これらの4つのパラメータのうち R と U は操作条件なので既知である。 U_e と X_0 は魚種や体長およびその場の環境条件によって変化する生物学的要因であり、これらの値が定めれば p を求めることができる。そして、稚魚まき網と直径 1 m のリングネットの採集結果 (Murphy and Clutter, 1972)、1 m リングネットと IKMT の採集結果 (Murphy and Clutter, 1972)、および IKMT を用いた 2 通りの異なる曳網速度による採集結果 (Aron and Collard, 1969) をこのモデルに適用し入網率を求めた。

また、中村（1992）はボンゴネットによる2通りの異なる曳網速度による採集結果をこのモデル式に適用し、入網率を推定した（Smith and Richardson, 1977 ; 中村, 1992）。しかし、これらの実験では曳網条件の変化が少なかったため、回避能力に関する2つのパラメータを同時に推定することはできなかった。そこで、板谷（2002）は、FMTを対象として、複数の曳網条件による採集結果をBarkleyの入網率のモデル式に適用し、マイクロネクトンの入網率および体長階級別の分布密度を推定し、定量採集法の有効性を示した（Fig. 2-2-b）。また、阿部（2007）は、FMTで採集されたツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* に対し、Barkleyの入網率に対象生物のランダムな遊泳行動を考慮した確率モデルを併用して入網率を算出した。

a) The entering rate model of the conical net. (Barkley, 1972)

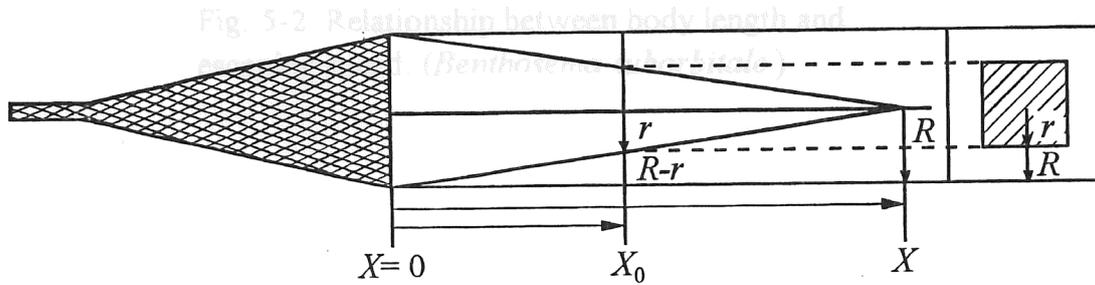


$$p = \frac{\text{Area of cross section at distance } X_0}{\text{Area of the net mouth opening}} = \left(\frac{\pi r}{\pi R}\right)^2 = \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

$$\therefore r = R \left(1 - \frac{X_0}{X}\right), \quad X = R \sqrt{\frac{U^2}{U_e^2} - 1}$$

$$p = \left(1 - \frac{X_0 \cdot U_e}{R \sqrt{U^2 - U_e^2}}\right)^2$$

b) The entering rate model of the FMT. (板谷, 2002)



$$p = \frac{\text{Area of cross section at distance } X_0}{\text{Area of the net mouth opening}} = \left(\frac{2r}{2R}\right)^2 = \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

Fig. 2-2 Definition of the entering rate p for a) conical net, b) FMT.

2-3 採集試験による網内残存率の推定

曳網採集具の網形状は、一般的に網口からコッドエンドに至るまで徐々にその面積が小さくなる漏斗状となる。このため、入網した対象生物は網口からコッドエンドに至るまでに、徐々に集約され、その密度が高くなっていく。松下ら（1999）は、この網内における集約を網内集約過程と定義している。この過程を明らかにすることは、資源保護のための選択的漁獲を実現するための漁具の設計資料として重要であり、様々な方法を用いて研究されている。例えば、エビトロール網や中層トロール網の身網の各部にポケット網を装着し、各部のポケット網の漁獲量の比較から、網内集約過程を調べる研究が行われている。このポケット網を用いた方法は、身網全体を覆うカバーネット方式よりも簡便に利用できるため、トロール網やカゴ網などの採集特性の評価に利用されている。

松下ら（1999）は、トロール網各部の網地を切除して、ポケット網をトロール網に装着することにより、網内の流動環境が集約過程に影響を与える事を明らかにした。その中でトロール網の網内集約過程においてコッドエンドに近づくにしたがって魚群密度が濃くなるため、ポケット網による採集個体数もコッドエンドに近い方が多くなる事を示した。

阿部（2007）は、FMT の身網各部での集約過程を明らかにするため、FMT の身網にポケット網を複数装着し、ツノナシオキアミの身網各部からの網目通

過頻度を調べたが、有意な差は認められなかった。これは、ツノナシオキアミの視覚反応が弱い夜間に行ったため、ツノナシオキアミが能動的な逃避行動を起こさなかったからと考えられた。

一方、徳島県において、カタクチイワシシラスを漁獲対象とする船曳網のコードエンドには目合 260 径 (50 cm の網幅にある網糸 (縦糸) の本数 (小山, 1973)) のモジ網が使用されるが、斎浦ら (2003) は船曳網の数カ所にポケット網を装着して曳網実験を実施したところ、カタクチイワシシラスはコードエンドから最も多く逸出していることがわかった。また、藤森ら (2008) は、ズボン式フレームトロール (Trousers-type Framed Midwater Trawl, 以後, T-FMT とする) を用いて北海道南部太平洋海域において、オキアミ類とスケトウダラ稚魚を対象とした採集実験を行い、動物プランクトンとマイクロネクトンに対する採集能力を調べるとともに、同採集具の小型生物に対する選択性について検討した。

2-4 他の観測手法を用いた採集効率の推定

曳網採集具の採集効率や掃過領域内の生物の割合などが、これまでにいくつかの観測技術を用いて実験的に推定されている (Somerton *et al.*, 1999)。

例えば, Adams *et al.* (1995) は ROV (Remotely operated vehicle) を用いて, Krieger and Sigler (1996) は潜水艇を用いて現場の生物密度を直接観察し, 採集具による採集結果との比較から採集効率を推定した。

また Harden-Jones *et al.* (1977) はトロール曳網経路に音響応答タグで識別された多数の魚を配置し, それらの遊泳行動を観察することによってトロール網の採集効率を推定した。

また, 閉鎖空間におかれた生物集団を繰り返しサンプリングして, CPUE の減少に DeLury 法を適用して, 採集具の採集効率を求めた枯渇実験 (Joll and Penn, 1990 ; Lasta and Iribarne, 1997) も行われた。

一方, Dickson(1993a)は, トロールによる漁獲プロセスを垂直集群, 水平集群, および逃避の3つの要素に分け, これらの組み合わせで漁獲プロセスを数学モデルで表現し, 採集効率を推定した (Dickson, 1993a ; Dickson, 1993b)。

採集効率の推定における問題点は, 対象とする生物の個体数密度あるいは採集具に遭遇する生物の個体数が不明なことである。これに対して, Adams *et al.* (1995), Krieger and Sigler (1996) や Harden-Jones *et al.* (1977) は漁具以外の手段を用いてこれを得ようとした。しかし, 映像情報で捉えることのできる範

囲は狭く，また，タグ実験では，タグを装着できる個体数が限られており，現場の個体数を精度よく見積もることは難しい。

2-5 音響的手法を用いた採集効率の推定

音響資源調査に用いられる計量魚探機は、超音波パルスを水中に発射し、魚群からのエコー信号を定量的に処理して魚群密度や魚のサイズに比例した信号を得る可視化測定機器である。音の強さは水中で拡散減衰や吸収減衰により減衰するので、音の強さを定量化するためには、発射してから戻るまでの時間に応じて受信した音の強さを補正する必要がある。この補正を TVG (Time Varied Gain) と言い、計量魚探機には不可欠なものである。現在の音響資源調査のほとんどはエコー積分法と呼ばれる手法を用いておりエコー強度が魚群密度に比例することを利用したものである (古澤, 1990)。

計量魚探機から出力される体積後方散乱係数 S_v は単位体積当たりの魚群密度 ρ_v に比例する。

$$S_v = \sigma_{bs}\rho_v \quad (2.5)$$

ここで、 σ_{bs} は魚 1 個体の後方散乱断面積を表し、その値のデシベル表現である TS と以下の関係がある。

$$TS = 10\log\sigma_{bs} \quad (2.6)$$

よって,

$$\sigma_{bs} = 10^{\frac{TS}{10}} \quad (2.7)$$

となる。

後方散乱断面積 σ_{bs} は基本的に体長 TL の 2 乗に比例する。したがって, 比例定数を b とすると,

$$\sigma_{bs} = bTL^2 \quad (2.8)$$

となり, 両辺を対数変換すると,

$$TS = 20\log TL + 10\log b \quad (2.9)$$

となる。この式の定数項 $10\log b$ は体長の 2 乗で規準化されたターゲットストレンジスであり, 魚種ごとにほぼ一定の値をとる。通常は規準単位として cm を用い, TS_{cm} と表記する。すなわち,

$$TS = 20\log TL + TS_{cm} \quad (2.10)$$

したがって、 TS_{cm} と魚群を構成する魚の平均体長 \overline{TL} が分かれば (2.5) 式より魚群密度 ρ_V を求めることができる。

一方、採集生物密度 ρ_{Tr} は採集個体数 C を網口が通過した水柱の体積 V_{Tr} で除することにより求めることができ、 V_{Tr} は採集具の網口面積 A と曳網距離 L の積なので次式で表現できる。

$$\rho_{Tr} = \frac{C}{V_{Tr}} = \frac{C}{AL} \quad (2.11)$$

したがって、音響情報により推定された生物密度 ρ_{Ac} と採集具により採集された生物密度 ρ_{Tr} の比をとることにより採集効率 q を推定することができる。

$$q = \rho_{Tr} / \rho_{Ac} \quad (2.12)$$

この方法は計量魚探機で推定された生物量と採集具で採集された生物量の高に高い線形性があることが条件であり、これらを証明するいくつかの研究が行われた (O'Driscoll, 2002)。例えば、Mackinson *et al.* (2005) は、北海における底生魚類調査において音響データと着底トロールによる漁獲量の高に高い相関を認めた。また、着底トロールを用いたメバル (*Sebastes spp.*) を対象とした研究 (Krieger *et al.*, 2001)、中層トロールを用いたカラフトシシャモ (*Mallotus*

villotus) を対象とした研究 (O'Driscoll, 2002) でも、音響データと漁獲データの間に関係が高い相関が得られている。

これまでに、計量魚探機の音響データを用いて採集効率の推定を試みた研究として、Doray *et al.* (2010) による、ヘイク (*Merluccius merluccius*) などの底生魚類に対する着底トロールの採集効率を推定した例や、チェサピーク湾における底生魚類であるニベ (*Micropogonias undulatus*) とホワイトバス (*Morone americana*) に対する着底トロールの採集効率の推定例 (Hoffman *et al.*, 2009) がある。

第 3 章 音響的手法を用いたフレーム型中層トロー ル（FMT）の採集効率の推定

本章では北海道噴火湾周辺海域におけるスケトウダラ稚魚の調査に使用される FMT の定量性を明らかにするため、計量魚探機を用いて現場の生物密度を高精度に推定し、採集された生物密度との比較から稚魚採集における FMT の採集効率の推定を行い、その有効性を検討した。

3-1 方法

3-1-1 生物採集と解析

2013年6月(臼尻沖), 2014年6月(室蘭沖), および2015年4~6月(鹿部沖と室蘭沖西部)に, 北海道南部に位置する噴火湾周辺海域(Fig. 3-1)において, 北海道大学附属練習船うしお丸(179トン)を用いて実験を行った。使用したFMT(Fig. 3-2)の網口枠は黒色のステンレス製パイプ(ϕ 43 mm)で構成される2 m \times 2 mの正方形であり, 網地は脚長1.5 mmのナイロンモジ網(黒色), 身網の長さは7.75 mであった。網口上部には各曳網の濾水量を算出するための濾水計(RIGO社製)と, 曳網中にリアルタイムで網の深度をモニターするための深度計(SIMRAD社製, PI50)を取り付けた。Fig. 3-2に示したように曳網方法は水平曳きとし, 計量魚探機により確認されたSSLに対し, 目標の深度を曳網できるように適宜ワープ長を調節した。そして, 目標深度に到達した後, 網深度の安定を確認してから10分間(2013年)または5分間(2014年, 2015年), 対水船速3ノットで曳網を行った。

昼間は特に大型個体は採集具から逃避するため採集されにくいと言われている。そこで, より幅広い体長範囲のスケトウダラの採集効率を推定するために, 夜間に計17回の曳網を行った。採集されたサンプルは, 船上において10%ホルマリン溶液で固定し, 後日, サンプルからスケトウダラ稚魚をすべて抽出し計数した後, 尾叉長(以後, FLとする)を電子ノギス(Mitutoyo, Absolute 500)

を用いて 0.1 mm 単位で測定した。また、1 曳網あたり 100 個体以上採集された場合は、無作為に抽出した 100 個体について体長測定を行った。

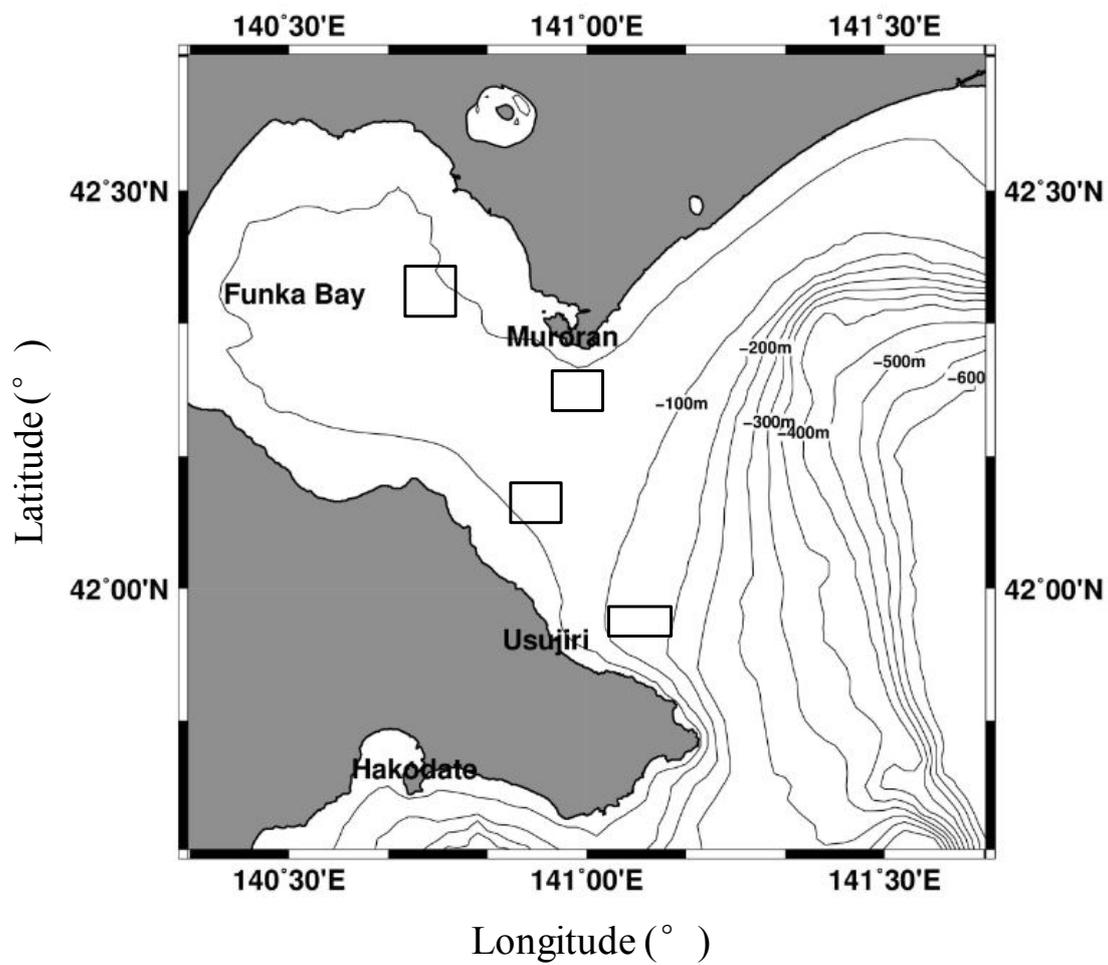


Fig. 3-1 Survey areas.

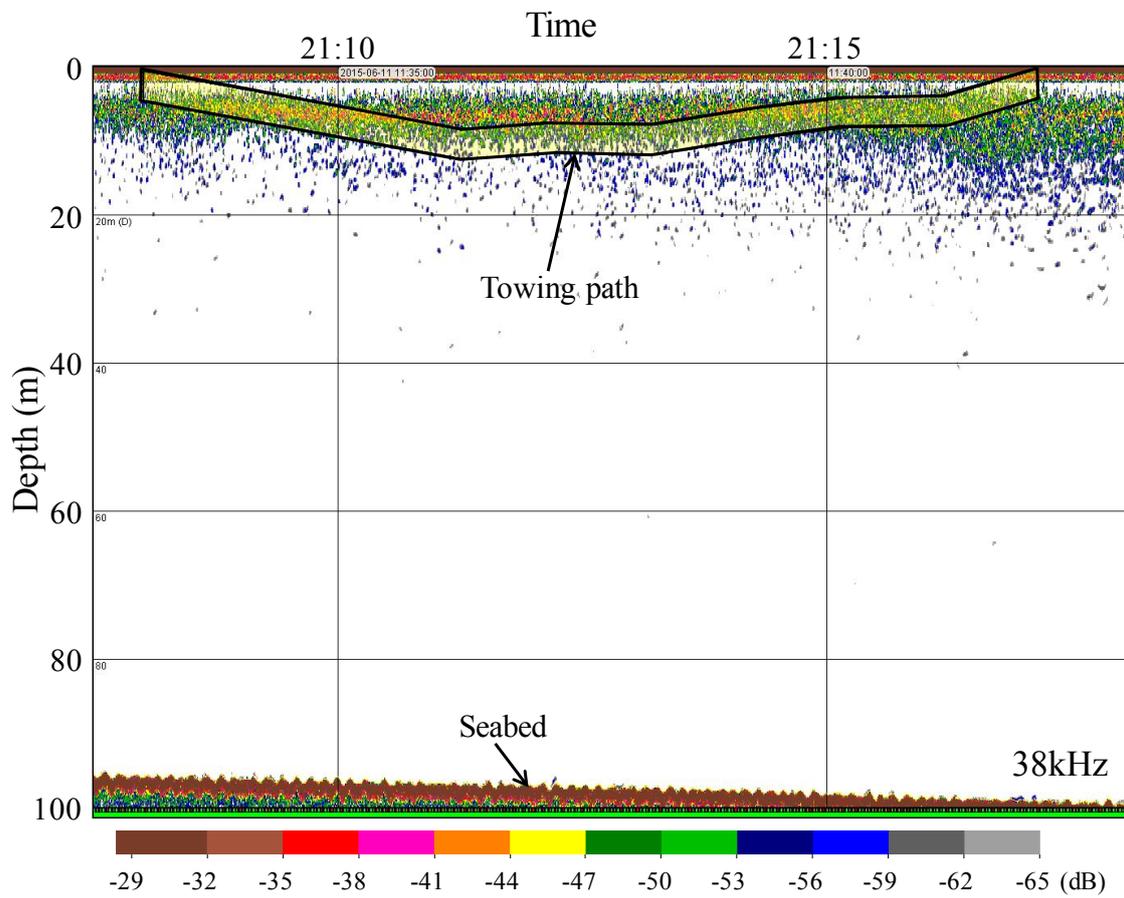


Fig. 3-2 FMT with black-net (upper) and echogram (lower) as towing.

3-1-2 音響データの収録と解析

音響データは、うしお丸に搭載された周波数 38, 120, 200 kHz の計量魚探機 EK60 (SIMRAD, Kongsberg, Norway) を用いて、パルス幅 1.024 ms, パルス間隔 1 s で収集し、深度 3 m から海底または深度 500 m までを対象として収録した。音響システムの較正は、Foote *et al.* (1987) の方法により較正球を用いて行った。音響データの処理には、水中音響データ処理ソフトウェア Echoview 4.0 (Myriax, Australia) を用い、深度計から得られた曳網深度をもとに、FMT の曳網深度を含む 4 m の幅 (網上 1 m から網下 1 m まで) で、曳網開始から巻き上げまでの範囲内において、平均 SV を算出した。スケトウダラ稚魚は有鰾魚であること、および動物プランクトンより大型であることから、動物プランクトンによる音響散乱の影響を最小限に抑えるため、採集効率の推定には周波数 38 kHz を用い、エコーグラムのスレッシュホールドを -65 dB に設定した (Demer, 2004)。

3-1-3 音響情報による採集効率の推定

採集効率 q は対象魚の網目からの逸脱がないものと仮定した場合、(3.1) 式に示すように、1 曳網当たりの採集個体数 C (ind.) を、網口が通過する水柱内に存在していた魚の個体数 N (ind.) で除することにより推定できる (Itaya *et al.*, 2007)。

$$q = C/N \quad (3.1)$$

また、採集個体数 C は、採集された魚の個体数密度 ρ_{Tr} (ind.m⁻³) と 濾水体積 V_{Tr} (m³) の積で表すことができる。

$$C = \rho_{Tr} V_{Tr} \quad (3.2)$$

水柱内に存在していた魚の個体数密度は、音響情報により次の(3.3)式と(3.4)式を使用して推定する (飯田, 1995)。

$$N = \rho_{Ac} V_{Ac} \quad (3.3)$$

$$\rho_{Ac} = S_v / \sigma_{bs} \quad (3.4)$$

ここで、 ρ_{Ac} (ind.m⁻³) は音響情報により推定される個体数密度（以後、音響密度とする）、 V_{Ac} (m³) は網口が通過した水柱の体積、 S_v (m⁻³) は SV (dB) の線形量である体積後方散乱係数、 σ_{bs} は TS の線形量である後方散乱断面積である。

次に V_{Tr} と V_{Ac} はそれぞれ (3.5) 式と (3.6) 式で表され、それらの関係が (3.7) 式となる。

$$V_{Tr} = \frac{Ax}{RD} \quad (3.5)$$

$$V_{Ac} = vtA \quad (3.6)$$

$$V_{Tr} = fV_{Ac} \quad (3.7)$$

ここで、 A (m²) は採集具の開口面積、 x は濾水計の回転数、 RD (m⁻¹) は濾水計のキャリブレーションにより得られた曳網 1 m あたりの回転数、 v (ms⁻¹) は曳網速度、 t (s) は曳網時間、 f は濾水効率である。濾水効率は、濾水計から計算された濾水体積を、曳網速度、曳網時間、網口面積の積で表現される網口が通過した水柱の体積で除することにより求められる (Barkley, 1972 ; 西沢・安楽, 1956 ; 五十嵐, 1957)。本研究に使用した濾水率は、FMT では 2013 年 6 月の曳網の平均値である 0.8 を、80 cm リングネットでは 2011 年 4 月における曳網の平均値である 0.9 を代表値として全ての推定に適用した。

さらに、(3.7) 式に (3.1) ~ (3.4) 式を代入し、 S_v について整理すると (3.8) 式を得ることができる。

$$S_v = \frac{f\rho_{Tr}\sigma_{bs}}{q} \quad (3.8)$$

したがって、計量魚探機によって S_v を測定し、採集具によってスケトウダラ稚魚の体長と密度を知ることにより、対象魚の後方散乱断面積である σ_{bs} と ρ_{Tr} を求めることができれば、採集効率 q を推定できる。

海洋に生息するスケトウダラ稚魚の体長分布は当然不均一であり、体長によって後方散乱断面積も異なるため、 S_v は (3.9) 式に示すように体長階級別の ρ_{Tr} と σ_{bs} の積和として表される (Iida *et al.*, 1996)。そこで、本研究では体長階級別の採集効率を以下の重回帰式により推定する。

$$S_v = \frac{f\rho_{Tr1}\sigma_{bs1}}{q_1} + \frac{f\rho_{Tr2}\sigma_{bs2}}{q_2} + \dots + \frac{f\rho_{Trm}\sigma_{bsm}}{q_m} + \varepsilon \quad (3.9)$$

ここで、 m は体長階級であり、 ε は残差である。

複数の曳網を行った場合、(3.9) 式は曳網回数分得られる。ただし、各体長階級に対する採集効率は曳網回に関わらず一定と仮定する。すなわち、各曳網回の S_v は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
S_v^1 &= \frac{f^1 \rho_{Tr1}^1 \sigma_{bs1}^1}{q_1} + \frac{f^1 \rho_{Tr2}^1 \sigma_{bs2}^1}{q_2} + \dots + \frac{f^1 \rho_{Trm}^1 \sigma_{bsm}^1}{q_m} + \varepsilon \\
S_v^2 &= \frac{f^2 \rho_{Tr1}^2 \sigma_{bs1}^2}{q_1} + \frac{f^2 \rho_{Tr2}^2 \sigma_{bs2}^2}{q_2} + \dots + \frac{f^2 \rho_{Trm}^2 \sigma_{bsm}^2}{q_m} + \varepsilon \\
&\vdots \\
S_v^n &= \frac{f^n \rho_{Tr1}^n \sigma_{bs1}^n}{q_1} + \frac{f^n \rho_{Tr2}^n \sigma_{bs2}^n}{q_2} + \dots + \frac{f^n \rho_{Trm}^n \sigma_{bsm}^n}{q_m} + \varepsilon
\end{aligned} \tag{3.10}$$

ここで、 n は曳網回、 S_v^n は n 回目の曳網時に測定された曳網深度の平均体積後方散乱係数、 ρ_{Trm}^n 、 σ_{bsm}^n は n 回目の曳網時に採集された生物のうち、体長階級 m に含まれる生物の個体数密度および平均後方散乱断面積である。また、 $q_1 \sim q_m$ は体長階級別の採集効率である。

計量魚探機で得られた平均 S_v を目的変数、採集具により推定した個体数密度と音響モデルにより推定した各生物の σ_{bs} の積を説明変数、採集効率の逆数を偏回帰係数として統計ソフト IBM SPSS Statistics 23.0 を用いて重回帰分析を行い、各体長階級の採集効率 q_m を推定した。

3-1-4 スケトウダラ稚魚のターゲットストレンジス

(3.9) 式や (3.10) 式で用いるスケトウダラ稚魚の後方散乱断面積は次のように求めた。貞安 (2005) は懸垂法によりスケトウダラ稚魚の TS を測定し、得られた TS のピッチ角特性から、平均 TS を算出した。そして、尾叉長 100 mm 以下のスケトウダラ稚魚の平均 TS (TS_{AVG}) と尾叉長の関係を (3.11) 式のように求めた。そこで、本研究では、採集された個体の平均 TS を平均尾叉長 FL を用いて同式より求めた。

$$TS_{AVG} = 26.57 \log FL - 74.03 \quad (3.11)$$

3-2 結果

3-2-1 生物採集

各年のFMTの曳網状況とスケトウダラ稚魚の採集結果をTable 3-1に示した。採集深度は8～13mであり、ほぼ表層付近であった。採集個体数は、2013年は1730～4402尾、2014年は469～872尾、2015年は44～19616尾であった。また、同一月、同一深度でも採集個体数密度が変わることもわかった。

2013年と2014年6月に得られたスケトウダラ稚魚の尾叉長頻度分布をFig. 3-3に示した。スケトウダラ稚魚の平均尾叉長と標準偏差は、各年において、それぞれ 46.6 ± 10.1 mm (2013年)、 43.6 ± 4.9 mm (2014年)であった。体長範囲は、2013年の方が広く25～78 mmであり、2014年では25～70 mmであった。

2015年に採集された稚魚の尾叉長頻度分布を4月、5月、6月に分けてFig. 3-4に示した。スケトウダラ稚魚の平均尾叉長と標準偏差は各月において、それぞれ 16.6 ± 4.5 mm (4月)、 30.4 ± 5.3 mm (5月)、 50.7 ± 6.0 mm (6月)であった。月別の調査は全て月初頭に行っており、10～70 mmのスケトウダラ稚魚の月平均成長速度は約17 mm/mon.となった。また、4月から6月にかけて、スケトウダラ稚魚の尾叉長範囲は約10～35 mm (4月)、約20～50 mm (5月)、約40～70 mm (6月)であり、いずれの月においても体長範囲は約30 mmであった。

Table 3-1 Summary of towing condition of FMT

Haul No.	Year/Month	Towing duration (min)	Warp length (m)	Towing depth (m)	Catch (ind.)	ρ_{Tr} (ind.m ⁻³)	SV (dB)
1	2013/Jun.	10	25	8	1730	0.39	-51.76
2	2013/Jun.	10	30	8	3094	0.83	-46.92
3	2013/Jun.	10	25	8	4402	1.13	-49.98
4	2014/Jun.	5	40	9	872	0.28	-56.51
5	2014/Jun.	5	46	11	469	0.15	-61.44
6	2014/Jun.	5	41	11	471	0.15	-60.96
7	2015/Apr.	5	84	11	19616	5.52	-61.42
8	2015/Apr.	5	120	12	19430	5.35	-59.94
9	2015/Apr.	5	112	9	9544	1.94	-63.93
10	2015/Apr.	5	147	12	8692	2.01	-64.71
11	2015/May	5	112	13	1456	0.28	-65.01
12	2015/May	5	110	12	4788	0.79	-59.92
13	2015/May	5	31	7	1199	0.38	-64.32
14	2015/May	5	46	11	1130	0.39	-61.30
15	2015/Jun.	5	45	8	44	0.02	-67.06
16	2015/Jun.	5	36	9	606	0.26	-55.32
17	2015/Jun.	5	51	11	6794	2.40	-45.26

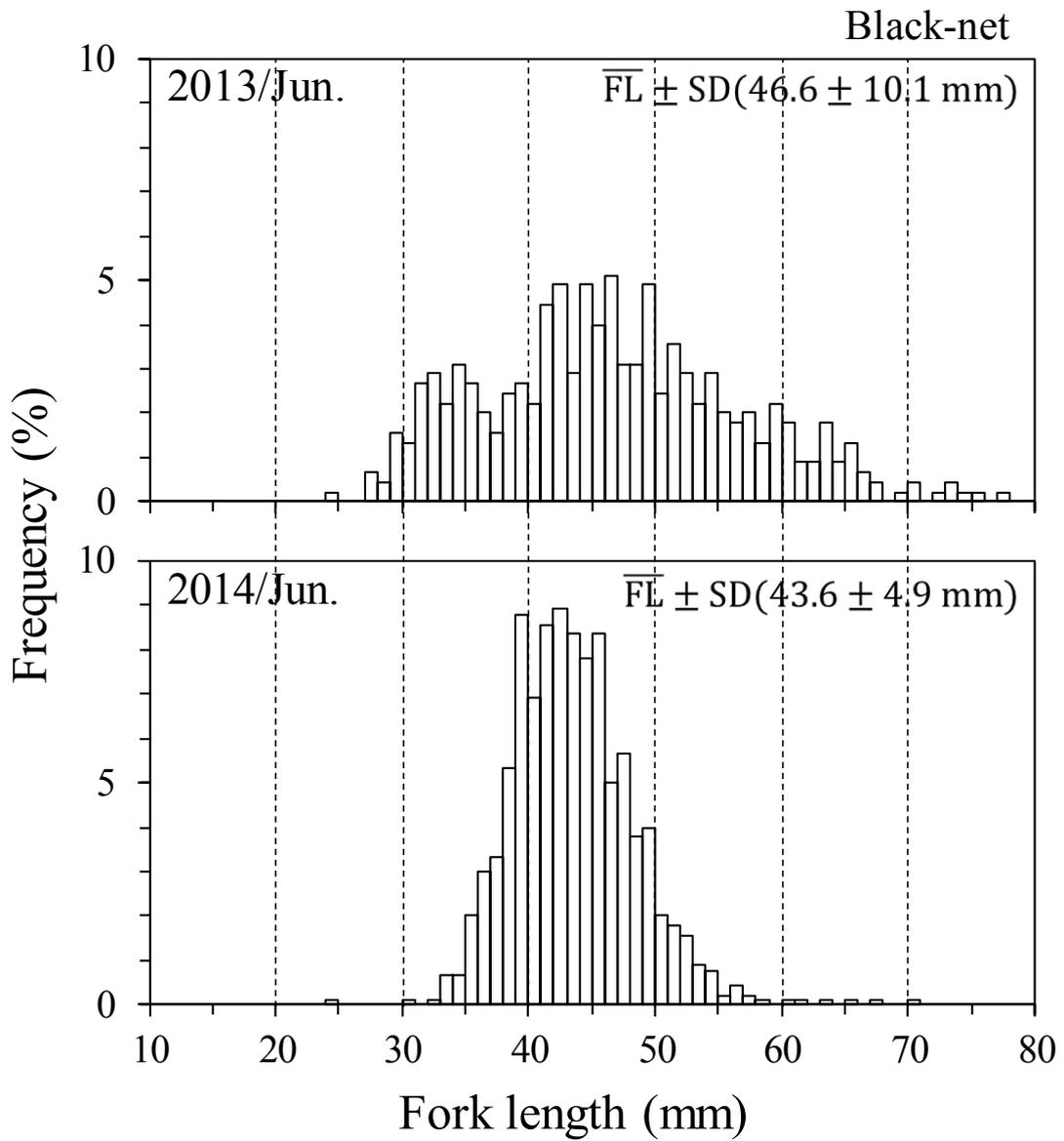


Fig. 3-3 Length frequency distribution of juvenile walleye pollock caught by FMT with black-net during nighttime in 2013 and 2014.

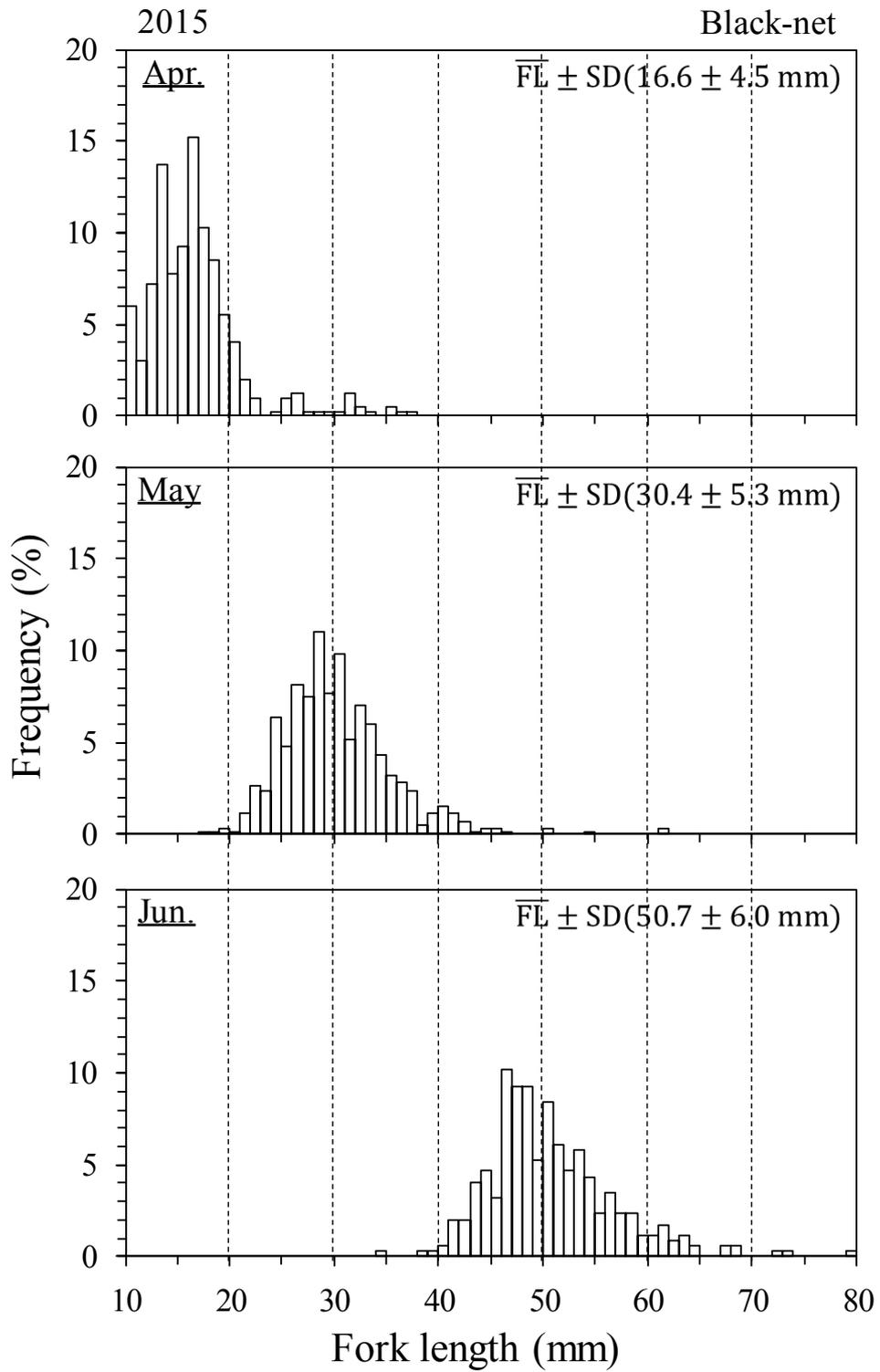


Fig. 3-4 Length frequency distribution of juvenile walleye pollock caught by FMT with black-net during nighttime in 2015.

3-2-2 体積後方散乱強度と採集個体数密度の関係

17回の曳網に対して、FMTの曳網部の平均SV (Table 3-1) と採集されたスケトウダラ稚魚の個体数密度 (Table 3-1) の関係を調べた。その結果を2015年4月、2015年5月、2013年から2015年の6月に分けて Fig. 3-5 に示した。月毎でSVと採集密度に明瞭な関係があるのがわかる。また、月別に採集密度が高いほど実測SVが大きくなる傾向が見られた。4月から6月までの1個体あたりの平均TSをあらわす回帰式の定数項を見ると、それぞれ-67.59 dB, -58.78 dB, -49.45 dB となり順に大きくなっていった。スケトウダラ稚魚の平均尾叉長が小さかった4月では、(3.11) 式から求めたスケトウダラ稚魚のTSと良く一致していた。しかし、スケトウダラ稚魚の平均尾叉長が大きくなると、(3.11) 式で求めたTSとの差が大きくなった。

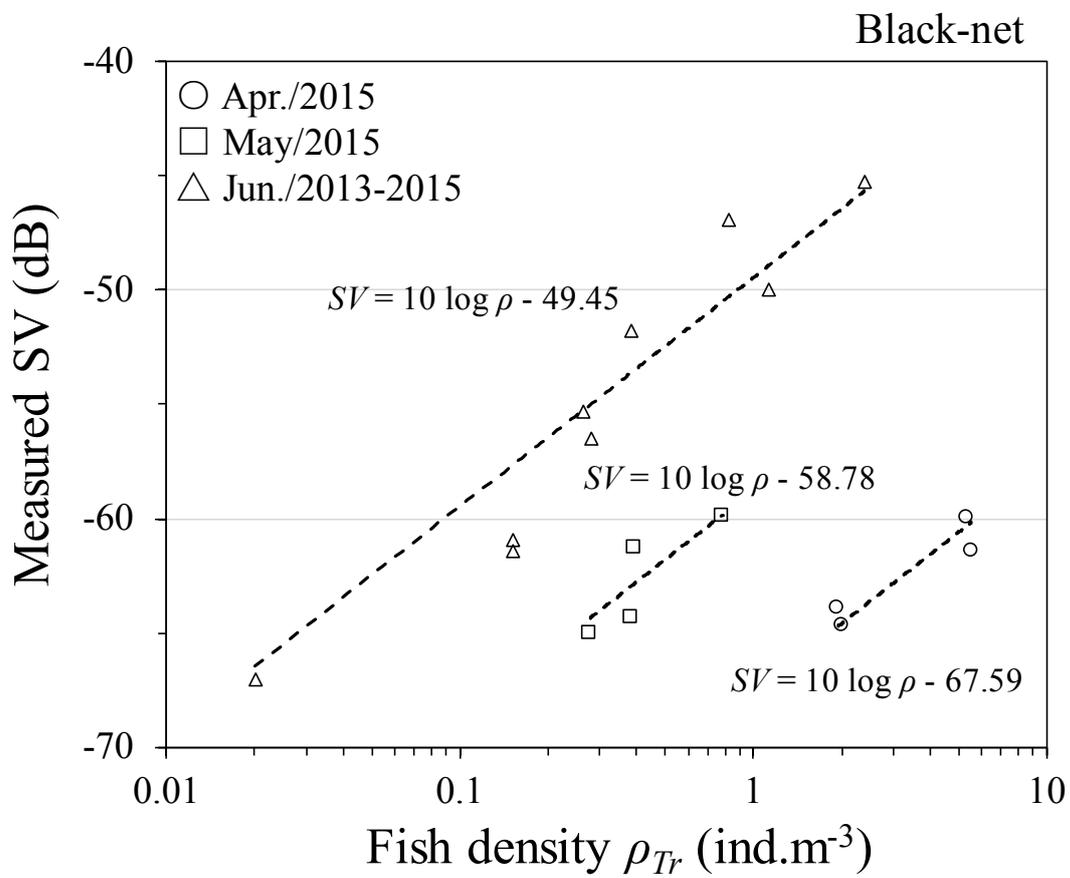


Fig. 3-5 Relationship between the measured SV and the fish density in different months.

3-2-3 音響情報により推定した採集効率

2015年4月, 2015年5月, 2013年から2015年の6月のデータをもとに(3.8)式を用いて求めたスケトウダラ稚魚に対するFMTの採集効率をFig. 3-6に示した。ここで(3.8)式の σ_{bs} は曳網毎で得られた平均尾叉長をもとに(3.11)式より求めた。その結果, 採集されたスケトウダラ稚魚の採集効率は0.1から0.9まで変化した。また, Fig. 3-6で示したように, 平均尾叉長の変化に伴う採集効率の変化の傾向はロジスティック関数で近似することができた($R^2=0.83$)。推定されたロジスティック回帰式は(3.12)式となった。

$$q = \frac{1}{1+e^{-2.33+0.08FL}} \quad (3.12)$$

次に, 計17回の採集実験で採集されたスケトウダラ稚魚を10 mm間隔で6つの体長階級に分け, (3.10)式を用いて重回帰分析($R^2=0.90$)を行い, 体長階級別の採集効率を推定した(Table 3-2)。推定された採集効率は体長階級に応じて0.08~0.99と変化し, いずれの値も p 値は低く($p<0.001$), (3.10)式で示すモデルは有意と判断された。また, Fig. 3-6に示した結果と同様に体長が大きくなると採集効率が低下することが示された。

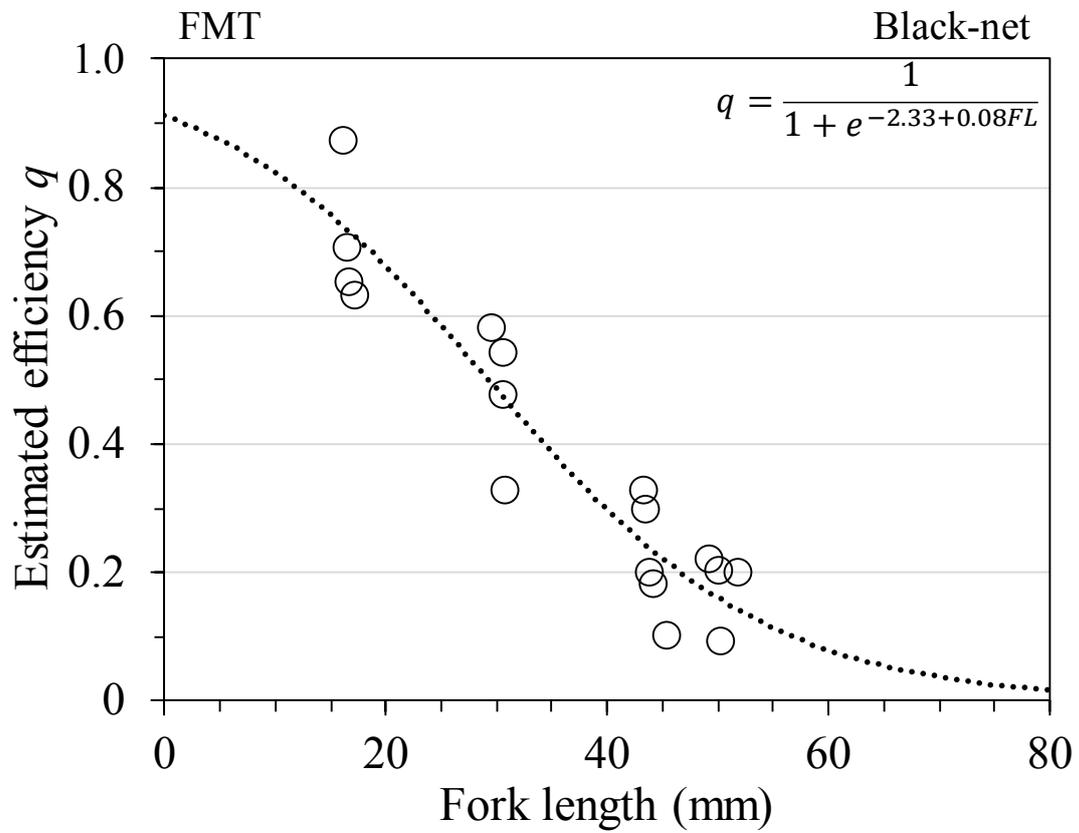


Fig. 3-6 Estimated sampling efficiency q for mean fork length of juvenile walleye pollock caught. The dotted line is an approximate curve.

Table 3-2 Estimated catch efficiency of FMT for each length class

Fork length range (mm)	q	p	95% Confidence interval for q	
			Lower bound	Upper bound
10-20	0.99	<0.001	0.89	1.10
20-30	0.65	<0.001	0.49	0.97
30-40	0.56	<0.001	0.47	0.69
40-50	0.33	<0.001	0.31	0.34
50-60	0.27	<0.001	0.26	0.28
60-70	0.08	<0.001	0.08	0.08

3-3 考察

3-3-1 採集効率の体長依存性

本研究では、スケトウダラ稚魚を対象に音響情報を併用して FMT の採集効率を推定した。その結果、曳網ごとに求めた採集効率 (Fig. 3-6) と体長階級別の採集効率 (Table 3-2) いずれにおいても体長の増加に伴い低下する様子が確認され、両者の傾向も一致していた。この低下の原因として、スケトウダラ稚魚の遊泳能力と視認能力が関係していると考えられる。板谷 (2002) は FMT を用いて曳網速度と網口面積を変えて比較採集実験を行い、ハダカイワシ属とソコハダカの入網率が体長に比例して低下する傾向を示した。このような結果は魚の回避能力が体長に伴い向上するためとしている。また、Ryer and Olla (2000) は、スケトウダラ稚魚の漁具に対する反応行動は視覚によるものが大きいことを示している。本研究では、曳網は全て夜間 15 m 以浅 (Table 3-1) で行われており、さらにワープ長が短いこともあり、船の灯火の影響で網周辺が完全な暗状態でなかったと考えられる。一般に表層は環境照度の影響を受けやすく、ある程度網が視認できる状況にある。網を視認した上に、大型個体が小型個体より強い遊泳能力を持つため、より高い割合で回避できたと考えられる。

そこで、Barkley (1972) の提案したモデルに基づいて、本研究で推定された採集効率からスケトウダラ稚魚の採集具に対する反応距離の試算を試みる。

Barkley (1972) モデルは最小の採集率 p を (2.4) 式のように表した。同式から

反応距離 X_0 は次式で表せる。

$$X_0 = \frac{(1-\sqrt{p})\left(R\sqrt{U^2-U_e^2}\right)}{U_e} \quad (3.13)$$

FMT の網口は 2 m × 2 m の方形であるが，ここでは，仮に一辺の半分 1m を半径 R とする円形枠を想定する。スケトウダラ稚魚の遊泳速度については，Ryer and Olla (1997) が摂餌時において毎秒体長の 1.0～2.2 倍 (体長 60～75 mm) であることを示している。採集時の魚の逃避速度は最大遊泳速度に近いと考えられるため，逃避速度を毎秒 2.2×体長と仮定してスケトウダラ稚魚の夜間の反応距離を求めた結果を Fig. 3-7 に示した。この図より尾叉長 10～60 mm のスケトウダラ稚魚の反応距離は 2.7～10.2 m と推定された。Zhang and Arimoto (1993) は，体長 100 mm のスケトウダラの眼の形態学的特性からその視認距離を 2～13 m の範囲と推定しており，本結果とほぼ一致した。また，体長により推定された反応距離の変化の傾向は指数関数で近似することができた ($R^2=0.90$)。

遊泳能力と視認能力など生物的要因は生物自身の成長段階によって変わるが，特に視認能力は環境要因からも影響を受ける。実際に，照度条件によってスケトウダラ稚魚の網に対する反応が異なるという報告もある (藤森ら，1999)。しかし，音響資源調査は昼夜に関わらず実施することも多い。また，藤森ら (2008) も本研究同様，時間帯により採集されるスケトウダラ稚魚の体長が大きく変わ

ることを示している。したがって、稚魚の各成長段階における定量的評価のため、昼夜間など様々な曳網条件で体長階級別に採集効率を推定する必要がある。

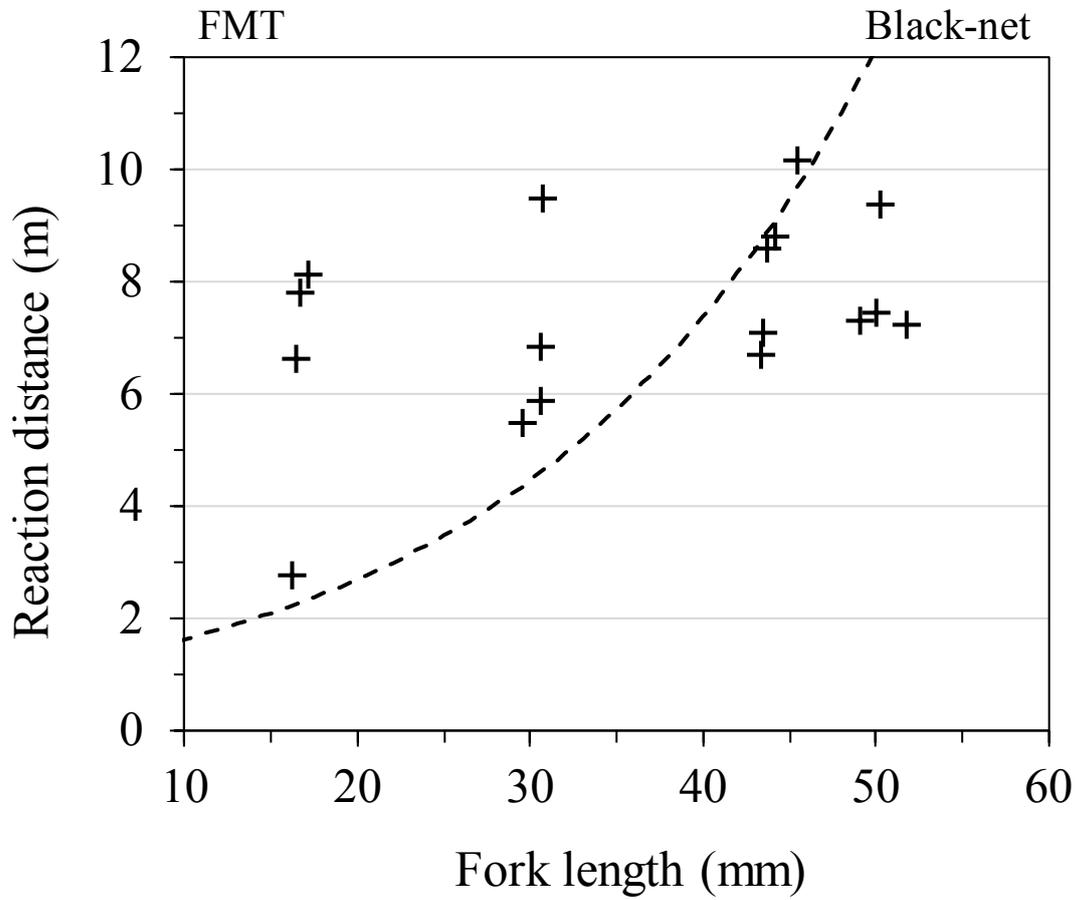


Fig. 3-7 Estimated reaction distance for mean fork length of pollock caught in each haul which was estimated by Barkley's model. The dashed line is an approximate curve.

3-3-2 音響情報により推定される採集効率の推定誤差

本章では、1回の曳網において、FMTにより得られた個体数密度と、その体長分布から得られる平均 σ_{bs} 、および、計量魚探機で得られる曳網範囲内の平均 S_v から採集効率を推定する方法を提案した。さらに、多数回曳網を行う場合、計量魚探機で得られた平均 S_v を目的変数、FMTにより得られた個体数密度と各体長階級の σ_{bs} の積を説明変数とする重回帰式により体長階級別の採集効率を推定できることを示した。ただし、同方法では音響情報の変動が推定値の精度に直接影響を与える。そこで、その変動が採集効率の推定値にどの程度の変動を生じさせるかについて感度解析した。

まず、SVの変動による採集効率の推定誤差を考察する。SVは体積1立方メートルあたりの魚群からのエコー強度であり、体長分布が一定の場合、個体数密度の指標として扱うことができる(古澤, 2001)。しかし、月別の曳網は同じ地点で連続3回あるいは4回行ったが、採集されたスケトウダラの密度(2015年6月以外)は2~3倍の差を示した(Table 3-1)。この要因の一つとして、SSL内の生物分布の偏りが考えられる。また、2015年6月においては、曳網を行った地点で風が強く、波も高く、海況が不安定だった。このような海洋環境においては、表層にいる生物の構成や分布が変動しやすいので、SSL内の生物分布の偏りはさらに大きくなっていた可能性がある。Szalay *et al.* (2007)は、ベアリング海東部におけるトロール漁獲と音響データの比較において、高い相関が

得られる水深範囲を調べ、海底とヘッドロープの間の層で最も高い相関が得られることを示した。本研究では、ワープ長と曳網深度を使用して、曳網軌跡と曳網深度の上下 1 m の範囲の SV を高精度に推定した。しかし、層毎の分布密度の偏りが大きい場合、積分範囲の設定が SV の誤差を生む可能性がある。これら 2 つの要因が計量魚探機と FMT による SV の不一致につながると思われる。そこで、計量魚探機で得られた平均 SV の変動に対する、採集効率の推定値の変動を (3.8) 式で調べた。その結果、SV が -3 dB から +3 dB まで 1 dB ずつ変化すると、推定される採集効率はそれぞれ 200%, 158%, 126%, 100%, 79%, 63%, 50% になることがわかった。つまり、SV が 3 dB 変わると、推定される採集効率は 2 倍変わることになる。したがって、採集効率の推定精度を高めるためには、曳網深度の精度を高めるとともに、各条件での曳網回数を増やす必要があるだろう。

次に、TS の変動による採集効率の推定誤差を考察する。本研究では貞安 (2005) が懸垂法により測定した TS のピッチ角特性から導いた平均 TS (1980) を使用した。平均 TS を算出する際、スケトウダラ稚魚の遊泳姿勢角の分布が平均遊泳姿勢角 -5° 、標準偏差 15° の切断正規分布に従うと仮定して平均化を行った。魚の遊泳姿勢角は、その挙動や生物学的性質に依存し、TS の変動要因となり音響資源調査の精度に影響を与える (向井, 1994)。Horne (2003) は、異なる光条件や魚群密度の反復実験の間にスケトウダラの遊泳姿勢分布に有意差が無く、ほとんど水平方向を維持したことを示した。また、Abe *et al.* (2004) は、尾又

長 5~10 cm のスケトウダラ稚魚の遊泳姿勢角分布の平均値を -20° から 10° まで、標準偏差を 5° から 25° まで変化させて平均 TS の変動を調べたところ、平均 TS の変動は 3 dB 未満であると報告した。また、小さい個体の TS の指向性は、大きい個体より鈍くなることも示した。体長 10~70 mm の稚魚は、使用した周波数 38 kHz の波長と同程度であり、その TS の指向特性はあまり鋭くないので、遊泳姿勢による TS のばらつきはあまり大きくないと考えられる。

スケトウダラ稚魚の TS については、貞安 (2005) が尾叉長 FL と平均 TS の関係式を求めているが、他の魚種については、音響モデルを用いて TS を推定した例などがある。そこで、採集効率を求める際に用いる TS として平均 TS や音響モデルから推定した TS を採用する場合などで、採集効率がどの程度変動するかを検討する。音響モデルについては、Stanton が提案した有鰾魚の TS 推定に用いられる扁長回転楕円体のハイパスモデル (PSM) を用いる (Stanton, 1989 ; Stanton, 1994a)。PSM のパラメータについては Coyle and Pinchuk (2002) が報告しており、鰾の長さは体長の 0.1975 倍、鰾の幅は鰾の長さの 0.9154 倍とした。また、Clay and Horne (1994) の報告に基づいて、空気の密度を 1.24 kg/m^3 、海水の密度を 1030 kg/m^3 、空中音速を 345 m/s、海水音速を 1490 m/s、空気と海水の密度比である g と同じく両者の音速比である h をそれぞれ $g=0.0012$, $h=0.22$ としてモデルに供した。これらを 2013 年と 2014 年のデータに適用し、両者の TS と推定された採集効率の差を Table 3-3 に示した。この表より、PSM で求めた TS_1 と貞安 (2005) で求めた TS_2 の差 ($TS_1 - TS_2$) は 3.29~3.71 dB であっ

たが、 TS_1 を使用して推定した採集効率は TS_2 を使用して推定した採集効率より 2.13~2.35 倍大きかった。音響モデルを使うと広い体長範囲や魚種毎の一般的な傾向を把握することができるが、特定の種やサイズにおける精度の高い TS の推定は難しい。体長と TS の関係が実験的に求められていない場合は採集効率の推定にこの程度の幅があることに注意すべきである。

Table 3-3 Change of catch efficiency with the variation of TS using different models

Haul No.	Year/Month	FL (mm)	TS(dB)		q_1/q_2
			TS ₁ *	TS ₂ **	
1	2013/Jun.	45.44	-52.99	-56.56	2.28
2	2013/Jun.	50.24	-52.11	-55.40	2.13
3	2013/Jun.	44.16	-53.23	-56.89	2.32
4	2014/Jun.	43.74	-53.32	-57.00	2.34
5	2014/Jun.	43.31	-53.40	-57.12	2.35
6	2014/Jun.	43.49	-53.37	-57.07	2.34

* : TS₁ is averaged TS estimated by PSM equation

** : TS₂ is averaged TS estimated by Sadayasu (2005) equation

3-3-3 異なる周波数による採集効率の検討

本章では対象であるスケトウダラ稚魚が有鰈魚であることから 38kHz の単一周波数を用いて FMT の採集効率を推定しているが、他の周波数を用いたときの採集効率の推定について考察する。

Fig. 3-8 に示したように周波数 38, 120, 200 kHz の 3 周波数により SV を求め、対象生物に最適な TS を与えて採集効率を推定し、生物の周波数特性が採集効率の推定に与える影響を考察した。ここで、採集具により推定した個体数密度 ρ_{Tr} と音響モデル (PSM) で推定した σ_{bs} の積を推定 S_v 、計量魚探機を用いて測定した S_v を実測 S_v と呼ぶ。使用したデータは 2015 年 4 月～6 月の採集結果である。

各曳網における 3 周波数の実測 SV と推定 SV を Table 3-4 に示した。Table 3-4 を見ると、各曳網について実測 S_v と推定 S_v の値が一致せず、その差は周波数によっても異なることが分かる。

Fig. 3-9 は各周波数毎に実測 s_v と推定 s_v から推定した採集効率と体長の関係を表したものである。どの周波数でも FL が大きくなると採集効率が低くなることが分かる。また、同一体長でも周波数が異なると対象生物の TS が変化するので推定される採集効率も異なる。

Fig. 3-9 を見ると、採集効率は小型個体では 38 kHz と 200 kHz、大型個体では 38 kHz と 120 kHz の結果が良く一致していた。具体的には、尾叉長 16 mm 前後

の小型個体 (Haul No.1~4) と 30 mm 前後の中型個体 (Haul No.5~8) では、38 kHz と 200 kHz の採集効率がほぼ同じであるが、120 kHz では採集効率が小さかった。これらの曳網時得られたサンプルを確認したところ、オキアミ類が多く採集されていた。Fig. 3-10 に有鰈魚と動物プランクトンの TS の周波数特性を示したが、これを見ると 120 kHz におけるオキアミ類の TS は 38 kHz や 200 kHz より大きい、スケトウダラ稚魚の TS は周波数によってあまり変化しないため、実測 SV に対するオキアミ類の影響が大きくなり、その結果 120kHz の採集効率が小さく推定されたと考えられた。これに対し、尾叉長 50 mm 前後の大型個体 (Haul No.9~11) では、38 kHz と 120 kHz の採集効率がほぼ等しく、200 kHz では若干大きかった。これは高周波数で動物プランクトンの TS が大きくなるのが原因と考えられた (Fig. 3-10)。

飯田ら (1999) は、北海道北部日本海において、オキアミとスケトウダラ仔稚魚が混在する SSL の SV を 38, 50, 120 kHz の 3 周波数で測定し、スケトウダラ仔稚魚が多い地点はオキアミ類が多い地点より SV が大きく、かつ周波数間の変化はあまりないが、オキアミ類が多い地点では高周波ほど SV が大きくなることを報告した。また、金ら (2016) は噴火湾周辺の全海域において SSL を観測し、構成生物により周波数特性が異なり、周波数 38 kHz で強く反応する散乱層は鰈を持つ魚類であり、オキアミ類は 200 kHz より 120 kHz の方が強く、逆にカイアシ類は 120 kHz より 200 kHz の方が強かったと報告している。したがって、有鰈魚に対しては、3 周波数の中で、38 kHz が最も動物プランク

トンの影響を受けにくいと言える。また、低周波数では稚魚の鰾のサイズは波長に比べて小さくなり、TSの指向性が鈍くなる。したがって、鰾を持つ稚魚の採集効率を推定するための周波数として38 kHzが妥当であると考えられた。

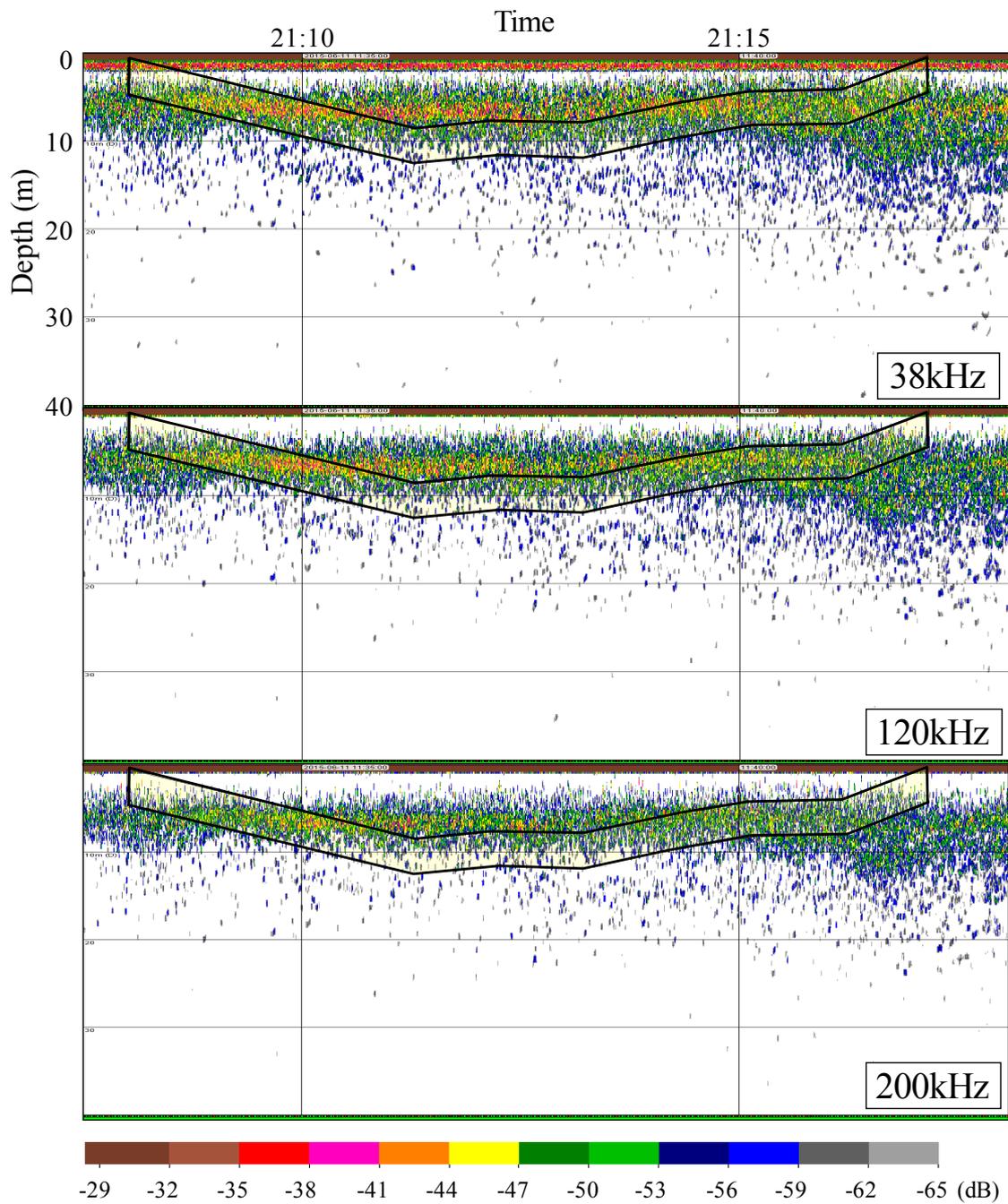


Fig. 3-8 Frequency response characteristic of juvenile walleye pollock.

Table 3-4 A comparison of measured SV by echo-sounder and estimated SV calculated using PSM model and net sampling

Haul No.	Measured SV (dB)			Estimated SV (dB)		
	38kHz	120kHz	200kHz	38kHz	120kHz	200kHz
1	-61.37	-56.81	-62.13	-51.77	-53.14	-53.54
2	-59.92	-58.74	-61.84	-51.68	-53.04	-53.42
3	-63.27	-61.56	-64.57	-55.91	-57.25	-57.64
4	-63.52	-61.76	-65.05	-56.05	-57.42	-57.81
5	-65.07	-64.11	-66.50	-60.09	-61.09	-61.36
6	-59.98	-59.04	-61.36	-55.55	-56.55	-56.82
7	-64.27	-63.20	-64.87	-58.96	-59.98	-60.25
8	-61.37	-60.39	-61.70	-58.57	-59.56	-59.83
9	-67.11	-68.40	-69.81	-67.87	-68.64	-68.83
10	-55.26	-56.23	-58.36	-56.57	-57.32	-57.52
11	-45.63	-46.68	-48.43	-46.68	-47.42	-47.61

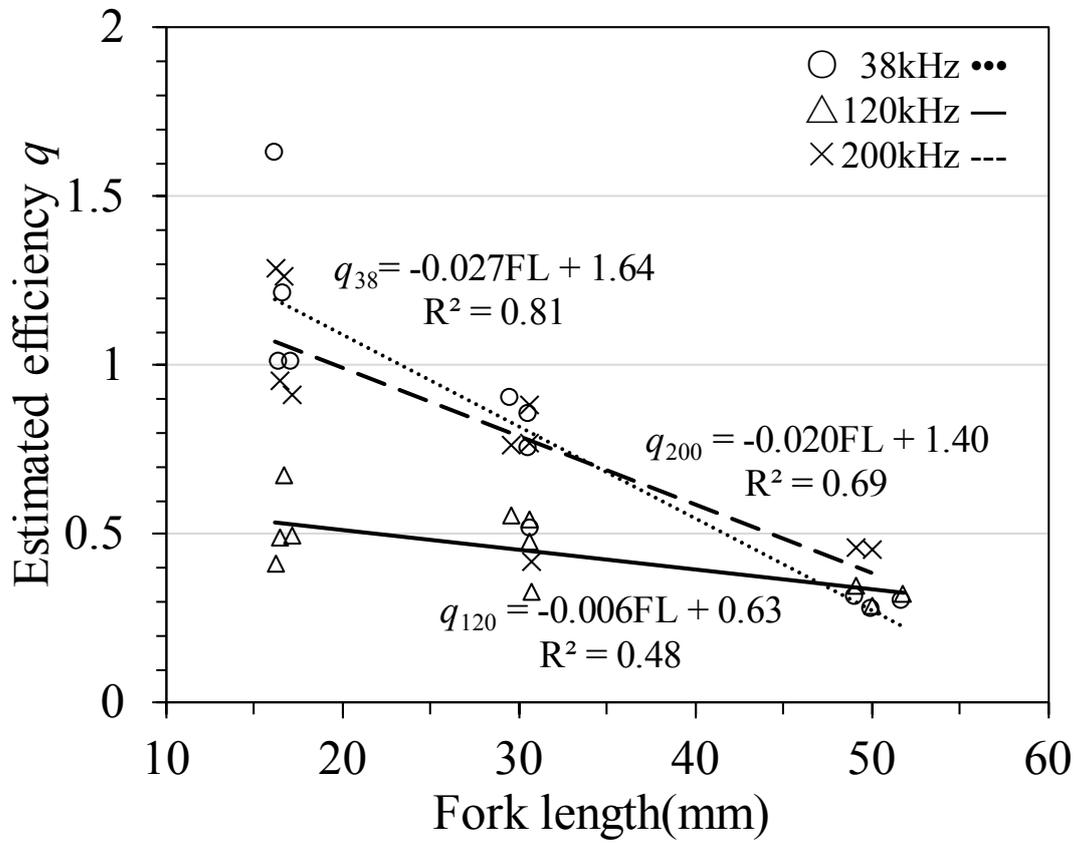


Fig. 3-9 Estimated sampling efficiency q for mean folk length of pollock caught in each haul using 38 kHz (○) , 120 kHz (△) , 200 kHz (×) , respectively.

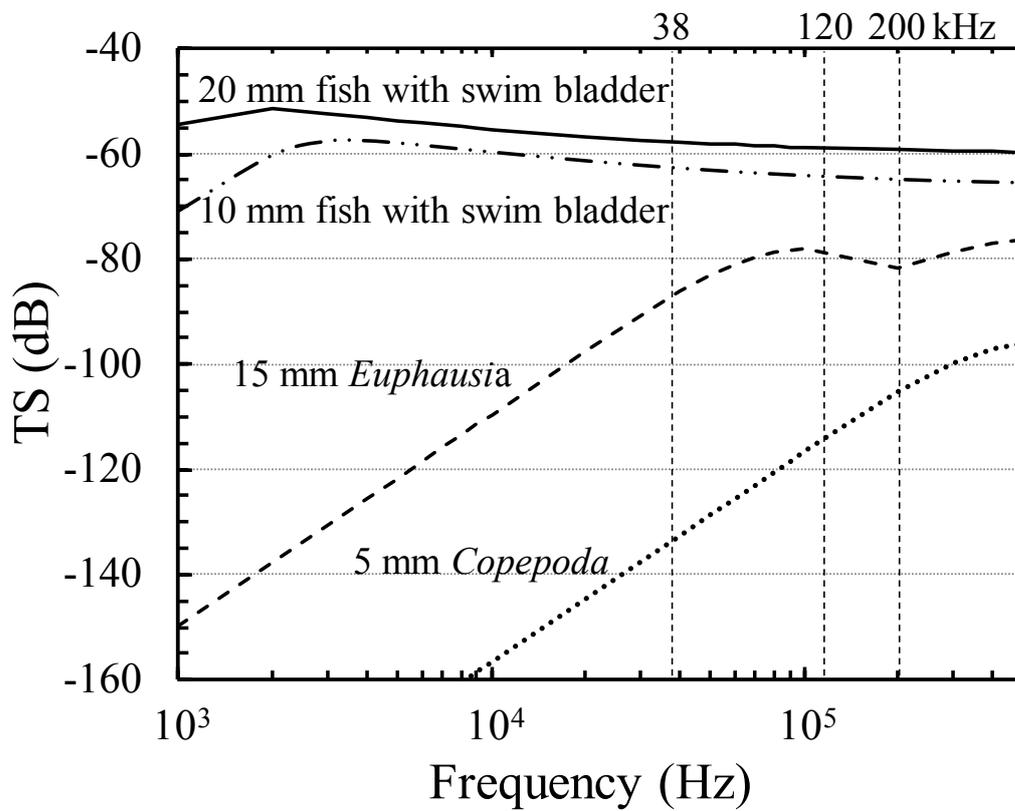


Fig. 3-10 TS frequency characteristics for different target organism.

3-3-4 本研究による採集効率の妥当性

本研究で得られた各曳網毎の採集効率、体長階級別の採集効率および 95%信頼区間を Fig. 3-11 に示した。各曳網毎の採集効率は、体長階級別採集効率の 95%信頼区間にほぼ一致した。また、小さな個体に対しては、ばらつきが大きく、体長が増加すると共にばらつきが小さくなった。

体長階級別採集効率の 95%信頼区間を見ると、網口前方にいる体長 10~30 mm のスケトウダラ稚魚の大部分は採集されるが、体長 60~70 mm のスケトウダラ稚魚は 1 割程度しか採集されないことになる。これは、体長の大きい稚魚ほど網口逃避を起こしやすいことを示している。

Siwabessy *et al.* (2000) は、西オーストラリアの北西棚における漁業調査において、計量魚探機による面積後方散乱係数 (s_A) の測定値と着底トロールによる漁獲結果から導き出された s_A の推定値を比較した。両者の傾向はほぼ一致したが、音響による測定値とトロールによる推定値の間にはかなりの差異が認められた。この差をもたらす要因はトロールによる推定に使用される TS やトロールの採集効率の影響が考えられた。そこで、計量魚探機で得られた実測 SV と採集効率を 1 として求めた推測 SV、および体長階級別の採集効率で補正した SV の比較を行った (Fig. 3-12)。採集効率を補正して推定した推定した SV は、実測 SV に近くなり、採集効率の補正の効果は明らかである。

過去のタラ (*Gadus morhua*) を対象とした研究例では、音響による測定値と

トロールによる推定値が、時刻、季節、サイズクラス、垂直分布、深度、着底トロールの曳網範囲などによって大きく異なることが報告されている (Michalsen *et al.*, 1996 ; Hjellvik *et al.*, 2003 ; Gauthier and Rose, 2005)。また, Doray *et al.* (2010) はヘイク (*Merluccius merluccius*) などの底生魚類に対するトロールの効率が昼夜で著しく異なることを示した。本研究では、夜間に黒色網地を用いてスケトウダラ稚魚に対する FMT の採集効率を推定したが、採集効率の影響要因は生物的要因, 環境要因, 曳網条件など多岐にわたるので, FMT の定量性を確保するためには、これらの影響を検討する必要がある。

これらの影響要因は生物の成長と密接に関係するため、対象魚種に対する採集具の採集効率を体長階級別に推定できれば、この誤差の大部分を補正により低減することができるであろう。

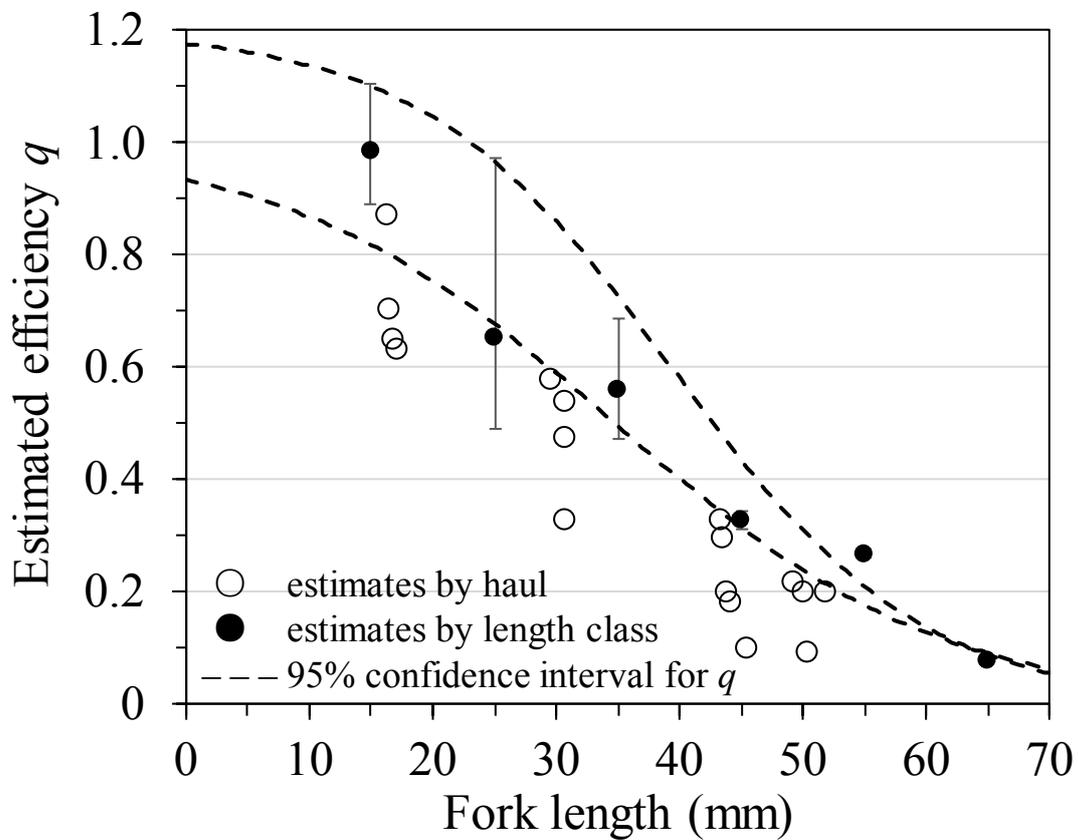


Fig. 3-11 Comparison of the estimated sampling efficiency with the fork length of juvenile walleye pollock caught by haul in this study (open circle, estimates by haul; solid circle, estimates by multiple regression; dashed line, 95% confidence interval for q).

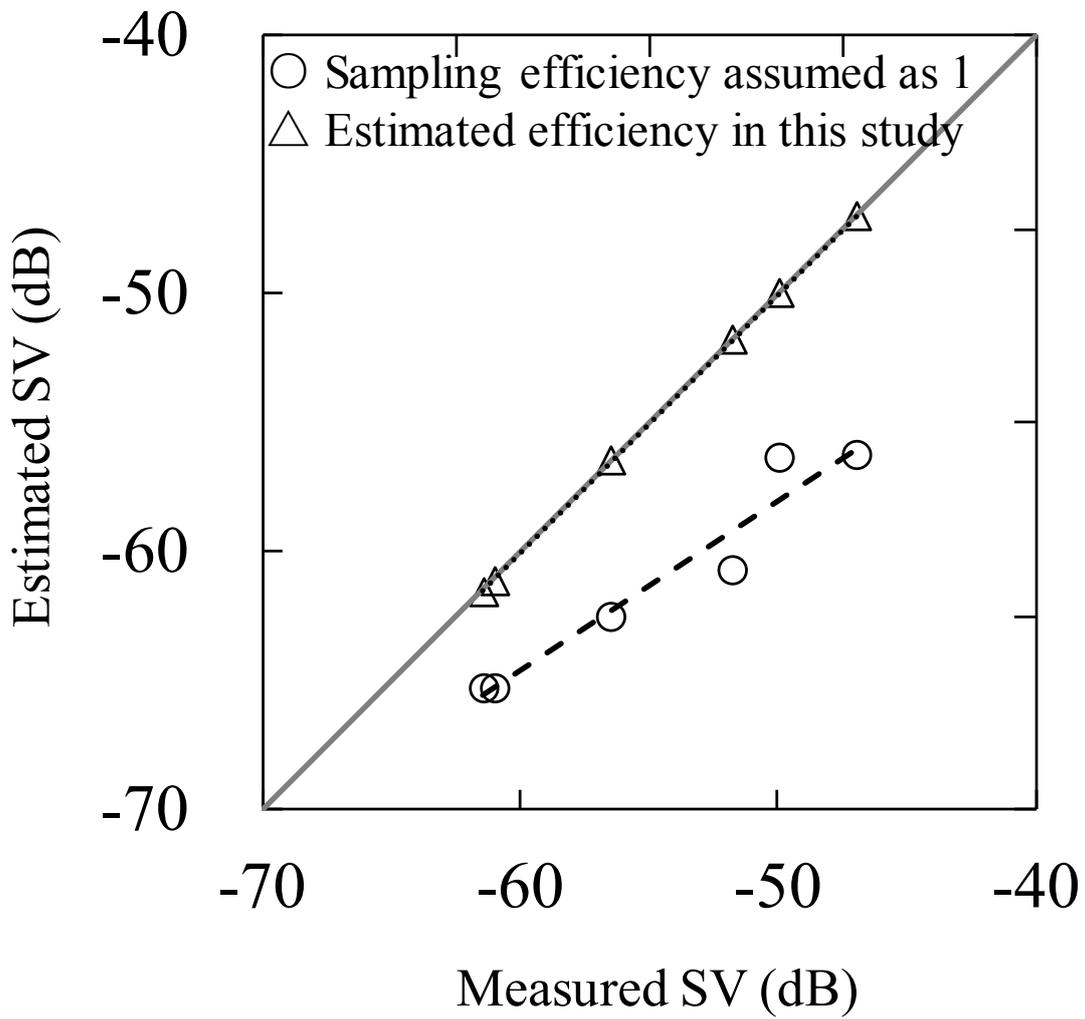


Fig. 3-12 A comparison of measured SV and estimated SV under the assumption of catch efficiency as 1 (circles), with estimated SV obtained from the estimated catch efficiency in this study (triangles).

第 4 章 採集条件が曳網採集具の採集効率に与える影響

網口面積が十分に大きく、生物が逸脱しない小さな網目サイズで、高速曳網可能な理想的な採集具を用いて生物を採集した場合、その採集効率は入網率に等しい（藤森，2007）。しかし、実際の入網率は複数の要因で変化する。その主な要因として、採集具の規模、曳網速度および対象生物の生物的特性などが挙げられる。藤森らは、FMT による曳網速度別採集試験で求めたスケトウダラ稚魚（平均体長 17mm）の個体数密度を、計量魚探機で測定した SV 値で基準化し比較したところ、曳網速度 2 kt で 0.45 尾/m³、3 kt で 0.7 尾/m³、4 kt で 1.3 尾/m³ となり、曳網速度の増加とともに個体数密度も増加することを示した。また、Itaya *et al.* (2007) は、ハダカイワシ類とカタクチイワシの採集において網口面積が大きく、かつ、曳網速度が速くなるほど採集密度が高くなることを示した。これは、Barkley の示唆どおり、採集具の採集効率が曳網速度と生物の逃避速度との相対関係で変化することを示している。

一方、魚は主に視覚により採集具の網地を認識して逃避行動を行う。Doray *et al.* (2010) は、漁獲量と音響手法で推定した生物量との比を用いてヘイク (*Merluccius merluccius*) などの底生魚種に対するトロールの採集効率を推定し、昼間に比べ夜間の採集効率が著しく高いことを報告した。また Rakowitz *et al.* (2012) は、2 周波識別ソナー DIDSON を使用して、トロールの網口前方にい

る魚類の行動を観察し、夜間（6%）よりも昼間（44%）の方が回避反応の割合が高く、光環境の違いがこの差を引き起こすことを示唆した。また、ICES の Zooplankton methodology manual (Harris RP *et al.*, 2000) では、対象生物の逃避を少なくするために、明るい色の採集具の使用を避け、暗い色の採集具を用いることを推奨している。しかし、Jůza *et al.* (2012) によると、昼間に、黒色網地と白色網地で作られた異なる色のネットの採集効率の比較を行い、ヨーロッパアンパーチ (*Perca fluviatilis*) , パイクパーチ (*Sander lucioperca*) , ラッフ (*Gymnocephalus cernua*) , コイ科の魚類において、個体数密度や体長に有意な変化は見いだせなかった。

このように、入網率の影響要因は多岐にわたるため、FMT を用いた採集の定量性を保証するためには、様々な採集条件と入網率の関係を詳しく知る必要がある。そこで、本章ではスケトウダラ稚魚を対象として、昼夜の光環境、網地色、および曳網速度が FMT の採集効率に与える影響を調べた。

4-1 方法

4-1-1 生物採集

異なる網地色の FMT を用いた生物採集実験は、2013 年 6 月、2014 年 6 月、および 2015 年 5 月～6 月に、北海道噴火湾周辺海域において、北海道大学水産学部附属練習船うしお丸を用いて行った。

使用した FMT の仕様、曳網深度の制御、サンプルの処理などは第 3 章と同様である。網地には黒色と青白色の 2 種類を用いた (Fig. 4-1)。網地色別採集実験では曳網船速は 3 ノットに統一し、黒色網地で 3 回曳網した後、最初の曳網地点に戻って、青白色網地に取り替えてから同一方向で再び 3 回曳網した。網地色別採集実験は、昼間に青白色網地で 12 回、黒色網地で 12 回、夜間に青白色網地で 9 回、黒色網地で 9 回の計 42 回行った。

また曳網速度別採集実験は、同海域において、2015 年 4 月～5 月に黒色網地のみを用いて、2 kt で 3 回、3 kt で 3 回、4 kt で 12 回の計 18 回行った。



Fig. 4-1 FMT with black net (upper) and cyan net (lower).

4-1-2 音響データの収録と解析

音響データは、うしお丸に搭載された周波数 38 kHz の計量魚探機 EK60 (SIMRAD, Kongsberg, Norway) を用いて、パルス幅 1.024 ms, パルス間隔 1s で、深度 3 m から海底または深度 500 m までを範囲として収録した。

音響データの処理には、水中音響データ処理ソフトウェア Echoview 4.0 (Myriax, Australia) を用い、深度計から得られた曳網深度を基に、FMT ネットの曳網深度を含む 4 m の幅で、曳網開始から巻き上げまでの範囲の平均体積後方散乱強度 (SV) を算出した。

スケトウダラ稚魚に対する採集効率は採集条件別に (3.8) 式を用いて推定した。また、スケトウダラ稚魚の TS はサンプルの体長を基に (3.11) 式により算出した。

4-2 結果

4-2-1 異なる光環境と網地色による採集生物の特徴

各年の FMT の曳網状況，採集個体数密度，および実測 SV を Table 4-1 に示す。採集個体数は，2013 年は 23～4402 尾，2014 年は 0～872 尾，2015 年は 0～6794 尾であった。各年における昼夜別，網地色別の平均採集個体数を Fig. 4-2 に示した。いずれの実験においても，夜間では黒色網地による採集尾数が青白色網地より多かったが，昼間は網地別に大きな差は認められなかった。採集尾数に与える網地の色と昼間・夜間の影響を分析するためにスケトウダラ稚魚の採集量を網地の色と昼間/夜間の 2 要因で二元配置分散分析を行った (Table 4-2)。また，2015 年 5 月については夜間に曳網を行っていなかったため，網地色の 1 要因で分散分析を行った (Table 4-2)。その結果，2015 年 6 月を除く全ての実験で $p < 0.05$ となり，網地色と光環境の要因効果と交互作用が認められ，採集尾数に強い影響を与えることがわかった。さらに，交互作用に有意差があった 2013 年と 2014 年について単純主効果分析を行ったところ (Table 4-3)，昼間において網地色の効果は弱く ($p > 0.05$)，昼夜間の効果が特に強い事が確認された ($p < 0.02$)。

次に，全ての採集で得られたスケトウダラ稚魚の体長分布を，昼夜別，網地色別に Fig. 4-3～Fig. 4-6 示した。採集されたスケトウダラ稚魚の平均尾叉長と標準偏差は 2013 年 6 月において，それぞれ 31.8 ± 5.4 mm (昼間/黒色)， 31.8

± 4.9 mm (昼間/青白色), 46.6 ± 10.1 mm (夜間/黒色), 35.1 ± 6.6 mm (夜間/青白色) であった。2014年6月においては, それぞれ 38.3 ± 5.0 mm (昼間/黒色), 31.6 ± 10.0 mm (昼間/青白色), 43.6 ± 4.9 mm (昼間/黒色), 40.5 ± 5.4 mm (夜間/青白色) であった。2015年5月においては, それぞれ 27.3 ± 3.2 mm (昼間/黒色), 27.9 ± 3.7 mm (昼間/青白色) であった。2015年6月においては, それぞれ 50.7 ± 6.0 mm (昼間/黒色), 49.7 ± 5.8 mm (夜間/青白色) であった。

次に, 黒色網地と青白色網地で採集されたスケトウダラ稚魚の体長分布の形状の差異を検定するため, コルモゴロフ-スミルノフ検定 (KS 検定) を行ったところ (Table 4-4), 夜間は網地の色によって体長分布が有意に異なることが示された ($p < 0.01$)。Fig. 4-3, Fig. 4-4, Fig. 4-6 に示した体長分布を見ると, 夜間においては黒色網地の方が青白網地よりも, 体長の大きい個体を採集する傾向が認められたが, 昼間は網地色の違いによる大きな体長分布の差はなかった。

Table 4-1 Summary of towing conditions of FMT
in different survey times and net colors

Haul No.	Year/Month	Day/Night	Net color	Towing duration (min)	Warp length (m)	Towing depth (m)	Catch (ind.)	ρ_{Tr} (ind.m ⁻³)	SV (dB)
1	2013/Jun.	Day	Black	10	150	40	140	0.02	-61.25
2	2013/Jun.	Day	Black	10	150	40	23	<0.01	-63.63
3	2013/Jun.	Day	Black	10	150	40	28	<0.01	-67.02
4	2013/Jun.	Day	Cyan	10	150	40	49	<0.01	-58.24
5	2013/Jun.	Day	Cyan	10	150	40	92	0.02	-56.55
6	2013/Jun.	Day	Cyan	10	150	40	31	<0.01	-60.48
7	2013/Jun.	Night	Black	10	25	8	1730	0.39	-54.46
8	2013/Jun.	Night	Black	10	30	8	3094	0.83	-49.92
9	2013/Jun.	Night	Black	10	25	8	4402	1.13	-49.29
10	2013/Jun.	Night	Cyan	10	25	8	937	0.09	-53.96
11	2013/Jun.	Night	Cyan	10	30	7	795	0.09	-51.33
12	2013/Jun.	Night	Cyan	10	25	7	1264	0.32	-51.93
13	2014/Jun.	Day	Black	5	99	35	4	<0.01	-57.38
14	2014/Jun.	Day	Black	5	130	34	4	<0.01	-54.95
15	2014/Jun.	Day	Black	5	160	36	6	<0.01	-54.59
16	2014/Jun.	Day	Cyan	5	140	36	3	<0.01	-54.35
17	2014/Jun.	Day	Cyan	5	150	39	0	<0.01	-57.56
18	2014/Jun.	Day	Cyan	5	150	37	3	<0.01	-54.23
19	2014/Jun.	Night	Black	5	40	9	872	0.28	-56.47
20	2014/Jun.	Night	Black	5	46	11	469	0.15	-58.53
21	2014/Jun.	Night	Black	5	41	11	471	0.15	-58.54
22	2014/Jun.	Night	Cyan	5	55	9	66	0.03	-54.65
23	2014/Jun.	Night	Cyan	5	48	12	119	0.03	-51.54
24	2014/Jun.	Night	Cyan	5	50	13	90	0.04	-55.37
25	2015/May	Day	Black	5	156	38	150	0.03	-66.54
26	2015/May	Day	Black	5	140	36	86	0.03	-66.96
27	2015/May	Day	Black	5	144	36	69	0.02	-67.12
28	2015/May	Day	Cyan	5	161	35	166	0.04	-65.17
29	2015/May	Day	Cyan	5	158	37	181	0.04	-63.25
30	2015/May	Day	Cyan	5	184	45	187	0.04	-54.90
31	2015/Jun.	Day	Black	5	164	33	2	<0.01	-59.81
32	2015/Jun.	Day	Black	5	154	39	0	<0.01	-58.14
33	2015/Jun.	Day	Black	5	227	85	0	<0.01	-58.04
34	2015/Jun.	Day	Cyan	5	105	27	3	<0.01	-59.80
35	2015/Jun.	Day	Cyan	5	170	37	1	<0.01	-61.69
36	2015/Jun.	Day	Cyan	5	146	34	2	<0.01	-60.92
37	2015/Jun.	Night	Black	5	46	8	44	0.02	-50.52
38	2015/Jun.	Night	Black	5	36	9	646	0.28	-47.76
39	2015/Jun.	Night	Black	5	51	11	6794	2.40	-47.20
40	2015/Jun.	Night	Cyan	5	49	12	399	0.16	-52.06
41	2015/Jun.	Night	Cyan	5	49	10	525	0.23	-48.59
42	2015/Jun.	Night	Cyan	5	64	13	1898	0.74	-48.92

Table 4-2 Analysis of variance on the number of catch
in different survey times and netting colors

Time	Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F -ration	p-value
2013 Jun.	Time	1	11719657	11719657	25.36	<0.01
	Color	1	3254167	3254167	7.04	0.03
	Time×Color	1	3214710	3214710	6.96	0.03
	Error	8	3696717	462090		
	Total	11	21885250			
2014 Jun.	Time	1	356041	356041	26.09	<0.01
	Color	1	198919	198919	14.58	<0.01
	Time×Color	1	194820	194820	14.28	<0.01
	Error	8	109155	13644		
	Total	11	858935			
2015 May	Color	1	8740	8740	9.00	0.04
	Error	4	3883	971		
	Total	5	12623			
2015 Jun.	Time	1	8837400	8837400	2.41	0.16
	Color	1	1808080	1808080	0.49	0.50
	Time×Color	1	1814296	1814296	0.50	0.50
	Error	8	29290276	3661285		
	Total	11	41750053			

Table 4-3 Analysis of variance on the simple main effect
in different survey times and netting colors

Time	Towing condition	Variable	df	Sum of Squares	Mean Square	F -ration	p-value	
2013	Black	Time	1	13605204	13605204	15.21	0.02	
		Error	4	3579067	894767			
	Cyan	Time	1	1329163	1329163	45.19	<0.01	
		Error	4	117649	29412			
	Day	Color	1	60	60	0.02	0.89	
		Error	4	10717	2679			
	Night	Color	1	6468817	6468817	7.02	0.06	
		Error	4	3685999	921500			
	2014	Black	Time	1	538801	538801	20.00	0.01
			Error	4	107741	26935		
		Cyan	Time	1	12060	12060	34.10	<0.01
			Error	4	1415	354		
Day		Color	1	11	11	4.92	0.09	
		Error	4	9	2			
Night		Color	1	393728	393728	14.43	0.02	
		Error	4	109147	27287			

Table 4-4 The results of KS test on fork length distribution
in different netting colors

Date	Day/Night	D	p-value	Null hypothesis
2013 Jun.	Day	0.096	0.37	Acceptance
2013 Jun.	Night	0.533	<0.01	Rejection
2014 Jun.	Night	0.258	<0.01	Rejection
2015 May	Day	0.093	0.09	Acceptance
2015 Jun.	Night	0.123	<0.01	Rejection

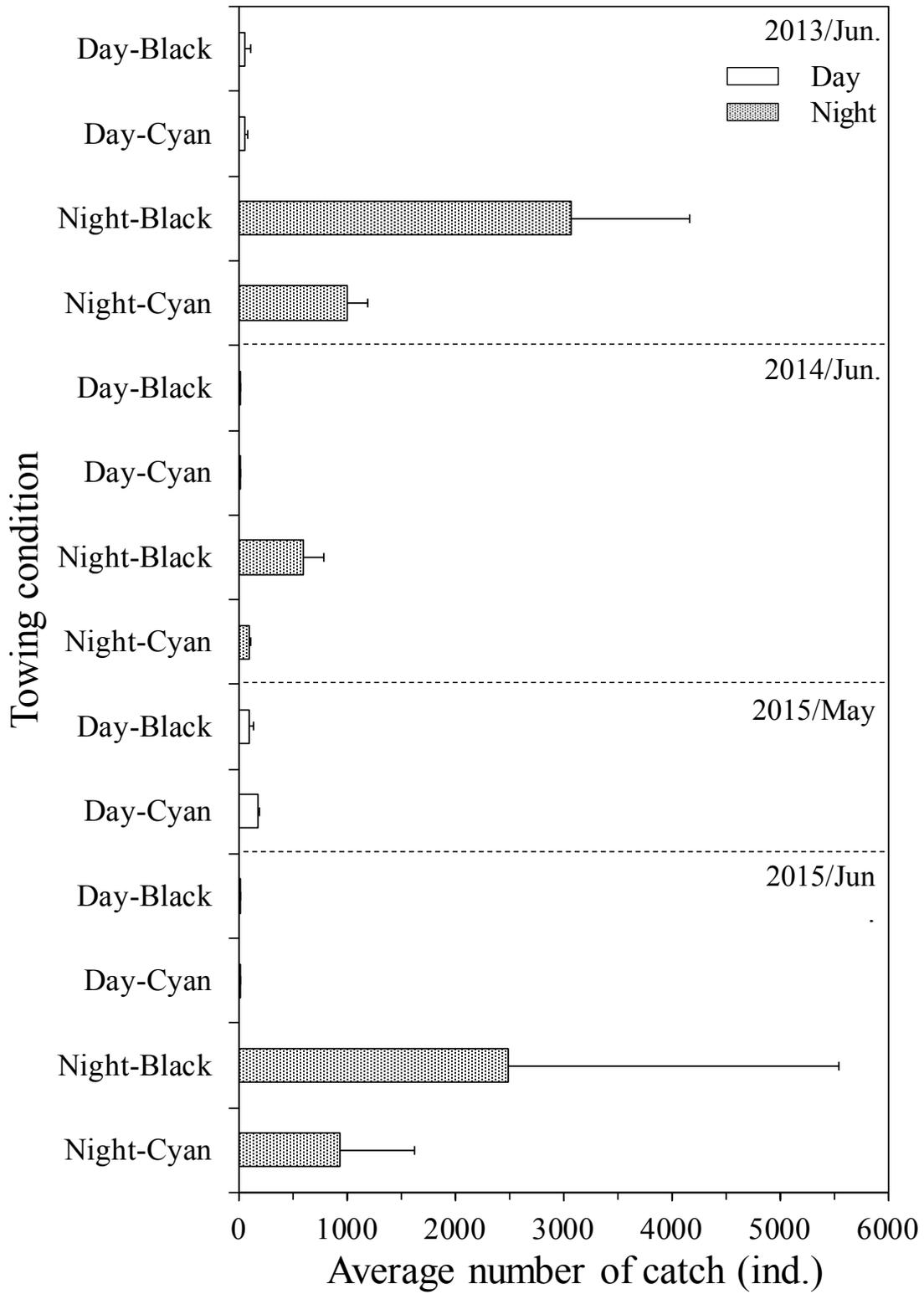


Fig. 4-2 Average number of catch in different towing conditions.

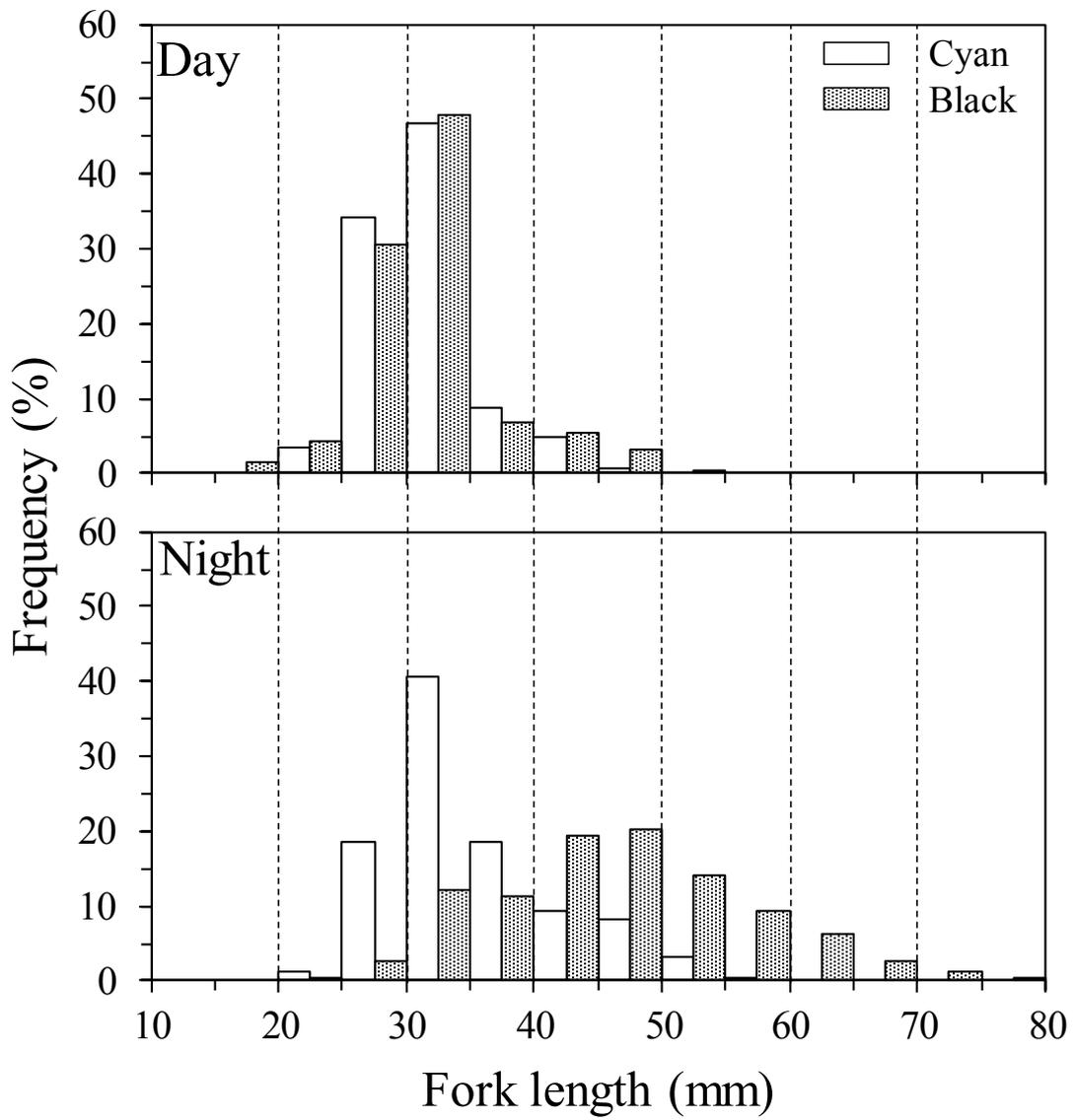


Fig. 4-3 Comparison of length frequency distribution of juvenile walleye pollock caught by FMT in different netting colors during daytime and nighttime in June 2013.

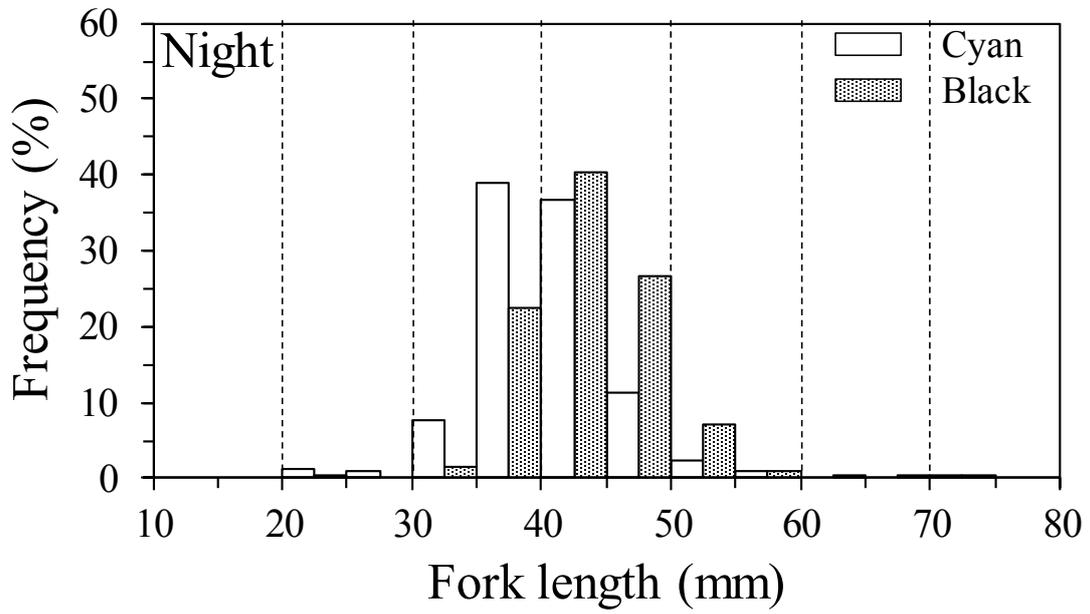


Fig. 4-4 Comparison of length frequency distribution of juvenile walleye pollock caught by FMT in different netting colors during nighttime in June 2014.

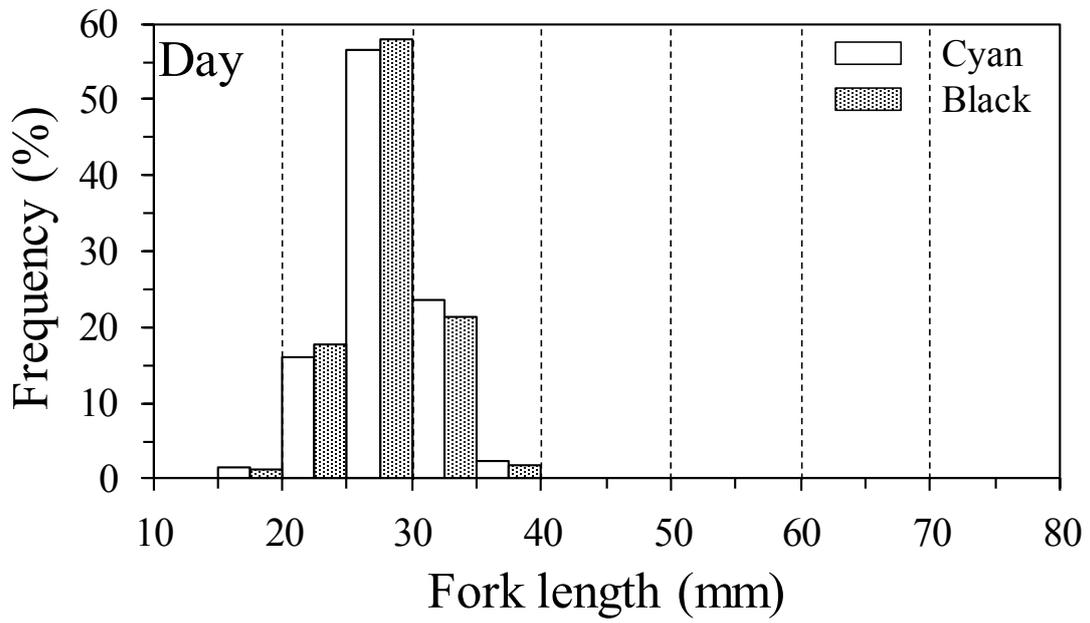


Fig. 4-5 Comparison of length frequency distribution of juvenile walleye pollock caught by FMT in different netting colors during daytime in May 2015.

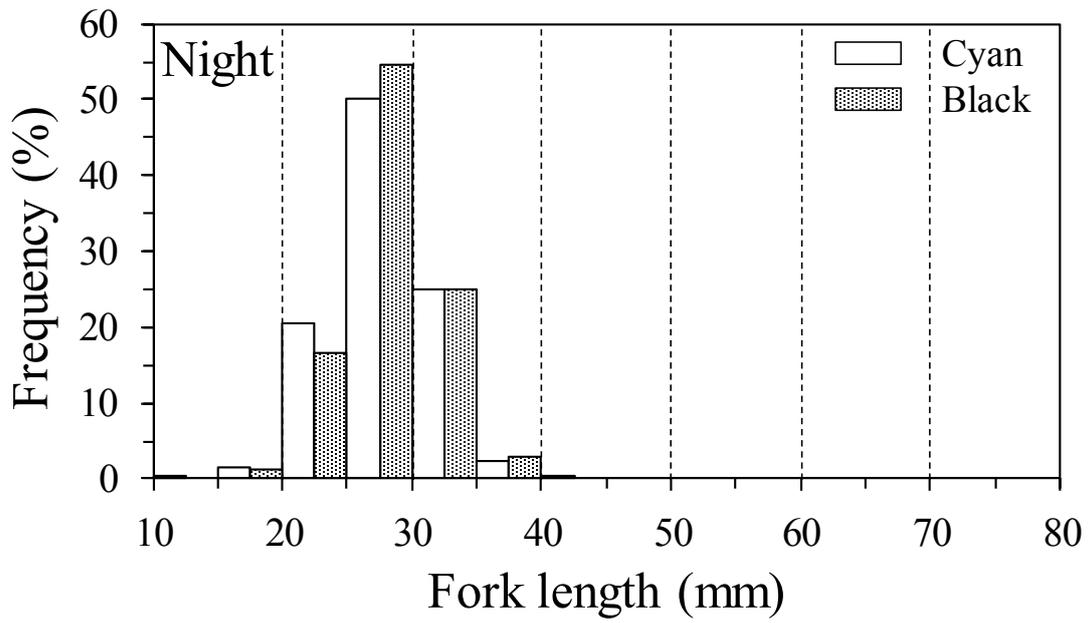


Fig. 4-6 Comparison of length frequency distribution of juvenile walleye pollock caught by FMT in different netting colors during nighttime in June 2015.

4-2-2 曳網速度の違いによる採集生物の特徴

次に、曳網速度の比較実験における FMT の曳網状況と実測 SV を Table 4-5 に示す。曳網速度別採集個体数は、4 月は 1204～5040 尾（昼間/4 kt）、896～19616 尾（夜間/3 kt）、8729～19891 尾（夜間/4 kt）、5 月は 1654～4932 尾（夜間/4 kt）、1059～3968 尾（夜間/2 kt）であった。スケトウダラ稚魚の体長が比較的小さい 4 月において、夜間では 4 kt による採集個体数が 3 kt より多かった。また同じ 4 kt でも、夜間における採集個体数が昼間より多かった。一方、スケトウダラ稚魚の体長が大きくなる 5 月においては、夜間でも 4 kt と 2 kt における採集個体数に差がなかった。

次に、採集個体数に与える曳網速度と光環境の影響を分析するために、各条件での採集量について一元配置分散分析を行った（Table 4-6）ところ、夜間においては曳網速度（2 kt, 3 kt, 4 kt）間の採集量に差があること（ $p > 0.05$ ）がわかった。また、高速曳網（4 kt）の場合は、昼夜間の採集量に差があることが確認された（ $p=0.07$ ）。

次に、各条件で得られたスケトウダラ稚魚の体長分布を、昼・夜間、曳網速度毎に分けて Fig. 4-7～Fig. 4-9 に示した。採集されたスケトウダラ稚魚の平均尾叉長と標準偏差は、2015 年 4 月では、それぞれ 16.1 ± 2.8 mm（夜間/3 kt）、 16.8 ± 5.0 mm（夜間/4 kt）、 15.4 ± 2.6 mm（昼間/4 kt）であった。2015 年 5 月では、それぞれ 30.6 ± 5.0 mm（夜間/4 kt）、 30.1 ± 5.6 mm（夜間/2 kt）で

あった。また 4kt の高速曳網では、採集された稚魚の平均体長は低速曳網の採集結果より若干大きかった。

次に、体長の分布形状の差異を検定するために、コルモゴロフ-スミルノフ検定 (KS 検定) を行った (Table 4-7)。その結果、夜間は曳網速度が異なっても体長分布に変化がないこと ($p > 0.05$)、および 4 kt の高速曳網では夜間の方が昼間より体長が大きいことがわかった。

Table 4-5 Summary of towing condition of FMT in different towing speeds

Haul No.	Year/Month	Day/Night	Towing speed (kt)	Warp length (m)	Towing depth (m)	Catch (ind.)	ρ_{Tr} (ind.m ⁻³)	SV (dB)
1	2015/Apr.	Day	4	151	18	5040	0.93	-63.00
2	2015/Apr.	Day	4	161	18	4048	0.77	-65.14
3	2015/Apr.	Day	4	174	19	1204	0.24	-67.39
4	2015/Apr.	Night	3	84	11	19616	5.44	-59.17
5	2015/Apr.	Night	3	74	10	1182	0.58	-67.00
6	2015/Apr.	Ngih	3	61	8	896	0.36	-66.00
7	2015/Apr.	Night	4	131	12	19891	5.41	-60.50
8	2015/Apr.	Night	4	114	8	9894	1.96	-63.93
9	2015/Apr.	Night	4	150	12	8729	2.02	-63.71
10	2015/May	Night	4	131	13	1654	0.29	-58.60
11	2015/May	Night	4	121	12	4932	0.81	-59.82
12	2015/May	Night	4	96	8	1673	0.82	-58.32
13	2015/May	Night	2	32	7	1059	0.36	-58.02
14	2015/May	Night	2	46	12	3968	0.38	-58.62
15	2015/May	Night	2	45	13	2042	0.36	-60.20

Table 4-6 Analysis of variance on the number of catch in different towing speeds

Date	Condition	Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F -ration	p-value
2015 Apr.	Night 3/4kt	Speed	1	45007248	45007248	0.59	0.49
		Error	4	307845489	76961372		
		Total	5	352852737			
2015 Apr.	4kt Day/Night	Time	1	124889313	124889313	6.31	0.07
		Error	4	79183613	19795903		
		Total	5	204072926			
2015 May	Night 2/4kt	Speed	1	493067	493067	0.16	0.71
		Error	4	12393434	3098359		
		Total	5	12886501			

Table 4-7 The results of KS test on fork length distribution in different towing speeds

Date	Conditon	D	p-value	Null hypothesis
2015 Apr.	Night-3/4kt	1.242	0.09	Acceptance
2015 Apr.	4kt-Day/Night	2.123	<0.001	Rejection
2015 May	Night-2/4kt	0.776	0.58	Acceptance

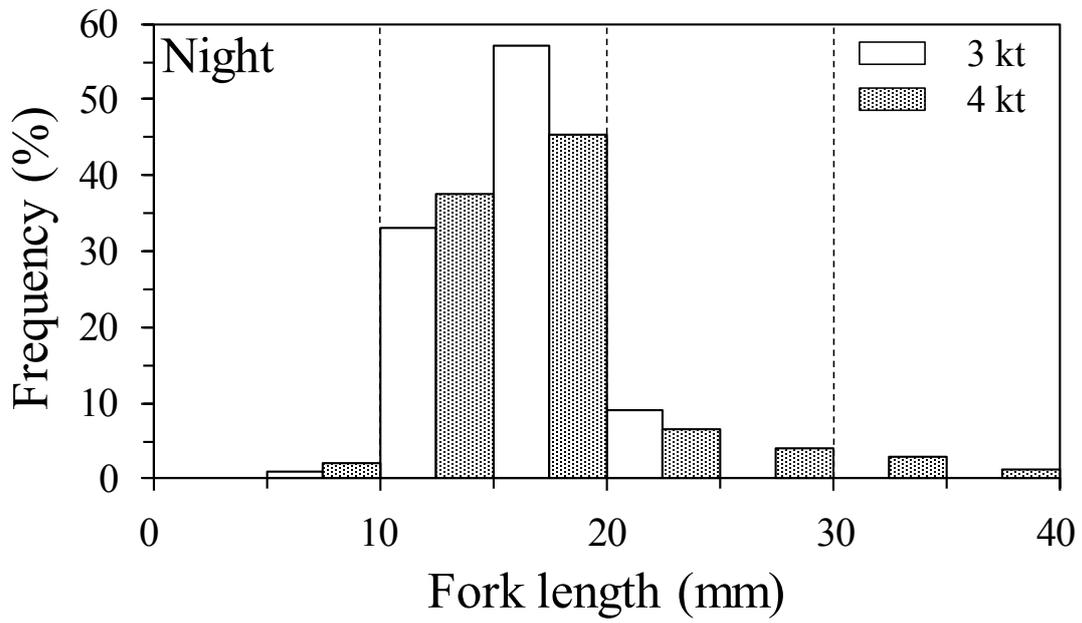


Fig. 4-7 Comparison of length frequency distribution of juvenile walleye pollock caught by FMT in different towing speeds with black-net during nighttime in April 2015.

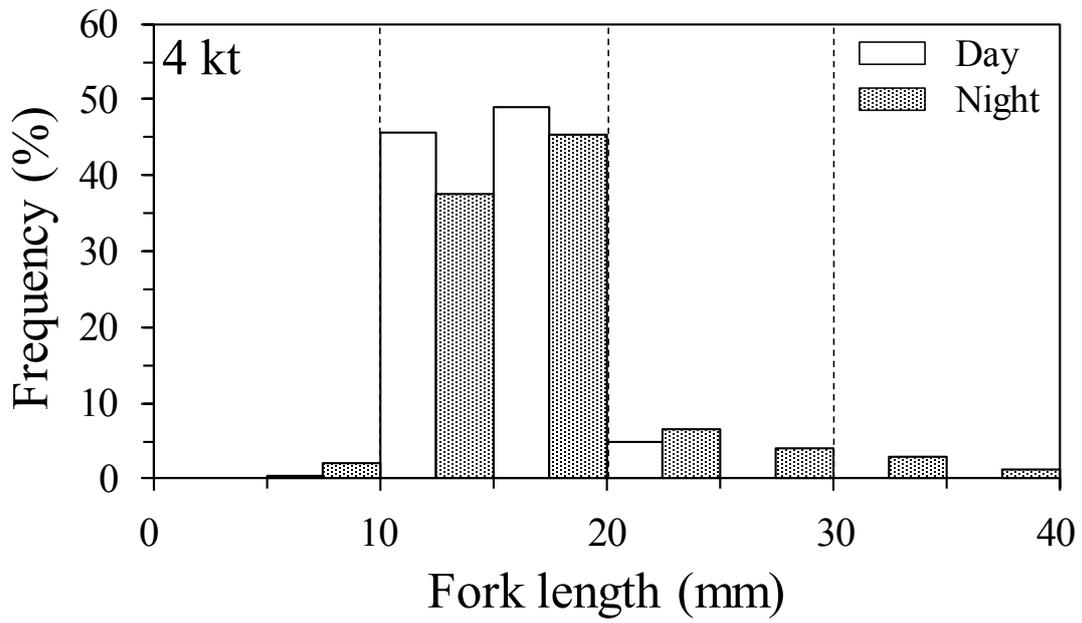


Fig. 4-8 Comparison of length frequency distribution of juvenile walleye pollock caught by FMT at a speed of 4kt with black-net during daytime and nighttime in April 2015.

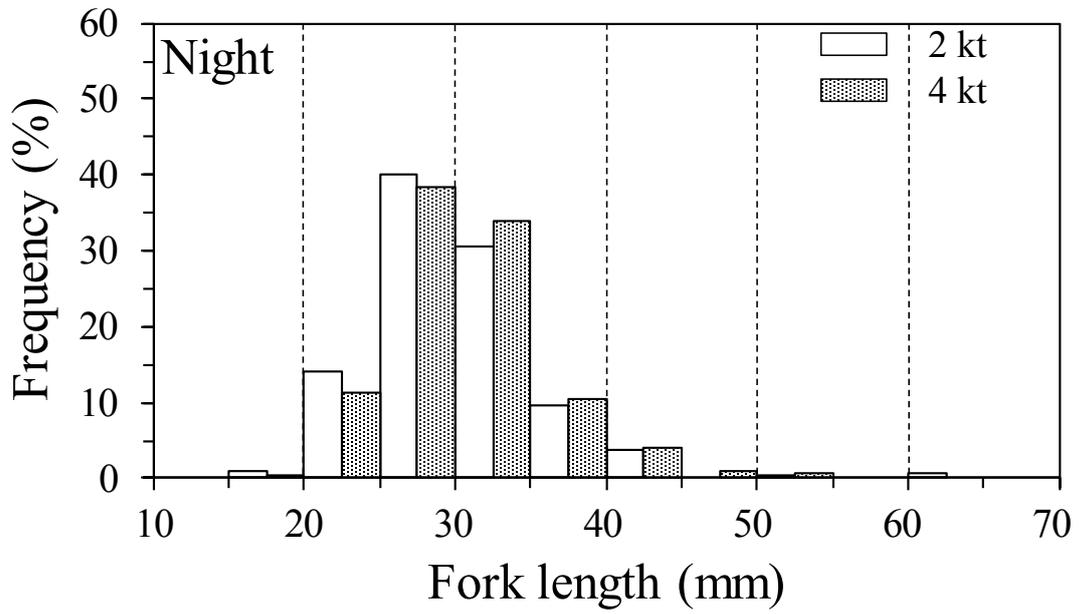


Fig. 4-9 Comparison of length frequency distribution of juvenile walleye pollock caught by FMT in different towing speeds with black-net during nighttime in May 2015.

4-2-3 異なる採集条件で推定した採集効率

次に、(3-8)式を用いて求めた異なる光環境と網地色におけるスケトウダラ稚魚に対するFMTの体長に対する採集効率の変化をTable 4-8に示した。

採集効率は2013年6月において、それぞれ<0.01(昼間/青白色)、0.01~0.02(昼間/黒色)、0.01~0.04(夜間/青白色)、0.16~0.20(夜間/黒色)であった。2014年6月においては、それぞれ<0.01(昼間/青白色)、<0.01(昼間/黒色)、0.01~0.02(夜間/青白色)、0.17~0.20(夜間/黒色)であった。また、2015年5月においては、それぞれ0.01~0.06(昼間/青白色)、0.04~0.07(昼間/黒色)、2015年6月においては、それぞれ0.03~0.13(夜間/青白色)、0.01~0.32(夜間/黒色)であった。

Table 4-8に示した昼間の結果を見ると、青白色網地と黒色網地ともに採集効率は著しく低く(<0.01)、特に2013年6月では0.01~0.02となり、かつ両者間に差が認められなかった。また、Fig. 4-10で示したように、昼間に黒色網地を使用した場合、10~50mmのスケトウダラ稚魚に対して、体長が大きくなるほど採集効率が低くなることがわかった($R^2=0.73$)。青白色網地の場合は、(採集効率が全体的に低く(<0.01))黒色網地で見られた体長依存性は認められなかった。

一方、夜間の採集効率を見ると、2013年と2014年の2年間の実験では黒色網地が青白色網地に比べて明らかに高かった(Table 4-8)。昼夜間の違いについ

では、網地の色に関わらず夜間の採集効率が昼間より高いことがわかった (Table 4-8)。

次に、曳網速度の違いによる FMT の採集効率を Table 4-9 に示した。採集効率は 2015 年 4 月において、それぞれ 0.30~0.52 (夜間/3 kt), 0.56~0.74 (夜間/4 kt), 0.15~0.24 (昼 - 4 kt) であった。2015 年 5 月では、それぞれ 0.25~0.47 (夜間/4 kt), 0.14~0.22 (夜間/2 kt) であった。いずれも 4 kt の高速曳網での採集効率が高く、夜間に曳網速度 4 kt で推定した採集効率は、昼間に比べて 3~4 倍高く、体長が大きいほど採集効率が低下することがわかった。

Table 4-8 Estimated catch efficiency in different survey times and netting colors

Year	Towing conditions (Time-Net color)			
	Day-Cyan	Day-Black	Night-Cyan	Night-Black
2013	<0.01	0.01-0.02	0.01-0.04	0.16-0.20
2014	<0.01	<0.01	0.01-0.02	0.17-0.20
2015	-	-	0.03-0.13	0.01-0.32

Table 4-9 Estimated catch efficiency in different survey times and towing speeds

Date	Towing conditions (Time-Speed)			
	Day-4kt	Night-4kt	Night-3kt	Night-2kt
2015 Apr.	0.15-0.24	0.56-0.74	0.30-0.52	-
2015 May	-	0.25-0.47	-	0.14-0.22

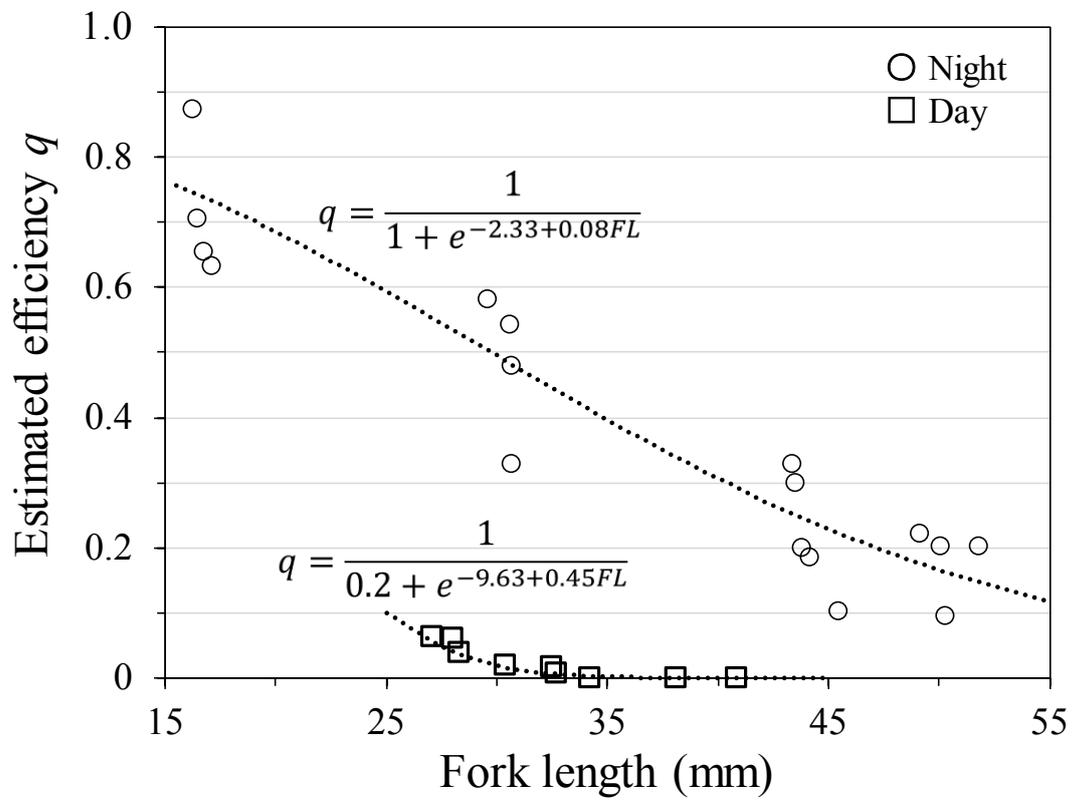


Fig. 4-10 Comparison of estimated sampling efficiency in daytime (squares) and nighttime (circles). The dotted lines represent the approximation.

4-3 考察

4-3-1 光環境がスケトウダラ稚魚の採集効率に与える影響

Barkley が提案した採集効率のモデル ((2.4) 式) により、採集効率は網口面積、曳網の対水速度、魚が網を回避する遊泳速度、反応距離などの要因で変化する。式を見ると、他の条件がどのように変わっても、反応距離が 0 に近づくと、採集効率も 1 に近づくとわかる。反応距離は魚が網を視認してから行動を起こす時の網からの距離であり、光の条件により変わる。

本実験において、曳網速度が 3 kt の場合、網地色に関わらず夜間の採集効率が昼間のそれより高いことがわかった (Table 4-8)。また、黒色網地で曳網速度が 4 kt の場合、夜間の採集効率の方が昼間の採集効率より 3~4 倍高いことが確認され (Table 4-9)、光環境がスケトウダラ稚魚の採集効率に最も重要な影響を与えていることが分かる。

一方、採集されたスケトウダラ稚魚の平均体長は、網地色に関わらず、夜間の方が昼間より大きかった (Fig.4-3)。夜間と昼間に採集されたスケトウダラ稚魚の平均体長の差は、2013 年では黒色網地で 4.8 mm、青白色網地 3.3 mm であり、2014 年は、黒色網地 4.7 mm、青白色網地 8.9 mm であった。また、4kt の高速曳網でも夜間の方が昼間より体長が大きかった。

これらのことから、現場の光環境がスケトウダラ稚魚の視覚に大きく影響し、昼間の明環境では生物の逃避能力が向上し、夜間に低下することが推察された。

4-3-2 網地色がスケトウダラ稚魚の採集効率に与える影響

2013年～2015年に行った実験において、夜間では黒色網地による採集個体数が青白色網地より明らかに多かった。しかしながら、昼間は網地色による大きな差は認められなかった。すなわち、スケトウダラ稚魚は昼間の高照度環境では黒色網地、青白色網地とも同様に視認して逃避行動を起こし、夜間の低照度環境では黒色網地が青白色網地よりも視認しにくいため、青白色網地の採集効率が低く、黒色網地の採集効率が高くなるものと考えられた。

また、夜間において黒色網地の方が青白色網地よりも体長の大きな個体を採集できることに関し、魚類の視力や色覚能力が成長とともに発達し、体長の大きな稚魚が青白色網地を視認して忌避した結果、夜間における黒色網地が青白色網地よりも採集効率が高い結果を示したものと考えられた。

魚類の色覚弁別能力は現場の照度や背景色とのコントラストが重要と考えられ、今後、現場の光強度やスペクトル分布などの光環境を定量的に測定し、さらに生物の視力や色覚能力を調べる必要があると考えられた。

4-3-3 曳網速度がスケトウダラ稚魚の採集効率に与える影響

2015年4月と5月の夜間においては、曳網速度の違い（2 kt, 3 kt, 4 kt）により採集効率に差が認められた（Table 4-6）。一般的には魚の回避能力が一定であっても、曳網速度が速くなると反応距離が短くなり、採集効率が高くなると考えられる。4月と5月においては高速曳網の方が低速曳網より高い採集効率を示した（Table 4-9）。

具体的な結果を見ると、曳網深度が同一の場合、曳網速度 1 kt を上げると、平均尾叉長 16 mm のスケトウダラ稚魚に対する採集効率（4月）は 1.1～2.5 倍高くなる、また平均尾叉長 30 mm のスケトウダラ稚魚に対しては、曳網速度 2kt を上げる（5月）と、採集効率が 1.1～3.4 倍に変化することがわかった。これらの結果は、Barkley（1972）モデルに示したように、曳網速度が速くなると反応距離が短くなり、採集効率が高くなることを証明できた。しかしながら、曳網速度 1 kt ごとで上げると、採集効率はどのくらいに高くなることがわからなかった。今後には、曳網回数を増やして、さらに細かくスケールで研究するべきであろう。

第 5 章 音響的手法を用いたプランクトンネットの採集効率の推定

動物プランクトンは、海洋生態系における食物連鎖の下位に位置し、魚類やクジラなど、より大型の動物の餌生物として重要である。魚類の餌生物である動物プランクトンの生物量と分布を正確に推定することができれば、魚の資源管理にもつながる。世界中の海洋で見られる音響散乱層（Sound Scattering Layer, 以後、SSL とする）は主に動物プランクトンや魚類マイクロネクトンで構成されることが知られており、当該海域の生物量や主要魚類の資源動向を把握する上で重要な解析対象である。音響散乱層の生物調査には主に計量魚探機が使用されるが、対象生物の種判別や体長を知るためにネットサンプリングが不可欠である。第 3 章と第 4 章では、稚魚を対象とした FMT の採集効率について議論してきたが、本章では稚魚と混在する動物プランクトンに焦点を当て、その採集に用いられるプランクトンネットの採集効率について議論する。

カイアシ類に代表される小型の動物プランクトンは一般に体サイズが 10 mm 以下であり遊泳力も小さい。そこで、これらの生物採集には NORPAC ネット、ボンゴネット、リングネット等、口径が小さく、網目サイズの小さな小型のプランクトンネットを、毎秒 1 m 程度の比較的低速で、垂直曳網や斜交曳網して用いる。しかし、網目サイズが小さいゆえに濾水率が小さくなり、網内を通過する水量が制限されるオーバーフロー現象が生ずる。また口径が小さく、曳

網速度が遅いことは、僅かな遊泳力を持つ動物プランクトンの網口逃避を引き起こす。その結果、採集効率が低下し、生物種や体長に対する選択性が生じ、現場生物の定量的な評価が難しくなる。

一方、オキアミ類などの大型動物プランクトンは体長が数センチメートルとなり、遊泳力を有することから、上述した小型プランクトンネットで採集することが難しくなる。そのため、定型網口枠を持ち、網目サイズを大きくした FMT などを比較的高速に曳網して大型動物プランクトンを採集する。しかし、ここでも網目サイズが大きいため小型生物が網目から逸脱したり、または大型生物が網口から逃避して採集効率が低下し、種や体長に対する選択性を生じる。

プランクトンネットによる動物プランクトンの採集の目的は生物を採集するのみならず、生物群集の種構成割合、体長分布、そして生物密度を定量的に把握することである。したがって、対象生物に適した採集具を用いると同時に、その体長選択性や採集効率を把握することにより、生物群集の定量評価を行う必要がある。

また、異なる採集具を用いたり、新たに採集具が開発された場合には、調査データの継続性を維持するため、従来のものとの採集効率やサイズ選択性の比較は、最終結果を標準化するために必要な知見となる (Brodeur, 2011)。

そこで本章では、リングネットや FMT を用いて音響散乱層内に分布する様々な生物を採集するとともに、計量魚群探知機を用いて現場で得た様々な音響情報を用いて、プランクトンネットの生物種や体長に対する採集効率を明らかに

し、動物プランクトンの定量採集法を確立することを目的とした。

5-1 方法

5-1-1 リングネットと FMT を用いた生物採集

実験は、2011年4～6月に北海道噴火湾湾外部 (Fig. 5-1) において、北海道大学水産学部附属練習船うしお丸を用いて行った。生物採集は、計量魚探機で確認された音響散乱層の中心深度を、4m² 枠のフレーム型中層トロールネット (FMT, 網地脚長 1.5 mm, Fig. 3-1) を用いて、約 3 ノット (1.54 m/s) で水平曳網した。同時に、口径 80cm のリングネット (網地脚長 0.5 mm, Fig. 5-2) を用いて、約 1m/s で垂直曳網した。採集具には深度ロガー (MDS5, Alec) を網口に取り付け、曳網深度を調整した。また、各曳網の濾水量を算出するため、FMT の網口上部とリングネットの網口に濾水計 (RIGO 社製) を取り付けた。

FMT およびリングネットによる生物採集は噴火湾口外部の水深 300 m の St. K で行った (Fig. 5-1)。採集した生物は、現場において濃度 10% のホルマリン溶液で固定した。そして後日、元田式プランクトン分割器 (Motoda, 1959) を利用して 1-1/256 に分割した。採集試料はほとんどが動物プランクトンであり、オキアミ類 (Euphausia), カイアシ類 (Copepoda), 端脚類 (Amphipoda), ヤムシ類 (Chaetognatha), その他の 5 種類に分類した後、種毎に個体数を計数した。そして、計数した個体数を濾水計の回転数から求めた濾水量で除することにより、採集個体数密度を求めた。また、オキアミ類, 端脚類, およびヤムシ類については全長 (以後, TL とする) を、カイアシ類については頭胸甲長 (以後,

PL とする) を電子ノギス (Mitutoyo, Absolute 500) を用いて 0.1 mm の桁まで測定した。以後, 全ての動物プランクトンはいずれも体長 (Body Length, BL) と標記する。さらに, 電子秤 (METTLER, AE200) を用いて 0.01 mg の桁まで湿重量を測定した。

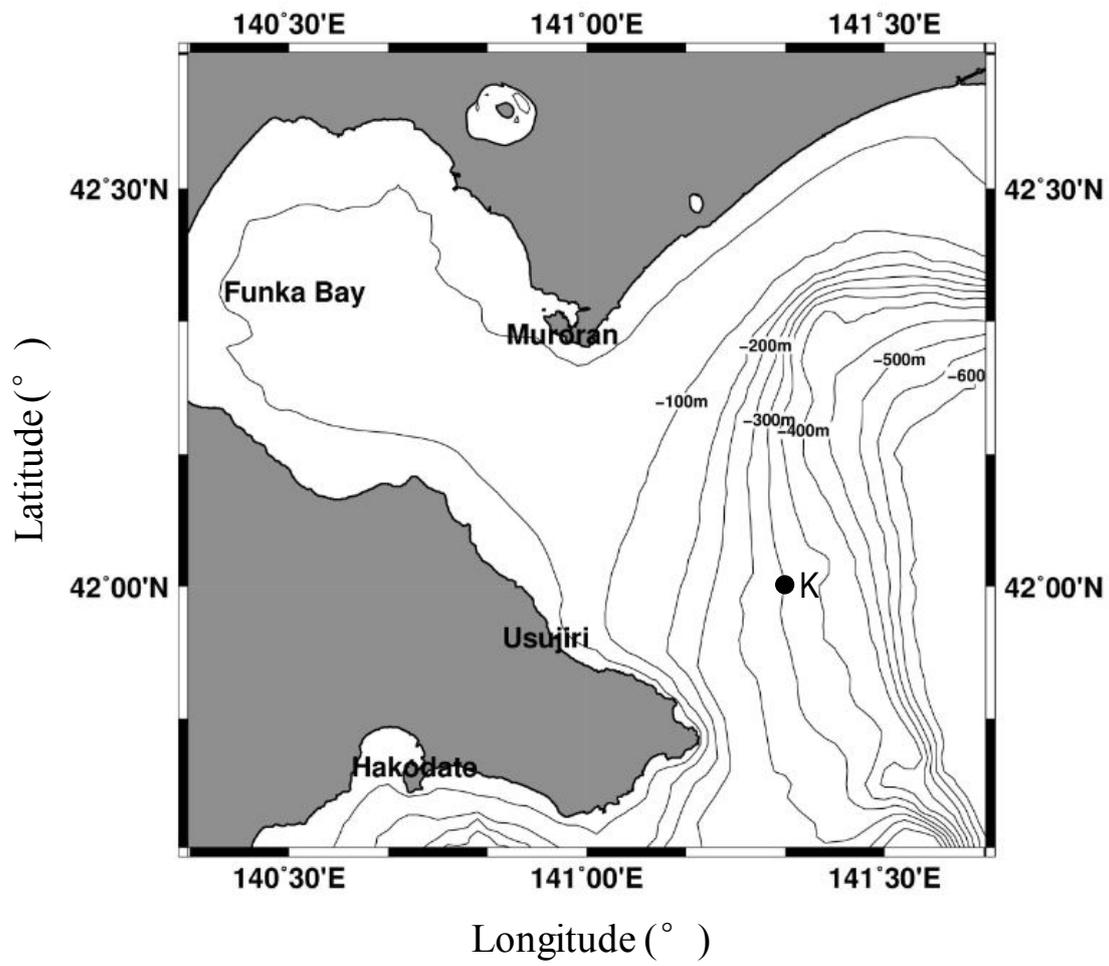


Fig. 5-1 Survey area and station.

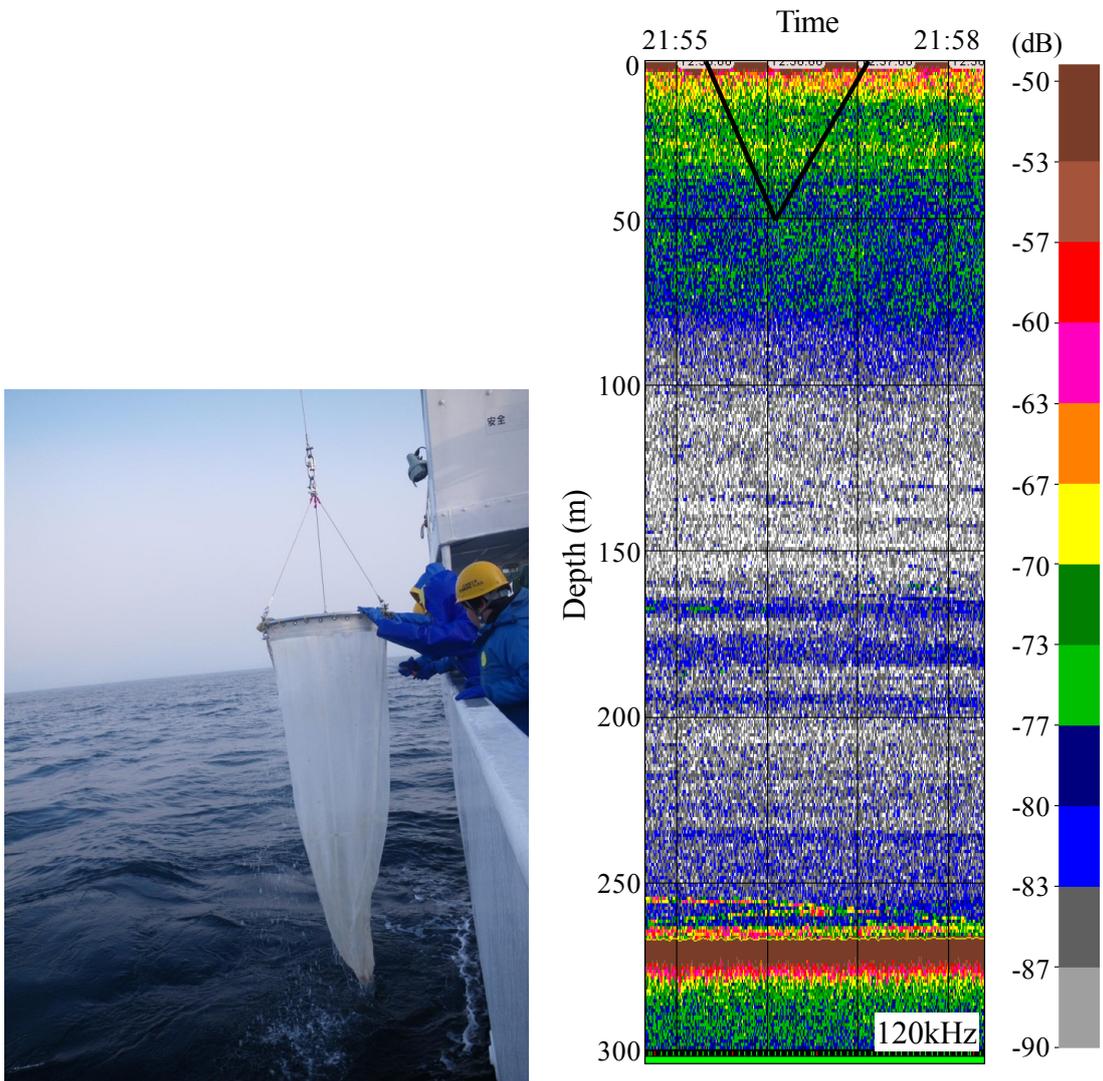


Fig. 5-2 80cm ring net (left) and echogram (right) as towing.

5-1-2 音響データの収録と解析

音響データは、うしお丸に搭載された周波数 120 kHz の計量魚探機 EK60 (SIMRAD, Kongsberg, Norway) を用いて、パルス幅 1.024 ms, パルス間隔 1 s で収集し、深度 3 m から海底または深度 500 m までのデータを収録した。

音響データの処理には、水中音響データ処理ソフトウェア Echoview 4.0 (Myriax, Australia) を用い、深度計から得られた曳網深度を基に、FMT ネットの曳網深度を含む 4 m の幅で、ネットの曳網開始から巻き上げまでの範囲内の平均体積後方散乱強度 (SV) を算出した。リングネットに関しては、曳網深度記録用データロガーから得られたネットの曳網深度データを基に、ネットの曳網軌跡をエコーグラムに重ね、その曳網時間内の SV を平均化し、平均 SV を算出した。

5-1-3 種別採集効率の推定

対象生物が1種類の場合は、計量魚探機によって S_v を測定し、生物採集によって得られた対象生物の体長から後方散乱断面積 σ_{bs} を、また採集量から生物密度 ρ_{Tr} を求めることができれば、(3.8)式により採集効率を推定することができる。

しかしながら、海中には様々な生物が混在し、体長や生物種によって後方散乱断面積も異なるため、測定された S_v は対象生物の ρ_{Tr} と σ_{bs} の積和によって表される（但し $q = 1$ の場合）。

$$S_v = \rho_{Tr1}\sigma_{bs1} + \rho_{Tr1}\sigma_{bs1} + \dots + \rho_{Trm}\sigma_{bsm} + \varepsilon \quad (5.1)$$

ここで、 m は生物種を、 ε は残差を表す。

複数の曳網を行った場合、この式が曳網回数分得られる。ただし、各生物に対する採集効率は曳網回に関わらず一定と仮定する。すなわち、各曳網回の S_v は(5.2)式のように表される。

$$\begin{aligned} S_v^1 &= \frac{f^1 \rho_{Tr1}^1 \sigma_{bs1}^1}{q_1} + \frac{f^1 \rho_{Tr2}^1 \sigma_{bs2}^1}{q_2} + \dots + \frac{f^1 \rho_{Trm}^1 \sigma_{bsm}^1}{q_m} + \varepsilon \\ S_v^2 &= \frac{f^2 \rho_{Tr1}^2 \sigma_{bs1}^2}{q_1} + \frac{f^2 \rho_{Tr2}^2 \sigma_{bs2}^2}{q_2} + \dots + \frac{f^2 \rho_{Trm}^2 \sigma_{bsm}^2}{q_m} + \varepsilon \\ &\vdots \\ S_v^n &= \frac{f^n \rho_{Tr1}^n \sigma_{bs1}^n}{q_1} + \frac{f^n \rho_{Tr2}^n \sigma_{bs2}^n}{q_2} + \dots + \frac{f^n \rho_{Trm}^n \sigma_{bsm}^n}{q_m} + \varepsilon \end{aligned} \quad (5.2)$$

ここで、 n は曳網回、 S_v^n は n 回目の曳網時に測定された曳網範囲の平均体積
後方散乱係数、 ρ_{Tm}^n は n 回目の曳網時に採集された生物種 m の個体数密度、
 σ_{bsm}^n は n 回目の曳網時における生物種 m の平均後方散乱断面積である。また、
 $q_1 \sim q_m$ は種毎の採集効率である。

次に、計量魚探機で得られた S_v を目的変数、採集具に採集個体数密度と
各生物の σ_{bs} の積を説明変数、採集効率の逆数を偏回帰係数として重回帰分析
を行い、種毎の採集効率 q_m を推定した。なお計算には統計ソフト IBM SPSS
Statistics 23.0 を用いた。

5-1-4 理論モデルによる動物プランクトンの TS の推定

対象生物の後方散乱断面積は、理論モデルにより推定した。これは対象生物の密度比、音速比、および形状から対象生物のターゲットストレングスを推定する方法である。使用したモデルは一般にオキアミ類やカイアシ類などの動物プランクトンの音響散乱特性の推定に用いられる Distorted-Wave Born Approximation (DWBA) 変形円筒モデルである。このモデルは、散乱体の生体密度や生体音速が海水のそれらに近い場合に有効であり (Chu *et al.*, 1993; McGehee *et al.*, 1998; Stanton and Chu, 2000), 散乱体の形状が体軸に沿った円筒薄片の集合とみなすことができる場合、その散乱振幅 f_{bs} は (5.3) 式で表される。なお、散乱振幅 f_{bs} と TS との間には (5.4) 式に示した関係がある。

$$f_{bs} = \int_{\vec{r}_{pos}} \frac{k_{sw}^2 a_c}{4k_{an}} \left(\frac{1+h^2}{gh^2} - 2 \right) \exp(2i\vec{k}_{an}\vec{r}_{pos}) \frac{J_1(2k_{an}a_c \cos \beta_{tilt})}{\cos \beta_{tilt}} |d\vec{r}_{pos}| \quad (5.3)$$

$$TS = 10 \log |f_{bs}|^2 \quad (5.4)$$

ここで、 \vec{r}_{pos} は円筒薄片の体軸上の位置ベクトル、 k は波数 ($k=2\pi/\lambda$), λ は波長 (m) である。添え字の sw と an はそれぞれ海水 (周囲媒質) と生物 (散乱体内部) であることを示す。 a_c は各円筒薄片の半径 (m) であり、散乱体の形状をデジタル化することにより求められる。 J_1 は第1種第1次ベッセル関数、 β_{tilt} は入射波と円筒の軸方向とのなす角を示す。 g は生物と周囲媒質との密度比、 h は生物と周囲媒質との音速比を表す。本研究では、北海道周辺海域にお

ける既往の知見から、オキアミ類については音速比 1.029, 密度比 1.053 (福田ら, 2012) を用い, カイアシ類については音速比に 1.021, 密度比に 0.998 (Matsukura *et al.*, 2009) を採用した。また, 北海道周辺海域における端脚類とヤムシ類の物理特性に関する既往の知見がなかったため, 端脚類については音速比に 1.005, 密度比に 1.065 (Greenlaw, 1977) を, ヤムシ類については音速比に 1.003, 密度比に 1.003 (Lawson *et al.*, 2004) を採用した。動物プランクトンの体形座標は, プランクトンネットを用いて採集した個体を側面方向から撮影したデジタルカメラ画像をもとに, 画像処理ソフトウェア ImageJ (Schneider *et al.*, 2012) を使用して輪郭をディジタイジングし \vec{r}_{pos} を求めた。そして背方向 TS の算出にあたっては \vec{r}_{pos} の座標のうち, r_y と r_z を入れ替えて求めた。また, 異なるサイズの動物プランクトンの輪郭データは, 代表的な形状の個体の輪郭データを拡大・縮小することで得た。これらのパラメータを用いて, McGehee *et al.* (1998) による MATLAB (Mathworks) コードを一部改変して TS の計算を行った。さらに対象生物の TS の平均値である TSavg を求めるにあたり, 全方向に平均して計算した。

5-2 結果

5-2-1 生物採集

FMT とリングネットで採集された各生物の個体数と採集密度を Table 5-1 と Table 5-2 に示した。採集生物は主としてオキアミ類、カイアシ類、端脚類、ヤムシ類であった。FMT による各曳網の優占種は、4 月においてはカイアシ類、5 月はカイアシ類とオキアミ類、6 月はオキアミ類と端脚類であった。Fig. 5-3 に採集された生物の個体数組成を示した。2011 年 4 月～6 月に FMT ネットで採集された生物の個体数比率は、オキアミ類、カイアシ類、端脚類、ヤムシ類と他の生物がそれぞれ 29.9%、57.5%、8.3%、2.6%、1.8%を占めた。一方、リングネットによる優先種はいずれもカイアシ類であった。リングネットで採集された生物の個体数比率は、オキアミ類、カイアシ類、端脚類、ヤムシ類と他の生物がそれぞれ 11.1%、82.0%、2.2%、2.8%、2.0%であった。

次に、Fig. 5-4 に採集された生物の湿重量組成を示す。FMT ネットで採集された生物の総湿重量は約 3.04×10^4 g であり、オキアミ類、カイアシ類、端脚類、ヤムシ類と他の生物がそれぞれ 46.2%、24.6%、25.1%、1.6%、2.5%を占めた。一方、リングネットで採集された生物の総湿重量は約 1.90×10^2 g であり、オキアミ類、カイアシ類、端脚類、ヤムシ類と他の生物がそれぞれ 27.7%、47.7%、17.0%、4.4%、3.2%を占めた。湿重量で見ると、FMT ではオキアミ類が全体の約半分を占めたが、リングネットではカイアシ類が全体の約半分を占めた。

FMT とリングネットで採集された生物の体長組成を Fig. 5-5 に示す。図を見ると、FMT で採集された生物の体長がリングネットで採集され生物よりも大きいことがわかる。また、オキアミ類の体長範囲は広く、その体長分布は FMT とリングネットで共に双峰型を示した。そのため、オキアミ類のターゲットストレンジスの推定に使用する体長として、13 mm 以下（以後、小型オキアミ類とする）と 13 mm 以上（以後、大型オキアミ類とする）の二つのグループに分けた。

Table 5-1 Number (C , ind.) and individual density (ρ_{Tr} , ind.m⁻³) of each organism sampled by FMT

No.	Date	Euphausia		Copepoda		Amphipoda		Chaetognatha		Others		
		C	ρ_{Tr}	C	ρ_{Tr}	C	ρ_{Tr}	C	ρ_{Tr}	C	ρ_{Tr}	
1	2011/Apr.	11040	1.60	98080	14.24	2752	0.40	7936	1.15	1888	0.27	
2		11584	1.16	158464	15.85	4352	0.44	11360	1.14	3456	0.35	
3		16128	2.52	138816	21.73	4192	0.66	8992	1.41	5216	0.82	
4		62336	11.43	246656	45.24	6528	1.20	7424	1.36	6784	1.24	
5		25152	5.41	270016	58.06	5568	1.20	12160	2.61	3776	0.81	
6		43904	8.74	348800	69.43	6272	1.25	6144	1.22	4482	0.89	
7	2011/May	54464	10.06	52288	9.65	3840	0.71	2688	0.50	1024	0.19	
8		115968	22.11	50944	9.71	7616	1.45	2688	0.51	1152	0.22	
9		30704	6.19	24320	4.90	2064	0.42	1424	0.29	1072	0.22	
10		28848	6.26	39952	8.67	3152	0.68	1632	0.35	880	0.19	
11		26240	5.21	59296	11.78	2432	0.48	5440	1.08	1984	0.39	
12		352	0.09	129536	33.71	3552	0.92	2272	0.59	960	0.25	
13		11776	1.41	29136	3.48	1632	0.19	2416	0.29	752	0.09	
14		512	0.06	46176	5.49	528	0.06	304	0.04	160	0.02	
15		2011/Jun.	78496	16.85	5248	1.13	7840	1.68	640	0.14	256	0.05
16			223808	35.46	4800	0.76	16448	2.61	576	0.09	960	0.15
17	67328		12.63	1792	0.34	72576	13.62	1152	0.22	16896	3.17	
18	78016		14.50	2560	0.48	69696	12.96	576	0.11	128	0.02	
19	992		0.18	112	0.02	9904	1.76	16	0.00	672	0.12	
20	256		0.04	1232	0.17	14192	1.97	752	0.10	272	0.04	

Table 5-2 Number (C , ind.) and individual density (ρ_{Tr} , ind.m⁻³) of each organism sampled by ring net

No.	Date	Euphausia		Copepoda		Amphipoda		Chaetognatha		Others	
		C	ρ_{Tr}	C	ρ_{Tr}	C	ρ_{Tr}	C	ρ_{Tr}	C	ρ_{Tr}
1	2011/Apr.	69	2.77	4742	190.31	102	4.09	248	9.95	172	6.90
2		66	3.97	4619	278.05	194	11.68	178	10.72	187	11.26
3		483	23.65	3917	191.80	95	4.65	149	7.30	295	14.44
4		444	21.23	3790	181.24	101	4.83	140	6.69	210	10.04
5		1635	57.52	4404	154.93	33	1.16	74	2.60	47	1.65
6		915	60.02	3547	232.67	21	1.38	63	4.13	36	2.36
7		1057	25.46	4626	111.44	51	1.23	84	2.02	34	0.82
8		848	21.27	4118	103.28	20	0.50	63	1.58	48	1.20
9		14	0.86	1978	120.83	1	0.06	2	0.12	7	0.43
10		263	2.40	2207	20.12	15	0.14	161	1.47	43	0.39
11	2011/May	74	5.01	1252	84.69	60	4.06	14	0.95	12	0.81
12		82	5.37	1675	109.76	66	4.32	26	1.70	15	0.98
13		226	15.69	1528	106.09	65	4.51	22	1.53	6	0.42
14		263	16.56	1831	115.30	66	4.16	40	2.52	9	0.57
15		16	0.34	482	10.29	95	2.03	12	0.26	7	0.15
16		72	0.74	2605	26.89	121	1.25	283	2.92	24	0.25
17		9	0.20	561	12.62	118	2.65	13	0.29	2	0.04
18		54	0.63	936	11.00	100	1.17	97	1.14	9	0.11

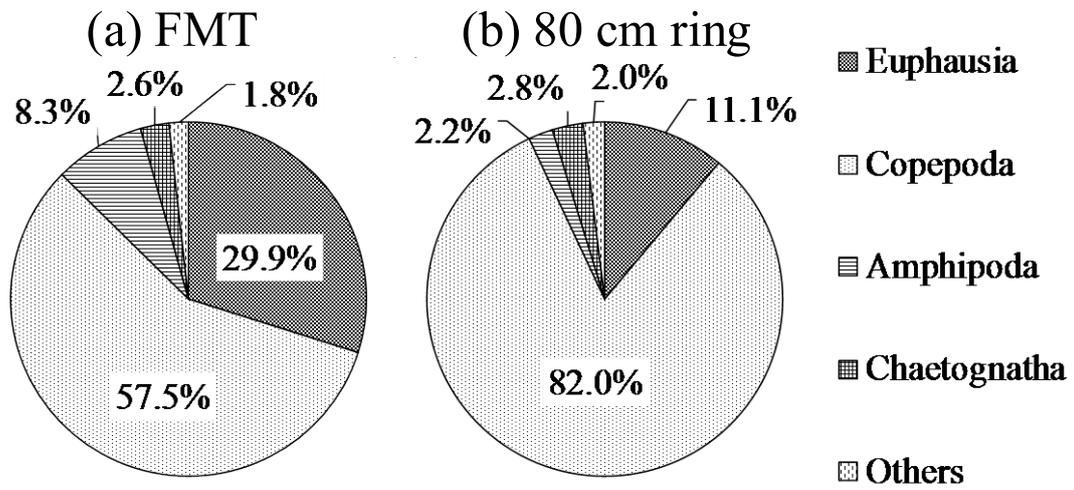


Fig. 5-3 Composition of the number of zooplankton sampled by (a) FMT and (b) 80 cm ring net.

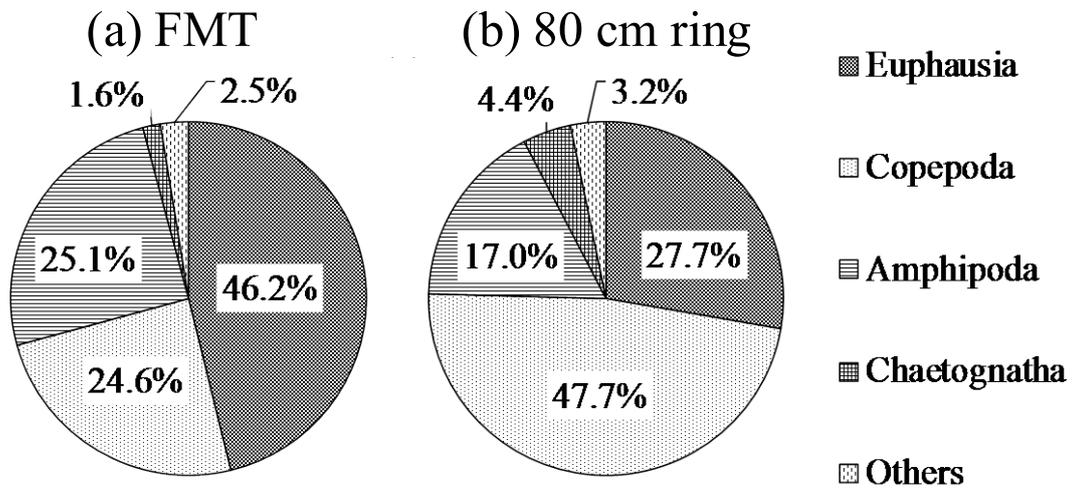


Fig. 5-4 Wet weight composition of zooplankton sampled by (a) FMT and (b) ring net.

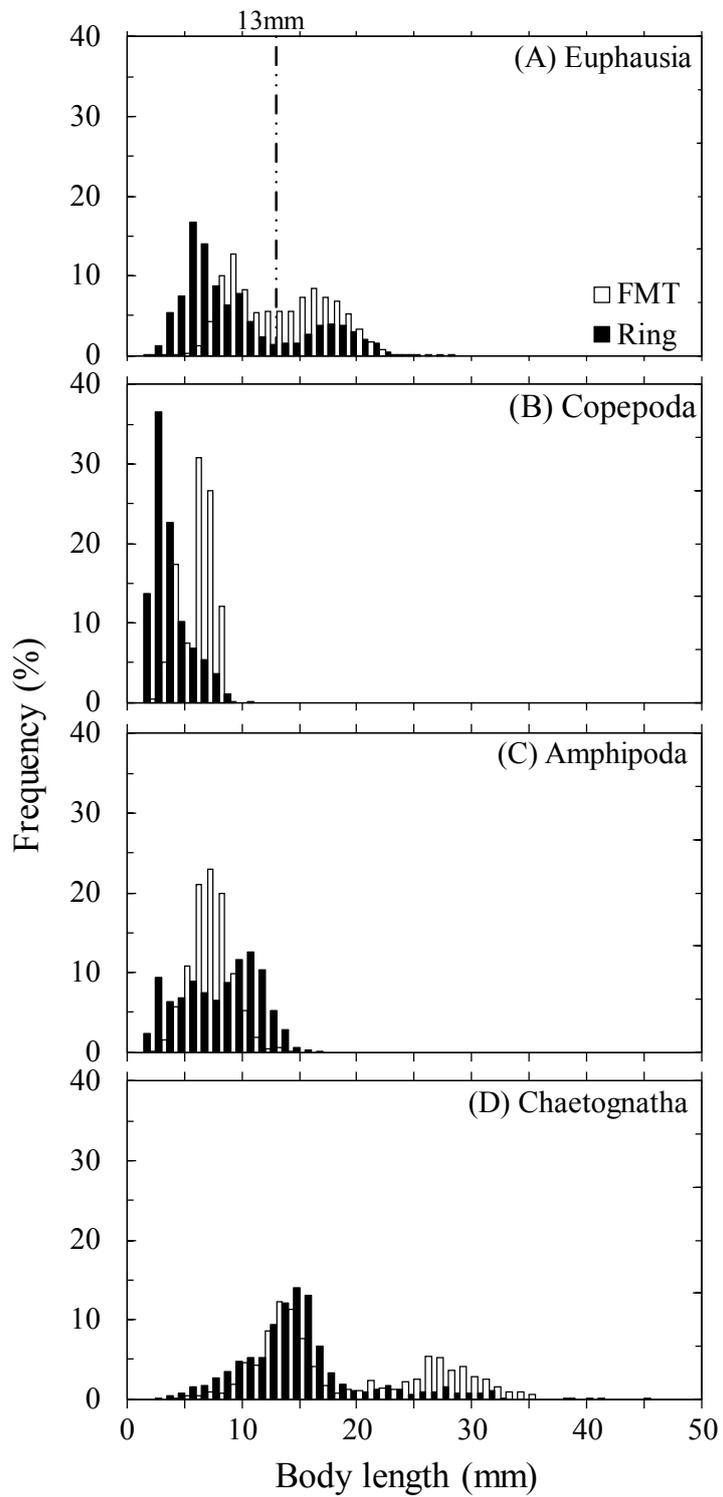


Fig. 5-5 Length frequency distribution of zooplankton sampled by FMT with black-net (white) and 80 cm ring net (black).

5-2-2 種別に推定された採集効率

計量魚探機を用いて生物の音響調査を行う場合、動物プランクトンの遊泳姿勢はランダムと考えられるため、DWBA モデルにより推定した TS パターンを全方向に平均し、これを用いて採集効率を推定した。採集データより求めた各生物の平均体長、DWBA による TS 推定に用いた音速比、密度比および DWBA モデルより求めた平均 TS を Table 5-3 に示す。さらに、(3.10) 式を用いて推定した動物プランクトンに対する FMT とリングネットの採集効率をそれぞれ Table 5-4 と Table 5-5 に示した。小型オキアミ類、大型オキアミ類、カイアシ類、端脚類、ヤムシ類に対する FMT の採集効率はそれぞれ 0.20 ($p=0.021$), 0.41 ($p<0.001$), 0.35 ($p=0.029$), 0.38 ($p=0.170$), 0.001 ($p=0.433$) であった。また、リングネットの採集効率は、それぞれ 0.62 ($p=0.050$), 0.09 ($p<0.001$), 0.88 ($p=0.012$), 0.42 ($p=0.268$), 0.04 ($p=0.835$) であった。

オキアミ類とカイアシ類については高い信頼度で採集効率を推定することができた ($p<0.05$)。小型オキアミ類については、リングネットの採集効率が FMT の採集効率より大きく、カイアシ類についてもリングネットの採集効率が FMT より大きかった。一方、大型オキアミ類については、比較的遊泳能力が高く、小型のプランクトンネット曳網では多くの個体が網口から逃避するため、リングネットの採集効率は FMT より小さかった (Table 5-4, Table 5-5)。

次に、異なる生物を対象として、異なる採集具の採集効率を比較するため、

採集された生物の等価球半径と採集効率の関係を調べた (Fig. 5-6)。その結果、FMT とリングネットの採集効率はともに等価球半径とロジスティックモデルで近似でき、リングネットの採集効率は等価球半径が大きくなるに従い小さくなり、FMT は逆の関係を示した。この理由は、リングネットは網目が小さいので網に入った生物がおおむね保持される反面、網口が小さいので遊泳能力を持つ生物が回避する。逆に FMT は網口サイズが大きく、曳網速度も比較的速く、動物プランクトンが回避できにくい反面、網目が粗いので網に入った生物が網目から逸脱する可能性が高くなるためと考えられた。つまり、動物プランクトンの採集においては、リングネットではその入網率が、FMT ではその残存率が採集効率の支配要因とすることができる。

次に、オキアミが優占した FMT のサンプル（個体数割合 80%以上）を使って推定した採集効率と体長との関係を Fig. 5-7 に示した。FMT の網口は大きく、曳網速度も速いので、動物プランクトンに対する採集効率は主に網目の大きさに関わる残存率から影響を受ける。同サイズのオキアミ類に対して、推定した採集効率は藤森ら（2008）が推定した残存率より小さかった。この原因については、藤森ら（2008）は大小の網目サイズ（1.7 mm, 0.526 mm）を同時に使用できる二つのコードエンドを有する FMT を使って選択性を推定しており、対照となるコードエンド（0.526 mm）の選択率を 1 として計算したためと考えられる。

Table 5-3 Target strength of the reference body length and used parameters

Species	Body length (mm)	g	h	TS (dB)
small Euphausia	9.75	1.053	1.029	-101.7
large Euphausia	17.06	1.053	1.029	-90.0
Copepoda	6.32	0.998	1.021	-103.8
Amphipoda	7.54	1.065	1.005	-101.6
Chaetognatha	19.14	1.003	1.003	-118.8

Table 5-4 Estimated catch efficiency for each zooplankton group caught using FMT

Species	q	p	95% Confidence interval for q	
			Lower bound	Upper bound
small Euphausia	0.20	0.021	0.11	0.94
large Euphausia	0.41	<0.001	0.35	0.50
Copepoda	0.35	0.029	0.19	2.54
Amphipoda	0.38	0.170	0.15	-
Chaetognatha	0.001	0.433	<0.001	-

Table 5-5 Estimated sampling efficiency for each zooplankton group
sampled by ring net

Species	q	p	95% Confidence interval for q	
			Lower bound	Upper bound
small Euphausia	0.62	0.050	0.31	-
large Euphausia	0.09	<0.001	0.09	0.09
Copepoda	0.88	0.012	0.54	2.40
Amphipoda	0.42	0.268	0.13	-
Chaetognatha	0.04	0.835	0.003	-

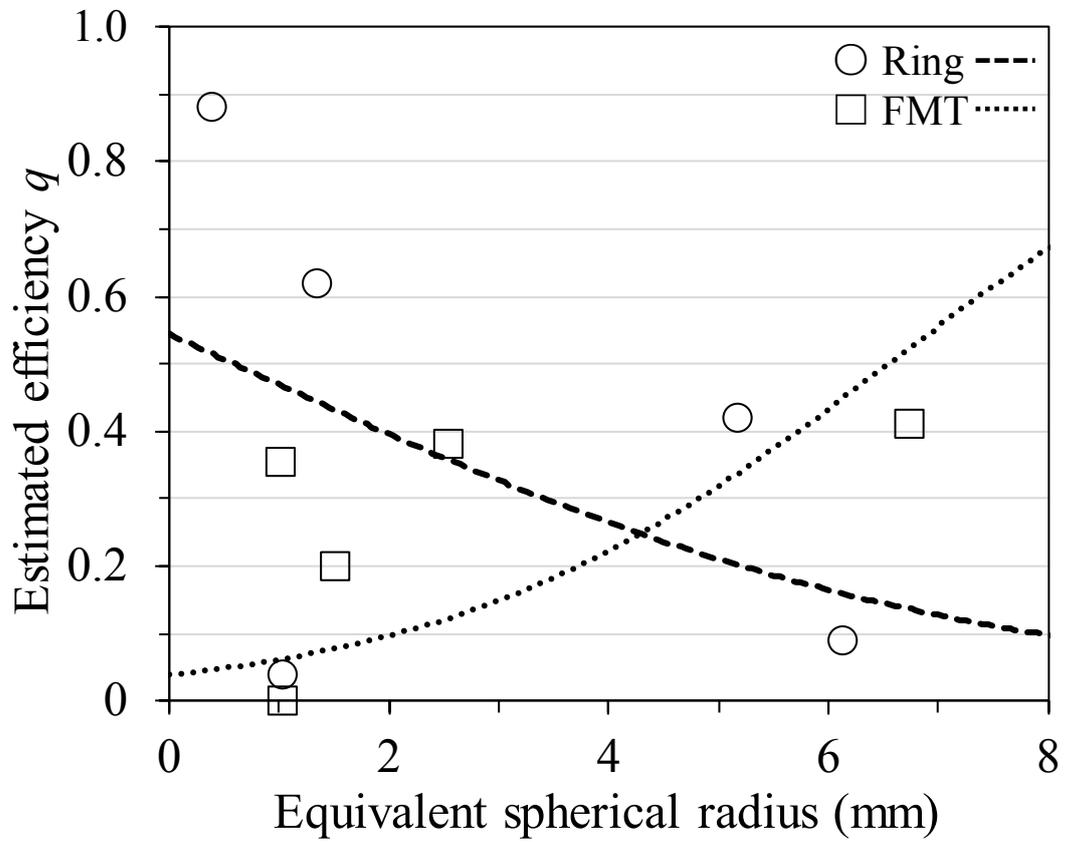


Fig. 5-6 Comparison of estimated catch efficiency using FMT and 80 cm ring net for different organisms. The dotted line and dashed line represent the approximation of FMT and ring net, respectively.

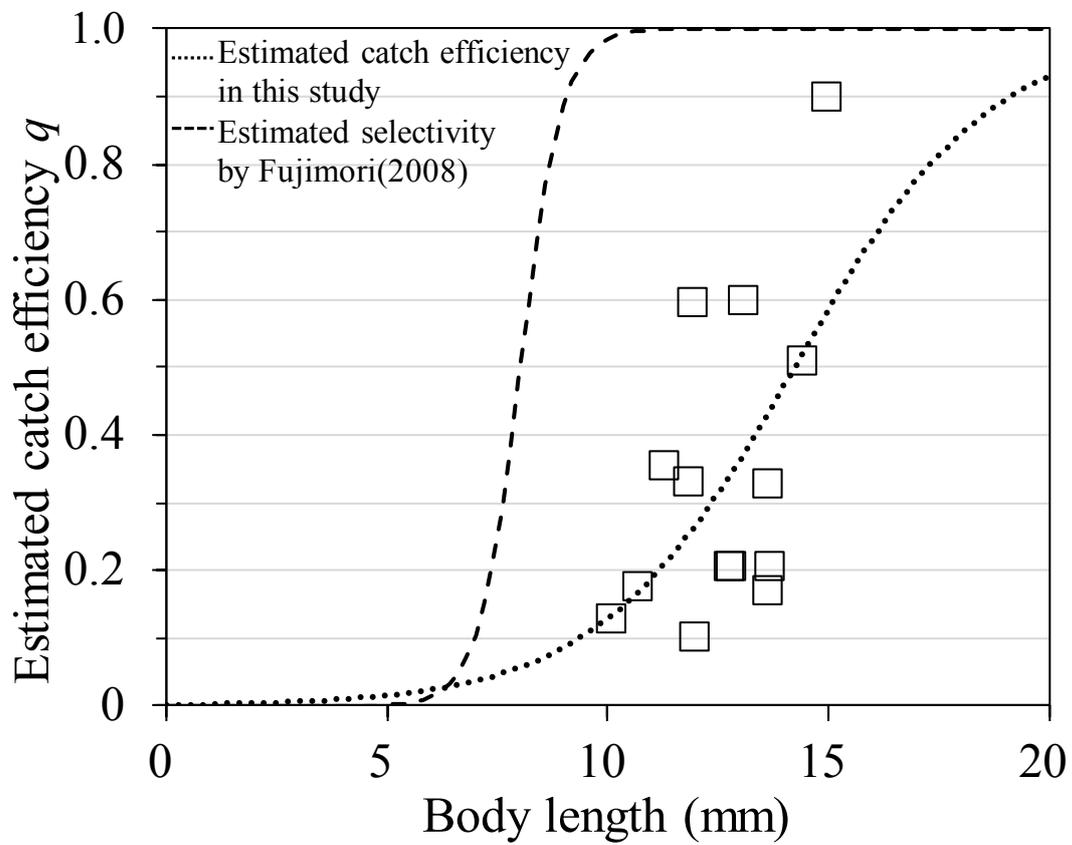


Fig. 5-7 Comparison between the estimated sampling efficiency in this study and the retention probability estimated by Fujimori (2008).

5-3 考察

5-3-1 プランクトンネットの種別採集効率の推定について

海中には様々な生物が混在し、その TS も異なるため、計量魚探機で測定された Sv は (5.1) 式のように、各生物種 (各体長) グループの Sv の代数和で表される。すなわち、音響的に生物密度を推定するためには、測定された Sv が各生物グループの Sv の和として合理的に説明できなければならない。通常、各生物の後方散乱断面積は体長別、種別に理論モデルを用いて推定される。採集個体数密度は採集結果から、体長別、種別に求められる。しかし、採集具の採集効率は 1 以下であることから、一般的には採集密度は音響手法で求めた生物密度よりも小さくなる。そのため採集密度と理論モデルで求めた SV は現場の SV の実測値よりも小さくなる (Fig. 5-8)。しかしながら、実際には実測 SV と推定 SV との差は一定でなかった。原因として、音響散乱モデルの妥当性、生物の体長分布や姿勢分布などの不確定性、他の散乱因子の存在などが考えられる。

本章では音響的手法を用いて種別に動物プランクトンの生物密度を求め、プランクトンネットによる採集密度と比較することで、使用した採集具の種別採集効率を推定した。その結果、オキアミ類とカイアシ類に関しては、採集効率が高い信頼度 ($p < 0.05$) で推定できたが、端脚類とヤムシ類に対しては高い信頼度の推定ができなかった (Table 5-4, Table 5-5)。その原因として、対象生物

のうち、オキアミ類とカイアシ類の構成比率が端脚類とヤムシ類に比べて高く、Sv への寄与率が高かったためと考えられた。そこで、各生物グループの Sv への寄与率を明らかにするために、実測 Sv と各生物グループの推定 Sv との相関関係を調べ Table 5-6 に示した。表から、大型オキアミ類の Sv と実測 Sv との単相関係数 (>0.95) は他の生物より高く、大型オキアミ類の寄与率が高いことがわかった。また、採集具別で見ると、FMT では大型オキアミ類だけではなく、小型オキアミ類も Sv への寄与率がその他の生物より高かった。したがって、FMT においては、オキアミ類における採集効率を高い信頼度で推定できた反面、小型動物プランクトンに対する採集効率の信頼度が低くなったと考えられる。また、Table 5-6 から、リングネットでは大型オキアミ類だけではなく、カイアシ類も Sv への寄与率がその他の生物より高いことがわかった。したがって、リングネットにおいては、大型オキアミ類とカイアシ類に対する採集効率は共に高い信頼度で推定できたものと考えられた。しかし、端脚類とヤムシ類が優占した採集データが少なかったため端脚類とヤムシ類に対する採集効率の信頼度が低かった ($p>0.1$) と考えられた。これを高い信頼度で推定するためには、端脚類やヤムシ類が優占する海域において曳網回数を増やす必要があると言える。

本研究では単一周波数の音響を用いて多種類の生物に対する採集効率を推定したが、最近、広帯域音響技術が急速に進歩しており、一度に複数周波数のデータを取得できるため、精度の高い周波数特性を観測することができる。広帯

域音響技術を用いると、サイズ別、種別の個体数密度推定の精度向上が期待され、さらに多くの生物種に対する採集効率の推定が可能になるだろう。

Table 5-6 Pearson correlation between measures Sv as towing and estimated Sv of each organism

Species	Measured Sv as towing	
	FMT	80 cm ring net
small Euphausia	0.46	-0.35
large Euphausia	0.95	0.99
Copepoda	0.16	0.32
Amphipoda	0.17	0.02
Chaetognatha	0.07	0.31

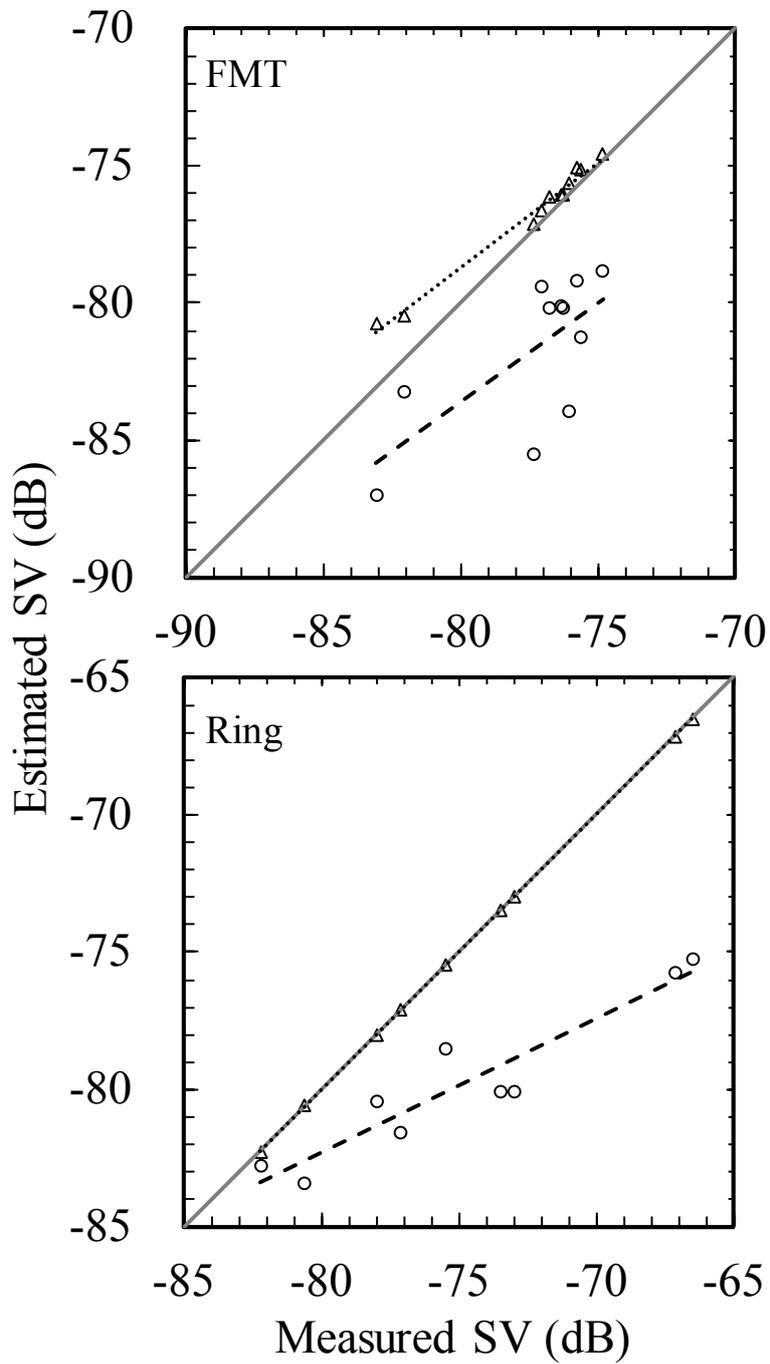


Fig. 5-8 Comparison of measured SV and estimated SV between when the sampling efficiency is assumed as 1 (circles) and when the sampling efficiency is employed (triangles).

5-3-2 動物プランクトンの定量採集について

小型オキアミ類とカイアシ類については、リングネットの採集効率が FMT の採集効率より大きかった (Table 5-4, Table 5-5)。この理由は FMT に用いた網地脚長が 1.5 mm と大きく、サイズの小さい動物プランクトンが網目逸脱のために採集できなかったためと考えられた。一方、大型オキアミ類については、リングネットの採集効率が FMT ネットの採集効率より小さくなった (Table 5-4, Table 5-5)。この理由は口径 80 cm のリングネットの口径が小さいため、サイズの大きな動物プランクトンが網口逃避のために採集できなかったからと考えられた。

本研究では取り上げなかったが、動物プランクトンの採集には NORPAC ネットが国際的な標準ネットとして広く使われている。口径が 45 cm の円形で、網地脚長 0.335 mm の網地を使用し、深度 100 m から表層まで、1m/s で垂直曳網することが決められており、これにより他海域とのデータ比較が容易になっている。本研究で用いたリングネットは口径 80 cm で網地脚長は 0.5 mm のものを 1m/s の速度で垂直曳網している。したがって、両者を比較した場合、中型動物プランクトンに対する採集効率は本研究で用いたリングネットの方が NORPAC ネットよりも大きいと推定される。しかし、体長が 1 mm 以下のマイクロ動物プランクトンは網目から逸脱する恐れがある。また、口径も大きいことから大深度からの垂直曳網には物理的に困難を伴い、中深度までの生物採集

に限定されるだろう。

一方、最近、稚魚や大型オキアミなど遊泳力のある生物の採集のために、大型のフレーム (5m²) を持ち、網地脚長が 1.95 mm と大きく、4kt の高速曳網が可能な MOHT ネットが開発された。本研究で使用した FMT と比較すると、大型オキアミ類などに対しては明らかに採集効率が高いと推定される。しかし網地脚長が 1.95 mm と大きいために、小型生物は網目から逸脱して、採集することができない。また採集具の規模が大きいため、これを利用する船舶も必然的に大型である必要がある。したがって動物プランクトンの定量採集には採集効率だけでなく、対象生物の体長範囲を効率よく採集できる採集具を選ぶこと、およびその生物種や体長に対する採集特性が既知であり、採集結果を標準化して、他の研究と比較できることが最も重要なことと考えられる。

第6章 総合考察

6-1 曳網採集具の採集効率と影響要因

水産資源量の推定には、主として漁業情報を用いた VPA が用いられるが、対象資源の生態や分布によっては適用できないことがあり、試験操業を含む資源調査が欠かせない。例えばトロール網による資源調査では特定の海域や水深を重点的に曳網し、得られた魚種や体長、漁獲量に基づく CPUE などの情報から資源状態を相対評価することができる。また、トロール網を用いた掃海面積法による資源量推定では、現場の漁獲から得られた生物密度を対象海域全体に引伸ばして資源量を推定している。

一般に魚類は成長段階が進むにつれて魚体が大型化し、遊泳能力も向上する。したがって大型生物が網口から逃避するなど採集具の採集効率が生物種や体長によって変化することになる。現在、トロール網を用いた資源量調査では採集効率を経験的に設定しており、科学的な根拠に乏しい。採集具の生物種や体長に対する採集効率が明らかになれば、種ごと、体長ごとの生物密度が求められ、これを基に偏りのない資源情報を定量的に把握することが可能になる。

曳網採集具の採集効率は網口回避に関わる入網率と、網目逸脱に関わる残存率によって決まる。採集効率に影響を及ぼす要因として、光環境、曳網水深、海流などの環境特性、採集具の規模、網地色や網目サイズ、曳網速度などの物

理特性、および対象生物の遊泳速度、視認能力などの生物特性が挙げられる。

これらの要因は相互に関係し、複合的に採集効率に影響を及ぼす。例えば本研究において、異なる網地色を用いた昼夜間での採集実験では、昼間に比べて夜間の採集効率が明らかに高く、また青白色網地に比べて黒色網地の漁獲効率が高かったのは、光環境が生物の視覚や逃避能力に大きく影響しているからと考えられる。

次に、採集具の物理特性に関して、本研究で使用した FMT とリングネットを比較すると、FMT は網口面積が大きく、網目も大きく、そのため高速の水平曳網が可能であるが、リングネットは網口面積が小さく、網目も小さく、曳網速度も制限される。FMT は比較的遊泳力の高い稚魚の採集を目的として開発されたが、稚魚でも体長が大きくなると網口逃避のために、明らかに採集効率が低下する。一方、動物プランクトンの採集を目的としたリングネットは、入網した小型動物プランクトンが網目から逸脱しないように、小さな目合いの網地を使用しているが、それが濾水率を低下させ、またオキアミのような大型動物プランクトンは網口逃避を起こすため採集効率が低下する。このようにさまざまな要因が採集具の採集効率に影響を及ぼすため、いろいろな条件の下で、生物種や体長に対する採集特性を明らかにする必要がある。

生物資源調査で使用される曳網採集具には、対象生物の確認や定性的な情報だけでなく、対象生物の構成比率、体長組成、そして生物密度などの定量的な資源情報の提供が求められる。微小プランクトンから魚類までを単一の採集具

で採集することは不可能であり，対象生物のサイズや行動に合わせた採集具を選択し，その運用も対象生物に合わせて行うことが必要である。しかし如何なる採集具を用いた場合でも，採集効率が既知であり，その採集効率を用いて補正することにより，偏りのない資源情報を得ることができるであろう。

6-2 音響的手法により推定した採集効率の信頼性

これまでに様々な調査用の採集具が用いられてきたが、音響ソナーや水中カメラ等の観測技術の進歩により、既存の採集具が必ずしも定量的ではないことが明らかとなっており、採集特性が不明な採集具が数多く存在する。

これは現場における真の生物量が把握できないことに起因する。漁獲や採集行為を伴わない直接的観測手法で真の生物量が把握できれば、採集量との比較により採集具の採集効率を推定することができる。計量魚探機は漁獲に寄らずに現場の生物量を推定できる代表的な直接観測技術である。計量魚探で得られる情報は体積散乱強度 SV などの音響量であり、これを生物量に変換するためには対象生物のターゲットストレンジスが必要である。最近では、魚類を含む様々な生物のターゲットストレンジスが明らかにされており、その知見を用いることにより、現場の生物密度を高精度に推定できれば採集具の採集効率を科学的に推定することができる。

しかしながら、本研究で提案した音響的手法を用いた採集効率の推定法は、計量魚探機で推定された採集具前方の生物密度を基にしているため、音響手法の制約や測定誤差がそのまま採集効率の推定誤差となって現れる。

音響手法の誤差要因の一つに魚種判別や体長推定の難しさがある。計量魚探機による資源量推定法は生物群集からの音響散乱量を定量化するものであり、特定の生物種による音響散乱を抽出することはできない。また生物のターゲットストレングスは体長によっても異なるため、測定した音響散乱量を体長ごとに分割することはできない。そのため、本方法では採集生物の平均体長から算出した平均ターゲットストレングスを用いて生物密度を推定している。したがって、採集具から完全に独立しているわけではなく、ここに誤差の要因がある。

次に、音響測定における雑音の問題がある。調査船舶が放射する航走ノイズは主にプロペラを発生源とする。プロペラが発生するノイズは広帯域であり、その範囲は計量魚探機で使われる超音波域にも及ぶ。ノイズに含まれる低周波成分によって生物が船舶から逃避行動を起こし、音響ビームから逸脱することにより、生物量を過小評価する可能性もある。また、ノイズの高周波成分は直接音響散乱量に重畳され、計量魚探が計測する積分値を過大評価する可能性がある。Aglen (1983) は、昼間の魚群を形成した状態と、夜間の分散した状態の結果を比較し、積分結果の相違はノイズを除去するための閾値によるロスが原因であると結論づけた。

さらに、音響手法の欠点として海面や海底によるマスキング現象がある。これらは海面や海底付近の生物が海面や海底から分離できない原理的な制約であり、この範囲をデッドゾーンと呼ぶ (Johannesson and Mitoson, 1983)。この現象は採集具の直近でも起こっている可能性があり、音響による生物量推定の過小評価につながる。

最後に TS の変動誤差がある。生物の TS は、周波数、魚種、体長、姿勢角などに依存して変動する。TS が変動するということは、すなわち反射強度そのものが変動するということであり、積分法を用いた生物推定の結果に誤差を与える。

第 3 章で考察したように、SV が 3 dB 変わると、推定される採集効率は 2 倍変わることになる。したがって、推定精度を高めるためには、SV 測定の精度を向上させる必要がある。そのためには平穏な海域において、トロールウインチなどの使用を制限して船舶ノイズを低減させ、また計量魚探機の振動子を採集具本体に設置するなどの工夫が必要であろう。さらに収録した音響データを用いて SV を計算する際には、使用する周波数に応じて、ノイズの除去のための閾値の設定などを慎重に設定すべきである。

最後に、TS の高精度推定について、本研究では貞安 (2005) が求めたスケトウダラ稚魚の TS-TL 関係式を使用して TS を求めたが、基準化最大 TS が基準化平均 TS より 1.09 dB 大きく、どちらを採用するかによって推定採集効率は土

23%変動する。したがって用いる TS の種類による変動の幅を念頭に置くべきである。

また TS は体長のほか、姿勢角や鰾の有無により大きく変化する。姿勢角の変化が TS に及ぼす影響は、波長に対して体長が大きくなるほど顕著になる。また、無鰾生物は有鰾生物に比べて TS が大幅に小さくなる上、その指向性が鋭くなり、その結果が採集効率推定に誤差を与える。したがって、音響的手法による採集効率の推定では、できるだけ低い周波数を用いることが重要である。

6-3 曳網漁具を用いた資源調査への応用

動物プランクトンの採集には、ある一定空間に存在する生物の現存量や個体数密度を求める定量採集法と、プランクトンの分布域や出現種の季節的变化などを定性的に計る定性採集法がある。定量採集法は資源量の推定や稚仔魚の餌環境などの調査を行うにあたって不可欠なものであり、それらの採集具として、リングネット、NORPAC、IKMT など多種の採集具が考案され、水平曳き、鉛直曳き、傾斜曳きなど曳網方法も多様である。しかしながら、これら多種多様なプランクトンネットの採集特性は不明確であり、採集されたデータから生物密度などの定量的情報を得ることができない。また一つの生物種に限ってみても、その幼生と成体では体長や遊泳能力、生息場所まで違う場合が多く、広い海域に分布する多種のプランクトン群集を単一の採集具で定量化することはほぼ不可能である。

動物プランクトン調査では、一般に NORPAC やボンゴネット等を鉛直曳きあるいは斜行曳きして用いられることが多いが、これらの小規模な採集具では大型の動物プランクトンや成長の進んだ仔稚魚類、マイクロネクトンなどの生物の採集が難しい (Fig. 6-1)。そこで遊泳能力を持つ生物の採集には、比較的規模の大きい IKMT (Isaacs-Kidd Midwater Trawl) あるいは Methot トロールのように高速曳網が可能な採集具が利用される場合が多い。しかしながら、IKMT は対水速度の変化により網口面積が変化するため運用上の制約がある。また、

Methot トロールは定形の網口を有するが、ディプレッサーを用いるため、その取り扱いが煩雑である。そこで定形網口枠を持ち、ディプレッサーが不要で高速曳網が可能な FMT が開発された。

動物プランクトン調査で重要なことは、何時（季節や時間帯）、どこに（海域や深度）、どのような種が、どれだけの密度で存在しているのかという定量的な情報である。Fig. 6-1 に示したように、目的によって使い分けられる多種多様な採集具によって得られたデータからこうした定量的な情報を得るためには、それぞれの採集具の採集効率を用いてデータを標準化することにより、初めて生物密度の絶対評価や相互比較が可能になる。本研究で提案した、音響的手法を用いた採集効率の推定法は如何なる採集具にも適用できるので、採集データの標準化の実現に貢献するだろう。

一方、漁業資源調査にはトロール網などが主として用いられ、スケトウダラやホッケなどの底魚類、サンマ・マイワシ・サバ類・スルメイカなどの浮き魚類の資源量や分布生態が調べられている（上田ら，2006）。例えば、代表的な表層種であるサンマ *Cololabis saira* は、漁期前（6～7月）に北西・中央北太平洋において調査船による漁獲試験を行い、その漁獲結果を基に資源量を推定している（納谷ら，2010）。漁具には中層トロールを用いており、掃海面積法を用いて、生物の面積密度をもとめ、これを全調査海域面積に引伸ばして現存量を推定している。このため、中層トロールの採集効率は推定資源尾数に直接影響する非常に重要なパラメータである。これまでに使用した採集効率($q=0.144$)は、

棒受け網漁業の CPUE から求めた資源量との対比で間接的に推定しているため、採集効率の精度は高いとは言えない。

また、キチジのような底生性の強い魚種の資源量推定には、着底トロールによる面積密度法が用いられている（服部ら，2006）。この方法では、漁獲効率を 1 として資源量を推定しているため、過小評価につながる恐れがある。

最近、計量魚探機を主とする水産音響技術の発展により、高い精度で生物資源量を推定することが可能になってきた。また、多くの調査船には計量魚探機が搭載されており、本論文で提案した方法を用いて、これら漁具の採集効率の推定に応用することが可能である。すなわち、当該漁具の特定の魚種に対する体長選択特性や漁獲効率が明らかになれば、試験操業データから科学的な資源量情報を得ることが可能になるであろう（Fig. 6-1）。

冒頭で述べたように、漁獲統計だけを用いた VPA で全ての水産資源量を評価することはできない。対象資源の直近年の資源量や現存量の把握、ライフスパンの短い魚種や局地的な資源などには漁業から独立した直接的資源量推定法が必要となる。本研究は対象生物に影響を与えずに生物量を評価できる音響調査法の利点を用いて、経験的に設定されている曳網採集具の採集効率に科学的根拠を与えるものである。

しかしながら、音響手法と曳網採集にはそれぞれ利点と欠点がある。音響手法には効率良く広い海域の資源調査ができる反面、対象生物の魚種や体長を正確に把握することができない。また、表面や海底近くの定量評価は原理上難し

い。一方、曳網採集具を用いた調査では、現場に生息する生物を重点的に直接採取して魚種や体長のほか栄養状態や年齢などの多くの資源情報を得ることができる反面、その定量性に問題がある。

トロール網を用いた資源量調査では、事前に対象生物の平面的、および鉛直的の広がり把握する必要があり音響的手法の併用が欠かせない。また、音響調査では対象生物の最適なターゲットストレンジスを得るために、魚種情報や正確な体長情報が必要であり、トロール網による曳網調査が欠かせない。したがって、対象資源の分布や生態に合わせて、音響を主とし曳網を従とした調査、または、曳網を主とし音響を従とした音響・トロール調査を適切に使い分けていくのが最良の方法と考えられる。採集具の定量化や音響技術の進歩、および様々な調査法の組み合わせにより、将来はさらに効率が良く、精度の高い資源調査が実現されるものと期待される。

また、最近、ビックデータの活用と AI による問題解決法が話題になっているが、資源量調査など資源のモニタリングや評価、資源加入や漁場形成、漁海況の予測ならびに漁業の管理、リアルタイムなモニターに基づく資源利用や省エネに最適な操業方法の選択など、様々な観測データや漁獲データを統合的に分析し、複雑な手順を必要としている資源管理を AI によって判断していくようなトータルシステムの開発へ向けた研究が必要になるだろう。

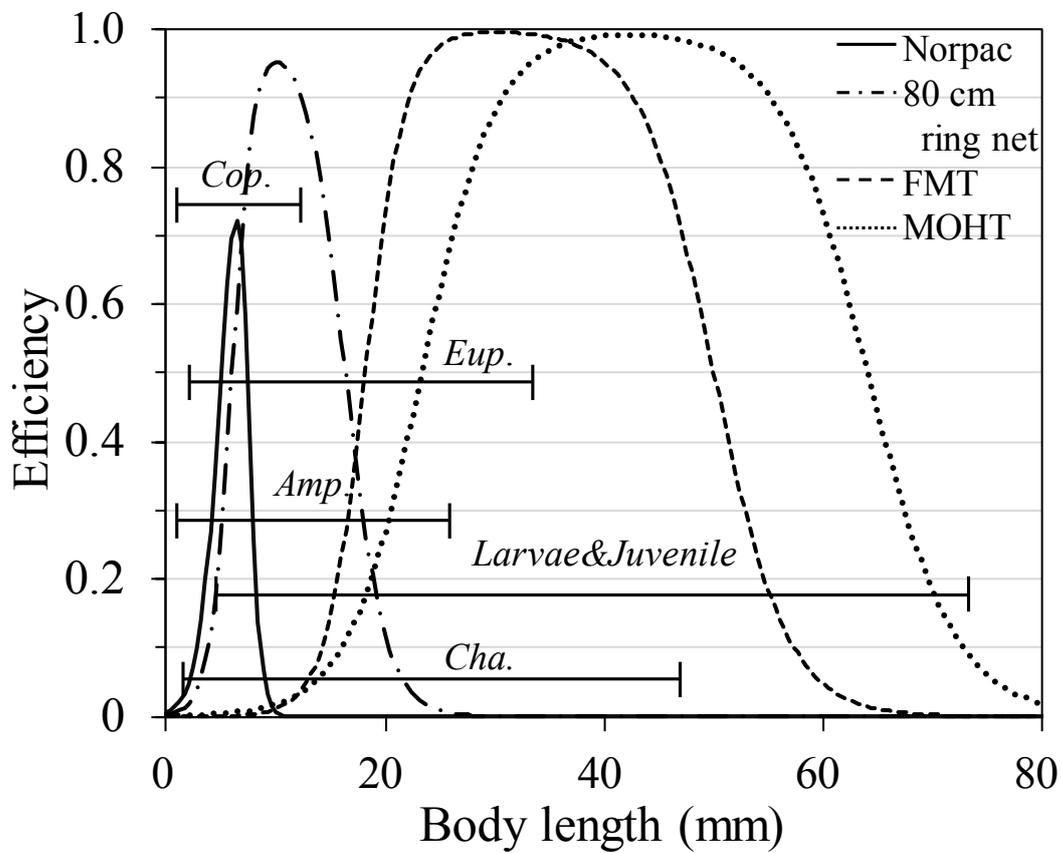


Fig. 6-1 Conceptual diagram of sampling efficiency for the various size creature in different sampling gear.

結論

本研究は仔稚魚や動物プランクトンの採集に用いられる曳網採集具の採集効率を求め、計量魚群探知機を用いて採集具前方の生物密度を求め、採集具による採集結果と比較することにより、曳網採集具の採集特性を明らかにしたものである。本研究で得られた知見は以下の通りである。

1. 対象生物が複数種で体長が不均一のとき、魚群探知機で推定される採集具前方の体積後方散乱係数 S_v は各生物の後方散乱断面積 σ_{bs} と生物密度 ρ_{Ac} との積和で表される。採集効率は現場の生物密度に対する採集生物密度との比であることから、多数回の採集実験を行い、計量魚探機で測定した平均 S_v を目的変数、採集生物密度 ρ_{Tr} と音響モデルにより推定した各生物の後方散乱断面積 σ_{bs} の積を説明変数とした重回帰式を作り、採集効率の逆数である偏回帰係数を重回帰分析により統計的に推定し、種別、体長別に曳網採集具の採集効率を推定する方法を考案した。
2. 本方法を用いてスケトウダラ稚魚の採集に用いられる FMT (2m×2m) の採集効率を体長階級別に推定した。その結果尾叉長 10~70 mm のスケトウダラ稚魚の採集効率は 0.99~0.08 と変化し、体長の増加にともない採集効率が低下することが示された。また様々な採集条件が採集効率に与える影

響を明らかにするため、昼夜間別、網地色別、曳網速度別に採集効率の変化を調べたところ、夜間の方が昼間よりも採集効率が高いこと、黒色網地が青白色網地よりも採集効率が高いこと、そして、曳網速度が速いほど採集効率が高くなることを定量的に示すことができた。

3. 次に、動物プランクトンの採集に用いられるリングネット（直径 80 cm）と FMT（2m×2m）の採集効率を生物種別に推定し比較した。その結果、推定された小型オキアミ類、大型オキアミ類、カイアシ類に対するリングネットの採集効率はそれぞれ 0.62 ($p=0.050$), 0.09 ($p<0.001$), 0.88 ($p=0.012$) となったのに対し、FMT の採集効率はそれぞれ 0.20 ($p=0.021$), 0.41 ($p<0.001$), 0.35 ($p=0.029$) となり、リングネットではカイアシ類などの小型生物の採集効率は高いが大型オキアミ類の採集効率が低下すること、FMT では逆に大型オキアミ類の採集効率は高いが小型生物の採集効率が低いことを定量的に示すことができた。

これらの知見は各種の動物プランクトンネットによる採集データの標準化に寄与するほか、トロール網を用いた魚類資源調査への応用も可能であり、音響技術とトロール技術を融合した資源調査法の発展に貢献するものと考えられた。

謝辞

本論文を取りまとめるにあたり、御忙しい中終始懇切なる御指導、御鞭撻を賜り、また貴重な在日留学の機会やフィールド調査の機会を与えてくださった、北海道大学大学院水産科学研究院海洋生物資源科学部門海洋計測学分野教授向井 徹博士、並びに同名誉教授飯田浩二博士に心より感謝申し上げます。

また、学会発表や論文投稿などに懇切丁寧な御指導ならびに御助言を頂き、本論文の主査を務めていただきました同分野教授藤森康澄博士に心より感謝申し上げます。また、本論文を査読され副査を務めていただきました同分野助教長谷川浩平博士に厚く御礼申し上げます。

フィールド調査では北海道大学水産学部附属練習船うしお丸船長亀井佳彦准教授はじめ士官、乗組員の方々に大変お世話になりました。深く感謝いたします。また、共に乗船して生物採集や分析、論文作成で御協力を頂いた研究室の学生ならびに先輩諸氏に深く感謝いたします。

また、学会や調査において多くの有益な助言や激励を頂いた水産音響学、漁業計測学の研究者の皆様に感謝の意を表します。

日本への留学の機会を与えられた大連海洋大学教授湯勇博士、同教授張国勝博士、同教授張鐘哲博士、同講師王喜風博士に心より感謝申し上げます。

博士課程ではロータリー米山記念奨学会の奨学金ならびに札幌ポプラライオンズクラブの青少年育成国際奨学金を受けました。ここに北斗ロータリークラ

ブはじめロータリー2510 地区の皆様，ならびに札幌ポプラライオンズクラブの
皆様に深く感謝いたします。

最後に，長い学生生活を金銭面，精神面など全面的に支えて頂いた両親と家
族に心より感謝申し上げます。

爸爸，感谢您为我付出的一切！

参考文献

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の昼夜変動. 日水誌 1999; **65(2)**: 252-259.

Abe K, Sadayasu K, Sawada K, Ishii K, Takao Y. Precise target strength measurement and morphological observation of juvenile walleye pollock (*Theragra chalcogramma*). IEEE 2004; doi: 10.1109/OCEANS.2004.1402945.

阿部真之. FMT (Framed Midwater Trawl)の採集特性と流れの影響. 博士論文, 北海道大学, 札幌. 2007.

Adams PB, Butler JL, Baxter CH, Laidig TE, Dahlin KA, Wakefield WW. Population estimates of Pacific coast groundfishes from video transects and swept-area trawls. *Fish. Bull.* US 1995; **93(3)**: 446-455.

Aglen A. Echo integrator threshold and fish density distribution. *FAO Fish. Rep.* 1983; No. 300: 27-34.

青木一郎, 三浦汀介, 今井信幸, 小松輝久. フレーム型中層トロールによる浮魚類仔稚魚の採集. 日水誌 2000; **66(1)**: 10-17.

Aron W, Collard S. A study of the influence of net speed on catch. *Limnol. Oceanog.* 1969; **14(2)**: 242-249.

Barkley RA. The Theoretical Effectiveness of Towed-Net Samplers as Related to Sampler Size and to Swimming Speed of Organisms. *ICES J. Mar. Sci.* 1964; **29(2)**: 146–157.

Barkley RA. Selectivity of towed-net samplers. *Fish. Bull.* 1972; **70(3)**: 799-820.

Brodeur RD, Daly EA, Benkwitt CE, Morgan CA, Emmett RL. Catching the prey: Sampling juvenile fish and invertebrate prey fields of juvenile coho and Chinook salmon during their early marine residence. *Fish. Res.* 2011; **108(1)**: 65–73.

Chu D, Foote KG, Stanton TK. Further analysis of target strength measurements of Antarctic krill at 38 and 120 kHz: Comparison with deformed cylinder model and inference of orientation distribution. *J. Acoust. Soc. Am.* 1993; **93(5)**: 2985-2988.

Clay CS, Horne JK. Acoustic models of fish: the Atlantic cod (*Gadus morhua*). *J. Acoust. Soc. Am.* 1994; **96(3)**: 1661-1668.

Coyle KO, Pinchuk AI. The abundance and distribution of euphausiids and zero-age pollock on the inner shelf of the southeast Bering Sea near the Inner Front in 1997—1999. *Deep-Sea Res. II* 2002; **49(26)**: 6009-6030.

Demer DA. An estimate of error for the CCAMLR 2000 survey estimate of krill biomass. *Deep-Sea Res. II* 2004; **51(12-13)**: 1237-1251.

Dickson W. Estimation of the capture efficiency of trawl gear. I: Development of a theoretical model. *Fish. Res.* 1993a; **16(3)**: 239–253.

Dickson W. Estimation of the capture efficiency of trawl gear. II: testing a theoretical model. *Fish. Res.* 1993b; **16(3)**: 255–272.

Doray M, Mahévas S, Trenkel VM. Estimating gear efficiency in a combined acoustic and trawl survey, with reference to the spatial distribution of demersal fish. *ICES J. Mar. Sci.* 2010; **67(4)**: 668–676.

Eleftheriou A. Marine Benthos Dynamics: Environmental and Fisheries Impacts. (Introduction and Overview) *ICES J. Mar. Sci.* 2000; **57(5)**: 1299–1302.

Foote KG, Knudsen HP, Vestnes G, MacLennan DN, Simmonds EJ. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: a practical guide. Technical Report, *ICES Coop. Res. Rep.* 1987; 144.

藤森康澄, 塩出大輔, 馬場紀彦, 清水晋, 三浦汀介. スケトウダラ稚魚の時刻と照度による行動. *日水誌* 1999; **65(1)**: 26-32.

藤森康澄. I-2. 音響散乱層調査のための採集具の開発. *日水誌* 2007; **73(5)**: 925-926.

藤森康澄, 山下由起子, 阿部真之, 板谷和彦, 向井徹. プランクトンとマイクロ

ネクトンの同時採集のためのズボン式フレームトローラー—小目合網地によるオキアミ類のサイズ選択性—. 水産工学 2008; **44(3)**: 197-204.

福田美亮, 向井徹, 澤田浩一, 飯田浩二. 懸垂法を用いたツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* の側面方向ターゲットストレンジス測定. 日水誌 2012; **78(3)**: 388-398.

古澤昌彦. 水産資源推定のための超音波による魚群探知に関する研究. 水産工
学研究所研究報告 1990; **11**: 173-249.

古澤昌彦. 音で海を見る. 成山堂書店, 東京. 2001.

Gauthier S, Rose GA. Diel vertical migration and shoaling heterogeneity in Atlantic
redfish: effects on acoustic and bottom-trawl surveys. *ICES J. Mar. Sci.* 2005; **62(1)**:
75–85.

Gislason H, Sinclair M, Sainsbury K, O’Boyle R. Symposium overview: incorporating
ecosystem objectives within fisheries management. *ICES J. Mar. Sci.* 2000; **57(3)**:
468–475.

Godø OR, Karp WA, Totland A. Effects of trawl sampling variability on precision of
acoustic abundance estimates of gadoids from the Barents Sea and the Gulf of Alaska.
ICES J. Mar. Sci. 1998; **55(1)**: 86–94.

Greenlaw CF. Backscattering spectra of preserved zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.* 1977; **62(1)**: 44-52.

原 一郎. 直接推定法の今日的意義. 「TAC 管理下における直接推定法—その意義と課題」(浅野謙治編) 恒星社厚生閣, 東京. 2000; 9-19.

Harden-Jones FR, Margetts AR, Greer-Walker M, Arnold GP. Efficiency of the Granton otter trawl determined by sector scanning sonar and acoustic transponding tags. *J. Cons. Int. Explor. Mer* 1977; **170**: 45-51.

Harris RP, Wiebe PH, Lenz J, Skjoldal HR, Huntley M. ICES Zooplankton Methodology Manual. Academic Press; 2000.

服部努, 成松庸二, 伊藤正木, 上田祐司, 北川大二. 東北海域におけるキチジの資源量と再生産成功率の経年変化. 日水誌 2006; **72(3)**: 374-381.

Hjellvik V, Michalsen K, Aglen A, Nakken O. An attempt at estimating the effective fishing height of the bottom trawl using acoustic survey recordings. *ICES J. Mar. Sci.* 2003; **60(5)**: 967-979.

Hoffman JC, Bonzek CF, Latour RJ. Estimation of bottom trawl catch efficiency for two demersal fishes, the atlantic croaker and white perch, in Chesapeake Bay. *Mar. Coast. Fish.* 2009; **1(1)**: 255-269.

Horne JK. The influence of ontogeny, physiology, and behaviour on the target strength of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*). *ICES J. Mar. Sci.* 2003; **60(5)**: 1063–1074.

Hu F, Oozeki Y, Tokai T, Matsuda K. Scale model of a new midwater trawl system for sampling pelagic larval and juvenile fish. *Fish. Sci.* 2001; **67(2)**: 254–259.

五十嵐脩蔵. プランクトンネットの濾水率について(Ⅱ報). 北海道大学水産科学院研究彙報 1957; **8(1)**: 48-50.

飯田浩二. 水中音響を利用した海洋生物資源量の推定. 海洋音響学会誌 1995; **22**: 17-25.

飯田浩二, 向井徹, 森英樹. 音響散乱層の体積後方散乱強度の周波数特性と構成種のターゲットストレングスに関する考察. 日水誌 1999; **65(1)**: 66-72.

Iida K, Mukai T, Hwang D. Relationship between acoustic backscattering strength and density of zooplankton in the sound-scattering layer. *ICES J. Mar. Sci.* 1996; **53(2)**: 507-512.

Itaya K, Fujimori Y, Shimizu S, Komatsu T, Miura T. Effect of towing speed and net mouth size on catch efficiency in framed midwater trawls. *Fish. Sci.* 2007; **73(5)**: 1007-1016.

Itaya K, Fujimori Y, Shiode D, Aoki I, Yonezawa T, Shimizu S, Miura T. Sampling performance and operational quality of a frame trawl used to catch juvenile fishes. *Fish. Sci.* 2001; **67(3)**: 436-443.

板谷和彦. FMT (Framed Midwater Trawl)の開発と定量採集法に関する研究. 博士論文, 北海道大学, 札幌. 2002.

Johanneson KA, Mitson RB. Fisheries acoustics -A practical manual for aquatic biomass estimation. *FAO Fish. Rep.* 1983; No. 240: 1-249.

Joll LM, Penn JW. The application of high-resolution navigation systems to Leslie-DeLury depletion experiments for the measurement of trawl efficiency under open-sea conditions. *Fish. Res.* 1990; **9(1)**: 41-55.

Jůza T, Čech M, Kubečka J, Vašek M, Peterka J, Kratochvíl M, Frouzová J, Matěna J. The influence of the trawl mouth opening size and net colour on catch efficiency during sampling of early stages of perch (*Perca fluviatilis*) and pikeperch (*Sander lucioperca*) in the bathypelagic layer of a canyon-shaped reservoir. *Fish. Res.* 2012; **123-124**: 21-25.

小山武夫. 水産資材便覧 (漁業資材編), 北海道水産新聞社, 札幌. 1973; 31-32.

金銀好, 向井徹, 飯田浩二. 体積後方散乱強度の周波数差を利用した北海道噴火湾周辺におけるオキアミ類とカイアシ類の識別. *日水誌* 2016; **82(4)**: 587-600.

Krieger K, Heifetz J, Ito D. Rockfish assessed acoustically and compared to bottom-trawl catch rates. *Alaska Fish. Res. Bull.* 2001; **8(1)**: 71–77.

Krieger KJ, Sigler MF. Catchability coefficient for rockfish estimated from trawl and submersible surveys. *Fish. Bull.* US 1996; **94(2)**: 282–288.

Lasta ML, Iribarne OO. Southwestern Atlantic scallop (*Zygochlamys patagonica*) fishery: assessment of gear efficiency through a depletion experiment. *J. Shellfish Res.* 1997; **16**: 59–62.

Lawson GL, Wiebe PH, Ashjian CJ, Gallager SM, Davis CS, and Warren JD. Acoustically-inferred zooplankton distribution in relation to hydrography west of the antarctic peninsula. *Deep-Sea Res., II* 2004; **51(17-19)**: 2041–2072.

Lenarz WH. Mesh retention of larvae of *Sardinops caerulea* and *Engraulis mordax* by plankton nets. *Fish. Bull.* US 1972; **70(3)**: 839–848.

Mackinson S, van der Kooij J, Neville S. The fuzzy relationship between trawl and acoustic surveys in the North Sea. *ICES J. Mar. Sci.* 2005; **62(8)**: 1556–1575.

Matsukura R, Yasuma H, Murase H, Yonezaka S, Funamoto T, Honda S, Miyashita K. Measurements of density contrast and sound-speed contrast for target strength estimation of *Neocalanus* copepods (*Neocalanus cristatus* and *Neocalanus plumchrus*) in the North Pacific Ocean. *Fish. Sci.* 2009; **75(6)**: 1377–1387.

松下吉樹, 井上喜洋, Tatarnikov VA. ポケット網実験から推定した北洋トロール漁業における魚類の網内集約過程. 日水誌 1999; **65(1)**: 3-10.

McGehee DE, O'Driscoll RL, Traykovski LVM. Effects of orientation on acoustic scattering from Antarctic krill at 120 kHz. *Deep-Sea Res. II* 1998; **45(7)**: 1273-1294.

Mehot RD. Frame trawl for sampling pelagic juvenile fish. *CalCOFI Rep.* 1986; **XXVII**: 267-278.

Michalsen K, Godø OR, Fernö A. Diel variation in the catchability of gadoids and its influence on the reliability of abundance estimates. *ICES J. Mar. Sci.* 1996; **53(2)**: 389-395.

Motoda S. Devices of simple plankton apparatus. *Mem. Fac. Fish., Hokkaido Univ.* 1959; **7**: 73-94.

向井徹. 魚の音響散乱特性—姿勢の影響—. 月刊海洋 1994; **26(10)**: 624-629.

Munk P. Catching large herring larvae: Gear applicability and larval distribution. *J. Cons. Int. Explor. Mer* 1988; **45(1)**: 97-104.

Murphy GI, Clutter RI. Sampling anchovy larvae with a plankton purse seine. *Fish. Bull.* 1972; **70(3)**: 789-798.

中村元彦. 60cm ボンゴネットにおけるカタクチイワシ仔魚の網口通過率の推

定. 日水誌 1989; **55(11)**: 1893-1898.

中村元彦. 曳網速度の違いによるプランクトンネットの採集効率の差. 日水誌 1992; **58(5)**: 861-869.

納谷美也子, 上野康弘, 毛利隆志, 大島和浩, 渡部俊広, 藤田薫, 伊藤喜代志, 岩崎和治, 松尾康也, 伊藤寛, 清水勇一. サイドスキャンソナーを用いた中層トロールのサンマに対する採集効率の推定. 日水誌 2010; **76(4)**: 658-669.

日本水産資源保護協会. 資源評価体制確立推進事業報告書 (平成 12 年度). 日本水産資源保護協会, 東京, 2001.

西沢敏, 安楽正照. 濾水計によるプランクトンネット濾水量の測定について. 北海道大学水産科学院研究彙報 1956; **6(4)**: 298-309.

O'Driscoll R, Rose G, Andersen J. Counting capelin: a comparison of acoustic density and trawl catchability. *ICES J. Mar. Sci.* 2002; **59(5)**: 1062-1071.

Ona E, Godø OR. Fish reaction to trawling noise: the significance for trawl sampling. *Rapports et Proces-Verbaux des Reunions Conseil Int. pour l'Explor. Mer.* 1990; **189**: 159-166.

大関芳沖. 卵稚仔調査法. 「TAC 管理下における直接推定法—その意義と課題」 (浅野謙治編) 恒星社厚生閣, 東京. 2000; 70-80.

Oozeki Y, Hu F, Kubota h, Sugisaki H, Kimura R. Newly designed quantitative frame trawl for sampling larval and juvenile pelagic fish. *Fish. Sci.* 2004; **70(2)**: 223–232.

大関芳沖. I-1.稚魚定量採集具開発の現状. 日水誌 2007; **73(5)**: 923-924.

Rakowitz G, Tušer M, Říha M, Jůza T, Balk H, Kubečka J. Estimation of the capture efficiency of trawl gear. *Fish. Res.* 2012; **123-124**: 37-48.

Ryer CH, Olla BL. Altered search speed and growth social versus independent foraging in two pelagic juvenile fishes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1997; **153**: 273-281.

Ryer CH, Olla BL. Avoidance of an approaching net by juvenile walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the laboratory: the influence of light intensity. *Fish. Res.* 2000; **45(2)**: 195-199.

貞安一廣. 魚類のターゲットストレングスの精密推定に関する研究. 博士論文, 北海道大学, 札幌. 2005.

斎浦耕二, 東海正. ポケット網実験から推定したカタクチイワシシラスに対する船曳網の網目選択性. 日水誌 2003; **69(4)**: 611-619.

斎浦耕二, 東海正. 船曳網コッドエンドに使用されるモジ網のカタクチイワシシラスに対する網目選択性の推定. 日水誌 2005; **71(1)**: 24-32.

Saville A. Mesh Selection in Plankton Nets. *ICES J. Mar. Sci.* 1958; **23(2)**: 192–201.

Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nat methods* 2012; **9(7)**: 671-675.

Siwabessy PJW, Penrose JD, Kloser RJ. A comparison between acoustically derived S_A estimates and those derived from nets. European conference on underwater acoustics, Lyon. 2000.

Smith PE, Richardson SL. Standard techniques for pelagic fish egg and larva surveys. *FAO Fisheries Technical Paper* 1977; **175**: 66-69.

Somerton D, Ianelli J, Walsh S, Smith S, Godø O, Ramm D. Incorporating experimentally derived estimates of survey trawl efficiency into the stock assessment process: a discussion. *ICES J. Mar. Sci.* 1999; **56(3)**: 299–302.

Stanton TK. Simple approximate formulas for backscattering of sound by spherical and elongate objects. *J. Acoust. Soc. Am.* 1989; **86(4)**: 1499-1510.

Stanton TK, Chu D. Review and recommendations for the modelling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton: euphausiids and copepods. *ICES J. Mar. Sci.* 2000; **57(4)**: 793–807.

Stanton TK, Wiebe PH, Chu D, Goodman L. Acoustic characterization and discrimination of marine zooplankton and turbulence. *ICES J. Mar. Sci.* 1994a; **51(4)**: 469–479.

水産庁. 平成 29 年度水産白書. 水産庁 HP (http://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpa_per/29hakusyo/index.html) ; 2017.

Szalay PG, Somerton DA, Kotwicki S. Correlating trawl and acoustic data in the eastern Bering Sea: A first step toward improving biomass estimates of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) and Pacific cod (*Gadus macrocephalus*)?. *Fish. Res.* 2007; **86(1)**: 77-83.

Thomas GL, Kirsch J. nekton and plankton acoustics: an overview. *Fish. Res.* 2000; **47(2-3)**: 107-113.

東海正. II-3.採集具におけるサイズ選択性の解析-網目選択とサイズ依存の網口回避. 日水誌 2007; **73(5)**: 933-934.

上田祐司, 成松庸二, 服部努, 伊藤正木, 北川大二, 富川なす美, 松石隆. VPA と着底トロール調査による資源量から推定された東北海域におけるマダラの漁獲効率. 日水誌 2006; **72(2)**: 201-209.

上野正博. 魚卵と仔魚の採集ネットへの網目保持. 日水誌 1986; **52(8)**: 1295-1300.

渡部泰輔. 「水産資源の解析と評価」卵数法 (石井丈夫編) 恒星社厚生閣, 東京. 1983; 9-29.

Wileman DA, Ferro RST, Fonteyne R, Millar RB. Manual of methods of measuring the selectivity of towed fishing gears. ICES Coop. Res. Rep. No. 215, Copenhagen. 1996.

Zhang XM, Arimoto T. Visual physiology of walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in relation to capture by trawl nets. ICES *Mar. Sci. Symp.* 1993; **196**: 113-116.