計量魚群探知機を用いた日本海隠岐諸島周辺海域における キュウリエソの音響散乱層の識別

藤野 忠 敬,^{1*} 宮下 和 士,¹ 青 木 一 郎²
増 田 紳 哉,^{3a} 氏 良 介,^{3b} 志 村 健³

(2004 年 11 月 16 日受付, 2005 年 6 月 14 日受理)

¹北海道大学大学院水産科学研究科, ²東京大学大学院農学生命科学研究科, ³鳥取県水産試験場

Acoustic identification of scattering layer by *Maurolicus japonicus*
around the Oki Islands, Sea of Japan

TADANORI FUJINO,^{1*} KAZUSHI MIYASHITA,¹ ICHIRO AOKI,²
SHINYA MASUDA,^{3a} RYOUSUKE UJI^{3b} AND TSUYOSHI SHIMURA³

¹Graduate School of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041-8611, ²Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8657, ³Tottori Prefectural Fisheries Experiment Station, Sakaiminato, Tottori 684-0046, Japan

We examined threshold-setting methods to identify *Maurolicus japonicus* SL (Scattering Layer) in the Sea of Japan. Acoustic survey data were collected in several months (May, June, Aug., Sep., and Oct.) from 2000 to 2003 around the Oki Islands, southwest of the Sea of Japan. The results showed the following threshold-setting method to be appropriate: to set the value as the lower limit S_V threshold obtained by subtracting 10 dB from the averaged maximum S_V of the water column. The depth range extracted by this method matched the existence of *M. japonicus* confirmed by the bottom and midwater trawl sampling. This method corresponds to the change of packing density by seeking the threshold baseline from the *M. japonicus* SL.

キーワード : S_V , 閾値設定, 音響散乱層, キュウリエソ, 魚種判別, 計量魚群探知機

日本海においてキュウリエソ *Maurolicus japonicus* は唯一の中深層性魚類として膨大な生物量を誇っており, 生態系の鍵種的な存在である。¹⁻³⁾ したがってその分布ならびに現存量を把握することは重要であり, 古くから卵稚仔調査の結果を用いた研究がなされてきた。¹⁻⁴⁾ これまでに日本海全体のキュウリエソの資源量は 1970 年代の日本海における卵稚仔調査の結果を用いて 330 万 t と試算され,¹⁾ 水平的には, 男鹿半島から対馬海峡までの大陸棚縁辺を中心とし, 隠岐諸島周辺や富山湾といった海底地形の構造に特徴のある海域に特に多く出現することが明らかとなっている。⁴⁾ 一方, 鉛直的には, キュウリエソが単一種で規模の大きな音響散乱層 (以後, 散乱層) を形成することから, 魚群探知機を用いた観察に

よる知見が蓄積されつつある。⁵⁻¹⁰⁾ 魚群探知機は水平的な分布に加え, 連続的にキュウリエソの鉛直分布を把握できる利点がある。例えば, 川口⁵⁻⁶⁾ は魚群探知機を用いて日本海のキュウリエソが日中は深度 160~200 m 程に分布し, 日没時に深度 30 m ほどに上昇した後, 分散し, 夜間は深度 130~170 m 程を中心に分布する日周鉛直移動を行うことを初めて報告した。また近年では計量魚群探知機 (以後, 計量魚探) を用いることによって, キュウリエソの分布だけでなく, 現存量を推定することが可能となっている。⁹⁾

このように, 計量魚探に代表される音響的な手法は日本海におけるキュウリエソの分布や量の評価にきわめて有効であるが, 音響データは超音波の反射量を捉えたり

* Tel : 81-138-40-8817. Fax : 81-138-40-8856. Email : fnori@fish.hokudai.ac.jp

^a 現所属 : 鳥取県境港水産事務所 (Tottori Prefectural Sakaiminato Marine Products Office, Sakaiminato, Tottori 684-0034, Japan)

^b 現所属 : 鳥取県栽培漁業センター (Tottori Prefectural Fisheries Research Center, Tohaku, Tottori 689-0602, Japan)

モートセンシングのデータであるため, 特定魚種の分布, 量を解析するためには魚探に映っている魚種が判別され (魚種判別), その上で魚群の輪郭を決定する音響反射のレベルに基づいた閾値設定が行われる必要がある。¹¹⁾ しかし, 魚群内の魚の密度は魚種や季節, 照度などの環境要因により変化するため,¹²⁾ 一定の閾値を与えることは難しい。このため, 魚群の輪郭を抽出する閾値設定は, 研究者がそれぞれ経験的に設定しているのが現状であり, 中深層性魚類の散乱層についてもこのような報告が認められる。例えば, Ménard and Marchal¹³⁾ はキュウリエソと同じように単一種で散乱層を構成するヤベウキエソ *Vinciguerria nimbaria* について, 魚群密度を日中は 2 個体/m³, 夜間は 1 個体/m³ として TS (ターゲットストレングス: 1 個体あたりの音響反射のレベル) より, S_V (体積後方散乱強度: 単位体積あたりの音響反射のレベル) を求め, これを散乱層の輪郭識別のための閾値として用いている。この方法は昼夜別の魚群輪郭の抽出には成功しているが, 季節による集群密度の変化は考慮されていない。また Bertrand *et al.*¹⁴⁾ は散乱層の S_V とネットにより得られた採集生物の対応から, S_V = -70 dB 以上において研究対象とするハダカイワシ類の散乱層を識別できると論じている。しかし, 昼夜比較を行っているにもかかわらず, 昼夜別の閾値設定の問題については検討していない。

日本海のキュウリエソについては濱野ら⁷⁾ が夏季を中心に隠岐諸島周辺海域でトロールを併用した音響調査を実施し, 資源量計測を目的としてキュウリエソを判別するために, 一定の S_V の下限閾値を設定し, 分布に関する複数の知見を組み合わせる基準を示している。この基準は, その後の計量魚探を用いたキュウリエソの分布特性の研究¹⁵⁾ でも用いられているが, 濱野ら⁷⁾ 自身が指摘するように夏季以外の季節において, 基準の有効性を検討することが課題となっている。

そこで, 本研究では近年収集した隠岐諸島周辺海域の春季, 夏季, 秋季の音響調査のデータを用いて, 従来の濱野ら⁷⁾ の方法と, 季節変化に対応しうる S_V の閾値設定を用いたキュウリエソ散乱層の識別方法を, 夜間の識別可能性も含めて比較検討し, 隠岐諸島周辺海域におけるキュウリエソ散乱層の識別方法を改良することを目的とした。

試料および方法

音響調査 トロールサンプリングを伴う音響データは隠岐諸島周辺海域において, 春季には 2001 年 5 月, 2002 年 5 月, 2003 年 5 月, 6 月, 夏季には 2001 年 8 月, 2002 年 8 月, および秋季には 2000 年 10 月, 2001 年 11 月に実施した計 9 回の音響調査で得た。使用した計量魚探は 2000 年 10 月より 2001 年 8 月までの計 3 回の

Table 1 Survey period and the scientific echosounder used

Survey period	Echosounder
23–25 Oct. 2000	KFC1000
14–17 May 2001	KFC1000
27–29 Aug. 2001	KFC1000
31 Oct.–1 Nov. 2001	KFC1000
20–23 May 2002	KFC3000
27–30 May 2002	KFC3000
27–29 Aug. 2002	KFC3000
26–29 May 2003	KFC3000
9–12 Jun. 2003	KFC3000

Table 2 Setting of the scientific echosounder

	KFC1000	KFC3000
Pulse duration	1.2 ms	0.6 ms
Frequency (kHz)	38 kHz	38 kHz
Equivalent beam width (dB)	-19.1	-19.1
Nominal angle (°)	8.5	8.5
Source level (dB)	228 dB	228 dB
TVG mode	20 log (R)	20 log (R)

調査では KFC1000 (カイジョー社), 2001 年 11 月以降の計 6 回の調査では KFC3000 (カイジョー社) で, いずれも鳥取県水産試験場試験船「第一鳥取丸」(198 t) に搭載されている。Table 1 に調査期間と使用した計量魚探, Table 2 に解析に用いた 38 kHz の周波数における KFC1000, 3000 の設定を示す。音響データの解析はキュウリエソの生息水深帯²⁾ とされる水深 150 m 以深の海域におけるトロールサンプリング時の音響データについて行った。昼夜全 31 点 (日中 25 点, 夜間 6 点) のトロールサンプリング地点を Fig. 1 に示す。サンプリングには表中層トロール (2002 年 5 月, 2003 年 5 月, 6 月) と着底トロール (2000 年 10 月, 2001 年 5 月, 8 月, 11 月, 2002 年 8 月) の二種類の採集具を使用し, 魚探反応が認められた深度において, 約 2~4 ノットで 30 分間曳網を行った。それぞれの網口寸法は表中層トロールが幅約 12 m, 高さ約 12 m でコッドエンドの目合は 9 mm, 着底トロールが幅約 22 m, 高さ約 3.2 m でコッドエンドの目合は 6 mm である。投網から揚網までの網の深度は網口上部に取り付けられた ITI 漁網監視装置 (SIMRAD 社) にて確認し, 表中層トロールは深度 10~50 m (2002 年 5 月, 2003 年 5 月, 6 月), 着底トロールは離底させ, 深度 42~207 m の曳網に用いた (2000 年 10 月, 2001 年 5 月, 8 月, 11 月, 2002 年 8 月)。得られた採集物は, 魚類についてその種別の個体数を計数した。キュウリエソについては採集個体数が多数であったので, 一定量の容器で漁獲物を計り, 容器

Fig. 1 Map of the survey area with sites of trawl sampling (○ Daytime and ● Nighttime).

一杯分の個体数に容器の杯数を乗じて総採集個体数を求めた。

音響データの解析 トロール曳網中に得られた音響データは、後処理ソフト Geoecho (SEC 社), ならびに Echoview ver.3.10 (SonarData 社) を用いて単位セル (水平方向に 0.1 海里, 鉛直方向 1 m) 毎に積分し, 単位セルの S_V を csv ファイルに出力した。csv ファイルは表計算ソフト MS Excel (Microsoft 社) を用いて展開し, 泡の影響を除去するため水面より深度 10 m までのデータを除外した。その後, MS Excel 上にて深度 10 m から海底直上までのデータについて以下に示す三つの方法を実施し, キュウリエソ散乱層の識別を検討した。

方法 1: 濱野ら⁷⁾が示す判断基準に従うキュウリエソ散乱層の識別方法である。濱野ら⁷⁾はキュウリエソの判別基準として, 1) キュウリエソがそれ以外の種との分離識別が非常に困難な夜間および, 日出時は計測時期として避ける, 2) 小塊群が連続して分布する日中を対象とする, 3) 日中二層の散乱層が有る場合はその下層を計測対象とする, 4) 日中に深度 150 m 以深, 水温 7°C 以下で見られる散乱層を対象とする, 5) $S_V = -67$ dB 以上で, 単位距離毎の S_V の鉛直分布曲線のピーク値がほぼ同じ値で連続している散乱層を対象とする, という 5 つの基準を示している。方法 1 ではこの基準に準じ, まず, 日中のデータについてのみキュウリエソ散乱層の識別を行った。3) については深度 150 m 以深に二層の散乱層が認められる場合の下層を解析対象とし, 4) についてはトロール操業地点における水温のデータを欠くため, 深度 150 m 以深を解析対象とする条件のみを用いた。

なお濱野の用いた周波数は 88 kHz であり, 本研究で

用いた周波数は 38 kHz と異なる。小型の魚類においては低周波の使用が共振現象をもたらす可能性が示唆されるが,¹⁶⁾ 濱野⁹⁾がキュウリエソから抽出した鰾と同体積の半径 1.73 mm, 3.12 mm の等価球を用い, 深度 50 m と 250 m における TS を検討した結果によると, 周波数 38 kHz においても 88 kHz との間で TS の差は 0.5 dB 以下であった。したがって本研究の周波数においても, 上述の 5) に示した, $S_V = -67$ dB の下限閾値をそのまま使用した。

方法 2: $S_V = -99$ dB から段階的に 3 dB ずつ下限閾値となる S_V を上げ, 曳網区間の s_a (面積後方散乱係数) の平均値 ($\bar{s}_a$) が低下し始める境界となる S_V を, 下限閾値としてキュウリエソ散乱層の識別を行う方法である (Fig. 2)。 s_a は s_v (体積音響散乱係数 $S_V = 10 \log s_v$) と以下の関係にある。

$$s_a = \int_{z_1}^{z_2} s_v dz$$

ここで z_1, z_2 は積算を行った深度の下限および上限であり, 本研究では海底直上 (z_2) より水面下 10 m (z_1) までを積分し, 曳網区間 (曳網開始から揚網開始の間に通過した水柱部分) における平均 s_a を求めた。段階的に下限閾値を上げ, 算出される $\bar{s}_a$ が低下し始める境界点により下限閾値を定める方法は, 音響調査において動物プランクトン等による微弱な音響反応や背景雑音の成分を取り除き, 対象とする魚群の音響反応をより明確に捉えるために用いられている。¹⁷⁾ 本調査海域においてはキュウリエソの散乱層が主要な音響散乱要因であるため, この方法を用いてキュウリエソ散乱層の識別を行った。

方法 3: 曳網区間において水平方向に 0.1 海里毎に積分した各データについて, 深度 10 m より海底直上までの鉛直方向の最大 S_V 値を抽出し, これを曳網区間で平均した値から 10 dB を差し引いた値を下限閾値とする方法である (Fig. 2)。キュウリエソは強い散乱層として調査海域に出現するため, 鉛直方向のデータの最大値はキュウリエソ散乱層を反映すると予想される。そこで各データの鉛直方向の最大値を抽出し, それを平均化することで曳網区間におけるキュウリエソ散乱層の最大密度の代表値を得ることが可能と考えた。本方法ではこの値より, 約 1/10 の密度を示す 10 dB を差し引いた値を下限閾値とし, キュウリエソ散乱層の識別を行った。

各方法によるキュウリエソ散乱層識別の妥当性は, トロールによるキュウリエソの採集の有無と, 曳網深度帯 (水平曳網中に網口上部および下部が通過した深度帯) がキュウリエソ散乱層として識別されたかどうかの一致により評価した。すなわち, キュウリエソが採集され, その曳網深度帯がキュウリエソ散乱層として識別された場合, または, キュウリエソが採集されず, 曳網深度帯

Fig. 2 A schematic of method 2 and 3. Threshold setting for method 2 is M_2 (dB). Threshold setting for method 3 is M_3 (dB). Black cells indicate the maximum S_v cell between depth z_1 (m) and z_2 (m).

もキュウリエソ散乱層として識別されない場合を一致とし、採集結果と識別結果が一致しないものを不一致として、各方法の一致率を求めた。また季節毎の適正な S_v の下限閾値を把握するため、調査月を春季（5月、6月）、夏季（8月）、秋季（10月、11月）の三つの季節にわけ、各方法により設定した S_v の下限閾値とその一致の程度を検討した。

結 果

キュウリエソ採集結果 着底トロールによる18点、表中層トロールによる13点の計31点のサンプリング結果をTable 3に示す。Table 3の採集個体数は結果を規準化するため、1海里あたりの採集個体数（Catch per unit distance; CPUD）に換算した値である。CPUDは1個体に満たない場合（Sampling No. 28）から10万個体以上（Sampling No. 2, 4, 7）に達する場合まであった。CPUDが100個体に満たない場合は、全体に占めるキュウリエソの割合が4.9～18.2%程度と少なかったが（Sampling No. 1, 20, 21）、100個体以上の単位で採集された場合は、採集物のほぼ全てがキュウリエソであった。昼夜別の採集深度帯に注目すると、日中は深度100～207 m（CPUDが1個体に満たないSampling No. 28を除く）、夜間は深度42～190 mで行った曳網でキュウリエソが確認された。日中については、深度50 m以浅で行った表中層トロールではキュウリエソはほぼ確認

されず、CPUDが100個体以上、組成100%でキュウリエソが確認された最も浅い深度帯は2001年5月に行った130～137 mの曳網であった（Sampling No. 8）。夜間は、深度100 m以深でキュウリエソがCPUDで100個体以上、組成100%で確認されたが、深度50 m以浅で行った曳網では（Sampling No. 20, 21）キュウリエソの組成が低く、マアジ *Trachurus japonicus*、カタクチイワシ *Engraulis japonicus* などの浮魚類の組成が高かった。

各方法によるキュウリエソ散乱層識別の一致率 曳網深度帯におけるキュウリエソの有無は、キュウリエソのCPUDが100個体に満たない場合、キュウリエソが散乱層に音響的な寄与をしていないと判断し「無」とした。Table 4に昼夜別に各曳網深度帯におけるキュウリエソの有無と、各方法によるキュウリエソ散乱層識別の一致、不一致を示す。日中25点の曳網区間の音響データについて各方法を実施した結果、一致率はそれぞれ、方法1～96%、方法2～36%、方法3～96%となり、方法1, 3がともに高い一致率を示した。日中を対象とした方法1を除き、夜間6点について方法2, 3を適用した結果、方法2, 3はともに67%の一致率となった。

次に季節毎の S_v の下限閾値設定とその一致率をFig. 3に示す。いずれの季節においても、下限閾値がもっとも低いのは方法2であり、次いで下限閾値を $S_v = -67$ dBに定めた方法1であった。方法3は夏季に方法1の

Table 3 Number and percentage of *Maurolicus japonicus* and other fishes caught with trawl net

Sampling No.	Date	Location		Trawl*1	Sampling time	Towing distance*2 (nmi)	Towing depth*3 (m)	Bottom depth (m)	Number of <i>M. japonicus</i> (/1 nmi.)	Number of other fishes (/1 nmi.)	% <i>M. japonicus</i> (number)
		Lat. (N)	Long. (E)								
1	24th Oct. 2000	35.58.03	133.45.32	Trawl A	Day	1.55	100–100	160–160	6.5	29	18.2
2	24th Oct. 2000	35.48.01	133.43.25	Trawl A	Day	1.78	175–185	196–200	10533.7	0	100
3	25th Oct. 2000	35.51.12	133.40.24	Trawl A	Day	1.86	160–164	190–191	2276.9	0	100
4	15th May 2001	35.43.72	134.00.22	Trawl A	Day	1.28	180–183	200–240	111418	0	100
5	15th May 2001	36.01.58	133.51.35	Trawl A	Night	1.6	172–190	213–219	858.8	0	100
6	16th May 2001	35.57.19	133.59.26	Trawl A	Day	1.39	164–170	262–267	0	0	0
7	16th May 2001	35.55.36	133.57.56	Trawl A	Day	1.24	189–203	203–245	104272.6	0	100
8	17th May 2001	35.51.24	133.39.57	Trawl A	Day	1.48	130–135	190–193	185.1	0	100
9	17th May 2001	36.02.27	133.52.11	Trawl A	Night	1.69	99–101	215–225	4180.5	0	100
10	28th Aug. 2001	35.45.19	133.00.03	Trawl A	Day	1.88	118–126	224–263	0	0	0
11	28th Aug. 2001	35.55.07	134.00.03	Trawl A	Day	1.56	200–207	249–261	205.8	0	100
12	28th Aug. 2001	35.45.04	134.00.21	Trawl A	Night	1.93	128–136	223–265	2716.1	0	100
13	29th Aug. 2001	35.55.51	133.39.48	Trawl A	Day	1.98	157–163	180–183	0	3.5	0
14	29th Aug. 2001	36.00.01	133.33.45	Trawl A	Night	1.49	133–147	169–190	1358.4	0	100
15	1st Nov. 2001	35.48.45	133.41.19	Trawl A	Day	1.56	118–124	193–196	0	2.6	0
16	21th May 2002	35.54.52	132.40.17	Trawl B	Day	1.38	40–50	182–183	0	0	0
17	28th May 2002	35.58.33	132.50.15	Trawl B	Day	1.23	10–20	157–164	0	1.6	0
18	29th May 2002	35.22.34	132.10.04	Trawl B	Day	1.33	10–20	157–158	0	23.3	0
19	30th May 2002	35.40.40	132.29.24	Trawl B	Day	1.28	10–20	178–179	0	14.8	0
20*4	27th Aug. 2002	35.59.31	132.41.19	Trawl A	Night	2.15	44–48	176–179	12.5	257.7	4.9
21*5	28th Aug. 2002	35.53.39	133.40.06	Trawl A	Night	1.26	42–46	186–191	57.4	309.5	14.9
22	29th Aug. 2002	35.54.08	133.39.30	Trawl A	Day	1.89	146–181	183–188	3737.3	0	100
23	27th May 2003	36.20.01	132.59.55	Trawl B	Day	1.87	15–30	170–171	0	0.5	0
24	27th May 2003	36.31.41	132.59.55	Trawl B	Day	1.09	15–30	186–188	0	0.9	0
25	28th May 2003	35.50.43	132.39.58	Trawl B	Day	0.87	15–30	173–175	0	1.1	0
26	29th May 2003	35.19.01	132.10.04	Trawl B	Day	1.2	15–30	151–153	0	10.8	0
27	9th Jun. 2003	35.54.23	133.30.08	Trawl B	Day	0.91	15–30	163–169	0	39.6	0
28	10th Jun. 2003	36.39.12	133.09.53	Trawl B	Day	1.08	15–30	209–211	0.9	0	100
29	11th Jun. 2003	36.00.01	132.49.57	Trawl B	Day	0.56	15–30	154–165	0	114.3	0
30	12th Jun. 2003	35.24.11	132.20.02	Trawl B	Day	1.29	10–20	156–156	0	7.8	0
31	12th Jun. 2003	35.34.31	132.20.20	Trawl B	Day	1.23	10–20	175–175	0	79.7	0

*1 Trawl A, Bottom trawl type; Trawl B, Midwater trawl type

*2 Towing distance indicates the distance between the beginning and ending of the horizontal tow

*3 Towing depth indicates minimum and maximum depth of the head rope during the horizontal tow

*4 Majority of the other catch; Horse mackerel 225.1 (N/1 nmi.) 87.7%, Japanese anchovy 26.0 (N/1 nmi.) 10.1%

*5 Majority of the other catch, Horse mackerel 296.8 (N/1 nmi.) 77.6%

下限閾値を下回る場合が認められたが、三つの方法のなかでは下限閾値が高い傾向にあった。 S_V の下限閾値が変動する方法 2, 3 について識別と採集結果が一致した事例の季節毎の特徴をみると、方法 2 は春季–72～–66 dB, 夏季–87～–78 dB, 秋季–81～–78 dB, 方法 3 は春季–65～–47 dB, 夏季–73～–62 dB, 秋季–65～–55 dB と、同じ季節内ではばらつきが大きいものの、両者ともに春季の下限閾値が高く、夏季が低い傾向にあった。クラスカル・ワーリス検定を行った結果、方法 2, 3 の下限閾値は季節により有意差があることが明らかとなった（方法 2, $\chi^2=14.77$, $p<0.001$ /方法 3, $\chi^2=17.15$, $p<0.001$ ）。

Fig. 4 に日中に行った、Sampling No. 4(A), No. 6

(B), No. 15(C), No.16(D) について各方法の適用例を示す。方法 1 では、基準 5) の S_V の下限閾値設定に従うと (A), (B) に示すようにキュウリエソが存在しない表層部分を含む広い範囲を識別するが、基準 4) に従って深度 150 m 以深を解析対象にする限り、不一致は認められない。また、(B) に示すように深度 150 m 以深でキュウリエソが存在しない層を S_V の下限閾値によって識別した場合も、基準 3) に従って、二層の散乱層のうち、下層を抽出することによって、キュウリエソの散乱層を正しく抽出した。ただし、基準 3) は (D) に示すように、二層が近接する場合は、解析対象の判断が曖昧となった。方法 2 では、 S_V の下限閾値が低い場合、(D) の場合のようにキュウリエソが存在しない日中の表層を抽

Table 4 Match and mismatch of the results of *Maurolicus japonicus* caught with trawl net and acoustic extraction of the towing depth by each method

Time	Sampling No.	Catch of <i>M. japonicus</i> ^{*1}	Method 1			Method 2			Method 3			
			SV threshold (dB)	Extraction of the towing depth ^{*2}	Match ^{*3}	SV threshold (dB)	Extraction of the towing depth ^{*2}	Match ^{*3}	SV threshold (dB)	Extraction of the towing depth ^{*2}	Match ^{*3}	
Day	1	—	−67	—	○	−81	+	×	−59	—	○	
	2	+		+	○	−81	+	○	−65	+	○	
	3	+		+	○	−78	+	○	−65	+	○	
	4	+		+	○	−66	+	○	−57	+	○	
	6	—		—	○	−72	+	×	−57	—	○	
	7	+		+	○	−69	+	○	−52	+	○	
	8	+		—	×	−66	+	○	−58	—	×	
	10	—		—	○	−87	+	×	−68	—	○	
	11	+		+	○	−87	+	○	−71	+	○	
	13	—		—	○	−87	+	×	−73	—	○	
	15	—		—	○	−75	+	×	−55	—	○	
	16	—		—	○	−75	+	×	−58	—	○	
	17	—		—	○	−78	+	×	−58	—	○	
	18	—		—	○	−78	+	×	−47	—	○	
	19	—		—	○	−75	+	×	−55	—	○	
	22	+		+	○	−81	+	○	−62	+	○	
	23	—		—	○	−78	+	×	−58	—	○	
	24	—		—	○	−75	—	○	−59	—	○	
	25	—		—	○	−75	+	×	−55	—	○	
	26	—		—	○	−72	+	×	−50	—	○	
	27	—		—	○	−66	+	×	−59	—	○	
	28	—		—	○	−72	—	○	−54	—	○	
	29	—		—	○	−84	+	×	−64	—	○	
	30	—		—	○	−78	+	×	−65	—	○	
	31	—		—	○	−78	+	×	−57	—	○	
Daytime accuracy rate ^{*4}					96% (24/25)			36% (9/25)			96% (24/25)	
Night	5	+	not applied	not applied	not applied	−66	+	○	−59	+	○	
	9	+				−66	+	○	−61	+	○	
	12	+				−81	+	○	−68	+	○	
	14	+				−78	+	○	−69	+	○	
	20	—				−81	+	×	−67	+	×	
	21	—				−78	+	×	−66	+	×	
Nighttime accuracy rate ^{*4}					not applied			67% (4/6)			67% (4/6)	

*1 +, N >= 10; —, N < 10.

*2 +, Extracted; —, not extracted.

*3 Match of the catch results and extraction of the towing depth: ○, match; ×, mismatch.

*4 Accuracy rate is the percentage of match.

Fig. 3 S_V threshold for each season. The symbol ● indicates match of *Maurolicus japonicus* catch with extraction of the towing depth by S_V threshold setting of each method. The symbol × indicates mismatch.

Fig. 4 Example of extracted image of *Maurolicus japonicus* (gray cells) by each threshold setting method. Left end is the echogram of the towing area. Color scale corresponds to the value of S_V (dB). Arrows in the echogram indicate the towing depth. Oblique lines show the depth range excluded from analysis in method 1. Red cells in method 3 indicate the maximum S_V cells. (A) Sampling No. 4, (B) Sampling No. 6, (C) Sampling No. 15, (D) Sampling No. 16.

出ることによる不一致が多かった。方法3は、キュウリエソが存在しない日中の表層を抽出することは無く、(B)、(C)のように方法1で二層が抽出される場合

も、キュウリエソが確認されない上層は抽出しなかった。また、方法3は水塊中の最大 S_V より下限閾値の基準を決定しているが、(A)に示すように、最大 S_V の位

置はキュウリエソ散乱層の位置と一致した。

考 察

昼夜の解析対象深度 これまでの魚群探知機を用いた観察から、日本海のキュウリエソは日中は140～150 m以深に分布し、日没時に表層付近まで上昇した後、分散し、夜間は深度100～170 mを中心とした広い深度帯に分布することが報告されている。^{5,7-9)} 濱野ら⁷⁾はキュウリエソが日中は深度150 m以深でのみ採集されることが、夜間はキュウリエソが他の反応と混在し分離できないことから、日中は150 m以深を解析対象とし、夜間は解析対象から除くことを推奨した。

本研究においては、5月に日中深度130 m～135 mの曳網で100個体以上かつ100%の組成でキュウリエソを確認した (Sampling No. 8)。濱野ら⁷⁾はキュウリエソを識別するために深度150 m以深の反応を対象とすることを提案しているが、本研究の結果は日中の生息深度の上限が季節により変化することを示唆している。今後、キュウリエソを対象とした日中の解析深度は150 mより浅い深度100 m以深とすることが推奨される。

本研究において、キュウリエソが夜間に100個体以上かつ100%の組成で確認された深度帯は約100 m以深であった。濱野ら⁷⁾は夜間キュウリエソの判別が困難である理由としてキュウリエソが出現する深度にウマヅラハギ *Thamnaconus modestus* やホタルイカモドキ *Euplateuthis chunii* の反応が混在することをあげている。このうちウマヅラハギは鰭を持ち、キュウリエソと比較して体長も大きいことから音響的な寄与が高いことが予想されるが、本研究のサンプリングでは確認されなかった。平成16年度の魚種系群別資源評価 (<http://abchan.job.affrc.go.jp/digests16/html/1673.html>) によれば、韓国でのウマヅラハギの漁獲量は濱野ら⁷⁾が調査を行った1986年に33万tの漁獲量を記した後、減少を続けており、本調査を実施した2000年代では1千t前後で推移している。また、我が国の九州西岸～日本海北部沿岸、東シナ海を合わせた漁獲量も2000年代は4～5.5千t程度と報告されている。したがって、1980年代と異なり、現在はウマヅラハギの反応がキュウリエソ反応に混じって出現する確率は低く、夜間もキュウリエソの散乱層の識別が可能と考えられる。

キュウリエソの夜間の分布深度については加藤⁴⁾が若狭湾において5月と10月に夜間の層別採集を行い (5月0 m, 30 m, 60 m, 90 m, 120 m, 150 m, 180 m, 200 m, 10月0～25 m, 25～50 m, 50～75 m, 75～100 m, 100～150 m, 150～200 m, 200～250 m, 250～300 m)、いずれの季節においてもキュウリエソ成魚や未成魚が0, 30 m, 0～25 mではほとんど採集されないことを報告している。本研究においても夜間に深度42～48 mで行った曳

網によるキュウリエソのCPUDは100匹未満であり、マアジやカタクチイワシといった浮魚類が採集生物の組成の大半を占めた (Sampling No. 20, 21)。表層域はキュウリエソの出現が少なく、浮魚類の組成が高いこと、また、過去の知見ではキュウリエソ成魚が夜間50 m～100 mの深度帯で採集されていることを考慮して^{4,7-9)}、今後、夜間の解析深度は浮魚との混在を避けるため、深度50 m以深を対象とすることが推奨される。

キュウリエソの音響散乱層の識別方法 キュウリエソを抽出する方法として、方法1；濱野らの方法⁷⁾ 方法2；プランクトン等の反応や背景雑音を取り除いた S_V の下限閾値を設定する方法、方法3；キュウリエソ層内の最大密度を基準として S_V の下限閾値を設定する方法を比較した結果、日中の25例では方法1と方法3が96%と同率の高い一致率を示し、方法2は36%と一致率が低く、夜間の6例では方法2, 3が67%と同率の一致率となった (方法1は夜間を対象としていないため、解析に含まなかった)。

一致率が低い方法2は、Fig. 3に示すように他の方法に比べ S_V の下限閾値が低く、日中にキュウリエソが存在しない層を抽出することによる不一致が多い (Table 3)。方法2は低い閾値から段階的に閾値を上げ、算出される水塊全体の S_a が低下し始める境界を S_V の下限閾値に設定することにより、音響散乱の弱い動物プランクトンの反応や背景雑音を除去し、キュウリエソの散乱層をより明確に捉える狙いがあった。しかし、実際にはプランクトン等の反応や背景雑音以外に、キュウリエソの適正閾値までの間に、他の生物による音響散乱因子が含まれていたと考えられる。

方法1と方法3は日中に高い一致率を示した。方法1は濱野の基準に従い、夜間を解析対象としなかったが、方法1の下限閾値設定 ($S_V = -67$ dB) を夜間にも当てはめて散乱層の識別を行うと、夜間の一致率は方法2, 3と同率 (67%) になり、夜間も下限閾値のみを設定することにより、方法1が有効であることが確認された。ただし、方法3は次の点において方法1より優れていると考えられる。

第一に、方法1では日中の解析対象深度に問題がある点が挙げられる。方法1は基準4)に従い、日中の深度150 m以深を解析対象とするが、本研究は130～135 mの曳網においてキュウリエソを確認しており、方法1は150 m以浅に分布するキュウリエソを抽出できない。

第二に、方法3が解析対象を選択する一般性において方法1に比べ、優れる点があげられる。方法1には基準3により深度150 m以深において二層構造が認められた場合に下層を抽出する条件があった。これはFig. 4(B)の場合に不一致を減じる働きをしている。しかし、Fig. 4(D)のように、二層が近接する場合は解析

対象の判断が難しくなり、キュウリエソ以外の散乱層を解析対象に含む危険がある。また、仮に本研究で推奨するように日中 100 m 以深を解析対象とした場合、Fig. 4 (B) のような場合においては複数の散乱層が出現するため、明確な基準により解析対象を限定することが困難となる。方法 3 であれば Fig. 4(B), (C) のように複数の層が出現しても、キュウリエソが存在しない層は抽出されない。これは方法 3 の S_V の閾値設定がキュウリエソの集群密度変化を反映することで、季節や場所が異なっても安定してキュウリエソの散乱層のみを抽出できるためと考えられる。なお、Fig. 4(A) のように、方法 3 により二層が抽出される場合はあるが、海外では同じキュウリエソ属の *Maurolicus muelleri* において、キュウリエソが成長段階によって二層に別れて分布するとの報告があり^{19,20)} 二層の上層もキュウリエソである可能性は十分に考えられる。

まとめと今後の課題 方法 3 はキュウリエソの識別について、従来の方法 1 と比較して、 S_V の閾値設定のみの設定により解析対象を明確に選択できる点において優れた。今後、日中は深度 100m、夜間は深度 50 m 以深を対象として、方法 3 を適用することにより、キュウリエソ散乱層の識別精度がさらに向上することが期待される。

最後に方法 3 の課題として以下の三点を述べる。

第一に、方法 3 における S_V の下限閾値を決定する最大 S_V からの S_V の下げ幅である。最大 S_V から 10 dB を差し引く本方法はやや便宜的であった。日中について深度 100 m 以深 (12 例)、夜間は深度 50 m 以深 (4 例) を対象として S_V の下げ幅を -5 dB, -10 dB, -15 dB に設定し、一致率を調べた結果、-5 dB と -15 dB が日中 83%, 夜間 100%, -10 dB が 92%, 夜間 100% となり、-10 dB の一致率が日中は -5 dB, -15 dB より高く、夜間は -5 dB, -15 dB と同率であった。現状において -10 dB を用いることが推奨されるが、 S_V の下げ幅については今後、層別採集の結果などを用いて検討する余地がある。

第二に、方法 3 を適用する距離の問題である。方法 3 の S_V の下限閾値は同じ季節でも場所によって設定値が異なることから (Fig. 3), 方法 3 はキュウリエソの連続性を加味した距離毎に適用しなければならない。濱野¹⁸⁾ はキュウリエソの連続性を、 S_V をパラメータとしたコレログラムより 3 海里程としているが、今後、連続性の季節差を検討し、方法 3 を適用する距離の単位を示す必要がある。

第三に方法 3 の解析手法の自動化である。方法 3 は、1.鉛直方向の各データについて最大 S_V 値 ($S_{V\text{MAX}}$) を抽出する、2.抽出した $S_{V\text{MAX}}$ の平均値 ($\overline{S_{V\text{MAX}}}$) を求める、3. $\overline{S_{V\text{MAX}}} - 10$ dB 以上のデータセットを作成す

る、という過程を必要とする (Fig. 2)。本研究では Echoview ver.3.10 を用いて魚探データを CSV ファイルに出力したのち、MS Excel を用いて CSV ファイルを展開するため、今後、MS Excel のマクロ機能を利用して、解析の手間を自動化する予定である。

謝 辞

データ収集にご協力いただいた、第一鳥取丸の乗組員の皆様、鳥取水産試験場の皆様に心より感謝申し上げます。また本稿を纏めるにあたり、貴重なご助言を頂いた東京大学農学部助教授山川卓博士、長崎大学助教授河邊玲博士に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Okiyama M. Abundance and distribution of eggs and larvae of a sternoptychid fish, *Maurolicus muelleri*, in the Japan sea, with comments on the strategy for successful larval life. *Rapp. P.-v. Reun. Cons. int. Explor. Mer.* 1981; **178**: 246-247.
- 2) 西村三郎. 1955 年 春季能登半島近海におけるキュウリエソの産卵ならびに卵・稚仔の分布. 日水研報 1959; **5**: 61-75.
- 3) 沖山宗雄. 日本海におけるキュウリエソの初期生活史. 日水研報 1971; **23**: 21-53.
- 4) 加藤久嗣. 日本海におけるキュウリエソの初期生活史に関する研究. 博士論文, 東京大学海洋研究所, 東京. 2001.
- 5) 川口哲夫. 日本海におけるキュウリエソに関する研究-I. 魚群探知機に記録されるキュウリエソの魚群映像と日周期活動. 鳥取水試報告 1971a; **17**: 37-54.
- 6) 川口哲夫. 日本海におけるキュウリエソに関する研究-II. 魚群探知機の映像よりみたキュウリエソ魚群の生息環境. 鳥取水試報告 1971b; **17**: 55-61.
- 7) 濱野 明, 内田和良, 武田靖昭. 音響的手法による日本海産キュウリエソの資源評価のための魚種判別法について. 水産海洋研究 1992; **56**: 295-308.
- 8) 内田和良, 濱野 明, 武田靖昭, 巽 重夫. 日本海南西海域におけるキュウリエソの分布と日周鉛直移動. 水産大学校研究業績 1992; **40**: 163-172.
- 9) 濱野 明. 魚類マイクロネクトンの資源量評価のための音響的調査手法に関する研究. 水産大学校研究業績 1993; **41**: 85-165.
- 10) Ohshima S. Distribution and stomach contents of *Maurolicus muelleri* in the Sea of Japan (East Sea). *J. Korean. Soc. Fish. Res.* 1998; **1**: 168-175.
- 11) Reid DG. Report on the echo trace classification. *ICES cooperative research report* no. 238. 2000.
- 12) Pitcher TJ, Parrish JK. Functions of shoaling behavior in teleosts. In: Pitcher TJ (eds) *Behavior of teleost fishes*. Chapman and Hall, London. 1993; 363-439.
- 13) Menard F, Marchal E. Foraging behavior of tuna feeding on small schooling *Vinciguerria nimbaria* in the surface layer of the equatorial Atlantic Ocean. *ICES J. Mar. Sci.* 2003; **16**: 231-238.
- 14) Bertrand A, Le Borgne R, Josse E. Acoustic characterization of micronekton distribution in French Polynesia. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1999; **191**: 127-140.
- 15) 野田勝延, 森脇晋平. 音響的手法による日本海南西海域のキュウリエソの分布特性. 水産海洋研究 1996; **1**: 1-6.

- 16) 古澤昌彦. 気泡と音波(K)一鯨と魚による超音波散乱一. 海洋音響学会誌 1989; **16**: 181-197.
- 17) 安間洋樹. 音響手法を用いたハダカイワシ科魚類の資源量推定に関する研究. 博士論文, 東京大学, 東京. 2004.
- 18) 濱野 明. マイクロネクトンの音響調査. 月刊海洋 1994; **26**: 647-652.
- 19) Goodson MS, Giske J, Rosland R. Growth and ovarian development of *Maurolicus muelleri* during spring. *Mar. Biol.* 1995; **124**: 185-195.
- 20) Giske J, Aksenes DL, Balino BM, Kaartvedt S, Lie U, Nordeide JT, Salvenes ABV, Wakili SM, Aadnesen A. Vertical distribution and trophic interactions of zooplankton and fish in Masfjorden, Norway. *Sarsia* 1990; **75**: 65-81.