

論文 Article

瀬戸内海三原瀬戸におけるイカナゴの夏眠底質環境

坂井陽一¹・遠藤 梓¹・岩崎菜美²・富山 毅¹・柴田淳也³・山口修平²・中口和光²

Estivation grounds of the sand lance *Ammodytes japonicus* (Ammoditidae) in the Mihara Strait, mid-western Seto Inland Sea, Japan

Yoichi SAKAI¹, Azusa ENDO¹, Nami IWASAKI², Takashi TOMIYAMA¹, Junya SHIBATA³,
Shuhei YAMAGUCHI² and Kazumitsu NAKAGUCHI²

要旨：瀬戸内海西部水域は過去に大規模な海砂利採取が為され、潜砂習性を持ち砂中で夏眠するイカナゴ資源の減少が明白な状況にあることから、イカナゴの生息底質の環境悪化が懸念されている。そこで、イカナゴの主要生息地の1つであった安芸灘三原瀬戸において、2014年と2015年の夏期にドレッジ調査を実施し、イカナゴの生息状況と底質性状を分析した。夏眠イカナゴは竹原沖から大三島南部の三原瀬戸西部エリア（3地点）と三原湾細島周辺の三原瀬戸東部エリア（2地点）で確認された。これら5地点はいずれもイカナゴが好むとされる粒径0.25mm–4.0mmの砂粒子をおよそ80%の重量割合で含む砂底質であった。一方、イカナゴの出現が確認できなかった地点の砂粒子成分の含有率は有意に低かった。三原瀬戸におけるイカナゴの夏眠生息に適した砂底質の分布は地理的に限られた状態にあり、イカナゴ資源回復を制約する要因になっている可能性が示唆された。

キーワード：イカナゴ, 夏眠, 三原瀬戸, 粒度組成, せん断強度

Abstract: The sand lance *Ammodytes japonicus* in the Seto Inland Sea is known to estivate in fine sandy grounds when water temperatures reach above 19°C, usually from late June to early December. Catches of the sand lance have decreased drastically since the mid-1980s, coinciding with large-scale quarrying for bottom sands, which strongly suggests that sand lance populations have been seriously impacted as a result of deterioration and disturbances to sandy-bottom habitats. Mihara Strait was once a major fishing ground for sand lance and has also suffered from quarrying. To evaluate the present condition of the sandy areas of Mihara Strait as potential estivation grounds of the sand lance, we sampled sediments at 11 survey points, using a square-shaped dredge towed by the training vessel *Toyoshio-maru* of Hiroshima University, in 2014 and 2015. We then analyzed the physical characteristics of the sediment samples. Sand lance individuals were observed in the sediments collected from five survey points: three on the western side and two on the eastern side of the strait. Sediments at these five survey points comprised sandy elements of 0.25–4.0 mm diameter, which constituted over 80% of the weight ratio of the sediment samples. Sediments from the other survey points included pebble elements and had significantly lower weight ratios of sandy elements, suggesting the unsuitability of the substrate at those points for burrowing by the sand lance. Thus, it is suggested that sandy grounds for estivation of the sand lance are geographically limited in Mihara Strait at present, a situation that may restrict population recovery of this species in these waters.

Keywords: sand lance, estivation grounds, Mihara Strait, sediment components, vane share strength

1 広島大学大学院生物圏科学研究科；Graduate School of Biosphere Science, Hiroshima University

2 広島大学生物生産学部；Faculty of Applied Biological Science, Hiroshima University

3 広島大学環境安全センター；Environmental Research and Management Center, Hiroshima University

I. 緒言

イカナゴ *Ammodytes japonicus* は、イカナゴ科 (Ammodytidae) の中で最も低緯度に生息する魚種であり、伊勢湾や瀬戸内海などの日本沿岸の比較的温暖な海域に広く分布する (橋本, 1991; Orr et al., 2015)。イカナゴは釘煮などの食材として一般に親しまれている。また、魚食性魚類の餌生物としても重要な貢献を果たしていることが知られている (橋本, 1991; 松田, 1999; 上, 2007; 新野ら, 2017)。

イカナゴは高水温期に長期間潜砂する夏眠習性を有しており (山田, 2011)、瀬戸内海では水温 19℃ 以上になる 6 月後半頃から 12 月前半頃までの約 5 か月間が夏眠期にあたる (反田, 1998)。夏眠には潮通しの良い砂底質が利用され、伊勢湾や瀬戸内海東部では粒径 0.25mm-4.0mm の砂底質を好み、特に、粒径 0.5mm-2.0mm の砂に選択性があると報告されている (中村ら, 1997; 反田, 1998)。活発に遊泳する低水温期においてもイカナゴの潜砂行動は夜間の休息や捕食者から逃避する際に日常的に見られることから (井上ら, 1967; 中村ら, 1997; 反田, 1998)、潜りやすく滞在しやすい底質は本種の生存に欠かせないものと考えられる。

瀬戸内海西部水域は、過去にはイカナゴの主要な漁場の 1 つであった (井上ら, 1967)。しかし、近年水揚げ量が大幅に減少し、特に安芸灘での減少が顕著となっている (反田, 2012)。その一因として 1960 年代から 2006 年まで実施された海砂利採取が (広島県は 1998 年まで)、同種の生息に適した底質環境に大きなダメージを与えた可能性が強く示唆されている (反田, 1998, 2012; 篠原, 2003; 柳, 2008)。

広島県におけるイカナゴ漁獲量は、1980 年 -1984 年には平均 871t/年のレベルにあった。しかし、その後 2008 年 -2012 年には平均 2.8t/年まで急激に落ち込んだ (日本の統計データと都道府県ランキング, 2017)。現在も広島県のイカナゴ漁業は備後灘走島周辺・布刈瀬戸周辺でわずかに実施されているのみであり、海砂利採取の実施された三原瀬戸水域では 1980 年以降イカナゴ漁獲量はゼロである (広島県, 2017)。また、広島県が海砂利採取禁止直後から実施してきた三原瀬戸水域での夏眠イカナゴの生息状況調査 (1998 年, 1999 年, 2005 年, 2015 年の 4 度実施) でも、1998 年以降イカナゴ確認個体数が減少傾向にあることが確認されており、特に 1999 年以降は極めて低い生息密度の状態にあることが示唆されている (広島県, 2017)。同様に、隣接する岡山県でもイカナゴの漁獲量がピーク時の約 50 分の 1 まで減少して

おり (上, 2007; 反田, 2012)、瀬戸内海西部水域広くにおいて現在のイカナゴ資源は思わしくない状況にある。

このイカナゴの保全・資源回復の方策を検討する上で、イカナゴの生息状況および底質環境の現況を理解する必要がある。海砂利採取禁止後のタイミングにおいて安芸灘三原瀬戸で実施された海底環境調査では、海砂採集跡地の底質の礫化や数十メートルもの深度変化など顕著な海底地形変化が確認されている (松田, 1999; 高橋ら, 2002; 柳, 2008; 広島県, 2017)。イカナゴの生息適地がこの海底環境の攪乱の影響を受けている可能性が示唆されているが、イカナゴの生息状況と対応させた底質性状調査はいまだ実施されていない。

そこで、本研究ではイカナゴの生息状況と同種の夏眠休息環境の現状を査察しうる底質データを獲得することを目的に、海砂利採取が過去に実施された三原瀬戸水域を調査エリアに設定し、2014 年と 2015 年の 7 月に広島大学附属練習船豊潮丸のドレッジを用いた底質採集調査を実施した。各年度 11 定点で採集した底質組成 (中央粒径, 淘汰度, 貝殻含有率) と潜砂抵抗 (せん断強度) を分析し、夏眠イカナゴの出現の有無と対応させながら、各調査定点の底質を比較評価した。三原瀬戸水域におけるイカナゴ生息状況と底質性状の現状データを基に、イカナゴの資源回復の鍵となる海底環境について考察する。

II. 材料と方法

1. ドレッジ調査

瀬戸内海安芸灘は多数の水道・瀬戸が存在する島嶼水域であり、芸予諸島に囲まれた三原瀬戸には砂堆が数多く存在する。本研究の調査定点は、海上保安庁発行の海底地形図 (昭和 60 年までの調査結果に基づく) において砂底の存在記載のある地点を基準に選定し、三原湾細島から竹原沖の唐島瀬戸までの三原瀬戸の東西広くに 9 地点、唐島瀬戸から大三島と大崎上島の海峡部にある大下瀬戸までの南北に 2 地点を設定した (St-1 から St-11 まで; Fig. 1)。

底質採集は、広島大学練習船豊潮丸の箱型ドレッジ (開口部 50cm×20cm, 袋長 100cm, 内袋目合 5mm; 離合社製 5121-B) を用い、2014 年 7 月 17-18 日と 2015 年 7 月 2-3 日の 2 期間、上述の 11 定点において実施した。調査は日中 8:30-16:30 に実施し、いずれの調査時も天候は晴れ及び曇りであった。調査時の気温は 2014 年 が 23.9℃ -28.1℃, 2015 年 は 21.9℃ -25.0℃ であった。2014 年調査時の水温は、表層



Fig. 1 安芸灘三原瀬戸水域におけるドレッジ調査地点（丸印：St-1 から St-11）。斜線範囲は過去の海砂利採取区域を示す。赤塗りはイカナゴ採捕地点を示す。三角印は広島県（2017）による調査定点（赤塗りは 2015 年調査でのイカナゴ採集地点；広島県，2017）。

21.9°C -22.9°C，低層 21.5°C -22.5°C [CTD（シーバード社 SBE9/11plus）による水底 0m-5m 上方水塊測定データ]であった。2015 年は表層 20.0°C -21.5°C であった（CTD 低層データなし）。いずれも瀬戸内海においてイカナゴの夏眠する水温帯にあり，実際に本調査において採集底質中からイカナゴ個体が採捕された（結果参照）。塩分濃度は 2014 年が表層 32.2psu-32.5psu，低層 32.3psu-32.6psu であった。2015 年が表層 31.9psu-32.6psu（CTD 低層データなし）と両年で同程度であった。ドレッジは着底後，2kt の船速で 1 分間曳航し，引揚げ後ただちに性状分析用に底質を約 20L 採集保管し，残りの底質中のイカナゴをふるいを用いて探査した。各地点の底質性状については，粒度組成（中央粒径，淘汰度，砂成分含有量），貝殻含有量，せん断強度について分析を行った（後述）。底質中から採集されたイカナゴ個体は（総計 8 個体），採集過程で魚体の一部が損傷した 3 個体を除き，ノギスを用いて標準体長を計測した。

本研究では 2014 年と 2015 年の 2 年度で 11 点での調査を繰り返し実施したが，2014 年の調査点と 2015 年の調査点の位置は全く同じではない（調査開始点のずれの直線距離：40m-550m；Table 1）。但し，いずれの地点も 2 回の調査点の水深はほぼ同等であった（Table 1）。本研究では 2 回の調査データの類似性や

相違性から，底質環境の均質性についての評価を試みた。また，2015 年の調査では 7 調査定点（St-1，2，7，8，9，10，11）においてドレッジ引揚げ後に自走式水中テレビカメラ装置（RTV-100MKIIS，三井造船）を用いて水底映像を 10 分間撮影記録した。カメラ装置は着底後，水平を保ったまま水流に任せて移動させた [練習船豊潮丸に搭載された多層式超音波流向流速計（RD インストゥルメント社 WH-ADCP300kHz マリナー）による水深 9.2m（固定）の流速計測値：0.4kt-1.5kt]。残りの 4 調査点については水流が速く（流速 1.8kt-3.0kt），撮影を断念した。

2. 底質性状分析

本研究では日本工業規格（JIS A 1204，2009）を参考に，粒径 0.063mm 未満をシルト，それ以上 0.25mm 未満を細砂，それ以上 1.00mm 未満を中砂，それ以上 2.00mm 未満を粗砂，それ以上 4.75mm 未満を細礫，4.75mm 以上を中礫とした。底質の粒度組成は，ふるい分析法（目合 18 種：8.00mm，6.70mm，5.60mm，4.75mm，4.00mm，3.35mm，2.80mm，2.36mm，2.00mm，1.70mm，1.40mm，1.00mm，0.71mm，0.50mm，0.355mm，0.25mm，0.125mm，0.063mm）を用い（水産庁，2008；JIS A 1204，2009），各底質につき 88g-159g ずつ 3 回の分析作業を行い，各画分の重量

Table 1. 瀬戸内海三原瀬戸ドレッジ調査地点におけるイカナゴ採捕数と底質特性。ND: 大きな礫が大部分を占めたため正確な測定ができなかったもの。調査地点の位置は Fig. 1 を参照。調査点距離は 2014 年と 2015 年のドレッジ調査開始点の直線距離を示す。好適砂含有率と最適砂含有率はそれぞれ粒径 0.25mm-4.0mm と粒径 0.5mm-2.0mm の砂成分の重量割合を示す。

St.	調査年	ドレッジ調査開始点		調査点距離 (m)	水深 (m)	イカナゴ採捕数 (尾)	底質性状					
		緯度 (N)	経度 (E)				中央粒径 [mm (Md ϕ)]	淘汰度 (ϕ)	好適砂含有率 (%)	最適砂含有率 (%)	貝殻含有率 (%)	せん断強度 (kN/m ²)
1	2014	34-18.598	132-55.719	340	35	2	0.43 (1.22)	1.18	81.8	32.5	14.2	0.77
	2015	34-18.436	132-55.608		34	0	1.18 (-0.24)	1.70	76.0	34.8	8.1	1.05
2	2014	34-18.753	132-57.799	450	31	2	0.82 (0.29)	1.15	95.3	60.2	12.5	2.01
	2015	34-18.998	132-57.787		37	0	1.23 (-0.30)	1.65	80.1	37.6	8.1	1.23
3	2014	34-18.711	133-00.602	140	38	0	4.56 (-2.19)	2.36	37.4	9.3	4.7	3.03
	2015	34-18.660	133-00.675		34	0	0.45 (1.15)	1.94	73.4	21.2	14.4	1.27
4	2014	34-20.980	133-05.689	280	20	0	4.47 (-2.16)	0.59	41.2	4.0	ND	ND
	2015	34-21.132	133-05.665		18	0	8.00 (-3.00)	ND	1.5	0.5	ND	ND
5	2014	34-21.471	133-07.664	110	19	1	2.25 (-1.17)	0.81	85.0	41.8	8.6	1.27
	2015	34-21.504	133-07.721		15	0	1.21 (-0.28)	1.39	82.3	52.6	9.1	1.10
6	2014	34-22.765	133-08.802	550	28	0	5.06 (-2.34)	1.10	39.7	14.3	33.6	2.59
	2015	34-22.479	133-08.697		24	2	1.68 (-0.75)	1.05	83.1	56.8	35.9	1.16
7	2014	34-20.047	133-05.262	360	13	0	0.46 (1.12)	1.45	84.7	26.6	20.3	1.60
	2015	34-19.860	133-05.207		20	0	0.40 (1.32)	1.30	81.3	20.8	14.6	0.86
8	2014	34-19.046	133-03.309	270	38	0	2.87 (-1.52)	2.28	52.8	18.3	10.4	2.85
	2015	34-18.947	133-03.173		36	0	7.92 (-2.99)	0.52	12.5	2.5	3.9	3.30
9	2014	34-17.523	133-03.621	110	22	0	3.02 (-1.60)	2.00	59.7	14.4	25.8	2.37
	2015	34-17.552	133-03.560		27	0	0.70 (0.52)	2.09	68.1	15.6	16.5	1.16
10	2014	34-16.287	132-57.900	40	35	0	2.11 (-1.08)	0.96	82.3	47.3	5.7	1.39
	2015	34-16.288	132-57.875		35	0	2.44 (-1.29)	1.67	68.5	34.0	11.4	2.23
11	2014	34-14.043	132-57.260	240	21	1	0.97 (0.04)	1.79	80.1	30.9	22.7	1.64
	2015	34-13.999	132-57.110		19	0	1.76 (-0.82)	1.21	89.6	44.9	16.9	1.23

平均を求めた。この粒度組成に基づいて、各底質の中央粒径 (mm; $Md\phi$) と粒度組成のばらつきの指標である淘汰度 $[(\phi 84 - \phi 16)/2]$ を求めた ($\phi = -\log_2 D$) (Inman, 1952; 角, 1967; 上杉, 1971; 水産庁, 2008)。また、イカナゴは粒径 0.25mm-4.0 mm の砂底質を潜砂環境として好み、そのうち特に 0.5mm-2.0mm の砂粒子への選択性があると報告されている (中村ら, 1997; 反田, 1998)。そこで、本研究の調査底質についても、前者の粒径範囲の砂の重量割合を好適砂含有率 (%), 後者の粒径範囲の砂の重量割合を最適砂含有率 (%) として求めた。

イカナゴの生息底質に貝殻が多く混じっている傾向を指摘する報告も存在する (井上ら, 1967; 反田, 1998)。そこで、本研究においても底質の貝殻含有量を塩酸溶解法 (松本, 1977) によって測定した。手順は以下の通りである。4 規定塩酸を乾燥させた底質 (約 50g) 中の貝殻が全て溶解し、反応が起こらなくなるまで加え (50ml-170ml), 残った底質を水洗し、ろ紙を用いて底質を回収して重量を測定し、反応前の重量との差を貝殻含有量とした。各底質につき 3 回ず

つ測定し平均値を求めた。

また、本研究では底質の潜砂抵抗、すなわち潜りやすさの指標となるせん断強度 (kN/m²) についても計測した。せん断強度は底質硬度の指標の 1 つとして、潜砂する底生生物の生息環境評価において成果を挙げており (梶原, 2013), イカナゴの潜砂頻度の高い底質を評価する指標としての有効性も確認されている (Endo et al., 2019)。底質をプラスチック水槽 (26cm × 15cm × 深さ 17cm) に深さ 7cm 入れ、水を底質上 5 cm まで入れた状態でハンドベーン (誠研舎, DO-1018, 高さ 4cm, 幅 2cm) を回転させて、せん断強度を測定した。測定は各底質につき 7 回行い、最大最小値を除いた 5 回分の測定平均値を求めた。

イカナゴの出現した底質とそれ以外の底質の性状比較には、SPSS 16.0 for Mac (SPSS Inc.) を用い、2 標本 t 検定を行った。

Ⅲ. 結果

1. 三原瀬戸の底質性状と分布パターン

本研究における 11 調査地点のうち、砂粒子 (細砂,

中砂および粗砂；粒径 0.06mm-2.0mm) を中央粒径とする底質が 2014 年と 2015 年の 2 回の調査ともに確認されたのは、St-1, St-2, St-7, St-11 の 4 地点のみであった (Table 1)。このうち St-1 は過去の海砂利採取区域内にあり、St-2 は海砂利採取区域に近接した位置にあった。また、St-5 と St-10 の 2 地点については、細礫と粗砂の混じったやや粗めの砂底質が 2 回の調査ともに確認された (Table 1)。これらの 6 地点の底質粒度組成の淘汰度は 1 前後の値が多く (Table 1)、さまざまな粒径の砂粒子が混在していた。これらの砂底質地点において、水底を流れながら移動撮影した映像には砂底環境のみが連続記録されていたことから (St-5 を除く 5 地点、5 分 40 秒から 7 分 41 秒間；Fig. 2)、それぞれの地点にはかなり広範囲に砂底環境が存在していることがうかがえた。これらの 6 砂底地点のうち 4 地点 (St-1, 2, 10, 11) は三原瀬戸西部エリアに位置していた (Fig. 1)。高根島と佐木島に挟

まれた St-7 では、礫底質を有する地点の目立つ三原瀬戸中央部にあって砂底質が唯一存在していた (Fig. 1)。

一方、礫成分 (粒径 2.0mm 以上) を中央粒径とする底質が 2 回の調査ともに確認されたのは、St-4 と St-8 の 2 地点であった。須波ノ洲と呼ばれる砂堆が海図上に記されていた St-4 では、2 度の調査ともに中礫を多く含む礫底質のみが出現し、砂を主成分の底質の存在は確認できなかった (調査点距離 280m；Table 1)。また、海砂利採取区域内に位置する高根島西沖の St-8 も中礫を多く含む礫底質が両調査年度ともに確認された (Fig. 3, Table 1)。中央粒径が中礫サイズを越える顕著な礫底質 (4.0mm 以上) は、三原瀬戸中央部から東部に位置する 4 地点 (上記 2 地点に加え St-3, 6) でのべ 5 回記録された (Fig. 1, Table 1)。

残りの 3 地点 (St-3, 6, 9) は、2 回の調査で粒径組成傾向の大きく異なる底質が採集され、礫底質と砂底質が近接混在する底質環境にあることがうかがわれ

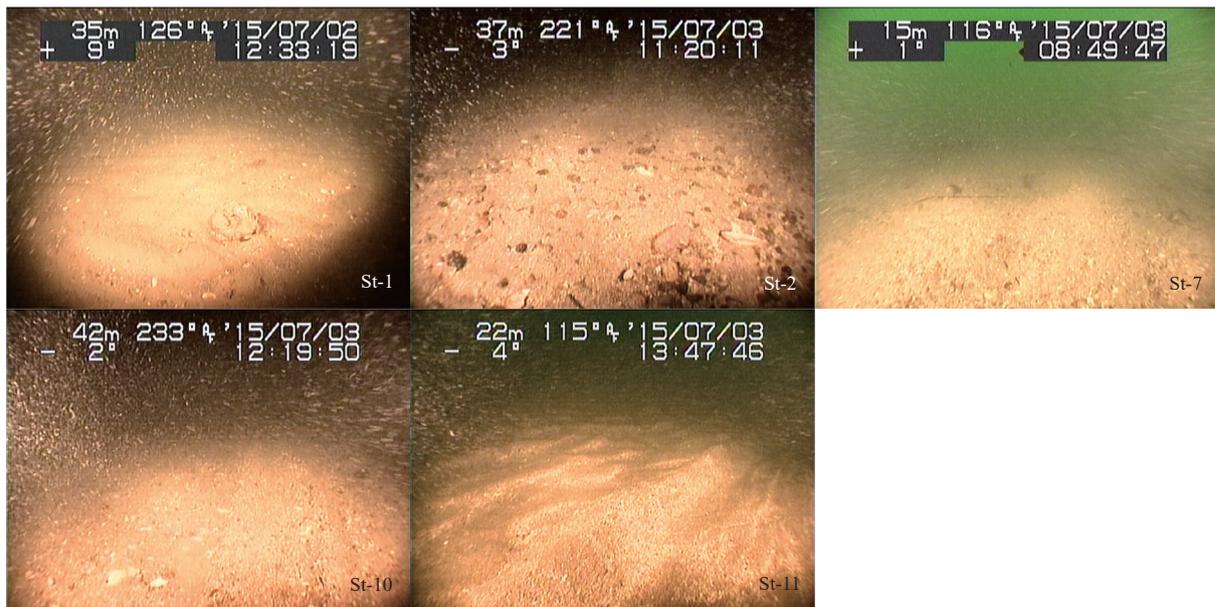


Fig. 2 ドレージ調査で砂成分を中央粒径とした水底が確認された地点の水中景観。水中テレビカメラ装置 (RTV-100MK II S) により撮影。画像中の数字は上段左から水深、船からの方角、年月日、カメラの水平角度、時刻。これらのうち St-1, 2, 11 で夏眠イカナゴが採捕された。



Fig. 3 ドレージ調査で礫成分を中央粒径とした水底が確認された高根島西沖 St-8 (海砂利採取区域内；Fig. 1) の水中景観。水中テレビカメラ装置 (RTV-100MK II S) により撮影。

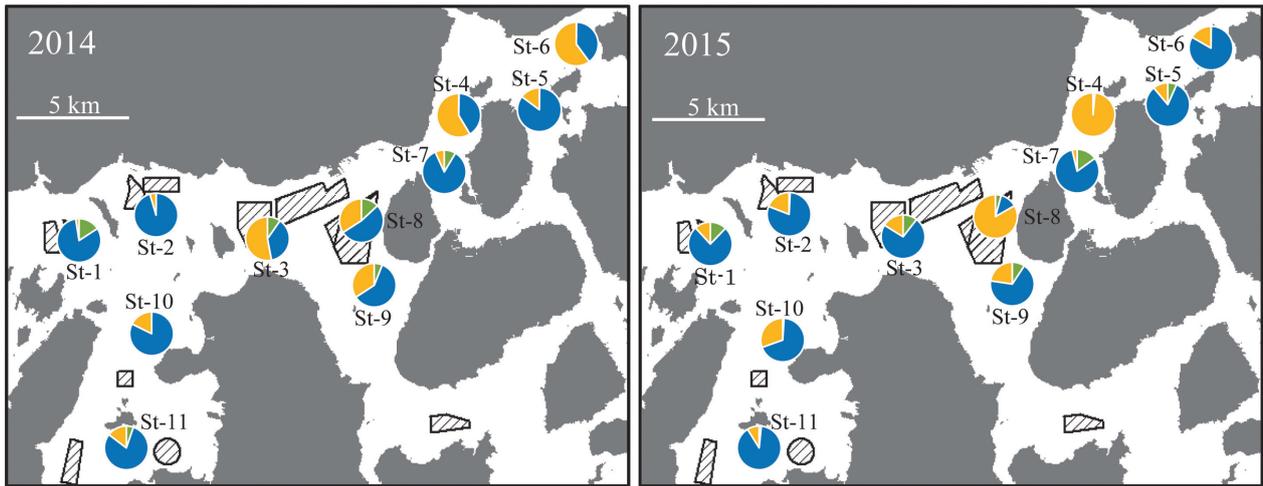


Fig. 4 三原瀬戸周辺水域における底質の粒度組成。円グラフの青色はイカナゴ潜砂生息に適していると報告のある粒径 0.25mm – 4.0 mm の砂粒子の重量割合（好適砂含有率；Table 1）。黄色はより粗い粒径 4.0mm 以上の礫成分，緑色はより細かい粒径 0.25mm 未満の細砂成分およびシルト成分の重量割合を示す。斜線範囲は過去の海砂利採集区域を示す。

た (Table 1)。特に海砂利採集区域であった大三島北沖の St-3 と、海砂利採集区域に近接する生口島西沖の St-9 は、2014 年と 2015 年の調査データともに粗めの礫底質と細かな砂底質が混在し、粒度組成の淘汰度が高かった (Table 1)。

本研究の 11 調査定点中に泥底は存在しなかった。粒径 0.25mm 未満の細砂成分を比較的多く含んだ底質は、竹原沖 (St-1)、大三島北沖 (St-3)、高根島周辺 (St-7, 8, 9) のみに見られた (粒度組成：4.3% -15.8%；Fig. 4)。粒径 0.063mm 未満のシルト成分については、ほぼ全ての調査点で粒度組成 1% 未満であった。

2. 夏眠イカナゴ出現地点の底質の特徴

竹原沖の St-1 と St-2、三原湾細島周辺の St-5 と St-6、大崎上島と大三島の海峡部にある横島南沖の

St-11 の合計 5 地点の採集底質中からイカナゴが出現した (Fig. 1, Table 1)。いずれの地点でも成魚サイズの個体 (標準体長：中央値 78.6mm, レンジ 71.9mm-83.3mm, n = 5) が 1 尾あるいは 2 尾採捕された (Table 1)。イカナゴの出現した 5 地点は三原瀬戸の西部エリアあるいは東部エリアに位置しており、三原瀬戸中央部では夏眠イカナゴを確認できなかった (Fig. 1)。

イカナゴが確認された 5 地点の底質は、中央粒径 0.43mm-2.25mm, 淘汰度 0.81-1.79 の砂底質であった (Table 1)。貝殻含有率は 8.6% -35.9% とかなり広いレンジであった (Table 1)。せん断強度は、0.77kN/m²-2.01kN/m² の低い抵抗値を示していた。

イカナゴ採捕 5 地点の底質性状を、イカナゴの出現が確認されなかった非採捕 6 地点と比較したところ、イカナゴ採捕地点の底質における粒径 0.25mm - 4.0

Table 2. 瀬戸内海安芸灘三原瀬戸における夏眠イカナゴ採捕地点 (St-1, 2, 5, 6, 11) と非採捕地点 (St-3, 4, 7, 8, 9, 10) の底質性状比較 (データソースは Table 1)。イカナゴ採捕 5 地点のデータは、イカナゴが採捕された年度のデータのみ (非採捕年度データは除く)。イカナゴ非採捕 6 地点については、のべ 12 回の調査データを集計した。

		イカナゴ採捕		t 値	P
		あり	なし		
中央粒径	(mm)	1.2 ± 0.7 (5)	3.1 ± 2.7 (12)	-1.5	0.1
	(Md ϕ)	-0.07 ± 0.93 (5)	0.49 ± 3.12 (12)	-0.4	0.7
淘汰度	(ϕ)	1.2 ± 0.4 (5)	1.6 ± 0.7 (11)	-1.2	0.3
好適砂含有率	(%)	85.1 ± 6.0 (5)	55.3 ± 27.3 (12)	2.4	0.03
最適砂含有率	(%)	44.4 ± 13.6 (5)	17.9 ± 13.6 (12)	3.7	0.002
貝殻含有率	(%)	18.8 ± 10.9 (5)	12.8 ± 7.1 (10)	1.3	0.2
せん断強度	(kN/m ²)	1.4 ± 0.5 (5)	2.0 ± 0.9 (10)	-1.5	0.1

mmの砂成分の重量割合である好適砂含有率はいずれも80%を越える値を示し、イカナゴ非採捕6地点より有意に高かった (Table 2)。また、特に選好性があるとされる粒径0.5 mm - 2.0 mmの砂成分の重量割合である最適砂含有率についても、イカナゴ非採捕6地点より有意に高かった (Table 2)。同様の比較において中央粒径、淘汰度、貝殻含有率、せん断強度に有意差は認められなかったが (Table 2)、礫底質の優占する三原瀬戸中央部エリアにあって例外的に細砂底質を有していた St-7 を外れ値としてイカナゴ非採捕地点から除くと、中央粒径 (3.7 ± 2.6 mm, $n = 10$) とせん断強度 (2.2 ± 0.8 kN/m², $n = 8$) に有意差がみとめられた (中央粒径: $t = -2.2$, $df = 18$, $P = 0.046$; せん断強度: $t = -2.4$, $df = 16$, $P = 0.03$)。

IV. 考察

1. 三原瀬戸の底質性状の現況

本研究では、海砂利採取禁止後16年を経過した時点における三原瀬戸水域の底質性状とイカナゴの生息状況の理解を目的にドレッジ調査を広範に実施した。その結果、三原瀬戸の西部エリア (St-1, 2, 10, 11) と東部エリア (St-5, 6) にイカナゴの夏眠生息に適した砂成分の優占する底質の存在を確認した (Fig. 1)。過去に海砂利採取区域内に位置していた St-1、それに近接する St-2 においても、イカナゴの利用しうる砂堆が現在も存在していることが確認された。本研究とほぼ同時期に三原瀬戸西部水域で実施された広島県 (2017) によるイカナゴ調査においても、やはりイカナゴの夏眠場の存在が確認されている (Fig. 1)。この共通性は、竹原沖から大崎上島・大三島海峡部までの三原瀬戸西部エリアのイカナゴ生息場所としての重要性を強調するものである。

対照的に、海砂利採取区域の集まる三原瀬戸中央部エリアでは、総じて礫成分が目立つ底質が優占しており (St-3, 4, 8, 9; Fig. 4)、三原瀬戸におけるイカナゴの夏眠生息に適した砂底質の分布はいまだ地理的に限られた状態にあることが確認された。広島県 (2017) の調査では St-3 の東方で夏眠イカナゴが確認されているが (Fig. 1)、本研究の St-3 と St-9 において調査年度により礫成分に偏った底質と、細砂の優占する底質という対照的なデータが確認されたことから、イカナゴの生息しうる砂底質は礫底質に隣接する形で限られた範囲に限定して残存しているものと推察される。なお、シルト成分の粒度組成は総じて低かったが、広島県 (2017) による2015年度の底質調査結果においても三原瀬戸西部エリアのシルト成分の低さ

が確認され (粒度組成 0.97 ± 0.78 %, $n = 25$)、過去から減少傾向にあることが報告されている。

高橋・村上 (2002) は粒子輸送モデルによる計算結果から、周辺に十分な砂の供給源がある場合、大久野島北東部に再び砂堆が形成される可能性を示唆しているが、該当地点に近い本研究の St-3 の底質データからは粒径0.25mm未満の細砂成分の重量割合が比較的目立つものの (Fig. 4)、まだ砂堆の形成には至っていない現状にある。但し、広島県 (2017) による2015年の底質調査では、St-3 よりも大久野島に近い調査地点 [No.59 (広島県, 2017)] で砂分の増加がみとめられている例もあり、底質変化が進みつつある可能性も示唆されている。また、海砂利採取区域でない須波沖 St-4 で顕著な礫底質が確認されたが、須波沖水道部において砂粒子が流失により、砂堆 (須波ノ洲) の喪失あるいは縮小が生じているものと推察される。

2. イカナゴの好む底質性状の特徴

本研究におけるイカナゴ出現地点の底質の中央粒径は0.43mm-2.25mmであったが (Table 1)、これは先行研究で報告されている他海域のイカナゴ夏眠場の底質性状 (中央粒径: 0.125mm-4.0mm; 中村ら, 1997; 反田, 1998, 2012; 篠原ら, 2003) の範囲に十分含まれる。また、伊勢湾や瀬戸内海東部水域のイカナゴが粒径0.25mm-4.0mmの砂底質を潜砂環境として好むこと、また特に0.5mm - 2.0mmの砂粒子への選好性が報告されているが (中村ら, 1997; 反田, 1998)、本研究のイカナゴ出現地点の底質もこれらの粒径成分を有意に多く含む特徴を有していた (Table 2)。

また粒度組成に関しては、上述した砂粒子の中央粒径に加えて、粒度分布のばらつきがある程度抑えられていることも重要である。底質環境に関する先行研究の存在する伊勢湾、播磨灘、備讃瀬戸ではイカナゴの生息密度の高い底質の淘汰度の上限レベルが1.1-1.7の範囲にあることが報告されている (中村ら, 1997; 反田, 1998; 篠原ら, 2003)。本研究のイカナゴ採捕地点における底質の淘汰度0.81-1.79 (Table 1) も同様の範囲にあったことから、瀬戸内海西部水域のイカナゴも、伊勢湾や瀬戸内海東部と同様の底質環境への要求性を有していることが示唆される。

イカナゴの生息底質における貝殻含有率についての過去の知見として、反田 (1998) は瀬戸内海東部播磨灘水域におけるイカナゴ採捕地点の貝殻含有率が16.9%以下にあることを報告している。一方、井上ら

(1967)は飼育実験から貝殻含有率30%以上の底質が好まれるとしている。このように貝殻含有率に関して対照的な見解が存在するが、本研究では貝殻含有率8.6 - 35.9%と広いレンジの底質でイカナゴが採捕され (Table 1), またイカナゴの採集された地点 (三原瀬戸西部と東部) とそれ以外の地点 (三原瀬戸中央部) の底質比較においても貝殻含有率に顕著な差は見られなかったことから (Table 2), いずれの先行研究とも傾向が一致しないと判断される。本研究の調査地点のほとんどで底質の貝殻含有率が30%を下回っていたが (30%を越えた底質はSt-6のみ), 1954年に実施された三原瀬戸東部エリア細島周辺水域におけるイカナゴ夏眠場の底質においても貝殻含有率が3-27%程度であり (井上ら, 1967), 三原瀬戸水域は総じて貝殻含有率の低い底質特性を有しているものと考えられる。このような水域では底質中の貝殻量がイカナゴの底質選択の要素となり難いかもしれない。

高根島と佐木島に挟まれたSt-7は、礫底質の優占する三原瀬戸中央部エリアにおいて例外的に細砂底質を有していた (Table 1, Fig.4)。本研究のSt-7の採集底質中からは甲殻類, 二枚貝類, ナメクジウオ類, 底生魚類などの生物が多数出現し (坂井, 未発表データ), 今後の再調査によりイカナゴの生息が確認される可能性は十分に高いと考えられる。本研究のイカナゴ採捕地点とイカナゴ非採捕地点の底質比較において, このSt-7のデータをイカナゴ非採捕地点の外れ値として計算から除くと, 中央粒径とせん断強度に有意差がみとめられたが, これは三原瀬戸においても中央粒径とせん断強度がイカナゴの生息適地環境を見極め・評価する上で重要な指標となることを示唆する。

Endo et al. (2019)は, 飼育下のイカナゴ潜砂実験により, 底質のせん断強度が中央粒径と強い相関関係にあること, また中央粒径と淘汰度の2つのパラメーターに基づく重回帰式によりせん断強度の変動を説明づけることを確認している。加えて, せん断強度がイカナゴの潜砂底質選好性をうまく表現する新たな指標となりうることを示唆している。飼育下のイカナゴが, せん断強度値0.8-1.6程度の底質を好むことをEndo et al. (2019)は報告しているが, 本研究のイカナゴ出現地点の野外底質データも同程度のせん断強度値であり (平均値1.4; Table 2), 傾向が合致している。ハンドベーンを用いたせん断強度の測定評価は手法の簡便さもあり, 粒度組成データとともにイカナゴの底質評価分析に大きな役割を果たすものと期待される。

本研究のドレッジ調査で確認されたイカナゴの出現個体数は1地点あたり2個体以下であったことから

(Table 1), いずれの調査地点においてもイカナゴが高密度で生息しているとは考えにくい。広島県による三原瀬戸西部7定点 (Fig. 1)における夏眠イカナゴ調査では, 1998年および1999年の実施時は全調査地点で数十個体のイカナゴがドレッジにより採集されていた。しかし, 2005年と2015年の調査ではイカナゴ採集個体数が1個体 - 2個体レベルに大きく減少している (広島県, 2017)。海砂利採取禁止措置が続き, イカナゴ漁業も行われておらず, 砂底環境の比較的整った三原瀬戸西部エリアが存在する現状にあってもなおイカナゴ個体群が減少の一途にある。大規模かつ長期に亘る生息場所への人為的攪乱を経た三原瀬戸イカナゴ個体群は, 個体数の自然回復が容易に進まない現況にあるものと推察される。

イカナゴ個体群の回復には, 生息適地となる砂底環境の存在に加えて, 生存に関わる水質・水温環境, 餌環境が維持された上で, 周辺水域でのイカナゴ成魚の再生産活動が活発に維持され, イカナゴ幼稚魚の新規加入定着およびそれらの個体の成長・生残が促進されることが不可欠である。砂底環境に関しては, 本研究で確認されたエリア間の分断の改善, すなわち三原瀬戸中央部エリアの底質環境が将来的に回復することで, イカナゴ資源の再生産・加入動態に良い変化を与える可能性は考えうる。そのような資源回復方策の検討を進める上で, 現状の三原瀬戸におけるイカナゴの繁殖および初期生活史に関する詳細な生態情報の獲得, さらに生息環境評価データの獲得が早急に求められる。

【謝辞】

本研究は, 環境省環境研究総合推進費S-13「持続可能な沿岸海域実現を目指した沿岸海域管理手法の開発 (2014-2018年度; 代表 柳 哲雄)」の助成を受け, サブテーマ「閉鎖性海域・瀬戸内海における栄養塩濃度管理法の開発 (テーマリーダー 西嶋 渉)」のプロジェクト事業の一環として実施したものである。本研究の遂行にあたり, 練習船豊潮丸のスタッフの皆様には本調査航海の安全実施に関するご尽力をいただいた。広島大学水圏資源生物学研究室の学生諸氏には野外調査時の献身的な協力支援を賜った。また, 広島大学環境安全センター 西嶋 渉氏, 広島大学大学院工学研究科 中井智司氏, 龍谷大学 奥田哲士氏, 神戸大学大学院海事科学研究科 浅岡 聡氏, 広島大学大学院生物圏科学研究科 橋本博明氏, 兵庫県立農林水産技術総合センター 反田 實氏, 五利江 重昭氏, 西川哲也氏には専門的見地にもとづく貴重なご助言を賜った。校

読者の方には本論文の改訂に関わる有意義なご意見を賜った。これらの方々に、この場をお借りして深くお礼申し上げます。

【文献】

- 井上 明・高森茂樹・国行一正・小林真一・仁科重巳(1967): イカナゴの漁業生物学的研究. 内海区水産研究所研究報告, 25, 1-335.
- 上 真一 (2007): 海砂採取と高級魚の減少. 『瀬戸内海事典』南々社, 70-72.
- 上杉 陽 (1971): ふるいをを用いた粒度分析方法の吟味-風成・海成の環境区分のために. 地理学評論, 44-12, 839-857.
- Endo A, Iwasaki N, Shibata J, Tomiyama T, Sakai Y (2019) The burrowing sand lance *Ammodytes japonicus* (Teleostei, Ammodytidae) prefers benthic sediments of low shear strength. *Journal of Ethology* (in press).
- 梶原直人 (2013): 底生生物の生息環境指標としての底質の硬度. 海の研究, 22 (5), 147-158.
- 篠原基之・日野宗治・小塚広之 (2003): 備讃瀬戸中央部におけるイカナゴの夏眠場の底質について. 岡山県水産試験場報告, 18, 6-11.
- 水産庁 (2008): 干潟環境及び二枚貝(アサリ)の状態把握方法. 干潟生産力改善のためのガイドライン, 3 (3), 18-20.
- 角 靖夫 (1967): 礫岩・礫層の調べ方 (3) 粒度・分析結果のまとめ. 地質ニュース, 159, 30-42.
- 高橋 暁・村上和男 (2002): 瀬戸内海忠海沖における海砂利採取の影響-底質移動特性. 海岸工学論文集, 49, 1356-1360.
- 高橋 暁・湯浅一郎・村上和男 (2002): 瀬戸内海芸予諸島周辺海域の海砂採取が流況に与えた影響. 沿岸海洋研究, 40 (1), 81-90.
- 反田 實 (1998): 内海漁場-イカナゴと底質. 『沿岸の環境圏』フジ・テクノシステム, 348-355.
- 反田 實 (2012): イカナゴの漁獲動向と瀬戸内海の海砂採取. 日本沿岸域における漁業資源の動向と漁業管理体制の実態調査, 平成 23 年度事業報告, II-2 (2), 79-94.
- 中村元彦・船越茂雄・向井良吉・家田喜一・石川雅章・柳橋茂昭 (1997): 伊勢湾産イカナゴの夏眠場所. 愛知県水試研報告, 4, 1-9.
- 新野洋平・柴田淳也・富山 毅・坂井陽一・橋本博明 (2017): 瀬戸内海中央部燧灘周辺におけるタチウオ *Trichiurus japonicus* の食性. 日本水産学会誌, 83, 34-40.
- 日本の統計データと都道府県ランキング (2017): 広島県のいかなご類の漁獲量の推移グラフ (1956 年から 2012 年), 47s.jp, <http://47s.jp/pages/0000626/34000>. 2018 年 8 月閲覧.
- 橋本博明 (1991): 日本産イカナゴの資源生態学的研究. 広島大学生物生産学部紀要, 30, 135-192.
- 広島県 (2017): イカナゴ. 『広島県海砂利採取環境調査報告』, 39-40.
- 松田 治 (1999): 瀬戸内海の水質・底質の現状と環境管理. 日本海水学会誌, 53, 229-240.
- 松本 進 (1977): 鹿児島県の海砂使用に関する実験研究. 鹿児島大学工学部研究報告, 19, 125-131.
- 山田浩且 (2011): 伊勢湾におけるイカナゴの新規加入量決定機構に関する研究. 三重水研報, 19, 1-7.
- 柳 哲雄 編著 (2008): 『瀬戸内海のお海底環境』恒星社厚生閣.
- Inman, D. L. (1952): Measures for describing the size distribution of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 22 (3), 125-145.
- JIS A 1204 (2009): 土の粒度試験方法. 日本工業規格 日本工業標準調査会 (JISC).
- Orr, J. W., Wildes, S., Kai, Y., Raring, N., Nakabo, T., Katugin, O., Guyon, J. (2015): Systematic of North Pacific sand lances of the genus *Ammodytes* based on molecular and morphological evidence, with the description of a new species from Japan. *Fishery Bulletin*, 113(2), 129-156.

(2018 年 8 月 31 日受付)

(2018 年 12 月 5 日受理)