

備讃瀬戸におけるイカナゴ夏眠場の底質温度

赤井紀子*・宮川昌志

The sand temperature at aestivation sites of Japanese sand lance *Ammodytes japonicus* in Bisan-Seto, the Seto Inland Sea

Noriko AKAI, Masashi MIYAGAWA

It is known that high water temperature during the aestivation period affects mortality and reproduction of Japanese sand lance *Ammodytes japonicus*. Therefore, in order to confirm whether there is a difference between water temperature and sand temperature, the relationship between water temperature near the sea bottom and sand temperature was examined by diving, and analyzed the physical characteristics of the sediment core samples, in 4 aestivation sites (Water depth: 15 m to 29 m) in Bisan Seto from 2017 to 2019. Although the relationship between sand temperature and sediment characteristics was not clear, the difference between the water temperature near the sea bottom and the sand temperature tended to increase as the sand depth and water depth increased. The temperature of the sediment near the depth of 10 cm, which the sand lance inhabits during the aestivation period, differs from the water temperature near the sea bottom in the range of 0°C to -0.4°C, there was little difference.

キーワード：イカナゴ，夏眠場，底質温度

イカナゴ *Ammodytes japonicus* は瀬戸内海の重要な漁業資源のひとつであり，香川県では主に備讃瀬戸において袋待網漁業の一種である込網漁業により漁獲される。香川県の漁獲統計によると¹⁻³⁾，備讃瀬戸のイカナゴの漁獲量は年による増減はあるものの，1994年頃までは6,000トン前後で安定していた。しかし，その後大きく変動しながら減少し，2009年には470トンと過去最低となり，以降，不漁年が散見されている。備讃瀬戸は播磨灘と燧灘に隣接する東西に細長い瀬戸部であり，平均水深16.3 mと瀬戸内海でも最も浅い海域である⁴⁾。瀬戸内海のほぼ中央に位置するため外海との海水交換性が低い海域である⁵⁾。また，鉛直混合が強いため⁶⁾，周年にわたって成層がほとんど見られない⁷⁾。瀬戸内海東部海域のイカナゴは6~7月に海底の砂に潜って夏眠生活を開始する⁸⁾。夏眠中のイカナゴは摂餌することなく，11月頃から生殖腺が発達し，12月に夏眠を終了して遊泳生活に戻った後，1月中旬頃

までに産卵する⁸⁻¹¹⁾。このように，イカナゴにとって夏眠期は，個体維持だけでなく再生産にとっても重要な時期にあたる。また，本種の主要な夏眠場が存在する備讃瀬戸の水温は近年上昇傾向にあり¹²⁾，8~9月の平均水温が27°Cを超えるような年（近年では2010年，2012年など）には，通常漁獲のない時期にも拘わらず衰弱あるいはへい死したイカナゴが底びき網に入網することが確認されている（赤井 私信）。赤井らは，備讃瀬戸産のイカナゴ当歳魚を夏眠期に24°C，26°C，28°Cで2か月間飼育し，水温が高いほど累積死亡率が高く，その後の再生産にも，よう卵数の減少などにより悪影響を及ぼすとの結果を得ている¹³⁾。また，高齢個体においても夏眠中の高水温は死亡率の増加やより多くのエネルギーの消耗などをもたらすことが示されている¹⁴⁾。このように夏眠期の水温動向はイカナゴにとって重要であることから，香川県水産試験場では，夏眠期のイカナゴに及ぼす水温の影響を海水温によっ

* 現 香川県農政水産部水産課

て推測してきた。しかし、夏眠期のイカナゴは砂中で生息するため、水温と砂中温度における差異の有無を確認しておく必要がある。前述のように、備讃瀬戸は潮流が速く、加えて、瀬戸内海を東西に結ぶ航路と本州と四国をつなぐ航路が交差していること、好漁場であり操業する漁船が多いために船舶の輻輳する海域であることから¹⁵⁾、長期間の温度測定は困難である。また、この海域では建設工事の為に骨材資源として1950年代半ばから2005年まで海砂採取が行われた。その骨材として採取される海砂の粒径がイカナゴの夏眠場の底質粒径と合致していたことから、イカナゴ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示唆されている¹⁶⁾が、砂中温度との関係は明らかではない。そこで、イカナゴの夏眠場においてダイバー潜水により砂中温度と海底直上水温または底質性状との関係を調べた。

材料および方法

本研究の調査対象地は、「平瀬」、「横瀬」、「中瀬」、「オーソの瀬」¹⁷⁾で、いずれも香川県水産試験場のイカ

ナゴ空釣りこぎ調査等において、夏眠中のイカナゴが採集されている場所である。また、中瀬とオーソの瀬は、過去に海砂利が採取されていた地点を含む。オーソの瀬については、海砂利採取と砂中温度の関係を調べるため、海底が大きく掘りこまれたままとなっている¹⁸⁾「オーソの瀬深場 (deep)」と非採取地点「オーソの瀬」の2地点を選定し、計5地点で次の調査を実施した (Fig. 1)。

調査は、2017年から2019年の、それぞれ最も水温が高くなる8月末から9月初めに、ダイバーの作業性を考慮し、原則として小潮期の転流時に行った (Table 1)。

ボタン型メモリー水温計 (Onset, Tidbit V2) を鉄製の棒に5 cm間隔で砂中深度20 cmまで (オーソの瀬の2地点についてはいずれも15 cmまで) しっかりと固定した。調査地点においてダイバーが垂直に突き刺して設置し、30秒毎の温度を約30分間記録した。最上部の水温計は底質表面から完全に露出させ、海底直上水温を測定した。水温計は各層1個設置したが、オーソの瀬の2地点については、砂中深度10 cmには3個、それ以外の層については2個とし、平均値を求めた。いずれの調査日においても、調査の前または後に、500 ml

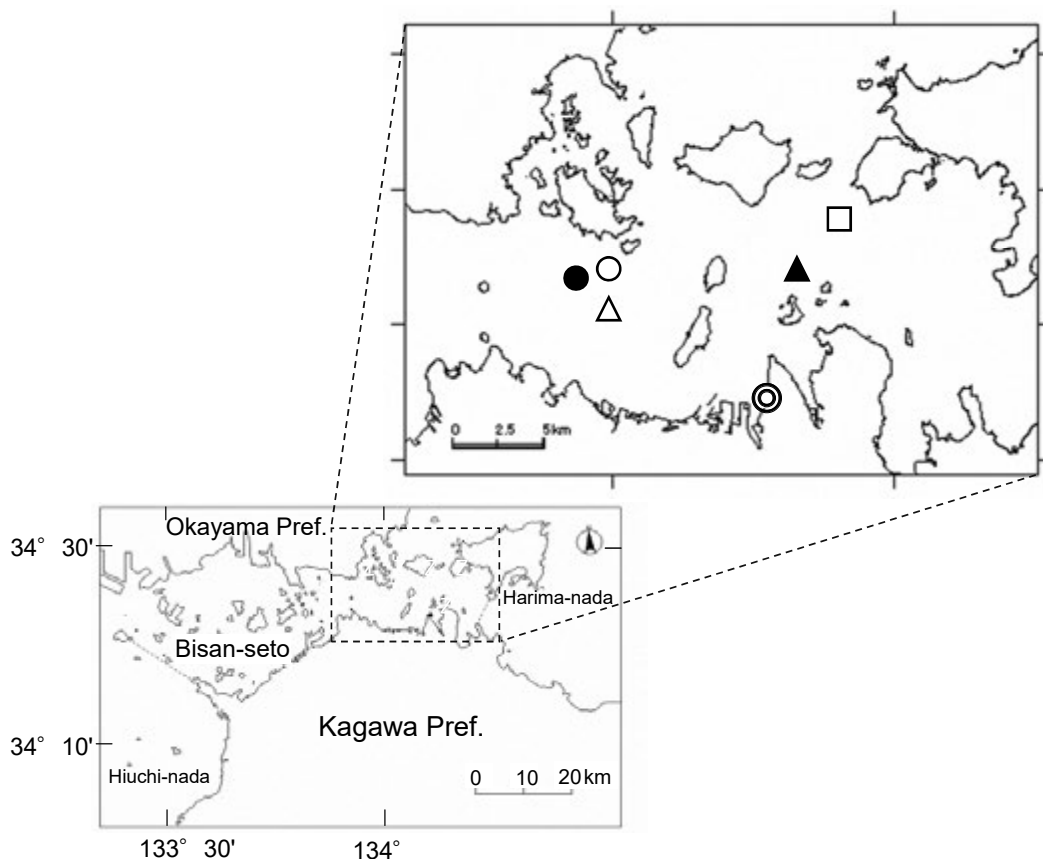


Fig. 1 Location of the survey sites in Bisan-Strait. The survey location names are Hira-shoal (□), Yoko-shoal (▲), Naka-shoal (△), Osono-shoal (○) and Osono-shoal (deeper site: ●).

のピーカーに蒸留水とともにロガーを入れ、25℃の恒温槽で1時間程度温度を測定した。水温安定時の機差は、公表精度±0.2℃以内に対し、±0.1℃内であったため、特に補正等を行わなかった。また、多項目水質計（RINKO-Profiler, JFEアドバンテック社製）により鉛直水温を10 cm間隔で測定した。ただし、中瀬では鉛直水温は測定しなかった。

ダイバーによる底質コアを水温計設置場所付近において、アクリル管（内径10 cm, 長さ40 cm）により平瀬および横瀬では2本ずつ、それ以外の地点では1本ずつ柱状に採取した。アクリル管を海底に対して垂直に押し込み、ゴム栓で管上端を密栓して静かに引き抜き、負圧により長さ15 cm以上の底質コアを採取した。密栓して実験室に持ち帰り、原形を壊さないように管から押し出し、表層から概ね0-5, 5-10, 10-15, 15-20の5 cm間隔に層切りし、計4層の試料とした。ただし、中瀬および横瀬は採取した堆積物が最深でそれぞれ15 cm, 17 cmであったため、15 cmまでの3層の試料とした。試料は、層別に粒度分析と強熱減量分析に供した。粒度分析については、8段階標準分析フルイ（目開き0.0625 mm, 0.125 mm, 0.25 mm, 0.5 mm, 1.0 mm, 2.0 mm, 4.0 mm, 8.0 mm）による乾式法（沿岸環境調査マニュアル（底質・生物篇）¹⁹⁾に準拠）で行った。粒径の単位は、粒度分析で幅広く使用されているφスケールを使用した。

$\phi = -\log_2 d$ ；ここでdは粒径（単位d:mm）

計られた粒度分布から累積百分比曲線を求めた後、Inman (1952)²⁰⁾の式によって中央粒径値（ $Md\phi$ ）、淘汰度（ $\sigma\phi$ ）を計算した。計算式は次のとおりである。

$$Md\phi = \phi 50$$

$$\sigma\phi = (\phi 84 - \phi 16) \times 2^{-1}$$

粒度区分はWentworth (1922)²¹⁾に従って分類した。

強熱減量分析については、風乾させた底質試料から2 mm以上の粒子を除去した後、550℃で3時間燃焼して試料重量の減量（IL550）を求めた。なお、温度計やアクリル管の設置状況は、ダイバーにより撮影された水中ビデオ映像により確認した。

海底直上水温（砂中深度0 cm）と砂中深度5, 10および15 cmの温度との差（以降、0-5 cm温度差, 0-10 cm温度差, 0-15 cm温度差とする）を求め、各層の底質性状（それぞれ0-5 cm層, 5-10 cm層, 10-15 cm層を対応させた）との関係を調べた。

また、海底直上水温と砂中温度の差に及ぼす水深の影響を調べるため、一般化線形モデル（generalized linear model; GLM, 正規分布）解析を行った。対数変換を行った水深を応答変数とし、確率分布は正規分布を仮定した。0-5 cm温度差, 0-10 cm温度差, 0-15 cm温度差を説明変数に用いた。GLMの適合度を判断するため、擬似変動係数（ R^2 ）を次式により求めた。

$$R^2 = 1 - (\text{残差逸脱度} \times \text{最大逸脱度}^{-1})$$

GLMの解析は統計解析ソフトウェア、R 3.6.1 (R Core Team, 2019) を用いた。

結果および考察

設置した水温計の値は、平瀬では30分間の測定において、約10分ごとに場所を変えて実施したため、水温計の値が安定した5分間の平均値を求めた。それ以外の地点では同じ場所で約30分間設置し、水温が安定した15分間の平均値を求め、Fig. 2に調査地点ごとの砂中温度分布を示した。海底直上と砂中温度の差異は、砂中温度5 cmでは0-0.2℃, 10 cmでは0-0.4℃, 15 cmでは0.1-0.6℃, 20 cmでは0.1-0.8℃の範囲で、砂中深度が深いほど、差異が大きくなる傾向にあった。差異が大きかった地点は、水深が深い横瀬とオーソの瀬深場であった。水深が浅い場所では差異が小さく、特に中瀬ではいずれの層でもほぼ同じ温度であった。また、対数変換された水深と0-5 cm温度差の間に有意な関係は認められなかった（ $n=5$, $P=0.09$ ）が、0-10 cm温度差（ $n=5$, $R^2=0.93$, $P<0.001$ ）および0-15 cm温度差（ $n=5$, $R^2=0.96$, $P<0.001$ ）の間には有意な関係が認められた（Fig. 3）。

本研究の調査は、高水温期、小潮期および転流時に行った。潮が大きくなるほど、間隙水の動きが大きく

Table 1 Environmental characteristics at each study sites.

Date of survey	Moon phase	Time of turn of tide	Station	Latitude (N)	Longitude (E)	Depth (m)
31 Aug. 2017	8.9	10:53	Hira-shoal	34.4503	134.1330	15.7
3 Sep. 2018	22.2	9:13	Naka-shoal	34.4083	133.9949	15.3
6 Sep. 2018	25.2	13:43	Yoko-shoal	34.4271	134.1070	28.6
5 Sep. 2019	5.2	14:44	Osono-shoal (deeper)	34.4282	133.9608	27.4
			Osono-shoal	34.4277	133.9781	17.1

なると予想され、今回観測された海底直上と砂中温度の差異は、小さくなると推測される。イカナゴが生息するとされる砂中深度10 cmまでの温度は、最大で、海底直上との差が -0.4°C であった。水深によって若干の差異が認められるものの、海底直上水温はイカナゴが夏眠時に経験する水温とほぼ一致すると考えられた。また、鉛直水温を測定しなかった中瀬を除く4地点における表層(0.5 m)とび海底直上1 m(以下、B1 mとする)の水温差は、 $0.04\text{--}0.25^{\circ}\text{C}$ の範囲で、(一例として、オーソの瀬における水温の鉛直分布をFig. 4に示した)鉛直にほぼ一様であった。よって、イカナ

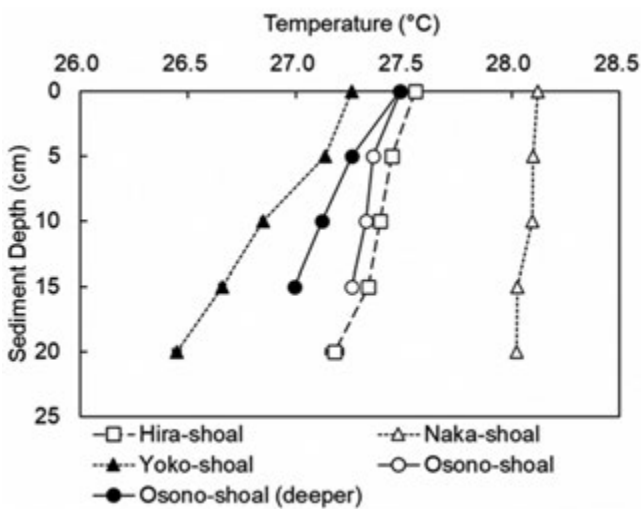


Fig. 2 Vertical distribution of sand temperatures at each survey site.

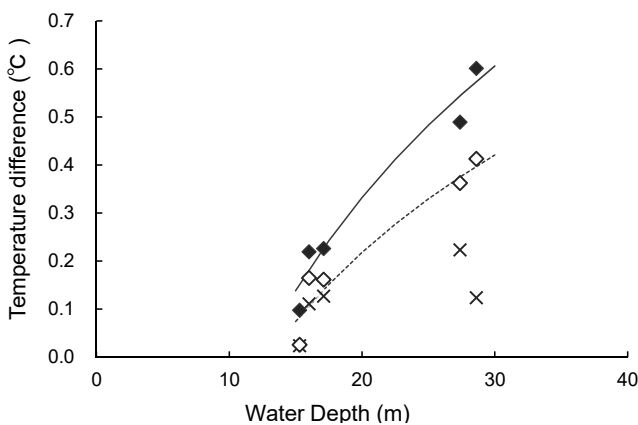


Fig. 3 Relationship between the temperature difference and water depth. Solid and dashed lines represent the linear mixed effect models fitted to temperature difference between sea bottom surface and 15 cm or 10 cm sediment depth, respectively. Figures show each data of temperature difference and water depth (\times : 0-5cm, \diamond : 0-10cm, \blacklozenge : 0-15cm).

ゴに対する夏眠期の温度の影響を、海水温(例えば、水産試験場が高松市屋島湾に設置している水温自動観測ブイによる水深1.5 mの海水温)を用いて評価することは、特段、差し支えないと考えられる。

中瀬の5-10 cm層で淘汰度が1.7であった以外は、全ての分析層で夏眠場の条件(中央粒径($Md\phi$): 2~1, 淘汰度($\sigma\phi$): <1.7 , 強熱減量: $<3\%$, 含泥率: $<6\%$)¹⁶⁾を満たしていた(Table 2)。平瀬, オーソの瀬, オーソの瀬深場では、いずれも20 cm深さの柱状堆積物の採取が行え、また、4層の底質性状に大きな違いは認められなかった。しかし、中瀬, 横瀬では、15 cm程度までしか採泥できず、3層の底質は見た目にも5 cm程度の明瞭な層状になっており、底質性状もばらつきが大きかった(Table 2)。粒径が大きいほど、間隙水の交換率は高まると予想されるが、本研究ではこれら底質性状と海底直上と砂中温度の差異に明瞭な傾向は認められなかった。また、オーソの瀬の2地点の底質性状はよく似ており、少なくとも砂中深度20 cmまでの底質に海砂採取の影響は窺えなかった。一方、Endo et al. (2019)²²⁾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が中央粒径と強い相関関係にあることを示している。反田(1998)¹⁶⁾は、播磨灘では水深の深い場所ほど大型の個体が分布しており、分布密度も深い地点ほど高いと報告している。イカナゴの潜砂底質選好性は、これら底質性状に加え、海底直上との温度差も関係しているのかもしれない。今後、同様の調査を、イカナゴの採集調査も合わせて広範囲に行うことでイカナゴの分布特性の解明に繋がるであろう。

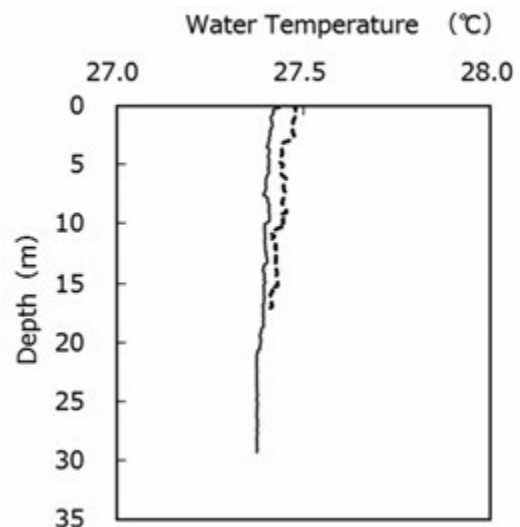


Fig. 4 Vertical profiles of water temperature at St. Osono-shoal. Solid and dashed lines show the observed data for deeper and shallow, respectively.

Table 2 Properties of sediment core samples taken by a scuba diver in Bisan Strait at the central Seto Inland Sea.

Station	Sediment depth (cm)	Number of cores	Grain components				Cley (%)	IL550 (%)
			Median grain size		Sorting of sediments ($\sigma\phi$)			
			Md50 (ϕ)	D (mm)				
Hira-shoal	0-5	2	1.4	389.3	0.6	0.1	1.0	
	5-10	2	1.3	398.1	0.7	0.1	1.1	
	10-15	2	1.4	391.7	0.7	0.2	1.1	
	15-20	2	1.4	380.0	0.6	0.1	1.1	
Naka-shoal	0-5	1	1.3	400.5	0.9	0.1	1.0	
	5-10	1	0.1	957.2	1.7	0.1	0.9	
	10-15	1	0.8	556.7	1.0	0.1	1.1	
Yoko-shoal	0-5	2	0.9	517.9	0.8	0.2	0.8	
	5-10	2	0.6	682.9	1.3	0.2	1.1	
	10-15	2	0.8	569.5	1.2	0.3	1.2	
Osono-shoal deep	0-5	1	1.4	369.6	0.4	0.6	0.9	
	5-10	1	1.5	365.0	0.5	0.3	0.9	
	10-15	1	1.5	365.4	0.4	0.1	0.9	
	15-20	1	1.5	365.0	0.4	0.3	0.8	
Osono-shoal shallow	0-5	1	1.5	358.9	0.4	0.1	0.9	
	5-10	1	1.5	355.3	0.4	0.1	0.9	
	10-15	1	1.5	354.2	0.4	0.1	0.9	
	15-20	1	1.5	353.6	0.4	0.1	1.0	

最後に、本研究の実施にあたり、多大なご協力をいただいた潜水士の高砂一義氏、香川県水産試験場調査船「やくり」の船長および乗組員の皆様に感謝の意を表します。

本研究は香川県資源管理協議会事業の一環で実施された。

文 献

- 香川農林水産統計協会：1993-2006, 香川水産統計年報 39次～52次, 香川.
- 香川農林水産統計協会：2007-2011, 香川農林水産統計年報 第53次～56次, 香川.
- 中国四国農政局統計部：2012-2018, 香川農林水産統計年報 平成22年～28年, 香川.
- 瀬戸内海環境保全協会：2018, 平成30年度瀬戸内海の環境保全資料集, pp.2.
- 小阪敦夫：1985, 瀬戸内海の環境. 恒星社厚生閣, 東京, pp.62.
- 橋本俊也・山本民次・多田邦尚・松田治・永末寿宏：1997, 瀬戸内海の一次生産と海洋構造. 沿岸海洋研究, **35**, 109-114.
- 武岡英隆：1985, 瀬戸内海の密度成層. 海と空, **60**, 45-152.
- 反田 實・岡本繁好：1992, 瀬戸内海東部海域におけるイカナゴの資源変動—生態的視点から—. 水産海洋研究, **56**, 201-205.
- 井上 明：1950, イカナゴ *Ammodytes personatus* の生態に就いて (第1報). 日水誌, **15**, 458-468.
- 浜田尚雄：1985, 我が国におけるイカナゴの生態と漁業資源, 水産研究叢書, 36, 日本水産資源保護協会, 東京, 1-82.
- 柳橋茂昭・船越茂雄・向井良吉・中村元彦：1997, 伊勢湾産イカナゴの夏眠期における生き残り成熟, 産卵機構. 愛知水試研報, **4**, 23-31.
- 山本昌幸：2003, 瀬戸内海中央部の備讃瀬戸における水温と塩分の長期変動. 水産海洋研究, **67**, 163-167.
- 赤井紀子・内海範子：2012, 瀬戸内海産イカナゴの死亡と再生産に及ぼす夏眠期における高水温飼育の影響. 日水誌, **78**, 399-404.
- 赤井紀子・岡本繁好：2019, 瀬戸内海産イカナゴ1歳魚以上の死亡に及ぼす夏眠期における水温の影響. 香水試研報, **18**, 1-4.

- 15) 原潔：1986, 備讃瀬戸海域の交通状況について. 航海, **88**, 75-80.
- 16) 反田 實：1998, 内海漁場—イカナゴと底質. 沿岸の環境圏 (平野敏行編), フジテクノシステム, 東京, 348-355.
- 17) 海上保安庁水路部：2013, 備讃瀬戸東部. 日本水路協会, 航海用海図W137A.
- 18) 環境省水環境部閉鎖性海域対策室：2002, 瀬戸内海における海砂利採取とその環境への影響 (瀬戸内海海砂利採取環境影響評価調査最終とりまとめ), 1-75.
- 19) 日本海洋学会：1986, 沿岸環境調査マニュアル (底質・生物篇) (日本海洋学会編), 恒星社厚生閣, 東京, 1-266.
- 20) Inman DL: 1952, Measures for describing the size distribution of sediments. J Sediment Petrol, **22**, 125-145.
- 21) Wentworth CK: 1922, A scale of grade and class terms for clastic sediments. J Geol, **30**, 377-392.
- 22) 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, **37**, 213-219.

要 旨

夏眠期の高水温はイカナゴの生残および再生産に悪影響を及ぼすことが知られているが、夏眠中のイカナゴは砂中で生息するため、水温と砂中温度における差異の有無を確認する必要がある。そこで、備讃瀬戸の4か所の夏眠場 (水深15 m~29 m) において、2017年から2019年の夏期に潜水により海底直上水温と砂中温度の関係を調べるとともに柱状採泥による底質調査を実施した。砂中温度と底質性状との関係は明らかではなかったが、砂中深度および水深が深くなるほど、海底直上水温と砂中温度の差は大きくなる傾向にあった。イカナゴが夏眠期に潜っている深さ10 cm付近の底質温度は、海底直上水温との差異が 0°C ~ -0.4°C の範囲にあり、周年混合域である備讃瀬戸では、イカナゴが夏眠時に経験する水温は海水温とほぼ一致すると考えられた。