

湖沼とその流入河川における絶滅危惧種ジュズカケハゼの 底生期稚魚の生息場所利用

小熊進之介^{1), 3) *}・金子誠也¹⁾・木村将士¹⁾・神成田優花¹⁾・原田慈雄²⁾・加納光樹¹⁾

Habitat use by benthic juveniles of the threatened goby *Gymnogobius castaneus* in Lake Hinuma and inflowing rivers, eastern Japan

Shinnosuke OGUMA^{1)3) *}, Seiya KANEKO¹⁾, Masashi KIMURA¹⁾, Yuka KAMINARITA¹⁾,
Shigeo HARADA²⁾ and Kouki KANOU¹⁾

Abstract: Habitat use by benthic juveniles of the threatened goby *Gymnogobius castaneus* was investigated at 94 sites in a brackish water body, Lake Hinuma, and eight inflowing rivers from June to July 2021, following the recruitment period of the species. During the study period, the goby occurred in the lower river reaches and around the river mouths, but rarely in the lake. A generalized linear mixed model based on presence/absence data of benthic juveniles with seven environmental variables at each site revealed that lower salinity, higher reed density and muddy to sandy substrate were the most significant determinants for the presence of benthic juveniles. Such environmental features should be maintained for the conservation of juvenile habitat for the species.

Keywords: Brackish water lake, Conservation, Emergent vegetation, Juvenile goby

1. はじめに

ジュズカケハゼ *Gymnogobius castaneus* (O'SHAUGHNESSY, 1875) は北海道、青森県から兵

庫県の日本海側、青森県から神奈川県太平洋側、サハリン、ウルップ島に分布し、平野部の自然湖沼やその周辺の水路、ため池、濠、河川下流域、

1) 〒 311-2402 茨城県潮来市大生 1375 茨城大学地球・地域環境共創機構水圏環境フィールドステーション

Water Environmental Field Station, Global and Local Environment Co-creation Institute, Ibaraki University, 1375 Ohu, Itako, Ibaraki 311-2402, Japan

2) 〒 649-3503 和歌山県東牟婁郡串本町串本 1557-20 和歌山県水産試験場
Wakayama Prefectural Fisheries Experimental

Station, 1557-20 Kushimoto, Kushimoto-cho, Higashimuro, Wakayama 649-3503, Japan

3) 〒 311-1203 茨城県ひたちなか市平磯町三ツ塚 3551-8 茨城県水産試験場

Ibaraki Prefectural Fisheries Research Institute, 3551-8 Mitsuzuka, Hiraiso, Hitachinaka, Ibaraki 311-1203, Japan

* Corresponding author:

Email: oguma0306@gmail.com

塩性湿地などに生息する小型のハゼ科魚類である(向井ほか, 2010; 明仁ほか, 2013; KANEKO *et al.*, 2019a, 2020; OGUMA *et al.*, 2022)。近年、霞ヶ浦や八郎潟、伊豆沼・内沼などでは本種の個体数が減少傾向にあり(藤本ほか, 2008; 富永ほか, 2013; 杉山, 2016), これにはオオクチバス *Micropterus nigricans* やチャネルキャットフィッシュ *Ictalurus punctatus* といった魚食性外来種の侵入のほか(環境省自然環境局野生生物課, 2004; 中井, 2004; 藤本ほか, 2008; 向井ほか, 2010; MATSUZAKI *et al.*, 2011; YASUNO *et al.*, 2012; 富永ほか, 2013), 埋立て・干拓, 護岸整備などによる生息環境の劣化が関わっている可能性もある(向井, 2015; 金子・加納, 2016)。そのため, 環境省や青森県・宮城県のレッドリストで準絶滅危惧に(青森県環境生活部自然保護課, 2020; 環境省自然環境局野生生物課, 2020; 宮城県環境生活部自然保護課, 2023), 福島県のレッドリストで絶滅危惧IB類に(福島県生活環境部自然保護課, 2023), 茨城県のレッドリストで絶滅危惧II類に(茨城県生活環境部環境政策課, 2016), 千葉県のレッドリストで重要保護生物に選定されている(千葉県環境生活部自然保護課, 2019)。このような危機的状况にも関わらず, 本種の保全に関わる活動としては魚食性外来種の防除事例しか認められず(中井, 2004), 適切な生息環境の保全方策の検討が急務となっている。

ジュズカケハゼの生態・生活史については, これまでに霞ヶ浦および飼育下での産卵生態(水資源開発公団・資源科学研究所, 1971; 中村, 1986), 諏訪湖での性成熟(熊川, 2001), 霞ヶ浦や涸沼における季節的出現や成長および食性(水資源開発公団・資源科学研究所, 1971; KANEKO *et al.*, 2016, 2019a, 2020; USUI *et al.*, 2018; OGUMA *et al.*, 2022), 達古武沼とその周辺河川での分布特性(針生ほか, 2007)が報告されている。しかしながら, 本種の発育初期の生態については未解明な点が多く, 自然環境下では涸沼の塩性湿地において稚魚が湿地前縁よりも相対的に塩分が低いクリーク内部で多く出現することや, 初夏までに浮遊生活から底生生活への移行(以下, 「着底」と記す)を終

え, 着底後はユスリカ類幼虫などを主に摂餌することが明らかにされているのみである(OGUMA *et al.*, 2022)。本種は低塩分水域から淡水域までの塩分環境に生息することが知られているが(原田, 2008, 2016; OGUMA *et al.*, 2022), これまでに本種の稚魚について多様な塩分環境を有する汽水湖やその流入河川において広域的に生息状況調査を実施し, どのような環境によく出現するのかを把握した事例はない。そのため, 優先的に保全すべき生息環境もよくわかっていない。

そこで本研究では, 絶滅危惧種ジュズカケハゼの生息地保全に関する基礎情報を得るため, 関東地方において本種の個体群が存続している涸沼とその流入河川下流域において本種の底生期稚魚の生息分布状況と環境変量や餌生物量との関係について調査を行い, 本種の底生期稚魚がどのような生息環境をよく利用しているのかについて明らかにした。

2. 材料と方法

2.1 調査地点の設定

茨城県中東部に位置する涸沼(Fig. 1)は, 関東地方に唯一残された天然の汽水湖(面積約9.35 km², 平均水深2.1 m, 最大水深約6.5 m)である。近年では生物多様性保全の観点から重要な水域として認識されており, 2014年に国指定の涸沼鳥獣保護区涸沼特別保護地区に指定され, 2015年にラムサール条約湿地に登録された。これまでに国内では霞ヶ浦や八郎潟といった汽水湖が下流側への水門や河口堰の設置に伴って淡水化されてきたが(二平, 2006; 杉山, 2016), 涸沼については東側の出口から下涸沼川と那珂川を経て太平洋に注ぐまでの約10 km区間にそのような河川横断工作物が設置されておらず, 現在も潮汐作用に伴う沿岸海域との自由な水交換が維持されている(猿渡ほか, 2006)。涸沼本湖の潮位差は, 平均で約30 cm, 最大で約50 cmである(今村・堀, 1964; 宇多ほか, 2007)。涸沼本湖の塩分は東西方向に異なる傾向があり, 東側は相対的に海域に近いいため塩分が高いのに対し, 西側では河川水の影響で塩分が低い傾向にある(阿須間ほか, 1998)。涸沼に

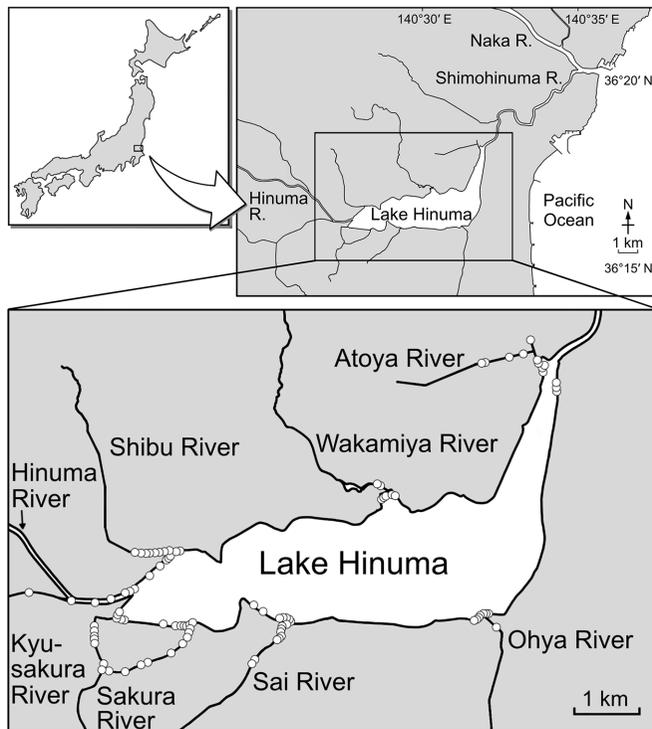


Fig. 1 Map showing 94 sampling sites (*open circles*) in Lake Hinuma and adjacent rivers, Ibaraki Prefecture, eastern Japan.

は後谷川、大谷川、若宮川、渋川、澗沼川、旧桜川、桜川、才川の8本の河川が流入している (Fig. 1)。これらの河川のうち後谷川と澗沼川の河口付近で2011-2015年に (KANeko *et al.*, 2019a, 2020; OGUMA *et al.*, 2022), また、大谷川、若宮川、渋川、澗沼川、旧桜川、桜川の下流域で2019-2020年にジュズカケハゼの生息が確認されている (木村将士, 未発表)。本研究では流入河川とその周辺水域での広域的な本種の生息分布状況を把握するため、澗沼のすべての流入河川計8河川の下流域に64地点、流入河川河口周辺の本湖湖岸の浅所に30地点の計94地点を調査地点に設定した (Fig. 1)。各河川の下流域から本湖にかけての調査地点では、岸際に抽水植物のヨシ *Phragmites australis* が繁茂していることが多く、底質は主に泥質から砂質であった。

2.2 稚魚の生息分布調査

ジュズカケハゼの底生期稚魚の生息分布状況を調べるために、2021年6月5日から7月15日にかけての日中の満潮時の前後2時間に採集調査を行った。なお、調査期間を6月上旬以降に設定したのは、澗沼の塩性湿地において5月中に本種の着底が終了すること (OGUMA *et al.*, 2022) が把握されていたためである。各地点の岸沿い20mの区画において、2名がタモ網 (開口部の幅35cm × 高さ35cm, 深さ45cm, 目合1mm) を用いて約20分間の採集を実施した。調査区画を踏査しながら、主に植物の根元付近、泥底、砂底といった基質域を足で攪拌し、設置したタモ網に足で流し入れるようにして採集した。採集された本種の稚魚については、原則として現地で塩垣・道津 (2014) と小熊ほか (2020) に従って種同定を行い、デジタルノギスを用いて体長を0.1mmの精度で

計測した後、採集地点に放流した。本種稚魚の発育段階区分についてはKANOU *et al.* (2004)を参考とし、採集直後の観察で水底への定位が認められ、体側の鞍状斑紋や第1背鰭、第2背鰭および臀鰭の黑色素胞の分布が成魚とほぼ同様になる体長14.3 mm以上の稚魚(小熊ほか, 2020)を底生期稚魚として扱った。なお、これまでに涸沼では、ジュズカケハゼの近縁種で形態も類似しているピリング *Gymnogobius breunigii*の生息も確認されていることから(猿渡ほか, 2006;金子ほか, 2011)、現地での同定が困難な個体については、氷冷後に10%ホルマリン溶液で固定し、研究室に持ち帰り実体顕微鏡下で明仁ほか(2013)と小熊ほか(2020)に従って頭部感覚管の開孔パターンを確認し同定した。

2.3 環境調査

稚魚の採集調査の後に、各地点で水温、塩分、溶存酸素量、流速、水深、泥分、ヨシの生育密度、および底生期稚魚の主要な餌生物であるユスリカ類幼虫(OGUMA *et al.*, 2022)の個体数密度を調べた。水温、塩分、溶存酸素量についてはマルチ水質チェッカーU-52(HORIBA社製)で、流速については電磁流速計VE20(KENEK社製)で、調査区画中央付近の流心部の7割水深において測定した。水深については各地点内で4 m程度の距離をあけた5か所で測量用スタッフを用いて測定し、その平均値を求めた。泥分については、各地点の底土の表層約2 cmから採集した約50 gの試料を山本ほか(2023)に従ってステンレスふるいでふるい分けし、試料全体の乾燥重量に占める泥(粒径63 μm 未満)の重量の割合を求めた。

ヨシの生育密度については、各区画内のヨシ帯前縁に少なくとも5 mの距離をあけて3か所に設置した方形枠(0.5 \times 0.5 m)のなかにあるヨシの茎の本数を計数し、その平均値を求めた。ユスリカ類幼虫については、直径5.5 cmの円筒形コアサンプラーを岸沿いの底土の表面から深さ10 cmまで挿入し採取した底質を、現場で目合0.25 mmのステンレスふるいでふるうことで採集し、5%中性ホルマリン溶液で固定してから持

ち帰った。研究室では実体顕微鏡下でユスリカ類幼虫の個体数を計数し、200 cm^3 あたりの個体数を算出した。

2.4 統計解析

調査地点間で岸線の形状や水深、底質などが異なり、底生期稚魚の採集努力量は必ずしも均一とはいえないことから、稚魚の個体数密度ではなく、出現の有無を統計解析の対象とした。本種の底生期稚魚の分布に影響を及ぼす環境要因を明らかにするために、統計パッケージR ver. 4.0.3(R CORE TEAM, 2020)を用いて、一般化線形混合モデル(GLMM)による解析を実施した。大畑ほか(2012)と林ほか(2013)を参考にして、各調査地点における底生期稚魚の出現または非出現(1/0)を目的変数とし、各環境変量を説明変数とした。空間自己相関の影響を考慮し、各河川と本湖を変量効果とした。目的変数が1/0であることから、分布族には二項分布を、link関数にはlogitを用いた。説明変数間の強い相関によって多重共線性の問題が生じるのを避けるため、GLMM解析を行う前に各環境変量間でスピアマンの順位相関係数を算出したところ、流速と水深もしくは流速と水温で相関係数の絶対値が0.5以上の強い相関がみられた。流速については、本種が河川だけでなく湖沼やため池、濠といった止水的な環境にも生息することから(中井, 2004;向井ほか, 2010;明仁ほか, 2013)、説明変数から除外し、本種の分布により影響を及ぼす可能性がある水温と水深を説明変数に残した。底質はカテゴリカル変数として扱い、泥分に基づいて3段階[a:砂質(泥分5%未満,残りは砂分),b:砂泥質(泥分5-35%,残りは砂分),c:泥質(泥分35%以上,残りは砂分)]に区分し、aを基準とした場合のb,cの選択性を調べた。RパッケージMuMInのdredge関数を用いて、NullモデルからFullモデルまでの全モデルにおいて赤池情報量基準(AIC)を算出し、AICの最も低いモデルをベストモデルとした。GLMM解析で底生期稚魚の出現・非出現に影響を及ぼすとみなされた各環境変量については、稚魚の出現・非出現地点間での差異を Mann-

Table 1. Mean value \pm standard error of environmental variables at each sampling site in Lake Hinuma and adjacent rivers

Site	Water temperature (°C)	Salinity	Dissolved oxygen (mg/L)	Current velocity (cm/s)	Water depth (cm)	Mud content (%)	Reed density (/0.25 m ²)	Chironomid larvae (Individuals /200 cm ³)
Atoya River	23.5 \pm 0.5	2.8 \pm 0.9	6.7 \pm 0.8	5.4 \pm 1.5	47.8 \pm 8.0	26.2 \pm 6.9	41.0 \pm 12.4	0.5 \pm 0.4
Ohya River	21.8 \pm 0.9	1.6 \pm 1.0	8.8 \pm 0.7	3.8 \pm 1.9	59.1 \pm 7.4	4.5 \pm 2.0	19.6 \pm 8.0	0.2 \pm 0.2
Wakamiya River	23.1 \pm 1.1	0.4 \pm 0.2	9.4 \pm 0.5	0.1 \pm 0.0	50.4 \pm 11.2	11.1 \pm 6.9	35.4 \pm 17.7	0.1 \pm 0.1
Shibu River	25.4 \pm 0.4	0.6 \pm 0.3	10.4 \pm 0.5	8.7 \pm 3.9	29.9 \pm 3.6	7.4 \pm 3.0	13.9 \pm 7.4	0.6 \pm 0.4
Hinuma River	26.8 \pm 1.2	0.2 \pm 0.0	8.5 \pm 1.1	0.4 \pm 0.2	58.5 \pm 10.7	19.1 \pm 7.0	22.3 \pm 9.7	1.1 \pm 0.4
Kyusakura River	22.8 \pm 0.6	0.4 \pm 0.1	7.4 \pm 1.0	1.0 \pm 0.7	63.1 \pm 6.0	46.9 \pm 9.2	44.2 \pm 14.1	0.8 \pm 0.3
Sakura River	22.5 \pm 0.7	1.2 \pm 0.6	11.7 \pm 0.6	9.6 \pm 2.5	30.7 \pm 3.3	9.3 \pm 2.0	12.3 \pm 3.9	3.7 \pm 1.1
Sai River	20.6 \pm 0.3	0.8 \pm 0.4	10.7 \pm 0.4	9.8 \pm 2.7	37.2 \pm 6.6	8.3 \pm 2.6	15.8 \pm 4.6	2.8 \pm 1.0
Lake Hinuma	27.4 \pm 0.6	2.9 \pm 0.7	10.7 \pm 0.3	0.1 \pm 0.0	60.0 \pm 2.9	10.7 \pm 2.8	24.5 \pm 6.1	0.0 \pm 0.0

Whitney's *U*-test で調べた。

3. 結果

3.1 各調査地の環境変量

調査期間中の各河川および涸沼本湖における水温、塩分、溶存酸素量、流速、水深、泥分、ヨシの生育密度、ユスリカ類幼虫の個体数密度の平均値 \pm 標準誤差を Table 1 に示した。水温の平均値は渋川、涸沼川、本湖では 25°C 以上であったが、他の河川では 20.6–23.5°C とやや低かった。塩分の平均値は涸沼の東側にある後谷川と大谷川および本湖では 1.6–2.9 と比較的高かったが、他の河川では 0.2–1.2 と低かった。溶存酸素量の平均値は 6.7–11.7 mg/L で推移した。流速の平均値は渋川、桜川、才川では 8.7–9.8 cm/s とやや速かったが、涸沼川と旧桜川では 0.4–1.0 cm/s と遅かった。水深の平均値は渋川、桜川、才川では 29.9–37.2 cm と浅かったが、旧桜川と本湖では 60.0–63.1 cm と深かった。底質については、河川と本湖ともに砂泥質から泥質の地点が概ね半数程度を占めていた。ヨシの生育密度の平均値は後谷川、若宮川、旧桜川で 35.4–44.2 本 /0.25 m² と高く、他の河川と本湖では 25 本 /0.25 m² 未満であった。ユスリカ類幼虫の個体数密度の平均値は、桜川と才川で 2.8–3.7 個体 /200 cm³ とやや高く、若宮川と本湖では 0.0–0.1 個体 /200 cm³ と低かった。

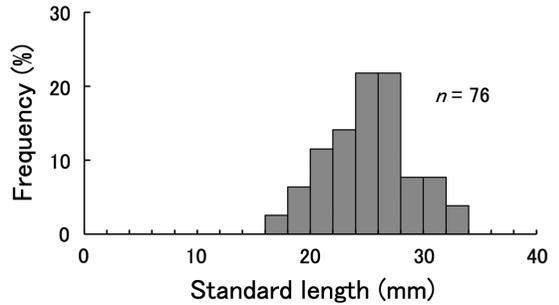


Fig. 2 Size-frequency distribution of benthic juvenile *Gymnogobius castaneus* collected in Lake Hinuma and adjacent rivers from 5th June to 15th July 2021.

3.2 底生期稚魚の生息分布状況

採集されたジュズカケハゼの底生期稚魚は計 76 個体 (体長 16.6–33.8 mm) で、体長のモードは 24–28 mm に認められた (Fig. 2)。底生期稚魚は 94 地点のうち 26 地点 (27.7%) で確認され、流入河川の河口付近からその上流約 500 m までの区間でよくみられた (Fig. 3)。ヨシが生育している地点では、稚魚は常にヨシの根元付近で採集された。涸沼の西側に流入する渋川、旧桜川、桜川では出現地点が多かった。その一方で、東側に流入する後谷川や本湖では出現地点が少なく、大谷川と若宮川では全く採集されなかった。

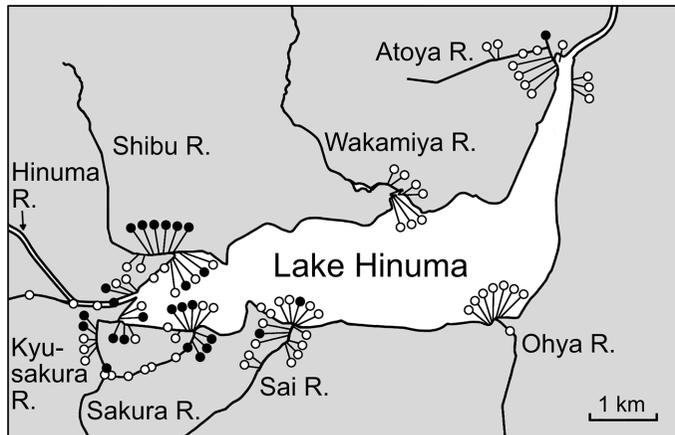


Fig. 3 Map showing all sites where benthic juvenile *Gymnogobius castaneus* were present (solid circles) or absent (open circles) in Lake Hinuma and adjacent rivers.

Table 2. Information-theory statistics and coefficients for the top five models explaining presence/absence of benthic juvenile *Gymnogobius castaneus*

Model	AIC	Δ AIC	Weight	Estimate (<i>Z</i> value)							
				Intercept	Water temperature	Salinity	Dissolved oxygen	Water depth	Sediment type	Reed density	Chironomid larvae
1	106.48	0.00	0.057	-1.799 (-2.647)	—	-0.320 (-1.706)	—	—	b, c	0.017 (1.777)	—
2	107.14	0.66	0.041	-1.065 (-2.182)	—	-0.321 (-1.763)	—	—	—	0.015 (1.643)	—
3	107.21	0.73	0.039	-1.018 (-1.122)	—	-0.310 (-1.675)	—	-0.017 (-1.138)	b, c	0.016 (1.766)	—
4	107.76	1.28	0.030	-1.380 (-2.365)	—	-0.228 (-1.452)	—	—	b, c	—	—
5	107.91	1.43	0.028	-0.746 (-1.779)	—	-0.250 (-1.520)	—	—	—	—	—
Null	109.10	2.62	0.015	-1.035 (-2.409)	—	—	—	—	—	—	—
Total number of selections by top five models; <i>n</i>					0	5	0	1	3	3	0

Sediment types: a, sandy bottom; b, sandy mud bottom; c, muddy bottom.

3.3 稚魚の出現・非出現と環境変量との関係

AIC が最も低かったベストモデルでは、塩分、ヨシの生育密度、底質が選択された (Table 2)。上位 5 モデル中での選択回数は、塩分が 5 回、ヨシの生育密度が 3 回、底質が 3 回であった。回帰係数については塩分で負の値、ヨシの生育密度で

正の値、底質は砂泥質と泥質で正の値であり、*Z* 値はいずれも比較的大きい値を示した (Tables 1, 3)。一方、水温、溶存酸素量、ユスリカ類幼虫の個体数密度は上位モデルの中では全く選択されず、水深は選択回数が 1 回のみであった。

GLMM 解析での選択回数が多かった 3 変量のそれぞれについて底生期稚魚の出現地点と非出現

Table 3. Information-theory statistics and coefficients for the top five models explaining presence/absence of benthic juvenile *Gymnogobius castaneus* among sediment types

Model	Estimate (Z value)		
	Sandy bottom	Sandy mud bottom	Muddy bottom
1	-1.799 (-2.647)	0.757 (1.240)	1.701 (2.048)
2	-	-	-
3	-1.018 (-1.122)	0.715 (1.169)	1.806 (2.184)
4	-1.380 (-2.365)	0.732 (1.235)	1.529 (1.943)
5	-	-	-

See text for the classification of sediment types.

地点の間で比較した (Fig. 4)。塩分については出現地点で 0.1-5.9 (中央値は 0.2), 非出現地点で 0.2-13.1 (0.3) で変動し, 中央値は出現地点の方がわずかに低く (Mann-Whitney's *U*-test, $Z = -2.23, P < 0.05$), また, 底質についても出現地点 (砂底が約 31%, 砂泥底が約 42%, 泥底が約 27%) で非出現地点 (砂底が約 51%, 砂泥底が約 37%, 泥底が約 12%) よりも泥底から砂泥底の地点の頻度が高かった (Mann-Whitney's *U*-test, $Z = 2.04, P < 0.05$)。ヨシの生育密度については出現地点で 0-124.0 本/0.25 m² (中央値は 25.2 本/0.25 m²), 非出現地点で 0-126.0 本/0.25 m² (4.3 本/0.25 m²) であり, 中央値は出現地点で高い傾向にあるものの, 出現地点と非出現地点で有意な差は検出されなかった (Mann-Whitney's *U*-test, $Z = 1.46, P = 0.14$)。

4. 考察

ジュズカケハゼの底生期稚魚の出現・非出現と 7つの環境変量に基づいて GLMM 解析を実施したところ, 塩分, ヨシの生育密度, 底質がベストモデルで選択された。これらのうち, ΔAIC が 2 未満の上位 5 モデルでの選択回数は, 塩分が 5 回と最も多く, 次いでヨシの生育密度と底質が 3 回で, 回帰係数については塩分で負の値, ヨシの生育密度で正の値, 底質で砂泥質と泥質が正の値であった。したがって, 本種の底生期稚魚は塩分が

低く, ヨシが繁茂し, 泥底から砂泥底の場所によく出現すると考えられる。これら 3 要因のうち, 本種の底生期稚魚が低塩分環境でよく出現することについては, 低塩分を嗜好する, もしくは, 高塩分では生残できない可能性が考えられる。調査期間中の涸沼とその流入河川において, 底生期稚魚は低塩分の流入河川の河口付近から上流約 500 m までの区間に主に出現し (出現地点の塩分の範囲は 0.1-5.9 だが, 中央値は 0.2 とわずかに塩分を含む程度), 相対的に塩分が高い本湖や一部の流入河川の河口付近にはほとんど出現しなかった。本種は霞ヶ浦を含む利根川下流域一帯では淡水域から塩分 2 未満の低塩分環境に主に生息するとされ (資源科学研究所, 1968; 中村, 1986), 涸沼の塩性湿地では低塩分のクリーク内に多いことが報告されているが (OGUMA *et al.*, 2022), 本研究においても低塩分 (最大でも 6 程度) が本種の底生期稚魚の生息に影響を及ぼす環境要因であるとみなされた。涸沼本湖では塩分が東側よりも西側で相対的に低いとされており (阿須間ほか, 1998), 本調査期間中にも涸沼本湖で同様な塩分傾斜が認められたことに加えて, 涸沼の西側の流入河川とその河口付近の低塩分水域において本種の底生期稚魚がよく出現する傾向がみられた。このように生息範囲が低塩分の水域に限定される傾向については, 少なくとも国内の汽水性ウキゴリ属 10 種では本種とシンジコハゼ *G. taranetzi* 以外には知

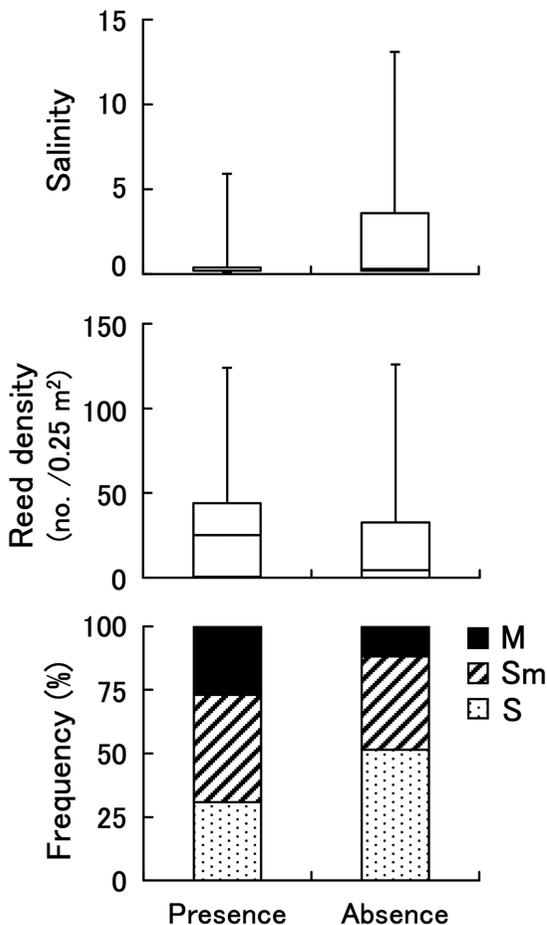


Fig. 4 Comparison of each environmental variable (salinity, reed density and frequency of main sediment types) between presence/absence of juvenile *Gymnogobius castaneus* collected at all sampling sites during the study. Box plots of salinity and reed density represent 25%, median and 75% values; vertical lines indicate minimum and maximum values. Sediment types: M, mud substrate; Sm, sandy mud substrate; S, sand substrate.

られていない (横尾ほか, 2009; 原田, 2016)。那珂川水系に分布するジュズカケハゼの近縁種2種のうち、ムサシノジュズカケハゼ *Gymnogobius* sp. 1 については純淡水魚であり、淡水域でしか採集記録はない (SHINOZAKI *et al.*, 2006)。また、

ピリングについては汽水魚で、潟沼では過去に採集記録はあるものの (猿渡ほか, 2006; 金子ほか, 2011)、近年の調査では生息が確認されていないため (KANeko *et al.*, 2020)、同じ水系内での比較は困難だが、東京湾やその流入河川の河口域浅所ではより高塩分の水域 (平均塩分 8.9–18.3) で優占的に出現することが報告されている (例えば、村井ほか, 2016; KANOU *et al.*, 2018)。したがって、これまでに指摘されてきたように (原田, 2008, 2016)、本研究においてもジュズカケハゼの選好性は、純淡水魚のムサシノジュズカケハゼと汽水魚のピリングの間に位置するといえる。なお、河川中流域から内湾にかけての塩分傾斜については、ウキゴリ属魚類の初期生活史の差異や生息空間の資源分割などに部分的に関与している可能性が示唆されている (原田, 2016; INUI *et al.*, 2018)。

ヨシの生育密度が高い場所で稚魚がよく出現したことについては、ヨシの茎や根などによって形成される複雑な立体構造と関係している可能性がある。本研究の出現地点のうちヨシが生育している場所では、本種の底生期稚魚が常にヨシの根元付近で採集された。ヨシの茎や根などの植物体構造やヨシが生育することで形成される微地形は、一部の小型魚類にとって隠れ家や捕食者からの避難場として機能している可能性が示唆されている (碓井ほか, 2014, 2015; 百成ほか, 2016; WHITFIELD, 2017; KANEKO *et al.*, 2019b)。魚食魚による影響を受けやすいジュズカケハゼ (中井, 2004; 向井ほか, 2010; 富永ほか, 2013; 小粥ほか, 2023) についても、ヨシ帯の複雑な構造が避難場として役立っている可能性がある。さらに、ヨシなどの抽水植物があることによって流れが緩やかになるため (鈴木, 1998)、そのような場所を本種の底生期稚魚が利用している可能性もある。

泥底や砂泥底の地点で本種の底生期稚魚がよく出現したことについては、本種の産卵生態から部分的に説明することができる。本種については雄が泥底に掘った巣穴で雌が産卵する習性が確認されており (水資源開発公団・資源科学研究所, 1971; 中村, 1986)、潟沼の塩性湿地では冬季 (産

卵期)に本種の成魚が泥分の高いクリーク内のみ
に出現し、そこで産卵している可能性が示唆され
ている (OGUMA *et al.*, 2022)。したがって、泥底
の産卵場所で孵化した後、浮遊生活を経て着底す
るまでにあまり分散しなかった可能性がある。これ
とは別に、泥分が高い場所は、先述したように
流れがゆるやかな場所でもあるため、そのような
場所を選好していた可能性もある。さらに、涸沼
の塩性湿地クリークでは、低塩分の泥底で本種の
主要な餌生物であるユスリカ類幼虫が多く (KA-
NEKO *et al.*, 2019a)、そのような場所が本種の好適
な餌場となっている可能性もある (OGUMA *et al.*,
2022)。しかしながら、本研究のGLMM 解析の結
果からは、涸沼本湖とその流入河川での広域的な
本種の底生期稚魚の出現・非出現とユスリカ類幼
虫の生息密度との間には明瞭な関係性は見出せな
かった。ただし、餌生物量の多寡については、よ
り狭い範囲での本種の生息密度の多寡や成長に影
響を及ぼしている可能性が否定されたわけではな
く、今後ともさらなる調査が必要である。

本研究の調査地である涸沼はラムサール条約湿
地に登録されており、鳥獣の保護及び管理並びに
狩猟の適正化に関する法律に基づいて、涸沼本湖
および湖岸の一部のヨシ原は特別保護地区に指定
され、埋立てや干拓といった人為的な環境改変が
規制されている。しかしながら、2015年には涸沼
の特別保護地区内のヨシ原において、太陽光発電
事業者によるヨシ刈りが行われた事例もあり (会
田・石井, 2016)、行政や地域団体による監視が強
化されている。一方で、流入河川については、本
湖に面するヨシ原と異なり特別保護地区と同等の
規制を受けないことから、生物の生息環境を保全
するために必要な措置を講じにくい実状がある。
したがって、今後、治水や利水のために流入河川
の改修や護岸化などを計画する場合には、本種の
生息環境に悪影響を及ぼさない方法について、専
門家とも事前に協議し、十分に検討することが求
められる。とくに、底生期稚魚の生息地保全の観
点からは、流入河川内に位置する低塩分で泥底や
砂泥底の場所の抽水植物帯の保全について十分に
留意することが望まれる。

謝辞

本研究の野外調査は、大涸沼漁業協同組合の
方々に同意していただいたうえで、関係法令を遵
守して実施した。採集調査時には、茨城大学地
球・地域環境共創機構水圏環境フィールドステー
ションの浅野泰輝氏、柏谷翔大氏、水木裕翼氏、
渡邊美如々氏にご協力していただいた。本稿の英
文については、Graham S. Hardy氏に校閲してい
ただいた。ここに記して心より御礼申し上げる。

引用文献

- 会田 濟, 石井和浩 (2016) : 関東唯一の汽水湖「涸沼
(ひぬま)」。湿地研究, 6, 93-95.
- 明仁, 坂本勝一, 池田祐二, 藍澤正宏 (2013) : ハゼ亜
目. 日本産魚類検索全種の同定 第3版 (中坊徹
次編). 東海大学出版会, 秦野, p. 1347-1553.
- 青森県環境生活部自然保護課 (2020) : 青森県の希少
な野生生物 青森県レッドデータブック (2020
年版). 青森県, 青森, 397 pp.
- 阿須間幸男, 堀江美紀, 石井 亮, 三浦啓吾, 大嶋和
雄 (1998) : 茨城県涸沼の環境資源. 茨城大学地
域総合研究所年報, (31), 1-21.
- 千葉県環境生活部自然保護課 (2019) : 千葉県の保護
上重要な野生生物 千葉県レッドリスト動物編
2019年改訂版. 千葉県環境生活部自然保護課,
千葉, 40 pp.
- 藤本泰文, 川岸基能, 進東健太郎 (2008) : 伊豆沼・内
沼集水域の魚類相 : 在来魚と外来魚の分布. 伊豆
沼・内沼研究報告, (2), 13-25.
- 福島県生活環境部自然保護課 (2023) : ふくしまレ
ッドリスト 2022年版. 福島県生活環境部自然保
護課, 福島, 61 pp.
- 原田慈雄 (2008) : ハゼ類—ウキゴリ属の多様な生活
史と個体発生の進化. 稚魚学—多様な生理生態
を探る (田中 克, 田川正朋, 中山耕至編), 生物
研究社, 東京, p. 43-51.
- 原田慈雄 (2016) : ハゼ亜目魚類の両側回遊 ウキゴ
リ属魚類の生活史進化. 海洋と生物, (38), 356-
362.
- 針生 勤, 仲島広嗣, 高村典子 (2007) : 達古武沼と周
辺河川における魚類の分布特性と生息状況. 陸
水学雑誌, 68, 157-167.
- 林 浩介, 小山彰彦, 鬼倉徳雄 (2013) : 牛津川近隣の
農業用水路におけるツチフキの産卵環境. 魚類

- 学雑誌, **60**, 141-147.
- 百成 涉, 柴田真生, 加納光樹, 碓井星二, 金子誠也, 佐野光彦 (2016): 茨城県北浦の沖帯から沿岸帯におけるヌマチチブ仔稚魚の生息場所利用と食性. 日本水産学会誌, **82**, 2-11.
- 茨城県生活環境部環境政策課 (2016): 茨城における絶滅のおそれのある野生生物 動物編 2016年改訂版 (茨城県版レッドデータブック). 茨城県生活環境部環境政策課, 水戸, 327 pp.
- 今村泰二, 堀 義彦 (1964): 茨城県潤沼の湖沼学的観測とプランクトンの季節的消長. 茨城大学文学部紀要 (自然科学), (15), 43-59.
- INUI, R., A. KOYAMA and Y. AKAMATSU (2018): Abiotic and biotic factors influence the habitat use of four species of *Gymnogobius* (Gobiidae) in riverine estuaries in the Seto Inland Sea. Ichthyol. Res., **65**, 1-11.
- 金子誠也, 加納光樹 (2016): ジュズカケハゼ. 茨城県における絶滅のおそれのある野生生物 動物編 2016年改訂版 (茨城県版レッドデータブック) (茨城県生活環境部環境政策課編), 茨城県生活環境部環境政策課, 水戸, p. 109.
- KANEKO, S., K. KANOU and M. SANO (2016): Food habits of salt marsh fishes in Lake Hinuma, Ibaraki Prefecture, central Japan. Fish. Sci., **82**, 631-637.
- KANEKO, S., K. KANOU and M. SANO (2019a): Comparison of fish assemblage structures among microhabitats in a salt marsh in Lake Hinuma, eastern Japan. Fish. Sci., **85**, 113-125.
- KANEKO, S., K. KANOU and M. SANO (2019b): Comparison of predation risks for small fishes in salt marsh microhabitats in Lake Hinuma, eastern Japan, using tethering experiments. Fish. Sci., **85**, 457-463.
- KANEKO, S., K. KANOU and M. SANO (2020): Differences in fish assemblage structures between tidal marsh and bare sandy littoral habitats in a brackish water lake, eastern Japan. Ichthyol. Res., **67**, 439-450.
- 金子誠也, 碓井星二, 百成 涉, 加納光樹, 増子勝男, 鎌田洗一 (2011): 標本記録に基づく1960年代の茨城県潤沼の魚類相. 日本生物地理学会会報, **66**, 173-182.
- 環境省自然環境局野生生物課 (2020): 環境省レッドリスト 2020. 環境省ホームページ: <https://www.env.go.jp/press/files/jp/114457.pdf>
- 環境省自然環境局野生生物課 (2004): ブラックバス・ブルーギルが在来生物群集及び生態系に与える影響と対策調査. 自然環境研究センター, 東京, 226 pp.
- KANOU, K., H. KOHNO and M. SANO (2004): Morphological and functional development of characters associated with settlement in the yellowfin goby, *Acanthogobius flavimanus*. Ichthyol. Res., **51**, 213-221.
- KANOU, K., T. YOKOO and H. KOHNO (2018): Spatial variations in tidepool fish assemblages related to environmental variables in the Tama River estuary, Japan. La mer, **56**, 1-10.
- 小粥淳史, 八柳 哲, 神戸 崇, 井上頌子, 荒木仁志 (2023): 環境 DNA メタバーコーディングを用いた北日本の溜池における外来魚の影響評価. 保全生態学研究, J-STAGE 早期公開.
- 熊川真二 (2001): 諏訪湖およびその周辺水域におけるハゼ科魚類の性成熟と諏訪湖における仔稚魚の浮遊行動. 長野県水産試験場研究報告, (5), 25-30.
- MATSUZAKI, S. S., N. TAKAMURA, K. ARAYAMA, A. TOMINAGA, J. IWASAKI and I. WASHITANI (2011): Potential impacts of non-native channel catfish on commercially important species in a Japanese lake, as inferred from long-term monitoring data. Aquatic Conserv. Mar. Freshw. Ecosyst., **21**, 348-358.
- 宮城県環境生活部自然保護課 (2023): 宮城県レッドリスト 2023 (汽水・淡水魚類). 宮城県ホームページ: <https://www.pref.miyagi.jp/documents/24174/kisuisansuikairui.pdf>
- 水資源開発公団, 資源科学研究所 (1971): 霞ヶ浦・北浦水産生物調査報告書. 水資源開発公団, 1-65.
- 向井貴彦, 渋川浩一, 篠崎敏彦, 杉山秀樹, 千葉 悟, 半澤直人 (2010): ジュズカケハゼ種群: 同胞種群とその現状. 魚類学雑誌, **57**, 173-176.
- 向井貴彦 (2015): ジュズカケハゼ広域分布種. レッドデータブック 2014—日本の絶滅のおそれのある野生生物—4 汽水・淡水魚類 (環境省編), ぎょうせい, 東京, p. 354.
- 村井俊太, 村瀬敦宣, 河野 博, 竹山佳奈, 中瀬浩太, 岩上貴弘 (2016): 東京湾の湾奥に再生された干

- 潟と人工海浜（大森ふるさとの浜辺公園）の魚類相. *La mer*, **54**, 11-27.
- 中井克樹 (2004) : ブラックバス等の外来魚による生態的影響. *用水と廃水*, **46**, 48-56.
- 中村 誠 (1986) : ジュズカケハゼの生態に関する研究—1 ジュズカケハゼの初期発生. 茨城県内水面水産試験場研究報告, (23), 13-17.
- 二平 章 (2006) : 霞ヶ浦漁業における物質循環機能の経済評価. 茨城県内水面水産試験場研究報告, (40), 69-77.
- 小熊進之介, 金子誠也, 原田慈雄, 加納光樹 (2020) : 茨城県潤沼の塩性湿地で採集されたジュズカケハゼ仔稚魚の形態発育. *日本生物地理学会会報*, **75**, 25-30.
- OGUMA, S., S. KANEKO and K. KANOU (2022): Seasonal occurrence and food habits of larvae and juveniles of the threatened goby *Gymnogobius castaneus* in a salt marsh in Lake Hinuma, eastern Japan. *Aquacult. Sci.*, **70**, 65-73.
- 大畑剛史, 乾 隆帝, 中島 淳, 大浦晴彦, 鬼倉徳雄 (2012) : 熊本県緑川水系におけるイチモンジタナゴ *Acheilognathus cyanostigma* の分布パターン. *魚類学雑誌*, **59**, 1-9.
- R CORE TEAM (2020): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>
- 猿渡敏郎, 小藤一弥, 田中宏典, 金高卓二, 齋藤伸輔 (2006) : 魚類の生息環境としての汽水湖—茨城県潤沼を例に. 魚類環境生態学入門—溪流から深海まで. 魚と棲みかのインターアクション (猿渡敏郎編), 東海大学出版会, 秦野, p. 74-102.
- 資源科学研究所 (1968) : 利根川河口堰建設事業に伴う水産動物に及ぼす影響予測解析調査. 水資源開発公団, 1-231.
- SHINOZAKI, T., M. HATSUMI, K. WAKAHAMA and A. GOTO (2006): Genetic evidence supporting the existence of two diverged groups in the goby *Gymnogobius castaneus*. *Ichthyol. Res.*, **53**, 82-86.
- 塩垣 優, 道津喜衛 (2014) : ハゼ亜目. 日本産稚魚図鑑 第2版 (沖山宗雄編), 東海大学出版会, 秦野, p. 1215-1218.
- 杉山秀樹 (2016) : 八郎潟の干拓ともなう漁業資源の変遷. *水環境学会誌*, **39** (A), 234-237.
- 鈴木興道 (1998) : 魚の住みやすい川づくりに資する魚類の生息分布とその場の流速. *土木学会論文集*, (593), 21-29.
- 富永 敦, 半澤浩美, 野内孝則, 荒山和則 (2013) : 霞ヶ浦における魚類および甲殻類の現存量の経年変化. *陸水学雑誌*, **74**, 1-14.
- 宇多高明, 見澤正勝, 古川秀一, 今村史子, 城野裕介 (2007) : 湖岸植生帯の再生手法に関する検討. *水工学論文集*, **51**, 1451-1456.
- 碓井星二, 加納光樹, 荒山和則, 佐野光彦 (2015) : 茨城県北浦のヨシ帯における魚類群集構造の季節変化. *日本水産学会誌*, **81**, 964-972.
- 碓井星二, 加納光樹, 佐野光彦 (2014) : 茨城県北浦のヨシ帯と護岸帯での魚類群集構造の比較. *日本水産学会誌*, **80**, 741-752.
- USUI, S., K. KANOU and M. SANO (2018): Food habits of fishes in a freshwater reed belt in Lake Kitora, eastern Japan, in summer. *Fish. Sci.*, **84**, 469-476.
- WHITFIELD, A. K. (2017): The role of seagrass meadows, mangrove forests, salt marshes and reed beds as nursery areas and food sources for fishes in estuaries. *Rev. Fish Biol. Fisheries*, **27**, 75-110.
- 山本天誠, 萩原富司, 諸澤崇裕, 加納光樹 (2023) : 霞ヶ浦の流入河川における外来種オオタナゴの仔魚の生息環境特性. *魚類学雑誌*, **70**, 73-82.
- YASUNO, N., Y. CHIBA, K. SHINDO, Y. FUJIMOTO, T. SHIMADA, S. SHIKANO and E. KIKUCHI (2012): Size-dependent ontogenetic diet shifts to piscivory documented from stable isotope analyses in an introduced population of largemouth bass. *Environ. Biol. Fish.*, **93**, 255-266.
- 横尾俊博, 堀之内正博, 荒西太士 (2009) : 宍道湖および中海において春季に灯火トラップで採集された仔稚魚. *LAGUNA*, (16), 47-52.

Received: November 8, 2023

Accepted: June 19, 2024

2023 年度日仏海洋学会賞

リモートセンシングによる海面高度計測

市川 香

Sea Surface Height Measurements by Remote Sensing Techniques

Kaoru ICHIKAWA

1. はじめに

海洋は、様々な時空間スケールで常に変化している。波浪や潮汐が規則性のある周期的な変化をしているのは陸から見ても分かるし、津波や高潮などは間欠的だが顕著な災害として認識される。海で泳げば、水温や塩分などの海水自身の性質、昼と夜の日内変動と、夏と冬の季節変化が混在していることを感じるだろう。さらに、海に出る機会が多い釣人なら、良漁場が常に同じ場所に出現するわけではなく、場所も時期も変化することを経験的に知っている。このように我々人類は、太古よりさまざまな海洋の変化を経験し、「海洋観測」という概念が発生する以前から、定性的ながら海の変化を認識してきたと思われる。やがて、それらを定量的に記録し、いろいろな時間や空間のスケールの現象が混在していることを理解し、それらを分離し、各々の原因を探り、未来の予測をすることで、海洋学は発展していったと言えるだろう。

なかでも、海に入らずに陸から直接認識できる「海面の高さ」の変化は、陸に住む人類にとって最も明確に把握されてきた現象ではないだろうか。潮の満ち引きや波の高さなどは、陸に住む人間でもかなり定量的に把握することができる。より正確に計測するには、例えば金属製のワイヤーで海面の高さを電気信号として計測するワイヤー式水位計(図1)などを岸壁に設置して、時間とともに海面の高さがどう変化するかを詳細に記録することが可能である。こういった水位計は、波浪や潮位の計測に多く利用されており、上述のワイヤー式の他にも、海底設置の圧力式、上部に固定したセンサーから海面までの距離を計測する超音波式やマイクロ波式、海面に浮かべたフロートまでの距離を紐やレーザーなどで計測するフロート式など、様々なタイプが存在している。

ところが、岸から離れて沖に出ると、この状況は反転する。すなわち、「陸に住む人間にとって定量的に把握しやすかった海面の高さ」は、沖では固定した参照基準がなくなってしまうために、計測が非常に難しくなってしまう。岸壁という動かない基準があってこそ水位計による定量的な計測が可能となっていたが、自分自身が海面とともに変位してしまう船舶からだ、水位計を使って海面の高さを正確に計測ができなくなる。



Fig. 1 ワイヤ式水位計（可搬式）。

もちろん、海底に固定された観測塔（図2）などを用いれば、海岸から離れた場所でも岸壁と同様に水位の計測は可能である。ただし、水深が深い沖合に観測塔を設置するには建設にも資材運搬にも設備運用にも膨大な費用が必要となるため、観測塔の計測が可能なのは、ごく限られた場所と台数に限定されてしまうことになる。

しかし、こうした状況は、1970年代後半以降の衛星リモートセンシング技術の発展によって打開されていく（市川，2014）。1978年に打ち上げられたSEASAT衛星海面高度計は、わずか3ヵ月と短命な衛星だったものの、外洋域であっても人工衛星を使うことで海面の高度を計測することが可能であることを示した（例えば ICHIKAWA and IMAWAKI, 1992）。その後も、衛星海面高度計を搭載した Geosat 衛星や ERS-1 衛星が打ち上げられ



Fig. 2 京都大学防災研究所の観測タワー。田辺湾口の沖合2km地点（水深10m）に固定された塔で、海面に向けて超音波式の水位計測をしている（白浜海象観測所のホームページより）。

たことで、外洋での海面高度の測定精度は向上していき（例えば ICHIKAWA and IMAWAKI, 1996）、1992年の TOPEX/Poseidon 衛星の打ち上げ以降現在に至るまで、35年間以上の長期間にわたって高精度の海面高度計測が持続されるようになった（例えば，FU and CAZENAVE, 2001）。

一方、洋上には参照基準がないという本質的な問題点も、測位システムの大幅な改善によって解決されようとしている。軍事目的で打ち上げられたアメリカの GPS (Global Positioning System) 測位衛星は、1990年代になると民生利用できるようになり、さらに2010年代以降には米国以外のロシアや中国などの測位衛星と併せて GNSS (Global Navigation Satellite System) と呼ばれる衛星測位システムとして利用できるようになった（例えば，GLEASON and GEBRE-EGZIABHER, 2009）。

GNSSを使うと、任意の時刻に任意の場所の測位座標値を求めることができるため、たとえ沖合の海上であっても、陸上と同様に参照座標系を使うことができる（例えば ICHIKAWA *et al.*, 2019）。

衛星海面高度計と GNSS という、衛星リモートセンシング技術を活用したシステムの発展によって、現在の我々は、観測塔がない沖合でも海面高度を高精度に計測できるようになっている。本稿では、まず海面高度がどのような要因で変化するのかを 2 節で説明した後に、リモートセンシングによる海面高度測定の手法について 3 節で解説し、今後の展望とまとめを、各々 4・5 節で述べる。

2. 海面高度の変動要因

流体である海水は、外力を受ければ容易に変形する（例えば、DEPT. EARTH SYS. SC. AND TECH., 2017）。上から押されれば（気圧が高ければ）水位は下がり、上に引かれれば（天体からの起潮力がかかれば）水位は上がる。さらに、海面が横方向に引きずられれば（風が吹けば）、粘性によって海面近くの薄い層（粘性境界層）内に流れが生じて海水が移動し、この流れが空間的に一様でなく周辺から水が集まれば（収束）水位は高くなり、逆に周辺に水が抜ければ（発散）水位は低くなる。例えば、粘性境界層内に岸壁に向かう流れがあったとして、流れは壁を貫通できないためにせき止められ、結果として岸壁で水位が高くなる。発達した低気圧が通過する際に高潮が発生する場合、気圧低下による水位上昇と、風による吹き寄せで生じる水位上昇の両方が効くことがある。

ただし、地球のように回転している系ではコリオリの力が働くため、これが効いてくると、外力と流れと水位変化の関係はもう少し複雑になる。波浪や津波のように短い時間スケールの現象だと地球回転の効果はほとんど無視できるが、ある程度長い時間（中緯度だと数日くらい）継続するような流れの場合には地球回転の効果が効くので、流れに対して直角方向に、流速に比例した大きさのコリオリ力が働く。例えば、突風が吹きはじめた際は風応力によって粘性境界層の海水は風下方向に流されるが、風が長時間吹き続ける場合は、

風で生じた境界層内の流れ（吹送流）もコリオリの効果を受ける。風によって海面に伝えられた応力は、境界層の内部を粘性で下方に減衰しながら伝わるため、吹送流は深さとともに流速と流向が変わる（例えば YOSHIKAWA and MASUDA, 2009）。結果として粘性境界層全体では、風の方向ではなく、風向の直角右向きに（南半球だと左向きに）海水が移動（エクマン輸送）することになる。このため、例えば日本周辺の東向きの風なら南側に境界層内の海水が輸送されるし、西向きの風なら北側に輸送されることになる。父島など太平洋の中央部の海域を考えると、その北側に東向きの偏西風が吹き、南側に西向きの貿易風が吹いているので、海水は南からも北からも北太平洋中央部に向かって輸送されてくるために、結果として境界層内に水が集まり、水位が高くなるのがわかる。

こうして北太平洋の中央部の海面が高くなれば、周辺に対して海面高度の勾配が生じる。海面高度の勾配（つまり圧力傾度）は、地衡流平衡した流れ（地衡流）に働くコリオリ力とバランスするので、北太平洋中央部の海面高度が高い方を常に右に見るような時計回りの地衡流の循環（亜熱帯循環）が生じていることになる。海面高度の勾配は、圧力傾度力とコリオリ力がバランスした定常状態になっているため、その形状のまま長時間維持される。つまり、地衡流平衡していて時間的に変化しにくい海面高度（海面力学高度）の分布を計測すれば、その勾配から地衡流を求めることができる。

海流の計測には流速計や漂流ブイの軌跡が用いられるが、これらの方法は測器の場所のみの特定の時刻の流速しか計測できないため、広域にわたって海流を計測するのが難しい。外洋の海面力学高度の計測が必要とされる最も大きな理由の一つは、海面力学高度分布から広域の海流の計測が可能になるからである。

ところで、上記のような外力による変形とは別に、海水自体の熱膨張によっても海水位は変化する。質量が同じ海水を考えると、水温が高くて（または塩分が低くて）密度が低いほど、大きな体積が必要になる。「単位底面積あたりの質量」が

圧力で、「単位底面積あたりの体積」が高さになるので、これは「圧力が同じなら密度が低いほど海面高度が高い」と言い換えることもできる。さらにこれを2地点間の比較として記述すると、「海面からある水深（水圧）までの水温が高い（または塩分が低い）場所ほど、海面高度が高くなる」と言い換えることもできる。

海面近くの季節躍層くらいの浅い深度に限定すると、上記の熱膨張の話は「海面水温が高いほど海水位が高い」ことになる。これが、いわゆる「地球温暖化による海面水位上昇」の一因である。ちなみに、温暖化による水位上昇にはもう一つ別の要因として、極域や高地の氷が解けて、固体の淡水が液体として海に供給されるために海水の質量が増加するという効果もある。この二つの要因の区別は、海水の質量が増えたか否かで区別することが可能である。つまり、地球の重力分布を計測する米独の衛星 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) ミッションなどによって、地球上の質量分布の時間変化を計測できるので、水として特定の場所に集中していた淡水の質量が融解して海洋に広がったかどうかを調べることができる。最近の研究結果によると、地球温暖化による水位上昇のうち、熱膨張の効果は4割で水の融解の効果が6割程度だと考えられている（例えば THOMPSON *et al.*, 2019）。

多くの海洋では季節躍層の下に主温度躍層があり、そこを境に下層の冷水と上層の暖水という大まかな二層構造をしている。上述のような浅い季節躍層付近ではなく、主温度躍層よりも深部に参照水深を設定した場合、海面高度に反映される海水温の変動は、もっぱら主温度躍層深度の上下に支配される。つまり、主温度躍層が海面方向に上昇すると上層の暖水が薄くなり下層の冷水が厚くなるために、全体としては冷水の効果が反映されて海面水位は低くなる。逆に主温度躍層が深くなれば、上層の暖水が厚くなる効果によって海面高度は上昇する。

厚さ10メートル程度の粘性境界層の厚さの変化が吹送流の収束・発散で生じているのと同様に、主温度躍層の深度変化は、数百メートルの厚さの

上層の流れの収束・発散によって主に生じる。ただし吹送流が非地衡流なのに対して上層の海流はほぼ地衡流（準地衡流）なので、そもそも収束・発散は生じにくい。準地衡流の収束・発散は、流れに絶対渦度（流れ自身の相対渦度と、惑星渦度の和）があるときに生じる。

相対渦度の効果によって、低気圧性の渦では躍層が上昇して上層が薄くなり海面高度が低下し、高気圧性の渦では躍層が下降して上層が厚くなり海面高度が上昇する。ちなみに、惑星渦度の効果（ β 効果）では、北上流がある場所では水位が上がり、南下流のある場所で水位が下がる傾向があるので、北半球の低気圧性渦は西側に南下流があるので海面高度が低下して、東側では北上流のために海面高度は上昇する。逆に高気圧性渦では西側の海面高度は上昇して東側の海面高度が下降するので、高低どちらの渦でも時間とともに中心の位置が西に伝搬していく性質（ロスビー波）を示す（図3）。実際に外洋の海面高度を計測してみると、非常に多くの渦が存在していて、それらの多くが西に進む性質があることが分かる（例えば AOKI *et al.*, 1995; CHELTON *et al.*, 2007）。この渦の位相速度が分かると、時間が経過すると海面高度（および準地衡流）がどのような変化をするのか予測できるので、将来予測に非常に有効である。データ同化手法など数値モデルとの組み合わせにおいて、海面力学高度の入力データが特に有益なのは、この性質が理由である。

3. リモートセンシングによる海面高度計測

リモートセンシングで海面高度を計測する場合でも、図1や図2のような水位計を用いる場合と、計測要素自体はあまり変わらない。すなわち、位置が既知のセンサーから海面までの鉛直距離を計測することで、海面の鉛直位置（高さ）に変換している。岸壁や海底に固定した水位計の場合、センサーの位置が時間変化しないと見なすことで、海面までの距離の計測から容易に海面高度への変換が可能であった。

船舶にセンサーを搭載する場合、海面の変位によってセンサーの位置が変動してしまうため、前

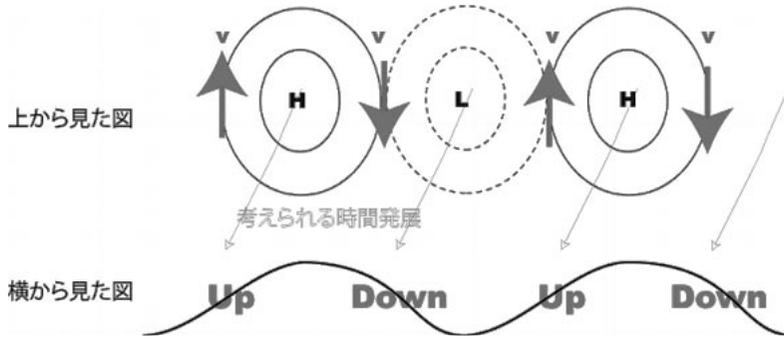


Fig. 3 北半球のロスビー波の伝搬の概略図。高気圧性渦 (H) と低気圧性渦 (L) の周辺に、矢印の向きに準地衡流が流れる。惑星渦度により、北上 (南下) 流では水位が上昇 (下降) するため、時間とともに渦は西側に移動していく。

述の「センサーの位置が既知」という前提が崩れてしまう。例えば、船舶が海面変動に完全に同期する場合、センサーから海面までの距離は一定のままになり、センサーによる水位計測自体の意味がなくなってくる。

一方、人工衛星にセンサーを搭載する場合には、衛星の高度は海面の運動と連動せず独立に求めることができるので、衛星から海面までの距離測定をすることで海面高度を計測することができる。衛星海面高度計の場合、陸上固定局からのレーザー測距や衛星の位置を計測する仏国の DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) システムに基づく衛星軌道計算によって、精密に衛星軌道高度を求めている。衛星の高度は 800~1000 km ほど上空だが、軌道高度は 0.01 m 程度の精度で決定することができる。ただし、衛星海面高度計の黎明期の 1980 年代までは軌道決定誤差が 0.5~1 m 程度あったため、別途処理が必要であった (例えば ICHIKAWA and IMAWAKI, 1992)。現在のように高精度な軌道決定が可能になったのは、軌道計算に必要な地球の重力場の知見が大幅に向上したことと、安定した軌道になるように軌道を高めに設定しているためである。

センサーから海面までの距離は、マイクロ波の脉冲を衛星直下に射出し、海面からの反射波が

衛星に到達するまでの往復時間を計測することで求めている。正確な鉛直距離を求めるために計測を衛星の直下点に限定しているのが、衛星軌道に沿う線状にしか観測点が分布せず、観測できない欠測域が周囲に 75~300 km ほど空いてしまうし、同じ場所を観測できるのが 10~35 日後と間隔が長くなってしまふ。複数個の衛星のデータを組み合わせることで欠測は減らすことができるものの、高々数台の衛星海面高度計群の観測は時空間に密だとは言いがたい。このため、2 節で述べた海面高度の変動要因のうち、時間変化が大きい非地衡流成分については、現象の一部のみを間欠的にしか観測できないことになる。例えば半日周期の潮汐成分である M_2 分潮は、約 10 日に一度の Jason 衛星の観測だと次に観測するのは 19.17 周期経過した状態の潮汐なので、位相が飛び飛びになって、エイリアシングされて約 60 日周期の信号に見えてしまう。このため、潮汐信号を抽出するには、長期間のデータを使った特別な処理が必要になる (YANAGI *et al.*, 1997)。

ところで、衛星海面高度計が計測するのは、マイクロ波パルスが上空から照射する半径 10 km 程度の海域 (フットプリント) の平均水位である。実際の海面には波浪が存在しているので、フットプリント内のマイクロ波の反射を細かく見ると、衛星に最も近い波頂部分での反射が最初に起き

て、最後に衛星から最も遠い波底部分で反射される。つまり、衛星がマイクロ波の反射波を受信し初めてから終わるまでの時間差が、波頂と波底の高度差すなわち波高を示すので、衛星海面高度計は海面高度のみならず波高も計測している。外洋の波高を直接計測することができる測器は少ないため、こうした観測は大変貴重である。ただし、個別の波浪を対象とするには衛星海面高度計観測の時空間分解能は粗すぎるため、波浪統計の解析や波浪モデルの検証に主に利用されている（例えば、ICHIKAWA *et al.*, 2020）。

なお、衛星からの計測時にはフットプリント内のマイクロ波の反射強度が空間一様であることが仮定されている。そもそも衛星海面高度計は、1節で述べたように岸壁付近に限定されていた海面水位計測を外洋でも行うために開発されていたので、マイクロ波の反射強度を決める海況が数十kmにわたって一様であるという仮定は無理なものではない。ただ、多くの船舶や地形や構造物が狭い範囲内に混在する縁辺海などの沿岸域ではこの仮定は現実的ではないため、「衛星海面高度計は外洋に限定して使用するもの」と認識されてきた。しかし、海運・漁業・マリンレジャーなどの分野からは、岸から比較的近い沿岸域でこそ海面高度計データを利用したいという要望が高まるようになる。やがて2010年代ころから欧州を中心にフットプリントのサイズを解析手法で小さくする処理法（リトラッキング）が開発されるようになって、衛星海面高度計の利用は外洋のみでなく沿岸域にまで拡大されるようになった。

こうした沿岸海面高度計のデータを調べると、岸壁の水位計で計測されてきた水位変動と、少し沖合の沿岸域の海面高度変動とが異なる変動をすることがあることも分かってきた。例えば、太平洋とインド洋の間にあるインドネシアのマカッサル海峡周辺の島の潮位計データからは、インド洋と太平洋の季節変動が逆位相で、太平洋が相対的に高い時期はマカッサル海峡を南下するインドネシア通過流が強くなり、逆にインド洋が相対的に高くなると南下流が弱く北上流成分が強化されることが分かっている。これらの関係からは、地球

回転の効果がほぼ効かない赤道周辺において、大洋間をつなぐ海峡内の流れが両端の圧力差によって決められていることが想像される。

ところが、沿岸海面高度計のデータを使って海峡内の水位分布の季節変動成分を調べてみると、この想像が間違っていることがわかった（ICHIKAWA, 2023）。図4は、マカッサル海峡内の点（5° S, 117° E）と周辺海域の海面高度の季節変動成分の相関の分布を示したものだが、インド洋のジャワ島南部に強い正相関、太平洋のミンダナオ島東部に有意な負相関があることが分かり、大洋間の季節変動が逆相関なことが確認できる。しかし、太平洋とマカッサル海峡の間のセルベス海全域や、インド洋とマカッサル海峡の間のジャワ海・フロレス海の南部には相関がないので、マカッサル海峡内と太平洋・インド洋の水位変動は、位相が揃っているが空間的には連続していないことが示唆される。マカッサル海峡内部では、50 m以深の幅が狭くなる3° S付近を挟んで南北間の海面高度の傾斜が大きくなっていて、力学的なバランスを計算すると、この部分の圧力差が海峡内の流速の底摩擦と定量的にバランスしていることが判明した。空間スケールが大きなモンスーンは図4で示した海域全体に吹くので、いろいろな島や浅海域でこの風の吹き寄せ効果が生じ、それぞれは独立した水位変化ではあるが、すべて季節風に起因するために変動の位相が揃う。このように、島の潮位計データだけで想像していた変動の様相と異なる状況が、沿岸海面高度計のデータが利用できることで認識できるようになる。

ところで、船舶などの洋上での水位計測における問題点は「センサーの位置が既知」という条件が満たせないことだと本節の冒頭で説明した。しかし、1節で述べたように、近年GNSS測位の精度が向上しており、海面とともに変動するセンサーの位置そのものを計測できるようになり、この問題を回避できるようになってきた。つまり、衛星海面高度計の軌道高度を計算で求めてきたのと同様に、GNSSを用いてセンサーのプラットフォームの位置を正確に求めることができれば、衛星以外でも海面高度の計測が可能である。

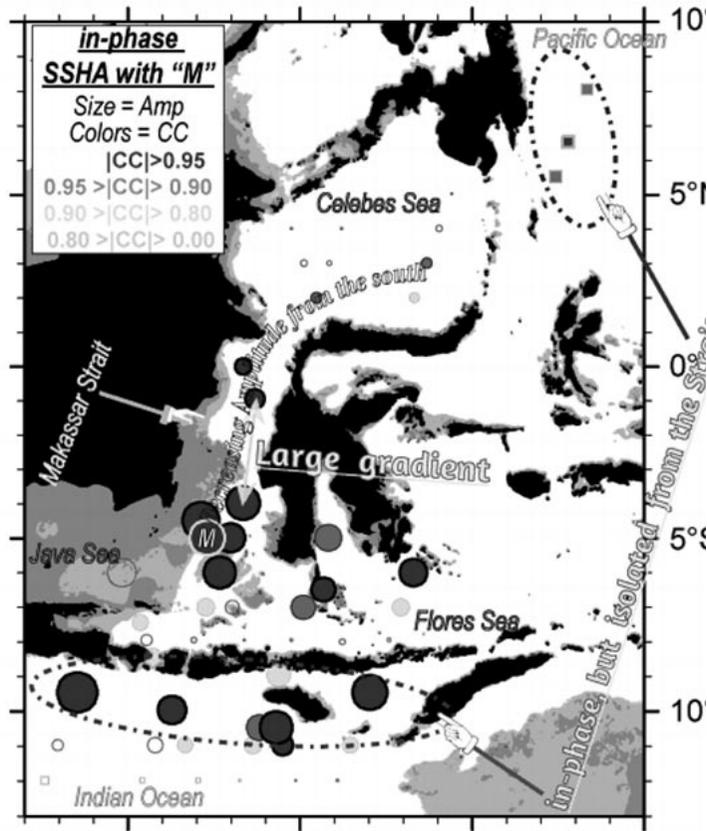


Fig. 4 海面高度の季節変動成分の、マカッサル海峡内の M 点 (5° S, 117° E) と周辺海域との相関分布 (濃淡)。円は正相関で四角が負相関を示し、記号の大きさは同期した季節変動の振幅を示す。影部分 は、水深 50 m と 300m の海域 (ICHIKAWA, 2023)。

近年の GNSS の測定が向上したのは、複数の国のシステムが開放されて測位に利用できる衛星の個数が飛躍的に増加したことと、参照できる地上固定局のデータも全世界に多数設置されたことで、各 GNSS 衛星の時計の誤差などを精度よく推定できるようになったためである。現在は、PPP (Precise Point Positioning) と呼ばれる手法によって、単独の受信機だけからでも、多くの地上固定局のデータを参照しながら最適解を解くことで精度の良い測位ができるようになっている。例えば、図 5 のように海面の水位変動に同期する小型のブイの高度を GNSS で測位すれば、海面高度の変化そのものを計測することができるようにな



Fig. 5 GNSS 受信機を内包した小型ブイを海面に降ろすところ

る (例えば, ICHIKAWA *et al.*, 2018; 2024)。

4. 今後の展望

GNSS を用いた海面高度測定は, 時刻や海域の制限なく利用できるため, 軌道直下に観測点が限定されるために粗くなる衛星海面高度計の時空間分解能を補うことが可能である。ただし, 特定の場所の海面高度を計測するには船舶などのプラットフォームをその場所に移動させなければならないので, 人工衛星のような繰り返し観測を広域で行うことは, 現実的には難しい。もっとも, 特定の航路を繰り返し航海するフェリーなどで GNSS 観測を利用すれば, 細かい時間分解能で繰り返し海面高度を計測することができる。しかも, 実質的に GNSS 受信装置を設置するだけで実装できるため, 装置の取付と運用のコストがほとんど発生しないという利点も重要である。

なお, 衛星海面高度計の時空間分解能は, 2023 年を境に革新的に向上した。これは, 米国の NASA (National Aeronautics and Space Administration) が主体となって進めた SWOT (Surface Water and Ocean Topography) ミッションが開始されたためである (JPL, 2024)。このミッションでは, 従来の衛星直下の観測点に加え, その両脇に約 60 km ずつの幅をもった帯状の海面高度計測が 2 km 格子間隔で行われるため, 従来型の海面高度計を 60 台ほど並走させたような効果がある。従来型の衛星海面高度計では, 例えば渦が移動して隣接する軌道の間に入ると欠測になってしまうという問題点があったが, 面的な観測ができる SWOT ミッションなら, この渦の形状の変化を含めて連続的に移動を追跡することができる。今後, 衛星海面高度計を用いた研究はさらに発展していくと考えられる。

5. まとめ

海面の高さは, 外力による変形や熱膨張など, 様々な要因で変動している。一方, 岸壁や観測塔などの固定されたプラットフォーム以外から海面の高さを計測しようとする, プラットフォーム自身の変位の計測も必要になるため, 洋上に参照

基準を持たない人類にとっては難しかった。しかし, リモートセンシングの技術を用いることで, 人工衛星を用いた沖合海域の海面水位の繰り返し計測や, 船舶を利用した海面水位計測までが可能になってきた。

海面高度を変動させる要因は複数あるため, それらにตอบสนองする海面高度変動の時間・空間スケールも様々であり, 最新の SWOT ミッションを用いたとしても, じゅうぶんに捕捉できない現象も含まれている。今後, 船舶 GNSS による補完的な観測や, データ同化手法による数値計算などを併用しつつ, 複雑に絡み合った多重スケールの現象の解析が期待される。

謝辞

基本的に私は活動拠点を西日本としていますので, 東京で行われる日仏海洋学会には, 実は最近まで一度も出席したことがありませんでした。現在は比較的参加するようにしているのですが, それもコロナ禍によってリモート会議が普及したためですので, 出欠不精なところはあまり変わっていないようです。不熱心な会員で, 誠に申し訳ありません。

こんな私が栄えある日仏海洋学会賞を頂けるようになったのも, これまで京都大学・英国の北ウェールズ大学・愛媛大学・九州大学でお世話になった先生・先輩の皆さんのご指導ご鞭撻のおかげであり, 同僚・後輩・学生の皆さんのご協力の賜物だと感謝しております。特に今脇資郎先生には, 京都大の学部学生の頃から衛星海面高度計のデータ処理の基礎から教えていただき, 九州大に移ってから中規模渦や黒潮などのテーマを一緒に研究させていただきました。学部学生当時は, まさか 35 年経過しても似たような衛星海面高度計の研究を続けているとは思っていませんでしたが, それだけ奥の深いテーマを授けてくださったということだと思います。故 柳哲雄先生とは愛媛大と九州大で一緒にさせていただき, 特に沿岸域での衛星利用に関しての着想を頂きました。世界的にここ 10~15 年で沿岸衛星海面高度計のニーズが高まってきたのですが, それよりも

10年も前から先駆けて沿岸衛星高度計の研究を始めているところに、柳先生の先見の明を感じます。北ウェールズ大学では、John Mathews先生に多様なリモートセンシングの手法を教えてくださいました。宇宙機関が提供する衛星高度計プロダクトのエンドユーザーから発展していった、船舶でのGNSS観測や高度計データのリトラッキング解析手法の開発など研究を展開・高度化させていくにつれて、マイクロ波の電波工学的な知識が必要となってきたのですが、英国の修士課程での学習成果を活用することができました。ここに記して御礼申し上げます。そして最後になりましたが、惜しめない献身的な協力で支えてくれた家族に心よりの感謝を申し上げます。

なお、研究の一部は科研費(21K19848, 22H01301)により行われています。

引用文献

- AOKI, S., S. IMAWAKI and K. ICHIKAWA (1995): Baroclinic disturbances propagating westward in the Kuroshio Extension region as seen by a satellite altimeter and radiometers, *J. Geophys. Res.*, 100 (C1), 839-855.
- CHELTON D.B., M.G SCHLAX, R.M. Samelson and R.A. de Szoeke (2007): Global observations of large oceanic eddies, *Geophys. Res. Lett.*, 34 (15), doi:10.1029/2007GL030812.
- DEPT. EARTH SYS. SC. TECH., INTERDISCIP. GRAD. SCH. ENGIN. SCI., KYUSHU UNIV., eds, (2017): *Fluid Dynamics for Global Environmental Studies*, Springer, 368 pp., ISBN 978-4-431-56497-3.
- FU, L. L. and A. CAZENAVE, eds, (2001): *Satellite Altimetry and Earth Sciences, A Handbook of Techniques and Applications*, Academic Press, International Geophysics Vol. 69, 463p.p., ISBN: 978-0-12-269545-2.
- GLEASON S. and D. GEBRE-EGZIABHER, eds, (2009): *GNSS, Applications and methods*, Artech House, 508p.p., ISBN 978-1-59693-329-3.
- 市川 香 (2014): 21世紀初頭の衛星海面高度計, *海の研究*, 23 (1), 13-27.
- ICHIKAWA, K. (2023): Mean Seasonal Sea Surface Height Variations in and around the Makassar Strait, *Rem. Sens.*, 15 (17), 4324, doi:10.3390/rs15174324.
- ICHIKAWA, K. and S. IMAWAKI (1992): Fluctuation of the sea surface dynamic topography southeast of Japan as estimated from Seasat altimetry data, *J. Oceanogr.*, 48 (2), 155-177.
- ICHIKAWA K. and S. IMAWAKI (1996): Estimating Sea surface dynamic topography from Geosat altimetry data, *J. Oceanogr.*, 52 (1), 43-68.
- ICHIKAWA, K., Y. YOSHIKAWA, A. MORIMOTO, K. FUKUDOME and J.H. YOON (2018): Complementary Remote Sensing Observations of the Tsushima Warm Current Patterns, in *Remote Sensing of the Asian Seas* (BARALE V. and M. GADE, eds), Springer, 191-204, ISBN 978-3-319-94067-0, doi:10.1007/978-3-319-94067-0_10.
- ICHIKAWA K., EBINUMA, T., KONDA, M. and YUFU K. (2019): Low-Cost GNSS-R Altimetry on a UAV for Water-Level measurements at Arbitrary Times and Locations, *Sensors*, 19, 998; doi:10.3390/s19050998.
- ICHIKAWA, K., X.F. WANG and H TAMURA (2020): Capability of Jason-2 subwaveform retracers for significant wave height in the calm semi-enclosed Celebes Sea, *Remote Sensing*, 12, 3367, doi:10.3390/rs12203367.
- ICHIKAWA, K., J.Q. ZHU, J. NODA, R. SAKEMI, K. YUFU and K. MATSUURA (2024): Ship-borne wave gauge using GNSS interferometric reflectometry, *Coastal Engin. J.*, 66 (2), 395-404, doi: 10.1080/21664250.2024.2342596.
- Jet Propulsion Laboratory (2024): *SWOT Science Data Products User Handbook*, JPL D-109532, 202pp.
- 京都大学防災研究所白浜海象観測所ホームページ (2024): <https://rfcd.dpri.kyoto-u.ac.jp/frs/shirahama/tower.html>
- THOMPSON, P. R., M.J. WIDLANSKY, E. LEULIETTE, D.P. CHAMBERS, W. SWEET, B.D. HAMLINGTON, S. JEVREJEVA, M.A. MERRIFIELD, G.T. MITCHUM and R.S. NEREME (2019): Sea-level variability and change in *State of the Climate in 2018*, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 100 (9), S84-S87, <https://doi.org/10.1175/2019BAMSStateoftheClimate.1>
- YANAGI, T., A. MORIMOTO and K. ICHIKAWA (1997):

Co-tidal and co-range charts for the East China Sea and the Yellow Sea derived from satellite altimetry data, *J. Oceanogr.*, 53 (3), 303-309.

YOSHIKAWA, Y. and A. MASUDA (2009): Seasonal variations in the speed factor and deflection angle of the wind-driven surface flow in the Tsushima Strait, *J. Geophys. Res.*, 114, doi:10.1029/2009JC005632.