

令和 5 年 3 月 3 日

水産資源、水産業への気候変動影響と適応、緩和
—第四期中長期以降の水産研究・教育機構の研究成果—

人為起源の温室効果ガス排出量の増加に伴い、とりわけ 20 世紀後半以降の気温や海水温の上昇が地球規模で進むとともに、貧酸素化や海洋酸性化の進行も明らかになっている。海面水温は全球平均で $0.56^{\circ}\text{C}/100$ 年の上昇率を示し（気候変動に関する政府間パネル、第六次評価報告書；IPCC, AR6）、日本周辺ではさらに上昇率が大きく、平均 $1.14^{\circ}\text{C}/100$ 年で進んでいる

(https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html)。気候変動に伴う海洋環境の変化は、海産生物の分布の変化（IPCC, 2019）や日本で問題となっているサンマやスルメイカの不漁問題ならびにサケの回帰率低下の要因とも考えられている（https://www.jfa.maff.go.jp/j/study/attach/pdf/furyou_kenntokai-19.pdf）。

ここでは、水産研究・教育機構（水産機構）が主として第四中長期以降に公表してきた研究成果をもとに、近年の気候変動に伴う海洋環境の変化とそれが日本周辺の海洋生態系や水産資源に及ぼす影響と気候変動影響への適応や温暖化の緩和に関する知見を取りまとめ、水産研究・教育機構の気候変動適応研究計画検討の基本資料とする。

1 海洋環境モニタリングの実施と海況予測等

気候変動が海洋生態系に及ぼす影響を把握し理解するためには、海洋ならびに生態系モニタリングが不可欠である。海洋環境のモニタリングは明治時代に開始され国と府県による全国的な定線調査もすでに 100 年以上の歴史がある（例えば、稲掛・渡邊, 2014）。近年は衛星リモートセンシングやグライダーなどの新技術の導入による高精度化・高域化、これら観測データを同化して数値モデルによる海洋の物理現象の 4 次元像の可視化も簡単にできるようになるなど、全国的な海洋環境のモニタリングは形を変えながらも現在も続いている。さらに水産機構の海洋分野では、1988 年から厚岸沖 A-ライン（親潮域～移行域）、2002 年から御前崎沖 O-ライン（黒潮周辺海域）ならびに東シナ海の CK-ラインにおいて、海洋物理、化学、低次生物を対象とした海洋モニタリングを継続し、海洋環境の変化を把握してきた。各県が採集した試料も含めてこれらモニタリングや多獲性浮魚類の卵稚仔調査で得られたプランクトン試料（プランクトンネットサンプルから卵稚仔を除いたあとの残滓）を Odate collection として塩釜庁舎に蓄積しており、数十年スケールの生態系変動を把握できる非常に貴重な試料として、内外の研究者に活用されている。

水産庁の委託事業で実施されてきた「赤潮モニタリング」や環境省による「モニタリングサイト 1000」（Terada et al., 2021）などの沿岸域モニタリングにより、赤潮プランクトン（例えば、岡本ら, 2019）や藻場（例えば、清本ら, 2021）、珊瑚礁生態系等の変化も捉

えられつつある。また、水温変化に加え、成層化や貧酸素化、酸性化が世界の様々な海域で把握されており（例えば Ishizu et al., 2019; Wakita et al., 2021; Stramma et al., 2020）、水産機構も内外の機関と協力して気候変動の影響把握に努めてきた（例えば, Fujii et al., 2021; Wakita et al., 2021）。

水産機構が開発した2ヶ月先までの海況予測を発信する FRA-ROMS (Kuroda et al., 2017) は、上述のような船舶による海洋観測のほか水中グライダーなどの自動観測機器や衛星観測で得られたデータを同化し、海洋モニタリングのプラットフォームとしても機能している。過去の物理現象の4次元像の把握が可能な再解析値（1993年以降の過去の予測値）を、粒子追跡モデルに適用して卵稚仔等の輸送解析や気候変動研究等に活用している（例えば, Kuroda et al., 2021）。

気候変動の将来の影響に備えるためには、基本となる物理環境の今世紀半ばや末までの気候変動影響の将来予測が必要である。気候変動将来予測社会実装プログラム（以下、SI-CAT）で開発された水平格子2km (SiCAT02) ならびに10km (SiCAT10) の近未来海洋予測データセットが公開されており、この利用が進んでいる。水産機構は、SiCAT02を用いて地域ごとに温暖化に伴う急潮の頻度や強度の変化を予測したデータセットを構築するとともに (https://search.diasjp.net/ja/dataset/Sicat_kyuchu)、急潮抽出統計モデルを開発している（久賀ら, 2018）。また、2018年から5年間の計画で開始された環境省の環境総合研究推進費S18「気候変動影響予測・適応評価の総合研究」では分野共通の気候シナリオと社会経済シナリオのもとで、水産業についても高解像度の気候変動影響予測手法の開発・高度化を進めており (<https://s-18ccap.jp/>)、気候変動の影響予測のためにSI-CATデータセットを利用している。

2 近年の日本周辺水域の海洋環境変化

人為起源の温室効果ガスによるいわゆる温暖化に伴う水温は日本周辺では全球平均の倍あるいはそれ以上の速度で上昇し、平均すると100年間に1℃前後の上昇率である。20世紀後半以降の水温変化は、10～20年周期で自然起源の要因によるいわゆるレジームシフトに、温暖化による水温上昇が上乗せされたように見受けられる。レジームシフトは太平洋10年規模振動指数^{*1}（以後、PDO）などの気候指数の変化をもとに捉えられることが多い。北太平洋における海洋上層（50～300m）の栄養塩や酸素濃度にも、水温の上昇傾向に加えて、PDOや北太平洋環流振動（NPGO）の強い影響が現れ、さらに親潮地域では、北太平洋指数（NPI）や18.6年の潮汐サイクルが重なって変化する様子が捉えられている（Stramma et al., 2020）。ちなみに、瀬戸内海では沿岸定線調査などのモニタリングにより水温が温暖化の影響で上昇し特に秋季に上昇率が大きいこと、陸域負荷削減が影響して栄養塩濃度の低下が顕著であることが把握されていて（阿保ら, 2018）、人為的な環境負荷における変化の影響も併せて見ておくことが重要である。

2000 年ごろから、温暖化の下で過去に見られた気候指数と自然起源の気候変動の関係性が変化し (Litzow et al., 2020), 日本近海でも水温分布と PDO 指数の対応関係が過去とは異なってきている (Kuroda et al., 2020b). 過去には PDO 指数が正の時には日本近海は寒冷で負の時には温暖な傾向にあったが, 1990 年代末に負に転じたにもかかわらず水温は顕著な上昇傾向を示さず, 逆に 2010 年代半ばに PDO 指数が正から負へと反転したが水温は上昇に転じている

(https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html).

厳冬や異常冷水イベント, そして海洋熱波などのイベントの発生とそれが海洋生態系に及ぼす影響についての報告も増加している. 夏に北極圏における気温が高いと日本などの東アジアや北米で厳冬となる (例えば, Inoue et al., 2012; Cohen et al., 2021) ことが指摘されるようになっている. Kuroda et al (2020a) は, 冬季の異常冷水イベントについて, 1960~1980 年代に頻発した異常冷水は親潮の極端な南下を伴っていたが, 2006 年, 2014 年に発生したイベントは親潮の南下を伴わず, オホーツク海における風による循環の極端な強まりによることを明らかにしている. 一方, 2010 年頃から日本周辺でも海洋熱波の発生が顕在化している (Miyama et al., 2021). 道東沖の時計回りの渦が 2010 年以降頻発し, 局所的な水温上昇をもたらしてサンマの漁場の適水温域の減少 (Kuroda and Yokouchi, 2017) やブリの回遊の変化 (Miyama et al., 2021) をもたらした可能性が指摘されている. 2021 年には日本海やオホーツク海をはじめ北西太平洋においてこれまでで最大規模となる海洋熱波が発生し (Kuroda et al., 2021), その直後に起こった大規模な赤潮発生の要因の一つになった可能性がある (Kuroda and Setou, 2021).

レジームシフトの発生時には, 温暖化による水温の上昇率に比べて短期間の間に大きな水温変化を伴うことが多く, 水産資源や海洋生態系ではこれに応答した変化が卓越してきた (例えば, Yatsu, 2019). しかし, 過去と同様の変化が繰り返されない可能性や, 海洋熱波の頻発のようにこれまで経験してこなかった海洋環境の変化の影響を想定する必要がある. モニタリングがより一層重要となるとともに, 変化に素早く対応することが求められている. なお, 海流の流れや位置にも変化が見られ, 2017 年から開始した黒潮大蛇行が長期継続している. 2010 年に黒潮続流は不安定流路から続流の流路長が短く流の強度も強い安定流路に変化し (Qiu et al., 2020), その後もその状況がほぼ継続すると同時に, 東経 165° 以西の海域で黒潮続流が北偏傾向を示している. 2010 年以降の道東沖の暖水塊の分布など, 東北から北海道の太平洋岸が広く黒潮系の水塊に覆われるようになっている. また, 北海道南東岸沖において親潮の弱化北退傾向が顕著で, 親潮輸送も減少傾向にある (Kuroda et al., 2015). これらのメカニズムの解明や気候変動との関係把握は今後の課題である.

3 海洋環境等生息環境変動が水産資源等に及ぼす影響

1) 分布の変化

20 世紀半ば以降、海洋生物の分布は極方向に移動し、全球平均のその速度は表層生態系の種類で 52 ± 33 km/10 年、底生生態系の種類で 29 ± 16 km/10 年 (IPCC, 2019) である。日本周辺では、舞鶴湾で観察された出現種の変化から見積もられた日本海における魚類分布の北上速度が 35 年で 330km 程度 (Masuda, 2008) と見積もられている。Kakehi ら (2021) は 2003 年以降の東北太平洋岸の底水温とテナガダラなどの底魚類の分布の中心の変化を調べ、底水温の上昇に伴い底魚類の分布の中心が北偏、東偏傾向にあることを明らかにした。また、とりわけ 2010 年代半ば以降に宮城県の市場への水揚げ量が冷水性のマダラなどで減少傾向、ワタリガニやサワラなどで増加傾向にあり (Kakehi et al., 2021), これらも分布の北上傾向を反映しているものと思われる。

個々の魚種の分布と水温の関係についても理解が進んだ。対馬暖流系のマイワシについて水温と密度依存要因が産卵に及ぼす影響を調べ、SST が、高い (低い) と産卵場は北に (南に) 移動するなどの産卵場のシフトと拡大・縮小、ならびに産卵のタイミングを変化させるのに対し、密度依存要因は産卵場の拡大または縮小のみに関連する (Furuichi et al., 2020b) ことが指摘されている。マサバ太平洋系群では、水温変化と関係して過去 40 年間で産卵期間が長期化し、2000 年代以降に産卵場の北上が観察されている (Kanamori et al., 2019)。日本海におけるクロマグロの在・不在と水温の関係を解析し、高水温下でクロマグロの出現頻度が高まり、地球温暖化の影響を受け日本海がクロマグロの産卵場として重要な位置を占めるようになってきた (Kodama et al., 2020) との指摘がある。2010 年代以降、東北太平洋岸において日本海に多いゴマフグと主として太平洋側に多いショウサイフグの雑種が多く出現するようになり、水温上昇に伴う分布変化が影響した可能性 (Takahashi et al., 2017) も指摘されている。

魚類以外でも分布の北偏傾向がうかがえ、フィリピンで記載され奄美群島以南の東南アジア各国に分布するナマコ類が鹿児島県内之浦湾で出現 (Nishihama et al., 2020) し、暖水性赤潮プランクトンの *Chatonella marina* ならびに *Cochlodinium polykrikoides* が 2014 年に初めて北海道西岸で確認されている (Shimada et al., 2016)。大型藻類にも気候変動の影響が見られ、九州や四国など日本の南西部では熱帯性のホンダワラ類の分布が拡大し、温帯性のカジメの分布は縮小した (Tanaka et al., 2012)。磯根資源であるメガイアワビとクロアワビの成長と成熟を比較したところ、前者は周年繁茂する藻場が必要であるのに対し、クロアワビでは季節的な変動のある藻場でも生息できる可能性が指摘される (清本ら, 2019) など、海藻群落の変化が磯根資源に及ぼす影響も明らかになってきた。

2) 水産資源の成長や生残と海洋環境変動

1990 年代に実施された農林水産省の大型別枠研究「バイオコスモス」において 1 歳になるまでのマイワシの死亡率と黒潮続流域の冬季水温の間に正の関係があることが示された (Noto and Yasuda, 1999)。これ以降、多獲性浮魚類が生活史初期に過ごす海洋環境と資源

変動の関係に注目した研究が行われ、その関係性について知見が蓄積されてきた（例えば Yatsu et al., 2005; Kidokoro et al., 2010; Nishikawa et al., 2011）。Kaneko ら（2019）は 2000 年以降の RPS と孵化後 10 日間に経験する水温の間に正の関係があること、ただしこの水温は黒潮流路と密接に関係することが報告されている。また、Yatsu ら（2021）は、1982～2018 年のサンマ標準化 CPUE の変動が黒潮再循環域の水温、プランクトン量などの環境要因だけでなく近年の外国漁船による漁獲の影響を入れると再現性がよいとこのことを報告している。多獲性浮魚類以外でも、クロマグロでは四国沖、あるいは東シナ海や日本海では、夏に水温が高い年に加入が多い傾向にある（Muhling et al., 2018）との指摘がある。日本産サケでは幼稚魚期の沿岸域水温と回帰率に相関があること（Saito and Nagasawa, 2009）やサケの稚魚が生き残るための適温範囲に収まる日数が長いほど、生き残りが良い可能性（Morita and Nakashima, 2015）が指摘されてきた。岩手県のサケの回帰率が沿岸の暖水の割合（Wagawa et al., 2016）と関係すること、暖かい年には冷たい年に比べてサケ稚魚の主要な餌である冷水性のプランクトンが少なく稚魚の肥満度も低く、親潮の流入が重要なこと（Yamada et al., 2019）が指摘されている。また、回帰率の変化は水温以外の他の要素も含んだサクラの開花日のような生物季節の変化と関連すること（Morita, 2016）を指摘した報告もある。

耳石の日輪解析により生活史初期の成長速度の把握が可能となり、資源変動要因を明らかにする上で強力なツールとなっている（例えば、伊藤ら, 2018）。マサバでは、4 月に孵化した仔稚魚の成長速度と加入量の間に正の相関関係があり、19℃以下では成長速度と水温に正の関係が見られる（Kamimura, et al., 2015）。このため、高水温で速く成長した個体が餌の豊富な海域に早期に移動し、選抜されていくことが生残に重要である可能性がある（Higuchi et al., 2019）。マアジでは春季の対馬暖流の強さと水温が仔魚期後期から稚魚期初期成長に影響し、日本海南西部の稚魚の個体数が多いこととの関係が考察されている（Takahashi et al., 2022）。マイワシでは、生残指標（卵あたりの加入個体数の自然対数）と仔稚魚期の成長速度に正の関係があり、その成長速度は 1～4 月の黒潮水温との間に負の関係が見られている（Takasuka et al., 2021）。このように、近年では、機構の有する資源量や加入量データと成長速度の関係を解析し、さらに成長速度と水温の関係を求めて水温環境の変動が資源動態に及ぼす影響について論じられるようになってきた。ただし、マイワシの成長速度と加入の関係の長期変動を調べた例で、その関係性が年代によって変化することが指摘（Furuichi et al., 2020a）されており、今後その要因等について研究を進める必要があるだろう。サケ幼稚魚についても、釧路沿岸の昆布森沖で採集された幼稚魚の成長速度を調べた結果、採集場所からより遠くで放流された個体では近くのものよりも成長速度が速く、成長依存の減耗が起きている可能性がうかがえた（Honda et al., 2017）。また、2001～2013 年級群で特に春先の水温が低かった 2012 年ならびに 2013 年級群では、サケ親魚のウロコから推定された海洋生活初期の成長速度が遅く、回帰率も低いことが示

された (Honda et al., 2021). ただし, 近年の水温が高い条件でとりわけ太平洋側で低い回帰率が続いている理由についてはさらに検討する必要がある.

飼育実験により水温上昇が成長や成熟に及ぼす影響を明らかにした研究例もある. スルメイカでは通常より高い水温で飼育した結果, 成長速度が上がって産卵が早まることが示され, 寿命も短くなると推測されている (Takahara et al., 2017). 瀬戸内海と大村湾のカタクチイワシについて, 水温と卵サイズには負の関係があるがその関係が海域により遺伝的に異なっていることが飼育実験で確かめられ (Yoneda et al., 2022a), こうした違いが生活史初期の生残率に影響しているかもしれない. さらに瀬戸内海ではカタクチイワシのエサとして重要な冷水性カイ脚類が減少傾向にあり, この影響を受けた親が水温上昇でより小さな卵を産むようになってきていることが近年の瀬戸内海におけるカタクチイワシの急激な加入低下の要因となっている可能性も示唆されている (Yoneda et al., 2022b).

環境要因と成長や生残, 資源変動の関係の把握は, 資源の変動メカニズムに関する理解を進め海洋環境の変化の影響予測を行なって気候変動の影響に備える上で欠くことができない研究課題である. ただし, 関係性の年代による変化や地域による違いが指摘されつつあり, メカニズムの理解のため, さらに知見を蓄積する必要がある.

3) 生息環境変動に合わせた水産対象種の進化

一般に, 生物は生息環境の変化に合わせて進化することが知られている. 水産対象種においても, サケの卵は, 地球温暖化の影響を受けて, 小型化・多産化の方向に進化している可能性が指摘されている (Hasegawa, et al., 2021). この理由について, 温暖な環境だと仔魚の生残率が高くなるために, ふ化する仔魚は小型でも支障がない, すなわち, 卵が小型化し, 卵サイズとトレードオフの関係にある卵数は増加するためだと論文中では考察されている. また, 本論文では, 変動を続ける自然環境下で水産資源を維持するには, 自然選択にさらされた個体群 (いわゆる野生魚) が不可欠であると指摘している. ただし, 環境変動に対する水産対象種の進化については研究例が乏しく, 今後, 知見を蓄積していかななくてはならない.

4 養殖への気候変動影響と適応に関する研究

藻類養殖や貝類養殖などの無給餌養殖について, 水温上昇に伴う採苗時期の遅れや養殖期間の短縮による生産量の減少や品質の低下が顕在化しつつある. また, 藻類養殖では, 植食性魚類であるアイゴやブダイ, クロダイの食害にも水温影響が観察される (棚田ら, 2019; 野田・村瀬, 2021; 竹中ら, 2021). 一方で気候変動適応に寄与する知見も得られつつある. 三陸地方のワカメでは, 発芽したワカメの孢子葉が養殖施設に設置される秋に低濃度の栄養塩を原因とする生育不良となって枯死することが問題となっており, 栄養塩濃度の鉛直分布を予測するモデルを開発して予測結果をワカメ養殖業者に提供している (Takehi et al., 2017). 種内交配をワカメの高温耐性獲得に適用し, 徳島県産鳴門金時草

(NN) と高温耐性がある椿天然株 (TT) の交配系統が両者の中間的な高水温耐性を有する (村瀬ら, 2021) ことが示されつつある。のり養殖では通常アマノリが用いられるが、気候変動へのレジリエンスを高めるため高温耐性を持つ品種の作出・活用やアマノリ以外の種類の活用が模索されている。山口県では地域特産種として注目されているカイガラアマノリ *Pyropia tenuipedalis* について、種苗生産技術の向上や水域での養殖筏の発達時期の予測への貢献を期待して生活史の各段階における水温特性を把握している (阿部ら, 2018; 村瀬ら, 2018)。桑原 (2014) は、魚類による食害対策に係る技術と課題を整理し、特に積極的に捕食者を除去して密度を下げるのが重要であり、そのためには行動特性の把握と利用を考えることが重要と指摘している。また、捕食者であるウニを取り上げ、雑海藻 (https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/contents/fukyu/episode/episode_list/136530.html) やキャベツなどの野菜 (白井ら, 2018) を餌としてウニの身入りをよくし、藻場の保全と駆除したウニの活用を図る技術も開発されている。

魚類養殖では天然種苗を用いた養殖や餌料の主原料として天然魚起源の魚粉が用いられることが多く、気候変動がこれらの魚類の分布や生産に及ぼす影響や養殖適地の変化への影響も見込まれる (桑原ら, 2006)。しかし、天然魚に比べて飼育環境の制御が行いやすく、人工種苗の生産技術や魚粉に頼らない餌料の開発も進みつつあり、FAO が 2018 年に公表した The state of the world fisheries and aquaculture 2018 (FAO, 2018) では、漁業における気候変動適応策の一つとして「養殖業」が位置づけられている。例えば気候変動の影響を受けて特に東北太平洋岸のサケの回帰率の低下が甚だしいが、岩手県ではサケマス類の養殖業が開始された (<https://www.nissui.co.jp/news/20220131.html>) のもその一例であろう。

養殖魚について高水温に対するレジリエンスを高めるための育種を効率的に行うために高温選抜効果を遺伝子レベルで評価する研究も進められてきた。冷水性のニジマスでは選択育種により高温選別系統が確立されてきたが、高水温下で飼育したところ高温選別系統でヒートショックプロテインの産生 (Ojima et al., 2012) や熱ショックタンパク質ファミリー遺伝子や転写因子の発現が高い (Tan et al., 2016) ことが明らかとなっている。また、上限致死温度 (28°C) で平衡状態を失うのに必要な有効時間 (ET) が表現型を識別するための有用な指標であることも示されている (Ineno et al., 2020)。ブリでは成長遅滞を示す水温 (30°C) で、飼料効率などの悪化に加え、肝臓への過剰な脂肪蓄積が確認される (Sotoyama et al., 2018) などの高水温影響に関する基礎的な知見も蓄積されつつある。

5 海洋酸性化の影響

地球規模で水温上昇、成層化、貧酸素化とともに海洋酸性化が進行している。RCP8.5 では今世紀の間に pH が 0.287~0.29 低下することがほぼ確実視され、北太平洋ではサンゴの骨格等を形成するアラゴナイトが溶解出す pH を下回ると予測されている (IPCC, 2019)。Onitsuka ら (2014) は飼育実験により、二酸化炭素分圧 (pCO₂) が 800~2000

ppm の間で $p\text{CO}_2$ の増加に伴ってサザエの初期発達速度の低下、奇形率の上昇、幼殻の小型化が進み、着底や生残に悪影響を及ぼす可能性 (Onitsuka et al., 2014) を指摘してきた。pH は日周変動を示し、エゾアワビの幼殻長形成に影響を及ぼす閾値はアラゴナイト飽和度 1.1 (1000-1300 ppm $p\text{CO}_2$) 付近にあり、その閾値を超えた時間、強度により幼殻形成への悪影響の程度が決まることも示している (Onitsuka et al., 2018a)。

東京湾などの富栄養化した閉鎖性海域の底層で特に高水温期に有機物の分解による無酸素状態でアラゴナイト未飽和が生じる可能性が指摘されている (Yamamoto-Kawai et al., 2015; 2016)。また、脱富栄養化の取り組みで夏季に散発的に発生するアラゴナイト未飽和が抑制されるが、大気中の二酸化炭素濃度が 600ppm を超えるとアラゴナイト未飽和が常態化する可能性もある (Yamamoto-Kawai et al., 2016)。北海道沿岸において物理・生物化学パラメータの連続モニタリングを行い、観察された夏よりも冬の方が pH や溶存酸素 (DO) 濃度が高くなるという季節変化は主に水温によって調節されていること、夜間よりも昼間の方が高い日内変動は主に昼間の一次生産者による光合成と夜間の海洋生物による呼吸の影響を受けており、温室効果ガス排出削減への意欲的な取り組みがなければ、今世紀末には、海洋温暖化と酸性化が亜寒帯沿岸の石灰化生物に与える影響が深刻化し、夏に 3 ヶ月間、炭酸カルシウムの低飽和状態の臨界レベルをそれぞれ超える可能性が示唆された (Fujii et al., 2021)。このように温室効果ガスの上昇に伴う複合影響が顕在化する可能性も徐々に明らかになり、改めて緩和の重要性が認識される。

6 温暖化対策

1) ブルーカーボン

地形学でいう湿地 (泥炭地、マングローブ、塩性湿地、海草藻場) は地球表面の 1 % を占めるに過ぎないが、生態系の有機炭素の 20% を蓄積し、単位面積あたりの炭素隔離速度は外洋域や陸域の森林より高い (Temmink et al., 2022)。海洋生物によって隔離・貯留された炭素であるブルーカーボン (堀, 2017) に、マングローブ、塩性湿地、海草藻場で隔離・貯留された炭素は入る。瀬戸内海沿岸のアマモ場では 3000 年以上前の堆積物中にアマモ DNA を検出でき (宮島・浜口, 2017)、海草藻場が炭素隔離にはたす大きな役割 (Miyajima et al., 2017) をうかがい知ることができる。なお、Hamaguchi et al. (2018) は、長期的な海草由来の有機炭素蓄積を解明するために不可欠な沿岸堆積物中の海草 DNA を直接検出する方法を環境 DNA 検出技術により開発している。

Hori ら (2021) は瀬戸内海と地中海のフランス沿岸でアマモ場の有無が天然のカキの成長・生残に及ぼす影響を調べ、アマモ場では貧酸素状況下にあっても着底後のカキの成長や生残が高いことを明らかにし、海草植生が養殖時の環境悪化を緩和しカキ養殖の持続可能性に寄与する可能性を指摘した。また、カキ礁を伴う潮間帯の海草植生は、貧栄養状態であっても人間への食料供給サービスを維持すると同時にブルーカーボンを利用した二酸化炭素排出のローカルオフセットシステムとして機能する沿岸生態系複合体 (CEC) とな

りうる (Hori et al., 2018). このような複数の機能を有しかつ UNFCCC-COP21 で採択されたパリ協定の推進に貢献する CEC の管理と利用は、今後の重要な研究ターゲットとなると期待される。

2) 省エネとカーボンニュートラルのための研究

2050 年カーボンニュートラルを達成するため、船舶においても技術開発が急ピッチで進みつつある。どのような技術を採用するかは船舶の大きさや走行距離で異なり、小型で短距離運行を行う船舶では電気推進や水素燃料電池が、大型で長距離運行を行う船舶では水素やアンモニアを燃料を用いるエンジン開発が進められている

(<https://www.mlit.go.jp/maritime/content/001406937.pdf>). 水産分野でも農林水産省の地球温暖化対策計画において漁船の省エネ運航や電化・水素化が推進されている

(<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/climate/taisaku/attach/pdf/top-17.pdf>). 当機構においても漁労作業負荷の比較的小さな養殖作業船について、水素燃料電池化研究を進めてきた (Takahashi, et al., 2019; Miyoshi, 2020). しかし、沖合・遠洋漁船では漁撈のために高馬力のエンジンや、これに伴うエネルギー消費の増加、長期航海への対応が必要となり、これについてはまだ方向性が定まっていない。なお、水素燃料電池漁船の普及には、試作艇の製作や実証実験、充電設備や水素充填設備の設置・運用方法の検討の必要性が指摘されている (溝口, 2022).

漁船についてどのような方向性を目指すにせよ、省エネは選択の幅を広げる上で必要不可欠な技術である。その一つとして、ウエザールーティングシステムの導入がある。市販されている商船用に開発されたウエザールーティングシステムはデータの取り扱いが粗く漁船では利用できなかったため、三好ら (2018) は、実船検証を通して漁船に適したシステム開発を行い、最短時間航路の選択によって、漁獲時間の増加による漁獲金額向上を達成できることを実証した。また、水産大学校練習船での利用では、最適航路の選択のみならず、船上での学生に対する気象を利用した航路選択教育を実施することができた。

海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律 (再エネ海域利用法) が令和 4 年 4 月に施行された。漁業と洋上風力発電の共存を図るため、将来、洋上風力発電機を設置する海域の環境影響評価や漁業影響評価を行う必要がある。海洋調査用の新型 AUV の開発により水中調査の効率化が図られ、環境 DNA 解析により周辺海域に生息する魚種の特定が可能になれば、漁業影響評価にも大きなメリットをもたらすことが期待される (溝口, 2022).

文献

阿部真比古・村瀬 昇・中江美里・中山冬麻・中川昌大・鹿野陽介 (2018) 紅藻カイガラアマノリの糸状体の生長, 球形細胞, 単列藻体および初期の葉状体形成における温度特性. 水産大学校研究報告, **66**, 81—88.

阿保勝之・秋山 諭・原田和弘・中地良樹・林 浩志・村田憲一・和西昭仁・石川陽子・益井敏光・西川 智・山田京平・野田 誠・徳光俊二 (2018) 瀬戸内海における栄養塩濃度等の水質変化とその要因. 沿岸海洋研究, **55**, 101—111.

https://doi.org/10.32142/engankaiyo.55.2_101

Cohen, J., L. Agel, M. Barlow, C. I. Garfinkel and I. White (2021) Linking Arctic variability and change with extreme winter weather in the United States. *Science*, **373**, 1116—1121.

<https://doi.org/10.1126/science.abi9167>

FAO (2018) The state of the world fisheries and aquaculture 2018.

Fujii, M., S. Takao, T. Yamaka, T. Akamatsu, Y. Fujita, M. Wakita, A. Yamamoto and T. Ono (2021) Continuous Monitoring and Future Projection of Ocean Warming, Acidification, and Deoxygenation on the Subarctic Coast of Hokkaido, Japan. *Front. Mar. Sci.*, 11 June 2021, Sec. Coastal Ocean Processes.

<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.590020>

Furuichi, S., Y. Niino, Y. Kamimura and R. Yukami (2020a) Time-varying relationships between early growth rate and recruitment in Japanese sardine. *Fisheries Research*, **232**, 105723. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2020.105723>.

Furuichi, S., T. Yasuda, H. Kurota, M. Yoda, K. Suzuki, M. Takahashi and M. Fukuwaka (2020b) Disentangling the effects of climate and density-dependent factors on spatiotemporal dynamics of Japanese sardine spawning. *Mar Ecol Prog Ser.*, **633**, 157-168. <https://doi.org/10.3354/meps13169>

Hamaguchi, M., H. Shimabukuro, M. Hori, G. Yoshida, T. Terada and T. Miyajima (2018) Quantitative real-time polymerase chain reaction (PCR) and droplet digital PCR duplex assays for detecting *Zostera marina* DNA in coastal sediments. *Limnol. Oceanogr. Methods*, **16**, 253—264. <https://doi.org/10.1002/lom3.10242>

Hasegawa, K., Y. Okamoto, and K. Morita (2021) Temporal trends in geographic clines of chum salmon reproductive traits associated with global warming and hatchery programmes. *Ecol. Solut. Evid.* **2**, e12107. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12107>

Higuchi, T., S. Ito, T. Ishimura, Y. Kamimura, K. Shirai, H. Shindo, K. Nishida and K. Komatsu (2019) Otolith oxygen isotope analysis and temperature history in early life stages of the chub mackerel *Scomber japonicus* in the Kuroshio–Oyashio transition region. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, **169–170**.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2019.104660>

Honda, K., T. Kawakami, K. Suzuki, K. Watanabe and T. Saito (2017) Growth rate characteristics of juvenile chum salmon *Oncorhynchus keta* originating from the Pacific coast of Japan and reaching Konbumori, eastern Hokkaido. *Fish. Sci.*, **83**, 987–996.
<https://doi.org/10.1007/s12562-017-1137-6>

Honda, K., T. Sato, H. Kuroda and T. Saito (2021) Initial growth characteristics of poor-return stocks of chum salmon *Oncorhynchus keta* originating from the Okhotsk and Nemuro regions in Hokkaido on the basis of scale analysis. *Fish. Sci.*, **87**, 653–663.
<https://doi.org/10.1007/s12562-021-01538-1>

堀正和 (2017) ブルーカーボンとは. 「ブルーカーボン浅海における CO₂ 隔離・貯留とその活用」堀正和, 桑江朝比呂編, 地人書館, 東京.

Hori, M., M. Hamaguchi, M. Sato, R. Tremblay, A. Correia-Martins, V. Derolez, M. Richard and F. Lagrade (2021) Oyster aquaculture using seagrass beds as a climate change countermeasure. *Bull. Jap. Fish. Res. Edu. Agen.*, **50**, 123 – 133.

Hori, M., H. Hamaoka, M. Hirota, F. Lagrade, S. Vaaz, M. Hamaguchi, J. Hori and M. Makino (2018) Application of the coastal ecosystem complex concept toward integrated management for sustainable coastal fisheries under oligotrophication. *Fish. Sci.*, **84**, 283–292. <https://doi.org/10.1007/s12562-017-1173-2>

稲掛伝三・渡邊朝生 (2014) 漁場環境のモニタリング. 「水産海洋学入門」水産海洋学会編, 講談社, 東京, 38—46.

Ineno, T., K. Yamada, K. Tamaki, R. Kodama, E. Tan, S. Kinoshita, K. Muto, T. Yada, S. Kitamura, S. Asakawa and S. Watabe (2020) Determination of thermal tolerance in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* based on effective time, and its reproducibility for a large number of fish. *Fish. Sci.*, **86**, 767–774. <https://doi.org/10.1007/s12562-020-01447-9>

Inoue J., M. E. Hori and K. Takaya (2012) The role of Barents Sea Ice in the wintertime cyclone track and emergence of a Warm-Arctic Cold-Siberian Anomaly. *Journal of Climate*, **25**. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00449.1>

IPCC (2019) Special Report on Oceans and Cryosphere in a climate change. <https://www.ipcc.ch/srocc/3>

Ishizu, M., Y. Miyazawa, T. Tsunoda and T. Ono (2019) Long-term trends in pH in Japanese coastal seawater. *Biogeosciences*, **16**, 4747–4763. <https://doi.org/10.5194/bg-16-4747-2019>

伊藤進一・船本鉄一郎・志田 修・上村泰洋・高橋素光・白井厚太郎・樋口富彦・小松幸生・横井孝暁・坂本達也・郭 晨穎・石村豊穂 (2018) 気候変動が水産資源の変動に与える影響を理解する上での問題点と今後の展望. *海の研究*, **27**, 59—73. https://doi.org/10.5928/kaiyou.27.1_59

Takehi, S., K. Naiki, T. Kodama, T. Wagawa, H. Kuroda, S. Ito (2017) Projections of nutrient supply to a wakame (*Undaria pinnatifida*) seaweed farm on the Sanriku Coast of Japan. *Fish. Oceanogr.*, **27**, 323—335. <https://doi.org/10.1111/fog.12255>

Takehi, S., Y. Narimatsu, Y. Okamura, A. Yagura and S. Ito (2021) Bottom temperature warming and its impact on demersal fish off the Pacific coast of northeastern Japan. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **677**, 177—196. <https://doi.org/10.3354/meps13852>

Kamimura, Y., M. Takahashi, N. Yamashita, C. Watanabe and A. Kawabata (2015) Larval and juvenile growth of chub mackerel *Scomber japonicus* in relation to recruitment in the western North Pacific. *Fish. Sci.*, **81**, 505–513. <https://doi.org/10.1007/s12562-015-0869-4>

Kanamori, Y., A. Takasuka, S. Nishijima, H. Okamura (2019) Climate change shifts the spawning ground northward and extends the spawning period of chub mackerel in the

western North Pacific. Mar. Ecol. Prog. Ser., **624**, 155—166.

<https://doi.org/10.3354/meps13037>

Kaneko, H., T. Okunishi, T. Seto, H. Kuroda, S. Itoh, S. Kouketsu and D. Hasegawa (2019) Dual effects of reversed winter–spring temperatures on year-to-year variation in the recruitment of chub mackerel (*Scomber japonicus*). Fish. Oceanogr, **28**, 212—227.

<https://doi.org/10.1111/fog.12403>

Kidokoro, H., T. Goto, T. Nagasawa, H. Nishida, T. Akamine and Y. Sakurai (2010) Impact of a climate regime shift on the migration of Japanese common squid (*Todarodes pacificus*) in the Sea of Japan. ICES Journal of Marine Science, **67**, 1314–1322.

<https://doi.org/10.1093/icesjms/fsq043>

清本節夫・渡邊庄一・前野幸男・吉村 拓・玉置昭夫 (2019) 海藻群落の優占種の差異がクロアワビとメガイアワビの再生産と成長に与える影響. 水産増殖, **67**, 65—79.

<https://doi.org/10.11233/aquaculturesci.67.65>

清本節夫・山仲洋紀・吉村 拓・八谷光介・邵 花梅・門田 立・玉置昭夫 (2021) 九州北西部壱岐島和歌地先におけるカジメ科海藻藻場の消失までの長期変動. 日本水産学会誌, **87**, 642—651. <https://doi.org/10.2331/suisan.21-00013>

Kodama, T., S. Ohshimo, A. Tawa, S. Furukawa, K. Nohara, H. Takeshima, S. N. Chiba, T. Ishihara, E. Sawai, M. Kawazu, M. Okazaki, T. Ono and N. Suzuki (2020) Vertical distribution of larval Pacific bluefin tuna, *Thunnus orientalis*, in the Japan Sea. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, **175**, 104785.

<https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2020.104785>.

久賀みづき・井桁庸介・広瀬直毅・渡邊達郎 (2018) 高解像度海洋モデルで表現された富山湾周辺海域における近慣性内部波・沿岸捕捉波の発生・伝播過程. La mer, **56**, 95—111.

Kuroda, H., T. Azumaya, T. Setou and N. Hasegawa (2021) Unprecedented Outbreak of Harmful Algae in Pacific Coastal Waters off Southeast Hokkaido, Japan, during Late Summer 2021 after Record-Breaking Marine Heatwaves. J. Mar. Sci. Eng., **9**, 1335.

<https://doi.org/10.3390/jmse9121335>

Kuroda, H., T. Saito, T. Kaga, A. Takasuka, Y. Kamimura, S. Furuichi and T. Nakanowatari (2020a) Unconventional Sea Surface Temperature Regime Around Japan in the 2000s–2010s: Potential Influences on Major Fisheries Resources. *Front. Mar. Sci.*, **7**, 574904. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.574904>

Kuroda, H. and T. Setou (2021) Extensive Marine Heatwaves at the Sea Surface in the Northwestern Pacific Ocean in Summer 2021. *Remote Sens.*, **13**, 3989. <https://doi.org/10.3390/rs13193989>

Kuroda, H., T. Setou, S. Kakehi, S. Ito, T. Taneda, T. Azumaya, D. Inagake, Y. Hiroe, K. Morinaga, M. Okazaki, T. Yokota, T. Okunishi, K. Aoki, Y. Shimizu, D. Hasegawa and T. Watanabe (2017) Recent Advances in Japanese Fisheries Science in the Kuroshio-Oyashio Region through Development of the FRA-ROMS Ocean Forecast System: Overview of the Reproducibility of Reanalysis Products. *Open Journal of Marine Science*, **7**, 62–90. <https://doi.org/10.4236/ojms.2017.71006>

Kuroda, H., Y. Toya, S. Kakehi and T. Setou, (2020b) Interdecadal variations of the Oyashio and extreme cold water events near the Japanese coast from the 1960s to the 2010s. In: *Changing Asia-Pacific Marginal Seas. Atmosphere, Earth, Ocean & Space*, ed. C. T. Chen, & X. Guo, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4886-4_13

Kuroda, H., T. Wagawa, Y. Shimizu, S. Ito, S. Kakehi, T. Okunishi, S. Ohno and A. Kusaka (2015) Interdecadal decrease of the Oyashio transport on the continental slope off the southeastern coast of Hokkaido, Japan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **120**, <https://doi.org/10.1002/2014JC010402>

Kuroda, H. and K. Yokouchi (2017) Interdecadal decrease in potential fishing areas for Pacific saury off the southeastern coast of Hokkaido, Japan. *Fish. Oceanogr.*, **26**, 439–454. <https://doi.org/10.1111/fog.12207c>

桑原久実 (2014) 魚の食害対策に係わる技術と課題. *日本水産工学会誌*, **51**, 253–257. https://doi.org/10.18903/fisheng.51.3_253

桑原久実・明田定満・小林 聡・竹下 彰・山下 洋・城戸勝利 (2006) 温暖化による我が国水産生物の分布域の変化予測. *地球環境*, **11**, 49–57.

Litzow, M. A., M. E. Hunsicker, N. A. Bond, B. J. Burked, C. J. Cunningham, J. L. Gosselin, E. L. Norton, E. J. Ward and S. G. Zador (2020) The changing physical and ecological meanings of North Pacific Ocean climate indices. PNAS, **117**, 7665—7671.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1921266117>

Masuda, R. (2008) Seasonal and interannual variation of subtidal fish assemblages in Wakasa Bay with reference to the warming trend in the Sea of Japan. Environ Biol Fish, **82**, 387—399. <https://doi.org/10.1007/s10641-007-9300-z>

宮島利宏・浜口昌巳 (2017) 堆積物における長期炭素貯留の仕組みと役割. 「ブルーカーボン浅海における CO₂ 隔離・貯留とその活用」堀正和, 桑江朝比呂編, 地人書館, 東京.

Miyajima, T., M. Hori, M. Hamaguchi, H. Shimabukuro and G. Yoshida, (2017), Geophysical constraints for organic carbon sequestration capacity of *Zostera marina* seagrass meadows and surrounding habitats. Limnol. Oceanogr., **62**, 954—972.
<https://doi.org/10.1002/lno.10478>

Miyama, T., S. Minobe and H. Goto (2021) Marine Heatwave of Sea Surface Temperature of the Oyashio Region in Summer in 2010–2016. Front. Mar. Sci., **7**, 576240.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.576240>

Miyoshi, J. (2020), Hydrogen Fuel Cell and Battery Hybrid-Powered Fishing Vessels: Utilization of Marine Renewable Energy for Fisheries, Modern Fisheries Engineering - Realizing a Healthy and Sustainable Marine Ecosystem-, CRC Press Taylor and Francis Group, 125-143. <https://doi.org/10.1201/9780429328039>

三好 潤・長谷川勝男・寺田大介・溝口弘泰・松田秋彦・小河道生・黒坂浩平・保尊 脩・日高浩一・萩原秀樹 (2018) 近海かつお一本釣り漁船の往復航海におけるウェザールーティング検証, 日本水産工学誌, **55**, 105—113. https://doi.org/10.18903/fisheng.55.2_105.

溝口弘泰 (2021) 洋上風力を通じた水産振興における水産工学的課題. 日本水産工学会誌, **58**, 207—212. https://doi.org/10.18903/fisheng.58.3_207

Morita, K. (2016) Cherry blossoms predict chum salmon survival. NPAFC Newsletter, **39**, 22—23.

Morita, K. and A. Nakashima (2015) Temperature seasonality during fry out-migration influences the survival of hatchery-reared chum salmon *Oncorhynchus keta*. J. Fish Biol., **87**, 1111—1117. <https://doi.org/10.1111/jfb.12767>

Muhling, B. A., D. Tommasi, S. Ohshimo, M. A. Alexande and G. DiNardo (2018) Regional-scale surface temperature variability allows prediction of Pacific bluefin tuna recruitment. ICES Journal of Marine Science, **75**, 1341—1352. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsy017>

村瀬 昇・阿部真比古・福留 慶・中川昌大・鹿野陽介 (2018) カイガラアマノリ葉状体の生長に及ぼす温度の影響. 水産大学校研究報告, **66**, 215—220.

村瀬 昇・棚田教生・多田篤司・島袋寛盛・吉田吾郎・阿部真比古・野田幹雄 (2021) 徳島県鳴門産ワカメ養殖品種と椿町産暖海性天然ワカメの交雑種苗の高温下での生長特性. 水産大学校研究報告, **69**, 81—88.

Nishihama, S., Y. Yamana and T. Yoshimura (2020) First record of the tropical holothurian *Stichopus naso* Semper, 1867 (*Echinodermata; Holothuroidea; Synallactida*) from the temprate coast of Kyushu mainland, Japan in relation to ocean warming. Plankton and Benthos Research, **15**. <https://doi.org/10.3800/pbr.15.66>

Nishikawa, H., I. Yasuda and S. Itoh (2011) Impact of winter-to-spring environmental variability along the Kuroshio jet on the recruitment of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*). Fish. Oceanogr., **20**, 570—582. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2011.00603.x>

野田幹雄・村瀬 昇 (2021) クロダイ成魚による養殖ワカメの食痕の特徴と採餌行動. 水産大学校研究報告, **69**, 93—101.

Noto, M. and I. Yasuda (1999) Population decline of the Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, in relation to sea surface temperature in the Kuroshio Extension. Canadian J. Fish. Aquat. Sci., **56**, 973—983. <https://doi.org/10.1139/f99-028>

Ojima, N., M. Mekuchi, T. Ineno, K. Tamaki, A. Kera, S. Kinoshita, S. Asakawa and S. Watabe (2012) Differential expression of heat-shock proteins in F2 offspring from F1

hybrids produced between thermally selected and normal rainbow trout strains. Fish Sci., **78**, 1051—1057. <https://doi.org/10.1007/s12562-012-0523-3>

岡本将揮・森 明寛・前田晃宏・福井利憲・坂本節子・山口峰生(2019) 有毒渦鞭毛藻 *Alexandrium ostenfeldii* の増殖に及ぼす水温と塩分の影響. 鳥取県衛生環境研究所報, **58**, 11-16.

Onitsuka, T., R. Kimura, T. Ono, H. Takami and Y. Nojiri, (2014) Effects of ocean acidification on the early developmental stages of the horned turban, *Turbo cornutus*. Mar Biol, **161**, 1127—1138. <https://doi.org/10.1007/s00227-014-2405-y>

Onitsuka T., H. Takami, D. Muraoka, Y. Matsumoto, A. Nakatsubo, R. Kimura, T. Ono and Y. Nojiri (2018) Effects of ocean acidification with pCO₂ diurnal fluctuations on survival and larval shell formation of Ezo abalone, *Haliotis discus hannai*. Marine Environmental Research, **134**, 28-36. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2017.12.015>.

Qiu, B., S. Chen, N. Sceneider, E. Oka and S. Sugimoto (2020) On the Reset of the Wind-Forced Decadal Kuroshio Extension Variability in Late 2017. Journal of Climate, **33**, 10813—10828. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0237.1>

Saito, T. and K. Nagasawa (2009) Regional synchrony in return rates of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) in Japan in relation to coastal temperature and size at release. Fisheries Research, **95**, 14—27. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2008.07.004>.

Shimada, H., S. Sakamoto, M. Yamaguchi and I. Imai (2016) First record of two warm-water HAB species *Chattonella marina* (Raphidophyceae) and *Cochlodinium polykrikoides* (Dinophyceae) on the west coast of Hokkaido, northern Japan in summer 2014. Regional Studies in Marine Science, **7**, 111—117. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.05.010>.

Sotoyama, Y., S. Yokoyama, M. Ishikawa, S. Koshio, H. Hashimoto, H. Oku and T. Ando (2018) Effects of a superoptimal temperature on aquacultured yellowtail *Seriola quinqueradiata*. Fish. Sci., **84**, 1063—1071. <https://doi.org/10.1007/s12562-018-1247-9>

Stramma, L., S. Schmidtke, S. J. Bograd, T. Ono, T. Ross, D. Sasano and F. A. Whitney (2020) Trends and decadal oscillations of oxygen and nutrients at 50 to 300 m depth in the

equatorial and North Pacific. *Biogeosciences*, **17**, 813—831. <https://doi.org/10.5194/bg-17-813-2020>.

Takahara, H., H. Kidokoro and Y. Sakurai (2017) High temperatures may halve the lifespan of the Japanese flying squid, *Todarodes pacificus*. *Journal of Natural History*, **51**, 2607—2614. <https://doi.org/10.1080/00222933.2016.1244297>

Takahashi, H., A. Toyoda and T. Yamazaki (2017) Asymmetric hybridization and introgression between sibling species of the pufferfish *Takifugu* that have undergone explosive speciation. *Mar. Biol.*, **164**, 90. <https://doi.org/10.1007/s00227-017-3120-2>

Takahashi, M., C. Sassa, S. Kitajima, M. Yoda and Y. Tsukamoto (2022) Linking environmental drivers, juvenile growth, and recruitment for Japanese jack mackerel *Trachurus japonicus* in the Sea of Japan. *Fish. Oceanogr.*, **31**, 70—83. <https://doi.org/10.1111/fog.12563>

Takahashi, R., J. Miyoshi, H. Mizoguchi and D. Terada (2019), Comparison of Underwater Cruising Noise in Fuel-Cell Fishing Vessel, Same-Hull-Form Diesel Vessel, and Aquaculture Working Vessel, *Transactions of Navigation*, **4**, 29—38. https://doi.org/10.18949/jintransnavi.4.1_29.

Takasuka, A., H. Nishikawa, S. Furuichi and R. Yukami (2021) Revisiting sardine recruitment hypotheses: Egg-production-based survival index improves understanding of recruitment mechanisms of fish under climate variability. *Fish Fish.*, **22**, 974—986. <https://doi.org/10.1111/faf.12564>

竹中彰一・河野芳巳・田村稔治・坂口秀雄・武智昭彦・島袋寛盛・吉田吾郎 (2021) 瀬戸内海から豊後水道の異なる水温環境下で養殖したヒジキ・ワカメ・トサカノリの成長. *日本水産学会誌*, **87**, 375—385. <https://doi.org/10.2331/suisan.20-00045>

Tan, E., S. Kinoshita, Y. Suzuki, T. Ineno, K. Tamaki, A. Kera, K. Muto, T. Yada, S. Kitamura, S. Asakawa and S. Watabe (2016) Different gene expression profiles between normal and thermally selected strains of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, as revealed by comprehensive transcriptome analysis. *Gene*, **576**, Part 1, 637—643. <https://doi.org/10.1016/j.gene.2015.10.028>.

棚田教生・多田篤司・手塚尚明・清本節夫 (2019) 養殖漁場でワカメ種苗の食害魚撮影に初めて成功. 徳島水研だより, **109**, 5—7.

Tanaka, K., S. Taino, H. Haraguchi, G. Prendergast and M. Hiraoka (2012) Warming off southwestern Japan linked to distributional shifts of subtidal canopy-forming seaweeds. *Ecology and Evolution*, **2**, 2854—2865. <https://doi.org/10.1002/ece3.391>

Temmink, R. J. M., L. P. M. Lamers, C. Angelini, T. J. Bouma, C. Fritz, J. van de Koppel, R. Lexmond, M. Rietkerk, B. R. Silliman, H. Joosten and T. van der Heide (2022) Recovering wetland biogeomorphic feedbacks to restore the world's biotic carbon hotspots. *Science*, **376** Issue 6593. <https://DOI: 10.1126/science.abn1479>

Terada, R., M. Abe, T. Abe, M. Aoki, A. Dazai, H. Endo, M. Kamiya, H. Kawai, A. Kurashima, T. Motomura, N. Murase, Y. Sakanishi, H. Shimabukuro, J. Tanaka, G. Yoshida and M. Aoki (2021) Japan's nationwide long-term monitoring survey of seaweed communities known as the “Monitoring Sites 1000”: Ten-year overview and future perspectives. *Journal of Applied Phycology*, **29**, 639—648. <https://doi.org/10.1111/pre.12395>

白井一茂・田村怜子・原日出夫 (2018) 野菜残差を餌としたムラサキウニ養殖について. 神奈川県水産技術センター研究報告, **9**, 9—15.

Wagawa, T., T. Tamate, H. Kuroda, S. Ito, S. Kakehi, T. Yamanome and T. Kodama (2016) Relationship between coastal water properties and adult return of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) along the Sanriku coast, Japan. *Fish. Oceanogr.*, **25**, 598—609. <https://doi.org/10.1111/fog.12175>

Wakita, M., K. Sasaki, A. Nagano, H. Abe, T. Tanaka, K. Nagano, K. Sugie, H. Kaneko, K. Kimoto, T. Okunishi, M. Takada, J. Yoshino and S. Watanabe (2021) Rapid Reduction of pH and CaCO₃ Saturation State in the Tsugaru Strait by the Intensified Tsugaru Warm Current During 2012–2019. *Geophysical Research Letters*, **48**, 10, e2020GL091332. <https://doi.org/10.1029/2020GL091332>

Yamada, Y., K. Sasaki, K. Yamane, M. Yatsuya, Y. Shimizu, Y. Nagakura, T. Kurokawa and H. Nikaido (2019) The utilization of cold-water zooplankton as prey for chum salmon fry

(*Oncorhynchus keta*) in Yamada Bay, Iwate, Pacific coast of northern Japan. *Regional Studies in Marine Science*, **29**, 100633. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100633>.

Yamamoto-Kawai, M., N. Kawamura, T. Ono, N. Kosugi, A. Kubo, M. Ishii and J. Kanda (2015) Calcium carbonate saturation and ocean acidification in Tokyo Bay, Japan. *J. Oceanogr.*, **71**, 427—439.

Yamamoto-Kawai, M., T. Mifune, T. Kikuchi and S. Nishino (2016) Seasonal variation of CaCO_3 saturation state in bottom water of a biological hotspot in the Chukchi Sea, Arctic Ocean. *Biogeosciences*, **13**, 6155—6169.

Yatsu, A. (2019) Review of population dynamics and management of small pelagic fishes around the Japanese Archipelago. *Fisheries Science*, **85**, 611—639.
<https://doi.org/10.1007/s12562-019-01305-3>

Yatsu, A, H. Okamura, T. Ichii and K. Watanabe (2021) Clarifying the effects of environmental factors and fishing on abundance variability of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the western North Pacific Ocean during 1982–2018. *Fish. Oceanogr.*, **30**, 194—204.
<https://doi.org/10.1111/fog.12513>

Yatsu, A., T. Watanabe, M. Ishida, H. Sugisaki and L. D. Jacobson (2005) Environmental effects on recruitment and productivity of Japanese sardine *Sardinops melanostictus* and chub mackerel *Scomber japonicus* with recommendations for management. *Fish. Oceanogr.*, **14**, 263—278. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2419.2005.00335.x>

Yoneda, M., T. Fujita, M. Yamamoto, K. Tadokoro, Y. Okazaki, M. Nakamura, M. Takahashi, N. Kono, T. Matsubara, K. Abo, G. Xinyu and N. Yoshie, (2022b) Bottom-up processes drive reproductive success of Japanese anchovy in an oligotrophic sea: A case study in the central Seto Inland Sea, Japan. *Progress in Oceanography*, **206**, 102860.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102860>.

Yoneda, M., M. Yamamoto and T. Tsuzaki (2022a) Experimental evidence for population variability of reproductive traits in Japanese anchovy *Engraulis japonicus*. *Regional Studies in Marine Science*, **49**, 102123. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.102123>.