

沿岸漁船観測データを利用したケンサキイカ漁場予測

伊藤, 毅史

<https://hdl.handle.net/2324/7157383>

出版情報 : Kyushu University, 2023, 博士 (学術), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

沿岸漁船観測データを利用したケンサキイカ
漁場予測

伊藤 毅史

2023年7月

要 旨

佐賀県玄海海域で重要種であるケンサキイカを主な漁獲対象とする沿岸いか釣漁業に代表されるように、佐賀県玄海海域の沿岸漁業も全国的な状況と同様、漁獲量の減少や操業コストの増加などにより非常に厳しい経営状況にある。海洋資源を持続可能な形で利用しながら水産業を成長産業に変えていくためには、衛星リモートセンシングや海洋GISの利用促進に加え、近年の技術革新が著しい情報通信技術、AIおよびロボット技術といった先端技術を積極的に水産業に導入・普及させることが重要である。

そこで本研究では、沿岸漁業において先端技術を導入し、操業の効率化を図るための第一歩として、沿岸海域における効率的な漁業者参加型の海洋観測システムの構築、デジタル操業日誌システムの開発と沿岸漁業現場への導入、そしてケンサキイカをパイロットモデルとして物理・生態系結合モデルを用いた漁場予測に関する技術開発・研究を行った。

沿岸海域における効率的な海洋観測システムの構築

沿岸海域における海況変動を的確に理解し、精度よく予測するためには、より時空間的に高密度な海洋観測が必要である。本研究では、様々な漁具への取り付けが可能な小型・軽量かつ堅牢な CTD センサーと、観測結果を操業現場で即時に確認できるデータを自動で転送し収集する仕組みを開発した。また、当該測器を利用した漁業者参加型の CTD 観測体制を構築し、実際の漁業現場における実証試験を実施した。これにより、漁業者は本観測システム導入前に比べて海洋観測を容易にできるようになり、その結果、九州北西の沿岸海域においてこれまでにない時空間スケールでの水温・塩分データの収集が可能となった。昇温期にかけての壱岐水道における水温・塩分の変動特性を調べた結果、塩分が 10~20 日で変動する様子を捉えていた。漁業者による CTD 観測は、既存の定線観測に比べて時空間的に高密度な観測データの収集が可能であり、沿岸海域における有効な観測手段であることが示された。2019 年

1 月から漁業者が観測した水温・塩分データは、海況予測モデル(九州大学・DREAMS)へ同化されるなど、漁海況予報の高精度化に貢献し始めている。

デジタル操業日誌システムの構築と現場実装

漁業者の操業情報は、水産資源の評価・管理および海況と漁況との関連を解明するための基礎データとして不可欠である。そこで本研究では、沿岸漁業における操業データの効率的な収集および解析を目的として、デジタル操業日誌システムの開発および現場実装を行った。2022年4月から佐賀県玄海海域の漁業現場に当該システムを本格的に導入し、28名の沿岸漁業者から操業データを収集する体制を構築した。端末の位置情報は航跡としてアプリ内に自動で収集され、また、漁業者が入力もしくは選択する操業情報を必要最小限に留めることで、漁業者はわずか5ステップで操業データの入力から報告までの作業を行うことができるようになった。調査協力者数の多い沿岸いか釣漁業とはえ縄漁業では、年間数百件単位で操業データの収集が可能となった。多種多様な漁法によって様々な魚種が漁獲される沿岸漁業の特徴を考慮しつつ、漁業現場での利用に適したシステムを導入し安定的な運用ができています。

物理・生態系結合モデルを用いたケンサキイカの漁場予測

ケンサキイカは、九州北西地域では生き造りとして利用されることがあるなどこの地域において経済的に重要な魚種である。しかしながら、日本海南西部から東シナ海における本種の年間総漁獲量は過去 30 年間で 80%以上減少している。本種の時空間分布を把握し予測するために、九州北西海域において鉛直 1 次元の物理・生態系結合(NPZD)モデルと漁場予測(HSI)モデルを構築した。HSI モデルの環境変数として NPZD モデル予測値(植物プランクトンもしくは動物プランクトン濃度)を加える場合と加えない場合の 3 つ比較実験を実施した。その結果、NPZD モデル予測値のうち動物プランクトン濃度を HSI モデルの環境変数として利用することで、九州北西海域に

おけるケンサキイカの漁場予測の精度が向上することが明らかとなった。本研究により動物プランクトン濃度のような低次生態系モデルを利用することで漁場予測モデルの精度が向上することが示された。さらに、本研究で得られた結果は効率的な漁業の実現と本種資源の保全と管理にも有意義である。

目次

第1章 緒言.....	1
1.1 水産業の概況と漁船漁業の目指すべき将来像.....	1
1.2 沿岸漁業の現状と課題.....	2
1.3 佐賀県玄海海域の海域的特性および沿岸漁業の特徴と課題.....	4
1.4 本研究の目的.....	6
1.5 図表.....	7
第2章 九州北西海域における漁業者参加型のCTD観測システムの構築.....	8
2.1 研究の目的.....	8
2.2 材料と方法.....	10
2.2.1 漁業向けCTDの開発.....	10
2.2.2 データの収集と解析.....	10
2.3 結果と考察.....	12
2.3.1 水温・塩分観測状況.....	12
2.3.2 漁業向けCTDと高精度CTDとの観測結果の比較.....	12
2.3.3 観測の時空間分布と観測例.....	13
2.4 まとめ.....	16
2.5 図表.....	17
第3章 沿岸漁業におけるデジタル操業日誌システムの開発と現場実装.....	27
3.1 研究の目的.....	27
3.2 デジタル操業日誌システム.....	28
3.2.1 システムの概要と操業状況報告.....	28
3.2.2 クラウドサービス機能の概要.....	28
3.2.3 出力システムの概要.....	28
3.3 現場実装.....	30
3.4 まとめ.....	32
3.5 図表.....	33
第4章 物理・生態系結合モデルを用いたケンサキイカの漁場予測.....	38

4.1 研究の目的	38
4.2 材料と方法	41
4.2.1 物理・生態系結合 (NPZD) モデル	41
4.2.1.1 物理的条件	41
4.2.1.2 生物的条件	41
4.2.1.3 海洋観測調査	42
4.2.2 Habitat Suitability Index (HSI) モデル	42
4.2.2.1 漁獲量データおよび研究海域	42
4.2.2.2 環境変数	42
4.2.2.3 HSI モデル構築	43
4.2.2.4 モデル評価および比較実験	44
4.3 結果	45
4.3.1 NPZD モデル	45
4.3.1.1 水温および塩分の鉛直プロファイル	45
4.3.1.2 PHY および ZOO の鉛直プロファイル	45
4.3.2 HSI モデル	45
4.3.2.1 環境変数のヒストグラムと SI 曲線	45
4.3.2.2 モデルの比較実験	46
4.4 まとめと考察	48
4.5 図表	51
第5章 総合考察	67
謝辞	74
引用文献	75

第1章 緒言

1.1. 水産業の概況と漁船漁業の目指すべき将来像

我が国周辺水域が含まれる北西太平洋海域は世界で最も漁獲量が多い海域であり、2020年の漁獲量は世界の漁獲量の21%程度を占める(水産庁, 2021)。このため我が国周辺海域では、沿岸域から遠洋・沖合にかけて多種多様な漁業が営まれ、様々な魚種が漁獲されている。北西太平洋海域は、世界的にみても生産性が高く、世界三大漁場と呼ばれる優良な漁場として知られている(北川, 2014)。しかし、当該水域の水産資源の状況は、「高位・中位・低位」の3区分による資源評価では、資源の水準と動向を評価した42魚種61系群のうち資源水準の状況が低位のものが56%を占めるなど厳しい状況である(水産庁, 2021)。このような状況に加えて、魚価や漁獲量の低迷、漁業従事者の高齢化、そして漁業就業者数の減少に歯止めがかからず、担い手の確保も恒常的な課題となっている。さらに、漁業者の経営に大きな影響を与える燃油価格は、もともと様々な要因により変動しやすい特徴を持つが、近年の国際情勢を受け高い水準で変動しており漁家経営を圧迫している。

このように厳しい現状にある我が国の水産業であるが、2015年に持続可能な開発のための2030アジェンダが国連サミットで正式に採択され、海洋資源についても持続可能な形で利用することが目標に掲げられた(https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/gic/page3_001387.html, 2023年2月12日)。その実現のためには、衛星リモートセンシングや海洋GISを利用した海洋空間の利用と管理が不可欠(齊藤, 2017)だと考えられる。また水産庁は、「水産新技術の現場実装推進プログラム」を2019年に公表し、その中で「経験と勘に頼ってきた沿岸漁業について、ICT等の先端技術の導入を促進」、「漁業者からのデータ収集・処理技術によって7日先までの漁場予測を可能とする技術の導入を目指す」、そして「データによる漁場予測技術により、沿岸漁業の収益性向上や円滑な後継者への技術承継を実現」という沿岸漁業の将来目標を掲げている(<https://www.gov-base.info/2019/12/10/77064>,

2023年2月12日)。海洋資源を持続可能な形で利用しながら水産業を成長産業に変えていくためには、衛星リモートセンシングや海洋GISの利用促進に加え、近年の技術革新が著しい情報通信技術、AIおよびロボット技術といった先端技術を積極的に水産業に導入・普及させる、いわゆる漁業のスマート化を図ることが重要である。この取組により新たに得られる漁業情報は、水産資源の評価や管理にも非常に有用になる。

1.2. 沿岸漁業の現状と課題

遠洋・沖合漁業では、衛星リモートセンシングの利用に加えて、海況予測モデルの利用やそのモデル予測値を利用した漁場予測の研究も進んでいる(Alabia et al., 2015a; Igarashi et al., 2018)。このような情報化の進んだ遠洋・沖合漁業に比べて、沿岸漁業では未だに「経験と勘」を頼りにした操業が営まれている(斎藤ら, 2021)。漁業者の「経験と勘」は漁場推定や操業判断といった意思決定を行う上で非常に重要であることは言うまでもないが、海洋前線や潮目といった漁業者が経験的に漁場探索に利用している知見(北川, 2014)を科学的に推定する取組、つまり漁場予測を沿岸漁業においても積極的に導入することが必要不可欠である。

漁場予測の取組により、漁業者は漁場探索に伴う燃油消費を抑え安定的な収益確保を図ることが可能となり、漁家経営の安定化につながると考えられる。そこで、漁場予測モデルを構築する上での我が国沿岸漁業の現状と課題について、次に示す2項目に焦点をしばってその現状と課題を整理する。まず、「沿岸海域での海洋観測体制」について、沿岸海域の海洋環境の把握や海況予測モデルの精度向上のためには、より効率的な海洋観測システムの構築が必要不可欠である。当該海域での海洋観測網の充実によって高精度な海況予報を沿岸漁業者に提供可能となる。また、海況予報の高精度化により当該予報値を利用する漁場予測の精度も向上し、沿岸漁業者の操業の効率化にも資すると考えられる。次に、「沿岸漁業での操業報告体制」について、

水産資源の評価や管理,そして海況と漁況との関係等の解析のためには漁業者の操業報告データが欠かせない.多種多様な漁法で様々な魚種が漁獲される沿岸漁業では,操業報告体制が構築されていない場合が多く,このような体制の構築は喫緊の課題である.

沿岸海域での海洋観測体制

遠洋・沖合漁業では,衛星リモートセンシングの応用が進んでいる(齊藤ら, 2021).衛星水温画像は最も長期に利用されており(齊藤ら, 2021),また,海面高度計情報はカツオやマグロなどの高度回遊性魚類を対象とした漁業では必要不可欠な情報となっている(斎藤, 2016).一方,沿岸漁業では,その操業エリアの狭さから遠洋・沖合漁業に比べてより高解像度の情報が求められることや海況の複雑さなどの問題もあり,遠洋・沖合漁業のように衛星情報が積極的に活用される段階には至っていない(斎藤, 2016).沿岸海域では,主に都道府県の水産試験研究機関による毎月の定線観測や定地水温の観測によってデータが蓄積されている.しかし,水平方向に数十km,時間的に数日程度で大きく変動する沿岸海洋環境を現状の観測体制で的確にモニタリングすることは困難である(田中ら, 2018).以上のように沿岸海域では,衛星情報の利用の難しさや海洋観測データの不足が,海況予測モデルの高精度化の妨げとなっている.

遠洋・沖合漁業で海洋循環数値モデルの利用が進んでいる背景として,海洋データ同化システムの研究が主に黒潮流軸の変動やメソスケール渦などおおよそ100 km以上のスケールを対象としていた(藤井ら, 2017)ことにも起因すると考えられる.海洋データ同化研究の進展は,海洋数値モデルの精度向上と海洋観測システムの発展によって支えられており,沿岸域といったより細かなスケールの現象の再現するためには,沿岸海域における新たな同化システムの開発や,より効率的な海洋観測システムの構築が課題とされている(藤井ら, 2017).2000年代初頭にイタリア,アメリカおよびフラン

スで漁船を活用した海洋観測システムの開発が始められ(Falco et al., 2007; Manning and Pelletier, 2009; Leblond et al., 2010), 近年, 我が国においても沿岸海域での海洋観測に漁船の活用が進んでおり(e.g., 大慶ほか, 2010; 渡慶次ほか, 2013; 2016; 清水ほか, 2021), 海洋観測網の充実が期待される. しかし, 沿岸漁業者の操業を極力妨げずに水温・塩分の鉛直構造の観測と漁業現場での観測結果の確認ができ, 海洋観測データの自動送信・集約を可能とする調査基盤は整備されておらず, 漁船を活用した観測網を拡大させるためにはこのような海洋観測体制の構築が重要である.

沿岸漁業での操業報告体制

沖合底びき網漁業や大中型まき網漁業などの大臣許可漁業では, 漁獲成績報告書, いわゆる操業データを農林水産大臣に提出する義務があることから, 当該漁業での対象魚種の漁獲情報が蓄積されてきた. これにより, 遠洋・沖合漁業での漁場予測といった海況と漁況との関係解明の研究が発展してきたといえる. 近年, 沖合漁業では, デジタル端末を用いて操業報告を行う取組も行われている(鈴木・佐野, 2019; 松本, 2022). 一方, 沿岸漁業では, そもそも漁獲報告体制が構築されていない場合が多く, 操業データの収集がなされている場合でも紙媒体で操業報告が行われることが多い. 沿岸漁業での先行研究では, マナマコ(和田ら, 2010; 佐野, 2018)やズワイガニ(前川・元林, 2022)といった単一魚種に特化した漁業においてデジタル操業日誌システムの現場への導入と, そのデータを活用した資源評価・保護が行われている. 多種多様な漁法によって様々な魚種が漁獲される沿岸漁業の特徴を考慮しつつ, 沿岸漁業現場のユーザーインターフェースに適したシステムの構築と現場への導入は喫緊の課題である.

1.3. 佐賀県玄海海域の海域特性および沿岸漁業の特徴と課題

佐賀県の北部に位置する玄海海域は, 東松浦半島と壱岐間に位置する壱岐水道

およびリアス式海岸が続く海岸線に唐津湾や伊万里湾などの内湾を有し、玄海諸島と呼ばれる7つの離島から構成される(Fig. 1.1)。壱岐水道と内湾域の水深は概ね60 mと30 m以浅である。当該海域の海底地形の概況は、極岸よりでは岩盤や転石混じりの巨礫帯が分布しており、沖に向かうにしたがって砂質帯となっている。

佐賀県玄海海域の漁業者は、東シナ海に面する五島灘や対馬暖流の影響を受ける壱岐水道および対馬東水道などの外海漁場、そして、河川水の影響を受ける唐津湾などの内湾漁場といった漁場環境に応じて多種多様な漁業を営んでいる。島嶼地域においては、各産業に占める漁業の割合が40%程度と最も高く(小林, 2016)、漁業は特に島嶼地域において重要な産業である。2018年漁業センサスによると、佐賀県玄海海域が含まれる松浦海区の漁業就業者数は993名(松浦海区;2013年比20.2%減, 全国;2013年比16.0%減)で、漁業就業者数に占める65歳以上の高齢者の割合は41.2%(全国:38.2%)となっている。松浦海区における主として営んだ漁船漁業経営体のうち沿岸いか釣漁業の割合が21.3%と最も高い。また、沿岸いか釣漁業の主要な漁獲対象種であるケンサキイカの活魚料理は重要な観光資源となっていることから、ケンサキイカはこの地域における重要種の一つである。九州北西海域が含まれる日本海南西部から東シナ海におけるケンサキイカの年間総漁獲量は、1988年には35,300トンであったが、2000年以降に減少し始め、2019年には過去最低の3,900トンにまで減少している(<https://abchan.fra.go.jp/digests2021/index.html>, 2023年2月12日)。沿岸いか釣漁業における漁労支出に占める燃油費の割合は、佐賀県玄海海域の漁業種類の中でも最も高く、平均する期間によっては約48%を占める(伊藤・藤崎, 2018)。沿岸いか釣漁業に代表されるように、玄海海域の沿岸漁業も全国的な状況と同様に非常に厳しい現状と課題を抱えている。

1.4. 本研究の目的

以上のことより本研究では、沿岸漁業において先端技術を導入し、操業の効率化を図るための第一歩として、「沿岸海域における効率的な海洋観測システムの構築」、 「デジタル操業日誌システムの開発と現場実装」および「物理・生態系結合モデルを用いたケンサキイカの漁場予測」に関する研究・技術開発に取り組むこととする。

第2章では、操業の効率化に有効な海況予報を沿岸漁業者に提供する体制の構築、海況予測モデルの信頼性の向上に欠かせない時空間的に高密度な漁業者参加型の海洋観測体制の構築、そして漁業者による海洋観測に必要な漁業現場で簡易的に取り扱うことができるCTDセンサー (CTD: Conductivity Temperature Depth) の開発について述べる。第3章では、水産資源の評価・管理および海況と漁況との関係解析の基礎データとして不可欠な操業データを沿岸漁業者から安定的かつ効率的に収集するために、デジタル操業日誌システムを構築する。そして、そのシステムの漁業現場への実装について述べる。第4章では、第2章と3章の技術開発により利用可能となった高精度な海況予測モデルと沿岸漁業者の操業データを利用し、ケンサキイカをパイロットモデルとして漁場予測モデルを構築する。海洋生態系のほぼ頂点に位置する漁獲対象物を海洋物理的な要因だけで予測するよりも、栄養塩や動植物プランクトンを考慮する方が海洋の食物連鎖系、すなわち「食う食われるの関係」をより正確に表現できるはずである。そのために、九州北西海域における鉛直1次元の物理・生態系結合 (NPZD) モデルを構築する。そして、NPZDモデルを活用したケンサキイカの漁場予測モデルの精度向上について述べる。最後に第5章では、各章で得られた結果について総合的な考察を行う。

1.5. 図表

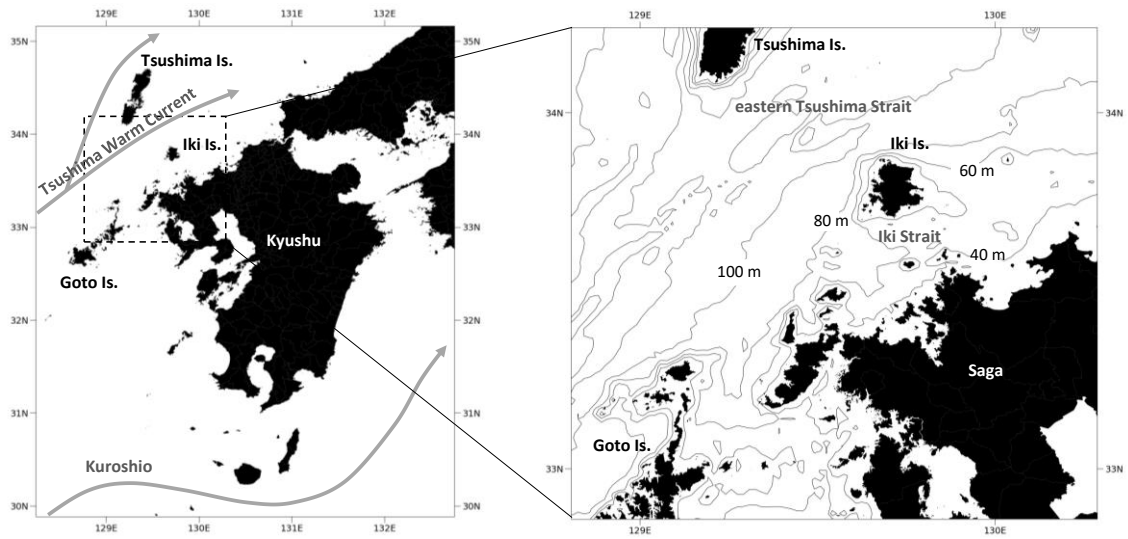


Figure1.1 Location of the study area.

第2章 九州北西海域における漁業者参加型のCTD観測システムの構築

2.1. 研究の目的

沿岸海域における海況変動を的確に理解し、海洋環境の変動機構を解明するためには、より時空間的に高密度な海洋観測が必要不可欠である。日本の各沿岸海域の水温・塩分分布については、主に都道府県の水産試験研究機関による月1度の定線観測によってデータが蓄積されている。しかし、沿岸海域での重要な物理過程が持つ時間スケールに比して、月1度の観測間隔は十分とはいえない(岡ほか, 2013)。沿岸海域では、ロスビー内部変形半径を考慮すると20 km以内の水平解像度、慣性周期や潮汐変化を考慮すると少なくとも1日数回の観測が求められよう。

衛星観測は有効な海洋観測手段であるが、マイクロ波による水温観測は空間解像度が50 kmと粗く、高い空間解像度(～1 km)をもつ衛星熱赤外面像においても雲による欠損という課題を抱えている(岡ほか, 2013)。観測水平間隔が数キロメートル以下の高解像度での観測が可能な水中グライダーを活用した海洋観測が国内でも徐々に導入されつつあり(清水ほか, 2017)、沿岸海域への展開が期待される。しかし、日本沿岸域では、小型漁船漁業が盛んであるためその展開は容易ではなく(伊藤ほか, 2016)、ごく沿岸における運用には至っていない。一方、近年になって、海洋観測への漁船の活用が検討されている(e.g., 大慶ほか, 2010; 渡慶次ほか, 2013; 2016; 清水ほか, 2021)。漁船を利用した海洋観測は、時空間的に密な観測を求められる沿岸海域において、海況データを高密度に収集するのに有効な調査手段として注目されている(渡慶次ほか, 2016)。しかしながら、漁業者の操業を妨げずに、水温・塩分の鉛直構造の観測や観測結果の自動送信・集約を可能とする調査基盤は、これまで整備されていなかった。そこで、筆者らは2016年度から、九州大学を中心とする研究グループで沿岸漁業の操業効率化に向けた「ICTを利用した漁業技術開発事業のうちスマート沿岸漁業推進事業(水産庁委託事業)」に参画し、研究を開始した(滝川ほか, 2019)。海況情報や海況予報は、漁業者にとって操業前に漁場の位置や海況による

操業条件を推測できる有効な情報であることから、これらの情報を活用することで漁業者は操業の可否や漁場の切り替えの判断をよりの確にできるようになり、その結果、操業の効率化につながる事が報告されている(渡慶次ほか, 2017)。したがって、本事業では、漁業者による水温・塩分・流れの観測体制を構築し、そこで得られたデータを海況予測モデルに同化させることでモデル出力の高精度化を図り、さらに、予測情報を漁業者に提供することで操業の効率化につなげることを目指している。このような観測体制を構築し時空間解像度が高い海洋観測を実現できれば、沿岸海域における海況予報の精度向上に貢献できるだけでなく、海況と漁況との関係のさらなる解明にも寄与すると考えられる。

本章では、当該事業の目標のうち漁業者による海洋観測体制の構築を目的とする。漁業者による海洋観測体制のうち最も基本的な水温・塩分観測について、漁業者の操業を妨げないよう操作しやすいCTDセンサー(CTD: Conductivity Temperature Depth)を開発し、その測器を用いた漁業者参加型のCTD観測体制の構築と漁業現場における実証試験の結果について報告する。また、昇温期にかけての壱岐水道における水温・塩分の変動特性を示し、漁業者によるCTD観測の有効性を検討する。

2.2. 材料と方法

2.2.1. 漁業向けCTDの開発

従来のCTD (ASTD, JFEアドバンテック株式会社製)は, 漁業現場での観測を考慮した設計ではないため, 漁業者にとっては大型で重量があり($\phi 136 \text{ mm} \times 491 \text{ mm}$, 空中重量約2,000 g), 精密機器であることから取り扱いに注意を要する. 国内でも利用実績のあるSonTek社製のCastAway-CTDは, 小型で軽量($\phi 72 \text{ mm} \times 203 \text{ mm}$, 空中重量約450 g)であるものの, 測位に時間を要する上に測器内蔵のモニター画面が小さいことから, 漁業者にとっては操作や観測データの閲覧が難しく, 迅速性が求められる漁業現場での使用は困難であることが事前の現場試験で示された. そこで本研究では, 漁業現場において観測, 結果の閲覧, データの収集および転送までの一連の操作を簡易的に行えるCTDセンサー(以下, S-CTD)を開発した (Fig. 2.1, Table 2.1). 漁具に取り付けて観測することを想定し, S-CTD (JFEアドバンテック株式会社製簡易CTD試作機)は小型・軽量($\phi 70 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$, 空中重量約870 g)かつ堅牢(ケース材質にチタンを採用)な設計となっている.

S-CTDと高精度CTD (ASTD102, JFEアドバンテック株式会社製) (以下, ASTD)のセンサー性能を比較したものをTable 2.2に示す. S-CTDのメーカー保証精度は, 水温 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, 電気伝導度 $\pm 0.2 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ (塩分 ± 0.3 程度), 深度 $\pm 2 \text{ m}$ 程度と, 沿岸海域における海況変動を把握できる必要最小限に留めるように設計された. これにより, 高精度CTDと比較してS-CTDの価格を低く抑えることが可能となった. 現場で得られた水温・塩分観測結果を用いた当該測器の精度検証については次章で言及する.

2.2.2. データの収集と解析

漁業者による観測にはS-CTDを用い, ロープでS-CTDを昇降する観測では1日の操業あたり最大3回, 漁具にS-CTDを取り付ける観測では1日の操業あたり最大11回実施した. なお, S-CTDを用いた海面から水深100 mまでの観測所要時間は, ロープによる昇降(毎秒1 m以下の昇降速度)とタブレット端末へのデータ転送を含めて5分程

度である。

福岡県、佐賀県および長崎県(以下、九州北部3県)の漁業者が海洋観測を行った主な海域と九州北部3県の水産試験研究機関が実施する定線観測点をFigure 2.2に示す。当該海域の大部分は200 m以浅の大陸棚上にあり、対馬暖流の影響を強く受ける海域である(Fig. 2.2)。従来の定線観測では観測の空白域が広く(Fig. 2.2)、この図からも空間解像度が不十分であることがわかる。

漁業操業の海域や時期は操業形態等に大きく依存することから、漁船による観測の時空間的な偏りを避けるためには、幅広い操業形態の多くの漁船に観測体制を導入させる必要がある(渡慶次ほか, 2013)。そこで本研究では、Table 2.3に示す多種多様な漁業種類で観測体制を構築した。漁船での観測を補うために、九州北部3県は県調査船でS-CTDでの観測を実施した。S-CTDとASTDとの観測結果を比較するため、佐賀県玄海水産振興センターが毎月上旬に1回実施する定線観測時に、ASTDにS-CTDを取り付けて観測を実施した。Figure 2.2内の三角形は、S-CTDの観測精度評価を行った佐賀県の定線観測点の1つである。次章で本観測点と黒枠内(壱岐水道)における海洋観測データを解析する。

漁業者が観測したデータは、S-CTD本体からBluetooth通信を介してタブレット端末のデータ収集専用アプリ(いであ株式会社製)に転送され、携帯電話のデータ回線によりクラウドストレージに転送される仕組みとなっている(Fig. 2.3)。漁業者によるCTD観測体制の構築にあたっては、九州大学応用力学研究所が開発・運用する海況予測モデル(Hirose et al., 2013)(以下、DREAMS)をベースとした海況予報アプリ(いであ株式会社製)を観測の対価として協力漁業者に提供している(Fig. 2.3)。本論文において解析に用いたデータの収集は、漁業者所有のクラウドストレージの共有リンクを介して行った。

2.3. 結果と考察

2.3.1. 水温・塩分観測状況

2019年1月から12月に九州北部3県の漁業者と県調査船がS-CTDで観測したデータ数は3,609プロファイルであった。そのうち、緯度経度情報が欠落していたデータが412プロファイルあり、それらのデータは解析から除外した。S-CTDは、タブレット端末とリンクし位置情報を取得する仕組みであり、端末でデータ収集用のアプリを起動せずに測器を使用した場合など、使用方法を誤ると観測データから位置情報が欠落してしまうことがある。位置情報の欠落は各漁業者がS-CTDを導入した初期に多く発生していたことから、協力漁業者が測器の取り扱いに不慣れであったことが原因と言える。したがって、漁業現場にS-CTDを導入する際は、導入初期段階における綿密な取り扱い説明や観測実施状況の詳細把握を継続的に行うなど、観測データの品質確保に係るサポートが不可欠である。

漁業者による観測は、五島列島の南西海域から対馬の北東海域まで分布し、特に五島列島の南東海域周辺や壱岐水道周辺で多かった。Figure 2.4は、2019年に実施された観測について、漁船の母港から観測点までの距離の頻度分布を月毎に集計したものである。母港から海洋観測実施海域までの距離は最長で182 kmであった。沿岸漁業者は日帰り操業を行うことが多いことから、母港から50 km以内の海域での観測が全体の85%を占めていた。一方、はえ縄漁業者は魚群探索のために漁場を広範囲に移動し出港後数日程度操業することがあるため、母港から海洋観測実施海域までの距離が長くなる傾向がみられた。

2.3.2. 漁業向けCTDと高精度CTDとの観測結果の比較

S-CTDの観測精度を評価するために、佐賀県玄海水産振興センターが毎月上旬に壱岐水道から対馬東水道にかけて1回実施する定線観測時にS-CTDとASTDの同時観測を実施した。2019年8月5日に実施した定線観測時の鉛直プロファイルをFigure 2.5に示す。8月と9月の観測データを用いて、S-CTDとASTDの観測結果の差を評価

した. 両者の観測の比較に用いたデータ数は135,166であり, 観測の差の二乗平均平方根 (RMS) は, 水温で 0.09°C , 電気伝導度で $0.08 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ であった. 日本海洋データセンター (以下, JODC) に収録されている九州北西海域 (北緯 33° ~ 34° , 東経 129° ~ 130° の範囲) における50 m層の平均水温と平均塩分は, 18.3°C と塩分34.4である. この条件下でS-CTDとASTDのRMS差を用いて塩分の最大・最小値を求め, 平均塩分との差を取ることで得られる塩分の精度は ± 0.14 である. また, 観測結果の平均値と標準偏差は, S-CTDでは水温で 21.1°C と 3.3°C , 塩分で33.9と0.7, ASTDでは水温で 21.4°C と 3.2°C , 塩分で33.9と0.7であった.

上述の結果に加えて, JODC収録の当海域における30 m (50 m) 層の水温と塩分の標準偏差はそれぞれ 4.0°C (3.6°C)と塩分0.4 (0.3) であることから, S-CTDは当海域における海況の変動スケールと比較して十分な観測精度を有していることがわかった. しかし, 塩分鉛直プロファイルの水深60~70 m付近のようにノイズが見られる場合もある (Fig. 2.5). S-CTDの水温・電気伝導度の時定数はいずれも0.2秒程度であるが, 開発段階では電気伝導度の時定数が水温の時定数より若干速く, このことによりノイズが発生していたことがその後の原因解析で明らかとなった. このノイズは, データを鉛直的に8 mの格子毎に中央値を採用することで除去できるものの, DREAMSへのデータ同化の即応性を優先させるために, 本研究では観測データの較正は行っていない.

なお, S-CTDとASTDの観測値を比較した結果, S-CTDの塩分の測定値の方がASTDの測定値と比べて低い値を示していた (Fig. 2.5). S-CTDとASTDの観測値を比較した事例が少ないため, 現時点ではこの差がバイアス誤差かランダムな誤差なのかを判断することは困難である. 観測データの補正については今後の検討課題である.

2.3.3. 観測の時空間分布と観測例

本節では, 佐賀県において重要な漁場, かつ, 観測データが充実していた壱岐水道での昇温期にかけての観測結果を例に, 観測の時空間分布と海洋構造の変化を示し, 漁業者による海洋観測の有効性を検討する.

本研究により取得した漁船観測データの解析例として、2019年5月から9月に壱岐水道 (Fig. 2.2の黒枠内: 北緯33度30分~42分, 東経129度45分~130度の範囲) で観測された水温・塩分の時系列変化をFig. 2.6に示す。なお、当該海域の観測点における最大水深は65 mであった。水温は6月中旬まで鉛直的に一様であり、6月下旬から成層構造が発達し、9月下旬まで成層状態が継続していた。塩分は6月まで鉛直的に一様であった。7月上旬, 7月下旬および8月中旬から9月下旬に塩分33.6以下の低塩分水塊が海底近くまで分布していた。漁業者によるCTD観測は、月に1回程度と少ない観測頻度の定線観測では捉えることができない短期的な塩分の変動を捉えていた。九州北部沿岸域における海況変動に関する先行研究について、昇温期には数日から十数日程度の周期で高温・低塩分水塊が対馬海峡を断続的に通過していることが明らかにされており (e.g., Tawara and Fujiwara, 1985; Manda et al., 2000; Mori et al., 2009), 夏季に対馬水道で断続的にみられる高水温・低塩分水は東シナ海陸棚水に由来すると推測されている (Manda et al., 2000; Mori et al., 2009)。

2019年8月から9月に九州北西海域で九州北部3県の漁業者が海洋観測した結果をFigure 2.7に示す。8月から9月にかけての観測結果を概観すると、8月には五島, 玄界灘および対馬のごく岸よりの海域を除いて、10 m層には高水温かつ低塩分の水域が、30 m層には10 m層に比べて低水温かつ高塩分の水域がそれぞれ広がっており、表層混合層が薄い状況を捉えていた。9月には対馬周辺で塩分31.0前後の低塩分水を観測しているのを除いて、水温・塩分ともに30 m層まで混合しており、8月に比べて表層混合層が厚い状況を捉えていた。

漁業者によるCTD観測は、既存の定線観測に比べて時空間的に高密度に観測データを収集することを可能にした (Fig. 2.6, 2.7)。また、漁業者による観測によって、短期的な時間スケールで海況変動を把握できることも示された (Fig. 2.6)。しかし、漁船観測データは漁場となる海域周辺に偏りやすいことも事実である。前述のとおり、九州北部3県は漁業者による観測で空白になりやすい海域で、データ不足を補う観測を行

っている. このような観測体制を構築することで時空間的により均質な観測データの取得を目指している.

2.4. まとめ

本研究では、様々な漁具への取り付けが可能な小型・軽量かつ堅牢なCTDセンサーと、観測結果を操業現場で即時に確認できデータを自動で転送し収集する仕組みを開発し、九州北部3県の漁業現場へ導入した。漁業者により観測された水温・塩分については、データ同化により海況予測モデルDREAMSの精度向上に供するとともに、当該モデルによる海況予報を観測に協力する漁業者への対価として提供するという取り組みが功を奏し、多くの漁業者から意欲的な協力を得るに至った。本報告では詳しい説明は省略するが、観測協力漁業者の一部には、海況予報を利用することで燃油使用量や操業時間を削減するなどの操業の効率化を実現するものも出始めている。漁業者による海洋観測体制の構築により、当該海域における海洋環境をこれまででない時空間解像度で調査することができるようになり、成層構造や低塩分水塊の変動や分布など、沿岸海域における海況特性の詳細を捉えることが可能となった。

2020年度からは、鳥取県、山口県、熊本県および鹿児島県へとこの取り組みが拡大されており、九州～山陰地方沿岸における海洋観測の高解像度化が着実に進んでいる。漁業者によるCTD観測の拡充は、海況予測モデルの高精度化に加え、沿岸海域における環境特性の解明、水産資源の変動要因や漁場形成機構の解明など、様々な研究に有用な情報となることから、今後もこのような取組の継続と拡充が重要と考える。

2.5. 図 表



Figure 2.1 Photo image of new CTD sensor “S-CTD”. This CTD instrument allows Bluetooth communication with Android devices aiming at automatic data transfer.

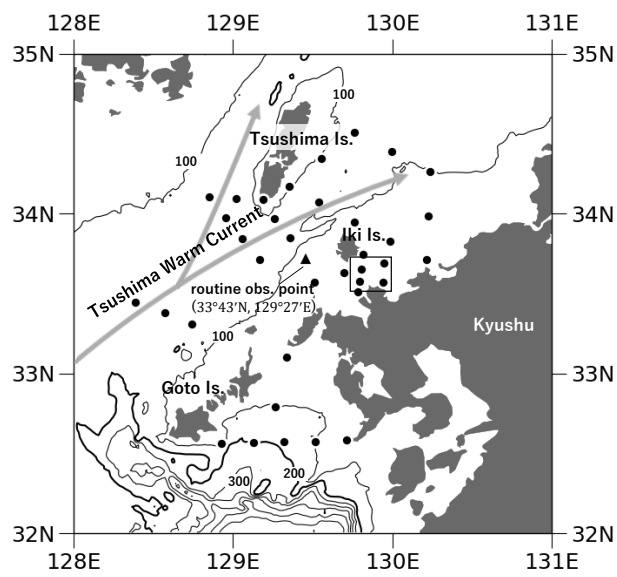


Figure 2.2 Seafloor topography of northwest Kyushu, Japan. The squared domain shows Iki Channel (33°30'–42'N, 129°45'–130°00'E). Black dots show routine observation points by Fukuoka, Saga, and Nagasaki Prefectures, and a triangle indicates a routine observation point (33°43'N, 129°27'E) where the accuracy of S-CTD and ASTD102 is compared at 9:38 am on Monday 5 August 2019.

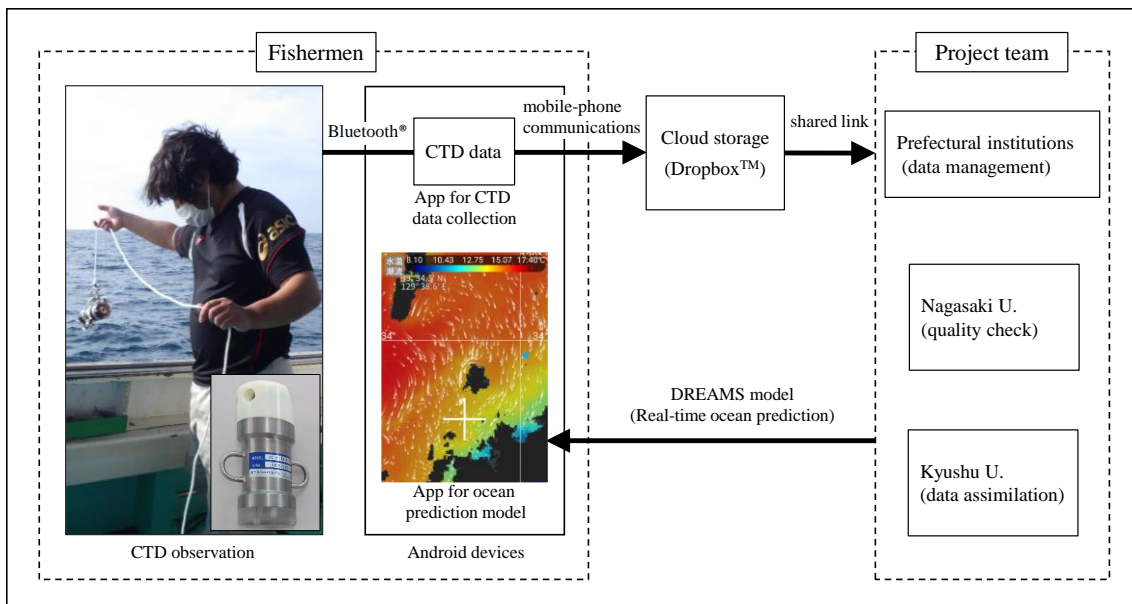


Figure 2.3 Data flowchart of CTD data and the ocean data assimilation and real-time ocean prediction model (DREAMS). Fishermen’s in-situ measurement data help improve the quality of the DREAMS.

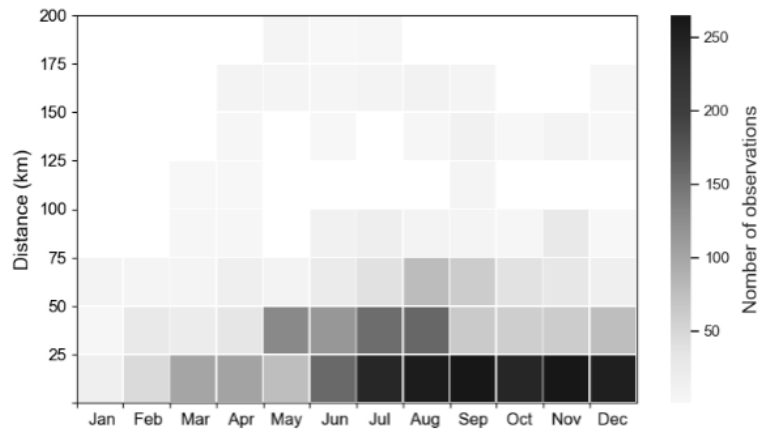


Figure 2.4 Distance between home ports and observation points from January to December 2019.

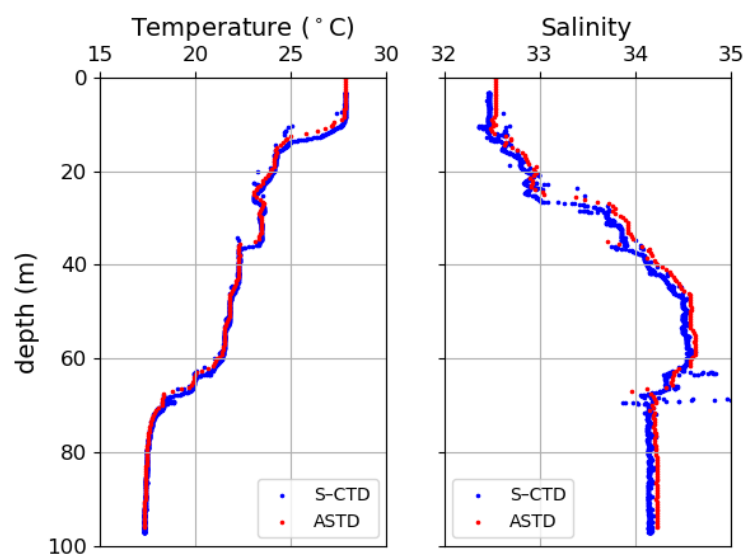


Figure 2.5 Vertical profiles of seawater temperature (left) and salinity (right) in routine observation point (33°43'N, 129°27'E) at 9:38 am on Monday 5 August 2019. Blue dots and red dots indicate S-CTD and ASTD values, respectively.

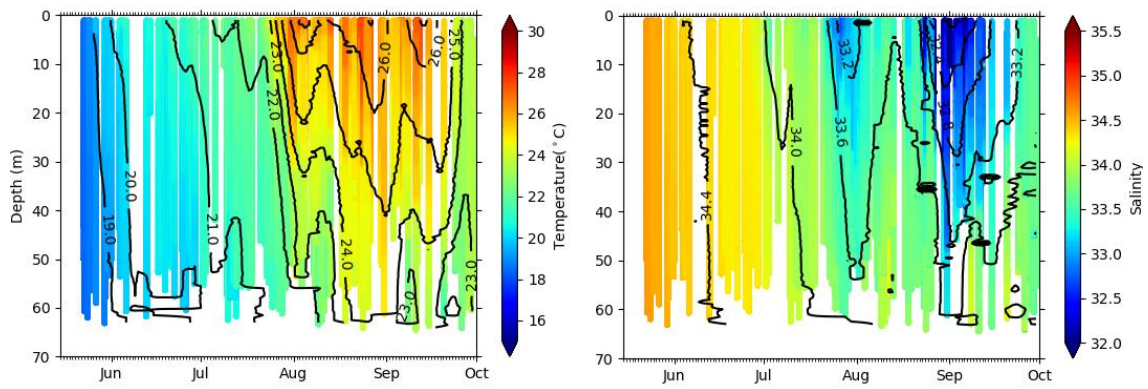


Figure 2.6 Time-series of seawater temperature and salinity in the Iki Channel from May to September 2019. The background color represents raw data, and the contour indicates 5-day moving average. The contour intervals are 1.0°C (temperature) and 0.4 (salinity), respectively. The maximum water depth in the Iki Channel is 65 m.

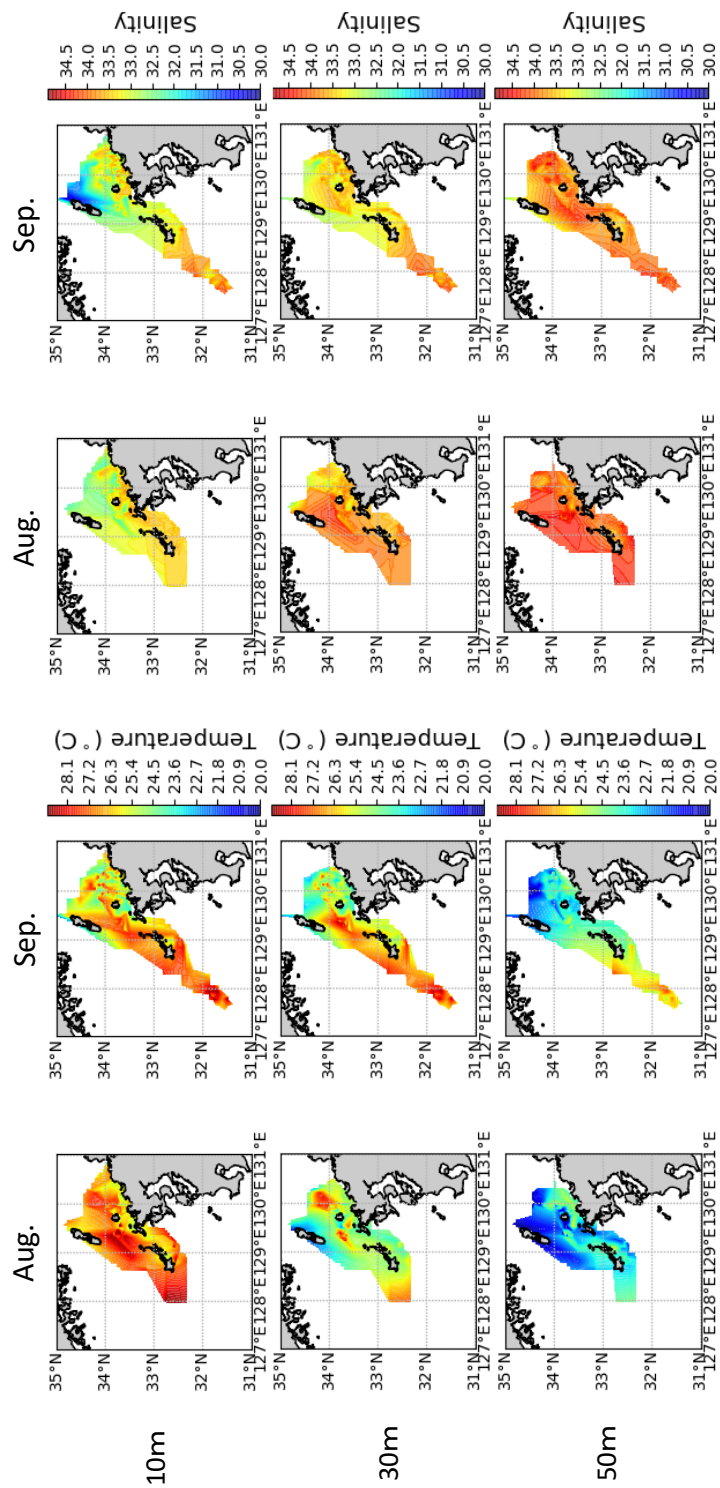


Figure 2.7 Horizontal distributions of seawater temperature and salinity at a depth of 10, 30, and 50 m. Observations were conducted by fishermen from August to September 2019.

items	spec
Housing material	Titanium (grade 2)
Weight	Approx. 870 g in air, 308 g in water
Dimension	Approx. $\varnothing 70$ mm \times 170 mm
Connection	Bluetooth
Recording capacity	200 m
Depth rating	300 m
Power source	Rechargeable lithium ion battery
Measurement time	Approx. 12 h
Charge mode	Wireless charging system
Charging time	Approx. 4 h 20 m

Table 1. Spec of the S-CTD. Sensor and instrument specification.

	conductivity		temperature		depth	
	S-CTD	ASTD	S-CTD	ASTD	S-CTD	ASTD
Measurement range	0.5 to 70 mS·cm ⁻¹	0.5 to 70 mS·cm ⁻¹	-3 to 45°C	-3 to 45°C	0 to 200 m	0 to 600 m or 0 to 1,000 m
Accuracy	± 0.2 mS·cm ⁻¹ (20 to 50 mS·cm ⁻¹)	± 0.01 mS·cm ⁻¹ (28 to 65 mS·cm ⁻¹)	± 0.2 °C (3 to 31°C)	± 0.01 °C (3 to 35°C)	± 1%F.S. (± 2 m)	± 0.1%F.S.

Table 2. A comparison table between the S-CTD versus the ASTD102.

Fishery types	Prefecture	Observing period
Squid angling fishery	Fukuoka, Saga, Nagasaki	Apr. to Nor.
Trolling line fishery	Fukuoka, Saga, Nagasaki	Jan. to Dec.
Floating vertical long line fishery	Fukuoka, Saga	Jan. to Dec.
Surrounding seine fishery	Fukuoka, Saga	Mar. to Dec.
Gill net fishery	Fukuoka	Jan. to Dec.
Long line fishery	Fukuoka, Saga, Nagasaki	Jan. to Dec.
Purse seine fishery (medium and small type)	Fukuoka	May to Dec.
Other	Nagasaki	Jan. to Dec.

Table 3. A list of fishery types of fishermen who cooperates with the ocean observation.

第3章 沿岸漁業におけるデジタル操業日誌システムの開発と現場実装

3.1. 研究の目的

水温、塩分、流れなどの海洋観測データをより時空間的に高密度に収集するために、九州大学や各県と企業の共同研究機関は、2016年度から漁業者の操業を極力妨げない海洋観測体制の構築を開始し、2019年から漁業現場への導入を始めた(伊藤ほか, 2021)。観測データは海況予測モデルに同化されることでモデルの精度向上に寄与し、当該モデルによる海況予報は観測協力漁業者への対価として提供されている。

2017年度から、上述の取組の中で産業上重要な魚種を対象とした海況と漁況との関連性の解明を主な目的として、観測協力漁業者の操業データを紙媒体で収集する調査を実施している。この調査では、漁業者側からみると、必須項目の記載漏れが起こり得ること、記載項目は必要最小限に設定しているものの漁業種類や漁の状況によっては記入自体が煩雑となる場合がある。操業データを収集する側からみると、日誌回収や回収した紙データを電子化するために時間と労力を要するという課題がある。

近年、沖合漁業においてデジタル端末を用いて漁獲成績報告書を簡便に作成する取組も行われている(鈴木・佐野, 2019; 松本, 2022)。漁獲報告体制が構築されていない場合が多い沿岸漁業においても同様に、操業データを安定的かつ効率的に収集・解析するためには、日誌を紙媒体から電子媒体に切り替えることが不可欠である。沿岸漁業での先行研究では、単一魚種に特化したデジタル操業日誌システムの現場への導入と、そのデータを活用した資源評価・保護が実施されている(和田ら, 2010; 佐野, 2018; 前川・元林, 2022)が、様々な漁法によって多くの魚種が漁獲される沿岸漁業の特徴を考慮しつつ、沿岸漁業現場での利用に適したデジタル操業日誌システムの構築と現場への導入は喫緊の課題である。

本章では、佐賀県が構築したデジタル操業日誌システムの概要、そして当該日誌の現場への導入状況について述べる。

3.2. デジタル操業日誌システム

3.2.1. システムの概要と操業状況報告

デジタル操業日誌のシステムの開発は、いであ株式会社システム開発センターが行った。電子操業日誌システムの概要をFigure 3.1に示す。前述の漁業者参加型の海洋観測体制の調査基盤を活用し、観測協力漁業者は海洋観測用のスマートフォンもしくはタブレット端末(Android)で操業データを入力する。操業データは携帯回線通信を經由して後述のクラウドサービスに自動転送される。

漁業者は、Googleアカウントを用いて入力アプリケーション(アプリ)にログインし、操業データの報告を行う。航跡情報は端末の位置情報サービスを用いて自動でアプリ内に収集される。デジタル操業日誌システムでの操業状況報告のスキームをTable 3.1およびFigure 3.2に示す。漁業者はわずか5ステップで操業データの入力から報告までの作業を行うことができる。本アプリは各フェーズでデータ入力正常でない次のステップに移行せず、それにより操業データの報告漏れを防いでいる。アプリは過去データの確認と分析(年・月・旬を選択)機能を有しており、漁業者は登録データを簡単に振り返ることができる。

3.2.2. クラウドサービス機能の概要

漁業者が入力した操業データを保管し、必要な際にそのデータを利用できるよう、本システムではFirebaseというGoogle社製のクラウドサービスを用いた。操業データは漁業者の操業場所や漁獲量が含まれる機密性の高い個人情報である。したがって、前述のような可用性を担保しつつ、各漁業者の操業データが他の漁業者などの第三者に漏洩することがないようにセキュリティ対策を講じている。

3.2.3. 出力システムの概要

出力システムではGoogleメールアドレスで漁業者を特定できるため、操業データを漁業者、漁業種類、魚種、操業時期、操業位置(エリア)等の項目別に効率的な集計

および解析が可能である。出力システムは上記の項目別に漁業種類および魚種ごとに季節的な漁場変遷や漁獲量および単位努力量あたりの漁獲量などを地理情報システム上に表示できる。操業データは年と月を設定することでcsv形式でダウンロードできる。

3.3. 現場実装

デジタル操業日誌システムの漁業現場への導入は、2020年からの試行段階を経て、2021年4月から本格的に開始した。Table 3.2に2022年の漁業種類別の調査協力者数と操業データ報告数を示す。システムの導入状況は調査協力者数が多い順に、沿岸いか釣り漁業、はえ縄漁業、小型底びき網漁業および船びき網漁業となっており、2022年には32名の沿岸漁業者に対してシステムを導入し28名の漁業者で操業データを収集する体制を構築した。特に沿岸いか釣り漁業(12名)とはえ縄漁業(9名)で調査協力者数が多く、操業データ取得数はそれぞれ432件と810件であった。

2020年のシステムの試行的な導入段階では、協力漁業者からデジタル操業日誌の操作性に関する意見を収集し、入力ステップの順番や入力画面の構成を見直すなど、漁業現場に適したユーザーインターフェース(UI)となるよう改善した。2021年からの本格的なシステムの導入段階では、導入当初はデジタル操業日誌システムの簡易的な操作マニュアルをもとに操業データを入力・報告していた漁業者も、当該システムは直感的な操作が可能なることから、その後は紙媒体に比べ操業報告が簡便になったということや、デジタル操業日誌では過去の操業データを簡易的に振り返ることができ便利だという好意的意見も聞かれるようになった。

操業データを収集する側にとっても、データはすでに電子化されているため、目的に応じて必要なデータを出力するだけでよく、省力化が図れている。紙媒体での操業日誌調査では、漁業者から操業日誌を回収しそのデータを電子化するまでに約1年を要していたが、当該システムを活用することで、報告が早い漁業者では操業の翌日に、遅くとも1か月後には操業データを収集することが可能となった。操業日誌調査に協力している沿岸いか釣り漁業者間では情報を共有することに対する合意形成ができていることから、Figure 3.3に示すような単位努力量当たりの漁獲量情報を漁業者に対して即時的に提供できるようになった。また、紙媒体では不可能であった、操業時の経時的な航跡データを自動で取得することが可能となり、操業データの質が大幅に向上

した.

このように、現時点でデジタル操業日誌システムは安定的に運用できているが、漁業現場にデジタル操業日誌システムなどの新たな情報通信技術を導入する際には、漁業現場に適したUIの知見の蓄積に加えて、その評価と再検討が必要であり(武藤ら, 2010), 当該システムの現場導入後も漁業者との意見交換および情報収集を重ねることが重要であると考えている.

3.4. まとめ

沿岸漁業における操業データの効率的な報告と収集および解析のために、デジタル操業日誌システムを開発し、佐賀県玄海海域の漁業現場に当該システムを導入した。2022年には28名の沿岸漁業者から操業データを収集する体制を構築した。特に沿岸いか釣漁業とはえ縄漁業では、年間数百件単位で操業データの収集が可能となった。さらなる操業データの収集に向けて協力漁業者を増やすことが今後の課題の一つである。

また、この取組で安定的かつ効率的に収集できるようになった操業データを活用して、漁場予測モデルを構築し2022年から調査協力漁業者に情報提供を開始した。このような調査研究をとおして、海況と漁況との関連性に対する漁業者の理解を深めることで、さらなる海況予報の活用につながると考えられる。さらに、操業データは、対象魚種の資源評価や管理のための基礎データとしても不可欠な情報であることから、沿岸漁業者の操業支援にとどまらず持続可能な漁業の実現に貢献することも期待される。

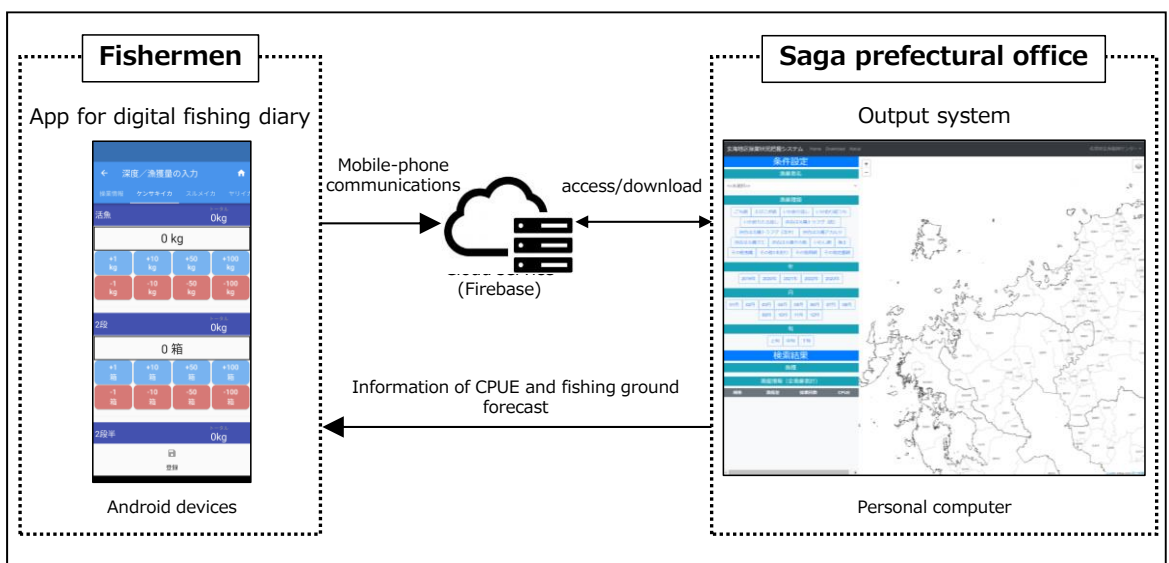


Figure 3.1 Data flowchart of digital fishing diary system.

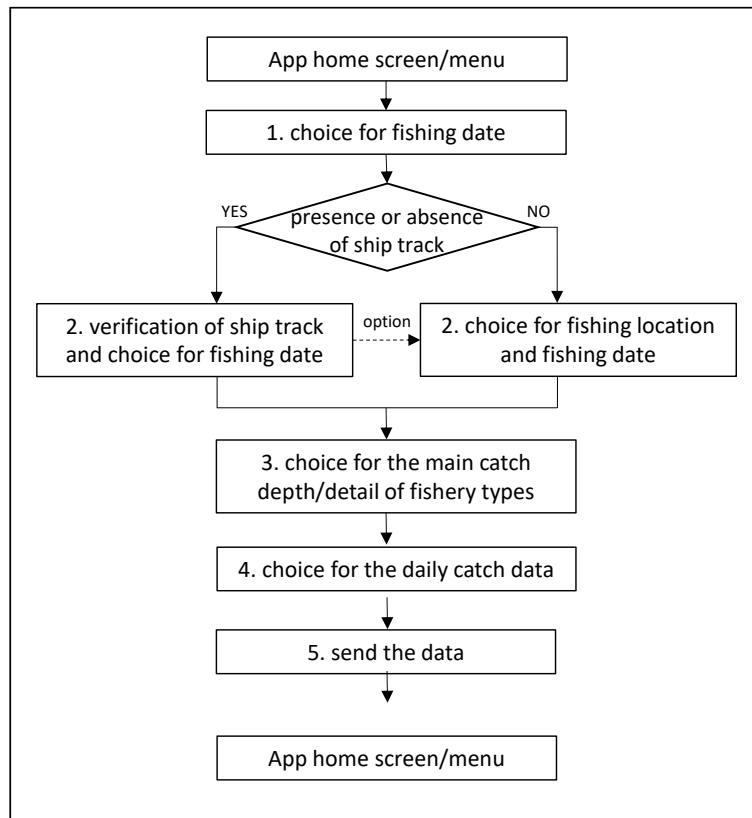


Figure 3.2 Scheme of digital fishing diary system.

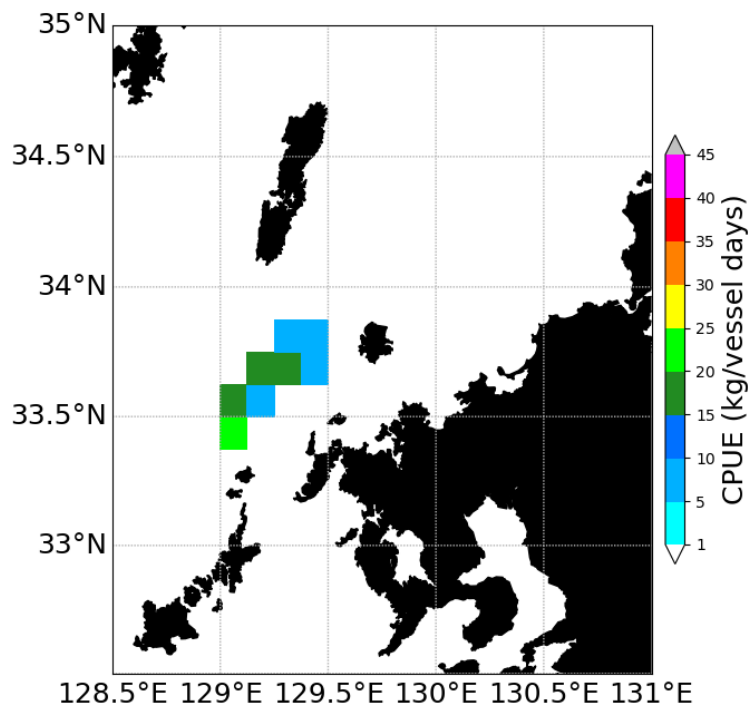


Figure 3.3 Example of the catch per unit effort of swordtip squid (*Uroteuthis edulis*) by squid jigging fisheries.

item	操作内容
Fishing date	操業報告する操業日を選択する
Fishing location/time of operation	アプリが取得した操業場所（航跡）を確認し、リスト一覧から操業開始終了時刻を選択する
Detail of Fishery types/Fishing depth (m)	漁業種類の詳細と主な漁獲水深帯を各リスト一覧から選択する
Daily catch data	対象魚種ごとに漁獲量（重量もしくは箱数）をボタン選択する
Send the data	情報入力後に「登録」ボタンを押下しデータを送信することで操業状況報告が終了する

Table 3.1 Scheme of digital fishing diary system.

Fishery types	Number of fishermen	Number of data
Squid angling fishery	12	432
Long line fishery	9	810
Trawl fishery	5	50
Surrounding seine fishery	2	149

Table 3.2 A list of fishery types and number of fishermen who cooperates with the digital fishing diary system observation.

第4章 物理・生態系結合モデルを用いたケンサキイカの漁場予測

4.1. 研究の目的

ケンサキイカ (*Uroteuthis edulis*) は、浅海性の種で東シナ海の陸棚域や日本海に広く分布し、これらの地域では重要な水産資源である。本種は、特に西日本において商業上重要種であり、釣り漁業や底曳網漁業で漁獲される (<https://abchan.fra.go.jp/digests2021/index.html>, 2023年2月12日)。ケンサキイカは夏季の対馬東水道では中層から底層付近 (約30–60 m) で主に釣り漁業によって漁獲される。夜間に操業される釣り漁業では集魚灯が用いられ、漁業者は、5トン未満の小型漁船では主に手釣りにより、約19トンの比較的大型な漁船では自動の釣り機によりケンサキイカを漁獲している。対馬東水道周辺海域における釣り漁業での本種の最小の水揚げサイズは100 mm程度である。Yamaguchi et al. (2015, 2018) は本種の平衡石の分析結果から、ケンサキイカは東シナ海南部で産卵し多くの個体が対馬暖流によって輸送されると推定している。日本海南西部から東シナ海における年間総漁獲量は、1988年には35,300トンであったが、2000年以降に減少し始め、2019年には過去最低の3,900トンにまで減少した (<https://abchan.fra.go.jp/digests2021/index.html>, 2023年2月12日)。漁獲量減少の要因は未だ解明されていないが、本種の主産卵場である東シナ海南部 (Yamaguchi et al., 2022) では、外国漁船による高い漁獲圧により資源状態の悪化が懸念される。

持続的な漁業や漁業の管理のためには、対象魚種の時空間的な分布を把握することが必要である (Valavanis et al., 2008)。したがって、ケンサキイカの正確な時空間的な分布を予測することは、本種資源の保全や管理そして漁業の効率化にも重要である。魚類の時空間分布を推定する方法の一つとしてHabitat Suitability Index (HSI) モデルがある。HSIモデルはシンプルかつ少ない環境変数により対象魚種の時空間的な分布を把握できることから (Igarashi et al., 2018; Lee et al., 2019)、広く用いられている予測手法である (e.g., Alabia et al., 2015a; Yu et al., 2015; Igarashi et al., 2018;

Lee et al. 2019; Yu et al., 2019).

HSIモデルを構築するための環境変数として衛星観測データ(海面水温, 海面高度, クロロフィルa)がよく利用されている(Alabia et al., 2015a; Igarashi et al., 2018; Lee et al. 2019; Yu et al., 2019). 特にクロロフィルa濃度は, 様々な魚種の時空間分布と間接的な関係があると考えられることから, HSIモデルの環境変数としてよく用いられている.

海洋循環数値モデルは海洋物理環境を正確に再現できることから, 近年では, HSIモデルの環境変数として海況予測モデル値(3次元の水温, 塩分そして東西および南北の流速成分)が利用されるようになってきた(Alabia et al., 2015a; Igarashi et al., 2018). それに加えて, 低次生態系モデルも様々な海域で精度よく適用されているため, 低次生態系モデルをHSIモデルに利用することで, 漁場予測の精度は向上するものと考えられる.

Onitsuka et al. (2007)は, 窒素循環の3次元の物理・生態系結合モデルを日本海において構築した. この3次元物理・生態系結合モデルは, 溶存態無機窒素(DIN), 植物プランクトン(PHY), 動物プランクトン(ZOO)およびデトリタス(DET)の4成分を構成要素とする(以下, NPZDモデル). 構成要素が4成分というシンプルかつパラメータ数が少ないこと(Onitsuka and Yanagi 2005), また, 海洋の低次生態系の時空間分布を正確に表現できることから(Koné et al., 2005; Heinle and slawig 2013), NPZDモデルは海洋の低次生態系を再現する方法として広く利用されている.

多くの小型の外洋性魚類やケンサキイカ幼稚仔はカイアシ類などの動物プランクトンを主に捕食することから, 動物プランクトンはこれらの種にとって重要な餌生物である. ケンサキイカは成長に伴って食性が変化することが報告されている. 本種の主な餌生物は, 幼稚仔ではカイアシ類, 端脚類そしてアミ類などの動物プランクトンであり(Yagi et al., 2011; 江口, 2013; 豊福・大隈, 2019), 成長に伴いマイワシやカタクチイワシなどの外洋性の小型魚類を主に捕食するようになることが報告されている(小川,

1982). したがって, NPZDモデルによりZOOを正確に再現できれば, ケンサキイカの漁場をより正確に予測できる可能性がある.

本章では, 九州北西海域における鉛直1次元の物理・生態系結合モデルの構築, 本研究海域におけるケンサキイカの漁場予測を行うためのHSIモデルの構築, そして, HSIモデルの環境変数としてNPZDモデル結果(植物プランクトンもしくは動物プランクトン濃度)を加える場合と加えない場合の3つ比較実験を行い, 漁場予測の精度を評価することを目的とする.

4.2. 材料と方法

4.2.1 物理・生態系結合 (NPZD) モデル

4.2.1.1. 物理的条件

本研究では、海洋物理的環境条件として海況予測モデルDREAMS_D (Hirose et al., 2021) の水温、混合層厚および流向・流速を用いた。DREAMS_Dの計算領域は南西32°N, 127°Eから北東36°16'N, 133°24'Eの範囲である (Fig. 4.1)。DREAMS_Dの格子間隔は東西方向では1/60°, 南北方向では1/75°で、鉛直格子数は98である。DREAMS_Dのパラメータ値はHirose et al. (2021) に詳しく記載してある。太陽放射は、気象庁MSM (Meso Scale Model) の雲量データを用い、Hirose et al. (1996) の方法に基づいて計算した。

4.2.1.2. 生物的条件

上述したように、鉛直1次元の物理・生態系結合モデルはDIN, PHY, ZOOおよびDETの4成分を構成要素とするモデルである。NPZDモデルにおける構成要素間の関係模式図をFigure 4.2に示す。NPZDモデルの式はOnitsuka and Yanagi (2005) に従った。鉛直移流はDREAMS_Dの鉛直速度を直接利用した。鉛直拡散係数は混合層では100 cm² s⁻¹, それより下層では1 cm² s⁻¹にそれぞれ設定した。本研究では、壱岐の南西海域に設けた6定点でNPZDモデルを構築した (Fig. 4.1)。その際、生態系に関するパラメータはOnitsuka and Yanagi (2005) と同様の値を用いた (Onitsuka and Yanagi experiment, 以下OY実験)。低次生態系モデルを他の海域に適用する場合、海域間でのプランクトン構造の違いを考慮して、生態系に関するパラメータ値を修正する必要があることが報告されている (Toyoda et al., 2013)。したがって、本研究海域においてより現実的な海洋の低次生態系を再現するために、生態系に関するパラメータを調整した (present experiment, 以下PR実験) (Table 4.1)。

初期条件として、DINでは10 mmolN m⁻³, PHYでは0.5 mmolN m⁻³, ZOOでは0.01 mmolN m⁻³, DETでは0.001 mmolN m⁻³を初期値としてそれぞれ与えた。ステー

ション5と6の最深層(115 m)のDINは 10 mmolN m^{-3} , PHYは 0 mmolN m^{-3} にそれぞれ固定した. ステーション1から4の最深層には西隣のステーションの同深度の計算値を利用した.

4.2.1.3. 海洋観測調査

水温, 塩分およびNPZDモデルにより算出されたPHYは, 多項目水質計(RINKO-Profiler(ASTD102), JFE Advantech Co., Ltd)で測定したクロロフィル蛍光値と比較することで評価した. 海洋観測調査は, 2020年7月から2022年8月にかけて合計17回実施した(Table 4.2). この調査は, 沿岸いか釣漁船(5トン未満)もしくは県調査船まつら(44トン)を用いて実施した(Table 4.2). DINの評価は, NPZDモデルで計算された5年間(2017–2021)の平均値とWorld Ocean Atlas 2018 (WOA18) データを比較することで評価した.

4.2.2. Habitat suitability index (HSI) モデル

4.2.2.1. 漁獲量データおよび研究海域

本研究で用いたケンサキイカの漁獲量データは, 2018年から2021年の6月から8月にかけて壱岐の南西海域周辺の漁場における沿岸いか釣漁船(5トン未満)の操業データを用いた. 操業データは, 一操業あたりの漁獲量(kg/day)および操業場所(緯度・経度)を含む情報である. 本研究では, Figure 4.1に示す枠内(20-km 四方)に含まれる操業データを用いてHSIモデルを構築した. ステーション4付近はケンサキイカの好漁場となっており, この枠内において最も操業データが多かったことから, 本研究ではこの枠内の操業データのみを用いてHSIモデルを構築した. なお, 本枠内に含まれる調査期間中の操業データ数は124である.

4.2.2.2. 環境変数

HSIモデルを構築するための海洋物理データとしてDREAMS_Dデータを用いた. 本研究では, HSIモデルの海洋物理的な環境変数として, 水温・塩分・絶対流速(0 m, 10 m, 30 m, 50 m, 70 m), 混合層厚そして水温・塩分・絶対流速の鉛直勾配値を用

いた. また, NPZDモデルで算出した植物プランクトンと動物プランクトン濃度(5–95 m, 10 m間隔)とその鉛直勾配値を海洋生物的な環境変数として用いた.

気温, 風速そして波高などの気象条件はHSIモデルの環境変数になり得るが, ケンサキイカは夏季の対馬東水道では主に30から60 m付近で漁獲されること, またよりシンプルなモデル構成とする観点から, 本研究ではこれらの気象条件はモデルの環境変数として用いないこととした.

HSIモデルを構築するにあたり, 上述の環境変数から一般化線形モデル (generalized linear model, GLM)を用いて変数選択を行った. その際, 原則としてAIC (Akaike's information criteria)が最小となる組み合わせを最良モデルとして選択した. 各変数間の多重共線性を排除するために, VIF (variance inflation factors) 値が5未満となるように変数選択を行った.

4.2.2.3. HSIモデル構築

はじめに, ケンサキイカの一操業あたりの漁獲量データをSI (suitability index) 値に変換した. SI値は次の式により算出した. :

$$SI = \frac{\text{Catch}}{\text{Max (Catch)}}$$

ここで, “Catch”はある階級幅における総漁獲量であり, “Max (Catch)”は各階級幅における最大の総漁獲量を示す. 水温, 塩分および絶対流速は, それぞれ2°C, 0.1および1 cm s⁻¹ごとに階級分けした.

次に, 環境変数ごとに次に示すロジステック式 (Yu et al., 2020) によりフィッティングを行った. :

$$SI_i = \exp [a \times (i - b)^2]$$

ここで, “i” はHSIモデルに含まれる環境変数を, “a” と“b”はロジステック式のパラメータ値をそれぞれ示す. 最小二乗法により残差平方和が最小となるよう計算した.

最後に, 得られたすべてのSI値を統合しHSIモデルを構築した. HSI値は0から1の間をとり, 次の式 (Yu et al., 2020) により算出する. :

$$\text{HSI} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{SI}_i$$

ここで，“n”はHSIモデルに用いられる環境変数の総数を示す。

4.2.2.4. モデル評価および比較実験

2018年から2020年のステーション4における操業データ数は84であり、このデータを用いてHSIモデルを構築した。次に示す3つの組み合わせにより比較実験を実施した。Exp. 1は、HSIモデルを構築するための環境変数として海洋物理データのみを使用した。漁場予測精度へのNPZDモデル予測値の寄与状況を調べるために、HSIモデルを構築するための環境変数にそれぞれPHY (Exp. 2)とZOO (Exp. 3)を加えた。漁場予測は最新年のデータで行うことから、本研究でも2021年の操業データ(n = 40)を利用して、構築したHSIモデルの予測精度の評価を実施した。

4.3. 結果

4.3.1. NPZDモデル

4.3.1.1. 水温および塩分の鉛直プロファイル

Figure 4.3a–cと4.4a–cに2021年の6月から8月にステーション4で観測・予測された水温および塩分の鉛直分布をそれぞれ示す。DREAMS_Dデータは多項目水質計で観測された値とよく一致していた。2021年6月から8月の中層の水温と塩分は、DREAMS_Dと観測値との差はそれぞれ約1°Cと約0.2であった。しかし、6月のDREAMS_Dの表層塩分は、観測値に比べて明らかに高い値を示していた。

4.3.1.2. PHYおよびZOOの鉛直プロファイル

PR実験で計算されたDINの値は、OY実験での計算値に比べてより現実的であり、WOA18の値とよく一致していた (Fig. 5a–d)。これは生態系に関するパラメータを調整した効果だと考えられる。PR実験とWOAの値に多少の差がみられる要因として、NPZDモデル予測値(5年平均)とWOA18値(数十年平均)の平均期間の違いが影響している可能性がある。

PR実験で計算されたPHYの値についても、OY実験での計算値に比べてより現実的な値を示していた (Fig. 6a–c)。実際に、中層におけるPHYの極大値はPR実験の方がOY実験よりもより正確に表現できている。しかしながら、PR実験においても、表層付近でのPHYの枯渇状況をうまく再現できていない。

4.3.2. HSIモデル

4.3.2.1. 環境変数のヒストグラムとSI曲線

Tables 4.3–4.5とFigure 4.7–4.9にGLMで選択されたExp. 1, Exp. 2およびExp. 3の環境変数をそれぞれ示す。SI値と最小二乗法で計算されたSI値の両者の相関係数は高かった (Tables 4.3–4.5)。

2018年から2020年の6月から8月にかけてケンサキイカの漁場の分布と海洋環境との関係をFigures. 4.7–4.9に示す。Exp. 1では、次に示す5つの物理的な環境変数が選

択された。ケンサキイカは水温の鉛直勾配 (Fig. 4.7; Temperature 0–70 m) が2–12°Cの範囲で漁獲されており、そのうち水温勾配が6–8°Cの範囲で最もよく漁獲されていた。塩分の鉛直勾配 (Fig. 4.7; Salinity 50–70 m) の範囲は–0.6から0.1であり、–0.1から0の範囲で本種の漁獲が最も多かった。本種は30 m層の絶対流速 (Fig. 4.7; Speed at 30 m) が0–50 cm s⁻¹ の範囲で漁獲されており、そのうち10–20 cm s⁻¹の範囲で最もよく漁獲されていた。絶対流速の鉛直勾配は二つの変数が選択され、一変数目 (Fig. 4.7; Speed 0–10 m) と二変数目 (Fig. 4.7; Speed 50–70 m) の範囲は–3から4 cm s⁻¹と–18から10 cm s⁻¹であり、それぞれ0から1 cm s⁻¹と–2から2 cm s⁻¹の範囲で本種が最も漁獲されていた。物理的な環境変数のうち流速に関する変数 (Fig. 4.7; Speed 30 m, Speed 0–10 m, Speed 50–70 m) が最も多く選択されており支配的な要素であった。絶対流速の鉛直勾配は成層構造に関連し、30 m層の絶対流速は表層付近は気象擾乱の影響を受けやすいことから大規模な地衡流の重要性を示しているものと考えられる。Exp. 2では、Exp. 1で選択された環境変数に加えてPHY (Fig. 4.8; PHY 45 m)が選択された。PHY (Fig. 4.8; PHY 45 m) の範囲は0.2から1.4 mmolN m⁻³の範囲であり、0.4から0.6 mmolN m⁻³の範囲漁獲量が最も多かった。Exp. 3では、Exp. 1で選択された環境変数に加えて塩分の鉛直勾配 (Fig. 4.9; Salinity 0–10 m) とZOO (Fig. 4.9; ZOO 5 m) が選択された。塩分の鉛直勾配 (Fig. 4.9; Salinity 0–10 m) とZOO (Fig. 4.9; ZOO 5 m) の範囲はそれぞれ–1.2から0.2と0から1.0 mmolN m⁻³であり、–0.2から0と0.2から0.4 mmolN m⁻³の範囲で漁業活動が最も高かった。

4.3.2.2. モデルの比較実験

Figure 4.10a–cに示すように、まず、2018年から2020年の6月から8月のデータを用いて、3つのHSIモデルの精度を検証した。Exp. 1, Exp. 2およびExp. 3のHSI値と一操業あたりの漁獲量の相関係数は、それぞれ0.296, 0.282および0.313であった。Exp. 1と3では、AICの値が最小となる上位1番目の組み合わせがそれぞれ選択された。一方、Exp. 2では、HSIモデルの環境変数として物理的環境変数のみが選択された組み合

わせが上位3番目までを占めており、PHYが環境変数として選択されたモデルは上位4番目であった。このことが、Exp. 2がExp. 1よりも相関係数が低かった要因だと考えられる。

次に、2021年の6月から8月のデータを用いて、3つのHSIモデルの予測性能の評価を行った(Fig. 4.11a-c)。Exp. 1, Exp. 2およびExp. 3のHSI値と一操業あたりの漁獲量の相関係数は、それぞれ0.500, 0.474および0.572であった。Exp. 1の相関係数はExp. 2に比べてわずかに高く、Exp. 3はExp. 1と2に比べて相関係数が高かった。この結果は、ZOOが統計的に相関係数の向上に寄与していることを示している。この要因については、4章で詳しく考察する。

4.4. まとめと考察

2018年から2020年のケンサキイカの操業データと水温・塩分・絶対流速の海況予測モデルデータを用いてHSIモデルを構築し、2021年のデータで漁場予測モデルの精度を評価した。また、鉛直1次元の物理・生態系結合モデルも構築した。HSIモデルの環境変数としてNPZDモデル予測値(PHYもしくはZOO)を加える場合と加えない場合の3つ比較実験を実施した。本研究の結果から、NPZDモデル予測値のうち5 m層のZOOの値をHSIモデルの環境変数として利用することで、漁場予測の精度が向上することが明らかとなった。

前述のように、衛星観測クロロフィルaデータはHSIモデルの環境変数としてよく利用されている。それに加えて、基礎生産量データもHSIモデルの環境変数として利用した事例も報告されている(Lee et al., 2018; Lee et al., 2019; Yu et al., 2019)。本研究では、HSIモデルに対するPHYの寄与状況を評価した。HSIモデルの環境変数として45 m層のPHYの値を加えたモデルは、海洋物理データのみを環境変数として利用したモデルと比較して、HSI値と一操業あたりの漁獲量の相関係数があまり改善されなかった。

一方で、HSIモデルの環境変数として5 m層のZOOの値を加えたモデルは、HSI値と一操業あたりの漁獲量の相関係数が3つのモデルの中で最も高かった。また、ここでは結果は示さないが、PHYとZOOの両方をHSIモデルの説明変数に加える比較実験も実施している。その結果、AICが最小となるベストモデルとして両説明変数が同時に選択されることはなかった。これまでの研究では、水温、塩分そしてクロロフィルa濃度などの海洋物理的な環境変数をもとに様々な魚種の時空間分布の推定が行われてきた。今回の研究では、ZOOをHSIモデルの環境変数として利用することで、漁場予測の精度がより向上することが示された。ケンサキイカの漁獲量と5 m層のZOOの値との間には負の関係がみられたことから、ZOOの現存量が表層付近ではなく中層付近に多いことがケンサキイカの時空間分布の指標になると考えられる。

本研究では、低次生態系モデルの生態系に関するパラメータをOY実験から改良した。Onitsuka and Yanagi (2005)と同様の生態系に関するパラメータを用いたOY実験と本研究(PR実験)の結果を比較すると、PR実験で計算されたDINとPHYの方がより現実的な値を示していた。Onitsuka et al. (2007)は日本海において3次元の物理・生態系結合モデルを構築した。日本海は200–300 m以深に日本海固有水と呼ばれる水塊を有し(宇田, 1934), その平均水深は1000 mを超える。一方, 本研究海域は対馬海峡東水道付近に位置している。対馬海峡東水道の平均水深は約110 mであり, 黒潮や台湾暖流に起因する対馬暖流の影響を受けるだけでなく, 長江希釈水の影響を受ける海域である(Senjyu et al., 2006)。したがって, OY実験とPR実験の結果の違いは, 研究を対象とする海域間のプランクトン組成の違いに起因するものと考えられる。

本研究では, NPZDモデル予測値をHSIモデルの環境変数として利用することで漁場予測の精度を向上させることに成功した。次の研究として, 当該研究海域における3次元の物理・生態系結合モデルを構築し, このモデルを活用して漁場予測を行うことが考えられる。近年では, 漁場予測手法として機械学習を用いる事例も報告されている(e.g., Alabia et al., 2015a; Alabia et al., 2015b; Gao et al., 2016; Mugo and Saitoh, 2020)。これらの新たな手法を用いることで, ケンサキイカの漁場予測の精度をさらに向上できる可能性がある。

ケンサキイカ資源は海洋環境(e.g., 水温, 塩分, 流速)に依存して変動すると考えられるが, これらの環境が変化することに対する潜在的な影響については不明な点が多い。本研究結果の特徴の一つとして, 流速に関する環境変数(Fig. 4.7; Speed 30 m, Speed 0–10 m, Speed 50–70 m)が物理的な環境変数の中で最も多く選択されたことである。前述したように, ケンサキイカは30 m層の絶対流速が0–50 cm s⁻¹ の範囲で漁獲されており, 10–20 cm s⁻¹の範囲にある場合に最も漁獲されていた。Kida et al. (2021)は, 日本海通過流が上昇傾向にあることを報告している。地球温暖化の進行に伴い, 九州北西海域における流速とその鉛直勾配が増加した場合, 本研究の結果から九州

北西海域におけるケンサキイカの漁獲量は減少すると推測される。

海洋環境の変化がケンサキイカの資源状況や時空間分布に及ぼす潜在的な影響を評価することは重要であり、本研究の結果はこの問題に対する基礎的な情報となる。ケンサキイカの漁獲量が長期的な減少傾向にある中、ケンサキイカ資源を効率的に利用することも必要である。本研究結果は、日本周辺海域におけるケンサキイカの時空間な分布予測に関する初めての知見となる。本研究で得られた結果は、効率的な漁業の実現のためだけでなく、本種の資源の保全と管理を行うためにも非常に重要な知見となり得る。

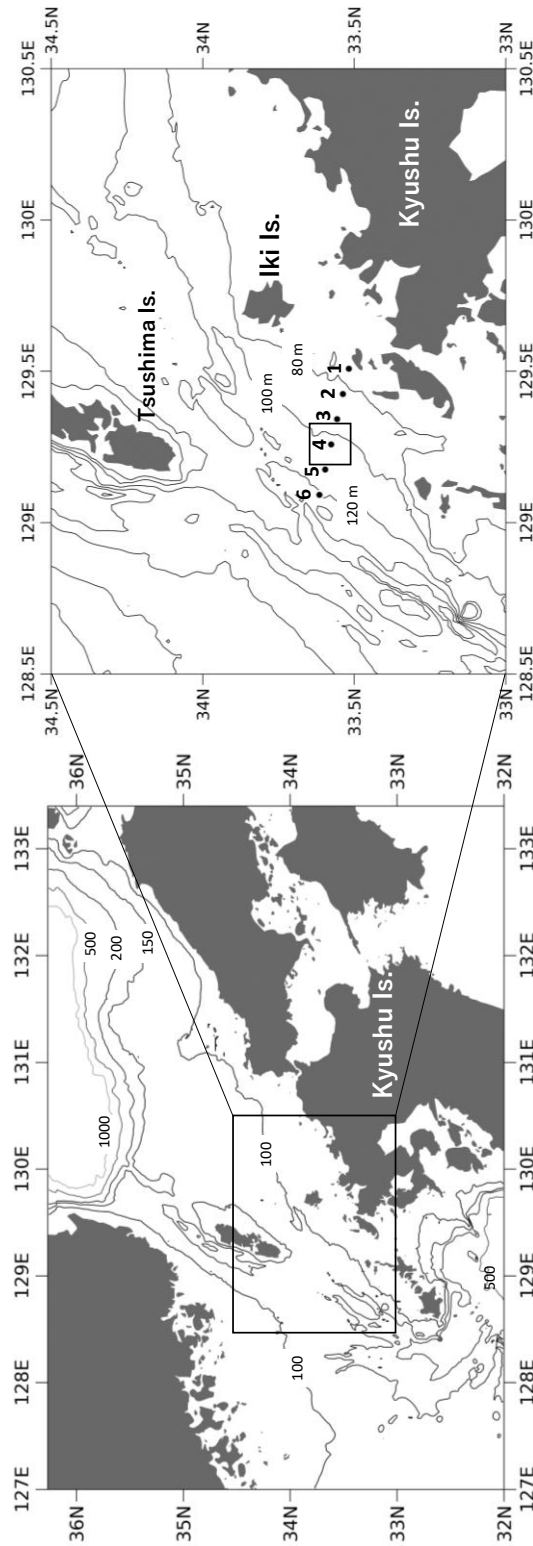


Figure 4.1 Map of the study area. One-dimensional ecosystem models are constructed, and hydrographic observations are carried out at stations 1–6. Contours show the water depth in meters.

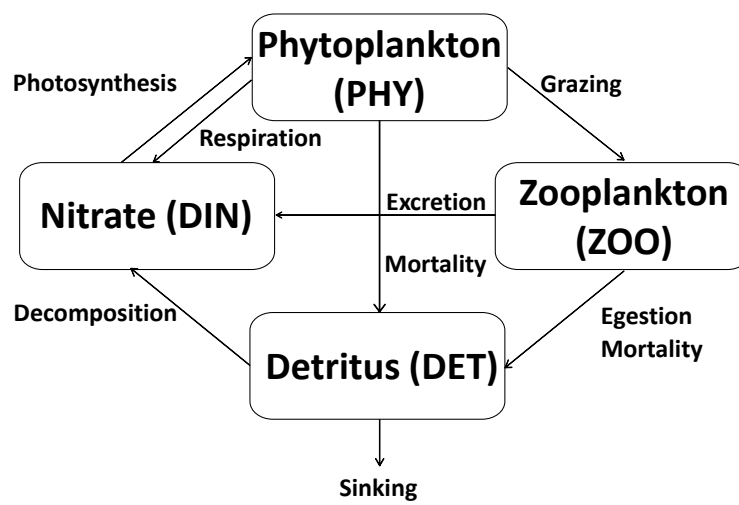


Figure 4.2 Schematic diagram of biochemical interactions in the ecosystem model.

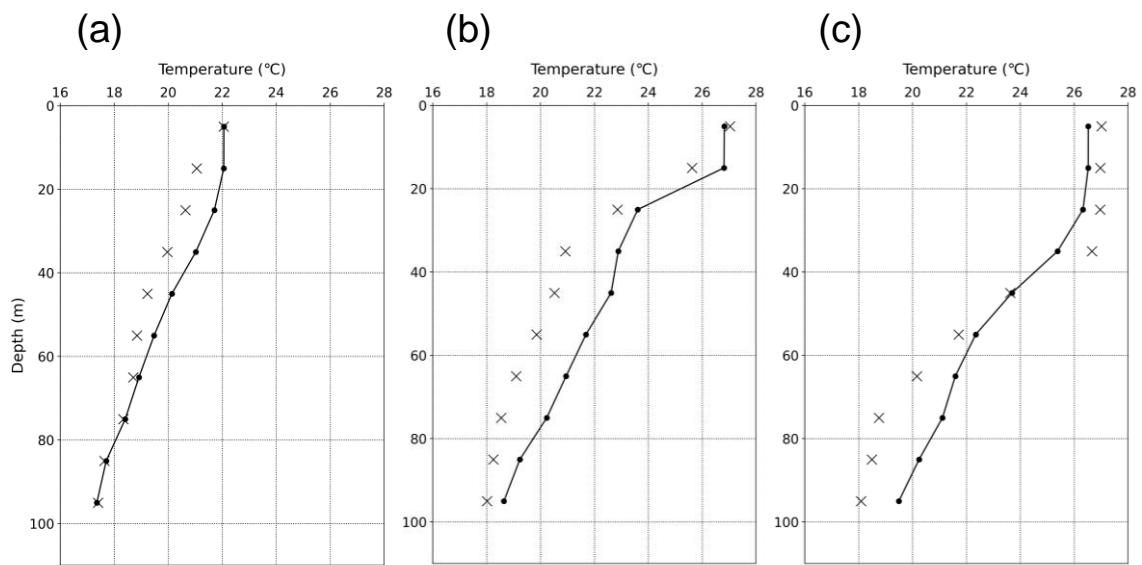


Figure 4.3 Vertical profiles of water temperature in (a) June 19 (b) July 21 (c) August 20 2021. Crosses represent observational data, and solid lines with filled circles indicate the DREAMS_D model.

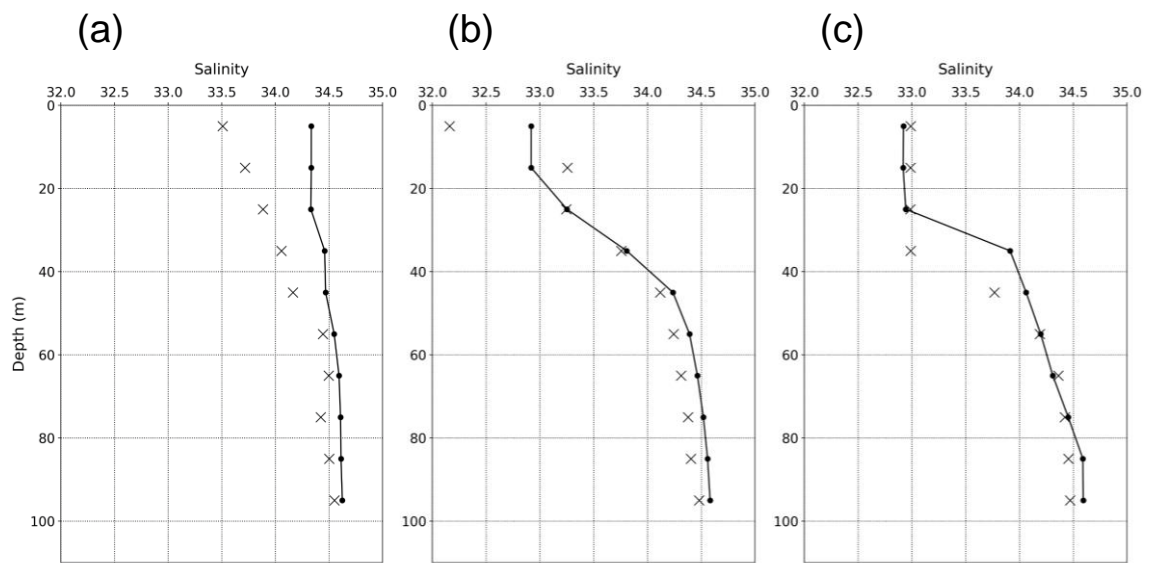


Figure 4.4 Same as Figure 3 but for salinity.

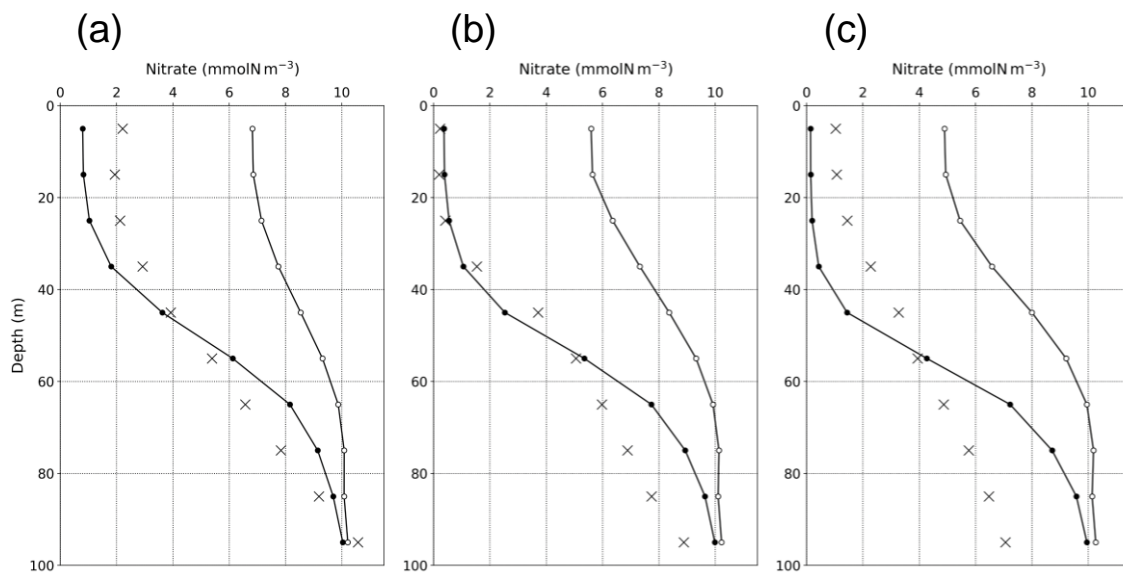


Figure 4.5 Solid lines indicate vertical profiles of nitrate in (a) June (b) July (c) August 2021. Filled and open circles indicate PS and OY experiments, respectively. Crosses represent climatological data (WOA18).

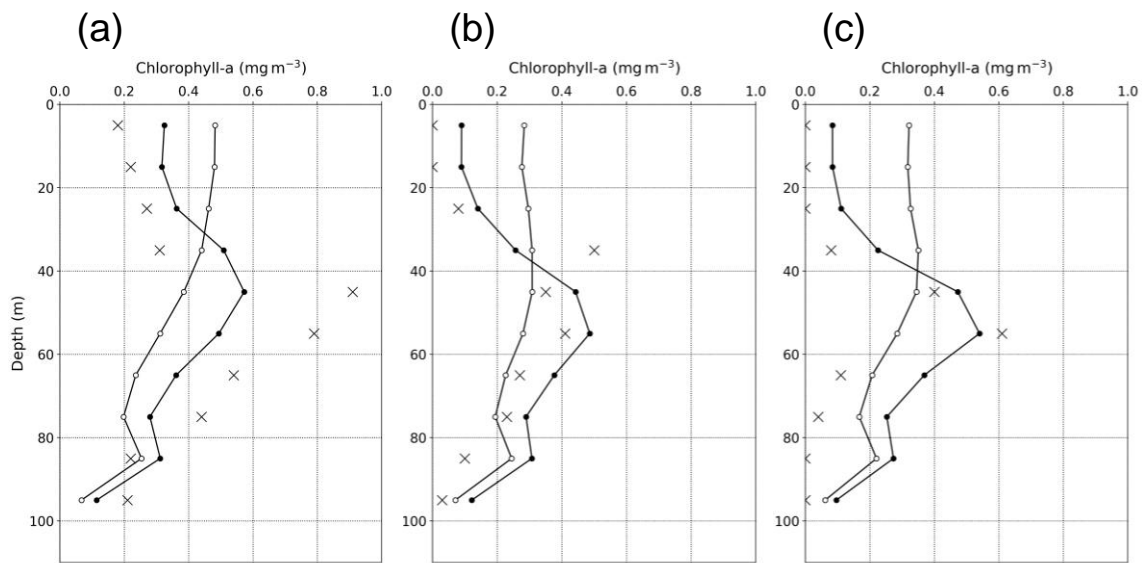


Figure 4.6 Solid lines indicate vertical profiles of chlorophyll-a in (a) June (b) July (c) August 2021. Filled and open circles indicate PS and OY experiments, respectively. Crosses represent observational data (ASTD102).

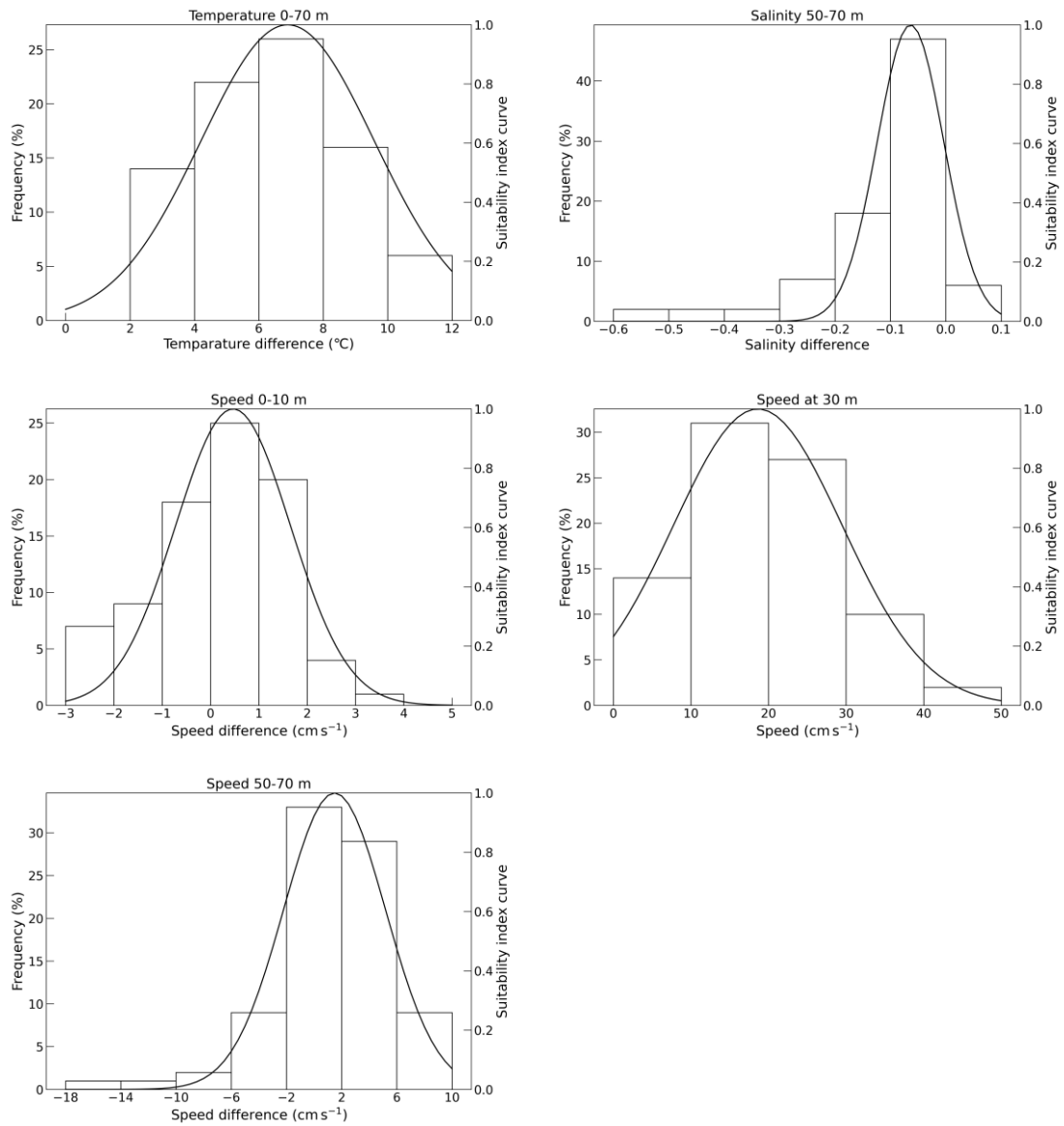


Figure 4.7 Histogram and fitted suitability index curves of the selected parameters (Table 3) of Exp. 1 for JJA 2018–2020.

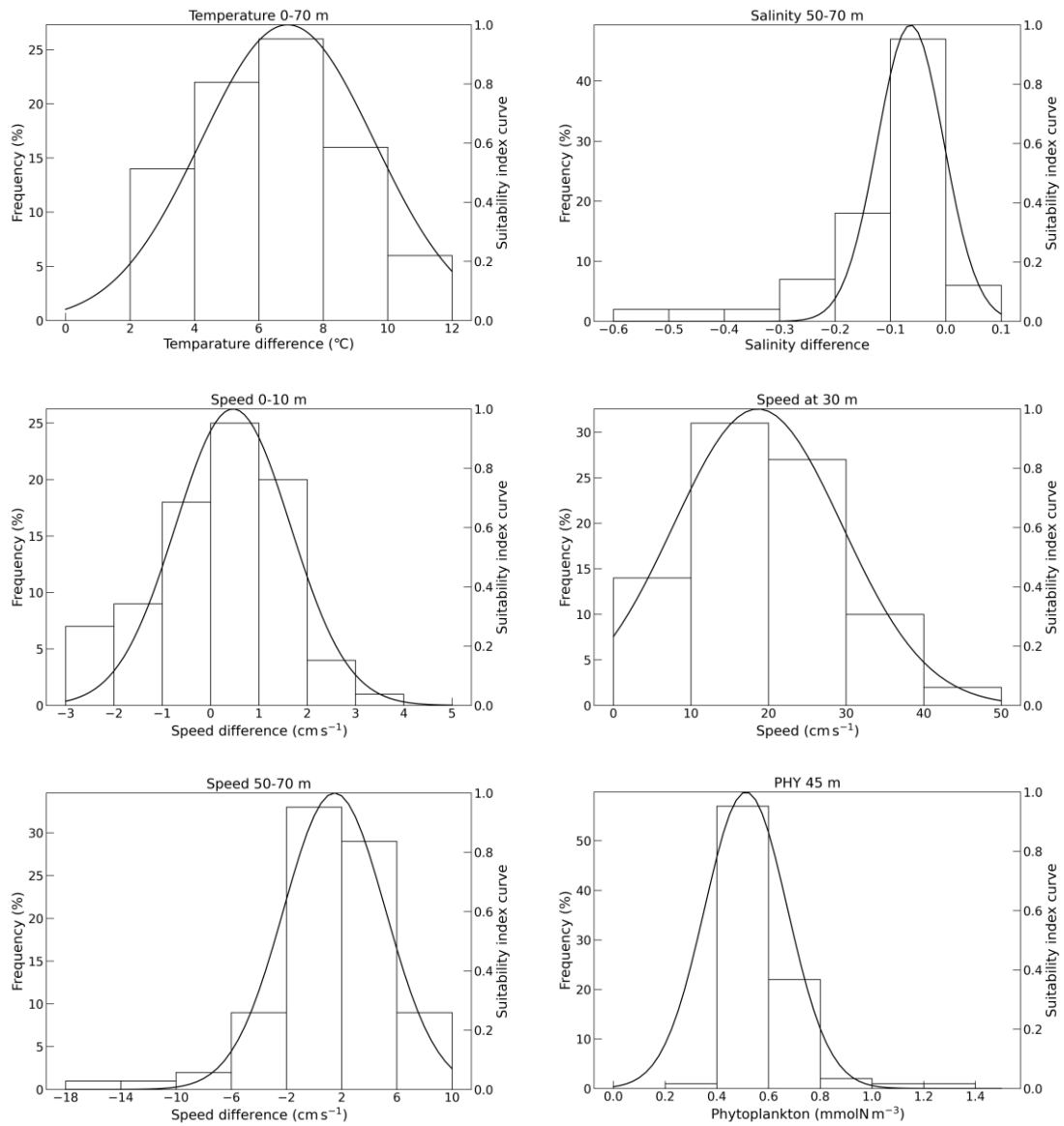


Figure 4.8 Same as Figure 7 but for Exp. 2.

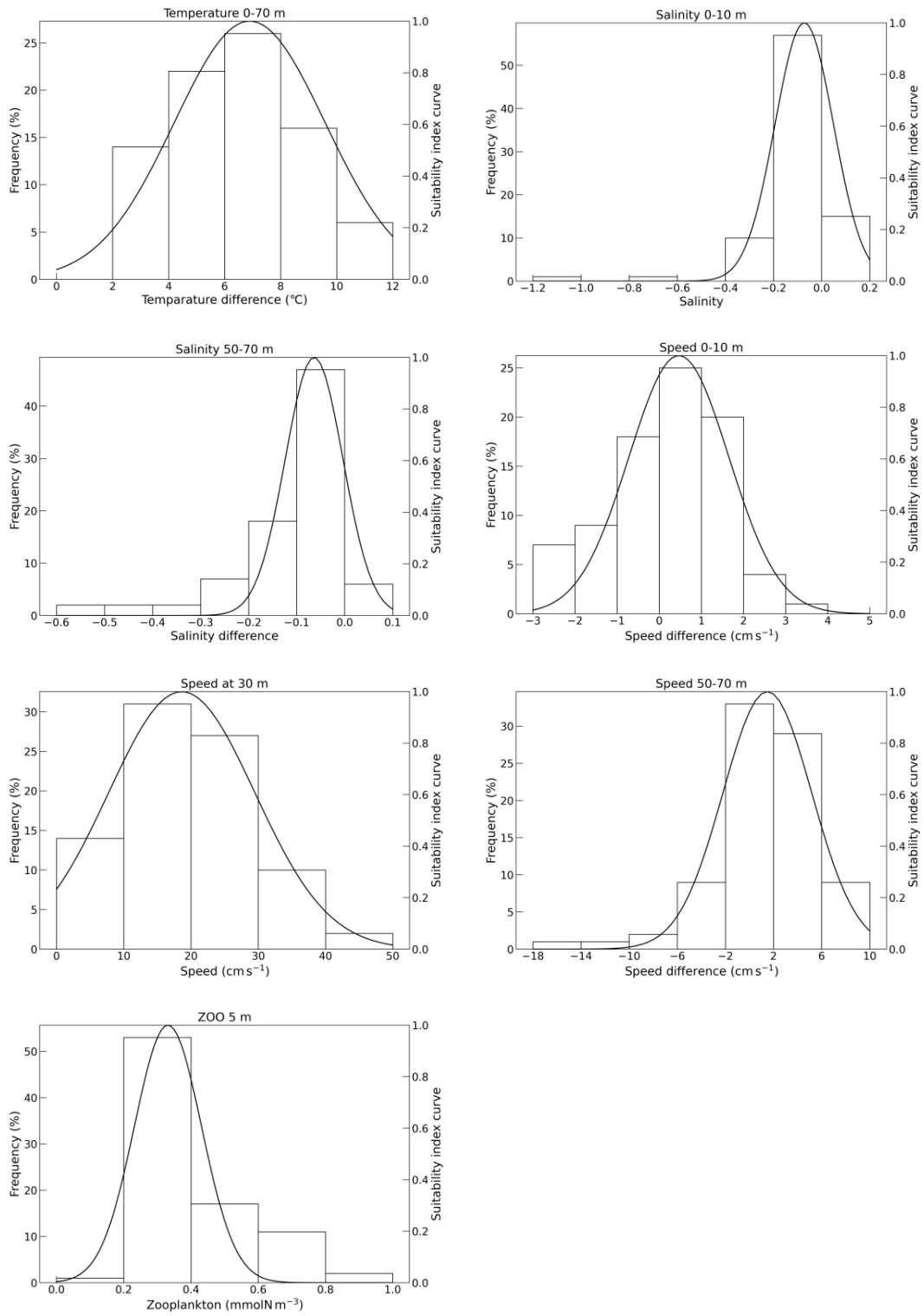


Figure 4.9 Same as Figure 7 but for Exp. 3.

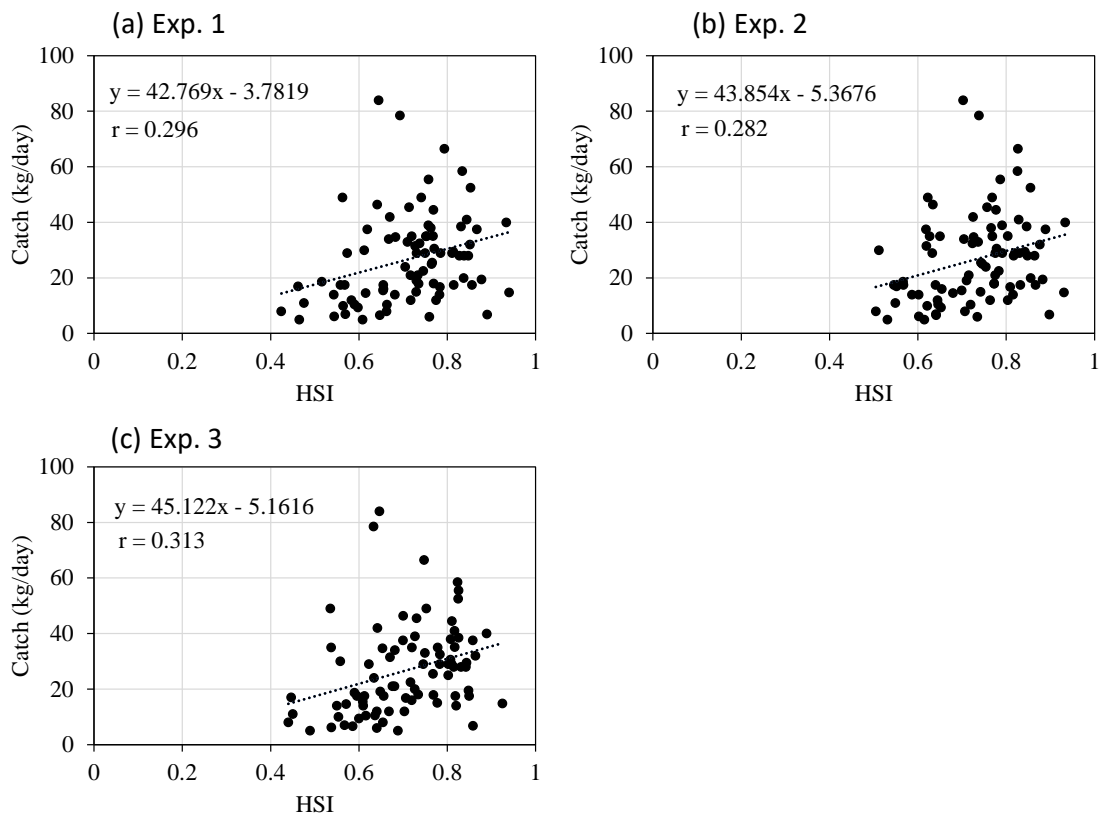


Figure 4.10 Correlation between the HSI values of (a) Exp. 1, (b) Exp. 2, and (c) Exp. 3 and daily fisheries catch data for the analysis period of JJA 2018–2020.

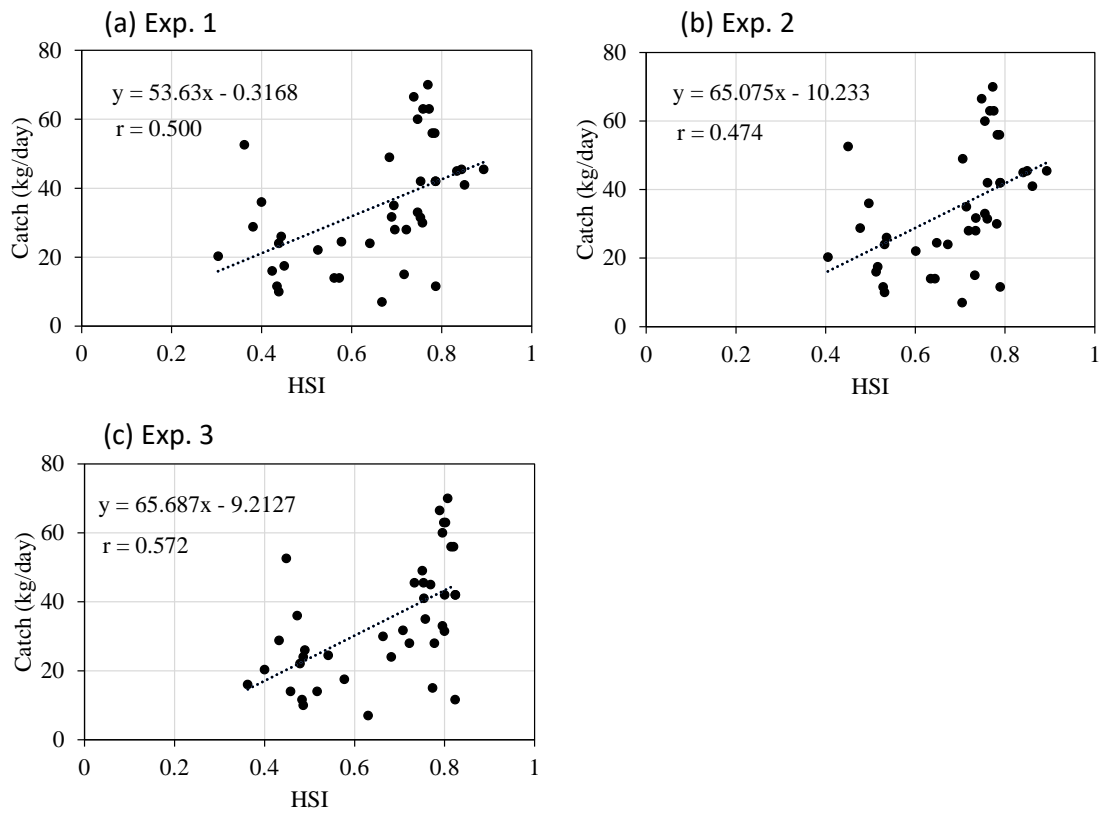


Figure 4.11 Same as Figure 10 but for the prediction period of JJA 2021.

Symbol	Definition	Value	Unit	Citation
V_{\max}	Maximum photosynthetic rate of PHY at 0°C	0.85 (0.6 ^a)	d ⁻¹	Kuroda et al. (2018)
K_{DIN}	Half saturation constant of PHY for DIN	0.5 (1.5 ^a)	mmolN m ⁻³	Kuroda et al. (2018)
k	Temperature coefficient for photosynthetic rate	0.0693	°C ⁻¹	OY (2005)
I_{opt}	Optimum light intensity	70	w m ⁻²	OY (2005)
α_1	Light dissipation coefficient of sea water	0.05	m ⁻¹	OY (2005)
α_2	Self shading coefficient	0.06	m ² mmolN ⁻¹	OY (2005)
R	Respiration rate at 0°C	0.03	d ⁻¹	OY (2005)
M_p	Phytoplankton mortality rate at 0°C	0.07	m ³ mmolN ⁻¹ d ⁻¹	OY (2005)
k_{MP}	Temperature coefficient for phytoplankton mortality	0.0693	°C ⁻¹	OY (2005)
G_R	Maximum grazing rate of ZOO at 0°C	0.3	d ⁻¹	OY (2005)
λ	Ivlev constant	1.4	m ³ mmolN ⁻¹	OY (2005)
σ	Threshold value for grazing	0.043	mmolN m ⁻³	OY (2005)
k_g	Temperature coefficient for grazing	0.0693	°C ⁻¹	OY (2005)
α_z	Assimilation efficiency of zooplankton	0.7	-	OY (2005)
β_z	Growth efficiency of zooplankton	0.3	-	OY (2005)
M_z	Zooplankton mortality rate at 0°C	0.07	m ³ mmolN ⁻¹ d ⁻¹	OY (2005)
k_{MZ}	Temperature coefficient for zooplankton mortality	0.0693	°C ⁻¹	OY (2005)
V_{PN}	Decomposition rate at 0°C (DET→DIN)	0.01 (0.05 ^a)	d ⁻¹	Fennel et al. (2006)
k_{PN}	Temperature coefficient for decomposition (DET→DIN)	0.0693	°C ⁻¹	OY (2005)

Table 4.1. Parameters used in the ecosystem model (PR experiment).

No.	Date	Vessel
1	July 7, 2020	Fishing vessel (< 5 tons)
2	August 13, 2020	Fishing vessel (< 5 tons)
3	August 20, 2020	Fishing vessel (< 5 tons)
4	August 30, 2020	Fishing vessel (< 5 tons)
5	September 10, 2020	Fishing vessel (< 5 tons)
6	September 29, 2020	Fishing vessel (< 5 tons)
7	October 18, 2020	Fishing vessel (< 5 tons)
8	June 9, 2021	Fishing vessel (< 5 tons)
9	July 21, 2021	Matsura (44 tons)
10	July 29, 2021	Matsura (44 tons)
11	August 20, 2021	Matsura (44 tons)
12	September 9, 2021	Matsura (44 tons)
13	October 26, 2021	Matsura (44 tons)
14	May 5, 2022	Matsura (44 tons)
15	June 16, 2022	Matsura (44 tons)
16	July 00, 2022	Matsura (44 tons)
17	August 24, 2022	Matsura (44 tons)

Table 4.2. Observation date and vessels.

Variables	SI models	RMSE	r
Temperature 0–70 m (T)	$\exp[-0.069(T - 6.90)^2]$	0.105	0.972
Salinity 50–70 m (S_B)	$\exp[-138.55(S_B + 0.064)^2]$	0.054	0.992
Velocity 0–10 m (V_A)	$\exp[-0.35(V_A - 0.47)^2]$	0.058	0.986
Velocity at 30 m (V_B)	$\exp[-0.004(V_B - 18.62)^2]$	0.0770	0.992
Velocity 50–70 m (V_C)	$\exp[-0.037(V_C - 1.49)^2]$	0.072	0.981

Table 4.3. Environmental parameters selected for the HSI model (Exp. 1).

Variables	SI models	RMSE	r
Temperature 0–70 m (T)	$\exp[-0.069(T - 6.90)^2]$	0.105	0.972
Salinity 50–70 m (S_B)	$\exp[-138.55(S_B + 0.064)^2]$	0.054	0.992
Velocity 0–10 m (V_A)	$\exp[-0.35(V_A - 0.47)^2]$	0.058	0.986
Velocity at 30 m (V_B)	$\exp[-0.004(V_B - 18.62)^2]$	0.0770	0.992
Velocity 50–70 m (V_C)	$\exp[-0.037(V_C - 1.49)^2]$	0.072	0.981

Table 4.4. Environmental parameters selected for the HSI model (Exp. 2).

Variables	SI models	RMSE	r
Temperature 0–70 m (T)	$\exp[-0.069(T - 6.90)^2]$	0.105	0.972
Salinity 0–10 m (S_A)	$\exp[-33.72(S_A + 0.072)^2]$	0.026	0.998
Salinity 50–70 m (S_B)	$\exp[-138.55(S_B + 0.064)^2]$	0.054	0.992
Velocity 0–10 m (V_A)	$\exp[-0.35(V_A - 0.47)^2]$	0.058	0.986
Velocity at 30 m (V_B)	$\exp[-0.004(V_B - 18.62)^2]$	0.0770	0.992

Table 4.5. Environmental parameters selected for the HSI model (Exp. 3).

第5章 総合考察

本研究では、沿岸漁業において先端技術を導入し、操業の効率化を図るための第一歩として、沿岸海域における効率的な海洋観測システムの構築、デジタル操業日誌システムの開発・現場実装および物理・生態系結合モデルを用いたケンサキイカの漁場予測の精度向上に関する技術開発・研究を行った。

本章では、まず、各章で得られた結論をまとめる。次に、各技術開発・研究結果を漁業現場に実装した際に漁業者から得られた代表的な意見を紹介する。最後に、各章の課題を本研究で構築した漁場予測モデルの更なる精度向上を念頭に抽出する。

沿岸海域における効率的な海洋観測システムの構築

沿岸海域での効率的な海洋観測システムを構築するために、漁業現場で利用可能な小型・軽量かつ堅牢なCTDセンサーと、観測結果を操業現場で即時に確認できデータを自動で転送・収集可能な調査基盤を開発し、九州北部3県の漁業現場に先行導入した。観測データは海況予測モデルDREAMSに同化されることで精度向上に寄与している。この取組では、観測協力漁業者への対価として海況予報を提供しており、海況予報を利用するために多くの漁業者から観測協力を得るという好循環ができていく。海況予報を利用することで燃油使用量や操業時間を削減するなどの操業の効率化を実現する漁業者も出始めている。漁業者参加型の海洋観測体制の構築によって、九州北西海域において海洋環境を過去にない時空間解像度で把握できるようになり、沿岸海域における海況特性の詳細を捉えることが可能となった。

デジタル操業日誌システムの構築と現場実装

沿岸漁業における操業データの効率的な収集および解析のために、デジタル操業日誌システムを開発し、2022年4月から佐賀県玄海海域の漁業現場に当該システムを本格的に導入した。当該システムを活用することで、漁業者はわずか5ステップで操業データの入力から報告までの作業を行うことができるようになった。2022年には28名の

沿岸漁業者から操業データを得ることが可能となった。調査協力者数が多い順に、沿岸いか釣漁業、はえ縄漁業、小型底びき網漁業および船びき網漁業となっている。当該システムを用いた操業報告により、沿岸いか釣漁業とはえ縄漁業では、年間数百件単位で操業データの収集が可能となった。多種多様な漁法によって様々な魚種が漁獲される沿岸漁業の特徴を考慮しつつ、沿岸漁業現場での利用に適したシステムを漁業現場に導入し安定的な運用ができています。

物理・生態系結合モデルを用いたケンサキイカの漁場予測

2018年から2020年のケンサキイカの操業データと水温・塩分・絶対流速の海況予測モデルデータを用いて九州北西海域において漁場予測(HSI)モデルを構築した。また、当該海域において鉛直1次元の物理・生態系結合(NPZD)モデルも構築した。

NPZDモデルの生態系に関するパラメータを既往知見から修正することで、当該海域における低次生態系をより正確に再現できた。漁場予測モデルの精度検証は2021年のケンサキイカの操業データをもとに行った。HSIモデルの環境変数としてNPZDモデル予測値(植物プランクトンもしくは動物プランクトン濃度)を加える場合と加えない場合の3つ比較実験を実施した結果、NPZDモデル予測値のうち5 m層の動物プランクトン濃度をHSIモデルの環境変数として利用することで、九州北西海域におけるケンサキイカの漁場予測の精度が向上することが明らかとなった。

本研究に対する漁業者の反応および意見

各章の研究・技術開発を行うと同時に、構築した技術の漁業現場への導入も実施した。これに対する漁業者の反応や意見について、著者が収集したもののうち代表的な事例を次に記載する。

沿岸海域における効率的な海洋観測システムの構築について、いか釣り漁業者からは、CTD観測結果を参考に漁具を投入する水深帯を決められているという事例が報

告されている。船びき網漁業者からは、漁具にCTDを取り付けて操業（観測）することで海中における漁具の挙動が可視化されることから、操業のための情報として非常に参考となるという意見が得られている。また、本取組の中で提供を開始した海況予報について、海況予報を操業の前日に確認し、その情報をもとに操業場所や出漁時間（操業開始時刻）を決めているという意見がある。このように、CTD観測結果と海況予報が操業のための情報として取り入れられており、一部の漁業者では操業のための情報として欠かせないものとなりつつある。上述のような好意的な意見がある一方で、壱岐西側海域、五島灘周辺海域などの一部の海域では海況予報の精度が下がるという漁業者からの意見がある。

デジタル操業日誌システムの構築と現場実装について、これまでの紙媒体での操業状況報告に比べて、当該システムを用いることで操業報告がより簡便になったという好意的な意見が得られている。2021年度から当該システムを32名の沿岸漁船漁業者に対して本格的に導入した。その結果、28名の漁業者から安定的に操業データを収集する体制を構築できた。しかし、4名の漁業者では、当該システムの安定的な活用には至っていない。

物理・生態系結合モデルを用いたケンサキイカの漁場予測について、本研究では鉛直1次元のNPZDモデルを用いた漁場予測モデルを構築したが、物理的環境データ(DREAMS_D)のみを用いた漁場予測モデルも構築しており、2022年6～9月にかけて一部の漁業者に対して漁場予測図を試験的に配信する試みを開始した。この取組に対して、「出漁や操業場所を決定するための情報が少ない沿岸漁業において、このような取組はありがたい。」という非常に前向きな意見が得られている。漁場予測の精度はこれから検証する段階であり、予測手法と予測に用いる説明変数の選択など改良の余地がある。

本研究の課題と今後の展望

漁業者参加型の海洋観測の現場試験と実証は、2019年までは九州北部3県をパイロットエリアとして行われた。九州北部3県の現場実証の成功を受け、2020年度から鳥取県、山口県、熊本県および鹿児島県を加えた7県に、2021年度から千葉県、富山県、石川県および島根県を加えた11県に、2022年度からさらに秋田県および徳島県を加えた13県に対象エリアを拡大してこの取組が実施されている。観測協力の対価として漁業者に提供している海況予報は、その精度の高さと操作性の良さから漁場選定や漁場環境把握のために欠かせないものとなってきている。一方で、上述したように、海域によっては海況予報の精度が低くなるとの漁業者からの意見もある。海況予報の精度は漁場予測の精度にも影響することから、今後は海況予測モデルのより詳細な精度検証が必要である。

沿岸海域における海況予測モデルの精度向上には、海況予測モデルに与える海洋初期値を最適化することが重要であり、海洋観測データの取得を継続することが欠かせない。今後も漁業者参加型の観測体制を維持・さらなる拡充を図るためには、得られた観測データ、解析値および予測値の提供範囲を水産分野に限るのではなく、データを必要とする他分野にも有償提供する体制の構築が必要だと考える。このような体制を構築することで、漁業者参加型の海洋観測に必要なランニングコスト、具体的には観測に対する漁業者への謝金や観測機器の更新・メンテナンス費等を安定的に確保できるようになる。一方で、漁業者による海洋観測は各漁業者の漁場周辺で行われることが多く個人情報を含む秘匿性の高い情報である。機密性を確保しつつ観測データを他分野にも提供可能とする方法の検討や、観測協力漁業者との調整が必要になるが、各都道府県の地方公設試験研究機関がその中心的な役割を担い、積極的な議論を進めるべき段階にあると考える。

デジタル操業日誌システムの導入により、効率的かつ安定的に沿岸漁業者から操業データを収集することが可能となった。今後は、このシステムを佐賀県玄海地域の沿岸漁業者の10%程度(100名程度)にまで調査協力者数を増やすことが当面の目標

である。当該システムを用いることで、漁業者はわずか5ステップで操業状況の報告ができるようになったが、調査協力者数をさらに増やすためには、デジタル操業日誌システムの操作ステップを可能な限り少なくする必要がある。先進的な事例では、デジタル操業日誌システムにAIを導入し、各漁業種類の航跡を学習させることで、漁場と操業開始・終了時刻の自動取得が可能となっている (<https://www.ocean5.co.jp/service/>, 2023年7月3日)。本技術開発でも同様の取組を実施しており、2023年度からAIを実装したデジタル操業日誌システムを漁業現場に試験的に導入する予定である。漁獲量情報についても、漁業種類によっては漁獲物のほぼすべてを特定の魚市場に出荷することから、市場の仕切書データから漁獲量を抽出することも可能である(山崎ら, 2014)。操業データ取得の自動化をさらに進めることで、操業報告の操作がさらに簡略化され、より漁業現場に適したUIとなるだけでなく、操作ミスを未然に防ぐことによるデータの質の向上にもつながる。

鉛直1次元の物理・生態系結合モデルは水平方向に制約があることから、その予測値を利用した漁場予測モデルでは漁場予測のエリアを限定する必要がある。このような制約はあるものの、漁場予測モデルの環境変数としてNPZDモデル予測値を加えることで九州北西海域におけるケンサキイカの漁場予測の精度が向上することが示された。したがって、当該海域における3次元の物理・生態系結合モデルを構築し、そのモデル予測値を活用した広域的な漁場予測を行うことが次の研究段階として考えられる。

ケンサキイカの漁場予測の精度は動物プランクトン濃度を環境変数として加えた予測モデルで最も高く、海洋物理的な環境変数のみを用いたモデルはそれに次ぐ予測精度であった。物理・生態系結合モデルを構築する際には、生態系に関するパラメータをその海域に適した値に修正する必要があることが本研究でも示された。これらのことから、他の海域で漁場予測モデルを導入する際には、まず海洋物理的な環境変数を用いて漁場予測モデルを構築し、さらに予測精度を向上させる必要がある場合に、

その海域に適した物理・生態系結合モデルを構築し漁場予測モデルの環境変数として海洋生物的な情報を加えることが効率的かつ効果的な研究方法だと考えられる。

ケンサキイカの漁獲量と5m 層の動物プランクトン濃度との間には負の関係がみられた。本文中には示していないが、AICの値が低い組み合わせとして動物プランクトンの鉛直勾配(5–45 m)が選択されるパターンもあった。この環境変数では、動物プランクトンが表層付近に少なく中層付近に多い場合にケンサキイカの漁獲量が多くなる関係がみられた。つまり、動物プランクトンが表層付近から移動し中層付近に集中する状態がケンサキイカにとって好ましい環境であると考えられる。この状態になることで、漁業者の操業効率が上がり漁獲量の増加に繋がるものと推察される。沿岸いか釣り漁業者は、これまでの経験と勘から漁獲水深帯を設定し、漁獲を行いながら漁獲水深帯を手探りで調整している。ケンサキイカの正確な水平分布の予測に加えて、鉛直的な分布も予測可能となれば、さらなる操業の効率化に資すると考えられる。

本研究では、漁場予測のアルゴリズムとしてHSIモデルのみを取り扱った。近年、漁場予測手法として機械学習を用いた事例も報告されていることから(e.g., Alabia et al., 2015a; Alabia et al., 2015b; Gao et al., 2016; Mugo and Saitoh, 2020), 今後は、機械学習による漁場予測モデルを構築し、漁場予測のアルゴリズムによる予測精度の違いについて検証する計画である。デジタル操業日誌システムの漁業現場への導入により他魚種の漁獲データの蓄積も進んでいる。ケンサキイカをパイロットモデルとして漁場予測モデルを開発したが、他魚種でも漁場予測モデルを構築し、その情報を漁業者に提供する予定である。

以上のように、各技術開発・研究で次の段階に進むための具体的な課題も見えてきた。本研究海域における沿岸漁業の操業の効率化のための調査研究は始まってまだ数年程度である。漁業者参加型の海洋観測体制の維持とさらなる拡充を図ることや、デジタル操業日誌システムの高度化と調査協力者数を増やす取組、そしてあらゆる魚種で海況と漁況との関係解明といった地道な調査研究を継続し、新たに出てくる課題

を一つずつ解決していくことが今後も重要である.

謝 辞

本研究の機会を与えてくださり、また、本研究の遂行および本論文のとりまとめにあたり、終始にわたって懇切な御指導と御校閲を賜った九州大学応用力学研究所教授 広瀬直毅博士に謹んで深謝の意を表します。

本論文をとりまとめるにあたり、御指導、御校閲くださった九州大学総合理工学府教授 杉原裕司博士、九州大学大学院農学研究院教授 太田耕平博士、九州大学応用力学研究所准教授 木田新一郎博士に厚く御礼申し上げます。

いであ株式会社 高山勝巳博士には物理・生態系結合モデルについて有益かつ貴重な御助言を頂きました。九州大学応用力学研究所助教 大貫陽平博士にはプログラミング言語初学者である私にPythonについて丁寧な御助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

佐賀県玄海水産振興センター 山浦啓治元所長、久野勝利前所長、中牟田弘典所長には、本研究の機会を与えてくださり、また、様々な御配慮を賜りました。船舶運行・調査取締担当の皆様には調査船による海洋観測調査に御協力を頂きました。資源研究担当の皆様には、本論文をとりまとめるにあたって有益な御助言を頂き、また、日常の業務でも様々な便宜を図って頂きました。学位取得にあたっては、佐賀県庁農林水産部農政企画課、同水産課および佐賀県玄海水産振興センターの関係各位に御支援と御配慮を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

漁業者参加型の海洋観測システム構築および操業データ報告調査では、佐賀玄海漁業協同組合所属の沿岸漁業者の皆様にご協力いただきました。ここに深く感謝を申し上げます。令和4年2月に御永眠された佐賀玄海漁業協同組合高串支所所属の青木 裕氏には、漁業者参加型の海洋観測システムおよび操業データ報告調査に当初から御協力いただきました。心から御礼申し上げるとともに、御冥福をお祈り致します。

引用文献

- Alabia, I.D., Saitoh, S., Mugo, R., Igarashi, H., Ishikawa, Y., Usui, N. and Seito, M. (2015a). Seasonal potential fishing ground prediction of neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) in the western and central North Pacific. *Fisheries Oceanography*, 24, 190–203.
- Alabia, I.D., Saitoh, S., Mugo, R., Igarashi, H., Ishikawa, Y., Usui, N. and Seito, M. (2015b). Identifying pelagic habitat hotspots of neon flying squid in the temperate waters of the central North Pacific. *PLoS ONE*, 10, e0142885. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0142885>
- 江口勝久(2013)ケンサキイカ孵化稚仔の65日令までの人工飼育. 佐賀県玄海水産振興センター研究報告, 6, 1–4.
- Falco, P., Belardinelli, A., Santojanni, A., Cingolani, N., Russo, A. and Arneri, E. (2007). An observing system for the collection of fishery and oceanographic data. *Ocean Science*, 3, 189–203.
- Fennel, K., Wilkin, J., Levin, J., Moisan, J., O'Reilly, J. and Haidvogel, D. (2006). Nitrogen cycling in the Middle Atlantic Bight: Results from a three-dimensional model and implications for the North Atlantic nitrogen budget. *Global Biogeochemical Cycles*, 20, GB3007; <https://doi:10.1029/2005GB002456>
- 藤井陽介・蒲池政文・広瀬直毅・望月 崇・瀬藤 聡・美山 透・広瀬成章・長船哲史・観 修妍・五十嵐弘道・宮澤泰正・豊田隆寛・干場康博・増田周平・石川洋一・碓氷典久・黒田 寛・高山勝巳(2017)日本の海洋データ同化研究—20年間の功績と今後の展望—. *海の研究*, 26, 15–43.
- Gao, F., Chen, X., Guan, W. and Li, G. (2016). A new model to forecast fishing ground of *Scomber Japonicus* in the Yellow Sea and East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 35, 74–81.

- Heinle, A. and Slawig, T. (2013). Internal dynamics of NPZD type ecosystem models. *Ecological Modelling*, 254, 33–42.
- Hirose, N., Kim, C.H. and Yoon, J.H. (1996). Heat budget in the Japan Sea. *Journal of Oceanography*, 52, 553–574.
- Hirose, N., Takayama, K. and Moon, J.H. (2013). Regional data assimilation system extended to the East Asian marginal seas. *Umi to Sora (Sea and Sky)*, 89, 43–52.
- Hirose, N., Liu, T., Takayama, K., Uehara, K., Taneda, T. and Kim, Y.H. (2021). Vertical viscosity coefficient increased for high-resolution modeling of the Tsushima/Korea Strait. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 38, 1205–1215.
- Igarashi, H., Saitoh, H., Ishikawa, Y., Kamachi, M., Usui, N., Sakai, M. and Imamura, Y. (2018). Identifying potential habitat distribution of the neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) off the eastern coast of Japan in winter. *Fisheries Oceanography*, 27, 16–27.
- 伊藤進一・有馬正和・市川雅明・青木 茂・奥西 武・笥 茂穂・長谷川大介・和川 拓・安田一郎・田中雄大・黒田 寛・清水勇吾(2016)水中グライダーによる沿岸海洋観測の可能性. *沿岸海洋研究*, 53, 125–133.
- 伊藤毅史・長本 篤・高木信夫・梶原伸晃・小久保貴幸・滝川哲太郎・広瀬直毅(2021)九州北西海域における漁業者参加型のCTD観測システムの構築. *水産海洋研究*, 85, 198–203.
- 伊藤毅史・藤崎 博(2018)漁場の海洋環境の見える化で沿岸漁業者をサポート. 月刊J-LIS, 5, 32–35.
- Kida, S., Takayama, K., Sasaki, Y., Matsuura, H. and Hirose, N. (2021). Increasing trend in Japan Sea Throughflow transport. *Journal of Oceanography*, 77, 145–153; <https://doi.org/10.1007/s10872-020-00563-5>
- 北川貴士(2014)漁場形成. 「水産海洋学入門 海洋生物資源の持続的利用」水産海

- 洋学会編, 講談社, 東京, 24–31.
- 小林恒夫 (2016) 「玄界灘島嶼社会の変容 佐賀県「玄海諸島」研究」小林恒夫著, 筑波書房, 東京, 1–263.
- Koné, V., Machu, E., Penven, P., Andersen, V., Garçon, V., Fréon, P. and Demarcq, H. (2005). Modeling the primary and secondary productions of the southern Benguela upwelling system: A comparative study through two biogeochemical models. *Global Biogeochemical Cycles*, 19, GB4021.
- Kuroda, H., Takasuka, A., Hirota, Y., Kodama, T., Ichikawa, T., Takahashi, D., Aoki, K. and Setou, T. (2018). Numerical experiments based on a coupled physical-biochemical ocean model to study the Kuroshio-induced nutrient supply on the shelf-slope region off the southwestern coast of Japan. *Journal of Marine Systems*, 179, 38–54.
- Leblond, E., Lazure, P., Laurans, M., Rioual, C., Woerther, P., Quemener, L. and Berthou, P. (2010). RECOPECA: a new example of participative approach to collect in-situ environmental and fisheries data. *Joint Coriolis Mercator Ocean Quarterly Newsletter* 37.
- Lee, D., Son, S.H., Kim, W., Park, J.M., Joo, H. and Lee, S.H. (2018). Spatio-temporal variability of the habitat suitability index for Chub Mackerel (*Scomber Japonicus*) in the East/Japan Sea and the south Sea of South Korea. *Remote sensing*, 10, 938.
- Lee, D., Son, S.H., Lee, C.I., Kang, C.K. and Lee, S.H. (2019). Spatio-temporal variability of the habitat suitability index for the *Todarodes pacificus* (Japanese common squid) around South Korea. *Remote Sensing*, 11, 2720
- 前川龍之介・元林裕仁 (2022) デジタル操業日誌システムを活用したズワイガニの資源保護. *日本水産学会誌*, 88, 537.
- Manda, A., A. Isobe, K. Omura and Y. Kyojuka (2000) Low-frequency temperature

- variability at Fukue Island located southwest of the Tsushima Straits. *J. Oceanogr.*, 56, 141–152.
- Manning, J. and Pelletier, E. (2009). Environmental monitors on lobster traps (eMOLT): long-term observations of New England's bottom-water temperatures. *Journal of Operational Oceanography*, 2, 25–33.
- 松本浩文 (2022) 漁獲成績報告書の自動作成. 「スマート水産業入門」和田雅昭編著, 緑書房, 東京, 56-57.
- Mori, K., T. Matsuno, T. Senju, N. Hirose and I.-S. Han (2009) Short-term temperature and salinity variations in the Tsushima Strait in 2004: Behavior of the surface low-salinity water in the Strait. *J. Oceanogr.*, 65, 301–310.
- Mugo, R. and Saitoh, S. (2020). Ensemble modelling of Skipjack Tuna (*Katsuwonus pelamis*) habitat in the western North Pacific using satellite remotely sensed data; a comparative analysis using machine-learning models. *Remote Sensing*, 12, 2591.
- 武藤悠助・戸田真志・和田雅昭・三島木一磨・出口貴也・岡本 誠 (2010) 漁業用電子操業日誌のユーザーインターフェース提案と評価. 日本デザイン学会研究発表大会概要集, 57.
- Nishikawa, H., Igarashi, H., Ishikawa, Y., Sakai, M., Kato, Y., Ebina, M., Usui, N., Kamachi, M. and Awaji, T. (2014). Impact of paralarvae and juveniles feeding environment on the neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*) winter-spring cohort stock. *Fisheries Oceanography*, 23, 289–303.
- 岡 英太郎・磯辺篤彦・市川 香・升本順夫・須賀利雄・川合義美・大島慶一郎・島田浩二・羽角博康・見延庄士郎・早稲田卓爾・岩坂直人・河宮未知生・伊藤幸彦・久保田雅久・中野俊也・日比谷紀之・寄高博行 (2013) 海洋学の10年展望 (I) – 日本海洋学会将来構想委員会物理サブグループの議論から –. *海の研究*, 22, 191–218.

- Onitsuka, G. and Yanagi, T. (2005). Differences in ecosystem dynamics between the northern and southern parts of the Japan Sea: Analyses with two ecosystem models. *Journal of Oceanography*, 61, 415–433.
- Onitsuka, G., Yanagi, T. and Yoon, J.H (2007). A numerical study on nutrient sources in the surface layer of the Japan Sea using a coupled physical-ecosystem model. *Journal of Geophysical Research*, 112.
- 大慶則之・辻 俊宏・千手智晴・広瀬直毅・中田聡史(2010)能登半島周辺海域の海況予報の新たな取り組み. *ていち*, 118, 53–60.
- 斎藤克弥(2016)衛星データの水産利用と沿岸への応用. *沿岸海洋研究*, 54, 63–68.
- 齊藤誠一(2017)衛星リモートセンシングで海洋空間を知る:水産資源の持続可能な利用のためのアプローチ. *情報管理*, 60, 641–650.
- 齊藤誠一・高橋文宏・五十嵐弘道(2021)水産分野におけるリモートセンシング利用の現状・課題・展望. *日本リモートセンシング学会誌*, 41, 189–199.
- 佐野 稔(2018)漁業者が活用しているマナマコ資源管理支援システムとその展開. *水産工学*, 55, 145–148.
- Senjyu T, Enomoto, H., Matsuno, T. and Matsui, S. (2006). Interannual salinity variations in the Tsushima Strait and its relation to the Changjiang Discharge. *Journal of Oceanography*, 62, 681–692.
- 清水勇吾・奥西 武・笥 茂穂・長谷川大介・和川 拓・井桁庸介・本多直人・瀬藤 聡・黒田 寛・伊藤進一(2017)水産研究・教育機構における水中グライダー運用記録と今後の活用法. *水産技術*, 9, 33–41.
- 清水勇吾・渡慶次 力・久野正博・瀬藤 聡・亀田卓彦・伊藤大樹・谷澤一宏(2021)簡易型XCTD観測装置の開発と海洋モニタリングにおける今後の活用法. *水産技術*, 14, 21–29.
- 水産庁(2021)第1章 我が国の水産業をめぐる動き. *水産白書*, 水産庁, 58–92.

- 鈴木祐太郎・佐野 稔(2019)北海道の底魚資源管理支援システム—ホッケの自主管理—. 日本水産学会誌, 85, 226.
- 滝川哲太郎・金嶽眞琴・伊藤毅史・広瀬直毅(2019)漁業者参加型海洋観測データと沿岸海況モデル—壱岐島周辺海域における冷却期の塩分変動特性—. 海洋理工学会誌, 25, 15–20.
- 田中裕介・石川洋一・五十嵐弘道・西川 悠・蒲池政文(2018)三陸沖の高解像度海洋モデルの開発. 日本水産学会誌, 84, 1047–1049.
- 田代征秋(1979)東シナ海ケンサキイカ漁場調査結果について. 長崎県水産試験場研究報告, 5, 45–52.
- Tawara, S. and T. Fujiwara (1985) Sea surface temperature distribution and its variability across the Tsushima Strait. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 41, 49–55.
- 渡慶次 力・福田博文・林田秀一・柳 哲雄(2013)まき網漁船によりリアルタイム計測された流向・流速データの特徴と有効性. *水産工学*, 50, 51–58.
- 渡慶次 力・林田秀一・福田博文・清水 学・市川忠史(2016)漁船計測による日向灘海況情報提供システムの運用と他海域への展開可能性. *沿岸海洋研究*, 53, 151–157.
- 渡慶次 力・西口政治・棧敷孝浩(2017)宮崎県海況情報の漁業者への経済効果. *水産海洋研究*, 81, 43–49.
- Toyoda T., Awaji, T., Masuda, S., Sugimoto, N., Igarashi, H., Sasaki, Y., Hiyoshi, Y., Ishikawa, Y., Saitoh, S., Yoon, S. In, T. and Kishi, M.J. (2013). Improved state estimations of lower trophic ecosystems in the global ocean based on a Green's function approach. *Progress in Oceanography*, 119, 90–107.
- 豊福太樹・大隈 斉(2019)ケンサキイカ稚仔が捕捉する動物プランクトン種. 佐賀県玄海水産振興センター研究報告, 9, 15–18.
- 宇田道隆(1934)日本海およびその隣接海区の海況. *水産試験場報告*, 5, 57–190.

- Valavanis V. D, Pierce, G. J., Zurr, A. F., Palialexis, A., Saveliev, A., Katara, I. and Wang, J. (2008). Modelling of essential fish habitat based on remote sensing, spatial analysis and GIS. *Hydrobiologia*, 612, 5–20.
- 和田雅昭・畑中勝守・佐野 稔・原田博行 (2010) 水産業における情報技術の活用について—IV. —リアルタイム情報の活用と水産資源評価—. 日本航海学会論文集, 124.
- Yagi, M., Takeda, T., Matsuyama, M. and Oikawa S. (2011). Prey capture by paralarvae of the squid *Uroteuthis (Photololigo) edulis* (Cephalopoda: Loliginidae) in captivity. *Aquaculture Science*, 59, 643–647.
- Yamaguchi, T., Kawakami, T. and Matsuyama, M. (2015). Migratory routes of the swordtip squid *Uroteuthis edulis* inferred from statolith analysis. *Aquatic Biology*, 24, 53–60.
- Yamaguchi, T., T. Aketagawa, T. Miyamoto, N. Hirose and M. Matsuyama (2018). The use of statolith analyses and particle-tracking experiments to reveal the migratory routes of the swordtip squid (*Uroteuthis edulis*) caught on the Pacific side of Japan. *Fisheries Oceanography*, 27, 517–524.
- Yamaguchi, T., Takayama, K., & Hirose, N. (2022). Influence of migratory route on early maturation of swordtip squid, *Uroteuthis edulis*, caught off western Kyushu Island, Japan. *Fisheries Research*, 249, 106233.
- 山崎礼華・和田雅昭・佐野 稔・高 博昭 (2014) 航跡情報を活用した漁場抽出アルゴリズムについて-たこいさり樽流し漁の事例-. 日本航海学会論文集, 130.
- Yu, W., Chen, X. and Zhang, Y. (2019). Seasonal habitat patterns of jumbo flying squid *Dosidicus gigas* off Peruvian waters. *Journal of Marine Systems*, 194, 41–51.
- Yu, W., J. Wen, Z. Zhang, X. Chen and Y. Zhang (2020). Spatio-temporal variations in the potential habitat of a pelagic commercial squid. *Journal of Marine Systems*, 206, 103339.