

課題番号： 4-2102

体系的番号：JPMEERF20214002

研究実施期間：令和3年度～令和5年度

世界自然遺産・知床をはじめとするオホーツク海南部海域の 海氷・海洋変動予測と海洋生態系への気候変動リスク評価

【重点課題】

主：【重点課題⑬】 生物多様性の保全に資する科学的知見の充実や対策手法の技術開発に向けた研究

副：【重点課題⑧】 気候変動への適応に係る研究・技術開発

【行政要請研究テーマ（行政ニーズ）】

（2-2）地域特性に応じた気候変動影響予測及び適応の推進に関する研究

研究代表者：三寺史夫

研究代表機関：北海道大学低温科学研究所

研究機関：北海道大学、水産研究・教育機構、筑波大学

北海道立総合研究機構、知床財団、京都大学

知床海域

- 知床は、北半球における季節海氷（流氷）の南限
- 知床は2005年に世界自然遺産に登録。「季節海氷による影響を受けた生態系の顕著な見本」であることが評価。

なぜ今か

- 海氷は、現在オホーツク海全体で見ると、**顕著な減少傾向**。ユネスコ世界遺産委員会は、**気候変動への適応戦略策定を勧告**
- 気候変動適応法（2018年）、北海道気候変動適応計画（2020年）
 - 海氷は地域産業（水産業、観光業）にとって大きな資源
 - 北海道気候変動適応計画（2020年3月）では海氷について記載。振興局や市町村単位など地域レベルでの適応計画策定。

研究の目的

【海氷変動予測】

- オホーツク海全体では、海氷面積の減少傾向が顕著だが、現在のところ流氷は知床海域まで毎年到達。
- しかしながら、今後の温暖化により知床海域からも急激に海氷が消失するという、未曾有の事態の可能性
- このように海域差の大きい、海氷変動の予測を全球気候モデルで行うことは困難
⇒海域レベルの予測には高解像の海氷・海洋モデリングと検証のための海洋モニタリングが不可欠
- 多数の気候モデル群と高解像の海氷・海洋モデルを結びつけた、知床海域スケールの海氷・海洋変動予測
✓ 温暖化がもたらす海氷消失可能性とその気候条件（気温、水温、風速など）の導出

【知床海域において海氷は豊かな海の基盤】

- 海氷融解に伴う植物プランクトンの大增殖
- それを起点とした豊かな水産資源形成や、シャチなど鯨類も来遊する高度な生物多様性
- アザラシなど鰭脚類にとって休憩や出産のための上陸場

研究の目的

知床海域における海氷および海洋変動を予測し、気候変動による海洋生態系への影響を評価

研究目標

課題全体の目標

1. シミュレーションにより、**知床海域の海氷・海洋変動予測**を行い、海氷消失可能性とその気候条件を導出。それに基づき、想定される**環境変動シナリオ**（海氷、海水温など）を提示（サブテーマ1, 2）
2. これまで欠落していた**冬季を含む海洋モニタリング網の整備**、および長期海洋変動解析。これらによる、海氷・海洋変動予測および変動シナリオの検証（サブテーマ3）。
3. 海氷および海氷融解を起点とした海洋生態系・生物多様性への**気候変動による影響を評価**。環境変動シナリオに基づく、**生態系の気候変動への応答予測**の提示（サブテーマ4, 5）



- 遺産管理への活用（既存の「世界遺産管理計画」や「海域管理計画」への反映、ユネスコ世界遺産委員会の勧告「気候変動適応戦略」策定への貢献）
- 北海道と連携し、振興局や市町村など地域レベルの適応計画の策定に貢献

研究計画 サブテーマ

【サブテーマ1】 知床海域の海氷・海洋変動予測とその不確実性の評価

サブテーマ代表：三寺史夫（北海道大学）

【サブテーマ2】 温暖化予測比較実験（CMIP6）に基づく環オホーツク気候システムの解明

サブテーマ代表：植田宏昭（筑波大学）

【サブテーマ3】 冬季を含む海洋環境モニタリング網の構築および海氷・海洋変動解析

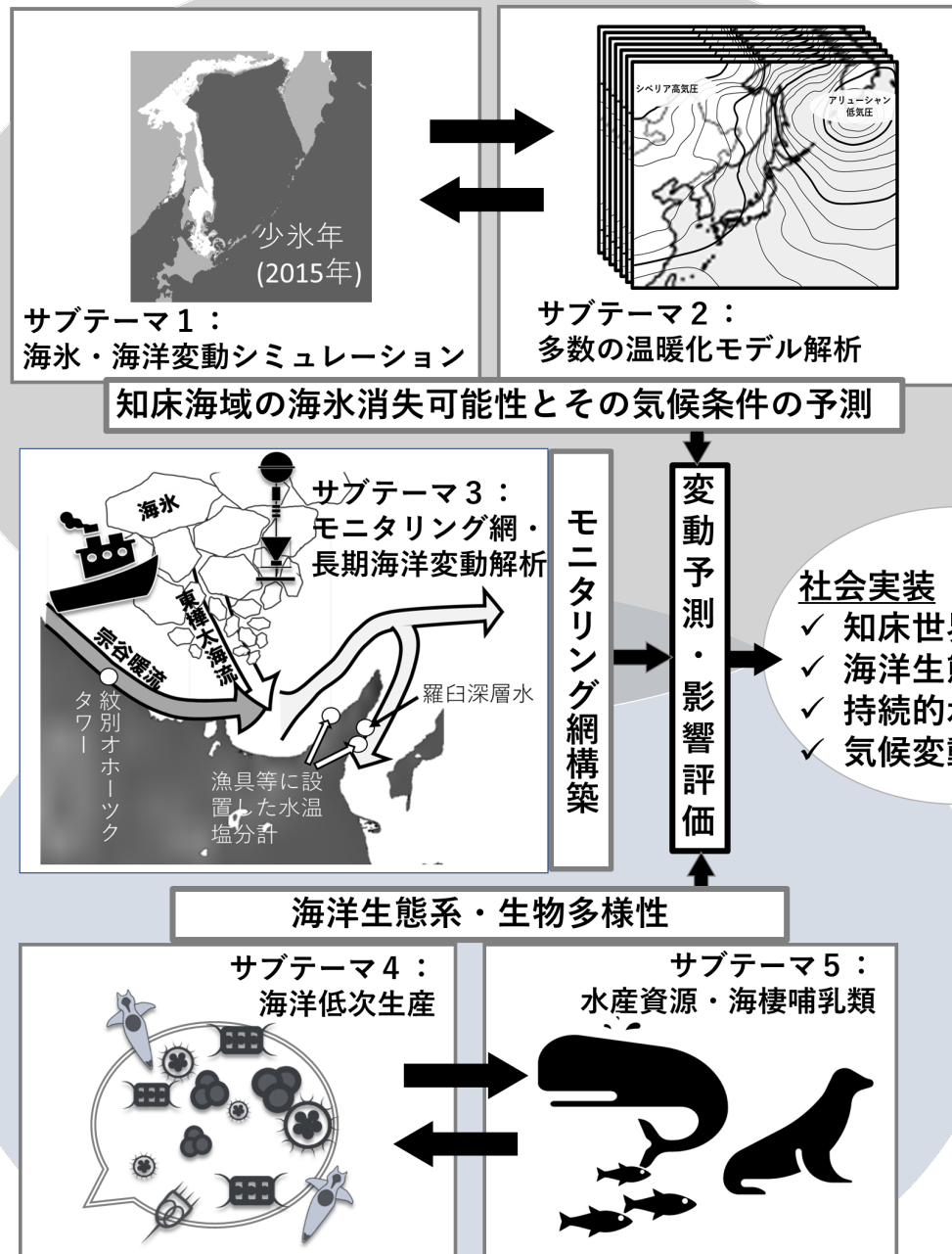
サブテーマ代表：中村知裕（北海道大学）

【サブテーマ4】 海氷域の物質変動と低次生産

サブテーマ代表：西岡 純（北海道大学）

【サブテーマ5】 海氷減少による水産資源・生物多様性への影響評価

サブテーマ代表：山村織生（北海道大学）



サブテーマ1 知床海域の海氷・海洋変動予測とその不確実性の評価

三寺・豊田・白岩（北大）、黒田・中野渡（水研）

【研究開発内容】 知床海域の海氷・海洋変動シミュレーションの開発と温暖化実験

- 北海道モデル（約2km格子）、オホーツク海モデル（約10km格子）の開発、および両者のネスティングの開発
- 開発された海氷・海洋モデルのパフォーマンスを見るために、気象庁再解析データ（JRA55）を用いて過去再現実験を実施
- サブテーマ2が作成する代表的な大規模温暖化パターン（大気データ）を用いた、知床海域の海氷の温暖化実験

【結果および考察】

1. 海氷・海洋モデルの開発

- ネスティングモデルの開発に成功
- 大気再解析JRA55を大気境界条件として、1993年から2019年の過去再現実験を実施。
- 再現性の良い海氷・海洋モデルを開発した

2. 温暖化実験

- 「現在気候を表すJRA55」に、サブテーマ2が作成する「CMIP6気候モデル群における現在気候値と将来気候値の差分」を加えることで将来気候の大気データを作成
- この将来大気データを用いて海氷・海洋モデルを駆動し、温暖化実験を実施
- 2006年の大気条件を用いた実験では、低位温暖化シナリオ（SSP1-2.6）でも図の領域で約66%の海氷減少が生じていた。

サブテーマ2 温暖化予測比較実験(CMIP6)に基づく環オホーツク気候システムの解明

植田・釜江（筑波大）

【研究開発内容】

- 第6期気候モデル相互比較計画（CMIP6）により提供されている気候モデル群を整備する
- 個々の気候モデルに対して、環オホーツク気候システムの現在気候の再現性評価を行う

【結果および考察】

1. CMIP6気候モデル群の現在気候再現性評価と大規模温暖化パターンの抽出

- CMIP6の大気海洋結合モデル群から、地表風の現在気候再現性を大気再解析データJRA-55と比較し評価
→15モデルを選定
- 低位温暖化シナリオ（SSP1-2.6）、中位温暖化シナリオ（SSP2-4.5）の2つのシナリオについて、15モデルで平均した2040～59年の温暖化差分量を計算→サブテーマ1に提供
- 温暖化するとアリューシャン低気圧の北偏と強化が生じ、北海道近傍では西風が強化される。ユーラシア大陸（オホーツクの上流）では、2°C程度の気温上昇を確認

2. オホーツク海海氷量の年々変動・季節内変動と大気循環場との関係

- オホーツク海海氷量の年々変動
(Ueda et al., *Atmosphere and Ocean* 投稿中)
 - ✓ アリューシャン低気圧と関係
 - ✓ 多氷年は寒気移流が大きい。
- 温帯低気圧の通過による海氷の急変動
(Kamae et al., *J. Meteor. Soc. Japan* 改訂中)
 - ✓ 低気圧通過時に南東風となる時 →海氷が一時的に減少
 - ✓ サハリン～道東沿岸では北風 →海氷域拡大

サブテーマ3 海洋モニタリング網と長期変動解析

中村・的場（北大）、美坂（道総研）、野別（知床財団）

【研究開発内容】

冬季を含む海洋モニタリング網を構築するとともにデータ集約化を促進。加えて、未整理データの校正・解析により過去の長期変動を解明し、重点監視項目を選定。

【結果および考察】

1. 知床沿岸モニタリング●

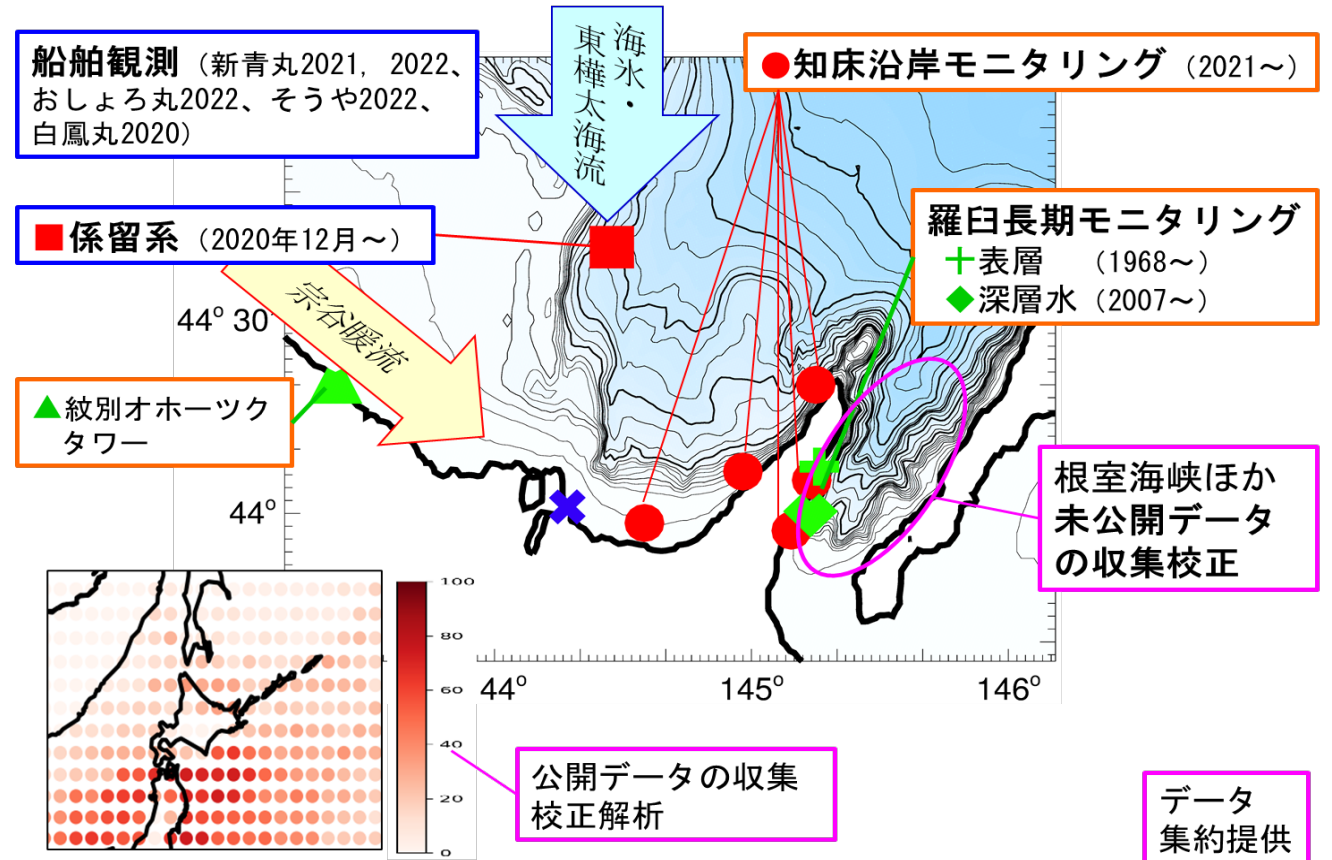
- 漁具への水温・塩分計の設置
- 水温の急激な低下現象の発見
→ 養殖漁業への影響

2. 船舶観測と係留系■

- これまで観測されたことのない海氷下の東樺太海流と冬季混合層の直接計測
→ サブテーマ1と協働し海氷の変動機構解明と予測向上に活用

3. 羅臼長期モニタリング+◆ 未公開データ

- 長期変動を捉えられる貴重なデータ



【研究開発内容】

- 栄養物質循環・低次生態系のモニタリング網構築
- 海氷および海氷融解を含めた水塊構造と栄養物質環境の季節変動の解明
- 春季ブルームにおける海氷微細藻類（アイスアルジー）と植物プランクトン動態の解明
- 海氷および海氷融解が物質循環と生物生産に与える影響を定量的に評価。

【結果および考察】

1. 冬季を含む栄養塩濃度の変動と海氷融解水の鉄供給インパクト

- 宗谷暖流水、東サハリン海流域の表層低塩分水、中冷水、オホーツク海中層水を生物地球化学的パラメータで水塊分けすることで、主要栄養塩濃度や鉄濃度の冬季を含めた季節変動を把握することに成功
- 酸素同位体比を利用し、海氷融解が表層の栄養塩濃度や鉄濃度に与えるインパクトを定量的に評価
- その結果、**海氷の融解は表層低塩分水の全鉄濃度に大きなインパクトを与えるが、主要栄養塩濃度にはほとんど影響を与えないことが判明**

2. 春季（海氷融解期）の植物プランクトンブルームの形成過程

- 2021年4月、2022年4～5月の観測航海により、海氷融解期の植物プランクトン春季ブルームをとらえることに成功。主に大型中心目珪藻Thalassiosiraが春季ブルームを形成していた
- アイスアルジーにThalassiosiraが多量に含まれており、培養実験でも優占
- 海氷下の水中および堆積物中において大型中心目珪藻は優占しておらず、春季ブルーム形成には**アイスアルジーの播種効果が重要 温暖化リスク同定につながる発見**

【研究開発内容】

- 海氷・水温等の物理環境と低次生産（植物プランクトン・動物プランクトン）の影響が高次栄養段階に伝搬する経路を解明。過去試資料から組成・豊度の経年変動と海氷の動向など環境要因との関連を分析
- 動物プランクトンのモニタリングデータを整理し解析することにより、海氷や海水温などの環境変化に対する動物プランクトンの応答を抽出
- 在データがほとんどない海棲哺乳類に関して、砕氷巡視船「そうや」による氷海域等の目視調査および音響調査を行い在データを蓄積。また、採取した環境DNAサンプルを分析し餌生物等を推定

【結果および考察】

1. 長期トロール調査による魚類群集の分析

- データを主成分分析し、年変動を環境データ(水温、海氷、テレネクション指数)でモデル化
- **沿岸海氷面積**は優占タラ類の生物量にプラス、**NPGO**（北太平洋循環変動）はマイナスの効果

2. 知床周辺での動物プランクトン糞粒計測

- 動物プランクトンの糞粒は生態系内の物質循環に重要
- 細目合ネットで糞粒の層別採集および Zooscanで計数計測を組み合わせた**新たな糞粒計測手法の開発**

3. 海棲哺乳類の在データ

- 冬季（海氷期含む）、春季（4～5月）、初夏（6月）に観測船からの目視調査
- 音響記録ではシャチ、マッコウクジラ、アザラシの鳴音を確認
- 環境DNAによる餌調査

(1) 進捗状況

計画通りに進展している

理由

- サブテーマ1はR3年度の計画であるモデル開発を完了した。サブテーマ2から将来予測大気データをすでに得ており、R4年度の温暖化実験を計画通り実施中。
- サブテーマ2は気候モデル群の解析までが目標であったが、サブテーマ1に前倒しで2050年の将来予測大気データ（SSP1-2.6, SSP2-4.5）を渡している。また、現在気候における海氷の解析も実施し、論文を投稿中
- サブテーマ3は観測網設置が完了。係留系の設置・回収も成功。未公開の長期データ収集・校正も順調
- サブテーマ4は海氷による栄養物質の海氷融解水へのインパクト定量化に成功。また、アイスアルジーの春季ブルームに対する播種効果を発見。これらは温暖化リスク同定に重要な知見
- サブテーマ5では、底魚に対する海氷変動や北太平洋循環の影響を分析。また、海棲哺乳類の在データの蓄積が順調に進展。動物プランクトンは、新たなモニタリング手法を開発し糞粒を通した物質循環を解析。羅臼深層水取水試料の分析等を通じて、時系列解析を予定。

目標達成見通し

以上の通り計画は順調に進んであり、研究期間内にすべての目標を達成できる見込みである

(2) 環境政策等への貢献

- 海氷・海洋変動の将来予測により、遺産管理、水産資源管理、生態系保全、地域の適応策に活用
- モニタリング網の設置により、海氷を含む海洋環境のモニタリングの強化と継続性
- 海氷が物質循環・海洋生態系に及ぼすインパクトが明らかになった。温暖化リスクの同定により、気候変動への適応策に活用
- ユネスコ世界遺産委員会勧告への答申に貢献

研究成果の発表状況

< 論文（査読あり） > 7件

【サブテーマ 1】

- 1) KURODA, H., T. TANAKA, S. ITO, and T. SETOU: Cont. Shelf Res., 230, 104568 (2021) Numerical study of diurnal tidal currents on the Pacific shelf off the southern coast of Hokkaido, Japan. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2021.104568>. (IF:2.629)
- 2) KURODA, H., T. AZUMAYA, T. SETOU, and N. HASEGAWA: J. Mar. Sci. Eng., 9, 1335 (2021) Unprecedented Outbreak of Harmful Algae in Pacific Coastal Waters off Southeast Hokkaido, Japan, during Late Summer 2021 after Record-Breaking Marine Heatwaves. <https://doi.org/10.3390/jmse9121335>. (IF: 2.744)
- 3) NAKANOWATARI, T., T. NAKAMURA, H. MITSUDERA, J. NISHIOKA, H. KURODA, and K. UCHIMOTO: Prog. Oceanogr., 197, 102615 (2021) Interannual to decadal variability of phosphate in the Oyashio region: Roles of wind-driven ocean current and tidally induced vertical mixing in the Sea of Okhotsk. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102615>. (IF:4.416)

【サブテーマ 4】

- 1) YAN, D., J. NISHIOKA, T. TOYOTA, and K. SUZUKI: Prog. Oceanogr., 204, 102806 (2022) Winter microalgal communities of the southern Sea of Okhotsk: A comparison of sea ice, coastal, and basinal seawater. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102806> (IF:4.416)

【サブテーマ 5】

- 1) HAMAO, Y., K. MATSUNO, Y. MITANI and A. YAMAGUCHI: J. Oceanogr., 78, 89–101 (2022) Spatial distribution of the protist community in the southern part of the Okhotsk Sea off Hokkaido during summer. (IF: 2.083).
- 2) 山口 篤, 濱尾優介, 松野孝平, 飯田高大: 水産海洋研究, 86, 41–49 (2022) 2021年秋季北海道太平洋沿岸における有害赤潮藻*Karenia selliformis*の水平分布および植物プランクトンの群集構造. (IF: なし)
- 3) KOJIMA, D., Y. HAMAO, K. AMEI, Y. FUKAI, K. MATSUNO, Y. MITANI and A. YAMAGUCHI: Deep Sea Res. I: Oceanogr. Res. Pap., **185**: 103771 (2022) Vertical distribution, standing stocks, and taxonomic accounts of the entire plankton community, and the estimation of vertical material flux via faecal pellets in the southern Okhotsk Sea. (IF: 3.101)

< 口頭発表（学会等） > 24件

< 「国民との科学・技術対話」の実施 > 6件