

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公募区分： 環境問題対応型研究（一般課題）

研究予定期間： 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度

課題番号： 【4-2102】

体系的番号： （J P M E E R F 2 0 2 1 4 0 0 2）

研究課題： 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

Research Title: Prediction of Sea Ice and Ocean Variations and Climate Change Risk Assessment on Marine Ecosystems in the Southern Sea of Okhotsk Including Shiretoko, a World Natural Heritage

研究代表者： 三寺 史夫

研究代表機関： 北海道大学

研究分担機関： 国立研究開発法人 水産研究・教育機構、筑波大学、公益財団法人 知床財団、地方独立行政法人 北海道立総合研究機構、京都大学

研究領域： 自然共生領域

キーワード： 知床、世界自然遺産、海氷、気候変動、影響評価

令和6（2024）年5月

## 目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
I. 成果の概要	4
1. はじめに（研究背景等）	8
2. 研究開発目的	8
3. 研究目標	8
4. 研究開発内容	10
5. 研究成果	13
5-1. 成果の概要	13
5-2. 研究目標の達成状況	19
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	22
6. 研究成果の発表状況の概要	23
6-1. 成果の件数	23
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	23
7. 国際共同研究等の状況	24
8. 研究者略歴	24
II. 成果の詳細	26
II-1 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」	26
[サブテーマ1要旨]	26
1. サブテーマ1研究開発目的	26
2. サブテーマ1研究目標	26
3. サブテーマ1研究開発内容	26
4. サブテーマ1結果及び考察	29
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	38
II-2 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」	40
[サブテーマ2要旨]	40
1. サブテーマ2研究開発目的	40
2. サブテーマ2研究目標	40
3. サブテーマ2研究開発内容	40
4. サブテーマ2結果及び考察	41
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	52
II-3 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」	54
[サブテーマ3要旨]	54
1. サブテーマ3研究開発目的	54
2. サブテーマ3研究目標	54
3. サブテーマ3研究開発内容	54
4. サブテーマ3結果及び考察	61
5. サブテーマ3研究目標の達成状況	67
II-4 サブテーマ4 「海氷域の物質変動と低次生産」	69
[サブテーマ4要旨]	69
1. サブテーマ4研究開発目的	69
2. サブテーマ4研究目標	69
3. サブテーマ4研究開発内容	69
4. サブテーマ4結果及び考察	73
5. サブテーマ4研究目標の達成状況	82
II-5 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」	83

[サブテーマ5要旨] .....	83
1. サブテーマ5研究開発目的 .....	83
2. サブテーマ5研究目標 .....	83
3. サブテーマ5研究開発内容 .....	84
4. サブテーマ5結果及び考察 .....	85
5. サブテーマ5研究目標の達成状況 .....	95
Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細 .....	96
(1) 成果の件数 .....	96
(2) 誌上発表 .....	96
(3) 口頭発表 .....	99
(4) 知的財産権 .....	105
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施 .....	105
(6) マスメディア等への公表・報道等 .....	107
(7) 研究成果による受賞 .....	108
(8) その他の成果発表 .....	108
Abstract .....	110

別紙 公募審査・中間評価結果への対応

I. 成果の概要  
 <課題情報>

公募区分：	環境問題対応型研究（一般課題）
研究実施期間：	令和3（2021）年度～令和5（2023）年度
課題番号：	【4-2102】
研究課題：	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
研究代表者：	三寺史夫（北海道大学、教授）
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
重点課題（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
研究領域：	自然共生領域

<キーワード>

知床
世界自然遺産
海氷
気候変動
影響評価

<研究体制>

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1リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
北海道大学	低温科学研究所	教授	三寺 史夫	
水産研究・教育機構	水産資源研究所	グループ長	黒田 寛	
水産研究・教育機構	水産資源研究所	主任研究員	中野渡 拓也	
北海道大学	低温科学研究所	助教	豊田 威信	

北海道大学	低温科学研究所	准教授	白岩 孝行	
-------	---------	-----	-------	--

<サブテーマ1 研究協力者>

機関名	部署名	役職名	氏名
北海道大学	大学院環境科学院	博士課程3年 (RA)	Yuan Nan (2021年度)
北海道大学	低温科学研究所	博士研究員	佐伯 立 (2022年4月～12月、2023年4月～12月)

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2 リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
筑波大学	生命環境系	教授	植田 宏昭	
筑波大学	生命環境系	助教	釜江 陽一	

<サブテーマ2 研究協力者>

機関名	部署名	役職名	氏名
筑波大学	生命環境系	助教	井上 知栄 (2022年度～2023年度)
筑波大学	生命環境系	大学院生	倉持 将也

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3 リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
北海道大学	低温科学研究所	講師	中村 知裕	
北海道立総合研究機構	釧路水産試験場	部長	美坂 正	2021年度～2022年度 (異動)
北海道立総合研究機構	釧路水産試験場	部長	嶋田 宏	2023度
知床財団	海洋河川事業係	係長	野別 貴博	
北海道大学	低温科学研究所	助教	的場 澄人	

## ＜サブテーマ3 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
北海道立総合研究機構	釧路水産試験場	主査	澤村 正幸
北海道大学	低温科学研究所	学術研究員	伊藤 薫 (2021年7月～2023年12月)

## サブテーマ4 「海氷域の物質変動と低次生産」

## ＜サブテーマ4 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
北海道大学	低温科学研究所	教授	西岡 純	
北海道大学	大学院地球環境 科学研究所	教授	鈴木 光次	

## ＜サブテーマ4 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
北海道大学	低温科学研究所	学術研究員	村山 愛子 (2021年11月～2022年1月)

## 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5 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
北海道大学	水産科学研究所	准教授	山村 織生	
京都大学	野生動物研究セ ンター	教授	三谷 曜子	
北海道大学	水産科学研究所	准教授	山口 篤	

## ＜サブテーマ5 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
該当なし			

## ＜研究経費（間接経費を含む）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	26,300千円	7,890千円	34,190千円
2022	25,120千円	7,536千円	32,656千円
2023	24,522千円	7,356千円	31,878千円
合計	75,942千円	22,782千円	98,724千円

## 1. はじめに（研究背景等）

知床半島は北半球における季節海氷到達の最南端である。知床は2005年に世界自然遺産に登録されたが、それは「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」ことが高く評価されたことによる。しかしながら、近年オホーツク海では海氷減少が著しく、ユネスコ世界遺産委員会は2019年の決議においてそれを懸念し、気候変動に対するモニタリングと適応管理戦略の策定を勧告した。国内においても2018年に気候変動適応法が施行され、地域社会と連携した早急な研究開発が促されている。

本研究は、知床をはじめとする北海道オホーツク海沿岸（以下、知床海域）における海氷および海洋変動を予測し、温暖化による海洋生態系への影響を評価するものである。知床海域では海氷融解に伴って植物プランクトンが大規模なブルームを起こし、それを起点とした豊かな水産資源形成がなされるとともに、シャチなど鯨類も来遊する高度な生物多様性を示す。また、アザラシは出産や休憩の上陸場として海氷を利用しており、当海域から海氷が消失すれば海洋生態系への影響が甚大であろうことが予想される。しかしながら海氷変動は地域差が大きい。全球を対象とした気候モデルではこのような海域スケールの現象は再現できず、また気候モデル間における予測にばらつきが大きいこと「知床海域から海氷が無くなるのか？水産資源や海洋生態系への影響はどうか？」という地域社会にとって切実な問いに、確度の高い予測を持って答えることができない状況にある。また、海氷が豊かな海の源ということは現時点では社会的通念にとどまっている。海氷が消失した場合の、海洋物質循環・生態系へのインパクトに関する科学的知見は乏しいのが現状である。

海氷・海洋モデルを用いたオホーツク海の水氷変動予測に関しては、文部科学省による「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（2017-2021年度）において、気象研究所がオホーツク海全体について21世紀末の水氷変動予測を行ったものがある（Yamanaka et al., 2021）。これに対して本研究では海氷・海洋モデルをさらに高解像度化し、知床をはじめとする北海道沿岸に焦点を当て、また21世紀末に加え中期的予測である2050年にも重点をおいて解析を行った。

<引用文献> Yamanaka et al. (2021) Projected climate change in the western North Pacific at the end of the 21st century from ensemble simulations with a high-resolution regional ocean model, *J. Oceanogr.*, 77, 539–560.

## 2. 研究開発目的

本課題では2050年および21世紀末（2090年）の水氷変動を予測し、海洋生態系・生物多様性への温暖化リスクを明らかにする。そのために、以下の3点を研究開発目的とする。①知床をはじめとするオホーツク海南部海域（知床海域）の水氷・海洋シミュレーションを開発し、当海域において、2050年、2090年における水氷変動予測を行う。また、海氷消失の可能性とその気候条件を導出する（サブテーマ1、サブテーマ2）。②データが極めて少ない冬季を含めた水氷・海洋モニタリング網を構築するとともに、過去の長期データ解析を行うことで、気候変動に対する知床海域の海洋・水氷応答メカニズムを明らかにする。また、この知見を予測および変動シナリオの検証に用いる（サブテーマ3）。③これまで観測が無かった水氷融解直後の植物プランクトン大規模ブルームを調査し、水氷および水氷融解が物質循環と低次生産に与える影響を定量的に明らかにする。また、水氷を起点とする海洋生態系・生物多様性に対する影響評価を行うことにより温暖化リスクを同定する（サブテーマ4、サブテーマ5）。

## 3. 研究目標

全体目標	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、地球温暖化に伴う水氷・海洋環境変動シミュレーションを開発し、当海域における水氷消失可能性とその気候条件を導出する。また、データが極めて少ない冬季を含めた水氷・海洋環境モニタリング網を構築するとともに、過去の長期データ解析を行うことで気候変動に対する知床地域の海洋・水氷応答機構を明らかにする。そして、これらを基盤に、水氷融解を起点とした海洋生態系・生物多様性への温暖化リスクを同定する。そして、知床世界自然遺産管理や地域産業における温暖化適応戦略策定に活用する。
------	---

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 1 実施機関	北海道大学、水産研究・教育機構 水産資源研究所
サブテーマ 1 目標	研究全体を統括するとともに、知床をはじめとするオホーツク海南部海域の海氷・海洋変動シミュレーションを開発し、当海域の地球温暖化に伴う海氷消失可能性とその気候条件を導出する。また、研究全体の成果をとりまとめて知床海域の海氷変動と海洋生態系に対する温暖化リスクを同定し、世界自然遺産管理計画や海域資源管理計画、地域社会の気候変動への適応戦略策定に活用する。
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 2 実施機関	筑波大学
サブテーマ 2 目標	ストーリーライン手法を用いて、マルチ気候モデル群による予測の中から海氷変動と紐づけた少数の代表的な大規模温暖化パターンを抽出することにより、地球温暖化に伴う環オホーツク地域の気候変動システムを明らかにする。また、海氷・海洋環境変動シミュレーションのための、大気境界条件を導出する。
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 3 実施機関	北海道大学、知床財団、北海道立総合研究機構
サブテーマ 3 目標	気候変動がもたらす海洋と海氷への影響を捉えるため、冬季を含む海洋環境モニタリング網を構築しデータ集約化を行う。加えて、未公開データの校正・解析により過去の長期変動を解明し、海氷融解直後の集中観測との組み合わせにより重点監視項目を選定することで、沿岸計測を中心とした効率的な長期モニタリング網を構築する。また、取得したデータをサブテーマ1に提供し、シミュレーションの精度評価と予測精度向上に活用する。
サブテーマ 4	海氷域の物質変動と低次生産
サブテーマ 4 実施機関	北海道大学
サブテーマ 4 目標	知床海域を対象とした、冬季から海氷融解期も含めて季節を通じた時系列モニタリング観測網を構築することにより、栄養物質環境の季節変動と微細藻類（アイスアルジーと海水中の植物プランクトン）動態の関係を解明し、最終的に海氷および海氷融解が物質循環と低次生産に与える影響を定量的に明らかにする。
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 5 実施機関	北海道大学、京都大学
サブテーマ 5 目標	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明らかにする。過年度試資料から組成・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する。多様な海洋生物からなる生物群集の環境変動に対する鍵種の選定とそ

の応答を解析することにより、知床海域の温暖化に対する群集構成と食物網構造への影響を評価し、温暖化リスクを提示する。また、海氷を出産などの上陸場として利用するアザラシ等海棲哺乳類の来遊・滞在などデータはほとんどないため、水中音響技術等を用いてデータを蓄積し、温暖化リスク評価の基礎資料とする。

#### 4. 研究開発内容

##### 【研究全体の構成】

本研究では、世界自然遺産・知床をはじめとするオホーツク海南部の海氷変動・海洋変動の将来予測をすることにより（サブテーマ1・サブテーマ2・サブテーマ3）、その生態系への影響を評価する（サブテーマ4・サブテーマ5）。また、冬季の観測データが極めて少ない海域であるため、温暖化による海氷・海洋変動および生態系への影響評価のための情報が乏しい。そのため、海洋・海氷データおよび生態系データを収集・蓄積し、その基礎情報を得る（サブテーマ3・サブテーマ4・サブテーマ5）。

##### ① 海氷の変動予測

【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

これらの2つのテーマは密接に関連しているので、以下の通り合わせて記述する。

##### （1）知床海域における海氷・海洋モデルの開発【サブテーマ1】

知床海域において、気候変動による海氷変動予測と海氷消失条件（気温、水温、風など）を求めるために、ネスティングを用いた海氷・海洋モデルを開発した。具体的には、①オホーツク海全体の海氷分布を再現する10km格子のオホーツク海モデルを作成し（図0-1. 中央）、これに②高解像度（2km格子）の北海道モデルをネスティングし（図0-1. 右）、知床海域における海氷分布を高解像度で再現する。ここでは、まず大気境界条件として気象庁の大気再解析データ（JRA55）を用いて過去再現実験を行い、サブテーマ3と協働してパフォーマンスを調べることで、海氷・海洋モデルの適正化を行った。

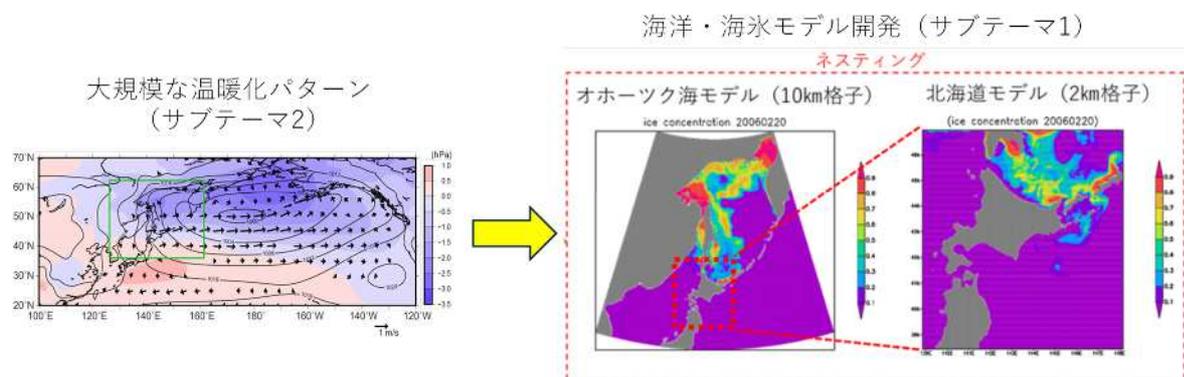


図0-1（図1-1）. 知床海域の海氷変動予測システム。オホーツク海モデル（中央：10km格子）に北海道モデル（右：2km格子）をネスティングし、海氷・海洋モデルを開発した（カラー陰影は海氷密度）。これをCMIP6気候モデル群から得た大気データの温暖化差分値（左）を用いて駆動する（カラー陰影は2050年と2000年の気圧差、ベクトルは地上風の差）。

##### （2）CMIP6気候モデル群からのモデルの選定と環オホーツク気候システムの変動予測【サブテーマ2】

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とともに、大気海洋結合モデル実験においてhistorical実験（1990～2009年；以下、「2000年」と表示）およびScenarioMIP（2040～2059年および2080年～2099年；以下、「2050年」および「2090年」と表示）の低位温暖化シナリオ実験（SSP1-2.6；21世紀後半にCO2排出量が実質ゼロ）・中位温暖化シナリオ実験（SSP2-4.5）・高位温暖化シナリオ実験（SSP5-8.5；CO2排出量の制限なし）の月平均値が利用できる15モデルを選択したうえで、個々の気候モデルに対して、環オホーツク海周辺域における地表風の現在気候再現性評価を行い、最終的に11モデルを選定した。また、大気海洋の諸変数（地上気温・地表風など）の温暖化差分

を計算し、海氷・海洋モデルの境界値として提供した。さらに、CMIP6気候モデル群の温暖化のばらつきを見るために、オホーツク海の風上側の地上気温および北海道北部の地上風の「2050年」および「2090年」と「2000年」の差をインデックスとして、気候モデルを分類した。

研究計画では高解像度版のHighResMIP気候モデル群を対象とする予定であったが、将来気候の計算期間が2050年までであるモデルが多いこと、大気海洋結合モデルの出力が存在するモデルが少ないことなどから、アドバイザーからの助言も踏まえ、CMIP6のhistorical実験およびScenarioMIPのSSPシナリオ実験を対象とすることに変更した。

### （3）温暖化実験【サブテーマ1・サブテーマ2】

温暖化実験の手順を以下の通り定めた。(i)「現在気候を表すJRA55(1993年-2018年)」に、「CMIP6気候モデル群における『2050年』および『2090年』気候値と『2000年』気候値との差分」を加えることで将来の大気データを作成し、(ii)その大気データを用いて、(1)で作成した海氷・海洋モデルを駆動することで、海氷変動の将来予測を実現する(図0-1)。

この実験手順に基づいた海氷の温暖化予測実験を、低位・中位・高位の3種の温暖化シナリオに対しておこなった。また、CMIP6気候モデル群中の温暖化のばらつきに対する海氷の応答を見るため、(2)で行った気候モデル群の分類に基づき将来気候の大気データを作成し、海氷変動実験を行った。

さらに、海氷が消失した場合の物質循環・低次生態系へのインパクトを見積もるために、海氷と鉄を物質循環プロセスに組み込んだ低次生態系モデルによる生態系モデル実験を行った。

### （4）現在気候における気候変動・海氷変動解析【サブテーマ1・サブテーマ2】

上記の温暖化実験に加え、基盤となる知見を得るため、従来のデータを用いて解析を行った。【サブテーマ1】では、海氷変動の解析を海上保安庁砕氷巡視船「そうや」による長期観測(1996年～2020年)、衛星による海氷観測データ(1988年～2020年)を用いて行った。「そうや」による観測については、これほどの長期にわたる海氷域の現場観測は、世界でも類を見ない。また、知床への漂着ごみについて、海氷の影響を考察した。【サブテーマ2】では、過去数十年の海氷・大気場などのデータを用い、知床海域の海氷変動に紐づける代表的な大気循環パターンを抽出するための基礎資料として、オホーツク海域における海氷量の年々変動および季節内～総観規模スケールの変動の解析を進めた。

## ② 知床海域沿岸モニタリング網の構築

【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

### （1）冬季を含む海洋環境モニタリング網の構築

沿岸モニタリング網を図0-2に示す。新たに

- ・知床沿岸の5カ所(西側3カ所、東側2カ所)に水温塩分計
- ・羅臼深層水取水口に水温塩分計(従来の水温計に追加)

を設置し、冬季を含む沿岸モニタリング網を構築した。

加えて、沿岸の定点観測として、紋別オホーツクタワー(紋別市:サブテーマ1と協同)と羅臼漁協ウニ種苗センターから、データ使用について協力を得た。船舶観測として、北海道立総合研究機構(道総研)による定期船舶観測および羅臼漁協による根室海峡北部の冬季観測について協力を得た。砕氷巡視船「そうや」による氷海域観測も、海上保安庁の協力を得て北海道大学低温科学研究所が継続している(サブテーマ1と4)。その他、海氷・潮位・風など気象庁の公開データを入手した。

### （2）過去の海洋観測データの収集・校正と解析

(1)のモニタリング網のうち、羅臼表層(羅臼漁協ウニ種苗センター)、羅臼深層水取水口水温データ(羅臼町・知床財団)、根室海峡北部の冬季CTD観測データ(羅臼漁協・道総研)には未公開の長期データがあった。これらを収集・校正し解析した。加えて、より広域・長期間の解析のため当初計画に追加

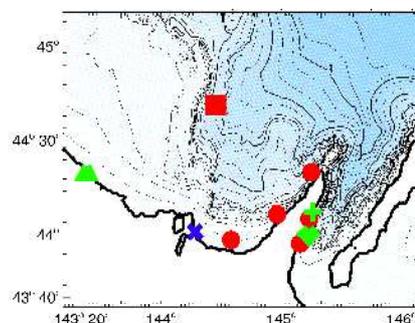


図0-2(図3-1)：モニタリング網。

- ：知床沿岸水温塩分計
- +
- ◆：羅臼深層水取水口
- ▲：オホーツクタワー
- ：係留系
- 青×：潮位

して、限定公開されている道総研の定期船舶観測データ、ならびに公開データ(World Ocean Database; WOD および 日本海洋データセンター; JODC)も収集・校正し解析した。

### (3) データのない季節・海域の現場観測

船舶による現場観測を本課題実施中に6回、本課題開始前の準備期に2回の合計8回実施し、のべ300回を超えるCTD観測を行うとともに、係留系の設置回収を行った。船舶観測は、データの無かった海氷融解直後の4月と5月、および海氷到来直前の12月、データの少ない初夏の6月と盛夏の9月に実施した。これらに加えて、3年弱にわたり設置した係留系および、サブテーマ1と4による2月の海氷域の観測も合わせて、一年を通じた現場観測データの取得に成功した。

### (4) データの集約と提供

地域社会や学界に資するため、収集したデータの集約と提供を行った。また、サブテーマ1の海洋・海氷モデル開発に取得データを利用した。

## ③ 生態系への影響評価

### 【サブテーマ4】海氷域の物質変動と低次生産

#### (1) モニタリング観測網の構築

南部オホーツク海域を対象とし、冬季から海氷融解期も含めて水塊構造と栄養物質環境の季節変動や、微細藻類(アイスアルジーと海水中の植物プランクトン)動態の関係を解明するために、季節を通じた時系列モニタリング観測網を構築した。具体的には、2021年4月の新青丸(JAMSTEC/東京大学大気海洋研究所)KS-21-6次研究航海、2022年2月の海上保安庁巡視船そうや航海、2022年4~5月の新青丸KS-22-6次航海、および2023年9月の新青丸KS-23-15次航海を実施した。これらの観測航海において、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とらえるためにCTD—CMS観測を実施し、表層から海底直上まで(2月層や航海のみ表層5m、15mのみ)の水温、塩分、密度データ、主要栄養塩濃度(硝酸塩、アンモニア、リン酸塩、ケイ酸)や鉄濃度、クロロフィル*a*(Chl-*a*)濃度、溶存酸素濃度、水酸素同位体比( $\delta^{18}O$ )測定用の海水サンプルを取得した。また、表層(水深0~5m深)からは、環境データ(水温、塩分、栄養塩濃度、光量等)と共に、植物プランクトン群集の現存量、組成、生産力を評価するための試料を採取した。

#### (2) 物質循環・海洋低次生態系の分析

航海後に、これら採取した試料の解析を実施した。さらに過去に、2019年2月の海上保安庁巡視船そうや航海と2020年12月の白鳳丸(JAMSTEC/東京大学大気海洋研究所)KH-20-12次研究航海で取得した同様のデータセットと比較することにより、南部オホーツク海の冬季から春季にかけて変化する主要一次生産者(微細藻類)の群集組成や光合成生理状態と環境データとの関係を明らかにする試みを実施した。上記の白鳳丸KH-20-12次研究航海および新青丸KS-21-6次研究航海では、南部オホーツク海から表層堆積物を採取した。同表層堆積物中で休眠する微細藻類が、海水の鉛直混合により、海洋表層に輸送され、太陽光を浴びた際、発芽し、増殖する能力があるか、またどの種が増殖する可能性があるか等を陸上の実験室で培養実験を行うことにより評価した。

#### (3) 植物プランクトンの動態

近年の南部オホーツク海域に生息する植物プランクトンの動態変化を明らかにするため、MODIS/Aqua等の海色衛星リモートセンシングデータを用いて、同海域のクロロフィル*a*濃度と純一次生産の季節変化と年々変化を評価した。

### 【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

#### (1) 魚類

魚類を中心とした群集に関しては、まずオホーツク海北海道沿岸陸棚域における17年間(2007年~2020年の春季)に亘る着底トロール調査資料(水深約300m)を用いて、海氷勢力をはじめとした環境変動が陸棚魚類群集に及ぼす影響を分析した。底曳き調査結果の経年変動から、主要分類群別の平均密度の経年変化を取り纏め、次に主成分(PC)分析を行い各年の第1および第2主成分を目的変数としてモデル化した。説明変数は平均水温、塩分、北太平洋十年規模変動指数(PDO)および北太平洋循環指数(NPGO)

に加え、海氷面積を用いた。従来指標とされてきたオホーツク海全域の面積（広域海氷）に加え、研究対象海域周辺に限定した面積（沿岸海氷面積）を算出し解析に利用した。次に、沿岸漁業資源と海洋環境の関連を明らかにするために羅臼漁業協同組合の長期的な水揚げ高資料を参照して、サブテーマ3により整備された水温情報を含む環境要因との関連を検討するとともに、個別魚種漁獲量の長期的データの分析を行った。

## （2）海棲哺乳類

これまで分布に関する知見が殆ど得られていなかった海棲哺乳類に関して、調査船上での目視調査を3航海で行うと共に、新規手法である音響サンプリングを利用した継続的モニタリング手法の開発を行い、主要種の出現状況と海氷勢力との関連を明らかにした。

## （3）海洋低次生態系

海洋低次生態系に関しては、まず知床半島東岸における動物プランクトン現存量と糞粒を介した物質輸送の研究から、生態系内で糞粒が物質輸送に果たす役割を定量的明らかにすると共に、画像撮影解析装置であるZooscanによる効率的な分析手法を確立した。更に、知床羅臼深層水の汲み上げ副産物試料を利用し、2007～2009年に採取した2年分の試料と比較することで動物プランクトン群集の経年変化と主要カイアシ類*Metridia okhotensis*の生活史を明らかにした。以上のような水温と関連した変化は、今後の温暖化リスク評価に際して基礎資料としての活用が期待される。

## 5. 研究成果

### 5-1. 成果の概要

#### ① 海氷変動予測

【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

#### （1）知床海域における海氷・海洋モデルの開発【サブテーマ1】

オホーツク海全体を再現する「オホーツク海モデル」（10km格子）を用い、気象庁の大気再解析JRA55を大気境界条件として、「現在気候」（1993年から2018年）の再現実験を行った。図0-3に見るように、オホーツク海全体の海氷の再現性が非常に良かった（成果番号7）。

次に北海道沿岸に着目するために、解像度の高い「北海道モデル」（2km格子）を「オホーツク海モデル」にネスティングした。開発されたモデルの再現性は非常に良く（図1-5）、北海道周辺における衛星観測による海氷変動とモデルとの相関係数は $r = 0.85$ であった（成果番号7）。

#### （2）CMIP6気候モデル群からのモデルの選定と環オホーツク気候システムの変動予測【サブテーマ2】

「CMIP6気候モデル群からのモデルの選定と大規模温暖化パターンの抽出」について、CMIP6の15種のモデルの環オホーツク海領域における現在気候再現性の評価を行った上で、11種のモデルを選定した。それら11モデルを対象に、現在気候再現実験（historical run）の「2000年」の値と、3種の温暖化シナリオにおける「2050年」あるいは「2090年」の値との差を計算した。その一例として、低位温暖化シナリオの地上気温と地表風についての11モデル平均・12～3月の4か月平均における温暖化差分（「2050年」マイナス「2000年」）の地理的分布を図0-4に示す。オホーツク海中・南部において地上西風が将来強まる傾向があり、この傾向は温室効果ガス排出量の増大と共に強まっていくと予測される。また、同一シナリオ・年代におけるモデル間のばらつきを考慮するため、先行研究で用いられているストーリーライ

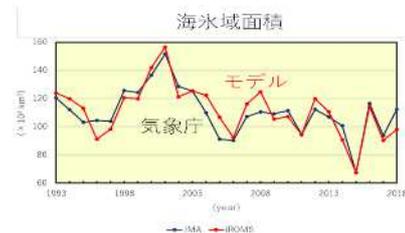


図0-3（図1-3） 「現在気候」の再現実験結果。気象庁の解析による海氷域面積と海氷・海洋モデルの結果との比較。

ン手法を用いた温暖化予測情報に関する計算を行った。最終的に、オホーツク海を包含する領域の大気地表データ（地表気温・地表比湿・地表風・海面更正気圧・降水量・下向き短波放射量・下向き長波放射量）の1～12月の各月平均値について、3種の温暖化シナリオ・「2050年」と「2090年」の2つの年代を対象として、11モデルの平均および4分割した各ストーリーのモデル平均について計算を行い、サブテーマ1が実施する海氷・海洋モデルの大気境界条件とした（成果番号7）。

（3）温暖化実験【サブテーマ1・サブテーマ2】

「2050年」「2090年」における海氷変動を評価するために、低位・中位・高位3種のシナリオについて、温暖化実験を行った。北海道東方海域（46°N以南）の積算海水面積（冬季間の海水面積の累計）の頻度分布を箱ひげ図にしたのが図0-5である。モデルによる「現在気候」の海氷再現実験は、観測値をよく再現している。このモデルの再現性を前提に、将来の海水面積積算値を評価した（「2050年」「2090年」には、「現在気候」の各年での大気条件に対して温暖化差分値を足しており、26冬季分の海氷シミュレーションがあることに注意）。その結果、「2050年」に低位温暖化シナリオでも、海氷は現在気候に比して平均値で約1/3に減少するという結果を得た。ただし、このシナリオではほとんどの年で、海氷は少ないながらも北海道まで届くこともわかる（成果番号7）。

「2090年」の場合は、シナリオ間の差が顕著である。「2090年」の低位温暖化シナリオでは「2050年」の海水面積を維持する一方で、高位温暖化シナリオでは、北海道東方での海氷はほぼ消滅する。全てのシナリオに対する知床沖合30km以内の積算海水面積の「中央値」を、北海道の地表気温の温暖化差分を横軸にとって描くと（図1-12）、現在より約3℃の気温上昇で中央値がゼロになることがわかった。これは、「北海道で冬季気温が現在より約3℃上昇すると、流水が知床に到達する年が半減する」ことを意味する。低位温暖化シナリオでは、「2050年」「2090年」とも気温上昇は約1.8℃であり、3℃より十分低い。以上より（成果番号7）

• 低位温暖化シナリオ（21世紀後半にCO2排出量実質ゼロ）では、海氷は大きく減じつつも、ほぼ毎年、知床に到達する。

• 高位温暖化シナリオ（CO2排出量に制限なし）では、21世紀末に知床から海氷が消失する。

という結論を得た。すなわち、低位温暖化シナリオを達成することが、知床の海氷の維持につながる。

次に、海氷が消失した場合の低次生態系への影響評価のため、海氷からの鉄供給を物質サイクルに組み込んだ低次生態系モデルによる数値実験を行った。知床海域において海氷融解直後の海洋輸送による

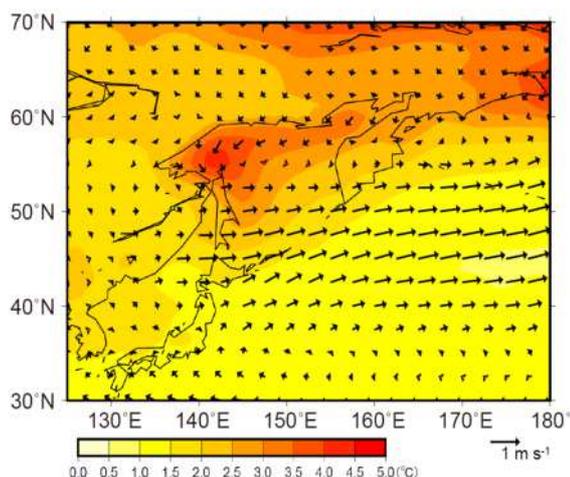


図0-4 12～3月の4か月平均における11モデル平均の地上気温（陰影、単位：℃）および地表風（ベクトル、単位：m s<sup>-1</sup>）の温暖化差分（低位温暖化シナリオの2050年と現在気候再現実験の2000年との差）の分布。

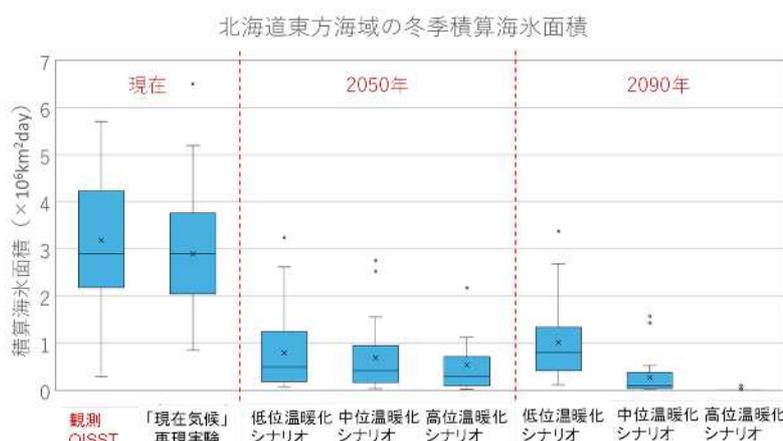


図0-5（図1-8）北海道東方海域における「2050年」「2090年」の積算海水面積予測の箱ひげ図。ひげの先端は最大値と最小値、箱の下端・中の線・上端は、それぞれ25パーセントイル、50パーセントイル（中央値）、75パーセントイルを表す。×は平均値。

鉄濃度（1nM；2021年観測でサブテーマ4が取得）に基づいて、海氷からの鉄供給「有り」「無し」について実験を行ったところ、低次生産量は「海氷無し」では「有り」に比して30%減少し、海氷からの鉄付加が生物生産に重要であることを示唆した（成果番号8, 42, 110）。

#### （4）現在気候における気候変動・海氷変動解析【サブテーマ1・サブテーマ2】

モデル開発の基礎として、「現在気候における気候変動・海氷変動解析」を行い、サブテーマ1が5編、サブテーマ2が5編の査読付き論文を出版した。そのうち、オホーツク海の海氷量の年々変動と大気循環場の関係についての【サブテーマ2】の研究（成果番号11）では、海氷が平年より多い年において、アリューシャン低気圧が平年より強いことや、海氷面積の正偏差がオホーツク海上の北西季節風をさらに強化し、冬季全体でのオホーツク海上における海氷面積の正偏差を維持する、といった正のフィードバックの存在が示唆されるなどの結果を得た。また、オホーツク海の海氷拡大期（12月～2月前半）における一時的な海氷減少が生じる際の状況について調査した研究（成果番号10）では、発達した温帯低気圧の通過に伴って発生する、オホーツク海へ吹き込む地表の南東風偏差がオホーツク海中央部の海氷減少を引き起こすこと、その一方で、北海道沿岸では対流圏下層の北風に伴って海氷密接度が逆に増加する傾向にあることなどを示した。

【サブテーマ1】では、オホーツク海の海氷変動を、海上保安庁砕氷巡視船「そうや」による長期観測（1996年～2020年）、衛星による海氷観測データ（1988年～2020年）を用い、オホーツク海を6つの海域に分けて詳細に解析した。オホーツク海の海氷面積は、海盆全体で見ると十年ごとに-7.13%の割合で減っている。しかしながら、海域ごとに詳しく見れば、北海道の緯度に当たるオホーツク南部海域では海氷面積はほぼ横ばいであった（成果番号4）。以上より、海氷変動は海域ごとに大きく異なっていることが明らかとなった。この研究は、知床海域に着目した海氷変動予測を実施する必要性を示したものである。また、知床での漂着ごみについて調査した。海氷がある現在では冬季に波は発生せず、海岸でのごみの更新はない。ところが知床から海氷が無くなれば冬季に高い波が発生しやすくなり、漂着ごみの堆積・流出が活発化するとともに、海岸線の浸食を引き起こす可能性が指摘された。（成果番号39, 54）

## ② 知床海域の沿岸モニタリング網の構築

### 【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

#### （1）冬季を含む海洋環境モニタリング網の構築（成果番号14）

知床沿岸において海氷に覆われる時期を含めた通年のモニタリングに成功した。知床は東岸と西岸で季節・短期変動ともに明瞭な違いが見られた。また東岸・西岸それぞれの測点間でも、季節変動に少し、短期変動に明瞭な違いが見られた。したがって、季節変動以上の時間スケールをモニターするならば東岸と西岸に1点ずつ、短期的な変動も対象とするならば複数点、測点を維持することが望ましい。

加えて、モニタリングにより二つ予想外の現象が発見された。知床東岸のモニタリングにより、夏季に水温が数十分で6℃程度下がるという、急激な水温低下現象を発見した。近年、夏季に養殖ホタテ稚貝の斃死が時折生じており、急激な水温低下はその一因かと疑われる。モニタリング網は夏季の水産業にも役立てられる可能性がある。

羅臼深層水取水口に設置した、時間的に高解像度の水温塩分計データから、深層水（およそ350m深から取水）に顕著な日変動が検出された。水温・塩分双方の変動から、海水が鉛直方向に50m～100m近く振動する内部潮汐が原因と考えられる。これほどの大振幅の内部潮汐は、鉛直混合を介して物質循環ひいては生態系にも影響している可能性が高い。

#### （2）過去の海洋観測データの収集・校正と解析（成果14）

羅臼では1968年から表層海水が測定され記録されていた。このデータを電子化して解析し、知床沿岸の長期変動を明らかにした。羅臼では、年平均表層水温がおよそ50年に1℃のペースで上昇していることが判明した（図0-6）。

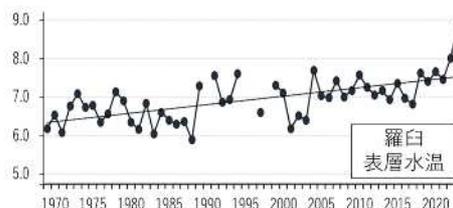


図0-6（図3-10） 羅臼表層水温（℃）の長期変動（1969年-2023年）

さらに、本課題実施中の2022年、2023年には、過去最高水温を連続して更新した。

公開データも合わせて、知床周辺海域の主な水塊の長期変動を解析した結果、知床海域で夏季に卓越する宗谷暖流水と冬季に卓越する東樺太海流水の両方で高温化傾向が見られた。本課題で収集・校正・解析した過去データは、世界遺産である知床海域の変動を理解するうえで貴重なデータとなる。

### (3) データのない季節・海域の現場観測 (成果番号14)

海氷下の東サハリン海流と水塊の係留系観測に成功した(協力：東京大学藤尾伸三准教授・柳本大吾助教)。船舶観測と合わせ、冬季の水塊変質、および顕著な経年変動が海氷面積だけでなくその直下の冬季混合層にもあることが観測された。これらのデータは、サブテーマ1および今後の海氷の変動機構の解明および予測向上に資する。

本課題実施中の船舶観測に加えて採択前年の観測も合わせることで、根室海峡北部の季節変動が初めて明らかになった。実は根室海峡北部は、世界遺産海域の半分を占めるにもかかわらず、研究者レベルでは季節変動すら分かっていなかった。(2)の未公開データと合わせて、本課題により、世界遺産海域の解明に大きく資することができた。

### (4) データの集約と提供

地域社会や学界に資するため、モニタリング結果の速報を羅臼漁協と斜里第一漁協にほぼ毎年提供するとともに、学界に向けたデータ提供用ウェブサイトを作成した。

## ③ 生態系への影響評価

### 【サブテーマ4】海氷域の物質変動と低次生産

#### (1) モニタリング観測網の構築

これまで南部オホーツク海では、春季4月から秋季(10月)にかけて栄養塩の季節変動が観測されていたが、秋季から冬季を経て春季までの季節変動は未解明であった。南部オホーツク海の各水塊の持つ栄養塩濃度の冬季を含めた季節的な変動を把握するために、冬季―春季のモニタリング網を構築し、データの解析を実施した。その際、水塊を分けるために、水温―塩分、 $\delta^{18}O$ 、栄養塩と見掛けの酸素消費量(AOU)の生物地球化学パラメータ等を用いて水塊を分けることを試みた。図0-7赤線で示すクリル海盆から斜面に差し掛かる観測ラインの観測データの硝酸塩濃度とAOUをプロットすると、表層低塩分水(SLSW)および中冷水(ICW)と、その下に存在するオホーツク中層水(移行水+深層水)を明瞭に分けることができた。

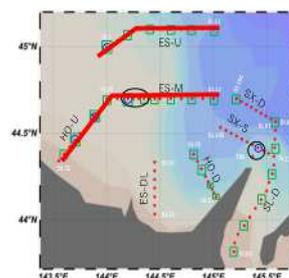


図0-7 (図4-1) .  
2021年4月新青丸  
航海観測点

#### (2) 物質循環・海洋低次生態系の分析

**物質循環:** 上記の水塊分けで得られた南部オホーツク海の表層低塩分水と中冷水の季節別の栄養塩濃度を図0-8に示す。表層低塩分水は2020年も2022年も冬季2月に海氷直下で最大の栄養塩濃度となり、春先の植物プランクトンブルーム時に消費される様子を捉えることができた(図0-8) (成果番号98)。

春季海氷融解時期(2021年4月)の観測海域のクリル海盆とその斜面付近の表層混合層(0-30 m)には塩分32.5の表層低塩分水が分布していた。表層混合層の低塩分化は、アムール川等の河川水の影響を受けた東サハリン海流表層水と海氷融解水の混合によって形成されると考えられる。本研究で測定した水酸素同位体比と塩分を用いたマスバランス式により、観測海域の表層低塩分水への海氷融解水の寄与を推定すると、海氷融解水は海水に含まれる淡水の40%を占めていると見積もられた(図0-9)。表層低塩分水の栄養塩や鉄濃度が、東サハリン海流水と海氷融解水の混合により決定されると仮定し、本研究で推定された表層混合層への海氷融解水の寄与率と、Kanna et al. (2014)で報告された海水中の鉄濃度および栄養塩濃度を用いて、海氷から東サハリン海流水への鉄と栄養塩供給インパクトを推定した。その結果、海氷の融解は東サハリン海流水の持つ全鉄濃度を55%(約17.7 nM)増加させ、また、溶存鉄濃度は8%(約0.05 nM)増加させることが明らかとなった。同じく海氷融解が表層低塩分水の栄養塩濃度に与えるインパクトを見積もると、海氷融解は東サハリン海流水の硝酸塩濃度(約15-20  $\mu\text{mol}/\text{kg}$ )を約0.3  $\mu\text{mol}/\text{kg}$ 程度減少させるに過ぎず、ほとんど影響を与えないことが明らかとなった(成果番号104)。

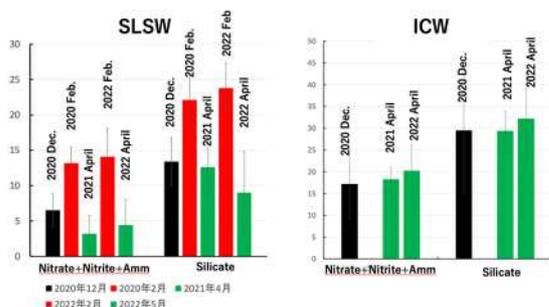


図0-8 (図4-5) . 表層低塩分水 (SLSW) と中冷水 (ICW) の硝酸塩、珪酸塩濃度季節的な違い

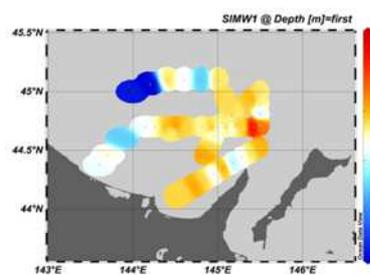


図0-9 (図4-8) . 水酸素同位体絡み積もった海水融解水の分布

<引用文献> Kanna, N., Toyota, T. and Nishioka, J., 2014. Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea. *Progress in Oceanography*, 126, 44-57.

**海洋低次生産** : 海水融解後の2021年4月および2022年の4~5月の海洋観測においては、表層低塩分水中で栄養塩や鉄の利用と大規模な春季植物プランクトンブルームの発生が確認され、走査型電子顕微鏡および光学顕微鏡による観察結果から大型中心目珪藻 *Thalassiosira* 属の優占が明らかとなった。一方、2019年2月の南部オホーツク海の海水下の海水中の植物プランクトンは主に小型中心目珪藻 *Chaetoceros* 属が優占し、その細胞は休眠期状態にあった (成果番号15)。この *Chaetoceros* 属は、冗長性解析により、低温で比較的高い溶存鉄濃度を好む傾向にあったことから、東サハリン海流の影響を受けていたことが示唆された (成果番号15)。また、2020年12月および2021年4月に採取した表層堆積物中の微細藻類の最確数法を用いた室内培養実験から、全ての採泥観測点において、珪藻類の発芽 (休眠期細胞から栄養細胞への変化) が確認され、小型中心目珪藻 *Chaetoceros socialis* complex の優占が判明した。上記の海洋観測および室内培養実験の結果から、冬季の海水下の海水中の植物プランクトン群集および表層堆積物の微細藻類群集が大型中心目珪藻 *Thalassiosira* 属の優占する春季植物プランクトンブルームを形成する種 (たね) になる可能性は低いことが考えられた。一方、2019年2月に南部オホーツク海で採取した海氷には、多量の *Thalassiosira* 属が含まれており、陸上の実験室において、同海氷を0°Cの現場海水で徐々に融解させ、光照射培養を実施した結果、同 *Thalassiosira* 属の大増殖が確認されている (Yan et al., 2020)。これらの結果より、南部オホーツク海の春季植物プランクトンブルームに対するアイスアルジーの播種効果の重要性を初めて提案した (成果番号15)。

<引用文献> Yan et al. (2020) Response to sea ice melt indicates high seeding potential of the ice diatom *Thalassiosira* to spring phytoplankton blooms: a laboratory study on an ice algal community from the Sea of Okhotsk. *Front. Mar. Sci.*, Article 613, 10.3389/fmars.2020.00613

### (3) 植物プランクトン動態

海色衛星リモートセンシングの結果から、近年、南部オホーツク海域の植物プランクトンブルームの時期がこれまでより早く、またその規模も大きくなっていることが初めて明らかになった。この植物プランクトンブルームの変化は冬季から春季の海氷動態等の環境変化との関係が示唆された。

## 【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

### (1) 魚類

環境要因が魚類群集構造に及ぼす影響を明らかにした。17年間に渡る底曳き網調査資料を用いて、太平洋十年規模変動 (PDO) や北太平洋循環振動 (NPGO) 等のテレコネクション指数やオホーツク海全域の海水勢力といった広域的な環境指標と、各採集地点における水温や陸棚周辺等の沿岸域における海水勢力を含むローカルな環境指標の両者の影響を検討した。その結果、オホーツク海陸棚域の魚類群集構造は、沿岸海水勢力と広域的な循環指標であるNPGOによる影響を大きく受けて変化していることが明らかとなった。豊度変動のエッセンスと言える第1主成分は海水勢力とも相関しており、タラ類やニシンといっ

た主要漁業資源の豊度変動に正の影響を示唆した。これは隣接する親潮域における魚類群集がほぼ水深により支配されていたのと対照的であった（成果番号19）。また、根室海峡における重要漁獲対象種の長期的な漁獲データを用いて、沿岸海水勢力とそれに関連した水温変動が資源動向に与える影響を分析したところ、海水勢力が強い年の春季には低水温となり、タラ類の漁獲に時間遅れを伴って負の影響を与えていることが示された。これは産卵期とそれに続く仔稚魚期における低水温が、タラ類の生き残りに不利であることを示している。この結果は上述のオホーツク海大陸棚データから得られた結果と一見矛盾するようであるが、根室海峡内部がタラ類の再生産海域であるのに対してオホーツク海陸棚が索餌域として利用されることの違いによるものであろう。一方、サケにおいてはむしろ若齢期に海水が強勢で低水温に推移した方が後の漁獲量が高まっていた。これは海水と関連した海洋生産力の向上をもたらす影響であると考えられた。

## （2）海棲哺乳類

これまで分布が殆ど不明であった海棲哺乳類に関して、調査船上での目視調査を3航海で行うと共に、受動音響サンプリングによる継続的モニタリング手法を開発した。まず目視調査と環境計測結果に基づき、イシイルカ、マッコウクジラおよびナガスクジラといった主要な鯨類の種分布予測モデルを作成した。また、受動音響サンプリングによる長期的な音響データを取得することができ、好氷性種であるクラカケアザラシの3来遊期に渡る出現パターンを明らかにした。その結果、本種の出現が海水勢力と密接に関連しており、今後海水勢力が衰退した場合、その出現頻度が低下することが予測された。

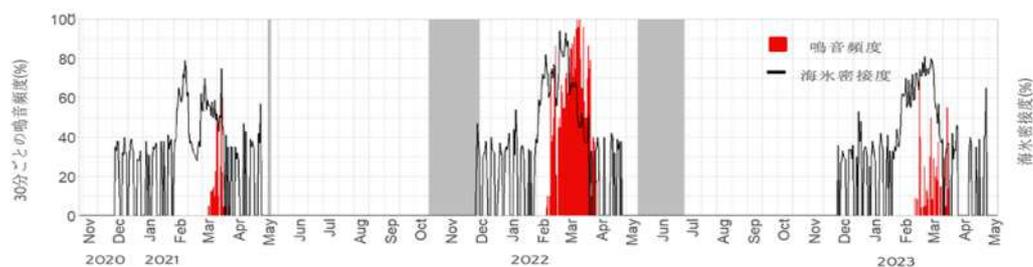


図0-10（図5-10）．本研究の音響収録期間を通じた海水密接度（黒線）とクラカケアザラシの鳴音頻度（赤棒）．灰色網掛け部分は、音響データが得られなかった時期を示す．

## （3）動物プランクトン

動物プランクトン群集構造の変化と糞粒を通じた輸送実態を明らかにすると共に（成果番号16, 17）、地域産業である深層汲み上げ水から採取された根室海峡の動物プランクトン群集と主要種生活史の経年変化を明らかに出来た。本研究による試料と2007～2009年に採取した2年分の試料と比較し、主要カイアシ類 *Metridia okhotensis* のフェノロジーが前倒しとなっていることを明らかにした。この変化は近年の水温上昇を反映しているものと考えられる。

以上の成果をまとめると、今後の温暖化に伴い、①低位温暖化シナリオ（21世紀後半にCO<sub>2</sub>排出量実質ゼロ）では、将来、海氷は現在の1/3程度に減少しつつも、知床に流氷がほぼ毎年到達可能なこと、②高位温暖化シナリオ（CO<sub>2</sub>排出制限無し）では、21世紀末に知床から海氷が消失すること、が示された【サブテーマ1・2】。またデータの少ない冬季を含めた知床周辺海域のモニタリング網を整備・拡充するとともに、漁協等の未公表データを電子化し知床表層海洋の長期温暖化傾向を明らかにした【サブテーマ3】。海氷減少は、海氷からの鉄供給、およびアイスアルジーによる植物プランクトンの播種（種まき）効果を減少させるため、春季の低次生産に負の影響を与えるリスクがある【サブテーマ4】。魚類と海氷との関係については、オホーツク海側大陸棚において海水勢力が強い時タラ類など魚群群集が増加傾向、また根室海峡側では、サケ若齢期の強い海水勢力が数年後の漁獲量に正の影響を及ぼすことが示された。これらは、海氷消失時にリスクとなる。さらに、好氷性種であるクラカケアザラシの出現は海水勢力と密接に関連しており、今後の出現頻度の低下が予測された【サブテーマ5】。以上、低位温暖化シナリオの実現が、知床の海氷と生態系の保全に重要、と結論する。

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況> . . . . . 3. 目標どおりの成果をあげた

**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**

全体目標	全体の達成状況
<p>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、地球温暖化に伴う海氷・海洋環境変動シミュレーションを開発し、当海域における海氷消失可能性とその気候条件を導出する。また、データが極めて少ない冬季を含めた海氷・海洋環境モニタリング網を構築するとともに、過去の長期データ解析を行うことで気候変動に対する知床地域の海洋・海氷応答機構を明らかにする。そして、これらを基盤に、海氷融解を起点とした海洋生態系・生物多様性への温暖化リスクを同定する。そして、知床世界自然遺産管理や地域産業における温暖化適応戦略策定に活用する。</p>	<p>本研究は、全体目標どおりの成果を上げたと考えられる。具体的には以下のとおりである。</p> <p>サブテーマ1・サブテーマ2では、北海道沿岸の海洋や海氷分布を精度良く再現する海氷・海洋モデルを開発し、CMIP6気候モデル群による環オホーツク地域の将来気候予測を利用して、21世紀半ば、21世紀末について海氷分布の将来予測を行った。その結果、①低位温暖化シナリオ（21世紀後半にCO2排出量実質ゼロ）では、将来、海氷は現在の1/3程度に減少しつつも、知床に流氷がほぼ毎年到達可能なこと、②高位温暖化シナリオ（CO2排出制限無し）では、21世紀末に知床から海氷が消失することが示された。</p> <p>サブテーマ3は、冬季データが極めて少ない知床海域において、水温・塩分の観測網の設置を完了した。また、長期データを漁協などの協力のもとで電子化し、50年にわたる水温上昇を見出した。さらに、海氷・海洋観測データをサブテーマ1に提供し、モデル精度向上に貢献した。</p> <p>サブテーマ4は、知床海域の低次生産について、栄養塩の冬季（海氷期）を含む変動、海氷による鉄輸送のインパクト、および海氷融解直後におけるアイスアルジーの播種効果を見出した。サブテーマ5では、ダラ類やサケといった生態系の鍵種の、海氷勢力を含む環境変化への応答を明らかにした。また、海棲哺乳類に関して受動的音響モニタリング手法による観測を、海氷期を含む長期間に亘って実施することができ、好氷性アザラシの分布変化と海氷勢力との関連を示した。</p> <p>以上、温暖化に伴う海氷減少と生態系への影響・温暖化リスクに関する基礎的情報を得た。これらの情報は、遺産管理、海洋資源管理、地域の温暖化適応策に貢献するものと考えられる。特に、<u>低位温暖化シナリオの実現が、知床の海氷と生態系の保全につながる、との予測結果が、本研究の最も重要な成果である。</u></p>

<【サブテーマ1】達成状況> . . . . . 2. 目標を上回る成果をあげた

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1目標	サブテーマ1の達成状況
<p>研究全体を統括するとともに、知床をはじめとするオホーツク海南部海域の海氷・海洋変動シミュレーションを開発し、当海域の地球温暖化に伴う海氷消失可能性とその気候条件を導出する。また、研究全体の成果をとりまとめて知床海域の海氷変動と海洋生態系に対する温暖化リスクを同定し、</p>	<p>知床海域・北海道周辺海域に着目し、「現在気候」において、海氷分布を精度良く再現する海氷・海洋モデルを開発した（図0-3）サブテーマ3と連携）。そして、サブテーマ2と連携して「2050年」と「2090年」の将来気候を作成し（図0-4）、それを大気境界条件として低位・中位・高位3種のCO2排出シナ</p>

<p>世界自然遺産管理計画や海域資源管理計画、地域社会の気候変動への適応戦略策定に活用する。</p>	<p>リオに基づく海氷変動予測を行った。その結果、低位温暖化シナリオならば将来知床海域の海氷面積は1/3程度に減少するものの、流氷はほぼ毎年知床まで到達可能であること、またCO2排出量無制限のシナリオならば知床から海氷が消滅すること（図0-5）など「海氷消失可能性とその気象条件」導出した（成果番号7）。</p> <p>さらに、当初計画にはなかった漂流ごみと海氷の関係について考察するとともに（成果番号39, 54）、サブテーマ4と連携し生態系モデルを用いて海氷からの鉄供給有無のインパクトを調査した（成果8, 42, 53）。</p> <p>温暖化による海氷減少の予測、およびその生態系への影響（あるいはリスク）の知見は遺産管理、海洋資源管理、適応対策に活用できる。以上より、目標を上回る成果をあげたものと判断する。</p>
--	---

< 【サブテーマ2】 達成状況 > . . . . . 2. 目標を上回る成果をあげた

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2 目標	サブテーマ2 の達成状況
<p>ストーリーライン手法を用いて、マルチ気候モデル群による予測の中から海氷変動と紐づけた少数の代表的な大規模温暖化パターンを抽出することにより、地球温暖化に伴う環オホーツク地域の気候変動システムを明らかにする。また、海氷・海洋環境変動シミュレーションのための、大気境界条件を導出する。</p>	<p>CMIP6気候モデル群の整備および、個々の気候モデルに対する現在気候再現性評価を行った。その結果11種の気候モデルを選定し（図2-1）、3つのSSPシナリオにおいて、今世紀半ばと今世紀末の2つの年代についての計6種類について、8つの気象要素の11モデル平均における温暖化差分量の計算を完了した（図2-2, 3）。またそれぞれのシナリオ・年代において、モデル間のばらつきを考慮した4つのストーリーラインについても温暖化差分量の計算を行った（図2-4）。これらのデータをサブテーマ1に提供し、海氷・海洋モデルの境界値として使用することで、オホーツク海の海氷量の将来予測に関する詳細な情報が提供できるようになったことから、この点については、当初計画の目標は達成することができたと認識している。</p> <p>また、オホーツク海の海氷量変動に関する過去の変動の解析について進めた。その結果、環オホーツク気候システムの解明に向けての基礎資料となる、オホーツク海の海氷の年々変動や総観～季節内変動に関する査読付き論文3本（成果番号10, 11, 13）と、北半球冬季気候の年々変動に関する査読付き論文2本（成果番号9, 12）を公表し、その一部は新聞に取り上げられた。これらの成果は当初目標を上回っており、サブテーマ2全体としては、当初の研究目標を上回る成果をあげたと判断する。</p>

< 【サブテーマ3】 達成状況 > . . . . . 2. 目標を上回る成果をあげた

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3 目標	サブテーマ3 の達成状況
-----------	--------------

<p>気候変動がもたらす海洋と海氷への影響を捉えるため、冬季を含む海洋環境モニタリング網を構築しデータ集約化を行う。加えて、未公開データの校正・解析により過去の長期変動を解明し、海氷融解直後の集中観測との組み合わせにより重点監視項目を選定することで、沿岸計測を中心とした効率的な長期モニタリング網を構築する。また、取得したデータをサブテーマ1に提供し、シミュレーションの精度評価と予測精度向上に活用する。</p>	<p>研究計画書の目標は、大きく4つに分けられる。(1) 冬季を含む海洋環境モニタリング網の構築とデータ集約化、(2) 未公開データの校正・解析による過去の長期変動の解明、(3) 海氷融解直後を含むデータの無い海域・時期の船舶・係留系観測、(4) 取得したデータのサブテーマ1および地域社会や学界への提供。</p> <p>(1)と(3)については、研究開発内容に記した通り、目標を達成した(図0-2)(成果番号14)。(2)については、計画書になかった公開データも収集・校正・解析し、より詳細に長期変動を明らかにした(図0-6)。以上により得られたデータに基づき、重点監視項目を選定した。(4)についても前者二つへの提供を終え、学界へは計画書通り終了後に実施できるよう準備を終えた。</p> <p>このように、目標は全て達成し、さらに計画書になかった「公開データの収集・校正・解析」を行ったことから、目標を上回る成果を上げたと判断する。</p>
--	--

<【サブテーマ4】達成状況> . . . . . 2. 目標を上回る成果をあげた

海氷域の物質変動と低次生産

サブテーマ4目標	サブテーマ4の達成状況
<p>知床海域を対象とした、冬季から海氷融解期も含めて季節を通じた時系列モニタリング観測網を構築することにより、栄養物質環境の季節変動と微細藻類(アイスアルジーと海水中の植物プランクトン)動態の関係を解明し、最終的に海氷および海氷融解が物質循環と低次生産に与える影響を定量的に明らかにする。</p>	<p>南部オホーツク海の季節変動をとらえるモニタリング網を共同利用の研究船や海上保安庁の研究船を利用することによって構築することができた(図0-7)。モニタリングの結果、栄養物質である窒素、リン、珪素や微量栄養素である鉄分の観測が実施でき、栄養塩については、冬季の海氷下海水が最高濃度となる季節的変動をしていること(図0-8)、鉄については海氷の融解水から表層水に供給されるインパクトを評価することができた(図0-9, 表4-3)。さらに、海氷内に含まれるアイスアルジーの播種(種まき)効果が、春季ブルームの発達に重要な役割を果たしていることを示した(成果番号15, 図4-12)。以上より、目標を上回る成果をあげたと判断する。</p>

<【サブテーマ5】達成状況> . . . . . 3. 目標どおりの成果をあげた

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5目標	サブテーマ5の達成状況
<p>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明らかにする。過年度試資料から組成・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する。多様な海洋生物からなる生物群集の環境変動に対する鍵種の選定とその応答を解析することにより、知床海域の温暖化に対する群集構成と食物網構造への影響を評価し、温暖化リスクを提示する。また、海氷を出産などの上陸</p>	<p>1. 水産資源を含む魚類群集の構造が海氷を含む環境要因により決定されることと個々の要因の重要性の度合いを明らかにすることができた(成果番号20)。</p> <p>2. スケトウダラやサケといった生態系の鍵種の、海氷勢力を含む環境変化への応答を明らかにすることができた。</p> <p>3. 海棲哺乳類に関して基礎データを収集し分布モデルを構築すると共に(成果番号19)、受動的音</p>

<p>場として利用するアザラシ等海棲哺乳類の来遊・滞在などデータはほとんどないため、水中音響技術等を用いてデータを蓄積し、温暖化リスク評価の基礎資料とする。</p>	<p>響モニタリング手法による観測を、海水期を含む長期間に亘って実施することができ、好水性アザラシの分布変化と海氷勢力との関連を示すことができた（図0-10）。</p> <p>4. 動物プランクトン糞粒による物質輸送量を細目合ネットとZooscanの併用により推定する手法を開発し、有力国際誌の表紙に掲載される論文として結実させた（成果番号16, 18）。また地域の産業資源である深層汲み上げ水の副産物であるプランクトン試料を用いて、その経年変化を明らかにすることができた。直近年の変化は水温の上昇に伴って生じており、温暖化リスク評価の基礎資料となる。</p> <p>以上より、目標通りの成果をあげたと判断する。</p>
--	--

### 5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

#### <得られた研究成果の学術的意義>

従来のオホーツク海海氷変動予測は、オホーツク海全体を対象としたものであった。本研究の【サブテーマ1・2】では、高解像度（2km格子）の海洋・海氷モデルを開発し、知床および北海道オホーツク沿岸に着目した海氷変動予測をはじめて実現した。また、従来は各々の気候モデルに対してダウンスケールしていたが、本研究では、CMIP6気候モデル群のアンサンブル平均を用いることにより、予測バイアスに軽減が期待されること、温暖化差分値を用いることで「現在気候」にバイアスがないこと等、より確度の高い海氷予測が実現できたと考える。この手法は汎用性があり世界各地の海氷変動予測に適用可能なため、先導的かつ発展性の高い研究といえる。

さらに、【サブテーマ2】では、これまで未解明な点が多かったオホーツク海の海氷の年々変動および総観～季節内規模（数日～2週間）の変動について、熱帯からのテレコネクションなどを含んだグローバル気候システムの観点など、独創的な視点による解析を行い、新たな知見を得た。

【サブテーマ3】では、モニタリング網を構築するとともに、未公開のデータ収集・校正およびデータの無い海域・時期（特に冬季を含めた通年）の現場観測を実施した。こうして得られたデータは世界自然遺産・知床の周辺海域を理解するうえで貴重なものである点において独創性があり、かつ今後の解析に資する発展性がある。

生態系に関しては【サブテーマ4】の研究によって初めて、冬季も含めた栄養塩濃度変動や、海氷融解が鉄分供給に与えるインパクト、海氷に含まれるアイスアルジーの播種（種まき）効果が明らかになり、南部オホーツク海の海氷が春季ブルームを引き起こし高い生物生産を生み出す仕組みの理解について先導性がある知見が得られた。【サブテーマ5】では、タラ類やサケといった産業上重要種の変動に海氷が及ぼす影響を指摘した。こうした研究は従来北極海やベーリング海といった極域またはその隣接海域で行われているが、海氷の影響の及ぶ最も低緯度域である知床半島周辺海域での実施は本研究が初めてであり先導的といえる。また、海水下での受動音響モニタリングを長期的に行うことに成功し、音響データの解析に機械学習的アプローチを用いてアザラシ鳴音の特定と抽出を行い得た成果も先導的である。更に、画像取得解析システムであるZooscanをプランクトン試料分析に活用し、海洋生態系内における糞粒が物質輸送に果たす役割を初めて定量的に示し得た成果は革新的である。

#### <行政等に既に貢献した成果>

特に記載する項目はない。

#### <行政等に貢献することが見込まれる成果>

本研究では、低位温暖化シナリオの実現が、知床の海氷と海洋生態系の保全につながる、との成果を得た。それら（海氷変動予測、モニタリング網の構築、生態系への影響評価）は、知床世界自然遺産地域科学委員会において途中経過を含めて資料を提出されており、世界自然遺産の管理計画等への貢献が見込まれる。また、ユネスコ世界遺産委員会からの勧告に対する回答作成に貢献する見通しである。さらに、北海道が主催する知床世界自然遺産地域連絡会議で本研究を公表するとともに（成果番号121、139）、温暖化による海氷減少の予測は報道等でも取り上げられており（成果番号143など）、地域の適応対策策定に向けての基礎資料としての活用が期待される。

## 6. 研究成果の発表状況の概要

## 6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	21
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	3
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	1
口頭発表（学会等・査読なし）：	93
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	24
マスコミ等への公表・報道等：	11
研究成果による受賞：	3
その他の成果発表：	0

## 6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
3	NAKANOWATARI T., T. NAKAMURA, H. MITSUDERA, J. NISHIOKA, H. KURODA, and K. UCHIMOTO (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. <i>Progress In Oceanography</i> , 197, 102615, DOI:10.1016/j.pocean.2021.102615.
4	TOYOTA T., N. KIMURA, J. NISHIOKA, M. ITO, D. NOMURA, and H. MITSUDERA (2022) The interannual variability of sea ice area, thickness, and volume in the southern Sea of Okhotsk and its likely factors. <i>Journal of Geophysical Research</i> , 127(12), <a href="https://doi.org/10.1029/2022JC019069">https://doi.org/10.1029/2022JC019069</a> .
7	7. 三寺 史夫, 佐伯 立, 井上 知栄, 植田 宏昭, 中野渡 拓也, 黒田 寛 (2024) 知床をはじめとする北海道オホーツク海沿岸海域における海水変動予測実験, <i>低温科学</i> , 82, 143-152, doi: 10.14943/lowtemsci. 82. 143.
10	KAMAE Y., H. UEDA, T. INOUE, and H. MITSUDERA (2023) Atmospheric circulations associated with sea-ice reduction events in the Okhotsk Sea. <i>Journal of the Meteorological Society of Japan</i> , 101, 125-137, <a href="https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-007">https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-007</a> .

11	UEDA H., M. KURAMOCHI, and H. MITSUDERA (2023) Interannual variations of sea-ice extent in the Okhotsk Sea - A Pan-Okhotsk climate system perspective. <i>Atmosphere-Ocean</i> , 61, 234-245, <a href="https://doi.org/10.1080/07055900.2023.2175639">https://doi.org/10.1080/07055900.2023.2175639</a>
14	中村知裕, 野別貴博, 嶋田宏, 美坂正, 西岡純, 藤尾伸三, 柳本大吾, 三谷曜子, 山村織生, 三寺史夫 (2024) 知床周辺海域の沿岸モニタリングおよび船舶観測と係留系観測. <i>低温科学</i> , 82, 153-160, doi: 10.14943/lowtemsci. 82. 153.
15	YAN D., J. NISHIOKA, T. TOYOTA, and K. SUZUKI (2022) Winter microalgal communities of the southern Sea of Okhotsk: A comparison of sea ice, coastal, and basinal seawater. <i>Progress in Oceanography</i> , 204, 102806, <a href="https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102806">https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102806</a> .
18	KOJIMA D., Y. HAMAOKA, K. AMEI, Y. FUKAI, K. MATSUNO, Y. MITANI, and A. YAMAGUCHI (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. <i>Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers</i> , 185: 103771, DOI: 10.1016/j.dsr.2022.103771.
19	FURUMAKI S., S. SHIGEMATSU, Y. IWAHARA, and Y. MITANI (2023) Fall distribution and diversity of cetaceans along the southern and eastern coasts of Hokkaido, Japan. <i>Regional Studies in Marine Science</i> , 62, 102913, DOI:10.1016/j.rsma.2023.102913.
20	YAMAMURA O, and K. KOOKA (2023) Community structure of demersal fish over the continental shelf off the southeastern coast of Hokkaido Island: The effect of eurythermy. <i>Journal of Sea Research</i> , 195, 102418. DOI: 10.1016/j.seares.2023.102418

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

## 7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

特に記載すべき事項はない。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）

## 8. 研究者略歴

<研究代表者略歴>

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
三寺史夫	東北大学理学研究科博士課程修了 理学博士 海洋科学センター研究員、国際太平洋研究センターグループリーダーを経て 現在、北海道大学低温科学研究所教授 主に海洋物理学を研究

## ＜研究分担者（サブテーマリーダー）略歴＞

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
1) 植田宏昭	筑波大学地球科学研究科修了 博士（理学） 気象研究所研究官、筑波大学講師、筑波大学准教授を経て、 現在、筑波大学生命環境系教授 日本気象学会理事、気象庁異常気象分析検討会委員 専門は気候システム学	2021年度 ～ 2023年度
2) 中村知裕	京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了 博士（理学） 海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センターポス ドク研究員を経て、 現在、北海道大学低温科学研究所講師 主に海洋物理学を研究	2021年度 ～ 2023年度
3) 西岡純	北海道大学大学院水産学研究科博士前期課程修了 博士（水産科学） 電力中央研究所研究員、北海道大学低温科学研究所助教授、 北海道大学低温科学研究所准教授を経て、 現在、北海道大学低温科学研究所教授 主に化学海洋学を研究	2021年度 ～ 2023年度
4) 山村織生	北海道大学大学院水産科学研究科博士課程修了 水産学博士 水産庁（のち独立行政法人水産総合研究センター）北海道区 水産研究所研究員を経て、 現在、北海道大学水産科学院准教授 主に魚類および鰭脚類の生態を研究	2021年度 ～ 2023年度

## II. 成果の詳細

### II-1 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1 要旨]

北海道オホーツク海沿岸は季節海氷が到達する北半球の最南端であり、地球温暖化に敏感な海域と考えられている。本研究では、北海道東方海域での海氷変動に着目し、2050年に関する海氷変動を評価した。予測実験は、オホーツク海全体をカバーする解像度 $1/10^\circ$ の海氷・海洋モデルに北海道周辺の海域をカバーする解像度 $1/50^\circ$ のモデルをネスティングし、第6期結合モデル相互比較計画（CMIP6）における2050年（21世紀半ば）および2090年（21世紀末）を中心とした20年間の平均値と2000年のその差分値を大気境界条件に利用することにより行った。その結果、低位温暖化シナリオ（21世紀後半にCO2排出量実質ゼロ）においても、北海道沖の海氷面積は2050年に現在の約1/3に減少する、という予測結果を得た。ただし、低位温暖化シナリオでは、将来、ほとんど（少なくとも半分以上）の年で海氷は知床まで到達することも予測された。一方、CO2排出量を制限しないシナリオの場合、21世紀末には知床周辺海域から海氷は消失する。また、海氷が消失した場合のリスクを検討するため、鉄サイクルを結合した低次生態系モデルによる海氷からの鉄供給が海洋低次生産に及ぼす影響、および漂流ごみに対する海氷の影響に関する検討を行った。

#### 1. サブテーマ1 研究開発目的

サブテーマ1では2050年および2090年の海氷変動を予測し、海洋生態系・生物多様性への温暖化リスクを明らかにする。そのために、知床をはじめとするオホーツク海南部海域（知床海域）の海氷・海洋シミュレーションを開発し、当海域において、2050年、2090年における海氷変動予測を行う。また、地球温暖化がもたらす海氷消失の可能性とその気候条件を導出する。さらに、海氷消失時のリスクを検討するために、低次生態系モデルを用いた海氷鉄供給の海洋低次生産への影響評価、また漂着ごみに対する海氷の影響を検討する。

#### 2. サブテーマ1 研究目標

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1 実施機関	北海道大学、水産研究・教育機構 水産資源研究所
サブテーマ1 目標	研究全体を統括するとともに、知床をはじめとするオホーツク海南部海域の海氷・海洋変動シミュレーションを開発し、当海域の地球温暖化に伴う海氷消失可能性とその気候条件を導出する。また、研究全体の成果をとりまとめて知床海域の海氷変動と海洋生態系に対する温暖化リスクを同定し、世界自然遺産管理計画や海域資源管理計画、地域社会の気候変動への適応戦略策定に活用する。

#### 3. サブテーマ1 研究開発内容

##### (1) 海氷・海洋モデル

オホーツク海全域をカバーする $1/10^\circ$ 格子の「オホーツク海モデル」に、 $1/50^\circ$ 格子で北海道沿岸域を計算する「北海道モデル」をネスティングして、北海道沿岸スケールの海氷変動を再現した（図1-1）。

「オホーツク海モデル」は、水産研究・教育機構（Japan Fisheries Research and Education Agency; FRA）がRegional Ocean Modeling System (ROMS)に基づき作成したモデルで（FRA-ROMS, Kuroda et al., 2017）、それに海氷モデルを結合したものである。過去再現実験の際は、大気外力として気象研究所の

大気再解析データJRA55-do (Japanese 55-year atmospheric reanalysis (JRA55) for driving ocean-sea-ice models, Tsujino et al., 2018) の3 時間平均値時系列を使用した。また、北と西の境界は大陸であるが、南と東の側方は海洋であり、そこでの境界条件はFRA-ROMS 再解析による各年の月平均値を用いた。積分期間は大気境界条件に衛星プロダクトが反映された1993 年1 月1 日から2018 年12月31日までの26年間である。この期間には典型的な多氷年(2001, 2003)、少氷年(2015) などが含まれている。

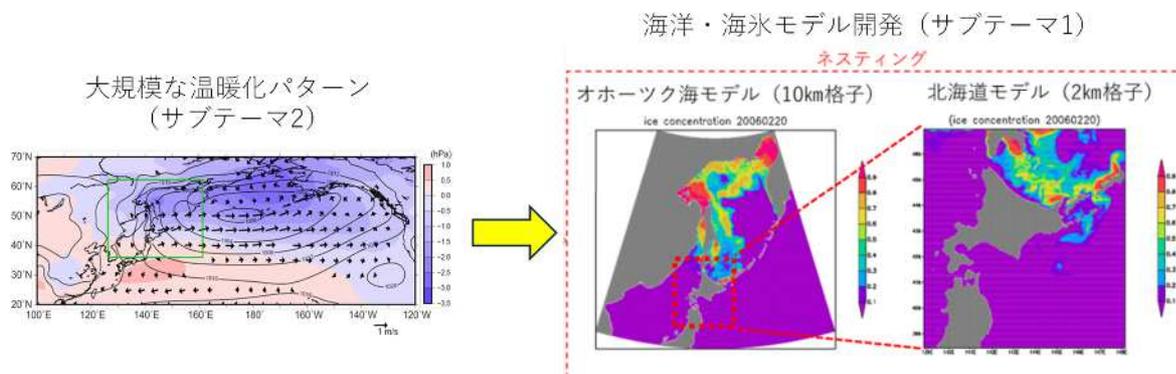


図1-1 (図0-1) 知床海域の海氷変動予測システム。オホーツク海モデル(中央; 10km格子, 陰影は海氷密接度)に北海道モデル(右; 2km格子, 陰影は海氷密接度)をネスティングし, 海氷・海洋モデルを開発した。これをCMIP6気候モデル群から得た「2050年」と「2000年」との差分値(左; 陰影は気圧の差分, ベクトルは風速の差分)を利用した大気境界条件を用いて駆動する。黄色の矢印は, 大気境界条件として強制することを意味する。

また、 $1/50^\circ$  格子の「北海道モデル」の計算領域は、サハリン島南端から北海道周辺海域をカバーしている。側方境界条件は、親モデルである「オホーツク海モデル」の3時間ごとのデータに基づき更新した(すなわち「オホーツク海モデル」から「北海道モデル」への一方向のネスティング)。加えて境界で潮汐を陽に計算した。海氷部分は「オホーツク海モデル」と同様の設定である。過去再現実験では、大気境界条件はJRA55-doを用いた。

ここでは、まず過去再現実験を行い海氷・海洋モデルのパフォーマンスを調べたのち、次節に述べる手順で温暖化実験を行い、海氷の変動予測を実施した。

<引用文献>

Kuroda, H. et al.(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 J. Mar. Sci.*, 7, 62–90.

Tsujino H. et al. (2018) JRA-55 based surface dataset for driving ocean-sea-ice models (JRA55-do). *Ocean Model.*, 130, 79–139. 10.1016/j.ocemod.2018.07.002

## (2) 温暖化実験

第6期結合モデル相互比較計画 (CMIP6) の気候モデル群の中から、環オホーツク海地域における地表風の現在気候再現性評価した結果、11モデルを選定した(サブテーマ2)。そして、その大気データを利用し、(1)節で開発した海氷・海洋モデルを用いて知床海域の海氷変動予測実験を行った。具体的な手順は以下のとおりである。

- ① CMIP6の中から選定した11のモデルを用い、現在と将来のアンサンブル平均(気候モデル群の平均)をそれぞれ作成し、それらから温暖化差分値を求めた。具体的には、上記の3つの温暖化シナリオについて、2040年-2059年の各月アンサンブル平均値(以下、2050年気候値と記述)と1990年-2009年の各月アンサンブル平均値(以下2000年気候値と記述)との差分値である。2090年と2000年の差分値も同様に作成した。大気変数の差分値として地表気温・地表比湿・地表風・海面気圧・降水量・下向き長波放射量・下向き短波放射量、海洋変数の差分値として海面水温・海洋内部のポテン

シャル水温について計算した。

- ② JRA55-do (1993年-2018年)に、①で作成した大気変数の差分値を加え、将来気候の大気境界条件とした。以下、これを「2050年」「2090年」の大気時系列と記述する(このように作成した「2050年」「2090年」の大気境界条件は26年分あることに注意;図1-2)。一方、JRA55-do (1993年-2018年)のみの大気条件を、ここでは「現在気候」と書く。

この大気境界条件を用い、(1)で開発した海氷・海洋モデルを駆動することにより、「2050年」「2090年」における知床海域の海氷変動予測を行った。ここで「2050年」予測とは、「2050年と2000年の大気変数差分値+JRA55-doの3時間ごとの時系列」の26年分の大気データ(例を図1-2に示す)により駆動された「オホーツク海モデル」(親モデル)と「北海道モデル」による予測シミュレーションを意味する。「2090年」予測についても同様である。ただし、気温差分に関しては、オホーツク海より西側の大陸上(128°E-137°E, 37°N-62°N)の値を用いた。オホーツク海上の気温差は、CMIP6気候モデル群における海氷融解の海上気温への影響を強く受けるため、過大評価の恐れがあるからである。

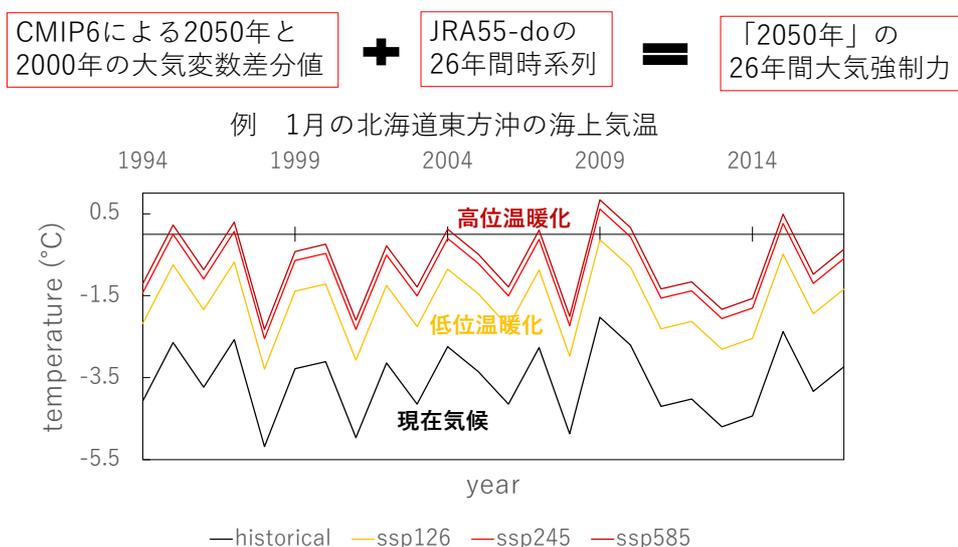


図1-2 温暖化予測実験のための大気強制力作成方法と例

- ③ 気候モデル間のばらつきが海氷変動予測に及ぼす影響を評価する。海氷変動に影響が大きい北海道周辺(42.5-47.5°N, 140.0-145.0°E)の西風偏差とユーラシア大陸・シベリア東部(42.5-58.75°N, 127.5-137.5°E)の気温をインデックスとして気候モデル群を4分類し、分類したそれぞれのカテゴリーで①、②を実行することにより、気候モデル間のばらつきによる海氷変動予測への影響を定量化する。

そして、以上の結果を総合して、「海氷消失可能性とその気象条件」を求める。

海氷・海洋モデルを用いたオホーツク海の海氷変動予測に関しては、文部科学省による「統合的気候モデル高度化研究プログラム」(2017-2021年度)において、気象研究所がオホーツク海全体について21世紀末の海氷変動予測を行ったものがある(Yamanaka et al., 2021)。モデルは10km格子である。これに対して本研究では海氷・海洋モデルをさらに高解像度化(2km格子)することで、知床をはじめとする北海道沿岸に焦点を当てたシミュレーションが可能となった。また、21世紀末に加え中期的予測である2050年にも重点をおいて解析を行った。

また、上記の①~③の手法は、「個々の気候モデルで得られた将来気候」を用いて海氷モデルを駆動するという、通常のダウンスケーリング(例えばYamanaka et al., 2021)とは異なるものである。個々の気候モデルでは、現在気候を正しく再現している(バイアスがない)との保証はない。したがって、

気候モデルの現在気候を用いてダウンスケーリングを行った場合、得られる現在の海水分布にバイアスがある可能性がある。一方、温暖化差分値に基づく温暖化予測では、「現在気候」としてJRA55-doを用いるので、そこにバイアスはない。したがって、差分値に基づく「2050年」における将来変化も、モデル群のアンサンブルから得られる大規模な温暖化パターンを、純粹に反映したものとなっている。「バイアスのない現在の大気条件」というのは優れた点であり、また図1-3（図0-3）に示すように、海水変動シミュレーションは現在の海水変動を非常に良く再現していることから、この手法は海水変動の将来予測についても有望な結果を与えるものと考えられる。

<引用文献>

Yamanaka et al. (2021) Projected climate change in the western North Pacific at the end of the 21st century from ensemble simulations with a high-resolution regional ocean model, *J. Oceanogr.*, 77, 539–560.

### (3) 現在における海水変動の解析

海水・海洋モデル開発の基盤として、オホーツク海の海水変動を解析した。衛星による海水観測データ（1988年～2020年）に加え、海上保安庁砕氷巡視船「そうや」による長期観測（1996年～2020年）を用いた。後者については、これほどの長期にわたる海水域の現場観測は世界でも類を見ない。オホーツク海全体では北半球で2番目に大きな海水減少を示すことが知られているが、本研究では、北海道の緯度に当たる南部海域をはじめ、オホーツク海を6つの海域に分けて詳細に解析した。

### (4) 海洋低次生態系モデルによる海水消失時のリスクの検討

世界自然遺産・知床の顕著な普遍的価値（OUV）は、海水がもたらす豊かな生物生産を起点とする海洋生態系と陸上生態系の連続性にある。したがって、海水による栄養物質輸送の有無が生物生産にもたらすインパクトの検討は、海水消失時のリスクを評価するうえで重要である。サブテーマ4の研究により、①海水融解時に海水からの鉄供給は海洋表層の鉄濃度に大きなインパクトがある、②硝酸など主要栄養塩には海水からの供給はほとんどない、ことが示された。したがって、ここでは、海水からの鉄供給が海洋低次生産（植物プランクトン・動物プランクトン）に及ぼす影響を、硝酸（N）-植物プランクトン（P）-動物プランクトン（Z）-排泄（D）の低次生態系モデルに鉄サイクルを結合したモデルを用いて検討した。2021年4月に行われた海水融解直後の観測結果（サブテーマ4）に対して、海水が運ぶ鉄がある場合とない場合について計算し、温暖化リスクを考察した。

### (5) 知床半島への漂着ごみと海水の役割の検討

北海道、知床半島沿岸には人為起源の漂着物が多数確認されており、これまで回収作業やボランティアによる海岸清掃が行われてきたが有効な対策はいまだ見出されていない。この海岸は野生動物の生活圏の一部であり、沿岸域は漁業や観光に利用されている。河川や海を通じて海岸に運ばれたごみは海岸上で滞留、あるいは海洋中に再び排出されると考えられる。気候変動により海洋および気候条件が変化した際に、これらの漂着ごみがどのように変化するかを知ることは、生態系への影響や海岸の景観、海洋汚染の観点から重要である。本研究では海岸漂着ごみの経時変化をモニタリングすることで、海岸漂着ごみの堆積・流出メカニズムおよび海水の役割の解明を目指した。

## 4. サブテーマ1 結果及び考察

### (1) 海水・海洋モデルの開発と「現在気候」の再現実験

まず親モデルである「オホーツク海モデル」を用い、大気再解析JRA55-doを大気境界条件として、1993年から2018年の「現在気候」再現実験を行った。図1-3はオホーツク海の各年の最大海水面積を示しており、オホーツク海全体の海水の再現性が非常に良いことがわかる。モデルの最大海水面積と気象庁の解析値との相関( $r$ )は、 $r = 0.90$ であった。例えば2015年は記録的な少氷年であったが、気象庁の解析と同様、モデルでも知床海域に海水が到達する状況が再現された。



図1-3 (図0-3) 「オホーツク海モデル」による「現在気候」再現実験の結果. 各年の最大海水域面積の、気象庁による解析（青の実線）と海水・海洋モデル（赤の実線）を比較した。

次に、オホーツク海モデル（10km格子）に北海道モデル（2km格子）をネスティングし、北海道沿岸に焦点をあてたモデルを開発した。両者を比較すると高解像度の北海道モデルをネスティングすることによる明らかな改善がみられる。例えば、オホーツク海モデル（10km格子）の北海道近傍を拡大し（図1-4左）、衛星観測（図1-4右）と比較すると、低解像度のオホーツク海モデルではアニワ湾での海水生成がみられず北海道沿岸の海水分布の再現性が低いことがわかる。一方、高解像度の北海道モデルではアニワ湾の海水生成が再現され（図1-4中央）、北海道沿岸域の海水分布は著しく改善している。これは、高解像度化による、海底地形（水深）の表現向上によるものである。

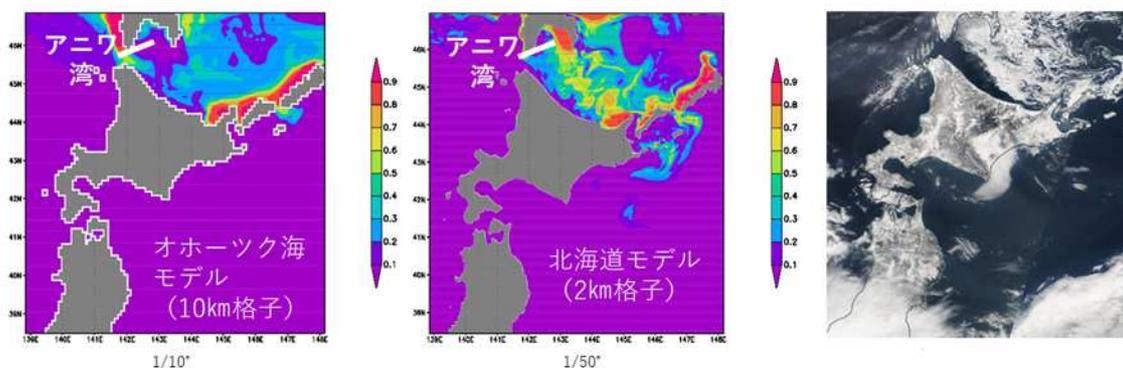


図1-4 (左) 「オホーツク海モデル」による北海道近傍の海水分布の拡大図（2006年2月20日）。陰影は海水密度。 (中央) 同日の「北海道モデル」における海水分布。陰影は海水密度。 (右) 2006年2月20日のModerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)による衛星画像。

また、北海道東方沖の海水面積（46° N以南）の北海道モデルにおける年々変動は衛星観測（Special Sensor Microwave/Imager ; SSM/I）と比較してよく再現されており（図1-5）、モデルと観測値の相関は、 $r=0.85$ であった。

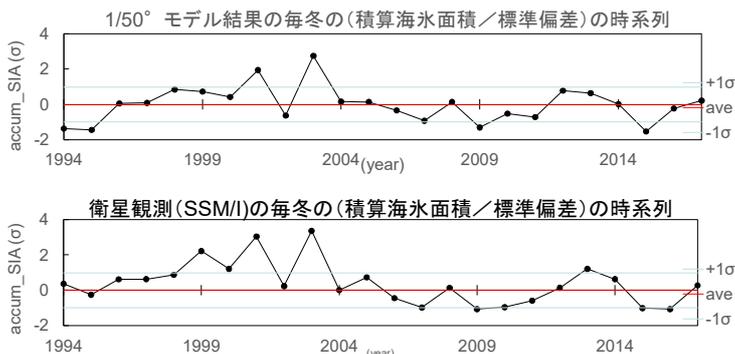


図1-5 北海道モデルによる積算海水面積の時系列（上）と衛星観測（下）との比較

(2) 温暖化実験

① CMIP6気候モデル群における環オホーツク地域の将来変化

CMIP6気候モデル群のうちデータが利用可能な19モデルについて環オホーツク海域における冬季気候の再現性を評価し、最終的に11モデルを採用した。具体的な手法については、サブテーマ2を参照されたい。この11モデルのアンサンブル平均を用いて、海氷・海洋モデル実験の大気境界条件として与えるための温暖化差分量を低位温暖化シナリオ (SSP1-2.6) ・中位温暖化シナリオ (SSP2-4.5) ・高位温暖化シナリオ (SSP5-8.5) についての計算結果をサブテーマ2から提供してもらい (図1-6, 2-2, 2-3) 、海洋・海氷モデルによる温暖化実験の大気境界条件として利用した。また、気候モデル間のばらつきを見るため、北海道近傍の西風偏差、オホーツク海西方 (風上) における地表気温偏差をインデックスとして気候モデル群を分類し、それぞれの温暖化差分値をサブテーマ2より提供をうけ (図2-4) 、海洋・海氷モデルの感度検定に利用した。

CMIP6気候モデル群における地表風の将来変化は、オホーツク海南部における地表西風成分の強化とアリューシャン低気圧の北上という特徴を示した。環オホーツク地域で言えば、オホーツク海北部で北風偏差、北海道付近で西風偏差となっていた。たとえば、低位温暖化シナリオ (SSP1-2.6) において、「2050年」での北海道付近の西風偏差は0.6ms<sup>-1</sup>程度と評価された (図1-6右)。また地表気温に関して言えば、現在気候との差は低位温暖化シナリオでさえ北海道の緯度で1.8℃を越えており (図1-6左)、環オホーツク地域に対する地球温暖化の影響は大きいことがわかる。

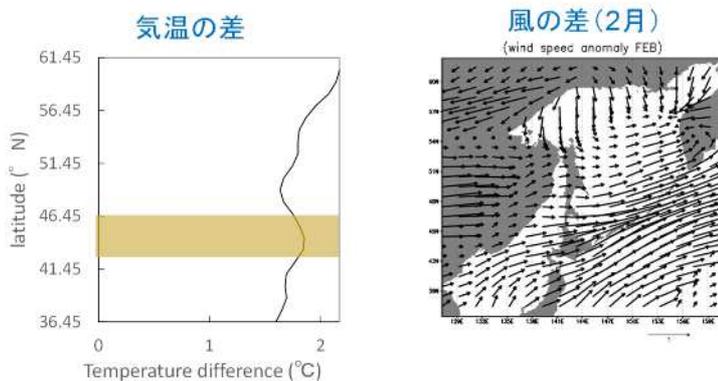


図1-6 CMIP6気候モデル群から求めた2050年と2000年との間の気温偏差 (左) と地表風偏差 (右)。低位温暖化シナリオにより求めた。気温偏差はオホーツク海・北海道の風上 (128° E-137° E, 37° N-62° N) における地表気温偏差の東西平均。黄色の帯は北海道の緯度を表す。

② 温暖化による海氷の応答

「2050年」「2090年」における海氷変動を評価するために、低位 (SSP1-2.6) ・中位 (SSP2-4.5) ・高位 (SSP5-8.5) それぞれのシナリオについて、温暖化実験を行った。ここでは主に、1/50° の北海道モデルを用いて行った解析結果について記述する。

図1-7に、例として2006年の大気データをもとにした、低位温暖化シナリオによる温暖化実験の結果

を示す。気温差分値に関しては、前述の通りオホーツク海より西側（128°E-137°E，37°N-62°N）の値を用いた。オホーツク海風上での気温上昇は、北海道の緯度で上述のように1.8°Cを超えており、その結果、低位温暖化シナリオでさえも海氷減少は顕著であることがわかった（図1-7）。2006年の再現シミュレーションでは海氷は知床半島に到達し、そこで滞留して、高い密接度を示している。一方、2006年の大気条件に基づく「2050年」の場合、海氷は、2月20日の時点で北海道に到達していない。温暖化に伴う海氷融解の増加および海氷生産量の減少が、この海氷減少をもたらすものと思われる。また、西風強化による海氷の沖への輸送も、海氷減少の一因と考えられる。

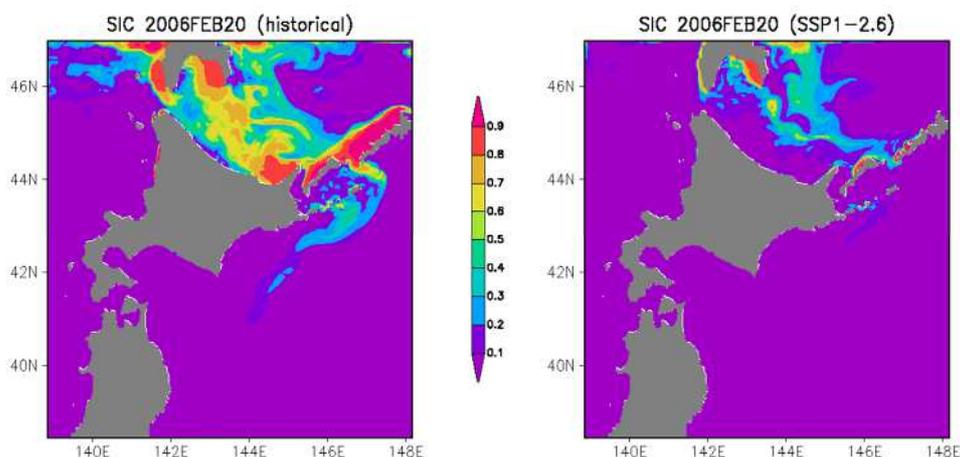


図1-7 （左）JRA55-doを用いて駆動した「現在気候」再現実験の、2006年2月20日の海氷密接度分布（陰影）。（右）CMIP6による将来気候（低位温暖化シナリオの「2050年」）に対応する温暖化実験から求めた海氷密接度分布（陰影）（2006年の大気データに温暖化差分値を足した実験）。

海氷面積の頻度分布を箱ひげ図にしたのが図1-8である。箱ひげ図のひげの先端は最小値と最大値を表す。また、箱の部分は海氷面積の25パーセンタイルから75パーセンタイルを示している（パーセンタイルとは、小さい数字から大きい数字に並べ替え、パーセント表示すること）。箱の中の線は中央値（メジアン）、すなわち50パーセンタイルを示している。×は平均値である。図1-8には、モデルの結果に加え、米国NOAAのOptimal Interpolation Sea Surface Temperature (OISST)による海氷分布の箱ひげ図を「観測値」として載せた。

モデルによる「現在気候」の海氷再現実験は、観測値をよく再現している。現在気候での中央値はモデルの方がやや大きいですが、平均値は観測とモデルともに約 $3.2 \times 10^6 \text{ km}^2 \text{ day}$ であった。このモデルの再現性を前提に、「2050年」の海氷面積積算値を評価する。低位温暖化シナリオの平均値は $1.2 \times 10^6 \text{ km}^2 \text{ day}$ 、中央値は $0.90 \times 10^6 \text{ km}^2 \text{ day}$ であった。低位温暖化シナリオの場合でも、海氷積算面積は現在気候に比して平均値で約1/3に減少するという結果を得た。さらに、中央値が平均値よりも小さいということは、温暖化すると平均値に対して海氷面積が小さな年の頻度が増えることを意味する。すなわち、海氷面積が平均値を下回るような年はより多くなることもわかった。中位・高位温暖化シナリオでは平均値はそれぞれ $0.78 \times 10^6 \text{ km}^2 \text{ day}$ 、 $0.61 \times 10^6 \text{ km}^2 \text{ day}$ 、中央値が $0.46 \times 10^6 \text{ km}^2 \text{ day}$ 、 $0.33 \times 10^6 \text{ km}^2 \text{ day}$ である。平均値で見ると、海氷面積は現在気候と比してそれぞれ1/4、1/5程度になることがわかる。

北海道東方海域の冬季積算海氷面積

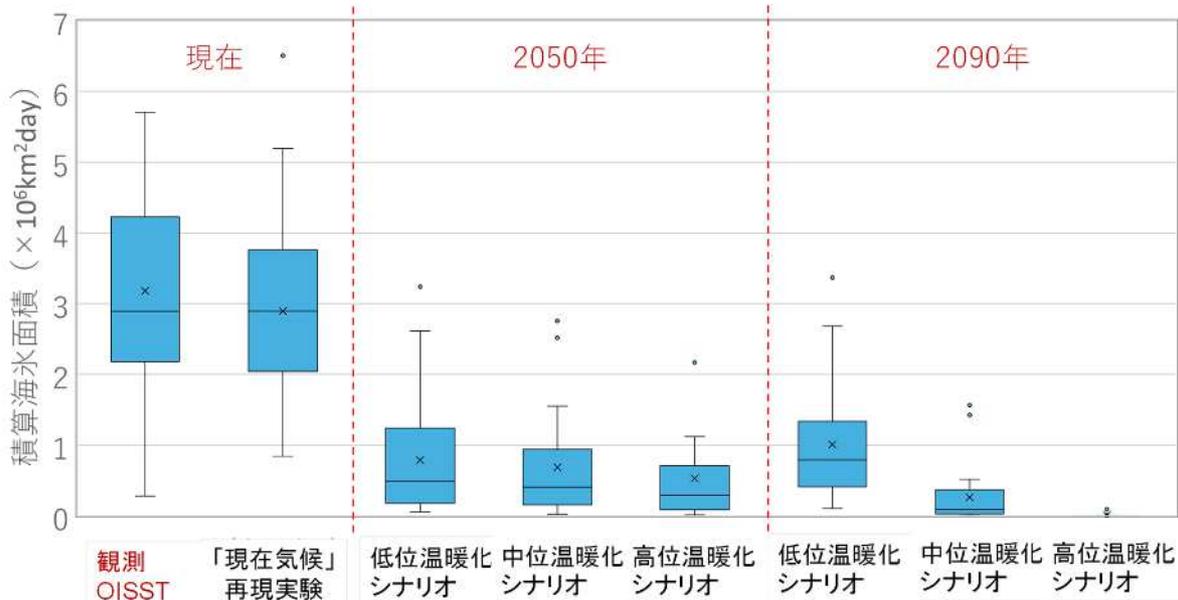


図1-8 (図0-5) 1/50° 北海道モデルによる積算海氷面積の「2050年」「2090年」予測の箱ひげ図。髭の先端が最大値と最小値を表す。また、箱の部分は海氷面積の25パーセンタイルから75パーセンタイルを示している（パーセンタイルとは、小さい数字から大きい数字に並べ変え、パーセント表示すること）。箱の中の線は中央値（メジアン）、×は平均値である。米国

ただし、図1-8において25パーセンタイルでみると、「2050年」では低温暖化シナリオで0.18×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> dayであり、多くの年で流氷が北海道まで到達することを意味する。すなわち海氷はその面積を大きく減少させながらも、北海道東方海域にほとんど毎年来ることも示唆された。

「2090年」になると3種のシナリオ間の差異が大きくなる。低温暖化シナリオでは、「2050年」とほぼ同じ積算海氷面積を維持することがわかる。一方、高温暖化シナリオでは、海氷は北海道東方海域からほぼ消滅する。

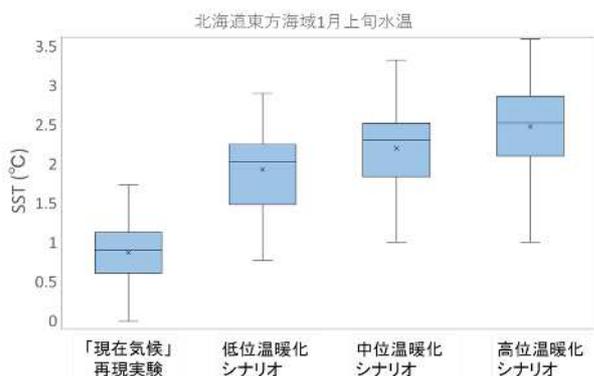


図1-9 「2050年」1月前半（流氷到来前）の北海道沖海面水温の箱ひげ図

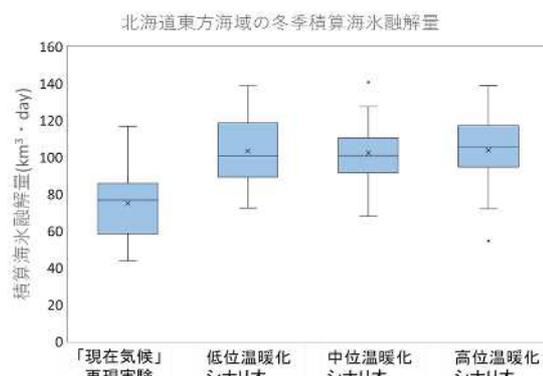


図1-10 「2050年」1-2月の北海道沖での海氷融解量

この顕著な海氷減少について考察するために、北海道沿岸域での1月上旬の海面水温（SST; 図1-9）を調べた。これは1/10° のオホーツク海モデルの結果であるが、大気強制力である温暖化差分値の分布は大スケールのものであり、海氷到来前のSSTの解析には問題がないと考える。海氷到来のプレコンディションとなる1月上旬の北海道沿岸SST（図1-9）では、「現在気候」から低温暖化への差異（平均値で約1.0℃）が、「2050年」におけるシナリオ間での差異（低温暖化シナリオと高温暖化シナリオで

約0.5℃)よりも大きい。東樺太海流に乗って北方より到来する海氷が、融解されつつ最終的に北海道沖に到達することを考えると、現在から2050年までのSST上昇による海氷融解の増加(図1-10)が、図1-8に見られるような、温暖化時における急激な海氷減少を引き起こすものと示唆される。図1-10において温暖化シナリオ間で海氷融解量に差異がないのは、温暖化の大きいシナリオでは海氷生成も減少し、北海道沿岸に到達できる海氷量そのものが減少しているためであろう。

また、温暖化実験における海氷面積の気温偏差、西風偏差に対する敏感度を調べるために、低位温暖化シナリオのアンサンブル平均における気温偏差のみ、あるいは風速偏差のみ、をJRA55-doに加えた実験を行った(図1-11)。その結果、海氷面積は、気温偏差に対してより敏感であることが分かった。西風偏差にも海氷面積減少の感度はあるが、それほど顕著ではなかった。

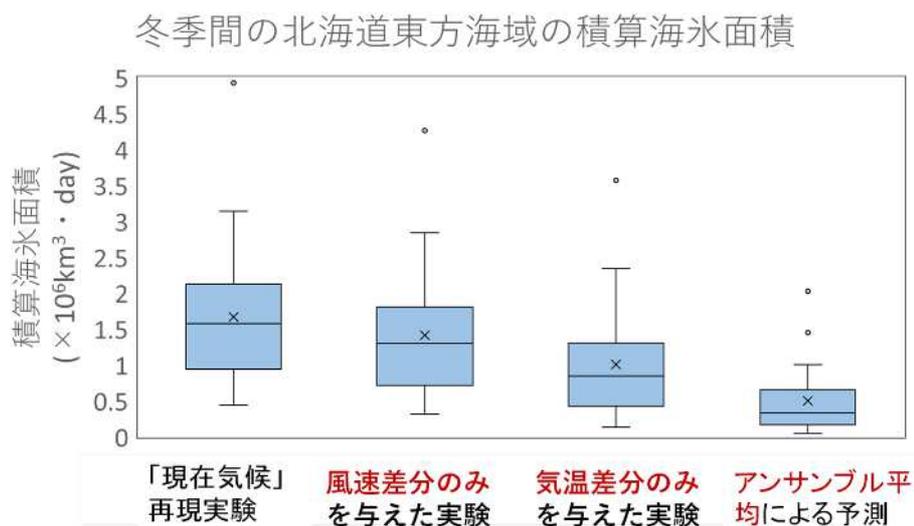


図1-11 JRA55-doに2050年との気温差分、風速差分のみ加えた大気強制力による実験。低位温暖化シナリオに対応

### 海氷消失可能性とその気象条件

これらを総合し、海氷消失可能性とその気象条件について考察する。海氷面積は気温偏差に対してより感度が高かったため、北海道での気温偏差を横軸にとり、知床沖合30kmの海氷面積をプロットした(図1-12)。ここで、縦軸は積算海氷面積の「中央値」を示している。

図1-12より、低位温暖化シナリオ(SSP1-2.6)において積算海氷面積は「2090年」のほうがやや大きいこと、すなわち、知床に到達する海氷は、21世紀末においても維持されることが分かる。一方で、中位・高位温暖化シナリオでは「2090年」のほうが気温上昇は「2050年」に比して高く、海氷面積減少がより顕著である。高位温暖化シナリオの「2090年」では、海氷がほとんど消滅する。

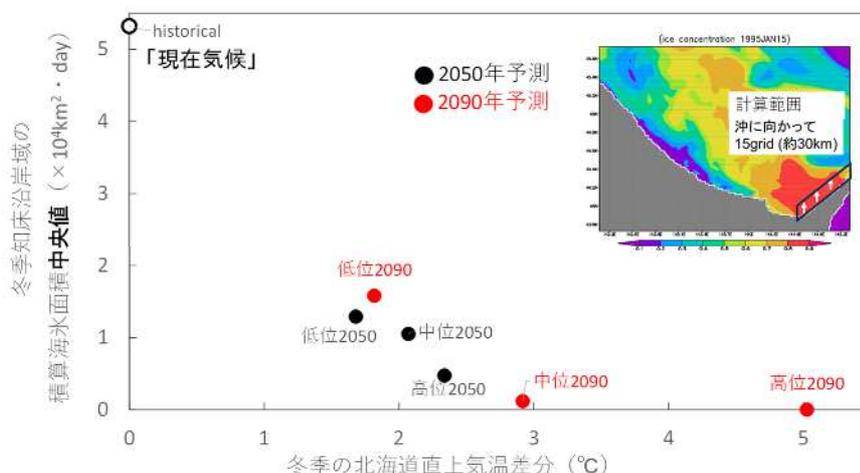


図1-12 知床半島沖合30kmの積算海氷面積の中央値。知床半島への流水の到来を表す指標である。右上の箱のカラー陰影は、海水密接度の例である(1995年1月15日)

また、北海道緯度帯での気温偏差が $3^{\circ}\text{C}$ を超えると、海氷面積の中央値が $0$ となることから分かる。このことは、「気温が $3^{\circ}\text{C}$ 程度上昇すれば、知床に流氷が到達する年は半減する」ということを表す。2090年の中位温暖化シナリオがちょうどそれにあたる。

以上より、「海氷消失可能性とその気象条件」として、次のような結論を得た。

- 低位温暖化シナリオの場合には海氷面積は大きく減少するものの、21世紀半ば、21世紀末のほとんどの年で海氷は知床に到達する。このシナリオにおける北海道の冬季の気温上昇は、21世紀半ば、21世紀末ともに「2000年」と比して、 $1.8^{\circ}\text{C}$ 程度である。
- 北海道で「2000年」に比して $3^{\circ}\text{C}$ 程度冬季気温が上昇すれば、海氷が知床に到達する年は半減する。
- 高位温暖化シナリオでは、知床の海氷は21世紀末にはほとんど消失する。この場合、北海道での冬季気温上昇は約 $5^{\circ}\text{C}$ である。

このことから、低位温暖化シナリオ（CO<sub>2</sub>排出量を21世紀後半に実質ゼロ）を地球規模で達成することが、知床の海氷、ひいては世界自然遺産・知床の顕著な普遍的価値(Outstanding Universal Value; OUV)である「海氷がもたらす豊かな海を起点とした海洋生態系と陸上生態系の連続性」を守ることにつながる、ということが予測された。これは、21世紀後半にCO<sub>2</sub>排出量実質ゼロの実現を必要とするシナリオである。CO<sub>2</sub>排出量を制限しない場合（高位温暖化シナリオ）、知床では海氷の消失というリスクを負う。

### ③ 気候モデル間ばらつきに対する海氷変動予測の感度

最後に、CMIP 6の気候モデル群のばらつきによる温暖化実験の海氷面積の感度について考察する。図1-13（左）に気候モデル群を、温暖化に伴う北海道近傍（ $45.5\text{-}47.5\text{N}$ ,  $140\text{-}145\text{E}$ ）の西風偏差と、オホーツク海の風上（ $42.50\text{-}58.75\text{N}$ ,  $127.50\text{-}137.50\text{E}$ ）の気温偏差をインデックスとして分類した図を示す（詳しくはサブテーマ2を参照）。それぞれの象限で平均した大気条件を基に海氷面積を数値実験すると、第1象限（気温偏差高・西風偏差強）では海氷減少が大きく、積算海氷面積は第3象限（気温偏差低・西風偏差弱）の事例に比して半分以下となった。なお、第2象限（気温偏差高、西風偏差弱）、第4象限（気温偏差低、西風偏差強）については、気候モデル群アンサンブル平均による温暖化実験結果と同程度の海氷面積となった。これらは、海氷変動予測は、気候モデルのばらつきに対してかなり敏感であることを示唆する。これは、中位・高位温暖化シナリオにおいても同様であった。

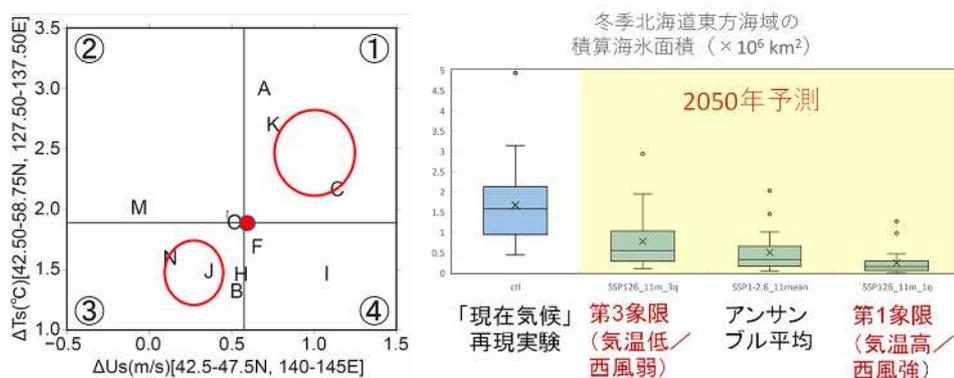


図1-13 気候モデル群のばらつきに（左）よる海氷変動予測実験のばらつき（右）。低位温暖化シナリオの「2050年」を用いた評価。

この予測のばらつきを検討するために、気温差分値を横軸にとり、各シナリオの気候モデル群からの大気境界条件を用いた $1/10^{\circ}$ 、 $1/50^{\circ}$ を含めたすべての実験での海氷予測（積算海氷面積の中央値）をプロットしたのが図1-14である。 $1/50^{\circ}$ モデルと $1/10^{\circ}$ モデルを比較するために、縦軸は「現在気候」の積算海氷面積を用いて正規化した。「2050年」については各シナリオのすべての象限について実験を

実施しその結果を描いた。これは、気候モデルによる温暖化予測のばらつきに対する海氷変動予測への影響を示すものである。

これを見ると、気候モデル群がもたらす温暖化予測のばらつきに対して海氷変動予測には感度があるものの（例えば低位温暖化シナリオ；はだ色、一重の枠線）、「北海道で約3℃気温が上昇すれば、海氷が知床に到達する年（頻度）は半減する」との見積もりは変わらないことがわかる。また、低位温暖化シナリオであれば北海道の気温が3℃より高くなることはなさそうであり、少なくとも半分以上の年で海氷は知床に到達することが示唆された。以上のように気候モデル群のばらつきにより海氷変動予測に影響があるものの、将来の気温上昇をインデックスとした海氷予測や海氷消失可能性の見積もりについては、大きな影響がないことが示された。

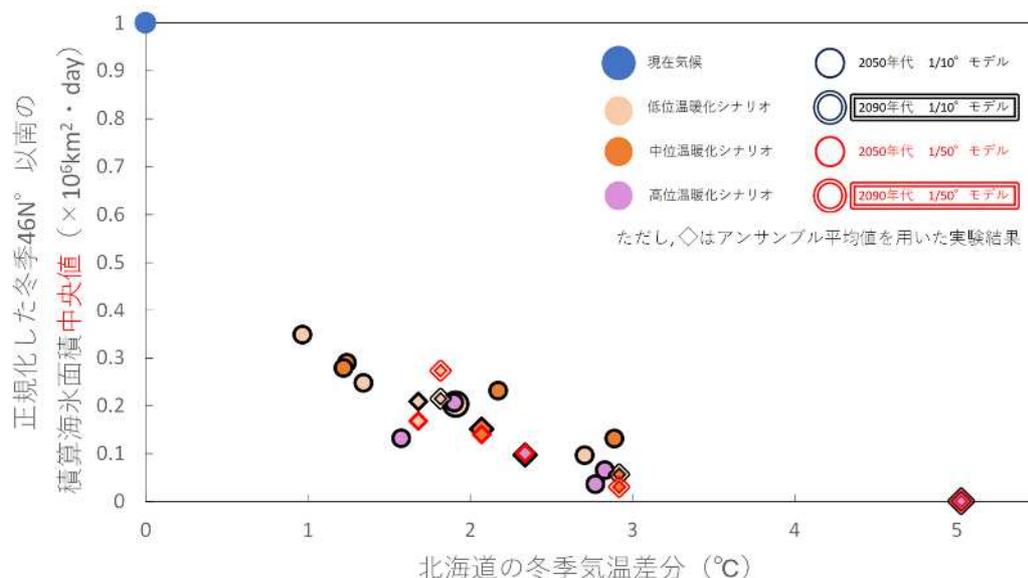


図1-14 気候モデル群のばらつきによる温暖化実験における積算海氷面積「中央値」のばらつき。1/50°モデル、1/10°モデルの結果を共通化するために、縦軸をそれぞれの現在気候の積算海氷面積で正規化した。実験ケースの凡例は右上の通りである。シナリオの区別を色、年代とモデル解像度の区別を枠線で示した。また、◇はアンサンブル平均を用いた実験を表す。

### (3) 「現在気候」における海氷分布の解析

ここではオホーツク海を6つの海域に分けて海氷変動を解析した。オホーツク海の家氷面積は、衛星観測 (SSM/I: Special Sensor Microwave/Imager) が開始された1988年から直近の2020年の期間では、海盆全体で見ると十年ごとに-7.13%の割合で減っている。しかしながら海域ごとに詳しく見れば、北海道の緯度に当たるオホーツク南部海域では海氷面積はほぼ横ばい（若干の増加）であった（図1-15）。このように、海氷変動は海域ごとに大きく異なっていることが明らかとなった。また、海上保安庁の砕氷巡視船「そうや」からの氷厚観測に基づき、海氷量（体積）推定を行った（成果番号4）。

この解析結果は、知床をはじめとする北海道沿岸に着目した海氷シミュレーションを実施することの、重要な基盤となった。

### (4) 生態系モデル

世界自然遺産・知床のOUVは、海氷がもたらす豊かな生物生産を起点とする海洋生態系と陸上生態系の連続性にある。したがって、海氷による鉄供給の有無が生物生産にもたらすインパクトの検討は、海氷

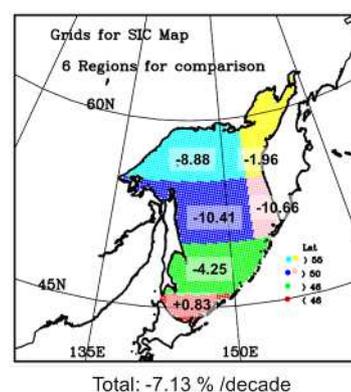


図1-15 海氷面積の変化傾向（10年毎の変化率）。北海道の緯度に当たる領域ではほぼ横這いである。

消失時のリスクを評価するうえで大事である。ここでは、海洋生態系の低次生産（植物プランクトン・動物プランクトン）に対する海水からの鉄供給の効果調べるために、生態系モデルによる数値実験を行った（成果番号43, 54）。モデルは、硝酸塩サイクルに鉄サイクルを結合したもので（図1-16）、それがさらに海洋・海水モデルに結合されている（ただし、深さ方向のみの一次元に改変）。

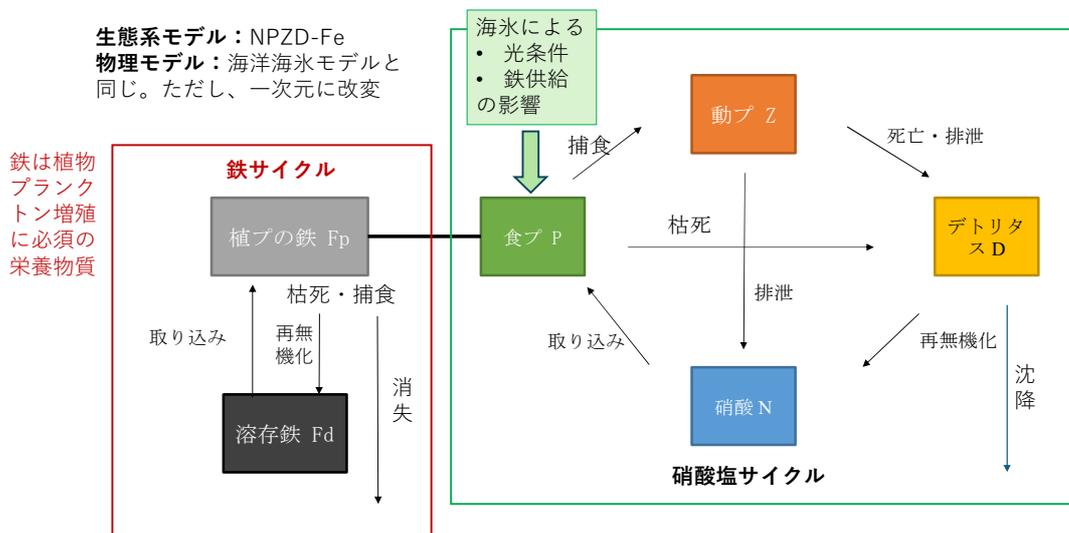


図1-16 鉄サイクルを結合した生態系モデルの模式図

図1-17は海水鉄を付加する前の表層の鉄濃度4種（0.5nM, 1.0nM, 2.0nM, 3.0nM）と、それに対して2015年（少氷年）、2021年（標準的な海水被覆）、2001年（多氷年）の光条件を与えた実験を示している。2021年に関しては、サブテーマ4によって、知床海域における海水融解直後の鉄濃度観測があり、表層100mの鉄濃度は約1nMであった。サブテーマ4の分析によると、この水塊は中冷水（Intermediate Cold Water）にあたるもので、東樺太海流や大陸棚からの海洋を通じた鉄輸送を表している。これに鉄を海水から供給するという実験を行った。

図1-17がその結果である。図の赤矢印が海水融解直後を観測した2021年の海水状況（光条件）と中冷水の鉄濃度（1nM）に対応した実験結果である。この条件による1月—6月を積算した低次生産は、海水からの鉄供給が「有る」場合に比べて「無い」場合には30%程度減少していることが分かる。このように、海水からの鉄供給は、知床海域の低次生産において重要なインパクトを与えることがわかった。また、鉄濃度0.5nMの海域は、生物生産が止まったときに硝酸やリン酸が残っている海域（High Nutrient Low Chlorophyll (HNLC) 海域）を模擬している。図1-17によると、このような海域では 海水からの鉄供給はさらにインパクトが大きく、低次生産は2倍

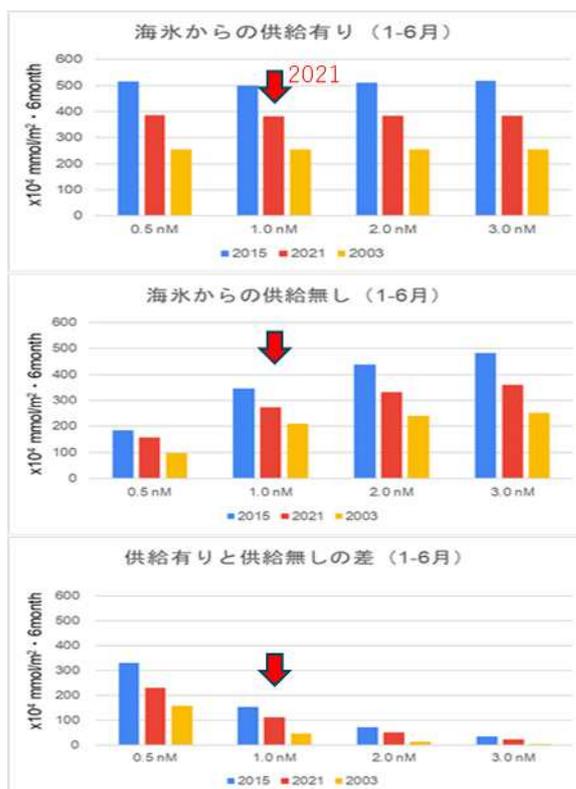


図1-17 生態系モデルの実験結果。赤矢印が海水融解直後を観測した2021年の海水状況（光条件）と中冷水の鉄濃度（1nM）に対応した実験結果である。

以上に増加する。

以上より、温暖化によって海氷（流氷）が消失すれば、海氷からの鉄供給が無くなり海洋低次生産は減少する、というリスクが示された。

#### （５）知床半島への漂着ごみと海氷の影響

海岸漂着ごみのモニタリングにあたっては、知床半島ルシャ（1-18左）において。ドローンを用い、調査期間中（2021年10月12日から2023年6月14日）に計3回撮影を行った。撮影画像から海岸の3次元モデルを構築し、海岸の西部(W)、中央部(C)、東部(E)において、各DSM（Digital Surface Model）およびオルソ画像から漂着物の分布と面積を調べた（図1-18）。調査期間中はタイムラプスカメラによって海岸の連続撮影を行った。また、地形断面測量から漂着物の層厚を求めた（成果番号38, 39）。

海岸の西部と中央部において、漂着物は後浜から背後の植生域まで広く堆積していた。東部では漂着物は後浜にまばらに存在し、堆積域は西部、中央部より小さかった。また、地形断面測量の結果より、漂着物は海岸中央部で最大1 m 程度堆積しており漂着量が少ない東部では数十 cm 程度の厚さであることが明らかとなった。調査期間中における漂着物の空間的・時間的変化をオルソ画像から判読すると、西部では堆積域の汀線側で漂着物の堆積域が増加していたが、東部では堆積域が減少していた（図1-18）。網走沖の波浪データによれば、周辺海域は夏期に波浪が弱く、海氷期直前の初冬に波浪が強まる季節パターンがある。設置した1時間間隔のタイムラプスカメラ映像から、2021年12月26日-27日、2022年1月3日-7日、11月14日-15日、12月24日-27の高波浪期に波が後浜に到達し、新たな漂着物の付加と堆積していた漂着物の流出が確認された。海氷が着岸し、海面を覆って以降は海岸の漂着ごみに変化は見られなかった。今後、気候変化に伴って海氷の到来が遅れたり、減少ないし消滅したりすることにより、冬期の高波に海岸が暴露する期間が増えることが予想される。この変化は漂着ごみの堆積・流出を活発化させると共に、従来、海氷が担ってきた冬期の海岸保護の役割の喪失を意味し、漂着ごみのみならず、海岸地形に大きな変化が生じる可能性がある。（成果番号39, 54）

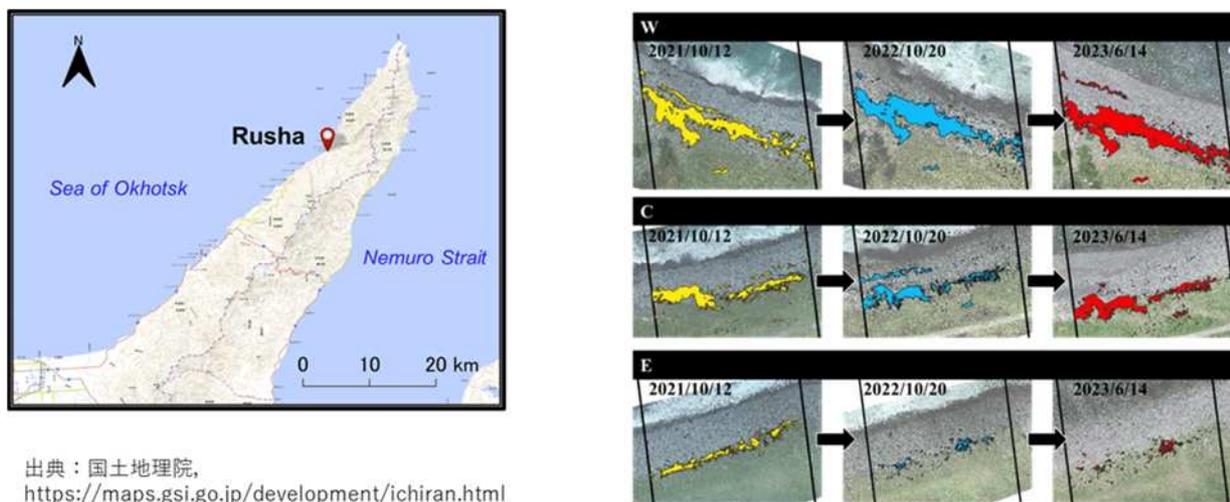


図1-18 （左図）調査地域の知床 ルシャ海岸。（右図）ルシャ海岸の西部（W）、中央部（C）、東部（E）において、2021年10月12日（黄色）、2022年10月20日（青）、2023年6月14日（赤）のオルソ画像上で漂着ごみと判別された領域。

#### 5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

サブテーマ1では、知床をはじめとするオホーツク海南部海域の海氷・海洋変動シミュレーションを開発し、当海域の地球温暖化に伴う海氷消失可能性とその気候条件を導出すること、また、研究全体の成果をとりまとめて知床海域の海氷変動と海洋生態系に対する温暖化リスクを同定し、世界自然遺産管理計画や海域資源管理計画、地域社会の気候変動への適応戦略策定に活用する、ということを目指し

た。

まず、知床海域・北海道周辺海域に着目し、「現在気候」において、海氷分布を精度良く再現する海氷・海洋モデルを開発した（サブテーマ3と連携）。そして、サブテーマ2と連携して「2050年」と「2090年」の将来気候を作成し、それを大気境界条件として低位・中位・高位3種のCO2排出シナリオに基づく海氷変動予測を行った。その結果、

- 低位温暖化シナリオ（21世紀後半にはCO2排出量実質ゼロ）が達成されれば、知床海域の海氷面積は現在に比べて1/3程度に減少するものの、ほぼ毎年（少なくとも2年に1度以上）知床に海氷が到達する。この時の気温差分は、北海道で1.8℃程度である
- 北海道の気温が3℃程度上昇すると、知床に流氷が到達する年（頻度）は半減する
- CO2排出量無制限のシナリオだと知床から海氷が消失する。この時の北海道での気温差分は、5℃程度である

との結論を得た。これにより「海氷消失可能性とその気象条件」導出の目標を達成した。

さらに、サブテーマ4と連携し、海氷からの鉄付加を組み込んだ生態系モデルを用い、海氷の有無によるインパクトを解析した。また、海氷が消失すると漂着ごみの堆積・流出が活発化する可能性を指摘した。これらは、当初計画にはなかった成果である。

温暖化による海氷減少の予測の定量化、およびその生態系や漂着ごみへの影響（あるいはリスク）の成果は遺産管理、海洋資源管理、気候変動適応対策に活用できる。特に、低位温暖化シナリオの実現が、知床の海氷の保持に重要、との知見は、地域のみならず国際社会へのメッセージとしても有用であろうと考える。

以上より、目標を上回る成果をあげたものと判断する。

## II-2 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2 要旨]

環オホーツク海領域を対象に、最新の気候予測モデル群であるCMIP6の中から、現在気候再現性が良好である11種のモデルを選定し、3つのSSPシナリオにおける2050年前後および2090年前後の大気地表面の温暖化差分（2000年前後を基準）を計算した。この計算結果はサブテーマ1のオホーツク海領域海氷・海洋モデルの将来予測計算に利用された。また、過去数十年の大気・海洋・海氷の観測データの解析を行い、環オホーツク海気候システムの解明のための研究を進めた。その結果、オホーツク海の海氷量の年々変動をもたらす大気場の特徴や、海氷拡大期の途中にみられる海氷の一時的な減少が温帯低気圧通過時の南東風と関係していること、網走における海氷の接岸・離岸時の大気場の特徴などについて明らかにした。

### 1. サブテーマ2 研究開発目的

サブテーマ2では、知床を含む環オホーツク海域の大規模温暖化パターンを、最新の気候予測モデル群であるCMIP6（Coupled Model Intercomparison Project phase 6）の出力より抽出を行い、サブテーマ1が実施する海氷・海洋環境変動シミュレーションのための、2050年・2090年前後における大気境界条件を導出することを第一の目的とする。また、過去数十年のデータ解析より、オホーツク海の海氷の変動の解析を行い、環オホーツク海気候システムの解明に向けた研究成果を示すことを第二の目的とする。

### 2. サブテーマ2 研究目標

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2 実施機関	筑波大学
サブテーマ2 目標	ストーリーライン手法を用いて、マルチ気候モデル群による予測の中から海氷変動と紐づけた少数の代表的な大規模温暖化パターンを抽出することにより、地球温暖化に伴う環オホーツク地域の気候変動システムを明らかにする。また、海氷・海洋環境変動シミュレーションのための、大気境界条件を導出する。

### 3. サブテーマ2 研究開発内容

サブテーマ2では、環オホーツク海領域を対象に、最新の気候予測モデル群であるCMIP6を用いて、それらの北半球冬季における現在気候再現性を評価し、その将来変化について調べた。研究計画では高解像度版のHighResMIP気候モデル群を対象とする予定であったが、将来気候の計算期間が2050年までであるモデルが多いこと、大気海洋結合モデルの出力が存在するモデルが少ないことなどから、アドバイザーからの助言も踏まえ、CMIP6のhistorical実験およびScenarioMIPのSSPシナリオ実験を対象とすることに変更した。CMIP6の気候モデル出力がアーカイブされている米国Lawrence Livermore National LaboratoryのESGF（Earth System Grid Federation）ウェブサイトより入手可能な気候モデル出力のうち、大気海洋結合モデルあるいは地球システムモデルを用い、historical実験（1990～2009年）およびScenarioMIP（2040～2059年と2080～2099年）の低位温暖化シナリオ実験（SSP1-2.6）・中位温暖化シナリオ実験（SSP2-4.5）・高位温暖化シナリオ実験（SSP5-8.5）といった3つの温暖化シナリオの全てで大気地表面データ（地表気温・地表比湿・地表風・海面更正気圧・降水量・下向き短波放射量・下向き長波放射量）が公開されているモデルを選定した。これらの中には、気候感度が大きすぎることにより最近数十年の地球平均気温の昇温トレンドを大きく上回っている、いわゆる‘hot models’と呼ばれるモデ

ルが含まれていたため、アドバイザーの助言に基づいて先行研究を参考にして‘hot models’を除き、15種のモデルを解析の対象とした。これらのモデル群について、環オホーツク海領域における地表風の現在気候再現性を行った結果、再現性が良いと判断される11種のモデルを選定した。この11種のモデルを対象に、上述の大気地表データの温暖化差分量を、historical実験の1990～2009年の20年平均（以下、「2000年」と）、3種のSSPシナリオにおける2040～2059年の20年平均（以下、「2050年」）および、2080～2099年（以下、「2090年」）の20年平均値との差として算出した。最終的にマルチモデル平均値として、3つのSSPシナリオの2つの年代の計6種について、11モデルの平均値を計算した。さらにモデル間のばらつきを考慮したストーリーライン手法を導入し、オホーツク海の風上側にあたる陸域の地上気温昇温量と、北海道オホーツク海沿岸付近における地表風の西風成分の温暖化差分量の2変数を用いて、3つのSSPシナリオの2つの年代の計6種のそれぞれについて4分割したストーリーにおける温暖化差分量についても計算を行った。これらの温暖化差分量データを、領域海氷・海洋モデル実験の境界値として、サブテーマ1に提供した。

また、過去数十年の海氷・大気場などのデータを用い、知床海域の海氷変動に紐づける代表的大気循環パターンを抽出するための基礎資料として、過去数十年における大気再解析データや海氷・海面水温の観測に基づくデータを用いてデータ解析を行った。特に、近年利用可能となった海氷に関する高時間・空間分解能データを用い、未解明な点が多いオホーツク海の海氷の時空間変動に着目した解析を行った。その結果、オホーツク海域における海氷量の年々変動および総観～季節内変動についての新たな知見を得た。

#### 4. サブテーマ2結果及び考察

##### (1) CMIP6気候モデル群からのモデルの選定と大規模温暖化パターンの抽出

はじめに、CMIP6の15種のモデルの環オホーツク海領域における現在気候再現性の評価を行った。オホーツク海を囲む北緯30～70度、東経120～180度の領域における「2000年」での地表風の水平分布再現性について、大気再解析データJRA-55を基準とし、二乗平均平方根誤差およびTaylorのスキルスコアを用いて評価を行った（図2-1）。その結果、15種のモデルのうち11種のモデルは日本周辺の北西季節風やアリューシャン低気圧などの循環場をよく再現していたが、やや再現性が低いモデルも4つ存在した（図

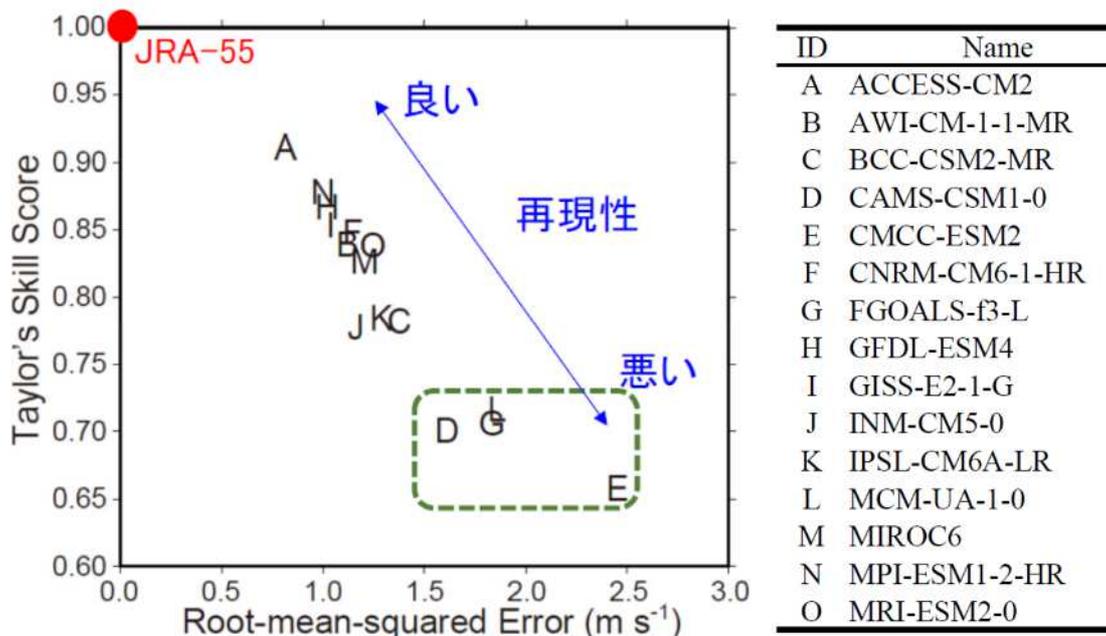


図2-1 CMIP6の個々のモデル（右表のアルファベットに対応）における、環オホーツク海域における12～3月の4か月平均地表風の水平分布再現性指標（横軸：二乗平均平方根誤差、縦軸：Taylorのスキルスコア）についての散布図。

2-1右下の緑点線枠)。これら4モデルを除いた11モデルを対象に、現在気候再現実験 (historical run) の「2000年」の値と、3種のSSPシナリオにおける「2050年」および「2090年」の値との差を計算した。

地上気温についての11モデル平均・12～3月の4か月平均における温暖化差分量の地理的分布を図2-2に示す。地上気温の昇温量は、SSP1-2.6シナリオでは「2050年」・「2090年」とともに相対的に小さく、SSP2-4.5シナリオでは「2050年」では小さめだが「2090年」ではやや大きくなる。SSP5-8.5シナリオでは「2050年」の時点ですでにやや大きく、「2090年」になると非常に大きくなる。また空間パターンの特徴としてはオホーツク海北西部に昇温量の極大がみられる。この海域は現在気候において、オホーツク海の中で海氷密接度が最も大きく、12～3月において海氷に覆われる期間も長い。そのため温室効果ガスの排出量の増大に応じて、「地上気温の上昇が→海氷密接度の減少（海氷に覆われる期間の短縮）→アルベドの減少→地上気温のさらなる上昇」といった大気海洋海氷結合系の正のフィードバックが強く現れたためであると考えられる。なおSSP5-8.5シナリオの「2090年」においては、シベリア陸域などより高緯度側に昇温量の極大が確認できる。

地表水平風についての11モデル平均・12～3月の4か月平均における温暖化差分量の地理的分布を図2-3に示す。どの排出シナリオ・年代でも共通して、北緯40～55度のオホーツク海・北太平洋域において、温暖化に伴い地表の西風が強化する傾向があり、温室効果ガスの排出量が多い場合ほどその傾向が強いことが確認できる。この傾向は先行研究で指摘されている、温暖化に伴うアリューシャン低気圧の強化および中心位置の北上傾向と整合的である。一方で、オホーツク海上の風の差分量を詳しくみると、北緯50度付近を境にその北では北西季節風の強化を示すが、北緯50度以南では南西風の差分量となっており、オホーツク海南部の地表風における北風成分は強まっていない。

次に同一シナリオ・年代におけるモデル間のばらつきを考慮するため、先行研究で用いられているストーリーライン手法を用いた温暖化予測情報に関する計算を行った。サブテーマ1と相談し、オホーツク海の風上側の陸域（北緯42.5～58.75度、東経127.5～137.5度の領域平均）の地上気温昇温量と、北海道北部付近（北緯42.5～47.5度、東経140～145度の領域平均）における地表風の西風成分の温暖化差分量を2つの変数として選択した。前者においては、大気海洋海氷結合系の影響が大きいオホーツク海上の気温昇温量を選ぶのはサブテーマ1が実施する海氷・海洋モデルによる計算としてふさわしくないということもあり、北西季節風の上流側にあたる陸域を選定した。3つのSSPシナリオの2つの年代の計6種の

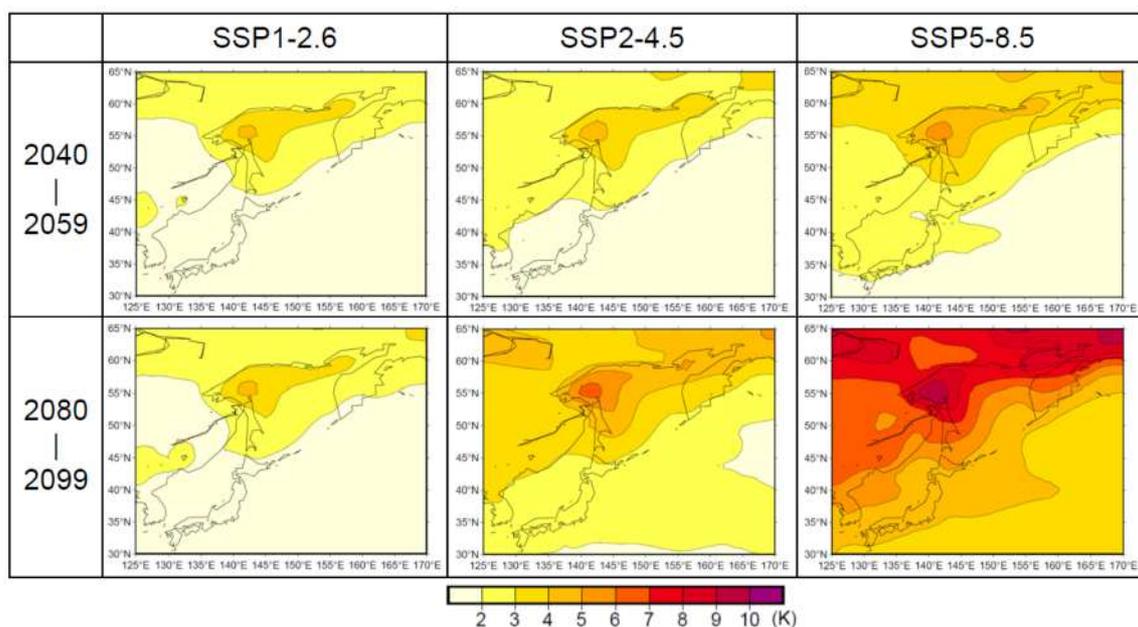


図2-2 12～3月の4か月平均における11モデル平均の地上気温温暖化差分量（単位：K）の地理的分布。上段（下段）が各SSPシナリオの「2050年」（「2090年」）と現在気候再現実験の「2000年」との差。左列・中列・右列がそれぞれSSP1-2.6シナリオ・SSP2-4.5シナリオ・SSP5-8.5シナリオの温暖化差分を示す。

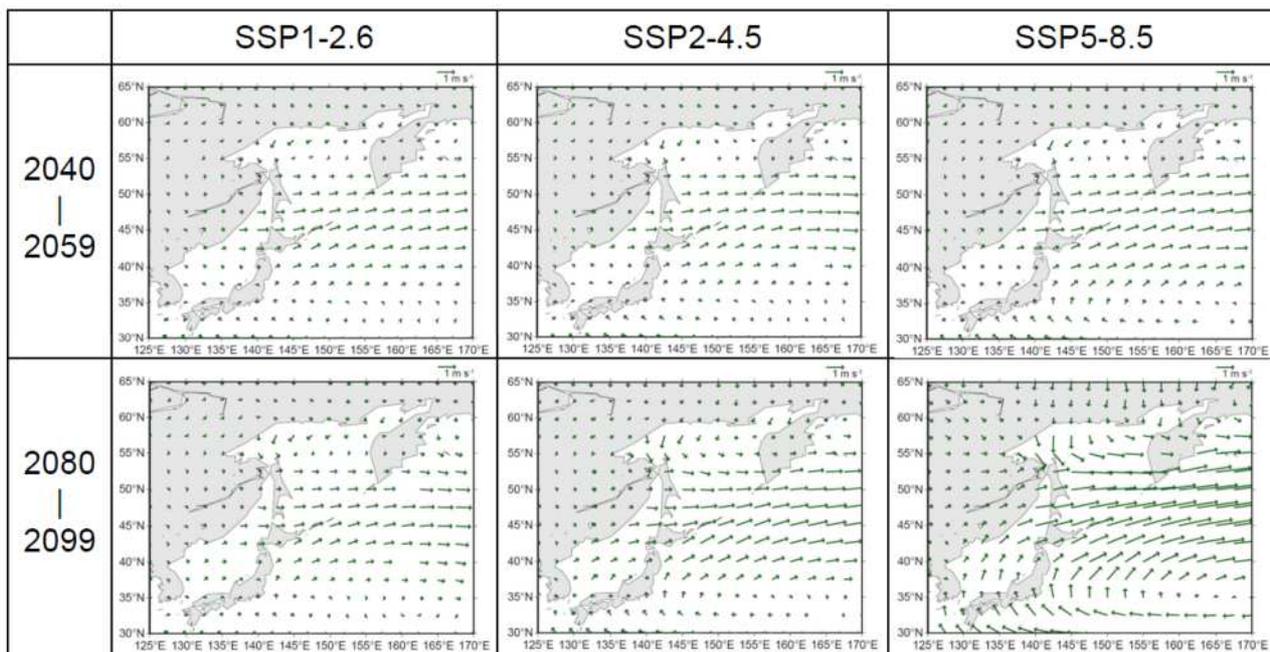


図2-3 12～3月の4か月平均における11モデル平均の地表風の温暖化差分量の地理的分布。上段（下段）が各SSPシナリオの「2050年」（「2090年」）と現在気候再現実験の「2000年」との差。左列・中列・右列がそれぞれSSP1-2.6シナリオ・SSP2-4.5シナリオ・SSP5-8.5シナリオの温暖化差分を示す。

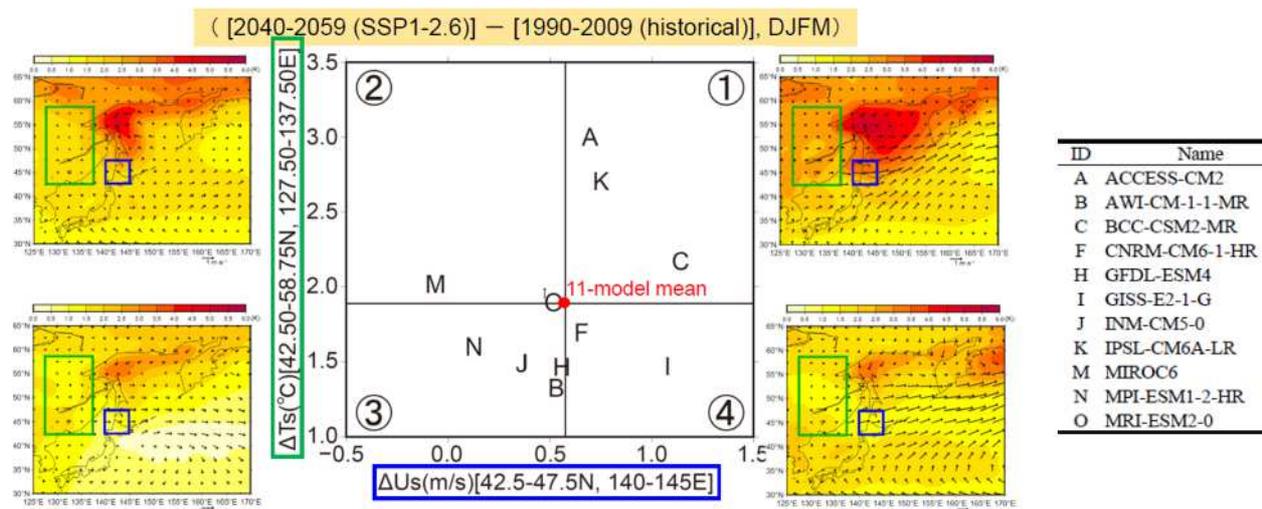


図2-4 12～3月の4か月平均におけるオホーツク海風上側の陸域（北緯42.50～58.75度、東経127.5～137.5度の領域平均）の地上気温昇温量（縦軸）と北海道北部付近（北緯42.5～47.5度、東経140～145度の領域平均）における地表風の西風成分の温暖化差分量（横軸）の、各モデルにおける値をプロットした散布図（中央）。SSP1-2.6シナリオの「2050年」と現在気候再現実験の「2000年」との差における例を示している。散布図中のアルファベットは右表の個々のモデルに対応している。赤丸は11モデルの平均値。両側の分布図は各ストーリーに属するモデルで平均した地上気温の昇温量（陰影）および地表風の温暖化差分量（矢印）の水平分布で、緑（青）枠は風上側の陸域（北海道北部付近）の領域を示す。

それぞれについて4分割したストーリーにおける温暖化差分量についての計算を行った。その1例として、SSP1-2.6の「2050年」における上記2変数の値をモデルごとにプロットした散布図を図2-4に示す。11モデルの平均値（図中の赤丸）を基準として4つのストーリーに分割した結果、地上気温の昇温量・西風成

分の強化の程度ともにモデル間のばらつきを考慮することができる。これらの各ストーリーに属するモデルで平均した大気温暖化差分量についても、SSPの3つのシナリオの「2050年」・「2090年」について算出を行った。

最終的に、オホーツク海を包含する領域（北緯36.25～62.50度、東経126.25～162.25度）の大気地表面データ（地表気温・地表比湿・地表風・海面更正気圧・降水量・下向き短波放射量・下向き長波放射量）の1～12月の各月平均値について、3つのSSPシナリオ・「2050年」と「2090年」の2つの年代の全てを対象として、11モデルの平均および4分割した各ストーリーのモデル平均について計算を行い、サブテーマ1に提供した。これらは領域海氷・海洋モデルの境界値として利用された。

## (2) 現在気候における環オホーツク海域の気候変動・海氷変動解析

サブテーマ2では環オホーツク海域の気候変動・海氷変動に関連した5編の査読付き論文を出版した。本節ではこれらの中から、オホーツク海の海氷量（海氷面積や海氷密接度）変動に直接関係した3点の研究成果について紹介する。

### a. オホーツク海海氷量の年々変動（成果番号11、Ueda et al. 2023, *Atmosphere and Ocean*）

過去48年間（1971～2018年）における1～3月のオホーツク海海氷量の年々変動と、大気循環場の変動との関係について調査した。オホーツク海上での海氷面積が48年平均値より1標準偏差以上大きい（小さい）年を多氷年（少氷年）として抽出し、合成図解析を行った。図2-5は多氷年（少氷年）の1～3月平均における海面更正気圧・地表風・地上気温偏差の合成図を示している。海氷が平年より多い年には、

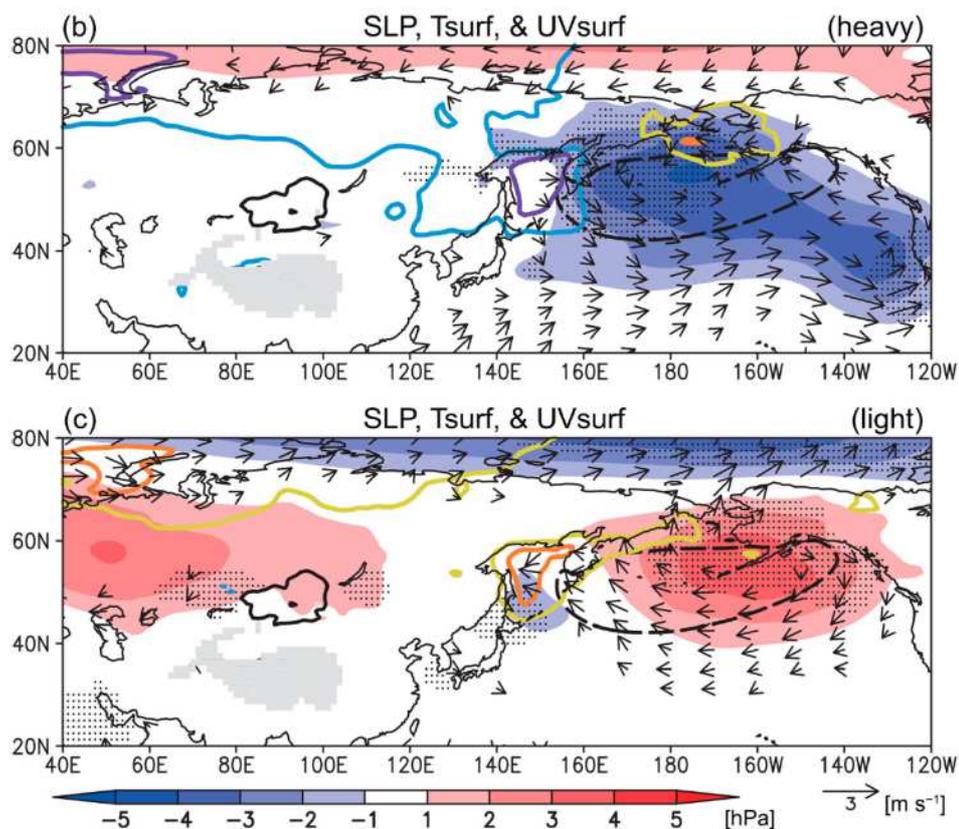


図2-5 (b)多氷年と(c)少氷年での1～3月平均における海面更正気圧偏差（陰影）、地表風（ベクトル）および地上気温偏差（紫：-3 K、青：-1 K、黄色：+1 K、橙：+3 K）の合成図。点描は信頼区間90%以上で有意な海面気圧偏差域を示す。太実線（太破線）は気候値の海面更正気圧1030 hPa（1005 hPa）の等値線を示す。（成果番号11のFig. 4b-c）

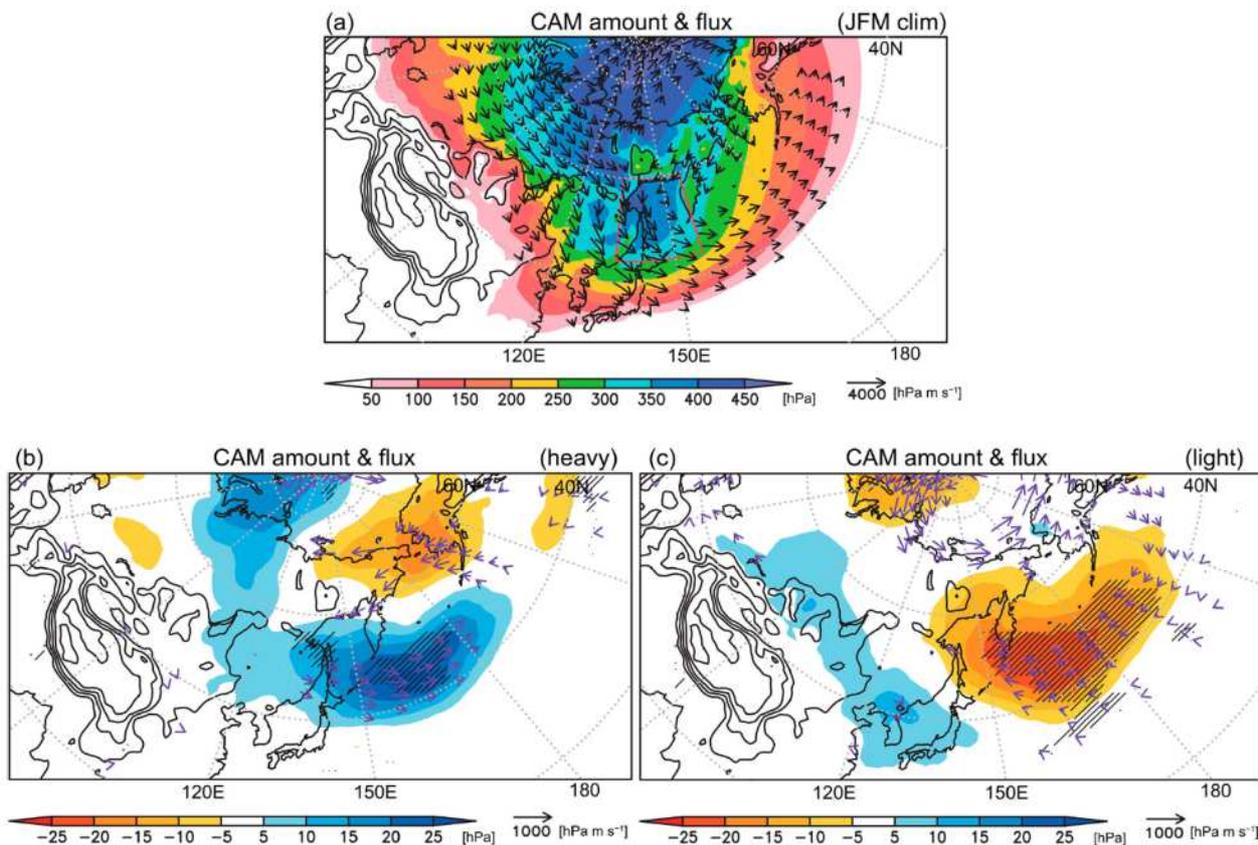


図2-6 1～3月における温位280 K以下で定義した(a)寒気質量（陰影）と寒気質量フラックス（ベクトル）の気候値。(b)多氷年での寒気質量（陰影）および寒気質量フラックス（ベクトル）偏差の合成図。斜線域は信頼区間90%以上で有意な海面気圧偏差域を示す。細実線は1,000 m間隔の地形の等高線を示す。(c) (b)と同様、ただし少氷年の偏差。（成果番号11のFig. 5）

アリューシャン低気圧が平年より強い。また、海氷の遮熱効果の影響があるため、地上気温負偏差の極大域はオホーツク海上に存在する。地上気温偏差-1 Kの等値線はシベリア高気圧の中心より高緯度側に広く分布している特徴も確認できる。少氷年は逆にアリューシャン低気圧が平年より弱い。またオホーツク海上には気温正偏差とともに、海面更正気圧の負偏差もみられる。その他に、北極域の気圧偏差から多氷年（少氷年）は北極振動指数が負（正）となる傾向があることも確認できる。

次に280 K以下の温位で定義した寒気質量とそのフラックスについて合成図解析を行った。その結果を図2-6に示す。気候学的な寒気質量はオホーツク海上に極大が存在し、北極域からユーラシア北東部及びベーリング海峡を通過して流入する。多氷年では、寒気質量偏差はオホーツク海を含む北太平洋上で有意に大きくなる。大陸上の寒気質量の蓄積と東向きの寒気質量フラックス偏差より、大陸からの寒気の吹き出しとオホーツク海の海氷生成との関係を示唆するが、寒気の生成・消滅項の計算からはユーラシア大陸からの寒波の影響は限定的であり、むしろオホーツク海の海氷の遮熱効果による寒気質量の生成量が大きく、その影響が北太平洋まで伸びている傾向を示唆する（図省略）。少氷年は概して多氷年と逆の傾向を示すが、北緯40度以南の日本の東海上（黒潮続流域）では、寒気質量の消滅項は多氷年・少氷年どちらも正偏差となっている。

続いて、多氷年と少氷年における海氷面積偏差・オホーツク海上の寒気質量偏差・アリューシャン低気圧の強度を表す北太平洋指数偏差の季節進行を図2-7に示す。多氷年では12月に海氷面積の正偏差が拡大し、続いてオホーツク海上の寒気質量の正偏差が1月に強まる。さらに1か月ほど遅れてアリューシャン低気圧が強まっていることから、オホーツク海上の北西季節風をさらに強化し、冬季全体でのオホーツク海上における海氷面積の正偏差を維持する、といった正のフィードバックの存在が示唆される。少氷年では、12月から2月までオホーツク海の海氷面積と寒気質量の負偏差が共通してみられる。ア

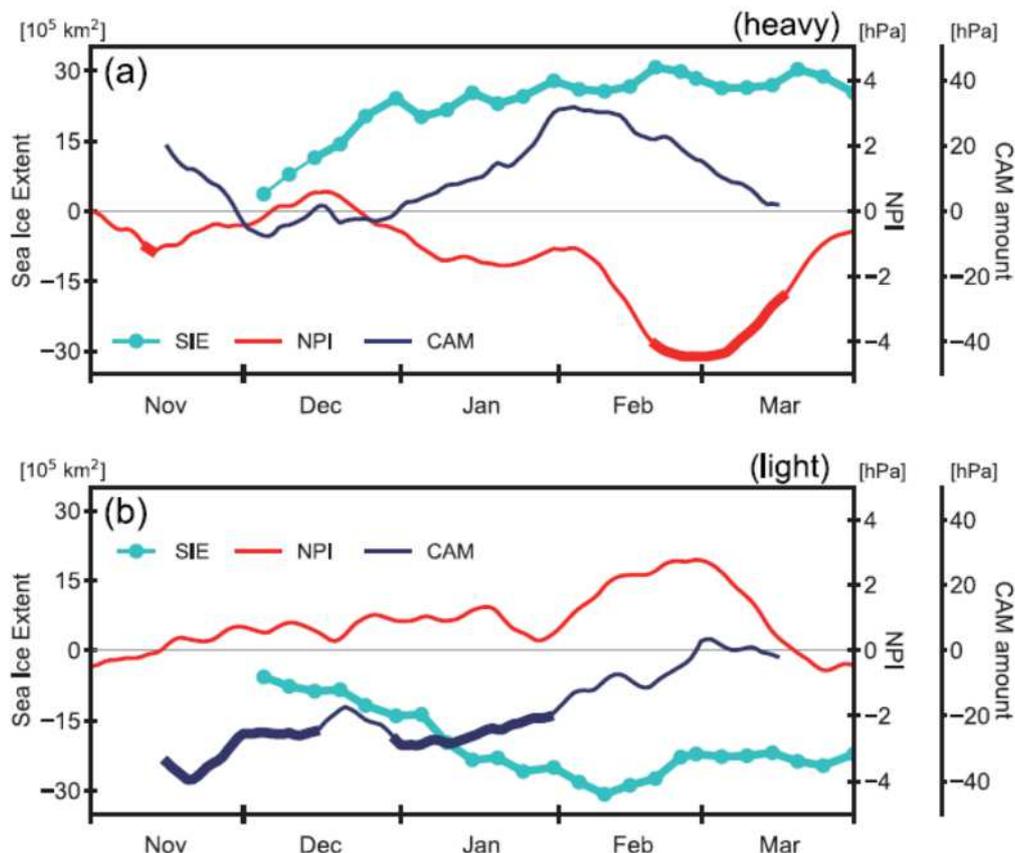


図2-7 (a)多氷年と(b)少氷年のオホーツク海の海水面積偏差(SIE、水色)、北太平洋指数偏差(NPI、赤)オホーツク海上の寒気質量偏差(CAM、紺色)の季節進行。太線は信頼区間90%以上で有意な期間を示す。北太平洋指数と寒気質量の偏差は31日移動平均の値を示す。(成果番号11のFig. 7)

リューシャン低気圧は2月から3月前半で特に平年より弱い。これらの結果から、冬季初めにおけるオホーツク海の海水面積偏差をもたらす寒気が多氷年・少氷年の違いにとって重要である可能性が示唆される。

さらに、多氷年・少氷年における北西太平洋の温帯低気圧経路の違いについて調べた。多氷年には黒潮一親潮続流域に沿って低気圧存在頻度が多く、アリューシャン低気圧の強化及びストームトラックの南偏と部分的には整合的である。少氷年にはカムチャツカ半島東方沖での低気圧存在頻度が増える。次に示すKamae et al. (2023) (成果番号10) では発達した温帯低気圧の通過に伴って発生する、オホーツク海へ吹き込む地表の南東風偏差がオホーツク海の海氷減少を引き起こすことを示しており、上記の少氷年の特徴と関係する可能性がある。

最後に大気のテレコネクション(遠隔影響)を介した熱帯海洋の影響について調べた。図2-8は1~3月における多氷年と少氷年の海面水温偏差と外向き長波放射量偏差(熱帯大気の対流活動強度の指標で、負偏差の場合、平年より強い)を示している。多氷年はエルニーニョ的な海面水温偏差となっており、先行研究で指摘されるように、太平洋-北米(PNA)テレコネクションパターンを介したアリューシャン低気圧の深まりと整合的である。少氷年では逆にラニーニャ型の海面水温・熱帯対流偏差となっており、対流圏上層の波活動度フラックスに関する合成図解析の結果(図省略)から、ラニーニャ年に特徴的な、東南アジア熱帯域から中国南部を経て日本に至る東南アジア-日本(SAJ)テレコネクションパターン(成果番号9)と呼ばれる大気の定常ロスビー波の伝播を通じて、アリューシャン低気圧の弱化和結びついていると解釈される。

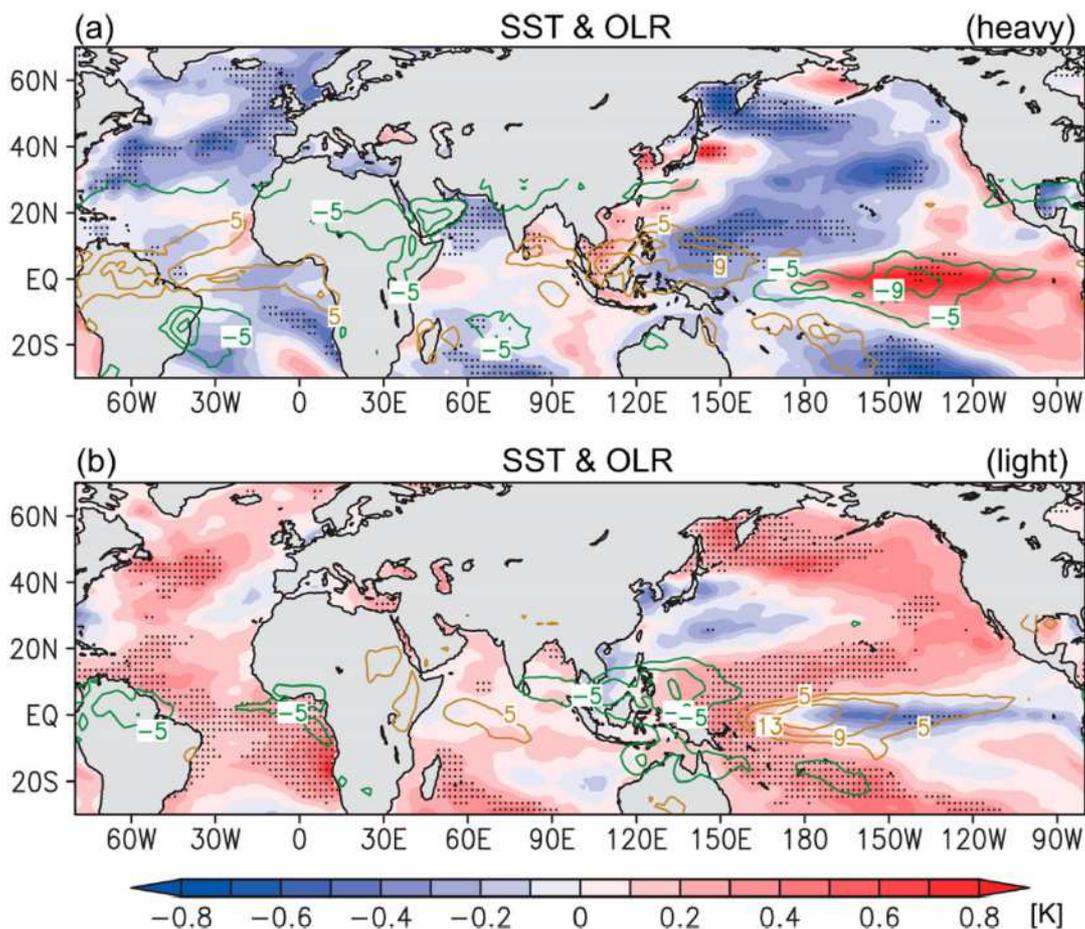


図2-8 1～3月における(a)多氷年と(b)少氷年の海面水温偏差（陰影、単位：K）と外向き長波放射量偏差（橙線が正、緑線が負、北緯30度～南緯30度の範囲のみ、単位：W m<sup>-2</sup>）の合成図。点描は信頼区間90%以上で有意な海面水温偏差域を示す。（成果番号11のFig. 10）

b. 温帯低気圧の通過によるオホーツク海の海氷の減少（成果番号10、Kamae et al. 2023, *J. Meteor. Soc. Japan*）

オホーツク海の海氷密接度は、海氷が拡大する12月から2月中旬の時期に数日から1週間程度の期間にわたって減少することがある。大気・海洋再解析データを用いて、オホーツク海におけるこの海氷密接度の急激な減少の要因を調査した。

図2-9はオホーツク海域で平均した海氷密接度の各年における季節変化を示す。赤線で示す2004/05年の

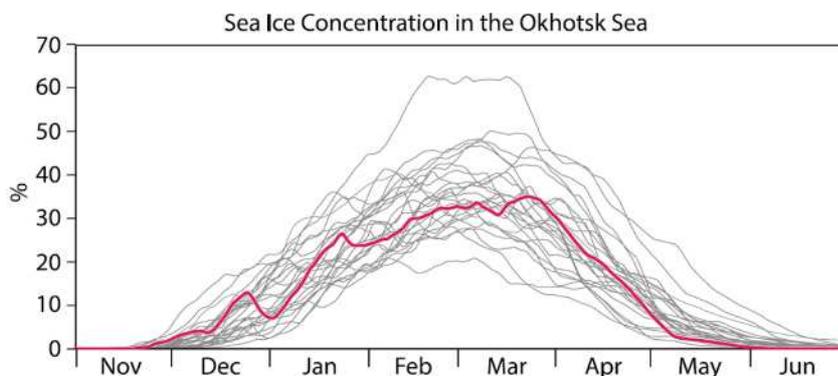


図2-9 オホーツク海域（北緯44～62度、東経135～157度）で平均した海氷密接度の1993/94～2018/19年の各年（細灰色）および2004/05年（太赤線）における季節進行の時系列。（成果番号10のFig. 2）

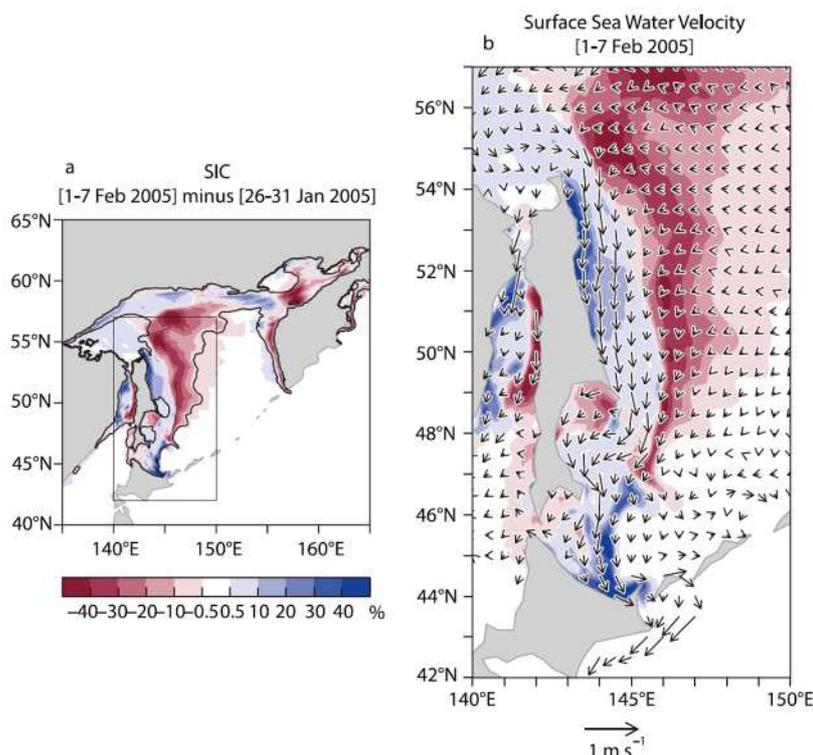


図2-10 2005年1月末から2月初めにおける海水減少事例。(a)2月1～7日と1月26～31日の海水氷接度差（単位：％）の水平分布。黒実線は1月26～31日における海水氷接度5％と90％の等値線。黒枠は(b)の領域。(b) (a)の拡大図に2月1～7日の海洋表層（0.5 m深）の流速（ベクトル）を重ねたもの。（成果番号10の Fig. 3）

の冬季に着目すると、12月下旬～1月初めや1月下旬に一時的に減少している。このうち1月下旬の減少事例における海水氷接度変化量の分布を図2-10aに示す。オホーツク海北部から中部では海水氷接度が大きく減少している一方、サハリンや北海道沿岸では増加している地域もある。この時の大気場の様子を図2-11に示す。1月30日には、対流圏中層では中国東北部から北日本付近にトラフ、その東の北西太平洋にリッジが位置し、地表付近ではオホーツク海南部に温帯低気圧が東進してきている。オホーツク海中部から南部の等圧線間隔は狭く、強い東～南東風が卓越する。2月2日になると中層のトラフと地表の温帯低気圧は東へと抜け、オホーツク海上の地衡風は北～北東風となっている。この地表風が図2-10bに示す沿岸部の南向きの海洋表層流や海水氷接度の変化に影響している可能性がある。

1993/94～2018/19年の26冬季（海水氷拡大期の12月1日～2月15日）の対象期間のうち、このような海水氷急減現象は21事例確認することができた（図省略）。またこの21事例の全てにおいて、対流圏下層（925 hPa）のオホーツク海上で平均した風の東西風成分は負の値（東寄りの風）を示した。

上記の21事例で合成した大気場の特徴を図2-12に示す。2005年の事例と同様に、対流圏中層および海面気圧には南北ダイポール型の偏差がみられ、対流圏下層では強い南東風偏差となっている。赤道太平洋の海面水温偏差ラニーニャ的であるが、統計的有意性は確認されず、この解析では明瞭な関係は得られなかった。海水氷減少の開始日を基準として前後4～6日のラグ合成解析を行った結果（図省略）、海水氷減少開始2日前に東シナ海から東進してきた温帯低気圧がオホーツク海南部に到達するタイミングで、オホーツク海北部・中部の海水氷を減少させる様子が明らかになった。その低気圧はその後北太平洋へと東進し、海水氷減少開始の6日後を中心に、アリューシャン低気圧が強まる傾向を示した。また、オホーツク海の内部における海水氷接度の変化に着目すると、南東風による海水氷の減少はオホーツク海北部・中部で生じる一方で、2005年の事例（図2-10）でもみられたように、サハリン沿岸や北海道オホーツク海沿岸では北からの海水氷の移流により一時的に増加する傾向がある。この結果は、海上風の風向逆転に伴って海水氷が移動することで、海水氷接度変化の空間的な非均一性をもたらしめていることを意味している。また、海水氷減少の開始日を基準とした大気海洋諸要素の時系列を日単位で合成解析した結果からは、

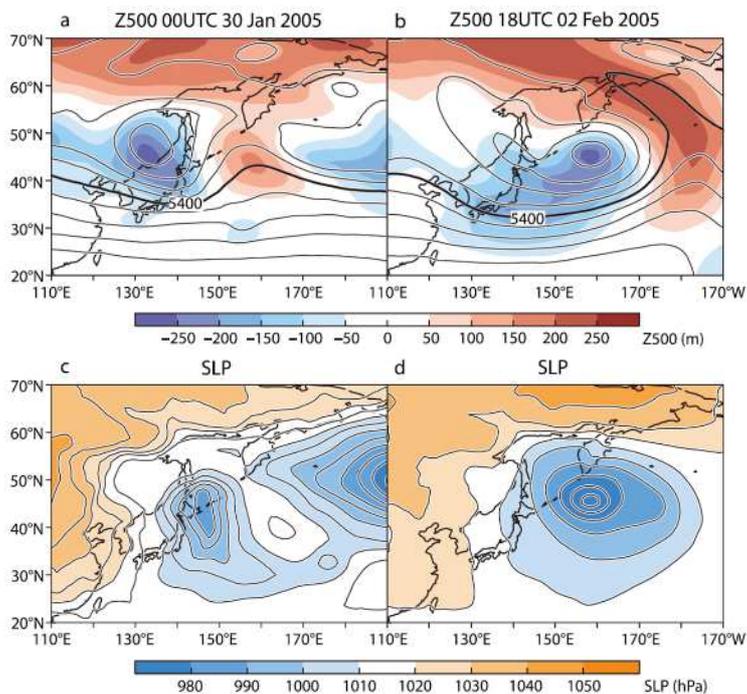


図2-11 (a-b)2005年1月30日00UTCおよび2月2日18UTCにおける500 hPa面ジオポテンシャル高度(線、単位:m)および、1991-2020年の平均からの偏差(陰影、単位:m)。(c-d)同時刻の海面更正気圧(単位:hPa)。(成果番号10のFig. 4)

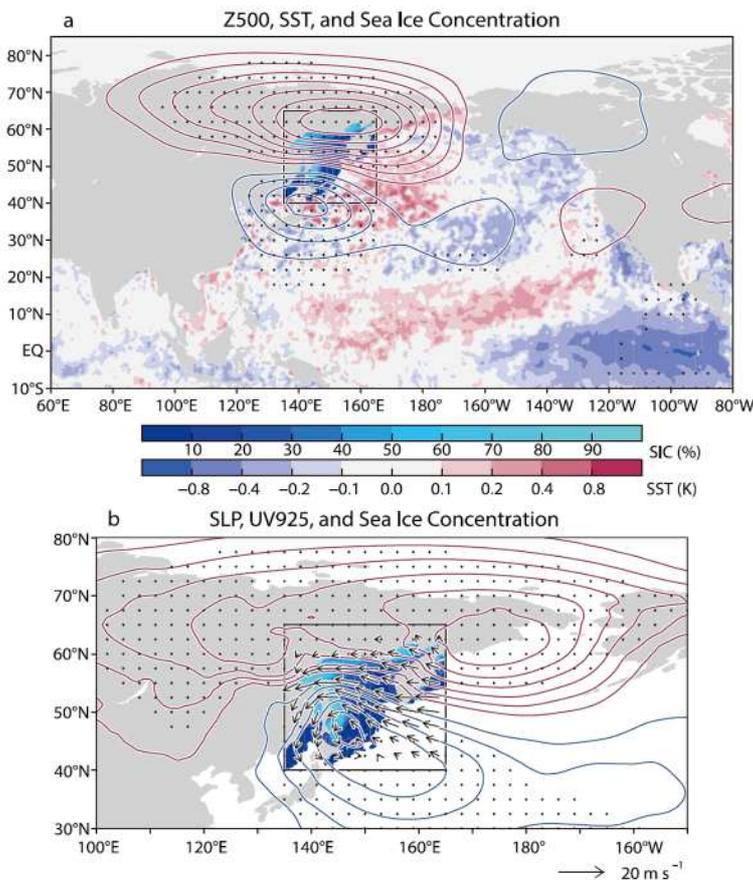


図2-12 海水減少21事例の大気場の合成図。(a) 500 hPa面ジオポテンシャル高度(赤線が正、青線が負、10 m間隔)、海面水温偏差(赤青陰影、単位:K)およびオホーツク海の海水氷密度度(紺~シアン陰影、単位:%)。(b)海面更正気圧(赤線が正、青線が負、0.5 hPa間隔)、925 hPa水平風偏差(ベクトル)。点描は(a) 500 hPa面ジオポテンシャル高度(b)海面更正気圧の差が信頼区間95%以上で有意。(成果番号10のFig. 6)

オホーツク海の家氷減少と対流圏下層の東風偏差はほぼ同時に発生し、両者が密接に関わっていることに加え、オホーツク海北部～中部では海氷減少時に海洋表層の塩分量の低下もみられ、海氷の一時的な融解が関係している可能性があることが示された。すなわち、対流圏下層の南東風偏差が暖気移流をもたらし、海氷が一時的に融解した影響により海氷減少が生じたことが示唆される。

c. 大気循環の観点からみた北海道オホーツク海沿岸海氷の総観規模変動及び年々変動 (成果番号13、Asazuma et al. 2024, *Okhotsk Sea and Polar Oceans Research*)

北海道オホーツク沿岸の海氷の総観規模変動について、63年間（1958～2020年）の網走の観測データを解析し、大気循環場との関係について調べた。網走における日々の海氷密度度（0～10の値を示す）の時系列から、海氷密度度が増加した日を接岸日、減少した日を離岸日と定義した。この定義ではそれぞれ毎冬季数回の接岸日・離岸日が選ばれるため、63年間で合計280回の接岸日と283回の離岸日を抽出した。

接岸日を基準とした大気場の合成図の時間変化を図2-13に示す。接岸2日前では北海道付近に位置する温帯低気圧は強くないが、その後接岸日にかけて東進しながら発達し、北海道オホーツク海沿岸では北～北西風が強まる。また、対流圏上層（250 hPa）の高度場偏差は、温帯低気圧が発達する時の環境場の特徴を示す。

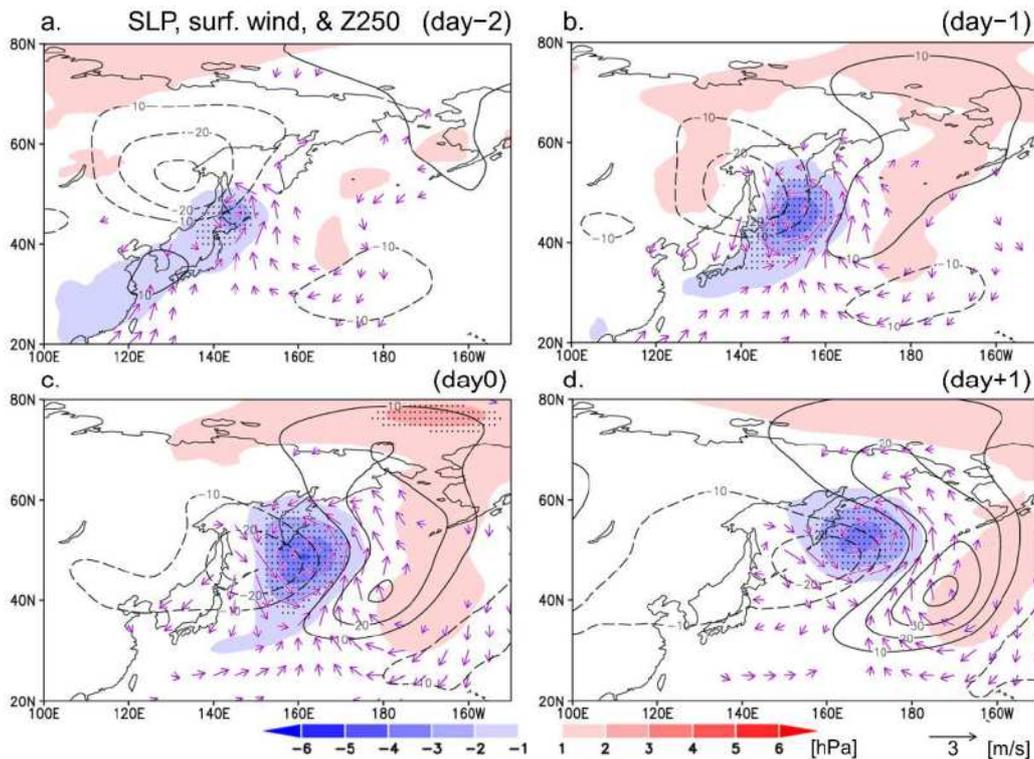


図2-13 接岸日を基準とした海面更正気圧偏差（陰影、単位：hPa）、250 hPaジオポテンシャル高度偏差（実線が正、破線が負、単位：m、10 m間隔）、地表風偏差（ベクトル、単位： $\text{m s}^{-1}$ ）の合成図。基準日の(a)2日前、(b)1日前、(c)当日、(d)1日後。点描は信頼区間95%以上で有意な海面更正気圧偏差域を示す。（成果番号13のFig. 3）

離岸日を基準とした合成図を図2-14に示す。北海道～オホーツク海南部の西に地上低気圧偏差（シベリア高気圧の弱まり）、東に高気圧偏差があり、それぞれ東進していく。地衡風バランスにより北海道付近では南風偏差となっている。対流圏上層の高度場偏差も地上から延長方向に西に傾いた構造を示しており、地表付近のシベリア高気圧の発達と衰退に対応した時間変化を示す。

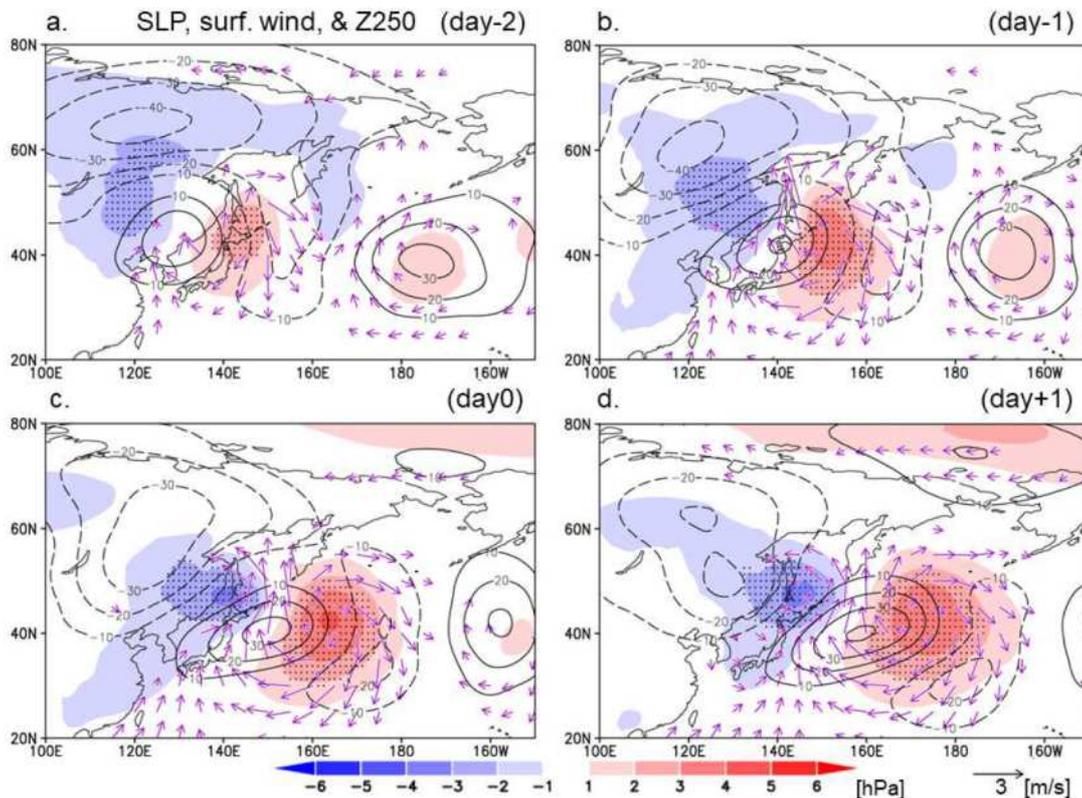


図2-14 図2-13と同様、ただし離岸日を基準とした合成図。(成果番号13のFig. 4)

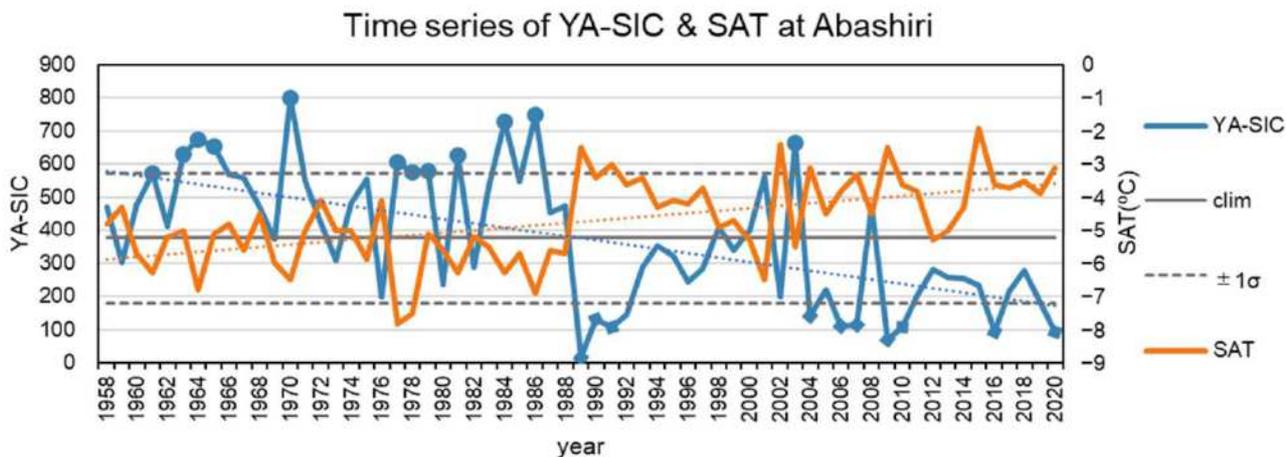


図2-15 網走における海水密接度の年間積算値(YA-SIC、青)と1~3月平均地上気温(SAT、橙、単位:°C)の経年変化。点線はそれぞれの線形トレンド。黒実線(破線)はYA-SICの期間全体の平均値(±1標準偏差)。青丸(青ダイヤ)は本研究で定義した多氷年(少氷年)。(成果番号13のFig. 5)

次に、網走における海水密接度の年間積算値(YA-SIC)を用いて、海水の経年変化を調べた(図2-15)。YA-SICは長期的にみて明瞭な負のトレンドが確認され、過去63年間に於いて網走沿岸で観測される海水が減少している傾向が明瞭に確認できる。またYA-SICは、網走の1~3月平均地上気温と有意な負相関(相関係数-0.81)を示す。YA-SICの1958~2020年における平均値±1標準偏差を超えた年を多氷年・少氷年と定義し、広域的な大気循環場の差異について調べた。多氷年には、オホーツク海の北風偏差に伴うアリューシャン低気圧が強まり、北海道に向かう寒気の侵入が促進される。また、寒気質量(CAM)とそのフラックス、CAMの生成・消滅量偏差について調べた結果(図2-16)、多氷年には、アリューシャン低気圧

の強まりと関係した、アラスカ付近からオホーツク海を経て北海道に向かう南西向きのCAMフラックス偏差がみられる。また、多氷年には北海道の北東海域にもCAM生成量の有意な正偏差があり（図2-16c）、オホーツク海の海氷の存在による遮熱効果の増大によるものと考えられる。少氷年には概ね逆の偏差が確認される。これらの結果は、北海道付近の大気場の偏差と海氷の遮熱効果の複合効果が、北海道付近の気温と海氷の有意な負相関の原因である可能性を示している。

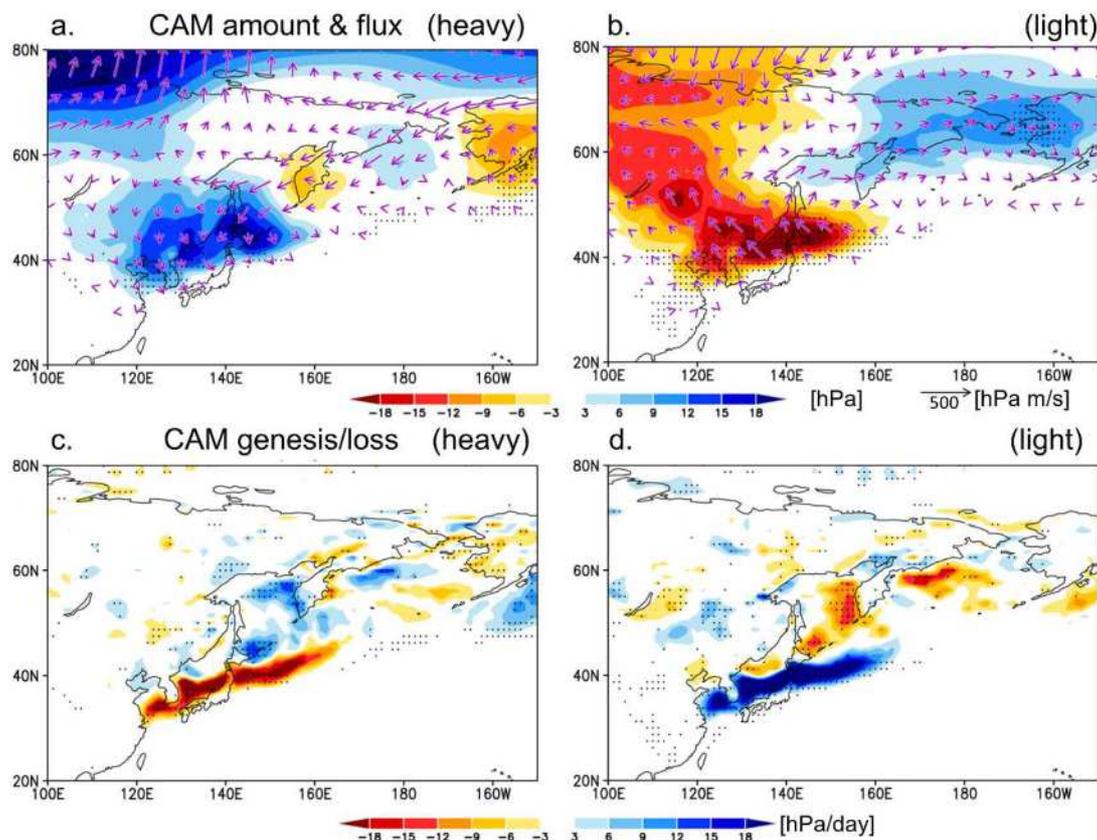


図2-16 (a)多氷年と(b)少氷年における温位280 K以下で定義した寒気質量偏差（陰影、単位：hPa）とそのフラックス偏差（ベクトル）の合成図および、(c)多氷年と(d)少氷年の寒気質量の生成量偏差（単位：hPa day<sup>-1</sup>）。点描は信頼区間95%以上で有意な(a, b)寒気質量偏差(c, d)寒気質量の生成量偏差域を示す。（成果番号13のFig. 8）

## 5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

サブテーマ2では、「ストーリーライン手法を用いて、マルチ気候モデル群による予測の中から海水変動と紐づけた少数の代表的な大規模温暖化パターンを抽出することにより、地球温暖化に伴う環オホーツク地域の気候変動システムを明らかにする。また、海水・海洋環境変動シミュレーションのための、大気境界条件を導出する。」という当初目標に基づいて研究を進めた。

「代表的な大規模温暖化パターンの抽出」および「海水・海洋環境変動シミュレーションのための、大気境界条件を導出」については、CMIP6気候モデル群より11種の気候モデルを選定し、3つのSSPシナリオにおいて、今世紀半ばと今世紀末の2つの年代についての計6種類について、8つの気象要素の11モデル平均における温暖化差分量の計算を完了した。またそれぞれのシナリオ・年代において、モデル間のばらつきを考慮した4つのストーリーラインについても温暖化差分量の計算を行った。これらのデータをサブテーマ1に提供し、海水・海洋モデルの境界値として使用することで、オホーツク海の海水量の将来予測に関する詳細な情報が提供できるようになったことから、この点については、当初計画の目標は

達成することができた。

また、「環オホーツク地域の気候変動システムの解明」に関しては、オホーツク海の海氷の年々変動や総観規模変動に関する査読付き論文3本（成果番号10・11・13）と、北半球冬季気候の年々変動に関する査読付き論文2本（成果番号9・12）を発表し、その一部は新聞に取り上げられた。これらの成果は環オホーツク気候システムの解明に向けての基礎資料となり、これらの成果は当初目標を上回っており、結論としてサブテーマ2全体としては、当初の研究目標を上回る成果をあげたと判断する。

## II-3 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3 要旨]

サブテーマ3の目的は、冬季を含む海洋モニタリング網の構築および過去データの収集・解析による知床海域の長期変動の解明である。そのために、(1)海洋環境モニタリング網を(1-a)沿岸観測、(1-b)船舶観測、(1-c)気象庁等が公開している陸域・衛星観測から構築した。新たに開始した沿岸観測により、(1a-a)知床半島西側と東側での季節変動の違いや短期変動の激しさが明らかになり、(1a-b)急激な水温低下現象と(1a-c)羅臼深層水の顕著な日変動が発見された。次に、(2)過去の海洋観測データの収集・校正と解析を、当初計画していた(2-a)未公開データに加えて、(2-b)公開データについても実施した。その結果、(2-a)知床周辺の水温変動や(2-b)水塊の長期変動が明らかになった。知床沿岸表層水温ならびに宗谷暖流水や東サハリン海流水には昇温傾向が示唆された。これらは生態系に影響を与える可能性がある。さらに、(3)データのない季節・海域について、(3-a)船舶と(3-b)係留系による観測を実施した。その結果、(3-a)冬季の水塊変質や(3-b)海氷下の水塊の観測に成功するとともに、(3-a)根室海峡北部の季節変動が初めて明らかになった。これらのデータは知床海域の海洋環境の理解と将来の予測に寄与することが期待される。そして、(4)本研究で観測・収集したデータを集約し、サブテーマ1と地域社会に提供し、学界への提供基盤を整えた。今後のモニタリングでは、沿岸と沖合の統合を進めることが重要であり、季節変動や短期変動の理解を進めるためには複数の測定地点が必要だろう。

## 1. サブテーマ3 研究開発目的

データが極めて少ない冬季を含めた海氷・海洋モニタリング網を構築するとともに、過去の長期データを解析することで、気候変動に対する知床海域の海洋・海氷応答メカニズムを明らかにする。また、この知見を予測および変動シナリオの検証に用いる。

## 2. サブテーマ3 研究目標

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3 実施機関	北海道大学、知床財団、北海道立総合研究機構
サブテーマ3 目標	気候変動がもたらす海洋と海氷への影響を捉えるため、冬季を含む海洋環境モニタリング網を構築しデータ集約化を行う。加えて、未公開データの校正・解析により過去の長期変動を解明し、海氷融解直後の集中観測との組み合わせにより重点監視項目を選定することで、沿岸計測を中心とした効率的な長期モニタリング網を構築する。また、取得したデータをサブテーマ1に提供し、シミュレーションの精度評価と予測精度向上に活用する。

## 3. サブテーマ3 研究開発内容

本テーマの主目標である(1)冬季を含む海洋環境モニタリング網の構築を実施した。そして、(2)未公開データの収集・校正による過去の長期変動の解析、(3)データのない海域・季節における船舶観測と係留系観測の実施、ならびに(4)観測データを集約しサブテーマ1に提供するとともに、地域社会・学会に提供するための基盤を整えた。加えて、(2)の長期変動解析のため、計画にはなかった公開データについても収集・校正し解析に用いた。以下では、(1)～(4)について項目ごとに研究開発内容を記す。重点監視項目については、II-3-4. サブテーマ3 結果及び考察で記述する。

### (1) 冬季を含む海洋環境モニタリング網の構築

海洋環境モニタリング網は、(a) 沿岸観測、(b) 船舶観測、(c) 気象庁等が公開している陸域・衛星観測から構成される。以下、この順に述べる。

#### (1-a) 沿岸モニタリング

沿岸モニタリング網の図を再掲する（図3-1（図0-2））。モニタリング網拡充のため、本研究で新たに

- ・知床沿岸の5カ所（西側3カ所、東側2カ所：図の赤丸）
- ・羅臼深層水取水施設（図の緑四角）

に水温塩分計を設置した。

前者は斜里第一漁業協同組合と羅臼漁業協同組合および漁業者の協力により、斜里側（知床半島西側）は定置網の基部に設置、羅臼側（東側）は冬季もホタテ養殖ブイに設置していただくことで、冬季の海水下でも観測が可能となった。知床半島西側は、海水や東サハリン海流水が直接到達する所なので、接岸位置等の変動をモニターできる可能性を探るため、半島の付け根、中央付近、先端付近の3か所に設置した。知床半島東側では、海水流入がオホーツク海側（北側）からと太平洋側（南側）から生じるのでその判別を試みるため、羅臼の南北2か所に設置した。設置水深は10～40m程度の浅海域で、使用した水温塩分計はJFEアドバンテック社製INIFINITY ACTW-USBである。この機種は、藻やフジツボなど生物のセンサー部への付着を防ぐワイパー式で、少なくとも本研究の観測では生物付着の影響は見られていない。

後者は水深約350mの海底近くから取水している。もともと水温計が設置されていたが、水塊変動と短期変動を調べるため、高時間分解能の水温塩分計を設置した（最終的に時間間隔は10分に設定した）。使用した水温塩分計はJFEアドバンテック社製DEFI2-CTである。

加えて、本研究開始前から実施されていたモニタリング

- ・羅臼ウニ種苗センター（図の緑十字）
- ・紋別オホーツクタワー（図の緑三角）

の測定データ提供に関して、それぞれ羅臼漁業協同組合と紋別市（サブテーマ1と協同）から協力を得た。前者は当初計画になかったが、(2)の未公開データの収集・整理に伴いモニタリング網に追加できた。

以上のモニタリングに関する詳細は中村ほか（2024）に記載されている。

#### (1-b) 船舶観測

モニタリング網を構成する船舶観測として、

- ・砕氷巡視船「そうや」による氷海域観測（海上保安庁協力。サブテーマ1と4が主導）
- ・北海道立総合研究機構の定期船舶観測
- ・羅臼漁業協同組合の根室海峡北部の冬季観測

から協力を得た。1番目の砕氷船「そうや」による観測は海上保安庁の協力を得て北海道大学低温科学研究所が継続している。3番目は当初計画になかったが、(2)未公開データの収集・整理に伴いモニタリング網に追加できた。

#### (1-c) 陸域・衛星観測など

その他、陸域観測（風・気温・降水量など）ならびに衛星観測（海水分布・海面水温など）について

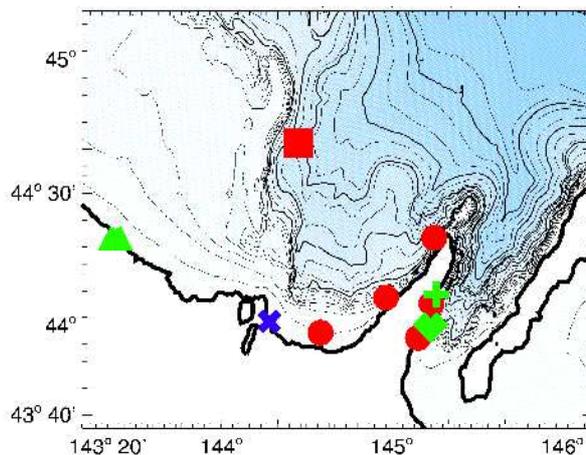


図3-1（図0-2）：モニタリング網。

- ：知床沿岸水温塩分計
- ＋：ウニ種苗センター
- ◆：羅臼深層水取水口
- ▲：オホーツクタワー
- ×：潮位
- ：係留系

は、気象庁などが公開する準リアルタイムデータを取得した。また、気象庁が観測・公開している稚内と網走の潮位データも取得した。

## (2) 過去の海洋観測データの収集・校正と解析

海洋観測データの収集から解析については、当初から計画していた(a)未公開データに加えて、(b)公開データについても実施した。以下、順に述べる。

### (2-a) 未公開データ（当初計画にあるデータ）

計画通りに以下の未公開データを校正・整理した。

- ・ 羅臼表層水（羅臼漁協ウニ種苗センター・旧採苗所）
- ・ 羅臼深層水取水口水温データ（羅臼町）
- ・ 限定公開されている紋別オホーツクタワー（紋別市）
- ・ 根室海峡北部の冬季水温塩分圧力（CTD）観測データ（羅臼漁業協同組合）

これらは現在もモニタリングが続いているので、(1)のモニタリング網に追加している。

羅臼表層水は栽培漁業のためのモニタリングとして、1968年から毎朝測定されている。そのデータを本研究で電子化した。なお、2001年から測定場所と測定水深が変更されたので、その補正も行った。羅臼深層水水温は2007年から測定と記録が続いている（モニタリング網構築では、塩分の測定を追加し、時間解像度を上げた）。紋別オホーツクタワーでは、水温塩分の測定が1996年から、機器故障・荒天・海氷に覆われたときを除き、ほぼ毎日行われている。なお、このデータは未公開ではないが、当初計画にあるので、こちらに分類している。以上についての詳細は中村ほか(2024)に記載されている。根室海峡北部の冬季CTD観測は漁業のための調査として1987年から実施されている。

### (2-b) 公開データ（当初計画に追加したデータ）

加えて、知床周辺海域の長期変動解析をより広域・長期間に伸ばすため、当初計画に追加して、

- ・ 限定公開されている北海道立総合研究機構の過去の定期船舶観測データ
- ・ 公開されている海洋観測データ・アーカイブ2つ
  - World Ocean Database: WOD (米国 National Centers for Environmental Information)
  - 日本海洋データセンター (JODC)

についても、収集・校正・QC (quality control) を行った。QCでは重複のチェックも行った。

以上(2-a)と(2-b)のデータを合わせると、水温と塩分が同時に測定された測点の分布は左下図、観測回数は右下図となった。本州沿岸に比べると少ないものの、北海道沿岸にはそれなりに密にデータがあり、海氷に覆われる1-3月を除けばそれなりの数のデータがある。

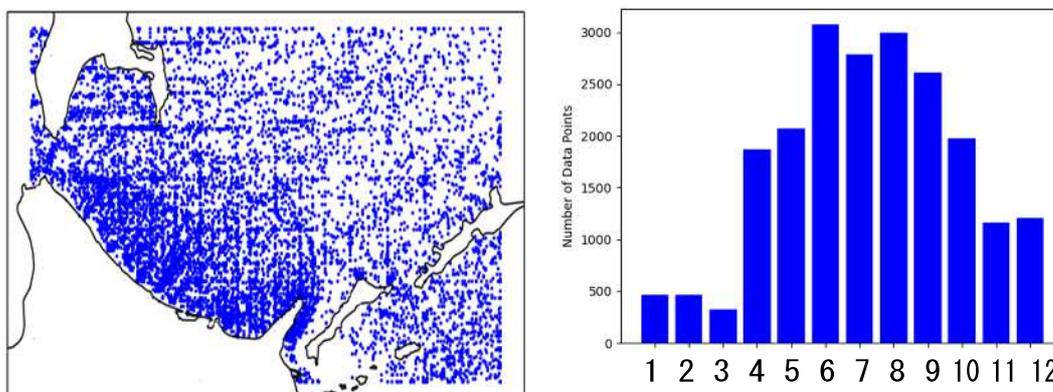


図3-2：収集した過去の海洋観測データ（水温塩分：校正・QC後）。（左）データの分布、（右）月別のデータ数。

### (3) データのない季節・海域の現場観測

データの無いまたは乏しい時期・海域について、(a)船舶による現場観測と、(b)係留系による観測を実施した。以下に順に記すが、内容と図は中村ほか(2024)に基づく。

#### (3-a) 船舶観測

本研究において船舶による現場観測を6回、本研究開始前の準備として2回、合計8回にわたりサブテーマ4と5と協同して実施した(ここではサブテーマ1と4が主導した砕氷船「そうや」による冬季観測は含めていない)。観測は、JAMSTEC(海洋研究開発機構)学術研究船「新青丸」と「白鳳丸」、北海道立総合研究機構釧路水産試験場試験調査船「北辰丸」、および北海道大学水産学部附属練習船「おしよる丸」にて行われた。以下に、船名・航海名称・航海時期および主導・協同したサブテーマを実施時期の順に列挙する。

- ・おしよる丸：C073Leg2：2019年6月：サブテーマ5主導、サブテーマ3と協同
- ・白鳳丸：KH-20-12：2020年12月：サブテーマ3主導、サブテーマ4、5と協同
- ・新青丸：KS-21-06：2021年4月：サブテーマ4主導、サブテーマ3、5と協同
- ・新青丸：KS-22-06：2022年4-5月：サブテーマ3主導、サブテーマ4、5と協同
- ・おしよる丸：C126：2022年6月：サブテーマ5主導、サブテーマ3と協同
- ・北辰丸：202210K：2022年9-10月：サブテーマ3
- ・新青丸：KS-23-15：2023年9月：サブテーマ4主導、サブテーマ5、3と協同
- ・北辰丸：202310K：2023年9-10月：サブテーマ3

以上の航海のうち、白鳳丸・新青丸・北辰丸の観測航海の測点は、知床周辺海域の複雑な水塊構造とその変動を捉えるために設けられた(図3-3上段)。中でも優先された測線は、次の5つである。

- ・ES-U; 最も北側45°N付近：測点1-11
- ・ES-M; 45°45' N付近：測点12-25
- ・HO-U; 紋別沖：測点25-31
- ・HO-D; ウトロ沖：測点45-53
- ・SL-D; 根室海峡北部：測点68-83

ES-UとES-Mは、北から来る東サハリン海流水を捉えるための測線で、それぞれ、上流側と中央の測線である。後述の係留系は、ES-M上に設置された。HO-UとHO-Dは、宗谷海峡から北海道沿岸を流れてくる宗谷暖流水を捉えるための測線で、それぞれ、陸棚を横切る上流側の測線と下流側の知床沖の測線である。HO-UはES-Mと繋がっている。SL-Dは、知床に沿った測線で、根室海峡北部(知床半島東側)の水深の大きい中央付近を縦断する測線である。

白鳳丸と新青丸の観測航海で実施できた測点を図3-3中下段に示す。係留系観測と合わせて東サハリン海流水を捉えるための2測線(ES-UとES-M)は全ての航海で実施できた。ただ、上の優先測線以外は荒天その他の理由でほとんど実施できなかった。北辰丸の観測航海で実施した測点を図3-4に示す。北辰丸航海では、北海道立総合研究機構釧路水産試験場の定期海洋観測に追加する形で、測線SL-Dにおいて観測を実施した。

おしよる丸観測航海は、海棲哺乳類・海鳥から動物・植物プランクトンといった高次栄養段階を含む生態系とその環境を調べるために実施された。そのため、測点が上記3船の観測航海と少し違うものの、知床周辺および係留系周辺でCTD観測が実施されている。

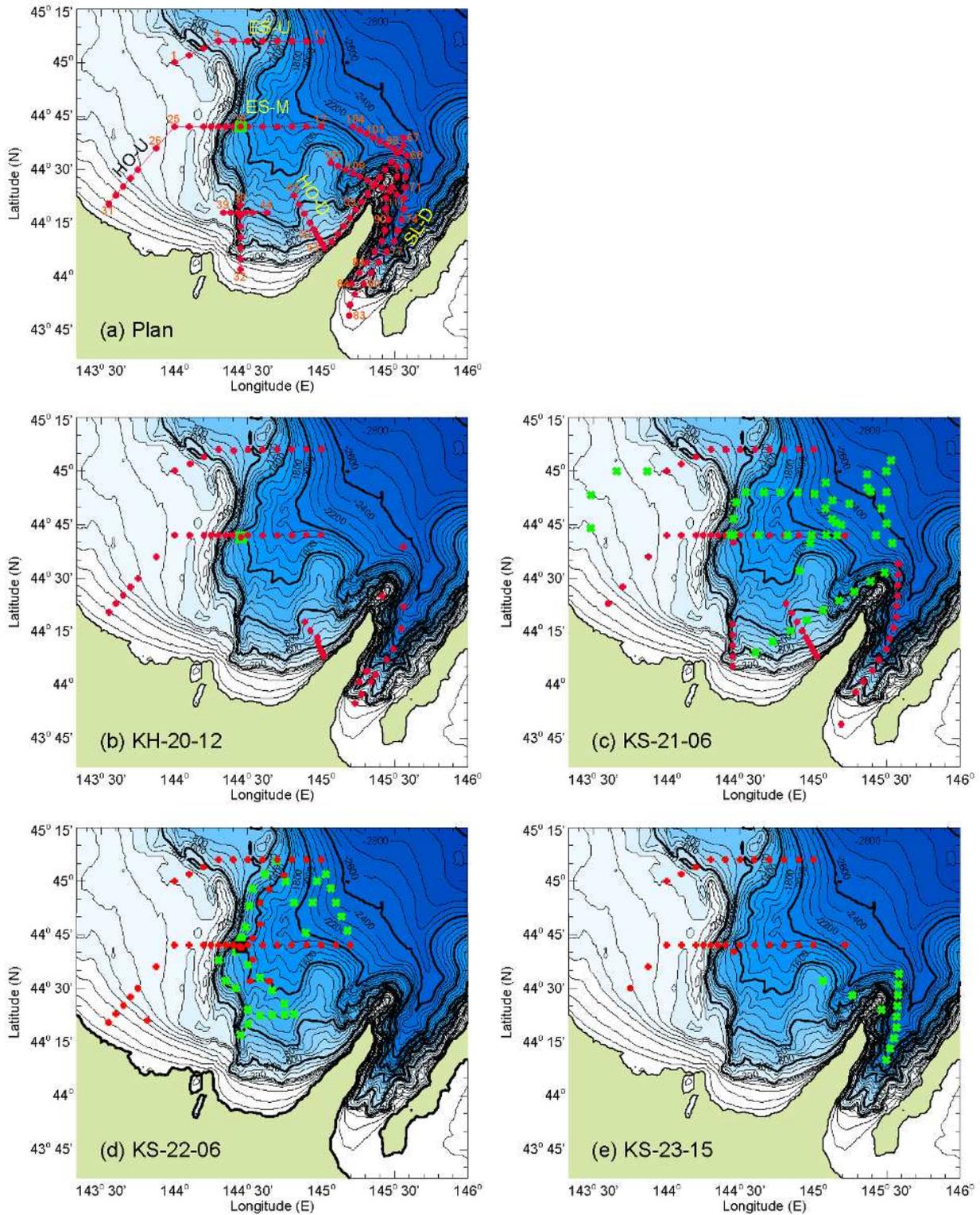


図3-3：白鳳丸と新青丸航海の測点。(a)最初の計画、(b)2020年白鳳丸KH-20-12航海、(c)2021年新青丸KS-21-06航海、(d)2022年新青丸KS-22-06航海、および (e)2023年新青丸KS-23-15航海。赤十字はCTD、緑×印はXCTD、緑四角は係留系。(a)の数字は測点番号、文字は測線名。背景は水深で、コンター間隔は200m以浅は25m、200m以深は100m。

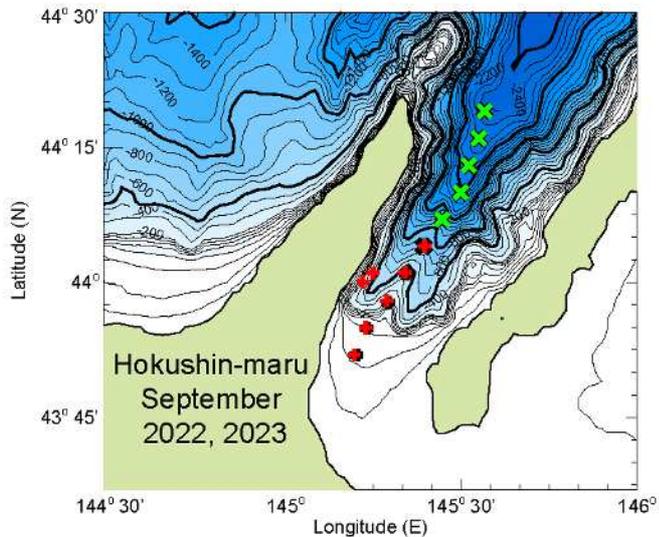


図3-4：北辰丸航海の測点。赤十字はCTD、緑×印はXCTD、黒×印は2022年のCTD測点（赤十字と重なっている）。背景は水深で、コンター間隔は200m以浅は25m、200m以深は100m。

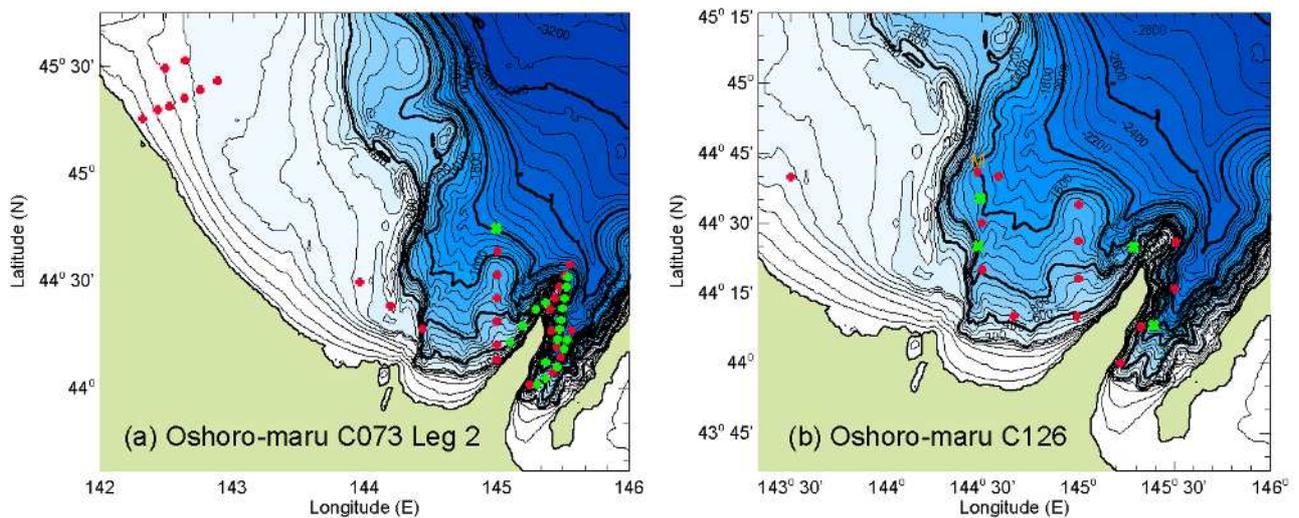


図3-5：おしよる丸航海の測点。(a) 2019年 C073 Leg2、(b) 2022年 C126、赤十字はCTD、緑×印はXCTD。(b)のMは係留系近傍の測点、背景は水深で、コンター間隔は200m以浅は25m、200m以深は100m。

### (3-b) 係留系観測

本研究において注目した冬季の東サハリン海流水の観測を行い、海氷との関連を探るために、海氷下の係留系観測を行った（協力：東京大学藤尾伸三准教授・柳本大吾助教、サブテーマ4と協同）。係留系の位置（図3-1）、水深1400m程度の陸棚斜面である。設置期間はトータル約2年9カ月で、

- ・ 第1期：2020年12月13日～2022年5月1日
- ・ 第2期：2022年 5月 9日～2023年9月2日

の2期間である。第1期と第2期に共通して設置したセンサーは、最上層（水深は、第1期は約66m、第2期は約37m）に水温塩分計、その少し下に上向きの流向流速計（ADCP）、水深およそ200mにCTDと流向流速計、水深およそ500mにセジメントトラップと流向流速計、そして海底付近に流向流速計である。第1期と第2期の間に回収・再設置した際にセンサーの設置水深が少しずれているが、海底が平坦でないこと、違いは系の全長の2%程度であることを考えると、より小さくするのは至難だろう。

(4) データの集約と提供

本研究の(1)から(3)で観測・収集したデータを集約し、サブテーマ1で必要とされたデータを提供した。さらに、地域社会に資するため、モニタリング結果の速報を斜里第一漁業協同組合と羅臼漁業協同組合にほぼ毎年提供するとともに、2024年3月には両方の漁業協同組合において説明会を開催した。また、学界に資するため、収集したデータをウェブサイトを通じて提供するためのプラットフォームを図3-6のように作成した。



図3-6：データ提供のためのプラットフォーム。

4. サブテーマ3 結果及び考察

(1) 冬季を含む海洋環境モニタリング網の構築

知床半島の東西沿岸において海氷に覆われる時期を含めた通年の水温塩分モニタリングを開始した。これにより、(a)知床半島沿岸の季節変動と短期変動を観測できた。加えて、時間的に高解像度でモニタリングしたことで、2つ予想外の発見があった。(b)急激な水温低下現象と(c)深層水の顕著な日変動である。以下、これら本研究で新たに開始した沿岸モニタリングの結果に焦点を当てて順に説明する。

(1a-a) 季節変動と短期変動

沿岸の水温塩分モニタリングの例として2022年の知床半島西側（知床岬の近く）と東側（モセカルベツ：半島中央より少し先端側）の水温と塩分の時系列グラフを図II-3-7に示す。

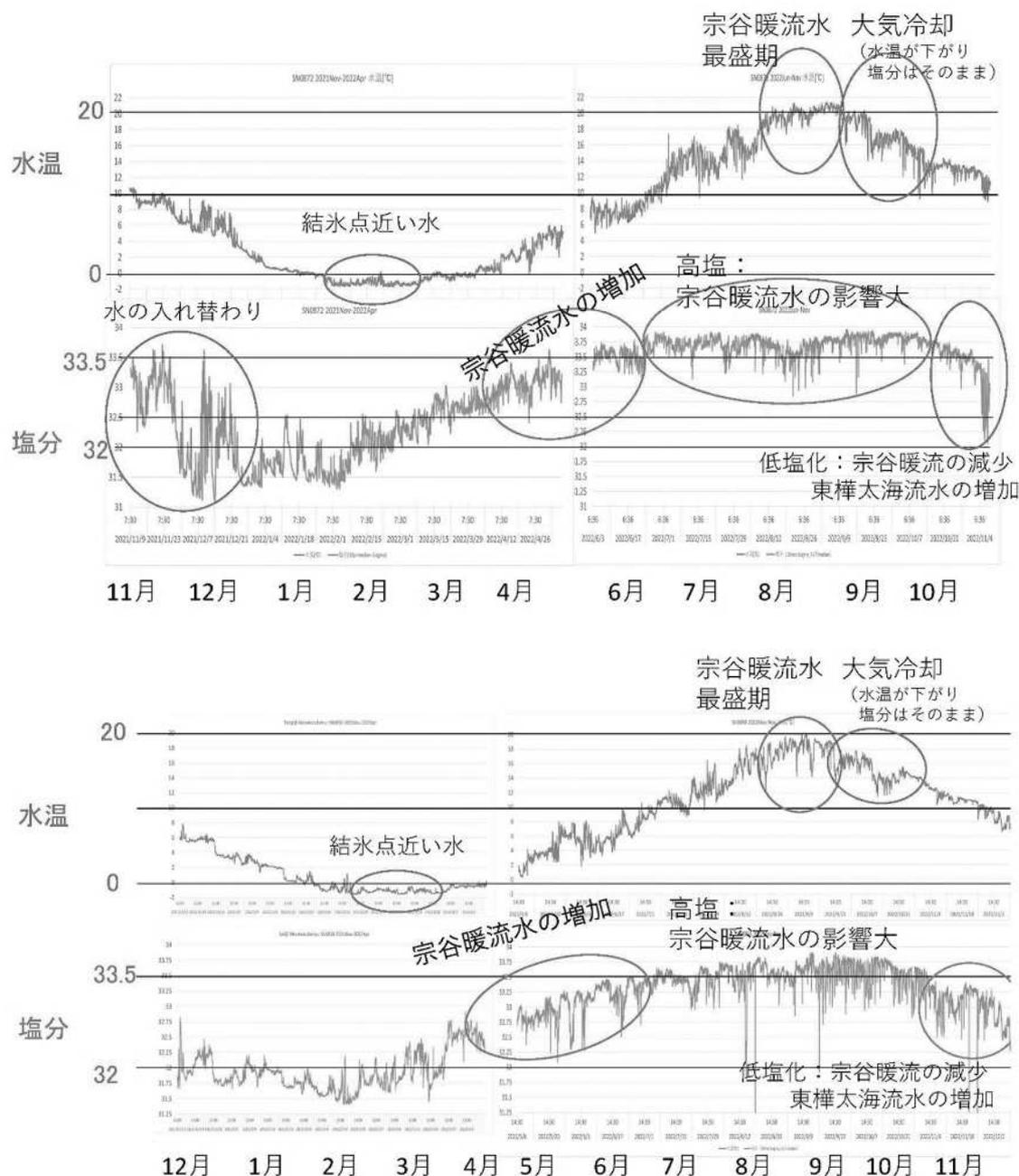


図3-7: 知床沿岸の水温塩分モニタリングの結果(2022年)。(上)知床半島西側(知床岬の近く)、(下)知床半島東側(モセカルベツ)。上下で開始時期と終了時期が異なることに注意。

知床の東側と西側の季節変動は大きくは似ている。水温は、冬季に結氷点（約 $-1.8^{\circ}\text{C}$ ）近くまで下がり、春季から初夏にかけて上昇し、晩夏に最高となり、秋季にはまた冷えていく。塩分も似た変動を示す。冬季に低塩低温の東サハリン海流水の流入により最小となり、春季に高塩高温の宗谷暖流水の流入に伴い増加して、夏季に最大となり、秋季には東サハリン海流水が流入し始めて下がっていく。水温の季節変動は大気と放射に伴う加熱冷却に伴うものもあるが、塩分の変動から分かるように宗谷暖流水と東サハリン海流水の入れ替わりによる寄与が大きい。

詳しく見ると、東側と西側では明瞭な違いがある。まず、宗谷暖流水や東サハリン海流水は先に知床半島西側に到達した後に根室海峡北部へ流入するため、水温と塩分の季節変動は、西側（斜里側）の方が早く始まる。次に、水塊が根室海峡に流入する際に変質を受けるため、東側（根室海峡側）の方が最高水温・最大塩分が若干低く、塩分の高い時期も東側の方が少し短い。ここでは示さないが、西側3か所同士そして東側2か所同士でも、それぞれ少し季節変動に違いがある。

加えて、今回の時間的に高解像度のモニタリングにより、短期変動が激しいことが明らかになった。潮汐による日変動、降水・雪解け後の河川水流入、数日から1か月程度の変動が、図II-3-7に見られる。こうした短期変動は、西側3か所同士そして東側2か所同士でも、明瞭に違いが見られた。

#### (1a-b) 急激な水温低下現象

時間的高解像度モニタリングにより、知床東岸において夏季に水温が数十分で $6^{\circ}\text{C}$ 程度下がるという、急激な水温低下現象を発見した。図3-8にその例を示す。

夏季、急激な水温低下が1か月に2～3回程度起きていた。中でも短期間で水温が低下した例を最下段に示す。水温が数十分で $15^{\circ}\text{C}$ から $9^{\circ}\text{C}$ まで下がったのち、6時間後にはほぼ元の水温に戻っている。その数時間前にソリトンに似た水温変動も見られる。塩分の変動も伴っているようだが、そこまで顕著ではない。

これら急激な水温低下現象が起きた日の潮位を見ると、ほぼ大潮の時期であった。上のソリトンと合わせて、潮汐が関与している可能性が高い。しかし、大潮時のいつ起きるか特定できないことから、潮汐だけが要因と思えない。風の影響など、今後の検討が必要である。

なお近年、夏季に養殖ホタテ稚貝の斃死が時折生じており、急激な水温低下はその一因になっている

可能性も疑われる。もしそうならばモニタリング網は夏季の水産業にも役立てられるかもしれない。

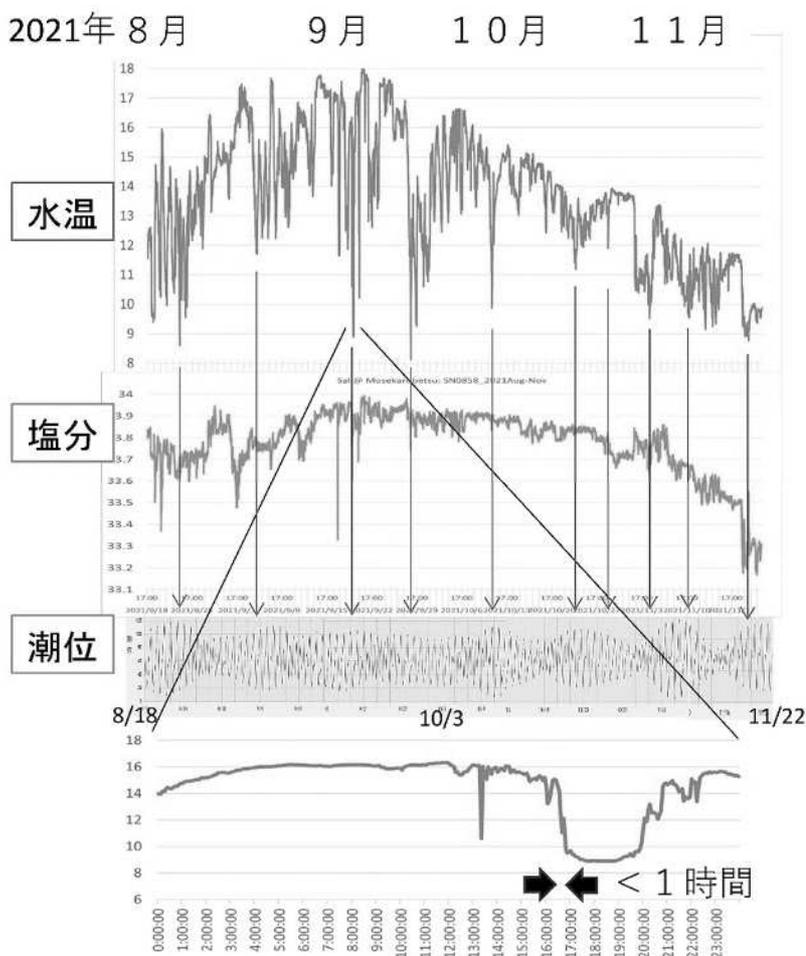


図3-8：急激な水温低下現象の例。2021年8月から11月の（最上段）水温、（2段目）塩分、（3段目）羅臼港の潮位（潮汐のみによる予測）。（最下段）急激な水温低下現象が起きた日の水温の例（2021年9月19日）

### (1a-c) 羅臼深層水の顕著な日変動

羅臼深層水取水口に設置した時間的高解像度の水温塩分計データから、深層水（およそ350m深から取水）に顕著な日変動が検出された。例を図3-9に示す。拡大図を見ると、水温が上がると塩分が下がり、その周期が約1日である。塩分も変動しているので、取水中の加熱冷却の結果ではないと分かる。

この日変動の主な原因は内部潮汐と考えられる。知床周辺の潮汐は一日周期の成分が卓越している。また、この時期水深350mでは深いほど低温高塩となる（季節によって変わる）。内部潮汐により海水が上下に振動すると、持ち上がった時に下層の低温高塩の海水が取水され、下がった時に上層の高温低塩の海水が取水され、グラフのような変動となる。水温塩分の鉛直プロファイルから見積もると、内部潮汐の波高は50m～100m程度となった。これほどの大振幅の内部潮汐は、鉛直混合を介して物質循環ひいては生態系にも影響している可能性が高い。

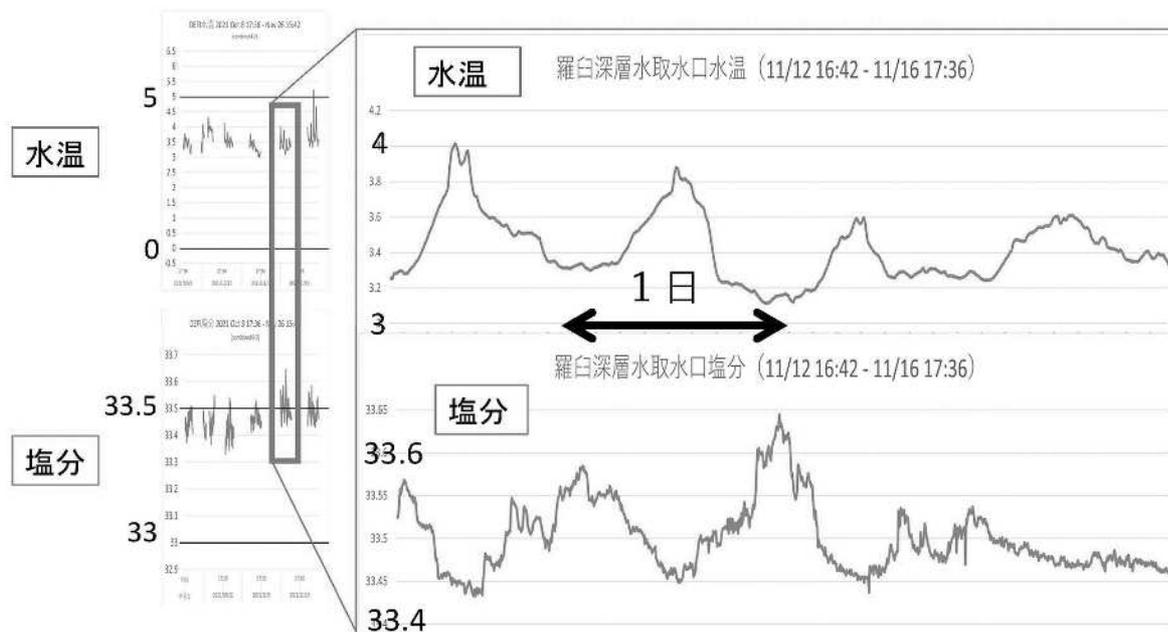


図3-9：羅臼深層水の日変動の例。（左）2021年10月8日から11月26日の水温と塩分、（右）11月12日から16日の拡大図。

## (2) 過去の海洋観測データの収集・校正と解析

知床周辺の過去の変動を明らかにするため、未公開の長期観測データの収集・校正と解析、および公開されたデータを含めた水塊の長期変動の収集・QC・解析を行った。本研究で収集・校正・解析したデータは、世界遺産である知床海域の変動を理解するうえで貴重なデータとなるだろう。ここでは、(a)本研究で収集した未公開データのうち最も長期にわたる羅臼表層水の水温、(b)公開データを含めた知床周辺の主要水塊の長期水温変動に注目して記す。

### (2-a) 羅臼沿岸表層水温

羅臼で1968年から測定されている表層海水温を解析した。例として、年平均水温のグラフを図3-10に再掲する。羅臼では2021年の時点で、年平均表層水温がおよそ50年に1℃のペースで上昇していることが判明した。夏季または4月～10月に限ると昇温のペースは倍近くになる。さらに、本研究実施中の2022年、2023年には、これまでより激しいペースで昇温し、過去最高水温を2年連続で更新した。こうして、既に他海域でも昇温傾向が示されているが、知床周辺も同様に昇温傾向にあることが確認された。水温は魚類を含め生態系に大きな影響を持つことから、今後の変動が懸念される。

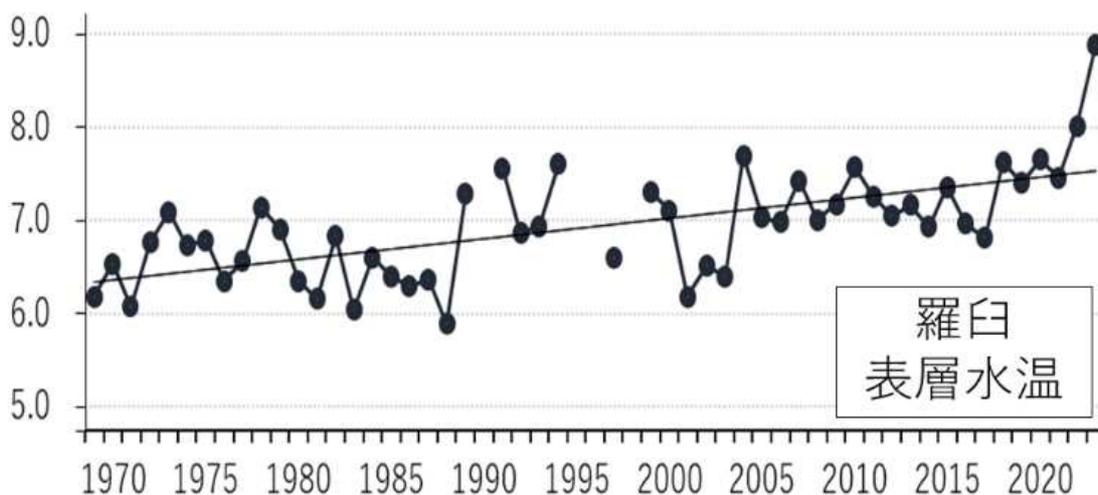


図3-10（図0-6）：羅臼表層年平均水温（℃）の長期変動（1969-2023）。

### (2-b) 水塊の長期変動

公開データと未公開データを合わせて水塊別に気候値を作成し、そこからの偏差を用いて長期変動を解析した。主要な水塊（宗谷暖流水、宗谷暖流前駆水、オホーツク海表層水、東サハリン海流水、中冷水、オホーツク海中層水）について解析したが、そのうち特に表層で主要な水塊である宗谷暖流水と東サハリン海流水について、図3-11に示す。

どちらの水塊も変動が激しい。宗谷暖流水は、水産試験場の定期観測が始まった1990年頃以降に比べて、1990年以前は変動が激しい。東サハリン海流水も大きな偏差は1980年以前に多い。これらには、観測頻度の影響が出ている可能性もある。それでも、両水塊ともに昇温傾向にあるのは、おそらく確かだろう。沿岸における経年変動や海氷との関係は結果及び考察の最後にまとめて述べる。

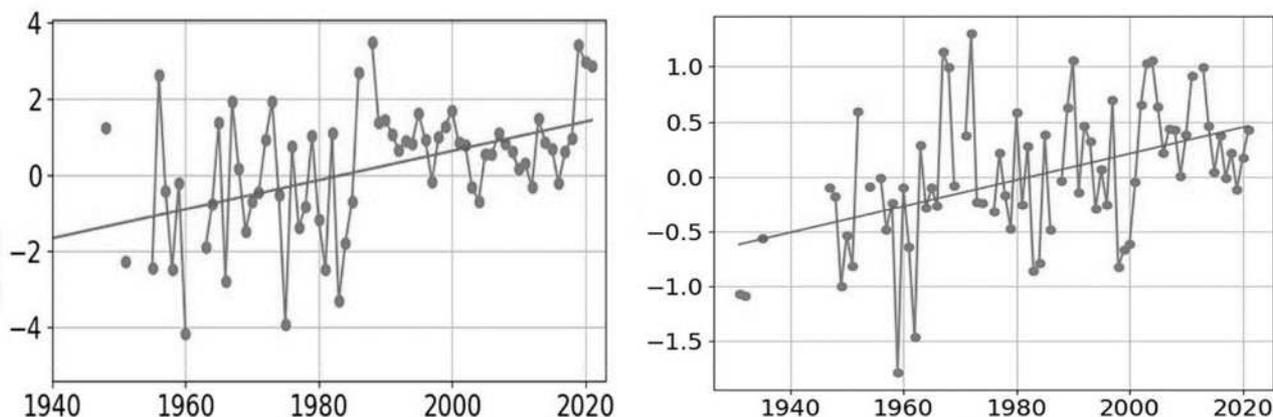


図3-11：オホーツク海北海道周辺の水塊の水温変動。（左）宗谷暖流水、（右）東サハリン海流水。値は気候学的季節変動からの偏差（℃）。

### (3) データのない季節・海域の現場観測

データの無いまたは乏しい時期・海域について、(a)船舶と(b)係留系による観測を実施したことで、冬季の水塊変質、根室海峡北部の季節変動、海氷下の東サハリン海流と水塊の観測などに成功した。以下、順に記す。

## (3-a) 船舶観測

4月、5月、6月、9月、12月に船舶観測を実施したことにより、冬季以外の季節をカバーできた。中でも、海氷融解直後の4月5月は、植物プランクトン大増殖（ブルーム）が起こるため生態系にとって重要な時期だが、観測がほとんどなかった。さらに、海氷融解直後（4月5月）と海氷到来直前（12月）の観測を比較することで、冬季の水塊変質や栄養物質供給を調べることができる。植物プランクトンや物質循環についてはサブテーマ4に任せ、ここでは冬季の水塊変質について紹介する。

図3-12に、12月と4月における水温鉛直断面を示す。場所は、係留系を設置した東西測線ES-Mである（図3-3a）。12月の観測（図左）では、表層100mないし200mまで4°C近い暖かい水塊が分布し、その下に水温1°C以下の中冷水（後述の冬季海面混合層の名残）が見られる。前者の暖水は宗谷暖流水の影響である。ただし、表層数十mは夏季の季節躍層の影響もある。次の4月の観測（図右）では、-1°C以下の冷たい水塊が水深200mまで達し、0°C以下の冷水が400m近くまで達している。これらは、冬季混合層の水で、冬季に海面で冷やされ高密度になった海水が、対流となり沈み込み、その下の海水と混ざることによって形成される。この過程は、海面の物質を下へ下層の物質を海面近くの有光層へと運ぶため、物質循環にも重要である。400mに達する冬季混合層はこれまでオホーツク海では観測例がなく、オホーツク海の水塊形成・物質循環の理解の向上につながる貴重な観測と言えるだろう。

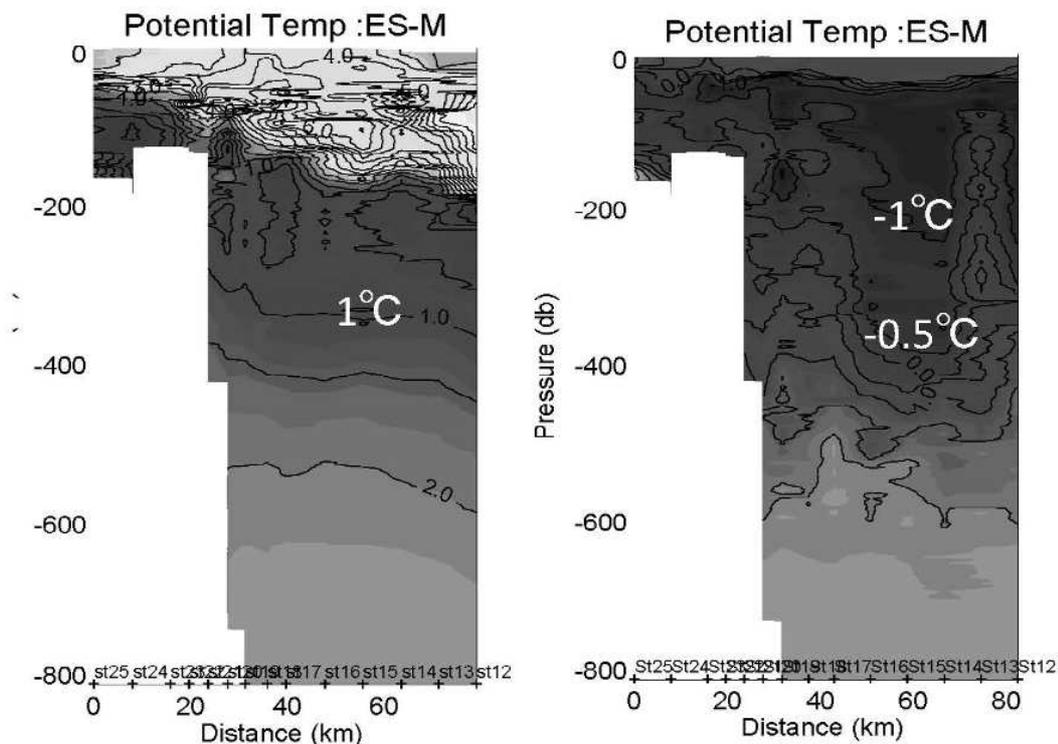


図3-12：水温の鉛直断面に見られる冬季の水塊変質。（左）2020年12月、（右）2021年4月の係留系を設置した東西測線ES-M上の水温鉛直断面。縦軸は圧力で1dbarは約1m。

さらに、根室海峡北部は、羅臼漁業協同組合の冬季観測および採択前年の観測と合わせて、季節変動を初めて明らかにできた。実は根室海峡北部は、世界遺産海域の半分を占めるにもかかわらず、研究者レベルでは海面付近を除き、季節変動すら分かっていなかった。その点でも本研究は、世界遺産海域の解明に大きく資することができた。

## (3-b) 係留系観測

海氷下の東サハリン海流と水塊の係留系観測に成功した。係留系最上部で測定された水温塩分の時系

列グラフを図3-13に示す。グラフを描くにあたり、流れが強い時は系が傾きセンサーが深く沈んでしまうので、センサーの水深変化が第1期は20m以下、第2期は5m以下の時のデータのみ抽出した。

冬季の水温は海氷分布をよく反映している。第1期（図上）と第2期（図下）ともに、おおむね海氷到来に伴い-1℃を下回り、海氷が無くなる頃に-1℃を上回り始めていた。しかし、塩分は海氷の有無に伴う変動より、到来する水塊に伴う変動の方が大きい。春季から秋季の変動は、知床沿岸と少し異なる。係留系の設置場所が水深1400m程度の陸棚斜面であることから、千島海盆水の影響が特に夏季に大きく、宗谷暖流水の流入が間欠的であるためと考えられる。また、第1期と第2期でセンサーの設置水深が約30m違うので直接比較はできないが、第1期の1回目と2回目の冬季、第2期の1回目と2回目の5-8月を比べても、経年変動が大きいことがうかがえる。

このように、船舶観測と合わせて、冬季の水塊変質および顕著な経年変動が海水面積だけでなくその直下の冬季混合層にもあることが観測された。これらのデータは、サブテーマ1および今後の海氷の変動機構の解明および予測向上に資すると期待される。

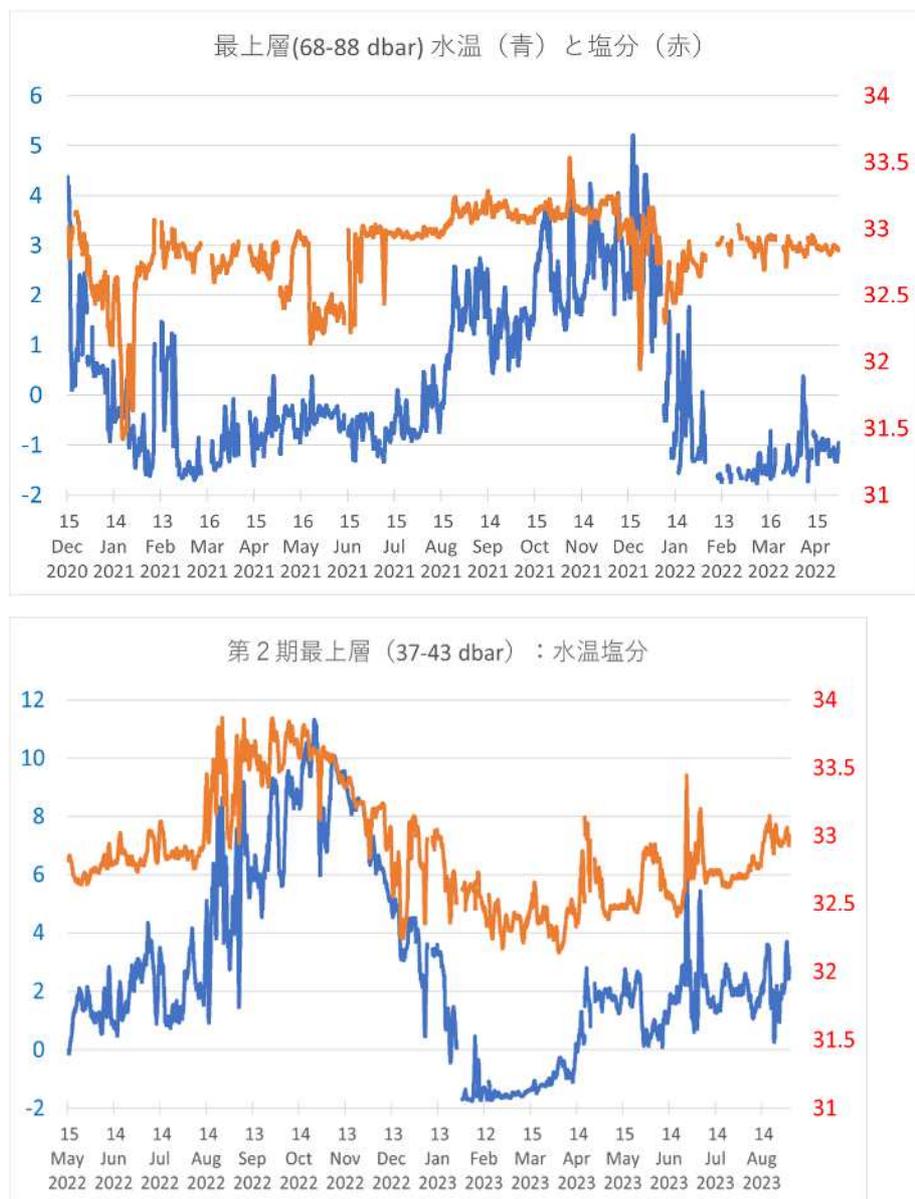


図3-13：係留系最上層の水温（赤）と塩分（青）。（上）第1期、（下）第2期。縦軸の値は、水温が左側、塩分が右側に記してある。

## 重点監視項目について

最後に、重点監視項目について検討するため、(a)2022年から2023年について沿岸のモニタリング（知床沿岸と紋別オホーツクタワー）と係留系のデータ、および海水分布の比較、(b)経年変動について、沿岸の長期データ（羅臼表層水と紋別オホーツクタワー）と水塊水温変動と海水の比較を行った。

(a)2022-2023年のデータを比較すると、上述のように、沿岸と係留系の水温塩分変動はあまり似ていない。言い換えると、千島海盆と沿岸は少し異なる変動をしているようである。各場所の冬季水温は、直上直近の海水の有無と関連がありそうだが、沖合や広域の海水分布・量との関連についてはこの期間のデータからは結論できなかった。

(b)経年変動を長期データ間で比較すると、年平均水温・塩分は羅臼表層水と紋別オホーツクタワー（水深8m）で似た経年変動をしており、オホーツク海沿岸から知床半島沿岸にかけて、大きな経年変動は共通している可能性が示唆された。ただし、塩分のトレンドは紋別と羅臼で少し異なっており、羅臼は根室海峡中央部以南の影響も受けるからかもしれない。水温について沿岸2か所と水塊の変動を比較すると、沿岸の夏季は宗谷暖流水と沿岸の12月は東サハリン海流水と経年変動が似ていた。一方で、オホーツク海表層水や中冷水の水温変動は沿岸水温の変動とあまり似ておらず、千島海盆の影響を沿岸では捉えられないなどの理由が考えられる。それでも、水塊の変動性評価と有意検定などは今後の課題として残っているものの、河川水流出など沿岸特有の変動があるにもかかわらず、沿岸モニタリングで沿岸にやってくる水塊（宗谷暖流水と東サハリン海流水）の経年変動をモニターできる可能性が示唆された。これらの水塊は、知床半島の先端から千島海盆そして太平洋へ流れていくことから、そうした下流域への影響についても沿岸モニタリングで評価できる可能性がある。

以上を踏まえると、沿岸における水温塩分モニタリングは宗谷暖流水と東サハリン海流水のモニタリングに有効である。一方、沖合とくに千島海盆域のモニタリングには衛星観測（海水密接度や海面水温）が有効であり、沿岸モニタリングのみから推測するのは現段階では難しそうである。加えて、(1-a)で記した知床半島東西の違いや短期変動を考慮すると、季節変動以上の時間スケールをモニターするなら東岸と西岸に1点ずつ、短期変動もモニターするならそれぞれに複数か所、測点を維持することが望ましい。

## 5. サブテーマ3 研究目標の達成状況

サブテーマ3の研究目標は、計画書の研究目標および研究計画を合わせると、次の4つに大きく分けられる。(1) 冬季を含む海洋環境モニタリング網の構築、(2) 未公開データの校正と解析による過去の長期変動の解明、(3) 海水融解直後を含むデータの無い海域・時期の船舶・係留系観測、そして(4) データ集約化と取得したデータのサブテーマ1および地域社会や学界への提供である。以下、これらの項目ごとに達成状況を記し、最後にまとめる。

### (1) 冬季を含む海洋環境モニタリング網の構築

研究開発内容II-3-3-1に詳述したように、新たに始めた知床沿岸の水温塩分モニタリング、既存の沿岸モニタリング、定期船舶観測、陸域・衛星観測のデータ取得からなるモニタリング網を構築した。

### (2) 未公開データの校正・解析による過去の長期変動の解明

研究開発内容II-3-3-2ならびに研究結果及び考察II-3-4-2に詳述したように、未公開データから知床沿岸の過去の長期変動を明らかにした。さらに、公開データも加えて、水塊の長期変動を明らかにした。

### (3) 海水融解直後を含むデータの無い海域・時期の船舶・係留系観測

研究開発内容II-3-3-3に詳述したように、本研究期間中に船舶による現場観測を6回実施し、約2年9カ月にわたる係留系観測を実施した。

重点監視項目について、(1)から(3)の結果をもとに研究結果及び考察II-3-4の最後に記したように検

討した。

(4) データ集約化と取得したデータのサブテーマ1および地域社会や学界への提供

研究開発内容II-3-3-4に記したように、データを集約化し、サブテーマ1と地域社会（本研究期間中では漁業協同組合）へ提供した。学界へは計画書通り終了後に実施できるよう準備を終えた。

このように、目標は全て達成し、さらに計画書になかった「公開データの収集・校正・解析」を行ったことから、目標を上回る成果を上げたと判断する。

## II-4 サブテーマ4 「海氷域の物質変動と低次生産」

### [サブテーマ4 要旨]

サブテーマ4では、海氷域の物質変動と低次生産に関する研究を進めた。冬季の海氷域の観測の難しさから、全季節を通じた栄養物質濃度の季節変動に関する情報が不足していた。本研究では南部オホーツク海の船舶を利用したモニタリング観測を実施した。その結果、冬季も含めた栄養塩濃度変動や、海氷融解が鉄分供給に与えるインパクト、海氷に含まれるアイスアルジーのシード効果が明らかになり、南部オホーツク海で春季ブルームを引き起こし高い生物生産を生み出す仕組みの理解について先導的な知見が得られた。また、海色衛星リモートセンシングの結果から、近年、南部オホーツク知床周辺海域の植物プランクトンブルームの時期がこれまでより早く、またその規模も大きくなっていることが初めて明らかになった。この植物プランクトンブルームの変化は冬季から春季の海氷動態等の環境変化との関係が示唆された。

### 1. サブテーマ4 研究開発目的

知床海域を対象とした、冬季から海氷融解期も含めて季節を通じた時系列モニタリング観測網を構築することにより、栄養物質環境の季節変動と微細藻類（アイスアルジーと海水中の植物プランクトン）動態の関係を解明し、最終的に海氷および海氷融解が物質循環と低次生産に与える影響を定量的に明らかにする。

### 2. サブテーマ4 研究目標

サブテーマ4	「海氷域の物質変動と低次生産」
サブテーマ4 実施機関	北海道大学
サブテーマ4 目標	知床海域を対象とした、冬季から海氷融解期も含めて季節を通じた時系列モニタリング観測網を構築することにより、栄養物質環境の季節変動と微細藻類（アイスアルジーと海水中の植物プランクトン）動態の関係を解明し、最終的に海氷および海氷融解が物質循環と低次生産に与える影響を定量的に明らかにする。

### 3. サブテーマ4 研究開発内容

オホーツク海は北太平洋北西部に位置する縁辺海であり、千島列島により西部北太平洋と隔てられている。オホーツク海と西部北太平洋の海水はブッソル海峡やクルーゼンシュテルン海峡を介して交換されており、北太平洋中層水の起源はオホーツク海中層水であることが明らかとなっている (Yasuda, 1997)。オホーツク海中層水は高密度陸棚水 (Dense shelf water; DSW) に由来し、オホーツク海の北西陸棚域のポリニヤで海水が生成される際に排出されるブラインによって密度の高い (最大27.05σ<sub>θ</sub>) DSWが形成される。DSWは陸棚堆積物由来の大量の粒子の輸送に寄与しており (Nakatsuka et al., 2006)、高いFe濃度が観測されている (Nishioka et al., 2007)。DSWに起因する高濃度のFeはオホーツク海中層水により北太平洋中層水に輸送され、海峡における乱流混合や冬季鉛直混合が中層水から表層水へのFe供給プロセスに重要な役割を果たすと同時に基礎生産を支える可能性が示されている (Nishioka et al., 2020; Nishioka et al., 2007; Yamashita et al., 2020)。

オホーツク海が直接的に影響を与えるのは中層水だけではなく、北海道南東部沿岸を流れる沿岸親潮水が知られている。沿岸親潮水は親潮水にオホーツク海起源の東サハリン海流や海氷融解水などが混合し、低温・低塩分に変質した水であると考えられている (Kuroda et al., 2019)。オホーツク海起源の海水の影響を受けた沿岸親潮水は周囲の水塊より高いFe濃度を持ち (Nishioka et al., 2011)、主にFe制限である親潮水と混合し広がるのと同時に、春季植物プランクトンブルームも広がりを見せることが衛

星データから確認されている。これらの先行研究は親潮水域の基礎生産がオホーツク海起源の水により支えられている可能性を示唆する。

本研究の調査域である南部オホーツク海は北半球における季節海氷域の南限である。冬季にはその海表面の50~90%が海氷に覆われ、南部オホーツク海の北海道沿岸域には毎年海氷が到達している。南部オホーツク海では春季の海氷融解時期に植物プランクトンの大規模な春季ブルームが起こることが知られている (Mustapha and Saitoh, 2008; Sorokin and Sorokin, 1999)。このような大規模な春季ブルームの発生要因としては、光環境の向上や海水温の上昇と淡水の流入による水柱の成層化などが重要であることは指摘されているが、海氷の融解が春季ブルームにもたらす生物地球化学的な作用は理解が進んでいない。先行研究では衛星観測に基づき海氷の生成・融解プロセスを考慮した熱塩フラックスが算出され、春季ブルームの空間分布が海氷の融解エリアとおおよそ一致することが示された (Nihashi et al., 2012)。Kishi et al. (2021) による研究では酸素センサー搭載型プロファイリングフロートにより春季ブルーム時の各種データが捉えられた。春季ブルーム期間中の溶存酸素濃度の増加率から生物生産の指標として純群集生産量 (Net Community Production: NCP) を算出しており、強い春季ブルームに相当する高いNCPが海氷融解エリアで観測された。この研究では、水柱の成層強化による光環境の向上の他に、海氷の融解により供給される微量栄養素であるFeが顕著な春季ブルームを引き起こす可能性が示唆されている。また、海氷に含まれるFeは岩石起源の鉱物粒子に由来し、海氷中のFe濃度はばらつきが大きいものの海氷下の表層水中のFe濃度より数桁濃度が高いことが明らかとなっている (Kanna et al., 2014)。南部オホーツク海ではKanna et al. (2018) により海氷の無い11月と海氷に覆われる2月の表層から深度1000 mまでの水温や塩分、Fe濃度、主要栄養塩濃度などの鉛直プロファイルが比較されている。11月から2月にかけて表層混合層が厚くなり、Fe濃度の増加が観測されている。

これらの先行研究では海氷と春季ブルームの関連性から海氷によるFe供給の可能性が示唆され、秋季から冬季にかけてのFeの供給過程が明らかとなっているが、海氷後退直後の観測実施例はなく、春季ブルーム時の海水中のFe濃度や海氷融解水によるFe供給インパクトは明らかとなっていない。また、海氷に含まれるアイスアルジーと大規模に起こる春季ブルームとの関係など、春季ブルームを生み出す生物学的要因も明らかになっていない。本サブテーマ4の研究では、南部オホーツク海において海氷後退直後のFe濃度を含む船舶観測をベースに次の(1)から(4)の研究内容を実施した。その結果を基に、春季ブルーム時のFeや主要栄養塩の濃度分布を含めた海洋内部の生物化学的環境と、海氷融解によるFeや主要栄養塩の供給インパクトを評価し、南部オホーツク海が大規模な春季ブルームを生み出す仕組みを明らかにすることを目指した。

(1) 南部オホーツク海域を対象とし、冬季から海氷融解期も含めて水塊構造と栄養物質環境の季節変動や、微細藻類 (アイスアルジーと海水中の植物プランクトン) 動態の関係を解明するために、季節を通じた時系列モニタリング観測網を構築した。具体的には、2021年4月の新青丸 (JAMSTEC/東京大学大気海洋研究所) KS-21-6次研究航海、2022年2月の海上保安庁巡視船そうや航海、2022年4~5月の新青丸KS-22-6次航海、2023年2月の海上保安庁巡視船そうや航海、および2023年9月の新青丸KS-23-15次航海を実施した。これらの観測航海において、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とらえるためにCTD—CMS観測を実施し、表層から海底直上まで (2月層や航海のみ表層5 m、15mのみ) の水温、塩分、密度データ、主要栄養塩濃度 (硝酸塩、アンモニア、リン酸塩、ケイ酸) や鉄濃度、クロロフィル *a* (Chl-*a*) 濃度、溶存酸素濃度、水酸素同位体比 ( $\delta^{18}O$ ) 測定用の海水サンプルを取得した。また、表層 (水深0~5 m深) からは、環境データ (水温、塩分、栄養塩濃度、光量等) と共に、植物プランクトン群集の現存量、組成、生産力を評価するための試料を採取した。

(2) 海水の融解が表層の鉄や栄養塩など栄養物質供給に与えるインパクトを定量的に評価するために、新青丸KS-21-6次航海 (JAMSTEC) を利用して南部オホーツク海の海水融解水に関わるデータ取得を実施した。2021年に海水は南部オホーツク海に到達していることが海水密接度を示す衛星画像から確認され、観測は同年の海水後退直後に行った。観測は北海道沿岸の陸棚上からクリル海盆にかけての東西に走る2本の観測線上 (ES-U, ES-M) と海岸線から垂直に引かれたHO-U の 29 測点においてCTD (Conductivity-Temperature-Depth) センサーにより塩分・水温の鉛直プロファイルを取得した。また、観測線 (ES-U, ES-M, HO-U) 上の17測点12層でCTD-CMS (Conductivity-Temperature-Depth/Carousel Multi-sampling System) によりクリーン採水を行った (Figure 1)。クリーン採水には主にベクトラン製アーマードケーブルを用いたが、St. 12, 14, 16, 18, 20, 23ではビニールテープでコーティングした鋼線ケーブルを用いた。採水器にはテフロンコート製の酸洗浄済みNiskin-X採水器 (12 L) を用いた。全Fe濃度 [T-Fe] 測定用サンプルは未ろ過の海水をテフロン採水口から酸洗浄済みの125 mL 低密度ポリエチレンボトル (Nalgene, Thermo Fisher Scientific Inc.) に採水した。溶存態Fe濃度 [D-Fe] 分析用海水サンプルは、酸洗浄済みの孔径0.2  $\mu\text{m}$  AcroPak 200 Capsule filterをシリコンチューブで採水口に取り付けろ過し、酸洗浄済み125 mL 低密度ポリエチレンボトル (Nalgene, Thermo Fisher Scientific Inc.) に採水した。クロロフィルa (Chl. a) は100 mLポリプロピレン製広口瓶 (アイボーイ, AS ONE)、主要栄養塩 ( $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) は10 mLのスπιツ管 (11-D, SANPLATEC) 2本、水の  $\delta^{18}\text{O}$  分析用海水サンプルは37.5 mLガラス製規格瓶 (広口) (透明NO. 4, AS ONE) に、それぞれ甲板上でNiskin-X採水器から直接採水し、主要栄養塩は採水後速やかに冷凍保存した。また、溶存酸素 (DO) はWOCE (World Ocean Circulation Experiment) タイプのガラス瓶 (紀本電子) に、Niskin-X採水器から採水用シリコンチューブを用いて採水した。観測期間中には曳航体による海表面連続クリーン採水を3度実施し、深度1.5~3 mの深度から合計40地点で採水を行った。この採水は甲板からブームを張り出し、曳航体を船体から離れた状態で航行し、酸洗浄済みのテフロンベローズポンプ (PFD1 210F, Asti) と内装テフロン外装PVCマルチパーパスホース (内径12mm, 外径18mm, 12×1B, AS ONE) を介して海水を船上に汲み上げた。[T-Fe] 測定用海水サンプル、[D-Fe] 測定用海水サンプルを船内のクリーンブース内で酸洗浄済み125 mL 低密度ポリエチレンボトル (Nalgene, Thermo Fisher Scientific Inc.) にそれぞれ採水した。[D-Fe] 測定用海水サンプルのろ過には酸洗浄済みの孔径0.2  $\mu\text{m}$  AcroPak 200 Capsule filterを用いた。また、クリーンブース内で未ろ過の海水をクロロフィルa (Chl. a)、主要栄養塩、 $\delta^{18}\text{O}$  分析用海水サンプル用として、それぞれ100 mLポリプロピレン製広口瓶 (アイボーイ, AS ONE)、10 mLのスπιツ管 (11-D, SANPLATEC)、37.5 mLガラス製規格瓶 (広口) (透明NO. 4, AS ONE) に採水した。

採水した [T-Fe]、[D-Fe] 濃度分析用サンプルには、20 %超高純度塩酸 (TAMAPURE AA-10, 多摩化学工業) を500  $\mu\text{L}$  添加、pH1.8以下に調整し分析時まで保管した。[D-Fe] と [T-Fe] は、微量鉄分析装置 (EN-701, 紀本電子工業) によりキレート樹脂カラム濃縮化学発光検出法 (Obata et al., 1997; Obata et al., 1993) で測定した。サンプルは分析直前に10 Mギ酸 - 2.4 Mアンモニウム緩衝液と高純度アンモニア水 (TAMAPURE AA-10, 多摩化学工業) でpH3.2に調整した。この分析における定量下限、検出限界は、キレート樹脂カラムを3回通過させた理論上測定可能な鉄を排除した海水 (RC0) を測定して求めた。毎回の分析で測定したRC0の測定値 ( $n=44$ ) より、定量下限  $3\sigma=0.03$  と算出された。サンプルの測定時に標準物質としてGEOTRACESで採水された標準海水 (SAFe D1-85)、NASS-6 (National Research Council

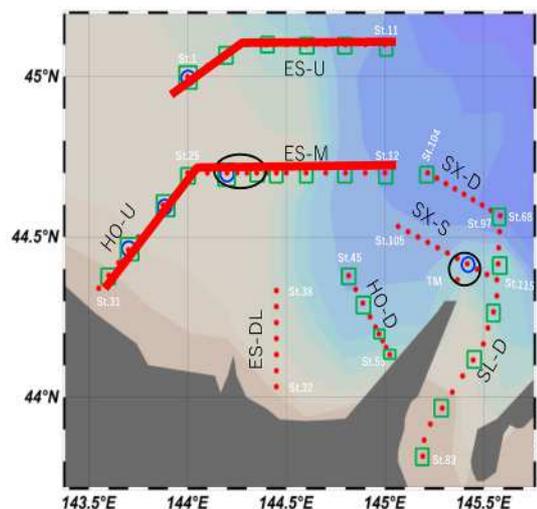


図4-1 (図0-7) . 春季南部オホーツク海の観測ライン、北ライン (上赤線)、南ライン (下赤線)

Canada) を測定した。標準海水Geotraces SAFe D1の分析結果は $0.68 \pm 0.03$  nM (濃縮時間60 s, n=4)、 $0.70 \pm 0.04$  nM (濃縮時間120 s, n=8) であり、公開されている保証値 $0.67 \pm 0.04$  nMと整合的であった。NASS-6の測定値は $6.96 \pm 0.07$  nM (n=15)、保証値は $8.86 \pm 0.82$  nMであった(高濃度サンプルを過小評価している可能性がある)。

凍結保存した主要栄養塩のサンプルは、分析時に4°Cで融解し常温に戻したのち、オートアナライザー (QuAAtro2-HR, BL-Tec) で $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$  (硝酸塩・亜硝酸塩)、 $\text{NO}_2^-$  (亜硝酸塩)、 $\text{NH}_4^+$  (アンモニウム塩)、 $\text{PO}_4^{3-}$  (リン酸塩)、 $\text{Si}(\text{OH})_4^{2-}$  (ケイ酸塩) 濃度を比色法により測定した。分析精度の保証のため栄養塩測定用海水標準物質 (KANSO Technos) を用いた。栄養塩の定量下限 ( $\sigma 3$ ) は、硝酸塩で $\sigma 3=0.05$ 、亜硝酸塩で $\sigma 3=0.005$ 、アンモニウム塩で $\sigma 3=0.45$ 、リン酸塩で $\sigma 3=0.034$ 、ケイ酸塩で $\sigma 3=0.12$ であった。低濃度標準物質であるKANSO CKと高濃度標準物質であるKANSO BZの測定値と保証値は整合的な値であった。DOはDOセンサー (SeaBird社製, SBE43) データを利用した。ウィンクラー法による測定結果をもとに補正した。 $\delta^{18}\text{O}$ はPicarro L2120-i水同位体比アナライザーにより $^{18}\text{O}$ 波長スキャンキャビティリングダウン分光法 (WS-CRDS) で昭光サイエンス株式会社 技術部SI分析グループにより分析された。分析の標準物質にはVSMOWを用いた。

(3) 春季の植物プランクトンブルームを生み出す生物学的な要因を明らかにするため、海水や海氷試料を使った実験と解析を実施した。過去に、2019年2月の海上保安庁巡視船そうや航海と2020年12月の白鳳丸 (JAMSTEC/東京大学大気海洋研究所) KH-20-12次研究航海で取得した同様のデータセットと比較することにより (Yan et al., 2020)、南部オホーツク海の冬季から春季にかけて変化する主要一次生産者 (微細藻類) の群集組成や光合成生理状態と環境データとの関係を明らかにする試みを実施した。上記の白鳳丸KH-20-12次研究航海および新青丸KS-21-6次研究航海では、南部オホーツク海から表層堆積物を採取した。同表層堆積物中で休眠する微細藻類が、海水の鉛直混合により、海洋表層に輸送され、太陽光を浴びた際、発芽し、増殖する能力があるか、またどの種が増殖する可能性があるか等を陸上の実験室で培養実験を行うことにより評価した。

(4) 近年の南部オホーツク海域に生息する植物プランクトンの動態変化を明らかにするため、MODIS/Aqua等の海色衛星リモートセンシングデータを用いて、同海域のクロロフィルa濃度と純一次生産の季節変化と年々変化を評価した。

<引用文献>

- Kanna, N., Sibano, Y., Toyota, T. and Nishioka, J., 2018. Winter iron supply processes fueling spring phytoplankton growth in a sub-polar marginal sea, the Sea of Okhotsk: Importance of sea ice and the East Sakhalin Current. *Marine Chemistry*, 206: 109-120.
- Kanna, N., Toyota, T. and Nishioka, J., 2014. Iron and macro-nutrient concentrations in sea ice and their impact on the nutritional status of surface waters in the southern Okhotsk Sea. *Progress in Oceanography*, 126: 44-57.
- Kishi, S. et al., 2021. The Prominent Spring Bloom and Its Relation to Sea - Ice Melt in the Sea of Okhotsk, Revealed by Profiling Floats. *Geophysical Research Letters*, 48(6).
- Kuroda, H. et al., 2019. Influence of Coastal Oyashio water on massive spring diatom blooms in the Oyashio area of the North Pacific Ocean. *Progress in Oceanography*, 175: 328-344.
- Mustapha, M.A. and Saitoh, S.-I., 2008. Observations of sea ice interannual variations and spring bloom occurrences at the Japanese scallop farming area in the Okhotsk Sea using satellite imageries. *Elsevier, Estuarine, Coastal and Shelf Science*, pp. 577-588.
- Nakanowatari, T., Ohshima, K.I. and Nagai, S., 2010. What determines the maximum sea ice extent in the Sea of Okhotsk? Importance of ocean thermal condition from the Pacific. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12).
- Nakatsuka, T. et al., 2004. Biogenic and lithogenic particle fluxes in the western region of the Sea

- of Okhotsk: Implications for lateral material transport and biological productivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109.
- Nihashi, S., Ohshima, K.I. and Kimura, N., 2012. Creation of a Heat and Salt Flux Dataset Associated with Sea Ice Production and Melting in the Sea of Okhotsk. *Journal of Climate*, 25(7): 2261-2278.
- Nishioka, J. et al., 2020. Subpolar marginal seas fuel the North Pacific through the intermediate water at the termination of the ocean circulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(23): 12665-12673.
- Nishioka, J., Ono, T., Saito, H., Sakaoka, K. and Yoshimura, T., 2011. Oceanic iron supply mechanisms which support the spring diatom bloom in the Oyashio region, western subarctic Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 116(C2).
- Nishioka, J. et al., 2007. Iron supply to the western subarctic Pacific: Importance of iron export from the Sea of Okhotsk. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 112(C10).
- Sorokin, Y.I. and Sorokin, P.Y., 1999. Production in the Sea of Okhotsk. *Journal of Plankton Research*, 21(2): 201-230.
- Toyota, T. et al., 2022. The Interannual Variability of Sea Ice Area, Thickness, and Volume in the Southern Sea of Okhotsk and Its Likely Factors. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(12): e2022JC019069.
- Yamashita, Y., Nishioka, J., Obata, H. and Ogawa, H., 2020. Shelf humic substances as carriers for basin-scale iron transport in the North Pacific. *Scientific Reports*, 10(1).
- Yan, D., K. Yoshida, J. Nishioka, M. Ito, T. Toyota and K. Suzuki (2020) Response to sea ice melt indicates high seeding potential of the ice diatom *Thalassiosira* to spring phytoplankton blooms: a laboratory study on an ice algal community from the Sea of Okhotsk. *Front. Mar. Sci.*, Article 613, doi: 10.3389/fmars.2020.00613.
- Yasuda, I., 1997. The origin of the North Pacific Intermediate Water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 102: 893-909.

#### 4. サブテーマ 4 結果及び考察

##### 4-1 主要栄養塩の冬季を含めた季節的変動

これまで南部オホーツク海では、春季4月から秋季(10月)にかけて栄養塩の季節変動が観測されていたが、秋季から冬季を経て春季までの季節変動は未解明であった。南部オホーツク海の各水塊の持つ栄養塩濃度の冬季を含めた季節的な変動を把握するために、冬季—春季のモニタリング網を構築し(図4-1)、データの解析を実施した。その際、水塊を分けるために、水温—塩分(T—Sダイアグラム)、塩分と見掛けの酸素消費量(AOU)、栄養塩とAOUの生物地球化学パラメータ等を用いて水塊を分けることを試みた。

従来の水塊分けに利用されていたT—Sダイアグラムおよび塩分と見掛けの酸素消費量(AOU)のプロット図4-2に示す。また、KH-21-6次航海で得られた海氷融解直後の観測ラインに沿った水温の断面図を図4-3に示す。これらの結果、南部オホーツク海の春季の水塊には、表層低塩分水(Surface Low Salinity Water: SLSW)、その下に存在する低温の中冷水(Intermediate Cold Water: ICW)、クリル海盆の深層に存在する深層水(Deep Water: DW)、ICWとDWの境界に存在する移行水(Transition Water: TW)、宗谷暖流水(Soya Warm Current Water: SWCW)に分けることができる。さらに、2021年4月に得られた硝酸塩濃度-AOUプロットを、2020年12月と2022年5月に得られた同プロットと比較した結果を図4-4に示す。12月は中冷水がより高い密度帯の水塊の影響を強く受けていること、また、春先2021年4月や2022年5月にはその中冷水が表層低塩分水と混ざることによって表層低塩分水の生物地球化学的プロパティが決定されていることが示唆された。

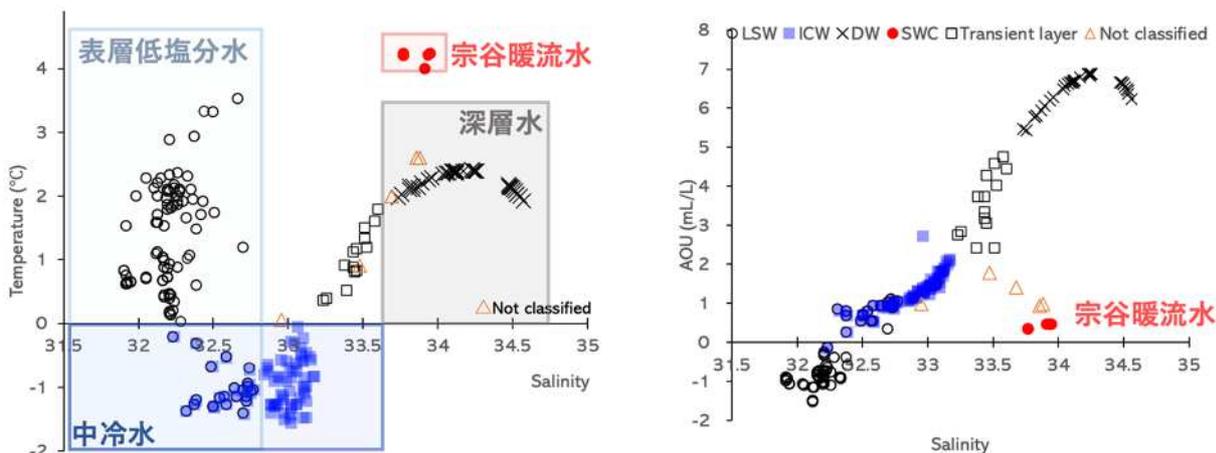


図4-2. 春季南部オホーツク海のT-Sダイアグラム（左）および塩分と見掛けの酸素消費量（AOU）のプロット図（右）

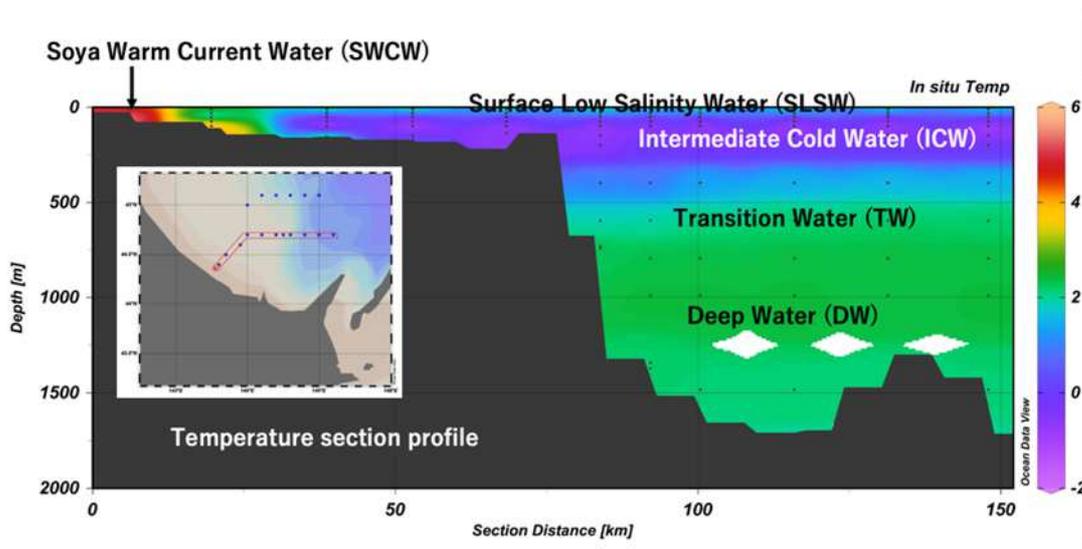
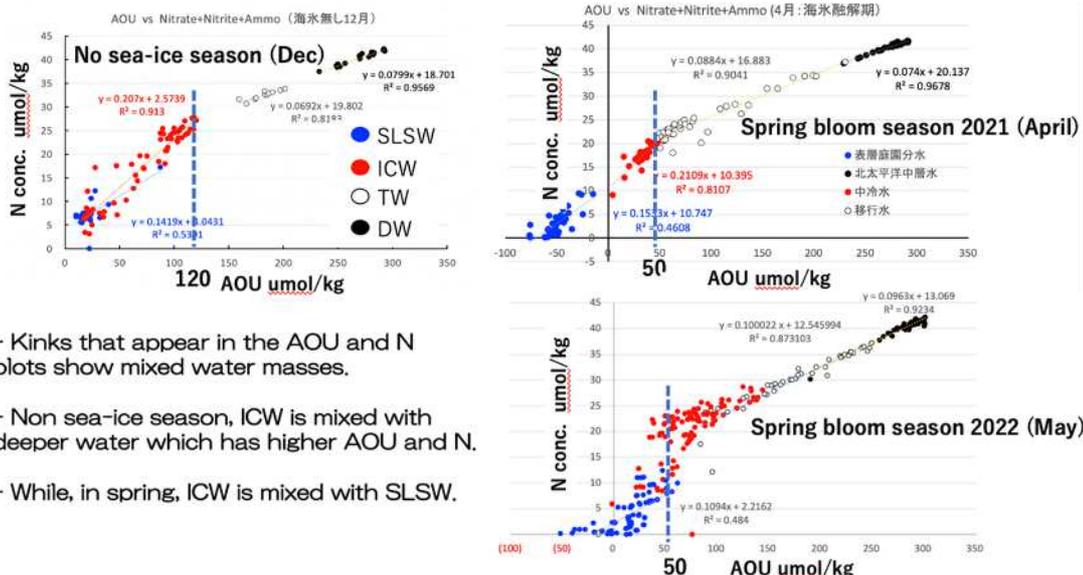


図4-3. KH-21-6次航海で得られた海水融解直後の観測ラインに沿った水温の断面図と各水塊の分布

上記の水塊分けで得られた各水塊の栄養塩濃度の値を表4-1に示す。また南部オホーツク海のSLSWとICWの季節別の栄養塩濃度を図4-5に示す。SLSWは2020年も2022年も冬季2月に海水直下で最大の栄養塩濃度となり、春先の植物プランクトンブルーム時に消費される様子を捉えることができた。一方、その下のICWの変化には有意な変動は見られなかった。これらの結果より、南部オホーツクの植物プランクトンブルームを生み出す表層の高栄養塩環境の形成には、北太平洋由来のクリル海盆中深層に存在する高栄養塩水塊（TW、DW）が、どのようにICWを介してSLSWに影響を与えるのかを理解することが重要であることが明らかとなった。



- Kinks that appear in the AOU and N plots show mixed water masses.
- Non sea-ice season, ICW is mixed with deeper water which has higher AOU and N.
- While, in spring, ICW is mixed with SLSW.

図4-4. 2020年12月（左）、2021年4月（右上）、2022年5月（左下）の硝酸塩濃度-AOUプロット

表4-1. 各水塊の栄養塩濃度

2020 Dec.	Nitrate+Nitrite+Ammo	Ammonia	Phosphate	Silicate
	(μ mol/kg)			
SLSW	6.5 ± 2.3	0.14 ± 0.06	0.83 ± 0.18	13.4 ± 3.4
ICW	17.2 ± 8.0	< 0.1	1.51 ± 0.62	29.5 ± 14.4
TW	32.4 ± 1.0	< 0.1	2.53 ± 0.06	75.6 ± 5.4
DW	40.6 ± 1.4	< 0.1	3.01 ± 0.09	146.0 ± 22
SWCW	4.06 ± 0.81	0.23 ± 0.1	0.36 ± 0.06	6.5 ± 0.5
2020 Feb.	Nitrate+Nitrite+Ammo	Ammonia	Phosphate	Silicate
	(μ mol/kg)			
SLSW	13.19 ± 4.2	1.04 ± 0.51	1.31 ± 0.27	22.1 ± 8.1
2021 April	Nitrate+Nitrite+Ammo	Ammonia	Phosphate	Silicate
	(μ mol/kg)			
SLSW	3.2 ± 2.6	0.27 ± 0.25	0.69 ± 0.17	12.6 ± 4.5
ICW	18.3 ± 2.6	< 0.1	1.61 ± 0.18	29.4 ± 4.5
TW	24.8 ± 4.5	< 0.1	2.04 ± 0.30	47.8 ± 16.1
DW	40.5 ± 1.2	< 0.1	3.01 ± 0.08	144.6 ± 20.1
SWCW	6.9 ± 0.84	0.92 ± 0.44	0.58 ± 0.04	8.7 ± 1.2
2022 Feb.	Nitrate+Nitrite+Ammo	Ammonia	Phosphate	Silicate
	(μ mol/kg)			
SLSW	14.1 ± 4.0	0.70 ± 0.34	1.39 ± 0.23	23.8 ± 3.5
2022 April-May	Nitrate+Nitrite+Ammo	Ammonia	Phosphate	Silicate
	(μ mol/kg)			
SLSW	4.44 ± 3.6	0.47 ± 0.38	0.65 ± 0.22	9.02 ± 5.8
ICW	20.3 ± 6.0	0.63 ± 0.56	1.73 ± 0.37	33.2 ± 10.6
TW	30.5 ± 5.2	0.22 ± 0.43	2.38 ± 0.36	65.54 ± 19.7
DW	40.7 ± 1.7	0.07 ± 0.03	3.0 ± 0.11	140.8 ± 20.7
SWCW	6.1 ± 5.3	0.9 ± 0.48	0.55 ± 0.36	9.68 ± 7.94

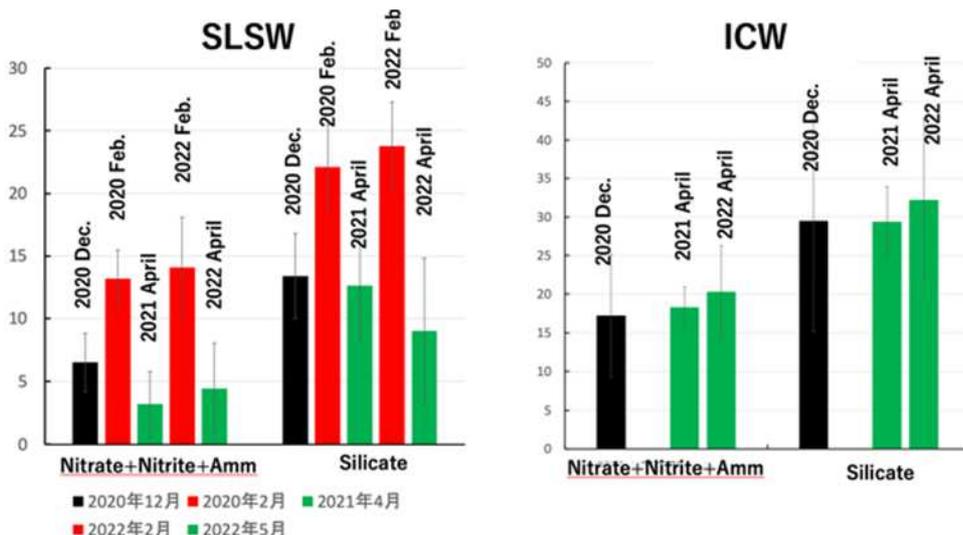


図4-5 (図0-8) . 南部オホーツク海のSLSW (左) とICW (右) の季節別の栄養塩濃度

#### 4-2 海氷融解水による鉄供給インパクトの評価

本研究の観測は海氷後退直後に実施されており、SLSWでは大規模な春季ブルームが発生していた (図4-6)。観測海域表層にはSLSWがあり、海氷融解水 (Sea Ice Melt Water; SIMW) などの淡水が混合していたと考えられる。ここではSLSWにおける海氷融解によるFeや栄養塩の供給インパクトを推定する。衛星による海氷密接度のモニタリングでは観測年に海氷がオホーツク南部まで到達しており、観測開始の直前まで観測海域に海氷が存在していたことが確認できた。観測海域表層には低塩分水が分布しており、低塩分水の淡水起源を探るため $\delta^{18}O$ の測定値を利用した。 $\delta^{18}O$ の鉛直プロファイルから、表層の低塩分水の $\delta^{18}O$ は $-1.8$ から $-0.9$ ‰と低い値をとった。SIMWの $\delta^{18}O$ のエンドメンバー値は $0.520$ ‰であることから (Toyota et al., 2007)、このSLSWの低い $\delta^{18}O$ 値は海水とSIMWのみの混合では説明できず、より低い $\delta^{18}O$ の値をもつ天水の混合があることが推測された。

SLSW中の淡水成分はSIMWと天水により構成されると考えられる。これは、塩分と $\delta^{18}O$ のプロットにおいて、SLSWのプロットがSIMW、天水、海水のエンドメンバーのプロットの内側に位置することから説明される (図4-7)。3つのエンドメンバーの塩分と $\delta^{18}O$ はそれぞれ、Toyota et al. (2007)で報告された海氷データ (塩分 $=4.6$ 、 $\delta^{18}O=0.520$ ‰)、中冷水以深の塩分と $\delta^{18}O$ のプロットの回帰直線 (式(1)  $y=0.653x-22.527$ ) のy切片 (塩分 $=0$ 、 $\delta^{18}O=-22.527$ ‰、ただしSIMWの影響を受けたと考えられるICWを除く)、ICWからSIMWの影響を除いた値を海水のエンドメンバーとした。海水のエンドメンバーはICW

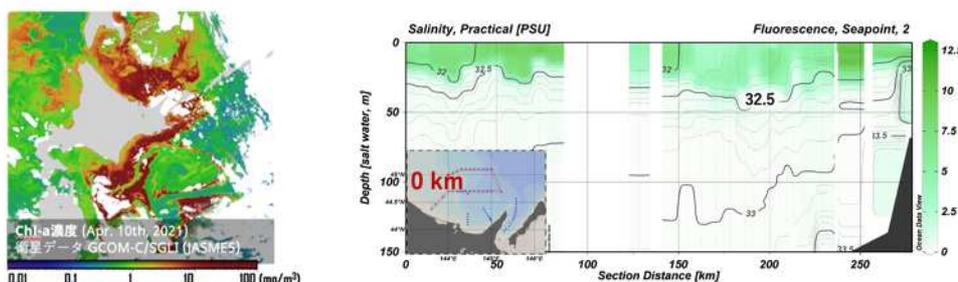


図4-6. 2021年4月に発生していた南部オホーツク海の春季ブルーム、衛星クロロフィルa画像 (左)、観測から得られたクロロフィルa断面図 (右) き

の塩分と  $\delta^{18}\text{O}$  の平均値と海水エンドメンバーを結んだ直線と式(1)の交点で表した (塩分=33.3、 $\delta^{18}\text{O} = -0.778 \text{ ‰}$ )。塩分と  $\delta^{18}\text{O}$  のプロットにおいてSLSWは天水-海水の混合線 (式(1)) と海水-海水の混合線の間位置するため、SLSWの淡水起源はSIMWと天水であると考えられた(図4-7)。

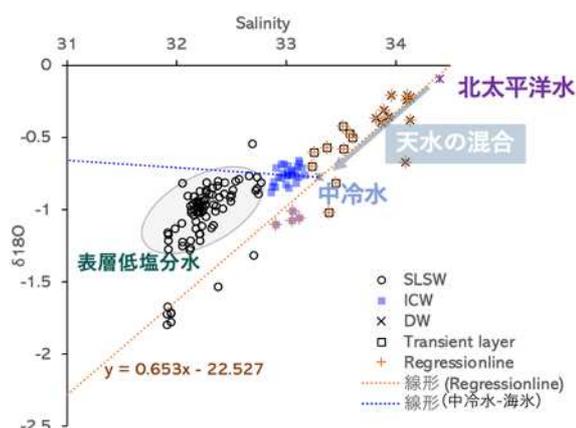


図4-7. 2021年4月航海で得られた塩分と  $\delta^{18}\text{O}$  のプロット

表4-2. マスバランス式に利用した水塊の塩分と  $\delta^{18}\text{O}$  のエンドメンバー

Water mass	%	Salinity	$\delta^{18}\text{O}$	Reference
中冷水 (seawater)	f1	33.3	-0.778	観測値 (中冷水)
天水 (meteoricwater)	f2	0	-22.527	観測値から推定
海氷融解水 (seaice)* <sup>1</sup>	f3	4.6	0.520	Toyota et al. (2007)

\*<sup>1</sup> Snow and ice are 1~2% of the total sea ice mass (Toyota et al., 2007)

次に、上で設定したエンドメンバーから以下のマスバランス式によりSIMWの割合を計算した。

$$\begin{cases} \text{Sal}_{\text{seawater}} \times f1 + \text{Sal}_{\text{meteoricwater}} \times f2 + \text{Sal}_{\text{seaice}} \times f3 = \text{in situ Salinity} \\ \delta^{18}\text{O}_{\text{seawater}} \times f1 + \delta^{18}\text{O}_{\text{meteoricwater}} \times f2 + \delta^{18}\text{O}_{\text{seaice}} \times f3 = \text{in situ } \delta^{18}\text{O} \\ f1 + f2 + f3 = 1 \end{cases}$$

マスバランス式の計算結果から、SLSWは、 $2.4 \pm 0.5 \%$  のSIMWと  $1.2 \pm 0.6 \%$  の天水、 $96.4 \pm 0.4 \%$  の海水成分から構成される。SLSWにおけるSIMWの寄与率は観測海域の東側で高く、st.1とst.3ではほとんどSIMWが混合していなかった(図4-8)。

以上の推定をもとにSIMWによる物質の供給インパクトについて評価した。海氷の融解による海水中の各物質濃度の変化を推定するために以下の式(i)で海氷融解後の各物質濃度  $[\text{Cx}]$  を計算した。尚、この計算では冬季の鉛直混合により形成されたICWの表層で海氷が融解し、SLSWが形成されたと仮定する(冬季混合によるICWへの海氷融解水の混合は無視する)。また、以下の計算においては海氷の融解中に混合した天水については考慮しない。SIMWの平均Fe濃度や栄養塩濃度はKanna et al. (2018)の報告値を参照した(表4-2)。

$$[\text{Cx}]_{\text{after seaice melt}} = [\text{Cx}]_{\text{seaice}} \times \text{SIMW}\% + [\text{Cx}]_{\text{ICW}} \times \text{ICW}\% \quad (\text{i})$$

海水の融解によるFe供給インパクトについて推定結果をもとに計算すると、[P-Fe]は $17.71 \pm 3.51$  nM増加し、[D-Fe]は $0.05 \pm 0.01$  nM増加した。観測時のICWの[P-Fe]は $36.36 \pm 16.68$  nMであり、SIMWの混合により形成されるSLSWはICWの[P-Fe]より約1.5倍高い $54.07 \pm 20.19$  nMと推定された。一方で観測時のICWの[D-Fe]は $1.41 \pm 0.42$  nMであり、海水の融解による[D-Fe]の供給インパクトはICWの[D-Fe]に対してほとんど影響を与えなかった（表4-3）。栄養塩濃度についてFe濃度と同様Table2の報告値をもとに海水の融解による供給インパクトを計算した結果、ICWにSIMWが混合することでSLSWの濃度は溶存無機窒素濃度[DIN]、リン酸塩濃度[P]、ケイ酸塩濃度[Si]のそれぞれで $-0.42 \pm 0.08$   $\mu\text{M}$ 、 $-0.04 \pm 0.01$   $\mu\text{M}$ 、 $-0.84 \pm 0.17$   $\mu\text{M}$ 変化する推定結果が得られた。ICWの[DIN]、[P]、[Si]はそれぞれ $21.7 \pm 1.9$   $\mu\text{M}$ 、 $1.85 \pm 0.13$   $\mu\text{M}$ 、 $36.7 \pm 4.8$   $\mu\text{M}$ であり、海水融解による栄養塩の供給インパクトは負の値（希釈効果）でSLSWの栄養塩濃度はICWと比較してほとんど変化しなかった。

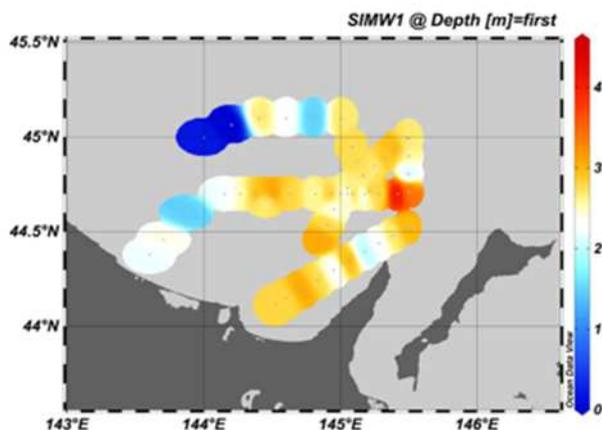


図4-8（図0-9）. 塩分と $\delta^{18}\text{O}$ から見積もった海水融解水の分布の割合

表4-3 海水の融解による表層低塩分水への鉄供給

	T-Fe (nM)	D-Fe (nM)
海水融解水混合前	$36.6 \pm 16.7$	$1.41 \pm 0.42$
海水融解水混合後	$54.1 \pm 20.1$	$1.46 \pm 0.43$
観測値	$23.4 \pm 7.9$	$0.85 \pm 0.29$

#### 4-3 春季の植物プランクトンブルームを生み出す生物学的な要因

海水融解後の2021年4月および2022年の4~5月の海洋観測においては、表層低塩分水中で栄養塩や鉄の利用と大規模な春季植物プランクトンブルームの発生が確認され、走査型電子顕微鏡および光学顕微鏡による観察結果から大型中心目珪藻*Thalassiosira*属の優占が明らかとなった（図4-9）。一方、2019年2月の南部オホーツク海の海水下の海水中の植物プランクトンは主に小型中心目珪藻*Chaetoceros*属が優占し（図4-10）、その細胞は休眠期状態にあった（成果番号15）。この*Chaetoceros*属は、冗長性解析により、低温で比較的高い溶存鉄濃度を好む傾向にあったことから、東サハリン海流の影響を受けていたことが示唆された（成果番号15）。また、2020年12月および2021年4月に採取した表層堆積物中の微細藻類の最確数法を用いた室内培養実験から、全ての採泥観測点において、珪藻類の発芽（休眠期細胞から栄養細胞への変化）が確認され、小型中心目珪藻*Chaetoceros socialis* complexの優占が判明した（図4-11）。上記の海洋観測および室内培養実験の結果から、冬季の海水下の海水中の植物プランクトン群集および表層堆積物の微細藻類群集が春季植物プランクトンブルームを形成する種（たね）になる可能性は低いことが考えられた。一方、2019年2月に南部オホーツク海で採取した海水には、多量の大型中心目珪藻*Thalassiosira*属が含まれており、陸上の実験室において、同海水を $0^\circ\text{C}$ の現場海水で徐々に融解させ、光照射培養を実施した結果、同*Thalassiosira*属の大増殖が確認された（図4-12; Yan et al., 2020）。

この結果は、南部オホーツク海の春季植物プランクトンブルームに対するアイスアルジーの播種効果の重要性を初めて提案するものであった。今後の温暖化による海氷量の減少によりアイスアルジーの存在量が減少し、延いては春季植物プランクトンブルームの規模や質が変化する可能性が考えられた（成果番号15）。

Yan et al. (2020) Response to sea ice melt indicates high seeding potential of the ice diatom *Thalassiosira* to spring phytoplankton blooms: a laboratory study on an ice algal community from the Sea of Okhotsk. *Front. Mar. Sci.*, Article 613, 10.3389/fmars.2020.00613

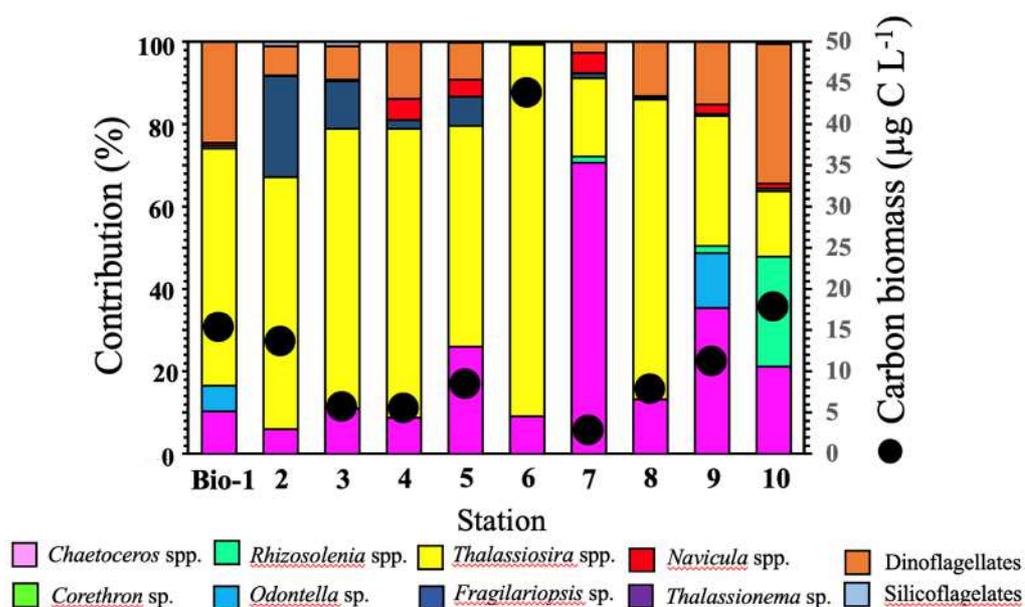


図4-9. 2021年4月の南部オホーツク海の表層（5m深）における有殻植物プランクトンの炭素生物量とその寄与率（%）

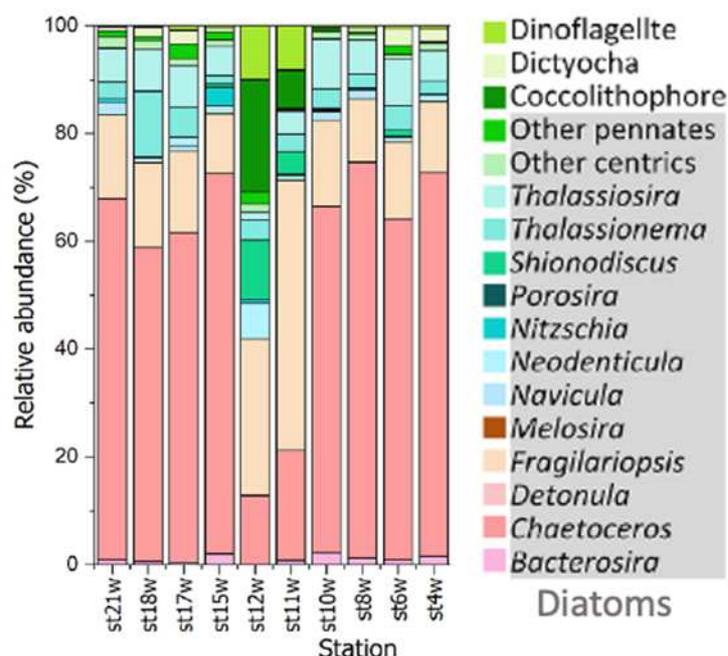


図4-10. 2019年2月の南部オホーツク海の表層（5m深）における有殻植物プランクトンの相対存在量（%）

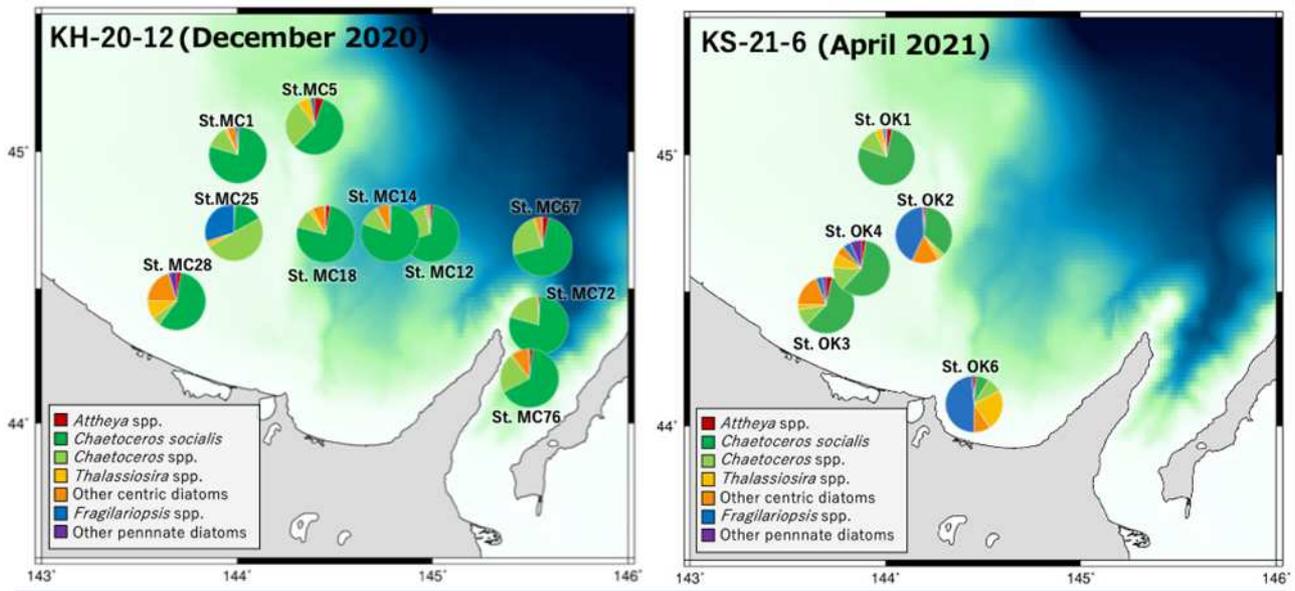


図4-11. MPN法から明らかにした表層堆積物からの増殖可能な珪藻類の群集組成

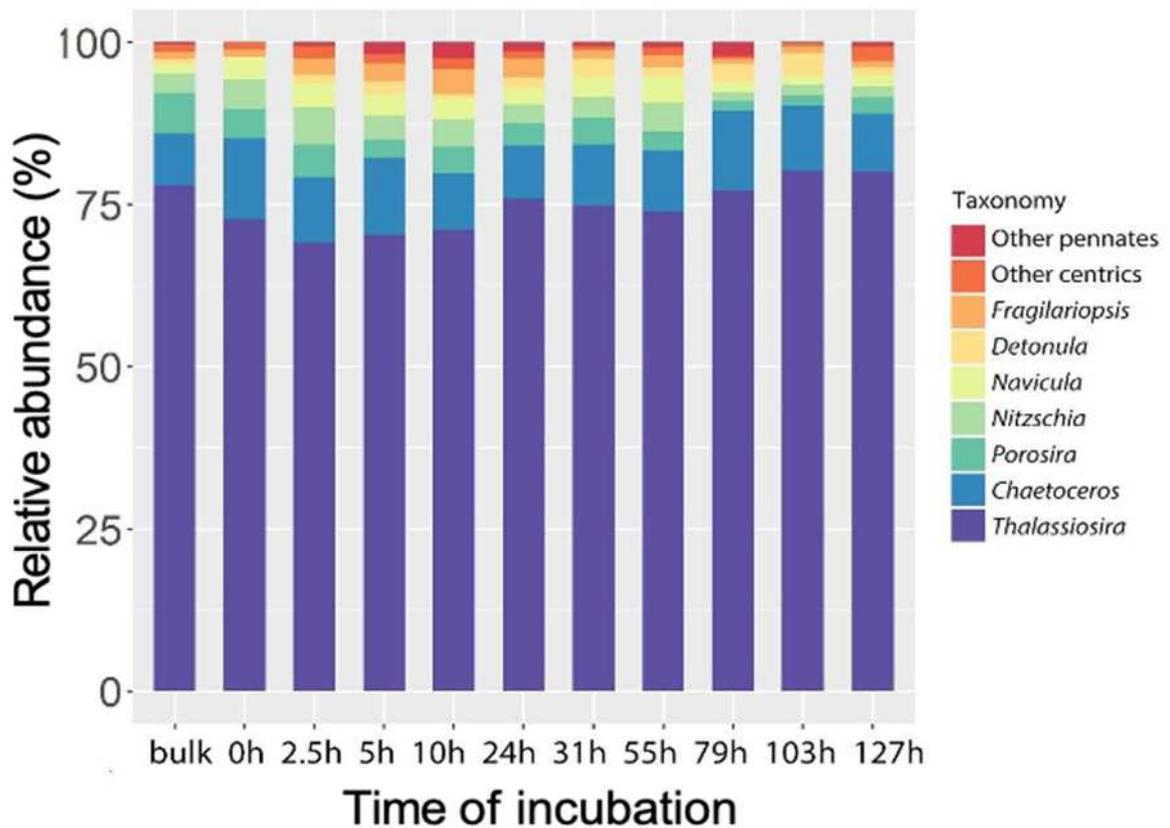


図4-12. 海水融解実験から明らかにした海水から増殖可能な珪藻類の群集組成

#### 4-4 近年の南部オホーツク海域に生息する植物プランクトンの動態変化

海色衛星リモートセンシングの結果から、近年、南部オホーツク海域の植物プランクトンブルームの時期がこれまでより早く、またその規模も大きくなっていることが初めて明らかになった（図4-13）。この植物プランクトンブルームの変化は冬季から春季の海氷動態等の環境変化との関係が示唆された。一方、海色衛星リモートセンシングで評価した南部オホーツク海における有光層内の純一次生産（植物プランクトンの光合成速度）には経年変化があまり見られなかったが、今後も同観測を継続する必要があると考えられた（図4-14）。

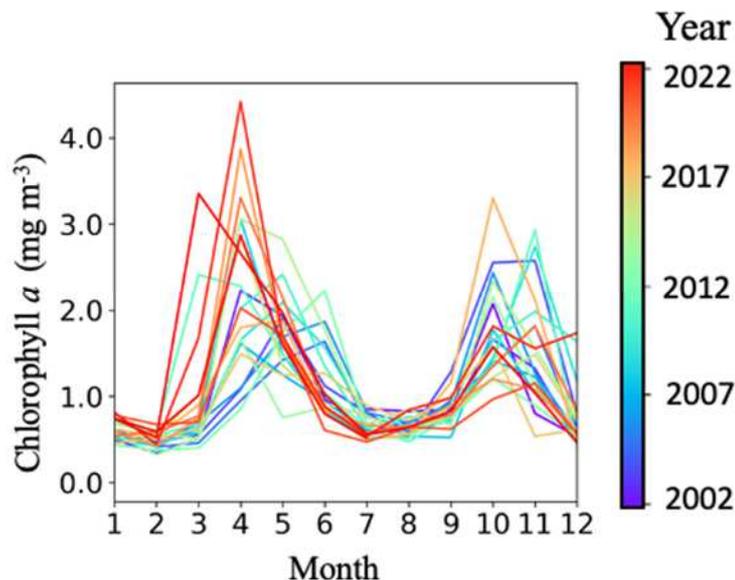


図4-13. 海色衛星リモートセンシングによる南部オホーツク海表層のクロロフィル $a$ 濃度（植物プランクトン現存量指標）の月変化と経年変化

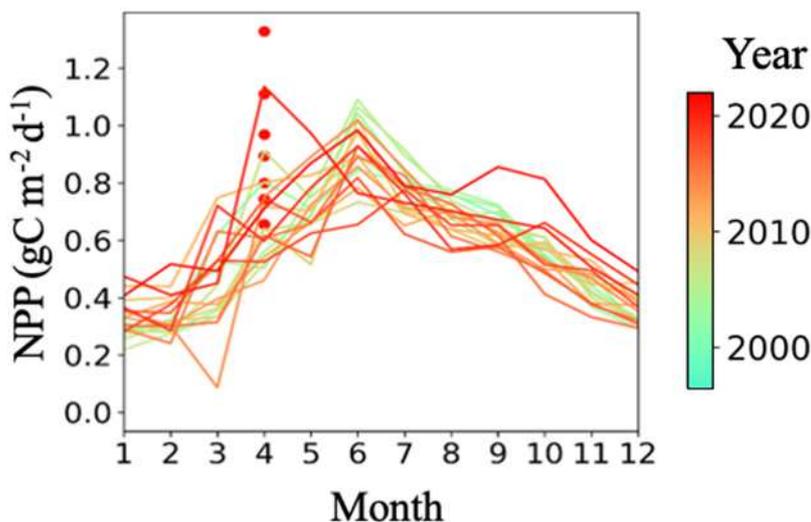


図4-14. 海色衛星リモートセンシングによる南部オホーツク海の有光層内の純一次生産（NPP）の月変化と経年変化。図中の赤丸は2021年4月の新青丸航海時に $^{13}\text{C}$ 法で実測した純一次生産の値

#### 5. サブテーマ4 研究目標の達成状況

南部オホーツク海（知床海域）を対象とした、冬季から海氷融解期も含めて季節を通じた時系列モニタリング観測網を構築することにより、栄養物質環境の季節変動と微細藻類（アイスアルジーと海水中の植物プランクトン）動態の関係を解明し、最終的に海氷および海氷融解が物質循環と低次生産に与える影響を定量的に明らかにすることを目標とした。

南部オホーツク海の季節変動をとらえるモニタリング網を共同利用の研究船や海上保安庁の研究船を利用することによって構築することができた。モニタリングの結果、栄養物質である窒素、リン、珪素や微量栄養素である鉄分の観測が実施でき、栄養塩については、冬季の海氷下海水が最高濃度となる季節的変動をしていること、鉄については海氷の融解水から表層水に供給されるインパクトを評価することができた。また、海氷内に含まれるアイスアルジーの播種（種まき）効果が春季ブルームの発達に重要な役割を果たしていることを明らかにした。さらに、海色衛星リモートセンシングにより、近年、春季植物プランクトンブルームの規模が大きくなるとともに、その開始時期が早まっていることを発見した。

以上のことから、目標以上の研究成果を上げることが出来たと考えられる。

## II-5 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5 要旨]

サブテーマ5では、海氷減少に代表される環境要因が、水産重要種を含む魚類群集および海生哺乳類に加えてプランクトンに及ぼす影響を解明し、温暖化を主とする環境リスクを予測することを主な目的とした。魚類に関しては、オホーツク海陸棚域の17年間に渡る底曳き網調査資料を用いて、PDO、NPGO両指数等の広域的な環境指標と、水温や沿岸海氷勢力を含むローカルな環境指標の影響を検討したところ、当海域の魚類群集構造は沿岸海氷勢力と広域的な循環指標であるNPGOによる影響を大きく受けて変化しており、特に沿岸海氷面積はタラ類やニシンといった優占種の豊度に正の影響を及ぼしていることが明らかとなり、これは隣接する親潮域における底魚群集構造がほぼ水深のみにより支配されていたのと対照的であった。次に、根室海峡域における47年間の漁獲資料を用いて環境要因が漁獲量と組成に及ぼす影響を検討したところ、オホーツク海とは対照的に沿岸海氷勢力が風力と共に主要種の漁獲に負の影響を及ぼしていた。これは、海氷が操業の妨げとして直接的に作用していることを反映していたと考えられた。更に、タラ類やサケといった重要漁獲対象種の漁獲統計を用いて、沿岸海氷勢力とそれに関連した水温変動が資源動向に与える影響を分析したところ、海氷勢力が強い年の春季には低水温となり、タラ類の漁獲に時間遅れを伴って負の影響を与えていた。これは生活史初期のタラ類生残に低水温が不利なことを示していた一方、サケにおいてはむしろその若齢期に海氷が強勢で低水温に推移した方が後の漁獲量が高まっていた。これは海氷と関連した海洋生産力の向上がもたらす影響であると考えられ、将来温暖化が進行した場合短期的にはタラ類の生産に有利に働くものの、中長期的には海洋生産力の減少を通じて漁業生産に負の影響が及ぶことが予想される。海棲哺乳類に関しては、これまで知床半島周辺海域での分布が殆ど不明であったため、調査船上からの目視調査を3航海で行い、イシイルカ、マッコウクジラやナガスクジラといった主要な鯨類に関して分布のマッピングを行うと共に環境変数にもとづく分布予測モデルを構築した。更に、受動音響サンプリングによる継続的モニタリング手法を開発し、長期的な音響データを取得して好氷性種であるクラカケアザラシの3来遊期に渡る長期的な出現パターンを明らかにした。その結果、本種の出現が海氷勢力と密接に関連しており、今後海氷勢力が衰退した場合、その出現頻度が低下することが予測された。また、プランクトン群集構造の変化と糞粒を通じた輸送実態を解明すると共に、汲み上げ水による根室海峡の動物プランクトン群集と主要種生活史の経年変化を明らかにした。以上の知見は、今後の温暖化影響評価の際の基礎資料としての活用が期待される。

### 1. サブテーマ5 研究開発目的

サブテーマ5では、海氷および海氷融解が物質循環と低次生産に与える影響を明らかにする。そして、それを起点とする海洋生態系・生物多様性に対する影響評価を行うことにより温暖化リスクを同定することを目的とした。

### 2. サブテーマ5 研究目標

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5 実施機関	北海道大学、京都大学
サブテーマ5 目標	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明らかにする。過年度試資料から組成・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する。多様な海洋生物からなる生物群集の環境変動に対する鍵種の選定とその応答を解析することにより、知床海域の温暖化に対する群集構成と食物網構造への影響を評価し、温暖化リスクを提示する。また、海氷を出産などの上陸場として利用するアザラシ等海棲哺乳類の来遊・滞在などデータはほとんどないため、水中音響技術等を用いてデータを蓄積し、温暖化

	リスク評価の基礎資料とする。
--	----------------

### 3. サブテーマ 5 研究開発内容

#### (1) 海氷勢力を始めとした環境要因が沿岸～沖合の魚類群集構造に及ぼす影響の解明

魚類を中心とした群集に関して、海氷勢力や海水温といった環境要因がその構造に及ぼす影響を分析した。水産教育・研究機構調査船で2001～2017年に実施した合計378地点の底曳き調査資料から、底魚類の密度変化を明らかにすると共に、これらの主要な変動成分に対して、各種テレコネクション指数やオホーツク海全域の海氷密度等の広域的な環境要因と、各採集地点の水温塩分や沿岸海氷勢力といった地域的な環境要因が、底魚群集の構造規定要因として作用する強度を、モデル変数選択により分析した。海氷面積は気象庁ウェブサイトより得られる各年各旬につき得られる画像を利用し推定した。モデル化にあたっては、まず漁獲データを主成分分析により縮約し、第1および第2主成分を目的変数、説明変数として上記の環境指標を用いて一般化加法モデルの変数を赤池情報基準により選択した。また、隣接する親潮陸棚域において2000年代に実施した底魚類底曳調査結果を同様の手法により併せて分析し、比較を行った。また、知床半島に密接した海域における環境変動の影響を調べるために、羅臼漁業協同組合の1980～2017年に亘る水揚げ資料を整備し、サブテーマ3により整備された羅臼沿岸の定地水温情報や沿岸海氷勢力を含む地域的な要因と、各種テレコネクション指数を含む広域的な環境要因を説明変数としたモデル選択を行った。

#### (2) 知床半島周辺海域における主要漁業資源の豊度に及ぼす海氷勢力と水温の影響

サケやスケトウダラといった、地域産業および海洋生態系における重要な構成員である漁業資源に関して、経年的な豊度変動と海氷勢力および水温との関係を分析した。漁業資源の豊度として北海道水産現勢による2001～2021年の21年間の漁獲量を参照し、また水温はサブテーマ3によって整備された羅臼沿岸の定地水温を用い、沿岸海氷勢力は気象庁ウェブサイトから得られる海氷密度図の色別ピクセル分布から各年各旬の海氷密度(%)を推定した。水温と海氷勢力を各々説明変数として、各魚種の漁獲量との相関を、当該年に加えて1～3年間(タラ類)、または1～4年間(サケ)の時間遅れ(ラグ)を含めて行った。

#### (3) 知床半島周辺海域における海棲哺乳類の分布とモデル化

知床半島周辺海域において目視調査結果に基づく生息適地モデルを作成し、海棲哺乳類の水平的な分布傾向と環境要因との関係を明らかにした。2021～2022年に北海道大学練習船おしよる丸およびJAMSTEC海洋観測船新青丸が知床半島周辺で行った3回の調査航海において目視調査を行った。同時に計量魚群探知機による音響調査も実施し、発見場所の海洋環境(衛星海表面水温、衛星クロロフィルa濃度、水深、距岸距離、海底傾斜角)を調べ、両者を合わせて出現種のマッピングを行うと共に、これら環境変数を用いてイシイルカ、マッコウクジラおよびナガスクジラといった主要な鯨類の分布予測モデルを作成した。鯨類の分布データと上記環境変数に、エントロピー最大化法(Maxentアルゴリズム)を基づいた種分布モデルを適用して、各種の分布予測を行った。

#### (4) 受動的音響サンプリングを利用した海獣類モニタリング手法の開発

これまで海氷に阻まれ把握が困難であった海棲哺乳類の冬季の出現状況を明らかにすることを目的に、夜間や結氷期の観測が容易かつ長時間連続して観測ができる受動的音響サンプリング手法を用いて、主要種の出現状況と海氷勢力との関連を明らかにした。当手法は前述の利点がある一方で、データが多く、手動での対象音の検出に時間がかかること、解析者の技量に検出が左右されることなどの欠点もある。このため、本研究では鳥類鳴音検出に用いられてきた深層学習による鳴音検出器の作成も試みた。2021～2023年の3冬季間、異なる周波数帯をカバーする水中録音装置AUSOMS-miniおよびA-tagより成る受動的音響モニタリングシステムを羅臼沿岸の海氷下に設置し、音響データを収録した。データ解析にあたっては、機械学習ソフトウェアによる種判別手法を導入した。

#### (5) プランクトン群集構造と機能の分析

まず2019年におしよる丸にて採集した試料に基づき夏季の知床半島周辺におけるマイクロプランクトン群集の空間分布を明らかにすると共に、2021年の知床半島東岸において動物プランクトン糞粒が物質輸送に果たす役割を定量的明らかにすると共に、画像撮影解析装置であるZooscanによる効率的な分析手法を確立した。更に、2021～2023年の知床羅臼深層水の汲み上げ副産物試料である計515本の動物プランクトン試料を利用して動物プランクトン群集の経年変化と主要カイアシ類Metridia okhotensisの生活史を明らかにし、2007～2009年に採取した2年分の試料と比較した。採集は3～135時間(平均32時間)にわたり、深層水を目合い420 μmの金属製ストレイナーにて濾過する際に捕集された動物プランクトンを、5～10%ホルマリン海水で固定して行った。

4. サブテーマ5 結果及び考察

(1) 海氷勢力を始めとした環境要因が沿岸～沖合の魚類群集構造に及ぼす影響の解明

オホーツク海陸棚沖合域における底生魚類の豊度は2010～2012年に一端スケトウダラとズワイガニにより増加したのち2014～2017年にいったん減少し、2018年以降にはスケトウ、マダラとニシンの豊度と共に再度増加した(図5-1)。こうした年々の豊度変化を縮約した第1主成分は沿岸海氷面積および北

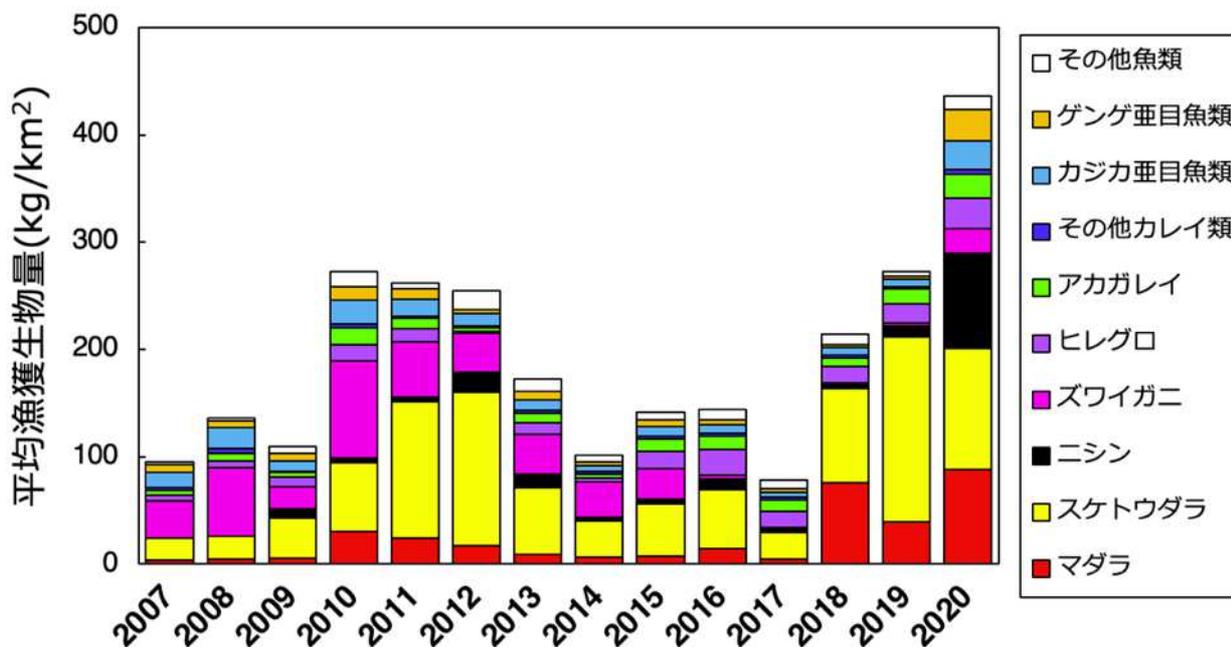


図5-1：オホーツク陸棚域における着底トロール調査に基づく主要底魚類豊度の経年変動。

太平洋循環振動指数 (NPGO) と、また第2主成分はNPGOと有意な相関を示し(表5-1)、海氷と循環強度が低次生産を通じて魚類豊度に正の効果をもたらしていることが示された一方、高豊度であった3魚種はむしろ高水温側を好んで分布していたことから、海氷は陸棚上では水温よりもむしろ海氷に関わる低次生産過程を通じて魚類豊度に作用していることが示唆された(図5-2)。また、隣接する親潮陸棚域における底魚類の群集構造に関しても小型底曳網による調査資料を用いて同様の解析を行ったところ、当海域では水温の効果は薄かった一方で水深の影響力が圧倒的に高く、これは主要魚種の広温性(eurythermy)を反映したものと考えられた(図5-3)。(成果番号20)

表5-1：オホーツク陸棚域における主要底魚類豊度データの第1および第2主成分に関するモデル選択結果。第1主成分では沿岸海氷面積とNPGOが、また第2主成分ではNPGOのみが有意な説明変数として選択された。

(2) 知床半島周辺海域における主要漁業資源の豊度に及ぼす海氷勢力と水温の影響

羅臼漁業協同組合の長期漁獲データのうち、サケ、スルメイカおよびスケトウダラといった漁獲量の主要部分を占める魚種は数量変動が大きくトレンド的であり自己相関成分が大きいため、環境シグナルの効果がマスクされがちと考え、本研究においてはカレイ類等を中心と「地魚」の資料を用いた。その結果、まず漁獲量は「地魚類」にお

PC1		Adj. R <sup>2</sup> = .507, p = .008**			
	Est.	S.E.	t-value	P	
Intercept	1.11	0.42	0.26	0.023 *	
沿岸海氷	-0.13	0.05	-2.59	0.025 *	
NPGO	0.29	0.10	2.77	0.018 *	

PC2		Adj. R <sup>2</sup> = .594, p = .0008***			
	Est.	S.E.	t-value	P	
Intercept	0.082	0.129	0.63	0.54	
NPGO	0.454	0.101	4.48	0.0008 ***	

いてはスケトウダラやスルメイカといった多獲性の魚種と異なり、トレンド的な変化がみられず、統計の集計期間を通じても総漁獲量は概ね3~4万トンで推移し大きな変動は認められなかった(図5-4)。しかし、1994~1995年にかけて魚種組成の不連続な変化が認められ、それまで多く漁獲されていたサメガレイやアサバガレイに代わってソウハチとヒレグロが急増した。こうした変化に関しては社会経済的な要因による操業形態の変化等も考えられたため、漁協職員への聞き取りを行ったところ1990年代半ばに操業形態の変化は特に見られなかったとのことであったが、本研究では未把握の人為的要因が関与している可能性に鑑みて1995年以降のデータを用いてモデル選択の解析を行った。その結果、第1主成分は羅臼気温と沿岸海氷面積といった地域環境による影響が大きかった一方、第2主成分はPDOおよびNPGOといった広域環境の関与が大きかった(表5-2)。海氷の影響は沿岸漁業の多くの魚種の漁獲量にとっては負の影響となっており、これは操業(出漁)への影響が及ぶことも含まれていると考えられた。また季節別の解析においても春季には縁が海氷勢力と共に風力が重要な説明変数として選択され、操業への直接の影響が示唆された。このように漁獲統計を通じた分析では漁業が「人の営み」であることの影響が避け難かった一方、1990年代半ばに見られた水揚げ組成の急激な変化に関してはその要因を明らかにできなかった。組成が急変した時期の数年前にあたる1989~1991年の3年間は全期間を通じて最も海氷勢力が弱かった時期であり、この海氷の少なさがソウハチやヒレグロの生活史初期における生残に有利に作用し、のちの漁獲量増加に繋がった可能性がある。このように本研究項目では生活史初期に遡及した時間遅れの効果までは検討できなかったが、次項目(b)においてタラ類とサケを対象に時間遅れを含む分析主要水産資源の沿岸水温と海氷変動への応答を明らかにするため、サブテーマ3において整備された根室海峡の定地水温の時系列および気象庁による海氷勢力資料を用いて、当海域における重要漁業資源であるタラ科魚類2種(スケトウダラおよびマダラ)

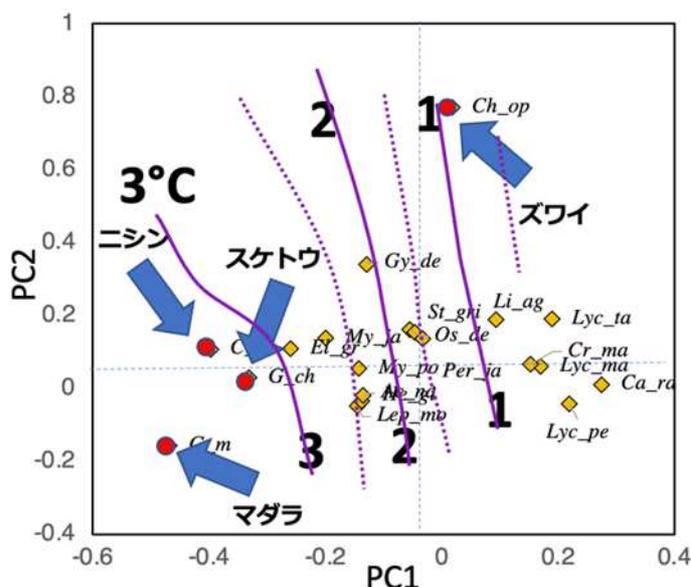


図5-2：オホーツク陸棚域における主要底魚類豊度の主成分得点と平均加重平均水温。

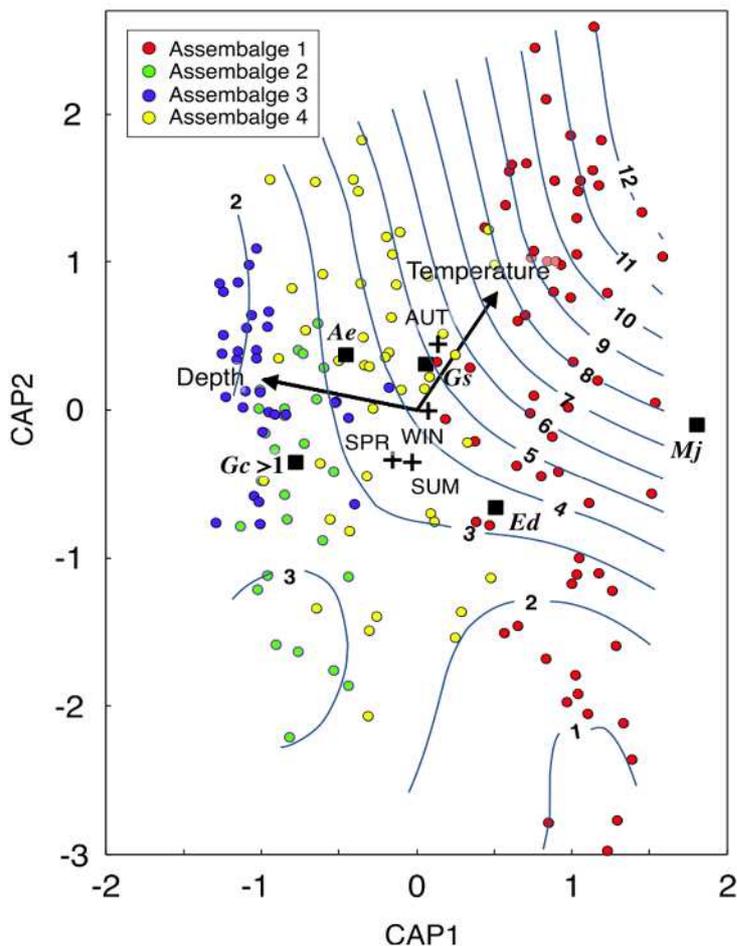


図5-3：親潮陸棚域169地点における底魚類豊度に基づく正準主座標分析結果。丸は各地点を、色は種組成に基づく類型化により示された4つの地点群、また黒い四角は優占種の主座標得点を示す。陸棚上部(赤)、中部(黄)および縁辺部(緑・青)の地点群は深度と相関の強い第1軸に沿って分離した一方で、幅広い水温帯を含み、群集構造決定における深度の水温に対する高い優位性が示された。

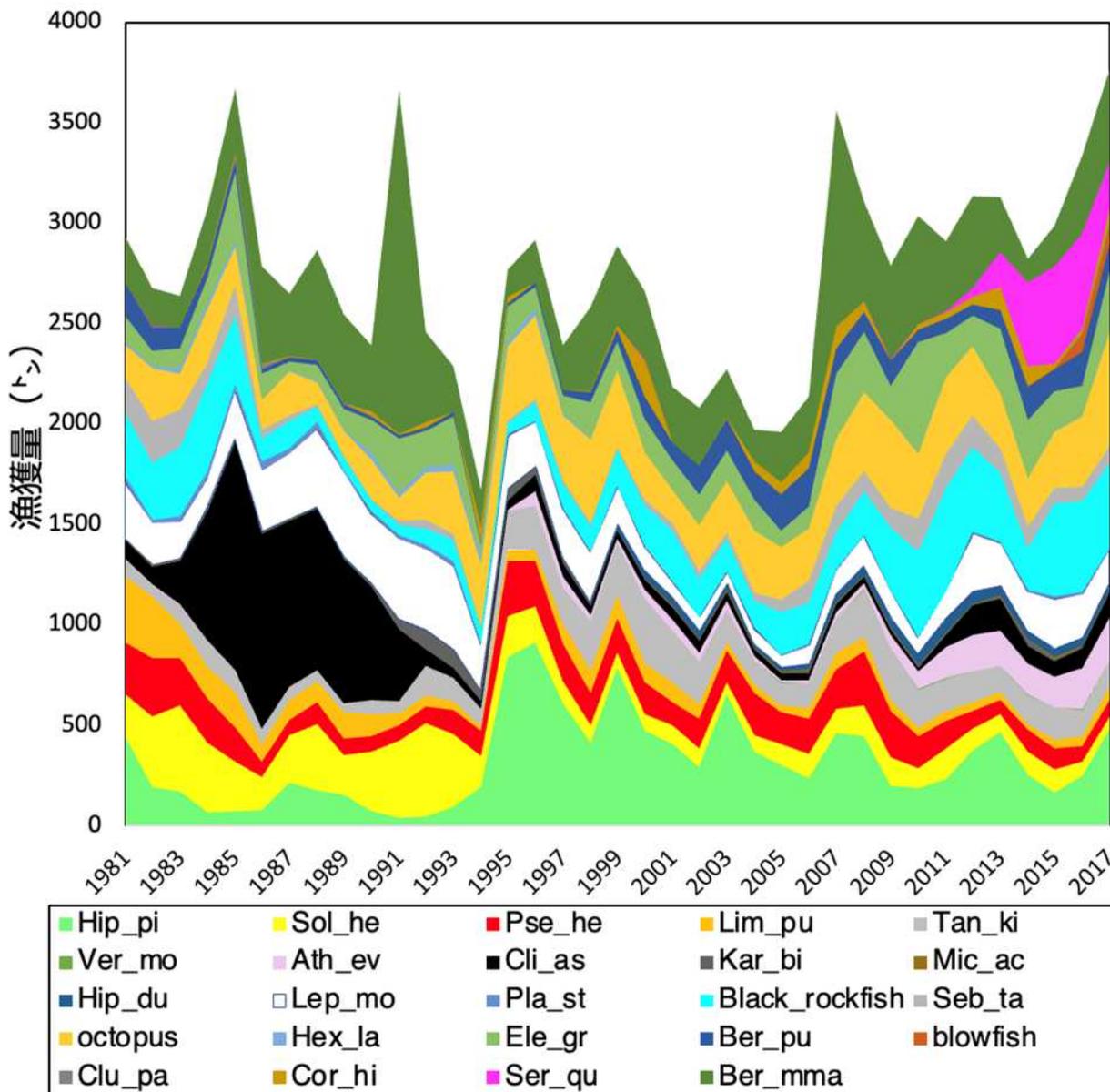


図5-4：羅臼漁業協同組合の鮮魚取扱高日報に基づく、地魚水揚げ量の経年変化。解析に用いたものの数量が多かったマダラとホッケは他種の変化をマスクするため図示していない。漁獲量の合計値は集計期間を通じて大きく変化しなかったものの、1994～1995年を境にそれまで多く漁獲されていたサメガレイ（黒：Cli\_as）やアサバガレイ（黄：Sol\_he）が急減し、ソウハチ（緑：Hip\_pi）やクロガシラガレイ（灰色：Tan\_ki）が急増した。

とサケについて検討を行った。まず沿岸海水面積と月平均の表層水温の関係を検討したところ、1～5月までは有意かつ比較的強い負の相関 ( $p < 0.01$ ) があり、「多氷年には表層水温が低い」という関係が認められた。しかし、6月以降こうした関係は薄れ、太陽輻射や水塊の置き換わりの影響が強まることを反映したものと考えられた。次に、沿岸海水面積、1～4月、3月および4月の水温とスケトウダラ漁獲量の関係を当年と1～3年の時間遅れについて調べたところ、総じて海水積と負の相関が、また表層水温とは正の相関が認められ、特に2年前の3月水温で最も相関が強かった ( $R^2 = 0.36, P < 0.001$ ; 図5-5)。3月は根室海峡における本種の産卵盛期に当たり、この時期の高水温は初期生残を通じて後年の資源状態に反映するものと考えられた。同様の関係はマダラでも認められ、やはり2年前の3～4月の水温と一層強い正相関が認められた ( $R^2 = 0.361$ )。以上の結果は、亜寒帯性 (boreal) のタラ科魚類に対して海水の存在は卵稚仔期の孵化～成長速度の停滞を通じて負の影響を与えること示唆しており、極域性 (Arctic) のホッ

表5-2：羅臼漁業協同組合の水揚量の経年資料に基づく主成分(PC)分析の第1および第2PCに関する環境変数の選択結果。第1PCでは羅臼の気温と沿岸海水勢力が、第2PCではPDOとNPGOが重要であった。

PC1			PC2		
	df	AIC		df	AIC
bestmodel	16.30575	58.38462	bestmodel	17.01109	40.40494
PDOout	13.63193	82.75409	PDOout	11.64219	87.61933
NPGOout	12.45202	95.15220	NPGOout	11.90594	82.30406
Okhotsk_iceout	15.17546	68.21470	Okhotsk_iceout	12.80794	77.96176
Shiretoko_iceout	11.20102	100.12387	Shiretoko_iceout	13.42171	68.92402
Rausu_tempout	10.69557	115.22307	Rausu_tempout	15.67253	41.25733
Rausu_suntimeout	12.63960	93.98644	Rausu_suntimeout	12.01702	74.25291
Rausu_rainout	14.76132	91.89559	Rausu_rainout	12.51528	76.52057
Shibetsu_windout	15.28463	80.49156	Shibetsu_windout	15.63516	58.76561
Rausu_sstout	14.77698	68.82113	Rausu_sstout	13.73726	64.74945

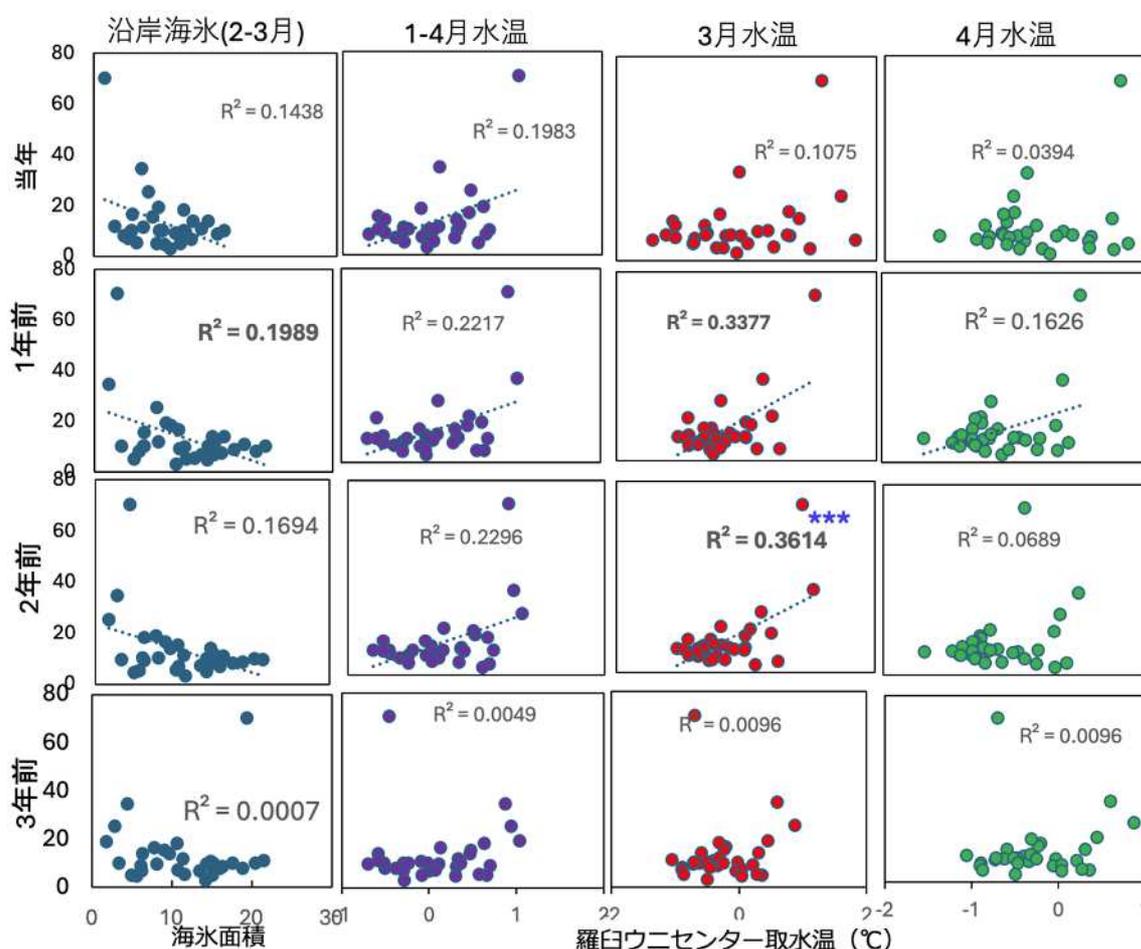


図5-5：羅臼町におけるスケトウダラ漁獲量に対する海氷勢力（1～4月）と各月水温の関係。当該年と1～3年間の時間遅れについて検討したところ、2年前の3月水温と最も強い正相関が認められた。

キョクダラやコマイとは対照的な応答であると考えられた。次に、サケについても同様の検討を行った（図5-6）。本種は概ね4歳秋季に産卵帰帰し漁獲対象となるため、まず当該年の秋季（9～11月）と春～夏季（4～8月）の水温と漁獲量の関係を調べたところ、秋季は無相関（ $R^2=0.03$ ）であったのに対して、春～夏季水温とは $R^2=0.22$ と緩やかながらも有意な負の相関が認められた（ $P<0.01$ ）。これは秋季の表層は輻射や水塊交換のため表層水温は上昇しても、初夏期頃の低い水温の影響がサケが遊泳する亜表層に

保存されていることを反映すると考えられた。当該年の沿岸海水面積とサケ漁獲量も緩い正の相関を示し ( $R^2=0.131, P<0.05$ )、冬春季の海水勢力の影響が秋の漁期まで亜表層に残存し、サケの漁況には正の影響を及ぼすことが示された。一方、サケが降海し沿岸で索餌する時期には低水温が負の影響を及ぼすと考えられてきたため、4年前の表層水温との関係を調べた。その結果、4月および5月の水温との間には緩やかながらも負の相関が認められた。これは、降海期の水温が低い方が4年後の回帰量が増えることを意味しているが、上述の予想に反するものであった。この要因として、根室海峡に來遊するサケの大部分は当海域への流入河川を起源としないため、局地的な低水温の影響を、より広域的な(海水増大と関連した)生産性増大の恩恵が上回るためと考えられた。その傍証として3年前の海水勢力では沿岸よりも広域のほうがより強い正相関が認められ、これは1歳時の餌環境へ正の影響をもたらしていることを示唆している。日本系サケはオホーツクで当歳秋季までを過ごすとされているが、オホーツク海の縁辺に位置する根室海峡に來遊するサケは、1歳以降も当海域を索餌場として利用しているのかもしれない。以上のように、根室海峡のサケにおいては海水勢力と関連しがちな春季の低水温は必ずしも後の來遊期の漁況に悪影響をもたらさず、むしろ若齢期の餌環境の向上を通じて、正の影響をもたらすことが示唆された。タラ科魚類ではこれと反対に強い海水勢力が資源動態に負の影響を与えることが示唆されたが、今後海水勢力が一層後退し、その負の影響が従来豊かであったオホーツク海の生産性に及んでしまった場合、高水温による再生産への正の影響は打ち消され、従来と異なるフェーズの資源動態を示す可能性もあるだろう。

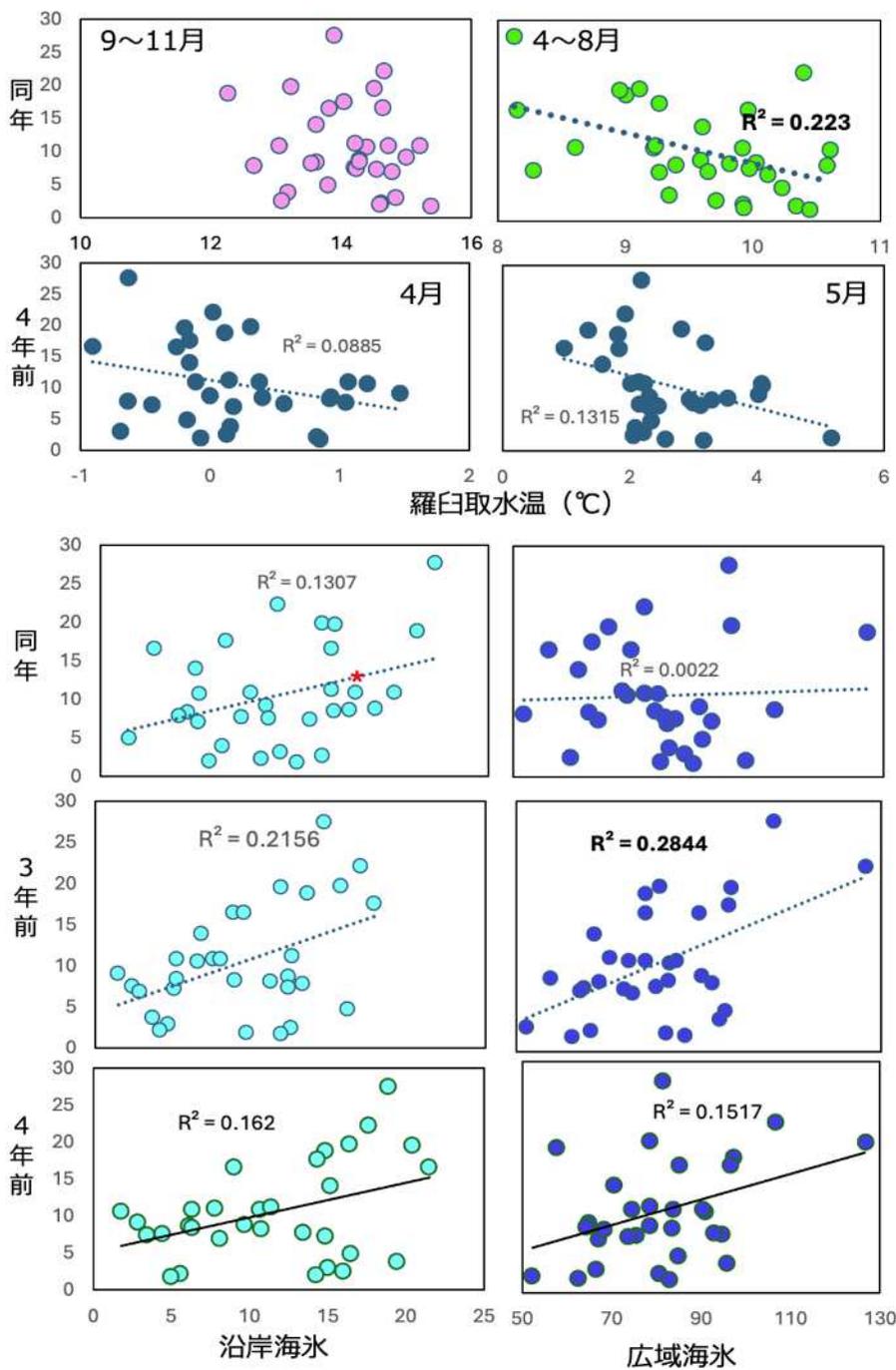


図5-6：羅臼町におけるサケ漁獲量と水温および海水勢力の関係。水温については当該年と4年前、海水勢力に関してはそれらに3年前を併せて検討した。当該年水温は漁期に該当する9～11月よりもむしろ4～8月で負相関が認められ、海水勢力では3年前との相関が最も高い正相関が見出された。

(3) 知床半島周辺海域における海棲哺乳類の分布とモデル化

目視調査では春期～夏期にミンククジラ *Balaenoptera acutorostrata*、ナガスクジラ *B. physalus*、シャチ *Orcinus orca*が見られ、夏期にはイシイルカ *Phocoenoides dalli*やマッコウクジラ *Physeter macrocephalus*が出現し、秋期になるとナガスクジラやシャチが消失し、カマイルカ *Lagenorhynchus obliquidens*が出現し

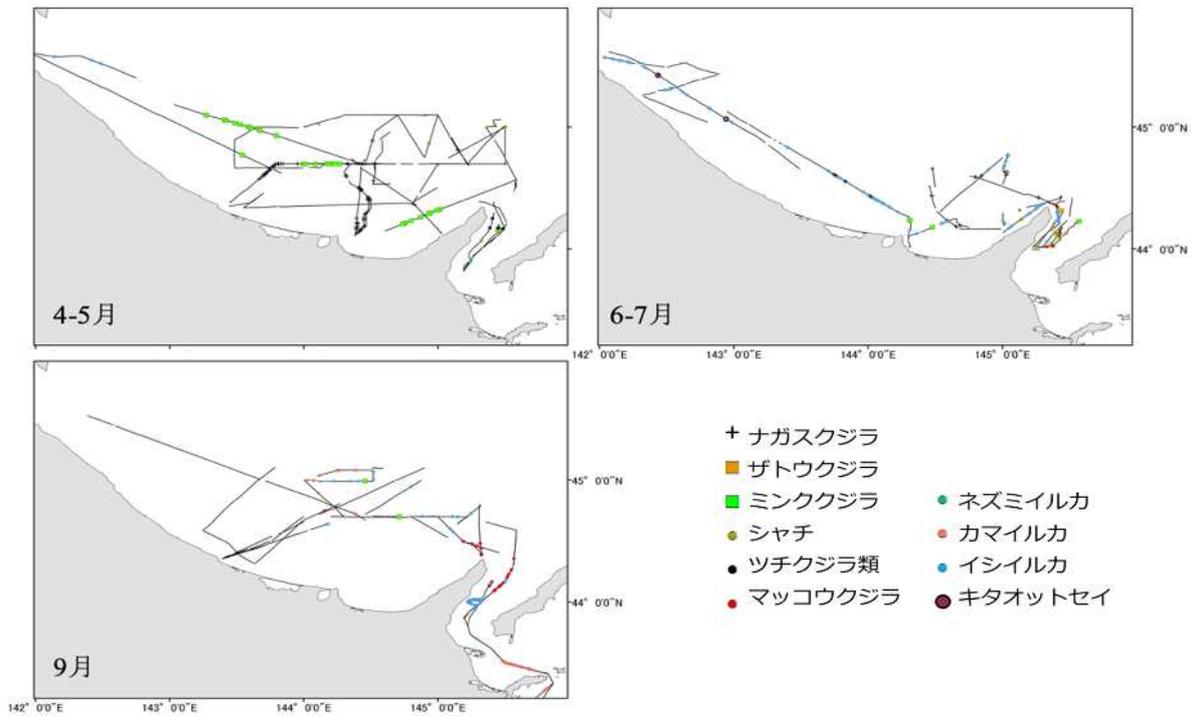


図5-7：各時期における目視調査の結果。黒線は航路，シンボルは各種の発見位置を示す。

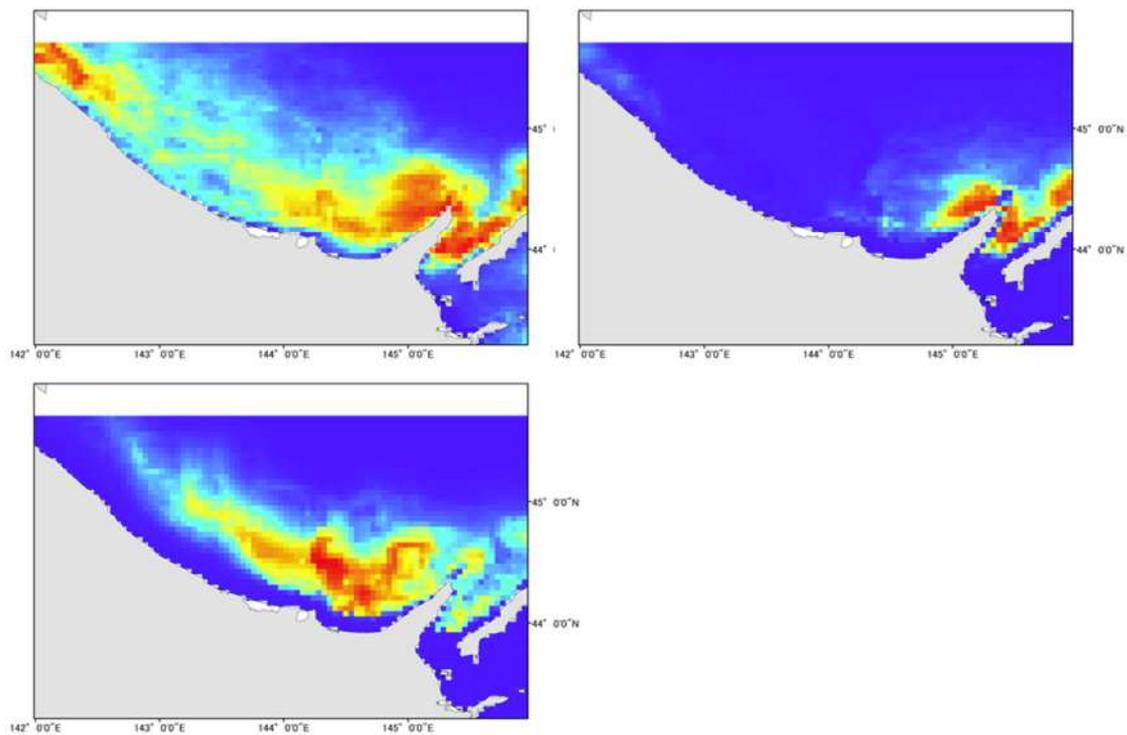


図5-8. 種分布モデルによるイシイルカ（左上），マッコウクジラ（右上）およびナガスクジラ（左下）の分布推定。

た(図5-7)。ミンククジラやナガスクジラといったヒゲクジラ類は、本海域においてオキアミ類を採餌していると考えられる。体長6-8 mのミンククジラが春から秋にかけて調査海域で見られた一方、体長18-20 mのナガスクジラは秋になると見られなくなった。このことは、ナガスクジラがミンククジラよりも早く繁殖海域への回遊を開始する可能性、あるいは、体長が大きく、大量の餌が必要なナガスクジラにとって、秋の知床海域は採餌場所として適していない、つまり餌であるオキアミ類が高密度に分布していない可能性の両者が考えられる。また、種分布モデルから、海棲哺乳類の種により利用海域は異なり、イシイルカやカマイルカのように知床半島東西のオホーツク海を広く利用する種、マッコウクジラやシャチのように知床半島周辺のみを利用する種、ナガスクジラやミンククジラのように半島西部が生息適地となる種がみられた(図5-8)。これら鯨類の分布には水深、海底傾斜、距岸距離といった地形的要因が影響を及ぼすことが示された。また、計量魚群探知機の音響反応と地形的要因の関係から、餌生物の分布が鯨類分布に影響を及ぼしている可能性も示された。

#### (4) 受動的音響サンプリングを利用した海獣類モニタリング手法の開発

受動的音響モニタリング(PAM)による音響記録では、カマイルカ、シャチ、マッコウクジラに加えてクラカケアザラシ *Histiophoca fasciata* の鳴音が確認された(図5-9)。クラカケアザラシの鳴音について、深層学習を利用した検出器をもとに、転移学習を用いて自動検出器を作成したところ、シャチ鳴音の取り違いが頻発しており複数年のデータへの適用には課題が残ったものの、マニュアルによる検証を合わせることで、精度を高く保ちつつ解析に要する時間を大幅に短縮することが可能となった。手動レビュー

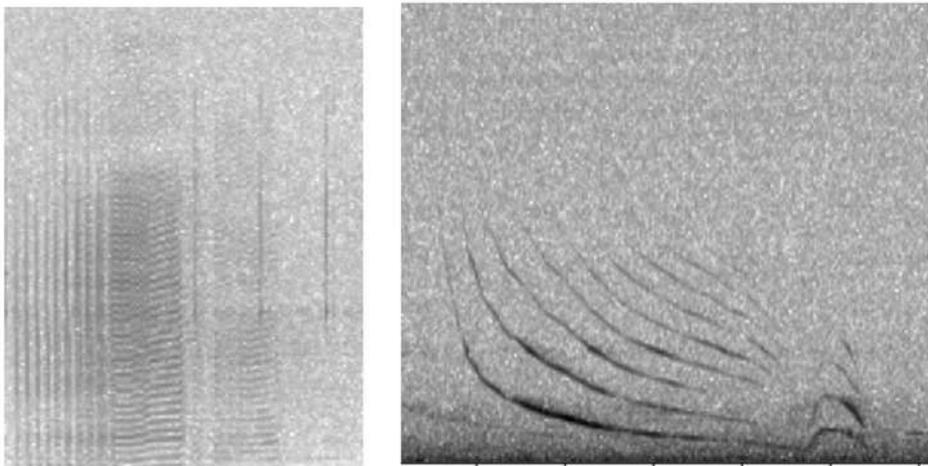


図5-9. PAMによって録音されたカマイルカ(左)とクラカケアザラシ(右)のエコーグラム。

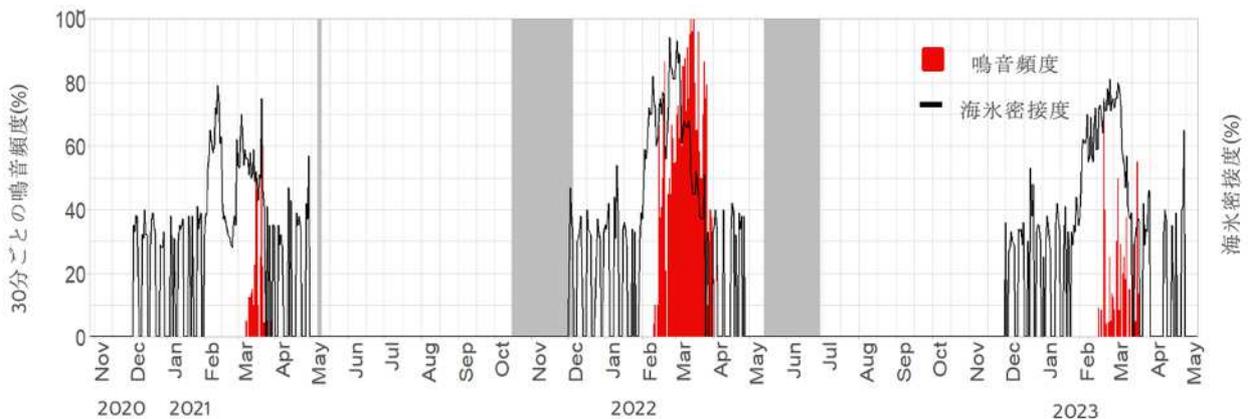


図5-10(図0-10). 本研究の音響収録期間を通じた海水密度(黒線)とクラカケアザラシの鳴音頻度(赤棒). 灰色網掛け部分は、音響データが得られなかった時期を示す。

を合わせた鳴音データについて経年変動を調べ、根室海峡内の海氷面積と比較したところ、クラカケアザラシの出現は海氷が存在し得る2～3月期のみを確認され、その出現状況は年によって大きく異なっていた。特に海氷勢力の変動と同調しており、海氷面積が大きい時に鳴音の出現頻度が増加する傾向が示された(図5-10)。クラカケアザラシは繁殖期と換毛期には海氷に上陸する必要があり、本研究からも海氷の存在が重要であることが示された。近年、知床半島周辺海域を含めたオホーツク海では海氷の減少が指摘されているため、本海域のクラカケアザラシにも負の影響が及ぶことが危惧された。

(5) プランクトン群集構造と機能の分析

マイクロプランクトン群集の空間分布では、19属42種の珪藻類、7属の渦鞭毛藻類、1属の珪質鞭毛藻類および繊毛虫類が出現し、6つの群集に区分された(図5-11)。特に、冷水帯に分布していた群集Eは、細胞内にドウモイ酸を有する *Pseudo-nitzschia pseudodelicatissima* や麻痺性貝毒の原因種である *Alexandrium tamarense* や *Alexandrium catenella* を含む *Alexandrium* spp. の細胞数密度が3～11倍も多かった。このことは、冷水帯による高生産は、生態系および水産資源のいずれの観点からも負の影響をもたらす可能性を示している。

当研究項目では、夏季の知

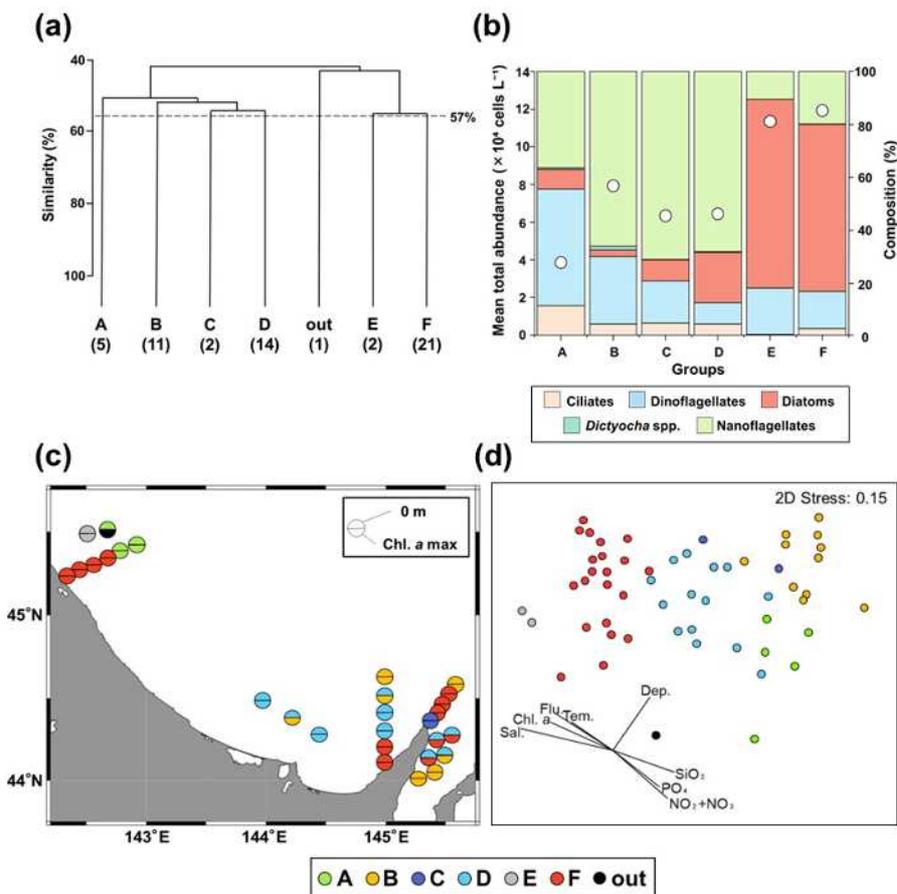


図5-11：マイクロプランクトンの群集分け (a)、各群集の細胞数密度と分類群組成 (b)、各群集の水平分布 (c)、各群集に及ぼす環境要因の影響 (d)。

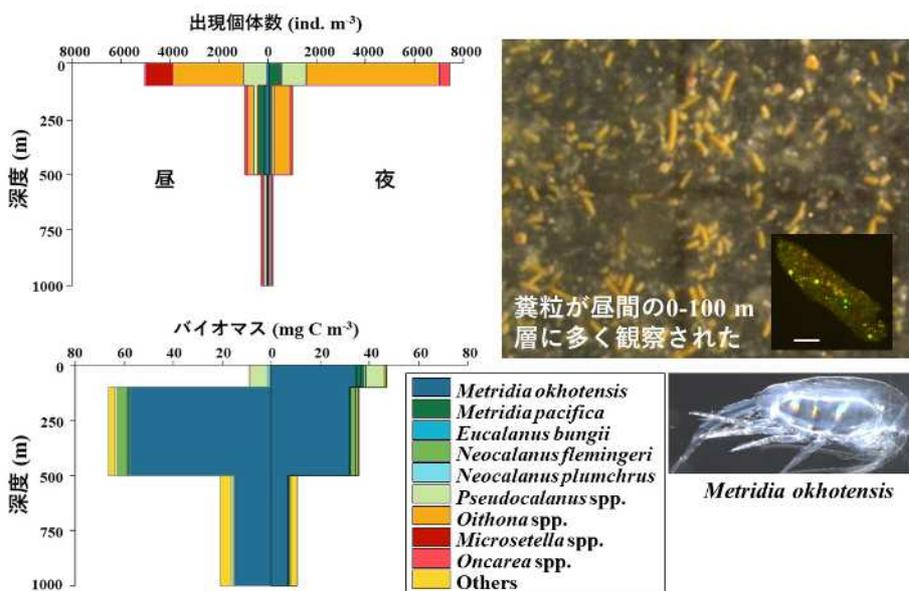


図5-12：カイアシ類出現個体数の昼夜鉛直分布。上の図の単位は出現個体数密度、下の図はバイオマス。右上は、昼間の水深0-100 m層において多数見られたカイアシ類 *Metridia okhotensis* が排泄したと考えられる糞粒。

床半島周辺におけるマイクロプランクトン群集の空間分布を調査し、宗谷暖流が卓越する沿岸域および中冷水の湧昇域では、主に珪藻類が優占し、沖合域では、主にナノ鞭毛藻類が優占しており、当該海域において、重要な基礎生産者が海域間で異なることが示された。このような分布は、水塊（オホーツク海表層低塩分水、宗谷暖流水および中冷水）間の、栄養塩および鉄濃度の違いに起因すると考えられた。

夏季の知床半島東岸における動物プランクトン現存量と糞粒を介した物質輸送に関する研究では、カイアシ類は数的には小型な *Oithona* 属と *Pseudocalanus* 属が優占し、昼間の表層0-100 mにおいて、*Microsetella* 属が多く出現していた。これに対しバイオマスには大型なカラヌス目の *Metridia okhotensis* が卓越し、夜間に表層に上昇する日周鉛直移動を行っていた（図5-12）。糞粒のサイズは0.01 mm<sup>3</sup> pellet-1 付近に昼夜全ての層において極大があった。また大型 (>0.2 mm<sup>3</sup>) の糞粒は夜間にのみ観察された。飼育実験に基づく糞粒観察では、糞粒中に蛍光能を持つ植物プランクトン細胞が観察され、いずれの種の糞粒においてもシアノバクテリアの占有率が26-65%と最も高かった。また水深500-1000 mにおけるカラヌス目カイアシ類 *Gaetanus variabilis* C5MとC6F において食糞がみられた。表層0-100 mにおけるマイクロプランクトンの現存量は453 mg C m<sup>-2</sup>であった。いっぽうカイアシ類の摂餌量は84-266 mg C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>の間にあり、オキアミ類の摂餌量は13.0-27.1 mg C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>の間にあり、カイアシ類の摂餌量に比べてオキアミ類の摂餌量は約 1/10 であった。これら動物プランクトンによる日間摂餌量は、マイクロプランクトン現存量の22-65%に相当していた。現場水深0-100 m層における糞粒現存量は105-296 mg C m<sup>-2</sup>であった。対して、カイアシ類による排泄量は34-107 mg C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>の間にあり、オキアミ類による排泄量は5.2-10.9 mg C m<sup>-2</sup> day<sup>-1</sup>の間にあった。これは糞粒現存量の13-112%に相当していた（図5-13）。また本研究では VMPS で採集された糞粒を ZooScan による同定、計数およびサイズ測定を行った。糞粒はネット試料中に実際に大量に採集されており、ZooScanを用いた糞粒の同定と、正確なサイズ計測が可能であった。野外環境中における糞粒現存量の昼夜差を評価する上で、本研究で用いた細かな目合いによるネット採集と採集試料の画像解析は、今後利用可能な新手法と言える。知床羅臼深層水における動物プランクトン群集の経年変化と主要カイアシ類 *Metridia okhotensis* の生活史に関する研究では、深層水の水温は0.6-5.2°Cの間にあり、季節的に低水温期（2-5月）と高水温期（7-12月）に分けられ、経年的には2007-2009年に比べ2022-2023年のほうがやや高かった。沈殿量は50-1945 μL m<sup>-3</sup>の範囲にあり、2007-2009年は2月から5月にかけて複数回の高い値が見られたが、2022-2023年は周年を通して低い値であった。動物プランクトン量は、沈殿量、出現個体数、湿重量バイオマスのいずれにおいても2007-2009年に比べて2022-2023年

の方が少なかった。また動物プランクトンの分類群組成とカイアシ類の種組成において、最優占した分類群や種は3年を通して共通していたが、2番目に優占した分類群や種は2007-2009年と2022-2023年で異なっていた。北海道周辺の南部オホーツク海においては2000年代から2010年にかけて温暖化の傾向があり、その水温上昇度合いは高水温な夏季から秋季にかけて顕著であることが報告されている。本研究において見られた水温上昇パ

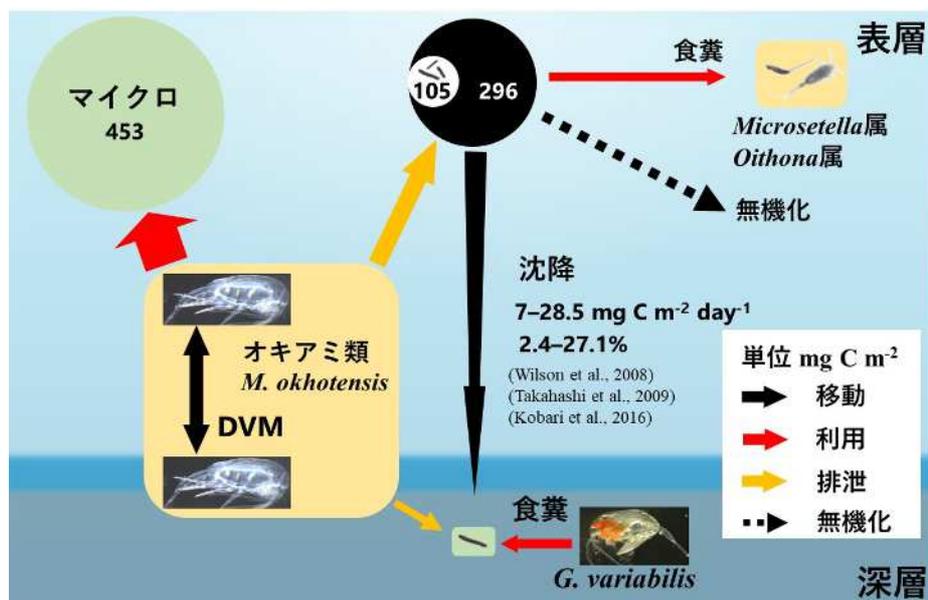


図5-13：夏季の知床半島東岸における各種プランクトンの現存量と、動物プランクトンの糞粒を介した鉛直的な炭素輸送量。

ターンは、これと一致するものであったが、同時期の海面水温の季節変化とは一部に経年的な不一致が見られた。また南部オホーツク海では、動物プランクトンの種毎の分布水深が鉛直的に明確に異なることが知られており、2022～2023年は2007～2009年に比べて、ポンプ取水口に存在する水塊や動物プランクトン群集が、鉛直的もしくは経年的に異なっていた可能性が示された。

羅臼深層水中のカイアシ類出現個体数に最優占した *M. okhotensis* の個体群構造、雌雄比および雌成体の生殖腺成熟には明確な季節変化があり、この季節変化は調査を行った3年でほぼ共通していた。*M. okhotensis* の個体群構造は、1-4月にかけて成体 (C6) が多くなっていた。雌雄比は C5 では周年を通して 1:1 であったが、C6 には明確な季節性が見られた。雌成体の生殖腺は、7-11月は大半が未発達であったが、12月から発達が始まり、2-5月は産卵中の個体が優占し、そのピークは4月末にあった (図5-14)。これらの季節変化は、南部オホーツク海における *M. okhotensis* に特徴的な生物季節的パターンであると考えられた。本研究から推定される本種の生活史は、以下の通りである。*M. okhotensis* は、高水温期 (7-11

月) には日周鉛直移動を行わず、雌は成体 (C6) で未発達な生殖腺のまま、雄はC5で深海にて休眠状態 (越夏) にあると考えられる。12月頃になると雄が成体へと脱皮を始め、この時期に雌雄比は雄に偏るといえる。同時に雌成体の生殖腺発達が始まり、4月になり植物プランクトンブルームが起これると、雌成体は鉛直移動を開始し表層にて産卵を行うと考えられた。本研究では約2週間間隔で周年を通じた採集により、*M. okhotensis* 再生産タイミングの季節変化について明らかにすることが出来たが、採集に用いたストレイナーが目合い420 μmと粗く、*M. okhotensis* について後期発育段階しか定量ができておらず、初期発育段階の季節変化については不明なままである。また採集は水深356 mからのみであるため、表層で起こるとされている本種の産卵や、初期発育段階の成長といったイベントを把握できていない。これら表層で起こる現象や初期発育段階の動態について明らかにすることは今後の課題である。

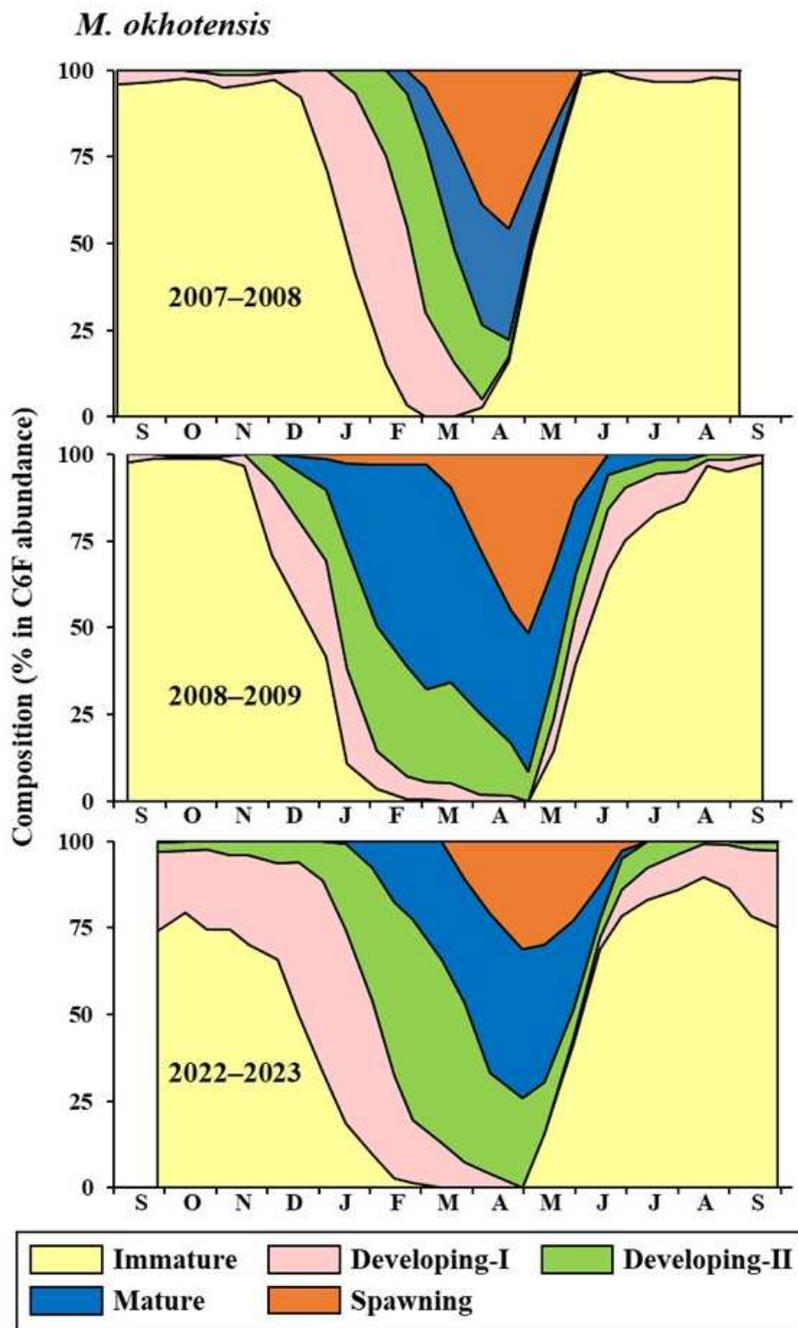


図5-14：羅臼深層水における主要カイアシ類 *Metridia okhotensis* 雌成体の生殖腺発達度合いの割合の季節変化。

## 5. サブテーマ5 研究目標の達成状況

サブテーマ5の目標は、海氷・水温等の物理環境と低次生産の影響が高次栄養段階に伝搬する経路を明らかにすることである。そのために、過年度試資料から組成・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した。多様な海洋生物からなる生物群集の環境変動に対する鍵種の選定とその応答を解析することにより、知床海域の温暖化に対する群集構成と食物網構造への影響を評価し、温暖化リスクを提示する。また、海氷を出産などの上陸場として利用するアザラシ等海棲哺乳類の来遊・滞在などデータはほとんどないため、水中音響技術等を用いてデータを蓄積し、温暖化リスク評価の基礎資料とすることを目標とした。

魚類に関しては、食物網を通じた環境変動の影響伝搬を具体的に示すことは叶わなかったものの、群集構造の解析と個別種の動態分析を通じて、海氷勢力の変化が及ぼす影響を示すことができた。また、海氷とそれと相互に関連した水温場の変化が主要水産資源種に及ぼす影響に関しては、同一の魚種でも時間遅れを伴い生活史の異なるステージで正負逆の効果をもたらすことを示すことができた。ただし、直近年にみられた極端な高水温の影響は未だデータセットに取り込まれていなかったため、データが更新され次第再解析してみる必要がある。海棲哺乳類に関しては、これまで基礎となるデータ蓄積がほとんどなかったため、新たな調査により主要種に関する分布状況を明らかにし、分布予測モデルまで構築した。また、受動的音響サンプリングによる複数年時に跨がる調査を始めて実施し、海氷勢力の経年変動とクラカケアザラシ出現状況の関連を示すことができた。その際には、膨大な生データに対して機械学習的アプローチを取ることにによる効率的なデータ解析方法が開発できた点は、特筆に値する。サブテーマ5の海洋低次生態系（プランクトン）について、マイクロプランクトン、動物プランクトンによる鉛直的な物質輸送量を明らかに出来て、査読付論文に発表できた。経年変化については、羅臼深層水でのサンプリングで明らかに出来た。

以上より、目標どおりの成果をあげたと判断する。

### Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

※この項目の成果番号は通し番号です。

#### (1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	21
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	3
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	1
口頭発表（学会等・査読なし）：	93
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	24
マスコミ等への公表・報道等：	11
研究成果による受賞：	3
その他の成果発表：	0

#### (2) 誌上発表

< 査読付き論文 >

成果番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	KURODA H., T. TANAKA, S. ITO, and T. SETOU (2021) Numerical study of diurnal tidal currents on the Pacific shelf off the southern coast of Hokkaido, Japan. <i>Continental Shelf Research</i> , 230, 104568, DOI:10.1016/j.csr.2021.104568.
2	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. <i>Journal of Marine Science and Engineering</i> , 9, 1335, <a href="https://doi.org/10.3390/jmse9121335">https://doi.org/10.3390/jmse9121335</a> .
3	NAKANOWATARI T., T. NAKAMURA, H. MITSUDERA, J. NISHIOKA, H. KURODA, and K. UCHIMOTO (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. <i>Progress In Oceanography</i> , 197, 102615, DOI:10.1016/j.pocean.2021.102615.

4	TOYOTA T., N. KIMURA, J. NISHIOKA, M. ITO, D. NOMURA, and H. MITSUDERA (2022) The interannual variability of sea ice area, thickness, and volume in the southern Sea of Okhotsk and its likely factors. <i>Journal of Geophysical Research</i> , 127(12), <a href="https://doi.org/10.1029/2022JC019069">https://doi.org/10.1029/2022JC019069</a> .
5	YUAN N. and H. MITSUDERA (2023) Cross-shelf overturning in geostrophic-stress-dominant coastal fronts. <i>Journal of Oceanography</i> , 79, 27-48, <a href="https://doi.org/10.1007/s10872-022-00661-6">https://doi.org/10.1007/s10872-022-00661-6</a> .
6	MUNDO, R., T. MATSUNAKA, T. NAKANOWATARI, Y. TANIUCHI, N. INOUE, H. KASAI, K. MASHITA, H. MITSUNUSHI, and S. NAGAO (2024) A review of the oceanographic structure and biological productivity in the southern Okhotsk Sea. <i>Progress in Oceanography</i> , 221, 103194, <a href="https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.103194">https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.103194</a> .
7	三寺 史夫, 佐伯 立, 井上 知栄, 植田 宏昭, 中野渡 拓也, 黒田 寛 (2024) 知床をはじめとする北海道オホーツク海沿岸海域における海氷変動予測実験, <i>低温科学</i> , 82, 143-152, doi: 10.14943/lowtemsci. 82. 143.
8	中野渡 拓也, 中村 知裕, 三寺 史夫 (2024) オホーツク海の海氷と潮汐を介した物質輸送モデリング研究, <i>低温科学</i> , 82, 103-118, doi: 10.14943/lowtemsci. 82. 103.

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
9	KURAMOCHI M. and H. UEDA (2023) Two types of wintertime teleconnection patterns over the western North Pacific associated with regionally different heating anomalies. <i>Journal of the Meteorological Society of Japan</i> , 101, 21-37, <a href="https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-002">https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-002</a> .
10	KAMAE Y., H. UEDA, T. INOUE, and H. MITSUDERA (2023) Atmospheric circulations associated with sea-ice reduction events in the Okhotsk Sea. <i>Journal of the Meteorological Society of Japan</i> , 101, 125-137, <a href="https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-007">https://doi.org/10.2151/jmsj.2023-007</a> .
11	UEDA H., M. KURAMOCHI, and H. MITSUDERA (2023) Interannual variations of sea-ice extent in the Okhotsk Sea - A Pan-Okhotsk climate system perspective. <i>Atmosphere-Ocean</i> , 61, 234-245, <a href="https://doi.org/10.1080/07055900.2023.2175639">https://doi.org/10.1080/07055900.2023.2175639</a> .
12	KURAMOCHI M., H. UEDA, T. IWASAKI, and K. TAKAYA (2023) Interannual variability of the mass-weighted isentropic zonal mean meridional circulation in the Northern Hemisphere winter. <i>Journal of Climate</i> , 36, 5605-5618, <a href="https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0895.1">https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0895.1</a> .
13	ASAZUMA Y., M. KURAMOCHI, and H. UEDA (2024) Intra-seasonal and interannual variations of sea ice along the Okhotsk coast of Hokkaido from the viewpoint of atmospheric circulation. <i>Okhotsk Sea and Polar Oceans Research</i> , 8, 8-16, <a href="https://doi.org/10.57287/ospor.8.8">https://doi.org/10.57287/ospor.8.8</a> .

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文
14	中村知裕, 野別貴博, 嶋田宏, 美坂正, 西岡純, 藤尾伸三, 柳本大吾, 三谷曜子, 山村織生, 三寺史夫 (2024) 知床周辺海域の沿岸モニタリングおよび船舶観測と係留系観測. <i>低温科学</i> , 82, 153-160, doi: 10.14943/lowtemsci. 82. 153.

成果 番号	【サブテーマ4】の査読付き論文
15	YAN D., J. NISHIOKA, T. TOYOTA, and K. SUZUKI (2022) Winter microalgal communities of the southern Sea of Okhotsk: A comparison of sea ice, coastal, and basinal seawater. <i>Progress in Oceanography</i> , 204, 102806, <a href="https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102806">https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102806</a> .

成果番号	【サブテーマ5】の査読付き論文
16	HAMOO, Y., K. MATSUNO, Y. MITANI, and A. YAMAGUCHI (2022) Spatial distribution of the protist community in the southern part of the Okhotsk Sea off Hokkaido during summer. <i>Journal of Oceanography</i> , 78, 89-101, DOI:10.1007/s10872-021-00630-5.
17	山口 篤, 濱尾優介, 松野孝平, 飯田高大 (2022) 2021年秋季北海道太平洋沿岸における有害赤潮藻 <i>Karenia selliformis</i> の水平分布および植物プランクトンの群集構造. <i>水産海洋研究</i> , 86, 41-49, DOI:10.34423/jsfo.86.2_41.
18	KOJIMA D., Y. HAMAO, K. AMEI, Y. FUKAI, K. MATSUNO, Y. MITANI, and A. YAMAGUCHI (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. <i>Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers</i> , 185: 103771, DOI: 10.1016/j.dsr.2022.103771.
19	FURUMAKI S., S. SHIGEMATSU, Y. IWAHARA, and Y. MITANI (2023) Fall distribution and diversity of cetaceans along the southern and eastern coasts of Hokkaido, Japan. <i>Regional Studies in Marine Science</i> , 62, 102913, DOI:10.1016/j.rsma.2023.102913.
20	YAMAMURA O, and K. KOOKA (2023) Community structure of demersal fish over the continental shelf off the southeastern coast of Hokkaido Island: The effect of eurythermy. <i>Journal of Sea Research</i> , 195, 102418. DOI: 10.1016/j.seares.2023.102418
21	岡部晴菜, 三谷曜子, 斎野重夫, 杉田知香, 古巻史穂, 尾澤幸恵, 小林希実 (2024) 北海道羅臼沖におけるザトウクジラ <i>Megaptera novaeangliae</i> 同一個体の複数回に亘る来遊の報告. <i>哺乳類科学</i> , 64, 1-1, DOI: 10.11238/mammalianscience.64.1.

< 査読付き論文に準ずる成果発表 (人文・社会科学分野) >

成果番号	【サブテーマ1】の査読付き論文に準ずる成果発表 (人文・社会科学分野)
	該当なし

成果番号	【サブテーマ2】の査読付き論文に準ずる成果発表 (人文・社会科学分野)
	該当なし

成果番号	【サブテーマ3】の査読付き論文に準ずる成果発表 (人文・社会科学分野)
	該当なし

成果番号	【サブテーマ4】の査読付き論文に準ずる成果発表 (人文・社会科学分野)
	該当なし

成果番号	【サブテーマ5】の査読付き論文に準ずる成果発表 (人文・社会科学分野)
	該当なし

## &lt;その他誌上発表（査読なし）&gt;

成果 番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
22	TOYOTA T., Y. YAMASHITA, and H. KODA (2023) A study on the properties of granular ice of sea ice from laboratory experiments. Proceedings of the 37th International Symposium on Okhotsk Sea & Polar Oceans, 37, 209-212.

成果 番号	【サブテーマ2】のその他誌上発表（査読なし）
	該当なし

成果 番号	【サブテーマ3】のその他誌上発表（査読なし）
	該当なし

成果 番号	【サブテーマ4】のその他誌上発表（査読なし）
	該当なし

成果 番号	【サブテーマ5】のその他誌上発表（査読なし）
23	櫻木雄太, 川上達也, 笠井亮秀, 山村織生, 三谷曜子 (2023) 夏の知床半島周辺海域における魚類相. 日本水産学会誌, 89 (5), 466-466.
24	三谷曜子, 古巻史穂, 櫻木雄太 (2023) なぜ知床半島周辺海域に海棲哺乳類が多く集まるのか. 日本水産学会誌, 89 (5), 468-468.

## (3) 口頭発表

## &lt;口頭発表（国際学会等・査読付き）&gt;

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
25	T. TOYOTA, N. KIMURA, J. NISHIOKA, M. ITO, D. NOMURA, and H. MITSUDERA: The 28th IUGG General Assembly (国外) (2023) The interannual variability of sea ice area, thickness, and volume in the southern Sea of Okhotsk and its likely factors.

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	該当なし

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	該当なし

成果 番号	【サブテーマ4】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	該当なし

成果 番号	【サブテーマ5】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	該当なし

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
26	豊田威信, 木村詞明, 西岡純, 伊藤優人, 野村大樹, 三寺史夫: 日本海洋学会2021年度秋季大会 (オンライン) (2021) オホーツク海南部の海水量の年々変動特性とその要因.
27	佐伯立, 三寺史夫, 中野渡拓也, 黒田寛, 岩本勉之: 北海道大学 低温科学研究所 研究集会「縁辺海と外洋とを繋ぐ対馬暖流系の物理・化学・生物過程」(2021) 領域海氷-海洋結合モデルに現れる宗谷海峡における表層流の日変動と道東沿岸の海氷分布との関係性について.
28	H. MITSUDERA, H. UEDA, T. NAKAMURA, J. NISHIOKA, O. YAMAMURA, R. SAIKI, T. USUI, and T. NAKANOWATARI: The 36th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (online) (2022) Shiretoko Marine Project on Prediction of Sea Ice Variations due to Climate Change, and its Impacts on Biogeochemical Processes and Marine Ecosystems.
29	T. TOYOTA, Y. ARIHARA, T. WASEDA, M. ITO, and J. NISHIOKA: The 36th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (online) (2022) Observations of ice cakes with a drone in the southern Sea of Okhotsk.
30	N. YUAN and H. MITSUDERA: Ocean Sciences Meeting (online) (2022) Cross-shelf overturning in geostrophic-stress-dominant coastal fronts.
31	西川穂波, 白岩孝行, 小林勇介: 2022年日本地理学会春季学術大会 (オンライン) (2022) 知床世界自然遺産における海岸漂着物に関する研究.
32	豊田威信, 木村詞明, 西岡純, 伊藤優人, 野村大樹, 三寺史夫: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究 研究集会「知床とオホーツク海の海氷-海洋-物質循環-生態系の連関と変動」(国内) (2022) オホーツク海結氷期の氷況年々変動の地域特性.
33	中野渡拓也, 渡邊英嗣, 中村知裕, 西岡純, 三寺史夫: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究集会「知床とオホーツク海の海氷-海洋-物質循環-生態系の連関と変動」(国内) (2022) オホーツク海の海氷鉄モデリング研究.
34	R. SAIKI, H. MITSUDERA, A. FUJISAKI-MANOME, N. KIMURA, J. UKITA, T. TOYOTA, and T. NAKAMURA: 12th International Workshop on Modeling the Ocean (online) (2022) Mechanism of ice-band pattern formation caused by resonant interaction between sea ice and internal waves in a continuously stratified ocean.
35	N. YUAN and H. MITSUDERA: 12th International Workshop on Modeling the Ocean (online) (2022) Cross-shelf overturning in geostrophic-stress-dominant coastal fronts.
36	R. SAIKI, H. MITSUDERA, H. KURODA, T. NAKANOWATARI, and K. IWAMOTO: 日本地球惑星科学連合大会 (国内) (2022) A relationship between daily variability of surface current velocity in Soya Strait and sea-ice distribution near east coast of Hokkaido in ice-ocean coupled regional ocean model.

37	黒田寛, 高木聖実, 谷内由貴子, 東屋知範: 2022年度水圏生態系モデリングシンポジウム (国内) (2022) 日本周辺太平洋陸棚域～開放型湾の低次生態系モデリング.
38	H. NISHIKAWA, Y. KOBAYASHI, and T. SHIRAIWA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) Research on beach litter in the Shiretoko World Natural Heritage Site.
39	西川穂波, 小林勇介, 白岩孝行: 日本地理学会 春季大会 (国内) (2023) 知床世界自然遺産地域における海岸漂着物に関する研究.
40	T. TOYOTA, Y. YAMASHITA, and H. KODA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) A study on the properties of granular ice of sea ice from laboratory experiments.
41	佐伯立, 三寺史夫, 中野渡拓也, 黒田寛, 井上知栄, 植田宏昭: 第37回北方圏国際シンポジウム (国内) (2023) オホーツク海の温暖化実験.
42	H. MITSUDERA, H. UEDA, T. NAKAMURA, J. NISHIOKA, and O. YAMAMURA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) Shiretoko Project: Prediction of sea ice variations due to climate change and its impacts on biogeochemical processes and marine ecosystems.
43	佐伯立, 三寺史夫, 中野渡拓也, 黒田寛, 井上知栄, 植田宏昭, 岩本勉之: JPGU (2023) 多氷年と少氷年のオホーツク海周辺のプレコンディショニングについて.
44	佐伯立, 三寺史夫, 中野渡拓也, 黒田寛, 井上知栄, 植田宏昭, 岩本勉之: 2023年秋季海洋学会 (2023) 温暖化実験により予測される道東沿岸域の海水分布の変化.
45	佐伯立, 三寺史夫, 中野渡拓也, 黒田寛, 井上知栄, 植田宏昭, 岩本勉之: 低温科学研究所共同研究集会 知床とオホーツク海の海水-海洋-物質循環-生態系の連関と変動 (2023) オホーツク海海水の温暖化実験.
46	T. NAKANOWATARI, T. NAKAMURA, H. MITSUDERA, J. NISHIOKA, H. NISHIKAWA, H. KURODA, and K. UCHIMOTO: PICES Annual meeting 2023 (国外) (2023) Numerical study on decadal-scale change in primary production in the subarctic North Pacific and the Sea of Okhotsk.
47	黒田寛: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究 研究集会「知床とオホーツク海の海水-海洋-物質循環-生態系の連関と変動」 (国内) (2023) 近年の西部亜寒帯循環、冬季オホーツク海の循環、アリューシャン低気圧.
48	黒田寛: 第16回さけ学研究会 (魚類系統研究会ジョイント大会) プログラム (国内) (2023) 招待講演 近年の北日本の海洋環境: 海洋熱波と海洋寒波.
49	T. TOYOTA: International Workshop on Arctic Ocean Observation: Future Collaboration by Research Vessels and Icebreakers (国内) (2023) History, methods, and findings of the Okhotsk sea-ice observations onboard SOYA over 25 years (invited)
50	豊田威信・西岡純・久賀みづき・村山愛子: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究 研究集会「知床とオホーツク海の海水-海洋-物質循環-生態系の連関と変動」 (国内) (2023) ビデオ画像解析から探るオホーツク海南部のアイスアルジ分布特性
51	R. SAIKI, H. MITSUDERA, T. NAKANOWATARI, H. KURODA, T. INOUE, H. UEDA: 第38回北方圏国際シンポジウム (2024) Difference of Pre-conditioning between Heavy-ice-year and Light-ice year in Okhotsk Sea.
52	H. MITSUDERA, R. SAIKI, T. INOUE, H. UEDA, T. NAKANOWATARI, and H. KURODA: 第38回北方圏国際シンポジウム (2024) Prediction of sea ice variations off Hokkaido in the southern Sea of Okhotsk.
53	T. NAKANOWATARI, E. WATANABE, T. NAKAMURA, J. NISHIOKA, and H. MITSUDERA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (国内) (2024) Numerical modeling study on sea ice iron transport and its impact on the primary production in the Sea of Okhotsk.
54	西川穂波, 白岩孝行: 日本地理学会 春季大会 (国内) (2024) 知床世界自然遺産・ルシヤ地区海岸における漂着物の経時変化.

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表 (学会等・査読なし)
----------	--------------------------

55	朝妻勇貴, 植田宏昭: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究 研究集会 (国内) (2022) 北海道オホーツク沿岸における海氷の離岸接岸を規定する大気循環場.
56	朝妻勇貴, 植田宏昭, 三寺史夫: 日本気象学会2022年度春季大会 (国内) (2022) 北海道オホーツク沿岸海氷の離岸接岸を規定する大気循環場.
57	植田宏昭, 倉持将也, 三寺史夫: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究 研究集会 (国内) (2022) 環オホーツク気候システムから見たオホーツク海における海氷の年々変動機構.
58	井上知栄, 植田宏昭, 釜江陽一: 日本気象学会2022年度春季大会 (国内) (2022) 環オホーツク海領域におけるCMIP6マルチ気候モデルの冬季気候再現性とその将来変化.
59	井上知栄, 植田宏昭, 釜江陽一: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究 研究集会 (国内) (2022) CMIP6気候モデル群における冬季オホーツク海周辺域の大気循環場の将来変化.
60	釜江陽一, 植田宏昭, 井上知栄, 三寺史夫: 日本気象学会2022年度春季大会 (国内) (2022) オホーツク海海氷面積の急変動をもたらす大気循環場の特徴.
61	釜江陽一, 植田宏昭, 井上知栄, 三寺史夫: Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国内) (2022) オホーツク海海氷面積の急変動をもたらす大気循環場の特徴.
62	釜江陽一, 植田宏昭, 井上知栄, 三寺史夫: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究 研究集会 (国内) (2022) オホーツク海海氷面積の急変動をもたらす大気循環場の特徴.
63	M. KURAMOCHI, and H. UEDA: Japan Geoscience Union Meeting 2022 (国内) (2022) Different teleconnection patterns and resultant turnabout of anomalous air temperature over East Asia in winter 2020/21.
64	倉持将也, 植田宏昭: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究集会 (国内) (2022) アリューシャン低気圧の年々変動機構と環オホーツク気候システムへの影響.
65	Y. ASAZUMA, H. UEDA, and H. MITSUDERA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) Seasonal and inter annual variations of sea ice along the Okhotsk coast of Hokkaido from the viewpoint of coupled atmosphere-ocean dynamics.
66	T. INOUE, H. UEDA, Y. KAMAE, and H. MITSUDERA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) Reproducibility and future projections of winter climate over the Pan-Okhotsk Sea region based on CMIP6 multi-model datasets.
67	H. UEDA, M. KURAMOCHI, and H. MITSUDERA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) Year-to-year fluctuations of sea-ice extent in the Okhotsk Sea associated with the winter monsoon spanning Eurasia and the North Pacific.
68	M. KURAMOCHI, and H. UEDA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) Relationship between fluctuations of the Aleutian low and the global atmospheric circulation from a Pan-Okhotsk climate perspective.
69	井上知栄, 植田宏昭: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究集会 (国内) (2023) CMIP6の複数排出シナリオにおける環オホーツク海域の冬季気候の将来変化.
70	植田宏昭, 倉持将也, 井上知栄, 三寺史夫: 日本気象学会2023年度秋季大会 (国内) (2023) 環オホーツク気候システムから読み解く冬季モンスーン変動.
71	釜江陽一, 横田百音: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究集会 (国内) (2023) 温暖な気流によるオホーツク海海氷の急激な減少.
72	帯向伸悟, 倉持将也, 植田宏昭: 日本気象学会2023年度秋季大会 (国内) (2023) 季節内変動スケールにおけるシルクロードパターンの多様性とその励起源について.
73	倉持将也, 植田宏昭: 日本気象学会2023年度秋季大会 (国内) (2023) 特定温位面以下の寒気質量を用いた夏季オホーツク海高気圧に伴う寒気流出と豪雨に関する解析.
74	坂本玲奈, 植田宏昭: 日本気象学会2023年度秋季大会 (国内) (2023) 冬季のテレコネクションパターンがもたらす日本国内の地域別気候影響.
75	横田百音, 釜江陽一: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究集会 (国内) (2023) 早春にオホーツク海南部の海氷面積を減少させる大気現象.
76	澤 悠夏, 唐木達郎, 植田宏昭, 佐伯 立, 三寺史夫: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究集会 (国内) (2023) 低気圧が駆動する暖水湧昇に伴うオホーツク海の海氷融解.

77	Y. SAWA, T. KARAKI, H. UEDA, R. SAIKI, H. MITSUDERA, and H. KURODA: The 38th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2024 (国内) (2024) Sea ice melting associated with vertical mixing driven by extratropical cyclones in the Sea of Okhotsk.
78	Y. KAMAE, and M. YOKOTA: The 38th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2024 (国内) (2024) Warm conveyor belt and warm currents causing the retreat of sea ice along the coast of the Sea of Okhotsk.
79	M. YOKOTA, and Y. KAMAE: The 38th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2024 (国内) (2024) Sea ice melting associated with vertical mixing driven by extratropical cyclones in the Sea of Okhotsk.

成果番号	【サブテーマ3】の口頭発表（学会等・査読なし）
80	中村知裕, 野別貴博, 美坂正, 藤尾伸三, 柳本大吾, 西岡純, 三寺史夫: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究 研究集会「知床とオホーツク海の海氷-海洋-物質循環-生態系の連関と変動」(国内) (2022) 知床海域の海洋モニタリングと船舶観測.
81	藤尾伸三, 柳本大吾, 中村知裕, 西岡純, 三寺史夫: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究 研究集会「知床とオホーツク海の海氷-海洋-物質循環-生態系の連関と変動」(国内) (2022) 係留系による東樺太沿岸流の通年観測.
82	野別貴博, 山石秀樹, 竹田和人, 中村知裕: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究 研究集会「知床とオホーツク海の海氷-海洋-物質循環-生態系の連関と変動」(国内) (2022) 羅臼深層水の水温について～季節・年変化の特徴～.
83	植田純生, 中村知裕: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究 研究集会「知床とオホーツク海の海氷-海洋-物質循環-生態系の連関と変動」(国内) (2022) 北海道オホーツク海陸棚の海底混合層と高濁度水.
84	中村知裕, 植田純生, 野別貴博, 美坂正, 三谷曜子, 西岡純, 三寺史夫: 令和5年度日本水産学会春季大会シンポジウム「知床周辺海域のホットスポット形成: 海洋環境から高次捕食者まで」(国内) (2023) 夏季オホーツク海北海道沿岸の水塊: タタール海峡水・海底混合層・北部根室海峡に注目して.
85	T. NAKAMURA, T. NOBETSU, T. MISAKA, J. NISHIOKA, Y. MITANI, O. YAMAMURA, and H. MITSIDERA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) Ocean monitoring and ship observations around Shiretoko.
86	S. FUJIO, D. YANAGIMOTO, T. NAKAMURA, J. NISHIOKA, and H. MITSIDERA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) Year-round observation of the East Sakhalin Coastal Current using a mooring system.
87	K. ITO and T. NAKAMURA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) Analysis of published and unpublished observation data around Shiretoko.
88	中村知裕・野別貴博・美坂正・嶋田宏・藤尾伸三・柳本大吾・西岡純・三寺史夫: 2023年度低温科学研究所共同研究集会「知床とオホーツク海の海氷-海洋-物質循環-生態系の連関と変動」(国内) (2023) 知床海域の海洋モニタリングと船舶観測2
89	藤尾伸三・柳本大吾・中村知裕・西岡純・小野数也・三寺史夫: 2023年度低温科学研究所共同研究集会「知床とオホーツク海の海氷-海洋-物質循環-生態系の連関と変動」(国内) (2023) 係留系による東樺太沿岸流の通年観測
90	野別貴博・竹田和人・中村知裕: 2023年度低温科学研究所共同研究集会「知床とオホーツク海の海氷-海洋-物質循環-生態系の連関と変動」(国内) 羅臼沿岸の定点における長期海洋観測データについて
91	伊藤薫・中村知裕・美坂正: 2023年度低温科学研究所共同研究集会「知床とオホーツク海の海氷-海洋-物質循環-生態系の連関と変動」(国内) 公開及び未公開データを用いたオホーツク海の各水塊の解析
92	植田純生, 中村知裕, 河野時廣, 伊藤薫: 日本海洋学会2023年度秋季大会 (国内) (2023) 北海道オホーツク海陸棚の海底混合層・高濁度水とその行方
93	野別貴博・竹田和人・山石秀樹・中村知裕: 第10回オホーツク海洋生物研究会研究集会「北海道周辺海域における低次生態系の現状」(国内) (2024) 羅臼沿岸の定点における長期水

	温・塩分データ.
94	T. NAKAMURA, T. NOBETSU, H. SHIMADA, T. MISAKA, J. NISHIOKA, Y. MITANI, O. YAMAMURA and H. MITSUDERA: The 38th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (国内) (2024) Ocean monitoring and ship observations around Shiretoko: 2.
95	K. ITO, T. NAKAMURA, and T. MISAKA: The 38th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (国内) (2024) Long-term variations of water masses in the southern part of the Okhotsk Sea using public and unpublished data.

成果 番号	【サブテーマ4】の口頭発表(学会等・査読なし)
96	西岡純, 豊田威信, 三寺史夫, 中村知裕, 小野数也, 大島慶一郎, 村山愛子, 鈴木光次, 渡辺裕, 今井望百花: 北海道大学 低温科学研究所 共同研究集会「縁辺海と外洋とを繋ぐ対馬暖流系の物理・化学・生物過程」(2021) 冬季から春季の南部オホーツク海における宗谷暖流とその周辺水塊の栄養物質環境.
97	渡邊裕, 西岡純, 三浦大輝, 豊田威信, 村山愛子, 黒田寛, 谷内由貴子, 中野渡拓也, 葛西広海: 北海道大学 低温科学研究所 共同利用研究(開拓型)研究集会「陸海結合システム: 沿岸域の生物生産特性を制御する栄養物質のストイキオメトリー」(2022) 東サハリン海流と海水融解水が沿岸親潮水と南部オホーツク海の栄養塩と鉄の分布に与える影響に関する研究.
98	今井望百花, 村山愛子, 小野数也, 山下洋平, 鈴木光次, 中村知裕, 大島慶一郎, 三寺史夫, 西岡純: 日本惑星科学連合2022年年会(2022) 海水融解水が南部オホーツク海における生物化学的環境と春季ブルームに与える影響.
99	鈴木光次, 閻冬, 渡邊翔, 深井悠里, 押野祐大, 吉田和広, 西岡純, 豊田威信, 伊藤優人, 入野智久: 日本海洋学会2022年度秋季大会(2022) 南部オホーツク海の春季植物プランクトンブルームを作る播種機構: アイスアルジーの重要性.
100	Y. SUN, J. NISHIOKA, T. TOYOTA, and K. SUZUKI: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) Differences in phytoplankton communities and their environmental factors in the southern Sea of Okhotsk between winter and spring.
101	M. IMAI, A. MURAYAMA, K. ONO, Y. YAMASHITA, K. SUZUKI, T. NAKAMURA, K. I. OHSHIMA, H. MITSUDERA, and J. NISHIOKA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) Impact of sea ice meltwater on biogeochemical condition in the southern Sea of Okhotsk.
102	J. NISHIOKA, T. TOYOTA, A. MURAYAMA, K. ONO, M. IMAI, Y. YAMASHITA, K. SUZUKI, T. NAKAMURA, K. I. OHSHIMA, and H. MITSUDERA: The 37th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2023 (国内) (2023) Characteristics of Water Masses and Nutrients conditions in the southern Sea of Okhotsk.
103	今井望百花, 村山愛子, 小野数也, 山下洋平, 鈴木光次, 中村知裕, 大島慶一郎, 三寺史夫, 西岡純: 東京大学 大気海洋研究所 共同利用研究集会「微量元素・同位体を用いた海洋生物地球化学研究(GEOTRACES-Japan)」(国内) (2023) オホーツク海における海水融解後の生物化学的環境と鉄供給インパクト.
104	今井望百花, 村山愛子, 小野数也, 山下洋平, 鈴木光次, 中村知裕, 大島慶一郎: 2023年度日本海洋学会秋季大会(2023) オホーツク海南部の水塊構造とFe濃度分布.
105	H. DENG, J. NISHIOKA, K. SUZUKI, I. YASUDA, and H. OGAWA: 2023年度日本海洋学会秋季大会(2023) Phytoplankton responses in iron and macro-nutrient fluxes from subsurface in the western North Pacific.
106	Y. SUN, J. NISHIOKA, T. TOYOTA, and K. SUZUKI: 2023年度日本海洋学会秋季大会(2023) Differences in phytoplankton communities and their environmental factors in the southern Sea of Okhotsk between winter and spring.
107	M. IMAI, A. MURAYAMA, K. ONO, Y. YAMASHITA, K. SUZUKI, T. NAKAMURA, K. I. OHSHIMA, H. MITSUDERA, and J. NISHIOKA: The 38th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (2024) Iron supply processes in the southern Sea of Okhotsk.
108	J. NISHIOKA, T. TOYOTA, A. MURAYAMA, K. ONO, M. IMAI, Y. YAMASHITA, K. SUZUKI, T. NAKAMURA, K. I. OHSHIMA, and H. MITSUDERA: The 38th International Symposium on the

	Okhotsk Sea & Polar Oceans (2024) Characteristics of water masses and nutrient properties in the southern Sea of Okhotsk.
109	S. YANXU, J. NISHIOKA, T. TOYOTA, and K. SUZUKI: The 38th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (2024) Differences in phytoplankton assemblages and their controlling factors in the southern Sea of Okhotsk between winter and spring.
110	T. NAKANOWATARI, E. WATANABE, T. NAKAMURA, J. NISHIOKA, and H. MITSUDERA: The 38th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (2024) Numerical modeling study on sea ice iron flux in the Sea of Okhotsk.
111	Y. TANOUE, P. WONGPAN, P. STRUTTON, Y. FUKAI, T. TOYOTA, J. NISHIOKA, and K. SUZUKI: The 38th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (2024) Ocean monitoring and ship observations around Shiretoko: 2.

成果 番号	【サブテーマ5】の口頭発表（学会等・査読なし）
112	小嶋大己, 濱尾優介, 飴井佳南子, 深井佑多佳, 松野孝平, 三谷曜子, 山口篤: 2021年日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会（オンライン）（2021）初夏の南部オホーツク海におけるプランクトン現存量と糞粒を介した物質輸送に関する研究.
113	D. KOJIMA, Y. HAMANO, K. MATSUNO, and A. YAMAGUCHI: The 36th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans (online) (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.
114	O. YAMAMURA, K. MATSUNO, and Y. KAMEI: PICES Annual Meeting (国外) (2022) Unexpected mass-occurrence of walleye pollock <i>Gadus chalcogrammus</i> in the epipelagic layer at the edge of the ocean basin: the benefit from copepod bloom.
115	細田七海, 重松早紀, 古巻史穂, 岩原由佳, 三谷曜子: 令和4年度日本水産学会春季大会（オンライン）（2022）地球温暖化に伴う秋期北海道沿岸域のハクジラ類の将来分布変化予測.
116	山口篤: 令和5年度日本水産学会春季大会（国内）（2023）初夏の南部オホーツク海におけるプランクトン現存量と糞粒を介した物質輸送に関する研究.
117	櫻木雄太, 川上達也, 笠井亮秀, 山村織生: 令和5年度日本水産学会春季大会（国内）（2023）夏の知床半島周辺海域における魚類相.
118	O. YAMAMURA, S. INOUE, and T. HAMATSU: PICES Annual Meeting (国外) (2023) Community structure of demersal fishes off the Okhotsk coast of Hokkaido in relation to environmental forcing

## (4) 知的財産権

成果 番号	発明者	出願者	名称	出願以降 の番号	出願 年月日
	特に記載すべき事項はない。				

## (5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ1】の実施状況
119	2021	三寺史夫: 北海道大学 低温科学研究所 公開講座（オンライン）, 夏と冬で亜熱帯と極域が入れ替わる知床の海の不思議.
120	2023	白岩孝行: 北海道大学 地球環境科学研究所, 世界自然遺産 知床が抱える海岸漂着ごみ問題.

121	2023	三寺史夫：令和5年度第2回知床世界自然遺産地域連絡会議，羅臼漁協，オホーツク海における海氷の変動予測について。
122	2023	三寺史夫：ヒロセ財団講演，夏と冬で亜熱帯と極域が入れ変わる知床の海。
123	2024	三寺史夫：公開シンポジウム「世界自然遺産知床周辺海域の海洋・海氷変動予測と海洋生態系への影響」，知床から流氷は消えるのか！？

成果番号	実施年度	【サブテーマ2】の実施状況
124	2024	植田宏昭：公開シンポジウム「世界自然遺産知床周辺海域の海洋・海氷変動予測と海洋生態系への影響」，オホーツク海における海氷の年々変動を引き起こすメカニズム。

成果番号	実施年度	【サブテーマ3】の実施状況
125	2024	中村知裕：斜里第一漁協，知床斜里側（西側）沿岸の水温塩分観測結果：速報。
126	2024	中村知裕：羅臼漁協，知床羅臼側（東側）沿岸の水温塩分観測結果：速報。
127	2024	中村知裕：公開シンポジウム「世界自然遺産知床周辺海域の海洋・海氷変動予測と海洋生態系への影響」，知床の海をモニターする。

成果番号	実施年度	【サブテーマ4】の実施状況
128	2021	鈴木光次：紋別市（オホーツク海氷科学センター），オホーツク海の概要。
129	2021	鈴木光次：紋別市（紋別生涯学習センター），アイスアルジーを学ぶ。
130	2023	西岡純：紋別高校出前授業，豊かなオホーツク海を作り出す流氷の役割。
131	2023	西岡純：低温研公開講座，オホーツク海と流氷の科学。
132	2023	西岡純：ヒロセ財団講演，流氷を中心とし、流氷の変化による生物、動物を含む環境への影響。
133	2024	西岡純：公開シンポジウム「世界自然遺産知床周辺海域の海洋・海氷変動予測と海洋生態系への影響」，流氷が豊かな生物生産を生み出す仕組み。

成果番号	実施年度	【サブテーマ5】の実施状況
134	2021	三谷曜子：亜寒帯～北極海海洋生態系研究(ESSAS) 2021 公開講演会（オンライン），海に暮らす哺乳類：オットセイやアザラシ、イルカとクジラ、そしてヒト。
135	2021	三谷曜子：第12回北極域オープンセミナーとの連携国際ワークショップ「太平洋北極圏における持続可能なクルーズ産業の開発：過去の展開と将来の展望」（オンライン）， Marine mammals and prospects for sustainable tourism.
136	2022	三谷曜子：一般社団法人マナティ研究所「第4回海牛祭り」，北海道のヒレアシ類の保全管理。
137	2022	三谷曜子：日本鳥学会2022年度大会公開シンポジウム「流氷がくる海 オホーツクの海と生き物たち」，網走市民会館，なぜこの海にシャチはくるのか。

138	2023	三谷曜子：武庫川女子大学附属中学校・高等学校 SSH公開講演会，武庫川女子大学 公江記念講堂，海棲哺乳類のフィールド科学。
139	2023	三谷曜子：令和4年度第2回知床世界自然遺産地域連絡会議，斜里町ゆめホール知床公民館ホール，北海道東部海域に来遊するシャチの生態とヒトとの関係について。
140	2023	三谷曜子：海棲哺乳類とヒトとが共に暮らす未来のために．京都市動物園，野生動物学のすすめ2023。
141	2023	三谷曜子：日本野生動物医学会学生部会 学生セミナー（オンライン），海棲哺乳類フィールドワークのススメ。
142	2024	山村織生：公開シンポジウム「世界自然遺産知床周辺海域の海洋・海水変動予測と海洋生態系への影響」，海水勢力の変化に対する生物の応答。

## (6) マスメディア等への公表・報道等

成果番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
143	朝日新聞（2024年2月29日，全国版夕刊）「消えゆく流氷」
144	日刊工業新聞（2022年12月15日，全国版）「オホーツク海南部海水量の変動特性解明」
145	中日新聞（2022年9月8日，夕刊）「世界遺産ごみ回収難航」
146	日刊工業新聞（2022年12月15日，全国版）「オホーツク海南部海水量の変動特性解明」

成果番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
147	筑波大学プレスリリース（2023年2月14日）「寒冬と暖冬を引き起こす大気の遠隔影響パターンの力学構造を解明」
148	筑波大学プレスリリース（2023年2月24日）「高緯度と熱帯からの遠隔影響がオホーツク海氷の年々変動を引き起こす～「環オホーツク気候システム」の端緒を開く～」
149	日経産業新聞（2023年3月10日，全国版朝刊）「流氷の増減 赤道域の気象影響」

成果番号	【サブテーマ3】のメディア報道等
	該当なし

成果番号	【サブテーマ4】のメディア報道等
150	北海道新聞（2023年9月29日）流氷の役割 地元高校生に解説 北大・西岡教授 紋別高校で授業

成果番号	【サブテーマ5】のメディア報道等
151	北海道大学プレスリリース（2022年5月27日）水産科学研究院「野外の動物プランクトン糞粒に関する新しい定量法～地球環境変動に影響を及ぼす海洋物質循環の正確な定量評価への貢献に期待～」

152	毎日新聞（2024年2月21日，地方版）「シャチ、流氷脱出できた？ 専門家「間一髪」の可能性示唆 羅臼沖 挟まれた群れ姿消し2週間／北海道」
153	京都大学プレスリリース（2023年5月8日）「秋の北海道沿岸において鯨類の分布を解明一分布に影響を与える海洋環境を調査」

## (7) 研究成果による受賞

成果 番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
154	NAN YUAN: 日本海洋学会2024年度奨励論文賞

成果 番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
155	倉持将也: 日本地球惑星科学連合2022年大会学生優秀発表賞

成果 番号	【サブテーマ3】の研究成果による受賞
	該当なし

成果 番号	【サブテーマ4】の研究成果による受賞
156	西岡純: 令和5年度文部科学大臣表彰・科学技術賞・研究部門

成果 番号	【サブテーマ5】の研究成果による受賞
	該当なし

## (8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
	該当なし

成果 番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
	該当なし

成果 番号	【サブテーマ3】のその他の成果発表
----------	-------------------

	該当なし
--	------

成果 番号	【サブテーマ4】のその他の成果発表
	該当なし

成果 番号	【サブテーマ5】のその他の成果発表
	該当なし

## Abstract

## [Research Title]

Prediction of Sea Ice and Ocean Variations and Climate Change Risk Assessment on Marine Ecosystems in the Southern Sea of Okhotsk Including Shiretoko, a World Natural Heritage

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Humio Mitsudera
(PI ORCID) :	
Principal Institution :	Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University Kita-19, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060-0819, JAPAN Tel: +81117065465 Fax: +81117067142 E-mail: kyodo@lowtem.hokudai.ac.p
Cooperated by :	Japan Fisheries Research and Educational Institute, Tsukuba University, Hokkaido Research Organization, Shiretoko Nature Foundation, Kyoto University
Keywords :	Shiretoko, World Natural Heritage, sea ice, climate change, impact assessment

## [Abstract]

Shiretoko was listed as a World Natural Heritage because of its outstanding universal value (OUV) that is productive interaction of marine and terrestrial ecosystems, influenced by the formation of seasonal sea ice. It is concerned, however, that the sea ice in the Sea of Okhotsk is decreasing because of the climate change. In this project, we conducted predictive evaluation of sea ice variations in the middle and the end of the 21<sup>st</sup> century focusing on the Shiretoko area, as well as impact assessments of the marine ecosystems in case of disappearance of the sea ice. It is predicted that the sea ice will reduce to 1/3 in the future even with the low CO<sub>2</sub> emission scenario, but nevertheless, the seasonal sea ice will reach the Shiretoko in most of the years with this scenario. In contrast, without restriction in CO<sub>2</sub> emissions, sea ice will disappear from the Shiretoko area in the end of the 21<sup>st</sup> century. Impacts of disappearance of sea ice on marine ecosystems are significant. Sea ice carries iron, which is one of essential micronutrients for phytoplankton to grow. We have found that iron concentration in the sea surface layer, where phytoplankton bloom occurs in spring, increases as much as ~55% when iron is released from sea ice as it melts. Seeding effects by ice algae on the spring phytoplankton bloom were also uncovered scientifically for the first time (Yan et al., 2022). These biogeochemical effects will be risked when sea ice disappears. There are also likely to be significant impacts on fish community due to sea ice variations. It was found that the abundance of demersal fish community is correlated significantly with the sea ice coverage over the continental shelf in the Sea of Okhotsk off the coast of Hokkaido. The salmon catch is correlated positively with the sea ice cover with a lag of three years. Further, a long-term monitoring of marine mammals by passive acoustic measurements were conducted in the Sea of Okhotsk where the marine mammals' distribution is not yet well known. Acoustic data of ice-loving seals were collected during winter adjacent to sea ice; the seals' population is predicted to decrease in the future. It is therefore important to realize a low carbon society from a point of view of preserving the OUV of the Shiretoko World Natural Heritage.

[References]

Yan, D. et al. (2022) 'Winter microalgal communities of the southern Sea of Okhotsk: A comparison of sea ice, coastal, and basinal seawater', *Progress in Oceanography*, 204, 102806, <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102806>

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).

## 別冊

## 【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応

指摘等	対応状況・非対応理由等
採択時コメント「大きな研究チームを構成しているので、5つのサブテーマを機能的に連携する研究体制を構築することが鍵となる。」	研究体制内でサブテーマを跨いだ協働体制を構築し、海洋観測など共同で実施するとともに、オンラインで密接にコミュニケーションをとった。また、研究集会を期間中に2度、紋別の国際シンポジウムでワークショップを2度開催し、サブテーマ間のコミュニケーションを図った。このため、サブテーマ間の緊密な連携のもと、研究を進められたと考える。
採択時コメント「サブテーマ2 以外は地域、海域に根ざした研究と評価される。北海道の研究機構の人材や資産をもっと活用されたい。」	研究分担機関に水産研究・教育機構（釧路）、北海道総合研究機構、知床財団が加わっており、重要な成果を上げていただいた。また、紋別市や漁協の未公開データも活用させていただいた。また、モニタリング網の設置では、漁協や羅臼深層水くみ上げ施設の協力をいただいている。
採択時コメント「リスク評価が得られた後の行政対応（社会実装）に対する、地域のみならず地球規模で検討すべき具体的かつ国際的な方策（現段階で考えられ得る対策）や視点も提示した方が良い。」	国際社会が目指している低位CO2排出シナリオ（21世紀後半にCO2排出量実質ゼロ）を実現することが、海氷を含む知床のOUVを維持することにもつながる、ということが本研究で示された。この成果を国内のみならず国際的にも発信していくことが今後重要だと考える。
採択時コメント「温暖化影響評価と適応策があまり区別されていない感がある。」など、適応策に関するコメント。	本研究の課題は、温暖化適応対策に活用しうる科学的情報の提供が目的である。その観点で、低位CO2排出シナリオが世界的に実現すれば、知床の海氷は（面積は減少しつつも）維持される可能性が高い、との情報は社会的にも意味があるだろうと考える。また、知床周辺海域を含むオホーツク海の海洋生態系の科学的情報は非常に少ないのが実態であり、まずは観測等により情報の収集と解析・分析を重点的に行った。その上で、温暖化による海氷減少・消失に伴うリスクも具体的に示すことができたと考える。
中間評価コメント「アムール川流域での山火事の発生、中国支援による植林活動など、ランドスケープの大きな変化が見込まれているので、オホーツク海への影響の大きいアムール州と中国・黒竜江省の活動の内容（衛星データからの情報など）を考慮したうえでの、さらなる展開を期待したい。」 「やはり流氷の供給源としてのアムールはとても気になるので、リモセンなどを活用した解析はぜひとも欲しい。」	アムール川を含む陸域のプロセスがオホーツク海にとって重要である、とのご指摘に異論はない。ただ、本プロジェクトに関しては、例えば今回注目した海氷に含まれる鉄は、海氷が生成される際、大陸棚上の海底堆積物が海洋の混合によって巻き上がり、海氷に閉じ込められることによって知床海域まで輸送される、というプロセスを経る（アムール川の水が凍りそこに鉄が取り込まれ知床まで運ばれるのではない、ということに注意していただいた

<p>「気候変動の陸域の影響による物質循環の変化がもたらす影響も加えて検討しないと、モデル予測結果の妥当性に説得力がない。」</p>	<p>い)。しかしながら、陸域の人為的改変や気候変動の影響が、河口や大陸棚への物質の沈積を通して、海洋や海氷の鉄輸送にどのように影響するのか、というプロセスは未解明であり、これを解明するには、それに焦点を当てロシアを巻き込んだ観測研究が必要であろうと考える。また、研究分担者の1人（白岩）は、これまでアムール川流域の永久凍土からの鉄流出に着目した研究にも取り組んでおり、今後の研究に期待したい。一方で、陸域の影響をモデルに取り込むには、いまだ不明な点が多い。これらは、今後の重要な研究課題と考える。</p> <p>以上の観点から、本研究では、海氷の鉄が海洋表層の鉄濃度に与えるインパクトを定量的に見積もることによって、知床海域から海氷が消失した場合の影響評価を行う、という点に焦点を当て研究を進めた。本研究の結果より、鉄は海氷輸送のみならず、東樺太海流や陸棚からの海を通した輸送があることも判明した。そのうえで海氷からの鉄供給は、知床周辺海域での鉄濃度を55%程度増加させること、が明らかとなった。</p> <p>また、モデルによる予測は、物理過程が比較的明確な海氷分布の将来予測を中心に行った。生態系モデルは当初計画になかったが、海氷からの鉄供給の有無が低次生産に与える影響を定量的に示すために実施した。今後、まずは海洋・海氷モデルと生態系モデルを結合し、海氷鉄輸送の効果を含めた予測の研究が必要である。その基盤のうえで、陸域の変化が、河口域や大陸棚の生物地球化学および物理プロセスを介しオホーツク海の物質循環に及ぼす影響を、評価・予測できるものと考ええる。</p>
<p>中間評価コメント「気候変動の海洋環境への影響の予測モデルに関しては、JAMSTEC など、他の研究機関でも検討されていると思われる。それらを引用し比較するとともに、本研究の成果の特徴や優位性がわかるような報告が欲しい。」</p>	<p>ご指摘に従い、文部科学省による「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（2017-2021年度）を実施した気象研究所の研究者と連携を取り、情報交換を行った。気象研究所では1/10°モデルを用い、オホーツク海全体について21世紀末の海氷変動予測を行っていた。本研究は、さらに高い解像度のモデルを用いた知床周辺海域に着目した海氷予測であり、また、21世紀末に加え21世半ばの予測もするなど、研究の新規性が高いことが明確となった。気象研の研究者には研究集会に来てもらうなど、本プロジェクト期間を通して情報交換を行った。</p>
<p>中間評価コメント「おそらく文献的にも情報が得られていると思われるが、海氷に乗ってもたらされる栄養塩の量がどの程度なのか、またそれがどの程度変化しているのか等が気になる」</p>	<p>本研究によって、海氷は鉄以外の、硝酸などの主要栄養塩はほとんど輸送しないことが分かった。主要栄養塩は、2月、海氷下の海水中で最大の濃度になるが、これは海洋の混合により栄養塩豊富な下層の水が湧き上がってくる</p>

	こと、また海氷下ではまだ生物生産に利用されていないこと、が要因と考えられる。
中間評価コメント「サブテーマごとのアウトリーチに加えて、プロジェクト全体としてのアウトリーチも期待する。」	2024年3月に公開シンポジウム「世界自然遺産知床周辺海域の海洋・海氷変動予測と海洋生態系への影響」を実施した。ハイブリッド形式で行われ、対面、リモート合わせて、約130名の参加者があった。