

課題番号： 4-2102

体系的番号：JPMEERF20214002

研究実施期間：令和3年度～令和5年度

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

課題代表者：三寺史夫

課題代表機関：北海道大学低温科学研究所

サブテーマ1：三寺史夫（北海道大学）

サブテーマ2：植田宏昭（筑波大学）

サブテーマ3：中村知裕（北海道大学）

サブテーマ4：西岡 純（北海道大学）

サブテーマ5：山村織生（北海道大学）

# 研究の背景

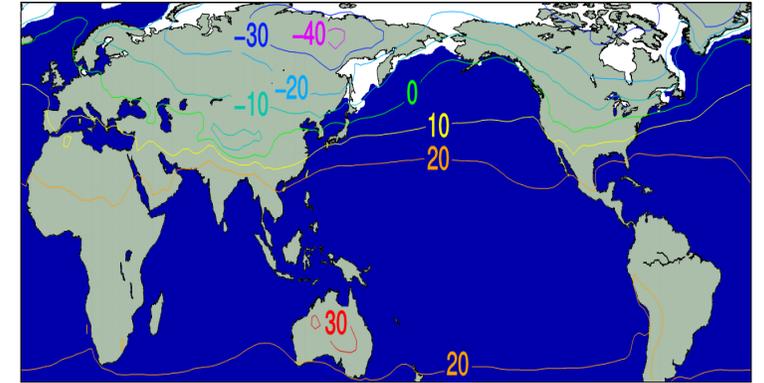
## 知床海域

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

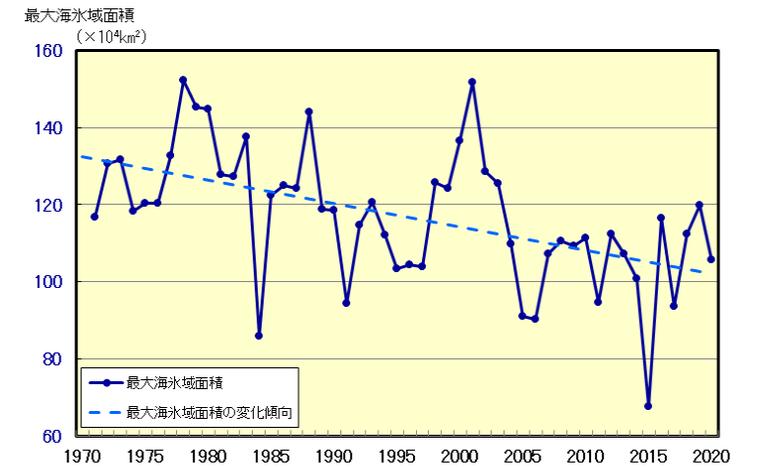
## なぜ今か

- 海氷は、現在オホーツク海全体で見ると、**顕著な減少傾向**。**ユネスコ世界遺産委員会は、気候変動への適応戦略策定を勧告**
- 国内では気候変動適応法（2018年）、北海道気候変動適応計画（2020年）
  - 海氷は地域産業（水産業、観光業）にとって大きな資源
  - 北海道気候変動適応計画（2020年3月）では海氷減少について記載。

## 2月の海氷の広がり



## オホーツク海全体の最大海氷面積



# 研究の目的

- **現在、海氷は毎年知床に到達。**しかし、今後の温暖化により**知床海域からの海氷消失が懸念**
- 地域差の大きい海氷変動予測を全球気候モデルで行うことは困難
- これまでも気候モデルを海洋海氷モデルでダウンスケールした研究はあるが (Yamanaka et al., 2021)、21世紀末のオホーツク海全域の海氷予測 (10km格子) であり、知床海域に着目した海氷変動予測はない。

## 目的

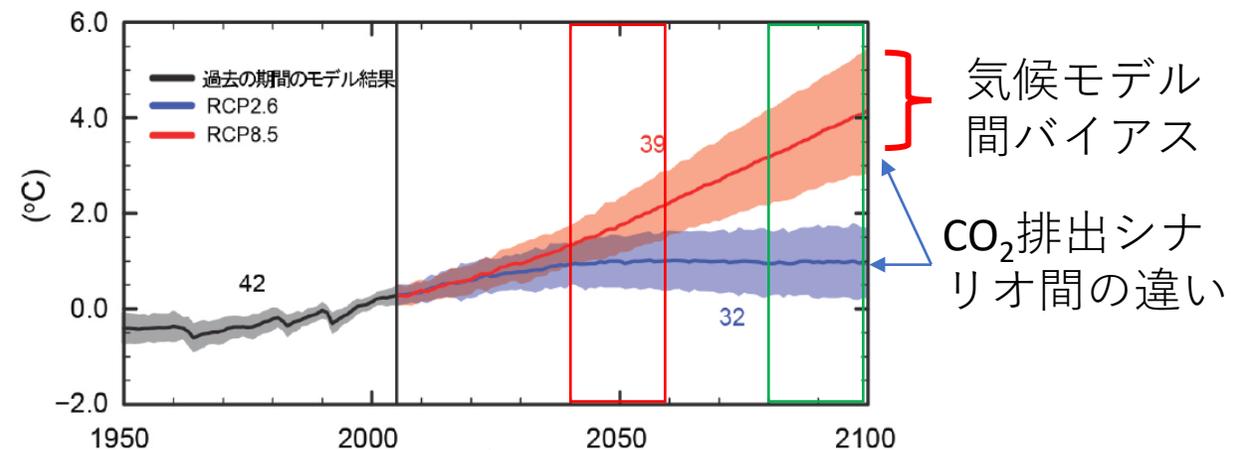
- **知床海域に着目した高解像 (2 km格子) の海氷・海洋モデリングを行い、将来の海氷変動予測**
  - ⇒ 20世紀末だけでなく**21世紀半ばにも着目**
  - ⇒ 温暖化がもたらす**海氷消失可能性とその気候条件** (気温、水温、風速など) を導出すること
- **データが極めて少ない冬季を含めた海氷・海洋モニタリング網を構築。予測モデルの検証**

海氷最小年 2015年



海氷面積**最小年**も、知床海域に海氷 (流氷) は到達。  
(気象庁の解析)

多数の気候モデル群による温暖化予測 (IPCC第5次報告)



# 研究の目的

- 知床海域において海氷は豊かな海の基盤
  - ・ 海氷融解に伴う植物プランクトンの大増殖
  - ・ 豊かな水産資源、鯨類も来遊する高度な生物多様性
  - ・ アザラシなどにとって休憩や出産のための上陸場
- **しかしながら、気候変動に対するリスク評価や適応対策策定にはデータや科学的知見が不足**

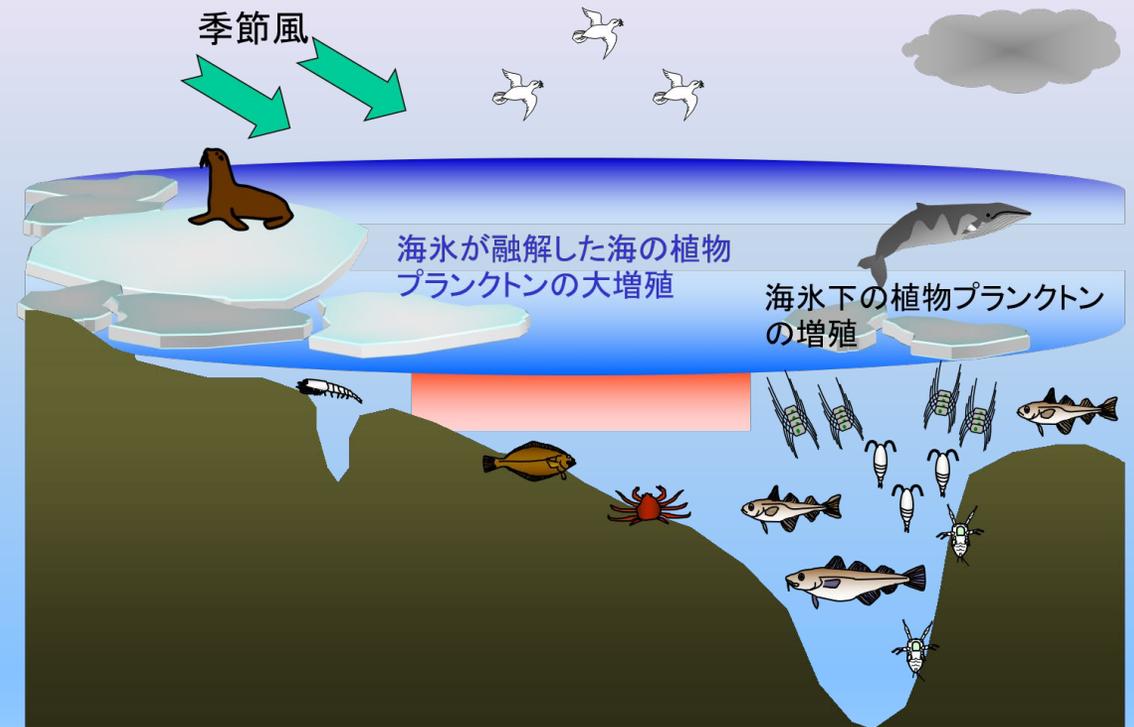
## 目的

- ・ 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の定量的解明
- ・ 海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

## 全体の研究目的

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

## 海氷周辺の海洋生態系における海氷の役割



ゴマフアザラシ  
(2020年3月)



海氷下のホッケの大群  
(2004年3月)

# 研究目標

## 課題全体の目標

1. 知床海域の海氷・海洋変動予測を行い、海氷消失可能性とその気候条件を導出（サブテーマ1, 2）
2. これまで欠落していた冬季を含む海洋モニタリング網の整備、および長期海洋変動解析。これらによる、海氷・海洋変動予測の検証（サブテーマ3）。
3. 海氷および海氷融解を起点とした海洋生態系・生物多様性への気候変動による影響を評価（サブテーマ4, 5）



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

【サブテーマ1】 知床海域の海氷・海洋変動予測とその不確実性の評価

サブテーマ代表：三寺史夫（北海道大学）

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

サブテーマ代表：植田宏昭（筑波大学）

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

サブテーマ代表：中村知裕（北海道大学）

【サブテーマ4】 海氷域の物質変動と低次生産

サブテーマ代表：西岡 純（北海道大学）

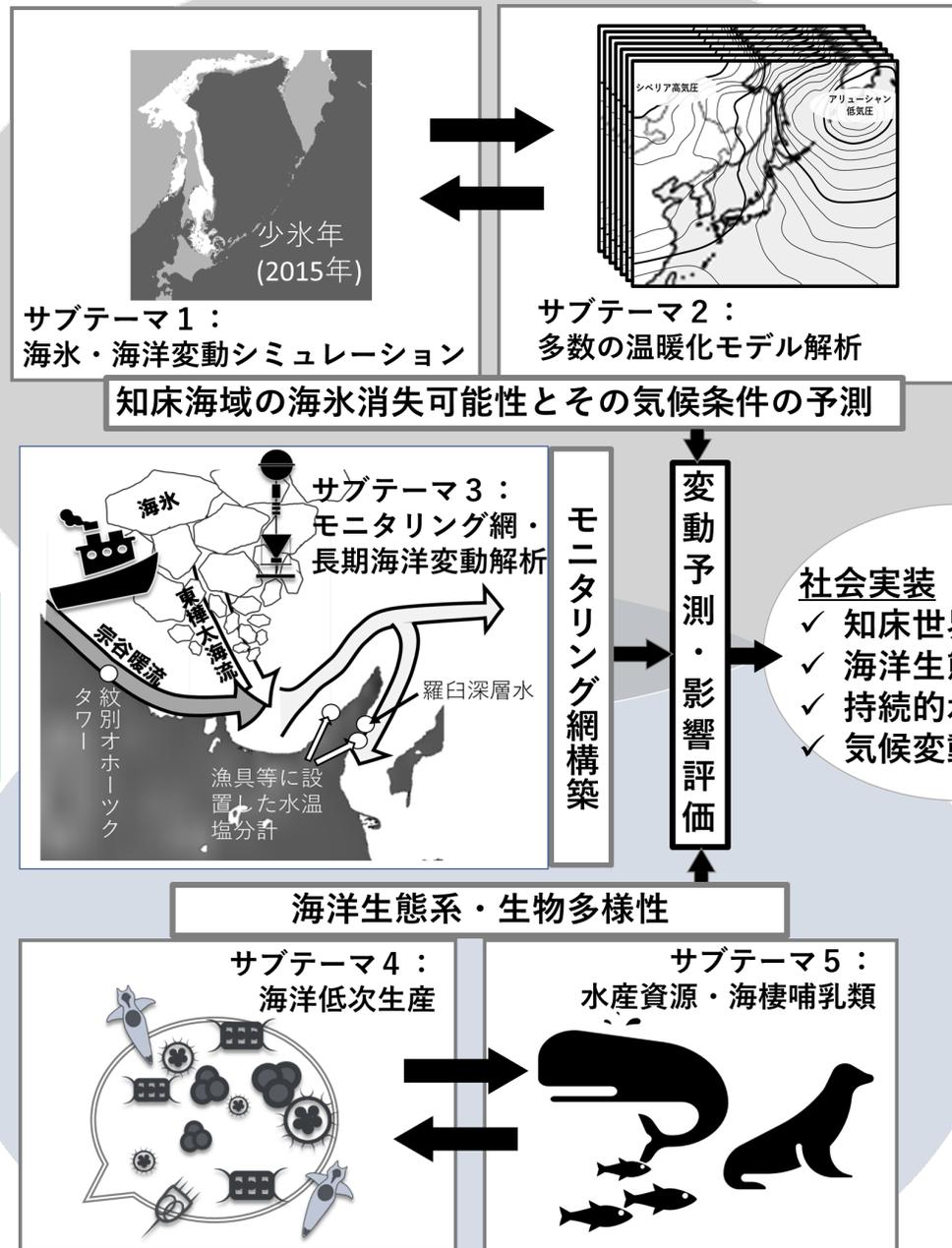
【サブテーマ5】 海氷減少による水産資源・生物多様性への影響評価

サブテーマ代表：山村織生（北海道大学）

予測

監視網

影響評価



# サブテーマ1 知床海域の海氷・海洋変動予測とその不確実性の評価

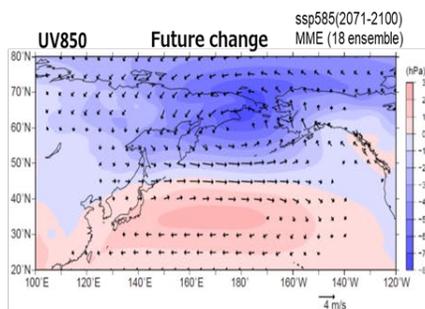
三寺・豊田・白岩（北大）、黒田・中野渡（水研）

## 【研究開発内容】 知床海域の海氷・海洋変動予測とその不確実性の評価

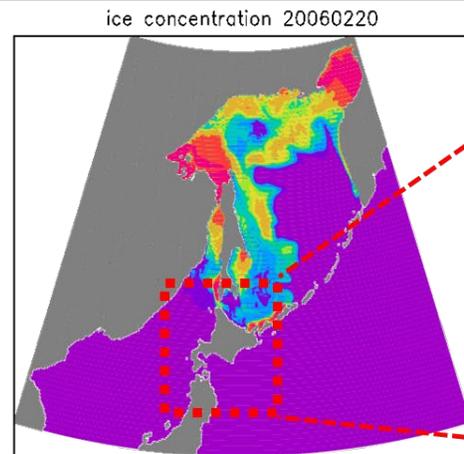
- 知床海域に着目した海洋・海氷モデル
- 北海道モデル（約2km格子）、オホーツク海モデル（約10km格子）の開発、および両者のネスティングの開発。「現在気候」再現実験は良好な結果。
- サブテーマ2が気候モデル群から抽出する代表的な大規模温暖化パターン（大気データ）を用いた、知床海域の海氷の温暖化実験（温暖化実験の結果・考察は、サブテーマ2の後に説明）

ネスティング

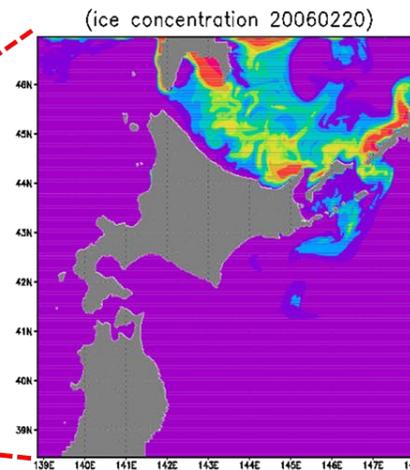
代表的な大規模温暖化パターン  
(サブテーマ2より)



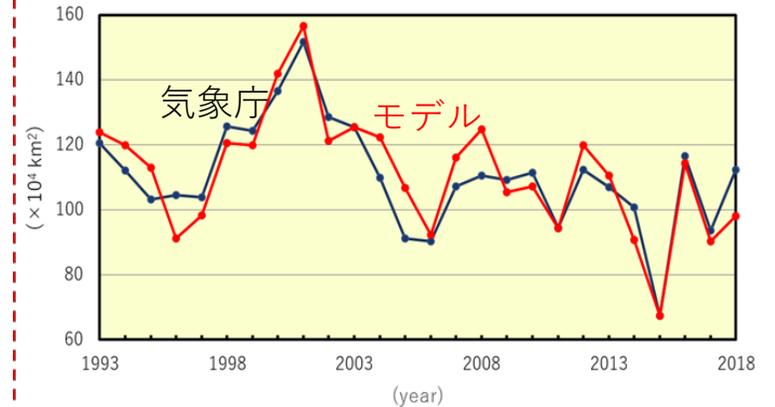
オホーツク海モデル (10km格子)



北海道モデル (2km格子)



最大海氷域面積



海氷・海洋予測システム。オホーツク海モデルに北海道モデルをネスティングし、知床海域を高解像度化した

「現在気候」再現実験。黒実線は気象庁解析、赤実線はモデル

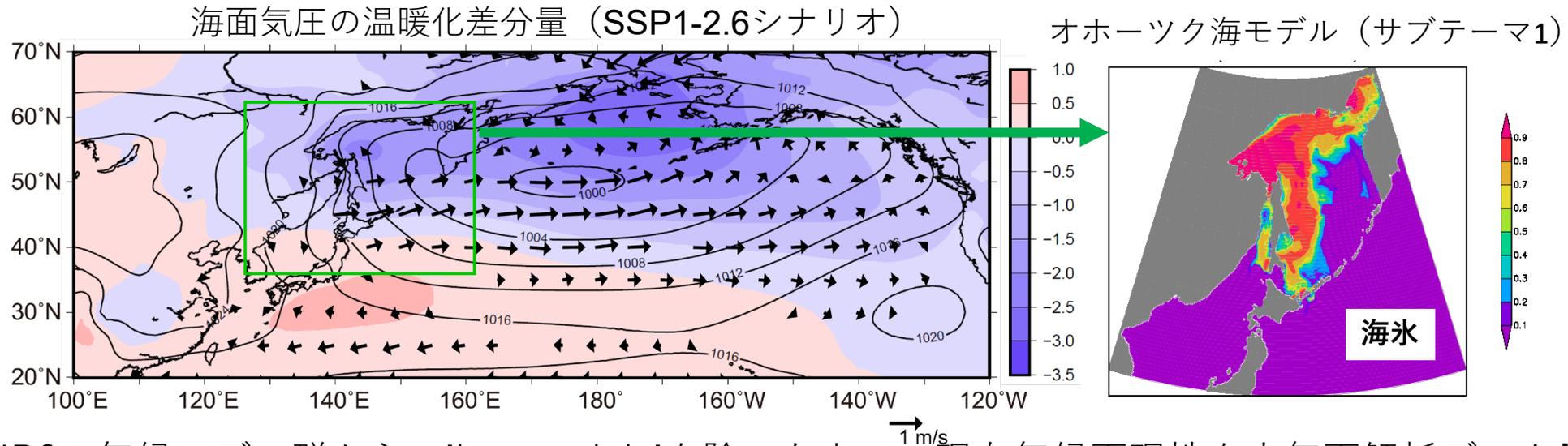
# サブテーマ2 温暖化予測比較実験(CMIP6)に基づく環オホーツク気候システムの解明

植田・釜江（筑波大）

## 【研究開発内容】

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

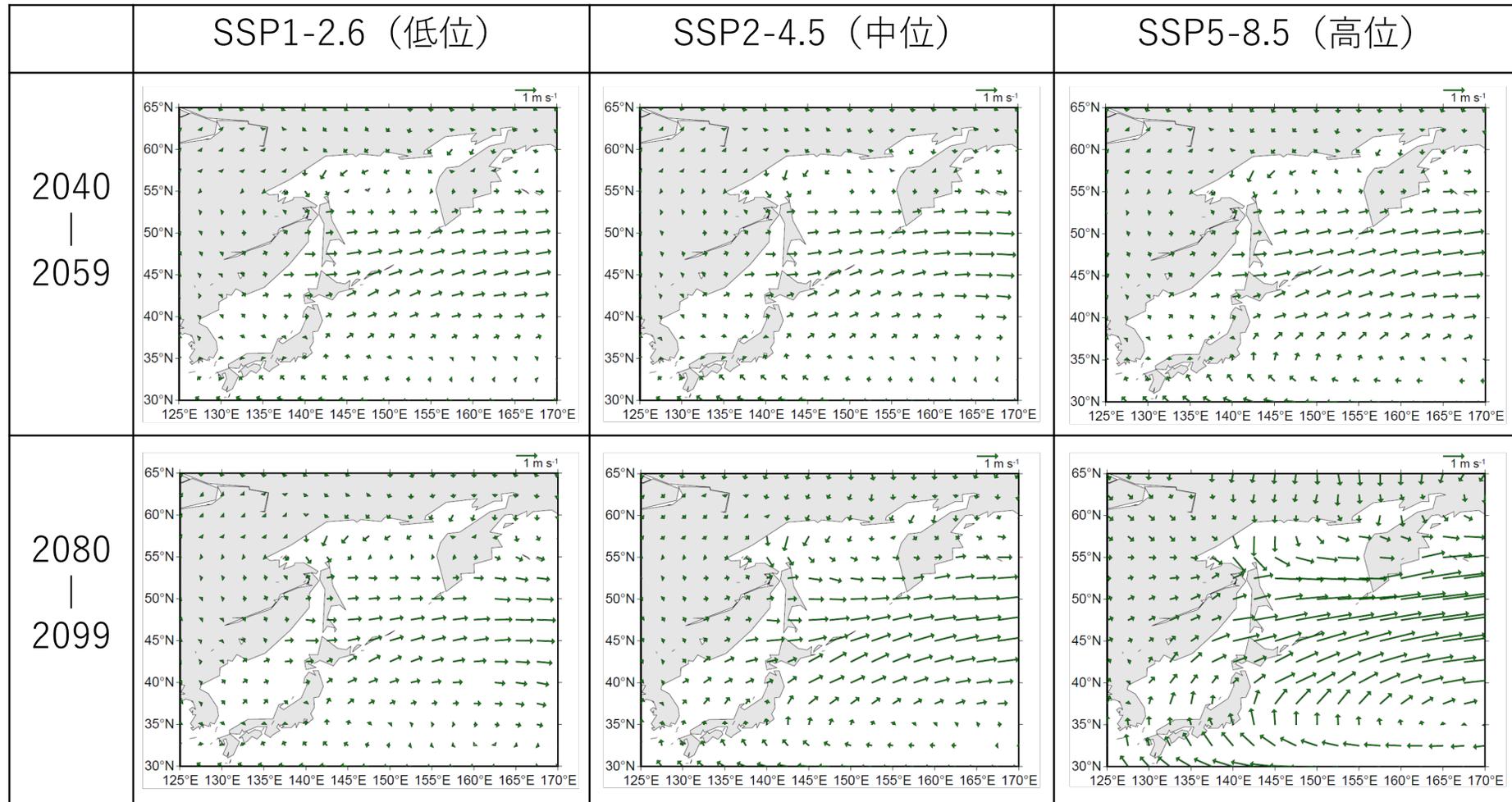
## 【結果および考察】 <CMIP6気候モデル群の現在気候再現性評価と大規模温暖化パターンの抽出>



- CMIP6の気候モデル群から、'hot models'を除いた上で、<sup>1 m/s</sup>現在気候再現性を大気再解析データ**JRA55**と比較し評価 →11モデルを選定
- 低位・中位・高位温暖化シナリオのそれぞれについて、11モデルで平均した2050年頃・2090年頃の温暖化差分量を計算 →サブテーマ1に提供
- 気温の昇温量や風の変化に関する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おける温暖化差分量についても計算 →サブテーマ1に提供

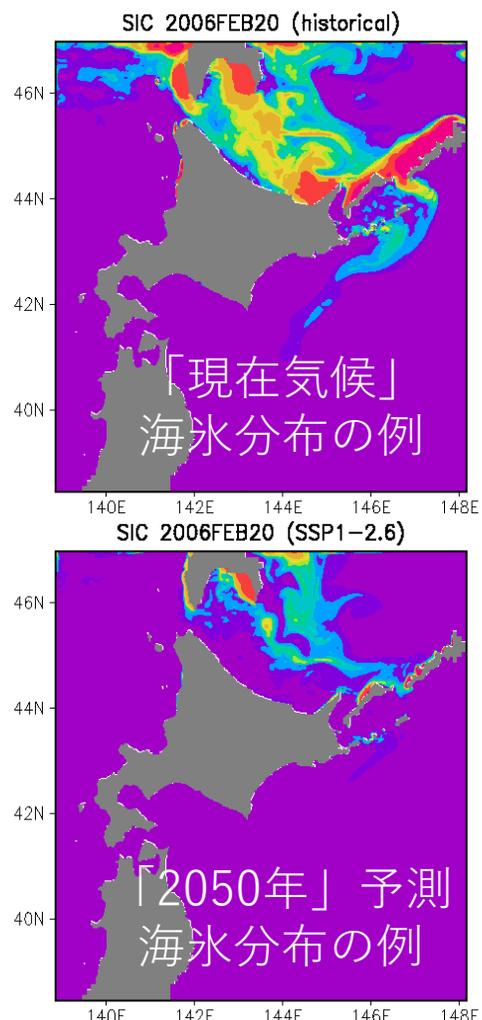
【結果および考察】 <CMIP6気候モデル群の現在気候再現性評価と大規模温暖化パターンの抽出>

地表風の温暖化差分 (11モデル平均,12~3月平均)

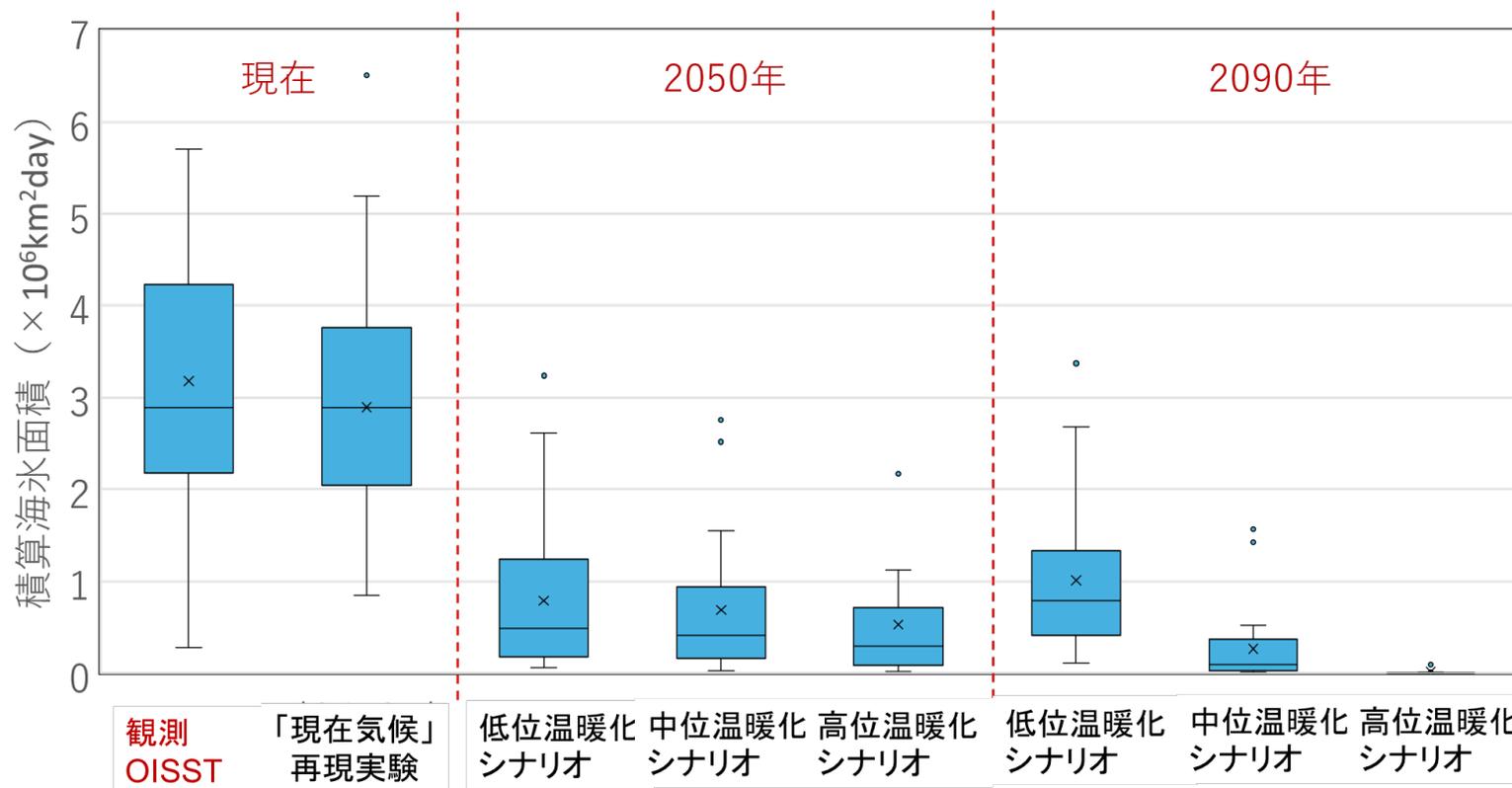


- 温室効果ガス排出量が多いほど北海道近傍では西風が強化され、海氷が離れる傾向が強くなる
- 低位・中位・高位温暖化シナリオのそれぞれについて、2050年頃・2090年頃の温暖化差分量を計算  
→サブテーマ1に提供

- 「現在気候」の気象研大気再解析JRA55-doに、サブテーマ2が作成した温暖化差分値を加え、「2050年」「2090年」の26年分の大気時系列を作成
- 海洋・海氷モデルを駆動し、知床海域に着目した海氷変動の将来予測



北海道東方海域の冬季積算海氷面積



海氷頻度分布の箱ひげ図

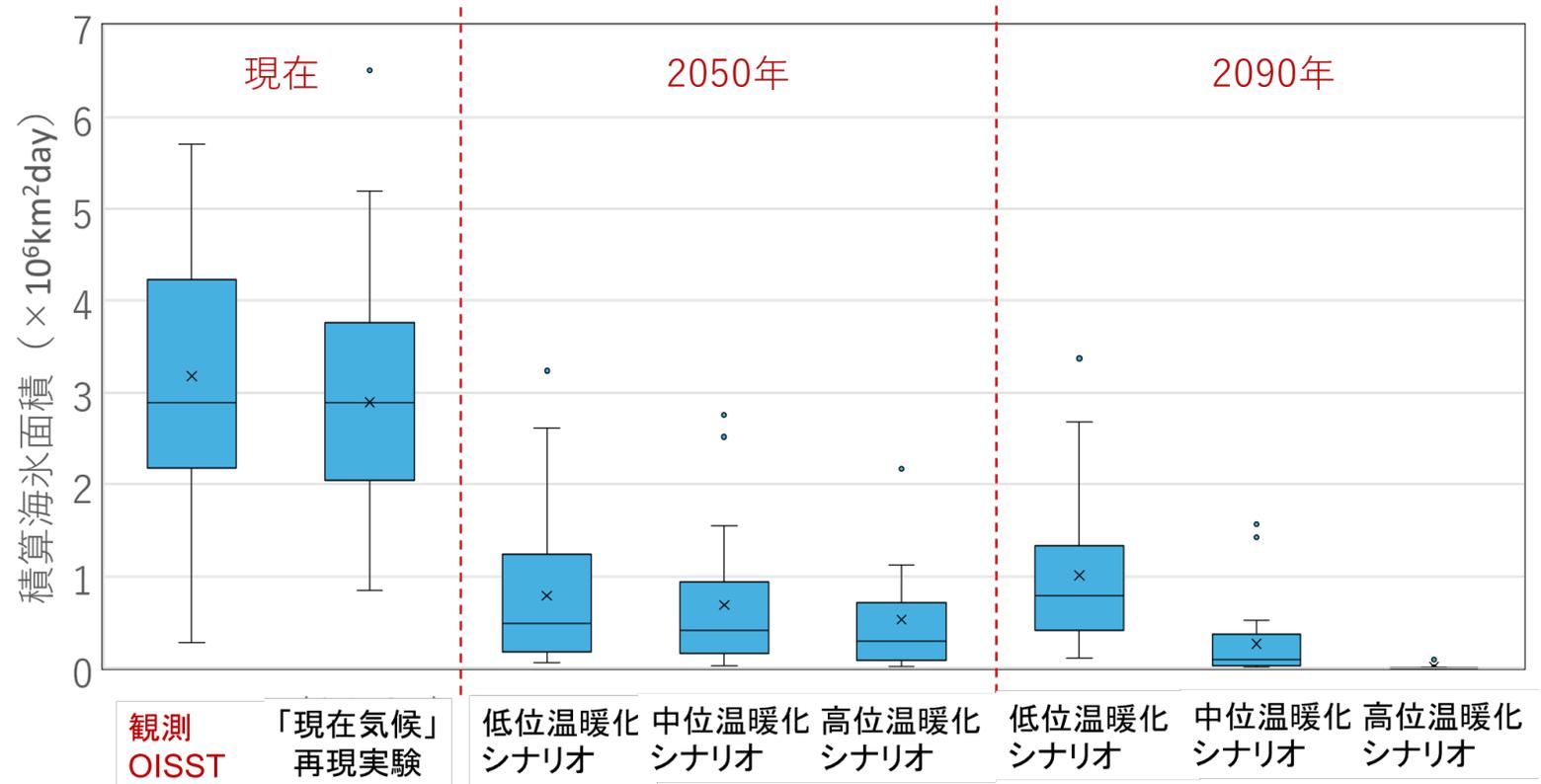
- 「現在気候」の気象研大気再解析JRA55-doに、サブテーマ2が作成した温暖化差分値を加え、「2050年」「2090年」の26年分の大気時系列を作成
- 海洋・海氷モデルを駆動し、知床海域に着目した海氷変動の将来予測

【結果および考察】

- 「現在気候」再現実験は、観測を良く再現
- 低位温暖化シナリオ**（21世紀後半にCO2排出実質ゼロ）でも、2050年に積算海氷面積が平均で1/3程度に減少
- しかしながら、**海氷がほとんど毎年到来**。2100年にも同等の積算海氷面積を維持。
- 高位温暖化シナリオ**（CO2排出無制限）では、**知床から海氷が消失**。

低位温暖化シナリオの実現が、知床の海氷の保持につながる。

北海道東方海域の冬季積算海氷面積



海氷頻度分布の箱ひげ図

# サブテーマ3 海洋モニタリング網と長期変動解析

中村・的場（北大）、美坂（道総研）、野別（知床財団）

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

サブテーマ  
1, 4, 5と  
協働

船舶観測（新青丸、北辰丸、おしよろ丸、そうや、白鳳丸）

■ 係留系  
(2020年12月～2023年9月)

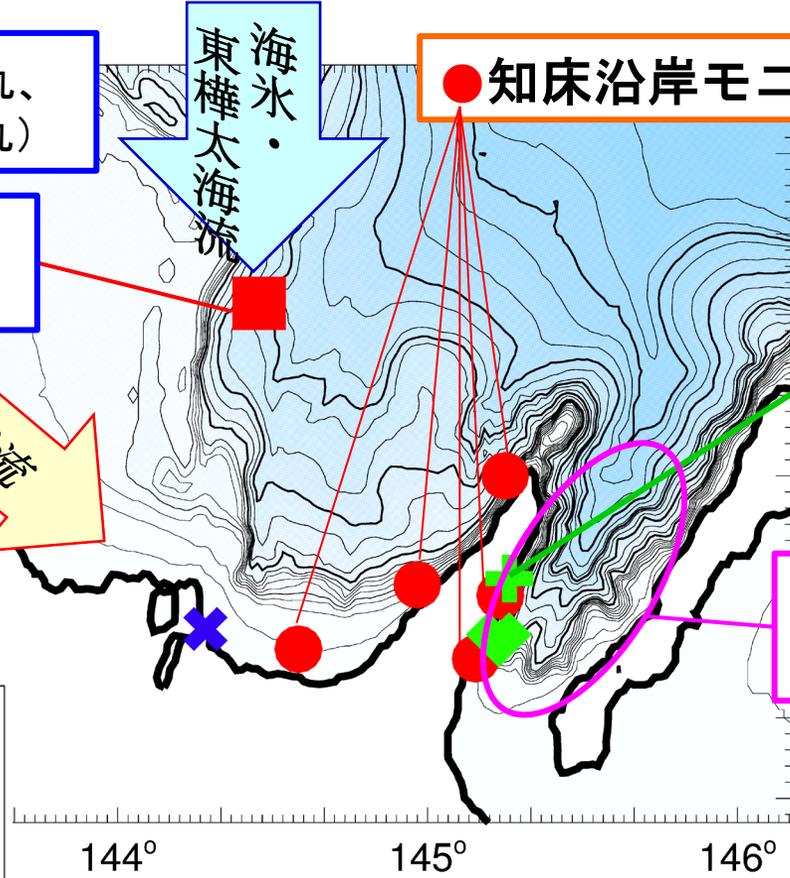
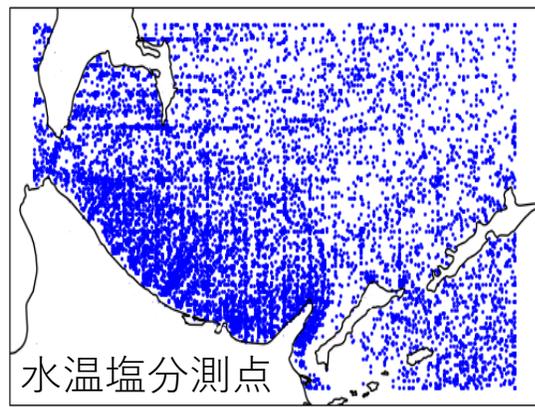
▲ 紋別オホーツク  
タワー(1996～)

海氷・  
東樺太海流

● 知床沿岸モニタリング (2021～)

羅臼長期モニタリング  
+ 表層 (1968～)  
◆ 深層水 (2007～)

根室海峡ほか 未公開  
データの収集校正



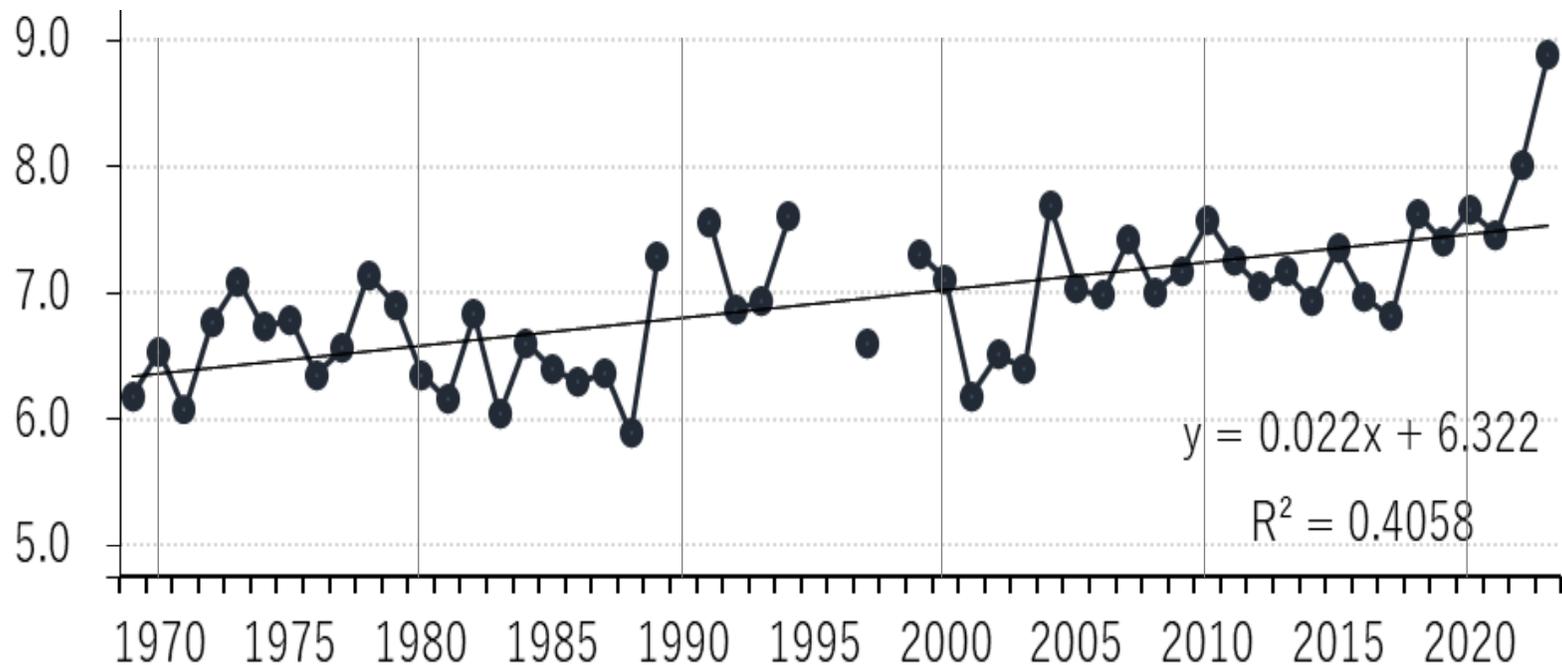
公開・非公開  
データの  
収集校正解析

データ  
集約提供

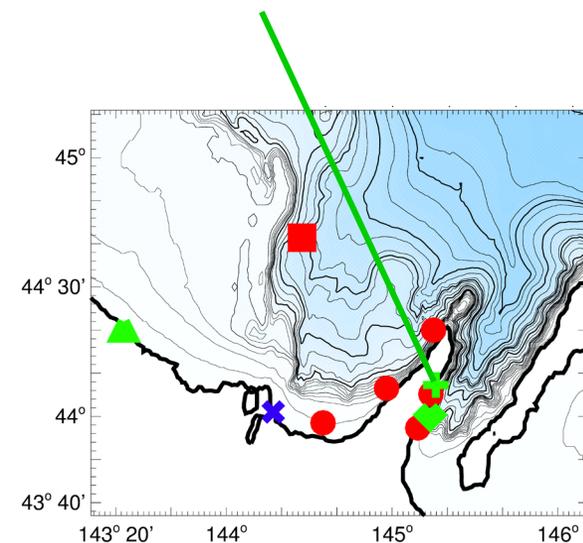
# 羅臼表層の長期変動

年平均水温

2023年8.89°C



羅臼漁協ウニ種苗センター+旧採苗所  
・1968年5月から、毎朝10時に測定  
・約55年間のデータを電子化・解析



- ・ 50年でおおよそ1°C 高温に (2021年まで)
- ・ 2022、2023年と連続で最高水温を更新

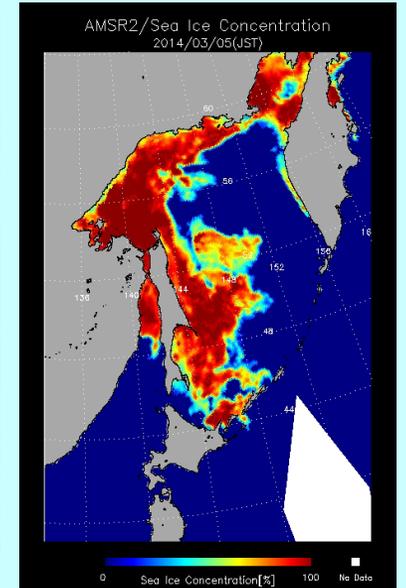
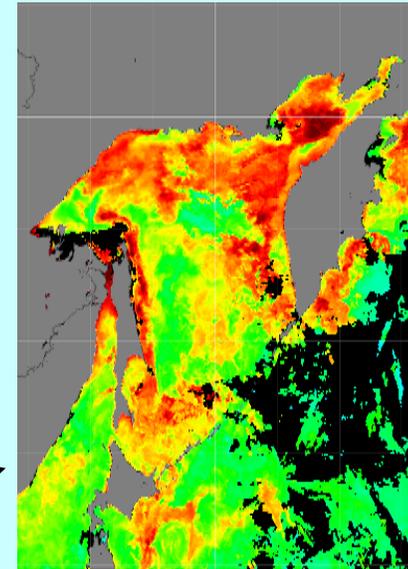
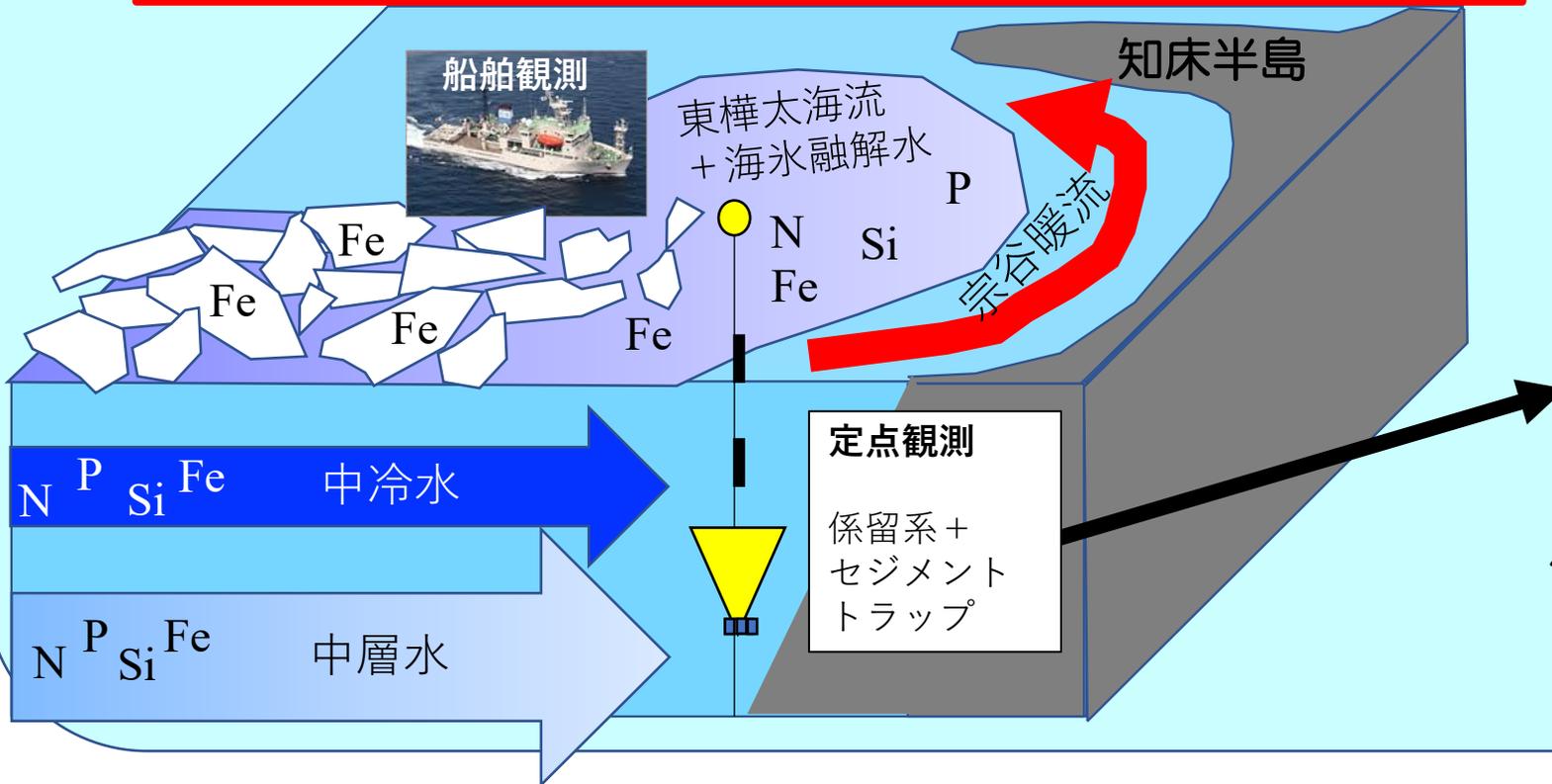


- ・ モニタリングによる温暖化の監視、科学的知見の蓄積
- ・ 知床世界自然遺産の資源管理計画策定や地域社会に貢献

【研究開発内容】

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

- 船舶観測と係留系による栄養物質環境とアイスアルジー、植物プランクトンの季節変動のモニタリング
- 海氷と海氷融解水の春季ブルームに対する役割の定量的解明



4月植物プランクトンブルーム 冬季海氷密接度

# これまでに実施した観測

2020年12月8-26日 白鳳丸航海：海水到来前の観測

・係留系の投入

2021年4月11日-5月1日 新青丸航海：海水融解期の観測

2022年2月9-16日 砕氷船そうや航海：海水期の観測

2022年4月26日-5月15日 新青丸航海：海水融解期の観測

・係留系の揚収と投入

2023年 2月9日-15日 砕氷船そうや航海：海水期の観測

2023年8月30日-9月13日 新青丸航海：海水融解期の観測

・係留系の揚収

2024年 2月8日-15日 砕氷船そうや航海：海水期の観測



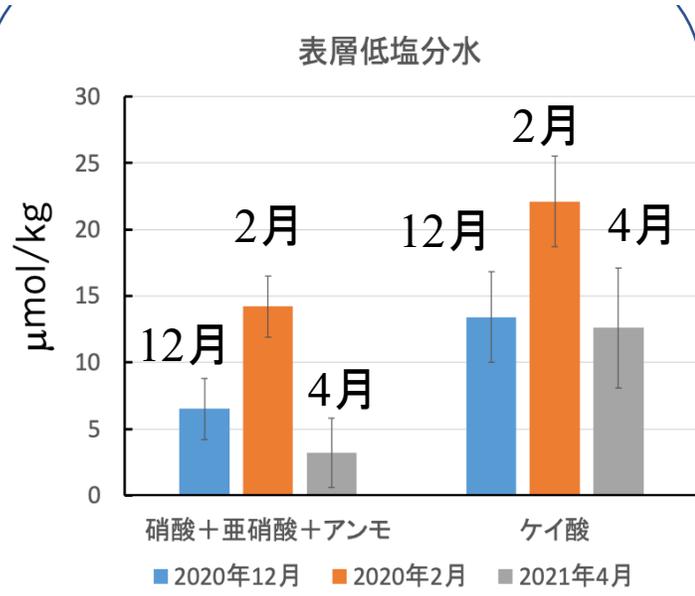
# 【結果および考察】 1. 冬季を含む栄養塩濃度の変動と海水融解水の鉄供給インパクト

鉄分は植物プランクトン増殖に必須

- 海水融解による表層低塩分水を他の水塊から分離し、**主要栄養塩濃度と微量栄養素である鉄濃度の冬季を含めた季節変動**を把握することに成功。
- 2月の**海水下の表層水で最大**の濃度になること、ブルーム時に硝酸塩が枯渇することが判明。

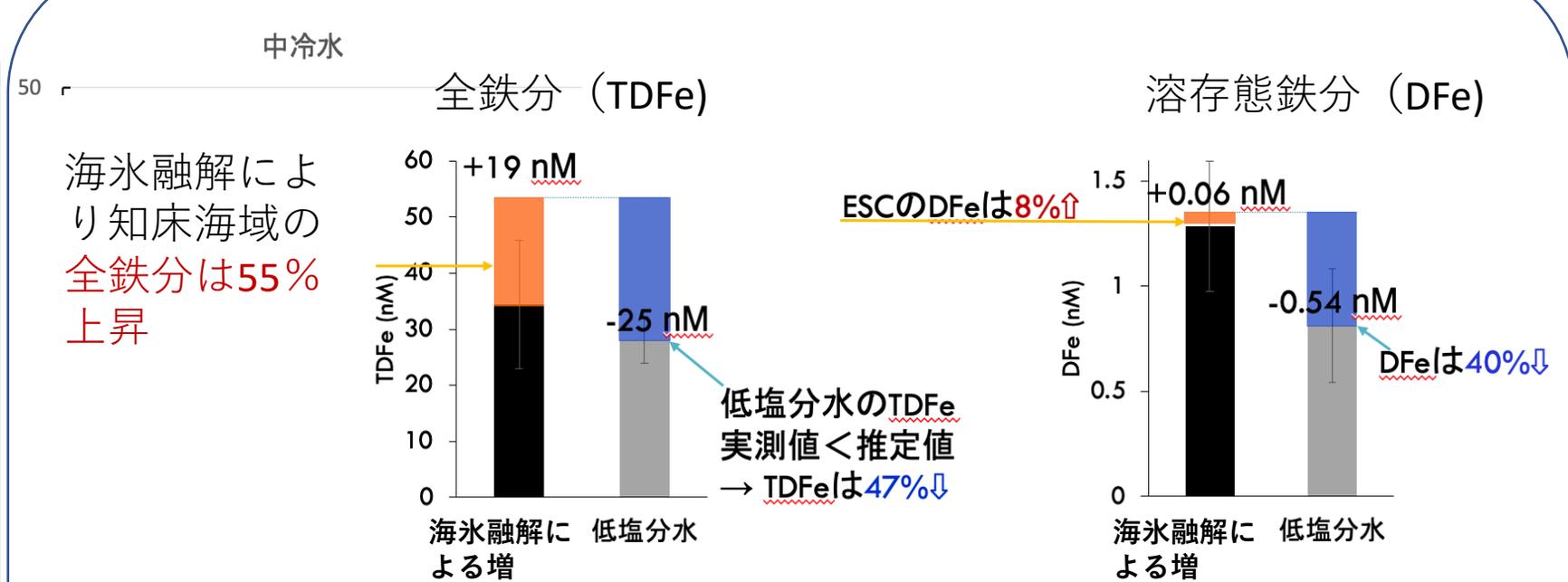
- 酸素同位体比を利用し、**海水融解が表層の栄養塩濃度や鉄濃度に与えるインパクトを定量的に評価**。
- **海水の融解は、知床海域の全鉄濃度に大きなインパクト（55%増）を与えるが、硝酸など主要栄養塩濃度にはほとんど影響を与えないことが判明**

## 冬季を含めた栄養塩の季節変動



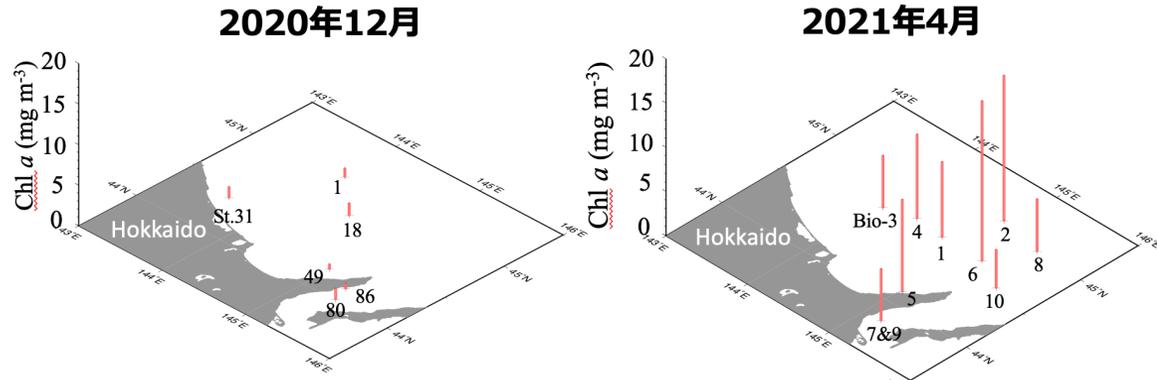
表層低塩分水の硝酸塩とケイ酸

## 海水融解が表層の鉄濃度を与えるインパクトの見積もり

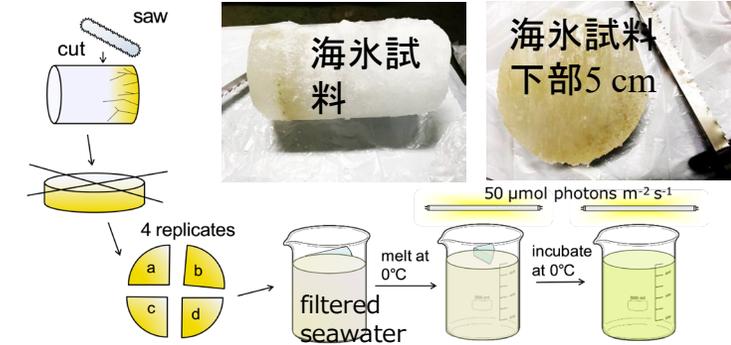


- ✓ 海水融解によるESCへのFe供給インパクトはTDFeが大部分を占める
- ✓ 春季植物プランクトンブルーム時には、凝集・沈降や生物利用によって鉄濃度は低下

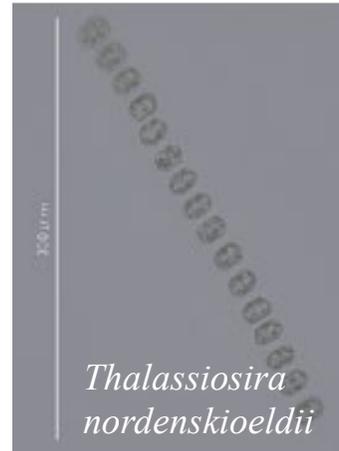
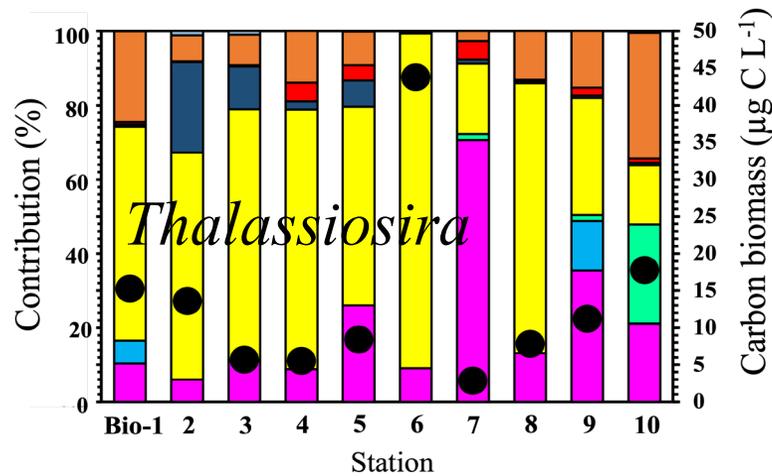
## 【結果および考察】 2. 春季（海氷融解期）の植物プランクトンブルームの形成過程



2021年4月、2022年4月の観測航海により、海氷融解期の植物プランクトン春季ブルームをとらえることに成功



- アイスアルジーには多量に大型中心目珪藻 *Thalassiosira* 含まれており、培養実験でも優占 (Yan et al., 2020)
- 一方、海氷下の海水中や海底堆積物には大型中心目珪藻 *Thalassiosira* が含まれていない (2021年、2022年の観測結果)



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種まき効果の発見。社会的通説はあるが科学的根拠は世界初 (Yan et al., 2022)



海氷からの鉄供給インパクト、アイスアルジーの種まき効果は、海氷消失による温暖化リスク同定につながる発見

主に大型中心目珪藻 *Thalassiosira* が春季ブルームを形成していた (2021, 2022の観測結果)

【研究開発内容】

- 海氷・水温等の物理環境と低次生産（植物プランクトン・動物プランクトン）の影響が高次栄養段階に伝搬する経路を解明。過去試資料から群集組成・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
- 海氷、水温が主要漁獲対象の動態に及ぼす影響を分析
- 在データがほとんどない海棲哺乳類に関して、目視調査と音響調査をサブテーマ3、4と連携して行いデータを蓄積。環境変数により分布を予測するモデルを構築。また機械学習による音声データ抽出技術を開発

【結果および考察】

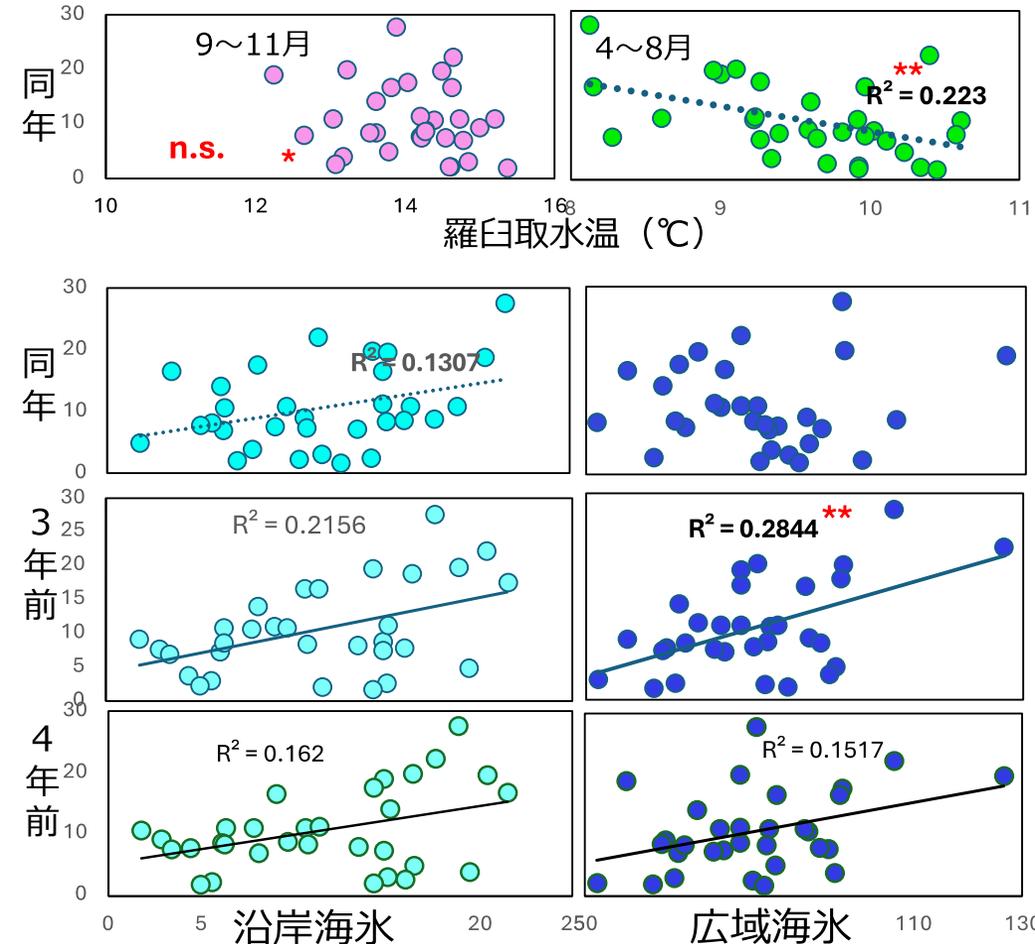
1. 魚類群集組成の豊度変動と海氷など環境要因

- ◆ オホーツク海側陸棚域でのトロール資料の解析
  - タラ類やニシンなどの魚類群集の変動
  - 沿岸の海氷勢力が強いつきに正の影響
  - 北太平洋循環（NPGO）など広域の変動とも関連

2. 主要漁業資源漁獲量と水温・海氷の関係

- ◆ 羅臼のサケ漁獲量
  - 1歳時（3年前）の広域海氷面積と最大の相関
  - 海氷と関連した高い生産性 > 低水温リスク

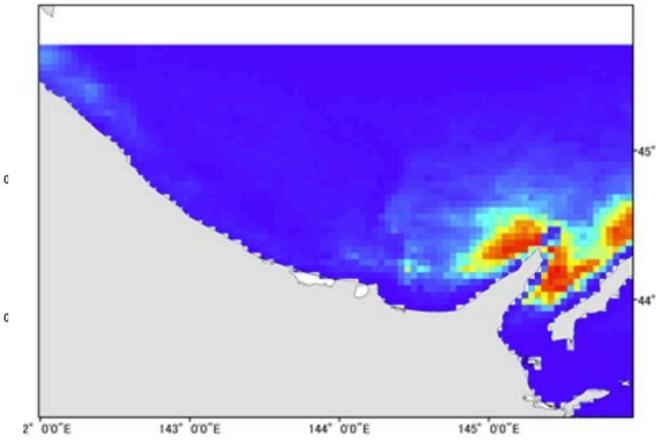
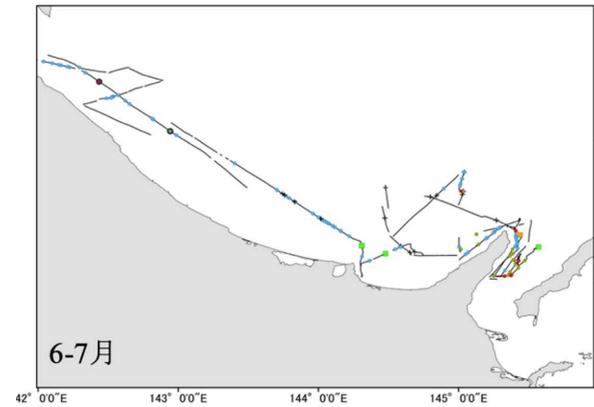
(右図)サケ漁獲量と水温(上)と海氷面積(下)の関係。水温は当該年漁期前の春～夏季と、海氷は広域の1歳時の面積と相関が高かった



## 【結果および考察】

### 3. 海棲哺乳類目視とモデリング

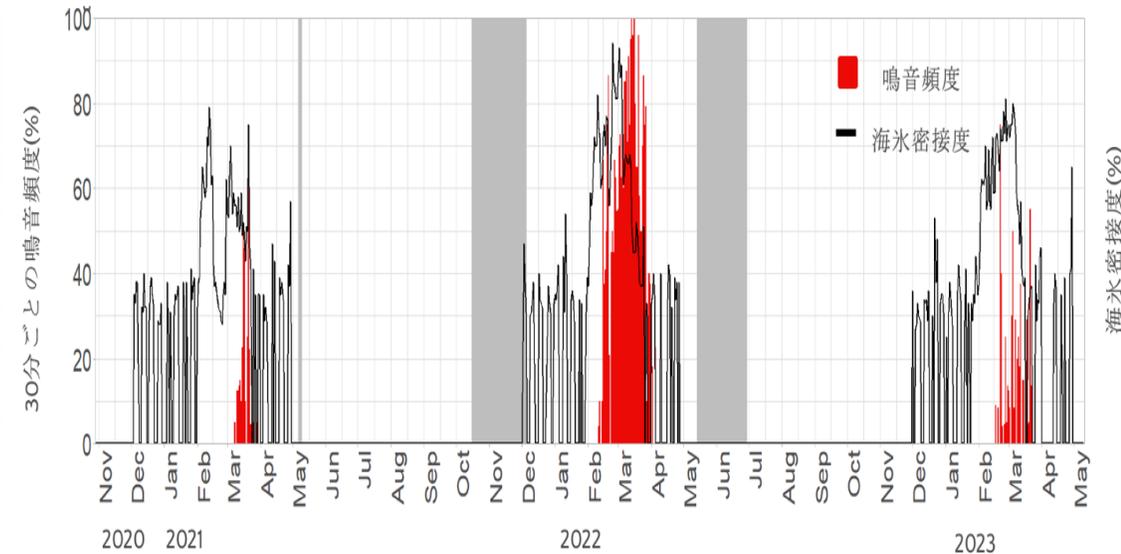
- 温暖化リスク同定に向けてデータ蓄積が肝要
- 冬季（海氷期含む）、春季（4～5月）、初夏（6月）に観測船からの目視調査 ←サブテーマ3, 4と協働
- 併せて行った観測データにもとづき出現予測モデルを構築



2023年6-7月に実施されたおしよ丸からの目視調査において発見された海棲哺乳類(左)と、構築されたモデルによるマッコウクジラの出現予測(右)

### 海氷下での受動音響サンプリングによる調査

- 従来海氷下での海獣調査は不可能だった
- 受動的音響サンプリングの導入により海氷下でも長期間にわたり観測が可能に
- データが膨大となるため音声検出に機械学習的アプローチを導入
- 3来遊期を通じた音響データ収録に成功
- 海氷下でクラカケアザラシの出現頻度が高かった
- 海氷減少にともなう負の影響を予測



受動的音響サンプリングシステム(左)と収録・検出されたクラカケアザラシの鳴音頻度(右:赤棒)、黒線は海氷密度度を灰色部分は、データ欠損期を示す。

# 目標の達成状況と環境政策等への貢献

## (1) 目標の達成状況 3 目標どおりの成果をあげた

### 課題全体の目標

1. 知床海域の海氷・海洋変動予測を行い、海氷消失可能性とその気候条件を導出（サブテーマ1, 2）
2. これまで欠落していた冬季を含む海洋モニタリング網の整備、および長期海洋変動解析。これらによる、海氷・海洋変動予測の検証（サブテーマ3）。
3. 海氷および海氷融解を起点とした海洋生態系・生物多様性への気候変動による影響を評価（サブテーマ4, 5）

### 具体的根拠および達成状況 以下の通りの成果を上げ、設定した目標をすべて達成した

1. **海氷変動予測**：2050年、2090年の3種シナリオの海氷変動予測を実施。**海氷消失可能性**：低位温暖化シナリオ（SSP1-2.6; 21世紀後半にCO2排出実質ゼロ）が達成されれば、海氷は大きく減少しつつも、知床までほぼ毎年到達すると予測。CO2排出制限なしのシナリオ（SSP5-8.5）であれば、21世紀末には、知床から海氷が消失。
2. **海洋モニタリング**：漁協等の協力のもとで**モニタリング網の設置完了**。漁協等の未公開データの収集・デジタル化および公開データにより長期変動を見出した。
3. **海洋生態系**：①海氷からの鉄供給効果を定量的に解明。海氷「有」は「無」に比べて、海洋表層の鉄濃度が55%増加 ②アイスアルジーの、植物プランクトン春季ブルームに対する播種（種まき）効果の発見 ③主要魚種と海氷勢力の関係を解明（オホーツク海陸棚でタラ類等に正の影響、サケ漁獲量に3年前の海氷勢力から正の影響）①-③は、**海氷消失時にはリスク**。⑤受動音響モニタリングによる海棲哺乳類の長期監視と機械学習による解析を実現。好氷性アザラシの今後の減少を予測。

## (2) 環境政策等への貢献

- 海氷・海洋変動の将来予測
- 海氷を含む海洋環境のモニタリング網の強化と継続性
- 海氷が物質循環・海洋生態系に及ぼすインパクトと温暖化リスクの同定

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。

- **遺産管理への活用**（既存の「世界遺産管理計画」や「海域管理計画」への反映、ユネスコ世界遺産委員会の勧告「気候変動適応戦略」策定への貢献）
- 北海道の計画と連携し、**地域レベルの適応計画の策定に貢献**気候変動への適応対策のための基礎的情報として活用
- 低炭素社会実現に向け、**国際社会へのメッセージ**としても有用ではないか

## 研究成果の発表状況

<論文（査読あり）> 21件

<その他誌上発表（査読なし）> 3件

<口頭発表（国際学会・査読付き）> 1件

<口頭発表（学会等）> 93件

<「国民との科学・技術対話」の実施> 24件

一般向けの公開シンポジウム「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」を実施（2024年3月、約130名参加）

<マスコミ等への公表・報道等> 11件

<研究成果による受賞> 3件