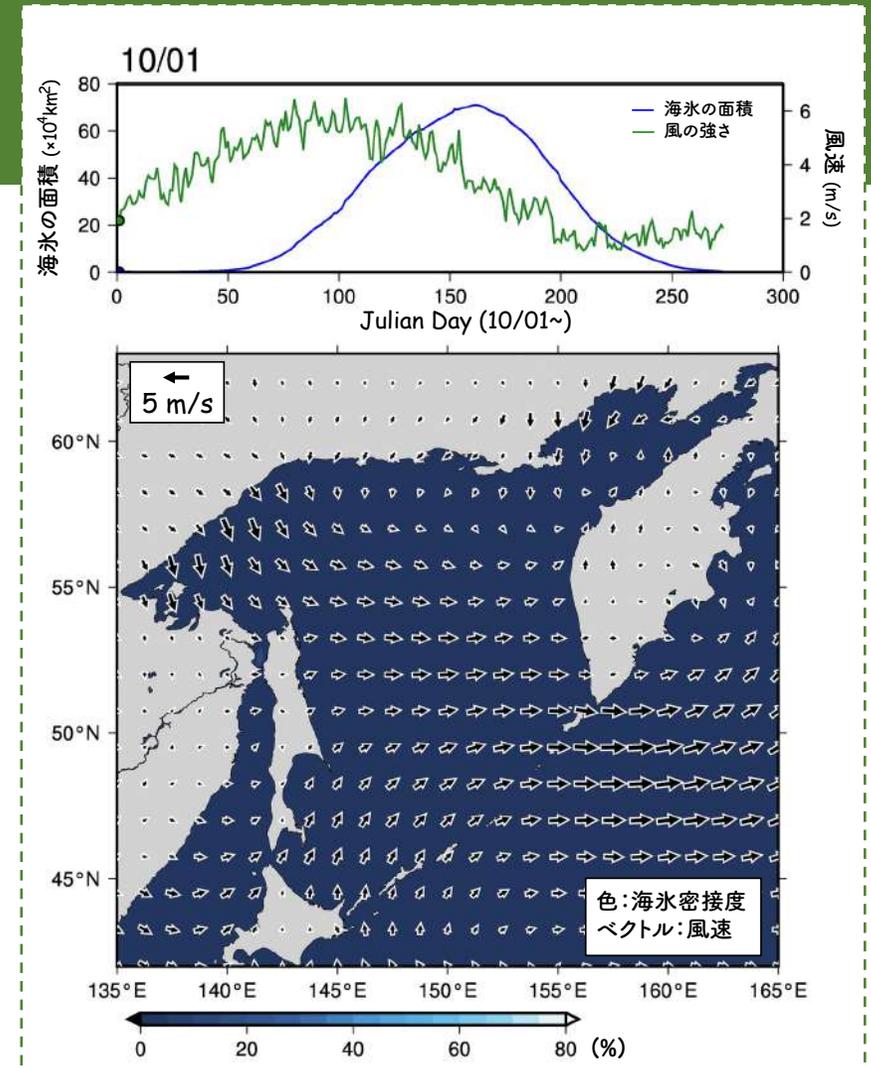


冬季オホーツク海の波浪研究 ～これまでの取組～

岩崎 慎介

土木研究所 寒地土木研究所

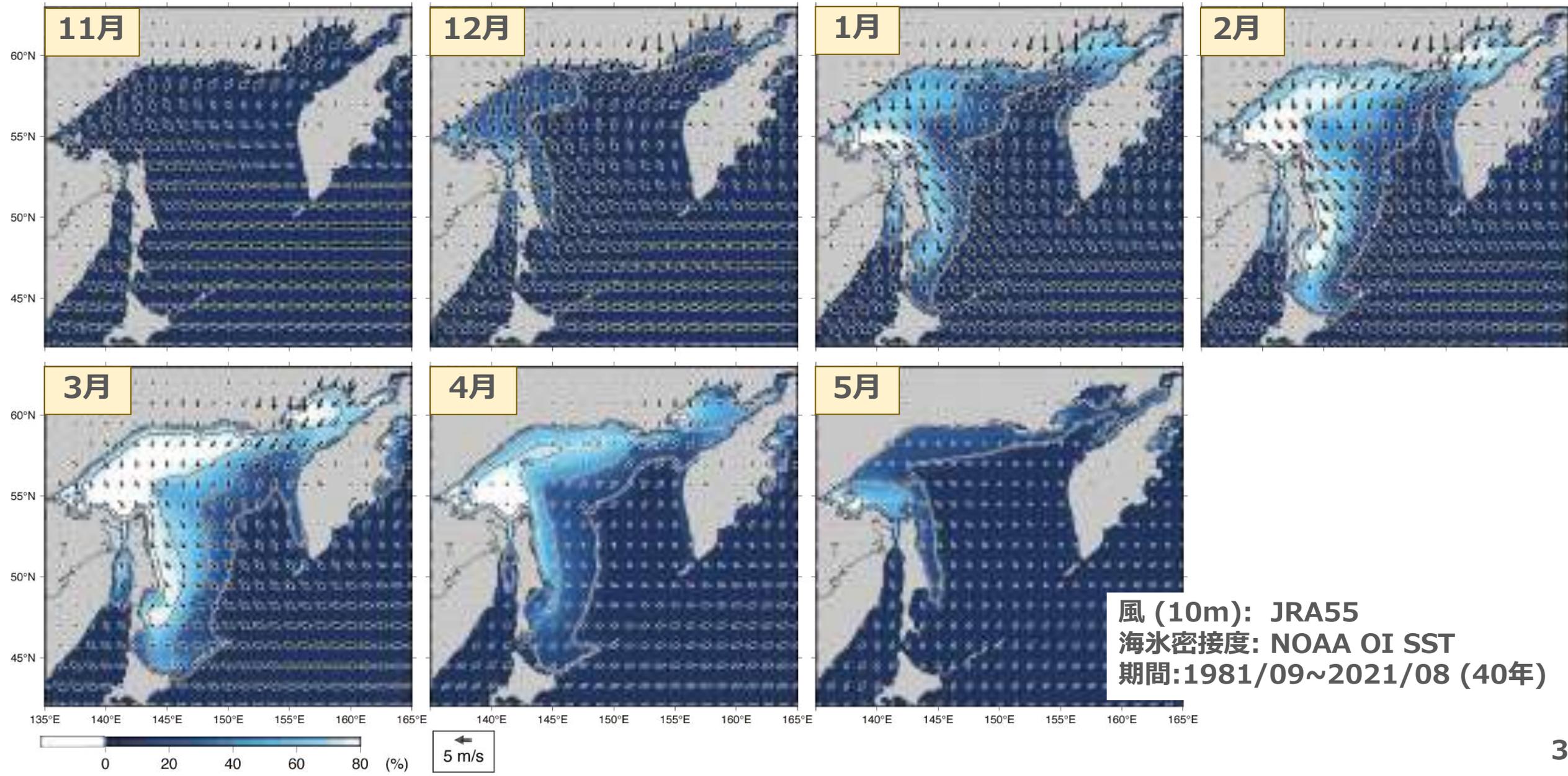
寒地水圏研究グループ 寒冷沿岸域チーム



これまでの経歴と研究

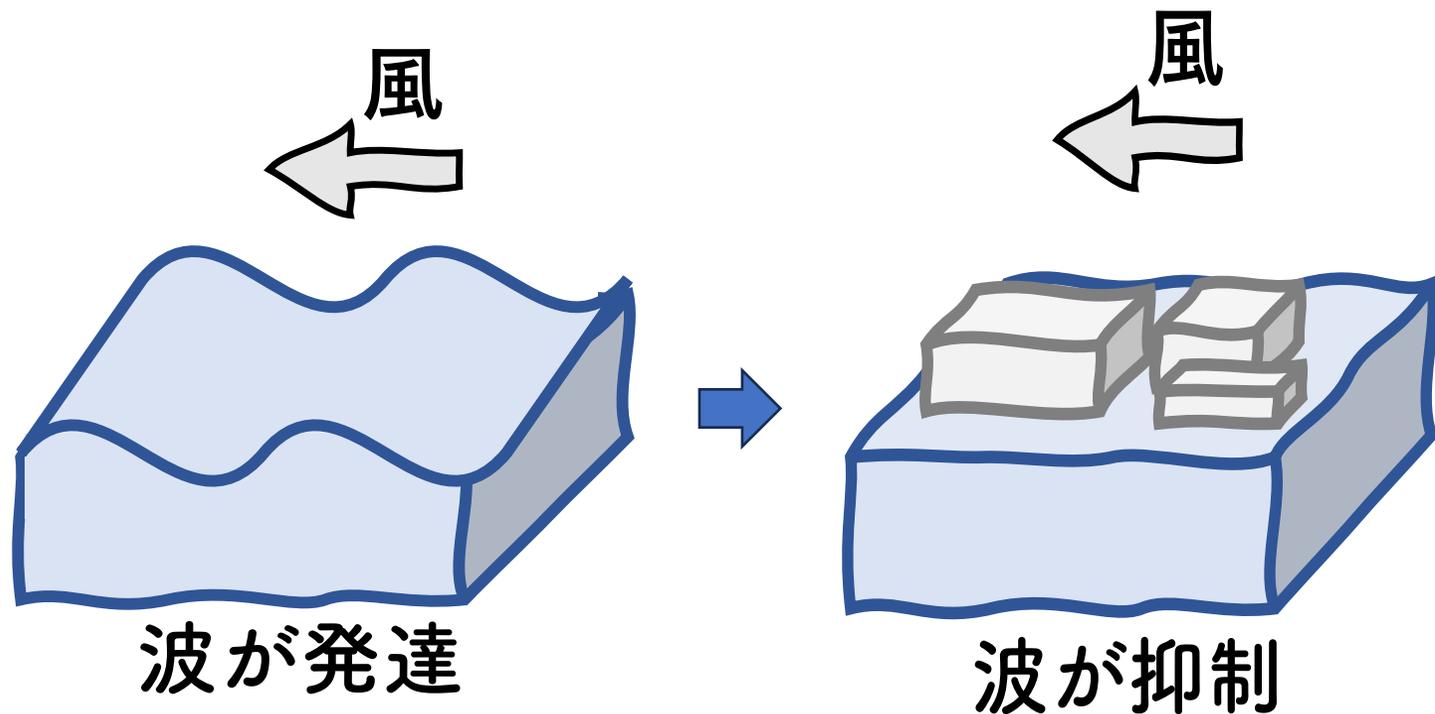
- **東海大学** 海洋学部地球環境工学科 
 1. 全球規模における衛星データによる海面熱輸送量
- **愛媛大学** 沿岸環境科学研究センター (3年間) 
 2. 数値モデルを活用した沿岸域の大気海洋相互作用
- **九州大学** 応用力学研究所 (4年間) 
 3. 海洋漂流物（海ごみ、マイクロプラスチック）の輸送過程
- **寒地土木研究所** 寒冷沿岸域チーム (6年目) 
 4. 北海道沿岸域における高波・高潮予測についての研究

オホーツク海の海氷密接度と風速の分布

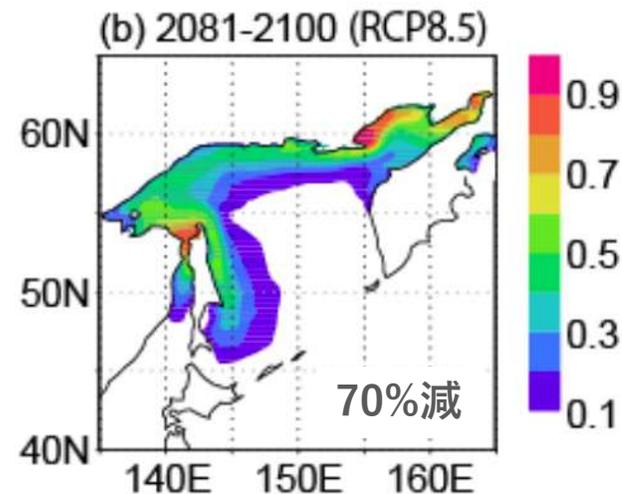


オホーツク海の波浪研究

海氷には波浪減衰効果がある。



- ・ オホーツク海の波浪に着目した研究例は少ない。



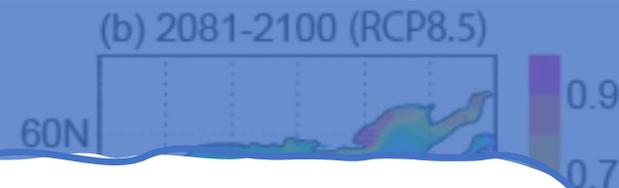
海氷密接度の予測 (RCP8.5)
環境省2020[気候変動影響評価報告書]

沿岸域に来襲する波浪の増大や、それに付随する：

- ・ 高波被害の増加
- ・ 海岸侵食の進行
- ・ 沿岸構造物安定性低下

災害事例の多発が懸念。

海氷には波浪減衰効果がある。



1. 海氷域に対するアルゴリズムの精度検討

Iwasaki and Otsuka (2021; *Front. Mar. Sci.*)

2. 波浪に対する海氷の役割：海上風の強弱で変化する自然の防波堤

Iwasaki (2023; *Prog. Oceanogr.*)

3. 海氷減少による波浪増大

Iwasaki (2023; *Sci. Rep.*)

・オホーツク海の波浪に着目した研究例は少ない。

・沿岸構造物の耐震性低下

災害事例の多発が懸念。

1. 海氷域に対するアルゴリズムの精度検討

Iwasaki and Otsuka (2021; *Front. Mar. Sci.*)

2. 波浪に対する海氷の役割：海上風の強弱で変化する自然の防波堤

Iwasaki (2023; *Prog. Oceanogr.*)

3. 海氷減少による波浪増大

Iwasaki (2023; *Sci. Rep.*)

1.海氷域に対するアルゴリズムの検討

オホーツクの波浪計算にも適用可能？
どのアルゴリズムが最も良い？

風 (10m): JRA55, DSJRA, 海氷密接度: NOAA OI SST, (海氷厚 : CFSR)



波浪モデル

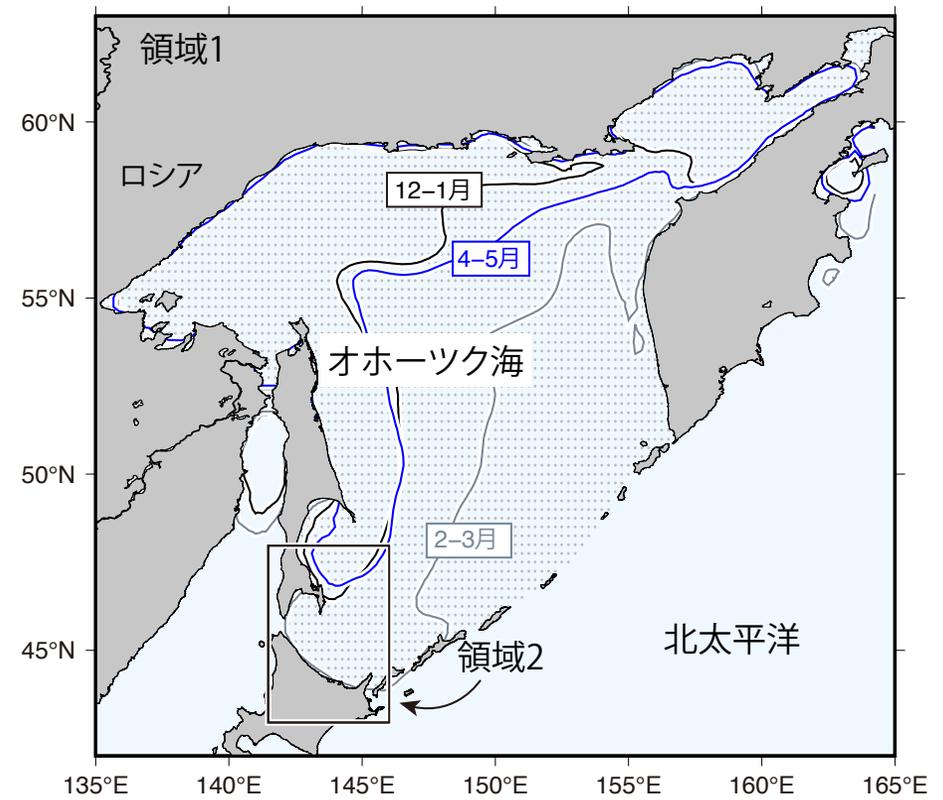
WAVEWATCH III ver. 6.07 (WW3)

- IC0 (Tolman 2003), IC1 (Rogers and Orzech 2013)
- IC2 (Liu and Mollo-Cristensen, 1988), IC3 (Wang and Shen 2010)
- IC4M1-IC4M7 (Collins and Rogers 2017), IC5 (Mosig et al. 2015)

モデル設定

モデル	WAVEWATCH III (Ver. 6.07)
空間解像度	領域1(0.25°), 領域2(0.08°)
周波数解像度	0.035-1.1 Hz (対数的に30分割)
方向解像度	10°
発達・散逸ソース項	ST4,ST6
海氷アルゴリズム	IC0,IC1,IC2,IC3,IC4M1-IC4M7,IC5
海岸線・海底地形	GEBCO2020

計算領域



計算期間: 2008/01~2010/12 (3年間)

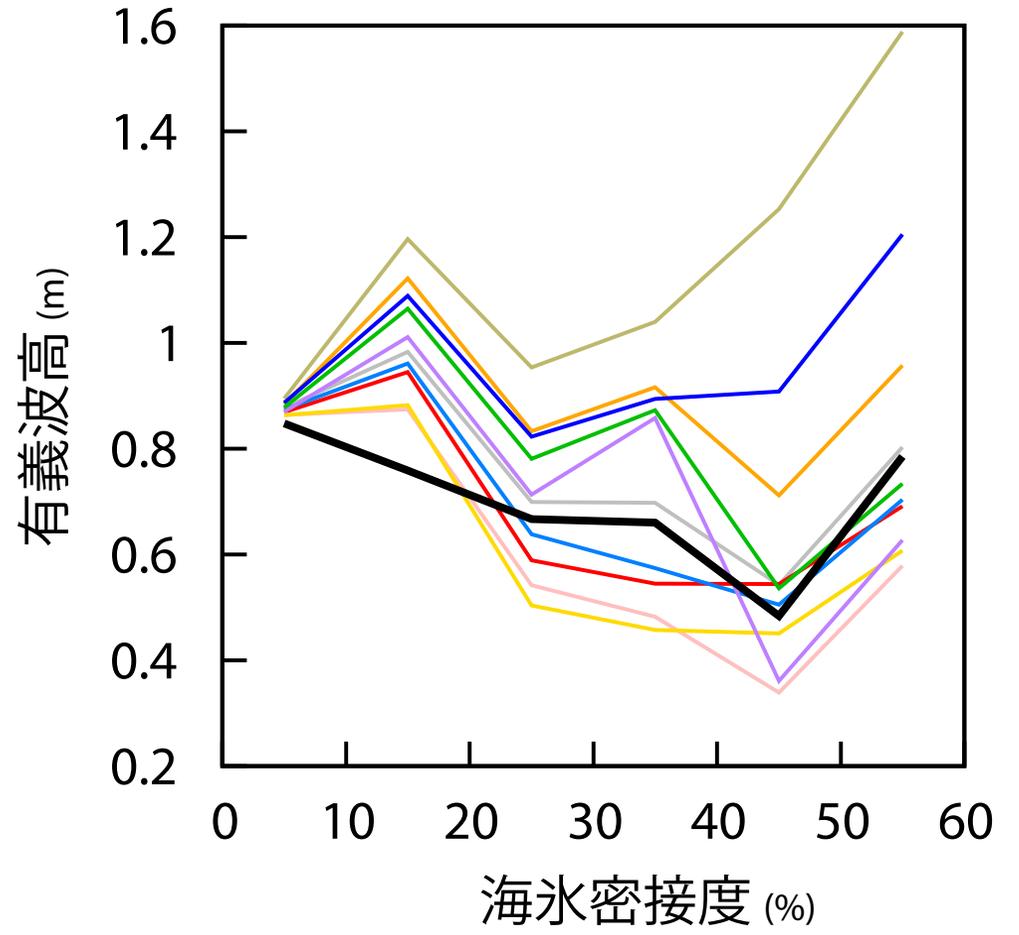
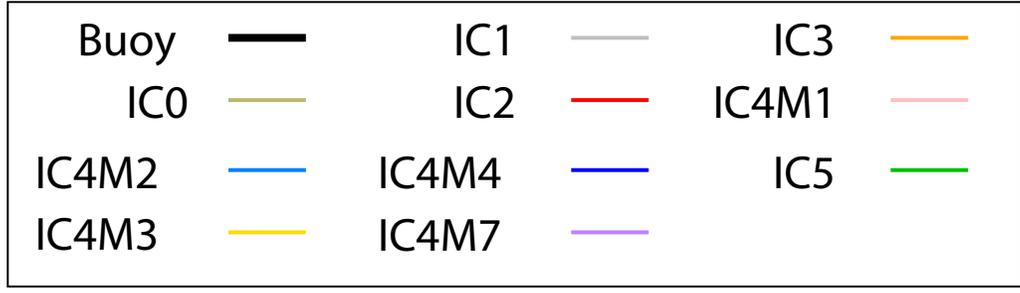
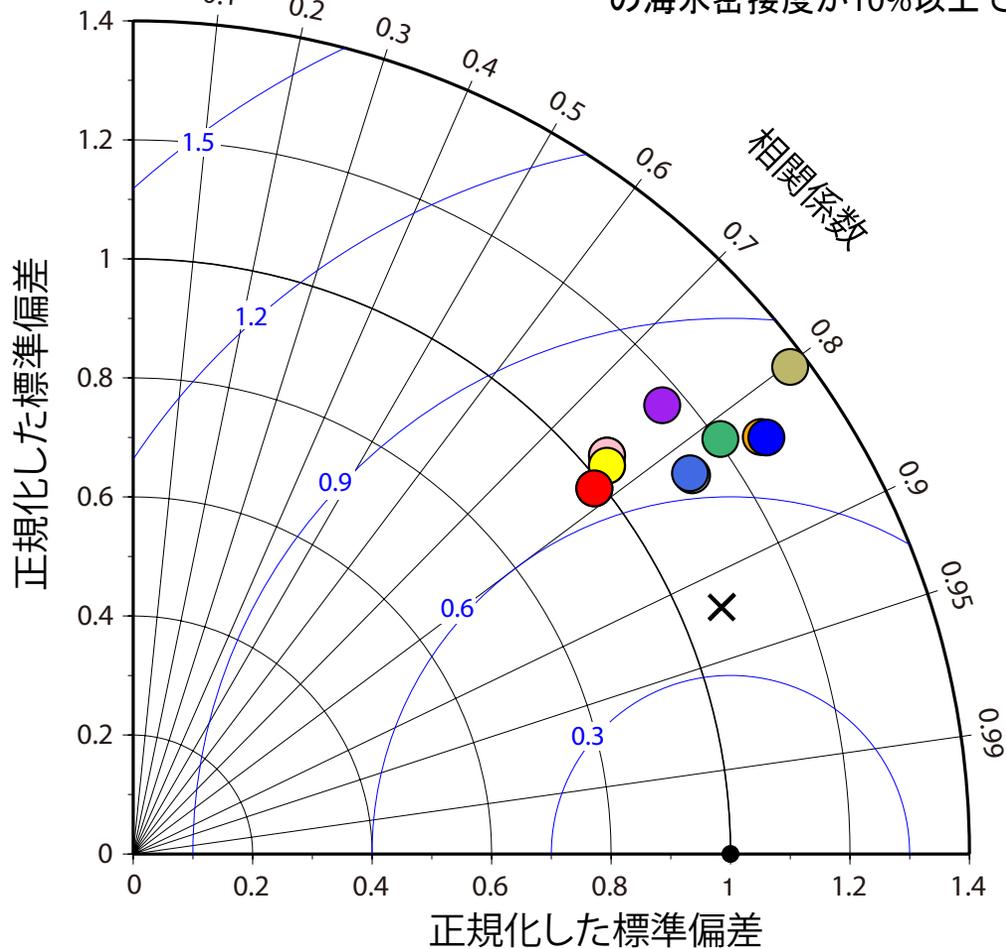
1. 海氷域に対するアルゴリズムの検討



×は海氷なしでの精度

観測点の周辺(44° -46° N, 142.5° -145.5° E)の海水密接度が10%以上での比較

有義波高



1.海氷域に対するアルゴリズムの検討

緑の太字は上位3位まで

有義波高の比較結果 (海氷>10%)

	IC0	IC1	IC2	IC3	IC4M1	IC4M2	IC4M3	IC4M4	IC4M7	IC5
バイアス(m)	0.47	0.1	0.01	0.25	-0.07	0.03	-0.06	0.29	0.1	0.17
二乗平均誤差(m)	0.51	0.4	0.41	0.44	0.44	0.4	0.43	0.44	0.47	0.43
相関係数	0.8	0.83	0.78	0.83	0.76	0.82	0.77	0.83	0.76	0.83

(海氷>50%)

	IC0	IC1	IC2	IC3	IC4M1	IC4M2	IC4M3	IC4M4	IC4M7	IC5
バイアス(m)	0.7	0.01	-0.1	0.14	-0.19	-0.09	-0.17	0.36	-0.15	-0.06
二乗平均誤差(m)	0.71	0.38	0.43	0.47	0.41	0.36	0.42	0.54	0.38	0.35
相関係数	0.81	0.89	0.88	0.87	0.88	0.9	0.87	0.85	0.9	0.91

詳しくはこちら ↓

[Iwasaki S](#) and Otsuka J, Evaluation of wave-ice parameterization models in WAVEWATCH^{RIII} along the coastal area of the Sea of Okhotsk during winter, *Frontiers in Marine Science*, Vol.8, 713784 (12 pages) (2021)

1. 海氷域に対するアルゴリズムの精度検討

Iwasaki and Otsuka (2021; *Front. Mar. Sci.*)

2. 波浪に対する海氷の役割：海上風の強弱で 変化する自然の防波堤

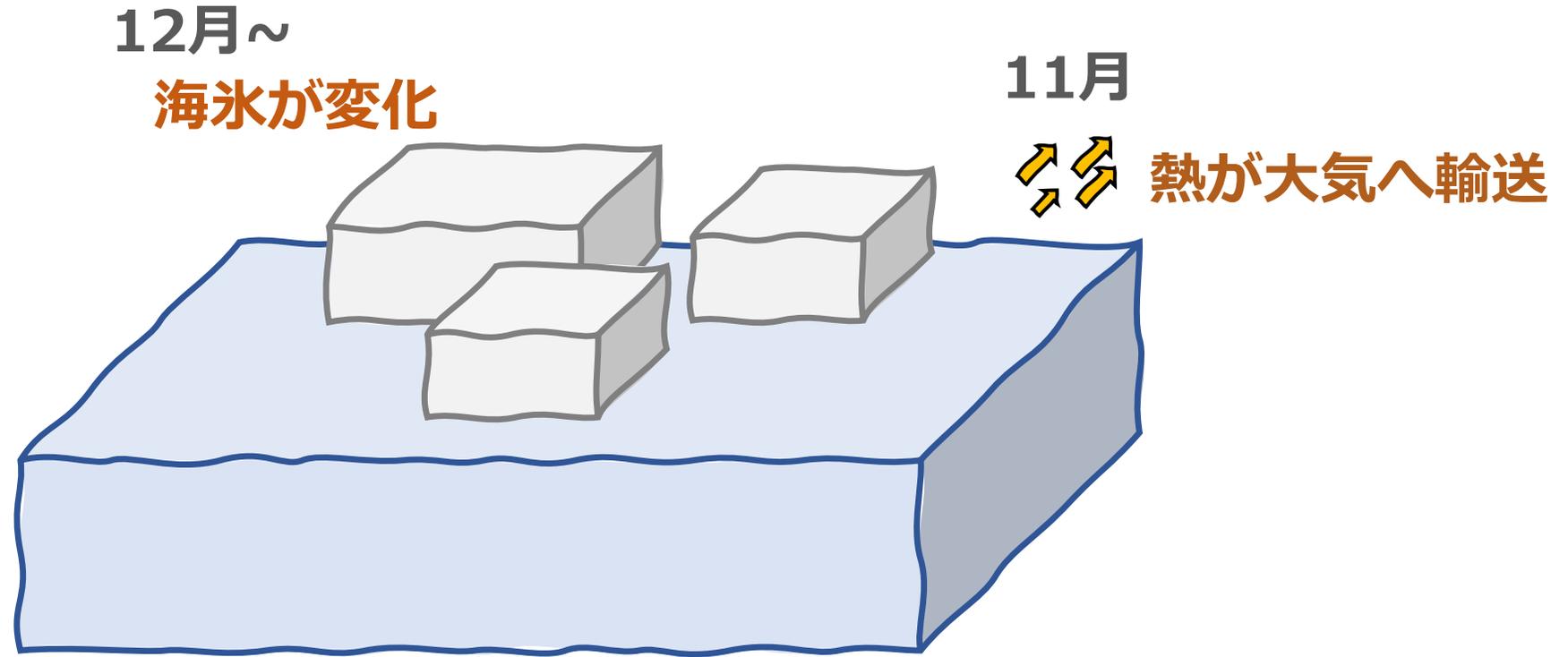
Iwasaki (2023; *Prog. Oceanogr.*)

3. 海氷減少による波浪増大

Iwasaki (2023; *Sci. Rep.*)

2. 波浪に対する海氷の役割

: 海上風の強弱で変化する自然の防波堤

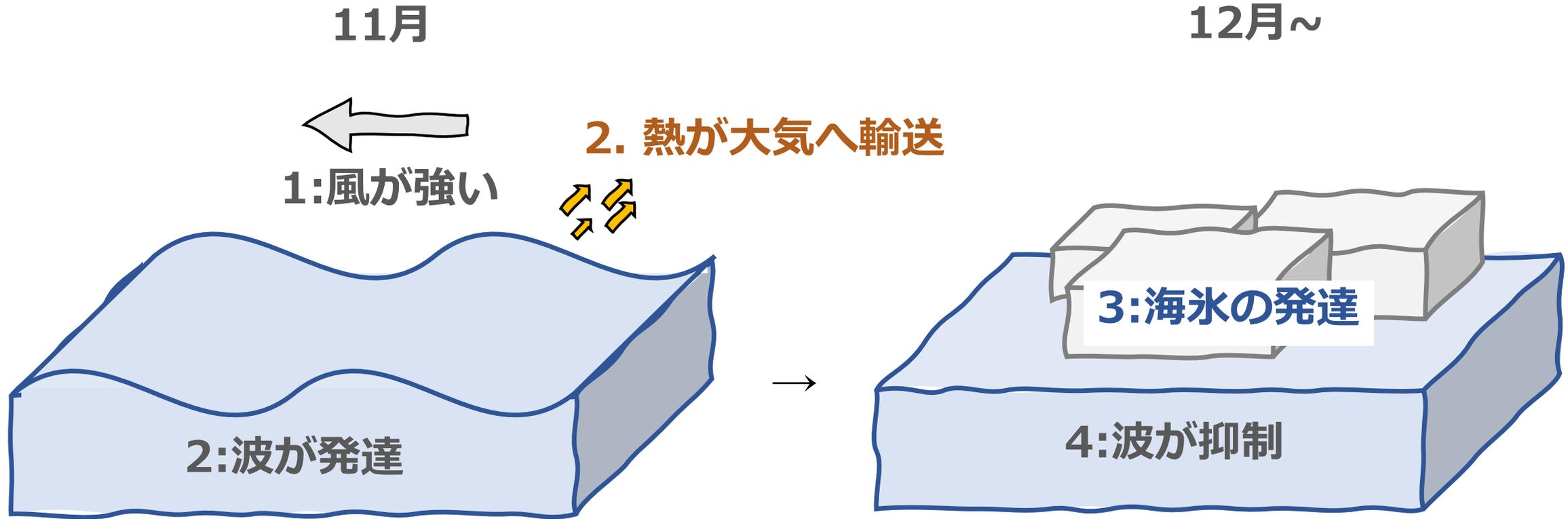


オホーツク海の家氷の経年変動に関する研究

(例えば、Kimura and Wakatsuchi, 2004, Nakanowatari et al., 2010,
Ohshima et al., 2006, Sasaki et al., 2007)

2. 波浪に対する海氷の役割

: 海上風の強弱で変化する自然の防波堤



海氷には、晩秋（11月）における波浪の増減に応じて、冬季の波浪を調整する可変的な防波堤としての役割がある??

手法 (波浪モデル)

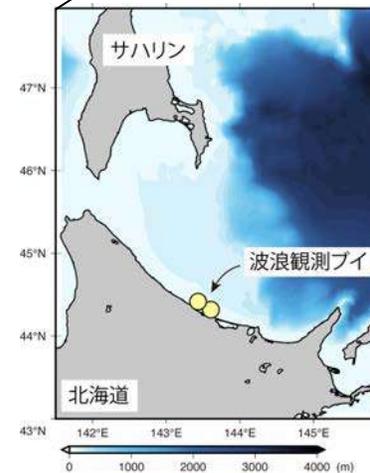
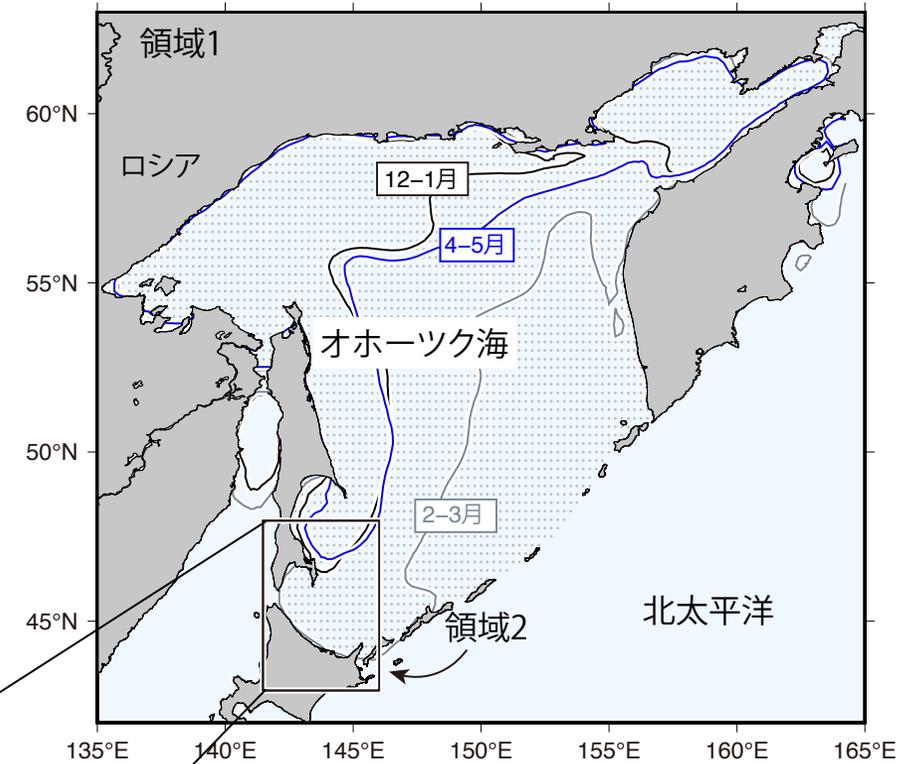
入力データ

海上風	海氷	Reference
JRA55	NOAA OISST	Kobayashi et al., (2015), Reynolds et al., (2007), Huang et al., (2021)

波浪モデル(WW3) 入力

モデル	WAVEWATCH III (Ver. 6.07)
空間解像度	領域1(0.25°), 領域2(0.08°)
周波数解像度	0.035-1.1 Hz (対数的に30分割)
方向解像度	10°
発達・散逸ソース項	ST6
海氷アルゴリズム	IC4M2 (Meylan et al., 2014)
海岸線・海底地形	GEBCO2020

計算期間: 1981/09~2021/08 (40年間)



2パターンの計算

1. 標準実験
2. 海氷なし実験

手法 (波浪モデル)

入力データ

海上風	海氷	Reference
JRA55	NOAA OISST	Kobayashi et al., (2015), Reynolds et al., (2007), Huang et al., (2021)

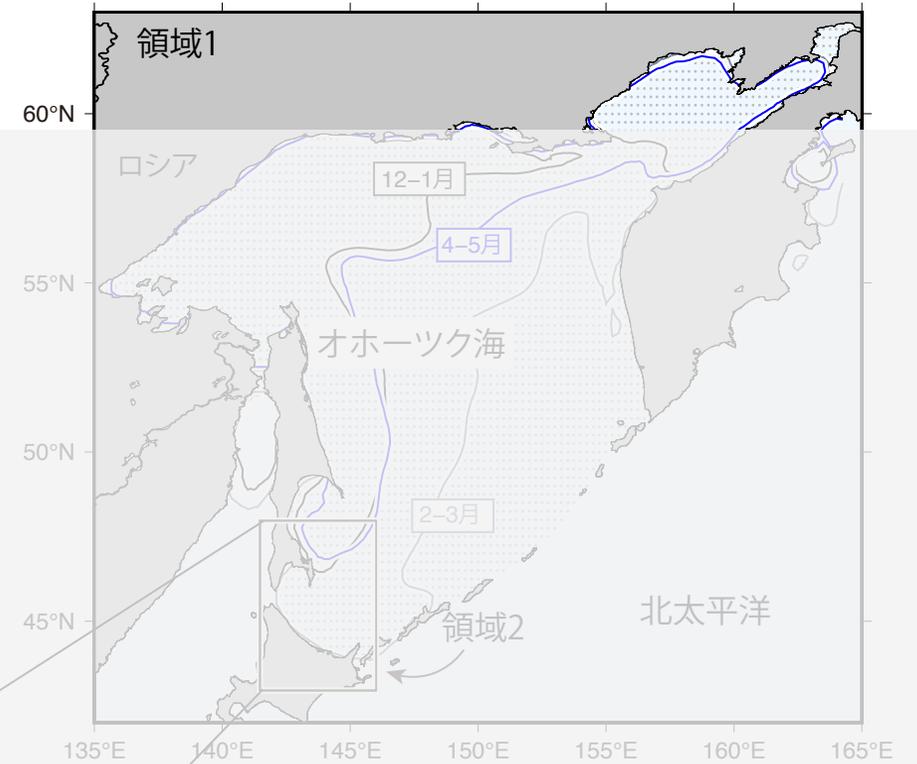
波浪モデル(WW3)  入力

モデル	WAVEWATCH III (Ver. 6.07)
空間解像度	領域1(0.25°), 領域2(0.08°)
周波数解像度	0.035-1.1 Hz (対数的に30分割)
方向解像度	10°
発達・散逸ソース項	ST6
海氷アルゴリズム	IC4M2 (Meylan et al., 2014)

波パワー (P_w)

$$P_w = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_{0,-1}$$

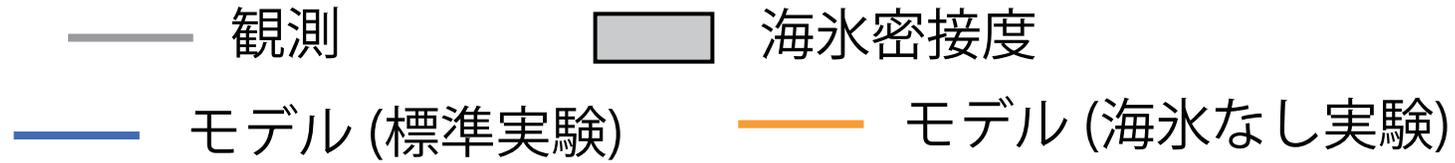
H_s : 有義波高 $g (=9.806 \text{ m s}^{-2})$
 $T_{0,-1}$: 平均周期 $\rho (=1025 \text{ kg m}^{-3})$



2パターンの計算

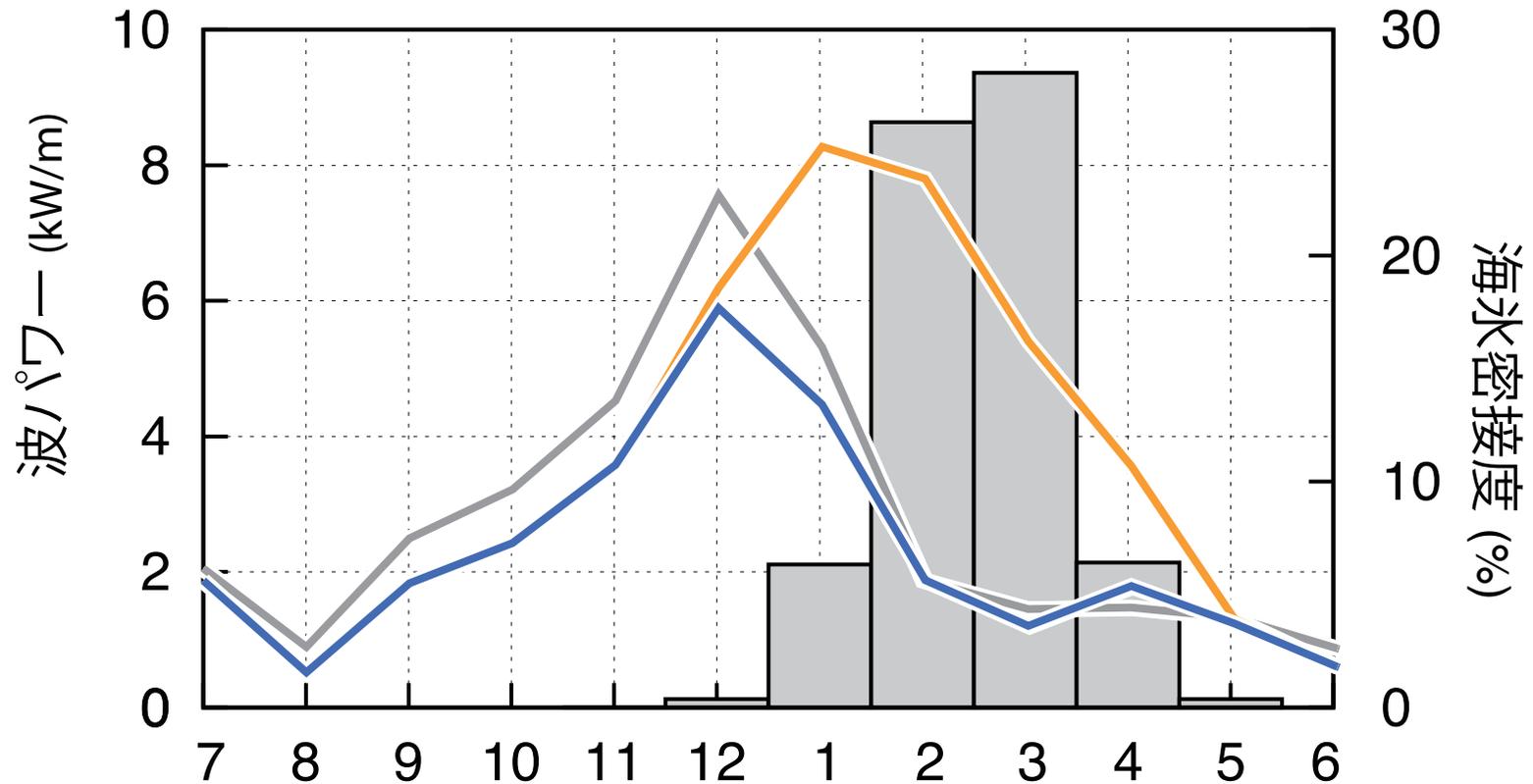
1. 標準実験 (CTL)
2. 海氷なし実験 (Non-ICE)

波浪に対する海氷の影響（観測との比較）



紋別

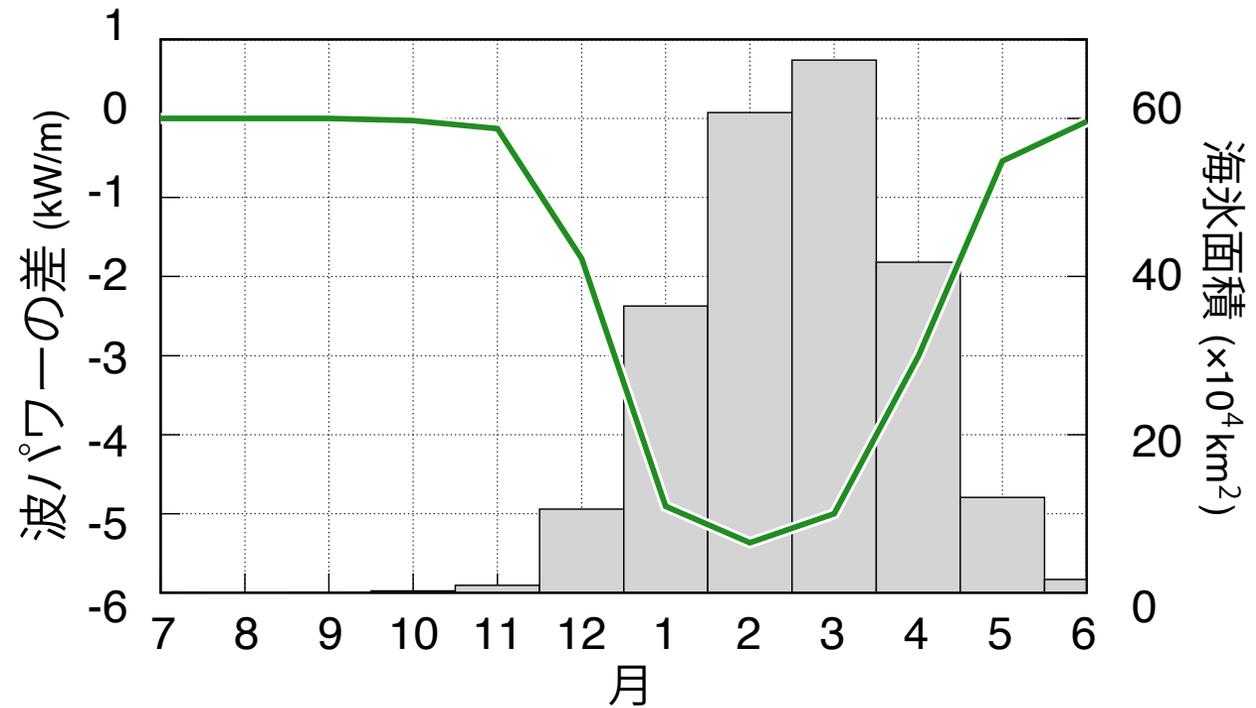
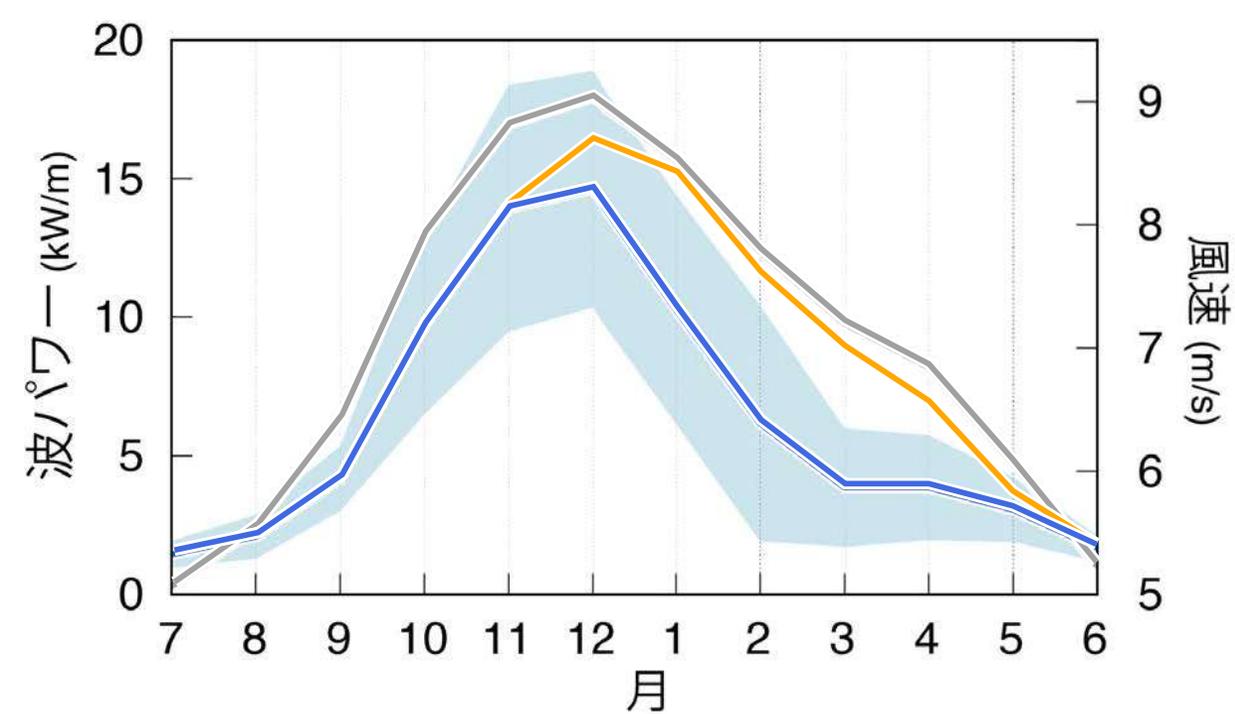
モデルは、観測とよく一致している。



波浪に対する海氷の影響 (全域)

オホーツク全体での波パワー

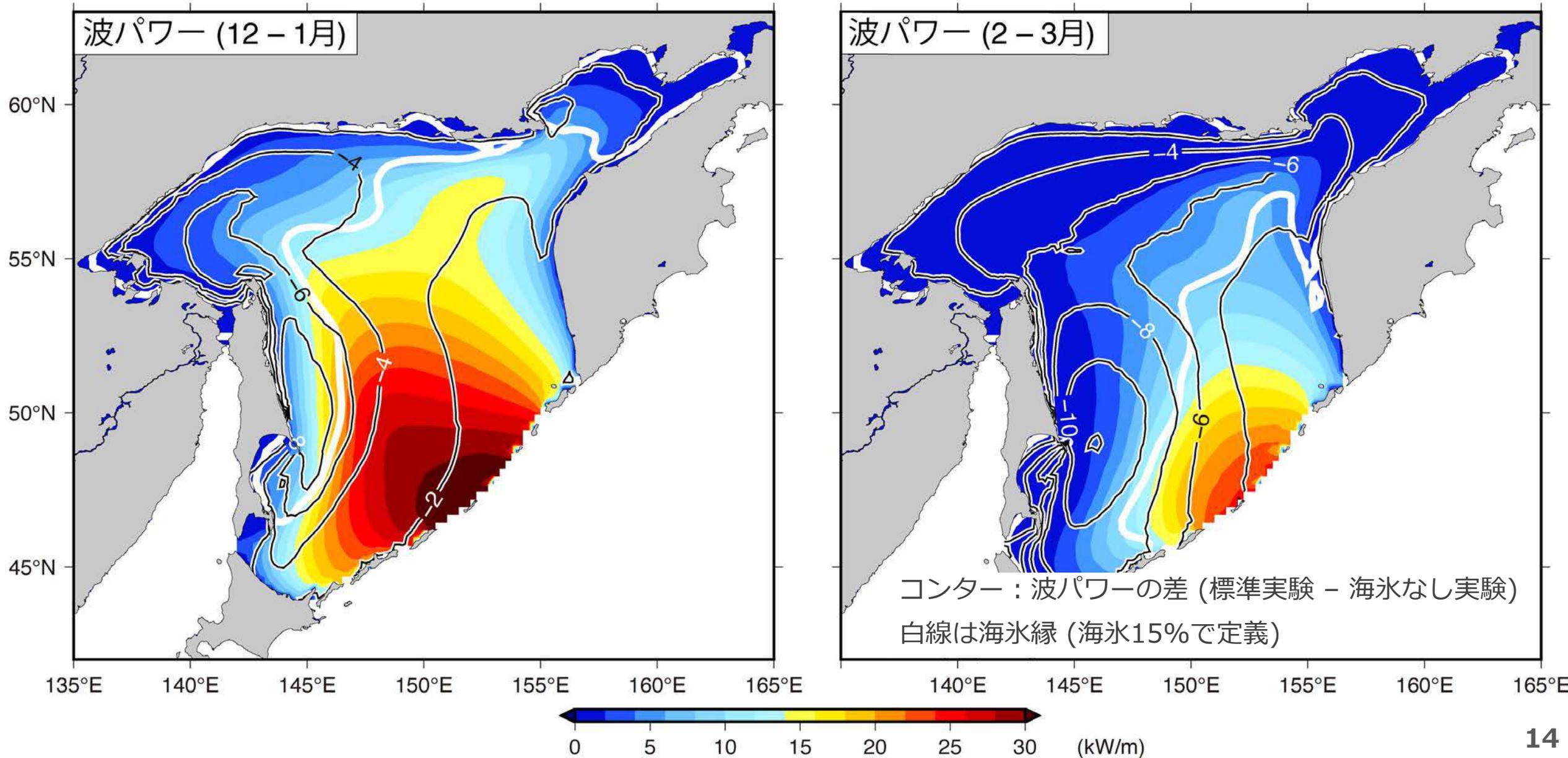
海氷は自然の防波堤



波浪に対する海氷の影響 (全域)

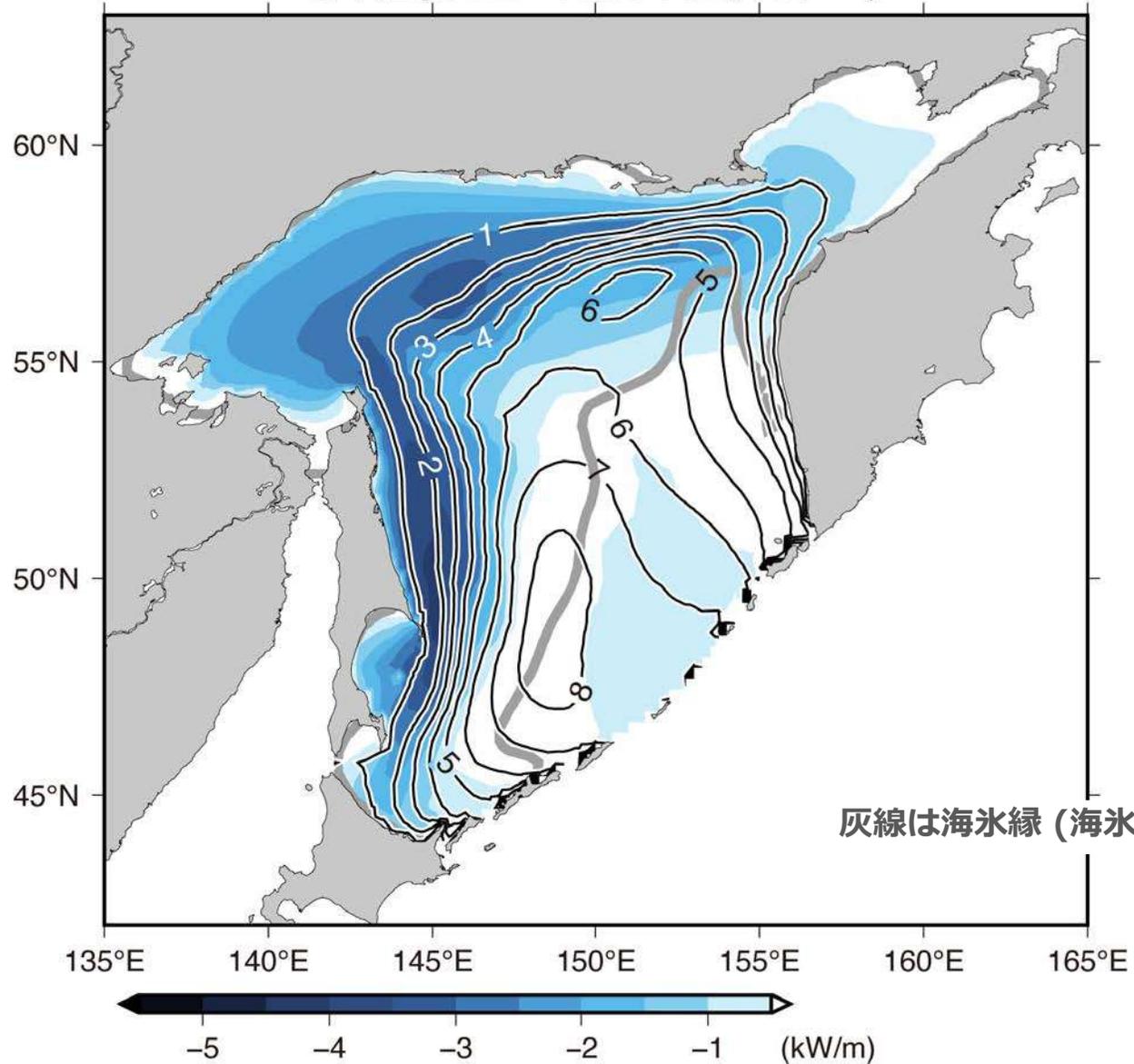
オホーツク全体での波パワー

海氷は自然の防波堤



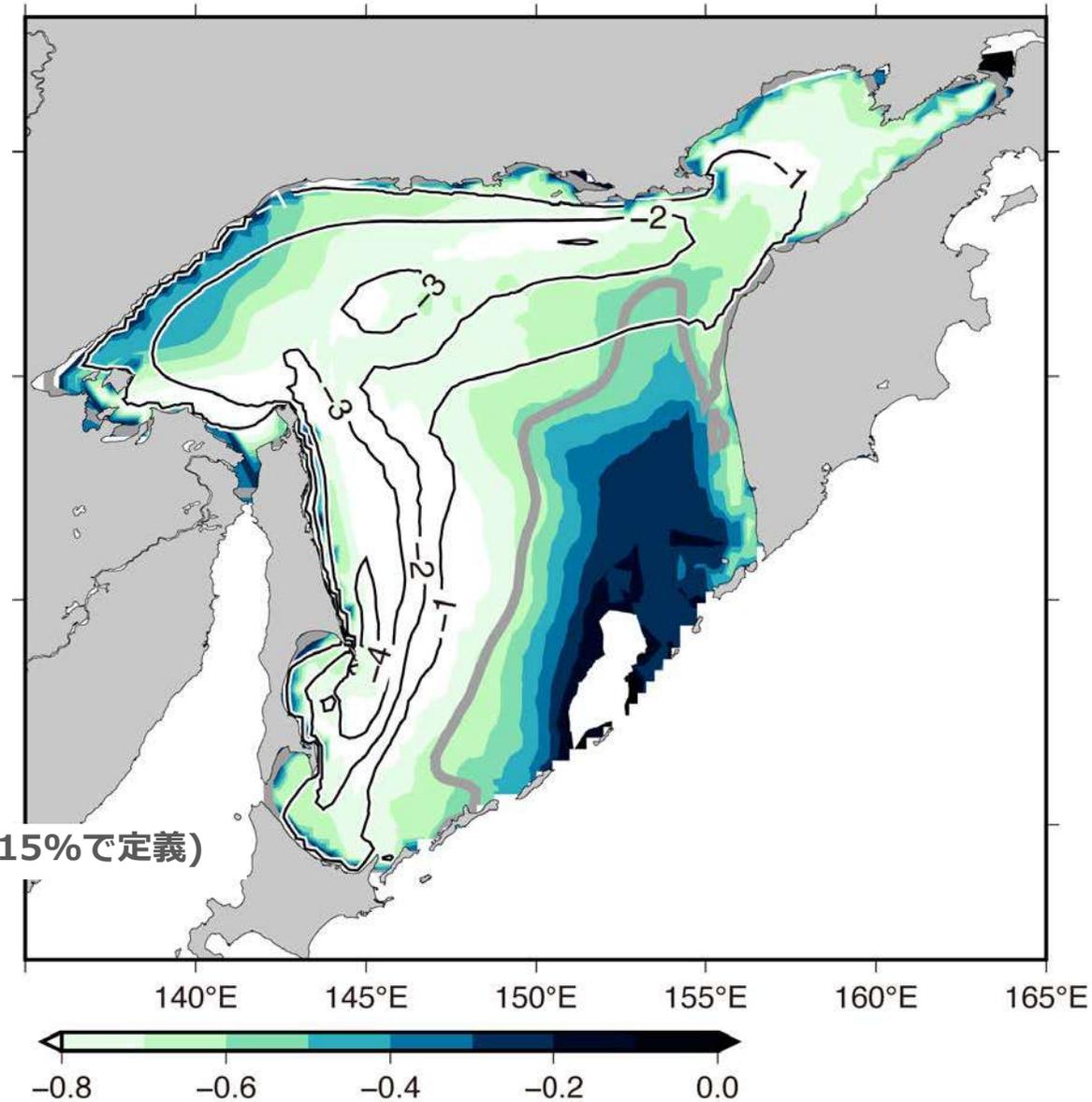
波浪に対する海氷の影響 (全域)

波パワーの標準偏差(コンター)と
その差(CTL - Non-ICE; カラー)

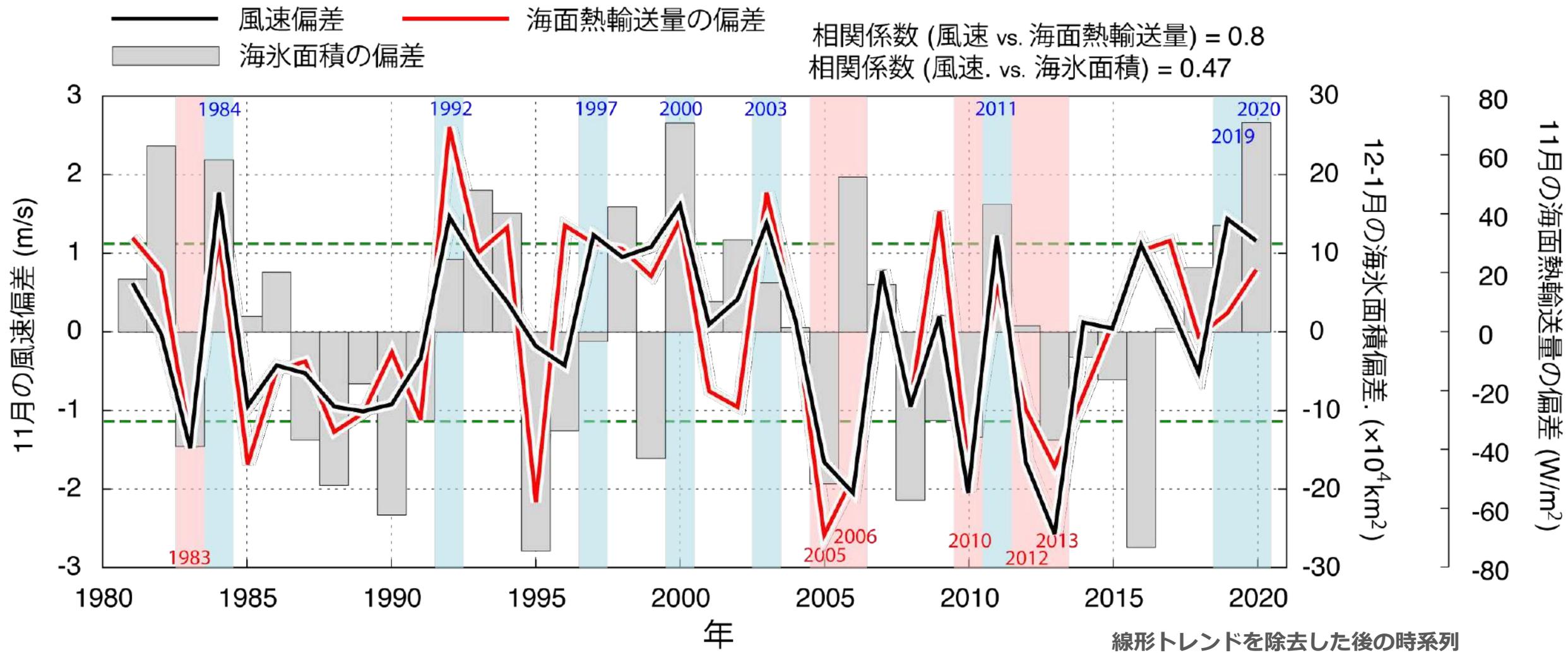


波パワーの標準偏差(コンター)と
相関係数(波パワー vs. 海氷密接度)

期間: 2-3月



11月の風と海面熱輸送量、海氷の関係



11月の風は、同時期の海面熱輸送量、その後(12-1月)の海氷面積と有意な相関がある。

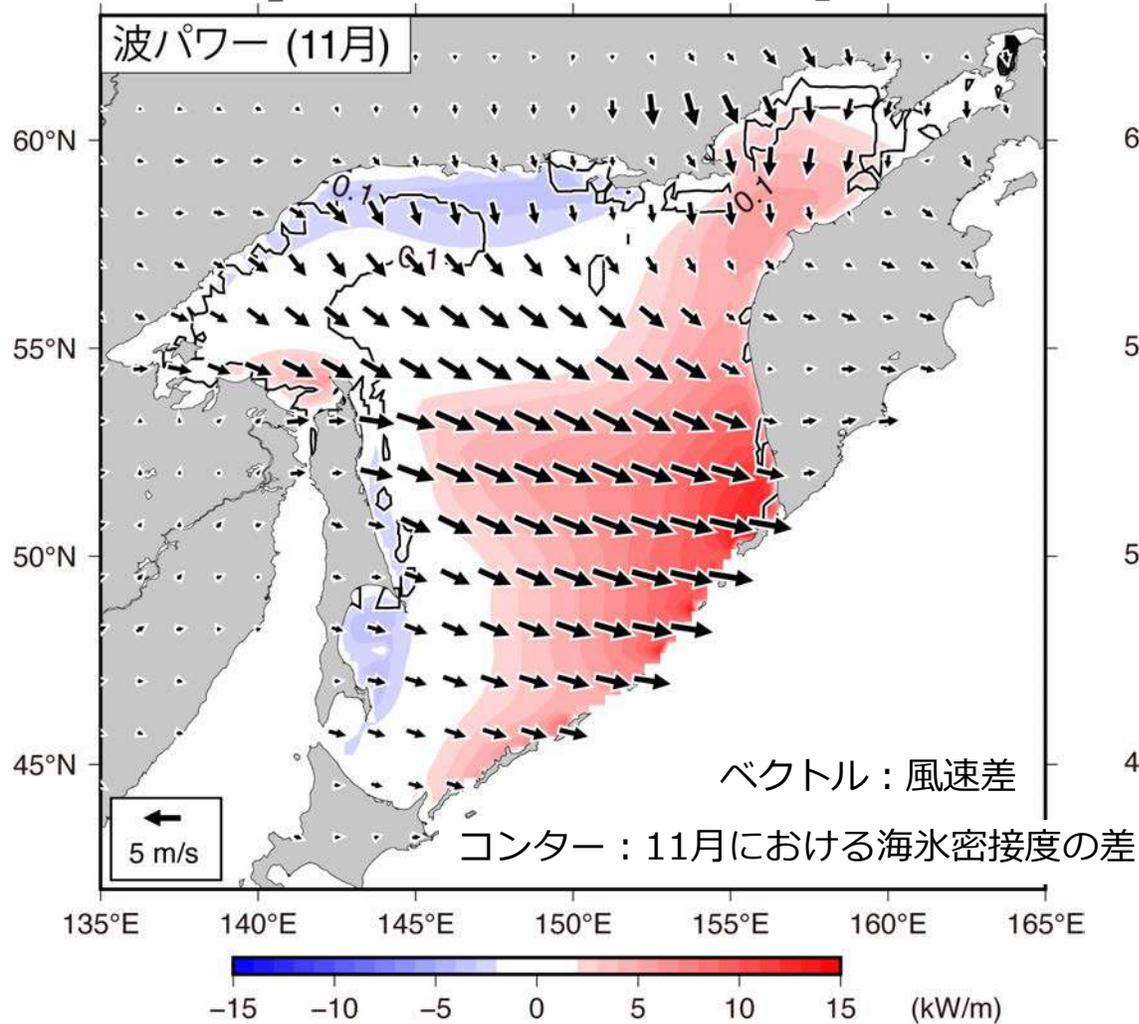
風の標準偏差 ($\sigma = 1.13 \text{ m/s}$)

標準偏差の±で風が強い年と弱い年を定義

11月の風による海面熱輸送量や海氷の変化

波パワーの差

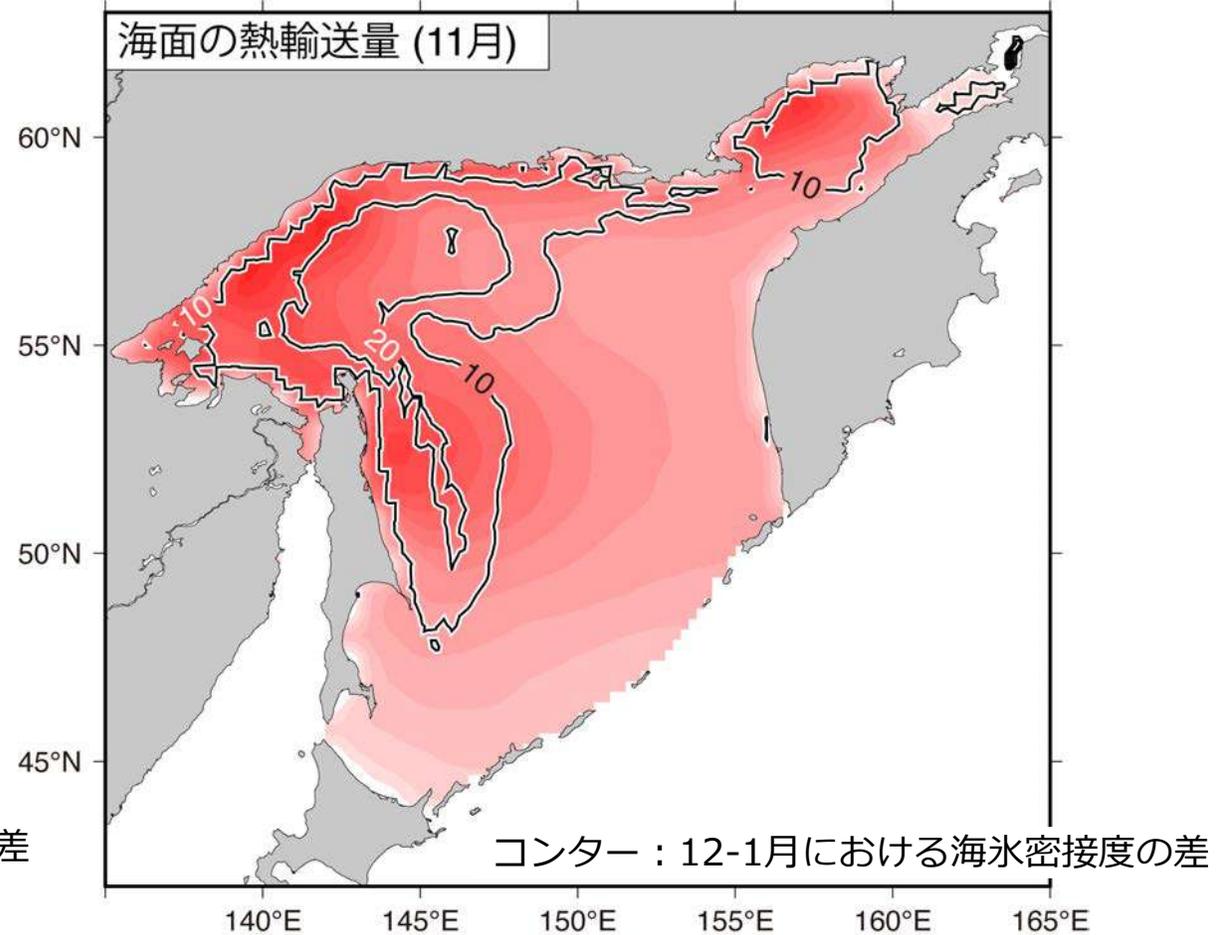
[風が強い年—風が弱い年]



11月の風が増加 → 11月の波パワー増加

海面熱輸送の差

[風が強い年—風が弱い年]

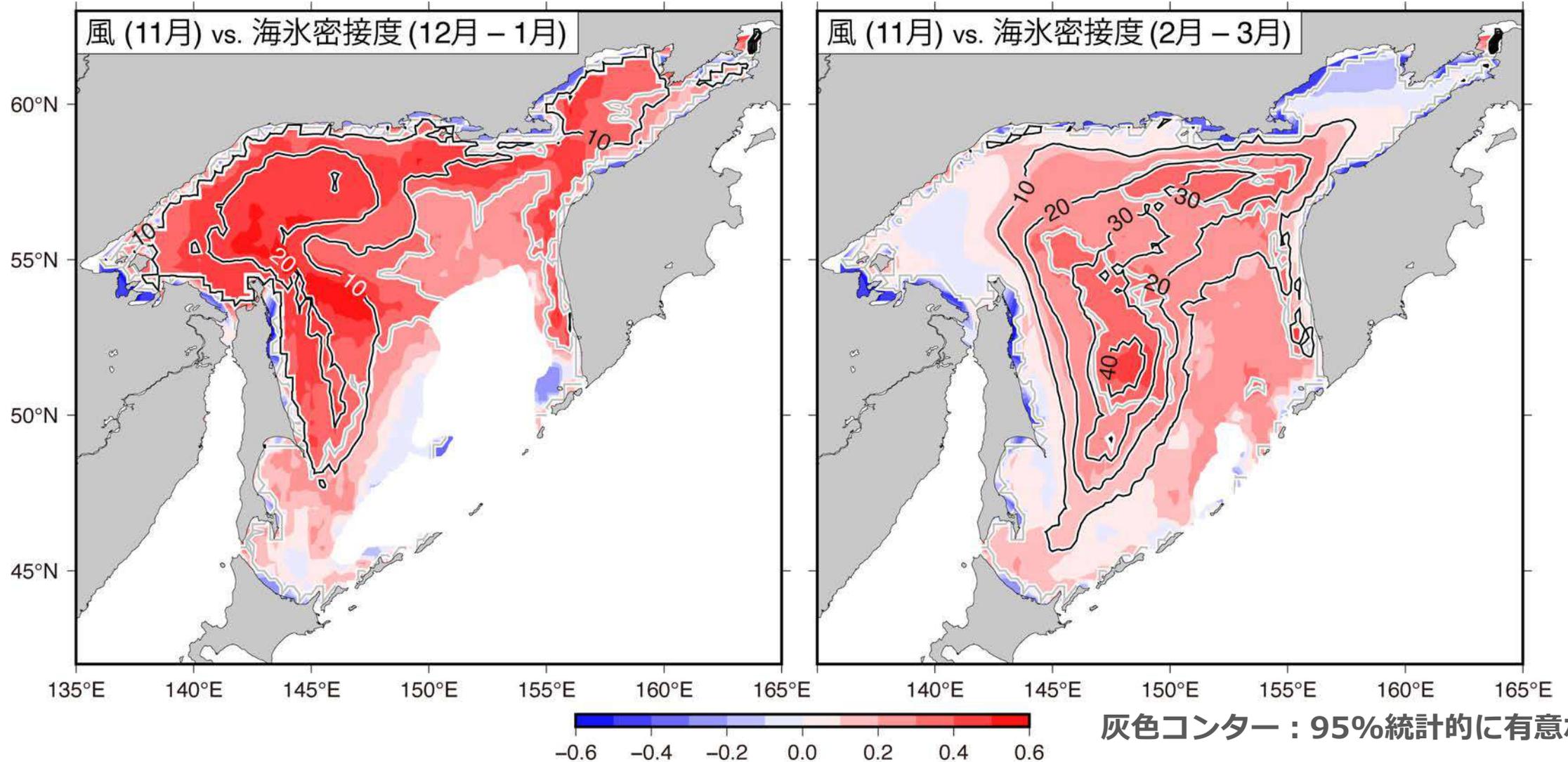


11月の風が増加 → 11月の海面熱輸送の増加 ↓

12-1月の海氷の増加 17

11月の風と海氷密接度の相関マップ

黒コンター：海氷密接度の差 [風が強い年—風が弱い年]



風と海氷の高い相関性が広範囲で見られる。

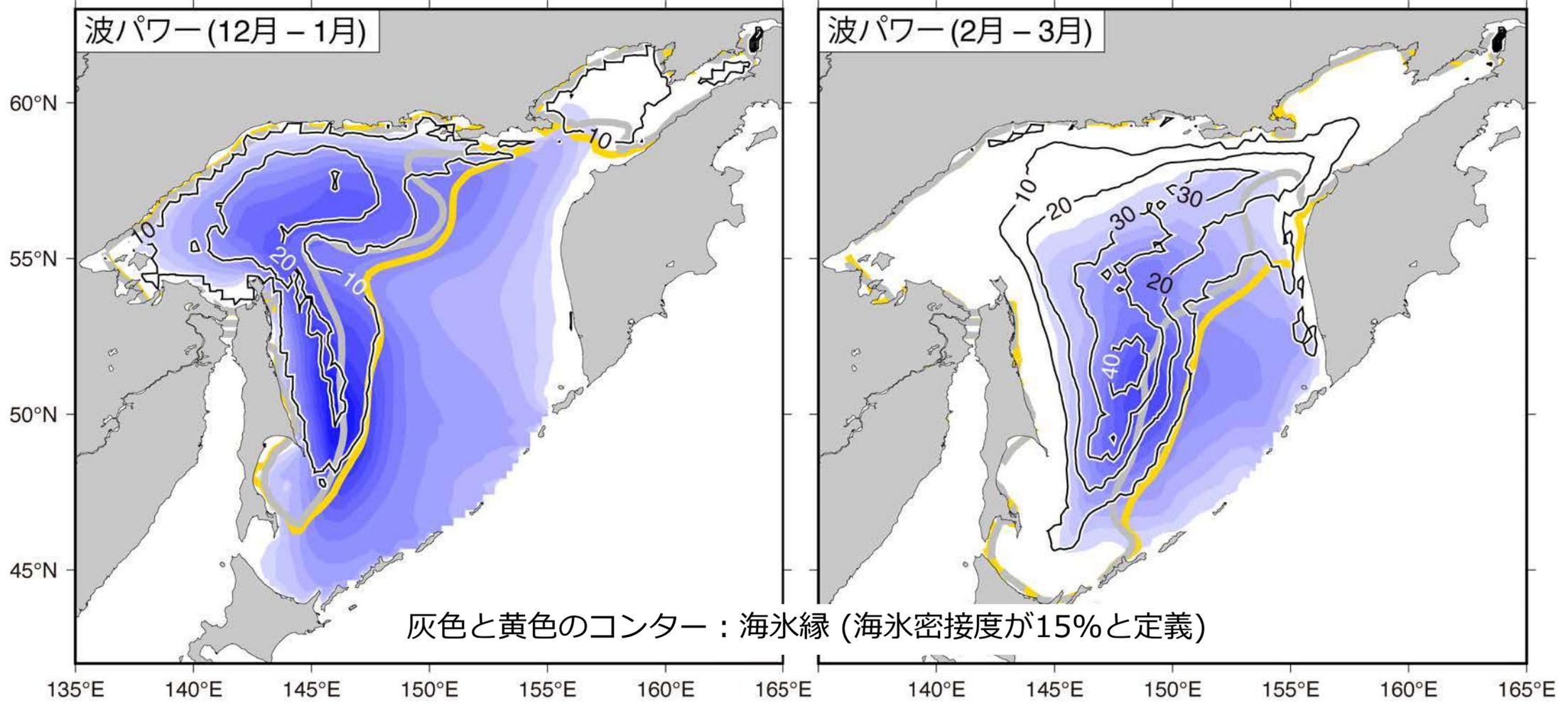
両者(風と海氷)の強い関係性は2-3月も見られる。

11月の風による波パワーの変化

波パワーの差 [風が強い年－風が弱い年]

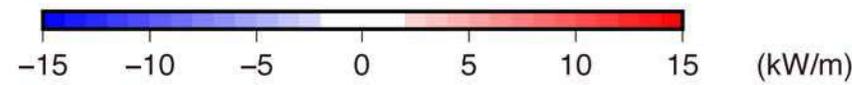
黒コンター：海氷密接度の差 [風が強い年－風が弱い年]

標準実験



黄色:風が強い年

灰色:風が弱い年



11月の風が増加 → 海氷域の拡張

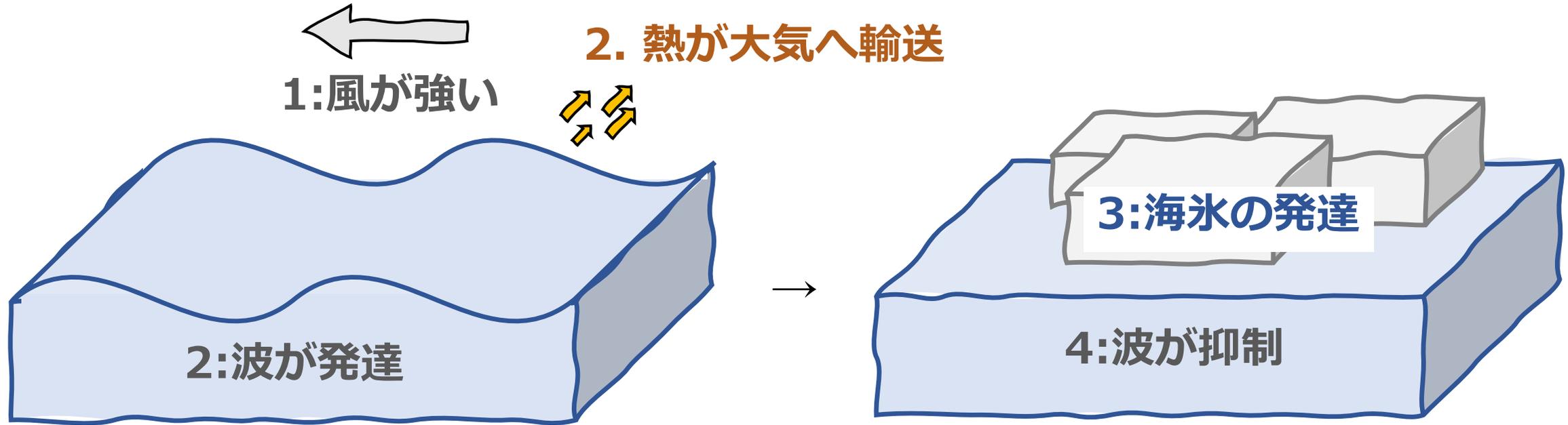
11月の風が増加 → 12-3月の波パワー減少

波浪に対する海氷の役割

: 海上風の強弱で変化する自然の防波堤

11月

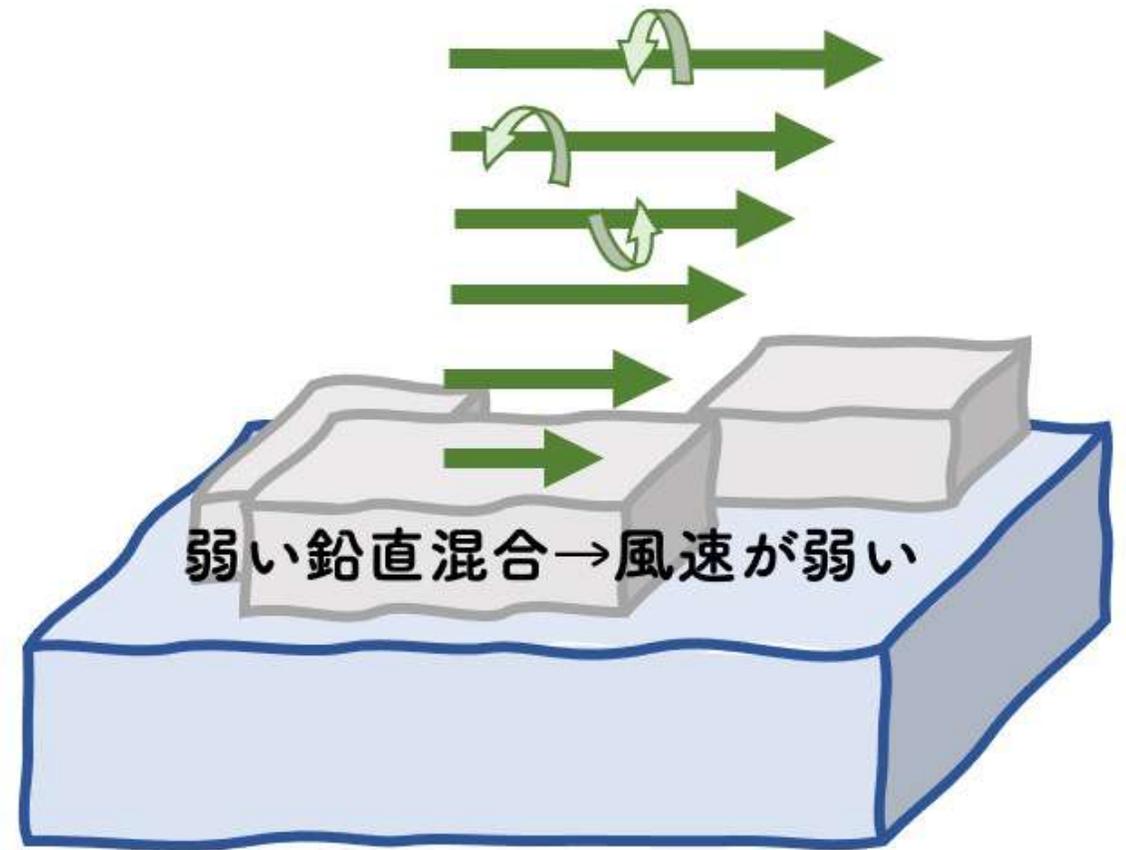
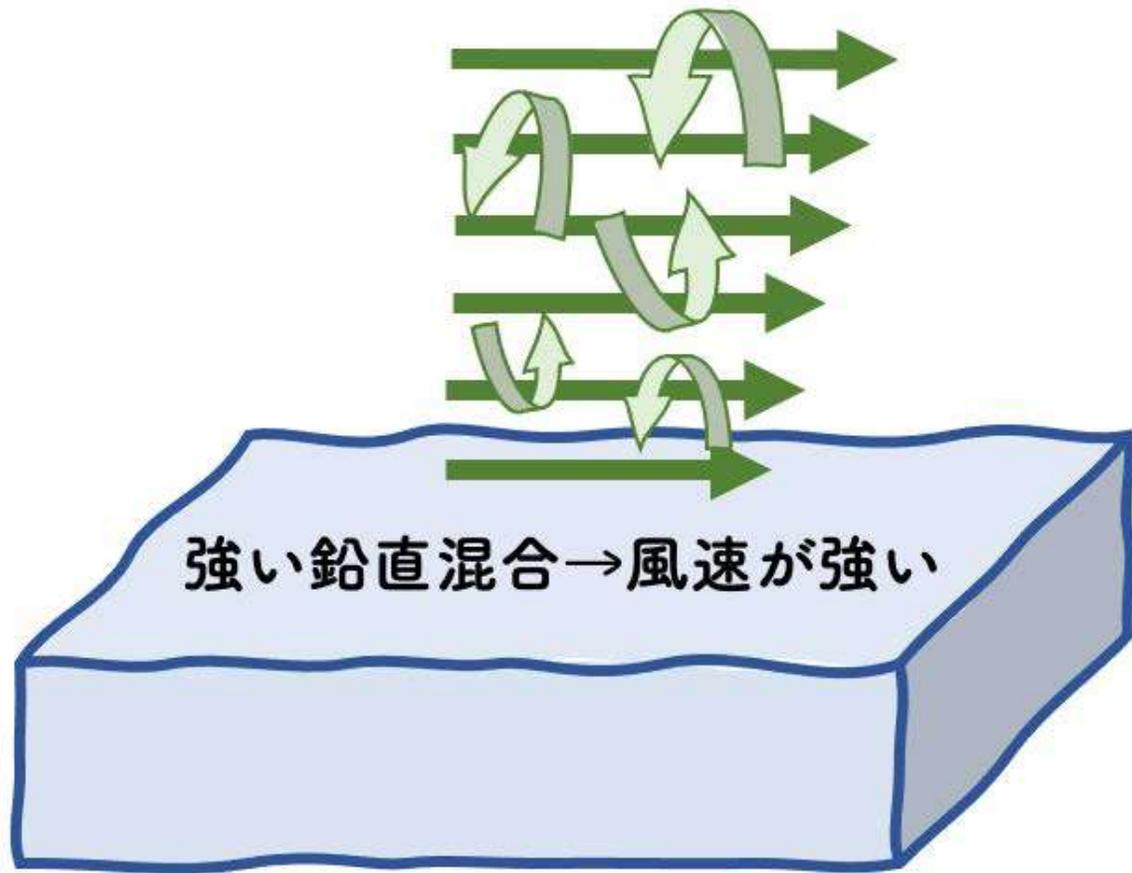
12月~



海氷には、晩秋（11月）における波浪の増減に応じて、冬季の波浪を調整する可変的な防波堤としての役割がある。

海氷による海上風の変化

上層ほど風速が大きい



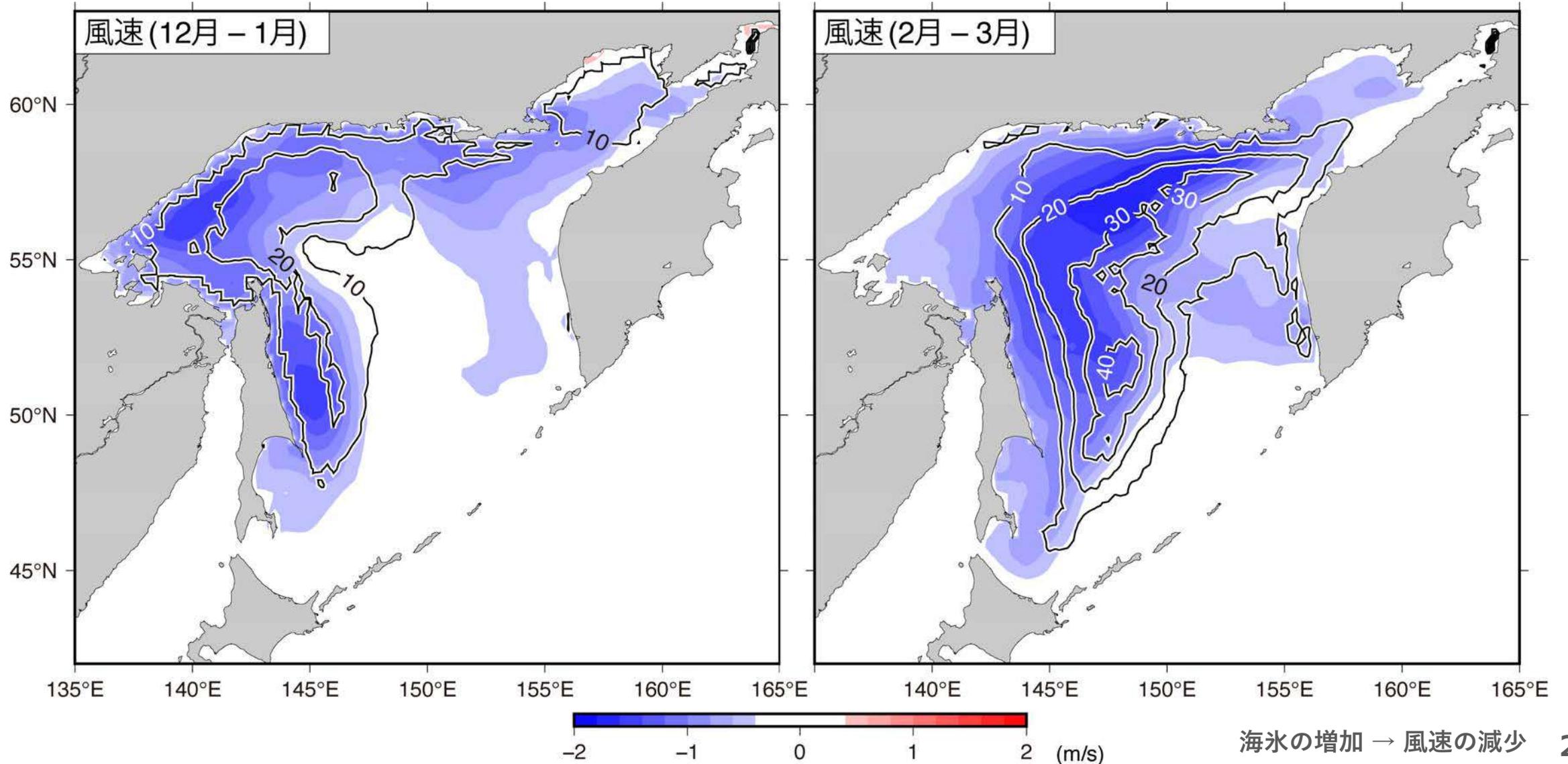
海氷の変化に応じて、風速も変化する。

Alkama et al., (2020)

海氷による海上風の変化

風速の差 [風が強い年－風が弱い年]

黒コンター：海氷密接度の差 [風が強い年－風が弱い年]

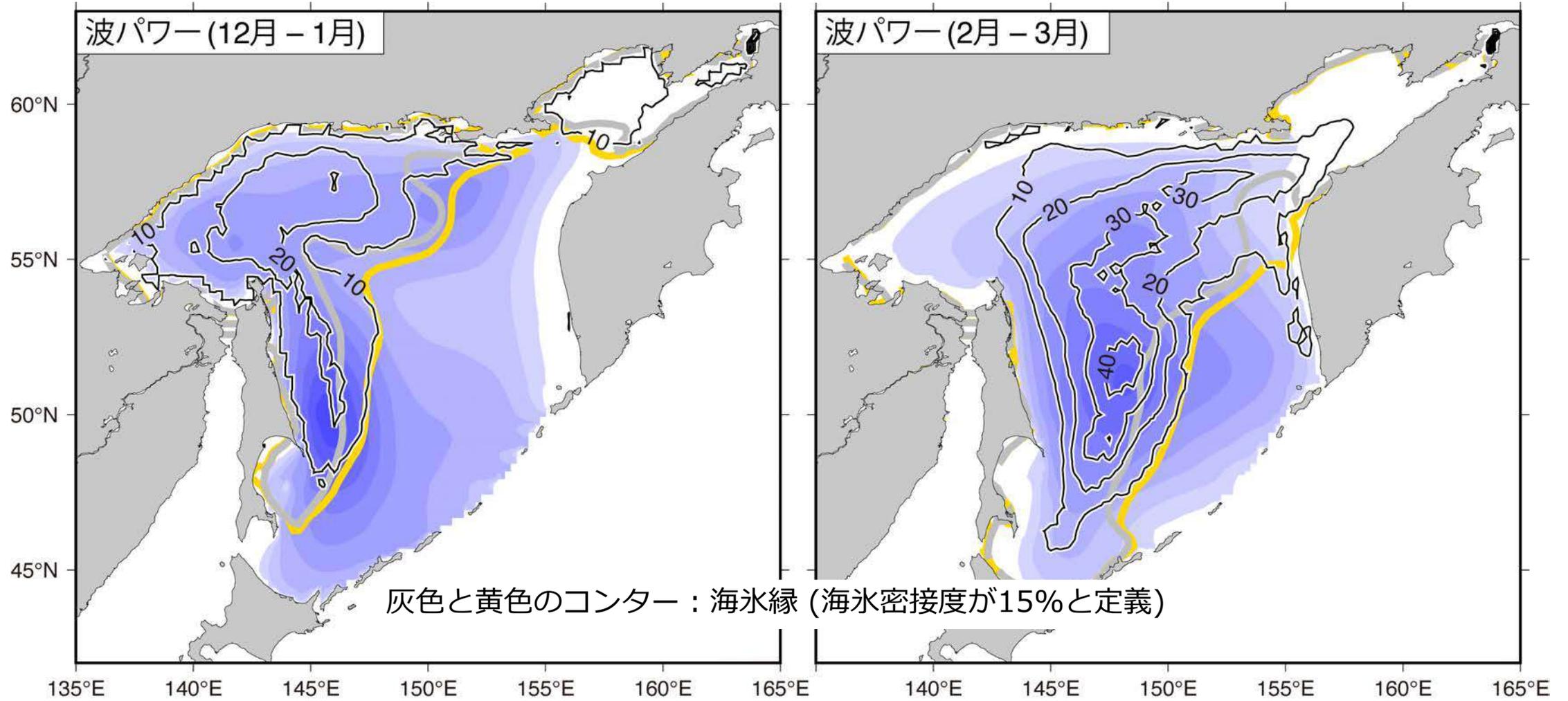


11月の風による波パワーの変化（海氷なし実験）

波パワーの差 [風が強い年－風が弱い年]

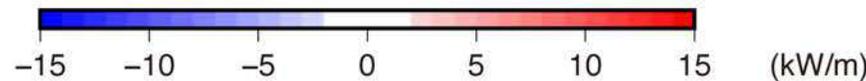
黒コンター：海氷密接度の差 [風が強い年－風が弱い年]

Non-ICE実験
[海氷なし]



黄色:風が強い年

灰色:風が弱い年

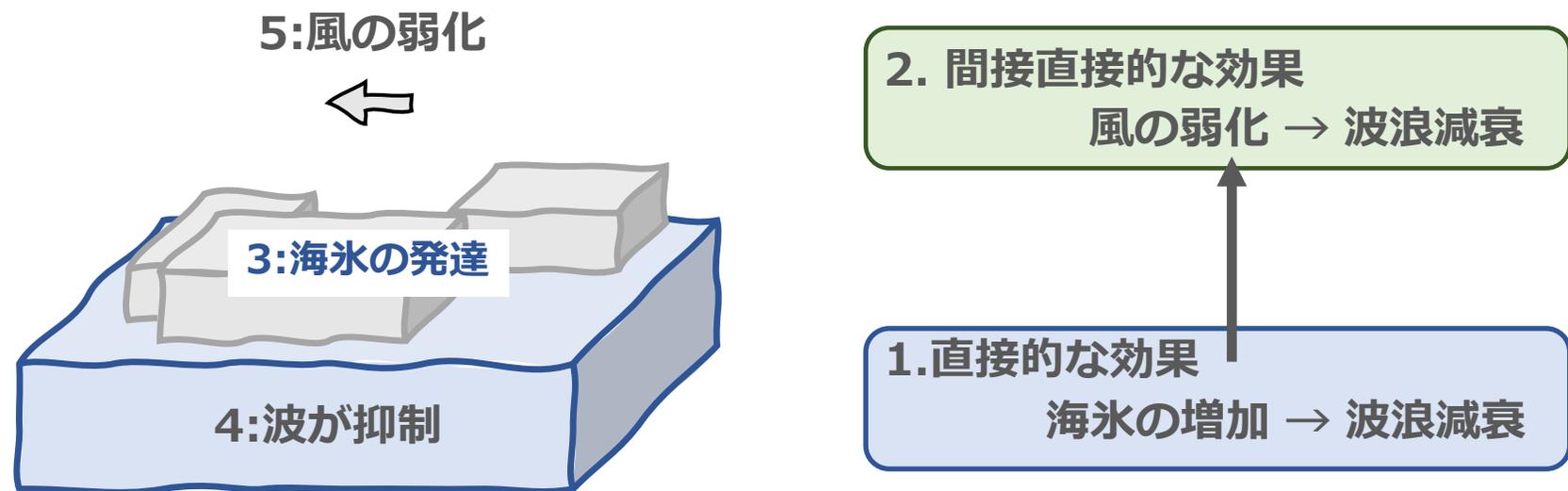


海氷の影響がなくても、波パワーにその傾向が見られる。

11月の風による波パワーの変化

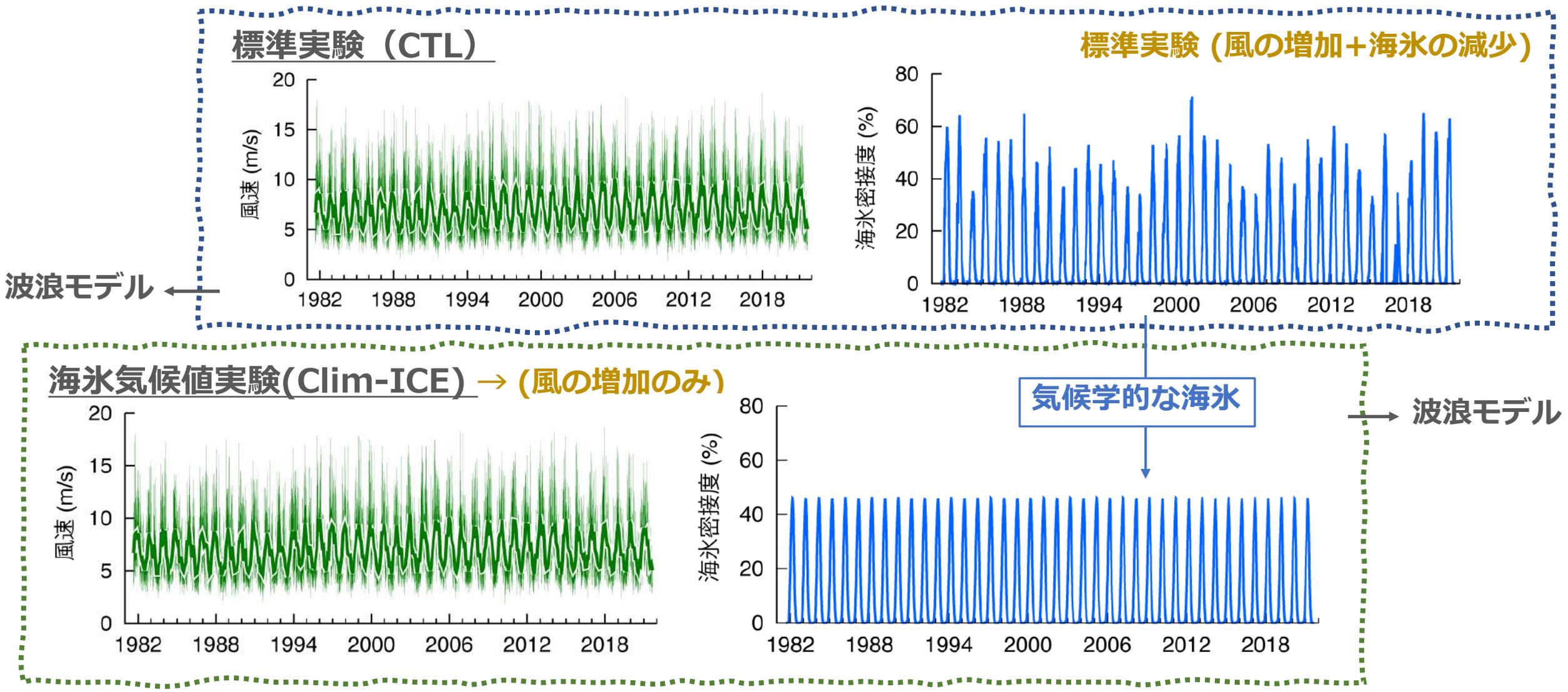
波パワーの差 (kW/m) [風が強い年—風が弱い年] 括弧内は割合(%)

	11月	12-1月	2-3月	4-5月
CTL [海氷あり]	2.15 (16.75)	-5.20 (-56.72)	-2.80 (-77.18)	-0.58 (-14.52)
Non-ICE [海氷なし]	2.23 (17.19)	-4.14 (-34.33)	-3.83 (-52.61)	-0.35 (-7.01)



直接的な効果(海氷)と間接的な効果(風)を切り分けられないか?

数値実験（標準実験と海氷気候値実験）



標準実験(CTL) - 海氷気候値実験(Clim-ICE) = 海氷の減少のみ

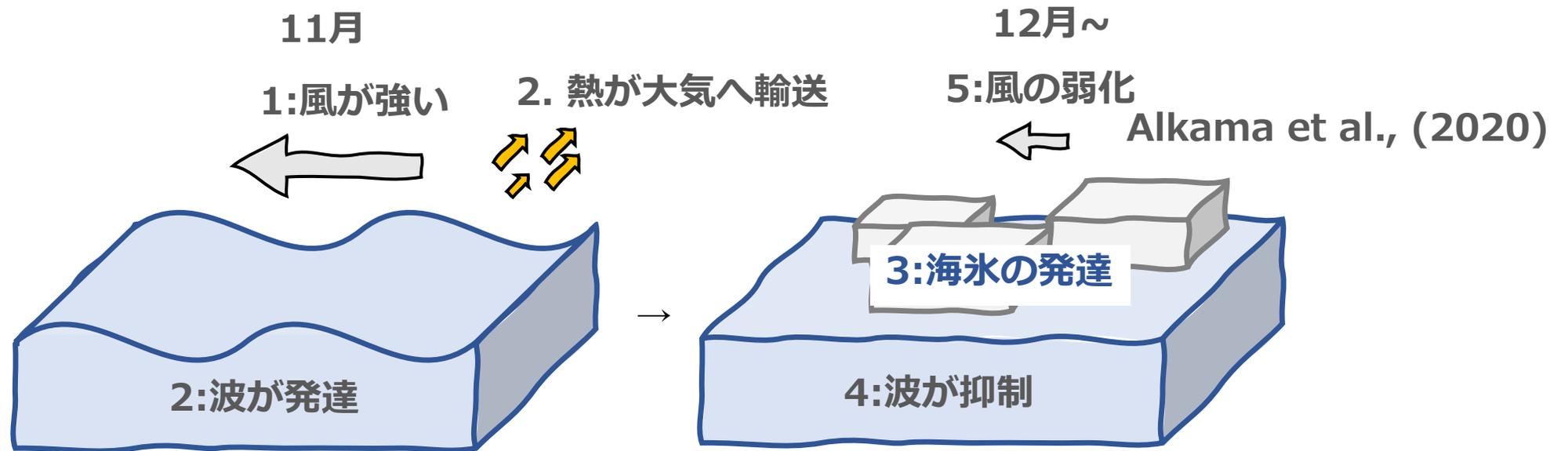
11月の風による波パワーの変化

波パワーの差 (kW/m) [風が強い年－風が弱い年] 括弧内は割合(%)

	11月	12-1月	2-3月	4-5月
CTL [海氷あり]	2.15 (16.75)	-5.20 (-56.72)	-2.80 (-77.18)	-0.58 (-14.52)
Non-ICE [海氷なし]	2.23 (17.19)	-4.14 (-34.33)	-3.83 (-52.61)	-0.35 (-7.01)
Clim-ICE [風の効果]	2.17 (17.01)	-2.38 (-28.50)	-0.57 (-24.50)	-0.26 (-9.96)
CTL - Clim-ICE [海氷の効果]	-0.02 (-0.26)	-2.82 (-28.22)	-2.23 (-52.68)	-0.32 (-4.56)

2-3月は、海氷による直接的な波浪減衰効果が大きい。

まとめ



- ・ オホーツク海の波浪に対する海氷の役割を、過去40年間における波浪シミュレーションから解析。
- ・ その結果、晩秋の波浪が強くなると、海氷が、冬季波浪を減少させる役割を持つことを提示。
海氷には、晩秋における波浪の増減に応じて、冬季の波浪を調整する可変的な防波堤としての役割がある。
- ・ さらに海氷には、直接的な波浪減衰効果と、風を弱化させることによる間接的な波浪減衰効果があることを解明。

1. 海氷域に対するアルゴリズムの精度検討

Iwasaki and Otsuka (2021; *Front. Mar. Sci.*)

2. 波浪に対する海氷の役割：海上風の強弱で変化する自然の防波堤

Iwasaki (2023; *Prog. Oceanogr.*)

3. 海氷減少による波浪増大

Iwasaki (2023; *Sci. Rep.*)

Iwasaki S, Increase in the wave power caused by decreasing sea ice over the Sea of Okhotsk in winter, *Scientific Reports*, Vol.13, 2539 (10 pages) (2023)



令和5年度、国際学術誌のダウンロード数Top100に認定。
(工学分野4,460編、地球・環境・生態系分野3,050編の論文中からの認定)



複数の新聞記事（朝日新聞、北海道建設新聞、中部経済新聞、静岡新聞、京都新聞及び福井新聞）に掲載。

← 北海道建設新聞, 2023/03/20

* 2024/11/08, 転載使用許可済み

手法 (波浪モデル)

入力データ

海上風	海氷	Reference
JRA55	NOAA OISST	Kobayashi et al., (2015), Reynolds et al., (2007), Huang et al., (2021)
ERA5	ERA5	Hersbach et al., (2020)
MERRA2	MERRA2	Gelaro et al., (2017)



波浪モデル(WW3)

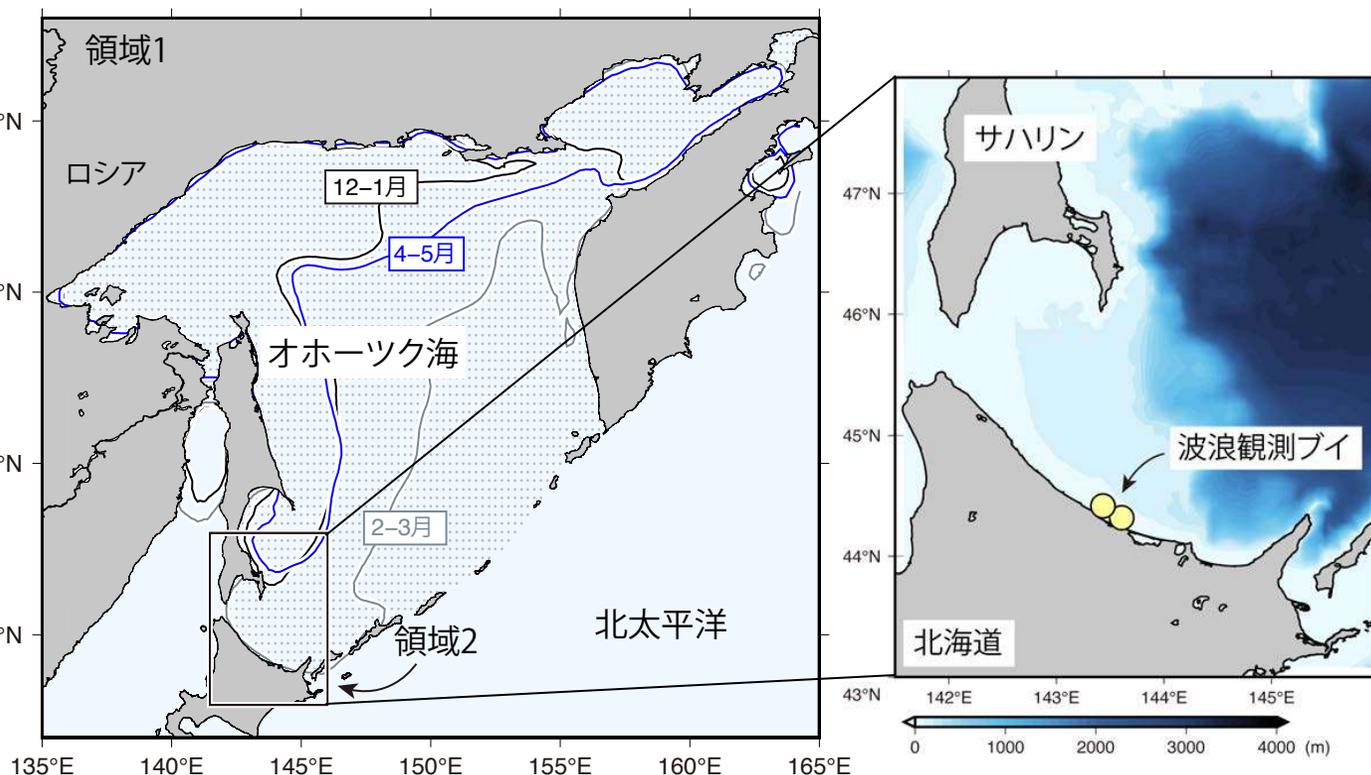
モデル	WAVEWATCH III (Ver. 6.07)
空間解像度	領域1(0.25°), 領域2(0.08°)
周波数解像度	0.035-1.1 Hz (対数的に30分割)
方向解像度	10°
発達・散逸ソース項	ST6
海氷アルゴリズム	IC4M2 (Meylan et al., 2014)
海岸線・海底地形	GEBCO2020

計算期間: 1981/09~2021/08 (40年間)

実験内容

- 標準実験 (3ケース)
- 海氷気候値実験 (3ケース)

海氷気候値実験 (気候学的な海氷値を使用)
 → 風速による波浪変化
 標準実験-海氷気候値実験 → 海氷による波浪変化



手法 (波浪モデル)

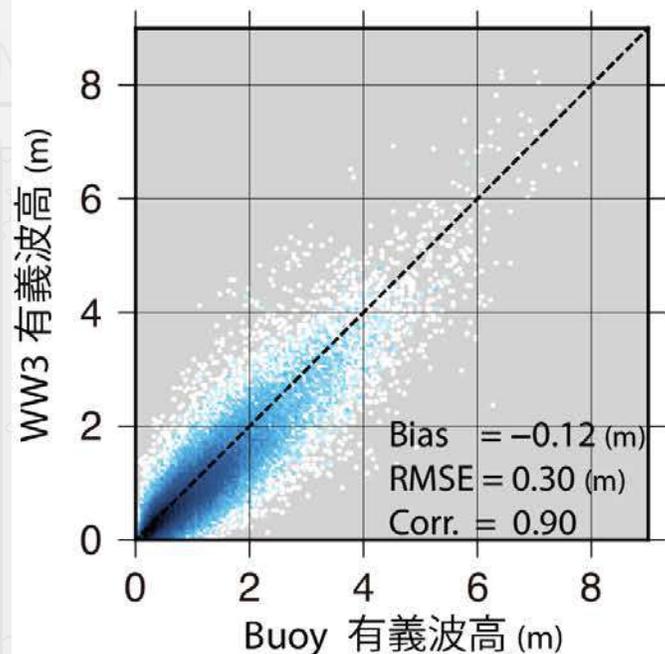
入力データ

海上風	海水	Reference
JRA55	NOAA OISST	Kobayashi et al., (2015), Reynolds et al., (2007), Huang et al., (2021)

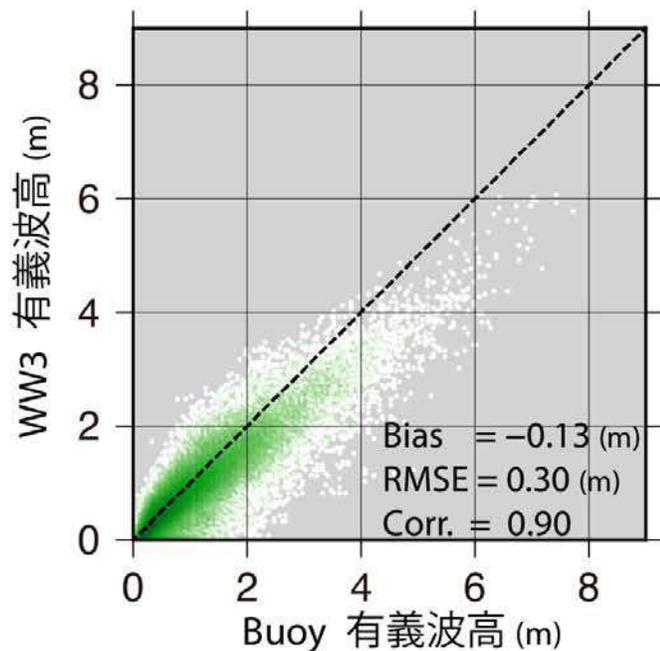
波浪モデル(WW3)

モデル	WAVEWATCH III (Ver. 6.07)
空間解像度	領域1(0.25°), 領域2(0.08°)
周波数解像度	0.035-1.1 Hz (対数的に30分割)

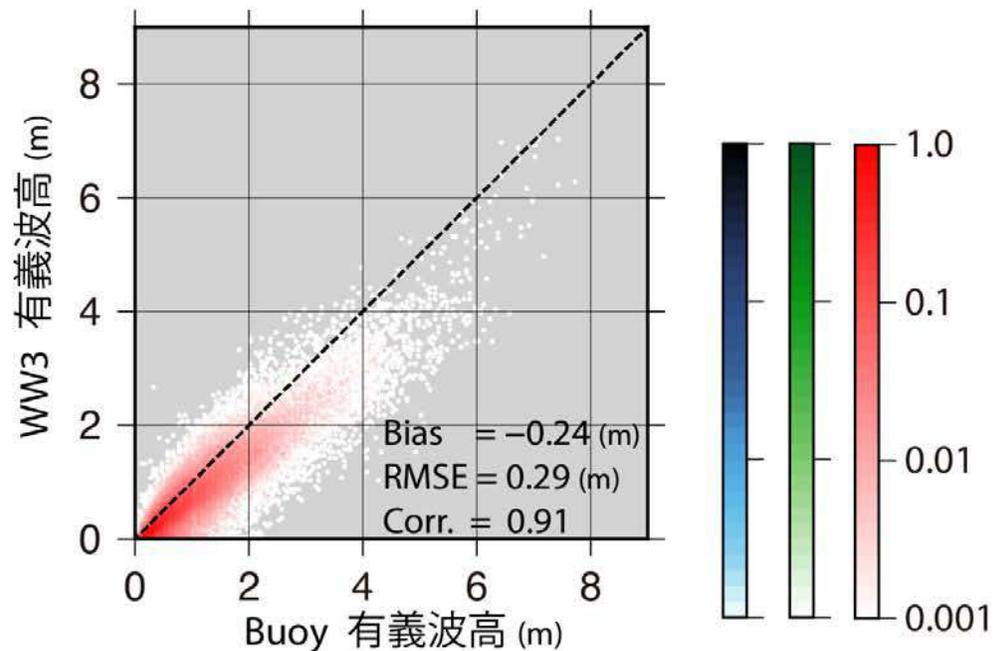
(a) 有義波高 (JRA55-標準実験)



(b) 有義波高 (ERA5-標準実験)

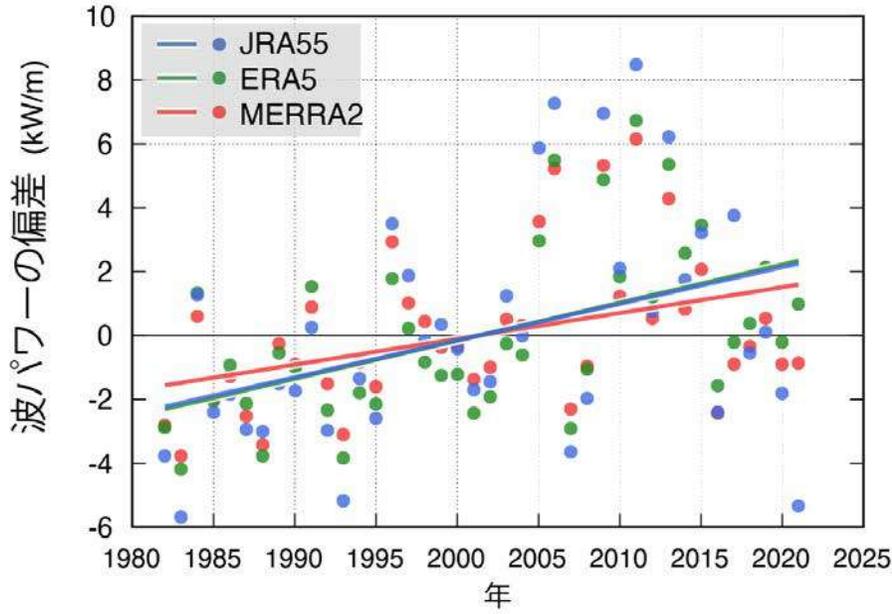
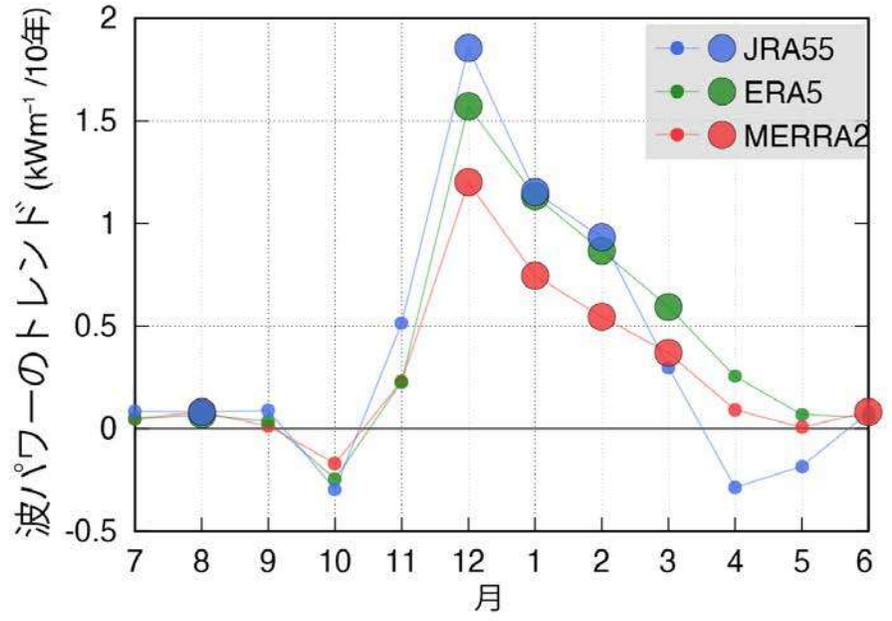


(c) 有義波高 (MERRA2-標準実験)

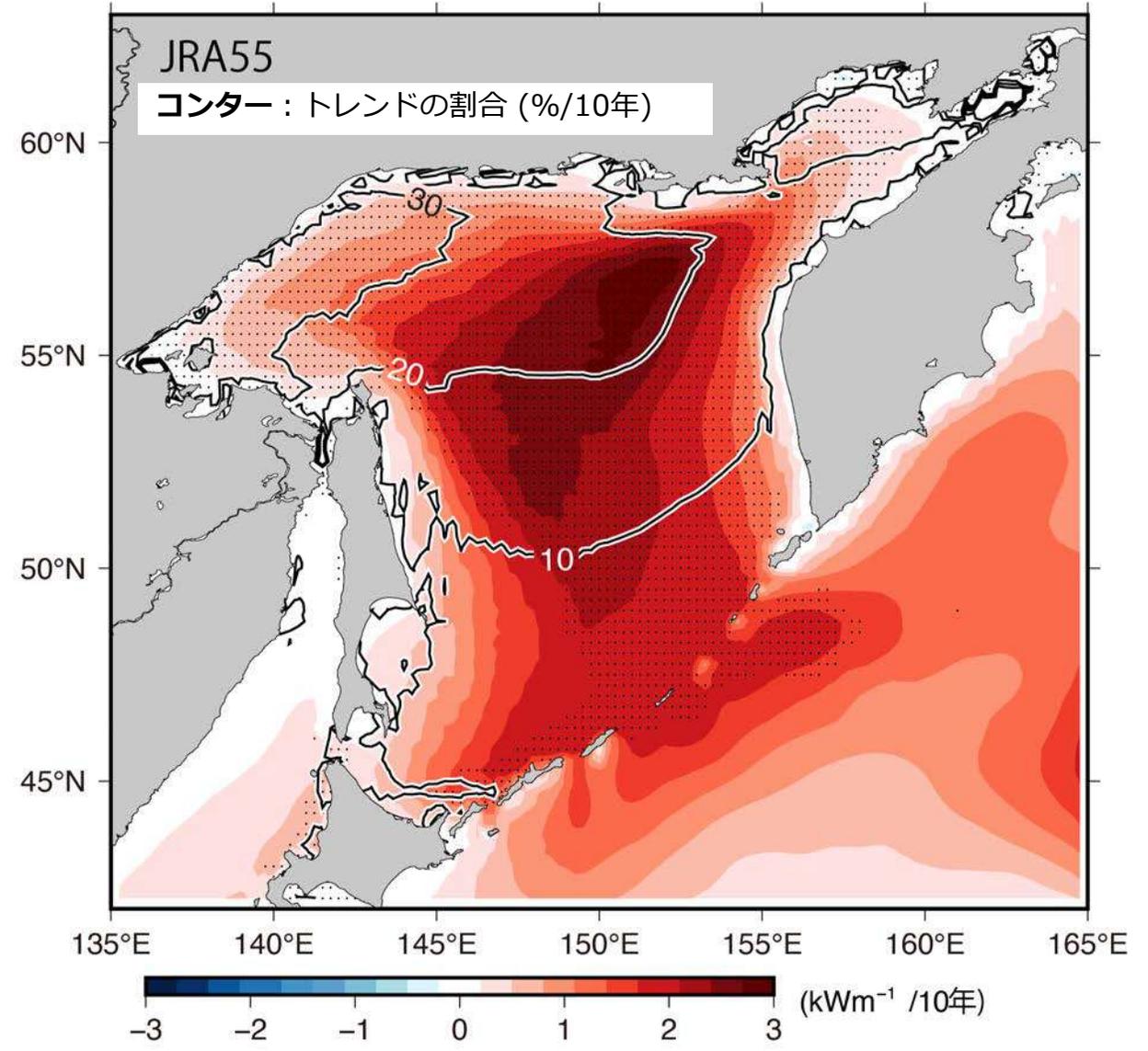


→ 風速による波浪変化
標準実験-海水気候値実験 → 海水による波浪変化

海水減少による波浪増大

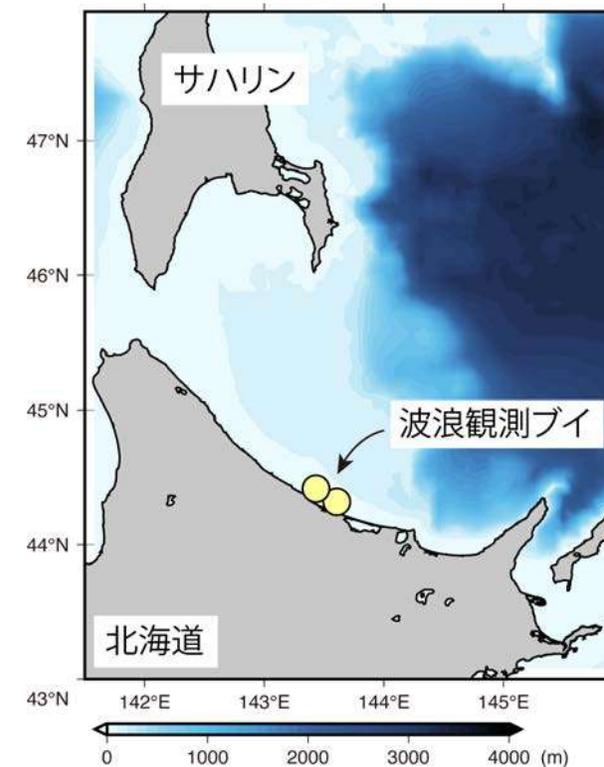
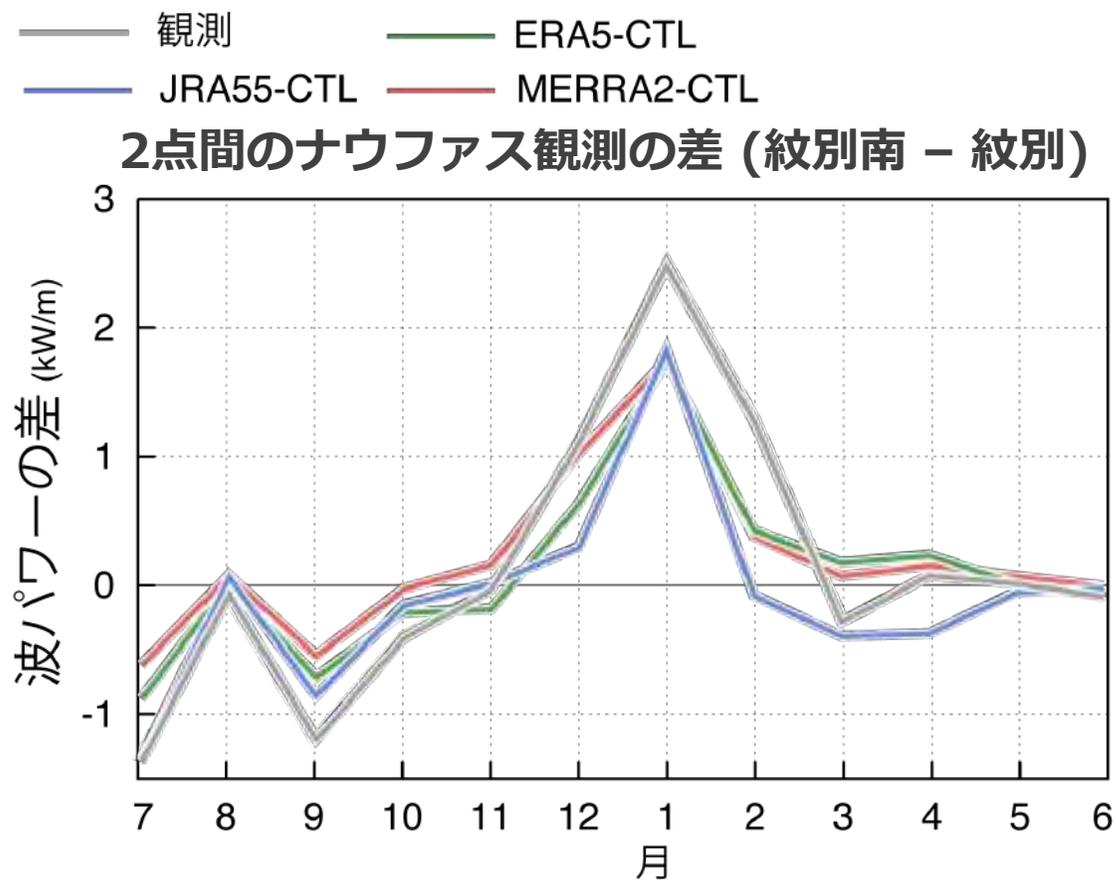


波パワーのトレンド (12-2月)

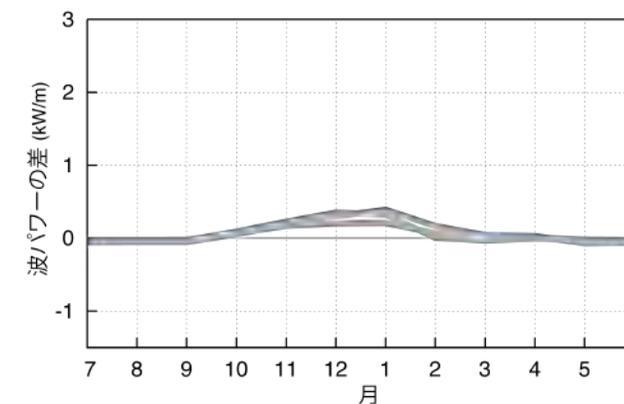


海水減少による波浪増大

Location name	位置	使用データ期間 (year)	観測深度 (m)	岸からの距離 (m)
紋別	44.416°N, 143.432°E	1981-1997	52	9,590
紋別南	44.318°N, 143.607°E	2000-2012, 2018-2020	52.6	8,200



地点による差 (データ期間は同様)



海氷減少による波浪増大

波パワー (12-2月)のトレンド

	トレンド [$\text{kW m}^{-1}/10\text{年}$]	割合 [%/10年]
JRA55	1.31	12.7
ERA5	1.19	15.3
MERRA2	0.83	12.1

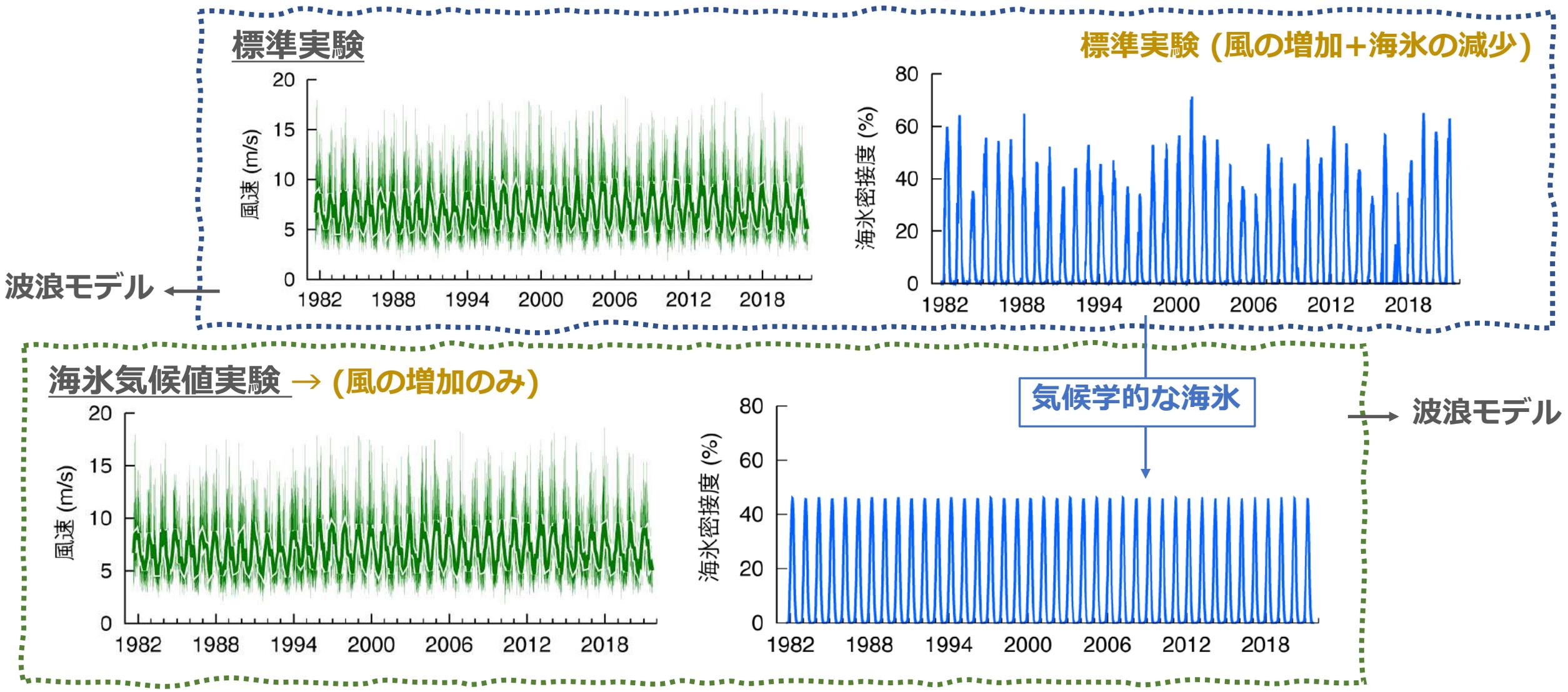
風速と海氷面積のトレンド (12-2月)

括弧内は(%/10年)

	風速 [$\text{ms}^{-1}/10\text{年}$]	海氷面積 [$\times 10^4 \text{ km}^2/10\text{年}$]
JRA55, NOAA OI	0.27 (3.21)	-1.26 (-3.52)
ERA5	0.17 (2.11)	-4.65 (-10.73)
MERRA2	0.14 (1.73)	-2.45 (-6.79)

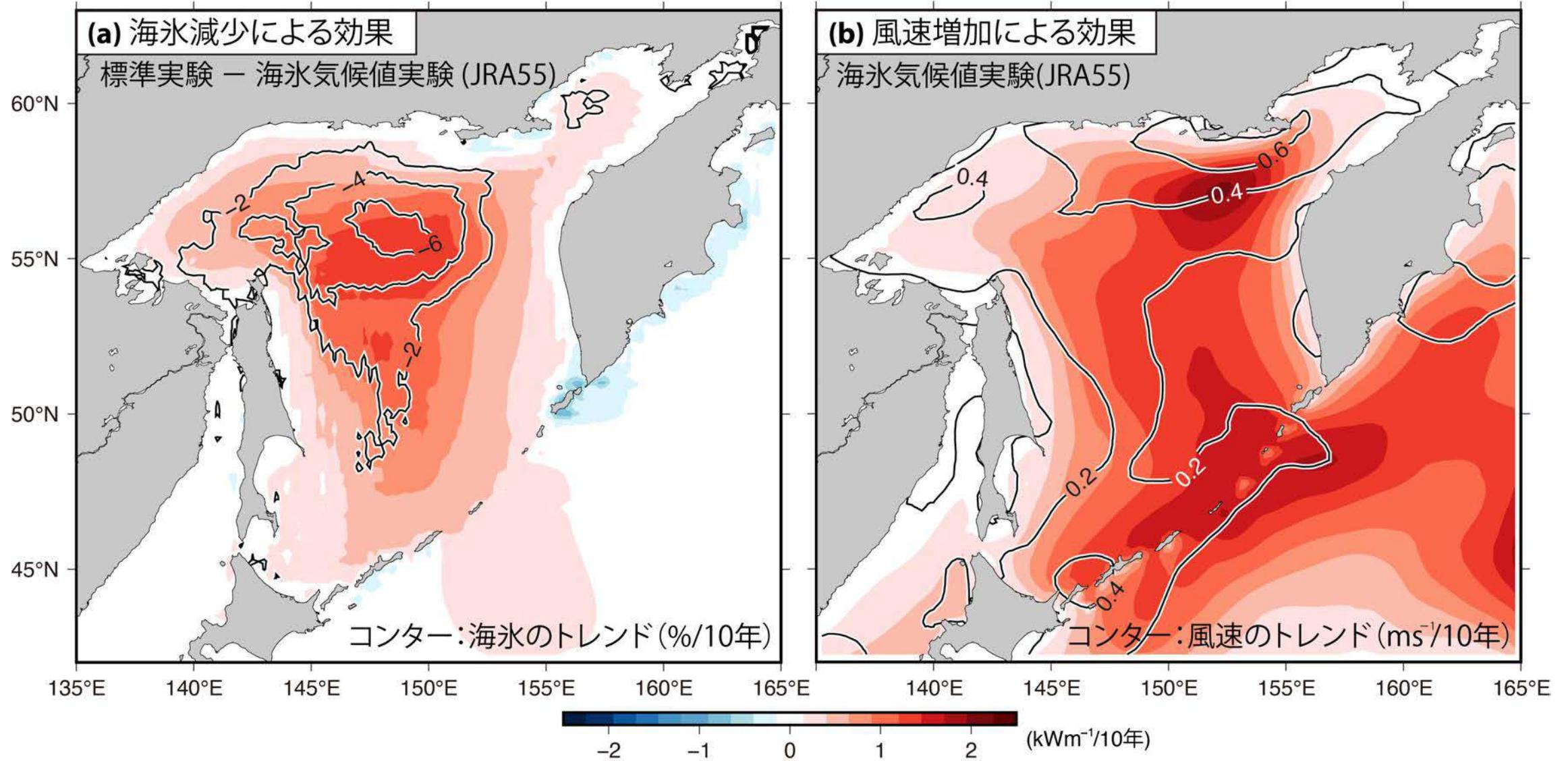
風の増加? 海氷の減少?

数値実験（標準実験と海氷気候値実験）



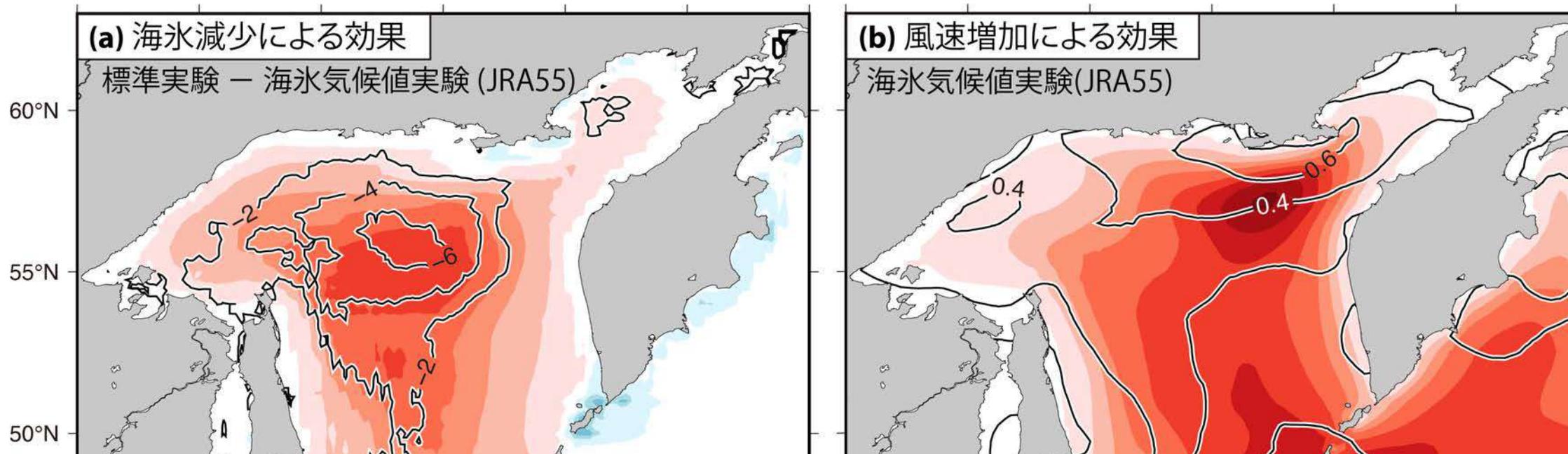
標準実験 - 海氷気候値実験 = 海氷の減少のみ

波パワーのトレンド (12-2月)



風速と海氷の寄与

波パワーのトレンド (12-2月)



波パワー (12-2月)のトレンド

風速の効果

海氷の効果

海氷気候値実験 [kWm⁻¹/10年]

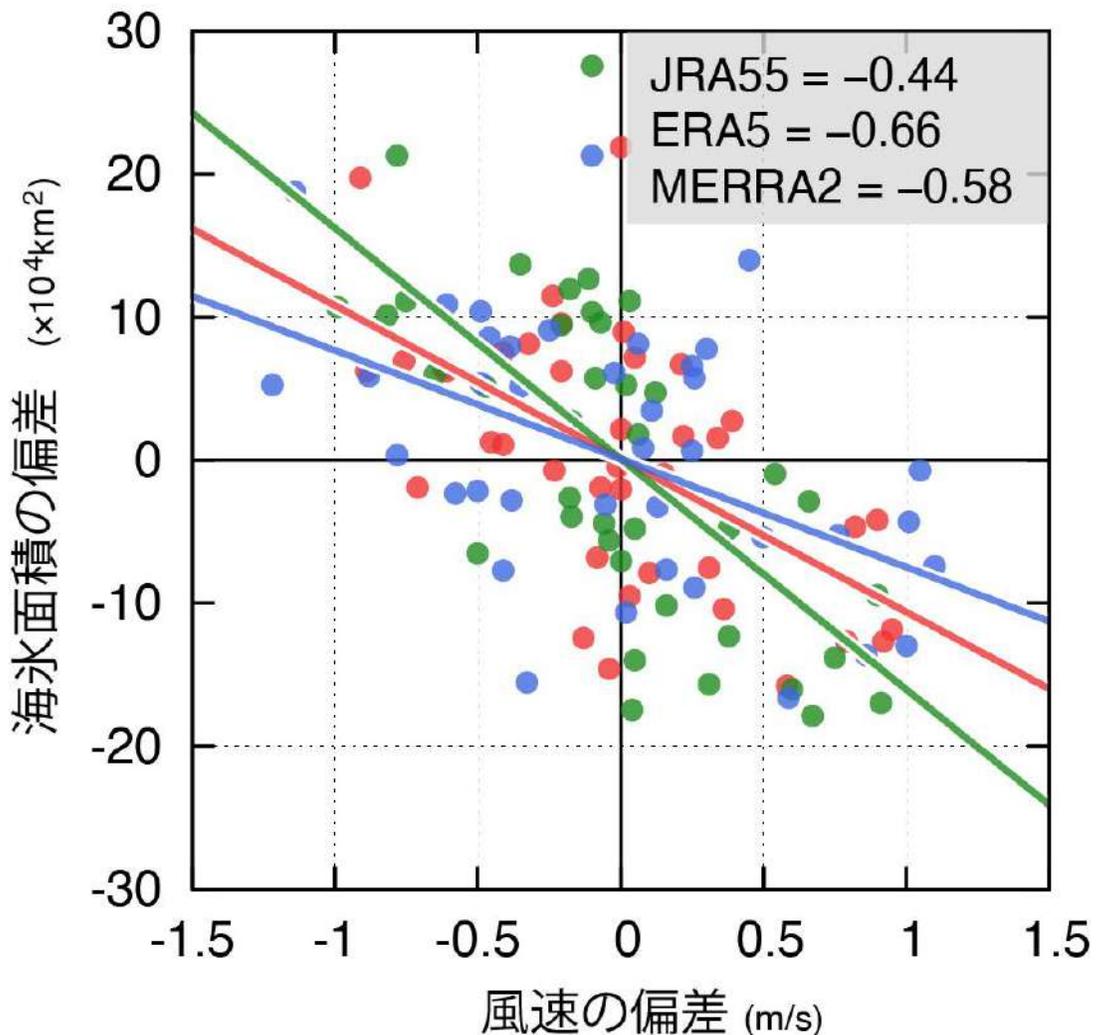
標準実験 – 海氷気候値実験 [kWm⁻¹/10年]

JRA55	0.81	0.5
ERA5	0.5	0.69
MERRA2	0.36	0.47

風速と海氷の関係 (12-2月の経年変動)

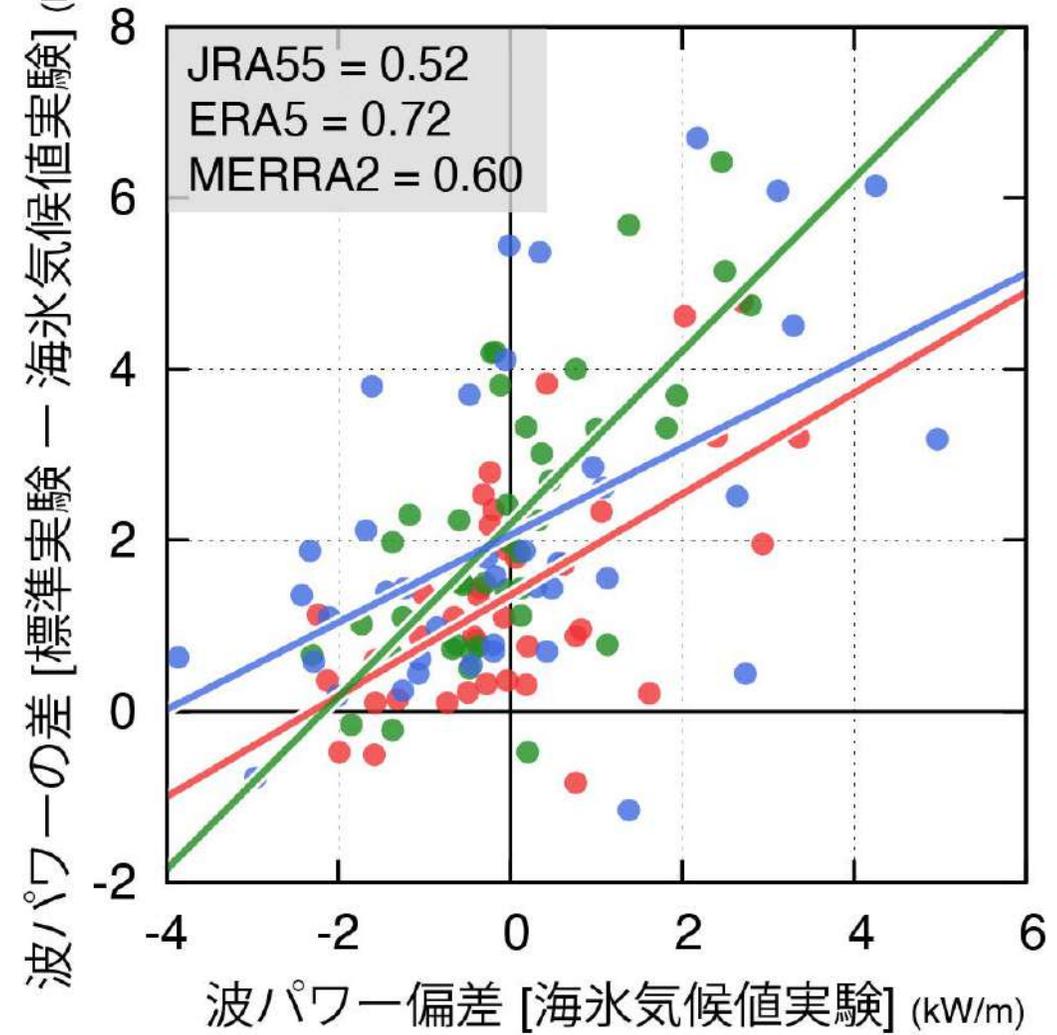
● JRA55 ● ERA5 ● MERRA2

風 vs 海氷面積



氷の影響
→

波パワー (風 vs 海氷)



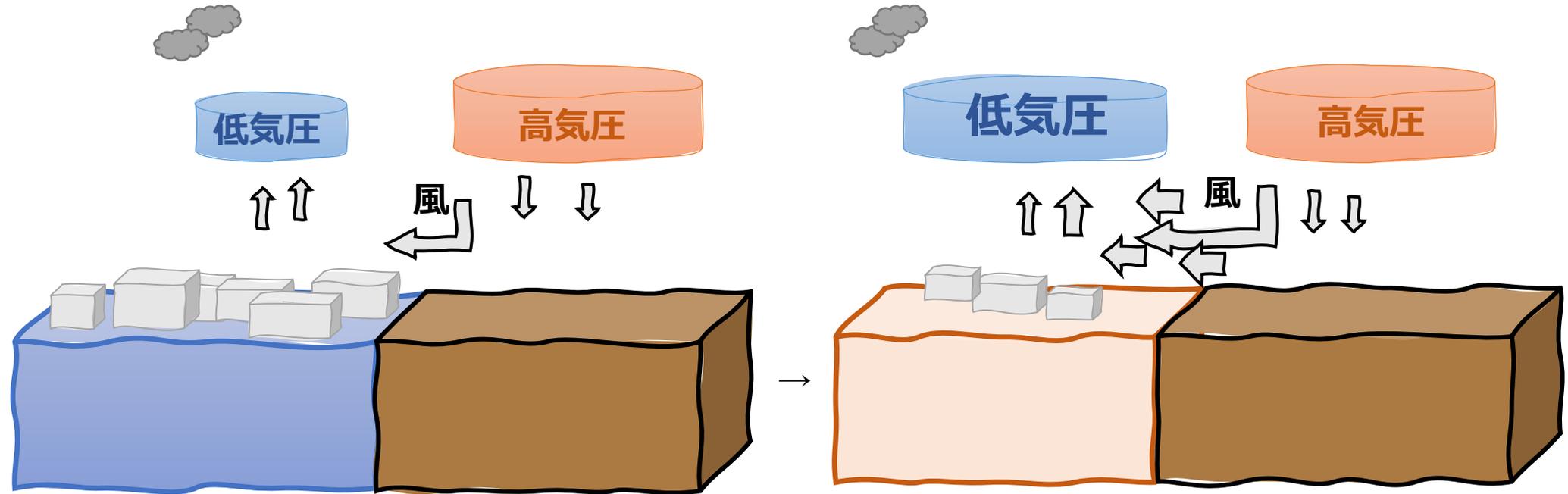
データ数:40

↑ 風の影響

海水減少による風速の増加

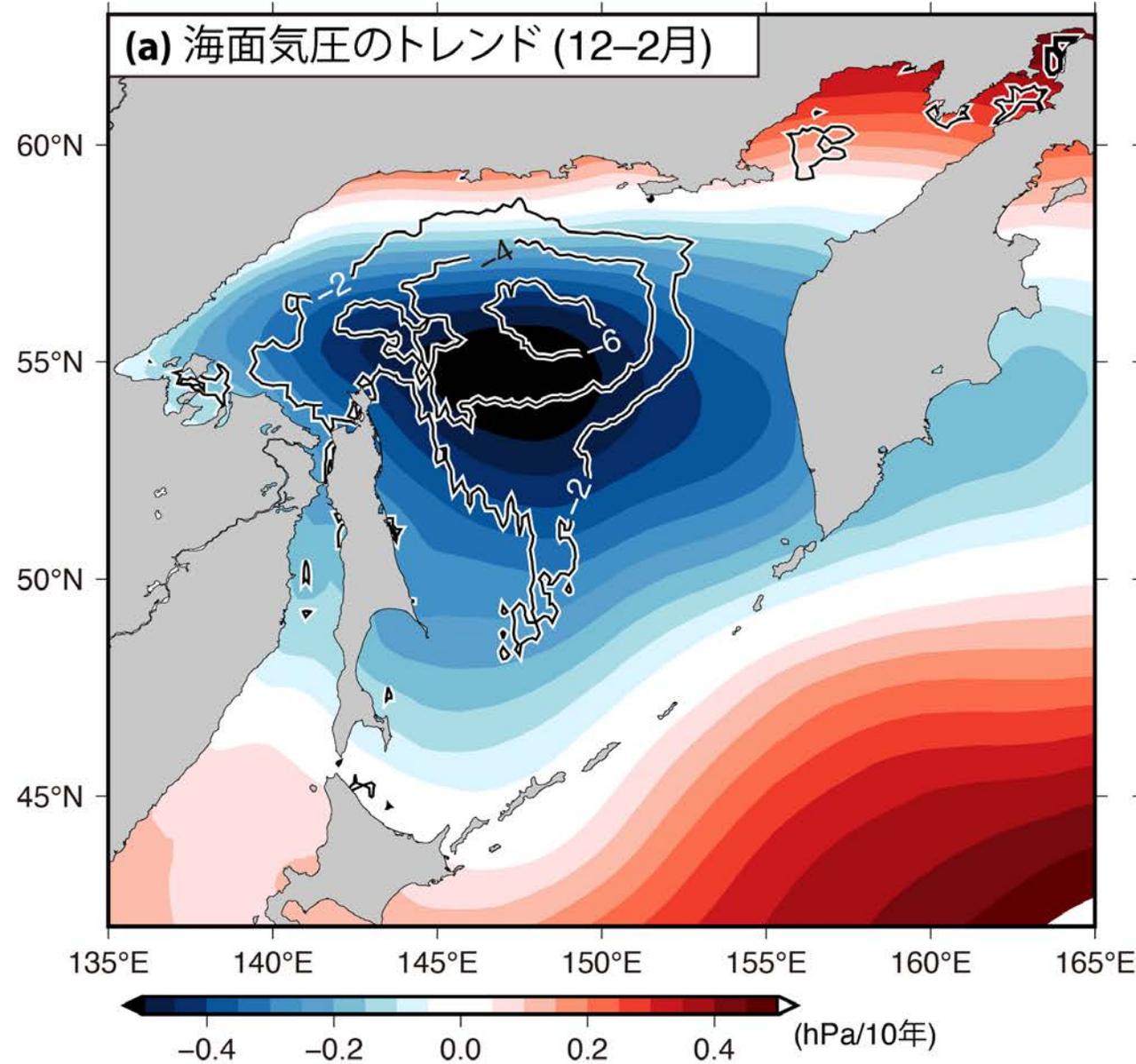
圧力調整メカニズム

Lindzen et al., (1987), Alkama et al., (2020)

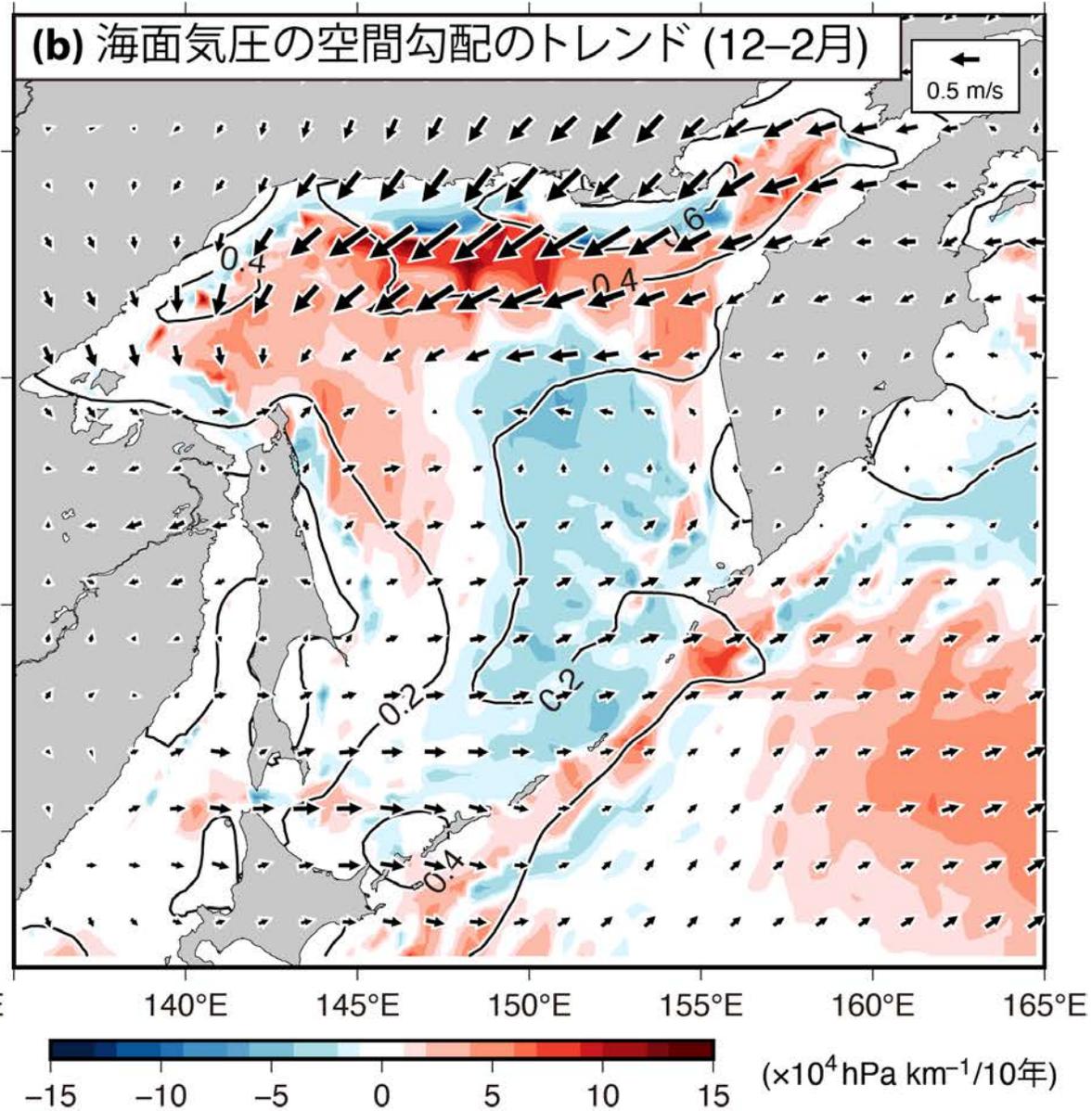


海水減少 → 海面気圧低下 ↓
気圧の空間勾配強化 → 海上風強化

海水減少による風速の増加



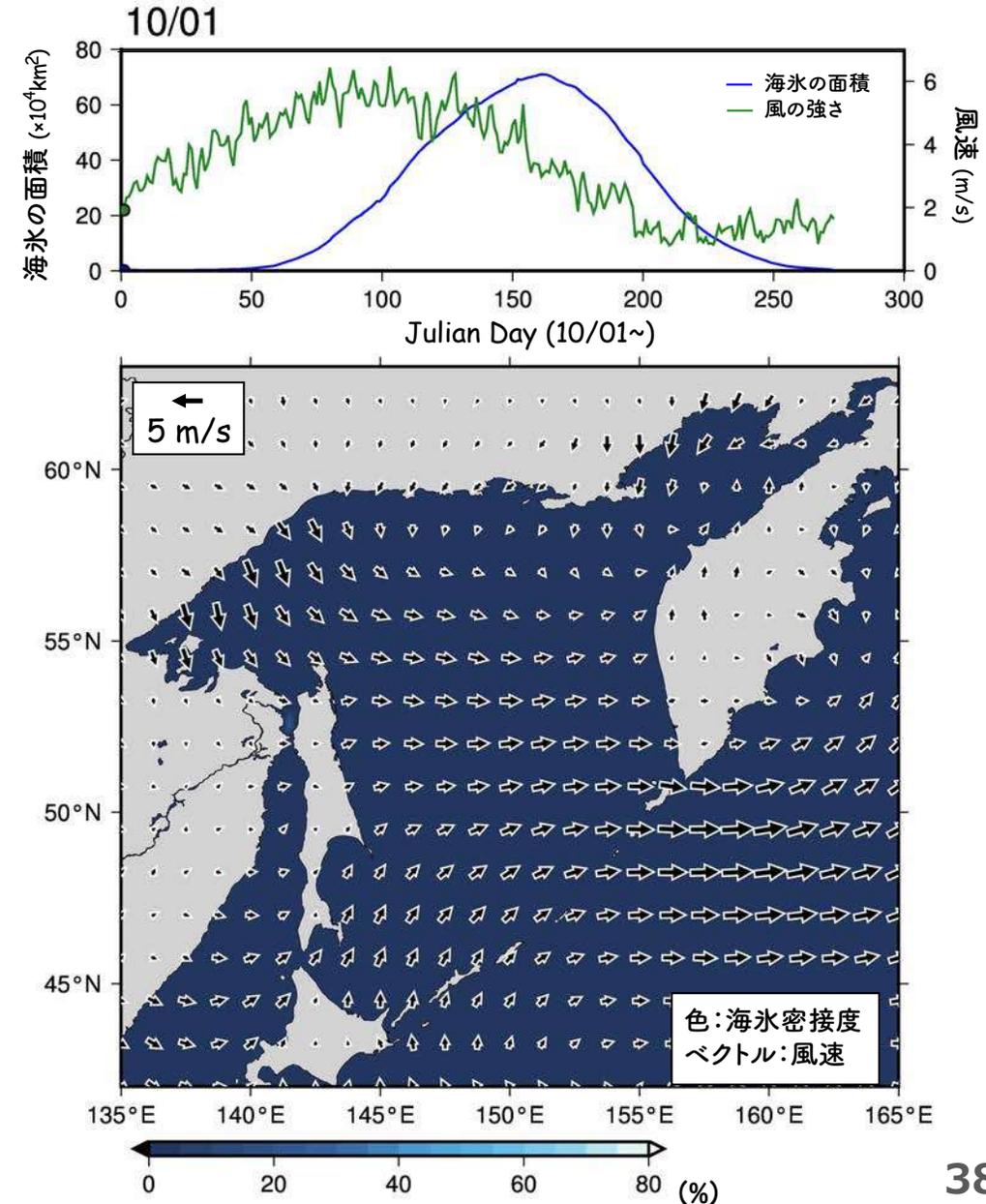
コンター: 海水のトレンド (%/10年)



コンター・ベクトル: 風速のトレンド (ms⁻¹/10年) 37

まとめ

- 過去40年間における波浪シミュレーションから、オホーツク海における波浪の長期トレンドを解析。
- その結果、冬季の波パワーが12~15%/10年で増加していることを証明。
- さらに冬季の波パワー増加の主な原因が、海氷の減少にあることを提示。



ご清聴ありがとうございました。