

オホーツク海の波浪研究に関するこれまでの取り組み

寒地土木研究所 寒冷沿岸域チーム

○岩崎 慎介

海水は波浪を減衰させる効果がある一方、我が国の北部に隣接するオホーツク海は、地球温暖化による海水の減少により、波浪の増大やそれに伴う様々な災害の多発が懸念されている。しかし、既往研究では、オホーツク海の波浪に着目した例は少なく、波浪の最適な計算アルゴリズムや長期変動特性の解明が課題であった。本論文では、これまで寒地土木研究所寒冷沿岸域チームで行ってきたオホーツク海の波浪研究に関する研究成果を報告する。

キーワード：オホーツク海、波浪増大、気候変動、数値モデル

1. はじめに

オホーツク海の海氷は、初冬（12～1月）前の11月から北西域で形成が始まり、晩冬（2～3月）にかけて成長し、4～5月に後退していく（図-1a）。気候変動下におけるオホーツク海の海氷は、大きな年々変動を持つものの⁴⁾、その年最大面積は1970年代からこれまで3.5%/10年で減少しており、今後も減少し続けることが予測されている⁵⁾。海氷は波浪を減衰させる効果を持つことから、海を浮遊する自然の防波堤としての役割があると言われ

ている。したがって、海氷の減少により、沿岸域の波浪増大や、それによる高波被害の増加、沿岸構造物安定性の低下、海岸侵食の進行などの災害多発が懸念される。

このような背景のもと、寒地土木研究所寒冷沿岸域チームでは、オホーツク海の波浪に着目した研究を行ってきた。初めに、波浪推算に対して世界的に広く用いられている第3世代波浪モデルであるWAVEWATCH III (WW3)⁶⁾に実装されている海氷域でのアルゴリズムの精度検討を行い、当該海域で再現性の高いアルゴリズムを選定した^{7,8)}。また、その結果に基づいた過去40年間の

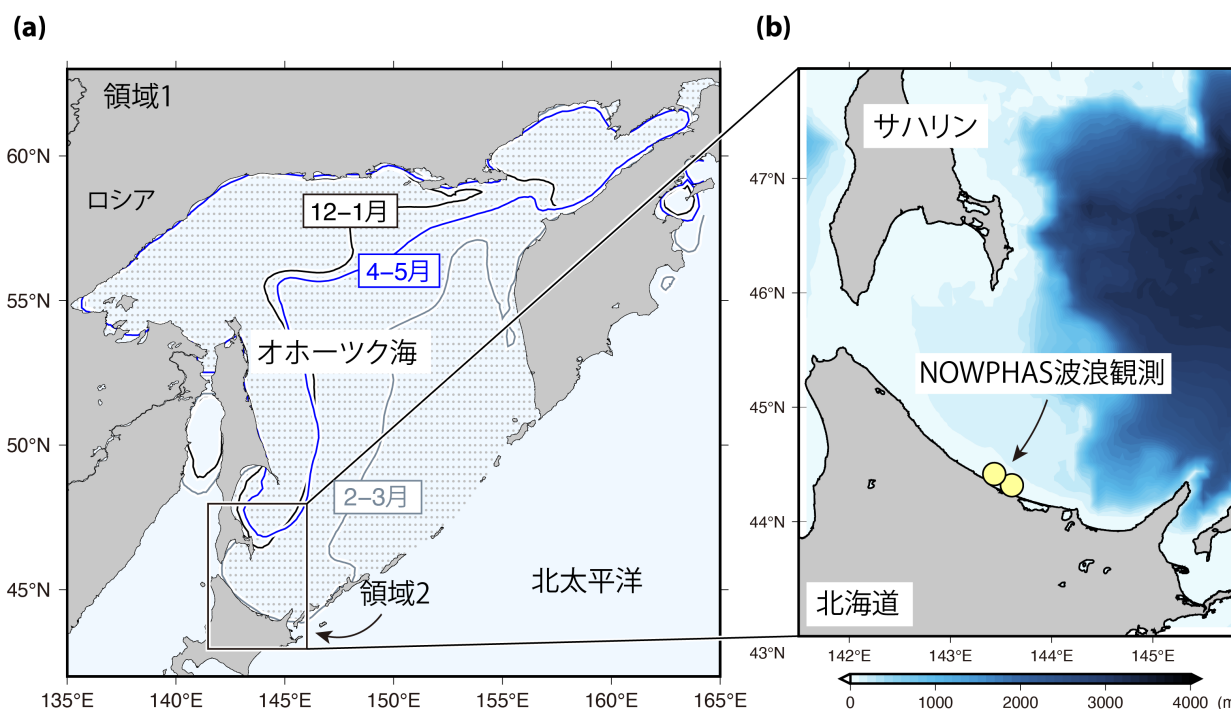


図-1 (a)初冬(12-1月;黒),晩冬(2-3月;灰),春(4-5月;青)における気候学的な海氷縁(海水密接度15%と定義)とモデル領域。(b)ナウファス波浪観測¹⁾の位置(2点の黄色丸)と水深(カラー)。(a)海氷密接度はアメリカ海洋大気庁(NOAA)で提供されているデータ^{2,3)}を使用した。ハッチの領域はオホーツク海を示す。海氷密接度は、空間方向(50km)に平滑化している。海氷密接度は、過去40年間(1981年9月初めから2021年8月末)のデータから計算。

波浪計算から、波パワーの気候値・経年変動⁹⁻¹²⁾・長期トレンド^{13,14)}や、それらに対する海氷の役割を明らかにしてきた。本論文は、これらの研究成果（以下3つのテーマ）の概要について紹介するものである。

- (1) 海氷域に対するアルゴリズムの精度検討
- (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
- (3) 海氷減少による波浪増大

2. 研究結果

(1) 海氷域に対するアルゴリズムの精度検証

初めに、オホーツク海で最適な海氷域の波浪計算アルゴリズムを明らかにするために、WW3 ver.6.07に実装されている6種類（IC0¹⁵⁾、IC1¹⁶⁾、IC2¹⁷⁾、IC3¹⁸⁾、IC4¹⁹⁾、IC5²⁰⁾）の海氷域に対するアルゴリズムの精度評価を行った。IC4に関しては、IC4M1からIC4M7まで7種類（IC4M1²¹⁾、IC4M2²²⁾、IC4M3²³⁾、IC4M4²⁴⁾、IC4M5⁶⁾、IC4M6²⁵⁾、IC4M7²⁶⁾）。そしてIC4M5-M6は、IC4M2で代用可能であったため、比較対象から除外した。

波浪計算はWW3のone-wayネスティングを用いて2つの領域で（図-1）、2008年の初めから2010年の終わりまで3年間の計算を各アルゴリズムで行った。空間解像度は、領域1が0.25°で、領域2が0.08°である。この節では観測との比較で使用した領域2のモデル結果を示す。領域1（空間解像度：0.25°）の風は気象庁より提供されているJRA55²⁷⁾を使用し、領域2（空間解像度：0.08°）の風はJRA55をダウンスケールしたDSJRA55²⁸⁾を用いている。さらに、海氷密度度（海面に対して氷に覆われている海面の占める割合を示したもの）はアメリカ海洋大気庁（NOAA）で提供しているOISST^{2,3)}を用いた。

ここでは、オホーツク海南部に位置する紋別（南）のNOWPHAS波浪観測を真値とした（図-1b）。表-1と図-2に各アルゴリズムと観測による有義波高の比較結果を示す。この結果から、海氷の大小に関わらず、有義波高に関しては、IC1とIC4M2が他のアルゴリズムよりも再現性が高いことが明らかになった。また、波浪研究では重要な変数となる周期に関しても精度検討を行った結果、IC4M2は、IC1よりも観測との整合性が高く、IC4M2が比較的安定したオホーツク海の波浪場を再現できることを示した。

オホーツク海の波浪に対する海氷域アルゴリズム

表-1 各アルゴリズムと観測の比較結果（有義波高）。

太字は10種類のア​​ルゴリズムで精度が高い上位3位までを意味する。

観測周辺の海氷密度度が10%以上の比較結果。括弧内の数値は、50%以上の比較結果。

	IC0	IC1	IC2	IC3	IC4M1	IC4M2	IC4M3	IC4M4	IC4M7	IC5
海氷>10%(50%)										
バイアス(m)	0.47 (0.7)	0.1 (0.01)	0.01 (-0.1)	0.25 (0.14)	-0.07 (-0.19)	0.03 (-0.09)	-0.06 (-0.17)	0.29 (0.36)	0.1 (-0.15)	0.17 (-0.06)
二乗平均誤差(m)	0.51 (0.71)	0.4 (0.38)	0.41 (0.43)	0.44 (0.47)	0.44 (0.41)	0.4 (0.36)	0.43 (0.42)	0.44 (0.54)	0.47 (0.38)	0.43 (0.35)
相関係数	0.8 (0.81)	0.83 (0.89)	0.78 (0.88)	0.83 (0.87)	0.76 (0.88)	0.82 (0.9)	0.77 (0.87)	0.83 (0.85)	0.76 (0.9)	0.83 (0.91)

の重要性を示す一例を図-3に示す。北海道沿岸域で海氷が顕著な時期(1-4月)において、海氷の影響を考慮することで、大幅に数値モデルの再現性が改善されていることが分かる。詳細は原著論文であるIwasaki and Otsuka (2021)⁷⁾や、岩崎・大塚(2022)⁸⁾を参照願いたい。

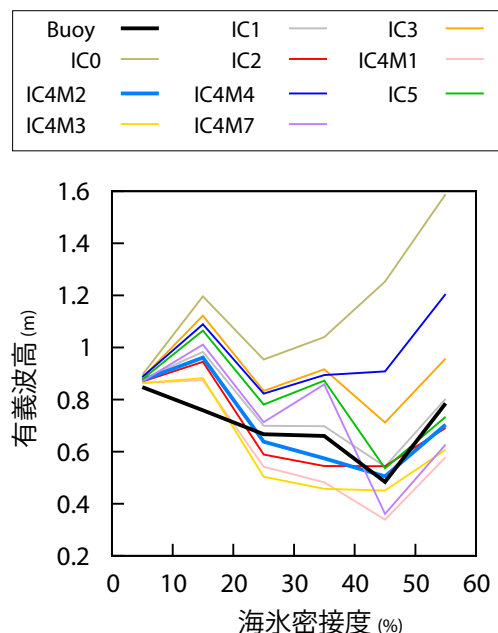


図-2 海氷密度度の関数で見た観測と各アルゴリズムによる有義波高。海氷密度度は観測域周辺(44°-46°N, 142.5°-145.5°E)から計算。

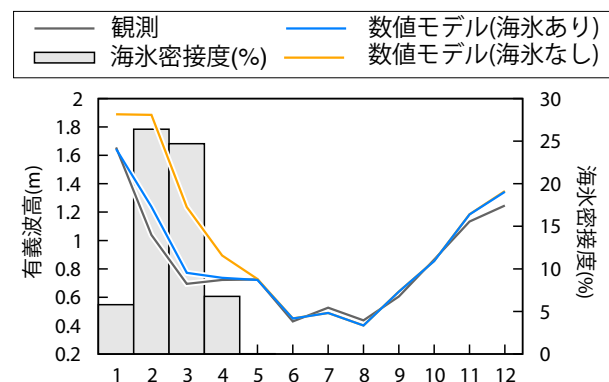


図-3 数値モデル(WW3)と観測による月毎の有義波高。灰色のバーは、観測域周辺の海氷密度度。海氷ありの数値計算は、IC4M2のアルゴリズムを適用。

(2) 波浪に対する海水の役割：海上風の強弱で変化する自然の防波堤

次に、波浪の経年変動に対する海水の役割として、以下に示す負のフィードバック過程の存在を証明したので、概要を示す。この研究では、JRA55による海上風とNOAAによる海水を用いて過去40年間（1981年9月の初めから2021年8月の終わりまで）で波浪モデルによる数値計算を実施した。海水域のアルゴリズムは、上記の研究結果に従い、IC4M2を用いた。

晩秋(11月)の北西風が例年より増加すると、同時期の波パワーは増加する(図4a)。一方、その北西風の増加は、初冬(12-1月)の海水形成を促進させるため、波パワーが小さくなることを明らかにした(図4b) すなわち、海水(自然の防波堤)は、晩秋の波パワーの強弱に伴い、

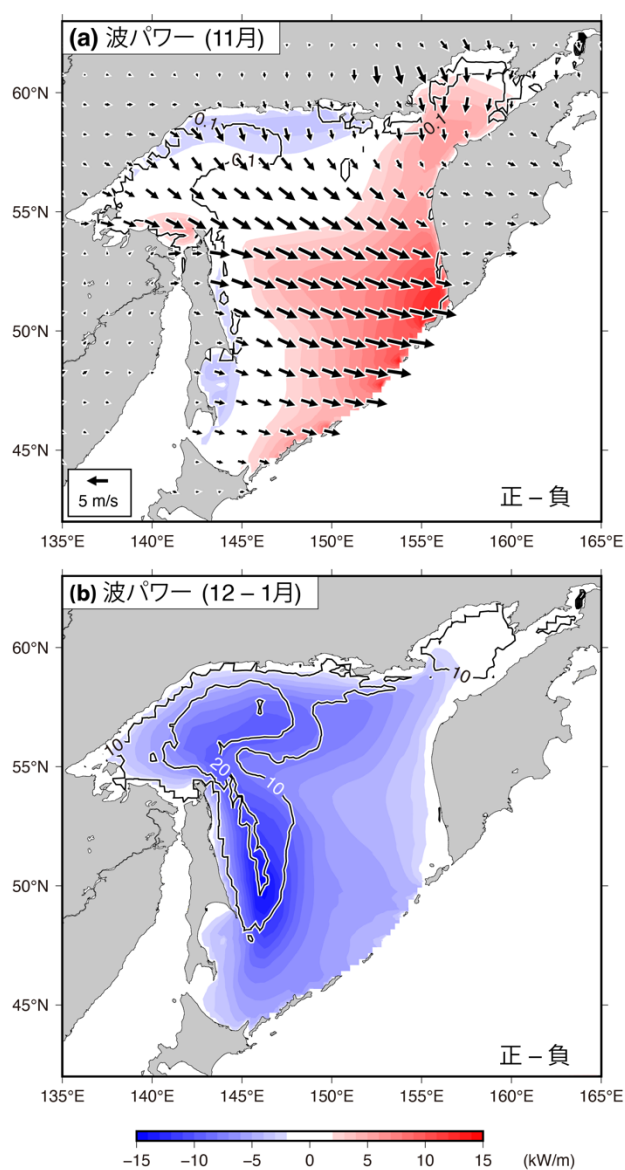


図4 11月の風が強い年と弱い年の波パワーの差(カラー)。(a)11月における風の差(矢印)。(b)初冬(12-1月)における海水密度度の差(%:コンター)。海水ありの数値計算から得られた結果。

IWASAKI Shinsuke

冬季における波パワーを変化させる機能を持っていることが分かった。また、冬季における海水の形成促進は、晩秋の北西季節風と、それに伴う冷たく乾いた空気による海から大気への熱輸送の増大による(図5a)。さらに、海水は、直接的な波浪減衰に加えて、大気下層の鉛直混合を抑制することで、海上風の弱化も引き起こし(図5b)、さらに波パワーを減少させることを明らかにした。この結果は、冬季の波浪予測における11月の海上風の有効性を示唆するものである。詳細は原著論文のIwasaki (2023)⁹⁾や、岩崎(2023)^{11, 12)}を参照頂きたい。

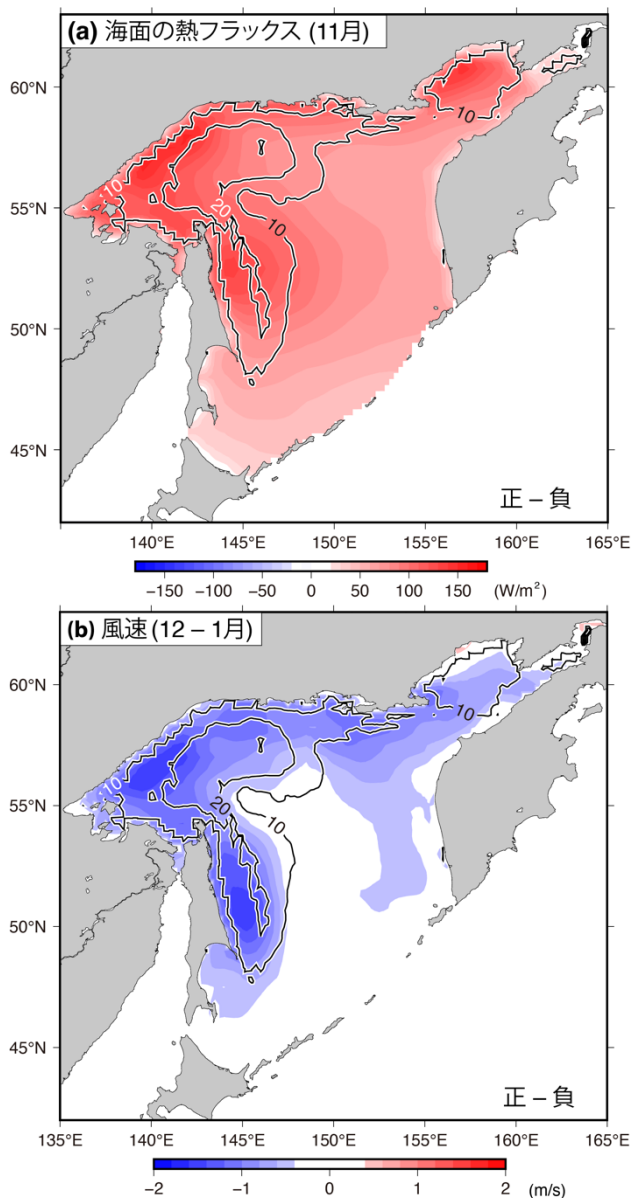


図5 11月の風が強い年と弱い年の(a)海面熱輸送量(11月)と(b)風速の差(12-1月)(カラー)。(a)熱輸送量の正値は、海から大気への熱輸送の増加を意味する。両図のコンターは、初冬における海水密度度の差(図4bのコンターと同様)。

(3) 海氷減少による波浪増大

最後に、過去40年間の波浪計算から波パワーの長期トレンドとその要因を調べた。この研究では、JRA55の海上風とNOAAの海水を用いた波浪計算に加えて、ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）によるERA5²⁹⁾とアメリカ航空宇宙局（NASA）の全球モデルデータ同化局（GMAO）によるMERRA2³⁰⁾による海上風と海水を用いて、計3種類の数値計算を実施した。

その解析結果から、オホーツク海全域で平均した波パワーは、冬季の間(12-2月)、顕著に増加していることが分かった（図-6）。また、波パワーのトレンド値は場所によって異なるものの、その傾向はほとんどの領域で正の値を示していた（図-7）。オホーツク海全域で平均すると、波パワーは10年で、約12～15%で増加していることが明らかになった（表-2）。この波パワーの増加要因には、「海氷減少による波浪減衰効果の低下」に加えて、「海上風増加による波浪発達」の効果が考えられる。事実として、データセット間に定量的な差はあるものの、海氷の減少に加えて風速の増加が確認できた（表-3）。また、この研究では、(2)節での研究の同様、海氷減少が、大気下層の不安定化を通じて風速を増加させることも示した（図は省略）。

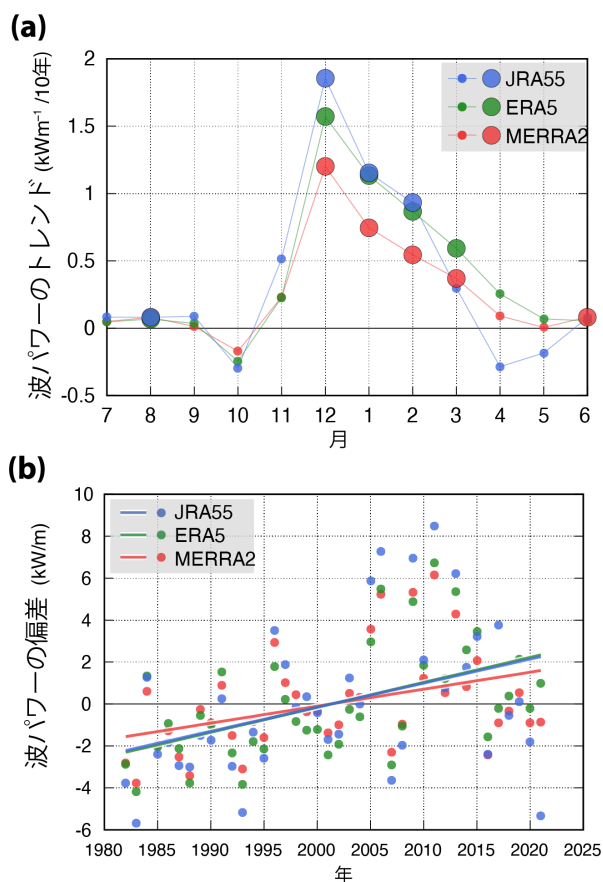


図-6 (a) オホーツク海における月毎の波パワーの長期トレンド。 (b) 冬季(12-2月)のオホーツク海における波パワー偏差（冬季平均—気候値）の時間変化とその回帰直線。 (a) 大きい円は統計的に有意（90%）なトレンドを意味する。

波パワーのトレンド (12-2月)

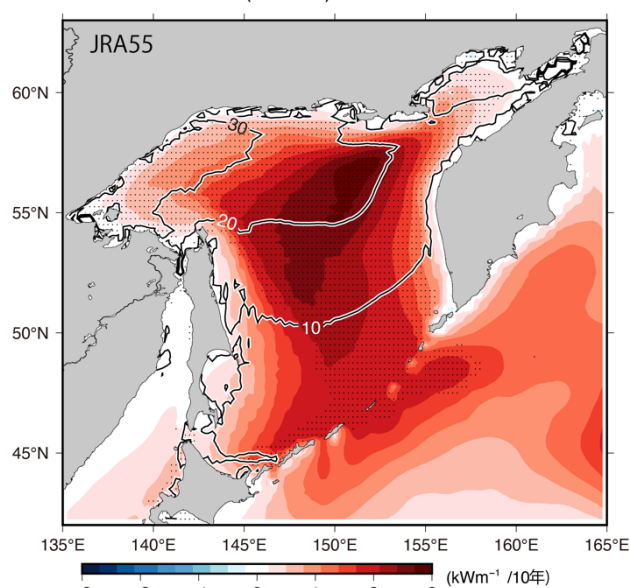


図-7 JRA55の数値計算から得られた冬季(12-2月)における波パワーの長期トレンド。コンターはトレンドの割合(%/10年)を示す。点描は統計的に有意（95%）な領域を示す。

表-2 オホーツク海における波パワーのトレンド。

	トレンド[kW m ⁻¹ /10年]	割合 [%/10年]
JRA55	1.31	12.7
ERA5	1.19	15.3
MERRA2	0.83	12.1

表-3 風速と海氷面積のトレンド(12-1月)。括弧内は(%/10年)。

	風速 [ms ⁻¹ /10年]	海氷面積 [×10 ⁴ km ² /10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)

この結果は、海氷減少が、冬季における波パワー増加の主要因であることを提示している。

この成果は、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）にも掲載され大きな反響を呼んだ。詳細な結果については、原著論文である Iwasaki (2023)¹³⁾ や岩崎 (2024)¹⁴⁾ を参照願いたい。

3. 今後

地球温暖化によるオホーツク海の家氷減少は、これからも継続することが予想され、沿岸域における被災事例の多発が懸念される。今後は、沿岸防災対策に貢献するべく、最新の気候モデルや、当チームで培ってきたオホーツク海に適した数値モデルを駆使し、当該海域全域や沿岸域における波浪の将来予測に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 全国港湾空港波浪情報網（ナウファス）波浪観測データ, <https://nowphas.mlit.go.jp/prg/pastdata>.
- 2) Huang, B., Liu, C., Banzon, V., Freeman, E., Graham, G., Hankins, B. et al. : Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2. *J. Clim.*, 34, 2923-2939, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0166.1>, 2021.
- 3) Reynolds, R. W., Smith, T.M., Liu, C., Chelton, D.B., Casey, K.S., Schlax, M.G. : Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature, *J. Clim.*, 20, 5473-5496, <https://doi.org/10.1175/2007jcli1824.1>, 2017.
- 4) Cavalieri, D.J., Parkinson, C.L., : On the relationship between atmospheric circulation and the fluctuations in the sea ice extents of the Bering and Okhotsk seas. *J. Geophys. Res.*, 92(C7), 7141-7162, <https://doi.org/10.1029/JC092iC07p07141>, 1987.
- 5) 文部科学省・気象庁：日本の気候変動 2020, 2020.
- 6) Wavewatch III Development Group (WW3DG): User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 6.07, *Technical Note 333*, NOAA/NWS/NCEP/MMAB pp.465, 2019.
- 7) Iwasaki, S., Otsuka, J. : Evaluation of wave-ice parameterization on models in WAVEWATCH III along the coastal area of the sea of Okhotsk during winter, *Front. Mar. Sci.*, 8, <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.713784>, 2021.
- 8) 岩崎慎介, 大塚淳一：冬季オホーツク海の海氷域における波浪モデルの評価, 寒地土木研究所月報, No. 833, pp.41-47, 2022.
- 9) Iwasaki, S., : Role of sea ice on winter wave power and its interannual variability in the Sea of Okhotsk: Natural breakwater modified by surface wind changes, *Prog. Oceanogr.*, 8, <https://doi.org/10.1016/j.pcean.2022.102944>, 2023.
- 10) 岩崎慎介, 大塚淳一, 酒井和彦：オホーツク海における「うねり性波浪」の特性—冬季・海氷が果たす役割—, 第66回（2022年度）北海道開発技術研究発表会, 防災 32, 2023.
- 11) 岩崎慎介：冬季オホーツク海の波浪に対する海氷の役割、その1：数値モデルの精度検討と気候学的波パワーの特徴, 寒地土木研究所月報, No.850, pp.2-14, 2023.
- 12) 岩崎慎介：冬季オホーツク海の波浪に対する海氷の役割、その2：海上風の変化によって調整される自然の防波堤, 寒地土木研究所月報, No.851, pp.11-25, 2023.
- 13) Iwasaki, S. : Increase in the wave power caused by decreasing sea ice over the Sea of Okhotsk in winter, *Sci. Rep.*, 13:2539, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29692-9>, 2023.
- 14) 岩崎慎介：冬季オホーツク海の海氷減少が引き起こす波の増大, ふゆトピア研究発表論文集 2024 in 北広島, 2024.
- 15) Tolman, H.L.: Treatment of unresolved islands and ice in wind wave models, *Ocean Model.*, 5, 219-231. [https://doi.org/10.1016/S1463-5003\(02\)00040-9](https://doi.org/10.1016/S1463-5003(02)00040-9), 2003.
- 16) Rogers, W.E., Orzech, M.D.: Implementation and Testing of Ice and Mud Source Functions in WAVEWATCH III, (Technical Memo. NRL/MR7320-09-9193). Washington, D.C: Naval Research Laboratory, 2013.
- 17) Liu, A.K., Mollo-Christensen, E. : Wave propagation in a solid ice pack, *J. Phys. Oceanogr.* 18, 1702-1712. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1988\)018<1702:wpiasi>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1988)018<1702:wpiasi>2.0.co;2), 1988.
- 18) Wang, R., Shen, H.H. : Gravity waves propagation into an ice-covered ocean: a viscoelastic model, *J. Geophys. Res.* 115:C06024, <https://doi.org/10.1029/2009JC005591>, 2010.
- 19) Collins, C.O., Rogers, W.E. : A source term for wave attenuation by sea ice in WAVEWATCH III, (Technical Memo. NRL/MR7320-17-9726), Washington, D.C: Naval Research Laboratory, 2017.
- 20) Mosig, J.E. M., Montiel, F., Squire, V.A. : Comparison of viscoelastic-type models for ocean wave attenuation in ice-covered seas, *J. Geophys. Res.* 120, 6072-6090. <https://doi.org/10.1029/2015JC010881>, 2015.
- 21) Wadhams, P., V.A. Squire, D.J. Goodman, A.M. Cowan, S.C. Moore: The attenuation rates of ocean waves in the marginal ice zone, *J. Geophys. Res.* 93, 6799-6818, 1988.
- 22) Meylan, M., Bennetts, L. G., Kohout, A.L. : In situ measurements and analysis of ocean waves in the Antarctic marginal ice zone, *Geophys. Res. Lett.* 41, 5046-5051. <https://doi.org/10.1029/2014GL060809>, 2014.
- 23) Horvat, C., Tziperman, E. : A prognostic model of sea-ice floe size and thickness distribution, *Cryosphere*, 9, 2199-4134, 2015.
- 24) Kohout, A.L., Williams, M.J.M., Dean, S.M., Meylan, M.H.: Storm-induced sea-ice breakup and the implications for ice extent, *Nature*, 509, 604-607, <https://doi.org/10.1038/nature13262>, 2014.
- 25) Rogers, W.E., Meylan, M.H., Kohout, A.L.: Frequency distribution of dissipation of energy of ocean waves by sea ice using data from Wave Array 3 of the ONR “Sea State” field experiment, (Technical Memo. NRL/MR7322-18-9801) Naval Research Laboratory, 2018.
- 26) Doble, M.J., Carolis, G.Ge., Meylan, M.H., Bidlot, J.-R., Wadhams, P. : Relating wave attenuation to pancake ice thickness, using field measurements and model results, *Geophysical Research Letters*, 42, 4473-4481, <https://doi.org/10.1002/2015GL063628>, 2015.
- 27) Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., et al. : The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Ser. II93, 5-48, <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>, 2015.
- 28) Kayaba, N., Yamada, T., Hayashi, S., Onogi, K., Kobayashi, S., Yoshimoto, K., et al. Dynamical regional downscaling using the JRA-55 (DSJRA-55), *SOLA*. 12, 1-5, <https://doi.org/10.2151/sola.2016-001>, 2016.

- 29) Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., et al. : The ERA5 global reanalysis. *G.J. R. Meteorolog. Soc.*, 16646(730), 1999-2049, 2020.
- 30) Gelaro, R., Mccarty, W., Suárez, M.J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., et al. : The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA2). *J. Clim.*, 30,5 419-5454, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>, 2017.