



CMIP6-OMIP2実験の構成を用いた 全球気候モデル CESM2 による海氷の将来予測

新潟大学 海岸工学研究室 小倉幸浩

1. 研究背景/研究目的

海氷の予測は重要な課題

気候変動

地球温暖化が進行

(1850年～1900年 → 2011年～2020年)

世界地表温度の平均値が**1.1°C**上昇

海氷減少

海氷のフィードバックによる急激な温暖化

(1979年～2014年)

地球全体：**0.19°C/年** 北極域：**0.73°C/年**

北極海航路

経済的・環境的なメリットが発生

東西航路と比較して距離を**30～40%**短縮

北極圏の船舶交通量が**27%**，総移動距離が**75%**増加

▶ 北極海航路について検討するために将来の海氷の動向を予測する必要がある

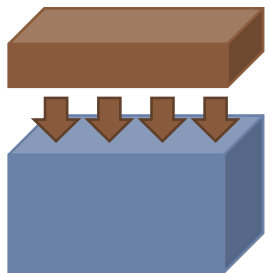
2. 既往研究

気候変動を理解するための取り組み



CMIP6（第6期結合モデル相互比較プロジェクト）

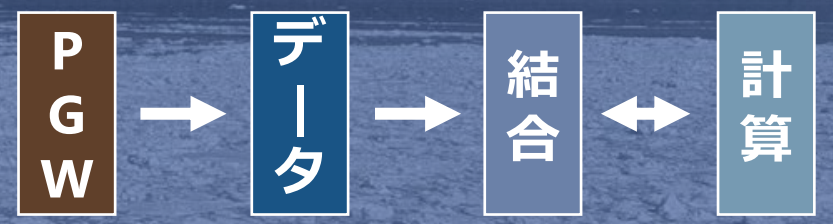
- **全球気候モデル**を用いた複数の実験による大規模データセット
- 大気海洋結合モデル(AOGCM)を用いた**historical**実験, **ssp**実験や, 海洋モデル(OGCM)と大気再解析データを用いた**omip2**実験など



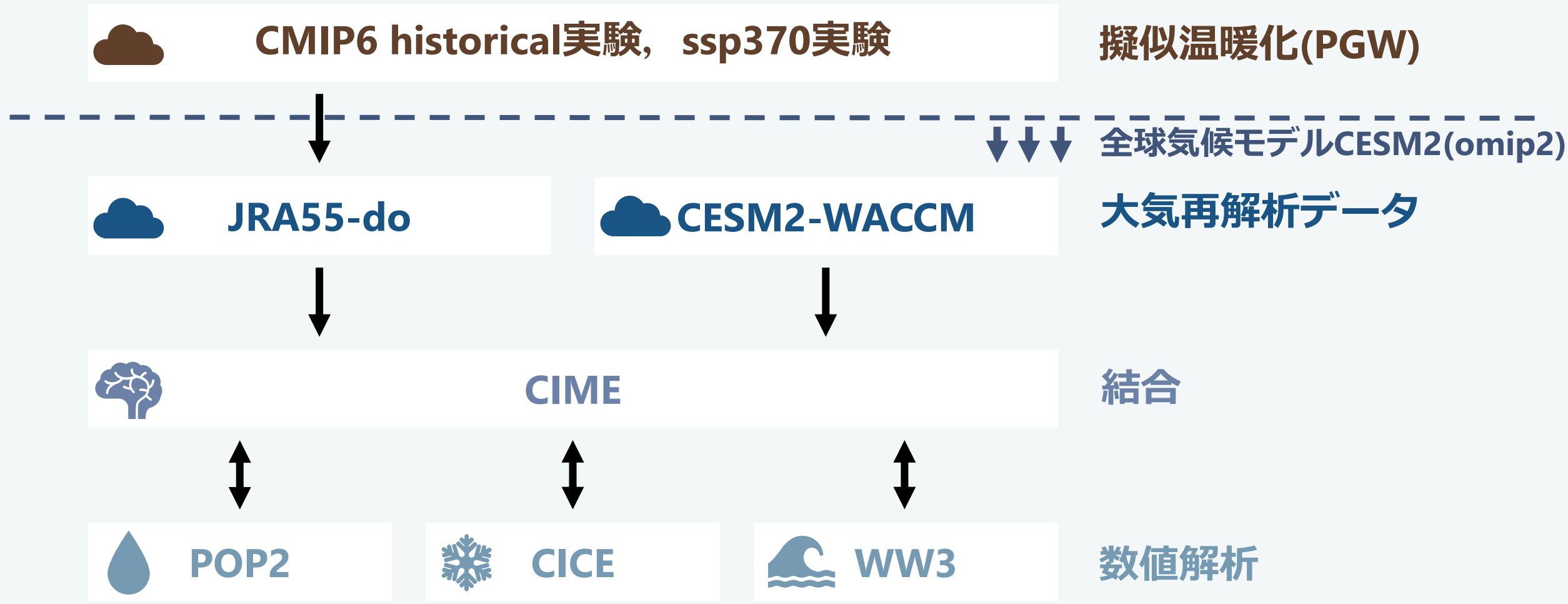
擬似温暖化(PGW)

- **領域気候モデル**への力学的ダウンスケーリング手法
- 大気再解析データに現在気候と将来気候の**偏差を加える**ことで温暖化後の将来を予測

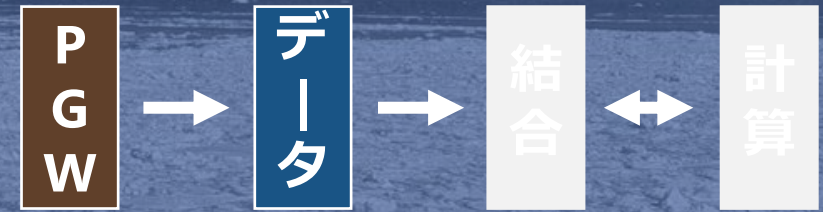
3. 研究方法



擬似温暖化の概念を全球気候モデルCESM2に適用

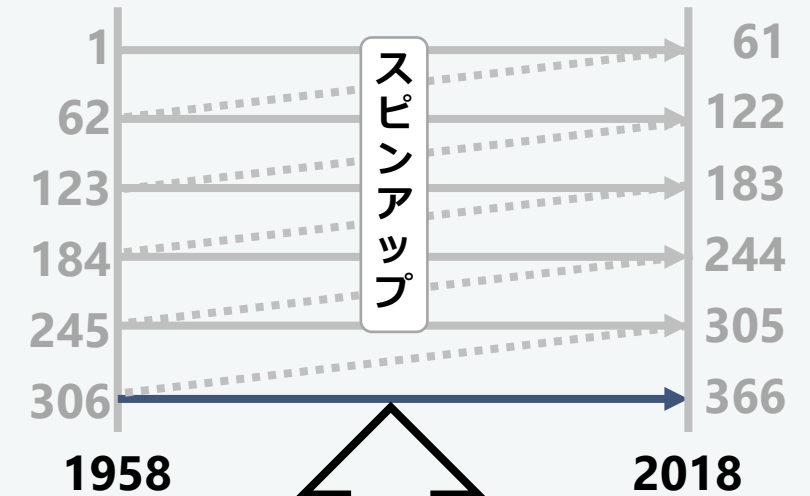


3. 研究方法



過去再現計算2ケースと，将来予測計算1ケースを実施

	過去再現計算		将来予測計算
	PGW-C58F98	PGW-C68F98	PGW-C58F38
現在気候期間(年)	1958~1967	1968~1977	1958~1967
将来気候期間(年)	1998~2007	1998~2007	2038~2047
分岐年	1959	1969	1959
計算期間(年)	1999~2006	1999~2006	2039~2046



▲ CESM2で行われたomip2実験の途中から分岐

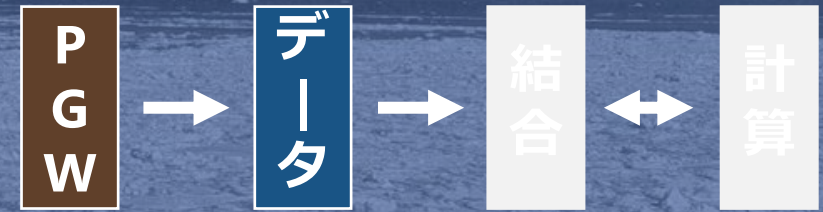
▲ 過去再現計算：予測精度の検証が目的

▲ 将来予測計算の期間：過去再現計算の精度をもとに決定

▲ 計算期間の最初の1年は収束性のエラーを回避するためなめらかに偏差を加えた

omip2実験の6サイクル目を使用
 1959年はomip2実験での307年
 1969年はomip2実験での317年に相当

3. 研究方法



複数のモデルを用いて現在気候と将来気候の偏差を作成

表.使用するCMIP6のモデル

No	モデル名
1	ACCESS-CM2
2	CMCC-CM2-HR4 ※1
3	CMCC-CM2-SR5
4	CNRM-CM6-1
5	CNRM-CM6-1-HR
6	EC-Earth3
7	MIROC6
8	MRI-ESM2-0

※1 過去再現計算のみ

表.偏差を加える変数

	比湿度	海面気圧	気温	風速(東)	風速(北)
CMIP6変数名	huss	psl	ts	uas	vas
	↓	↓	↓	↓	↓
JRA55-do変数名	q_10	slp	t_10	u_10	v_10

- ▲ 現在気候と将来気候の月別平均値の偏差をJRA55-doに加算
- ▲ JRA55-doは日本の気象庁による大気再解析(JRA-55)に基づいて作成された, omip2実験で使用される大気再解析データ
- ▲ 過去再現計算と将来予測計算で各モデルのメンバーは異なる

3. 研究方法



海氷モデルCICE 方程式

$$\text{基本方程式} \quad \frac{\partial g}{\partial t} = -\nabla \cdot (g\vec{u}) - \frac{\partial}{\partial h} (Rg) + \psi$$

力学項 熱力学項

力学（応力の均衡）

$$m \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \nabla \cdot \sigma + \tau_\alpha + \tau_w - \hat{k} \times m f \vec{u} - m g \nabla H_0$$

→ 内部応力+風応力+水応力+コリオリ力+海面傾斜応力

熱力学（大気から海洋への表面エネルギーフラックス）

$$F_0 = F_s + F_l + F_{L\downarrow} + F_{L\uparrow} + (1 - \alpha)(1 - i_0)F_{sw}$$

熱力学（海氷上面の融解）

$$q\delta h = \begin{cases} (F_0 - F_{ct})\Delta t & \text{if } F_0 > F_{ct} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

\vec{u} : 海氷の水平速度ベクトル

R : 海氷の熱力学的な成長率

ψ : 海氷厚の再分布関数

g : 海氷厚分布関数

m : 単位面積あたりの氷雪の合計質量

τ_α : 風応力

τ_w : 水応力

σ : 氷の強度を表す内部応力テンソル

\hat{k} : 垂直単位ベクトル

f : コリオリパラメーター

∇H_0 : 海面勾配

F_s : 顕熱フラックス

F_l : 潜熱フラックス

$F_{L\downarrow}$: 入射短波フラックス

$F_{L\uparrow}$: 出射短波フラックス

F_{sw} : 入射短波フラックス

α : 短波アルベド

i_0 : 吸収された短波フラックスが氷に浸透する割合

q : 表面の海氷または雪の層のエンタルピー

δh : 海氷厚の変化

F_{ct} : 上面から海氷内部への伝導フラックス

3. 研究方法

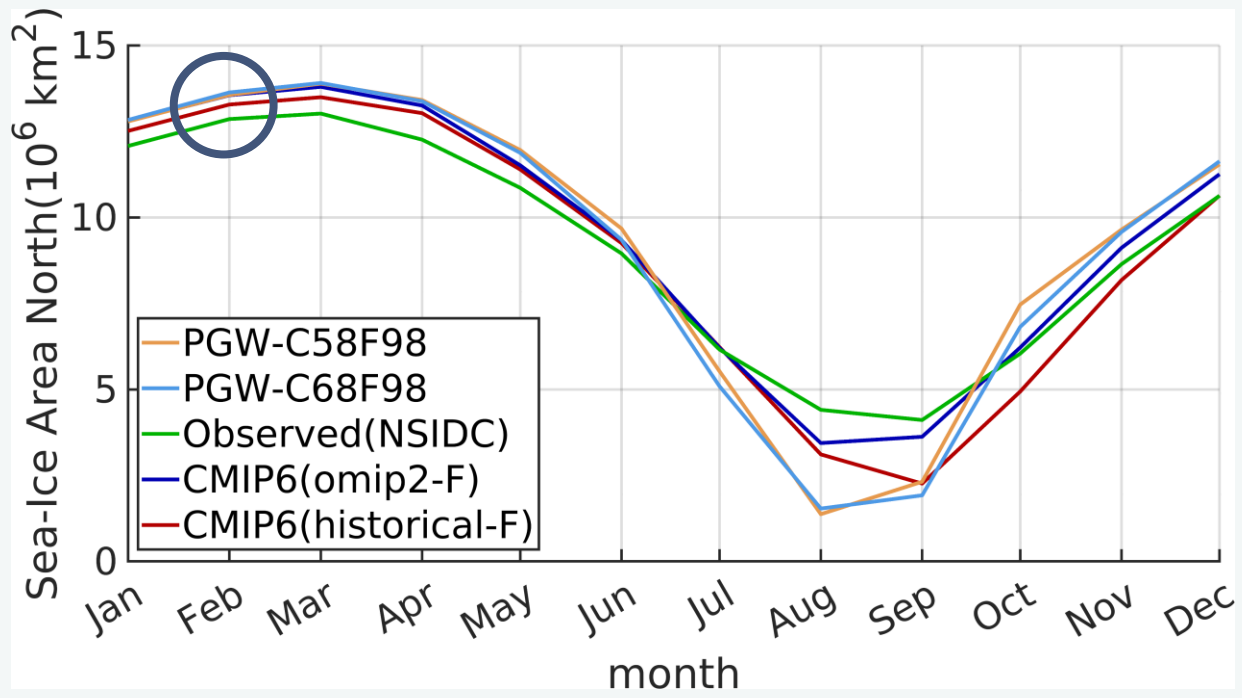


海氷モデルCICE 計算条件

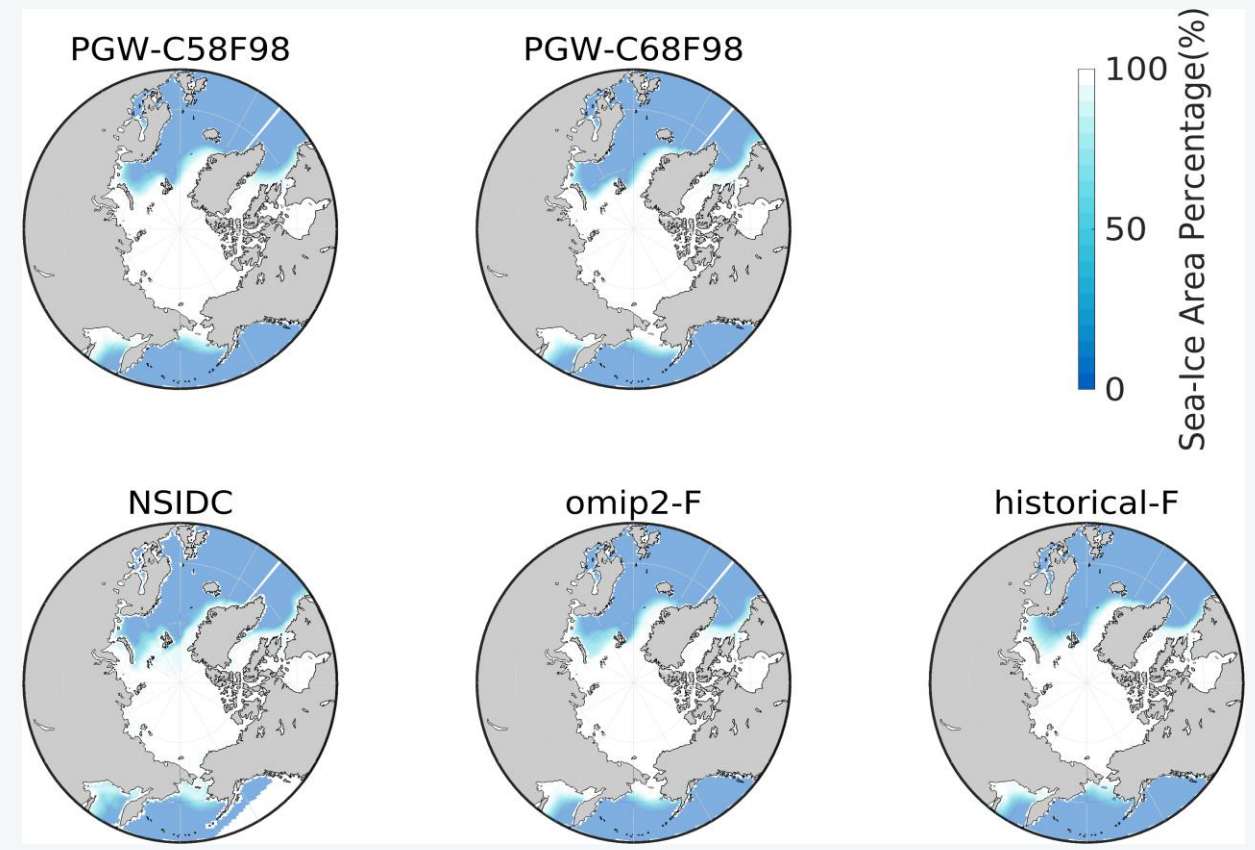
タイムステップ	1時間
海氷厚分布の補間方法	Liner remapping
熱力学	Mushy layer
力学	EVP dynamics
水平輸送スキーム	Liner remapping advection
短波フラックススキーム	Delta-Eddington method

4. 研究結果 過去再現計算

月別平均 北半球海氷面積 (2002~2006)



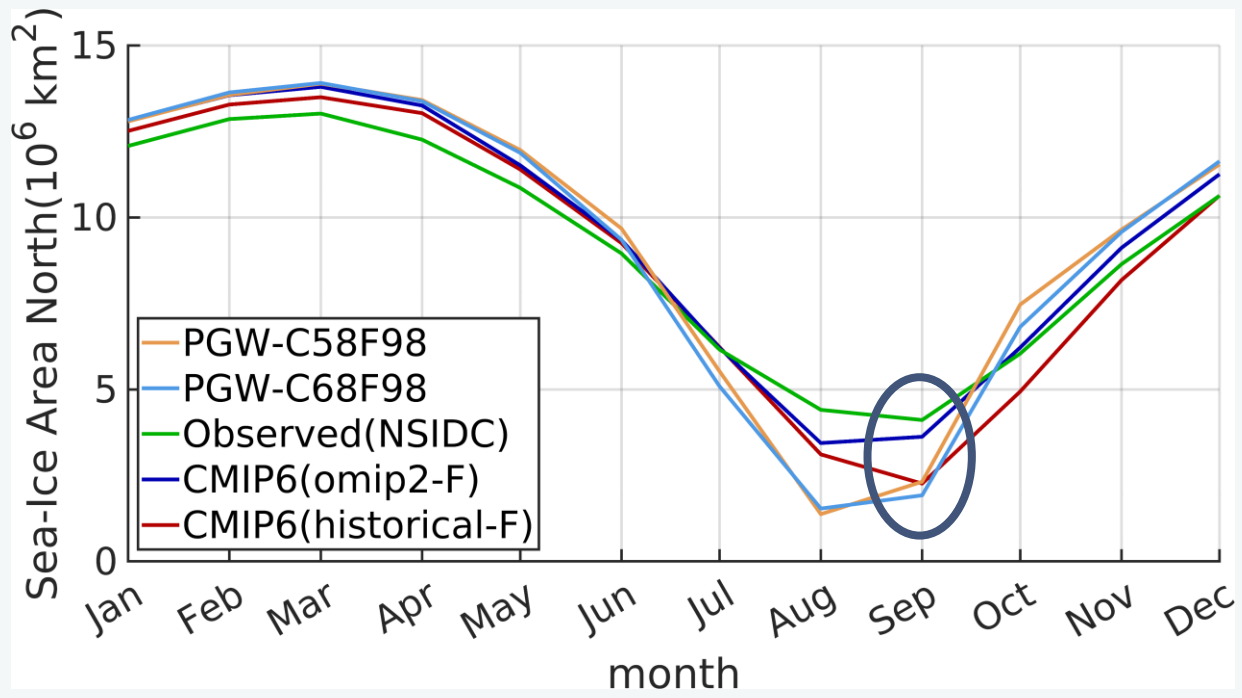
2月 平均海氷密接度 (2002~2006)



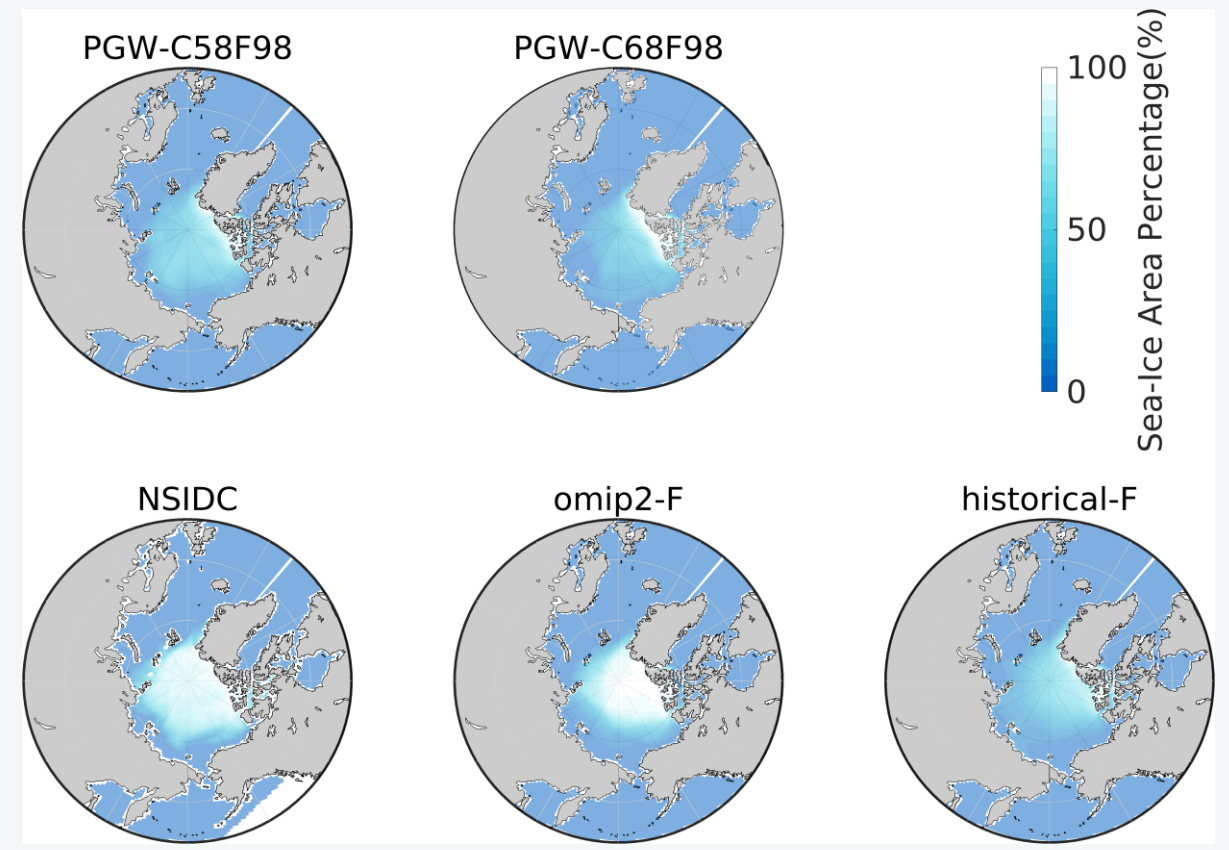
 多くの月で北極海の家氷状態を良好に再現

4. 研究結果 過去再現計算

月別平均 北半球海氷面積 (2002~2006)



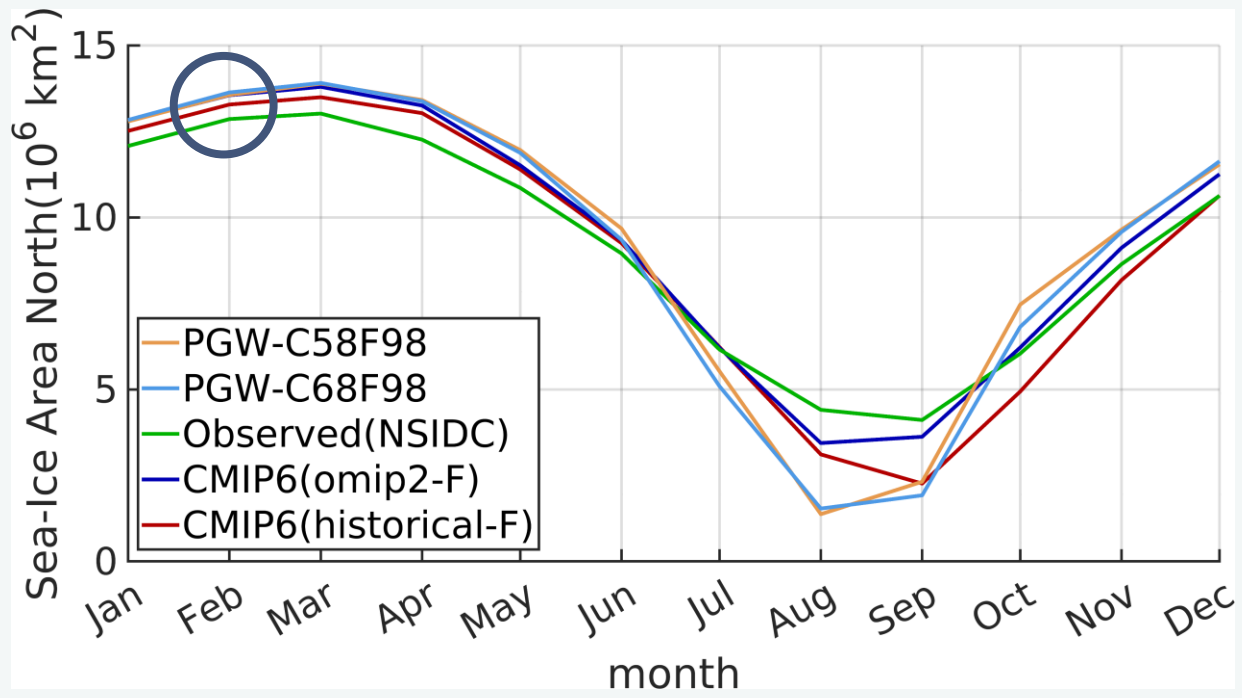
9月 平均海氷密接度 (2002~2006)



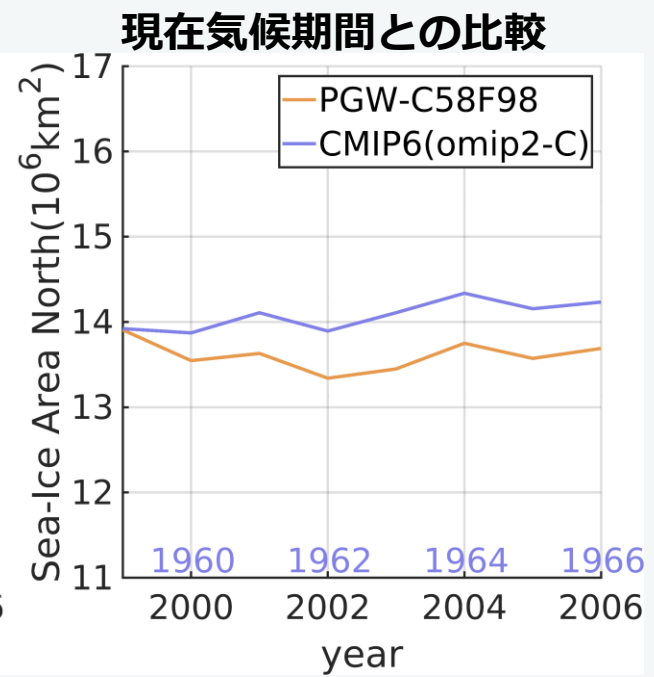
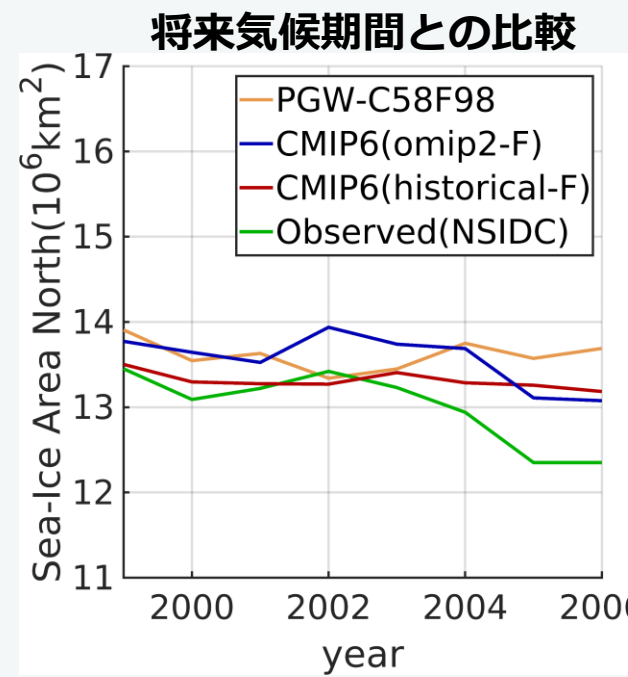
観測値およびomip2実験と比較して夏季の海氷の状態を過小評価

4. 研究結果 過去再現計算

月別平均 北半球海氷面積 (2002~2006)



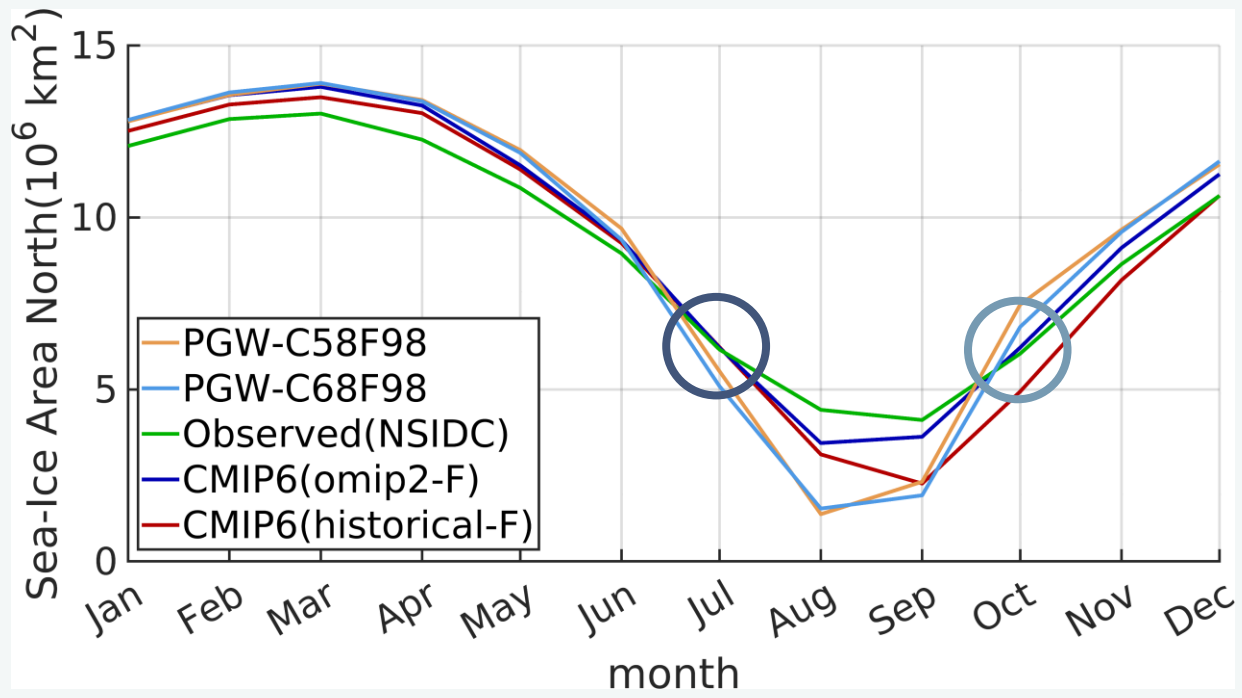
2月 北半球海氷面積 年次変動 (2002~2006)



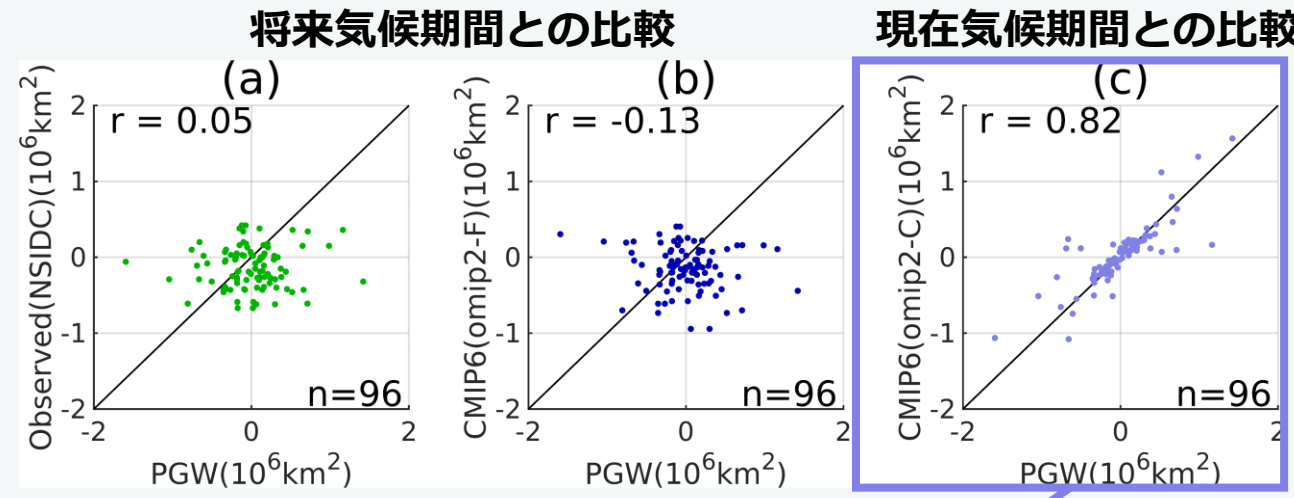
▲ 北半球海氷面積の年ごとの増減は現在気候期間と類似

4. 研究結果 過去再現計算

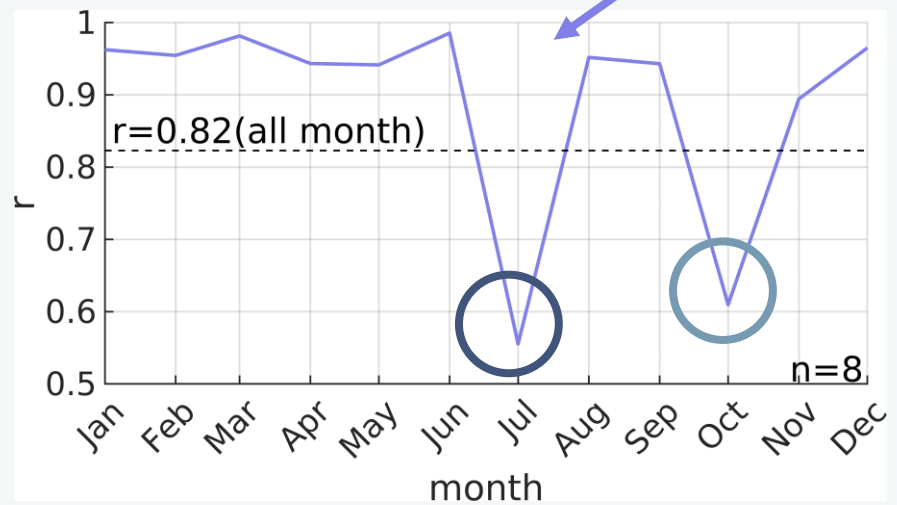
月別平均 北半球海氷面積 (2002~2006)



海氷密接度 前年同月からの増減値 (2002~2006)



月別相関係数

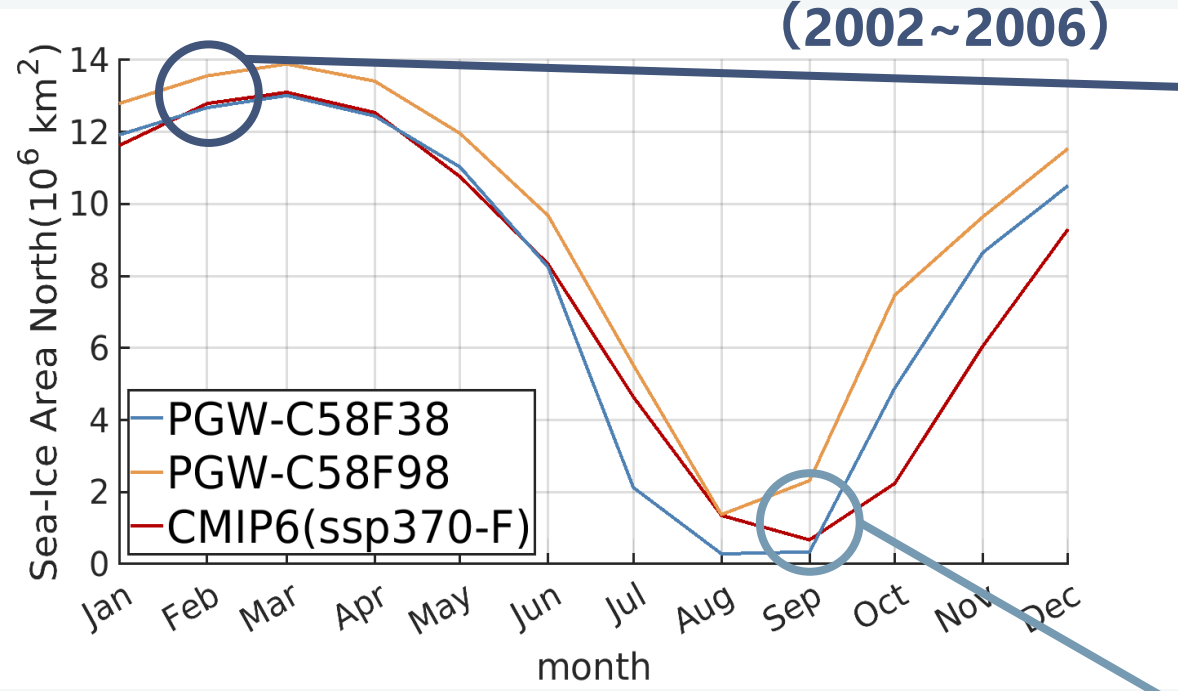


北半球海氷面積の年ごとの増減は現在気候期間と類似

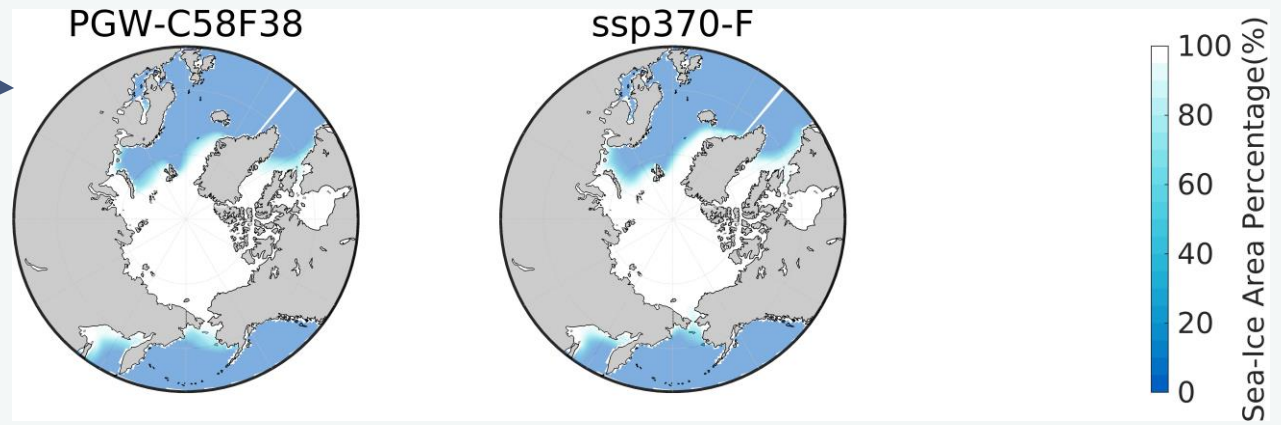
夏季の前後のみ低い相関

4. 研究結果 将来予測計算

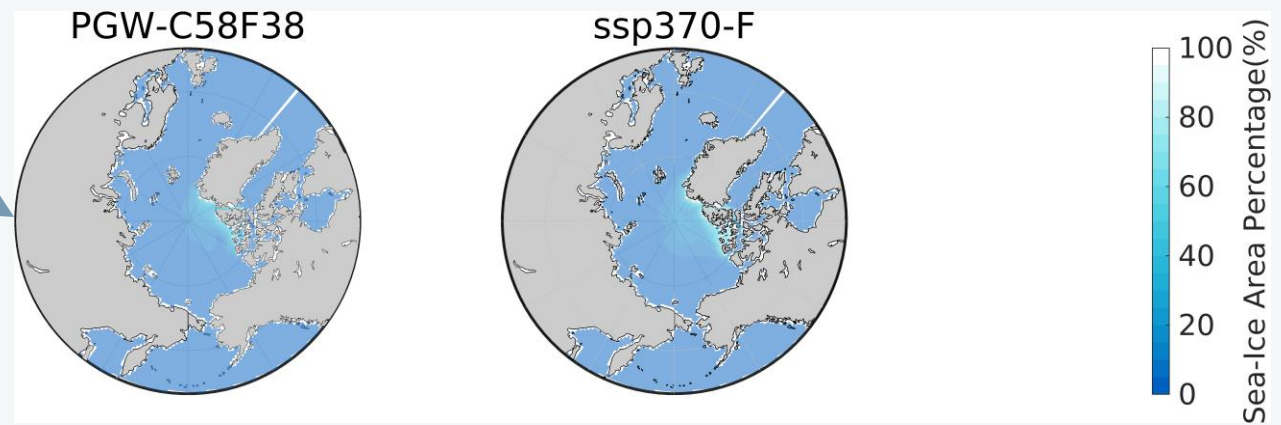
月別平均 北半球海氷面積 (2042~2046) (2002~2006)



2月 平均海氷密接度 (2042~2046)



9月 平均海氷密接度 (2042~2046)



過去再現計算より海氷面積が減少

過去再現計算とhistoricalの比較, 将来予測計算とssp実験の比較とで同様の傾向

5. 考察

夏季の海氷面積を過小評価

基本方程式
$$\frac{\partial g}{\partial t} = -\nabla \cdot (g\vec{u}) - \frac{\partial}{\partial h} (Rg) + \psi$$

力学項 熱力学項

計算値

omip2

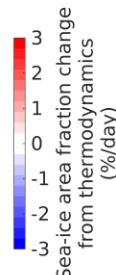
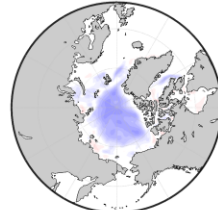
偏差

熱力学

PGW-C68F98

CMIP6(OMIP-F)

PGW-C68F98 -
CMIP6(OMIP-F)



力学

PGW-C68F98

CMIP6(OMIP-F)

PGW-C68F98 -
CMIP6(OMIP-F)

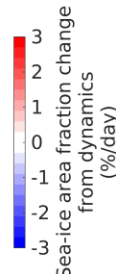
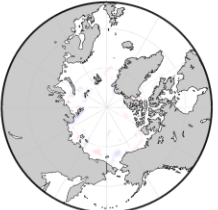


図.海氷面積減少への寄与 7月 (2002年~2006年平均)

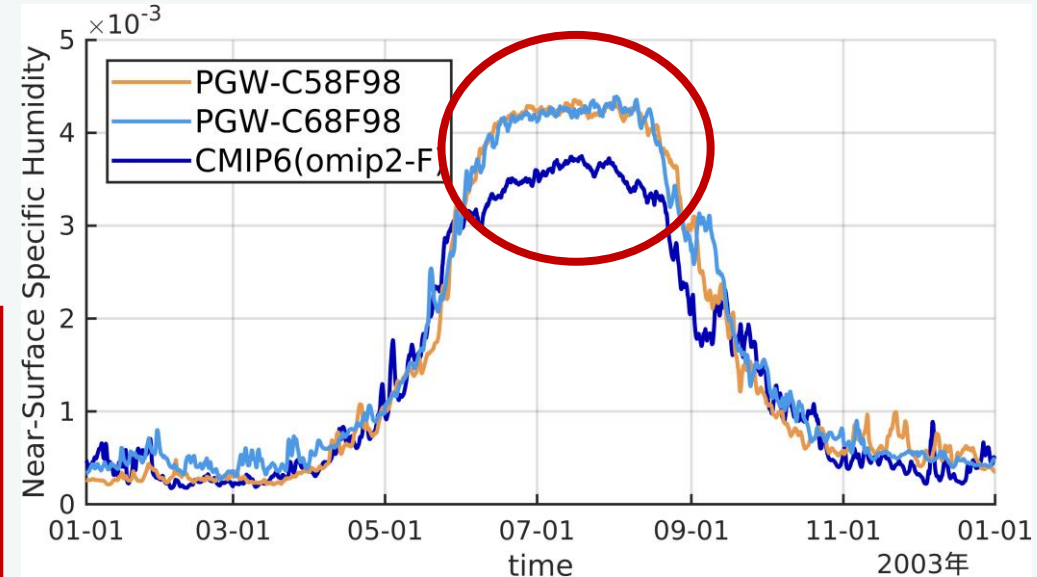


図.使用した比湿度データの値 (極付近) (2002年~2006年平均)

▲ 熱力学が大きく影響

▲ 極付近の比湿の値が夏季に増大

5. 考察

夏季の海氷面積を過小評価

熱力学（大気から海洋への表面エネルギーフラックス）

$$F_0 = F_s + F_l + F_{L\downarrow} + F_{L\uparrow} + (1 - \alpha)(1 - i_0)F_{sw} \quad (2)$$

熱力学（海氷上面の融解）

$$q\delta h = \begin{cases} (F_0 - F_{ct})\Delta t & \text{if } F_0 > F_{ct} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

熱力学（潜熱フラックス）

$$F_l = C_l(Q_\alpha - Q_{sf}) \quad (1)$$

F_l ：潜熱フラックス

C_l ：非線形の乱流熱伝導係数

Q_α ：比湿度

Q_{sf} ：表面飽和比湿

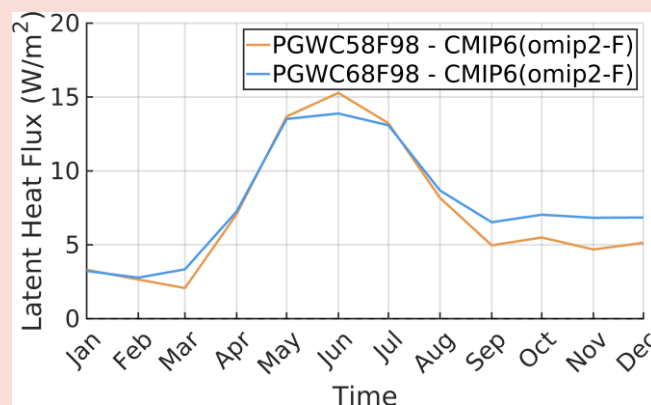


図.過去再現計算とomip2の潜熱フラックスの偏差

北極圏の比湿度が過大に評価される

北極付近の潜熱フラックスが増加 ①

大気から海洋への
表面エネルギーフラックスが増加 ②

海氷上面の融解量が増加 ③

6. まとめ

- ▲ CMIP6のomip2実験の構成を用いて、全球モデルを用いた擬似温暖化実験を実施し、北半球海氷面積および海氷密接度を評価
- ▲ 過去再現計算では、大部分の季節でomip2実験の値と類似
→omip2実験の観測値に対する精度を良好に再現
- ▲ 過去再現計算では、夏季にomip2実験と比較して過小評価
→北極の比湿度の過大評価が原因と思われる
- ▲ 将来予測計算では過去再現計算と比較して北半球海氷面積の減少を確認

参考文献

1. IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvarinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, 3(1), Article 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>
2. Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvarinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T. and Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth & Environment*, 3(1), Article 168. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3>Constable, A.J., S. Harper, J. Dawson, K. Holsman, T. Mustonen, D. Piepenburg, and B. Rost, 2022: Cross-Chapter Paper 6: Polar Regions. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2319–2368, doi:10.1017/9781009325844.023.
3. Screen, J. A. and Simmonds, I. (2010). The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 464(7293), 1334-1337. <https://doi.org/10.1038/nature09051>Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.
4. Constable, A.J., Harper, S., Dawson, J., Holsman, K., Mustonen, T., Piepenburg, D., and Rost, B., 2022: Cross-Chapter Paper 6: Polar Regions. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2319–2368, doi:10.1017/9781009325844.023.Notz, D., & SIMIP Community (2020).Arctic sea ice in CMIP6.*Geophysical Research Letters*,47, e2019GL086749.<https://doi.org/10.1029/2019GL086749>
5. 大塚夏彦, 大西富士夫, 泉山耕, 北極海航路による海上輸送の変遷と特徴, 土木学会論文集 B3 海洋開発), 73巻(2017) 2号, pp.25-30, 2017. [Otsuka, N., Ohnishi, F., and Izumiyama, K.: REVIEW OF THE RECENT NORTHERN SEA ROUTE ACTIVITIES, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3(Ocean Engineering)*, Vol73, Issue 2, Pages I_25-I_30, 2017]
6. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., and Taylor, K. E.: Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development.*, 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>, 2016.
7. Griffies, S. M., Danabasoglu, G., Durack, P. J., Adcroft, A. J., Balaji, V., Böning, C. W., Chassignet, E. P., Curchitser, E., Deshayes, J., Drange, H., Fox-Kemper, B., Gleckler, P. J., Gregory, J. M., Haak, H., Hallberg, R. W., Heimbach, P., Hewitt, H. T., Holland, D. M., Ilyina, T., JungCLAUS, J. H., Komuro, Y., Krasting, J. P., Large, W. G., Marsland, S. J., Masina, S., McDougall, T. J., Nurser, A. J. G., Orr, J. C., Pirani, A., Qiao, F., Stouffer, R. J., Taylor, K. E., Treguier, A. M., Tsujino, H., Uotila, P., Valdivieso, M., Wang, Q., Winton, M., and Yeager, S. G.: OMIP contribution to CMIP6: experimental and diagnostic protocol for the physical component of the Ocean Model Intercomparison Project, *Geoscientific Model Development.*, 9, 3231–3296, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3231-2016>, 2016.

参考文献

8. Notz, D., and SIMIP Community (2020). Arctic sea ice in CMIP6. *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL086749. <https://doi.org/10.1029/2019GL086749> Danabasoglu, G., Lamarque, J.-F., Bacmeister, J., Bailey, D. A., DuVivier, A. K., Edwards, J., et al. (2020). The Community Earth System Model Version 2 (CESM2). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS001916. <https://doi.org/10.1029/2019MS001916>
9. Tsujino, H., Urakawa, L. S., Griffies, S. M., Danabasoglu, G., Adcroft, A. J., Amaral, A. E., Arsouze, T., Bentsen, M., Bernardello, R., Böning, C. W., Bozec, A., Chassignet, E. P., Danilov, S., Dussin, R., Exarchou, E., Fogli, P. G., Fox-Kemper, B., Guo, C., Ilicak, M., Iovino, D., Kim, W. M., Koldunov, N., Lapin, V., Li, Y., Lin, P., Lindsay, K., Liu, H., Long, M. C., Komuro, Y., Marsland, S. J., Masina, S., Nummelin, A., Rieck, J. K., Ruprich-Robert, Y., Scheinert, M., Sicardi, V., Sidorenko, D., Suzuki, T., Tatebe, H., Wang, Q., Yeager, S. G., and Yu, Z.: Evaluation of global ocean–sea-ice model simulations based on the experimental protocols of the Ocean Model Intercomparison Project phase 2 (OMIP-2), *Geoscientific Model Development*, 13, 3643–3708, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3643-2020>, 2020. Fetterer, F., Knowles, K., Meier, W. N., Savoie, M., & Windnagel, A. K. (2017). Sea ice index, version 3. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/10.7265/N5K072F8>
10. Shu, Q., Wang, Q., Guo, C., Song, Z., Wang, S., He, Y., and Qiao, F.: Arctic Ocean simulations in the CMIP6 Ocean Model Intercomparison Project (OMIP), *Geoscientific Model Development*, 16, 2539–2563, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-2539-2023>, 2023. Cai, Z., You, Q., Chen, H., Zhang, R., Zuo, Z., Chen, D., Cohen, J., Screen, J., (2024). Assessing Arctic wetting: Performances of CMIP6 models and projections of pre-precipitation changes. *Atmospheric Research*, 297, Article 107124. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107124>
11. Danabasoglu, G., Lamarque, J. F., Bacmeister, J., Bailey, D. A., DuVivier, A. K., Edwards, J., Emmons, L. K., Fasullo, J., Garcia, R., Gettelman, A., Hannay, C., Holland, M. M., Large, W. G., Lauritzen, P. H., Lawrence, D. M., Lenaerts, J. T. M., Lindsay, K., Lipscomb, W. H., Mills, M. J., Neale, R., Oleson, K. W., Otto-Bliesner, B., Phillips, A. S., Sacks, W., Tilmes, S., Kampenhout, L., Vertenstein, M., Bertini, A., Dennis, J., Deser, C., Fischer, C., Fox-Kemper, B., Kay, J. E., Kinnison, D., Kushner, P. J., Larson, V. E., Long, M. C., Mickelson, S., Moore, J. K., Nienhouse, E., Polvani, L., Rasch, P. J. and Strand, W. G. (2020). The Community Earth System Model Version 2 (CESM2). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS001916. <https://doi.org/10.1029/2019MS001916>
12. Elizabeth, C. H., William, H. L., Adrian, K. T., Jeffery, N. and Elliott, S. (2015) CICE: the Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual Version 5.1 LA-CC-06-012, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos NM 87545.
13. Fetterer, F., Knowles, K., Meier, W. N., Savoie, M., and Windnagel, A. K. (2017). Sea ice index, version 3. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/10.7265/N5K072F8>. [Date Accessed].
14. Meier, W. N., Fetterer, F., Windnagel, A. K., and Stewart, S. 2021. NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version 4. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. <https://doi.org/10.7265/efmz-2t65>. [Date Accessed].
15. Cai, Z., You, Q., Chen, H., Zhang, R., Zuo, Z., Chen, D., Cohen, J. and Screen, J., (2024). Assessing Arctic wetting: Performances of CMIP6 models and projections of precipitation changes. *Atmospheric Research*, 297, Article 107124. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107124>

最後に

ご清聴ありがとうございました