

2. 北極温暖化増幅のメカニズムと将来予測

吉 森 正 和*

1. はじめに

大気中の温室効果ガス濃度が増加すると、地上気温が他の地域に比べて北極域で大きく上昇する。このことは、気候モデルが開発され始めた頃から良く知られている (Manabe and Wetherald 1975)。平衡応答として大きく現れることと、過渡的応答として早く現れることは本来異なる現象であるが (Yoshimori *et al.* 2017)、現実の世界でも近年北極域が顕著に温暖化していることは周知の事実である。一般に、全球平均に比べて北極域平均の地上気温上昇量が大きいことを北極温暖化増幅 (Arctic warming amplification または Arctic amplification) という。

第1図は、IPCC第5次評価報告書にまとめられた約100年後の全球と北極域で平均した気温変化の予測を表している。北極温暖化増幅と北極域の予測幅が大きいことが特徴である。予測幅には内部変動の影響も含まれているが (Hodson *et al.* 2013)、予測幅に寄与している気候モデルのばらつきの低減が期待される。

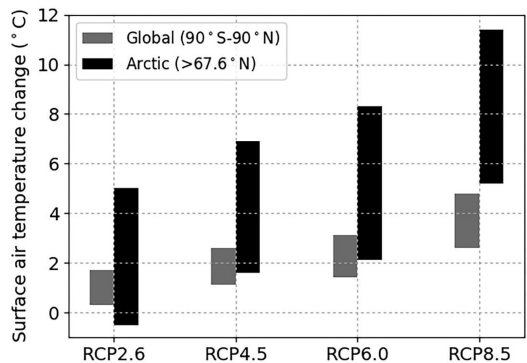
2. 近年の北極温暖化

海水上の気温観測データが不足しているため、北極温暖化増幅を観測データで示すのは意外と難しい (吉森 2014)。ここでは再解析データで概観してみる。第2図は、全球、北極域、南極域の3つに分けて、1979年以降の年平均地上気温の推移を示したものである。南極域の温暖化の遅れや北極域の温暖化が全球平均の2倍かそれ以上のスピードで進んでいることが読み取

れる。一方で、北極域の温暖化には明瞭な季節性がある (第3図)。一般に、北極温暖化増幅は雪氷アルベド・フィードバックを引き合いにして説明されることが多いが、極夜を含む日射の少ない秋から冬にかけて温暖化が大きく現れる事実は、アルベド・フィードバック以外のプロセスも必要とする。また、アルベド変化の効果を除去した数値実験でも、北極温暖化増幅の起きることが繰り返し報告されている。Voigt *et al.* (2016) では、海水の無い水惑星温暖化実験においても、北極温暖化増幅が起きている。

3. メカニズムを理解するためのアプローチ

「メカニズム」という言葉は、ニュートンの運動方

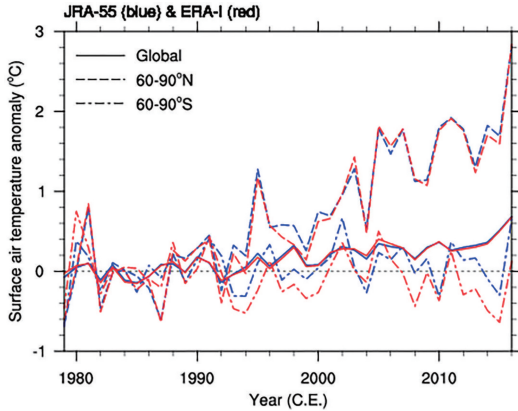


第1図 21世紀の約100年間の年平均地上気温変化の予測 (°C)。IPCC第5次評価報告書のTable 12.2 (Collins *et al.* 2013)のデータを基に作成。縦軸は90%信頼区間。灰色が全球平均、黒色が北極域平均。横軸は将来予測の(代表的濃度経路)シナリオの違いを表し、RCPの後の数字は産業革命前を基準にしたときの21世紀末のおおよその放射強制力の大きさ (Wm^{-2})を表す。

* 北海道大学大学院地球環境科学研究院／国際連携研究教育局／北極域研究センター／東京大学大気海洋研究所。

masakazu@aori.u-tokyo.ac.jp

© 2019 日本気象学会



第2図 1979～1993を基準にした全球、北極域、南極域の年平均地上気温の変化(°C)。JRA-55(青)とERA-Interim(赤)再解析データより作成。両色とも実線が全球平均、破線が北極域平均、鎖線が南極域平均。

程式に代表されるように狭義には時間発展的な因果関係の説明を連想させるが、本稿では、力学的エネルギー保存則による運動の理解のように、診断的な意味合いも含めて緩く用いる。複雑な相互作用の結果として現れる応答を理解するためには、次に述べるフィードバック解析がその一助となるが、その方法には次の2つの代表的なアプローチがある(e.g., Bony *et al.* 2006)。

3.1 エネルギー収支に基づく分析

エネルギー収支解析は、観測された変化やシミュレートされた応答を決める支配的なプロセスや気候モデル間の差異の要因を特定するのに利用される。たとえば、気候感度の不確実性の特定に水蒸気や雲の変化がもたらす放射効果などが調べられてきた。こうした分析では、原理的には観測とシミュレーションを個々のプロセスレベルで比べる事が可能である。北極温暖化増幅メカニズムの探求では、地表面温度変化の診断に、大気上端での放射フラックスを利用する方法や地表面での放射・熱フラックスを利用する方法が用いられてきた。これらの方法はマルチモデル解析には利用しやすい一方(Lainé *et al.* 2016)、大気温度構造の変化とその寄与を具体的なプロセスに帰着させることができなかった。近年提案された気候フィードバック応答解析法(CFRAM)では、この制約が緩和された(Lu and Cai 2010; Yoshimori *et al.* 2014a, b)。こうした分析からわかってきたことを第4.1節で紹介

する。

3.2 感度実験に基づく分析

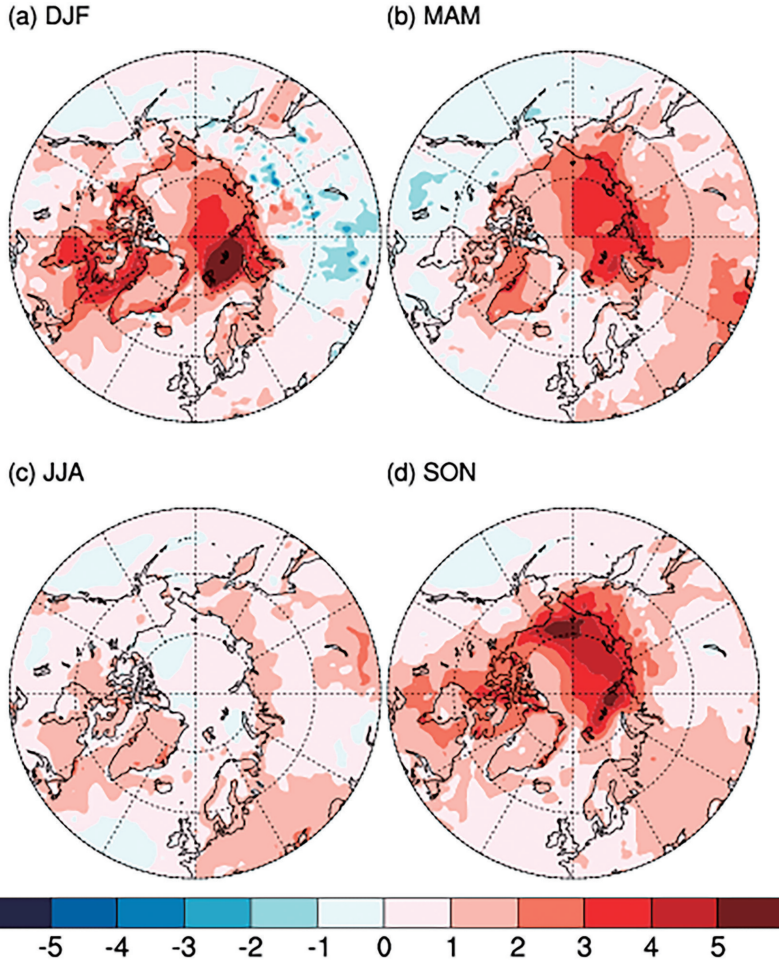
数値モデルを用いた感度実験の有用性は言うまでもないが、ここではフィードバック解析としての側面に触れたい。支配的なプロセスの特定およびプロセス間の(因果関係も含めた)相互作用の理解は、原理的には個々のプロセスの系統的なオン・オフ実験の繰り返しを通して得ることができる(Stein and Alpert 1993)。しかし実際には、モデル設計上の都合や実験数の多さから実施が困難であることも多い。また、非物理的な設定や相互作用の非線形性により、個々の感度実験を現実的なシミュレーション結果の解釈に結び付けることが容易でない場合もある。こうした制約を緩和するための一つの試みとして、第3.1節で述べた分析と感度実験を組み合わせた研究を第4.2節でごく簡単に紹介する。

4. 理解の現状

4.1 季節性と支配的なプロセス

第4図は、32の気候モデルで予測された21世紀末の北極温暖化増幅に寄与するプロセスを地表面のエネルギー収支に基づいてその平均像を表している。さまざまなプロセスの北極域の温度上昇への寄与を月ごとに熱帯への寄与と比較して相対的な割合として示しており、棒グラフの正の値は北極温暖化を増幅、負の値は抑制する働きを表している。各棒グラフの総和が折れ線で示されているシミュレーション結果に一致する。第4図a, cでは、夏季のアルベド・フィードバックの寄与が海洋・海水の熱吸収によって相殺され(Other surf. effects)、結果的にほとんど昇温に寄与していない。一方、10～12月にかけての大きな昇温には、海洋・海水の貯熱の減少(Other surf. effects)、大気成層の効果(Nonbarotropic warming)、雲の温室効果(Clouds)、各フィードバックプロセスと放射法則の非線形性との相乗効果(Synergy)が効いている。一方で、海洋と陸上の違いも顕著である(第4図a, b)。温度上昇を上向き長波放射の増加に読み変えて診断する地表面でのエネルギー収支解析においては、地表付近の昇温は温度の上昇した海水面からたくさんの長波放射が射出されていることに相当する。しかし、海洋からの熱放出自体は海面水温の低下に寄与しており、海洋・海水の貯熱の減少が地上気温を上昇させる過程が不鮮明である。

第5図は、1つの気候モデルの1%漸増CO₂実験



第3図 北半球中高緯度における1979～1993年平均から2002～2016年平均の地上気温変化(°C)。(a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON. ERA Interim 再解析データより作成。

において、CO₂倍増に対するCFRAMによる解析結果を示したものである。各プロセスによる加熱が熱放射と釣り合うのに必要な温度変化として表現されている。10～12月の北極温暖化に見られる対流圏中層に比べて相対的に大きな下層の温暖化は、海洋・海水の貯熱の減少(RES)、地表からの顕熱フラックスと大気境界層の拡散過程(SH+VDF)によって維持され、大気中の移流(DYN)、蒸発・大規模凝結・対流(EVP+LSC+CUM)によって抑制されている。また、CO₂や水蒸気の放射効果も下層の温暖化を増幅する傾向がある。こうした診断は、これまで「気温の上昇」や「気温の鉛直構造」の効果と一括りにされてき

た項を具体的なプロセスに帰着する第一歩になると期待される。

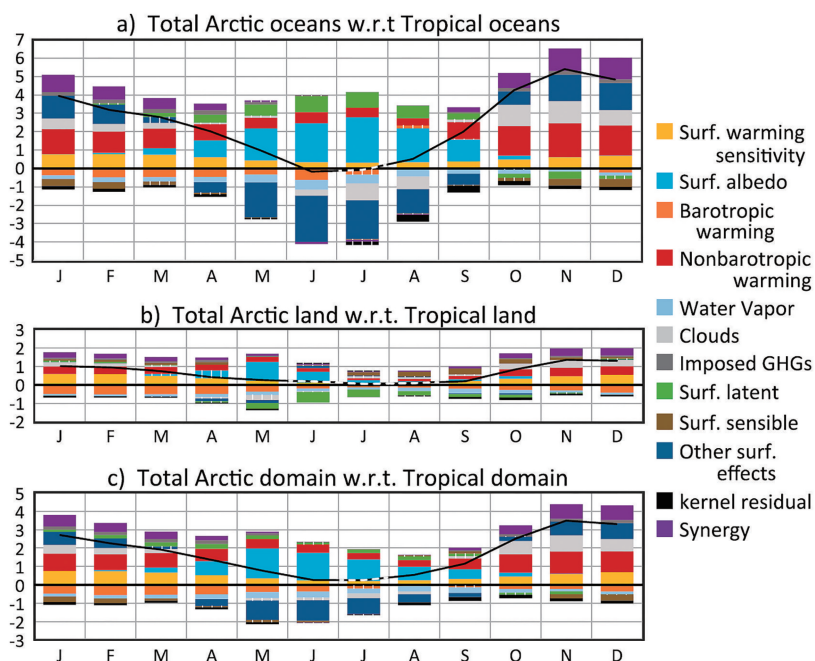
以上の結果は、次のように要約される。日射の強い夏季には、温暖化によって減少した海水被覆の効果で海洋に供給される放射エネルギーが増加するが、一部は海水のさらなる融解に消費され、残りは温度上昇に寄与する。このとき、氷の残っている場所の海面水温は融点のままであり、さらに熱容量の大きな海洋の温度上昇は比較的小さい。また、雲の変化が太陽放射の反射を通して負のフィードバックとして働く。季節が進行して気温が低くなると、温暖化によって海水の減少した暖かい海洋から大気に効率的に熱が放出され、強い大気の成層と増加した雲の温室効果によって、(温暖化前に比べて)地表付近が大きく昇温する。このとき、熱容量の大きな海洋からの熱放出にともなう海面水温の低下はわずかであり、凝固点に到達した場合には海水が生成さ

れる。また、温暖化の応答では、熱放射を通してエネルギーの釣り合いを取るように温度は上昇するが、地表温度の低い北極域の冬季においては温度上昇に対する熱放射の効率が低いため、相乗的に温度変化が大きく現れる。すなわち、海水アルベド・フィードバックが夏の海洋熱吸収を増加させ、海水断熱効果の減少の結果として10～12月に海洋から大気への熱放出の増加が生じるが、この時期は、雲、成層、放射法則の点で地表付近が温暖化しやすい季節であるため、北極の温暖化が促進される。

4.2 大気熱輸送の役割

Hwang *et al.* (2011) は、マルチモデルの将来予測

Contributions to surface Arctic Amplification



第4図 CMIP5のRCP4.5 (中位安定化) シナリオの下で、月ごとに様々な過程が北極域の海上 (a)、陸上 (b)、全域 (c) の昇温に寄与する割合を熱帯との相対的な割合で表示 (32個の気候モデルの平均)。正の値ほど、北極域の温暖化増幅に寄与。Lainé *et al.* (2016) Fig. 6より転載 (© American Meteorological Society. Used with permission.)。各項の詳細については本文と元論文を参照のこと。

において、北極域への大気熱輸送が減少しているモデルほど、北極温暖化増幅が大きい傾向にあることを示した。後者が前者の原因と考えることもできるが、いずれにしても大気熱輸送は北極温暖化増幅に寄与していないように見える。一方、Graversen and Burtu (2016) は、潜熱輸送は凝結熱の放出による温暖化に加えて、水蒸気と雲の温室効果による温暖化の効果も併せ持つため、乾燥静的エネルギーとの合計で定義される大気熱輸送量は、1週間前後のスケールで見ると北極域の温度上昇に対する大気的作用を必ずしも正しく表さないことを指摘した。Graversen and Burtu (2016) は、この結果を将来予測に統計的に外挿し、北極温暖化増幅における潜熱輸送の役割を議論した。ほぼ同時期に、Yoshimori *et al.* (2017) は温暖化実験において低緯度の温度上昇の影響だけを取り出す感度実験や、さらに北極域の海面水温や海水分布の応答を抑制した感度実験を行い、前述のCFRAM解析と

組み合わせることによって、Graversen and Burtu (2016) が指摘した潜熱輸送の重要性を明確に示した。

5. 今後の課題

5.1 天候現象とのリンク

第3.1節で紹介したフィードバック解析は、支配的なプロセスを特定する足がかりとしては有用であるが、具体的な現象とのリンクが不明である。たとえば、雲の温室効果が重要であることはわかるが、日々出現する雲のタイプや頻度が具体的にどのように変化して、結果的に気候学的に見た北極温暖化増幅に寄与するフィードバック項に反映されるのかは未解明である。同様に、大気熱輸送が重要なこともわかるが、個々の総観規模擾乱や惑星波が頻度を含めてどのよう

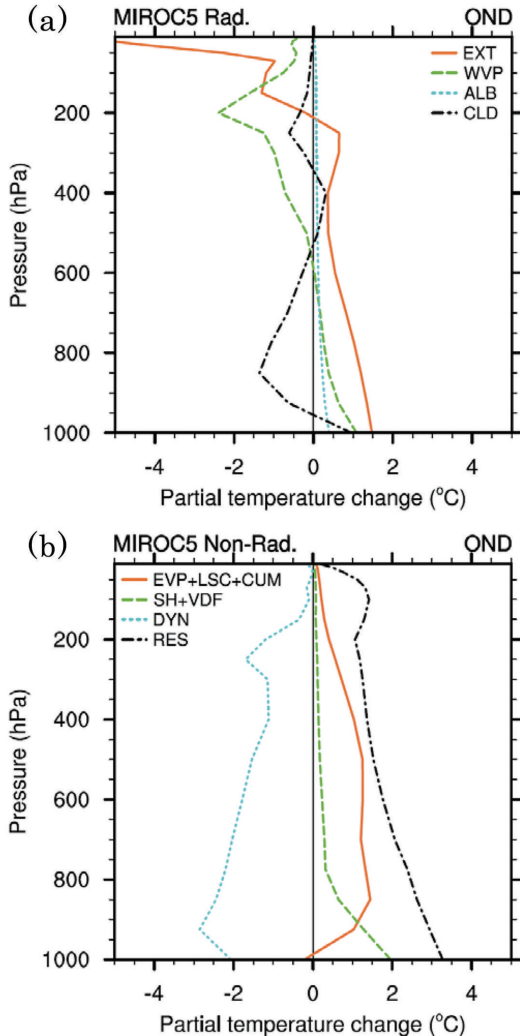
に変化して、フィードバック項に効いてくるのかよくわからない。時間・空間スケールをまたいで理解を深めていく必要がある。

5.2 素過程とのリンク

気候モデルの改善という点から考えると、第4節で紹介した研究は、現在気候の再現バイアスに加えて、雪氷アルベド、大気境界層、極域の下層雲、海洋混合層の表現などが重要であることを示唆している。すなわち、表面融解によって生成する海水上の池（メルトポンド）を始めとするアルベドの季節進行、冬の地表付近の逆転層、相変化をともなって応答に寄与する混合相雲、北極海表層の強い成層などを正しく表現する必要がある。こうした表現の改善が気候学的に見た北極温暖化増幅に寄与するフィードバック項にどのように影響するのか、系統的な理解が必要である。

5.3 過去の気候からの知見

北極域は今後、測器観測データがこれまで記録した



第5図 気候モデルMIROC5の1%漸増CO₂実験における10~12月の北緯70°以北の鉛直気温分布の変化への寄与(°C)。(a)放射過程、(b)放射過程以外。EXT:CO₂、WVP:水蒸気、ALB:地表アルベド、CLD:雲、EVP+LSC+CUM:地表蒸発+大規模凝結+積雲対流、SH+VDF:顕熱+鉛直拡散、DYN:大気移流、RES:大気、海洋、海水の貯熱。Yoshimori *et al.* (2014b)のFigs. 10a, 10cより転載(© American Meteorological Society. Used with permission.)。詳細については元論文を参照のこと。

ことのない変化を経験することが予想されている。一方で、北極温暖化増幅は過去においても生じていたことが明らかになっている。たとえば、程度は小さいが

約6千年前の完新世中期や、より明瞭な約12~13万年前の最終間氷期などが挙げられる。両時代については、温室効果ガスの上昇ではなく、地球の公転・自転に関する条件が現在と異なっていたことが主な原因であるが、最近の著者らの研究により、北極域の応答、すなわち温暖化のプロセスには共通性があることがわかってきた。Schmidt *et al.* (2014)は、完新世中期と将来予測における海水減少にマルチモデル間で弱いながら相関関係があることを報告したが、今後はその根拠となる物理過程の検証が必要である。最後に、モデルには未だ含まれていない素過程が残されており、予測の不確実性≠モデルのばらつきであることに留意し、謙虚に過去と向き合う重要性を強調しておきたい。

謝辞

第2図と第3図は、気象庁によるJRA-55長期再解析プロジェクトにより提供されたデータセット(Kobayashi *et al.* 2015)とECMWFにより提供されたERA Interim再解析データ(Dee *et al.* 2011)を使用して作成した。本稿の内容の一部は、GRENE北極気候変動研究事業と環境省の環境研究総合推進費S-10プロジェクトの成果を反映したものであり、執筆に際しては、JSPS 科研費JP17H06104と北極域研究推進プロジェクトArCSの支援を受けた。継続的に議論をさせていただいた阿部彩子教授とAlexandre Lainé博士に御礼を申し上げます。

参考文献

- Bony, S., R. Colman, V. M. Kattsov, R. P. Allan, C. S. Bretherton, J.-L. Dufresne, A. Hall, S. Hallegatte, M. M. Holland, W. Ingram, D. A. Randall, B. J. Soden, G. Tselioudis and M. J. Webb, 2006: How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *J. Climate*, **19**, 3445-3482.
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichet, P. Friedlingstein, X. Gao, W. J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A. J. Weaver and M. Wehner, 2013: Long-term climate change: Projections, commitments and irreversibility. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y.

- Xia, V. Bex and P. M. Midgley, eds.). Cambridge University Press, 1029-1136.
- Dee, D. P., S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kállberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B. K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thepaut and F. Vitart, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.
- Graversen, R. G. and M. Burtu, 2016: Arctic amplification enhanced by latent energy transport of atmospheric planetary waves. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 2046-2054.
- Hodson, D. L. R., S. P. E. Keeley, A. West, J. Ridley, E. Hawkins and H. T. Hewitt, 2013: Identifying uncertainties in Arctic climate change projections. *Clim. Dyn.*, **40**, 2849-2865.
- Hwang, Y.-T., D. M. W. Frierson and J. E. Kay, 2011: Coupling between Arctic feedbacks and changes in poleward energy transport. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L17704, doi:10.1029/2011GL048546.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- Lainé, A., M. Yoshimori and A. Abe-Ouchi, 2016: Surface Arctic amplification factors in CMIP5 models: land and oceanic surfaces, seasonality. *J. Climate*, **29**, 3297-3316.
- Lu, J. and M. Cai, 2010: Quantifying contributions to polar warming amplification in an idealized coupled general circulation model. *Clim. Dyn.*, **34**, 669-687.
- Manabe, S. and R. T. Wetherald, 1975: Effects of doubling CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 3-15.
- Schmidt, G. A., J. D. Annan, P. J. Bartlein, B. I. Cook, E. Guilyardi, J. C. Hargreaves, S. P. Harrison, M. Kageyama, A. N. LeGrande, B. Konecky, S. Lovejoy, M. E. Mann, V. Masson-Delmotte, C. Risi, D. Thompson, A. Timmermann, L.-B. Tremblay and P. Yiou, 2014: Using paleo-climate comparisons to constrain future projections in CMIP5. *Clim. Past*, **10**, 221-250.
- Stein, U. and P. Alpert, 1993: Factor separation in numerical simulations. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2107-2115.
- Voigt, A., M. Biasutti, J. Scheff, J. Bader, S. Bordoni, F. Codron, R. D. Dixon, J. Jonas, S. M. Kang, N. P. Klingaman, R. Leung, J. Lu, B. Mapes, E. A. Maroon, S. McDermid, J. Park, R. Roehrig, B. E. J. Rose, G.L. Russell, J. Seo, T. Toniazzo, H.-H. Wei, M. Yoshimori and L. R. V. Zepetello, 2016: The tropical rain belts with an annual cycle and a continent model intercomparison project: TRACMIP. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **8**, 1868-1891.
- 吉森正和, 2014: 北極温暖化増幅. *細氷*, **60**, 2-15.
- Yoshimori, M., M. Watanabe, A. Abe-Ouchi, H. Shiogama and T. Ogura, 2014a: Relative contribution of feedback processes to Arctic amplification of temperature change in MIROC GCM. *Clim. Dyn.*, **42**, 1613-1630.
- Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi, M. Watanabe, A. Oka and T. Ogura, 2014b: Robust seasonality of Arctic warming processes in two different versions of MIROC GCM. *J. Climate*, **27**, 6358-6375.
- Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi and A. Lainé, 2017: The role of atmospheric heat transport and regional feedbacks in the Arctic warming at equilibrium. *Clim. Dyn.*, **49**, 3457-3472.