

306 (IPCC；気候モデル；海水；気候感度)

5. 気候変化における北極と南極の応答と役割：過去と将来

阿部 彩子^{*1}・斎藤 冬樹^{*2}・吉森 正和^{*3}・小室 芳樹^{*2}
大石 龍太^{*3}・渡部 雅浩^{*3}・大垣内 るみ^{*2}・高橋 邦夫^{*2}
鈴木 香寿恵^{*4}・川村 賢二^{*5}・野沢 徹^{*6}

1. はじめに

極域がどのような状態であるか、極冠（極の水）を有しているかは、惑星の環境や地球の気候変化を特徴づける重要な指標である。現在の地球の両極では、分布はかなり異なるが、一年を通して海水も氷床も存在する。将来、この氷が減少したり消失するほどの環境変化が本当に起こるのか、起きるとしたらいつ頃なのかについては、関心が高く、IPCC（気候変化に関する政府間パネル）第5次報告書（AR5）の第1ワーキンググループでも今まで以上に大きくとりあげられることが予想される。最近報告されているいくつかの観測事実は、これまで以上に、氷の融解が進んでいることを示している。一方、これまでのモデル計算は大

局では矛盾のないものの、海水の変化も氷床の変化も過小評価みにあることがわかってきた。今われわれの住んでいる世界にゆっくりと変化が起きており、現実として氷の拡大縮小の感度が高いことがわかってきた。様々な時間スケールの過去の気候のシミュレーションや数値実験を重ね、極域の気温変化を決めるプロセスの理解を深めた上で気候の将来予測をすることが重要であろう。

2. 近年の極域の気候変化

宇宙空間からの観測により、氷の存在の範囲（extent）を知ることができる（ここで、格子データの extent とは、海水密度が0.15以上の海水を含む格子の面積合計である）。第1図に示すように、1970年代以降、北極海の夏（9月）の海水の範囲は、年々の変動は経ながらも全体としては右肩下がりに減少している（Miller *et al.* 2010）。とくに2007年は9月の海水面積の最小を記録し、北極海の半分ほどになった。IPCC 第4次報告書（AR4; IPCC 2007）で用いた様々な気候モデルとそれによる将来予測の計算に比べて、かなり速いペースで海水後退が進んでいることが

^{*1}（連絡責任著者）東京大学大気海洋研究所。
abeouchi@aori.u-tokyo.ac.jp

^{*2} 海洋研究開発機構。

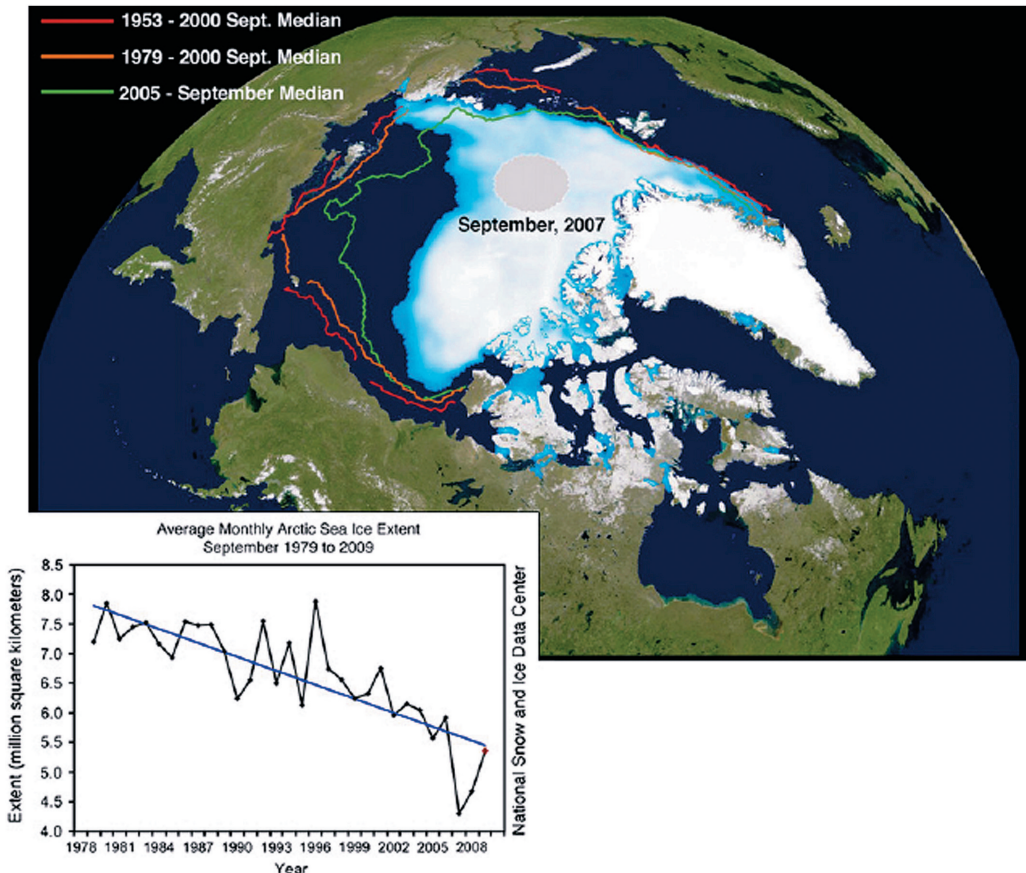
^{*3} 東京大学大気海洋研究所。

^{*4} 国立極地研究所。

^{*5} 国立極地研究所／総合研究大学院大学極域科学専攻。

^{*6} 国立環境研究所。

© 2013 日本気象学会



第1図 北極海の9月の海氷とその変化 (Miller *et al.* 2010). 写真は2007年9月の海氷とグリーンランド氷床、赤、橙、緑の線は、1953年から2000年の9月の中央値、1979年から2000年の9月の中央値、2005年の9月の中央値をそれぞれ示す。

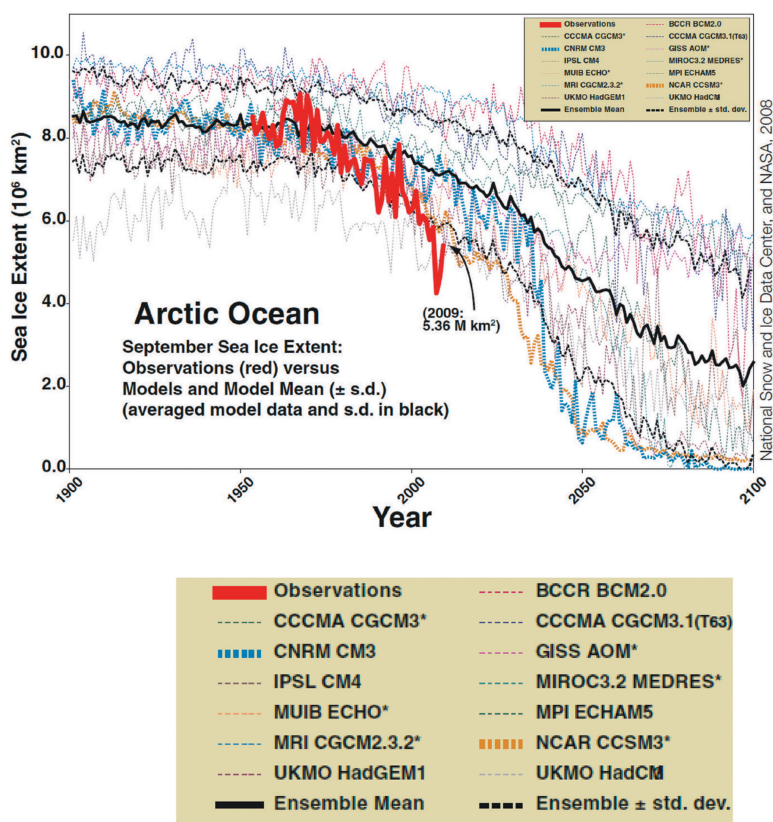
観測からわかってきた (第2図)。

衛星からは氷床の高度や質量の変化もとらえられるが、それに地上や飛行機の観測をあわせると、とくに最近の10年足らずにグリーンランド氷床で大きな変化が起きていることが明らかになった (第3図, Alley *et al.* 2010; Rignot *et al.* 2011). 南極でもすこし小さめだがやはり高度の減少などの観測結果が示されつつある (Pritchard *et al.* 2009). これらの観測は、大気海洋結合モデルの診断計算や氷床モデルを用いた予測 (Suzuki *et al.* 2005; Saito and Abe-Ouchi 2005) を上回る速さで進んでいる。気温や降水量などの観測データを用いたとしても説明できるのはせいぜい半分で、残りは、底面滑りや海洋による融解などのプロセスの重要性が指摘されている (van den Broeke *et al.* 2009; Holland *et al.* 2009). 大気海洋結合モデルにお

ける氷床質量収支の予測誤差の原因として、気温変化の過小評価と氷床モデルの力学プロセスの考慮の不足の両方が挙げられている。

3. 極域温暖化の予測とメカニズムは？

低緯度に比べて極域の気温変化がずっと大きいと予想されている。そもそも、なぜ、極域の気温変化が大きいのか。Manabeらは“Polar Amplification” (極域気温増幅) として、アルベドフィードバックや下層大気の役割で説明している (IPCC 1990). 一方、モデルは現実を説明しているのか。古気候データで示された大きな極域の気候感度をモデルでは十分表現できていないとされ、モデルの Polar Amplification のメカニズムの検証や議論が盛んだ (Davies *et al.* 2009; Moran *et al.* 2006; Masson-Delmotte *et al.* 2006).



第2図 20世紀から21世紀の北極海の海水 extent の変化の観測 (赤線) と各種モデル結果 (Stroeve *et al.* 2007に観測を延長加筆)。

モデルを検証するため、この数十年でも現実大気の大気温度の長期間の空間時間データをカバーして温暖化構造を検出することは重要である。この数十年多くのデータで北極の大気温度の上昇傾向が北半球平均より顕著になりつつある。気温上昇はとくに秋から冬にかけて大きく、海水の変化と連動していることが異なるデータセット (NCEP と JRA) で示された (Serreze *et al.* 2009)。実はその変化が ERA40 では対流圏中層から始まっていると報告されたが (Graversen *et al.* 2008), ERA40 から ERA-Interim へとデータ精度が向上すると、下層が先に大きく暖まることや、それが海水の後退する領域や時季によく一致することが確認された (Grant *et al.* 2008; Bitz and Fu 2008; Serreze *et al.* 2009; Screen and Simmonds 2010)。極域の境界層 (Boe *et al.* 2009) や渦熱輸送などの (モデルでは表現が十分でない) プロセスの役割なども指摘されている (Kug *et al.* 2010)。全球の大気放射解析を定量的に行うことで、気温増幅に関しての水蒸気、雲、ア

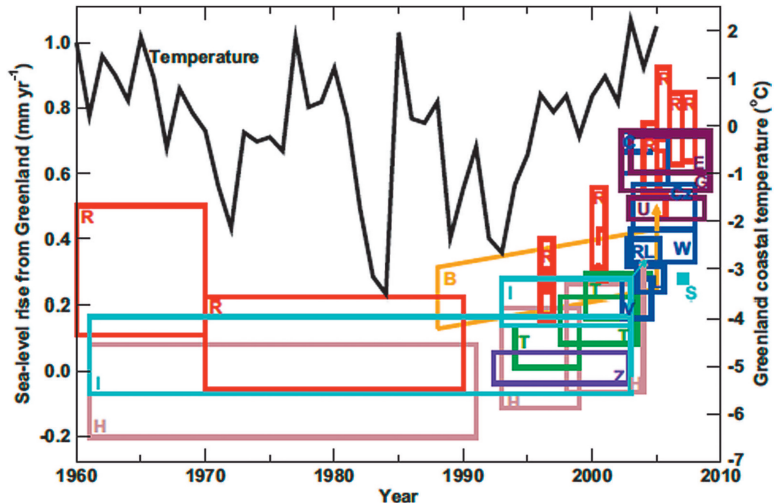
ルベドなどの相対的役割を調べることができる (Bony *et al.* 2006)。第4図では、極域では短波のアルベドフィードバックと同じくらい下層の温暖化による成層の変化 (lapse rate feedback) が大きいことが定量的にみてとれる (Yoshimori *et al.* 2009)。

大気海洋結合システムで予測される地上気温の上昇の仕方は、大気中のプロセスだけでなく海洋が熱をどう吸収 (uptake) して再分配するかや、海水の再現性によって変わる。北極海水の再現性は日本から CMIP5 に提出されて IPCC AR5 で用いられた MIROC5 や、CMIP3 に提出されて IPCC AR4 に用いられた MIROC3.2 の高解像度版 (3hi) の再現性が同じくらい良い。また MIROC3.2 の中解像度版

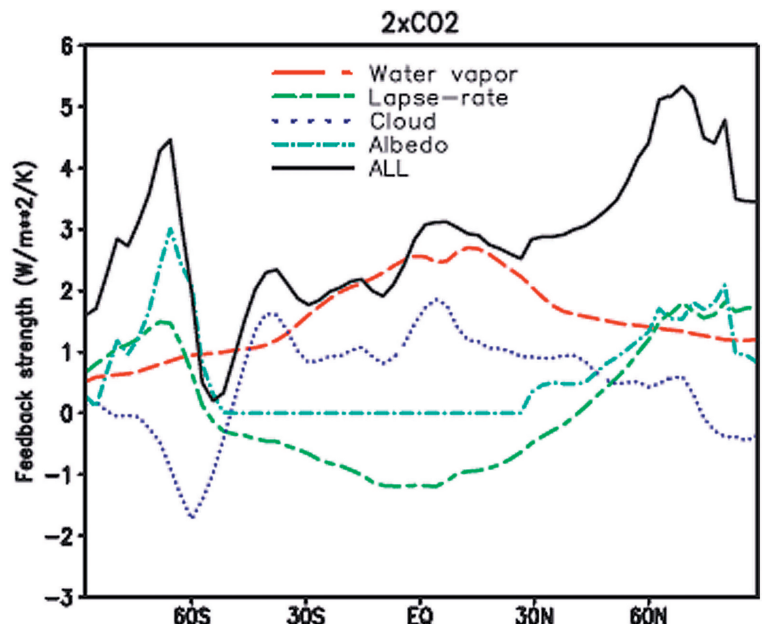
(3med) と高解像度版 (3hi) では気候感度を決定する大気のフィードバックは同程度であるが、大気海洋結合での温暖化実験でのふるまいは大きく異なり高解像度版 3hi が温度上昇や海水後退が最も激しかった (第5図, 第6図)。これは、解像度の違い以外に、20世紀の海水の再現性や海洋の成層構造を決定する拡散係数の違いなどが原因である (Yokohata *et al.* 2008)。とくに、現在気候のバイアス問題は大気海洋結合モデリングでは深刻である。多くのモデルで、北極域では海水を過大評価し (第2図)、反対に南極域では海水を過小評価して温暖バイアスがでやすいことが知られている (Trenberth and Fasullo 2010)。海洋の成層を決定するプロセス及び渦拡散に代わる表現への依存性や、極域の雲の表現 (Ogura *et al.* 2008)、氷床表面で強く放射冷却を受けて吹く斜面下降流 (カタバ風) の影響によるポリニア及び雲の表現や海水の表現 (Ogura *et al.* 2004; Komuro and Hasumi 2007) など、いろいろな問題が考えられ、今後研究することが

必要である。IPCC AR5に貢献するためCMIP5に提出予定のMIROC5版(Watanabe *et al.* 2010; Komuro *et al.* 2012; 本稿の第6図)でも、20世紀再現では、北極の海水の過大評価のため、北極の海水の20世紀末から21世紀初頭の急激な縮退が表現できておらず、南極の海水が夏にはほとんどないため当然その後の変化も小さい(第5図, 第6図)。また、気候感度が以前よりずっと低めにでており、大方雲や対流の計算スキームを新しくしたことが効いていると考えられるが、南極の海水が20世紀から過小評価されていることを見れば、海水に関わる計算にも原因がありそうである。今後極地の再現性を改良するためパラメタ依存実験や解析を重ねることが必要である。

気候モデルのふるまいを全体として検証する際、通常は過去の気候のデータが用いられる。しかし、長期間の気候変化を考えたり古気候における極地の温暖化を解釈する上では、植生や氷床の効果、すなわち大気海洋以外のフィードバックプロセスを考える必要がある。この概念を表す言葉として、最近、Earth system climate sensitivity (Hansen *et al.* 2008; Lunt *et al.* 2010) が用いられている。たとえば、植生の変化によるさらなる温暖化(O'ishi and Abe-Ouchi 2009; O'ishi *et al.* 2009) が海水フィードバックを通じ

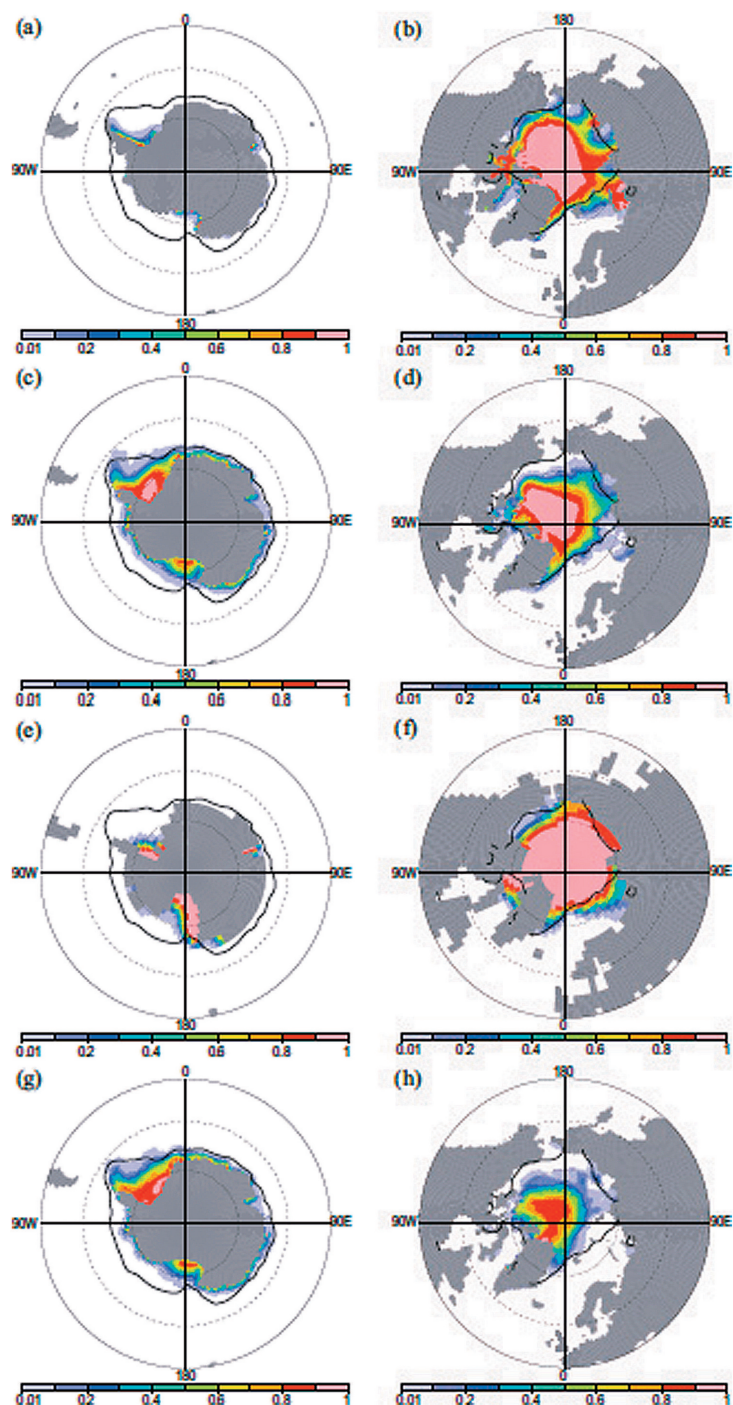


第3図 衛星に搭載された重量計や高度計により観測されて見積もられたグリーンランド氷床の質量収支の変化(様々な色の四角)と、グリーンランド気温の変化(黒実線)。質量収支の変化は左側縦軸の海水準変化率(年間 mm で示す)に従い、四角は観測期間と観測誤差範囲、色の違いは代表研究グループを示す(Alley *et al.* 2010)。グリーンランド気温の変化は右側縦軸に従う。

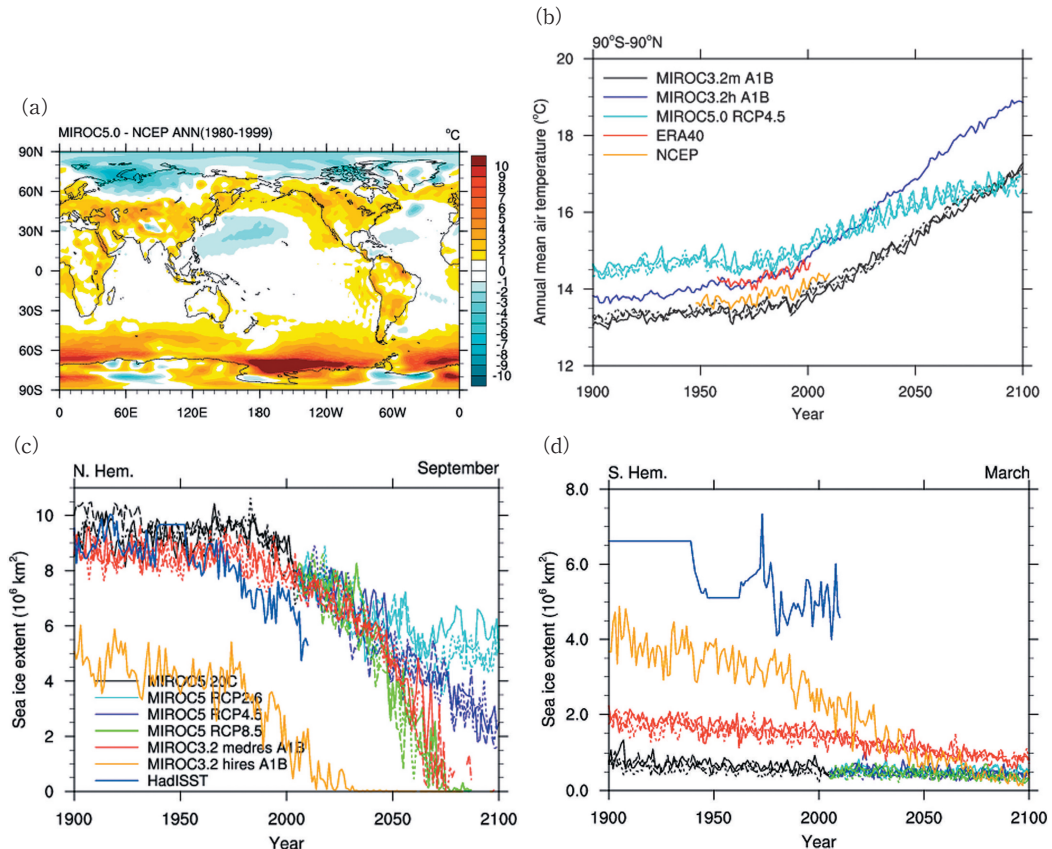


第4図 各種大気放射フィードバック効果の緯度分布: 水蒸気(赤の破線), 温度減率(緑の破線), 雲(紺の点線), アルベド(青の一点鎖線), 合計量(黒実線)。

て温暖化を極地で約20%増幅することや氷床の有無や拡大縮小が極地の気温の圧倒的増幅効果になっている



第5図 気候モデルによる両極の月平均夏の海水の密接度の再現。黒線は衛星観測 (HadISST の密接度0.15)。
上から下へ MIROC のバージョン：5版，4h版，3med版，3hi版。



第6図 MIROC5による20世紀再現実験の気温バイアス (a), 及びMIROC3.2および5による20世紀再現実験と21世紀予測実験 (速報) による各要素の変化 (b): 気温, (c): 北極海水 extent, (d): 南極海水 extent)。

ことなど、定量的に示されつつある (Ogura and Abe-Ouchi 2001; Abe-Ouchi *et al.* 2007)。いずれにしても、極域の温暖化メカニズムを理解して温暖化予測を向上させるためには、古気候も含めた観測によるモデルの検証と、気候モデル改良と数値実験が不可欠である。

参考文献

- Abe-Ouchi, A., T. Segawa and F. Saito, 2007: Climatic conditions for modelling the Northern Hemisphere ice sheets throughout the ice age cycle. *Clim. Past*, 3, 423-438.
- Alley, R. B. *et al.*, 2010: History of the Greenland Ice Sheet: paleoclimatic insights. *Quat. Sci. Rev.*, 29, 1728-1756.
- Bitz, C. M. and Q. Fu, 2008: Arctic warming aloft is data set dependent. *Nature*, 455, E3-E4.
- Boe, J., A. Hall and X. Qu, 2009: Current GCMs' unrealistic negative feedback in the Arctic. *J. Climate*, 22, 4682-4695.
- Bony, S. *et al.*, 2006: How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *J. Climate*, 19, 3445-3482.
- Davies, A., A. E. S. Kemp and J. Pike, 2009: Late Cretaceous seasonal ocean variability from the Arctic. *Nature*, 460, 254-258.
- Grant, A. N., S. Bronnimann and L. Haimberger, 2008: Recent Arctic warming vertical structure contested. *Nature*, 455, E2-E3.
- Graversen, R. G., T. Mauritsen, M. Tjernstrom, E. Kallen and G. Svensson, 2008: Arctic warming aloft is data set dependent - Reply. *Nature*, 455, E4-E5.
- Hansen, J., M. Sato, P. Kharecha, D. Beerling, R. Ber-

- ner, V. Masson-Delmotte, M. Pagani, M. Raymo, D. L. Royer and J. C. Zachos, 2008: Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? *Open Atmos. Sci. J.*, **2**, 217–231.
- Holland, P. R., H. F. J. Corr, D. G. Vaughan, A. Jenkins and P. Skvarca, 2009: Marine ice in Larsen Ice Shelf. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L11604, doi:10.1029/2009GL038162.
- IPCC, 1990: Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Report prepared for IPCC by Working Group 1 (Houghton, J. T. *et al.* (eds.)). Cambridge University Press, 365pp.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S. D. *et al.* (eds.)) Cambridge University Press, 996pp.
- Komuro, Y. and H. Hasumi, 2007: Effects of variability of sea ice transport through the Fram Strait on the intensity of the Atlantic deep circulation. *Clim. Dyn.*, **29**, 455–467.
- Komuro, Y. *et al.*, 2012: Sea-ice in twentieth-century simulations by new MIROC coupled models: A comparison between models with high resolution and with ice thickness distribution. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 213–232.
- Kug, J.-S., D.-H. Choi, F.-F. Jin, W.-T. Kwon and H.-L. Ren, 2010: Role of synoptic eddy feedback on polar climate responses to the anthropogenic forcing. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L14704, doi:10.1029/2010GL043673.
- Lunt, D. J., A. M. Haywood, G. A. Schmidt, U. Salzmann, P. J. Valdes and H. J. Dowsett, 2010: Earth system sensitivity inferred from Pliocene modelling and data. *Nature Geosci.*, **3**, 60–64.
- Masson-Delmotte, V. *et al.*, 2006: Past and future polar amplification of climate change: climate model inter-comparisons and ice-core constraints. *Clim. Dyn.*, **26**, 513–529.
- Miller, G. H. *et al.*, 2010: Temperature and precipitation history of the Arctic. *Quat. Sci. Rev.*, **29**, 1679–1715.
- Moran, K. *et al.*, 2006: The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean. *Nature*, **441**, 601–605.
- Ogura, T. and A. Abe-Ouchi, 2001: Influence of the Antarctic ice sheet on southern high latitude climate during the Cenozoic: Albedo vs topography effect. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 587–590.
- Ogura, T., A. Abe-Ouchi and H. Hasumi, 2004: Effects of sea ice dynamics on the Antarctic sea ice distribution in a coupled ocean atmosphere model. *J. Geophys. Res.*, **109**, C04025, doi:10.1029/2003JC002022.
- Ogura, T., S. Emori, M. J. Webb, Y. Tsushima, T. Yokohata, A. Abe-Ouchi and M. Kimoto, 2008: Towards understanding cloud response in atmospheric GCMs: The use of tendency diagnostics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86**, 69–79.
- O'ishi, R. and A. Abe-Ouchi, 2009: Influence of dynamic vegetation on climate change arising from increasing CO₂. *Clim. Dyn.*, **33**, 645–663.
- O'ishi, R., A. Abe-Ouchi, I. C. Prentice and S. Sitch, 2009: Vegetation dynamics and plant CO₂ responses as positive feedbacks in a greenhouse world. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L11706, doi:10.1029/2009GL038217.
- Pritchard, H. D., R. J. Arthern, D. G. Vaughan and L. A. Edwards, 2009: Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature*, **461**, 971–975.
- Rignot, E., I. Velicogna, M. R. van den Broeke, A. Monaghan and J. Lenaerts, 2011: Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L05503, doi:10.1029/2011GL046583.
- Saito, F. and A. Abe-Ouchi, 2005: Sensitivity of Greenland ice sheet simulation to the numerical procedure employed for ice-sheet dynamics. *Ann. Glaciol.*, **42**, 331–336.
- Screen, J. A. and I. Simmonds, 2010: The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, **464**, 1334–1337.
- Serreze, M. C., A. P. Barrett, J. C. Stroeve, D. N. Kindig and M. M. Holland, 2009: The emergence of surface-based Arctic amplification. *Cryosphere*, **3**, 11–19.
- Stroeve, J., M. M. Holland, W. Meier, T. Scambos and M. Serreze, 2007: Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L09501, doi:10.1029/2007GL029703.
- Suzuki, T., H. Hasumi, T. T. Sakamoto, T. Nishimura, A. Abe-Ouchi, T. Segawa, N. Okada, A. Oka and S. Emori, 2005: Projection of future sea level and its variability in a high-resolution climate model: Ocean processes and Greenland and Antarctic ice-melt contributions. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L19706, doi:10.1029/2005GL023677.
- Trenberth, K. E. and J. T. Fasullo, 2010: Simulation of present-day and twenty-first-century energy budgets of the southern oceans. *J. Climate*, **23**, 440–454.
- van den Broeke, M., J. Bamber, J. Ettema, E. Rignot, E. Schrama, W. J. van de Berg, E. van Meijgaard, I.

- Velicogna and B. Wouters, 2009: Partitioning recent Greenland mass loss. *Science*, **326**, 984-986.
- Watanabe, M. *et al.*, 2010: Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, **23**, 6312-6335.
- Yokohata, T. *et al.*, 2008: Comparison of equilibrium and transient responses to CO₂ increase in eight state-of-the-art climate models. *Tellus A*, **60**, 946-961.
- Yoshimori, M., T. Yokohata and A. Abe-Ouchi, 2009: A comparison of climate feedback strength between CO₂ doubling and LGM experiments. *J. Climate*, **22**, 3374-3395.
-