

気候感度

Part 3 : 古環境からの検証

吉 森 正 和^{*1}・横 畠 徳 太^{*2}・小 倉 知 夫^{*2}・大 石 龍 太^{*1}
 河 宮 未 知 生^{*3}・塩 竈 秀 夫^{*2}・對 馬 洋 子^{*4}・小 玉 知 央^{*3}
 野 田 暁^{*3}・千 喜 良 稔^{*3}・竹 村 俊 彦^{*5}・佐 藤 正 樹^{*1,*3}
 阿 部 彩 子^{*1,*3}・渡 部 雅 浩^{*1}・木 本 昌 秀^{*1}

1. はじめに

天気59巻1月号に掲載された解説「気候感度 Part 1」では、気候感度を制御する様々なフィードバック過程についてその概念と理解の現状を紹介した(吉森ほか 2012a)。その後、2月号に掲載された解説「気候感度 Part 2」では、観測データを活用した気候感度の不確実性低減へ向けた最近の取り組みを紹介した(吉森ほか 2012b)。本稿では、現在とは大きく異なる環境であった遠い過去も含め、地質学的証拠を活用した気候感度の検証と不確実性の低減へ向けた研究について紹介する。さらに、速いフィードバック(雲や海水の変化など)のみを考慮したチャーニー感度(CS, Part 1 参照)の推定にとどまらず、測器観測データからはほとんど情報の得られない、遅いフィードバック(植生分布や氷床の変化)も考慮した地球システム感度(ESS, Part 1 参照)の推定についても言及する。

2. 古気候から見た気候感度と地球システム感度

過去の気温は、海底・湖底堆積物中の微化石や花粉の種構成、元素濃度や同位体比などの化学情報、氷床コア中の化学情報、樹木年輪や歴史文書資料から得ら

れる情報など、間接指標と呼ばれる様々な代替データをもとに推定される。古気候は、その復元された気温変化を通して、個々のフィードバックではなくシステム全体としての応答である気候感度を推定できるという点で、巨視的な検証材料を提供する。ここではまず、人為起源の温暖化との比較の観点から、現在と同程度あるいはそれ以上に温暖であったと言われる時代に注目して、気候感度と地球システム感度の推定について概観する。その後、地球温暖化とは対照的で一見無関係に思われがちな過去の寒冷な時代、氷期の気候情報を利用した気候感度と地球システム感度の推定について述べる。

2.1 地球史上の温暖期

西暦950~1100年頃は中世温暖期(medieval warm period, 最近では中世気候異常: medieval climate anomaly)として知られており(Xoplaki *et al.* 2011)、確かに復元された北半球平均気温は過去2千年という時間スケールの中では20世紀後半には及ばないが比較的温暖な時期を示している(Mann *et al.* 2008)。しかし、この温暖期の正確なタイミングについては地域差があることが指摘されており、また、海洋や熱帯、南半球も温暖な状態であったかは明らかではない(Jansen *et al.* 2007)。この温暖期の原因についても完全には明らかにされていない。Hegerl *et al.* (2006)は、復元された過去700年に渡る北半球平均気温を束縛条件に、エネルギー収支大気モデルを用いてCSの確率分布を求めた(第1図の最上段)。このモデルでは、気候感度パラメータは内部で計算されず実験毎に一定値が設定されるが、Tett *et al.* (2007)は全球気候モデル(GCM)によるシミュレーションでは過去

*1 東京大学大気海洋研究所。

*2 国立環境研究所。

*3 海洋研究開発機構地球環境変動領域。

*4 Met Office Hadley Centre。

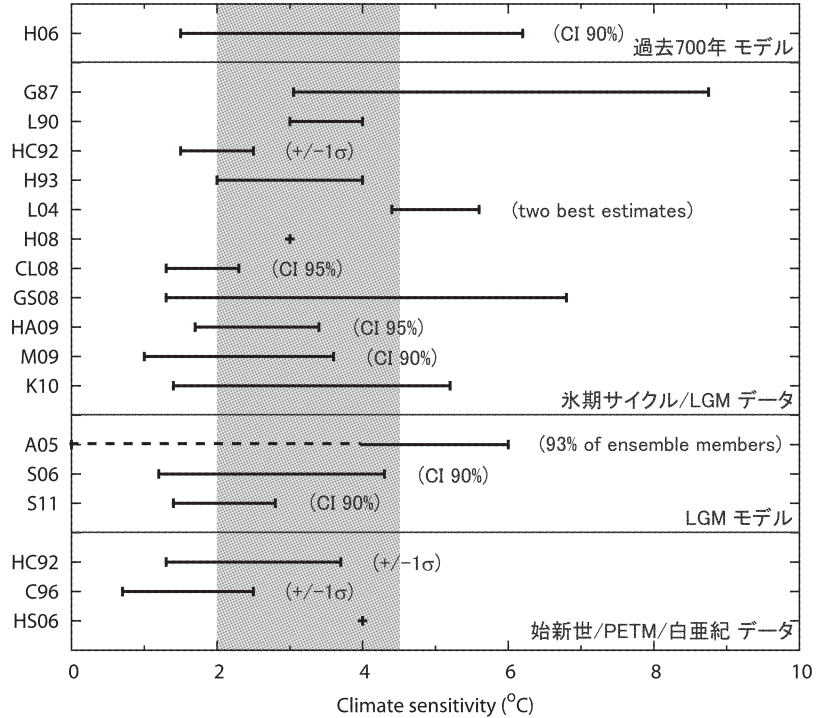
*5 九州大学応用力学研究所。

—2011年5月24日受領—

—2011年11月4日受理—

500年に渡り気候感度パラメータが変化していることから、このようなアプローチに注意を促している。なお、過去千年に関するモデル研究の詳細については、吉森・阿部 (2010) を参照されたい。

完新世の初期から中期 (約9千～6千年前) にかけては、完新世気候最適期という言葉があるほど、温暖で湿潤な気候であったと言われることがしばしばある。実際にはこれは北半球の中高緯度を主に指しており、全球的に現在よりもはるかに暖かかったという証拠はない (Crowley 1990)。マルチモデルを用いたシミュレーションでも、全球平均気温が現在とあまり変わらないことが確認されている (Braconnot *et al.* 2007)。この時期の主な境界条件の現在との違いは、地球の「軌道要素」である。ここでは便宜上、公転軌道に関するパラメータである離心率や近日点の季節に加えて地軸の傾きも含めて軌道要素と呼ぶことにする。軌道要素の変化は、日射の季節・緯度分布は変えるが総量にはほとんど影響しないため、気候感度の検証には直接利用しにくい (Hargreaves and Annan 2009b)。当時は地軸の傾きが現在よりも大きかったために、低緯度で寒冷化、高緯度で温暖化の傾向にあり、さらに北半球の夏に近日点があったために、北半球の夏に中高緯度で暖かくなる傾向にあった。これらの特徴は、低緯度も温暖化し、北半球中高緯度の冬から春にかけて特に顕著に温暖化する温室効果ガスの効果と異なるため、将来気候への単純な類型とはならない (Crowley 1990; Mitchell 1990)。しかし、サハラが草木で覆われてい



第1図 古気候を利用した気候感度の推定に関する主な研究。CI：信頼区間。吉森・阿部 (2009) を改訂。陰影はIPCC-AR4による気候感度の推定幅を示す。H06：Hegerl *et al.* (2006), G87：Gentson *et al.* (1987), L90：Lorius *et al.* (1990), HC92：Hoffert and Covey (1992), H93：Hansen *et al.* (1993), L04：Lea (2004), H08：Hansen *et al.* (2008), CL08：Chylek and Lohmann (2008a, b), GS08：Ganopolski and Schneider von Deimling (2008), HA09：Hargreaves and Annan (2009a), M09：MARGO Project Members (2009), K10：Köhler *et al.* (2010), A05：Annan *et al.* (2005), S06：Schneider von Deimling *et al.* (2006), S11：Schmittner *et al.* (2011), C96：Covey *et al.* (1996), HS06：Higgins and Schrag (2006)。G87については、L90やH08に従い、南極の気温変化量が全球平均変化量の2倍と仮定して調節した。また、L04は熱帯のみの気候感度を対象にしているため注意が必要である。A05では低感度側は規定されていないため、破線で示した。CL08の結果はGS08とHA09により否定されている。

た状況 (いわゆる「緑のサハラ」) が再現できるかどうかなど、モデルの植生分布の再現性を評価する上で重要視されている時代である (Chikira *et al.* 2006; Ohgaito and Abe-Ouchi 2007)。完新世と同様の理由で、最終間氷期 (約13万～11万6千年前) も、気候感度の検証にそのまま利用するのは難しい (Crowley 1990)。一方、Part 1で議論した極域の気温変化増幅メカニズムの理解には両時代とも重要である (Oishi and Abe-Ouchi 2011)。

鮮新世中期 (約330万～300万年前) は、大陸配置が現在とあまり変わらない過去において、現在よりも明

らかに温暖な時期として知られている (Haywood *et al.* 2009). 全球気温は 2~3°C 高く、海水準も 5~40 m 高かったと推定されている (Jansen *et al.* 2007; Raymo *et al.* 2009). この時代の氷床コアは残っていないため二酸化炭素 (CO₂) 濃度の推定には幅があるが、約 360~400 ppm と考えられている。現在と

異なる気候の要因としては、CO₂の他に氷床や植生分布の変化も考えられ、これらを放射強制力の一部と見なすことによって CS が求められ、フィードバックと考えることによって ESS が求められる (第 1 表)。しかし、GCM によるシミュレーションは復元データのいくつかの重要な特徴を捉えておらず (Haywood and Valdes 2004; Dowsett and Robinson 2009; Dowsett *et al.* 2009; Lunt *et al.* 2010), この時期の気候形成の因果関係は必ずしも明らかにされていない。したがって、CS や ESS の推定には、まずモデル・データ間のギャップを埋め、気温や氷床の変化の原因を確立することが課題である。新生代を意識した GCM による感度実験でも氷床のアルベドと高度の変化が周囲に大きな気候応答をもたらすことが示されており (Ogura and Abe-Ouchi 2001), このことから氷床変動の理解が重要であることがわかる。

白亜紀 (約 1 億 4550 万年~6550 万年前) から始新世 (約 5580 万年~3390 万年前) にかけては現在より著しく温暖な時代として知られており (Barron 1983; Zachos *et al.* 2001), CS の推定も行われた (第 1 図)。しかし、CO₂濃度の不確実性に加えて、最近復元された熱帯の温度は 80~90 年代の研究による推定値より高めの値を示しているため (Pearson *et al.* 2001; Forster *et al.* 2007; Bornemann *et al.* 2008), これらの値の解釈には注意が必要である。また、大陸配置や地形が現在と大きく異なるため、これらの効果も定量的に吟味する必要がある。CO₂濃度の不確実性の大きなこれらの時代は、感度の検証というよりも、極域の増幅メカニズムの理解も含め、熱帯に比べて非常に大きな温暖化を示す高緯度 (Jenkyns *et al.* 2004; Pucéat *et al.* 2007) のモデルによる再現性の検証がまず課題である。

第 1 表 古気候を利用した地球システム感度の推定に関する主な研究 (CS: チャーニー感度, ESS: 地球システム感度).

研究	時代	地球システム感度
Covey <i>et al.</i> (1996)	白亜紀	ESS=3.8±2.0°C
Royer <i>et al.</i> (2007)	過去 4 億 2000 万年	ESS/CS>1.5
Hansen <i>et al.</i> (2008)	過去 42 万 5 千年	ESS/CS≈2
Pagani <i>et al.</i> (2010)	鮮新世初期・中期	ESS/CS≫1
Lunt <i>et al.</i> (2010)	鮮新世中期	ESS/CS=1.3~1.5
Park and Royer (2011)	過去 4 億 2000 万年	ESS/CS≥2

暁新世と始新世の境界である約 5500 万年前には地質学的時間スケールにおいて急激な温暖期があった。この温暖期は暁新世始新世境界温暖極大期 (PETM) と呼ばれ、1 万年間に全球気温が約 5°C 上昇し、それ以前より温暖な期間が約 10 万年間続いたことが酸素同位体比などから知られている (Higgins and Schrag 2006)。PETM は炭素同位体比の減少によっても特徴づけられるが、これを説明するためにメタン・ハイドレートまたは有機炭素の放出が仮説として挙げられている。放出源によって CO₂濃度の見積もりが大きく異なってくるため、このイベントを利用した CS の推定 (第 1 図) もその影響を受ける (Zachos *et al.* 2005; Pagani *et al.* 2006)。PETM についても、極域増幅メカニズムの解明も含め、北極域の異常な温暖化 (Sluijs *et al.* 2006) のモデルによる再現性の検証が重要である。

2.2 氷期サイクル

ここまでは、温暖化問題のアナロジーという視点から地球史上の温暖期に注目してきたが、過去の寒冷な時期についても Part 1 で解説した気候フィードバックの概念はそのまま適用できる。実際、氷期の気候を利用して CS の推定を試みた研究は多数ある (第 1 図)。260 万年前頃に始まった第四紀の氷期・間氷期サイクルは、主に約 4 万 1 千年周期の変動を繰り返した後、100 万年前頃からは主に約 10 万年周期で変動を繰り返している。少なくともこの 10 万年周期においては、温室効果ガス、氷床量、気温などが連動して変化している (e.g., Kawamura *et al.* 2007)。この氷床変動は主に軌道要素の変化により駆動されていることがこれまでの研究により示されている (e.g., Abe-Ouchi *et al.* 2007)。しかし、速いフィードバックのみを含む CS を考える場合には、軌道要素とともに、

温室効果ガス、氷床、植生分布の変化も放射強制要素とみなされる。したがって、軌道要素と温室効果ガスのみを放射強制力と考えてCSを推定するのは誤りである。一方、ESSを考える場合には（第1表）、氷床と植生分布は強制要素ではなく、（遅い）フィードバックである。このとき、軌道要素の放射強制力は全球・年平均するとほぼゼロであること、氷床は履歴の影響を受け多重平衡解を持つ可能性があることから、ESSの推定は必ずしも容易ではない。たとえば、実際には北半球高緯度における夏の日射量の減少によって引き起こされた氷床の拡大に対して、全球・年平均の日射量変化を入力と考えたり、CO₂変化のみを入力として考えてしまうと、感度を大幅に過大評価してしまう。したがって、感度の推定には氷期サイクルの詳細なメカニズムの解明が必要であり、現在、CO₂の変動メカニズムや数千年スケールの気候変動が氷期サイクルに与える影響なども含め活発に研究が行われている。

氷期サイクルの中でも、特に約2万1千年前頃の最終氷期最盛期（LGM）の気候はよく参照される。包括的なレビューは吉森・阿部（2009）に譲るが、ここでは最新の研究成果も含め全体像を整理する。氷期を利用したCSの推定には主に3つの方法がある。1つ目の方法は、間接指標から過去の気温を復元し、当時の放射強制力から気候感度パラメータを求め、このパラメータが不変であるという仮定のもと、CO₂倍増時の放射強制力からCSを求める。海底コアや南極氷床コアの時系列データを利用した推定（Lea 2004；Köhler *et al.* 2010；Masson-Delmotte *et al.* 2010）や、熱帯全域にわたるLGMの海面水温変化を利用した推定（MARGO Project Members 2009）がある。時系列を利用する方法では、間接指標が広域ではなく地域的な温度変化を代表しているにすぎない可能性があるという点で不確実性が残る。2つ目の方法は、CO₂倍増実験によりCSが既知のモデルでLGMシミュレーションを行い、復元データとの整合性からCSの妥当性を検証する。この方法は、将来予測に使用される多くの気候モデルについて古くから行われてきたが、特に最近ではLGMにおける南極の気温や熱帯の海面水温と陸上気温についてモデルの評価が行われている（Masson-Delmotte *et al.* 2006；Braconnot *et al.* 2007；Jansen *et al.* 2007；Otto-Bliesner *et al.* 2009）。また、LGMにおけるこれらの地域の温度変化がCSと密接に関係している可能性は物理摂動アン

サンプル実験により支持されている（Hargreaves *et al.* 2007）。一方で、気候モデルの境界条件として与えられる南極氷床に関する不確実性や検証に使用される海面水温の間接指標間の差異を狭めることが今後の課題である。3つ目の方法は、物理摂動アンサンプル実験において復元データからパラメータの分布を推定した後、CO₂倍増実験を行ってCSの確率分布を求める。この方法は、手法そのものが新しい上、多くの計算機資源を必要とするため、あまり多くの研究はまだ行われていない（Annan *et al.* 2005；Schneider von Deimling *et al.* 2006；Schmittner *et al.* 2011）。しかし、測器記録や過去千年の気候変動からでは難しいCSの高感度側の確率分布の推定幅の低減に有効であることが指摘されている（Annan and Hargreaves 2006）。上述の研究では、過去と将来において気温変化を決めるプロセスに関連性がなければ感度の検証に結びつかないが、最近では個々のフィードバックにまで踏み込んで、マルチモデル・マルチパラメータに渡って、この関連性についての定量的な評価が行われている（Crucifix 2006；Yoshimori *et al.* 2009；Yoshimori *et al.* 2011）。その結果、制限はあるものの、CSの検証として氷期気候の利用価値が高いことも確認されている。

第1表や第1図に代表されるように、古気候研究ではモデルと観測を上手に利用しながら、CSやESSの推定が行われてきた。気候変動に関する政府間パネルの第4次評価報告書（IPCC-AR4）の将来予測に用いられたGCMのCSは2.1～4.4°Cの範囲であるが（IPCC 2007 Table 8.2）、古気候から推定された気候感度と概ね整合的である。しかし、個々の研究にはそれぞれ異なった不確実性や問題点があるため、単純に多数決でこれらの結果を評価することはできないことに留意する必要がある。

3. まとめと今後の展望

本稿では、現在と異なった気候条件下での気候感度の検証という視点で古気候が果たす役割について紹介した。将来予測に使用されるモデルは古気候データにより全球規模、地域規模で検証されているが、過去約1億年に渡り少なくともモデルの気候感度が復元データと不整合であるということを示す積極的な証拠はなく、むしろ整合的である。モデルのみを使った推定ではなく、またモデルの構築や調整に使用される測器観測データとは独立な検証材料を提供するという点で、

今後も古気候が感度の研究において果たす役割は大きいと考えられる。同時に、理論や測器観測データに基づくさらなるモデルの改良、モデルを走らせるための古環境境界条件（海陸分布、氷床分布、温室効果ガスなど）やモデルを検証するための古気候データの信頼性の向上が必要であり、気候感度の不確実性の低減のためにはコミュニティ間の連携が非常に重要である。

謝辞

本稿の執筆に際し、環境省の地球環境総合推進費(S-5)と文部科学省の21世紀革新プログラムの支援を受けました。建設的なコメントをいただいた査読者の方に感謝いたします。

略語一覧

AR4 : The Fourth Assessment Report 第4次評価報告書
 CS : Charney Sensitivity チャーニー感度
 ESS : Earth System Sensitivity 地球システム感度
 GCM : Global Climate Model 全球気候モデル
 IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
 LGM : Last Glacial Maximum 最終氷期最盛期
 PETM : Palaeocene-Eocene Thermal Maximum 暁新世始新世界境界温暖極大期

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.
- Annan, J.D. and J.C. Hargreaves, 2006: Using multiple observationally-based constraints to estimate climate sensitivity. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L06704, doi:10.1029/2005GL025259.
- Annan, J.D., J.C. Hargreaves, R. Ohgaito, A. Abe-Ouchi and S. Emori, 2005: Efficiently constraining climate sensitivity with ensembles of paleoclimate simulations. *SOLA*, **1**, 181-184.
- Barron, E.J., 1983: A warm, equable Cretaceous: The nature of the problem. *Earth-Sci. Rev.*, **19**, 305-338.
- Bornemann, A., R.D. Norris, O. Friedrich, B. Beckmann, S. Schouten, J.S.S. Damsté, J. Vogel, P. Hofmann and T. Wagner, 2008: Isotopic evidence for glaciation during the Cretaceous supergreenhouse. *Science*, **319**, 189-192.
- Braconnot, P. *et al.*, 2007: Results of PMIP2 coupled simulations of the Mid-Holocene and Last Glacial Maximum —Part 1: experiments and large-scale features. *Clim. Past*, **3**, 261-277.
- Chikira, M., A. Abe-Ouchi and A. Sumi, 2006: General circulation model study on the green Sahara during the mid-Holocene: An impact of convection originating above boundary layer. *J. Geophys. Res.*, **111**, D21103, doi:10.1029/2005JD006398.
- Chylek, P. and U. Lohmann, 2008a: Aerosol radiative forcing and climate sensitivity deduced from the Last Glacial Maximum to Holocene transition. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L04804, doi:10.1029/2007GL032759.
- Chylek, P. and U. Lohmann, 2008b: Reply to comment by Andrey Ganopolski and Thomas Schneider von Deimling on “Aerosol radiative forcing and climate sensitivity deduced from the Last Glacial Maximum to Holocene transition”. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L23704, doi:10.1029/2008GL034308.
- Covey, C., L.C. Sloan and M.I. Hoffert, 1996: Paleoclimate data constraints on climate sensitivity: The paleocalibration method. *Clim. Change*, **32**, 165-184.
- Crowley, T.J., 1990: Are there any satisfactory geologic analogs for a future greenhouse warming? *J. Climate*, **3**, 1282-1292.
- Crucifix, M., 2006: Does the Last Glacial Maximum constrain climate sensitivity? *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L18701, doi:10.1029/2006GL027137.
- Dowsett, H.J. and M.M. Robinson, 2009: Mid-Pliocene equatorial Pacific sea surface temperature reconstruction: A multi-proxy perspective. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, **367**, 109-125.
- Dowsett, H.J., M.A. Chandler and M.M. Robinson, 2009: Surface temperatures of the Mid-Pliocene North Atlantic Ocean: Implications for future climate. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, **367**, 69-84.
- Forster, A., S. Schouten, M. Baas and J.S.S. Damsté, 2007: Mid-Cretaceous (Albian-Santonian) sea surface temperature record of the tropical Atlantic Ocean. *Geology*, **35**, 919-922.
- Ganopolski, A. and T. Schneider von Deimling, 2008: Comment on “Aerosol radiative forcing and climate sensitivity deduced from the Last Glacial Maximum to Holocene transition” by Petr Chylek and Ulrike Lohmann. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L23703, doi:10.1029/2008GL033888.
- Genthon, G., J.M. Barnola, D. Raynaud, C. Lorius, J. Jouzel, N.I. Barkov, Y.S. Korotkevich and V.M. Kotlyakov, 1987: Vostok ice core: Climatic response to CO₂ and orbital forcing changes over the last

- climatic cycle. *Nature*, **329**, 414-418.
- Hansen, J., A. Lacis, R. Ruedy, M. Sato and H. Wilson 1993: How sensitive is the world's climate? *Res. Explor.*, **9**, 142-158.
- Hansen, J., M. Sato, P. Kharecha, D. Beerling, R. Berner, 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.
- Hargreaves, J.C. and J.D. Annan, 2009a: Comment on "Aerosol radiative forcing and climate sensitivity deduced from the Last Glacial Maximum to Holocene transition", by P. Chylek and U. Lohmann, *Geophys. Res. Lett.*, 2008. *Clim. Past*, **5**, 143-145.
- Hargreaves, J.C. and J.D. Annan, 2009b: On the importance of paleoclimate modelling for improving predictions of future climate change. *Clim. Past*, **5**, 803-814.
- Hargreaves, J.C., A. Abe-Ouchi and J.D. Annan, 2007: Linking glacial and future climates through an ensemble of GCM simulations. *Clim. Past*, **3**, 77-87.
- Haywood, A.M. and P.J. Valdes, 2004: Modelling Pliocene warmth: Contribution of atmosphere, oceans and cryosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **218**, 363-377.
- Haywood, A.M., H.J. Dowsett, P.J. Valdes, D.J. Lunt, J. E. Francis and B.W. Sellwood, 2009: Introduction. Pliocene climate, processes and problems. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, **367**, 3-17.
- Hegerl, G.C., T.J. Crowley, W.T. Hyde and D.J. Frame, 2006: Climate sensitivity constrained by temperature reconstructions over the past seven centuries. *Nature*, **440**, 1029-1032.
- Higgins, J.A. and D.P. Schrag, 2006: Beyond methane: Towards a theory for the Paleocene-Eocene Thermal Maximum. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **245**, 523-537.
- Hoffert, M.I. and C. Covey, 1992: Deriving global climate sensitivity from palaeoclimate reconstructions. *Nature*, **360**, 573-576.
- Jansen, E., J. Overpeck, K.R. Briffa, J.-C. Duplessy, F. Joos, V. Masson-Delmotte, D. Olago, B. Otto-Bliesner, W.R. Peltier, S. Rahmstorf, R. Ramesh, D. Raynaud, D. Rind, O. Solomina, R. Villalba and D. Zhang, 2007: Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, 433-497.
- Jenkyns, H.C., A. Forster, S. Schouten and J. S. S. Damsté, 2004: High temperatures in the Late Cretaceous Arctic Ocean. *Nature*, **432**, 888-892.
- Kawamura, K., F. Parrenin, L. Lisiecki, R. Uemura, F. Vimeux, J.P. Severinghaus, M.A. Hutterli, T. Nakazawa, S. Aoki, J. Jouzel, M.E. Raymo, K. Matsumoto, H. Nakata, H. Motoyama, S. Fujita, K. Goto-Azuma, Y. Fujii and O. Watanabe, 2007: Northern Hemisphere forcing of climatic cycles in Antarctica over the past 360,000 years. *Nature*, **448**, 912-916.
- Köhler, P., R. Bintanja, H. Fischer, F. Joos, R. Knutti, G. Lohmann and V. Masson-Delmotte, 2010: What caused Earth's temperature variations during the last 800,000 years? Data-based evidence on radiative forcing and constraints on climate sensitivity. *Quat. Sci. Rev.*, **29**, 129-145.
- Lea, D.W., 2004: The 100 000-yr cycle in tropical SST, greenhouse forcing, and climate sensitivity. *J. Climate*, **17**, 2170-2179.
- Lorius, C., J. Jouzel, D. Raynaud, J. Hansen and H. Le Treut, 1990: The ice-core record: Climate sensitivity and future greenhouse warming. *Nature*, **347**, 139-145.
- 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.
- Mann, M.E., Z. Zhang, M.K. Hughes, R.S. Bradley, S.K. Miller, S. Rutherford and F. Ni, 2008: Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **105**, 13252-13257.
- MARGO Project Members, 2009: Constraints on the magnitude and patterns of ocean cooling at the Last Glacial Maximum. *Nature Geosci.*, **2**, 127-132.
- 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.
- Masson-Delmotte, V. *et al.*, 2010: EPICA Dome C record of glacial and interglacial intensities. *Quat. Sci. Rev.*, **29**, 113-128.
- Mitchell, J.F.B., 1990: Greenhouse warming: Is the mid-Holocene a good analogue? *J. Climate*, **3**, 1177-1192.
- 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.
- Ohgaito, R. and A. Abe-Ouchi, 2007: The role of ocean thermodynamics and dynamics in Asian summer monsoon changes during the mid-Holocene. *Clim.*

- Dyn., 29, 39–50.
- O'ishi, R. and A. Abe-Ouchi, 2011: Polar amplification in the mid-Holocene derived from dynamical vegetation change with a GCM. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L14702, doi:10.1029/2011GL048001.
- Otto-Bliesner, B.L., R. Schneider, E.C. Brady, M. Kucera, A. Abe-Ouchi, E. Bard, P. Braconnot, M. Crucifix, C. D. Hewitt, M. Kageyama, O. Marti, A. Paul, A. Rosell-Melé, C. Waelbroeck, S.L. Weber, M. Weinelt and Y. Yu, 2009: A comparison of PMIP2 model simulations and the MARGO proxy reconstruction for tropical sea surface temperatures at last glacial maximum. *Clim. Dyn.* **32**, 799–815.
- Pagani, M., K. Caldeira, D. Archer and J.C. Zachos, 2006: An ancient carbon mystery. *Science*, **314**, 1556–1557.
- Pagani, M., Z. Liu, J. LaRiviere and A.C. Ravelo, 2010: High Earth-system climate sensitivity determined from Pliocene carbon dioxide concentrations. *Nature Geosci.*, **3**, 27–30.
- Park, J. and D.L. Royer, 2011: Geologic constraints on the glacial amplification of Phanerozoic climate sensitivity. *Amer. J. Sci.*, **311**, 1–26.
- Pearson, P.N., P.W. Ditchfield, J. Singano, K.G. Harcourt-Brown, C.J. Nicholas, R.K. Olsson, N.J. Shackleton and M.A. Hall, 2001: Warm tropical sea surface temperatures in the Late Cretaceous and Eocene epochs. *Nature*, **413**, 481–487.
- Pucéat, E., C. Lécuyer, Y. Donnadieu, P. Naveau, H. Cappetta, G. Ramstein, B.T. Huber and J. Kriwet, 2007: Fish tooth $\delta^{18}\text{O}$ revising Late Cretaceous meridional upper ocean water temperature gradients. *Geology*, **35**, 107–110.
- Raymo, M.E., P. Hearty, R. De Conto, M. O'Leary, H. J. Dowsett, M.M. Robinson and J.X. Mitrovica, 2009: PLIOMAX: Pliocene maximum sea level project. *PAGES News*, **17**, 58–59.
- Royer, D.L., R.A. Berner and J. Park, 2007: Climate sensitivity constrained by CO_2 concentrations over the past 420 million years. *Nature*, **446**, 530–532.
- Schmittner, A., N.M. Urban, J.D. Shakun, N.M. Mahowald, P.U. Clark, P.J. Bartlein, A.C. Mix and A. Rosell-Melé, 2011: Climate sensitivity estimated from temperature reconstructions of the Last Glacial Maximum. *Science*, **334**, 1385–1388.
- Schneider von Deimling, T., H. Held, A. Ganopolski and S. Rahmstorf, 2006: Climate sensitivity estimated from ensemble simulations of glacial climate. *Clim. Dyn.*, **27**, 149–163.
- Sluijs, A., S. Schouten, M. Pagani, M. Woltering, H. Brinkhuis, J.S.S. Damsté, G.R. Dickens, M. Huber, G.-J. Reichart, R. Stein, J. Matthiessen, L.J. Lourens, N. Pedentchouk, J. Backman, K. Moran and the Expedition 302 Scientists, 2006: Subtropical Arctic Ocean temperatures during the Palaeocene/Eocene thermal maximum. *Nature*, **441**, 610–613.
- Tett, S.F.B., R. Betts, T.J. Crowley, J. Gregory, T.C. Johns, A. Jones, T.J. Osborn, E. Öström, D.L. Roberts and M.J. Woodage, 2007: The impact of natural and anthropogenic forcings on climate and hydrology since 1550. *Clim. Dyn.*, **28**, 3–34.
- Xoplaki, E., D. Fleitmann and H. F. Diaz, 2011: Editorial: Medieval climate anomaly. *PAGES News*, **19**, 4.
- 吉森正和, 阿部彩子, 2009: 気候感度の制約において第四紀研究の果たす役割と可能性について. *第四紀研究*, **48**, 143–162.
- 吉森正和, 阿部彩子, 2010: 気候システムの統一的理解と将来予測へ向けた古気候モデリング. *月刊海洋*, **42**, 142–151.
- Yoshimori, M., T. Yokohata and A. Abe-Ouchi, 2009: A comparison of climate feedback strength between CO_2 doubling and LGM experiments. *J. Climate*, **22**, 3374–3395.
- Yoshimori, M., J. C. Hargreaves, J. D. Annan, T. Yokohata and A. Abe-Ouchi, 2011: Dependency of feedbacks on forcing and climate state in physics parameter ensembles. *J. Climate*, **24**, 6440–6455.
- 吉森正和ほか, 2012a: 気候感度 Part 1 : 気候フィードバックの概念と理解の現状. *天気*, **59**, 5–22.
- 吉森正和ほか, 2012b: 気候感度 Part 2 : 不確実性の低減への努力. *天気*, **59**, 91–109.
- Zachos, J., M. Pagani, L. Sloan, E. Thomas and K. Billups, 2001: Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, **292**, 686–693.
- Zachos, J.C., U. Röhl, S.A. Schellenberg, A. Sluijs, D.A. Hodell, D.C. Kelly, E. Thomas, M. Nicolo, I. Raffi, L. J. Lourens, H. McCarren and D. Kroon, 2005: Rapid acidification of the ocean during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Science*, **308**, 1611–1615.

Climate Sensitivity
Part 3: Verification from the Past Environment

Masakazu YOSHIMORI*¹, Tokuta YOKOHATA*²,
Tomoo OGURA*², Ryouta O'ISHI*³, Michio KAWAMIYA*⁴,
Hideo SHIOGAMA*², Yoko TSUSHIMA*⁵, Chihiro KODAMA*⁴,
Akira T. NODA*⁴, Minoru CHIKIRA*⁴, Toshihiko TAKEMURA*⁶,
Masaki SATOH*^{3,4}, Ayako ABE-OUCHI*^{3,4},
Masahiro WATANABE*³ and Masahide KIMOTO*³

*¹ (Corresponding author) Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo,
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8568, Japan.

*² National Institute for Environmental Studies.

*³ Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo.

*⁴ Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technol-
ogy.

*⁵ Met Office Hadley Centre.

*⁶ Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University.

(Received 24 May 2011; Accepted 4 November 2011)
