

古気候シミュレーションを活用した気候感度および 気候フィードバックのメカニズムに関する研究

—2020年度日本気象学会賞受賞記念講演—

吉森正和*

1. はじめに

この度は栄誉ある日本気象学会賞を頂き、誠に光栄に存じます。私のような者が頂いて良いものかと戸惑いを感じますが、今後への期待と責務を負う覚悟で拝受したいと考えます。日本気象学会の会員の皆様の中には、気候感度や気候フィードバック、古気候研究にあまり触れる機会のない方が多いと想像しており、研究内容を評価いただいたことは正直驚きでしたが、同時に新たな挑戦を勇気づけ、大変意義深いことと感じます。推薦者はもちろん、選考・承認いただいた方々のご理解と寛容性に感謝するとともに、今後、多くの方とともにこの分野を発展させることができれば望外の喜びです。

本稿の前半はどちらかというと個人的な回想録になりますが、体験や周囲の方々から頂いた言葉などを共有することによって、少しでも研究者を目指す若い方の役に立つがあれば幸いです。後半ではもう少し学術的な側面を強調して受賞の対象となった研究の背景や意義を共有することによって、これまでの研究の流れと今後の展望に関する議論へ貢献できれば幸いです。特に、選定理由として注目いただいた古気候シミュレーションを活用した気候感度に関する研究、北極域温暖化増幅に寄与する気候フィードバック過程とそのメカニズムに関する研究について詳しく述べたいと思います。なお、選定理由として評価いただいた論文全てを無理に引用せず、コアとなるものだけを中心

にお話しさせていただきます。

2. 研究のはじまりと変遷

2.1 工学から理学の世界へ

学部4年から大学院修士課程まで、早稲田大学の工学系の研究室で物理探査、特に電磁探査法を研究していました。もともと環境問題を研究したかったのですが、化学的なアプローチよりも物理的なアプローチを好み、結局できるだけ物理に触れる研究室を選びました。研究は室内実験を中心に行い、フィールド調査に参加する機会もありました。探査手法を研究する中で、地球を知る方法だけでなく地球そのものを知りたいという理学的な欲求、当時の環境問題への関心、数値実験に強い興味があったことなどが重なり、遠回りは承知で地球環境問題を数値的に研究する道へ進むことに決めました。

過去の短期留学経験が楽しかった影響も大きいと思いますが、地球のことを何も知らない学生を受け入れてくれるの、これまでの業績よりもこれから可能性を見てくれる海外の大学院しかない、という勝手な思い込みから留学することにしました。大使館内の図書館に籠って情報を集めることが当たり前の時代ではありましたかが、最終的に3つの国の大連立の大学院から合格をいただくことができました。主に指導教員（候補）とのやりとり、経済的利点、国立の気候センター（CCCma）が構内にあることから、全く知らない街、カナダ、ブリティッシュ・コロンビア州の州都にあるヴィクトリア大学の博士課程に進学することにしました。早大の先生からいただいた「言語力で劣る留学生を受け入れてくれるのだから現地の学生より研究で優らないと意味がない」という激励を胸に刻み、海を渡りました。

* 東京大学大気海洋研究所。

masakazu@aori.u-tokyo.ac.jp

—2021年2月10日受領—

—2021年8月31日受理—

© 2022 日本気象学会

最初は学部生に混じっての「流体力学」の受講からです。運良く、海洋内部波の Garrett-Munk spectrum などで知られる Christopher Garrett 先生から理学の面白さや考え方を教わることができました。初年度は大半の時間を授業に費やし、周りに釣られて笑うしかできないほど英語もたどたどしく、発表しても「褒められる=まだ対等に見られていない」状態でしたが、徐々に「質問される=相手にされる」ようになり、研究も進んでいきました。指導教員はもともと海洋物理学が専門の Andrew Weaver 先生で、とにかく居心地の良い大学、そして研究室でした。研究テーマは欲張りな私にちょうど良い、大気一海洋（気候）モデルと氷床モデルを結合させて第四紀の気候変動の謎を解明するというものでした。研究室には世界中から多勢の学生やポスドクが集まっており相談する人もたくさんいました。普段の先生とのやりとりはもっぱら昼休みのコンピュータ・ゲームだけでしたが、研究に行き詰ったときには常にポジティブに、「予想と違う結果が出たときこそ喜べ」というアドバイスを受けました。工学では実用的な結果が大切にされますが、結果に裏切られて理解を進展させるという理学的な発想に触れた瞬間だったように思います。

2.2 古気候モデリングの開始

古気候モデリングは、多くの場合、現在や将来の気候シミュレーションと同一のモデルを用いて、過去の気候変動の原因や仕組みに関する仮説の検証やその解明のために行います。また、現在と異なる条件下のシミュレーション結果を古環境復元と照らし合わせることによって、モデルの信頼性を評価し、適用範囲を検証することができます。

博士課程で最初に設定した研究テーマは、数千年スケールのいわゆる氷期の「急激な気候変動」と呼ばれるものでした。しかし途中で、まずは氷期一間氷期の遷移がきちんと再現できなくてはと考え、結局そちらの方が博士論文のテーマとなりました。氷床モデルについては、開発者であり世界第一線の氷河学者でもあるブリティッシュ・コロンビア大学の Garry Clarke 先生と Shawn Marshall 博士に相談させていただいたものの、物理的な距離もあり、かなりの部分を独学でなんとか凌いだという感が否めません。気候モデルと氷床モデルの結合作業は、コードを書いて走らせては（翌日には）止まりの連続でしたが、最終的には3次元海洋大循環モデル（OGCM）を含むおそらく世界最初の気候一氷床結合モデルを完成させることができまし

た。地球の軌道要素と大気中の温室効果ガス濃度を別々に変化させる実験によって、夏に大きな昇温をもたらす軌道要素の変化が駆動源となり、冬に大きな昇温をもたらす温室効果ガスが2次的なフィードバックとして寄与して氷期から間氷期へ遷移することを示しました (Yoshimori *et al.* 2001; Weaver *et al.* 2001)。一方で、使用していた大気モデル（EMBM）は海洋モデルの境界条件としては適切なものでしたが、大気との相互作用が重要な氷床モデルにとっては簡易すぎると感じ、後半では研究室と同じ建物に入っていた CCCma が開発した大気大循環モデル（AGCM）を使わせてもらいました。重力波パラメタリゼーションで知られる Norman McFarlane 博士に直接コードを説明していただくという贅沢な環境であったことは後に実感しました。EMBM-OGCM から計算された海面水温 (SST) を AGCM の境界条件として用い、また気温変化に応じて植生分布を変化させる実験によって、SST の低下とツンドラの拡大が前提条件となって間氷期から氷期へ遷移することを示しました (Yoshimori *et al.* 2002)。結局、氷期の急激な気候変動については、当時ポスドクの Andreas Schmittner 博士がリードを取り、私が結合させた気候一氷床モデルを使用して Science 誌に論文を出版することができました (Schmittner *et al.* 2002)。「これからは気候一氷床結合モデルの時代が来る」と言われつつ、その需要をあまり認識しないまま、私自身は AGCM、大気海洋大循環モデル（AOGCM）へと軸足を移していました。

とともに環境問題に興味があった欲張りな私は、Andrew が IPCC の執筆に深く携わっていたこともあり、もう少し最近の時代に研究対象を広げたくなっていました。そんな中、かねてからエレガントな研究スタイルに惹かれていたスイスの首都にあるベルン大学の Thomas Stocker 先生の下で、AOGCM を使った最近500年間の気候変動というテーマでポスドク研究を行う機会があり、これに飛びつきました。北米中心の世界観だけではなく、ヨーロッパ的な視点に興味があったことも後押ししました。しかし、ここでの研究はチャレンジの連続でした。プロジェクトで利用を予定していた NCAR の当時の AOGCM が安定して長期積分できなかったこと、モデル開発者が遠くにいるため情報収集が極めて難しかったこと、最近500年間はイベント的な火山噴火を除いて外部強制が弱く、これまで対象としてきた時代と比べて内部変動が卓越しており、長期積分のアンサンブル実験なしでは代替指標

との比較が難しいことなどが挙げられます。開始当初の生産性は極めて低かったものの、モデル診断ツールの作成や解析プログラムの蓄積、統計学的な検証を強く意識できたことはその後の貴重な資産となりました。一方で、とにかく論文を書かなくてはダメだということを強く認識した時代でもありました。Thomas の洞察力やセンスの良さには遠く及びませんが、複雑な結果を簡便な図やダイアグラムに集約して理解し提示することの重要性、毎回毎回の発表の大切さを特に学んだように思います。

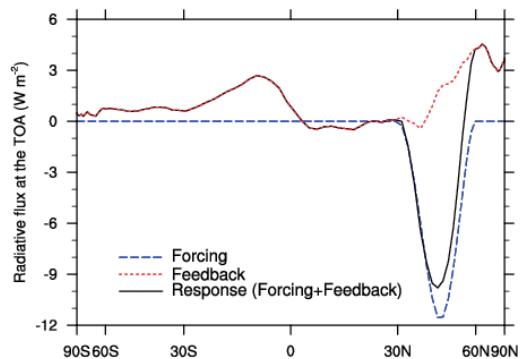
2.3 放射フィードバック解析の開始

ベルン大学在職中のある日、突然アメリカから電子メールでポスドク研究員のお誘いをいただきました。送り主は、アメリカ、ニュージャージー州立ラトガーズ大学の Anthony Broccoli 先生でした。彼は1999年にカナダで開催された PMIP のワークショップで、議論におけるリーダーシップという点で私が特に感銘を受けた研究者の1人でしたが、実は私の博士論文の学外審査員を引き受けてくださった方です。真鍋淑郎先生との複数の共著論文で黎明期から成長期の古気候モーリングをリードされてきたことでも知られています。

気候システムは大気、海洋、海水、陸面といったサブシステムから構成され、サブシステム間の相互作用がその状態を決めるのに重要なことはよく知られています。気候システムから見て外的な放射強制に対する気温の応答には、気温変化がアルベドや水蒸気量の変化などを介して地球の放射収支を変え、それがまた気温変化に再帰する放射（気候）フィードバック過程が重要です。ラトガーズ大学に着任すると私の研究テーマはさらに現在に近づき、観測された気候変動の要因分析に利用することを目的として、20世紀の様々な放射強制因子に対する気候応答を特徴付けることでした。具体的には、海洋混合層モデルを結合した AGCM を用いて、二酸化炭素、太陽放射、対流圏の硫酸・黒色炭素・有機炭素の各種エアロゾル、成層圏の火山性エアロゾル、対流圈オゾンを別々に変化させてその平衡応答を調べました。この時、たまたま同じ研究室で CO_2 に対する放射フィードバックを解析している学生がおり、自然な流れでその手法を他の強制因子にも適用することを考えました。Yoshimori and Broccoli (2008) では、黒色炭素の単位放射強制力あたりの全球平均気温変化は二酸化炭素に比べて小さく、それが負の雲フィードバックによること、またその値は黒色炭素の鉛直分布に依存することなどを明らかにしまし

た。また、黒色炭素は温暖化を引き起こす一方で全球平均降水量を減少させること、その理由は大気のエネルギー収支から明瞭に説明されることなどを示しました。今から思うと、もっと先行研究を丁寧に読んで実験・解析していれば、強制とフィードバック、速い調節と遅い応答の区別がもう少し明快に整理された形の論文に仕上げられたはずです。実際、放射フィードバックよりもハドレー循環の応答という文脈で引用されることが多いようです。続く Yoshimori and Broccoli (2009) こそ、放射フィードバックとハドレー循環の応答を結びつけて理解する新しい枠組みを提案したつもりでしたが（第1図）、前者の方が引用されることが多いようです。メッセージの伝え方が不鮮明だったのではと反省する点です。

Tony (Anthony) は、新しいアイディアをどんどん投げかけてコミュニティをリードして行く Andrew



第1図 热帶外に負の放射強制を与えた場合の大気上端での放射フラックスの変化：放射強制力（青鎖線）、プランク応答を含む全フィードバック（赤点線）、応答（黒実線）。放射強制を与えた緯度帶のみでプランク応答を介してエネルギーの不足を相殺できず、南半球低緯度（ $0 \sim 30^\circ\text{S}$ ）からハドレー循環偏差を介してエネルギーの変化分を正味で北へ輸送して補償。北半球低緯度（ $0 \sim 30^\circ\text{N}$ ）ではハドレー循環の下降流偏差を伴う強い正の水蒸気フィードバックが負のプランク・フィードバックを相殺するため大気上端での放射フラックスはほとんど変化しない。他方、南半球低緯度ではハドレー循環の上昇流偏差を伴う正の水蒸気フィードバックと負の温度減率フィードバックが相殺し、負のプランク・フィードバックが働く。異なる緯度帶での面積が等しくなるように横軸を設定。Yoshimori and Broccoli (2009) Figure 1a を一部改訂。© American Geophysical Union.

(現在、政治家) や Thomas (前 IPCC 第一作業部会共同議長) とは少し「趣き」が異なり、私には緻密な科学をどちらかというと地味に積み上げていく、安定感のある研究者に見えます。信頼している Tony に自分の専門性について相談した後に、相互作用やフィードバックに注目するシステム学的視点を強みに変えようと考えたのもその頃だったと思います。実は、私が「フィードバック」に興味を持ったのは最初に遡ります。電磁探査法を研究していた時に信号を増幅する電子回路としてオペアンプを学びました。オペアンプにはフィードバックと呼ばれるループ回路が利用されています。システムの振る舞いを考える時には増幅や抑制作用をフィードバックと結びつけて理解し、またそれが非線形な応答につながることが面白く、留学願書とともに提出したエッセイにも、そのような視点を含めて気候をシステムとして研究したいということを書きました。留学後に忘れかけていた頃、Hansen *et al.* (1984) を読んで具体的に気候研究に適用された例を学び、いつかやってみたいと考えていました。留学前から「システム」という考え方を大切にしていた私にとって、院生時代に代理で「地球システム科学」の講義をしたことや、現在、気候システム研究系と地球惑星システム科学グループに所属していることを考えると、研究課題は変わっても案外まっすぐに進んできたのかもしれません。

2.4 日本での研究活動のきっかけ

海外でこの道に入り、ほとんど日本の研究者を知らない私が、日本に帰国する機会を模索していたときにコンタクトをとったのが東京大学大気海洋研究所（当時、気候システム研究センター）の阿部彩子先生でした。阿部先生のお名前は雑誌のインタビュー記事や書籍で留学前から知っていたのですが、初めてお会いしたのは Tony と同じく 1999 年の PMIP のワークショップでした。PMIP 閉会後、訪問した Lawrence Mysak 先生から彼のご自宅へ一緒に招待頂き、その思い出を頼りに連絡させていただきました。実は Andrew の元指導教官が Lawrence で、Thomas も Lawrence の下で同時期にポスドクをしていたことがあり、不思議な縁を感じます。阿部先生の下で研究することは前出の Garry や真鍋先生にもお勧めいただき、10 年近くに及ぶ海外生活を終え、日本での研究活動が始まりました。

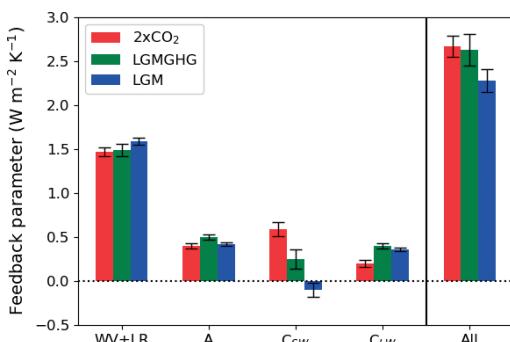
3. 気候感度と気候フィードバックに関する研究

3.1 古気候シミュレーションを活用した気候感度に関する研究

気候感度は放射強制に対する地上気温の変化のしやすさを表す用語ですが、大気中の二酸化炭素濃度を 2 倍にして十分時間が経った後の全球・年平均地上気温変化量が平衡気候感度の標準的な定義として用いられます（吉森ほか 2012a）。吉森（2015）で強調されていますように、この指標は気候システムの特性を表す 1 つの数値に過ぎない上に、現実には観測できない物理量であるにも関わらず、その推定は長年に渡って気候研究の中心的課題として位置付けられてきました。気候感度の決定には気候システムのエネルギー収支という本質的な要素が含まれ、推定には様々な階層の物理過程やその相互作用の把握が不可欠であり、システムの統合的な理解が試されます。また、気候感度は気候変動の影響評価、緩和策、適応策を考える上で最も基本的な情報であるにも関わらず、長い間、不確実性の低減に苦労してきた歴史があります。地球科学において測定できない物理量を推定するには、多角的なアプローチを取らざるを得ません。その 1 つの有力な手段が、古気候を利用する方法です（吉森ほか 2012c）。古気候と聞くと不確定幅がより広がるような印象を持つかもしれません、モデルや測器観測データとは独立した情報を基に推定できるという点と、異なる推定を統合した最新のベイズ推定においても信頼区間の制約に中心的な役割を果たしているという点で、気候感度の推定では重要視されています（Sherwood *et al.* 2020）。後者の点については、SST 変動の空間パターンの違いから、20 世紀の気候フィードバックが温暖化の平衡応答を強く規定できないことが原因と考えられています。

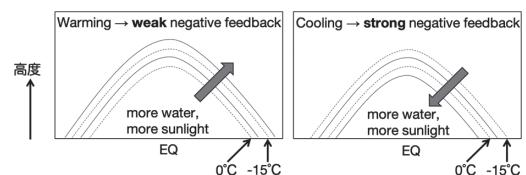
古気候研究では、現在の激変する地球環境が枕詞として引き合いに出されるのを度々目にしますが、過去の気候が将来の予測に、なぜ、どのように、どの程度役に立つかについて、日本で研究活動を始めた頃、定量的な視点で向き合っている研究が少ないと感じていました。そこで、まず最終氷期最盛期（LGM）と二酸化炭素倍増時（ $2 \times \text{CO}_2$ ）の放射強制力と放射フィードバックの定量化と両時代におけるそれらの違いを調べました。ところで、真鍋先生の論文を読むと、さすがに開発者だけあってモデルの中身を隅々まで知り尽くして結果を説明されていることを強く感じます。その影響を受け、自分たちのモデル（MIROC）について

て、マルチモデル解析とは違い、自分たちでしかできない深い解析を行って説明するべきという意識を強く持って、きっちりとした定量化にこだわりました。高精度の放射フィードバックの解析には、気候データとしては比較的高頻度の3時間出力データを使い、かつシミュレーション用いた気候モデルと同一の放射伝達プログラムを使用することが大きな強みになります。ラトガーズ大学在職時に国立環境研究所の横畠徳太博士とフィードバック解析について情報交換させていただいたこともあり、彼から多大なる支援を受け、おそらく世界で初めて放射部分摂動（PRP）法を3次元の古気候シミュレーションデータの解析に適用し、放射フィードバックの各要素（プランク、温度減率、地表面アルベド、雲）の短波・長波領域での寄与を精度良く評価することができました（Yoshimori *et al.* 2009）。この研究では上記の定量化に加えて、単位放射強制力当たりの気温変化（比気候感度）がLGMの方が $2 \times \text{CO}_2$ よりも小さく、その要因が短波の雲フィードバックにあることを示し（第2図）、さらに、温暖化時と寒冷化時で液体と固体の水から構成される混相雲の相変化フィードバックに起因する可能性が高いことを状況証拠から考察しました（第3図）。



第2図 産業革命前標準実験を基準としたフィードバックの強さ（プランク応答は除く）。正の値は気温変化を助長し、負の値は抑制する方向に作用する。WV+LR：水蒸気と温度減率フィードバックの和、A：地表面アルベド・フィードバック、C_{sw}：雲短波フィードバック、C_{LW}：雲長波フィードバック、All：総計。MIROC3.2-T42大気海洋混合層モデルの結果。2×CO₂：CO₂倍増実験（赤）、LGM GHG：温室効果ガス濃度のみLGM設定（緑）、LGM：LGM実験（青）。Yoshimori *et al.* (2009) Figure 3を一部改訂。©American Meteorological Society. Used with permission.

一方で、1つのモデルに過ぎないため、この結果の普遍性には疑問がありました。そこで、少なくとも自分たちのモデルではどのくらいロバストであるかについて調べることにしました。方法は物理パラメータ摂動アンサンブル（PPE）の解析でした。実は、世界で最初にPPEをLGMに適用し、LGMを制約条件にして気候感度の推定を行ったのは日本の海洋研究開発機構—東京大学—国立環境研究所のグループです（Annan *et al.* 2005）。Hargreaves *et al.* (2007) は、さらに詳細にLGMとCO₂倍増アンサンブル実験における感度の違いを調べており、日本では環境がすでに整っていました。残された課題は、気候フィードバック要素の特定と定量的評価で、私の方はどうやってPRP法では不可能なほど数多くのシミュレーションを効率良く十分な精度で解析するかという点にエネルギーを費やしました。通常、フィードバックの解析手法はCO₂強制などを想定して開発されたことが多いため、地球の軌道要素や地形なども変わる古気候に適用する場合には、特有の問題が生じます。試行錯誤の末、短波領域には近似PRP法、長波領域には放射カーネル法を適用すれば良いことがわかりました。解析の結果、Yoshimori *et al.* (2009) の結果はパラメータ・チューニングによる偶然の産物ではなく、このモデルにはロバストな特性であることが示されました（Yoshimori *et al.* 2011, 第4図）。この結論に安心感も得ましたが、他のモデルの振る舞いに関する示唆は得られず、多くのPPE研究と同様に「MIROCはあくまでもMIROC」という事実にやや残念な感想を持ちました。これら2つの研究から、比気候感度が基本（背景）場に依存（state-dependent）すること、強制因子

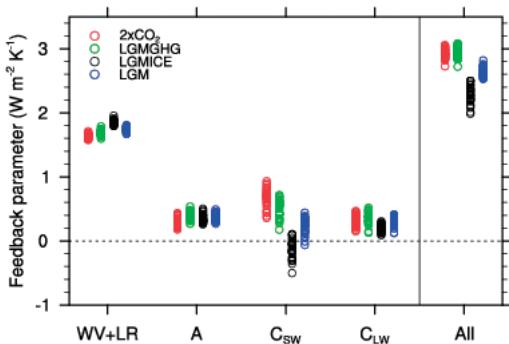


第3図 水の相変化を通して温暖化と寒冷化で雲フィードバックの強さが異なる理由を表す模式図。横軸は緯度。点線が変化前、実線が変化後。Yoshimori *et al.* (2009, 2011) のモデルでは-15~0°Cの間で雲水と雲氷が共存し、その間の両者の割合は線形に決められている。寒冷化の方方がより強い負の雲相変化フィードバックを生じる。この効果は水床付近でさらに強調される。

にも依存 (forcing-dependent) することが明確に示されました。これらの知見は現在では比較的当たり前のこととして受け入れられており、雲の相変化フィードバックの重要性についても広い意味で繰り返し指摘されています。これらの研究はマルチモデル解析へと発展し、IPCC 第 5 次評価報告書の執筆にも貢献することができました (Hargreaves *et al.* 2012; Masson-Delmotte *et al.* 2013)。第 5 図は、マルチモデルでも LGM 強制に対する雲の短波放射フィードバックが CO_2 温暖化強制に対するものよりも小さい傾向にあることを示しています。

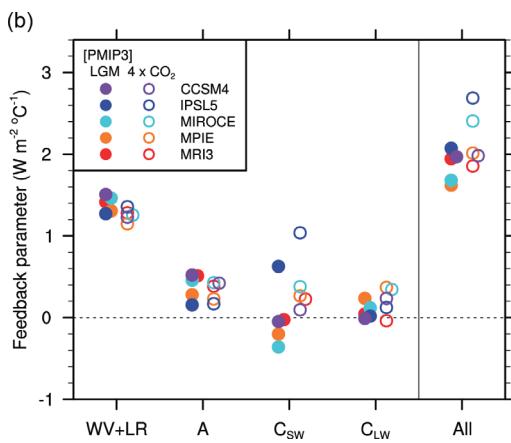
今後の課題としては、より古い時代や温暖な時代を利用した気候感度の推定、気候フィードバックの基本場依存と強制因子依存の区別と仕組み、気候フィードバック間の連関の解明 (Yoshimori *et al.* 2020) が重要と考え、現在、複数の科研費課題の下で進めています。

Crucifix (2006) や Masson-Delmotte *et al.* (2006) にもあるように、古気候シミュレーションを活用した気候感度の研究は、IPCC 第 4 次評価報告書、PMIP 第 2 期の頃から国際的にも行われています。日本では、阿部先生、Julia Hargreaves 博士、James Annan 博士のリードの下、気候予測の不確実性に関する研究交流が行われていましたが、環境省の環境研究総合推進費 S5 プロジェクトの関係もあり、私もその小規模な会合に参加することになりました。S5 では、国立環境研究所の江守正多課題代表から、古気候実験、アンサンブル



第4図 第2図と同様。ただし、MIROC3.2-T21大気海洋混合層モデルを用いたパラメータアンサンブル実験（各31メンバー）の結果。 $2 \times \text{CO}_2$: CO_2 倍増実験（赤）、LGMGHG : 温室効果ガス濃度のみ LGM 設定（緑）、LGMICE : 氷床のみ LGM 設定（黒）、LGM : LGM 実験（青）。Yoshimori *et al.* (2011) のデータを用いて作成。

実験、気候感度研究に深い理解と継続的なサポートをいただき、進展が加速しました。2010年頃から、大気海洋研究所でも渡部雅浩先生のリードの下、小規模な気候感度勉強会が適度な頻度で開かれ、参加者のレベルアップと多くの共同研究論文を生みました。いずれの会合でものびのびとした雰囲気で議論が交わされ、結果的に多くの成果が得られたと感じています。同じ頃、佐藤正樹先生が気候感度研究会を主催し、気候感度に関する誤解を含めた概念の整理や最新の知見を発信する機会がありました。この研究会の内容を多くの共著者の方とまとめたものが天気の解説記事として掲載されました（吉森ほか 2012a, b, c）。以前に「背伸びをしてでも引き受けると次に繋がる」というアドバイスを耳にしたことがあります。この時は萎縮しつつ思い切って取りまとめの大役を引き受けました。個々人の執筆箇所が見えやすい形でのまとめ方もあったかと思いますが、独立した節の集合にせず、流れや表記を含めて読みやすくしたいという意図で、今となっては大変失礼に感じますが、図々しくいろいろ書き換えさせていただいた部分も結構ありました。テーマを絞った勉強会や研究会からは得たものが非常に多く、リードしていただいた方々の行動力を見習わなくてはと思います。



第5図 第2図と同様。ただし5つの異なる大気海洋大循環モデルの結果。LGM: LGM 実験（塗りつぶしありの丸）、 $4 \times \text{CO}_2$: 瞬時 4 倍増 150 年実験の最後の 20 年平均（塗りつぶしなしの丸）。色の違いは各モデルを示す。IPCC 第 5 次評価報告書 Figure 5.5b (Masson-Delmotte *et al.* 2013) を転載。詳細は原図参照のこと。©IPCC.

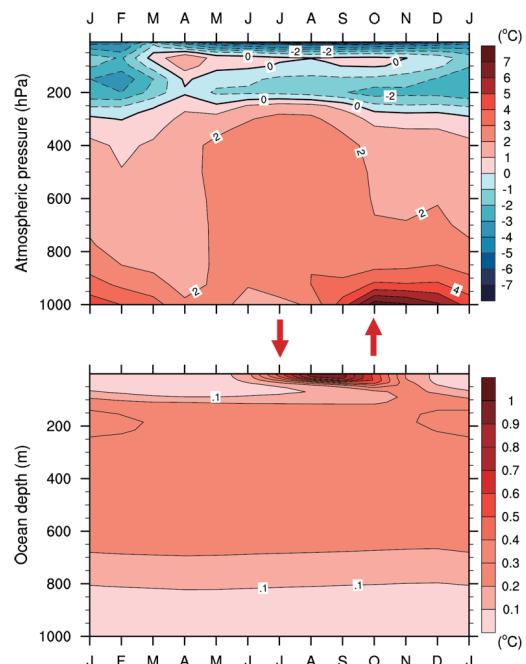
3.2 北極域温暖化増幅のメカニズムと気候フィードバックに関する研究

地球温暖化に代表される気候変化では、一般に北極域平均の気温が全球平均気温よりも大きく変化することがよく知られています（吉森 2014, 2019）。北極域温暖化増幅と呼ばれる現象です。気候感度の研究では最終的に求める変数が全球平均気温ですので、全球平均のエネルギー収支に注目し、ほとんどの場合、大気上端での放射フラックスを調べます。一方、地域的な気温変化を理解したい場合に、必ずしも各地域における大気上端での放射フラックスと地上気温の対応は自明ではありません。例えば、水平方向のエネルギー輸送の効果も考慮する必要があります。大気上端での放射フラックスを数学的、形式的に地表面温度変化相当に換算することはできますが（Crook *et al.* 2011），物理的な解釈は単純ではありません。気候感度で培ったフィードバック解析手法を北極域温暖化増幅メカニズムの理解に役立てようと考えた時に最初にこの課題に直面しました。

各地域における地表面でのエネルギー・フラックスと地上気温の対応も自明ではありませんが、シュテファン・ボルツマンの法則に従い地表から射出される長波放射は地表面温度の4乗に比例することから、直感的には地表面でのエネルギー・フラックスを調べる方が適していると考えました。そこで Ohmura (1984) に習い、Laîné *et al.* (2016) では放射カーネル法を用いて地表面でフィードバックの評価を行いました。残念ながら、ほぼ同時期に同様の発想で行われた Pithan and Mauritsen (2014) に結果的に遅れての出版となってしまいましたが、季節性や海陸の違いも含めて圧倒的に詳細な知見を得ることができました。特に、冬季に北極域の成層が強く、シュテファン・ボルツマン則の非線形性が効き、雲の温室効果が強化することが北極域温暖化増幅に寄与することを多数のモデルに共通して特定しました。また、Yoshimori *et al.* (2014b) と整合して、夏に太陽エネルギーを余剰に吸収し冬に大気に放出する海洋混合層の「季節呼吸」が鍵となる過程であることも示しました。Yoshimori and Suzuki (2019) ではより簡便な方法で同様の解析を行い、約6千年前の完新世中期においては日射の季節緯度分布、将来においては温室効果ガス、と主な放射強制因子が異なるにも関わらず、北極域の温暖化メカニズムに一貫した共通性を見出しました。Laîné *et al.* (2016), Yoshimori and Suzuki (2019) はいずれもマルチモデ

ル解析であり、解析対象のモデルを走らせてことなく月平均データ出力からフィードバックを診断する必要があり、そこには工夫が必要でした。地表面エネルギー収支の解析から、北極域温暖化増幅の特徴の1つである、日射が強くアルベドフィードバックの卓越する夏季ではなく、むしろ冬季に温暖化が大きく現れる（cold-season amplification）理由の理解が進みました（吉森 2019；第6図）。

大気上端にせよ、地表面にせよ、单一の高度におけるエネルギー・フラックスの解析では、北極域温暖化増幅のある本質的な特徴を説明することができません。それは、対流圏全体ではなく地表付近の温暖化増幅（bottom amplification）です。すなわち、北極域温暖化増幅の理解のためには、なぜ北極域の気温上昇が他の地域に比べて大きいのかに加えて、なぜ地表付近の気温上昇が上空に比べて大きいのかという問い合わせにも答えなくてはならないと考えました。この課題に悩ん



第6図 温暖化（大気 CO₂濃度 1 % 漸増）実験における CO₂倍増時（約70年後）の温度変化。横軸：月、縦軸：気圧（上）、水深（下）。北緯70度以北を平均。夏に海洋に吸収される太陽放射が増加し、秋に海洋から大気に放出される熱が増加する様子を矢印で表現。Yoshimori *et al.* (2014b) Figure 9b を改訂。©American Meteorological Society. Used with permission.

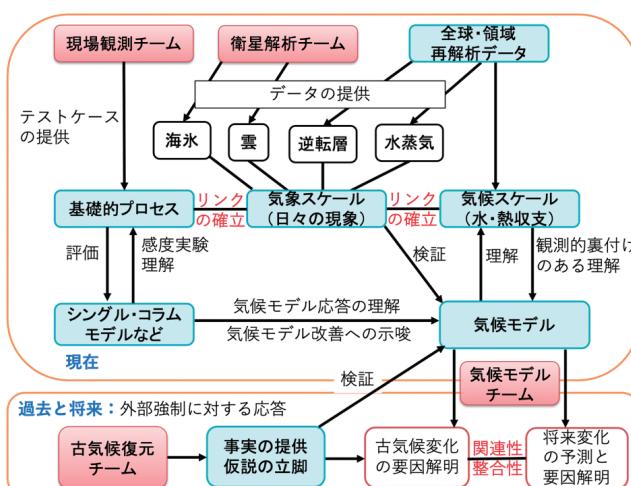
でいる時に耳にしたのが、CFRAM という解析法でした。一言で言うと、地表面だけでなく大気各層のエネルギー収支も含む連立方程式を解くことによって、地表面と大気 3 次元の温度変化に寄与する物理過程を特定します。これはもはや（プランク応答を基準に比較する）放射フィードバックというより、フィードバックも含めた気候応答そのものを解析するもので、自分で定式化したわけではありませんが、いただいたアドバイスも含めて実装には様々な工夫を凝らしたつもりです (Yoshimori *et al.* 2014a, 2014b, 2017)。地表面一大気の連立したエネルギー収支の解析から、bottom amplification の理解が進みました (吉森 2019)。

このようにいろいろな解析手法を適用し、これまで別々に指摘されてきたフィードバック過程の寄与を系統的に調べることによって、統合的な理解が少しづつ明瞭になってきました。特に、将来の北極域温暖化増幅において、雪氷アルベド、大気成層、雲の温室効果、放射法則の非線形性が重要なことが示され、なぜ北極域は他の地域よりも昇温が大きく、それが寒冷な季節に地表付近で顕著なのかが明らかになってきました。これらの詳細については、吉森 (2014, 2019, 2021), 吉森ほか (2015) の解説を参考ください。しかし、

フィードバック解析は結局のところ、収支式の各項の釣り合いを診断しているに過ぎません。したがって、基本的に個々のフィードバック間の相互作用についての情報は得られません。ある日、仕事帰りにバスを待っている時に、高畠 縁先生から、モデルの辻褄合わせを見ているだけにならないようにという貴重な助言をいただきました。実は、この指摘は長い間自己の中で燻りつつ脇に放置してきた、メカニスティックな因果関係の理解にどう繋げるか、観測の裏付けをとるにはどうすれば良いか、という 2 つの大きな課題と直結していました。また、木本昌秀先生から学んだ、自然の謎の解明、真理の追求を常に意識するという姿勢にも密接に関係していると思います。ひとまず、数値実験とフィードバック解析を同時に活用することを思いつき、大気熱輸送と北極域の気候フィードバックの運動性を Yoshimori *et al.* (2017) にまとめました。観測データからの裏付けについては、質量やエネルギーの収支が厳密には満たされていない再解析データセットに前述のフィードバック解析を直接適用することは一旦諦め、気候フィードバック過程の気象学的実体の把握を通して、個々の気候フィードバック過程の検証と短期データを用いた長期予測の信頼性評価を目指す

ことにしました (第 7 図)。これに関連して、2020 年 6 月より ArCS II プロジェクトの下で、「気象気候の遠隔影響と予測可能性—北極域温暖化増幅のメカニズム—」という課題を進めているところです。喻えて言うならば、変動する気候という「森の生態系」は、実体である気象という「木の生理学」を通して理解するのが本質的と考えます。要素還元主義とは距離を置きつつ、素過程という「光合成」まで遡ることができたら理想的です。

私の極域研究は、前出の S5、その後継の S10 プロジェクトや文科省の GRENE 北極気候変動研究事業をきっかけに始まりました。特に GRENE 事業では、多くの北極域研究者と知り合うことができ、組織化された大規模プロジェクトの恩恵を多く受けることができました。また、2013 年から約 5 年半に渡って「北極環境研究の長期構想」の編集に携わる機会をいただき、ここでも経験豊富な先生や勢いのある若手研究者の方々と親睦を深めることができました。研究内容に関する議論はもちろんのこと、極域気候変動を自分の中心的



第 7 図 極域の気候フィードバックの理解の深化を意識した研究の模式図。中央に示す日々の現象の変化を気候応答に関連付けることによって気候フィードバックの実体に迫る。その知見を活かして基礎的プロセス（素過程）と気候応答を関連付けることによってシステムの統合的理解と気候モデルの改善に貢献。実際には多階層のモデル群による連携が必要。過去、現在、将来の気候変動を同一レベルで俯瞰することによって将来予測の不確実性低減に貢献。

な研究テーマとして位置づけ、気候フィードバックの研究を推進する後押しをしていただいたように感じます。2020年の新型コロナウイルス禍において、改めてオンライン交流の大切さを痛感しています。

4. おわりに

古気候シミュレーションを活用した気候感度に関する研究はまだまだ発展途上です。このアプローチの根底には、将来を写す鏡として過去を利用するのではなく、気候フィードバックという物理過程やメカニズムの理解を通して過去と将来をつなごうという意志があります。この考えは、全球平均値だけでなく、地域的な気候変動にも当てはまります。そして、共通の物理法則にしたがって動く数値モデルを異なる条件に適用することによって、将来予測を古気候研究の枕詞として利用するのではなく、定量的な議論を通して結語にすることが可能になります。必要なのは、異なる専門家集団の間を往来する勇気と日本気象学会の細分化された専門家の方々からのお智恵を拝借することではないかと思います。「気候フィードバック」はまだ広く浸透した用語ではないと思いますが、気候は天気の統計的な表現であり、位相空間における天気のトラジェクトリーが気候と考えれば、気候の実体は気象であり、気象学の発展とともにその理解は深化していくものと考えます。気候フィードバックという概念がきちんとした理解とともに広く浸透し、気象と気候をつなぐ新しい架け橋となれば幸いです。

気候の将来予測の第一人者である真鍋先生は、スーパー・クリエイティブな阿部先生と定量化にこだわる私が良いコンビになることを予測していました。私からコンビというのはおこがましいですが、受賞の対象となった研究に関する論文のほとんどは阿部先生との共同研究です。このように多くの方との出会いと言葉に支えられてここまで来ました。研究者を目指す若い方にも、ぜひ人との交わりを大切にして、人と一緒に研究する楽しみを実感してもらえばと思います。今後も向上心とともに、手法や論文に対して、職人魂とまではいかなくても、「こだわり」を持って研究に邁進していきたいと考えます。

謝 辞

本文中に登場した方々はもちろん、登場しなかった次の方々を含め多くの人から様々な形で研究活動や研究生活を助けていただきました：Alexandre Laîné、

Nick Schutgens、井上豊志郎、浮田甚郎、大垣内るみ、岡 顕、小倉知夫、川村賢二、釜江陽一、塙竜秀夫、末吉哲雄、鶴田治雄、野沢 徹、森 正人、山内 恭（敬称略）。受賞に結びついた多くの成果は、東京大学大気海洋研究所で行った研究がもとになっています。メンバーの皆様に深く感謝いたします。特に、阿部彩子先生（と研究室の皆様）、渡部雅浩先生には、長きに渡り常日頃から様々なアドバイスや議論を通して本当に世話になっています。あまりに交流が多く本文中で十分に触れられませんでしたが、深く、深く感謝の意を表したいと思います。また、私の研究は全球気候モデルが軸となって進められてきました。多くのモデル開発者の費やした努力と時間に支えられたものであることを記しておきたいと思います。2014年4月から4年半、北海道大学大学院地球環境科学研究院・環境科学院に在職しました。このときの経験からは、本稿にも登場する現在の研究の方向性を決める上で大きな刺激と影響を受けました。大切なものを得たことに対してメンバーの皆様に深く感謝いたします。最後に、約10年間の海外生活も含めて暖かい理解とともに好きなように好きな道に進ませてくれた両親、いつも支えてくれる妻、エネルギーを時に吸い取り時にくれる、癒してくれる2人の娘たちに感謝いたします。本稿の執筆に際し、JSPS 科研費（JP17H06104, JP19K03968, JP19H05595）、北極域研究加速プロジェクト（ArCS II）JPMXD1420318865の支援を受けました。

略語一覧

- AGCM : Atmospheric General Circulation Model 大気循環モデル
- AOGCM : Atmosphere–Ocean General Circulation Model 大気海洋大循環モデル
- ArCS II : Arctic Challenge for Sustainability II 北極域研究加速プロジェクト
- CCCma : Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis カナダ気候モデリング解析センター
- CFRAM : Climate Feedback-Response Analysis Method 気候フィードバック・応答解析法
- EMBM : Energy–Moisture Balance Model エネルギー・水蒸気収支モデル
- GRENE : Green Network of Excellence グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス
- 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

MIROC : Model for Interdisciplinary Research on Climate
MIROC 気候モデル

NCAR : National Center for Atmospheric Research アメリカ大気研究センター

OGCM : Ocean General Circulation Model 海洋大循環モデル

PMIP : Paleoclimate Modelling Intercomparison Project 古気候モデリング相互比較プロジェクト

PPE : Perturbed Parameter/Physics Ensemble パラメータ/物理摂動アンサンブル

PRP : Partial Radiative Perturbation 放射部分摂動

SST : Sea Surface Temperature 海面水温

参考文献

- 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.
- Crook, J. A., P. M. Forster and N. Stuber, 2011: Spatial patterns of modeled climate feedback and contributions to temperature response and polar amplification. *J. Climate*, 24, 3575-3592.
- Crucifix, M., 2006: Does the Last Glacial Maximum constrain climate sensitivity? *Geophys. Res. Lett.*, 33, L18701, doi:10.1029/2006GL027137.
- Hansen, J., A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy and J. Lerner, 1984: Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms. *Climate Processes and Climate Sensitivity* (J. E. Hansen and T. Takahashi, eds.), *Geophysical Monograph Series*, 29, AGU, 130-163.
- 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.
- Hargreaves, J. C., J. D. Annan, M. Yoshimori and A. Abe-Ouchi, 2012: Can the Last Glacial Maximum constrain climate sensitivity? *Geophys. Res. Lett.*, 39, L24702, doi:10.1029/2012GL053872.
- Laîné, A., M. Yoshimori and A. Abe-Ouchi, 2016: Surface Arctic amplification factors in CMIP5 models: Land and oceanic surfaces and seasonality. *J. Climate*, 29, 3297-3316.
- Masson-Delmotte, V., M. Kageyama, P. Braconnot, S. Charbit, G. Krinner, C. Ritz, E. Guilyardi, J. Jouzel, A. Abe-Ouchi, M. Crucifix, R. M. Gladstone, C. D. Hewitt, A. Kitoh, A. N. LeGrande, O. Marti, U. Merkel, T. Motoi, R. Ohgaito, B. Otto-Bliesner, W. R. Peltier, I. Ross, P. J. Valdes, G. Vettoretti, S. L. Weber, F. Wolk and Y. Yu, 2006: Past and future polar amplification of climate change: Climate model intercomparisons and ice-core constraints. *Clim. Dyn.*, 26, 513-529.
- Masson-Delmotte, V., M. Schulz, A. Abe-Ouchi, J. Beer, A. Ganopolski, J. F. González Rouco, E. Jansen, K. Lamberbeck, J. Luterbacher, T. Naish, T. Osborn, B. Otto-Bliesner, T. Quinn, R. Ramesh, M. Rojas, X. Shao and A. Timmermann, 2013: *Information from Paleoclimate Archives. Climate Change 2013: The Physical Science Basis* (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley, eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 383-464.
- Ohmura, A., 1984: On the cause of "Fram" type seasonal change in diurnal amplitude of air temperature in polar regions. *Int. J. Climatol.*, 4, 325-338.
- Pithan, F. and T. Mauritsen, 2014: Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geosci.*, 7, 181-184.
- Schmittner, A., M. Yoshimori and A. J. Weaver, 2002: Instability of glacial climate in a model of the ocean-atmosphere-cryosphere system. *Science*, 295, 1489-1493.
- Sherwood, S. C., M. J. Webb, J. D. Annan, K. C. Armour, P. M. Forster, J. C. Hargreaves, G. Hegerl, S. A. Klein, K. D. Marvel, E. J. Rohling, M. Watanabe, T. Andrews, P. Braconnot, C. S. Bretherton, G. L. Foster, Z. Hausfather, A. S. von der Heydt, R. Knutti, T. Mauritsen, J. R. Norris, C. Proistosescu, M. Rugenstein, G. A. Schmidt, K. B. Tokarska and M. D. Zelinka, 2020: An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Rev. Geophys.*, 58, doi:10.1029/2019RG000678.
- Weaver, A. J., M. Eby, E. C. Wiebe, C. M. Bitz, P. B. Duffy, T. L. Ewen, A. F. Fanning, M. M. Holland, A. MacFadyen, H. D. Matthews, K. J. Meissner, O. Saenko, A. Schmittner, H. Wang and M. Yoshimori, 2001: The UVic earth system climate model: Model description, climatology and applications to past, present and future climates. *Atmos.-Ocean*, 39, 361-428.
- 吉森正和, 2014: 北極温暖化増幅. 細氷, 日本気象学会北海道支部機関紙, 60, 2-15.
- 吉森正和, 2015: 2013年度春季大会シンポジウム「変化する地球環境と気象学の役割」の報告:5. 気候感度の不確実性と地球温暖化予測. 天気, 62, 269-274.
- 吉森正和, 2019: 2017年度秋季大会シンポジウム「北極域」の報告:2. 北極温暖化増幅のメカニズムと将来予測. 天気, 66, 214-219.
- 吉森正和, 2021: 北極域の気候変動研究の現状と今後の展開. 気候システムニュース No.8, 1-4.

- [https://ccsr.aori.u-tokyo.ac.jp/CCSR_News_PDF/\(2021.8.31閲覧\).](https://ccsr.aori.u-tokyo.ac.jp/CCSR_News_PDF/(2021.8.31閲覧).)
- Yoshimori, M. and A. J. Broccoli, 2008: Equilibrium response of an atmosphere-mixed layer ocean model to different radiative forcing agents: Global and zonal mean response. *J. Climate*, 21, 4399–4423.
- Yoshimori, M. and A. J. Broccoli, 2009: On the link between Hadley circulation changes and radiative feedback processes. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L20703, doi:10.1029/2009GL040488.
- Yoshimori, M. and M. Suzuki, 2019: The relevance of mid-Holocene Arctic warming to the future. *Clim. Past*, 15, 1375–1394.
- Yoshimori, M., A. J. Weaver, S. J. Marshall and G. K. C. Clarke, 2001: Glacial termination: Sensitivity to orbital and CO₂ forcing in a coupled climate system model. *Clim. Dyn.*, 17, 571–588.
- Yoshimori, M., M. C. Reader, A. J. Weaver and N. A. McFarlane, 2002: On the causes of glacial inception at 116 kaBP. *Clim. Dyn.*, 18, 383–402.
- 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.
- 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, 横畠徳太, 小倉知夫, 大石龍太, 河宮未知生, 塩竈秀夫, 尾馬洋子, 小玉知央, 野田 晓, 千喜良 稔, 竹村俊彦, 佐藤正樹, 阿部彩子, 渡部雅浩, 木本昌秀, 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, 横畠徳太, 小倉知夫, 大石龍太, 河宮未知生, 塩竈秀夫, 尾馬洋子, 小玉知央, 野田 晓, 千喜良 稔, 竹村俊彦, 佐藤正樹, 阿部彩子, 渡部雅浩, 木本昌秀, 2012b : 気候感度 Part 2 : 不確実性の低減への努力. *天気*, 59, 91–109.
- 吉森正和, 横畠徳太, 小倉知夫, 大石龍太, 河宮未知生, 塩竈秀夫, 尾馬洋子, 小玉知央, 野田 晓, 千喜良 稔, 竹村俊彦, 佐藤正樹, 阿部彩子, 渡部雅浩, 木本昌秀, 2012c : 気候感度 Part 3 : 古環境からの検証. *天気*, 59, 143–150.
- 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 the MIROC GCM. *J. Climate*, 27, 6358–6375.
- 吉森正和, 阿部彩子, A. Laîné, 2015 : 北極温暖化増幅をもたらすフィードバックプロセスの特定とその不確実性評価. 北極通信, GRENE 北極気候変動事業, 情報・システム研究機構国立極地研究所, (7), 2–3.
- Yoshimori, M., A. Abe-Ouchi and A. Laîné, 2017: The role of atmospheric heat transport and regional feedbacks in the Arctic warming at equilibrium. *Clim. Dyn.*, 49, 3457–3472.
- Yoshimori, M., F. H. Lambert, M. J. Webb and T. Andrews, 2020: Fixed anvil temperature feedback: Positive, zero, or negative? *J. Climate*, 33, 2719–2739.

Studies on climate sensitivity utilizing paleoclimate simulations and mechanisms of climate feedback

Masakazu YOSHIMORI*

* *Atmosphere and Ocean Research Institute, the University of Tokyo, 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa-shi, 277-8568 Chiba, Japan*
E-mail: masakazu@aori.u-tokyo.ac.jp

(Received 10 February 2021; Accepted 31 August 2021)