

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03968

研究課題名(和文) 温暖化基礎理論の構築へ向けた気候フィードバック過程間の連動性の解明

研究課題名(英文) Elucidation of climate feedback codependency towards fundamental theory of global warming

研究代表者

吉森 正和 (Yoshimori, Masakazu)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：20466874

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：これまでの研究では気候変動に伴う水蒸気や雲などの放射効果は別々に特定されることが多く、その関連性についてはあまり注目されてこなかった。そこで本研究では、気候フィードバック過程間の連動性の解明を目的とした。まず、理論的な考察に基づいて発案した新しい気候フィードバックの定式化の有効性を、大気大循環モデルを用いて示した。次に、熱帯対流圏上層の雲頂温度は大局的には温暖化の前後で不変であるというFAT理論(及びそれに修正の加えられたPHAT理論)の気候フィードバックにおける意味について、全く新しい視点から再解釈を与えた。さらに、現在気候場からの温暖化時の雲フィードバックの「予測可能性」について議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二酸化炭素濃度の上昇に対する気温上昇量を知ることは、気温上昇の上限目標に対して人類が排出する二酸化炭素の許容量を判断し、政策を検討する上で不可欠な情報である。世界の平均気温の上昇量は気候フィードバックと呼ばれる、気温上昇に伴って生じる水蒸気や雲の変化が引き起こす更なる地球の放射収支の不釣り合いの影響を強く受ける。本研究は、これまで進展が遅く未確立であるフィードバック基礎理論の体系化に貢献するものである。注目するフィードバックが温暖化を増幅する働きがあるのか、抑制する働きがあるのか、中立なものなのか、フィードバック間の連動性を調べることによって議論し、いくつかの新しい概念的な発展を実現させた。

研究成果の概要(英文)：Many previous studies quantified the radiative effect of changes in atmospheric constituents such as water vapor and clouds separately, but the codependency of feedbacks has not been explored sufficiently. In this study, the relation among feedback processes was investigated and the validity of a new framework of climate feedbacks based on a basic theoretical argument was demonstrated using an atmospheric general circulation model. This study also proposed re-interpretation of relatively well accepted FAT theory in which tropical anvil cloud temperature is invariant before and after the global warming, as well as PHAT theory, a modified version of the FAT theory in which slight warming of anvil cloud temperature is suggested. Furthermore, discussion was made on the “predictability” of the cloud feedback under the global warming from the current climate information alone.

研究分野：気候変動

キーワード：地球温暖化 気候フィードバック 気候モデル 上層雲

1. 研究開始当初の背景

(1) 雲フィードバックの理解

大気中の二酸化炭素濃度が 2 倍に上昇し、気候システムが統計的な定常状態に達した時の全球平均した地上気温変化量は平衡気候感度と呼ばれ、約 40 年の間、盛んに研究されてきた。この指標は元々気候モデルの特性を表すもので、観測できない理想化された概念に基づくが、他の多くの気候場の応答の大きさを規定する代表的な指標であることが明らかになるに連れ、その重要性が増している。過渡的な応答も含め、一般に気温の上昇量は入力となる放射強制力だけでなく、地上気温の変化に誘発されて変化する様々な要素の放射効果(気候フィードバック)によって大きな影響を受ける。これまでの研究では、気候モデル間のばらつきを決める主要因である雲のフィードバックのうち下層雲の応答が注目されてきた。しかし、上層雲の応答についても、モデル間のばらつきは無視できないほど大きい (Zelinka et al., 2012a, b)。

(2) 気候フィードバックの定式化

気候フィードバックの研究では、気候モデルのばらつきの要因特定に多くのエネルギーが費やされ、理論の構築は後回しにされてきた傾向がある。しかし、何がどこまで確からしいのかという点を物理的に説明することも同程度に重要である。他方、Huybers (2010)や Caldwell et al. (2016)は、複数のフィードバック過程の間に正相関や逆相関があることを指摘し、これらを整理統合する必要性を主張した。Randall et al. (2007)は、逆相関の関係にある気温の鉛直構造変化(気温減率)フィードバックと水蒸気フィードバックを一括りに定量化すると、両者を合わせた正味の不確実性はそれぞれの不確実性よりもはるかに小さくなることを示した。このように、気候感度の確信度を高め正味の不確実性を低減するためには、気候フィードバック過程間の連動性を理解することが重要である。

気候フィードバックの連動性を考慮して定式化の枠組みを更新していく上で鍵となるのは、相殺する大きな項を一括りに定式化し、残りの小さな項(微小項)の特性に注目することである。すなわち、微小項の理解を不確実性の低減に繋げることが有効と考えられる。Ingram (2013)や Held and Shell (2012)は、温度フィードバックと温暖化の前後で相対湿度が不変と仮定した場合の水蒸気フィードバックを一括りに定量化し、残りの微小項である相対湿度変化の放射効果を 1 つのフィードバックとして捉える新しい定式化を提案した。

他方、Hartmann and Larson (2002)は、大気中の水蒸気量が気温で支配される上、熱帯のかなとこ雲のデイトレインメント高度が下降流域での水蒸気による放射冷却で決まるため、上層の雲頂温度が温暖化の前後で大局的には不変であるという FAT (Fixed Anvil Temperature) 理論を提唱した。すなわち、温暖化時の上層雲(かなとこ雲)の高度が気温変化によって強く規定されることを指摘した。これらの研究を俯瞰すると、温度フィードバック、水蒸気フィードバック、上層雲フィードバックの間には、強い物理的な制約があり、統合することによって気候フィードバックの理解が進展すると推考できる。しかし、この考察はその有効性が示されていない。

(3) 雲フィードバックの予測

温暖化応答において、熱帯の気温鉛直構造はおおよそ湿潤断熱減率に従うことが知られており、もしある程度の精度を持って温暖化後の気温の鉛直構造変化が温暖化前に推定できるのであれば、気温と連動する水蒸気や雲高度フィードバックの一部も推定できる可能性が考えられる。このことは、現在気候の情報のみから気候フィードバックの一部を規定できる可能性を意味し、温暖化基礎理論の構築にとって重要である。

2. 研究の目的

本研究は長波放射のフィードバックを主な対象とし、FAT 理論に忠実に従って変化する雲の長波放射フィードバック(以降、FAT 雲フィードバック)に着目する。FAT 理論によれば、主に熱帯域の上層雲の高度は気温上昇に伴って高くなる。そこで本研究では、気温減率フィードバックと FAT 雲フィードバックの間に逆相関関係があるという仮説を立てて検証する。さらに、気温減率フィードバックと水蒸気フィードバックの間にある既知の逆相関関係を利用し、これら 3 つのフィードバックを一括り(以降、T-FRAT フィードバック)に定式化することにより、それぞれの見かけのばらつきを排除し、より本質的な不確実性の提示を目指す。しかし、T-FRAT はその有効性が示されていない。そこで、(1)気候モデルにおける上層雲のフィードバックが、上空も含めた気温の変化によってどの程度説明できるのかを理解するために、気温減率フィードバックと FAT 雲フィードバックの関係性を明らかにし、(2)気候モデルバージョン間の長波放射フィードバックの違いを解釈するための T-FRAT フィードバックの有効性を検証し、(3) T-FRAT フィードバック、特に FAT 雲フィードバック部分が、現在気候(基本場)における雲分布と(希釈)湿潤断熱減率からどの程度再現可能か、雲フィードバックの「予測可能性」を検討する。すなわち、不確実性の大きな気候フィードバックにおいて、理論的考察に基づいて説明できる部分を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 雲フィードバックの理解

ベースラインとなる数値実験として、1979年以降の温室効果ガスやエアロゾルといった放射強制因子と海面水温や海水分布といった境界条件をMIROCの大気大循環モデルコンポーネントに与えて現実的な大気状態を再現する、いわゆるAMIP実験を行った。次に、海面水温を4上昇させる以外は同一条件の実験、AMIP+4K実験を行った。それぞれの実験において放射計算に関係する高時間分解能(3時間毎)データを出力し、モデルの放射コード部分を用いて部分放射摂動(PRP = Partial Radiative Perturbation)法により、精緻な放射フィードバック解析を行い、各フィードバックを定量化した。FAT理論にしたがって雲に関する変数をAMIP+4K実験の気温を用いて変化させ、FAT雲フィードバックを定量化した。同様の解析を次の(2)と(3)の実験についても繰り返すことにより、FAT雲フィードバックの特性を把握し、FAT雲フィードバックと温度フィードバックとの関係、特にFAT理論において雲からの射出温度が変わらないという制約が持つ本質的な意味を放射フィードバックという点から考察した。

(2) 気候フィードバックの定式化

当初はMIROC気候モデルにおいて不確実性の高いパラメータを同時に走査したパラメータアンサンブル実験(Ogura et al., 2017)を活用して、各気候フィードバック間の相関関係を調べることを計画した。その際、気温減率フィードバックがどの程度ばらつくかを調べたが、T-FRATの有効性を容易に検証できるほど大きくはないと判断した。そこで、AMIP実験からAMIP+4K実験の気温変化プロファイルを強制的に変えて気温減率フィードバックを評価し、その上で相対湿度不変とした時の水蒸気フィードバック、FAT雲フィードバックを評価し、気温減率フィードバックと連動する気候フィードバックの大きさを定量化した。

(3) 雲フィードバックの予測

気候モデルによる降水の再現性について調べたHirota et al. (2014)を参考に、対流パラメタリゼーションにおいて重要なエントレインメント率に関するパラメータを走査する実験を5ケース行った。まず、エントレインメント率と気温減率フィードバックの関係を調べ、気温減率フィードバックのばらつきを定量化した。実際にシミュレートされた気温プロファイルとそれを基にFAT雲フィードバックを計算し、両者の関係を調べた。さらにPoChedley et al. (2019)を参考に、当初考えていた湿潤断熱減率よりも洗練された、エントレインメントによって空気塊が周囲の大気によって希釈される効果を考慮した、希釈湿潤断熱減率(Romps et al., 2016)を用いて気温応答を予測し、それにもなうFAT雲フィードバックを評価した。実際にシミュレートされた気温プロファイルを用いて評価されたFAT雲フィードバックと希釈断熱減率を用いて予測された気温プロファイルを用いて評価されたFAT雲フィードバックを比較し、理論的な予測可能性について考察した。

4. 研究成果

(1) 雲フィードバックの理解

地球温暖化に対する雲の応答を、シミュレートされた気温変化からFAT理論に基づいて計算し、その放射効果を評価した。FAT雲フィードバックが、従来の雲フィードバックの枠組みでは、次の(2)と(3)の実験を含めて、基本的に正のフィードバックであることがわかった。FAT雲フィードバックが正であることはすでに先行研究で診断されていたが、理論に調和する形で3次元的に雲場を変化させて放射効果を定量化したのはYoshimori et al. (2020)が初めてあり、IPCC第6次評価報告書(Forster et al., 2021)において、FAT雲フィードバックが正である根拠として引用された。

他方、雲頂からの射出温度が温暖化の前後で変わらないというFATの制約は、雲高度フィードバック(OLRの減少)が温度フィードバックにおける雲からの射出量の増加(OLRの増加)によって相殺されることを意味する。この考察をFATフィードバックの再解釈として指摘した。この考察は、FATが成立する条件の下では、モデル間の長波の雲高度フィードバックのばらつきが温度フィードバックのばらつきによって打ち消されるために、実質的にモデル間の気候感度のばらつきに寄与しないことに帰結する。しかし、この理論的考察を実際の大循環モデルシミュレーションで示すのは難しいため、次の(2)で述べる感度解析によりその根拠を調べた。

(2) 気候フィードバックの定式化

AMIP実験に対するAMIP+4K実験の気温応答のうち地表面温度変化からのずれ成分を増減させた場合に、FAT雲フィードバックがどのように変化するかを調べた。図1では、上層の気温上昇が大きくなるほど400~200hPaの雲が減少し、100hPa付近の雲が増加している。この変化はFAT理論に従って雲の高度が増大することを反映している。放射効果を評価すると、図2に示されるように、全球平均および熱帯平均において、気温減率フィードバックとFAT雲フィードバックには概ね逆相関の関係があることが示され、理論的考察を支持している。

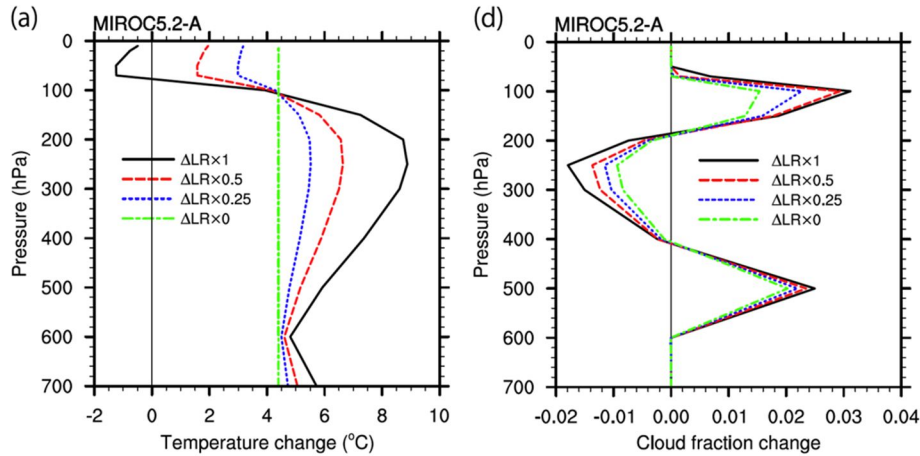


図1 (a)感度実験において変化させた気温変化。LRx1 が AMIP+4K 実験と AMIP 実験の気温変化に相当。LRx0 が AMIP+4K 実験と AMIP 実験の地表面温度変化に相当。(b)FAT 理論にしたがって計算した雲量の変化。Yoshimori et al. (2020)の Fig. 6 から転載。©American Meteorological Society.

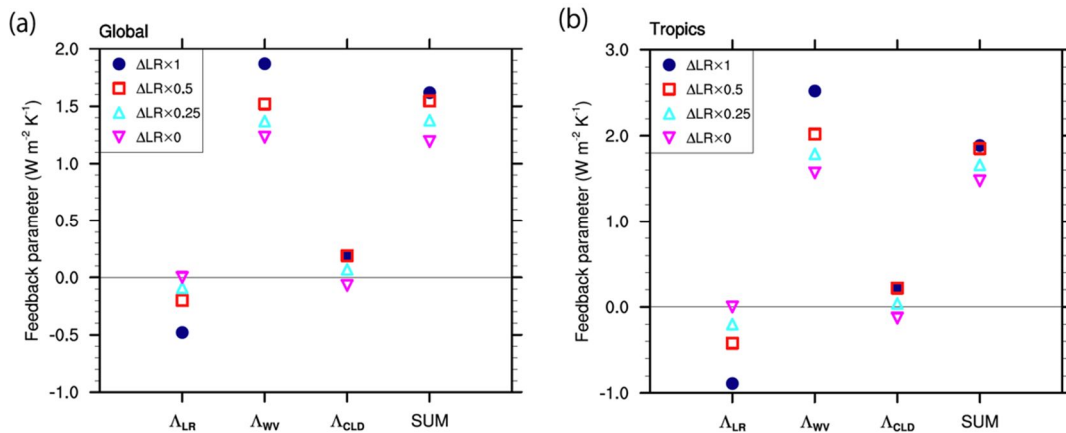


図2 図1の感度実験における長波放射フィードバック。LR は気温減率フィードバック、WV は温暖化の前後で相対湿度不変の条件下での水蒸気フィードバック、CLD はFAT 雲フィードバック、SUM は3者の合計。(a)全球平均、(b)熱帯平均。Yoshimori et al. (2020)の Fig. 7 から転載。©American Meteorological Society.

以上の結果により、長波放射フィードバックに関する新しい定式化の有効性が支持された。この定式化は単にフィードバックの切り分けを変えるのではなく、気候フィードバックの理解にとって本質的な意味を持つ。「研究開始当初の背景」で述べたように、相殺する項を一括りにすることによって、残りの項が正味の不確実性の要因として重要なことを指摘し、フィードバックにおける確実性の高い要素と不確実性の高い要素の見通しを良くする。したがって、気候フィードバック過程間の連動性の理解とともに、今後焦点を当てるべき対象を絞り込むのにも役立つ。本課題では、FAT 理論（あるいは修正された PHAT 理論）からの実際の雲高度応答のズレがその対象に当たる。

(3) 雲フィードバックの予測

大循環モデルでエントレインメント率を走査して得られた気温プロファイルを用いて、気温減率フィードバックと FAT 雲フィードバックの関係を調べた。エントレインメント率を大きく表現したモデルほど、温暖化時に上層の昇温が抑制され、負の気温減率フィードバックの絶対値が小さくなり、正の FAT 雲フィードバックが小さくなる傾向が見られた。これは、人工的にモデルに与えられた気温減率の変化と FAT 雲フィードバックの関係性を示した(2)の結果を、モデルによってシミュレートされた気温減率のばらつきを用いて検証したことになり、サンプル数は限られているものの、概ね結果を支持するものである。

希釈断熱減率を用いて予測された気温プロファイルを用いて計算された FAT 雲フィードバックは実際にシミュレートされた気温プロファイルを用いて計算された FAT 雲フィードバックに比較的近い値を示した。実験を行った 5 つの異なるエントレインメント率のケースについて、熱帯平均では、予測された FAT 雲フィードバックは最大でも約 11%の過小評価であった。このことは現在気候に関する情報のみから希釈断熱減率を用いて理論的に気候フィードバックの一部を予測できることを支持する。モデルバージョン間の違いの説明にはさらなる精確的な検証が必要であるが、温暖化基礎理論の構築へ向けてたいへん重要な知見が得られたと考える。

(4) その他

Yoshimori et al. (2020)では、全天放射フラックスと晴天放射フラックスの差で定義される雲放射効果が、雲以外の要素の変化から影響を受けてしまう、いわゆる雲のマスク効果についての新たな解釈を提案した。これまで温度変化の雲マスク効果は一般に正の値を取ることが知られており、気温減率成分は正にも負にもなり得、両者の合計である温度変化成分が正になる必然性はないことを実験結果から示すとともにその理由を解説した。その中で、長波の雲マスク効果は、射出高度の変化として統一的に理解できること指摘した。

一連の気候フィードバックに関する研究は日本気象学会賞の受賞にも関連し、吉森 (2022)では気候フィードバックに関する最新の視点を含めて概説した。また、気候フィードバック過程間の連動性の解明に密接に関連して、寒冷化と温暖化実験の解析を通じて、雲、地表アルベドフィードバック、気候感度の関係も指摘した (Sherriff-Tadano et al., 2023)。

(5) 総括

本研究は、地球温暖化予測に関係する理論や概念的な側面を重視し、温暖化基礎理論の構築へ向けて気候フィードバックの連動性の解明を目指した。特に、これまでの FAT フィードバックに関する解釈を雲フィードバックの枠組みを超えて大きく改変して再解釈を提供した点、雲マスク効果の考え方を射出高度の変化として統一的に理解する利点と視点を提供した点が特徴的である。気候フィードバックの新しい定式化の実用性については残された課題もあるが、気候フィードバックの理解を深め、確実性と不確実性を整理する斬新な試みと評価したい。

得られた成果は非常に実用的な側面を含んでいる。特に、FAT 雲フィードバックのモデル間のばらつきは気候感度のモデル間のばらつきにはほとんど寄与しないと帰結されること、現在気候の情報から FAT 雲フィードバックの大きさが推定できる可能性があることが挙げられる。

熱帯上層の雲頂付近の温度は大局的には温暖化前後で不変であるという FAT 理論及びわずかに上昇するという修正が加えられた PHAT 理論の放射フィードバックにおける意味について、全く新しい視点から再解釈を与えて新しいパラダイムを創出し、温暖化基礎理論の構築へ向けた進展に貢献したと言う点も含めて、本プロジェクトの主目的は達成できたと考える。

<<参考文献>>

- Caldwell, P. M., M. D. Zelinka, K. E. Taylor, and K. Marvel, 2016: Quantifying the sources of intermodel spread in equilibrium climate sensitivity. *J. Climate*, 29, 513-524.
- Forster, P. and others, 2021: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the IPCC AR6*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923-1054.
- Hartmann, D. L., and K. Larson, 2002: An important constraint on tropical cloud - climate feedback. *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2002gl015835.
- Held, I. M., and K. M. Shell, 2012: Using relative humidity as a state variable in climate feedback analysis. *J. Climate*, 25, 2578-2582.
- Hirota, N., Y. N. Takayabu, M. Watanabe, M. Kimoto, M. Chikira, 2014: Role of convective entrainment in spatial distributions of and temporal variations in precipitation over tropical oceans, *J. Climate*, 27, 8707-8723.
- Huybers, P., 2010: Compensation between model feedbacks and curtailment of climate sensitivity. *J. Climate*, 23, 3009-3018.
- Ingram, W., 2013: A new way of quantifying GCM water vapour feedback. *Clim. Dyn.*, 40, 913-924.
- Ogura, T., and others, 2017: Effectiveness and limitations of parameter tuning in reducing biases of top-of-atmosphere radiation and clouds in MIROC version 5. *Geosci. Model Dev.*, 10, 4647-4664.
- Po-Chedley, S., M. Zelinka, N. Jeevanjee, T. J. Thorsen, B. D. Santer, 2019: Climatology explains intermodel spread in tropical upper tropospheric cloud and relative humidity response to greenhouse warming. *Geophys. Res. Lett.*, 46, 13,399-13,409.
- Randall, D. A. and others, 2007: *Climate Models and Their Evaluation*. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the IPCC AR4*, Cambridge University Press, 589-662.
- Romps, D. M., 2016: Clausius-Clapeyron scaling of CAPE from analytical solutions to RCE. *J. Atmos. Sci.*, 73, 3719-3737.
- Zelinka, M. D., and D. L. Hartmann, 2010: Why is longwave cloud feedback positive? *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2010jd013817.
- Zelinka, M. D., S. A. Klein, and D. L. Hartmann, 2012a, b: Computing and partitioning cloud feedbacks using cloud property histograms. *J. Climate*, Part I: Cloud radiative kernels. 25, 3715-3735; Part II: Attribution to changes in cloud amount, altitude, and optical depth. 25, 3736-3754.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 吉森正和	4. 巻 69
2. 論文標題 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-	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 天気	6. 最初と最後の頁 75-85
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yoshimori, M., F. H. Lambert, M. J. Webb, and T. Andrews	4. 巻 33
2. 論文標題 Fixed Anvil Temperature Feedback: Positive, Zero, or Negative?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 2719-2739
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/JCLI-D-19-0108.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Sherriff-Tadano, S., A. Abe-Ouchi, M. Yoshimori, R. Ohgaito, T. Vadsaria, W.-L. Chan, H. Hotta, M. Kikuch, T. Kodama, A. Oka, and K. Suzuki	4. 巻 36
2. 論文標題 Southern Ocean surface temperatures and cloud biases in climate models connected to the representation of glacial deep ocean circulation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Climate	6. 最初と最後の頁 3849-3866
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1175/JCLI-D-22-0221.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yoshimori, M.
2. 発表標題 Preliminary results on the relation between convection, lapse-rate feedback, and cloud feedback
3. 学会等名 Cloud Feedback Model Intercomparison Project Workshop（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉森正和
2. 発表標題 FATメカニズムに由来する気候感度の不確実性と放射フィードバックの新しい定式化について
3. 学会等名 日本気象学会2020年度春季大会（感染症の影響で予稿集の発行のみ）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉森正和
2. 発表標題 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.
3. 学会等名 日本気象学会2020年度秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshimori, M., F. H. Lambert, M. Webb and T. Andrews
2. 発表標題 Fixed anvil temperature feedback, positive, zero, or negative?
3. 学会等名 AGU (American Geophysical Union) 2020 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshimori, M.
2. 発表標題 Fixed anvil temperature feedback, positive, zero, or negative?
3. 学会等名 Cloud Feedback Model Intercomparison Project Workshop (Mykonos, Greece) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
英国	UK Met Office, Hadley Centre	Exeter University		