

令和 5 年 6 月 13 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：19K03966
研究課題名(和文) 水惑星全球雲解像モデルで再現されるマッデン・ジュリアン振動とその環境場への感度

研究課題名(英文) Madden-Julian oscillation reproduced by an aqua-planet global cloud resolving model and its sensitivity to environmental conditions

研究代表者
宮川 知己 (Miyakawa, Tomoki)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：80584979
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：現実の地球において観測される、熱帯域を数週間から2ヶ月程度の時間スケールで東進して地球全体の気象・気候に大きな影響をもたらすマッデン・ジュリアン振動(MJO)について、その性質が環境場からどのように影響を受けているのかを調べた。MJOの東進を良く再現することで知られる全球雲解像モデルNICAMに水惑星と呼ばれる全球海洋にした理想的な設定を与えることで現象の本質部分を取り出して調べ、さらに現実的な設定での実験とも比較した結果、海面温度の東西差がMJOの東進において重要であること、また対流発達域に生じる相関規模の渦擾乱に伴う海面からの潜熱供給によりその効果が強められることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MJOの東進に対して、どのような環境場と擾乱が影響しているかについての理解が進んだことにより、より正確な予報のためには数値予報モデルが、海面水温の東西差がよく表現できることと、海面からの潜熱供給を強化する渦擾乱を適切に表現できる解像度を有することが必要であることが明らかになった。MJOは数週間から2ヶ月程度の比較的長い時間スケールの現象である一方で、中緯度の多雨・小雨や熱波・寒波をもたらしたり台風発生の引き金となったりすることから、本研究による知見を参考にして今後数値予報モデルの改良が進むことにより、こうした現象の季節予測の精度向上に繋がることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：The Madden-Julian Oscillation (MJO), is a major fluctuation observed in the tropical atmosphere, which travels eastward on a time scale of several weeks to two months, strongly influencing the global weather and climate. The dependency of MJO to the environmental conditions is investigated in this study by an idealized "aqua-planet" version of the global cloud-resolving model NICAM, which is known for its good performance in reproducing the MJO eastward propagation. The simplification allows to extract the essential aspects of this phenomenon. Results are also compared to experiments conducted under more realistic settings, for interpretation. It was revealed that the east-west contrast in sea surface temperature is crucial for the eastward propagation of the MJO. Furthermore, it was found that the effect is enhanced by latent heat supply from the ocean associated with synoptic-scale atmospheric eddies occurring within the active convective envelope.

研究分野：気象学/気候学

キーワード：マッデン・ジュリアン振動 水惑星実験 全球雲解像モデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マッデン=ジュリアン振動 (MJO) は熱帯の降水や台風発生に支配的な影響を及ぼす他、中・高緯度の異常天候や季節傾向の延長予測 (2 週間以上) における予測可能性の主要なソースであると指摘されており、そのメカニズムの理解と予測精度向上は科学的・社会的意義が大きい。

<研究開始当初における世界の MJO シミュレーションの状況>

数値モデルによる MJO の再現は長年困難であったが、研究開始時点までの 10 年間にヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) など一部のモデリングセンターにおいて徐々に観測と整合的な雲域の東進が再現されるようになってきていた。その先駆けとなったのが全球で積雲対流を陽に表現する全球雲解像モデル NICAM であった。

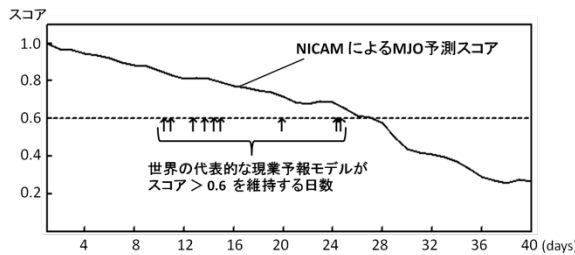


図 1. NICAM による MJO 予測スコアと世界の代表的な現業予報モデル(矢印)の成績比較。スコア > 0.6 が有効な予測の目安。

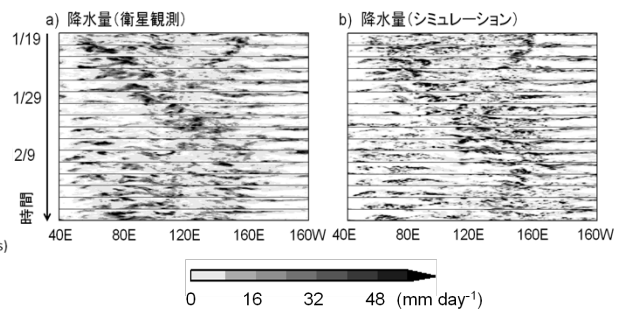


図 2. 時間(縦軸)とともに東進する降雨域。左は衛星観測、右は NICAM によるシミュレーション結果。

雲の簡略化 (パラメタリゼーション) を行う通常の全球モデルと比較して大量の計算資源を必要とするが、予測可能期間および雲域の再現精度において現在世界最高クラスの性能を有していることが文科省の HPCI 戦略プログラム分野 3 「防災・減災に資する地球変動予測」(戦略 3) において課題代表者らにより示された (Miyakawa et al. 2014, 図 1-2)。さらに後継のポスト「京」重点課題 4 「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」(ポスト京)において開発した、3次元の力学的な海洋モデルと結合した新モデル NICAM-COCO により、エルニーニョ現象などの長期変動と MJO との相互作用も調べることが可能になった (Miyakawa et al. 2017)。一方で、他国でも全球雲解像モデルの開発が進んでおり、今後 2-3 年の間に現在の NICAM と同等の性能が実現することが見込まれていた。

<MJO の多様性>

MJO は 30-60 日程度の周期を持つとされるが、冬季には東進成分が支配的な一方で夏季には北進成分が顕著になる他、オーストラリアモンスーンの開始や熱帯収束帯の季節に伴う移動と同期して伝播するなど、大規模場の変動とも密接に関連している。また、エルニーニョやインド洋ダイポールなどの海洋現象や、成層圏の準 2 年周期振動の状況によっても振幅や伝播速度が影響されることが知られている。上述のような様々な状況の複雑な重ね合わせによって決まる環境場の影響を受けるため、MJO の性質や構造には大きなばらつきが存在する。

<メカニズム研究の状況>

MJO はケルビン波、混合ロスビー重力波、ロスビー波、内部重力波など様々な時間/空間スケールの熱帯波動擾乱を伴う。1990 年代には MJO 自体を対流などにより変調を受けた波動擾乱と解釈する説が主流であったが、本研究開始時点では、何らかの理由により東進する対流活発域 (熱源) に対する応答として波動擾乱が存在している、との解釈が多数派となっていた。MJO の対流活発域は対流圏中・下層の水蒸気との結びつきが顕著で、水平規模の大きな水蒸気正偏差の 5m/s 程度での東進を実現することが MJO の再現に重要であると考えられている。このような水蒸気正偏差および対流活発域の東進を実現する理論モデルは複数提案されているが (例: Yang and Ingersoll, 2014)、現実の多様な MJO を統一的に説明するものはまだ存在していなかった。

2. 研究の目的

「MJO とは何か?」という国際的な関心の高い問題に発見後 40 年を経ているがまだ明確な答えが見つかっていない大きな原因は、様々な変動 (例: 季節, エルニーニョ, 成層圏準 2 年振動など) の

【1 研究目的、研究方法など (つづき)】

組み合わせにより異なる環境場のもとで、MJO の性質や構造が変わってしまうことである。数値モデルで現象を再現した上でさまざまな環境場の要素に対する感度実験を実施することによりその影響を定量化するという手順が定跡だが、MJO の場合は従来のモデルでは再現性が低かったこと、環境場の要素が複雑に絡みあっていて評価が難しいことにより、環境場の影響の理解が進んでいない。

しかし、課題代表者らは MJO の再現性に優れた NICAM を、陸を排除して季節を固定し赤道域に波数 1 の海面水温偏差を与えただけの水惑星の設定で動作させることにより、ごく単純化された環境場で繰り返し発生・東進する MJO のシミュレーションに成功した(Takasuka et al., 2015)。その後さらに、水平解像度 3.5 km, 7 km, 14 km の水惑星実験においてそれぞれ MJO シミュレーションに成功してデータを取得した。本研究ではこの理想環境下でのユニークかつ豊富な MJO データをベースとして、(a)MJO のもっとも基本的な構造と性質を抽出すること (b)MJO の性質や構造が環境場の状況およびモデルの設定でどのように変質するかを明らかにすることの 2 点を目的とした。

3. 研究の方法

〈ステップ 1〉

Takasuka et al. (2015) の設定をベースに、NICAM を用いて基準水温 27°C, 熱帯東西水温差 2K を与えた水惑星環境のもとで実験を実施する。水平格子間隔 220 km, 112 km, 56 km, 28 km, 14 km の各設定における 5 年分の基準実験データを作成し、MJO のもっとも基本的な構造と性質を抽出するとともに、その解像度依存性を確認する。

〈ステップ 2〉

MJO を変質させると指摘されている環境場の代表的な要素や、雲内の降水粒子の変換効率・落下速度について、設定を変更した感度実験や関連研究の実験データとの比較を行い、それらがどのように MJO の性質に影響するかを確認する。

〈ステップ 3〉

現実的な設定の MJO 実験と比較し、上記で得られた結果が現実においてどのような現象と対応するかを確認する。また、水惑星設定において惑星の傾斜角などのパラメータを変更した場合に環境場がどのように変化するかを調査する。

4. 研究成果

NICAM の水惑星実験を実施し、水平格子間隔 220 km, 112 km, 56 km, 28 km, 14 km の各設定における 5 年分の基準実験データを作成し、解析した。基準実験データに時空間スペクトル解析を施すと、すべての水平解像度において MJO に対応する対流活発域が確認される一方で (図 3)、水平格子間隔 56 km 以上と比較して 28 km 以下では東進速度が有意に大きいことが確認された (図 4)。が、このような違いが現われる理由として、低解像度においては総観規模の渦擾乱が海面からの潜熱供給の強化を通じて MJO の対流活発域と比較的強く結合しているために東進ケルビン波成分も東へ伝播しづらくなっている可能性を指摘した。同様の特徴は水平 7 km 格子の実験において報告されており、解像度に対して単調に依存していない。

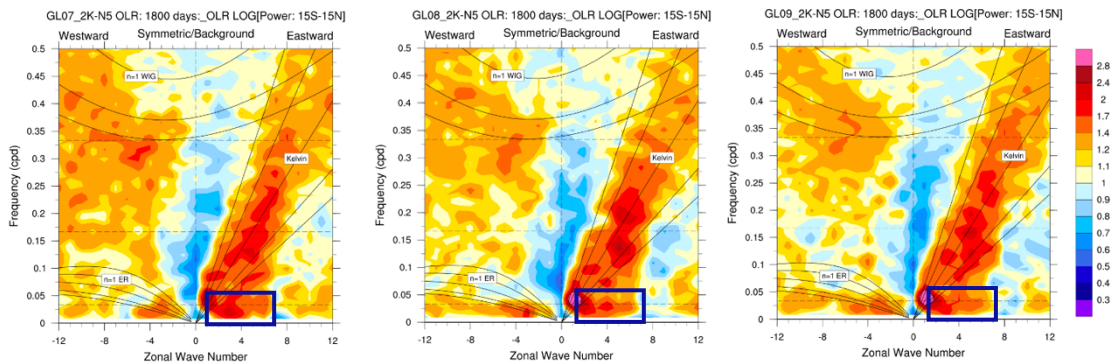
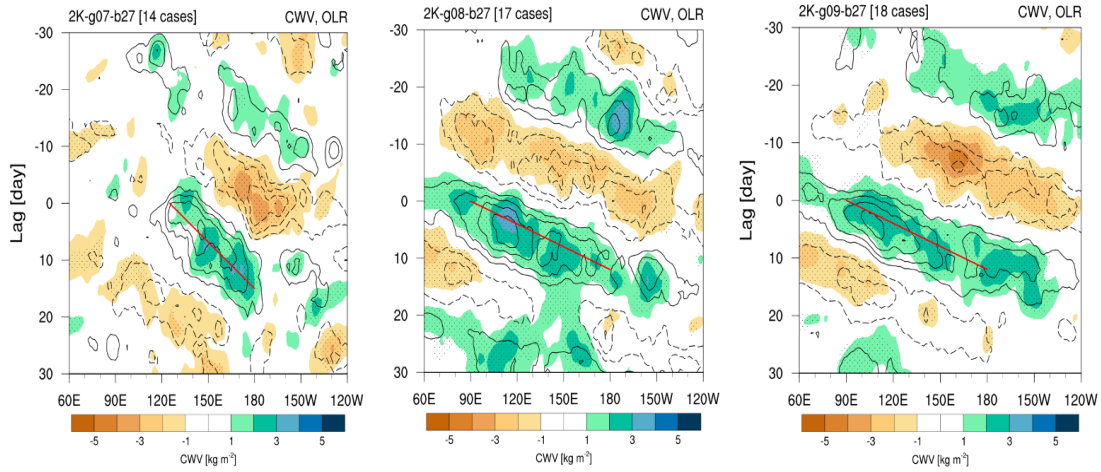


図 3: NICAM による 5 年実験データの熱帯域 (15N-15S) 外向き長波放射の赤道対称成分についての時空間スペクトルのシグナル強度図。水平解像度 56 km (左), 28 km (中央), 14 km (右)。黒実線は赤道波理論により導かれる Kelvin 波, ロスビー波, 西進慣性重力波の領域を示している。MJO のシグナルは青の矩形内にあらわれる (高須賀氏提供)。

【1 研究目的、研究方法など (つづき)】



125E-180, Days 0 to 15 → 3.7°/day 90E-180, Days 0 to 12 → 7.5°/day 90E-180, Days 0 to 12 → 7.5°/day

図4：NICAMによる5年実験データの熱帯域(15N-15S)平均のMJ0合成図(経度時間断面)。水平解像度56 km(左)、28 km(中央)、14 km(右)。カラーは鉛直積算水蒸気量、コンターは外向き赤外放射。赤線はMJ0対流発域の中心を示す(高須賀氏提供)。

MJOを変質させると指摘されている代表的な要素のうち、海面水温の東西構造の違いが上述した海面からの潜熱供給の強化を強める可能性が考えられたが、関連する課題との共同で実施した大規模なアンサンブルMJ0実験において、異なる東進特性を持つMJ0事例間で海面水温の東西構造を取り替えた実験を行うとMJ0東進の確率分布もほぼ入れ替わることが確認された。また、東進が早いか遅いか分岐するような確率分布を有するMJ0事例においては、中緯度のロスビー波の屈折が起こるかどうか東進速度を左右することがわかった。

関連する課題との共同で実施した、220 km および 14 km の水平解像度に設定したNICAMによる水惑星15年実験の結果から、MJ0だけでなく環境場自体の温度・水蒸気構造もまた水平解像度への依存性が大きいことが示された。本研究の設定においては高解像度の実験結果の方が雲被覆が小さく、暖かく大気中の水蒸気量の多い背景場となっていた。このような傾向の地軸傾斜角(0°, 23.5°, 45°, 60°)への依存性も確認された(図5 Kodama et al. より)。さらに、水惑星実験において対流圏中層にトップを持つ比較的浅い対流に伴う運動量輸送の効果を異なるモデル間で比較する国際プロジェクトに参加し、NICAMによる実験データ作成の一部を担当した。

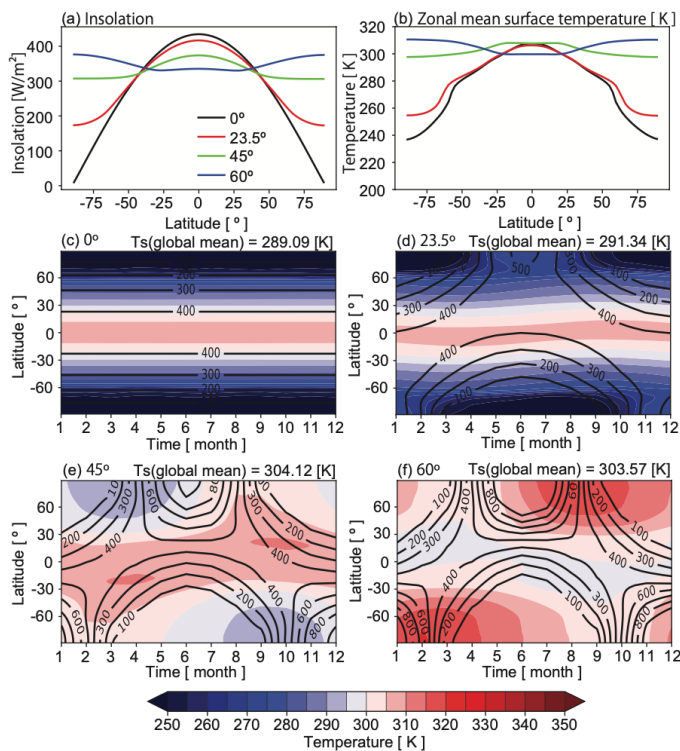


図5：水平解像度14 kmで地軸傾斜角を変化させて実験した結果。(a)太陽入射 (b) 地表温度の東西平均 (c)-(d) 4種類の地軸傾斜角(0°, 23.5°, 45°, 60°)に対する地表温度東西平均の緯度時間断面図。Kodama et al. (2022)より。

【1 研究目的、研究方法など (つづき)】

MJO の西側に生じるロスビー応答成分は台風発生の引き金となることから、本研究の成果は台風の季節予測精度向上の取り組みへの波及効果も期待される。また、全球雲解像モデル比較プロジェクト DYAMOND2 においては、各国の研究機関のモデルにおいて再現される MJO の振幅と伝播特性が大きく異なることが明らかになっている (図 6) が、その理由を理解する助けになることも期待される。

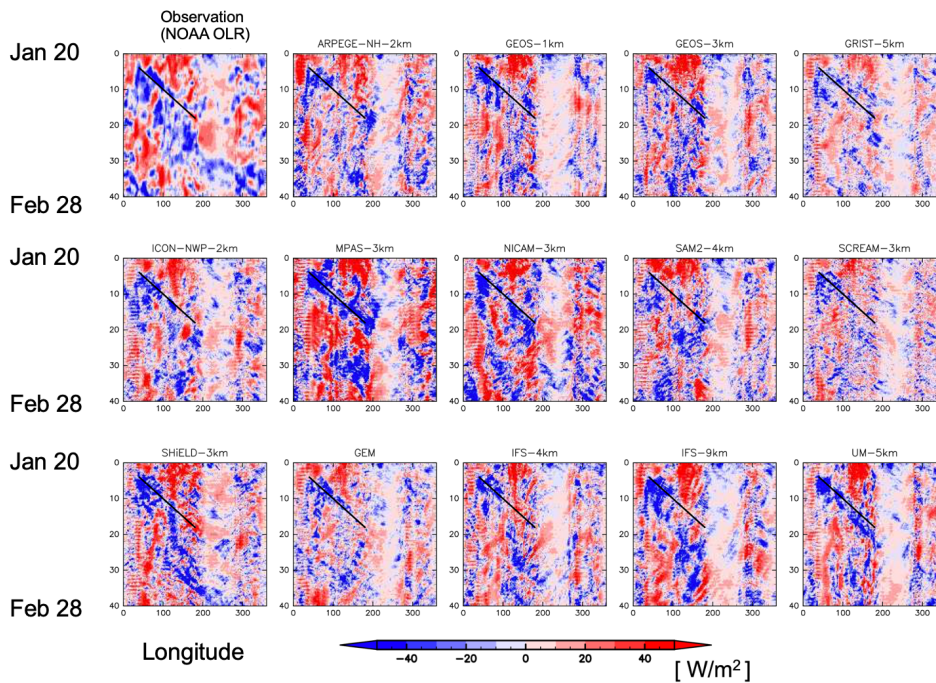


図 6： 全球雲解像モデル比較プロジェクト DYAMOND2 で研究対象となった 2020 年 1 月 20 日からの MJO 実験事例。外向き赤外放射偏差の熱帯域 (15N-15S) 平均の経度時間断面図。黒線は観測における MJO 対流活発域の先端 (東端) のおおよその位置。NICAM は中段中央。

<引用文献>

Miyakawa, T., M. Satoh, H. Miura, H. Tomita, H. Yashiro, A. T. Noda, Y. Yamada, C. Kodama, M. Kimoto, and K. Yoneyama, 2014, Madden-Julian Oscillation prediction skill of a new-generation global model demonstrated using a supercomputer. *Nature Comm.*, doi:10.1038/ncomms4769.

Yang, D., and A. P. Ingersoll, 2014: A theory of the MJO horizontal scale. *GRL*, 41, 1059-1064.

Takasuka, D., Miyakawa, T., Satoh, M., Miura, H., 2015: Topographical effects on the internally produced MJO-like disturbances in an aqua-planet version of NICAM. *SOLA*, 11, 170-176.

Miyakawa, T., H. Yashiro, T. Suzuki, H. Tatebe, M. Satoh, 2017: A Madden-Julian Oscillation event remotely accelerates ocean upwelling to abruptly terminate the 1997/1998 super El Nino. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2017GL074683.

Kodama, T., Takasuka, D., Sherriff-Tadano, S., Kuroda, T., Miyakawa, T., Abe-Ouchi, A., Satoh, M., 2022: Climate of high obliquity exo-terrestrial planets with a three-dimensional cloud resolving climate model. *Astrophysical Journal*, 940 (1). 87. p. 87. ISSN 0004-637X.

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 Kodama, C., Ohno, T., Seiki, T., Yashiro, H., Noda, A. T., Nakano, M., Yamada, Y., Roh, W., Satoh, M., Nitta, T., Goto, D., Miura, H., Nasuno, T., Miyakawa, T., Chen, Y.-W., and Sugi, M.	4. 巻 14
2. 論文標題 The Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): experimental design, model description, and impacts of model updates.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geosci. Model Dev.	6. 最初と最後の頁 795, 820
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/gmd-14-795-2021	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 Nakamura, Y., T. Miyakawa, M. Satoh	4. 巻 98
2. 論文標題 The role of Typhoon Kilo (T1517) in the Kanto-Tohoku heavy rainfall event in Japan in September 2015	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Meteor. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 915, 926
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2151/jmsj.2020-046	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 Kodama, T., Takasuka, D., Sherriff-Tadano, S., Kuroda, T., Miyakawa, T., Abe-Ouchi, A., Satoh, M.	4. 巻 940-1
2. 論文標題 Climate of high obliquity exo-terrestrial planets with a three-dimensional cloud resolving climate model	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 1, 13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac98ae.	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

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 3件/うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Tomoki Miyakawa
2. 発表標題 Model Improvement
3. 学会等名 WCRP workshop on Future of Climate Modelling (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Miyakawa, T., T. Suematsu, R. Masunaga, T. Kawasaki, R. Shibuya, C. Kodama, M. Nakano, H. Yashiro, M. Satoh
2. 発表標題 Introduction to the Ocean-Coupled Components of DYAMOND2, the Inter-Comparison Project for Global “Storm-Resolving” Numerical Models
3. 学会等名 Platform for Advanced Scientific Computing (PASC) 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮川知己
2. 発表標題 全球雲解像海洋結合モデルNICOCO 現状と展望
3. 学会等名 海洋学会2021年度秋季大会共催シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Miyakawa, T., Yamada, Y., Suematsu, T., Masunaga, R., Takasuka, D., Nakano, M., Kodama, C., Yashiro, H., Satoh, M., Miyoshi, T., Kodama, T., and Kawasaki, T.
2. 発表標題 Towards S2S-scale Large-ensemble Prediction Using Global Cloud/cloud-system Resolving Model NICAM on Fugaku
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society Annual Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Miyakawa, T., Yamada, Y., Suematsu, T., Masunaga, R., Takasuka, D., Nakano, M., Kodama, C., Yashiro, H., Satoh, M., Miyoshi, T., Kodama, T., and Kawasaki, T.
2. 発表標題 Overview of global scale large ensemble simulations using NICAM on Fugaku
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Miyakawa, T.
2. 発表標題 From K to Fugaku: activities toward extended-range prediction using NICAM/NICOCO
3. 学会等名 JpGU 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Suematsu, T., Kodama, C., Yashiro, H., Yanase, T., Miura, H., Miyakawa, T., Satoh, M.
2. 発表標題 Dependence of the reproducibility of the MJO convection on differences in the surface flux conditions in NICAM
3. 学会等名 JpGU 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片山卓彦, 水島佳緒, 今田由紀子, 宮川知己, 木本昌秀
2. 発表標題 確率台風モデルを用いた台風季節予報の可能性調査
3. 学会等名 日本気象学会 2020秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoki MIYAKAWA and Hiroaki MIURA
2. 発表標題 Resolution dependencies of tropical convection in global cloud/cloud-system resolving NICAM.
3. 学会等名 AOGS 16th Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片山卓彦, 水島佳緒, 千葉丈太郎, 吉田康平, 宮川知己, 木本昌秀
2. 発表標題 大規模アンサンブル実験結果を用いた台風季節予報の可能性調査
3. 学会等名 日本気象学会2019秋季大会
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
研究協力者	高須賀 大輔 (Takasuka Daisuke)		
研究協力者	小玉 貴則 (Kodama Takanori)		
研究協力者	クロック ダニエル (Klocke Daniel)		
研究協力者	キム ダヒョン (Kim Daehyun)		
研究協力者	ウェディ ニルス (Wedi Nils)		

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			
ドイツ	Max Planck Institute for Meteorology	Deutscher Wetterdienst		
米国	University of Washington			
英国	ECMWF			