

# 全球非静力学モデルを用いた高解像度計算による気象擾乱の発生・発達メカニズムとその予測可能性に関する研究

課題責任者

那須野 智江 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター

著者

那須野 智江\*<sup>1</sup>、清木 達也\*<sup>1</sup>、大野 知紀\*<sup>2</sup>、中野 満寿男\*<sup>1</sup>、江口 菜穂\*<sup>3</sup>

\*<sup>1</sup>海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター, \*<sup>2</sup>気象庁 気象研究所, \*<sup>3</sup>九州大学 応用力学研究所

キーワード：全球非静力学モデル, 雲微物理過程, 台風, 季節スケール予測, 成層圏—対流圏結合

## 1. はじめに

本課題では、全球非静力学大気モデル Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM; Satoh et al. 2014[1]; JAMSTEC および連携研究機関において共同開発)の高度化およびこれを用いた数値実験を行うことにより、雲に関する気候再現性を向上させるとともに、台風等の気象擾乱の発生・発達メカニズムを明らかにし、それらの予測に関する知見を拡充することを目的とする。NICAMの特色は、雲・降水に関する物理プロセスを詳細に計算する点である。上記目的を達成するために、本課題では雲の微物理過程の精緻化を重点的に行っている。また、高解像度非静力学全球モデルの特性を生かした事例として、今年度は2022年1月に発生した気象津波に関する数値シミュレーションも行った。台風の発生・発達メカニズムに関する研究としては、海面水温偏差の台風強度への影響や、成層圏の変動による台風への影響に関するアンサンブル数値実験を行った。以下にそれぞれの内容を報告する。

## 2. 雲微物理過程の精緻化

### 2.1 落下速度に起因するモデル誤差

雲粒子の成長を記述し、格子内の雲水混合比や雲水数濃度といった平均量を予報する数値モデルをバルク法雲微物理モデルという。本研究ではバルク法雲微物理モデル内で解かれている氷粒子間衝突過程を改良し、その全球大気への影響を紹介する。

一般的に、バルク法雲微物理モデルでは雲粒子の終端落下速度  $v$  は直径  $D$  のべき乗で表現されている ( $v = aD^b$ )。しかしながら、指数  $b$  は Reynolds 数といった雲粒子周りの流れの特性に依存して変化するものであり [2]、小さい粒径の場合には 2 を、大きい粒径の場合には 0.5 に漸近する事が分かっている (図 1)。従って、雲粒子の成長段階によらず一定の係数  $a$  と指数  $b$  を利用する事は無視できない系統的バイアスを生むことが分かってきた [3]。この簡易的な終端落下速度は雲粒子の重力沈降と衝突過程で直接用いられており、凝結・蒸発、昇華、融解では間接的に用いられている。本研究では、理論に基づいた正確な終端落下速度の計算手法を採用し、衝突成長方程式を精度よく解く手法を提案した。この手法を大気モデル NICAM に

組み込まれている 2 モーメントバルク法雲微物理モデル NDW6 に適用し、全球実験をもって改良結果の検証を行った。

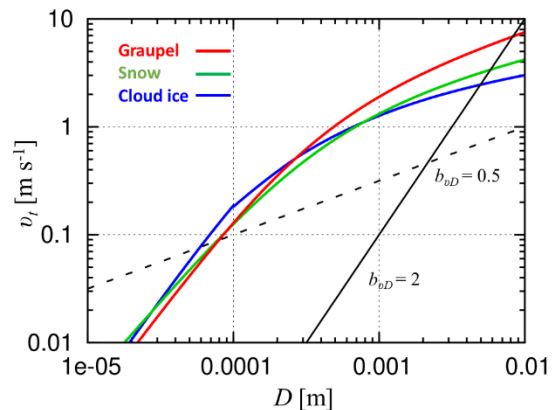


図 1: 様々な粒子種の終端落下速度  $v$  の最大径  $D$  依存性。

### 2.2 衝突成長方程式

衝突成長方程式は粒子種  $k$  の断面積内を単位時間あたりに通過する粒子種  $j$  の総数を計算することで得られる。粒形分布関数を  $f$ 、粒子質量を  $x$ 、衝突効率を  $E$  と置くと、以下のように表現される。

$$\partial L_j / \partial t =$$

$$- \iint_0^\infty x_j f_j(\ln D_j) f_k(\ln D_k) K(D_j, D_k) d \ln D_j d \ln D_k,$$

$$K = E_{jk}(D_j, D_k) \pi / 4 (D_{a,j} + D_{a,k})^2 |v_j(D_j) - v_k(D_k)|,$$

ここで、 $K$  は衝突カーネルと呼ばれる。この衝突カーネルの中には粒子の落下速度差が含まれている為、上式の積分は解析的に解くことが出来ない。そこで、従来のバルク法雲微物理モデルでは衝突カーネルを簡易化する事で積分を解析的に解く手法をとってきた [3]。本研究ではこの落下速度差を精度良く計算する手法として簡易化と近似を用いず、二重積分を直接 Gauss-Legendre 求積法で解くようにした。本研究では 2 重積分の計算速度を削減しつつも計算精度を 90% 以上に保つよう、ガウスの求積点数を 4 点とした。これにより、NICAM 全体の計算コストは地球シミュレータ上で約 11% の増加にとどまっている。また、

落下速度は理論に基づく以下の定式化を採用した[2, 4, 図1参照]。

$$v = \eta_a / D \rho \delta_0^2 / 4 \left( \sqrt{1 + 4 / (\delta_0^2 \sqrt{C_0}) \sqrt{2xg\rho D^2 / A\eta_a^2}} - 1 \right)^2,$$

ここで、 $\delta_0^2=5.83$ ,  $C_0=0.6$ ,  $\eta_a$ は空気の動粘性係数、 $\rho$ は大気密度、 $g$ は重力加速度である。

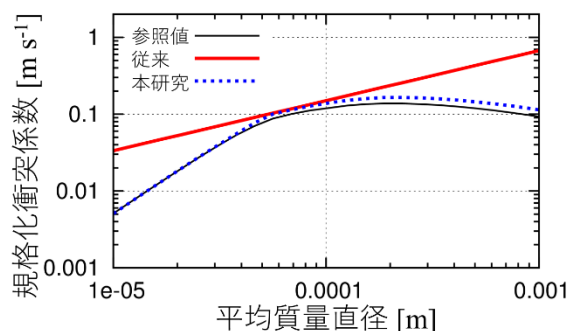


図2: 規格化された衝突係数の平均質量直径依存性。参照値は数値積分による高精度解法の結果を示している。

図2に雲氷同士の衝突による質量混合比減少率の平均直径依存性を示す。これを見ると、従来の手法では直径が40-100  $\mu\text{m}$ の範囲で終端落下速度のべき乗則が最適化されている事が分かる。一般的に雲氷の有効半径は30-40  $\mu\text{m}$ (直径では60-80  $\mu\text{m}$ )である事が知られている為[5]、ほとんどの雲システムでは従来の手法でも精度よく表現できていることが分かる。しかしながら、氷晶数濃度の多いところや、成長初期の薄い巻雲(直径が10-20  $\mu\text{m}$ )では従来の手法は4倍ほど衝突成長を過大評価していることが分かる。このことから、全球実験では熱帯の圏界面付近の雲形成で系統的なバイアスを生むことが考えられる。

### 2.3 全球実験によるモデル改良の検証

雲微物理モデルの改良の効果を検証するため、大気モデル NICAM を用いた全球実験を実施した。水平解像度は14km、鉛直層数は78層とし、2016年9月12日を初期値とした10日積分の結果を用いてモデルを評価した。本研究で利用した雲微物理モデル以外の物理設定は HighResMIP で用いた設定[6]に準拠している。

改良前(CTL)と改良後(NEW)を比較したところ、主に熱帯における雲氷と雪の配分に大きな違いが見られるようになった。図3に主な雲微物理量の鉛直分布を示す。改良によって小さな氷雲の衝突成長が抑えられ、結果として対流圏上部における質量混合比と数濃度が大幅に増加する事になった。これらのことはレーダーエコーの contoured frequency by altitude diagram (CFAD) を改善するように働くことが分かった(図4)。CTLでは圏界面付近に広がる薄い雲氷が観測に比べてより早く成長しており、比較的大きなレーダーエコーを持つ粒子が多く存在する事が分かる(図4a-b)。一方、NEWでは高度16-18kmにおける雲氷の衝突が抑えられた結果、-30dBZ から-20dBZ のレーダーエコーを持つ雲氷が多く見られるよう

になった(図3b:4a-4c)。これら小さな雲氷粒子が昇華成長をしながらゆっくり落下する事により、圏界面付近から高度10km付近まで伸びていくレーダーエコーのモードがより明瞭に見られるようになった。

衝突成長の抑制は巻雲の寿命を長引かせることに作用し、マクロな視点では雲量の増加につながった(図4d)。結果として熱帯平均としては巻雲の光学的厚さが増加し(図3d-e)、雲放射強制力に換算すると短波で4から5  $\text{Wm}^{-2}$ 、長波で7から8  $\text{Wm}^{-2}$ 程度の増加につながった(図示は省略)。この増加は CERES 衛星と比べて NICAM の放射収支を改善する方向に働いた。更に、これらの値は CMIP3, 5 の気候モデルに永らく潜み続ける熱帯海洋上の放射バイアスに丁度合致しており[7]、本研究は NICAM のみならず、世界中の気候モデルの改良に資する可能性が高い。

本研究成果は査読付き国際誌に論文として出版された[8]。

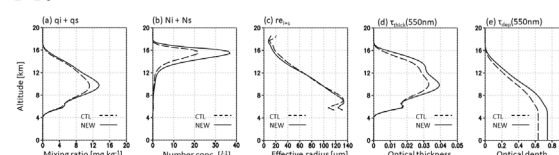


図3: 熱帯における雲氷と雪を足し合わせた(a)質量混合比、(b)数濃度、(c)有効半径、及び光学的厚さと雲頂からの光学的深さの鉛直分布。0-20°Nの熱帯海洋上で時空間平均を行った。

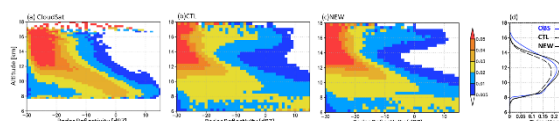


図4: 熱帯における94GHzレーダーエコーで作成した巻雲(雲底気温が253K以下の氷雲として定義)のCFADを示す。左から(a)衛星観測値、および(b)CTLと(c)NEWの結果に衛星シミュレータをかけた結果を示す。また、最右(d)に巻雲雲量鉛直分布を示す。

### 3. トンガ噴火実験

2022年1月15日に発生したフンガトンガ・フンガハアパイ火山の大規模噴火によって、気象津波が世界的に観測された。気象津波を引き起こした大気波動を再現するため、NICAMを用いて数値実験を行った。水平格子間隔は14km、7km、3.5kmを用いた。ここでは3.5km格子モデルの結果のみを示す。鉛直格子間隔は対流圏中層から高度60kmにかけて400mとした。モデルトップは85km、鉛直層数は181層である。

1/15 00UTC の MERRA2 を用いて 14km モデルを 04UTC まで積分した。この出力に噴煙柱を模した Warm bubble をおいて初期値化した実験と、それを置かない実験とをそれぞれ実施し、その差分を噴火シグナルとして解析する。それぞれ14時間の積分を行った。“Warm bubble”として、火山付近の0.14度緯度経度格子4点の地表から500hPaまで気温偏差100K比湿偏差50g/kgのサーマルをおいた。

海面気圧の噴火シグナルとして、約310m/sで水平伝搬するLamb波と、それと比べて遅い240m/sで伝搬する

Pekeris 波[9]とが比較的大きな振幅で確認された。

Lamb 波にともなう気圧変動に少し遅れて潮位変動が観測されていることから、Lamb 波に着目して解析を行う。Lamb 波は分散性がないため、位相速度場が解析できればエネルギー伝搬について議論できる。ここでは、各時刻において火山から 280m/s と 330m/s とで伝搬する波面の間に Lamb 波の wave front が存在すると仮定し、海面気圧の最大値を取る格子を Lamb 波の wavefront と定義し、その到達時刻を解析した。到達時刻から各格子点における位相速度ベクトルを解析した。Lamb 波の位相速度は一定ではなく、たとえば日本付近では 300m/s を下回っている (図 5a)。Lamb 波の振幅は伝搬距離により一定に減衰するのではなく、局所的に大きな場所が存在しており (図 5b)、Lamb 波の位相速度 (したがって群速度) が収束している場所とよく対応していた (図 5c)。本数値実験データは Suzuki et al. (2023) [10] による気象津波の数値実験の外力として利用された。

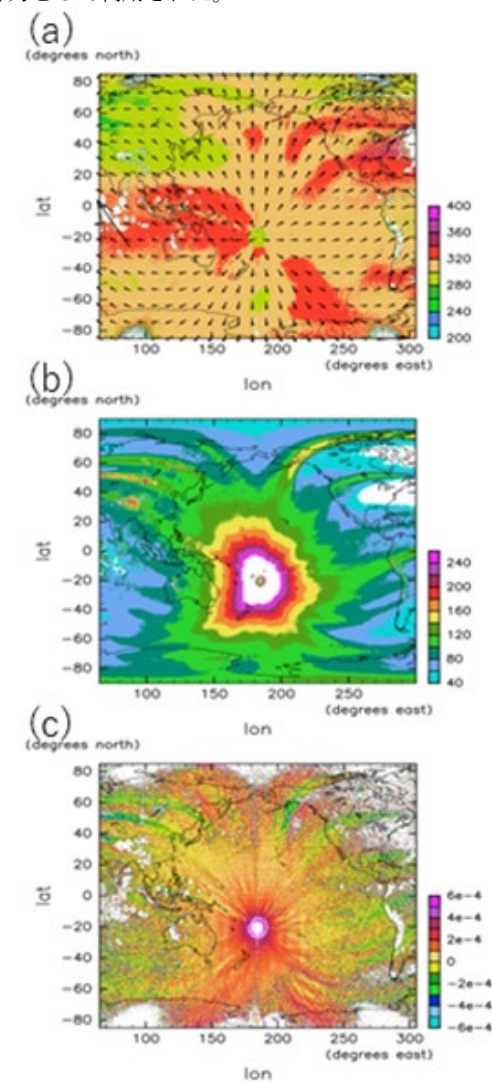


図5: 解析されたLamb波の(a)位相速度(m/s)、(b)振幅(Pa)、(c)位相速度の発散(1/s)。

#### 4. 台風に対する成層圏変動の影響

冬半球成層圏で発生する成層圏突然昇温現象 (Stratospheric Sudden Warming ; SSW) は極域で 40 度以上の昇温となる一方で、赤道域の下部成層圏では熱帯平均で-1 度程度の降温となる。これまで人工衛星観測や客観解析データの解析から、SSW 発生時に熱帯対流圏界面遷移層 (Tropical Tropopause Layer ; TTL) が熱力学的に不安定となることで熱帯域の積雲活動が活発化することや、Madden-Julian Oscillation (MJO) や台風の発生・発達に影響を与えている事を示してきた (Eguchi and Kodera, 2010[11]; Eguchi et al., 2015[12], Kodera et al. 2015[13], など)。最近では、全球大循環モデルの成層圏の力学場を客観解析でナッジングし、疑似的に SSW を発生させた場合とそうでない場合で、熱帯域の積雲対流活動の活動度に差があることが示されている (Noguchi et al. 2020[14])。しかし、全球大循環モデルで使用されている積雲対流パラメタリゼーションの種類によって、積雲対流活動の SSW に対する応答が異なることが同時に指摘されていた。

2019 年 8 月下旬~9 月上旬、南半球 SSW が発生していた時期に多くの熱帯低気圧が発生した。2019 年の台風 15 号 (Faxai) の発達・発生を主眼とした全球雲解像度モデル (NICAM) の 38 層実験 (JRA-55 初期値, 高度~40 km) のデータを利用し、SSW の影響が熱帯域で顕著にみられる事例の合成解析を実施した。この実験では、計算開始日が 8 月 24 日前後で、SSW 時の TTL 降温度合いに差が生じる、すなわち計算開始日がより 9 月上旬に近づくと SSW 発生時の環境場が再現されていたこと (数値実験の初期値依存性) を利用して合成解析を実施した。その解析結果から、SSW 発生時に太平洋域の熱帯低気圧がより西側で発生し、経路も西寄りに進むことがわかった。

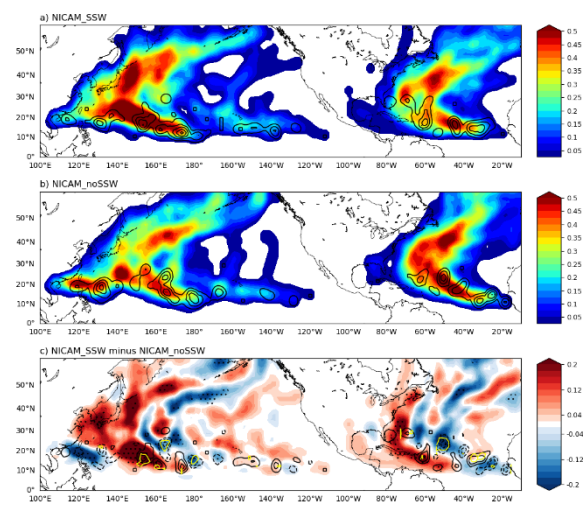


図6: NICAM 78 層実験で SSW の発生が顕著であった事例 (上段) とそうでない事例 (中段) (各 24 事例) の台風頻度 (色コンター) と発生頻度 (黒コンター) とその差 (中段)。

今年度は成層圏の力学場をより詳細に解析をするため、モデルトップを 0.01 hPa (~80km) まであげた 78 層実験を実施した。初期値データは ERA5 と JRA55 を用い、計算開始日を 8 月 20 日~27 日の間それぞれ 3、6 時間間隔、合計 96 メンバー数を実施した。解析結果を図 6 に示す。38 層と同様に、熱帯低気圧の発生経度帯が太平洋では西側に偏位している。78 層では 38 層実験よりも TTL の降温度合いが弱いことが分かった。今後、78 層と 38 層の TTL の応答の違いも含めて、成層圏内部の力学場に関して詳細な解析を実施し、議論を深める。

## 5. 台風に対する海面水温変動の影響

前年度に引き続き、2018 年の西太平洋の台風活動に対して、太平洋の熱帯・亜熱帯・中緯度の海面水温のインパクトを明らかにするための感度実験の追加計算を行い（メンバー数を増加）、前年度からの発展として、台風強度に関する解析を行った。その結果、共通する傾向として、台風の生涯最大強度の頻度分布は二山分布となり（図 7）、強くなる台風の頻度割合は、熱帯の海面水温が低い実験では少なくなる傾向が見られた。この原因を明らかにするため、強い台風の発生位置・最大強度位置の分布やそれらと海面水温との関係を調査中である。

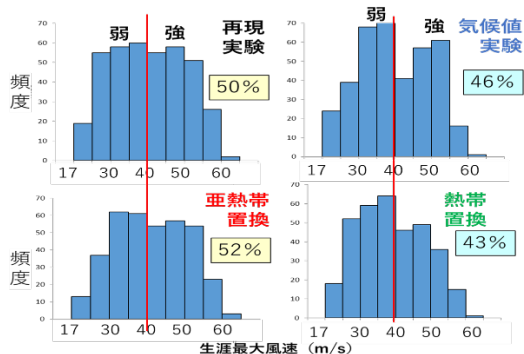


図 7: 数値実験における西太平洋 (100-180E, 0-50N) の台風生涯最大強度 (風速) の頻度分布。(左上) 再現実験 (右上) 気候値の海面水温を与えた実験 (左下) 亜熱帯の海面水温を気候値に置き換えた実験 (右下) 熱帯の海面水温を気候値に置き換えた実験。

## 4. まとめ・今後の課題

モデル開発に関する成果として、全球非静力学モデルにおける氷粒子間衝突過程の改良を行い、巻雲の寿命が長くなることで地球の放射収支のバイアスが改善されることを確認した。また、直近の事例を対象とする先鋭的なシミュレーションも行い、火山噴火に伴う大気波動の新たな理解に繋がる結果を得た。本課題の主な対象である台風については、特徴的な事例についてアンサンブル数値実験を行い、成層圏の影響 (2019 年の事例) や、海面水温の台風強度への影響 (2018 年の事例) の傾向を確認した (成果の取りまとめに向け次年度継続の予定)。台風等の擾乱の季節スケールの変動において、海洋過程が重要となることから、大気海洋結合版 (NICOCO) を用いた基

盤研究を進めている。初期値作成のための F90 版 COCO と NICOCO の ES4 への移植を行い、テスト計算を完了した。不具合への対処に予想外の時間を要したため、当初の計画より遅れているが、次年度本実験に取り掛かる予定である。

## 謝辞

感度実験に用いた海面水温データは、米国地球物理流体力学研究所の村上裕之博士から提供を受けた。JRA-55 は気象庁から、ERA5 はヨーロッパ中期予報センターから、MERRA2 は NASA/GMAO から提供を受けた。本研究は、文部科学省統合的気候モデル高度化研究プログラム (JPMXD0717935457)、JAXA 第 3 回地球観測研究公募 EarthCARE 応用研究課題、科研費基盤研究 C (JP21K03674)、科研費学術変革 (B) JP20H05728、科研費基盤研究 B (JP21H01156)、科研費新学術領域研究 (JP19H05696, JP20H05172) の支援を受けて実施した。

## 文献

- [1] Satoh, M., and 17 co-authors, “The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and Development”, *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1, (2014).
- [2] Mitchell, D. L., “Use of Mass- and Area-Dimensional Power Laws for Determining Precipitation Particle Terminal Velocities”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 53(12), 1710-1723. (1996).
- [3] Seifert, A., Blahak, U., & Buhr, R., “On the analytic approximation of bulk collision rates of non-spherical hydrometeors”, *Geoscientific Model Development*, 7(2), 463-478. (2014).
- [4] Böhm, H. P., “A General Equation for the Terminal Fall Speed of Solid Hydrometeors”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(15), 2419-2427. (1989).
- [5] Rossow, W. B., & Schiffer, R. A., “Advances in Understanding Clouds from ISCCP”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11), 2261-2288. (1999).
- [6] Kodama, C., et al., “The Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): Experimental design, model description, and impacts of model updates”, *Geoscientific Model Development*, 14(2), 795-820. (2021).
- [7] Li, J.-L. F., Waliser, D. E., Stephens, G., Lee, S., L’Ecuyer, T., Kato, S., Loeb, N., & Ma, H.-Y., “Characterizing and understanding radiation budget biases in CMIP3/CMIP5 GCMs, contemporary GCM, and reanalysis”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(15), 8166-8184. (2013).

[8] Seiki, T., & Ohno, T., “Improvements of the Double-Moment Bulk Cloud Microphysics Scheme in the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM)”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 80(1), 111-127, (2023).

[9] Watanabe, S., K. Hamilton, T. Sakazaki, and M. Nakano, “First Detection of the Pekeris Internal Global Atmospheric Resonance: Evidence from the 2022 Tonga Eruption and from Global Reanalysis Data”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79, 3027-3043 <https://doi.org/10.1175/JAS-D-22-0078.1>, (2022).

[10] Suzuki, T., M. Nakano, S. Watanabe, H. Tatebe, and Y. Takano, “Mechanism of a meteorological tsunami reaching the Japanese coast caused by Lamb and Pekeris waves generated by the 2022 Tonga eruption”, *Ocean Modelling*, 181, 102153, <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2022.102153>, (2023).

[11] Eguchi, N. and Kodera, K., “Impacts of stratospheric sudden warming event on tropical clouds and moisture fields in the TTL: a case study”, *SOLA*, 6, 137-140, doi:10.2151/sola.2010-035, (2010).

[12] Eguchi, N., K. Kodera, and T. Nasuno, “A global non-hydrostatic model study of a downward coupling through the tropical tropopause layer during a stratospheric sudden warming”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 297-304, (2015).

[13] Kodera, K., Funatsu, B. M., Claud, C., and Eguchi, N., “The role of convective overshooting clouds in tropical stratosphere troposphere dynamical coupling”, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 6767-6774, (2015).

[14] Noguchi, S., Kuroda, Y., Mukougawa, H., Mizuta, R., and Kobayashi, C., “Impact of satellite observations on forecasting sudden stratospheric warmings”, *Geophysical Research Letters*, 47, e2019GL086233, (2020).