

## 成層圏力学場による熱帯低気圧の発生・発達過程への影響

江口菜穂(九大・応力研) 小寺邦彦(気象研) 山田洋平 那須野智(JAMSTEC)

小林健太(九大・総理工)

### 1 はじめに

昨今、極端現象が顕在化しつつあることが否めない。特に台風(熱帯低気圧)は、生活基盤等に甚大な被害をもたらし得るため、社会的関心が高い気象現象である。今後、地球温暖化にともない強力な熱帯低気圧の頻発が危惧されており、その進路や強度のより正確な予報/予測は、防災、減災の観点からも重要な課題である。

熱帯低気圧は熱帯域で発生し、海面からの温暖で湿潤な空気塊をエネルギー源として、高緯度方向に移動する。下層において、湿潤な空気塊を取り込み、渦を巻き、1次循環(北半球では反時計回り)を形成するとともに、中心に吹き込んだ風が上昇し、浮力を失う高度(雲頂、高度約10~14 km)に到達して、水平に吹き出す2次循環を形成する(図1参照)。

一般的に、積乱雲の発達(強度や到達高度)を決定する要因は、対流圏中・下層の湿度の鉛直分布、地表面気温や対流有効位置エネルギー(CAPE)等にあると考えられ、対流圏上層の影響は小さいと考えられていた。しかし最近、成層圏(熱帯で高度20~50 km)の影響が指摘されている。例えば、成層圏下部の気温変化が熱帯低気圧の強度に与える影響等を議論した先行研究や、将来気候の変化に対する台風強度の議論も活発である[例えば、Vecchi *et al.*, 2013; Emanuel *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2014; Knutson *et al.*, 2020]。

本研究では、成層圏の力学過程が熱帯低気圧の発生や発達に与える影響について、最近の数値モデルを用いた先行研究の紹介と、全球雲解像モデルを用いた初期解析結果について報告する。

### 2 先行研究の紹介

筆者らはこれまで、主に衛星観測データと客観解析データを用いて、成層圏の短期現象である突然昇温現象(Stratospheric Sudden Warming; SSW)に着目し、成層圏と対流圏の力学的結合過程を調べてきた[Eguchi and

Kodera, 2010; Kodera *et al.*, 2011; 2015; Eguchi *et al.*, 2015]。

Eguchi *et al.* [2015]では、全球非静力学モデル Non-hydrostatic global model (NICAM) [Satoh *et al.*, 2014]を用いて、SSW時に成層圏の南北(Brewer-Dobson; BD)循環の上昇流強化による下部成層圏および熱帯対流圏界面遷移層(Tropical Tropopause Layer; TTL 高度14~20 km)の断熱的な降温と、それによる静的安定度の低下する事で、対流圏の上昇流を増強し、対流圏の積雲対流活動を活発化させていることを明らかにした。

またYoshida *et al.* [2019]では、高解像度全球大気モデル(MRI-AGCM3.2) [Mizuta *et al.*, 2017]による大規模アンサンブルシミュレーションデータセット d4PDFを用いて、SSWが熱帯対流圏の対流活動に与える影響について調べ、特に強度の強い熱帯低気圧活動に統計的に有意な増加(約30%)が見られた事を示した。

Noguchi *et al.* [2020]は、気象研究所の大循環モデル(MRI-AGCM) [Mizuta *et al.*, 2012]を用いて、2019年9月のSSW発生時の40hPaより上部の成層圏を客観解析データを用いて現実にナッジングさせた場合とそうでない場合との比較を行った。その結果、SSW時には対流圏界面領域が降温し、熱帯低気圧が有意に発生することを示した。また異なる積雲対流パラメタリゼーションにより、成層圏循環の変化に対する熱帯の積雲対流の応答の違いを議論している。

これら研究の他にも、2次元、3次元軸対称モデルを用いて、上層大気の熱帯低気圧への影響を議論した先行研究は以下が挙げられる。Ramsay [2013]、Moon and Kieu [2017]やTakemi and Yamasaki [2020]。

このように数値モデルを用いて成層圏の力学過程がTCに与える影響を議論する研究が増えてきているが、実際には種々のパラメタリゼーションや初期値依存性からくる予測可能性の問題等から、定量的な影響評価に至っていないのが現状である。

### 3 NICAM アンサンブル実験の初期結果

2019年9月に南半球極域で2002年以来の大規模なSSWが発生し、同時に熱帯域で台風13、14、15号が相次いで発生した。山田ら [personal communication, 2020] は、NICAMを用いて、2019年8月下旬から9月上旬の北半球夏季に多く発生した台風に関して、初期値を6時間毎にずらせてアンサンブルとした実験を実施した。

実験はNICAM.14を用い、水平解像度は14km、鉛直層数は38層、モデルトップは約37kmである。25km以上はスポンジ層となっている。TTL領域では、約1.5kmの鉛直分解能となっている。積雲対流スキームは不使用。初期値は気象庁55年長期再解析データ JRA-55 (Japanese 55-year Reanalysis) [Kobayashi *et al.*, 2015]を用いている。積分の総数は100で、初期値を8月13日00UTCから9月17日18UTCまで6時間ずつずらして、30日間積分を実施した。なお、同要旨集の小林らの研究では、鉛直層数78層のNICAMの実験を行っており、成層圏内の力学過程を考慮できる。

初期値が8月25日以降の予報ではSSWに伴う熱帯上部対流圏/下部成層圏領域が降温して、熱帯低気圧が複数個発生し、強度も強まっていることが確認された。このことにより、積雲対流パラメタリゼーションを用いていない全球雲解像度モデルによっても、成層圏の力学過程が熱帯域の積雲対流活動および、台風発生に影響を与えていることが示唆された。本稿では、このNICAMの出力データを用いて、初期解析した結果を示す。

図2に、熱帯域(20S-20N)で平均した下部成層圏(50hPa)気温の時系列と南半球中緯度(40S-70S)で平均した100hPaのHeat flux ( $v'T'$ )を示す。気温の時系列から、24/25日を境に気温の下降度合いに差があることがわかる。本研究では、気温降下幅が大きいグループ(8月25日12UTC、26日00、12、18UTC)と小さいグループ(8月23日00、12、18UTC、24日06UTC)に分けて、各種物理量の違いを調べた。Heat fluxをみると、8月下旬までは気温変化幅の変化は確認されないが、9月上旬に変化幅の大きいグループの活動度が約1.5倍大きくなっていることが分かる。

図3に、気温降下幅の小さい23/24日平均と大きい25/26日平均に於ける、9月3日の南

半球極域100hPaにおけるジオポテンシャル高度とそれらの違いを示す。これを見ると、計算初期値が25/26日の平均の結果の方が極域で波数1の増幅を確認できる。JRA-55の客観解析データにおいても、23日には波数1の波は卓越していない。26日にはNICAMとほぼ同じ経度帯にGPHの高い領域(波数1)が確認できた(図省略)。このことから、23/24日の初期値では、現実の成層圏の波活動をよく再現できておらず、その為に予報されたSSWが弱かった可能性が示唆される。一方、25/26日を初期値とした場合、現実に近い波活動が表現され、SSWによる誘起された熱帯域での降温がより現実に近い降下幅になったと考えられる。

図4に、熱帯域における100hPaの気温および積雲対流の特徴の違いを示す。これから、23/24日平均よりも25/26日平均の方が熱帯域全体で気温の低下がみられ、平均約1度下がっていた。またOLRでみる積雲対流活動については、西部太平洋、大西洋で熱帯低気圧と考えられる領域がみられ、緯度平均すると北緯10度付近にOLR偏差の極小値が存在している。この緯度帯はSSTが高く、ハドレー循環の立ち上がりの緯度帯に相当する。

### 4 まとめ

数値モデルを用いて、成層圏による熱帯積雲対流活動、特に熱帯低気圧に及ぼす影響について議論した先行研究が存在するが、その定量的な影響評価にはいたっていない。全球雲解像度モデルNICAMの38層のアンサンブル実験 [山田ら,2020] の出力値から、初期値を8月25日以降の場合には、成層圏の力学場の再現が現実に近く、その結果熱帯下部成層圏、上部対流圏の気温の降下を確認した。さらに初期値が23/24日と25/26日の積分結果の平均積雲対流活動を比べた結果、25/26日では北緯10度で活動が強まり、成層圏の南北循環場との関連が示唆され、さらに太平洋上で発生した熱帯低気圧の強度が増していることがわかった。今後は熱帯低気圧の発生環境に関して詳しく調べる予定である。

#### 謝辞

科研費基盤C(課題番号:JP18K03743)の支援を受けています。本研究は、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「防災・減災に資する新時代の大アンサンブル気象・大気環境予測」

の一環として実施されたものです。また、本研究の一部は、海洋研究開発機構の地球シミュレータおよび東北大学が提供するスーパーコンピュータ SXACE の計算資源の提供を受け、実施しました。

### 参考文献

Emanuel *et al.*, *JC*, 2013  
 Eguchi and Kodera, *SOLA*, 2010  
 Eguchi *et al.*, *ACP*, 2015  
 Kobayashi *et al.*, *JMSJ*, 2015  
 Kodera *et al.*, *JMSJ*, 2011  
 Kodera *et al.*, *ACP*, 2015  
 Knutson *et al.*, 2020  
 Mizuta *et al.*, *JMSJ*, 2012  
 Mizuta *et al.*, *BAMS*, 2017  
 Moon and Kieu, *Atmosphere*, 2017  
 Noguchi *et al.*, *GRL*, 2020  
 Ramsay, *JC*, 2013  
 Satoh *et al.*, *Prog. in Earth and Planet.*, 2014  
 Takemi and Yamasaki, *Atmosphere*, 2020  
 Vecchi *et al.*, *JC*, 2013  
 Wang *et al.*, *JAS*, 2014  
 Yoshida *et al.*, *Workshop for Stratospheric predictability and impact on the troposphere @ECMWF*, 2019

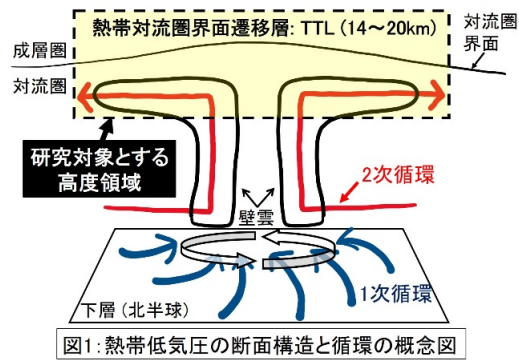


図 1: 熱帯低気圧の断面構造と循環の概念図

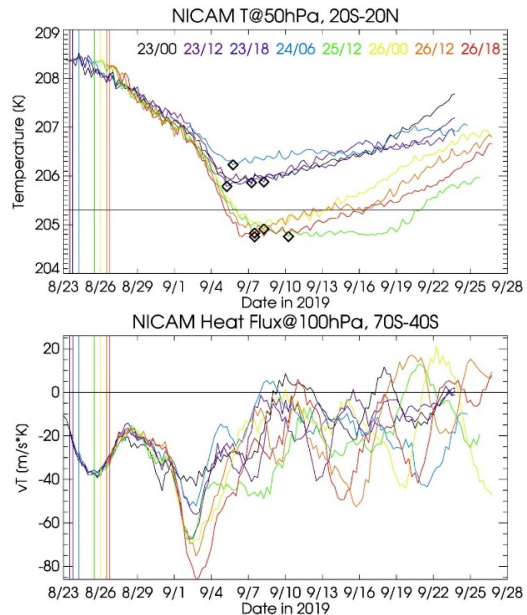


図 2: (上) 50 hPa における熱帯域の気温[K]の時系列。気温低下が弱い事例と強い事例、各 4 例ずつのみ示す。初期値が早いほど、暖色系の色で示す。各事例の初期値の日付と時間を図中に示す。23/00 なら、23 日 00UTC が初期値のラン。各ランの最低気温をひし形で示す。横線は 205.3K で、低温化の強弱の閾値として参照した気温を示す。(下) 100hPa、南緯 40 度から 70 度平均した Heat flux ( $v'T'$ ) の時系列。

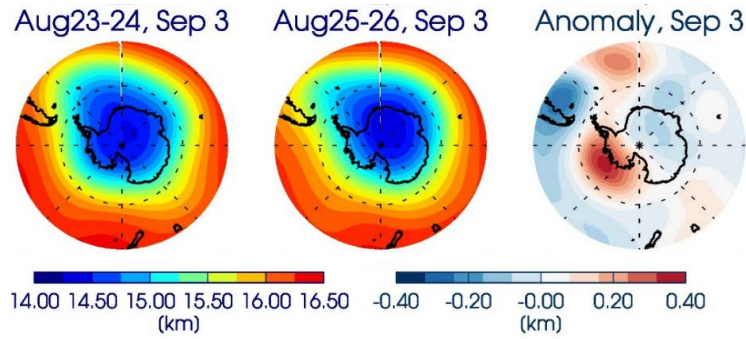


図 3: 2019 年 9 月 3 日の 100hPa でのジオポテンシャル高度 (GPH) [km]。(左) 計算開始日が 23、24 日の平均、(中央) 計算開始日が 25、26 日の平均。(右) それらの差。

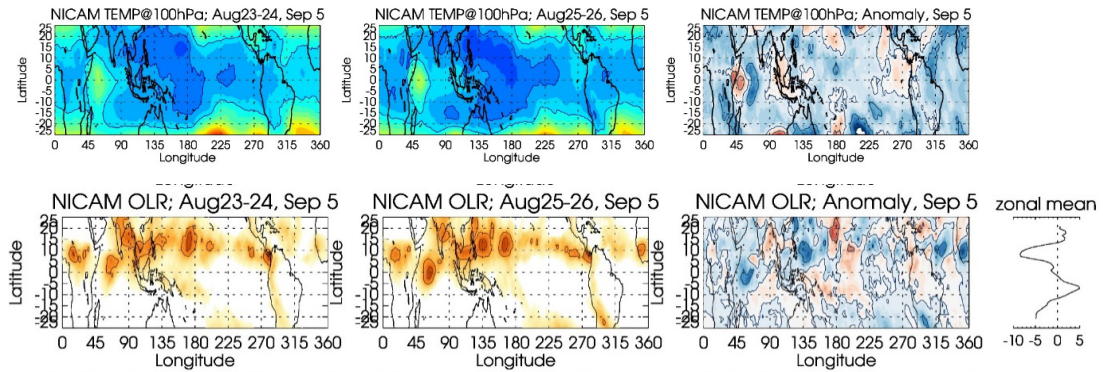


図 4: 9 月 5 日の 100hPa の気温 (上段) と OLR (下段) の水平マップ。(左) 8 月 23/24 日平均、(中央) 8 月 25/26 日平均、(右) 25/26 日平均と 23/24 日平均の差。(最右下) OLR 偏差の東西平均緯度分布。(上段)カラーコンターは 190 K~200 K、2.5 K ずつ。コンターは 1.5 K 毎。(下段) 100~200 W/m<sup>2</sup>、40 W/m<sup>2</sup> ずつ。コンターは 45 W/m<sup>2</sup>。