

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：32612

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05872・19K21053

研究課題名（和文）台風の強度・構造に対するエアロゾルの影響

研究課題名（英文）Effects of aerosols on intensity and structure of tropical cyclones

研究代表者

宮本 佳明 (MIYAMOTO, Yoshiaki)

慶應義塾大学・環境情報学部（藤沢）・講師

研究者番号：90612185

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,800,000円

研究成果の概要（和文）：台風は中心付近で雲が形成されることで駆動する。そのため台風の強度や構造は雲の構造に依存する。雲粒が形成するためには凝結核（エアロゾル）が必須であり、その数濃度が変わると雲の構造が変わることが分かっている。本研究は、台風の強度・構造に対するエアロゾルの数の影響を明らかにする。そこで、流れ場とエアロゾル・雲過程を解く精緻な気象モデルを用いて、エアロゾルの数濃度を系統的に変えた実験を行なった。その結果、成熟した台風の強さへのエアロゾル数の影響は小さい一方、強化過程に大きく影響することが分かった。これは、台風の成熟時の強度は環境場で決まるのに対して、発達時は個々の雲の役割が大きいためと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでエアロゾルの影響は、層積雲や積雲などで主に研究されてきた。近年では台風への影響も調べ始められているものの、事例研究が多く理解は進んでいない。本研究では、理想的な台風の計算条件にエアロゾルの効果だけを追加して計算を行ったため、純粋なエアロゾルの影響を議論できたと考えられる。近年の産業発展により人為起源のエアロゾルが増加しており、さらに温暖化によって中緯度まで強い台風が到達している。つまりエアロゾルの影響は、今後さらに重要になると考えられる。本研究でエアロゾルの台風への影響の理解が得られたため、今後、予測精度向上に向けて継続して研究することで、社会的意義のある成果へ繋がると期待される。

研究成果の概要（英文）：Tropical Cyclones (TCs) are driven by latent heat released by forming clouds in the core region. TC intensity and structure depend on spatial distribution of latent heating. To form cloud droplets, cloud condensation nuclei (CCN) are essentially needed and structure of cloud depends on the number of CCN. Although some recent studies have investigated the impacts of aerosols on TCs, they examined case studies and mainly focused on impacts on clouds in TC. Hence, it is necessary to deepen the basic understanding of the impacts of aerosol on TCs. This study aims to examine the sensitivity of TC intensity and structure to the number density of aerosol. For this purpose, we conducted a set of numerical simulations using a meteorological model with a bin-microphysics model by changing the number density of aerosol.

研究分野：気象学

キーワード：台風 熱帯低気圧 エアロゾル

1. 研究開始当初の背景

台風の駆動メカニズムは、その防災面状の重要性から、古くから活発に研究されてきた。一連の結果、台風は海面から水蒸気を獲得し、その水蒸気が中心付近で凝結することで大気を温め、外側から空気が流入する際に大きな角運動量を輸送することで発達する。そのため、基本的に海から供給される水蒸気の量が多いほど台風は強くなる。水温が高いほど水蒸気の供給量が増えるため、温暖化によって海面水温が増加すると、台風が強化すると考えられている。

水蒸気が凝結する過程、つまり水滴が形成する過程を細かく見ると、過飽和になった空気の中でエアロゾルが凝結核 (Cloud Condensation Nuclei: CCN) となり、その周りに水蒸気が凝集することで、水滴が形成される (Pruppacher and Klett 1997)。この時周囲の空気の温度が上昇する。水滴が形成すると、その後はさらなる凝結成長、水滴同士の衝突を通して、粒径が大きくなって行き、やがて重力によって落下する。つまり、水滴が形成するためには、凝結核であるエアロゾルが必要で、これがないと相対湿度数百%まで水滴は形成されない。

ここで重要な点は、CCNの数に応じて、雲粒の数も変わるという点である (Twomey 1977)。同じ水蒸気量が凝結しても、雲粒の数が多い時は一粒あたりの粒径が小さくなるため、その後の衝突する確率が低くなり、成長を妨げる様になる一方、雨粒大になりにくいいため、雲の寿命は延びると考えられる。さらに気温が 0 度以下の層まで達するとさらに熱を放出して氷粒として成長することもある (Andreae et al. 2004; Rosenfeld et al. 2008)。氷の過程も含めるとその影響はさらに複雑となる。

自然界には凝結核 (CCN) や (氷粒子の形成時に核となる) 氷晶核になる様々な種類のエアロゾルが、無数に存在している。その中でも主要なのは海塩粒子や硫酸塩などであり、人為起源のものも存在する。産業の発展により多量のエアロゾルが大気中に放出され、太陽光を散乱させることで大気中の放射収支に大きく影響を与えている。さらに、それらのうちいくつかは CCN にもなり、雲全体の形状や性質を変えると考えられている。つまり、同じ気温・湿度の環境場でも、CCN の数濃度が変わると雲の構造も変わる。上述のように、台風は回転中心付近での雲の分布、つまり水蒸気が凝結する分布が変わると、台風自体の強度・構造が大きく変わることから、CCN の数が変化すると台風の強度・構造も変化すると考えられる (Tao et al. 2012)。

これまでも台風に対するエアロゾルの影響は、雲とエアロゾルの過程を解く数値モデルを用いて研究されてきた。Zhang et al (2007) は、Saharan Air Layer のダスト粒子の数濃度が変化することで台風の強度が変化することを示した。複数の既往研究による知見では、台風内の雲の CCN となるダスト粒子の数濃度が大きいとき、外側降雨帯 (レインバンド) での対流活動が活発になるとされ、この結果台風の強度が減少すると報告されている (Zhang et al. 2007, 2009, Carrio and Cotton 2011, Rosenfeld et al. 2011, Khain et al. 2010, Yuan and Wang 2014, Zhao et al. 2018)。化学物質輸送モデルを用いた数値シミュレーションを行うことで、海塩粒子の海面フラックスが増加すると、降水を増加させ、雲の構造が変化することが示された (Jiang et al. 2016, 2019a, 2019b)。また、人為起源のエアロゾルを考慮すると台風の強度が弱まること示された (Wang et al. 2014)。この傾向は大陸性のエアロゾルを考慮した場合でも同じである (Khain et al. 2016, Lynn et al. 2016)。一方で、海塩粒子の供給源を台風のコア域に加えたり、Saharan ダストが目の壁雲域へ流入すると台風が強くなること示された (Herbener et al. 2014, Khain et al. 2010)。

このように、研究によってエアロゾルが台風に与える影響は異なっている。これは、CCN 数濃度と台風の関係が複雑で、環境場などその時々条件によって変わってきてしまい、ほぼ全ての既往研究は現実事例のシミュレーションを行って解析しているためと考えられる。つまり、エアロゾルが台風に与える影響については、基本的な理解が不足しており、現実事例に入る前に、エアロゾル以外の影響を取り除いた実験を行なって、エアロゾルの台風に対する影響を詳しく調べる必要がある。この基礎理解が進まないと、現実事例や将来予測などは進めることが難しい。

2. 研究の目的

本研究では、エアロゾルが台風に与える影響を、高精度の数値モデルを用いて、理想条件化で発達する台風に着目して複数回のシミュレーションを実行することで解明する。具体的には、エアロゾルの数濃度を変化させた時に、シミュレーションの中での台風の強度・構造が、どの様に変化するのかを細かく解析して明らかにする。エアロゾルが雲に与える影響は非常に複雑で、解析的に支配方程式の解を導出することは難しい。そこで、エアロゾルの効果を加味した高精度数値モデルを用いて、ある程度の近似が含まれるものの、現実的な解 (特に時間発展を含む) を得ることを狙う。現実事例では、エアロゾル以外の効果によって複雑に台風の強度・構造が決まっているため、今回はエアロゾルの影響のみに注目するため、すでに多くの研究で行われてきた理想的な条件下で成長する台風の計算を行う。この理想条件で、エアロゾルの数濃度のみを系統的に変える。その結果を解析することで台風の強度・構造へのエアロゾルの影響を解明する。

3. 研究の方法

気象場の時間発展を解く数値気象モデル (Miyamoto and Takemi 2010) と、エアロゾルの効果を解く雲物理モデル (Suzuki et al. 2010) を併せて大型コンピュータで解くことで、台風が形成してから成熟するまでの一連の過程を計算した。気象モデルは、Rotunno and Emanuel (1987) を基にした回転軸対称系の非静力学モデルで、風速三成分とエクスナー関数、温位、水蒸気混合比と各種スカラー変数を予報変数とする。空間方向には 4 次精度の中央差分、時間方向

には3次のRunge-Kuttaで離散化した。雲物理モデルは温かい雨を取り扱い、粒径をbinで分けて表現するモデルである。これまでの(エアロゾルを考慮しない)多くの台風研究(例: Miyamoto and Takemi 2013, 2015, Miyamoto and Nolan 2018)と同様に、初期値として回転軸対称な渦を水平一様な大気場の中に挿入して、その時間発展を解いた。ここで、初期値の大気場はJordan (1958)の熱帯平均環境場を、渦はRotunno and Emanuel (1987)を用いた。最大風速は 20 m s^{-1} 、最大風速半径は 100 km とした。水平方向の境界には放射条件を、上下方向の境界には固定境界条件を適用した。底面は海面として、水温を 300 K で固定した。コリオリパラメータは $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ で一定とした。格子スケール未満の拡散はSmagorinskyモデルで解き、混合長さは水平・鉛直それぞれ、 $1000 \text{ m} \cdot 100 \text{ m}$ とした。高度 16 km よりも上に、上部境界での重力波の反射を抑えるダンピング層を設けた。計算領域は、半径方向に格子点数250点で 1530 km までカバーし、鉛直方向には高度 22 km まで40層に離散化した。水平方向の格子幅は最も内側の 95 km まで 1 km 、それ以降徐々に広がり、最も外側で約 17 km である。鉛直方向の格子間隔は下層ほど小さく、最下層で 200 m で、上に行くほど大きくした。初期値のエアロゾルの数濃度は、高度 1 km まで一定で、それより上では指数関数的に減少するようにした。下層のエアロゾル数濃度の値に係数をかけ、その係数を系統的に変えて実験を行った。エアロゾルの物性値は海塩粒子とした。この条件で、200時間の積分を行った。

本研究では新たに、海面からの供給項、雨滴に付着して落下する湿性除去項(Wang et al. 2014)、さらに環境場からの供給項を加えた。最後の項は、今回のモデルが軸対称系であり移動に伴う周囲からの供給を表現できないためである。

4. 研究成果

a) 二次元軸対称モデルによる実験結果

図1に、 $\text{CCN} = 100 \text{ cc}^{-1}$ の時の実験の結果得られた、非断熱加熱 Q_{mp} 、接線風速 v 、凝結物混合比 q_t 、動径風速 u の半径・高度断面図を示す。それぞれ、台風が準定常状態における10時間で平均した結果である。接線風速の極大が半径 30 km ・高度 1 km 付近に存在し、その高度 1 km 以下に内向き流、高度約 14 km 付近に外向き流が存在する。さらに最大風速半径付近には強い非断熱加熱量と大きな凝結物混合比が確認できる。

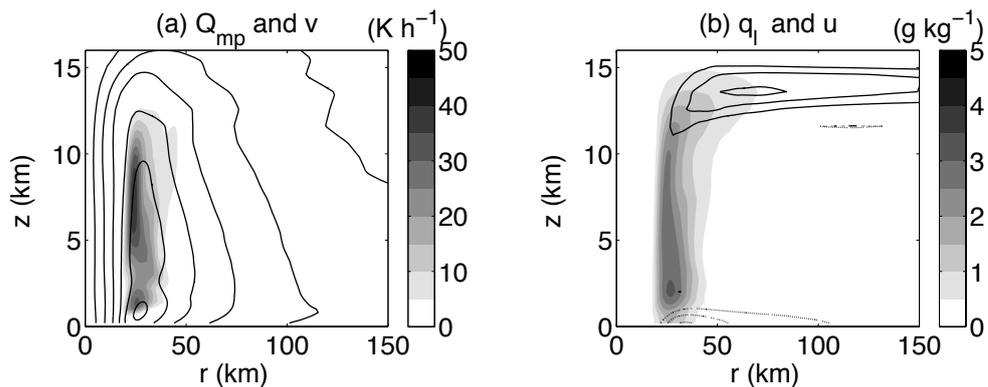


図1 : (a)非断熱加熱 Q (陰影)と接線方向風速 v (等値線)、(b)凝結物混合比 q_t (陰影)と動径風速 u (等値線)の半径・高度断面図。 v 、 u の等値線の間隔はそれぞれ 10 m s^{-1} 、 5 m s^{-1} である。

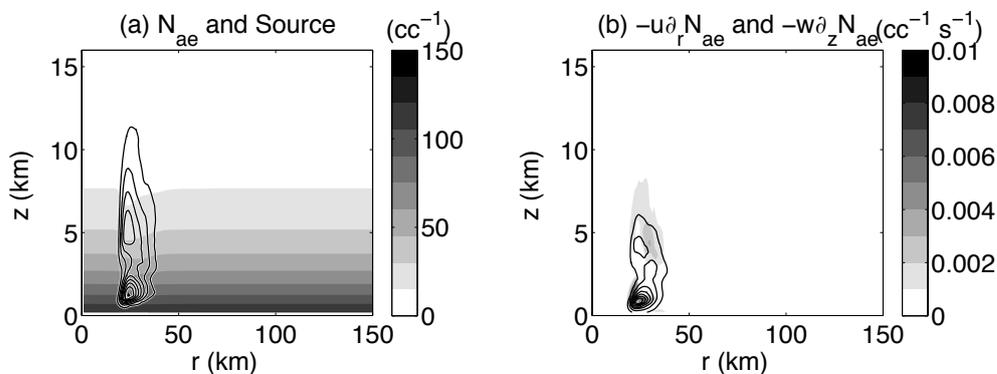


図2 : (a)数濃度 N_{ae} (陰影)と生成項(等値線)、(b)動径方向移流項(等値線)と鉛直方向移流項(陰影)の半径・高度断面図。各等値線の間隔は、 $1 \cdot e^{-3} \text{ cc}^{-1} \text{ s}^{-1}$ である。

図2に、エアロゾル(海塩粒子)の数濃度 N_{ae} 、凝結による減衰項、動径方向移流項、鉛直移流項の半径・高度断面図を示す。エアロゾルは下層ほど大きく上層ほど小さく、特に非断熱加熱が大きい部分で CCN 数が減少している。最大風速半径・高度付近、及び、目の壁雲域の下層で動径方向移流・高度方向移流が大きい。

図3に高度2.5 kmでのCCN数濃度・シンク項・動径方向移流項・鉛直方向移流項の分布を示す。最大風速半径・高度付近で特にCCN数の減少が顕著に見られる。ここは目の壁雲の下端部分に相当し、先行研究と同様に、雲の形成に必要なCCN数が減ったと考えられる。さらに、動径・鉛直方向移流によって補填されていることが分かる。

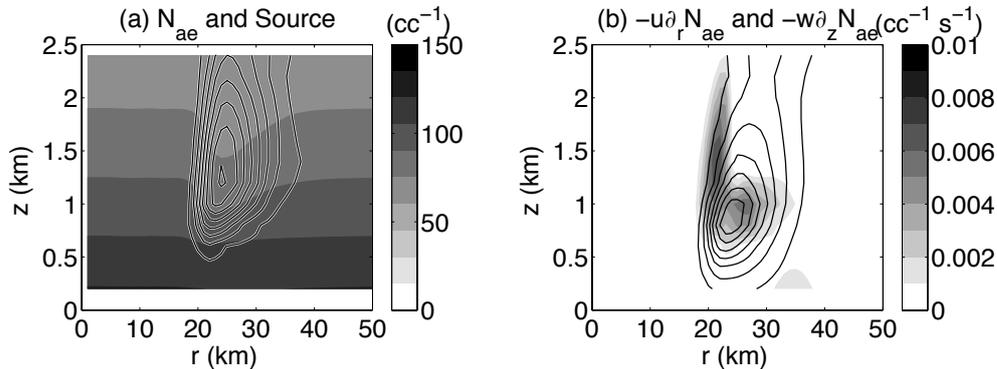


図3：図2と同じだが、高度2.5 km以下の結果。

次にエアロゾル数濃度の時間変化式の収支解析を行った。エアロゾル数濃度の時間変化は、動径方向・鉛直方向移流項・雨粒による湿性除去項 (scav)・海面フラックス (SFLX)・蒸発による再生成フラックス (EFLX) で決まる。計算結果の風速やエアロゾル数濃度などを用いて、各時間における各項の値を計算した。図4に、半径100 km以内で平均したエアロゾル数濃度の時間変化と各項の時系列図を示す。この結果から、各項共に計算開始後70 h程度から特に、鉛直移流項が正に大きく水平移流項が負で大きい。主にこの両者が釣り合っており、それに海面フラックスが加わることで収支が決まっていると解釈することができる。

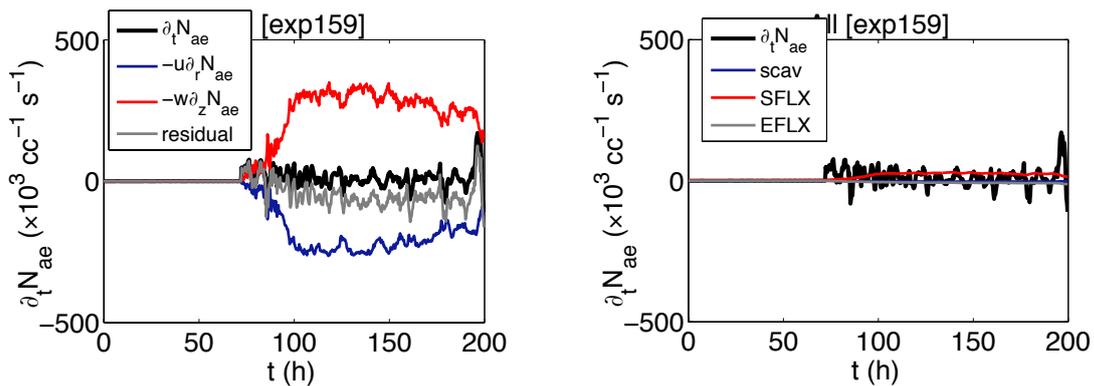


図4：エアロゾル数濃度と保存式における各項の時間変化図。左図での黒線・青線・赤線・灰色線はそれぞれ、局所時間変化項、動径方向移流項、鉛直方向移流項、残差項を表す。右図では、青線が雨粒に付着して落下する項、赤線が海面フラックス、灰色線が蒸発による生成フラックスを表す。

図5に大気最下層におけるCCN数濃度を10000, 1000, 100 cc⁻¹で変えた時の、台風の強度の時系列図を示す。台風の強度は、Miyamoto and Nolan (2018)と同様に、自由大気下層にあたる高度2 kmの最大風速と定義した。図から、どの実験でも最初緩やかに発達し、やがて急激に発達を開始する。その後最大強度に達して、徐々に強度が弱まっていく。CCNが10000と1000 cc⁻¹の時の結果は似たものになっているが、CCNが100 cc⁻¹になると、強化速度も速く、最大の強度も強くなることが分かった。

a) 二次元簡易モデルによる熱対流の計算・広範囲高精度モデルによる下層雲の計算結果

そこで、そもそも対流自体へのCCNの影響を明らかにするために、二次元湿潤対流を対象にCCN数濃度を系統的に変えた実験を行なった (Miyamoto et al. 2020a)。その結果、CCN数の影響は、対流が生まれて間もない期間に限られ、環境場によって対流の振る舞いが決まるフェーズになると、CCN数の大小の影響は見られなくなった。台風でも、成熟した時には、環境場によって強度が決まるため、CCN数の影響は限られると考えられる。しかし、発生期や発達期には、コア域での深い湿潤対流が重要な役割を担っており、CCN数の影響が大きく出てくると考えられる。

また、下層雲(積雲)に関して、高精度の数値モデルを用いて広範囲をカバーする数値実験結果を解析し、エアロゾルの影響を調べた (Miyamoto et al. 2020b)。すると、エアロゾルの数濃度が減少すると共に、積雲内の鉛直速度と、雨粒の粒径が増加し、各雲セルの水平スケールが小さくなり降水が増加するなど、大きな影響が見られた。台風の時も同様に、CCN数が少ない

環境では、降水粒子までの成長が早く、それに伴い雲の構造も変化すると考えられる。

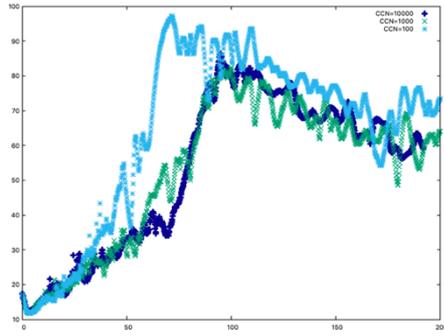


図5：CCNを10000（紺色）、1000（緑色）、100（水色） cc^{-1} とした時の実験で得られた台風の強度の時間変化図。

b) 考察：幅広いパラメータ空間における台風のCCN数依存性

本研究で得られた、CCNの数濃度が少ない時には台風の強度が弱まるという結果を考察する。台風の強度・構造は目の壁雲域での凝結分布に大きく依存しているため、ここで鍵となる過程は、海塩粒子がCCNとして目の壁雲域で凝結が生じる時であると考えられる。CCN数が少ないと、与えられた過飽和度が同じであれば、粒子の数が少ないが一粒あたりの大きさが大きくなる。

そこで積雲対流の形成時に注目して、CCN数を系統的に変えた数値実験を行なった。その結果、CCN数が少ないと対流形成が遅れて、対流強度自体も弱くなることが分かった。収支解析を行なった結果、CCN数が少ないときは、凝結による加熱が弱いことが示された。結果を考察すると、大きい粒子の方が形成するために長い時間が必要であり、CCN数が少ない時には、大きい粒子が形成する間に、もともと浮力を伴っていた流体粒子が、十分に凝結加熱を得られないまま移動してしまうため、雲まで成長しづらいと考えられる (Miyamoto *to be submitted*)。図7にCCN数が多い時と少ない環境場における、水滴が凝結する時の粒径と水物質の質量の時間変化に関する模式図を示す。

台風では、もしCCN数が少ないと、二次循環によって持ち上げられた空気塊の中で凝結が生じるものの、与えられた過飽和度に対応した粒径（CCN数が少ないと大きい）まで十分に成長できないので、凝結加熱が十分に生じない。凝結による非断熱加熱が弱いと、台風の強度に直接的に影響するため、大きな感度になったと考えられる。

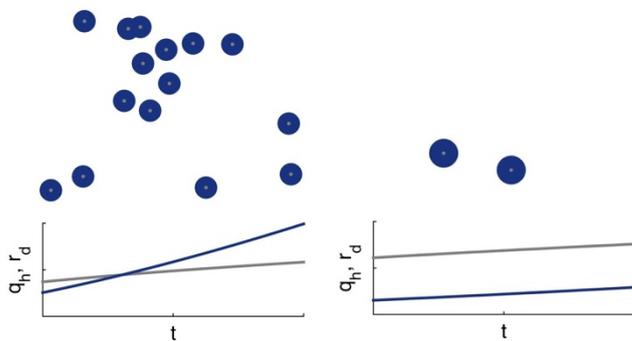


図7：CCN数濃度が多い時（右）と少ない時（左）の、水滴が形成する時の粒径（灰色線）と、凝結した水の質量（青線）の時間変化を表した模式図 (Miyamoto et al. *to be submitted*)。CCN数が少ないと粒径が大きな粒子が形成しようとするが、与えられた過飽和度の分を凝結するためには長い時間がかかってしまい、結局少量の水しか生成することができない。その分非断熱加熱量も減るため、浮力が生じず、対流も形成されないと考えられる。

d) まとめ

台風に対するエアロゾル（CCN）の影響を調べるため、高精度の雲物理過程を解く数値モデルを用いて、CCN数濃度を系統的に変えた数値計算を行なった。その結果、先行研究でも示されたように、雲の構造や降水量に影響が生じた。また、台風の強度も、CCN数が減少すると共に強くなることが示された (Miyamoto et al. *to be submitted*)。これは、先行研究で積乱雲の強度への感度を調べたものと整合的である。この結果を解釈するため、同じくCCN数を系統的に変えた積乱雲の理想化実験を行った。CCN数が少ないと、流体塊が移動する時間内に凝結できる量が減るため、加熱量が減って積乱雲が弱まることが分かった (Miyamoto *to be submitted*)。この結果は、台風のCCN数への依存性の解釈にも適用すると考えられる。

また、CCN数の台風への影響は、特に発生期や発達期に顕著であった。そこで、二次元系でCCN数を系統的に変えたRayleigh対流の数値実験を行なったところ、対流が生じ始めた時は、CCN数が少ないと弱い対流が生じたが、十分に時間が経って境界条件で決まる準定常状態になるとCCN数の影響は非常に小さくなった。台風も成熟期は環境場で決まるので、この結果と整合的である (Miyamoto et al. 2020a)。下層雲などはCCN数への影響が顕著に出るが (例：Miyamoto et al. 2020b)、これは雲物理過程が流れ場を決めるためと考えられる。台風の場合も発生期・発達期のように雲が重要な役割になる時には、CCN数の影響が強くなるが、成熟期になるとそれほどの影響は見られなかった。

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 2件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Miyamoto, Y., D. S. Nolan, and N. Sugimoto | 4. 巻 75 |
| 2. 論文標題 A Dynamical Mechanism for Secondary Eyewall Formation in Tropical Cyclones | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Atmospheric Sciences | 6. 最初と最後の頁 3965-3986 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0042.1 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Miyamoto, Y., S. Nishizawa, and H. Tomita | 4. 巻 98 |
| 2. 論文標題 Impacts of Number of Cloud Condensation Nuclei on Two-Dimensional Moist Rayleigh Convection | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Meteorological Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 437-453 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-023 | 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 Nolan, D.S., Y. Miyamoto, S. Wu, and B.J. Soden | 4. 巻 147 |
| 2. 論文標題 On the Correlation between Total Condensate and Moist Heating in Tropical Cyclones and Applications for Diagnosing Intensity | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Monthly Weather Review | 6. 最初と最後の頁 3759-3784 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1175/MWR-D-19-0010.1 | 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 |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Miyamoto, Y., D. S. Nolan, and N. Sugimoto |
| 2. 発表標題 Dynamical Mechanism for Secondary Eyewall Formation in Tropical Cyclones |
| 3. 学会等名 The 13th Conference on Mesoscale Convective Systems and High-Impact Weather in East Asia（国際学会） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Miyamoto, Y |
| 2. 発表標題 Linear Thermal Analysis of discretized fluid equations. Seminar of Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sciences |
| 3. 学会等名 Seminar of Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sciences (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 宮本佳明 |
| 2. 発表標題 270メンバーのアンサンブル計算から得られた急発達前の台風の構造変化 |
| 3. 学会等名 低気圧と暴風雨に係るワークショップ 2019 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 宮本佳明, D. S. Nolan, 杉本憲彦 |
| 2. 発表標題 エクマンバンピングを介した不安定 |
| 3. 学会等名 日本気象学会2018年度秋季大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 宮本佳明, D. S. Nolan, 杉本憲彦 |
| 2. 発表標題 第二の眼の壁雲の形成メカニズム |
| 3. 学会等名 日本気象学会2018年度秋季大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 宮本佳明 |
| 2. 発表標題 台風における風 |
| 3. 学会等名 第60回風に関するシンポジウム（招待講演） |
| 4. 発表年 2018年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 筆保弘徳, 山田広幸, 宮本佳明, 伊藤耕介, 山口宗彦, 金田幸恵 | 4. 発行年 2018年 |
| 2. 出版社 ベレ出版 | 5. 総ページ数 242 |
| 3. 書名 台風についてわかっていること知らないこと | |

〔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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
| | | | |