平成 29 年 6 月 19 日 気 象 研 究 所 東 京 大 学 海 洋 研 究 開 発 機 構

# 台風全域の超高解像度シミュレーションが解明した風の微細構造

台風の詳細構造を解明するために、理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」 を駆使し、これまで不可能だった台風全体を高分解能(100m)で計算する「台風全 域ラージ・エディ・シミュレーション(注 1)」を実施して、海上の台風の地表面 付近、特に台風の最も風速が強い領域における風の微細構造を初めて明らかにしま した。

その結果、これまでに指摘されていた壁雲の外側にあるロール構造(注2)に加 えて、台風の壁雲(注3)付近にも別の構造を持つ新しい2種類のロール構造が出 現しました。これら新しい2種類のロール構造が計算されたのは本研究が世界で初 めてです。このロール構造により、海上の台風でありながら局所的に平均風速の4 割に達する著しい風速変動を伴う突風が吹いている計算になりました。

本研究で得られた結果は、これまで知られていなかった台風内の詳細構造を明ら かにしたという学術的な貢献に加えて、防災上も、地表面付近に生じうる突風の強 度についての情報を与える重要な成果です。また、数値予報モデルが台風の強度を よりよく予報するために必要な、地表面付近の水蒸気などの輸送を表現するパラメ タリゼーション(注4)の高度化にも貢献できます。

台風は激しい雨と暴風を伴い、しばしば甚大な災害をもたらします。台風の暴風は、時間的・ 空間的に大きく変動する1km以下のスケールの微細構造を持ち、その微細構造による強風が被害 を大きくします。しかしながら、強風の実態を把握するための観測の機会や、高分解能な観測手 段が限られているため、微細構造は明らかになっていません。観測の不足を補うため、数値シミ ュレーションによる台風の再現結果を用いる研究が期待されますが、台風に伴う微細構造を解像 する高い分解能で台風全体を覆うような計算は従来のコンピュータでは不可能でした。

本研究では、世界で7位の計算スピードを持つ理化学研究所の「京」(Top500、2016年11月) を駆使し、これまで不可能であった、台風全体を収める広い計算領域を持ち、同時に、現業予報 よりもはるかに高分解能で地表面付近の微細構造をも解像する「台風全域ラージ・エディ・シミ ュレーション」を実現して(図1)、台風の地表面付近(特に台風の最も風速が強い壁雲付近)に おける微細構造を初めて明らかにしました。

「台風全域ラージ・エディ・シミュレーション」実験の結果、これまでに指摘されていた台風の 壁雲の外側にあるロール構造(タイプA)に加えて、台風の壁雲に近いところにも別の構造を持 つ2つの種類のロール構造(タイプB・C)が計算されました(図2)。タイプB・Cのロール構 造の存在は、本研究で初めて計算されたものです。このロール構造の下降流により、海上であり ながら平均風速の4割に達する著しい風速変動を伴う突風が局所的にもたらされる計算になりま した (図 3)。

今回得られた結果は、台風の地表面付近の未知の物理過程を明らかにするという学術的な貢献 に加えて、地表面付近で起こりうる突風に関する防災上重要な情報を与えます。また、数値予報 モデルで台風の強度をよりよく予報するためには、地表面付近の水蒸気などの微細構造による輸 送を適切に表現する必要があり、その効果を表現するパラメタリゼーションの高度化にも有用な 情報を与えます。今回は2ケースの実験を実施しましたが、現在開発が進められているポスト「京」 コンピュータでは、さらに多数のケースに対し、より詳細に台風を再現することが可能になり、 上記の貢献が一層加速されると期待できます。最新型のフェーズドアレイレーダー(注 5)など 観測技術も向上していることから、本研究によって新たに存在が示唆された2種類のロール構造 についても、今後、観測により存在が確認されることを期待します。



図1 「台風全域ラージ・エディ・シミュレーション」で再現された雲の3次元分布。 台風の中心を含む、200×200kmの範囲を図示しています。



図 2 台風中心付近の雲(上)と、地表面付近に出現した3種類のロール構造(タイプ A-C)と それらに伴う地表面付近の強風域の概念図(下)。



図3 台風中心における地表面付近の突風率(注6)の分布。

本成果は Springer Nature 社出版の国際学術誌「Scientific Reports」誌に 6 月 19 日付けで掲載 予定です。論文の概要を別紙に掲載します。

#### <用語解説>

- (注1) <u>ラージ・エディ・シミュレーション(LES)</u>:計算結果でみられたロール構造のように、「ラージ・エディ」と呼ばれる渦を計算格子上で解像するシミュレーション手法です。一般的な数値予報モデルの計算では、比較的小さい構造である「ラージ・エディ」は解像されず、それらの効果のみ(統計的にみちびきだされたもの)が導入されています。その場合と比較すると、LESは計算負荷が高いものの、より信頼できる計算となります。
- (注 2) <u>ロール構造</u>:上昇・下降流が平行して形成され、地表付近ではそれぞれ弱風や強風域と なります。上昇・下降流により上下方向の熱量・水蒸気や運動量の輸送が行われます。水平風 がある場合に下層を温めるなどして発生する熱対流でも同様の構造がみられますが、本研究で みられたロール構造は生成機構が異なっています。
- (注3) <u>壁雲</u>:台風の目を囲うように形成される雲。雲を生じる際の熱の開放が台風の駆動源となります。
- (注 4) パラメタリゼーション:数値予報モデルでは、限られた時間内に予報結果を得ることが 必要なため、今回発見したような微細構造を表現可能な解像度で計算を行うことができません。 そこで、これらの微細構造の効果を、物理的な考察に基づき、近似的に表現する必要があり、 この表現の工夫はパラメタリゼーションと呼ばれます。
- (注5) フェーズドアレイレーダー:平面上に小型アンテナを複数配列し、それぞれの電波の発 射タイミングの制御により、アンテナの上下方向の機械的な首振り機構を省略した最新鋭のレ

ーダーです。立体空間を隙間なく、10~30秒という短時間で、高分解能に観測することが可能 になりました。

(注6) <u>突風率</u>:平均的な風速に対し、短時間に吹く突風の風速の割合であり、値が大きいほど 強い突風が出現する可能性を示します。例えば「突風率が1.4」とは、平均風速の4割増の風 速が瞬間的にもたらされる可能性を意味します。ここでは、突風率は(3秒間平均した風速の 最大値)/(1分平均した風速)で定義しています。これは気象庁の定義(3秒間平均した風速 の最大値)/(10分平均した風速)とは異なります。また今回は海上の台風について調べてい ますが、陸上の台風は全体的により大きな突風率をもつことが知られています。

#### 謝辞

本リリースの研究は、文部科学省ポスト「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」(代表機関:海洋研究開発機構、研究代表者:高橋桂子 地球情報基 盤センター長、http://www.jamstec.go.jp/pi4/)の一環として実施したものです。重点課題 4の サブ課題 A「革新的な数値天気予報と被害レベル推定に基づく高度な気象防災」では、活用でき るあらゆる観測データを活用し、さらに積乱雲等を桁違いの高解像度でシミュレーションするこ とで、集中豪雨や台風などの予測精度を向上し、リードタイムをできるだけ長くする予測の実現 を目指しています。

【本件に関する問い合わせ先】

- ・気象研究所企画室(広報担当) TEL:029-853-8535
- ・東京大学 大気海洋研究所 海洋大気力学分野 教授 新野 宏 TEL:04-7136-6050
- ・国立研究開発法人海洋研究開発機構
  地球情報基盤センター 企画調整室
  (広報担当)

TEL: 045-778-5442

## 掲載予定の論文の概要

タイトル

Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones

### 著者

伊藤純至1,2、大泉伝3、新野宏2

(1. 気象研究所、2. 東京大学大気海洋研究所、3. 海洋研究開発機構) Scientific Reports doi: 10.1038/s41598-017-03848-w

(http://www.nature.com/articles/s41598-017-03848-w)

## 1. はじめに

直径が約1000kmの激しい大気中の渦巻である台風は、大雨や暴風・高潮・高波による被害や 塩害などを広範囲にもたらします。このうち、台風の強風は中心から数100kmの広い範囲に生じ ますが、台風の通過後に強風の被害を調べると決して一様ではなく、1km以下の被害域が点在し ている場合があります。1990年後半になって、そのような点在する小規模な被害域の手がかりが 得られました。可搬型のドップラー・レーダーにより、台風内の地表面近くに数100m間隔で並 ぶ水平軸を持ったロール状の渦構造があることがわかってきたのです。

このような台風の地表面付近の微細構造は、突風の原因となるだけでなく、地表面(海面)と 上空の大気との間の、熱や水蒸気、運動量の交換を通して台風の構造や発達にも影響するため、 その理解は防災上も気象学的にも重要です。

台風はその一生の大半を海上で過ごし、激しい暴風や高波を伴うため、その地表面付近の構造 の観測は容易ではありません。その点、数値シミュレーションによる再現は有力な研究手段とな ると期待されますが、現実的な台風に伴う地表面付近の微細構造を再現するためには、直径 1000km の台風を収める広い計算領域を、微細構造が解像可能な細かい格子間隔で分割して計算 する膨大な計算を行う必要があり、既存のコンピュータでは不可能でした。本研究では、高い演 算性能と大容量のメモリをもつ「京」を利用することにより、世界で初めて、このような計算「台 風全域ラージ・エディ・シミュレーション」(以下、台風全域 LES)を実現し、地表面付近の微 細構造を解明したものです。

#### 2. 数値シミュレーションの概要

天気予報では、流体の運動と水の相変化などの物理過程の時間変化の方程式から成る「数値予報モデル」をスーパーコンピュータで解くことにより、日々の天気や気候を予測しています。本研究では、気象庁の数値予報モデルである「気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)」を用いて、台風に伴う微細構造を再現しました。但し、気象庁の天気予報では、一番解像度が良い局地モデルでも水平格子間隔は2kmですが、今回の台風全域LESでは水平格子間隔を100mとしました。このように超高解像度にすることにより、地表面近くの非常に乱れた気流(乱流と呼ばれます)の構造を信頼できる形で表現することが可能となりました。計算領域サイズは水平 2000km× 2000km×鉛直 23km、格子数は水平 20000×20000、鉛直 60、下面は水平一様に海面を仮定しています。計算時間を節約するため、最初に水平格子間隔 2kmの粗い解像度のモデルで最盛期まで台風を発達させ、その計算データを初期値にして、水平格子間隔 100mの台風全域LES 計算を 10時間行いました。計算には「京」全系のほぼ 1/8(約 9000CPU、72000 コア) を利用して正味で約4日かかりましたが、計算ジョブを投入してから実行されるまでの待機時間やデータの転 送、事後的なデータ処理を含めると、最終的な出力の作成には約1年を要しました。出力された データ量は全部で数100テラバイトになりました。なお、台風全域LESは強い台風(STC)と中程 度の強さの台風(MTC)の2種類について行いました。以下、特に断らない場合は、MTCに対する 結果を中心にお示しします。

3. 計算結果と解明されたこと

3.1 再現された台風

図1は台風全域 LES で再現された台風の雲の3次元分布です。目を取り巻く壁雲や上部での 吹き出しなど、台風の基本的な構造とともに、水平の広がりが数 km 以下の個々の細かい積乱雲 も解像されています。アニメーションでは、個々の積乱雲の盛衰の様子もみえます。



図1 再現された雲の3次元分布。(a)は台風を俯瞰したもの、 (b)は台風の中心を横切る鉛直断面より眺めたもの。

水平解像度 100m の台風全域 LES の結果と、その初期値を作成するために行った水平解像度 が粗い 2km の計算の結果を比較すると、台風の強度(最低気圧や最大風速)には顕著な違いはあ りませんでした(図 2)。ただし、強い台風(STC)では、低解像度の結果に比べて、台風全域 LES の方が目の半径が小さくなる構造の変化がみられました。



図 2 (a)最大風速(高度 10m)と(b)最低気圧の時系列。実線は解像度 2km の初期値作成のための計算、●印は台風全域 LES の結果(120時間後から計算を開始しました)。青は中程度の強さの台風(MTC)、紫は強い台風(STC)の結果。

3.2 台風に伴う地表面付近の微細構造

地表面付近の鉛直方向の速度をみると、水平方向に数 100m~数 km ごとに、線状の上昇流 域と下降流域が交互に並んでいる様子がみられます(図3)。また図3 に描かれた実線の位置を横 切る鉛直断面では(図4)、様々なスケールの乱れた流れがあるものの、地表面付近には周期的な ロール状の流れのパターンがみえます。

これらのロール状の構造は、台風中心からの距離によって、異なる特徴をもつ3種類のロール 構造(タイプA、B、C)に分類されることが分かりました。

タイプA:半径20kmより外側でみられ、ロールの軸は周方向からやや内向き。

タイプB:半径12km~20kmの範囲でみられ、ロールの軸は半径方向へ向く。

タイプC:最大風速半径より内側の半径12km~8kmの範囲にみられ、ロールの軸は周方向からやや外向き。



図 3 高度 27m の水平断面の鉛直方向の速度。赤系は上昇流域、青系は下降流域を表します。 各図(a)、(b)、(c)は半径の外側から内側に向かう順に示してありますが、カラースケールが各図で 異なることに注意してください。(c)の緑線で囲んだ領域は、高度 10m での風速が 55m/s 以上の 領域。



図4 タイプA、B、Cのロールをそれぞれ横切る鉛直断面内の風速分布。断面内の風速ベクト ルを矢印、断面に直交する風速をシェードで表しています。断面の位置は図3の実線(矢印は左 端を表します)で示してあります。

タイプAロールは、回転を伴う乱流の底面付近に一般的にみられるロール構造とみられ、既 往研究でもその存在が予想されていましたが、台風全体を扱うシミュレーションで再現されたの は、本研究が初めてです。

ー方、タイプBとCは、本研究で初めて計算されたロール構造です。地表面付近で台風中心 へと吹き込む風は、壁雲に近づく上昇流に転じます。その際、風速の高度分布には風速の極大が 形成されますが、タイプBロールはそのような風速分布が原因となって生じるロール構造と考え られます。タイプCロールは壁雲の近くの接線方向の風速が最大となる半径付近にだけ生じてい ます。回転の効果が著しく強い場合にのみ生じる特殊な不安定現象(平行不安定と呼ばれます)が発 現したものと考えられます。

タイプA、Bロールによる海面から壁雲への水蒸気の輸送は、台風の壁雲を構成する積乱雲の駆動源となります。一方、タイプCロールの存在は地表面付近に限定されています(図5)。タイプCロールでは、下降流が上空の大きな運動量を地表面付近に運ぶことにより、顕著な突風を引き起こしていました。タイプCロールが存在する領域では、海上の台風に伴う突風の強さの指標である突風率の標準的な値とされる1.1よりもはるかに大きな突風率~1.4(短時間変動は20m/sに達する)が局所的に生じていました(図6)。

以上のように、本研究で行った台風全域 LES により、これまでほとんど未解明であった、 台風の中心に比較的近い領域の地表面付近に存在する微細構造の特徴と生成機構が明らかになり ました。



図 5 タイプ B、C ロールを横切る鉛直 断面内の鉛直速度。陰影は雲が一定以 上ある領域。鉛直断面の位置は図 3c に示してあります。



4.今後の展開

今回再現した台風は、極力単純化した環境における仮想的なものですが、同様の微細構造(特に中心付近のタイプ B、C ロール)は実際の台風でも存在すると期待され、近い将来、最新の気象観測測器の活用で確認されることが期待されます。

す。

台風全域 LES のように解像度の高いシミュレーションの計算負荷は非常に大きいため、直ち に現業台風予報に導入することはできません。従って、当面は、本研究で見つけたような微細構 造は解像しない粗い解像度のモデルを使うしかなく、その場合、海面から上空にどれだけの熱や 水蒸気、運動量を運ぶかを、解像できている物理量からなるべく精緻に求める(大気境界層のパ ラメタリゼーションと呼ばれます)必要があります。従来の大気境界層のパラメタリゼーション は、台風環境下の状況は想定せずに作られていますので、台風全域 LES にもとづき、パラメタリ ゼーションの検証を行い、必要があれば改良を行うことは、台風予報の改善につながると期待さ れます。

台風全域 LES では、大気境界層だけでなく、図1にみられるように台風内の個々の積乱雲も 再現しています。積乱雲は台風内で大気下層から上空に水蒸気や熱・運動量を輸送していますが、 現在の台風予報モデルでは積乱雲も十分に解像できているわけではありません。そこで、台風全 域 LES の結果は、様々な環境場での積乱雲の振る舞いを理解し、その水蒸気や熱・運動量の輸送 に果たす役割の理解にも有用と期待され、解析を進めていきたいと考えています。

現在開発中のポスト「京」コンピュータは、「京」よりもさらに大規模な計算が可能となる予 定です。今後は1) 台風の発生初期から最盛期に至るまでのより長期間の計算、2)LES としての 信頼度が高い、より高解像度の計算、3)鉛直シアの存在など異なる環境場での計算、4)観測と対 比可能な現実事例の計算などを行い、台風に関わる物理過程の理解と台風予報の改善への貢献を 進めていきたいと考えています。