

## 2.2. (b) 台風等極端事象の高解像度ダウンスケーリングシミュレーション

サブ課題代表者：坪木和久（名古屋大学宇宙地球環境研究所）

（名古屋大学宇宙地球環境研究所）相木秀則、篠田太郎、金田幸恵  
（気象業務支援センター）高藪 出

### a. 要約

台風はしばしば東アジア地域に暴風や豪雨により災害をもたらす。大雨などの極端事象はその多くが台風によってもたらされる。本研究はそのような極端事象をもたらす台風の高解像度シミュレーションを行い、構造や発達メカニズムを明らかにし、擬似温暖化実験や力学的ダウンスケーリング実験、さらに環境場に対する感度実験により、気候変動に伴い将来台風が強度や到達緯度についてどのように変わるのかを明らかにすることを目的とする。これにより将来、日本を含む中緯度地域の台風リスクがどのように変わるのかについて明らかにする。本年度は領域大気海洋結合モデル CReSS-NHOES 及び雲解像モデル CReSS を用いた台風の再現実験と全球モデル実験の台風のダウンスケーリングシミュレーションを実施した。特に強い台風の再現実験の再現性を検証するとともに、最大強度に達するプロセスとメカニズムを調べた。これと並行し、大気だけのモデル（雲解像モデル）によるシミュレーションを行い、海洋結合のインパクトを示した。また、全球モデルの台風の力学的ダウンスケーリング実験を開始した。

まず、観測された非常に強い台風についての再現実験を行い、最大強度に達するプロセスとメカニズムを調べた。台風の発達や衰退は海面水温（SST）の影響を大きく受ける。なかでも強い台風に共通してみられる急発達は高い SST が必要となる。再現実験では、水平解像度2km という極めて高解像度の非静力学大気海洋結合モデル CReSS-NHOES を用いた。これにより観測された非常に強い台風を再現し、急発達期における台風の内部プロセスと SST 分布の関係を明らかにした。

再現実験の対象は、2010年10月フィリピンに上陸した平成22年台風第13号（Megi）である。台風 Megi は、急発達後、最低中心気圧885hPa に達した、21世紀に入ってもっとも強い台風である。CReSS-NHOES による3次元大気海洋結合実験（3dO）とあわせて、海面水温が台風の影響を受けない海面水温固定実験（Fixed Ocean experiment: FO）も実施した。実験の結果は、海洋の効果を考慮するか否かにかかわらず、3dO 及び FO 実験とも経路をほぼ再現した。一方、台風の強度変化は2実験間で大きく異なった。台風 Megi の強度の再現に成功した3dO 実験の結果を中心に、台風の最大強度にいたるまでの発達メカニズムを調査した。その結果、SST が台風の眼の中でより高い時、最大風速半径の内側に背の高く強い上昇気流が形成され、台風が急発達する一方、SST が台風の眼の中と比較して外側でより高い時、最大風速半径の外側に上昇気流が形成され壁雲上昇気流が弱くなり、台風の発達が停滞する傾向がみられた。これらの結果より、非常に強い台風の強度をより精度よく予測するには、台風の中心付近の SST の詳細な分布を再現する必要があることが示された。

次に中緯度地域における台風の雨による災害について、再現実験と擬似温暖化実験による将来変化を調べた。近年、日本各地で台風や豪雨といった気象現象の極端化が懸念されている。2016年8月には観測史上初めて北海道・東北に太平洋側から4つの台風が立て続けに上陸し、北海道東部に記録的な大雨をもたらした。これらの顕著現象が、21世紀末にはどのように変化するかは、中緯度地域の台風防災において大きな問題である。そこで、2016年8月後半に北海道・東北に上陸した4つの台風の中から、2016年台風第7号を例にとり、CReSS-NHOES で温暖化実験を実施することで、台風とそれに伴う豪雨の将来変化予測を試みた。実験に用いた CReSS-NHOES の水平解像度は0.04度である。なお、結合においてより正しく海面水温が大気の計算に反映されるように大気海洋の結合部分を改良した。まず、大気・海洋それぞれについて、気象庁55年長期再解析及び JCOPE2再解析データを初期値・境界値を用いて再現実験（CNTL）を実施

した。計算期間は台風第7号が日本の南海上にある2016年8月15日18UTCから北海道の北東海上に抜ける18日00UTCまでの54時間である。CReSS-NHOESを用いた標準実験(CNTL)の他にNHOESを結合しないCReSS単体の実験(CReSS実験)も実施した。さらに温暖化実験として、擬似温暖化実験(PGW)手法を用いた。その結果、気象庁ベストトラック(BT)では台風第7号の最低中心気圧は980hPaであったが、CNTL実験では977hPaであり、最大強度及び経路ともに良好な再現性であった。PGW実験において台風は、よりゆるやかな進行速度で東寄りの経路を取りつつ北上し、最低中心気圧973hPaに達した。これは傾圧性の弱化により、上層ジェットが弱まったためと考えられる。3次元海洋モデルを結合していないCReSS実験では、最低中心気圧973hPaと最大強度を過大評価した。

擬似温暖化実験では21世紀末、北海道付近の海面水温は4～5℃上昇する。それに伴い大気下層の水蒸気量が増加して、台風第7号が太平洋を北上する間、北海道東部には20g/kg以上の潤沢な水蒸気が供給される。その結果、降水は、より狭い領域により強く集中する傾向がみられた。特に、台風上陸24時間前の台風が北海道から700km以上離れた南海上に位置する時点より、北海道東部には強い雨がみられた。このことは、温暖化気候において、北海道東部では、単に雨量が増すだけでなく、より強く集中した豪雨へのより早期の警戒の必要性を示唆する。

領域モデルによる将来変化予測手法には、擬似温暖化実験の他に、全球モデルによる将来変化予測実験からの力学的ダウンスケーリング実験がある。前者は、現在の既往顕著台風が将来気候環境場に置かれた時の振る舞いを予測する一方、後者は全球モデルの気候実験から顕著事例を選ぶため、現在気候ではみられない将来の温暖化気候に特有の顕著台風を捉えることが可能であるという利点がある。名古屋大学チームでは、擬似温暖化実験の他に、全球モデルの台風の力学的ダウンスケーリング実験の一環として、「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース、database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF)」からのダウンスケーリング実験を計画している。このd4PDFからのダウンスケーリング実験で日本付近を通過する台風が日本に与える影響の将来変化を調査する。特に日本の東海上を北上して北海道東部に太平洋側から上陸する台風に注目する。気象庁ベストトラックデータによると1951年～2017年までの間、該当する台風は計8例みられた。うち3例は2016年8月後半の事例である。d4PDFで対象となる台風は、過去、非温暖化、4度上昇実験において、それぞれ186例、190例、125例であった。d4PDFは、すべての実験を大気モデルで実施しており、台風の通過による海面水温の冷却を考慮していないため、台風の強さを過大評価している可能性がある。CReSSによる力学的ダウンスケーリング実験では、高解像度化して台風の構造や降水分布をより現実的に再現するだけでなく、海洋1次元モデルにより台風の中心付近といった強風下の海洋の冷却効果を考慮する。本年度は、日本の東海上を北上し北海道に上陸する台風の一つの事例について、水平解像度0.04度の雲解像モデルCReSSでダウンスケーリング実験した。このように、d4PDFにみられる台風を雲解像モデルCReSSでダウンスケーリング実験することにより、台風やそれに伴う雨について、より詳細かつ定量的な議論が可能となることが期待される。

## b. 研究目的

西部北太平洋に発生する台風は、地球上に発生する熱帯低気圧の中でも、発生数が最も多く、また強度も最大である。台風はそれに伴う強風と大雨により大きな災害を毎年のようにもたらしており、台風が気候変動に伴いどのように将来変わるのかを量的に精度よく推定・予測することは、防災上重要な情報である。近年の全球モデルの高解像度化に伴い、台風がよく再現されるようになってきたが、強度やメカニズムについては、全球モデルの解像度はまだ不十分であり、また、パラメタリゼーションのもたらす不確実性も大きい。台風の強度を量的に予測し、構造や発達メカニズムを明らかにするためには、高解像度の領域非静力学モデルによるシミュレーションが不可欠である。これまで実施してきた創生プログラムの雲解像モデルCReSSと非静力学大気海洋結合モデルCReSS-NHOESを用いた実験では、台風の強度を精度よく推定しメカニズムを考察するためには、台風と海洋の相互作用を正しく再現することが不可欠であることが示されて

きた。そこで本研究では台風より高精度なシミュレーションを目指し、これらのモデルを用いて、台風の力学的ダウンスケール実験や擬似温暖化実験を行う。それにより気候変動に伴い台風の強度がどのように変わるのか、日本を含む中緯度における暴風や豪雨などの台風のリスクが将来どのように変わるのか、さらに台風の強度を決めるメカニズムとプロセスはどのようなものかを明らかにする。また、力学的ダウンスケール実験から得られる高解像度の台風のデータセットを整備し、国内外の研究者に提供する。

### c. 研究計画、方法、スケジュール

#### 研究計画・方法

##### 【研究開始3年後の達成目標】

これまで創生プログラムで開発してきた非静力学大気海洋結合モデル CReSS-NHOES 及び雲解像モデル CReSS を用いて、実際に観測された台風のうち特に強いものについて再現実験を行い、その強度や進路についての検証を行うとともに、発達メカニズム、特に大きな強度に達する過程におけるメカニズムを明らかにする。さらに全球モデルから与えられる大気・海洋のデータを用いて、台風の力学的ダウンスケール実験と擬似温暖化実験を行い、気候変動に伴い台風の最大強度、総降水量、到達緯度などがどのように変わるのかを明らかにする。

##### 【研究開始5年後の達成目標】

台風の力学的ダウンスケール実験と擬似温暖化実験をさらに進め、最大強度、総降水量、到達緯度などについて量的な推定を行う。また、さまざまな強度の台風について力学的ダウンスケール実験を行い、気候変動が台風の発達や強度に影響する時、環境場のパラメータによってそれがどのように変わるのか、さらに発達メカニズムがどのように変わるのかを明らかにし、災害リスク情報に資することを旨とする。また、東アジア・北太平洋域における温暖化時の台風の高解像度データセットを整備し、国内外の研究者に提供する

#### 年次計画

##### 【研究1年目計画】

これまで創生プログラムで開発してきた非静力学大気海洋結合モデル CReSS-NHOES 及び雲解像モデル CReSS を用いて、観測された特に強い台風についての再現実験を行い、その再現性を検証するとともに最大強度に達するプロセスとメカニズムを調べる。この時大気だけのモデルによるシミュレーションを並行して行い、海洋結合のインパクトを示す。また、全球モデルの台風の力学的ダウンスケール実験を開始する。

##### 【研究2年目計画】

観測された台風のシミュレーション実験を継続するとともに、現在気候と将来気候における全球モデルの台風についての力学的ダウンスケール実験を行う。また、顕著な台風についての擬似温暖化実験を行う。これらにより台風の最大強度、総降水量、到達緯度などの推定を行うとともに、その発達メカニズムを明らかにする。特に海洋の変動のインパクトに着目して調べる。

##### 【研究3年目計画】

全球モデルの現在気候と将来気候の台風について、非静力学大気海洋結合モデルと雲解像モデルによる力学的ダウンスケール実験と擬似温暖化実験を継続し、それぞれに気候における最大強度に達するプロセスとメカニズムを明らかにする。

##### 【研究4年目計画】

非静力学大気海洋結合モデルと雲解像モデルを用いて、現在気候と将来気候の全球モデルの台風の力学的ダウンスケール実験を行い、高解像度の台風のデータセットの整備を開始する。



また、さまざまな強度の台風についての力学的ダウンスケーリング実験において、環境場のパラメータをさまざまに変えたアンサンブル実験を行い、台風の最大強度の推定を行う。

### 【研究5年目計画】

非静力学大気海洋結合モデルを用いた多数の台風の力学的ダウンスケーリング実験を行い、高解像度の台風のデータセットを整備し、国内外の研究者に提供する。環境場のパラメータについてのアンサンブル実験を継続して実施し、温暖化気候における台風の最大強度や総降水量についてより高い精度の推定を行い、これまでの成果を取りまとめる。

### 【期待される成果】

台風のより高精度な予測が可能となる非静力学大気海洋結合モデルと雲解像モデルが整備される。これらは実際の観測された台風の再現実験によって検証されるとともに、そのシミュレーション結果を用いて、台風の発達メカニズム、特に急速な発達のメカニズムが明らかになる。これは台風の最大強度へのプロセスを明らかにすることになる。全球モデルの台風についての力学的ダウンスケーリング実験と観測された特に強い台風についての擬似温暖化実験により、温暖化した将来気候における台風の最大強度、総降水量、到達緯度などがより高精度に推定される。結合モデルによる実験で、海洋の変動がこれらに与えるインパクトが明らかになる。台風の環境場についてのアンサンブル実験により、環境場のパラメータについての台風の強度などの感度が示される。さらに多くの台風についての力学的ダウンスケーリング実験により、東アジア・北太平洋域における温暖化した気候における高解像度の台風のデータセットが整備され、国内外の研究者に提供される。このデータは台風災害や高潮などの気候変動リスクを推定する基礎データとして活用されることが期待される。

#### d. 平成29年度研究計画

領域大気海洋結合モデル及び雲解像モデルを用いた台風の再現実験と全球モデル実験の台風のダウンスケーリングシミュレーションを実施する。領域大気海洋結合モデル及び雲解像モデルを用いた台風の再現実験と全球モデル実験の台風のダウンスケーリングシミュレーションを実施するために、まず、これまで創生プロで開発してきた非静力学大気海洋結合モデルの海面交換過程の改良を行う。さらに、これを用いて観測された特に強い台風についての再現実験を行い、その再現性を検証するとともに、最大強度に達するプロセスとメカニズムを調べる。これと並行し、大気だけのモデル（雲解像モデル）によるシミュレーションを行い、海洋結合のインパクトを示す。また、全球モデルの台風の力学的ダウンスケーリング実験を開始する。

#### e. 平成29年度研究成果

##### 1. 非静力学大気海洋結合モデルによる顕著台風の再現実験

###### 1.1. はじめに

台風は、暖かい海面から供給される熱・水蒸気フラックスをエネルギー源とする。したがって、台風の発達や衰退は海面水温（SST）の影響を大きく受ける。中でも強い台風に共通してみられる急発達は高いSSTが必要となる（Kaplan and DeMaria 2003）。一方、強い台風は通過に伴いSSTを低下させる（Wada et al. 2014）。このように、台風の発達プロセスはSST分布と密接にかかわりあうが、台風の中心付近は壁雲といった活発な雲活動で覆われているため、衛星等の観測的手法で詳細なSST分布を取得することは困難である。そこで、水平解像度2kmという極めて高解像度の非静力学大気海洋結合モデル CReSS-NHOES（Aiki et al. 2015）を用いて観測された非常に強い台風を再現し、急発達期における台風の内部プロセスとSST分布の関係を明らかにする。

## 1.2. 実験設定

再現実験の対象は、2010年10月フィリピンに上陸した平成22年台風第13号 (Megi) である。台風 Megi は、急発達後、最低中心気圧885hPa に達した21世紀に入ってもっとも強い台風である。用いたモデルは、名古屋大学で開発された大気雲解像モデル (Cloud Resolving Storm Simulator, CReSS; Tsuboki and Sakakibara 2002) に海洋研究開発機構で開発された3次元海洋モデル NHOES (Non-Hydrostatic Ocean model for the Earth Simulator, NHOES; Aiki et al. 2006, 2011) を結合した領域モデル CReSS-NHOES (Aiki et al. 2015) である。CReSS-NHOES による3次元大気海洋結合実験 (3dO) とあわせて、海面水温が台風の影響を受けない海面水温固定実験 (Fixed Ocean experiment: FO) も実施した。水平解像度は大気・海洋とも緯度・経度座標系で0.02度である。大気側の初期値・境界値には気象業務支援センターから配信された全球モデル GPV (GSM) を用いた。海洋側の初期値・境界値には、海洋研究開発機構より提供された JCOPE2 (北西太平洋再解析, Miyazawa et al. 2009) の全球客観解析版 (水平解像度0.1度) を用いた。計算は、2010年10月14日0000UTCを初期値とし、フィリピンを通過後、台湾に接近する10月23日0000UTCまでの9日間にわたって実施した。

## 1.3. 結果と考察

図1に、再現された台風の2010年10月14日～10月23日の経路及び中心気圧を気象庁ベストトラックデータと比較する。海洋の効果を検討するか否かにかかわらず、3dO 及び FO 実験とも経路をほぼ再現している。一方、台風の強度変化は2実験間で大きく異なった。最低中心気圧においては、気象庁ベストトラックデータの885hPa に対して、3dO 実験では892hPa であり再現性が良い。SST を固定した FO 実験では839hPa に達した。

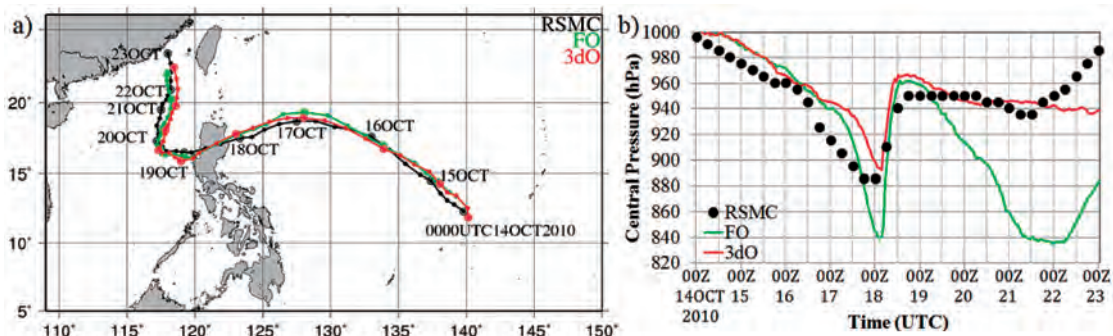


図1 2010年10月14日～10月23日の台風 Megi の a) 経路及び b) 中心気圧。気象庁ベストトラックデータ (黒)、3dO 実験 (赤)、FO 実験 (緑)。(Kanada et al. 2017c より)

台風 Megi の強度の再現に成功した3dO 実験の結果を中心に、台風の最大強度にいたるまでの発達メカニズムを調査した。図2に、発達期 (Intensifying)、及び、中心気圧が大きく変化しなかった期間 (Steady) における台風の内部コア構造と SST プロファイルを示す。台風の眼にあたる壁雲上昇気流内側の SST がもっとも高い時、中心付近に背の高く強い上昇気流がみられ発達速度が大きくなる傾向にあった (図2a)。一方、内部コア域の SST が全域で29℃以上と暖かいものの眼の中と比較して壁雲外側の SST がより高い時、壁雲外側の対流活動が活発になり壁雲上昇気流が弱まり、発達が停滞する傾向がみられた (図2b)。これらの特徴は、急発達中の熱帯低気圧 (Intensifying storms) は最大風速半径付近 (壁雲上昇気流の位置にほぼ対応する) か、その内側に背の高く強い対流 (Convective Bursts: CBs) を持つ傾向にある一方、強度をあまり変えない熱帯低気圧 (Steady or Slow-intensifying storms) では CBs が最大風速半径の外側にみられる傾向があるという、航空機観測に基づいた統計的研究 (Rogers et al. 2013)、及び、活発な対流による潜熱の解放が最大風速半径の内側にみられる時、そのエネルギーがもっとも効率よく運動エネルギーに変換されるという理論研究 (Pendergrass and Willoughby 2009, Persing et al. 2013) と整合的である。



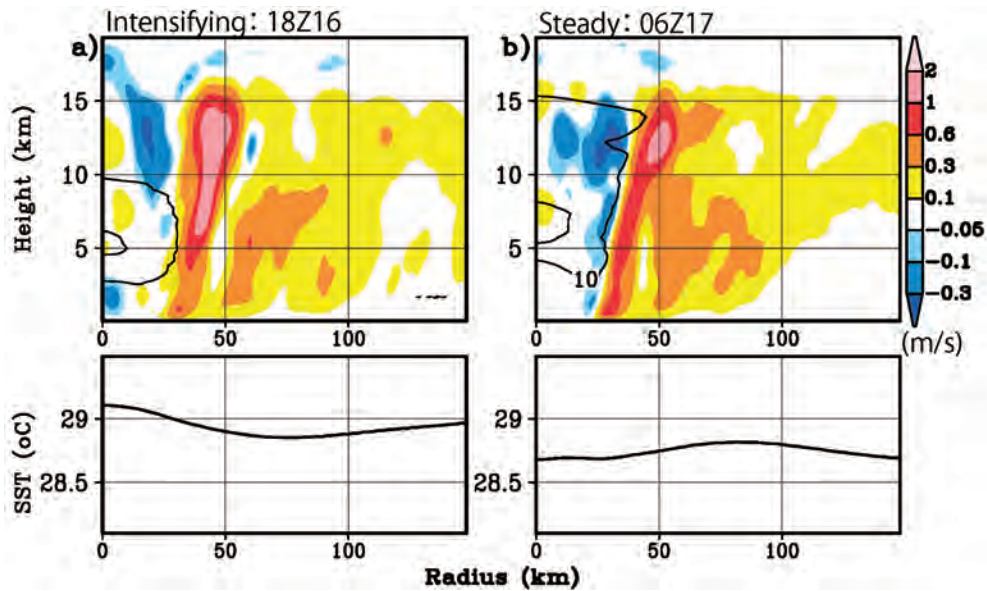


図2 方位角方向に平均した鉛直気流の動径—高度断面図（上）及び SST（下）。上図実線は温位の半径500km 以内平均からの偏差（5K 及び15K）を示す。（Kanada et al. 2017c 一部改変）

次に、方位角方向に平均した SST の時間変化と内部コア内の対流活動の関係に着目する（図3）。FO 実験においては、台風による海洋冷却の効果が考慮されていないため、解析期間中の内部コア域の SST はほぼ29℃以上である。しかしながら、壁雲上昇気流より外側で SST が高い期間（10月16日1500UTC-10月16日2100UTC）には、最大風速半径の外側の高 SST 域で上昇気流の形成がみられる（図3b の 'A'）。この間、FO 実験の台風の発達是比较的緩やかであった。10月17日0400UTC 以降、眼の中の SST が極めて高くなり、FO 実験の台風は急発達を開始した。3dO 実験においても、眼の中の SST が高くなる10月17日0600UTC 以降、中心付近の対流が徐々に活発になり、10月17日1200UTC に急発達を開始する。

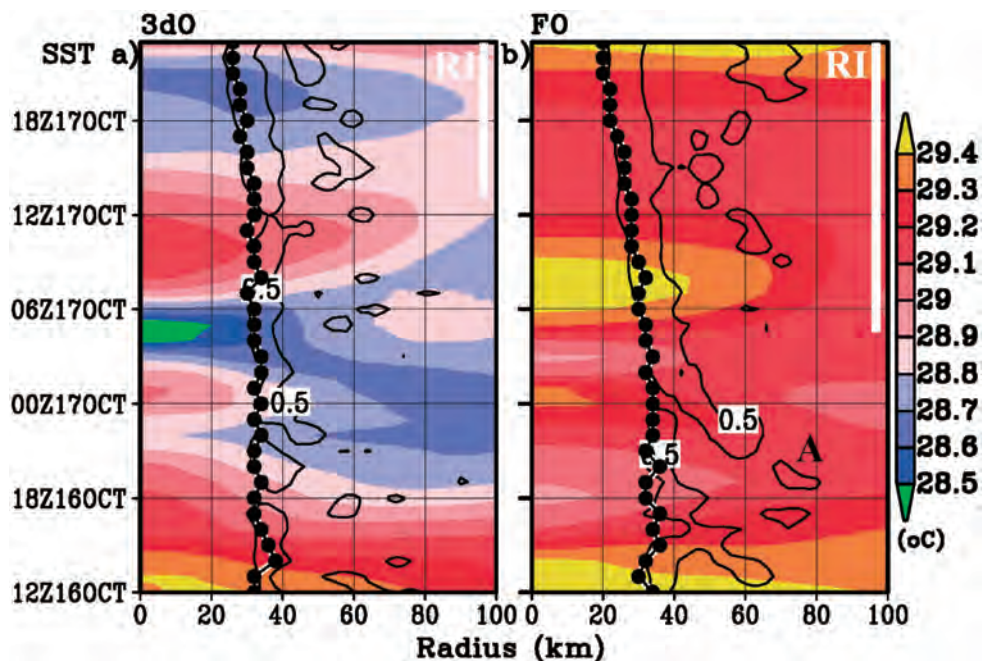


図3 方位角方向に平均した SST の動径—時間断面図、a) 3dO 実験、b) FO 実験。実線、黒丸、白線は、中下層（高度2-6km 間で平均）の上昇気流0.5m/s、高度10m の最大風速半径、急発達期をそれぞれ示す。（Kanada et al. 2017c より）

このように SST の動径方向のプロファイルと上昇気流の形成位置は密接にかかわっている。その要因を解明するため、方位角方向に平均した対流有効位置エネルギー (CAPE) の時間変化を下層水蒸気量と合わせて示す (図 4)。台風の一次循環が強くなるにつれて、中心付近の慣性安定度が大きくなり、暖かく湿った空気が最大風速半径内側の眼の中に蓄積される。たとえば 3dO 実験の10月16日1200UTC-10月16日1800UTC の CAPE は 2000 J/kg と非常に大きい。この間、3dO 実験の CB の大半は最大風速半径内側に現れている (図 5)。その後、3dO 実験では、中心付近の SST が低下し、かつ暖気核が発達したため、CAPE が急激に低下し、同時に CB が最大風速半径の外側に形成されるようになる (図 5)。その後、3dO 実験の台風では SST の上昇とともに、眼の中の CAPE が再び 2000 J/kg を越え、急発達を開始した。FO 実験でも、急発達を開始する前に最大風速半径の内側で高 CAPE がみられ、かつ、このとき最大風速半径内側で CB が高頻度になるという同様の傾向がみられた。

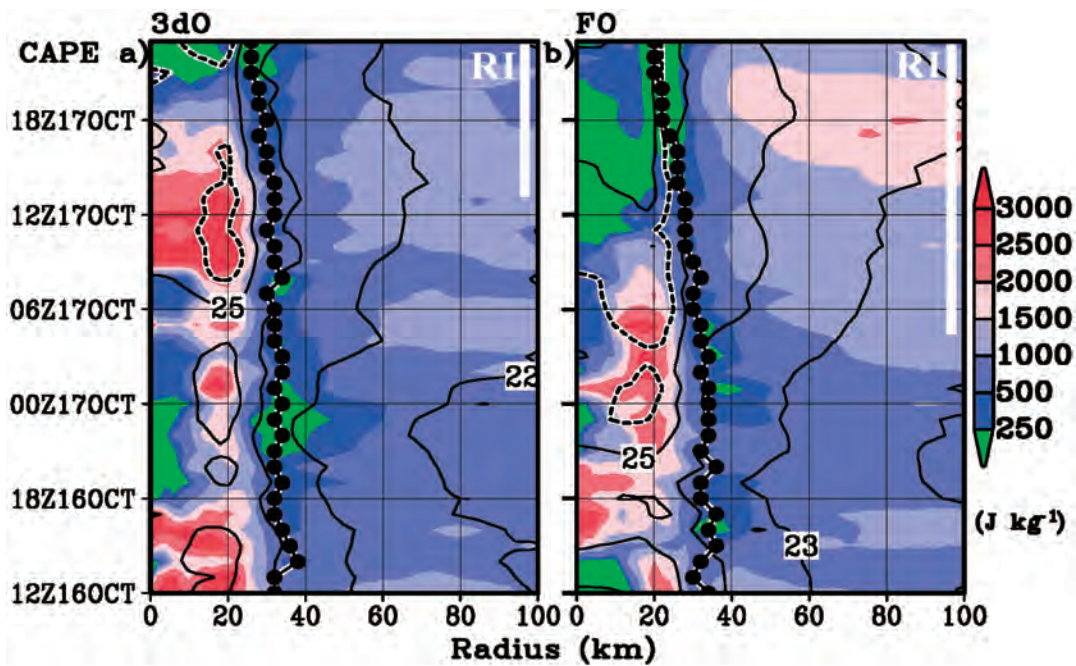


図 4 図 3 と同じ、ただし、CAPE 及び高度1.5mの水蒸気混合比 (g/kg, コントアは1g/kg 毎、ただし破線は25.5 g/kg)。(Kanada et al. 2017c より)

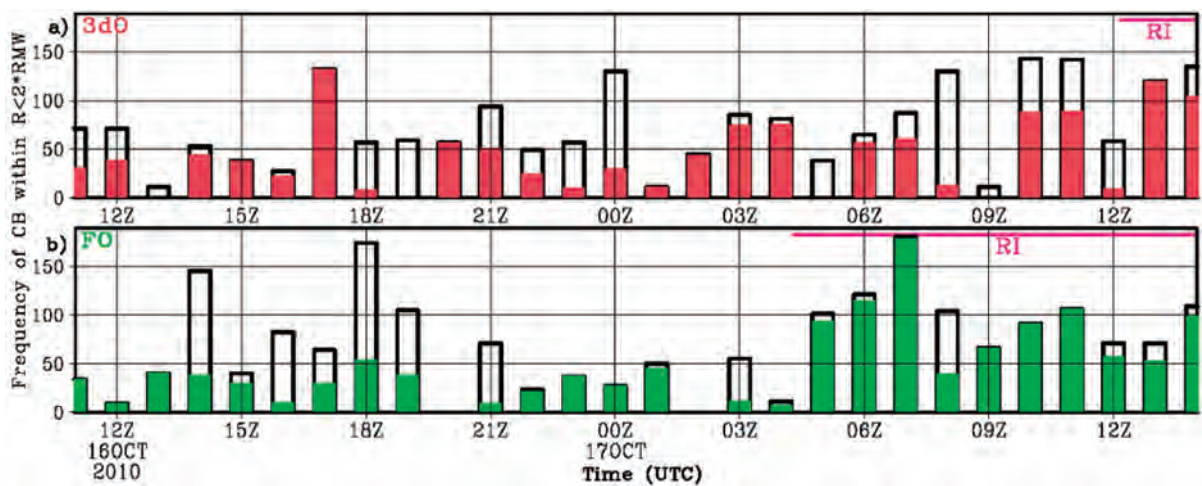


図 5 内部コア (高度2kmの最大風速半径 RMW の2倍と定義)のCB数の時間変化。色付きはRMW以内のCB数。CBの定義はRogers et al. (2013)に基づき、高度8kmにおける鉛直気流が $4.6 \text{ m s}^{-1}$ 以上のグリッドとした。(Kanada et al. 2017c より一部改変)



#### 1.4. まとめ

非静力学大気海洋結合モデル CReSS-NHOES を用いて、観測された非常に強い台風 Megi を再現することにより、海洋の応答の影響を考慮した非常に強い台風の最大強度に到達するプロセス及び発達メカニズムを調査した。

その結果、SST が台風の眼の中でより高い時、最大風速半径の内側に背の高く強い上昇気流が形成され、台風が急発達する一方、SST が台風の眼の中と比較して外側でより高い時、最大風速半径の外側に上昇気流が形成され壁雲上昇気流が弱くなり、台風の発達が停滞する傾向にみられることが明らかになった。

このことは、台風を中心付近の詳細な SST 分布が、台風内部コアの活発な対流の発生する位置やタイミングをコントロールすることを通して、台風の発達プロセスに大きなインパクトを与えることを示唆する。すなわち、非常に強い台風の強度をより精度よく予測するには、台風を中心付近の SST の詳細な分布を再現する必要がある。以上の結果をまとめて、Kanada et al. (2017c) として国際学術誌 *Journal of Geophysical Research* に発表した。

将来気候における台風の最大強度を予測する上でこれらの結果は極めて重要である。今後は、事例を増やし精度を向上させるとともに、将来気候実験を実施するにあたっての海洋の初期値・境界値作成手法の開発と検討を進める。

### 2. 非静力学大気海洋結合モデルを用いた2016年台風第7号の擬似温暖化実験

#### 2.1. はじめに

平成29年度研究成果「1. 非静力学大気海洋結合モデルによる顕著台風の再現実験」においては、21世紀に入りもっとも強い台風として、比較的低緯度の海上を西進した台風 Megi を対象とした。一方で、近年、日本各地で台風や豪雨といった気象現象の極端化が懸念されている。2016年8月には観測史上初めて北海道・東北に太平洋側から4つの台風が立て続けに上陸し、北海道東部に記録的な大雨をもたらした。これら顕著現象が、21世紀末にはどのように変化するか調査する必要がある。そこで、2016年8月後半に北海道・東北に上陸した4つの台風の中から、2016年台風第7号を例にとり、CReSS-NHOES で温暖化実験を実施することで、台風と台風に伴う豪雨の将来変化予測を試みた。

#### 2.2. モデルと実験設定

実験には、CReSS-NHOES を用いた。モデル及び設定の詳細を表1に示す。水平解像度は0.04度である。なお、結合における海面水温のタイムステップごとの更新の順序を変更し、より正しく海面水温が大気の計算に反映されるように改良した。

まず大気・海洋それぞれ気象庁55年長期再解析のp面解析データ及びJCOPE2再解析データを初期値・境界値を用いて再現実験(CNTL)を実施した。計算期間は台風第7号が日本の南海上にある2016年8月15日18UTCから北海道の北東海上に抜ける18日00UTCまでの54時間である。CReSS-NHOESを用いた標準実験(CNTL)の他にNHOESを結合しないCReSS単体の実験(CReSS実験)も実施した。



表1 モデル詳細

|  | Atmosphere Model (CReSS3.4.1)  | Ocean Model (NHOES)  |
|--|--|--|
| Horizontal domain                        | 132–155° E by 25–50° N with a resolution of 0.04 deg by 0.04 deg   |  |
| Vertical extents                         | Top height: 28.5 km<br>(lowest dz = 200 m)   | From the sea surface to the bottom of<br>the ocean<br>(dz = 2 m for the top 100-m) |
| Time step                                | 4 sec  | 0.5 sec (barotropic)<br>15.0 sec (baroclinic)                                      |
| Coupling interval                        | 300 sec  |  |
| Coupling quantities                      | SST (from NHOES)   | Surface heat, fresh water and<br>momentum<br>(from CReSS)                          |
| Surface heat and<br>momentum<br>exchange | Latent and sensible heats and momentum: Louis et al. (1982) with Kondo<br>(1975), Short- and long-wave radiation: Tsuboki and Sakakibara (2002);<br>Segami et al. (1989) |  |
| Cloud                                    | Simple 2-moment 3-ice bulk scheme<br>(No cumulus convection)   | N/A  |
| Turbulence                               | Deardorff (1980)   | Furuichi et al. (2012)   |
| Initial and boundary<br>conditions       | JRA-55<br>(resolution: 1.25 deg)   | JCOPE2 (Miyazawa et al. 2009)<br>(resolution: 0.1 deg)                             |
| Initial time                             | 1800 UTC 15 August 2016  |  |

次に温暖化実験として、擬似温暖化実験 (PGW) 手法を用いた。大気サイドの設定及び詳細は Kanada et al. (2017a) に準ずる。ただし、本研究では大気海洋結合モデルを用いたので、海洋サイドの温暖化差分の与え方には工夫が必要である。ここでは、SST 差分が水深100mで0になるよう線形内挿して与えた。海面水温、気温、水蒸気、高度を温暖化差分として与えた標準の擬似温暖化実験 (PGW) の他に、さらに風差分を加えた PGW\_UV 実験、また大気場にのみ温暖化差分を加え、海洋は昇温させない PGW\_ATM 実験も実施した。実験リストを表2にまとめた。実験に使用した SST の差分、地上水蒸気量の差分、高度場の差分を図6に示す。CNTLにおいて関東沖の SST は26°C、北海道付近は18°C前後であった (図6d)。PGW 実験の SST 上昇は東北沖以南で3°C以上、北海道周辺域では5°C前後と高緯度ほど大きい。その結果、PGW 実験における計算開始時の SST は関東沖で30°Cを超え、さらに台風の発達に必要とされる26°C以上の海域が北海道南東海上まで広がることになる。気温の上昇に伴い、日本周辺の地上水蒸気量は3kg/kg以上増加する (図6b)。また、温暖化による昇温は水平一様ではなく高緯度ほど大きい (図6a, c) ため、傾圧性は弱化する。

表2 実験リストと最低中心気圧

| 実験名        | 温暖化差分                             | 最低中心気圧  |
|------------|-----------------------------------|---------|
| 気象庁ベストトラック | N/A                               | 980 hPa |
| CNTL       | N/A                               | 977     |
| CReSS      | N/A                               | 973     |
| PWG        | T, Z, QV, SST + $T_{ocean}$       | 973     |
| PWG_UV     | T, Z, QV, SST, Wind + $T_{ocean}$ | 972     |
| PWG_ATM    | T, Z, QV                          | 987     |

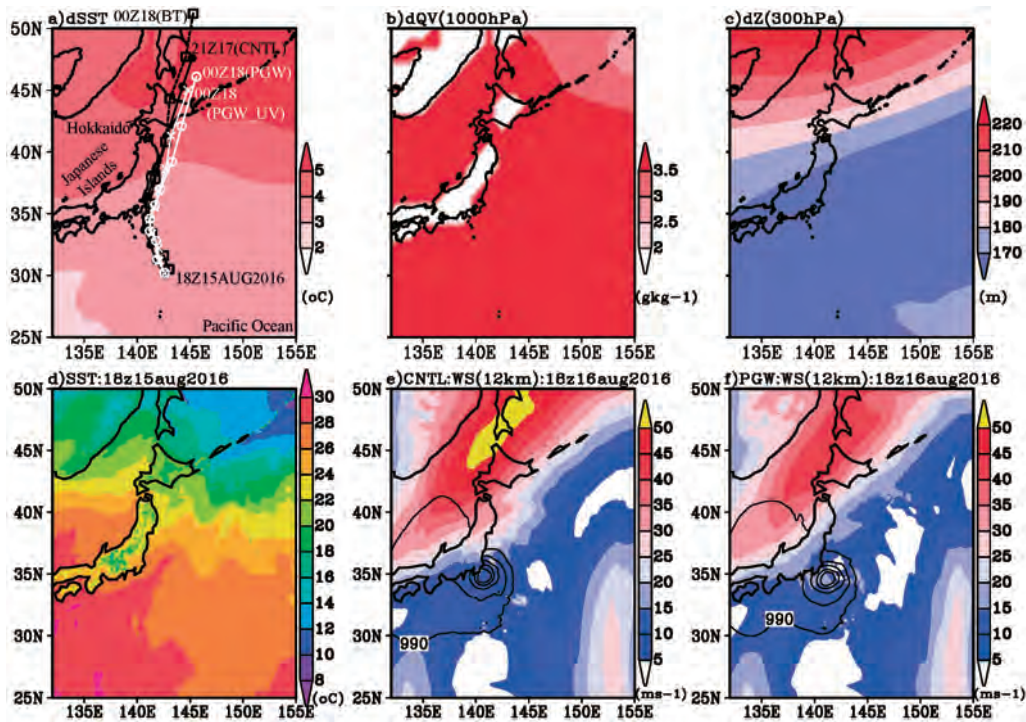


図6 擬似温暖化実験で用いた温暖化差分、(a) SST (dSST: °C)、(b) 1000hPa 高度の水蒸気混合比 (dQV: g/kg)、(c) 300hPa 高度のジオポテンシャル高度 (dZ: m)。a) に6時間毎の台風経路、気象庁ベストトラック (□)、CNTL 実験 (●)、PGW 実験 (○)、PGW\_UV 実験 (×) を付記した。(d) 2016年8月15日1800UTC の SST の水平分布。2016年8月16日1800UTC の高度12km の風速分布 (WS: m/s)、(e) CNTL 実験、(f) PGW 実験。図中の黒コンターは海面更正気圧978、981、984、987、990 hPa。(Kanada et al. 2017より)

### 2.3. 結果

気象庁ベストトラック (BT) によると台風第7号の最低中心気圧は980hPaであった。CNTL 実験では977hPaであり、最大強度及び経路ともに良好な再現性であった (表2及び図6a)。PGW 実験において台風は、よりゆるやかな進行速度で東寄りの経路を取りつつ北上し、最低中心気圧973hPaに達した。これは傾圧性の弱化により、上層ジェットが弱まったためと考えられる (図6e, f)。3次元海洋モデルを結合していない CReSS 実験では、再現実験で最低中心気圧973hPaと最大強度を過大評価した。これは台風の通過に伴う海面水温低下の影響を考慮していないためである。風差分を与えた PGW\_UV 実験の結果は、PGW 実験と大きな違いはみられなかった。また、大気のみ温暖化させた PGW\_ATM 実験では、台風がほとんど発達しなかった。これは、温暖化気候下、高度が上がるにつれて昇温も大きいため大気場が安定化し (Kanada et al. 2017a)、台風の発達が抑制されるためである。

台風第7号は北海道東部に大雨をもたらした。本研究では宗谷岬と襟裳岬を結んだ直線以東の陸上を北海道東部と定義して、この領域での降水の変化を調査する。

CNTL 実験に対し PGW 実験では降水開始時刻に差はないが、台風の北上速度が遅いため北海道への上陸が約6時間遅くなり降水期間も約6時間長引いた (図7 [II])。PGW 実験の降水はより強くより狭い領域に集中する傾向にある。さらに PGW 実験では台風が北海道に上陸する約18時間前に顕著な降水イベントが発生した (図7 [I])。この時北海道東部には最大40mm/hをこえる非常に強い降水が集中してみられる (図7f)。PGW 実験では台風の接近にともなって台風による南東風で20g/kg以上の水蒸気が北海道東部まで輸送される (図7f)。この潤沢な水蒸気にもなって、より強く大量の降水がもたらされたと考えられる。さらに、台風上陸時にも広い範囲により強く多量の雨がもたらされる (図7g, h)。



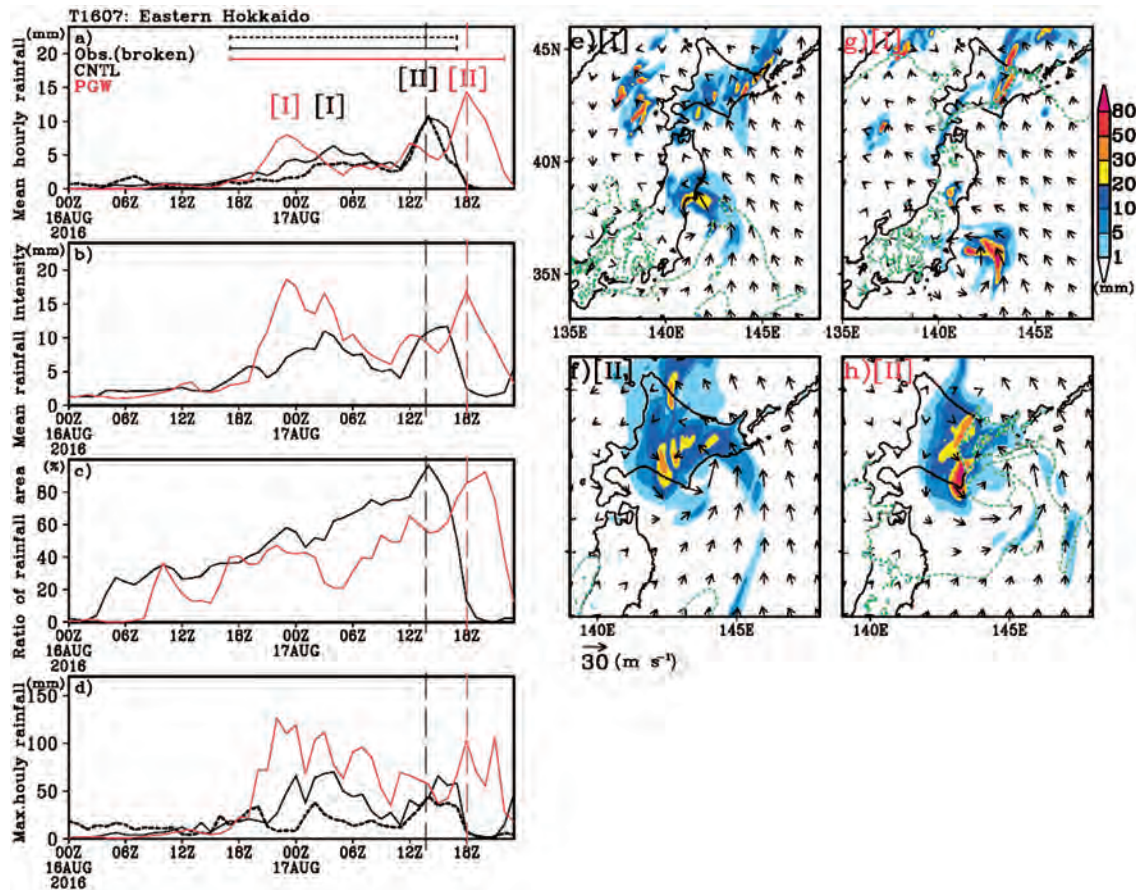


図7 北海道東部の降水特性。a) 領域平均1時間降水量（上部直線は領域平均降水量1mm以上がみられた期間で定義した降水期間）、b) 領域平均降水強度、c) 解析領域に対する降水領域の割合、d) 領域最大1時間降水量。CNTL実験（黒実線）、PGW実験（赤実線）。破線はAMeDASより作成。縦線はCNTL実験（黒）及びPGW実験（赤）の台風の上陸時を示す。[I]及び[II]は、先行して発生した降水イベント、台風上陸イベントをそれぞれ示す。降水イベント[I]の1時間降水量の水平分布、(e) CNTL実験（2016年8月17日0400 UTC）、(g) PGW実験（8月16日2300 UTC）。黒い矢印、緑の破線は、高度10mの風の場合、及び水蒸気混合比20 g/kgをそれぞれ示す。(f) - (h) (e) - (g)と同じ、ただし降水イベント[II]、(f) CNTL実験（8月17日1400 UTC）、(h) PGW実験（8月17日1800 UTC）。

## 2.4. まとめと考察

2016年8月北海道東部に大雨をもたらした台風第7号を対象に擬似温暖化実験を実施して将来変化を調査した。21世紀末、北海道付近の海面水温は4～5℃上昇する。その結果、大気下層の水蒸気量が増加して、台風第7号が太平洋を北上する間、北海道東部には20g/kg以上の潤沢な水蒸気が供給される。もたらされた降水は、より狭い領域により強く集中する傾向がみられた。特に、台風上陸24時間前の台風が北海道から700km前後以上離れた南海上に位置する時点より、北海道東部には強い雨がみられた。このことは、温暖化気候下、北海道東部では、単に雨量が増すだけでなく、より強く集中した豪雨へのより早期の警戒の必要性を示唆する。以上の結果をまとめて、Kanada et al. (2017b)として国際学術誌 SOLA に発表した。

本年度は台風第7号のみを対象としたが、2016年後半には他にも3事例の台風が北海道や東北地方に立て続けに上陸し、多量の雨をもたらしている。現在、対象を、これら3事例の台風すべてに拡張し、擬似温暖化実験を進めている。

### 3. 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF) からのダウンスケーリング実験

領域モデルによる将来変化予測手法には、擬似温暖化実験の他に、全球モデルによる将来変化予測実験からの力学的ダウンスケーリング実験がある。前者は、現在の既往顕著台風が将来気候環境場に置かれた時の振る舞いを予測する一方、後者は全球モデルの気候実験から顕著事例を選ぶため、現在気候ではみられない将来の温暖化気候に特有の顕著台風を捉えることが可能であるという利点がある。

名古屋大学チームでは、擬似温暖化実験の他に、全球モデルの台風の力学的ダウンスケーリング実験の一環として「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース、database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF)」からのダウンスケーリング実験を計画している。d4PDFは、文科省・気候変動リスク情報創生プログラムにより、気象庁／気象研究所の全球大気モデルMRI-AGCM3.2（水平解像度60km、以降AGCM60）及び領域大気モデルNHRCM（水平解像度20km、以降RCM20）を用いて実施された、これまでにない多数（最大100メンバ）のアンサンブル実験であり、確率密度分布の裾野にあたる極端気象の再現と変化について十分な議論ができるとされている。

このd4PDFからのダウンスケーリング実験で日本付近を通過する台風が日本に与える影響の将来変化を調査する。経路データはYoshida et al. (2017)と同じデータベースを用いた。2016年8月後半の事例より、北海道に太平洋側から上陸する台風が、北海道といった比較的緯度の高い地域にもこれまでに経験したことがないような豪雨をもたらす危険性があることが明らかになった。そこで、まず日本の東海上を北上して北海道東部に太平洋側から上陸する台風に注目する。気象庁ベストトラックデータによると1951年～2017年までの間、該当する台風は計8例みられた。うち3例は2016年8月後半の事例である。d4PDFで対象となる台風は、過去、非温暖化、4度上昇実験において、それぞれ186例、190例、125例であった（表3）。図8にそれらの全経路を示す。中心気圧が910hPa以下の非常に強い台風となった位置を黒ドットで付記したが、過去には北緯30度付近以南にしか見られなかったこれらの分布が、温暖化気候実験では北緯40度付近まで北上している。

表3 d4PDFの過去、非温暖化、4℃昇温実験の年数と北海道に太平洋側から上陸する台風の頻度

| 実験名        | メンバー数    | 各年数 | 総年数         | 総発生頻度    | 頻度/100年 |
|------------|----------|-----|-------------|----------|---------|
| 過去 (RCM20) | 100 (50) | 60  | 6000 (3000) | 186 (98) | 3.1     |
| (非温暖化)     | 100      | 60  | 6000        | 190      | 3.2)    |
| 4度上昇       | 90       | 60  | 5400        | 125      | 2.1     |



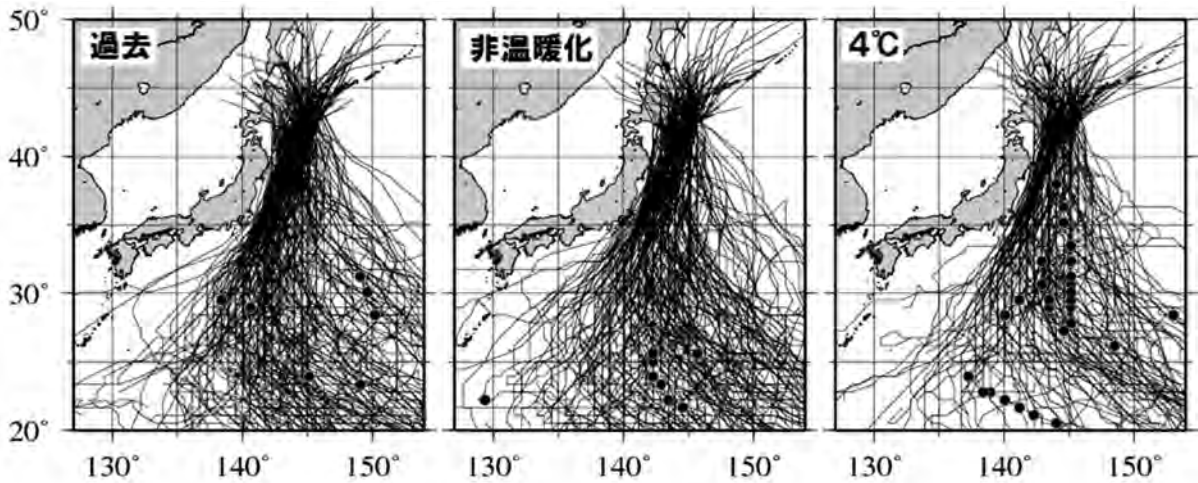


図8 d4PDFでみられた北海道に太平洋側から上陸する台風の経路。左から、過去実験、非温暖化実験、4°C上昇実験。黒ドットは中心気圧910hPa以下を示す。

d4PDFは、すべての実験を大気モデルで実施しており、台風の通過による海面水温の冷却を考慮していないため、台風の強さを過大評価している可能性がある。CReSSによるダウンスケーリング実験では、高解像度化して台風の構造や降水分布をより現実的に再現するだけでなく、海洋1次元モデルにより台風の中心付近といった強風下の海洋の冷却効果を考慮する。なお、d4PDFのAGCM60は水平解像度約60kmと粗いため、AGCM60を水平解像度約20kmのNHRCMで力学的にダウンスケールした結果(RCM20)を初期値・境界値とする。RCM20の過去実験の計算年数は3000年分とAGCM60の半数であり、対象となる台風も約半数の98事例であった。なお、RCM20では、非温暖化実験は実施していない。

図9は、上述の手順で抽出した台風を水平解像度0.04度の大気雲解像モデルCReSSでダウンスケール実験した例である。このとき日本の東海上を、二つの台風が立て続けに北上している。対象となる台風は、中心位置北緯40度、東経147度付近にあり、先行して北海道に接近している。図のように、RCM20では、台風の中心付近の限られた領域に20mm/h以下の雨域が広がるだけである。一方、CReSSによるダウンスケーリング実験では、台風の壁雲にあたる比較的強く集中した雨や、台風に先行するレインバンドが北海道南東域に20mm/h以上の強い雨をもたらしているといった詳細な分布を捉えている。

このように、雲解像モデルCReSSでダウンスケーリング実験することにより、台風やそれに伴う雨について、より詳細かつ定量的な議論が可能となることが期待される。来年度以降、実験領域や分解能といったモデルの設定を固定し、対象となるすべてについてダウンスケーリング実験を実施する予定である。

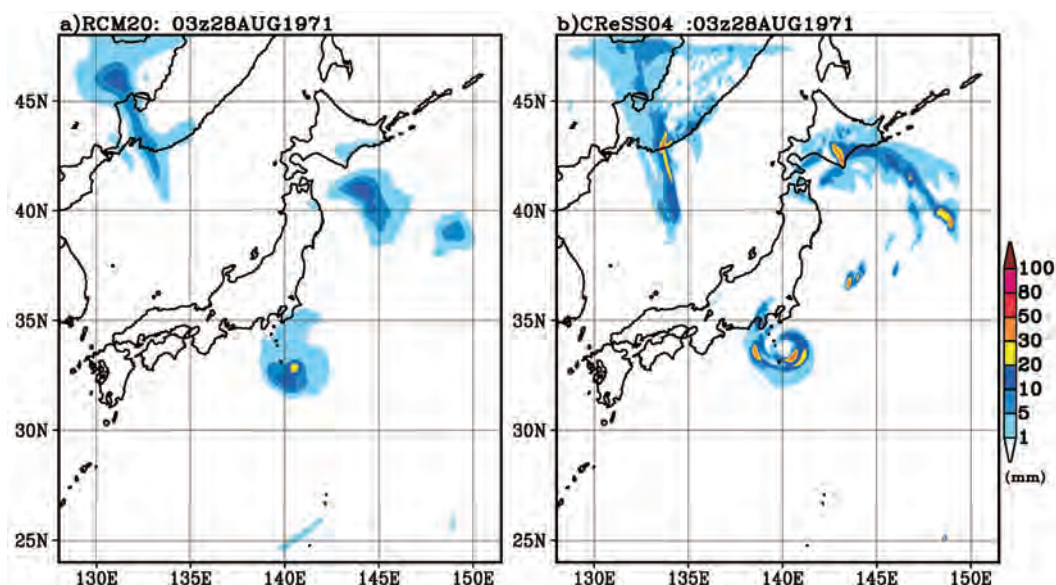


図9 d4PDFからのCReSSによるダウンスケーリング実験の例。1971年8月28日0300UTCの1時間降水量の水平分布図、左：RCM20（親モデル）、右：CReSS（ダウンスケーリング実験。1971年8月25日1800UTC計算開始）。

#### f. 引用文献

- Aiki, H., K. Takahashi, and T. Yamagata, 2006: The Red Sea outflow regulated by the Indian Monsoon, *Cont. Shelf Res.*, **26**, 1448–1468.
- Aiki, H., J. P. Matthews, and K. G. Lamb, 2011: Modeling and energetics of tidally generated wave trains in the Lombok Strait: Impact of the Indonesian Throughflow, *J. Geophys. Res.*, **116**, C03023, doi:10.1029/2010JC006589.
- Aiki, H., M. Yoshioka, M. Kato, A. Morimoto, T. Shinoda, and K. Tsuboki, 2015: A coupled atmosphere-ocean-surface-wave modeling system for understanding air-sea interactions under tropical cyclone conditions, *Bull. Coastal Oceanogr.*, **52**, 139–148.
- Kanada, S., T. Takemi, M. Kato, S. Yamasaki, H. Fudeyasu, K. Tsuboki, O. Arakawa, and I. Takayabu, 2017a: A multi-model intercomparison of an intense typhoon in future, warmer climates by four 5-km-mesh models, *J. Clim.*, **24**, 6017–6036.
- Kanada, S., K. Tsuboki, H. Aiki, S. Tsujino and I. Takayabu, 2017b: Future enhancement of heavy rainfall events associated with a typhoon in the midlatitude regions, *SOLA*, **13**, 246–251.
- Kanada, S., S. Tsujino, H. Aiki, M. Yoshioka, Y. Miyazawa, K. Tsuboki, and I. Takayabu, 2017c: Impacts of SST patterns on rapid intensification of Typhoon Megi (2010), *J. Geophys. Res.*, **122**, 13, 245–13, 262.
- Kaplan, J., and M. DeMaria, 2003: Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin, *Wea. Forecasting*, **18**, 1093–1108.
- Miyazawa, Y., and Coauthors, 2009: Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr.*, **65**, 737–756.
- Pendergrass, A.G., and H.E. Willoughby, 2009: Diabatically induced secondary flows in tropical cyclones. Part I: Quasi-steady forcing, *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 805–821.
- Persing, J., M. T. Montgomery, J. C. McWilliams and R. K. Smith, 2013: Asymmetric and axisymmetric tropical cyclone dynamics, *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 12299–12341.
- Rogers, R. F., P. Reasor, and S. Lorsolo, 2013: Airborne Doppler observations of the inner-core structural differences between intensifying and steady-state tropical cyclones, *Mon. Wea. Rev.*



141, 2970–2991.

Tsuboki, K., and A. Sakakibara, 2002: Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator, in *High Performance Computing*, edited by H. P. Zima et al., 243–259, Springer, New York.

Wada, A., T. Uehara, and S. Ishizaki, 2014: Typhoon-induced sea surface cooling during the 2011 and 2012 typhoon seasons: observational evidence and numerical investigations of the sea surface cooling effect using typhoon simulations, *Progress in Earth and Planetary Science*, **1:11**, doi:10.1186/2197-4284-1-11.

Yoshida, K., M. Sugi, R. Mizuta, H. Murakami, and M. Ishii, 2017: Future changes in tropical cyclone activity in high-resolution large-ensemble simulations, *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 9910–9917, doi:10.1002/2017GL075058.

## g. 成果の発表

### (1) 原著論文 (発行・印刷済み)

Kanada, S., K. Tsuboki, H. Aiki, S. Tsujino, and I. Takayabu, 2017: Future enhancement of heavy rainfall events associated with a typhoon in the midlatitude regions, *SOLA*, **13**, 246–251, doi:10.2151/sola.2017-045, 2017, 12.

Kanada, S., S. Tsujino, H. Aiki, M. Yoshioka, Y. Miyazawa, K. Tsuboki, and I. Takayabu, 2017: Impacts of SST patterns on rapid intensification of Typhoon Megi (2010), *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, doi:10.1002/2017JD027252, 2017, 12.

### (2) 学会、研究集会等

相木秀則：台風条件下の波浪・海洋混合層エネルギー収支、日本海洋学会2017年度秋季大会、仙台国際センター会議棟、仙台市、2017/10/15

Kanada, S., S. Tsujino, H. Aiki, M. Yoshioka, Y. Miyazawa, K. Tsuboki, and I. Takayabu, Impacts of SST patterns on rapid intensification of Typhoon Megi (2010). 12th International Conference on Mesoscale Convective Systems and High-Impact Weather in East Asia (ICMCS-XII), National Taiwan University Hospital (NTUH), Taipei, Taiwan, 2017/10/17–20

金田幸恵：擬似温暖化実験による2016年台風7号およびそれにともなう雨の将来変化予測。メソ気象研究会、北海道大学学術交流会館小講堂、北海道、2017/10/29

金田幸恵・辻野智紀・相木秀則・吉岡真由美・宮澤泰正・坪木和久・高藪出：雲解像大気・海洋結合領域モデルを用いた Typhoon MEGI (2010) の再現実験、日本気象学会2017年度秋季大会、北海道大学学術交流会館、北海道、2017年度秋季大会講演予稿集 D405、2017/10/30–11/2

金田幸恵：雲解像大気・海洋結合領域モデルを用いた Typhoon MEGI (2010) の再現実験、インド洋/太平洋域における海洋循環/環境応用に関する研究集会、名古屋大学・東山キャンパス・研究所共同館 II、愛知、2017/11/9

金田幸恵：擬似温暖化実験による2016年台風7号の将来変化予測、シームレス台風予測研究会、JAMSTEC 東京事務所、東京、2017/11/10

### (3) アウトリーチ活動 (講演、研修、報道、新聞、テレビ、ラジオ等)

坪木和久：台風の豪雨災害の現状と地球温暖化に伴う将来変化。一般社団法人不動産協会講演会、一般社団法人不動産協会、中日ビル・クラブ東海、愛知、2017/11/22

坪木和久、台風3号について、NHK、クローズアップ現代、7月6日、2017/7/6

坪木和久、台風3号について、TBS、報道特集、7月8日、2017/7/6

坪木和久、九州豪雨について、KBC九州朝日放送、土曜もアサデス、2017/7/29

坪木和久、竜巻特集、テレビ愛知、ゆうがたサテライト、2017/8/4

- 坪木和久、豊橋の竜巻とみられる突風について、テレビ愛知、ゆうがたサテライト、UP、2017/8/8
- 坪木和久、豊橋の竜巻とみられる突風について、東海テレビ、みんなのニュース One、2017/8/8
- 坪木和久、九州豪雨について、KBC九州朝日放送、ニュースピア、2017/8/16
- 坪木和久、九州豪雨について、日本テレビ（全国）、NNNドキュメント、2017/8/21
- 坪木和久、台風の災害について、南日本放送、MBC ニュースナウ、2017/9/1
- 坪木和久、豪雨について、東海テレビ、みんなのニュース One、2017/9/1
- 坪木和久、豊橋の竜巻について、NHK（東海三県）、ほっとイブニング、2017/9/4
- 坪木和久、豪雨について、静岡テレビ、とびっきり静岡、2017/9/5
- 坪木和久、スーパー台風について、NHK 総合、NHK スペシャル MEGA CRISIS、2017/9/9
- 坪木和久、異常気象について、テレビ愛知、サンデージャーナル、2017/9/10
- 坪木和久、スーパー台風について、フジテレビ、とくダネ、2017/9/13
- 坪木和久、台風18号について、TBS、報道ステーション、2017/9/14
- 坪木和久、台風について、大阪毎日放送、サタデープラス、2017/9/16
- 坪木和久、台風18号について、TBS、あさチャン、2017/9/18
- 坪木和久、九州豪雨特集にコメント、読売新聞、2017/7/6
- 坪木和久、九州北部の豪雨特集、読売新聞、2017/7/12
- 坪木和久、災害大国の特集欄にコメント、朝日新聞、2017/7/24
- 坪木和久、愛知県内で発生した竜巻とみられる突風についてコメント、読売新聞、2017/8/8
- 坪木和久、愛知県内で発生した竜巻とみられる突風について解説、読売新聞、2017/8/9
- 坪木和久、愛知県内で発生した竜巻とみられる突風について解説、毎日新聞中部、2017/8/9
- 坪木和久、豪雨について、毎日新聞、2017/10/16
- 坪木和久、福井県の記録的な大雪についてコメント、読売新聞、2018/2/7
- 坪木和久、水蒸気観測について、朝日新聞、2018/2/18