

台風による海塩の日本への大規模輸送メカニズムの解明と輸送量の算出

宮本 佳明

慶應義塾大学環境情報学部

概要

日本には毎年台風が来襲し、その際に海から巻き上げた大量の海塩粒子を輸送する。特に沿岸域では、電力設備や農作物・建物へ付着することで、台風通過時には塩害が深刻になる。こうした塩害を防ぐためには、どの程度の量の海塩粒子がどこに輸送されるのかを予め予測する必要があり、正確な予測のためには輸送メカニズムの理解が求められる。

これまでは、天気予報で用いられるような気象モデル(プログラム群)をコンピュータを用いて解くことで、台風のメカニズムを調べる研究は多くなされてきた。しかし、海塩粒子については既存の気象モデルでは考慮されておらず、新たに数値モデルを組む必要がある。一方で、大気中の海塩粒子の輸送過程を解いた研究もなされているが、台風による輸送を解いた研究はない。

そこで本研究では、海塩粒子の振る舞いを解く精緻な化学物質輸送モデルと、気象場(台風)の時間発展を解く気象モデルを用いて、数値シミュレーションを行い、結果を解析することで、台風による海塩粒子輸送プロセスを解明した。まず気象モデルで、台風の風や雲の場を計算し、そのデータを用いて化学物質輸送モデルによるシミュレーションを行なった。

その結果、まず日本に接近する現実的な台風を再現することができ、その風・雲のデータから、海塩粒子が陸地へ輸送される過程が計算された。重力による落下や雨粒に付着した粒子が落下することで地上への付着量が決まっていた。また、海岸からの距離の関数として解析したところ、重力落下量は沿岸に近づくほど多くなるのに対し、雨による落下量は必ずしも沿岸で最大ではないことが分かった。さらに、雨による落下量の方がおよそ1桁大きいことが明らかになった。つまり、地上への海塩粒子の総量で考えると、通常考えられる重力落下による量よりも、雨による落下の方が多かった。しかし雨に伴って海塩粒子が落下しても直ぐに流されるため、直接的な塩害には結びつきにくいことも考えられる。今回の事例では、沿岸から約 100 km 内陸の部分までで特に落下量が多かった。今後は、さらに他の事例研究や、雨による落下が塩害を引き起こす可能性などの調査が必要である。

1. 研究目的

台風は日本など多くの国に来襲し、甚大な被害をもたらすため、台風の将来予測は社会的・政治的・経済的に非常に重要である。台風はその強風によって海面から海塩粒子を生成し、水平方向へ輸送する。海に囲まれた日本では、風によって海塩粒子が陸へ輸送されることで、沿岸域での塩害が深刻である。特に台風が接近・通過した際

の海塩粒子輸送量は膨大で、各地で塩害による被害が生じる。2018年の台風24号では、強風によって輸送された海塩粒子が電線に付着して発火したり、電車の運行を妨げたり、農作物へ付着したりと大きな被害を与えた。こうした塩害の軽減のためには、どの程度の量の海塩粒子が、いつ、どこに輸送されるのかを定量的に予測する必要があり、そのためには輸送メカニズムの理解が必要である。

海塩粒子は、主に風によって海から大気中へ流入し、風によって流される(図1)。その一方で、重力によって落

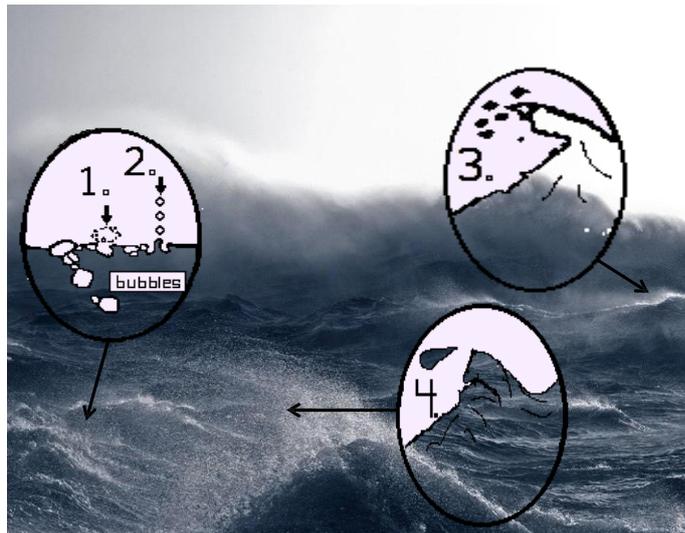


Figure 1: Schematic of mechanisms on generation of sea-salt aerosols from the ocean surface(1). Process 1 represents generation from air bubble that in ocean water. Process 2 represents generation by falling of rainfall. Process 3 represents generation from the top of wave. Process 4 represents generation by separation of wave top.

下し、また雨粒に付着して落下することで、海や陸地に落下する。海塩粒子の大きさは数 μm 以下と小さく落下速度も大きくないが、雨粒の大きさは数 mm とおよそ千倍の粒径であり、落下速度も非常に大きい(数 m s^{-1})。そのため、速い速度で落下してくる雨粒に海塩粒子が捕捉されて、海塩粒子も地上へ落下する。この一連の過程を解析的に解くことは困難であるため、数値計算に頼るしかない。これまでも、風によって海塩粒子が輸送される過程を解く数値モデルが開発され、コンピュータによる計算が行われてきた⁽¹⁻²⁾。しかし、最も輸送量が大きくなる台風での海塩粒子の輸送過程は明らかになっていない。

台風は、海から熱エネルギー(水蒸気)を獲得し、その熱エネルギーが中心付近で雲(水滴)になることで運動エネルギーに変換されて駆動する(図2)。そのため、獲得する熱量が多いほど、つまり海水温が高いほど、台風は強くなるのである。地球温暖化によって、海の水温も増加する傾向にあるため、台風は強くなると予測されている。ここで、台風にとって重要な“水蒸気が水滴になる(凝結する)”ためには、核となる物質が必要である。通常は大気中に浮遊するエアロゾルと呼ばれる微粒子が、この核となり、凝結核(Cloud Condensation Nuclei: CCN)と呼ばれる(図3)。海塩粒子もエアロゾルの一種であり、海上で生成する台風の中では海塩粒子が CCN になると考えられている。

地球温暖化に伴って台風に伴う風が強まると、より多くの量の海塩粒子が海面から巻き上げられ、今よりも多くの量の粒子が沿岸域に輸送されることが考えられる。上述した台風 24 号では、海塩粒子を洗い流してくれる雨が少なく、長時間強風が続いたことで、膨大な量の海塩粒子が輸送されたと考えられる。“雨台風”・“風台風”という言葉があるように、こういった特徴は台風ごとに異なるため、台風による海塩粒子の供給量を事前に予測するためには、海塩粒子の輸送のメカニズムを理解する必要があるが、上述のようにまだ未解明な点が多く残る。そこで本研究では、台風が海塩粒子を運ぶ過程を定量的に調べる。また、雲が存在する現実の大気場で、大学のキャンパスと離島にて観測を行い、数値シミュレーションの結果と比較することで、計算結果の精度を検証する。

2. 研究方法

台風による海塩の輸送メカニズムの解明と、輸送量の算出を行うため、まず日本に接近する現実的な台風の風・雲などといった気象場のシミュレーションを実行した。次に、計算で得られた風・雲のデータを用いて、海塩粒子の振る舞いを解くモデルを用いて時間発展を解いた。そして、得られた結果を解析し、台風による海塩粒子の輸送に関する定量的な議論を行なった。

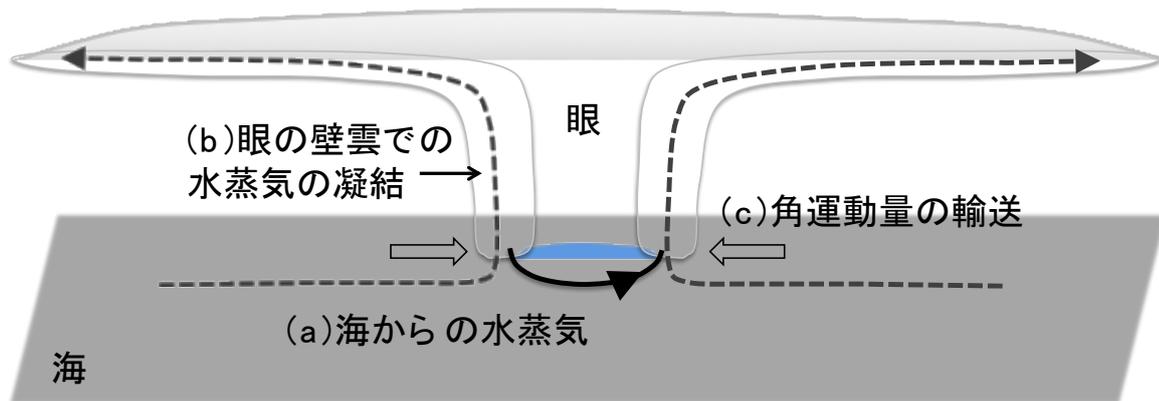


Figure 2: Schematic for mechanism on typhoons(4). The three fundamental processes for the driving mechanism of typhoon are (a) supply of water vapor from the ocean surface, (b) condensation of water vapor in eyewall, a ring-shape cloud surrounding eye, and (c) inward transport of angular momentum by inward velocity to compensate mass in the eyewall.

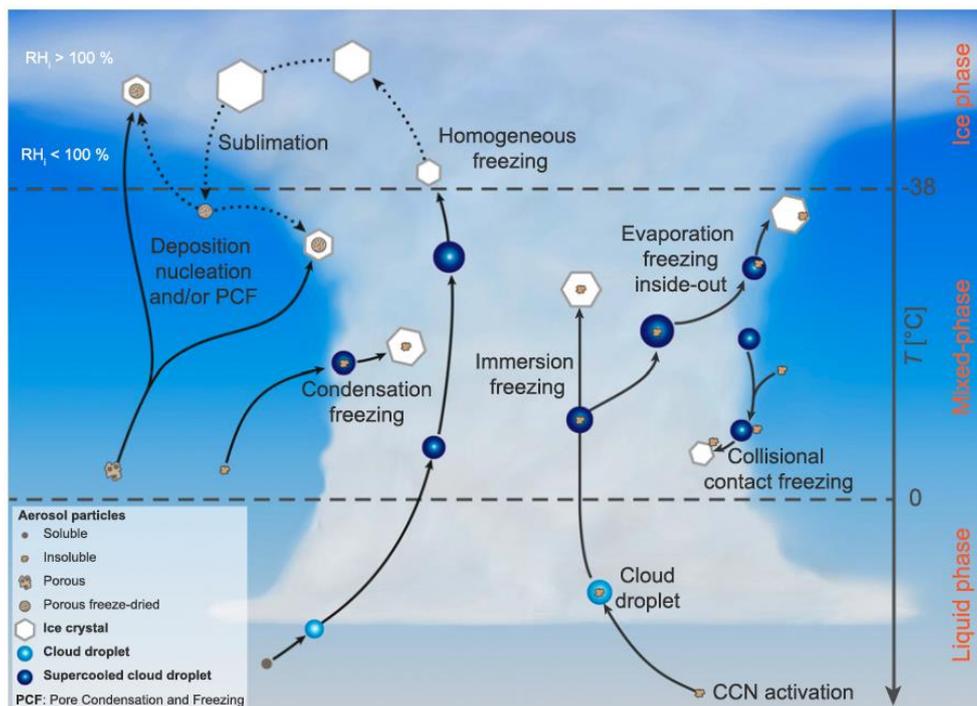


Figure 3: Schematic for aerosol as cloud or ice condensation nuclei in a convective cloud⁽⁵⁾. The number of aerosol decreases when it activates and becomes nuclei of cloud droplet or ice particle.

気象場を解くために用いたモデルは世界で幅広く使われる気象モデル(Weather Research and Forecasting⁽⁶⁾)で、本研究ではすでに学術論文として公開された台風に関するシミュレーションの結果を利用した⁽⁷⁾。気象モデルは、空気の流速(3方向)、密度、温度、水蒸気量といった気象場に関する変数の時間発展を表す微分方程式を離散化して解くプログラム群のことを指す。具体的には、質量保

存の式(密度)、流体の運動方程式(運動量3方向)、熱力学の第一法則(温度)、各種スカラー量の保存式(水蒸気など)を支配方程式とする系を考える。方程式の離散化は、時空間方向に有限の数の離散点に分割して行う。例えば空間については、格子(基盤の目)状に区切った上で、各格子点で風速や温度の時間発展を解く。また、雲過程や太陽放射、地球放射など、空間(格子)スケールは細かい

ものの気象現象に重要となる様々な物理過程は、格子点上の変数の値を用いてパラメタライズされる(影響が近似的に解かれる)。

今回用いたものも含めて、気象モデルは日々の天気予報で用いられるものとほとんど同じである。気象モデルの研究によって天気予報モデルが発展して来たこともあり、気象モデルを用いれば、近未来の予測であれば、現在であればかなり良い精度で予測することができる。特に今回用いた気象モデルは、最先端のもので、現在世界中で研究だけでなく現業の気象予報のためにも利用されているものである。

しかしながら、この計算には海塩粒子の過程は一切考慮されていないため、このシミュレーションでまず風や雲の計算を行い、その結果を用いて、海塩粒子の輸送過程に関しては別途計算を行った。海塩粒子の輸送計算には、近年開発された化学物質輸送モデル⁽⁸⁾を用いた。具体的には、上のシミュレーションで得られた台風に伴う風や雲などの気象データを入力して、海塩粒子が輸送されて行く過程を計算した。今回利用した輸送モデルは、気象庁で開発された化学物質輸送モデルで、他の事例においても利用され、すでに精度が検証されているものである。計算の初期値には、日本付近の(台風が来ていない時も含む)平均的な海塩粒子データを用いた。計算領域は台風シミュレーションと同様に、日本とその近海を取り囲む領域を設定して、水平の格子幅は 15 km、鉛直には 30 層とし、3 日間の時間積分を行なった。今回は、数あるエアロゾルの中でも特に海塩粒子に着目して計算・解析を行なった。気象場の計算設定の詳細に関しては、Nayak and Takemi (2018)⁽⁷⁾を参照されたい。

3. 研究結果

3. 1. 海塩粒子の輸送計算

本研究では、2 種類の数値モデルで計算した結果を解析し、どのような物理過程によって海塩粒子が輸送されて行くのかを明らかにする。海塩粒子が輸送される過程は、細かく分けると、

- a) 移流: 風によって流される過程
- b) 拡散: 空気内で混合される過程
- c) 雨による除去: 雨粒にぶつかって付着し落下する過程

- d) 重力落下: 重力によって落下する過程
- e) 凝結による除去: 雲粒の形成時に、核になって水滴に取り込まれる過程
- f) 蒸発による再生成: 水滴が蒸発して、取り込まれていた粒子が大気に戻る過程
- g) 海面による生成: 海面で粒子が生成され大気へ移動する過程

に分けることができる。つまり、ある時刻・点における海塩粒子量 N_s が、時間 Δt 秒後に変化する量は、これらの過程による変化の正味の値となる。数式で表せば、

$$\underbrace{\frac{\partial N_s}{\partial t}}_{\text{Tendency}} = - \underbrace{\left(u \frac{\partial N_s}{\partial x} + v \frac{\partial N_s}{\partial y} \right)}_{\text{horizontal adv}} - \underbrace{w \frac{\partial N_s}{\partial z}}_{\text{vertical adv}} + \underbrace{K \nabla^2 N_s}_{\text{diffusion}} + \underbrace{S_{\text{flux}}}_{\text{src flux}} + \underbrace{G_{\text{fall}}}_{\text{grav fall}} + \underbrace{R_{\text{scav}}}_{\text{rain scav}} + \underbrace{N_{\text{nucl}}}_{\text{nucleation}} + \underbrace{E_{\text{evap}}}_{\text{evaporation}}$$

となり、これが海塩粒子の輸送方程式である。ここで、左辺は、ある時刻・地点における海塩粒子の時間変化項を表し、右辺は、左から順に水平移流項・鉛直移流項・拡散項・海面による生成項・重力による落下項・雨滴による除去項・凝結による除去項・水滴の蒸発による生成項を表す。(u,v,w)はそれぞれ、東西方向風速、南北方向風速、鉛直方向風速を示す。拡散項の K は拡散係数で、 ∇ は一階の空間微分演算子である。流体力学的な変化である移流項・拡散項以外は、簡易的に記号で表現しているが、実際には複雑な数式になる。詳しくは例えば Pruppacher and Klett (1978)⁽⁹⁾を参照されたい。

この式は複雑すぎて手で解けないため、近似を施した上でコンピュータを用いて数値的に解く。ここで、コンピュータで式を解くために微分方程式に施す近似を、離散化と呼び、上のような偏微分方程式では、基本的に各微分項を Taylor 展開して、ある精度の項まで解き、それより高次の項は無視するというものである。そのため高次の項まで解いた方が精度の高い計算結果が得られるが、当然ながら計算時間も必要になることから、ある程度の精度を確保できる次数の項まで打ち切られる。現実的な結果を出す精度が、すでに多くの研究によって分かっている。また、式の中には微分で表されない項もあり、それらはまた別の離散化方法がある。一般的に離散化する方法は離散化(数値)スキームと呼ばれる。

海塩粒子の輸送過程は上の式で記述できるため、台風が通過するときの各項の値を計算することで、どの項が支

配的なのかを見つけることが可能となる。支配的な項(物理過程)が分かるということは、台風による海塩粒子輸送のメカニズムを明らかにすることに等しい。そこで本研究では、各項を気象・化学輸送モデルの両計算の出力結果から計算し、それぞれの値を比較した。今回作成した解析プログラムは、風および雲と海塩粒子濃度の情報さえ入力すれば、台風のみならず他のあらゆる気象条件にも適用することが可能である。

3. 2. 計算結果

風・雲・雨のデータと海塩粒子のデータを式に入力して、各格子点における海塩粒子数濃度の時間変化を解いた。図4に計算開始9時間後における海上風と凝結物混合比(雲物質の乾燥空気に対する質量比)の場の水平分布とその時の海塩粒子の濃度の水平分布を表す。日本の南海上に台風が再現されており、その中心付近と特に南側に大きな凝結物混合比の値が存在する。また、本州の東海上にはスパイラル状の雲が、北海道にも大きな値の凝結物混合比の集合体を確認される。この結果からは現実的な気象場が再現されていることが分かる。同じ時刻の高度18 mにおける海塩粒子の分布を見ると、台風の中心付近の特に北西側に大きな値が確認される。また、日本の東海上にはスパイラル状の雲分布に対応する形で海塩粒子の大きな領域が存在する。台風に伴って反時計回りに回転する風の場合が存在し、それに流される形で、海塩粒子が陸に輸送されていることが分かる。

図5に、海面からの海塩粒子供給量、対流性の雲内の雨粒に取り込まれることによる除去量、重力落下による除去量、対流雲以外の雨に取り込まれて落下する量、の水平分布を表す。ここで、対流性の雲とは、積乱雲や台風の中心付近の雲のように、強い上昇流を伴う雲のことを指す。海からの生成量は、風速に依存することからも分かる通り、海上風速が速い台風の中心付近や日本東海上の雲付近で大きくなっている。生成量が大きい領域では、重力落下による乾性沈着量が大きい。これは、粒径の大きい海塩粒子が海から生じて、落下速度が速く直ちに落下するためと考えられる。また、凝結物混合比が特に大きい台風中心付近で、対流雲による除去量が大きい。関東や南東北の太平洋側、北海道で湿性除去量が大きい。

図6に、台風の周囲500 km以内で積算した海塩粒子(の供給)量、除去量、移流・拡散項の時間変化図を表す。

シミュレーション時間が進むと共に、各項とも増大して行く。これは、台風の強度が少しずつ強くなっていったため、風が速くなると海面からの供給量が増加する。さらに、台風の強度は中心付近の対流雲と深く関係しているため、対流性除去項が最も大きく、次に乾性沈着量が大きい。これらの値も台風の強度と共に増加している。一方で、台風の周囲では湿性沈着や霧沈着による除去量は少ない。

図7に、日本列島(沖縄を除く)の各格子点で算出した海塩粒子量の、海岸線からの距離に応じた値を示す。海岸線までの距離は、各格子点から、もっとも近くの海岸線座標までの距離を算出して求めた。図を見ると、海塩粒子は初期値からの増加量は、海岸付近で最も高く、距離に応じて減少している。海岸線に近い地域では、最も多いところで台風接近前の約5倍に達している。台風による海塩粒子輸送の影響は、20 ~ 30 km内陸までが顕著である。乾性沈着量も、海岸付近で最も大きい。これは、乾性沈着量が海塩粒子の重力による落下に関係するため、沿岸域の方が粒径の大きな粒子が多いことから、沈着量が多いと考えられる。陸に入るほど、重い粒子は落下してなくなるため、乾性沈着量も減少する。一方で湿性沈着量は、沿岸域よりも内陸に入った方が大きい。

3. 3. 観測結果

次に、得られたシミュレーションの結果の検証を行うため、複数地点で観測を行なった。具体的には、大学のキャンパス(神奈川県藤沢市)をはじめとする関東の複数箇所(茨城県つくば市・東京都港区・神奈川県横浜市神奈川区など)および離島(沖縄県宮古島・鹿児島県種子島)にて、雲・降水が存在した時の、雲底高度や視程など雲の性質と、雨水を採取してその塩分濃度を測定した。

しかしながら、今回行なった測定ではシミュレーションと整合するような結果は得られなかった。この原因として、まず測定の方法とタイミングが挙げられる。シミュレーションでは台風を対象に計算を行なったが、測定では台風のデータを取れなかったため、単発の積乱雲や寒冷前線に伴う乱層雲が対象であった。これによる違いが大きいと考えられる。また、今回は雨水を採取してその塩分濃度を調べるという手法をとったが濃度が薄く測定できない場合は非常に多かった。そのため測定結果のデータの信憑性が欠けてしまっている。今後はこの反省を生かし、例えば採取した雨水を一度蒸発させてから濃度を測るなど、対応策を

考えて、特に台風通過時に測定して行きたい。また、観測
測器を増やして、同時刻に複数箇所で観測を行なって行

くことも必要だと考えられる。

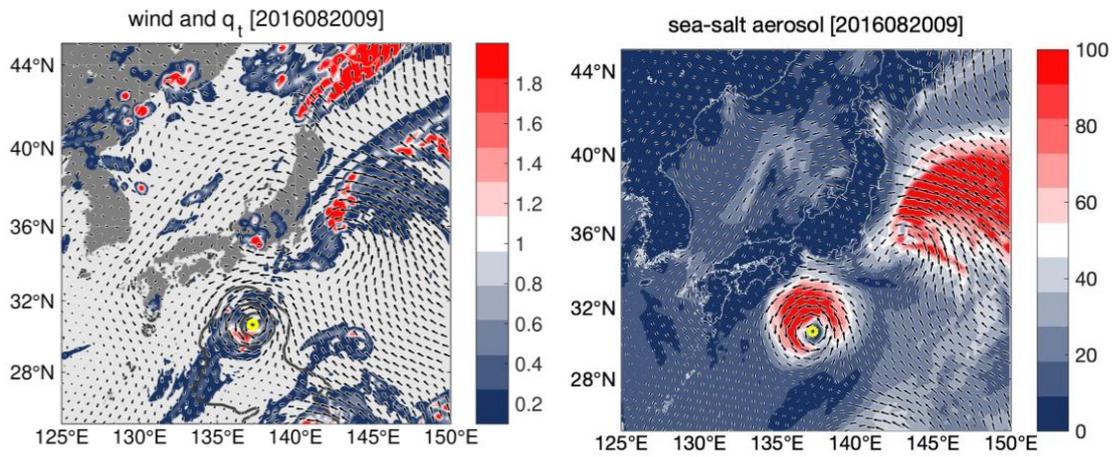


Figure 4: (Left) Horizontal wind at the 10-m altitude above the surface (vector), vertically averaged mixing ratio of hydrometeor (shaded), and sea-level pressure (contour) at $t = 9$ h of simulation. The mixing ratio is averaged from 1.5 to 10 km and unit is g kg^{-1} . The contour interval of sea-level pressure is 10 hPa. (Right) Concentration of sea-salt aerosol (shaded) with the surface wind (vector) at $t = 9$ h.

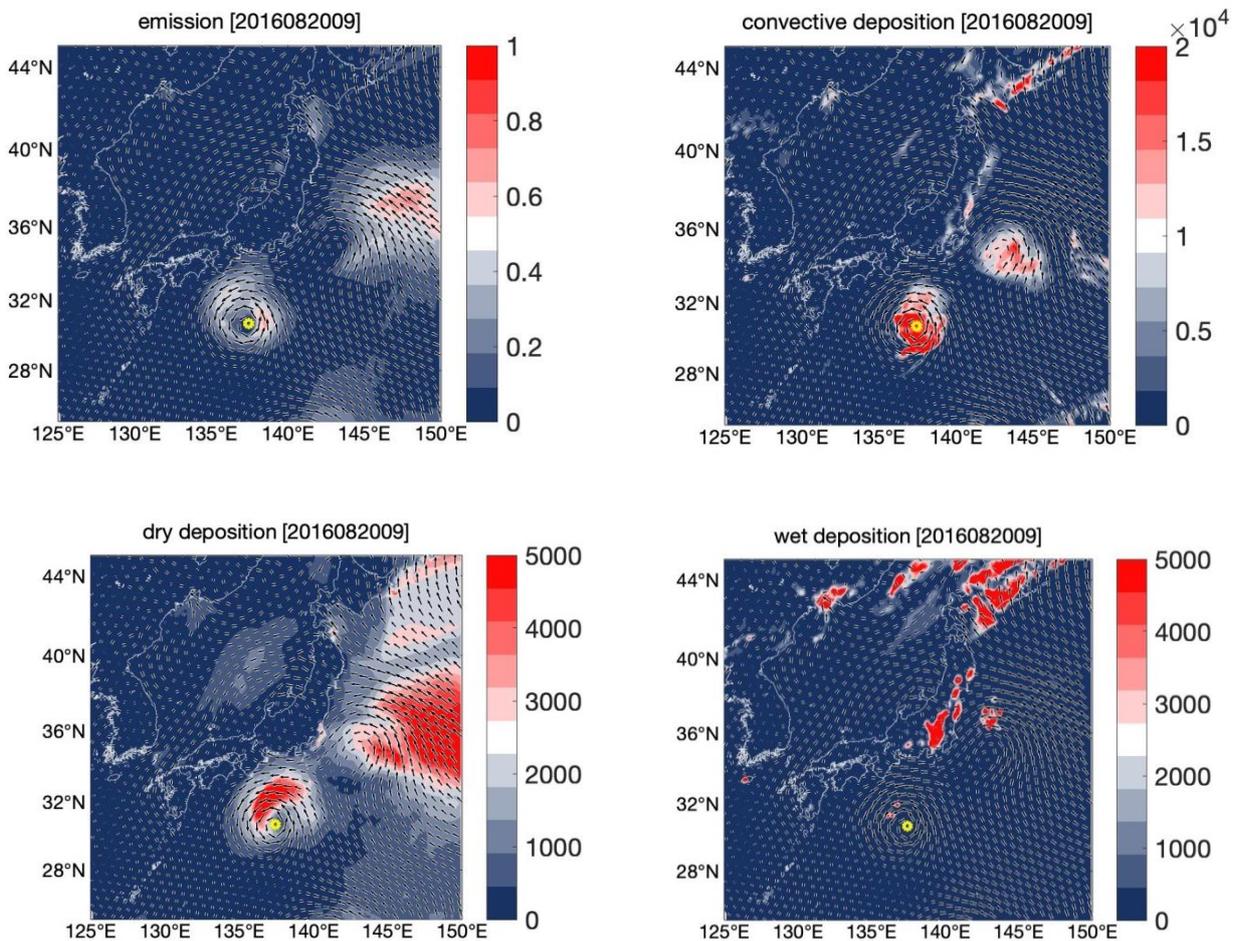


Figure 5: Same as Fig. 5, but for (left top) Generation term of sea-salt aerosol from the ocean surface, (left bottom) Dry-deposition term, (right top) Convective-deposition term, and (right bottom) wet-deposition term. The deposition terms are evaluated at the lowest model layer.

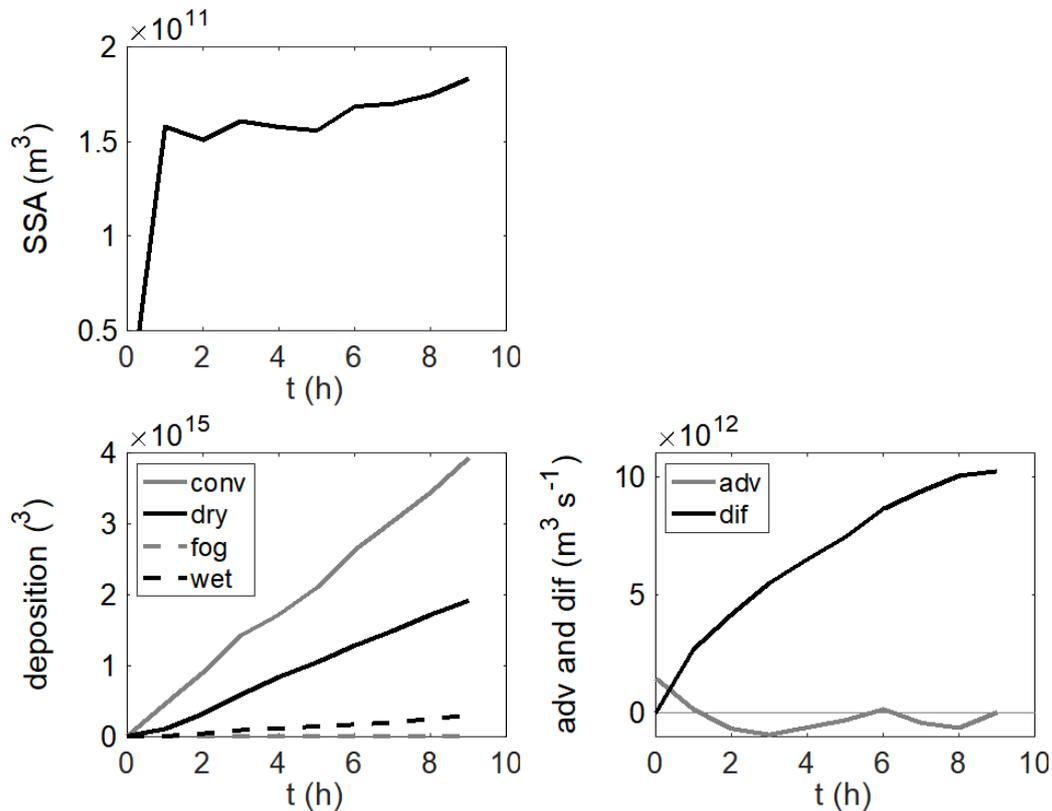


Figure 6: Time series of (left top) sea-salt aerosol (SSA), (right top) surface emission of SSA, (left bottom) depositions, and (right bottom) advection and diffusion terms. SSA and advection and diffusion terms are integrated inside the 500-km radius and below $z = 12$ km. The emission and depositions are integrated inside the 500-km radius. In the left bottom panel, the black solid, gray solid, black dashed, and gray dashed lines represent the dry, convection, wet, and fog depositions, respectively. In the right bottom panel, the black and gray lines stand for the advection and diffusion terms.

4. 考 察

図 6 に示した、台風域内で積算した各過程の値の時間変化図において、台風域内ながら感想沈着量が多くなっていた。これは、台風直下では、海面からの供給量が多いことから、粒径の大きな海塩粒子も大気に流入し、それらは重すぎて直ちに落下するため、供給量が多いところで乾性沈着量が大きくなっていると考えられる。この結果は、各沈着量の水平断面図を示した図 5 からも確認できる。

図 7 の解析において、湿性沈着量は沿岸域よりも内陸に入った方が大きいことが示された。これは、平面図で見られたような内陸で湿性沈着量が多い部分が寄与していると考えられる。また、中央値に比べて最大値が大きい

のは、今回は沖縄を除く日本全域で解析を行ったため、台風に影響を受けていない領域の部分が中央値に反映されており、最大値の方は台風による影響が強い地域を反映しているためと考えられる。この結果は、あくまで一つの台風事例を解析したものであり、今後さらに事例の解析が必要である。

今後は、より社会に役立つような結果を創出するため、図 7 で行った海岸線からの距離を関数とした解析に加えて、台風中心からの距離や、各海岸地点における海の方角、降水量との関係(乾性沈着量と湿性沈着量の比)などに注目して解析を行う。

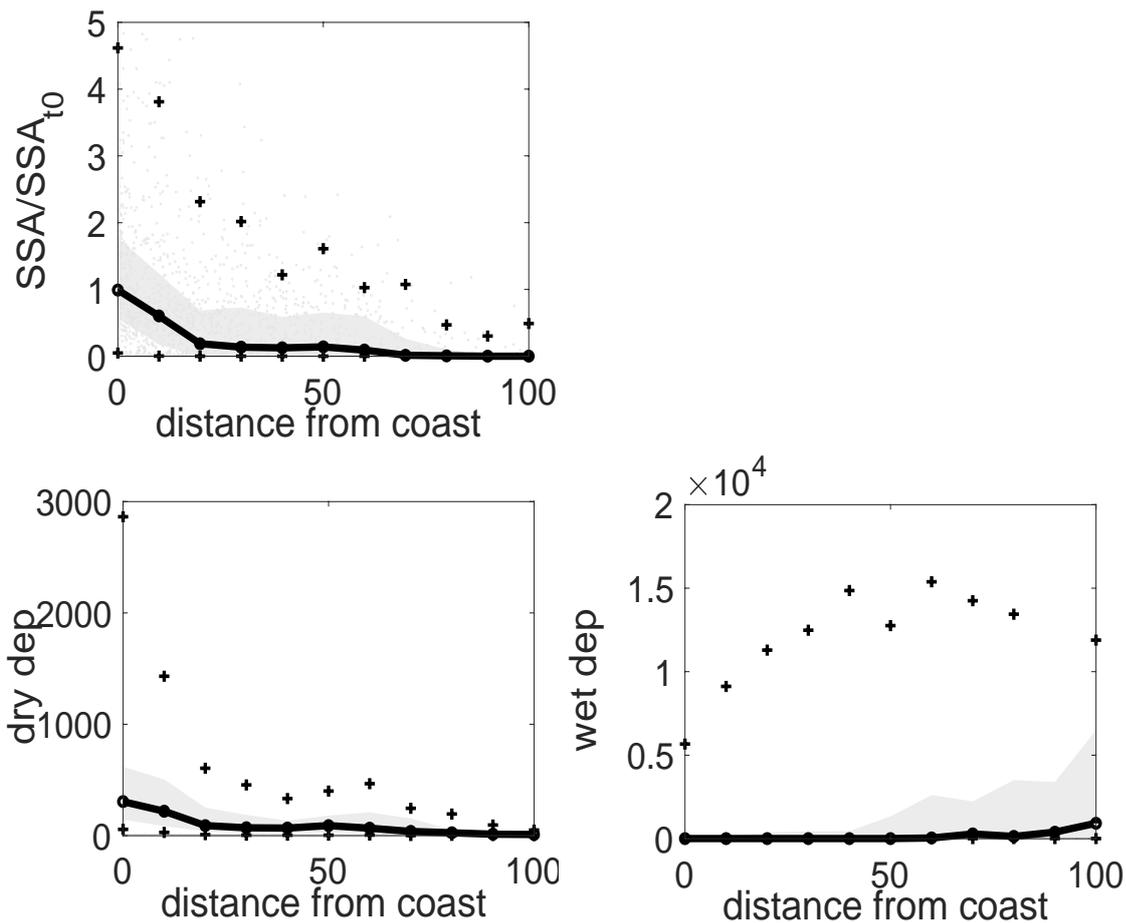


Figure 7: (Left top) the ratio of SSA at the end of simulation to that at the initial time, (right top) dry deposition, and (right bottom) wet deposition as a function of distance from the coast. The unit of horizontal axis is km. The solid black line indicates the median at a 10-km interval. The crossings stand for 5% and 95% values, and gray shaded area represents the range from 25% to 75% values.

5. 今後の課題

本研究では、台風によって海塩粒子が陸地に向かって輸送されて行く過程を、精緻な化学物質輸送モデルと気象モデルを用いてシミュレーションを行うことで調査した。まず幅広く利用されている気象モデルを用いて、日本に接近する台風に関するシミュレーションを行い、台風に伴う風や雲といった気象変数のデータを取得した。次に、これら気象変数を入力値とし、化学物質輸送モデルを用いて、台風の風によって日本域へ輸送される海塩粒子のシミュレーションを行なった。

その結果、地上への海塩粒子の沈着量は、重力による落下や雨粒に付着した粒子が落下する過程によって決ま

っていた。また、海岸からの距離の関数として解析したところ、重力落下量は沿岸に近いほど多くなるのに対し、雨による落下量は必ずしも沿岸で最大ではないことが分かった。さらに、雨による落下量の方がおよそ1桁大きいことが明らかになった。つまり、地上への海塩粒子の総量で考えると、通常考えられる重力落下による量よりも、雨による落下の方が多いたことが分かった。しかし雨に伴って海塩粒子が落下しても直ぐに流されるため、直接的な塩害には結びつきにくいことも考えられる。今回の事例では、沿岸から約 100 km 内陸の部分までで特に落下量が多かった。今後は、さらに他の事例研究や、雨による落下が塩害を引き起こす可能性などの調査が必要である。

6. 文献

1. 須藤 仁・服部康男・平口博丸, 2008: 海塩粒子輸送シミュレーションによる塩分付着量推定に関する研究, 電力中央研究所報告, N07028.
2. 木原直人・平口博丸・高橋 章・藤田慎一, 2009: 大気中の海塩粒子濃度の短期間予測手法の開発, 土木学会論文集 B2(海岸工学) Vol. B2-65, 1166-1170.
3. Grythe, H., J. Ström, R. Krejci, P. Quinn, and A. Stohl, 2014.: A review of sea-spray aerosol source functions using a large global set of sea salt aerosol concentration measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 1277–1297.
4. 宮本 佳明, 2018: 台風が発達するワケ, 『台風についてわかってること知らないこと』, 筆保 弘徳 編. ベレ出版, 218pp.
5. Kanji, Z.A., L.A. Ladino, H. Wex, Y. Boose, M. Burkert-Kohn, D.J. Cziczo, and M. Krämer, 2017: Overview of Ice Nucleating Particles. *Meteorological Monographs*, 58, 1.1–1.33,
6. Skamarock, W.C., et al. 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Notes, NCAR/TN-4751STR.
7. Nayak, S., and T. Takemi, 2019: Dynamical downscaling of Typhoon Lionrock (2016) for assessing the resulting hazards under global warming. *J. Meteor. Soc. Japan*, 97, 69-88.
8. Kajino, M., Deushi, M., Sekiyama, T. T., Oshima, N., Yumimoto, K., Tanaka, T. Y., Ching, J., Hashimoto, A., Yamamoto, T., Ikegami, M., Kamada, A., Miyashita, M., Inomata, Y., Shima, S., Adachi, K., Zaizen, Y., Igarashi, Y., Ueda, H., Maki, T., and Mikami, M. 2018: NHM-Chem, the Japan Meteorological Agency's regional meteorology – chemistry model (v1.0): model description and aerosol representations, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-128>.
9. Pruppacher, H. R., and J. D. Klett, 1997: *Microphysics of Clouds and Precipitation*. D. Reidel, 714 pp.

Mechanism and Quantitative Estimation for Typhoon-Induced Massive Transport of Sea-Salt Particles

Yoshiaki Miyamoto

Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

Summary

Tropical cyclones (TCs) transport significant amount of sea-salt aerosols (SSAs) by strong winds to coastal regions, which causes severe damages through salinization of land. However, predicting transportation of SSAs by TC is a challenging issue, because transporting processes of SSA by TC are complicated and determined by many processes such as surface emission, gravitational fall, scavenging by rain droplets, and nucleation. Because of the importance, previous studies calculated the amount of SSAs transported by winds by developing a numerical model solving the processes that play a role in transporting SSAs. However, few studies have been conducted to examine transportation of SSAs by TC. This study aims to investigate the transportation of SSAs produced by winds associated with TC toward land by conducting a set of numerical simulations using a sophisticated chemical transport model and a widely used meteorological model.

The simulation realistically simulated a TC approaching Japan and transporting processes of SSA, production at the ocean surface, advection, and deposition. It is found that the amount of deposition due to gravity is largest near the coastal region. In land, the dry deposition is about one order of magnitude smaller than that of moist deposition. Meanwhile, the amount of moist deposition is largest not at the coast, but approximately 50 km from the coast. In the TC system, which is defined inside the 500-km radius from the center, the moist deposition is the largest contributor out of all terms in the SSA budget equation. More cases need to be examined for better understanding.