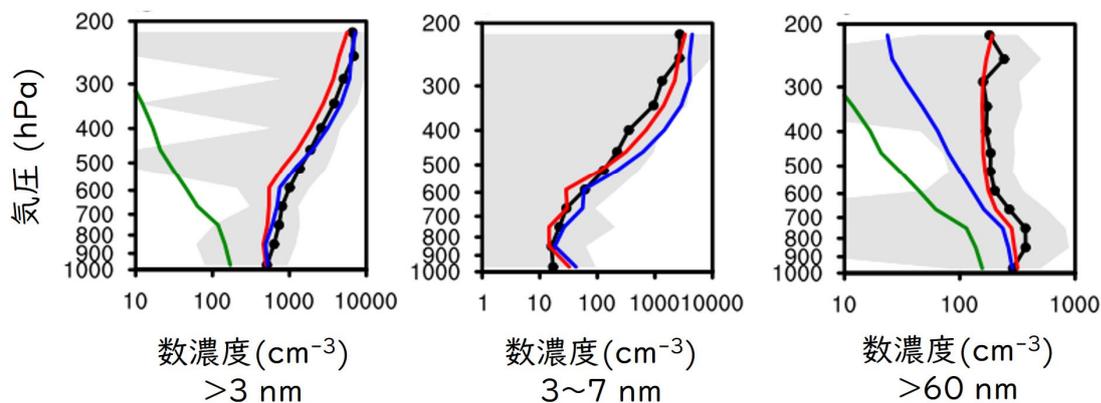


観測, モデル計算, モデル計算 (二次有機エアロゾル生成off),
モデル計算 (新粒子生成off)



気候モデルによる大気微粒子の数濃度・粒径分布の 推定精度を大きく向上させることに成功 ～微粒子の雲への影響評価や気候予測の高精度化に期待～

【本研究のポイント】

- ・気候モデルによる数値シミュレーションによって、遠隔域（太平洋上や大西洋上）において観測された微粒子の数濃度や粒径分布、雲凝結核数（雲粒の核となる大気微粒子の数）の空間分布を再現することに初めて成功。
- ・雲凝結核数の推定において、多くの気候モデルでは十分に考慮されていない大気微粒子の生成・成長プロセスを考慮する重要性を解明。
- ・気候変動や地球温暖化の将来予測を高精度化するための知見となることが期待。

【研究概要】

国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学大学院環境学研究科の松井 仁志 准教授、リウ ミンシュ 研究員は、大気微粒子が生成・成長するプロセスを詳細に扱った気候モデルの数値シミュレーションを行い、太平洋上や大西洋上などの陸から離れた遠隔域において観測された大気微粒子の数濃度や粒径分布、雲凝結核数（雲粒の核として働く大気微粒子の数）の空間分布を再現することに初めて成功しました。そして、多くの気候モデルでは十分に考慮されていない大気微粒子の生成・成長プロセス（大気中で粒径数 nm 程度の非常に小さな粒子が生成し、その粒子表面での有機物を含む粒子の生成を通して粒径 50~100 nm 程度まで成長するプロセス）が、遠隔域における雲凝結核数を決める主要なプロセスであることを明らかにしました。大気微粒子が雲凝結核として働いて雲の特性を変化させる効果は、気候変動予測において特に不確実性が大きく、本成果は、気候の将来変化や地球温暖化の予測の高精度化につながる重要な知見となることが期待されます。

本研究成果は、2022 年 9 月 28 日付地球物理学分野の国際学術誌「Geophysical Research Letters」に掲載されました。

【研究背景と内容】

大気中の微粒子（エアロゾル）は、太陽光を散乱・吸収するとともに、雲粒の核として働くことで雲の物理特性（雲粒の数や大きさなど）を変化させます。これらは、地球を冷却する効果を持ち、二酸化炭素などの温室効果ガスによる加熱効果を部分的に相殺する役割を果たしていると考えられています。しかし、エアロゾルが雲の物理特性に与える影響には非常に大きな不確実性があり、この不確実性を減らすことが気候変動研究・予測において極めて重要な課題となっています（IPCC 第 6 次報告書）。エアロゾルの雲への影響の不確実性が大きい主な要因のひとつとして、さまざまな気候モデル^{注1)}の間で、エアロゾルや雲の扱いが大きく異なることが挙げられます。特に現状の気候モデルでは、雲の水滴の核（雲凝結核：Cloud condensation nuclei: CCN）として働くエアロゾルの観測再現性が十分ではなく、その全球分布^{注2)}の推定精度を向上させることが大きな課題となっています。

大気中の雲の環境では、粒径がおおよそ 50~100 nm 以上のエアロゾルが CCN として働きます^{注3)}。CCN の数濃度（CCN 数）の推定では、エアロゾルの数濃度や粒径分布とこれらを決める大気プロセスの推定が鍵を握ります。特に、新粒子生成^{注4)}と呼ばれる非常に小さな粒子が生成するプロセスや、二次有機エアロゾル（Secondary Organic Aerosol: SOA）^{注5)}の生成によってエアロゾルが成長する（粒径が大きくなっていく）プロセスは、大気中の CCN 数の増加につながるプロセスと考えられています（図 1）。しかし、先行研究では、これらのプロセスのシミュレーションの手法・精度が十分ではなかったこともあり、CCN 数に対するこれらのプロセスの重要性はよくわかっていませんでした。本研究では、SOA 生成と新粒子生成の両方を詳細にシミュレーションす

ることが可能な気候モデルを用い、これらのエアロゾル生成プロセスが CCN 数の全球分布の推定に与える影響を定量的に評価しました。

本研究では、SOA 生成と新粒子生成の両方を詳細に考慮した気候モデルと、太平洋上・大西洋上の遠隔域で行われた広域航空機観測との比較を実施しました。そして、この気候モデルのシミュレーションによって、広域航空機観測で得られたエアロゾルの数濃度と粒径分布、CCN 数、有機エアロゾルの質量濃度の空間分布を再現することに初めて成功しました（図 2）。また、SOA 生成と新粒子生成を考慮しないシミュレーションを個別に行い、これらのシミュレーションでは観測されたエアロゾルの数濃度や有機エアロゾルの質量濃度を大幅に（場所によっては 1~2 桁程度）過小推定することを示しました（図 2）。そして、これらの生成プロセスによって形成される CCN が、遠隔域における全 CCN 数の 50%以上を占めることを推定しました（図 3）。これらの結果から、遠隔域における CCN 数の推定において、大気中で数 nm 程度の非常に小さい粒子が生成し、それらの粒子が SOA の生成プロセスによって CCN となる粒径までの成長する過程が極めて重要な役割を果たすことを明らかにしました。

また、本研究では、人間活動由来のエアロゾルの割合が現在よりも少ない産業革命前の気候では、現在の気候よりも全 CCN 数に対する SOA 生成・新粒子生成由来の CCN 数の寄与が大きくなることを示唆しました。そして、このような産業革命前と現在における CCN 数に対する寄与の違いに起因し、両プロセスが産業革命前から現在までの雲の放射強制力^{注6)}を 0.1 W m^{-2} 程度変化させることを示しました。

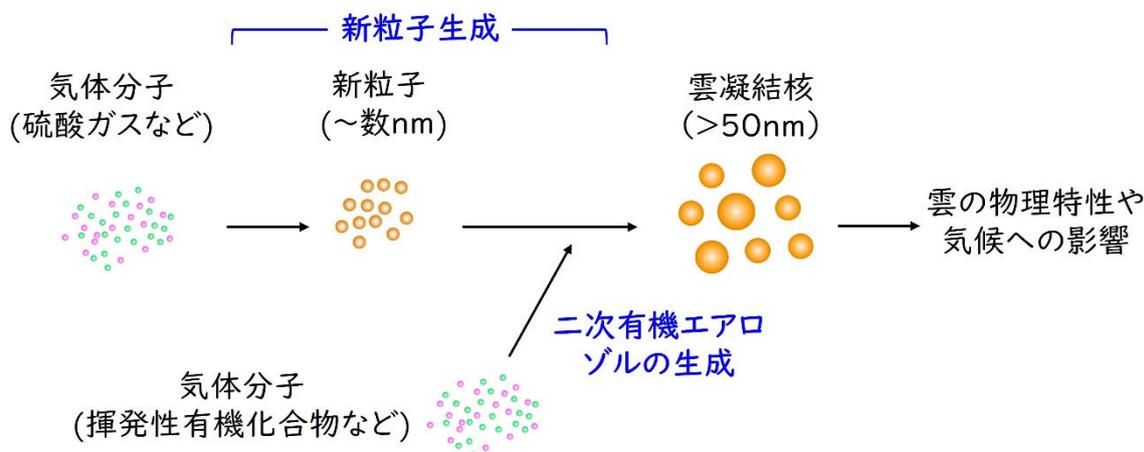
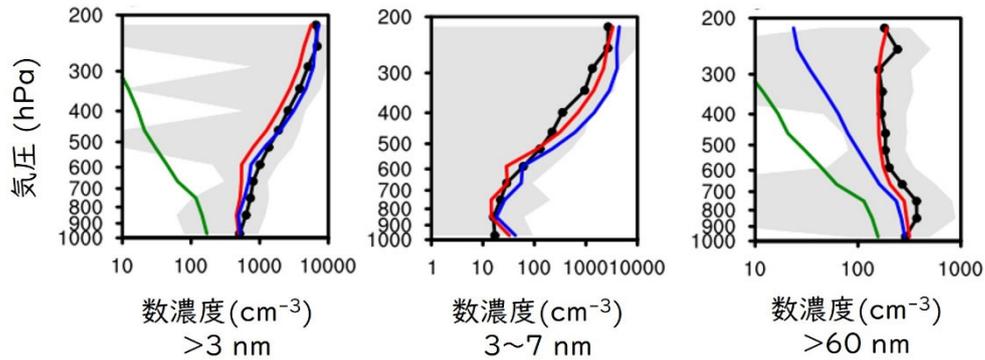


図 1. 本研究で着目した二次有機エアロゾル (SOA) の生成プロセスと新粒子生成プロセスの概要図。新粒子生成プロセスは、エアロゾルの数濃度を増大させる。SOA の生成プロセスは、エアロゾルの粒径を増大させ、雲凝結核として機能する粒径までエアロゾルを成長させる。本研究ではこれらのエアロゾル生成プロセスを詳細に考慮した気候モデルを用い、エアロゾルの数濃度と粒径分布、雲凝結核数の推定手法・精度を大きく向上させた。

熱帯域 (25N-25S) でのエアロゾル数濃度

観測, モデル計算, モデル計算 (SOA生成off), モデル計算 (新粒子生成off)



ATom航空機観測の飛行経路図

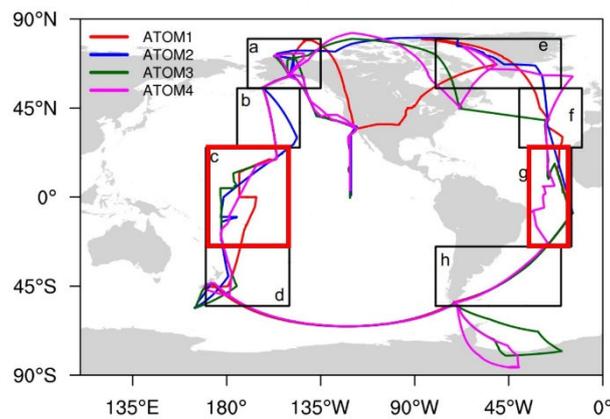


図2. (上) 広域航空機観測 (ATom) と数値シミュレーション (モデル計算) の比較。比較例として、熱帯域 (25° N から 25° S の範囲、下図の赤枠の範囲内) における結果を示す。左から、粒径 3 nm 以上のエアロゾル数濃度、粒径 3~7 nm のエアロゾル数濃度、粒径 60 nm 以上のエアロゾル数濃度の鉛直 (高度) 分布を示す。それぞれ、全エアロゾル数、新粒子生成によって生成した直後のエアロゾル数、雲凝結核数に対応する。二次有機エアロゾル (SOA) 生成と新粒子生成の両方を考慮したシミュレーション (赤) では、すべての粒径範囲のエアロゾル数濃度が観測結果 (黒) とよく一致している。一方、SOA 生成を考慮しないシミュレーション (青) と新粒子生成を考慮しないシミュレーション (緑) では、エアロゾル数濃度を大幅に過小推定している。これらの結果から、SOA 生成と新粒子生成の両プロセスを詳細に考慮することが、エアロゾルの数濃度と粒径分布、雲凝結核数を精度良く推定する上で極めて重要なプロセスとなることを明らかにした。(下) 数値シミュレーションとの比較・検証に用いた ATom 航空機観測の飛行経路。太平洋と大西洋において、北半球の高緯度から南半球の高緯度までの広域観測が 2016 年から 2018 年にかけて行われた。

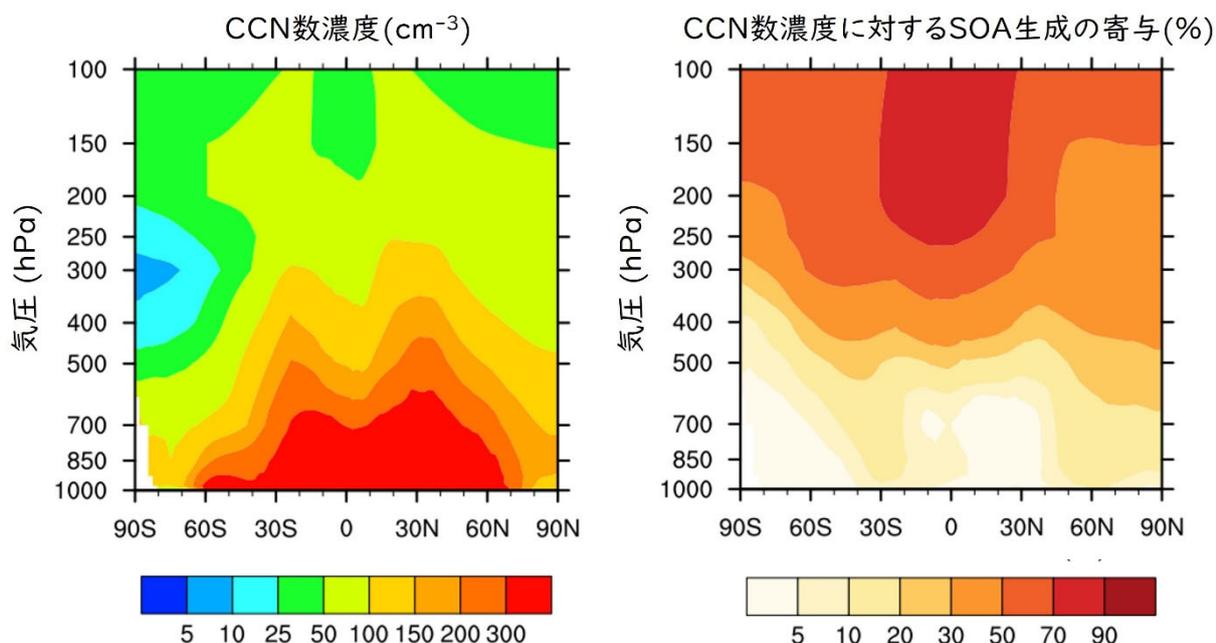


図3. (左) 本研究で推定した CCN 数の緯度－高度分布（経度方向に平均）。(右) CCN 数に対する二次有機エアロゾル (SOA) 生成の寄与。特に、対流圏上層や成層圏下層の CCN 数の推定において、新粒子生成によって非常に小さい粒子が生成し、それらの粒子が SOA 生成によって成長するプロセスが重要な役割を果たすことを示している。両図とも、過飽和度（注3参照）が1%の場合の CCN についての結果を示す。

【成果の意義】

本研究では、SOA の生成と新粒子生成が互いに影響し合いながらエアロゾルの数濃度・粒径分布を変化させることに着目し、これらのプロセスを同時にかつ詳細に考慮することが、有機エアロゾルの質量濃度、エアロゾルの数濃度・粒径分布、CCN 数、エアロゾルの雲への影響、放射強制力の数値シミュレーションの精度を向上させるために不可欠であることを明らかにしました。また、全 CCN 数に対するこれらのプロセスの寄与が、人間活動の変化とともに過去から将来にかけて変化することを示唆しました。SOA 生成と新粒子生成は、多くの気候モデルでは十分な精度で扱われていません。今後これらのプロセスを多くの気候モデルで導入もしくは精緻化することによって、CCN 数の推定精度を向上させていくとともに、エアロゾルが雲に与える影響評価の高度化や、気候の将来予測の精度向上につなげていくことが求められます。

本研究は、日本学術振興会・科学研究費助成事業（19H04253、19H05699、19KK0265、20H00196、20H00638、22H03722）、環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費（JPMEERF20202003）、文部科学省・北極域研究加速プロジェクト（ArCS II：JPMXD1420318865）などの支援のもとで行われたものです。

【用語説明】

注1) 気候モデル：

地球全体の大気を緯度・経度・高度の3次元方向に細かい格子に分割し、それぞれの格子での気象要素（気温、風速など）や物質の濃度（水蒸気、微量気体成分、微粒子など）の時間変化を、流体力学、熱力学、化学などの法則に従って計算する数値モデル。本研究で用いた名古屋大学の気候モデル（CAM-ATRAS）は、エアロゾルの大気への放出、大気中での生成・変質・輸送、降水などによる除去といったプロセスを考慮して、数ナノメートルから数十マイクロメートルの大きさを持つエアロゾルの空間分布とその時間変化を計算する。

注2) 全球分布：

地球大気全体の空間分布。

注3) 粒径がおよそ50~100 nm以上のエアロゾルがCCNとして働きます：

エアロゾルが雲の中で雲の水滴の核（雲凝結核、CCN）となるかどうかは、雲の中での水蒸気の過飽和度（水蒸気量が飽和水蒸気量をどれくらい超えているか）や、エアロゾルの粒径・化学組成などに依存して決まります。一般的に、エアロゾルの粒径が大きいほどCCNになりやすいとされています。粒径50~100 nm以上のエアロゾルはCCNとなり、雲粒を形成するのに対し、それ以下の粒径の多くのエアロゾルはCCNとはなりません。

注4) 新粒子生成：

大気中の気体分子の集合体から粒径1~3 nm程度の非常に小さい粒子が大量に生成し、その後、粒子表面でのエアロゾルの生成を通してさらに成長する（粒径が大きくなっていく）プロセス。本研究で用いた気候モデルCAM-ATRASでは、粒径1 nmの粒子の生成と、それらの超微小粒子が二次有機エアロゾルの生成（注5参照）などを通して大きな粒子に成長していく過程を、物理・化学法則に基づいて計算する。粒径1~10000 nmのエアロゾルを12個のグループに分割して粒径分布を表している。

注5) 二次有機エアロゾル（Secondary Organic Aerosol: SOA）：

有機化合物の酸化反応を通して生成するエアロゾル。二次有機エアロゾルの生成は、すでに大気中に存在しているエアロゾルの成長に寄与し、エアロゾルの粒径分布を変化させ、CCN数を増やす。本研究で用いた気候モデルCAM-ATRASでは、有機化合物の揮発性（気化のしやすさ）に着目したモデルを用い、幅広い揮発性を持った有機化合物からの二次有機エアロゾルの生成を考慮している点が特徴である。一般的なモデルでは、揮発性の高い有機化合物からの二次有機エアロゾルの生成のみを考慮しているが、本研究のモデルでは、より揮発性の低い有機化合物（半揮発性・中間揮発性の有機化合物）からの二次有機エアロゾルの生成も考慮しており、大気観測で得られた有機エアロゾル濃度の再現性がよい。

注6) 放射強制力 :

ここでは、CCN が雲の物理特性を変化させることによって、地球に出入りする正味の放射エネルギー（太陽から入ってくる放射エネルギーと地球から出ていく放射エネルギーの差）が、産業革命前（1750年）から現在（2010年）までにどれくらい変化するかの度合いを表す。

【論文情報】

雑誌名 : Geophysical Research Letters

論文タイトル : Secondary Organic Aerosol Formation Regulates Cloud Condensation Nuclei in the Global Remote Troposphere

著者 : Mingxu Liu¹ and *Hitoshi Matsui^{1,2}

1 名古屋大学大学院環境学研究科

2 名古屋大学未来社会創造機構脱炭素社会創造センター

DOI: 10.1029/2022GL100543

URL: <https://doi.org/10.1029/2022GL100543>