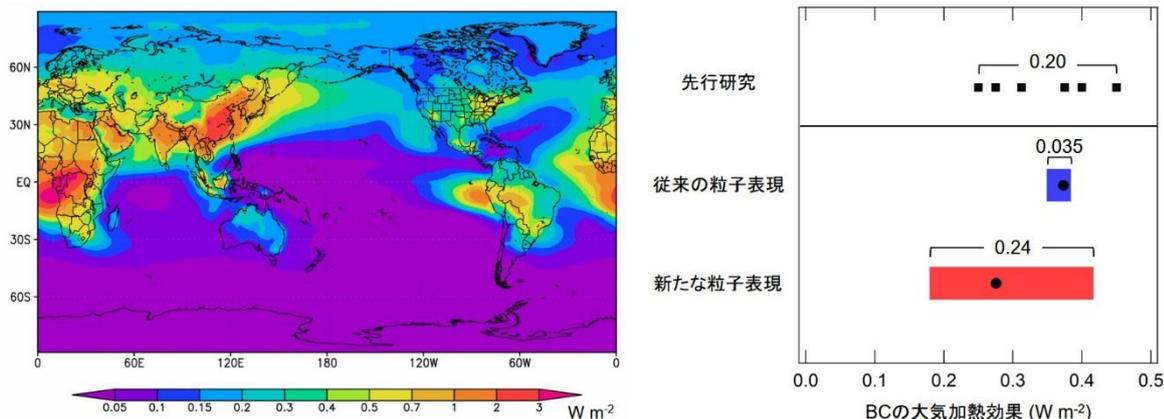


BCの大気加熱効果



大気中のすす粒子による地球温暖化効果

～個々の粒子の大きさや被覆量の違いを考慮する重要性を解明～

名古屋大学大学院環境学研究科の松井 仁志 助教、米コーネル大学の Douglas Hamilton 博士、Natalie Mahowald 教授の研究グループは、大気中に放出されるすす粒子による地球温暖化効果（大気を加熱する効果）に関する最先端の計算法を用いた数値シミュレーションを行い、これまでの計算法では十分に考慮されていない個々の粒子の大きさや化学組成（すす粒子以外の成分によって被覆される量）の違いを高い精度で表現・計算することが、すす粒子の地球温暖化効果を精度良く推定する上で不可欠であることを明らかにしました。また、このような個々の粒子の違いを考慮することが、将来のすす粒子の削減対策や温暖化対策を評価する際にも重要であることを明らかにしました。今後の気候変動予測の高精度化に向けて、この研究成果が、その不確実性を減らす重要な知見となることが期待されます。

なお、この研究成果は、平成 30 年 8 月 27 日に英国オンライン科学雑誌「*Nature Communications*」に掲載されました。

この研究は、日本学術振興会・科学研究費助成事業（26740014,17H04709,26241003,16H01770,15H05465）、環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費（2-1403,2-1703）、国立極地研究所 GRENE（グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス）北極気候変動研究事業・ArCS 北極域研究推進プロジェクトの支援のもとで行われたものです。

【ポイント】

- ・地球全体の大気を対象としたすす粒子の数値シミュレーションを行い、すす粒子が大気を加熱する効果を精度良く推定するためには、これまで注目されてこなかった個々の粒子の大きさ（特に、大気に排出された直後の粒子の大きさ）や化学組成（すす粒子以外の成分による被覆量^{注1)}）を高い精度で表現・計算することが不可欠であることを明らかにした。
- ・将来のすす粒子の削減対策や温暖化対策を評価する際にも、個々の粒子の大きさと被覆量が重要な役割を果たすことがわかった。

【研究背景と内容】

化石燃料・バイオ燃料の燃焼やバイオマスバーニング（森林や草原での火災）によって大気中に排出される炭素を主成分とする黒色のエアロゾル（大気中の微粒子）は、ブラックカーボン（Black carbon; BC、すす）と呼ばれ、太陽光を効率的に吸収し地球大気を加熱する効果（大気加熱効果）を持ちます。産業革命後の人間活動に伴う BC の大気加熱効果は、二酸化炭素やメタンに次いで 3 番目に大きいと考えられており、地球温暖化の要因の 1 つと認識されています（IPCC 第 5 次報告書）。BC の大気加熱効果は、大気観測や全球エアロゾルモデル^{注2)}を用いた数値シミュレーションによって推定されます。世界の様々な全球エアロゾルモデルによる BC の大気加熱効果の推定の幅（モデル間の違い）は非常に大きく、この推定幅を減らすことが、気候変動研究における重要な課題の 1 つとなっています。

個々の BC 粒子の大気加熱効果は、粒子の大きさ（粒径）や被覆量によって大きく変わります（図 1）。近年の観測によって、大気中の BC 粒子は様々な粒径・被覆量を持つことがわかってきました。しかしながら、このような BC 粒子の特徴を、多くの全球エアロゾルモデルでは正確に表現していません。また、粒子が大気中に排出された直後の粒径（排出粒径）の扱い方にも、エアロゾルモデルによって大きな違いが存在します。これまでの研究では、排出された直後の粒径のモデル間の違いが、BC の大気加熱効果を推定する上で重要になるとは考えられてきませんでした。

今回、研究グループは、個々の BC 粒子の粒径・被覆量の違いを細かく区別できる全球エアロゾルモデルを用い、粒子が排出された直後の粒径の違いが、BC の大気加熱効果の推定に大きな影響を及ぼすことを明らかにし、そのメカニズムを解明しました。まず、個々の粒子の被覆量の違いを細かく区別した数値シミュレーションと、そうでない従来型の（これまでのエアロゾルモデルで用いられている）数値シミュレーションを行い、排出粒径のモデル間の違い^{注3)}が BC の大気加熱効果に及ぼす影響を調べました（図 2）。その結果、被覆量の違いを区別してシミュレーションした場合にのみ、排出粒径の違いによって BC の大気加熱効果の推定値が大きく（2 倍以上）変わることが明らかになりました（図 3、図 4）。この大きな推定の幅は、排出直後の粒径の違いによって BC 粒子が関わるエアロゾルプロセス^{注4)}の速度が変わり、その結果、BC 粒子の粒径・被覆量に大きな違いをもたらし、光吸収量と大気加熱効果が大きく変わる、というメカニズムによって作り出されることがわかりました。従来のエアロゾルモデルでは、このメカニズムを十分な精度で計算できないこともわかりました。この結果は、BC の大気加熱効果を精度良く推定するためには、個々の粒子の被覆量の違いを細かく区別し、さらに粒子が排出された直後の粒径を正確に扱うことが不可欠であることを示しています。今後、様々な大気観測によって粒子が排出された直後の粒径の不確かさを減らしていくとともに、多くのエアロゾルモデルで個々の粒子の被覆量の違いを細かく区別していくことが必要です。

また、将来の BC の気候への影響を推定する際にも、個々の粒子の被覆量の違いを区別し、排出直後の粒径を高い精度で表現・計算することが重要になることがわかりました。BC は、二酸化炭素やメタンと比べて大気中の寿命^{注5)}が非常に短く、将来の温暖化対策として、気候の急激な変化を緩和・抑制する効果が期待されています。本研究の結果は、現在の気候における BC の大気加熱効果を精度良く推定するだけでなく、将来の BC の削減対策や温暖化対策の評価においても、個々の BC 粒子の粒径と被覆量が気候に及ぼす影響を詳細に考慮した数値シミュレーションが必要になることを示しています。

なお、この研究は、日本学術振興会・科学研究費助成事業（26740014, 17H04709, 26241003, 16H01770, 15H05465）、環境省・環境再生保全機構の環境研究総合推進費（2-1403, 2-1703）、国立極地研究所 GRENE（グリーン・ネットワーク・オブ・エクセレンス）北極気候変動研究事業・ArCS 北極域研究推進プロジェクトの支援のもとで行われました。また、第一著者は、日本学術振興会・海外特別研究員制度の支援を受けました。

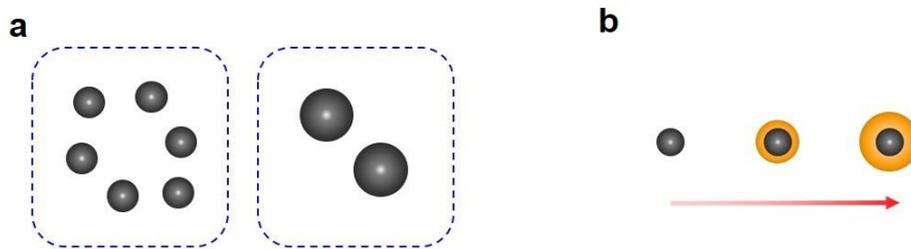


図 1. BC 粒子の粒径と被覆量の重要性

パネル a: BC の総量（質量濃度）が同じであっても、粒径が違えば数濃度は大きく異なる。BC の単位質量あたりの太陽光の吸収量も、粒径に強く依存する。

パネル b: 粒子が排出された直後は、被覆のない BC 粒子の割合が多い。大気中で起こるエアロゾルプロセス（注 4 参照）によって、徐々に BC 以外の成分（硫酸塩エアロゾル、有機エアロゾルなど）に被覆される（矢印）。この被覆がレンズのような役割を果たし、太陽光を集光するため、被覆量が多くなるにつれて、BC の単位質量あたりの光吸収量は最大で 2 倍程度増大する。

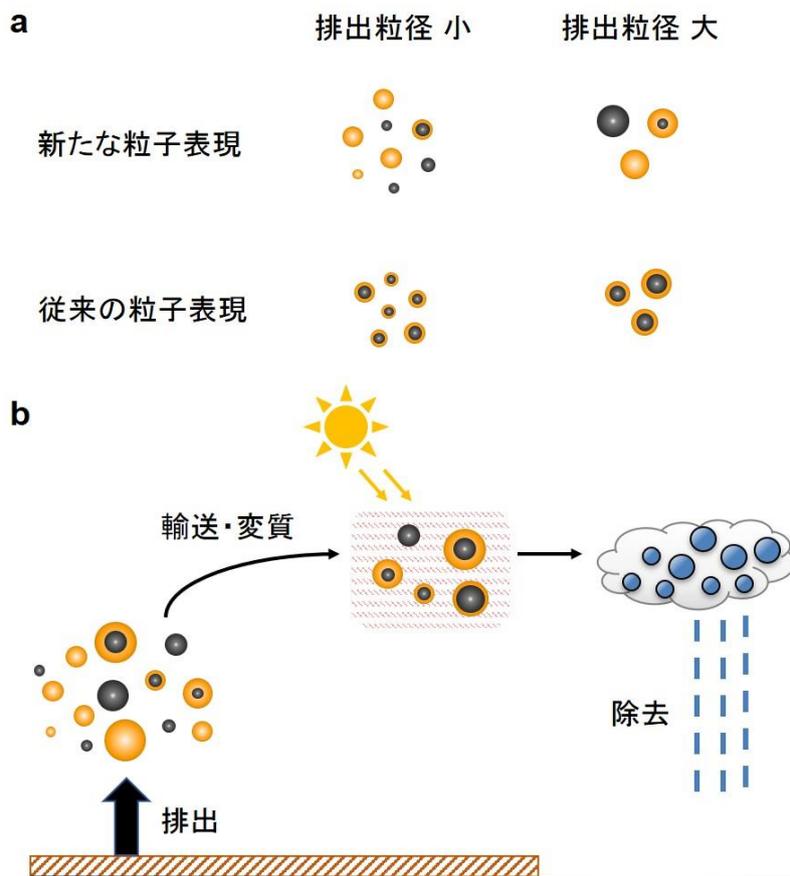


図 2. 個々の BC 粒子の被覆量の違いを区別したシミュレーション（「新たな粒子表現」）と区別しないシミュレーション（「従来の粒子表現」）における、粒子の粒径・被覆量のイメージ図（パネル a）。異なる排出粒径を用いた多くの数値シミュレーションを行った。「新たな粒子表現」では、様々な被覆量を持つ BC 粒子（被覆のない BC 粒子、被覆の薄い BC 粒子、被覆の厚い BC 粒子など）を区別して表現することができる。「従来の粒子表現」は、多くのエアロゾルモデルで使われている表現方法と概ね同じ方法であり、個々の粒子の被覆量の違いを十分に区別できない。これらの排出粒径と粒子表現をもとに、BC 粒子の大気中の輸送・変質過程や降水などによる除去過程を計算し、BC の大気加熱効果への影響を評価した（パネル b）。

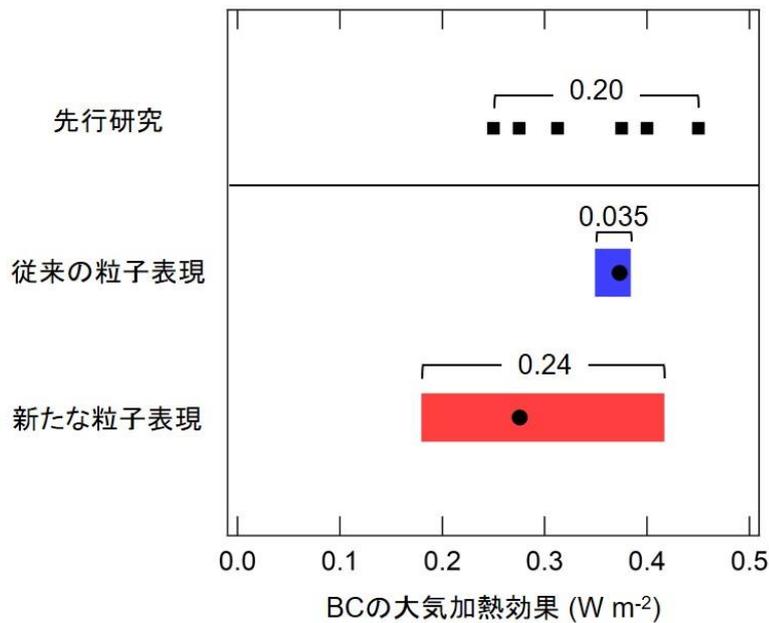


図 3. BC の大気加熱効果の推定範囲（地球大気全体の平均）。

「従来の粒子表現」と「新たな粒子表現」の横棒は、粒子が排出された直後の粒径のモデル間の違い（注 3 参照）によって、BC の大気加熱効果の推定値が変わる範囲を示す。「新たな粒子表現」は、「従来の粒子表現」と比べて約 7 倍大きな範囲を持つ（「新たな粒子表現」： 0.24 W m^{-2} 、「従来の粒子表現」： 0.035 W m^{-2} ）。■は先行研究で推定された BC の大気加熱効果の値を示す。個々の先行研究では、別々の全球エアロゾルモデルが用いられているため、排出直後の粒径だけではなく、BC が関わる全てのプロセスやパラメータの表現方法が各研究によって異なる。一方、「従来の粒子表現」と「新たな粒子表現」の横棒は、排出直後の粒径だけを変えた場合の BC の大気加熱効果の範囲を示している。「新たな粒子表現」の範囲（ 0.24 W m^{-2} ）は、先行研究の推定値の範囲（ 0.20 W m^{-2} ）に匹敵する。これは、BC の大気加熱効果を推定する際に、排出直後の粒径の扱い方が重要になることを示している。「従来の粒子表現」と「新たな粒子表現」の横棒内の●は、平均的な排出粒径を用いた場合の BC の大気加熱効果の推定値を示す。

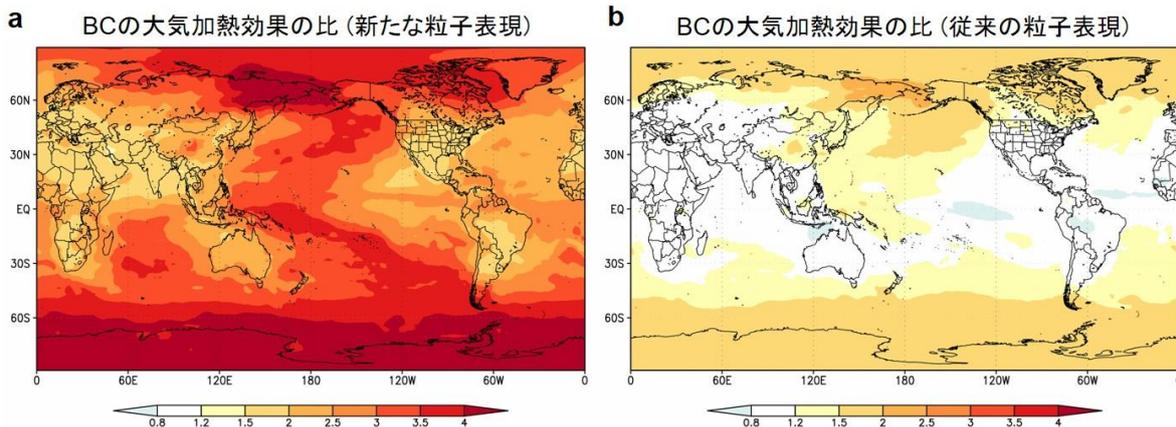


図 4. 排出直後の粒径の上限・下限値（注 3 参照）を用いた数値シミュレーションから計算した、BC の大気加熱効果の比率（下限 / 上限）。BC の大気加熱効果の推定において、排出直後の粒径の扱い方が重要でない場合、比率は 1 に近くなる。比率が 1 より大きくなるほど、BC の大気加熱効果を推定する際に、排出直後の粒径の扱い方がより重要になることを示している。

【成果の意義】

本研究では、BC の大気加熱効果の推定において、これまで注目されてこなかった粒子の排出直後の粒径の扱い方が、極めて重要な役割を果たすことを明らかにしました。この結果は、個々の BC 粒子の被覆量の違いを細かく区別することによって初めて推定されるため、これまでのエアロゾルモデルでは計算することができません。個々の粒子の被覆量と排出粒径は、将来の温暖化対策や大気環境対策の評価を行う際にも、鍵となる要素となることが示されました。今後、これらの要素の大気観測を多く行うことによって、排出粒径のモデル間の違いを減らしていくとともに、観測に基づいた個々の BC 粒子の被覆量の違い（被覆のない BC 粒子、被覆の薄い BC 粒子、被覆の厚い BC 粒子などの違い）を多くのエアロゾルモデルで表現していくことが求められます。

本研究の結果は、BC 粒子が大気の循環や降水過程に及ぼす気候影響や、BC 粒子が極域における雪氷の融解に及ぼす気候影響を評価する際にも、個々の BC 粒子の被覆量の違いを区別したシミュレーションが重要になる可能性を示しています。このような数値シミュレーションによって、BC 粒子のこれらの気候影響を再評価していくことも重要です。

【用語説明】

1. すず粒子以外の成分による被覆量：

大気中の BC 粒子は、それぞれの粒子が異なる大きさ・被覆量を持つ（図 2）。多くの BC 粒子は、BC 以外のエアロゾル成分（硫酸塩エアロゾル、有機エアロゾルなど）に被覆された状態で大気中を浮遊している。この被覆量は、大気中を運ばれる間に様々なエアロゾルプロセス（注 4 参照）によって徐々に変化していく（図 1b）。BC 粒子の被覆量が変わると、太陽光の光吸収量や、降水による除去のされやすさが変わる（図 1b）。

2. 全球エアロゾルモデル：

地球全体の大気中のエアロゾルを対象とした数値モデル。大気中の数 nm から数十 μm の

大きさを持つエアロゾルの排出、大気中の輸送・変質、降水などによる除去といったプロセスを考慮して、エアロゾルの時空間分布を計算する（図 2b）。

3. 排出粒径のモデル間の違い：

これまでの研究では、化石燃料の燃焼によって排出されるエアロゾルの中心粒径として 30～80 nm の範囲の値、バイオ燃料の燃焼とバイオマスバーニングによって排出されるエアロゾルの中心粒径として 50～200 nm の範囲の値が用いられている。この範囲内で排出粒径を変化させた数値シミュレーションを行い（図 2）、それぞれのシミュレーションについて、BC の大気加熱効果を推定した（図 3、図 4）。

4. BC 粒子が関わるエアロゾルプロセス：

BC 粒子が大気中を浮遊している間に起こる変質・除去プロセス（図 2b）。ここでは、凝縮（既存粒子上での気体成分のエアロゾル（液体・固体）への変化）、凝集（粒子同士の衝突・併合）、大気および雲内での化学反応、降水等による大気からの除去を指す。これらのプロセスによって BC 粒子の粒径・被覆量が変化していく。

5. 大気中の寿命：

個々の粒子・分子が大気中にとどまる平均的な時間。BC の場合、大気中に存在する総量を降水等による除去速度で割った値として定義され、約 1 週間と考えられている。BC の大気寿命は、二酸化炭素やメタンと比べて大幅に短い（メタンの大気中の寿命は約 10 年）。そのため、BC の排出量が減少すると、大気濃度も短い時間スケールで減少する。一方、二酸化炭素の排出量が減少したとしても、その効果が大気濃度に反映されるまでには、長い時間を要する。

【論文情報】

雑誌名：*Nature Communications*

論文タイトル：Black carbon radiative effects highly sensitive to emitted particle size when resolving mixing-state diversity

著者：Hitoshi Matsui*, Douglas S. Hamilton, and Natalie M. Mahowald

DOI：[10.1038/s41467-018-05635-1](https://doi.org/10.1038/s41467-018-05635-1)