

雲・降水に伴うエアロゾルの除去過程を支配するメカニズムの観測的解明

大畑 祥（地球惑星科学専攻 特任研究員）

茂木 信宏（地球惑星科学専攻 助教）

森 樹大（地球惑星科学専攻 大学院生）

小池 真（地球惑星科学専攻 准教授）

近藤 豊（国立極地研究所 特任教授）

発表のポイント

- ▶ 対流性の降水雲において、大気中のエアロゾルの除去の効率を決める物理プロセスを初めて観測から明らかにした。
- ▶ 粒子トレーサーという新しい観測指標を導入することにより、実際に除去されたエアロゾルが雲の中で経験した物理プロセスを読み取ることが可能にした。
- ▶ 大気物質循環とその気候影響を予測するための数値モデルにおける大きな不確実要因である「雲・降水に伴うエアロゾルの除去過程」の理解を深めることを通して、今後の気候変動予測の精緻化に貢献することが期待される。

発表概要

大気エアロゾルのうち、粒径 **0.05-1** マイクロメートル程度の粒子（累積モードエアロゾル）は数濃度・質量濃度が高く、太陽光の散乱・吸収を通じて気候に最も大きな影響を及ぼします。これらのエアロゾルは主に湿潤対流に伴う降水によって除去されることが知られていましたが、除去の効率を決めている物理メカニズムについては、それに関するデータを得る方法が無く、観測に基づいた理解が得られていませんでした。東京大学大学院理学系研究科の大畑祥特任研究員、茂木信宏助教、森樹大大大学院生、小池真准教授、および国立極地研究所の近藤豊特任教授らは、大気エアロゾルの構成成分の一つであるブラックカーボン（BC）を雲・降水過程における粒子トレーサーとして使う方法論を確立し、それを用いた観測から、エアロゾルに水蒸気が凝結して雲粒になる段階（雲粒活性化）が、降水に伴う累積モードエアロゾルの除去の効率を決める物理メカニズムであることを解明しました。さらに、雲粒活性化の決定要因の一つである最大過飽和度の推定を可能にしました。これらの結果は、大気エアロゾルの存在量ならびに気候影響を予測する数値モデルにおいて雲粒活性化の物理プロセスを陽的に計算することの重要性を示すものであり、今後の大気物質循環と気候のモデリングの検証と改良のための重要な指針となることが期待されます。

発表内容

大気中に浮遊する粒径 **0.001-10** マイクロメートル程度の固体・液体の微粒子（エアロゾル）は、太陽光を散乱・吸収したり雲による太陽光の反射率を変えることを通じて地球の放射収支に大きな影響を及ぼします。化石燃料やバイオマスの燃焼や大気化学反応に伴い生成する粒径 **0.05-1** マイクロメートル程度のエアロゾルは、凝集や重力沈降による消失が遅いため、大気中での数濃度・質量濃度が高く、累積モードエアロゾルと呼ばれます。この粒径範囲のエアロゾルは、太陽光の散乱・吸収効率が高かつ雲凝結

核数に支配的な寄与をするため、とりわけ気候に大きな影響を及ぼします。本研究の対象はこの「累積モードエアロゾル」であり、ここでは簡単のため「エアロゾル」と呼ぶこととします。エアロゾルの大気からの除去は、主に湿潤対流に伴う降水で起こることが知られています。また、地表付近で生成したエアロゾルが上空まで輸送される量は、湿潤対流に伴う鉛直輸送で支配されています。そのため、湿潤対流でどのようなエアロゾルが優先的に除去あるいは除去を免れて上方に輸送されるのかを理解することが、エアロゾルの気候影響を正しく理解し予測する上で鍵となります。しかし現在まで、湿潤対流でエアロゾルの除去の効率を支配する詳細なメカニズムについての理解は極めて不十分です。

湿潤対流において、エアロゾルの一部は何らかの物理メカニズムで水滴（雲粒・雨粒）に取り込まれ、雲粒を取り込みながら成長・落下する雨粒によって大気から除去されます。雲粒・雨粒に取り込まれるメカニズムとして、上昇流中で過飽和となった水蒸気がエアロゾル表面に凝結して雲粒を生成すること（雲粒活性化）と、エアロゾルと雲粒がブラウン拡散により凝集すること（雲粒との衝突）、落下中の雨粒にエアロゾルが慣性衝突すること（雨粒との衝突）の3種の効果が考えられます。雲粒活性化、雲粒との衝突、雨粒との衝突の3種の物理メカニズムの理論（実験）式は既知であるものの、実際の湿潤対流においてこれらのメカニズムのうちどれがどの程度寄与しているのかについては、多くの仮定を伴う数値シミュレーションによる推察があるのみで、観測からはほとんど何も分かっていませんでした。

本研究では、非水溶性の固体エアロゾルであるブラックカーボン粒子（BC）^{（注1）}をトレーサーとして使うことで、実際に降水で除去されたエアロゾルが、どのような物理プロセスで水滴へ取り込まれたのかを判別できる観測手法を実現しました。本手法は、BCの粒径分布が水中でも安定であるという実験事実と、大気中と降水中のBCの粒径別数濃度を測定する新たな技術に基づいています。降水開始前の大気境界層内のBC（除去前のBC）と降水に含まれるBC（除去後のBC）の同時地上観測を行いました（図1）。雲粒活性化、雲粒との衝突、雨粒との衝突の3種の物理メカニズムで、水滴への取り込み効率の粒径依存性が著しく異なるため、大気中のBCに対する降水中のBCの粒径分布の変化は、BC含有粒子が除去過程で経験した水滴への取り込みメカニズムに特徴的な粒径依存性を直接反映したものになります。大気中・降水中で観測されたBCの粒径別数濃度の（降水/大気）比を除去効率と定義し、除去効率のBC粒径依存性と、大気中BCの被覆の厚さ・被覆成分の吸湿性^{（注2）}や雨滴粒径分布に基づいて算出した各々の取り込みメカニズムのBC粒径依存性を比較することにより、どのメカニズムがどの程度水滴への取り込みに寄与しているかを決定することができます。

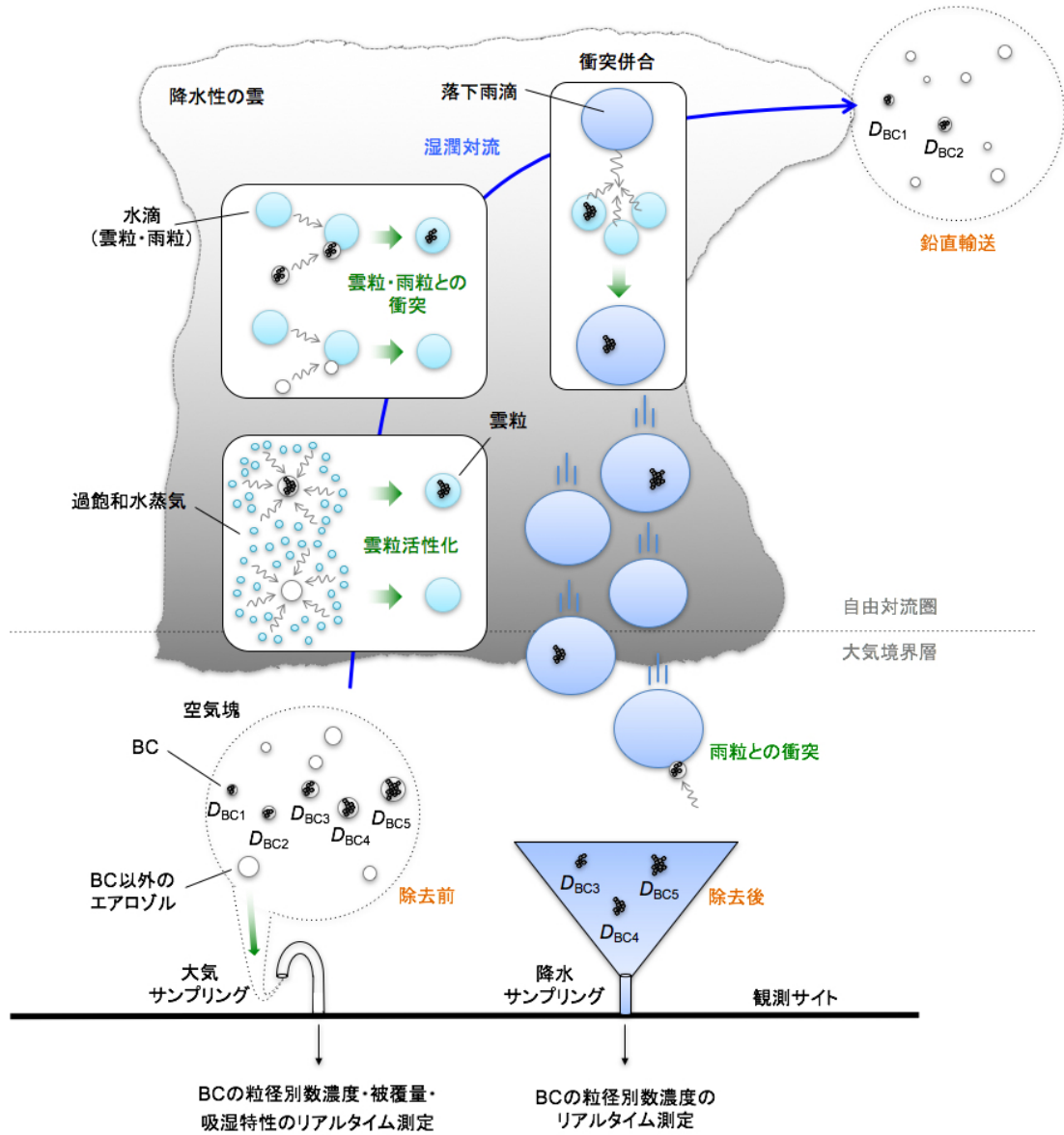


図 1.エアロゾルの降水除去過程と観測手法の模式図。湿潤対流により上昇する空気塊に含まれるエアロゾルのうち、ある数割合のエアロゾルが雲粒活性化あるいは水滴との衝突により水滴内部に取り込まれ、降水として大気から除去される。個々の BC の質量等価粒径 (D_{BC}) は降水除去過程で不変である。

本観測手法を、2014 年夏季の東京における 10 回の降水イベントに対して適用しました。降水中 BC は大気中 BC に比べて粒径の大きい BC の数濃度が相対的に高く、除去効率に強い BC 粒径依存性があることを明らかにしました (図 2)。この強い粒径依存性は、BC 含有粒子と雲粒・雨粒の衝突効率の BC 粒径依存性ではなく、BC 含有粒子の雲凝結核能の BC 粒径依存性によってのみ説明されることを定量的に示しました (図 3)。これは、BC 含有粒子が水滴への取り込まれる物理メカニズムのうち、雲粒活性化が支配的であったことを示しています。エアロゾルが水滴に取り込まれる物理メカニズムはエアロゾルの内部構造にほとんど依存しないため、この結論は BC 含有粒子と同様の粒径を持つ全ての種類のエアロゾルにも当てはまります。

雲粒活性化が支配的な取り込みメカニズムであることが明らかな降水イベントについては、除去効率の BC 粒径依存性と、地上で同時に観測された BC 含有粒子の BC 粒径別臨界過飽和度に基づき、降水性の雲内部において BC 含有粒子が雲粒活性化を経験した時の水蒸気過飽和度の値を推定することも可能です。

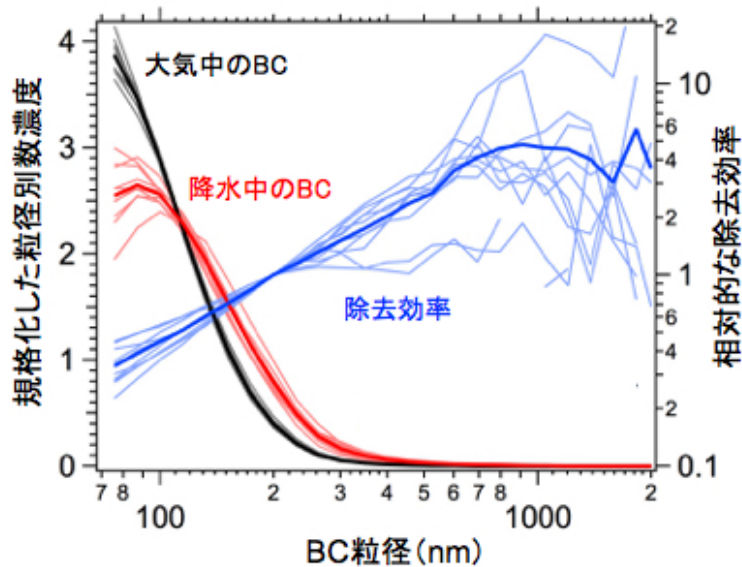


図 2.大気中（除去前）と降水中（除去後）の BC 粒径別数濃度と、それらから求まる除去効率。10 回の降水イベントそれぞれの観測値を細線、平均値を太線で示す。粒径別数濃度は総数濃度により規格化している。見やすくするため、ここでは BC 粒径 200 nm の除去効率の値を 1 としてスケーリングしている。

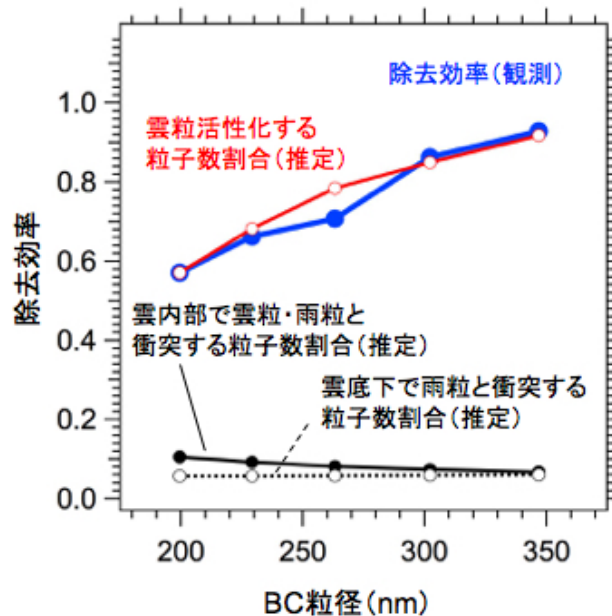


図 3.観測された BC 除去効率と、観測に基づいて推定された各微物理メカニズムによる BC の除去割合。1 つの典型的な降水イベントの結果を示している。ここでは空気塊が経験した最大過飽和度を 0.25% と仮定することで、推定された雲粒活性化する粒子数割合の粒径依存性が実際に観測された除去効率の粒径依存性とよく一致している。雲粒や雨粒との衝突過程では、BC 粒径が大きいほど除去効率が高いという観測結果を説明できず、また衝突割合の値は雲粒活性化割合のそれに比べて著しく小さい。

【本研究の意義】

BC を粒子のトレーサーとみなす新しい観測方法論により、実際の湿潤対流においてエアロゾルの除去効率を支配する物理メカニズムを読み取ることが初めて可能になりました。特に、夏季における東京の降水では、雲粒活性化が除去の効率を決定している物

理プロセスであることを解明し、さらに実際に除去されたエアロゾルが経験した雲粒活性化のときの水蒸気過飽和度を観測的に決定しました。降水している雲の中の水蒸気過飽和度は「雲・降水に伴うエアロゾルの除去過程」の数値シミュレーションにおける大きな不確実要素であり、その計算値を検証するための観測データを得る方法はこれまでにありませんでした。今回の観測により得られたこれらの知見は、大気物質循環と気候影響を予測するための数値モデルの精緻化に貢献することが期待されます。

発表雑誌

雑誌名	Scientific Reports (オンライン版 10 月 5 日)
論文タイトル	A key process controlling the wet removal of aerosols: new observational evidence
著者	S. Ohata, N. Moteki※, T. Mori, M. Koike, Y. Kondo ※責任著者
DOI 番号	10.1038/srep34113
論文 URL	http://www.nature.com/articles/srep34113

用語解説

注 1 ブラックカーボン (BC)

化石燃料・バイオマスなどの不完全燃焼により生じる固体で黒色の炭素エアロゾル成分。化学的に安定で水に不溶。水中に分散した状態でも粒径が安定していることが実験的に確かめられている。

注 2 BC の被覆の厚さ、被覆成分の吸湿性

BC 含有粒子は単一粒子レーザー誘起白熱法により測定される。単一粒子レーザー誘起白熱法では、レーザー内で BC が発する白熱光の強度から個々の BC の質量を定量する。BC の密度を仮定することにより個々の BC の質量等価粒径が得られる。また、白熱光と同時に散乱光も検出することで BC と内部混合した非 BC 成分の量を測定する。本観測では、大気中の BC 含有粒子の BC 粒径・被覆の厚さ・被覆成分の吸湿性と、降水に含まれる BC の粒径を測定した。