

北極気候に関わるブラックカーボン・エアロゾルと雲微物理量

小池真^{1,2}、近藤豊²、P.R.Sinha¹、大畑祥¹、茂木信宏¹、東久美子²、大島長³、松井仁志⁴、塩原匡貴²、
小林拓⁵、浮田甚郎⁶

¹ 東京大学

² 国立極地研究所

³ 気象研究所

⁴ 名古屋大学

⁵ 山梨大学

⁶ 新潟大学

Black carbon aerosols and cloud microphysics in the Arctic

M. Koike^{1,2}, Y. Kondo², P.R.Sinha¹, S. Ohata¹, N. Moteki¹, K. Goto-Azuma², N. Oshima³, H. Matsui⁴, M. Shiobara²,
H. Kobayashi⁵, and J. Ukita⁶

¹University of Tokyo

²National Institute of Polar Research

³Meteorological Research Institute

⁴Nagoya University

⁵Yamanashi University

⁶Niigata University

北極域での放射強制力には、温室効果気体とともにエアロゾルの影響も大きいと考えられているが、その見積りもりの不確定性は大きい。ブラックカーボン・エアロゾル (BC) は大気中での太陽放射吸収による加熱作用に加え、雪氷面に沈着し雪・氷のアルベドを低下させる効果がある。これらの放射効果は BC の粒径などの微物理特性、濃度、沈着量に依存する。BC の濃度・沈着量は、その発生源・輸送・沈着過程に大きく支配される。従来の北極研究においては、これらの要素や過程の定量的理解の基礎となる BC 観測に大きな誤差があることが問題となっていた。また数値モデル計算においても北極へ輸送される BC の除去過程の表現などに問題があり、北極 BC の挙動の再現性に問題があった。さらに BC に限らず人為起源のエアロゾルが北極に輸送されることにより、雲微物理量に影響し、雲の放射効果や降水過程に影響する可能性についても大きく理解が遅れていた。

このような研究背景から GRENE 北極事業では、研究課題 (3) 「北極温暖化のメカニズムと全球気候への影響：大気プロセスの包括的研究」(研究代表者：浮田甚郎)において、BC の動態解明などが行われた。第 1 に、東京大学が開発してきた COSMOS 測定器を使った観測を、北極大気の代表的な観測拠点であるアラスカのバローとスピッツベルゲン島のニーオルスンにおいて 2012 年から 3 年間にわたり実施した。COSMOS は従来の BC 測定で問題となっていた揮発性エアロゾル成分の干渉を加熱除去して測定可能な、高精度の BC 全質量濃度の連続自動測定装置である。この観測の結果、両観測地点とも冬に濃度が高い季節変化を示し、またニーオルスンの方がバローよりも濃度が低いことなどが確認された。この両観測地点では、アメリカ海洋大気庁 (NOAA) およびストックホルム大学により CLAP /PSAP 測定器を使ったエアロゾルの光吸収係数測定が 20 年以上実施されている。このエアロゾルの光吸収係数から BC 質量濃度に変換するためには、単位質量あたりの BC による光吸収係数の値 (質量吸収係数) が必要となる。本研究では COSMOS との同時観測との比較から、これら長期観測で使用されている測定結果から BC 質量濃度の値付けをすることが可能となった。これは今後の北極 BC の動態解明やアセスメントにおいて、大きな貢献といえる。

本研究では第 2 に、降水・降雪による BC 沈着量も高精度観測により世界で初めて明らかにした。降水・降雪過程は、北極大気中の BC が雪氷面に沈着する主要な過程と考えられるが、これまで信頼性の高い測定技術がなかった。降水・降雪による BC 除去過程は、BC の大きな発生源があるアジアから北極への輸送中での除去効率を推定する上でも、重要な知見である。本研究では降雪・降水試料中の BC の粒径別数濃度を測定するために、水試料をネブライザー (噴霧器) で霧粒化したのちに乾燥させ、生成した BC を BC 測定装置で測定する手法を理論的・実験的な研究により確立した。そしてニーオルスンとバローにおいて 2013 年からの 2 年間にわたり BC の湿性沈着量の定量化に成功した。この結果、降水中の BC 濃度と、この BC 濃度と降水量の積である BC 沈着フラックスは、冬季・春季に高く夏季には低くなっていることがわかった。これは大気中 BC 濃度の季節変化と整合的である。本研究で初めて明らかとなった BC 沈着量は、今後の数値モデル計算の検証などで重要な役割を果たすものである。

本研究では第 3 に、北極への BC 輸送に関わるエアロゾルモデル研究をおこなった。アジアなどの BC の地上発

生源からの輸送中の BC の降水除去過程は、北極 BC 動態を数値モデルで再現する上で鍵となるプロセスである。暖かい雨による BC の降水除去率は、被覆がない状態で大気中に排出された湿性除去を受けにくい状態の BC が、大気中で水溶性の無機・有機エアロゾル成分により被覆され湿性除去を受けやすい内部混合状態への変化する過程に依存している。このような観点から、エアロゾルの粒径と BC の混合状態を陽に表現した新しいエアロゾルモデルの開発が進められてきた。この結果、詳細なエアロゾルプロセスの表現に基づき、BC 混合状態観測の特徴を数値モデルにより世界で初めて再現することに成功した。また多くの計算機資源が必要となるグローバルなエアロゾル数値モデルのために、より簡略化した BC の混合状態の変化の表現の開発も行ってきた。これらの先進的なエアロゾルモデルはアジアなどからの北極への BC 輸送・湿性除去過程を定量化する上での基礎となるものである。

本研究では第 4 に、北極圏で初めて雲微物理量の連続直接観測を実施し、雲粒数濃度が冬季に比べて夏季に増加する季節変化などを明らかとした。観測はニーオルソンのゼッペリン山山頂の観測所（標高 450m）において、2013 年から 2 年間にわたり実施した。ゼッペリン山山頂と山麓では、それぞれストックホルム大学とイタリアのフィレンツェ大学などのチームがエアロゾルの粒径分布の観測を実施している（後者は夏季のみ）。雲粒数濃度は雲凝結核数濃度の指標として採用した乾燥直径 100 nm 以上のエアロゾル数濃度と正の相関をもつことが明らかとなり、北極下層雲の雲微物理量がエアロゾルの影響を受けていることを長期観測から初めて示すことに成功した。本研究ではまたニーオルソンにおける 2 回の観測キャンペーンを実施し、係留気球により雲粒の直接測定を成功させた。この結果、北極下層雲の氷晶の形状などについて多くの知見を与えることができた。これは雲レーダやライダーなどのリモートセンシングの雲測定の検証においても重要な結果である。

なお本研究は国際共同研究として実施しており、ノルウェー極地研究所、ドイツのアルフレッド・ヴェーゲナー研究所、アメリカの NCAR をはじめとする多くの研究機関の研究者の協力のもとに実現した。またバローの BC データはアメリカ NOAA の J. Ogren 氏とカリフォルニア大学バークレー校の Y. Zhao 氏、ゼッペリン山のデータはストックホルム大学の J. Strom 氏と P. Tunved 氏と NILU の O. Hermansen 氏、ゼッペリン山山麓データは ISAC/CNR の V. Gobetti 氏とフィレンツェ大学の R. Udusti 氏と A. Lupi 氏に提供いただいた。また GRENE 北極研究を含め国内の多くの研究者のご協力をいただいた。数値モデル計算では、東京大学情報基盤センターのスーパーコンピュータなどを使用した。