

【2-1403】地球温暖化に関わるブラックカーボン放射効果の総合的評価（H26～H28 累計予算額 169,509 千円）

研究代表者 小池 真（東京大学）

1. 研究実施体制

- （1）BC 観測とモデル検証（東京大学）
- （2）エアロゾル混合状態とグローバルモデルによる評価（国土交通省気象庁気象研究所）
- （3）エアロゾル粒径分布と化学組成（国立研究開発法人国立環境研究所）
- （4）広域エアロゾル観測と領域モデルによる評価（国立研究開発法人海洋研究開発機構）

2. 研究開発目的

上記の背景を踏まえた本研究の目的は下記の4項目である。（1）大気中のBC質量濃度のうち、化石燃料・バイオ燃料起源の相対的寄与を観測的に解明する。（2）BCの大気寿命を支配する除去メカニズムを集中観測と長期観測に基づいて解明する。（3）BCの形状・混合状態を観測から明らかにし、さらに個々の複雑形状のBC含有粒子の光吸収特性を高精度で計算できる方法論を開発する。（4）これらの観測的・理論的知見を反映した数値モデル計算によりBC放射強制力とBC削減効果を評価する。

3. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

BCの気候影響の大きさを決める主要項目である、大気中におけるBC質量濃度、BC単位質量濃度あたりの太陽放射吸収量（質量吸収断面積）、また、BCの削減効果の大きさを決める同時に放出されるBC以外のエアロゾルとその前駆気体に起因する放射効果について、以下のような新しい科学的成果を得た。第一に、東アジア広域大気中のBC質量濃度が近年有意な減少傾向にあることを観測から見出し、数値モデルとの比較により、この濃度減少が発生量の減少に起因することを示した。これは、東アジア広域におけるBC排出削減技術向上・環境政策の効果が排出増加要因を相殺していることを実証する初めての結果である。第二に、BCの鉛直輸送量や大気寿命に強く影響を及ぼす大気プロセスである、湿潤対流におけるBC除去過程について、その除去効率が概ね雲底付近における雲粒活性化の段階で決まっていることを観測から実証した。この新たな観測結果により、BC湿性除去の予測性能改善のためには、特に、被覆の薄いBCが多い発生源近傍において、被覆成分と被覆量の予測精度の向上が重要であることを示唆した。第三に、BCの質量吸収断面積に強く影響する他のエアロゾル成分との混合状態について、電子顕微鏡による詳細観察に加え、光吸収の増幅効果が大きく異なる付着形態と被覆形態を単一粒子ごとに判別して観測する方法を開発し、他のエアロゾルと内部混合したBCは9割以上が被覆形態であることを初めて実大気で統計的に実証した。さらに、複雑形状のBC含有粒子の質量吸収断面積を高精度・高速な理論計算法を開発した。第四に、炭素同位体比分析を用いた観測手法により、東アジア広域平均のBC発生源は、化石燃料燃焼起源が9割、バイオマス燃焼起源が1割であることを明らかにした。第五に、BCの混合状態と有機エアロゾルの生成過程を詳細に計算できるエアロゾルモデルATRASを開発し、それを用いた感度実験により、BC削減時のエアロゾル直接放射強制力の変化量を評価し、東アジア領域全体では正の放射強制力を減少させることを示した。最後に、上記の観測結果をもとに、グローバルモデルにおけるBCの混合状態などの素過程の表現の改良を行った結果、BCの空間分布および光吸収量の再現性が向上し、全球規模のBCの直接放射強制力を定量的に評価することが可能となった。

グローバルモデルでは表現できない詳細なBCの混合状態とその降水除去や光吸収特性影響を表現した数値モデルを使った研究により、アジアでのエアロゾルの光吸収の光学的厚みは、地上放射観測

AERONETと平均で 35%程度で一致することがわかった。多くのグローバルモデルはAERONETと大きな不一致を示しており、本研究の結果はグローバルモデルのBC混合状態の扱いに大きな不確定性があることを示している。またBCのみを削減した計算と、BC削減時にその発生源から同時に排出される他のエアロゾル成分（前駆気体）も同時に削減する現実的な計算により、放射強制力が大きく変化することが明らかとなった。これはBC以外のエアロゾルを総合的に評価することの重要性を示すとともに、大気化学反応やエアロゾルの物理化学過程の非線形的な相互作用も正確に計算することの重要性を示すものである。

東京都心における大気エアロゾルの化学組成と粒径分布、及び、降水中の化学組成を初めて明らかにした。大気エアロゾルと降水中ではともに硫酸イオンと有機物の濃度が高かった。降雨の初期において、降水中の酸化された有機物の割合が高く親水性と考えられ、雲や雨滴に多く取り込まれたと推測される。沖縄辺戸、長崎福江観測所での観測でも酸化された有機物の割合が高く、硫酸イオンも多いことからエアロゾルの輸送中に酸化されていることが明らかとなった。化学組成が雲凝結核特性に大きく寄与していることが明らかとなった。

福江でのBC濃度の長期減少傾向から、中国発生源でのBC排出量低下の可能性を指摘した。またLulinでの春季BCピークに関して、インドシナ半島北部の森林火災から高度上昇したブルームが西風で運ばれてくるメカニズムが明らかになった。このように福江・LulinにおけるBC通年観測データは、世界的に見て精度や信頼度が高いものであり、数値モデルを検証し、重要な発生源である中国やインドシナ半島バイオマス燃焼からのBC排出量とその推移を把握するためのベンチマークとなるデータが長期間得られた。降水によるBC除去速度を福江での長期観測から定量的に評価し、近似式を提案した。数値モデルでのプロセス表現の検証を可能とした。

放射性炭素同位体比の観測と、レボグルコサンをバイオマス燃焼のトレーサーとした解析とを初めて複合させたことによって、BC、有機炭素(OC)別で、化石燃料起源・バイオマス燃焼起源・それ以外を分離することが初めて可能となった。このことにより、排出インベントリや、モデルシミュレーション結果におけるBC、OCの起源分類を評価し、化石燃料の寄与が実際にはインベントリやモデル結果より高いことを示唆した。

(2) 環境政策への貢献（研究代表者による記述）

<行政が既に活用した成果>

平成 26 年～28 年度にかけて環境省大気モニタリングデータ総合解析ワーキンググループ委員会において、越境大気汚染の影響を受ける九州沖縄地区では硫酸イオンの濃度が高いことを報告した。これらの結果は平成 29 年度以降にまとめられる総合解析ワーキンググループの報告書に反映される予定である。

平成 26 年～28 年度にかけて韓国環境省主催の Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia（長距離越境大気汚染）会議に日本側観測代表者として環境省 水・大気環境局 大気環境課からの依頼により出席し、越境大気汚染の影響を受ける九州沖縄地区では硫酸イオンの濃度が高く、越境大気汚染（長距離輸送）の指標として硫酸イオンが活用できることを報告した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

IPCC 第 5 次報告書によると、BC の大気上端での正の直接放射強制力は二酸化炭素、メタンに次いで三番目に大きい。しかしその見積もりには大きな不確定性がある。本研究はその不確定性の基本的な要因である BC と他のエアロゾルの混合状態や、降水により大気から BC が除去される効率を決める因子を観測から明らかにした。この知見をもとに、数値モデルにおける降水に伴う BC 除去メカニズムの計算を精緻化することで、放射強制力だけではなく、PM2.5 濃度など大気環境因子の予測精度の向

上が期待される。

福江・Lulin における通年 BC 観測データは、アジアの BC 主要発生源からの排出量の動向を把握する基礎情報として重要である。本研究により、衛星観測が困難な BC についての排出減少・越境汚染減少を示唆する初めてのデータを福江での観測から提供した。今後の削減対策の検討に加え、削減効果の把握・検証の意味でも、信頼度の高い機器による長期濃度観測が政策へもたらす貢献は大きい。BC と有機炭素 (OC) それぞれの発生源寄与を、化石燃料燃焼とバイオマス燃焼、OC はさらにそれ以外 (植生森林) の寄与に分離可能であることを実証し、福江での BC は 91%化石燃料燃焼起源であることを示した点は、BC や PM_{2.5} の削減対策の精密な議論や、削減効果を詳細に把握し検証していくために有効である。福江で得られた情報はまだ限られているが、エミッションインベントリでの中国での BC 排出について、化石燃料燃焼の寄与割合に上方修正を加える必要性を提唱している。

BC の混合状態を陽に表現する詳細なエアロゾルモデルを開発し、BC の放射強制力や BC 排出量削減効果の定量化を行った。この結果、アジアという限定された領域での 2009 年 4 月というテストケースでの評価ではあるが、BC の排出量削減が温暖化対策としてある程度有効である一方、削減が BC のもつ大きな放射強制力をそのまま減少させるわけではないことが明らかとなった。正の放射強制力の減少量が BC のもつ放射強制力よりも小さくなってしまうのは、BC 削減時に同じ発生源から発生する他の無機・有機エアロゾル (やその前駆気体) も同時に削減され、負の放射強制力も減少してしまうからである。また発生源別の計算の結果、民生 (residential and commercial) が、BC 以外の成分も削減される現実的な計算においても正の放射強制力を削減する有効な方策である可能性が示された。これらの結果は、BC 削減シナリオを行政レベルで検討する時にきわめて重要である。

北極評議会 (Arctic Council; AC) の「ブラックカーボンとオゾンの気候影響の評価報告書」作成のための会議 (AMAP, Arctic Monitoring and Assessment Programme 会議) にも参加し、推進費の成果などを報告した。この報告書では北極評議会加盟国を中心に、ブラックカーボンなどの排出量削減のための勧告の科学的基礎となる内容であり、今後の日本の行政においても検討が必要となる可能性がある。

北極評議会 (Arctic Council; AC) のブラックカーボン及びメタン専門家会合 (EGMCM, Expert Group on Black Carbon and Methane) に外務省、環境省、文部科学省の要請により出席し、推進費の成果などを報告した。この会議の主目的はブラックカーボン、メタンの排出削減実施の勧告を含む内容の報告書 (Summary of Progress and Recommendations) を取りまとめることであった。この報告書は、2017 年 4 月の Arctic Council Ministerial Meeting において SAO (Senior Arctic Officials) が各国大臣に提出済みとのことであり、今後、日本の行政においても検討される見込みである。

本研究で得られた知見は、気候モデルへの反映を通じて、次期の IPCC レポートに重要な貢献ができる結果である。開発した高度なエアロゾルモデルでは、課題となってきた有機エアロゾル量や PM_{2.5} のモデル再現についても大幅に改善しており、BC の大気中存在量や起源分類、放射影響の見積の精度向上に加えて、有機物や PM_{2.5} の越境汚染対応策の検討に資するものである。本研究で開発した気象研究所地球システムモデルは、第 6 期結合モデル比較計画 (CMIP6) での気候変動予測実験で利用されるため、本研究で得られた成果は、次期 IPCC へ直接的に貢献することが期待される。

4. 委員の指摘及び提言概要

観測研究とモデル研究が飛躍的に進展し、科学的に重要で画期的な研究成果が得られた。BC のみならず BC と共に放出されるエアロゾルを含めた全体としての放射強制力の変動メカニズムを明らかにした点は高く評価できる。短い研究期間内に、次期 IPCC AR6 に貢献できる成果が発信され、行政の場に活用できる成果が発信されている。この 3 年間では達成できなかったことや今後期待すべきこと等、今後に繋がるまとめがなされていないのが残念である。

5. 評点

総合評点：A