

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2014

課題番号：23221001

研究課題名(和文) アジアのエアロゾル・雲・降水システムの観測・モデルによる統合的研究

研究課題名(英文) Integrated studies of aerosol-cloud-precipitation system in Asia based on measurement and model calculations

研究代表者

近藤 豊 (Kondo, Yutaka)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20110752

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 165,500,000円

研究成果の概要(和文)：エアロゾル・雲・降水過程の理解が不十分なため、気候変動予測に大きな不確実性が生じている。我々はエアロゾルの微物理特性(数濃度・粒径分布など)の理解の改善により、気候に影響を及ぼすエアロゾルの主要な過程を解明した。また素過程の理解を通して雲の微物理特性、降水粒子の生成、エアロゾルの湿性除去を解明した。エアロゾル・雲・降水測定のための先端計測器を開発し、航空機・地上観測を行い、鍵となる過程の理解を進展させた。それらの過程を正確に表現した世界最先端の領域モデルを開発し、観測との比較により各要素を段階的に検証した。モデルと観測データを組み合わせ、エアロゾルの雲・降水への影響を高精度で推定した。

研究成果の概要(英文)：Insufficient understanding of the processes relevant to aerosols, clouds, and precipitations leads to large uncertainties in the prediction of future climate change. We studied key processes that influence the climate by improving the understanding of aerosol microphysical properties (e.g. number and size distribution). Microphysical properties of clouds (number and size distribution), their relationship to the formation of raindrops, and wet removal of aerosols have been investigated through understanding of the basic processes. For this purpose we developed advanced techniques to measure aerosols, clouds, and aerosols in raindrops and made aircraft and ground-based observations. We also developed an advanced regional scale model, which precisely represents these processes. We validated the each element of the model by comparison with the observations. We estimated the effects of aerosols on clouds and precipitation by combining the model calculations and observations.

研究分野：大気化学

キーワード：気候変動 環境変動 環境分析 エアロゾル 雲 降水 観測 モデル

1. 研究開始当初の背景

最新の IPCC 報告書でも明確に述べられているように、地球温暖化を引き起こす放射強制力の最大の不確定要因は、エアロゾルの雲への影響（エアロゾルの間接効果）に関わるものである。また、光吸収性のブラックカーボン（BC）エアロゾルは太陽光を強く吸収して大気を加熱する一方、光散乱性エアロゾル（硫酸塩・有機化合物）および BC は太陽光を減光し地表を冷却する。これらのプロセスは、大気の安定度を増加/減少させ、対流活動の変化を通して、雲・降水過程に影響を及ぼすと考えられている（準直接効果）。これらの効果を精度良く理解するためには、エアロゾル・雲・降水を統合的かつ実証的に理解する研究が不可欠である。第一に、エアロゾルの間接効果の鍵となるエアロゾルの数濃度と粒径分布、また準直接効果の鍵となるエアロゾルの混合状態や単位質量あたりの光吸収率などを直接観測により把握し、それらを支配する要因（生成される全エアロゾル数に対する BC の相対的寄与など）を理解することが必要である。第二に、観測と比較でき、かつアジアスケールでのエアロゾルの雲・降水への影響を詳細に評価できる領域スケールモデルを開発し、エアロゾルからの雲粒生成や湿性沈着など、鍵となるプロセスを表現したモジュールを新たに導入することが必要である。このように一段階ずつ着実に実証的な研究を積み上げていくことにより、エアロゾルの雲・降水への影響が初めて評価可能となる。

2. 研究の目的

本研究では、エアロゾルの数濃度・粒径分布を中心軸として、雲粒の数・粒径、雲粒の衝突併合により生成する降水を、素過程に基づき統合的に理解する。鍵となる過程を正確に表現した数値モデルを開発し、各要素を段階的に検証し、エアロゾルの雲・降水への影響を高精度で推定する。また BC の大気加熱効果を、観測と数値モデルにより正確な評価をする。BC の微物理特性の時間・空間変動を観測で明らかにし、これを高精度で再現するモデルを開発し、その効果を評価するという方法をとる。このために最先端の計測技術を用いてエアロゾル・雲の航空機・地上観測を行い、鍵となる過程の理解を段階に進展させる。気候変動を予測し対策を講ずるための基盤となる科学的方法論を確立する。

3. 研究の方法

(1) 先端的なエアロゾル・雲測定器の開発
航空機上でエアロゾルのサイズ分布と雲粒のサイ

ズ分布を高速で光学的に測定する装置を開発・整備した。BC と BC を含まないエアロゾルを区別してそれぞれの吸湿特性を地上で測定する装置 (h-SP2) を開発した。吸湿成長率の測定値は Kappa-Köhler 理論による理論値と測定誤差内で一致し、新しい測定法が実大気観測に適用可能であることが確認された。また、これまで測定が困難であった降水中の BC の粒径分布を高精度で測定する方法を開発した。このシステムは空圧式ネブライザーと改良型 BC 測定器 (wide-range SP2) 及び自動降水採集装置からなる。本格的な観測を始める前に高い機能を持つ測定器の開発を十分に行い、高精度な観測データを取得するという研究方法を取った。

(2) エアロゾル航空機観測

2013 年の 2 - 3 月と東シナ海・黄海上空において 7 月に東北・北海道沖にて、BC の微物理特性（質量濃度・混合状態・粒径分布）、エアロゾルの粒径分布・数濃度、雲粒数、CO の混合比を航空機で測定した (A-FORCE-2013W, 2013S) を実施した。エアロゾルの間接効果・準直接効果の鍵となる諸パラメーターを高精度で観測した。このデータを 2009 年の春に実施した A-FORCE-2009 のデータと比較し、季節変動を調べるという方法を取った。

(3) エアロゾル・降水地上観測

エアロゾルの間接効果・準直接効果を評価するための地上観測を沖縄辺戸岬・長崎福江島で長期間にわたり実施した。BC の雲粒への成長は BC の吸湿特性と、空気塊が経験する過飽和度に依存する。このため降水中の BC のサイズ分布はエアロゾルと雲の相互作用を調べる上で重要なパラメーターである。新たに開発した手法で、東京と沖縄辺戸岬で降水中の BC の粒径分布を高精度で測定した。東京で大気エアロゾル（吸湿特性も含む）・降水の同時観測を 2014 年の夏に行った。

(4) エアロゾル - 雲の航空機観測

A-FORCE-2013W, 2013S 航空機観測で、エアロゾルとともに雲微物理量の測定を実施した。これらの観測では地球の放射収支に重要な下層雲を対象とし、雲底下でのエアロゾル観測と、その直上で形成される雲内での雲微物理量観測をセットとして実施した。2009 年のデータ比較し、季節変動を調べるとともに、2009 年では観測しなかつた降水している雲システムの観測も実施した。

(5) 数値モデル開発

エアロゾルの直接・間接効果の推定において重

要となるエアロゾル表現とその変動の物理化学過程（凝縮、凝集過程）を表現した新しいエアロゾルモデルを開発した。直接効果の推定においては、エアロゾルの混合状態が重要であるため、エアロゾルの粒径と BC の混合状態を表現した 2 次元ビンモデルを開発した。間接効果においてはエアロゾルの数濃度が重要となるため、エアロゾルの数濃度を増加させる新粒子生成を精度よく計算するスキームを開発した。さらに直接・間接の両方の効果で重要となる有機エアロゾルの生成過程を表現する新しいモデルの開発を行った。このエアロゾルモデルを領域三次元気象化学結合モデル WRF-chem に導入し、東アジアを対象とした計算を実施した。またエアロゾルの雲影響の鍵となるエアロゾルの雲粒活性化過程について、数値モデルの計算格子で表現できないサブグリッドスケールの上昇流速の表現の改良を実施した。これらの数値モデル計算を航空機観測と比較検証した。

4. 研究成果

(1) エアロゾル航空機観測の結果

2013年の冬に比べ2009年春では南中国起源の自由対流圏の空気塊中でBC質量濃度が大きく低下していることが分かった。気象解析と組み合わせ、BCの季節変動は降水量の季節変動により大きく駆動されており、降水がエアロゾルの除去を通して広域のBC高度分布に大きく影響することを実証した。またBC除去が大きい空気塊ほど、BCの平均粒径が小さくなる傾向が観測され、大粒径のBCほど優先的に湿性除去を受けていることが明らかになった。BCを含まないエアロゾルでも、全数濃度や粒径分布に対しても同様の季節変化、湿性除去の影響を示す結果が得られた。このエアロゾルの多くは雲凝結核(CCN)として作用するので、アジアにおけるCCNの広域分布と雲微物理特性を理解する重要な知見である。またこの結果は、エアロゾルの放射強制力推定における大きな不確実要因となっている、気候モデル・領域モデルにおけるエアロゾルの湿性除去の表現を検証するためにも重要であると考えられる。また、観測により得られた高精度のエアロゾルの空間分布とその時間変動はアジアでは初めてのものであり、直接効果、準直接効果を推定するための数値モデルの検証に重要なデータとなる。

(2) 東京でのエアロゾル・降水観測

Humidified-SP2 (h-SP2) とエアロゾル質量分級装置を組み合わせ、各エアロゾルの吸湿特性を BC

含有量毎に測定した。東京で h-SP2 により得られた BC 被覆成分の組成（吸湿パラメータ $Kappa$ ）のデータと、標準 SP2 で測定された各 BC の乾燥被覆量のデータから、BC 粒径の小さな BC 含有粒子ほど臨界過飽和度が高いことが判明した。これと整合的に降水イベントにおける雨水中の BC の数粒径分布は、降水開始直前の大気中の BC の数粒径分布より平均的に大きかった。降水開始前の大気中の BC 含有粒子の臨界過飽和度の推定値から、BC 含有粒子が大気中で経験した最大過飽和度の中央値が 0.1% 程度であったと推定された。過飽和度 0.1% で雲凝結核として作用する BC 含有粒子の数割合は、BC 粒径 200 nm の粒子の内 27% にとどまると推定され、東京近傍の粒径の小さな BC が降水イベント時に効率良く鉛直輸送されたことを示唆している。このように、大気・降水の同時観測による BC 湿性除去に関する観測データはエアロゾルの気候影響を推定するモデル内の BC 湿性除去過程を総合的に検証する上で有用であることが示された。

(3) BC 準直接効果の推定のためのエアロゾル放射モデルの開発

(1), (2) の観測的知見は BC が雲粒子として成長する過程を理解する上で重要である。雲粒中の BC は雲粒子を加熱・蒸発させる準直接効果を持つ。準直接効果の推定には、この知見に加え、雲粒中の BC の光吸収効果の計算が必要になるが、この計算結果は使用する光散乱モデル間で異なる。ここでは、光吸収性粒子を含む水雲粒子の吸収断面積を高速かつ高精度に近似計算する手法（内部電場法）を開発した。本手法は雲粒に対して非常に小さい粒子が含まれるとき、雲粒内部の電場が微小な粒子による影響をほとんど受けないという仮定のもとで、光吸収性粒子と雲粒の内部電場を近似によって表すため非球形の BC にも適用可能である。典型的な雲粒と BC サイズの場合、可視光の波長で内部電場法は吸収断面積の厳密解を約 5% 以内で再現することが示された。また、内部電場法では BC が雲粒中でランダムな位置に存在している状況を考慮した平均的な吸収断面積を、簡単な数式により表現できる。これをグローバルな放射モデルに組み込むことで、BC を含む雲粒の光吸収をより正確に、かつ妥当な計算量で評価することが可能となる。

(4) 雲の観測的研究

春季東シナ海と比較して、北海道沖では非降水時においても雲粒数濃度が 1/5 程度の濃度となっていた。東シナ海と北海道沖の雲粒数濃度の違いはエアロゾル数濃度と良く対応しており、人為的

エアロゾルが西太平洋の雲粒数濃度に強く影響していることが示された。北海道沖では降水時には雲粒数濃度がより低く、雲水量が小さく、雲粒有効半径が大きく、雲底下でのエアロゾル数濃度も相対的に少ない。これから降水によるエアロゾルの除去により、雲粒数濃度が低下し、雲粒粒子の粒径が大きくなり、より降水しやすくなるという正のフィードバックが働くことが示唆される。逆に非降水時にはエアロゾル数濃度が高く、雲粒粒径が小さく、降水が起きにくい条件になっている。この降水・非降水の2つのレジームへの遷移過程を示唆する結果も得られた。北海道沖の下層雲は、地球の放射収支において重要な役割を果たす北西太平洋の下層雲の一部を構成している。本研究により、その下層雲において2つの顕著なレジームが存在することが初めて示唆された。

(5) 領域モデルの開発

エアロゾルの粒径とBCの混合状態を表現した2次元ピンモデルを開発し、領域三次元気象化学結合モデルWRF-chemに導入した。航空機観測との比較により、BCの被覆の厚さやその粒径依存性を良く再現できることを示した。BCの混合状態を区別しない放射計算は、大気境界層内におけるBCによる大気加熱率を30~40%程度も過大評価する可能性があることを示した。新粒子生成については、核形成(気体からの粒子生成)で生成する直径1nm程度の粒子からのエアロゾルの凝縮・凝集による粒子成長過程を理論に基づいて計算するモデルを開発し、新粒子生成を支配しているのは、核形成で生成した粒子の成長速度と、既存粒子への取り込みという2つの競合過程の均衡であることを示した。さらに従来のモデルでは大きく過小評価されてきた有機エアロゾルについて、半揮発性の有機化合物の酸化過程を考慮した有機エアロゾルモデルを開発し、有機エアロゾルの観測値の絶対量や時間変動を再現することに成功した。

エアロゾルの雲粒への活性化過程の計算スキームの改良を実施した。エアロゾルからの雲粒生成の効果を正しく評価するためには数値モデルの計算格子では表現しきれないサブグリッドスケールの上昇流速度を考慮する必要がある。従来、拡散係数を使った表現は数値モデルの鉛直解像度に陽に依存するという問題点があったため、境界層モデル(Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino, level 2.5)において乱流運動エネルギー計算と統合的なサブグリッドスケールの上昇流速度をもちいて雲粒生成を計算するようにモデルの改良を実施した。改良されたモデルは観測された雲粒数濃度を再現することが示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計14件)

Kondo, Y. (2015), Effects of black carbon on climate: Advances in measurement and modeling, *Monogr. Environ. Earth Planets*, 3, 1-85, doi:10.5047/meep.2015.00301.0001 査読有

Matsui, H., et al. (2014), Development of an aerosol microphysical module: Aerosol Two-dimensional bin module for formation and Aging Simulation (ATRAS), *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 10315-10331. 査読有

Mori, T., et al. (2014), Wet deposition of black carbon at a remote site in the East China Sea, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1002/2014JD022103. 査読有

Moteki, N., et al. (2014), Identification by single-particle soot photometer of black carbon particles attached to other particles: Laboratory experiments and ground observations in Tokyo, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1002/2013JD020655. 査読有

Koike, M., N. Moteki, K. Pradeep, T. Takamura, N. Takegawa, Y. Kondo, H. Matsui, A. Shimizu, and N. Sugimoto (2014), Case study of absorption aerosol optical depth closure over the East China Sea, *J. Geophys. Res.*, 119, 122-136, doi:10.1002/2013JD020163 査読有.

Oshima, N., et al. (2013), Vertical transport mechanisms of black carbon over East Asia in spring during the A-FORCE aircraft campaign, *J. Geophys. Res.*, 118, 13175-13198, doi:10.1002/2013JD020262. 査読有

Matsui, H., et al. (2013), Spatial and temporal variations of new particle formation in East Asia using the NPF-explicit WRF-chem model, *J. Geophys. Res.*, 118, 11,647-11,663, doi:10.1002/jgrd.50821. 査読有

Matsui, H., et al. (2013), Seasonal variations of Asian black carbon outflow to the Pacific: Contribution from anthropogenic sources in China and biomass burning sources in Siberia and Southeast Asia, *J. Geophys. Res.*, 118, 9947-9967, doi:10.1002/jgrd50702 査読有

Matsui, H., et al. (2013), Development and validation of a black carbon mixing state resolved three-dimensional model: Aging processes and

radiative impact, *J. Geophys. Res.*, *118*, 2304-2326, doi:10.1029/2012JD018446 査読有

Ohata, S., et al. (2013), Evaluation of a method to measure black carbon particles suspended in rainwater and snow samples, *Aerosol Sci. Technol.*, *47*, 1073-1082. 査読有

Bond, T. C., et al. (2013), Bounding the role of black carbon aerosol in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res.*, *118*, doi:10.1002/jgrd.50171. 査読有

Koike, M., et al. (2012), Measurements of regional-scale aerosol impacts on cloud microphysics over the East China Sea: Possible influences of warm sea surface temperature over the Kuroshio ocean current, *J. Geophys. Res.*, *117*, D17205, doi:10.1029/2011JD017324. 査読有

Moteki, N., et al. (2012), Size dependence of wet removal of black carbon aerosols during transport from the boundary layer to the free troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, *39*, doi:10.1029/2012GL052034. 査読有

Oshima, N., et al. (2012), Wet removal of black carbon in Asian outflow: Aerosol Radiative Forcing in East Asia (A-FORCE) aircraft campaign, *J. Geophys. Res.*, *117*, D03204, doi:10.1029/2011JD016552. 査読有

[学会発表](計6件)

N.Oshima, M.Koike, Y.Kondo, H.Nakamura, N.Moteki, H.Matsui, N.Takegawa, and K.Kita: "Vertical transport and removal of black carbon over East Asia in spring during the A-FORCE aircraft campaign." 2014 AGU fall meeting, San Francisco, USA, 2014 December 15, 2014.

森樹大, 近藤豊, 茂木信宏、水中に分散したブラックカーボン粒子の粒径分布の測定法の研究、大気化学討論会 2014年10月29日 府中グリーンプラザ(東京都・府中市)

大畑祥, 茂木信宏, Joshua P. Schwarz, 近藤豊、ブラックカーボン含有粒子の吸湿性を測定する新手法の開発、日本地球惑星科学連合 2014年大会、2014年5月1日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

森樹大, 近藤豊, 茂木信宏, 大畑祥, 松井仁志, 岩崎綾, 友寄喜貴, 嘉手納恒、夏季の沖縄県辺戸岬における降水中のブラックカーボン粒子濃度の支配要因、日本地球惑星科学連合 2014年大会、2014年5月1日、パシフィコ横浜(神奈川県・横浜市)

松井仁志, 小池真, 近藤豊, 高見昭憲, 金谷有剛, 滝川雅之: アジア域の有機エアロゾル生成の人為・自然起源相互作用: VBSモデルの開発と検証、日本気象学会 2014年度春季大会、2014年5月21日、横浜市開港記念会館(神奈川県・横浜市)

Matui, H., M.Koike, Y.Kondo, N.Oshima, N.Moteki, Y.Kanaya, A.Takami and M.Irwin, Seasonal variations of Asian black carbon Outflow to the Pacific: Contribution from anthropogenic sources in China and biomass burning sources in Siberia and Southeast Asia, AGU 2013 Fall meeting, San Francisco, USA, December 9, 2013.

[その他]
ホームページ等
<http://www-sys.eps.s.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 豊 (KONDO, Yutaka)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号: 20110752

(2) 研究分担者

小池 真 (KOIKE, Makoto)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号: 00225343

高見 昭憲 (TAKAMI, Akinori)
独立行政法人国立環境研究所・地域環境研究センター・室長
研究者番号: 00262030

竹川 暢之 (TAKEGAWA, Nobuyuki)
首都大学東京・理工学研究科・教授
研究者番号: 00324369

大島 長 (OSHIMA, Naga)
気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部

・研究官
研究者番号：50590064

新野 宏 (NIINO, Hiroshi)
東京大学・大気海洋研究所・教授
研究者番号：90272525

松井 仁志 (MATSUI, Hitoshi)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球表層物
質循環研究分野・研究員
研究者番号：50590064
(平成26年度より研究分担者)

(3) 連携研究者

北 和之 (KITA, Kazuyuki)
茨城大学・理学部・教授
研究者番号：30221914

茂木 信宏 (MOTEKI, Nobuhiro)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：20507818