

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：82109

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23710029

研究課題名(和文) 全球大気大循環・エアロゾル結合モデルの開発と黒色炭素粒子の気候影響評価

研究課題名(英文) Development of a global-scale aerosol model coupled with atmospheric general circulation model and evaluation of climate effects of black carbon

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 0円

研究成果の概要(和文)：ブラックカーボン(黒色炭素粒子)の変質過程の新しいパラメタリゼーションを開発した。開発したパラメタリゼーションを導入することで、ブラックカーボンの混合状態の変化を表現できる全球大気大循環・エアロゾル結合モデルを開発した。また、東アジア域で実施された航空機観測とモデル計算を組み合わせ、ブラックカーボンの輸送過程と除去過程を明らかとした。観測結果で検証したモデルを用いて、ブラックカーボンの空間分布および気候影響を評価した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new parameterization of black carbon aging. Using our parameterization, we have developed a global-scale aerosol model coupled with atmospheric general circulation model, which can represent a time evolution of the mixing state of black carbon. We have also examined transport and removal processes of black carbon using aircraft measurements conducted over East Asia and model simulations. We have validated the model calculations by the observations and evaluated the spatial distribution of black carbon and its climate effects.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：エアロゾル 黒色炭素粒子 モデル 混合状態 大気化学 放射 気象 大気環境

1. 研究開始当初の背景

大気中の多くのエアロゾル(大気中の微粒子)成分は太陽光を散乱するのに対し、ブラックカーボン(黒色炭素粒子)は例外的に太陽光を強く吸収し、大気を加熱する。この加熱効果のため、ブラックカーボンは気候影響を評価する上で非常に重要なエアロゾルとして位置づけられている。

エアロゾルの気候影響を評価する上で特に重要な点は、領域・全球規模のブラックカーボンの空間分布や放射効果が、ブラックカーボンの混合状態(他のエアロゾル成分によってどの程度被覆されているか)に強く依存することである。しかしながら、従来の数値モデルではブラックカーボンの混合状態の表現が非常に簡易的に扱われており、これまでの気候影響評価には大きな不確定が含まれていた。

2. 研究の目的

(1) 全球モデルの開発

ブラックカーボンの変質過程(混合状態の変化)の新しいパラメタリゼーションを開発する。開発したパラメタリゼーションを導入し、ブラックカーボンの混合状態の変化を表現できる全球大気大循環・エアロゾル結合モデルを開発する。

(2) ブラックカーボンの気候影響評価

エアロゾルの降水による除去過程は、現在のエアロゾルモデルが含む最大の不確定性の一つである。この不確定性を軽減させるために、東アジア域で実施された航空機観測とモデル計算を組みあわせて、ブラックカーボンの輸送過程と除去過程についての理解を深める。これまでに実施された観測結果を用いて、開発した全球モデルを検証する。検証したモデルを用いて、全球規模でのブラックカーボンの空間分布および放射影響を評価する。

3. 研究の方法

(1) 全球モデルの開発

エアロゾルの微物理過程を詳細に扱うボックスモデル MADRID-BC (Model of Aerosol Dynamics, Reaction, Ionization, and Dissolution - Black Carbon) を用いて、物理化学法則に基づきブラックカーボンの混合状態の変化を表現できる新たなパラメタリゼーションを開発した。このパラメタリゼーションを気象研究所の地球システムモデルを構成する全球エアロゾルモデル MASINGAR (Model of Aerosol Species IN the Global Atmosphere) に導入することで、ブラックカーボンの混合状態の時間的・空間的变化を表現できる全球大気大循環・エアロゾル結合モデルを開発した。

(2) ブラックカーボンの気候影響評価

2009年3-4月に黄海・東シナ海・西太平洋上において実施された A-FORCE (Aerosol Radiative Forcing in East Asia) 航空機観測により得られた観測データを解析することで、ブラックカーボンの降水による除去過程について調べた。また、エアロゾルの湿性沈着過程に独自の改良を加えるなど、これまでに改良を実施してきた領域三次元化学輸送モデル WRF-CMAQ (Weather Research and Forecasting - Community Multiscale Air Quality) と航空機観測結果を組み合わせ、東アジア域におけるブラックカーボンの輸送過程と除去過程について調べた。モデルで扱われるエアロゾルの除去過程の新たな検証方法についても考案した。

これまでに実施されたエアロゾルの観測結果(東アジア域および北極域での地上観測や航空機観測など)を用いて、開発した全球モデルの検証・改良を実施した。検証したモデルを用いて、全球規模でのブラックカーボンの空間分布および直接放射強制力について評価した。これらの評価については、ブラックカーボンの変質過程を簡易的に表現した従来のモデル計算との比較も実施した。

4. 研究成果

(1) 全球モデルの開発

MADRID-BC を用いて、ブラックカーボンの混合状態の変化(疎水性ブラックカーボンが、他のエアロゾル成分によって被覆されることで、親水性ブラックカーボンへと変化する過程)を表現できる新たなパラメタリゼーションを開発した。このパラメタリゼーションでは、被覆成分の生成速度を疎水性ブラックカーボンの総量で規格化することで、ブラックカーボンの疎水性から親水性への変換速度を表現しており、汚染大気から清浄大気までのあらゆる条件下において使用可能である。このパラメタリゼーションを導入することで、大気環境に応じたブラックカーボンの疎水性から親水性への変換を表現できる全球大気大循環・エアロゾル結合モデルを開発した。

本研究で考案した物理化学法則に基づくブラックカーボンの変質過程のパラメタリゼーションは、世界に先駆けて開発されたものである。本研究により得られた成果は、従来の全球モデルでの簡易的表現に対して根本的な優位性を持つものであり、国内外における今後の気候モデルの改良に貢献できる重要な成果である。

(2) ブラックカーボンの気候影響評価

A-FORCE 航空機観測によって得られたデータの解析を行った。一酸化炭素(CO)をトレーサとして扱い、観測された空気塊中のブラックカーボン濃度とCO濃度の比率の変化を用いて、大気中に排出されたブラックカーボ

ンの何割が除去されずに観測点まで輸送されたかを示す輸送効率（除去過程の指標）を導出した。A-FORCE 航空機観測により得られたブラックカーボンの輸送効率とその質量濃度の高度分布を図1に示す（図中の黒色）。ブラックカーボンの輸送効率は、空気塊が輸送中に経験する降水量に応じて減少することを明らかにするとともに、東アジア域においては、高度2-4 kmでは70-90%、高度4-9kmでは30-50%程度であることを明らかとした。

改良した領域三次元化学輸送モデルによる計算とA-FORCE 航空機観測との比較を通じて、ブラックカーボンの除去過程について調べた。改良したモデルで計算されたブラックカーボンの濃度およびその輸送効率の鉛直分布と観測との比較を図1に示す（図中の白色がモデル結果）。モデルは観測から推定した輸送効率を全高度においてよく再現しており、これはモデルで取り扱われているエアロゾルの除去過程の妥当性を示している。

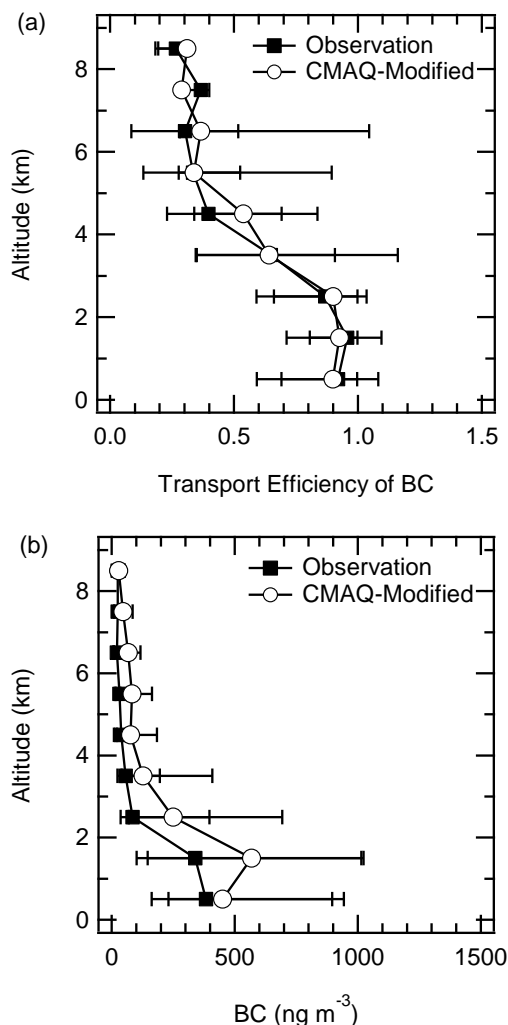


図1. A-FORCE 航空機観測結果（黒色四角）とモデル計算結果（白丸）の高度分布の比較。(a) ブラックカーボンの輸送効率、(b) ブラックカーボンの質量濃度 (ng m⁻³)。全観測期間（2009年3/18-4/25）における中央値と67%レンジを高度1kmごとに示す。

本研究で考案したブラックカーボンの輸送効率は、モデルで扱われるエアロゾルの除去過程の表現の検証に利用することができる非常に有用な指標である。この成果は、今後の国内外のエアロゾルモデルの検証・改良に大きく貢献できるものと期待される。

また、モデル計算結果と気象場の解析を組み合わせることで、春季東アジア域におけるブラックカーボンの輸送過程と除去過程を明らかにした（図2）。アジア大陸からのブラックカーボンの輸送経路は主に3通りあり、大気境界層内を東向きに輸送される経路（ブラックカーボンの降水による除去は弱い）に加えて、中国北東域（低気圧活動に伴う上昇、中程度の除去）と中国南部の内陸域（地形性と積雲対流活動に伴う上昇、強い除去）において境界層内から自由対流圏中へと上方輸送され、引き続き西風によって下部対流圏中と中部対流圏中をそれぞれ輸送される経路が存在することを明らかとした。

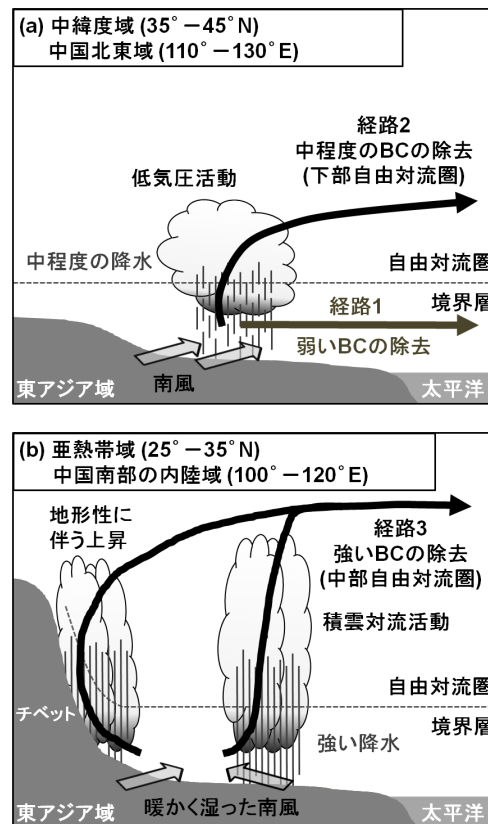


図2. 春季東アジア域におけるブラックカーボンの主要な輸送経路と輸送過程・除去過程の概念図。

新たに開発したパラメタリゼーションを導入した全球エアロゾルモデルを用いることで、ブラックカーボンが疎水性から親水性へと変換される時間スケールは、東アジア域などの発生源域では1-2日程度であるのに対

し、北極域では10-20日程度と、地域によって大きく変化することを明らかとした(共に地表面における年平均値)。また、一定値の時定数(1.2日)を仮定して変質過程を表現した従来のモデル計算結果と本計算結果を比較したところ、北極域などの発生源遠方域において、従来のモデルでは過小評価されていたブラックカーボンの質量濃度が本計算では増大し、観測値の再現性が向上した。さらに、モデル計算と航空機観測により得られたブラックカーボンの高度分布の比較を通じて、全球モデルの検証および改良を実施した。

開発・改良した全球モデルを用いて、全球規模でのブラックカーボンの空間分布と直接放射強制について推定した。ブラックカーボンの大気中コラム量と大気上端におけるその直接放射強制力の計算結果を図3に示す。本計算では、全球年平均での大気上端におけるブラックカーボンの直接放射強制力は $+0.3 \text{ W m}^{-2}$ (従来の計算では $+0.2 \text{ W m}^{-2}$)と推定された。これらの結果はパラメタリゼーションを通じて、ブラックカーボンの混合状態の変化が、全球規模の空間分布や放射強制力に大きな影響を及ぼすことを示している。

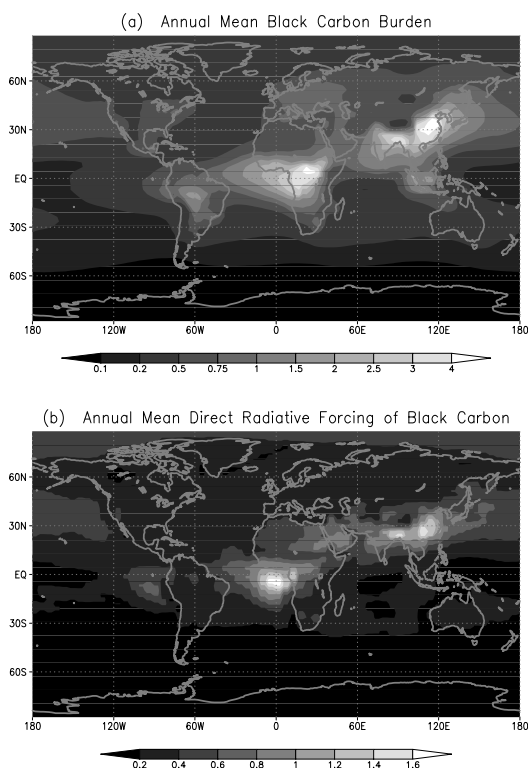


図3. 本研究で開発した新たなパラメタリゼーションを導入した全球エアロゾルモデルによる計算結果。(a) ブラックカーボンの大気中コラム量 (mg m^{-2})、(b) 大気上端におけるブラックカーボンの直接放射強制力 (W m^{-2})。2008-2009年の年平均値。

本研究で開発・改良した全球エアロゾルモデルは、ブラックカーボンの放射強制力について従来よりも精度良く推定することが可能である。本研究により得られた成果は、エアロゾルの気候影響評価の精度を向上させる上で、重要な基盤となるものである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計16件)

査読有りの論文(計13件)について、以下に記載する。

Oshima, N., ブラックカーボン粒子のモデル研究: ミクロスケールから全球スケールまで, *Modeling Studies of Black Carbon Particles: From the Micro Scale to the Global Scale*, *Earozoru Kenkyu*, 29 (1), 22-31, 2014 (in Japanese with English abstract).

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jar/-char/ja/>

Oshima, N., M. Koike, Y. Kondo, H. Nakamura, N. Moteki, H. Matsui, N. Takegawa, and K. Kita, Vertical transport mechanisms of black carbon over East Asia in spring during the A-FORCE aircraft campaign, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 13,175-13,198, doi:10.1002/2013JD020262, 2013.

Oshima, N., and M. Koike, Development of a parameterization of black carbon aging for use in general circulation models, *Geosci. Model Dev.*, 6, 263-282, doi:10.5194/gmd-6-263-2013, 2013.

Matsui, 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, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 9948-9967, doi:10.1002/jgrd.50702, 2013.

Takegawa, N., N. Moteki, M. Koike, N. Oshima, and Y. Kondo, Condensation particle counters combined with a low-pressure impactor for fast measurement of mode-segregated aerosol number concentration, *Aerosol. Sci. Technol.*, 47:10, 1059-1065, DOI: 10.1080/02786826.2013.822462, 2013.

Liu, X., Y. Kondo, K. Ram, H. Matsui, K. Nakagomi, T. Ikeda, N. Oshima, R. L. Verma, N. Takegawa, M. Koike, and M. Kajino, Seasonal variations of black carbon observed at the

remotemountain site Happo in Japan, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 3709-3722, doi:10.1002/jgrd.50317, 2013.

Oshima, N., Y. Kondo, N. Moteki, N. Takegawa, M. Koike, K. Kita, H. Matsui, M. Kajino, H. Nakamura, J. S. Jung, and Y. J. Kim, 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, 2012.

Kajino, M., Y. Inomata, K. Sato, H. Ueda, Z. Han, J. An, G. Katata, M. Deushi, T. Maki, N. Oshima, J. Kurokawa, T. Ohara, A. Takami, and S. Hatakeyama, Development of the RAQM2 aerosol chemical transport model and predictions of the Northeast Asian aerosol mass, size, chemistry, and mixing type, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 11833-11856, doi:10.5194/acp-12-11833-2012, 2012.

Kajino, M., M. Deushi, T. Maki, N. Oshima, Y. Inomata, K. Sato, T. Ohizumi, and H. Ueda, Modeling wet deposition and concentration of inorganics over Northeast Asia with MRI-PM/c, *Geosci. Model Dev.*, 5, 1363-1375, doi:10.5194/gmd-5-1363-2012, 2012.

Koike, M., N. Takegawa, N. Moteki, Y. Kondo, H. Nakamura, K. Kita, H. Matsui, N. Oshima, M. Kajino, and T. Y. Nakajima, 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, 2012.

Moteki, N., Y. Kondo, N. Oshima, N. Takegawa, M. Koike, K. Kita, H. Matsui, and M. Kajino, Size dependence of wet removal of black carbon aerosols during transport from the boundary layer to the free troposphere, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L13802, doi:10.1029/2012GL052034, 2012.

Verma, R. L., Y. Kondo, N. Oshima, H. Matsui, K. Kita, L. K. Sahu, S. Kato, Y. Kajii, A. Takami, and T. Miyakawa, Seasonal variations of the transport of black carbon and carbon monoxide from the Asian continent to the western Pacific in the boundary layer, *J. Geophys. Res.*, 116, D21307, doi:10.1029/2011JD015830, 2011.

Kondo, Y., N. Oshima, M. Kajino, R.

Mikami, N. Moteki, N. Takegawa, R. L. Verma, Y. Kajii, S. Kato, and A. Takami, Emissions of black carbon in East Asia estimated from observations at a remote site in the East China Sea, *J. Geophys. Res.*, 116, D16201, doi:10.1029/2011JD015637, 2011.

査読無し論文(計3件)について、以下に記載する。

Oshima, N., Aging of black carbon and its impact on aerosol optical properties and cloud condensation nuclei activities using a mixing state resolved model, *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, 68, 32-35, 2013. http://www.mri-jma.go.jp/Publish/Technical/index_jp.html

Goto, D., N. Oshima, T. Nakajima, and T. Takemura, Treatment of black carbon and availability of electron microscope for global climate models, *Technical Reports of the Meteorological Research Institute*, 68, 24-27, 2013. http://www.mri-jma.go.jp/Publish/Technical/index_jp.html

Goto, D., N. Oshima, T. Nakajima, T. Takemura, and T. Ohara, Impact of the aging process of black carbon aerosols on their spatial distribution, hygroscopicity, and radiative forcing in a global climate model, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 12, 29801-29849, doi:10.5194/acpd-12-29801-2012, 2012.

〔学会発表〕(計11件)
研究代表者による発表分(計11件)についてのみ、以下に記載する。

Naga Oshima, Makoto Koike, and Taichu Y. Tanaka, Development of a Parameterization of Black Carbon Aging for Use in General Circulation Models, 2013 International Aerosol Modeling Algorithms Conference, December 5, 2013, Davis, USA.

Oshima, N., M. Koike, Y. Kondo, H. Matsui, N. Moteki, H. Nakamura, N. Takegawa, and K. Kita, Vertical Transport of Black Carbon over East Asia during the A-FORCE Aircraft campaign, Goldschmidt 2013, August 28, 2013, Florence, Italy.

大島長、小池真、近藤豊、松井仁志、茂木信宏、中村尚、竹川暢之、北和之、春季東アジア域におけるブラックカーボンの上方輸送過程(A-FORCE 航空機観測)

日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013 年 5 月 19 日、幕張。

大島長、小池真、近藤豊、松井仁志、茂木信宏、中村尚、竹川暢之、北和之、春季東アジア域におけるブラックカーボンの上方輸送過程と輸送経路、日本気象学会 2013 年度春季大会、2013 年 5 月 17 日、代々木。

Naga Oshima, Yutaka Kondo, Nobuhiro Moteki, Nobuyuki Takegawa, Makoto Koike, Kazuyuki Kita, Hitoshi Matsui, Mizuo Kajino, Hisashi Nakamura, Jinsang Jung, and Young-Joon Kim, Wet removal of black carbon in Asian outflow: Aerosol Radiative Forcing in East Asia (A-FORCE) aircraft campaign, 12th International Global Atmospheric Chemistry Conference, September 20, 2012, Beijing, China.

N. Oshima, M. Koike, Y. Zhang, and Y. Kondo, Aging of black carbon and its impact on aerosol optical properties using a size and mixing state resolved model, International Radiation Symposium 2012, August 6, 2012, Berlin, Germany.

Naga Oshima, Aging of black carbon and its impact on aerosol optical properties and cloud condensation nuclei activities using a mixing state resolved model, International symposium on aerosol studies explored by electron microscopy, February 17, 2012, Tsukuba, Japan.

Naga Oshima, Yutaka Kondo, Nobuhiro Moteki, Nobuyuki Takegawa, Makoto Koike, Kazuyuki Kita, Hitoshi Matsui, Mizuo Kajino, Hisashi Nakamura, Jinsang Jung, and Young-Joon Kim, Wet Removal of Black Carbon in Asian Outflow During Aerosol Radiative Forcing in East Asia (A-FORCE) Aircraft Campaign, 2011 International Aerosol Modeling Algorithms Conference, December 2, 2011, Davis, USA.

大島長、小池真、近藤豊、茂木信宏、中村尚、竹川暢之、北和之、春季東アジア域におけるブラックカーボンの上方輸送過程、日本気象学会 2011 年度秋季大会、2011 年 11 月 16 日、名古屋。

大島長、小池真、近藤豊、茂木信宏、中村尚、竹川暢之、北和之、領域モデルを用いた春季東アジア域におけるブラックカーボンの上方輸送過程、第 17 回大気化学討論会、2011 年 10 月 19 日、宇治。

Naga Oshima, Yutaka Kondo, Nobuhiro Moteki, Nobuyuki Takegawa, Makoto Koike, Kazuyuki Kita, Hitoshi Matsui, Mizuo Kajino, Hisashi Nakamura,

Jinsang Jung, and Young-Joon Kim, Wet removal of black carbon in Asian outflow: Aerosol Radiative Forcing in East Asia (A-FORCE) aircraft campaign, 10th AeroCom Workshop, October 5, 2011, Fukuoka, Japan.

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

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