

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 30日現在

機関番号：12601  
 研究種目：基盤研究（S）  
 研究期間：2007～2011  
 課題番号：19101001  
 研究課題名（和文） 航空機観測に基づくアジアのブラックカーボンの気候影響の解明  
 研究課題名（英文） Studies of impacts of black carbon aerosol on climate based on aircraft observations

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

研究成果の概要（和文）：本研究ではブラックカーボン測定器を開発・改良し、その測定器を搭載した航空機観測を東アジア域・北極域で行った。ブラックカーボンの濃度・粒径分布・混合状態などの微物理特性を測定し、ブラックカーボンの気候影響を評価する上で鍵となる時空間分布・広域輸送・変質過程・除去過程を明らかにした。また、ブラックカーボンの微物理特性を詳細に表現した全球・領域モデルを開発した。観測結果を用いてモデルの検証を行い、ブラックカーボンの放射効果および気候への影響を定量的に評価した。

研究成果の概要（英文）：We have developed a black carbon (BC) instrument. Using the BC instrument, aircraft campaigns have been conducted over the western Pacific and the Arctic. We measured various microphysical properties of BC aerosol (e.g., mass concentration, size distribution, mixing state) and showed spatial and temporal distribution, large-scale transport, transformation, and removal processes of BC. We also developed global and regional models that can represent the detailed BC microphysical properties. Model calculations were validated by measurements. Using these models, impact of BC on the Earth's climate has been evaluated quantitatively.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	30,600,000	9,180,000	39,780,000
2008年度	28,300,000	8,490,000	36,790,000
2009年度	11,700,000	3,510,000	15,210,000
2010年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
2011年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
総計	85,100,000	25,530,000	110,630,000

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・ブラックカーボン・航空機観測・アジア・気候影響

## 1. 研究開始当初の背景

ブラックカーボンは、太陽光を強く吸収し大気を加熱するため、対流が抑制され、雲の生成・降雨が抑制されると考えられている。また、ブラックカーボンは雲凝結核として作用するため、雲の反射率、雲量、降水量などの変化も引き起こすと考えられている。しかしながら、このようなブラックカーボンの気候影響を研究する上で鍵となるブラックカーボンの粒径分布、混合状態（他のエアロゾル成分による被覆量）などの微物理特性の測定

や光吸収率の測定はこれまで行われてこなかった。

## 2. 研究の目的

1) これまで我々が継続的に開発してきたブラックカーボン測定器を、ブラックカーボンの粒径分布や被覆量を測定可能な装置に改良する。この装置を航空機に搭載してブラックカーボンの粒径分布、被覆量などをアジア大陸の下流域で測定し、ブラックカーボンの広域輸送・変質過程・除去過程などを明らか

にする。

2) 全球・領域モデルを用いてブラックカーボンの濃度を計算し、航空機で測定された3次元のブラックカーボン濃度と比較し、モデルの検証を行う。また、ブラックカーボンの被覆効果を表現可能なモデル開発を行う。そして、アジアにおけるブラックカーボンの放射効果および気候への影響を定量的に評価する。

### 3. 研究の方法

1) ブラックカーボン測定器を航空機に搭載し、2009年の春季に、東シナ海・黄海上空においてブラックカーボンの微物理特性(質量濃度・混合状態・粒径分布)、エアロゾルの粒径分布、雲粒数などを測定する高精度の航空機観測(A-FORCE)を実施した(全21フライト)。また、2008年の春季・夏季に北極域(カナダ・グリーンランド周辺)で行われたNASAの航空機観測(ARCTAS)に参加し、同様のブラックカーボン測定器による観測を行った。これらの航空機観測の結果を用いて、ブラックカーボンの微物理特性の空間分布を明らかにするデータ解析を行った。

2) ブラックカーボンの混合状態を表現したモデルを開発した。アジア域においてモデル計算を行い、観測されたブラックカーボンの混合状態を用いて検証を行った。このモデル計算結果に基づいて、ブラックカーボンの混合状態や吸湿特性の変質過程を表現したパラメタリゼーションを作成した。このパラメタリゼーションを全球モデルに組み込み、ブラックカーボンの気候影響を評価した。

### 4. 研究成果

1) ブラックカーボン測定器の検出器をダイオードから光電子増倍管に変えることにより感度を大幅に向上させ、直径70nmまでの粒子を測定できるようにした。また、ブラックカーボンの被覆量を高精度で測定するためのエアロゾル散乱光学系を製作した。

2) 2009年の春季に行ったA-FORCE航空機観測によって得られたデータを解析した。中国からの汚染空気塊の流出が顕著な東シナ海・黄海上空におけるブラックカーボンの粒径分布・濃度・混合状態の高度分布を明らかにした。トレーサー(一酸化炭素)の濃度を用いてブラックカーボンの輸送効率(排出源からの輸送割合)を詳細に推定した。ブラックカーボンの被覆と粒径には良い正の相関があることを見出し、時間の進行と共に凝縮・凝集が進行することを示した。

3) 2008年の春と夏に得られた北極・中緯度でのブラックカーボンのデータを解析した。春季のデータでは、長距離輸送されたブラッ

クカーボンの粒径分布、被覆量の特性を評価し、ブラックカーボンの発生源を同定した。夏に得られたアメリカおよびカナダでの森林火災近傍でのデータからそれぞれの発生源付近でのブラックカーボンの粒径分布、被覆量の特性を評価した。またブラックカーボンと他のトレーサーとの相関の傾きから、森林火災による発生源付近での放出比を求め、従来の発生源の推定の誤差を評価した。またブラックカーボンの被覆量の増大には凝集過程が重要な役割を果たしていることを示した。

4) 春季と夏季におけるブラックカーボンの北極への輸送効率を推定した。春季のロシアでのバイオマス燃焼により生成するブラックカーボン質量の輸送効率は80%程度であるのに対し、夏季には3%程度にまで低下する。これはブラックカーボンの降水による除去が夏季に著しく増加することに起因することを、降水量の推定を用いて示した。

5) 2008年2月から2009年5月までの領域モデルWRF-CMAQの計算を行った。モデル計算は中国の影響が強い冬季と春季について、地上長期観測点(辺戸)で観測されたブラックカーボン濃度を概ね再現した。モデル計算結果から、中国全域からのブラックカーボンの排出量は $1.92 \text{ Tg yr}^{-1}$ 、その不確定性幅は40%と見積もられた。この値はZhangらによってボトムアップ的に見積もられた中国からのブラックカーボンの排出量データの値( $1.81 \text{ Tg yr}^{-1}$ )と非常に近く、その絶対量の妥当性が検証された。

6) A-FORCE航空機観測とWRF-CMAQモデルの計算結果を比較した結果、モデルは観測されたブラックカーボン濃度の高度分布を概ね再現できることがわかった。また、モデル計算はブラックカーボンの輸送効率の高度分布を良い精度で再現した。検証されたモデル計算結果を用いて、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について調べた。その結果、中国華北域では主に低気圧活動に伴いブラックカーボンが上方輸送されていたのに対し、中国華中内陸域では主に地形性の上昇流に伴いブラックカーボンが上方輸送されていたことが明らかとなった。

7) ブラックカーボンの混合状態を表現したスキームを開発し、領域モデルWRF-chemに導入した。このモデルを東アジア域の計算に適用した。モデル計算は、観測されたブラックカーボンの質量濃度・数濃度、散乱性エアロゾル(ブラックカーボンを含まないエアロゾル)の体積濃度・数濃度について、時間変

動や鉛直分布を概ね再現した。また、観測されたブラックカーボンの混合状態についてもその特徴を再現した。このモデル計算結果を用いて、詳細な混合状態を考慮した場合としない場合（従来のモデルのように各粒径について単一の混合状態を仮定）のエアロゾルの光学・放射特性の違いを明らかにした。詳細な混合状態を考慮した場合に比べ、単一の混合状態を仮定した計算では大気境界層内の吸収係数や大気加熱率を30~40%程度、地上でのエアロゾルの放射強制力の絶対量を約10%過大推定すると見積もられた。これらの結果は、ブラックカーボンの気候影響や温暖化対策を考える際に混合状態の取り扱いが非常に重要になることを示している。

8) ブラックカーボンの混合状態や吸湿特性の変質過程を表現したパラメタリゼーションを作成し、全球気候モデルに組み込んだ。変質過程を考慮していない従来の計算と比較して、全ブラックカーボンに対する疎水性・疎水性のブラックカーボンの質量割合の推定が大きく改善され、これまでの観測結果と整合的なモデル計算結果が得られた。全球年平均での人為起源ブラックカーボンの放射強制力の推定値は、 $+0.3 \text{ Wm}^{-2}$ と見積もられた。

#### 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19件)

- ① Kondo, Y., L. Sahu, N. Moteki, F. Khan, N. Takegawa, X. Liu, M. Koike, T. Miyakawa, Consistency and traceability of black carbon measurements made by laser-induced incandescence, thermal-optical transmittance, and filter-based photo-absorption techniques, *Aerosol Sci. Tech.*, 45, 295-312, DOI:10.1080/02786826.2010.533215, 2011.
- ② Kajino, M, Y. Kondo, EMTACS: Development and regional scale simulation of a size, chemical, mixing state and shape resolved atmospheric particle model, *J. Geophys. Res.*, 116, D02303, doi:10.1029/2010JD015030, 2011.
- ③ McNaughton, C. S., A. D. Clarke, S. Freitag, V. N. Kasputin, Y. Kondo, N. Moteki, L. Sahu, N. Takegawa, J. P. Schwarz, J. R. Spackman, L. Watts, G. Diskin, J. Podolske, J. S. Holloway, A. Wisthaler, T. Mikoviny, J. de Gouw, C. Warneke, L. Jimenez, M. Cubison, S. G. Howell, A. Middlebrook, R. Bahreini, B. E. Anderson, E. Winstead, K. L. Thornhill, D. Lack, J. Cozic, J. and C. A. Brock, Absorbing aerosol in the troposphere of the Western Arctic during the 2008 ARCTAS/ARCPAC airborne field campaigns, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11, 1543-1459, doi:10.5194/acpd-11-1543-2011, 2011.
- ④ Tilmes, S., L. K. Emmons<sup>1</sup>, K. S. Law, G. Ancellet, H. Schlager, J.-D. Paris, H. E. Fuelberg, D. G. Streets, C. Wiedinmyer, G. S. Diskin, Y. Kondo, J. Holloway, J. P. Schwarz<sup>9</sup>, J. R. Spackman, T. Campos<sup>1</sup>, P. Nedelec, and M. V. Panchenko, Source contributions to Northern Hemisphere CO and black carbon during spring and summer 2008 from POLARCAT and START08/preHIPPO observations and MOZART-4, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11, 5935-5983, doi:10.5194/acpd-11-5935-2011, 2011.
- ⑤ Matsui, H, Y. Kondo, N. Moteki, N. Takegawa, L. K. Sahu, Y. Zhao, H. E. Fuelberg, W. R. Sessions, G. Diskin, D. R. Blake, A. Wisthaler, and M. Koike, Seasonal variation of the transport of black carbon aerosol from the Asian continent to the Arctic during the ARCTAS aircraft campaign, *J. Geophys. Res.*, 116, D05202, doi:10.1029/2010JD015067, 2011.
- ⑥ Rose, D., Gunthe, S. S., Su, H., Garland, R. M., Yang, H., Berghof, M., Cheng, Y. F., Wehner, B., Achtert, P., Nowak, A., Wiedensohler, A., Takegawa, N., Kondo, Y., Hu, M., Zhang, Y., Andreae, M. O., and P. ch1, U.: Cloud condensation nuclei in polluted air and biomass burning smoke near the mega-city Guangzhou, China Part 2: Size-resolved aerosol chemical composition, diurnal cycles, and externally mixed weakly CCN-active soot particles, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 2817-2836, doi:10.5194/acp-11-2817-2011, 2011.
- ⑦ Kondo, Y., H. Matsui, N. Moteki, L. Sahu, N. Takegawa, M. Kajino, Y. Zhao, M. J. Cubison, J. L. Jimenez, S. Vay, G. S. Diskin, B. Anderson, A. Wisthaler, T. Mikoviny, H. E. Fuelberg, D. R. Blake, G. Huey, A. J. Weinheimer, D. J. Knapp, and H. Brune, Emissions of black carbon, organic, and inorganic aerosols from biomass burning in North America and Asia in

- 2008, *J. Geophys. Res.*, 116, D08204, doi:10.1029/2010JD015152, 2011.
- ⑧ Moteki, N., N. Takegawa, K. Koizumi, T. Nakamura, Y. Kondo, Multiangle polarimetry of thermal emission and light scattering by individual particles in airflow, *Aerosol Sci. Tech.*, 45, 1184–1198, doi:10.1080/02786826.2011.583299, 2011.
- ⑨ Ohata, S., N. Moteki, and Y. Kondo, New method for measurement of the size distribution of black carbon particles dissolved in rainwater, *Aerosol Sci. Technol.*, 45, 1326–1335, doi:10.1080/02786826.2011.593590, 2011.
- ⑩ Gunthe, S. S., D. Rose, H. Su, R. M. Garland, P. Achtert, A. Nowak, A. Wiedensohler, M. Kuwata, N. Takegawa, Y. Kondo, M. Hu, M. Shao, T. Zhu, M. O. Andreae, and U. Pösch, Cloud condensation nuclei (CCN) from fresh and aged air pollution in the megacity region of Beijing, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 11, 023–11, 039, doi:10.5194/acpd-11-9959-2011, 2011.
- ⑪ Wang, Q., D. J. Jacob, J. A. Fisher, J. Mao, P. L. Sager, E. M. Leibensperger, C. C. Carouge, Y. Kondo, J.-L. Jimenez, M. J. Cubison, and S. J. Doherty, Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter-spring: implications for radiative forcing, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11, 19395–19442, doi:10.5194/acpd-11-19395-2011, 2011.
- ⑫ Vay, S. A., Y. Choi<sup>2</sup>, K. P. Vadrevu<sup>3</sup>, D. R. Blake, S. C. Tyler<sup>5</sup>, A. Wisthaler<sup>6</sup>, A. Hecobian, Y. Kondo<sup>8</sup>, G. S. Diskin, G. W. Sachse, J.-H. Woo, A. J. Weinheimer, E. T. Olsen, A. Stohl, J. F. Burkhardt, and P. O. Wennberg, Patterns of CO<sub>2</sub> and Radiocarbon across High Northern Latitudes during IPY 2008, *J. Geophys. Res.*, D14301, doi:10.1029/2011JD015643, 2011
- ⑬ Sahu, L. K., Y. Kondo, Y. Miyazaki, N. T. Kim Oanh, Prapat Pongkiatkul, Seasonal and diurnal variations of black carbon and organic carbon aerosols in Bangkok, *J. Geophys. Res.*, D15302, doi:10.1029/2010JD015563, 2011.
- ⑭ 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 the observations at a remote site in the East China Sea, *J. Geophys. Res.*, 116, D16291, doi:10.1029/2011JD015637, 2011.
- ⑮ Matsui, H., M. Koike, Y. Kondo, N. Takegawa, A. Wiedensohler, J. D. Fast, and R. A. Zaveri, Impact of new particle formation on the concentrations of aerosol number and cloud condensation nuclei around Beijing, *J. Geophys. Res.*, 116, D19208, doi:10.1029/2011JD016025, 2011.
- ⑯ Matsui, H., Y. Kondo, N. Moteki, N. Takegawa, L. K. Sahu, M. Koike, Y. Zhao, H. E. Fuelberg, W. R. Sessions, G. Diskin, B. E. Anderson, D. R. Blake, A. Wisthaler, M. J. Cubison, and J. L. Jimenez, Accumulation mode aerosol number concentrations in the Arctic during the ARCTAS aircraft campaign: Long-range transport of polluted and clean air from Asia, *J. Geophys. Res.*, 116, D20217, doi:10.1029/2011JD016189, 2011.
- ⑰ 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.
- ⑱ Cheng, Y. F., H. Su, D. Rose, G. G. Gunthe, M. Berghor, B. Wehner, P. Achtert, A. Nowak, N. Takegawa, Y. Kondo, M. Shiraiwa, Y. G. Gong, M. Shao, M. Hu, T. Zhu, Y. H. Zhang, A. Wiedensohler, M. O. Andreae, and U. Pöschl, Size-resolved measurement of the mixing state of soot in the megacity Beijing, China: diurnal cycle, aging and parameterization, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11, 32161–32204, doi:10.5194/acpd-11-32161-2011, 2011.
- ⑲ Wang, Y., X. Wang, Y. Kondo, M. Kajino, J. W. Munger, and J. Hao, Measurement of black carbon and its correlation with trace gases at a rural site in Beijing: Implications for bottom-up

emissions, *J. Geophys. Res.*, *J. Geophys. Res.*, 116, D24304,  
doi:10.1029/2011JD016575, 2011.

(3) 連携研究者  
なし

[学会発表] (計4件)

- ① Y. Kondo, 「The effect of the reduction of black carbon as a measure of mitigation of climate change」 IGES International Workshop on a Co-Benefits Approach, 2012/1/13, IGES, Hayama, Kanagawa
- ② 近藤 豊, 「中国におけるブラックカーボンの発生と輸送」AGU 研究プロジェクト報告会、2011年12月14日、東京大学山上会議所、
- ③ Y. Kondo, R. L. Verma, N. Oshima, H. Matsui, K. Kita, U. Kajii, S. Kato, T. Miyakawa, L. K. Sahu, A. Takami  
「Asian continent to the western Pacific and estimate of CO emissions from China」AGU 2011 Fall Meeting, 2011/12/7, San Francisco,
- ④ 近藤 豊, 「東京におけるブラックカーボンの削減の検証-大気質の改善と地球温暖化対策」シンポジウム「気候変動対策としてのディーゼル車対策」@ エコツェリア (東京・丸の内) 2011年1月17日

[その他]

ホームページ等

<http://www-sys.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~kondo/index.html>

## 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  
竹川 暢之 (TAKEKAWA NOBUYUKI)  
東京大学・先端科学技術研究センター・准教授  
研究者番号：00324369  
竹村 俊彦 (TAKEMURA TOSHIHIKO)  
九州大学・応用力学研究所・准教授  
研究者番号：90343326  
宮崎 雄三 (MIYAZAKI YUZO)  
北海道大学・低温科学研究所・助教  
研究者番号：60376655