

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26241003

研究課題名(和文) 東アジアの人為起源エアロゾルの間接効果

研究課題名(英文) Indirect effects of anthropogenic aerosols in East Asia

研究代表者

小池 真 (KOIKE, Makoto)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・准教授

研究者番号：00225343

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,100,000円

研究成果の概要(和文)：雲粒はエアロゾル(大気中を浮遊する微粒子)を核として生成するため、人為起源エアロゾルの増加は雲にさまざまな影響を与える可能性がある。本研究では人工衛星データの解析から、東シナ海の黒潮という温暖な海水が、冬季の大陸からの寒気の吹き出し時に境界層を不安定化させ、上昇流を強化させることにより、人為起源エアロゾルの雲への影響を増幅させていることを明らかにした。また航空機観測データの解析からもエアロゾルと雲・降水の関係を示し、数値モデルを改良することにより、観測から明らかになったエアロゾルや温暖な海水の雲への影響を再現することに成功した。

研究成果の概要(英文)：By serving as cloud condensation nuclei, aerosols affect cloud microphysics, and as a consequence, they can affect cloud albedo, cloud amount, and precipitation. In this study we show using satellite-derived cloud data that cloud droplet number concentration increases over the East China sea where the Kuroshio ocean current with high sea surface temperature (SST) is located especially when cold air outbreak takes place. We also show using aircraft data that aerosol number concentration and vertical structure of cloud liquid water content are very different in precipitating clouds as compared with those in non-precipitating clouds. Using improved numerical models, we show that these observed features of influences of aerosols and SST on clouds and precipitation can be successfully reproduced.

研究分野：大気環境科学

キーワード：エアロゾル 雲物理 数値モデル

1. 研究開始当初の背景

大気中に浮遊する微粒子(エアロゾル)は、雲凝結核(CCN)として働くことにより、雲微物理過程や降水過程に影響する。この結果、雲量や雲の鉛直構造などの雲のマクロ量にも影響すると考えられる。このようなエアロゾルの雲への影響(間接効果)は、地球の放射収支や気候変化に対して重要な役割を果たしていると考えられる。しかしながら、その推定の不確定性幅は大きく、気候変化予測における最大の不確定性要因の一つになっている(IPCC 報告書など)。この不確定性を克服するためには、エアロゾルという物質科学と、気象学を融合させた新しい統合的研究が必要である。

東アジアは世界的に見ても人為起源エアロゾル濃度が高い。またエアロゾルの雲への影響の仕方は、雲が形成される気象場によって異なると考えられる。このため東アジアの高濃度の人為的なエアロゾルの雲への影響は、東アジア特有の気象場の中でとらえる必要がある。

2. 研究の目的

我々はこれまでの航空機観測により、アジアから輸送される高濃度の人為的エアロゾルが、黒潮という暖かい海面水温(SST)上において対流強化により雲微物理量を変化させるという、物質科学と気象学の知見の融合を必要とする事象を発見した。本研究の目的は、新しい航空機観測や人工衛星データ観測の解析、および数値モデル計算という統合的研究アプローチにより、東アジア特有のエアロゾルの下層雲への影響を明らかにすることである。特にSSTや境界層の構造に着目することにより、エアロゾルが直接引き起こす雲微物理量の変化(雲のミクロな変化)と、その結果として生じる雲の鉛直構造や鉛直積算雲水量などの雲のマクロな変化を理解することである。

3. 研究の方法

(1) 本研究では私たちがこれまでの航空機観測により明らかにしてきたエアロゾルの雲微物理への影響の空間的な広がり、気象場の季節進行の中でとらえるために、人工衛星MODISデータを使った解析を実施した。具体的にはMODISの雲の光学的厚みと有効半径データを用いて、雲頂温度が0°C以上(水雲)かつ非降水性の雲について、上記のパラメータから雲粒数濃度(Nc)の推定を行った。またエアロゾルの指標としては、MODISの微小エアロゾルの光学的厚み(AOD)を用いた。気象場やSSTはERA-interimの再解析データを使用し、海面気温(surface air temperature, SAT)とSSTとの差(SST-SAT)に着目した解析を実施した。

(2) 本研究ではまた、2013年の7月に北海

道東方沖合で実施された航空機観測のデータを解析した。この観測ではSSTとSATが比較的近い状況で実施され、下層雲や霧が観測された。本研究では特に雲底下のエアロゾルや雲の鉛直構造について、降水と非降水のそれぞれの雲の違いに着目した解析を行った。

(3) 本研究ではエアロゾルやSSTの雲微物理への影響を調べるために、領域数値モデルWRF-chem(ver. 3.4)および、理化学研究所で開発されたSCLAEのラージ・エディター・シミュレーション(LES)モデルを使用した。WRF-chemではサブグリッド・スケールでの上昇流速の表現に問題があったため、その改良を実施した上で数値計算を実施した。またSCALE-LESでは降水によるエアロゾルの除去が表現されていなかったため、その表現を追加した上で計算を実施した。

4. 研究成果

(1) 人工衛星データ解析によるエアロゾルとSSTの雲への影響評価

人工衛星MODISから非降水性の水雲が検出された日のみのデータを用い、各月・各場所ごとにSST-SATが高い日(上位5日間)と低い日(下位5日間)との差を調べた。この解析の結果、冬季の東シナ海において温暖なSSTをもつ黒潮に沿って海面温度と海面気温との差(SST-SAT)が大きくなる領域(最大で8K)が現れ、それが雲粒数濃度の増大(最大で1.8倍)をもたらしていることが明らかとなった(図1)。

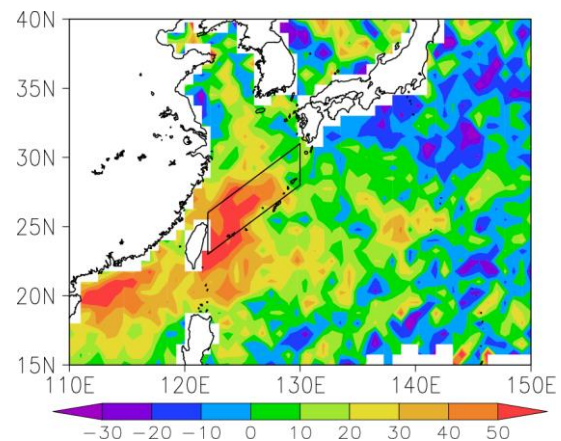


図1. 2009年1, 2, 11, 12月の人工衛星MODISデータから得られたSST-SATの高い日と低い日での雲物数濃度の差(%). 黒枠で示した黒潮域で雲粒数濃度が増大している。

このSST-SATの増大は寒気の吹き出しに対応しており、境界層を不安定化させ上昇流速を増大させる効果と、大陸からの人為的エアロゾルの輸送効果の2つの効果が働いていることが明らかとなった(図2)。あるエアロゾル量(AODのレンジ)のデータだけに着目してみても、SST-SATの8Kの増加に対して、Ncが40-80%増大していた。すなわちエアロゾル量に変化していなくても、寒気の

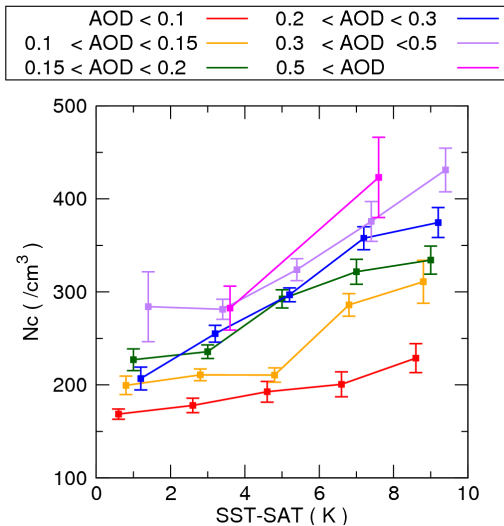


図2. 各 AOD (エアロゾルの光学的厚み) における SST-SAT と雲粒数濃度(Nc) との関係。図1の黒枠内での解析結果。AOD の増加とともに、また SST-SAT の増加とともに Nc が増加している。

吹き出しにより雲粒数濃度が大きく変化することを示している。さらに、AOD が小さい時と大きい時の Nc の差 (エアロゾルの雲粒数影響) は、SST-SAT が高い方が大きい (今回の解析では 1.5 倍大きい) ことが分かった。これは黒潮という高い SST が東アジアの高濃度の人為的エアロゾルの雲微物理影響を増幅させていることを示す結果である。これらのエアロゾルと SST の雲微物理影響メカニズムは、西太平洋だけでなく西大西洋など温暖な SST をもつ海域においても同様におこりうる普遍的なものであると考えられる。

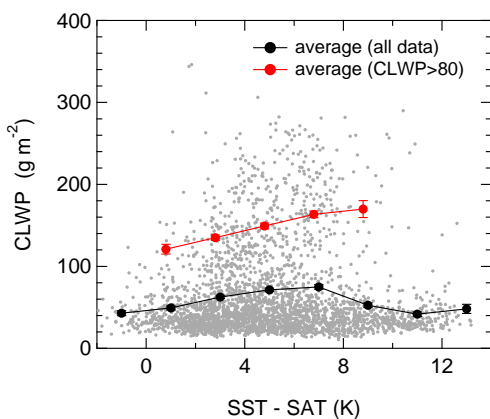


図3. SST-SAT と鉛直積算雲水量 (CLWP) との散布図。図1の黒枠内での解析結果。

本研究ではさらに鉛直積算雲水量という雲のマクロ量に対しても SST が影響していることを示唆する結果を得た (図3)。この影響は主として 80 g m⁻² 以上の厚さをもつ雲に見られていた。一方、AOD (エアロゾル) と

の明確な相関は見られなかった。このようにエアロゾルと SST の雲のマクロ量への影響は極めて複雑であることが改めて確認された。

(2) 航空機観測によるエアロゾルと雲・降水相互作用評価

夏季に北海道東方沖で実施された航空機観測データを解析した結果、非降水雲と比べて降水している雲では、雲粒数濃度 (Nc) と雲底下での累積モードのエアロゾル数濃度 (Na) はともに低濃度となっていることが明らかになった (図4)。降水粒子の粒径分布を用いて境界層内エアロゾルの除去の時定数を見積もった結果、0.60 mm/day の降水量でもエアロゾルは 12 時間で除去されることが明らかとなった。低濃度のエアロゾルは雲水量が低くても降水を引き起こす可能性があるが、ひとたび降水が始まると、降水によるエアロゾル除去がさらに降水しやすくしていることを示唆する結果となった。

また非降水雲では雲水量が雲底から断熱的な雲で期待されるようにほぼ線形に増加するのに対し、降水している雲内では雲水量が鉛直方向に不均一になっていることが明らかとなった (図5)。このような鉛直構造となる理由は観測だけからでは分からないが、このような不均一な鉛直構造の報告がない亜熱帯東太平洋の下層雲と比較すると、境界層の構造の違いが見られた。亜熱帯東太平洋ではハドレー循環の下降域にあたるため、

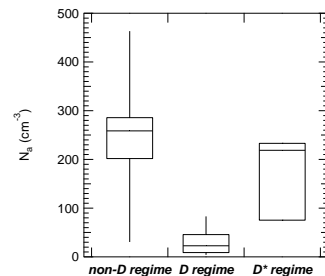


図4. 非降水雲 (non-D)、降水雲 (D)、および降水直後と考えられる雲 (D*) での雲粒数濃度 (Nc) の中央値 (ボックスは 25-75% レンジ、棒は 10-90% レンジ)。雲底下での雲凝結核となりうるエアロゾル数濃度 (Na) も似たような大小関係をもっていた。

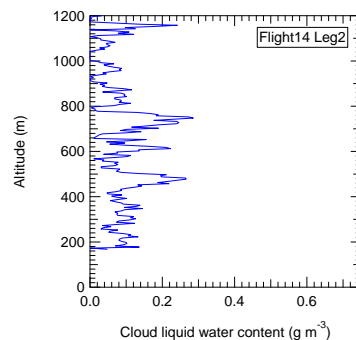


図5. 航空機により観測された降水雲中での雲水量の鉛直分布。

強い温度逆転層が見られ、また境界層の上では相対湿度が 20%以下となるような極めて乾燥した状況となっている。一方で中緯度である西部北太平洋の下層雲では、明確な温度逆転層は見られず、また境界層の上でも湿潤であった。このため雲が鉛直発達しやすい状況となっていた。この雲の鉛直発達とそれに伴う降水が、上記のような雲水量の不均一構造をもたらしていた可能性が示唆された。

(3) 数値モデル計算によるエアロゾルと海面温度 (SST) の雲への影響評価

本研究では、夏季の西部北太平洋での下層雲の航空機観測を対象とした数値モデル研究を実施した。数値モデルとしては、理化学研究所で開発された SCALE のラージ・エディター・シミュレーション (LES) モデルをもちいた。エアロゾルと雲・降水との相互作用を調べるために、降水によるエアロゾルの除去過程を微物理モデルに加える改良をおこなった。この改良された数値モデルを使った計算の結果、非降水時に観測されたエアロゾル数濃度や気象場を仮定すると、非降水性の雲

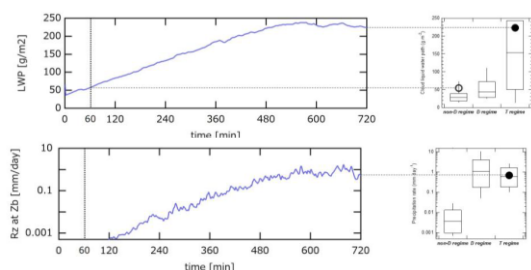


図 6. (上図)数値モデル計算によって得られた鉛直積算雲水量の時間変化 (左) および計算開始 1 時間後 (白丸) と 12 時間後 (黒丸) の値と観測値 (ボックス) との比較 (右)。非降水性の雲条件から数値計算を開始した結果、降水が始まり降水直後の観測結果と似たような値が得られた。(下図) 雲底での降水量について同様の図。

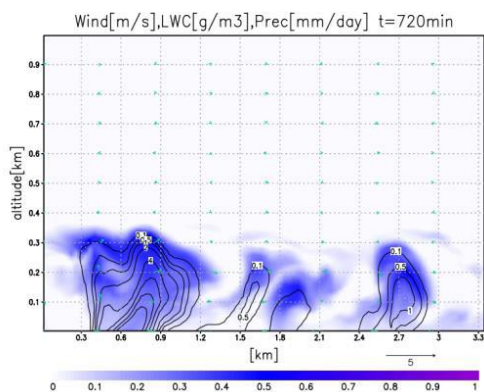


図 7. 降水雲で観測されたエアロゾル数濃度を仮定した数値モデル計算の結果。計算開始から 12 時間後の雲水量 (色) と降水量 (等値線) の水平・高度断面。鉛直方向に不均一な雲水量の構造が見られる。

が再現された。また時間とともに雲層が厚くなり、やがて降水し始めた (図 6)。一方、降水時に観測された低いエアロゾル数濃度を仮定すると降水性の雲が再現され、観測されたような雲水量のパッチ状の鉛直構造と似た構造も現れた (図 7)。さらに感度実験として、亜熱帯東太平洋見られるような強い温度逆転層を仮定すると、下層雲の鉛直発達は抑制された。

本研究ではさらに 2009 年の春季東シナ海・黄海で実施されたエアロゾルと下層雲の航空機観測を対象とした数値モデル計算を WRF-chem を用いて実施した。この結果、数値モデルの空間解像度以下のスケール (サブグリッドスケール) での乱流による上昇流の効果を、エアロゾルから雲粒活性化において正しく評価することが重要であることがわかった。本研究では力学計算と整合的な表現を導入することにより、航空機観測から推定された上昇流速度と絶対値に近い値を得ることができた。さらにこの上昇流速度の指標として雲粒数濃度とエアロゾル数濃度の比率を、航空機観測と数値モデル計算と比較したところ正の相関が見られた。これは高い SST (黒潮) 上への寒気移流などによる大気境界層内での上昇流強化を、数値モデル計算がある程度正しく再現できていることを示唆する結果である。

以上のように本研究では、西太平洋の下層雲を研究対象として、SST と境界層の構造に着目した観測データの解析と数値モデル計算を実施することによりエアロゾルと雲の相互作用の重要な側面を明らかにすることができた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- (1) Okajima, S., H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka, A. Kuwano-Yoshida, B. Taguchi, M. Mori, Y. Kosaka: Basin-scale atmospheric response to decadal SST variability in the North Pacific subarctic frontal zone, *Journal of climate*, 10.1175/JCLI-D-17-0200.1, 31, 2018, 297-315, 査読有
- (2) P. R. Sinha, Y. Kondo, K. Goto-Azuma, Y. Tsukagawa, K. Fukuda, M. Koike, S. Ohata, N. Moteki, T. Mori, N. Oshima, E. J. Forland, M. Irwin, J.-C. Gallet, and C. A. Pedersen: Seasonal progression of the deposition of black carbon by snowfall at Ny-Alesund, Spitsbergen, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 10.1002/2017JD028027, 123, 2018, 997-1016, 査読有
- (3) Sullivan R. C., P. Crippa, H. Matsui, L. R. Leung, C. Zhao, A. Thota, and S. C. Pryor: New particle formation leads to cloud dimming, *Nature Partner Journals*:

- Climate and Atmospheric Science, 10. 1038/s41467-018-03997-0, 2018, 査読有
- (4)Okata, M., T. Nakajima, K. Suzuki, T. Inoue, T. Y. Nakajima, and H. Okamoto : A study on radiative transfer effects in 3D cloudy atmosphere using satellite data, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 10. 1002/2016JD025441, 122, 2017, 443-468, 査読有
- (5)Yumimoto, K., Tanaka, T. Y., Oshima, N., and Maki, T : JRAero: the Japanese Reanalysis for Aerosol v1.0, Geoscientific Model Development, 10. 5194/gmd-10-3225-2017, 10, 2017, 3225-3253, 査読有
- (6)Gan, B., L. Wu, F. Jia, S. Li, W. Cai, H. Nakamura, M. A. Alexander, A. J. Miller : On the response of the Aleutian Low to greenhouse warming, Journal of climate, 10. 1175/JCLI-D-15-0789. 1, 30, 2017, 3907-3925, 査読有
- (7)Ma, X., P. Chang, R. Saravanan, R. Monturo, H. Nakamura, D. Wu, X. Lin, L. Wu : Importance of resolving Kuroshio front and eddy influence in simulating the North Pacific storm track, Journal of climate, 10. 1175/JCLI-D-16-0154. 1, 30, 2017, 1861-1879, 査読有
- (8)Moteki, N., K. Adachi, S. Ohata, A. Yoshida, T. Harigaya, M. Koike, Y. Kondo : Anthropogenic iron oxide aerosols enhance atmospheric heating, Nature Communications, 10. 1038/ncomms15329, 8, 2017, 15329, 査読有
- (9)Sinha, P. R., Y. Kondo, M. Koike, J. A. Ogren, A. Jefferson, T.E. Barrett, R. J. Sheesley, S. Ohata, N. Moteki, H. Coe, D. Liu, M. Irwin, P. Tunved, P. K. Quinn, and Y. Zhao : Evaluation of ground-based black carbon measurements by filter-based photometers at two Arctic sites, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 10. 1002/2016JD025843, 122, 2017, 3544-3572, 査読有
- (10)Kaiho, K. and N. Oshima : Site of asteroid impact changed the history of life on Earth: the low probability of mass extinction, Scientific Reports, 10. 1038/s41598-017-14199-x, 7, 2017, 14855, 査読有
- (11)Reddington, C., K. S. Carslaw, P. Stier, N. Schutgens, H. Coe, S. ..., Y. Kondo, N. Oshima (32名中25,26番目)... : The Global Aerosol Synthesis and Science Project (GASSP): Measurements and Modeling to Reduce Uncertainty, Bulletin of the American Meteorological Society, 10. 1175/BAMS-D-15-00317. 1, 98, 2017, 1857-1877, 査読有
- (12)Miyakawa, T., N. Oshima, F. Taketani, Y. Komazaki, A. Yoshino, A. Takami, Y. Kondo and Y. Kanaya : Alteration of the size distributions and mixing states of black carbon through transport in the boundary layer in east Asia, Atmospheric Chemistry and Physics, 10. 5194/acp-17-5851-2007, 17, 2017, 5851-5864, 査読有
- (13)Kanaya, Y., H. Matsui, F. Taketani, X. Pan, Y. Komazaki, Z. Wang, L. Chang, D. Kang, M. Choi, S.-Y. Kim, C.-H. Kang, A. Takami, H. Tanimoto, K. Ikeda, and K. Yamaji : Observed and modeled mass concentrations of organic aerosols and PM_{2.5} at three remote sites around the East China Sea: Roles of chemical aging, Aerosol and Air Quality Research, 10. 4209/aaqr. 2016. 12. 0573, 17, 2017, 3091-3105, 査読有
- (14)Matsui, H. and N. Mahowald : Development of a global aerosol model using a two-dimensional sectional method: 2. Evaluation and sensitivity simulations, Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 10. 1002-2017MS000937, 9, 2017, 1887-1920, 査読有
- (15)Matsui, H. : Development of a global aerosol model using a two-dimensional sectional method: 1. Model design, Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 10. 1002/2017MS000936, 9, 2017, 1921-1947, 査読有
- [学会発表] (計 21件)
- (1)Letu, H., H. Ishimoto, T. M. Nagao, T. Y. Nakajima, and J. Riedi : Retrieval of Ice Cloud Properties from HIMAWARI-8 satellite measurement by Voronoi Light Scattering Model, The 17th Electromagnetic and Light Scattering Conference, 2018
- (2) Oshima, N. and M. Koike: Modeling studies of black carbon using a MRI Earth System Model, AMAP short-lived climate forcers (SLCF) expert group meeting (国際学会), 2018
- (3) Matsui, H.: Development of a global aerosol model using a two-dimensional sectional method, oral presentation, Frontiers of Atmospheric Aerosol Studies: Toward the Understanding of the Health and Climatic Effects (国際学会), 2018
- (4) 大島長: 気象研究所地球システムモデルによる北極ブラックカーボンの放射影響, ArCS エアロゾル・雲研究会合, 2017
- (5) Nagao, T., M., and T. Y. Nakajima : An attempt to retrieval vertical profile of water-cloud droplet effective radius

from SWIR satellite measurements:
Simulation, JAXA Joint Workshop, 2017
(6) Okata, M., H. Okamoto, T. Y. Nakajima,
T. Inoue, T. Nakajima, and K. Suzuki
: Assessment of 3D cloud radiative
transfer effects applied to collocated
A-Train data. AGU Fall Meeting 2017. 2017
(7) Nagao, T. M., H. Murakami, and T. Y.
Nakajima: Estimating the vertical profile
of droplet effective radius for water
clouds from SWIR measurements of
Himawari-8: Algorithm, AGU Fall Meeting
2017, 2017
(8) Letu, H., T. M. Nagao, T. Y. Nakajima,
H. Ishimoto, and J. Riedi : Retrieval of Ice
Cloud Properties from HIMAWARI-8/AHI by
Voronoi Light Scattering Model, PIERS
conference 2017, 2017
(9) Letu, H., W. Li, H. Shang, T. Y.
Nakajima, T. M. Nagao, and H. Chen :
Influence of the aerosol under the cloud
layer on calculation of the shortwave
radiation flux in China from satellite
data, ACRS 2017, 2017
(10) Shilimkar, V. and Y. Tanimoto :
Relative role of steric and wind driven
fluctuations of sea surface height in
Pacific and Indian Ocean on decadal
variation of ITF transport, 2017 年日本海
洋学会秋季大会, 2017
(11) 大島長 : 気象研究所地球システムモデル
による北極ブラックカーボンのモデル研
究, グリーンランド南東ドームアイスコア
に関する研究集会, 2017
(12) Yamagishi, T., H. Takenaka, T. M.
Nagao, and T. Y. Nakajima : Evaluation of
the influence on the cloud properties by
the change of yellow sand concentration
using “Himawari-8”, The 1st
Tokai-KMUTT Symposium, 2017
(13) Letu, H., T. Y. Nakajima, T. M. Nagao,
and H. Ishimoto: Investigation of the Cloud
Properties from HIMAWARI-8 Satellite Data,
017 JST-NSF-RCN Workshop on Distributed
Energy Management Systems, 2017
(14) Matsui, H. and N. Mahowald :
Development of a global aerosol model
using a two-dimensional sectional method,
poster presentation, 22nd Annual CESM
Workshop (国際学会) , 2017
(15) 松井仁志: 粒径分布と混合状態を解像
した二次元ビン法を用いた全球エアロゾル
モデルの開発, 日本気象学会 2017 年度春季
大会, 2017
(16) 大島長、田中泰宙、神代剛、吉村裕正、
川合秀明、工藤玲、行本誠史、出牛真、小池
真: 気象研究所地球システムモデルの開
発とブラックカーボンの空間分布と放射効果
の評価, 日本気象学会 2017 年度春季大
会, 2017

(17) Okata, M., K. Suzuki, T. Inoue, H.
Okamoto, and T. Y. Nakajima: Assessment of
the 3D cloud radiative transfer effects
using observed satellite data, 日本地球
惑星科学連合 2017 年大会, 2017
(18) Nagao, T. M., and T. Y. Nakajima:
Estimating Vertical Profile of
Water-Cloud Droplet Effective Radius from
SWIR Measurements of Himawari-8/AHI via
Cloud Profile Statistics, 日本地球惑星科
学連合 2017 年大会 2017
(19) Letu, H., T. M. Nagao, T. Y. Nakajima,
H. Ishimoto, H. Shang, and L. Chen: The
retrieval of ice-cloud properties from
Himawari-8/AHI, 日本地球惑星科学連合
2017 年大会, 2017
(20) 大島長、田中泰宙、神代剛、吉村裕正、
川合秀明、工藤玲、行本誠史、出牛真、小池
真: 気象研究所地球システムモデルによる
ブラックカーボンの空間分布と放射効果,
日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 2017
(21) Letu, H., T. M. Nagao, T. Y. Nakajima,
H. Ishimoto, J. Riedi, H. Shang, and L.
Chen: Retrieval of ice cloud properties
from Himawari-8/AHI --Investigation of
the DC cloud' s generation process, EGU
Meeting (国際学会) , 2017

[その他]

ホームページ等

<http://www-aos.eps.s.u-tokyo.ac.jp/~koike/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

① 谷本 陽一 (TANIMOTO Youichi)

北海道大学・地球環境科学研究所・教授
研究者番号: 00291568

② 中村 尚 (NAKAMURA Hisashi)

東京大学・先端科学技術研究センター・教
授
研究者番号: 10251406

③ 中村 卓司 (NAKAMURA Takuji)

国立極地研究所・研究教育系・所長
研究者番号: 40217857

④ 松井 仁志 (MATSUI Hitoshi)

名古屋大学・環境学研究科・助教
研究者番号: 50549508

⑤ 大島 長 (OSHIMA Naga)

気象庁気象研究所・環境・応用気象研究
部・主任研究官
研究者番号: 50590064

⑥ 中島 孝 (NAKAJIMA Takashi)

東海大学・情報理工学部・教授
研究者番号: 70408029