

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：82109

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656075

研究課題名(和文) 大気微量成分の衛星観測を事前評価するシステムの構築

研究課題名(英文) Development of a satellite OSSE system for atmospheric constituent observations

研究代表者

関山 剛 (SEKIYAMA, Tsuyoshi)

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：90354498

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：観測システムシミュレーション実験(OSSE)によって衛星エアロゾル観測の事前評価を行った。この実験ではNASA/CALIPSO搭載のライダー観測機器が全球エアロゾルモデルによって擬似的に再現され、東アジア上空のエアロゾル分布の比較によってCALIPSOデータの有効性が調べられた。疑似CALIPSOデータの情報を反映させた解析値では、反映させなかった解析結果に比べて、硫酸エアロゾル分布と黄砂分布の推定誤差がどちらも格段に小さくなった。このOSSEの結果によってCALIPSOの有効性を強く示すことができた。同様の手法を使うことによって、他の地球観測衛星を事前評価することも可能であろう。

研究成果の概要(英文)：A satellite-borne aerosol observation system was assessed by observing system simulation experiments (OSSEs), in which the lidar instrument of CALIPSO/NASA satellite was emulated by a global aerosol simulation model. Its performance over a three-month period was validated using aerosol optical thickness (AOT) distributions in East Asia. The analysis derived from the emulated CALIPSO data demonstrated the ability to produce better analyses of sulfate and dust aerosols in comparison to the analysis without CALIPSO data. This result presents great possibilities for the beneficial use of the satellite lidar data. The OSSE results strongly suggest that the use of real CALIPSO data will have a beneficial effect on obtaining more accurate sulfate and dust aerosol analyses. The use of the same OSSE technique will allow us to perform a prior assessment of the next-generation lidar satellite EarthCARE, which will be launched in 2016.

研究分野：大気化学

キーワード：事前評価システム エアロゾル 衛星観測 データ同化 観測システムシミュレーション実験 OSSE

## 1. 研究開始当初の背景

地球科学の観測には期待される成果というものがあり、そのために計画と準備が行われる。特に現代の衛星観測やネットワーク観測では莫大な資金がつかみ込まれ、長い年月をかけてその準備が行われる。では、その観測衛星が打ち上げられ(ネットワークが整備され)観測が行われたとして、その観測データは必ず期待された知見をもたらしてくれるのだろうか。答えは否である。原因は何であろう。

一つには、測器の性能や寿命が予想を裏切った場合である。これは、ある程度は、仕方がない。宇宙空間や僻地といった極限環境での機器の動作をすべて事前予測することは困難であるからだ。一方、とりあえず測器は動いてくれたのに(ある程度の測器性能は得られたのに)観測データが期待したほどの新しい知見をもたらさない場合がある。特にこれは細かいプロセス解明(いわゆる虫の目)を試みた場合ではなく、メソあるいは総観規模現象の全体的把握(いわゆる鳥の目)を試みた場合に顕著である。ではこの「予想外」も仕方がないのであるだろうか。否、この失敗は理論的にはかなりの程度で事前に評価可能である。

実際、気象予報の分野ではその事前評価の技術が実用化されつつある。その技術を大気環境の研究にも応用できるのではないか。

## 2. 研究の目的

今日の大気エアロゾル衛星観測を考えると、鳥の目で見た状況把握が非常に期待される。「そもそもエアロゾルとは何か」「エアロゾルの成長過程は物理化学的にどう説明されるのか」というような虫の目的な研究も重要であるが、それらはすでに地上観測や航空機観測である程度の成果が残されてきている。一方、衛星観測に第一に求められるものはそれらと異なる。

すなわち、エアロゾルプリュームの形や移動を把握し、組成や粒径の広域的な分布を知ることが求められるのだ。それがエアロゾル予報の精度向上につながり、ひいては天気予報モデルや気候予測モデルの精度向上にもつながる。このような鳥の目での衛星観測の場合、新しい観測データは既存の知見に量的なインパクトを与えなければならない。今日では一般的に定性的なエアロゾル情報は既知だからである。

しかし、これまでそのようなインパクトが定量的に見積もられたことはない(少なくとも大気エアロゾル観測に関しては皆無である)。そのような定量的事前把握を実現するのが観測システムシミュレーション実験(OSSE)と呼ばれる擬似観測データ同化実験である。この計算機実験を行えば観測インパクトの定量的評価は可能である。ここで最

も重要な点は、その評価は衛星が打ち上がる前に実行可能であるところだ。すなわち事前評価である。

衛星の開発と打ち上げには莫大な国費が投入される。国民の納めた税金が大量に投入される以上、打ち上げ後に取得が見込まれる情報が現在の知見に与えるインパクトを事前に評価するべきである。基礎研究には無駄が避けられないとはいえ、避けられる無駄は避けなければならない。そして、許容される費用対効果の上限と下限は数値解析によって事前に設定されるべきなのである。本研究ではその数値解析をエアロゾルの観測衛星に関して実行し、その衛星観測の有用性を事前評価することに挑戦する。

(注)エアロゾルとは微小粒子が気体中を浮遊している状態を指し、地球大気のエアロゾルでは、その粒子サイズは数十 nm から数十  $\mu\text{m}$  程度である。このエアロゾル微小粒子は大気中で雲の形成に関わり、太陽光の散乱吸収を通じて気候に大きな影響を与えている。

## 3. 研究の方法

### (1)

本研究では、大気エアロゾル衛星観測システムの有用性を打ち上げ前に評価するため、観測システムシミュレーション実験(OSSE)を行う。OSSEの作業を簡単に説明すると以下のようになる。

- ・全球エアロゾル化学輸送モデルを用いてエアロゾルと雲のシミュレーションを行う(=ネイチャーランの作成)

- ・評価対象の衛星の観測行為をシミュレートするプログラム(観測演算子)を作成する

- ・ネイチャーランの結果と観測演算子を用いて、エアロゾルの擬似観測値を作成する(この値には雲によるノイズや欠測、ランダムな観測誤差も疑似的に加える)

- ・この擬似観測値を用いてアンサンブル・カルマン・フィルタによるデータ同化解析を行い、エアロゾルの解析値を作成する

- ・この解析値とネイチャーランを比較して、解析値の精度を定量化する(実験条件を変化させることによってどのように精度が向上/低下するのかを調べる)

(注)データ同化とは地球科学の分野で観測と数値モデルを融合するために使われるフィルタリング技術のこと。

### (2)

OSSEとは、現実には存在しない観測をデータ同化した場合に、その観測が解析値の精度に与えるインパクトを調べるための計算機実験である。それは理想化された環境、すなわち地球大気の真の状態(真値)がすべて既知の状態を仮想し、その真値から擬似的に観測値を作成し、それをデータ同化することで擬似的な解析値を算出し、その精度を真値と比較して調べることによって擬似観測の有用性を評価する。この真値は通常、初期条件や

境界条件をすべて制御したモデルシミュレーションによって作成される(いわゆるバーチャルワールド=計算機の中の地球である)。

本研究では、JAXA が当初 2013 年頃に打ち上げを予定していた大気エアロゾル観測衛星 (EarthCARE) の OSSE を実行し、事前評価することを計画していた。しかしその打ち上げが 2016 年以降に延期されてしまった。OSSE による事前評価が正しかったかどうかの検証は実際に衛星が打ち上げられなければ行うことができない。もし EarthCARE の OSSE を行ったとしても、その OSSE の結果が正しかったかどうかが科研費の実施期間内に判明しなければ、単なる自己満足の研究になってしまう可能性がある。したがって、当初の本研究計画を変更し、すでに打ち上げられ順調に機能している米国 NASA の大気エアロゾル観測衛星 (CALIPSO) の OSSE を行うこととした。CALIPSO による観測が存在した場合としない場合の差を理論的に計算し(これがすなわち OSSE である)その結果を現実の CALIPSO 観測の解析作業と比較する。現実の CALIPSO 観測はこれまで多くの研究者によって解析が行われ、非常に多くのエアロゾル情報を提供してきている。したがって、OSSE によってそのような CALIPSO 観測の重要性を示すことができるかどうか、この萌芽研究の成否を決めると言える。もし CALIPSO の OSSE が成功したならば、おそらく EarthCARE の OSSE も成功するだろうと期待できる。

### (3) 実際の作業手順

気象研究所がこれまで開発してきた全球エアロゾル化学輸送モデルを使い、1 年分のエアロゾルと雲のシミュレーション計算を行った。その計算結果はすべてのモデル変数値をすべてのタイムステップにおいて保管した。モデルの水平解像度は 200km 程度、エアロゾルの種別は鉱物粒子 / 硫酸塩 / 海塩 / 黒色炭素 / 有機炭素を区別した。このシミュレーション計算はネイチャーランと呼ばれ、その結果がすなわち擬似観測の舞台となる仮想地球である。この仮想地球では地球大気すべての真の状態(真値)が既知であると仮定される。

気象研究所がこれまで開発してきたアンサンブル・カルマン・フィルタ 4 次元データ同化システム [Sekiyama et al., 2010] をそのまま本研究に流用した。その CALIPSO 用観測演算子(観測行為をシミュレートする計算プログラム=最新のデータ同化には必須)を上記のネイチャーランに適用し、エアロゾルの擬似観測値を作成した。この値にはランダムな観測誤差だけでなく、仮想地球の雲によるノイズや欠測も加える必要があるが、この作業には雲ノイズ擬似生成スキームを新規開発して対処した。CALIPSO の測器光学特性と軌道要素については NASA から公表されているデータを利用することによって CALIPSO の存在を擬似的に再現することがで

きた。この擬似観測値を用いてエアロゾルデータ同化を実行し、CALIPSO 観測が含まれた解析値(および CALIPSO 観測値の情報が含まれていない解析値)を作成した。また、実際に打ち上げられた CALIPSO は 1 台だけであるが、もし同じ性能の衛星が 4 台打ち上げられていたらどのような解析値が得られたはずなのかも計算した。このような計算は OSSE でなければ不可能である。

このようにして作成したエアロゾルの解析値とネイチャーラン(=疑似世界の真値)の比較を行い(その際、二乗平均平方根誤差や相関係数の比較、プリュームの図形認識解析いわゆる MODE 解析などを利用)その解析精度を定量的に調べた。CALIPSO 観測の存在によってネイチャーランが高精度に再現できれば、CALIPSO 観測には大きな存在価値があると判断できる。

### 4. 研究成果

全球のエアロゾル分布は非常に複雑であるため、解析の代表例として 2000 年代中頃の東アジアにおける鉱物粒子エアロゾルと硫酸塩エアロゾルに焦点を当てた解析結果を以下に示す [Sekiyama et al., 2012]。鉱物粒子エアロゾルは一般に黄砂と呼ばれており、硫酸エアロゾルは PM2.5 の主成分である。どちらも東アジアにおける大気汚染の要因として重要である。また、プリュームの形や位置はエアロゾル光学的厚さ(AOT)の分布をもとに算出した。

図 1 はある年の 3 月から 5 月までに(ネイチャーランの世界の)東アジアで発生した硫酸エアロゾルについて、そのプリュームの再現精度を解析した結果である。プリュームの中心位置の誤差、プリュームの面積の誤差、プリュームの強度(=エアロゾルの濃さ)の誤差、どれをとっても CALIPSO が無い場合よりも CALIPSO が存在する場合の方が再現精度は高い。特に面積、すなわち大気汚染の広がりについては CALIPSO 観測のデータが存在することによって約 2 倍も精度が良くなっている。

図 2 は同様に、ある年の 3 月から 5 月までに(ネイチャーランの世界の)東アジアで発生した鉱物粒子エアロゾル(黄砂)について、そのプリュームの再現精度を解析した結果である。プリュームの中心位置の誤差、プリュームの面積の誤差、プリュームの強度(=エアロゾルの濃さ)の誤差、どれをとっても CALIPSO が無い場合よりも CALIPSO が存在する場合の方が再現精度は高い。図 1 に比べて図 2 は欠測が多いように見えるのは、定常的に発生する PM2.5 に対して黄砂は間欠的に発生する現象であるためである。黄砂が発生していない期間についてはそのプリュームの解析はできない。図 2 を見ると、黄砂プリュームの場合は面積だけでなく中心位置の精度が CALIPSO によって劇的に改善していることが分かる。CALIPSO 観測情報が存在してい

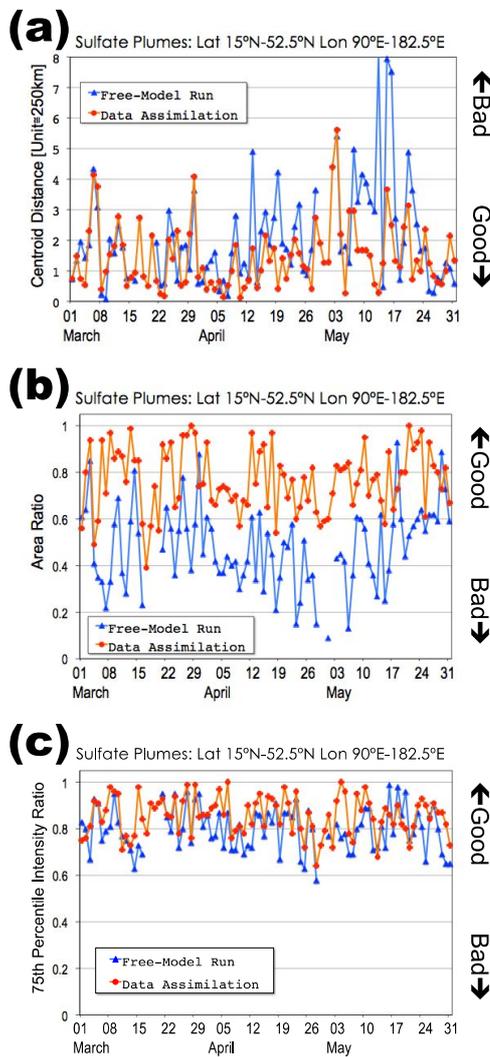


図 1 . ある年の 3 月から 5 月において東アジアで発生した硫酸エアロゾルプリュームの解析精度 ( = ネイチャーランとの差 ) 。青線は CALIPSO 観測データを反映させていない場合、赤線は CALIPSO 観測データを反映させた場合。(a) プリュームの中心位置の誤差、ただし縦軸の 1 ユニットは約 250km、(b) プリュームの面積の誤差、縦軸の単位は真値との比、(c) プリュームの強度 ( = エアロゾルの濃さ ) の誤差、縦軸の単位は 75 パーセントイル強度の真値との差。

ない場合はプリュームの位置は 500km から 1000km の解析誤差を持っていたのに対し、図 CALIPSO 観測情報を活用 ( = データ同化に利用 ) することによって位置誤差が 100km 程度に低下している。

以上の OSSE で示したのは CALIPSO が現実と同じ 1 台のみ存在する場合の評価結果である。一方、図 3 および図 4 は CALIPSO が 4 台存在した場合の評価結果を示している。これは黄砂の発生量の推定精度をプロットしており、ある黄砂発生イベントにおいてゴビ砂漠全域における黄砂総発生量の推移を 4 日間あるいは 7 日間追跡している。ネイチャーラ

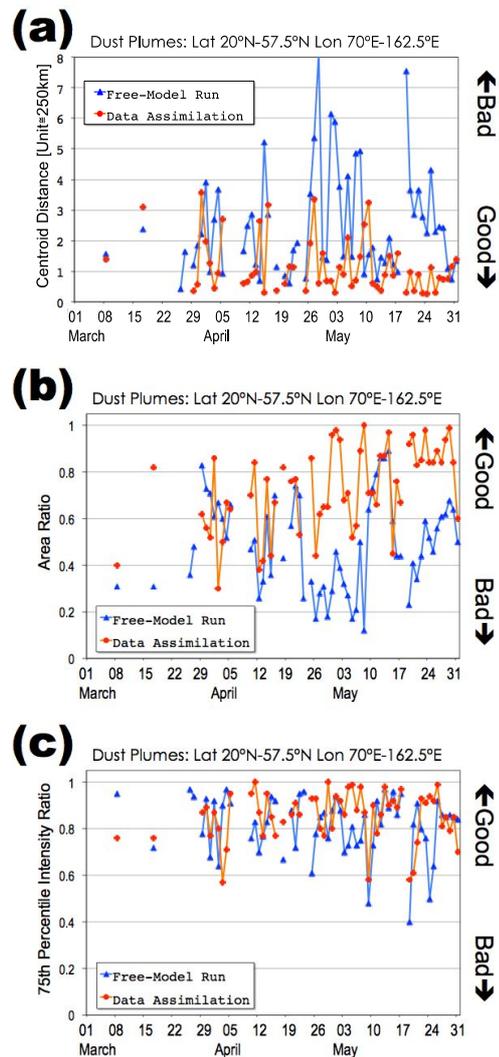


図 2 . ある年の 3 月から 5 月において東アジアで発生した鉱物粒子エアロゾル ( = 黄砂 ) プリュームの解析精度 ( = ネイチャーランとの差 ) 。青線は CALIPSO 観測データを反映させていない場合、赤線は CALIPSO 観測データを反映させた場合。(a) プリュームの中心位置の誤差、ただし縦軸の 1 ユニットは約 250km、(b) プリュームの面積の誤差、縦軸の単位は真値との比、(c) プリュームの強度 ( = エアロゾルの濃さ ) の誤差、縦軸の単位は 75 パーセントイル強度の真値との差。

ンは OSSE の世界の真値であるから、推定値がこれに近ければ解析精度が高いということになる。これらの結果によると、CALIPSO が 1 台だけでも黄砂発生量の推定精度は改善するが、もし 4 台打ち上げられていればさらに改善する場合もあることが分かる。その改善の程度が定量的に示されていることは非常に重要であり、OSSE の将来性を示している (ただし、残念ながら CALIPSO が 4 台打ち上げられる計画はないので検証は不可能)。

以上の実験結果から、CALIPSO 観測データの有用性を、実際の観測データを用いることなく、示すことができた。すなわち、エアロ

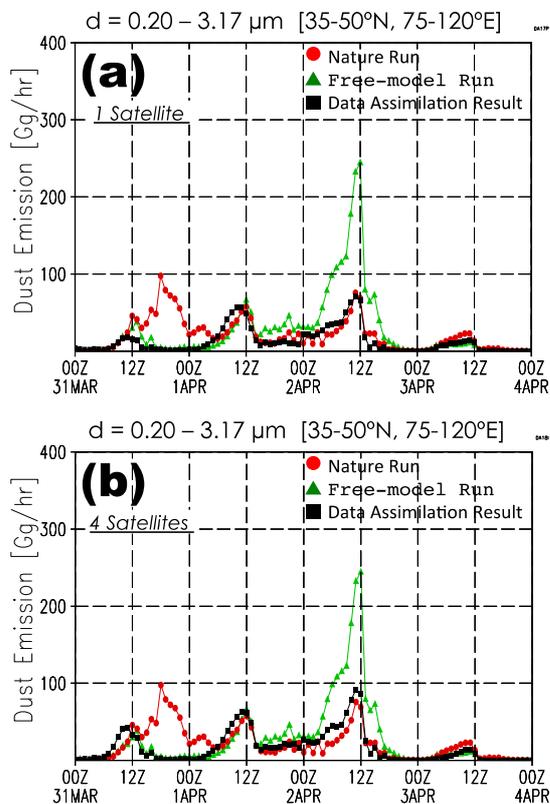


図3. ある年の3月31日から4月3日にかけてゴビ砂漠全域において発生した鉱物粒子エアロゾル (= 黄砂) の推定量。赤線はネイチャーラン (= 仮想世界の真値)、緑線はCALIPSO 観測データが反映されなかった場合の推定値、黒線はCALIPSO 観測データが反映された推定値。(a) CALIPSO が1台だけ存在する場合、(b) CALIPSO が4台 (軌道間隔 90°) 存在する場合。

ゾル観測衛星の事前評価を行うという研究計画は達成されたと考えられる。このようなエアロゾル観測に関する OSSE が行われたのは世界初の例であると思われる。気象予報の分野では OSSE の手法を用いた観測網の事前評価が一般的に利用されているように、今後はエアロゾル観測の分野でも OSSE が一般化されることになろう。本研究はその先鞭を付けたと評価できる。

#### < 引用文献 >

Sekiyama, et al., Data assimilation of CALIPSO aerosol observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **10**, 39-49, 2010.

Sekiyama et al., A simulation study of the ensemble-based data assimilation of satellite-borne lidar aerosol observations, *Geoscientific Model Development Discussions*, **5**, 1877-1947, 2012.

#### 5. 主な発表論文等

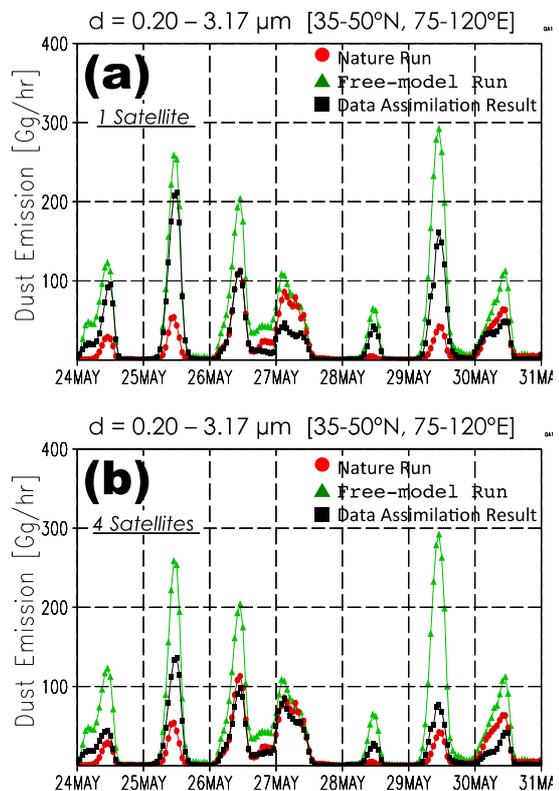


図4. ある年の5月24日から31日にかけてゴビ砂漠全域において発生した鉱物粒子エアロゾル (= 黄砂) の推定量。赤線はネイチャーラン (= 仮想世界の真値)、緑線はCALIPSO 観測データが反映されなかった場合の推定値、黒線はCALIPSO 観測データが反映された推定値。(a) CALIPSO が1台だけ存在する場合、(b) CALIPSO が4台 (軌道間隔 90°) 存在する場合。

(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 3 件)

Sessions, W.R., J.S. Reid, A. Benedetti, P.R. Colarco, A. da Silva, S. Lu, T. Sekiyama, T.Y. Tanaka, J.M. Baldasano, S. Basart, M.E. Brooks, T.F. Eck, M. Iredell, J.A. Hansen, O.C. Jorba, H.-M.H. Juang, P. Lynch, J.-J. Morcrette, S. Moorthi, J. Mulcahy, Y. Pradhan, M. Razinger, C.B. Sampson, J. Wang, D.L. Westphal: Development towards a global operational aerosol consensus: basic climatological characteristics of the International Cooperative for Aerosol Prediction Multi-Model Ensemble (ICAP-MME), *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**, 335-362, doi:10.5194/acp-15-335-2015, 2015. 査読有り

Colarco, P., A. Benedetti, J. Reid and

T. Tanaka: Using EOS Data to Improve Aerosol Forecasting: The International Cooperative for Aerosol Prediction (ICAP), *The Earth Observer*, **26(5)**, 14-19, [http://eospsso.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/eo\\_pdfs/September\\_October\\_2014\\_color508.pdf](http://eospsso.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/eo_pdfs/September_October_2014_color508.pdf), 2014. 査読無し

Sekiyama, T. T., T. Y. Tanaka, and T. Miyoshi, A simulation study of the ensemble-based data assimilation of satellite-borne lidar aerosol observations, *Geoscientific Model Development Discussions*, **5**, 1877-1947, doi:10.5194/gmdd-5-1877-2012, 2012. 査読有り

〔学会発表〕(計 8 件)

Tanaka, T.Y.: Updates of the aerosol prediction in Japan Meteorological Agency, International Cooperative for Aerosol Prediction (ICAP) 6th working group meeting, ボウルダー (米国コロラド州), 2014年10月21日.

Yumimoto, K.: Experiences from data assimilation experiments with CTM, Joint seminar for Asian dust and aerosol modeling, Koran Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS), ソウル (大韓民国), 2014年8月21日.

Yumimoto, K.: Experiences from several data assimilation methods: ground-based lidar 4D-Var and MODIS AOD LETKF, International Cooperative for Aerosol Prediction (ICAP) 5th working group meeting, エポカルつくば (茨城県つくば市), 2013年11月5日.

田中泰宙: 汚染混合黄砂の数値モデル研究: 2013年1月の大気汚染事例, 日本気象学会 2013年春季大会, 国立オリンピック記念青少年総合センター (東京都渋谷区), 2013年5月17日.

Sekiyama, T.T.: Data Assimilation of Lidar Aerosol Observations, AICS International Workshop on Data Assimilation, 計算化学研究機構 (兵庫県神戸市), 2013年2月27日.

Sekiyama, T.T., A simulation study of the ensemble-based data assimilation of satellite-borne lidar aerosol observations, 93rd AMS annual meeting, オースティン (米国テキサス州), 2013年1月5日.

関山剛: アンサンブル・カルマン・フィ

ルタによる CALIPSO エアロゾル観測のデータ同化, 日本気象学会 2012 年度秋季大会, 北海道大学 (北海道札幌市), 2012 年 10 月 3 日.

Tanaka, T.Y.: Current status and updates of the aerosol forecast in Japan Meteorological Agency, 4th International Cooperative for Aerosol Prediction (ICAP) Workshop, フラスカーティ (イタリア), 2012 年 5 月 14 日.

〔図書〕(計 1 件)

A. Benedetti, J.M. Baldasano, S. Basart, F. Benincasa, O. Boucher, M.E. Brooks, J.-P. Chen, P.R. Colarco, S. Gong, N. Huneus, L. Jones, S. Lu, L. Menut, J.-J. Morcrette, J. Mulcahy, S. Nickovic, C.P. Garcia-Pando, J.S. Reid, T.T. Sekiyama, T.Y. Tanaka, E. Terradellas, D.L. Westphal, X.-Y. Zhang, C.-H. Zhou, Operational Dust Prediction, 223-265, *Mineral Dust: A Key Player in the Earth System*, 1st edition, Peter Knippertz and Jan-Berend W. Stuut edited, Springer, Netherlands, 2014.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

関山 剛 (SEKIYAMA, Tsuyoshi)  
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: 90354498

### (2) 研究分担者

田中 泰宙 (TANAKA, Yasumichi)  
気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・併任職員  
研究者番号: 50435591

### (3) 研究協力者

小木 昭典 (OGI, Akinori)  
気象庁・地球環境・海洋部・係員

弓本 桂也 (YUMIMOTO, Keiya)  
気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・主任研究官