

氏名・(本籍)	せき やま つよし 関 山 剛
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理第1251号
学位授与年月日	平成25年1月23日
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Data assimilation of satellite-borne lidar aerosol observations and its validation with Asian Dust (衛星搭載ライダーによるエアロゾル観測のデータ同化と黄砂による検証)
論文審査委員	(主査) 教授 岩崎俊樹 教授 青木周司 教授 早坂忠裕 准教授 山崎剛 准教授 余偉明

## 論文目次

Abstract	i
Contents	iii
List of Figures	v
List of Tables	vii
Acknowledgments	viii
<b>1. Introduction</b>	<b>1</b>
1.1. Background	1
1.2. Objectives	4
1.3. General Methodology	6
1.4. Outline of Thesis	11
<b>2. Simulation Study on EnKF Data Assimilation of Satellite- Borne Lidar Aerosol Observations</b>	<b>15</b>
2.1. Introduction	15
<b>3. Data Assimilation of Real Satellite-Borne Lidar Aerosol Observations</b>	<b>16</b>
3.1. Introduction	16
3.2. Description of the Data Assimilation System	18
3.2.1. Observational Data	18
3.2.2. Data Assimilation Scheme	19
3.2.3. Experimental Design	22
3.3. Results and Discussion	23
3.3.1. Comparison with CALIPSO data	23

3.3.2. Comparison with Ground-Based Lidar Observations	25
3.3.3. Comparison with Weather Reports	26
3.4. Summary	27
<b>4. Dust Emission Estimation by Data Assimilation</b>	<b>36</b>
4.1. Introduction	36
4.2. Effects of Snow Cover and Soil Moisture on Asian Dust	37
4.3. Methodology	38
4.4. Results and discussion	40
4.4.1. Case Studies	40
4.4.2. Comparison with Another Inversion Analysis Result	41
4.4.3. Comparison with Independent Lidar Observations	43
4.5. Conclusion	43
<b>5. Summary</b>	<b>53</b>
5.1. Conclusions	53
5.2. Future Directions	54
References	56

## 論文内容要旨

我々は衛星搭載ライダーによるエアロゾル観測のための四次元アンサンブル型データ同化システムを開発した。このシステムは局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF)、全球エアロゾルモデル、およびライダー観測をエミュレートする観測演算子から成っている。まず初めに我々は、観測システムシミュレーション実験 (OSSE) を利用して衛星搭載ライダーの疑似エアロゾル観測を用意し、データ同化システムの動作確認を行った。この OSSE ではライダー搭載人工衛星 CALIPSO のレベル 1 B データを模倣した。レベル 1 B データにはリトリーブ処理を受けていない減衰後方散乱係数 (532nm と 1064nm) および偏光解消度 (532nm) が含まれている。この疑似観測データ同化実験のパフォーマンス評価は MODE (オブジェクト認識による診断評価法) によって行った。その際、解析対象としたのは東アジア域の硫酸およびダストエアロゾルの光学的厚さ分布である。システムは OSSE の実験条件下で問題なく動作し、データ同化無しの場合よりも精度良くエアロゾルプリュームの解析値を作成することに成功した。例えば、エアロゾルプリュームの重心間距離 (解析値と真値との差) の 3ヶ月平均は、硫酸エアロゾルの場合に 600km から 400km へ、ダストエアロゾルの場合に 750km から 330km へ改善した。また、エアロゾルプリュームの面積比 (解析値と真値との比) の 3ヶ月平均は、硫酸エアロゾルの場合に 0.49 から 0.76 へ、ダストエアロゾルの場合に 0.51 から 0.72 へ改善した。この時、エアロゾルプリュームの解析値が改善するだけでなく、ダスト放出量の逆推定値も改善することが真値との比較によって示された。これら OSSE の結果から、このデータ同化システムは実際の CALIPSO 観測値を使用した場合にも適切に動作するであろうことが強く示唆された。さらに、OSSE による感度試験を行うことによって、LETKF の共分散膨張率および局所化の最適なパラメータ設定を探ることができ、アンサンブルメンバーの減少や観測データの減少に対するシステムの性能劣化の度合いを見積もることができた。著者らの知る限り、エアロゾル観測の光学特性や雲の影響を適切に取り扱った OSSE は本研究が最初である。

その次に、我々はこのデータ同化システムを2007年春季における実際の CALIPSO エアロゾル観測に適用し、その結果を2種類の独立観測によって検証した。一つは国立環境研究所の地上設置ライダー観測からリトリーブされた消散係数の鉛直分布（ダストおよび球形エアロゾル）であり、もう一つは気象庁による目視黄砂観測である。検証の結果、リトリーブ処理を行っていないライダー観測値（CALIPSO レベル1B データ）からもデータ同化によってエアロゾル粒子のタイプ判別が可能であり、黄砂発生域から大陸や海洋を超えて流出するダストプルームの時空間的構造が詳細に再現可能であることが分かった。例えば、気象予報の検証でしばしば使われるスレットスコア（0 から 1 まで変動；1 が最高点）を算出して調べたところ、2007年5月28日に日本列島を覆ったダストプルームの再現ではデータ同化によってスコアが0.42 から 0.74 へ劇的に改善した。衛星搭載ライダーは鉛直および時間分解能は非常に高いが観測の水平分布が極めて疎であるため利用が難しい。しかし本研究の結果からその有効利用がデータ同化によって可能であることが示された。ここで作成されたエアロゾル解析値はエアロゾル予報の初期値としても利用可能であり、観測の得られない遠隔地や雲で覆われた地域においても予報初期値を提供できる。著者らの知る限り、CALIPSO のエアロゾル観測をデータ同化することに成功したのは本研究が最初である。

最後に、我々は上記と同じデータ同化システムと CALIPSO エアロゾル観測を用いて2007年春季における黄砂の放出量逆推定を行った。この実験ではダスト放出量の誤差は主にモデル内の積雪と土壤水分量の不確実性に起因しているという仮定を置いてデータ同化によるパラメータ推定を行った。また、ここで用いたデータ同化システムにはモデルバイアス補正スキームと one-way 変数局所化と呼ばれるスキームを組み込んだ。one-way 変数局所化とは気象場の客観解析値をエアロゾル観測値と同時にデータ同化し、それにより得られる風向とエアロゾル濃度との間の共分散情報だけをエアロゾル解析に利用する手法である。モデルバイアス補正と変数局所化によって同化計算の発散が押さえられ、データ同化システムの安定性が増加した。黄砂放出量の推定結果は風下における地上設置ライダーの独立観測と比較することによって検証した。2007年3月に複数回発生した黄砂イベントの再現において、データ同化を行わない場合はゴビ地域における土壤水分量の過大評価によってダスト放出量は極めて過小評価になるのだが、データ同化による放出量の補正を行うことによって、再現される黄砂イベントが観測とほぼ一致するようになった。また、この CALIPSO データ同化によって推定されたゴビ地域におけるダスト放出量分布は、この推定とは全く独立に行われた異なる手法によるダスト放出量逆解析法の推定結果と良い一致を示した。これらの結果から、衛星搭載ライダー観測のデータ同化によってエアロゾルプルームの上流情報を再構築することが現実に可能であることが示された。

この学位論文ではエアロゾル科学の探究において最新のデータ同化スキームと衛星観測データの組み合わせが潜在的に素晴らしい可能性を秘めていることが示された。本研究から生み出されたプロダクトは気候変動、気象予報、大気汚染、海洋生物学、農業、公衆衛生など幅広い研究分野に対して貢献可能であろう。

## 論文審査の結果の要旨

本研究では、全球化学輸送数値モデルとアンサンブルカルマンフィルターを利用し、エアロゾルの4次元データ同化システムを開発し、黄砂の事例についてその精度を評価した。とくに、CALIPSO 衛星 (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) によるライダー後方散乱観測のデータ同化に世界で初めて成功した。

まず、CALIPSO 搭載のライダーの後方散乱を想定した観測演算子を開発し、データ同化システムに組み込んだ。CALIPSO は衛星軌道に沿う断面を観測するが、それを数値モデルに同化することによって、エアロゾルの合理的な3次元分布を再現することができる。このデータ同化システムを用いて観測システムシミュレーション実験 (OSSE) を行った。OSSE とは、数値モデルのシミュレーション結果を真値と仮定し、それに基づいて作成した架空の観測データを利用したデータ同化実験である。真値との比較を通じて、システムの動作を確認し、データ同化パラメータおよび観測演算子を最適化した。

次に、当該システムを用いて CALIPSO の実際の観測データの同化実験を行った。日本周辺で黄砂が観測された事例について、データ同化結果と数値モデルで単純に再現した結果を比べると、黄砂の地理的な分布に大きな相違が見られた。気象官署の黄砂観測や地上に設置したライダー観測による検証では、データ同化を行った場合の方が観測データとよく整合した。衛星搭載ライダー観測のデータ同化はエアロゾルの実況監視に極めて有効であることが示された。

さらに、このデータ同化システムを用いて、エアロゾルの発生源の逆推定を試みた。逆推定された発生量を、数値モデルで診断した発生量と比べた結果、やや大きな誤差が見出された。数値モデルのパラメータゼーションに関する考察から、誤差は再現された積雪量や土壌水分量の不確実性と関連すると推定した。比較を通じて、数値モデルの誤差要因を詳しく調べることにより、数値モデルを改善することが期待される。

本研究の成果に基づき、気象庁では、エアロゾルの実況監視システムの現業化に取り組んでいる。このシステムが実用化すれば、黄砂予報を改善することが期待される。ダストエアロゾルの問題は黄砂のみならず世界中に存在する。本研究の成果は、グローバルな地球環境問題の基礎資料として有効である。以上の研究成果は、自立して研究活動を行うのに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、関山剛提出の博士論文は、博士 (理学) の学位論文として合格と認める。