

機関番号：82109

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740275

研究課題名 (和文) 高精度データ同化システムの開発による大気微量成分の濃度予測可能性の検証

研究課題名 (英文) Predictability of atmospheric minor constituents validated by a high-performance data assimilation system

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

研究成果の概要(和文):最先端の数値統計手法であるアンサンブル・カルマン・フィルタを用いて大気微量成分のデータ同化システムを新規開発した。データ同化とは観測結果とモデルシミュレーション結果を融合する技術である。そのシステムを使って成層圏オゾンおよび対流圏エアロゾルの濃度解析値を作成し、その解析値を予測計算の初期値として利用した。その結果、数時間～数日後のオゾン層および黄砂エアロゾル濃度予測精度が劇的に改善されることが確認された。

研究成果の概要(英文):We developed a data assimilation system for atmospheric minor constituents using the Ensemble Kalman filter that is an advanced mathematical statistic scheme. Data assimilation is an informational technology, which merges model simulation results and observation results. The analyses of stratospheric ozone and tropospheric aerosol concentrations were calculated by this data assimilation system. We performed numerical hindcast simulations of the ozone layer and dust aerosol using those analyses as initial conditions. Consequently, the ozone/dust predictability in several hours/several days was evidently improved.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	0	1,100,000
2009年度	1,200,000	0	1,200,000
2010年度	800,000	0	800,000
総計	3,100,000	0	3,100,000

研究分野:数物系科学A

科研費の分科・細目:地球惑星科学 気象・海洋物理・陸水学

キーワード:大気化学、データ同化

1. 研究開始当初の背景

一般的に大気化学を含む地球物理学分野の研究では再現実験が困難である。また現象のスケールが巨大であることから十分な質と量の観測を確保できないことが多い。このような背景から、この分野では理論および観測とともにシミュレーションモデルによる数値実験が重要な研究手法として用いられてきた。さらにその中でも気象予測の分野では社会的な実利面での要請に応えるため、観測空白域の情報を数値シミュレーションによって補完するデータ同化の技術が

非常に発達し、今日では精密な客観解析値の作成と天気予報への応用が行われている。

しかし、大気化学分野においてはデータ同化の開発と利用は遅れてきた。理由の一つには、化学反応を始めとする現象の複雑さが要因となってシミュレーションモデルの高精度化が難しくなったこと、また大気微量成分の測定の困難さが要因となって観測データの不足が極めて深刻であり、その結果として計算機負荷の低いデータ同化手法が採用できなかったことが挙げられる。

しかしながら、最近では徐々にではあるが、人

工衛星や航空機による観測、地上からのリモートセンシングなどにより、大気化学観測データは蓄積され始めている。また、かつては気象分野で開発されたデータ同化システムの大気化学への応用は膨大な計算機負荷をもたらすため技術的に困難とされてきたが、昨今の計算機の高性能化によって技術的な障壁が低くなっている。そのため、大気化学分野における高精度データ同化システムの開発は世界的に喫緊の課題とされている。

さらに、データ同化技術が注目される最大の理由はその「初期値」作成能力である。大気のようなカオス的振る舞いをする非線形系ではその短期予測精度がモデルの性能や境界条件の精度だけでなく、初期条件(初期値)の精度に大きく依存する(いわゆるバタフライ効果)。予測可能性における初期値依存性を調べるには、初期値を様々な条件において用意する必要がある。より高い精度の初期値を誤差情報も含めて入手できれば、系の予測可能性をより正確に評価することができる。高精度データ同化システムはまさにそのような初期値の供給が可能な技術である。

日本国内では地球フロンティア、九州大学、東大 CCSR において大気化学分野での高精度データ同化システムの開発が始まったようだが、残念ながら未だ完成に至ったものは皆無である。

2. 研究の目的

(1) アンサンブル・カルマン・フィルターの大気微量成分データ同化への実装実現

アンサンブル・カルマン・フィルターは高精度データ同化システム実装法の一つとして主に気象予報分野での適用・検証が進められているが、大気化学分野への応用は世界的にも開発競争の途上である。気象要素と異なり、観測地点数が少なく、非線形的な生成・消滅プロセスが複雑に関与する大気微量成分に対してアンサンブル・カルマン・フィルターのような複雑なデータ同化手法を適用することはそれ自体が技術的に挑戦的なことであり、成功した場合の科学的・技術的貢献は大きい。

このシステム開発が成功すれば大気微量成分の精密な客観解析値が得られ、観測と数値シミュレーションという二つの研究アプローチの相補的な統合がこれまで以上に高い精度で可能となり、観測空白域の情報を手に入れたいという大気化学研究の積年の夢が本格的に実現する。これまでもカルマン・フィルターや変分法といった高度な手法を用いて、成層圏オゾンやその関連物質のデータ同化を行った例や、二酸化炭素の地表面濃度分布時系列の作成例などが知られているが、どれも時間・化学要素・空間的な広がり限定されていた。また大気微量成分の客観解析値を広範囲に作成した例として成層圏オゾン分布があるが、その同化手法は成層圏オ

ゾン以外への応用性が低い。本研究では研究協力者からの支援のもとに、これら世界的な業績を越える成果を出すことを目指す。

(2) 大気微量成分の予測可能性における初期値依存性の検証

カオス的な振る舞いをする現実大気をシミュレーションモデルによって予測する場合、その予測可能性はモデル自体の性能以外にも境界値と初期値の精度に大きく依存する。しかしながら、モデル内パラメータの調整によって検証できる『予測可能性の境界値問題』に対し、初期値の作成という困難な作業を伴う『予測可能性の初期値問題』は、特に大気化学分野において、これまでほとんど検証されてこなかった。予測可能性の初期値依存性を検証するという事は、大気というカオス系の時間発展を定量的に把握するということであり、基礎科学的にも応用科学的にも重要な知見となる。

大気微量成分の精密な客観解析値を過去にさかのぼって作成することによって、モデル予測実験(ハインドキャスト)の初期値を大量に得ることができ、予測可能性の初期値問題を豊富な事例で詳細に検証することが可能となる。さらに、アンサンブル・カルマン・フィルターではそのデータ同化計算過程において全空間でのモデル予測及び解析誤差情報が得られるが、それらの情報を利用してオゾンやエアロゾルなどの予測に関する初期値問題を検証した研究はこれまでに行われた例がない。本研究が最初の例となるはずである。

以上の研究成果によって、大気微量成分の濃度予測精度が時間・空間的に変動する特徴を詳細に把握することが可能となる。これは社会的ニーズの大きいオゾン層予測・黄砂予測・オキシダント予測等のシステム構築の基礎資料となる。

3. 研究の方法

(1) アンサンブル・カルマン・フィルターを実装するデータ同化システムの開発は以下の手順で行われた。

①気象研究所においてこれまでに開発された成層圏オゾンモデル(CCM1)および対流圏エアロゾルモデル(MASINGAR)を基本シミュレーションモデルとして利用し、②気象庁数値予報課において開発が進められている局所アンサンブル変換カルマンフィルター(LETKF)を実装スキームとして採用する。③気象庁数値予報課、気象研究所、メリーランド大学のデータ同化研究者との間でソースコードの共有を行うことによって開発負荷を軽減させ、④衛星観測データ(CALIPSO/CALIOP および EP/TOMS)を高度利用するために観測演算子プログラムを独自開発することによって成層圏オゾンの高精度データ同化システムおよび対流圏エアロゾルの高精度データ同化システムをそれぞれ完成させた。

このデータ同化システムによってオゾンやエア

ロゾルなどの大気微量成分の客観解析値が作成可能となり、数時間～数日先の濃度予測実験を行うための初期値として利用できることとなった。

(2)成層圏オゾン実験

本研究において使用するシミュレーションモデルには、気象研究所の全球オゾンモデル version1(CCM1)を採用した。シミュレーションモデルの気象場(水平風/気温分布)については、ECMWFの再解析値をナッジング(ニュートン緩和法による外部データの取り込み)することによって再現した。

データ同化の対象となる制御変数にはオゾン濃度を設定し、取り込む観測変数には比較的広範囲・高密度の観測値が入手可能な衛星観測オゾン全量(EP/TOMS)を設定した。この全量値の鉛直局所化は行わなかった。すなわち、解析値の鉛直分布は100%アンサンブル・カルマン・フィルターが(モデル結果をもとに)推定したものとなる。

検証データにはEP/TOMS それ自身の値およびオゾンゾンデ観測値を利用した。また、予報精度向上の比較対象として、気象庁オゾン層予測計算モデルと同タイプ(=ナッジングシステム)のモデルを用意した。

過去の客観解析値を初期値として使用し、シミュレーションモデルによる短期予測計算(ハインドキャスト)を行った。ハインドキャストとは過去の出来事の詳細な予測計算を行い(計算中は過去の出来事について未知と仮定)、その結果を既存の観測値で答え合わせをする予測モデル検証手法である。

初期値すなわち客観解析値を作成するにあたり、データ同化の際に用いるアンサンブルメンバー数を様々に変化させ(これは背景誤差の推定精度を変更することに等しい)、さらにデータ同化する観測データ密度を1倍から1/100倍の間で変化させることによって(これは恣意的に観測行為をスクリーニングしていることと同義)、様々な条件の初期値を用意した。

(3)黄砂エアロゾルの実験

本研究において使用するシミュレーションモデルには、気象研究所の全球エアロゾルモデル(MASINGAR)を採用した。シミュレーションモデルの平均気象場(水平風/気温分布)については、気象庁の再解析値をナッジング(ニュートン緩和法による外部データの取り込み)することによって再現した。ただし、アンサンブルメンバー毎の摂動は適宜与えることによって、気象場とエアロゾル濃度との間の共分散情報はデータ同化計算に利用するようにした。

データ同化の対象となる制御変数にはダスト(黄砂)濃度、硫酸エアロゾル濃度、ダスト地表面フラックス強度を設定し、取り込む観測変数には衛星搭載ライダー観測(CALIPSO/CALIOP)による減衰後方散乱係数および偏光消滅度を設定した。

検証データにはCALIPSO/CALIOPとは独立に観測された地上ライダー観測網の消散係数およびSYNOP(WMO地上実況気象通報)観測結果を利用した。2007年春季のエアロゾル客観解析値を初期値として使用し、シミュレーションモデルによるダストエアロゾル(黄砂)の短期予測計算(ハインドキャスト)を行った。

初期値すなわち客観解析値を作成するにあたり、ダスト地表面フラックス強度の拘束条件を変更し、様々な条件のダスト(黄砂)エアロゾル初期値を用意した。

4. 研究成果

(1)成層圏オゾン予報実験結果

人工衛星によるオゾン全量観測値(EP/TOMS)をデータ同化することによって、3ヶ月間の成層圏オゾン解析値を作成した。気象庁現業(紫外線予測)で使用されている簡便なデータ同化手法(ニュートン緩和法)による解析結果と比較して、オゾン全量の解析精度に大幅な改善が見られることを確認した。オゾン全量(成層圏オゾンがその大部分を占める)のみをアンサンブル・カルマン・フィルターによってデータ同化する試みは世界でもおそらく初である。

データ同化の際に用いるアンサンブルメンバー数を様々に変化させた場合(=背景誤差推定精度を変化させた場合)、データ同化サイクル開始直後には短期予報誤差の違いが大きいが(アンサンブルメンバーが多い程解析精度が上がり、その結果予報精度も向上する)、サイクル開始後1~2ヶ月が過ぎてデータ同化サイクルが安定化してしまえばアンサンブルメンバー数の変化は予報誤差の変化に直結しないことが判明した。

データ同化に利用する観測データ密度を1倍から1/100倍の間で変化させた場合も、データ同化サイクル開始直後には短期予報誤差の違いが大きいが(利用可能な観測が多い程解析精度が上がり、その結果予報精度も向上する)、サイクル開始後1~2ヶ月が過ぎてデータ同化サイクルが安定化すると予報精度に大きな差が生じなくなった。

これらの結果はアンサンブル・カルマン・フィルターの性能が極めて高いため、解析値(=予報初期値)の作成条件に関わらず高精度の解析値が作成されてしまうため、安定した予測計算が可能となるからである。この結論は(様々な初期値精度を用意することによって)予測可能性を定量的に検証するという本研究の当初の目標とは少し異なっているが、一方で高精度データ同化システムの高い可能性を実証したと言える。このような高い解析水準のデータセットを作成したことは成層圏オゾンの科学的理解に対して大きな貢献となるであろう。

(2)黄砂エアロゾル予報実験結果

人工衛星搭載のライダー装置(CALIPSO/CALIOP)で測定した観測値をデー

タ同化することによって、12 ヶ月間のダスト(黄砂)／硫酸エアロゾル濃度それぞれの解析値およびダスト(黄砂)発生源推定値を作成した。人工衛星によるエアロゾルのライダー観測値をデータ同化する試みに成功したのはこれが世界初であり、今回作成したエアロゾルの解析値は現時点において世界で最も詳細かつ高精度なものである。ライダー観測は鉛直解像度と時間解像度が極めて高いが水平視野が極端に狭いという特徴があり、その観測データの利用方法が難しいのだが、我々のデータ同化解析によって最大限にその観測情報を活用することが可能となった。この解析値には黄砂および硫酸エアロゾルの大気中濃度分布のほかに、黄砂エアロゾルの発生源(砂漠などの乾燥地表面)における放出強度の推定値も含まれている。この放出強度情報は高精度データ同化システムによる逆解析によって初めて広範囲に得られるようになったものである。

さらに、モデルバイアス(=系統誤差)の動的推定モジュールをシステムに組み込んだことによってデータ同化解析精度、特に黄砂の地表面放出量の解析精度が向上した。このシステムを用いて予測初期値を作成し、2007年3-5月のダスト(黄砂)エアロゾルのハインドキャスト実験を行った。実験結果は東アジアにおける地上ライダー観測結果およびSYNOP(WMO地上実況気象通報)観測結果と比較することによって、特に黄砂予報の検証を行なうことになった。これら独立観測値と予測実験結果を比較することによって、初期値の改善が予測精度の著しい向上に繋がることを確認した。エアロゾル予測の場合、その予測誤差は主に発生量の推定誤差が原因であり、そのエアロゾル発生量の推定誤差は気象要素(大気中の物質の流れを支配する風向風速)の予測誤差に比べてそもそも桁違いに大きいことが確認された。

上記の成果は大気微量成分のデータ同化実験としても世界最高水準の技術力であり、そのプロダクトであるエアロゾル解析値は気候変動予測の研究あるいは中長期天気予報の改善に必須の情報である。また、ダスト(黄砂)エアロゾル分布の予測誤差の原因(=予測可能性の変動要因)を定量的に把握できたことは黄砂現象の科学的理解に対して大きな貢献となった。

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3件)

- ① Sekiyama, T.T., T.Y. Tanaka, T. Maki, and M. Mikami, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, **7A**, 40-43, 2011. (査読有り)
- ② Sekiyama, T.T., M. Deushi, and T. Miyoshi, Operation-Oriented Ensemble Data Assimilation of Total Column Ozone, *Scientific*

Online Letters on the Atmosphere, **7**, 41-44, 2011. (査読有り)

- ③ Sekiyama, T.T., T.Y. Tanaka, A. Shimizu, and T. Miyoshi, Data assimilation of CALIPSO aerosol observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **10**, 39-49, 2010. (査読有り)

[学会発表](計13件)

- ① 関山剛, Dust Aerosol Analysis and Prediction with Lidar Observations and Ensemble Kalman Filter, AGU Fall Meeting 2010, 2010年12月15日, サンフランシスコ(米国)
- ② 関山剛, Overview - MRI/JMA - Asian Dust Simulation, Prediction, and Verification, The Second International Cooperative for Aerosol Prediction (ICAP) Workshop, 2010年10月1日, オクスフォード(イギリス)
- ③ 関山剛, Dust analysis and prediction with ensemble-based data assimilation, 9th AeroCom Workshop, 2010年9月28日, オクスフォード(イギリス)
- ④ 関山剛, Aerosol Data Assimilation with Lidar Observations and Ensemble Kalman Filter, The Second GAW Aerosol Lidar Observation Network (GALION) Workshop, 2010年9月22日, ジュネーブ(スイス)
- ⑤ 関山剛, 大気エアロゾルのデータ同化, 第27回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2010年8月4日, 名古屋(愛知県)
- ⑥ 関山剛, Dust aerosol analysis and prediction with 4D-EnKF data assimilation, EGU General Assembly 2010, 2010年5月4日, ウィーン(オーストリア)
- ⑦ 関山剛, Data Assimilation of CALIPSO Aerosol Observations Using an Ensemble Kalman Filter, 第4回日中韓気象学会共同会議, 2009年11月9日, つくば(茨城県)
- ⑧ 関山剛, ライダーによるエアロゾル観測をアンサンブル・カルマン・フィルタでデータ同化する, 第15回大気化学討論会, 2009年10月20日, つくば(茨城県)
- ⑨ 関山剛, Aerosol Data Assimilation with an Ensemble Kalman Filter Using CALIPSO and Ground-Based Lidar Observations, 第5回WMOデータ同化シンポジウム, 2009年10月5日, メルボルン(オーストラリア)
- ⑩ 関山剛, Aerosol Data Assimilation with an Ensemble Kalman Filter Using CALIPSO and Ground-Based Lidar Observations, IAMAS-IAPSO-IACS 2009 Joint Assembly, 2009年7月24日, モントリオール(カナダ)
- ⑪ 関山剛, 4次元アンサンブル・カルマン・フィルタを用いた CALIPSO エアロゾル観測のデータ同化, 第14回大気化学討論会, 2008年10月30日, 横浜(神奈川県)
- ⑫ 関山剛, Assimilation of Asian dust aerosol using a 4-dimensional local ensemble transform

Kalman filter, 地球大気化学国際協同研究計画第10回国際大会, 2008年9月10日, アヌシー(フランス)

⑬ 関山剛, Assimilation of total ozone using a local ensemble transform Kalman filter, 成層圏過程とその気候影響研究計画第4回総会, 2008年9月3日, ボローニャ(イタリア)

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

無し

(3)連携研究者

無し

(4)研究協力者

眞木 貴史(MAKI TAKASHI)
気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・主任研究官
田中 泰宙(TANAKA TAICHU)
気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・主任研究官
出牛 真(DEUSHI MAKOTO)
気象庁気象研究所・環境・応用気象研究部・研究官
清水 厚(SHIMIZU ATSUSHI)
国立環境研究所・アジア自然共生研究グループ・主任研究員
三好 建正(MIYOSHI TAKEMASA)
メリーランド大学・大気海洋科学部・助教
Avelino F. Arellano, Jr(アベリーノ・F・アレラーノ・ジュニア)
アリゾナ大学・大気科学部・助教