

課題名	RF-0901 4次元データ同化手法を用いた全球エアロゾルモデルによる気候影響評価
課題代表者名	竹村俊彦（九州大学応用力学研究所）
研究実施期間	平成21～22年度
累計予算額	22,230千円（うち22年度 10,530千円） 予算額は、間接経費を含む。
研究体制	(1) 4次元データ同化手法を用いた全球エアロゾルモデルによる気候影響評価 九州大学
研究概要	<p>1. はじめに</p> <p>大気浮遊粒子状物質（エアロゾル）は、人類および他生物の呼吸器系等に悪影響を及ぼしたり視界悪化を招いたりする他、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)でも指摘されているように、気候変動を誘発する物質である。しかし、エアロゾルは発生源が多様であること、温室効果気体とは異なり粒子であるために大気滞留時間が短いこと、さらに物理化学組成に依存して直接効果（太陽放射および赤外放射の散乱・吸収）および間接効果（雲の凝結核／氷晶核の機能を通じた雲反射率および降水効率の変化）が大きく異なることなどから、地球規模のエアロゾルの分布および気候に対する影響を評価することは難しかった。しかし、エアロゾルの気候に対する影響は、IPCCにおいても温室効果気体に次ぐ大きさを持っていると見積もられていることから、気候変動を解明していく上で非常に重要な因子である。そこで、本研究課題の代表者は、これまでに対流圏主要エアロゾルである黒色炭素・有機物・硫酸塩・土壌粒子・海塩粒子の分布や気候影響を地球規模でシミュレートすることが可能なエアロゾル気候モデルSPRINTARSを開発してきた。SPRINTARSは国際的な研究プロジェクト等を通して、高精度なモデルであることが確認されている。SPRINTARSを用いた研究代表者によるこれまでの研究成果は、IPCC第1作業部会第4次評価報告書（2007年）の図表や参考文献として多数引用され、研究代表者自身が同報告書のContributing Authorとして第2章および第8章の執筆を担当した。</p> <p>上述のように、気候変動を含む地球環境に対するエアロゾルの影響は多大である。IPCC第4次評価報告書におけるエアロゾルの気候に対する影響の評価は、本研究課題の代表者を含めた国内外の研究の進展により、以前の評価報告書よりも不確実性が減少した。しかし、温室効果気体の気候影響評価と比較すると、依然として不確実性が高いのが現状である。この問題の打開策の1つとして、データ同化手法を導入した精度の高いエアロゾルの気候影響の評価が考えられる。</p> <p>2. 研究目的</p> <p>本研究課題では、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>地球規模のエアロゾルの分布および気候影響をシミュレートするエアロゾル気候モデルSPRINTARSに対して、観測データを直接導入するために、データ同化手法の1つである4次元変分法を適用することを最大の目的とした。そして、</li> <li>エアロゾルの気候に対する影響を評価する際の大きな不確定要素の1つであるエアロゾル排出量の時空間分布に関して、高精度な逆推定を行う</li> <li>4次元データ同化を適用後にエアロゾルの放射強制力を算出することにより、従来の研究よりも信頼度の高いエアロゾルの気候に対する影響の評価を行う</li> </ul> <p>ことを目的とした。大気物質輸送モデルへのデータ同化適用の研究は、領域スケールから始まり、全球物質輸送モデルへの応用は端緒に終わったばかりであるため、全球エアロゾルモデルへ4次元変分法を適用するシステムを開発すること自体に新規性がある。また、対流圏エアロゾルの発生源分布・強度の逆推定を全球スケールで複数年にわたって行った研究はない。さらに、エアロゾルの気候影響評価に同化結果を用いた前例はなく、IPCCをはじめとする気候変動の評価の精度向上に大きく寄与すると期待できる。</p>

## 3. 研究の方法

研究方法の概略を図1に示す。SPRINTARSは、対流圏主要エアロゾルである炭素性（黒色炭素・有機物）粒子・硫酸塩・土壌粒子・海塩粒子の分布や気候影響を地球規模でシミュレートすることが可能な数値モデルである。エアロゾルの輸送プロセス（発生・移流・拡散・化学反応・湿性沈着・乾性沈着・重力落下）を計算するだけでなく、大気放射過程や雲微物理過程と結合させてエアロゾル直接効果・間接効果を計算することが可能である。このSPRINTARSに、データ同化手法の1つである4次元変分法を適用する。4次元変分法では、通常的时间順方向の積分を行った後、観測データを用いて対象パラメータを修正しながら時間逆方向に積分する（図2）。時間逆方向に解くためのアジョイントモデルを構築することが、本研究課題の鍵である。具体的には、4次元変分法では、次のような評価関数 $J$ を定義する。

$$J = \frac{1}{2}(x - x^b)^T \mathbf{B}^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}(H(x) - y)^T \mathbf{R}^{-1}(H(x) - y)$$

ここで、 $x$  はモデル変数（初期条件など）、 $y$  は観測データ、 $H$  はモデル空間から観測空間への投影を表す観測演算子（モデルによる時間発展を含む）、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{R}$  はそれぞれ背景誤差・観測誤差である。右辺第二項は、数値モデルの結果と観測データとの間の差の二乗和を表している。4次元変分法では、この評価関数が最小になるようにモデル変数  $x$  を最適化する。

データ同化に用いる観測データとして、TERRAおよびAQUA両衛星搭載のMODISセンサによって観測されるエアロゾル光学的厚さ(AOT)を用いた。AOTはSPRINTARSでも計算され、大気中のエアロゾル量を示す標準的なアウトプットの1つであり、同化に用いるのに適している。MODISは1日ではほぼ全球をカバーできるため、時間分解能の高いデータ同化が期待できる。また、2000年から観測が継続されているため、複数年にわたるエアロゾル排出量の推定とその経年変化の評価への応用が可能となる。

本研究課題は、弓本桂也氏（九州大学応用力学研究所・日本学術振興会特別研究員）の協力の下に行われた。

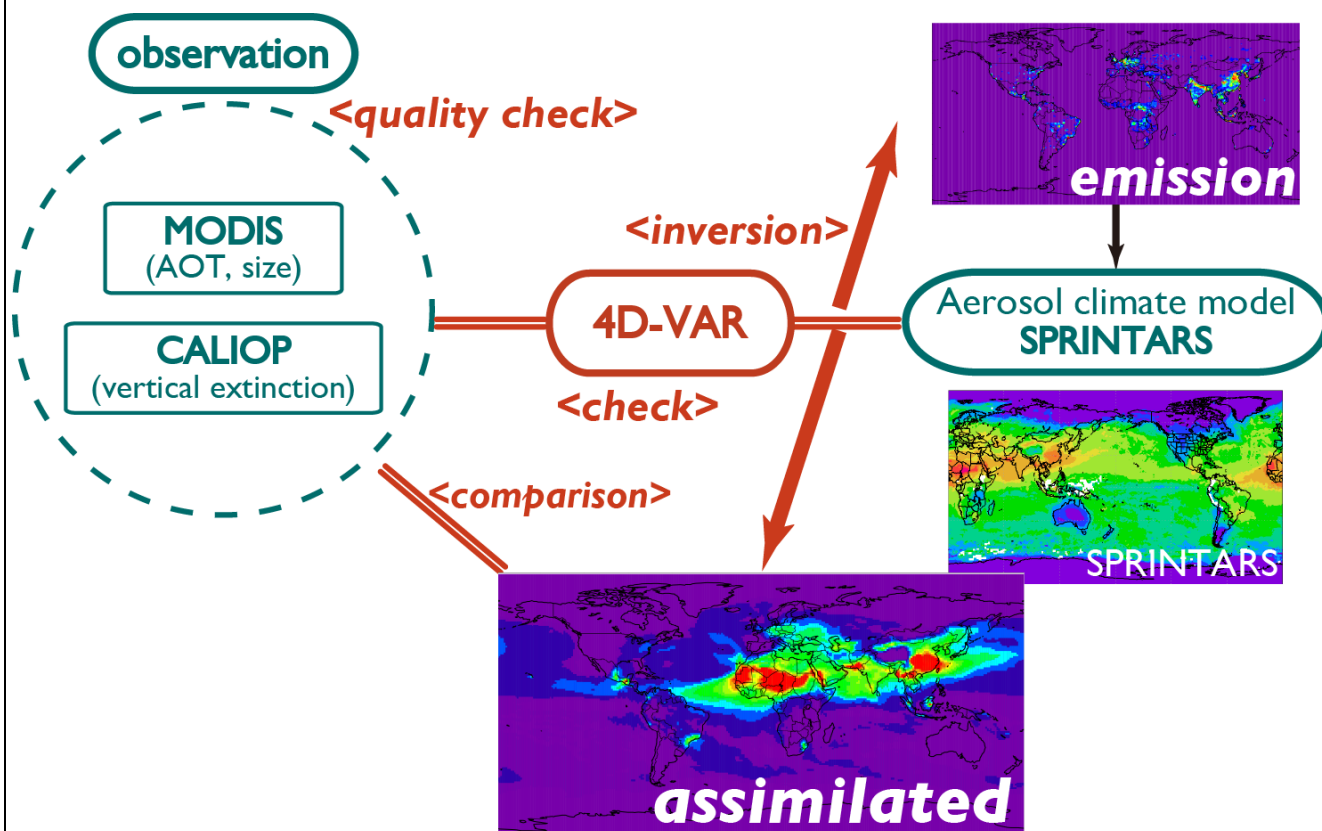


図1 研究方法の概略図。

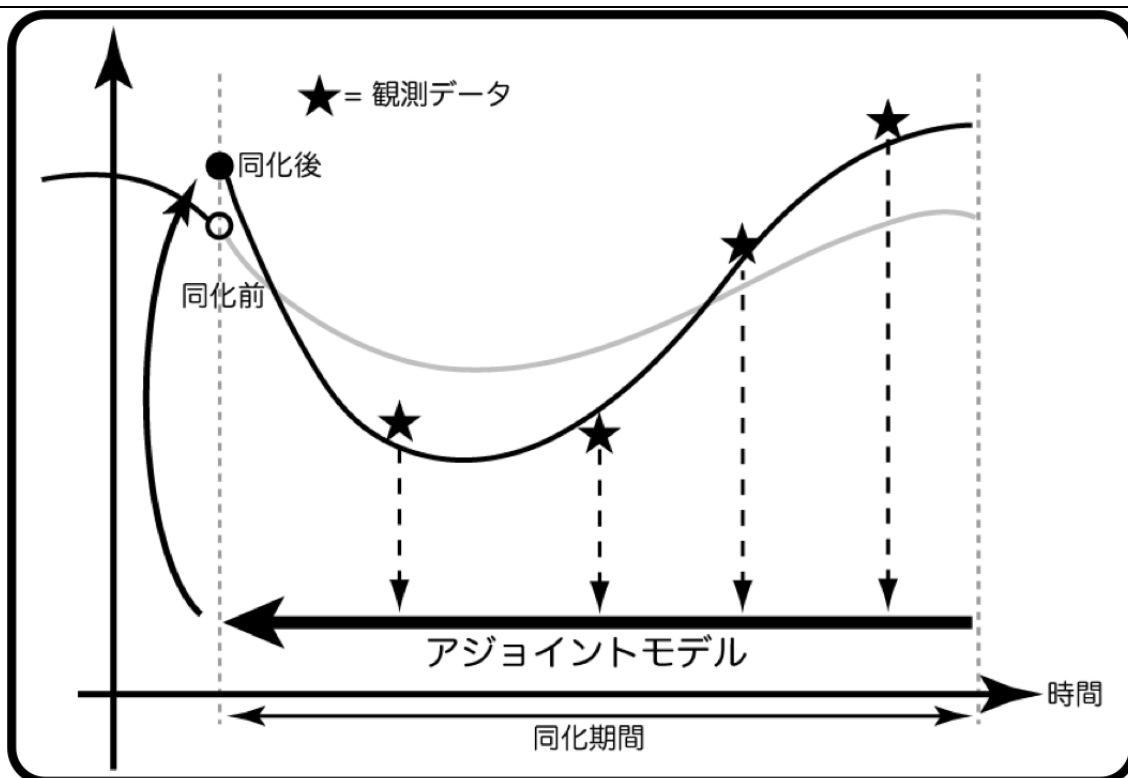


図2 4次元変分法の概略図。灰色曲線が時間順方向積分、黒色曲線が時間逆方向積分を示す。

#### 4. 結果及び考察

最初に、本研究課題の最重要行程である4次元変分法適用のためのアジョイントモデルの構築を行った。アジョイントモデルは、元々SPRINTARSにおいて時間順方向で計算するために構築されている輸送プロセス（発生・移流・拡散・化学反応・湿性沈着・乾性沈着・重力落下）を、観測データを導入しつつ時間逆方向で解くために、新たにプログラムを作成しなければならない。アジョイントモデルは、初年度におおよそ構築され、2年目（最終年度）に改良を続けた。

SPRINTARSに4次元変分法を適用したシステム（SPRINTARS-4DVAR）は、双子実験により検証を行った。双子実験とは、あらかじめモデル計算から仮の真値と仮の観測値を求めておき、それらを用いた同化実験を通じて同化手法の有効性を調査することである。ここでは、標準のSPRINTARSの計算結果を真値と仮定した。双子実験に用いる観測データは、実際の人工衛星搭載センサであるMODIS（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer）から得られたエアロゾル光学的厚さ（550nm）の2元分布のデータを想定し、真値に観測誤差（0.05）を想定した乱数を加えて作成した。

TERRA/MODISの観測頻度を想定して1日に1度の同化とし、最適化対象である制御変数は、各エアロゾルの排出量とした。また、土壌性エアロゾルに関しては、地球規模でエアロゾルの鉛直分布を観測することができる能動センサ（ライダー）CALIOPの後方散乱係数（532nm）のデータを想定した実験も行った。CALIOP想定実験の観測頻度は1日48パスであり、観測誤差は $0.01 \text{ km}^{-1}$ である。

その結果、土壌性エアロゾルと炭素性エアロゾルに関しては、同化後に明らかに真値に収束していることが示された。また、土壌性エアロゾルに関して、疑似MODISデータを用いた実験の方が疑似CALIOPデータのそれに比べ、真値への良い一致を見せた。これは、排出量にのみ差異を与え最適化を行う今回の実験設定においては、水平方向を広くカバーするMODISデータの方が有効な情報量が多かったためと考えられる。しかし、実際の同化問題では、鉛直分布の情報も重要なファクターであることは言うまでもない。一方、海塩エアロゾルに対する双子実験の結果は、同化により光学的厚さ・排出量ともに真値に近づいているものの、炭素性エアロゾルの場合と比較して、1日1回の同化では収束しにくいことが示された。3時間毎に同化を行うと、より収束することが分かったため、発生はし続けるものの、発生量の時空間変動が大きい場合には、同化頻度を増やす必要があることが示唆された。以上の結果、本研究で構築した4次元変分法を用いたデータ同化システムが有効に機能しており、また、エアロゾル排出量の逆推定に有用であることが示された。

次に、実際のエアロゾル輸送現象に対して、本研究で構築したデータ同化手法を適用した。使用する観測データは、TERRA/MODISおよびAQUA/MODISから得られたエアロゾル光学的厚さ（550nm）のうち、粒子半径 $1\mu\text{m}$ 以上のCoarseモードの値である。同化期間は、2007年3月29日から4月3日である。図3は、4月1日のMODISによる観測値とデータ同化前後のSPRINTARSによるシミュレーション結果を示している。MODISの観測では、日本海や黄海でCoarseモードの光学的厚さの値が高くなっている。一方、データ同化前のシミュレーション結果は、MODISの観測値と比較して、定性的な分布は良い一致を見ているものの、定量的に小さくなっている。これが、データ同化後にはMODISの観測値に近づいていることが見て取れ、本研究で構築したシステムが正常に機能していることを示している。また、4月1日～3日にかけて日本各地の気象台において黄砂が観測されたこととも整合している。以上の結果、SPRINTARS-4DVARは、実際の観測データにも有効であり、観測データをベースとしてエアロゾル分布を現実的に再現することが可能であることが示された。

データ同化後に逆推定された計算期間合計の黄砂発生量の分布を、同化前と比較した結果、同化前から同化後に光学的厚さの数値が増加していることに伴い、発生量も大部分の発生領域で増加していることが示された。4次元変分法は、上述の通り、時間を過去に遡って積分するアジョイントモデルが組み込まれているため、発生源まで陽に遡ることが可能であり、観測データを基にして高精度でエアロゾル発生量の逆推定がなされていると考えることができる。以上の結果は、SPRINTARSオリジナル（データ同化前）のシミュレーションが黄砂現象を過小評価していることを必ずしも示唆しているものではなく、人工衛星観測による誤差の影響を受けている可能性もある。つまり、データ同化で使用する観測データの質が保証されていることも、非常に重要であることを指摘しておく。

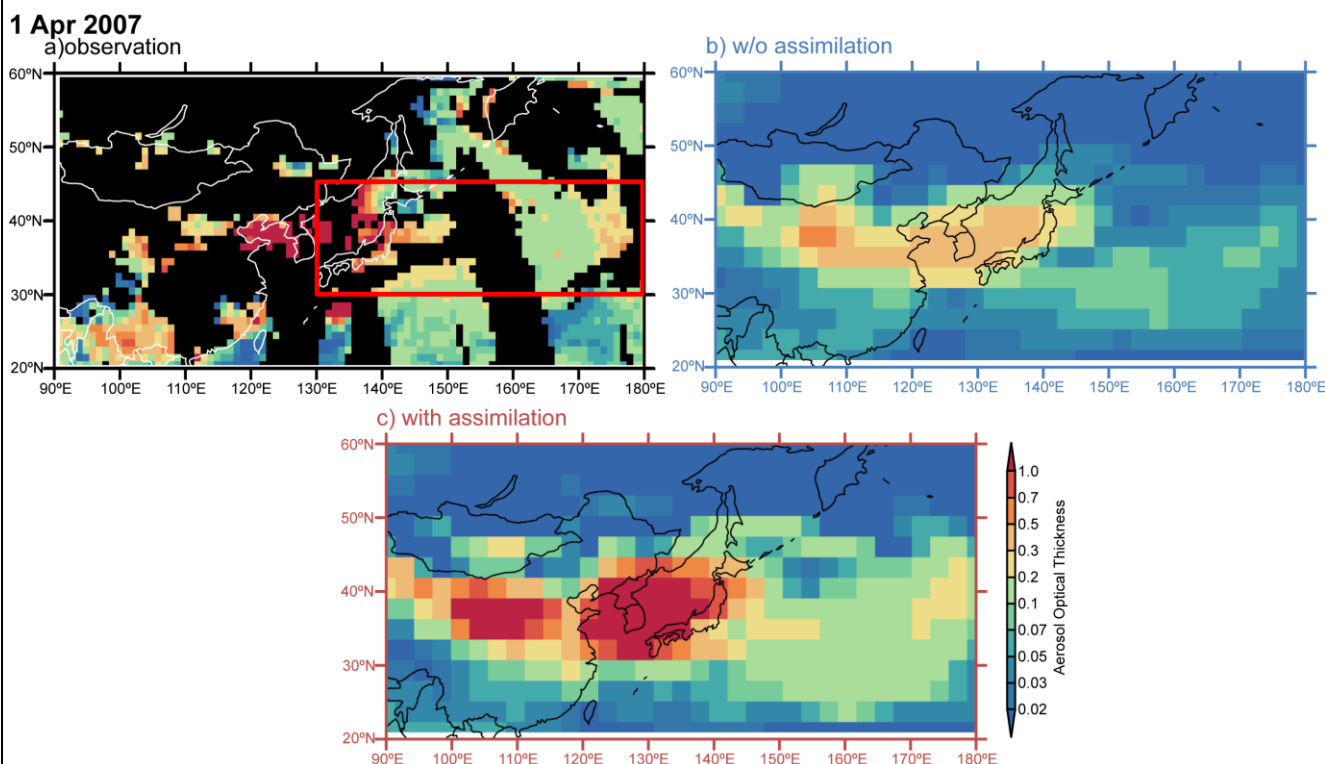


図3 2007年4月1日の a) MODISのCoarseモードのエアロゾル光学的厚さ b) データ同化前の黄砂の光学的厚さのシミュレーション結果 c) データ同化後の黄砂の光学的厚さのシミュレーション結果。

データ同化による黄砂発生量の逆推定が、複数年にわたり有効になされるかを確認するため、前段落に記したのと同様の実験を、2006～2009年の各年3月2日～4月10日を対象として行った。データ同化が有効に機能しているかを確認するため、同化前の排出量は標準のSPRINTARS計算結果よりも一定割合で減らした。結果は、効果的に黄砂発生量を上方修正しており、相対的な年々変動も同化で使用したMODISの光学的厚さに一致していることが示された。

そして、上述の黄砂現象に関して、データ同化前後での対流圏界面での放射強制力の差を検討した。同化後に黄砂濃度が上昇したため、長波放射の放射強制力は広域で正にシフトしており、同化前後の差が大きい地域では $+2 \text{ W m}^{-2}$ 以上となった。一方、短波放射領域では、データ同化により黄砂濃度が上昇していることに伴い、広い範囲で負の強制力が増加した。短波放射領域での黄砂の放射吸収率は、他の砂漠地域のダストよりも小さいことが知られており、黄砂濃度が高くなると負の放射強制力を生むと言われている。しかし、短波の放射強制力が正にシフトしている領域もある。これは、同化前から放射強制力が正であった領域である。高濃度ダストの高度が雲よりも高いため、ダストは直達光だけではなく雲層による反射光も吸収し、その結果として吸収率が高まることになるためである。以上のように、本研究課題で構築したデータ同化システムにより、これまで数値モデル単独で行ってきた放射強制力の評価を、観測データを用いて修正することも可能となった。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

全球物質輸送モデルへのデータ同化の応用は世界的に端緒についたばかりであるため、全球エアロゾルモデルへ4次元変分法を適用するシステムを開発したこと自体に新規性がある。さらに、このデータ同化システムが正常に機能することを確認し、エアロゾル発生量の逆推定およびデータ同化後のエアロゾル放射強制力を算出できたことは、大気物質輸送の分野および気候変動評価において大きな進歩となった。

### (2) 環境政策への貢献

物質輸送モデルへのデータ同化の適用は以前から重要性が指摘されており（例えば環境省・気象庁「地球温暖化観測推進ワーキンググループ報告書第2号」第1章）、その基礎が本研究課題により構築された。観測データを直接的に数値モデルで使用するデータ同化手法を適用することにより、従来よりも信頼度の高いエアロゾルの気候影響評価を行うことが可能となり、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第5次評価報告書への貢献をはじめとする国際的な地球環境政策への貢献が期待されている。また、深刻化が懸念されている東アジアの越境大気汚染に関して、本研究課題の成果により、従来よりも信頼度の高いエアロゾル排出量の時空間分布の推定が可能となり、国内大気環境政策へより広く貢献することが期待される。内閣府「最先端・次世代研究開発支援プログラム」（平成22年度末～25年度）採択課題である「数値モデルによる大気エアロゾルの環境負荷に関する評価および予測の高精度化」（研究代表者：竹村俊彦）において、SPRINTARSエアロゾル予測システム（<http://sprintars.net/forecastj.html>）へ本研究課題の成果を適用することにより、エアロゾル週間予測の高精度化を図ることとしている。

## 6. 研究者略歴

課題代表者：竹村 俊彦

1974年生まれ、東京大学大学院理学系研究科修了、博士（理学）

現在九州大学応用力学研究所准教授

研究参画者

(1)：竹村 俊彦（同上）

## 7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

### (1) 査読付き論文

- 1) 竹村俊彦, 2009: エアロゾル気候影響評価の現状と今後の展開. エアロゾル研究, 24, 237-241.
- 2) 弓本桂也, 竹村俊彦, 江口健太, 鶴野伊津志, 2009: エアロゾル輸送モデルとデータ同化. エアロゾル研究, 24, 256-261.
- 3) Yumimoto, K., K. Eguchi, I. Uno, T. Takemura, Z. Liu, A. Shimizu, N. Sugimoto, and K.

Strawbridge, 2010: Summertime trans-Pacific transport of Asian dust. *Geophysical Research Letters*, 37, L18815, doi:10.1029/2010GL043995.

(2) 査読付論文に準ずる成果発表（「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可）  
該当せず。