

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

九州大学応用力学研究所

竹村 俊彦

〈研究協力者〉

九州大学応用力学研究所（日本学術振興会特別研究員） 弓本 桂也

平成21～22年度累計予算額：22,230千円（うち、平成22年度予算額：10,530千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] エアロゾルの気候に対する影響の評価は、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。その問題の打開策の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。本研究課題では、地球規模のエアロゾルの分布および気候影響を計算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。つまり、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ためのアジョイントモデルをSPRINTARS内に構築した。その後、構築された4次元変分法を適用したシステムをテストするための実験を行い、同化が有効に機能していることが確認され、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、実際の人工衛星による観測データを用いて、データ同化システムを組み込んだSPRINTARSによるシミュレーションを行った。その結果、データ同化後にはシミュレーション結果が観測値に近づいていることが確認され、エアロゾル発生量も観測データと整合的に修正されたことが示された。そして、エアロゾルの気候影響評価が可能であるSPRINTARSにデータ同化手法を組み込んだことから、観測データを用いてエアロゾル放射強制力の修正を行うことが可能となった。これは、数値気候モデルと観測データとを「融合」したエアロゾルの気候影響評価であることから、従来の研究手法による気候影響評価よりも信頼度が高まることが示唆される。本研究課題の成果は、将来の気候変動予測の高精度化へ寄与することが期待され、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の次期評価報告書等へ貢献することが期待される。さらに、大気環境が悪化している東アジアの風下側にある日本への影響を、データ同化手法を用いて定量的に把握し、環境行政に対して科学的根拠資料を提示することが期待される。

[キーワード] エアロゾル、データ同化、4次元変分法、気候変動、SPRINTARS

1. はじめに

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^{1), 2), 3), 4)}。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）⁵⁾の図表や参考文献として多数引用され^{1), 3), 6), 7)}、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。

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定性が減少した。しかし、温室効果気体の気候影響評価と比較すると、依然として不確定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。

2. 研究目的

本研究課題では、

- 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、

- 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
- 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

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^{8), 9), 10), 11)}、全球物質輸送モデルへの応用は端緒についたばかりであるため¹²⁾、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。

3. 研究方法

研究方法の概略を図1に示す。

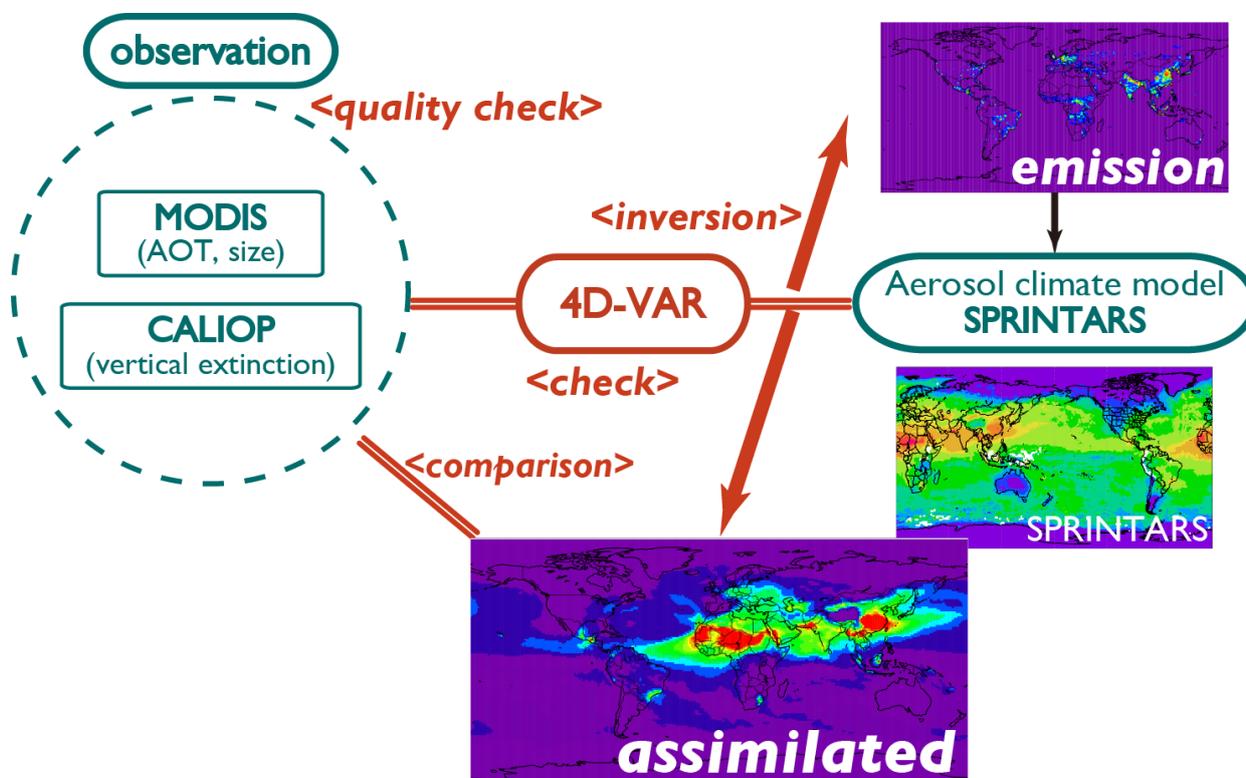


図1 研究方法の概略図。

(1) エアロゾル気候モデルSPRINTARS

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。また、SPRINTARSは全球モデルであるが、例えば東アジア域における大気汚染物質や黄砂の飛来状況等の領域スケールで短時間の現象の再現性にも優れていることが確認されている^{13), 14)}。また、「1. はじめに」で述べた通り、SPRINTARSを用いた研究成果は、IPCC第4次評価報告書に数多く採用された^{1), 3), 6), 7)}。

(2) 4次元変分法同化システム（SPRINTARS-4DVAR）の構築

全球エアロゾル気候モデルSPRINTARSを対象に、データ同化*手法の1つである4次元変分法

(4D-Var)*を適応した。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。

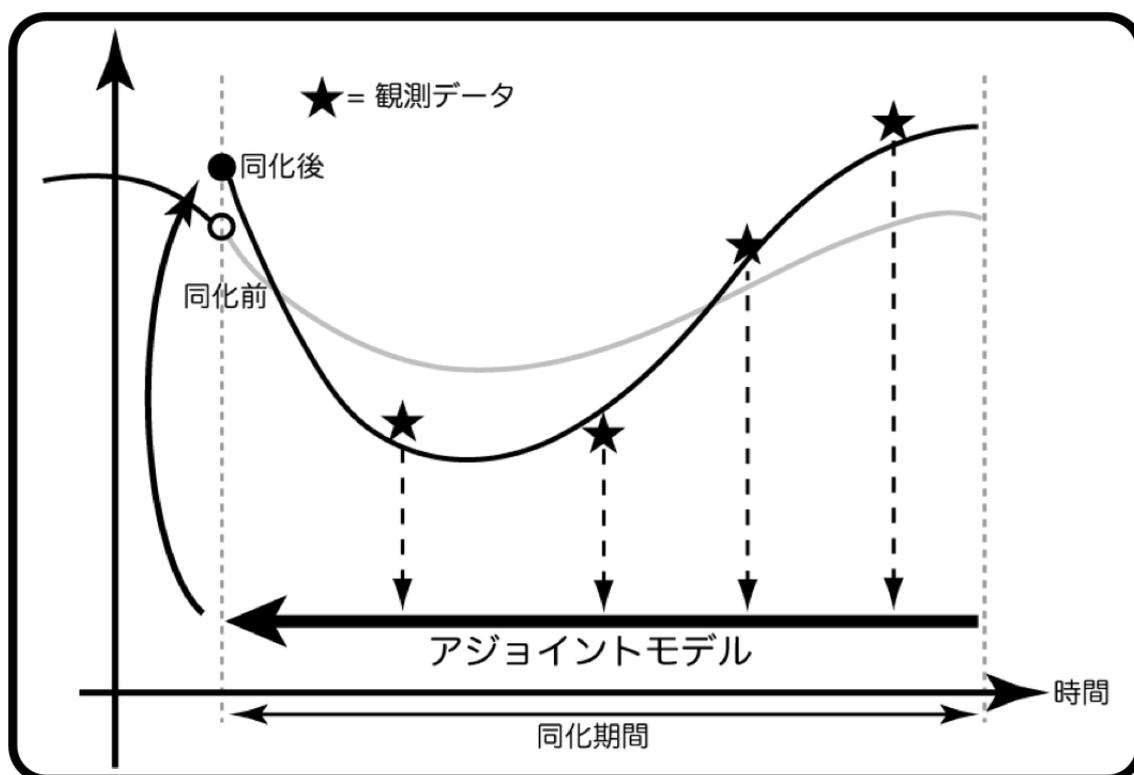


図2 4次元変分法の概略図。灰色曲線が時間順方向積分、黒色曲線が時間逆方向積分を示す。

(3) エアロゾル観測データ

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)¹⁵⁾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。

(4) 全球エアロゾル排出量の逆推定とエアロゾル気候影響の評価

(2) の4次元変分法を、(1) のSPRINTARSに導入して、(3) のエアロゾル観測データを用いることにより、対流圏エアロゾルの排出量強度・時空間分布の逆推定を全球規模で行った。エアロゾルの気候影響評価の不確定性の主要因の1つとして、モデリング研究で必要となるエアロゾル排出量の時空間分布の推定誤差が挙げられる。エアロゾルは、主に人為起源（硫酸塩・炭素性）などと自然起源（土壌粒子・海塩粒子など）とに分けられる。人為起源エアロゾルの排出量は、主にエネルギー消費量や人口分布などの多岐にわたる統計量をベースに作成されるが、それぞれの統計データ・作成プロセスで用いられる仮定や係数に誤差や不確実性が含まれているため、最終プロダクトである排出量に誤差が積算されることになる。人為起源エアロゾル排出量データの誤差は、場合によって約2倍～数倍になるという指摘もある。一方、自然起源エアロゾルの排出量は、風速など様々な気象要素を考慮したモデル内部の推定式で算出されているが、様々なパラメータに左右されるため、やはり不確実性が含まれる。そこで、本研究課題では、データ同化手法をエアロゾル気候モデルSPRINTARSに適用し、従来の統計・推定式ベースの推定とは異なるエアロゾルの排出量推定を行った。複数年にわたって逆推定を行い、発生量の経年変化を調査した。また、(1) で述べた通り、SPRINTARSはエアロゾルの気候に対する影響を計算することができる。本研究課題では、4次元データ同化を適用することにより、数値気候モデルSPRINTARS単独ではなく、MODISによるエアロゾル観測データも用いて、エアロゾルの放射強制力を算出した。

*データ同化

数値モデルと観測データとを「融合」し、時間変化する大気の状態を高精度で推定することである。数値モデルにおける観測データの従来の利用法は、数値モデルから出力されるある物理量を、同地点・同時刻・同物理量の観測値と単純に比較して、数値モデルの改良に活用する、というものであった。しかし、データ同化では、数値モデルにより計算されたある時刻の大気の状態を観測データで直接修正して最適な推定値を求める。データ同化は、気象予報・海況予測に積極的に用いられているが、物質輸送の分野ではその応用例はまだ少ない。また、データ同化の大きな特徴の1つとして、基本的に物理法則に則って構築されている数値モデルを介することにより、直接観測されない物理量の推定が可能であることが挙げられる。この特徴を用いて、本研究課題ではエアロゾル排出量を逆推定する。

*4次元変分法

Advanced Data Assimilationと呼ばれる最尤推定法を基礎とする同化手法である。4次元変分法は「スモーカー」に区分され、その名の示す通り4次元時空間を対象とした同化手法であり、設定された同化期間内の様々な時刻で観測されたデータを同時に同化して、それらのデータと最も整合性のとれたモデルの初期値を求める。また、初期値の代わりに、観測データと整合性のと

れた外力や拡散係数などのモデル内パラメータを推定することも可能である。時間を遡って積分するアジョイント（随伴）モデルを用いるため、アジョイント法とも呼ばれる。気象予報業務では、日本の気象庁、ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）、米国国立環境予報センター（NCEP）などで採用されている。

4. 結果・考察

（1）SPRINTARS-4DVARの構築

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。

（2）SPRINTARS-4DVARの検証

SPRINTARSに4次元変分法を適用したシステムは、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 km^{-1} である。

図3は、MODISによる観測を想定した土壌性エアロゾルに対する双子実験の結果を示す。同化対象である光学的厚さ、および制御変数である発生量ともに、同化後に明らかに真値に収束していることが示された。評価関数は、計算の反復回数とともに指数関数的に減少し、約8回以降は大きく変化しないことが分かった。図4には、CALIOPによる観測を想定した双子実験の結果を示すが、MODISを想定した実験の方が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。

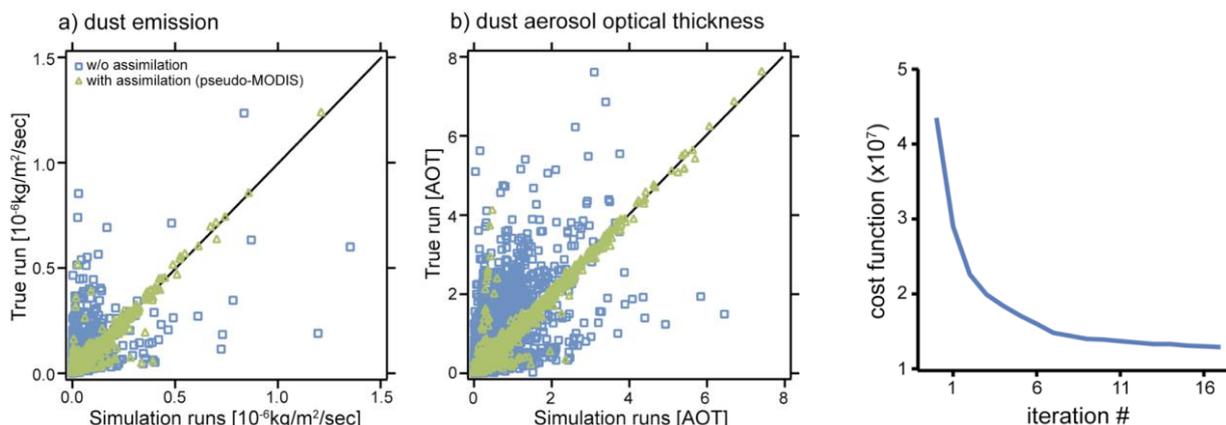


図3 疑似MODIS光学的厚さデータを用いた土壌性エアロゾルに対する双子実験の結果。青四角はデータ同化前、緑三角は1日1度のデータ同化後。(左)発生量(中)光学的厚さ(右)計算反復回数と評価関数との関係。

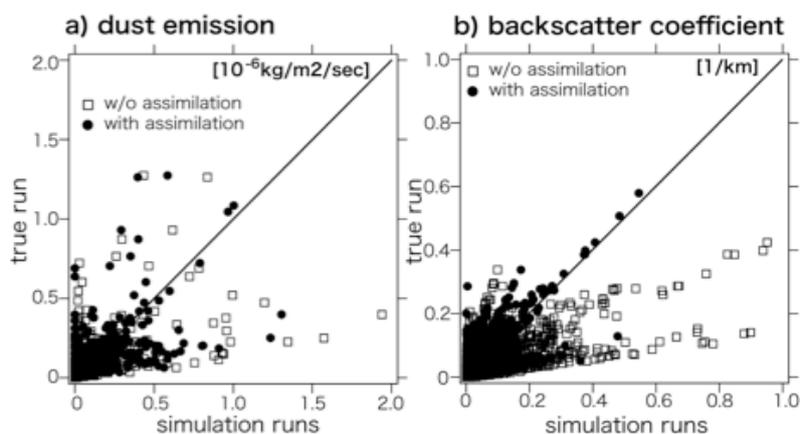


図4 疑似CALIOP後方散乱係数データを用いた土壌性エアロゾルに対する双子実験の結果。四角はデータ同化前、丸は1日1度のデータ同化後。(左)発生量(右)後方散乱係数。

炭素性エアロゾルに対する双子実験の結果を図5に示す。土壌性粒子と同様、同化対象である光学的厚さ、および制御変数である発生量ともに、同化後に明らかに真値に収束していることが示された。評価関数は、計算の反復回数とともに指数関数的に減少したが、土壌性粒子よりも収束性が低いことが示されている。

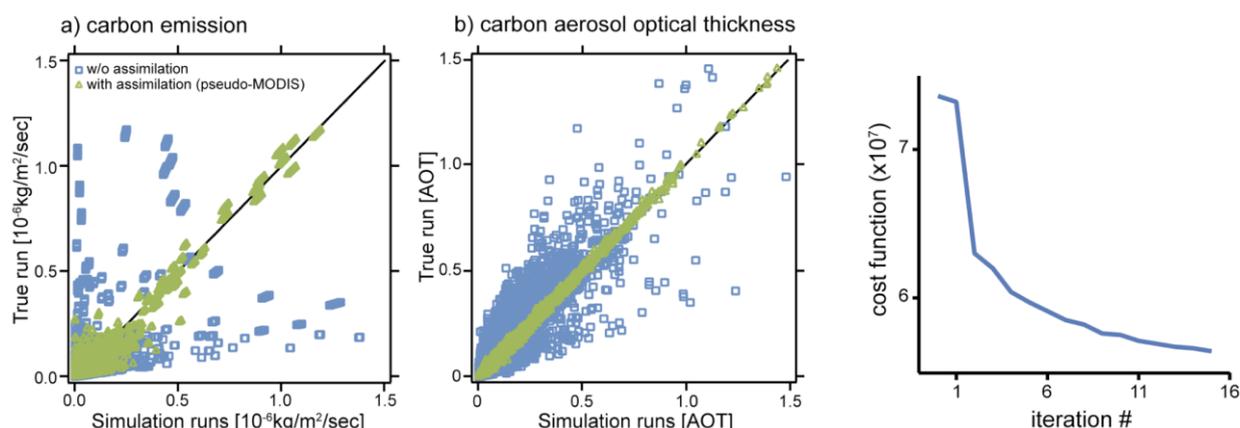


図5 疑似MODIS光学的厚さデータを用いた炭素性エアロゾルに対する双子実験の結果。青四角はデータ同化前、緑三角は1日1度のデータ同化後。(左) 排出量 (中) 光学的厚さ (右) 計算反復回数と評価関数との関係。

図6は、海塩エアロゾルに対する双子実験の結果を示している。1日1度のデータ同化後に、光学的厚さ・排出量ともに真値に近づいているものの、土壌性エアロゾルや炭素性エアロゾルの場合と比較して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のあることが示唆された。

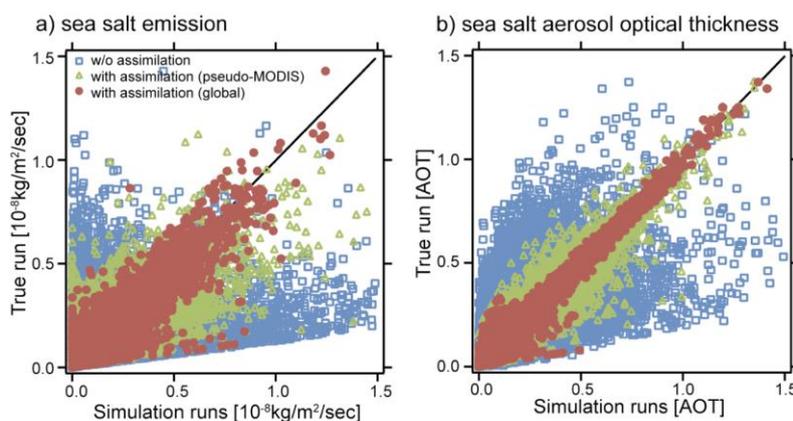


図6 疑似MODIS光学的厚さデータを用いた海塩エアロゾルに対する双子実験の結果。青四角はデータ同化前、緑三角は1日1度のデータ同化後、赤丸は3時間毎のデータ同化後。(左) 発生量 (右) 光学的厚さ。

以上、双子実験の結果、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。

(3) SPRINTARS-4DVARの実際の現象に対する適用

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、2007年4月1日～3日の粒子半径 $1\mu\text{m}$ 以上のCoarseモードの値である。同化期間は、3月29日から4月3日である。制御変数は、黄砂発生量である。図7は、各日の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。4月1日には、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。4月2日は、MODISのCoarseモードAOTが日本列島で大きくなっており、また、全国48箇所の気象台で黄砂が観測されている。一方、データ同化前のSPRINTARSの結果は、黄砂の飛来自体はシミュレートできているものの、定量的に過小評価している可能性がある。それが、データ同化により修正されていることが分かる。図8には、この実験の評価関数と計算反復回数との関係を示しており、5回までは評価関数が減少し、6回以降は安定していることが分かる。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。

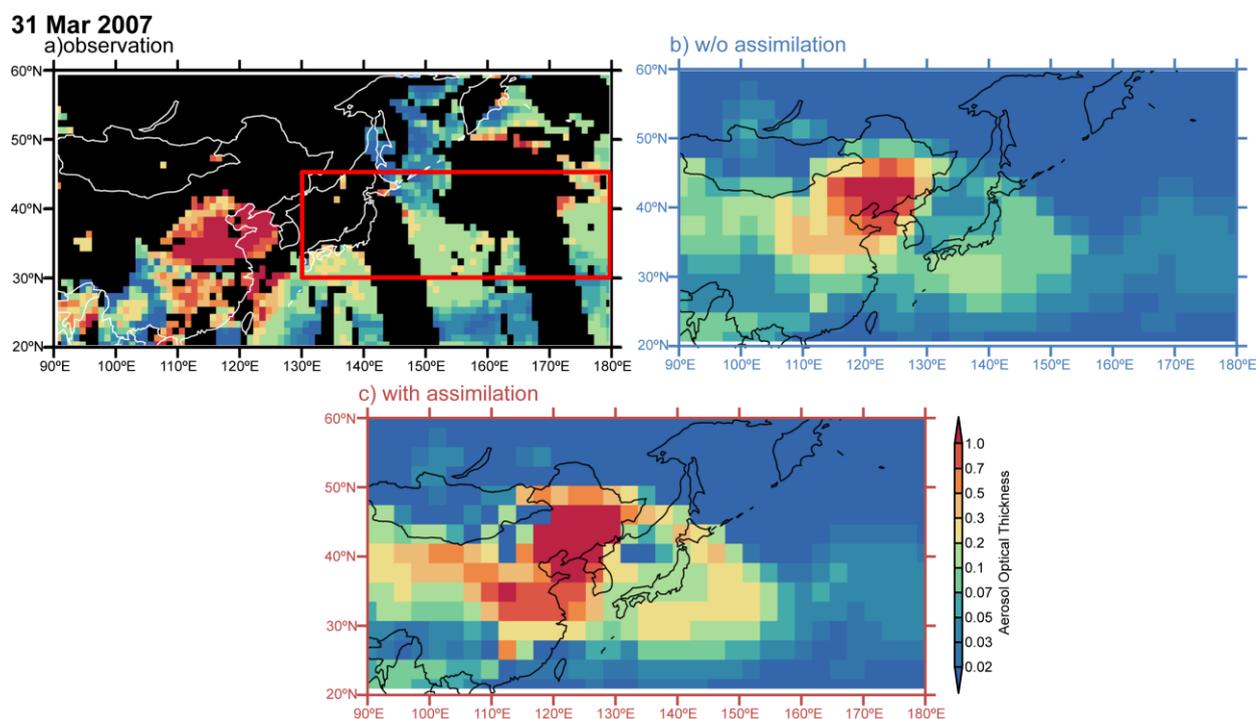
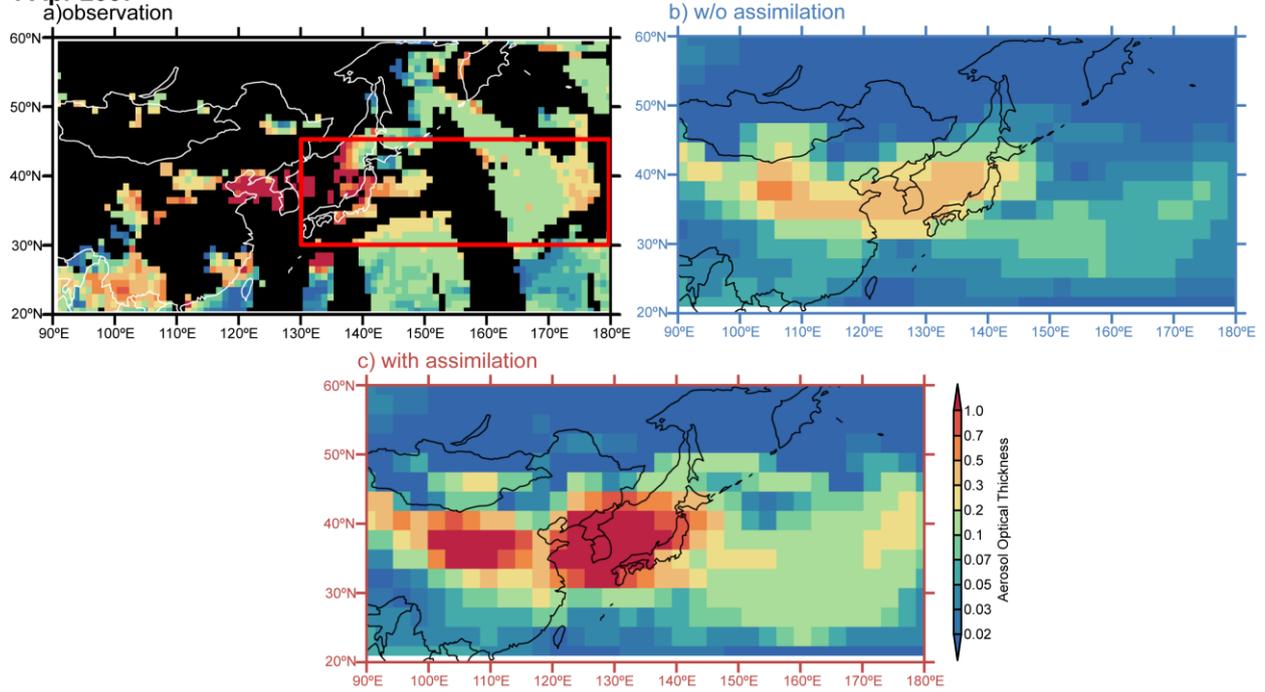


図7 2007年3月31日の a) MODISのCoarseモードのエアロゾル光学的厚さ b) データ同化前の黄砂の光学的厚さのシミュレーション結果 c) データ同化後の黄砂の光学的厚さのシミュレーション結果。

1 Apr 2007



2 Apr 2007

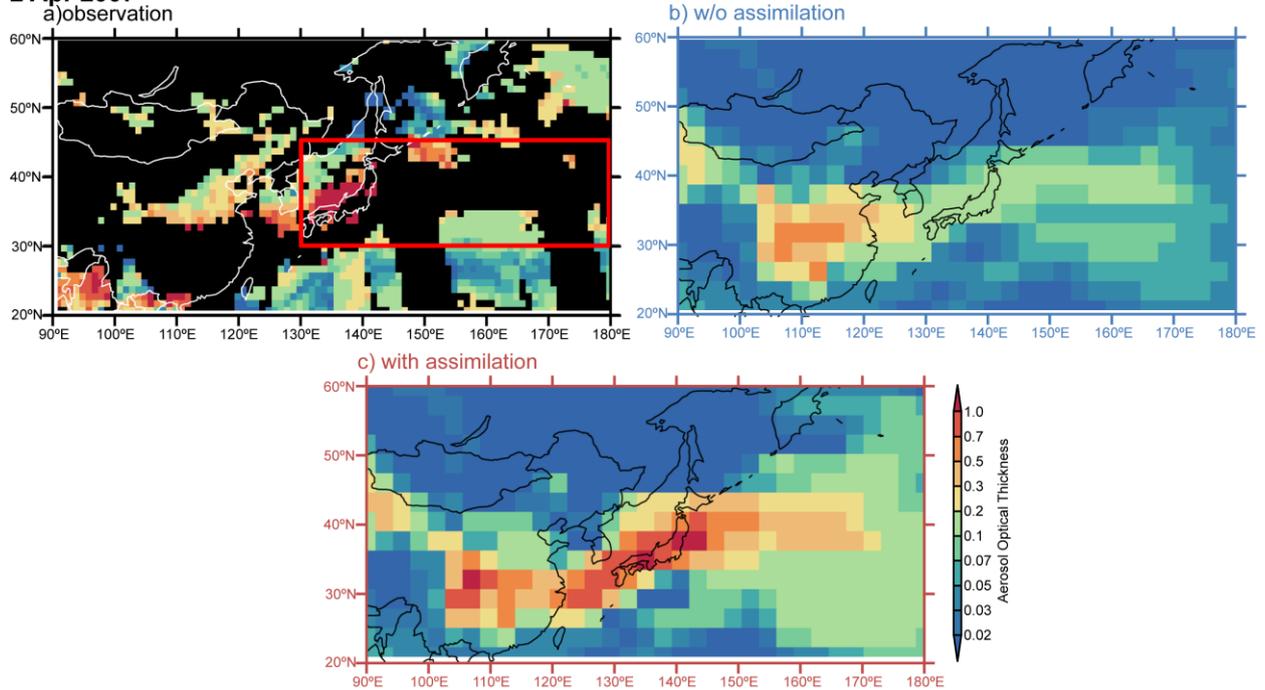


図7 (続き) 2007年 (上) 4月1日 (下) 4月2日の a) MODISのCoarseモードのエアロゾル光学的厚さ b) データ同化前の黄砂の光学的厚さのシミュレーション結果 c) データ同化後の黄砂の光学的厚さのシミュレーション結果。

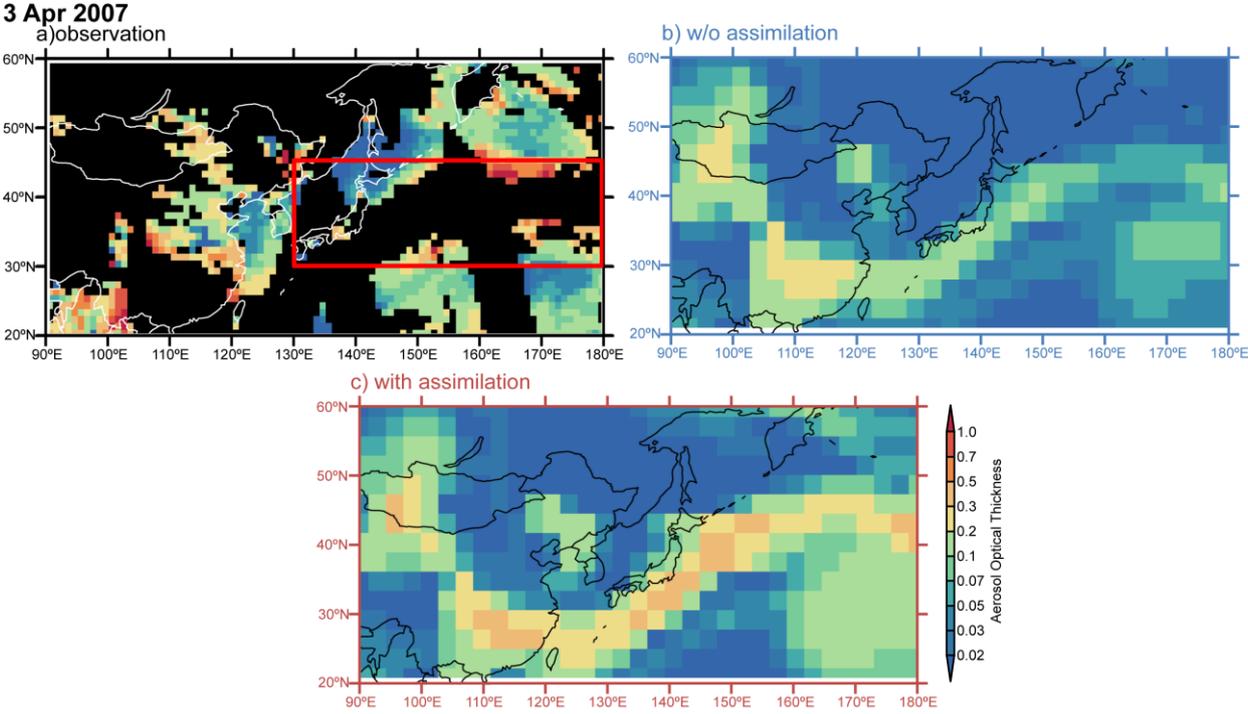


図 7 (続き) 2007年4月3日の a) MODISのCoarseモードのエアロゾル光学的厚さ b) データ同化前の黄砂の光学的厚さのシミュレーション結果 c) データ同化後の黄砂の光学的厚さのシミュレーション結果。

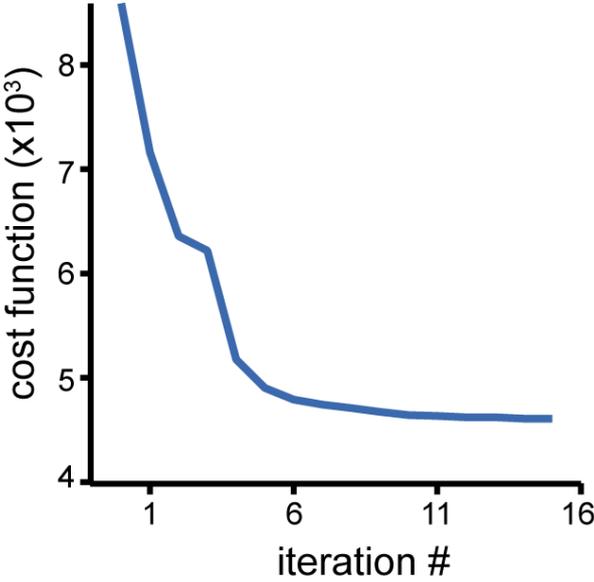


図 8 2007年3月29日～4月3日の同化期間におけるMODISのCoarseモードのエアロゾル光学的厚さ適用時の評価関数と計算反復回数との関係。

図9は、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分布と、同化前と比較した同化後の黄砂発生量の増加量を示している。図7で見た通り、同化前から同化後に光学の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分かる。4次元変分法は、上述した通り、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。

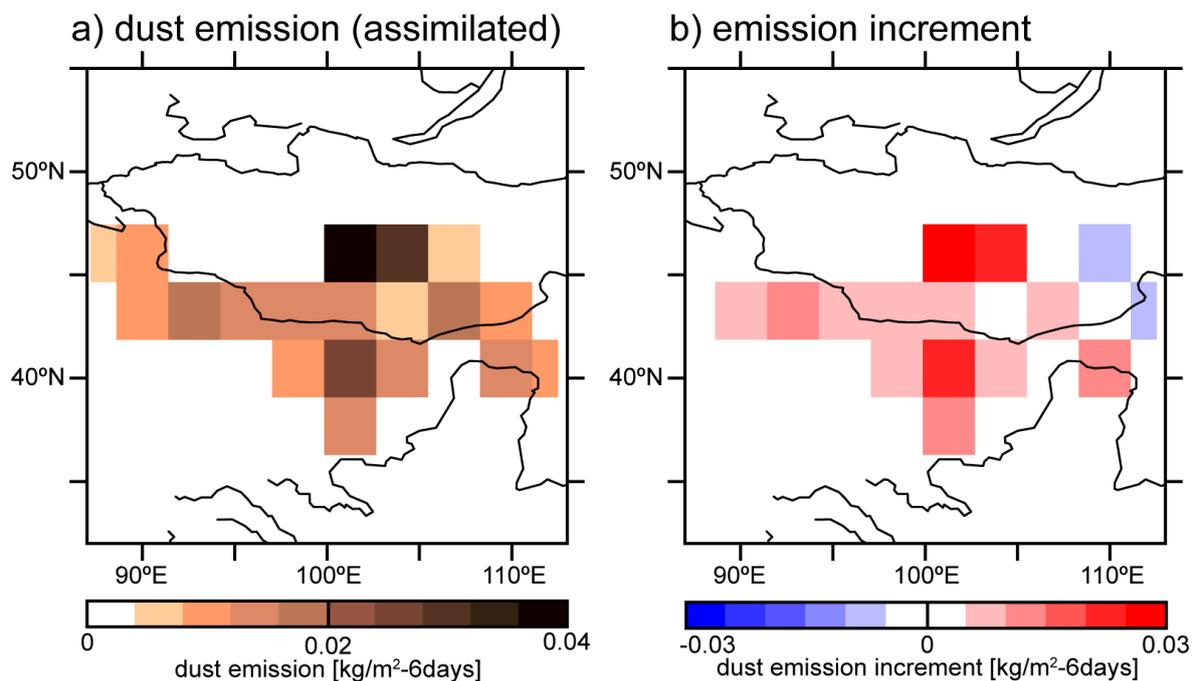


図9 2007年3月29日～4月3日の a) データ同化後の黄砂発生量 b) データ同化による黄砂発生量の増加量。

SPRINTARS-4DVARを用いて、黄砂発生量の逆推定を複数年にわたり行った結果が図10である。2006～2009年の各年3月2日～4月10日を対象として行った。なお、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ている。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の光学の厚さに一致していることが分かる。

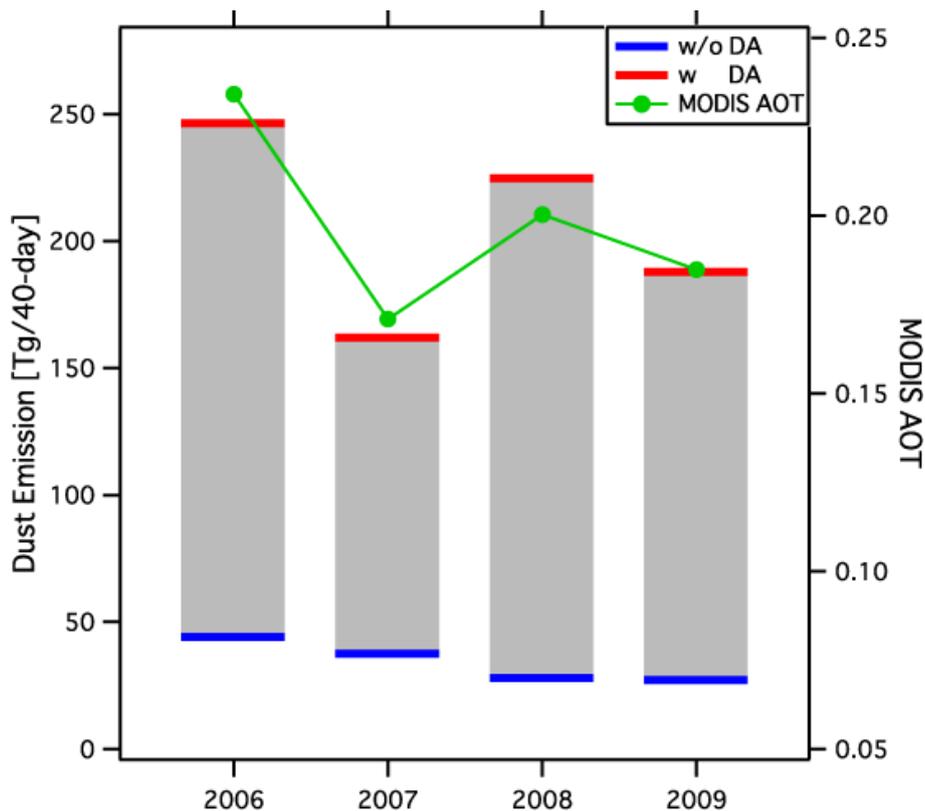


図 1 0 2006年～2009年の各年3月2日～4月10日の黄砂積算発生量（青：同化前 赤：同化後）と MODISによるエアロゾル光学的厚さの領域・期間平均値。

（4）SPRINTARS-4DVAR適用後の放射強制力の算出

図 1 1 および図 1 2 には、2007年3月29日から4月3日の黄砂による対流圏界面での放射強制力に関して、データ同化前後とその差を示す。上述した通り、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 $+2 \text{ W/m}^2$ 以上変化した。一方、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されている。図 1 1 で示されている結果も、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場合、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。

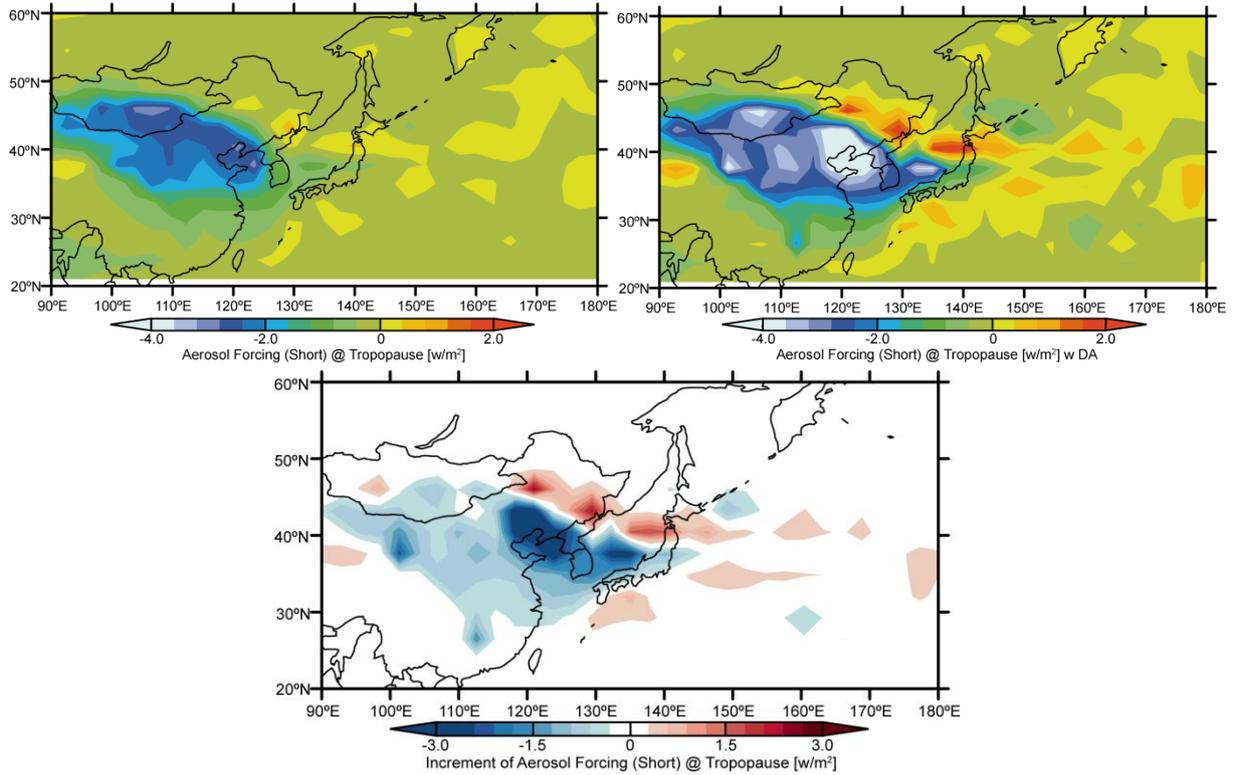


図 1 1 2007年3月29日～4月3日の黄砂による対流圏界面での短波放射強制力。(左上) データ同化前 (右上) データ同化後 (下) データ同化前後の差。

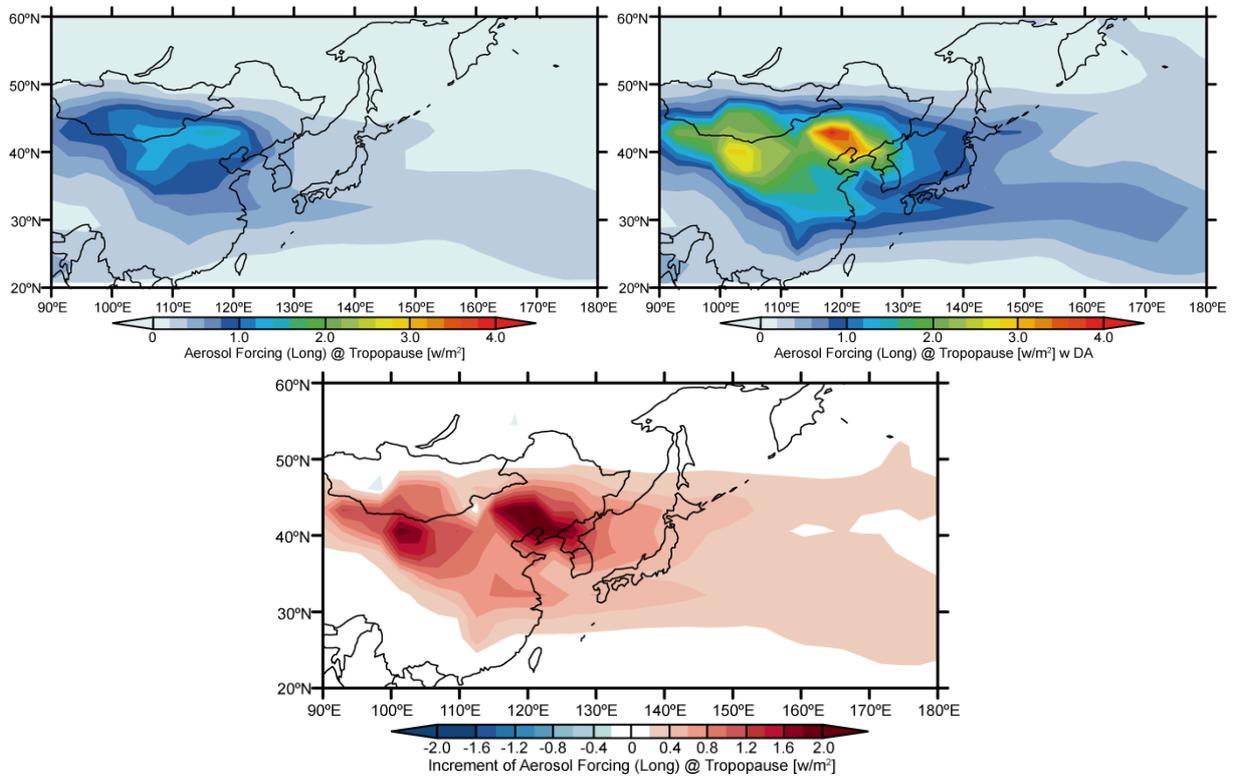


図 1 2 2007年3月29日～4月3日の黄砂による対流圏界面での長波放射強制力。(左上) データ同化前 (右上) データ同化後 (下) データ同化前後の差。

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. 引用文献

- 1) Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima, 2000: Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *Journal of Geophysical Research*, 105, 17853-17873.
- 2) Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben, and S. Kinne, 2002: Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model. *Journal of Climate*, 15, 333-352.
- 3) Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima, and T. Nakajima, 2005: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. *Journal of Geophysical Research*, 110, D02202,

doi:10.1029/2004JD005029.

- 4) Takemura, T., M. Egashira, K. Matsuzawa, H. Ichijo, R. O'ishi, and A. Abe-Ouchi, 2009: A simulation of the global distribution and radiative forcing of soil dust aerosols at the Last Glacial Maximum. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 3061-3073.
- 5) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007: *Climate Change 2007: The Scientific Basis*. edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignorand, and H. L. Miller, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp.
- 6) Takemura, T., T. Nakajima, T. Nozawa, and K. Aoki, 2001: Simulation of future aerosol distribution, radiative forcing, and long-range transport in east Asia. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 79, 1139-1155.
- 7) Takemura, T., Y. Tsushima, T. Yokohata, T. Nozawa, T. Nagashima, and T. Nakajima, 2006: Time evolutions of various radiative forcings for the past 150 years estimated by a general circulation model. *Geophysical Research Letters*, 33, L19705, doi:10.1029/2006GL026666.
- 8) Yumimoto, K., and I. Uno, 2006: Adjoint inverse modeling of CO emission over the East Asian region using for dimensional variational data assimilation. *Atmospheric Environment*, 40, 6836-6845.
- 9) Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, and S. Satake, 2007: Adjoint inverse modeling of dust emission and transport over East Asia. *Geophysical Research Letters*, 34, 8, L08806, doi:10.1029/2006GL028551.
- 10) Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, and A. Shimizu, 2008: MODIS AOT based inverse modeling for Asian dust, *SOLA*, 4, 89-92.
- 11) Yumimoto, K., I. Uno, N. Sugimoto, A. Shimizu, Z. Liu, and D. M. Winker, 2008: Adjoint inversion modeling of Asian dust emission using lidar observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 2869-2884.
- 12) Dubovik, O., T. Lapyonok, Y. J. Kaufman, M. Chin, P. Ginoux, R. A. Kahn, and A. Sinyuk, 2008: Retrieving global aerosol source from satellites using inverse modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 209-251.
- 13) Takemura, T., I. Uno, T. Nakajima, A. Higurashi, and I. Sano, 2002: Modeling study of long-range transport of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia. *Geophysical Research Letters*, 29(24), 2158, doi:10.1029/2002GL016251.
- 14) Takemura, T., T. Nakajima, A. Higurashi, S. Ohta, and N. Sugimoto, 2003: Aerosol distributions and radiative forcing over the Asian-Pacific region simulated by Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species (SPRINTARS). *Journal of Geophysical Research*, 108(D23), 8659, doi:10.1029/2002JD003210.
- 15) Remer, L. A., R. G. Kleidman, R. C. Levy, Y. J. Kaufman, D. Tanre, S. Mattoo, J. V. Martins, C. Ichoku, I. Koren, H. Yu, and B. N. Holben, 2008: Global aerosol climatology from the MODIS satellite sensors. *Journal of Geophysical Research*, 113, D13S07,

doi:10.1029/2007JD009661.

7. 国際共同研究等の状況

本研究課題の代表者は、エアロゾルモデル相互比較プロジェクトAeroComへ発足当初から参画し、エアロゾルモデルSPRINTARSを用いた貢献を行っている。AeroComは、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第4次評価報告書におけるエアロゾルの気候影響評価に関して主導的な役割を果たし、また、世界気候研究計画（WCRP）と地球圏－生物圏国際協同研究計画（IGBP）の共同プロジェクトである大気化学と気候（AC&C）イニシアチブと連携している。

8. 研究成果の発表状況

（1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 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.

<査読付論文に準ずる成果発表>

該当せず.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 竹村俊彦, 2010: モデリング研究によるエアロゾル気候影響評価. 低温科学, 68, 137-142.

（2）口頭発表（学会等）

- 1) Takemura, T., K. Yumimoto, H. Okamoto, and T. Nishizawa: Comparison and data assimilation for global aerosol climate model with measured data from active sensors. EarthCARE Workshop 2009, Kyoto, Japan, June 12, 2009.
- 2) Takemura, T.: Long-term trend of aerosol radiative forcing estimated with different emission inventories. 8th AeroCom Workshop, Princeton, NJ, USA, October 5, 2009.
- 3) Takemura, T., and A. Ohmura: Trend of surface solar radiation over Asia simulated by aerosol transport-climate model. AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, December 14, 2009.
- 4) Takemura, T., and A. Ohmura: Analysis of decadal trend of surface solar radiation in Asia simulated by an aerosol transport-climate model. 3rd Asia Pacific Radiation

Symposium, Seoul, Korea, August 25, 2010.

- 5) Takemura, T.: Change in surface solar radiation due to aerosols for several decades based on AeroCom Phase II Experiment. 9th AeroCom Workshop, Oxford, UK, September 28, 2010.
- 6) Takemura, T.: Evaluation and data assimilation of aerosol distributions and climate effects simulated by SPRINTARS using remote sensing observations in the Asian region. 16th CReS International Symposium, Okinawa, Japan, October 21, 2010.

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない

(6) その他

弓本桂也、山本・正野論文賞、日本気象学会（2010）.