

課題名 A-0903 大気環境に関する次世代実況監視及び排出量推定システムの開発

課題代表者名 岩崎 俊樹 (東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻 教授)

研究実施期間 平成21～23年度

累計予算額 84,795千円 (うち23年度 28,533千円)  
予算額は、間接経費を含む。

## 研究体制

- (1) 総括および4次元データ同化結果の検証(東北大学大学院理学研究科)
- (2) 二酸化炭素およびエアロゾル地表面フラックス推定に関する研究(国土交通省気象庁気象研究所)
- (3) 大気環境再解析システムの開発 ((独) 海洋研究開発機構)
- (4) データ同化情報を活用したモデルの改良 ((独) 国立環境研究所)

## 研究概要

### 1. はじめに(研究背景等)

地球環境保全のために、大気微量成分(二酸化炭素、エアロゾル、オゾンなど)のグローバルな実況監視に対する関心が高まっている。最近では、様々な衛星観測が実施されるようになった。二酸化炭素については2009年、OCO衛星(Orbiting Carbon Observatory)は打ち上げ失敗に終わったものの、温室効果ガス観測衛星(GOSAT衛星)の打ち上げは成功し貴重な観測データを送り続けている。また、GOSAT-IIやOCO-IIの打ち上げが計画されており、二酸化炭素の衛星観測は大幅な精度向上とデータ量の増加が期待される。エアロゾルについては、CALIPSO衛星(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)によるライダー観測データが得られるようになった。将来、ライダー観測は雲エアロゾル放射ミッション(Earth CARE 衛星)によって一段と強化される見込みである。オゾンに関しては、OMI(オゾン全量観測)やMLS(鉛直分布)などの精度の高い衛星観測データが得られている。また、亜酸化窒素や一酸化炭素など、様々なオゾン関連化学種の観測も行われている。大気微量成分の衛星観測は急速に進展している。しかしながら、衛星観測はある断面の情報に限定される。加えて、衛星観測はそれぞれの測器に起因する誤差を含んでいる。大気微量成分について、多くの観測情報を統合し、グローバルな3次元分布を再現するために、化学輸送モデルによる4次元データ同化システムの構築が期待されている。

データ同化とは観測データと予測モデルによる第一推定値を融合し、実況値を得るものである。特に、初期条件を得る目的で、数値予報分野で発達した。現在、数値予報分野では、4次元変分法に基づくデータ同化手法が主流である。しかし、4次元変分法によるデータ同化は、大気化学輸送モデルなどの複雑な予測式への適用は困難である。近年、いわゆる汎用性に優れたアンサンブルカルマンフィルター(EnKF)によるデータ同化スキームが開発された。数値予報分野のデータ同化実験でも、EnKFは4次元変分法と遜色ない精度を達成した。EnKFを用いれば、複雑な大気化学輸送モデルに対しても、比較的容易に4次元データ同化スキームを構築できる。そこで、本研究では、二酸化炭素、ダストエアロゾル、オゾンの実況監視・予測のために、EnKFを用いた化学輸送モデルの4次元データ同化システムを開発することにした。

本研究で使用する化学輸送モデルは、いずれも大気データのデータ同化出力により駆動される。したがって、大気微量成分のデータ同化出力の精度は、大気の再解析の精度に影響される。とりわけ、平均子午面循環は、大気微量成分のグローバル輸送を支配する。その精度は大気微量成分の分布に大きく影響する。下部成層圏のブリューワー・ドブソン循環(BDC)について、気象要素の再解析(気象庁(JRA-25)、米国気象局(NCEP/NCARおよびNCEP/DOE)、ヨーロッパ中期予報センター(ERA40、ERA-Interim))の精度に関心が高まっている。

### 2. 研究開発目的

本研究では、二酸化炭素、ダストエアロゾル、オゾンの大気微量成分の実況監視・予測のために、

EnKFによる4次元データ同化スキームを開発する。特に、EnKFによるデータ同化スキームが大気微量成分のデータ同化に使えることを確認する。

二酸化炭素については、疑似観測データを用いた観測システムシミュレーション実験(OSSE)によりEnKFによるデータ同化スキームの動作を確認し、地上、航空機、GOSATおよびAIRS(Atmospheric Infrared Sounder)の衛星観測データの同化の有効性を確認する。実際の観測データを用いた実験では、衛星データの前処理システムを作成し、4次元データ同化のインパクトを調べる。エアロゾルについては、CALIPSOのライダー観測データの同化試験(観測システム実験)を行う。エアロゾル分布に関するデータ同化結果を、黄砂の測候所等の独立観測データを用いて検証する。地表面フラックスに関する同化結果をモデル出力と比較する。EnKFによるオゾンの4次元データ同化システムでは、OMI(全量データ)やMLS(鉛直プロファイル)などの衛星観測データについての観測システム実験を行い、それぞれの衛星データのインパクトを調べる。オゾン関連化学種の衛星観測データの同化が与えるインパクトを調べる。

大気微量成分輸送の計算精度に大きな影響を与えるブリューワー・ドブソン循環について、大気の再解析(気象庁(JRA-25)、米国気象局(NCEP/NCARおよびNCEP/DOE)、ヨーロッパ中期予報センター(ERA40、Era-Interim))を比較検証する。また、気象庁では現在作成中の再解析JRA-55とJRA-25の速報的な比較解析を実施する。

### 3. 研究開発の方法

#### (1) 総括および4次元データ同化結果の検証

各サブプログラム担当者と協議のうえ研究計画を策定した。各サブプログラムの進捗を確認し、相互の情報交換を促進する。EnKFを用いた大気微量成分のデータ同化スキームについて、課題を体系的に整理する。特に、大気化学輸送モデルのデータ同化について発生した共通の課題については、協力して解決に当たる。同時に、それぞれの成分固有の問題を明らかにして、将来の課題として提起する。

質量加重付温位面帯状平均法(MIM: Mass-weighted Isentropic zonal Mean)に基づいて、気象要素のおもな再解析(気象庁(JRA-25)、米国気象局(NCEP/NCARおよびNCEP/DOE)、ヨーロッパ中期予報センター(ERA40、Era-Interim))のブリューワー・ドブソン循環(BDC)を解析する。年々変動や経年変化などの比較解析を通じて、再解析間の共通性とばらつきを評価する。また、気象庁では現在、新しい再解析JRA-55を実施中である。JRA-25の速報的な比較解析を通じて再解析の精度向上を評価する。再解析を用いた化学輸送モデルの長期積分から、BDCとオゾン分布の関係を明らかにする。

4次元データ同化の精度は利用する大気輸送モデルの性能に依存する。大気輸送モデルの性能を検証するため、再現された二酸化炭素の帯状平均場の季節変化を、他の解析や数値モデルの結果により比較・検証する。特に、輸送モデルの大きな不確定要因である鉛直拡散を調整する。

#### (2) 二酸化炭素およびエアロゾル地表面フラックス推定に関する研究

EnKFを用いた二酸化炭素フラックス解析システムを構築した。OSSEを行い、地上、航空機、衛星の観測データの有効性について調べる。実際の観測データを扱うデータ同化実験を実行するために、必要な技術開発(観測データ整備、輸送モデル改良、データ同化システム開発)を行なう。可能な限り多くのデータを収集し、品質管理を行なう。4次元データ同化実験の結果を、独立な観測データや他の解析結果と比較し、性能を評価する。特に、GOSATの観測データの同化手法を開発し、そのインパクトを明らかにする。

ダストエアロゾルの4次元データ同化システムを構築した。動作検証のために、双子モデル実験によって衛星搭載ライダー(CALIPSO)の観測値を擬似的に作成し、OSSEを行なう。データ同化結果を気象官署の黄砂観測データにより検証する。EnKFによるデータ同化システムを利用して、黄砂の大気中濃度分布を解析し、黄砂の地表面フラックス強度(放出量)の最適推定を行なう。データ同化により推定されたダストの地表面フラックスを、エアロゾルの化学輸送モデルの予測結果と比較し、数値モデルのパラメータ化の妥当性を調べる。

#### (3) 大気環境再解析システムの開発

本研究では、対流圏のオゾン分布と窒素酸化物の排出量を同時に推定する高度なデータ同化システムを開発した。データ同化手法にはEnKFを採用する。更に衛星搭載センサによる二酸化窒素の観測情報から日々の窒素酸化物の排出量を2.8度格子の分解能で推定することを可能とする。この手法を利用することで、(1)時間とともに観測情報を蓄積し、(2)化学輸送モデル(CTM)のアンサンブルシミュレーションにより動的に見積もられる背景誤差共分散情報を利用し排出量と濃度の間接的な関連

性を反映することが可能となる。モデル格子に対する観測データの時空間代表性を高めるためにスーパーオブザーベーション法を採用する。更に、成層圏オゾンの高度な実況監視を目指して、最先端のデータ同化手法であるEnKFと大気中の複雑なオゾン化学・輸送過程を取り入れた全球化学気候モデルを用いた4次元データ同化システムを構築する。

#### (4) データ同化情報を活用したモデルの改良

EnKFを環境研の化学気候モデルに適用して、東西風速、南北風速、気温、オゾン濃度の同化を行った。研究開発の手順は以下のとおりである。

- 1) CCSR/NIES(気候システム研究センター/国立環境研究所)気候モデルに対してこれらの変数のモデルのアウトプットをそのまま入力データとして使う完全実験(したがって、同化入力データに対しモデルのバイアスはないと見なされる)を行ってEnKFによる同化がうまく働いているかどうかの確認を行う。
- 2) 実際の観測データを使った同化実験をCCSR/NIES化学気候モデルを使って行い、モデルの風速、気温、オゾン濃度のバイアスが同化結果に及ぼす影響を調べる。
- 3) 同じ同化条件を用いた同様な実験を、CCSR/NIES気候モデルMIROC3.2、気象研化学気候モデル、および化学輸送モデルCHASERを使って共通の期間について行う。これらの異なるバイアスをもつ複数のモデルによる同化の結果を解析し、それぞれのモデルのもつバイアスが同化にどのような影響を与えるかについて解析を行う。また、これらの現有モデルのバイアスおよび同化に使用するデータの種類と同化性能との関係を明らかにする。

### 4. 結果及び考察。

#### (1) 総括および4次元データ同化結果の検証

本サブプログラムは本研究全体を総括した。本研究では、二酸化炭素、エアロゾル及びオゾンの3成分について、4次元データ同化システムを開発した。特に、EnKFに基づくデータ同化スキームは、大気微量成分の実況監視・予測に大変有効であることが実証された。観測データをEnKFスキームにより大気化学輸送モデルへ同化する基本フレームは共通である。異なる大気微量成分のデータ同化システムを並行して開発することにより、大気微量成分のデータ同化に関する一般的な手法の確立を目指した。輸送モデルの精度、背景誤差相関を計算する際の局所化の考え方などについては、共通する課題として検討された。研究が進展するにつれて、それぞれの化学種に固有の問題が顕在化した。二酸化炭素では、GOSATのバイアスを修正する前処理がたいへん重要であった。エアロゾルの場合は、数値モデルで予測した地表面フラックスはデータ同化による推定との相違が顕著となり、モデルのパラメータ化に対する課題を提示した。オゾンの場合は、複雑な反応をする関連化学種の観測データの同時同化の手法の開発が興味ある課題となった。

本サブプログラムの2番目の課題では、代表的な大気再解析、気象庁(JRA-25)、米国気象局(NCEP/NCAR & NCEP/DOE)、ヨーロッパ中期予報センター(ERA40、Era-Interim)について、ブリューワー・ドブソン循環(BDC)を比較した。化学輸送モデルの精度は、それを駆動するのに用いる大気再解析の精度に依存する。とりわけ平均子午面循環のBDCは、大気微量成分の分布に大きな影響を与える。比較解析の結果、BDCは最も基本的な循環であるにもかかわらず、再解析間に相当大きな相違があることが分かった。さらに、気象庁の新しい再解析、JRA-55の速報的な比較研究も行った。

3番目の課題としては、気象研究所で開発された二酸化炭素のデータ同化システム出力の検証を行った。詳細な検証から、化学輸送モデルの鉛直拡散係数を調整した。GOSATの観測データは、大きな季節変化を示す陸上の植生による二酸化炭素フラックスの解析には有効であることが分かった。ただし海洋上のフラックス推定や人間活動の影響を評価するためには、データ同化スキームをさらに改良するとともに、衛星データの精度向上およびデータ量の増加に期待するところが大きい。

#### (2) 二酸化炭素およびエアロゾル地表面フラックス推定に関する研究

二酸化炭素に関しては、地上観測データ、航空機観測データ、衛星観測データ(GOSAT およびAIRS)を一体的に同化し、二酸化炭素濃度と二酸化炭素フラックスを一体的に解析するシステムを構築した。OSSEでは、地上、航空機、衛星の観測はそれぞれ相互に補完する傾向があり、すべてを使用したときに最も地表面フラックスの推定精度が高くなることが示された。実データの同化では、観測データの品質管理に輸送モデルと逆解析を組み合わせる客観的な手法を考案して実装した。現時点では衛星観測データに無視できないバイアスが残っていることが判明したため、輸送モデルと逆解析を用いた衛星観測データのバイアス補正システムを構築した。その結果、GOSATでは8ppm程度の、AIRSは3ppm程度

のバイアスを補正した。解析された二酸化炭素濃度は解析値に近くなる傾向を示すと共に、主に陸域のフラックスを修正することができた。ただし、人間活動の影響の大きい都市近郊では、濃度分布の局地性が著しく強いためにその扱いが難しい。また、海面でのフラックスは変動の幅が小さいことから、データ同化による修正はまだ難しいのが現状である。二酸化炭素濃度、フラックス推定精度に大きな影響を与える輸送モデルに関しては、気象研・気象庁大気大循環モデルとの直接結合を行い、鉛直輸送過程に新しい積雲対流スキームを導入するなど改良を施した。

エアロゾルに関しては、衛星搭載ライダーによるエアロゾル観測とEnKFを用いることによって、エアロゾルのデータ同化システムを新規開発した。このデータ同化システムの動作を確かめるためにOSSEを行い、良好な結果を得た。実観測データによる現実大気へのデータ同化では、特に東アジアのダストエアロゾル（黄砂）に着目してその解析結果を気象官署のデータで検証した。CALIPSOの観測データを同化することにより、黄砂の水平分布が大幅に改善された。また、黄砂の発生域から日本へかけての移流の様子が正確に把握できるようになっただけでなく、発生域での地表面フラックス量（黄砂発生量）をデータ同化で逆推定できていることが確認できた。データ同化で推定された地表面フラックスは、大気化学輸送モデルのパラメータ化による推定とかなり異なることが確認された。フラックスの比較を徹底的に行うことにより、化学輸送モデルのダスト生成に関するパラメータ化の改良にも有益である。衛星搭載ライダーのデータ同化に成功したのは我々が世界初であり、この技術を応用することによって黄砂予報の精度を劇的に改善することが可能である。将来、Earth-CARE衛星の観測データが得られるようになれば、一層の予報改善が期待される。

### （3）大気環境再解析システムの開発

密な衛星観測データを同化に利用することで、大気微量成分のデータ同化システムから時空間に均一で均質な大気環境データセットを作成可能とした。データ同化から衛星観測データの情報を最大限に引き出すとともに、同化プロセスを解析することで現在の化学輸送モデルが持つ問題点を調査した。まず、東アジアおよび全球の大気汚染の把握に向けた最適な観測網に関する考察に向けて、データ同化システムを用いたOSSEを行った。OSSEでは、新たな観測の持つインパクトを測器が開発される以前に数値シミュレーションから調査できる。OSSE結果の解析から、東アジア域での大気環境の実況監視の向上のために静止衛星観測が大変重要であることが明らかとなった。更に、実際の衛星観測データを利用した同化実験を実施した。対流圏微量成分のモデルシミュレーションでは、大気中の化学輸送過程に加えて地表面での排出／沈着過程に起因する大きな不確定が存在する。データ同化により最適化された排出量データは主に人為起源および生物燃焼と関連する重要な情報を提供し、解析された濃度の時空間変動に関する情報は大気環境の実況監視と大気プロセスの理解に役立つ。解析から、従来のボトムアップアプローチによるエミッションインベントリには大きな不確定性が存在することが明らかとなった。本データ同化システムを用いた成層圏オゾンのデータ同化実験からは、オゾン全量観測データとともに3次元オゾン濃度観測データを同化に用いた場合に最も解析精度が良くなることが明らかとなった。高精度な3次元オゾン解析データの作成には複数の異なる衛星観測データを利用してデータ同化を行うことが有効であることが示された。

### （4）データ同化情報を活用したモデルの改良

- 1) CCSR/NIES化学気候モデルにEnKFを適用して水平風速、気温、オゾン濃度の同化の完全実験を行った。理想的には、モデルのアウトプットは入力データに完全に一致すべきであるが、結果は、変動の激しい部分に若干ずれを生じていた。これは、計算時間の節約のため、同化の時間分解能をある程度の長さにとらざるを得ない（本研究では6時間に設定）ことが関係している。同化の時間分解能をさらに短くとれば解消すると考えられる。
- 2) 次に、実観測データをEnKFによって同化した実験を行った。この場合、モデルのこれらの変数と観測値との間には食い違いがある（モデルは観測値を完全に再現できるものではないため）。それによって、同化結果は、観測値からの一定のずれを生じる。CCSR/NIES化学気候モデルでは、下部成層圏の50hPaの高度において、同化結果は観測値に近い値と変動を示しているが、上部成層圏の5hPaでは、変動は近いが値にずれを生じている。特にオゾン濃度と気温のずれが目立つ。オゾンに関しては変動についてもずれを生じた。これは、モデルのもつバイアスに関係している。東西風速、気温、オゾン濃度の化学気候モデルの2000年3月の平均値とJRA25再解析データの同年同月の平均値との差の緯度－高度分布調べたところ、気温とオゾン濃度に関して、50hPaに比べて5hPaのバイアスが大きいことがわかった。
- 3) 同様な実験を、日本の3研究機関で現在開発されている4つの異なる化学輸送モデルへEnKFを適用

し、NASAの地球観測衛星Auraに搭載されたMicrowave Limn Sounder (MLS) で観測された3次元オゾン濃度およびOzone Monitoring Instrument (OMI) -Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) から得られたオゾン全量の同化実験を行った。同化のための実験設定は、4つのモデルに共通に適用した。以下の表に示す4つの実験を行い、それぞれの実験による同化のバイアスと誤差 (RMSE、root mean square error) を評価した。

| 実験名     | 設定概要                              |
|---------|-----------------------------------|
| O3-FREE | オゾン同化なし                           |
| MLS     | MLS (3次元オゾン濃度, 200hPa~0.1hPa) を同化 |
| OMI     | OMI-TOMS (オゾン全量) を同化              |
| FULL    | MLS と OMI-TOMS を同化                |

その結果、現状の、バイアスのある化学気候モデルを使っても、全球成層圏オゾン濃度分布と全球オゾン全量分布の両方を同化することで、オゾン全量の誤差をモデル間でほぼ同程度の、観測誤差以下の小さい値にすることができた。また、モデルのオゾンの鉛直分布に正・負のバイアスが混在する場合は、オゾン全量の観測データだけではオゾン濃度の良好な同化結果を得ることが難しいことがわかった。さらに、成層圏のオゾン濃度を固定した対流圏化学モデルでは、誤差を小さくすることは難しいことがわかった。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

二酸化炭素、エアロゾル、オゾンというそれぞれ性質の異なる大気微量成分に対して、EnKFによる4次元データ同化システムが十分な機能を発揮することが実証された。今後、衛星による大気微量成分観測は発展することが見込まれる。4次元データ同化の高度化により、大気微量成分の実況監視と予測は大幅な精度向上が見込まれる。対流圏微量成分のモデルシミュレーションでは、大気中の化学／輸送過程に加えて地表面での排出／沈着過程に起因する大きな不確定が存在する。複数の衛星搭載センサにより取得された複数の化学物質の観測情報を併せて利用することで、オゾンとその前駆気体の大気中濃度と排出量を同時に最適化可能とするシステムを構築した。先駆的な試みを実施した本研究から、全球および東アジア域における数十年に及ぶオゾンおよび関連化学種の長期再解析データ作成の足掛かりとなる重要な成果が得られた。また、本研究により達成した成層圏オゾンの実況監視の改善は、成層圏オゾンの分布変動を引き起こすプロセスの解明に大いに役立つものである。衛星観測情報をデータ同化で統合し対流圏および成層圏の化学場を包括的に解析した研究は世界でも僅かであり、先駆的な試みを実施した本研究から、全球および東アジア域における数十年に及ぶオゾンおよび関連化学種の長期再解析データ作成の足掛かりとなる重要な成果が得られた。

### (2) 環境政策への貢献

大気微量成分のデータ同化は、実況監視・予測精度の向上を通じて、様々な応用分野がある。二酸化炭素の地表面フラックスの推定にはまだ課題が多いが、衛星観測データが改善されれば大幅な精度向上が期待される。エアロゾルのデータ同化では、黄砂の予測精度の向上が期待される。将来は、硫化水素や海塩粒子などのエアロゾルへの応用も視野に入れる。

大気汚染を引き起こす化学物質の排出量と大気中濃度の変動を、これまでの解析手法と比較してより高精度に解析することが可能となった。これらの情報は大気汚染状況の監視／警報の発令／予報、汚染物質排出の取り締まりに寄与することができる。本研究で開発した成層圏オゾンのデータ同化技術によってオゾン短期予測精度が向上したため、気象庁業務（紫外線情報提供）の高度化のため現業化される予定となっている（平成26年度）。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) T. Iwasaki, H. Hamada and K. Miyazaki: J. Meteor. Soc. Japan, 87, 997-1006 (2009)  
“Comparisons of Brewer-Dobson Circulations diagnosed from Reanalyses”
- 2) K. Miyazaki: J. Geophys. Res., 114, D19304, doi:10.1029/2009JD011892 (2009)

- “Performance of a local ensemble transform Kalman filter for the analysis of atmospheric circulation and distribution of long-lived tracers under idealized conditions”
- 3) T. Maki, M. Ikegami, T. Fujita, T. Hirahara, K. Yamada, K. Mori, A. Takeuchi, Y. Tsutsumi, K. Suda, T. J. Conway: *Tellus B*, 62, 797–809 (2010)  
 “New technique to analyse global distributions of CO<sub>2</sub> concentrations and fluxes from non-processed observational data”
- 4) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, A. Shimizu, and T. Miyoshi: *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 39–49 (2010)  
 “Data assimilation of CALIPSO aerosol observations”
- 5) H. Akiyoshi, Y. Yamashita, K. Sakamoto, L. B. Zhou, and T. Imamura: *J. Geophys. Res.*, 115, D19301(1–22), doi:10.1029/2009JD012683 (2010)  
 “Recovery of stratospheric ozone in calculations by the Center for Climate System Research/National Institute for Environmental Studies chemistry-climate model under the CCMVal-REF2 scenario and a no-climate-change run”
- 6) T. Maki, T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, and M. Mikami: *SOLA*, 7A, 021–024 (2011)  
 “The Impact of Ground-based Observations on the Inverse Technique of Aeolian Dust Aerosol”
- 7) K. Miyazaki, T. Maki, P. Patra, and T. Nakazawa: *J. Geophys. Res.*, 116, D16306, doi:10.1029/2010JD015366 (2011)  
 “Assessing the impact of satellite, aircraft, and surface observations on CO<sub>2</sub> flux estimation using an ensemble-based 4-D data assimilation system”
- 8) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, T. Maki and M. Mikami: *SOLA*, 7A, 40–43 (2011)  
 “The Effects of Snow Cover and Soil Moisture on Asian Dust: II. Emission Estimation by Lidar Data Assimilation”
- 9) T. T. Sekiyama, M. Deushi, and T. Miyoshi: *SOLA*, Vol. 7, 041–044, doi:10.2151/sola.2011-011 (2011)  
 “Operation-Oriented Ensemble Data Assimilation of Total Column Ozone”
- 10) M. Deushi, and K. Shibata: *Papers in Meteorology and Geophysics*, 62, 1–46 (2011) “Development of a Meteorological Research Institute Chemistry–Climate Model version 2 for the Study of Tropospheric and Stratospheric Chemistry”
- 11) C. Kobayashi, and K. Shibata: *J. Meteor. Soc. Japan*, 89, No. 4, pp.363–376 (2011)  
 “Evaluation of Dynamical Contribution to Lower Stratospheric Ozone Trends in Northern Mid-latitudes over the Last Two Decades (1980–2006) Using a Chemical Transport Model”
- 12) A. F. Bais, K. Tourpali, A. Kazantzidis, H. Akiyoshi, S. Bekki, P. Braesicke, M. P. Chipperfield, M. Dameris, V. Eyring, H. Garny, D. Iachetti, P. Jöckel, A. Kubin, U. Langematz, E. Mancini, M. Michou, O. Morgenstern, T. Nakamura, P. A. Newman, G. Pitari, D. A. Plummer, E. Rozanov, T. G. Shepherd, K. Shibata, W. Tian, and Y. Yamashita: *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 7533–7545, doi:10.5194/acp-11-7533-2011, www.atmos-chem-phys.net/11/7533/2011/ (2011)  
 “Projections of UV radiation in the 21st century: impact of ozone recovery and cloud effects”
- 13) K. Miyazaki, H. J. Eskes, and K. Sudo: *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 2263–2288, doi:10.5194/acp-12-2263-2012 (2012)  
 “Global NO<sub>x</sub> emission estimates derived from an assimilation of OMI tropospheric NO<sub>2</sub> columns”

<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)  
 特に記載すべき事項はない。

## (2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) T. Iwasaki, H. Hamada and K. Miyazaki: Comparisons of Brewer–Dobson Circulations diagnosed from Reanalyses. The 5th WMO Symposium on Data Assimilation, Melbourne, Australia, October, 2009
- 2) T. T. Sekiyama, T. T. and T. Y. Tanaka, 2010: Dust aerosol analysis and prediction with 4D–EnKF data assimilation, EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria, 02–07 May 2010.
- 3) 中村哲、秋吉英治、宮崎和幸、岩崎俊樹: 日本気象学会 2010年度秋季大会、京都、2010年10月27–29

- 日；2010年度秋季大会講演予稿集(96)、193。「環境研CCM-LETKFを用いた大気-オゾン同時推定と三次元オゾンプロファイル利用のインパクト」
- 4) 中村哲, 秋吉英治, 宮崎和幸, 岩崎俊樹: 日本気象学会 2010年度秋季大会、京都、2010年10月27-29日；2010年度秋季大会講演予稿集(96)、509.
  - 5) 岩崎俊樹、横尾好朗、沢田雅洋、中澤高清、青木周司、柴田清孝、小林ちあき、眞木貴史、関山剛、出牛真、宮崎和幸、中村哲、秋吉英治：大気環境に関する次世代実況監視及び排出量推定システムの開発、幕張、May, 2011 「化学気候モデルへ適用したLETKFによるオゾン同化シミュレーション実験」
  - 6) K. Miyazaki, T. Sekiyama, T. Nakamura, M. Deushi, T. Maki, C. Kobayashi, H. Akiyoshi, K. Shibata, Y. Yokoo, M. Sawada, T. Nakazawa, S. Aoki, and T. Iwasaki: Recent developments in chemical data assimilation for atmospheric gases and aerosols in Japan, The 8th Stratospheric Processes and their Role in Climate (SPARC) Data Assimilation workshop, Brussels, Belgium, June 20-22, 2011.
  - 7) T. Nakamura, M. Deushi, K. Miyazaki, C. Kobayashi, H. Akiyoshi, K. Shibata, T. Iwasaki: 2011 International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly, Melbourne: 28 June -7 July 2010, PROGRAM HANDBOOK, 243 (2011) "An Inter-comparison of Observation System Experiments for Stratospheric Ozone between LETKF Data Assimilation Systems with CCSR/NIES CCM, MRI CCM, and CHASER CTM"
  - 8) K. Miyazaki, H. Eskes: Global NO<sub>x</sub> emission estimates from OMI NO<sub>2</sub> data and ensemble Kalman filter data assimilation, AIR QUALITY AND CLIMATE CHANGE: Interactions and Feedback, Urbino, Italy, 13-16 September 2011.
  - 9) 中村哲、秋吉英治、出牛真、宮崎和幸、小林ちあき、柴田清孝、岩崎俊樹：第17回大気化学討論会、2011年10月18日-20日（発表2011年10月18日）、京都大学生存圏研究所、第17回大気化学討論会講演要旨集、P33 「CCSR/NIES化学気候モデル・気象研化学気候モデル・CHASERを用いた局所アンサンブルカルマン変換フィルター(LETKF)による成層圏オゾンデータ同化実験の相互比較」
  - 10) K. Miyazaki: Simultaneous assimilation of satellite NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, and HNO<sub>3</sub> data for the integrated analysis of tropospheric compositions, Eindhoven University of Technology, 23 February 2012.
  - 11) T. Maki, T. T. Sekiyama, K. Shibata, K. Miyazaki, T. Miyoshi, K. Yamada, Y. Yokoo and T. Iwasaki: Carbon Cycle Analysis using real observation data and LETKF, The GOSAT WORKSHOP 2012 - towards GOSAT-2 mission, Tokyo, 29 February 2012.

## 7. 研究者略歴

課題代表者：岩崎俊樹

1952年生まれ、東北大学大学院理学研究科博士課程修了、博士(理学)、現在、東北大学大学院理学研究科教授

研究参画者

(1) 1) 岩崎俊樹 (同上)

2) : 中澤高清

1947年生まれ、東北大学大学院理学研究科博士課程単位取得退学、博士(理学)、東北大学理学部助教授、現在、東北大学大学院理学研究科教授

3) : 青木周司

1954年生まれ、東北大学大学院理学研究科博士課程修了、博士(理学)、国立極地研究所助手、現在、東北大学大学院理学研究科教授

(2) 1) : 柴田清孝

1953年生まれ、北海道大学大学院理学研究科修士課程修了、博士(理学)、現在、国土交通省気象研究所環境・応用気象研究部第一研究室長

2) : 小林ちあき

1964年生まれ、埼玉大学理学部卒業、現在、国土交通省気象庁気象研究所気候研究部第五研究室主任研究官

3) : 眞木貴史

1966年生まれ、京都大学理学部卒業、国土交通省気象庁地球環境・海洋部環境気象管理

官付化学輸送モデル開発推進官、現在、国土交通省気象研究所環境・応用気象研究部第一研究室主任研究官

4) : 関山 剛

1970年生まれ、大阪大学理学部卒業、現在、国土交通省気象庁気象研究所環境・応用気象研究部第一研究室主任研究官

5) : 出牛真

1974年生まれ、気象大学校卒業、現在、国土交通省気象庁気象研究所環境・応用気象研究部第一研究室研究官

(3) 1) : 宮崎和幸

1978年生まれ、東北大学大学院理学研究科博士課程修了、博士（理学）、現在、独立行政法人海洋研究開発機構地球環境変動領域研究員

(4) 1) : 秋吉英治

1961年生まれ、九州大学大学院理学研究科博士課程修了、博士（理学）、福岡大学理学部助手、現在、独立行政法人国立環境研究所大気圏環境研究領域主任研究員

**A-0903 大気環境に関する次世代実況監視及び排出量推定システムの開発****(1) 総括および4次元データ同化結果の検証**

東北大学大学院理学研究科

岩崎俊樹

中澤高清

青木周司

〈研究協力者〉

国土交通省気象庁気象研究所

眞木 貴・小林ちあき

(独) 海洋研究開発機構

宮崎和幸

平成21～23年度累計予算額：24,565千円

(うち、平成23年度予算額：5,044千円)

予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】** 本サブプログラムは本研究全体を総括した。本研究の目的は、大気微量成分（二酸化炭素、エアロゾル及びオゾン）の濃度分布や地表面フラックスの実況監視と予測のために、化学輸送モデルを用いた大気微量成分の4次元データ同化システムを構築することである。データ同化スキームには汎用性の高いアンサンブルカルマンフィルター（EnKF）を用いる。異なる大気微量成分のデータ同化システムを並行して開発することにより、大気微量成分のデータ同化に関する一般的な手法の確立を目指した。その結果、EnKFによるデータ同化は、大気微量成分の実況監視・予測に大変有効であることが確認された。

本サブプログラムの2番目の課題では、代表的な大気再解析、気象庁（JRA-25）、米国気象局（NCEP/NCAR&NCEP/DOE）、ヨーロッパ中期予報センター（ERA40、Era-interim）について、ブリューワー・ドブソン循環（BDC）を比較した。化学輸送モデルの精度は、それを駆動するのに用いる大気再解析の精度に依存する。とりわけ平均子午面循環のBDCは、大気微量成分の分布に大きな影響を与える。比較解析の結果、BDCは最も基本的な循環であるにもかかわらず、再解析間に相当大きな相違があることが分かった。さらに、気象庁の新しい再解析、JRA-55の速報的な比較研究も行った。

3番目の課題は、気象研究所で開発された二酸化炭素のデータ同化システム出力の検証を行った。とくに、温室効果ガス観測衛星(GOSAT)の観測データは、大きな季節変化を示す陸上の植生による二酸化炭素フラックスの解析には有効であることが分かった。ただし海洋上のフラックス推定や人間活動の影響を評価するためには、データ同化スキームをさらに改良するとともに、衛星データの精度向上およびデータ量の増加に期待するところが大きい。なお、二酸化炭素の研究は気象研からの報告にまとめる。

**【キーワード】** データ同化、アンサンブルカルマンフィルター、二酸化炭素、ダストエアロゾル、オゾン

## 1. はじめに

地球環境保全のためには、大気微量成分（二酸化炭素、エアロゾル、オゾンなど）の濃度分布及び排出量に関する精度の高い実況監視情報と予測情報が必要である。このような要請に応える方法として、大気微量成分の4次元データ同化システムの開発が期待されている。4次元データ同化システムとは、観測データを予測モデルに同化することによって、観測データの持つ情報を最大限活用し物理的な整合性の高い実況解析を行うものである。気象予測分野などで長く開発されてきた。しかしながら、これまで気象予測分野で用いられてきたデータ同化スキームは、変分法に基づくものである。その場合、予測モデルの自己随伴モデルの構築が不可欠であり、予測モデルが複雑な場合は適用が困難であった。他方、カルマンフィルターによるデータ同化も早くから検討されてきたが、背景誤差共分散の評価に多大な計算を要することが、実利用の大きな障害となっていた。しかし、ここに来て、背景誤差相関を計算するのにアンサンブル予報を利用することにより、計算量を大幅に減らすことが提案された<sup>1,2)</sup>。これを契機に、いわゆるアンサンブルカルマンフィルター（EnKF）によるデータ同化研究が急速に進展した。気象予測分野においては、EnKFは4次元変分法と遜色ない精度を達成した<sup>3)</sup>。EnKFでは、予測式をブラックボックスのまま、予測結果のみを利用する。予測式に関連したコーディングの負荷はほとんどないので、予測式が複雑な大気微量成分のデータ同化に向いている。そこで、本研究では、二酸化炭素、ダストエアロゾル、オゾンの実況監視・予測のために、EnKFによる4次元データ同化スキームを開発することにした。それぞれの大気微量成分の4次元データ同化スキームは各サブプログラムで開発される。本サブプログラムは、全体を総括する。

本研究で使用する化学輸送モデルは、いずれも大気大循環モデルに結合されている。過去の微量成分の観測データを同化する際には、実際に近い大気状態を実現するために、大気大循環モデルの気象要素を大気再解析の結果に強制的に近づける。したがって、大気微量成分のデータ同化出力の精度は、大気の再解析の精度に影響される。平均子午面循環は、大気微量成分のグローバル輸送を支配するので、その精度は大気微量成分の分布に大きく影響する。とりわけ、下部成層圏のブリューワー・ドブソン循環（BDC）は重要である。そこで、本サブプログラムでは、BDCについて、気象要素の再解析（気象庁（JRA-25）、米国気象局（NCEP/NCARおよびNCEP/DOE）、ヨーロッパ中期予報センター（ERA40、Era-interim））を比較する。また、気象庁では新しい再解析JRA-55を実施中である。本サブプログラムでもJRA-25と速報的な比較解析を実施する。

二酸化炭素では、初めての本格的な二酸化炭素の観測衛星となる温室効果ガス観測衛星（GOSAT）の観測データの同化に大きな関心が集まっている。GOSATの観測データは誤差が比較的大きく、データ量も必ずしも多くはないので、有効利用は簡単ではない。しかし、今後、GOSAT-IIやOCO（Orbiting Carbon Observatory）-IIなど、衛星による高精度の二酸化炭素観測が計画されており、そのデータ同化はますます重要な課題となるであろう。本研究においては、二酸化炭素のデータ同化システムを構築し、GOSATの観測データがデータ同化出力結果に与えるインパクトを調べる。

## 2. 研究開発目的

### （1）研究計画の総括

本研究では、二酸化炭素、ダストエアロゾル、オゾンなどの大気微量成分の実況監視・予測の

ために、アンサンブルカルマンフィルター（EnKF）による4次元データ同化スキームを開発する。特に、EnKFによるデータ同化スキームが大気微量成分のデータ同化に使えること確認する。本サブプログラムでは、各サブプログラムの研究の進捗状況を掌握し、相互の情報交換を促進する。また、研究計画全体を遅滞なく実施する。

### （2）大気再解析のブリューワー・ドブソン循環の相互比較

本サブプログラムでは、大気微量成分輸送計算精度に大きな影響を与えるブリューワー・ドブソン循環について、大気の再解析（気象庁（JRA-25）、米国気象局（NCEP/NCARおよびNCEP/DOE）、ヨーロッパ中期予報センター（ERA40、Era-interim））を比較検証する。また、気象庁では現在作成中の再解析JRA-55とJRA-25の速報的な比較解析を実施する。

### （3）二酸化炭素のデータ同化結果の評価・検証

気象研究所で開発された4次元データ同化システムの性能を観測データに基づいて評価する。特に、化学輸送モデルの性能がデータ同化に及ぼす影響を評価する。GOSATの観測データのみを同化した場合、解析結果に与えるインパクトを評価する。

## 3. 研究開発方法

### （1）研究計画の総括

各サブプログラム担当者と十分協議のうえ研究計画を策定する。年2回程度研究打合せを企画し、各サブプログラムの進捗を確認し、各サブプログラム間相互の情報交換を促進する。特に、二酸化炭素、エアロゾル、オゾンの各4次元データ同化システムで発生した共通の問題については、協力して解決に当たる。EnKFを用いた大気微量成分のデータ同化スキームについて、課題を体系的に整理する。同時に、それぞれの成分固有の問題を明らかにして、将来の課題として提起する。

### （2）大気再解析のブリューワー・ドブソン循環の相互比較

質量加重付温位面帯状平均法（MIM: Mass-weighted Isentropic zonal Mean）に基づいて、気象要素の再解析（気象庁（JRA-25）、米国気象局（NCEP/NCARおよびNCEP/DOE）、ヨーロッパ中期予報センター（ERA40、Era-interim））のブリューワー・ドブソン循環（BDC）を解析する<sup>4)</sup>。年々変動や経年変化などの比較解析を通じて、再解析間の共通性とばらつきを評価する。また、気象庁では現在、新しい再解析JRA-55を実施中である。JRA-25の速報的な比較解析を通じて再解析の精度向上を評価する。再解析を用いた化学輸送モデルの長期積分から、BDCとオゾン分布の関係を明らかにする。

### （3）二酸化炭素のデータ同化結果の評価・検証

4次元データ同化の精度は利用する大気輸送モデルの性能に依存する。大気輸送モデルの性能を検証するため、再現された二酸化炭素の帯状平均場の季節変化を、他の解析や数値モデルの結果により比較・検証する。特に、輸送モデルの大きな不確定要因である鉛直拡散を調整する。

今後、GOSAT-IIやOCO-IIなど、衛星観測データが増加することが期待される。このため、GOSATの観測データの利用について検討する。GOSAT衛星観測データのみを4次元同化し、地上観測を検

証データとして扱い、GOSATの観測データを同化しない場合と比較して、GOSAT衛星観測データのインパクトを調べる。

## 4. 結果及び考察

### (1) 総括

#### 1) 本プロジェクトの背景と目的

##### a 大気微量成分の実況監視の重要性

大気環境に大きな影響を与える微量気体やエアロゾルの監視・予測は重要な研究課題である。二酸化炭素は言うまでもなく地球温暖化をもたらす原因物質として、その動態が大きな関心を集めている。人為的な排出量は、化石燃料の消費量に基づいて、様々な推定が試みられている。しかし、どの推定も大きな不確実性を伴っている。また、陸上の植生は春に吸収し秋に放出するという大きな季節変化を示す。その結果、年平均の正味の吸収量については、不確実性が極めて大きい。海洋の吸収量は大気海洋のそれぞれの二酸化炭素分圧を比較することにより求めているが、広い海洋全体のフラックス推定には相当の誤差が混入する。観測データに基づき地表面フラックスを正確に求めたい。このために、インバージョンによる逆推定の研究が進められてきた。しかしながら、インバージョンは観測のデータ量が多い場合は、すべての観測データを有効に使うのは難しいという欠点がある。現在、GOSAT-IIやOCO-IIなど、二酸化炭素の観測データが急速に増えることが見込まれている。これらの観測データを有効に活用するために、大気微量成分の4次元データ同化システムの開発が期待されている。

春には、中国で発生する黄砂がしばしば日本にも降り注ぎ、視程障害や健康被害などで市民生活にも影響を与える。発生源に近い中国や韓国では、その被害は一層深刻である。気象庁でも数年前より数値モデルに基づく黄砂の予測情報を一般に提供している。しかしながら、黄砂の発生量の評価は大変むずかしく、予報誤差の大きな要因となっている。近年ではライダー観測が積極的に行われるようになった。CALIPSO衛星(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations)では観測データの分布は線状ではあるが、鉛直分布に関する豊富な観測データを提供している。また、将来は雲エアロゾル放射ミッション(Earth-CARE衛星)がさらに多量のライダー観測データを提供する見込みである。これらの衛星によるライダー観測データを利用し、数値モデルの初期条件を改善し、予報精度の向上を図りたいと考えている。このため、衛星観測データの4次元同化に大きな期待が集まっている。特に、EnKFによる4次元データ同化では、黄砂の3次元分布のみならず、発生量(地表面フラックス)の情報も得ることができる。発生量が分かれば、発生を診断するためのパラメタリゼーションスキームを検証することが可能であり、データ同化の情報を利用して、予測モデルの精度向上も期待される。

成層圏のオゾン是有害な紫外線を除去する有益な物質である。他方、対流圏のオゾンは光化学オキシダントの原因物質で有害な物質である。紫外線情報を提供するためにオゾンの予測が実施されている。また、光化学オキシダントについて、複雑な対流圏の光化学過程を含む化学輸送モデルにより予測が試みられている。いずれにしても、数値予測のためには精度の高い初期条件が必要である。オゾンについては、OMI(全量データ)やMLS(鉛直プロファイル)などの比較的精度の高い衛星観測データが得られている。しかしながら、OMIからは鉛直分布は分からないし、MLSは鉛直分布が分かるものの軌道に沿う線上でしかデータが得られない。また、オゾンの予測のた

めには関連化学種の初期条件も必要である。観測データを補いグローバルな3次元分布を常時監視・予測していくために、化学輸送モデルを利用した4次元データ同化システムの開発が望まれる。4次元データ同化の精度は数値モデルの精度に依存する。オゾンに関連化学種が多く反応も複雑で、化学輸送モデルの精密化が課題である。

#### b 大気微量成分の4次元データ同化

前節で述べたように、二酸化炭素、エアロゾル、オゾンの4次元データ同化スキームの開発が焦眉の急となっている。大気微量成分に関する高度なデータ同化の研究はまだ始まったばかりである。それぞれの成分について、目的は異なるものの、大気化学輸送モデルを利用する4次元データ同化という大きなフレームは共通である。本研究では、以上のような背景を考慮し、3つの微量成分に対する4次元データ同化スキームを並行して開発することにした。その理由は、大気微量成分のデータ同化に関する一般的な手法の確立を目指すためである。また、分野の異なる研究者が協力することで、研究の効率化を図るとともに、分野横断的な情報交換を行うためである。

4次元データ同化では、予測のための数値モデルを観測データで修正しながら、時間積分を実行する。特に気象予測の分野では、数値モデルの気温や風の初期条件を得るために、早くから開発が進められてきた。データ同化の原理は図(1)-1に示すとおりである。t1時刻の解析値を初期条件として数値モデルによりt2時刻まで予測する。予測結果を第一推定値とし、観測データにより修正し新たにt2時刻の解析値を得る。次にt2時刻から予測を行う。この手続きを繰り返す。数値モデルの変数の自由度に較べて、観測データ量が圧倒的に少ないために、数値モデルの合理性を最大限に考慮し、実況値を推定。

気象予測の分野では、4次元データ同化手法は、継続的修正法、多変量最適内挿法、3次元変分法、4次元変分法と進化してきた。とくに、4次元変分法は予測モデルそのものを力学的な拘束条件と見なすことにより、大幅な精度向上が図られた。ただし、4次元変分法では、解析値を決定する際に、同化期間のすべての時間ステップの変数値を使用するので、莫大な計算機メモリーを必要とする。また、予測モデルの自己随伴演算子をコーディングするする必要があり、プログラム開発にたいへん手間がかかる。予測変数が多く、かつ、予測モデルが複雑な化学輸送モデルによる4次元データ同化にはあまり向かない。このため、なかなか大気微量成分のデータ同化には取り組まれてこなかった。他方、カルマンフィルターの4次元データ同化への利用は、昔から考えられていた。しかしながら、背景誤差相関（予報誤差相関）の計算に手間がかかるため、気象分野ではあまり利用されなかった。しかし、アンサンブル予報の結果を用いて背景誤差相関を評価する、アンサンブルカルマンフィルター（EnKF）が提案されて、気象分野でも一気に実用化が進みだした。Miyoshi and Yamane, (2007)<sup>3)</sup>は、気象予測においてもEnKFは4次元変分法と遜色のない4次元データ同化を実行できることを明らかにした。また、この手法では、予報結果を利用するだけで予報モデルの詳細には踏み込む必要がないため、4次元変分法に較べて維持管理と移植性ははるかに優れている。

本研究ではEnKFによる大気微量成分のデータ同化システムの確立を目指すことにした。EnKFについて簡単に説明する。図(1)-2で、2次元位置は変数の値を表している。まず点線内に分布しているたくさんの初期条件から、それぞれ1同化期間だけアンサンブル予測（細い矢印）を行う。アンサンブル予測結果は実線の楕円の状態まで広がる。太い破線は予測のアンサンブル平均であ

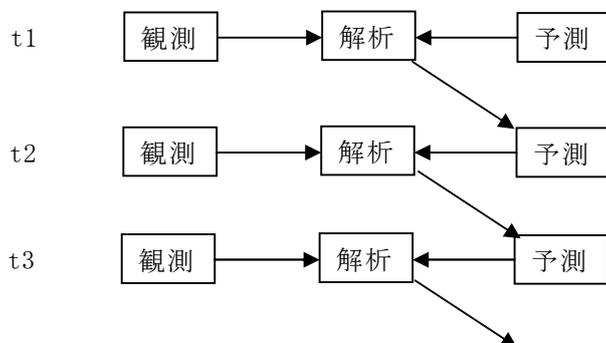
る。アンサンブル平均を第一推定値と観測データ（星印）とを比較し背景誤差相関を利用して、予報変数の修正量を決めて解析値を得る。さらに摂動の大きさを決めてアンサンブル予報のための多数の初期条件を得る。この手続きを繰り返す。

#### c 大気微量成分の4次元データ同化の精度に影響を与える因子

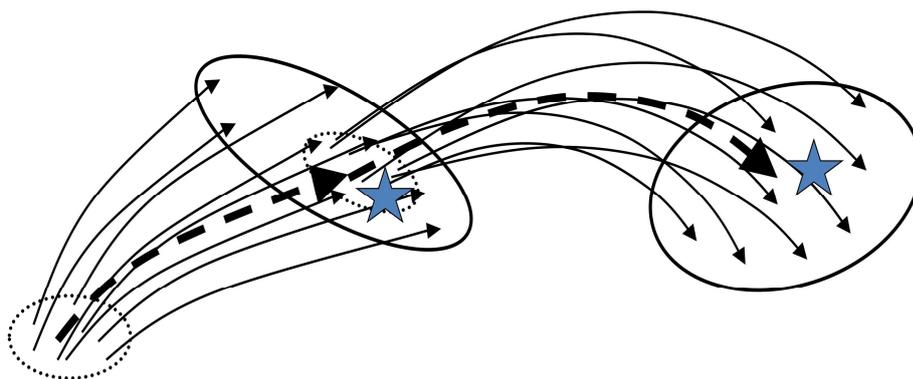
本研究で利用する数値モデルは大気大循環モデルに結合した大気化学輸送モデルである。大気化学輸送モデルは、大気微量成分の風による輸送と光化学反応による生成消滅を計算する。化学輸送モデルを駆動するには、大気の4次元データ同化結果を利用する。従って、大気データ同化の精度は大気微量成分の輸送計算の精度に大きな影響を与える。本プロジェクトでは、世界の数値予報センターの主な再解析プロダクトについて、ブリューワー・ドブソン循環を比較した。また、気象庁の再解析JRA-25と新しい再解析JRA-55との比較を行い、その精度を評価する。

4次元データ同化結果の精度は観測データの品質や量に大きく依存する。本研究では、観測システム実験や観測システムシミュレーション実験などにより、観測システムが4次元データ同化出力の品質に与える影響を評価する。また、大気微量成分の4次元データ同化の見地から、将来の最適な観測システムについての設計に関する情報を提供する。

データ同化プロダクトの品質は数値モデルの性能そのものにも大きく依存する。数値モデルの改善が第一推定値の品質を向上させ、その結果、データ同化の品質向上にも寄与する。



図(1)-1 データ同化システムの概念図。



図(1)–2 アンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化の概念図。水平面上の位置は変数の値を意味する。点線による楕円はアンサンブル予報の初期値の分布領域で、実線による楕円は1同化期間の予報結果の分布領域である。細い矢印は1同化期間のアンサンブル予報の各メンバーで太い点線の矢印はその平均値。星印は観測データ。

## 2) 本プロジェクトのまとめと将来展望

本研究では、二酸化炭素、エアロゾル(黄砂)、オゾンのそれぞれについて、EnKFを用いたデータ同化システムを開発した。擬似観測データを用いた観測システムシミュレーション実験(OSSE)では、観測データ量を増やすことにより、4次元データ同化の結果がネイチャーラン(数値モデルによって作成した仮想的な正解)に近付くことが確認された。実際の観測データを用いた4次元データ同化実験結果を独立な観測データによる検証を続けている。データ同化試験の結果は、観測データの種類と量を増加すれば、精度が向上することを確認した。観測データの有効利用の手法が担保され、今後の観測システムの展開に向けて大変有意義である。とくに、EnKFは大気微量成分の4次元データ同化に幅広く利用できることを明らかにした。ただし、本研究での開発期間は3年と短く、まだ未解決の問題も多い。引き続き精度向上を目指して開発を続ける必要がある。以下、それぞれの気微量成分について、4次元データ同化システムの開発の現状と課題を簡単にまとめる。

### i) 二酸化炭素

二酸化炭素では、地上観測、航空機観測および衛星観測(GOSAT(温室効果ガス観測衛星「いぶき」)の3種類の観測データの同化に取り組んだ。観測システムシミュレーション実験では、3種類の観測はそれぞれ相互に補完する傾向があり、すべてを使用したときに最も地表面フラックスの推定精度が高くなることが示された。実際の観測データの同化試験では、とくに季節変化の大きい陸上の地表面フラックスの季節変化の推定精度を向上させることができた。ただし、人間活動の場合は局地性が著しく強いためその扱いが難しい。また、海面でのフラックスは変動の幅が小さいことから、データ同化による修正はまだ難しいのが現状である。GOSATはまだ相当に誤差が大きかつデータ量も少ない。しかし、本研究では、慎重にバイアス修正を試みた結果、データ同化結果に相当のインパクトがあった。今後、少ないデータを最大限に活用できるように、4次元データ同化スキームを改善し、GOSATデータの有効利用を図る。

本研究計画の立案時には、アメリカ航空宇宙局(NASA)がOCOの打ち上げを計画中であり、多量の二酸化炭素データが得られることを想定していた。不幸にしてOCOは打ち上げに失敗し、データが得られなかったことは、本研究にとってたいへん残念なことであった。しかし、GOSAT-IIでは大幅な精度向上が図られること、さらに、OCO-IIの打ち上げも計画されていることから、将来は、衛星観測データの精度と量が大幅に改善される見込みである。その時は、4次元データ同化は地表面フラックスの推定の強力な道具となることが期待される。

#### ii) エアロゾル

エアロゾルには様々な生成要因があり、大気学輸送モデルではすべてのエアロゾル生成を一律に扱うことは難しい。本研究では、生成過程が比較的簡単なダストエアロゾル(東アジアでは黄砂)のEnKFによる4次元データ同化スキームを開発した。とくに、CALIPSO搭載のライダー観測で得られた減衰後方散乱係数の同化に、世界で初めて成功した。CALIPSOは鉛直分解能の高いデータではあるが、水平的には軌道に沿う線状にのみ分布している。気象官署のデータで検証した結果、CALIPSOの観測データを同化することにより、黄砂の水平分布が大幅に改善された。この成果は、気象庁で行われている黄砂予測の実利用を目指し、精度向上とシステム開発を続けている。将来、Earth-CARE衛星の観測データが得られるようになれば、一層の予報改善が期待される。

ダストエアロゾルは地面から舞い上がった塵がソースである。しかし、ダストの放出量の正確なパラメータ化は難しく、数値モデルによる予測や推定の大きな不確定要因である。本研究では4次元データ同化から推定された地表面フラックスの精度を評価した。データ同化結果は、大気化学輸送モデルのパラメータ化による推定とかなり異なることが確認された。このようなフラックスの比較を徹底的に行うことにより、化学輸送モデルのパラメータ化の改良にも有益である。

将来は、様々な種類のエアロゾルを統一的に扱うことが大きな目標である。ただし、エアロゾルの生成消滅はたいへん複雑であり、生成消滅機構に関する研究を通して精密な数値モデルそのものの開発が大きな課題である。

#### iii) オゾン

オゾンは場所によって光化学的な活性がたいへん高い。オゾンの光化学反応に関連する化学種はたいへん多く、そのうちのかなり化学種はオゾン同様に予報変数として扱われる。データ同化システムでは、すべての予報変数に初期条件を与える必要がある。複雑な化学反応システムでは、4次元変分法によるデータ同化コードの開発は極めて困難である。コードの開発ではEnKFがたいへん有利である。

オゾンでは、OMI(全量データ)やMLS(鉛直プロファイル)などの衛星観測データが得られている。OMIからは鉛直分布は分からないし、MLSは道に沿う線上でしかデータが得られないことが欠点として指摘されたが、データ同化を通して、鉛直分布は大幅な改善が見られた。また、オゾンの観測データの4次元同化は、他の化学種やラジカル(OH)などの分布にも影響を与えている。

本研究では、オゾンの4次元データ同化システムを海洋科学技術研究センター、気象研究所、国立環境研究所の3つの化学輸送モデルに適用し、比較実験を行った。観測データが増えるに従い数値モデル依存性が減少するという良好な結果を得ている。オゾンの実況監視・予測精度の向上にとってたいへん有望な結果である。

大気微量成分の4次元データ同化結果の精度は、化学輸送モデルを通じて、気象要素の解析結果の品質にも影響される。本研究では、成層圏の微量成分に大きな影響を与える平均子午面循環について、代表的な再解析、気象庁（JRA-25）、米国気象局（NCEP/NCARおよびNCEP/DOE）、ヨーロッパ中期予報センター（ERA40、Era-interim）を比較した。各再解析はブリューワー・ドブソン循環（BDC）が大筋で共通の季節変化の特徴を持つことを示した。しかし、子午面構造は再解析間で不整合が見られた。年々の変動も定性的には共通の特徴を持ち、自然の変動をある程度捉えていることを示した。しかし、経年変化では再解析間の相違が大きく、温暖化シグナルなどの議論はまだ難しい。また、平均鉛直速度の緯度分布には、再解析間であまり整合性のないノイズがみられた。このノイズは、大気微量成分に対する鉛直拡散を過大評価し、微量成分の成層圏における滞留時間を過小評価させる危険がある。ノイズは新しいEra-interimとJRA-25では比較的少ない。現在、気象庁でJRA55の再解析が続行中である。本研究でも速報的な比較解析を行った。JRA25とJRA55では、系統的な相違が見られた。とくに、BDCに顕著な改善が見られた。今後、大気微量成分の歴史的な再解析のためにも、この再解析の完了が待たれる。

## （2）ブリューワー・ドブソン循環の精度検証

### 1) 再解析の比較

グローバルな地球大気に歴史的再解析（気象庁；JRA-25、米国気象局；NCEP/NCARおよびNCEP/DOE、ヨーロッパ中期予報センター；ERA-40、Era-interim）から平均子午面循環を診断し、相互に比較検証する。診断期間は1979-2001年で、季節平均値の気候値、経年変化および年々変動を調べる。平均子午面循環は、大気微量成分輸送と対応がよい等温位面での質量加重帯状平均（MIM）を用いて評価する<sup>4,5)</sup>。通常、平均子午面循環は等圧面上の帯状平均（東西平均）から求めることが多い。しかし、単なる等圧面上の帯状平均は、中高緯度ではストークスドリフトの効果が大きく、大気微量成分の子午面輸送あまりよく対応しない。このため、大気微量成分輸送には、しばしば、変形されたオイラー平均の残差循環（TEM）を用いる。温位面は物質面ともいわれ、微量成分輸送を表現するのに最適である、MIMはTEMの自然な拡張である。再解析同士の比較を通じて、再解析の平均子午面循環の気候特性や変動特性に関する有意性を確認する。また、大気大循環モデルの結果との比較により、気候特性の物理的整合性を検討する。

図(1)-3は、各再解析（気象庁；JRA-25、米国気象局；NCEP/NCARおよびNCEP/DOE、ヨーロッパ中期予報センター；ERA-40、Era-interim）から診断された12-2月（DJF）および6-8月（JJA）の平均子午面循環の1979-2001年平均値（Era-interim, 1989-2001年）である<sup>6)</sup>。また、比較のために大気大循環モデルの結果（GCM；気候値の海面水温を用いた1年間のシミュレーション）も示す。MIM法（等温位面質量加重付帯状平均）では、対流圏の低緯度にハドレー循環、対流圏中高緯度の直接循環、成層圏に半球単一の直接循環（ブリューワー・ドブソン循環、BDC）がある。いずれの循環も冬半球が圧倒的に強い。対流圏のハドレー循環は、ERA-40が1割程度強いものの、各再解析間でそれほど大きな相違が見られない。成層圏のBDCも、概ね似たような季節変化を示すが、その強さや微細構造はそれぞれの解析によって相当異なっている。成層圏-対流圏の大気交換効率はERA-40が他に比べて2~3割強い。JJAでは、NCEP/NCARとNCEP/DOEにおける南半球セルと北半球セルの境界が他とは異なり南半球側に傾いている。JRA-25にはJJAに低緯度に不自然な構造が現れる。このような誤差原因として、再解析の4次元データ同化に利用した数値モデルの気温バイアスに起

因する可能性が大きい。成層圏気温バイアスを減少させるためには、数値モデルの放射スキームおよび積雲対流スキームなどの物理過程のパラメタリゼーションの精密化が望まれる。

対流圏-成層圏の質量交換効率の年々変動と経年変動を調べた。図(1)-4の左は、12-2月（北半球が冬）の場合の100hPaの質量流線関数である。最大値は北半球における成層圏-対流圏の、最小値（その-1倍）は南半球の、それぞれ質量交換効率を表している。極大極小の位置はよく一致していて、ブリューワー・ドブソン循環（BDC）の構造は各解析間の違いは少ない。しかしその強度にばらつきが見られる。図には示さないが、6-8月はBDCの構造そのものにも違いが見られる。図(1)-4の右は、交換効率の季節変化を表している。季節変化の位相は各再解析間で一致しているが、その強度は相当にばらつきが大きい。図(1)-5は、100hPaの各緯度における冬季の質量流線関数である。冬季の極向きの成層圏極向きのBDCの質量輸送を表している。北半球の冬については相当異なるものの、年々変動は各解析間である程度相関が認められた。再解析の4次元データ同化の過程で、予報モデルが波と平均流の相互作用を通して平均子午面流を生み出したと考えられる。南半球の冬は、北半球の冬に較べて、解析間の相関も低く、トレンドもばらばらである。大気に関する観測データの少なさが、南半球の総観の悪さと関係している可能性がある。一方、経年変化であるが、再解析されたBDCのトレンドは年々変動や再解析間のばらつきに比べて小さく、現時点で有意な経年変化を見出すことは困難であった。再解析の精度の向上を待ちたい。

再解析から求めた鉛直流の緯度分布は、長期間平均してもランダムな変動が見られる。再解析を用いて、大気成層圏滞留時間を推定すると、実際の微量成分の観測から推定される滞留時間より短く、再解析から求められた鉛直速度は、相当ノイズが大きいと考えられる<sup>6)</sup>。ノイズは、GCMではあまり見られないこと、新しい解析、JRA-25やEra-interimでは比較的抑えられていることから、ノイズの原因はデータ同化に関係した第一推定値と観測データの不整合である可能性が高いと推察される。再解析では、数値モデルと観測の誤差を逡減し、力学的な整合性を考慮した高度のデータ同化スキームの導入を図ることによって、その精度向上とノイズの除去を達成することが期待される。

以上の結果から、今後実施する大気微量成分の4次元データ同化に関して、用いるべき再解析によって、その結果がある程度異なること、少なくとも成層圏大気輸送に起因する経年変化は、検出が困難であることなどが、指摘される。大気微量成分の4次元データ同化には、精度の高い再解析が望まれている。現在、気象庁で55年の再解析（JRA-55）が進行中である。JRA-55の一層の精度向上のため、本研究の結果はJRA-55の実行グループに伝えられた。次節で、JRA-25とJRA-55のBDCを比較する。

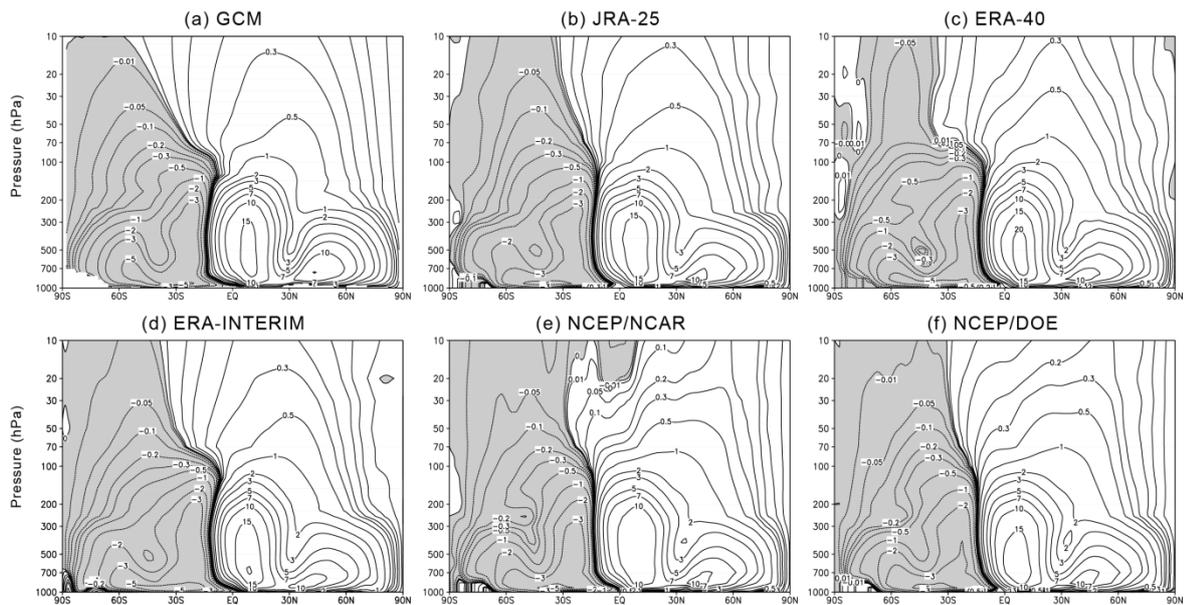


Fig. 1a: DJF

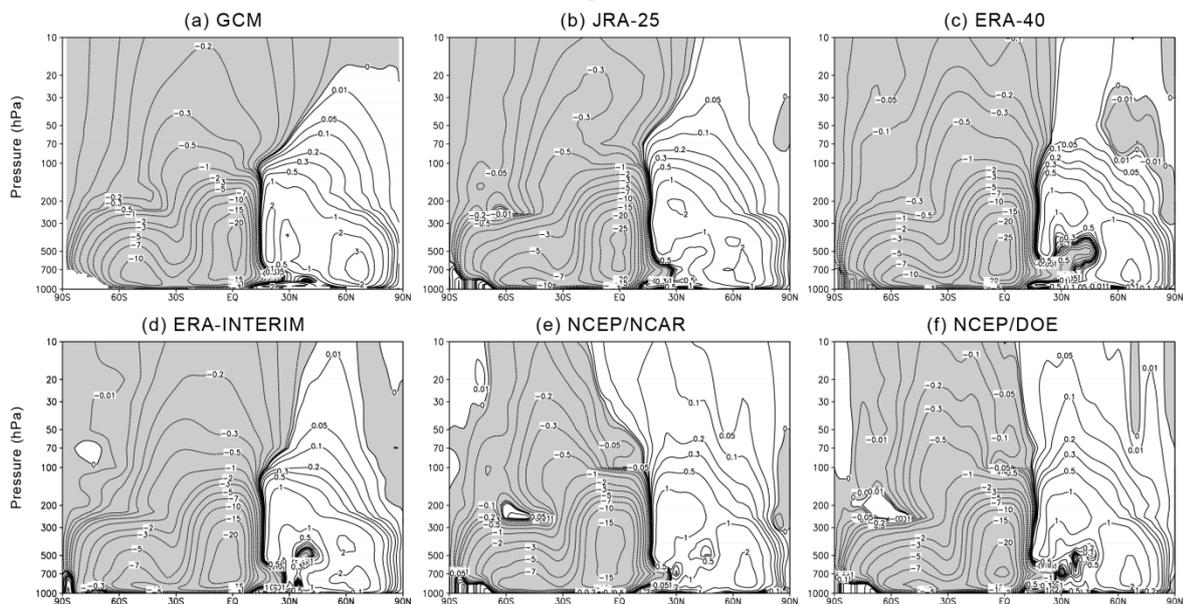
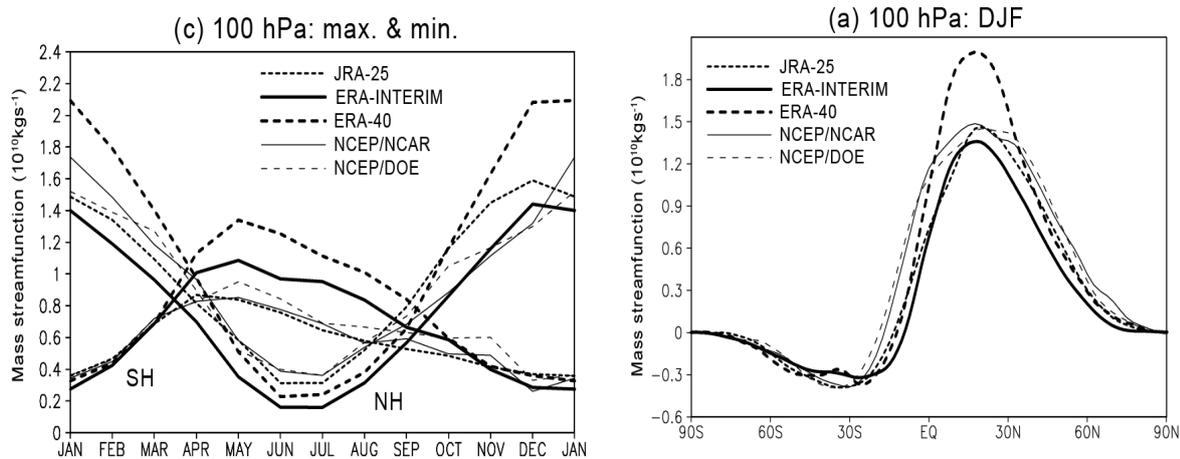


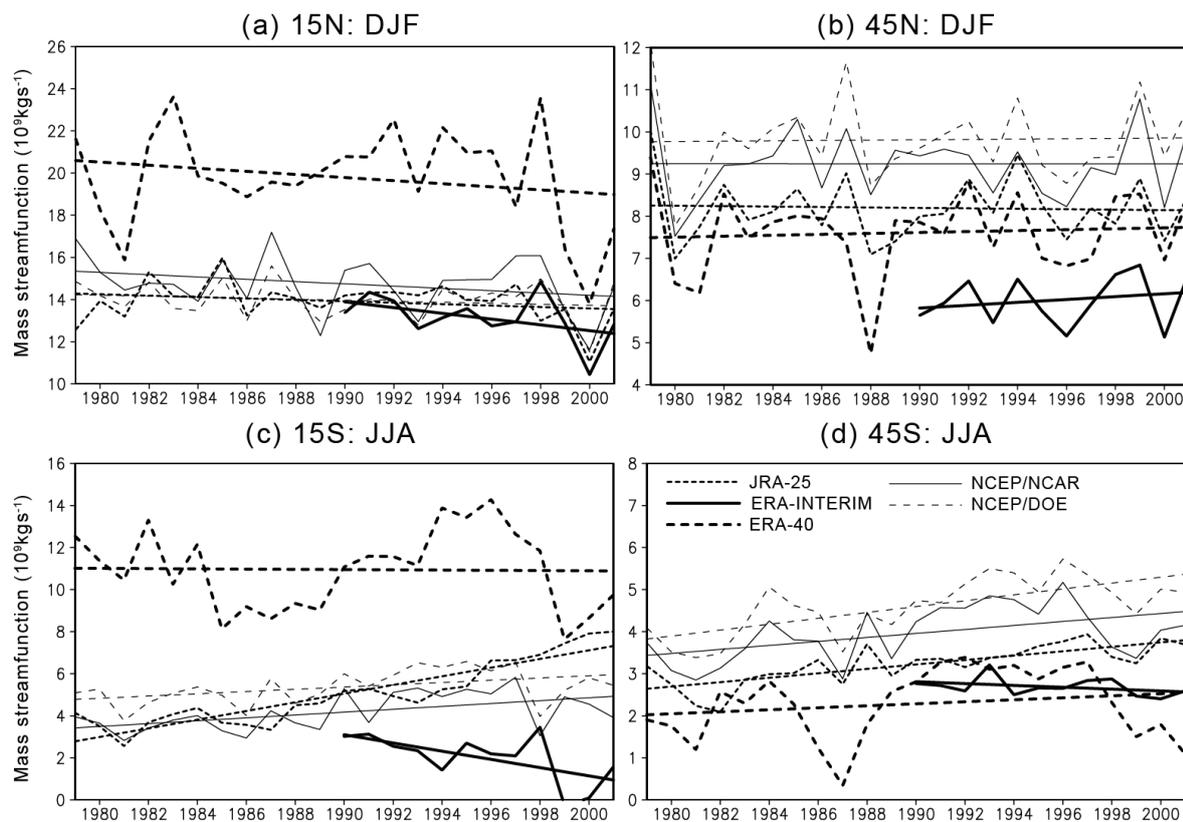
Fig. 1b: JJA

図(1)－3 1979-2001年のDJF(12月、1月、2月：上)およびJJA(6月、7月、8月：下)で平均した質量流線関数 (a:GCM、 b:JRA-25、 c:ERA-40、 d:Era-interim、 e:NCEP/NCAR f:NCEP/DOE)。ただし、 GCMは1年、Era-interimは1989-2001年平均。  
等値線は  $\pm 25, \pm 20, \pm 15, \pm 10, \pm 7, \pm 5, \pm 3, \pm 2, \pm 1, \pm 0.5, \pm 0.3, \pm 0.2, \pm 0.1, \pm 0.05, \pm 0.01$  ( $10^{10} \text{kg s}^{-1}$ )。影は負値を表す。



図(1)－4

左：12，1，2月で平均(1979-2001)した100hPaにおける質量流線関数の緯度依存性 ( $10^{10} \text{kg s}^{-1}$ )  
 右：平均(1979-2001)した100hPaの質量流線関数の最大値と(−1)最小値の季節変化 ( $10^{10} \text{kg s}^{-1}$ )



図(1)－5 100hPaにおける質量流線関数 ( $10^{10} \text{kg s}^{-1}$ ) の経年変化(直線はトレンド) ( $10^{10} \text{kg s}^{-1}$ )  
 (a) 45N, 12-2月 (b) 15N, 12-2月 (c) 45S, 6-8月 (d) 15S, 6-8月

## 2) JRA25と JRA55の比較

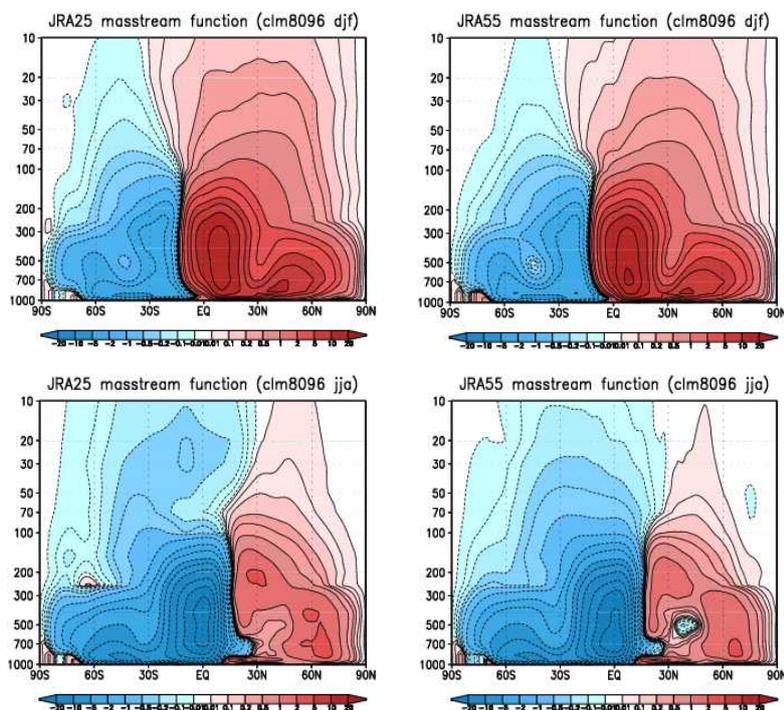
JRA-55の4次元データ同化システムは、2009年12月時点の気象庁現業システムに準拠しており、JRA-25が準拠していた2004年3月時点の現業システム以降の技術開発の成果が取り込まれた大気データ同化システムになっている<sup>7)</sup>。主要な変更としては、同化手法が3次元変分法から4次元変分法へ変更、同化に使用するモデルの解像度がT106L40(水平解像度120km、鉛直40層、最上層0.4hPa)からTL319L60(水平解像度60km、鉛直60層、最上層0.1hPa)へ変更、長波放射スキームがバンドモデルからラインバイラインモデルによるテーブル参照法へ変更、などがあり、他にも短波スキーム、放射過程による雲の取り扱い、積雲対流スキームへのトリガー関数の導入など、各種スキームの変更が行われている。さらに、データ同化に使用する観測データについても、例えば衛星観測データは、気象衛星センターや欧州気象衛星開発機構(EUMETSAT)において再処理されたものを新たに入手し、使用するようになっている。また、従来型観測データと呼ばれる地上観測や高層観測データについても、既存のデータのオフラインチェック、ブラックリストの作成、データエンコード・デコードの誤りの検出によるデータの修正、他機関で問題となったデータへの対処など、徹底した品質管理が行われており、JRA-55によるプロダクトはJRA-25よりも更に時間的な均質性の高い大気の長期データセットであると考えられる。

Iwasaki et al., (2009)<sup>6)</sup>では、各種大気再解析データによるBD循環の比較の中で、6月～8月(JJA)平均のJRA-25の平均子午面循環の気候値には、赤道上空の下部成層圏に他の再解析データには見られない逆転した循環が表現されていることを指摘した。まず、これを確認するため、図(1)-6にJJA平均のJRA-25とJRA-55の質量流線関数分布を示す。気候値としての平均期間が変わってもJRA-25には、赤道下部成層圏に逆転した循環が見られるが、JRA-55の平均子午面循環にはそのような循環は見られない。また、100hPaより上空における北半球循環と南半球循環の境目は上空ほど北半球側に傾く傾向があり、これは、GCMの結果や、ERA-40、Era-interimEra-interim再解析データと一致した。12月から2月(DJF)平均の平均子午面循環の気候値については、JRA-25とJRA-55に特に大きな差は見られなかった。

次に100hPaにおける質量流線関数の経度分布を図((1)-7)に示す。DJF平均では、北緯20度から60度において、JRA-55の循環がJRA-25と比べて $0.2 \times 10^{10} \text{kg s}^{-1}$ 程度弱いのが、最大値には大きな差は見られなかった。一方、JJA平均では、北緯20度から40度の正の循環(北半球側循環)については、JRA-55のほうがJRA-25より弱いのが、南緯30度から北緯10度の負の循環(南半球側循環)は、JRA-55のほうが強い(絶対値として大きい)分布となっており、差は $0.5 \times 10^{10} \text{kg s}^{-1}$ 程度と、DJFにおける差より大きかった。Iwasaki et al., (2009)<sup>6)</sup>の中で示された質量流線関数の経度分布と比較すると、JRA-55の経度分布はEra-interimの分布と似た分布となった。

100hPaにおける質量流線関数は、DJF平均ではJRA-25とJRA-55にあまり差は見られなかったが、JJA平均ではJRA-55のほうがJRA-25より南半球側循環が強い。そこで、循環強度変化の季節性を確認するため、100hPaにおけるJRA-25とJRA-55の月平均質量流線関数の最大値と最小値を図(1)-8に示した。質量流線関数の最大値は北半球循環の強さを示し、最小値の絶対値は南半球側循環の強さを示している。どちらの循環も、DJFにおいては、JRA-25とJRA-55にあまり差は見られないが、他の季節では差が大きい。北半球循環は、JRA-55のほうがJRA-25より弱く、南半球循環は、JRA-55のほうがJRA-25より強く表現されるようになった。Iwasaki et al., (2009)<sup>6)</sup>の中で示された季節性と比較すると、JRA-55の北半球循環は12月に、南半球循環は5月に最大となっており、

Era-interimと同様な季節性を示している。



図(1)－6 季節平均質量流線関数分布(1980-1996年平均)、単位： $10^{10}$ kg/s).

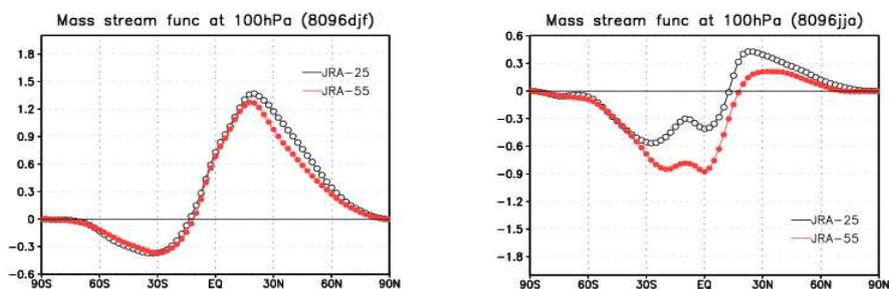
左上：JRA-25のDJF(12月-1月)平均

右上：JRA-55のDJF平均

左下：JRA-55のJJA(6月-8月)平均

右下：JRA-55のJJA平均

等値線は  $\pm 25, \pm 20, \pm 15, \pm 10, \pm 7, \pm 5, \pm 3, \pm 2, \pm 1, \pm 0.5, \pm 0.3, \pm 0.2, \pm 0.1, \pm 0.05, \pm 0.01$ 。

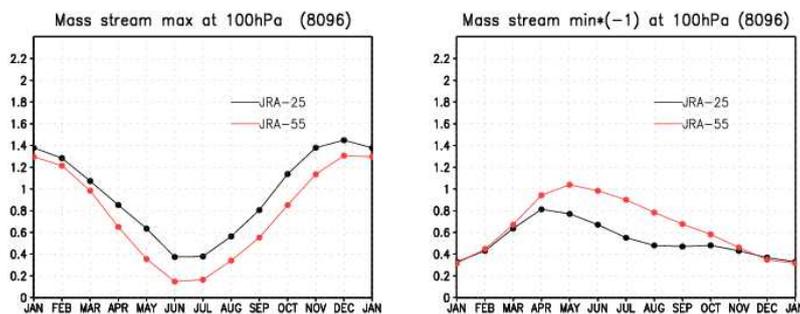


図(1)－7 100hPaにおける季節平均質量流線関数(1980-1996年平均)の緯度分布

(単位： $10^9$ kg/s) 左：DJF(12月-1月)平均

右：JJA(6月-8月)平均

黒がJRA-25、赤がJRA-55を示す。



図(1)－8 100hPaにおける月平均質量流線関数(1980-1996年平均)の最大値と最小値の季節変化(単位:  $10^9 \text{kg/s}$ )

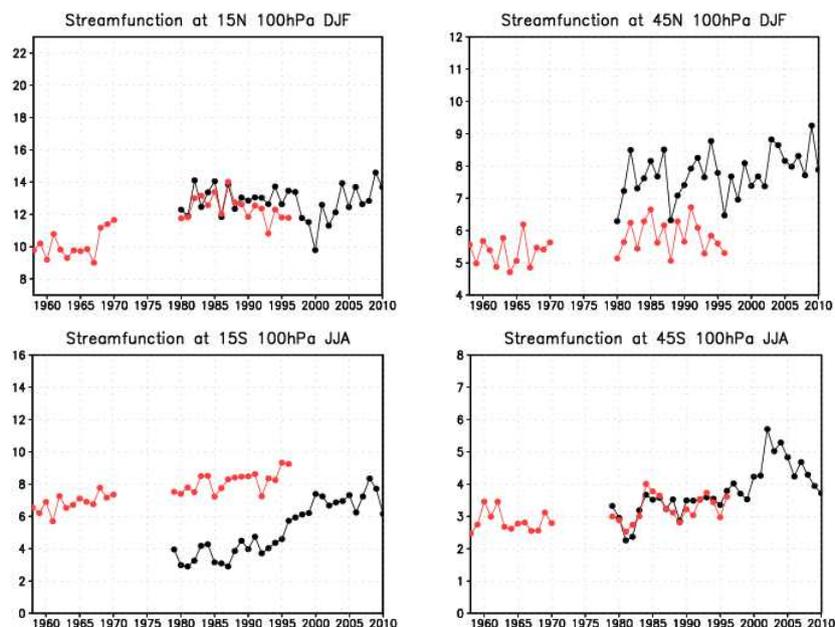
左: 最大値の季節変化(北半球側循環の強度) 右: 最小値の季節変化(南半球側循環の強度)  
黒がJRA-25、赤がJRA-55を示す。

次に、100hPaにおける質量流線関数の年々変動を示す。図(1)-9は、DJFにおける北緯15度と45度の質量流線関数の値と、JJAにおける南緯15度と45度の年々変動を示している。JRA-55のDJFにおける北緯15度の変動と、JJAにおける南緯45度の変動は、JRA-25とほとんど差がないが、DJFにおける北緯45度の変動は $0.2 \times 10^{10} \text{kgs}^{-1}$ 程度弱く、JJAにおける南緯15度の変動は $0.5 \times 10^{10} \text{kgs}^{-1}$ 程度強い。このようにバイアスは見られるが、1980年から1996年の期間でJRA-25とJRA-55の年々変動の相関は、DJFの北緯15度で0.53、北緯45度で0.65、また、JJAの南緯15度で0.79、南緯45度で0.82とそれぞれ高い相関を示している。

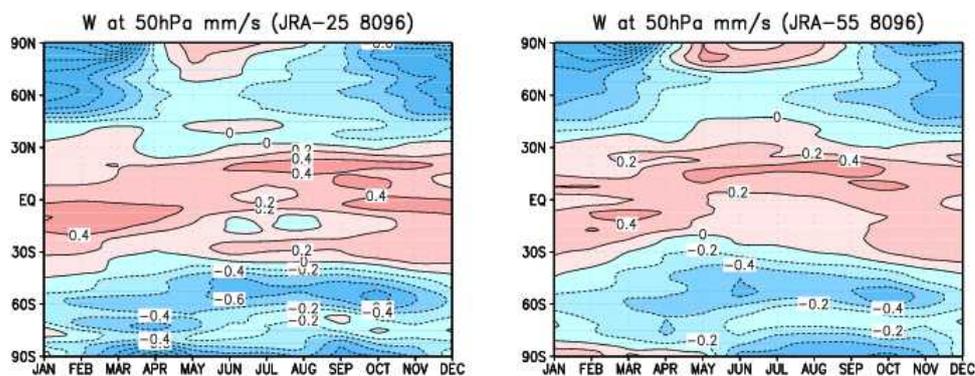
Iwasaki et al., (2009)<sup>6)</sup>では、20世紀の北半球冬循環に弱い減少トレンドがあることと、南半球循環に増加トレンドがあることが指摘されている。JRA-55のDJFにおける北緯15度の変動には、1980年代半ばから1990年代半ばにかけて、北半球冬循環に弱い減少トレンドがみられる。また、この期間には、南半球循環に増加トレンドがみられており、これらの結果は、Iwasaki et al., (2009)<sup>6)</sup>で指摘された結果と整合的である。しかし、JRA-55において計算された1958年から1970年の期間をみると、北半球冬循環に増加トレンドが見られる。このような60年代と80年代のトレンドの違いは、数十年規模スケールの気候変動の一部を捉えている可能性も考えられるが、同化に用いた観測データの変遷(1980年代は衛星観測データがデータ同化の際に使用されている)が影響した人為的な変動を捉えている可能性もある。JRA-55では、同一のデータ同化システムを用いて衛星観測データを同化に使用せず、従来型観測データのみを同化して作成した長期再解析(JRA-55C)データの作成が計画されている。この結果などを用い、また、他機関で行われた再解析データを用いることで、60年代と80年代の成層圏循環におけるトレンドの差の原因についての知見が得られると考えられるが、これについては、今後の研究課題としたい。

最後に、帯状平均上昇流について示す。Iwasaki et al., (2009)<sup>6)</sup>では、JRA-25とEra-interim以外の再解析データには、GCMの結果とした場合に、帯状平均上昇流が非常に雑音が多いことが指摘されており、データ同化において、観測データが力学的な不安定をもたらす、鉛直速度の時間空間分布の雑音を多くしている。図(1)-10にJRA-55の50hPa高度における帯状平均上昇流の季節変化(1980から1996年の17年平均)を示す。JRA-55の帯状平均上昇流は、JRA-25よりもスムーズな分布となっており、JRA-25と同様にBD循環の下降域の識別をしやすくなっている。Ebita et

al., (2011) <sup>7)</sup>で指摘されているように、JRA-55の下部成層圏気温は同化に使用したモデルの放射過程の改善により、バイアス、RMSEともJRA-25と比べ大幅に改善されており、それが、帯状平均上昇流の表現に影響していると考えられる。JRA-25には、1998年ごろに、衛星観測測器のTOVS(TILOS Operational Vertical Sounder)からATOVS (Advanced TILOS Operational Vertical Sounder)への変更に伴う下部成層圏気温の不連続な変化があることが知られているが、これらが、JRA-55におけるBD循環の表現において、どのように改善されるのか、今後の調査課題としたい。



図(1)-9 100hPaにおける質量流線関数の年々変動(単位:  $10^9 \text{ kg/s}$ )  
 左上: DJFの北緯15度。 右上: DJFの北緯45度  
 左下: JJAの南緯15度。 右下: JJAの南緯45度。  
 黒がJRA-25、赤がJRA-55を示す。



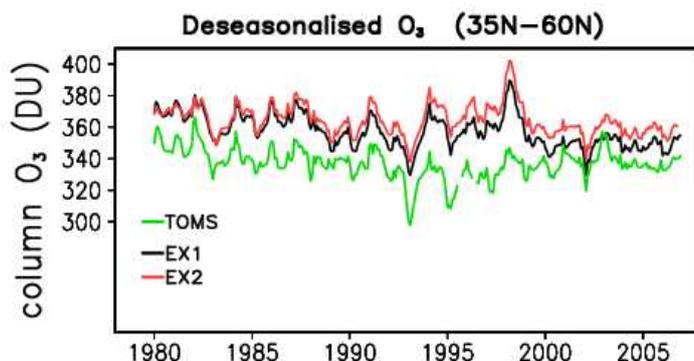
図(1)-10 50hPa高度における帯状平均上昇流の季節変化(1980から1996年の17年平均)。  
 左: JRA-25。 右: JRA-55。 暖色が上昇域、寒色が下降域を示す。

### 3) JRA25を利用したオゾンの再現

化学輸送モデルを用いた過去数十年のオゾン層変動の解析研究では、大気の大気力学場として大気長期再解析の風や温度が用いられており、ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）で行われた長期再解析ERA-40の風速場や気温場を用いた研究が多くなされている。しかし、ERA40を用いたオゾンの再現実験では、実際の観測では見られない不自然なオゾン増加が1980年代の後半に北半球中緯度で再現されており<sup>8,9)</sup>、ERA40の風や気温によりその不自然なオゾンの変動が生成されていると考えられている<sup>9)</sup>。また、ERA40のBD循環が他の再解析データより強い傾向がみられること（例えば Iwasaki et al., (2009)<sup>6)</sup>）も知られており、このような大気の特徴が、下部成層圏オゾンの再現に影響を及ぼしていることが想像される。そこで、過去数十年のオゾン変動における力学場の変化、特に風速場の影響を、JRA-25を用いた3次元化学モデルによるオゾンの再現実験を行うことにより評価した。なお、この節の報告は、Kobayashi and Shibata, (2011)<sup>10)</sup>を要約したものである。

実験に用いたモデルは、気象研究所で作成された化学気候モデル(MRI-CCM1, Shibata et al., (1999)<sup>11)</sup>)である。このモデルの力学モジュールは、大気大循環モデルMRI-JMA 98<sup>12)</sup>が基になっており、T42L68（水平解像度300km、鉛直42層、最上層0.01hPa）の解像度を持っている。化学モジュールは、49の化学種、極成層圏雲(PSC)上で6種、硫酸エアロゾル上で3種の不均一反応を扱っている。このMRI-CCM1に対し、JRA-25の6時間ごとの風速データをナッジング法により同化することで力学場を再現し、生成されたオゾン場の1980年から2006年までの結果を解析する。実験設定は2通り行った。一つは、オゾン層破壊物質であるCly, Bryの濃度の鉛直分布の経年変化を、あらかじめ1次元モデルで作成しておき、それをこの化学モデルに強制する方法（EX1）であり、もう一つは、Cly, Bryの濃度の鉛直分布を1979年の値で固定し、化学モデルに強制する方法（EX2）である。これらの実験は、ハロゲン類の与え方が異なるだけであるので、実験結果の差はハロゲン類の変化による影響とみなすことができる。また、EX2実験の設定のなかで年々変動する設定は、強制しているJRA-25の風速場だけであるので、EX2実験結果の年々変動やトレンドは、JRA-25の風による影響とみなすことができる。

衛星観測データ（TOMS/SBUV）及び再現実験結果の月平均北半球中緯度平均オゾン全量時系列を図(1)-11に示した。1980年から2006年の各月平均値を差し引き、同期間の年平均値を加えることによって、季節変化成分を取り除いた時系列である。どちらの実験結果のオゾン全量も、10から40DU(ドブソン単位)程度のバイアスがあるものの、観測と同様な時間変化をしていることが分かる。例えば、観測には1993年に減少し、1994年に回復するような時間変動が見られるが、両方の実験において、その様子が再現されている。この観測に見られる一時的なオゾン減少は1991年のピナツボ火山噴火による効果と考えられている<sup>8)</sup>が、ここで行ったシミュレーション実験では火山性エアロゾルの化学効果が考慮されていないにも関わらず、どちらの実験においても1993年のオゾン全量の一時的な減少が再現されていることは興味深い。また、ERA40の力学場を用いた Hadjinicolaou et al., (2005)<sup>8)</sup>の実験でも、この一時的なオゾン減少が再現されていることが指摘されている。このことから、JRA-25やERA40により解析された風速場には、ピナツボ噴火による火山性エアロゾルに起因する成層圏循環の変化の情報が含まれており、その力学場で駆動された化学モデルが再現するオゾンにその情報が反映され、一時的なオゾン全量の減少が再現されたのではないかと考えられる。

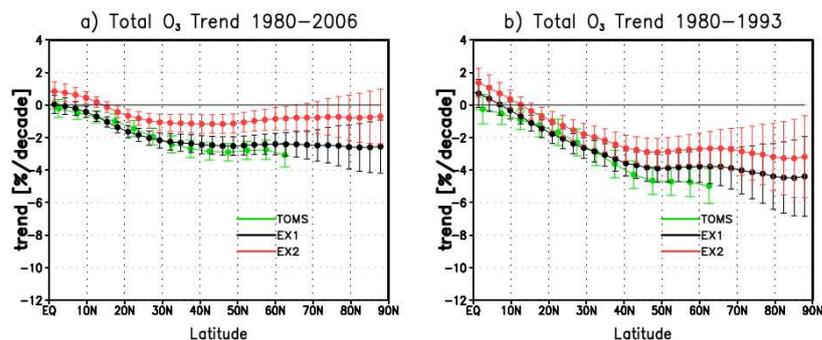


図(1)-11 季節変動成分を取り除いた北半球中緯度における月平均オゾン全量時系列。  
 緑：TOMS/SBUV。 黒：再現実験EX1 赤：再現実験EX2

実験により再現された北半球中緯度域のオゾン全量時系列に関して、Feng et al., (2007)<sup>4)</sup>は、ERA40を用いたオゾンの再現実験において、観測では見られない不自然なオゾン全量の正偏差が1980年代後半に再現されることを指摘していた。これは、Hadjinicolaou et al., (2005)<sup>8)</sup>の実験でも見られている。図(1)-11で示したように、今回行ったJRA-25を用いたオゾンの再現実験では、そのような不自然なオゾン全量の偏差は再現されていない。これは、1980年代から1990年代半ばにおけるオゾン減少トレンドの評価において有利であると思われる。そこで、再現実験を行った全期間（1980年-2006年）とオゾン減少トレンドが顕著な1980年から1993年までの期間について、衛星観測データ及びオゾン再現実験結果の帯状平均オゾン全量のトレンド解析を行い、その緯度分布を図(1)-12に示した。どちらの期間においても、衛星観測によるオゾン全量トレンドは、北半球中緯度域では統計的に有意な負のトレンドを示している。オゾン再現実験EX1では、北半球中緯度域で過小評価ではあるが、観測のトレンドをほぼ再現している。一方、オゾン層破壊物質の濃度を1979年に固定したオゾン再現実験EX2のトレンドは、1980年-2006年の期間では、EX1のほぼ半分、1980年から1993年の期間では、EX1の3分の2の大きさの負のトレンドを示している。この結果は、オゾン全量の負のトレンドの内、半分から3分の2は輸送などによる力学の効果により生じていることを示しており、Hadjinicolaou et al., (2005)<sup>8)</sup>が示したオゾントレンドにおける力学の効果の見積もりよりやや値が大きいものの、整合した結果になっている。

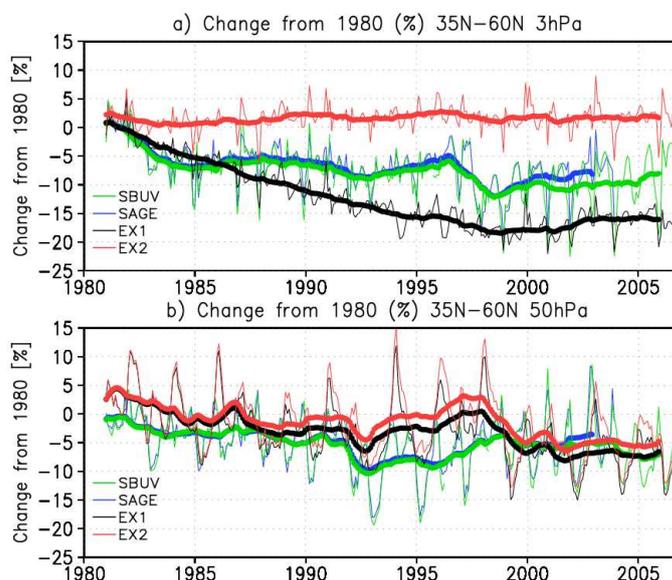
図(1)-13に、成層圏上部と下部における北半球中緯度のオゾン濃度の年々変動の様子を示す。衛星観測、及び、オゾン再現実験とも、1980年との比で示しており、成層圏準2年周期変動(QB0)に伴う変動を除くため25か月移動平均したものを太線で示している。

QB0を除いた成層圏上部の衛星観測によるオゾン濃度の年々変動は、6, 7年程度の変動と重なってはいるが、1980年から1990年代後半にかけて長期的な減少傾向がみられる。オゾン再現実験EX1では、1980年から1990年代後半にかけて長期的な減少傾向が再現されているが、6, 7年程度の変動はみられない。一方、ハロゲン類の濃度を1979年に固定したオゾン再現実験EX2の結果は、1980年から2006年までほぼ一定を保っている。EX1とEX2の実験設定の差はハロゲン類の長期変化であるので、成層圏上部のオゾンの長期変化にはハロゲン類の濃度の変化が大きく寄与していることがわかる。



図(1)-12 北半球帯状平均オゾン全量トレンド緯度分布。左：統計期間1980年-2006年 右：統計期間1980年-1993年。緑：TOMS/SBUV。黒：再現実験EX1。赤：再現実験EX2。エラーバーは標準偏差の2倍の範囲

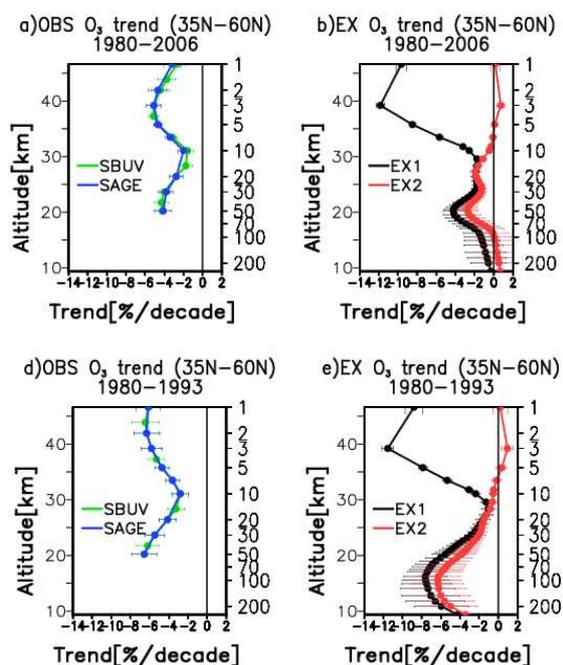
一方、成層圏下部のオゾン濃度の年々変動は、衛星観測データでみると、1980年から1990年代前半にかけてオゾン濃度が減少しているが、その後、緩やかな上昇傾向が見られる。EX1とEX2はともに、1980年から1990年代前半にかけて減少傾向を示しており、観測結果を良く再現している。その後、1990年代後半まで上昇したあと2006年まで下降しており、成層圏下部のオゾン濃度の年々変動は、EX1とEX2の差があまりない。この結果は、成層圏上部とは異なり、成層圏下部のオゾン濃度の変動には、力学場の変動の寄与が重要であることを示している。



図(1)-13 成層圏上部(3hPa)と下部(50hPa)における月平均及び25か月移動平均オゾン濃度時系列  
緑：SBUV。青：SAGE。黒：再現実験EX1。赤：再現実験EX2。

北半球中緯度におけるオゾン濃度トレンドの高度分布を図(1)-14に示す。図(1)-12と同様、再

現実実験を行った全期間（1980年-2006年）とオゾン減少トレンドが顕著な1980年から1993年までの期間について、トレンドを評価した。衛星観測では、どちらの期間においても成層圏上部と成層圏下部にオゾン濃度減少トレンドのピークが見られ、鉛直分布はダブルピーク構造をしている。EX1で再現されたオゾン濃度トレンドは、成層圏上部では過大評価ではあるが、成層圏下部にもオゾントレンドのピークがありダブルピーク構造を再現している。一方、EX2では、どちらの期間においても成層圏下部にオゾントレンドのピークがあるが、上部のトレンドは小さく、ダブルピーク構造を再現していない。EX2実験の設定のなかで年々変動する要素は強制しているJRA-25の風だけであるので、EX2実験で再現した成層圏下部のオゾントレンドは、力学場の変動の寄与が大きいと考えられる。EX1におけるオゾントレンドとの比から考えると、成層圏下部においては、オゾン減少トレンドの3分の2程度は力学場の変動が寄与していると評価することができる。



図(1)-14 北半球中緯度におけるオゾン濃度トレンド高度分布。

上段：統計期間1980年-2006年

下：統計期間1980年-1993年

緑： SBUV

青： SAGE

黒： 再現実験EX1

赤： 再現実験EX2

エラーバーは標準偏差の2倍の範囲

以上のように、オゾン分布の変動、特に下部成層圏オゾンの変動には力学場が大きな影響を及ぼしており、正確にオゾン分布を再現するためには、正確な風速場の情報が必要となる。前節で述べたように、現在作成中の大気長期再解析データJRA-55では、下部成層圏の循環がJRA-25よりも精度よく表現されていると考えられており、今後の課題として、JRA-55の風速場を利用したオゾン分布の再現実験も行いたい。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

二酸化炭素、エアロゾル、オゾンというそれぞれ性質の異な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による4次元データ同化システムが十分な機能を発揮することが実証された。今後は、大気微量成分の研究基盤として引き続き精度向上を図る。また、衛星観測システムの開発グループとの連携を深め、大気微量成分の実況監視システムの構築や再解析の実施に向けて、気象学の研究基盤として発展させる。

大気の歴史的な再解析について、平均子午面循環に関する精度が定性的に明らかとなった。大気微量成分の子午面輸送のみならず、大気大循環の最も基本的物理量の不確実性に関する情報が得られた。本研究で行ったMIM(等温位面質量加重付帯平均)による診断は、ユニークな解析手法である。今後、利用を推進する。

JRA-55の平均子午面循環はJRA-25から改善されていることが明らかとなった。また、数十年程度で均質な大気解析場が得られる見込みがあることも明らかになった。本研究において、JRA-55解析値は使用されなかったが、大気微量成分は子午面輸送に大きく影響されるので、今後、大気微量成分の4次元データ同化を行うにあたり、さらに精度の良い結果が得られる可能性を示すことができた。

オゾン濃度分布の変動、特に下部成層圏オゾンの変動には、風速などの大気場が大きく貢献していることが、過去30年にわたるオゾン分布再現実験によって確認できた。長期にわたる精度のよいオゾン濃度分布を再現するためには、対象期間の正確な大気場の均質な情報が必要であることが分かった。従来の同化システムによるオゾン分布再現実験ではあったが、同化システムの精度の状態を示す基準となるデータセットを作成することができた。

### (2) 環境政策への貢献

大気微量成分の4次元データ同化は今後実用的な利用が始まることが期待される。二酸化炭素については、濃度の3次元グローバル分布の解析に、その後精度が向上すれば、地表面フラックスの推定に利用される。エアロゾルのデータ同化システムは気象庁の黄砂予測のための初期値作成に利用される見込みである。Earth CARE衛星が実用化されれば一層の予測精度の向上が期待される。オゾンのデータ同化システムは紫外線予測のためのオゾン予測の初期値作成に利用される。また、広域大気汚染を含むグローバルな地球環境の監視と予測に応用が可能である。

大気再解析の平均子午面循環の検証結果は、大気微量成分4次元データ同化結果の誤差推定に有効である。ブリューワー・ドブソン循環の解析誤差要因についての情報は、現在実行中の再解析(JRA-55)の精度向上に寄与した。また、JRA-55の平均子午面循環の速報的な解析を実施した。今後JRA-55は大気微量成分解析に利用が見込まれるが、その時、精度評価に利用される。オゾンの長期変動に関する解析結果は、紫外線予測や大気汚染情報作成を行う同化システムと同等のシステムを用いており、このシステムの精度の把握や、問題点の把握に貢献している。

## 6. 国際共同研究等の状況

大気微量成分のデータ同化研究 T. Miyoshi University of Maryland アメリカ  
アンサンブルカルマンフィルターに関するアドバイザー

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) T. Iwasaki, H. Hamada and K. Miyazaki: J. Meteor. Soc. Japan, 87, 997-1006 (2009)  
“Comparisons of Brewer-Dobson Circulations diagnosed from Reanalyses”
- 2) C. Kobayashi and K. Shibata: J. Meteor. Soc. Japan, 89, 363-376 (2011) “Evaluation of Dynamical Contribution to Lower Stratospheric Ozone Trends in Northern Mid-latitudes over the Last Three Decades (1980-2006) Using a Chemical Transport Model”

<査読付論文に準ずる成果発表>

なし

<その他誌上発表(査読なし)>

岩崎俊樹、地球環境研究センターニュース、2012年2月号 [Vol. 22 No. 11]  
“地球環境の実況監視と予測に向けて”

### (2) 口頭発表(学会等)

- 1) K. Miyazaki, T. Machida, P.K. Patra, T. Iwasaki, Y. Sawa, H. Matsueda, M. Takigawa, and T. Nakazawa: Global-scale transport of carbon dioxide in the troposphere, 8th International Carbon Dioxide Conference, September, 2009.
- 2) T. Iwasaki, H. Hamada and K. Miyazaki: Comparisons of Brewer-Dobson Circulations diagnosed from Reanalyses. The 5th WMO Symposium on Data Assimilation, Melbourne, Australia, October, 2009
- 3) T. Iwasaki, T. Maki and K. Miyazaki: Four Dimensional Data Assimilation of GOSAT Observation Data Using a Local Ensemble Transform Kalman Filter. 2nd GOSAT RA PI Meeting, Kyoto, January, 2010
- 4) 中村哲、秋吉英治、宮崎和幸、岩崎俊樹、化学気候モデルへ適用したLETKFによるオゾン同化シミュレーション実験、日本気象学会2010年度秋季大会、京都、October 2010.
- 5) 眞木貴史、関山剛、柴田清孝、宮崎和幸、三好建正、岩崎俊樹、炭素循環解析へのGOSAT観測データの利用について、日本気象学会2010年度秋季大会、京都、October 2010.
- 7) 眞木貴史、山田和孝、岩崎俊樹:「気象庁二酸化炭素分布情報を用いたGOSATのバイアス調査」、日本気象学会春季大会専門分科会「気象庁が提供する気象データの利用と数値モデル開発の現状・課題」、国立オリンピック記念青少年総合センター、May, 2011.
- 8) K. Miyazaki, T. Iwasaki, T. Maki: Four-dimensional data assimilation of GOSAT data using an ensemble Kalman filter, The 3rd GOSAT RA PI Meeting, John McIntyre Conference Centre, Edinburgh, Scotland, UK, May 20, 2011.
- 9) 岩崎俊樹、横尾好朗、沢田雅洋、中澤高清、青木周司、柴田清孝、小林ちあき、眞木貴史、

- 関山剛、出牛真、宮崎和幸、中村哲、秋吉英治、大気環境に関する次世代実況監視及び排出量推定システムの開発、幕張、May, 2011
- 10)横尾好朗、眞木貴史、宮崎和幸、岩崎俊樹、CO<sub>2</sub> 輸送モデルMJ98-CDTM による鉛直拡散及び地表面フラックスの影響評価、幕張、May, 2011
- 11)T. Nakamura<sup>1</sup>, M. Deushi, K. Miyazaki, C. Kobayashi, H. Akiyoshi, K. Shibata, and T. Iwasaki: An Inter-comparison of Observation System Experiments for Stratospheric Ozone between LETKF Data Assimilation Systems with CCSR/NIES CCM, MRI CCM, and CHASER CTM, IUGG General Assembly 2011, JM02-#4800, Melbourne, Australia, July, 2011.
- 12)眞木貴史、関山剛、柴田清孝、宮崎和幸、三好建正、横尾好朗、岩崎俊樹：「実観測データを用いた炭素循環解析システムの構築」、日本気象学会秋季大会スペシャルセッション「大気中の二酸化炭素観測手法の新たな展開とそのデータ利用」、名古屋大学、2011年11月18日
- 13)横尾好朗、眞木貴史、関山剛、柴田清孝、宮崎和幸、三好建正、岩崎俊樹、MJ98-CDTM を用いた二酸化炭素データ同化実験、名古屋、November 2011
- 14)T. Maki, T. T. Sekiyama, K. Shibata, K. Miyazaki, T. Miyoshi, K. Yamada, Y. Yokoo and T. Iwasaki: Carbon Cycle Analysis using real observation data and LETKF, The GOSAT WORKSHOP 2012 - towards GOSAT-2 mission, Tokyo, 29 February 2012.
- 15) 眞木貴史、関山剛、柴田清孝、宮崎和幸、三好建正、横尾好朗、岩崎俊樹:衛星観測データを用いた炭素循環解析、日本気象学会春季大会専門分科会「温室効果ガス観測技術衛星GOSAT「いぶき」の利用研究」、つくば国際会議場、2012年5月29日（予定）

### (3) 出願特許

なし

### (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

気象サイエンスカフェ東北

日時：平成23年11月12日 15:00～16:30 会場：仙台市天文台

青木周司「二酸化炭素はどこから来てどこに行くのか？

-地球温暖化とのかかわりについて考えてみよう-

### (5) マスコミ等への公表・報道等

なし

### (6) その他

なし

## 8. 引用文献

- 1) G. Evansen: Ocean Dynamics, 53, 343-367 (2003) "The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation"
- 2) T. M. Hamill: NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, pp.1-46 (2003) "Ensemble-based

atmospheric data assimilation, A tutorial”.

- 3) T. Miyoshi and S. Yamane: *Mon. Wea. Rev.*, 135, 3841-3861 (2007) “Local Ensemble Transform Kalman Filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution”.
- 4) T. Iwasaki: *J. Meteor. Soc. Japan*, 67, 293-312 (1989) “A diagnostic formulation for wave-mean flow interactions and Lagrangian-mean circulation with a hybrid vertical coordinate of pressure and isentrope”
- 5) K. Miyazaki, and T. Iwasaki: *J. Atmos. Sci.*, 62, 1192-1208 (2005) “Diagnosis of meridional ozone transport based on mass weighted isentropic zonal means”
- 6) T. Iwasaki, H. Hamada and K. Miyazaki: *J. Meteor. Soc. Japan.*, 87, 997-1006 (2009) “Comparisons of Brewer-Dobson Circulations diagnosed from Reanalyses”
- 7) A. Ebita, S. Kobayashi, Y. Ota, M. Moriya, R. Kumabe, K. Onogi, Y. Harada, S. Yasui, K. Miyaoka, K. Takahashi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, M. Soma, Y. Oikawa, and T. Ishimizu: *SOLA*, 7, 149-152 (2011) “The Japanese 55-year Reanalysis JRA-55 : An Interim Report”
- 8) P. Hadjinicolaou, J. A. Pyle and N. R. P. Harris: *Geophys. Res. Lett.*, 32, L12821 (2005) “The recent turnaround in stratospheric ozone over northern middle latitudes: A dynamical modeling perspective”
- 9) W. Feng, M. P. Chipperfield, M. Dorf, K. Pfeilsticker, and P. Ricaud: *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 2357-2369 (2007) “Mid-latitude ozone changes: studies with a 3-D CTM forced by ERA-40 analyses”
- 10) C. Kobayashi and K. Shibata: *J. Meteor. Soc. Japan*, 89, 363-376 (2011) “Evaluation of Dynamical Contribution to Lower Stratospheric Ozone Trends in Northern Mid-latitudes over the Last Three Decades (1980–2006) Using a Chemical Transport Model”
- 11) K. Shibata, H. Yoshimura, M. Ohizumi, M. Hosaka, and M. Sugi: *Pap. Meteorol. Geophys.*, 50, 15–53 (1999) “A simulation of troposphere, stratosphere and mesosphere with an MRI/JMA98 GCM”
- 12) K. Shibata M. Deushi, T. T. Sekiyama, and H. Yoshimura: *Pap. Meteorol. Geophys.*, 55, 75– 119 (2005) “Development of an MRI chemical transport model for the study of stratospheric chemistry”
- 13) S. Solomon, R. W. Portmann, R. R. Garcia, W. Randel, F. Wu, R. Nagatani, J. Gleason, L. Thomason, L. R. Poole, and M. P. McCormick: *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1871–1874 (1998) “Ozone depletion at mid-latitudes: Coupling of volcanic aerosols and temperature variability to anthropogenic chlorine”

## (2) 二酸化炭素およびエアロゾル地表面フラックス推定に関する研究

国土交通省気象庁気象研究所

環境・応用気象研究部 第一研究室

柴田 清孝

眞木 貴史

関山 剛

出牛 真

気候研究部 第五研究室

小林 ちあき

〈研究協力者〉

(独) 海洋研究開発機構

宮崎 和幸

平成21～23年度累計予算額：34,403千円

(うち、平成23年度予算額：12,701千円)

予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】** 二酸化炭素に関しては、地上観測データ、航空機観測データ、衛星観測データを一体的に同化し、二酸化炭素濃度と二酸化炭素フラックスを一体的に解析するシステムを構築した。観測データの品質管理に輸送モデルと逆解析を組み合わせる客観的な手法を考案して実装した。現時点では衛星観測データに無視できないバイアスが残っていることが判明したため、輸送モデルと逆解析を用いた衛星観測データのバイアス補正システムを構築した。その結果、温室効果ガス観測衛星(GOSAT)GOSATでは8ppm程度の、大気赤外サウンダ(AIRS)は3ppm程度のバイアスを補正した。解析された二酸化炭素濃度は解析値に近くなる傾向を示すと共に、主に陸域のフラックスを修正することができた。二酸化炭素濃度、フラックス推定精度に大きな影響を与える輸送モデルに関しては、気象研・気象庁大気大循環モデルとの直接結合を行い、鉛直輸送過程に新しい積雲対流スキームを導入するなど改良を施した。

エアロゾルに関しては、衛星搭載ライダーによるエアロゾル観測とアンサンブルカルマンフィルターを用いることによってエアロゾルのデータ同化システムを新規開発した。このデータ同化システムの動作を確かめるために観測システムシミュレーション実験と呼ばれる理想実験を行い、良好な結果を得た。実観測データによる現実大気データのデータ同化では、特に東アジアのダストエアロゾル(黄砂)に着目してその解析結果を検証した。データ同化結果と独立観測との比較によって、黄砂の発生域から日本へかけての移流の様子が正確に把握できるようになっただけでなく、発生域での地表面フラックス量(黄砂発生量)をデータ同化で逆推定できていることが確認できた。衛星搭載ライダーのデータ同化に成功したのは我々が世界初であり、この技術を応用することによって黄砂予報の精度を劇的に改善することが可能である。

**【キーワード】** 二酸化炭素、黄砂、データ同化、逆解析、放出量推定

## 1. はじめに

### (1) 二酸化炭素フラックス推定

地球温暖化の主要な原因物質とされている二酸化炭素濃度の将来予測は、排出シナリオに依存する部分も大きいですが、まだ地表面（陸域・海洋）との交換過程が十分に理解されていないこともあり、各機関の予測モデル間の違いは大きい<sup>1)</sup>。この交換過程を理解し、二酸化炭素収支を定量的に理解するためには二酸化炭素収支の直接測定が理想であるが、現在の技術的かつ人的資源の制約から極めて困難である。加えて、衛星等のリモートセンシング観測においても二酸化炭素収支を直接測定できる観測は現時点では存在しない。別のアプローチとして、現在様々な機関の元で陸域や海洋の素過程から二酸化炭素収支を定量的に計算する数値モデルの開発も進められてきたが、まだモデル間の結果の違いは大きく、我々が必要とする知見を得るに至っていない。このように観測あるいはモデルから二酸化炭素収支を直接解明する試みは現時点では成功していない。

一方、二酸化炭素は大気中で極めて安定であり、その輸送は基本的に大気の輸送と共に行われるという特徴がある。近年、計算機や気象学の進展に伴い、大気をシミュレートする数値モデルの進展は著しい。加えて、大気中の二酸化炭素濃度観測は従来から行われてきた地上観測に加え、近年は航空機、衛星等による移動体観測が行われるようになり、大気中の二酸化炭素濃度観測データ数も増加している。そこで、これらの観測データと数値モデルを組み合わせることによって、大気中の濃度から二酸化炭素収支を推定するという手法（逆解析）が盛んに行われるようになり、国際的な相互比較プロジェクトも行われるようになってきた<sup>1)</sup>。これまでの主流として使われてきた方法は、地表面の領域・期間を区切りそこから一定量の二酸化炭素を放出して数値モデルでその輸送過程をシミュレートし、用いた観測データ群を最もよく表現できるよう二酸化炭素収支を調整するという手法であった。この手法によって亜大陸規模での二酸化炭素収支を解析できるようになった<sup>1)</sup>が、より詳細な解析を実施しようとする必要と必要な計算機コストが飛躍的に増大するという問題点があった。この問題点に対応できるという特徴からアンサンブルカルマンフィルター（EnKF）の優位性が着目され、様々な機関で研究が始められている。本研究課題でもEnKFを用いた二酸化炭素収支解析システムの構築を行った。また、先に挙げた異なるプラットフォームの観測データを統合して解析に利用することで、フラックス推定精度は著しく改善するものと期待できる。しかしながら、これまでのところ、それらのデータを統合利用した研究は行われておらず、各観測の相対的な重要性は自明ではない。

### (2) エアロゾルデータ同化

今後の気候変動の予測は人類に課せられた喫緊の課題であり、その重要なファクターの一つとして大気エアロゾルが挙げられる。大気エアロゾルの気候へ与える直接効果（短波・長波放射の散乱・吸収による放射強制力への影響）および間接効果（雲核として働くことによる降水過程や雲アルベドへの影響）について、これまでの定性的な議論を超えて定量的な議論が必要となっている<sup>1,2)</sup>。また日々の天気予報の高精度化を求める立場からも、大気エアロゾルの挙動把握が強く求められるようになってきている<sup>3)</sup>。また、雪氷の表面に沈着したエアロゾルが地表のアルベドを低下させる効果、遠洋の海水に沈着して植物プランクトンの栄養塩となる効果など、これまで考えられてこなかった環境への影響も指摘されている<sup>2)</sup>。さらに、大気環境への影響においては、対流圏の硫酸エアロゾル、ダストエアロゾル（いわゆる黄砂）、黒色炭素エアロゾル（いわゆるスス）など

は人間の健康を著しく害し、あるいは農業や産業などの社会活動に深刻な影響を与えている<sup>4,5)</sup>。

しかしながら、エアロゾルの発生沈着過程、大気中での3次元分布、さらにそれらの経時変化には不明な点があまりに多い。そのため、データ同化すなわち観測とモデルの情報統合によって、エアロゾルの広範囲かつ正確な解析値を得ることが大変期待されている。特にエアロゾルの地表面フラックス（放出量および沈着量）は総観規模での直接観測がほとんど不可能であり、データ同化によって逆推定することができれば極めて有益な知見となりうる。近年、数値気象予報モデルあるいは化学輸送モデルと高度なデータ同化スキーム（変分法あるいはアンサンブルカルマンフィルターなど）を組み合わせた研究開発が世界的に進んでいるが、エアロゾルに関しては未だ実用化に至ったシステムは無い。これら先行研究ではデータ同化スキームの精度が低いこと、解析値のエラーや感度を定量的に調べていないこと、利用できる観測値が時間的・空間的に極めて疎であること、などが問題点として挙げられる。さらに現業の数値気象予報システムにおいては、エアロゾルのデータ同化を導入することによって放射や雲物理の精度向上が望めるだけでなく、トレーサーとして利用することによる風の場の改善も将来的に期待できる<sup>3)</sup>。エアロゾルのデータ同化は大気物理学・大気化学における非常にチャレンジングな最先端の技術開発と言える。

## 2. 研究開発目的

### (1) 二酸化炭素のデータ同化

本研究では、最先端のデータ同化手法であるEnKFと高性能の化学輸送モデルを用いて、大気微量成分のための4次元データ同化システムを開発することを目的とする。本サブテーマでは二酸化炭素、エアロゾルについて、衛星観測データの利用環境の整備、EnKFの最適化、化学輸送モデルの精度向上を図り、4次元データ同化システムの性能向上を図る。従来手法の逆解析等によるデータ同化結果と比較し、性能を評価する。特に、EnKFの大気微量成分析の応用例は欧米でもまだ少ないので日本独自の研究として発展させる。

二酸化炭素フラックス推定における本研究課題の達成目標は、構築した4次元データ同化システムを用いて、二酸化炭素の高精度な地表フラックス推定を実現することである。実験的再解析データの解析から、各種衛星観測データを同化して全球の大気環境の実況監視に役立つデータセットを作成できるかを明らかにする。この取り組みにより、将来の数十年に及ぶ長期間の観測データを用いた再解析の足がかりとする。

このために可能な限り多くの観測データ（地上、航空機、衛星等）を収集して客観的な品質管理を施し、データ同化システムに導入できるようにする。地上・航空機観測に関しては精度の高い（誤差0.1ppm程度）二酸化炭素濃度観測データが利用可能であるが、空間代表性誤差を考慮する必要がある。衛星観測データに関しては、測器の特性に応じた気柱積算量が利用できるが地上・航空機観測と比較して精度は一桁程度悪くなる。また、同一の測器で全球を観測することやデータ数が他の観測よりも多いことなどからバイアスの存在は致命的である。このため、衛星観測データのバイアスに関する調査を行い、必要であれば修正法を実装する。

データ同化の鍵となる輸送モデルに関してもフレームの変更や鉛直輸送過程の改良を通じて輸送モデルのバイアスを減らし、フラックス推定精度の向上を目指す。本研究における気象データは計算効率の面などからJRA-25<sup>6)</sup>等の再解析値をナッジングすることとし、気象場の解析は行わないこととした。

また、GOSATの観測誤差などの諸条件を考慮し、GOSATデータの利用により地表フラックスの推定精度がどの程度改善するのかを、4次元データ同化システムに基づく数値実験から明らかにする。実際のGOSATデータが利用可能となった時点で、構築した4次元データ同化システムにより二酸化炭素の地表面フラックスの推定を高度化することでIPCC第5次評価報告書への貢献を目指す。

## (2) エアロゾルのデータ同化

対流圏エアロゾルの全球分布、特に東アジア域分布の再解析値作成を可能とする高精度データ同化システムの技術確立を目指す。このデータ同化システムを利用して、エアロゾルの地表面フラックス推定を目指す。エアロゾルモデルでは主要なエアロゾルすべて（硫酸塩、ダスト（いわゆる黄砂）、海塩、有機物、黒色炭素）をシミュレーションするが、データ同化の制御変数としては硫酸エアロゾルとダストエアロゾル（黄砂）のみを選択する。他のエアロゾル種は観測のバックグラウンドとしてのみ扱う。データ同化スキームには4次元アンサンブルカルマンフィルター（4D-EnKF）を採用し、4D-EnKFの有効性を検証する。

広範囲かつ高精度な鉛直プロファイル情報が入手可能な衛星搭載LIDAR（CALIPSO）の全球エアロゾル観測値をデータ同化対象の観測値として利用し、そのCALIPSOデータの中でもレベル1（リトリーブ処理前）データの利用を目標とする。そのために必要となる詳細なLIDAR観測演算子のソースコード開発が可能であるかどうかの検証も行う。

開発した高精度データ同化システムを用いて、東アジア域のダストエアロゾル（黄砂）の発生源、すなわち中国やモンゴルの乾燥地帯（主にタクラマカン砂漠およびゴビ砂漠）における地表面フラックスの強度を逆推定する。また、東アジア域の越境汚染を実況監視する基礎技術の一つとして、このデータ同化システムが利用可能であるかどうかを検証する。

東アジア域のエアロゾル、特に黄砂を主なターゲットとする理由は、一つにはそれが我が国の大気環境に非常に大きな影響を及ぼしているという環境政策上の重要性のためであり、もう一つには地表面フラックス推定の対象として黄砂の発生源と輸送過程が比較的詳細に把握されているという科学技術上の優位性がある。また黄砂は他のエアロゾル種と比較して観測値が多く蓄積されており、データ同化結果の検証が比較的容易であることも見逃せない。しかし一方で、本研究によって開発予定のデータ同化システムは全球をカバーしており、本研究によって黄砂のデータ同化解析の有用性が確認されれば、他の地域のダストエアロゾルを対象としたデータ同化解析も十分期待できる。

## 3. 研究開発方法

### (1) 二酸化炭素のデータ同化

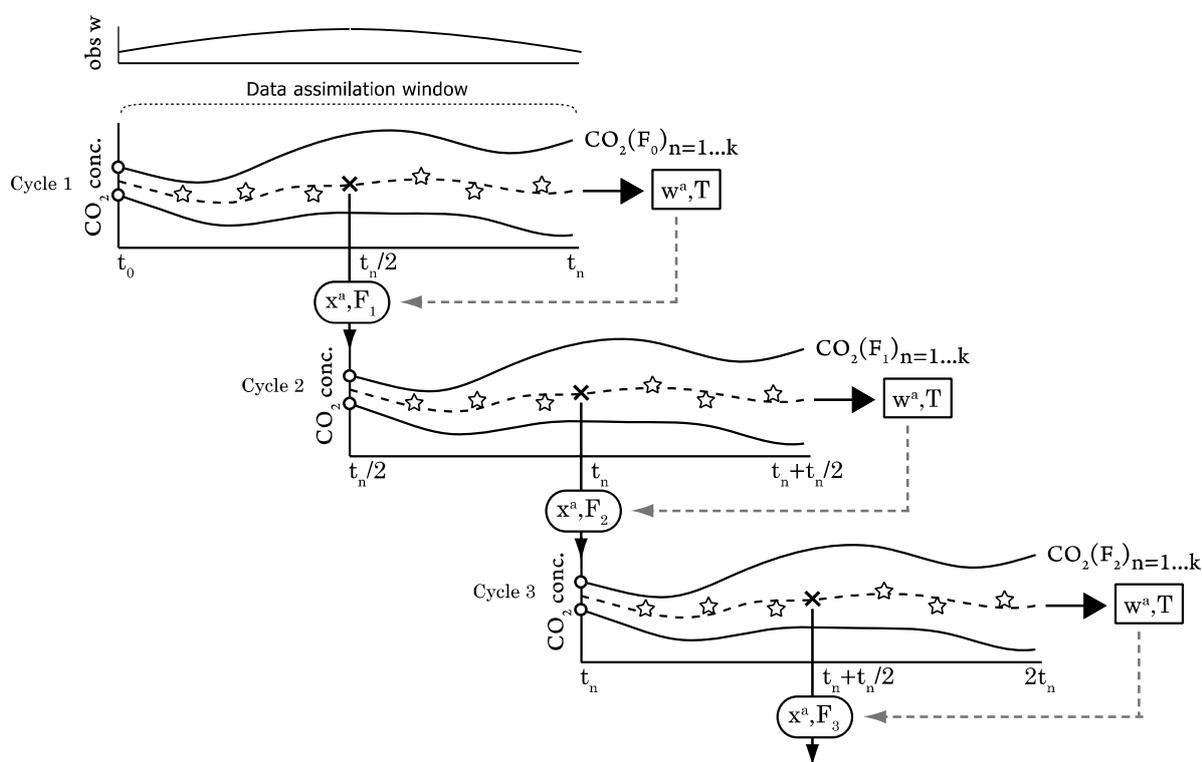
二酸化炭素に関しては、アンサンブルカルマンフィルターを用いた二酸化炭素フラックス解析システムの構築を行った。このために必要な技術開発研究（観測データ整備、輸送モデル改良、データ同化システム開発）を行った。

観測データ整備に関しては、可能な限り多くのデータを収集し、品質管理を行った。観測データの品質管理システムとして、統計的な品質管理に加えて逆解析を用いた品質管理手法の開発を行った。この手法の長所としては、解析する数値モデルの時間・空間代表性に応じた観測データ品質管理を行うことができる点である。地上観測データに関しては観測所選別や不確かさの設定

に、衛星観測データに関してはバイアスの補正システムに逆解析から得られる情報を利用した。特に当初想定していなかった衛星観測データのバイアス補正に本手法を用いることができた。

輸送モデル改良に関しては、これまで逆解析で利用してきたオフラインモデル（CDTM）を大気大循環モデル（MJ98）に直接結合（オンラインモデル）した。このことによって、MJ98が毎ステップ計算する気象データを物質の輸送計算に利用できることから輸送精度の向上が見込まれる。比較実験の結果では、成層圏界面の表現の向上などが見られた。さらに積雲対流による輸送過程としてMJ98で採用されているArakawa-Schbert積雲対流スキームのマスフラックスを利用するようにし、これまで他のモデルと比較して弱めであった鉛直輸送を強化することができた。

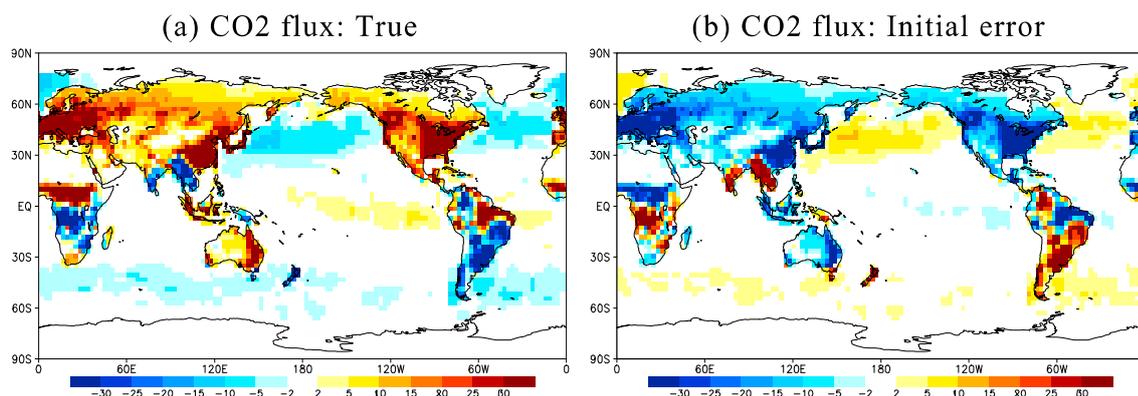
海洋研究開発機構では、アンサンブルカルマンフィルターに基づく4次元データ同化システムを開発し、二酸化炭素フラックスの推定に適用した。解析するフラックスの分解能は水平空間に2.8度、時間間隔は1.5日と高分解能であることが特徴である。理想化状況下で作成した擬似観測データを利用して、地上観測、GOSATによる衛星観測、民間航空機による観測（CONTRAIL）、それぞれがフラックス改善に対して持つ相対的な重要性を評価した。図(2)-1には開発した二酸化炭素フラックス推定のためのデータ同化システムの概念図を示す。図(2)-2には理想化実験で想定した真の二酸化炭素フラックスの分布と初期の誤差分布を示す。



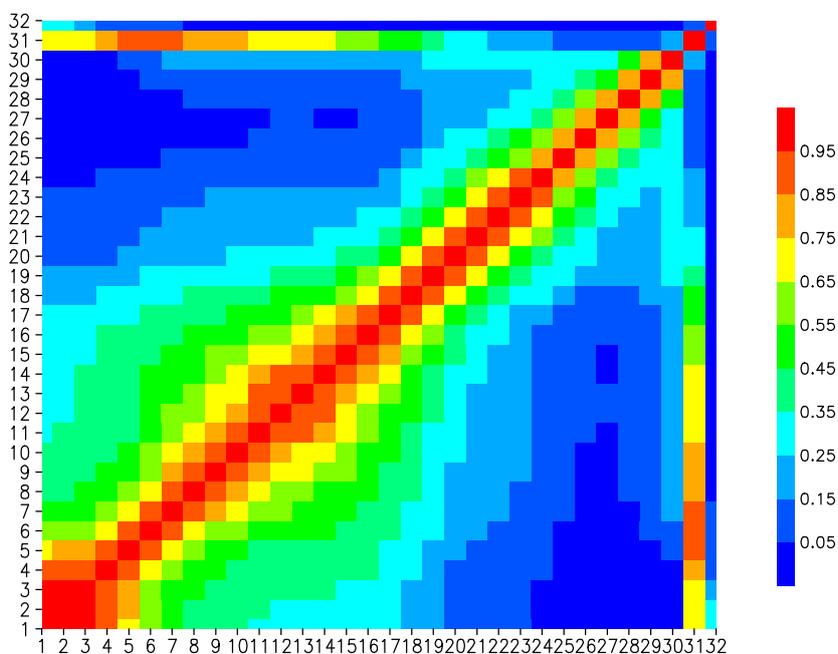
図(2)-1 二酸化炭素地表面フラックス推定のための4次元データ同化システムの概念図。

二酸化炭素フラックスの推定のためには、図(2)-3に示す背景誤差共分散情報を利用して、二酸

化炭素のフラックスと大気中濃度を同時に最適化可能となる。本システムでは、二酸化炭素フラックスに関する予報モデルは利用しない。結果として、そのスプレッドは継続して縮小することとなる。フラックス共分散の過小評価を回避する目的で、共分散膨張テクニックを導入した。本テクニックの導入は全ての観測データの同化に重要であった。また、航空機観測データの同化のためにはスーパーオブザーベーション法を適用した。この手法は、より代表性の高い観測データを作成する上で大変に役に立ち、特にヨーロッパにおいてフラックス推定を大きく改善した（図(2)-4）。GOSATデータの同化のためにはアベレージングカーネル情報を利用した。

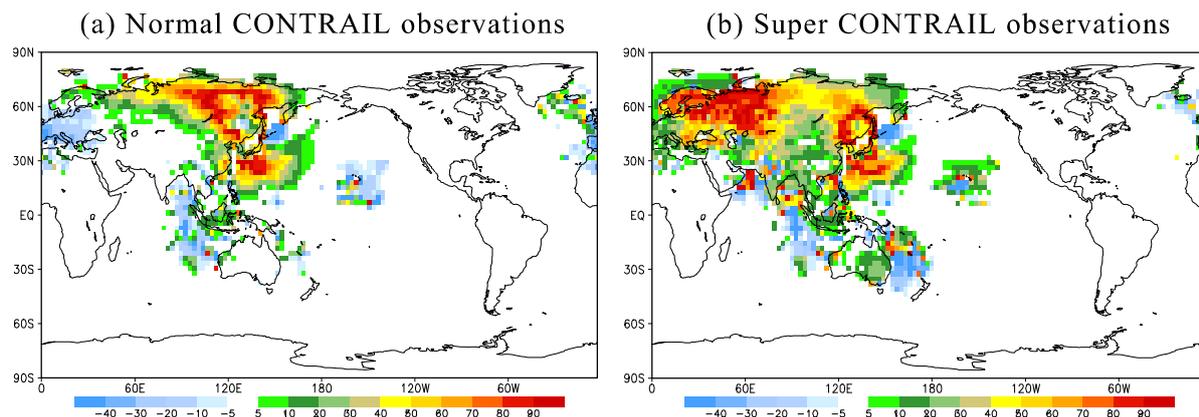


図(2)-2 理想化実験において想定した二酸化炭素フラックスの分布とその初期誤差

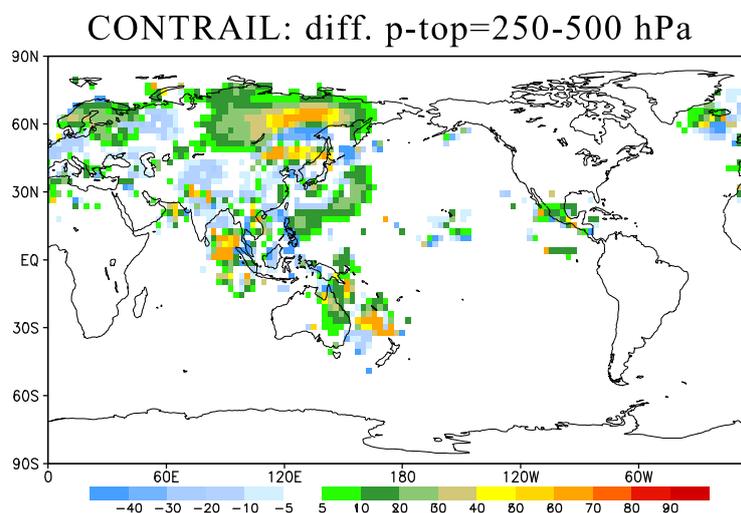


図(2)-3 全球平均した背景誤差共分散行列の構造。1-30は各モデルレベルにおける二酸化炭素の大気中濃度、31は二酸化炭素鉛直積算濃度、32は二酸化炭素の地表フラックスを示す。理想化条件における感度実験より、3日の同化ウィンドウと900kmの局所化半径を持つ4次元デー

データ同化システムを解析に適用した。本枠組みは、解析地点から遠く離れた解析時刻とずれた時刻に取得される観測データを利用する上で効果的である。CONTRAILデータの同化には長い鉛直局所化を適用し、上空の観測データが地表面解析に大きな影響を持つ事を可能とした。長い鉛直局所化を適用することで、ユーラシア大陸の広範囲においてフラックス推定の改善が見られた（図(2)-5）。これらの取り組みを通して、開発したデータ同化システムは様々な観測情報を反映し二酸化炭素のフラックスを精度良く推定可能となることを確認した。

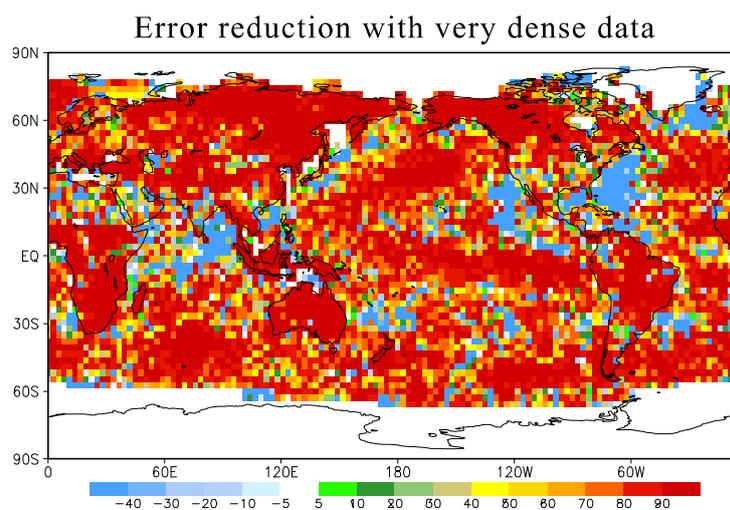


図(2)-4 通常のCONTRAIL航空機観測データと、そのスーパーオブザーベーションを利用した場合の地表フラックス改善率。

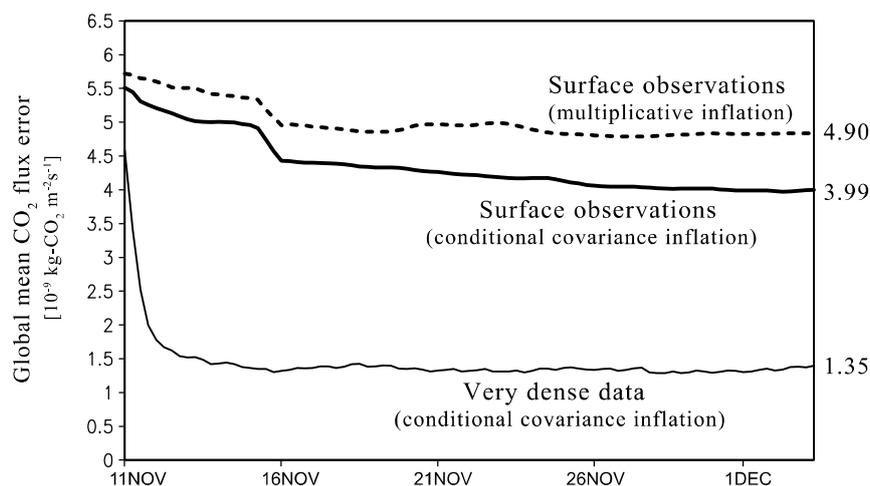


図(2)-5. CONTRAIL航空機観測データ同化時に鉛直局所化長を変更した場合の地表フラックス改善率の違い。正の値は、鉛直局所化長を長くすることで解析が改善された領域を示す。

理想化実験はデータ同化システムの性能を評価するためにも利用した。非常に密で高精度な観測データを用いた擬似観測データ同化実験から、データ同化システムは問題なく動作しており、二酸化炭素フラックスの分布を高精度に推定可能であることを確認した。図(2)-6には本理想化実験から取得された二酸化炭素フラックスの誤差修正率を示す。フラックス絶対量の小さな海上などを除いて、修正率はおおむね100パーセントに近く、高精度な解析が行われていることを示す結果である。全球平均した解析誤差もデータ同化サイクルを介して効果的に減少していることが分かる(図(2)-7)。



図(2)-6 高分解能・高精度観測データの同化により取得された二酸化炭素フラックスの誤差修正率。



図(2)-7 高分解能・高精度観測データの同化により取得された二酸化炭素フラックス誤差の時系列(細い実線)。太線には地上観測データの同化によって得られたフラックス誤差の時系列を合わせて示す。

この結果を用いて実観測データを利用したデータ同化システムのプロトタイプを構築した。今回、利用予定だった衛星のうち、OCO (NASA) の打ち上げ失敗により利用できる観測データ数が十分でなかったことや、もう一つの衛星 (GOSAT) に2%程度という無視できないバイアスの存在が確認できたため、急遽バイアス補正システム (上記) の開発を行った。加えて、観測データ数の不足を補うために大気赤外サウンダ (AIRS) の観測データについても先に述べたバイアス補正システムを利用してデータ同化の入力として利用できる体制を整えた。

最終的に収集し、品質管理を施した観測データ群と改良された輸送モデルを利用してデータ同化システムによる解析実験を行い、先験情報として与えた二酸化炭素気候値フラックスが観測データによってどのように修正されたかを把握した。

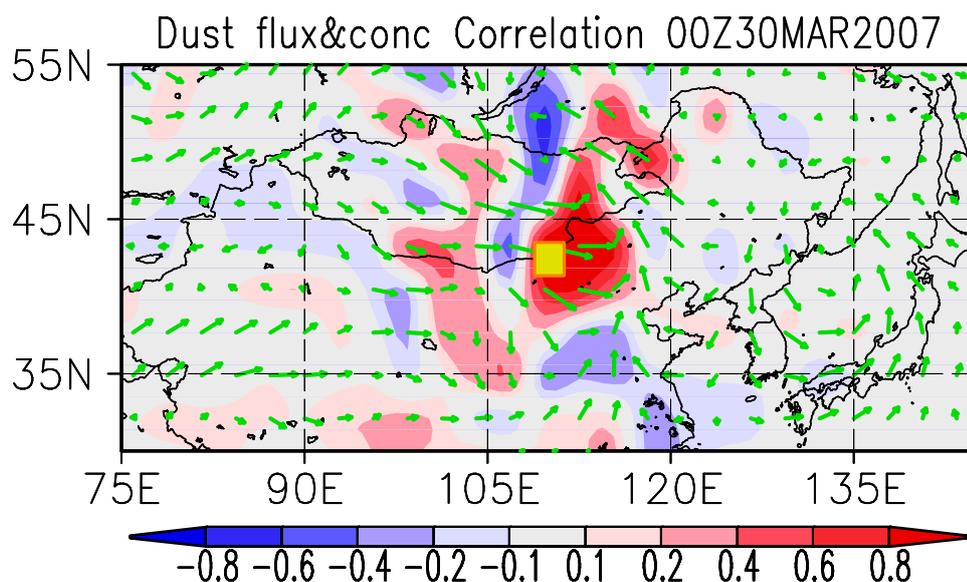
## (2) エアロゾルのデータ同化

最新のデータ同化手法である変分法あるいはアンサンブルカルマンフィルタは古典的なデータ同化手法 (最適内挿法、緩和法など) と異なり、モデル予報変数の解析値を作成するだけでなく、モデル予報変数と相関関係にあるモデル内パラメータの最適推定を行うことが可能である。モデル内パラメータとしてエアロゾル (黄砂など) の地表面フラックスに修正を施す係数を定義すれば、観測データで得られた情報を過去に遡りエアロゾルの地表面フラックスを逆推定することが理論上可能である<sup>7)</sup>。それを図示したものが図(2)-8である。すなわち、データ同化解析と同時に (あるいはデータ同化解析の中で) 逆解析を行うのである。我々は、このデータ同化を使った逆解析を黄砂に適用することによって、ゴビ砂漠・タクラマカン砂漠といった黄砂発生域での地表面フラックス量の推定を目指している。そのため、独自のエアロゾルデータ同化システムの開発と改良を行った。ここで最新のデータ同化手法の中でも大気環境シミュレーションとの親和性が最も高く、計算機負荷の低い手法の一つである局所アンサンブル変換カルマン・フィルタ<sup>8,9,10,11,12)</sup> (アンサンブルカルマンフィルタの一種) を使い、数値シミュレーションモデルには気象庁の黄砂予測業務にも使われている全球エアロゾルモデルMASINGAR<sup>13) 14)</sup> を使用した。一連の実験は水平解像度を約 $2.8^\circ$  (およそ300km) に設定して実行した。観測データには米国航空宇宙局 (NASA) の人工衛星CALIPSOに搭載されているライダー装置<sup>15)</sup> によって得られた2波長 (532nmと1064nm) の減衰後方散乱係数と偏光解消度 (532nmのみ) を使用し、独自の観測演算子 (データ同化においてモデル変数を観測量へ変換するプログラム) を開発してデータ同化計算を行った<sup>16)</sup>。また、データ同化の精度を極めて大きく損なう要因である数値モデルのバイアスを補正するため、動的バイアス推定スキーム<sup>17)</sup> をデータ同化システムへ組み込んだ<sup>18)</sup>。このEnKFデータ同化システムによって黄砂の大気中濃度分布の解析値を作成し、その上で黄砂の地表面フラックス強度 (放出量) の最適推定を行った。

データ同化システム自体の動作検証のために、まずは双子モデル実験によって衛星搭載ライダー (CALIPSO) の観測値を擬似的に作成し、観測システムシミュレーション実験 (OSSE) を行った。それによりエアロゾルデータ同化システムの解析精度を客観的に検証することが可能となった。OSSEはシミュレーションモデルによって作成した仮想地球の疑似観測値 (これには観測誤差もランダムノイズを加えてある) を実際の観測値のように扱い、データ同化する実験である。データ同化に使用するモデルと仮想地球を作成するために用いるモデルは同じMASINGARであるが、モデル内パラメータを変更することによって異なる挙動を示すようにした。OSSEでは地球の状態が厳

密に既知であるため（地球の状態はすべてモデルシミュレーションによって疑似的に作成されるため）、データ同化の精度検証に必要な“正解”との比較が容易に可能である。これは実観測データを利用しては不可能であり、OSSEの極めて大きな利点である。本研究ではこの利点を利用してデータ同化システムの性能を検証する。また、エアロゾル解析精度の検証作業においてMODE（オブジェクトベース診断法）と呼ばれる画像クラスター認識スキームを導入することによって、エアロゾル濃度の分布をより定量的に診断することが可能となった。MODEは領域気象モデルで計算される降水量予報の検証のために米国大気研究センター（NCAR）において開発された技術であり、エアロゾルのプリューム解析の精度検証にも流用可能であることが本研究において確認できた。MODEはプリュームの形を解析対象とし、そのプリュームの重心位置や面積、プリューム内の最大強度を比較することによって解析値と現実の比較（どれくらい似ているか）を算出する。

その後、実際の衛星搭載ライダー（CALIPSO）観測値を用いて2007年春季のデータ同化実験を行った。2007年は3月上旬から6月上旬まで長い期間にわたって黄砂が発生し、非常に強度の強いダスト発生イベントも頻発した年である。このデータ同化結果における大気黄砂濃度を独立観測（データ同化に用いなかった観測値）と比較することによって解析精度の検証を試みた。さらにこの時期の黄砂発生源におけるフラックス強度（発生量）を逆推定し、EnKFとは別の手法を用いて逆推定された黄砂発生量<sup>19)</sup>と比較した。



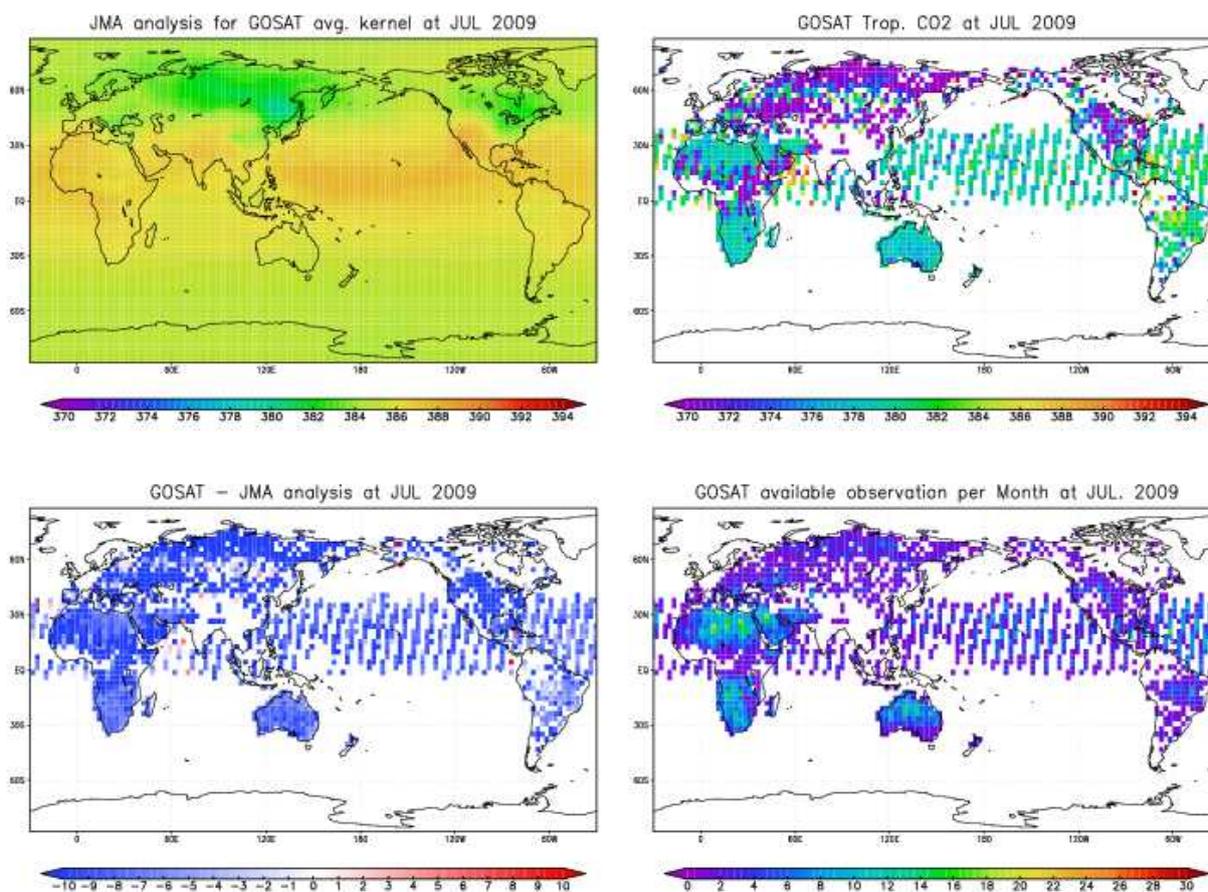
図(2)-8. 2007年3月30日00UTCにおける（図の中央の黄色い四角の領域から放出される）ダストフラックス量とその周囲の地表面ダストエアロゾル濃度との相関係数。緑色の矢印は2007年3月30日00UTCにおける地表面の風を表す。相関係数は2007年3月29日00Zからの24時間アンサンブル予報の結果を元にして計算した。ダスト放出領域の風下で大きな正の相関が見られることが分かる。この風下における相関の存在を手がかりにして、EnKFデータ同化では地表面フラックス量の逆推定を行う。すなわち、観測値が入手できた地点における相関の大きさに比例してその観測値の重要性の重み付けを行い、その観測値の値に合わせてダスト放出領域のフラックス量を増減させる。風上側における正あるいは負の相関の存在はサンプリングエラーが原因と思われる。

## 4. 結果及び考察

### (1) 二酸化炭素のデータ同化

データ解析システムに関しては、エーロゾルのデータ同化システムを二酸化炭素用に移植した。解析対象はモデル格子点（水平約300km）の数日平均の二酸化炭素フラックスとした。従来の逆解析では全球を数十個の領域に分割した月平均二酸化炭素フラックスの解析が主な対象であったので、時間・空間解像度共に大きく向上している。この際、二酸化炭素に特有の観測データ等への対応を行った。利用する観測データとしては、地上（連続観測、フラスコ観測）、航空機（CONTRAIL）<sup>20)</sup>、衛星（GOSAT、AIRS）の観測データを収集した。これらの観測データは観測点の場所などによって時間的、空間的な代表性が異なり、解析対象の時間、空間解像度によっては望ましくない情報を有している場合がある。そこで、まず従来の手法である逆解析を用いて逆解析と観測値のずれが大きな観測値を除外した後に逆解析を行う、といった操作を除外される観測値がなくなるまで繰り返すことによって、解析対象となる時間・空間解像度の情報を持つ観測地点の選別を行った（図(2)-8）<sup>19)</sup>。この図によると、海洋もしくは南半球といった比較的二酸化炭素濃度変動が少ない観測地点の観測値選別率がよくなっており、全球的な二酸化炭素収支を解析するための観測値選別を行うことができた。

航空機観測に関しては、観測頻度が約1分と極めて短く、全ての観測データを解析に用いると同



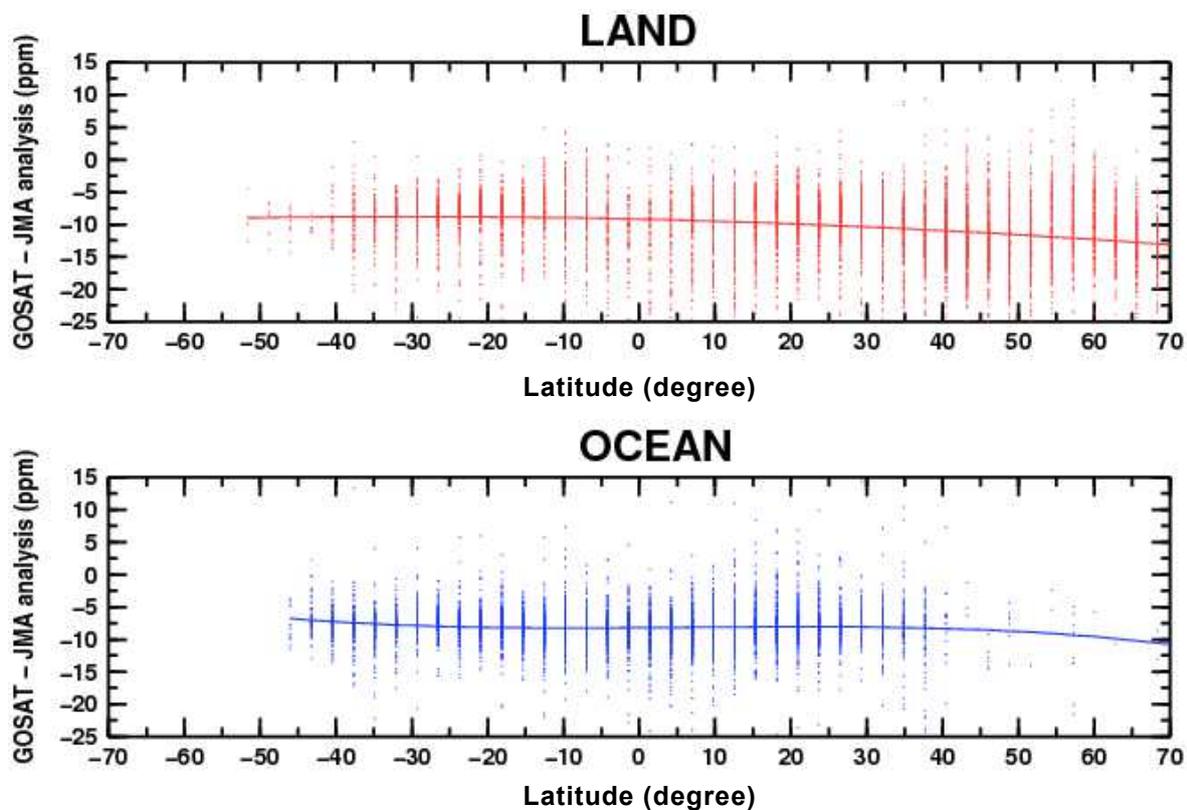
図(2)-9 GOSATのバイアス調査例（2009年7月）。左上：独立解析値（単位：ppm）、右上：GOSATによる観測値、左下：GOSATのバイアス（右上－左上）、右下：GOSATの観測頻度（観測数／月）

じモデル格子内に矛盾した情報が多く含まれることになることや、解析に要する計算コストが飛躍的に大きくなることなどから、モデル格子内の観測値を時間平均したスーパーオブザベーションをすることによって空間、時間代表性の問題を解決した。航空機観測データは空港近傍で鉛直観測データが得られ、それ以外の場所では対流圏上部～成層圏下部の観測データが得られるが、空港付近では今回の解析対象よりも小さな空間スケールの二酸化炭素放出吸収源の影響を受けた観測データが得られることが多いため、地表より2km以下の観測データは今回の解析では利用しないこととした。

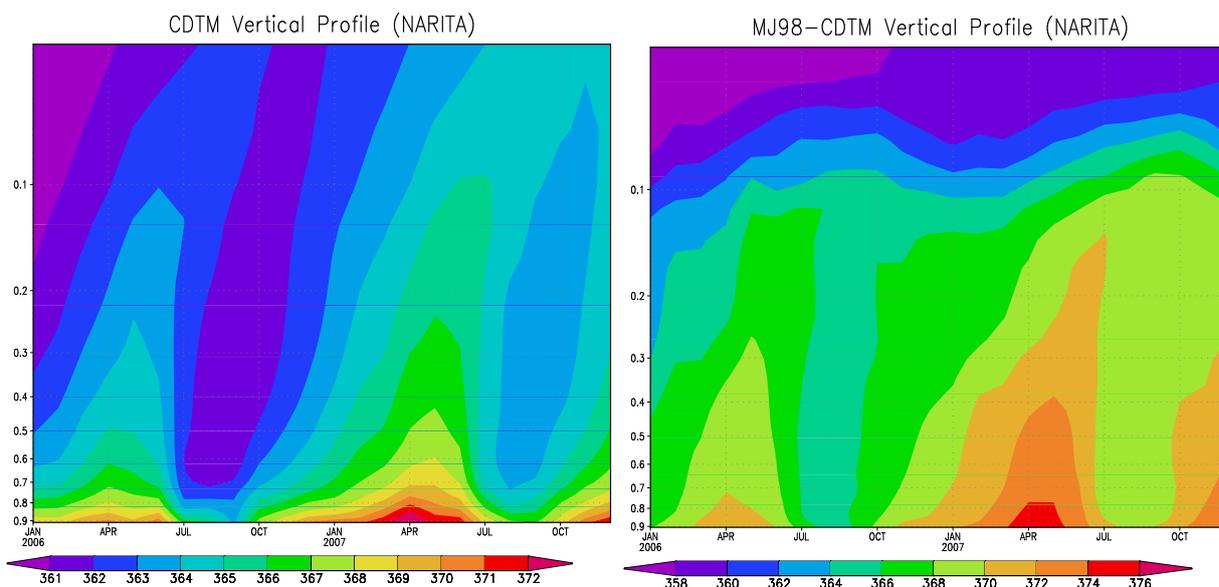
衛星観測に関しては、当初利用を想定していた温室効果ガス観測技術衛星（GOSAT）と米国航空宇宙局（NASA）のOCOのうち、OCOの打ち上げ失敗により利用可能観測データの大幅な減少が懸念された。さらに、GOSATも雲の影響や、海洋は観測がサングリント（海面における太陽からの反射光）に限定できることなどから当初想定していたよりは利用可能な観測データが大幅に減少した。加えて、GOSATが観測した気柱平均二酸化炭素濃度（Level 2 SWIR, Ver. 1. X）には2%前後かつ季節・緯度帯により異なるバイアスが存在していたため、このまま解析に用いることは困難な状況であった。そこで、先に述べた従来型の逆解析（地上と航空機観測データのみを利用しているため、GOSAT解析値とは独立した解析データとなる）から得られた二酸化炭素解析値とGOSATの気柱平均二酸化炭素濃度を月平均値同士で比較し、その差を補正するスキームを考案して実装した（図(2)-9）。このバイアスは、緯度帯（図(2)-10）や季節（図は省略）に応じて変化していることも分かった。このバイアス補正スキームは原理的には他の衛星観測データにも利用することが可能であるため、NASAの赤外サウンダ（AIRS）が観測した対流圏上部に感度の極大を持つ二酸化炭素気柱量に対してもこの手法を適用し、利用可能な観測データ数の増加を試みた。

次に解析に利用する輸送モデルの改良を実施した。これまでの逆解析等では一定時間間隔の気象データから計算時刻における気象データを内挿して輸送計算を行うといったオフラインモデル（CDTM、Sasaki et al., 2002）を用いていた。このモデルは気象場の計算を行う必要がないため高速な計算が可能であるといった特徴を持っていたが、データ同化で使うには輸送精度に問題がある懸念があった。また、実際に輸送モデルによる実験を行ってみると、鉛直輸送が他のモデルと比較して弱いことに加えて、成層圏界面が表現できず対流圏と成層圏の物質の交換が速すぎるなどといった問題点があった。そこで、気象研究所・気象庁が開発した大気大循環モデルと直接結合する（オンラインモデル、MJ98-CDTM）ことによって大気大循環モデルが計算した毎ステップの気象データを輸送計算に用いることによって、輸送計算の精度を向上させることとした。同一の二酸化炭素フラックス（化石燃料燃焼、海洋との交換、陸上生物圏）を与えてCDTMとMJ98-CDTMの成田上空における二酸化炭素濃度の変動を比較した図を(2)-11に示す。CDTMでは対流圏の二酸化炭素がほぼ一定の割合で成層圏に到達しているが、MJ98-CDTMでは100hPa付近に壁のようなものが存在し、対流圏の二酸化炭素がすぐには成層圏に到達していないことが分かる。また、CDTMと比較してMJ98-CDTMの方が対流圏における鉛直輸送が強い（地表面と上空の濃度勾配が小さい）特徴も見られた。しかしながら、モデル比較相互実験（Niwa et al., 2011）によるとMJ98-CDTMの比較的強化された鉛直輸送も他のモデル群と比較して鉛直輸送が弱かったことなどから、従来オフラインモデルで用いていたKuoスキームを基にした拡散による鉛直輸送の計算をMJ98で採用されているArakawa-Schbert積雲対流スキームが計算する鉛直方向のマスフラックスから鉛直輸送を計算するスキームを導入した。その結果、ラドン等の物質を用いた輸送計算結果を見ても、鉛

直輸送が従来のKuoスキームを基にしたものよりも強化され、他の輸送モデルと近い結果が得られるようになった（図(2)-12）。

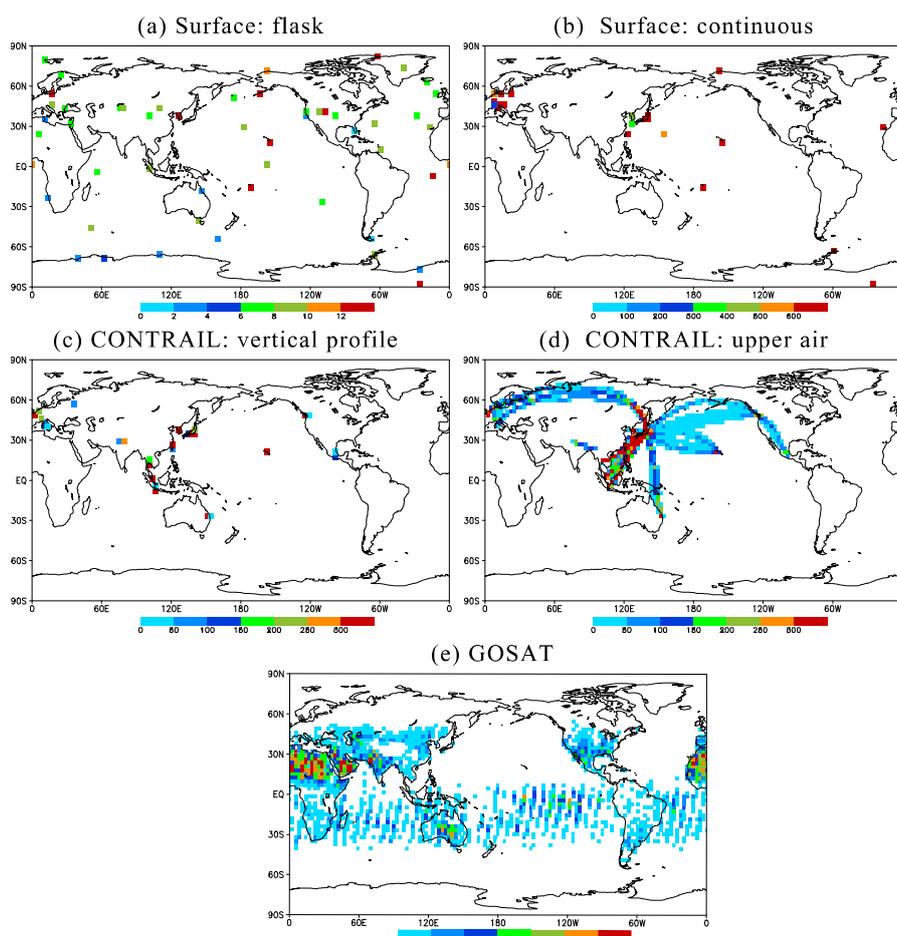


図(2)-10. 緯度帯におけるGOSATのバイアス。上段が陸域、下段が海洋のみの結果を示す。



図(2)-11 成田上空におけるオフラインモデル（左）とオンラインモデル（右）の二酸化炭素輸送実験結果（2006～2007年）。縦軸は地上を1とした際の気圧を示す。単位はppm。

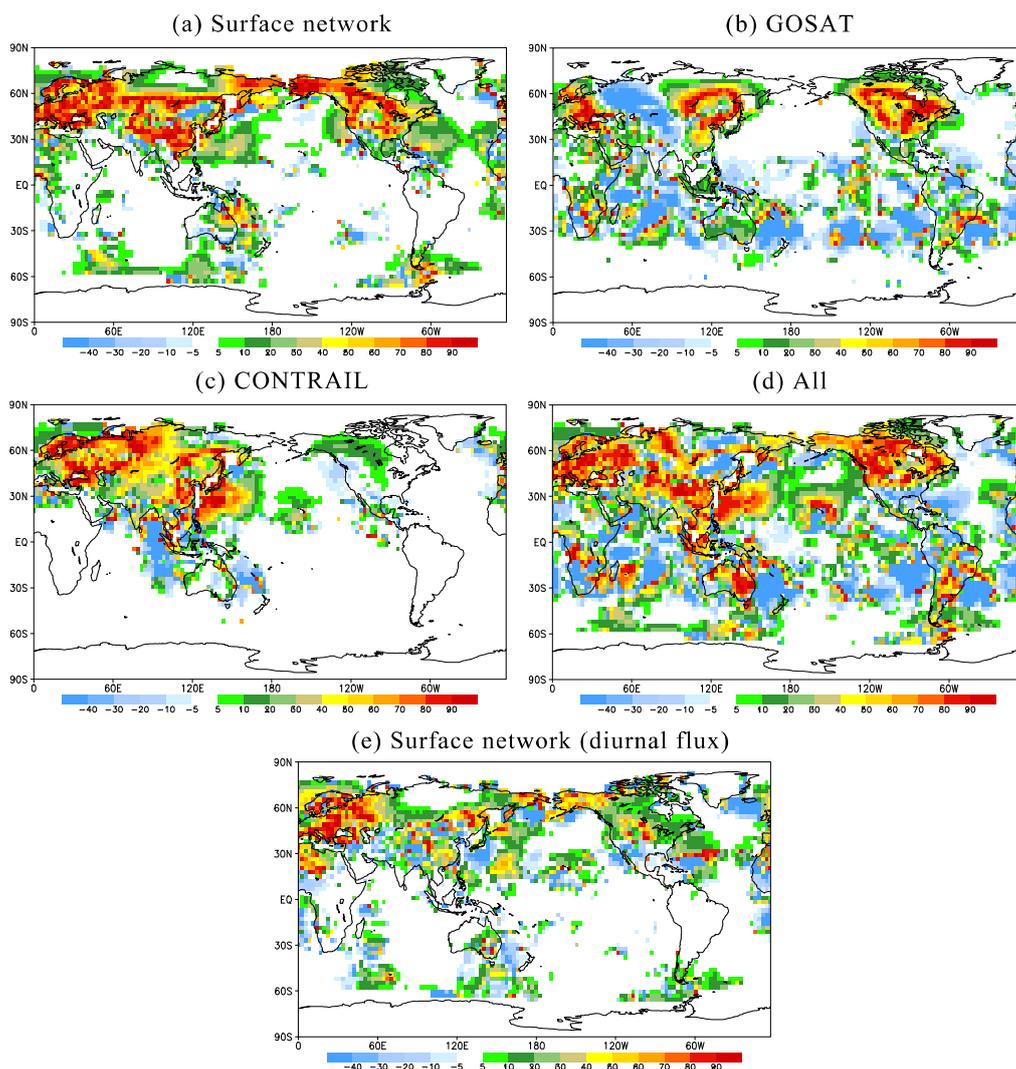
データ同化システムとしては、計算効率や実装の容易さ等の面から最近脚光を浴びつつあるアンサンブルカルマンフィルターを用いた。この手法は逆解析などと比較すると比較的少数（数十～百）の輸送モデルに微小な摂動を与えたアンサンブル計算を行うことによって背景誤差を見積もり、観測データを導入することによって最適な解析値（アンサンブル平均と散らばり具合）を導出する手法のことである（図(2)-1）。海洋研究開発機構では、このシステムを用いて各観測プラットフォームが二酸化炭素フラックス推定にどの程度寄与するのかを確認するため、観測システムシミュレーション実験（OSSE）を実施した。現実の自然界では正解の二酸化炭素フラックスは未知であるが、OSSEでは正解があらかじめ分かっているものとして輸送モデル（AGCM、Numaguchi et al., 1995）と気候値フラックスによるシミュレーションにて正解と考える二酸化炭素濃度分布をあらかじめ計算しておき、これに対して各プラットフォームの観測誤差を設定して疑似観測データを作成した。より現実的な設定とするため、地上、航空機（CONTRAIL）、衛星観測（GOSAT）の観測頻度は実際のものを利用した。3つの異なるプラットフォーム（地上観測、CONTRAIL航空機観測、GOSAT衛星観測）により取得された観測データを用いたOSSEを実施した。各観測データの信頼性はこれまでの研究により報告された値を用いた。図(2)-12想定した観測データの分布を示す。



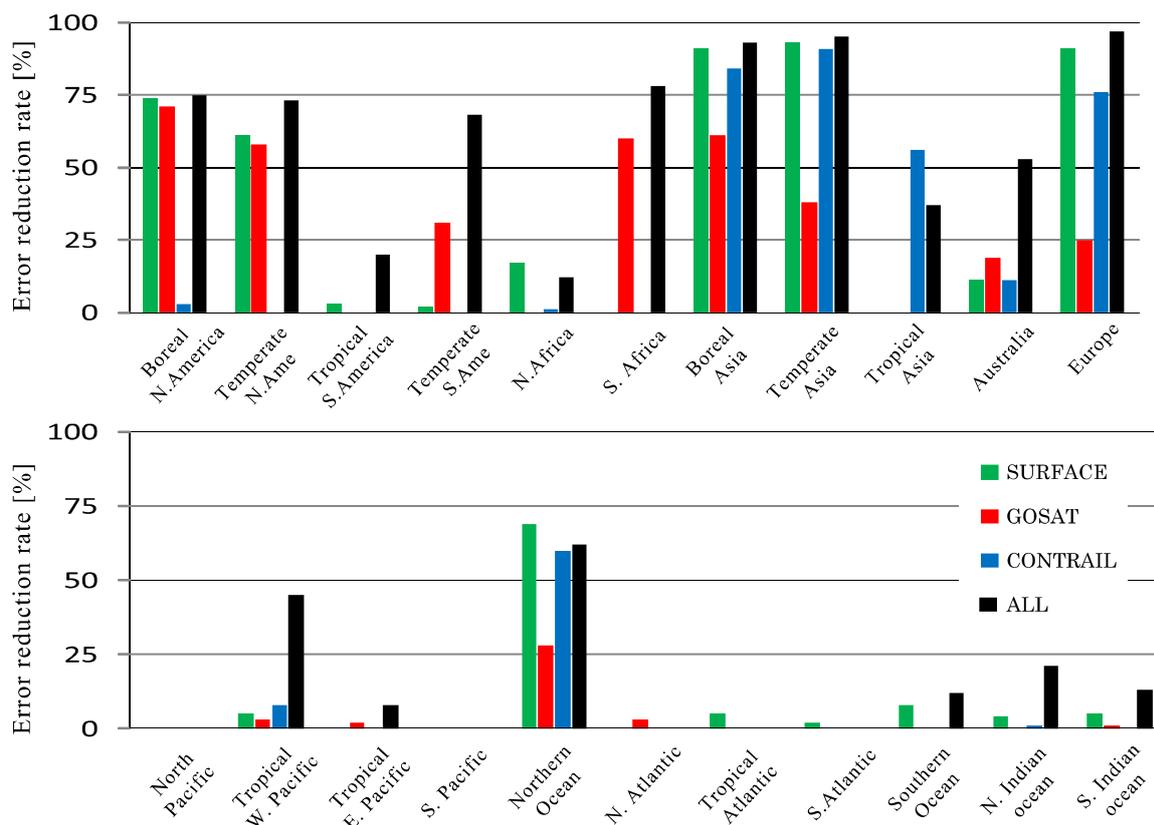
図(2)-12 OSSEで想定した観測データの分布。色は格子当たりの観測データ数（一ヶ月あたり）を示す。

図(2)-13は、OSSEから見積もった各観測データの同化による地表フラックスの改善率を示す。地上観測データはフラックスの推定を大きく改善する。特に、北米、温帯アジア、ヨーロッパにおいて大きな改善が見られた。改善率は領域スケールで50%程度、グリッドスケールでは60%程度であった。同時に、GOSATによる鉛直精算濃度とCONTRAILデータもフラックス修正に対する強い拘束力を保持する可能性があることが分かった。全球平均では、それぞれのデータを個別に同化した場合、CONTRAILデータの持つ潜在能力はGOSATデータの能力とほぼ同等であった。領域スケールでは、GOSATデータは南北アメリカの温帯、南アフリカ、温帯アジア、ヨーロッパで大きな改善効果を与える。領域平均フラックスに対する改善率は30%に達し、グリッドスケールでは最大で50%程度の大きな改善があった。一方、熱帯のフラックスに対する改善効果は十分ではなく、雲の存在に関連するデータ取得頻度と品質の不十分さに起因することが指摘される。CONTRAILデータはヨーロッパ、熱帯、温帯アジアにおいて大きな改善をもたらした。CONTRAILの上空のデータはシベリア上でのフラックスの改善に大変重要であった。上空のデータを同化することで、領域平均のフラックスの改善率は40%に達した。インド上においてもCONTRAILデータ同化による大きな改善があった。これらの領域ではCONTRAILデータのみが大きな改善を与え、フラックスの修正に対して極めて重要なデータセットであることが明らかとなった。一方、対流圏界面よりも上空で取得されたデータはフラックスの改善に寄与せず、同化に利用するデータの選択には注意を要することが明らかとなった。CONTRAILデータおよびGOSATデータを地表観測データと同時に同化した場合、CONTRAILデータの影響はGOSATデータの影響よりも小さくなることが分かった。CONTRAILデータと地上観測データの間にはその観測領域に大きな重複があるが、GOSATは新たな観測領域上でデータを提供するためである。

全ての観測データを同時に同化することで、データ同化システムは全空のフラックスの推定を大幅に改善する。図(2)-14から分かるように、各観測がそれぞれの観測の欠損領域を補い合い、多くの領域で推定が向上することとなった。結果として、フラックスの改善率は、陸上の多くの領域で50%以上になる。全球平均では、全ての観測を利用することで、地上観測のみを利用した場合と比較してフラックスの推定誤差は20%程度小さくなった。この結果は、様々なプラットフォームにより取得されるデータを同時に適切にデータ同化可能とする最先端のデータ同化システムを開発することで、炭素循環に関する理解の向上に貢献し得る可能性を示唆するものである。しかしながら、推定されたフラックスは大きな誤差を含む領域もある。例えば、アフリカ北部、熱帯南米、北米南部、中東、オーストラリア西部においては更なる観測データが依然として望まれる。

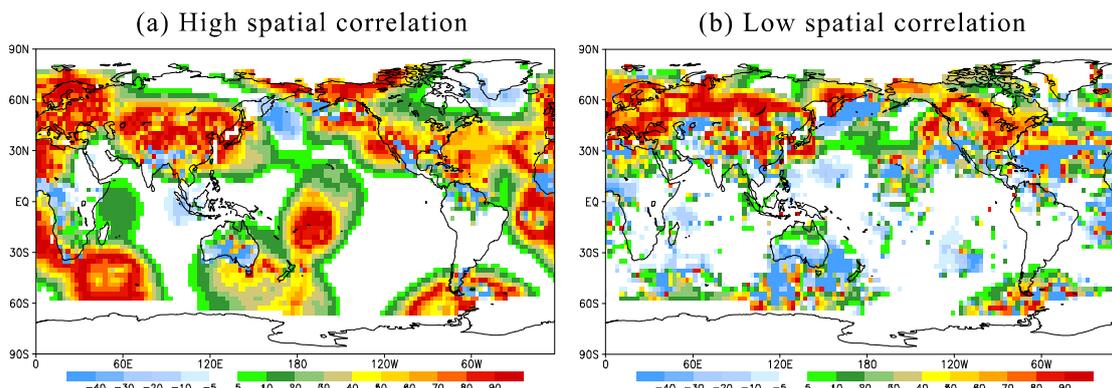


図(2)-13 OSSEにより見積もられた二酸化炭素地表フラックスの改善率の全球分布。異なるデータの同化によって得られた結果と全ての観測データを同時に同化し得られた結果を示す。下図(e)にはエミッションの日変化を考慮した場合に地表観測データを同化し得られた結果を示す。

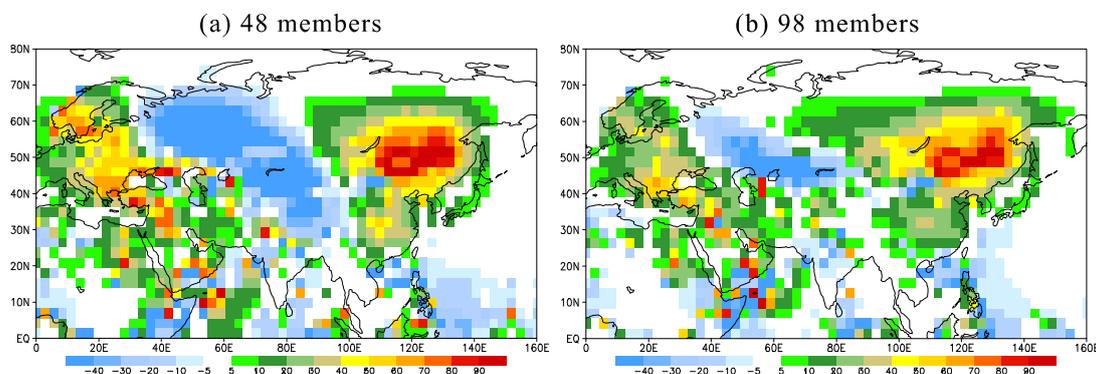


図(2)-14 OSSEにより見積もられた二酸化炭素地表フラックスの改善率の領域分布。異なるデータ及び全てのデータの同化によって得られた結果を示す。

更にいくつかの感度実験を実施し、OSSEの結果はその設定（例えば、利用するフラックスの初期値及びその不確定性、観測エラーなど）に強く依存することが分かった。観測とモデルに内在する様々な誤差要因がフラックスの推定結果に多大な影響を及ぼし、データ同化によるフラックス改善を妨害する。例えば、現実に報告されているGOSATの大きな観測エラーを適用することで、GOSATデータのフラックス誤差軽減に対する能力はおおよそ半減することが分かった。更に、図(2)-15に示すように、フラックスの初期誤差の空間構造がOSSEによる改善の様子に多大な影響を及ぼすことも分かった。フラックス誤差の様子が各格子で大きく異なる場合には、データ同化による修正がより困難となることを示す結果である。また、データ同化システム自身のパラメータにも解析結果は敏感であった。例えば、データ同化に利用するアンサンブルメンバーの数が十分でない場合には、顕著なサンプリングエラーが生じ、データ同化による効果的な改善を妨げる可能性がある（図(2)-16）。これらの要素はOSSEの結果に多大な影響を及ぼすが、異なる設定下においても各観測データの相対的な重要性についてほぼ共通であることも分かった。



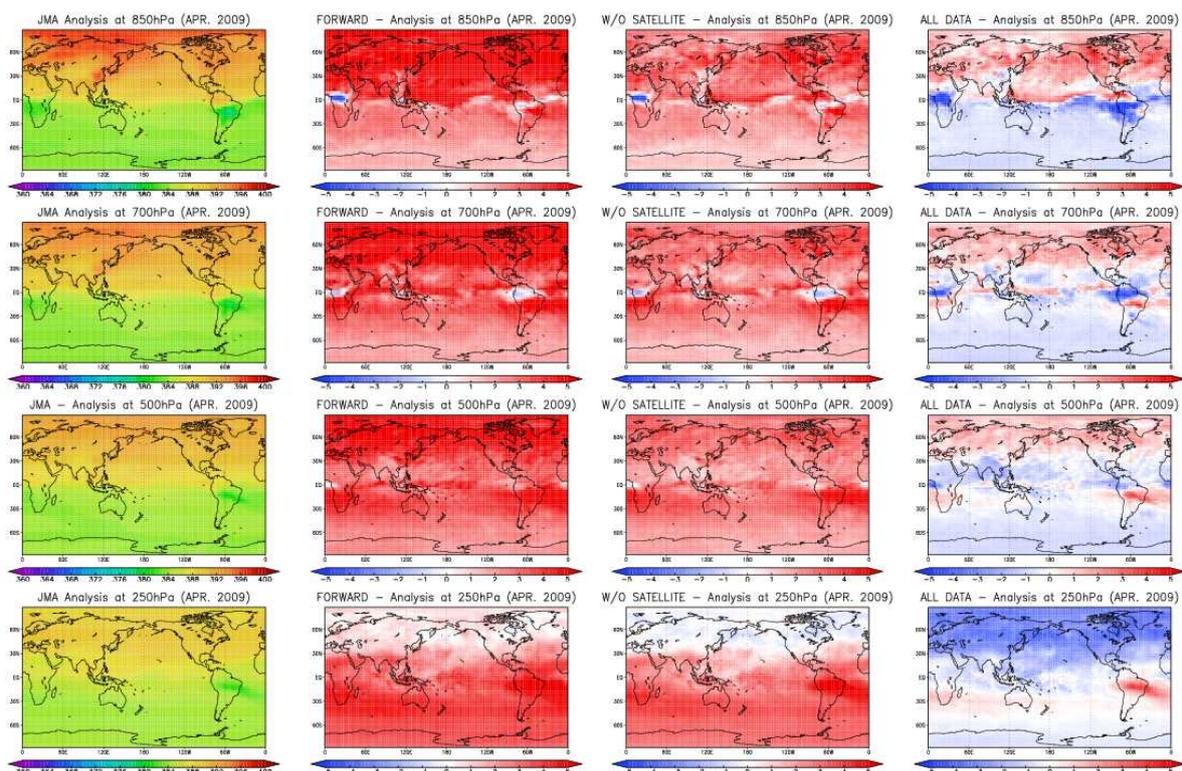
図(2)-15 OSSEにより見積もられた二酸化炭素地表フラックスの改善率の空間分布。フラックス初期誤差の空間相関が高い場合と低い場合の結果を示す。



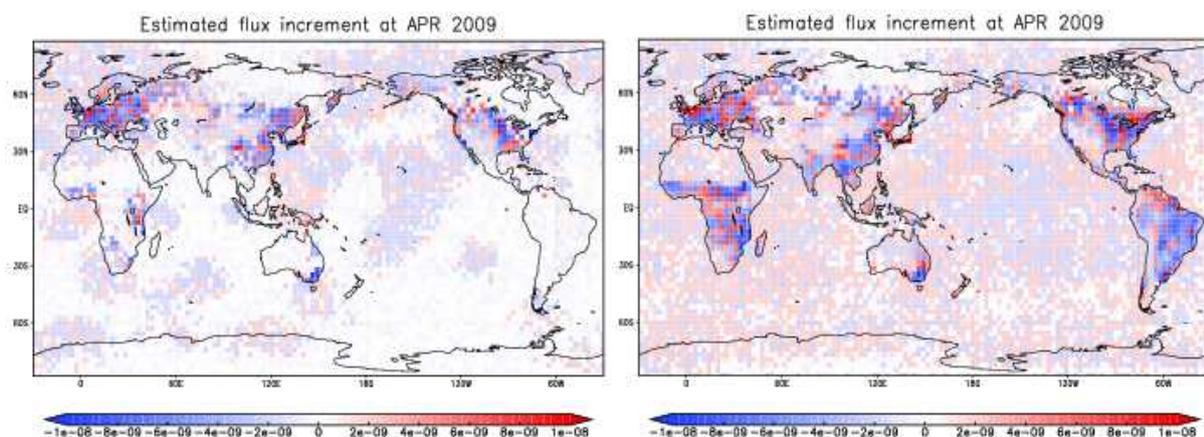
図(2)-16 OSSEにより見積もられた二酸化炭素地表フラックスの改善率の空間分布。異なるアンサンブルメンバーのデータ同化から得られた結果を示す。

本研究の今後の展開は、実際に観測されたデータを本研究によって開発されたシステムに適用することである。実観測データ実験は炭素循環に関する知見を得るために有用である。しかしながら、実データ実験からはシステムの最適化やそれぞれの観測データの相対的な重要性を客観的に判断することは困難である。本研究により取得された知見は、実データ実験におけるそれら不明な要素に対する重要な提言となり得る。

最後に、これまでに開発してきたデータ同化システム、輸送モデルと収集した観測データを用いて2006～2009年にかけてのデータ同化実験を実施した。地上観測データに関しては逆解析で選別（データ選別率が0.5以上の地点）し、衛星観測データに関しては独立解析データでバイアスを補正した後のGOSATとAIRSデータを用いた。航空機観測データと衛星観測データに関してはモデル格子内で時間平均したスーパーオブザーベーションを用いた。逆解析との比較結果を図(2)-17に示す。



図(2)-17. 2009年4月における月平均二酸化炭素濃度。最左列は逆解析による解析値を示す。左から2列目は輸送モデル実験結果（データ同化なし）を、3列目は地上+航空機によるデータ同化結果を、最右列は全データを用いたデータ同化結果を示す。最上段は850hPa、上から2段目は700hPaの、上から3段目は500hPaの、最下段は250hPaの結果を示す。単位はppm。



図(2)-18 2009年4月におけるデータ同化による二酸化炭素フラックスの月平均修正量（単位： $\text{kgCm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ）を示す。左図は地上+航空機観測データをデータ同化した結果を、右図は全観測データ（地上+航空機+衛星）をデータ同化した結果を示す。

輸送モデルのみの結果で見られる解析値との差が観測データを増やすことによって小さくなっている（但し、衛星観測データはこの解析値を用いたバイアス補正を行っているために当然の結果でもある）。次に、あらかじめ与えておいた気候値フラックスに対して解析が与えた修正量を図(2)-18に示す。地上+航空機観測データを用いた場合には、主に観測データの多い陸域でフラックスの修正が行われ、衛星観測データを追加することによってほぼ全球における二酸化炭素フラックスの修正が可能となることが分かった。

次に、実際の観測データを用いたデータ同化実験によりその性能を評価した。

a) データ同化のインパクトと植生フラックス依存性の評価

地上、航空機、衛星の実際の観測データを4次元データ同化した結果、特に、中高緯度で、大陸上で二酸化炭素の地表面フラックスに相違が認められた。このインパクトはおおむね妥当な効果だと判断される。中高緯度の陸上での二酸化炭素フラックスの誤差は他の地域に較べて大きい。中高緯度では、日射量が植物活動に起因する二酸化炭素フラックスに大きな季節変化を引き起こす。日射量の多い春季は、植物の成長期で、炭酸同化作用により多量の二酸化炭素を吸収する。しかし、秋季には、炭酸同化作用は著しく減り、呼吸と枯死のために二酸化炭素を放出する。その結果、中高緯度の大陸上の二酸化炭素フラックスは季節変化がたいへん大きい。季節変化の振幅が大きいので、誤差も連動して大きくなる。従って、大陸上のフラックスは、観測データの精度がそれほどよくなるとも、同化することにより有為に修正される。ただし、都市では二酸化炭素濃度が局所的に高く、その周辺の観測データの同化は今回の方法では難しい。今後、フラックスの地域性に配慮した特別の同化手法を開発する必要がある。都市周辺の観測データの扱いについては次節で述べる。海上では、もともとフラックスの変動の幅が小さいために濃度変動も小さく、相当に精度の高い観測データでなければ、同化してもフラックスの合理的な修正は難しい。海上で二酸化炭素フラックスの解析精度を向上のためには、現在計画中の精度の高い衛星観測に期待するところが大きい。

二酸化炭素の地表面フラックスは、第一推定値として気候値を用いている。第一推定値として前日値を用いことも考えられるが、データ量が少ないと追従しない危険性がある。ここでは、気候値を用いている。地表面フラックスの収束性を調べるため、第一推定値として2つの異なる植生フラックス気候値を用いデータ同化の比較実験を行った。4次元データ同化が適切に機能すれば、濃度が観測データに近づくことで、フラックスも適当な値に収束することが期待される。大気下層の二酸化炭素濃度と地表面フラックスの根平均自乗差（RMSD）をデータ同化の実施前後で比較した。データ同化後、濃度もフラックスもRMSDがデータ同化前に較べてわずかに増え、必ずしも収束に向かっていないことが分かった。濃度やフラックスの地理的な分布をよく見ると、データ同化後に相対的にスケールの小さな変動が増え、これが2つの解析間のRMSDの値を大きくしているように見える。さらに、データ同化における地表面フラックスの収束性は、データ同化スキームにおける局所化距離の変更にも敏感に反応した。少ない観測データの有効活用を図るためにも、局所化距離や背景誤差相関の妥当性を含めて、データ同化スキームのさらなる調整の必要がありそうである。

二酸化炭素の衛星観測データなどが増えれば、濃度の収束性は改善するはずである。地表面フラックスも第一推定値にあまり依存しなくなることが期待される。今回の調査では、データ同化

の際に少ない観測データに過剰に応答しているように見える。観測データが少ない場合でも機能するように、データ同化スキームをさらに改良する必要がある。現状では、第一推定値に使用する地表面フラックスの気候値の精度も重要である。

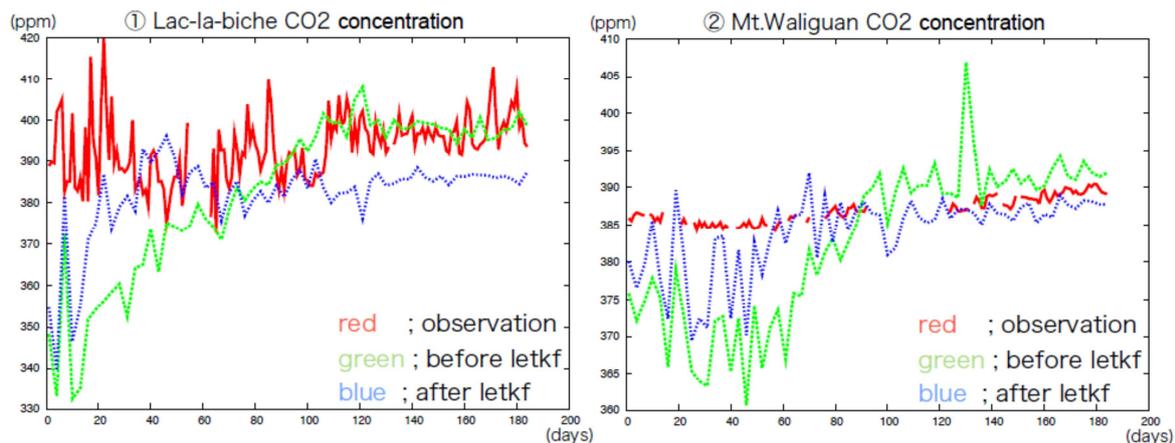
#### b) GOSAT 観測データのみのデータ同化試験

GOSAT-IIやOCO-IIが計画されるなど、将来、衛星による二酸化炭素観測は大きな進展が予定されている。GOSATのデータ同化は将来の衛星データ利用の試金石である。GOSATの観測データのインパクトを明らかにするために観測システム実験を行った。この実験では、二酸化炭素濃度の地上観測は、すべて検証用の独立観測データとして扱った。

ただし、検証に用いる地上観測データの選び方には注意が必要である。データ同化の出力値の空間代表性は数値モデルの解像度で決まる。今回の4次元データ同化実験では水平解像度はT42（スペクトルモデルで波数42の三角形切断：水平格子間隔およそ280kmに相当）である。これに対して、地上観測が直接代表している範囲は極めて狭い。地表面状態が一樣であれば、地上観測の実質的な空間代表性は広がる。しかし、土地利用が複雑な場合は地域代表性が低下する。観測点の地表面状態が地域平均と異なっていれば、バイアスが発生する。観測点周辺での土地利用が異方的であれば、風向によって代表する地域が異なる。特に、都市の二酸化炭素濃度は森林や耕作地との差が大きく、大きなバイアスや著しい風向依存性の原因となる。一般に、4次元データ同化出力の解像度、数100km程度にわたる一様性を仮定することは難しい。今回は都市の影響の少ない地上観測データのみを選んで検証に利用した。

図(2)-19は比較的人為的な影響の少ない地点で、GOSATのデータ同化のインパクトを地上観測と比較したものである。両ポイントとも緯度が比較的高く、かつ、大陸上であり、比較的季節変化が大きい。また、季節変化の振幅と同様に誤差も大きく、衛星データで修正が十分可能である。Lac-la-bicheの冬を除いて、GOSATを同化した場合はしない場合に較べて地上観測に近づいている。これは期待された結果と言える。Lac-la-bicheの冬の場合は、近くのGOSATの観測と地上観測との間にバイアスがあったと考えられる。このほか、都市の影響が少ない地点でさえ、地上観測データによる検証で改善が認められる場合が多い。ただ、森林での観測データといえども、データ同化が何時もフラックスを改善しているわけではなく、二酸化炭素の衛星観測のデータ同化の難しさを表している。

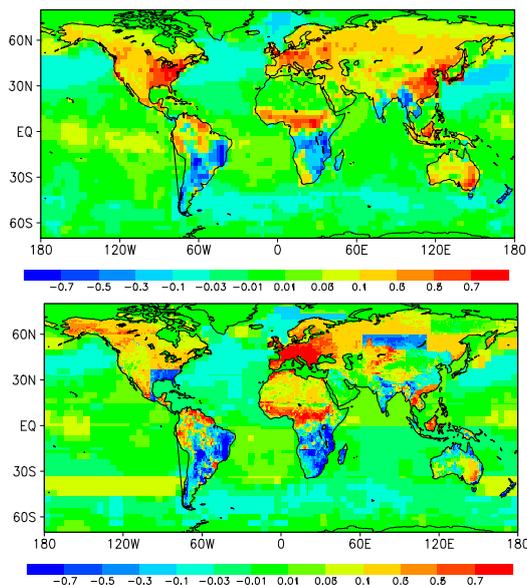
同化に利用するGOSATの観測データの解像度も考慮する必要がある。GOSATのスポットは約10km×10kmであり、ここで用いた全球のデータ同化システムの格子点間隔は数100kmよりはるかにスケールが小さい。つまり、データ同化の格子点が代表する領域内に、GOSATの観測点がたくさんあれば、GOSATの観測から格子点の観測データを推定することが可能である。しかし、さすがにそれだけ超密な観測データを得ることは難しい。今後、限られた衛星観測データから粗い解像度のデータを推定する手法の開発や、高解像度モデルによるデータ同化など、様々な工夫が期待される。



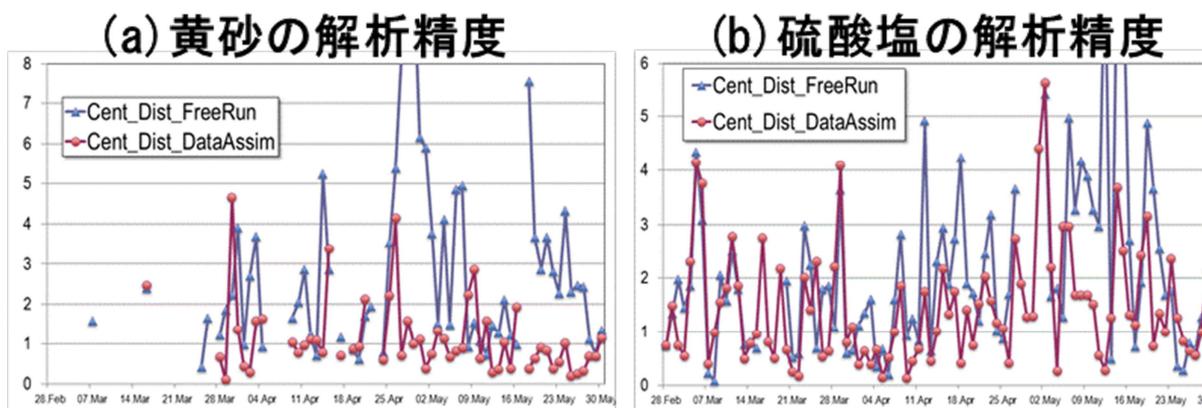
図(2)-19 Lac-la-biche (カナダ、lon=-112.45, lat=54.95)とMt. Waliguan (中国、lon=100.9, lat=36.28)における地上の二酸化炭素濃度(ppm)。日数は2009年7月1日を起点とする。  
赤：観測、緑：データ同化なし、青：GOSATを同化。

これまでの研究で二酸化炭素の地表面フラックス推定のために広く用いられてきたベイズ推定に基づくインバージョン解析と比較して、本研究により開発したアンサンブルカルマンフィルタに基づく手法はいくつかの利点を持つことが考えられる。第一に、各格子のフラックス分布を近隣の観測データのみを用いて修正することで高分解能な推定が可能となることが考えられる。従来のインバージョン解析では地球を例えば22個に領域に分割して、それぞれの領域に対する大まかな修正を施していた。更に、大気中濃度と排出量の背景誤差共分散構造は大気輸送モデルのアンサンブル計算により随時、動的に見積もられ、モデル誤差に応じた排出量の適切な修正を施すことが期待できる。しかしながら、高分解能領域に対して十分な拘束力を与えるほど現在利用可能な観測データの数は沢山ではなく、解析された解析場の空間構造と個々の解析に用いる観測範囲には注意を要する。更に、アンサンブルカルマンフィルタを用いた解析では限られたアンサンブル数に起因して背景誤差に関する深刻なサンプリングエラーが存在する可能性がある。

上述のアンサンブルカルマンフィルタの欠点を克服するために、アンサンブル数120、局所化半径2200km、同化ウィンドウ3日とするシステムを開発し、従来のインバージョン解析による推定と比較した。本アンサンブルカルマンフィルタシステムの計算には多大な計算コストを要するため、本研究の範囲内では試験的な利用であるが、計算機環境の向上を見据えれば将来に現業的に利用できる可能性は大いにある。図(2)-20に、本アンサンブルカルマンフィルタシステムと従来のインバージョン解析による二酸化炭素地表面フラックスの比較を示す。大まかに類似する解析値が得られたが、例えば、北米南東部やユーラシア大陸の中央部で顕著な違いが見られた。これらの違いは、解析手法の本質的な違いだけではなく、計算に利用するパラメータにも依存する。今後、それらの依存性を明らかにし、解析手法の改善が排出量の推定に及ぼす影響を明確にする必要がある。更に、解析手法の違いは空間構造だけではなく経年変化など時間構造にも多大な影響を及ぼす可能性がある。炭素循環過程の解明のために高精度な解析システムの開発が望まれる。



図(2)-20アンサンブルカルマンフィルターデータ同化システム（上）およびベイズ推定に基づくインバージョン解析（下）により解析した二酸化炭素地表フラックスの全球分布。両者の計算には、同一の地上観測データを利用している。



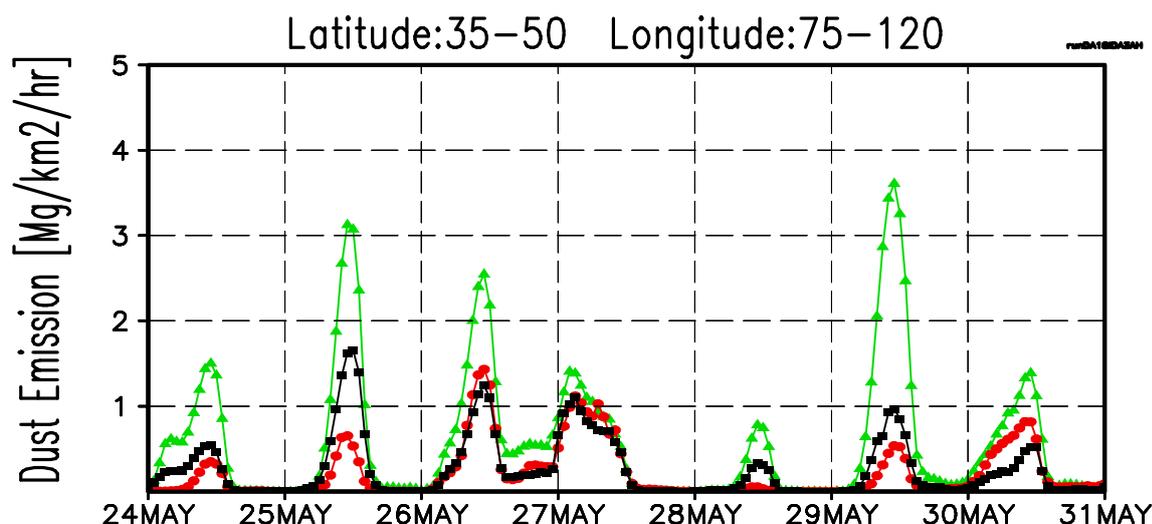
図(2)-21 OSSE（観測システムシミュレーション実験）における解析値と真値のエアロゾルプルームの重心間距離（東アジア域のみの平均値）を時系列で示す。ここで解析値はモデルフリーラン（青色▲：Cent\_Dist\_FreeRun）およびデータ同化（赤色●：Cent\_Dist\_DataAssim）の結果であり、真値は双子モデル実験によって擬似的に作成されたもの。（a）はダストエアロゾルすなわち黄砂、（b）は硫酸エアロゾルについて2007年3月～5月について診断した結果。縦軸は重心間距離（1 unit = 約250km）を表し、横軸は時間（3月1日から5月31日まで）。モデルフリーランの結果よりもデータ同化の結果において重心間距離が短い傾向が見られる。すなわちデータ同化によって真値との差が小さくなったことが示されている。

(2) エアロゾルのデータ同化

図(2)-21はOSSE（観測システムシミュレーション実験）によって診断されたダストおよび硫酸エ

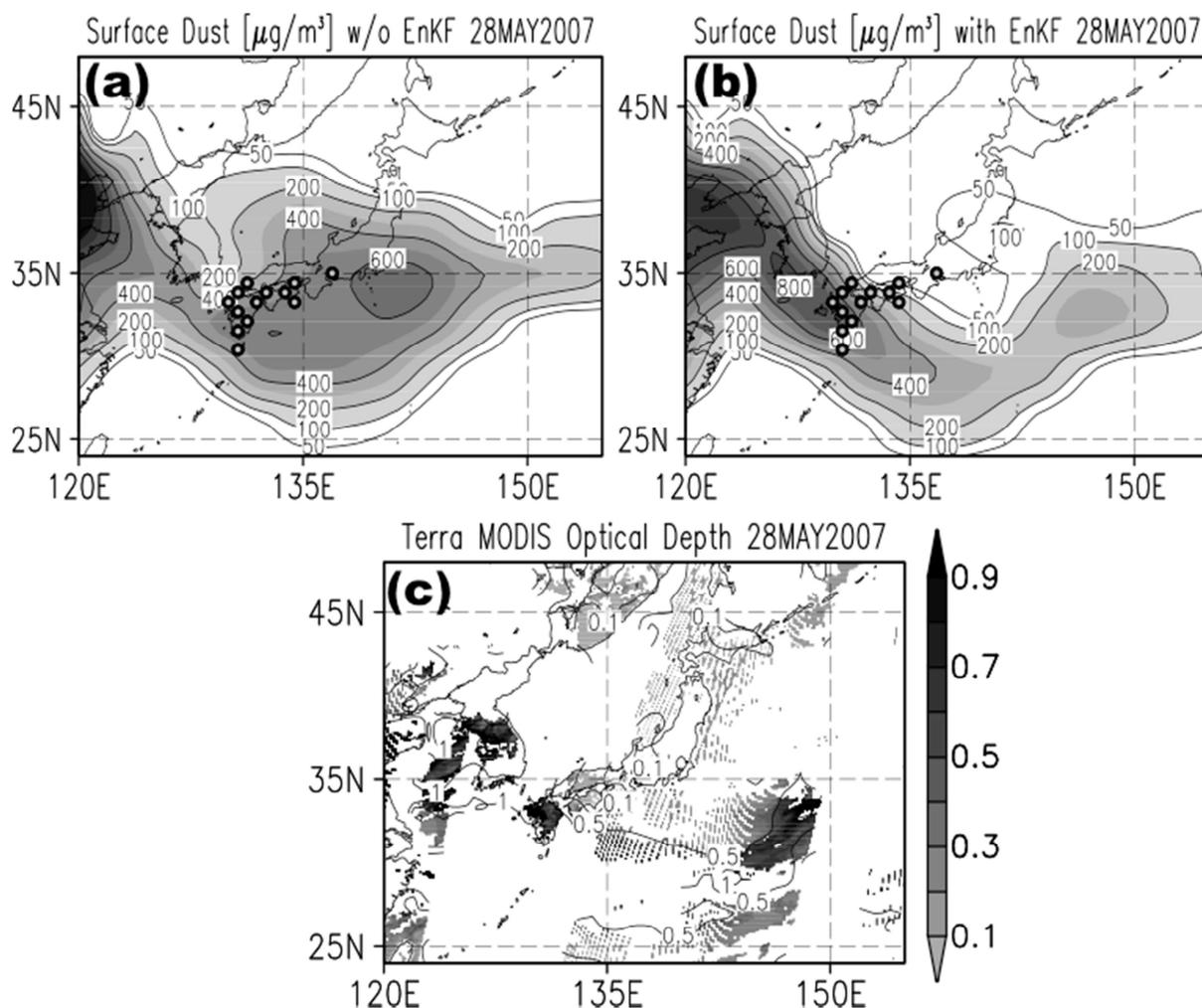
エアロゾルの解析精度の時系列変化である（値が小さいほど解析値と真値の差が小さいことを示す）。エアロゾルが発生し、大気中にそのプリュームが流れていった場合、そのプリュームの形状をMODE（オブジェクトベース診断法）によってクラスター認識させ、その重心位置を特定し、モデルシミュレーション結果もしくはデータ同化結果の重心位置と真値の重心位置の距離を測ることによって解析精度の診断を行った。明らかにモデルフリーランの結果よりもデータ同化の結果において、重心間距離が短い傾向が見られる。すなわちデータ同化結果と真値の差がより小さいということが示されている。これによってCALIPSOデータ同化によるダストエアロゾル（黄砂）解析の有意性が確認された。またそれとともに、ダストエアロゾルだけでなく硫酸エアロゾルの解析もCALIPSOデータ同化によって可能であることが分かった。このことは硫酸エアロゾルとダストエアロゾルが重なってしまい（これを外部混合と呼ぶ）、ライダー観測において硫酸エアロゾルとダストエアロゾルのシグナルが重なって得られることになっても、データ同化によってそれらのシグナルは分離されて解析されていることを示している。東アジアは世界有数の硫酸エアロゾル発生地域であり、硫酸エアロゾルのシグナルの中からもダストエアロゾルのシグナルを取り出すことができるデータ同化システムの能力は黄砂（＝東アジアのダストエアロゾル）の解析を行う際に必須の要件である。

図(2)-22は同じOSSEによって逆推定された中国及びモンゴルの黄砂発生域（北緯 $35^{\circ}$ から $50^{\circ}$ 、東経 $75^{\circ}$ から $120^{\circ}$ の範囲）における黄砂発生量の時系列である。緑線はデータ同化を行わなかった場合のモデルシミュレーション結果、赤線はOSSEで真値と仮定される疑似的な仮想地球の状態、黒線がデータ同化の結果である。データ同化を行わないフリーのモデルシミュレーション結果（緑線）が真値（赤線）から大きく外れている一方、データ同化の結果（黒線）は真値（赤線）に非常に良い一致を見せる。これでCALIPSO観測とEnKFデータ同化システムを用いた黄砂の地表面フラックス推定（発生量の逆推定）が精度良く動作していることが確認できた。ただし、フリーのモデルシミュレーションで黄砂が全く発生していない状況では、真値において黄砂が発生しているも、データ同化による逆推定（＝発生量の補正）が上手く働かない傾向があるのは残念である。これはEnKFの原理的な弱点であり、「物がある」状態においてはその物の統計的特性を調べることはできるが、「物がない」状態ではそもそもその物の統計的特性をアンサンブル予報で調べるができないために起こる。これは将来の改善すべき点として残る。

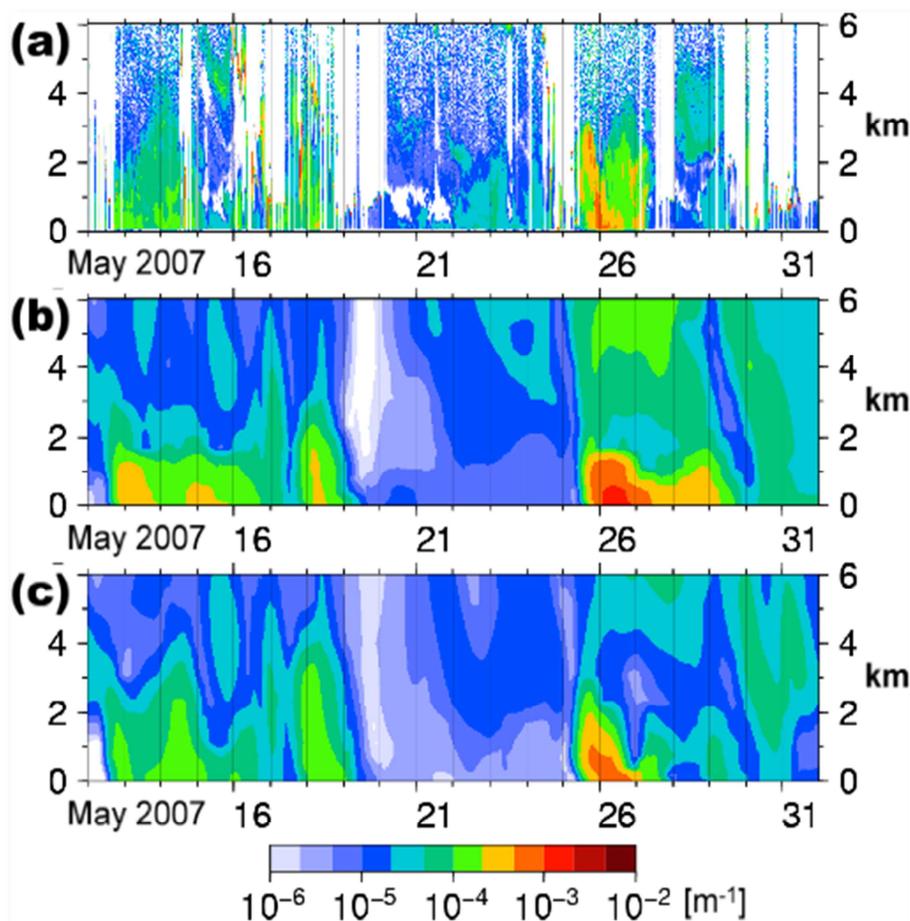


図(2)-22 OSSE（観測システムシミュレーション実験）における中国及びモンゴルの黄砂発生域（北緯35°から50°、東経75°から120°の範囲）における黄砂発生量の時系列。縦軸は1時間1km<sup>2</sup>あたりの発生量の積算平均値、横軸は2007年5月24日から30日までを表す。緑線（▲）はデータ同化を行わなかった場合のモデルシミュレーション結果、赤線（●）はOSSEで真値と仮定される疑似的な仮想地球の発生量、黒線（■）がデータ同化の結果。データ同化を行わないモデルシミュレーション結果（緑線：▲）は真値（赤線：●）から大きく外れている一方、データ同化の結果（黒線：■）は真値（赤線：●）に非常に良い一致を見せている。

OSSEによってデータ同化システム自体の性能を検証し、CALIPSOレベル1データ（リトリブ処理前）の利用が可能であることが確かめられた。また新規開発したLIDAR観測演算子も正常に動作していることが確認できた。そこで、実際の衛星搭載ライダー（CALIPSO）観測値を用いてエアロゾルのデータ同化実験を行い、大陸での黄砂発生状況と風下（日本あるいは朝鮮半島）への輸送（プルーム）を解析した。ここで解析時期として日本での黄砂被害が多発した2007年春を対象として選ぶこととした。図(2)-25ではデータ同化を行わなかった場合と行った場合の2007年5月28日における地表面ダスト濃度推定値とその日に黄砂を目視観測した気象官署の位置を比較している。この日、九州・四国地域は黄砂に覆われていたことが目視観測によって報告されていたが、その他の地域の大半では黄砂が観測されていなかったことが分かる。データ同化を行わない場合、黄砂プルームが日本へ到達していたことは計算できているが、そのプルームが覆う領域は実際の目視観測で推定される領域とは大きく異なっている。一方、データ同化を行うことによって黄砂プルームの位置と目視観測の報告地点が極めて良い一致を見せるようになる。図(2)-25では衛星搭載イメージャーMODISによって観測された同じ日のエアロゾル光学的厚さ（値が大きいほどエアロゾル濃度の鉛直積算量が多い）が示されている。データ同化によって得られた黄砂プルームの形状はMODISによって独立に観測されたエアロゾル高濃度領域（＝光学的厚さの大きな領域）とよく一致していることも見て取れる。



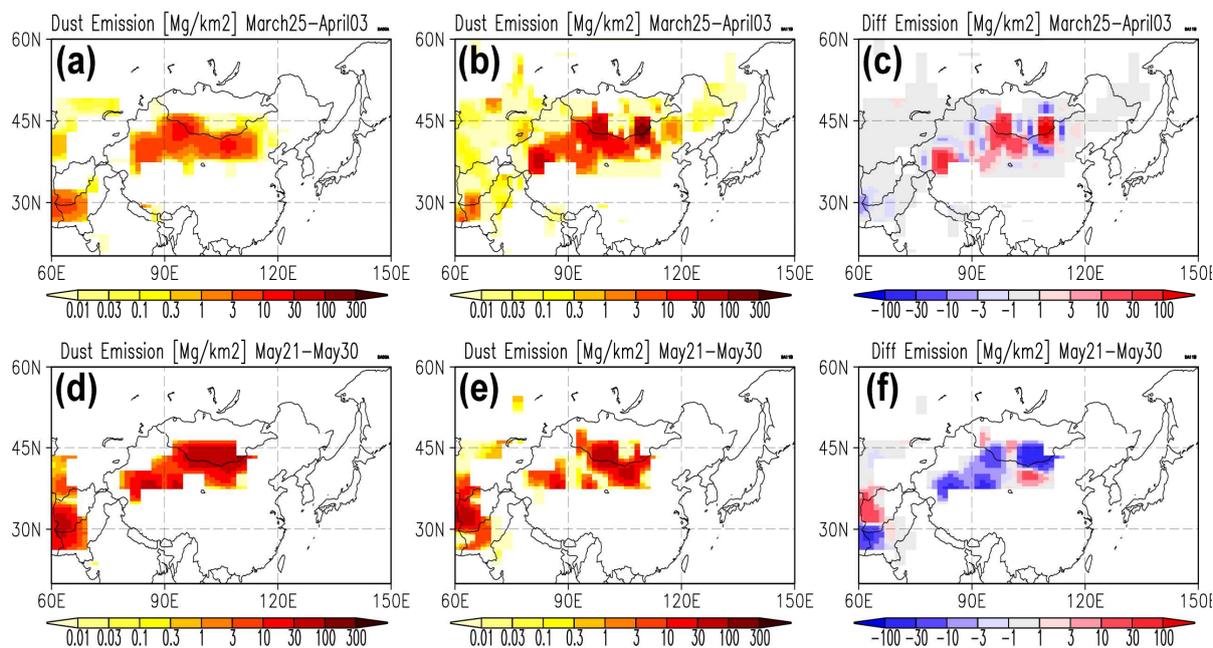
図(2)-23 (a)データ同化を行なわなかった場合と(b)行なった場合の2007年5月28日における地表面ダスト濃度推定値(日平均;一般的な環境基準値である $100\mu\text{g m}^{-3}$ 以上の領域に濃淡を付加;色が濃いほど高濃度)及びその日に黄砂を観測した気象官署(黒丸で示した場所;ただし日本国内のみ)。データ同化には現実のCALIPSO観測値を用いた。(c)MODIS/NASAによって観測された同日のエアロゾル光学的厚さ(濃淡が濃いほどエアロゾル鉛直積算量が多い)。この日、九州・四国地域は黄砂に覆われて観測が報告されていたが、その他の地域ではほとんど黄砂が観測されなかったことが分かる。データ同化結果のプルームの形状はこの独立観測結果と非常によく一致している。また、このデータ同化結果のプルーム形状はMODISによって観測されたエアロゾル高濃度領域(=光学的厚さの大きな領域)とよく一致していることも見て取れる。



図(2)-24 2007年5月における島根県松江市上空ダスト消散係数の比較。(a) 国立環境研究所の地上設置ライダーによる観測値、(b) データ同化をしなかった場合のモデルシミュレーション結果、(c) CALIPSO観測値をEnKFでデータ同化した結果。横軸は日付、縦軸は高度である。(a)の実観測では偏光解消度を用いてダストのシグナルを取り出している。消散係数が大きいと一般的にダスト濃度が高い。データ同化前(b)ではプルームの濃度、高度、タイミングが少しずつ現実から離れているが、データ同化後(c)では改善されている(特に5月14日、18日、26日のプルームで顕著)。(a)のライダー観測はデータ同化に利用されおらず(=独立観測)、CALIPSOが偶然この上空を通過する可能性も低いいため、データ同化による解析精度の向上はこれよりも上流においてCALIPSOによって観測された情報の影響であると言える。

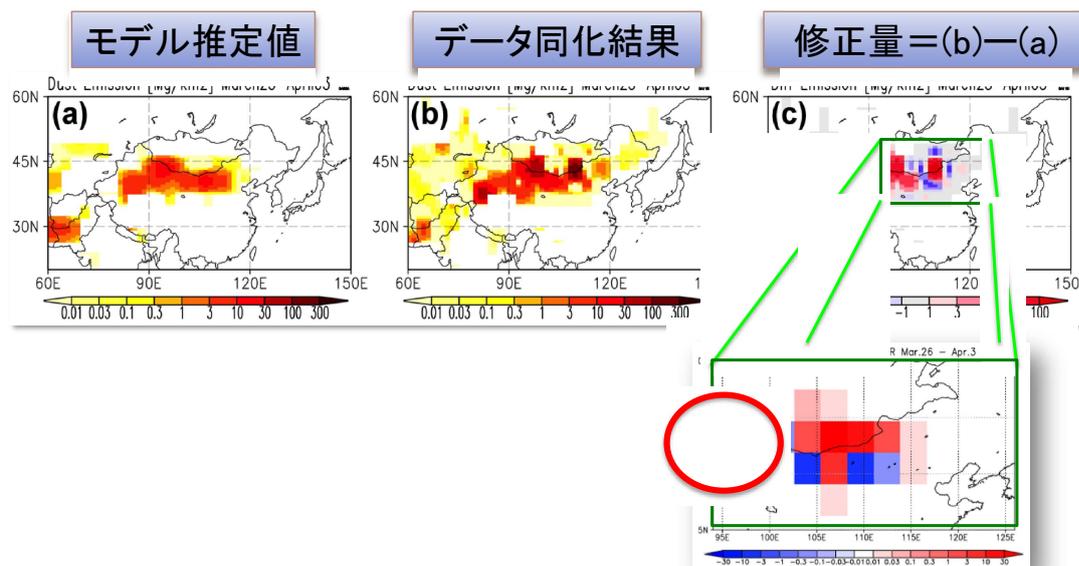
図(2)-24は2007年5月における島根県松江市上空のダスト消散係数を比較したものである。国立環境研究所の地上設置ライダーによる観測が最上段、データ同化をしなかった場合のモデルシミュレーション結果が中段、CALIPSO観測値をEnKFでデータ同化した結果が下段である。地上ライダーの観測値はデータ同化には用いていない(=独立観測)。また、この実観測では偏光解消度の大きさを用いてダストのシグナルを同定し、消散係数を計算している。一般的に消散係数が大きいとエアロゾル濃度が高い。データ同化前ではプルームの濃度、高度、タイミングが少しずつ現実(独立観測値)から離れているが、データ同化後はそれらが改善されている(特に5月14日、

18日、26日のプルームで顕著)。地上ライダー観測はデータ同化に利用されておらず、CALIPSOが偶然この上空を通過する可能性も低いと、データ同化による解析精度の向上はより上流においてCALIPSOによって観測された情報がデータ同化された影響と考えられる。図(1)-4および図(1)-5から、本研究で開発されてデータ同化システムは東アジアのダストエアロゾル(黄砂)の分布解析において良好に動作していることが確認できた。



図(2)-25. (上段) 2007年3月25日～4月3日に起きた黄砂の地表面フラックス積算量：(a)モデルシミュレーションのみによって推定した結果、(b)現実のCALIPSO観測を用いたデータ同化によって逆推定した結果、(c)それら両者の差。(下段) 2007年5月21日～30日に起きた黄砂の地表面フラックス積算値：(d) (e) (f)はそれぞれ(a) (b) (c)と同様。

次にエアロゾル地表面フラックス推定の一例として黄砂の発生源推定を検証する。主な黄砂発生源域(内モンゴル・外モンゴル)では初春(3月～4月上旬)には残雪などが原因で、晩春(5月頃)には植生被覆が原因で黄砂発生量のモデル推定値に大きな誤差が発生する<sup>21)</sup>。これらをデータ同化によって補正し、真値に近い発生量を逆推定することが本研究の究極の目的と言える。図(2)-25の上段は2007年3月25日から4月3日に起きた黄砂大発生時の地表面フラックス(=発生量)積算量であり、(a)はモデルシミュレーションのみによって推定した結果、(b)は現実のCALIPSO観測を用いたデータ同化によって逆推定した結果、(c)はそれら両者の差を表す。下段は2007年5月21日から30日に起きた黄砂大発生時の地表面フラックス積算値である。両者の差を観ると逆推定による補正量は決してランダムに分布しているわけではなく、正の補正や負の補正が特徴的な集まりを持っていることが分かるが、残念ながらこの解析結果を直接何らかの観測値で検証することは不可能である。そこで本研究と同じエアロゾルモデルMASINGARを用い、異なる観測値(主に韓国および日本で観測された地表面PM<sub>10</sub>濃度)と異なる地表面フラックス逆推定スキーム(バイズ線形合成法)を用いて計算した同じ時期の地表面フラックス補正量<sup>18)</sup>との比較を試みた(図(2)-26)。



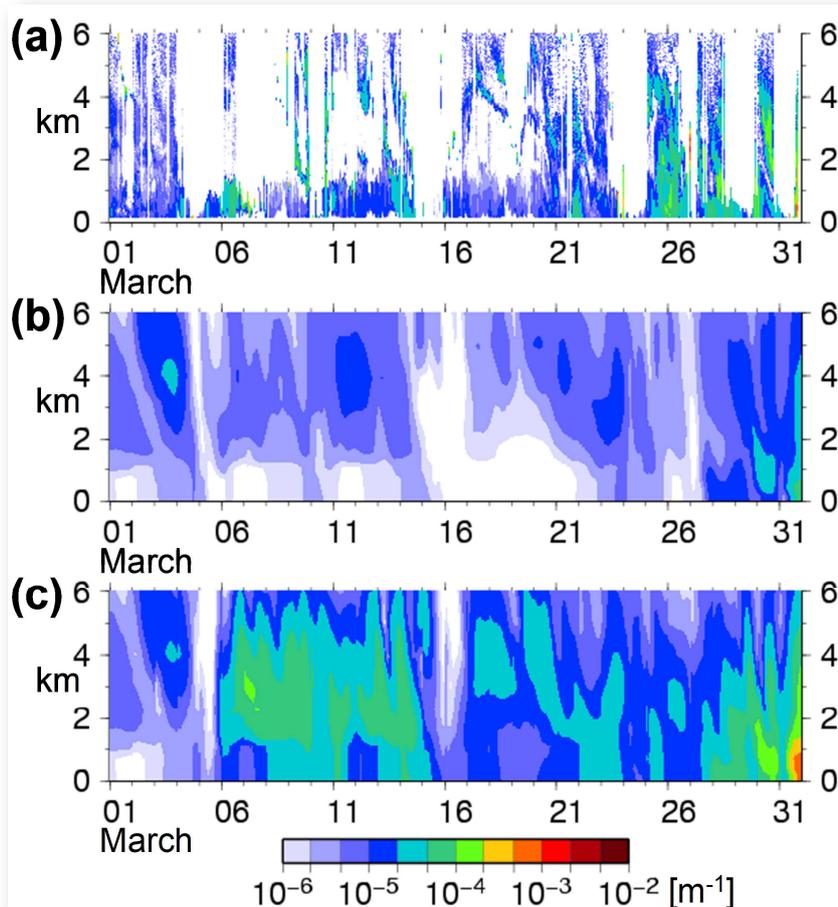
図(2)-26. (上段) 2007年3月25日～4月3日に起きた黄砂の地表面フラックス積算量：図(1)-6と同様に(a)モデルシミュレーションのみによって推定した結果、(b)CALIPSOデータ同化によって逆推定した結果、(c)それら両者の差。(下段)本研究と同じエアロゾルモデルを用い、異なる観測値(主に韓国および日本で観測された地表面PM<sub>10</sub>濃度)と異なる地表面フラックス逆推定スキーム(ベイズ線形合成法)を用いて計算した同じ時期の地表面フラックス補正量<sup>18)</sup>。ゴビ砂漠近辺における修正量の分布がCALIPSOデータ同化の結果とPM<sub>10</sub>ベイズ逆推定の結果との間で定性的には良く一致していることが分かる。PM<sub>10</sub>観測によるベイズ逆推定の場合、ゴビ砂漠西方では修正が行われていないが、これは修正が必要ないと推定されたからではなく観測地点からの距離が離れすぎたために最適推定が行えなかった(シグナルがノイズに埋もれてしまった)ためだと思われる。

この比較から、ゴビ砂漠近辺における修正量の分布(データ同化前とデータ同化後のダスト発生量の差)が、本研究におけるCALIPSOデータ同化の結果とMaki et al.によるPM<sub>10</sub>ベイズ逆推定の結果との間で定性的には良く一致していることが分かる。ただし、PM<sub>10</sub>観測によるベイズ逆推定ではゴビ砂漠よりも西方では修正が行われていないが、これはモデルの修正が必要ないとベイズ線形合成法によって推定されたからではなく、この領域が観測地点から離れすぎたために最適推定が行えなかった(取り出すべきシグナルがノイズに埋もれてしまった)ためだと思われる。

また、CALIPSOデータ同化によって黄砂の発生量を推定した結果、下流域(日本)へ到達する黄砂プルームがどのように再現されるのかを調べた結果が図(2)-27である。ここで比較したのは2007年3月における長崎県長崎市上空のダスト消散係数であり、観測値は国立環境研究所の地上設置ライダーによる独立観測で得られたものを用いた。ここでダストの消散係数は先ほどと同様に偏光解消度の値を用いて分離している。データ同化をしなかった場合のモデルシミュレーション結果とデータ同化によって得られた結果をそれぞれ独立観測と比較すると、データ同化をしなかった場合では大規模な黄砂の到来がほとんど再現できていないにもかかわらず、データ同化をした場合ではほとんどの黄砂到来が再現されている。これは特に3月6～15日、19～22日、27日以降

に到来したプルームで顕著である。先に述べたとおり初春の黄砂発生域は積雪や土壌水分量が多く、黄砂の発生をモデル単独で再現することが難しい。一方、データ同化結果では黄砂放出量が逆推定されて放出量再現精度が著しく向上したため、非常に現実に近い黄砂濃度が下流域（日本）において再現できている。この比較結果によって、間接的にデータ同化による逆推定が成功していることが確認できたと言えよう。

以上の結果より、東アジアのダストエアロゾル（黄砂）に関してEnKFデータ同化システムは当初の期待どおり良好な動作を示していると言える。また、OSSEによって東アジアの硫酸エアロゾルの解析も可能であることが示唆されている。一方、CALIPSOは全球をカバーして観測を行っており、このデータ同化システムでも東アジアに限定せず全球のダストおよび硫酸エアロゾルを同時に解析している。本研究では解析結果の検証を東アジアに限定しただけである。世界ではサハラ砂漠や南アジア、オーストラリアや南米大陸でもダストエアロゾルが大量に発生しており、それらの解析も非常に重要である。今後はこれら世界規模のダストプルーム解析を予定している。また、本研究では硫酸エアロゾルの実データによる検証は観測情報の不足から断念したが、新規観測（今後打ち上げ予定の衛星観測など）が得られた場合には非常に重要な目標となる。



図(2)-27 2007年3月における長崎県長崎市上空ダスト消散係数の比較。(a)国立環境研究所の地上設置ライダーによる観測値、(b)データ同化をしなかった場合のモデルシミュレーション結果、(c)CALIPSO観測値をEnKFでデータ同化した結果。横軸は日付、縦軸は高度である。(a)の実観測では偏光解消度を用いてダストのシグナルを取り出している。消散係数が大きいと一般的にダスト濃度が高い。データ同化前(b)では黄砂の到来がほとんど再現できていないが、データ同化後(c)ではほとんどの黄砂到来が再現されている(特に3月6~15日、19~22日、27日以降のプルームで顕著)。初春の黄砂発生域は積雪や土壌水分量が多く、黄砂の発生をモデル単独で再現することが難しい。一方(c)では、データ同化によって黄砂放出量が逆推定されて放出量再現精度が向上したため、実観測値と非常に近い黄砂濃度が再現できている。

## 謝辞

本研究にあたり、衛星（GOSAT）観測データはGOSAT研究公募事務局より提供を受けた。航空機（CONTRAIL）観測データはCONTRAILプロジェクト（国立環境研究所、気象研究所）より提供を受けた。大気赤外サウンダ（AIRS）観測データは米国航空宇宙局（NASA）より提供を受けた。二酸化炭素地上観測データに関しては、以下の諸機関から気象庁温室効果ガス世界資料センターを通じて提供を受けた。

## 略語

AEMET: Agencia Estatal de Meteorologia (Spain)

BoM: The Bureau of Meteorology (Australia)

CNR-ICES: International Center for Earth Sciences, Consiglio Nazionale delle Ricerche (Italy)

DNA-IAA: Direccion Nacional del Antartico-Instituto Antartico Argentino (Argentina)

CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australia)

EC: Environment Canada (Canada)

ENEA: Italian National Agency for New Technology, Energy and the Environment (Italy)

FMI: Finnish Meteorological Institute

IAFMS: Italian Air Force Meteorological Service (Italy)

ITM: Department of Applied Environmental Science, Stockholm University, (Sweden)

JMA: Japan Meteorological Agency (Japan)

Eco-Mo: Foundation for Promoting Personal Mobility and Ecological Transportation (Japan)

LSCE: Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (France)

MGO: Main Geophysical Observatory, Roshydromet (Russian Federation)

MRI: Meteorological Research Institute, JMA (Japan)

NIES: National Institute for Environmental Studies (Japan)

NIWA: National Institute of Water & Atmospheric Research (New Zealand)

NOAA/ESRL: Earth System Research Laboratory, NOAA (USA)

RSE: Ricerca sul Sistema Elettrico (Italy)

Saitama Prefecture (Japan)

SAWS: South African Weather Service (South Africa)

UBA: Umweltbundesamt (Germany)

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

地上、航空機、衛星観測を一体的に取り扱う二酸化炭素データ同化システムのプロトタイプを構築することができた。このようなシステムは日本国内では現時点でほとんど存在せず、世界においてもごく限られている。このシステムの構築過程において、客観的な観測データの品質管理システムや衛星観測データのバイアス補正システムを構築した。これらの手法は今後新たな観測プラットフォームが運営された際にもそのデータを比較的容易にデータ同化システムに導入することが可能となったことを示す。また、輸送モデルもいくつかの改良を施すことによって国際的に標準レベルの性能を維持できるようになった。

データ同化の面では、観測システムシミュレーション実験によって各観測プラットフォームの二酸化炭素フラックス推定誤差の減少量を評価ができることを示した。この手法は、新たな衛星等の観測を実施する前にその効果を定量的に把握することができるため、利用価値は極めて高い。実際の観測データを用いたデータ同化の面では、データ数や観測データのバイアス等の制約条件下で有意義な結果を得ることができた。二酸化炭素濃度の面ではデータ同化による精度向上が見られた。二酸化炭素フラックスに関しては、衛星観測データバイアス補正の寄与があるため定量的な評価は困難であるが、陸域での修正量が大きくなるなどの合理的な結果が得られた。

衛星ライダー観測のデータ同化システム開発に成功したのは我々の研究グループが世界で最初であり、現在においてもレベル1のデータ（リトリーブ処理前の物理量）を同化できる唯一のグループである。また、アンサンブルカルマンフィルターを用いた黄砂の地表面フラックス推定に着手し、かつ成功したのも世界で我々のみである。ここで開発された技術は黄砂だけでなく他の大気汚染物質の発生源推定にも応用可能なツールであり、モデルと観測を融合する基礎技術として非常に有用である。東アジア域の越境汚染を実況監視する基礎技術の一つとして、このデータ同化システムが利用可能であることが確認できた意義は大きい。

ここで得られた黄砂の解析値は黄砂研究における基礎データとなるだけでなく、黄砂の地表面フラックス（発生）推定量は黄砂予報における境界値として利用可能であり、地表面フラックス推定値と同時に得られる黄砂の大気中濃度解析値は黄砂予報における初期値として利用可能である。

人工衛星によるエアロゾル観測の高精度データ同化システム開発に成功している研究グループは世界でも僅かであり、我々はヨーロッパ中期気象予報センター(ECMWF)と並んで最先端の技術力を維持している(ECMWFは4次元変分法とMODIS観測を利用)。この技術力は黄砂予報精度の向上のみならず、気候変動予測のモデル精度向上にも寄与可能である。

### (2) 環境政策への貢献

本研究で開発された二酸化炭素データ同化システムをより多くの観測データに用いることによって、従来の逆解析よりも高い時間・空間解像度での二酸化炭素フラックス解析を行うことが可能となる。二酸化炭素フラックスの実況監視精度の向上は将来的には二酸化炭素の人為排出量を推定する際の基礎資料となると同時に、炭素循環モデルの改善を通じて地球温暖化予測精度の向上に貢献することができる。

本研究で開発されたエアロゾル（特に黄砂）のデータ同化技術は気象庁業務（黄砂情報提供）の精度向上のために現業化される予定である（2015年度予定）。また、黄砂の解析値は環境省における黄砂情報提供サービスの向上に寄与することが可能であり、さらに発生源・発生量の情報は東アジア各国での黄砂被害対策・砂漠化対策などの基礎資料として用いることができ、日本の国際貢献としての活用が期待できる。

## 6. 国際共同研究等の状況

### 1) 日中韓黄砂共同研究

カウンターパート：Chun氏（韓国気象庁）、Wang氏（中国環境監視センター）、西川雅高（国立環境研究所）

連携状況：観測データ共有ならびにこのデータを用いたデータ同化解析

国際的な位置づけ：日中韓環境大臣会合の合意を経て設置

### 2) 世界気象機関（WMO）砂塵嵐警戒評価システム（SDS-WAS）

カウンターパート：Nickovic氏（WMO事務局）、Zhang氏（中国気象局）、Park氏（ソウル大）、杉本信夫（国立環境研究所）

連携状況：観測データ並びに予測データの共有システムの構築中

国際的な位置づけ：WMOの計画として承認

### 3) 大気トレーサー輸送モデル相互比較実験（TRANSCOM）

カウンターパート：欧米の研究機関多数（Peylin氏（フランス気候科学研究センター）等）

連携状況：データ同化結果の相互比較、輸送モデル検証

国際的な位置づけ：地球圏－生物圏国際協同研究計画（IGBP）により設立

### 4) エアロゾル予測のための国際協力フォーラム（International Cooperative for Aerosol Prediction (ICAP)）

カウンターパート：

Angela Benedetti（ヨーロッパ中期気象予報センター研究官・英国）

Peter Colarco（米国航空宇宙局研究官・米国）

Sarah Lu（米国環境予測センター研究官・米国）

Miha Razinger（ヨーロッパ中期気象予報センター研究官・英国）

Jeff Reid（米国海軍研究所研究官・米国）

連携状況：現業向けエアロゾル予報モデルの開発協力

国際的な位置づけ：研究者ベースでの共同研究

### 5) アンサンブルカルマンフィルターによるデータ同化の大気化学への応用に関する研究

カウンターパート：三好建正（メリーランド大学准教授・米国）

連携状況：データ同化システムの共同開発

国際的な位置づけ：研究者ベースでの共同研究

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) T. Maki, M. Ikegami, T. Fujita, T. Hirahara, K. Yamada, K. Mori, A. Takeuchi, Y. Tsutsumi, K. Suda, T. J. Conway : Tellus B, 62, 797-809 (2010) “New technique to analyse global distributions of CO<sub>2</sub> concentrations and fluxes from non-processed observational data”
- 2) T. Maki, T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, and M. Mikami: SOLA, 7A, 021-024 (2011) “The Impact of Ground-based Observations on the Inverse Technique of Aeolian Dust Aerosol”
- 3) K. Miyazaki, : Journal of Geophysical Research, 114, D19304, doi:10.1029/2009JD011892 (2009) “Performance of a local ensemble transform Kalman filter for the analysis of atmospheric circulation and distribution of long-lived tracers under idealized conditions”
- 4) K. Miyazaki, T. Maki, P. Patra, and T. Nakazawa: Journal of Geophysical Research, 116, D16306, doi:10.1029/2010JD015366 (2011) “Assessing the impact of satellite, aircraft, and surface observations on CO<sub>2</sub> flux estimation using an ensemble-based 4-D data assimilation system”
- 5) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, A. Shimizu, and T. Miyoshi: Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 39-49 (2010) “Data assimilation of CALIPSO aerosol observations”
- 6) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, T. Maki and M. Mikami: SOLA, 7A, 40-43 (2011) “The Effects of Snow Cover and Soil Moisture on Asian Dust: II. Emission Estimation by Lidar Data Assimilation”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 関山剛：日本気象学会第44回夏季大学「新しい気象学」講義テキスト，（2010）  
「大気微量成分のデータ同化」
- 2) 関山剛：日本気象学会関西支部第33回夏季大学「最新の衛星観測」講義テキスト，（2011）  
「エアロゾルを宇宙から観る」

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, A. Shimizu and T. Miyoshi, : Aerosol Data Assimilation with an Ensemble Kalman Filter Using CALIPSO and Ground-Based Lidar Observations, IAMAS-IAPSO-IACS 2009 Joint Assembly (MOCA-09), J21.11/24417, 2009.
- 2) K. Miyazaki, Performance of local ensemble transform Kalman filter data assimilation system on analysis of long-lived tracer distributions in the troposphere and stratosphere, MOCA-09: IAMAS - IAPSO - IACS 2009 Joint Assembly, Montreal, Canada, July, 2009.
- 3) K. Miyazaki, A local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the analysis of the global distribution of CO<sub>2</sub>, 8th International Carbon Dioxide Conference, 2009.
- 4) K. Miyazaki, T. Machida, P.K. Patra, T. Iwasaki, Y. Sawa, H. Matsueda, M. Takigawa, and T. Nakazawa, Global-scale transport of carbon dioxide in the troposphere, 8th

- International Carbon Dioxide Conference, 2009.
- 5) K. Miyazaki, Performance of a local ensemble transform Kalman filter data assimilation system for the analysis of the atmospheric circulation and the distribution of long-lived tracers, The 5TH WMO Symposium on Data Assimilation, Melbourne, Australia, 5- 9 October, 2009
  - 6) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, A. Shimizu and T. Miyoshi, : Aerosol Data Assimilation with an Ensemble Kalman Filter Using CALIPSO and Ground-Based Lidar Observations, The Fifth WMO Symposium on Data Assimilation, P138, 2009.
  - 7) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, A. Shimizu and T. Miyoshi, : DATA ASSIMILATION OF CALIPSO AEROSOL OBSERVATIONS USING AN ENSEMBLE KALMAN FILTER, Fourth Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology (第4回日中韓気象学会共同会議) , S3-22, 8-10 November 2009.
  - 8) T. T. Sekiyama and T. Y. Tanaka, 2010: Dust aerosol analysis and prediction with 4D-EnKF data assimilation, EGU General Assembly 2010, Vienna, Austria, 02-07 May 2010.
  - 9) K. Miyazaki, Potential impacts of GOSAT, CONTRAIL, and surface observations on carbon flux estimation with an ensemble-based 4D data assimilation, The Seventh Stratospheric Processes And their Role in Climate (SPARC) Data Assimilation (SPARC-DA7), Exeter, England, 21-23 June 2010.
  - 10) 関山剛, 田中泰宙, 清水厚, 三好建正, 2010: 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, 名古屋大学, 2010年8月3日~5日, G06.
  - 11) T. T. Sekiyama, 2010: Aerosol Data Assimilation with Lidar Observations and Ensemble Kalman Filter, The Second GAW Aerosol Lidar Observation Network (GALION) Workshop at the WMO Headquarters in Geneva, Switzerland on 20-23 September 2010.
  - 12) T. T. Sekiyama and T. Y. Tanaka, 2010: Dust analysis and prediction with ensemble-based data assimilation, 9th AeroCom Workshop, University of Oxford, UK, 27-30 September, 2010.
  - 13) T. T. Sekiyama and T. Y. Tanaka, 2010: Overview - MRI/JMA - Asian Dust Simulation, Prediction, and Verification, The Second International Cooperative for Aerosol Prediction (ICAP) Workshop, University of Oxford, England, 30 September-1 October, 2010.
  - 14) 眞木貴史, 関山剛, 柴田清孝, 宮崎和幸, 三好建正, 山田和孝, 岩崎俊樹, 2010年: 炭素循環解析へのGOSAT観測データの利用について, 日本気象学会2010年度秋季大会, 京都, 2010年10月27日.
  - 15) T. Maki, T. Tanaka, T. Sekiyama and M. Mikami: Modeling Study for the TAD Case JAPAN, The 3rd Meeting of Working Group (I) for Joint Research on DSS among Mongolia, China, Korea and Japan, Cheju, Korea, 8-10 Nov 2010.
  - 16) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, A. Shimizu, and T. Miyoshi: Dust Aerosol Analysis and Prediction with Lidar Observations and Ensemble Kalman Filter, AGU Fall Meeting 2010, San Francisco, USA, 13-17 December (2010).
  - 17) T. T. Sekiyama, : Fundamentals of Ensemble Kalman Filter in an operational system,

- The Third International Cooperative for Aerosol Prediction (ICAP) Workshop, University of Colorado, Boulder, CO, USA, May 11, 2011.
- 18) 眞木貴史, 山田和孝, 岩崎俊樹: 「気象庁二酸化炭素分布情報を用いたGOSATのバイアス調査」, 日本気象学会春季大会専門分科会「気象庁が提供する気象データの利用と数値モデル開発の現状・課題」、国立オリンピック記念青少年総合センター、2011年5月18日.
  - 19) K. Miyazaki, T. Iwasaki, T. Maki: Four-dimensional data assimilation of GOSAT data using an ensemble Kalman filter, The 3rd GOSAT RA PI Meeting, John McIntyre Conference Centre, Edinburgh, Scotland, UK, May 20, 2011.
  - 20) T. T. Sekiyama: Data Assimilation of Lidar Aerosol Observations, Seminar at the School of Earth & Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, South Korea, July 26, 2011.
  - 21) 関山剛: エアロゾルを宇宙から観る, 日本気象学会関西支部第33回夏季大学「最新の衛星観測」, キャンパスプラザ京都, 2011年8月27日.
  - 22) 眞木貴史, 関山剛, 田中泰宙: 「数値モデルを用いた地球環境解析」(招待講演)、日本農業工学会第27回シンポジウム・日本学術会議公開シンポジウム「地球環境・気候変動と農業環境工学」、タワーホール船堀、2011年9月21日.
  - 23) T. T. Sekiyama and T. Y. Tanaka: Object-Based Verification of Aerosol Simulations, 10th AeroCom Workshop, Kyushu University, Fukuoka, Japan, October 3, 2011.
  - 24) F. Hasebe, Y. Domon, K. Miyazaki, Y. Inai, SOWER (Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region): Application of Data Assimilation to the Study of TTL Dehydration, WCRP OSC Climate Research in Service to Society, Denver, CO, USA, 25 October 2011.
  - 25) T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, T. Maki and M. Mikami: Asian Dust Emission Estimated by Ensemble Data Assimilation of Satellite-Borne Lidar Observation, 5th Korea-Japan-China Joint Conference on Meteorology, BEXCO, Pusan, South Korea, October 25, 2011.
  - 26) T. Maki, T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, K. Yamada, M. Mikami: The Dust Modeling Research Activities in Meteorological Research Institute, The fourth Meeting of Working Group I for Joint Research on Dust and Sand Storms, Beijing, China, 11 November 2011.
  - 27) 眞木貴史, 関山剛, 柴田清孝, 宮崎和幸, 三好建正, 横尾好朗, 岩崎俊樹: 「実観測データを用いた炭素循環解析システムの構築」, 日本気象学会秋季大会スペシャルセッション「大気中の二酸化炭素観測手法の新たな展開とそのデータ利用」, 名古屋大学, 2011年11月18日.
  - 28) 関山剛, 眞木貴史, 田中泰宙, 出牛真: 「エアロゾルと大気微量成分のデータ同化」(招待講演)、科研費新学術領域「東アジアにおけるエアロゾルの植物・人間系へのインパクト」シンポジウム, 京都大学, 2012年1月25日.
  - 29) T. Maki, T. T. Sekiyama, K. Shibata, K. Miyazaki, T. Miyoshi, K. Yamada, Y. Yokoo and T. Iwasaki: Carbon Cycle Analysis using real observation data and LETKF, The GOSAT WORKSHOP 2012 - towards GOSAT-2 mission, Tokyo, 29 February 2012.
  - 30) 眞木貴史, 関山剛, 柴田清孝, 宮崎和幸, 三好建正, 横尾好朗, 岩崎俊樹: 衛星観測データを用いた炭素循環解析, 日本気象学会春季大会専門分科会「温室効果ガス観測技術衛星GOSAT

「いぶき」の利用研究」，つくば国際会議場，2012年5月29日（予定）。

### (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

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp., (2001) “Aerosols, their Direct and Indirect Effects, In Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., et al. (eds.)]”
- 2) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp., (2007) “Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, In Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., et al. (eds.)]”
- 3) 気象庁予報部予報課：数値予報課報告・別冊第55号，気象庁予報部，183 pp., (2009)「全球モデルの課題と展望」
- 4) World Health Organization (WHO) Regional Office for Europe: WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, (2006) “Air Quality Guidelines Global Update 2005: Particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide”
- 5) United Nations Environment Programme (UNEP): UNEP, Nairobi, Kenya, 354 pp., (2008) “Atmospheric Brown Clouds Regional Assessment Report with Focus on Asia”
- 6) Onogi, K., Koide, H., Sakamoto, M., Kobayashi, S., Tsutsui, J., Hatsushika, H., Matsumoto, T., Yamazaki, N., Kamahori, H., Takahashi, K., Kato, K., Oyama, R., Ose, T., Kadokura, S. and Wada, K: Q. J. R. Meteorol. Soc., 131: 3259–3268, (2005) “JRA-25: Japanese 25-year re-analysis project—progress and status”
- 7) Evensen, G: Springer, Berlin, Germany, 279 pp., (2007) “Data Assimilation”
- 8) Miyoshi, T. and Yamane, S: Mon. Wea. Rev., 135, 3841–3861, (2007) “Local Ensemble

- Transform Kalman Filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution”
- 9) Miyoshi, T., Yamane, S., and Enomoto, T.: SOLA, 3, 089-092, doi:10.2151/sola.2007-023, (2007) “Localization the error covariance by physical distances within a Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF)”
  - 10) Miyoshi, T. and Aranami, K.: SOLA, 2, 128-131, (2006) “Applying a Four-dimensional Local Ensemble Transform Kalman Filter (4D-LETKF) to the JMA Nonhydrostatic Model (NHM)”
  - 11) Miyoshi, T. and Sato, Y.: SOLA, 3, 037-040, (2007) “Assimilating Satellite radiances with a Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) applied to the JMA Global Model (GSM)”
  - 12) Miyoshi, T., Yamane, S., and Enomoto, T.: SOLA, 3, 045-048, (2007) “The AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis: ALERA”
  - 13) Tanaka, T. Y., Orito, K., Sekiyama, T. T., Shibata, K., Chiba, M., and Tanaka, H.: Pap. Met. Geophys., 53, 119-138, (2003) “MASINGAR, a global tropospheric aerosol chemical transport model coupled with MRI/JMA98 GCM”
  - 14) Tanaka, T. Y., and Chiba, M.: MASINGAR. J. Meteor. Soc. Japan, 83A, 255-278, (2005) “Global simulation of dust aerosol with a chemical transport Model”
  - 15) Winker, D.M., Hunt, H.H., and McGill, M.J.: Geophys. Res. Lett., 34, L19803, doi:10.1029/2007GL030135, (2007) “Initial performance assessment of CALIOP”
  - 16) Sekiyama, T. T., Tanaka, T. Y., Shimizu, A., and Miyoshi, T.: Atmos. Chem. Phys., 10, 39-49, (2010) “Data assimilation of CALIPSO aerosol observations”
  - 17) Li, H., Kalnay, E., Miyoshi, T., and Danforth, C.M.: Mon. Wea. Rev., 137, 3407-3419, (2009) “Accounting for Model Errors in Ensemble Data Assimilation”
  - 18) Sekiyama, T. T., Tanaka, T. Y., Maki, T., and Mikami, M.: SOLA, 7A, 40-43, (2011) “The effects of snow cover and soil moisture on Asian dust: II. Emission Estimation by Lidar Data Assimilation”
  - 19) Maki, T., T. Y. Tanaka, T. T. Sekiyama, and M. Mikami: SOLA, 7A, 21-24, (2011) “The Impact of Ground-Based Observations on the Inverse Technique of Aeolian Dust Aerosol”
  - 20) Machida, T., H. Matsueda, Y. Sawa, et al: J. Atmos. Oceanic. Technol. 25 (10), 1744-1754, (2008) “Worldwide measurements of atmospheric CO2 and other trace gas species using commercial airlines”
  - 21) Tanaka, T. Y., Sekiyama, T. T., Maki, T., and Mikami, M.: SOLA, 7A, 36-39, (2011) “The effects of snow cover and soil moisture on Asian dust: I. A Numerical Sensitivity Study”

### (3) 大気環境再解析システムの開発

(独) 海洋研究開発機構

宮崎 和幸

<研究協力者>

国土交通省気象庁気象研究所

環境・応用気象研究部 第一研究室

柴田 清孝・出牛 真

気候研究部 第五研究室

小林 ちあき

平成21～23年度累計予算額：7,504千円

(うち、平成23年度予算額：3,642千円)

予算額は、間接経費を含む。

**[要旨]** 密な衛星観測データを同化に利用することで、大気微量成分のデータ同化システムから時空間に均一で均質な大気環境データセットを作成可能となると期待されている。データ同化から衛星観測データの情報を最大限に引き出すとともに、同化プロセスを解析することで現在の大気化学輸送モデルが持つ問題点を調査することが可能となる。本研究では、(1) 東アジアおよび全球の大気汚染の把握に向けた最適な観測網に関する考察に向けて、データ同化システムを用いた観測システムシミュレーション実験(OSSE)を行った。OSSEでは、新たな観測の持つインパクトを測器が開発される以前に数値シミュレーションから調査できる。(2) 更に、実際の衛星観測データを利用した同化実験を実施した。対流圏微量成分のモデルシミュレーションでは、大気中の化学/輸送過程に加えて地表面での排出/沈着過程に起因する大きな不確定が存在する。データ同化により最適化された排出量データは主に人為起源および生物燃焼と関連する重要な情報を提供し、解析された濃度の時空間変動に関する情報は大気環境の実況監視と大気プロセスの理解に役立つ。衛星観測情報をデータ同化で統合し対流圏および成層圏の化学場を包括的に解析した研究は世界でも僅かであり、先駆的な試みを実施した本研究から、全球および東アジア域における数十年に及ぶオゾンおよび関連化学種の長期再解析データ作成の足掛かりとなる重要な成果が得られた。

**[キーワード]**

データ同化、大気汚染、成層圏オゾン

#### 1. はじめに

##### (1) 大気微量成分のデータ同化

大気微量成分の時空間変動に関する情報は、大気環境の実況監視および気候システムを理解する上で非常に重要である。近年、地上観測や衛星搭載センサによる大気化学の観測データが蓄積されてきているが、全球および領域スケールの大気質変動を把握する上でその量は依然として十

分ではない。また、複数の化学種の挙動を高精度な観測から連続的に捉えるには技術的な問題が残っており、大気中の化学反応に関する理解を妨げている。一方、詳細な化学過程を含む大気化学輸送モデルが開発・利用されているが、大気汚染を引き起こす複雑な化学過程の表現には未だ問題を抱える状況にある。データ同化により、限られた観測データから大気質の時空間変動を連続的に最適推定する取り組みが望まれている。

本研究では、局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) と全球化学輸送モデルCHASER (Sudo et al., 2002)<sup>1)</sup> を用いて開発した大気微量成分のデータ同化システムの有用性を議論する。まず、モデルは完全であると仮定した仮想実験においてデータ同化システムの性能を検証する。次に、大気化学衛星観測データの利用に向けて実施した観測システムシミュレーション実験 (OSSE) の結果について報告する。最後に、実際に衛星搭載センサにより取得された観測データを利用した実観測データ同化実験の結果について報告する。

## (2) 成層圏オゾンのデータ同化と短中期予測

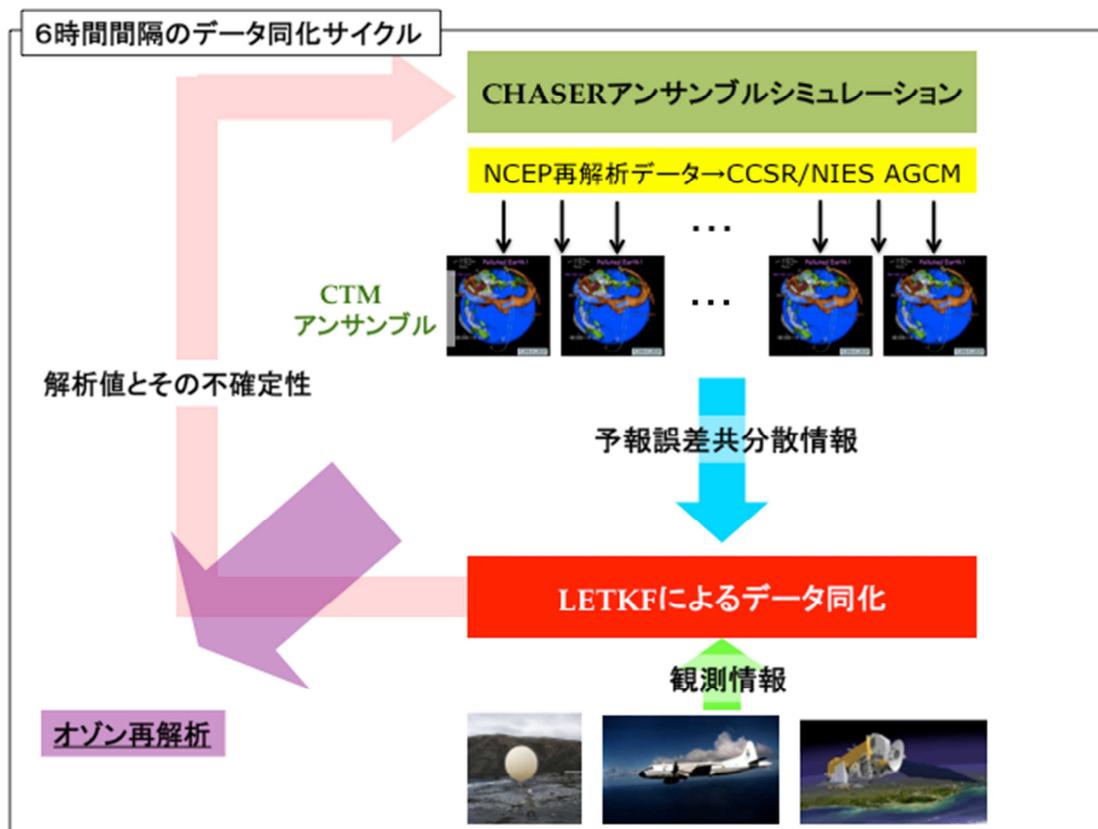
南極オゾンホールに代表される深刻な成層圏オゾンの破壊は、1980年代以降現在に至るまで続いていることが種々の観測事実より明らかになっている。近年においては、北半球高緯度域においても成層圏オゾンの顕著な破壊が観測されている (Manney et al., 2011)<sup>2)</sup>。このため、全球的な成層圏オゾン分布の実況監視技術を高度化し、この実況監視データに基づいた紫外線予測の精度を高めることは社会的に重要な課題となっている。

## 2. 研究開発目的

### (1) 大気微量成分のデータ同化システム

本研究ではオゾンに関するデータ同化システムを開発した。オゾンのデータ同化は、大気環境の実況監視、初期値改良を通して化学天気・UV予報の向上、放射結合を介して気象解析の改善、大気輸送・化学プロセスの理解に重要な役割を果たす。欧米ではオゾンデータ同化の相互比較プロジェクトなどが実施されているが、データ同化スキームの未熟さやモデル自身の性能の問題に起因して依然として解析精度に問題を抱える。また、広く使用されている変分法で用いられるアジョイントモデルは、詳細な化学過程を含んだシステムに適用するのは難しく、詳細な化学過程を含んだ化学輸送モデルを用いたデータ同化システムはごく限られており、新たな同化システムが望まれている。高精度なオゾンの解析のためには、オゾンのみならず関連する化学種を同化する重要性も指摘されているが、その効果は明らかではない。

本研究では、局所アンサンブル変換カルマンフィルタを用いてオゾンのデータ同化システムを構築した。この手法では、詳細な化学スキームを含む場合でも、データ同化スキームが難なく構築できるといった利点がある。本スキームでは、アンサンブル予報は確率論的な予報を行い、カルマンフィルタで要求される誤差の時間発展に関する情報を供給し、流れに依存した誤差情報を反映することが可能であり、4次元変分法と同様に高度なデータ同化手法として知られる。



図(3)-1. オゾンデータ同化システムの概念図

図(3)-1に構築したデータ同化システムの概念図を示す。予報モデルには対流圏の詳細な化学過程を含むCHASERを利用し、CHASERのアンサンブルシミュレーションから大気微量成分分布の背景誤差分散を作成し、観測情報を併せて同化を行うことで、データ同化によるオゾンの解析値を取得する。6時間間隔の同化サイクルを介して観測情報を蓄積する。

## (2) 成層圏オゾンのデータ同化と短中期予測

成層圏オゾンの高度な実況監視を目指して、最先端のデータ同化手法であるアンサンブルカルマンフィルター(EnKF)と大気中の複雑なオゾン化学・輸送過程を取り入れた全球化学気候モデルを用いた4次元データ同化システムを構築する。このデータ同化システムでは、主に衛星に搭載された各種測器によって得られる観測情報を取り入れ、オゾン濃度の全球時空間分布を推定する。同化システムの開発に当たっては、長期的に安定して精度良く動作するシステムの開発に取り組む。

本研究で開発したデータ同化システム(以下、本データ同化システム)によって得られた解析値の精度を、同化時には使用していない独立観測データなどを用いて検証する。また、この実況監視システムから得られた解析値を初期値とした成層圏オゾン短期予測システムを構築しその予測精度を検証する。

### 3. 研究開発方法

#### (1) 大気微量成分のデータ同化

##### 1) 対流圏オゾンのOSSE (仮想化実験)

データ同化の動作を理解するために、仮想オゾン観測データを同化した際の下部対流圏におけるオゾン濃度の変動を調査した。本調査には、真値と予報値との差である背景誤差、データ同化による修正量である解析インクリメントを利用し、これらはデータ同化の挙動を理解する上で重要な物理量である。仮想状況下におけるOSSEでは、データ同化システム、数値モデル、擬似的な観測データセットを使用して、新たな観測が同化解析場に持つインパクトを、測器が開発される以前に調べることができる。同時に、十分な観測情報を想定した場合には、データ同化システムが十分な性能を示すかどうかを確認することができる。

##### 2) 実データ同化による対流圏オゾン解析

窒素酸化物は大気汚染および気候に影響を及ぼす重要な化学種である。窒素酸化物は対流圏のオゾンバジェットをコントロールし、更にはOHラジカル濃度に影響し対流圏の化学過程に重要な影響を及ぼす。窒素酸化物の主な排出源には、人為起源、生物燃焼起源、土壌起源がある。これらの排出量分布は統計情報を基にしたボトムアップインベントリーにより推定されているが、依然として大きな不確定性を持つ事が指摘されている。二酸化窒素の衛星観測データを用いたトップダウン解析から、それらの不確定性を軽減し窒素酸化物排出量の高精度な推定が行える可能性がある。本研究では、OMIによる衛星観測データを用いたデータ同化計算から、窒素酸化物排出量の全球分布とその季節変動を推定することを試みた。

本研究では、窒素酸化物の排出量を推定する高度なデータ同化システムを開発した。データ同化手法にはアンサンブルカルマンフィルターを採用した。更に state augmentation手法を利用することで、OMIによる二酸化窒素の観測情報から日々の窒素酸化物の排出量を2.8度格子の分解能で推定することを可能とした。この手法を利用することで、(1) 時間とともに観測情報を蓄積し、(2) CTMのアンサンブルシミュレーションにより動的に見積もられる背景誤差共分散情報を利用し排出量と濃度の間接的な関連性を反映することが可能となる。観測のモデル格子に対する観測データの時空間代表制を高めるためにスーパーオブザーベーション法を採用した。

#### (2) 成層圏オゾンのデータ同化と短中期予測

##### 1) 化学輸送モデルの精度検証

本データ同化システムでは、数値予報モデルによって得られる予測場(背景場)と衛星などによって得られる観測情報を、EnKF手法によって最適に統合することで解析値の作成を行う。このため、本研究で用いる化学気候モデルの性能が解析場の精度に大きな影響を及ぼす可能性があり、モデルの精度検証をおこなう必要がある。そこでゾンデ観測データや衛星観測データを用いて、データ同化に用いる化学気候モデルの性能を検証する。

##### 2) 複数の衛星観測データを同時利用したデータ同化システムの開発とその精度検証

成層圏オゾンは現在複数の衛星によって常時観測が行われており、本データ同化システムの開発に当たっては、これら複数の衛星測器による観測情報を有効に利用する必要がある。オゾン

衛星観測は、周縁観測・直下視観測など幾つかの観測手法、波長帯で測定されている。また観測値として得られる物理量も 3 次元的なオゾン濃度分布のほか、大気の下端から上端までのオゾン量を積算した気柱全量（以下、オゾン全量）としても得られる。複数の異なる衛星観測データを同時にデータ同化に利用することで解析場の精度が改善できるよう、データ同化手法の開発に取り組む。本データ同化システムで作成した解析場の精度検証を行う。精度検証は、解析場とオゾンゾンデ観測などを比較することで行う。また、本データ同化システムで用いる EnKF 手法の有効性を検証するため、EnKF 手法とは異なる同化手法（ナッジング手法）によって得られた解析場との比較も行う。

### 3) 成層圏オゾン短期予測システムの開発とその精度検証

本データ同化システムによって作成した解析値を初期値とした、成層圏オゾンの短期予測システムを構築する。この短期予測システムを用いたハインドキャスト実験を行ない、成層圏オゾン予測精度の検証を行う。

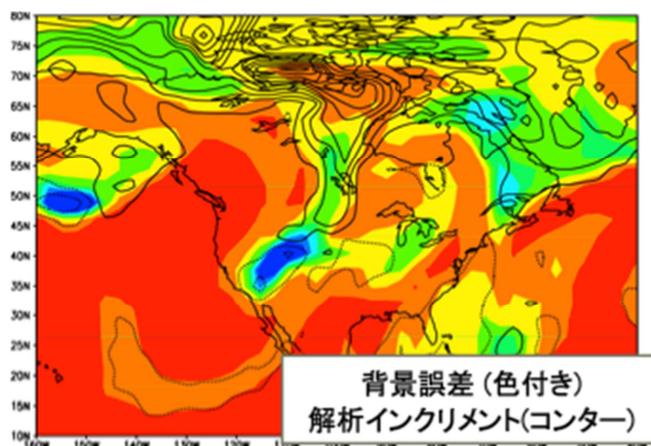
## 4. 結果及び考察

### (1) 大気環境のデータ同化システム

#### 1) 対流圏オゾンの OSSE

##### a. 仮想化実験

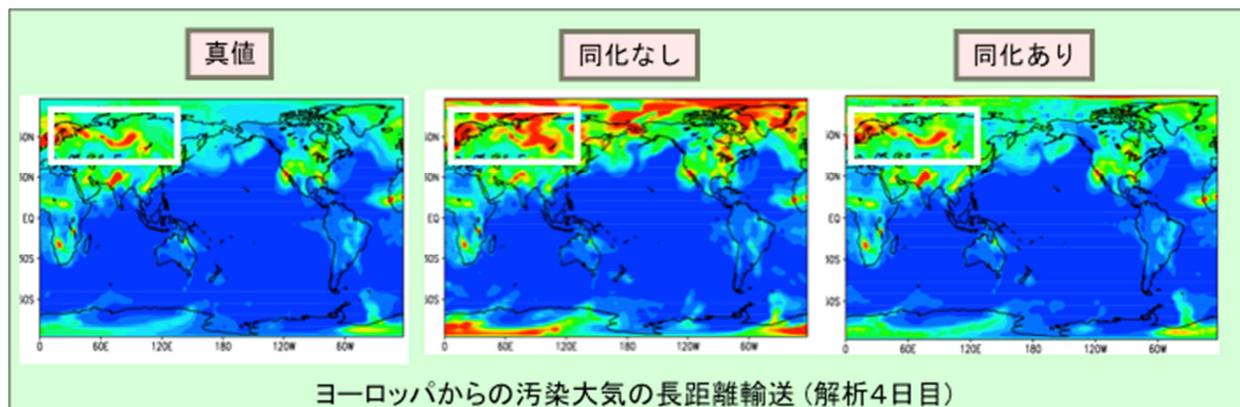
仮想実験から得られた背景誤差と解析インクリメントの空間構造を図(3)-2に示す。アンサンブルブレッドは背景誤差パターンを良く捉え、流れに沿った構造について背景誤差を適切に修正していることが分かる。



図(3)-2 理想化実験により得られたオゾンの背景誤差と解析インクリメント

次に図(3)-3にはヨーロッパからの越境汚染のケースを示す。真値では、ヨーロッパからユーラシア大陸中央部への高オゾン濃度大気の越境汚染が発生している。一方、データ同化を行わない場合には、正確な大気微量成分の初期分布を知らないために、このような局所的な越境輸送を表現できないが、データ同化で観測データを取り込むことで、分布変動を精度良く表現することが

できる。



図(3)-3 下部対流圏におけるオゾン濃度の全球分布。左から、真値、データ同化を行わないシミュレーション結果、データ同化結果を示す。

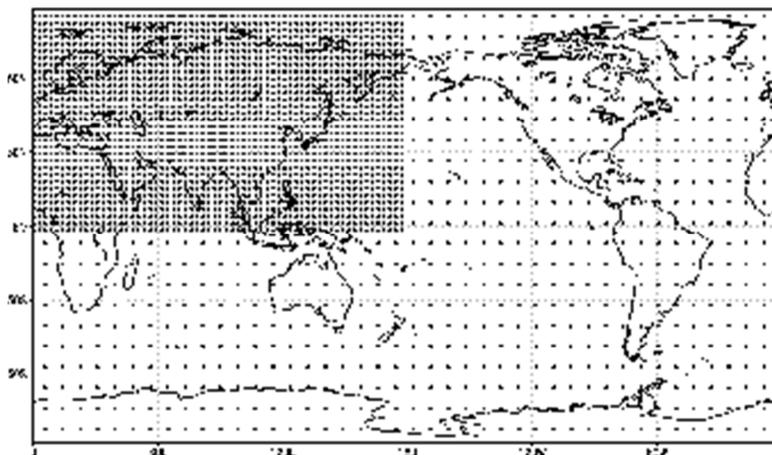
このように、十分な観測情報が与えられた場合には、開発したデータ同化システムは精度の高いオゾンの解析場を提供する。次に、計画されている静止衛星観測データのデータ同化への利用について理想化実験から調査した結果を報告する。

#### b. 衛星観測OSSE

東アジアにおける地表オゾンの推定に最適な静止衛星観測網を調査することを目的としたOSSEを実施した。実験手順を以下に示す。

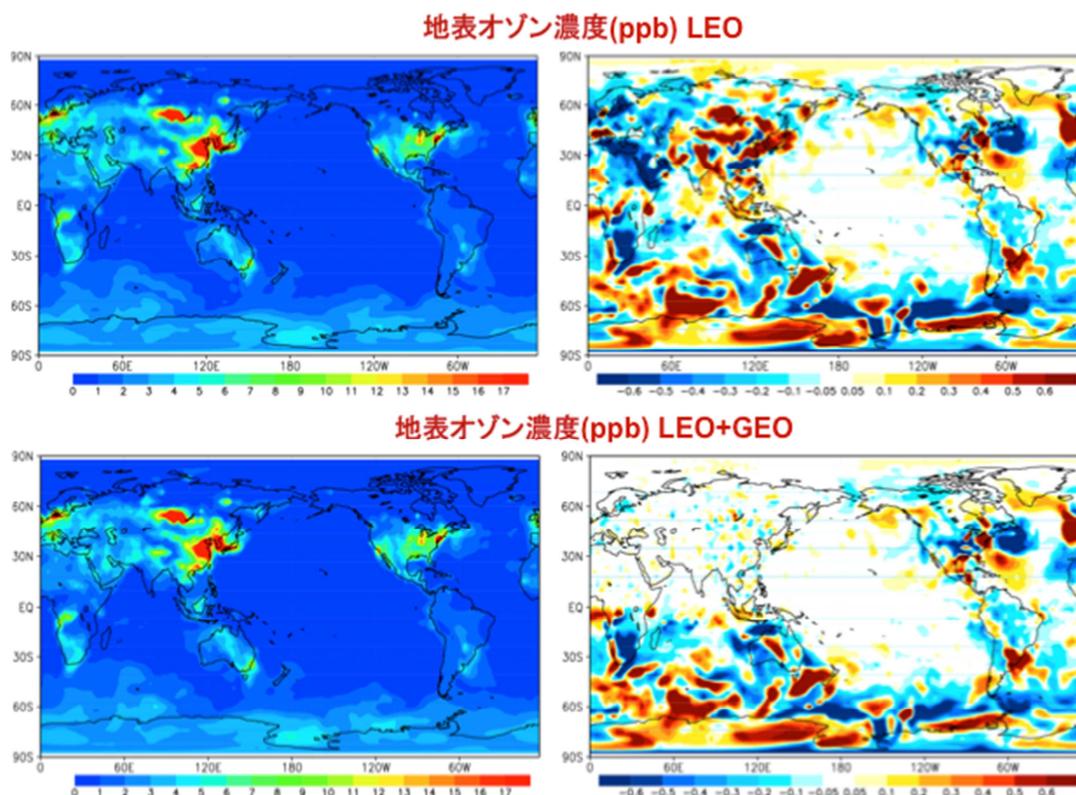
- i) モデルによる予報の一つを真の大気の状態 (Nature run) とする。
- ii) Nature runを基に、想定される観測誤差、観測範囲、分解能、観測変数を考慮し、擬似的な観測データセットを生成する。
- iii) 初期値に不確定性を考慮した不完全モデル予報結果に擬似的な観測を同化し、各化学種の時空間分布を推定する。
- iv) データ同化による推定結果とNature runを比較し、想定した観測網が持つインパクトを評価する。

静止衛星による観測データは、ユーラシア大陸域に水平2.8度間隔、鉛直各層に均一に6時間間隔に存在すると仮定し、大気と地表フラックスにエラーはなし、観測誤差は5%で正規分布に従い、バイアスはなしと仮定した。



図(3)-4 想定した軌道観測衛星および静止観測衛星（図中・左上）による観測データ分布

軌道衛星(LEO)による粗い観測に加えて、静止衛星(GEO)による高分解能な観測を追加して利用することで、地表オゾンの解析度差がどの程度改善するのかを調査した。図(3)-5にはデータ同化により解析された地表オゾン濃度の分布を示す。軌道観測データを同化した場合には全球的に1ppb近い解析誤差が存在するが（図右上）、静止衛星観測を追加することで観測領域では著しく誤差を軽減する（図右下）。静止衛星観測を同化することで、東アジアのオゾン解析誤差は1/8程度に軽減し、同化サイクルを通して北米などでもエラーを20%程度軽減できる。

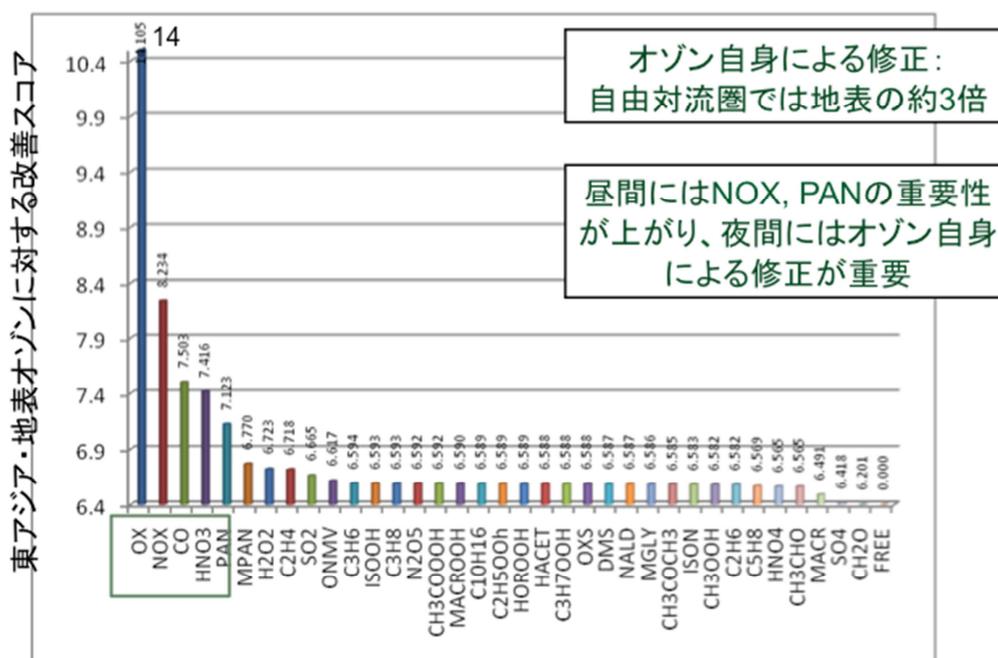


図(3)-5 軌道衛星（上段）および静止衛星（下段）をデータ同化した場合のオゾン濃度分布（左）とその解析誤差（右）。右の図で赤色（青色）は真値よりもオゾン濃度が高い（低い）領域を示す。

## c. 各化学種の重要性

次に、静止衛星観測によって得られる異なる化学種の観測情報が、それぞれ地表オゾンの推定にどの程度影響を及ぼすかについて調べた結果を図(3)-6に示す。図の縦軸には、データ同化を行わない場合に存在した誤差がデータ同化によってどの程度改善したのかを百分率で示す。縦軸にはデータ同化に用いた化学種を示す。大気微量成分の濃度自身のデータ同化を行うことで、大気微量成分の分布推定は著しく改善する。大気中には複雑な化学システムが存在し、データ同化により取り込んだ観測情報は化学システムおよび解析サイクルを介して非同化化学種へと素早く影響してゆく。一方、反応速度の非常に速い化学種の分布推定に対しては、データ同化による修正が難しく推定結果に悪影響を及ぼす場合もあり、大気微量成分の効果的なデータ同化システムの構築に向けて同化化学種の選択が重要である。

OSSEに基づく解析結果から、化学システムを介して $\text{NO}_x$ 、CO、 $\text{HNO}_3$ 、PAN (acyl peroxy nitrates)、MPAN (peroxymethacryloyl nitrate)などの関連する化学種の観測情報が地表オゾンの推定に重要であることが明らかとなった。すなわち、オゾン自身を同化しなくても、化学システムを介して関連する化学種の観測情報からオゾンの推定を改善できる可能性がある。一方、自由対流圏内のオゾン推定するためには、関連する化学種の観測データによる推定修正効果は小さく、オゾン自身を高精度に観測することが重要であった。また、地表オゾンの推定に対して、昼間には $\text{NO}_x$ 、PANの重要性が高く、夜間には関連化学種による修正は難しくオゾン自身による修正が重要な役割を果たすことがあった。これらの結果はモデルの性能に依存するので注意が必要だが、観測デザインに有用な情報が得られた。



図(3)-6 各化学種の濃度を同化することによるオゾン濃度の改善率 (%)

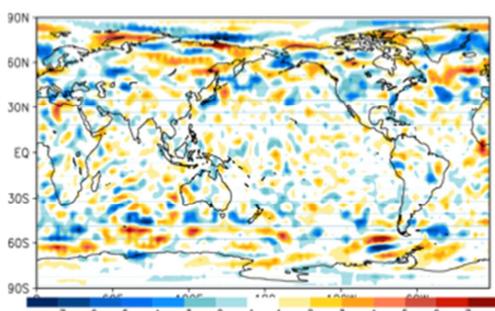
#### d. 化学気象結合同化システムの利用

最後に、化学場と気象場を同時にデータ同化する結合同化システムに関する理想化実験を実施した（図(3)-8）。大気微量成分のデータ同化を行わない化学-気候結合モデルでは、大気微量成分の予報誤差が大気場の推定にも悪影響を及ぼす。大気微量成分のデータ同化を行った結合同化システムでは、大気微量成分の改善が放射過程を通して気象場の改善にも良い影響を及ぼすことが明らかとなった。一方で、寿命の長い大気微量成分の分布と大気循環場の変動には通常大きな相関があり大気場と微量成分を同時に同化しそれらの共分散を考慮することで、より精度の高い微量成分解析が実施可能となる可能性がある。気象と大気微量成分の結合システムでの利用や同時解析も今後の重要な研究課題となる。

### 化学-気象結合同化システムの利用

#### # 気象場・化学場共に同化

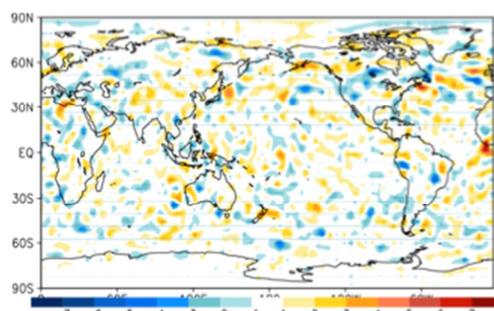
化学-気候結合モデル  
(結合なし)



オゾン予報誤差が大気場に悪影響

東西風の誤差: 6/s程度

化学-気候結合同化システム  
(放射結合あり)



オゾン観測情報がデータ同化  
を介して大気場を修正する。

東西風の誤差: 最大で2 m/s 程度

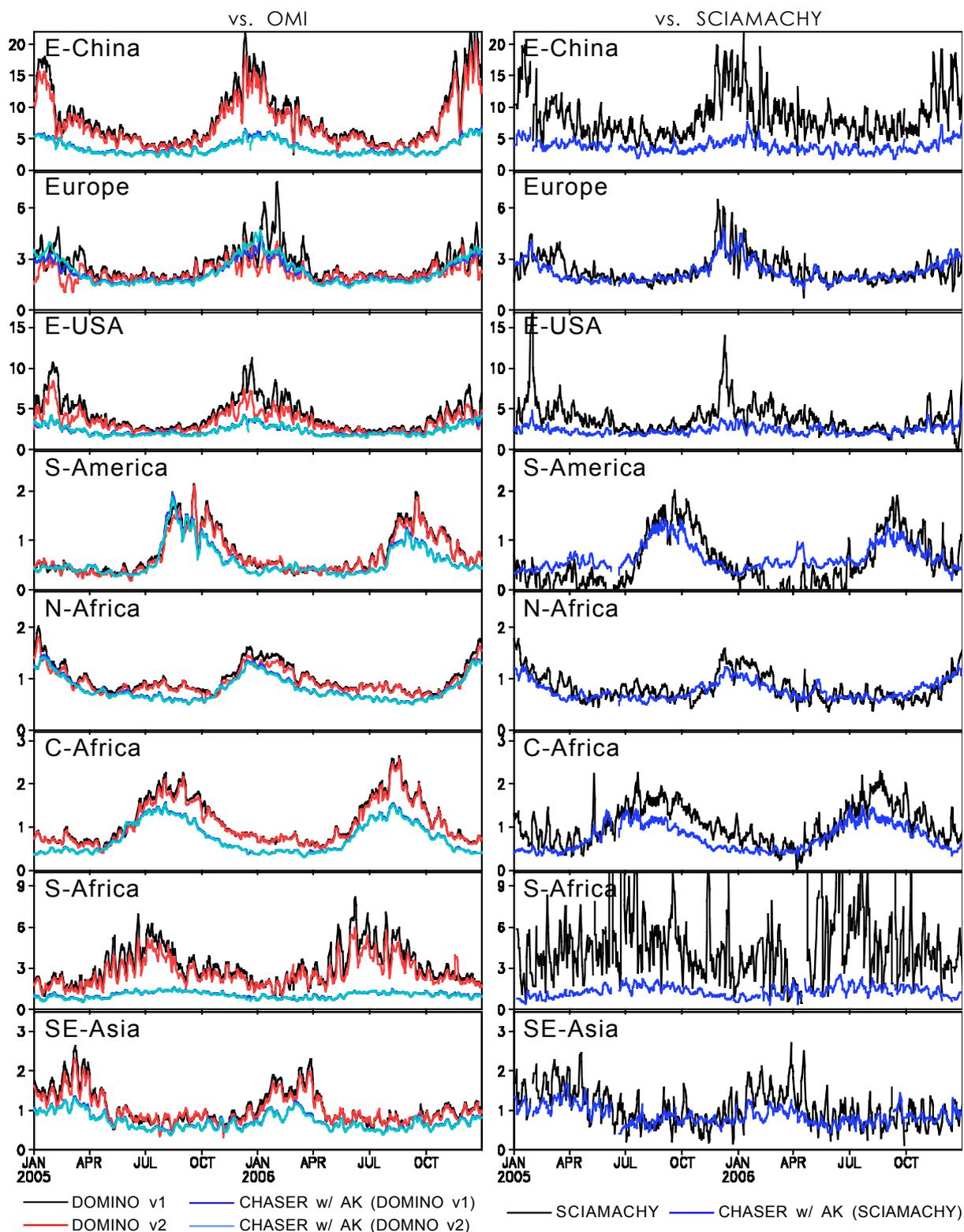
300 hPa 東西風誤差

図(3)-8. 化学-気象結合同化システムによる東西風の解析誤差。

#### 2) 実データ同化による対流圏オゾン解析

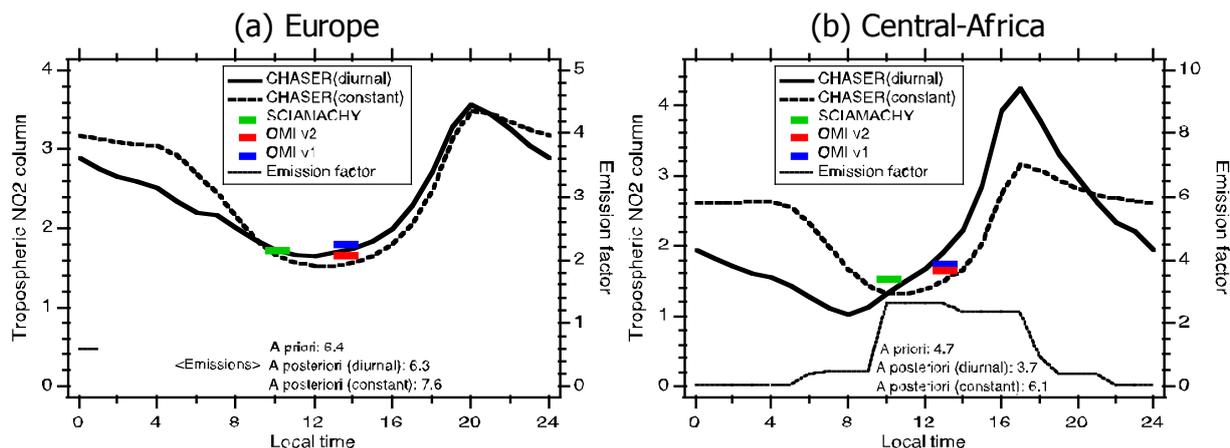
##### a. 解析結果

データ同化を実施する前に、データ同化に用いるモデルと観測の一致について調査した。図(3)-9にはモデルおよび衛星観測により取得された二酸化窒素対流圏鉛直積算濃度の季節変動を各領域について示す。大まかにモデルと衛星データは良い一致を示す。しかし、大気汚染の多くの領域でモデルは二酸化窒素濃度を過小評価する傾向があり。過小評価は冬に顕著であり、ボトムアップインベントリーによる排出量が過小評価されている可能性を示唆する。生物燃焼域においてもモデルは濃度を過小評価する傾向が見られる。



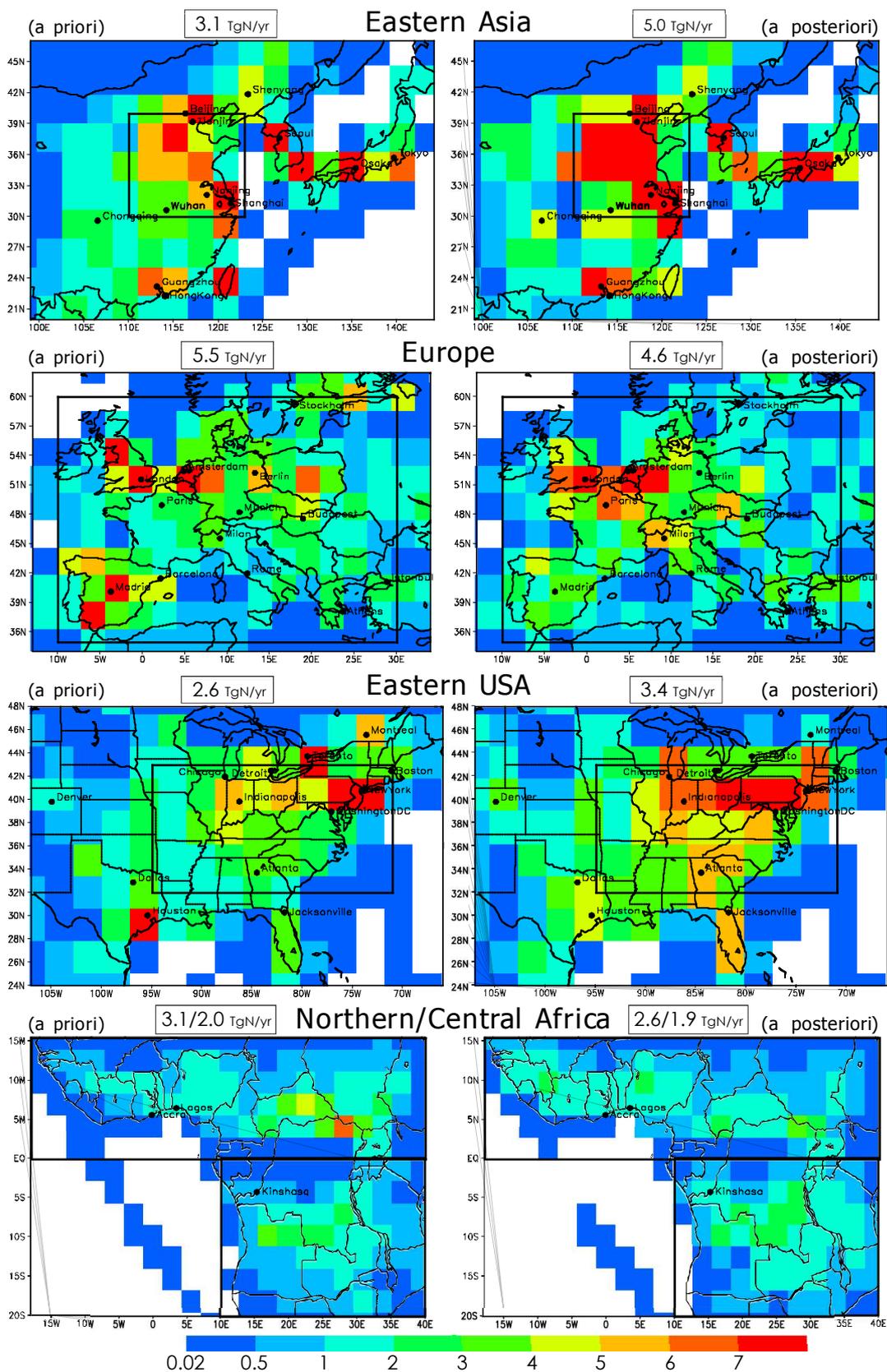
図(3)-9. モデルおよび衛星リトリバルによる領域平均した二酸化窒素対流圏鉛直積算濃度の時系列分布。左の図はOMI (DOMINO v1:黒色、DOMINO v2:赤色) および対応する観測時刻のモデルの時系列 (DOMINO v1:紺色、DOMINO v2:青色)、右の図はSCIAMACHY (黒色) および対応する観測時刻のモデルの時系列 (紺色) を示す。

対流圏における二酸化窒素濃度は著しい日変化を示す。モデルによるシミュレーション結果を改善する上で、日変化の再現性は重要である。本研究では、それぞれ異なるカテゴリーの排出量に異なる日変化関数を適用しシミュレーション結果の改善を試みた（図(3)-10）。本取り組みにより、衛星リトリバルとの不一致の一部は解消される事が分かった。



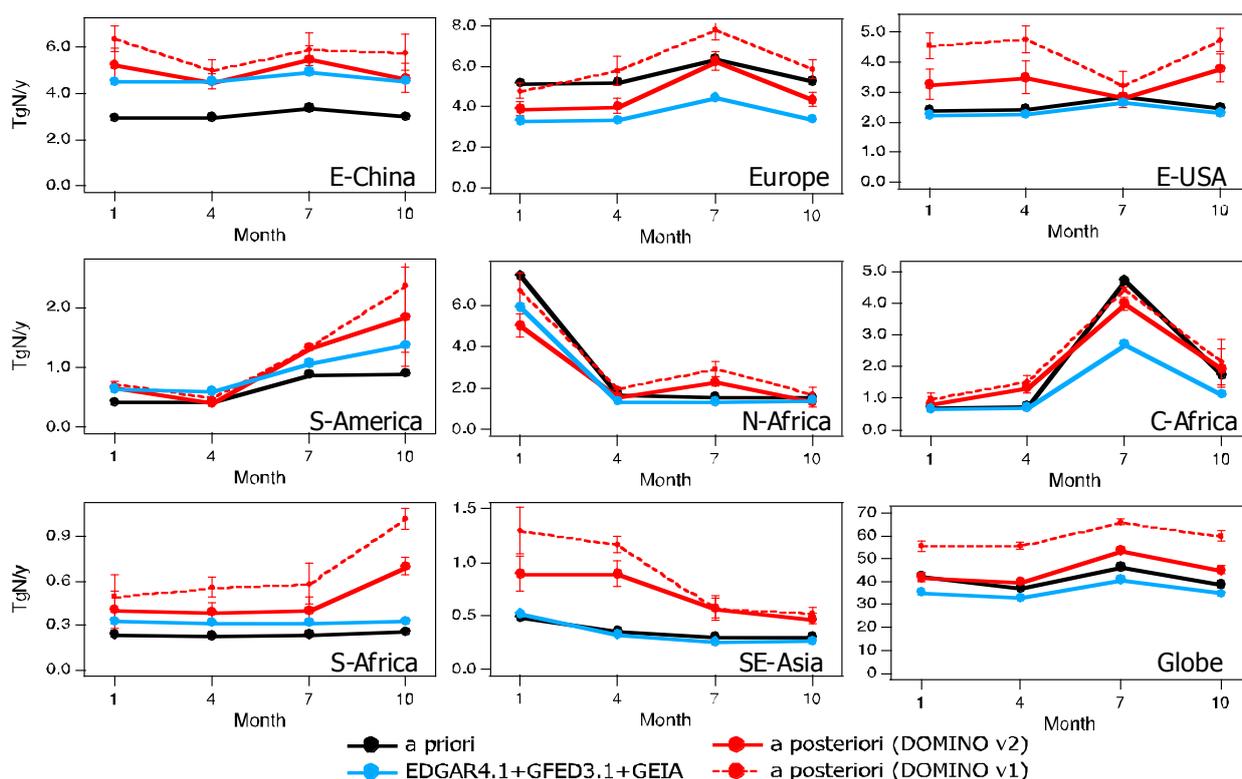
図(3)-10 モデルおよび衛星リトリバルにより取得された二酸化窒素対流圏鉛直積算濃度の日変化。ヨーロッパおよび中央アフリカにおける領域平均値を示す。太線は濃度、細線は排出量の日変化プロファイルを示す。太線の実線は日変化プロファイルを適用したシミュレーション結果、破線は日変化のない排出量を与えたシミュレーション結果を示す。

本研究により推定された窒素酸化物の排出量は、解析の元としたボトムアップエミッションデータ（統計報告値などから作成されたデータ）と比較して、窒素酸化物の排出量は中国東部、アメリカ東部、南アフリカ、ヨーロッパ中東部においてより大きな排出量を示した（図(3)-11）。これら本解析による増加は、ボトムアップインベントリーによる推定は人為起源の推定を過小評価している可能性を示唆する。データ同化による著しい増大は中国東部にみられ、元の排出量と比較して約 1.7 倍となった。著しい増加は南アフリカの Highveld 地域およびアメリカ東部にも見られ、約 1.4-2.5 倍の増加があった。その他の人為起源の排出が支配的な領域と異なり、ヨーロッパではデータ同化により領域平均した排出量は減少した。領域平均では減少したものの、解析インクリメントは格子間で大きく異なり、ヨーロッパ北西部や南西部では排出量の増加があった。



図(3)-11. ボトムアップインベントリーおよび本研究によるデータ同化解析から取得された窒素酸化排出量( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )の空間分布。2005年の平均値を示す。

データ同化は生物燃焼起源の排出量の季節変動とその振幅も大きく変化させた（図(3)-12）。著しい増加はアフリカ中央部およびアジアで4月に、南米で10月にあった。これらの増加の結果として、推定された生物燃焼域での排出量の極大は春に現れ、エミッションインベントリーによる冬の極大とは大きく異なった。推定された排出量は、解析の基とした排出量データよりも新しいインベントリー（EDGAR 4.1, GFED 3.1, GEIA）とより良い一致を示した。しかしながら、それらのインベントリーデータと推定された排出量の間には、ヨーロッパ、アメリカ東部、中央アフリカ、東南アジアなどで大きな不一致が見られた。



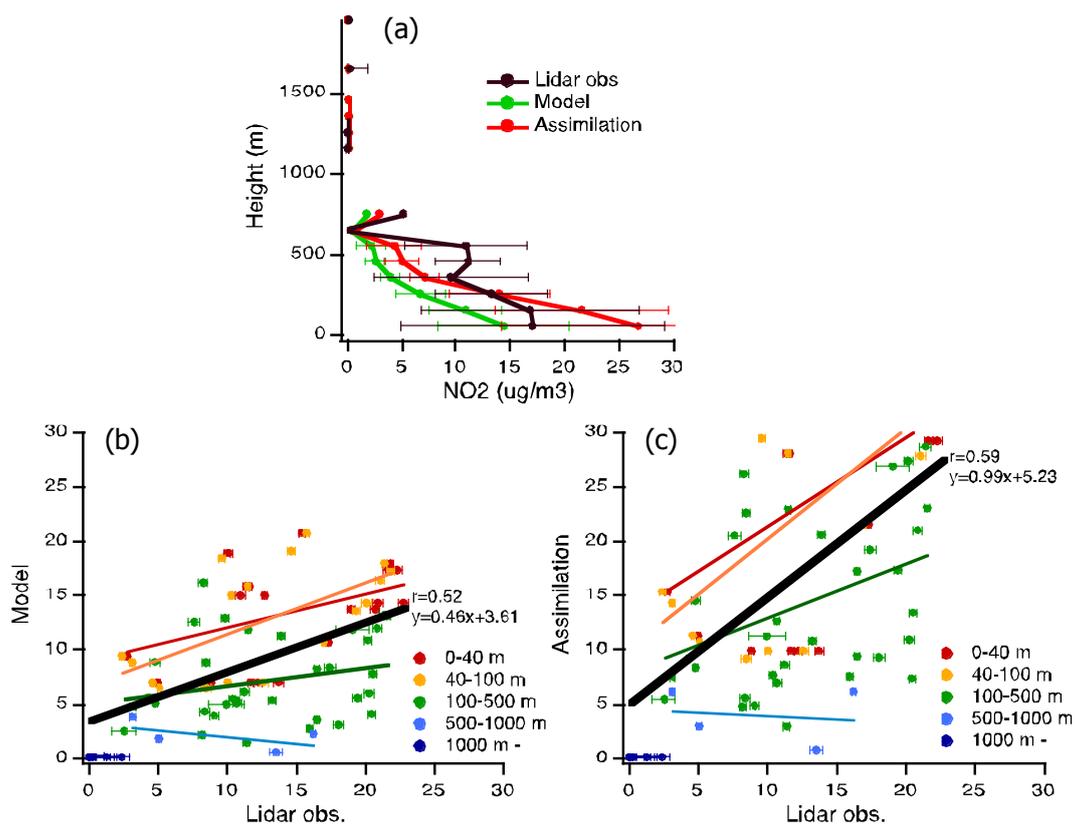
図(3)-12 領域積算した窒素酸化物排出量(TgN/yr)の季節変化。データ同化による解析値(赤色)、モデルに用いたインベントリーデータ(黒色)、より新しいインベントリーデータ(水色)による結果を示す。データ同化による解析値は、DOMINO v2をデータ同化に利用した結果(赤色実線)とDOMINO v1を利用した結果(赤色点線)を示す。

データ同化結果は、修正した排出量を用いたシミュレーション結果とデータ同化に利用していない独立観測データを比較することで検証した。独立検証データにはSCIAMACHY(ESAによる衛星搭載センサ)によるリトリバルデータ、INTEX-B(NASAによる航空機観測)キャンペーン期間中の航空機観測データ、DANDELIONS(KNMIによる地上ライダー観測)キャンペーン期間中のライダー観測データを用いた。衛星リトリバルとの比較結果を表(3)-1にまとめる。INTEX-BおよびDANDELIONSとの比較は図(3)-13および図(3)-14に示す。排出量の修正は観測データとの一致を大きく改善させ、これは排出量の表現がデータ同化により改善された可能性を示唆する。二酸化窒素濃度に対する排出量修正の効果は高度500m以下で顕著であった。自由対流圏においてはそ

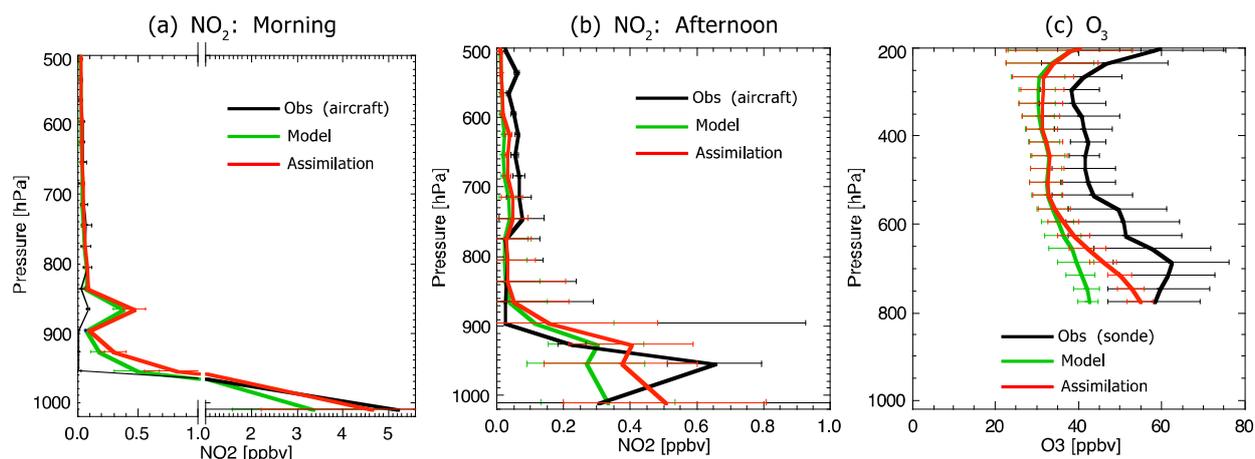
の影響は非常に小さかった。自由対流圏内の二酸化窒素分布を改善するためには雷による生成過程など上空における生成過程を改善する必要がある。対流圏下層における二酸化窒素の表現の向上は、オゾン濃度の観測との一致にも大きく貢献した（図(3)-14）。同時に、データ同化による修正はデータ同化に用いる観測データの質と量にも大きく依存するので注意が必要であることが分かった。

表(3)-1 データ同化結果（およびモデルシミュレーション（括弧内））と衛星リトリーバル間の二酸化窒素対流圏鉛直積算濃度のバイアス。

|           |          | January       | April         | July          | October       |
|-----------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| E-China   | vs. OMI  | -0.67 (-4.58) | -0.19 (-1.64) | -0.08 (-0.78) | -0.53 (-2.42) |
|           | vs. SCIA | -1.37 (-7.24) | -0.64 (-2.54) | -0.77 (-1.93) | -1.09 (-2.85) |
| Europe    | vs. OMI  | -0.12 (0.84)  | -0.40 (-0.35) | -0.09 (-0.26) | -0.31 (-0.25) |
|           | vs. SCIA | -0.58 (0.08)  | -0.21 (-0.11) | 0.07 (-0.04)  | 0.29 (0.36)   |
| E-USA     | vs. OMI  | -1.92 (-2.65) | -0.96 (-1.68) | -0.04 (-0.31) | -0.52 (-1.46) |
|           | vs. SCIA | -4.79 (-5.40) | -0.92 (-1.85) | -0.23 (-0.52) | -0.78 (-1.63) |
| S-America | vs. OMI  | 0.02 (-0.03)  | 0.05 (0.02)   | -0.06 (0.10)  | 0.03 (-0.43)  |
|           | vs. SCIA | 0.09 (0.05)   | 0.54 (0.49)   | 0.03 (0.15)   | -0.02 (-0.43) |
| N-Africa  | vs. OMI  | 0.12 (0.15)   | 0.11 (-0.07)  | -0.11 (-0.22) | -0.04 (0.05)  |
|           | vs. SCIA | -0.07 (-0.07) | 0.21 (0.19)   | -0.12 (-0.21) | 0.18 (0.29)   |
| C-Africa  | vs. OMI  | -0.17 (-0.25) | 0.13 (-0.05)  | -0.19 (-0.27) | -0.37 (-0.50) |
|           | vs. SCIA | -0.22 (-0.31) | 0.30 (0.02)   | -0.48 (-0.54) | -0.33 (-0.43) |
| S-Africa  | vs. OMI  | -0.54 (-0.73) | -1.17 (-1.42) | -1.58 (-2.80) | -0.74 (-1.38) |
|           | vs. SCIA | -2.16 (-2.47) | -2.74 (-3.02) | -3.42 (-4.73) | -0.54 (-1.79) |
| SE-Asia   | vs. OMI  | -0.01 (-0.32) | -0.14 (-0.44) | 0.16 (-0.09)  | -0.09 (-0.15) |
|           | vs. SCIA | 0.24 (-0.21)  | -0.29 (-0.54) | 0.18 (0.16)   | 0.19 (0.17)   |

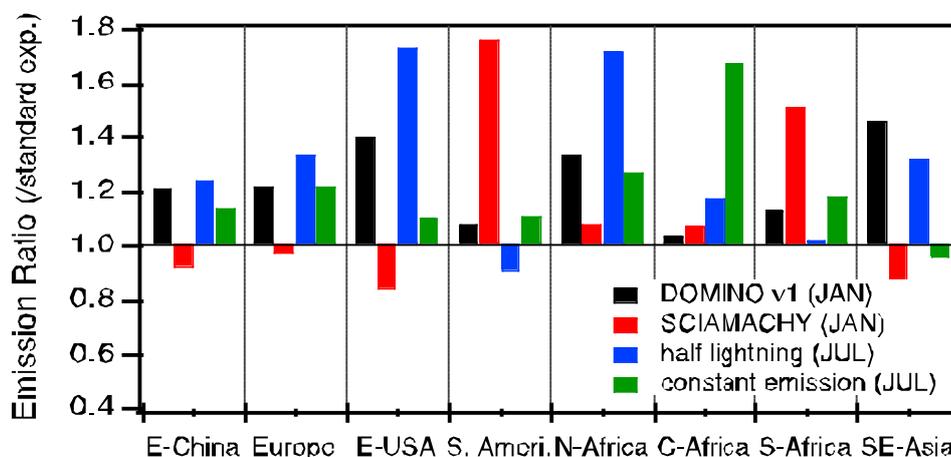


図(3)-13 DANDELIONキャンペーン中にライダー観測により取得された二酸化窒素濃度の鉛直分布との比較結果。モデルシミュレーション結果およびデータ同化結果との比較結果を示す。鉛直プロファイル(a)に、観測(横軸)とモデルおよびデータ同化解析(縦軸)による濃度(ug/m<sup>3</sup>)を比較した散布図を(b, c)に示す。



図(3)-14 INTEX-Bキャンペーン中に航空機観測により取得された二酸化窒素およびオゾン濃度の鉛直分布との比較結果。モデルシミュレーション結果およびデータ同化結果との比較結果を示す。

モデルおよび衛星リトリバルに内在する様々なエラーに起因して、推定された排出量は大きな不確実性を持つものと考えられる。実際に、データ同化による修正はデータ同化に用いる観測データの質と量にも大きく依存するので注意が必要である。図(3)-15に示すように、同化するデータの違いによって排出量の推定結果に大きな違いがあった(図中黒色)。特に、内在するリトリバルのバイアスは排出量の推定結果に多大な影響を及ぼし、領域平均排出量を最大で60-70%程度変化させた。更に、観測とモデルの不一致は著しい日変化を持つことから、異なる観測時間のデータを同化することで推定結果は大きく異なった(図中赤色)。窒素酸化物の排出量を精度よく推定するためには、モデルと衛星リトリバルの品質及び振る舞いに多いに注意する必要があることが本研究により明らかとなった。

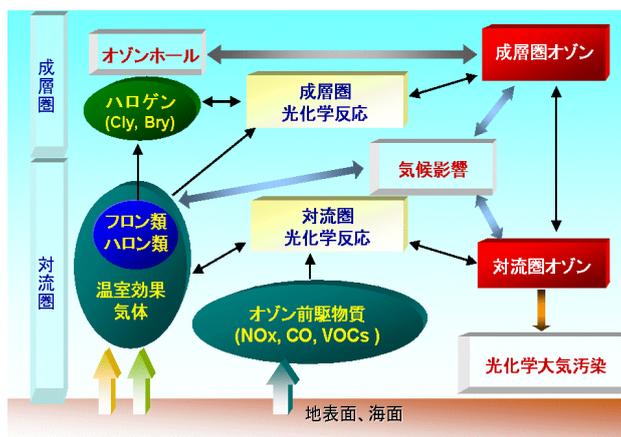


図(3)-15. 算出した領域平均排出量のモデルパラメータおよび同化データに対する感度(相対比で示す)。標準データ同化実験との比率を示し、黒色は古いバージョンのOMIリトリバルを用いた結果、赤色はSCIAMACHYデータを用いた結果、青色は雷による窒素酸化物生成量を減少させた結果、緑色は窒素酸化物排出量の日変化を考慮しなかった場合の結果を示す。

## (2) 成層圏オゾンのデータ同化と短中期予測

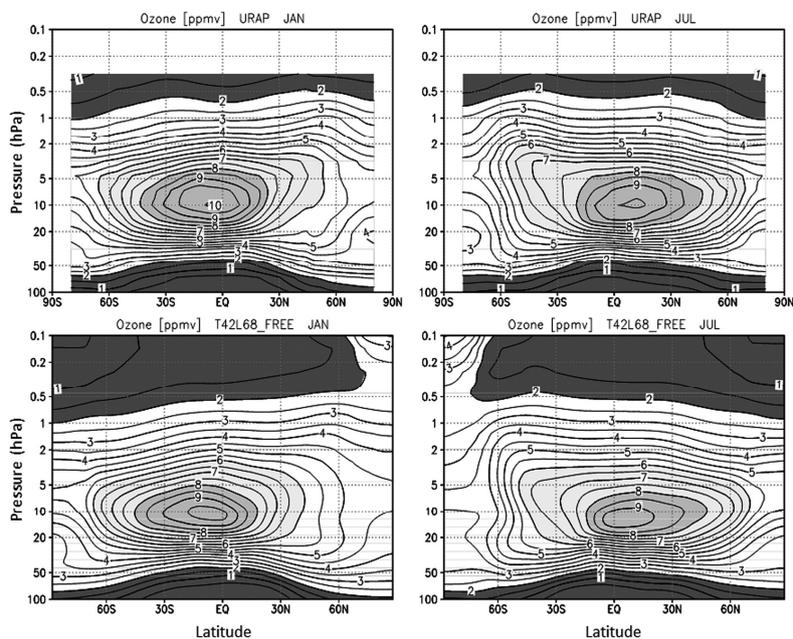
### 1) 化学輸送モデルの精度検証

本データ同化システムでは、気象研究所において開発された気象研究所化学気候モデル(MRI-CCM2;誌上発表(2))を数値予報モデルとして用いる。MRI-CCM2は、地上から成層圏までのオゾンおよび他の大気微量成分の時空間濃度分布を計算するために必要な大気化学・物理過程をその相互作用とともに考慮している(図(3)-16)。化学・輸送計算モジュールにおいては、90の化学種・172の気相反応・59の光解離反応・16の不均一反応に加えて、改良セミ・ラグランジュスキームを用いた格子スケールの輸送計算、サブ格子スケールの積雲鉛直輸送・乱流鉛直輸送、乾性・湿性沈着、さまざまな起源からの微量成分のエミッション、の各プロセスを取り扱っている。



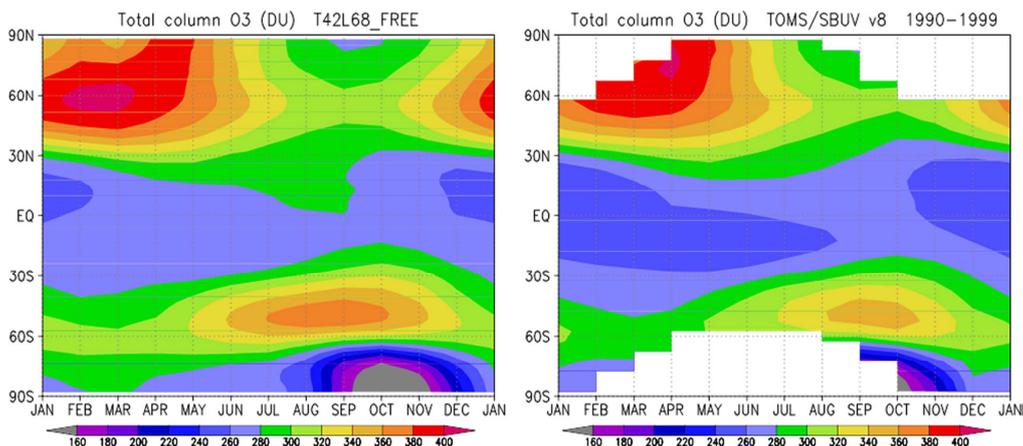
図(3)-16 気象研究所化学気候モデル(MRI-CCM2)がターゲットとする大気化学過程

MRI-CCM2のモデル精度を検証するため、数値積分を10年間行って1990年代の微量成分濃度分布の再現実験を、データ同化を行わずにモデルフリーで行った。図(3)-17の下段に、この再現実験を10年間平均して得られた帯状平均オゾン濃度の1,7月の平均値を示す。また上段には、同時期の衛星UARSに搭載されたHALOE (Halogen Occultation Experiment) によるオゾン濃度観測値を示す。図(3)-17が示すように、モデルによる再現値は観測にみられる成層圏オゾン濃度分布の全体的な特徴を季節変化も含め良く再現しているものの、高度10hPa付近の低緯度域に存在するオゾン濃度極大付近において0.5~1ppmv程度過小になっている。



図(3)-17 成層圏における帯状平均オゾン濃度の月平均値(単位: ppmv)。(上段) 1990年代のUARS-HALOE衛星観測によって得られた観測値。(下段) 同時期のMRI-CCM2による再現実験の10年間平均値。(左図) 1月、(右図) 7月の月平均値。

図(3)-18に、同実験から得られた帯状平均オゾン全量の緯度一季節分布を衛星観測(TOMS/SBUV)と比較した結果を示す。図(3)-18が示すように、モデルで再現されたオゾン全量の季節変動は観測値を良く再現している。しかし、低緯度域においては全季節をとおして10 DU程度の正バイアス、また南半球中緯度においては6月～11月の期間について最大20 DU程度の正バイアスが存在している。



図(3)-18 帯状平均オゾン全量の緯度一季節断面図（単位：DU）。オゾン全量値をカラー陰影で示す。白抜き（右図）は観測データの空白域を示す。（左図）MRI-CCM2による再現実験の10年間平均値。（右図）TOMS/SBUV衛星による観測値の10年間平均値。

## 2) 複数の衛星観測データを利用したデータ同化システムの開発とその精度検証

本データ同化システムで利用するオゾン観測データは、衛星Auraに搭載されたMLS(Microwave Limb Sounder)による3次元オゾン濃度観測データ(Level2, Version 2.2)およびOMI(Ozone Monitoring Instrument)によるオゾン全量観測データ(Level2, Version3)である。MLSオゾン観測は太陽掩蔽法で行われ、その観測領域はほぼ全球域にわたる緯度 $\pm 82^\circ$ 内であり高度領域は215-0.02hPaである。一方、OMIによるオゾン全量観測は、大気による太陽放射の後方散乱を紫外域で観測して行われるため、極夜域では観測できないという特徴がある。

MLS Level2データの水平解像度は200-300kmでモデル解像度とほぼ同程度であり、その鉛直解像度は約3kmである。一方、OMI Level2データの水平解像度は数10kmであり、モデルおよびMLSの水平解像度よりはるかに細かい。そのためデータ同化時には、水平格子 $2^\circ$ 毎に平均したのち赤道で東西 $5^\circ$ ・南北5度の間隔に対応するよう全球でデータを間引いたデータを利用している。

また気象場（東西風、南北風、気温）の観測データとして、気象庁が作成した再解析データ(JCDAS)を利用している。気象場についてもEnKF手法によるデータ同化を行っているが、本データ同化システムではオゾン濃度場との背景誤差共分散は考慮していない。

本データ同化システムで用いたEnKF手法は、Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF; Miyoshi and Yamane, 2007)<sup>3)</sup>である。LETKF手法を用いた本データ同化システムの最適化を行うために、いくつかの予備実験を行なった。

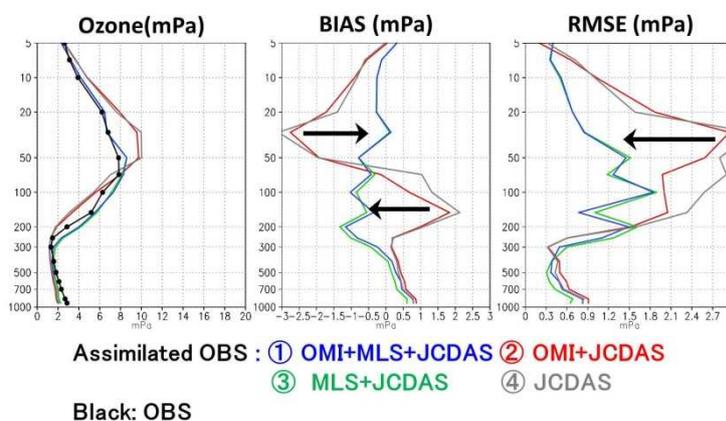
- ・アンサンブル数：32
- ・同化解析サイクル：6時間

- ・背景誤差共分散の局所化距離：水平方向650 km、鉛直方向 対数気圧で0.4
- ・背景誤差共分散の膨張：Adaptive(最大20%)

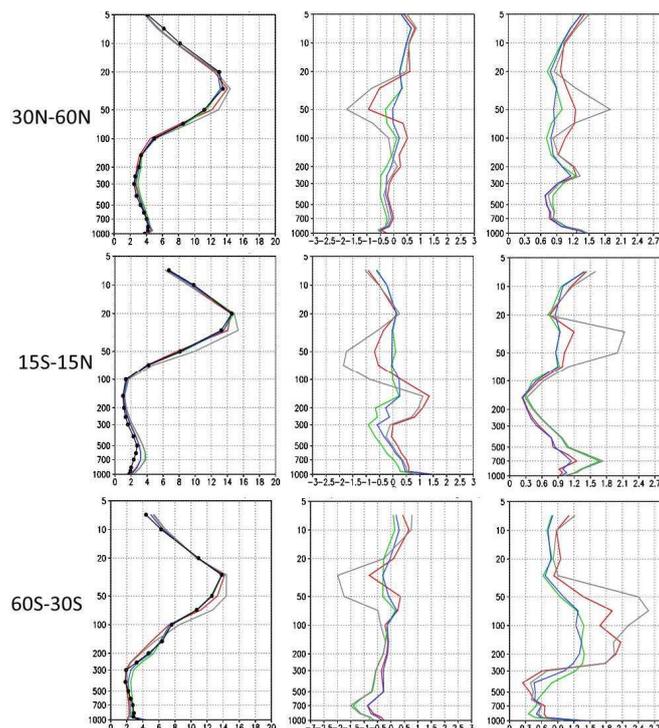
予備実験の結果をもとに上記のように設定した本データ同化システムをもちいて、以下に示す4つの観測システム実験 (Observational System Experiment: OSE) 実験を2006年6~10月の期間について行った。ただし最初の1ヵ月間はスピンアップ期間とし精度検証に用いていない。

- ① 気象場およびOMI、MLS観測データすべてを同化
- ② 気象場およびOMI観測データのみ同化
- ③ 気象場およびMLS観測データのみ同化
- ④ 気象場の観測データのみ同化

上記4つの実験で得られたオゾン解析場をオゾンゾンデ観測値で検証した結果を図(3)-19、図(3)-20に示す。



図(3)-19オゾン解析値のオゾンゾンデ観測データによる精度検証。南半球高緯度域(90S-60S)の2006年8~9月平均値。(左)オゾン濃度(単位:mPa)、(中央)バイアス、(右)二乗平均平方根誤差(右)の鉛直プロファイル。黒：観測値、青：実験①、赤：実験②、緑：実験③、灰：実験④



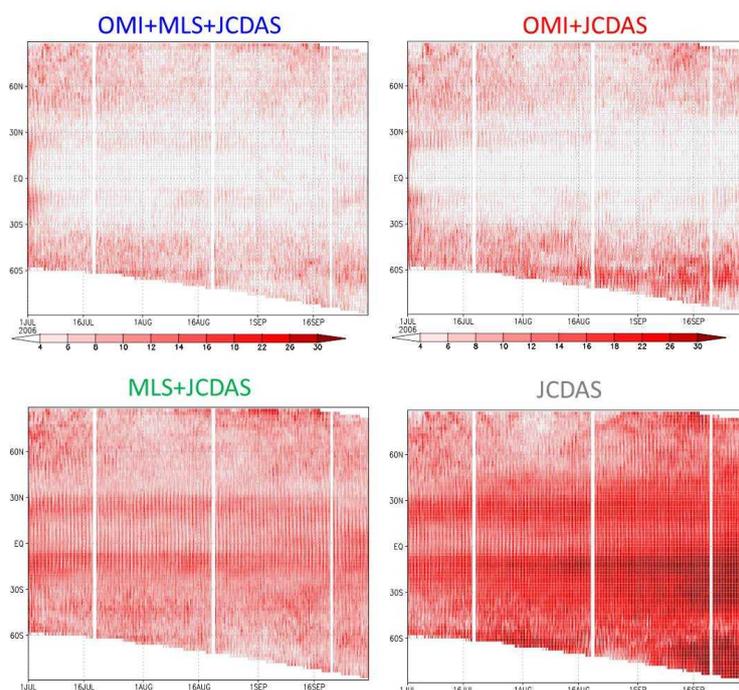
図(3)-20 オゾンゾンデ観測データによるオゾン解析値鉛直プロファイルの精度検証。(上段)北半球中緯度域(30N-60N)、(二段目)低緯度域(15S-15N)、(下段)南半球中緯度域(60S-30S)について示す。

図(3)-19が示すように、低緯度域においては、高度10hPa付近でみられたモデルのバイアスがOMIおよびMLS観測データを同化した場合に大幅に減少しているとともに、OMI観測のみを同化した場合についてもこのバイアスは有意に減少している(図(3)-20)。このことは、オゾン全量という高度情報をもたないOMI観測データを用いても、オゾン鉛直プロファイルの解析精度を向上させることが可能であることを示している。

南半球高緯度の高度200~5hPa域においては、MLS観測データを同化することによって解析値のバイアス・二乗平均平方根誤差が大幅に減少している。一方、OMI観測データを同化した場合は、バイアス・誤差ともに軽減している高度領域があるものの、その領域はかなり限定的である。これは、極夜域ではOMIによる観測が出来ないため、この領域・季節において得られるOMI観測データが少ないためであると考えられる。

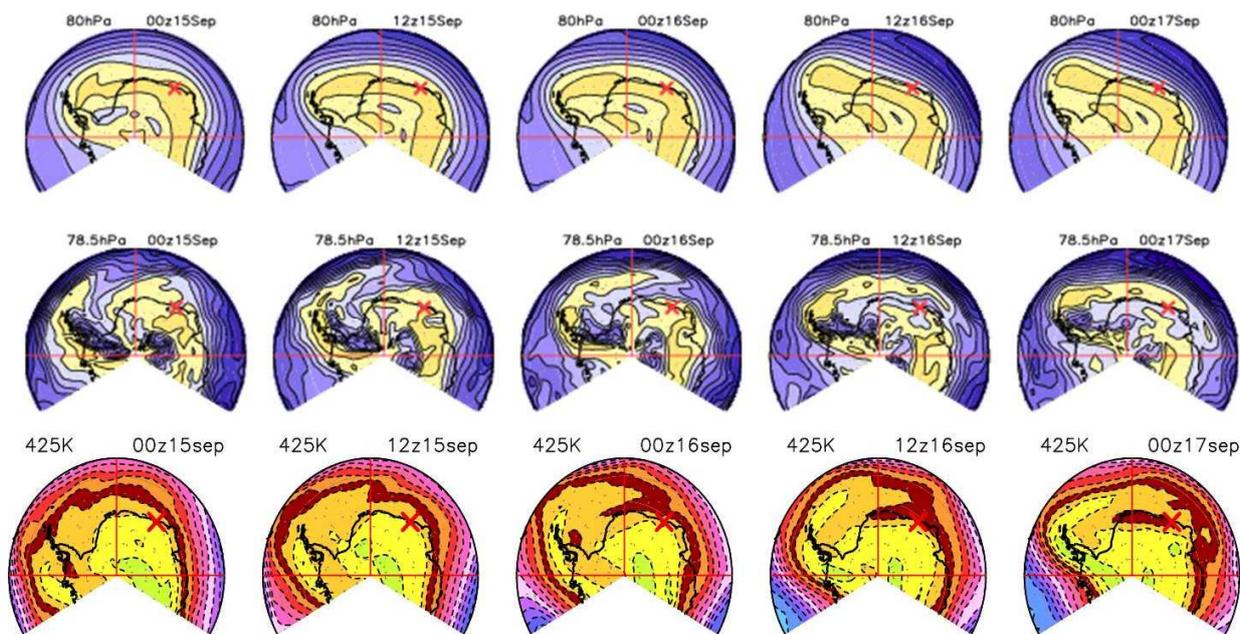
その他の緯度帯においても、オゾン鉛直プロファイルの解析精度が最も良かったのはOMIおよびMLS観測データとともに同化した実験であり、複数の衛星観測データを効果的に組み合わせることでオゾン解析場の精度が大幅に向上することが本実験により示されたといえる。ただし、OMI観測データを同化することによっても、オゾン鉛直プロファイルの解析精度はおおよそその高度領域において向上している。

図(3)-21には、4つの実験で得られた解析場の帯状平均オゾン全量をOMI観測データで検証した結果を示す。赤色陰影がオゾン全量の二乗平均平方誤差を示し、陰影が濃い領域で誤差が大きい。オゾン全量についてもOMIおよびMLS観測データを同時に同化した解析場の精度が最も良いことが分かる。

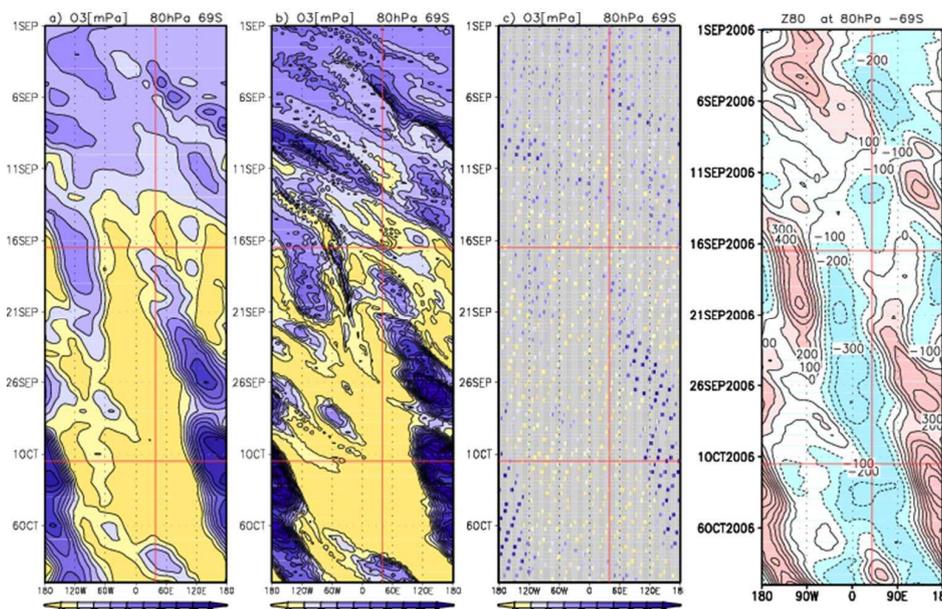


図(3)-21 オゾン全量解析値のOMI観測データによる精度検証。オゾン全量の二乗平均平方誤差(単位: DU)帯状平均緯度-時間断面。期間は2006年7月1日～9月30日。二乗平均平方誤差値を赤色陰影で示す。(左上) 実験①、(右上) 実験②、(左下) 実験③、(右下) 実験④。

次に、本データ同化システムで用いたEnKF手法が解析精度の向上に有効であることを検証するために、これまで気象庁で利用されてきた同化手法(ナッジング手法)で作成された解析値と本実験で得られた解析値との比較を行った。比較はオゾンホール生成時の南半球極域の9月～10月についておこなった。図(3)-22には、それぞれの手法で解析された高度80hPaのオゾン濃度分布が渦位分布とともに示されている。また図(3)-23には、それぞれの手法によるオゾン解析値がホフメラー図としてMLS観測値および高度場の偏差とともに示されている。



図(3)-22 南半球極域における高度80hPaの(上段、中段)オゾン濃度分布および(下段)425K温位面上の渦位分布。オゾン濃度(上段、中段)および渦位(下段)をカラー陰影で示す。9月15日00UTC~17日00UTCにおける12時間ごとのスナップショットを示す。(上段)ナッジング手法によるオゾン解析値、(中段)EnKF手法によるオゾン解析値。単位はmPa。



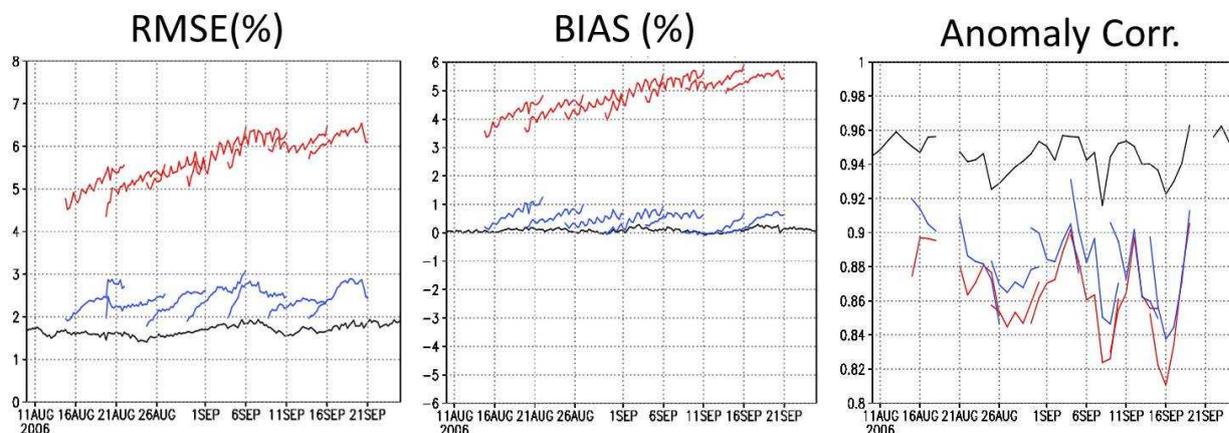
図(3)-23 (左図) ナッジング手法および(中左図) EnKF手法によって作成されたオゾン解析値、(中右図) MLSオゾン観測値(単位:mPa)の南緯69度・高度80hPaにおける経度-時間断面図。オゾン濃度をカラー陰影で示す。ただし、(中右図) MLS観測値の灰色領域は観測データの空白域。(右図) 高度場の帯状平均からの差(単位:m)。高度場の帯状平均からの差をカラー陰影で示す。

図(3)-22、図(3)-23が示すように、EnKF手法によって作成されたオゾン濃度分布はナッジング手法と比較して、より時空間的にスケールの小さい変動を再現している（それぞれの解析値の作成にあたって用いたモデルの時空間解像度は同じであることに注意されたい）。またMLS観測データのみでは、観測空白域のため小スケールのオゾン濃度変動を詳細に検出することが困難となっている（図(3)-23）。この小スケールのオゾン濃度変動は、渦位の変動（図(3)-22）および高度場の変動（図(3)-23）との対応が良く、極向きロスビー波の碎波により極渦境界域に起源をもつ空気塊が細いフィラメントを形成したために引き起こされたと考えられる。

### 3) 成層圏オゾン短期予測システムの開発とその精度検証

本データ同化システムによって作成したオゾン解析値を初期値とした成層圏オゾン短期予測システムを用いて、7日間のハインドキャスト実験を2006年8～9月の期間について行なった。なお、このハインドキャスト（過去の現象に対する予測）実験の期間中、気象場は常に気象庁JRA-25再解析データを用いて同化している。図(3)-24には、このハインドキャスト実験で得られたオゾン全量の予測精度の検証結果を示している。

実験④（気象場のみ同化）のオゾン解析値を初期値として用いた場合、北半球中緯度における予測期間内のオゾン全量バイアスが4-6%、誤差が5-6%であったのと比較して（図(3)-24：赤線）、実験①（気象場、MLSおよびOMIともに同化）によって作成されたオゾン解析場を用いた場合、バイアスが1%、最小二乗誤差が3%以内と減少し（図(3)-24：青線）、オゾン観測データ同化による初期値の改善によってオゾン全量の短期予測の精度は予測期間内において向上している。



図(3)-24 7日間のハインドキャスト実験（期間2006年8～9月）によって得られた、北半球中緯度（30N-60N）におけるオゾン全量の予測精度。（左図）最小二乗誤差（%）、（中図）バイアス（%）、（右図）アノマリー相関。予測の検証データとしてAura/OMI観測データを用いた。

黒線：実験①で作成された解析値、青線：実験①（気象場、MLSおよびOMIともに同化）のオゾン解析値を初期値とした予測実験、赤線：実験④（気象場のみを同化）した解析値を初期値とした予測実験。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

対流圏微量成分のモデルシミュレーションでは、大気中の化学／輸送過程に加えて地表面での排出／沈着過程に起因する大きな不確定が存在する。複数の衛星搭載センサにより取得された複数の化学物質の観測情報を併せて利用することで、オゾンとその前駆気体の大気中濃度と排出量を同時に最適化可能とするシステムを構築した。データ同化で作成した排出量分布は主に人為起源および生物燃焼と関連する重要な情報を提供し、解析された濃度の時空間変動に関する情報は大気環境の実況監視と大気プロセスの理解に役立つ。複数の衛星観測情報をデータ同化で統合し対流圏化学場を包括的に解析した研究は世界でも僅かである。先駆的な試みを実施した本研究から、全球および東アジア域における数十年に及ぶオゾンおよび関連化学種の長期再解析データ作成の足掛かりとなる重要な成果が得られた。

本データ同化システムをもちいた成層圏オゾンのデータ同化実験により、オゾン全量観測データとともに3次元オゾン濃度観測データを同化に用いた場合に最も解析精度が良くなることが明らかになり、高精度な3次元オゾン解析データの作成には複数の異なる衛星観測データを利用してデータ同化を行うことが有効であることが示された。

冬季南半球極域の事例解析によって、本データ同化システムで用いたEnKF手法はナッジング手法と比較して、より時空間的に小スケールのオゾン濃度変動を再現できることが明らかになり、EnKF手法の優位性が示された。

成層圏オゾン短期予測実験を行なうことで、オゾン観測データ同化による初期値の改善によってオゾン全量の短期予測精度が大幅に向上することが明らかになった。

### (2) 環境政策への貢献

本研究で開発された成層圏オゾンのデータ同化技術によってオゾン短期予測精度が向上したため、気象庁業務（紫外線情報提供）の高度化のため現業化される予定となっている（平成26年度）。大気汚染を引き起こす化学物質の排出量と大気中濃度の変動を、これまでの解析手法と比較してより高精度に解析することが可能となった。これらの情報は大気汚染状況の監視／警報の発令／予報、汚染物質排出の取り締まりに寄与することができる。

## 6. 国際共同研究等の状況

衛星観測データの利用に関してオランダ王立気象研究所 (KNMI) との共同研究を実施している。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

< 論文 (査読あり) >

- 1) T. T. Sekiyama, M. Deushi, and T. Miyoshi: SOLA, Vol. 7, 041-044, doi:10.2151/sola.2011-011 (2011). “Operation-Oriented Ensemble Data Assimilation of Total Column Ozone”
- 2) M. Deushi., and K. Shibata: Papers in Meteorology and Geophysics, 62, 1-46 (2011). “Development of a Meteorological Research Institute Chemistry-Climate Model version 2 for the Study of

Tropospheric and Stratospheric Chemistry”

- 3) C. Kobayashi, and K. Shibata: J. Meteor. Soc. Japan, 89, No. 4, pp.363-376 (2011). “Evaluation of Dynamical Contribution to Lower Stratospheric Ozone Trends in Northern Mid-latitudes over the Last Two Decades (1980-2006) Using a Chemical Transport Model”
- 4) K. Miyazaki, Eskes, H. J., and Sudo, K.: Atmos. Chem. Phys., 12, 2263-2288, doi : 10.5194/acp-12-2263-2012 (2012). “Global NO<sub>x</sub> emission estimates derived from an assimilation of OMI tropospheric NO<sub>2</sub> columns”,

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

## (2) 口頭発表（学会等）

- 1.) M. Deushi, and K. Shibata: Development of an MRI chemistry-climate model coupled with data assimilation system for ozone forecasts, MOCA-09 IAMAS/IAPSO/IACS Joint Assembly, J467, July 2009 in Montreal, Canada
- 2.) M. Deushi, T. T. Sekiyama, and K. Shibata: Ensemble Kalman filter assimilation of atmospheric chemical constituents data with a MRI chemistry-climate model: OSS Experiments, THE 5TH WMO International Symposium on Data Assimilation, 205, October 2009 in Melbourne, Australia.
- 3.) K. Kita, Y. Kasai, K. Sagi, S. Hayashida, Y. Kanaya, H. Irie, K. Noguchi, K. Miyazaki, M. Takigawa, Y. Kondo, M. Koike, and H. Akimoto, Transboundary air pollution in East/Southeast Asia and geostationary observation, AGU2009 fall meeting
- 4.) M. Deushi, and Y. Kuroda, Role of the stratospheric ozone on the medium-range weather forecast: A case study of northern winter 2003-2004, SPARC DynVar Workshop 2, November 2010 in Boulder, Colorado.
- 5.) K. Miyazaki, H. Eskes, Global NO<sub>x</sub> emission estimates using OMI NO<sub>2</sub> data and ensemble-based data assimilation, The EGU General Assembly 2011, Vienna, Austria, 03-08 April 2011.
- 6.) K. Miyazaki, H. Eskes, Global NO<sub>x</sub> emission estimates from OMI NO<sub>2</sub> data and ensemble Kalman filter data assimilation, MACC Conference on Monitoring and Forecasting Atmospheric Composition, Utrecht, The Netherlands, 23-27 May 2011.
- 7.) K. Miyazaki, T. Sekiyama, T. Nakamura, M. Deushi, T. Maki, C. Kobayashi, H. Akiyoshi, K. Shibata, Y. Yokoo, M. Sawada, T. Nakazawa, S. Aoki, and T. Iwasaki, Recent developments in chemical data assimilation for atmospheric gases and aerosols in Japan, The 8th Stratospheric Processes and their Role in Climate (SPARC) Data Assimilation workshop, Brussels, Belgium, June 20-22, 2011.
- 8.) K. Shibata, M. Deushi, and C. Kobayshi, Evaluation of the separate effects of stratospheric ozone assimilation and total ozone assimilation, and their impacts on the predictability of stratospheric and

tropospheric ozone, SPARC Workshop on Data Assimilation, June 2011 in Brussels, Belgium.

- 9.) T. Nakamura, M. Deushi, K. Miyazaki, C. Kobayashi, H. Akiyoshi, K. Shibata, and T. Iwasaki: An Inter-comparison of Observation System Experiments for Stratospheric Ozone between LETKF Data Assimilation Systems with CCSR/NIES CCM, MRI CCM, and CHASER CTM, IUGG General Assembly 2011, JM02-#4800, July 2011 in Melbourne, Australia.
- 10.) K. Miyazaki, H. Eskes, Global NO<sub>x</sub> emission estimates from OMI NO<sub>2</sub> data and ensemble Kalman filter data assimilation, AIR QUALITY AND CLIMATE CHANGE: Interactions and Feedback, Urbino, Italy, 13-16 September 2011.
- 11.) 中村哲、秋吉英治、出牛真、宮崎和幸、小林ちあき、柴田清孝、岩崎俊樹: CCSRNIES 化学気候モデル・気象研化学気候モデル・CHASER を用いた局所アンサンブル変換カルマンフィルター(LETKF)による成層圏オゾンデータ同化実験の相互比較, 第17回大気化学討論会, P33, 京都, October 2011.
- 12.) K. Miyazaki, H. Eskes, Surface and lightning NO<sub>x</sub> emission estimates from data assimilation of OMI and TES satellite data, AGU Fall Meeting 2011, San Francisco, 5 December 2011.
- 13.) K. Miyazaki, Simultaneous assimilation of satellite NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO, and HNO<sub>3</sub> data for the integrated analysis of tropospheric compositions, Eindhoven University of Technology, 23 February 2012.

### (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

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) Manney, G. L., Santee, M. L., Rex, M., Livesey, N. J., Pitts, M. C., Veefkind, P., Nash, E. R., Wohltmann, I., Lehmann, R., Froidevaux, L., Poole, L. R., Schoeberl, M. R., Haffner, D. P., Davies, J., Dorokhov, V., Gernandt, H., Johnson, B., Kivi, R., Kyro, E., Larsen, N., Levelt, P. F., Makshtas, A., McElroy, C. T., Nakajima, H., Parrondo, M. C., Tarasick, D. W., von der Gathen, P., Walker, K. A., and Zinoviev, N. S.: Nature, doi:10.1038/nature10556 (2011) “Unprecedented Arctic ozone loss in 2011”
- 2) Sudo, K., M. Takahashi, J. Kurokawa, and H. Akimoto, CHASER: *J. Geophys. Res.*, 107, 10.1029/2001JD001113 (2002) “A global chemical model of the troposphere 1. Model description”

- 3) Miyoshi, T. and S. Yamane: *Mon. Wea. Rev.*, 135, 3841-3861. doi:10.1175/2007MWR1873.1 (2007).  
“Local ensemble transform Kalman filtering with an AGCM at a T159/L48 resolution”.

#### (4) データ同化情報を活用したモデルの改良

(独) 国立環境研究所

地球環境研究センター 気候モデリング・解析研究室 秋吉 英治  
中村 哲

<研究協力者>

(独) 海洋研究開発機構 地球環境変動領域 宮崎 和幸  
東北大学大学院理学研究科 岩崎 俊樹

平成21～23年度累計予算額：18,323千円

(うち、平成23年度予算額：7,146千円)

予算額は、間接経費を含む。

**[要旨]** 気象予報モデルへのオゾン濃度の同化は、気象予報の精度を向上させることが期待されている。本サブテーマでは、オゾン濃度の同化を、アンサンブルカルマンフィルターと国内の4つの化学気候モデル/化学輸送モデルを用いて行い、モデルのもつバイアスと同化性能との関係を調べた。その結果、以下のことがわかった。(1) モデルの成層圏のオゾンバイアスは、オゾンの同化性能のみならず気温の同化性能にも悪影響を及ぼす。(2) オゾン全量の同化に関して、モデルのオゾンの鉛直分布に正・負両方のバイアスが混在している場合は、オゾン全量観測データのみでオゾン濃度の鉛直分布の良好な同化結果を得ることは難しい。(3) 現状のバイアスのある化学気候モデルでも、グローバルな成層圏オゾン濃度データとグローバルなオゾン全量データの両方を同化データとして用いることによって、オゾン濃度および全量の両方について良好な同化結果を得ることができた。以上の結果はアンサンブルカルマンフィルターによる同化のパラメータ(アンサンブル数、局所化スケール、同化時間間隔、共分散等)や観測データの誤差の大きさなどにある程度依存することに注意する必要がある。また、少しでもバイアスの少ないモデルの開発を進めていくことも同化精度を向上させるためには必要である。このようなオゾン同化によって、現状の化学気候モデルを使って気温や風速などの気象要素の同化の精度の向上が期待できる。

**[キーワード]** オゾン層、データ同化、化学気候モデル、アンサンブルカルマンフィルター、バイアス

#### 1. はじめに

オゾンは成層圏大気の熱源であり、成層圏大気のグローバル循環に重要な役割を果たしている。また、成層圏は対流圏の上に位置するが、熱帯積雲対流、ジェット気流などを通して対流圏の気象と相互作用をしている。さらに、成層圏オゾン量は地表の紫外線量に影響を及ぼす。このようなことから、オゾンを含んだデータ同化を行うことは、成層圏のみならず地表や対流圏の気象デ

ータの同化の精度を上げると考えられる。そしてオゾンなど複雑な化学反応が関与する化学種を含んだデータ同化は、4次元変分法よりもアンサンブルカルマンフィルターの方が、精度を落とさずにより簡単な手順で行うことができると言われている。本研究では、アンサンブルカルマンフィルターを化学気候モデルに適用し、オゾン濃度と気象要素の同化を行った。そして、モデルのバイアスがオゾン同化に及ぼす影響について解析を行った。

## 2. 研究開発目的

国立環境研究所の化学気候モデル（CCSR/NIES化学気候モデル）にアンサンブルカルマンフィルターを適用し同化計算を行い、気温、風速、オゾン濃度など、モデルの観測データとのずれ（バイアス）が、アンサンブルカルマンフィルターを用いた同化結果に及ぼす影響について調べる。さらに、国内に存在する他の3つの化学気候モデル／化学輸送モデルについても同様な解析を行い、モデルのバイアスが同化に及ぼす影響についてまとめ、結果に基づきモデルの改良を進め、オゾンを含めた高精度の再解析データの作成に資する。

## 3. 研究開発方法

アンサンブルカルマンフィルターを環境研の化学気候モデルに適用して、東西風速、南北風速、気温、オゾン濃度の同化を行う。研究開発の手順は以下のとおり。

(1)CCSR/NIESモデルに対してこれらの変数のモデルのアウトプットをそのまま入力データとして使う完全実験（したがって、同化入力データに対しモデルのバイアスはないと見なされる）を行ってアンサンブルカルマンフィルターによる同化がうまく働いているかどうかの確認を行う。

(2)実際の観測データを使った同化実験を行い、モデルの風速、気温、オゾン濃度のバイアスが同化結果に及ぼす影響を調べる。

(3) 同じ同化パラメタを用いた同様な実験を、CCSR/NIES気候モデル（MIROC3.2モデル）、気象研化学気候モデル、およびJAMSTEC化学輸送モデル（CHASER）を使って共通の期間について行う。これらの異なるバイアスをもつ複数のモデルによる同化の結果を解析し、それぞれのモデルのもつバイアスが同化にどのような影響を与えるかについて解析を行う。また、これらの現有モデルのバイアスおよび同化に使用するデータの種類と同化性能との関係を明らかにする。

## 4. 結果及び考察

### （1）環境研の化学気候モデルとオゾンのデータ同化

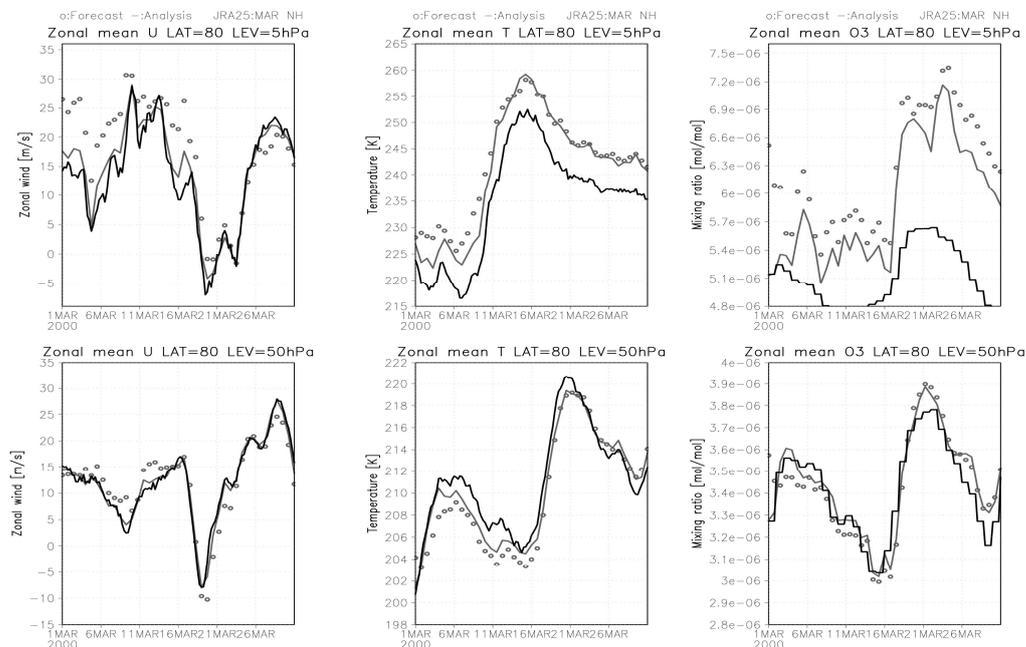
（独）国立環境研究所では化学気候モデルの開発を行った。このモデルは東京大学気候システムセンター／国立環境研究所 化学気候モデル（CCSR/NIES CCM）として、国連環境計画／世界気象機関（UNEP/WMO）傘下の国際プロジェクト・化学気候モデル検証(CCMVal)に参加し、オゾン層の将来予測実験を行って、世界気象機関(WMO)オゾンアセスメント2006<sup>1)</sup>、2010<sup>2)</sup>に貢献してきた。また同時に、このモデルのもつバイアスについても明らかとなった。本研究では、このCCSR/NIES化学気候モデルにアンサンブルカルマンフィルターを適用し、気象場（水平風速、気温）とオゾン濃度の同化を行った。

まず、アンサンブルカルマンフィルターを使った完全実験を行った。完全実験とは、モデルのアウトプットを観測値（同化のインプットデータ）として同化を行うもので、いわば動作テスト

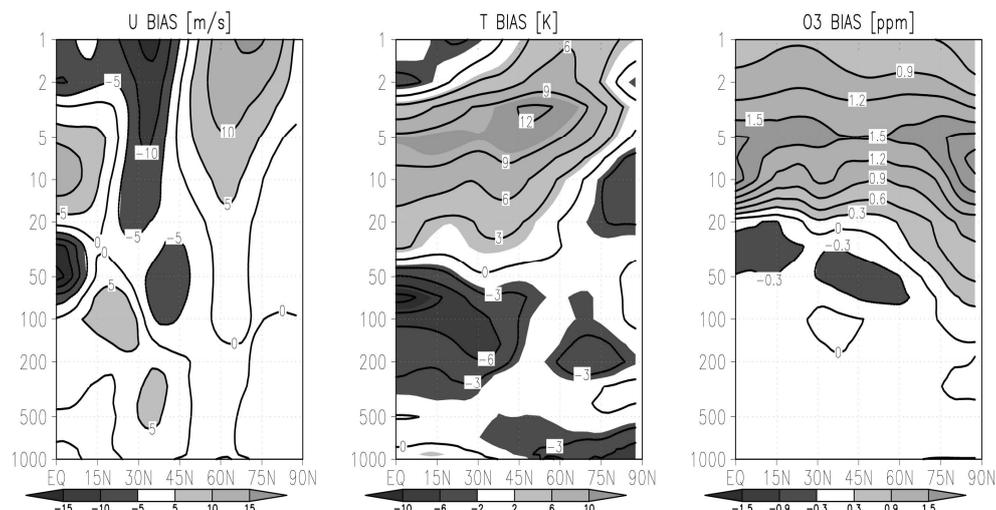
の類である。従って、完全実験では、使用したモデルのバイアス（観測値からのずれ）はないと仮定する。これによって、アンサンブルカルマンフィルタによる同化がうまく働いているかどうかを確認した。理想的には、モデルのアウトプットは入力データに完全に一致すべきであるが、結果は、変動の激しい部分に少しずれが生じていた。これは、計算時間の節約およびコストパフォーマンスのため、この同化の時間分解能をある程度の長さにとらざるを得ない（本研究では6時間に設定）ことが関係している。同化の時間分解能をさらに短くとれば解消すると思われる。

## （２）モデルの誤差がデータ同化に与える影響

次に、実観測データをアンサンブルカルマンフィルタによって同化した実験を行った。図(4)-1に、2000年3月について、気象庁JRA25再解析データの東西風速、南北風速、気温、オゾン濃度を入力データとし、CCSR/NIES化学気候モデルを用いてアンサンブルカルマンフィルタによる同化を行った結果の、東西風、気温、オゾン濃度時間変化を示す。この場合、モデルのこれらの変数と観測値との間には食い違いがある（モデルは観測値を完全に再現できるものではないため）。それによって、同化結果（グレーの実線）は、観測値からの一定のずれを生じる。下部成層圏の50hPaでは、同化結果は観測値に近い値と変動を示しているが、上部成層圏の5hPaでは、変動は近いが値にずれを生じている。特にオゾン濃度と気温のずれが目立つ。オゾンに関しては変動についてもかなりずれている。これは、モデルのもつバイアスに関係している。このことを確認するため、図(4)-2に、東西風速、気温、オゾン濃度の化学気候モデルの2000年3月の平均値とJRA25再解析データの同年同月の平均値との差の緯度－高度分布を示す。図(4)-1と図(4)-2に用いた80N付近を見ると、気温とオゾン濃度に関して、50hPaに比べて5hPaのバイアスが大きいことがわかる。

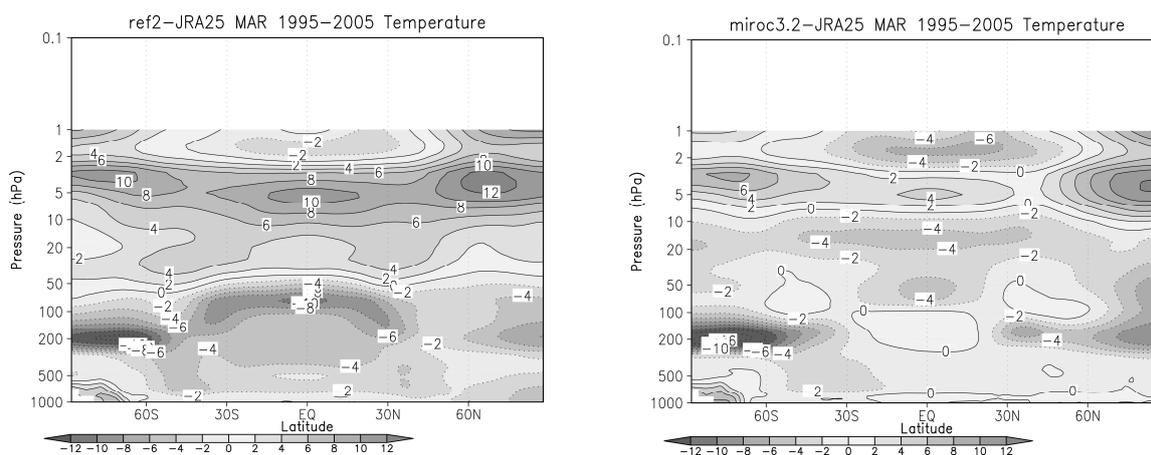


図(4)-1 CCSR/NIES 化学気候モデルとアンサンブルカルマンフィルタを用いた同化結果（3月、緯度80N）。気象庁JRA25再解析データの東西風速、南北風速、気温、オゾン濃度を同化した結果。黒実線が入力データ、グレーの実線がアンサンブル平均の同化結果、○印がモデルの予報値を表す。（上）5hPaの高度、（下）10hPaの高度、左から右へ東西風速、気温、オゾン混合比の時間変化。



図(4)-2 2000年3月平均の東西風速(左)、気温(中)、オゾン濃度(右)の、(化学気候モデル) — (観測) の緯度高度分布。

以上により、CCSR/NIES化学気候モデルの成層圏におけるバイアスが同化性能に悪影響を与えていることがわかったので、このモデルに内在する気温バイアスを除去すべく、IPCC-AR4<sup>3)</sup>に使われた大気大循環モデルMIROC3.2をベースとして新しい化学気候モデルの開発を行なった。図(4)-3に、CCSR/NIES化学気候モデルの3月平均の気温の観測値(JRA25)からの差と、MIROC3.2化学気候モデルと観測値との差を示す。MIROC3.2化学気候モデルではより高い放射スペクトル分解能と新しい吸収帯データベースを使用した放射スキームを搭載しており、これによって熱帯圏界面付近の低温バイアスが著しく除去されている。また、上部成層圏のオゾン濃度の正バイアスもかなり解消された(図略)。次節で述べるシステム間比較においては、MIROC3.2化学気候モデルも使用することとする。



図(4)-3 CCSR/NIES 化学気候モデル(左)と MIROC3.2 化学気候モデル(右)の2000年3月平均の気温バイアス。JRA25 データからの差を緯度高度断面で表す。

### (3) システム間比較

前節では、CCSR/NIES化学気候モデルを用いた同化実験の結果を示した。本節では、CCSR/NIES化学気候モデル、MIROC3.2化学気候モデル (IPCC-AR4<sup>3)</sup>) に使われたMIROC3.2モデルに、CCSR/NIES化学気候モデルの化学計算モジュールを搭載して新しく開発された化学気候モデル)、気象研化学気候モデル、CHASER (対流圏化学輸送モデル) の4つのモデルを使った、共通のアンサンブルカルマンフィルタの同化パラメータを用いた同化実験によるモデルバイアスと同化性能との関係について述べる。それぞれのモデルのもつバイアスによって同化性能がどう異なってくるのか、また、4つのモデルに共通の影響は何か、を調べることが目的である。

#### 1) 使用したモデル

##### i CCSR/NIES化学気候モデル

CCSR/NIES AGCM5.4g大循環モデルをベースにした化学気候モデル。解像度はT42L34 (水平解像度2.8度、鉛直解像度1-3km、上端高度約75km)。放射スペクトルの分割数は18。

##### ii MIROC3.2化学気候モデル

CCSR/NIES/JAMSTEC共同開発のMIROC3.2大循環モデルをベースにした化学気候モデル。解像度はT42L34 (水平解像度2.8度、鉛直解像度1-3km、上端高度約75km)。放射スペクトルの分割数は32。

##### iii 気象研化学気候モデル

MRI大循環モデルをベースにした化学気候モデル。解像度はT42L68 (水平解像度2.8度、鉛直解像度500m-2km、上端高度約75km)。

##### iv CHASER

MIROC3.2大循環モデルをベースにした対流圏化学輸送モデル。解像度はT42L34 (水平解像度2.8度、鉛直解像度 数100m~2km、上端高度約40km)。

#### 2) 同化実験のパラメータ

##### i アンサンブル数 : 32

##### ii 局所化スケール : 水平650km、鉛直0.4(logP座標)

##### iii 同化時間ステップ : 6時間

##### iv 共分散 : 気象変数 (気温、東西風速、南北風速) 間では考慮するが、これらの気象変数とオゾン濃度またはオゾン全量との間では考慮しない。オゾンとオゾン全量間では考慮する。

##### v 共分散膨張 : 100%-200% (adaptive)

#### 3) 同化に使用したデータ

##### i 気象データ (気温、東西風速、南北風速) : JCDASデータ (経度、高度、気圧面 (高度))

- ・時間分解能 : 6時間毎のデータ

- ・解像度 : 化学気候モデルの分解能を考慮して、赤道で東西5度・南北5度の間隔に対応するように全球でデータを間引いた。鉛直方向は1000-0.4hPaの高度範囲で23層。

- ・観測誤差の設定 : 複数再解析データ (JRA25, ERA40, Era-interim, N・RA1, NRA2)間のアンサンブル標準偏差を観測誤差とした。

##### ii オゾン濃度の3次元データ (経度、緯度、気圧面 (高度)) : MLSデータ

- ・バージョン：L2データ version2.2 (高度範囲、215-0.02hPa)
- ・解像度：水平160-300km、鉛直3km
- ・データのスクリーニング：Massart et al.(2009)による方法を使用した。
- ・観測誤差：5-100% (L2precision/L2valueが1.0を超えるデータ、つまり誤差が100%を超えたデータは除去した。)

iii オゾン全量データ（経度、緯度）：OMI-TOMS

- ・バージョン：OMTO3G ver.3
- ・解像度およびデータのスクリーニング：経度緯度が0.25度×0.25度のデータを2度×2度に平均して使用。平均にはエラーフラグが一つも無い格子データのみを使った。2.0度格子に平均後、JCDASと同様、赤道で東西5度・南北5度の間隔に対応するように全球でデータを間引いた。時間分解能は6時間。
- ・観測誤差：0.1-2.0% (random error 2.0% [OMI Data User's Guide] を平均化時のピクセル数で標準化)

4) 実験設定

以下の表(4)-1 に示す4つの実験を行い、それぞれの実験による同化のバイアスと誤差(RMSE、root mean square error)を評価した。

| 実験名     | 設定概要                              |
|---------|-----------------------------------|
| O3-FREE | オゾン同化なし                           |
| MLS     | MLS (3次元オゾン濃度, 200hPa~0.1hPa) を同化 |
| OMI     | OMI-TOMS (オゾン全量) を同化              |
| FULL    | MLS と OMI-TOMS を同化                |

表(4)-1：化学気候モデルとアンサンブルカルマンフィルターを使った4つの実験。それぞれの実験のオゾンデータに関する同化の違いを示す。

5) 結果及び考察

アンサンブルカルマンフィルターによる同化のオゾン全量および鉛直プロファイルへの効果について、以下にモデル別に示す。

i CCSR/NIES 化学気候モデル (図(4)-4)

上部成層圏でのオゾン濃度バイアスが顕著なモデルである。オゾンデータを同化しない場合のオゾン全量の誤差(RMSE)は比較的大きい。MLS のオゾン濃度データ (200hPa~0.1hPa の高度) を同化すると、中・下部成層圏のオゾン濃度が修正されてオゾン全量の誤差は南北両半球の中・高緯度でかなり改善された (図(4)-4d, e の●印)。一方、OMI-TOMS オゾン全量データを同化した場合は、オゾン全量の誤差はさらに改善され、特にバイアスはどの緯度でもほぼ0となる (図(4)-4d, e の□印)。ただしこの時オゾン濃度の鉛直プロファイルの誤差が下部成層圏を除く高度で増大する傾向が見られた (図(4)-4a, b, c の□印のついた実線)。この結果は、このモデルの下部成層圏~対流圏のオゾン濃度の負のバイアスに関係している。オゾン全量の同化によって、対流圏オゾン濃度の負のバイアスのしわ寄せが成層圏オゾン濃度

の過大評価を導いていると考えられる。最後に MLS のオゾン濃度データと OMI-TOMS オゾン全量データを両方同化した場合は、オゾン全量の誤差も最小となった (図(4)-4d, e の△印)。OMI-TOMS オゾン全量データのみを同化した時のような、鉛直プロファイルの誤差の増大は見られない (図(4)-4a, b, c の△印のついた実線)。

#### ii MIROC3.2 化学気候モデル (図(4)-5)

このモデルは CCSR/NIES 化学気候モデルに比べると、上部成層圏のオゾン濃度バイアスが小さく、また、それによって気温バイアスも小さい。CCSR/NIES 化学気候モデルに存在した熱帯対流圏界面付近の気温バイアス (-6~-8K) が無くなり、従って成層圏の水蒸気量も倍増して観測値に近くなった。

このモデルを使った 44 つの実験 (表(4)-1) によってそれぞれ得られた同化の効果は、CCSR/NIES 化学気候モデルによるものとほぼ同じであった。ただし、南半球では、成層圏のオゾン濃度およびオゾン全量バイアスが CCSR/NIES 化学気候モデルよりかなり小さいため (図(4)-5a, d, e の○印)、OMI-TOMS オゾン全量データのみを同化した場合でも、オゾン濃度の鉛直分布に顕著なずれが生じることはなく (図(4)-5a の○印のついた実線)、同化はうまく働いた。

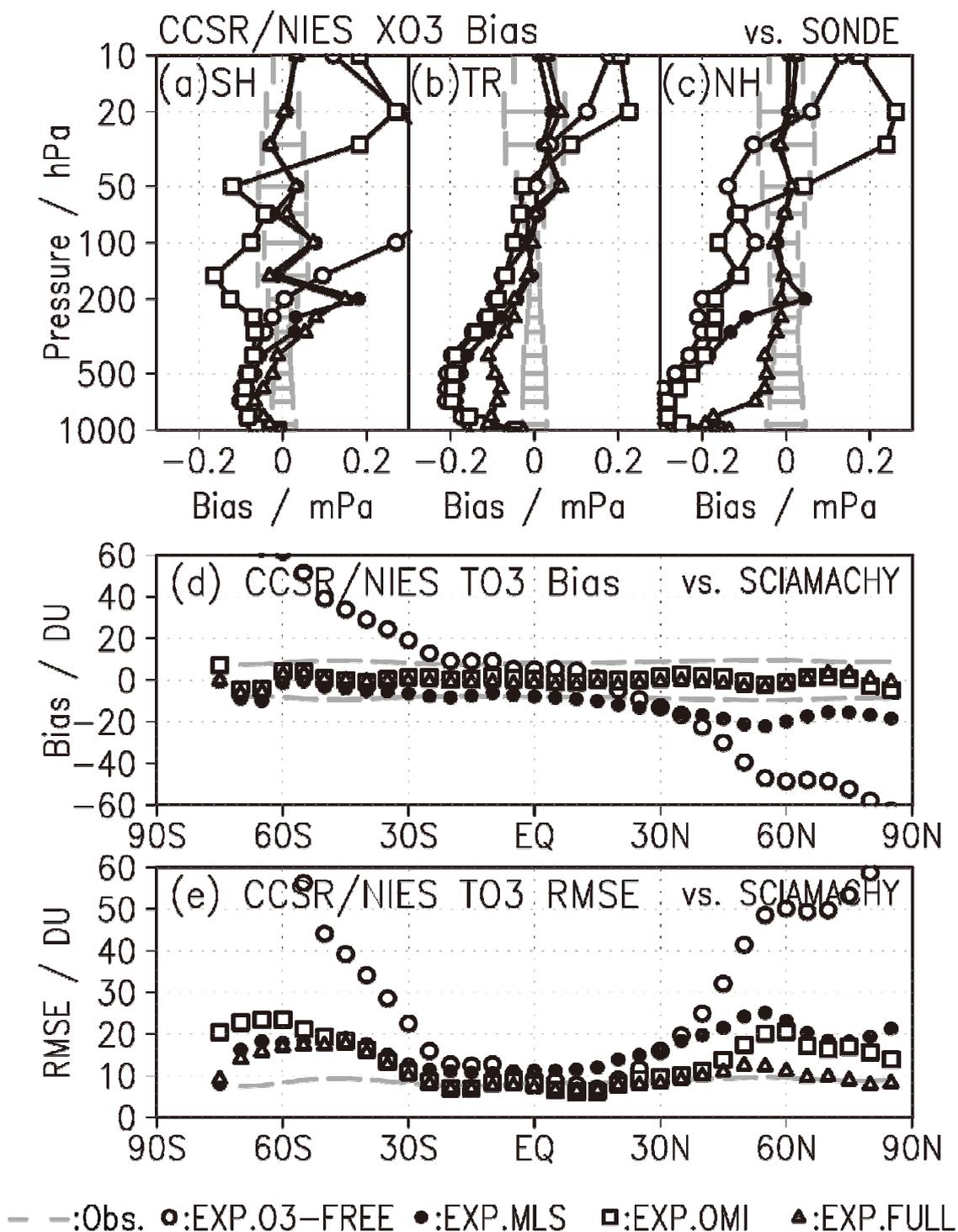
#### iii 気象研化学気候モデル (図(4)-6)

下部成層圏 (50hPa) にオゾン濃度のバイアスが見られるのが特徴。オゾンデータを同化しない場合のオゾン全量の誤差(RMS)は比較的小さい(図(4)-6a~e の○印)。MLS のオゾン濃度データの同化、OMI-TOMS オゾン全量データの同化によって、CCSR/NIES 化学気候モデルおよび MIROC3.2 化学気候モデルと同様な誤差縮小の特徴を示し、さらに両方のデータを同化した場合は、誤差が最も小さくなり、CCSR/NIES 化学気候モデル、MIROC3.2 モデルの誤差と同程度となった (図(4)-6d, e の△印)。

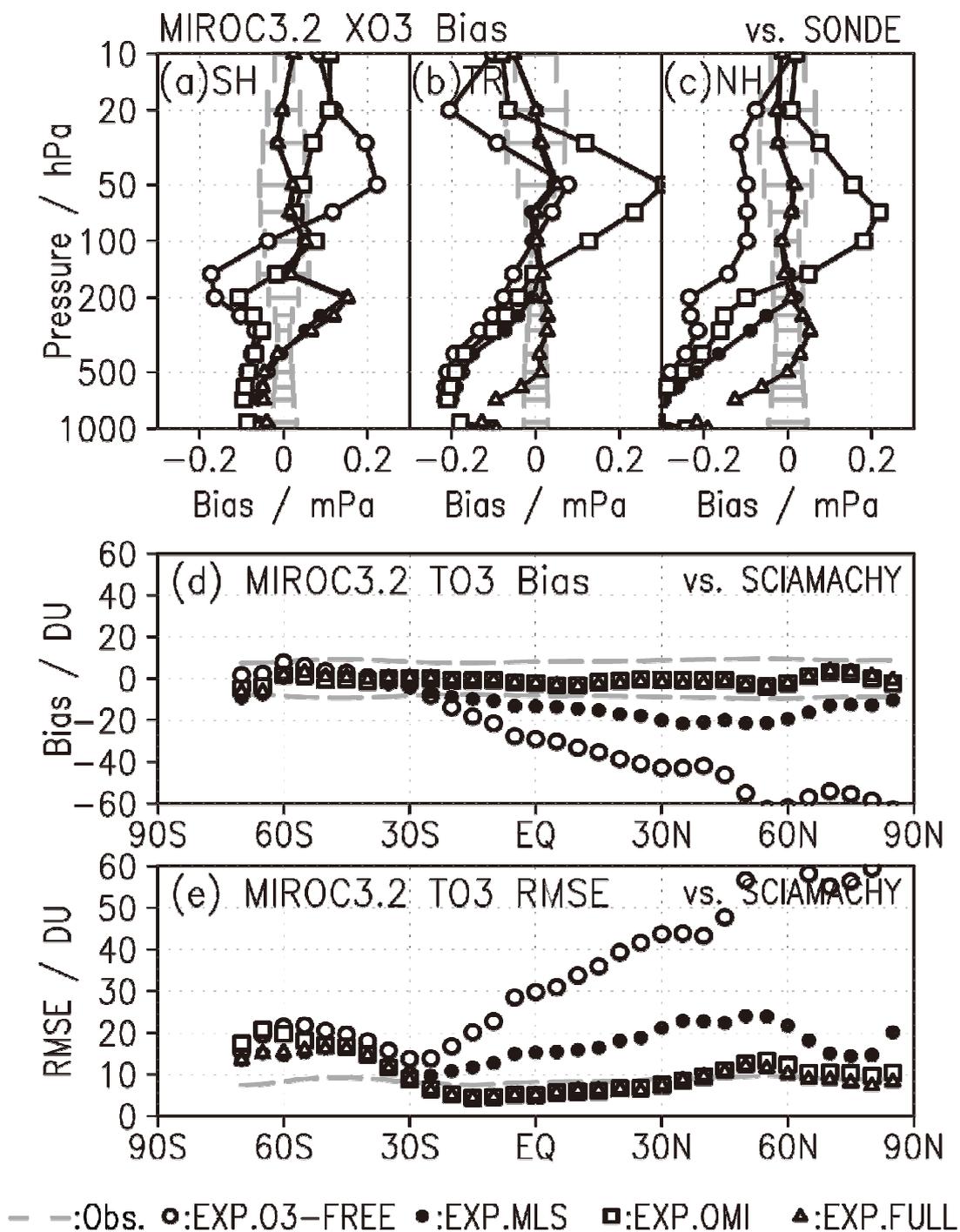
#### iv CHASER (図(4)-7)

このモデルでは、オゾン全量に大きなウェイトを占める 70hPa より上の成層圏オゾン濃度が気候値に固定されているので (対流圏化学モデル)、オゾン全量の同化実験はあまり意味がないので行わなかった。MLS オゾンデータを同化した結果、オゾン全量バイアスおよび root mean square error の改善はあまり見られなかった (図(4)-7d, e)。Root mean square error は、どの緯度においても SCIAMACHY(Scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric cartography)観測データの誤差より大きかった (図(4)-7e)。原因としては、成層圏オゾン濃度が固定されていること、MLS データの最下端は 200hPa でありそれ以下の高度での同化は行われないことが考えられる。

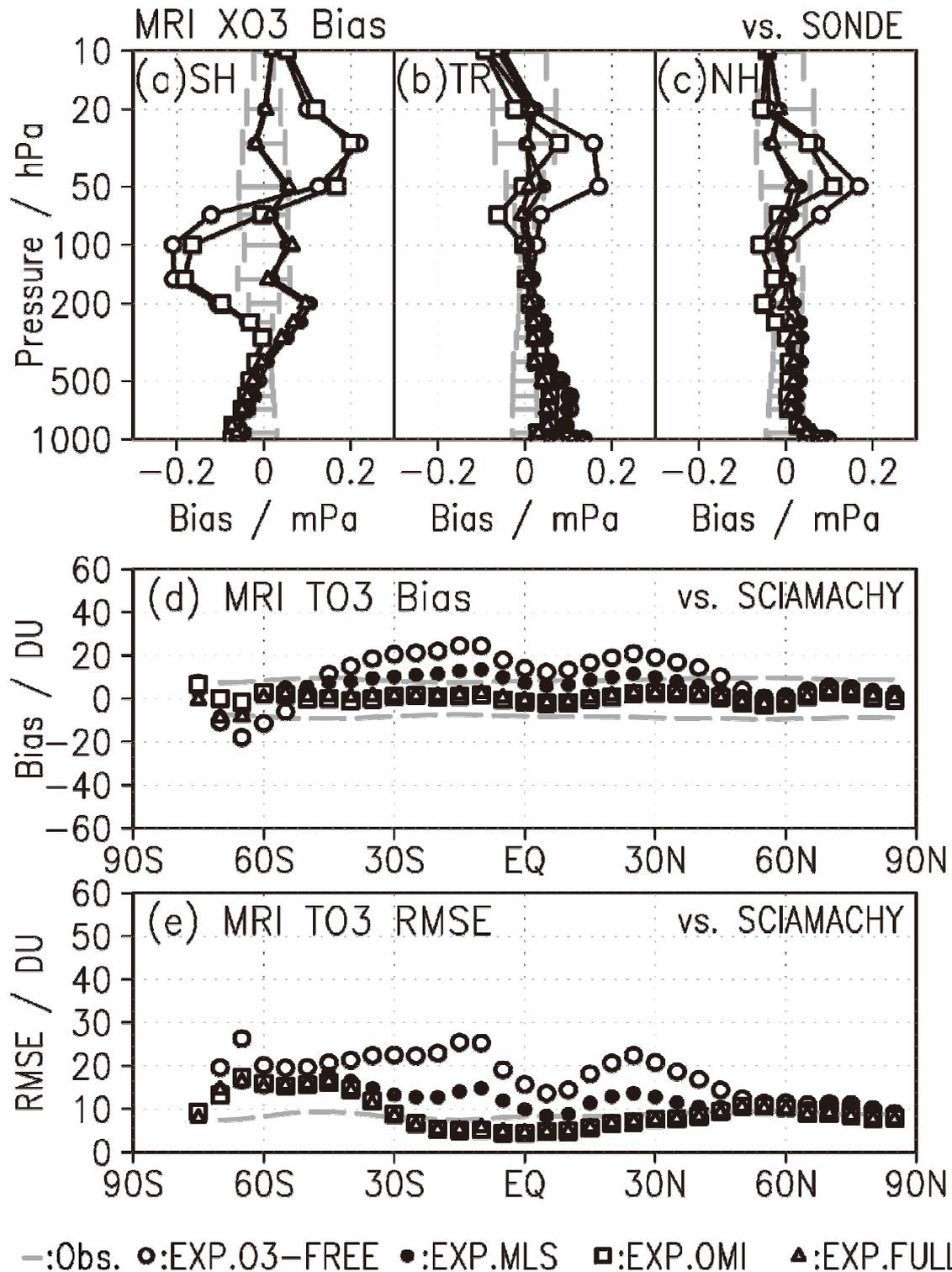
以上の結果、現状の、バイアスのある化学気候モデルを使っても、オゾン濃度分布 (全球の成層圏) とオゾン全量分布 (全球) の両方を同化することで、オゾン全量の誤差をモデル間でほぼ同程度の、観測誤差以下の小さい値にすることができた。また、特にモデルのオゾンの鉛直分布に正・負のバイアスが混在する場合は、オゾン全量の観測データだけではオゾン濃度の良好な同化結果を得ることが難しいことがわかった。



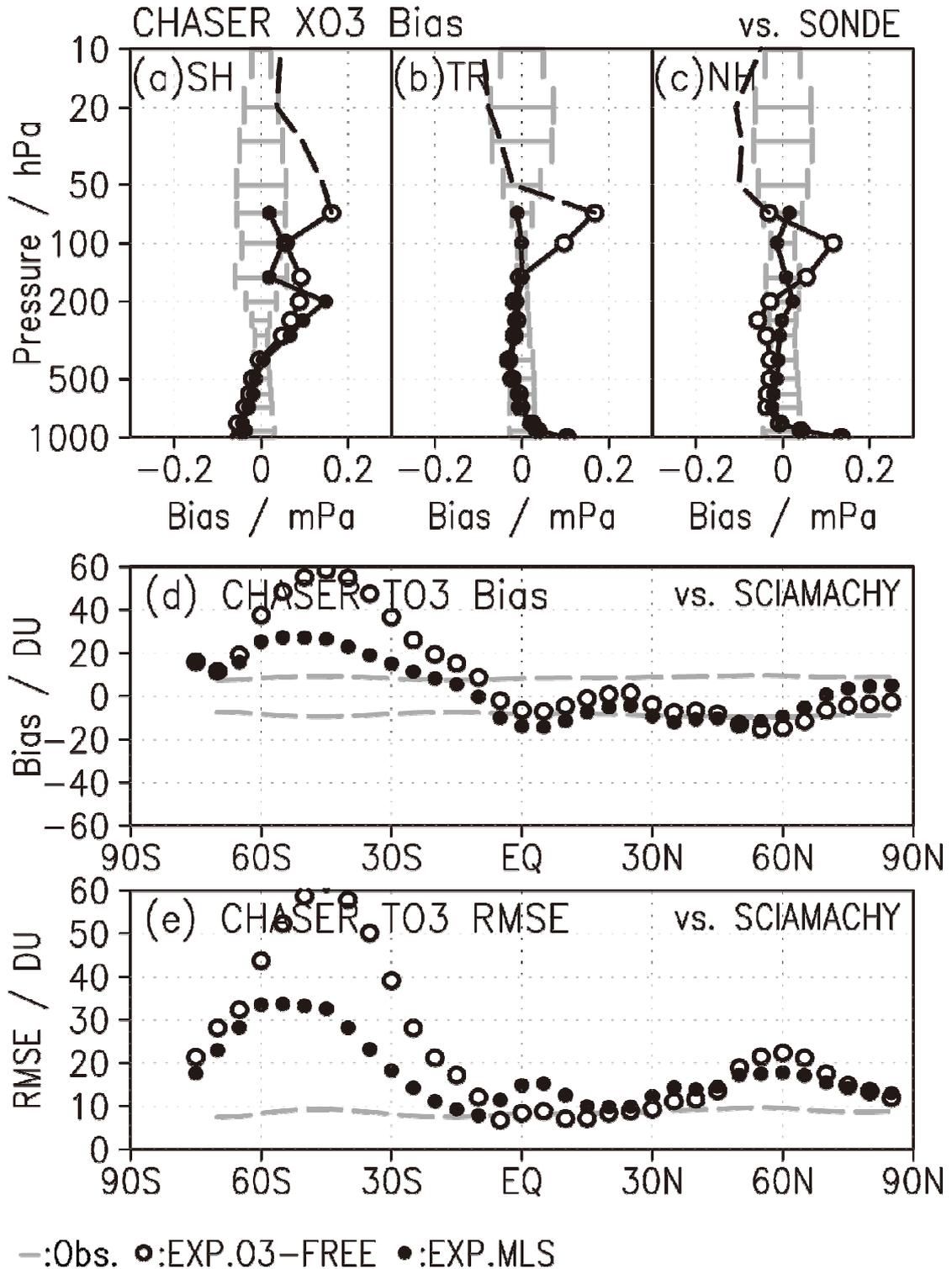
図(4)-4 CCSR/NIES 化学気候モデルを用いたオゾン同化結果。(a)30°N-90°N で平均した同化オゾン体積混合比のオゾンゾンデデータからのバイアスの鉛直分布。(b)同じく、30°S-30°N での平均。(c)同じく、90°S-30°S での平均。線の区別(実験名)を図の下部に記す。灰色のエラーバーはオゾンゾンデデータの観測誤差の鉛直分布を表す。(d)経度平均同化オゾン全量の SCIAMACHY データからのバイアスの緯度分布。灰色の破線は SCIAMACHY データの誤差を表す。(e)同じく、SCIAMACHY データからの root mean square error の緯度分布。



図(4)-5 MIROC3.2 化学気候モデルを用いたオゾンの同化結果。(a)30oN-90oN で平均した同化オゾン体積混合比のオゾンゾンデデータからのバイアスの鉛直分布。(b)同じく、30oS-30oN での平均。(c)同じく、90oS-30oS での平均。線の区別(実験名)を図の下部に記す。灰色のエラーバーはオゾンゾンデデータの観測誤差の鉛直分布を表す。(d)経度平均同化オゾン全量の SCIAMACHY データからのバイアスの緯度分布。灰色の破線は SCIAMACHY データの誤差を表す。(e)同じく、SCIAMACHY データからの root mean square error の緯度分布。



図(4)-6 気象研化学気候モデルを用いたオゾンの同化結果。(a)30°N-90°Nで平均した同化オゾン体積混合比のオゾンゾンデデータからのバイアスの鉛直分布。(b)同じく、30°S-30°Nでの平均。(c)同じく、90°S-30°Sでの平均。線の区別(実験名)を図の下部に記す。灰色のエラーバーはオゾンゾンデデータの観測誤差の鉛直分布を表す。(d)経度平均同化オゾン全量のSCIAMACHYデータからのバイアスの緯度分布。灰色の破線はSCIAMACHYデータの誤差を表す。(e)同じく、SCIAMACHYデータからのroot mean square errorの緯度分布。



図(4)-7 CHASER 化学輸送モデルを用いたオゾンの同化結果。(a)30oN-90oN で平均した同化オゾン体積混合比のオゾンゾンデデータからのバイアスの鉛直分布。(b)同じく、30oS-30oN での平均。(c)同じく、90oS-30oS での平均。線の区別(実験名)を図の下部に記す。灰色のエラーバーはオゾンゾンデデータの観測誤差の鉛直分布を表す。(d)経度平均同化オゾン全量の SCIAMACHY データからのバイアスの緯度分布。灰色の破線は SCIAMACHY データの誤差を表す。(e)同じく、SCIAMACHY データからの root mean square error の緯度分布。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

オゾン濃度の全球3次元分布衛星観測データ（成層圏）とオゾン全量の衛星観測データの両方を、アンサンブルカルマンフィルターを使って化学輸送モデルへ同化することで、それぞれの化学モデルが持っているバイアスに結果的にあまり依存しない良好なオゾン濃度の同化結果を得ることができ、これによって、現状の化学気候モデルを使って気温や風速などの気象要素の同化性能の向上が期待できる。

### (2) 環境政策への貢献

紫外線情報の精度向上に貢献できる。

## 6. 国際共同研究等の状況

SPARC（成層圏プロセスとその気候に対する役割）の活動の1つであるCCMVal (Chemical Climate Model Validation: 化学気候モデル検証プロジェクト)に参加。CCSR/NIES化学気候モデルの計算結果データを提供し、他のモデルの結果と共に、その解析などに関して共同研究を行っている。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) H. Akiyoshi, Y. Yamashita, K. Sakamoto, L. B. Zhou, and T. Imamura: *J. Geophys. Res.*, **115**, D19301(1-22), doi:10.1029/2009JD012683 (2010)  
 “Recovery of stratospheric ozone in calculations by the Center for Climate System Research/National Institute for Environmental Studies chemistry-climate model under the CCMVal-REF2 scenario and a no-climate-change run”
- 2) M. I. Hegglin, A. Gettelman, P. Hoor, R. Krichevsky, G. L. Manney, L. L. Pan, S.-W. Son, G. Stiller, S. Tilmes, K. A. Walker, V. Eyring, T. G. Shepherd, D. Waugh, H. Akiyoshi, J. A. Añel, J. Austin, A. Baumgaertner, S. Bekki, P. Braesicke, C. Brühl, N. Butchart, M. Chipperfield, M. Dameris, S. Dhomse, S. Frith, H. Garny, S. C. Hardiman, P. Jöckel, D. E. Kinnison, J. F. Lamarque, E. Mancini, M. Michou, O. Morgenstern, T. Nakamura, D. Olivie, S. Pawson, G. Pitari, D. A. Plummer, J. A. Pyle, E. Rozanov, J. F. Scinocca, K. Shibata, D. Smale, H. Teyssèdre, W. Tian, Y. Yamashita: *J. Geophys. Res.*, **115**, D00M09, doi:10.1029/2010JD013884 (2010)  
 “Multimodel assessment of the upper troposphere and lower stratosphere: Extratropics”
- 3) L. D. Oman, D. A. Plummer, D. W. Waugh, J. Austin, J. F. Scinocca, A. R. Douglass, R. J. Salawitch, T. Canty, H. Akiyoshi, S. Bekki, P. Braesicke, N. Butchart, M. P. Chipperfield, D. Cugnet, S. Dhomse, V. Eyring, S. Frith, S. C. Hardiman, D. E. Kinnison, J.-F. Lamarque, E. Mancini, M. Marchand, M. Michou, O. Morgenstern, T. Nakamura, J. E. Nielsen, D. Olivie, G. Pitari, J. Pyle, E. Rozanov, T. G. Shepherd, K. Shibata, R. S. Stolarski, H. Teyssèdre, W. Tian, Y. Yamashita, J. R. Ziemke: *J. Geophys. Res.*, **115**, D24306, doi:10.1029/2010JD014362 (2010)  
 “Multimodel assessment of the factors driving stratospheric ozone evolution over the 21st century”

- 4) N. P. Gillett, H. Akiyoshi, S. Bekki, P. Braesicke, V. Eyring, R. Garcia, A. Yu. Karpechko, C. A. McLinden, O. Morgenstern, D. A. Plummer, J. A. Pyle, E. Rozanov, J. Scinocca, and K. Shibata: *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 599-609, doi:10.5194/acp-11-599-2011 (2011)  
“Attribution of observed changes in stratospheric ozone and temperature”
- 5) Y. Yamashita, H. Akiyoshi, M. Takahashi: *J. Geophys. Res.*, **116**, D06118, doi:10.1029/2010JD015016 (2011)  
“Dynamical response in the Northern Hemisphere midlatitude and high-latitude winter to the QBO simulated by CCSR/NIES CCM”
- 6) A. F. Bais, K. Tourpali, A. Kazantzidis, H. Akiyoshi, S. Bekki, P. Braesicke, M. P. Chipperfield, M. Dameris, V. Eyring, H. Garny, D. Iachetti, P. Jöckel, A. Kubin, U. Langematz, E. Mancini, M. Michou, O. Morgenstern, T. Nakamura, P. A. Newman, G. Pitari, D. A. Plummer, E. Rozanov, T. G. Shepherd, K. Shibata, W. Tian, and Y. Yamashita: *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 7533-7545, doi:10.5194/acp-11-7533-2011, www.atmos-chem-phys.net/11/7533/2011/ (2011)  
“Projections of UV radiation in the 21st century: impact of ozone recovery and cloud effects”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

## (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 秋吉英治、山下陽介、坂本圭、Zhou Libo、今村隆史：日本地球惑星科学連合2009年大会、千葉（幕張メッセ国際会議場）、2009年5月16日-21日；日本地球惑星科学連合2009年大会予稿集CD-ROM、F207-007。  
「CCSR/NIES化学気候モデルを用いたCCMva1-REF2シナリオ実験と気候固定実験における成層圏オゾンとハロゲン濃度の回復時期」
- 2) 中村哲、秋吉英治、山下陽介：第7回「異常気象と長期変動」研究集会、京都、2009年10月30-31日  
「夏季成層圏オゾン増加が対流圏循環へ及ぼす影響」
- 3) 中村哲、秋吉英治、今村隆史：日本地球惑星科学連合2010年大会、千葉（幕張メッセ国際会議場）、2010年5月23日-28日（発表2010年5月27日）；日本地球惑星科学連合2010年大会予稿集CD-ROM、AAS003-10。  
「極成層圏力学過程へのC10ダイマーサイクルの影響と相互作用」
- 4) 中村哲、秋吉英治、宮崎和幸、岩崎俊樹：日本気象学会 2010年度秋季大会、京都、2010年10月27-29日；2010年度秋季大会講演予稿集(96)、193。  
「環境研CCM-LETKFを用いた大気-オゾン同時推定と三次元オゾンプロファイル利用のインパクト」
- 5) 中村哲、秋吉英治、宮崎和幸、岩崎俊樹：日本気象学会 2010年度秋季大会、京都、2010年10

月27-29日；2010年度秋季大会講演予稿集(96)、509.

「化学気候モデルへ適用したLETKFによるオゾン同化シミュレーション実験」

- 6) 秋吉英治, 山下陽介, 中村哲:2010年度南極昭和基地大型大気レーダー計画 (PANSY) 研究集会, 2010年12月21日、東京都立川市

「化学気候モデルのオゾンホールシミュレーション」

- 7) T. Nakamura, M. Deushi, K. Miyazaki, C. Kobayashi, H. Akiyoshi, K. Shibata, T. Iwasaki: 2011 International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly, Melbourne, 28 June -7 July 2010, PROGRAM HANDBOOK, 243 (2011)

“An Inter-comparison of Observation System Experiments for Stratospheric Ozone between LETKF Data Assimilation Systems with CCSR/NIES CCM, MRI CCM, and CHASER CTM”

- 8) 中村哲、秋吉英治、出牛真、宮崎和幸、小林ちあき、柴田清孝、岩崎俊樹：第17回大気化学討論会、2011年10月18日-20日（発表2011年10月18日）、京都大学生存圏研究所、第17回大気化学討論会講演要旨集、P33

「CCSR/NIES化学気候モデル・気象研化学気候モデル・CHASERを用いた局所アンサンブルカルマン変換フィルター(LETKF)による成層圏オゾンデータ同化実験の相互比較」

### (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

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 50, 572pp, Geneva, Switzerland, 2007.
- 2) WMO (World Meteorological Organization), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 52, 516pp, Geneva, Switzerland, 2011.
- 3) IPCC: Climate Change 2007. The Physical Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

## **Development of a Next Generation System for Monitoring the Atmospheric Environment and Estimating the Emission Inventory of Related Species**

Principal Investigator: Toshiaki IWASAKI

Institution: Graduate School of Science, Tohoku University  
Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8578, JAPAN  
Tel: +81-22-795-5779 / Fax: +81-22-795-7758  
E-mail: iwasaki@wind.gp.tohoku.ac.jp

Cooperated by: Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency  
National Institute for Environmental Studies

[Abstract]

Key Words: Data assimilation, Ensemble Kalman filter, Carbon dioxide, Aerosol, Ozone

This project aims at developing four Dimensional Data Assimilation (4DDA) systems for better analyses of the global distribution of carbon dioxides, aerosols and ozone, and the surface fluxes of related species. These assimilation systems have a common framework, in which observation data are assimilated into chemical transport models coupled with general circulation models. Ensemble Kalman Filter (EnKF) scheme is adopted as the assimilation method for very complicated numerical chemical transport models, rather than the 4-dimensional variational scheme.

The EnKF scheme was successfully introduced into the data assimilation system for carbon dioxides. The assimilation of GOSAT observation data is of great concern, because several similar satellites will be launched to improve and enhance the observations of carbon dioxides in the future. The assimilation of GOSAT data has positive impacts on the analysis of the surface flux, if biases of GOSAT data are offset correctly. The data assimilation system is expected to estimate anthropogenic emissions of carbon dioxides from satellite observations.

The project conducted a first world-wide trial on data assimilation of space-borne LIDAR aerosol observations by CALIPSO. The analyzed data of Asian dust “Kosa” distribution are very consistent with the surface observations at Japanese weather stations and ground-based LIDAR observations. This will be implemented into operational “Kosa” prediction system at Japan Meteorological Agency.

Data assimilation systems for ozone are based on chemical transport models, including very complicated photochemical reactions. This system assimilates several kinds of satellite observations of total ozone amount (OMI), ozone vertical profiles (MLS) and related species, while it produces consistent fields of global ozone distribution both in the

troposphere and the stratosphere. Combined use of different kinds of observation data greatly improves quality of data assimilation and makes it free from characteristics of chemical transport models. This system is applicable to the ultra-violet forecast and to the lower tropospheric air-quality forecast.

In the historical data assimilation, the atmospheric reanalyses are used to drive the coupled chemical transport-general circulation models and they affect the quality data assimilation of these constituents. A validation study was made on Brewer-Dobson circulations (BDC) which control the meridional transports of constituents. The detrended interannual variability of BDC is, to some degree, correlated between different reanalyses, but the trend is significantly different among them. JMA's new reanalysis, JRA-55 may be more reliable to drive the chemical transport model.

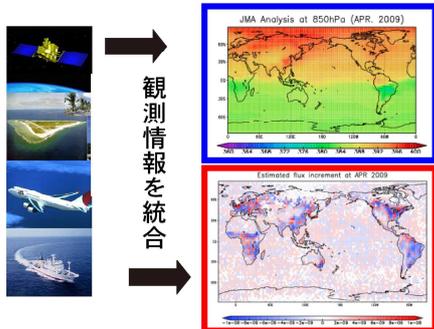
# 大気環境に関する次世代実況監視及び排出量推定システムの開発

## アンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) を利用した大気微量成分の4次元データ同化システム

### [ CO2・エアロゾル 同化システムの構築 ]

#### CO2 地表フラックス推定への応用

- ・地上／航空機／衛星観測データの同化による大気濃度／地表フラックスの推定



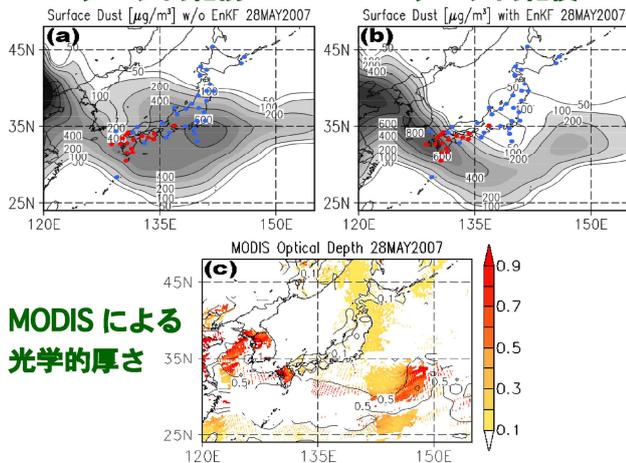
- ・季節変化の大きい陸上で大きなインパクト
- ・人間活動や海洋との交換の定量化には精密化が必要

#### 黄砂の推定への応用

- ・衛星ライダー CALIPSO の大気エアロゾル観測をデータ同化

#### データ同化前

#### データ同化後



#### MODIS による光学的厚さ

- ・黄砂分布の解析・予報精度が劇的に向上
- ・黄砂発生量の逆推定に成功

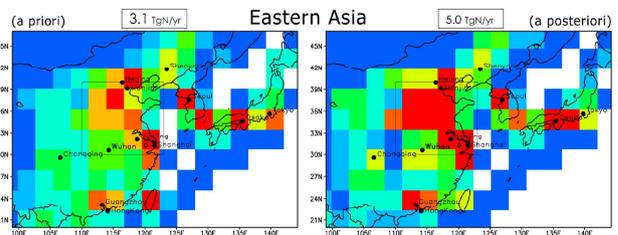
### [ 大気環境実況監視システムの構築 ]

#### 窒素酸化物排出量の推定への応用

- ・衛星観測データの同化による大気汚染物質排出量の推定をその大気環境に対する影響評価

#### データ同化前

#### データ同化後



- ・複数化学種に対するデータ同化による大幅な改善
- ・複数化学種のデータ同化による大幅な改善

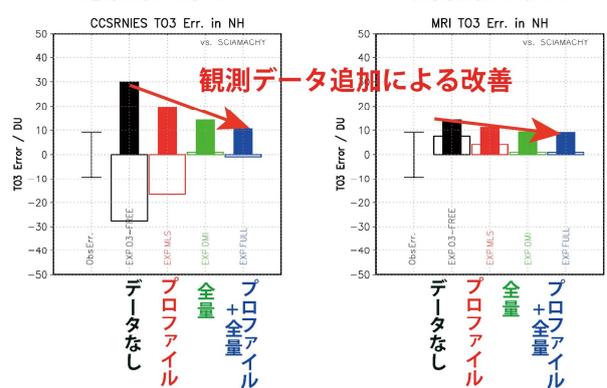
### [ 成層圏オゾンデータ同化システムの構築 ]

#### 成層圏オゾン解析と予報への応用

- ・成層圏オゾンの衛星観測データの同化
- 異なるモデルを用いたオゾン同化の比較

#### 環境研モデル

#### 気象研モデル



- ・観測データの追加による成層圏オゾン解析の改善
- ・同化結果を利用した紫外線予報の向上

### 得られた成果

リアルタイムのエアロゾル・オゾンの実況監視予測精度の向上

社会への貢献

CO2・エアロゾルの地表面フラックス推定精度の向上

政策提言への貢献

オゾン・CO2・エアロゾルの4次元歴史的データの復元

大気科学への貢献

### 今後、期待される波及効果

- ・大気微量成分の4次元データによる地球環境システムモデルの検証
- ・モデルの性能向上および大気組成変動・地球温暖化予測精度の向上