

地球表層における物質循環モデルの 開発研究

課題代表者： 宮崎 和幸^{2,1}

課題参加者： 滝川 雅之^{3,4}、関谷 高志⁴、大越智 幸司⁴、須藤 健悟^{5,1}、他

1 海洋研究開発機構 地球環境観測開発研究センター

2 NASAジェット推進研究所

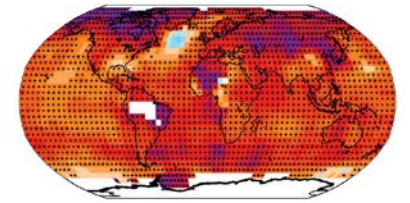
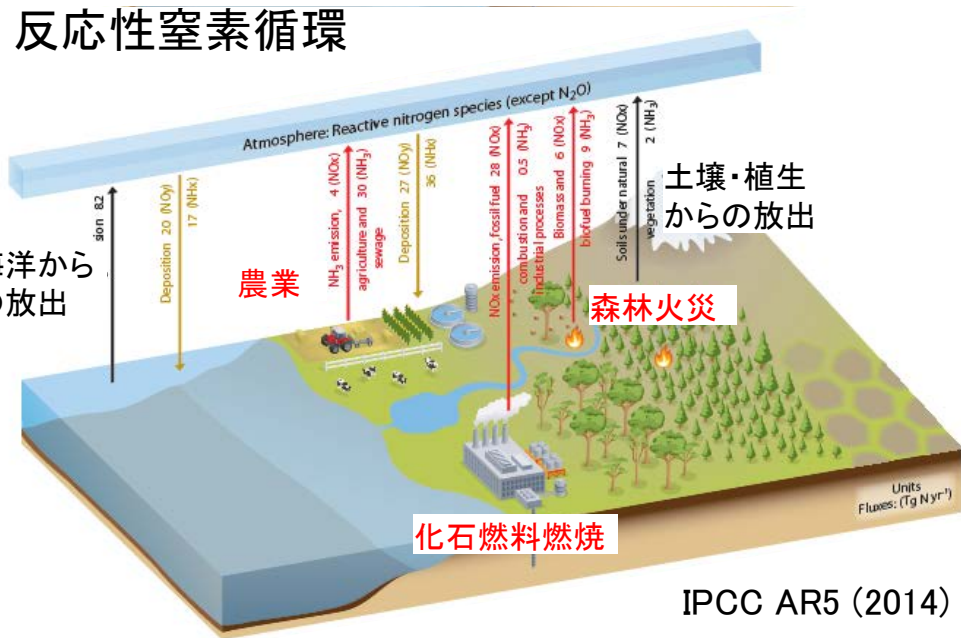
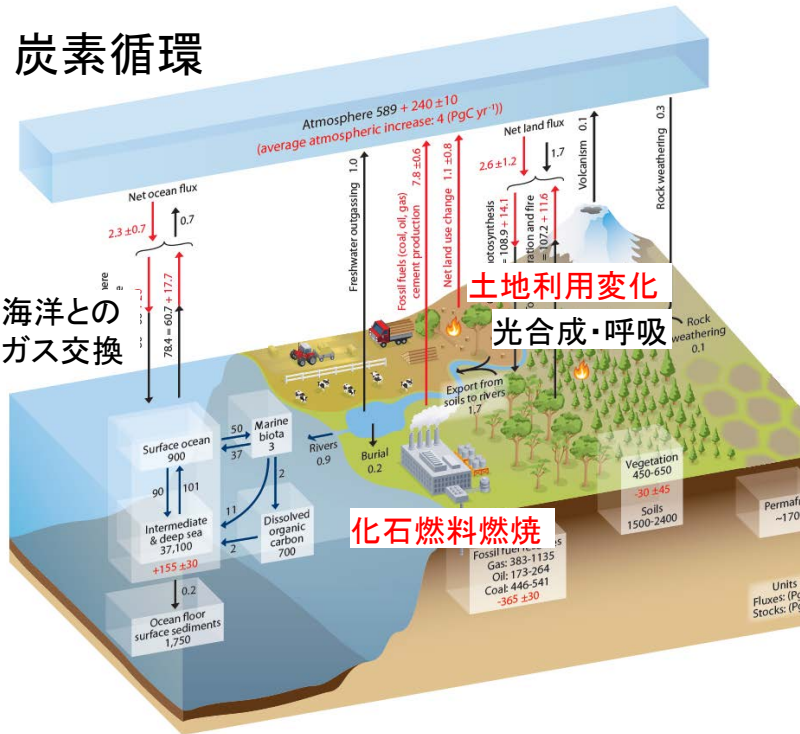
3 海洋研究開発機構 北極環境変動総合研究センター

4 海洋研究開発機構 ビッグデータ活用予測プロジェクトチーム

5 名古屋大学 大学院環境学研究科

地球表層における物質循環と人間活動

- 大気-海洋-陸域の物理・生物化学プロセスを通じて、地球表層では様々な物質が循環
- 人間活動により、地球表層の物質循環が大きく変化し、環境問題を引き起こす



気候変動



人体の健康



生態系への影響

自然プロセス

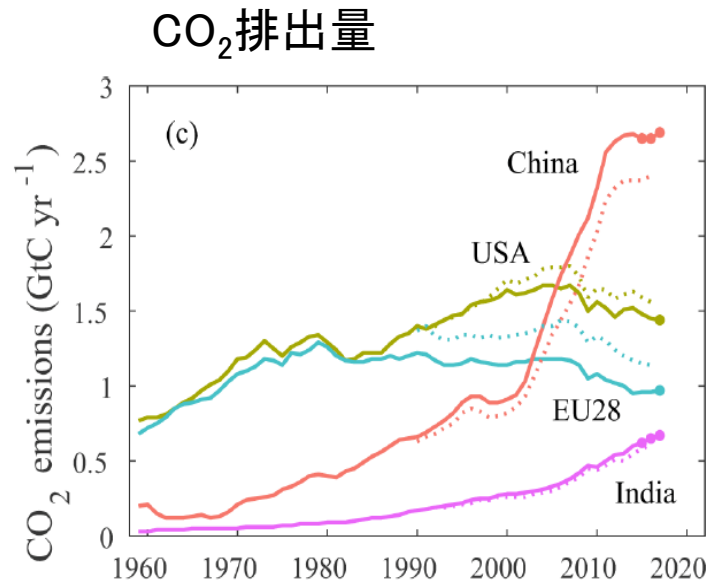


人間活動

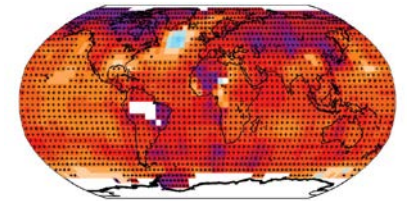
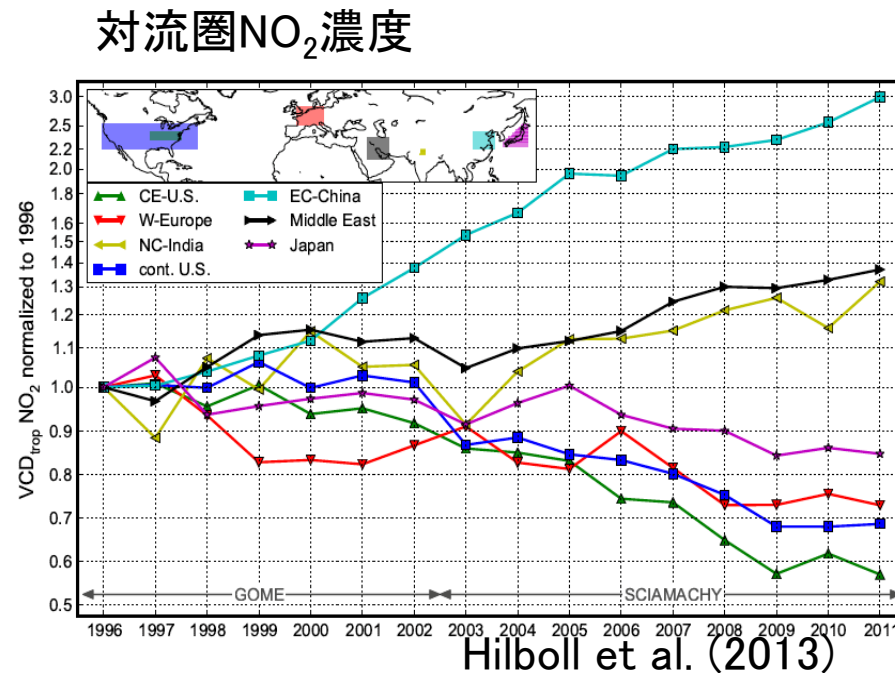


地球表層における物質循環と人間活動

- 大気-海洋-陸域の生物化学プロセスを通じて、地球表層では様々な物質が循環
- 人間活動により、地球表層の物質循環が大きく変化し、環境問題を引き起こす



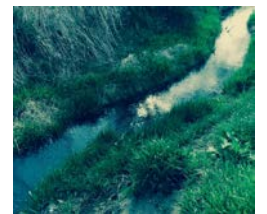
Le Quere et al. (2018)



気候変動



人体の健康



生態系への影響

自然プロセス



人間活動



地球表層の物質循環モデルの開発研究

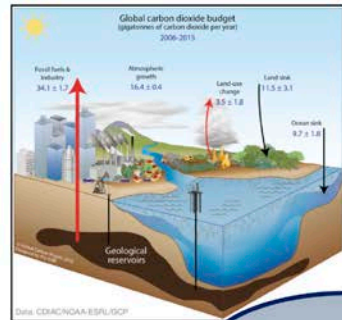
(1) エアロゾルモデル研究

1

(2) 炭素循環モデル研究

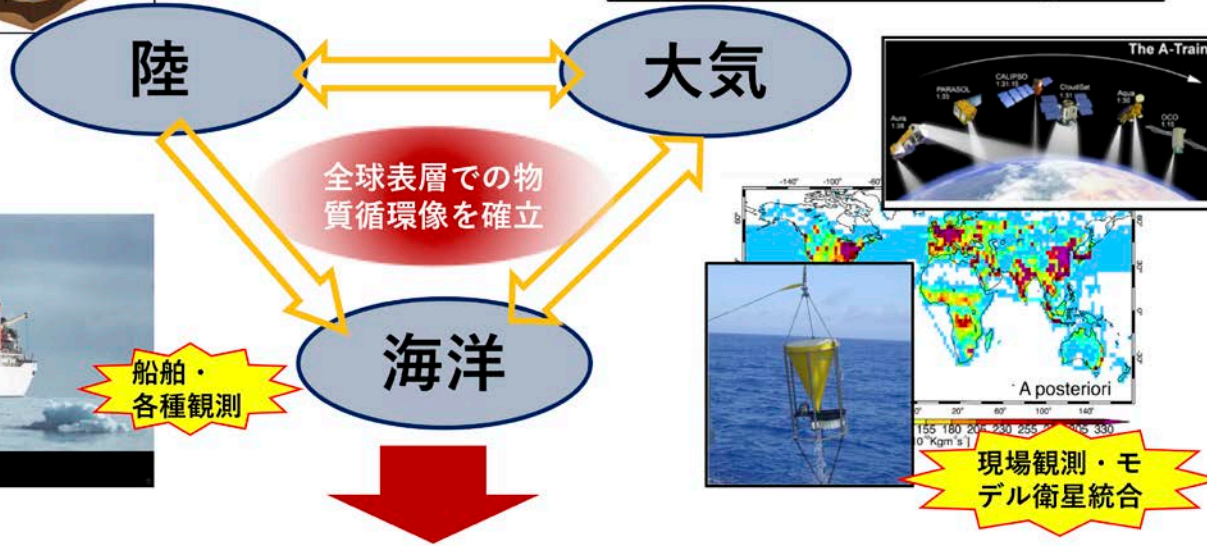
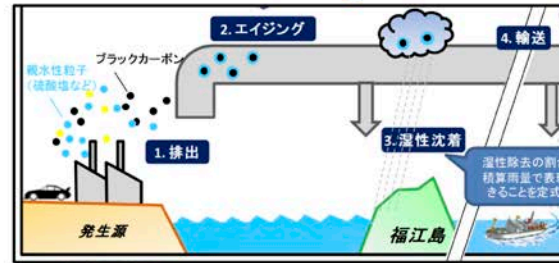
BCの主要な濃度変動プロセスを解析

観測・モデル統合



陸面-大気間の炭素収支を再評価

観測・モデル統合



1. エアロゾルモデル研究

- エアロゾル濃度変動を支配するプロセスの高度化

2. 炭素循環モデル研究

- 全球大気輸送モデルACTMと観測情報を組み合わせた炭素収支の高精度化

3. 大気組成データ同化研究

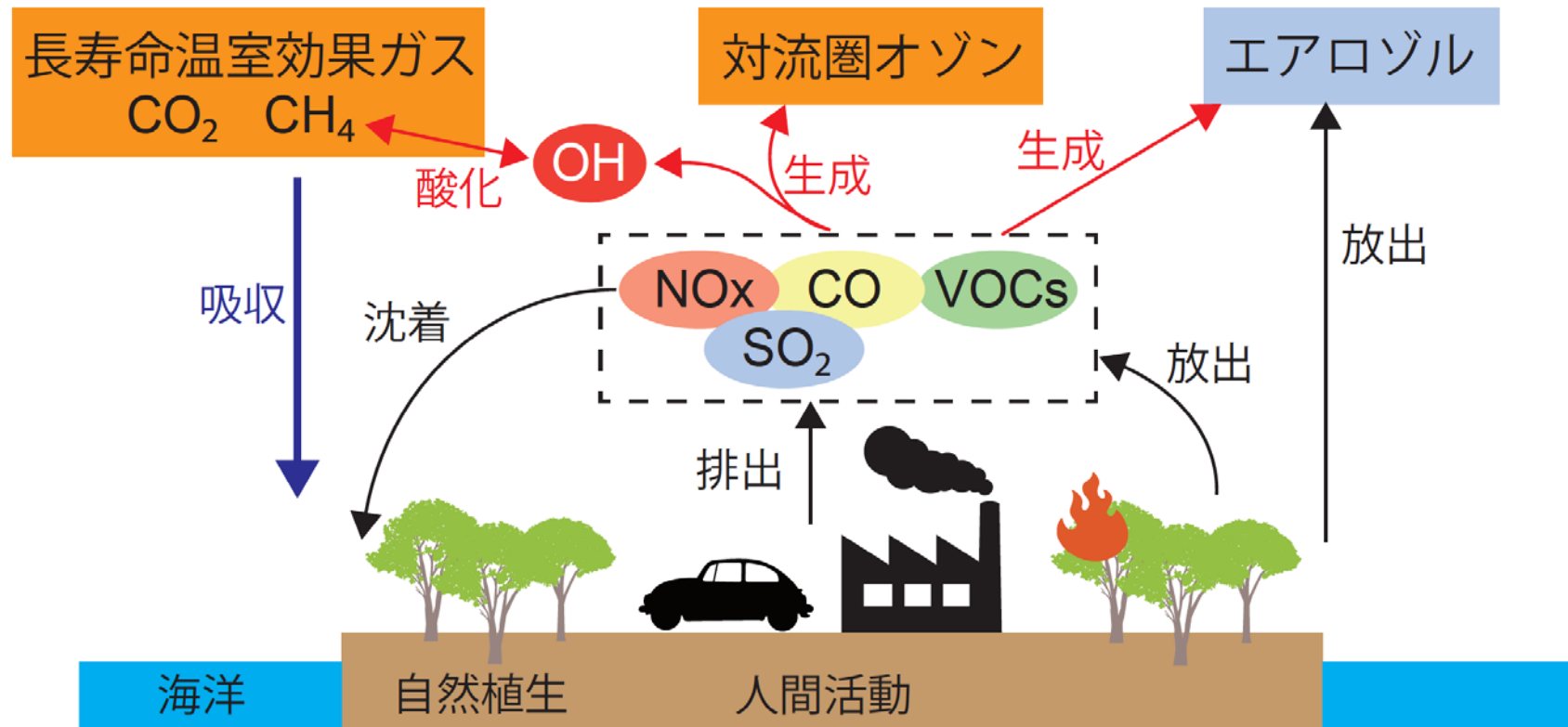
- データ同化による、様々な衛星観測と化学輸送モデルCHASERによる情報の統合利用

人間圏・気候・生態系との結びつきを解明

(3) 大気組成データ同化研究

大気化学組成の地球表層の物質循環における役割

- 大気化学組成は、大気化学反応や海洋・陸域生態系への影響を通じて、長寿命温室効果ガスやエアロゾル濃度変動にも影響すると考えられている
- 定量的な理解のためには、各地域における大気化学組成の濃度・排出量の時空間変動に関する情報が不可欠



衛星観測と数値モデルの情報の統合利用

- 詳細な大気輸送・化学プロセスを考慮した化学輸送モデルと衛星観測による情報を、高度なデータ同化手法をもとに統合利用することで、濃度と排出量を高精度に推定

全球大気化学輸送モデル

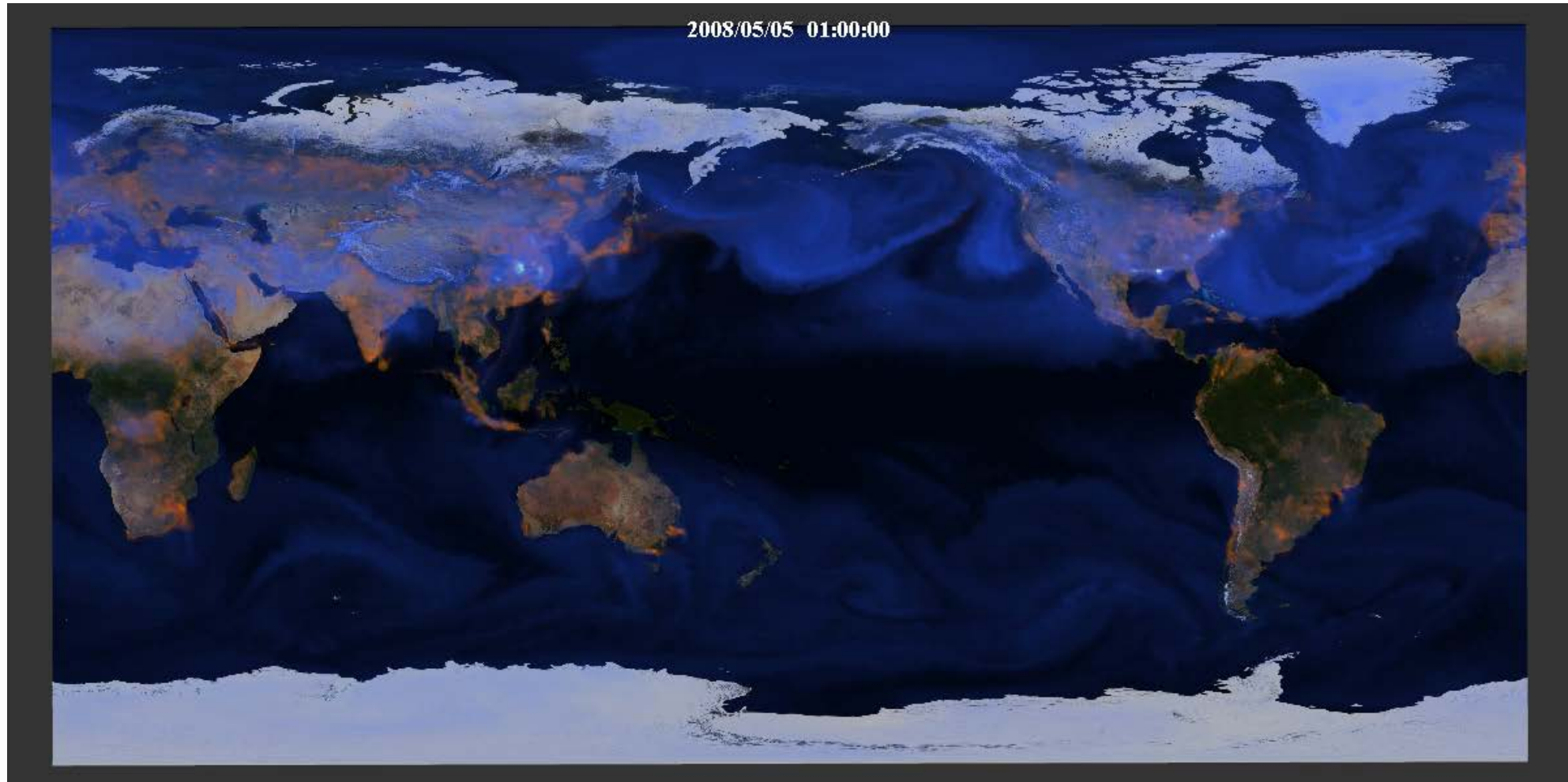
- ✓ 関連するプロセスを考慮
 - ✓ 排出
 - ✓ 輸送拡散
 - ✓ 化学反応
 - ✓ 沈着



↑
統計データから推計された排出量

化学輸送モデルCHASERによる計算例

- 地表 NO_2 濃度・ O_3 濃度

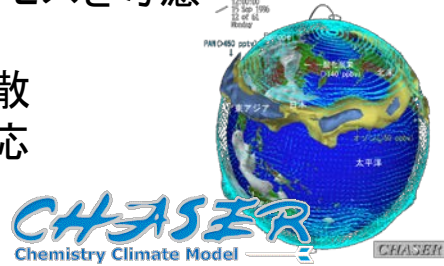


衛星観測と数値モデルの情報の統合利用

- 詳細な大気輸送・化学プロセスを考慮した化学輸送モデルと衛星観測による情報を、高度なデータ同化手法をもとに統合利用することで、濃度と排出量を高精度に推定

全球大気化学輸送モデル

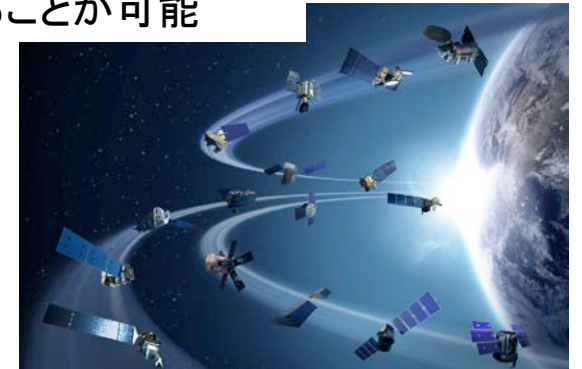
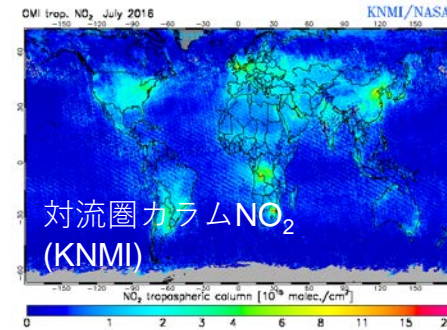
- ✓ 関連するプロセスを考慮
 - ✓ 排出
 - ✓ 輸送拡散
 - ✓ 化学反応
 - ✓ 沈着



統計データから推計された排出量

衛星観測

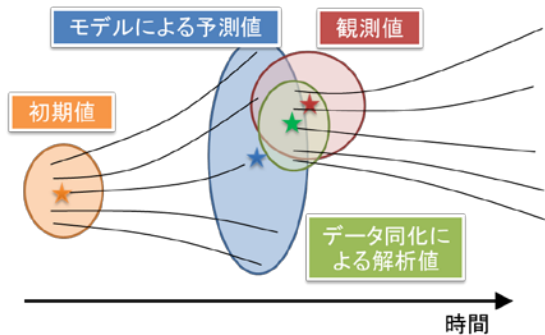
- ✓ 全球規模の分布を得ることが可能



+



4次元データ同化



各地域における、大気汚染物質の濃度変動要因の解明

本年度の成果

- 様々な衛星観測とモデルの情報を統合した、第2世代対流圏化学再解析データセット(TCR-2)の構築
- 次世代衛星測器(TROPOMI)のデータ同化による利用に着手
- 次世代衛星観測の有効な利用を見据えた、56km解像度の全球データ同化計算の本格実施(ポスター発表)

本年度の成果

- 様々な衛星観測とモデルの情報を統合した、第2世代対流圏化学再解析データセット(TCR-2)の構築
- 次世代衛星測器(TROPOMI)のデータ同化による利用に着手
- 次世代衛星観測の有効な利用を見据えた、56km解像度の全球データ同化計算の本格実施(ポスター発表)

対流圏化学再解析データ

	TCR-1.0 (Miyazaki et al., 2015)	TCR-2.0 (Miyazaki et al., in prep.)
同化手法	アンサンブル・カルマンフィルタ(EnKF)、32メンバー	
予報モデル	CHASER(47化学種 & 113化学反応) 気象場:NCEP/DOE-II に緩和	MIROC-Chem(92化学種 & 262化学反応) 気象場:ERA-Interim に緩和
状態変数	NO _x , CO排出量、雷NO _x 生成、35化学種	NO _x , CO, SO ₂ 排出量、雷NO _x 生成、35化学種
同化した観測	OMI NO ₂ (DOMINO2), SCIAMACHY & GOME-2 NO ₂ (TM4NO2A v2.3), TES O ₃ (v5), MOPITT CO (v6 TIR), MLS O ₃ , HNO ₃ (v3.3)	OMI & SCIAMACHY & GOME-2 NO ₂ (QA4ECV v1.1), TES O ₃ (v7), MOPITT CO (v7 TIR/NIR), MLS O ₃ , HNO ₃ (v4.2)、OMI SO ₂ (PCA)
アприオリ排出量	EDGAR v4.2, GFED v3.1, GEIA	HTAP v2.2, GFED v4.1s, GEIA
期間	2005-2012	2005-2017
解像度	水平2.8°x2.8°, 鉛直32層(地上~高度40km)	水平1.1°x1.1°, 鉛直32層(地上~高度40km)

TCRの特色

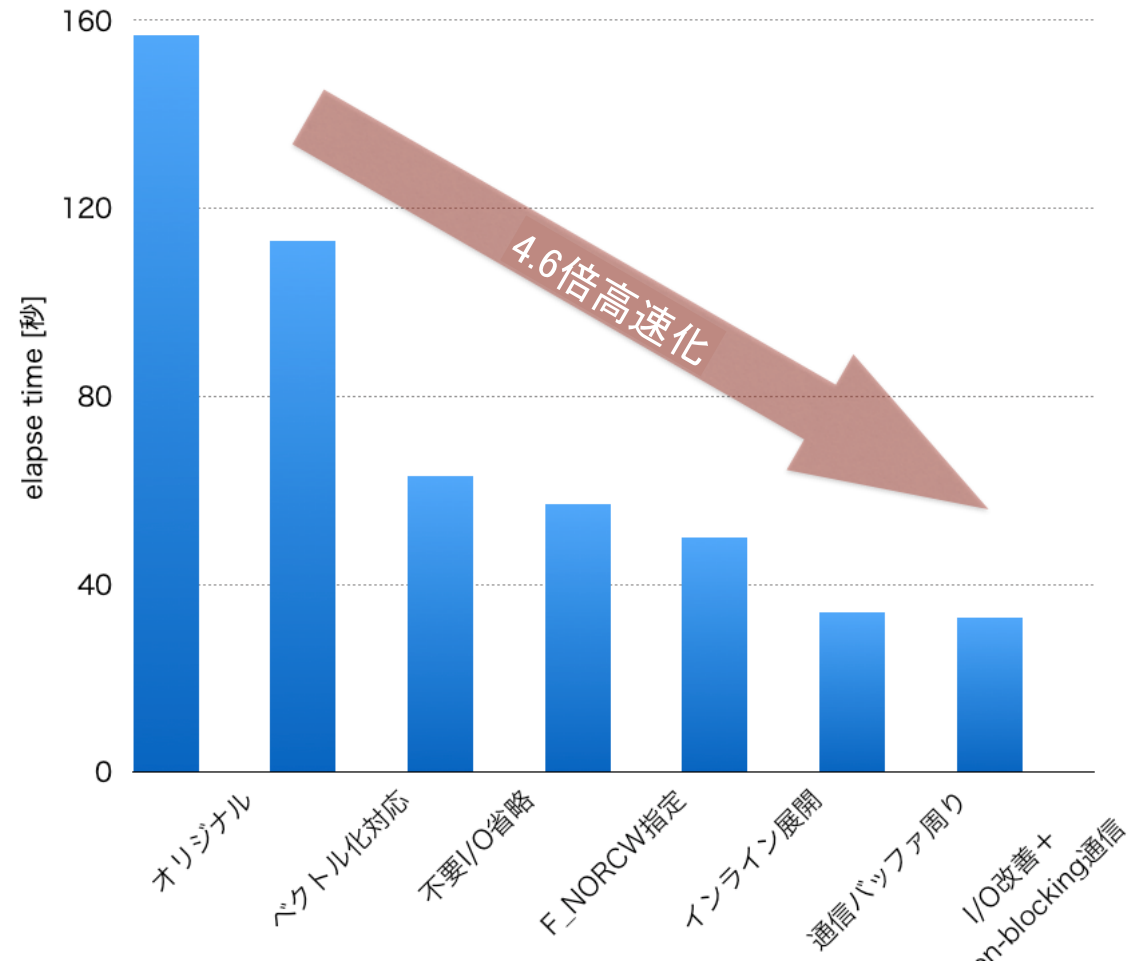
- 高度なデータ同化手法 → 化学輸送モデル・衛星観測の情報を最大限利用
- 多成分データ同化 → モデル不確実性(例:大気中での消失)を低減し、排出量を高精度に推定
- 複数測器からのNO₂観測を同化 → NO_x排出量の日変化を推定
- 長期間の高解像度全球再解析 → 全球について一貫した、大気組成の十年規模変動のより詳細な情報

対流圏化学再解析データ

	TCR-1	TCR-2	MACCRA	CAMSiRA
期間	2005–2012	2005–2017	2003–2012	2003–2015
水平解像度	2.8° (約300 km)	1.1° (約120 km)	80 km	110 km
鉛直解像度	32層 (~2 hPa, σ 座標)	32層 (~2 hPa, σ -p hybrid座標)	60層 (~0.1 hPa)	60層 (~0.1 hPa)
予報モデル	CCSR/NIES/FRCGC AGCM-CHASER	MIROC-Chem	C-IFS MOZART-3	C-IFS CB05/ Cariolle ozone
同化スキーム	EnKF	EnKF	4D-VAR (バイアス補正あり)	4D-VAR (バイアス補正あり)
同化した観測	OMI, TES, MOPITT, MLS	OMI, SCIAMACHY, GOME-2, TES, MOPITT, MLS	GOME, MIPAS, MLS, OMI, SBUV/2, SCIAMACHY, IASI, MOPITT, MODIS	GOME, MIPAS, MLS, OMI, SBUV/2, SCIAMACHY, IASI, MOPITT, MODIS
同化した化学種	O ₃ , CO, NO ₂ , HNO ₃	O ₃ , CO, NO ₂ , SO ₂ , HNO ₃	O ₃ , CO, AOD	O ₃ , CO, AOD
状態変数	濃度場 + 排出量	濃度場 + 排出量	濃度場	濃度場
参考文献	Miyazaki et al. (2015)	Miyazaki et al. (in prep.)	Inness et al. (2013)	Flemming et al. (2017)

地球シミュレータ向けの最適化

- 特別推進課題(2016~2017年) および本課題により、データ同化コードを地球シミュレータ向けに最適化
- ベクトル化のためのコード改変、I/O効率の改善により、地球シミュレータでの実計算時間で4.6倍高速化

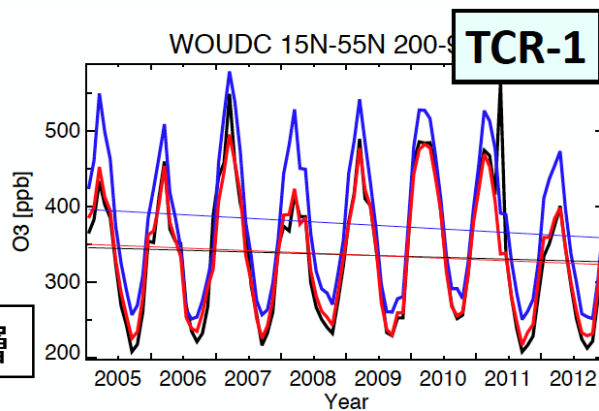


性能評価：対流圏オゾン

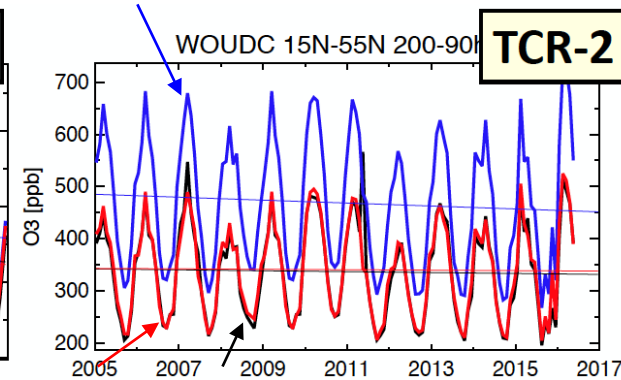
- 同化に使用していないオゾンゾンデ観測と比較(北半球中緯度)
- モデル計算(データ同化なし)に比べ、オゾンゾンデ観測に対する不一致が大きく改善
- 対流圏中層・下層において、TCR-1に比べ、バイアス・RMSEが改善

v.s. WOUDC
ozonesonde
15N-55N

対流圏上層



モデル計算



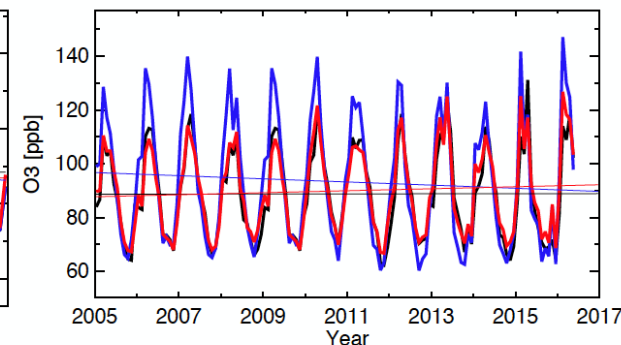
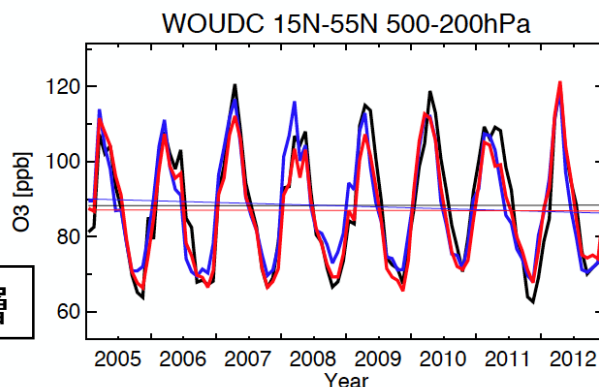
再解析観測

TCR-1 → TCR-2

Bias
-1.3 → 0.2
RMSE
17.7 → 15.8

11%改善

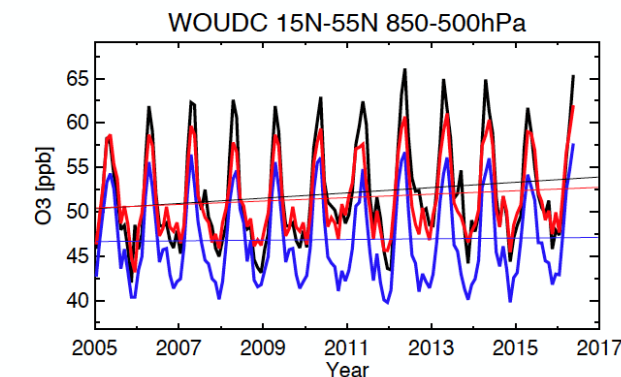
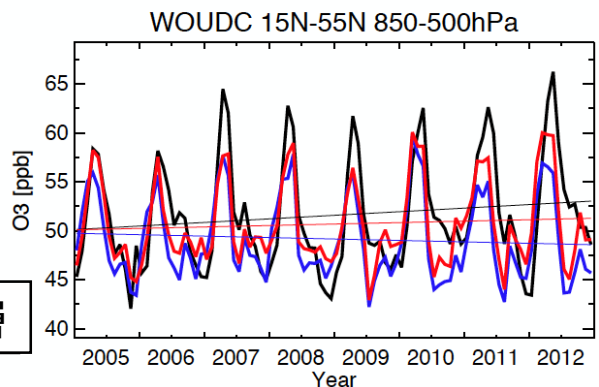
対流圏中層



Bias
-0.9 → -0.5
RMSE
6.9 → 6.1

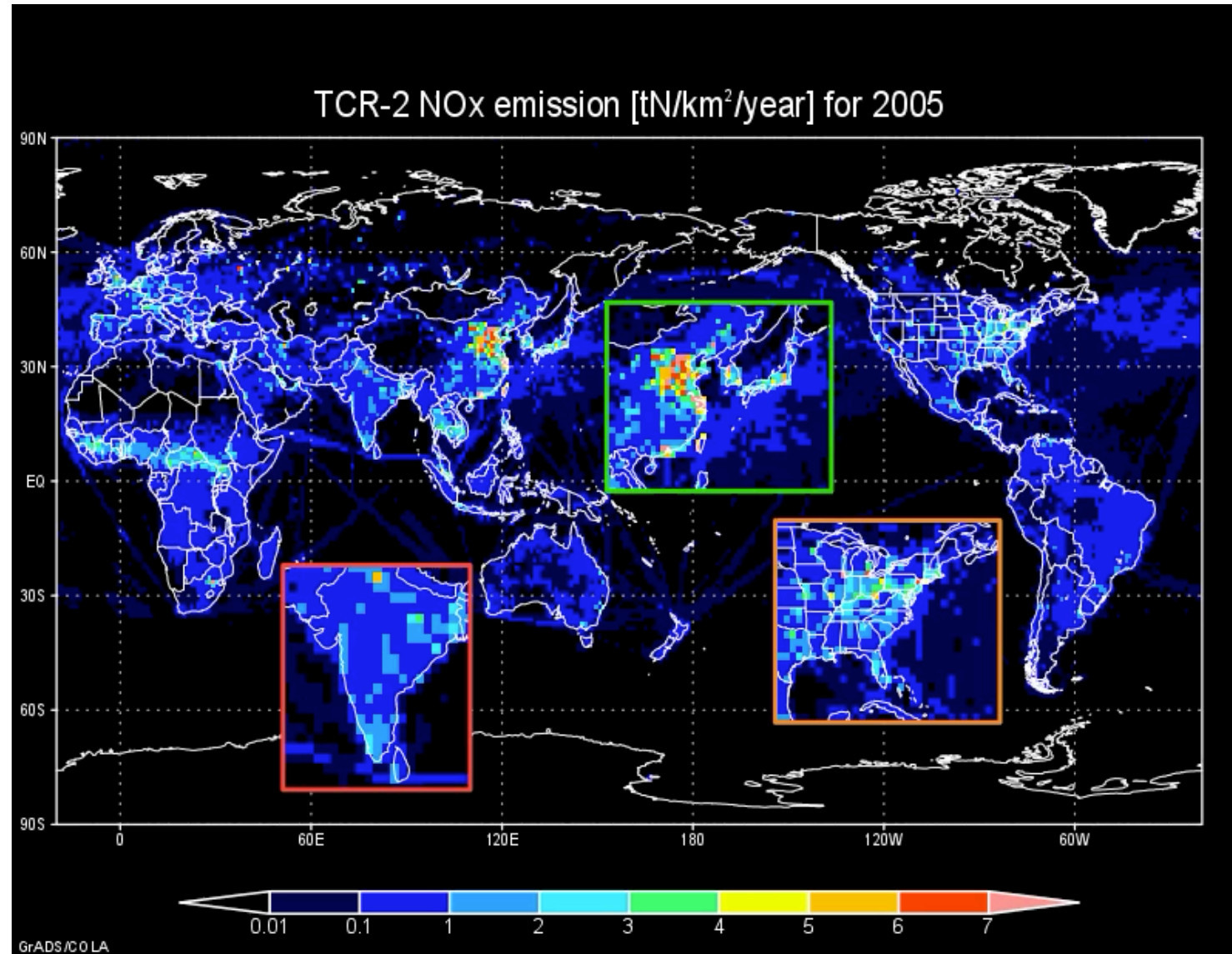
12%改善

対流圏下層

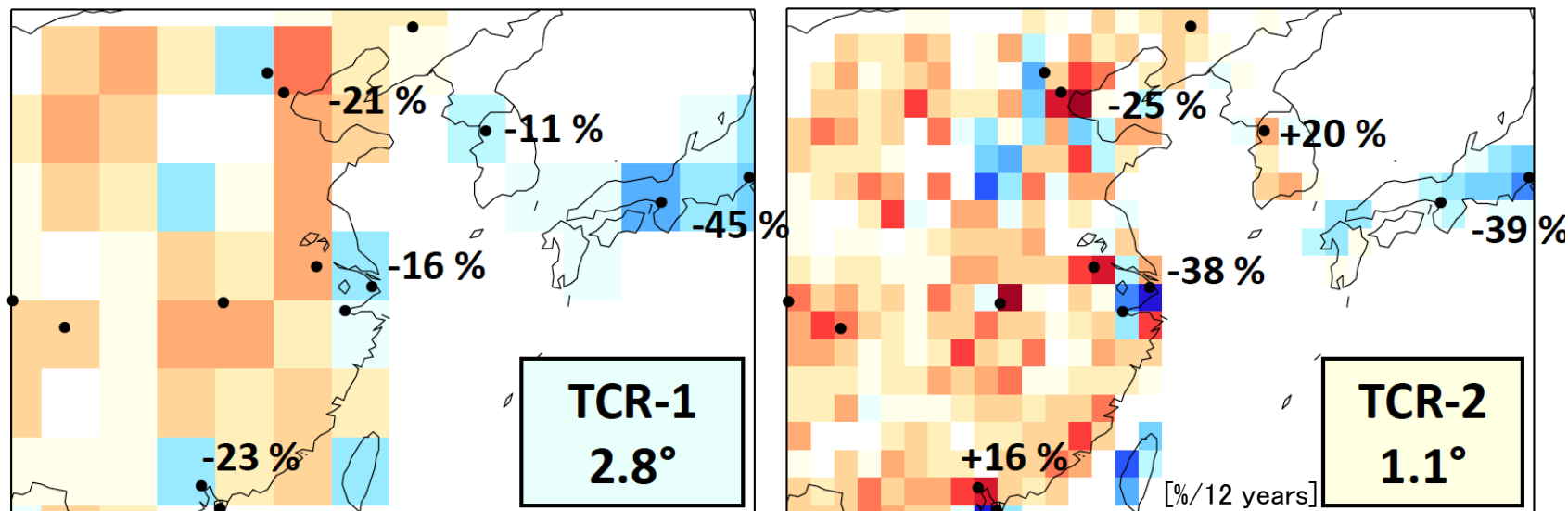


観測
モデル計算
再解析

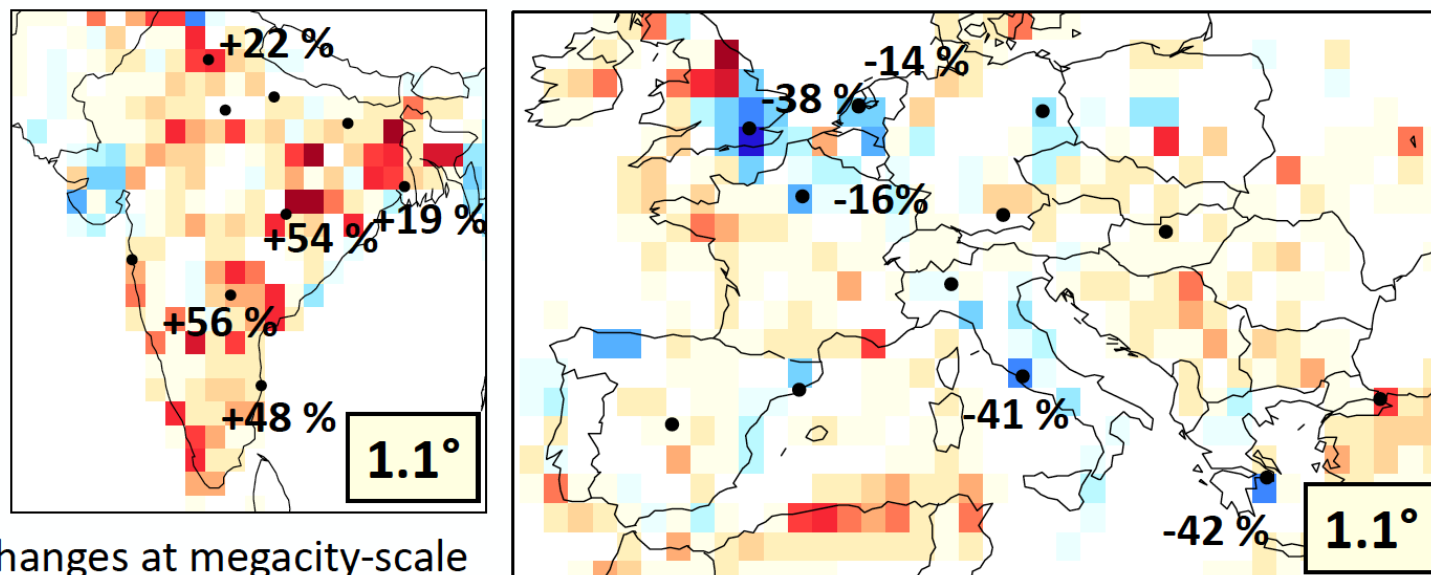
データ同化によるNO_x排出量推定



NO_x排出量推定：2005～2016年の変化傾向

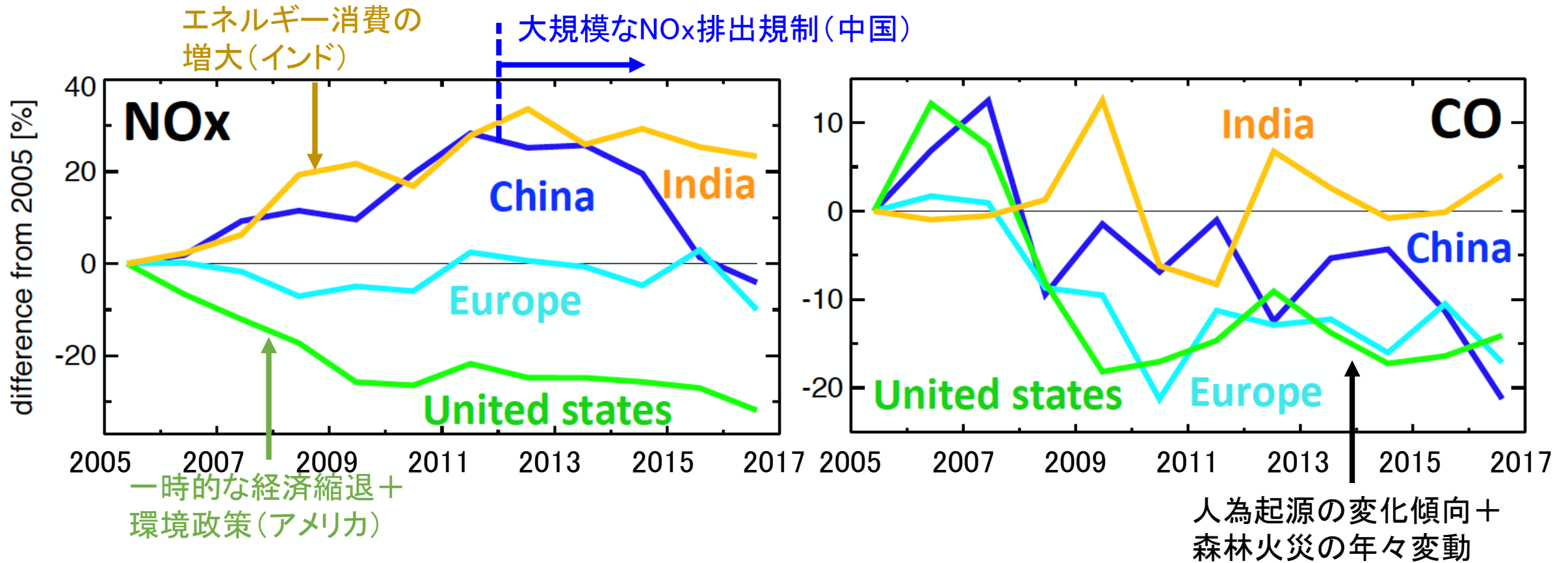


- TCR-2では、TCR-1より詳細なNO_x排出量変化の空間分布が評価可能となった
- 大都市域や大規模な発電所付近において、排出量の大きな変化が推定された



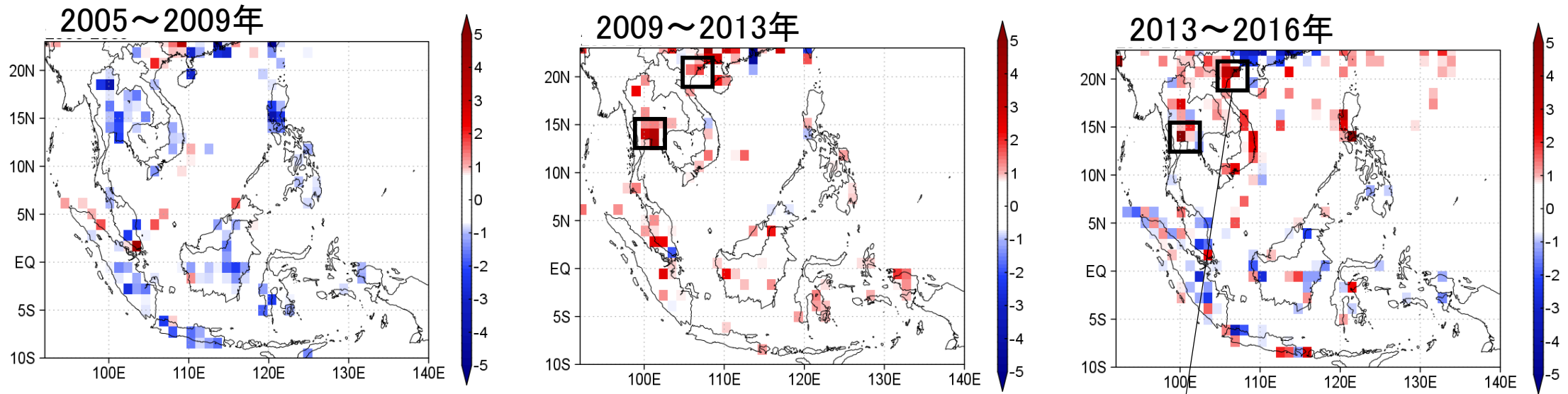
- Decadal changes at megacity-scale

NO_x & CO排出量推定： 汚染域の経年変化



NO_x排出量推定： 東南アジア

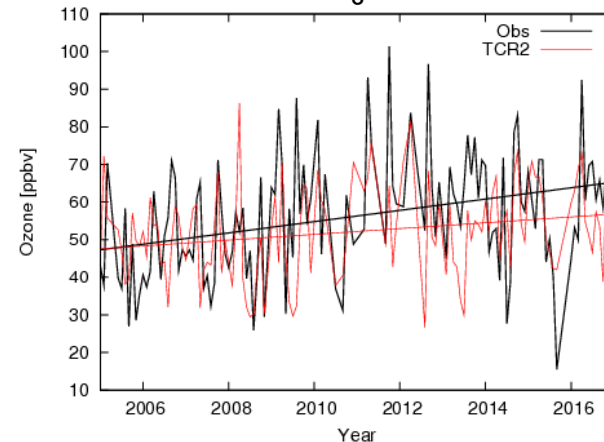
- NO_x排出量の線型トレンド



- 統計データや長期観測データが乏しい地域では、再解析データが濃度・排出量の時空間変動把握に有用な情報源となりうる
- 2009年以降、ハノイやバンコクなど東南アジアの大都市付近で顕著な排出量増加(2005年比で約20%)

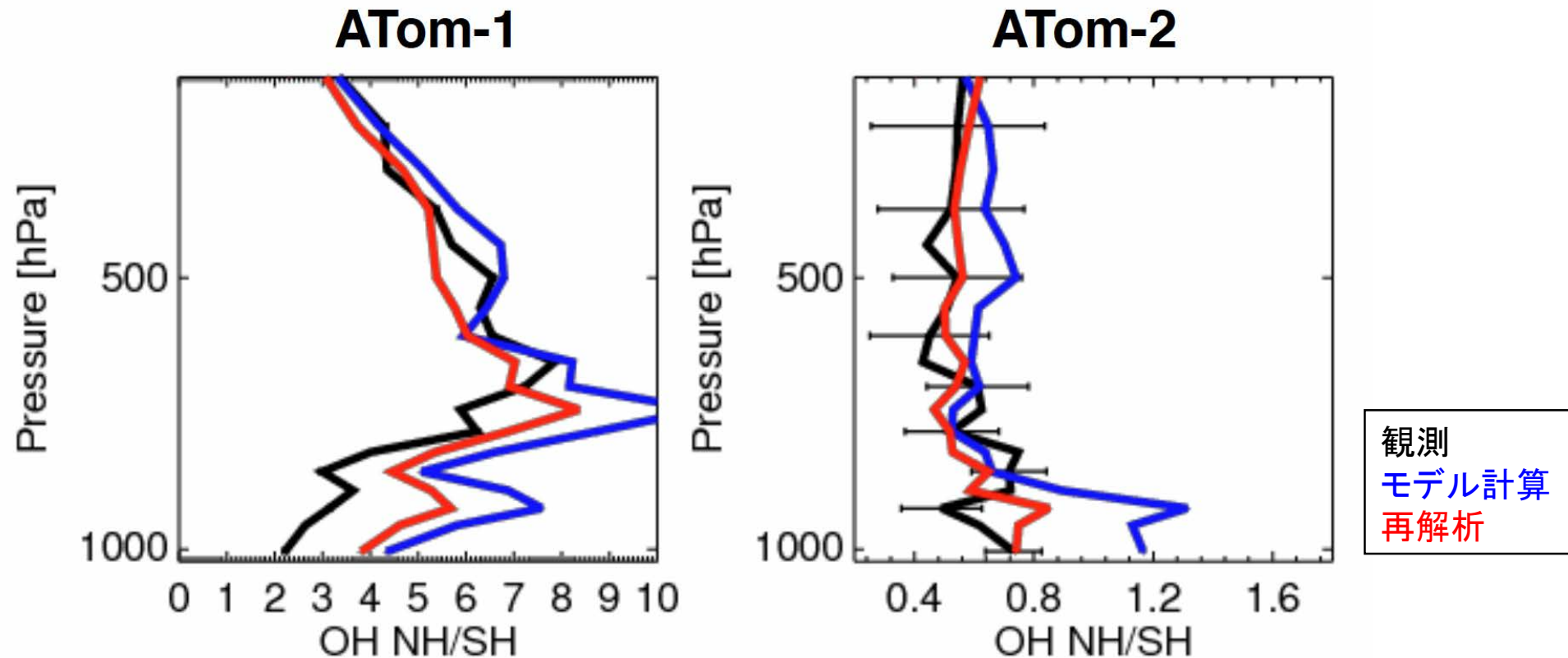
ハノイ上空のO₃濃度(900 hPa)

[x10⁻¹² kg N m⁻² s⁻¹ /decade]



オゾンゾンデ観測
再解析

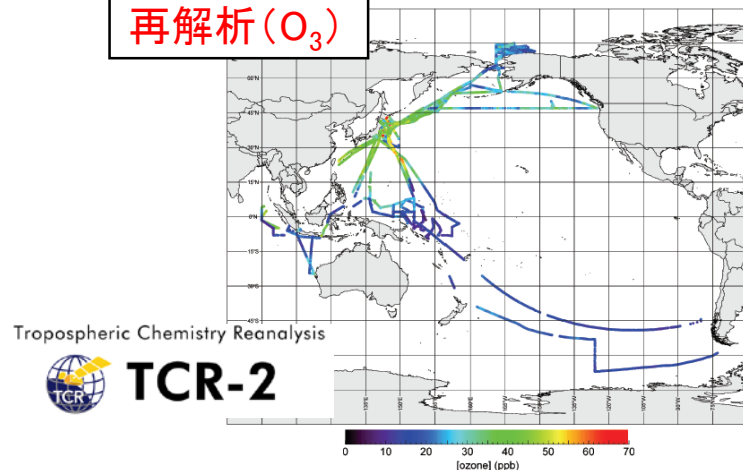
OHラジカルの推定



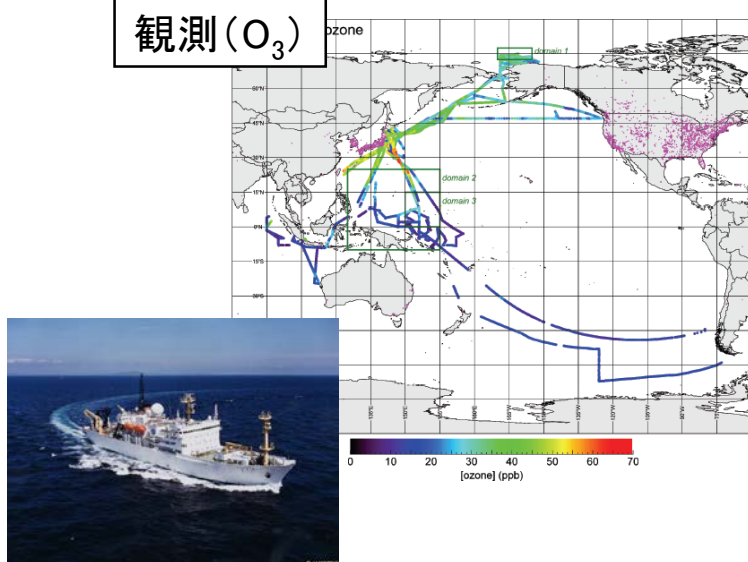
- 太平洋・大西洋を縦断する航空機キャンペーン観測 (ATom) と比較
- 関連する大気化学組成のデータ同化により、南北半球間のOH濃度比が改善
- メタン(温室効果ガス)消失の精緻化による、メタン放出量推定の改善が期待できる

R/V みらいによる観測と併せたデータ解析

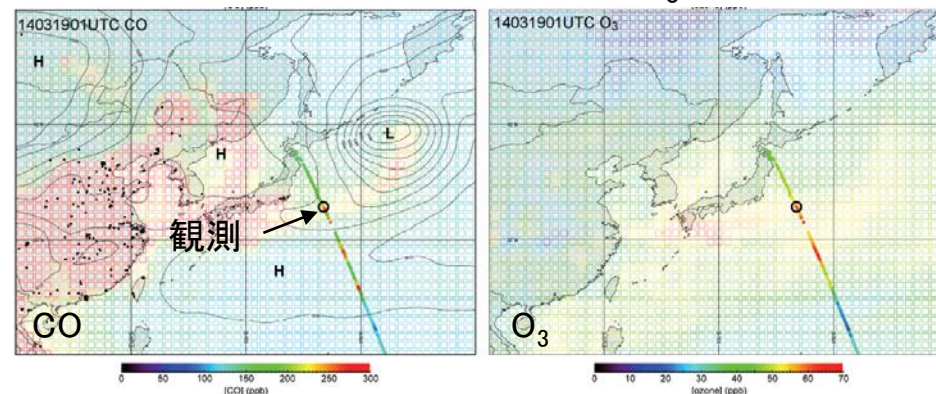
再解析(O₃)



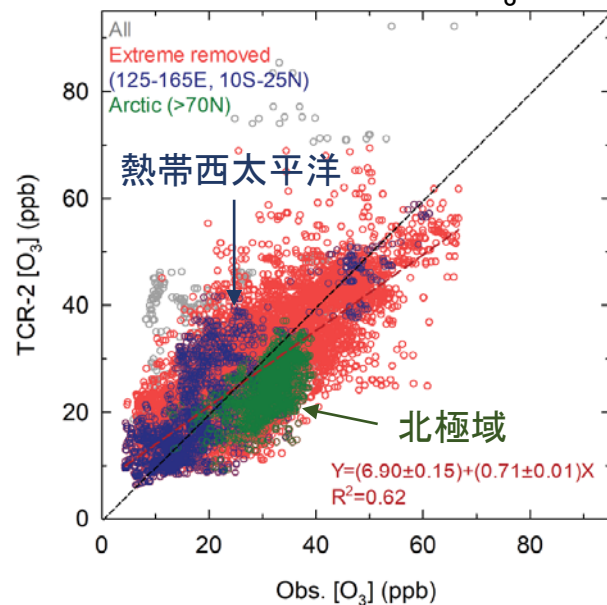
観測(O₃)



長距離輸送イベント時の地表CO・O₃濃度分布



全期間の観測と再解析のO₃濃度比較



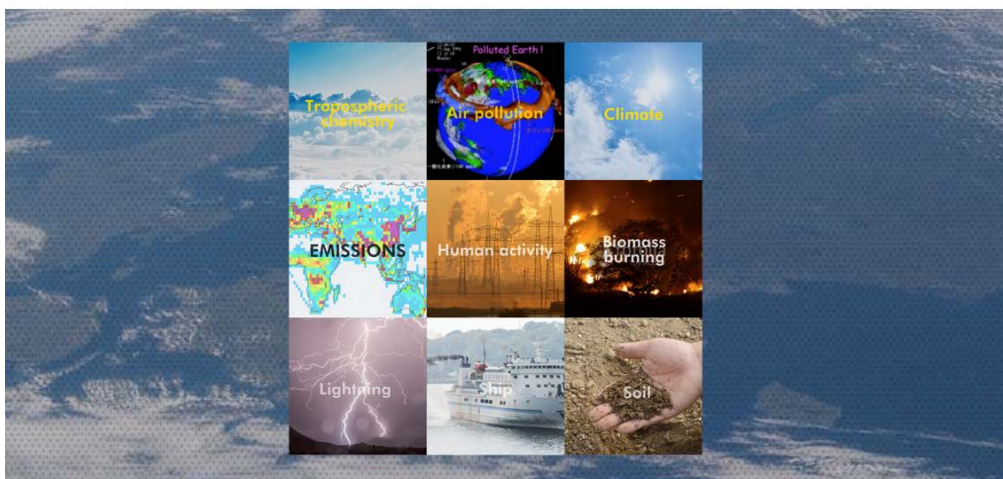
- 再解析は、汚染域からの輸送によるO₃濃度上昇については良く一致
- 熱帯西太平洋・北極域では、再解析に系統的なバイアス
- 鉛直混合・乾性沈着(北極域)やハロゲン化学種によるO₃消失反応(熱帯域)のモデルプロセスを改善する必要性を示唆

データセットの公開・情報発信

Tropospheric Chemistry Reanalysis



Home / About data / Download / Publications / Contact



News & Topics

December 5, 2018
TCR-2 data is released!

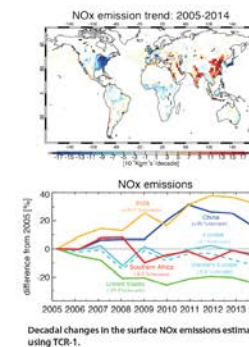
- Webで公開(ダウンロード数: ~200件/月)
- 世界で2例目のデータセット(TCR-1)

Tropospheric Chemistry Reanalysis (TCR-1) dataset

Toward better understanding of the atmospheric environment

TCR-1

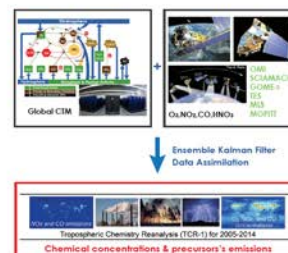
Tropospheric Chemistry Reanalysis for 2005-2014



Why is this useful?

The chemical reanalysis data set has great potential to contribute in a number of ways to studies of the atmospheric environment and climate:

1. The concentration and emission data, which are produced consistently from a single analysis system, provide comprehensive information on atmospheric composition variability in order to improve the understanding of the processes controlling the atmospheric environment.
2. The reanalysis data provide initial and boundary conditions for climate and chemical simulations. They can also be used as inputs to meteorological reanalyses for radiation calculations.
3. The obtained emission data can be used to study variabilities in emissions and evaluate bottom-up emission inventories.
4. The statistical information obtained during the reanalysis calculation can be used to suggest the development of models and observations.



What is chemical reanalysis?

Chemical reanalysis is a systematic approach to creating a long-term, consistent, and integrated data assimilation product of atmospheric composition, by making best use of all available data, from spatially and temporally heterogeneous sensors, scattered in space and time.

What is data assimilation?

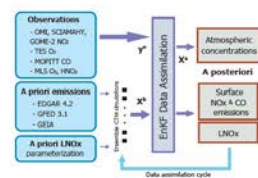
Data assimilation is a technique for combining different observational datasets with a model by considering the characteristics of each measurement.

What is TCR-1 dataset?

Six hourly, decadal, global-scale datasets of O₃, CO, and NO_x three-dimensional concentrations from the ground surface to the lower stratosphere, and surface NO_x and CO emissions from anthropogenic, biomass burning, and biogenic sources.

What methodology was used?

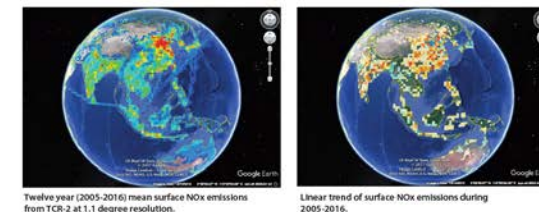
The chemistry reanalysis was conducted by assimilating multiple data sets from the OMI, MLS, TES, and MOPITT satellite instruments. The reanalysis calculation was conducted using a global chemical transport model (CHASER) and an ensemble Kalman filter technique that simultaneously optimized the chemical concentrations of various species and emissions of several precursors.



A new version (TCR-2) will be released winter 2017/2018

TCR-2

New features
Increased horizontal resolution: 1.1 degree
Extended time period: 2005-2016
Some improvements in data assimilation



Reference:
Miyazaki, K., Sudo, K., I., and Tada, K.: A tropospheric chemistry reanalysis for the years 2005-2012 based on an assimilation of OMI, MLS, TES, and MOPITT satellite data, Atmos. Chem. Phys., 15, 8315-8348, https://doi.org/10.5194/acp-15-8315-2015

This work was supported by Coordination Funds for Promoting Aerospace Utilization by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan, and the First 4 computer project (Fourth time) - Assessment of meteorological and global environmental predictions utilizing observational Big Data. The reanalysis calculation was conducted using Earth Simulator under the "Climate Project with Special Support" project of the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology.

TCR-1 web site: <https://ebcrpa.jamstec.go.jp/~miyazaki/tcr/>

JAMSTEC Japan Agency Marine-Earth Science and Technology
3175-25, Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama-city, Kanagawa, 236-0001, Japan
PHONE: +81-45-778-5715 FAX: +81-45-778-5706
Contact: Dr. Kazuyuki Miyazaki kmiyazaki@jamstec.go.jp



Copyright © Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. All rights reserved.

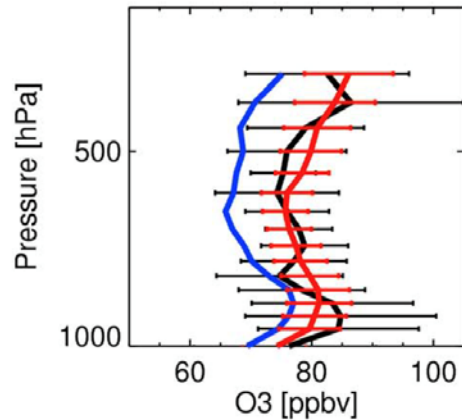
<https://ebcrpa.jamstec.go.jp/tcr2/>

TCRの利用例

- 国内外において、航空機観測データの解析、排出量インヴェントリの評価に利用されている。

航空機観測 (KORUS-AQ) データの解析

ソウル上空のO₃濃度

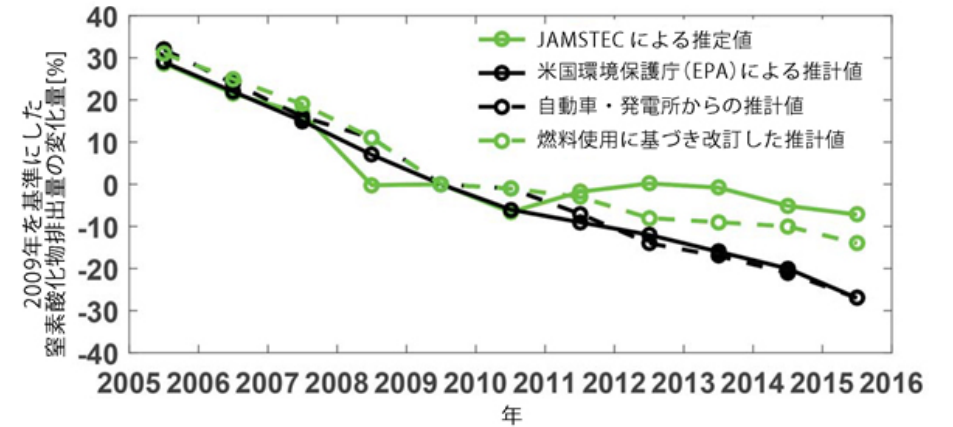


観測
モデル計算
再解析

Miyazaki et al. (2018)

アメリカの排出量インヴェントリ評価

アメリカのNO_x排出量変化



Jiang et al. (2018)

2018年5月プレスリリース

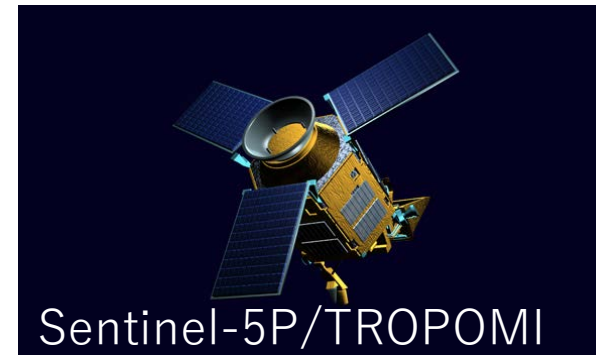
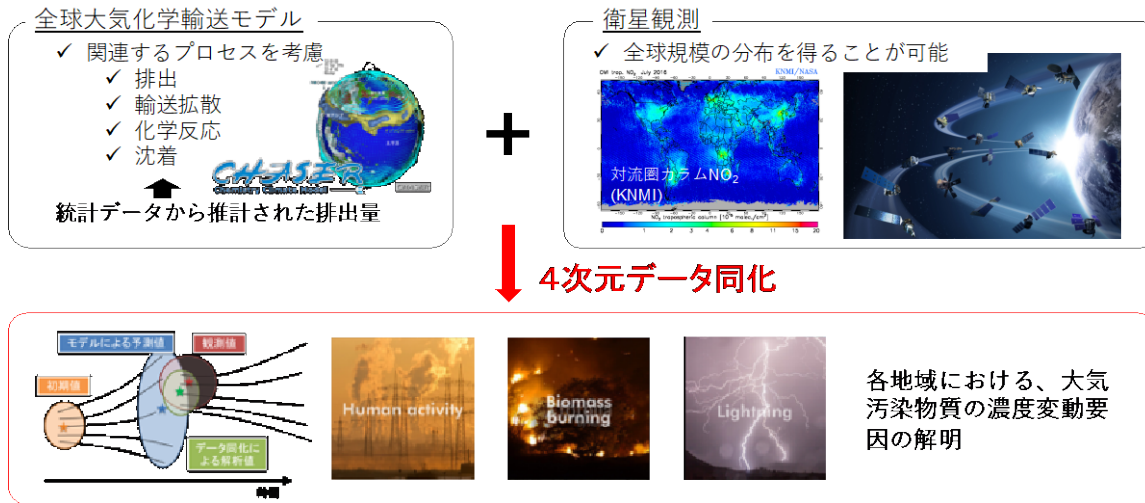
本年度の成果

- 様々な衛星観測とモデルの情報を統合した、第2世代対流圏化学再解析データセット(TCR-2)の構築
- 次世代衛星測器(TROPOMI)のデータ同化による利用に着手
- 次世代衛星観測の有効な利用を見据えた、56km解像度の全球データ同化計算の本格実施(ポスター発表)

次世代衛星測器TROPOMI NO₂のデータ同化

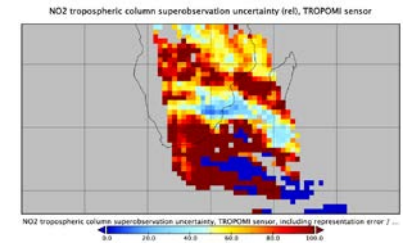
- より精緻な濃度・排出量情報の推定に向けて

大気組成データ同化システム



Sentinel-5P/TROPOMI

<http://www.tropomi.nl>



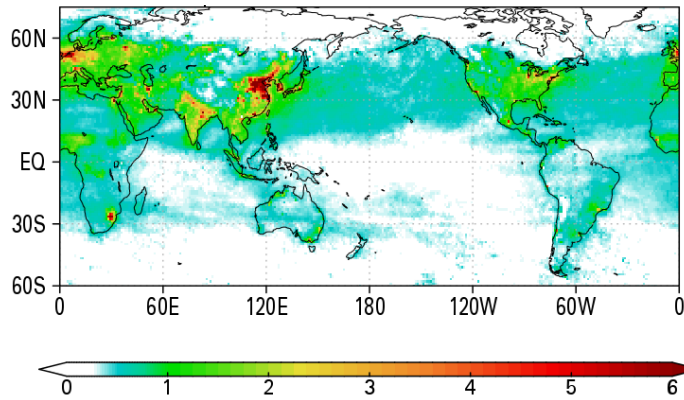
衛星プロダクト作成機関(王立オランダ気象研究所)で開発された最新のモデル格子スケールの観測誤差推定手法を使用

水平分解能・データ品質(e.g., S/N比)が大きく向上した次世代衛星測器による観測情報を最大限利用し、より精緻な濃度・排出量の時空間変動の推定を目指す

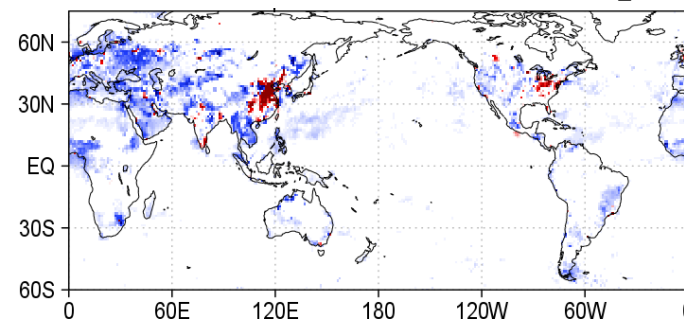
次世代衛星測器TROPOMI NO₂のデータ同化

- TROPOMIデータ同化の検証： 2018年4月15～28日の対流圏NO₂カラム量

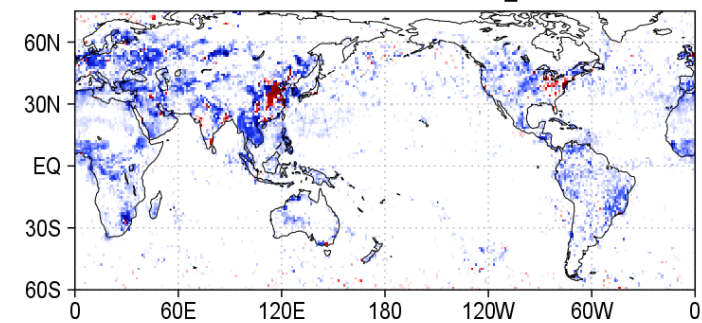
TROPOMI NO₂ (衛星観測)



モデル計算-TROPOMI NO₂

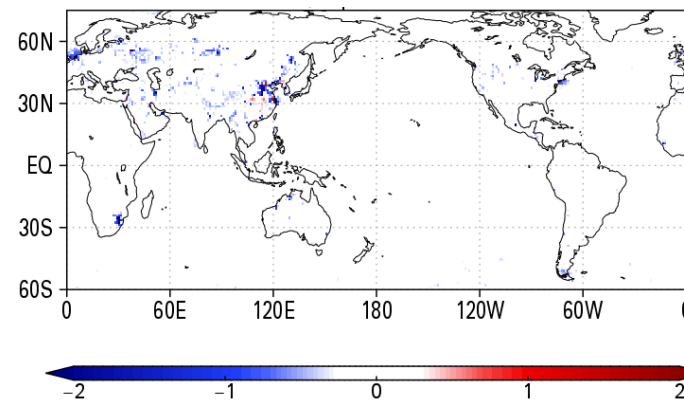


モデル計算-OMI NO₂ (同化しない衛星観測)

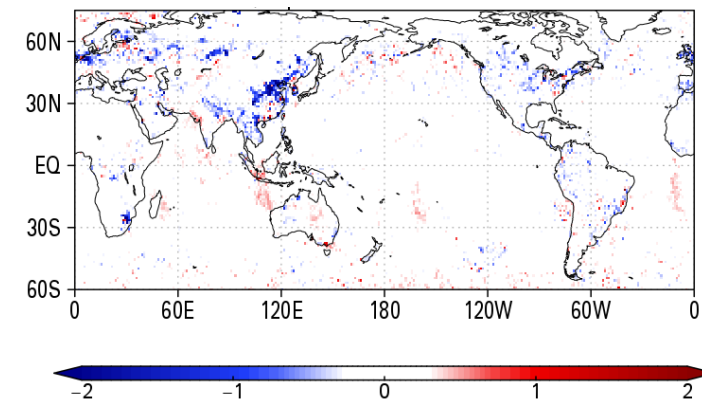


注: モデル計算の排出量は2010年のデータ

データ同化-TROPOMI NO₂



データ同化-OMI NO₂

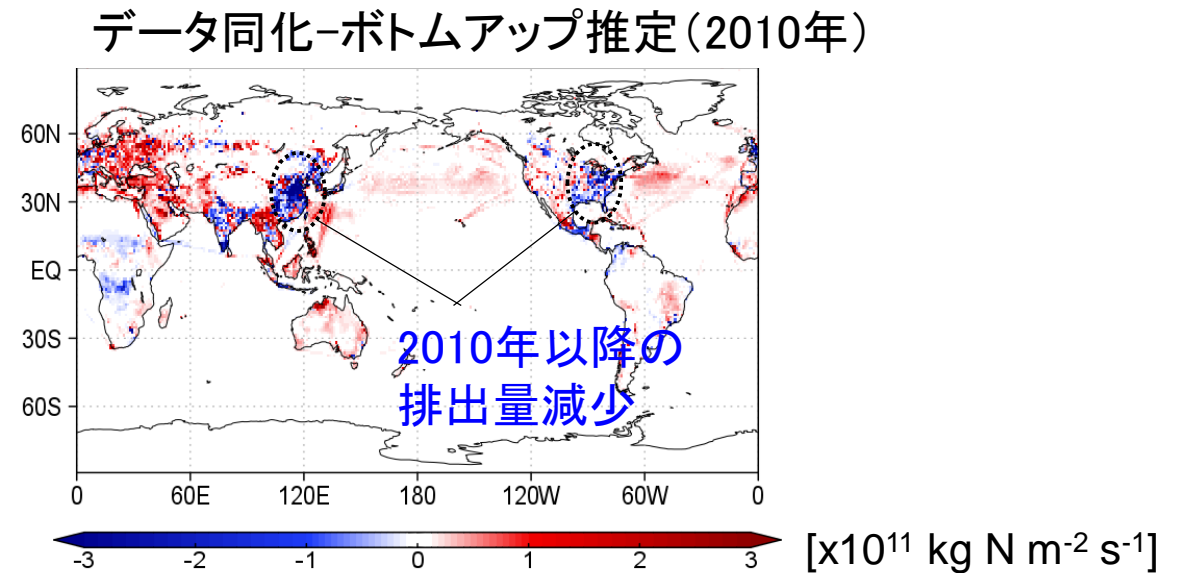
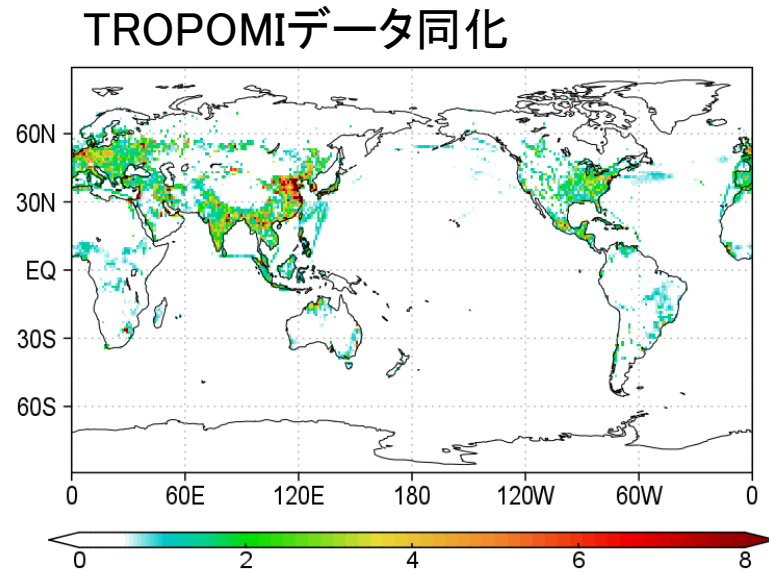


[x10¹⁵ molecule cm⁻²]

- モデル計算は、中国・米国東部では過大評価、Rural域では過小評価
- データ同化は、2つの衛星観測に対するモデルバイアスを減少させた

次世代衛星測器TROPOMI NO₂のデータ同化

- TROPOMIデータ同化によるNO_x排出量推定（2018年4月15～28日）



- 中国・米国東部で排出量が減少、Rural域では増加
- 今後は、現場観測データも用いて、濃度・排出量の詳細な時空間変動について調査する予定

NO _x 排出量 [TgN/yr]	ボトムアップ推定[2010]	TROPOMI データ同化
全球	42.1	44.8
ヨーロッパ	3.9	4.5
アメリカ	4.7	3.8
中国	7.8	5.0
インド	3.5	2.8

まとめと今後の課題

- 様々な衛星観測とモデルの情報を統合した、第2世代対流圏化学再解析データセット(TCR-2)の構築
 - 様々な改良を行った、新たな再解析データセットをWeb公開
 - 10年規模の濃度・排出量変動をよく捉えており、これまでのデータセットとともに科学研究・環境政策の評価などに利用され始めている
 - 本データセットを元に、発展途上地域の気候環境の影響評価も行う予定
- 次世代衛星測器(TROPOMI)のデータ同化による利用に着手
 - 衛星プロダクト作成機関(KNMI)との共同研究で、対流圏NO₂のデータ同化に着手
 - TROPOMIによる他の成分(O₃, CO, SO₂, HCHO)も併せて、より高精度な多成分データ同化へと発展させる計画
- エアロゾルモデル・炭素循環研究との連携 (例: CH₄の放出量推定)

ご静聴ありがとうございました