

## 大気移流拡散モデルの改良とその適用 Improvement and Application of an Air Advection Diffusion Model

池本久利<sup>1</sup>, 植田洋匡<sup>2</sup>

Hisatoshi IKEMOTO<sup>1</sup> and Hiromasa UEDA<sup>2</sup>

近年、計算機の性能向上やコミュニティシステムが普及してきたこと等により、モデル計算に関する取り組みが進んできている。本研究では、近年のモデル計算に関する状況を整理し、使用環境を整えるとともに、水銀(Hg)の全球規模の挙動に関するモデル計算の精度向上への取組み、及び冬季北京のPM<sub>2.5</sub>汚染を対象として大気汚染と都市気象変化の相乗作用の研究を行った。その結果、Hgの予測精度は臭素(Br)の反応を組み込むことで精度が向上すること、大気汚染と都市気象変化はブラックカーボン(BC)による日射の吸収、地表気温の低下、逆転層の強度と高度の変化を促し、さらなる高濃度の汚染状況を作り出していることが導き出された。

キーワード : air advection diffusion model, chemical transport model, mercury, PM<sub>2.5</sub>

### 1. 研究目的

近年、計算機の性能向上（並列処理などの高速化、大容量化）により、PCクラスタマシンを用いたモデル計算が可能になり、環境関連分野で広く用いられはじめた。このことを受け、本研究の目的は、モデルの種類やその現在の状況を整理し、水銀(Hg)等の化学物質への適用を検討することにある。

大気汚染移流拡散の予測システムは、気象モデル、化学輸送モデル、エミッションインベントリ、グラフィックスモデルからなるフレームワーク（枠組み）である。各モデルは物理的、化学的な素過程（プロセス）をパラメタライズした種々のモジュールから構成されている。例えば、化学輸送モデルには、大気拡散、化学反応、乾性、湿性沈着などの素過程が含まれ、化学反応過程には光化学反応、エアロゾル動力学等のモジュールが含まれる。

気象予測システムの構築は、先進国を中心に各国気象庁で進められてきた。1980年代後半には、欧米を中心に「共用」を目的とした、コミュニティシステム（コミュニティモデルともいう）が開発され、計算プログラム・コード、理論・内容説明書、ユーザズガイドを公開し、コミュニティに参加する研究者によるシステム進化が進められて

きた。また、気象関係従事者による天気予報や、一般の研究者による研究活動等に利用されており、MM5（Fifth-Generation Mesoscale Model）は Pennsylvania State Universityと National Center for Atmospheric Research（NCAR）が開発したもので韓国などでは現業業務、天気予報にも使用されている。その後継モデル、WRF-ARW（Weather Research and Forecasting, Advanced Research WRF）モデルはNCARが中心になって開発したもので、コミュニティもNCAR中心で運営され、システムも進化して、現在はバージョン3.8が公開されている。

化学輸送予測システムとしては、US-EPAが開発したCMAQ（Community Multi-scale Air Quality Model）モデルやNCARのWRF-ARWモデルに対応するWRFchemモデル、ハーバード大学のGEOS-chemなどがある。

我々は、これまで大気乱流と乱流拡散過程、光化学反応、エアロゾル動力学等の素過程の理論的、実験的研究を行い、これらのモデリング、モジュール作成を通して、MM5、WRF-ARW、WRFchemのシステム進化に貢献してきた。また、これらを用いて、海陸風、山岳気象、台風、集中豪雨等のメソ異常気象や光化学大気汚染、酸性雨や越境大気汚染研究を行ってきた（Uno, I., Ueda, H. and

1 一般財団法人日本環境衛生センター東日本支局環境工学部計画建設技術課 Japan Environmental Sanitation Center Environmental Engineering Dept. Municipal Solid Waste Consulting Div.

2 一般財団法人日本環境衛生センター顧問 Japan Environmental Sanitation Center adviser

Wakamatsu,S. 1989: Boundary-Layer Meteorology, 49, 77-98など)。

本研究では、(1) これらのモデルシステムを日本環境衛生センターのPCクラスタマシンにインストールして、種々のユーザ、目的に対応できる計算環境を構築する。(2) さらに、これら予測システムを用いて、1) Hgの全球的な挙動、2) PM<sub>2.5</sub>の大気汚染と都市気象変化の相乗作用汚染、それに伴う都市気象変化と気象変化に伴う大気汚染の更なる悪化についての研究を進める。

## 2. 大気移流拡散予測システムの概要

大気移流拡散予測システムの構成は Fig.1 のとおりである。

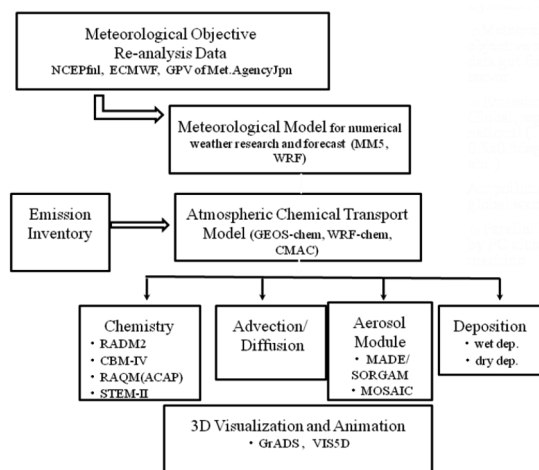


Fig.1 大気移流拡散予測システム

### 2.1 気象モデル

まず、化学物質を輸送する大気運動について気象モデルを用いて計算する。計算に用いる初期条件、境界条件には、世界各国の気象官署で観測されたデータを収録し、客観解析(外挿法の一つ)した気象客観解析データ Meteorological re-analysis data (Fig.1の最上段)を用いる。

この他、気象客観解析データとしては、日本気象庁の数値予報に基づいて気象業務支援センターが提供している気象予報数値データ GPVやヨーロッパ中期予報センター (ECMWF)が提供している ERA-40 データ (1957年9月以降) が用いられる。

本研究では、主に米国のNCEP-fnl (Final Analysis

Data, National Centers for Environmental Prediction) のものを用いる。これは、6時間/日、水平最大解像度 1° (約100 km)、鉛直26層 (最高高度10 hPa高) の気象要素がリストアップされており、1960年以降、今日までのものがインターネットからフリーでダウンロードできる。

気象モデルは、大気中での運動量、熱、水分の輸送、地表面、水面での交換過程、大気放射、積雲対流、雲物理過程等を計算して、風向風速、気温、湿度、雲、雨、雪等の分布を高い時間及び空間分解能で予測する。各過程には、理論及び実験に基づくモジュールが数種類用意されており、ユーザは目的に合わせて選択できる。本研究では、気象モデルとして、MM5とその後継、WRF-ARWをインストールして実行する。

### 2.2 化学輸送モデル

気象場での化学物質の輸送、拡散、反応、沈着過程を計算する。拡散過程は気象モデルでも共通に使用する。拡散過程には、単純なものから高次の乱流理論に基づくモジュールまで、数種用意されている。

Fig.2 に示したように、排出された一次汚染物質は、大気中を輸送、拡散されるうちに、光化学反応などの大気反応により、二酸化窒素(NO<sub>2</sub>)や酸化性の二次汚染物質オゾン、過酸化水素(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)などに変換される。これが硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、炭化水素類と反応して酸性物質をつくり、一部は粒子化して硫酸、硝酸エアロゾルや有機エアロゾルなどの二次粒子になる。二次的に生成される粒子はPM<sub>2.5</sub>など微小粒子として分類される。これらガス状、エアロゾル状の汚染物質は、大気乱流中で地表に沈着除去される(乾性沈着)。さらに、雲粒の凝結核として、また衝突併合により雲粒、雨滴に取り込まれ、液相反応を経て酸性雨、雪、霧になって直接地表に沈着する(湿性沈着)。大気反応過程については、通常、化学種110個、素反応120種の気相反応、化学種30個、反応および気液平衡40種の液相反応のモジュールが用いられる。エアロゾルについては、粒子直径別に、粒子生成、

衝突併合、成長、気相-エアロゾル相間の平衡、表面反応など多数の過程を含むモジュールが数種用意されている。

本研究では、WRFchemおよびGEOS-chemをインストールして実行する。WRFchemの反応過程、エアロゾルのモジュールとしては、RADM2-MADE-SORGANおよびCBM-IV-MOSAICを用いる。

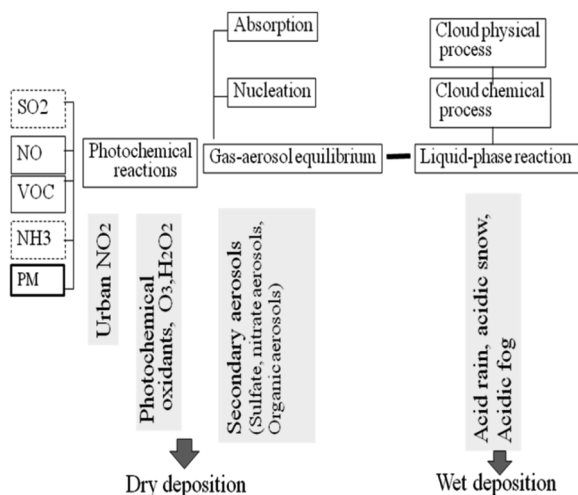


Fig. 2 輸送中に発現する様々な形態の大気汚染

### 2.3 エミッションインベントリ

二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>、ブラックカーボン(BC)等の大気汚染物質や温室効果物質など大気微量物質について排出インベントリが整備され、1~数年毎に更新されている。Table 1に、種々の研究機関で整備されている各種大気微量物質のエ

ミッションインベントリを示す。全球については1°×1°メッシュで、東アジアなど領域規模では0.5°×0.5°メッシュのものが入手できる。日本国内については、汚染物質によっては500 mや1 kmメッシュのものが作成されている。本研究では、全球にはGEIA (Global Emissions Initiative)、東アジア、日本についてはREAS (Regional Emission inventory in ASia) およびStreets (2012) のインベントリを用いる。

### 2.4 グラフィックスモデル

計算結果の時間-空間分布(1-5次元)および時間-空間断面の等値線図(地表濃度の水平分布など)とそれらのアニメーションを描画する。本研究ではGrADS及びVIS-5Dをインストールして用いる。

### 3. 輸送・拡散モデルの構築

発電所や廃棄物焼却施設などの大気環境影響アセスメントにおいて、大気拡散予測にはプルーム、パフモデルが用いられている。これに加えて、「特殊気象条件下での拡散の予測」(内部境界層の形成による「いぶし現象」(フェュミゲーション)、逆転層の形成によるトラッピング現象、建物の影響(ダウンドラフト、ダウンウォッシュ))と施設周辺に排煙がぶつかるような高い山などがある場合には、地形影響の予測が要求される。これらに

Table.1 Emission inventories in Asia and the World

Inventory	SO <sub>x</sub> ,SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	VOC	NH <sub>3</sub>	CO	BC	OC	PM <sub>10</sub>	Hg	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HFCs	PFCs	SF <sub>6</sub>
UNFCCC	○	○	○	○	○					○	○	○	○	○	○
RAINS·GAINS	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○			
EDGAR	○	○	○	○	○					○	○	○	○	○	○
GEIA	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○			
LTP	China	○	○	○	○										
	Japan	○	○	○	○			○							
	R. of Korea	○	○	○	○			○							
ACCESS	○	○	○	○	○	○	○			○	○				
REAS	○	○	○	○	○	○	○			○	○	○			
EA-Grid	○	○	○	○	○			○	○						

For meso- and regional air pollution

For global warming and for global and inter-regional air pollution

UNFCCC inventory has been developed by United Nations for Climate Changes mainly for GHG but also for air pollutants

RAINS·GAINS is developed by International Institute for Applied System Analysis (IIASA) to estimate emissions of air pollutants including GHG.

EDGAR is developed by National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) to estimate emissions of air pollutants and GHG.

GEIA has been developing inventories of global gas and aerosol emissions as part of International Geosphere - Biosphere Programme (IGBP).

LTP is a joint research program among China, Japan and Korea to improve understanding of trans-boundary air pollutants in Northeast Asia.

ACCESS is developed by David Streets in Argonne Nat. Lab. to support the Aerosol Characterization Experiments (ACE-Asia), Transport and Chemical Evolution over the Pacific Experiments and the MICS-Asia project.

REAS is developed by Frontier Research Center for Global Change and National Institute for Environmental Studies to understand the role of trace constituents in the atmosphere.

EA-Grid is developed by the Ministry of the Environment in Japan to understand transboundary air pollutants in Northeast Asia.

対応するためのモデルとして、ISC-PRIMEモデル、METI-LISモデル、トラッピングモデル、Lyons-Coleモデルなどが用いられている。しかし、これらはいずれもブルーム、パフモデルを拡張したものであり、予測精度に課題がある。また、地形影響の予測には、電中研モデルが用いられているが、大気拡散に大きな影響を及ぼす大気安定度の効果（温度成層効果）が考慮されていない。

### 3.1 統計的ラグランジェ拡散モジュール

ブルーム、パフモデルの欠点は、不安定成層境界層（混合層、Convective boundary layerという）で顕著になる。混合層中では、地表からの強いブルームによる上昇流域updraft regionと緩やかな下降流域downdraft regionの2つで構成されている。上昇流域での鉛直風速は下降流域での鉛直風速よりはるかに強く、また、それぞれの領域の面積比  $a_{updraft}/a_{downdraft}$  は  $<1$  になっている。このような鉛直風速の非対称性（大きなskewness歪度）のために、煙の拡散は、上下に対称なブルーム、パフモデルの濃度分布（ガウス分布）から偏倚し、煙の主軸は地面に平行ではなく上下に大きく蛇行する。Fig.3は、Willmarthの水槽実験とLuhr and Sawfordの数値モデルの結果を比較した。

図に示したように、混合層（厚さ $\delta$ ）中のトップ $z_s = \delta$ に排出された場合、煙が徐々に下降して地面に達し、その後徐々に上昇する。そのため、ブルーム、パフモデルの最大着地濃度は $1/1.6 - 1/2.0$ 程度の過小評価になってしまう。

本研究では統計的ラグランジェ拡散モジュール（Lagrangian stochastic turbulent diffusion module）を開発した。これは、鉛直風速の確率密度分布の非対称性を考慮し、乱流拡散をマルコフ過程と仮定し、多数の拡散粒子の運動をLangevin equationで記述して、それを数値的に追尾するものである。混合層の内部では、粒子運動の時間スケールLagrangian time scaleが上昇（下降）流域の時間スケールよりずっと長いことから、上昇（下降）流域内の粒子は、そのまま同領域に止まって上昇（下降）すると仮定でき、それぞれの流域内部での粒

子運動を定式化したものである。Fig.3の一番下の図に、本研究の結果がLuhr and Sawfordの計算結果と良く一致することを示す。

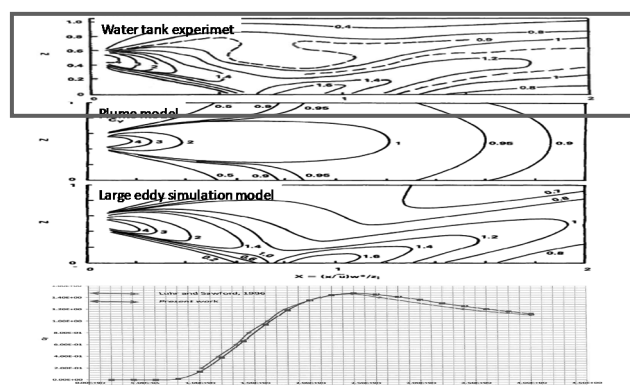


Fig.3 Contour of concentration when pollutant is emitted from top of the convective boundary layer.

### 3.2 成層乱流拡散モジュールを組み込んだ気象モデルWRFと化学輸送モデルWRF-chem

乱流拡散の理論としては、従来 $k-\epsilon$ モデルや $k-l$ モデルが使われてきたが、温度成層状態（鉛直方向に温度分布があり、流体運動に浮力が作用する状態）によって数千倍変化する乱流拡散を記述するには十分な精度がなかった。我々は、乱流に及ぼす成層効果を室内実験と野外観測で調べ、「成層乱流理論」（Algebraic Stress Model, ASM : Uno, Wakamatsu & Ueda 1989, Ueda et al. 2012）を提唱してきた。また、このASMをプログラミングして成層乱流拡散モジュールを作成した。

このASMは、これまで特に予測精度が低いとされていた「安定」成層乱流に対しても、高い精度を有する。即ち、安定成層中では、乱流拡散は急激に減衰するが、その影響は鉛直方向と流れ方向、スパン方向とで大きく異なり、運動量拡散と物質の拡散とで異なり、接地気層とその上空（自由大気）とでも異なること、さらに、強い安定成層では逆勾配拡散（低温側から高温側への熱拡散）さえ起こることを、高精度で予測できる（Komori, Ueda, Ogino & Mizushima, 1978, 1983; Ueda, Mitsumoto & Komori, 1981; Hanazaki, 1993; Hanazaki & Hunt, 2004）。現時点では、このASMが成層乱流理論として最も再現性の高いものの一

つと考える。

これまで、この成層乱流拡散モジュールを組み込んだ熱流体力学モデルSIMPLER-3Dを、熱的に誘起される局地風（海陸風や山谷風）とその中で光化学大気汚染の研究に用いてきた（Sha, Ueda, 1990, 1991; Chang, et al. 1989, 1990, 1991）。

本研究では、気象モデルWRFと化学輸送モデルWRFchemに、この成層乱流拡散モジュールを組み込んだ予測システムを整備した。

このシステムを用いれば、複雑地形上に建設される廃棄物焼却施設や発電所などの排煙拡散の合理的な予測、特に、これまで予測が困難であった「地形影響の予測」と「特殊気象条件下での拡散の予測」に利用できる。特殊気象条件のうち「逆転層の形成によるトラッピング現象」にはWRF-chemがそのまま用いられ、ダウンドラフト、ダウンウォッシュの予測には、熱流体力学モデルSIMPLER-3Dと統計的ラグランジェ拡散モジュールを組み合わせて、またフュミゲーションの予測には、WRFモデルと統計的ラグランジェ拡散モジュールとを組み合わせて用いれば、これまでにならぬ高精度予測が可能になる。

#### 4. 地球規模、領域規模の大気化学輸送モデル

##### 4.1 GEOS-chemモデル

GEOS-chemは気象データとゴダード地球観測システム（GEOS）をもとに実行するグローバルな3次元大気化学輸送モデル（CTM）であり、NASAのグローバルモデリングチームと関係するオフィスが提供しているものである。本モデルは、世界中の研究グループによって大気組成の問題の広い範囲に適用されている。モデルの科学的な方向性は、国際GEOS-CHEMの運営委員会とユーザーキンググループによって提供されている。モデルは、米国NASAの地球科学部門とカナダ国立工学研究評議会からの支援を受けて、ハーバード大学、ダルハウジー大学内に設置されるGEOS-CHEMサポートチームによって管理されている。

##### 4.2 WRF-chemモデル

WRF（Weather Research and Forecasting）モデルは大気科学・気象の研究と天気予報業務の両方のニーズに対応するために設計された次世代数値予報システムである。データ同化システム、ネスティングおよび並列計算が容易に行える。モデルは数千kmから数10m四方の領域を対象とした計算に対応できる。地球規模の計算も可能である。

WRF-chemはWRFモデルに大気化学をカップルしたモデルである。モデルは、気象現象と同時に微量ガスとエアロゾルの排出量、輸送、混合、および化学変換をシミュレートする。モデルは、地域規模の大気質、野外観測の解析、および雲と化学の間の雲スケールの相互作用の研究に使用できる。

本研究では、気象モデルWRFと化学輸送モデルWRF-chemに上記の「成層乱流拡散モジュール」を組み込んだ。また、東アジア全域について、エミッションインベントリをWRF-chemにリンクすれば、東アジア全域の気象及び種々の大気汚染が計算できる。また、WRF-chemのネスティング機能を用いて、東アジアの一部（例えば、日本、関東地方、川崎市など）の気象、大気汚染の計算ができる。さらに、大気汚染による気象変化、気象変化に伴う大気汚染のさらなる悪化など、気象と大気汚染の相乗作用（フィードバック）が計算できる。

WRFモデル、WRF-chemモデルについての解説書、ユーザーズマニュアルおよびモデル結果の可視化グラフィックスモデルの説明書をTable 2に示す。

Table.2 References of WRF model, WRF-chem model and graphics model GrADS.

WRF Model User's page	<a href="http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/">http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/</a>
WRF Model / Working Group 11 (CHEM)	<a href="http://ruc.fsl.noaa.gov/wrf/WG11/">http://ruc.fsl.noaa.gov/wrf/WG11/</a>
WRF Ver3 Modeling System User's Guide	<a href="http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf">http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf</a>
WRF/Chem V3 User's Guide	<a href="http://ruc.fsl.noaa.gov/wrf/WG11/Users_guide_01dec08.pdf">http://ruc.fsl.noaa.gov/wrf/WG11/Users_guide_01dec08.pdf</a>
A Description of WRF Version 3	<a href="http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf">http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf</a>
GrADS home	<a href="http://www.iges.org/grads/">http://www.iges.org/grads/</a>
GrADS user's manual	<a href="http://www.iges.org/grads/gadoc/">http://www.iges.org/grads/gadoc/</a>
NetCDF*	<a href="http://www.unidata.ucar.edu">http://www.unidata.ucar.edu</a>

5. 研究結果

5.1 GEOS-chemを用いた、Hgの全球規模の挙動の研究

5.1.1 目的

欧米を中心に水銀問題に対する関心が高まっており、モデルの検討など取り組みが進んでいる。GEOS-chemにもHgモデルが公表されていることから、本研究では精度向上を目的としてパラメタライズの修正を検討する。

5.1.2 結果

産業革命以降蓄積されたHgの土壌からの放出のフラックスを文献によって見直し、臭素(Br)及びオゾン(O<sub>3</sub>)による無機水銀(Hg<sup>0</sup>)の酸化反応を考慮した。

Fig.4の領域IIからVIIに対して、環境省「有害大気汚染物質モニタリング調査」によるHgの測定結果と比較を行った結果を示す (Fig.5)。各グリッドの観測値は、グリッド内に存在する全ての一般環境測定局における測定結果の平均値及び標準偏差 (エラーバー) である。夏季のHg濃度について着目すると、Br及び日射量のみを考慮したBASEでは過小評価であったのに対し、パラメータに修正を加えた他の3ケースでは再現性が向上した。

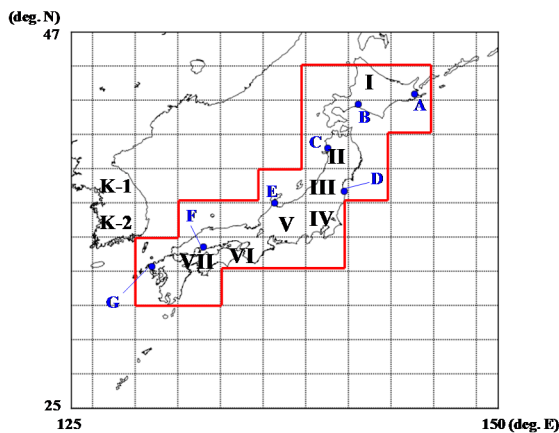
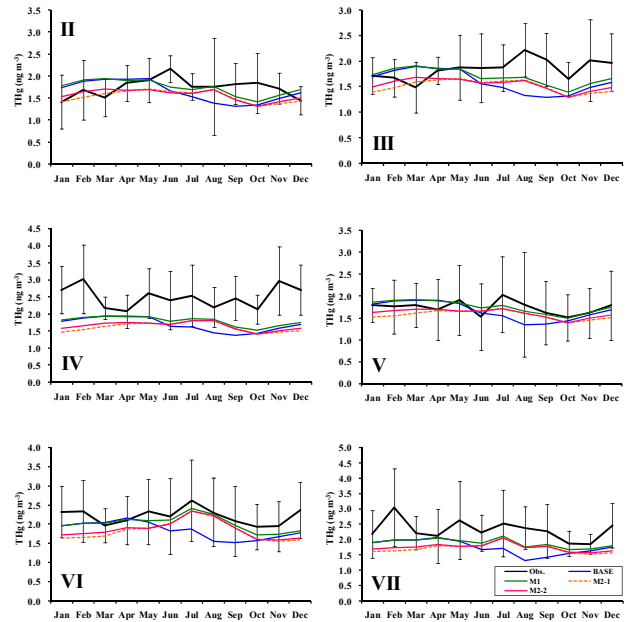


Fig. 4 GEOS-Chem-Hgによる日本周辺の計算領域。グリッド解像度は2° (緯度方向) × 2.5° (経度方向)



BASE : 土壌からのHgフラックス→土壌Hg濃度及び日射量を考慮 Hg<sup>0</sup>の酸化反応 : Br  
 M1 : 土壌からHgフラックス→土壌Hg濃度、日射量、及び気温を考慮 Hg<sup>0</sup>の酸化反応 : Br  
 M2-1 : 土壌からのHgフラックス→土壌Hg濃度、日射量、及び気温を考慮 Hg<sup>0</sup>の酸化反応 : Br+O<sub>3</sub>  
 M2-2 : 土壌からのHgフラックス→土壌Hg濃度、日射量、及び気温を考慮 Hg<sup>0</sup>の酸化反応 : Br+O<sub>3</sub> (極域はBrのみ)

Fig. 5 日本列島上の各陸面グリッド (図4-2のII~VII) における、2007年の地表層大気中総水銀 (THg) 濃度の観測値 (Obs.) 及びモデル計算値。観測値は、当該グリッド内に存在する全ての一般環境測定局における、「有害大気汚染物質モニタリング調査」によるHgの測定結果の平均値 (Cave) 及び標準偏差 (σ ; エラーバー)。ただし、Cave ± 3σの範囲から外れる測定結果は外れ値として除外した

5.2 WRFchemを用いた、大気汚染と都市気象変化の相乗作用の研究—冬季北京のPM<sub>2.5</sub>汚染—

5.2.1 目的

発展途上国の巨大都市では、冬季晴天日に環境基準の数10倍の高濃度エアロゾル汚染が発生する。本研究は、大気汚染と都市気象変化との相互作用の解明と排出削減効果の評価を目的とする。

5.2.2 結果

エアロゾルは日射の散乱により地表での直達日射量を減少させ、地上気温の低下を招く。また、ブラックカーボン (BC、すす) は日射を吸収するため、日出後、午前中にはエアロゾル層 (地表から200-300 mの気層) の上面を加熱して逆転層を強

化する。夜間には、通常、地面との長波放射の授受により地表気温を上昇させるが、冬季北京の場合、夜間の気温低下と高濃度大気汚染のために大量の凝結核から放射霧が生成し、霧粒から天空への長波放射により地表気温は1～2℃低下する。このように、鉛直方向の熱的構造、特に、逆転層の強度と高度を大きく変化させる。これがエアロゾル濃度のさらなる上昇（正のフィードバック）をもたらす。Fig.6には、一例として、2013年1月26日から2月1日にかけての北京市の高濃度大気汚染とそれに伴って生じた都市気象の変化を示す。

上図には汚染物質（SO<sub>2</sub>+NO<sub>x</sub>）排出量が現状の0.001倍、下図には1.0倍時の地上気温、日射量とBCの地上濃度の日変化を示す。

比較すると、BCの濃度上昇後に汚染物質（SO<sub>2</sub>+NO<sub>x</sub>）排出量の濃度上昇が認められ、汚染物質（SO<sub>2</sub>+NO<sub>x</sub>）排出量が1.0倍時のものは、1月29日頃から気温及び日射量の上昇が抑えられ、その後に汚染物質（SO<sub>2</sub>+NO<sub>x</sub>）排出量の増加が認められた。

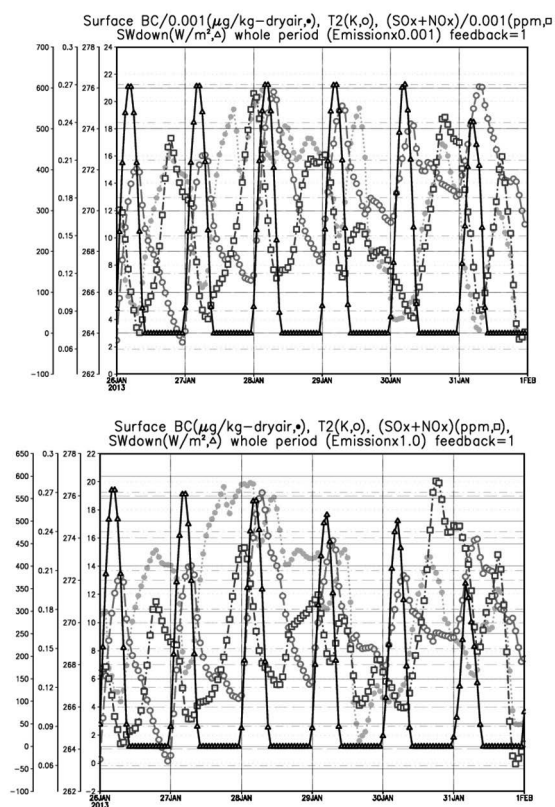


Fig. 6 大気汚染と都市気象変化の相乗作用。汚染物質排出量が現状の0.001倍と1.0倍時の地上気温、日射量とBC、SO<sub>2</sub>+NO<sub>x</sub>の地上濃度の日変化

## 6. まとめ

- 1) 気象モデル、化学輸送モデルとして、WRF、WRFchem、GEOS-chemを日本環境衛生センターのPCクラスタマシンにインストールして予測システムを構築した。多くのユーザが種々の目的に対して計算実行できるように、操作マニュアルを整備した。
- 2) グラフィックモデルとして、GrADSをインストールして描画システムを構築した。
- 3) Hgの全球挙動について土壌からの再飛散過程、金属水銀の酸化過程のモジュールを精緻化し、わが国の有害大気汚染物質モニタリングのデータおよび海外での観測データがよく再現できることを示した。

### 【参考文献】

- 1) Uno, I., Ueda, H. and Wakamatsu, S. 1989: *Boundary-Layer Meteorology*, 49, 77-98.
- 2) Ueda, H., Fukui, T., Kajino, M., Horiguchi, M., Hashiguchi, H. and Fukao, S. 2012: *J. Atmos. Sci.*, 69, 323-337.
- 3) Komori, S., Ueda, H., Ogino, F. & Mizushima, T. 1978: *Phys. Fluids*, 25, 1539-1546.
- 4) Komori, S., Ueda, H., Ogino, F. & Mizushima, T. 1983: *J. Fluid Mech.*, 130, 13-26.
- 5) Ueda, H., Mitsumoto, S. & Komori, S. 1981: *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 107, 561-571.
- 6) Hanazaki, H. & Hunt, J.C.R. 2004: *J. Fluid Mech.*, 507, 1-42.
- 7) Hanazaki, H. 1993: *J. Fluid Mech.*, 249, 415-44

## Summary

Model calculations of meteorology and air pollution have become popular in recent years. The calculations have shown great progress, due to advances in computer performance and community modeling systems. In this study, we integrated our previous research achievements on physical and chemical processes into the frame work of the community model. Moreover, we constructed an air advection diffusion model system and set the computer environment. Subsequently, first, we tried to simulate global-scale mercury (Hg) behavior in atmosphere with high accuracy. Second, we conducted calculations of the synergy effects between urban climate change and air pollution. The PM<sub>2.5</sub> winter

pollution in Beijing was used as a target. We improved the prediction accuracy of the behavior of atmospheric Hg, by refining parameterizations of re-entrained Hg from soil and incorporating the photo-oxidation reaction of Hg with bromine(Br). In other cases, we derived high concentrations of air pollutant. Moreover, we showed that black carbon promotes the absorption of solar radiation and decreases the surface temperature. A change in the strength and height of the inversion layer causes a higher concentration of air pollutants.