

# 東アジア域の地域気象と物質輸送モデリングの総合化

九州大学応用力学研究所 ○鷗野 伊津志

Integration of Regional Meteorology and Chemical Transport Modeling over the East Asia

Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

Prof. Itsushi UNO

**Abstract** This project studied an integration of regional meteorology/climate model and tropospheric chemical transport model (CTM) to have a better understanding of atmospheric environmental assessment over the East Asia. One of the prototype integrated model, Chemical weather FORecasting System (CFORS), was developed and was intensively used during the ACE-Asia (Asia Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment) intensive observations of year 2001 under the coordination of IGAC (International Global Atmospheric Chemistry) project. It was revealed that the CFORS prediction of the natural aerosols (Kosa dust and biomass soot) and anthropogenic aerosol (sulfate) provided the very important contribution for the operation of airborne research. Modeling study showed that the complicated air flows (multi-scale air flows) over the Japan play a significant role to understanding the chemical environment over Asia.

## 1 緒言

地球温暖化物質の物質循環の研究、環境酸性化物質（酸性雨）の長距離輸送研究、地域気候・気象モデリング、対流圏・成層圏物質（オゾン等）交換過程の研究には、数値モデルが重要な役割を果たす。これらの研究は相互に強く関係しておりモデル研究においては、野外観測やリモートセンシングで得られた個々の事象を独立に扱うのではなく、物理・化学現象の共通部分の統合化を行い、総合的なモデルの開発と応用を積極的に進める必要がある。そのためには地域気候・気象モデルと対流圏内の物質輸送モデル（例えば越境大気汚染モデル）の総合化が不可欠であり、大気中微量成分の空間分布・時間変化を示す「化学天気予報図（chemical weather forecast map）」を作成することが重要である。

本研究では、東アジア域における地域気候・気象変化と対流圏物質輸送プロセスを統合化し大気環境の変化のシミュレート可能なモデルの構築を行った。

## 2 研究計画

図1に研究開発計画と内容の全体の概念を示す。

アジアモンスーン域に特徴的な気象現象、たとえば梅雨、夏季・冬季の季節風、および、これらの気象変化に伴って生じる大気汚染物質の輸送・拡散の解明には水平分解能数10 km程度の地域気象モデルが重要な役割を果たす。特に、日本は周囲を海に囲まれており気象観測データが得られにくい。そのため雲・降水・降雪系を含む地域気象モデルとリモートセンシングが重要である。

一方、対流圏物質輸送モデルは、従来の都市型大気汚染モデルと異なり、汚染物質の雲や降水・降雪系による変換・除去プロセスを取り込むことが必要で、これらを含む地域気象モデルからの情報が有用である。更に、海上（東シナ海、日本海など）での沈着量が日本域に到達する汚染質の絶対量の予測に感度が大きく、これらを総合的に扱える物質輸送モデルが必要である。また、土地利用、植生変化、人為起源発生源排出シナリオを適切に両モデルに取り込む必要もある。これらの観点から、以下の研究開発を連携して進めた。

- (A) 地域気候・気象モデルによる東アジア域の気候・気象変動解析
- (B) 対流圏物質輸送モデルによる化学天気予報図の作成と可視化解析

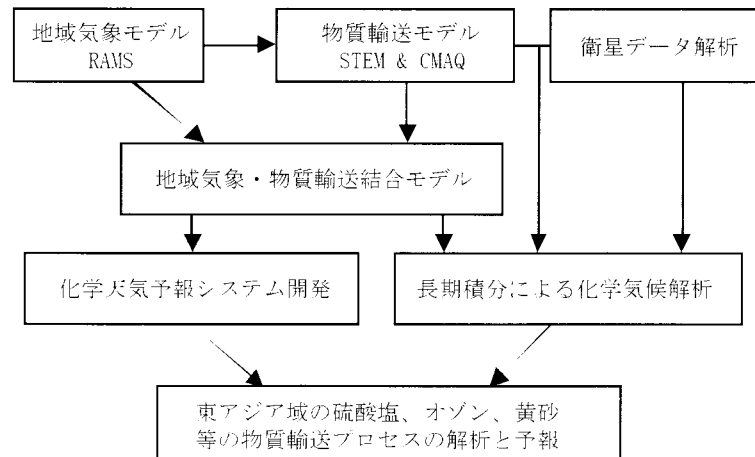


図1 研究開発計画・内容の概念図

### 3 研究の主な成果

#### (1) 地域気候・気象モデルによる東アジア域の気候・気象変動解析

コロラド州立大学で開発された地域大気モデリングシステム (RAMS; Pielke et al., 1992) を改良した地域気候モデルを構築した。モデルの性能を評価するため、東アジア域を対象に1993、1994年を例として2年間の気候再現実験を行い、結果を観測値と比較して問題点の検討を行った。計算領域は日本を中心とした東アジア域で水平格子分解能は40kmである。

モデルによって再現された1994年1月の降水量とGPCP 観測値 (GPCP: Global Precipitation Climatology Project) の比較から、モデルの降水量は観測値の大規模な特徴をよく表現していることを確認した。モデルでは本州の日本海側で非常に降水量が多く、太平洋側では少ないコントラストが明瞭に表れていた。日本の各地域 (北海道、本州日本海側、太平洋側東部、太平洋側西部、九州) で平均した降水の年変化についてモデルの結果とAMeDASによる観測値の比較を行い、9月頃を中心に主に太平洋側西部で降水の過小評価が顕著であるが、それを除いてモデルは観測された降水量の変化をよくシミュレートすることが示された。

また、対流性の降水が卓越する夏季は、冬季と比較して降水量分布の再現が一般に困難であり、特に、梅雨期の亜熱帯高気圧において非現実的な強い降水が見られるという問題があった。しかし、モデルの積雲対流スキームに変更を加え、対流圏下層が乾燥した領域で深い積雲対流が抑止されることを考慮することにより、この問題を回避することができた。これによって、現実の大気においても、亜熱帯高気圧における深い積雲対流活動の抑止に、対流圏下層の乾燥空気存在が重要であることが示唆された。

#### (2) Off-line 型の物質輸送モデルによる東アジア域の長距離輸送解析

地域気象モデルRAMSにより得られた気象データを off-line で用い、物質輸送モデルSTEM (Sulfur Transport Eulerian Model) と米国環境保護庁の第3世代物質輸送モデルMODELS3/CMAQを用いた輸送シミュレーションを進めた。

ここでは、CMAQを用いて大気環境評価を行った結果を示す。本研究では、まずRAMSで計算された気象・水象データを直接かつ最大限使用できるように、RAMS-CMAQ気象データ変換のインターフェースを整備した。その結果を基に、CMAQを1997年1月間について適用した。

図2には、モデルで得られた硫酸塩の時間変動と、計算領域内の $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_4$ の収支解析を示す。モデルは、観測された硫酸塩の変化を非常によく再現し、冬季の硫酸塩エアロゾル $\text{SO}_4$ の寿命が2.8日と推定された。

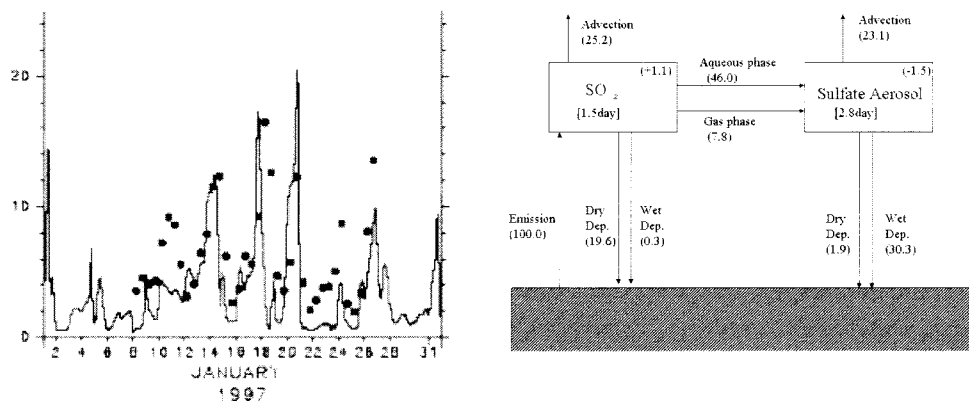


図2 (左) 長崎県福江島でのモデル(実線)と観測(点)の $\text{SO}_2$ の比較(濃度は $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )、  
(右)  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_4$ の収支解析の結果

### (3) 地域気象・物質輸送結合モデルの開発と応用

上述のoff-line型の物質輸送モデルの長所を持ち、かつ、地域気象モデルと物質輸送モデルを結合した新しいモデルを開発した。この結合型モデルでは、気象モデルと物質輸送モデルを同時に計算することで、気象モデルの持つ毎時間ステップの詳細な乱流、雲、降水等の気象パラメータを得られ、同時に、物質分布の変化に応じた大気放射へのフィードバックを扱うことが可能となる。ここでは、開発されたモデルの成果を示す。

#### a) 黄砂の輸送モデルの構築と衛星データ解析

地域気象モデルと結合した黄砂の輸送モデルを開発した。この輸送モデルでは、黄砂の発生源の特定に、NDVI植生インデックスと積雪被覆率データを利用し、発生条件には土壌分類に従った臨界摩擦速度マップを利用した。また、粒径別輸送、乾性沈着、湿性除去、重力沈降のプロセスもモデル内に組み込んだ。1998年4月10日～25日にかけての東アジア域の大規模な黄砂エピソードに適用し、その輸送解析を行った。

1998年4月14～15日に主にゴビ砂漠～黄土高原で発生した黄砂は、寒冷渦に巻き込まれる形で日本列島を西から東に横断するように輸送されるのがシミュレートされた。

図3にモデルで計算された黄砂のカラム濃度とNOAA AVHRRから本研究で開発されたAVI (Aerosol Vapor Index)の比較を示す。開発されたモデルが黄砂の輸送過程をよく再現することが理解でき、これは地域気象モデルとカップルした解析で初めて明らかにされた成果である。

#### b) 化学気候シミュレーション

地域気象モデルRAMSと結合した $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_4$ の化学輸送モデルを開発し、東アジア域を対象として、1994年4月～1995年3月までの長期積分を行った。モデルは東アジア域の詳細な気象変化を再現しており、季節毎の特徴的な気象パターンと $\text{SO}_4$ 濃度の地域分布の特徴の解析を行った。

図4には、 $\text{SO}_4$ の年間平均濃度の地域分布を示す。日本国内の濃度は $4\sim 12\text{mg}/\text{m}^3$ 程度で、濃度分布は、台湾～南西諸島～東日本にそった等値線の存在が特徴的で、東京と沖縄の年平均濃度はほぼ同じレベルであることが示された。

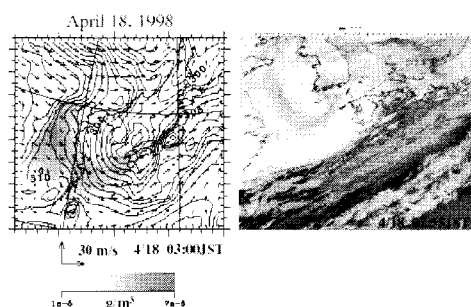


図3 モデルで計算された黄砂のカラム濃度(左)とNOAA AVHRRから計算されたAVI (Aerosol Vapor Index; 白いところが高濃度の黄砂) (右)の比較

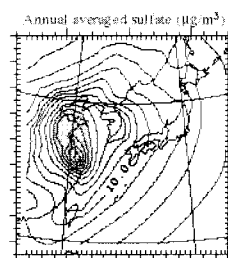


図4 モデルで計算された $\text{SO}_4$ の年間平均濃度の地域分布

#### (4) 化学天気予報システムの開発と2001年春季の国際共同観測への参加

以上の研究成果の統合化を目指して、地域気象モデルと物質輸送モデルをカップルした化学天気予報システム (Chemical weather FORcasting System: 通称CFORS) を構築した。CFORSは、利用する境界条件となる気象データによるが、72～96時間先までの気象変化と物質輸送をシミュレートする。赤道以北から北緯55度のアジア域の自然起源、人為起源の物質の輸送を予報するシステムである。表1にシステムの構成を示す。

2001年4月に地球大気化学国際共同研究 (IGAC) の一環で、日本、韓国、台湾、米国などから100人以上の研究者が参加した大気中の浮遊粒子 (エアロゾル) の国際共同観測 (ACE-Asia) が大型の航空機、船舶、地上観測網を用いて過去最大級の規模で行われた。この化学天気予報システムは、航空機の観測計画の立案に積極的に用いられた。

ACE-Asiaの観測期間中には数度の大規模な黄砂が発生し、特に、4月6日から8日にかけて中国の砂漠で発生した黄砂は沿海州北部の寒冷渦 (低気圧) に巻き込まれ高濃度のまま、北太平洋を横切り北米東岸まで達した。(図5左)。また、その翌週には黄砂が西日本を覆う様子が予報された (図5右)。これらの予報結果はNASAの海色センサー衛星SeaWiFSの観測結果と一致していた。

観測とモデルの結果を解析することで、黄砂が硫酸塩に数時間の遅れを持って日本に飛来することや、従来知られていなかった、東南アジアの焼き畑に伴うススや一酸化炭素が日本に輸送されることが明らかにされつつあり、今後の詳細な解析が待たれている。

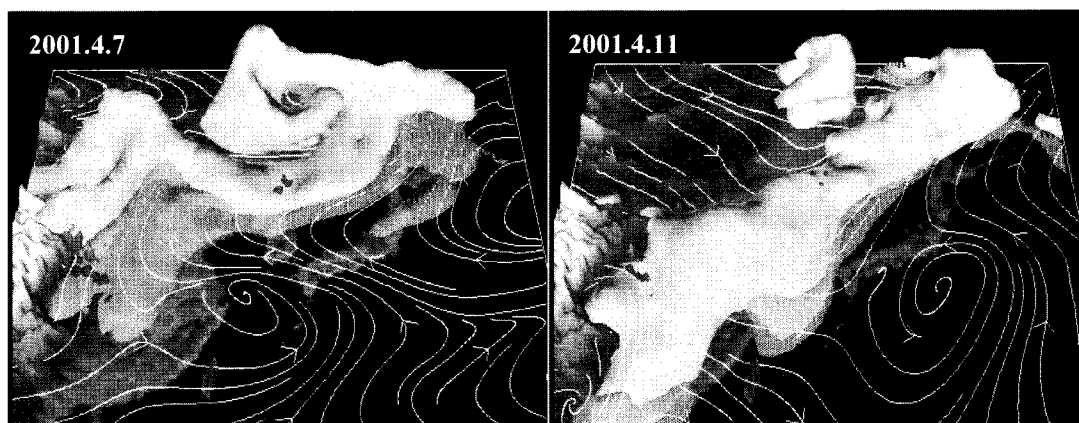


図5 化学天気予報システムで計算された (左) 寒冷渦に取り込まれ北日本に流れだす黄砂 (黄色) と硫酸塩 (ピンク)、(右) 西日本に流れだす黄砂と硫酸塩。白い矢印は高度500 mでの風の流れを示す。

表1 化学天気予報システムCFORSの基本構成

モデルの構成	地域気象ドライバー RAMS 物質輸送モデル RIAM-Transport module
輸送対象物質	SO <sub>2</sub> /SO <sub>4</sub> , Black Carbon/Organic Carbon, 土壌性 Dust (12-15 粒径), Lighting NO, Radon, CO、火山性ガス
モデル計算領域	東アジア域 (モデル水平格子 80km) で緯度 25°、経度 115° を中心 とした 8000km×7200km の領域
気象境界条件	NCEP (米国環境予報センター) の全球 AVN データ、及び、気象庁 JMA アジア域格子点予報値 GPV データ (いずれも 6 時間毎の指定面気圧 の予報値)
海水面温度	NCEP 診断値
予報スケジュール	72 時間予報 (JMA-GPV) を用いた場合 96 時間予報 (NCEP-AVN) を用いた場合
計算機環境	バイオウルフ型 Pentium Linux Cluster (17node)
化学天気予報結果の公開	CGI による会話型 web base (vis5D による 3D 表示を含む)

#### 4 ネットワークの活用

気象・物質輸送モデルの計算結果はいずれも多次元・多変数であり、結果の正確な解釈にはコンピューターグラフィックスを多用した3次元の可視化技術が必要である。そのため、

- ・研究分担者間のデータ交換
- ・化学天気予報システムの開発と運用（NCEP, JMA データのルーチ的な取得）
- ・化学天気予報結果の公開

にSINETとIMNETネットワークの活用を行った。

#### 5 まとめ

地域気象モデルと物質輸送モデルを統合化した新世代の対流圏気象・物質輸送結合モデルの研究開発を行い、通常の天気図のように「化学天気予報図」を作成することの可能性を追求し、一部は具現化した。更に、黄砂のような自然起源の物質についても同様の予報を行うことが可能であり、砂漠化の問題とも関連した自然現象がアジア域の大気環境に与える影響を的確に予測することを可能とした。

2001年春季には、開発された化学天気予報システムを用いて、国際共同観測であるACE-Asia と NASAが中心に行うTRACE-P（TRAnsport and Chemical Evolution over the Pacific）の集中観測期間（2001年2月～4月）の化学天気予報が行われた。アジア域のような規模の大きな大気環境観測に際して、化学天気予報結果は、観測計画の立案に積極的に利用され、その有効性が確認された。本研究開発の結果をもとに、観測とモデル化のアプローチが統合され、より効率的な研究の推進が期待されている。

#### 6 研究実施体制

九州大学応用力学研究所 鶴野 伊津志、辰野 正和、石井 幸治、伊賀啓太  
石原 浩二（科学技術振興事業団技術員）

国立環境研究所大気環境研究領域 江守 正多、菅田 誠治、野沢 徹

静岡大学工学部 大原 利眞

鹿児島大学 木下 紀正(教育学部)、矢野 利明、飯野 直子（工学部）

菊川浩行（水産学部）