

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 鷓野 伊津志

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

Prof. Itsushi for Applied Mechanics, Kyushu University.

Abstract This project study will integrate regional meteorology/climate model and tropospheric chemical transport model (CTM) to have a better understanding of atmospheric environmental assessment over the East Asia. Integrated model will be used to make 'chemical weather forecast map' in this region.

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る。

東アジア地域の大气環境問題を考えた場合，土地利用の改変や植生変化に伴う地域気候変化の他に，中国等の発展途上国の急速な経済発展による汚染物質排出量の増大に伴う越境大気汚染（酸性雨原因物質や光化学オゾンの長距離輸送）の影響の顕在化が指摘されている。21世紀初頭には我が国においても越境汚染に起因する酸性雨による植物・土壌被害の発現の可能性も示唆されている。それ故，我が国を含めた地域の詳細な大気環境予測・評価のための研究開発が必要であり，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)」を作成することが必要となっている。

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た大気環境変化をシミュレート可能なモデルの構築を目指している。

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ている。

- (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

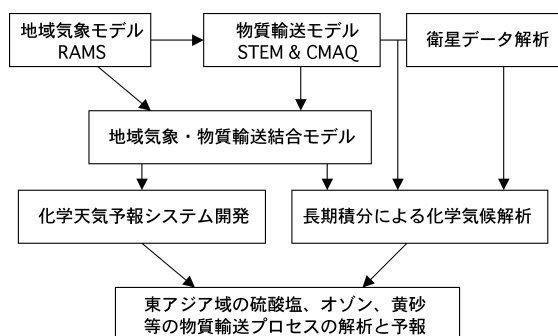


図1 研究開発計画・内容の概念図

3 研究の進捗状況

(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する。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(図2を参照)で水平格子分解能は40kmである。

図2にモデルによって再現された1994年1月の降水量とGPCP 観測値を示す(GPCP; Global Precipitation Climatology Project)。GPCP のデータは月平均の全球降水量分布を2.5格子の分解能で推定したものである。図から、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。GPCP では分解能の不足から捉えられていないが、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る。これはシベリア高気圧からの寒気の吹き出しと日本海からの水蒸気の供給によりもたらされる日本海側の豪雪を表現しており、現実的である。

図3に、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示す。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。

改良した地域気象モデルは梅雨季を除いて東アジアの地域気象と降水パターンをよく再現するが、梅雨季には主に積雲対流スキームの問題により梅雨前線の再現性に問題があること明らかになった。今後はモデルの降水過程および陸面水文過程を改良し、日本および広域のデータを用いてさらに検証を行っていく予定である。

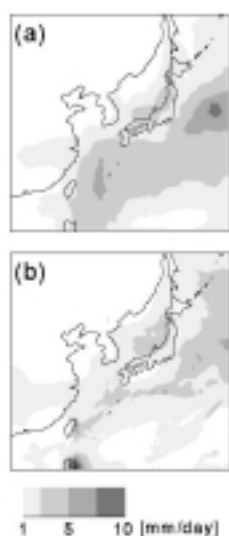


図2 モデルによって再現された1994年1月の降水量(上)とGPCP 観測値(下)の比較

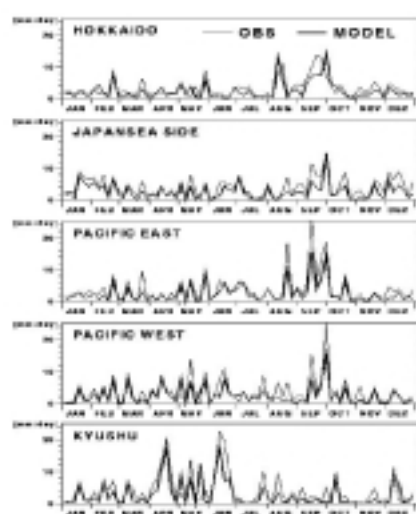


図3 日本の各地域(北海道、本州日本海側、太平洋側東部、太平洋側西部、九州)の平均降水のモデルと AMeDAS の観測値の比較

(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で使い、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ている。

ここでは、STEMを用いて大気環境評価を行った結果の例を示す。本研究では、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、STEMの座標系や湿性・乾性沈着モデル、光解離定数設定法などについて改良を図っている。シミュレーション期間は1993年4月であり、計算領域は北緯31°、東経121°を中心とする東西4,800km×南北4,400kmの範囲である。

図4には、1993年4月18日12時における地上濃度分布を示すが、サルフェイト、ナイトレートおよびオゾンが中国大陸から日本列島に輸送されている様子がシミュレートされている。図5には、大阪で連続測定されたエアロゾルの日平均濃度との比較結果を示す。計算結果は、モデルの水平メッシュが80kmと大きくローカルな寄与を計算することができないため、やや過少ではあるが全体的な変動は実測と整合している。

(3) 地域気象・物質輸送結合モデルの開発

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の開発を進めている。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応用例を示す。

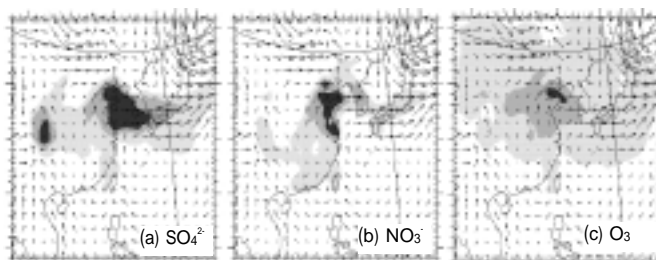


図4 1993年4月18日12UTCにおける地上濃度分布。

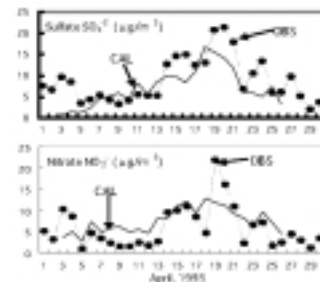


図5 1993年4月の大阪の地上濃度の実測(溝畑による)とモデルの比較

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。寒冷渦の通過に伴い、ダストの鉛直分布は、最初に濃い層が高い高度に現れ、続いて低い位置へと変化することがモデルの鉛直空間分布から示され、これはライダー観測の結果を合理的に説明していた。

図6にモデルで計算された黄砂のカラム濃度とNOAA AVHRRから計算された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結果である。

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SO₂/SO₄²⁻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SO₄濃度の地域分布の特徴の解析の結果を報告する。計算領域は図2の範囲である。通年計算には膨大な計算時間が必要となるが、ここでは、高性能のベイオウルフ型並列計算機Linux Cluster システムを利用した。

図7には、SO₄²⁻の年間平均濃度の地域分布を示す。日本国内の濃度は4～12 μg/m³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。中国大陸内部の濃度分布は、発生源の地域分布に対応した形を取っている。

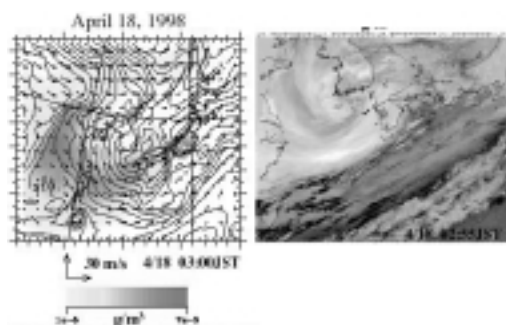


図6 モデルで計算された黄砂のカラム濃度（左）とNOAA AVHRRから計算された AVI(Aerosol Vapor Index；白いところが高濃度の黄砂）（右）の比較

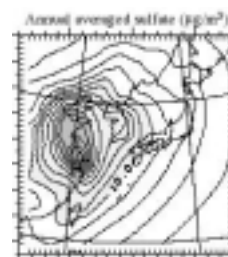


図7 モデルで計算されたSO₄²⁻の年間平均濃度の陸域分布

(4) 化学天気予報システムの開発について

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)の構築を開始した。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り、本システムは2001年2～3月に予定されているアジア域のエアロゾルの動態を総合的に計測する ACE-Asia (Aerosol Characterization Experiment Asia) の航空機、船舶のオペレーション際の指針として利用が期待されている。

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 ₂ /SO ₄ , 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	ベイオウルフ型 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どれも多次元・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 データのルーチン的な取得）
- ・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ている。

5 今後の計画

本研究で提案している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を用いると、現在の天気図のように化学天気予報図を作成すること可能となる。また、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が可能となる。アジア域のような規模の大きな現象の場合には、現象の全体像を捕らえずに閼雲に観測等の個別研究を進める傾向がみられるが、ここで化学天気予報図が作成されるようになると観測、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る。

本研究課題で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)の化学天気予報を行う計画が進行中である。

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圏環境部 江守 正多、菅田 誠治、野沢 徹

静岡大学工学部 大原 利真

鹿児島大学 木下 紀正(教育学部)、矢野 利明、飯野 直子(工学部)

研究協力者

Dr. D. W. Byun (U.S. EPA / National Exposure Research Laboratory, U.S.A.)

Dr. Xiaoming Cai (University of Birmingham, U.K.)

Dr. Marina Baldi (Institute of Atmospheric Physics (IFA-CNR), Italy)

Dr. Bill Hibbard (Wisconsin University/SSEC, U.S.A.)

Dr. Mahesh Phadnis (Princeton University, U.S.A.)