

国立環境研究所 ○ 鶴野 伊津志、若松 伸司
大韓民国国立環境研究院 柳 承道

1 はじめに

大気汚染の時間・空間分布には窒素酸化物・硫黄酸化物・炭化水素の地域的な発生源分布とその時間変化と、地域的な気象条件（海陸風の交替や混合層の発達など）が複雑にかつ非線型に関連している。従って、環境濃度と発生源との因果関係を把握するためには、局地気流のモデル（観測値による客観解析や数値予報モデル）と移流拡散と大気反応を含む3次元モデルの適用が重要となる。特に、光化学大気汚染の高濃度時にはその空間スケールが水平方向に100 km以上、鉛直方向には混合層の時間変化に対応して数100 mから2 km程度に達し、時間的にも2-3日のスケールを持っている。更に、問題に関与する汚染物質も重要なものだけでも20成分以上であるため、大量の観測結果や数値シミュレーション結果を高速に処理し表示・解析することが必要である。

このような3次元の大気の流れと大気汚染質の移流拡散のデータ解析には、コンピューターによるデータ解析と高度なグラフィックス処理能力を利用した可視化が有力なツールとなる。特に、最近のUNIXワークステーションの画像処理機能を利用した会話的なデータ処理が可能となりつつあり、最新の可視化技術の大気汚染データ解析への応用の重要性が増しつつある。

本報では、航空機等を利用した関東地域における3次元気流・大気汚染観測データとその3次元数値シミュレーションの結果をコンピューターグラフィックスを用いて表示・解析する。

2 気象モデルと都市スケール大気汚染モデル

2.1 気象モデル

局地気流のモデルとしては、（1）関東地域での23地点での気流観測結果をもとに、客観解析により3次元的なdivergence freeの気流を計算する方法（Sherman, 1978）と（2）静力学平衡・ブシネス近似のメソスケール数値気象予報モデル（Pielke, 1974; Mahrer and Pielke, 1978）の両者を利用した。ここで、数値気象予報モデルは温位や風速の初期プロファイルや計算領域の地形条件から3次元的な気流・拡散場を数値的に予報するモデルであり、観測値をモデルシミュレーションに取り込むことで更に予報精度を向上させることができる。

2.2 大気汚染3次元モデル

大気汚染3次元モデル（Urban Airshed Model; UAM）は米国EPAが中心となって開発した3次元オイラーモデル（Ames *et al.*, 1985）を主に利用している。モデルの基本方程式は、

$$\frac{\partial}{\partial t}(\Delta H C_i) + \frac{\partial}{\partial x}(\mu \Delta H C_i) + \frac{\partial}{\partial y}(\nu \Delta H C_i) + \frac{\partial}{\partial \rho}(W C_i) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \Delta H \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \Delta H \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial \rho} \left(K_V \frac{\partial C_i}{\partial \rho} \right) + R_i \Delta H + S_i \Delta H$$

ここで、 $\rho = (z - h(x, y)) / \Delta H$ で W は ρ 座標系での鉛直風速、 C_i は汚染質 i の濃度、 ΔH はモデル領域の高さ、 K_H 、 K_V はそれぞれ水平、鉛直方向の乱流拡散係数、 R_i は汚染質 i の反応項、 S_i は汚染質 i の発生・沈着項、 $h(x, y)$ は地表面高度である。最新のUAMでは、反応モデルとして炭化水素を炭素間の結合状態より7種類に分類して取り扱うCBM-4スキーム（Gery *et al.*, 1989）を利用しており、反応式は85本、物質数は33成分である。

計算にあたってはモデルに気象や発生源の情報を入力するとともに初期条件、境界条件等の諸条件を設定する必要がある。今回のモデル計算は1981年7月に関東地方において気象の立体分布と大気汚染物質の航空機観測を行った時のデータを用いて実行した。1981年7月16日と7月17日のフィールド観測データを用いてのモデルの詳細な検証がWakamatsu and Schere (1991)により行われており O_3 の地域分布や時刻変化が詳細に再現されている。フィールド観測が行われた16日と17日にかけて関東地域において高濃度の光化学大気汚染が出現した。この間の平均風速は2 m/s 程度と弱風であり、海陸風循環が発達し極めて複雑な気流場が構成されていた。モデル計算の領域は東西183km、南北172kmの範囲であり約6 kmの正方形メッシュを用いた。垂直方向には2 kmまで100m ごとに20層の等間隔グリッドとした。初期条件、境界条件は地上及び上空における観測値をもとに設定した。

3 計算結果の表示・解析法

数値計算は国立環境研究所の大型計算機 HITAC M-680/180E で行い、計算結果を UNIX ワークステーション SUN SPARC 2 及びシリコングラフィックス IRIS 上に表示・解析した（なお、基本的には全ての計算をワークステーション上で行うことが可能である）。

計算結果の基本的な表示は NCAR (National Center for Atmospheric Research) Graphics Version 3.1 を用いて SPARC 2 上で行った。NCAR Graphics は FORTRAN のサブルーチンパッケージであり、カラー表示が可能であるが、高度なアニメーション作成機能はない（図1にはその表示結果を示す）。

そこで、アニメーション表示はIRIS上の流体計算可視化ソフト（計算流体力学研究所）を用い、その結果をNVS (Network Video System) で商用のVTRにコマ撮り録画した。今回の研究ではポリウムレンダリング手法を用いて高濃度オキシダント気塊の形成と輸送過程を可視化した。

1981年7月16日と17日には、特に高いオキシダント濃度が関東南部地域において観測されたが、この汚染には海陸風などによる局地気流循環により形成される閉鎖系大気場における汚染物質の循環現象が大きく寄与していたことがモデル計算の結果明らかとなった。特に、夜間から早朝にかけて東京湾沿岸部及び東京首都圏地域において放出された大気汚染物質は、陸風によって海上に流出した後、海風によって内陸地域に輸送され、日中に放出された汚染物質とともに光化学反応を起こし高濃度の O_3 が発生した。気流場は

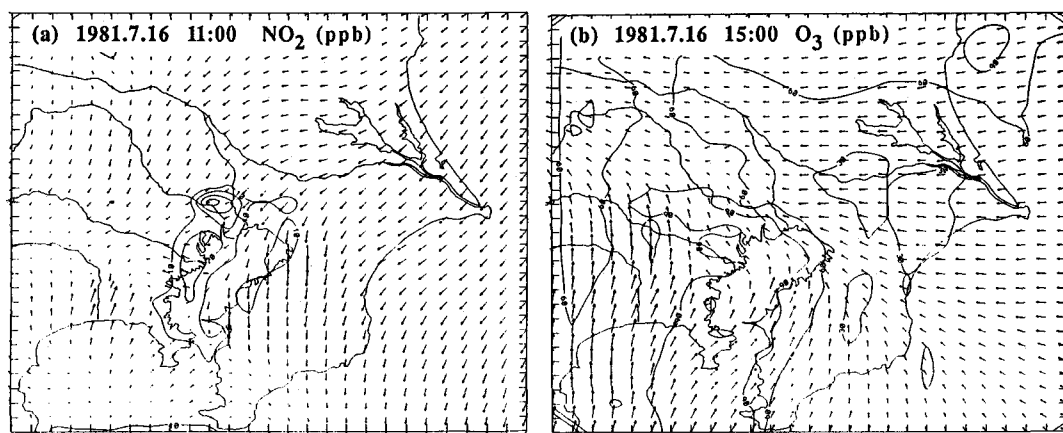


図1 UAMで計算された気流場と (a) 1981年7月16日11時モデル第1層($z=100m$)の NO_2 の濃度分布、(b) 1981年7月16日15時モデル第1層($z=100m$)の O_3 の濃度分布。

極めて複雑であり、日中には鹿島方面からの東系の風と、相模湾からの南系の風との間に風の収束域が形成された。このため特に東京都以南の地域において高濃度が出現持続した。午後から夜間にかけては上空に高濃度の二次汚染物質が認められた。このような二次生成大気汚染物質濃度の立体分布を可視化によりダイナミックに把握することが出来た。

4 まとめ

計算結果の可視化の第一の意義は現象をより直接的に理解する助けとなることであるが、計算結果のチェックや発生源対策を検討するにあたっても極めて有用である。今回の計算にあたっては境界面から流入する大気汚染物質の寄与が大きかったため境界条件の設定が合理的になされているかどうかのチェックや、風系のチェックのために可視化の情報は役立った。このモデル計算の最終的な目的は発生源の質と量の変化が、環境濃度にどのような変化を及ぼすかといった事を具体的に明かにする事である。光化学大気汚染は生成機構が極めて複雑であり発生源の強さと環境濃度との関係には比例関係がない。このため各種の発生源や気象条件ごとに計算を繰り返し最適な解を探索する必要がある。計算により得られる数値情報量は天文学的な数となるため、可視化以外の方法での計算結果の解析、評価は極めて困難である。可視化により全体の傾向を把握し、詳細な解析は数値情報を利用するのが最も合理的であろう。

なお、当日VTRを用いて可視化の結果もあわせて表示する予定である。

文献

- Ames, J., T. C. Myers, L. E. Reid, D. C. Whitney, S. H. Golding, S. R. Hayes, and S. D. Reynolds, (1985): SAI Airshed Model Operations Manuals - Volume I. User's Manual. EPA-600/8-85/007a.
- Gery, M. W., Whitten, G. Z., Killus, J. P. and Dodge, M. C. (1989): A photochemical kinetics mechanism for urban and regional scale computer modeling. *J. Geo. Phys.*, 94, 12925-12956
- Mahrer, Y. and Pileke, R. A. (1978): A test of an upstream spline interpretation technique for the advective terms in a numerical mesoscale model, *Mon. Wea. Rev.*, 106, 818-830.
- Pileke, R. A. (1974): A three dimensional numerical model of the sea breezes over South Florida, *Mon. Wea. Rev.*, 102, 115-134.
- Sherman, C. A. (1978): A mass-consistent model for wind fields over complex terrain, *J. Appl. Meteorol.*, 17, 312-319.
- Wakamatsu, S. and Schere, K. L., (1991): A Study Using a Three Dimensional Photochemical Smog Formation Model Under Conditions of Complex Flow, Application of the UAM to the Tokyo Metropolitan Area. EPA-600/3-91/015.