

## CS - 134

Polar Stereo Graph 上の輸送・反応方程式を用いた  
東アジアにおける物質輸送シミュレーション  
—— PEACAMPOT を対象とした解析 ——

大成建設 正員 松尾 浩嗣  
豊橋技術科学大学 正員 北田 敏廣  
気象研究所 佐々木 秀孝

## 1. はじめに

この数年、東アジア-北太平洋地域において対流圏の人為起源微量化学物質に関するいくつかの国際共同観測プロジェクトが実施された。1991年10月に行われた PEACAMPOT(10/5 ~ 11: 国立環境研、気象研等) もその一つであり、このプロジェクトで得られた情報は、I. 東アジアの排出源が形成する  $\text{NO}_x$  等の人為起源物質のバックグラウンド濃度を知り、II. それらの人為物質から化学的に生成し得る  $\text{O}_3$ (温暖化物質でありかつ他の化学物質の寿命をも決める key 物質) に関する情報を得る、上で大変に貴重なデータセットとなっている。しかしながら、観測は、その性格上、時空間で疎な情報を与えるに留まらざるを得ず、得られたデータは広域に分布する排出源との関係をただちに明示するものではない。この点を補うために、本研究は、輸送・反応方程式系の数値モデルによって、観測によって得られた濃度データの再現をはかり、それらがどのような空間分布の一部分を切り出したことに相当するかを明らかにすることを旨とした第一ステップである。特に、10月7日に長崎 ~ ソウル間の黄海上空(約 3,300 m) で取られた航空機観測データを対象に解析を行った。

## 2. 気象場と対象領域および計算諸元

気象場には、気象研究所の JSM(Japan Spectral Model) の出力場(水平方向に  $97 \times 97$  の 40 km メッシュ、鉛直方向に変動格子 19 点、3 時間毎)を用いた。計算領域は、JSM 出力場の南北両端をそれぞれ 10 格子点と東縁 10 格子点を除いた、日本、中国、台湾、韓国、北朝鮮を含む地域であり、鉛直方向には 997.5 hPa から上端 275 hPa までの 15 点である。計算は、10月5日 00GMT から開始し、輸送計算のタイムステップを 30 分とした。

JSM 領域からの総排出量は、 $\text{SO}_2$  が年間 580 万トン、 $\text{NO}_x$  が 360 万トンである。非メタン炭化水素類と CO については  $\text{NO}_x$  の排出源分布に連動させたものを用いた(モル比にして、 $\text{NMHC} : \text{NO}_x = 3 : 2$ 、 $\text{CO} : \text{NO}_x = 10 : 1$ )。

## 3. 輸送・反応モデル

気象場(JSM 出力場)が緯度  $60^\circ\text{N}$  の Polar Stereo Graph 上で与えられているため、本モデルの輸送方程式もこれに合わせ座標変換を行った。式(1)に本モデルの輸送・反応方程式を示す。数値解法は LOD-FEM(Locally One Dimensional-Finite Element Method)を用いた。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + m U \frac{\partial C}{\partial x} + m V \frac{\partial C}{\partial y} + \sigma \frac{\partial C}{\partial \sigma} = m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left( K_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left( K_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{g^2}{\pi^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \rho^2 K_V \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) + R_i(C_1, C_2, \dots, C_{37}) \quad (1)$$

ここに、 $C_i$  は、第  $i$  番目の化学種濃度(ppbv)、 $U, V, \sigma$  は  $x, y, \sigma$  方向のそれぞれの流速成分( $U, V$  は map 上での成分)、 $K_H, K_V$  は水平、鉛直方向の拡散係数、 $\rho$  は空気密度、 $g$  は重力加速度、 $\pi(= P_s - P_t = P_s$  : 大気の上端を変数変換領域の上端としたため、 $P_t = 0$  ;  $P_s$  : 地上気圧)である。また、 $m$  は球面から map 上へ投影した時の距離の歪み率を表す map factor で、式(2)に示すように緯度  $\phi$  のみの関数で表せられる(例えば、Haltiner and Williams, 1980)。

$$m(\phi) = \frac{1 + \sin 60^\circ}{1 + \sin \phi} \quad (2)$$

化学反応項  $R_i$  は、22 の輸送化学種( $\text{NO}, \text{NO}_2, \text{HNO}_3, \text{PAN}, \text{SO}_2, \text{SO}_4^-, \text{O}_3$ , 炭化水素類等)と 15 の定常状態近似化学種( $\text{OH}, \text{HO}_2$  等)を含む 86 の化学反応モデルで構成されている。初期濃度は、これまでの観測等で得られた結果からバックグラウンド濃度を推定し、これを与えた。また、湿性沈着速度には雲頂高度を推定した後(松尾ら, 1993)、降雨量に結び付けた定式化(北田, 1994)を用いた。

## 4. 10月7日の気象場

図1は、10月7日の地上天気図およびフライトルート(太い破線)を示す。図1に見られるように、大陸には高気圧がはりだし、一方、北緯  $20^\circ$ 、東経  $130^\circ$  の北太平洋上に台風 21 号があって、それらの影響で日本付近には停滞前線が形成されていた。また、6 日から 7 日にかけて小さな低気圧が朝鮮半島を通過して日本海にぬけている。従って、フライトの前半は、大陸性高気圧の南東外縁、すなわち台風 21 号の北西方向の遠い外縁を横断しており、フライトの後半では高気圧の支配下を飛んだことになる。図 2(a), (b) は、データが取得された時間帯における高度 960 hPa と 660 hPa での水平流れ場を示す。図 2(b) より、黄海上空 約 3,500 m 付近は、常に北西風が支配していることが分かる。

## 5. 結果と考察

観測値と計算値との比較：(1)  $\text{O}_3$  濃度：観測値(高度 約 3,300 m)の特徴は、フライトの前半 0 ~ 140 分および後半の 220 分以降に相対的な高濃度が見られることである。図 3 に  $\text{O}_3$  の観測値と計算値との比較を示す。フライトの前半は、第 8 層(高度 約 2,000 m)と比較的良好一致を示すが、後半は観測値の濃度が減少するのに対して計算値では濃度が増加している。この計算濃度の増加は、高気圧に伴う沈降降により上層の高濃度の  $\text{O}_3$  が降下したためと考えられる。流れそのものは、信頼できる JSM によって再現されている

ものと仮定すれば、上層の初期  $O_3$  に問題があったことになるが、これ以上の推測は今ではできない。なお、観測高度付近での計算結果(第10層: 約 3,500 m) とは、約 10 ~ 20 ppb の開きがある。(2)  $NO_x$  濃度: 図4に  $NO_x$  の観測値と計算値の比較を示す。フライトの初期(~80分)に高濃度が現われるという定性的な傾向が、 $O_3$  と比べてより明確な形で見い出され、その特性は観測値と良く一致している。 $O_3$  はもともと対流圏に広く分布し、反応生成する物質であるのに対して、 $NO_x$  は地表付近に強い排出源を持つ物質であることがこの差をもたらすものと考えられる。すなわち、フライトの前半は、日本列島沿いの収束域(図2(b))付近での上昇流により持ち上げられた人為  $NO_x$  に富む気塊を観測し、後半は高気圧による沈降流により降下した上層の気塊を観測したことを意味する。ただ、観測値とほぼ同高度での計算結果(第10層: 約 3,500 m) は、観測値と比べて低く、0.4 ppb 程度の開きがある。 $NO_x$  には、 $N_2O$  分解に基づく成層圏ソースや電光による対流圏自然ソースもあり、この差はこれらの自然排出を考慮していないことによる可能性がある。一次汚染物質と二次汚染物質の分布特性: 図5、6は、高度 900 hPa (約 1,000 m) 面での  $SO_2$ 、 $SO_4^{2-}$  水平濃度分布の時間推移を示す。図5に示すように、一次汚染物質である  $SO_2$  濃度分布は、強い排出源上で高濃度帯を形成しており、しかもその分布形状は時間と共にあまり変化しない。一方、図6に示すように、二次汚染物質である  $SO_4^{2-}$  濃度分布は、高濃度帯が排出源上から少し南西にずれたところ、すなわち総観規模流れの下流部に形成される。この高濃度域は、時間と共に輸送され広がっていく。

## 6. おわりに

日本付近の大気濃度組成の特徴を明らかにするべく行われた PEACAMPOT にあわせて、大気汚染物質の輸送・反応シミュレーションを行った。計算は試行的なものであったが、1991年10月7日に大村(長崎県)~ソウル間のフライトルート(高度 約 3,300 m) に沿って取得された  $O_3$ 、 $NO_x$  濃度の変化の特徴を定性的に再現することができた。フライトの前半(日本付近)では、水平風の収束に伴う上昇流による下層汚染気塊を、後半(黄海および朝鮮半島)では高気圧の沈降流による上層の対流圏気塊をそれぞれ観測しているものと推測できた。観測値と計算値(人為排出源のみ考慮)で  $NO_x$  濃度に差があり、比較を通じて自然起源および航空機等、上層での人為起源排出量を見積もる必要があると考えられる。また、降水による気塊の変質もさらに検討する必要がある。

## References

- Haltiner, G. J. and R. T. Williams, 1980: NUMERICAL PREDICTION AND DYNAMIC METEOROLOGY. JOHN WILEY & SONS Pub. pp. 10-13  
 松尾浩嗣, 北田敏廣, 佐々木秀孝, 1993: JSM データを用いて推定した雲頂高度と衛星写真解析との比較・検討.  
 土木学会第48回年次学術講演会概要集, CS6 地球規模環境問題, pp. 16-17, CS70.  
 北田敏廣, 1994: 酸性降水の輸送と反応・沈着モデル, 気象研究ノート, 第182号, 印刷中.

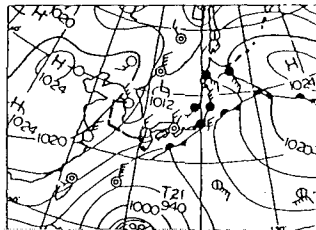


図1 10月7日のフライトルートと地上天気図

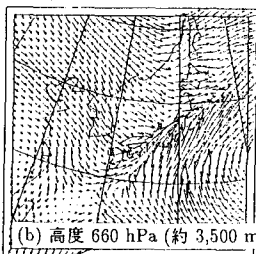
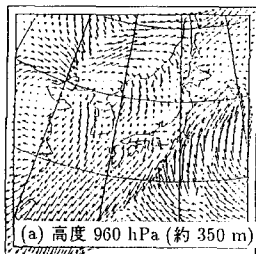


図2 10月7日12 JSTの水平流れ場

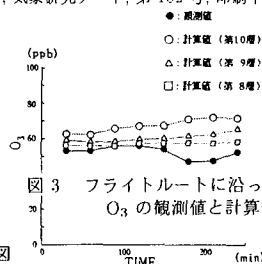


図3 フライトルートに沿った  $O_3$  の観測値と計算値の比較

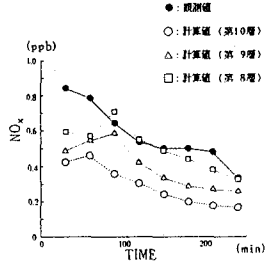


図4 フライトルートに沿った  $NO_x$  の観測値と計算値の比較

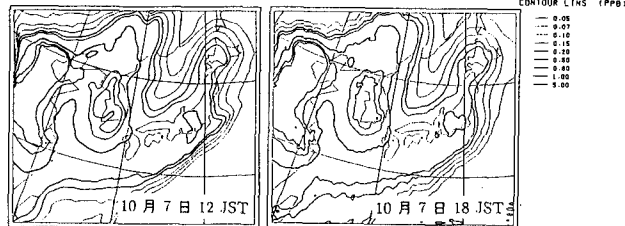


図5 高度 900 hPa における  $SO_2$  濃度分布

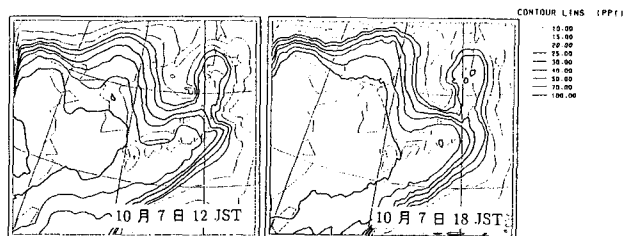


図6 高度 900 hPa における  $SO_4^{2-}$  濃度分布