

11. PSU/NCAR MM5 を用いた長距離物質輸送に対する 雲物理場の影響の推定

Estimation of the effect of cloud physics field to the long-range transport
using PSU/NCAR MM5

倉田学児* 大嶽公康** 北田敏廣*
Gakuji KURATA*, Kimiyasu OHTAKE**, Toshihiro KITADA*

ABSTRACT In recent decades, increasing quantities of pollutants have been transported from Asian countries to the Pacific ocean and the Arctic area and cause a acid rain or acid snow over these area. The mechanism of long-range transport of chemical species must be made clear to understand how these pollutants affect eco-system and environment. In these mechanism, cumulus convection should be very important, because it generate strong vertical air movement.

In this study, the realistic meteorological field over Japan and the northern Pacific ocean in winter season has been simulated by using PSU/NCAR MM5 (mesoscale model). At first, some physical options on MM5 has been tested to make sure that how these selection affect the vertical transport. After that, amount of vertical transfer was estimated in this case

KEYWORD; mesoscale model, cumulus convection, vertical transfer, long-range transfer

1.はじめに

近年、東アジア地域から放出された人為起源の微量環境汚染物質が太平洋や北極海の遠隔地に輸送され、環境・生態系に深刻な影響を与えるものと懸念されている。特に日本は梅雨時の流れや冬季の季節風によって、大陸起源の酸性物質の影響を強く受けるものと考えられる。排出された一次汚染質が輸送される過程で酸性物質に変換されるが、この変換には雲生成に伴う液相への一次汚染質の取り込みと液相酸化が重要な役割を果たすものと考えられている。また、雲の中でも積雲系のものは、種々の理由で励起された局所的な強い上昇流に伴って生ずるものであり、汚染物質を液相に取り込むと同時に境界層から自由対流圏に運ぶ重要な輸送過程と考えられる。

これまで冬期の日本海に見られる筋状のロール雲を対象にして雲物理場を推定し、それに伴う物質の輸送や相間移動が大陸起源の汚染質から酸性物質生成にどう影響するかを調べた研究などがあるが、冬期の日本海は観測等よりかなりよく知られた気象場（筋状雲の生成とその性質など）を形成しており、その情報を流れ場に利用して診断的に雲物理場を得ることより良い結果を得てきた¹⁾。ただし、一般的には、前もって詳しく記述できるような流れ場を持たないことが多く、また雲の形成と大気流れの形成は互いに密接に関わりあっているために、これらを同時に解くことが求められている。本研究では PSU/NCAR の非静力学系メソスケールモデルである MM5 を用いて積雲対流を含む予測的な気象場を再現し、そこで生成された積雲対流の構造および鉛直輸送量について検討を行う。本研究は、積雲の生成による酸性物質の輸送、沈着量推定の第一段階であり、引き続いて、気相および大気水相物質に関する詳細な輸送・反応モデル²⁾と結合して、雲および降水生成に伴う汚染物質の変換、空間再配分の過程を明らかにする予定である。また、この方向での研究成果は、地球規模モデルにおけるサブグリッドスケールのモデリングにとって重要な情報を提供する。

2.MM5(Fifth generation NCAR Mesoscale Model)

2.1.MM5 の概要

本研究に用いた MM5 は NCAR(National Center of Atmospheric Research)で継続的に開発されている非静力学メソスケールモデルである。MM5 は次のような機能を有している。

・非静力学モデル／静力学モデルの両者を扱える

* ; 豊橋技術科学大学工学部エコロジー工学系 Dep. of Ecological Engineering, Toyohashi University of Technology ** ; 日本上下水道設計(株) NIPPON JOGE SUIDO CO. LTD.

表 1 MM5 で用意されている主要な物理的オプション

オプション	選択肢			
雲物理モデル	warm rain	simple ice phase	mixed ice phase	
完全 3D コリオリ力	Yes	No		
上端を放射境界条件にする	Yes (放射条件)	No (Rigid)		
PBL オプション	なし	バルク PBL	高解像度 Blackadar	
積雲パラメータ化	なし	Anthes-Kuo	Grell	Arakawa-Schubert
地表面水蒸気・熱流束	あり	なし		
地表面温度変動	あり	なし		
地表面分類	13 種類	2 種類		
地表面放射への雲の効果	あり	晴天下での放射のみ		
積雪被覆効果	考慮する	考慮しない		
蒸発散	通常の蒸発効果	蒸発効果なし	降水蒸発による冷却効果なし	
浅い対流 (shallow convection)	なし	あり		

(網掛けは本研究で主に使用したモデル)

- ・積雲対流パラメータ化や地表面境界スキーム等の物理オプションがあり、様々な条件で解析を行うことができる。
- ・複数の計算領域をネスティングして、同時に計算することができる。
- ・解析値を観測データに近づける FDDA (4 次元データ同化)が行える。

MM5 で選択可能な運動方程式系・雲物理モデル・放射モデル・大気境界層モデル・積雲パラメータ化モデル・地表面モデルの内重要なものを表 1 に示した。本研究では、これらのモデル間の違いがシミュレーション結果にどの程度影響するのかを把握し、より現実に近い気象場を再現するためには何を改善すればよいかを明瞭にするために、モデルを代える事による感度解析的な計算を行った。網掛けを行った項目は本研究で主に用いたオプションであることを示している。

2.2.輸送物質の追加

微量化学物質の長距離輸送における積雲対流の鉛直輸送の推定を行うための手法として、本研究では生成・消滅をしない輸送物質を仮定して、モデルの予測変数に追加した。移流・拡散方程式は、MM5 の水象物質のものに準じて組み込んだ。

ここで、初期場及び境界条件において、下層の約 1km の高さまでに 1 ppm の濃度で分布させておき、これが時間と共にどのように輸送されるかを調べた。

3.シミュレーション条件

3.1.解析領域及び気象場

解析領域(domain1)は図 1 に示した領域であり、水平 495km 四方で、グリッド間隔は 9km である。鉛直方向に対しては、高度を約 12km の pt=200hPa (頂部圧力) とし、地形に沿った座標系で 20 層に分割した。また、domain2 を設定し (設定場所は図 1 参照) ネスティングを用いて同時に計算している。domain2 の領域は 153km 四方であり、水平グリッド間隔は 3km、鉛直方向の高度及びσ座標は domain1 と同じである。なお、domain2 は、解析日の積雲対流の生成域にあわせて 2 個所に設定した。(それぞれ domain2-A, domain2-B とする)

解析対象日時は 1996 年 12 月 22 日 9:00 (日本時間) から 23 日 9:00 までの 3 日間である。22 日夜には日本海から低気圧が本州を東へ縦断し、その後典型的な冬型の気圧配置となり、24 日には高気圧の通過で冬型が崩れている。図 2 には、東海から関東沖にかけて前線が通過した 12/23 の午前 3:00 の地上気象図を示す。

3.2.初期条件および境界条件

初期場には、気象庁の数値気象予報値である GPV(Grid Point Value)の 12 月 22 日 AM9:00 の値を用いてい

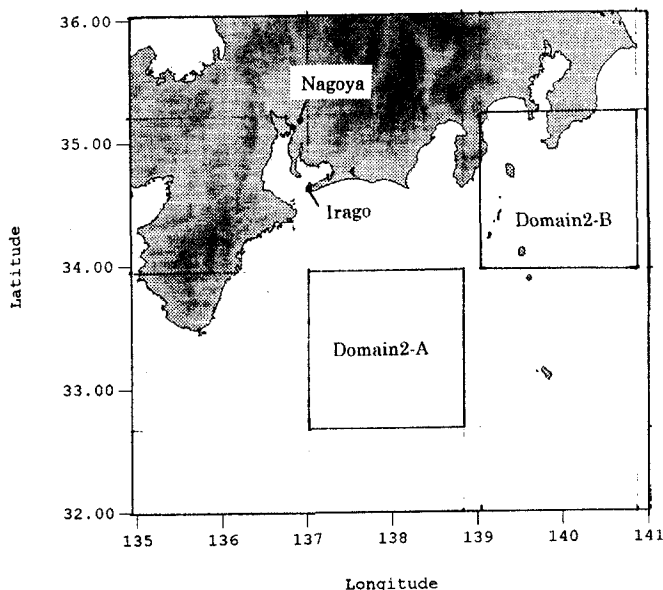


図1 解析対象領域及びネスティング位置

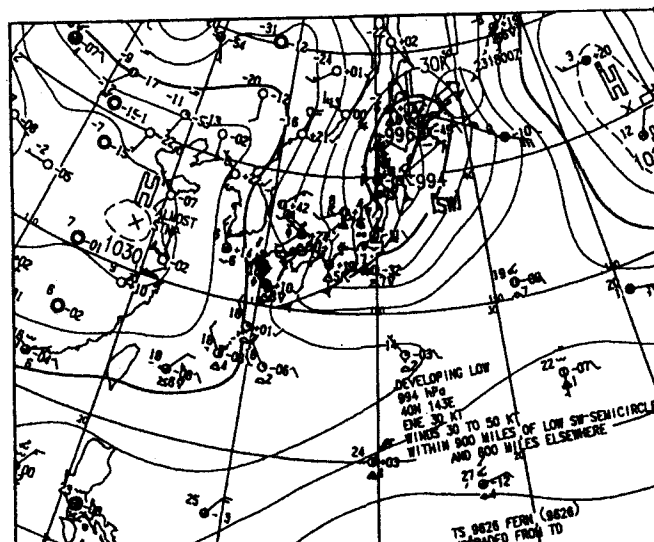


図2 地上気象図 12/23 3:00 (JST)

る。GPV は地表面、925hpa、850hpa、700hpa、500hpa の5層について地表面は約20km間隔、上層は約40km間隔で、気温、露点温度差、風速2成分(u,v) (700hpaは3成分)、気圧面高度が与えられているので、これを線形内挿した。ただし、500hpa面より上空は外挿せずに、モデル大気の気温減率に従って気温を与えた。

境界条件は、6時間毎のGPVデータを同様に用いて与えている。ただし、ネスティングされたdomain2の境界条件は、domain1の計算値を随時用いて設定している。

3.3. 検証に用いたデータ

シミュレーションで求めた気象場が妥当なものかどうか検証するために、地上気象観測値として名古屋地方気象台および愛知県伊良湖測候所の気圧、気温および水蒸気圧の観測値を、高層気象データとして潮の岬の観測値を用いて比較を行った。また、計算された雲水場等の妥当性を判断するために、GPV値を用いた。

3.4. シミュレーションの条件設定

MM5の各種のオプションがどのように計算結果に影響するかを調べるために、各計算に用いた条件は表2の通りである。case 2は地表面フラックスの影響を比較する。case 3はcase 1と同じオプションを用いているが、積雲対流の位置に合わせてdomain2の位置を房総半島沖に移して計算している。case 4, case 5は積雲パラメータ化の影響を調べるためである。

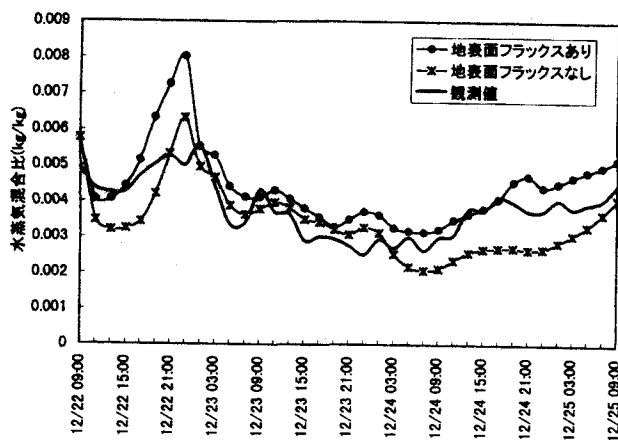
4. 結果及び考察

4.1. 地表面フラックスの影響及びDomain1での計算値の妥当性

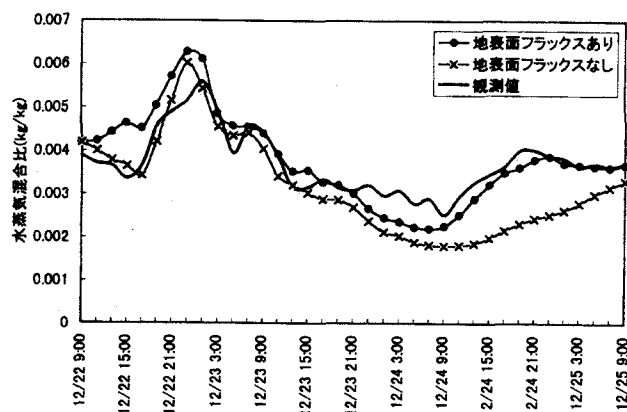
まず、case 1を暫定的に標準と仮定して、これと地表面の熱フラックス及び水蒸気フラックスを無くしたcase 2および地上観測点での観測値を比較することによって地表面のフラックスが結果に与える影響とDomain1での計算値の妥当性について検証してみた。図3は、case 1, case 2の伊良湖付近および名古屋市付近のグリッドの地表面の水蒸気混合比をそれぞれ伊良湖測候所と名古屋地方気象台の観測値と72時間の時系列で比較したものである。伊良湖の結果は平均的には一致しているが、地表面フラックスを入れた場合では多少過大な値になっている。これは伊良湖が伊勢湾に突き出した半島の先端であることとDomain1のグリッド間隔

表2 シミュレーションに用いた条件

	Domain2 位置	地表面 フラックス	Domain1の 積雲対流調整
case 1	中央	あり	Grell
case 2	中央	なし	Grell
case 3	房総沖	あり	Grell
case 4	房総沖	あり	なし
case 5	房総沖	あり	Anthes-Kuo



(A) 伊良湖



(B) 名古屋

図3 水蒸気混合比の観測値と計算値の比較

が 9km と大きいことから、ほとんど海洋上の地点として扱われてしまっている事が原因ではないかと思われる。それに対して名古屋の結果は比較的よく一致している。これは三方が陸地で取り囲まれており海洋からの水蒸気の輸送の影響が少ないためとも考えられる。

次に図4に12月24日午後9:00の潮の岬での気温および水蒸気混合比の鉛直プロファイルを高層気象観測値およびcase 1, case 2で比較してみた。いずれも観測値にほぼ一致したプロファイルを示している。また、case 2とcase 1の違いは高度1000m以下の大気境界層内では顕著であるが、上層ではほとんど変わらない。これは、計算領域外からの流入が支配的であるためと考えられる。

4.2. 雲水場の生成域の妥当性

次に、房総半島沖で積雲ラインの通過が見られた12/23午前3:00(JST)を選んで、case 1で得られた雲水場の位置(図5-A)とGPVデータの露点温度差(図5-B)を比較した。図5-Bのコンター線は水蒸気の飽和度を示している。GPVデータで雲が生成されていると思われる露点温度差が 2°C 以下の領域を線で囲んでいるが、計算値の方が雲の生成域が東に寄っている。これは、下層の流速が過剰に計算されたためと思われる。しかし、対応する大気塊において、ほぼ同程度の雲頂・規模の積雲が生成されていることから、この計算で用いた積雲生成のモデルは妥当性があると思われる。

4.3. 積雲パラメータ化の違いによる雲生成の比較

次に、case 3, case 4, case 5の3通りについて積雲パラメータ化の違いによる雲生成への影響の比較をおこなった。case 3はGrellの積雲パラメータ化、case 4は積雲パラメータ化を用いない場合、case 5はAnthes-Kuoの積雲パラメータ化を用いた場合である。いずれのケースもネスティングされたDomain2では積雲パラメータ化を用いずに計算しているので、Domain2での積雲生成の違いを比較することで、Domain1での積雲パラメータ化の扱いの違いが水蒸気場・温度場にどのような影響を与えているか調べる。図6はそれぞれのケースについて北緯 $34^{\circ}15'$ での鉛直断面上での雲水混合比である。コンターは雲水混合比 0.1g/kg を表している。

まずcase 5のAnthes-Kuo法では、ほとんど雲水が生

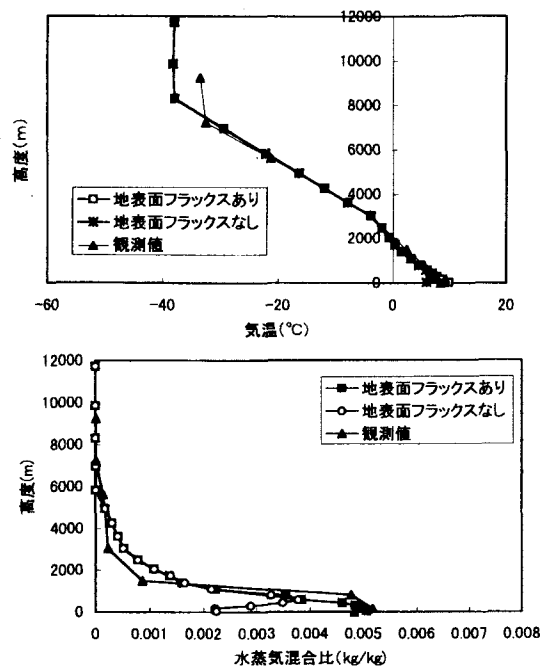


図4 高層気象観測値およびcase 1, case 2の鉛直プロファイルの比較(潮の岬)

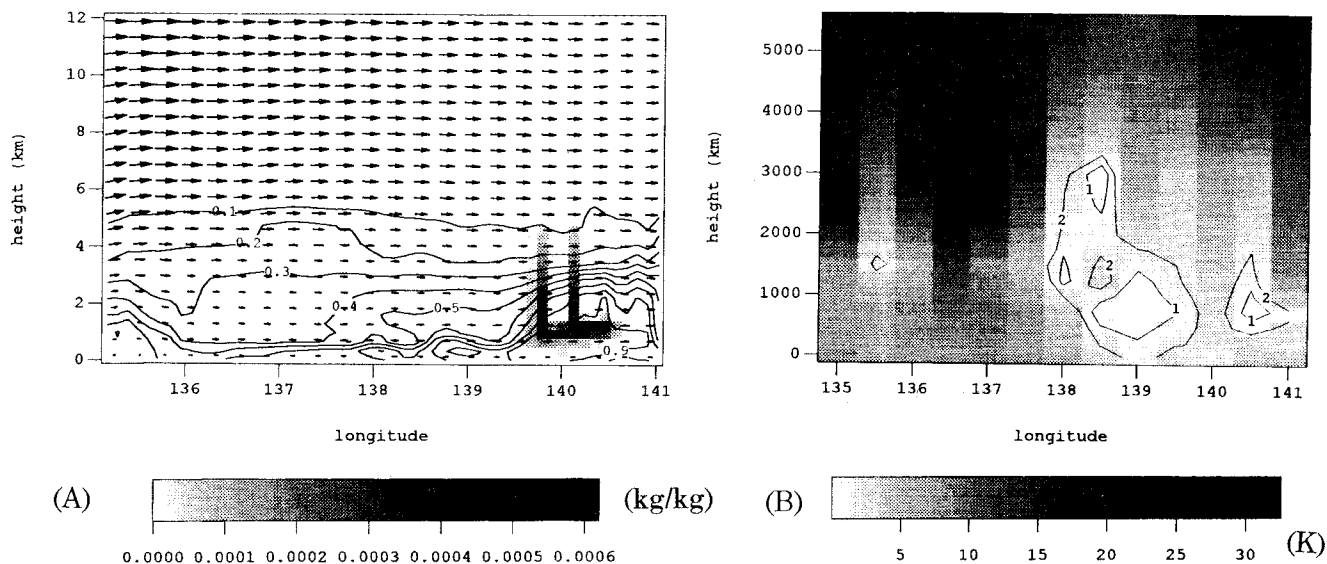


図5 12/23 AM3:00 の雲水場と GPV の露点温度差(2°C以下の)の比較

成していない。これは、Domain 1 の領域において下層の水蒸気の収束が積雲パラメータ化によって鉛直方向への水蒸気と熱の分配として調整されてしまっているために、Domain 2 の境界条件として新たに積雲を生成するだけの水蒸気の収束が得られなかったためと推測される。case 4 では逆に Domain 1 での積雲パラメータ化を行わずに雲微物理モデルのみで積雲対流を行わせているために、十分にサブグリッドスケールの対流効果を調整しきれずに、Domain 2 での水蒸気場の収束が過剰に生じ、背の高い積雲が生成されている。Grell の積雲パラメータ化を用いた case 3 では、これらの中間で雲頂が 3000~4000m の積雲が生成されている。

4.4. 下層からの物質輸送の見積もり

次にこれらの積雲対流によって下層の物質がどの程度上層へ輸送されるのかを比較してみた。図7は、前節の case 3, case 4, case 5 について Domain 2 の領域中央付近の鉛直断面での下層からの輸送物質の濃度分布を表している。これらを比較してみると、前節で示した積雲対流の違いに対応して、case 5 ではほとんど鉛直輸送が見られないが、case 4 では相当量の物質が上層へ輸送されていることがわかる。case 3 は case 4 ほど強くはないが、5000~6000m 程度にまで物質が輸送されている。

5.最後に

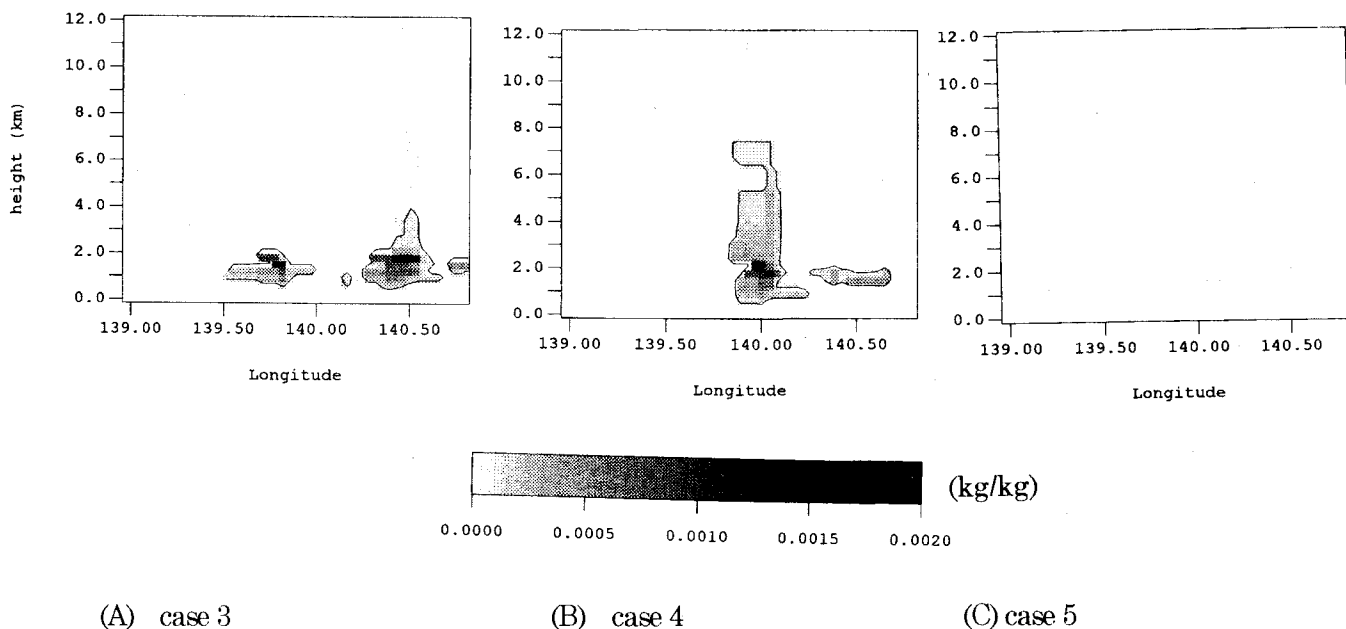


図6 雲水場の鉛直コンター (Domain 2, 34° 15' N, 12/23 AM3:00 JST)

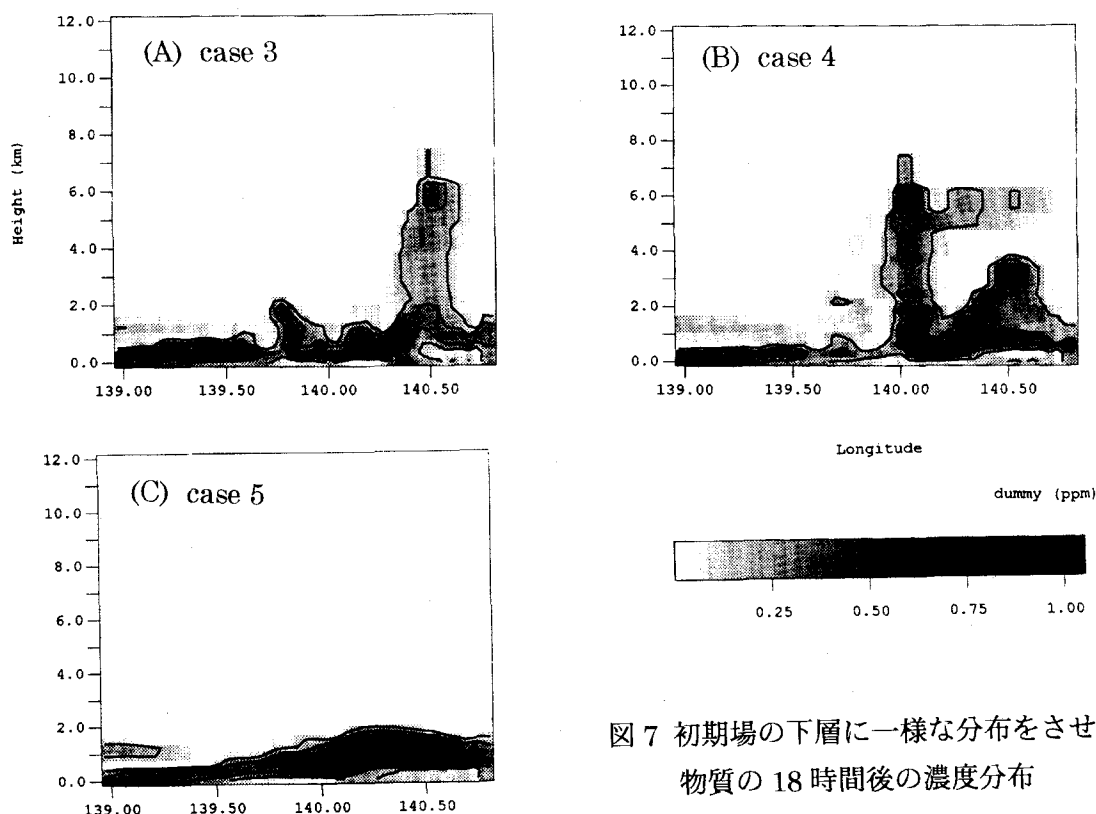


図7 初期場の下層に一樣な分布をさせた物質の18時間後の濃度分布

本研究では、PSU/NCAR MM5 を用いて日本付近での積雲対流による微量化学物質の鉛直輸送の効果を推定することを目的として、まず、平成8年12月の気象場の再現のために積雲パラメータ化モデルおよび地表面フラックスのモデルの寄与を調べ、得られた気象場の元で微量化学物質が積雲対流によって大気下層から上層へどの程度輸送されるかを推定した。地表面の熱および水蒸気のフラックスは当然組み入れる方が予測精度が高くなるが、特に海洋からの熱および水蒸気のフラックスの計算のためには、より詳細な海洋の表面温度等を取り入れて行く必要があると思われる。また積雲パラメータ化の予測精度に対する影響は大きく、鉛直輸送量の推定に直接影響を与える事がわかった。本研究の対象では Grell の積雲パラメータ化で最も適切な水蒸気・温度の鉛直分配が得られたが、他の領域や異なる気象場のもとではどのようなものになるのかも検討していかなければならない。

今後、さらに航空機観測のデータとの比較、他のパラメータの感度解析、グリッド間隔 1km での積雲対流の詳細構造の解析などを行ってモデルの予測精度を高めると共に、SO_x, NO_x, NMHC などの気相・液相での化学反応なども取り入れて、現実の微量化学物質の長距離輸送へのメソスケール大気現象の影響の評価を進める予定である。

参考文献

- 1) Kitada et al. Numerical Modeling of long-range transport of acidic species in association with meso-β-convective clouds across the Japan sea resulting in acid snow over coastal Japan -I,(1993) Atmospheric Environment, vol. 27AA,1061-1076
- 2) Georg A. Grell, Jimmy Dudhia, David R.Stauffer, A description of the Fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model(MM5) (1995), NCAR TECHNICAL NOTE
- 3) 北田敏廣, 酸性降水の輸送・反応・沈着モデル, (1994), 気象研究ノート第 182 号, 日本気象学会, 95-117
- 4) N.Chaumerliac, E.Richard, J. P. Pinty, Sulfur Scavenging in a Mesoscale Model With Quasi-Spectral Microphysics: Two-Dimensional Results for Continental and Maritime Clouds. (1987), Journal of Geophysical research, vol.92 No.D3,3114-3126