

# 地域気象モデルによる花粉飛散の数値シミュレーション

神 田 学<sup>\*1</sup>・張 翔 雲<sup>\*1</sup>・鶴 野 伊津志<sup>\*2</sup>・  
川 島 茂 人<sup>\*3</sup>・高 橋 裕 一<sup>\*4</sup>・平 野 元 久<sup>\*5</sup>

## 要 旨

地域気象モデルに花粉の移流・拡散・発生・沈降の物理プロセスを組み込んだ花粉予測モデルを開発した。花粉発生フラックスは、スギ林上の集中観測結果と物理的考察に基づき大気飽差の関数としてモデル化された。スギ林データベースや花粉自動観測システムが整備されている山形盆地を対象として検証計算を行い、花粉個数濃度の日変動特性が概ね良好に再現された。とりわけ花粉が夜間の弱風時に盆地内で滞留し高濃度化する現象が計算で示された。また、地表面摩擦速度や花粉粒子の沈降速度が花粉発生に及ぼす影響を感度分析により検討した。

### 1. 本研究の目的

気象予報の精度向上に伴い、高分解能の気象予測値を地域の各種生活環境情報に役立てることが望まれる。本研究の目的は、その1つの試みとして、スギ花粉の飛散プロセスを物理的に考慮した移流拡散モデルを既存の地域気象モデルに取り込むことにより、花粉飛散の日変動特性をどの程度再現可能か、数値計算により検討するものである。花粉症患者は、全国民の2割に達するとも言われ、まさに国民病である。そのためスギ花粉に関わる研究は、医学・農学・気象学など広範に渡る(例えば、佐橋ほか, 1995に詳しい)。花粉飛散の予測と言う点に絞ってこれまでの研究を整理すると、(1) 総飛散数の推定(雄花の着生量や前年夏季からの気象履歴が利用される)、(2) 飛散開始時期の推定(主に1月1日からの積算温度が利用される)、そして(3) 日単位での花粉個数濃度の量的推定、に大別される。前者(1)、(2)は、植物成長や植物生理に関連したもので、本研究では、これらの点については踏み

込まず既存知見を前提とする。(3)は、スギが十分に開花したいわゆる花粉シーズンにおいてどのような気象条件で花粉が飛び出し、移流・拡散するか、という応用気象学的な予測であり、本研究で対象とするのはこのカテゴリーに属する予測である。花粉個数濃度の日変動予測については、川島・高橋(1991)の先験的な研究が上げられる。また、花粉の日変動予測は、気象協会により行われている。しかしながら、花粉発生のプロセスの扱いは経験的で不明確な点が多い。また、観測では1日の中でも花粉個数濃度の顕著な時間変動があることが知られているが(高橋ほか, 1989)、そのような日内の時間変動の再現性について検討された例は少ない。これらの点を踏まえ、本研究のねらいは、以下の2点に集約される。(1) 局地スケールでの花粉個数濃度の日変動特性について、その再現性を検討する。(2) 不確定性の多いスギ花粉の発生プロセスを観測・物理的考察・感度分析により検討する

### 2. 地域気象モデル

気象モデルは Pielke *et al.* (1992) により開発された Regional Atmospheric Modeling System (RAMS 4.3.0)を用いた。このモデルは、環八雲のシミュレーション(神田ほか, 2000)や黄砂の長距離輸送のシミュレーション(Uno *et al.*, 2001)に応用されている。今回の計算で用いたモデル設定値を第1表にまとめて示

\*1 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻。

\*2 九州大学応用力学研究所/地球フロンティア研究センター。\*3 農業環境技術研究所。\*4 山形県衛生研究所。

\*5 NTT生活環境研究所。

—2001年5月23日受領—

—2002年2月15日受理—

第1表 本計算で用いたモデルオプション.

|           |  |
|-----------|--|
| 基礎方程式     | 圧縮・非静水圧  |
| 水平座標系     | ポーラステレオ座標                                      |
| 鉛直座標系     | $\sigma_z$ 座標                                  |
| 湿潤過程      | 雲・雨・雪・雹・霰・氷晶・凝集体の7種類の微物理過程                     |
| 地表面過程     | 2層キャノピーモデル (Tremback and Kessler, 1985)        |
| 地表以外の境界条件 | ラーズスケールナッジング                                   |
| 放射過程      | 短波・長波とも微物理量に対応した2ストリームモデル                      |
| 乱流過程      | 鉛直: レベル2.5 クロージャーモデル (Mellor and Yamada, 1982) |

第2表 各グリッドの計算条件.

|        | 水平格子数    | 水平解像度  | 鉛直格子数 | 鉛直解像度                     | 時間解像度  |
|--------|----------|--------|-------|---------------------------|--------|
| Grid 1 | 52 x 48  | 10 km  | 30    | 100-1000(m) <sup>*)</sup> | 20 (s) |
| Grid 2 | 74 x 62  | 3.3 km | 30    | 100-1000(m)               | 10 (s) |
| Grid 3 | 70 x 118 | 0.8 km | 30    | 100-1000(m)               | 5 (s)  |

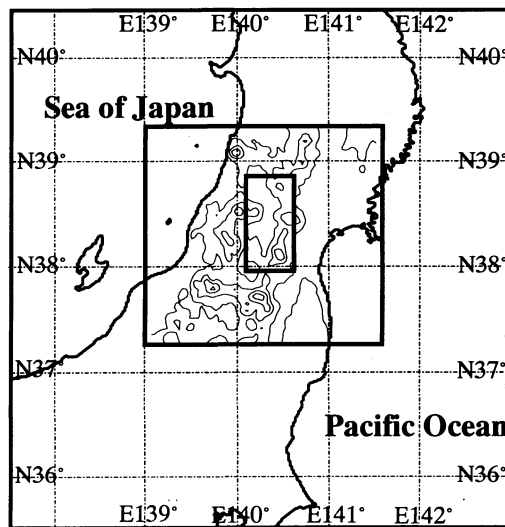
<sup>\*)</sup> 鉛直解像度は1.2倍のストレッチング幅で上に行くに従って大きくなっている。

す。後述するように、花粉発生プロセスは、湿度や降雨といった水にも影響を受けていることが考えられるため、7種類(雲・雨・雪・雹・霰・氷晶・凝集体)の微物理過程を考慮した湿潤モデルを用いた。計算領域における標高・土地利用情報は、国土地理院の数値地図情報を元にデータベースを作成し、地表面過程として、Tremback and Kessler (1985) の2層キャノピーモデルを用いた。

境界条件および初期条件には四次元データ同化手法を用いた。ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecasts) の Advanced Operational Analysis Upper Air Data (水平解像度0.5度、鉛直21層) を総観場の気象データとして6時間毎に客観解析データを作成し、初期及び境界における同化データとして連続的に計算に取り込んだ。

総観場の影響を局所場に反映させるために、多重ネスティング手法によって解像度の異なる3つの計算領域を設定して、相互に計算結果を反映させながら(two way nesting) 計算を行った。Grid 1は総観規模の気象変動を考慮するために東北地方全体を、Grid 2, 3は検証地域である山形盆地周辺を対象とした。計算領域を第1図に、計算条件を第2表に示す。

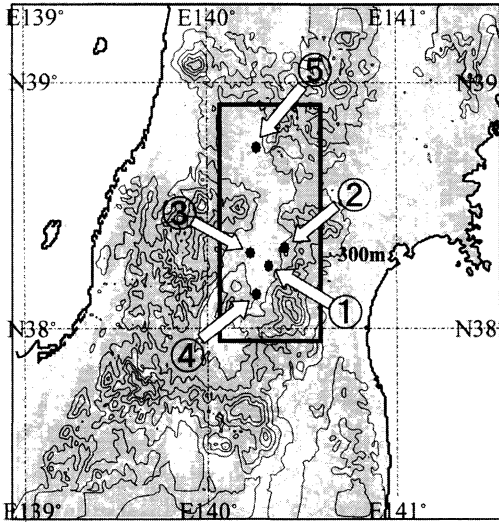
計算は東京工業大学学術国際情報センターの超並列スーパーコンピューター-Origin2000により、64CPU並列計算モードで行った。気象・花粉を含む5日分のシミュレーションで約2時間を要した。



第1図 計算領域図。外側の大きい枠から順に Grid 1, 2, 3の計算領域を示す。コンターは500 m 間隔の標高を表す。

### 3. 解析対象領域と花粉データに関する諸元

山形盆地では、共著者の1人である高橋が中心となり花粉に関する多くの先験的な試みがなされており(山形県衛生研究所, 1997) スギ花粉に関する豊富な数値データが存在していることから、ここを解析対象として選定した。スギ林分布は環境省の自然環境保全基礎調査(解像度1 km)を基に川島・高橋(1991)がリモートセンシングと併せて補正したデータベース



第2図 観測地点の位置とスギ林の分布。ハッチング部分はスギ林が存在していることを示す。①山形, ②山寺, ③山辺, ④上山, ⑤新庄の各観測地点。コンターは250 m間隔の標高を表す。

第3表 花粉および気象観測地点の諸元。

| 地点番号 | 地名 | 経度     | 緯度    | 花粉計測 | 気象計測                     |
|------|----|--------|-------|------|--------------------------|
| ①    | 山形 | 140.34 | 38.24 | なし   | T, H, R, U <sup>注)</sup> |
| ②    | 山寺 | 140.44 | 38.31 | あり   | T, H                     |
| ③    | 山辺 | 140.26 | 38.30 | あり   | T, H                     |
| ④    | 上山 | 140.28 | 38.15 | あり   | T, H                     |
| ⑤    | 新庄 | 140.31 | 38.76 | あり   | T, H, R, U               |

注) Tは気温, Hは相対湿度, Rは降雨量, Uは風向・風速の観測を表す。

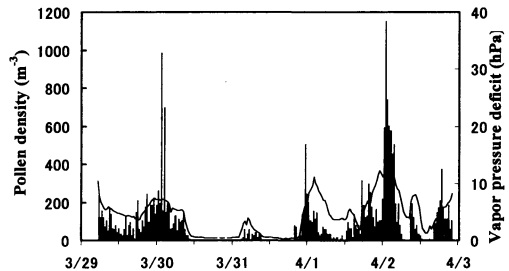
を利用した(第2図)。解析対象日は、NTTが試験的にスギ花粉の自動観測システムを導入した2000年4月20~24日までの5日間とした。本論で議論される5つのデータ観測点(NTTの花粉観測点およびアメダス観測点)の位置を第2図に示す。いずれも盆地内に位置している。その諸元を第3表に記す。花粉個数濃度計測には、NTT光散乱方式花粉カウンターが使用された。これらの花粉計測データは花粉発生源であるスギ林から2 km以上離れた建物屋上(地上から約10~20 m)で計測されていることから、大気境界層内の濃度としてシミュレーションとの比較に用いられる。これは、次章で述べる森林直上の発生源濃度とは区別される。本論で用いたNTTの花粉情報システムおよび花粉カウンターの詳細と有効性については文献

第4表 花粉発生モデル構築のための集中観測の要約。

|        |  |
|--------|--|
| 場所     | 農林水産省農業環境技術研究所内のスギ林  |
| 時期     | 1999年 3月29日 ~ 4月3日   |
| スギ林の諸元 | 樹高約10 m LAI約6  |
| 観測高度   | 全ての観測項目についてスギ林直上 1m  |
| 平均化時間  | 30分  |
| 観測項目   | 気温・風速 (Kaijo WAT395)<br>湿度 (Visala HUMCAP)<br>花粉濃度 (大和製作所 KH3000)<br>日射 (英弘精機 MS-42) |

第5表 発生源花粉濃度と気象因子との相関係数。

|              | 花粉濃度との相関係数 |
|--------------|------------|
| 大気飽差         | 0.395      |
| 風速           | 0.213      |
| 気温           | 0.126      |
| 相対湿度         | 0.217      |
| 日射量          | 0.225      |
| 大気飽差 x 風速の2乗 | 0.295      |
| 大気飽差 x 風速の3乗 | 0.300      |



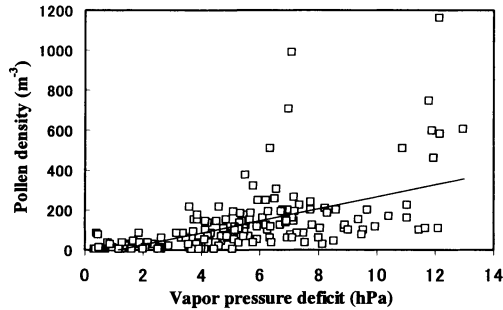
第3図 花粉個数濃度(棒グラフ)と大気飽差(実線)の時系列(2000年)。農林水産省農業環境技術研究所内。

(平野ほか, 2000; 平野・加藤, 2001)を参照されたい。

#### 4. スギ花粉飛散のモデル化

##### 4.1 集中観測による森林直上のスギ花粉個数濃度(発生源濃度)と気象要素の関係

既存の花粉個数濃度計測値は通常、建物の屋上などスギ花粉の発生源から離れた観測点で得られたものである。これらは移流・拡散・沈降などのプロセスを経た後の「結果」であるから、花粉発生そのもののモデル化に当たっては、森林境界層内の花粉フラックスデータを使用することが好ましい。過去にそのようなデータが存在しないことから、解析対象領域とは異なる場所と時期に集中観測を行った。その観測概要を第



第4図 花粉個数濃度と大気飽差の相関関係 (2000年). 農林水産省農業環境技術研究所内.

4表に示す(詳細は、張, 2001を参照されたい). 本来花粉フラックスそのものを計測すべきであるが, 花粉のフラックス計測法は確立されておらず, 今回は森林直上における花粉個数濃度(以下, 発生源濃度と呼ぶ)と気象要素との対応を検討することとした. その際, 通常境界層乱流データと同様, 花粉個数濃度・気象要素とも30分平均値について相関を検討した. その結果を第5表にまとめた. 風速・気温・日射量などに比べて, 大気飽差(飽和水蒸気圧と水蒸気圧の差)との相関が最もよい結果となった. 大気飽差と花粉個数濃度の時系列変動を第3図に, また二者の相関図を第4図に示す. 花粉個数濃度の時間変動傾向を大気飽差がよく表していることが読みとれる. ここでは観測データが非常に限られているため各気象要素の変動幅や相関の有意性を厳密に検討したわけではない. しかし, いくつかの気象要素や気象履歴を考慮することも試みたが(第5表), 単純に発生源濃度を大気飽差のみの線形関数で表現した場合が最も相関が良かった.

過去に花粉発生に対する大気飽差の影響を直接指摘した研究はない. しかし, 斉藤・宇佐(1980), 高坂(1986)は, 降雨後あるいは前線の通過後など気温上昇と湿度低下が同時に起こる際に花粉が大量に飛散することを指摘しており興味深い. 気温上昇と湿度低下の同時性は大気飽差の上昇を意味しており, 本論の結果を定性的に支持している.

次節では大気飽差に着目して花粉発生フラックスの定式化を試みる. 大気飽差は, 気孔開閉の直接的な制限因子の1つでありそのメカニズムも植物生理学的に明らかにされつつあるが(例えば小杉, 1995), 大気飽差がどのようなメカニズムで花粉飛散の拘束条件となるかは現段階では不明である.

4.2 花粉発生フラックスのモデル化と物理的考察  
前項の検討より, 花粉の発生源濃度が大気飽差によって強く支配されていることを示した. これに基づき本論では最も単純な花粉発生の個数フラックス  $F \uparrow$  (個  $m^{-2} s^{-1}$ ) として大気飽差に比例する (1) 式を標準モデルとして提案する.

$$F \uparrow = a_1 V_a m \quad (\text{標準モデル}) \quad (1)$$

ここで,  $m$ : 計算メッシュにおけるスギ林の被覆率 ( $0 \sim 1$  の値を取り,  $0$  はスギ林なし,  $1$  は全てスギ林で覆われている),  $V_a$ : 大気飽差 (hPa),  $a_1$ : モデル定数を表す. この標準モデルの適用性は, 第5章で具体的に検証される.

花粉放出に影響を及ぼす可能性のある大気飽差以外の気象要素についても考察する. 日・時間単位で花粉個数濃度(発生源濃度ではない)を気象要素と対応づけた研究例がいくつかある. 佐橋ほか(1995)は, 気温上昇と風速増大が花粉飛散に重要であると指摘している. Kawashima and Takahashi (1995) も, 花粉放出を気温変動および風速から定式化している. 有沢(1999)は, 花粉放出量が風速に依存すること, および放出を開始する臨界風速が存在することを指摘している. 以上より, 大気飽差以外の重要な支配要因の1つとして風速の影響を検討しておく必要がある. 風速の影響については河川工学における河床の浮遊砂の巻き上げ理論を参照して定式化する. 底面から巻き上げられる砂粒子は, 摩擦速度  $u_*$  ( $ms^{-1}$ ) の2乗に比例することが多くの実験的研究により裏付けている(例えば, 池田 1992). このアナロジーを採用し, かつ浮遊砂のような自由粒子と異なり, 発生段階で大気飽差の拘束を受けることを考慮すると, (2) 式が得られる(実験モデル1). このモデルでは, 大気飽差と同時に摩擦速度という乱流輸送パラメータが考慮されている点の特徴である. 花粉粒子の位置エネルギーの増加分が, 乱れエネルギーの供給速度に比例するというエネルギー的な次元考察からは, (3) 式が得られる(実験モデル2). この場合の花粉フラックスは, 摩擦速度の3乗に比例する.

$$F \uparrow = a_2 u_*^2 V_a m \quad (\text{実験モデル1}) \quad (2)$$

$$F \uparrow = a_3 u_*^3 V_a m \quad (\text{実験モデル2}) \quad (3)$$

ここで,  $a_2, a_3$ : モデル定数を表す. この2つの発生モデルの適用性については第6章の感度分析で検討される.

(1)~(3) 式中のモデル定数  $a_1, a_2, a_3$  を決定するためには、花粉フラックス  $F \uparrow$  の値が必要である。しかし、花粉フラックスは直接計測されていないので、以下の手順でパラメータを同定した。乱流平均化時間内において、森林上での花粉の発生量と沈着量が釣り合っていると仮定すると、(4) 式の関係が成り立つ。この仮定は前述の浮遊砂の理論でも用いられ成功している。

$$F \uparrow = D \downarrow \quad (4)$$

ここで、 $D \downarrow$  は沈着フラックス ( $\text{個 m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) であり、沈着速度  $w_s$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) と発生源における花粉個数濃度  $C_s$  ( $\text{個 m}^{-3}$ ) の積として (5) 式で表される。

$$D \downarrow = w_s C_s \quad (5)$$

沈着速度  $w_s$  には、重力による沈降効果の他に慣性衝突と乾性沈着の効果が含まれるが、風が比較的弱く、花粉程度の大きな粒径の場合は、沈降効果が卓越することが知られている。そこで、沈着速度  $w_s$  は沈降速度  $w_d$  に等しいとして、ストークスの (6) 式より  $0.036$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) とした。

$$w_d = \frac{\rho_c g d^2}{18 \nu} \quad (6)$$

ここで、 $\nu$  : 空気の動粘性係数 ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )、 $\rho_c$  : 花粉の比重 (無次元)、 $g$  : 重力加速度 ( $\text{ms}^{-2}$ )、 $d$  : 花粉粒子の粒径 (m) を表す。花粉の物性値は報告により幅があるが (佐橋, 2000)、ここでは佐橋ほか (1995) により比重 (1.0) と粒径 ( $35 \mu\text{m}$ ) とした。

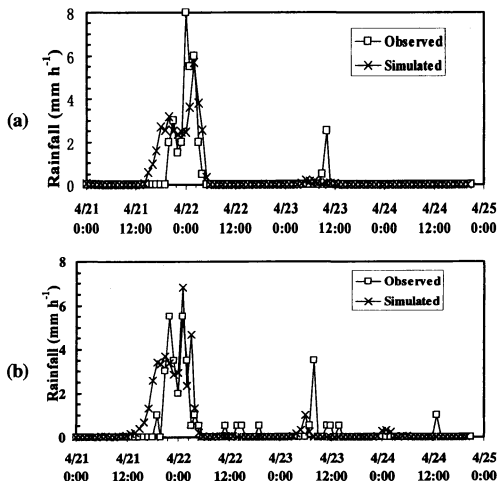
4.1節で述べた集中観測における発生源濃度  $C_s$  と気象要素 ( $u^*$ ,  $V_a$ ) の30分平均値を用いて、(4) 式を仮定すれば、(1) 式~(6) 式よりモデル定数を求めることが出来る。その結果、 $a_1 = 0.018$  ( $\text{個 m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ )、 $a_2 = 0.25$  ( $\text{個 m}^{-4} \text{s hPa}^{-1}$ )、 $a_3 = 0.95$  ( $\text{個 m}^{-5} \text{s}^2 \text{hPa}^{-1}$ ) を得た。

### 4.3 スギ花粉の移流拡散過程

スギ花粉の移流拡散方程式は、気象モデルの中で以下のようにあらわすことが出来る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w - w_d) \frac{\partial C}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial C}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K \frac{\partial C}{\partial z}) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $t$  : 時間、 $u, v, w$  : 風速の  $x, y, z$  方向成分、 $K, K_H$  : 鉛直方向および水平方向の乱流拡散係数、 $C$  : 花粉個数濃度 ( $\text{個 m}^{-3}$ ) を表す。底面での境界条件は慣



第5図 地上降雨量の再現性(2000年). (a)山形, (b)新庄.

性衝突や乾性沈着を無視したので、(8) 式により各時間ステップ毎に与えられる。

$$-K \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=z_d} = F \uparrow \quad (8)$$

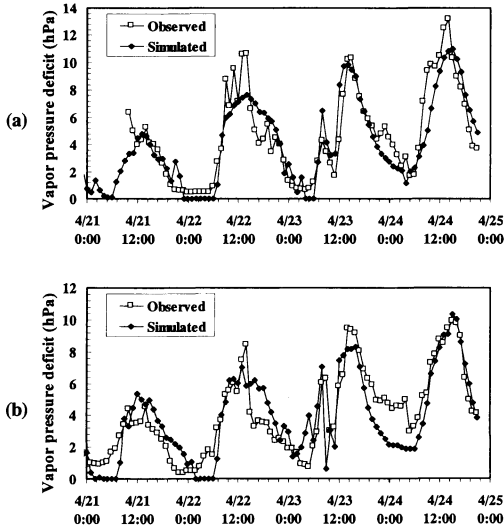
ここで、 $z_d$  : 底面 (発生源) 高度である。地上に落下した花粉の再飛散はここでは考慮していない。乱流拡散係数は運動量のそれと同じと仮定した。

### 4.4 スギ開花状態の取り扱い

第1章で述べたとおり、解析対象地域のスギ林における開花状態をあらかじめ生物学的知見に基づいて決定しておかなければならない。対象地域の山形盆地周辺は高低差によって開花時期に大きな相違があることが知られている。ここでは1月1日からの積算温度がしきい値を越えた時点で開花とする川島・高橋 (1991) の方法になった。その結果、解析対象日において標高350 m以上の高度のスギが全面開花していると仮定した。スギ開花の個体差のばらつきに着目した研究例もあるが (科学技術庁研究開発局, 1999)、本研究ではそれらについては考慮していない。

## 5. 山形盆地における花粉飛散シミュレーション

4.2節で提案した花粉発生フラックスの標準モデル (1) 式を用いて花粉の日変動特性の再現性を検討する。以下の議論では解析第1日目を計算安定のための初期期間と考え、解析2日目 (4月21日) 以降を考察の対象とする。



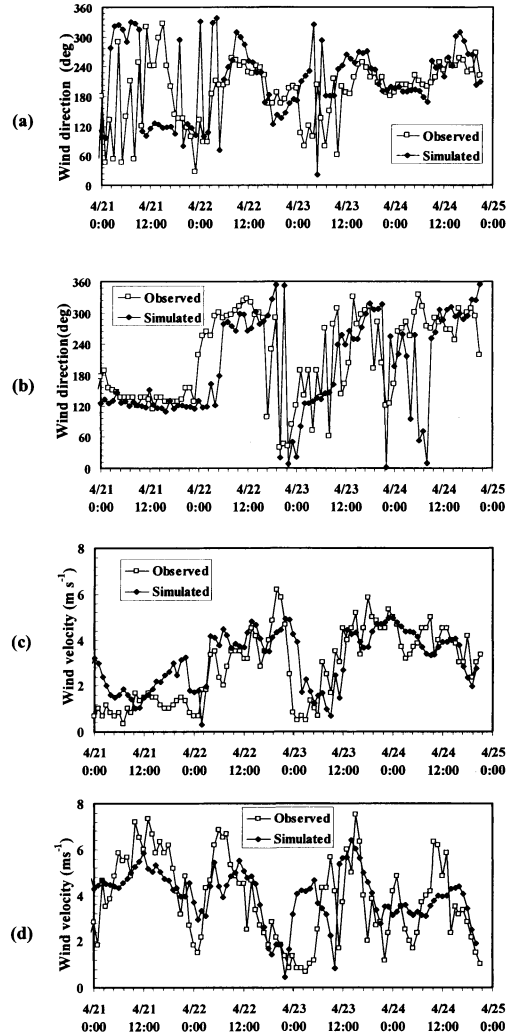
第6図 大気飽差の再現性 (2000年). (a) 山辺, (b) 上山.

### 5.1 気象場の再現性

降雨の有無は大気飽差に大きな影響を与える。そこで、降雨計測が行われている山形・新庄について地上降雨量の計算値と観測値を第5図に示した。両地点において4月21～22日の深夜における $10 \text{ mm hr}^{-1}$ 未満の雨、および4月23日午前の $1\sim 2 \text{ mm hr}^{-1}$ の微雨が、やや過小評価ながら計算により再現されている。後述する花粉の高濃度現象はこの2つの降雨イベント間に発生している。大気飽差の再現性は言うまでもなく花粉の発生量そのものを左右する。そこで、盆地のエッジに位置し計算メッシュ内にスギ林を比較的多く含む山辺・上山の2地点について大気飽差の観測値と計算値を第6図に示した。大気飽差はまとまった降雨のあった解析期間前半(4月21～22日)は低いが、後半23～24日へと次第に増加しており、天気回復と共に花粉発生のポテンシャルが日毎に増大していることが示されている。移流・拡散の点からは風速・風向も重要な要素である。第7図には山形・新庄の2地点における風向・風速の計算値と観測値を示した。いずれの地点においても、風向・風速とも概ね良好に再現されている。盆地中央に位置する山形では、23日午前中に極端に風速が弱くなっており、この時間帯が次に述べる花粉高濃度現象に対応している。

### 5.2 花粉濃度の再現性

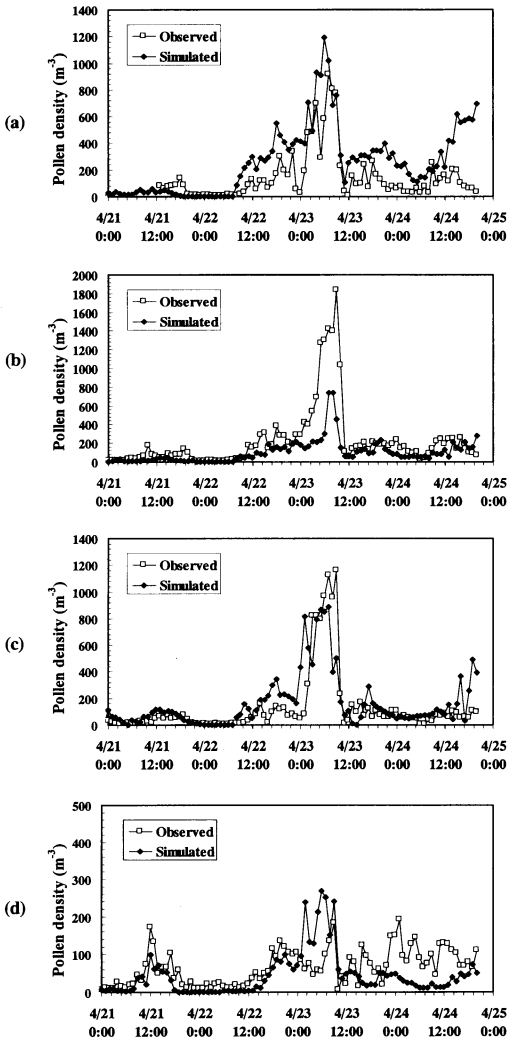
第8図に全ての花粉観測点における花粉濃度の実測値と計算値の時系列変化を示す。いずれの観測点も22



第7図 風向・風速の再現性 (2000年). (a) 山形風向, (b) 新庄風向, (c) 山形風速, (d) 新庄風速.

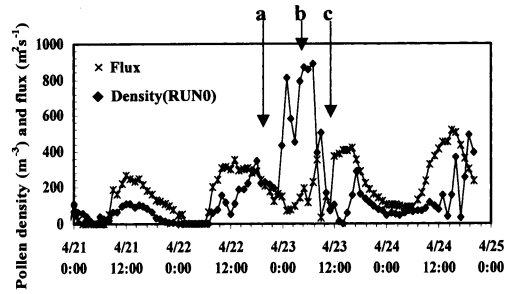
日夜間から23日早朝にかけて急激な花粉濃度の上昇が見られる点が大きな特徴である。計算値は、この23日早朝の花粉濃度の急増傾向を含め4日間の花粉変動パターンを概ね良好に再現している。

細かく見ると、山形盆地南東に位置する山寺・上山では、花粉濃度のピークの位相・個数濃度も良好に再現されている(第8図aおよびc)。山形盆地南西に位置する山辺ではピークの位相は観測と合っているがピーク値がやや過小評価されている(第8図b)。山形盆地の北端に位置し、日本海に通ずる新庄では、花粉のピーク値や位相において計算値と観測値との間に若



第8図 花粉の観測値と計算値の時系列変化(2000年). (a) 山寺, (b) 山辺, (c) 上山, (d) 新庄.

干の不一致が見られる(第8図d). 新庄では高濃度現象前後にあたる23日深夜の風速の再現性(第7図d)が良くないことが原因の1つとして考えられる. また, 山形盆地内ではわずかな観測点の高度・位置の違いで花粉濃度の点計測値が大きく異なることも報告されており(高橋ほか, 1989), 必ずしもメッシュ計算値と点計測値が定量的に一致すべきものでもない. 花粉の発生源分布は, 空間的な不均一性が非常に大きい上に, 複雑地形内では低風速時の風向分布は複雑である. 実際, 高濃度時の花粉濃度は複雑な風系と大きな空間的

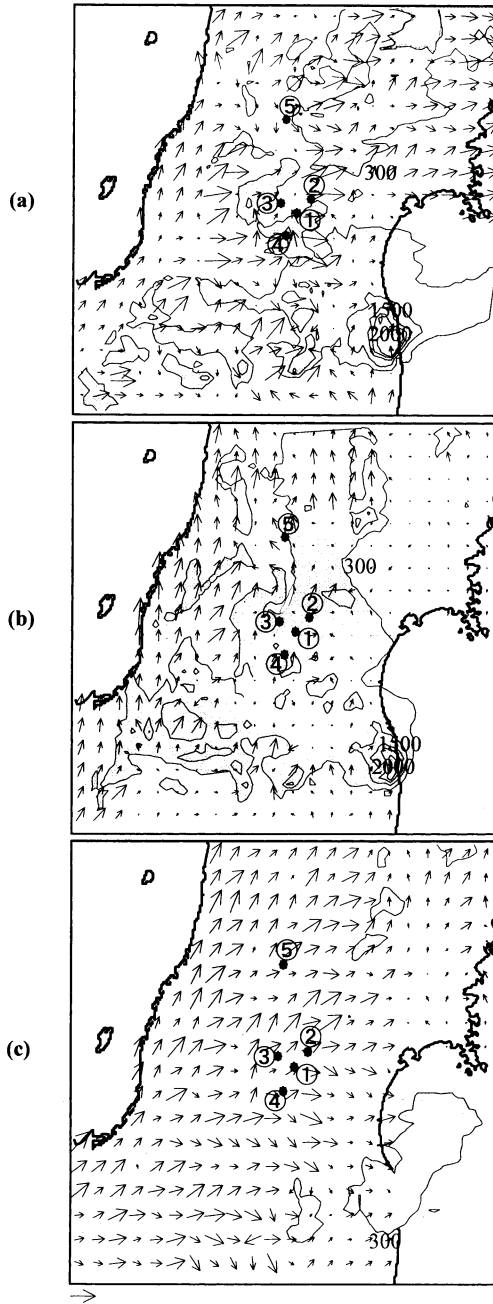


第9図 花粉発生フラックスと花粉個数濃度の時系列(2000年, 上山). 図中の矢印 a~c は第10図, 第11図, 第12図の3時刻に対応.

ばらつきを呈している(後述, 第11図b). これらの点を考慮すれば, 計算は概ね盆地内の高濃度現象を良好に再現していると判断して良いだろう.

### 5.3 花粉発生フラックスと花粉個数濃度との関係

次に, 23日早朝の高濃度現象を中心に花粉濃度の変動パターンについて詳しく考察する. 高濃度現象は上述した2つの降雨イベント(第5図)の合間に発生しており, なおかつ, 解析期間後半に比べてこの期間の大気飽差が必ずしも大きくない(第6図)ことも先に述べたとおりである. 第9図には, 上山に於ける花粉発生フラックスと花粉濃度の計算値を比較して示す. 総じて, 花粉濃度は花粉フラックスより数時間の位相遅れをもって午後3~6時頃ピークが表れているが, 23日の高濃度現象の時だけは, 花粉フラックスと花粉濃度がほぼ逆相関になっている点が興味深い(図は割愛するがこの傾向は他の観測点についても同様に見られた). すなわち, 花粉フラックスは大気飽差に直接規定されるため, 飽差の増大する昼に多くの花粉が飛散し, 夜は逆に少なくなる. 一方, 花粉濃度はむしろ花粉フラックスの小さくなった22日の深夜から23日の早朝に大きなピークを示している. ここで重要な点は, 高濃度化した22日深夜~23日早朝は, その前後に比べて風速が著しく小さくなっている点である(第7図c). 花粉濃度は, 発生フラックスの強度と, 大気混合による希釈効果・移流効果のバランスで決まっている. 日中は花粉が大量に飛散しても, 移流・拡散による希釈効果が卓越し, それほど高濃度化しない. ところが, 風速が弱まると, 盆地外への移流が抑えられると同時に, 地表近くの大気が安定化することにより鉛直拡散も抑えられ地表面近傍に花粉が集積し高濃度化するものと考えられる.



第10図 モデルによる地上50 m地点に於ける花粉濃度の分布 (Grid 2の結果). (a) 22日 19:00, (b) 23日5:00, (c) 23日11:00. ハッチングは花粉個数濃度が300 (個  $m^{-3}$ )以上の地点を表す. 図左下隅のベクトルが5 ( $ms^{-1}$ )を示す.

#### 5.4 花粉高濃度現象のメカニズム

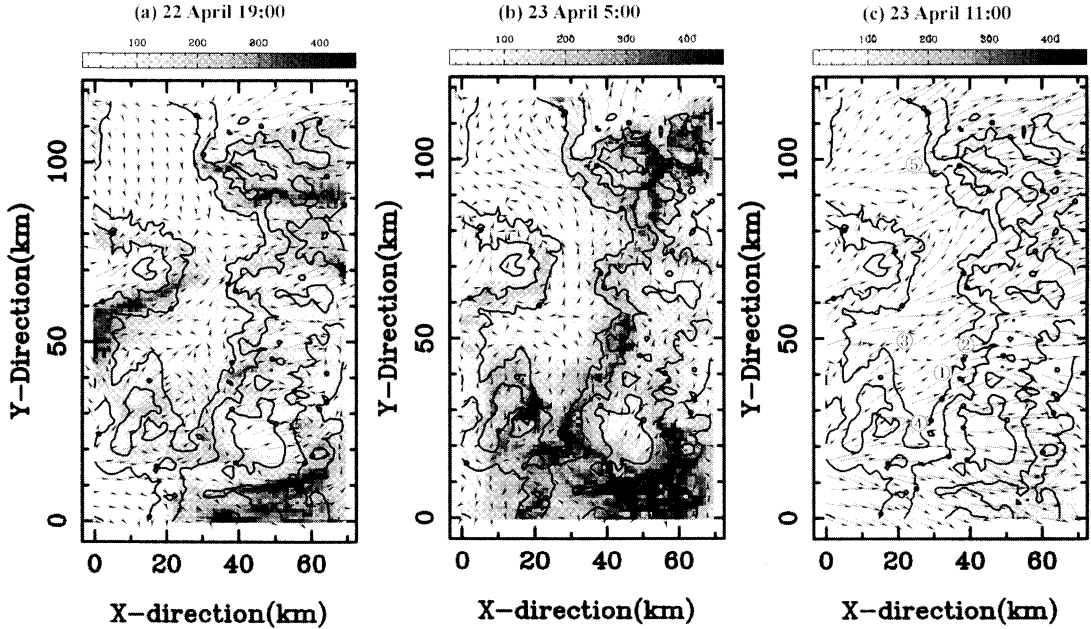
以上の点を踏まえ、花粉濃度の空間分布から高濃度現象のメカニズムを検証してみたい。まず、高濃度現象を含む前後の3時刻における地上花粉濃度分布を示す。3つの時刻は第9図の矢印記号a~cに対応している。第10図はGrid 2の計算結果で花粉の大局的な動きが分かる。第11図はGrid 3の計算結果で盆地内の微細な風系と花粉の動きが分かる。高濃度現象の際には、盆地周辺が弱風であると同時に明確な卓越風向が存在せず、花粉が盆地周辺に滞留している(第10図b, 第11図b)。その傾向は、地形的に閉塞性の強い山形盆地南部でとりわけ顕著で、山岳斜面から盆地底部にかけて強い花粉濃度の水平勾配を形成している。高濃度現象の前後では(第10図a, cおよび第11図a, c)、西からの一般風が卓越しており、盆地東側斜面から発生した花粉が太平洋側へ移流されている様子が顕著に現れている。とりわけ、23日11:00(第11図c)には、盆地を吹き抜ける非常に強い西風が発生しており、発生源である東側斜面においても花粉濃度の上昇は認められない。第12図には上述した3時刻に対応する花粉濃度の鉛直断面図を示した。断面は山形を横切る東西面(第11図中Y軸の40 km地点)である。高濃度現象の際には(第12図b)、上空高度1 km程度まで風速の弱い層が存在し、山形盆地全体が卓越風向を持たない淀み域となっている。山岳斜面や盆地底における地表近傍で花粉濃度が高く、1 kmまで強い花粉濃度の鉛直勾配がついている。このことから鉛直拡散が抑制されていることが分かる。22日の19:00(第12図a)では盆地内に時計回りの循環が発生しているものの、上空の強い西風が花粉を東へ移流させている。23日11:00(第12図c)では地表から上空へ至る一様で強い西風が存在し、東側山脈では上空2 km以上まで花粉が輸送されている。

以上見てきたように、局地的な花粉濃度は発生源強度と同時に移流・拡散過程に強く支配されている。

#### 6. 感度分析

前章で見たように花粉濃度の時間変動パターンは概ね再現されることが示された。本章では、花粉発生への摩擦速度の影響および花粉の沈降速度の影響について検討した。第5章で行った再現計算をRUN0として、計5つの数値実験を行った。その設定条件を第6表に示す。摩擦速度の影響については4.2節で定式化した(2)式および(3)式を花粉発生モデルとして使用





第11図 モデルによる地上50 m地点に於ける花粉濃度の分布 (Grid 3の結果). (a) 22日19:00, (b) 23日5:00, (c) 23日11:00. 各図のグレースケールは花粉の個数濃度 (個  $m^{-3}$ ) を表す. 各図左上隅のベクトルが  $2.5 (ms^{-1})$  を示す.

第6表 感度分析における条件設定.

|       | 発生における摩擦速度の影響     | 花粉の沈降速度 ( $m s^{-1}$ ) |
|-------|-------------------|------------------------|
| RUN 0 | (なし) 標準モデル (1)式   | 0.036                  |
| RUN 1 | (2乗) 実験モデル 1 (2)式 | 0.036                  |
| RUN 2 | (3乗) 実験モデル 2 (3)式 | 0.036                  |
| RUN 3 | (なし) 標準モデル (1)式   | 0.05                   |
| RUN 4 | (なし) 標準モデル (1)式   | 0                      |

する.

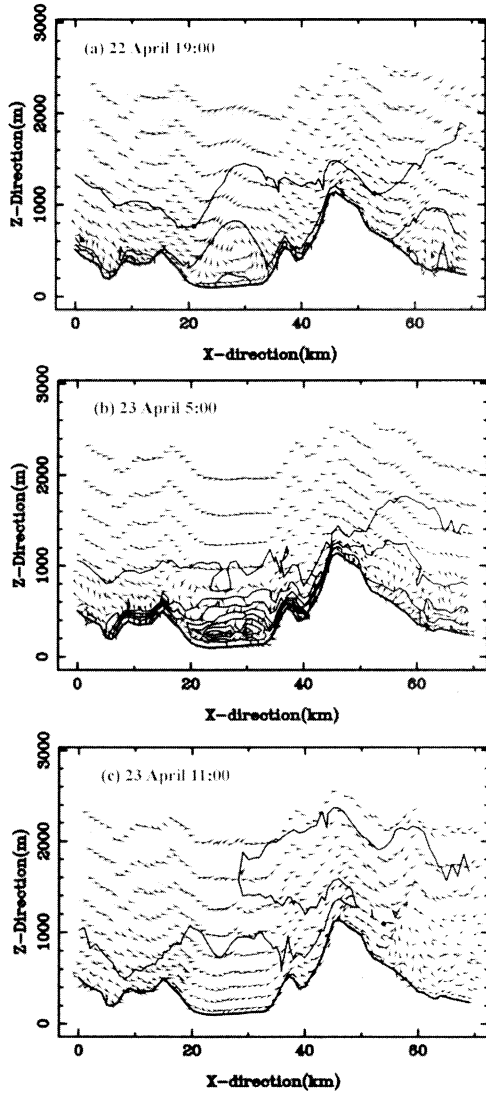
### 6.1 摩擦速度の影響

第13図 a に摩擦速度の影響を変化させた3つの計算結果を比較した. 特徴として, 摩擦速度の影響を取り込んだ2つのケースはいずれも実測の変動パターンとは逆相関で大きく異なったものとなっている. 23日早朝の微風時の高濃度現象は再現できず, 逆に実測には見られなかった21日の日中に高濃度となっている. これは明らかに大気飽差よりも摩擦速度 (あるいは地表面風速) の影響が効きすぎているためである. このように本計算結果の範囲内においては摩擦速度を考慮したモデルは花粉濃度の再現性を向上させなかった. 4.2節で述べたように花粉発生量と風速の関連性を指摘した既存の研究成果を踏まえれば摩擦速度も重要なファクターの1つと思われるが, 2乗や3乗に比例す

るような単純なものではないようである. この点については今後さらに花粉フラックスを直接計測するなど質の高い観測データの蓄積が強く望まれる (例えば, 科学技術庁研究開発局, 1999).

### 6.2 沈降速度の影響

いずれの地点においても沈降のないRUN4がもっとも高濃度化しており, とりわけ23日早朝の高濃度時にはその違いが明瞭である (第13図 b に上山についてのみ示す). 沈降は地表面へのシンクとして効果的に作用し, とりわけ地表面近傍が高濃度化している23日早朝のような状況では低層の花粉尘度を引き下げる作用をもつ. RUN0 (沈降速度  $0.036 m s^{-1}$ ) とRUN3 (沈降速度  $0.05 m s^{-1}$ ) の違いは小さく, この範囲に沈降速度を設定すれば結果に及ぼす影響はそれほど大きくない. なお, 本計算では慣性衝突や乾性沈着の効果を無視しているため, 実際の沈着量を過小評価している可能性がある点に注意が必要である. いずれにしろ沈降速度が小さい場合, 花粉濃度が高濃度化する傾向にあるという事実は花粉症に関連して重要な知見である. なぜなら, 本論では特に対象としなかったが, スギ花粉の表面には花粉径よりも1オーダー小さい (約  $0.7 \mu m$ ) ユービッシュボディと呼ばれる無数の小突起

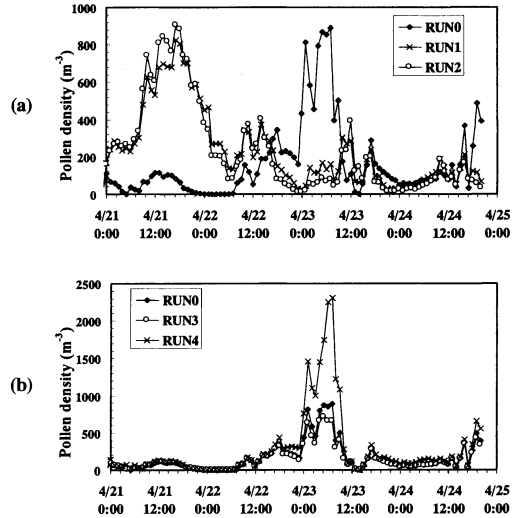


第12図 モデルによる風速と花粉濃度の鉛直断面分布 (Grid 3の結果で、断面は第11図のY=40 kmラインに対応). (a) 22日19:00, (b) 23日5:00, (c) 23日11:00. 花粉個数濃度コンターの間隔は50 (個 m<sup>-3</sup>).

があり、この小突起は花粉から分離し、それ自体が花粉のアレルギーを引き起こすことが知られている。その数は、花粉そのものよりも遙かに多く、沈降速度はほとんど無視し得るからである。

7. 結論

局地気象モデルを用いて、花粉個数濃度の日変動特



第13図 感度解析の結果。(a) 花粉発生に及ぼす摩擦速度の影響、(b) 花粉の沈降速度の影響、いずれも上山。

性とスギ花粉の発生プロセスについて検討を行った結果、以下の成果が得られた。

- (1) 集中観測結果と物理的考察に基づき、大気飽差に依存するスギ花粉発生フラックスモデルを提案した。これにより、大気飽差は花粉発生プロセスにとって最も重要なファクターの1つであることが示された。
- (2) 上記モデルを局地気象モデルに組み込んで山形県に於ける花粉観測データと比較したところ、弱風夜間における高濃度現象を含めて、花粉個数濃度の時間変動パターンが概ね良好に再現された。
- (3) 山形盆地における花粉高濃度現象メカニズムを発生フラックス強度・移流・拡散の観点から明らかにした。
- (4) 感度分析の範囲内では摩擦速度の影響は見いだせず、2乗や3乗に比例するような単純な関係ではないことが示唆された。
- (5) 沈降速度の低下は花粉個数濃度のピーク値を増加させる効果をもつ。通常言われている沈降速度の範囲内では結果に及ぼす影響は小さい。

参考文献

有沢雄三, 1999: スギ林からの花粉放出量の計測・予測に関する研究「スギ花粉症克服に向けた総合研究」成果報告書, 335-348.

- 平野元久, 庄司正成, 加藤 忠, 高橋裕一, 横山敏孝, 2000: 花粉リアルタイムセンシングとネットワークを融合した花粉予報システムの提案, *アレルギー*, **49**, 957-957.
- 平野元久, 加藤 忠, 2001: 花粉情報システム, *NTT R&D*, **50**, 890-894.
- 池田駿介, 1992: 植生が河川の流れや河道形状に及ぼす効果に関する基礎的研究, 文部省科学研究費補助金研究成果報告書 (01550398), 109pp.
- 科学技術庁研究開発局, 1999: 「スギ花粉症克服に向けた総合研究」成果報告書, 502pp.
- 川島茂人, 高橋裕一, 1991: 開花日を考慮したスギ花粉の拡散シミュレーション—スギ花粉の拡散過程に関する研究 (III), *日本花粉学会誌*, **37**, 137-144.
- Kawashima, S. and Y. Takahashi, 1995: Modeling and simulation of mesoscale dispersion process for airborne cedar pollen, *Grana*, **34**, 142-150.
- 神田 学, 井上裕史, 鶴野伊津志, 2000: “環八雲”の数値シミュレーション, *天気*, **47**, 83-96.
- 小杉緑子, 1995: 気孔コンダクタンスの計測とモデリング, *水文・水資源学会誌*, **8**, 221-230.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Phys.* **20**, 851-875.
- Pielke, R. A., W. R., Cotton, R. L., Walko, C. J., Tremback, W. A., Lyons, L. D., Grasso, M. E., Nicholls, M. D., Moran, D. A., Wesley, T. J., Lee and J. H., Copeland, 1992: A comprehensive meteorological modelling system—RAMS, *Meteorol. Atmos. Phys.* **49**, 69-91.
- 佐橋紀男, 2000: 花粉とアレルギー, *空気清浄*, **37**, 380-387.
- 佐橋紀男, 高橋裕一, 村山貢司, 1995: スギ花粉のすべて, (株)メディカル・ジャーナル社, 117pp.
- 齊藤洋三, 宇佐神篤, 1980: スギ花粉症と気象, *気象*, **24**, 6-9.
- 高橋裕一, 東海林喜助, 片桐 進, 1989: 山形盆地におけるスギ花粉飛散の日内変動とそれに及ぼす温暖・寒冷前線の影響, *アレルギー*, **38**, 407-412.
- 高坂知節, 1986: スギ花粉症と気象条件, *日本医事新報*, **3275**, 121-121.
- 張 翔雲, 2001: 2000年度東京工業大学国際開発工学専攻修士論文, 81pp.
- Tremback, C. J. and R., Kessler, 1985: A surface temperature and moisture parameterization for use in mesoscale numerical models, Preprints. 7th AMS Conference on Numerical Weather Prediction. June 17-20, Montreal, Quebec, Canada, Amer. Meteorol. Soc., Boston, 355-358.
- Uno, I., H. Amano, S. Emori, K. Kinoshita I. Matsui and N. Sugimoto: Trans-Pacific yellow sand transport observed in April 1998: A numerical simulation *J. Geophys. Res.* **106**, D16, 18331-18344.
- 山形県衛生研究所, 1997: 空中スギ花粉の飛散動態に関する研究, 80pp.

## Numerical Study on Dispersion of Cedar Pollens Using Meso-scale Meteorological Model

Manabu KANDA\*<sup>1</sup>, XiangYun Zhang\*<sup>1</sup>, Itsushi UNO\*<sup>2</sup>,  
Sigeto KAWASHIMA\*<sup>3</sup>, Yuichi TAKAHASHI\*<sup>4</sup> and Motohisa HIRANO\*<sup>5</sup>

\*<sup>1</sup> (Corresponding Author) Department of International Development Engineering, Tokyo Institute of Technology, O-okayama 2-12-1 Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, Japan.

\*<sup>2</sup> Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

\*<sup>3</sup> National Institute for Agro-Environmental Sciences

\*<sup>4</sup> Yamagata Prefectural Institute of Public Health

\*<sup>5</sup> NTT Lifestyle and Environmental Technology Laboratories

(Received 23 May 2001; Accepted 15 February 2002)