

スギ花粉の放出と拡散過程に関する研究

川島茂人*・高橋裕一**

1. はじめに

毎年早春の2月頃から5月頃まで、スギ花粉による花粉症が発生する。近年その患者数は増加する傾向にあり、大きな社会問題となっている。アレルギー症状を軽減するためには、抗アレルギー剤による治療などいくつかの方法があるが、何をおいてもまずアレルギー症状を起こす物質への接触をできるだけ少なくすることが大切である。しかしながらテレビ、新聞などで報じられる花粉予報は十分に詳細なものとは必ずしも言えず、患者自身が行動を判断するためには、従来よりも時間的・空間的に詳しいスギ花粉飛散情報を、客観的かつ高精度で作成できる手法を開発する必要がある。そのためには、まずスギ花粉の拡散過程に関わる様々な現象を大気生物学(Aerobiology)などの手法を用いて明らかにし、さらにその成果を物理学的な手法や各種情報処理手法等を用いて組み合わせることで、精度の高い花粉情報を生み出せるシステムを構築していくことが重要である。

大気中を輸送される様々な物質の拡散過程は、一般的に次の移流・拡散方程式で記述される。

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -V \cdot \nabla P + \nabla(K \cdot \nabla P) + S_0 - S_r \quad (1)$$

ここで、 $\nabla = \partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$ 、 P は対象とする物質の濃度であり、花粉の場合は単位体積の空気中にある花粉数、 V は大気の流れベクトル、 K は拡散係数、 S_0 は物質の発生強度、 S_r は物質の消失強度、 x, y, z は直交座標系である。この式は直接的には、ある場所における対象とする物質の濃度変化が、その物質の移流、拡散、発生および消失によって決まることを表わしているとともに、間接的には、輸送過程が移流、拡散、

発生、消失などのサブプロセスから構成されていることを示す。

花粉においても、輸送過程全体は第1図に示すように、森林から発生する過程、風によって運ばれつつ拡散する過程、落下し沈着する過程に大別される。花粉の拡散問題では、各過程をできるだけ区別して解析して、各サブプロセスの中の主要原理を明らかにすると同時に、明らかになった原理を組み合わせ輸送過程全体を総合的に解析することが重要である。本稿では、このような考え方をふまえ、花粉が森林から発生してからたどる経過にそって、「スギ花粉の放出と拡散過程に関する研究」の概要について解説する。

2. 発生源問題

花粉が雄花芽から空気中に飛び出すプロセスは、厳密には「放出(Emission)」と呼ぶべきであるが、わかりやすくするために「発生」という呼び方も使用した。

2.1 スギ森林の分布

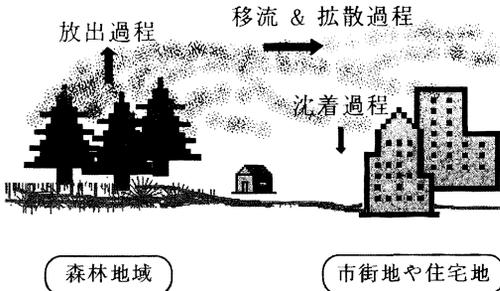
花粉発生源の問題で、まず重要となるのが、発生源となるスギ森林の分布である。これを評価するには、既存の植生図を用いる方法と、リモートセンシング画像をもとに評価する方法がある。

環境庁(当時)が作成した3種類の植生図(環境庁, 1975, 1980, 1986)をもとに、国土数値情報の地域区画単位の一つである2次メッシュごとに、各メッシュ内のスギ森林の面積率を読み取り、スギ森林分布の数値マップを作成した例を第2図に示す。黒い点の多いところほど、スギ森林の密度の高い地域である。環境庁(当時)が作成した植生図は、更新回数が少なく最新のスギ林を評価できないという問題点がある。そこで、人工衛星画像を用いて、スギ森林分布図を作成する方法について検討した(Takahashi *et al.*, 1992; 高橋・川島, 1999a)。その結果、いくつかの検討課題は残るものの、最新のスギ森林分布図を作成すること

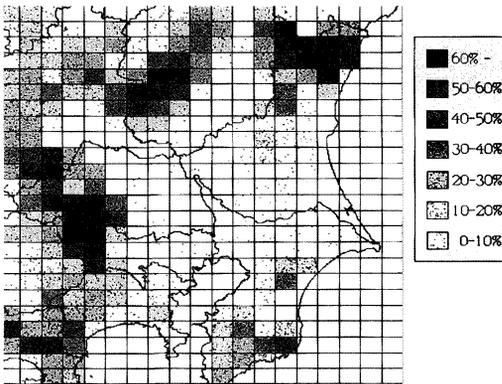
* 農業環境技術研究所. ** 山形県衛生研究所.

—1999年2月5日受領—

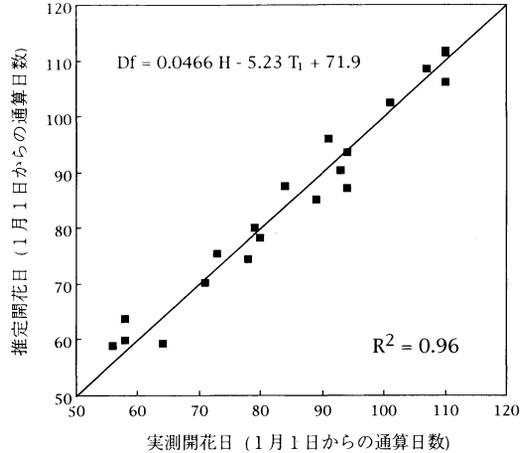
—2002年9月24日受理—



第1図 スギ花粉の輸送過程の基本的構成。花粉において、輸送過程全体は、森林から発生する過程、風によって運ばれつつ拡散する過程、落下し沈着する過程に大別される。



第2図 スギ森林の分布図の例。スギ森林の分布状況に2次メッシュを重ねたもの。黒い点の多いところほど、スギ森林の密度の高い地域。2次メッシュは、縮尺2万5千分の1の地図1枚に相当する区画で、関東地方では、およそ縦10 km、横10 kmの大きさとなる。



第3図 標高と1月の平均気温から推定した開花日と実測開花日の関係。

いることを示した。また、高橋ほか (1989b) や芦田ほか (1989) のように、スギの樹勢やセミの初鳴日など生物的な因子を加味する予測法も検討されている。小笠原ほか (1998) は、数十年にわたる長期的なスギ花粉総飛散数の年次変動をスギ造林面積との関係で解析し、空中花粉の増加が壮齢林面積の増加と関係していることを明らかにした。翌シーズン花粉総飛散数を予測するために、高橋ほか (1996b) は、前年の7月の平均気温 (°C) と前年の雄花芽量 (%) を用いる計算式を提案した。また、予測年の前年の夏期の気温だけでなく、前々年の夏期の気温も考慮することによって、花粉総飛散数の予測精度が向上することが明らかになった (高橋・川島, 1999b)。

3. 発生 (放出) 過程

3.1 開花日の推定・予測手法

スギ開花日を面的に推定・把握することは、スギ花粉の拡散過程を解明する上で大切なポイントの1つであり、花粉飛散予測においても重要な情報である。しかしながら、地形の変化に富む地域では、場所による開花日のずれが大きく、如何に、より正しく空間的な分布を推定するかが問題となる。そこで、局地スケールおよびメソスケールの地域を対象に、気象情報や地形情報等に基づいて開花日の分布を推定する手法が必要となる。

毎日の気温を積算する手法に基づくスギ開花日マップの作成手法について山形県を対象地域として検討した (高橋ほか, 1991; Takahashi and Kawashima,

ができた。

2.2 花粉総飛散数の予測

1シーズンあたりの花粉総飛散数に関する研究は、全プロセスの結果を総合的に見たものであるため、どのプロセスで述べるのが適切か難しい。しかしながら、花粉総飛散数はその年の雄花芽の量に密接に関係しているため、発生源問題の1つとして考えた。斉藤・宇佐神 (1980) は、7月の平均気温・湿度と翌春の総飛散数との関係について検討した。王ほか (1984) は夏期の最高気温から、翌春の総飛散数を推定する回帰式を示した。根本 (1988) は、7月の最高気温と降水量および冬期の最低気温が、翌春の花粉総数と関係して

1993). さらに、より広域的な開花日を推定するために利用できるいくつかの手法を比較検討した(川島・高橋, 1993). その結果、標高と1月の平均気温から重回帰式で開花日を推定する手法が、最も推定誤差が小さく、実用性も高いことが明らかになった(第3図).

3.2 飛散開始日

平ほか(1992)は、スギ花粉の飛散開始を予測するためには休眠打破日が重要であることを示すとともに、富山県において休眠打破となる条件を明らかにした. 小笠原ほか(1995)は、六甲山系を中心に兵庫県内のスギ開花時期を調査した結果、六甲山系のスギ林が兵庫県内の飛散開始の指標となること、休眠打破日以降の日平均気温積算値が飛散開始日を推定するのに有効であることを示した. Sahashi *et al.* (1995)は、9年間の平均飛散開始日、最高気温、緯度などの間の関係を、九州から東北地方にまたがる17地点のデータに基づき解析した. その結果、1月の最高気温の積算値は1月1日から飛散開始日迄の日数と高い負の相関があること等を明らかにした. このように、様々な角度から飛散開始日の推定法に関する研究が行われており、簡易で実用的な手法が求められている. そこで、開花前数ヶ月間の気温変化パターンに着目して、飛散開始日の予測法を検討した結果、気温変化パターンの最低温度等を用いて、飛散開始日を簡易に推定できることが示された(川島ほか, 1998).

3.3 開花期間、開花パターン

標高差によるスギ開花期間のずれを、山形盆地から蔵王連山にかけて調査した. その結果、開花時期は標高に従って登るように推移すること、いづれの標高でも開花期間は約10~14日であること、スギ林の標高が上限に近づくと開花期間は短くなる等のことが明らかになった. スギ森林地帯(真室川町)において、日最高気温、開花状態、空中花粉数を調査した結果、放出源地域における空中花粉濃度の経日変化は、台形パターンを示した(高橋ほか, 1993).

3.4 発生量と気象条件の関係

斉藤・宇佐神(1980)は、花粉飛散数の日変化と気象状態との関係を調べた結果、湿度が低下するに従って飛散数は増加すること、たとえ夜間でも寒冷前線の通過によって湿度が低下し、風速が強くなれば多数の花粉が短時間に飛散することを明らかにした. 佐橋ほか(1983)は、本州中部におけるスギ花粉捕集調査の結果にもとづき、日平均気温の急激な上昇があった後に、捕集数の大きなピークが観測されること、最大ピー

クが春一番のような強風の日に出現する確率が高いことなどを明らかにした. また、高坂(1987)は、花粉の飛散数は、気温の上昇と湿度の低下が同時に起こると増加すること、雨が降ると著しく減少すること、雨上がりに気温の上昇と湿度の低下があれば特に大きくなることなどを述べている. 高橋ほか(1989a)は、山形市におけるスギ花粉飛散の日変化の様子と気象条件との関係を調べた結果、温暖前線通過前には著しく花粉飛散数の多い時間帯が見られ、それに続く寒冷前線通過時には花粉飛散数が非常に少なくなることなどを明らかにした. 以上のような研究をふまえて、スギ花粉が大気中に飛び出す量と気象条件の関係についてモデル化を試みた.

スギ花粉量を気象条件との関係でモデル化するには、バーカード式などの体積法による空中飛散花粉濃度の実測値を用いることが望ましい. しかしながら、実測データが花粉捕集数(落下付着数)の場合は、花粉捕集数と空中飛散花粉濃度の間に近似的な比例関係が成り立つことを利用して解析した. 東京都西部に広がるスギ花粉発生源地域(青梅市、八王子市)の気象データとスギ花粉捕集数データ(青梅市、五日市市、八王子市にて採集)を中心に、スギ花粉がどのような気象条件の時に飛び出すかについて、各気象要素と花粉飛散数との相関解析を行った. その結果、次のことが明らかになった.

a) アメダス観測4要素(気温、風向・風速、日照時間、降水量)の中で気温と風速が、花粉飛散数との相関係数が大きい.

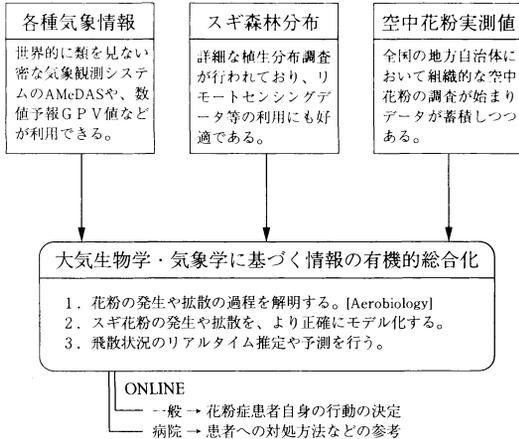
b) ある時刻の気温や風速の値そのものよりも、それ以前のある期間の平均的な状態からの差として定義される気温や風速の「変動値」の方が、花粉飛散数との相関が高い.

これらは、気温の急激な上昇があった後に、捕集数の大きなピークが観測されることや、最大ピークが春一番のような強風の日に出現することが多いという報告と符合する. この結果をシミュレーションモデルに組み込むために、気象条件とスギ花粉発生量の関係を、次式(2)、(3)、(4)のように定式化した(川島, 1991; Kawashima and Takahashi, 1991, 1995).

$$\Delta T_i = T_i - \left(\sum_{j=1}^N T_{i-j} \right) / N \quad (2)$$

$$\Delta W_i = W_i - \left(\sum_{j=1}^N W_{i-j} \right) / N \quad (3)$$

$$F_i = a\Delta T_i + b\Delta W_i + c \quad (4)$$



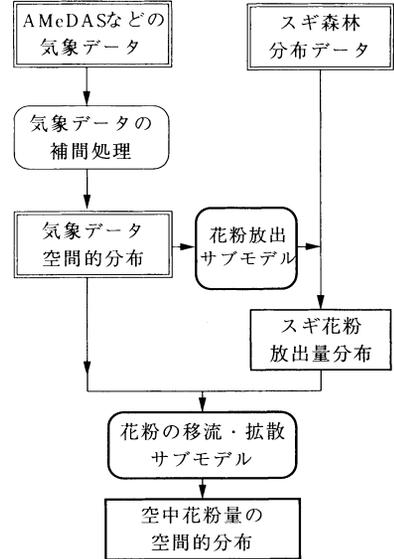
第4図 スギ花粉拡散過程に関する研究の全体的枠組み。スギ林の植生分布や各種気象情報等を用いて、より合理的に詳細なスギ花粉飛散量分布の推定や予測ができないかと考えた。

ここで、 T は気温、 W は風速、 ΔT_i は気温の変動値、 ΔW_i は風速の変動値、 i は時刻、 j は積算を求める際の時刻差、 N は平均化期間のデータ数、 F は単位面積のスギ森林から単位時間に大気中に放出される花粉数である。重みパラメータ a, b, c は、対象とする年次の雄花芽の形成量に関係する。

これらの式のパラメータを経験的に決める際には、 ΔW のかわりに W を用いる効果や、 ΔT と ΔW の積の項を検討するなど、様々な組合せで比較検討を行い、重相関係数の最も高くなる式を選択した。平均化期間 N の長さを変化させ、実測飛散数との相関を調べた結果、最適の N が456時間 (19日間) であることが明らかになった。さらに、この N で計算した $\Delta T, \Delta W$ と、スギ森林地域の花粉捕集数データを用いて、重回帰式 (4) の重み a, b, c を決めた。また、最近の解析では、時間に対する気温の変化率によっても、大気中への花粉放出量が評価できることが明らかになった。

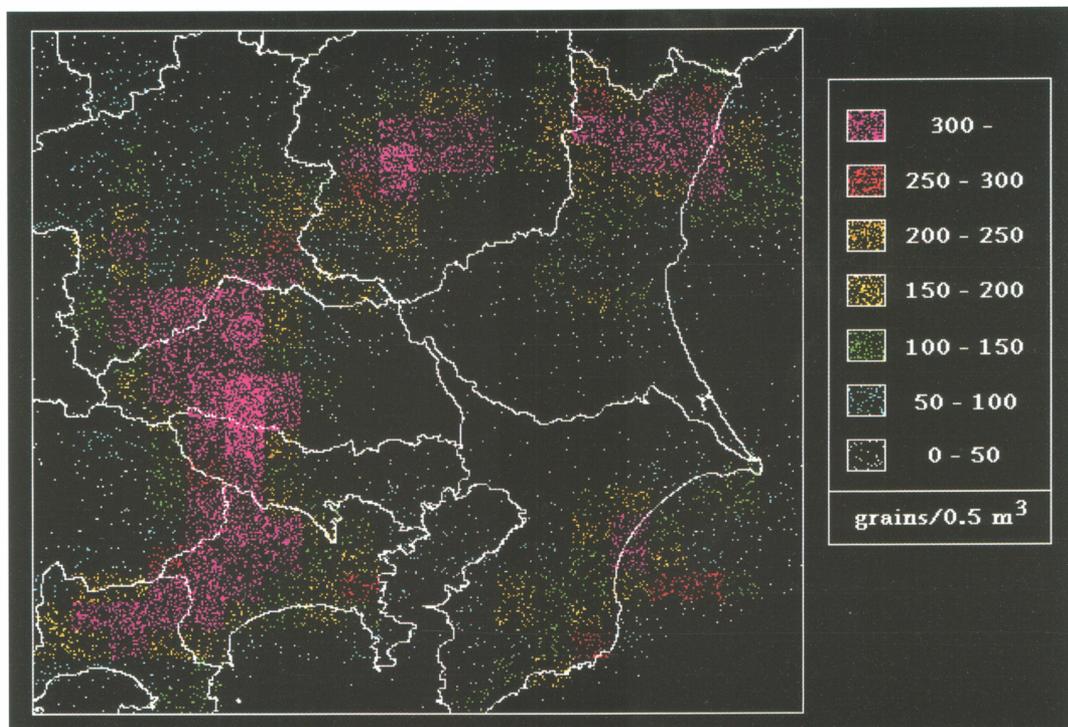
4. 移流・拡散過程および総合的解析

比較的短い距離の拡散について検討した例として、Raynor *et al.* (1972) は、チモシーの花粉が拡散し沈着する過程を実験的に調べ、発生源からの距離と飛散数との関係を図示した。また、Raynor *et al.* (1973) は、点源および線源からの花粉の拡散状況を面的に測定し、花粉濃度や沈着速度と発生源からの距離の関係を明らかにした。Price and Moore (1984) は、台地



第5図 スギ花粉発生・拡散モデルの全体的構成。毎時気象データと、スギ森林の分布データをモデルに入力する。各気象要素の分布は、スギ花粉発生モデルおよび移流・拡散モデルへ入力する。

の周囲から谷風が吹き上げるような地形では、風が収束する台地中央部で多数の花粉が降下する現象があることを明らかにした。一方、中長距離の花粉の輸送や拡散を扱った研究として、Markgraf (1980) はスイスの山岳地帯で、複数の標高において花粉捕集数を測定し、鉛直方向の花粉の拡散について調べた。その結果、標高の高い所における花粉の拡散は一般風によって説明されること、標高の低い所における測定結果は、より局所的な植生の影響を受けることなど、高山地帯における花粉の拡散特性を明らかにした。また、Mandrioli *et al.* (1980) は北イタリアのポー河流域地帯において、ハシバミ花粉の大気輸送について調べ、大気中の花粉濃度の分布が気象条件によって強く影響されること、一度落下した花粉が再飛散する効果で、花粉が大気中に存在する期間が花粉の放出期間よりも長くなることなどを示した。Hall (1990) は、アメリカ中部の山岳地帯から平原地帯にわたる320 Kmを横断する37個所で花粉捕集数の観測を行い、捕集された花粉の20~60%は中長距離の輸送を経たものであることを示した。Scott and Bakker (1985) は南極の島において、様々な表層土中に含まれる外来花粉を調べた結



第6図 関東地方におけるスギ花粉飛散量分布のシミュレーション。点の多い所ほど、花粉濃度が高く計算された地域。

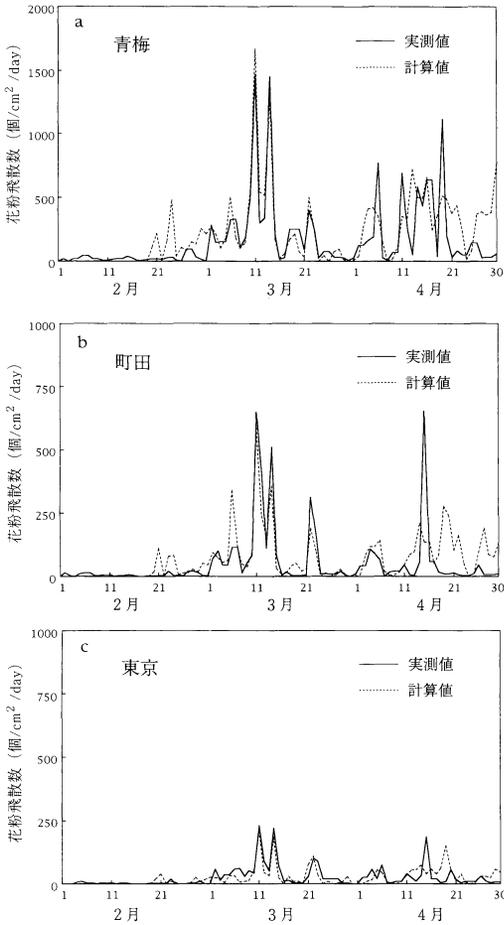
果、これらの花粉が遠く離れたアフリカ南端や、さらに遠い南アメリカから、卓越する西風によって輸送されたものであることを明らかにした。スギ花粉の拡散について考察した研究として、小笠原ほか(1991)は、兵庫県内においてスギ・ヒノキ科の空中花粉調査を行い、神戸の気象データや六甲山のスギ開花状況等との関係を解析した。菅谷ほか(1995)は、埼玉県におけるスギ・ヒノキ科花粉の飛散状況を調査し、飛散量日別値と風向との関係等を明らかにした。このほか国内各地においてスギ花粉飛散数と近傍の気象観測値との関係が調査されているが、点的データ同士の解析であるため、飛散状況をより全体的に捉える面的な解析は困難となっている。

以上のように、花粉の輸送や拡散について調べた研究はかなりあるが、花粉の輸送や拡散をシミュレーション手法を用いて面的に調べた研究はほとんどない。そこで、各種気象データやスギ森林分布データ等を用いて、花粉の輸送や拡散現象をシミュレートする方法を検討した。

4.1 スギ花粉の発生と拡散過程のモデル化

わが国には、世界的にも他に類を見ない空間的に密な気象観測システムであるアメダス(地域気象観測網)が展開されている。また、国内の植生については詳細な調査が行われており、植生分布図としてまとめられている。さらに、近年花粉症が社会問題化したことに対応して、いくつかの地方自治体によって、組織的な花粉捕集数の観測が始まり、データが蓄積しつつある。そこで、これらの情報を積極的に利用し、有機的に統合することにより、従来よりも詳細な、スギ花粉飛散量分布の推定を行う手法について検討した(第4図)(川島, 1991; Kawashima and Takahashi, 1991, 1995)。

本来、大気中での花粉拡散は3次元的に計算しなければならない。しかしながら、花粉の上空での拡散動態がまだほとんどわかっていない。また、数少ない観測例の1つとして、川崎市衛生局がヘリコプターを用いて調査した高度別のスギ花粉濃度値において、地上300mで半数以上の花粉が観測された事から、スギ花粉の多くは大気境界層下部の気流によって輸送される



第7図 スギ花粉飛散数経時変化の実測値と計算値。
 (a) 花粉の発生源に近い地点(青梅),
 (b) 花粉の発生源からすこし離れた地点(町田),
 (c) 花粉の発生源からかなり離れた地点(東京)。

と考えられる。そこで、近似的ではあるが、アメダスの観測で得られた風速場で、どこまでスギ花粉の拡散が再現できるか試みた。その際、花粉発生時の気象条件を評価するためにも、アメダスで得られたデータを用いた。計算対象領域は、関東地方1都6県とその周辺各県の一部を含む、南北約220 km、東西約230 kmの範囲とした。毎時の気象4要素(気温、風向・風速、日照時間、降水量)を観測しているアメダス観測点は、対象地域内に87地点ある。アメダスデータの処理手法については、川島(1990a, 1990b)にもとづいた。環境庁(当時)が作成した3種類の植生図(環境庁, 1975, 1980, 1986)をもとに、スギ森林分布の数値マップを

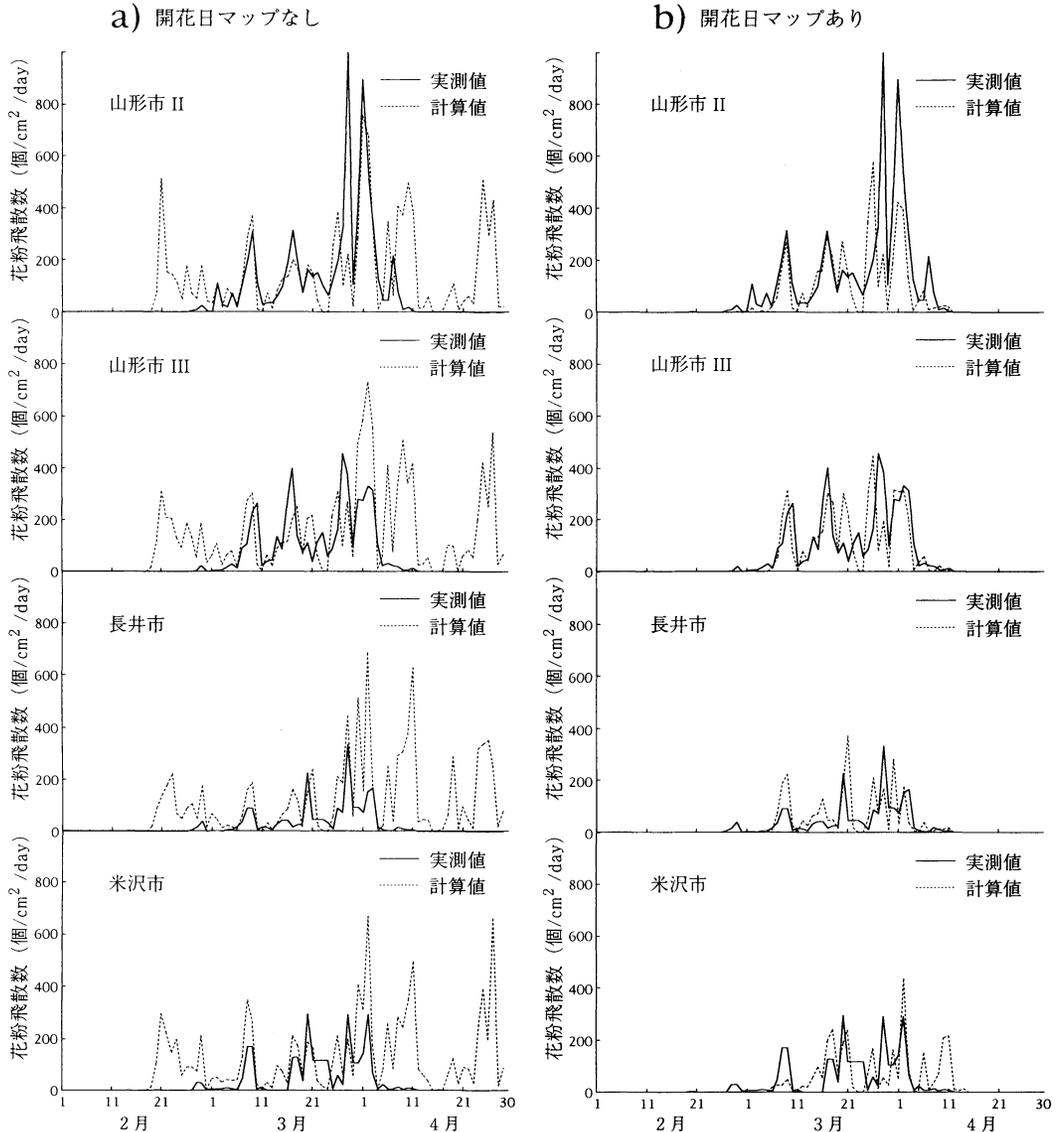
作成した。

スギ花粉発生・拡散モデルの全体的構成を第5図に示す。スギ花粉発生モデルは、開花したスギ森林における気象条件とスギ花粉発生量の関係を定式化したものである。モデルからの出力は、一様なスギ森林からの単位時間あたり、単位面積あたりの花粉発生可能量である。各メッシュごとに花粉発生可能量とスギ森林面積率を掛け合わせて、スギ花粉発生量を求めた。アメダスデータをモデル格子点に補間して得た地上風分布と、式(4)に基づきアメダスデータから推算した各格子点上のスギ花粉発生量とを、移流・拡散モデル(1)へ入力した。移流・拡散モデルでは、過去に発生した花粉の移流・拡散後の分布と、対象とする時刻に発生した花粉の分布を重ね合わせるにより、対象時刻におけるスギ花粉飛散量分布を計算した。輸送中の花粉量の沈着に伴う減少効果は、平均の乾性沈着率および降水に伴う湿性沈着率によって与えた。

第6図に、シミュレーション結果として得られる毎時の花粉飛散量分布の一例を示す。点の多い所ほど、花粉濃度が高く計算された地域である。もともとスギ森林の多い関東地方の西部や北部では、花粉濃度が高く計算されている。スギ森林地域から放出された花粉が風によって運ばれるために、風向きによっては、スギの森林などの無い東京でも、花粉濃度が高くなる状況が再現されている。さらに、太平洋や相模湾上に花粉が飛散してゆく状況もシミュレートされている。第7図に、花粉数経時変化の実測値と計算値を示す。図の横軸は日付、縦軸は花粉数である。スギが花粉を多量に発生させる3月初めから4月中旬までの最も問題となる期間においては、実測した飛散数の経時変化と、計算した飛散量の経時変化は、全体的に見て、かなりよく一致している。また、発生源からの距離による飛散数の違いも再現している。計算値のピークが表れている日に、実測値が台地状になっている日があるのは、ダラム式の測定(スライドガラスの交換)が休日に行われなかったためである。花粉が飛び始める時期と終了する時期で計算値が過大評価となっているのは、開花日の場所による違いをこのモデルでは、まだ組み込んでいないためである。

4.2 開花日を考慮したスギ花粉拡散シミュレーション

開花日の場所による違いをモデルに組み込んでいないと、花粉の飛散開始時期および終了時期において計算値が実測値を上回る問題が生じる。そこで、スギ花



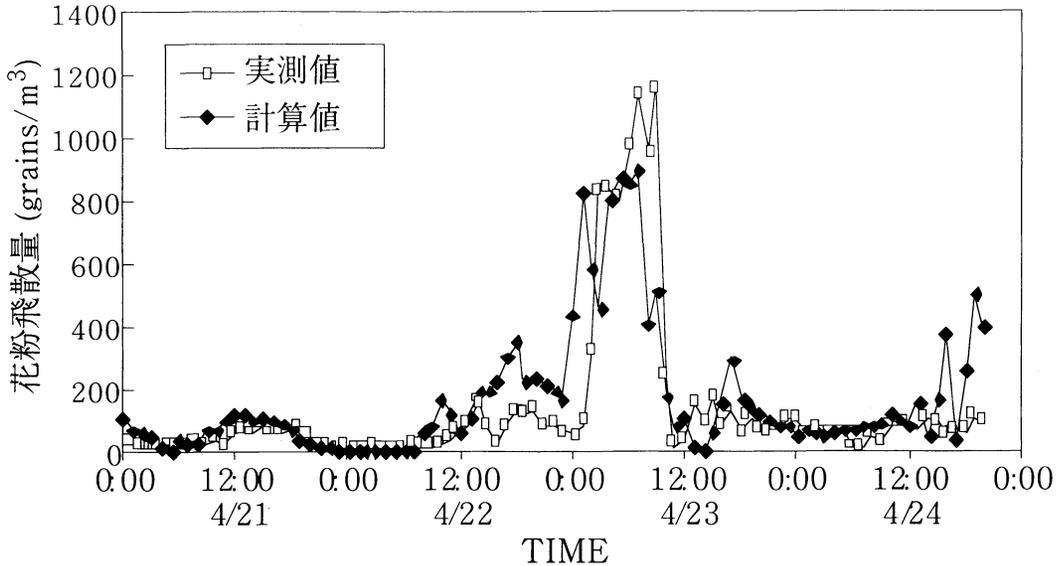
第8図 開花日データの有効性の検証。スギ花粉飛散数経時変化の実測値と計算値。(a) 開花日データを用いないシミュレーション結果、(b) 開花日データを用いたシミュレーション結果。

粉発生・拡散モデルを山形県を中心とする東北地方南部に適用するとともに、標高や局地気象の違いによる開花日の地域間差を組み込み、スギ開花日マップデータの有効性について検討した(川島・高橋, 1991; Kawashima and Takahashi, 1999)。

まず、開花日の地域間差に関する情報が無い場合を考え、2月20日以降は地域内で一様に開花しているものとしてシミュレーションを行った。第8図(a)にス

ギ花粉飛散量の経時変化の実測値と計算値を示す。山形市IIは山形市中心部にあり、周囲は都市化されている。山形市IIIは、周囲は畑や水田、住宅などが散在している。長井市は、山形県南部の南北に長い盆地内に位置する。どの地点でも、実測値には無いピークが、飛散開始期と飛散終了期に計算されている。

次に、開花日のマップデータを用いてシミュレーションを行った。対象地域は地形の変化に富んでいる



第9図 RAMS モデルを用いた空中花粉濃度の経時変化. 上山における実測時別濃度値と計算時別濃度値の比較. 原図は神田ほか (2002).

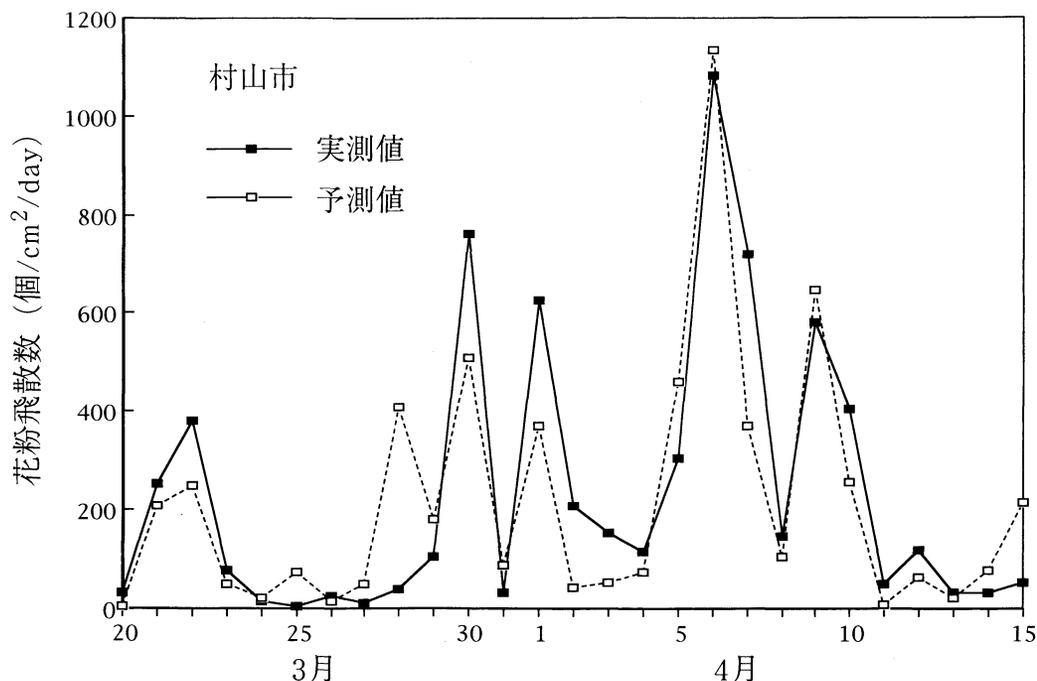
ため、開花日の地域差が大きく表れる。シミュレーションにおける開花期間は、平ほか (1991) の報告と筆者らの開花調査に基づいて10日間とした。計算結果を第8図 (b) に示す。いずれの地点でも、シミュレーションは、飛散開始期と終了期における花粉飛散量の増加と減少を再現しており、飛散期間全体として飛散量の変動パターンを再現している。開花日データを用いることによって、スギ花粉発生・拡散シミュレーションモデルは、1つのシーズン中におけるスギ花粉飛散量の変動を、より正しくシミュレートできるように改善された。しかしながら、山形市IIで3月末に現れた最大のピークがうまく計算されていない。この理由として、一度地上に落下した花粉の再飛散をモデルが考慮していないことなどが考えられる。

4.3 地域気象モデルを用いたスギ花粉拡散シミュレーション

花粉の広域的な拡散過程をより時間的・空間的に精度高くシミュレートする試みとして、地域気象モデルを利用した研究が行われた (神田ほか, 2002)。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3次元地域気象モデルに取り込むことにより、花粉飛散量の時間変化等がどの程度再現可能かを数値計算により検討した。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) にも応用されている。モデルの初期値及び境界条件として、総観場を表す気象格子点データを4次元的にモデルに同化していった。具体的には、欧州中期予報センター (ECMWF: European Centre for Medium-range Weather Forecasts) の客観解析データ (水平解像度: 0.5度; 鉛直21層) を初期場として与え、引き続き6時間毎にモデルに取り込んでいった。総観場の影響を局所場に反映させるために、多重ネ스팅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。

第9図に計算結果例として、上市市 (山形県) 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。1995年4月22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、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。細かく見ても、花粉濃度のピークの位相・個数濃度ともかなり良好に再現されている。ただし、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計測値が大きく異なることもあるので、計算値が実測値と多少食い違うことはやむを得ない。シミュレーションで再現できた高濃度現象は、上空高度1 km程



第10図 花粉拡散モデルとGPVデータから求めた予測飛散数と実測飛散数の経時変化。予測値は実測値とほぼ一致した変化を示し、本手法により、かなり高精度の予測が可能であることがわかる。

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たためであると考えられる。このように、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ことが明らかになった。

5. 応用研究課題

シミュレーションでは、花粉の面的分布や飛散経路を調べるだけでなく、花粉飛散量分布の予測や現実には行えない仮説的な実験なども行うことができる。

5.1 空中スギ花粉シミュレーション法を用いた花粉情報

空中花粉の飛散開始時期、シーズンの総飛散量および日々の花粉飛散状況を適時住民に知らせ、花粉症患者の発症を最小限に食い止める目的で、スギ花粉情報の作成手法と問題点について検討した(高橋ほか, 1996a)。この方法は1995年のシーズンに、実際の花粉情報として応用することができた。リアルタイムで得られた推定結果を評価するため、後日収集された実測値との関係を解析し、さらに、実際の情報提供に際して生じた種々の問題点についても考察した。スギ花粉情報として、コンピュータグラフィックスを用いて作成し

た、スギ森林の開花状況推定分布と空中スギ花粉飛散状況分布を、テレビ局を通じて提供した。シミュレーションに要する時間は、約1.5時間かかった。テレビ局では午後6時の放送に使用するには、午後3時まではデータが必要であったので、逆算すると計算結果の画像を得る作業は午後1時には開始しなければならなかった。そのため使用したデータはその日の午前中(12時)までのものに限られた。シミュレーション値を日別値にまとめ、日別実測値と比較した結果、実測で得られた多くのピークは計算値にも再現された。酒田市の最大ピークや県南部の米沢市、長井市での大きなピークは計算では小さく見積もられてしまったが、内陸部の村山市、寒河江市、山形市では実測値と計算値が比較的良く一致した。

5.2 花粉拡散モデルとGPVデータによる翌日のスギ花粉飛散量予測

気象庁は、気象予報業務で得られる数値予報データの格子点値(GPVデータ)を公開している。そこで、上記のシミュレーションモデルに、GPVデータを与えることにより、翌日のスギ花粉飛散量の分布や変化を予測する手法を開発するとともに、その精度について検討した(川島ほか, 1996)。GPVデータは、1995年

3月15日～4月15日の各日の夜21時を初期時刻として翌日の21時までの24時間分を数値予報した際の地上予報値を用いた。そこで、このGPVデータを用いた花粉拡散シミュレーションは、夜間のうちに翌日の花粉飛散状況を予測することになる。予測結果を検証するために、山形県内の数地点で得られた空中花粉捕集数調査結果を用いた。

山形市においては、予報対象期間の全体について、予測値は実測値とほぼ一致した変化を示し、かなりの程度の予測が可能であることが示された。村山市においては、山形市よりもさらに予測値と実測値は一致した(第10図)。シミュレーションは、約10 km×10 kmの範囲の平均的な花粉量を計算するアルゴリズムになっていることを考慮すると、村山市の捕集状況が捕集地点周辺の代表性の良いものになっていると考えられる。また、北西部の日本海に面した酒田での飛散量変化は特殊であるが、GPVによる予測はこれも再現した。ただし、対象地域南部の長井市では、全体に予測値が実測値よりも低くなる傾向が見られた。

5.3 地球温暖化がスギ花粉飛散に及ぼす影響

近年、大気中の二酸化炭素やメタンなどの増加による地球温暖化が懸念されている。スギの雄花芽は夏季の気温が高いほど多く作られ、翌シーズンはスギ花粉の大飛散年になることが知られている。そこで、高橋ほか(1996b)は、気温上昇がスギ花粉総飛散数に及ぼす影響を検討した。また、Inoue *et al.* (2002)は、降雪量の多少がスギ花粉の飛散開始日に与える影響を調べ、それに基づき、地球温暖化が進んでいった際に、スギ花粉の飛散開始日がどう影響を受けるかについて議論した。

5.4 シミュレーション手法を用いたスギ花粉発生源マップの作成

スギ花粉症の社会問題化に伴い、適切な森林管理が求められ、都市にアレルゲンを供給する主たる森林がどこであるかを明らかにする必要性が生じてきた。そこで、すでに開発されたスギ花粉の拡散シミュレーション手法を用いて、対象都市に飛来するスギ花粉の発生源地図の作成を試みた(川島・高橋, 1995)。その結果、都市に到達する花粉は、寄与率の小さなものまで含めると、かなり遠方の広域的な発生源に由来するものの、主たる発生源は、比較的近距离の山地斜面のスギ森林であることが推定された。

6. 今後の研究指針

さらに検討すべき課題などを考慮しながら、今後の研究指針について簡単にまとめた。

a) 発生源に関して

従来の方法では、雄花芽形成量の年次的な変動は考慮しているが、地域による形成量の多少は組み入れていない。しかしながら、現実には森林の樹齢構成などにより雄花芽形成量が異なることが明らかになっている(金指ほか, 1990)。今後、このような地域的特性を、より正確にモデルに取り込む必要がある。

b) 発生(放出)過程に関して

開花日や開花期間の場所による違いをより精度良くモデルに組み込む必要がある。この精度が低いと、花粉の飛散開始時期および終了時期において計算値と実測値が大きく異なることになる。また、より良いスギ花粉発生モデルを構築し、より正しくパラメータを評価するためには、一様なスギ森林地帯において、パーカード式などによる空中飛散花粉濃度と、気温、風速などの気象要素を同時に観測し、解析することを継続的に実施する必要がある。

c) 移流・拡散過程に関して

上空の花粉飛散量や鉛直方向の花粉濃度分布について、観測例は非常に少なく、ほとんど何も解っていない状況である。そこで、上空での花粉の飛散動態に関する基礎的情報を得たり、3次元モデルを用いる時のパラメータを得るために、3次元的に花粉濃度分布を観測する必要がある。さらに、3次元的な観測成果を活用して、スギ花粉拡散のシミュレーションモデルの改良を行う。その際、メソスケール気象場の数値計算モデルの利用方法やカスタマイズ方法が技術的なキーポイントとなる。

d) 沈着過程に関して

沈着過程に関する研究が不十分であるとの指摘もある。例えば、都市域で観測されるピークが、シミュレーションで再現されていない点については、花粉の再飛散を考慮するなど、モデルの改良が必要である。

e) 花粉予報システムに関して

本手法をリアルタイムで運用する際などのために、スギ花粉発生モデルのパラメータを事前に推定する必要がある。それには、雄花芽の形成量をできるだけ正確に予測しなければならない。また、スギ花粉の発生と拡散を計算するシミュレーションモデルの空間分解能を1 km程度にして、精度を向上させる必要がある。このためには、スギ森林分布データやスギ開花日マッ

ブを国土数値情報の3次メッシュ(約1 km²)単位で作成する必要がある。

今後は、モデルをさらに実際の現象に近づけ、計算精度を向上するため、上記の課題などをモデルに組み込む手法について検討するとともに、より多くの地域や年次のデータを解析して、モデルの構造やパラメータの改良を行い、本手法をさらに一般的なものとするための検討を積み重ねてゆく予定である。

7. おわりに

本解説は、関連する既往の研究等を含めて、スギ花粉の放出と拡散過程に関する現在までの研究成果を、学会誌や国際誌等において発行された論文を中心に整理し、気象学会会員の方々にその概要を紹介するためにまとめたものである。また、大気生物学というあまり耳慣れない研究分野について知っていただきたいとも考えた。花粉アレルギーの問題は、世界各地で起きている国際的な問題であり、現代病として今後さらに大きな社会問題に発展するものと思われる。症状を軽減するための方策が医学、気象学、生態学、育種学など、様々な分野において相互に関連して研究され、問題が少しでも解決する方向に向かうことを切に希望する。本稿では、誌面の制約などから、詳しい説明をできなかった箇所も多くあるが、それらについては参考文献をご参照いただきたい。また、空中花粉モニタリング手法の研究については本解説に含めなかった。

参 考 文 献

- 芦田恒雄, 井手 武, 田端司郎, 衛藤幸男, 吉川恒男, 松永 喬, 1989: 生物季節, 体感温度を指標としたスギ花粉飛散量の予測, 日本花粉学会会誌, **35**, 19-25.
- Hall, S. A., 1990: Pollen deposition and vegetation in the southern Rocky Mountains and southwest Plains, USA, *Grana*, **29**, 47-61.
- Inoue, S., S. Kawashima and Y. Takahashi, 2002: Estimating the beginning day of Japanese cedar pollen release under global climate change, *Global Change Biology*, **8**, in press.
- 金指達郎, 横山敏孝, 金川 侃, 1990: スギ人工林における雄花生産量, 日本花粉学会会誌, **36**, 49-58.
- 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.
- 神田 学, 張 翔雲, 鶴野伊津志, 川島茂人, 高橋裕一, 平野元久, 2002: 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, *天気*, **49**, 267-277.
- 環境庁, 1975: 植生区分図(1/20万), 自然環境保全調査報告書.
- 環境庁, 1980: 現存植生図 (1/5万), 第2回自然環境保全基礎調査(植生調査).
- 環境庁, 1986: 現存植生図 (1/5万), 第3回自然環境保全基礎調査(植生調査).
- 川島茂人, 1990a: アメダスデータの処理と気象要素の動的表示法, 農業環境技術研究所研究資料, 第8号, 37pp.
- 川島茂人, 1990b: アメダスデータにもとづく毎時気温補間手法の比較検討, 農林水産省別枠研究「情報処理」研究成果集, 第1分冊, 322-333.
- 川島茂人, 1991: スギ花粉の発生と拡散過程のモデル化—スギ花粉の拡散過程に関する研究(I)—, 日本花粉学会会誌, **37**, 11-21.
- 川島茂人, 高橋裕一, 1991: 開花日を考慮したスギ花粉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)—, 日本花粉学会会誌, **37**, 137-144.
- Kawashima, S. and Y. Takahashi, 1991: Modeling of outbreak and dispersion processes of airborne pollen of *Cryptomeria japonica*, Abstracts of XIV International congress of Allergology and Clinical Immunology, 237.
- 川島茂人, 高橋裕一, 1993: 広域的なスギ開花日分布の推定手法—スギ花粉の拡散過程に関する研究(IV)—, 日本花粉学会会誌, **39**, 121-128.
- Kawashima, S. and Y. Takahashi, 1995: Modelling and simulation of mesoscale dispersion processes for airborne cedar pollen, *Grana*, **34**, 142-150.
- Kawashima, S. and Y. Takahashi, 1999: An improved simulation of mesoscale dispersion of airborne cedar pollen using a flowering-time map, *Grana*, **38**, 316-324.
- 川島茂人, 高橋裕一, 1995: シミュレーション手法を用いたスギ花粉発生源マップの作成, *アレルギー*, **44**, 1006.
- 川島茂人, 高橋裕一, 大島照和, 1996: 花粉拡散モデルとGPVデータによるスギ花粉飛散量予測—スギ花粉の拡散過程に関する研究一, 日本気象学会1996年春季大会講演予稿集, 184.
- 川島茂人, 高橋裕一, 佐橋紀男, 1998: 気温変化パターンに基づくスギ花粉飛散開始日の簡易予測, *アレルギー*, **47**, 649-657.
- 高坂知節, 1987: スギ花粉症と気象条件—飛散の予報への可能性を探る—, 日本医事新報, No. 3275, 121.
- Mandrioli, P., M. G. Negrini, C. Scarani, F. Tampieri and F. Trombetti, 1980: Mesoscale transport of *Corylus* pollen grains in winter atmosphere, *Grana*, **19**, 227-233.

- Markgraf, V., 1980 : Pollen dispersal in a mountain area, *Grana*, **19**, 127-146.
- 根本 修, 1988 : 杉花粉と気象, *天気*, **35**, 39-46.
- 小笠原寛, 栗花落昌和, 瀬尾 達, 坂上雅史, 吉村史郎, 1995 : 六甲山系におけるスギの標高別開花時期と中国・丹波山地の開花時期, *日本花粉学会会誌*, **41**, 129-137.
- 小笠原寛, 吉村史郎, 中原 聡, 藤谷哲造, 岡田 等, 1991 : 兵庫県におけるスギ・ヒノキ科花粉飛散状況, *日本花粉学会会誌*, **37**, 145-150.
- 小笠原寛, 吉村史郎, 後藤 操, 栗花落昌和, 藤谷哲造, 中原 聡, 1998 : スギ壮齡林面積増加による花粉飛散総数の増加, *日本花粉学会会誌*, **44**, 97-105.
- 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.
- Price, M. D. R. and P. D. Moore, 1984 : Pollen dispersion in the hills of Wales : A pollen shed hypothesis, *Pollen et Spores*, **26**, 127-136.
- Raynor, G. S., E. C. Ogden and J. V. Hayes, 1972 : Dispersion and deposition of timothy pollen from experimental sources, *Agricultural Meteorology*, **9**, 347-366.
- Raynor, G. S., E. C. Ogden and J. V. Hayes, 1973 : Dispersion of pollens from low-level, crosswind line sources, *Agricultural Meteorology*, **11**, 177-195.
- 佐橋紀男, 幾瀬マサ, 斉藤洋三他, 1983 : 本州中部における1983年のスギ花粉捕集調査成績, *日本花粉学会会誌*, **29**, 19-28.
- Sahashi, N., K. Murayama and T. Shiina, 1995 : Review of the pollen front of *Cryptomeria japonica* over Japan, *Jpn. J. Palynol.*, **41**, 119-127.
- 斉藤洋三, 宇佐神 篤, 1980 : スギ花粉症と気象, *気象*, **24**, 6-9.
- Scott, L. and E. M. van Zinderen Bakker Sr., 1985 : Exotic pollen and long-distance wind dispersal at a sub-Antarctic Island, *Grana*, **24**, 45-54.
- 菅谷愛子, 津田 整, 大口広美, 小野幸夫, 下林裕子, 杉本日出雄, 松本清志, 渡辺高志, 1995 : 埼玉県における1994年のスギ・ヒノキ科花粉飛散状況, *日本花粉学会会誌*, **41**, 31-41.
- 平 英彰, 寺西秀豊, 剣田幸子, 槻陽一郎, 清水規矩雄, 河合康守, 1991 : スギ林の雄花着花状況と空中花粉飛散パターンとの関連性について—1990年における富山県の例—, *アレルギー*, **40**, 1200-1209.
- 平 英彰, 寺西秀豊, 剣田幸子, 1992 : スギの花粉飛散開始日の予測について, *アレルギー*, **41**, 86-92.
- Takahashi, Y. and S. Kawashima, 1993 : Locality of flowering time of *Cryptomeria japonica* and the method to estimate the time, Abstracts of XV International Botanical Congress, 246.
- 高橋裕一, 川島茂人, 1999a : 人工衛星画像を利用したスギ林分布図の作成, *日本花粉学会会誌*, **45**, 49-54.
- 高橋裕一, 川島茂人, 1999b : 夏期気温の年次差を利用したスギ花粉総飛散数の新予測方法, *アレルギー*, **48**, 1217-1221.
- 高橋裕一, 川島茂人, 相川勝吾, 1996a : 空中スギ花粉シミュレーション法を用いた花粉情報, *アレルギー*, **45**, 371-377.
- 高橋裕一, 川島茂人, 相川勝吾, 1996b : 空中スギ花粉濃度に及ぼす地球温暖化の影響—山形市とその周辺地域で得られた予測結果—, *アレルギー*, **45**, 1270-1276.
- 高橋裕一, 川島茂人, 大江栄悦, 片桐 進, 1991 : スギ花粉の発生と拡散過程のモデル化—メッシュ化手法を用いたスギ開花日の予測 (II)—, *日本花粉学会会誌*, **37**, 35-40.
- 高橋裕一, 小野正助, 小野 静, 石森久子, 青木四郎次, 川島茂人, 木村和則, 相川勝吾, 1993 : スギ開花の時期と標高, メッシュ気温との関係, *日本花粉学会会誌*, **39**, 113-120.
- 高橋裕一, 東海林喜助, 片桐 進, 引地郁夫, 1989a : 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.
- Takahashi, Y., K. Tokumaru and S. Kawashima, 1992 : Distribution Chart of *Cryptomeria japonica* Forest through Data Analysis of Landsat-TM, *Jpn. J. Palynol.*, **38**, 140-147.
- 高橋裕一, 山口勝也, 安部悦子, 東海林喜助, 片桐 進, 1989b : 雄花形成量を用いた来シーズンのスギ花粉飛散総数の予測方式の試み, *免疫アレルギー*, **7**, 98-99.
- Uno, I., H. Amano, S. Emori, K. Kinoshita, I. Matsui and N. Sugimoto, 2001 : Trans-Pacific yellow sand transport observed in April 1998 : A numerical simulation, *J. Geophys. Res.*, **106**, D16, 18331-18344.
- 王 主栄, 古内一郎他, 1984 : 気象と花粉症, *アレルギーの臨床*, **39**, 33-36.

Studies on Emission and Dispersion Processes for Airborne Cedar Pollen

Shigeto KAWASHIMA* and Yuichi TAKAHASHI**

* (Corresponding author) National Institute for Agro-Environmental Sciences,
3-1-3, Kannondai, Tukuba-shi, 305-8604, Japan.

** The Yamagata Prefectural Institute of Public Health.

(Received 5 February 1999 ; Accepted 24 September 2002)

平成15年度 RITE 国際研究交流事業海外研究者招聘事業・
国内研究者海外派遣事業募集案内

目 的：財団法人地球環境産業技術研究機構 (RITE) は、国際的な研究交流・共同研究を積極的に進めるため、国内外の大学・研究機関で研究を行い、積極的に地球環境問題の解決のために活用していただける研究者を募集いたします。

概 要

1. 採用予定人数：本募集は国の平成15年度関係予算の成立を前提としており、招聘者の採択は予算確定後に決定されます。
(参考 平成14年度の研究者採択件数の実績：招聘 5 件、派遣 3 件)
2. 招聘・派遣期間：平成15年 6 月15日～平成16年 2 月15日の間で 2 か月以上、最長 8 か月
3. 応募要件：国内の大学、企業及び研究機関であること
4. 給付内容：渡航費、支度料、滞在費、赴任旅費、研究旅費、保険料
5. 応募方法：応募要領に基づき、所定の申請様式により、RITE あてに申請。(応募要領、申請様式は HP からダウンロードできます)

募集期間：平成14年12月初旬～平成15年 1 月中旬**募集テーマ**

A) 地球温暖化の主な原因とされる二酸化炭素、メタ

- ン等の温室効果ガスを対象とした次の分野の研究
- ① 効率的な分離・回収・処分技術、有効利用するための再資源化に関する研究
 - ② 発生を抑制するための革新的なプロセス技術に関する研究
 - ③ CO₂吸収源の拡大(固定化、貯蔵)に関する研究
- B) 地球環境の保全に資する産業技術の研究
- ① 上記A) の対象物質を除き、環境中に広く放出され、地球環境に大きな負荷を与える物質の発生を抑制する技術、または無害化等の処理技術に関する研究
 - ② 環境に大きな負荷を与える物質に代替する物質の開発に関する研究
 - ③ 素材等のリサイクル、有効利用等に関する研究
- 問い合わせ先：

財団法人 地球環境産業技術研究機構 (RITE)
〒619-0292 京都府相楽郡木津町木津川台9-2
企画調査グループ企画チーム 寺島・西村
Tel : 0774-75-2301, Fax : 0774-75-2314
E-mail : plnng@rite.or.jp

* 詳細は RITE 事務局にお問い合わせ頂くか、HP (URL : <http://www.rite.or.jp/>) をご覧下さい。