

C-1 東アジアにおける酸性・酸化性物質の動態解明に関する研究

(2) 東アジアにおける大気動態解明のための航空機等を用いた観測に関する研究

② 東アジア地域における酸性雨に関連する汚染質の輸送に関する研究

	研究代表者	気象研究所	佐藤純次
気象庁 気象研究所			
応用気象研究部		里村雄彦・佐々木秀孝・岡田菊夫・高橋俊二・栗田 進 木田秀次	
気象衛星・観測システム研究部		内野 修・永井智広・藤本敏文	
運輸省 船舶技術研究所			
装備部		長田 修・山岸 進・山之内 博・土屋正之	

平成2-4年度合計予算額 81,580千円

〔要旨〕東アジア地域における硫黄酸化物の輸送過程を解明し、酸性沈着を評価するために、汚染質の乾性及び湿性沈着、変質を含む長距離輸送モデルを開発した。モデルは移流・拡散モデルとそのための気象変数を予測する気象予測モデルから構成されている。酸性沈着の問題は降水が重要な役割を占めるために、気象予測モデルの降水に関する再現性をアメダスデータを用いて検証した。東アジア地域におけるシミュレーションを実施する前に、長距離輸送モデルの検証とパラメータのチューニングを行うために排出源データ及び実測による湿性沈着量データが整備されている北アメリカにおけるシミュレーションを行った。また、サブグリッドスケールの地形による汚染質の鉛直輸送を把握し、モデルに反映するために可搬型及び航空機搭載型ライダーによるエアロゾルの鉛直輸送観測、海洋混合層の観測等を行った。

本研究で開発した長距離輸送モデルによって1985年の東アジアにおける硫黄酸化物の1年間の長距離輸送過程のシミュレーションを実施した。計算はわが国の排出源を除いて行い、近隣諸国の排出源がわが国に及ぼす酸性沈着量の寄与率を見積もった。シミュレーションの結果では国外の排出源によってわが国に沈着する硫黄酸化物の年間湿性沈着量は0.1～0.3 g/m²程度であった。

〔キーワード〕酸性雨、長距離輸送、数値モデル、湿性沈着

1. 序

東アジア地域の諸国では近年の急速な工業化の進展により著しいエネルギーが消費されており、その結果、生態系にとって有害であるばかりでなく、地球規模の環境に影響を及ぼす可能性のある大気汚染物質が大量に大気中に排出されている。特に酸性雨の主たる原因物質である硫黄酸化物については、1975年では年間排出量が中国、日本、韓国、北朝鮮、台湾だけでも約1千5百万トンであったものが、10年後の1985年には40%増の2千百万トンにもなっている。このうち約80%が中国によって占められており、この割合は年々増加していくものと思われる。

このうち約80%が中国によって占められており、この割合は年々増加していくものと思われる。参考までにわが国について述べると、1975年、大気汚染防止法の一部改正による硫黄酸化物の総量規制法が施行されて以来、排出量は僅かながら減少の傾向をたどっている。上記の事情から、東アジア地域においても近い将来、北アメリカやヨーロッパのような酸性雨等の酸性降下物による被害が現れることが懸念されている。

2. 研究目的

この研究の主たる目的は、東アジアにおける酸性雨の主要な原因物質である硫黄酸化物の長距離輸送過程の解明及び乾性／湿性沈着量を評価するためのモデルの開発、及びこのモデルによって酸性沈着による影響の程度を推測することである。

3. 研究方法

大気汚染質の輸送モデルはラグランジュとオイラー型に分類され、前者は流跡線モデルやパフモデル及び粒子モデルなどである。一方、後者は拡散方程式の解を格子点毎に数値的に得る格子モデルである。またそれぞれが時間毎や日々の濃度変化を評価するような短期モデルと季節や年平均濃度を評価する長期モデルに分類することができる。酸性沈着による影響は酸性物質の沈着が継続的に累積することによって発生するために、酸性雨原因物質の輸送モデルでは殆ど長期モデルが用いられている。本研究では短期モデルを長期積分することにより長期モデルとしての性格を持たせるようにした。

酸性雨を対象とした輸送モデルでは、汚染質の輸送過程において光化学反応による2次汚染質の生成、乾性沈着、湿性沈着等が関与している。特に降水域や降水量のデータが必要不可欠であり、また東アジア地域の多くの領域は海洋によって占められているために、緻密な気象観測データに乏しく、観測データを直接モデルに用いることはできない。そこでこの研究では輸送モデルのための気象変数は数値モデルによって予測することにした。すなわち、長距離輸送モデルは図1に示されているように気象予測モデルと移流・拡散モデルによって構成されている。

(1) 気象予測モデル

① 気象予測モデルの概略

気象予測モデルとしては気象庁の旧アジア領域数値予報モデルであるFLMを用い、これを拡散計算に適合するように改良した。主な改良点は鉛直方向の気層は従来の12層を16層に増設する

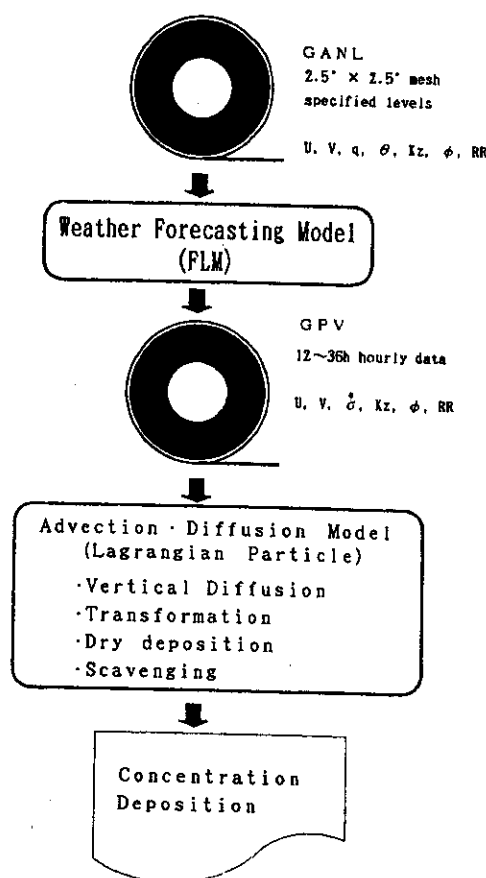


図1 輸送モデルの構成と計算フロー

と共に、拡散計算に都合が良いように下層を密にした。また境界層の物理過程は接地境界層のバルク法を相似則に、エクマン境界層のK理論をクロージャーモデルのレベル-2 (Mellor and Yamada, 1974) に置き換えた。初期値と境界値には12時間毎に作成されている全球客観解析値 (GANL) を用いた。なお、FLMについては巽 (1983) によって述べられているのでここでは省略する。風や気圧等の気象変数の予測精度は予測時間が短いほど高いので、12時間毎に新しい初期値で計算すれば良いのであるが、気象予測モデルにはスピニアップの特性があるため、計算を開始して数時間迄の予測結果は使えない。そこで12Zを初期値として36時間先迄の1時間毎の予測値を計算し、最初の12時間は利用しない。境界値は12時間毎に更新する。さらに翌日の12ZのGANLを初期値としてまた36時間の積分を行う。これを繰り返すことによって長期間の気象予測データを蓄積した。

②降水の検証

酸性雨に関連する汚染質の湿性沈着量をモデルによって評価するためには、気象予測モデルによる降水域、降水量の再現性が重要な役割を占める。そこでモデルによる降水量、降水域の再現性を統計的に調べた。また、モデルによる降水の有無を判別するための最小降水量いわゆる「しきい値」を設定することが重要であり、これらを調べるために日本域において、モデルによる予測結果をアメダス資料を用いて検証した。

積算降水量の広域空間平均によるモデル降水量の検証は1985年のアメダス降水データをモデルの格子に合わせ、モデルと実測のそれぞれについて3時間降水量の基本ファイルを作成した。これより6時間及び12時間降水量データを作成し、空間平均領域は大関 (1985) や萬能寺 (1988) と同じように日本域を北海道、東北、関東・中部、近畿・中国・四国、九州、沖縄の6領域に分割し、それぞれの領域における空間平均降水量の時系列に対して検証を行った。この領域はおおよそ500kmのスケールで検証を行っていることになる。結果は北海道と沖縄を除いては雨の降り始め、降り終わりともかなり良く再現されているが、降水量は計算値の方がやや多かった。一方、降水のしきい値の設定には極値を持つ以下の3つのスコア計算を用いた。全観測に対して予測と観測が一致した割合、すなわち予測の的中率を表す「Accuracy」、降水が予測も観測もされなかった場合を除いた的中率を表すスコアである「Threat」、予測の平均的雨域の広さが適切であるかどうかの目安になる「Bias」である。これらの各スコアについて0~2mm/hの範囲に対して計算した。表1は1985年の四季を代表する月として1、4、7、11月についてのAccuracy、Threatスコアを最大にまたBiasスコアが最も1に近い降水量を示したものである。

表1 各スコアを最大にする降水量

Score	Jan.	Apr.	July	Nov.
Accuracy	1.00	0.40	0.30	0.30
Threat	0.04	0.10	0.03	0.03
Bias	0.10	0.10	0.03	0.05

観測のしきい値を1mm/hとした場合では、降水はされているが予測では現れず、見逃すことがある。

0.3mm/hではまとまった降水がある時は比較的予測されている。0.03mm/hでは予測される場合が多くなるが、同時に観測されていない場合でも予測に現れることがある。スコア計算結果を総合的に判断して、降水のしきい値の年間値として0.1mm/hを設定した。

(2) 移流・拡散モデル

① ランダムウォークモデル

気象予測モデルによって予測された気象変数に従って大気汚染質は移流・拡散する。移流・拡散にはセミ・ラグランジュ法による粒子モデルを用いた。この方法は各粒子毎に属性を持たせることができるので、汚染質の変質や沈着を取り扱うのに便利である。発生源から汚染質の発生強度に応じた数の粒子を大気中に放出し、水平には風の成分 u 、 v によって移流するだけであり、鉛直には風の鉛直成分 σ と鉛直拡散によって移動する。鉛直拡散と風の鉛直シャーにより生じる間接的な拡散に比べて水平拡散の粒子の輸送に対する寄与は小さいので無視し、拡散は鉛直方向だけを考慮した。

一度に多数の粒子を考え、個々の粒子の鉛直方向の運動には鉛直流による粒子の動きに加えて拡散係数に対応したランダムな動きを与え、粒子の座標上の位置を求める。鉛直拡散係数を K_z とすると、時刻 t において高度 z にあった粒子の Δt 時間後の高度は

$$z(t + \Delta t) = z(t) + \sigma \Delta t \pm \sqrt{2\Delta t K_z}, \quad (1)$$

で計算され、複号はどの時間ステップにおいても全ての粒子についてランダムに正負の何れかを取る (Diehl et al., 1982)。混合層内では鉛直拡散係数が高度変化するため、濃度の傾度がなくても鉛直フラックスを生じる等の誤差が発生する。この誤差を避けるため、(1)式に補正項を附加するかまたは時間積分を以下のように2段階で計算して平滑化を行う。先ず、 $t + \Delta t$ における粒子の位置 z^* を次の式によって計算しておく。

$$z^* = z(t) + \sigma \Delta t \pm \sqrt{2\Delta t K_z(z^*)}. \quad (2)$$

次に z^* を用いて $t + \Delta t$ における粒子の位置を以下によって計算する。

$$z(t + \Delta t) = z(t) + \sigma \Delta t \pm \sqrt{2\Delta t K_z(z^*)}. \quad (3)$$

このスキームを用いて Δt を十分に小さく取ることによって誤差を少なく抑えることができる。

粒子の鉛直拡散係数は運動量、熱及び水蒸気についての拡散係数と等しいと仮定すれば、粒子の鉛直拡散係数は気象予測モデルにおいて以下のように与えられているので、これを用いた。

$$K_z = l^2 \Psi.$$

l は混合距離であり、 Ψ は風の鉛直シャーと安定度の関数として以下のように与えられる。

$$\Psi = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2 - \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}}. \quad (4)$$

ここに、 $V^2 = u^2 + v^2$ 、 g は重力による加速度、 θ は温位である。

②汚染質の変質過程

硫黄酸化物の人為的発生の多くは SO_2 であり、 SO_2 の大気中における酸化反応は酸化性ラジカルによる気相反応と雲中において H_2O_2 が介在する液相反応が主たるものであるが、気相反応による汚染質の変質だけを考慮し、輸送モデルに取り入れた。 NO_x が存在する汚染大気中では OH ラジカルによる硫酸の生成が支配的であり(畠山、1988)、 OH ラジカルは光化学反応による亜硝酸やアルデヒド等の分解によって生成される。輸送モデルでは大気中における気相反応によって SO_2 から生成された粒子はサルフェート(硫酸イオン)であると仮定し、 $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$ の変質を反応速度に相当する変換率を時間の関数として $0.01/\text{h}$ を用いた。すなわち1時間に1%の割合で SO_2 が SO_4^{2-} に変質するが、全ての SO_2 がサルフェートに変質することは非現実的であるので、変質の上限を設定した。人為的発生源の影響が少ない大気バックグランド濃度の $\text{SO}_2/\text{SO}_4^{2-}$ の比率が0.1であること(Cuong et al., 1974)から90%を変質の上限とした。

③乾性沈着過程

SO_2 から生成されるサルフェートは粒径がサブミクロンの微粒子であるため、重力落下は無視できるが、地表面における汚染質の沈着過程を考慮する必要がある。乾性沈着は地表面に非常に近い気層における気体または微粒子状汚染質濃度の下向きのフラックスを F_d とすると、次のように定義される速度の次元を持った沈着速度 V_d で評価される。

$$F_d = V_d \frac{\partial C}{\partial z} \quad (5)$$

ここで、 C は汚染質の濃度である。長距離輸送モデルでは地表面付近における汚染質濃度の鉛直勾配は発生源から離れるに従って小さくなる。厳密には、沈着速度は汚染質の種類によって異なるばかりでなく、地表面状態に依存するパラメーターが含まれており、そのために長距離輸送モデルでは土地利用形態に応じて格子毎に重みを考慮して与える。ここでは広い計算領域と格子間隔のため、詳細な土地利用形態は考慮せずに、各格子毎の地表面状態が水面と陸面の2通りを判別し、それぞれの格子毎及び汚染質毎に異なった沈着速度を与えた。

④湿性沈着過程

汚染質の湿性沈着過程には大気中の汚染質が降水によって捕捉され、雨滴と共に地表面に沈着するウォッシュアウトと汚染質が雲粒と係わり合うレインアウトの2つの過程がある。後者の過程は雲の生成機構や汚染質の液相反応等が関与した複雑な過程であり、ここでは降水による汚染質の捕捉だけをモデルに取り入れた。気象予測モデルによって予測された降水のしきい値以上の降水量がある領域において、汚染質が一律に洗浄されるものとした。各汚染質の沈着速度、洗浄係数は表2に示した値を用いた。

3. 長距離輸送モデルの検証

東アジア地域では酸性雨の原因汚染質である SO_2 や SO_4^{2-} の発生源及び沈着量に関する測定データが非常に乏しいので、東アジア地域のシミュレーションに先駆け、長距離輸送モデルを検証するための試算を行った。試算は雨量や沈着量など多くの測定点で実測され、さらに発生源データも比較的揃っている北米を対象にして行った。アメリカでは EPA と NOAA が中心とな

って「連邦酸性雨アセスメント計画 (NAPAP)」が 1983 年より進められており、沈着量等のモニタリングデータが整備されている。まず、北米の地形を読み込んだ気象予測モデルによって 1984 年 12 月 4 日から 1985 年 3 月 3 日までの冬季 3 カ月について 1 時間毎の気象変数を予測し、拡散計算のために蓄えた。発生源データについては、「The 1985 NAPAP Emission Inventory (Version 2)」、沈着量については、「NADP/NTN Annual Data Summary (Precipitation Chemistry in the United States 1985)」を用い、これらのデータは全て米国環境保護庁 (EPA) からの提供を受けた。アメリカにおける硫黄酸化物の大発生源は東部地域に集中しており、上記の発生源データから発生源の位置を格子点に落とす際には Venkatram 等、(1989) による発生源分布図を参照した。沈着過程の計算結果からみると湿性沈着量の分布はかなり良く一致し、モデルは降水による沈着量の分布についてはある程度まで表現できるようになった。計算による沈着量は格子の $1/4$ の面積で評価した。

さらに検証を深めるために、各測定点におけるサルフェートの沈着量の実測値と計算値を比較

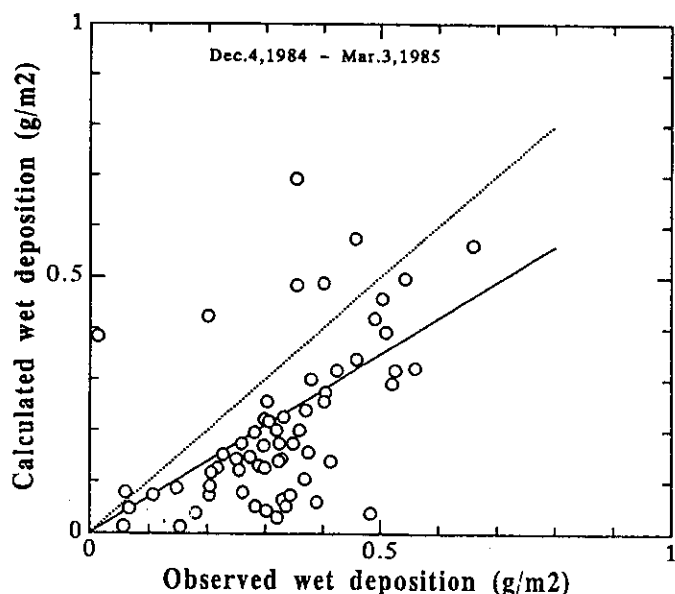


図2 各測定点における SO_4^{2-} の降水による沈着量の実測値と計算値との比較。

表2 乾性沈着速度と降水による湿性沈着率

	Species	Land	Water
Dry deposition velocity (cm/s)	SO_2	0.51	0.32
	SO_4^{2-}	0.21	0.02
Scavenging coefficient (l/s)	SO_2	3×10^{-5}	
	SO_4^{2-}	1×10^{-4}	

した (図2)。図からも明らかなように、計算値は幾分過小評価をしており、計算値は平均的に実測値の約 70 % 程度に留まっている。この試算段階では $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$ の変質過程は含まれていない。また、降水量のしきい値を大きめの 0.5 mm/h に設定したために降水による沈着量の計算値が過小に評価されたものと考えられる。この結果に基づいて降水量のしきい値と降水洗浄係数の見直しを行い、その結果を降水量のしきい値と降水洗浄係数の設定に反映させた。

4. 東アジア地域における硫黄酸化物輸送過程のシミュレーション

(1) 東アジアにおける硫黄酸化物の発生源

硫黄酸化物の東アジア地域における発生源の位置として、主要な工業地域とその地域の中心的な工業都市を抽出し、その位置の緯度及び経度を地図上で読みとり、モデル格子点に配置した。発生量については科学技術庁科学技術政策研究所第4調査研究グループによる「アジア地域のエネルギー消費構造と地球環境影響物質(SO_x 、 NO_x 、 CO_2)排出量の動態分析(平成3年11月)」を基にして、1985年の各地域における硫黄酸化物の発生量を人口や産業動態を加味し、それぞれの工業地域や都市へ加重配分した。さらにロシア極東地域の発生源を調査してこれに追加した。

(2) シミュレーション結果

先ず、近隣諸国における発生源からの影響を見積もるため、わが国における発生源を除いて計算を行った。図3はわが国の主要な10地域における硫黄酸化物の年間総沈着量、乾性及び湿性沈着量を示したものである。総沈着量は北九州が最も多く、徳山、倉敷と次第に少なくなる。特に乾性沈着量はわが国の西から東に向かって次第に減少していることが分かる。各月毎の沈着量から季節的な特徴を見ると九州や中国地域では乾性及び湿性沈着量双方とも夏季に少なくなっている。一方、湿性沈着量はどの地域においても8月が少ない。乾性沈着量は新潟と苫小牧を除いて僅かではあるが冬季に多い傾向を示している。図4は1985年4月～1986年3月までの1年間にわが国の主要な都市において測定された降水量とExcess SO_4^{2-} (海塩粒子を除いた硫酸態)の年間湿性沈着量を示したものである。

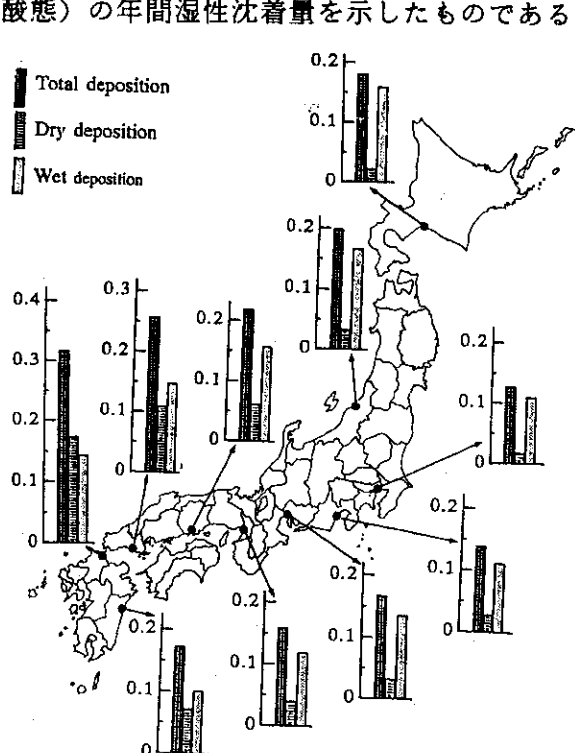


図3 近隣諸国の発生源だけに由来するわが国主要地域における硫黄酸化物の年間沈着(モデル計算)。

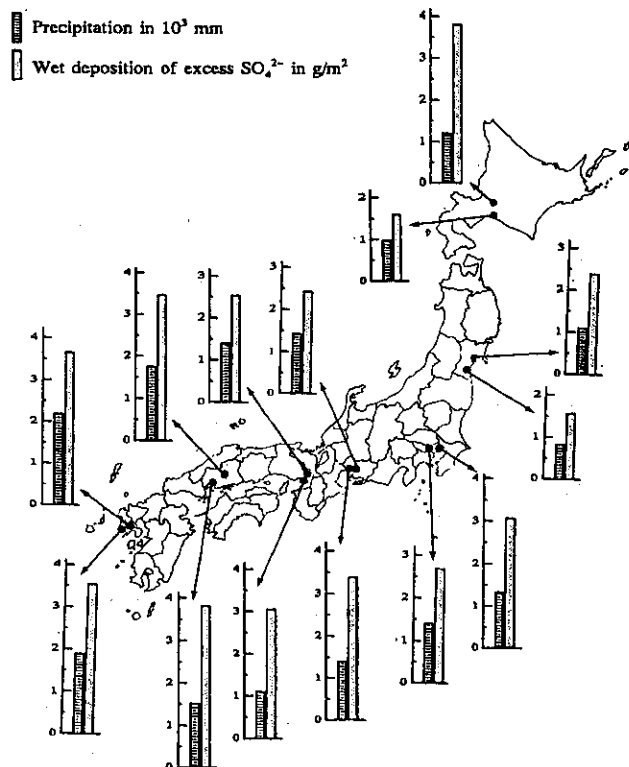


図4 わが国の主要都市で測定されたExcess SO_4^{2-} (環境庁調査による)。

モデル計算と評価期間に3カ月のずれはあるが、わが国における酸性沈着に対する近隣諸国の寄与率は数%程度であることをモデル計モデル計算は示している。

本研究で開発した長距離輸送モデルは汚染質の発生源指定型のソースオリエンテッド・モデルであるが、個々の粒子に属性を与えてあるので、沈着量を評価するリセプターにおける沈着量に寄与している発生源を辿って行くことができる。すなわち、個々の粒子がどこから来たものであるかを特定することができる。この性質を用いて北九州地域の沈着量に寄与している発生源を調べた。図5は発生源の寄与率を示したものであり、縦軸は相対沈着量、横軸は発生源番号である。湿性沈着量に関しては図5(a)及び(b)からも分かるように冬季では韓国、中国河湖北省、夏季では韓国台湾、中国湖南省、上海等の寄与)では、韓国からの寄与が大きく、夏季の7月は上が比較的大きい。これに対して乾性沈着量に関しては図に示していないが、冬季(1月)では韓国からの寄与が大きく、夏季の7月は上海、台湾、韓国の寄与が大い。

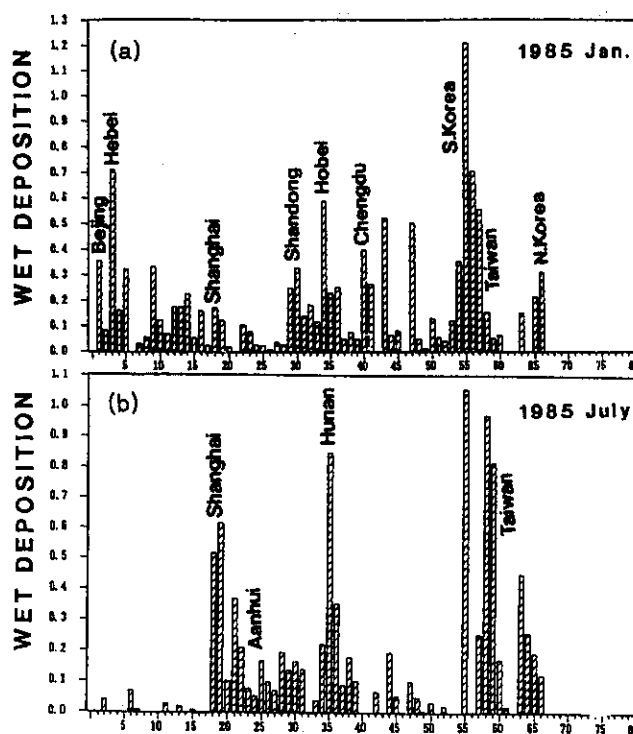


図5 北九州地域の1月(a)と7月(b)の湿性沈着量に対するそれぞれの発生源の寄与率

5. ライダー等による野外観測

長距離輸送モデルの格子間隔は127kmであるので、低気圧や前線等は表現されるが、格子間隔より小さい現象である積雲対流や山岳地形による上昇流による鉛直輸送はモデルでは表現することができない。そこで、サブグリッドスケールの現象を把握し、モデルに反映するために赤城山においてドップラーソーダー、レーウィンゾンデ、測風気球等による気流の観測と同時に、航空機ライダー、可搬型ライダーを用いてエアロゾルや雲を観測することにより、山岳を越える気流をトレースした。

一方、汚染質の輸送過程に重要な役割を占める海上における混合層の観測を実施することによって、長距離輸送モデルの海上輸送における参照データの取得を図った。運輸省航海訓練所練習船青雲丸(5千トン)に可搬型ライダーを搭載し、1993年8月、長崎県平戸においてエアロゾルの鉛直方向固定及び鉛直断面観測の他に気象、海象観測も行った。海面近くの大気は安定であり、係留ゾンデ観測によれば高度150mで気温の急激な下降があり、相対湿度もこの高度を境に上層で急に上昇していたことから、海面付近では南西風であるが、上層では平戸島を越えて西風が吹いていたと考えられる。ライダーの後方散乱強度には乱れのパターンが見られた。比較的大きなスケールの乱れを解析するために周波数分析を行った結果、ほぼ定常的な乱れであり、空間スケールは数十mから数百mであることが分かった。1991年8月に新島で実施した観測

についても同様な解析を行った。一様な乱れの分布を示す高度は約170 mに達しており、その上層ではエアロゾル濃度が急に低下していることから、海上混合層であると考えられる。ここの乱れのスケールは200～300 mであった。

6. まとめ

東アジア地域における酸性雨に関わる汚染質の長距離輸送、沈着過程を表現するモデルを開発し、同地域における硫黄酸化物の輸送シミュレーションを1985年について実施した。計算はわが国の発生源を除いて行い、近隣諸国の発生源がわが国に及ぼす影響の程度を見積もった。計算結果によれば、外国の発生源によってわが国に沈着する硫黄酸化物の年間沈着量は0.1～0.3 g/m²程度であり、実測によるわが国の沈着量より1桁小さかった。本モデルの湿性沈着過程には雲が関与した汚染質の沈着過程が含まれていないが、最近の研究では湿性沈着における雲の役割が重要視されると共に、in cloud scavenging の寄与率が高いことも指摘されている。したがって、今後の問題としてモデルの精度向上を図るには、in cloud scavenging の過程をモデルに取り入れる必要があり、そのために格子間隔をさらに狭くしたモデルの開発が行われている。

参考文献

- Chuong, N. B., B. Bonsang and G. Lambert, 1974: The atmospheric concentration of sulfur dioxide and sulfate aerosols over antarctic, subantarctic areas and oceans. *Tellus*, 26, 241-249.
- Diehl, S. R., D. T. Smith and M. Sydor, 1982: Random-Walk simulation of gradient-transfer process applied to dispersion of stack emission from coal-fired power plants. *J. Appl. Met.*, 21, 69-83.
- Eliassen, A., Ø. Hov, I. S. A. Isaksen, J. Saltbones and F. Stordal, 1982: A Lagrangian long range transport model with atmospheric boundary layer chemistry. *J. Appl. Met.*, 21, 1645-1661.
- 畠山 史郎, 1986: 硫黄酸化物の放出と大気中での酸化反応。国立公害研究所研究報告, 第02号, 215-231.
- J. Appl. Met.*, 21, 859-873.
- 萬能寺 信崇, 1988: J S Mの統計的検証。昭和63年数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 67-76.
- Mellor, G. and T. Yamada, 1974: A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1791-1806.
- 大関 誠, 1985: V F Mの降水量予報の統計的な検証。昭和63年数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 90-94.
- 巽 保夫, 1983: 10層アジア地区ファインメッシュモデル(10L FLM)。気象庁電子計算室報告・別刷29号, 45-93.
- Venkatram, A. B. E. Ley and S. Y. Wong, 1982: A statistical model to estimate long-term concentration of pollutants associated with long-range transport. *Atmos. Environ.*, 16, 249-257.

研究発表の状況

佐藤純次、里村雄彦、佐々木秀孝、村治能孝、1991：乾燥沈着及び降水洗浄を考慮した長距離輸送モデル。日本気象学会春季大会予稿集。

高橋俊二、1991：反応を含む移流・拡散モデルの開発。日本気象学会秋季大会予稿集。

内野修、水野芳成、藤本敏文、1991：航空機搭載型ライダー。第14回レーザーセンシングシンポジウム。

内野修、永井智広、水野芳成、藤本敏文、1991：航空機搭載ライダーによる対流圏下部のエアロゾル観測。地球大気環境高精度観測システム研究会。

O. Uchino, Y. Mizuno, T. Takashima, T. Fujimoto, T. Nagai and Y. Nikaidou, 1991: Ground-based and airborne lidar measurement of atmospheric aerosols. OSA Technical Series, 18, 215-217.

J. Sato, T. Satomura and H. Sasaki, 1991: Long-range transport model incorporating dry and wet deposition components. Japan-Canada Workshop on Atmospheric Dispersion. Abstracts, p28.

佐藤純次、里村雄彦、佐々木秀孝、村治能孝、1992：乾燥沈着、降水洗浄及び変質を考慮した長距離輸送モデル。日本気象学会春季大会予稿集。

佐藤純次、里村雄彦、佐々木秀孝、村治能孝、1993：東アジア地域における大気汚染質の長距離輸送シミュレーション。日本気象学会春季大会予稿集。