

大阪市

正員 ○松井光弘

山梨大学工学部

正員 大石哲

京都大学防災研究所

正員 池淵周一

1. **はじめに** 近年、酸性雨問題は地球規模の環境問題として大きな関心を集めている。多くの酸性雨予測モデルが提案されているが、多くは雲物理過程がパラメタライズされたモデルである。しかし、酸性物質の移動については雲物理過程が重要であると考える。したがって、本研究では大石の開発した詳細な雲物理過程をもつ雲物理モデルを用いて酸性雨・酸性雪の予測もモデルの開発及びメカニズムの解明を目的とする。

2. **モデルの概要** 本研究で使用する2次元対流モデルと化学物質反応・輸送モデルの概要を述べる。

2.1 **2次元対流モデル** 本研究で用いた2次元対流モデルの特徴は、非静水力学モデル、AE系(非弾性系)であること、加えて、テンソル解析を用いた座標変換により地形の表現が可能なことである。

雲物理過程の特徴は、液層・固層にある様々な降水粒子を仮定せずに、主として径と密度でクラス分けしているその数密度(空気の単位体積あたりの個数)を陽に表現された詳細な雲物理過程によって収支を計算している点である。降水粒子を水滴、霰、あられ、氷晶に大きくクラス分けされ、さらに半径によって細かくクラス分けされる。本モデルでは、大きく分けて、凝結過程、衝突・併合過程、凍結・着氷過程、融解過程の微物理過程の4つからなり、それぞれの降水粒子のクラス間の変化量をそれぞれ数値化している。

2.2 **化学物質反応・輸送モデル** 酸性物質の Rutledge et al の物質収支式を基にして氷晶、霰、雪の凝結成長の際に SO_2 が吸収される反応を加味した。対象とする時間が数時間程度であるため光化学反応の寄与は少ないと考えて光化学反応はこのモデルでは取り扱わないものとした。化学物質の気体、各降水粒子間の移動は以下のようなプロセスで行われる。

- 凝結核として大気中のエアロゾルが降水粒子に取り込まれる。

- 降水粒子の落下時に下にあるエアロゾルを捕集する。
- 降水粒子の凝結成長の際にヘンリーの法則に従い気体を取り込む。
- 降水粒子の相変化に伴う移動

に大別される。酸性雨モデルの概念図を図1に示す。

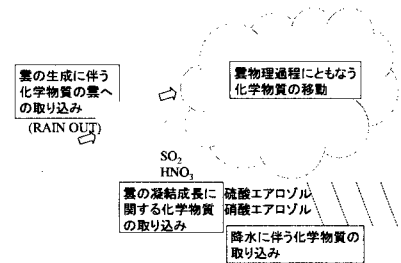


図 1: 酸性雨モデルの概念図

3. **適用と考察** 本節では酸性物質は大気状態の違いによりどのような振る舞いを示すか、また山岳地形の有無によって酸性物質の局地性や降下量の変化、warm rain, cold rain による雲生成機構の違いによる振る舞いの変化を見るために酸性雨、酸性雪予測モデルを2次元で数値計算を行なうことにより酸性雨、酸性雪のメカニズムの解明を目指した。

また、本研究では2次元で十分に降水と化学物質の挙動を表現することが可能であると考え2次元での数値計算を採用した。

3.1 **対流性降雨での考察** 対流性降雨については cold rain と warm rain についての差、山岳地形の酸性物質の降下量への影響などを比較した。

1. warm rain と cold rain の比較について

caold rain と warm rain の酸性雨について与える影響の比較をする。両ケースともに山岳地形はない。まず、降雨量についてであるが cold rain と warm rain について大きな違いは氷粒子の有無による降雨強度の違いである。氷に対する飽和水蒸気混合比が小さいこと、霰、雪などの氷粒子

は軽いことといった性質のために雲は大量の水蒸気を貯えることができるために強い雨を降らせることができる。しかし、硫酸イオンの降下量としては降水量ほどの違いはない。硫酸イオンの供給源としては、凝結核として取り込まれるものと、水滴、霰、氷晶の凝結成長の際に気体を取り込まれるものがあるが、後者は前者に比べると少量であること、また雲が発達している部分では硫酸エアロゾルは消費されているので新たに供給される量が少量であることが挙げられる。

2. 山岳地形が酸性物質の降下と与える影響

山岳地形の酸性雨と与える影響について比較を試みた。両ケースともに cold rain とした。総降水量と硫酸イオンの総降下量をみると、地形のない場合で最大値をとるのは 16 km 付近でありこれは氷粒子が融解してもたらされた降雨である。しかし硫酸イオンの降下量の最大値となる地点は 10 km 付近となる。これは降雨の始まった地点と一致し、硫酸イオンは降雨の始まりに集中する傾向があると言える。地形のある場合には降雨量の最大値となる地点は 10 km 付近で、また硫酸イオンの降下量の最大値となる地点も 10 km 付近となる。これは、地形の効果により降雨が停滞しうるために硫酸イオンが長時間継続して狭い領域で降下しているためであると考えられる。

3.2 層状性降雨での考察 地形のない場合には、降雨の初期に最大の量の硫酸イオンを降下させておりその後は水平風により移動している。一方、地形の存在する場合は、地形の効果により地形のある場合にはない場合に比較すると降雨域が地形の影響により移動せずに山頂付近に停滞している。このときの雲底高度が山頂よりも低いために山頂を越える際に雨を降らせる。雲の発生高度が山頂と同程度であるために地形により地上への降下の領域が限定されて狭い範囲で長時間硫酸イオンの地表への降下が認められる。つまり、この場合には山岳が存在することにより大きな局地性が生じていることが確認された。(図 2)

3.3 雪の場合での考察 このケースにおいて今までのケースと大きく異なる点は硫酸イオン、硝酸イ

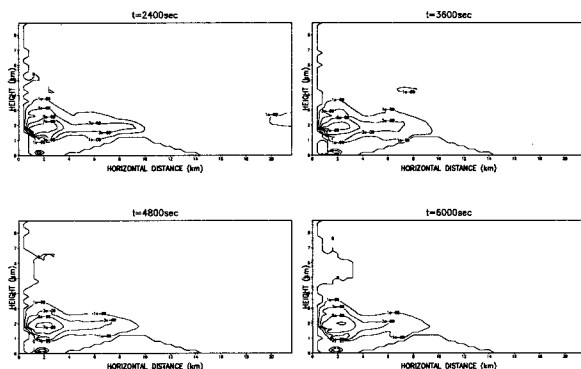


図 2: 山岳地形ありの降水粒子中の硫酸イオン (g/g)

オンとともに初期の降雪から 5 分程度の時間遅れを伴ってピークをむかえている点である。水滴と氷晶の接触により一部は地表に達するのであるが、酸性物質が高濃度の部分は上昇しており、まだ雲の中心部分に存在していると考えられる。また、このケースでは雪と雨が混在する形態の降水であり、酸性物質のピークは雨の降水が始まり少し過ぎた 25 分前後から始まり 50 分前後までとなっている。凝結核として雲に混入した酸性物質が雲の成長による降雨とともに地表へと運ばれていると考えられる。その後は降水がないために酸性物質の地表面への降下は少なくなっている。両物質ともに 8 ~ 9 km 地点で大きな値を示しているが、25 ~ 45 分時の降雨の形態の時にもたらされたものである。

4. 結論 本研究において詳細な雲物理過程を含む酸性雨・酸性雪予測モデルの開発とその適用を試み、酸性物質降下についてのいくつかの成果を得ることができた。本研究で開発したモデルと大気中に酸性物質の観測データ、検証データの蓄積とあいまって酸性雨、酸性雪のメカニズム解明の一助となることを願う。

参考文献

- 1) 大石哲：積雲の雲物理構造解析を基礎にした洪水制御支援環境の開発に関する研究，京都大学学位論文，1997.
- 2) Rutledge, S.A Hegg, D.A and Hobbs, P.V (1986): A Numerical Model for Sulfur and Scavenging in Narrow Cold-Frontal Rainbands Journal of Geophysical Research Vol.91, No.D13, pp.14,385-14,402.