

硝酸の湿性降下量と雨滴粒径分布の 関係に関する数値実験的研究

Numerical Approach for the Effect of Size Distribution of Rain Drop
on the Wet Deposition of Nitrate

大石 哲¹・砂田 憲吾²・池淵 周一³

OISHI Satoru, SUNADA Kengo and IKEBUCHI Shuichi

¹正会員 博(工) 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科(〒 400-8511 甲府市武田)

²フェロー 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科(〒 400-8511 甲府市武田)

³フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所水資源研究センター(〒 611-0011 宇治市五ヶ庄)

In this study, we investigate the effect of size distribution of rain drop on the wet deposition of nitrate. The numerical acid rain model which uses the bin method for calculating the cloud microphysical processes is used for the investigation. The results are as follows, i) rain which mainly consists of large size droplets makes much amount of wet deposition of nitrate, ii) accumulated rainfall amount is important to estimate the amount of wet deposition of nitrate, iii) spatial variation of wet deposition of nitrate is large, and iv) wet deposition of nitrate can be estimated by space borne radar with considering the graupel fall.

Key Words : acid rain, drop size distribution, numerical simulation, bin method, wet deposition

1. はじめに

雨滴粒径分布が酸性物質の湿性降下量に与える影響は大きいと考えられる。雨滴一粒に単位時間に取り込まれる物質の量をきわめて簡単に推定するならば、取り込み量は雨滴の単位時間通過体積に比例すると考えられるので、雨滴径を D 、落下速度を v として $\pi D^2/4 \times v$ となる。落下速度も Gunn and Kinzer¹⁾によれば雨滴径の増加関数である。したがって、雨滴一粒に短時間に取り込まれる物質量は雨滴径に関する増加関数となる。

雨滴粒径分布を扱った研究として、沖・虫明²⁾はリモートセンシングによる降雨強度算定のためには瞬時的な降雨強度の性質を調査する必要があるという視点から、雨滴粒径分布観測に基づいて推定された1分間降雨強度データの時間的変動特性を調査している。また、沖・虫明³⁾は雨滴粒径分布の観測値を用いてレーダによる降水観測の換算パラメータを同定する手法を検討し、さらに実時間キャリブレーションへの適用可能性について述べている。さらに、中川ら⁴⁾および中川ら⁵⁾は、MUレーダーデータを用いて雨滴粒径分布の鉛直構造を定式化しレーダー雨量の推定手法を提案している。

雨滴粒径分布を考慮して酸性雨を扱ったものとして、

坂本⁶⁾は降雨強度が酸性雨濃度に与える影響はそのときの雨滴粒径分布を用いて推定でき、かつその推定値の誤差比が累加雨量の一次関数となることを示した。Oishi et al.⁷⁾は、雨滴粒径分布を考慮することができる数値モデルを用いて、酸性雨のレインアウトおよびウォッシュアウトの比が雨滴粒径分布を考慮しないバルク法と、雨滴粒径分布を算出することができるbin法で異なることを報告している。

このような研究をふまえ、本研究では雨滴粒径分布が硝酸の湿性降下量に与えている影響を数値モデルで調査する。ここで対象としているのは、雨滴粒径分布と硝酸の湿性降下量の関係であり、1粒の雨滴の粒径と湿性降下量の関係ではない。本研究は、バルク法を用いたRutledge and Hobbs⁸⁾やKitada et al.⁹⁾などのバルクタイプの雲物理過程を用いている酸性雨予測モデルの中で暗に仮定されている雨滴粒径分布関数では、表現できていない雨滴粒径分布が湿性降下量に影響を与えていることを述べるものである。したがって、大石ら¹¹⁾の研究と同様に、bin法で計算される雨滴粒径分布を酸性物質収支モデルで逐次数値積分して用いている。

表-1 モデルに入力した化学物質の初期条件,

化学物質	地表濃度 [g/g]	地表濃度 [ppb]	HI _i [km]
SO ₂	4.3×10^{-9}	1.95	2.0
SO ₄ ²⁻	3.1×10^{-9}	—	3.5
NH ₄ ⁺	1.6×10^{-8}	—	3.5
H ₂ O ₂	5.9×10^{-10}	0.506	∞
NO ₃ ⁻	7.7×10^{-10}	—	3.5
HNO ₃	1.7×10^{-9}	0.780	2.0
PAN	4.2×10^{-9}	0.014	∞

2. 数値モデルの概要

本研究で用いた雲解像モデルは Takahashi¹²⁾, 高橋ら¹³⁾, 大石ら¹⁰⁾によって開発されてきたものである。モデル内の力学過程・微物理過程の詳細については大石ら¹⁰⁾を, 化学物質収支モデルの詳細については大石ら¹¹⁾を参照されたい。

本研究では主風速方向と鉛直方向の2次元モデルを用いており, 地形は与えていない。モデルの水平分解能は400m, 鉛直分解能は200mである。主風速は2.0m/sである。大気プロファイルとして, 積雲がしやすい条件付き不安定な仮想大気を水平一様に与えた。また, 積雲を生起させるために大気の一部では周囲よりは気温, 水蒸気混合比を大きくしている。

本研究で用いている bin 法では降水粒子を相(液体, 固体)と密度と形(球, 円板)で分類した上で, それぞれを径や厚さで細かく分類する。分類された結果, 降水粒子はクラス(L)に属することになる。bin 法ではその数密度(単位体積中に含まれる個数) $X(L)$ を予報変数としている。分類方法を表-2に示した。

クラス L に属する水滴の代表径 $D(L)$ は,

$$D(L) = D_0 \exp\left(\frac{L-1}{DJ}\right) \quad (1)$$

である。ここで $D_0 = 4 \times 10^{-4}$ [cm], $DJ = 4.329$ である。小さい粒子領域で成長が早いことから, 小粒子部分を細かく分けうる指数分布を用いている。このように bin 法では, クラス L に相当する径が $D_s(L)$ cm ~ $D_l(L)$ cm の水滴が単位体積あたり何個あるかを計算可能である。数密度は, モデル中では移流, 拡散といった力学過程と, 凝結, 衝突, 凍結, 融解などの微物理過程で変化する。

粒径分布 $N(D)$ と数密度の関係は

$$X(L) = \int_{D_s(L)}^{D_l(L)} N(D) dD \quad (2)$$

である。すなわち粒径分布とは数密度の密度関数となっ

ている。

本研究で導入している化学物質は SO₂, SO₄²⁻, NH₄⁺, H₂O₂, NO₃⁻, HNO₃, PAN である。化学物質の初期条件および境界条件は, Rutledge, Hegg and Hobbs¹⁴⁾に基づいて水平方向に一様で, 鉛直方向には指数関数 $Q_i = Q_i(0) \exp(-h/HI_i)$ で与えた。表-1に各化学物質の地表濃度 $Q_i(0)$ と低減係数 HI_i を示す。 h は高度を表す変数である。

ここでは, これらの化学物質が化学物質収支モデルで反応して生成する硝酸の湿性降水量を考察対象としている。硝酸の湿性降水量は, 雨水 1cm³ 中の硝酸の質量 [g] である。

3. 計算結果と考察

図-1に数値シミュレーションによって得られた地点ごとの降雨強度とその地点における硝酸の湿性降水量の関係を示す。従来の解析でよく用いられている関係であるが, 図-1より両者の関係はあまりないことがわかる。

そこで, 湿性降水量に対する新たな解析方法を提案する。図-2に径が2mm以上の水滴の質量が全水滴の質量に占める割合と, 累加雨量および硝酸の湿性降水量の関係を示す。縦軸が硝酸の湿性降水量, 横軸が径が2mm以上の水滴の質量が, 全水滴の質量に占める割合であり, マークの大きさが累加雨量を表す。マークは最小のものが累加雨量10mm以下, 最大のものが累加雨量が30mm以上を表している。図-2より, 径の大きな水滴からなる降雨の方が硝酸の湿性降水量が多いこと, しかも, その関係が成り立つのは累加雨量が小さい場合であることがわかる。すなわち, 累加雨量が小さく径の大きな水滴からなる降雨の場合には硝酸の湿性降水量が多いことが示される。

次に硝酸の湿性降水量が多い地点の計算データのみを用いて, 湿性降水量と地上における雨滴粒径分布の時間変化を示したものが, 図-3および図-4である。凡例には計算開始からの経過時間と硝酸の湿性降水量 [g/cm³] を示している。図-3の太い実線は計算開始から1000秒経過後の雨滴粒径分布を示す。この時は径が2mm以上の雨滴の割合が0.32であり, 大粒径の水滴が少ない降雨である。また, 累加雨量は0.3mmであった。この時の硝酸の湿性降水量は 0.85×10^{-6} g/cm³ であった。太い点線, 破線, 一点鎖線は計算開始から1200 ~ 1600秒経過後の雨滴粒径分布を示している。この時は径が2mm以上の雨滴の割合が0.73 ~ 0.85と大きな雨滴からなっており, 累加雨量は3.0mm ~ 9.9mmであった。この時の硝酸の湿性降水量は $1.7 \sim 2.3 \times 10^{-6}$ g/cm³ と多い。細い線はいずれも計算開始から1800 ~ 2200秒経

表-2 モデル中の降水粒子の種類およびクラス. 氷晶は円板型で () 内は厚さ方向,

種類	相	形	密度 [g/cm ³]	径によるクラス数	最小の径 [μm]	最大の径 [mm]
水滴	液相	球	1.0	33	2.0	3.2
雹	固相	球	0.9	45	2.0	51.9
霰	固相	球	0.3	45	2.0	51.9
氷晶	固相	円板	0.1	21 (5)	2.0 (1.0)	20.5 (41.0)

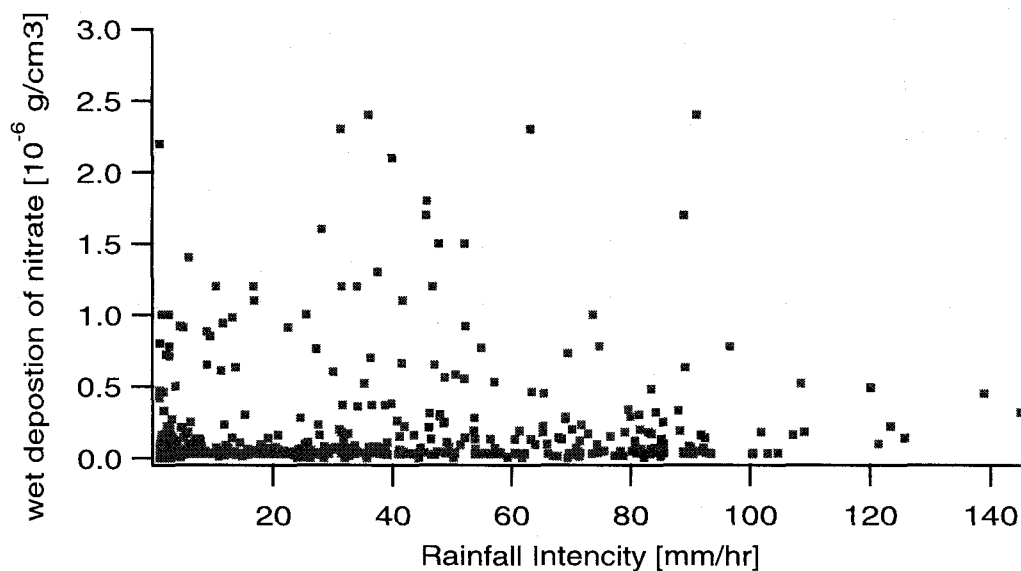


図-1 降雨強度と硝酸の湿性降下量の関係.

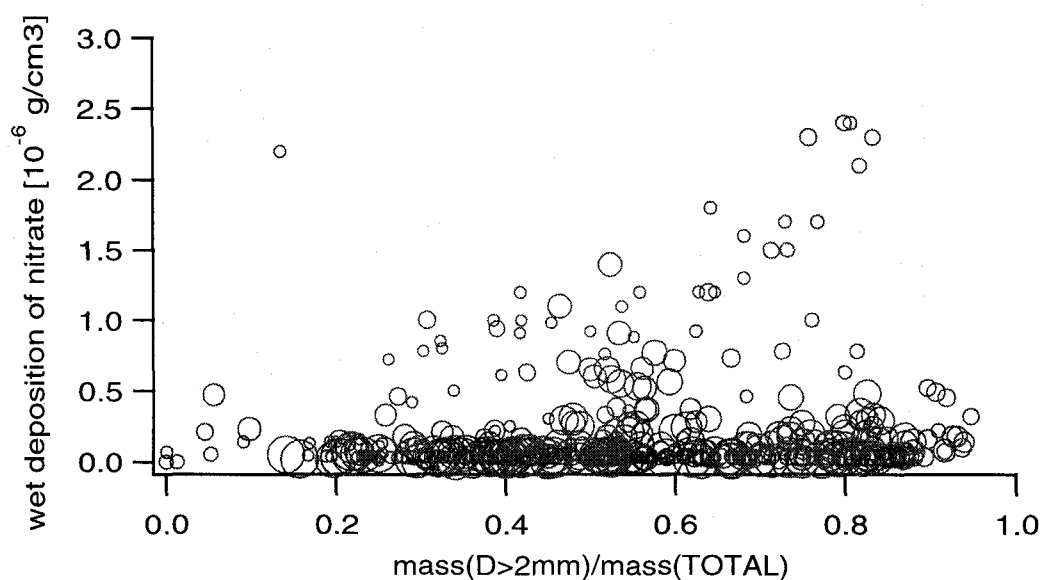


図-2 径が2mm以上の水滴の質量が全水滴の質量に占める割合と硝酸の湿性降下量の関係. マークの大きさは累加雨量.

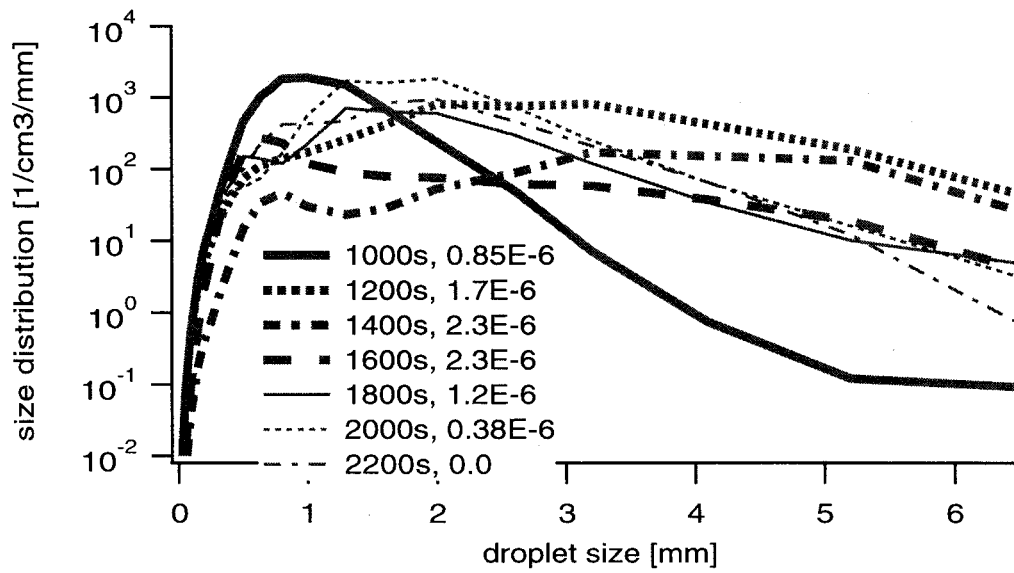


図-3 硝酸の湿性降下量が多い地点での雨滴粒径分布の時間変化. 凡例は各線が表す計算開始からの経過時間と, 硝酸の湿性降下量 $[\text{g}/\text{cm}^3]$ を表している.

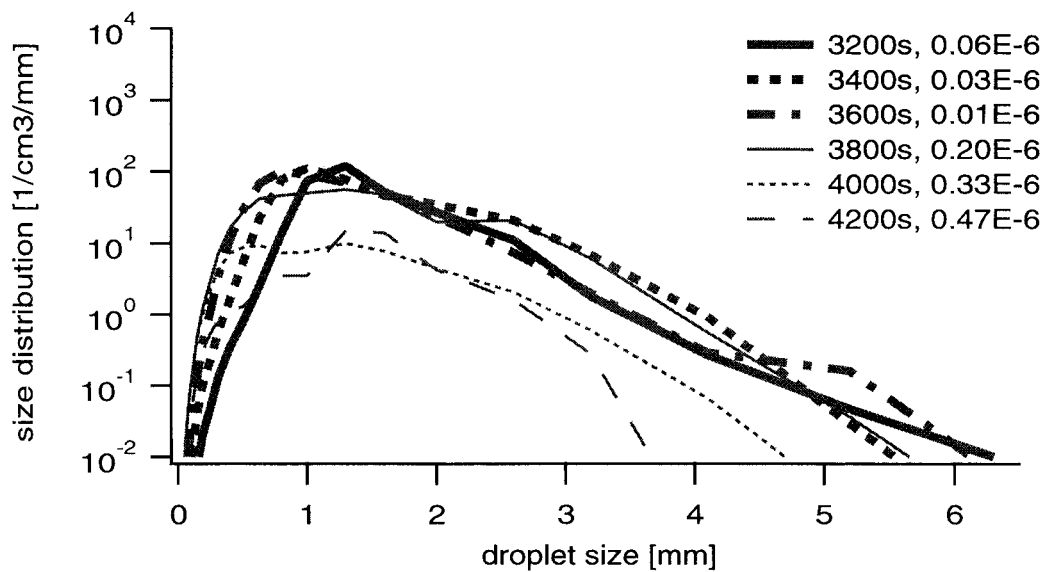


図-4 硝酸の湿性降下量が多い地点での雨滴粒径分布の時間変化. 凡例は各線が表す計算開始からの経過時間と, 硝酸の湿性降下量 $[\text{g}/\text{cm}^3]$ を表している.

過後で、累加雨量は11.7~15.7mmであった。この時には径が2mm以上の雨滴の割合は0.64~0.53である。図中で、横軸の径が2mm以上の部分に対応する雨滴粒径分布線の傾きに注目すると、右下がりの傾きが大きくなっており、大きな雨滴の割合が小さいことがわかる。硝酸の湿性降下量は $1.2 \times 10^{-6} \text{g/cm}^3$ から急激に減少している。減少している理由は先行降雨で化学物質が落とされてしまっていて供給が足りないことと、大きい雨滴の割合が小さいことの両方が考えられる。以上をまとめると、累加雨量は10mmより小さくて径が2mm以上の雨滴の割合が0.7より大きいと硝酸の湿性降下量が大きくなっている。

図-4は図-3を求めた地点における、いわゆる2山形降雨の2山目の雨の雨滴粒径分布であり、図-3と同様に硝酸の湿性降下量を付記している。計算開始より3200秒において累加雨量は17.4mmであり、径が2mm以上の雨滴の割合も0.40以下であって大きな雨滴の割合も少なく、硝酸の湿性降下量は小さい。この中で硝酸の湿性降下量は変動しているが絶対値が小さいので考察対象とはしない。

ここまでで、累加雨量が小さく径の大きな水滴からなる降雨の場合には硝酸の湿性降下量が多いことが示された。また、硝酸の湿性降下量が多い地点のデータを用いて詳細な雨滴粒径分布の時間変化を調査した。

一方、図-2の右下にも小さなマークが見られ、大粒径の雨滴が占める割合が大きい、累加雨量が少ないという条件を満たしたときにも硝酸の湿性降下量が小さくなる場合がある。これらのデータを調べたところ、風上側に硝酸の湿性降下量が多い降雨がある場合であった。

例えば、前段落で述べた硝酸の湿性降下量が多い地点と、雨滴の大きさや累加降雨の条件は同様であるにもかかわらず硝酸の湿性降下量は小さな地点を1地点ずつ選び、降雨強度、径が2mm以上の雨滴の割合、硝酸の湿性降下量の時系列を示したものが図-5、図-6および図-7である。図中でwindwardとあるものは、風上側方境界から7200mの地点の量を表し、leewardとあるものは風上側方境界から9600mの地点を示している。風下側の降雨の方が風上側の降雨より、降雨強度(図-5)、径が2mm以上の雨滴の割合(図-6)ともに大きい。しかし硝酸の湿性降下量(図-7)はきわめて小さい。これは、風上側の降雨によって大気中化学物質が落とされてしまっていることによると考えられる。このことから、先行降雨としては空間的に大きな範囲を考えに入れる必要があること、硝酸の湿性降下量はきわめて大きな空間変動をしていることがわかる。

また、固相の降水粒子は液相の降水粒子よりも粒径の成長が早いので、固相の降水粒子を多く含む雲は大きな粒径の水滴からなる雨をもたらしていると考えら

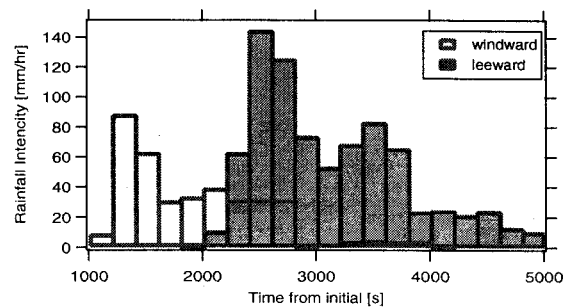


図-5 風上側と風下側にある地点におけるハイトグラフ

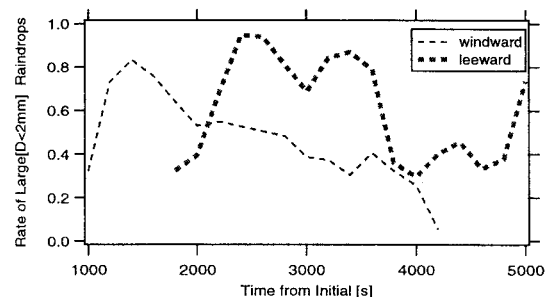


図-6 風上側と風下側にある地点における径が2mm以上の雨滴の割合

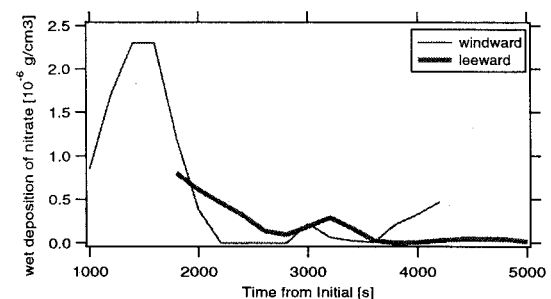


図-7 風上側と風下側にある地点における硝酸の湿性降下量

れる。そこで、霰の生成および成長過程と、硝酸の湿性降下量の関係を調査する。

図-8は2次元断面中で霰が最も多く存在する場所の時間変化を追った軌跡を示したものである。図中の数字は計算開始からの時間(秒)であり、マークの大きさは霰の混合比を示しており、最小のものは0.0g/kg、最大のものは11g/kgである。水平軸は風上側方境界からの距離である。計算開始から800秒から霰の混合比が最大値をとる高さは上昇し、霰の最大混合比も増加して雲が激しく成長していることがわかる。計算開始より1400秒以後2000秒まで、すなわち霰の混合比が最大値をとる高さは下降して霰の最大混合比も増加しない成熟期において硝酸の湿性降下量は大きい。計算開始から3000秒以後は2山型降雨の2山目であって先に

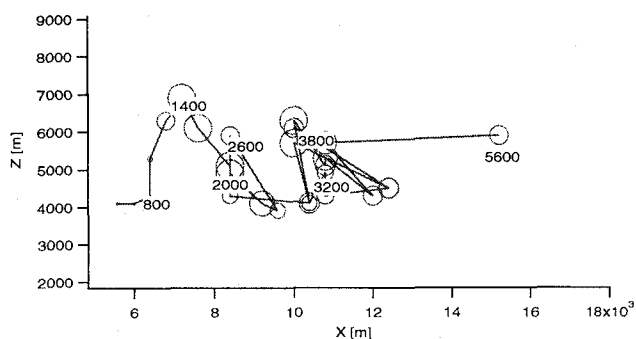


図-8 2次元断面中で霰が最も多く存在する場所の軌跡。マークの大きさは霰の混合比

述べたように硝酸の湿性降下量は小さい。

このように風上側に先行降雨が存在しない場合には、霰が上空で十分発達して大粒径の水滴を作ったうえで降下してきた場所において硝酸の混合比が大きくなっている。したがって、ブライトバンドに影響されない TRMM などの 3 次元レーダーデータを収集することによって、硝酸の湿性降下量が多いところを推定することが可能であると考えられる。

4. おわりに

本研究では雨滴粒径分布が酸性物質の湿性降下量に与えている影響を数値モデルで調査した。その結果、以下のことが示された。

- 先行降雨が少ない場合には、径が 2mm 以上の水滴の割合が大きな雨の方が硝酸の湿性降下量が大きい。
- 先行降雨は風上側の地点も含めた広い範囲の累加雨量によって、多寡を判断する必要がある。
- 硝酸の湿性降下量の空間変動はきわめて大きい。
- 風上側に先行降雨がない場合には、上空で発達した霰の下降する位置では硝酸の湿性降下量が大きくなる可能性があるため、衛星搭載 3 次元レーダーなどで硝酸の湿性降下量が多いところの推定が可能であると考えられる。

この結果は、観測的調査のデータ整理における指針となる。一方で、これらの結果をより定量的にするためには、事例数を増加した数値計算による調査だけでなく、雨水の採取分析および雨滴粒径分布の測定による観測的調査が必要である。

以上を本論文の結論とする。

謝辞： 本研究は日本学術振興会 科学研究費補助金基盤研究 (B)(2)「酸性雪の長距離輸送とそれが流出過程に及ぼす影響に関する研究」(代表：池淵周一)の援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Gunn, R. and G.D. Kinzer : The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, *Journal of Meteorology*, **6**, pp.243-248, 1949.
- 2) 沖大幹・虫明功臣：雨滴粒径分布観測による短時間降雨強度の変動特性, 水工学論文集, 第 38 巻, pp.33-38, 1994.
- 3) 沖大幹・虫明功臣：雨滴粒径分布データを用いたレーダ換算定数の同定, 水工学論文集, 第 37 巻, pp.9-14, 1993.
- 4) 中川勝弘・中北英一・佐藤亨・池淵周一：降雨タイプに依存した雨滴粒径分布パラメータとその鉛直分布, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.141-146, 1997.
- 5) 中川勝弘・中北英一・佐藤亨・池淵周一：雨滴粒径分布の鉛直構造解析とレーダー雨量推定手法の構築, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.7-12, 1998.
- 6) 坂本康：雨滴径分布に基づく降雨水質の時間変化の解析, 水文・水資源学会誌, 第 3 巻 2 号, pp.31-37, 1990.
- 7) Oishi, S., M. Matsui and S. Ikebuchi : Numerical study on the effect of atmospheric profile to acid snow distribution, Abstract book of Acid Rain 2000, Kluwer Academic Publishers, p.45, 2000.
- 8) Rutledge, S.A. and P.V. Hobbs : The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. XII: A diagnostic modeling study of precipitation development in narrow cold-frontal rain bands. *Journal of Atmospheric Science*, **41**, pp.2949-2972, 1974.
- 9) Kitada, T., P.C.S. Lee and H. Ueda : 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, Model description and qualitative verifications. *Atmospheric Environment*, **27A**, pp.1061-1076, 1993.
- 10) 大石哲・木谷有吾・中北英一・池淵周一：詳細な雲物理過程を考慮した豪雨に及ぼす地形の影響に関する数値実験的研究, 水工学論文集, 第 41 巻, pp.117-122, 1997.
- 11) 大石哲・松井光弘・池淵周一：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, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.1-6, 2002.
- 12) Takahashi, T. : Warm rain, giant nuclei and chemical balance, *Journal of Atmospheric Science*, **33**, pp.269-286, 1974.
- 13) 高橋劭・阿波田康裕：詳細な雲の微物理過程を考慮した二次元積雲の数値実験, 京都大学防災研究所年報, 第 36 号 B-2, pp.189-217, 1993.
- 14) Rutledge, S.A., D.A. Hegg and P.V. Hobbs : A Numerical Model for Sulfur and Nitrogen Scavenging in narrow Cold-Frontal Rainbands, 1. Model Description and Discussion of Microphysical Fields, *Journal of Geophysical Research*, **91 D13**, pp.14385-14402, 1986.

(2002. 9. 30 受付)