

酸性雨のもととは酸性雪？ —雪粒子の形成機構と構成成分の究明—

遠藤辰雄（北海道大学低温科学研究所）

降雪現象に関わる最近の観測や実験によって得られた知見を、以下の(1)~(3)のテーマについて、やや独断的にまとめ、(4)の方向で考察してみたい。

(1) 降水の多くは ice phase で形成される 雲の鉛直構造を 0°C の融解高度を堺として温度高度と緯度で図式化したものを用い多くの降水が cold rain であることを示す。特に熱帯では従来から warm rain (cloud) と cold rain (cloud) に分けて対称的に説明されているが、TOGA/COARE in Japan の観測結果では赤道域でも cold cloud が多く占めていた例を示すことが出来る。このことから全球的にみて、地上で雨として観測される降水は上空の雲の中では、多くの場合に氷点下の ice phase (固体相) であり、そこでは固体相に関わる複雑な雲の微物理過程が展開されているはずである。

(2) 降雪粒子の成長の履歴 地上で居ながらにして降雪が観測される高緯度や積雪寒冷地(期)では、試料として採取される降雪粒子には、その成長過程に関わる諸々の履歴情報が含まれているという利点がある。雨であれば、せいぜい粒径分布や降り初めか終わりか等の時期、雨量強度等が得られる情報の全てであるが、降雪粒子では、これらに加えて、降雪粒子の外形の種類として、霰(アライ)や雲粒付き雪結晶であるか、雲粒の付かない単結晶であるか、またこれらの単結晶が併合合体した雪片(セップ)であるか否か等が重要な情報である(後述)。次に雪の結晶形の種類から、その成長時の気温と水蒸気量が確定され、さらに結晶の中心部から外辺部に至る結晶構造の推移から成長の初期から最後の段階までの成長環境を知ることが出来る。これらの知識と理解は人工雪の室内実験によって正確に得られている。特に最近、低温室内において鉛直風洞の上昇気流内で一個の雪粒子を長時間浮遊させて成長させる実験に成功したのである。そこでは天然の降雪の落下中に固有の流れの場における成長を完全に再現したことになるので、ここで初めて真なる成長速度が定量的に求めることが可能になったと言える。それによると、最も成長速度の速い結晶形は -15° ($\pm 2^{\circ}$) で成長する樹枝状結晶と次に -7° ($\pm 0.7^{\circ}$) で成長する角柱状結晶である。またこれらの落下速度が再びこの順序で低く、極小値を示している。言い換えれば滞空時間が長いことに相当し、二つの相乗効果によって極めて成長効率が早いと言う事が出来る。気温が -7° の層が雲の中に無いことは良くあるが、 -15° の層は極域も含んでほとんどの雲に存在し、その層の厚さも -7° の層より2倍以上も厚いことが分かる。この層の中では成長速度が他の高度と比べて2ケタも異常に速いので、短時間の間に樹枝状結晶に成長してしまうので、その結果、世の中で見られる雪結晶の大部分はこの樹枝状結晶であることが、このことから説明される。降水の質量を効率良く稼ぐ、2つの主な形成成長過程は雲粒付き雪結晶から始まる「霰の形成」と雲粒の付かない雪結晶が併合して出来る「雪片の形成」である。前者は成長するほど落下速度が速くなり、それがさらに成長に対して正のフィードバックとして働くことになる。また後者は成長しても、落下速度がほぼ 1m/sec に収斂してこれを超えない特異な性質があり、このことも雪片の形成に対して正のフィードバックとして働くので、両者の運命は、ひとたび決まると途中で乗換えが出来ないことになるが、この自然界の必然性は驚きに値し、実に面白いことである。特に興味あることは、雪片の遅い落下速度では典型的な $10\sim 20\mu\text{m}$ のサイズの雲粒をほとんど捕捉することは出来ないので、「霰」と「雪片」の特徴がさらに明確になる。すなわち霰の形成は、凝結した過冷の雲粒が雪に付着凍結する riming 成長過程により、雪片の形成の基本は、水

蒸気が気相から直接雪結晶の表面に拡散沈着して凝集する deposition 成長過程によって、これらの過程は全く異なりはっきりと二分される。前者の「霰」粒子は液相の雲粒が全体積を占めるので液相反応が深く関係し、これに選択的に関わる硫酸塩が取り込まれることになる。一方、後者の雪片には雲粒はほとんど付かないので、液相反応に関わる効果を考慮する必要はない。これらの「霰」と「雪片」の2つの主要な降水要素は同一の対流セルから降る場合にも落下速度の差により「降り分け」現象が起こす。その結果、一連の降水(or 雨)が、初期には「霰」が、後半では「雪片」がそれぞれ関与するような降水(or 雨)成分から構成されることが容易に理解される。

(3) 酸性雪の形成機構 降雪粒子を、その場で待機して観察しながら、約1時間毎に容器に降り込んだ降雪を集めて密閉し、これを凍結保存をする観測を行って来た。この受雪容器は降雪時間以外は蓋をして dry fallout の混入を避ける様に注意した。これによって24時間毎の採取法や積雪を一定時間の経過後に採取する場合に比べて dry fallout の混入を避けて、出来るだけ新鮮な降雪を採取し積雪と区別する努力をした。化学分析の結果、雲粒付きの雪結晶や霰は酸性度が高く、主に硫酸塩が卓越して含まれていることが、従来通りに確認された。ところが雲粒の付かない単結晶の降雪が連続して降った事例があり、この時の降雪に含まれるイオンには硫酸塩よりはむしろ硝酸塩の方が異常に目立った値で高く観測された。これについては単結晶の氷の結晶格子に異なる元素が入り込めないと(少しの例外を除いて)されているので、これは意外な発見であった。しかし時期を同じくして、Pruppacher 教授のグループの室内実験で、成長中の氷の表面に硫酸塩や硝酸塩が過酸化水素の共存下で効果的に取り込まれると言う一連の報告が相次いでなされたのである。これに勢いを得て、この観測結果を説明出来る情況証拠をサーベイしてみた。この降雪は冬季の石狩平野では頻繁に起こる例ではないが、その降雪機構は、たまたまマルチドップラーレーダ観測により運動学的構造も含めて比較的良く把握された収束帯状雲の例である。この降雪雲は北海道西部海岸において、沖に向かって弧状に張り出した帯状雲であり、北西からの季節風と南東の内陸からの陸風の合流して、海岸前線を形成しているものである。それは石狩湾の海上で停滞し、その前線面で起こる上昇流では霰や雲粒付きの降雪粒子が盛んに形成されその場で降ってしまっているが、雲粒の付かない雪結晶は浮遊して、そこから20-30km 風下側後方の観測点(陸上)まで流されて来たものと考えられる。この降雪は北西からの季節風が日本海を吹走する間に降り込んだ水蒸気が起源となっているものである。それらに日本列島側からの近距離起源の汚染物質が混入することは考え難いと言える。ところが、この収束帯状雲の下層大気は、この収束雲の構造から明らかなように、内陸からの寒冷で重たい都市汚染大気が楔状に下層に貫入したもので、その上に温暖で軽い季節風の気流が乗り上がって滑昇し、その上昇気流内で発生した降雪が汚染されていない綺麗な季節風の中で成長し、それが徐々に落下して下層の厚さ500-600m の汚染大気中を通過して地上に到達したものであり、その最後の段階で、問題の硝酸塩を捕捉したものと考えられる。しかし、これにはいくつかの問題がある。汚染大気と接触する雲底下の大気の水蒸気は未飽和であるので、Diehl et al(1995)が実験から得た効果的条件として挙げている雪の表面が拡散成長中であると言う事は満たされないのである。

「文献」 Diehl K., Mitra S. K. and Pruppacher H. R. (1995) Atmospheric Environment 29,975-981.

(4) 硝酸塩の長距離輸送物質への参加の可能性 最近の遠隔過疎地における観測でも、降雪に硝酸塩が常にある程度含まれていることが分かり、硝酸塩も遠距離輸送を多少被るか、あるいは少なくともその地域の外部から輸送されてくると言う可能性が期待される。そこで、これに関連する研究として、有機化合物との交換による長寿命化、海洋上の輸送の途中で発生したり供給される可能性、CCN として雲サイクルへの参加などがあり、これらの可能性の検証が期待される。