

## 2. 大気の塵を探る —黄砂から降雪まで—

北海道大学低温科学研究所 遠藤辰雄

### 1. はじめに

地上大気が強制的に上昇させられて上がっていくと、その途中で雲が発生しそれが雨や雪などの降水にまで成長する。一方下降させられると雲が蒸発してはれるのであるが、この一連の物理過程を説明するのに極めて役に立つニューヨーク州立大学のシェーファー先生が“降水の階段”と称している模式図（原図）を図1に示す（参照：Schaefer and Day, 1981）。

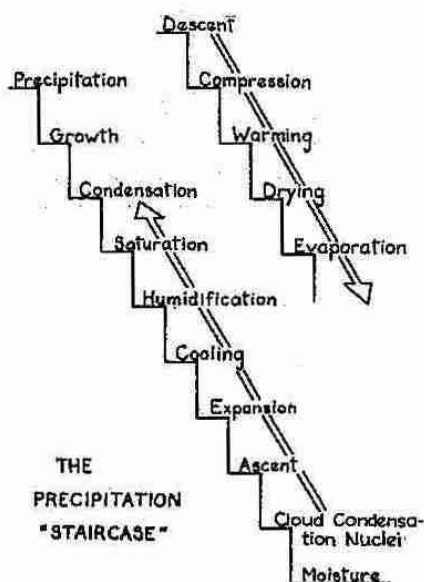


図1 シェーファー先生の降水の階段（原図）  
 上り階段：Moisture 湿度，  
 Cloud Condensation Nuclei 雲核，  
 Ascent 上昇，Expansion 膨張，  
 Cooling 冷却，Humidification 湿潤化，  
 Saturation 飽和，Condensation 凝結，  
 Growth 成長，Precipitation 降水  
 下り階段：Descent 下降，  
 Compression 圧縮，Warming 発熱，  
 Drying 乾燥，Evaporation 蒸発

図の「のぼり」側では、最初に地上大気に適当な湿り気があり、また将来雲粒になるときの芯となる雲核が含まれているとしている。これが上昇すると、高さの増加とともに気圧が下がるので、持ち上げられた大気塊は膨張させられるが、この膨張することは外に向って仕事をすることになるので、その分だけその大気塊の全エネルギーが減少し、そのため温度が下がって冷却してしまう。すると含まれ得る水蒸気の限界値が下がるので、他に変化が無くても逆に相対湿度が上昇したことになり、やがて100%になって飽和状態に到達してしまう。さらに上昇すると過剰な水蒸気は何か結露し始めるが、それが雲粒子の芯になる雲核である。ここから先では種々の成長過程を経て一人前の大きさの雨滴や雪結晶になり自然落下が始まる。

一方、この大気が下降し始めると、これまでとは逆に高度が下がるにつれて気圧が増加するので、その大気は圧縮され、外から仕事を受けるので、その大気塊の全エネルギーが増加し、温度が上昇してくる。すると空気が含み得る水蒸気の上限值が増加するので、他に変化が無くても相対湿度は減少することになり、今

度はどんどんと乾燥していくことになり、結果的には蒸発が起こって、降水や雲粒が消失してしまうことになる。この事は「風が吹くと桶屋（おけや）が儲（もう）かる」式に覚えたと極めて重要で役に立つセリフになる。つまり、「大気が上昇すると曇り、下降すると晴天になる」である。

ところで、この説明には大変重要な鍵が含まれていたのである。階段の上昇の始めに雲核が存在することが明記されており、これが無いと今の話は実現しないのである。それらは大気中の塵のなかにふくまれているものである。ではその塵とは、どんな大きさで、どのような種類があるのであろうか。この大気中の塵について詳しく探ってみることにしよう。

## 2. 大気中の浮遊粒子

大気中含まれるあらゆる粒子を、ここではとりあえず「大気浮遊粒子」と呼ぶことにし、その主なものについて粒子の大きさ（粒径）の範囲を図2のリボンの幅で示してある。この図も原図（参照：Schaefer and Day, 1981）であり、横軸は粒子の直径で単位は $\mu\text{m}$ ミクロン（micrometer）である。しかしその縦軸には特に意味は無い。図の最左端の粒径は0.0001ミクロン（ $\mu\text{m}$ ）で1Å（オングストローム）で原子か簡単な分子の大きさの世界である。次の0.001ミクロン（ $\mu\text{m}$ ）の目盛りが不測にもミスしていることはご愛嬌であるが、それが最近のMKS単位系では良く使われるnm（ナノメータ）に相当する。

このようなミクロのスケールには日常的に馴染みがないので、全く取り付く島がない状態である。しかし、通常の光学的顕微鏡で見ることの出来る大きさの限界は1ミクロンである。またこの図にもあるが人間の毛髪（図中の human hair）の太さは100ミクロンと記されている。日本人の髪の毛はやや細く直径で50ミクロン（ $\mu\text{m}$ ）くらいからであるが、これはどこにでもある身近なスケールとして活用されたい。

タバコの煙は100nm～数1000nmに及び可視光線の波長（400-700nm）範囲に納まり、「紫煙」と称される乾いた時の煙の紫色であり、これを深く吸い込んで吐き出すと水蒸気で粒径が大きくなりその結果、白い煙として見られることがよく引き合いに出される話であり、ここで示される大きさと一致する話である。

## 3. ユンゲによるエアロゾルの代表的な粒径分布

このように計測が困難な微小粒子の研究の結果を総括してエアロゾルの典型的な粒径分布を世界ではじめて提案したのがユンゲであり、それは図3に示すものである。これは特に大陸性のエアロゾルの粒径分布に相当するが、このうち現在では、粒径が微小の方の山々の存在や分布の形が様々な変動をもつことが指摘されてはいるが、それを除くといつでも概ねこの形が再現されるのである。図の中に記された、大気イオン、エイトケン核、大核、巨大核などの核粒子の名前と粒径範囲が図に記載され、歴史的な記録としてその後数多く引用されているものである。以下にそれらの粒径のエアロゾルについて発生と消滅までの挙動に関する説明が図4においてなされる。

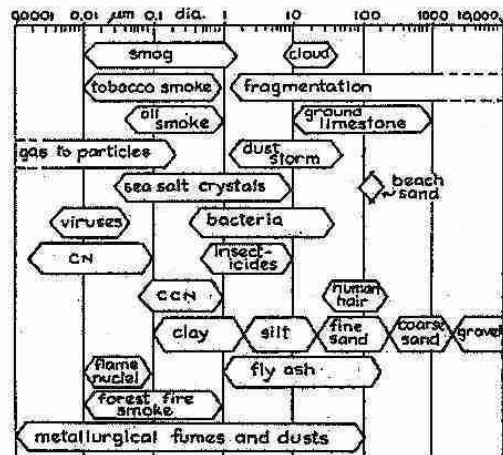


図2 大気浮遊粒子（原図）  
fragmentation 破砕物, ground limestone 石灰石粉末, insecticides 殺虫剤, gravel 砂利, metallurgical fumes 金属フェーム  
その他の英訳は講義で行う。

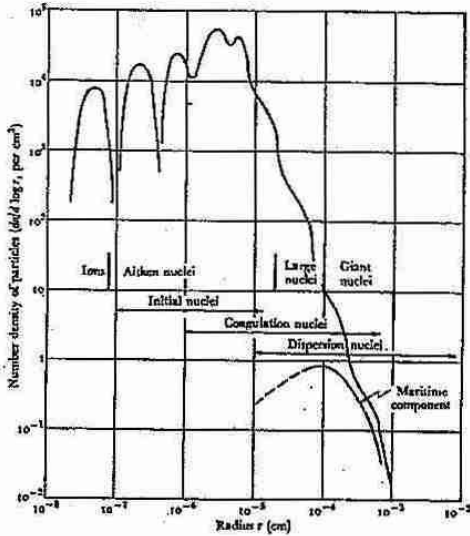


図3 ユンゲによる大気エアロゾルの粒径分布 (原図)

縦軸：個数空間密度（数密度） 横軸：粒子半径（cm） 図中の和訳 Ions 大気イオン, Aitken nuclei エイトケン核, Large nuclei大核, Giant nuclei 巨大核, Initial nuclei初期核, Coagulation nuclei 凝集核, Dispersion nuclei 分散核, Maritime component 海洋性成分

### 4. エアロゾルの粒径と挙動

エアロゾルの粒径分布を表面積でとると、明瞭な3つの山が図4のように認められる。これは粒子の形成や成長は粒子の表面へのフラックスによって進行するので、卓越する3つのモードが表面積粒径分布において、初めて表されることを物語っていることになる。この図は大喜多（1982）の和訳図を引用しているが、その元は Whitby and Cantrell（1976）によるもので、エアロゾルの成因と変遷、消滅などの挙動を総括的に説明している、優れた模式図である。発生の様式は粒子直径で2 μmを境にして、それより大きい粗大粒子と、小さい方の微小粒子とに分けられ、それぞれの発生源が全く異なることが挙げられている。微小粒子の側の発生源はまず気体から始まっているが、その粒径の小さいほうから順にみていくと、まずはじめの第1のモード（山）については次の様に考えられる。それは常温では気体でなく固体か液体である物質でも、高温である限り蒸気として気体の状態で存在するものが多く、これが冷却して凝縮すると核を形成し、1次粒子として発生したことになる。これが複数個合体して凝集してエイトケン粒子を形成して0.002 μmから0.1 μmまでの範囲に納まる事になる次のモードでは低揮発性の蒸気が考えられ、これは凝縮が起こりやすく、高濃度であれば均一核形成を起こして粒子を形成することになる。

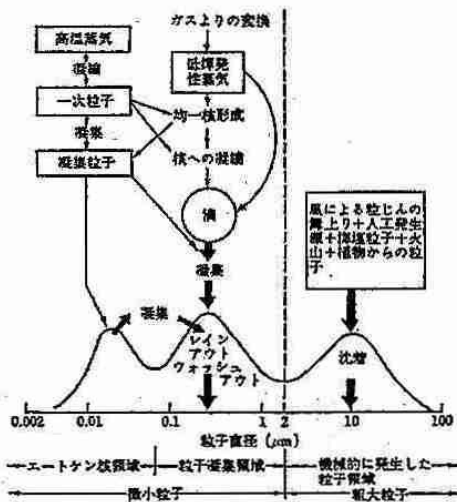


図4 エアロゾルの粒径と挙動 大喜多（1982）によるWhitby and Cantrell（1976）からの引用和訳 エアロゾルの粒子表面積粒径分布でみた微小粒子と粗大粒子の粒径範囲およびその形成消滅過程の概念説明図

## 5. 凝結核測定装置を用いた観測例

凝結核の測定装置はエイトケン (Aitken) によって実用化された装置が有名であり、その原理は断熱膨張による瞬間冷却によって造りだされる水などの液体蒸気の高い過飽和によって含まれるエアロゾルのほとんどすべてを凝結させてその発生した液滴は目で見える可視サイズであるから、その液滴 (霧) の個数濃度から元のエアロゾルの個数濃度を求めるものである。これは実験室に組み立てられた大掛かりな装置であるが、それを操作が簡便で、小型軽量にして携帯型にしたのがガードナーカウンター (講義で紹介) である。この装置を始めて日本に持ち込んだのは先述のシェーファー先生である。彼は人工降雨の実験が盛んであった時代に、雲のシーディング (種まき) の専門家であり、そのころ北米の5大湖の風下で降る大雪が日本海の降雪と類似であるということで、日米共同研究が生まれ、その一端として彼らも来日し、石狩平野の降雪を見学して帰ったものである。その時、この驚くべき装置を置き土産として残され、それを至るところで観測した結果がその後の研究のはじまりとなっておりそれらを紹介する。

図5はその装置を用いて、大雪が降っている最中の札幌市とその周辺部において、乗用車で移動しながら測定した凝結核の水平分布図である。この観測は大雪の降るときの夜間には、この当時は比較的交通量がへり、当時は少なかった4輪駆動車で運転しながらガードナーカウンターで間歇的に測定しながら市内を移動した記録である。基点は銭函 (A点) から始め国道5号線に沿って藻岩下 (B点) まで走り、そこから雁来街道を通して江別 (C点) に至るルート沿いであるがその測定値の凝結核の個数濃度を図のように直線に近似して投影して水平分布の断面構造とみなしたものである。市街地中心部のピーク値は10万個/ccであり、その周辺部の平均値は2千個/ccであり、約2桁の違いがあることが分かる。このような機械的な断熱膨張による過飽和度は300%から1000%などのような高い値である。現実の雲が形成される時の過飽和度ははこれに比べると遙かに小さく1~4%ぐらいであり、この過飽和度の機械的な実現はかなり困難であり、現在は化学拡散場の製作等の研究開発が進められているところである。しかし、エアロゾルの太陽エネルギーの地球への入射に対する影響として、エアロゾルそのものの混濁度の他に、それらが雲粒子の芯になる雲核 (Cloud Condensation Nuclei: CCN と称され) として雲の発生に大きな影響を及ぼすことで、その重要性が指摘されているものである。しかしその測定はいまだに困難であり、昔から定義と検出原理の議論が続いているものである。とはいえ、雲核としての性質は定性的には粒子の表面の吸湿性が良いこと、比較的粒径が大きいことなどの条件が要求されるものである。

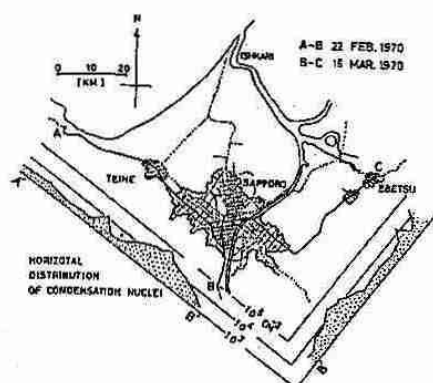


図5 札幌市とその周辺の凝結核水平分布の測定  
簡易凝結核測定器で測定した札幌市とその周辺のエイトケン核数密度の水平分布

## 6. 凍結の開始を促す核あるいは引き金現象

雪結晶の形成の元は、過冷却の液体からなる雲粒子から始まっていて、そこでは液相から固体相への変化が必要である。それは過冷却で液相の水滴の中に凍結開始の原因になる粒子が存在することでありこれを凍結核という。それが凍結の芯になってそこから結晶成長が始まっている場合である。あるいは凍結開始の引き金になっている場合もある。このような原因になる核をまとめて氷晶核と呼んでいるが、この氷晶核の個数濃度の測定値と形成された雪結晶の個数濃度を比較してみたところ、それが1000倍にもあたり、この違い

を説明するための議論が最近まで続いた。

そのことは Ice Multiplication (意識すると：氷晶化増殖作用) 説と言われて数多く推測された。それらの中には、超音波などの衝撃で凍結開始するとか、外来粒子などが衝突・接触するだけで凍結開始するなどである。しかし、その後、室内実験の結果、氷点下6度付近の過冷却の微水滴が急激に凍結する時に表面が先に凍結して殻をつくり、次に内部が凍るにつれて内部の膨張により、表面の殻がわれて、そこから過冷却の水が飛び出して、瞬時に凍結しておびただしい数の氷の小片を撒き散らすことになる。これが氷晶核として働くためであることが説明され、現在それが広く受け入れられるに至っている。

気球に吊るす高層気象観測用のラジオゾンデにさらにドライアイスを砕いたものをネットに入れて長い紐でつないで、春先の冬の夜半の曇った日に、雲の中に飛揚した結果の図である。飛揚してから連続的に降雪用に開発した高速走査レーダで全方向を監視し続けたのであるが、始めのうちは全く何も認められなかった。このシーディング実験は失敗したものと諦めかけていた。約23分ほど経過してから、地上の風向から推測したものは、かなりずれた方向と距離と位置に小さな一点が輝いているのが発見された。その方位にレーダの輝線を合わせて、そこでアンテナを垂直に走査してみたところ、図6に見られるような鉛直方向に降下しながら尾をひくレーダエコーが発見された。これは大変な驚きである。この時のラジオゾンデの記録から気温と相対湿度が分かるがその記録からゾンデとドライアイスが雲の中のどの部分を通っていたか、その位置がわかる。しかも計算によると氷飽和になっていて雪が成長する事が分かるので、そこでシーディングがなされた事が推定される。またその時に計算される風向きと風速が変わらないと仮定して、このシーディングされた紐状の部分に風に乗ってどこまで流されるかを求めるために、エコーの初めて発見された時刻まで計算して延長してみると、それが驚くことに図6のように、発見されたエコーの位置とよく一致することがわかる。このことからこのエコーがドライアイスによってシーディングされたことが証明されたことになる。このシーディングは局所急速冷却によると考えられるものである。

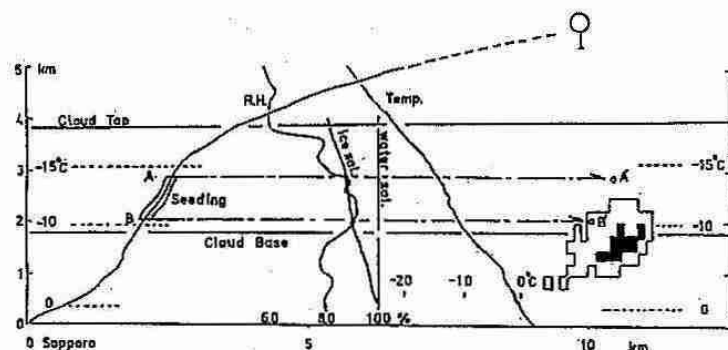


図6 レーダエコーで見た人工降雪実験の証拠  
ドライアイスのシーディングによる人工降雪実験

## 7. 液体窒素による急速冷却によるシーディングによる科学館人工降雪発生装置の予備実験

現在、青少年科学館で展示されている人工降雪発生装置の予備実験装置が図7である。その当時は世界初の試みで、天然の本物に出来るだけ近い状態で美しい雪結晶を年中夏でも降らして観察できるようにしたいと言う発想であった。

これを当時大きな経費をかけて建設が予定されていた札幌市青少年科学館の呼び物の1つの柱にしようと言うことであり、その成否を確かめるために、設立関係者から切実な依頼がなされたのである。低温科学研究所の低温実験室内で最高の丈を取ることの出来る部屋に、図7のような高さ5mの垂直風洞を作り、その

上昇気流中に過湿しながら氷晶を浮遊して成長させることを考えた装置である。これは実物の3分の1の大きさであるから、これで予定通りの降雪現象が持続して起こるならば、本番でも確実に発生するであろうということ、あとは実行あるのみであった。そこで、それまでに実績のある実験装置の組み合わせで発展させることになり、私の研究で使用していた初期氷晶発生装置（図の中央部）を活用した。それは液体窒素に浸した銅の棒の他端を過湿塔内に露出し、その接触空気の局所急速冷却によりおびただしい数の氷晶を発生させ保留し、その一部を垂直風洞本体内に適宜拡散により導入したものである。この実験は見事に成功し数時間の長さで継続させることが出来た。しかし、この氷晶発生装置は半永久展示としては面倒で維持費がかかり過ぎるのではと言う難点が指摘され、建設請負会社では我々の助言により、電磁弁を使用した断熱膨張方式の実用化試験を進め、それが現在の装置に使われているものである。

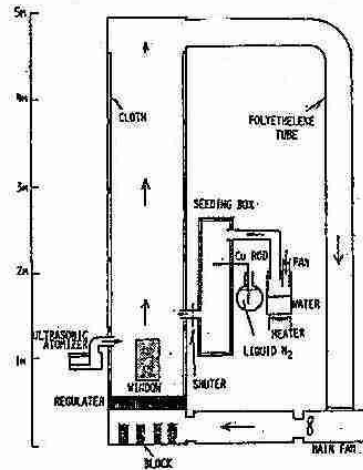


図7 科学館の人工降雪装置の予備実験  
液体窒素による局所急速冷却によるシーディング実験

### 8. 黄砂の流出の様子

1987年3月5-6日に日本各地に黄砂がみられ、筑波のライダーでも見事に観測された。そのデータに合わせて八黄砂粒子の飛来した軌跡をシミュレーションしてみたのが図8である。ここでは発生源を、中国大陸の乾燥地帯である黄土高原を発生源とし、舞上り高度を4 kmとして連続的に発生するものとし数値計算した結果である。

黄砂は地上に降下して初めてその発生を知ることが多いが、実際には上空7-9 kmにも存在し、それが日本列島を通過して地上に降らずに太平洋に張り出していることもあることが伺える。最近の衛星画像のデータでは北米にまで及んでいるのが認められている。地上に降下する黄砂現象は冬の終わりから春先に多く報告されるが、地上から上空まで積算して計測される最近の光学的観測の結果によると、秋の一時期を除くほとんどいつでも上空に飛来して通過していることが分かってきた。これらの図は、そのような状況があり得る事を示唆するものであるといえる。従って日本の青空の色は西洋の鮮やかなブルジャンブルーと言うよりは、少々グレーの加わった藍色の青に近いことの方が多く、そのことから日本人の色に関する美的感覚はこの黄砂の影響を受けているとも考えると面白いことである。

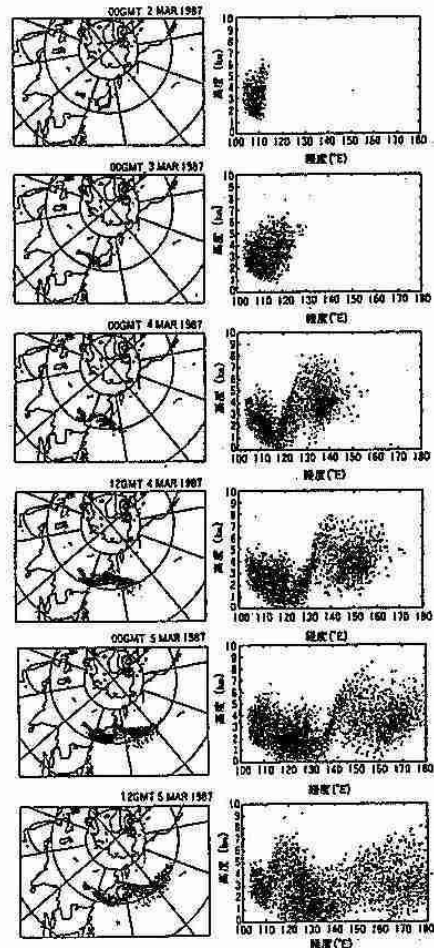


図8 黄砂のトレース実験 甲斐(1991)  
黄砂を数値計算した軌跡の水平分布と鉛直分布 (1987年3月2日0時~5日12時:グリニッチ標準時)

## 9. おわりに

大気中の塵の研究は、軍事的なガスの拡散の問題として扱われて進歩した歴史もあるが、計測法がかなり困難なために幾分研究の推進が遅れてきた分野にあったと言える。しかし今日になって地球規模の大気汚染が進行して、地球温暖化の問題においても、この塵の影響が少なからず重要であると取り上げられて問題になっているところでもある。そのような必要とあいまって近年の先端技術の進歩により、これまで困難とされてきた計測技術が急速に発展し、新しい研究成果や地球規模の知見が日増しに見出されだし、この分野の問題は「古くて新しい問題」として脚光を浴びる状況になってきたところである。

この他に人為起源により自然界で見られるシーディング効果として、最近話題になっているジェット機による飛行機雲であるコントレール (Contrail) と大型船舶による雲発生が衛星から認められそれがシップトラック (Ship-track) と呼ばれている現象が挙げられる。これらについても講義で写真からその実態を示し、その成因についても考えてみよう。

付録：「用語解説」(キーワード・メモ)

**固体・液体・気体 (物質の三態)**：固体では構成する原子や分子の間で働く引力が強く、振動は許されてもお互いの位置関係は変えられない拘束をうけあっている状態にある。液体はその分子同士の熱的な運動が激しくなり、これらの拘束力をこえて動き出し、位置の入れ替えや移動が可能であるが、全体のまとまりから脱出していくことがまだ出来ない状態にある。気体になると更に激しく運動し出し、その拘束からも解放され自由に脱出して飛び回れる状態になると説明される。

**凝結 (凝縮)**：気体から液体に相変化すること。

**昇華 (昇華凝結)**：気体から液体を飛び越して直接固体に相変化すること。昇華凝結 (deposition) とも言う。

**凍結**：液体から固体に相変化すること

**凝結核**：凝結する時の芯や引き金になる核物質。英語の Condensation Nuclei から略して CN と称する。

**昇華核**：昇華 (昇華凝結) する時の芯になる核物質。

**凍結核**：凍結を起こす芯や引き金になる核物質。

**雲核**：天然の雲の核になる核物質。くもの上昇速度により生じる程度の極めて低い過飽和度で凝結する核のことで、上述の凝結核の千分の1程度の数で存在する。英語の Cloud Condensation Nuclei から略して CCN と称する。

**氷晶核**：天然の氷晶 (大気中の氷結晶) になる核物質で、上述の昇華核と凍結核を合わせたものに相当する。

**凝集**：小さな微小粒子が合体して大きな粗大粒子を形成すること。

**過冷却**：ふつう水は温度 0℃より温かくなると融けだし固体から液体になる。しかし、水は 0℃以下に冷やされても凍結して氷にならない場合がある。この状態を過冷却という。実際には極めて純粋できれいな水をきれいな容器に入れて静かにゆっくりと温度を下げていくとこの状態が実現する。しかし、これは不安定であって、何かのショックや異物質の侵入があるだけで一瞬にして凍結してしまう。大気中に凝結する雲粒子や霧粒は元来蒸留水を作るときの過程と同じであるから、一般は極めて純粋であり、そのうえ粒径が小さいために凍結しやすい条件が揃っているのでよく過冷却の状態が実現するわけである。

**エアロゾル**：大気中に浮遊する粒子で固体と液体はあり得るが気体は許されない。

粒径分布：粒子の大きさ（半径または直径）を横軸にして、区間幅毎に個数濃度などを縦軸にとってその配分の具合をさして言うが、縦軸は個数濃度に限らず、目的に対応して表面積濃度や体積（質量）濃度でとることもある。

レインアウト：雨などの降水粒子を形成する過程において、芯となって大気中の塵が使われて除かれること指し、主に雲の中で起こる。

ウォッシュアウト：すでに形成された雨や雪などが落下中に大気中の塵を取り除くことを指す。それらは主に雲底より下の大気中で起こる現象である。

（参考文献）

大喜多敏一（1982）：大気保全学 産業図書 pp.254.

甲斐 憲次（1991）：黄砂のライダー観測と数値シミュレーション、黄砂 名古屋大学水圏科学研究所編、55-70.

Schaefer, J. V. and Day, A. J. (1981) : A field guide to the atmosphere, Houghton Mifflin Company Boston, pp.359.

Whitby, K. T., and Cantrell, B. (1976) Fine particles, in International Conference on Environmental Sensing and Assessment, Las Vegas, NV, Institute of Electrical and Electronic Engineers.