

## 雲・エアロゾルと気候

海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター 中村晃三

### 1. はじめに

雲は気候において重要な役割を果たす。しかし、どのような光学的特性をもった雲がどの高度にどのくらいの頻度と寿命で起こるかを正確に評価するのはたいへん難しい。現在大きな問題になっている地球温暖化に関する議論(例えば、IPCC:気候変動に関する政府間パネル報告書)でも、その不確かさの原因となる重要な要素の1つが雲である。

雲ができるためには、エアロゾルと呼ばれる空気中に数多く浮かぶ小さな粒が重要な役割を果たす。エアロゾルはそれ自身放射に影響する(直接効果)が、雲粒数の変化(第1種間接効果)や雲の寿命や雲量の変化(第2種間接効果)を通して気候に影響する。

雲のでき方とそのときに重要な役割を果たすエアロゾルの話を簡単に紹介してみたい。

### 2. 雲のでき方、飽和蒸気圧と過飽和度

水蒸気を含む空気が上昇すると、気圧の低下に伴う膨張に内部エネルギーを消費するため、気温が低下する。このとき、しばしば水蒸気の一部が凝縮し多くの小さな水滴が生ずる。これが雲である。ところが、水の粒は小さければ小さいほど蒸発しやすい。そのため、単純に気温が低下しても、それだけではなかなか雲は生じない。

このときの水の相変化の様子を考えてみよう。固体(氷)や液体(液水)の水の場合、1つの分子の周りには多くの分子があって、互いに適当な距離だけ

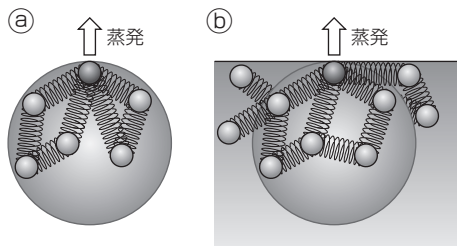


図1 液体の水の中での分子間力が水の蒸発を妨げる様子を表す概念図。小さな水滴(Ⓐ)では平らな水面(Ⓑ)に比べて少しの分子しか関与しないため、蒸発が起こりやすい。そのため、小さい水滴ほど平衡相対湿度が大きい、言い換えると凝縮しにくいといえる。

離れて結合し、その点のまわりで熱運動をしている。熱を与え温度を高く(=熱運動を活発に)していくと、分子間の結合が崩れた状態、つまり気体になる(蒸発の潜熱は分子間の結合を振り切るのに必要なエネルギーである)。

ここで、コップのような蓋のない容器に水をいれたことを想像しよう。通常、十分に時間が経つと、容器の水は蒸発して無くなってしまふ。温度が高いほど早く蒸発が起こるが、温度が低くても、十分に時間が経てば全ての液水が蒸発する。これに対して、容器に蓋があり、液水の量が十分に多い場合は、液水の蒸発による減少はある程度進んだところで停止する。このとき、液水が減らないのは、蒸発と同じ割合で凝縮が起こっているためであると考えられる。この状態を平衡状態と呼び、平面の水との間で平衡な状態を飽和(相対湿度が100%)と呼んでいる。

そんな飽和状態になった容器の中に、小さな水滴が浮いていたとしよう。このとき、平らな水面に対しては飽和している空気だが、小さな水滴の場合は、図1からわかるように、液体の水分子どうしの引き付けあう力が平面の場合よりも小さいため、その温度と水蒸気圧では蒸発する分子の数の方が凝縮する分子の数よりも大きくなり、この小さな水滴は蒸発してしまう。別の言い方をすると、この小さな水滴が平衡になるのは平らな水面に対して飽和している

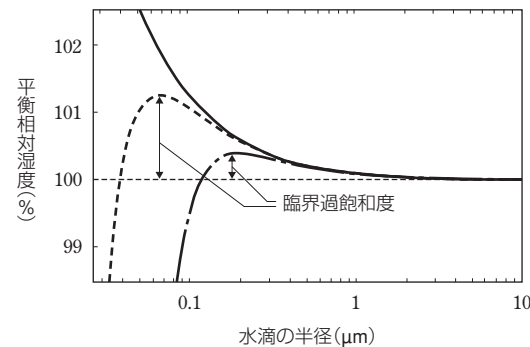


図2 水滴の半径と平衡相対湿度との関係。水滴の半径の単位はマイクロメートル(10<sup>-6</sup>m)である。実線は、純粋な水の場合、破線と一点鎖線は、水溶性のエアロゾルで、小さなもの(破線)と大きなもの(一点鎖線)の場合の例。

よりも多くの水蒸気が存在しているときで、そのような状態を過飽和と呼ぶ。この小さい水滴ほど蒸発しやすい(=平衡蒸気圧が大きい)傾向は曲率効果あるいはケルビン効果と呼ばれていて、図2の実線で表されるように、水滴の大きさが小さければ小さいほど顕著になる。空気の塊が上昇して温度が低下し、水蒸気の凝縮が起こる場合、最初にできる水滴が数個の水蒸気分子が偶然に衝突してできるごく小さなものだとすると、相対湿度が数百%程度になるまで凝縮が起こらないことがわかっている。

### 3. 雲生成におけるエアロゾルの役割

さて、実際は湿度が100%程度で小さな水滴が生成する。これは、エアロゾルを中心に、その周囲に水蒸気が凝縮することで、最初からある程度の大きさの水滴になるため、あまり大きな過飽和でなくても蒸発せずに存在できるおかげである。このようなエアロゾルには山火事や工場でものが燃えるときの煙、大気中の微量ガスの化学反応によるもの、土壌粒子や海水のしぶきなどからできるものなど、様々なものがあり、典型的な半径0.1μm程度のもので、1mm<sup>3</sup>に数個ぐらいの割合で存在する。また、エアロゾルが例えば海のしぶきからできる塩化ナトリウムのように水に溶ける物質の場合、溶液の場合の蒸気圧降下の法則にしたがい、水に溶けている物質のモル濃度に応じて平衡蒸気圧が減少するため、100%未満の湿度でも小さな水滴が生成できる。このとき、半径rの水滴の成長速度は、近似的に

$$r \frac{dr}{dt} \propto \left( S - \frac{A}{r} + \frac{Br_N^3}{r^3 - r_N^3} \right)$$

で表される。ここで、Sは過飽和度(相対湿度-1.0)、 $r_N$ は物質が球状だとしたときの半径、AとB(物質に依存)は実験から決まる定数で、右辺( )内の第2項が曲率効果、第3項が物質が水に溶けた効果を表す項である。 $r_N$ とrが与えられたとき、 $\frac{dr}{dt} = 0$

となる状態の過飽和度は平衡過飽和度と呼ばれ、その値は、右辺=0から

$$S_b = \frac{A}{r} - \frac{Br_N^3}{r^3 - r_N^3}$$

で表される。図2の破線はある半径 $r_N$ の水溶性のエアロゾルの平衡過飽和度の例(rによる変化)であ

る。ここで、平衡過飽和度の最大値( $\frac{\partial S_b}{\partial r} = 0$ から決まる)をこのエアロゾルの臨界過飽和度、そのときの半径を臨界半径と呼ぶ。このエアロゾルの成長(rの増加)を考えると、臨界過飽和度以上の湿度のときにこのエアロゾルは成長する(活性化された状態と呼ぶ)。様々な大きさのエアロゾルを含んだ空気が上昇し、相対湿度が大きくなる時、小さな臨界過飽和度のエアロゾル(同じ物質なら大きな粒子)から活性化される。エアロゾルの活性化は、周囲の水蒸気を使い上昇する空気の過飽和度を下げる働きをもつ。そのため、エアロゾル活性化による過飽和度の低下が空気塊の上昇による過飽和度の増加を上回るところで、過飽和度の増加がとまる。このときの過飽和度を最大達成過飽和度と呼び、このときまでに活性化したエアロゾル(最大達成過飽和度よりも小さな臨界過飽和度をもつエアロゾル)が雲粒(代表半径10μm)に成長していく。つまり、最大達成過飽和度が雲粒の個数を決めることがわかる。

このようにしてできた小さな水滴は周囲の水蒸気を凝縮させて大きくなっていくが、その成長速度は大きくなるほど相対的に遅くなる。そのため、大きな落下速度(例えば、数m/sの落下速度になるのは半径が1mm程度のもの)になるには、非常に多く(例えば10<sup>6</sup>個)の水滴が互いにつぶつて合体することが重要である。このとき、落下速度は水滴の大きさで決まるため、ぶつかりあうためには異なる大きさの水滴ができることが重要で、雲が生成するときに、どのような大きさの水滴がどのくらいの個数できるかという分布(粒径分布と呼ぶ)が雨の生成する速度、言い換えると、雲の寿命を決めているといえることができる。

このように、空気中にどのくらいの大きさのエアロゾルが、どのくらいの数だけあるかということが、雲粒の生成だけでなく、寿命を含む雲の性質全体の決定において重要な役割を果たす。人類起源のものを含め、全球のエアロゾルの生成量の見積もりとその移流をモデル化し、その分布に基づいた雲生成のシミュレーションが行われるようになってきている。まだ不十分ではあるが、衛星データとの比較によってその有効性も検証されるようになってきており、今後の研究が期待されている。