

基礎気象学講義 復習問題

第 5 回

雲と降水の形成

1 問題

1 次の文章を読んで、後の問いに答えなさい。

雲の中には、微細な水の粒が浮遊して存在しており、これを (A) と呼ぶ。(A) は周囲の水蒸気を取り込んで成長するが、(a)雨滴と言える大きさにまで成長するにはかなりの時間がかかるため、別の要因による雲や雨滴の生成過程があると考えるのが自然と言えよう。

これらの水滴は浮力と重力の影響下で運動する。十分小さく Stokes 流に従うような半径の粒子については、比較的正確にその落下速度を求めることができるが、大きくなるにしたがい抵抗係数の変化や形状の変化により厳密に取り扱うことが難しくなる。しかしながら、大きい水滴は小さい水滴より速く落下することから、小さい水滴に衝突してこれを取り込む。この過程を (B) と呼ぶ。衝突が起こるか否かについては、大小の粒子半径を R, r と、衝突の起こりうる粒子の中心間距離の閾値を x_0 とする時、次の (b)衝突係数 E により指標が与えられる。

$$E(R, r) = \frac{x_0^2}{(R + r)^2}$$

この確率により (B) が起こり、やがて雨滴として成長して降ってくるような、氷晶を介さない雨のことを (C) 雨と呼ぶ。

一方、0.1mm 以下の氷晶を核とし、これによる凝結で雪が形成される場合がある。一度形成された雪が降水として降ってくる場合、(c)途中で溶けた場合は雨となり、溶けない場合は雪として観測される。この雨のことを氷晶雨あるいは (D) 雨と呼ぶ。

(C) 雨は通常 (E) 低気圧からの雨に、(D) 雨は通常 (F) 低気圧からの雨に相当する。

(講義テキストを基に作成)

- (1) 文中の空欄 (A) ~ (F) に当てはまる語句を答えなさい。
- (2) 下線部 (a) について、0.001mm の水滴が雨滴と呼べる大きさに成長するまでにかかる時間を答えなさい。
- (3) 下線部 (b) について、衝突係数を理論的に計算したグラフを図 1 に示す。横軸は大きい側の粒子に対する小さい粒子の半径の比を示し、縦軸は衝突係数を示している。この図では、捕捉される粒子が小さい場合の衝突係数が小さくなるのがわかるが、このようになる理由を述べなさい。
- (4) 下線部 (c) について、観測される降水現象が雪になるか雨になるかは、図のように観測場所の湿度と気温に依存する。図から明らかな通り、雪になるのは気温や湿度が低いほど有利であるが、その理由を述べなさい。

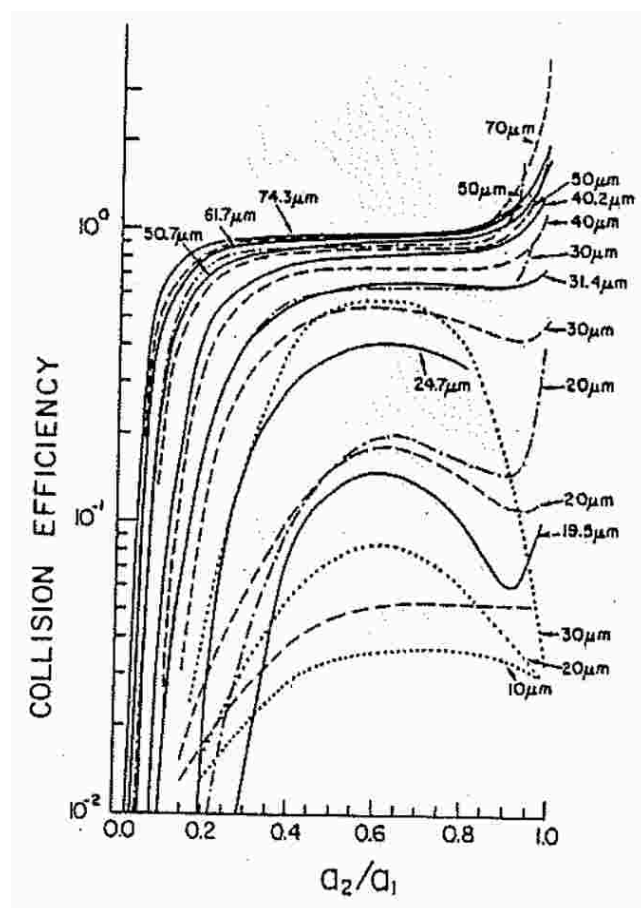


図 1: 衝突係数の理論計算値。各曲線の値は大きい側の粒子半径を示す。

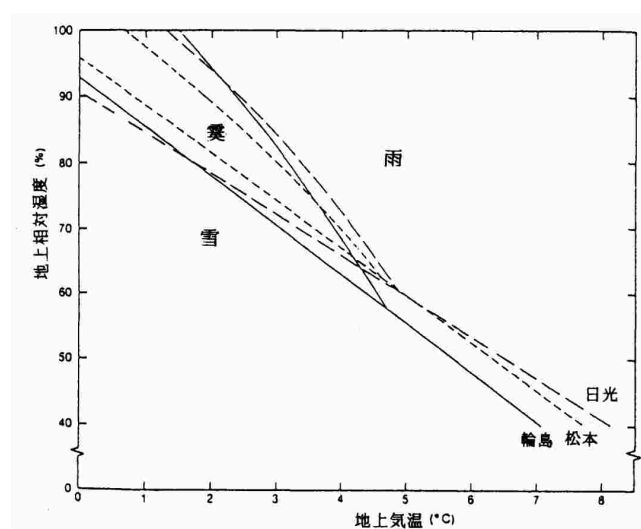


図 2: 温度・湿度による雨と雪の種別。気象学会誌「天気」の「天気の教室 雪と雨をわけるもの」(松尾敬世) より引用

2 教科書図 4.2 の曲線はケーラー曲線と呼ばれる。この下限は Raoult の法則により、上限は Kelvin の法則により与えられる。この問題では、ケーラー曲線を実際にかいてみよう。

- (1) 半径 r の球形の水滴に対し、Raoult の法則が成り立つと仮定する。今、この水滴が吸湿性エアロゾルの希薄溶液であるとき、 e'/e を r の関数として表しなさい。係数部分は定数 b として良い。
- (2) 前問で求めた e は球形水滴に対する飽和水蒸気圧であるから、Kelvin の式の e_r に相当している。このことを踏まえ、Kelvin の式の半径無限大の水滴に対する e を e_∞ と記す時、 e'/e_∞ を r の関数として表しなさい。
- (3) 前問の指数関数内の r に対する係数を a と表すことにする。指数関数を線形近似し、 ab の項を neglect することにより、 e'/e_∞ を r, a, b 及び定数のみによる式に書き直しなさい。
- (4) 以上の議論を踏まえ、99% から過飽和度 1% 程度の範囲のケーラー曲線を描きなさい。

3 古来、天気は神が定めるものとして、渇水時などには雨乞いの儀式が行われた。日本各地で広く行われた形態としては、山野、特に山頂で火を焚き、鉦や太鼓を鳴らして大騒ぎする形態が多いとされている。

- (1) この形態の雨乞いについて、火を焚くことは科学的にも有効と考えられるが、それは何故か説明しなさい。
- (2) 同様の形態の雨乞いが有用でないと思われるのはどのような気候の地域か、根拠とともに述べなさい。

2 答案

- 1 (1) (A) エアロゾル
(B) 併合過程
(C) 暖かい
(D) 冷たい
(E) 温暖
(F) 寒冷

(2) 12 時間

- (3) 分子の x_0^2 が小さくなり、分母も R のみで考えれば良いので、大きいときよりも衝突係数が小さくなる。
- (4) 水の融点は 0°C なので、低いと雪になりやすい。また、湿度が低いと蒸発したときの水によって周囲の空気が冷やされる。そのため、雪が溶けることなく地表に到達できるため、気温や湿度が低いほうが良い。

2 (1) Raoult の法則は

$$\frac{e'}{e} = \frac{n_w}{n_w + n_s}$$

である。 n_w は純粋の分子数、 n_s は溶質の分子数である。また、問題文より希釈されているので $n_w \ll n_s$ であるので、

$$\frac{e'}{e} = 1 - \frac{n_s}{n_w}$$

と近似表現できる。半径 r なので、体積 V は

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

である。よって、水の質量 m_w は

$$m_w = V\rho_w = \frac{4}{3}\pi r^3\rho_w$$

である。よって、 n_w は

$$n_w = V\rho_w = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3\rho_w}{M_w}$$

である。よって、

$$\frac{e'}{e} = 1 - \frac{n_s}{\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_w \frac{M_w}{M_w}}$$

定数を b とすると、

$$\frac{e'}{e} = 1 - b/r^3$$

となる。

(2) Kelvin の式は

$$\ln\left(\frac{e_r}{e}\right) = \frac{2\sigma}{\gamma \rho_w R_\gamma T}$$

である。 e が e_∞ であることに注意すると、

$$\frac{e'}{e_\infty} = e^{\frac{2\sigma}{\gamma \rho_w R_\gamma T}}$$

である。

(3)

(4)

- 3 (1) 煙が上がることで、大気中にエアロゾルが大量に浮遊する。このエアロゾルが凝結核となり、雲粒が形成される。結果、水滴が落ちてきて雨が降るので科学的に有効と考えられている。
- (2) 気温、湿度が低いところは向いていない。雲粒ができて水滴が落ちても、湿度が低いと雪になってしまい水滴が落ちてこないから。

3 読書案内

大気熱力学及び降水の物理に関する邦書はあまり多くない。洋書であるが、Rogers, Yau は古典的な名著とされている。

- 水野量 2000 "雲と雨の気象学" 朝倉書店
- 村上正隆 2021 "日本の降雪" 朝倉書店
- 武田喬男, 安田延寿, 上田豊, 藤吉康志 1992 "水の気象学" 東大出版
- R.R.Rogers, M.K.Yau 1989 "A Short Course in Cloud Physics" Butterworth-Heinemann