

硫酸アンモニウムの CCN に競合的成長する 雲粒の平衡半径と平衡温度

() 芝 定孝、平田雄志 (大阪大学大学院基礎工学研究科)、八木俊策 (摂南大学工学部)

はじめに：大気中の水蒸気は $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 粒子の様な水溶性の大気エアロゾル上に凝結し、雲粒を経て降水となる。逆に、地表の水は蒸発散により、水蒸気として大気中に移動する。その際、大気中に放出された種々の物質（いわゆる大気汚染物質）も雲粒や雨滴に取り込まれ、降水とともに地上の水に移動する。この様に水および汚染物質の循環には水の蒸発散と凝結とが深く関わっている。

大気中での物質移動過程は二つに大別される。それらは、大気雲粒間の物質移動過程および大気雨滴間の物質移動過程、即ち、雲中での取り込み(レインアウト)と雲底下での取り込み(ウオッシュアウト)とである。レインアウト出力はウオッシュアウトへの入力となり、重要な情報をもたらす。レインアウトのモデル組み立てには、雲粒サイズ、物質移動、液相反応の三つが主要な因子と考えられる。

雲粒の平衡半径は物質移動を支配する重要因子であるとの観点から新たに数式モデルを組み立て、雲粒の平衡半径について検討した。従来の Köhler モデルは実用に際し、重大な欠点を有するからである。また、CCN による雲粒生成時の温度上昇は、平衡半径に影響を与えるには小さいが、気塊を静力学的に不安定にし、降水を伴う対流雲を生ぜしめる（熱対流の引き金となる）には十分大きい。CCN 起因の温度上昇は降水生起因子となり得るとの観点から、平衡温度について検討した。

雲粒の競合的成長の数式モデル：雲粒の競合的成長に対する支配方程式は物理化学的考察より、化学ポテンシャルの平衡、水分質量の保存、熱エネルギーの保存を用い、Table-1 の Eqs.(1)~(3)のようになる。 μ は化学ポテンシャル、 S は飽和比、 T は温度、 a は雲粒半径、 m は質量、 h は単位質量当たりのエンタルピー、添字 e, w, v, a はそれぞれ、平衡、液体の水、蒸気の水、空気を表す。雲粒平衡半径を求める伝統的な Köhler モデルは Eq.(1)の化学ポテンシャルのみを支配方程式とし、変数は半径 a_e のみで、温度、飽和比は一定とする。Eqs.(1)~(3)より、半径、温度、飽和比は Eqs.(4)~(6)のようになる。 C_{px} は定圧比熱、 L_e は蒸発潜熱、添字 0 は初期値を示す。 N は気塊の CCN の個数密度、 M は分子量、 σ は表面張力、 e は蒸気圧、 n は総モル数、 R は気体定数、 v は van'tHoff 定数である。

数値シミュレーション：本数式モデルと Köhler モデルの比較を Fig.1 に、数値シミュレーションの結果を Fig.2~4 に示す。Fig.2~4 に使用する無次元変数は Table-1 の Eqs.(7)~(9)で定義する。Fig.1 で本モデルが Köhler モデルに見られる様な臨界飽和比の制約を受けない事が図解されている。Fig.2 で競合的成長で CCN 個数密度の増加とともに雲粒平衡半径の減少する事がわかる。Fig.3 は雲粒生成にともなう蒸発潜熱放出による温度上昇の N に対する変化、Fig.4 は雲粒生成による水蒸気消費の N に対する変化を示す。いずれの図も初期飽和比 S_0 をパラメータとしている。 S_0 が大きい程、半径の減少、温度の上昇、水蒸気の消費のいずれも大きくなる。Fig.3 と Fig.4 では曲線は N に対して単調に変化せず、最小値と最大値を有する。対応する N より小さい N の領域では、雲粒個数の増加にもかかわらず、急激なサイズ減少で (Fig.2 参照) 全水蒸気消費量が僅かに減少していくとえられる。

結論：新モデルによる雲粒の競合的成長の数値シミュレーションで、次の事が明らかとなった。(1) 気塊内の初期飽和比が大きい程、競合的成長による雲粒平衡半径の減少はより顕著となる。(2)凝結核個数密度に対する平衡温度の変化、飽和比の変化は単調ではなく、それぞれ、最小値、最大値を有する。(3)気塊の温度上昇は平衡半径に影響を与える程大きくはないが、飽和水蒸気を含む気塊の断熱的高度上昇起因の温度上昇に比して大きく、CCN は熱対流の引き金となり得る事を予想せしめる。

謝辞：C. F. Clement 博士より本研究に関し有益なコメントを頂いた。また、本研究は文部科学省の科学研究補助金の特定領域研究「微粒子の環境影響」(U-91532-01-0)の補助により行った。

Table 1. Governing equations, working equations and normalized variables.

A. Governing equations

$$\mu_w(S_e, T_e, a_e) = \mu_v(S_e, T_e, a_e) \quad (1)$$

$$d(m_w + m_v + m_a) = 0 \quad (2)$$

$$d(m_w h_w + m_v h_v + m_a h_a) = 0 \quad (3)$$

B. Working equations

$$\ln(S_e) = \frac{A_1}{a_e} - \frac{A_2}{a_e^3} \quad (4)$$

$$T_e = T_0 + \frac{L_e(T_0)m_{we}}{\Delta C_p m_{we} + C_{pv} m_{ve} + C_{pa} m_{ae}} \quad (5)$$

$$S_e = S_0(1 - A_3 a_e^3) a_4 \quad (6)$$

where $\Delta C_p = C_{pw} - C_{pv}$;

$$A_1 = \frac{2M_w \sigma}{R_3 T_e \rho_{we}}; \quad A_2 = \frac{4\pi \rho_{we} R_1 T_0}{3M_w e(T_0)};$$

$$A_3 = \frac{3\nu_s M_w N}{4\pi M_s \rho_{we}}; \quad A_4 = \frac{n(T_0) e_{sat}(T_0)}{n(T_e) e_{sat}(T_e)}.$$

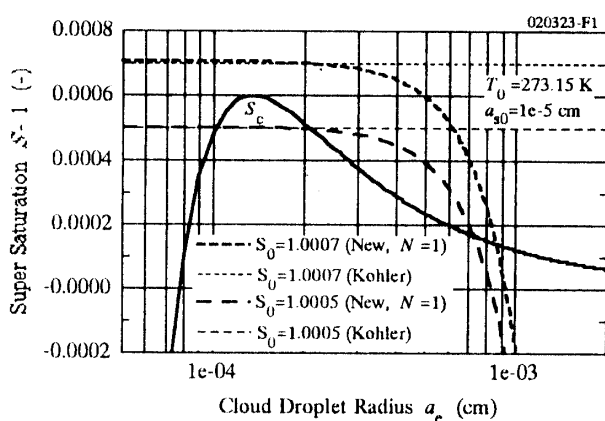
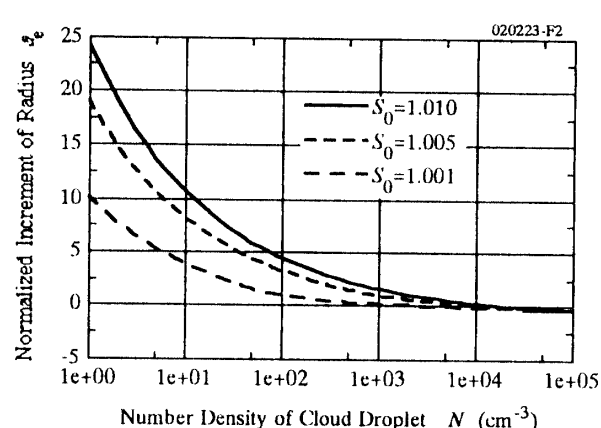
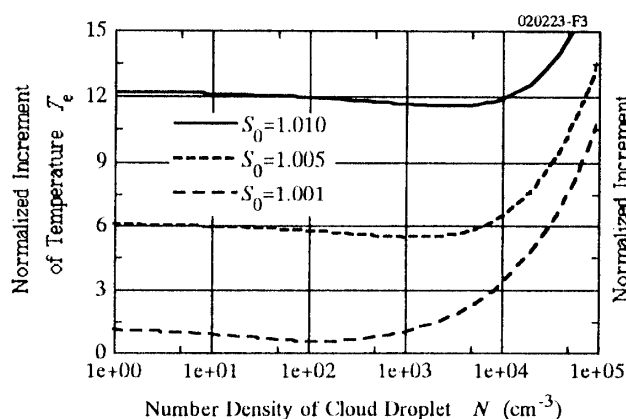
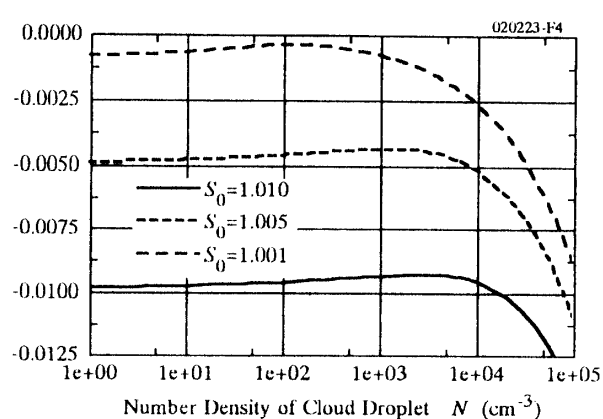
C. Normalized variables

$$\hat{a}_e = \frac{a_e - a_p}{a_p} \quad (7)$$

$$\hat{T}_e = \frac{T_e - T_0}{\Delta T_{as}} \quad (8)$$

$$\hat{S}_e = \frac{S_e - S_0}{S_0} \quad (9)$$

where a_p = potential radius; $\Delta T_{as} = \Delta \Gamma_{as} \times \Delta H = 4.0 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$; $\Delta \Gamma_{as} = \Gamma_a - \Gamma_s \approx 4.0 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C/m}$. Γ_a and Γ_s = dry adiabatic lapse rate ($9.8 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C/m}$) and saturation adiabatic lapse rate ($5.8 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C/m}$), respectively.


Figure 1. Supersaturation vs Equilibrium Radius.

Figure 2. Equilibrium Radius vs CCN Number Density.

Figure 3. Temperature Increment vs CCN Number Density.

Figure 4. Saturation Ratio Decrement vs CCN Number Density.