平成28年度 国立極地研究所・研究集会 エアロゾル・雲・降水の相互作用に関する研究集会,2017年2月17日,国立極地研究所

吸湿性エアロゾルを用いた 雲シーディング

*橋本明弘(気象研)・山下克也(雪氷研)



過冷却雲に対する氷化作用(中・高緯度帯、冬季)

散布物質:ヨウ化銀・ドライアイス・液体炭酸

原理:水と氷の飽和水蒸気圧差を利用した氷粒子成長の促進

暖かい雲に対する雲粒成長促進作用(低緯度帯,夏季)

散布物質:吸湿性粒子(塩・シリカ・炭酸カルシウム・塩化カリウム)

原理:大粒子導入による(衝突併合過程を介した)雲粒成長の促進



^{吸湿性エアロゾルを用いた雲シーディング} マイクロパウダー(塩粒子)による雲シーディング数値実験



Fig. 7 Temporal change in the domain-averaged precipitation. The lines indicate the non-seeded case and the seeded cases with the number concentration under the cloud base; 9 cm⁻³, 45 cm⁻³, 90 cm⁻³ and 180 cm⁻³, (a) for the shallow convective cloud case at 11.5 min and (b) for the stratiform cloud at 68.5 min. Reprinted from Kuba and Murakami (2010) with modification.

- Hashimoto, A., N. Kuba and M. Murakami, 2015: Research on Precipitation Enhancement by Using Numerical Model, *Earozoru Kenkyu*, 30(1),(2015)doi: 10.11203/jar.30.
- N. Kuba and M. Murakami 2010: Effect of hygroscopic seeding on warm rain clouds numerical study using a hybrid cloud microphysical model, Atmos. Chem. Phys., 10, 3335–3351, 2010

March 17, 2017



パーセル型ビン法微物理モデルを 用いた吸湿性雲シーディング実験

吸湿性エアロゾルを用いた雲シーディング はじめに



NaCl

 $(NH_4)_2SO_4$

吸湿性粒子シーディングに よる雲粒成長強化を数値的 に実験。

モデリング

κ -Köhler 理論に基づく液滴膨潤・雲核活性・凝結成長を多次 元ビン法雲物理モデルに導入。

断熱パーセル上昇実験

BGエアロゾル(硫酸アンモニウム)に対して塩粒子を散布 雲粒成長(シーディング効果)に関する感度実験





エアロゾルの吸湿度を表すパ ラメタ κ を導入し、従来の *Köhler* 理論を拡張

複数の異なる吸湿性物質を含む液滴の膨潤・雲核活性・凝 結成長を取り扱える

Petters, M. D. and S. M. Kreidenweis, 2007: A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1961–1971.



March 17, 2017





March 17, 2017

Akihiro Hashimoto

8/20



March 17, 2017

Akihiro Hashimoto

9/20



実験結果 サイズスペクトル

吸湿性エアロゾルを用いた雲シーディング





雲粒生成数のルックアップ<u>テーブル</u>

吸湿性エアロゾルを用いた雲シーディング





吸湿性エアロゾルを用いた雲シーディングまとめ その1

- *κ* −Köhler 理論に基づく液滴膨潤・雲核活性・凝結成長を 多次元ビン法雲物理モデルに導入。
- 内部混合・外部混合した吸湿性粒子2成分系における雲 生成計算をシームレス化。
- 塩粒子散布による人工降雨のための最適シーディング量 を見積もった。



JMA-NHMを用いた吸湿性 雲シーディング実験



雲粒から雨滴への変換

雲粒同士の衝突併合による成長にともなう雲水クラ スから雨クラスへの混合比の変換率 P_{ccnr} は、Berry and Reinhardt (1974) による衝突併合の数値実験 (ビ ン法) の結果を用いたパラメタリゼーションをもとに した Cohard et al. (2000) の定式化に従った。

$$P_{\rm ccnr} = \max\left(\frac{1}{\rho_{\rm a}}\frac{L}{\tau}, 0\right)$$
(3.2.20)
$$L = 2.7 \times 10^{-2}\rho_{\rm a}Q_{\rm c}(0.0625 \times 10^{20}\sigma_{\rm c}^3\overline{D_{\rm c}} - 0.4)$$

$$\tau = \frac{3.7}{\rho_{\rm a}Q_{\rm c}}(0.5 \times 10^6\sigma_{\rm c} - 7.5)^{-1}$$

これに基づいて、雲水混合比を P_{ccnr} 減少、雨混合比 を P_{ccnr} 増加させる。

雲粒数濃度変化率 N_{ccol} については、Long (1974) の 捕捉係数を用いて次のように与えた。

$$N_{\rm ccol} = \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^\infty K_2 (D_1^6 + D_2^6) \\ n_{\rm c}(D_1) n_{\rm c}(D_2) dD_1 dD_2 \\ = K_2 N_c^2 \frac{1}{16} \frac{\Gamma \left(\nu_{\rm c} + \frac{6}{\alpha_{\rm c}}\right)}{\Gamma \left(\nu_{\rm c} + \frac{6}{\alpha_{\rm c}}\right)}$$
(3.2.21)

= $\kappa_{2} \nu_{c} \frac{1}{\lambda_{c}^{6}} \overline{\Gamma(\nu_{c})}$ (0.2.21) 雨滴数濃度変化率については、雨滴の初期粒径を D_{r0} = 81 7 μ m と仮定し、 P_{rmr} を用いて次のように与えた。

$$\rho_{\rm a} P_{\rm ccnr} \qquad \rho_{\rm a} P_{\rm ccnr} \qquad (a a a)$$

$$N_{\rm ccnr} = \frac{\rho_{\rm a} r_{\rm ccnr}}{m_{\rm r0}} = \frac{\rho_{\rm a} r_{\rm ccnr}}{\frac{\pi}{6} \rho_w D_{\rm r0}^3}$$
(3.2.22)

ここで、 $K_2 = 2.59 \times 10^{15} \text{m}^{-3} \text{s}^{-1}$ である。これに基づき、雲水数濃度を N_{ccol} 減少、雨滴の数濃度を N_{ccnr} 増加させる。

橋本,2008:2モーメント雲物理パラメタリゼーション.数値予報課報告・別冊54号.

雨滴による雲粒捕捉

雨滴による雲粒捕捉過程についても Long (1974)の 捕捉係数を用いて定式化を行った。この過程による混 合比変化率は、

$$P_{\rm racw} = \int_0^\infty \int_0^\infty K(D_{\rm c}^P + D_{\rm r}^P) \frac{\pi}{6} D_{\rm c}^3 \frac{\rho_{\rm w}}{\rho}$$
$$n_{\rm c}(D_{\rm c}) n_{\rm r}(D_{\rm r}) dD_{\rm r} dD_{\rm c},$$
$$= \frac{\pi}{6} \frac{\rho_w}{\rho_{\rm a}} \frac{K N_{\rm c} N_{\rm r}}{\lambda_{\rm c}^3} \left[\frac{1}{\lambda_{\rm c}^P} \frac{\Gamma\left(\nu_{\rm c} + \frac{P+3}{\alpha_{\rm c}}\right)}{\Gamma(\nu_{\rm c})} + \frac{1}{\lambda_{\rm r}^P} \right]$$
$$\frac{\Gamma\left(\nu_{\rm c} + \frac{3}{\alpha_{\rm c}}\right)}{\Gamma(\nu_{\rm c})} \frac{\Gamma\left(\nu_{\rm r} + \frac{P}{\alpha_{\rm r}}\right)}{\Gamma(\nu_{\rm r})} \left[(3.2.23) \right]$$

雨滴による雲粒捕捉

雨滴による雲粒捕捉過程についても Long (1974)の 捕捉係数を用いて定式化を行った。この過程による混 合比変化率は、

$$P_{\rm racw} = \int_0^\infty \int_0^\infty K(D_{\rm c}^P + D_{\rm r}^P) \frac{\pi}{6} D_{\rm c}^3 \frac{\rho_{\rm w}}{\rho} \\ n_{\rm c}(D_{\rm c}) n_{\rm r}(D_{\rm r}) dD_{\rm r} dD_{\rm c}, \\ = \frac{\pi}{6} \frac{\rho_w}{\rho_{\rm a}} \frac{K N_{\rm c} N_{\rm r}}{\lambda_{\rm c}^3} \left[\frac{1}{\lambda_{\rm c}^P} \frac{\Gamma\left(\nu_{\rm c} + \frac{P+3}{\alpha_{\rm c}}\right)}{\Gamma(\nu_{\rm c})} + \frac{1}{\lambda_{\rm r}^P} \right] \\ \frac{\Gamma\left(\nu_{\rm c} + \frac{3}{\alpha_{\rm c}}\right)}{\Gamma(\nu_{\rm c})} \frac{\Gamma\left(\nu_{\rm r} + \frac{P}{\alpha_{\rm r}}\right)}{\Gamma(\nu_{\rm r})} \right]$$
(3.2.23)

初期雲粒数濃度の差異が、その後の 雲粒成長速度に影響する。

15/20



エアロゾル 硫酸アンモニウム 移流・拡散・乾性沈着・湿性沈着

塩化ナトリウム 移流・拡散・乾性沈着・湿性沈着

雲•降水雲•雨 移流•拡散•沈着

雲氷·雪·霰·雹 移流·拡散·沈着









まとめ その2

吸湿性エアロゾルを用いた雲シーディング

外部混合した吸湿性粒子2成分系に関する多次元ビン法雲 物理モデルの計算結果をルックアップテーブル化。

- バルク法雲物理モデルに吸湿性雲シーディング過程を導入 しテスト中。
- 塩粒子散布率に対する雨水生成の依存性を内包した雲シー ディング領域モデルの原型ができた。

