

バルク法による雲微物理パラメタリゼーション

小高正嗣

2007 年 6 月 22 日

1 はじめに

前回のセミナーまでに, 村上 (1999) を基にバルク法による雲微物理パラメタリゼーションの概要について調べてきた. ここではそのまとめを行う. まとめるにあたっては, どのような枠組でパラメタリゼーションが考えられているのかが理解できるよう心がけた. 数式表現の詳細についてはこれまでの資料を参照されたい

2 凝結物質のカテゴリ分け

バルク法による雲微物理パラメタリゼーションでは, 凝結物質を大気運動に対してその重力落下が無視できる「雲粒子」と無視できない「降下粒子」に分け, その質量混合比率と数密度の時間発展を計算する.

液相の「雲粒子」の「降下粒子」はそれぞれ雲水と雨水, 液相の「雲粒子」の「降下粒子」はそれぞれ雲氷と雪および霰と呼ぶ. それぞれのカテゴリ分けの基準は以下のようにになっている (村上 1999, 5.2 節参照).

水蒸気 気相の凝結成分

雲水 直径 $100\ \mu\text{m}$ 以下の水滴

雨水 直径 $100\ \mu\text{m}$ 以上の水滴

雲氷 直径 $100\ \mu\text{m}$ 以下の氷粒子

雪 直径 100 μm 以上, 落下速度 0.1 ~ 1 m/sec, 低密度の氷粒子

霰 直径 100 μm 以上, 落下速度 1 ~ 4 m/sec, 高密度の氷粒子

また, 粒子直径に関するパラメタとして以下がある.

- 衝突併合で雨水への変換が開始される雲粒の臨界平均直径 D_{cm} . 通常 20 μ 程度の値が用いられる (村上 1999, 5.3.2.2 節 (4)-(a) 参照).
- 凝集または拡散成長した雲水を雪をみなす最小半径 r_{s0} (村上 1999, 5.3.2.2 節 (4)-(b) 参照).

3 各カテゴリ粒子のサイズ分布

各カテゴリに属する粒子のサイズ分布は以下のように仮定する (村上 1999, 表 5.1 参照).

雲水 サイズ分布関数 $n_c(D_c)$ は単分散分布

$$n_c(D_c) = N_{c0} \delta(D_c - \overline{D_c}) \quad (1)$$

で与え, N_{c0} は一定とする. したがって, 雲水の数密度は予報変数とはしない. 平均直径 $\overline{D_c}$ は雲水混合比を用いて

$$\overline{D_c} = \left(\frac{6\bar{\rho}q_c}{\pi N_{c0}\rho_w} \right) \quad (2)$$

と与えられる.

雨水 サイズ分布関数 $n_r(D_r)$ は

$$n_r(D_r) = N_{r0} \exp(-\lambda_r D_r) \quad (3)$$

と与え, N_{r0} は一定とする. このとき,

$$\lambda_r = \left(\frac{\pi N_{r0}\rho_w}{\bar{\rho}q_r} \right)^{1/4} \quad (4)$$

と表されることから, 雨水の数密度

$$N_c = \int_0^\infty n_{r0} \exp(-\lambda_r D_r) dD_r$$

は, 雨水混合比 q_r の関数として与えられることになる. それゆえ, 雨水の数密度は予報変数とはしない.

雲氷 雲水同様サイズ分布関数は単分散分布で与える。ただし、雲氷の数密度は N_i は予報変数とする。この取り扱い、 N_i を一定とした場合には必ず「混合比大 = 粒子直径大」となってしまう (式 (2) 参照) ことを回避するために導入されている。

雪、霰 サイズ分布関数は雨水同様に式 (3) の形で与える。ただし、数密度は N_s, N_g は予報変数とする。

4 各カテゴリ粒子の落下速度

各カテゴリに属する粒子の落下速度は

$$U_x(D_x) = \alpha_{ux} D_x^{\beta_{ux}} \left(\frac{\rho_x}{\bar{\rho}} \right) \quad (5)$$

と与える (村上 1999, 5.3.1.2 節, 表 5.1 参照)。ただし、雲水、雲氷の落下は雲水または雲氷間の衝突による成長を計算する場合にのみ考慮し、他のカテゴリ粒子 (雨、雪、霰) との衝突を考える場合には無視する (村上 1999, 5.3.2.2 節 (3) 参照)。

5 各カテゴリの混合比と数密度の予報方程式

各カテゴリの混合比と数密度の予報方程式は、以下のように表される (村上 1999, 5.3.2.1 節参照)。ただし、ここでは簡単のため移流項と乱流拡散項を省略した形で表す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_v}{\partial t} = & -NUA_{vi} \\ & -VD_{vr} - VD_{vi} - VD_{vs} - VD_{vg}(-VD_{vc}), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_c}{\partial t} = & -NUF_{ci} - NUC_{ci} - NUH_{ci} \\ & (+VD_{vc}) \\ & -CL_{cr} - CL_{cs} - CL_{cg} \\ & -CN_{cr} \\ & +ML_{ic}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_r}{\partial t} = & +VD_{vr} \\ & +CL_{cr} - CL_{ri} - CL_{rs} - CL_{rg} \\ & +CN_{cr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +ML_{sr} + ML_{gr} \\
& -FR_{rg} \\
& +SH_{sr} + SH_{gr} \\
& +PR_c,
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial q_i}{\partial t} = & +NUA_{vi} + NUF_{ci} + NUC_{ci} + NUH_{ci} \\
& +SP_{si} + SP_{gi} \\
& +VD_{vi} \\
& -CL_{ir} - CL_{is} - CL_{ig} \\
& -CN_{is} \\
& -ML_{ic},
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial q_s}{\partial t} = & +VD_{vs} \\
& +CL_{cs} + CL_{is} + \alpha_{rs}CL_{rs} - (1 - \alpha_{rs})CL_{sr} - CL_{sg} \\
& +CN_{is} - CN_{sg} \\
& -ML_{sr} \\
& -SH_{sr} - SP_{si} \\
& +PR_s,
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial q_g}{\partial t} = & +VD_{vg} \\
& +CL_{ir} + CL_{ri} + (1 - \alpha_{rs})(CL_{sr} + CL_{rs}) \\
& +PG_{gi} \\
& +CN_{sg} \\
& -ML_{gr} \\
& +FR_{rg} \\
& -SH_{gr} - SP_{gi} \\
& +PR_g.
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_i/\bar{\rho}}{\partial t} = & +\frac{1}{m_{i0}}NUA_{vi} + \frac{N_c}{\bar{\rho}q_c}(NUF_{ci} + NUC_{ci} + NUH_{ci}) \\
& +SP_{siN} + SP_{giN} \\
& -\frac{N_i}{\bar{\rho}q_i}(-VD_{vi} \\
& +CL_{ir} + CL_{is} + CL_{ig} + ML_{ic}) \\
& -\frac{1}{m_{s0}}CN_{is}
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial N_s/\bar{\rho}}{\partial t} = -AG_{Ni}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & + \frac{N_s}{\bar{\rho}q_s}(VD_{vs} - ML_{sr}) \\ & - (1 - \alpha_{rs})CL_{srN} - CL_{sgN} \\ & + \frac{1}{m_{s0}}CN_{is} - CN_{sgN} \\ & - AG_{Ns}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_g/\bar{\rho}}{\partial t} & = + \frac{N_g}{\bar{\rho}q_g}(VD_{vg} - ML_{gr}) \\ & + CL_{riN} + (1 - \alpha_{rs})CL_{rsN} \\ & + CN_{sgN} \\ & + FR_{rgN} \end{aligned} \quad (14)$$

6 雲微物理素過程

6.1 核形成

核形成過程は水蒸気または雲水から雲氷の変換過程として考慮する．不均質核形成過程だけを取り扱う (村上 1999, 5.3.2.2 節 (1) 参照)．

昇華核形成 (NUA) 昇華によって水蒸気から雲氷を形成する過程．昇華核形成による雲氷数密度の増加率は NUA_{viN} は、観測などに基づく経験式で与えられる．

凍結核形成 (NUF) 雲水粒子が凍結してそのまま雲氷粒子へと変化する過程．Bigg (1953) の実験式に基づいて与える．

接触凍結核形成 (NUC) 過冷却となった雲水粒子にエアロゾルなどが衝突することで雲氷が発生する過程．接触凍結核形成の原因として、空気分子との衝突による雲水粒子のブラウン運動、エアロゾル粒子の拡散泳動と熱泳動を考慮する．

二次氷晶生成 (SP) 雪と霰が過冷却雲粒と衝突しながら成長する際に、雲氷粒子を生成する過程．室内実験に基づく経験式で与えられる．

7 拡散による凝結/蒸発

拡散による凝結/蒸発 (VD) としては以下を考慮する (村上 1999, 5.3.2.2 節 (2) 参照).

雲水と凝結/蒸発 (VD_{vc}) 湿潤飽和調節法で計算する.

雲氷, 雪, 霰の凝結/蒸発 ($VD_{vi}, VD_{vs}, VD_{vg}$) 凝結と蒸発の両方を考える.

雨水の凝結/蒸発 (VD_{rv}) 蒸発のみを考える. これは湿潤飽和調節法を用いることで場の水蒸気混合比は常に飽和混合比以下になっているため.

8 衝突捕捉

粒子が衝突することで混合比および数密度が変化する過程. 粒子の落下速度は質量の重みをつけた平均落下速度で見積もる. 粒径が大きい粒子と小さい粒子が衝突した場合, 小さい粒子の落下速度は無視する (村上 1999, 5.3.2.2 節 (3) 参照).

異なるカテゴリ間の粒子の捕捉成長 ($CL_{cr}, CL_{cs}, CL_{cg}, CL_{is}, CL_{ig}, CL_{rg}, CL_{sg}$) 幾何学的な衝突断面積は降水粒子の直径で見積もる. また, 平均捕捉率 $\bar{E}_{xy}$ は適当にパラメタ化して与える. 村上 (1999) では, ストーク数 Stk の関数として

$$\bar{E}_{xy} = \frac{Stk^2}{(Stk + 0.5)^2} \quad (15)$$

と与えている. 上記の関数形は, 粒子の運動が流れ場に追従している ($Stk \ll 1$) のとき $\bar{E}_{xy} \rightarrow 0$, 粒子の運動が流れ場と独立な場合 ($Stk \gg 1$) のとき $\bar{E}_{xy} \rightarrow 1$ となるよう工夫されている.

過冷却雨水と雲氷または雪の衝突による霰の捕捉成長 (CL_{ri}, CL_{rs}) 捕捉率 $\bar{E}_{ri}, \bar{E}_{rs}$ は定数として扱う. 凍結は瞬時に起こると仮定する.

雲氷, 雪, 雨水の捕捉による霰の成長 (PG) 気温が低く完全に凍っている場合 (乾燥成長) と, 気温が高く霰の表面が水で濡れている場合 (湿潤成長) に場合分けして考える.

雲氷どうしの凝集による数密度変化 (AG_{Ni}) 同じカテゴリ間の衝突を扱うため, 相対速度は落下速度に速度分散を掛けた値で評価する. 捕捉率 $\bar{E}_{ii}$ は一定とする.

雪どうしの凝集による数密度変化 (AG_{Ns}) Passarelli (1978) の解析的なモデルに基づく方程式で与える.

9 新しいカテゴリへの変換

混合と数密度の変化率はいずれも

$$CN_{xy} \propto \frac{q_x}{\Delta_{xy}}, \quad (16)$$

$$CN_{xyN} \propto \frac{N_x}{\Delta_{xy}} \quad (17)$$

のように表されると仮定し, 定式化を行う (村上 1999, 5.3.2.2 節 (4) 参照).

雲水から雨水への変換 (CN_{cr}) 雲水どうしが衝突併合し, 雨水へと変化する仮定を表す. 雲水混合比から計算される雲粒の平均直径が臨界平均直径 D_m を越えたと変換が生じると考える. $\overline{E_{cc}} = 0.55, D_m = 20\mu\text{m}$ とする.

雲氷から雪への変換 (CN_{is}) 雲氷どうしの凝集による成長と雲氷の拡散成長を考える. 凝集による雪混合比の変化率は凝集による数密度変化 (AG_{Ni}) に基づいて与える.

雪から霰への変換 (CN_{sg}, CN_{sgN}) 雪は過冷却雲粒を捕捉して成長し, その密度を増加させながら霰に変化する. しかし雪の密度は予報変数ではないので, 雪から霰への変換は, 温度が 273 K 以下のときに雲粒捕捉による雪から霰への変換率 (ここでは CN_{sg}^{cl} と表す) が昇華凝結による水蒸気から雪への変率 (VD_{vs}) よりも大きくなると生じると考える (Murakami, 1990).

混合比の変化率は「雪から霰へと変換される数濃度の変化率 (CN_{sgN}) × 霰の質量」 として定式化する.

雨粒と雪との衝突にともなう霰の生成確率 ($1 - \alpha_{rs}$) 雨粒と雪の平均質量の比の関数として与える.