

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 7 月 6 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, 凝結物質を大気の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, 固相の「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 μm 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とみなす最小半径 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。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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)．

均質凍結核形成 (NUH) 雲水の凍結によって雲氷を形成する過程． $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下にならないと生じない．具体的な定式化は村上 (1999) には記述がない．

不均質昇華核形成 (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．

不均質凍結核形成 (NUF) 雲水の凍結によって雲氷を形成する過程．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にエアロゾルなどが衝突することで雲氷を形成する過程．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．

6.2 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.

6.3 衝突捕捉

粒子どうしの衝突により, 混合比および数密度を変化させる過程. 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). カテゴリ x に属する粒子がカテゴリ y に属する粒子に衝突併合されることで, x の混合比が減少する割合 (y の混合比が増加する割合) は, 基本的には以下の式に基づいて考える.

$$CL_{xy} = \frac{1}{\rho} \int_0^\infty \int_0^\infty \sigma E_{xy} |U_x - U_y| m_x n_x n_y dD_x dD_y$$

ここで, σ は衝突断面積, m_x は直径 D_x を持つカテゴリ x の粒子の質量, E_{xy} は捕捉率である.

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 ($Stk \ll 1$) 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.

過冷却雨水と氷晶 (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. 捕獲された雨水は 1 時間ステップ内で完全に凍結すると仮定する.

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.

実際には, 乾燥成長と湿潤成長の差は剥離による混合比の変化 SH_{gr} として扱われるので, PG を場合分けする必要はない.

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.

6.4 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, 雨水へと変化する過程を表す. 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 を越えると変換が生じると考える. $\bar{E}_{cc} = 0.55, D_m = 20\mu\text{m}$ 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}) $\times$ 雪と同じサイズを持つ霰の質量」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.

6.5 融解

温度 T がある値 T_0 を越えると生じる固相粒子から液相粒子への変換である (村上 1999, 5.3.2.2 節 (5) 参照)

融解による雲氷から雲水への変換 (ML_{ic}) 雲氷はその熱容量を無視できるほど十分小さいと考え、 $T > T_0$ となった瞬間に融解すると考える。

融解による雪および霰から雲水への変換 (ML_{xc}) 周囲の大気からの熱拡散、凝結および蒸発の潜熱、水を捕獲した際に生じる顕熱の合計分だけ、融解が生じると考える。

6.6 凍結

温度 T がある値 T_0 を下回る生じる液相粒子から固相粒子への変換である (村上 1999, 5.3.2.2 節 (5) 参照)。

凍結による雨水から霰への変換 (FR_{rg}) Bigg (1953) の実験式に基づいて霰数濃度の変化率 FR_{rgN} を決め、それを用いて混合比の変化率 FR_{rg} を定式化する。

6.7 水剥離

雪および霰が他のカテゴリの粒子を衝突捕捉して成長する際に、その一部が融解して雨水を生成する過程。温度 T がある値 T_0 を越えた場合と、霰の湿潤成長が生ずる場合に発生すると考える (村上 1999, 5.3.2.2 節 (5) 参照)。

剥離による雪から雨水への変換 (SH_{sr}) $T > T_0$ の場合、捕捉成長によって形成された雪はすべて融解し、雨水になると考える。

剥離による霰から雨水への変換 (SH_{gr}) $T > T_0$ の場合と $T < T_0$ で湿潤成長が生じている場合とに場合分けする。 $T > T_0$ の場合は雪と霰との衝突捕捉成長 (CL_{sg}) 以外の霰の捕捉成長分を SH_{gr} とみなす。 $T < T_0$ で湿潤成長が生じている場合は、 PG_{dry} と PG_{wet} との差を SH_{gr} とみなす。

6.8 沈降

粒子の重力落下による混合比と数濃度の変化. 落下速度はそれぞれ質量の重みおよび数濃度の重みをつけた平均落下速度を用いる (村上 1999, 5.3.2.2 節 (7) 参照).

7 その他の注意事項

- 水と氷の混合物を扱う場合には, その混合比と数濃度を予報変数に追加する (村上 1999, 5.3.2.2 節 (5) 参照).
- 凝結物混合比の消失率が非常に大きく場合には, 消失率の大きさを適当に調整し 1 ステップで凝結物が消失しないようにする (村上 1999, 5.3.2.2 節 (8) 参照).
- 混合比と数濃度から計算される粒子の平均直径が, 仮定したカテゴリ粒子の直径と矛盾する場合がある. その場合には数濃度の値を調節してつじつまを合わせる (村上 1999, 5.3.2.2 節 (8) 参照).