

## 雲マイクロ物理と乱流

学籍番号: 23413529 氏名: 小崎 友裕

指導教員名: 後藤 俊幸 教授

## 1 はじめに

雲は地球温暖化や気候変動の問題を考える上で極めて重要な要素であり、かつ多くの謎に包まれている。雲中を航空機が通過する際に大きく揺れることから分かるように、雲中には乱流が存在し、これが雲粒子の衝突、合体、成長、降水の促進などと深く関わっている。しかし、その重要さにも関わらず雲の発生、成長、移動、降水、消滅などや乱流との相互作用の理解が十分ではない。本研究では、雲の成長過程における乱流混合と雲粒子の相互作用をはじめとする雲マイクロ物理過程の解明にむけて、直接数値計算 (DNS) を行い、雲中に存在する雲粒子の挙動と、雲粒子が乱流に及ぼす影響について解析する。

## 2 基礎方程式と計算条件

本計算では地表温度  $11^{\circ}\text{C}$ 、高度  $1500\text{m}$  に存在する雲を想定し、温度、水蒸気混合比、浮力などの基本的な物理過程を考慮して数値解析を行う。時間経過後に雲粒子の蒸発がとまる条件のもと、雲中の一辺  $25.6\text{cm}$  の立方体に半径  $20\mu\text{m}$  の雲粒子をおよそ 200 万個、減衰乱流中に注入した場合を想定し、以下の方程式を考える。乱流場、スカラー場は Euler 的に、粒子は Lagrange 的に方程式を解いていく。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} + B \mathbf{e}_z \quad (1)$$

$$B \equiv g \left( \frac{T - T_0}{T_0} + \varepsilon (q_v - q_0) - q_l \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T = k_t \nabla^2 T + \frac{L_v}{C_p} C_d \quad (3)$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla q_v = k_v \nabla^2 q_v - C_d \quad (4)$$

$$\frac{d\mathbf{x}_j}{dt} = \mathbf{v}_j \quad (5)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_j}{dt} = \frac{1}{\tau_p} (\mathbf{u}(\mathbf{X}_j, t) - \mathbf{v}_j - \tau_p g \mathbf{e}) \quad (6)$$

(1)式の右辺第四項はブジネスク近似によって取り入れた浮力項、(2)式の右辺第三項は、雲粒子の相変化による作用を示す項である。(5)と(6)式は  $j$  番目の雲粒子に関する方程式であり、物理過程として重力、ストークス抵抗を考慮する。 $\tau_p$  は緩和時間と呼ばれ、粒子の速度が流れ場の速度に緩和するまでの時間を示す。格子点座標を使って粒子位置における物理量を補間する際には、Taylor Series 13 (TS13) スキームを用いた。連続体方程式における空間微分にはフーリエスペクトル法を、時間積分には連続体部分、粒子部分ともに Runge-Kutta-Gill 法を用い、3 軸方向に周期境界条件を課して計算を実行した。

## 3 計算結果

図1に雲粒子の分布を示す。初期に雲粒子を一定の帯状領域に分布させてから1秒後には空間全体に広がっており、乱流により粒子が急速に混合されていることがわかる。また、粒子は下方に分布を広げていることから、重力の影響が及んでいることが確認できる。次に、図2に雲粒子半径の確率密度関数

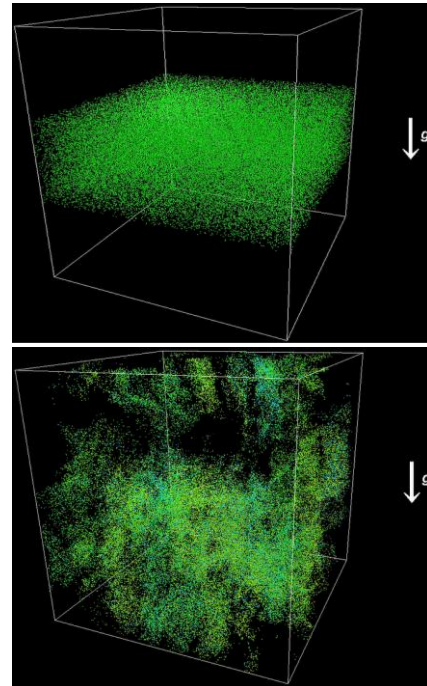


図 1: 雲粒子の分布 (上: 初期状態, 下: 1 秒後)

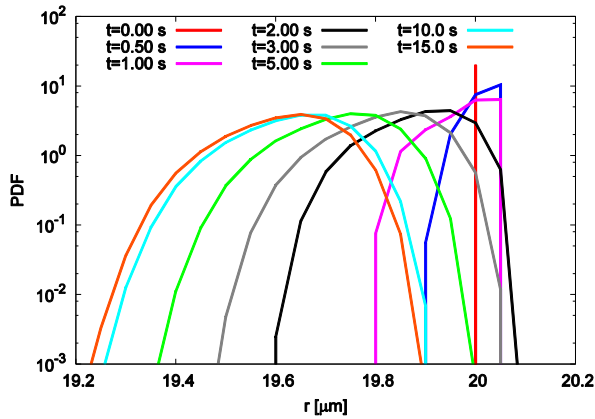


図 2: 粒子半径の PDF の時間推移

(PDF)の時間推移を示す。図から、半径は減少傾向にあり、時間経過に伴いPDFの裾野は大きく広がっていることがわかる。これは水蒸気混合比が様に混合された場合に未飽和となるよう初期設定したこと、雲粒子が未飽和空気、過飽和空気と何度も触れ合うことによる。また、時間経過に伴い半径の減少傾向が弱まっていることがわかる。これは雲粒子の蒸発により水蒸気を放出し、未飽和であった空気が飽和状態に近づくことによる。やがて平衡点に達し、蒸発しなくなることで半径の変化は起こらなくなる。次に、図3にx, y方向とz方向のエンストロフィ $\Omega$  ( $=\omega_i^2$ )の時間推移を示す。図を見ると、時間経過後において $\Omega_x$ と $\Omega_y$ の値が大きくなることわかる。これは粒子を加えることで浮力が生じ、浮力が乱流場のz方向成分に対して力を加えるため、 $u_z$ が非等方的に振る舞うことにより $\langle u_z \rangle$ の値が増加したためである。次に、浮力を加えた時(赤線)と加えていない時(青線)での乱流エネルギースペクトルを比較したものを図4に示す。図を見ると、浮力を加えることによりエネルギーの減衰が(特に高波数側において)

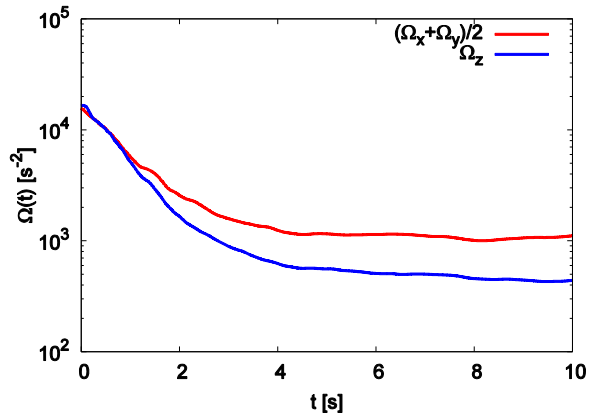


図 3: x, y と z 方向のエンストロフィ $\Omega$ の時間推移

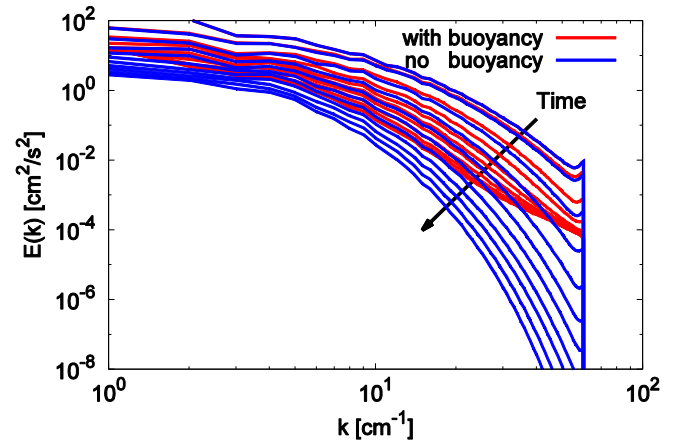


図4: 浮力を加えた場合と加えない場合での乱流エネルギースペクトルの比較  
遅くなっていることがわかる。浮力 $B$ は格子点周りに存在する雲粒子の影響を大きく受けるので、微小な粒子による雲粒子の運動や温度変化が小スケールの統計性質に影響を及ぼしたと考えられる。

#### 4 まとめ

本研究では、数値計算により雲中に存在する雲粒子の挙動と、雲粒子が乱流に及ぼす影響について解析した。設定された雲粒子は乱流によって混合され、周りの空気の状態に応じて状態変化し周りの温度と水蒸気を変化させた。雲粒子半径のPDFの形状は時間経過に伴い広がる様子が見られたが、やがて平衡点に達することにより粒子半径の変化は起こらなくなった。また、主に空気中に存在する水分量の影響により浮力が発生し、その影響により高波数側から非等方な力が加わり乱流にエネルギーが注入されるというこれまでの研究とは異なる外力メカニズムが存在することがわかった。今後は粒子同士の衝突を考慮するとともにRe数と粒子数を増加させ、より正確に雲の生成過程を再現し解析を進める予定である。

#### 5 参考文献

- [1] M. Andrejczuk, W. W. Grabowski, P. K. Smolarkiewicz, " Numerical Simulation of Cloud-Clear Air Interfacial Mixing", J. Atmos. Sci. vol63, pp1451-1466(2002).
- [2] E. W. Saw, J. P. L. C. Salazar, L. R. Collins and R. A. Shaw, " Spatial clusterin of polydisperse inertial particles in turbulence: I. Comparing Simulation with theory", New J. Phys, vol14, pp105030 (2012).