

# 雲マイクロ物理解明のための大規模数値計算手法の基盤技術開発

研究代表者 名工大大学院 後藤 俊幸

雲の成長の初期過程を解明するために必要な、乱流輸送と基本的な物理プロセスをとりこんだ大規模シミュレーションコードを作り上げるのに必要な基礎技術を、計算機科学の最新の知見を取り込みながら開発することを目的として、微視的な視点から解明するための直接シミュレーションコードのプロトタイプの開発を行った。開発は大きく分けて2つの方向からなされた。その第1は、乱流と雲粒子との相互作用を解析するためのプログラムのプロトタイプを開発することであり、第2は乱流により輸送される温度や水蒸気混合比などのスカラー場の高速高精度計算手法を確立することである。

まず、第1の部分。ブシネスク近似による Navier-Stokes 方程式、連続の方程式、温度と水蒸気場の方程式を、周期境界条件のもとでスペクトル法を用いて解いた。乱流場には雲粒子であるマイクロメートル

サイズの水滴の蒸発と凝結にともなう潜熱の出入りによる浮力と外力が加わる。また、温度場と水蒸気場には潜熱の出入りに伴う付加項が現れる。雲粒子は、流れ場とその粒子の速度差に比例するストークスの抵抗と重力が働き、その半径は粒子近傍の過飽和度に応じて成長（凝結）または縮小（蒸発）する。粒子位置での流体速度は2次補間で計算され、粒子半径の変化に伴う潜熱は、粒子位置より周辺の流体格子点上に線形的重みづけで配分される（PIC）。連続体部分以外の最適化は今後の課題である。

1辺が25.6cmの立方体中で定常乱流状態を実現し、ある時刻( $t=0$ にとる)において雲粒子(半径10ミクロン)を領域の鉛直方向中心部分に水平方向に広がる薄い層内にランダムに分布させた。外力を取り去り、乱流が減衰していく時の乱流運動エネルギー、水蒸気混合比、温度ゆらぎなどの時間発展を解析した。図1は乱流エネルギーについて、浮力項がない乱流場との比較を示したものである。雲粒子の蒸発により浮力項を通して乱流に運動エネルギーが注入され乱流の減衰が抑えられることが見て取れる。これに対応して、乱流運動エネルギースペクトルでは、全波数で減衰が緩やかになり、特に高波数側ではこれが顕著になっている。図2と図3は0.6秒での水蒸気混合比、雲粒子の空間分布と半径分布(色)をそれぞれ示したものである。

第2の部分。昨年度に引き続いて、スカラー場には結合コンパクト差分を、乱流場にはスペクトル法を用いるハイブリッド法を開発をさらに進めた。スカラー場の勾配の確率密度関数やスカラー場構造について、スペクトル法と比較して空間精度を詳しく解析した。その結果、スペクトル法と同等の空間精度を持ち、計算速度はシュミット数( $Sc$ )が1の時には約25%、 $Sc$ が50以上の時には速度場を低解像度にするにより約4倍の高速化が図られた。

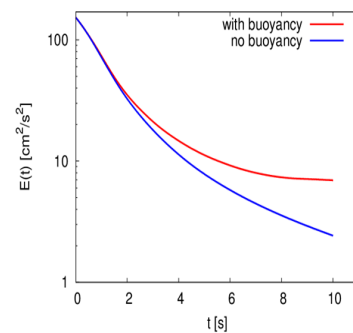


図 1: 乱流運動エネルギーの時間変化。赤：浮力効果あり、青：浮力効果なし

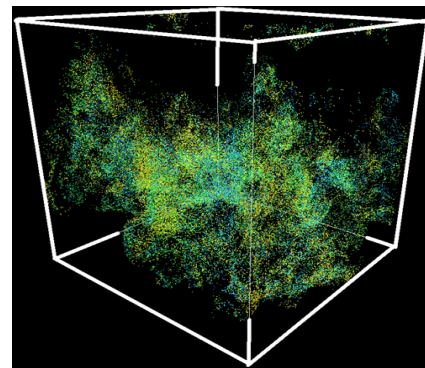


図 2: 初期 0.6 秒での雲粒子分布。赤から青になるしたがって雲粒子半径は小さくなる。

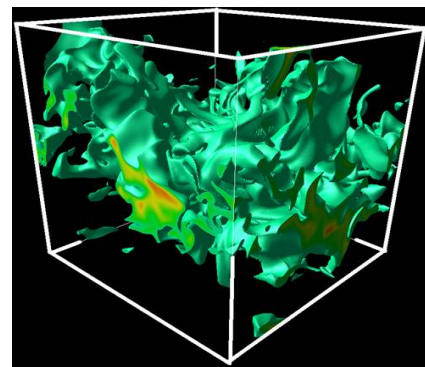


図 3: 初期 0.6 秒での水蒸気混合比の分布。過飽和部分を可視化