

12-NA01

研究代表者氏名(所属) 後藤俊幸(名古屋工業大学)

研究課題名

雲マイクロ物理過程と乱流混合との相互作用の計算科学的解明



雲マイクロ物理

雲内部および雲の境目における雲粒子の生成、乱流による乾燥・湿潤空気の混合、雲粒子の混合、消滅、衝突・合併の動力学、統計などを対象とする

研究目的

雲粒子はどのようにして生成され、成長し、輸送・混合され雨粒になるか？

- ・雲粒子と乱流による水蒸気や温度の混合・輸送との相互作用におけるミクロからセミマクロまでのプロセスを物理の基本原則にのっとり丸ごとシミュレーションできるプログラムを開発
- ・雲粒子形成のきっかけ、凝結成長、乱流による雲粒子と水蒸気の不均一な空間分布の形成、凝結と衝突による粒径分布の変化、乱流強度へのフィードバックなどを調べて、雨粒形成までのプロセスを解明する

研究計画

- ・雲粒子乱流輸送コード(スペクトル法)を用いて高解像度(1024³)、高レイノルズ数($R_\lambda=400$)、雲粒子数($N=10^8$)で計算し、雲粒子空間分布、雲粒径分布、乱流強度へのフィードバックを計算する
- ・雲粒子部分の高効率化をさらに進める
- ・結合コンパクト差分ハイブリッドコードによる乱流輸送コードに雲粒子コードを移植し、さらなる計算の効率化を図る

系の特徴

高レイノルズ数乱流

高い輸送・混合能力 運動量、スカラー(温度場、水蒸気混合)
 強い間欠性(エネルギー散逸、スカラー散逸の時空間的局在、界面)
 雲粒子の輸送、乾燥空気と湿潤空気の混合(空間的に非一様)
 Kolmogorov 長さ(最小の乱流渦の直径) ~ 1mm

雲粒子

凝結核(エアロゾル)+水分子集団
 凝結(蒸発)による成長(消滅)+熱収支
 衝突・合体による成長
 粒径分布 $1\mu m \sim 100\mu m \ll 1mm \sim \eta$ Kolmogorov 長さ
 粒子密度 $n \sim 1/\eta^3$ 雲粒子数 $N \sim 10^{10}$

方程式

乱流場 (オイラー的)

Boussinesq 近似

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\nabla \pi + \nu \nabla^2 \theta + e_z B + f, \quad \nabla \cdot u = 0$$

浮力 外力

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T = \kappa \nabla^2 T + \frac{L}{c_p} C_d$$

凝結、蒸発

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} + u \cdot \nabla q_v = \kappa \nabla^2 q_v - C_d$$

$$B = g \left(\frac{T - T_0}{T_0} + \epsilon(q_v - q_{v0}) - q_c \right)$$

雲粒子 (ラグランジュ的)

$$\frac{dX_j}{dt} = V_j(t)$$

$$\frac{dV_j}{dt} = \frac{1}{\tau_j(t)} (u(X_j(t), t) - V_j(t)) + ge_3 \quad \text{ストークス近似}$$

$$R_j(t) \frac{dR_j(t)}{dt} = KS(X_j(t), t) \quad \text{雲粒子の成長、変化}$$

$$C_d(x, t) \equiv \frac{1}{m_{air}} \frac{dm_l(x, t)}{dt} = \frac{4\pi r_l D}{\rho_0 a^3} \sum_{k=1}^{N_\Delta} R(X_j, t) S(X_j(t), t) \quad \text{凝結率}$$

R_j = 雲粒半径, S = 過飽和度, K = const.

計算スキーム

スペクトルコード+雲粒子動力学コード

乱流場(非圧縮流体) スペクトル法(乱流計算に特化)
 雲粒子 粒子追跡+PIC法
 FX1における効率 約14%

ハイブリッドコード+雲粒子動力学コード

非圧縮速度場 スペクトル法(乱流計算に特化)
 スカラー場 結合コンパクト差分スキーム
 雲粒子 粒子追跡+PIC法

水分子MDコード

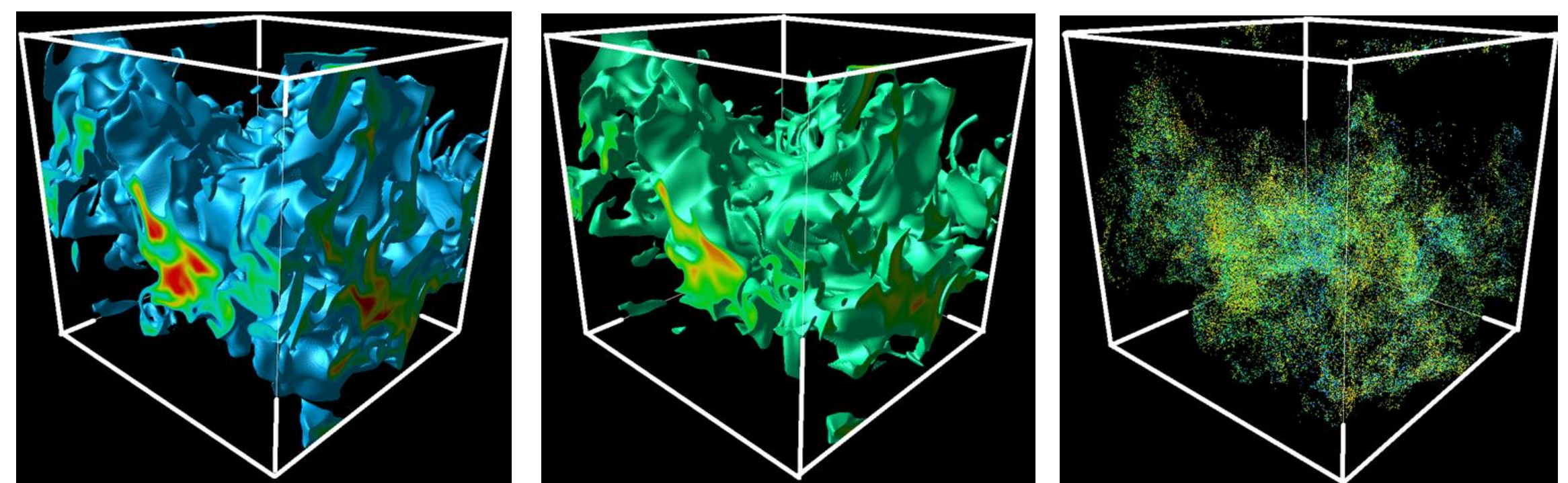
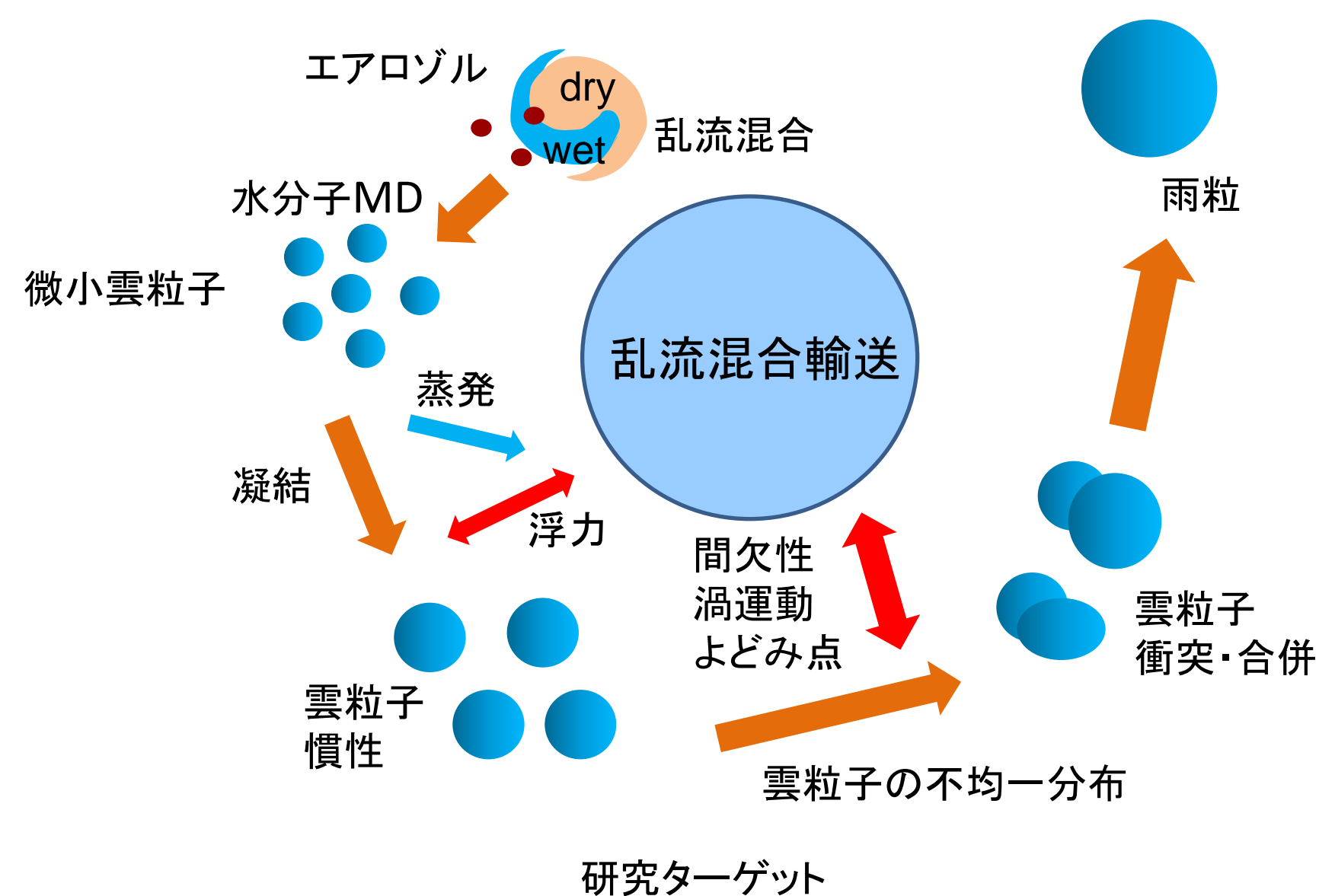
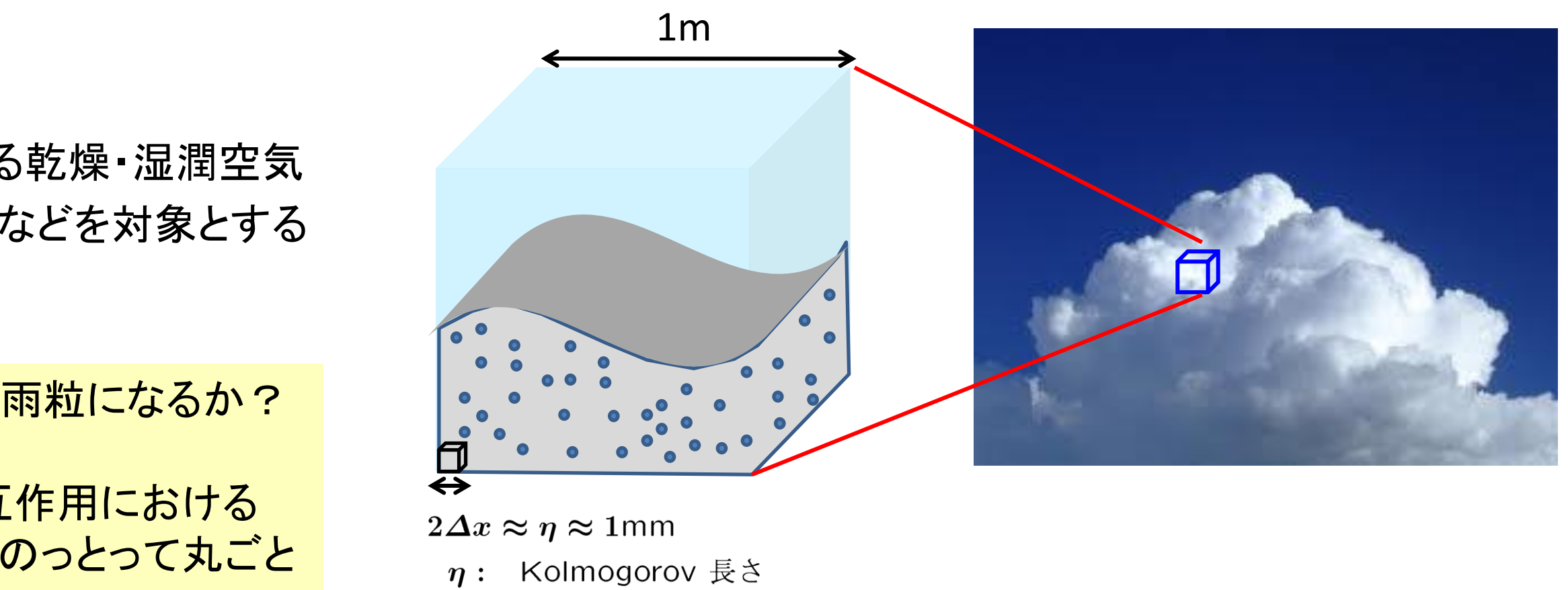
角運動量時間反転対称性保存型ベルレ法
 水分子ポテンシャル TIP4P

計算機資源

乱流場: 長さスケール比 1m/0.5mm 格子点数 2048³
 時間スケール比 60sec/10msec 60000 ステップ
 雲粒子: 特性長さ 1 μ m ~ 100 μ m、特性時間 1m sec
 粒子数 10⁹
 水分子MD: 粒子数 10⁷
 計算機: Fujitsu FX1, 1024 cores (256nodes)

連携研究者

雲マイクロ物理モデル
 Schumacher, J. Ilemnau, Germany
 Miura, H. NIFS, Japan
 乱流混合大規模計算
 Yeung, P.K., Georgia Inst. Tech, USA.



スペクトル+雲粒子動力学コードにより計算された減衰乱流中の温度、水蒸気混合比、雲粒子の空間分布
 t=0.6 secでの温度ゆらぎ($T>0$, 左図), 水蒸気混合比(過飽和領域, 中図), 雲粒子分布(右図).
 雲粒子半径は赤から青になるにしたがって減少する. 格子点数 256³, 雲粒子数 2¹⁸