

11-NA19

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

雲マイクロ物理解明のための計算科学的基盤構築



雲マイクロ物理

雲: 水蒸気、雲粒、水滴、氷などからなる

対象

層積雲(Stratocumulus) 内部および雲の境目における
乾燥空気、湿潤空気の乱流混合、雲粒子の生成、消滅、動力学、統計

研究目的

乱流と雲粒子の相互作用解明に向けて高精度、高速な
大規模計算シミュレーションコードを開発

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
高解像度の乱流場のシミュレーションが必要

方程式と計算スキーム

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

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

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

凝結、蒸発

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

ハイブリッドコード

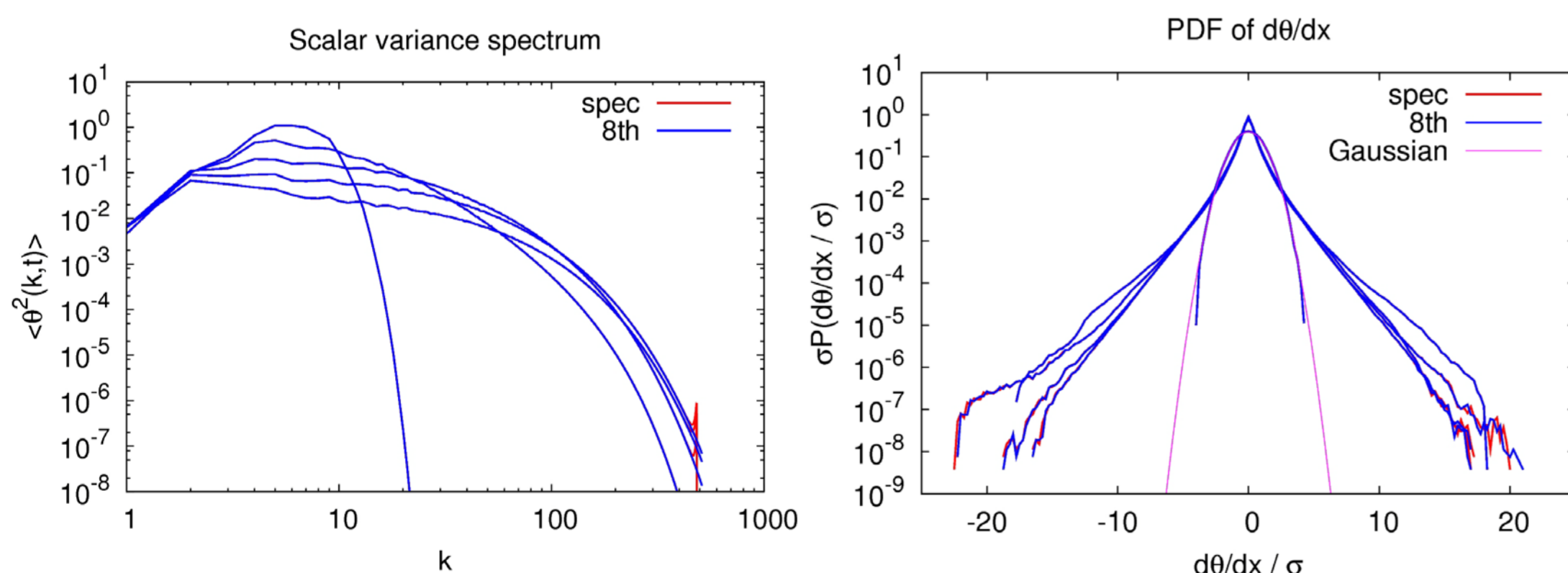
非圧縮速度場

スペクトル法(乱流計算に特化)
ポアソン方程式

スカラー場

結合コンパクトスキーム
実空間でのモデル化

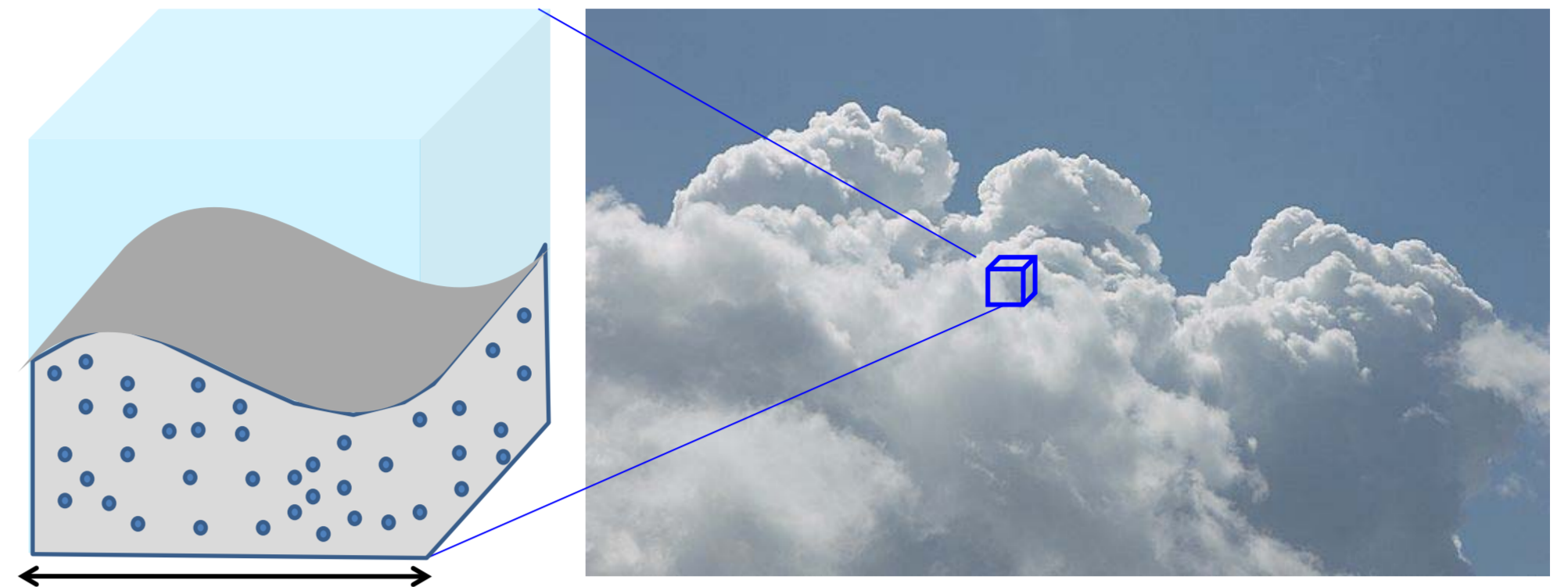
2次元分割による3次元FFTとハイブリッドコードの比較



スペクトル法と同等の精度

計算時間は約30%短縮

	$N_{velocity}$	N_{Scalar}	ν	Sc	計算時間(1step)
Run1(Full Spec)	1024	1024	8.0×10^{-4}	1	8.1(s)
Run2(Hybrid)	1024	1024	8.0×10^{-4}	1	5.7(s) ↓ 29%減
Run3(Full Spec)	1024	1024	8.0×10^{-3}	50	8.1(s)
Run4(Hybrid)	256	1024	8.0×10^{-3}	50	1.4(s) ↓ 83%減



1m
 $2\Delta x \approx \eta \approx 1\text{mm}$
 η : Kolmogorov 長さ
層積雲(Stratocumulus)

雲粒子

生成(凝結)と消滅(蒸発)、熱収支(衝突、合体)
粒径分布 $1\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m} \ll$ Kolmogorov長さ
空間分布 粒子密度 雲粒子数
衝突確率分布 $n \approx 1\text{個}/\eta^3$ $N \approx 10^{10}\text{個}/\text{m}^3$

雲粒子 (ラグランジュ的)

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

格子点から粒子位置における場の補間(2次補間)
粒子位置から格子点への粒子特性量の分配(CIP)

$$\frac{dV_j}{dt} = \frac{1}{\tau_j(t)} (u(X_j(t), t) - V_j(t)) + ge_3$$

ストークス近似

$$R_j(t) \frac{dR_j(t)}{dt} = KS(X_j(t), t)$$

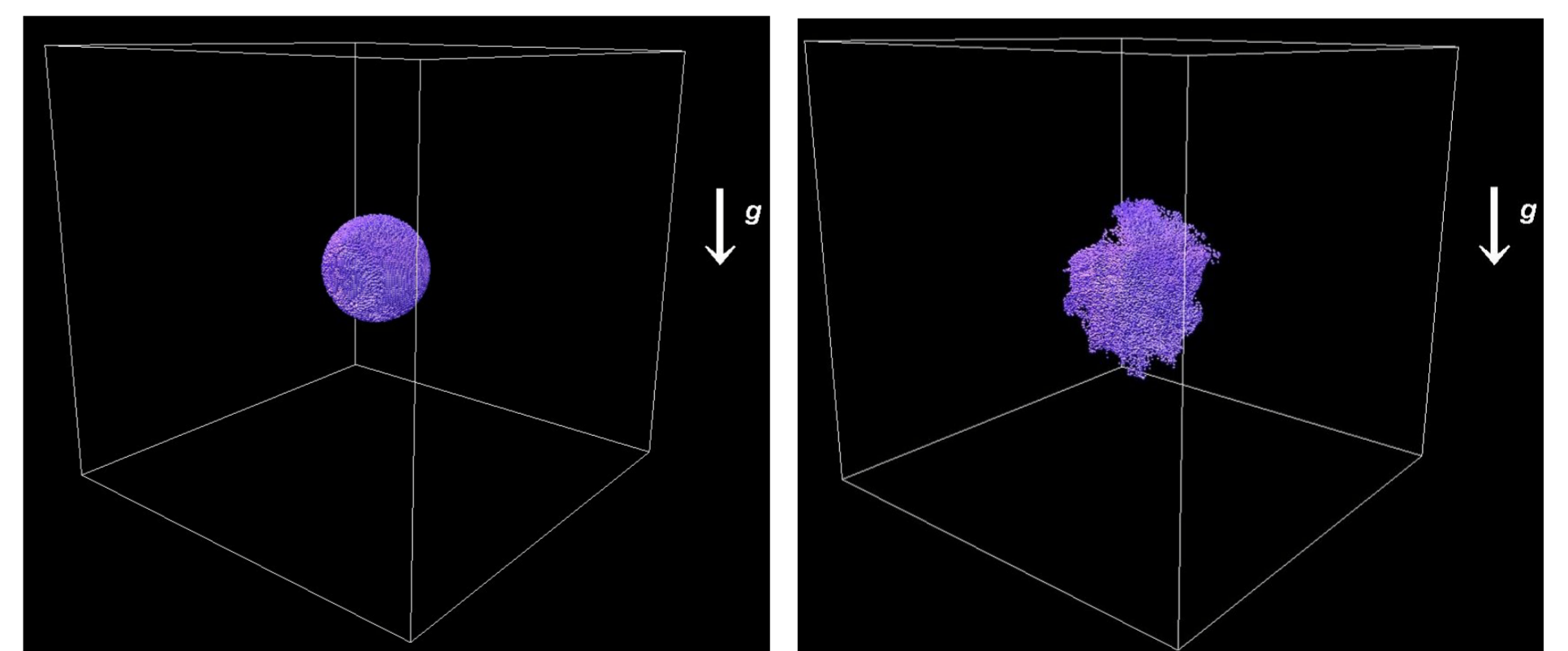
雲粒子の成長、変化

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

凝結率

R_j = 雲粒半径, S = 過飽和度, K = const.

粒子追跡 $\tau_p=0$



減衰乱流中を沈降する粒子分布
MPI プロセス数 $N_{px} \times N_{pz} = 2 \times 16$
乱流場 $N = 256^3$
粒子数 $N_p = 2.5 \times 10^5$
 $R_\lambda = 32$
+
粒子半径変化
蒸発・凝結による熱収支
浮力への寄与