

# マルチプラットフォーム・マルチスケール混相乱流計算による非線形雲微物理の解明

課題代表者: 大西領<sup>1)</sup>

共同研究者: Yin YUWEI<sup>2)</sup>、富永健斗<sup>3)</sup>、岩島昌也<sup>3)</sup>、高瀬卓也<sup>2)</sup>、常盤匠<sup>2)</sup>、Pranith AYAPILLA<sup>4)</sup>

1) 東京科学大学 総合研究院スーパーコンピューティング研究センター／情報基盤センター

2) 東京科学大学 工学院機械系・機械コース

3) 東京科学大学 工学院機械系・超スマート社会卓越コース

4) 東京科学大学 総合研究院スーパーコンピューティング研究センター

## 背景:

線状降水帯に代表される豪雨現象の頻発・激甚化により、社会的・経済的被害が深刻化している。豪雨予測の高精度化に向けて、数値予報モデルの時空間解像度を高めるだけでなく、雲微物理過程を含む物理モデルそのものの高度化が不可欠である。特に、空間解像度が数十～数百メートル級に達する高解像度気象シミュレーションでは、従来は暗黙的に (implicitly) 扱われてきた乱流構造を陽的に (explicitly) 解像・表現することが求められる。しかし、乱流と雲粒子の相互作用を考慮した直接シミュレーションは極めて計算コストが高く、また、従来の直接計算コードは最新のGPUアーキテクチャを十分に活用できていない。計算性能および拡張性の観点から、**抜本的なソフトウェア基盤の更新**が求められている。



図1: 局所豪雨の深刻な被害は大きな社会課題

## 目的:

CPUとGPUを活用した大規模マルチプラットフォーム計算により、(a) 豪雨予測に資する雲物理モデリングのソフトウェア基盤を再構築するとともに、(b) 雲形成から降水に至る非線形・混相乱流過程を解明およびモデル化する。

## 中間成果(1):

- ✓ Fortran90で記述されていたLCS(右を参照)をJulia言語化し、LCS.jlを開発した。
  - 2,048<sup>3</sup>流体格子および10億個の慣性粒子計算より、既往研究と同等の混相乱流統計量を得た(=高い信頼性を確認できた)
- ✓ CPU計算において、LCS.jlはLCS(Fortran90)と同程度の高い計算性能を有する。
- ✓ LCS.jlは、64ノード(256GPU)までの並列計算において良好な強スケーリング性および弱スケーリング性を有する。
- ✓ LCS.jlは、CPUとGPUのヘテロジニアスな利用環境においても高い性能を有する。

## 中間成果(2):

- ✓ 鉛直方向に長い準1次元計算領域(図3)を用い、雲凝結核活性化、凝縮成長、衝突成長、落下という暖かい雨の全雲微物理過程を考慮した降雨計算を行った。乱流を考慮する計算としない計算を実施し、乱流が降雨過程に与える影響を明らかにした。

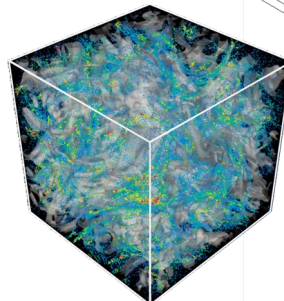


図2: 3次元等方性乱流場中に偏在する微小慣性粒子 (Box計算)

## Lagrangian Cloud Simulator (LCS)の支配方程式

### • 流体の支配方程式

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{U} = 0 \quad \text{and}$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{F}(\mathbf{x}, t)$$

### • スカラーφ(水蒸気)の輸送方程式

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \right\} \phi = \kappa \nabla^2 \phi + S_\phi$$

### • 粒子運動の支配方程式

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{f}{\tau_p} \{ \mathbf{V} - [\mathbf{V}(\mathbf{x}, t) + \mathbf{u}(\mathbf{x}, t)] \} + \mathbf{F}_{\text{impulse}} + \mathbf{g}$$

### • 粒子成長の支配方程式

$$\frac{dm_{p,i}}{dt} = \left( \frac{dm_{p,i}}{dt} \right)_{\text{act}} + \left( \frac{dm_{p,i}}{dt} \right)_{\text{cond}} + \left( \frac{dm_{p,i}}{dt} \right)_{\text{coll}}$$

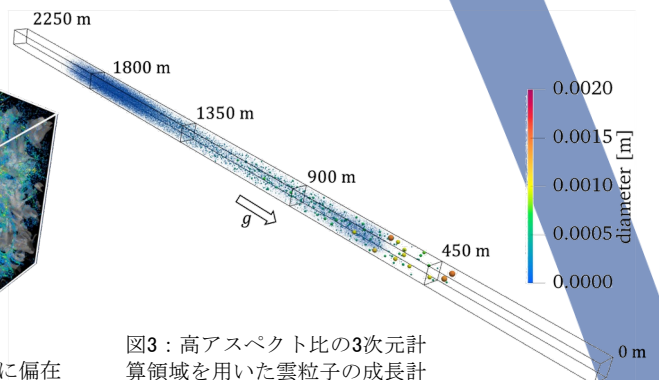


図3: 高アスペクト比の3次元計算領域を用いた雲粒子の成長計算 (そうめんどメイン計算)

## 発表成果:

### 査読付き論文

- M. Iwashima and R. Onishi, "Direct Lagrangian tracking simulation of droplet growth in vertically-developing turbulent cloud", Atmos. Chem. Phys. Disc. (under review)
- T. Tominaga and R. Onishi, "LCS.jl v1.0: A High-Performance, Multi-Platform Computational Model in Julia for Turbulent Particle-Laden Flows", Geoscientific Model Development Discussion (under review)
- T. Tominaga and R. Onishi, "Finite-Time Relaxation of Inertial Particle Clustering in Non-Equilibrium Turbulence", under review

### 国際会議

- M. Iwashima and R. Onishi, "Lagrangian tracking simulation of precipitation particles in vertically developing turbulent cloud", JpGU-AGU Joint Meeting 2026, Chiba, Japan, 5/24-29, 2026.
- M. Iwashima and R. Onishi, "Direct Lagrangian Simulation of Droplet Growth in a Vertically Developing Turbulent Cloud", TSFP14, Heidelberg, Germany, 7/28-31, 2026.
- T. Tominaga and R. Onishi, "Numerical Simulations of Inertial Particle Clustering in Non-Equilibrium Turbulent Flows", TSFP14, Heidelberg, Germany, 7/28-31, 2026.

### 国内会議

- 富永, 大西, 非平衡乱流中の慣性粒子クラスタリングの有限時間緩和, 日本流体力学会年会2026, 信州大学, 9/24-9/26, 2026.
- 富永, 大西, Julia 言語によるマルチプラットフォーム対応分散混相流ソルバ LCS.jl の開発, 2026/06/17, 東京理科大学(招待講演)