

超水滴法を用いた雲の高解像度計算における計算的課題の克服

松嶋俊樹

CPS セミナー 11/7

神戸大 CPS

出身研究室: 京都大学理学研究科地球惑星科学専攻 気象学研究室
学位論文「大気中の微細渦の力学に関する数値的研究」

- 竜巻の様な渦の安定性解析
- 数値計算法開発
- 竜巻を模した渦の理想実験

理研

- 超水滴法による雲の精緻な計算

神戸大 CPS

- **超水滴法による雲の精緻な計算** (Matsushima et al., 2023)
- 林先生の「あかつきデータ同化」基盤 S プロジェクト関係者と共同で、あかつきによる観測で得られた放射輝度の直接データ同化に向けて、金星大気の雲・化学・放射結合 GCM 開発を進行中



雲と乱流

超水滴法

雲微物理量の推定精度の向上

計算性能評価

将来課題

雲と乱流

雲は大量の水滴 (および氷粒子) の集団で, それらは複雑な乱流の流れと広い範囲の時空間スケールと相互作用する。

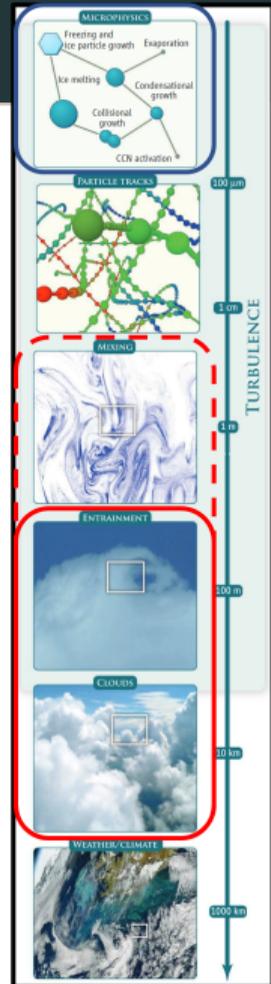
乱流は, エントレインメント (雲内への乾燥大気の流れ) や雲内での混合を駆動し, それによって温度, 湿度, 凝結核 (エアロゾル) の変動をもたらす。

それは, 雲粒の活性化, 凝結成長, 乱流による衝突併合の促進や水滴の分裂に影響を与え, 浮力や摩擦を通してより大きなスケールへと影響を与える。

特に, 雲微物理と乱流混合には二つのレジームがあり, その違いが降水へ影響を与え, さらには放射を介して気候スケールに影響が及ぶこともあり得る。

- ・ 大スケール: 雲と大気境界面で不連続かつ不均質的に混合する
- ・ 小スケール: 雲と大気でスムーズかつ均質的に混合する。

Bodenshatz et al., 2010: Can We Understand Clouds Without Turbulence?



雲の形成自体も非常に小さなスケールの乱流が重要なことがある (Stevens et al., 2020)

層積雲の雲頂エントレインメントゾーンでの乱流 ~1m

- Mellado et al. 2018: 直接数値実験 (DNS, ただしレイノルズ数を変更) とラージエディシミュレーション (LES) の組み合わせにより, 関連するプロセスの理解を早めることができると提案
- Schulz and Mellado 2019: 雲頂エントレインメントに乱流と雲粒の沈降がどちらも同程度に重要
- Akinlabi et al. 2019: 乱流運動エネルギーの推定

一方で, 彼らの研究では, 雲は飽和調節によって計算されている. 雲と乱流の重要な相互作用過程は表現することはできていない.

より詳細な雲微物理過程を用いることはできないのか?

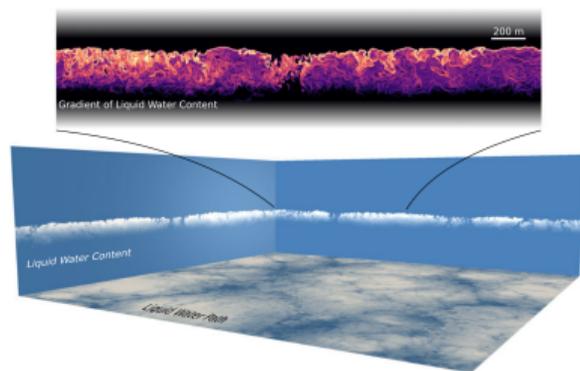


Figure 1. Composite of two vertical cross sections of liquid water content, a zoomed region on top with the gradient magnitude, and a bottom horizontal plane showing the liquid water path. Data corresponds to the direct numerical simulation case $h_0 = 0.7$ m at $t \approx 4.0$ hr (see Table 1).

Mellado et al., 2018: DNS and LES for Simulating Stratocumulus: Better Together

雲と乱流

超水滴法

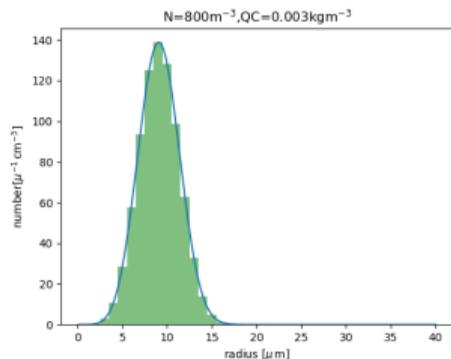
雲微物理量の推定精度の向上

計算性能評価

将来課題

雲微物理スキーム (バルク法・ビン法)

バルク法とビン法



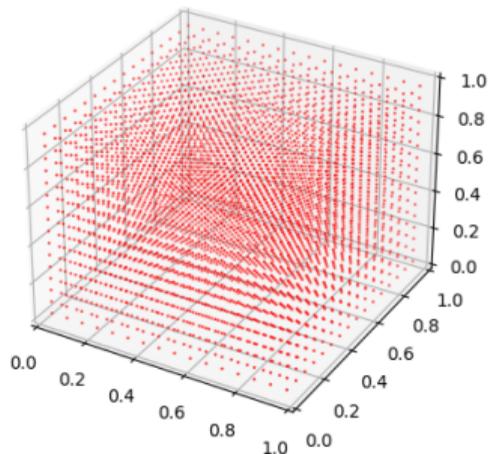
雲微物理過程 (水雲の場合): 凝結成長 (+活性化), 衝突併合, 沈降

• バルク法

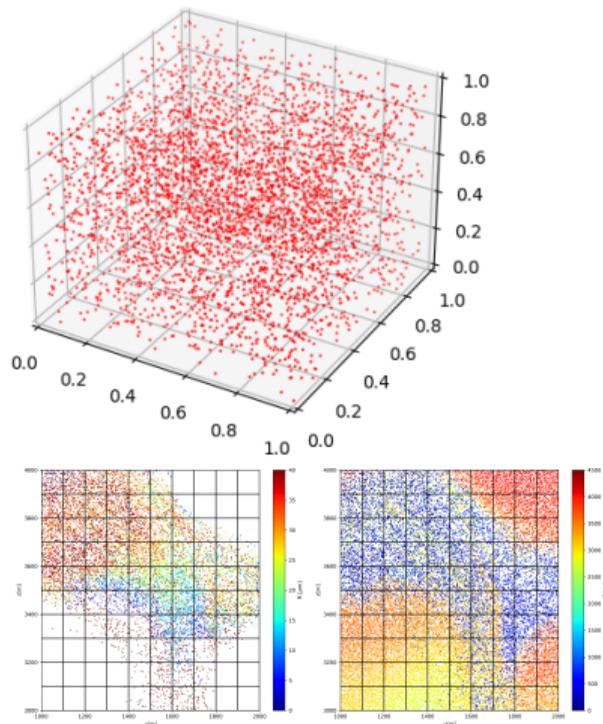
- 粒径分布の関数形をカテゴリ毎 (例: 雲, 雨) に仮定.
- 分布のパラメーターと同数 (1 個から 3 個程度) の分布モーメントをトレーサー変数として解く.

• ビン法

- 粒径分布をビンで区切って表現する.
- 別の状態 (例えば溶解する凝結核の量) との同時分布を考えた場合 → 多次元ビン法.



超水滴法



• 超水滴法 (super-droplet method, SDM) : Shima et al. (2009)

- 雲内の水滴から, 代表的な水滴 (超水滴) をサンプリング. 水滴の属性 (半径, 凝結核の質量, ...) が多いほど, ビン法に比べて効率的になる.
- 各超水滴は, 第一原理的な支配方程式により時間発展を解く
- 粒子間相互作用はモンテカルロ法を応用
 - 多体ではなく二体衝突の組み合わせのみ考える (計算量は $O(N)$ に). 衝突回数にバイアスが入らないように衝突確率を調整.
- 数値粘性の影響を受けない (凝結成長の計算に有利)
- 衝突併合をより自然に近い確率的なプロセスとして扱える
 - ビン法で衝突併合を扱う際に用いる Smoluchowski 方程式は決定論的な方程式で, 水滴の確率的成長過程を扱えない.
 - 確率的衝突過程では, より速く雨粒へと成長するものがあり得る.

SDM の基礎方程式

粒子の時間発展: (\mathbf{X}, R, ξ, M)

粒子移流:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{u}(\mathbf{X}, t) - v_{\infty}(R, \rho, T, p)$$

活性化・凝結成長 (Köhler 理論):

$$\frac{dR^2}{dt} = 2A \left[S - 1 - \frac{a(T)}{R} + \frac{b(M)}{R^3} \right]$$

\mathbf{X} : 水滴の位置, R : 水滴の半径, ξ : 多重度, M : 溶解する凝結核 (エアロゾル) の質量, v_{∞} : 終端速度, S , 過飽和度

衝突併合: Shima et al., 2009 によるモンテカルロ法的な衝突併合アルゴリズム.

格子内にある粒子で衝突併合の候補のうち, 二体衝突のみを考慮するが, 衝突回数の期待値は多体衝突する場合に一致するように修正する.

大気場の時間発展

セル内の粒子とセル平均の大気場で相互作用を計算する (質量, 運動量, 熱).

SDM の基礎方程式 (乱流モデル)

SGS 速度・過飽和度ゆらぎモデルは今回の数値実験では使わない

- 大気場の LES と同様に様々な仮定からなっている (e.g. 等方一様性, ガウス性)
- 導入すべき変数が多い (4 変数)
 - 導入にかかるデータ量・計算量増大に比した物理的観点での利点が (高解像度実験で) あるかはよく分からない。

より高解像度な計算をすることで, 自然に近い雲の振る舞いの一端にでも到達できる可能性を上げたい (ただし重要ではないとは考えていないので今後の課題).

Orstein-Uhlenbeck 過程に対応する確率微分方程式 (ランジュバン方程式)

$$dw' = -\frac{w'}{\tau_t} dt + \sqrt{\frac{2\sigma_{w'}^2}{\tau_t}} dW$$

過飽和度ゆらぎモデル: Grabowski and Abade (2017), Abade et al. (2018)

$$\frac{dS'}{dt} = -\left(\frac{1}{\tau_c} + \frac{1}{\tau_t}\right) S' + a w'(t),$$
$$a = \frac{L_v g}{R_v T^2 c_p} - \frac{g}{RT}$$

ここで, τ_t は渦回転時間スケール, τ_c は相変化の時間スケール (雲水数密度と平均半径に依存). 両者の比で定義される無次元数 (Damköhler 数: τ_t/τ_c) が乱流と雲微物理の相互作用の特徴的パラメーターになる.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = S_v,$$

$$\frac{\partial \rho q_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho q_v \mathbf{u}) = S_v + \mathcal{D}q_v,$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p - (\rho + \rho_w) \mathbf{g} \mathbf{e}_z + \mathcal{D}\mathbf{u},$$

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \theta \mathbf{u}) = \frac{1}{c_p^*} \left(\frac{p}{p_{00}} \right)^{\frac{R^*}{c_p^*}} Q + \mathcal{D}\theta,$$

$$p = p_{00} \left(\frac{\rho \theta R^*}{p_{00}} \right)^{\frac{c_p^*}{c_p^* - R^*}}.$$

$$\theta \equiv T \left(\frac{p_{00}}{p} \right)^{\frac{R^*}{c_p^*}}.$$

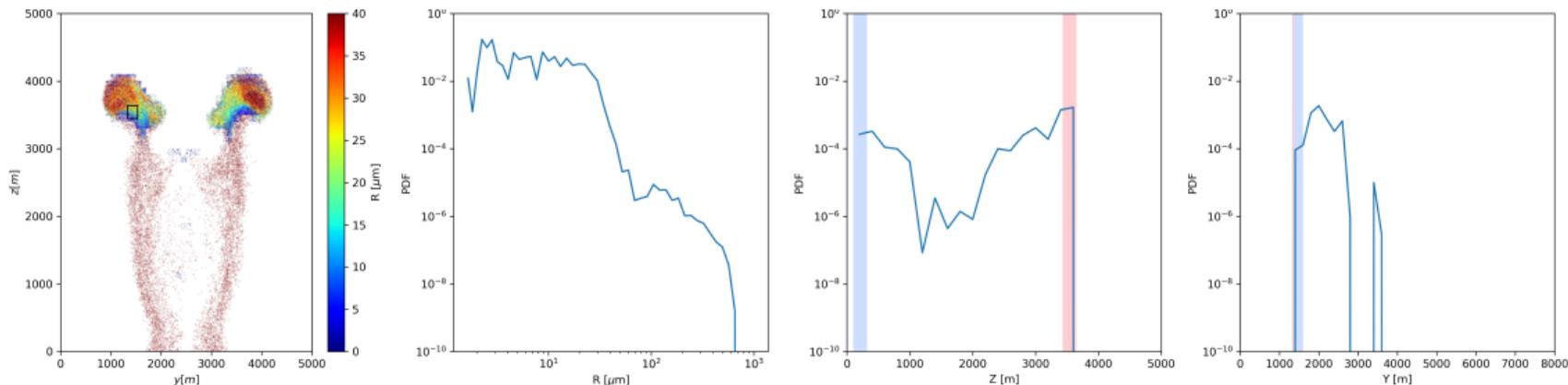
ρ : 湿潤大気密度, q_v : 比湿, \mathbf{u} : 速度, θ : 温位, p : 圧力

SCALE-RM v5.4.5 (Nishizawa et al., 2015) ベースの develop 版から機能追加.

- 完全圧縮方程式系
- MPI による三次元 **and/or** 二次元領域分割
- マップファクター排除で力学計算を単純化
- Arakawa-C 格子に基づく有限体積法
- 移流スキーム: 5 次風上差分 + FCT による非負保証 (単調性は課さない)
- 時間積分: 4 段 4 次ルンゲクッタ法 (音波), 3 段ルンゲクッタ法 (トレーサー移流)
- 雲微物理スキーム
 - 2 モーメントバルク法: Seiki and Nakahima (2014)
 - ビン法: Suzuki et al. (2010)
 - 超水滴法: Shima et al. (2009)

SDM を用いた数値実験の例: warm bubble 実験

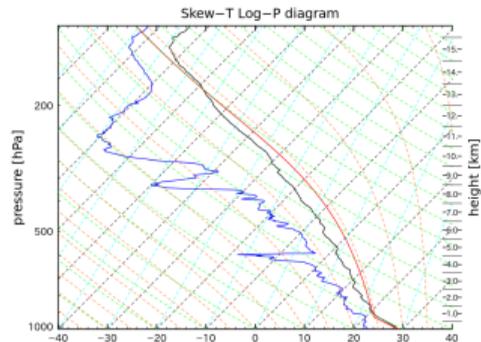
- 領域 : $0.3\text{km} \times 8\text{km} \times 5\text{km}$, 100m 解像度
- 湿度 70% の条件付き不安定成層の環境場に、+2K の温位擾乱を境界層に与える
- 30 分積分



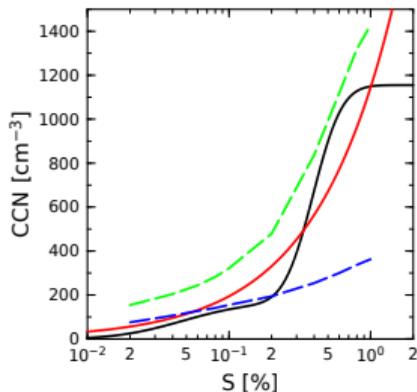
水滴半径で色を付けた、雲粒・雨粒の超水滴分布, 粒径分布, 超水滴の初期鉛直座標分布, 初期水平座標分布 [動画]

- 粒径分布生成にかかわるプロセストラッキングが可能

SDM を用いた数値実験の例: SCMS



大気鉛直プロファイル



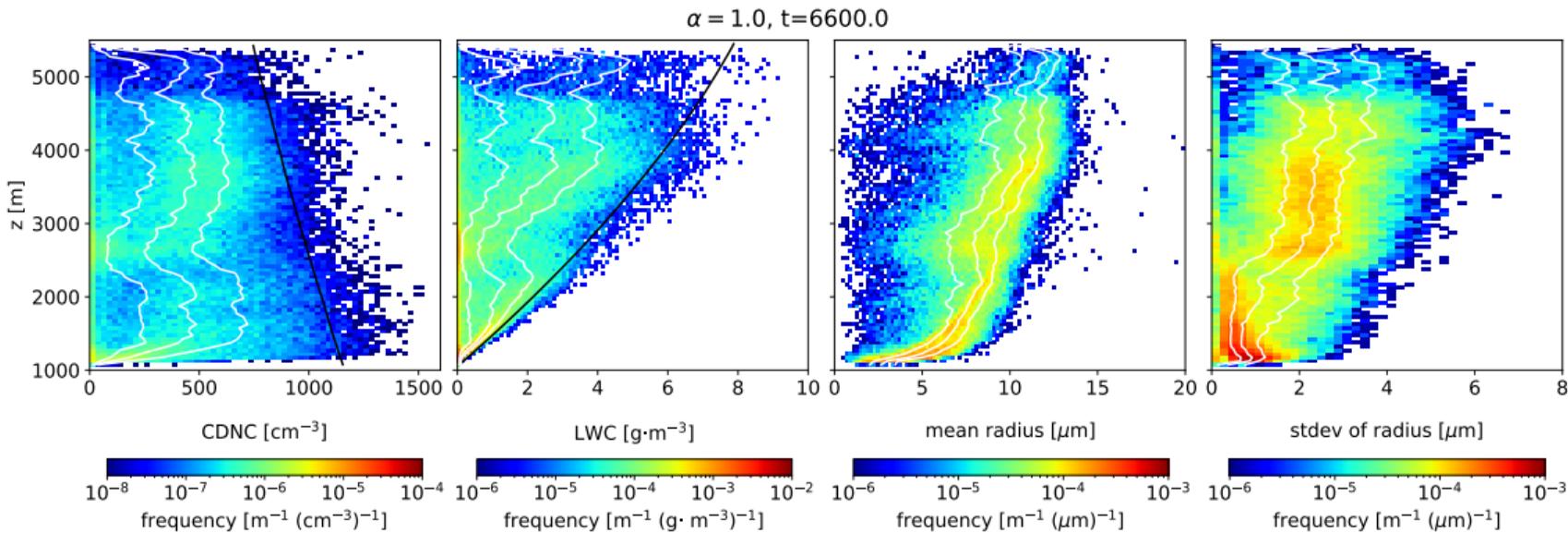
活性化する雲凝結核数の過飽和度依存性



Small Cumulus Microphysics Study (SCMS) 観測キャンペーン (e.g. Knight and Miller, 1998; Hudson and Yum, 2001; Brenguier et al., 2011) をもとにした数値実験 (Lasher-trapp et al., 2005; Matsushima et al., 2021) [youtube]

SCMS ケースで得られた CFAD と観測との比較

contour frequency by altitude diagram(CFAD): 雲水数密度 (CDNC), 雲水量 (LWC), 平均半径, 標準偏差



[動画]

観測 (変動の平均と標準偏差) : $\text{CDNC} = 294 \pm 243 \text{cm}^{-3}$, $(\text{LWC}) / (\text{adiabatic LWC}) = 0.213$

一方で、超水滴法は実用観点でまだ課題が多い

- プロセスの精緻化
 - Spontaneous and collisional breakup processes
 - 混相プロセスを含んだモデリング (Shima et al. 2020). ただし, 液相・固相の共存する状態を含むモデリングはまだできていない
- 力学モデルとの結合
 - 乱流影響. 低解像度では, 格子より小さいスケールが乱流だけとも限らない.
 - 地形あり, 全球領域への拡張
- 計算機適応
 - ビン法に比べて理論的には少ない計算量であるものの, バルク法と比較すると (経験的には)30 倍の計算時間がかかる (Shima et al., 2020). より広い応用領域までの波及効果を狙うなら改善は必須 (e.g. 気象予報)

本研究の問題意識・目的

- 気象・気候モデルの不確実性低減を大目標として、それに繋がる方向性を提示することが、モデリング研究としては重要
 - 「乱流表現だけ」が鍵になるのであれば、(計算資源の制約のもとでは) 従来的なバルク法を使ったままのアプローチもあり得る。
- 乱流と雲微物理は多くのスケール階層で相互作用する。相互作用の鍵になるのは乱流混合と凝結成長の時間スケールだが、低解像度では長い時間スケールしか表現できず、関係する雲微物理量は経験的な方法で陽に解けるわけではない。
- 本研究で、乱流表現 (高解像度化) と雲微物理 (精緻化) の同時に詳細化できることを示したい。

そのために必要なこと

- 超水滴法の計算手法を従来よりさらに高解像度で適用できるようにする
 - 雲微物理量のより高精度な推定 (サンプリング手法の改良, 粒子移流の高精度化)
- プロセス精緻化の同時達成の実現可能性
 - 計算機対応 (ここでは A64FX を想定). 大規模実験による実現可能性の実証.

雲と乱流

超水滴法

雲微物理量の推定精度の向上

計算性能評価

将来課題

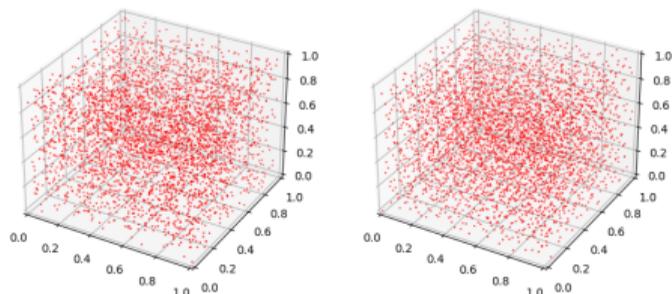
どのように代表とする水滴を選ぶか?

SDM は粒径分布に経験的な仮定を置かないが、代表となる水滴の選び方に任意性がある。

- 何に注目するか: 「降水」現象の再現性を重視して、降雨開始のトリガーになる大きな水滴を重視する (e.g. Arabas and Shima 2013)
- どのように選ぶか: 乱数よりも空間内でより一様を選ぶ → low-discrepancy sequences

低解像度では、数の少ない大きな水滴を重視することは非常に重要。実際、単に頻度分布から代表を決める (Shima et al., 2009) と超水滴数の増加に対して降水に関する収束が遅い (Unterstrasser et al., 2017) が、頻度分布と無関係に選択 (代わりに超水滴ごとに異なる重みを付与する) することで超水滴数は $O(100)$ 個程度で結果が収束する。しかし、高解像度では一部の水滴の重みが 1 を下回りサンプリングが効率的ではなくなる。

一方、直接数値実験 (DNS) ではすべて重み 1 で持つ。適切な選択方法にサンプル数 (あるいは解像度) 依存があるのでは?



提案分布の生成

提案分布

- 凝結核 (エアロゾル) のサイズ分布を正規化した確率分布 \mathbf{b}_1
- サイズ分布とは無関係に選ぶ: 対数ドメイン上での (区間限定した) 一様分布 \mathbf{b}_2

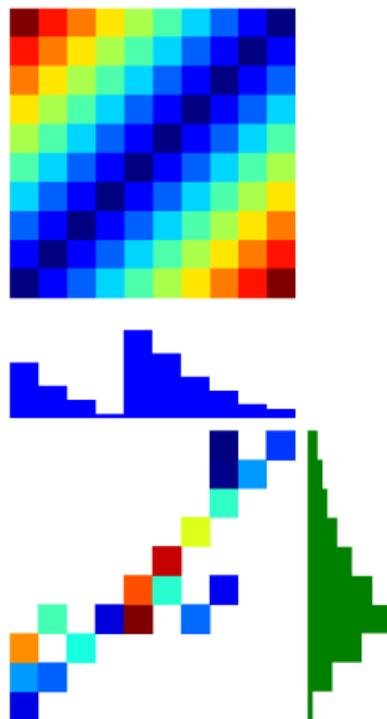
確率分布の重み付き平均によって, 中間的な性質をもつ確率分布 \mathbf{a} を新たに生成する (e.g. McCann, 1997; Cuturi, 2013):

$$\mathbf{a} = \arg \min_{\mathbf{a} \in \Sigma_n} \left\{ (1 - \alpha) W_2^2(\mathbf{a}, \mathbf{b}_1) + \alpha W_2^2(\mathbf{a}, \mathbf{b}_2) \right\},$$

ここで,

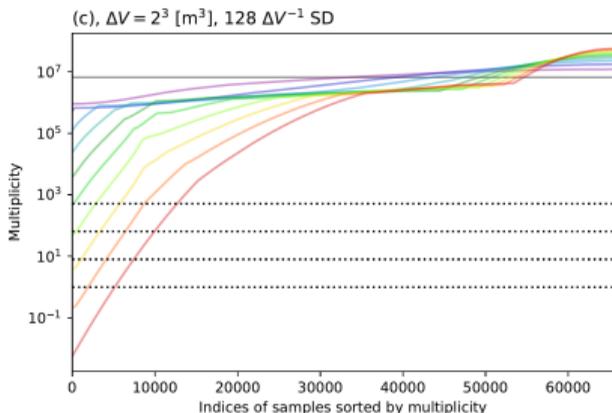
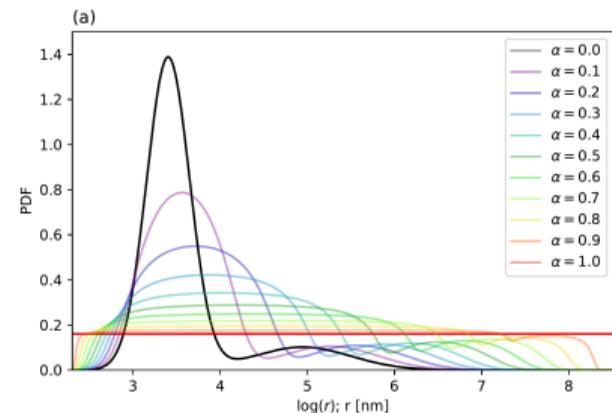
$$W_p(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \left(\min_{P \in \mathcal{U}(\mathbf{a}, \mathbf{b})} \sum_{i,j} |i - j|^p P_{ij} \right)^{\frac{1}{p}}.$$

W_p^p は、 i から j への移動コストが $|i - j|^p$ であるときに、分布 \mathbf{a} から分布 \mathbf{b} への輸送にかかる総コストの最小値.



輸送コスト $|i - j|^p$ および輸送計画 P_{ij}

提案分布の生成



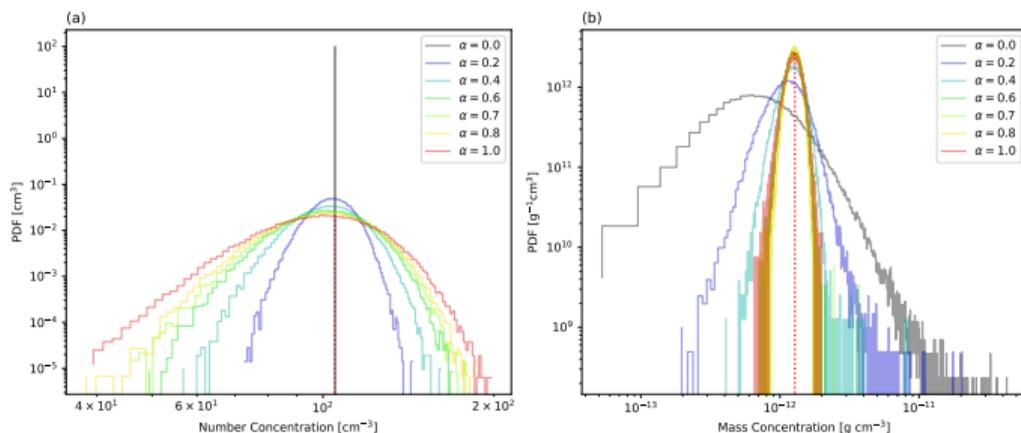
- 一様分布から 2modal な分布へ徐々に変わる確率分布が生成される
- 小 α で多重度のダイナミックレンジが減少
- 確率分布をつなぐパスが重要
 - (L^2 ノルムを使う場合, ダイナミックレンジは変わらない)

生成した確率分布をサンプリングに使うと, 物理的観点では何が変わるのだろうか?

(a) エアロゾル分布に比例する PDF(黒太線) と, サンプリングを行う提案分布 ($\alpha = 0-1$).

(c) サンプリングで得られた超水滴が持つ多重度.

サンプリングで得られるエアロゾル統計量の分布

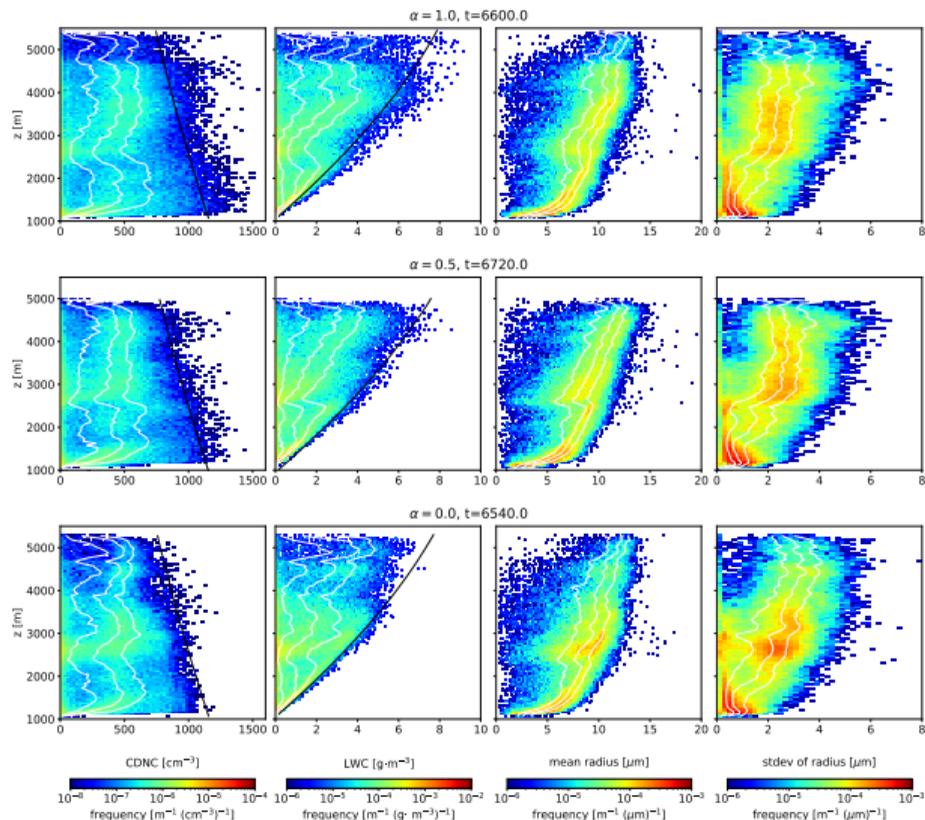


異なる提案分布を用いた場合に得られる, (a) エアロゾル数濃度. (b) エアロゾル質量濃度, の PDF.

凝結核の数濃度および質量濃度の推定 (体積 2 m³, 128 個) を大量に繰り返し, 確率密度関数を計算. α を変えても期待値は不変だが, 分布 (実際の数値実験では空間的変動) は異なる.

α 大の場合, 質量の大きな凝結核がどこでもサンプリングされていたが, α 小ではそれを含んだ場所で大きな質量濃度をとる (自然に存在する空間的変動に近い).

SCMS 実験の CFAD の α に対する感度



[1], [0.5], [0]

- α 小で, 雲水数密度 (CDNC) と雲水量 (LWC) の上限値が断熱的成長の場合の理論値と比較して改善. より自然な変動に.
- α 小で雨のトリガーになる水滴が減少し, 平均半径の大きな格子は減少する.
- 高解像度化とともに α を小さくすると, 雲微物理量の変動と降水の再現性を同時に改善できることを示唆. さらに相変化時間スケールの精度が改善されることで, 乱流にも影響がある可能性

粒子移流の高精度化

初期に超水滴数密度が一様になる配置を考えたとしても、時間発展とともに一様性が大きく失われる可能性がある。位置に関するリサンプリングは追加のコストを考えると避けたい。

そもそも超水滴数密度が一様な場からずれる原因: 超水滴位置に補間した速度場から計算した発散場が 0 でない (あるいは格子位置でもつ発散場と異なる)。発散場の満たすべき関係:

$$\text{div} = \frac{\partial u_p}{\partial x} + \frac{\partial v_p}{\partial y} + \frac{\partial w_p}{\partial z} = \frac{u_1 - u_0}{\Delta x} + \frac{v_1 - v_0}{\Delta y} + \frac{w_1 - w_0}{\Delta z}$$

速度場の補間にこの性質を追加すべきだが、代わりにセル間の速度の連続性や空間精度が犠牲になる。よく用いられる一次精度の補間 (e.g. Grabowski et al., 2018) では、格子内の渦度が特定のケースで 0 になる。乱流混合をよく表現するには、格子内での渦度をある程度でも表現できた方が良いのでは?

色々な例 (Jenny et al., 2001, Wang et al. 2015) はあるのだが、本研究のケース (3D, Arakawa-C 格子, 発散場あり) でそのまま使える方法がなかったので構築した (少し拡張しただけでしかないが)。周囲の値および空間微分値を使いセル内で空間 2 次精度を実現している。

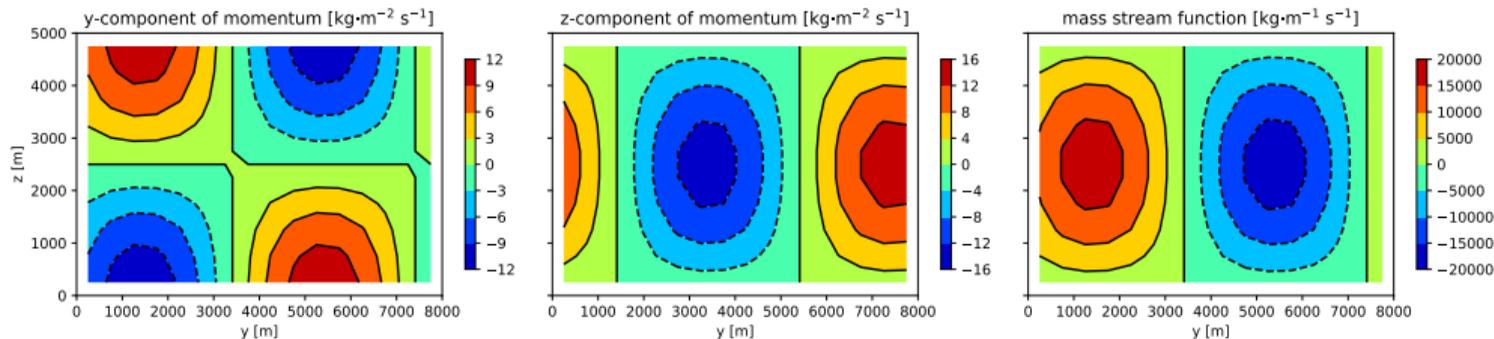
粒子・トレーサー移流のテストで、どのように精度改善するか調べる。

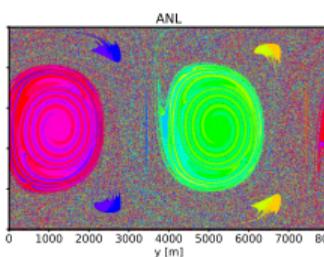
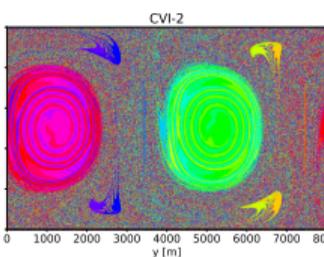
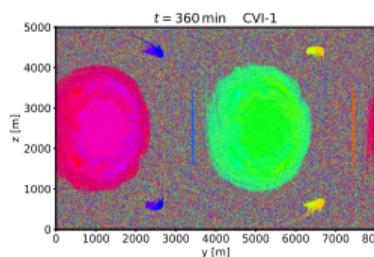
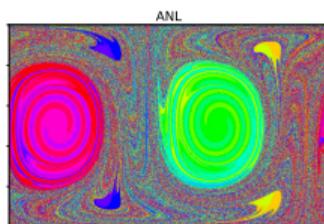
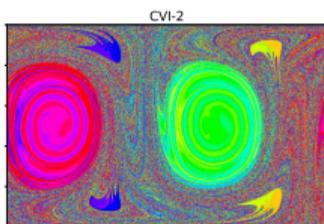
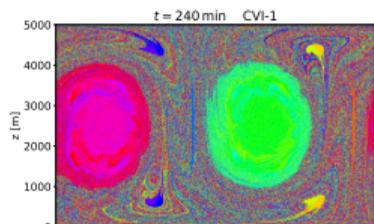
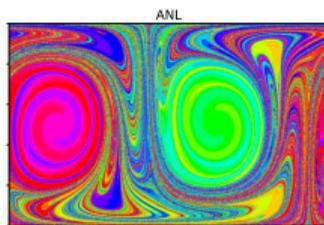
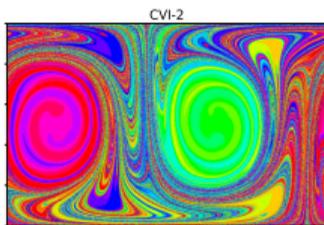
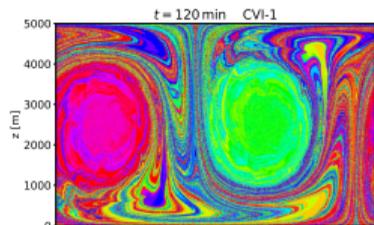
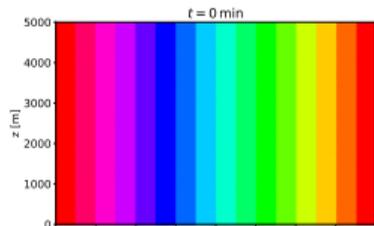
粒子・トレーサー移流のテスト

セルが周期変動する 2D ベナール対流のような流れ: 流れは単純. 粒子運動はカオス的 (Malhotra et al. 1998)

粒子を領域内に準一様に置き, それぞれの粒子を解析解, 一次精度の補間, 二次精度の補間 (本研究) を使用して時間発展を解く. 粒子に識別可能なラベルを付けて時間発展させることで, その情報を使って任意の初期値からの時間発展を計算する.

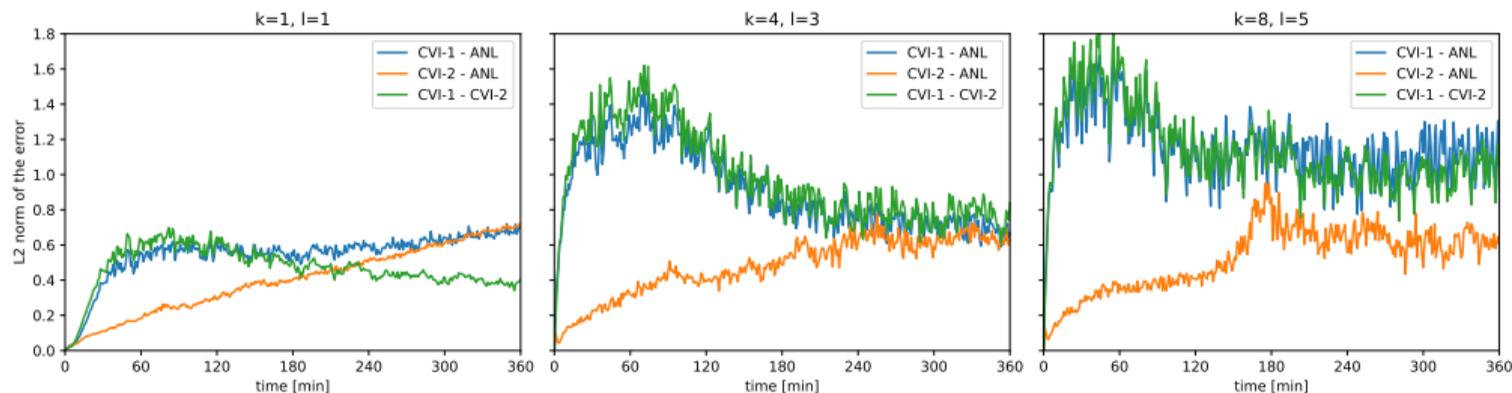
1. 粒子分布はどう変わるか
2. トレーサー場の解析解からの誤差発展. 初期条件で与える分布の空間スケール (k, l) の感度





- セル変動の周期は 30 分
- セルの縁では乱流のように激しい混合, 内部などで秩序的な構造が残る.
- 一次精度では解析解と比較して混ざり方がおかしい(格子状パターン). セルの内部ではより混合する(微視的に数値粘性がなくとも, 巨視的には数値粘性があるかのように働いている).
- 二次精度の補間によって大きく改善

トレーサー場の解析解からの誤差発展



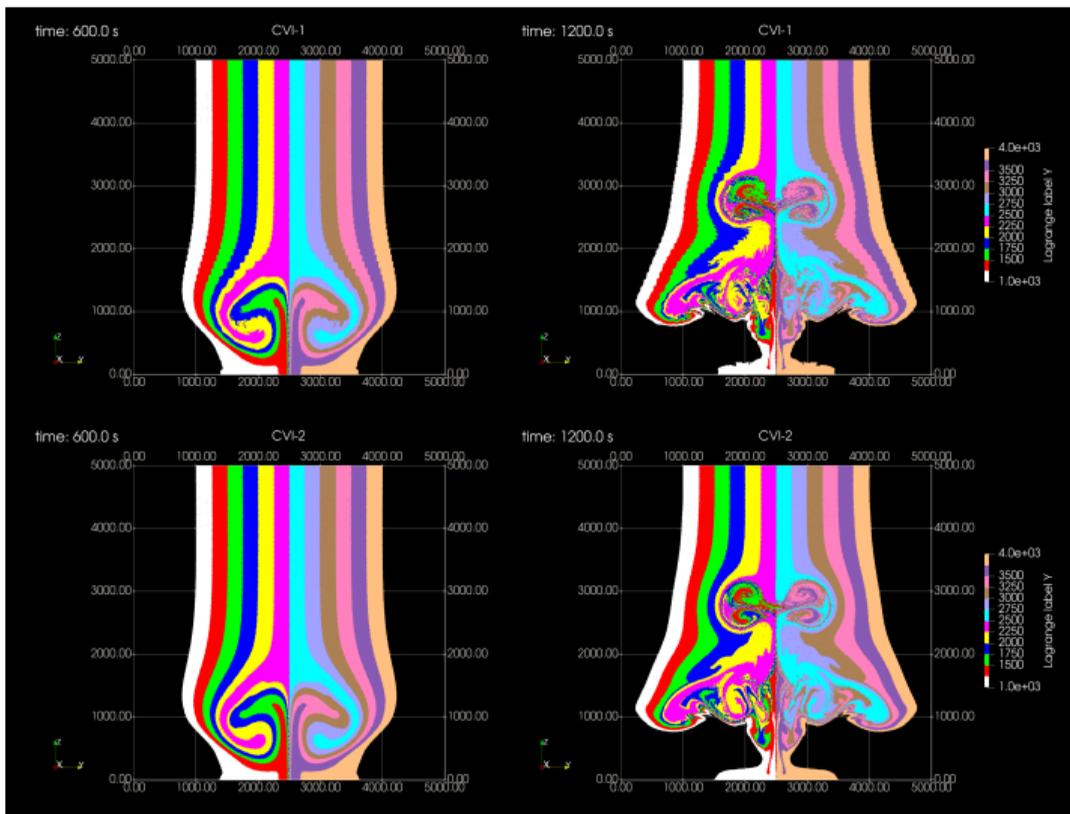
トレーサー分布の誤差発展における波数依存性

トレーサー分布

$$\phi(y, z, t = 0) = \sin\left(\frac{\pi lz}{5,000 \text{ m}}\right) \left[\sin\left(\frac{2\pi lk}{8,000 \text{ m}}\right) + \epsilon \cos\left(\frac{2\pi ky}{8,000 \text{ m}}\right) \right] + \sqrt{1 + \epsilon^2}$$

- 空間スケールによらず誤差は減少
- 高波数ほど改善の影響が長時間残る
- 乱流に伴う微細スケールの変化をより高精度に解けることを期待

warmbubble 実験の補間精度に対する感度



- 浮力によるトルクで渦度生成される. そこで補間精度の差が現れやすい.
 - 周囲の乾燥大気場との混合 (エントレインメント)
- 二次精度の補間を用いることで格子上のパターンが抑制され, 雲内で微細なパターンを残している.

[cvi1], [cvi2]

雲と乱流

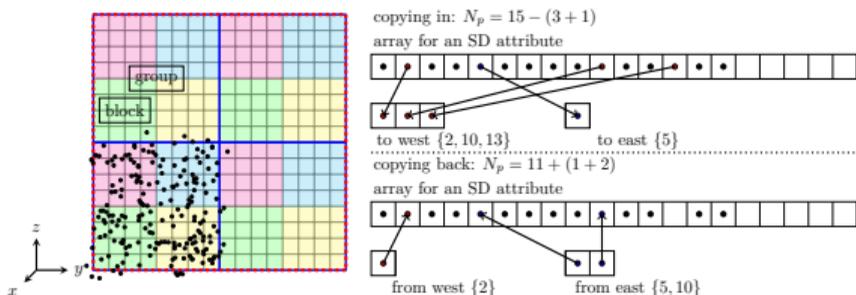
超水滴法

雲微物理量の推定精度の向上

計算性能評価

将来課題

高速化の基本戦略



前提: キャッシュブロッキング

多くの研究と同様に、空間を 8^3 以下の小さなブロック (格子場は L1 に載るサイズ) に分割し、ブロック ID でスレッド並列化. 演算密度が高いため、データがキャッシュに載れば高性能を期待できそうだが..

雲の存在や場の値, 超水滴の粒子種別・属性が変わることで演算パターンが変わることがある.

- 凝結成長 (未飽和 or 過飽和, ニュートン反復)
- 終端速度 (水滴の大きさによる分岐)
- 衝突併合 (雲の存在. 確率的な衝突判定)

また, 超水滴法は問題によっては超水滴数増大からくるメモリ容量の制限もある.

結局, 超水滴法の高性能計算から見たポイントは

1. 演算パターンが変化することもある状況で演算をベクトル化する
2. 情報の圧縮

1. 演算パターンが変化することもある状況で演算をベクトル化する

分割された空間は有効解像度 (Skamarock et al., 2004) の範囲と同程度であることを利用する方向でコードを最適化

- ブロック内での場が均質的なので、同じような状態の粒子が揃いやすい。場合によっては条件分岐が少し単純になる。同じ条件の超水滴でベクトル化しやすい。

2. 情報の圧縮

- 分割した小さな空間に対する相対座標を FP32 で表現する。低精度表現でも、高解像度で必要な位置精度を確保できる。
- 水滴の重みは高解像度で INT32 の範囲に収まる。
- 位置の INT16 表現や、水滴半径の FP16 表現なども部分的には試したが、安直な方法ではうまくいかないようだった (演算誤差が大きい, 時間変化を足しこむ際に情報落ちが起こる)

計算性能評価に用いる数値実験の設定

実験設定：

- BOMEX(Siebesma et al., 2003, Vanzanten et al., 2011)
 - 浅い積雲集団のテストケース
 - 7.2kmx7.2kmx3.0km, 50m/40m 解像度、6h 積分
- SCMS(Lasher-trapp et al., 2005, Xue et al. 2022)
 - ICMW2021 題材になった、ビン法と超水滴法のモデル・スキーム間比較のテストケース
 - 10kmx10kmx8km, 50m 解像度、3h 積分

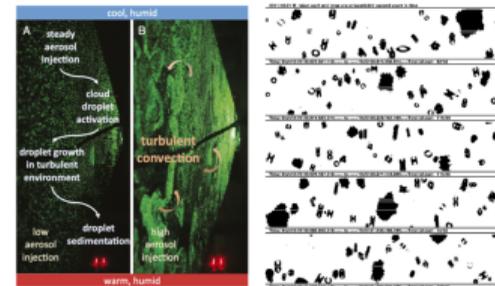
指標：計算資源量（最小のノード数を用いて数値実験した場合のノード時間積）

The 10th International Cloud Modeling Workshop



The 10th International Cloud Modeling Workshop will be held in Indian Institute of Tropical Meteorology (IITM), Pune, India, 26th to 31st July 2021. Please see below for details of the workshop cases that will be run.

Workshop Cases:



PI Chamber Simulation Case: Modeling Aerosol-Cloud-turbulence Interactions in the Cloud Chamber

The cases proposed here are focused on the cloud-aerosol-substance interactions in a warm cloudy environment, i.e., no ice particles. Modeling results from DNS, LES, and other sub-grid/mesoscale models are all welcomed. [You will find more information here.](#)

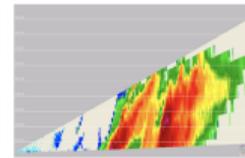
Aerosol effect in deep convective clouds under different moisture environments over the Indian peninsula: a CAIPEEX-Case study

Investigate the small and large droplet impact on aerosol effect with a LES/CFD model using model outputs from weather model and investigate the impact on mixed-phase cloud processes in the polluted conditions. [You will find more information here.](#)



Isolated cumulus congestus based on SCMS campaign: comparison between Eulerian bin and Lagrangian particle-based microphysics

Since the droplet size distribution affects radiative properties of warm (pre-fee) clouds and likely impacts formation of precipitation through collision-coalescence, this case aims to see whether bin or Lagrangian bin microphysics models is affected by artificial spectral broadening in bin schemes (Bjornsson et al. 2019; Grabowski et al. 2019). [You will find more information here.](#)



Convection in Strong Vertical Wind Shear: The 2 Aug COPE Case

The proposed modeling exercise is to conduct simulations of the case with various idealized modeling frameworks to gain insight on:

- the effects of strong vertical wind shear on microphysical processes (e.g. collision-coalescence, ice production, riming, rim-spreading, evaporation of falling hydrometeors, etc.)
- the effects of strong vertical wind shear upon different representations of microphysical processes used in numerical models

[You will find more information here.](#)

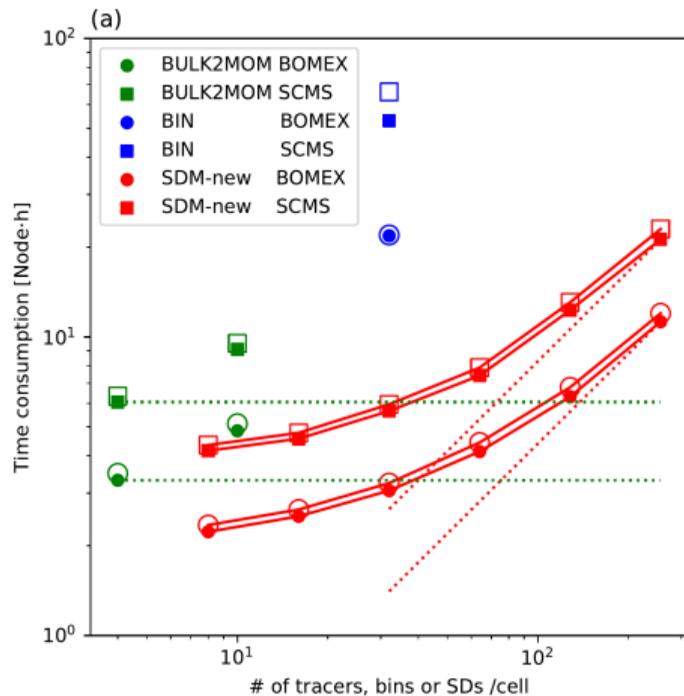
スキーム：

- 2モーメントバルク法 (BULK2MOM : Seiki and Nakajima, 2014; Morrison and Grabowski, 2008)
 - SDM に合わせるために混相過程を除外. サブグリッド凝結モデルを導入.
 - 一般的なキャッシュ最適化は適用済み. ループ分割に余地あり.
- ビン法 (BIN : Suzuki et al., 2010)
 - 混相過程なし条件. モンテカルロ法による衝突併合計算の高速化 (Sato et al., 2009) は off.
 - 最内ループがビンのインデックスループなので, ビン数が少ない場合には SIMD 化の効率は悪い.
- 超水滴法 (SDM)

時間刻みや空間解像度はどのスキームを用いる場合でも同じとした:

- バルク法の経験的な仮定によって現象の時間スケールが変わるわけではない (Santos et al., 2020)
- バルク法は仮定により空間解像度依存性を小さくする可能性があるが真の解への収束とは無関係. 乱流表現の方で条件を合わせる方向で考えた.

計算性能評価 (BOMEX, SCMS)



- 2モーメントバルク法とSDM32-128くらいが同程度。
- 128個/cell程度は結果の収束性のために必要 (Shima et al., 2020, Matsushima et al., 2021)

実用的には、従来型スキーム(バルク法)とほぼ同程度の計算資源でより精緻な計算が可能

トレーサー数、ビン数、平均超水滴数に対する消費計算資源量(ノード時間積)

超高解像度実験の実現可能性

実験設定 : BOMEX、約 1 時間 (3680s) 積分。領域 13824m×13824m×3072m

計算設定 : 「富岳」 36864 ノード (23.2%)

	No. of grid points	No. of SDs per cell	step (DYN)	grid length
Mellado et al., 2018	5120 × 5120 × 1280	/	60000	1.1 m
Sato et al., 2017	1152 × 1024 × 600	30	450000	6.25 / 5 m
This study	6912 × 6912 × 1536	128	782609	2 m
Ratio	103.68	4.267	1.739	2.901

自由度 : 格子数 104 倍と超水滴数 442 倍。

演算精度 : 力学は倍精度、SDM は単精度を中心とした混合精度演算 (縮約演算は倍精度、格子位置は 2 バイト整数)

(参考) NICAM 870m (glevel13 96 層) より約 1.14 倍多い格子数

	Time [min]	Speed [PFLOPS]	Memory Throughput [PB/s]
Time integration time	576	7.97 (7.04)	13.7 (37.2)
Dynamics	290	8.55 (7.55)	20.5 (55.7)
Microphysics	274	7.50 (6.62)	6.25 (16.9)
Short time step	238	9.50 (8.39)	21.3 (57.9)
Tracer time step	15.0	5.85 (5.17)	21.6 (58.7)
Tracking	87.9	15.3 (13.5)	2.89 (10.5)
Condensation	32.6	18.2 (16.1)	5.28 (14.3)
Coalescence	5.75	7.58 (6.69)	17.5 (47.3)
SD sorting	79.2		12.5 (33.9)
3D to and from 2D conversion	53.47		

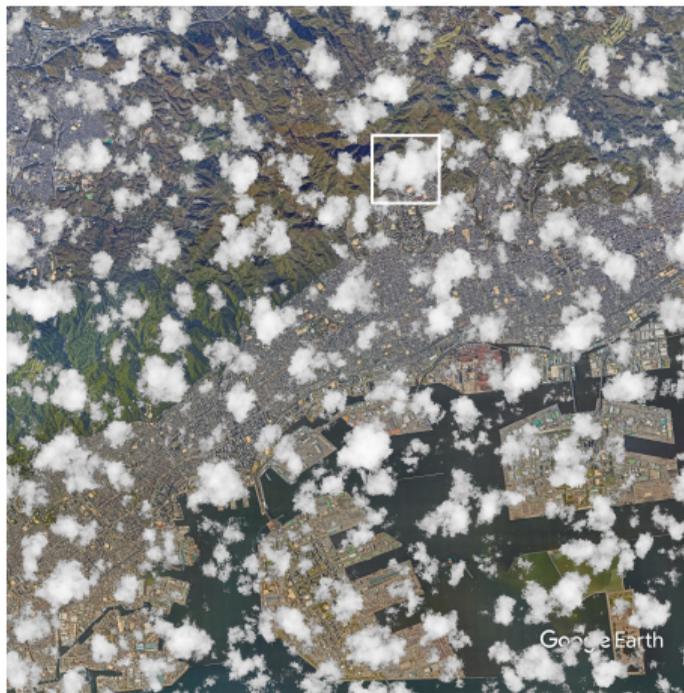
- SDM 全体 : 2.86×10^{13} particle-step/s

参考:

NICAM-LETKF (Yashiro et al., 2020): 演算性能 6.6%

トカマクプラズマ PIC (Xiao et al., 2021): 3.73×10^{13} particle step/s

計算された雲の場



- 浅い積雲集団の計算のため領域全体の表現に用いていた格子数で、1つの雲を表現

雲と乱流

超水滴法

雲微物理量の推定精度の向上

計算性能評価

将来課題

科学的課題:

- 長時間積分および雲微物理の空間スケール依存性の調査
- 不確実性低減に対する開発した数値モデルの優位性の実証 (高解像度化 + 小 α)

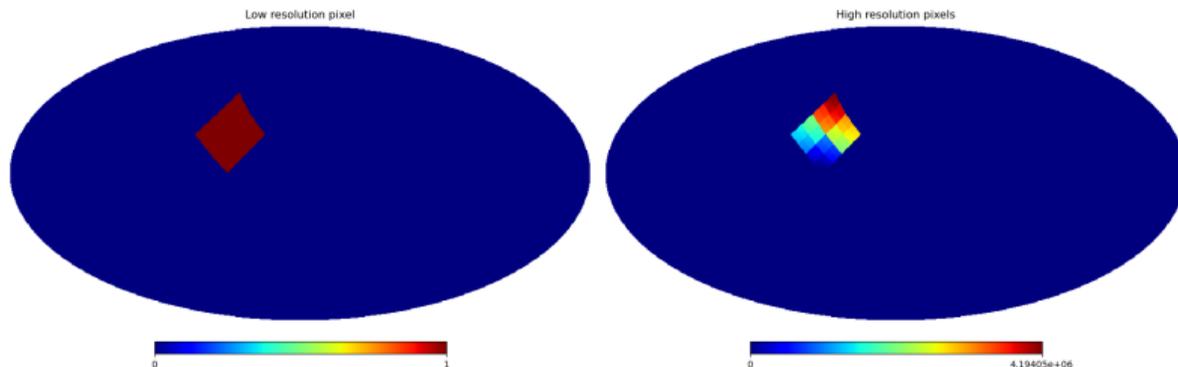
計算的課題:

- 使用メモリ量削減のため, 低精度表現利用の詳細検討
- アクセラレータ対応?

全球への拡張?

惑星表層環境の研究に応用するなら, トレーサー移流だけで良いので全球拡張の実現可能性が重要.

- ネスト可能かつ補間が単純なことが望ましい. 各セルが等体積だと統計的ゆらぎの緩和に有利.
 - e.g. HEALPix (Gorski et al. 2005)
 - 欧米の全球モデル (ICON) では解析をこの格子系で行う方向になっている.
 - 数値モデルでも使われ始めている (ECMWF).
 - 超水滴位置は HEALPix の高解像度ピクセルの位置で保存すれば良い.



低解像度および高解像度の HEALPix 格子

雲と乱流は広い範囲の空間スケールで相互作用するため、乱流と雲微物理を同時に詳細化することが重要である。本研究では、雲のシミュレーションにおいてメートルからサブメートルスケール解像度を超水滴法を用いて実現するための数値モデル開発とその検証を行った。

1. サンプリング手法の改良

- 高解像度で効率的な手法を開発した。降雨と変動の両方をより良く表現できることが期待される。

2. 粒子移流の高精度化

- 超水滴位置での発散場が格子場の発散場と一致する性質をもつ二次精度の補間法を構築した。
- 混合のパターンを大きく改善した。特に高波数で改善の影響が長時間見られることを示した。

3. A64FX を想定した計算最適化

- 実用的に、2 モーメントバルク法と同程度の計算資源でより精緻な数値実験を可能にした。
- 「富岳」による大規模実験で、目的の計算が可能であることを実証した。

4. 開発した数値モデルの優位性の実証および、さらなる拡張 (e.g. アクセラレータ対応, 全球拡張) が課題。

Matsushima, T., Nishizawa, S., and Shima, S.: Overcoming computational challenges to realize meter- to submeter-scale resolution in cloud simulations using the super-droplet method, *Geosci. Model Dev.*, 16, 6211 – 6245, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-6211-2023>, 2023. Supplement: <https://doi.org/10.5194/gmd-16-6211-2023-supplement>