

超水滴法による粒子流体連成 シミュレーションの応用可能性 について

草野完也、島伸一郎

独立行政法人海洋研究開発機構
地球シミュレータセンター

連結階層シミュレーション研究開発プログラム



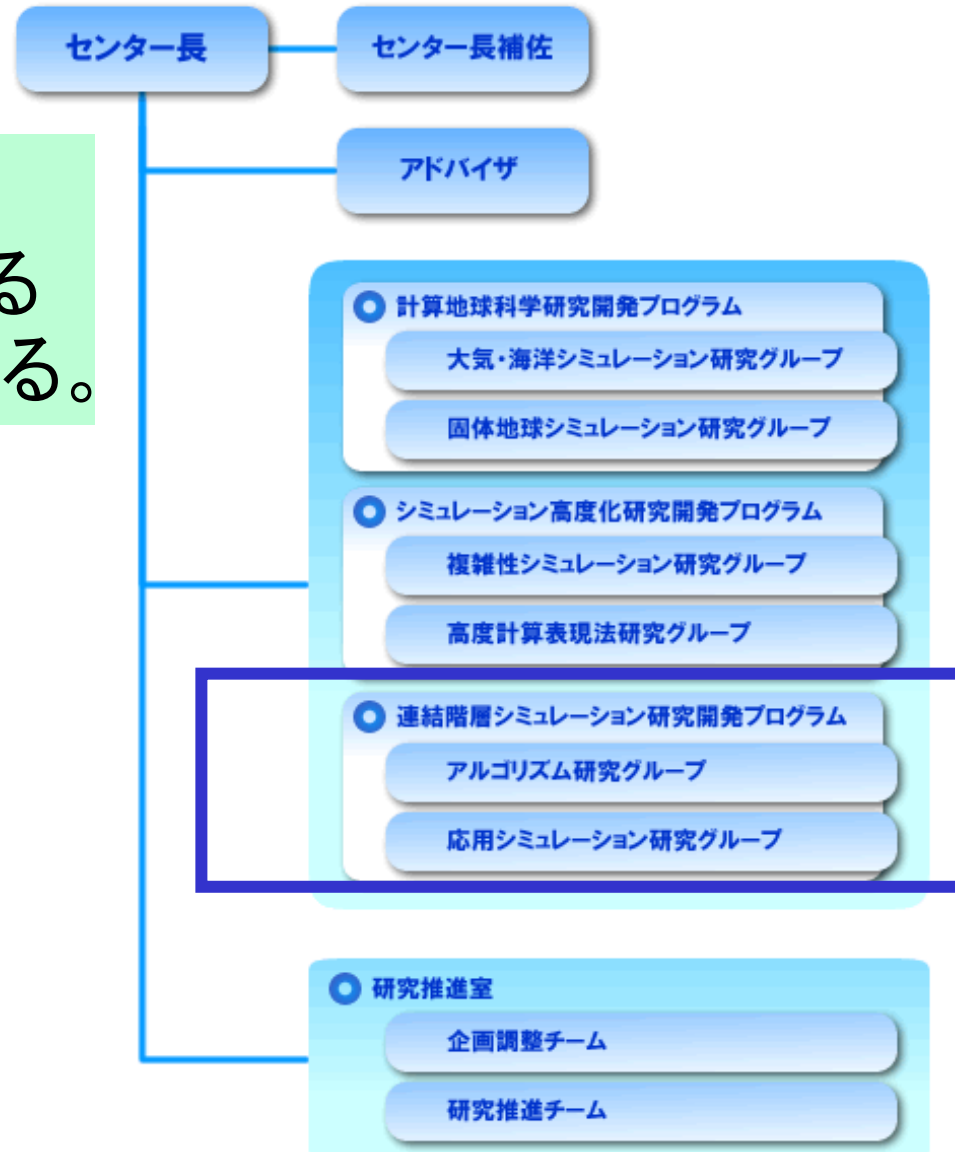
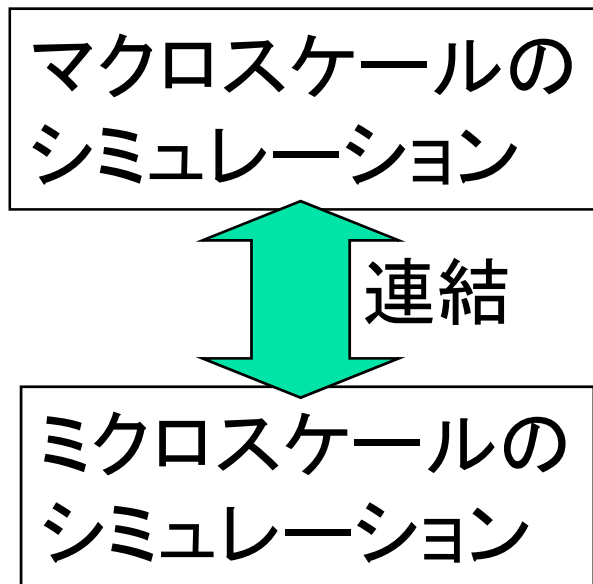
2007/12/6

独立行政法人
海洋研究開発機構



連結階層シミュレーションのねらい

物理階層の異なる現象の相互作用を、各階層に適合する数値モデルの連結で表現する。



地球シミュレータセンターの組織

連結階層シミュレーションの方法

境界連結法
(埋め込み型)

変数連結法
(繰り込み型)

マクロスケール(近似モデル)

$$\frac{\partial f}{\partial t} = F(f, \eta, \chi, \dots)$$

流体モデル
粘弾性モデル

連結
手法

ミクロスケール(第1原理モデル)

運動論モデル
MDモデル

局所問題

vs.

非局所問題

連結階層シミュレーションの応用

気象気候学

宇宙プラズマ物理

核融合科学

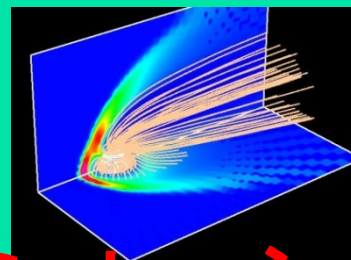
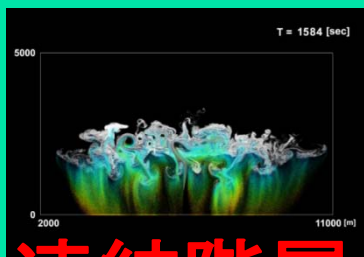
■ 大気力学

超水滴雲モデル

■ プラズマ物理学

粒子加速、磁気再結合、宇宙天気

環境科学



連結階層シミュレーション

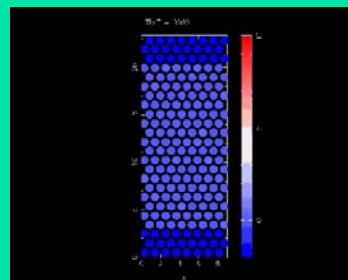
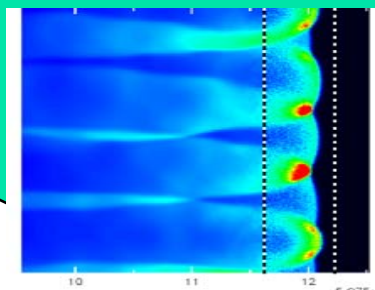
材料科学

■ 流体力学

燃焼流体

■ 固体力学

摩擦力学

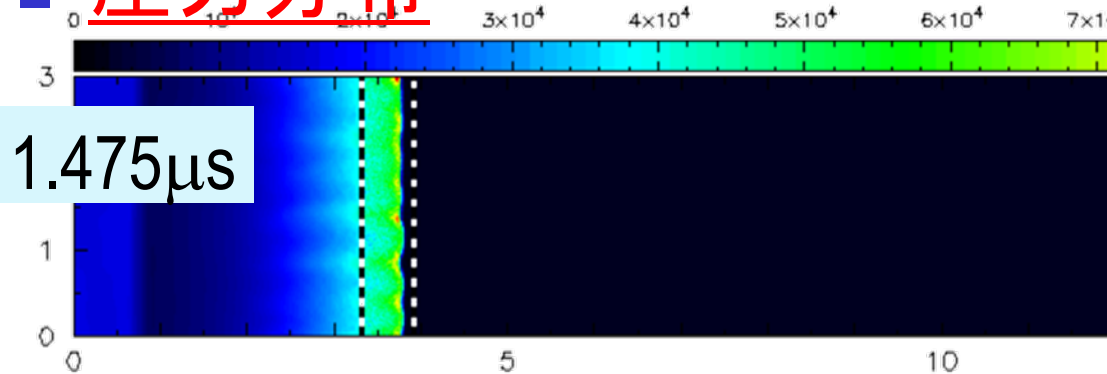


工学応用

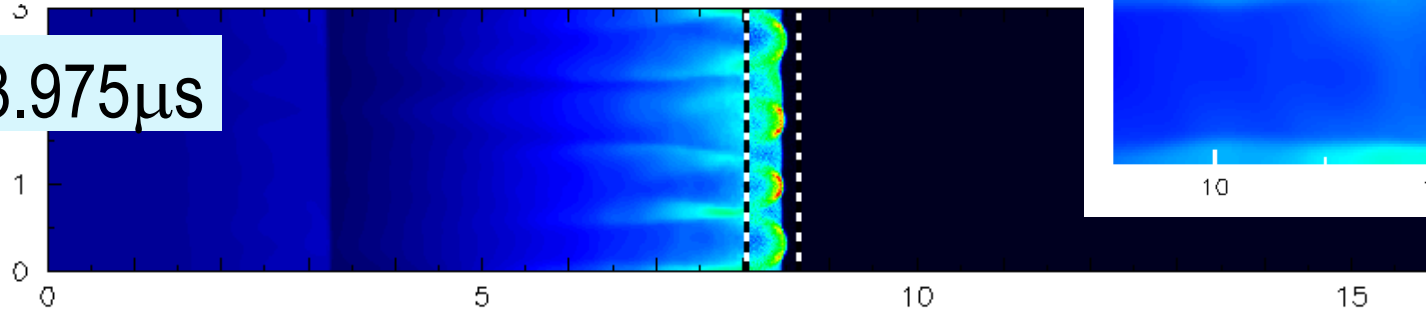
固体地球物理学

連結階層デトネーションモデル

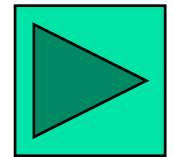
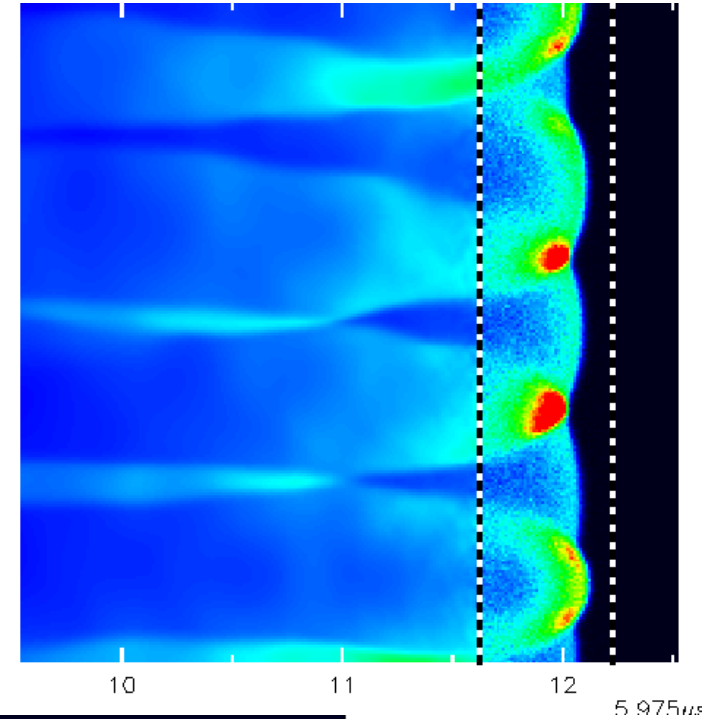
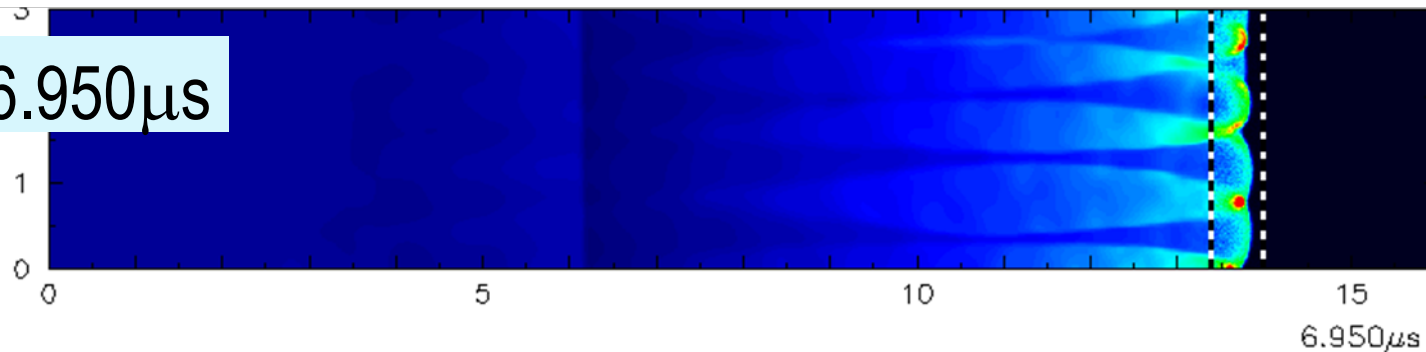
■ 圧力分布



$3.975\mu\text{s}$



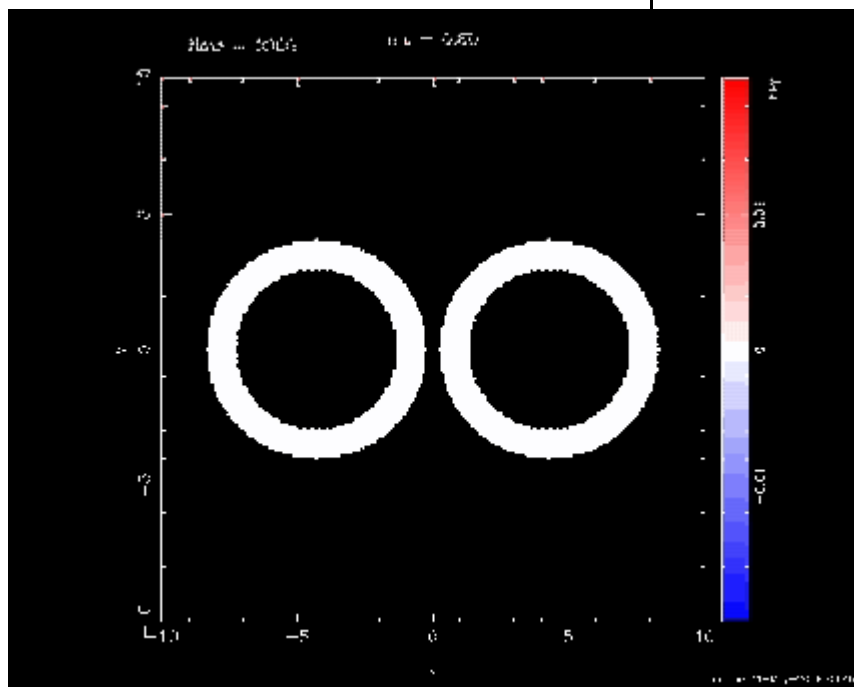
$6.950\mu\text{s}$



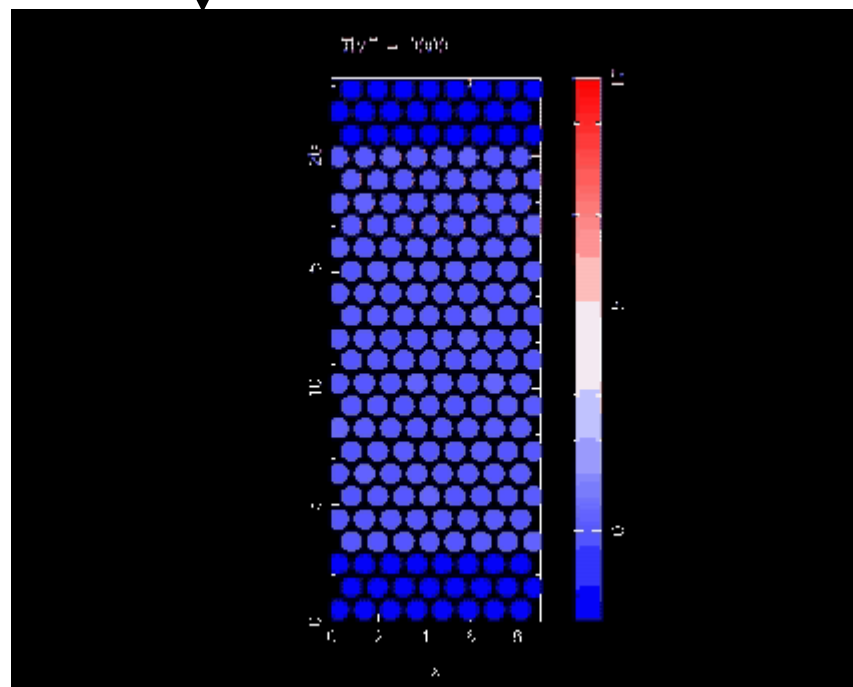
連結階層摩擦モデル

アモン・クーロンの法則 $F = \mu N$

N, V



Macro-model
(SPH method)

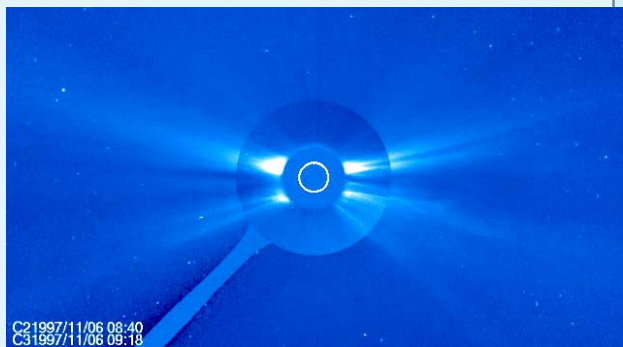


Micro-model
(MD using LJ-potential)

μ, T

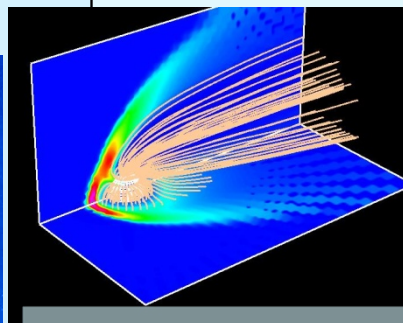
パラメタ連結 (Hirose et al. 2007)

連結階層宇宙プラズマモデル

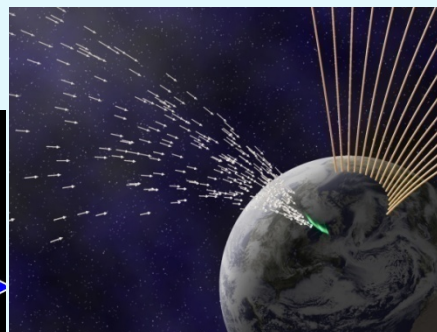


衝撃波形成

太陽高エネルギー
粒子加速



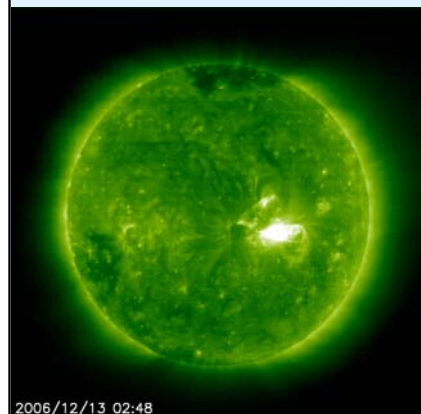
太陽風磁気圏相互作用



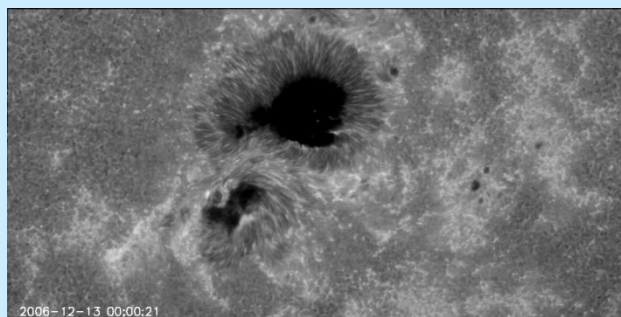
磁気圏電離圏相互作用



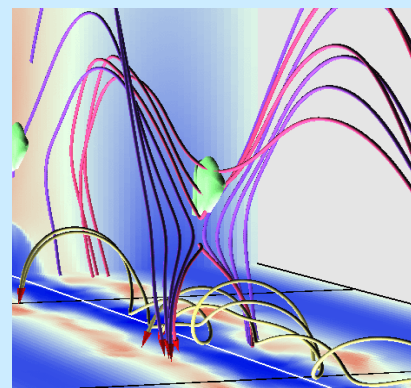
オーロラ粒子加速



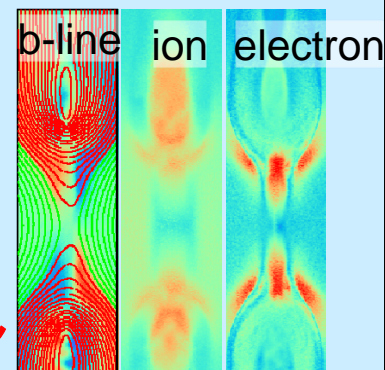
コロナ質量放出



太陽フレア
(2006.12.13)



磁気リコネクション



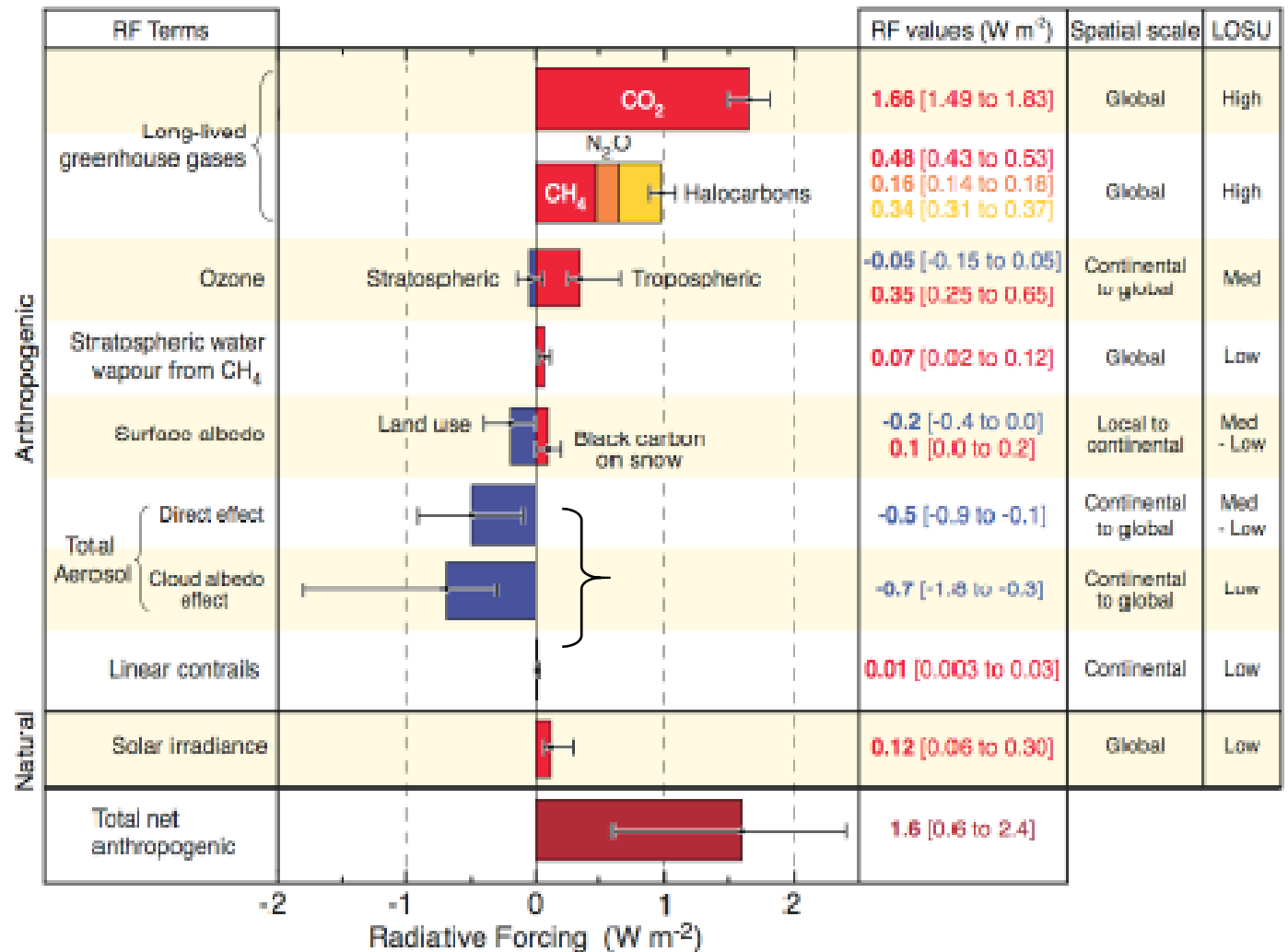
超水滴雲モデル



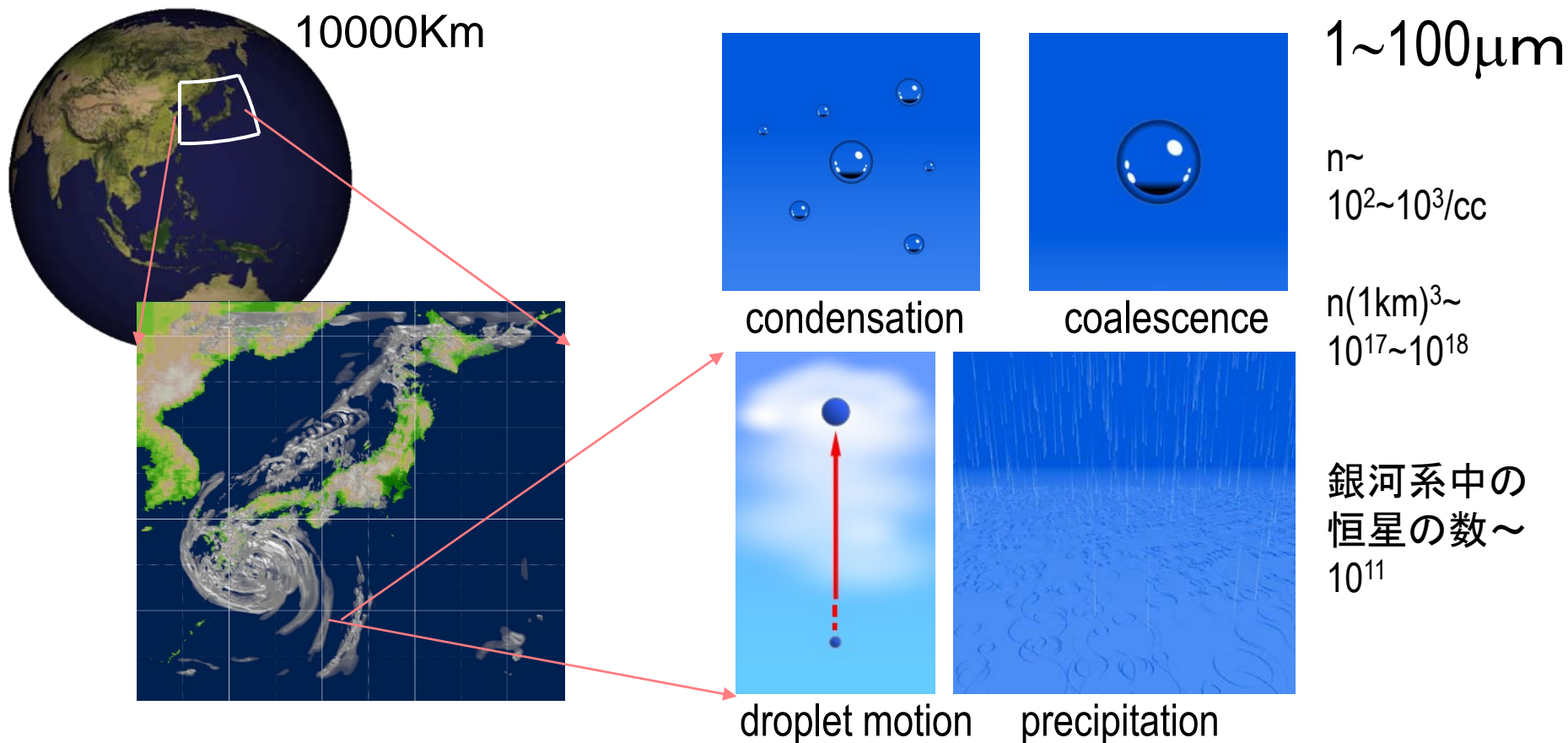
人為起源の気候強制力 (IPCC)

Radiative Forcing Components

エアロゾル
雲



連結階層問題としての雲



大気流体
ナビエ・ストークス型方程式

+ 雲微物理 (凝縮成長、
相変化、衝突成長、分裂、
運動、化学反応、電荷)

従来の雲モデル(warm rain model)

■ バルクパラメタリゼーション法 & ビン法

$$\rho \frac{D\bar{\mathbf{v}}}{Dt} = -\nabla P - (\rho + \rho_w)\bar{\mathbf{g}} + \lambda \rho \nabla^2 \bar{\mathbf{v}},$$

$$P = \rho R_d T,$$

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \bar{\mathbf{v}},$$

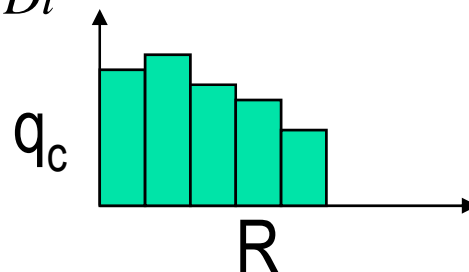
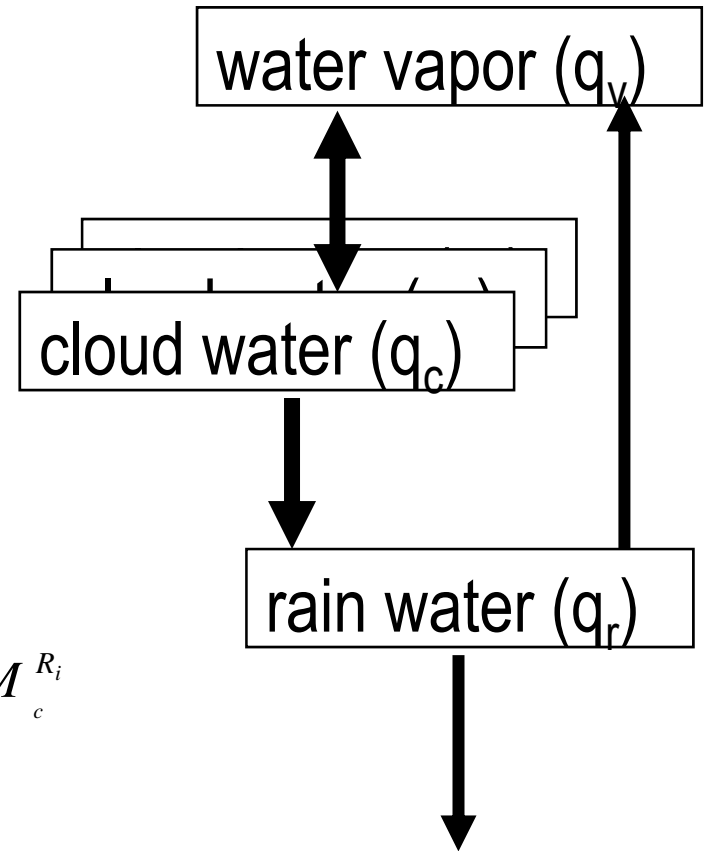
温位 $\frac{D\theta}{Dt} = D_\theta + M_\theta$ ← 複雑な経験則

水蒸気 $\frac{Dq_v}{Dt} = D_v + M_v$ ↑ 雲微物理過程

雲水 $\frac{Dq_c}{Dt} = D_c + M_c$ → **ビン法** $\frac{Dq_c^{R_i}}{Dt} = D_c^{R_i} + M_c^{R_i}$

雨水 $\frac{Dq_r}{Dt} = D_r + M_r$

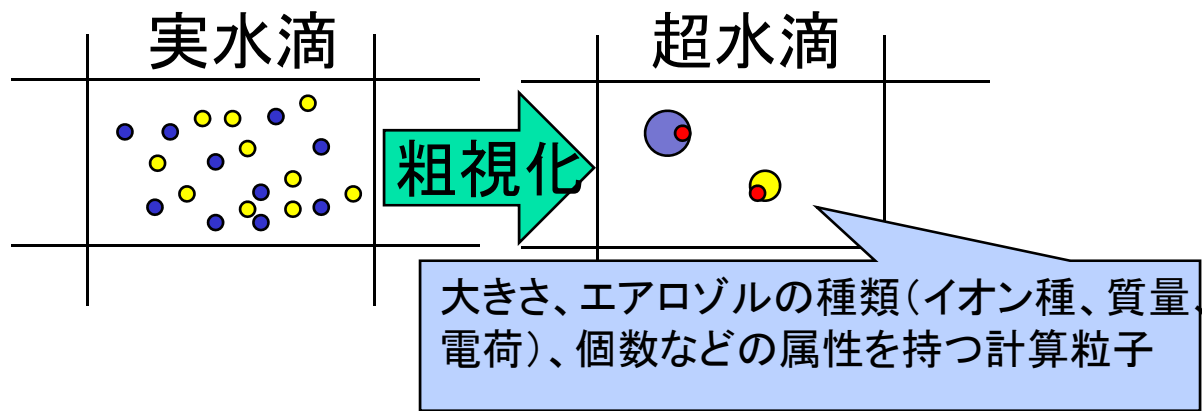
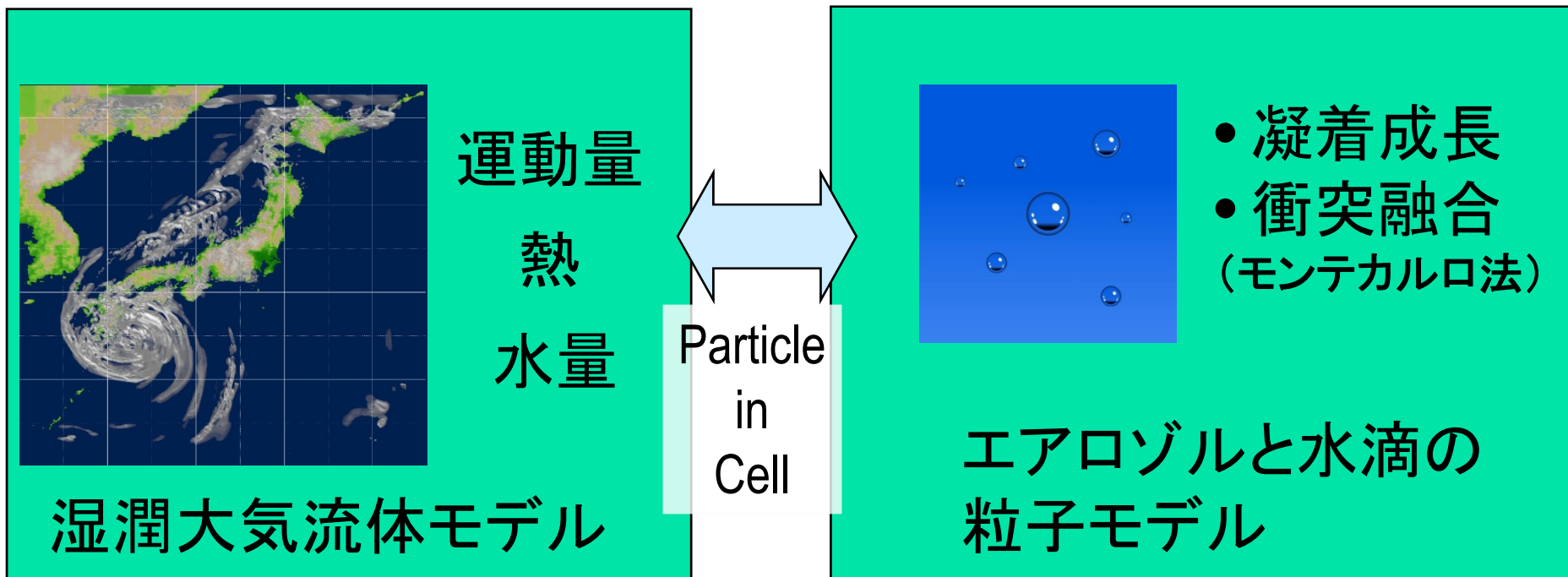
↑ 拡散過程



連結階層型の雲シミュレーション

ナビエ・ストークス方程式

超水滴法



大気モデルと超水滴モデルとの連結

非静力大気モデル

$$\rho \frac{D\bar{\mathbf{v}}}{Dt} = -\nabla P - (\rho + \rho_w)\bar{\mathbf{g}} + \lambda\rho\nabla^2\bar{\mathbf{v}},$$

$$P = \rho R_d T,$$

運動量

$$\frac{D\theta}{Dt} = -\frac{L}{c_p \Pi} S_v + \kappa \nabla^2 \theta,$$

熱

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \bar{\mathbf{v}},$$

$$\frac{Dq_v}{Dt} = S_v.$$

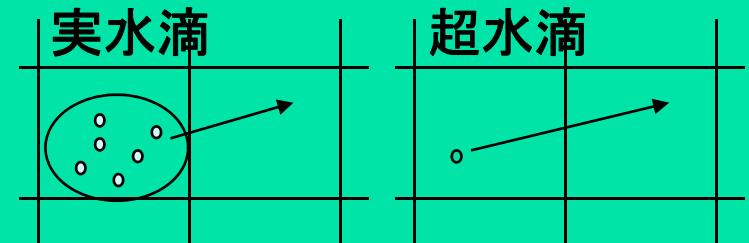
水蒸気

$$S_v = \frac{d}{dt} \rho_w = \frac{d}{dt} \sum_{\text{各セル毎の超水滴の和}} \xi_i m_i$$

超水滴モデル

「同様の属性を持つ十分に混合された複数の水滴の集合を表現する仮想粒子」

動的変数
連結

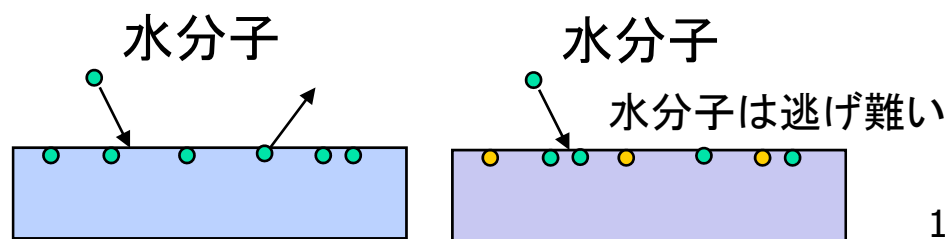
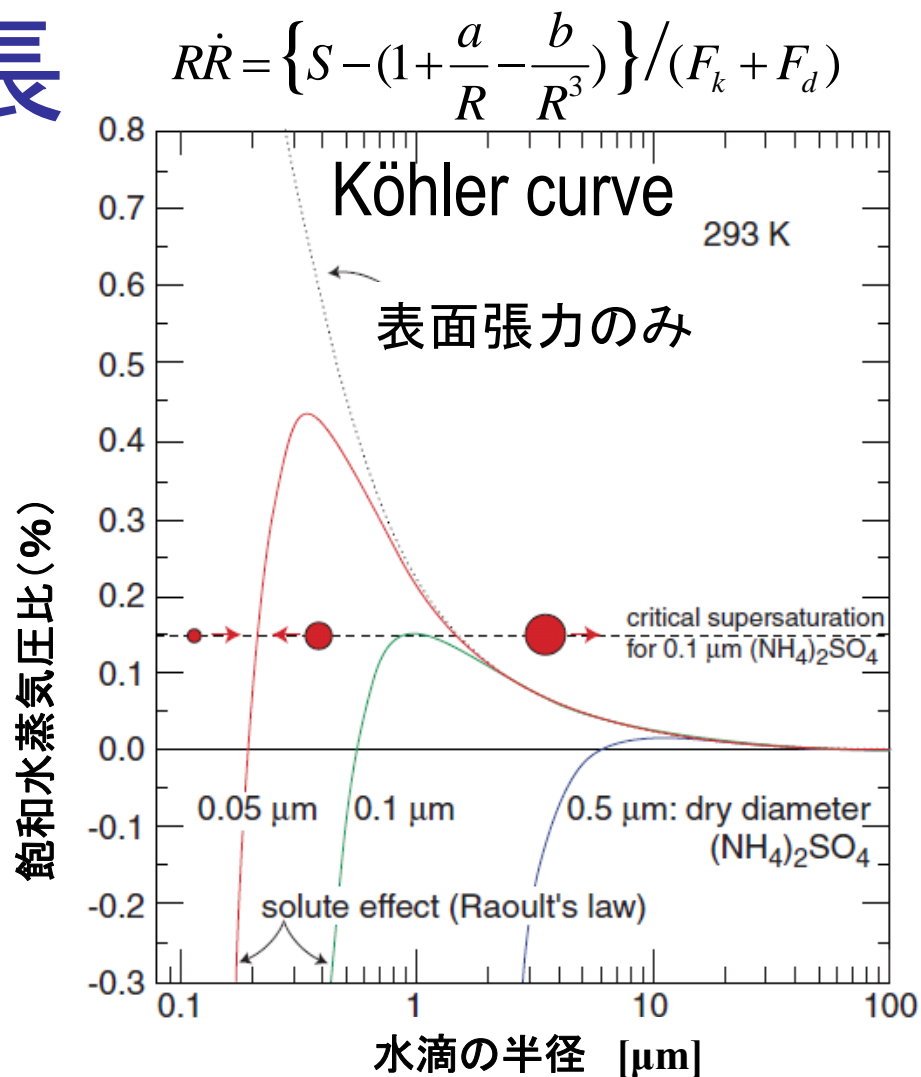
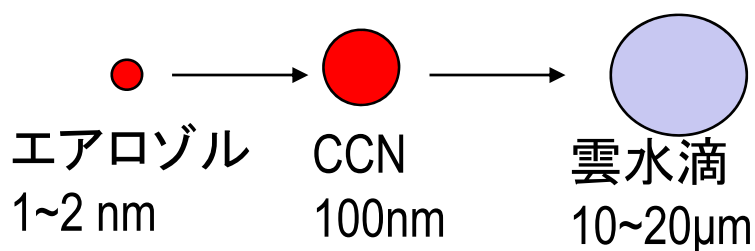
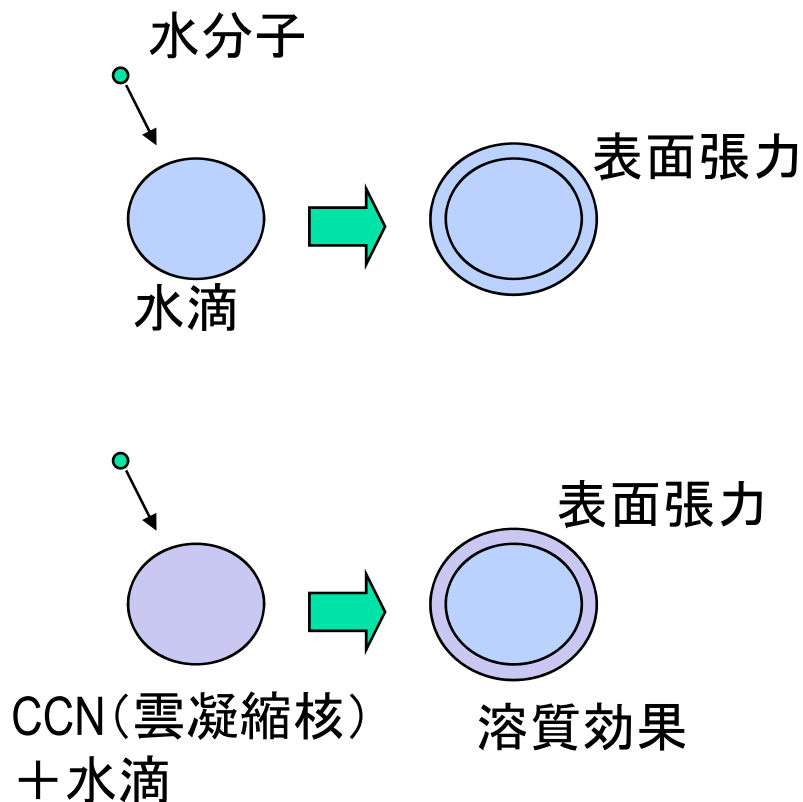


位置 \mathbf{r} 、速度 \mathbf{v} 、半径 R 、凝結核の質量と化学種 M 、電荷 q 、多重度 n

水滴運動論、衝突併合、凝結成長(エアロゾル効果)

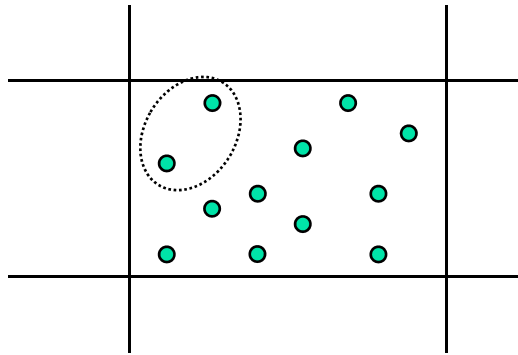
様々な動的粒子系(噴霧、ダスト、マイクロバブル)への応用可能 ⇒ 特許申請

雲水滴の凝縮成長



衝突併合

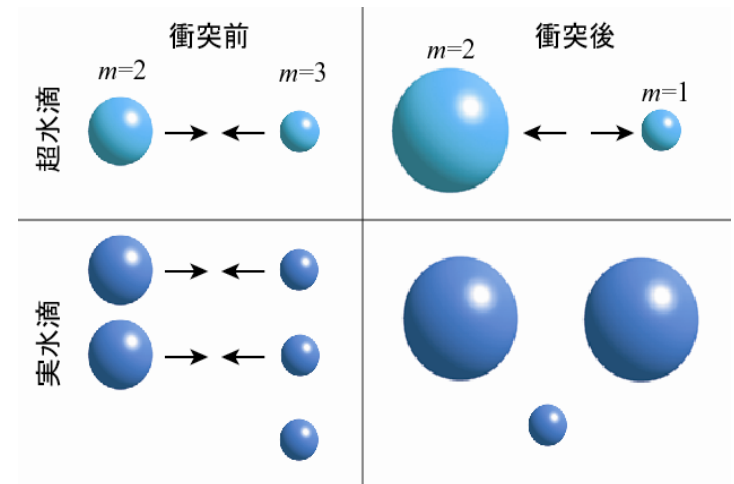
■ モンテカルロ法 (完全混合状態仮定)



ペアリング



衝突判定



衝突操作



Monte Carlo Schemeの詳細

1. 各格子内の全ての超水滴 (N_s 個) についてランダムな順列を作り, 重複なくペア (j, k) を $[N_s/2]$ 個作る。
(衝突候補対の生成)
2. 全ての衝突候補対について, 以下の確率で衝突判定を行う

全てのとりうるペア ($N_s C_2$ 個) を考える代わりに, $[N_s/2]$ 個のペアでこれを代表させる → これで計算コストが $\sim N^2$ でなく $\sim N$ に!

その代わりに衝突確率を割り増しして調整



超水滴の衝突併合確率

$$P_{jk}^{(s)} := \max(n_j, n_k) P_{jk}$$

確認) n_j 個の実水滴と n_k 個の実水滴が衝突すると, 衝突数の期待値は

$$E_{jk} = n_j n_k P_{jk}$$

超水滴jと超水滴kの衝突併合は, 実水滴 $\min(n_j, n_k)$ の衝突併合を意味する

よって, 超水滴の表現する実水滴の衝突併合数の期待値は

$$\begin{aligned} E_{jk}^{(s)} &= \min(n_j, n_k) P_{jk}^{(s)} \\ &= \min(n_j, n_k) \max(n_j, n_k) P_{jk} \\ &= n_j n_k P_{jk} \\ &= E_{jk} \end{aligned}$$



さらに、複数回衝突併合する事も考慮して(Δt が大きいと起こる)

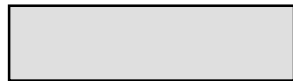
各衝突併合候補ペアに対して以下の操作を行う,
Ranを(0,1)の一様乱数として

$$q = \begin{cases} [p_i] + 1 & \text{if } \text{Ran} < p_i - [p_i] \\ [p_i] & \text{if } \text{Ran} \geq p_i - [p_i] \end{cases}$$

nj



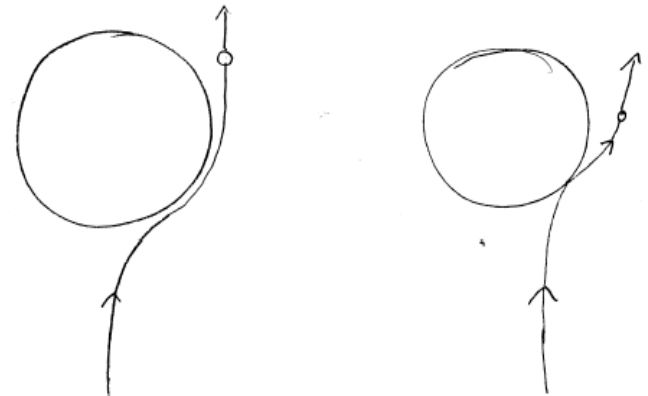
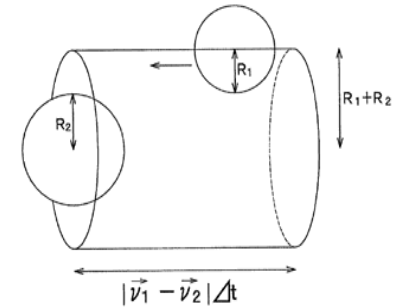
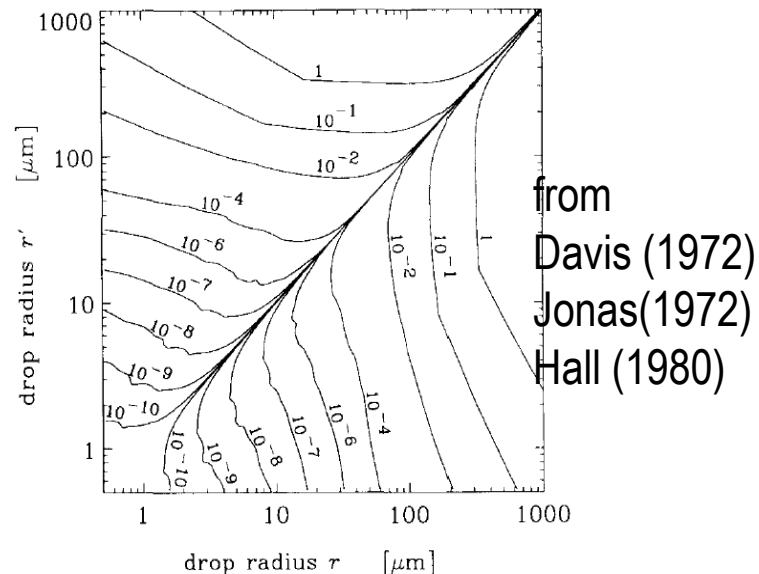
nj



水滴の衝突併合確率カーネル

大気流体場の空間スケールよりも十分小さな空間 ΔV 中で、水滴は十分乱雑に運動していると仮定して
(水滴的混沌状態の仮定: 水滴同士は確率的に衝突併合する)

$$P_{jk} := e_{jk} \frac{\Delta t}{\Delta V} \pi (R_j + R_k)^2 |\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_k|$$



軽い粒はぶつからい

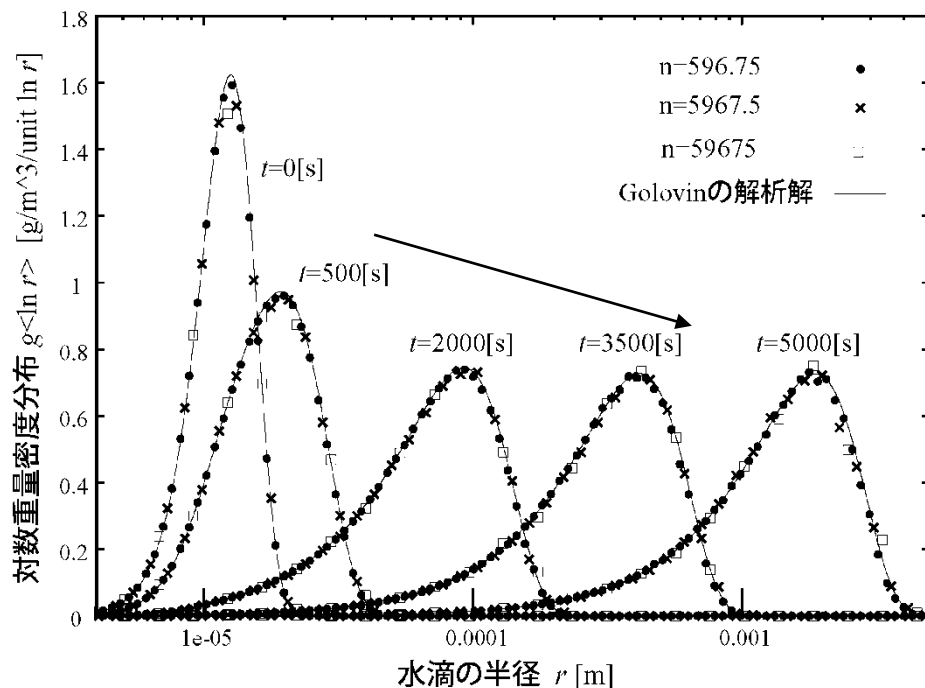
ぶつかるも、はね返るも

Fig. 4. Contour plot of the hydrodynamic coalescence kernel Eq. (21). The labels indicate the values of the contour lines in cm^3/s . On the diagonal from the lower left to the upper right this kernel is zero because drops of equal size do not coalesce since they fall with the same terminal velocity.

衝突併合過程の検証

■ Stochastic Collection eq.の厳密界との比較

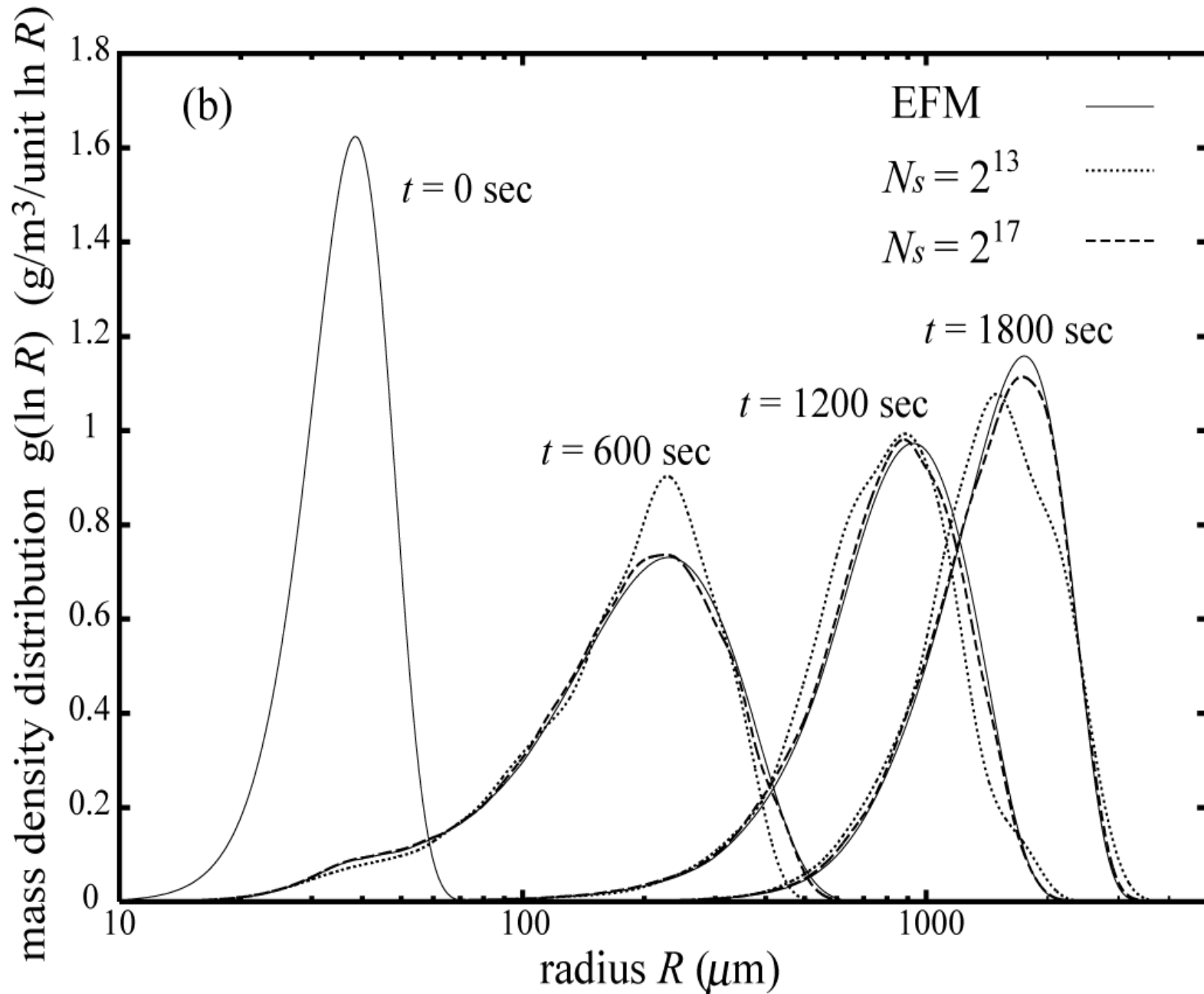
$$\begin{aligned}\partial_t n(x, t) = & \frac{1}{2} \int_0^x n(x') n(x - x') K(x', x - x') dx' \\ & - \int_0^\infty n(x) n(x') K(x, x') dx'\end{aligned}$$



雲粒子粒径分布の
時間変化

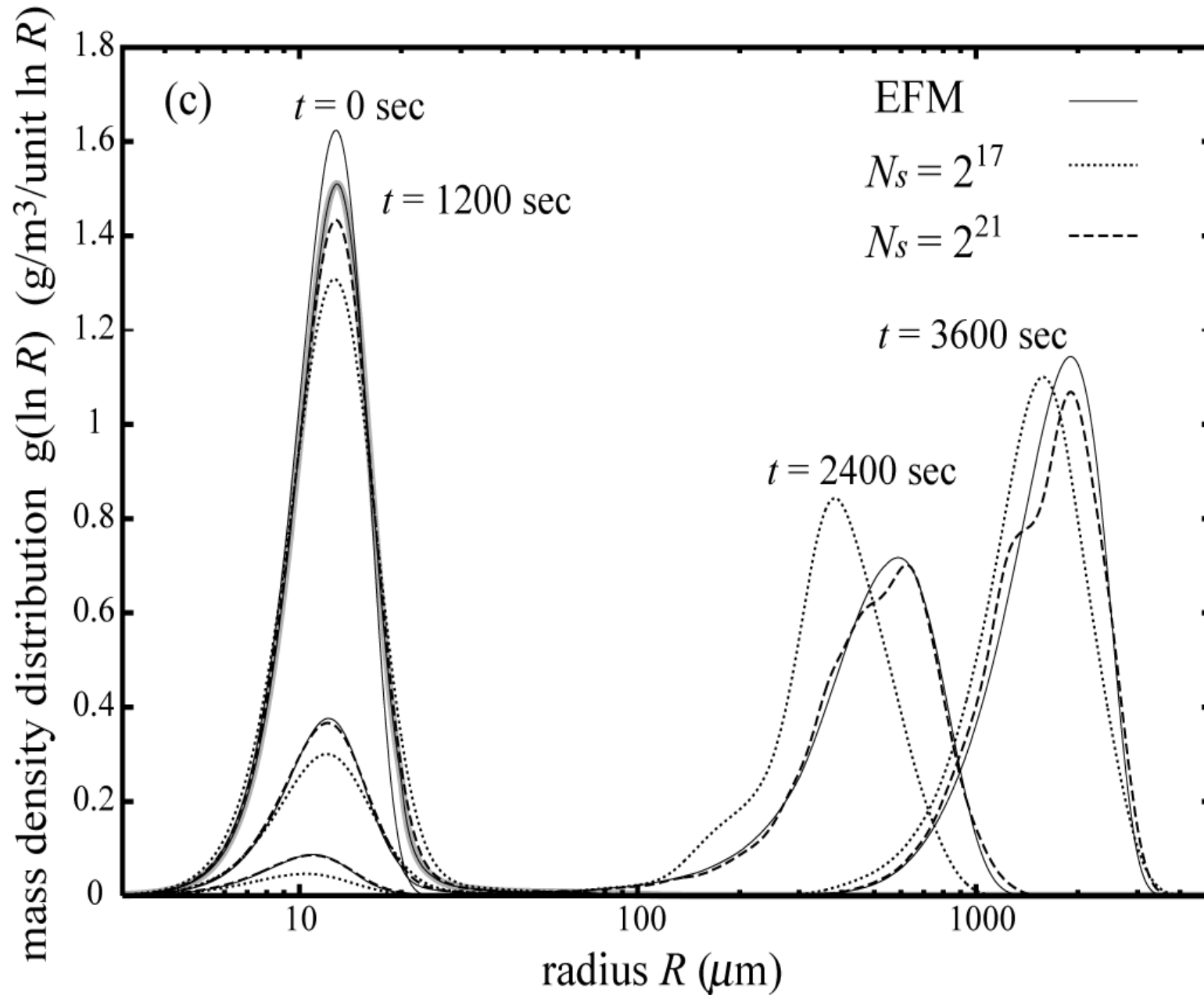


hydrodynamic kernel



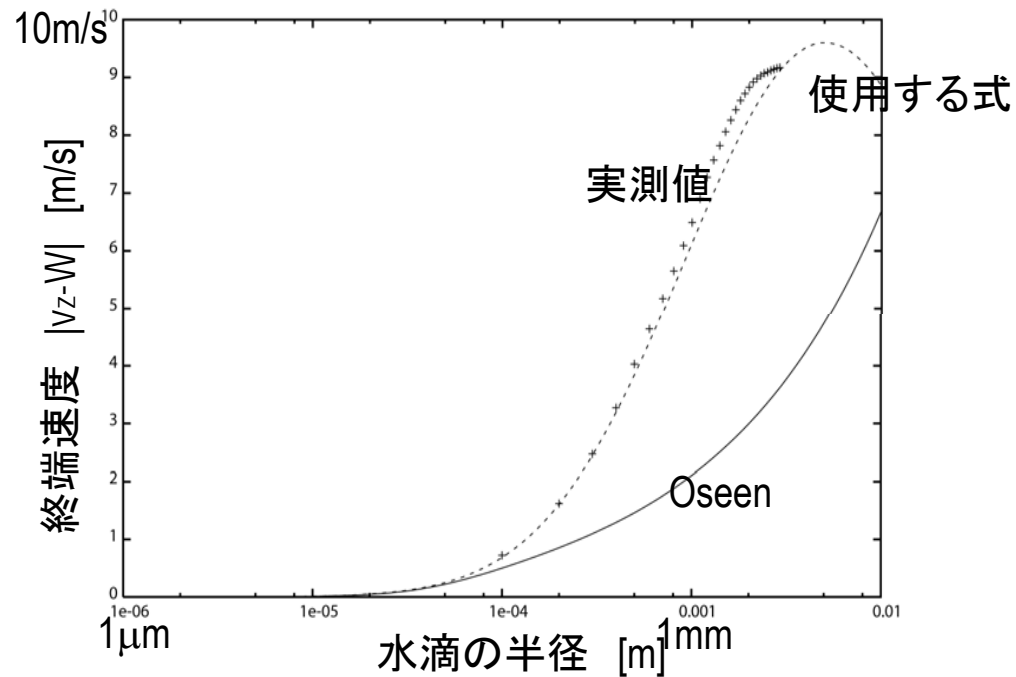


. hydrodynamic kernel



超水滴の運動

■ 終端速度





海洋上の浅い積雲のテスト計算

微物理過程: 超水滴法, 力学過程: 非静力学モデル

$$\Delta x = 3.125 \text{ m and } \Delta z = 4.0 \text{ m}$$

大気流体場

$$U(\mathbf{x}, t = 0) = 0,$$

$$T(x, z = 0, t = 0) = 305.0 \text{ K},$$

$$P(x, z = 0, t = 0) = 101325 \text{ Pa},$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \begin{cases} -9.5 \text{ K km}^{-1} & \text{if } z < 2.0 \text{ km}, \\ +3.0 \text{ K km}^{-1} & \text{if } z \geq 2.0 \text{ km}, \end{cases}$$

$$q_v(\mathbf{x}, t = 0) = 0.022 \exp \left[- \left\{ \frac{(z + 200.0 \text{ m})}{2000.0 \text{ m}} \right\}^2 \right].$$

warm bubble

$$\theta(\mathbf{x}, t = 0) = \theta_b(\mathbf{x}, t = 0) + 1.0 \text{ K}$$

$$\times \exp \left[- \left\{ \frac{(z - 500.0 \text{ m})}{400.0 \text{ m}} \right\}^2 - \left\{ \frac{(x - 6.4 \text{ km})}{1200.0 \text{ m}} \right\}^2 \right],$$

CCN (NaCl) number density $1.0 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$

$$p(M_i) = \frac{1}{M_0} \exp \left(- \frac{M_i}{M_0} \right), \quad M_0 = 1.0 \times 10^{-16} \text{ g}.$$

雲と雨の超水滴シミュレーション



Cloud Formation Simulated
by Super-Droplet Method

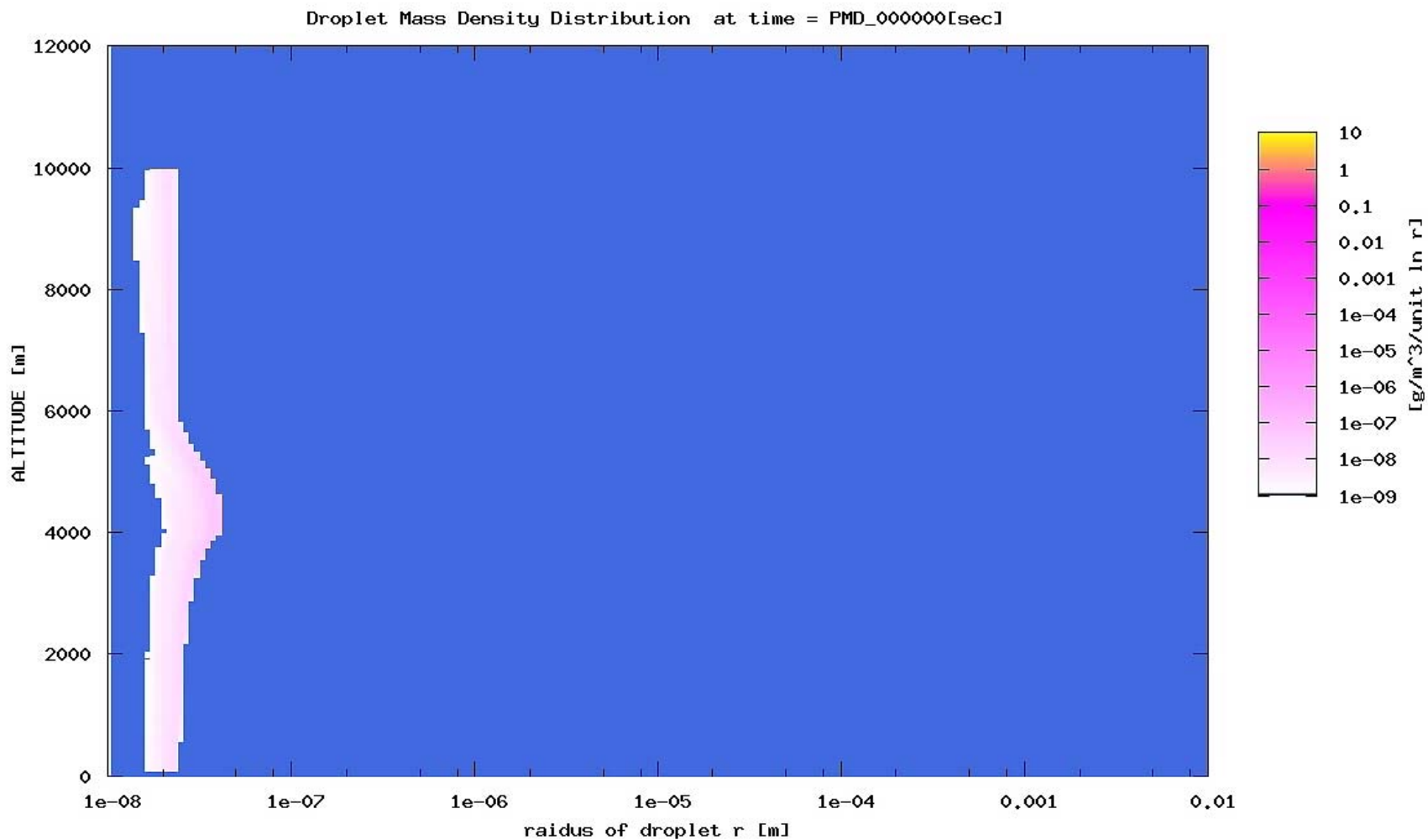
T = 12 [sec]

5000

0 2000

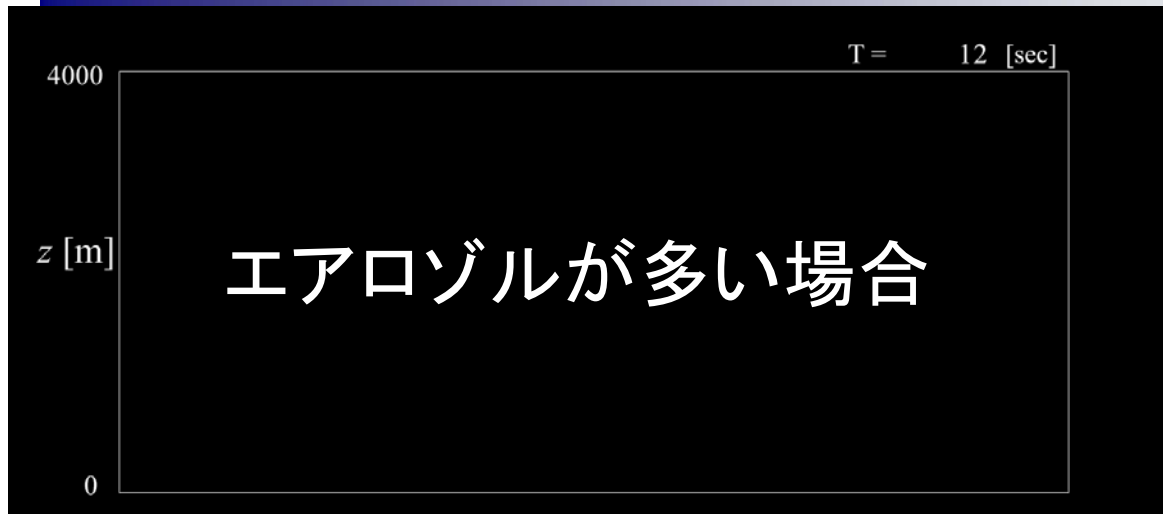
11000 [m]

高度

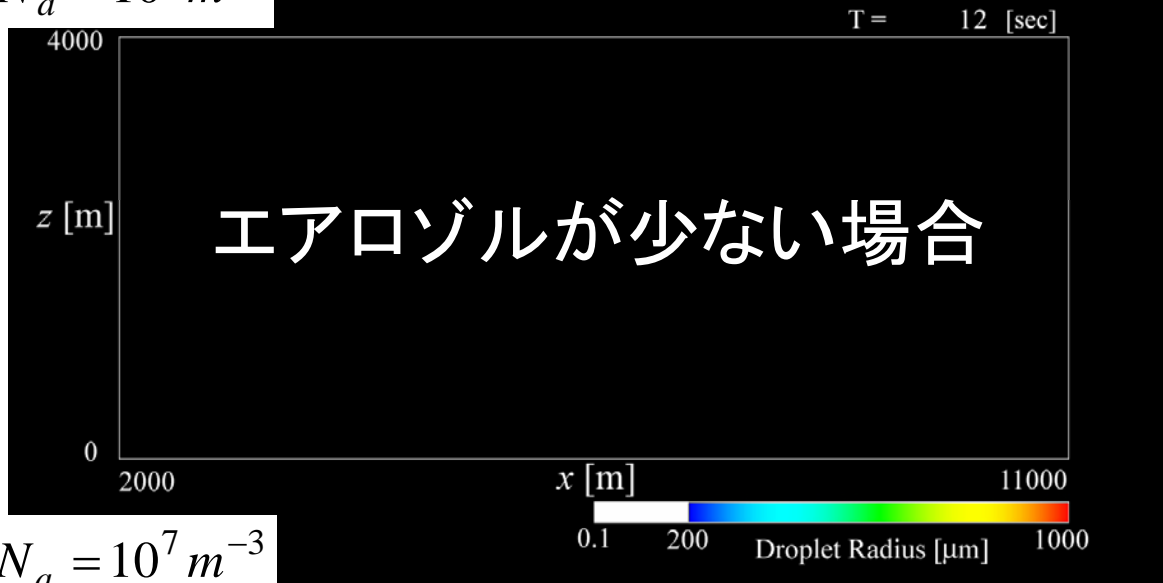


水滴の大きさ

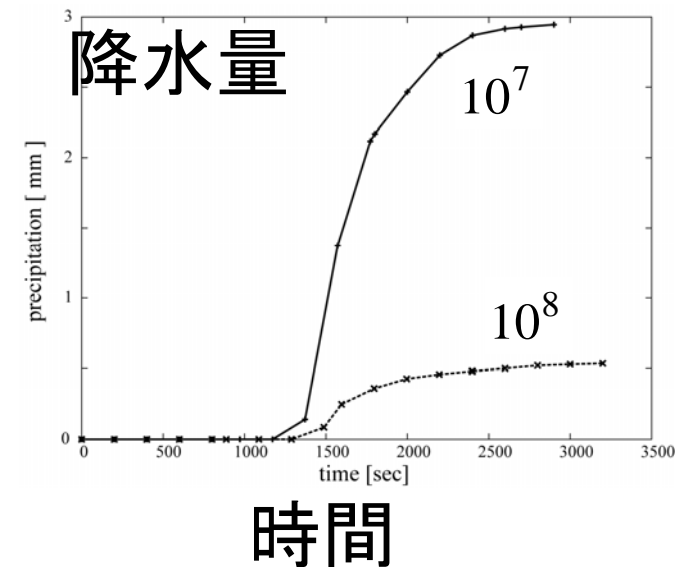
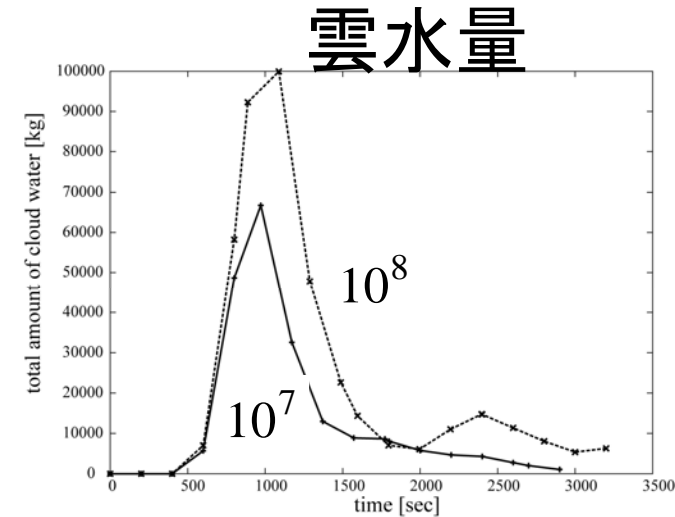
雲形成と降雨に対するエアロゾル効果



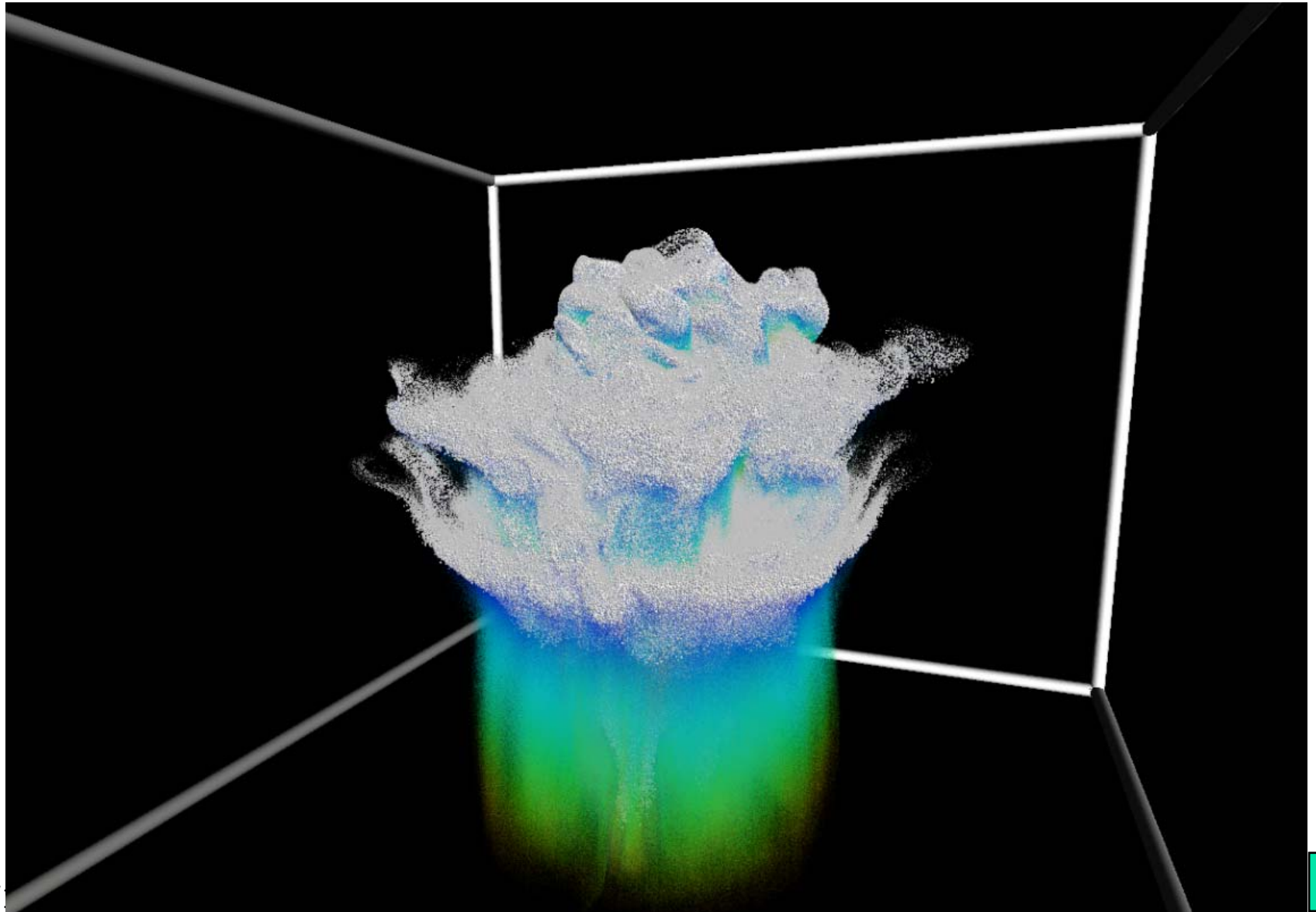
$$N_a = 10^8 m^{-3}$$



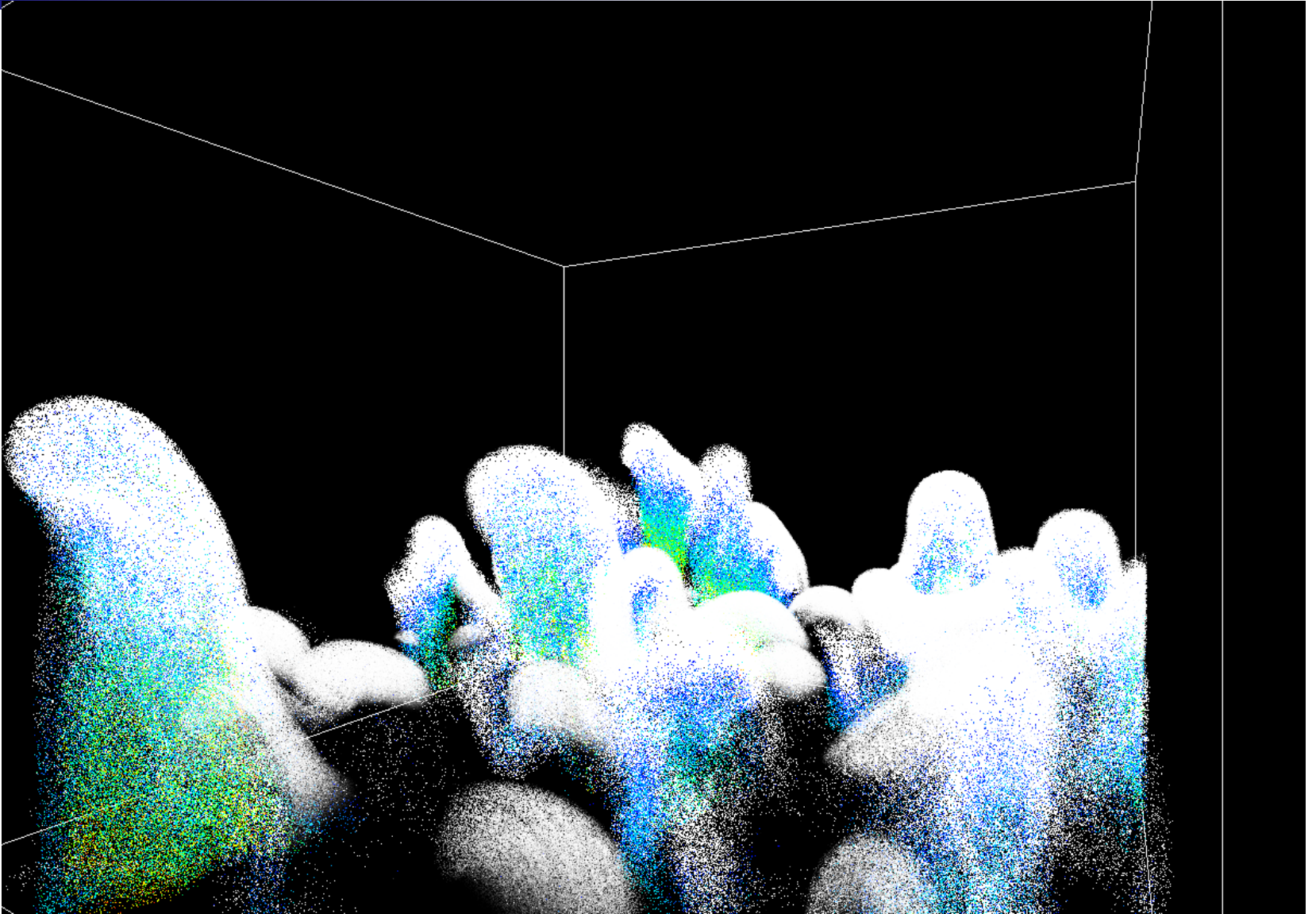
$$N_a = 10^7 m^{-3}$$



3次元雲形成シミュレーション



GCSS-RICOプロジェクト



超水滴法の長所と短所

■ 長所

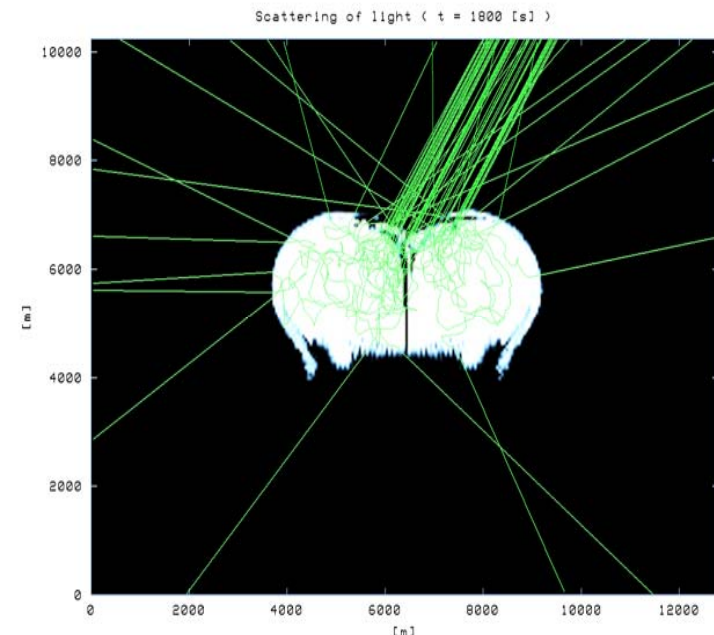
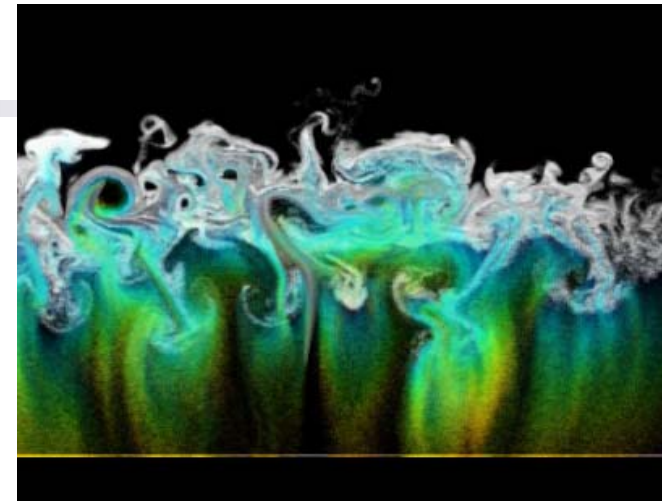
- 粒子の分布(速度、粒径、物質種、エアロゾル、電荷、温度、相、形状)を考慮できる。
- 粒子と流体の複雑な相互作用を第1原理から考慮できる。
- 粒子の無いときもそのまま計算できる。
- 2体衝突で粒子数が変わっても、超水滴数は変わらない。
- 粒子変数次元と共に衝突併合計算量はそれほど急激に増えない。

■ 短所

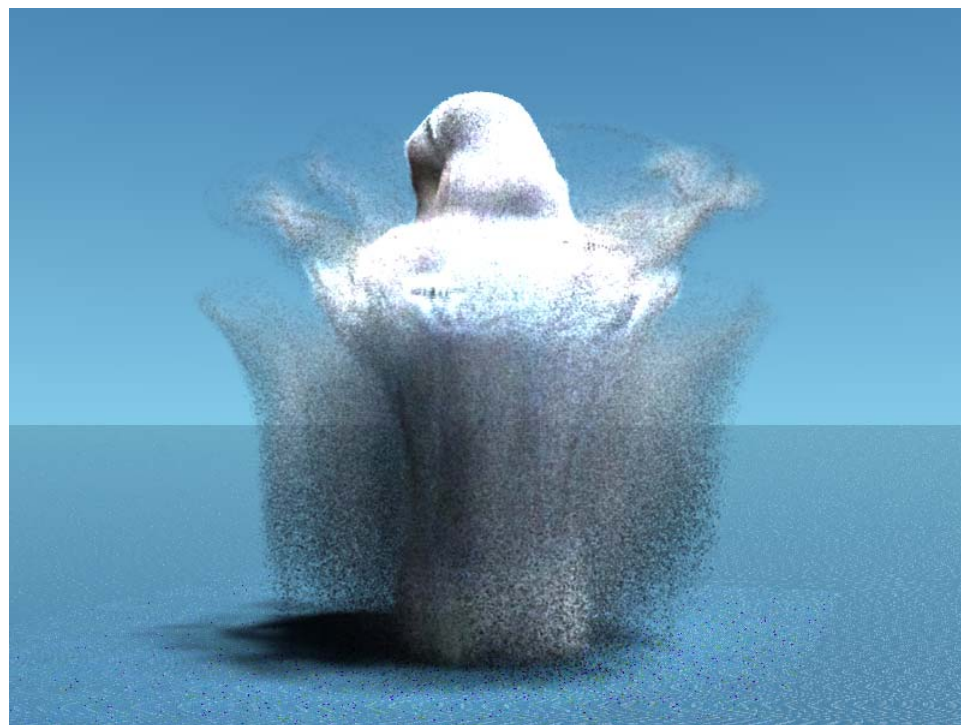
- 流体モデルに比べて計算は重い。
- 統計誤差

超水滴法の応用

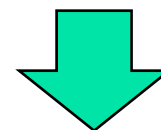
- 雲乱流研究
 - 自己維持乱流の一種
- 温暖化予測
 - 雲の光学特性と地球のアルベド評価 → GCMへの連結
- 気象予報
 - 電荷分離(雷放電)
 - 人工降雨
- 様々な動的粒子系の応用
 - プラズマ中のダスト成長
 - 噴霧燃焼
 - 噴煙
 - マイクロバブル



雲の光学特性を考慮した可視化



光の波長、
水滴の大きさと数
に応じた光の散乱
と吸収の計算が可能

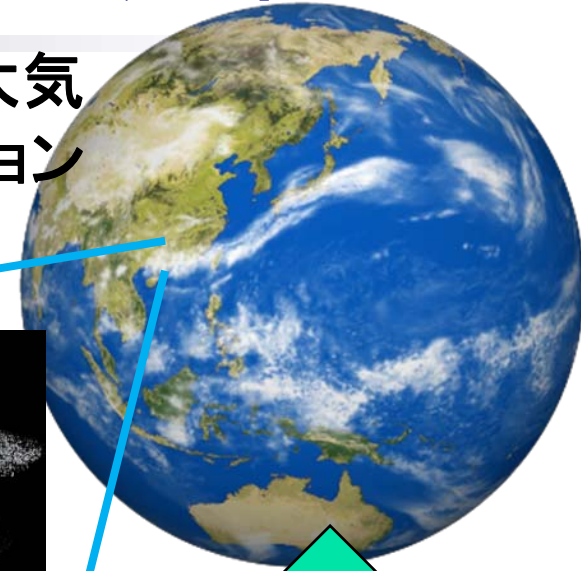


大気放射の精密な
解析

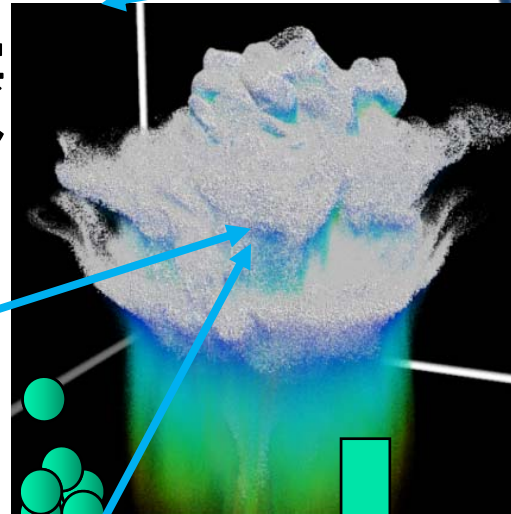
連結階層型気候シミュレーション

- 宇宙線気候影響
- 温暖化予測の精密化
- 人工降雨の最適化

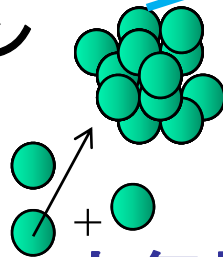
全球大気
シミュレーション



超水滴雲
シミュレーション

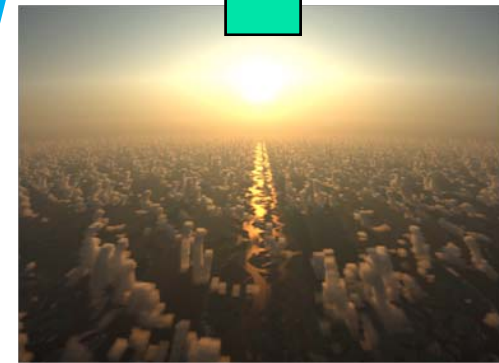
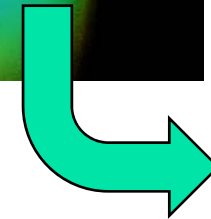


エアロゾル生成の分子
シミュレーション



大気電離

太陽圏の宇宙線伝搬
シミュレーション



大気放射
シミュレーション

