

# 超水滴法による雲形成シミュレーションの 研究進展状況

火山現象の数値計算研究, 16, Nov, 2009

海洋研究開発機構 地球内部ダイナミクス研究領域  
島 伸一郎

## people involved

### 雲のモデリング

坪木和久 (名大/JAMSTEC)  
榊原篤志 (Chuden CTI Co. Ltd.)  
長谷川晃一 (Chuden CTI Co. Ltd.)  
大淵濟(JAMSTEC)  
草野完也 (JAMSTEC)

### データ処理と可視化

荒木文明 (JAMSTEC)  
河原慎太郎 (JAMSTEC)

# 概要

超水滴法(SDM)は粒子法による確率的な雲微物理モデル (S.S. et al., QJRMS, 2009)

比較的少ない計算コストで正確な予測が期待される

**(一般に離散粒子が衝突併合を繰り返す系に適用可能)**

現在, 観測との比較や, 雲微物理過程の精密化を進めている

## 話の流れ

1. 雲を構成する物理法則
2. 超水滴法の概要
3. CReSS-SDMの開発状況
4. 宮古島の観測再現計算 (途上)
5. まとめと今後の計画

# 1. 雲を構成する物理法則

## 雲の力学過程

湿潤大気の流体力学的振舞い

## 雲の微物理過程

相互作用

エアロゾル/雲粒/降水粒子の振舞い

- 風と重力による運動
- 雲粒の凝結成長, 衝突併合
- エアロゾルの組成  
海塩(NaCl), 硫酸塩, 有機炭素, 黒色炭素, 硝酸塩, 等
- 気相との化学反応
- 氷晶(雪, ひょう, あられ)への相変化, 帯電過程, 分裂過程, 等々

精密な数値シミュレーションが難しい

- 膨大な量の水滴( $10^9$ 個/ $m^3$ )
- 本質的に非定常現象

→ 超水滴法を開発した

# 1.1. 雲形成の基礎方程式

## 雲力学過程

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

motion eq.

momentum coupling

$$P = \rho R_d T, \quad \text{eq. of state}$$

$$\frac{D\theta}{Dt} = -\frac{L}{c_p \Pi} S_v,$$

adiabatic process

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

thermal coupling

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

eq. of continuity

mass coupling

$\rho = \rho_d + \rho_v$ : 湿潤大気密度

$q_v = \rho_v / \rho$ : 水蒸気の混合比

$\bar{v}$ : 風速

$T$ : 温度

$\theta$ : 温位

$\Pi = (p / p_0)^{R_d / c_p}$  エクスナー関数

$\rho_w$ : 水滴の密度

$S_v$ : 水蒸気と水の相変化によるソース項

$\bar{g}$ : 重力定数

$\lambda, \kappa$ : 乱流拡散係数

$R_d$ : 乾燥空気の気体定数

$c_p$ : 定圧比熱

$L$ : 水蒸気の潜熱

$$\rho_w(\mathbf{r}, t), S_v(\mathbf{r}, t)$$

水滴(微物理系)  
との相互作用項

空間単位体積辺りの液体の水の密度

空間単位体積, 単位時間辺りに液体の水が蒸発して水蒸気になった質量/ $\rho$

# 雲微物理過程

実水滴 (エアロゾル/雲粒/降水粒子の総称)

$N_r(t)$ : 大気中の実水滴の総数

位置:  $\mathbf{x}(t)$

属性:  $\mathbf{a}(t) = \{a_1(t), a_2(t), \dots, a_d(t)\}$

実水滴の時間発展

個別運動

$$\frac{d\mathbf{x}_i}{dt} = \mathbf{v}_i, \quad \frac{d\mathbf{a}_i}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{a}_i), \quad i = 1, 2, \dots, N_s(t).$$

相互作用 (衝突併合): 確率的に扱えると仮定

$$\begin{aligned} P_{jk} &= C(R_j, R_k) |\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_k| \frac{\Delta t}{\Delta V} \\ &= K(R_j, R_k) \frac{\Delta t}{\Delta V} \\ &= \text{probability that real-droplet } j \text{ and } k \\ &\quad \text{inside a small region } \Delta V \text{ will coalesce} \\ &\quad \text{in a short time interval } (t, t + \Delta t). \end{aligned}$$

雲力学過程への作用

$$\rho_w(\mathbf{x}, t) := \sum_{i=1}^{N_r} m_i(t) \delta^3(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i(t)), \quad S_v(\mathbf{x}, t) := \frac{-1}{\rho(\mathbf{x}, t)} \sum_{i=1}^{N_r} \frac{dm_i(t)}{dt} \delta^3(\mathbf{x} - \mathbf{x}_i(t)),$$

# 実水滴の数密度の時間発展方程式

無相関の近似が成り立つとすると

$$p(n_1, \bar{a}_1, n_2, \bar{a}_2) = p(n_1, \bar{a}_1) p(n_2, \bar{a}_2),$$
$$p(n_1, \bar{a}_1, n_2, \bar{a}_2, n_3, \bar{a}_3) = p(n_1, \bar{a}_1) p(n_2, \bar{a}_2) p(n_3, \bar{a}_3).$$

以下が導ける

$$\frac{\partial n(\mathbf{a}, \mathbf{x}, t)}{\partial t} + \nabla_{\mathbf{x}} \cdot \{\mathbf{v}n\} + \nabla_{\mathbf{a}} \cdot \{\mathbf{f}n\} = \frac{1}{2} \int d^d a' n(\mathbf{a}') n(\mathbf{a} - \mathbf{a}') K(\mathbf{a}', \mathbf{a} - \mathbf{a}') - n(\mathbf{a}) \int d^d a' n(\mathbf{a}') K(\mathbf{a}, \mathbf{a}'),$$

超水滴法とはこの方程式の数値解法

## 2. 超水滴法の概要

### 基本アイデア

不要に多い実水滴の自由度を粗視化する手法

### 超水滴の定義

位置座標  $r$ , 属性  $a$

**多重度  $n$** : 同一属性の  $n$  個の実水滴を表現.

### 超水滴のダイナミクスと数値解法

個別運動: 実水滴と同じ方程式

各超水滴に対して常微分eq.を解く

衝突併合: **新しい確率過程を導入** (次スライド)

期待値として実水滴系に対応

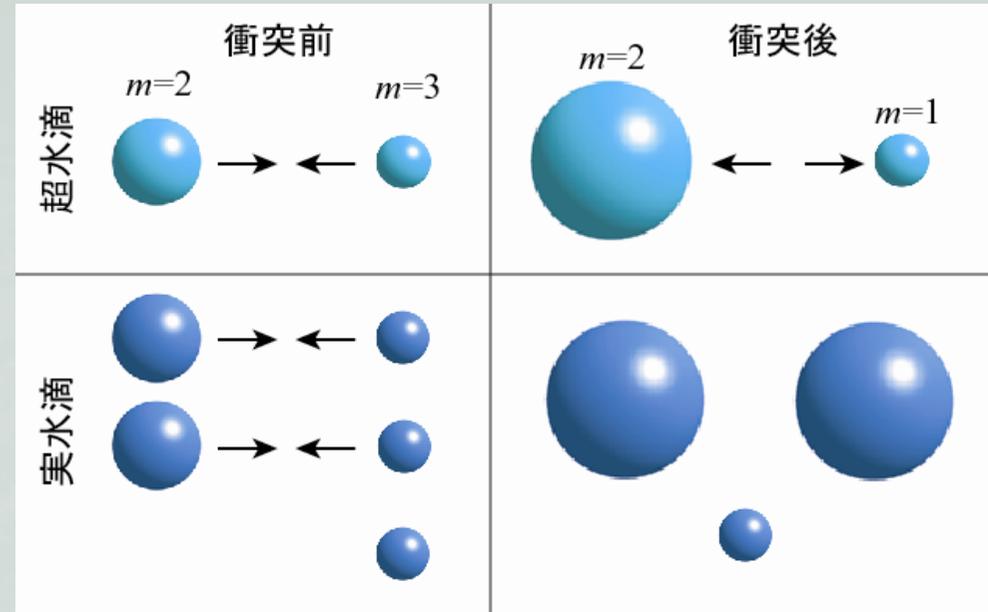
**独自のモンテカルロ法で数値計算**

# 超水滴同士の衝突併合の定義

$n_1$  の超水滴と  $n_2 (>n_1)$  の超水滴は  
 $n_1$  の大きな超水滴と  
 $(n_2 - n_1)$  の超水滴になる

すると,

実水滴の数は融合により減るが,  
超水滴の数は(ほぼ)保存する



# 超水滴の衝突併合確率

衝突併合数の期待値を再現する様に, 次の様に定義

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

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 $k$ 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

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

## 2.1. 超水滴法の特徴のまとめ

超水滴は複数の実水滴を表す計算粒子

個別ダイナミクスは常微分eq.を解く

衝突併合過程は独自のモンテカルロ法を使って確率的に解く

拡張性が高い

比較的容易に複雑な雲微物理過程を表現できる

より複雑な雲微物理過程の計算に向いている

衝突併合する任意の離散粒子系に適用可能

噴霧燃焼, 星の形成, 液滴分散系, 気泡成長, マグマ, 火山噴煙

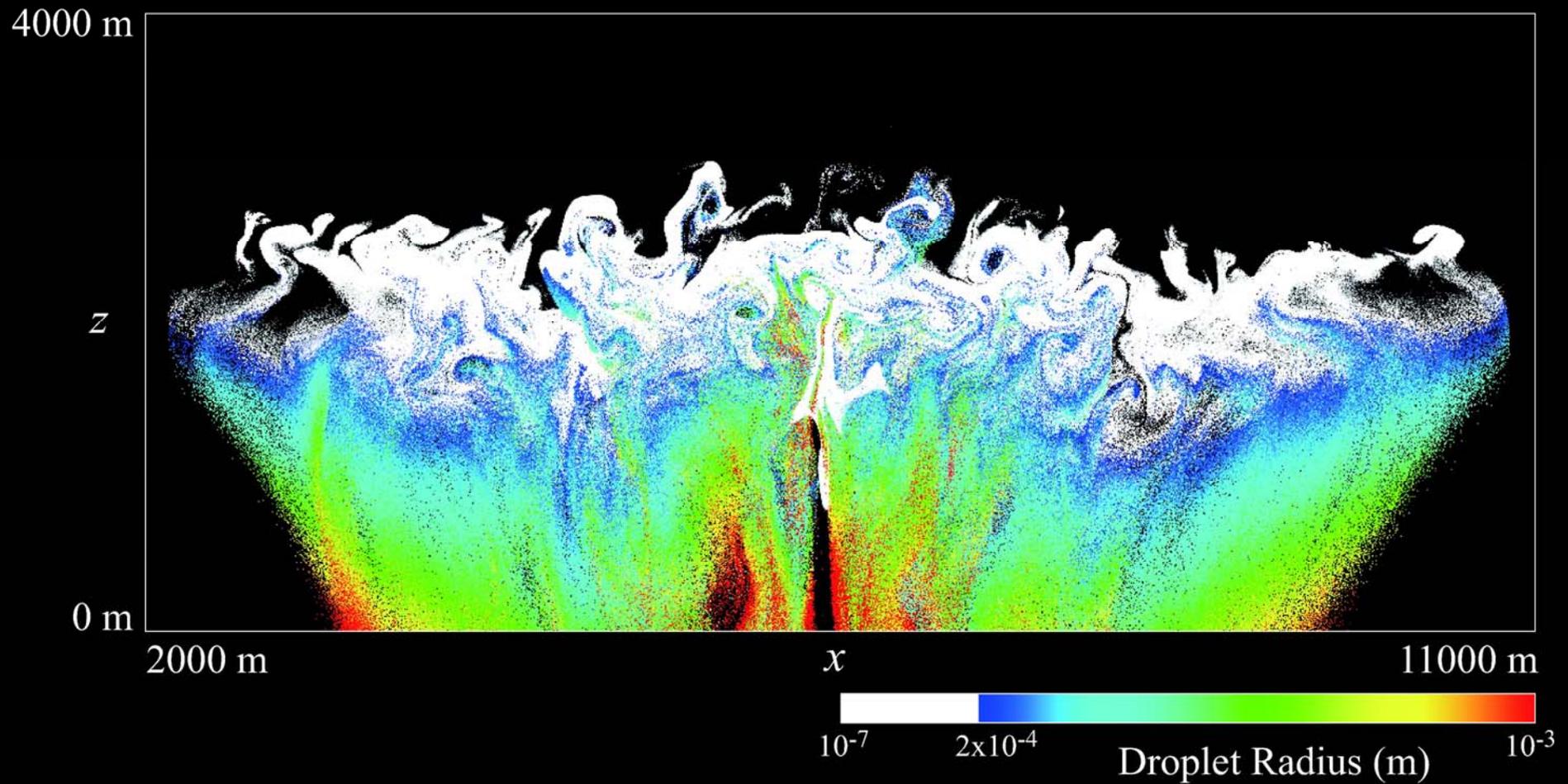
Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) 法の1種

希薄ガスの流れを記述するBoltzmann方程式の数値解法

噴霧燃焼モデル類似: KIVA + “extended NTC method” (Schmidt and Rutland 2000)

## 2.2. 計算例

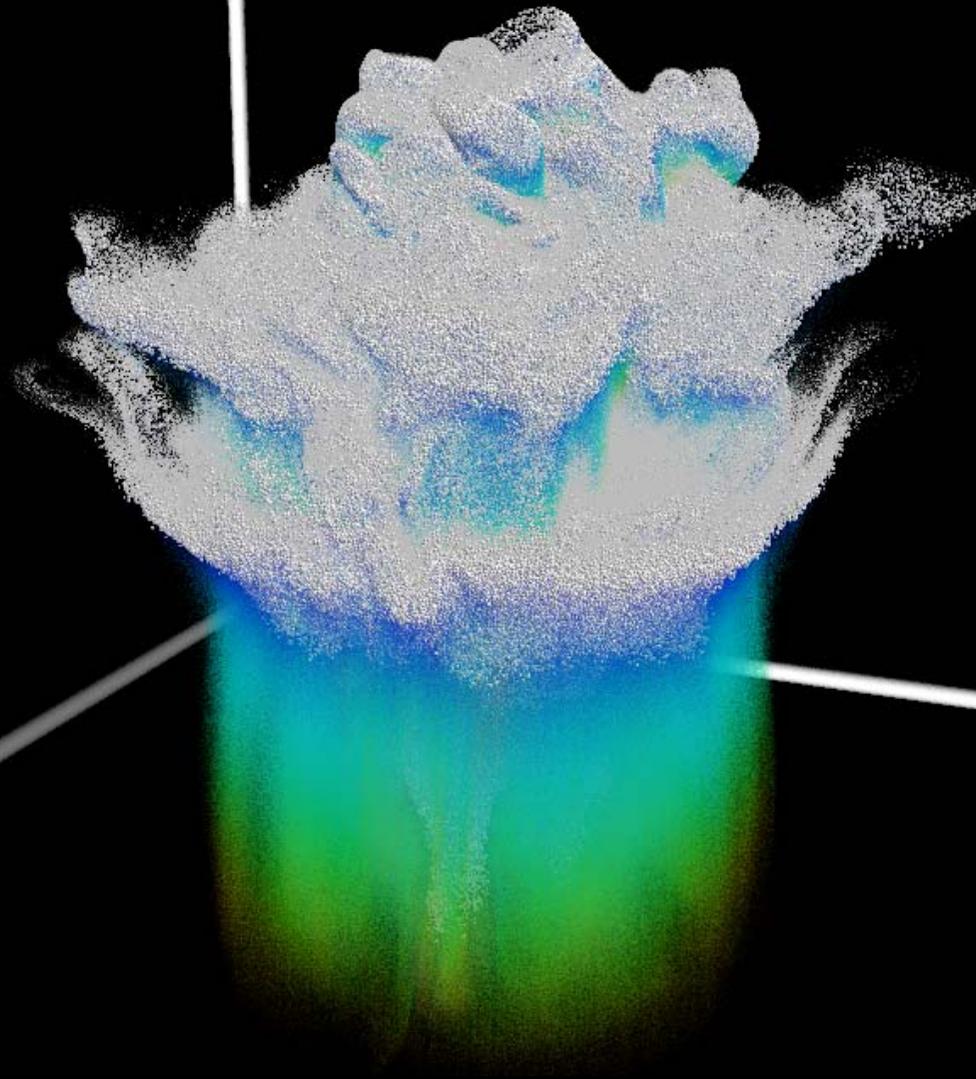
$T = 1590 \text{ sec}$



**warm bubble case (3D,  $\Delta z = 8$  m)**

grid: 624x1024x1024, particles: #10<sup>10</sup>,

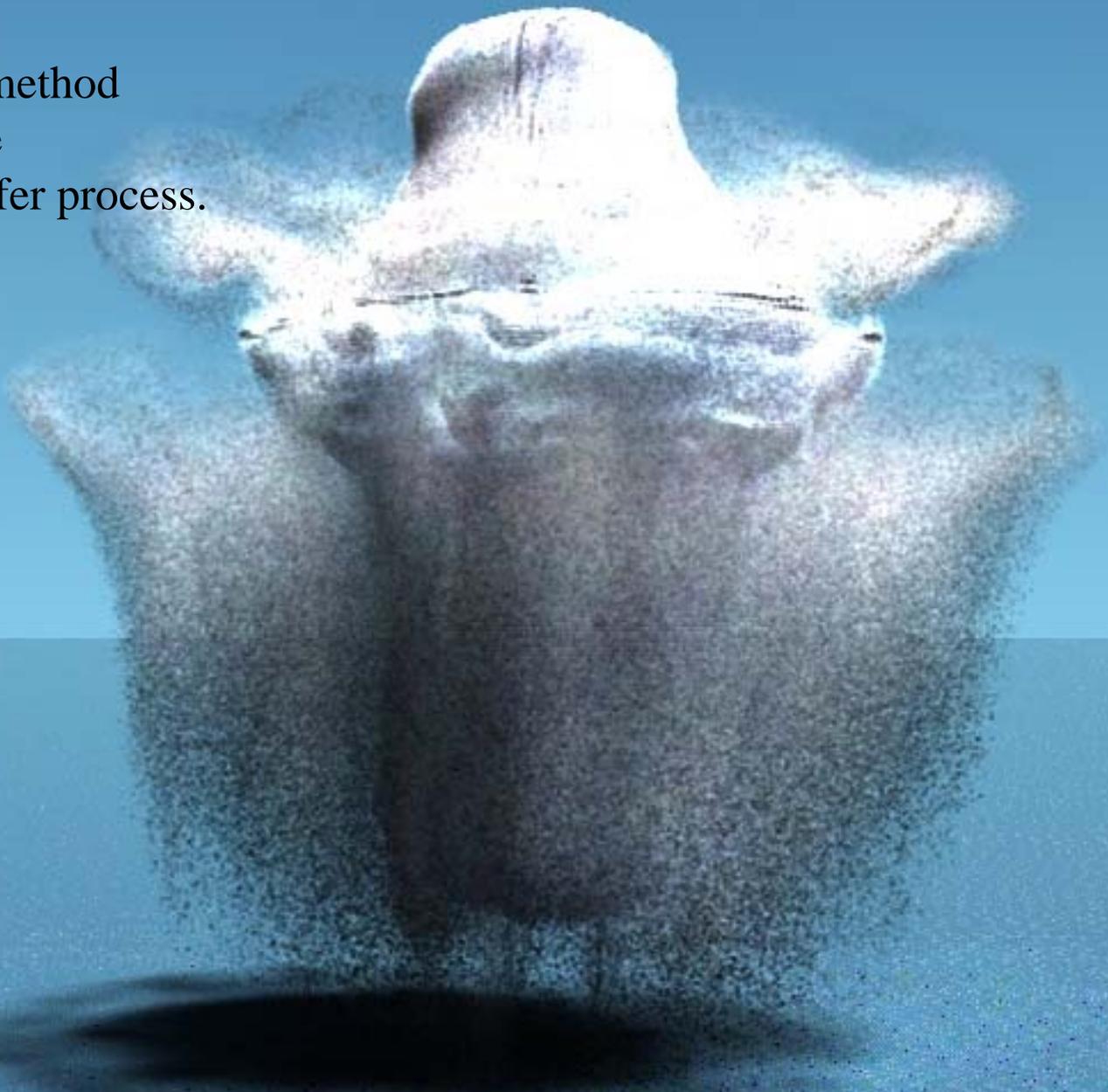
ES 256 nodes



**photo realistic visualization:**

$\Delta z = 16 \text{ m}$

Photon-mapping method  
is used to simulate  
the radiation transfer process.



### 3. CReSS-SDMの開発状況

目的: 信頼性の高い雲力学モデル(CReSS)に実装する事で, **海洋上の低層雲を数日・数百キロスケールで精密計算する**

雲微物理過程の最小構成が実装済み

水蒸気凝結・蒸発 / 衝突併合 / 移流・沈降・降雨

ES2用にチューニング済み

ピーク性能比4~10%程度.

高い並列化効率により128ノードの利用許可 (申請可能な最大ノード数)

現在, より詳細な雲微物理過程を実装中

宮古島の観測再現実験の試計算を最近始めた

## 4. 宮古島の観測再現計算 (途上)

### 4.1. 再発達を伴う海洋性孤立対流雲

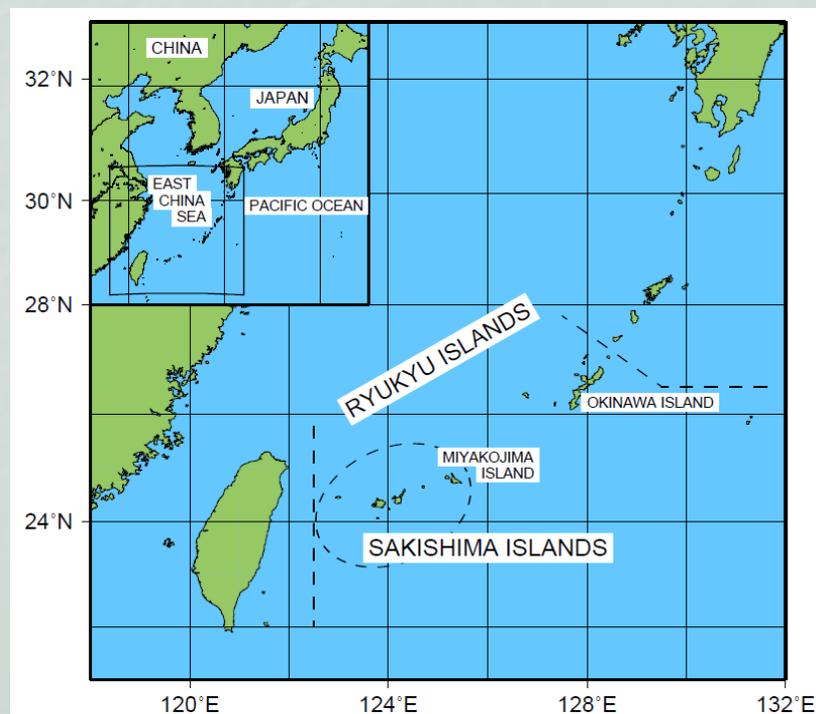
研究の背景・概要 (内藤大輔さんの修論より抜粋)

宮古島周辺は、梅雨期にほぼ全層が非常に湿潤な場になる。

再発達を伴う新しいタイプの対流雲が観測された

解析した結果、北米に代表される乾燥域では見られない、

未知の維持メカニズムが示唆された。



## 5. まとめと今後の計画

---

- 海洋性低層雲の精密計算に向け, 超水滴法(SDM)をCReSSに実装中
  - 雲微物理の最小構成は実装済み, さらに拡張中
  - 観測との比較を通してCReSS-SDMの有効性の検証を開始