

---

# 雲に見られる混相乱流現象 －雲粒の乱流衝突成長－

「火山現象の数値計算研究」  
於 東京大学地震研究所  
2009/11/16

大西 領、高橋桂子  
地球シミュレータセンター/JAMSTEC

# 雲に見られる混相乱流現象

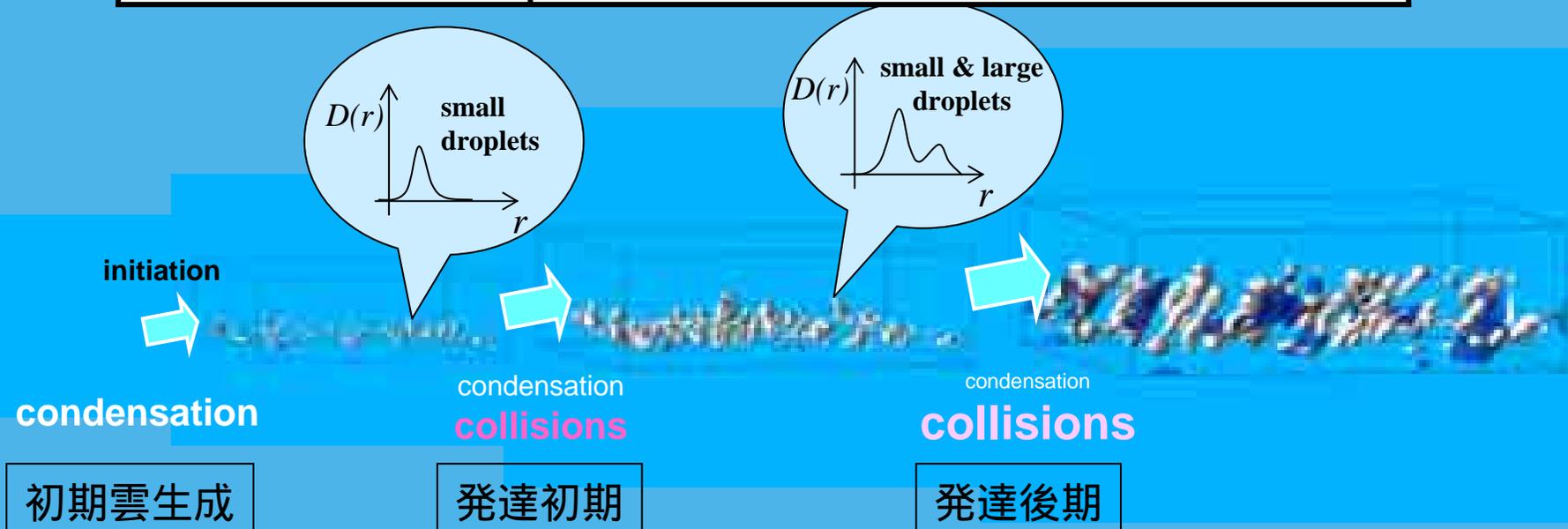
- 雲の多くは上昇気流によって乱流状態
  - (層雲  $\sim 10^{-3}[\text{m}^2/\text{s}^3]$ )
  - 積雲  $\sim 10^{-2}[\text{m}^2/\text{s}^3]$
  - 積乱雲  $\sim 10^{-1}[\text{m}^2/\text{s}^3]$
  - テイラースケール基準乱流レイノルズ数 $Re$  は $10^3\sim 4$
- 水滴(球形)や氷粒、雪片(非球形)を含む
  - 慣性粒子の混合拡散
  - 周囲大気との混合(エントレインメント)
  - 相変化
  - **衝突合体**、分裂

# 代表的なスケールと無次元数

- コルモゴロフスケール = 1mm
- エアロゾル径 = 1  $\mu\text{m}$ 、雲粒径 = 10  $\mu\text{m}$ 、雨粒径 = 100  $\mu\text{m}$  ~ 1mm
- $Re = 10^{3\sim 4}$
- 雲粒のストークス数:  $St < 1$ 、 $St \sim 1$  ( $St = \frac{\rho v^2 r}{\mu}$ )
- $\frac{\rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{air}}} = 10^3$

# 雲の発達と雲粒成長

雲の発達段階	支配的プロセス
初期雲生成時	凝結核生成、凝縮
発達初期	凝縮 同程度の大きさの粒子同士の衝突
発達後期	異径粒子間(大粒子と小粒子)の衝突



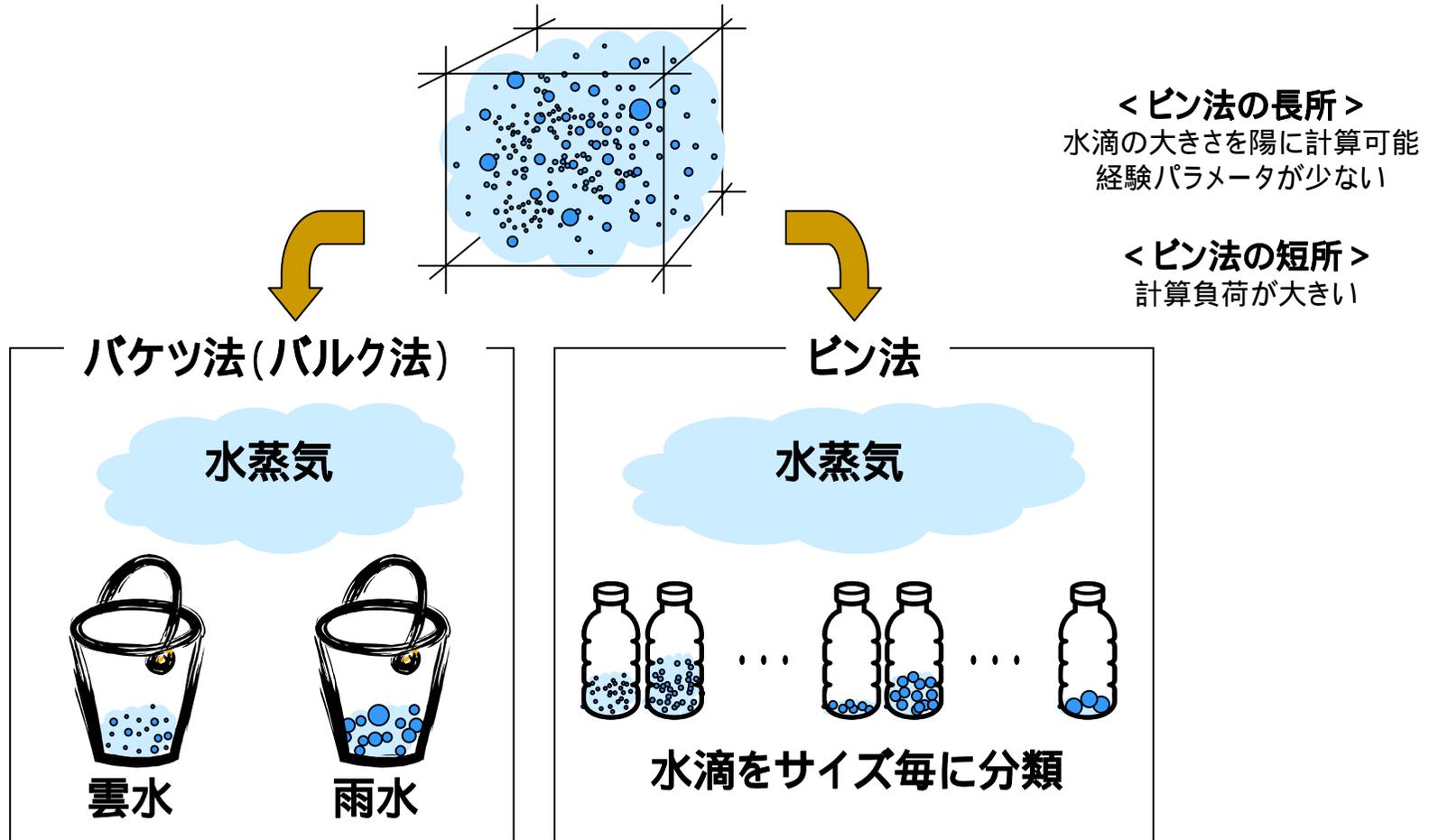
---

# 雲粒の乱流衝突研究

「なぜ、素早い降雨開始が可能なのか？」

- エントレインメント説
- 巨大雲凝結核 (GCCN) 説
- 雲粒の乱流衝突説
  - ~1960年代 支配的な要素 (e.g. Arenberg 1939; Saffman&Turner 1956)
  - ~1990年代前半 陥落 (e.g. Beard&Ochs 1993)
  - 1990年代後半~ 復活 (e.g. Sundaram&Collins 1997; Falkovich 2002)
  - 現在 「適度に重要な要素」  
でも、現在でも批判的な意見もある (e.g. Pinsky et al. 2007)

# 雲微物理計算法 - バケツ法(バルク法)とビン法 -



# バルク法による衝突成長計算

- 雲粒同士が衝突して、雨粒になる過程 (autoconversion過程)

- 例: Kesslerの式

$$\frac{dq_r}{dt} = a \times \max(q_c - q_{c0}, 0)$$

ただし,  $q_c, q_r$ は雲水混合比および雨水混合比[kg/kg],  
 $a$ は時係数(e.g.,  $a=1 \times 10^{-3}$ [1/s]),  $q_{c0}$ はある閾値(e.g.,  $q_{c0}=0.5 \times 10^{-5}$ )

- 雨粒が雲粒を併合する過程

- 例: Grellらの式

$$\frac{dq_r}{dt} = f(q_c, \overline{V_{p\infty}}(q_r))$$

バルク法を使って“雲粒の乱流衝突の影響”を調査するには限界がある

# ビン法における衝突成長計算

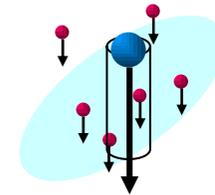
## Stochastic Collection Equation (SCE)

$$\left( \frac{\partial n_p(r)}{\partial t} \right)_{col} = \frac{1}{2} \int_0^r \underbrace{K_c(r'', r')}_{\text{衝突頻度因子}} n_p(r'') n_p(r') dr' - \int_0^\infty \underbrace{K_c(r, r')} n_p(r) n_p(r') dr'$$

Hydrodynamic (Gravitational) 衝突モデル  
(乱流衝突を無視)

$$K_c(r_1, r_2) = \pi R^2 |V_\infty(r_1) - V_\infty(r_2)|$$

(  $R$  : collision radius ( $=r_1+r_2$ ),  $V$  : settling velocity )

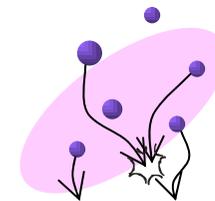


乱流衝突モデル (大西ら、機論B(2005,2006,2007))  
(乱流衝突を考慮)

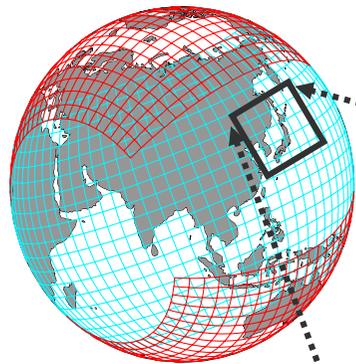
$$\langle K_c(r_1, r_2, l_\eta, u', Re_\lambda) \rangle = 2\pi R^2 \langle |w_r| \rangle g(R)$$

$|w_r|$  : radial relative velocity at contact (Wang et al. 2000)

$g(R)$  : radial distribution function at contact (original model) **偏分布効果**



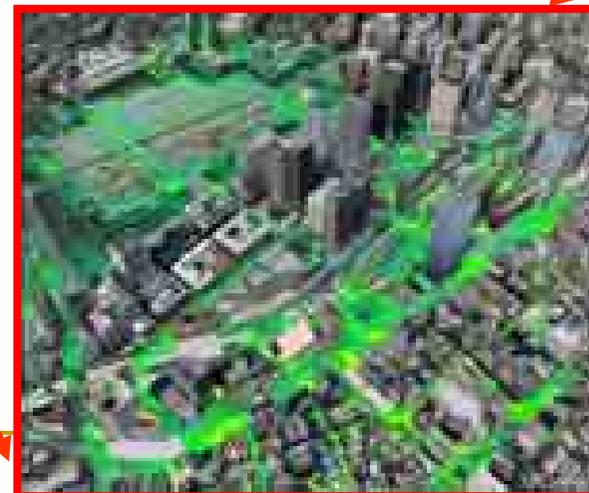
# Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment (MSSG)



global scale



mesoscale



urban scale

- Applicable to global, regional and local scales seamlessly
- Ying-Yang grid for globe
- Consists of 3 modes; atmos. / ocean / coupled
- Highly optimized for the Earth Simulator (ES)

# MSSG-ビン法計算結果例

- 計算解像度約20m, 512x512x200個の計算格子, 33個のビン
- 水滴の大きさを計算
- 水滴の大きさに応じて, 物理に忠実に可視化
- 32nodes on ES2, 1.1TB memory, 4hours for 30min integration

参考: バケツ法計算の可視化例  
(計算解像度 = 100m)



---

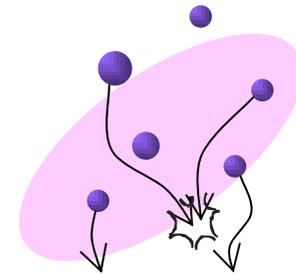
# 乱流衝突モデル

大西, 高橋, 小森, 機論B (2007)

大西, 小森, 機論B (2006)

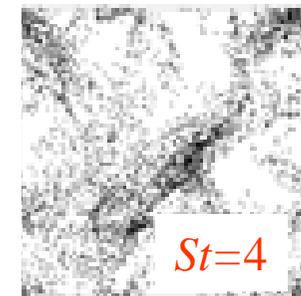
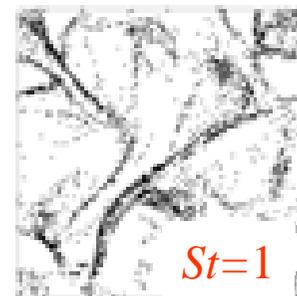
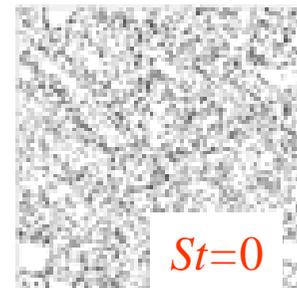
大西, 小森, 機論B (2005)

# turbulent collision kernel model



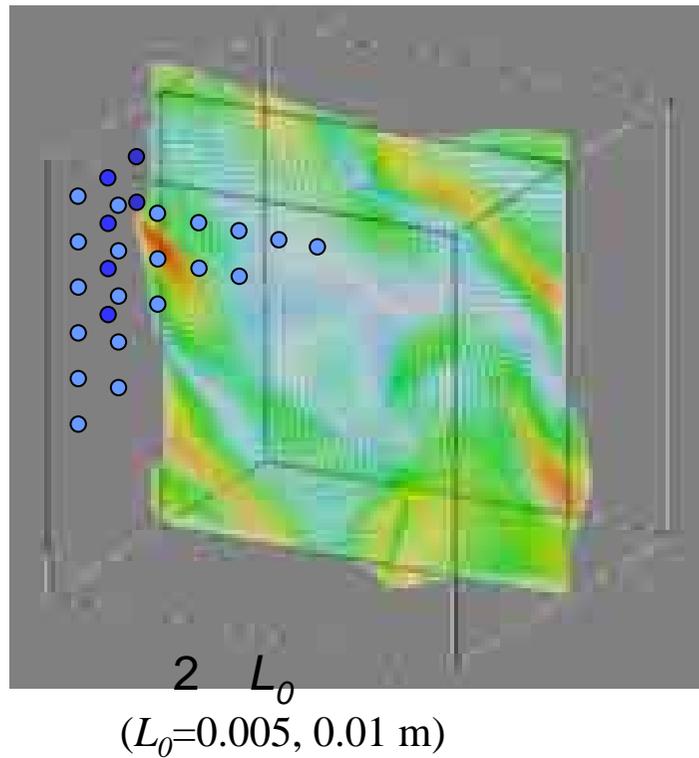
$$\langle K_c(r_1, r_2, l_\eta, u', \text{Re}_\lambda) \rangle = 2 \pi R^2 \langle |w_r| \rangle g(R)$$

- $R$  : collision radius ( $=r_1+r_2$ )
- $|w_r|$  : radial relative velocity at contact
- $g(R)$  : radial distribution function at contact



$$St = \tau_p / \tau_\eta$$

# 定常等方性乱流場に対するDNS



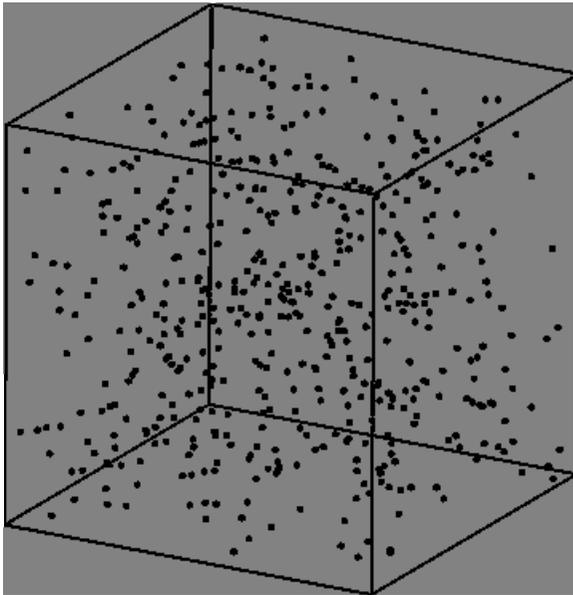
$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (U \cdot \nabla) \omega = (\omega \cdot \nabla) U + \nu \nabla^2 \omega$$

擬スペクトル法

{  
・周期境界条件  
・強制外力  
} → 定常等方性乱流場

	Re (= $l u'$ )
FLOW-1	36.3
FLOW-2	44.3
FLOW-3	54.3
FLOW-4	83.2

# 粒子運動に対するDNS



粒子は水滴

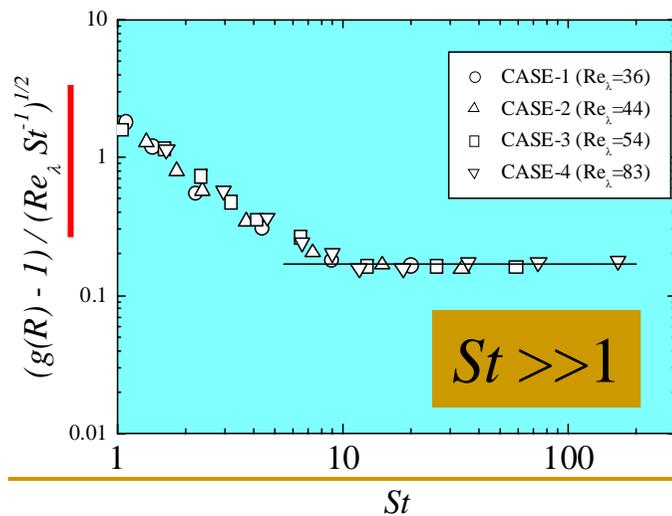
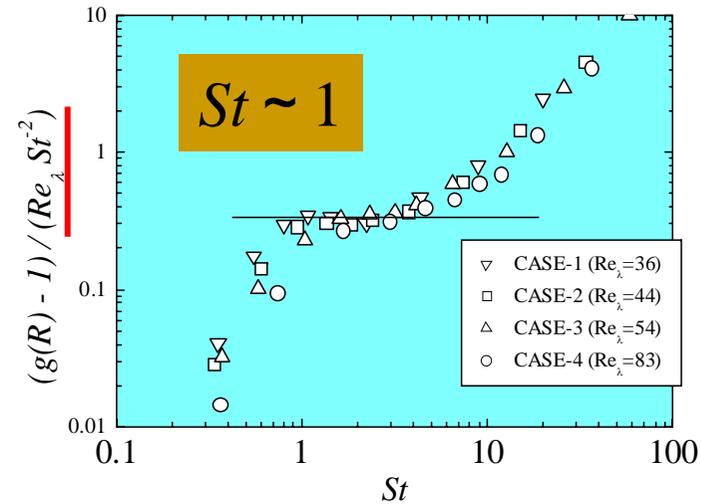
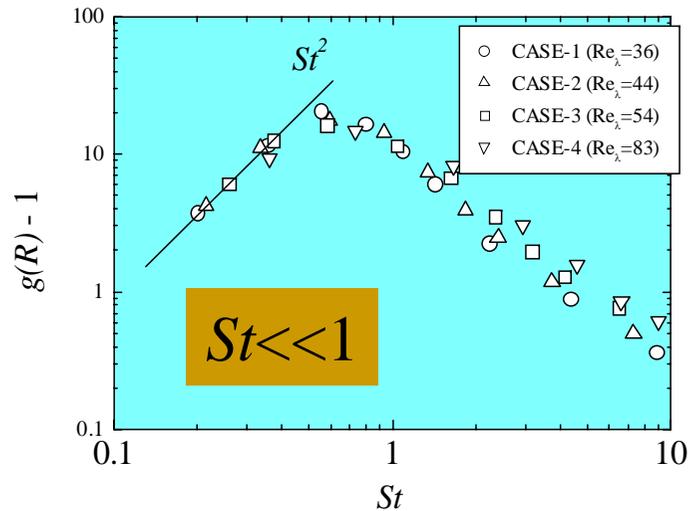
Stokes粒子

$$\frac{\partial v_p}{\partial t} = \frac{U(x_p) - v_p}{\tau_p} + g \dots$$

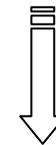
Lagrangian 法

	Number of particles	Number density $n$ [1/cm <sup>3</sup> ]
RUN-1	4096	132
RUN-2	4096	132
RUN-3	4096	132
RUN-4	13824	55.7

# $g(R)$ の $St$ および $Re$ 依存性



$$g(R) - 1 \propto \begin{cases} St^2 & (St \ll 1) \\ Re_\lambda St^{-2} & (St \sim 1) \\ Re_\lambda^{1/2} St^{-1/2} & (St \gg 1) \end{cases}$$

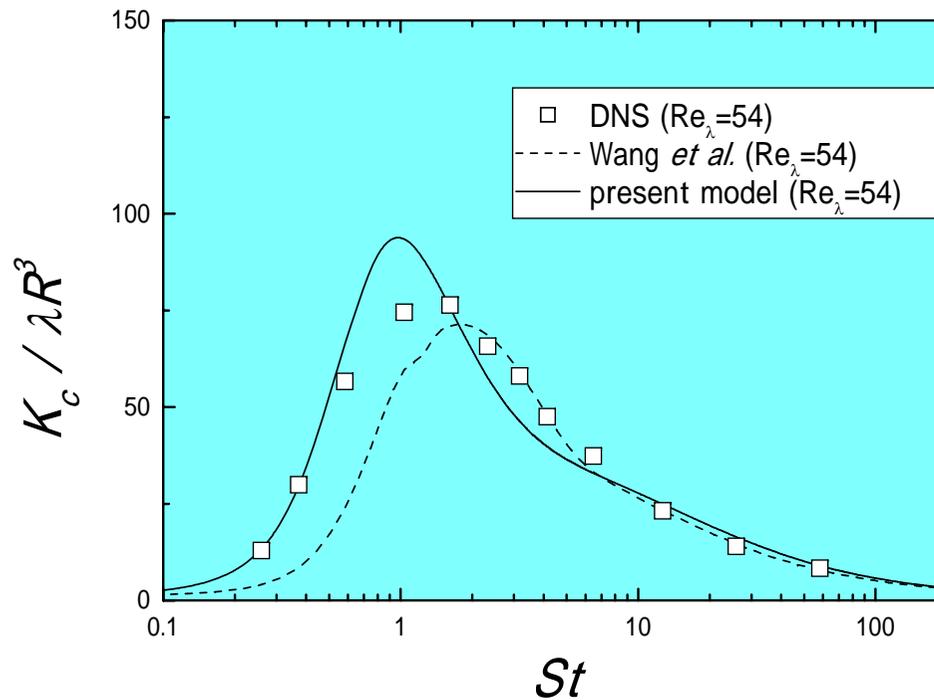


$$\begin{aligned} Re_\lambda &\propto (l_\lambda/l_\eta)^2 \\ St &\propto (r/l_\eta)^2 \end{aligned}$$

$$g(R) - 1 \propto \begin{cases} (r/l_\eta)^4 & (St \ll 1) \\ (l_\lambda/r)^2 (l_\eta/r)^2 & (St \sim 1) \\ l_\lambda/r & (St \gg 1) \end{cases}$$

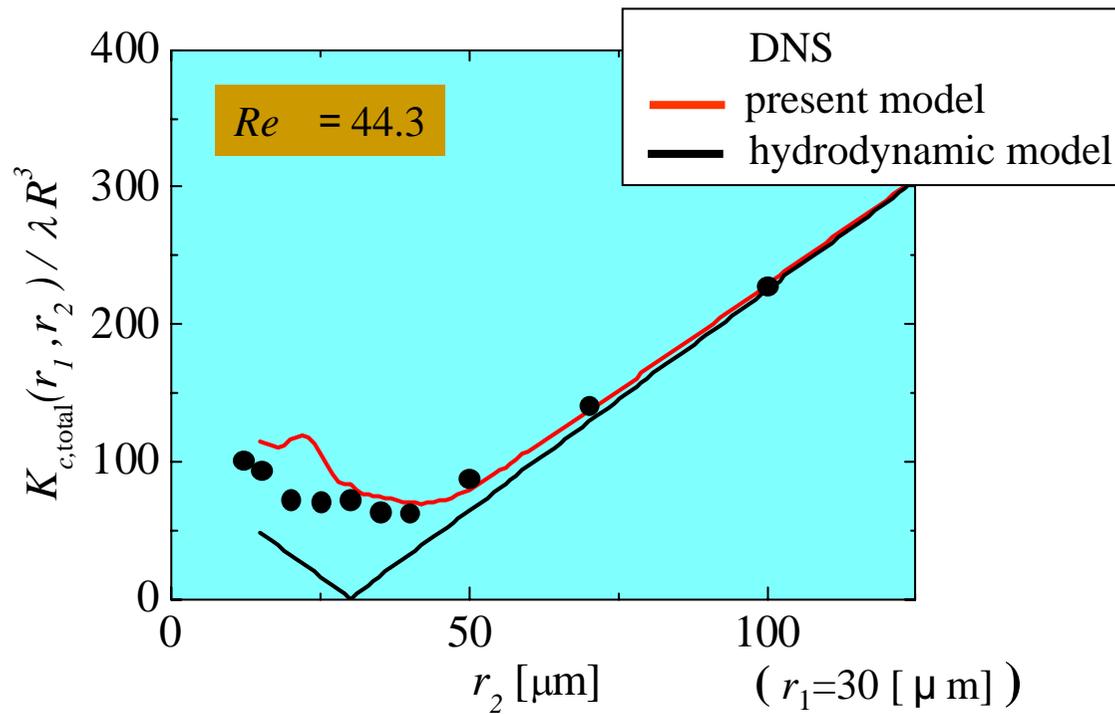
物理的裏づけがある！

# 同一径粒子間の衝突頻度因子



モデルの結果はDNSの結果と良好に一致する。

# 異径粒子間の衝突頻度因子

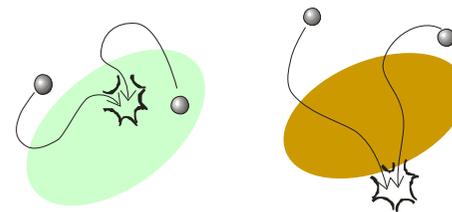


本衝突因子モデルは、異径粒子間衝突に及ぼす乱流の影響を良好に表現できる。

# 同一径粒子間衝突に及ぼす重力沈降の影響

粒子の運動方程式

$$\frac{\partial v_p}{\partial t} = \frac{U(x_p) - v_p}{\tau_p} + g \dots\dots$$



non-gravity case

gravity case

Onishi, Takahashi & Komori, Phys. Fluids (accepted)

大西, 小森, 機論B (2005)

大西, 小森, 機論B (2005)

- 
- スライド6枚省略

---

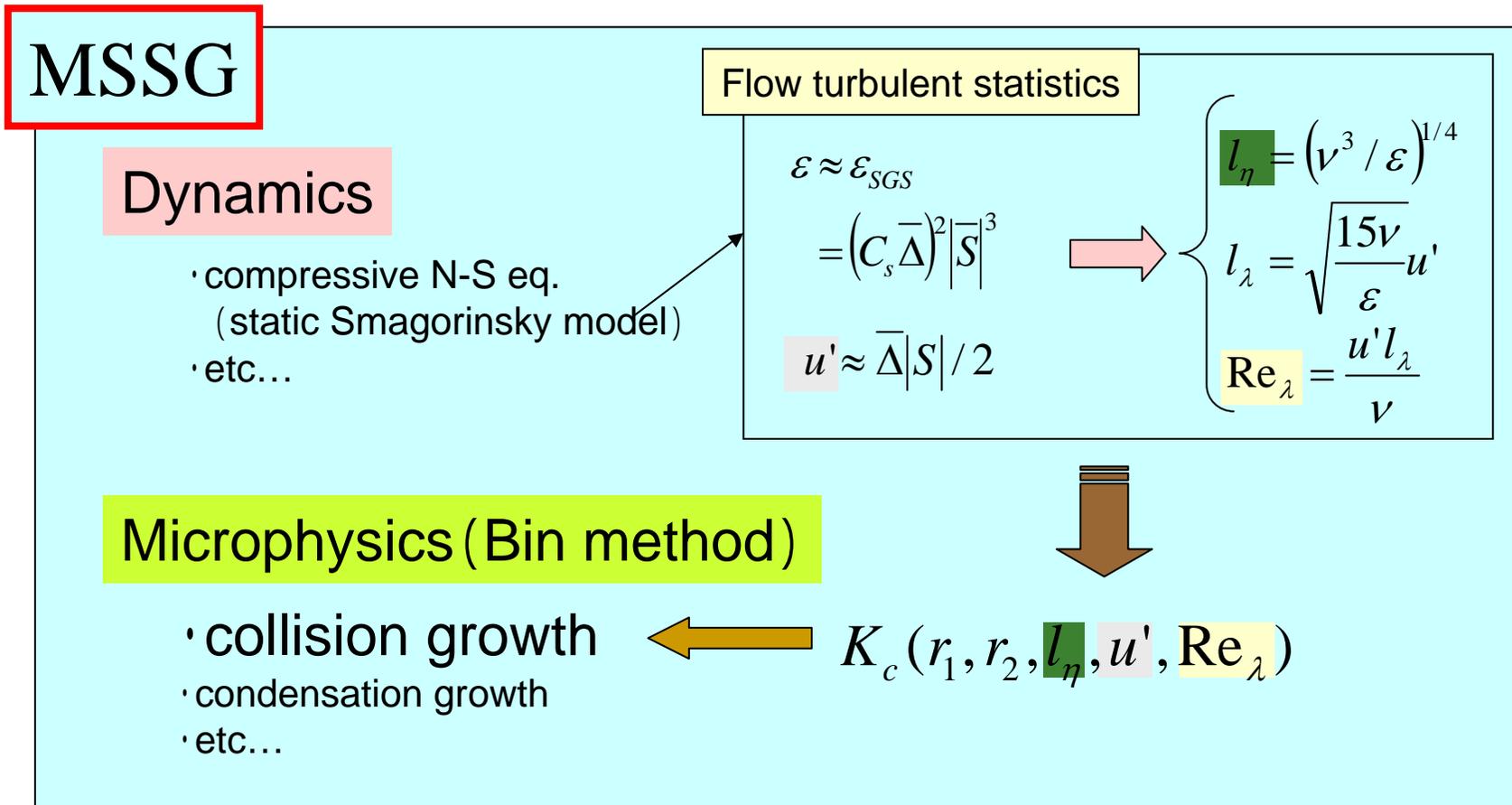
# 雲粒の乱流衝突の感度実験

---

雲粒の乱流衝突、GCCN(巨大雲凝結核)の存在が雲の発達にどのような影響を及ぼすのか？

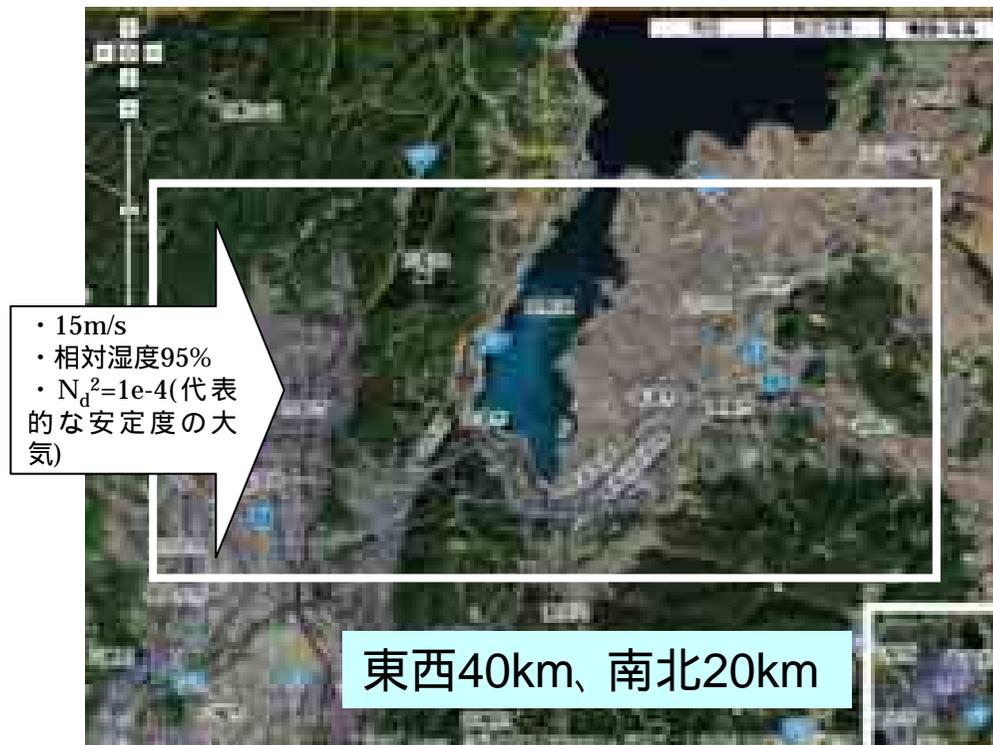
# 乱流雲解像気象シミュレーション法

## — 雲粒の乱流衝突を考慮 —

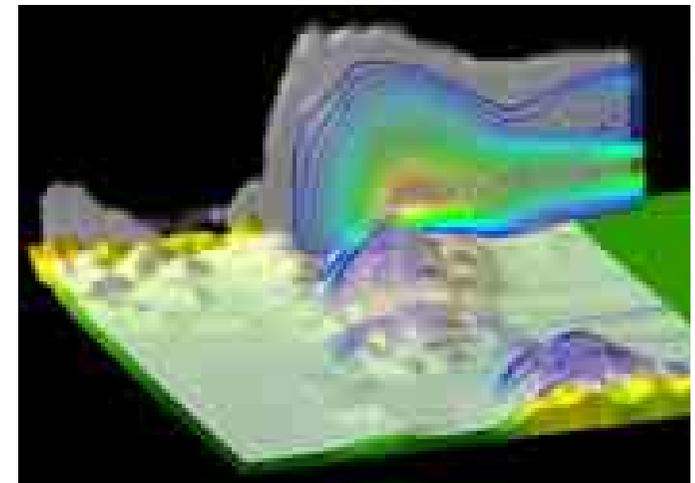


# 地形性対流雲に対する感度実験

実地形(比叡山)を対象とした理想実験

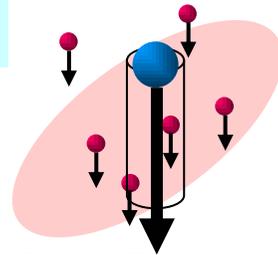


計算結果例

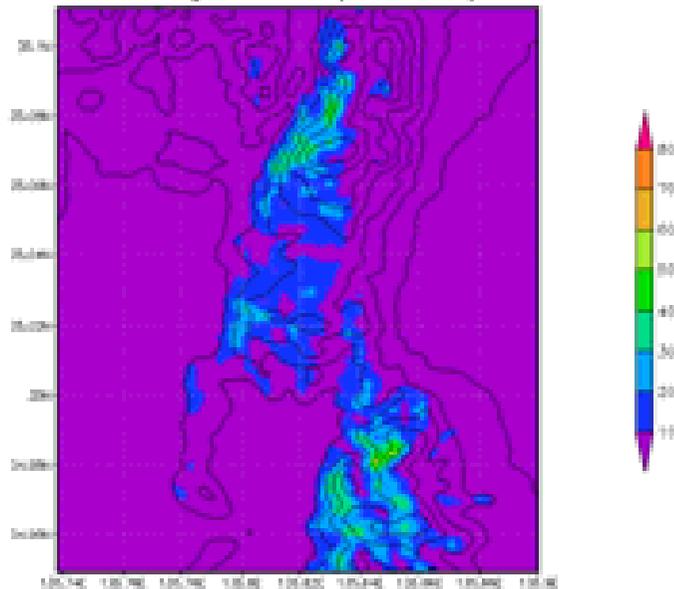


# 降雨量の結果

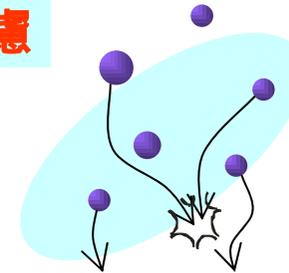
乱流衝突ムシ



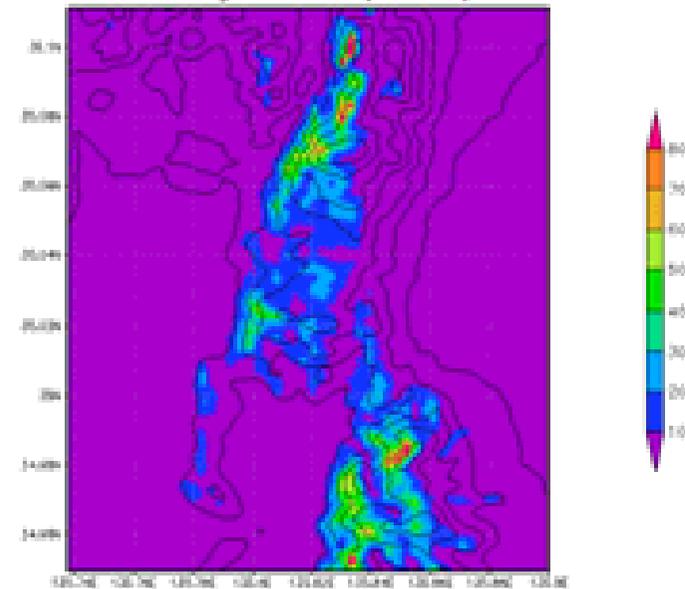
average rainfall (RUN-NoT)



乱流衝突考慮



average rainfall (RUN-T)

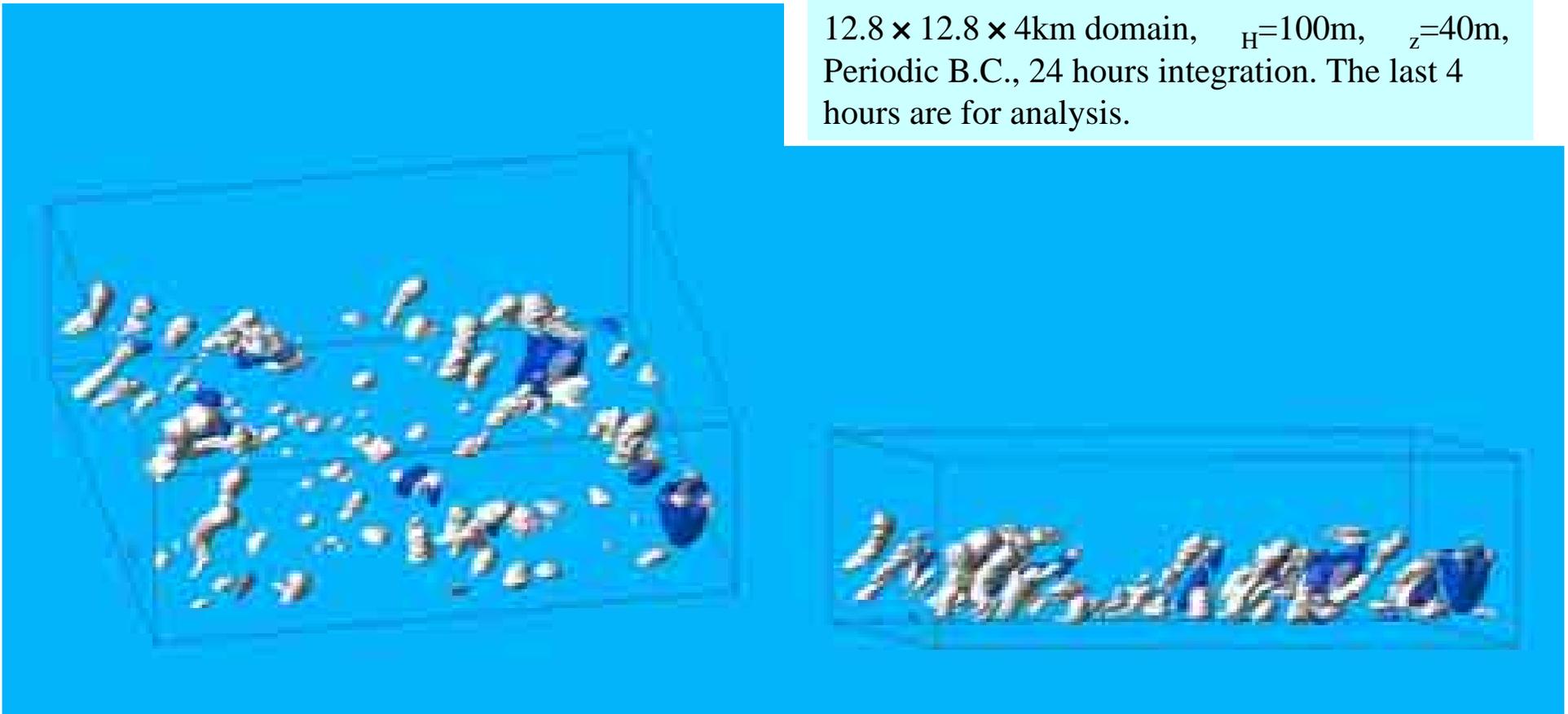


乱流衝突によって、山の上流斜面で降雨が約20%も増加

# RICOモデル比較実験

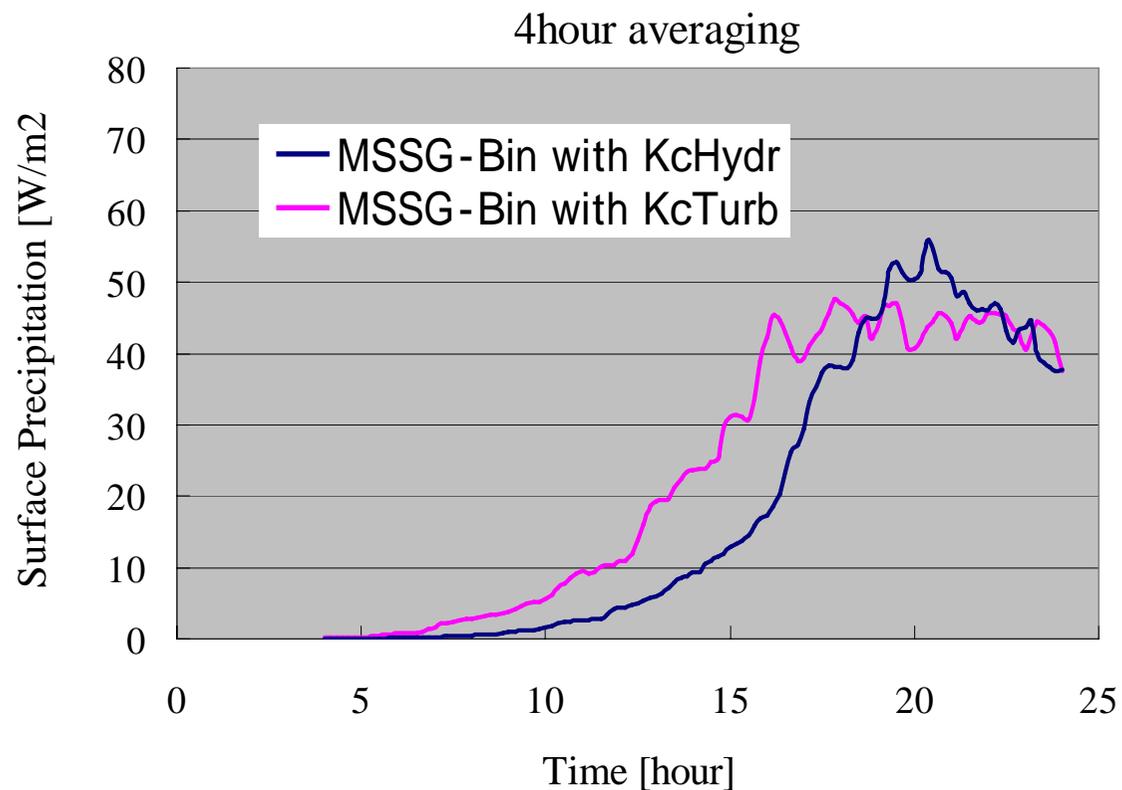
- Initial data from “Rain In Cumulus over the Ocean” field campaign by GCSS
- Useful for investigating cloud microphysical processes
- $r < 40\mu\text{m}$  cloud droplets;  $r > 40\mu\text{m}$  rain drops, in protocol

$12.8 \times 12.8 \times 4\text{km}$  domain,  $H=100\text{m}$ ,  $\Delta z=40\text{m}$ ,  
Periodic B.C., 24 hours integration. The last 4  
hours are for analysis.



- 
- スライド3枚省略

# 地表面降水量に現れる乱流衝突の影響 (4時間移動平均データ)



乱流衝突によって、降雨の開始が早まる

# まとめ

- 雲は混相乱流現象の宝庫
- 3次元ビン法雲シミュレーションの結果から、雲粒の乱流衝突成長は対流雲の発達に影響を及ぼすことが明らかとなった。
  - 初期の雨滴(大水滴)形成に大きな影響を及ぼしているのではないか。(まだ私見)