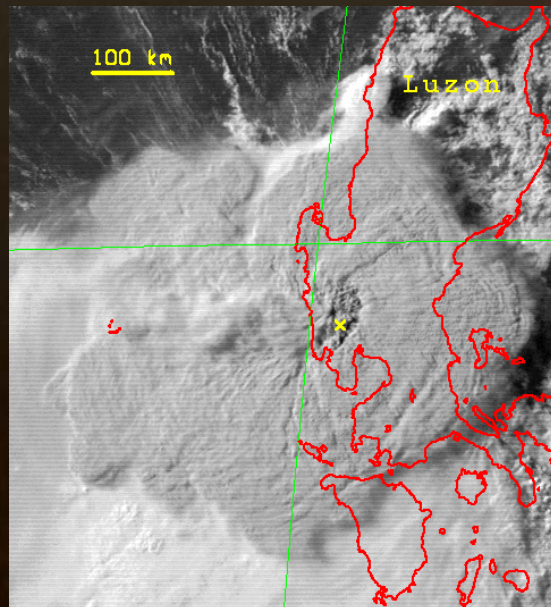
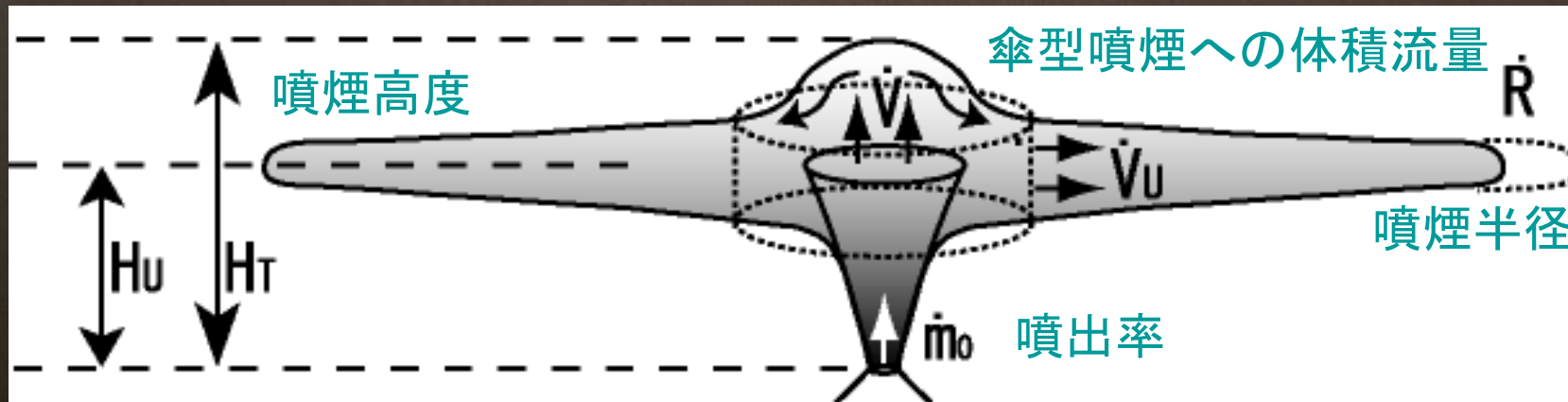


3Dシミュレーションによる
噴煙内部の乱流混合の解析
: 大規模噴火から中小規模噴火の再現へ

○鈴木雄治郎 (海洋研究開発機構 IFREE)
小屋口剛博 (東京大学 地震研究所)

火山噴煙のシミュレーション



衛星からの観察



1. 頻繁に起こる小中規模の噴煙から百年に一度の大規模噴煙まで噴煙ダイナミクスの理解

2. 噴煙ダイナミクスの支配要因の理解

- ・噴煙・大気の密度変化
- ・乱流による混合
- ・大気成層
- ・火山灰粒子の分離・沈降
- ・風
- ・水蒸気

非定常3次元数値モデル

[Suzuki et al., JGR 2005]

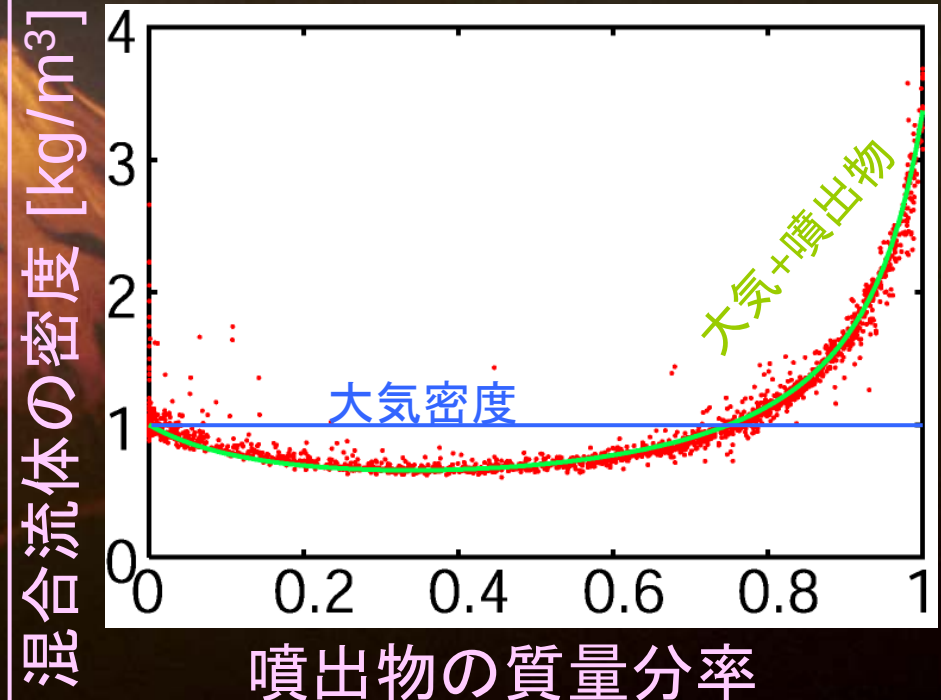
- ・乱流による混合効率に注目：
火山灰と火山ガスの相対速度を無視した
2流体モデル
- ・平坦な地表上の円形の火口
- ・噴出条件
噴出率: 10^{6-9} kg/s
温度 : 1000-1100 K
揮発成分量: 3-6 wt%
- ・熱帯・中緯度の気候構造

◎乱流混合

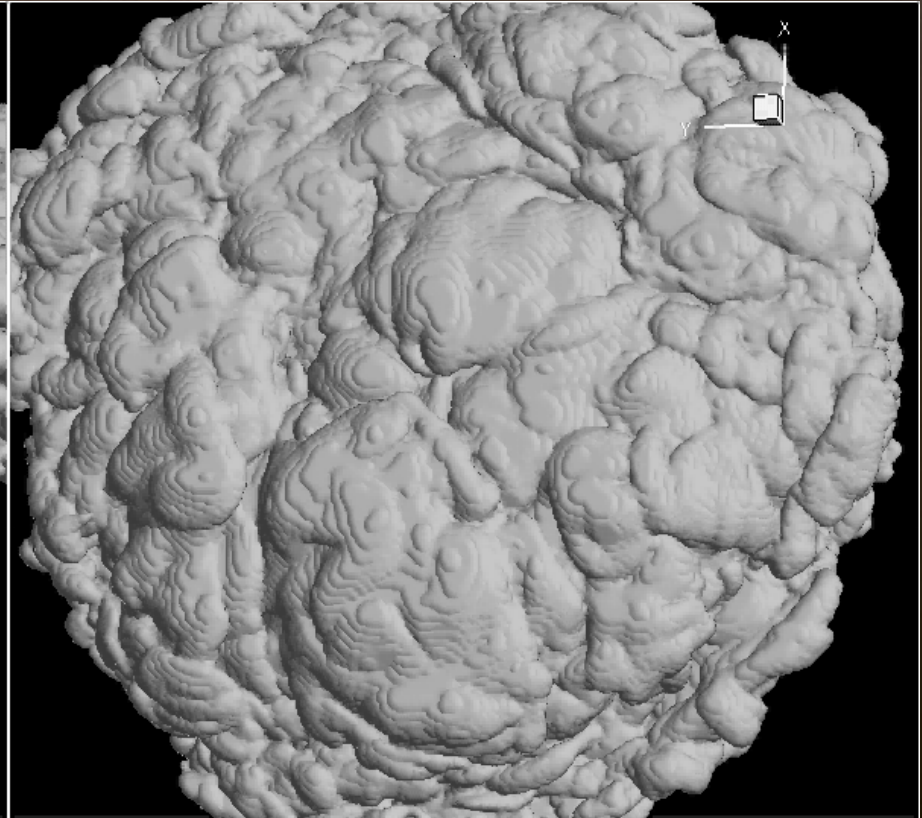
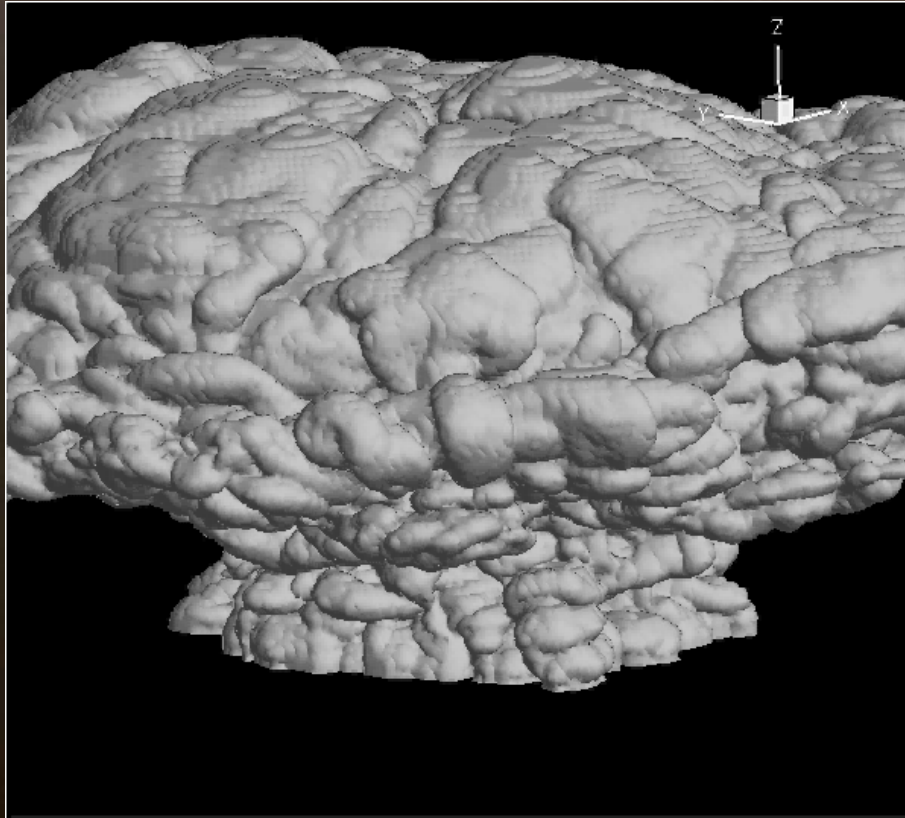
3次元座標系
高分解能の計算スキーム
細かな計算グリッド

◎変則的な密度変化

$$P \sim \rho_c (\underline{n_g R_g} + n_a R_a) T$$
$$\equiv \rho \underline{R_{eff}} T$$



大規模噴煙(噴出率 10^9 kg/s)の再現



等値面(噴出物の質量分率)

上から



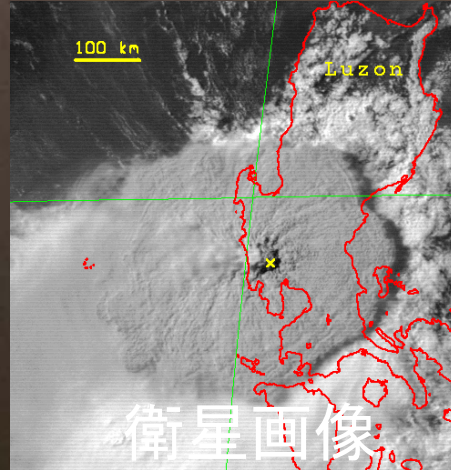
ピナツボ噴火の再現

100 km



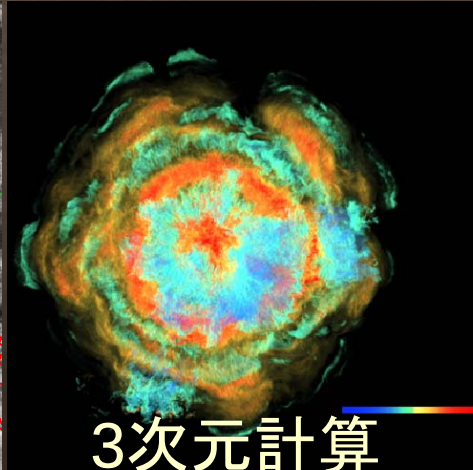
3次元計算

(噴出物の質量分率)



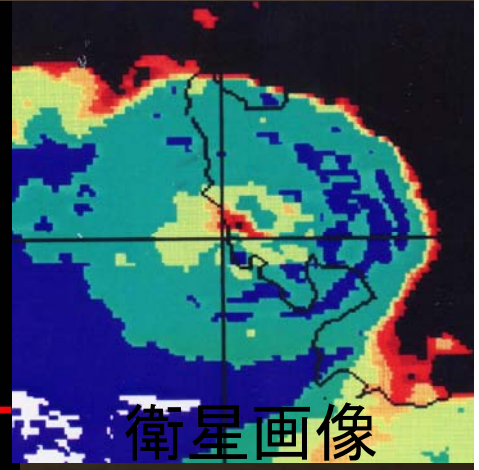
衛星画像

(可視光)



3次元計算

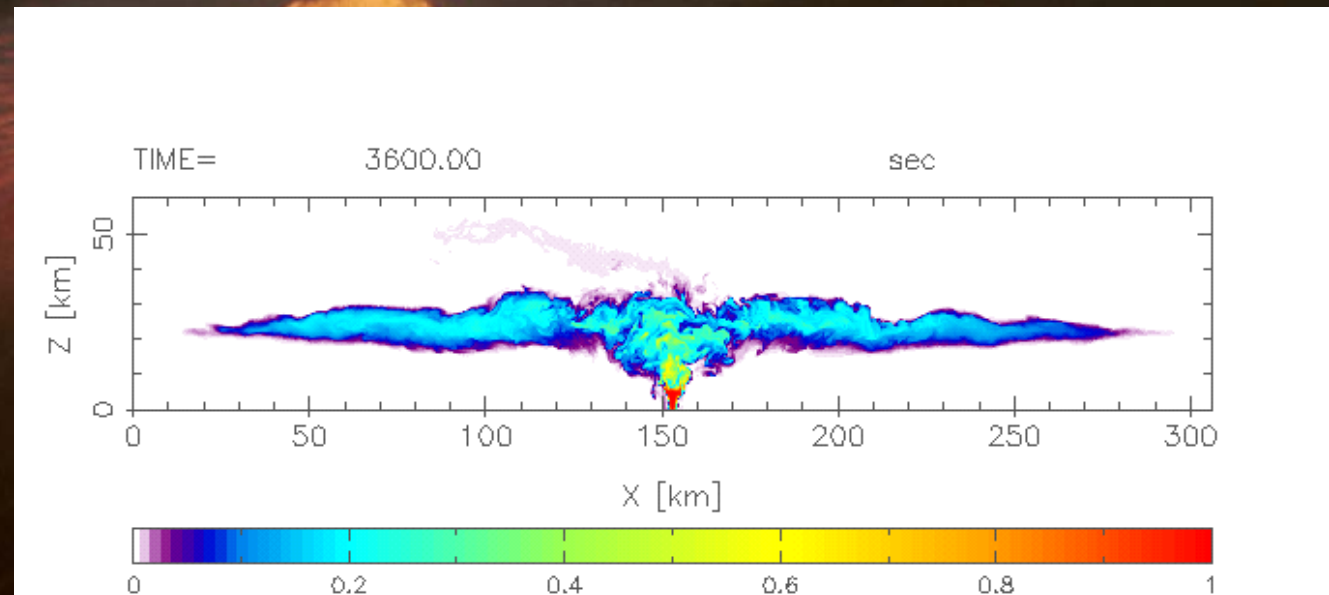
(温度)



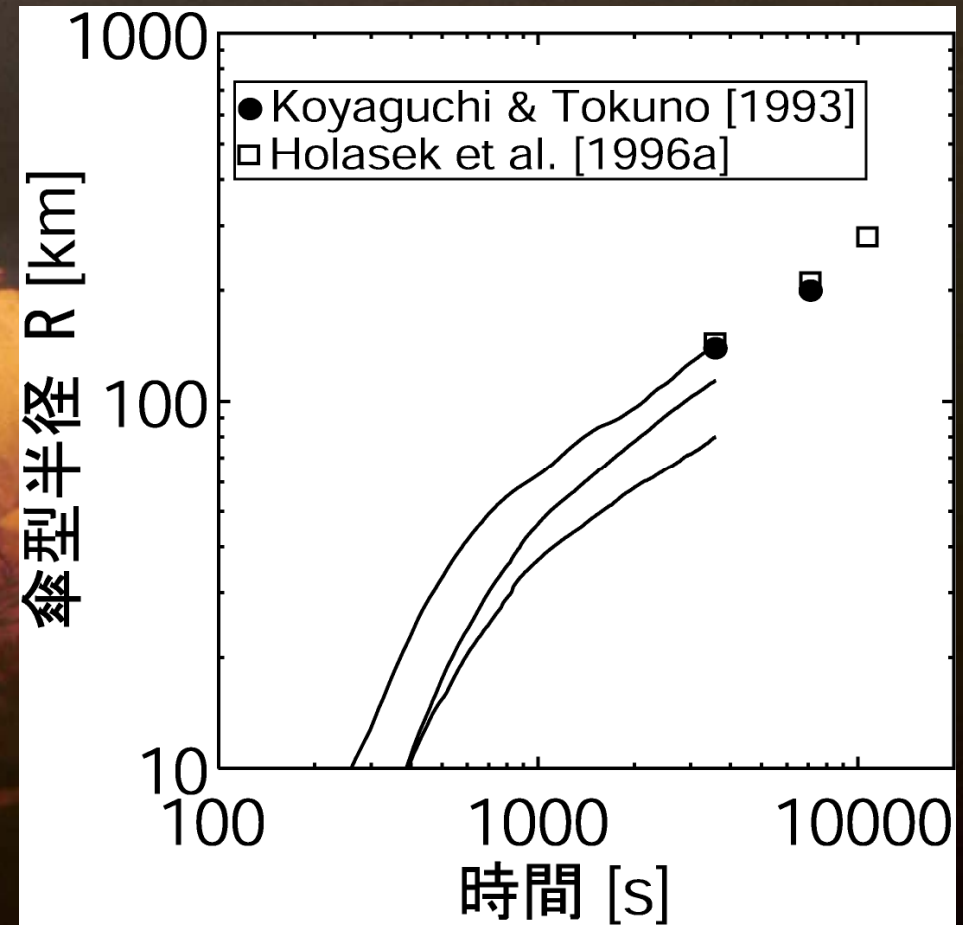
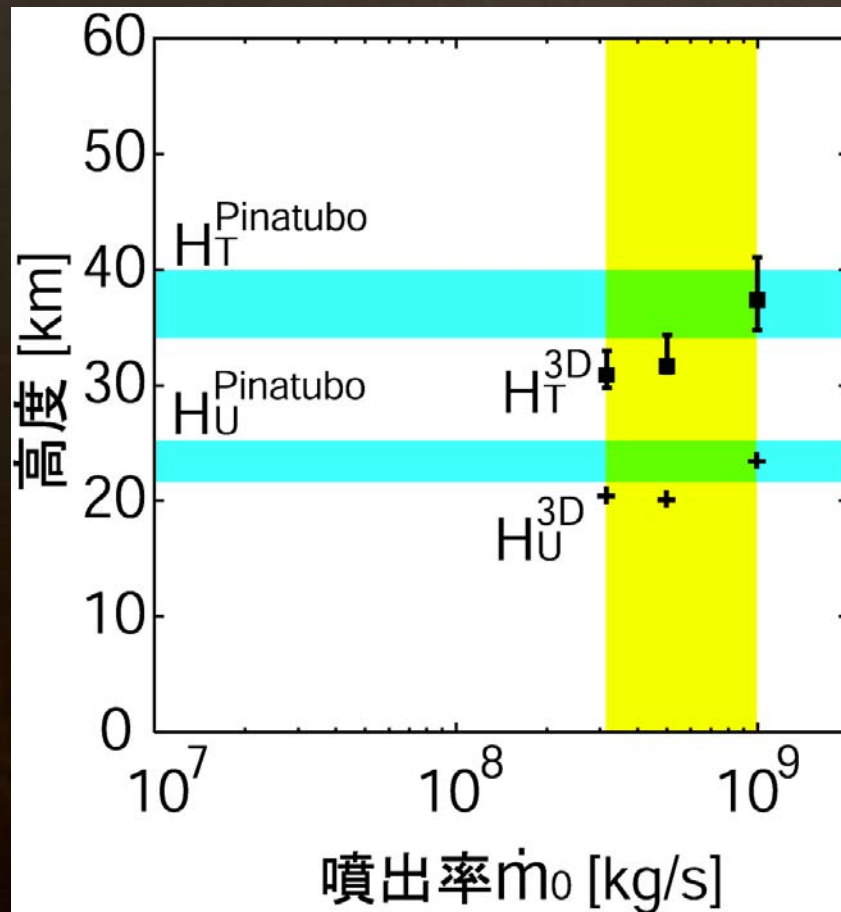
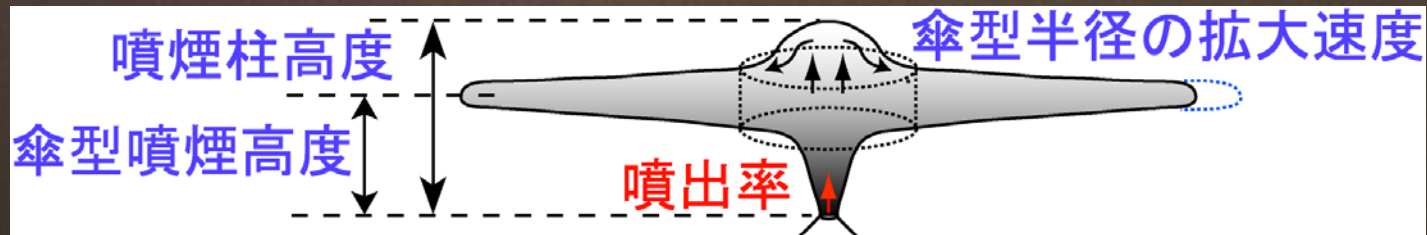
衛星画像

(赤外光)

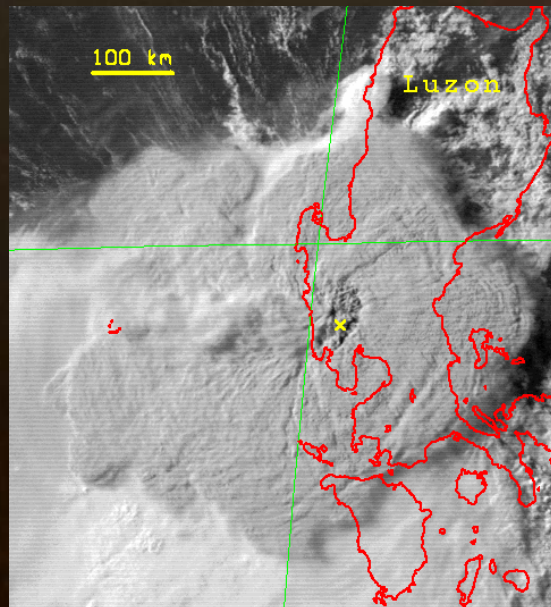
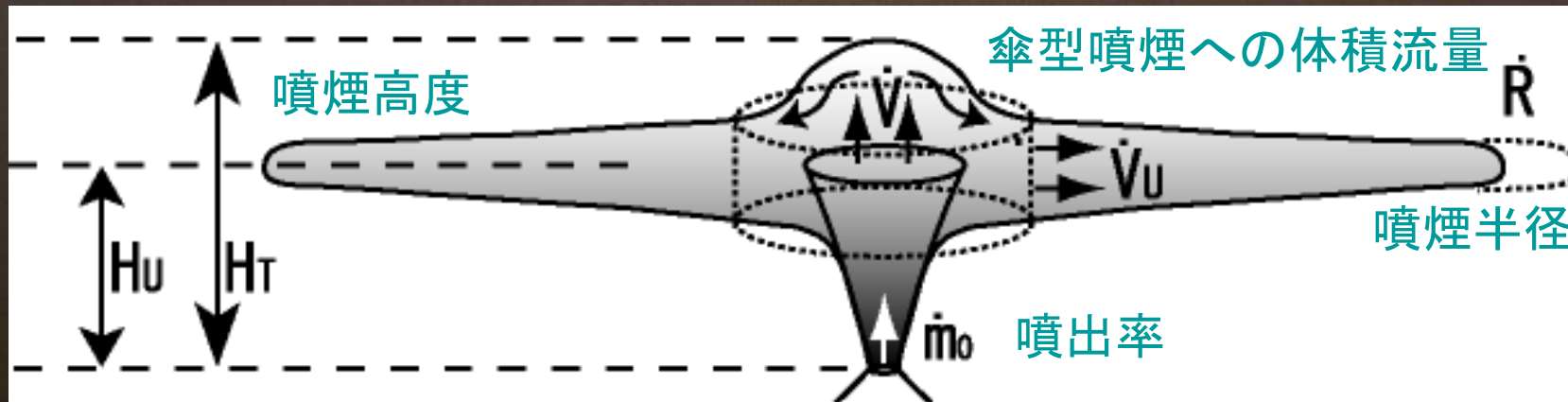
○噴出物質量分率
の断面分布



観測データを定量的に再現



火山噴煙のシミュレーション



衛星からの観察



1. 頻繁に起こる小中規模の噴煙から百年に一度の大規模噴煙まで噴煙ダイナミクスの理解

2. 噴煙ダイナミクスの支配要因の理解

- ・噴煙・大気の密度変化
- ・乱流による混合
- ・大気成層
- ・火山灰粒子の分離・沈降
- ・風
- ・水蒸気

大規模噴火から中小規模噴火の再現へ

計算の難しさ: 火口付近 と 噴煙全体を再現すること
細かいグリッド 多量のグリッド数

噴出率と火口半径の関係 $\dot{m} \propto L_0^2$

噴煙高度と噴出率の関係 $H \propto \dot{m}^{1/4} \rightarrow H \propto L_0^{1/2}$

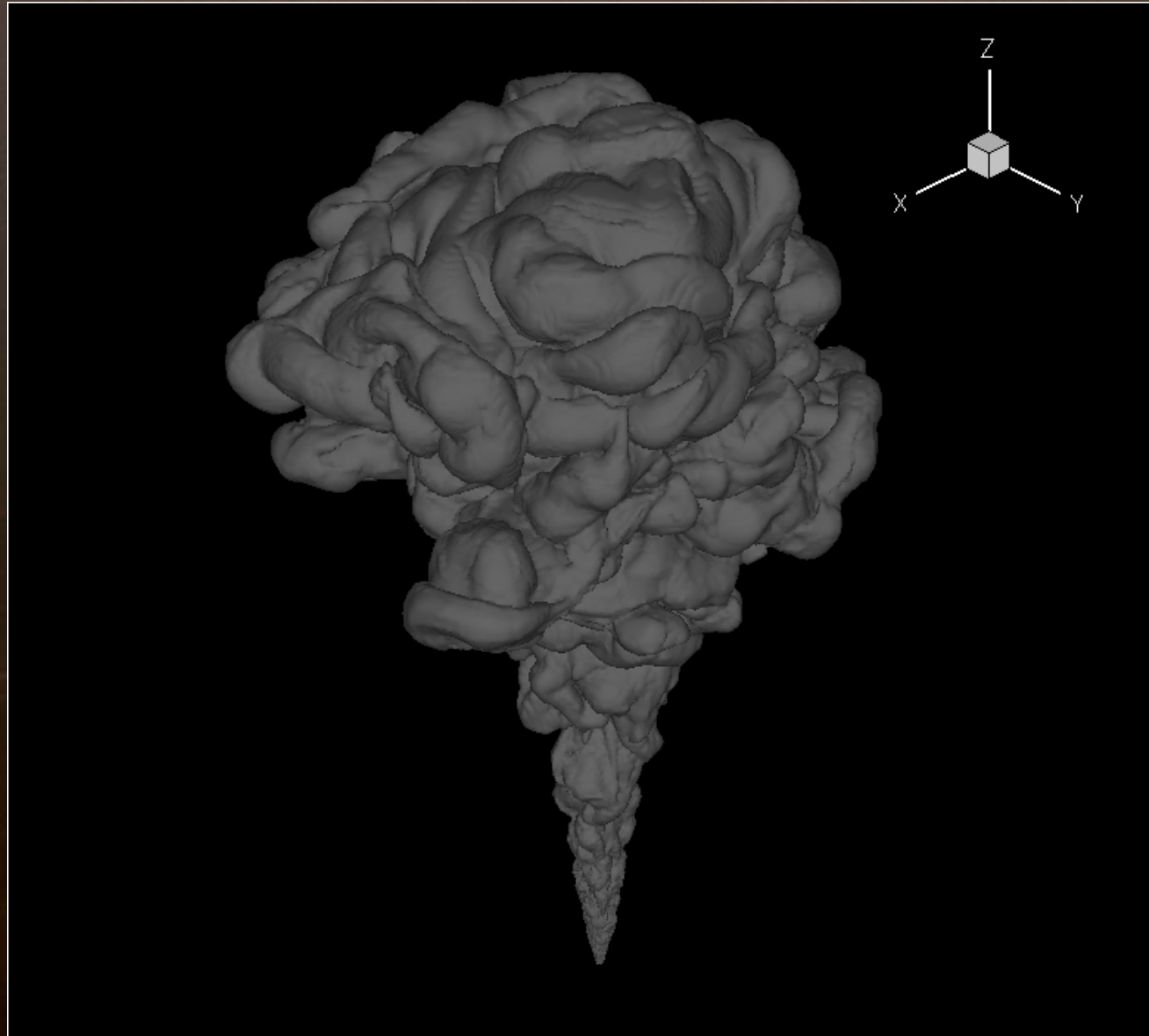
ピナツボ	伊豆大島B火口噴火
$L_0 \sim 10^{2-3} \text{ m}$	$L_0 \sim 10^1 \text{ m}$
$m_0 \sim 10^9 \text{ kg/s}$	$m_0 \sim 10^{5-6} \text{ kg/s}$
$H \sim 30 \text{ km}$	$H \sim 10 \text{ km}$

グリッドサイズは
 $1/10 \sim 1/100$

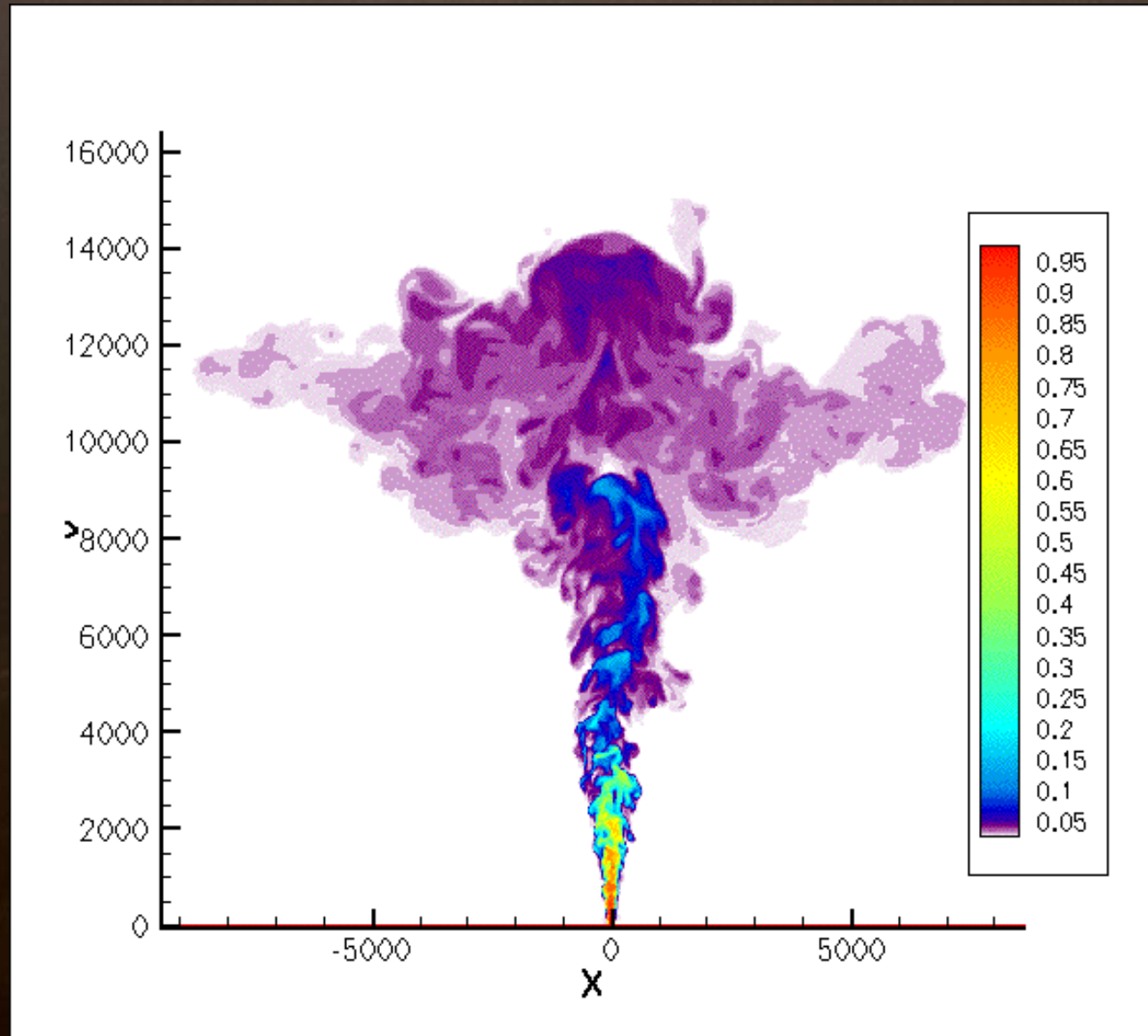
計算でカバーする
領域は変わらない

↓
グリッド数が増える

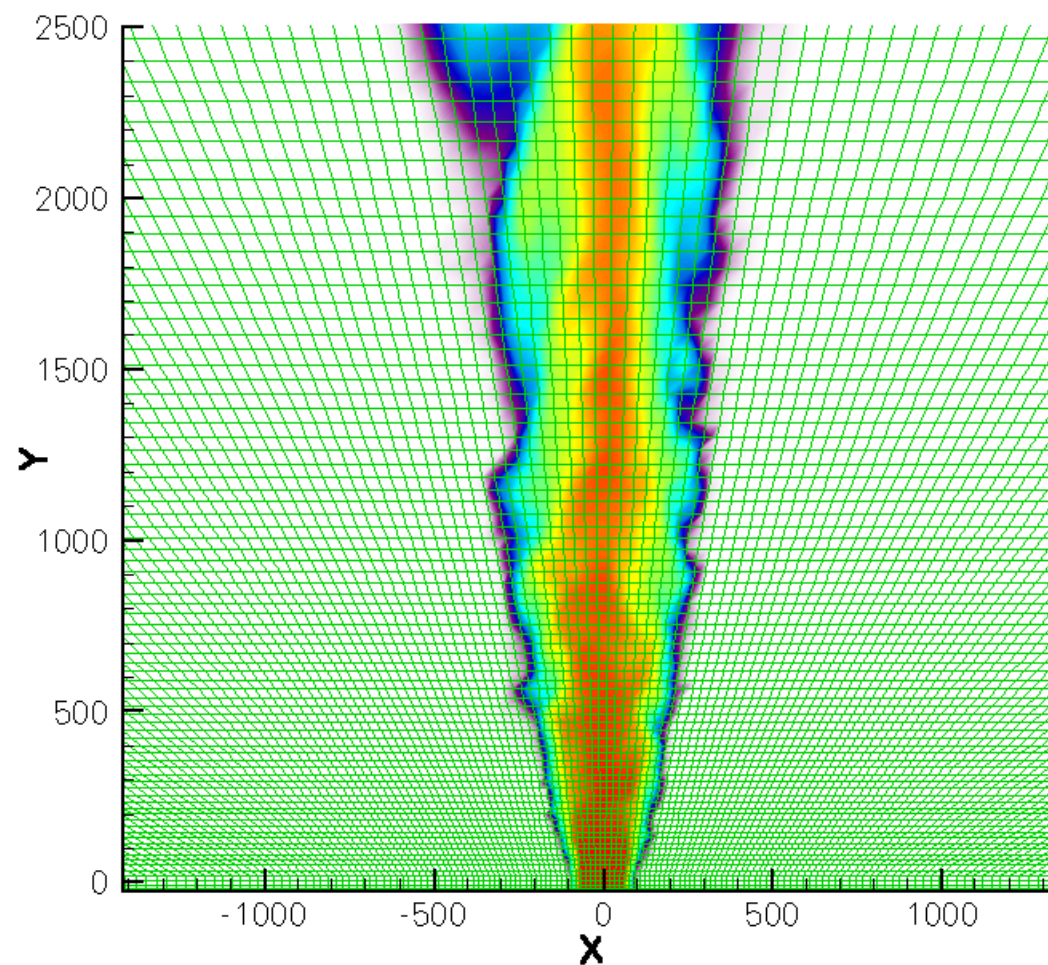
中規模の噴火計算



中規模の噴火計算



中規模の噴火計算(拡大図)



火山噴煙における乱流混合

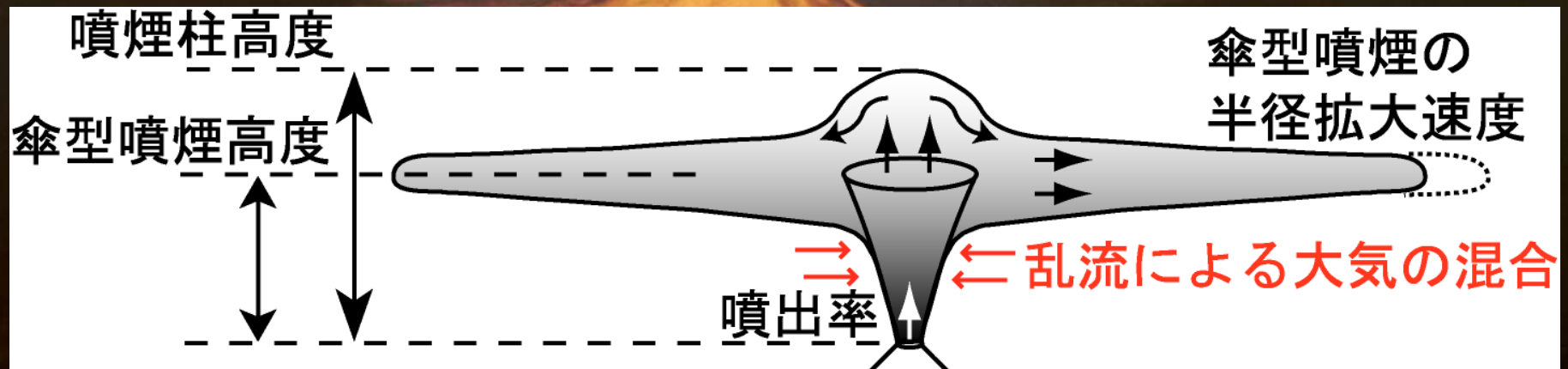
噴煙の挙動：高温の火山灰＋火山ガスが噴出

大気を取り込み十分

- 膨張
- 軽くなって上昇(噴煙柱)
- 大気と密度が釣り合い水平に拡大(傘型噴煙)

大気を取り込み不十分

- 膨張不足
- 重いまま崩壊(火砕流)
- 火砕流上面で大気取り込み上昇(灰神楽)
- 大気と密度が釣り合い水平に拡大(傘型噴煙)



乱流による混合効率が噴煙ダイナミクスを支配

⇒ 噴煙を再現・噴煙内の混合メカニズムの理解

混合効率の指標(定常噴流)

均質(密度成層なし) + 定常状態なら...

自己相似性を持ち

(半径方向の拡大 $\propto$ 出口からの距離)

エントレインメント仮説で説明

取り込み速度 = $k \times$ 特徴的速度

実験より $k \sim 0.1$ (一定)



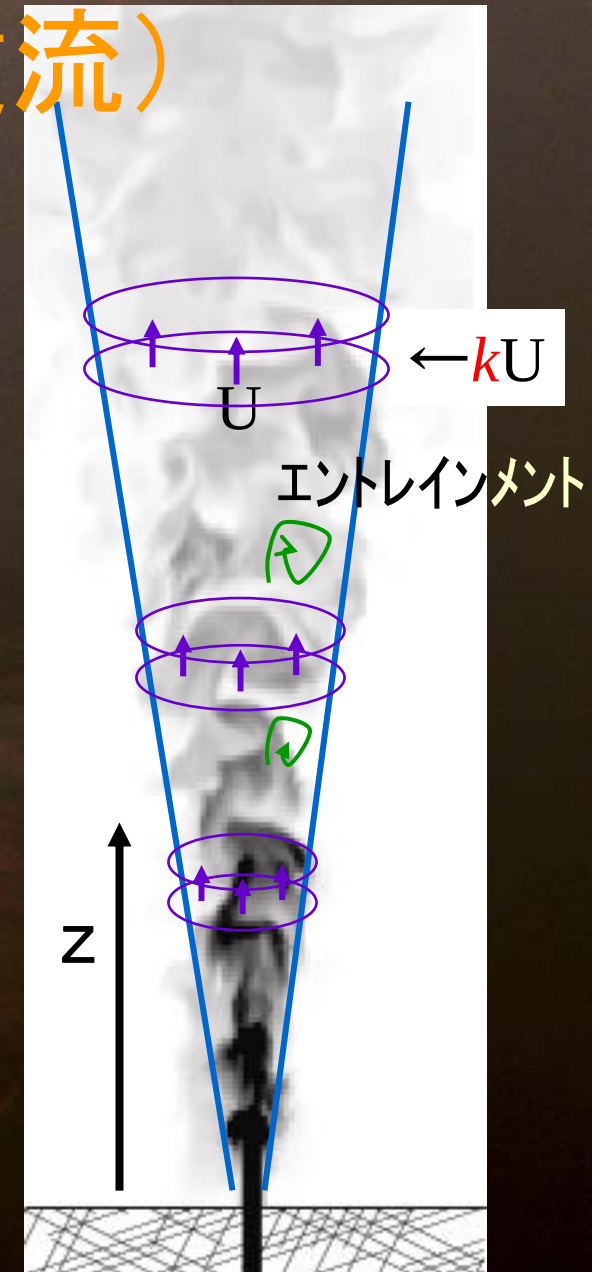
噴煙柱に適用: 1次元モデル[Woods, 1988]

噴出率を与え、定常状態・ k 一定を仮定し

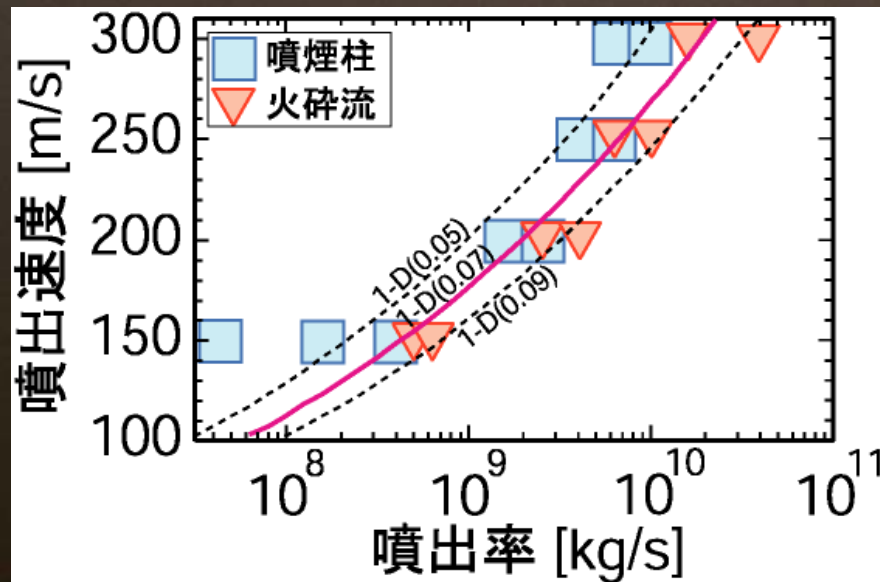
噴煙柱高度・火砕流発生条件 を予測

$$\frac{d(\bar{\rho}UL^2)}{dz} = 2k\rho_{air}UL$$

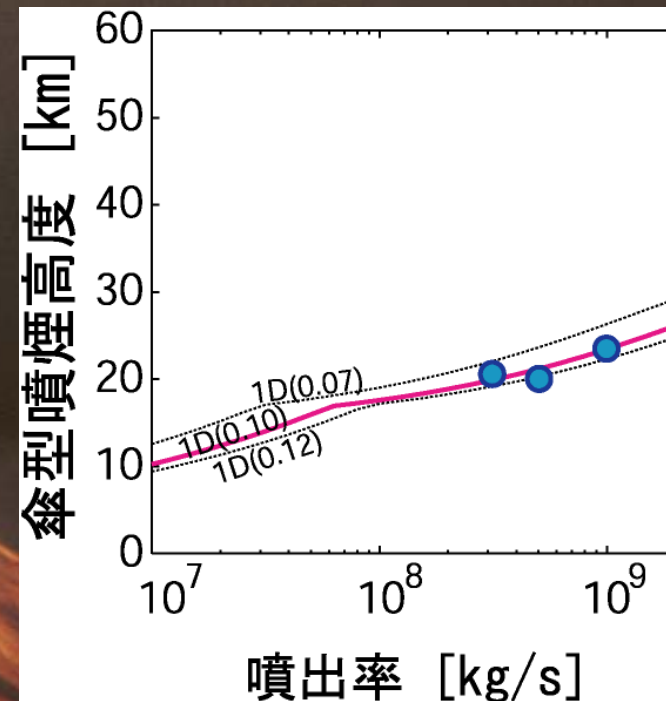
$\bar{\rho}$	平均密度
ρ_{air}	大気密度
U	平均速度
L	特徴的長さ



混合効率 k の高さ方向平均値



火砕流の発生条件 → $k \sim 0.07$
[Suzuki et al., 2005]
: 火口から数km高までの平均値

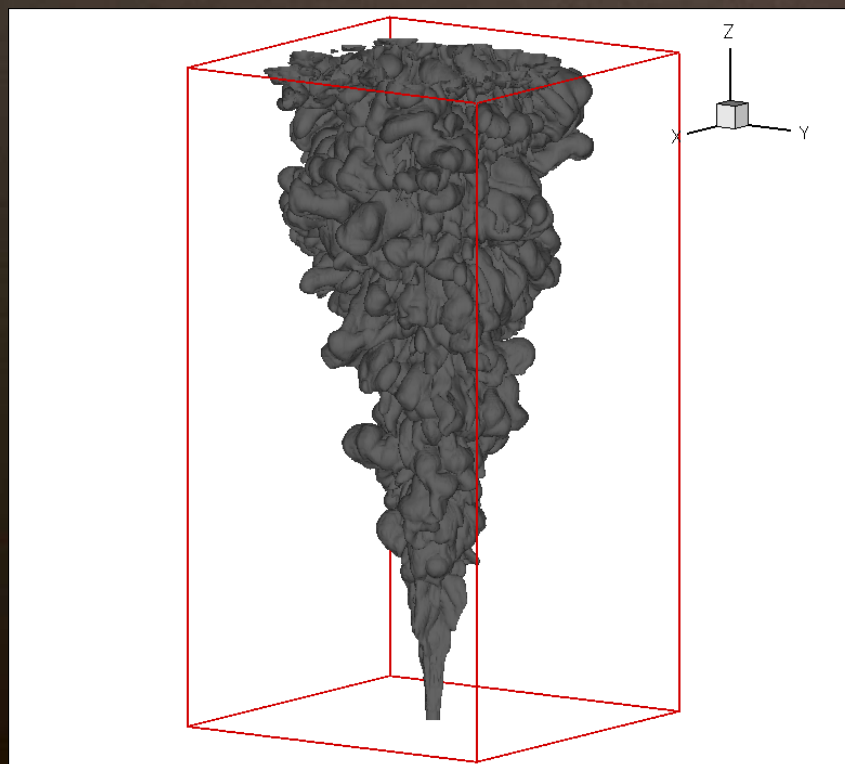


傘型噴煙の高度 → $k \sim 0.10$
[Suzuki and Koyaguchi, under review]
: 火口から噴煙柱上部までの平均値

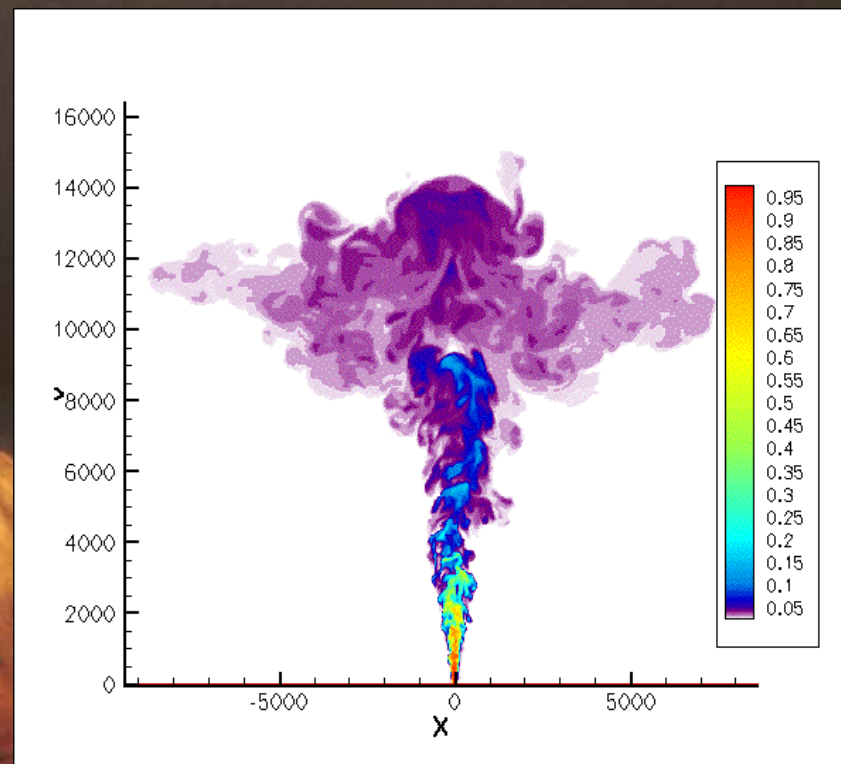
火口近傍: $k \sim 0.07$ < 火口全体: $k \sim 0.10$

混合効率 k の高さによる変化を具体的に知りたい ⇒ 3次元計算で具体的に測定

噴煙柱の3次元数値計算結果



細かな乱流構造の再現



噴煙柱・傘型噴煙の再現

3D計算からのkの見積もり

定常1Dモデル

$$\frac{d(\bar{\rho}UL^2)}{dz} = 2k\rho_{air}UL$$

エンテインメント係数

$$k = \frac{\frac{d(\bar{\rho}UL^2)}{dz}}{2\rho_{air}UL}$$

$\bar{\rho}$	平均密度
ρ_{air}	大気密度
U	平均速度
L	特徴的長さ
$\bar{\xi}$	平均質量分率
$\bar{T}$	平均温度

$$\bar{\rho}, U, L, \bar{\xi}, \bar{T}$$

各高さにおける流量

質量flux

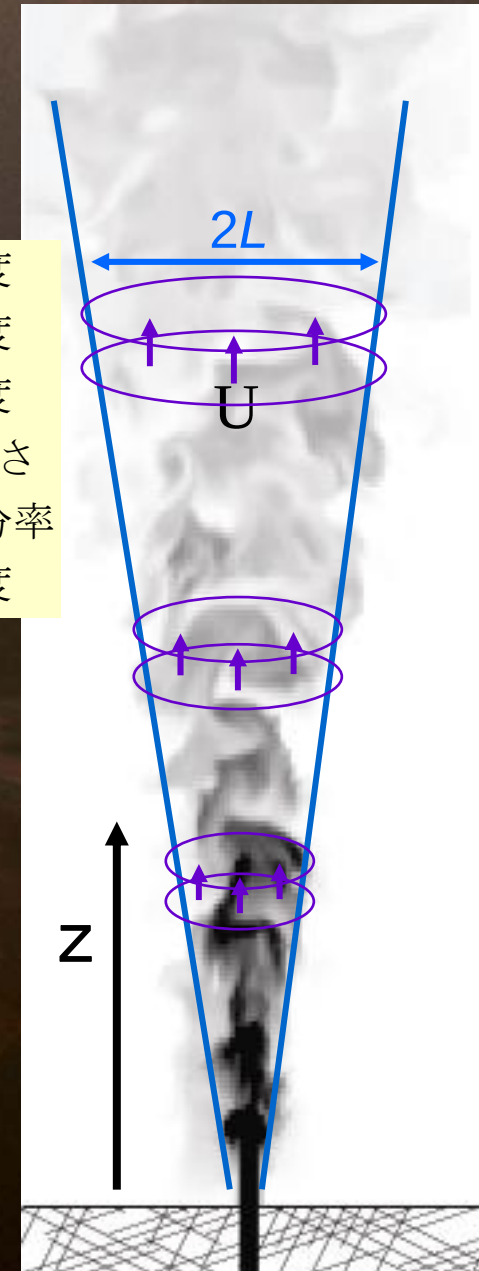
噴煙質量flux

運動量flux

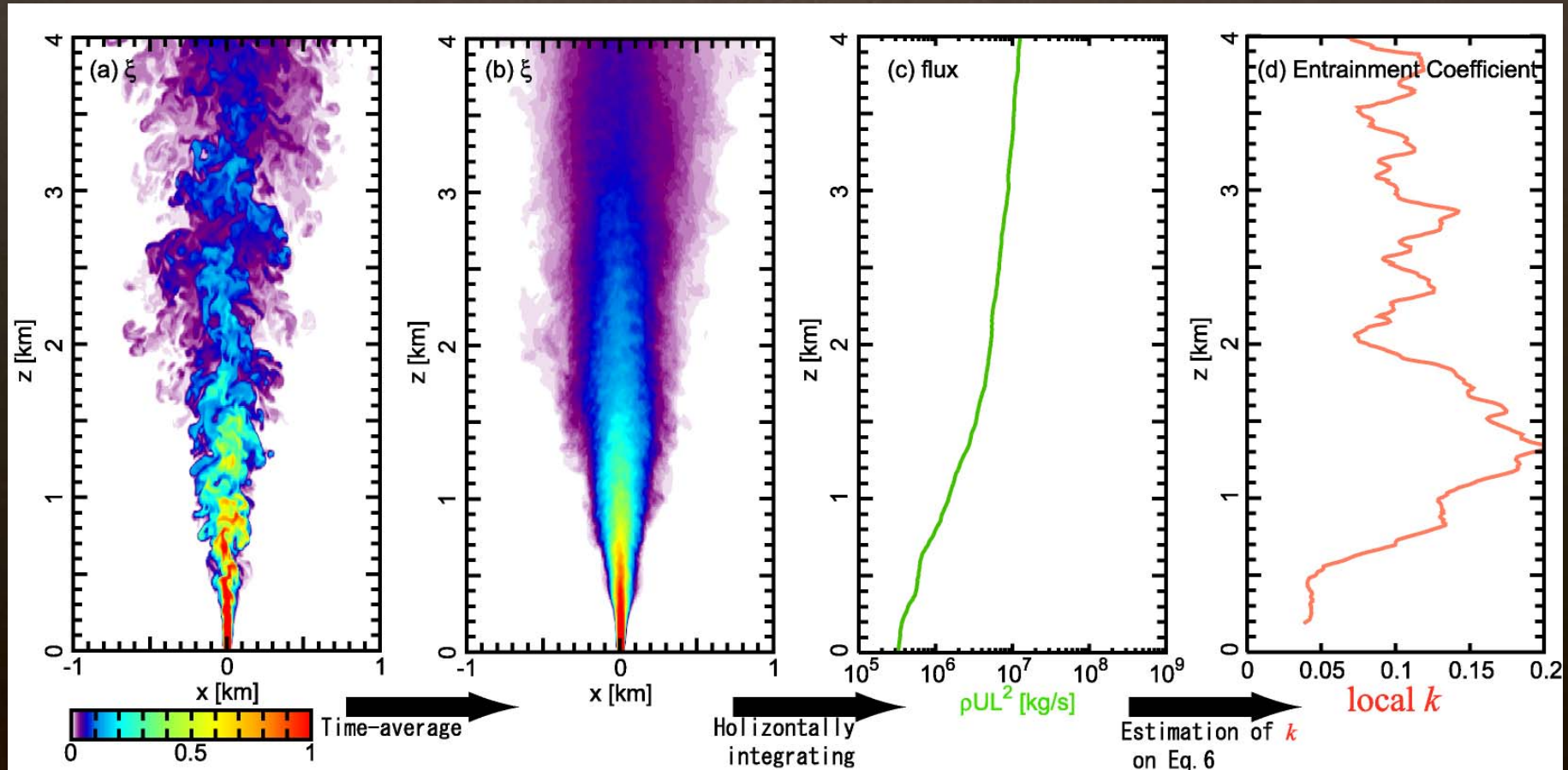
エンタルピーflux

$$\begin{aligned}\bar{\rho}UL^2 &= \int_0^\infty 2\rho wx dx \\ \bar{\rho}\bar{\xi}UL^2 &= \int_0^\infty 2\rho\xi wx dr \\ \bar{\rho}U^2L^2 &= \int_0^\infty 2\rho w^2 x dx \\ \bar{\rho}\bar{C}_{mix}\bar{T}UL^2 &= \int_0^\infty 2\rho C_{mix}Tw x dx\end{aligned}$$

3D計算より得られる



噴煙柱の混合効率($Q_0=10^{7.0}$ kg/s)



噴煙柱下部: $k=0.03 \sim 0.07$

噴煙柱上部: $k=0.10 \sim 0.15$

混合効率が変化する原因

1. 急激な膨張による混合に必要な渦の破壊

[Bhat and Narasimha, 1996]

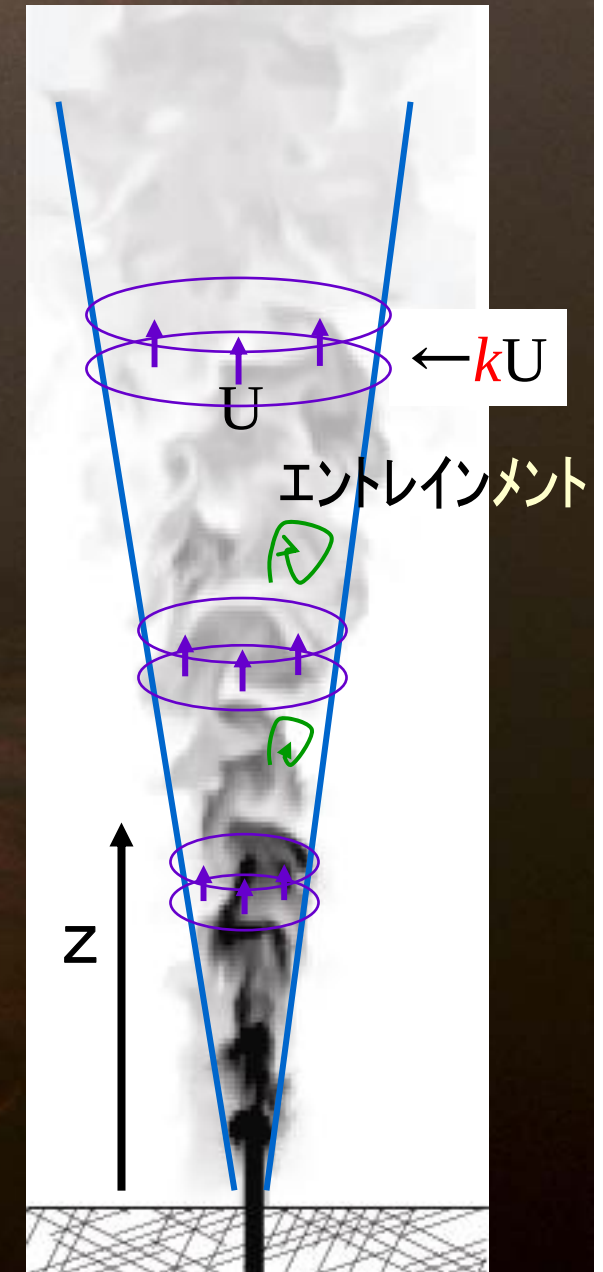
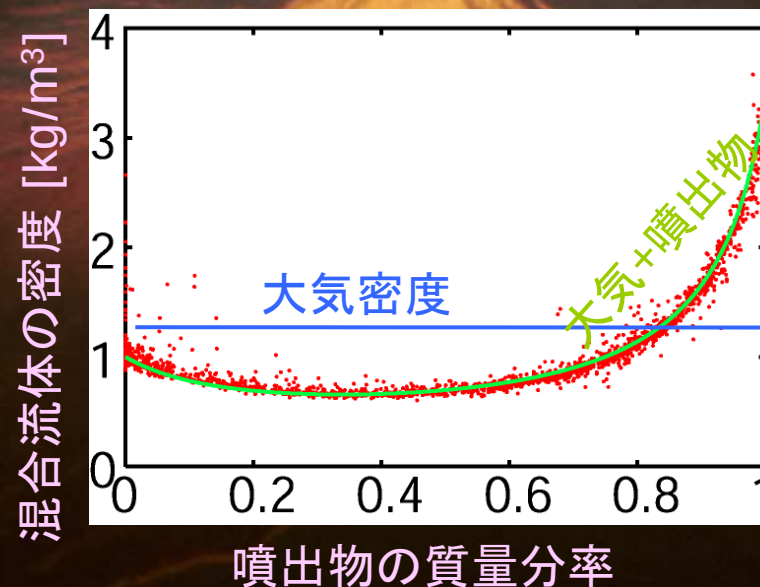
2. 浮力の変化 (in ブジネスク近似)

[Kaminski et al., 2005; Carazzo et al., 2006]

3. 物理量profileの変化 (in ブジネスク近似)

[Kaminski et al., 2005; Carazzo et al., 2006]

4. 圧力の変化

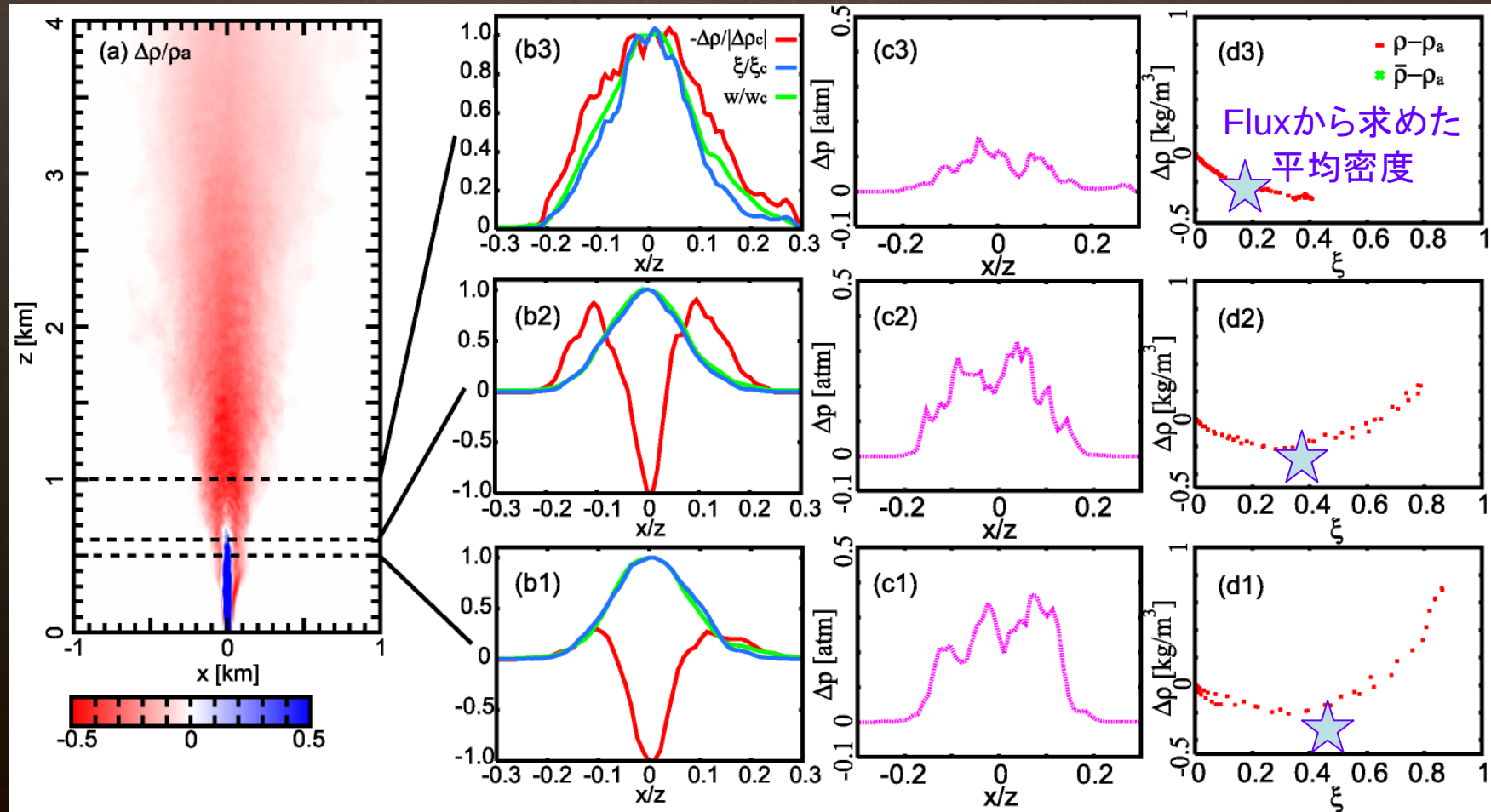


物理量のプロファイル

密度差 濃度 速度

圧力差

濃度—密度の関係



平均密度はunderestimate

$$k = \frac{\frac{d(\bar{\rho}UL^2)}{dz}}{2\rho_{air}UL} = \frac{\frac{dQ}{dz}\bar{\rho}^{1/2}}{2\rho_{air}M^{1/2}}$$

$\bar{\rho}$ 平均密度
 Q 質量flux
 M 運動量flux

密度プロファイルの解析解

速度・濃度・温度プロファイルがGaussianで与えられる時

速度

$$w = w_c \exp\left(-\frac{x^2}{\lambda_w^2 z^2}\right)$$

濃度

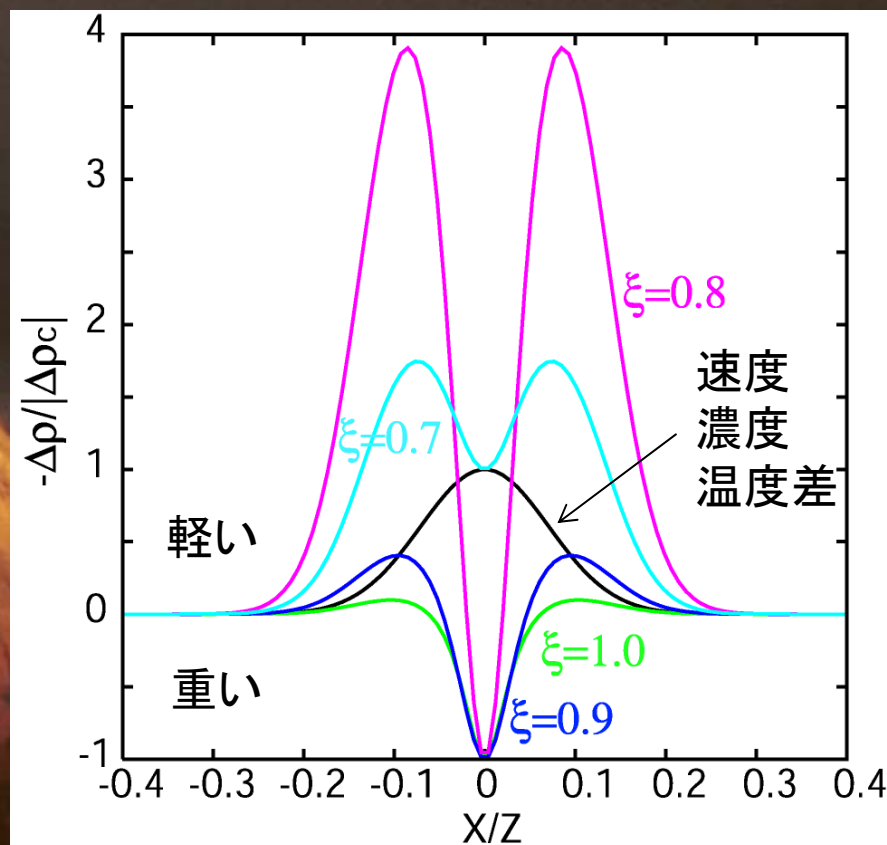
$$\xi = \xi_c \exp\left(-\frac{x^2}{\lambda_\xi^2 z^2}\right)$$

温度差

$$\Delta T = \Delta T_c \exp\left(-\frac{x^2}{\lambda_T^2 z^2}\right)$$

噴煙の状態方程式を仮定すると

$$P = \rho_c (n_g R_g + n_a R_a) T$$



密度プロファイルは中心濃度で大きく変化する
⇒ 平均濃度・密度で求めた混合効率を実際と異なる

まとめ

噴煙内での混合効率は高さによって変化する

火口付近 0.03–0.07

噴煙柱上部 0.10–0.15

混合効率変化の原因

火口付近での圧縮

状態方程式の非線形性

Future work

混合効率の実際と実効を分離

3次元計算

取り込み速度の直接測定

$$\frac{d(\bar{\rho}UL^2)}{dz} = 2k\rho_{air}UL \quad \boxed{U_e} = k\boxed{U}$$

解析的研究

中心軸の鉛直profileを与えた時の実効的な k

