

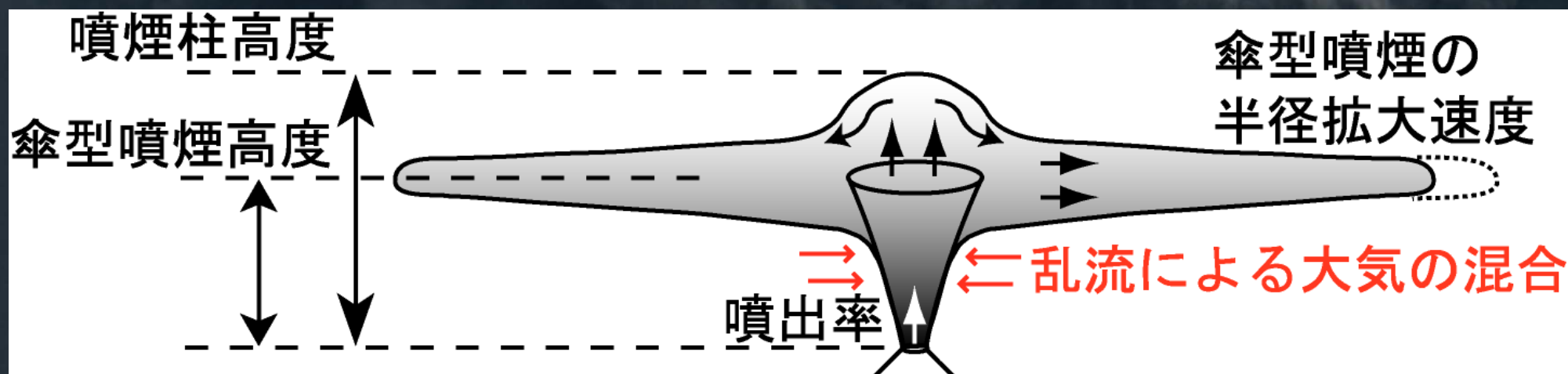
上昇する噴煙柱の乱流混合効率の 数値計算結果からの直接測定

○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）

火山噴煙における乱流混合

噴煙の挙動: 噴出物と周囲大気の乱流による混合が支配

- ・噴煙柱 or 火砕流
- ・噴煙柱高度
- ・傘型噴煙の高度、半径拡大速度



火山噴煙内の混合メカニズムの理解
→ モデル化できれば防災利用も可

噴煙柱の混合効率

噴煙柱の1次元モデル化

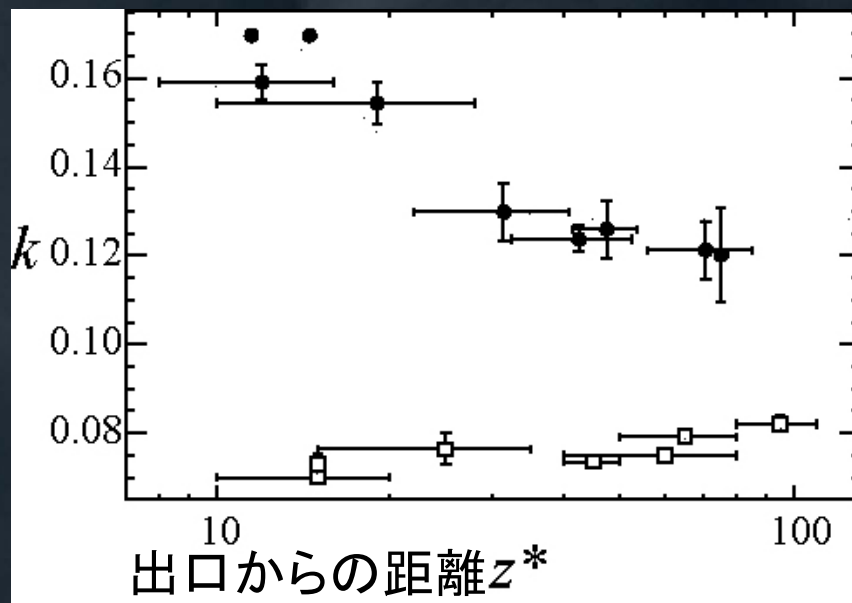
質量保存式 $\frac{dQ}{dz} = Q_{in} = \rho_{air} \times (2\pi L) \times U_{\varepsilon}$

周囲流体の流入速度 $U_{\varepsilon} = k \times$ 平均速度 U

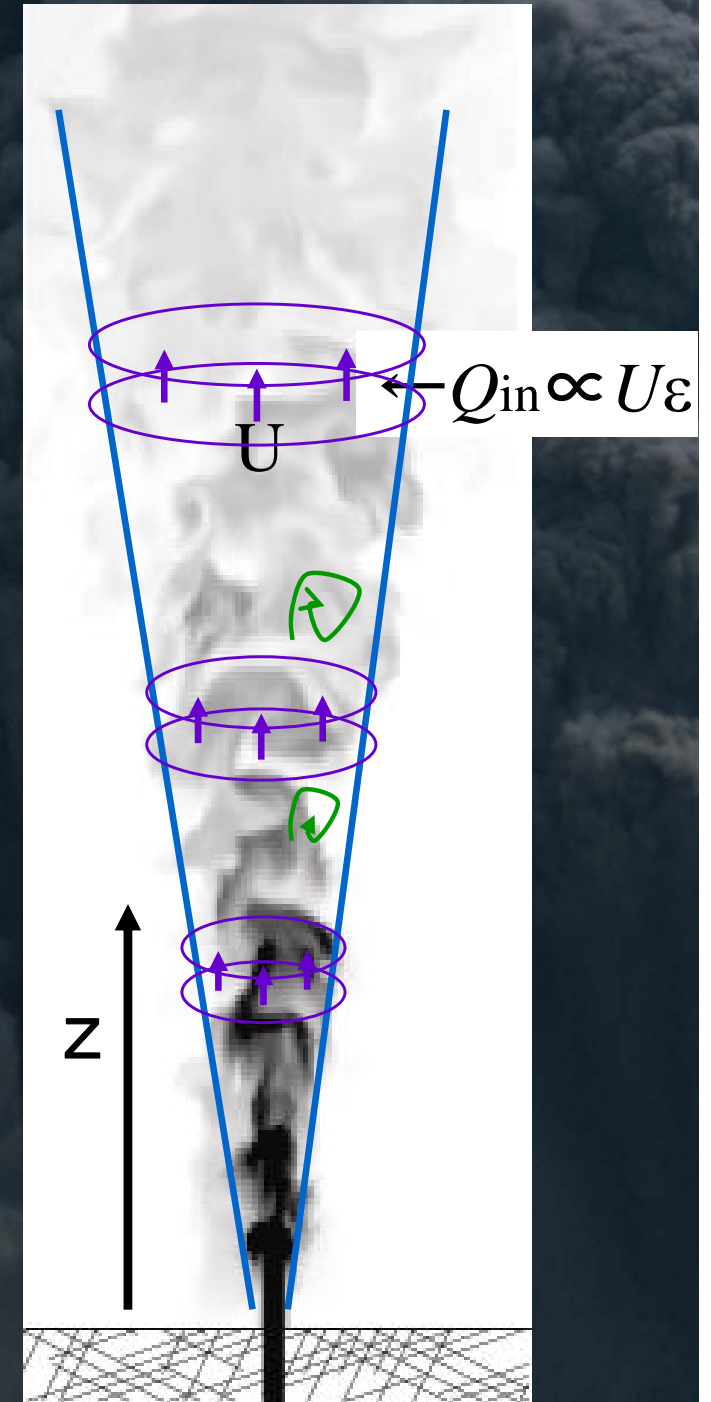
$$\frac{dQ}{dz} = \rho_{air} \times (2\pi L) \times (kU)$$

- Q 質量流量
- Q_{in} 大気流入量
- ρ_{air} 大気密度
- U 平均速度
- L 特徴的長さ

室内実験

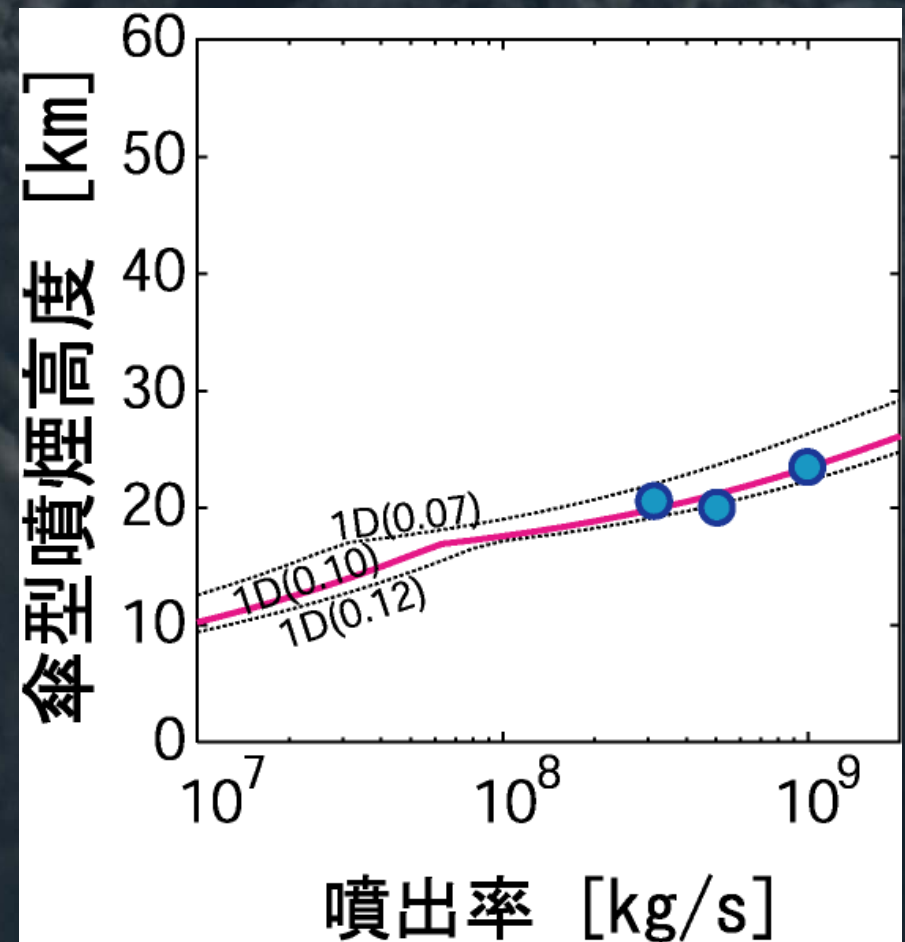
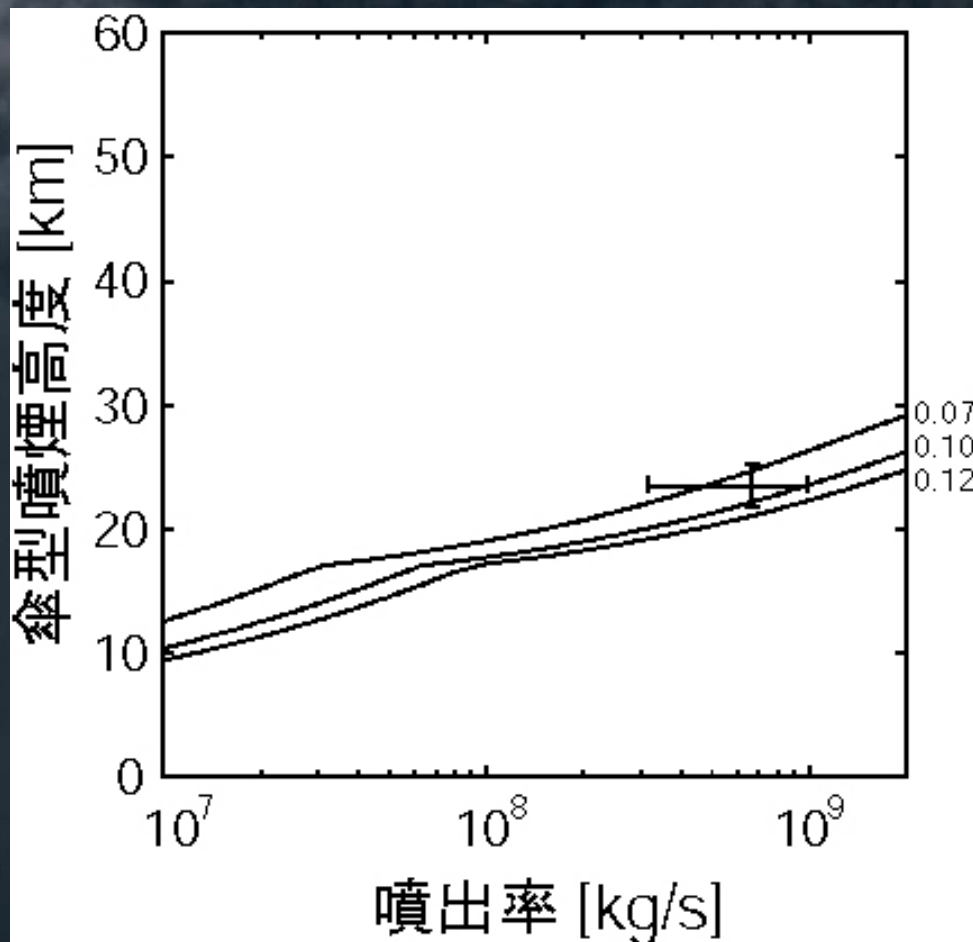


[Carazzo et al., 2006を改変]



噴煙高度から見た混合効率

Pinatubo1991年噴火の観測データ 3D数値シミュレーション



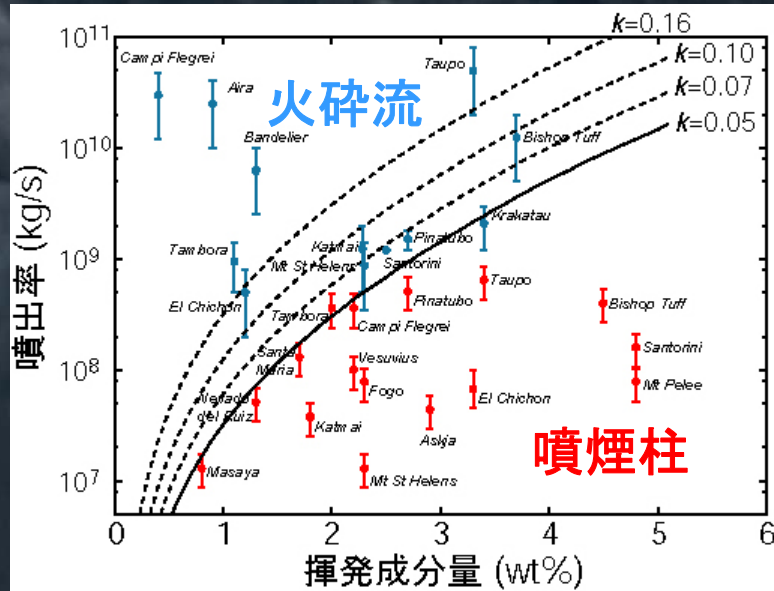
$k \sim 0.1$

[Suzuki et al., 2005;
Suzuki and Koyaguchi, 2009]

火砕流発生条件から見た混合効率

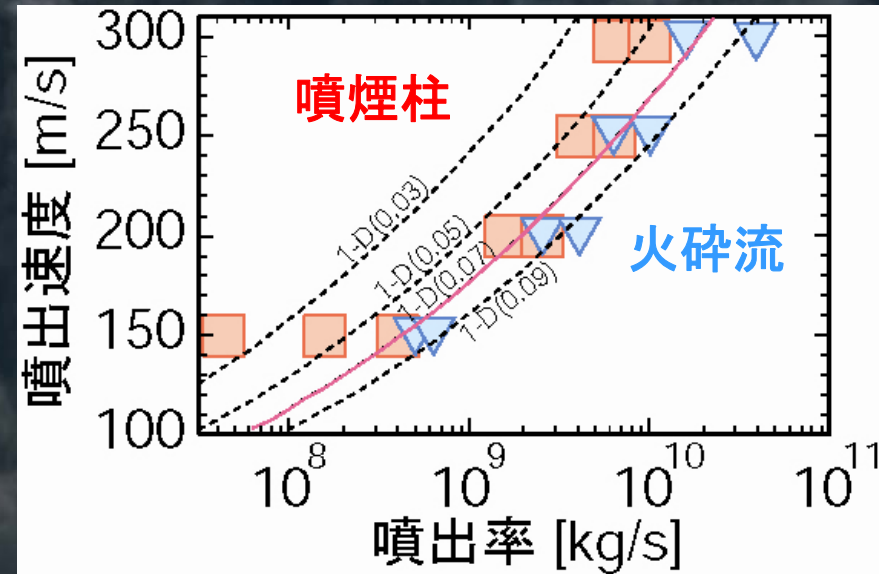
観測・フィールド観察

[Carazzo et al., 2008を改変]

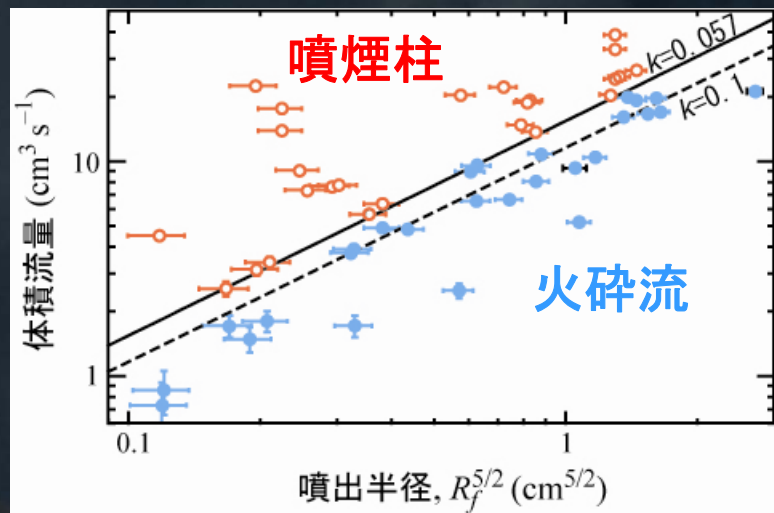


3D数値シミュレーション

[Suzuki et al., 2005を改変]



室内実験 [Kaminski et al., 2005を改変]



$k=0.05\sim0.07$

噴煙柱高度からの混合効率 $k=0.1$ より優位に小
 → 混合効率 k が高さによって変化することを示唆

3次元数値計算を使って混合効率 k を
 高さの関数として求めることを目指す

噴煙柱の3次元シミュレーション

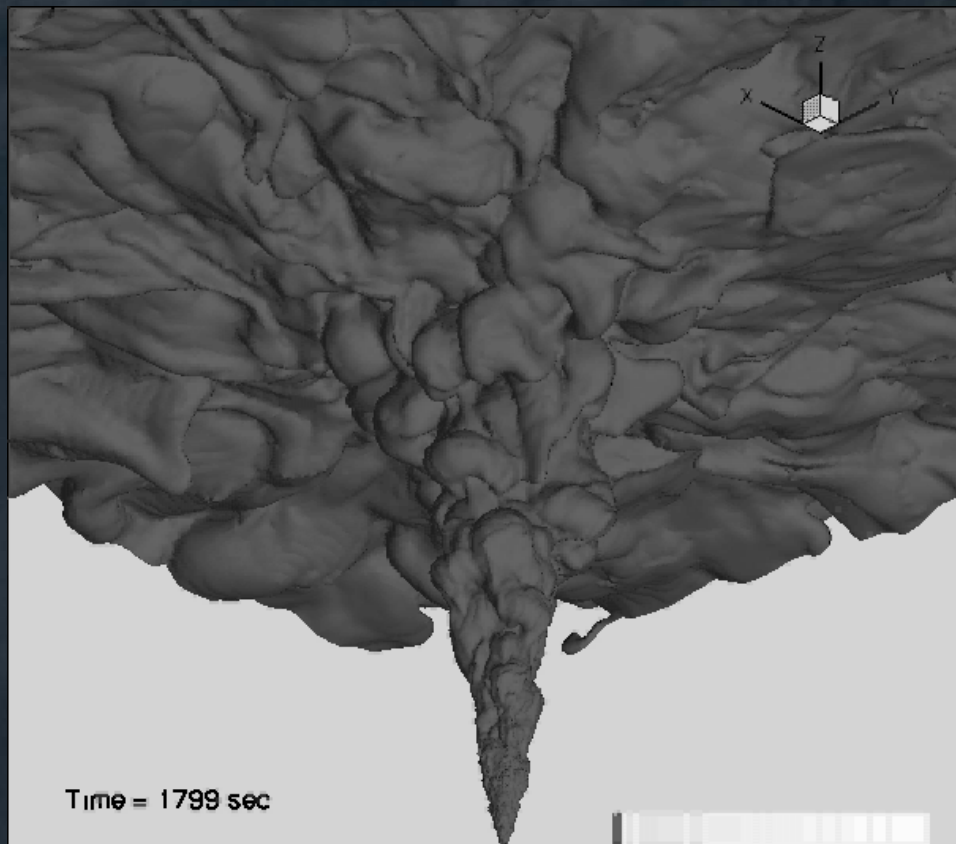


乱流混合を見積もるために必要な条件

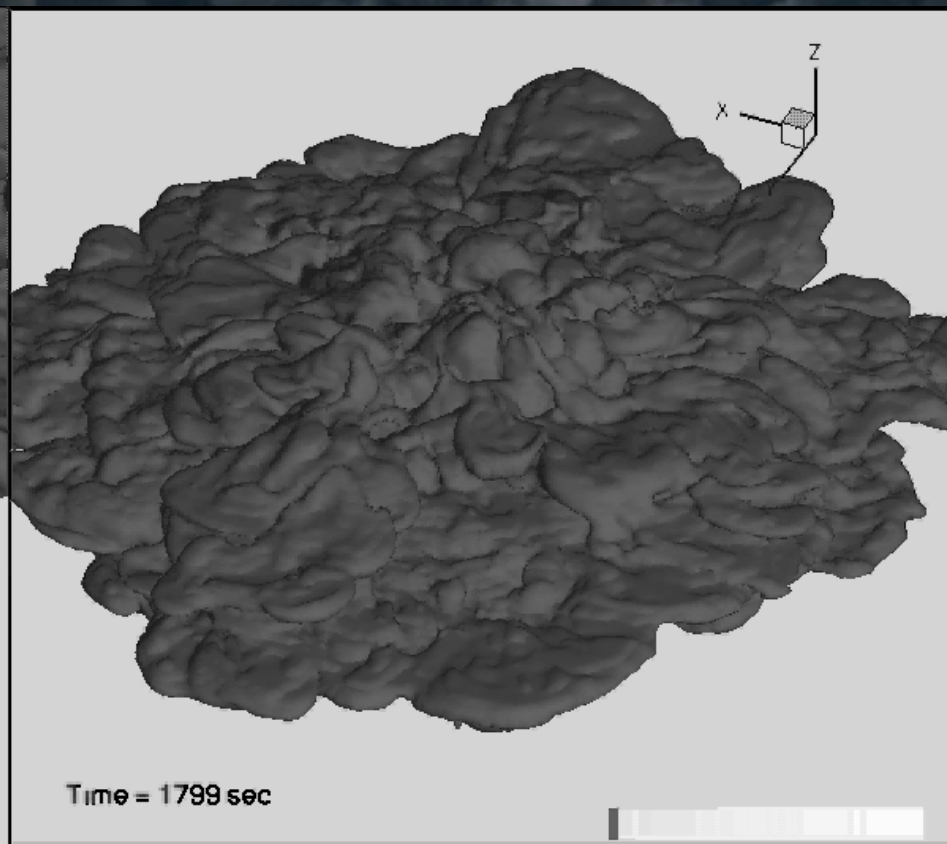
- ・火口付近から噴煙柱, 傘型噴煙まで発達した乱流構造の再現
- ・定常状態と見なせる十分に長い時間の再現

⇒ 一般座標を用いた流体計算コードを開発. 512個のCPUを1ヶ月分使用

噴出物濃度の等値面



近傍の斜め下から



遠方の斜め上から

3D計算からの混合効率*k*の見積方法

$$\frac{dQ}{dz} = (2\pi L) \times \rho_{air} \times (kU)$$

質量流量の増加 = 大気流入量 Q_{in}

Q	質量流量
ρ_{air}	大気密度
U	平均速度
L	特徴的長さ

0. 噴煙高度・火砕流発生条件から
実効的な値を求める

$k=0.1$ from 噴煙柱高度

$k=0.05\sim 0.07$ from 火砕流条件

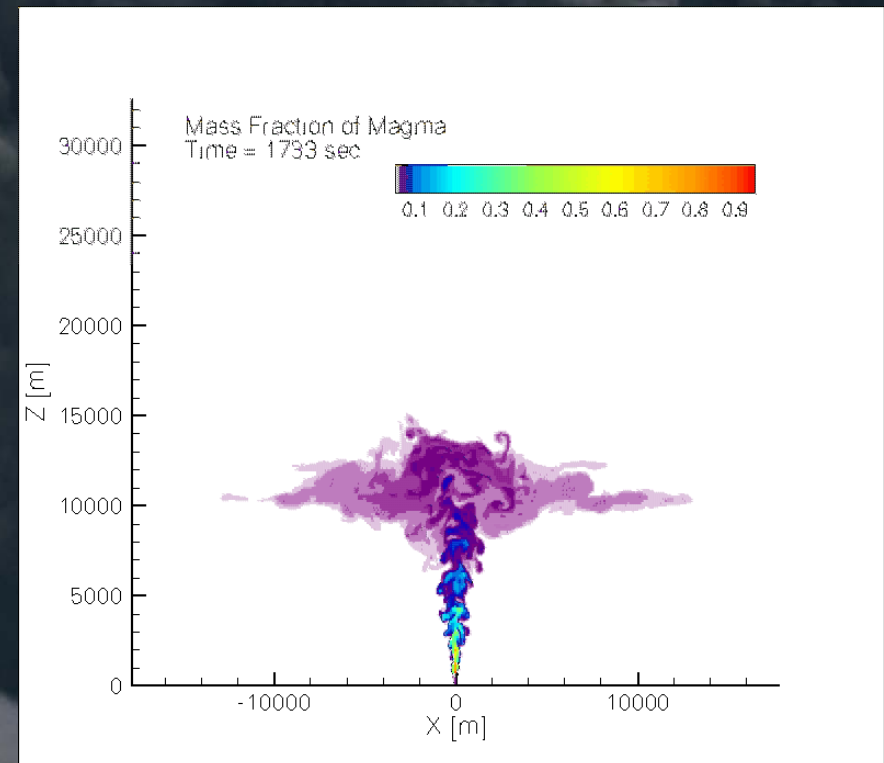
1. 噴煙柱の質量保存式を用いる

$$k = \frac{dQ}{dz} / (2\pi \rho_{air} UL)$$

2. 大気流入量を直接測定する

$$k = Q_{in} / (2\pi \rho_{air} UL)$$

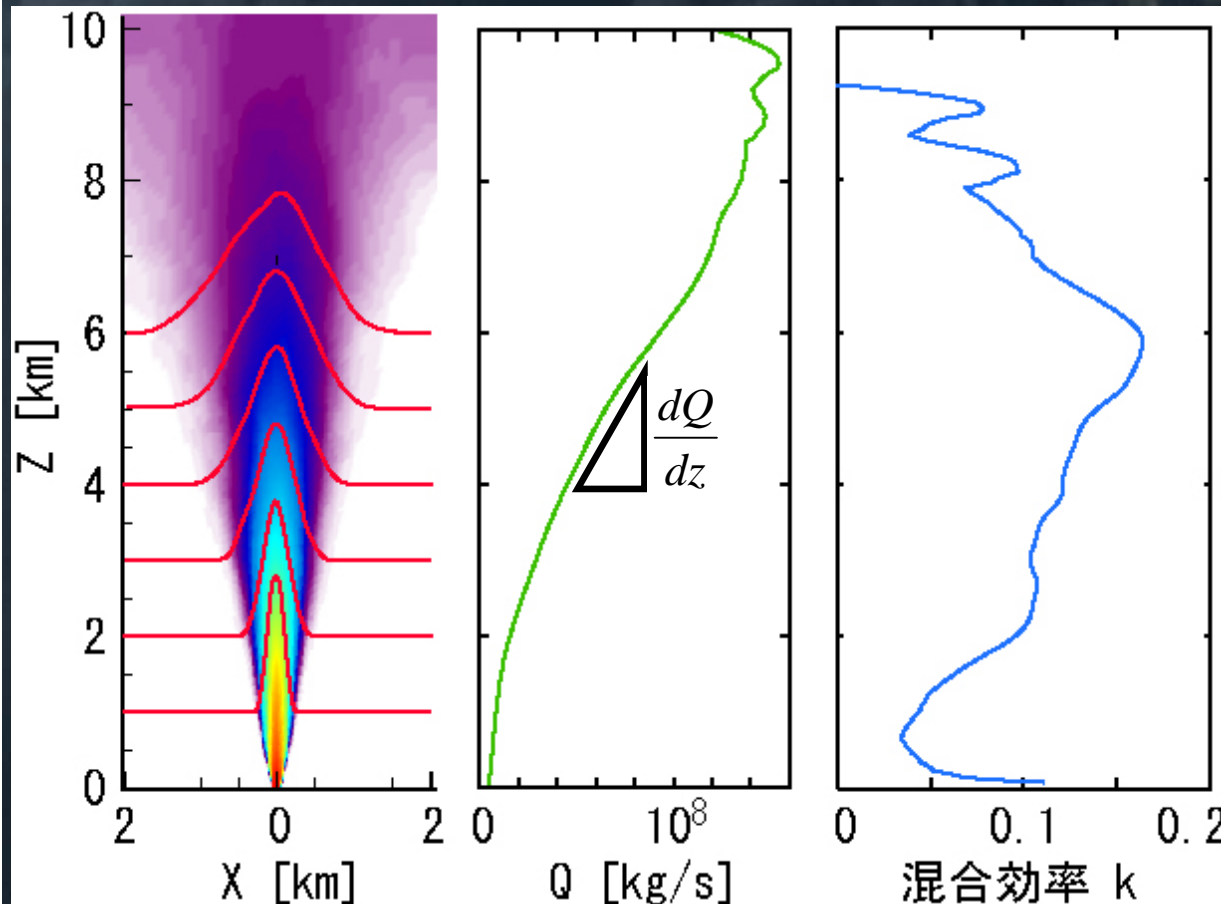
断面での噴出物濃度分布



混合効率 k の見積り 1

噴煙柱の質量保存式を利用

時間平均図
(濃度・速度) 質量流量



$$k = \frac{dQ}{dz} / (2\pi \rho_{air} UL)$$

$$Q = \pi \int_{-\infty}^{\infty} \rho w x dx$$

$$UL = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} w^2 x dx}$$

Q	質量流量
U	平均速度
L	特徴長さ
ρ	密度
w	速度
ρ_{air}	大気密度

$z > 2\text{km} : k = 0.10 \sim 0.15$
 $z < 2\text{km} : k = 0.03 \sim 0.05$
 火口直上 : $k \sim 0.10$

混合効率 k は
高さによって変化

混合効率 k の見積り2

大気流入量の直接測定

時間平均図
(濃度・速度)

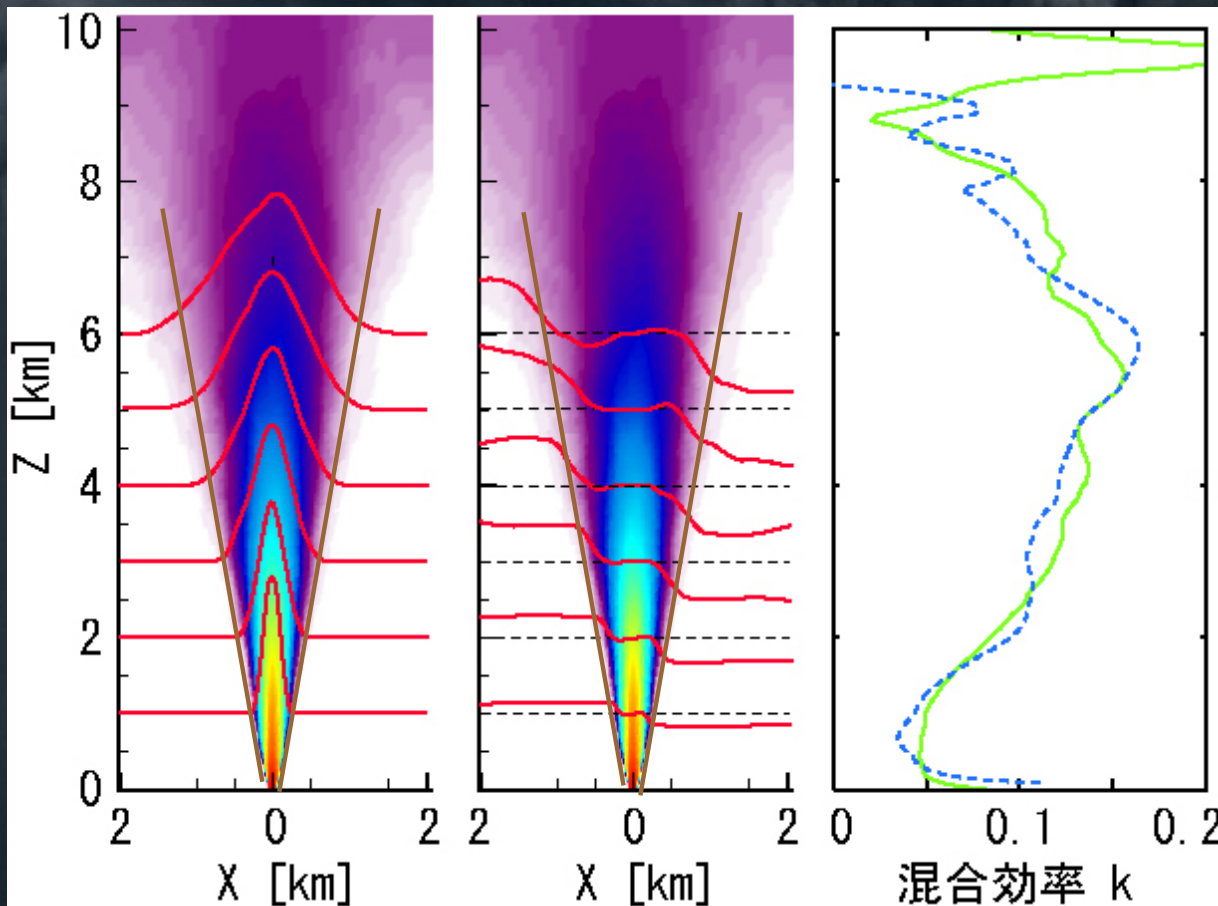
大気流入量

$$k = Q_{in} / (2\pi\rho_{air}UL)$$

Q	質量流量
U	平均速度
L	特徴長さ
ρ	密度
w	速度
ρ_{air}	大気密度

$$Q_{in} = \rho u(2\pi x)$$

$$UL = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} w^2 x dx}$$

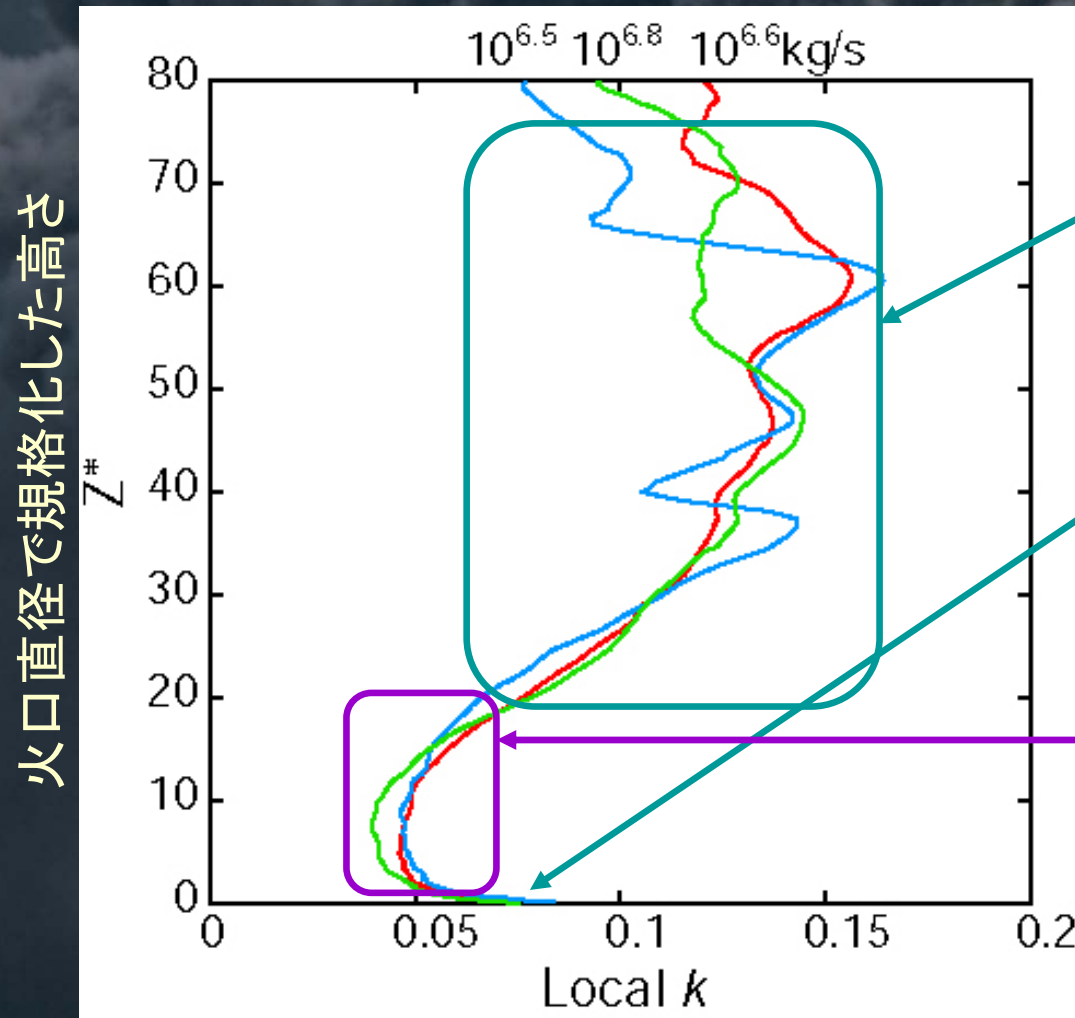


見積り方法1と同じ傾向
 $z > 3\text{km} : k = 0.10 \sim 0.15$
 $z < 2\text{km} : k = 0.04 \sim 0.07$
 火口直上 : $k \sim 0.07$

混合効率 k の変化は
 2つの見積り方法で確認

$X > 2\sigma$ でほぼ一定

混合効率 k の変化



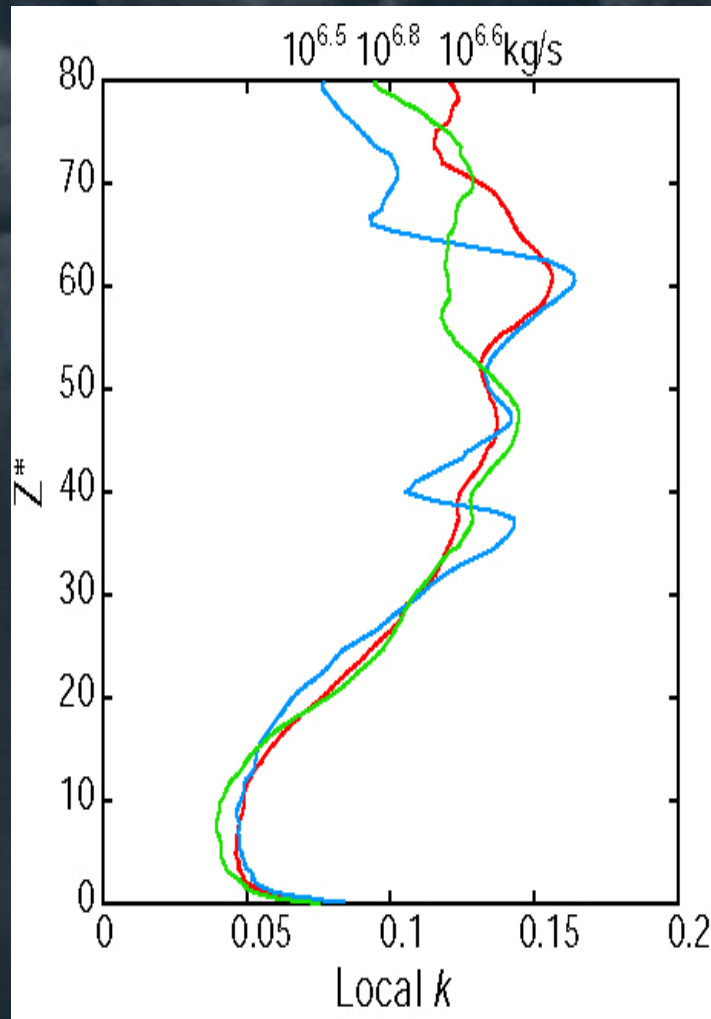
k 変化は噴出条件に依らない
 $k=0.10\sim 0.15$ at $z^* > 15$
≈室内実験Plume

$k\sim 0.07$ at $z^* < 3$
≈室内実験Jet

$k\sim 0.05$ at $3 < z^* < 15$
JetやPlumeよりも小さくなるのが
噴煙の特徴

火砕流発生条件から求めた実効値
 $k=0.05\sim 0.07$ とも整合的

噴煙柱下部でなぜ混合効率 k が小さい？



提案されている混合効率低下の原因

1. 浮力の生成に伴う渦の破壊

[Bhat and Narasimha, 1996]

2. 負の浮力 (negative buoyancy)

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

negative buoyancy plume < Jet < Plume

3. 物理量 (上昇速度・濃度・浮力) の水平profileの変化

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

運動量やエネルギーの水平分布も変わるため

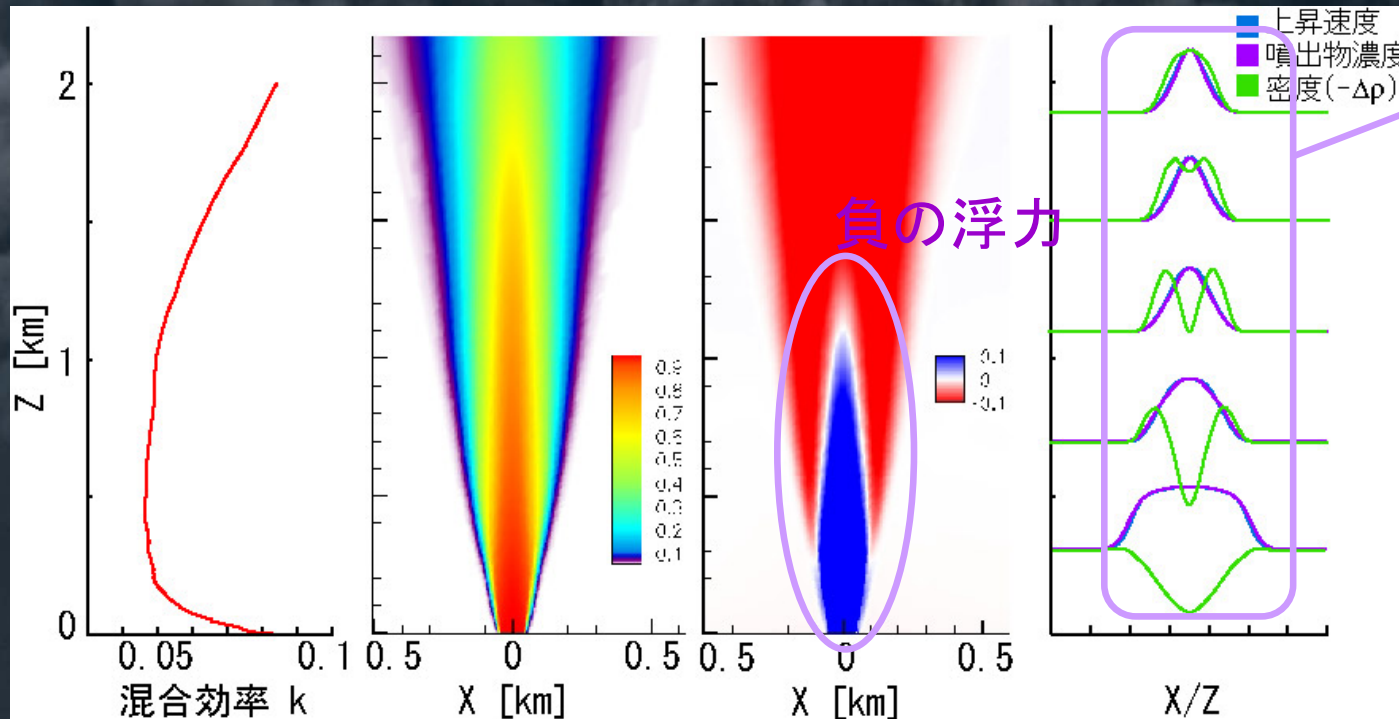
「shearを生むエネルギー: 総エネルギー」も変化

3D計算による物理量profileと混合効率 k

濃度分布

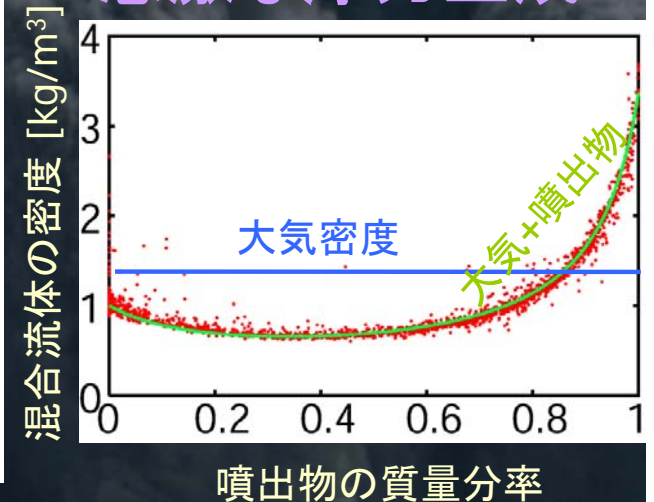
密度分布

水平profile



浮力profileが変化

急激な浮力生成



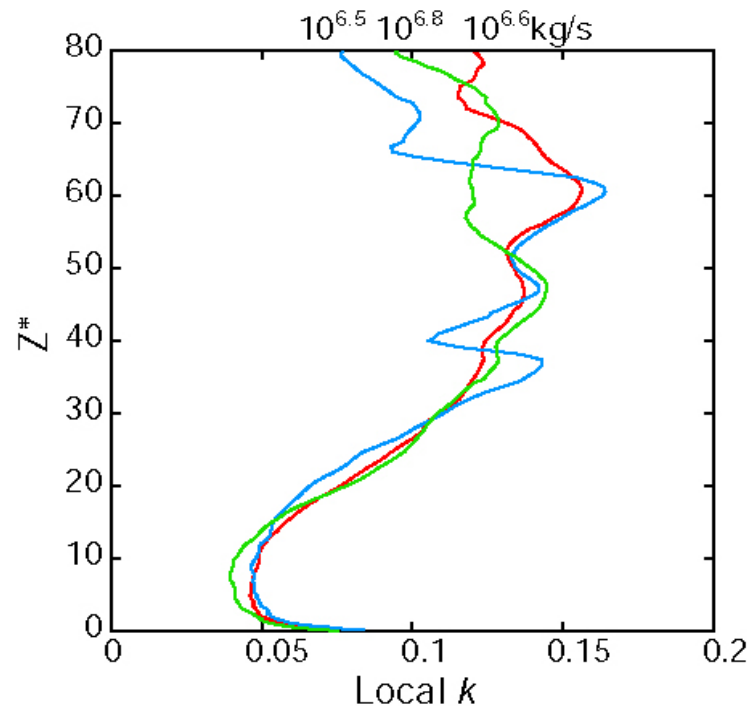
1. 浮力の生成に伴う渦の破壊
2. 負の浮力 (negative buoyancy)
negative buoyancy plume < Jet < Plume
3. 物理量 (上昇速度・濃度・浮力) の水平profileの変化

Kaminski et al. [2005]モデル

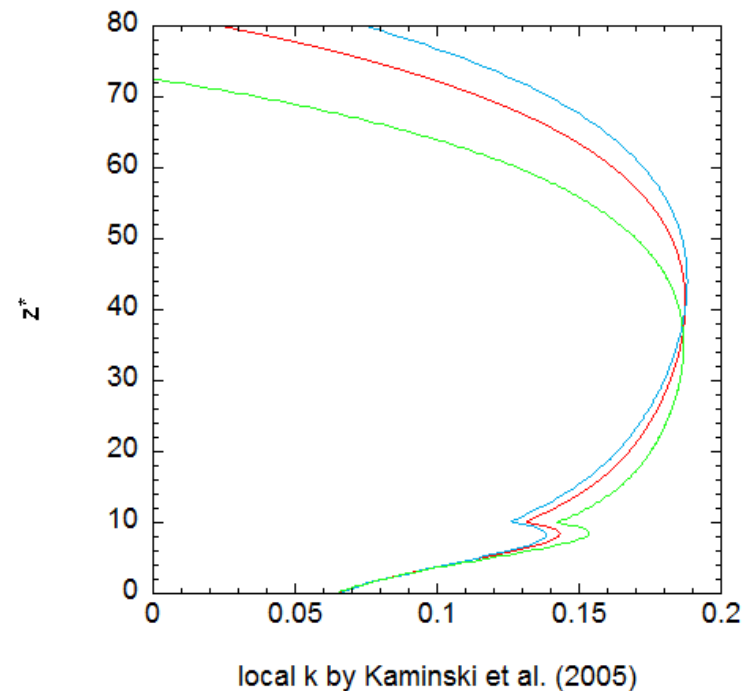
$$k = k_0 + \left(1 - \frac{1}{A}\right) Ri + \frac{L}{2} \cdot \frac{d \ln A}{dz}$$

2.浮力変化 3.profile変化

k_0 定数
 Ri リチャードソン数
 L 特徴長さ
 A 浮力profile:速度profile



3D結果による測定



Kaminski et al. モデルによる予測

浮力生成による渦の破壊なども含めた、噴煙の混合効率を定量的に再現できるモデルが必要

まとめ

噴煙と大気の混合効率 k を3つの手法で測定し、それぞれが整合的な結果を得た。特に、大気流入量を直接測定する手法は初めての試み。

火口直上 ~ 0.07 : Jet的振舞い

噴煙柱下部 ~ 0.05

⇒ 火砕流発生条件を支配

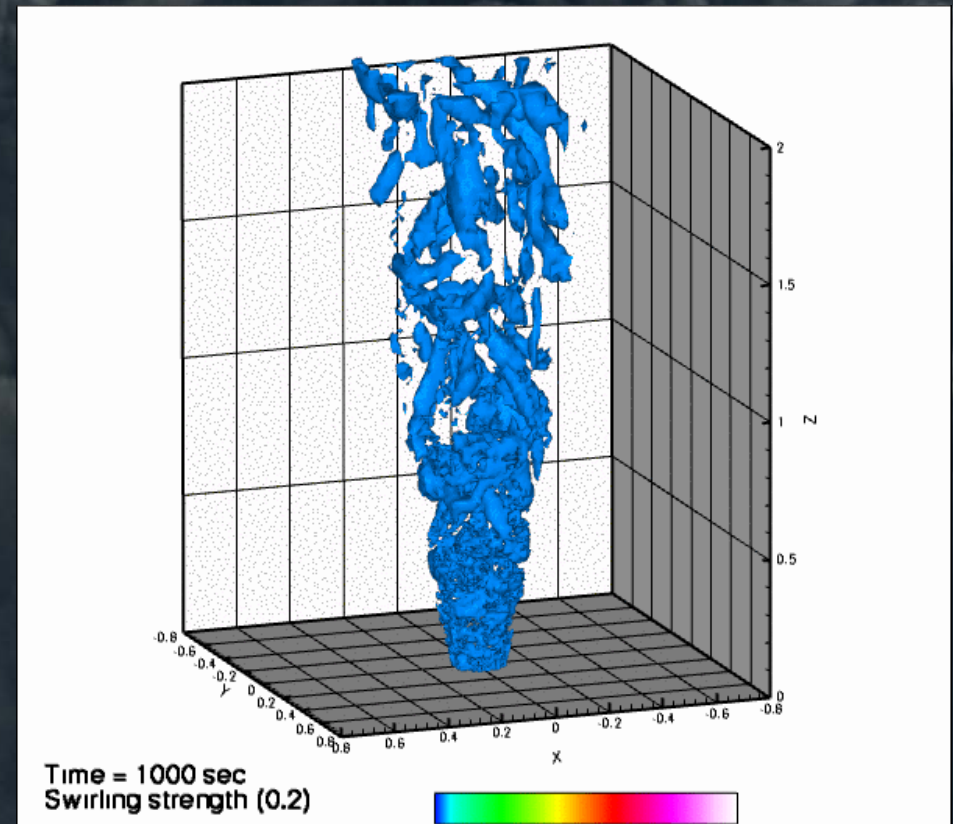
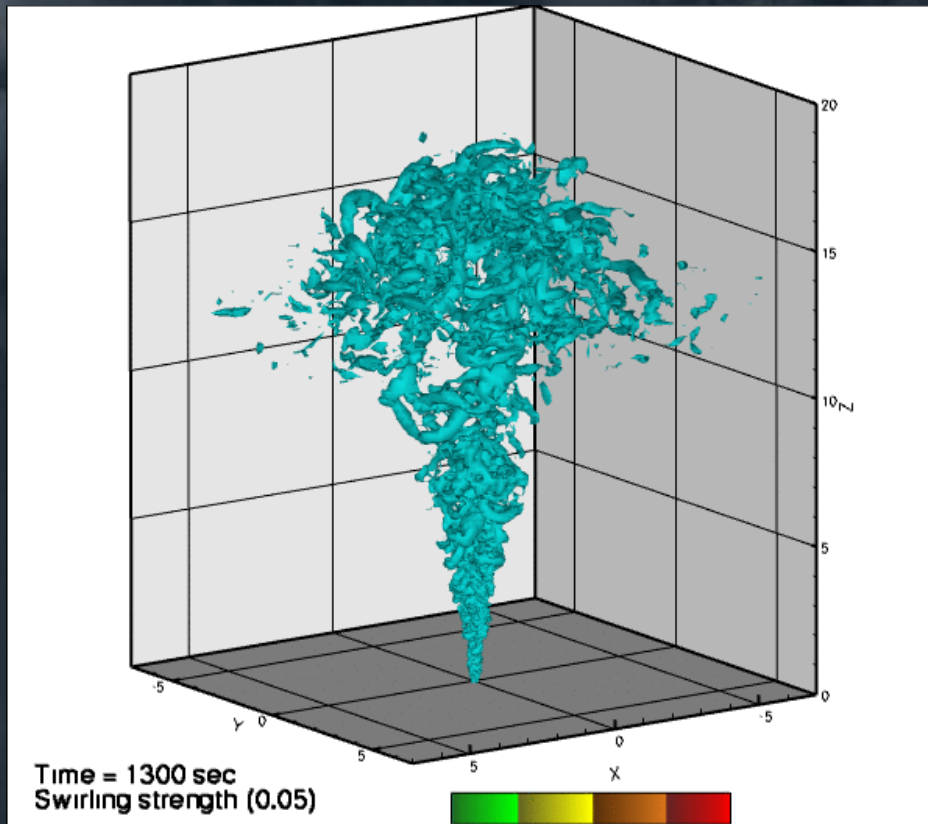
噴煙柱上部 $0.10 \sim 0.15$: Plume的振舞い

⇒ 噴煙柱高度を支配

噴煙の混合効率を定量的に再現するモデルを構築するために、本3D計算が有効となる

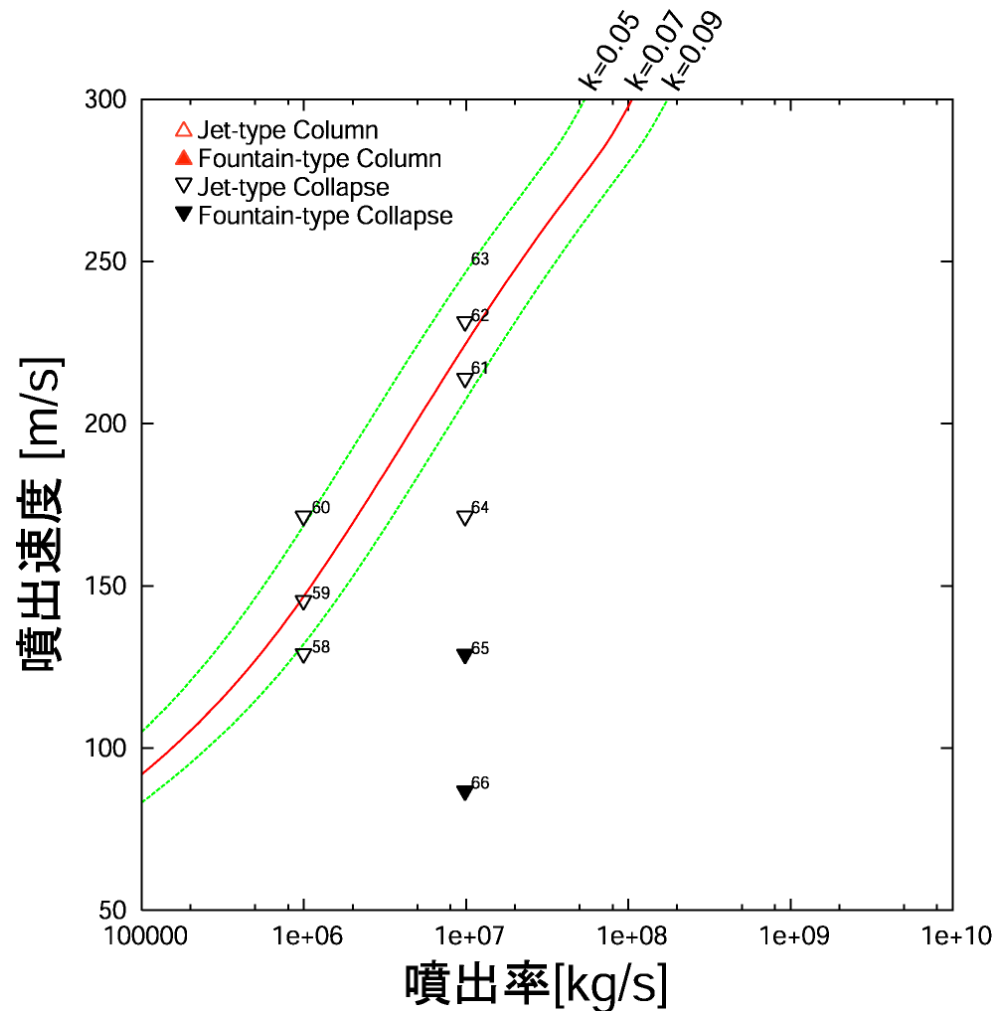
今後の方向性1

渦の3次元構造: Swirling Strength

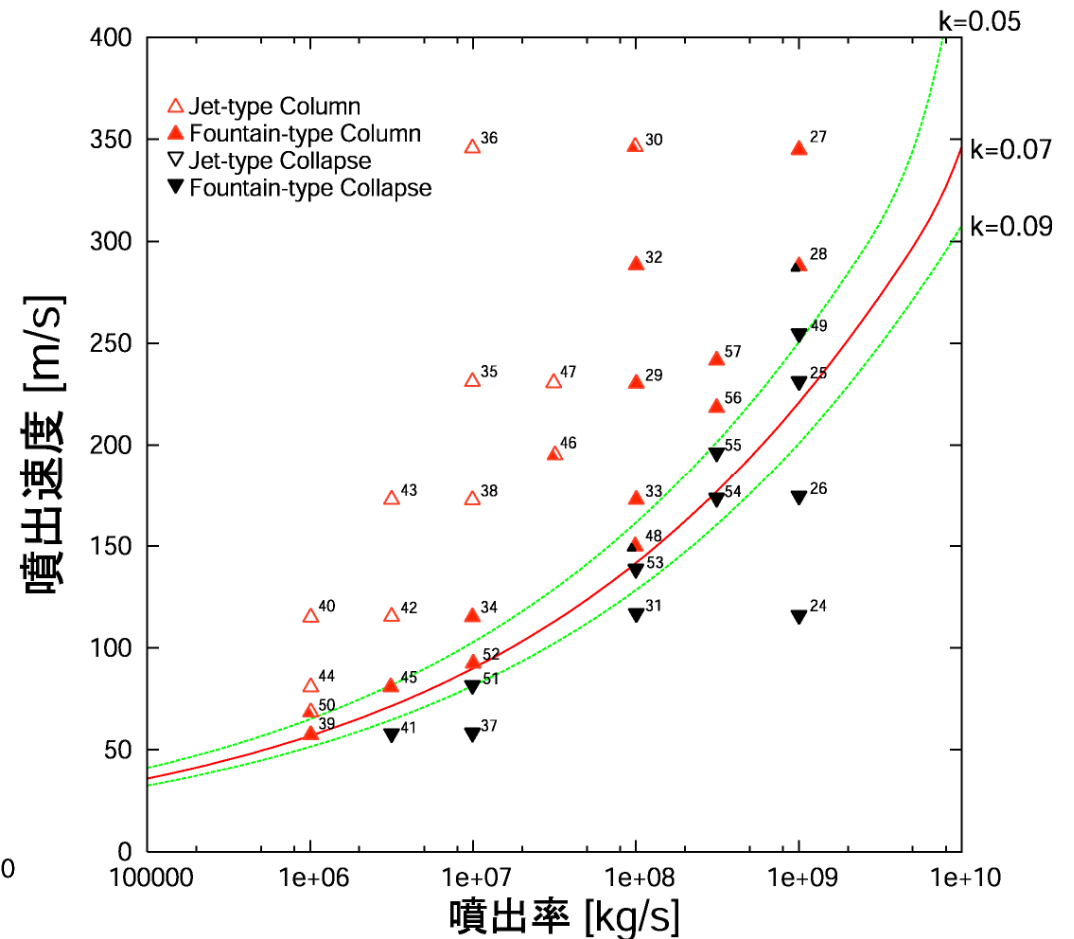


今後の方向性2

噴出条件を変えた場合の火砕流発生条件



550K



1000K