

乱流状態の噴煙中の固体粒子の 懸濁モデルに関する観測からの 制約条件

東京大学 地震研究所

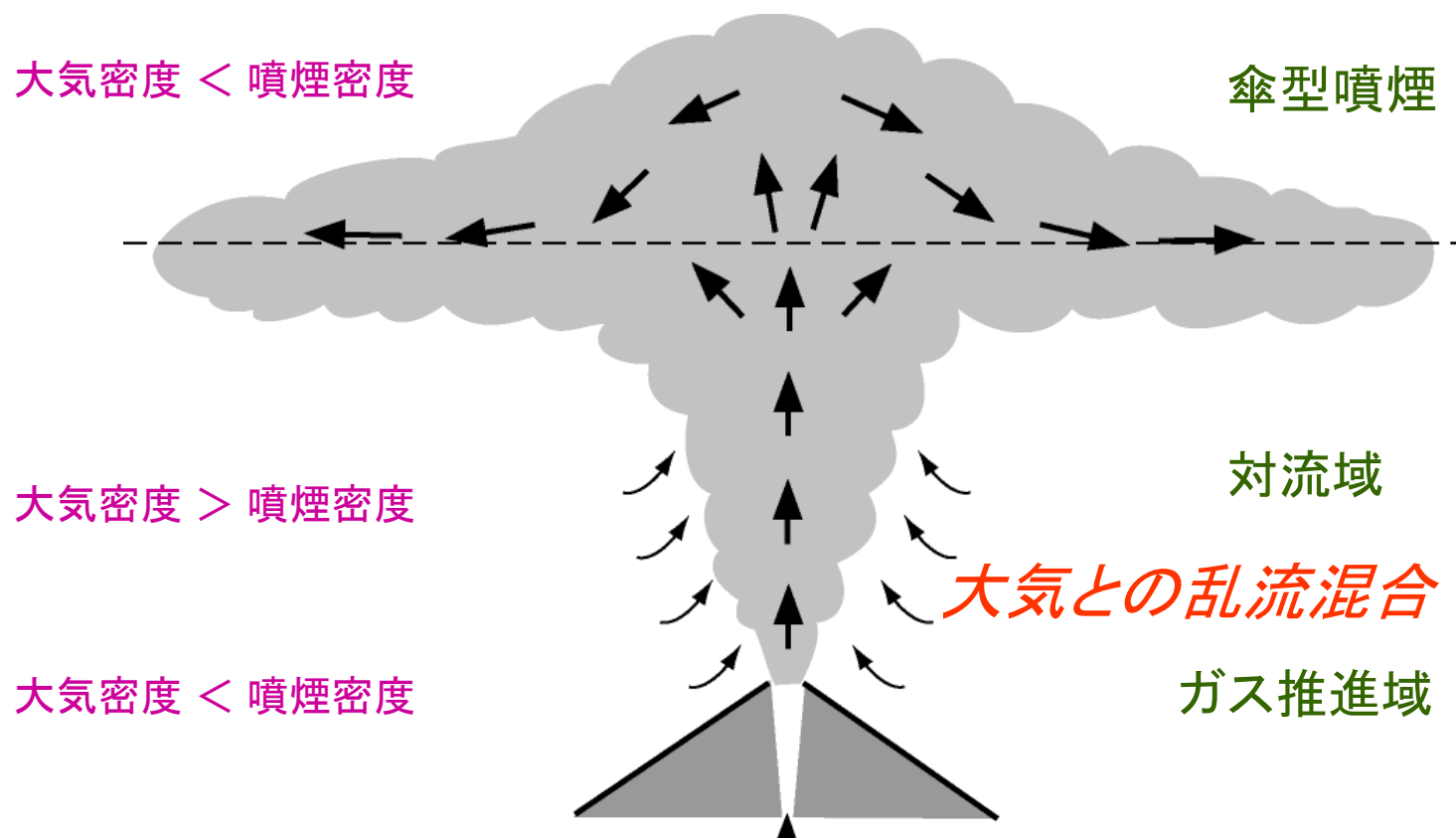
小屋口剛博・落合清勝

JAMSTEC

鈴木雄治郎

火山噴煙のダイナミクス

傘型噴煙の拡大から火口での噴出率が推定できる。



固気混相モデルに向けての目標設定

渦による大気への取り込み
火砕物（熱源）の落下



噴煙モデル（極限）



破碎の程度 大
平均粒径 小
乱流 強

破碎の程度 小
平均粒径 大
乱流 弱

噴煙・火砕流からの 火砕物の落下

2-way相互作用があることは確実だが、定量的・実証的なモデル化が難しい。

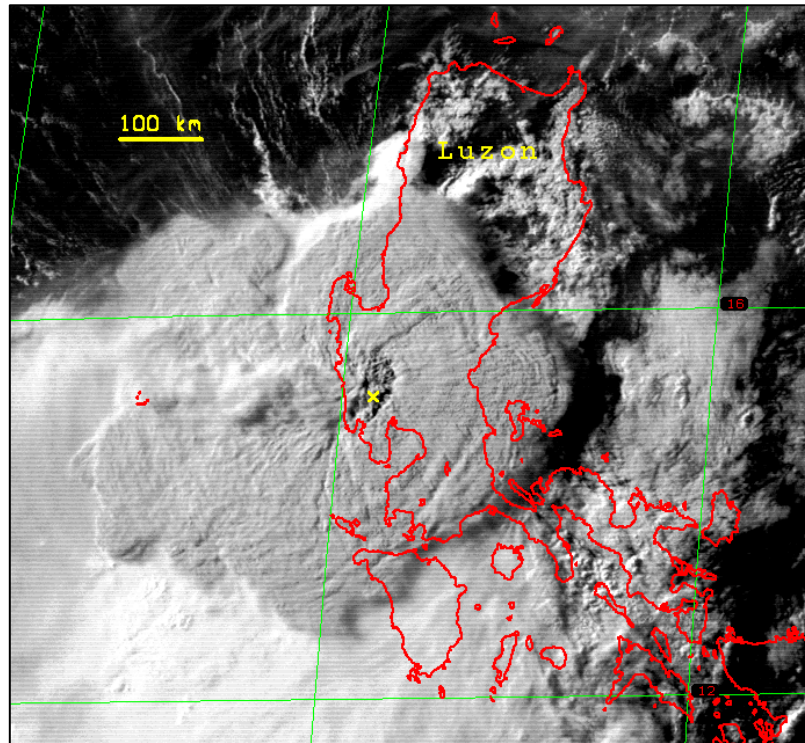
1-way相互作用について、どの程度「**定量的な実証**」が可能か？



対象とする観測事実

人工衛星データと堆積物の性質を統一的に理解したい。

応用：過去の噴火についても高精度で傘型噴煙の拡大率が推定できる。



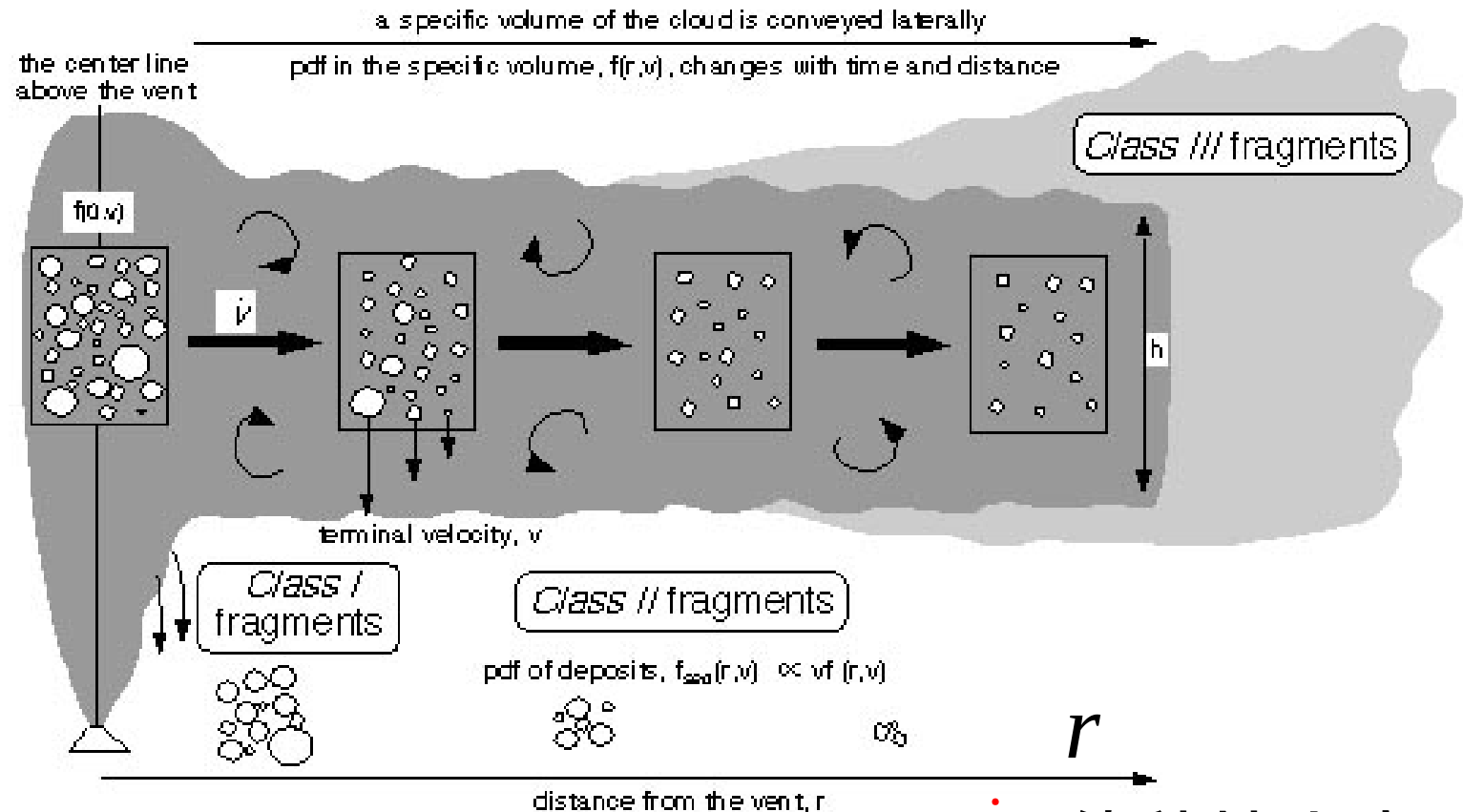
1991年ピナツボ噴火
人工衛星画像



1991年ピナツボ噴火
降下火砕堆積物

火砕物降下モデル

(Bursik et al., 1992; Koyaguchi and Ohno, 2001)



$$\ln s_i(r; v_{ti}) = -\frac{\pi r^2 v_{ti}}{\dot{V}} + \ln s_i(0; v_{ti})$$

$\dot{V}$: 体積拡大率

v_{ti} : 終端速度

s_i : 単位面積堆積量

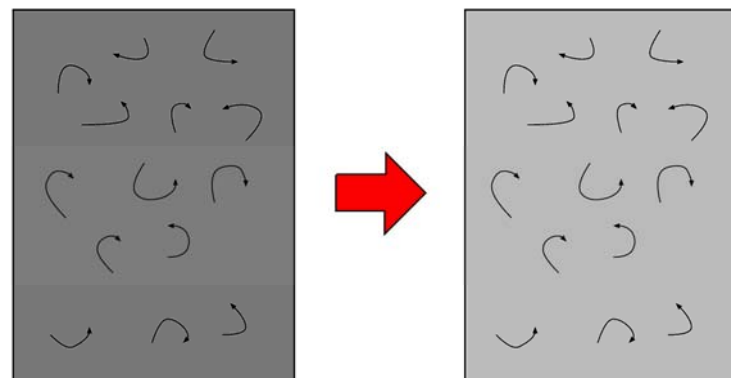
従来のモデルの仮定とその改善

従来のモデル

乱流強度 $>$ 終端速度

均質混合モデル

粒子濃度の時間変化

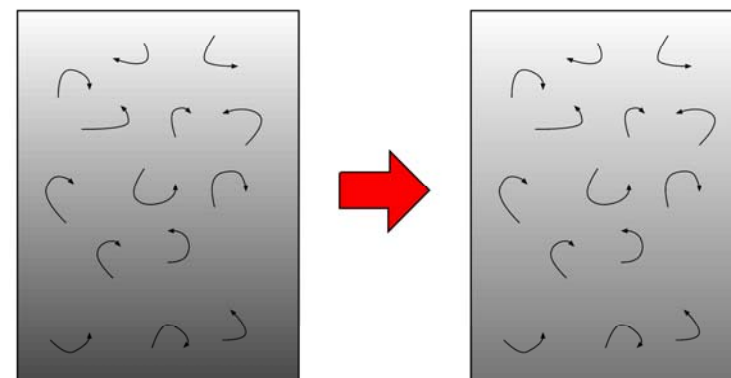


(a)

今回のモデル

乱流強度 $<$ 終端速度

不均質混合モデル

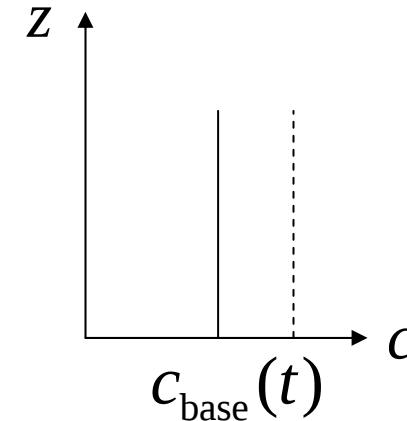


(b)

粒子濃度の時間変化を決めるモデル

均質混合モデル (Martin and Nokes, 1988)

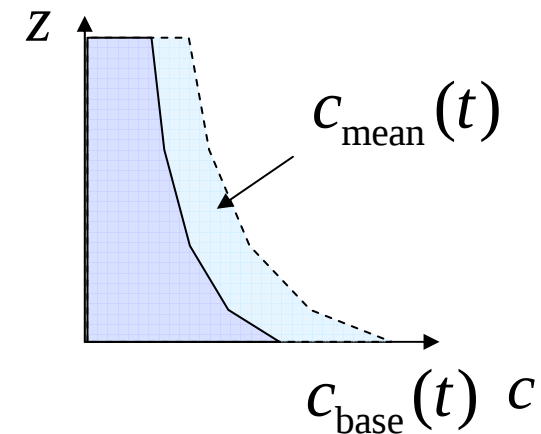
$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -Av_t c_{\text{base}} \\ c_{\text{base}} = c_{\text{mean}} = \frac{N}{Ah} \end{cases} \quad \begin{array}{l} N: \text{領域全体の粒子数} \\ A: \text{底面積} \end{array}$$
$$\frac{dc_{\text{mean}}}{dt} = -\frac{v_t}{h} c_{\text{mean}} \quad c_{\text{mean}}(t) = c_0 \exp\left(\frac{-v_t t}{h}\right)$$



不均質混合モデル (This study)

$$c_{\text{base}} = \kappa c_{\text{mean}} = \kappa \frac{N}{Ah}$$
$$c_{\text{mean}}(t) = c_0 \exp\left(\kappa \frac{-v_t t}{h}\right)$$

$$\kappa \equiv \frac{c_{\text{base}}}{c_{\text{mean}}}; \text{ 粒子の濃集率}$$



乱流拡散モデルによる κ の推定

乱流拡散モデル

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + v_t \frac{\partial c}{\partial z}$$

定常状態, 粒子の出入無し

$$\varepsilon_z \frac{\partial c}{\partial z} + v_t c = 0$$

ε_z : 乱流拡散係数 c : 粒子濃度

z : 流体底面からの高さ

v_t : 粒子の終端速度 h : 流体の高さ

$$c(z) \propto c_{\text{base}} \exp \left(-\frac{v_t}{\varepsilon_z} z \right)$$

c_{base} : 底面での粒子濃度

乱流拡散係数と乱流強度の関係 (Huppert and Sparks, 1980)

流体内が一様な乱流で、乱流拡散係数が z によらず一定と仮定すれば

$$\varepsilon_z = C W_{\text{rms}} h$$

C : オーダー 1 の定数

W_{rms} : 乱流の強さ

h : 傘型噴煙の全体の厚さ

$$\kappa \equiv \frac{c_{\text{base}}}{c_{\text{mean}}} = \frac{v_t h / \varepsilon_z}{1 - \exp(-v_t h / \varepsilon_z)} = \frac{S / C}{1 - \exp(-S / C)}$$

$$S \equiv \frac{v_t}{W_{\text{rms}}}$$

不均質混合モデルの考え方

乱流拡散モデルによる粒子濃度分布の推定

$$\varepsilon_z = CW_{\text{rms}} h$$

C : オーダー 1 の定数

W_{rms} : 乱流の強さ

h : 傘型噴煙の全体の厚さ

粒子沈降実験

噴煙の3次元
数値計算

粒子濃集率 κ の推定

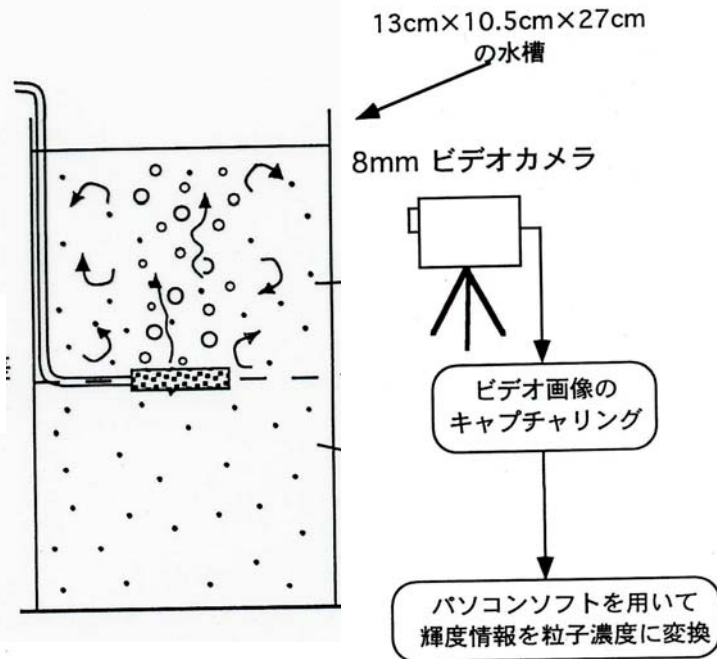
$$\kappa = \frac{S/C}{1 - \exp(-S/C)} \quad S \equiv \frac{v_t}{W_{\text{rms}}}$$

堆積速度の推定

粒子沈降実験の概略図

二層実験

上層 1.0 g/cm^3
下層 1.005 g/cm^3



噴煙からの粒子の分離を想定して、
乱流中を粒子が沈降する2層構造の
実験を行った。(比較のために単層
構造でも実験を行った)

粒子濃度の測定
(ビデオ画像から画像処理)

K の決定

粒子のない状態で乱流強度の測定
(レーザードップラー流速計)

W_{rms} の決定

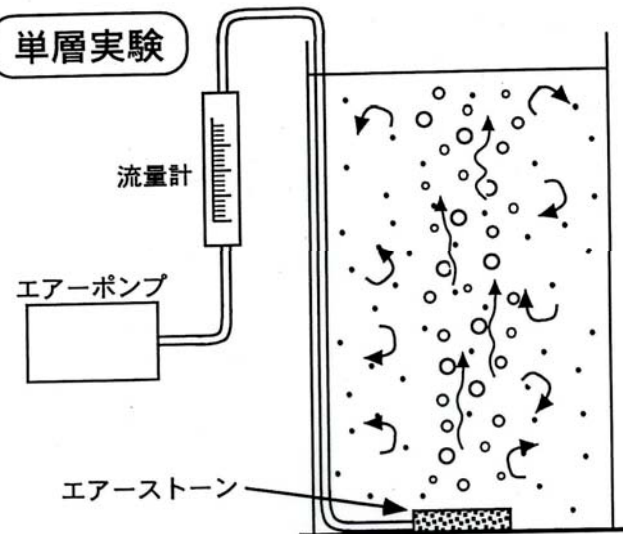
終端速度(静止流体中の粒子の
ストークス沈降速度)を計算

v_i, S の決定



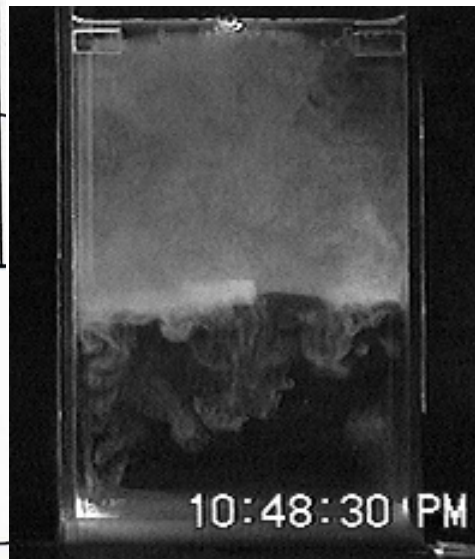
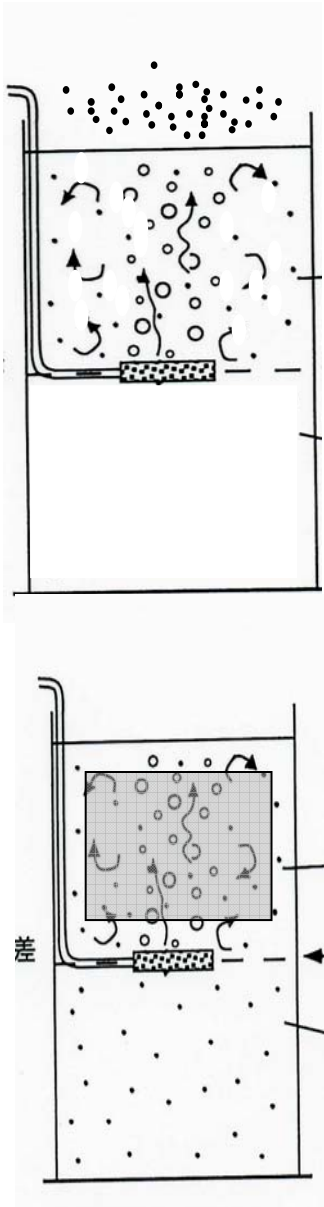
C の決定

単層実験

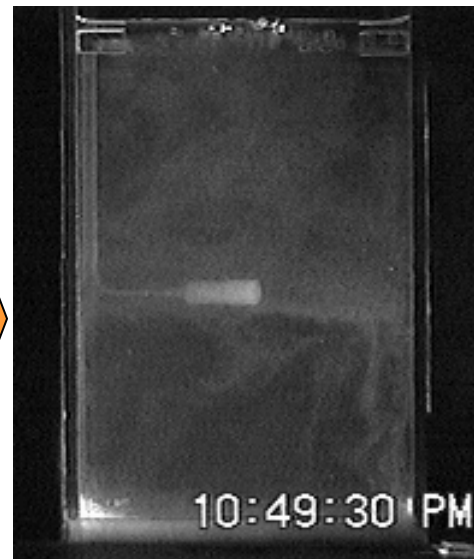


$$K = \frac{S/C}{1 - \exp(-S/C)}$$

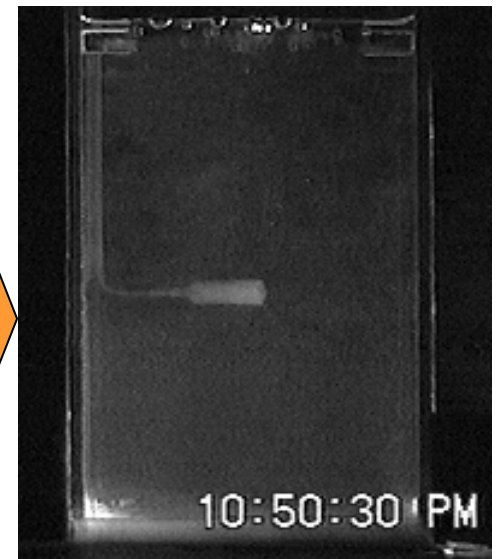
実験結果(1/3: 概要)



測定開始

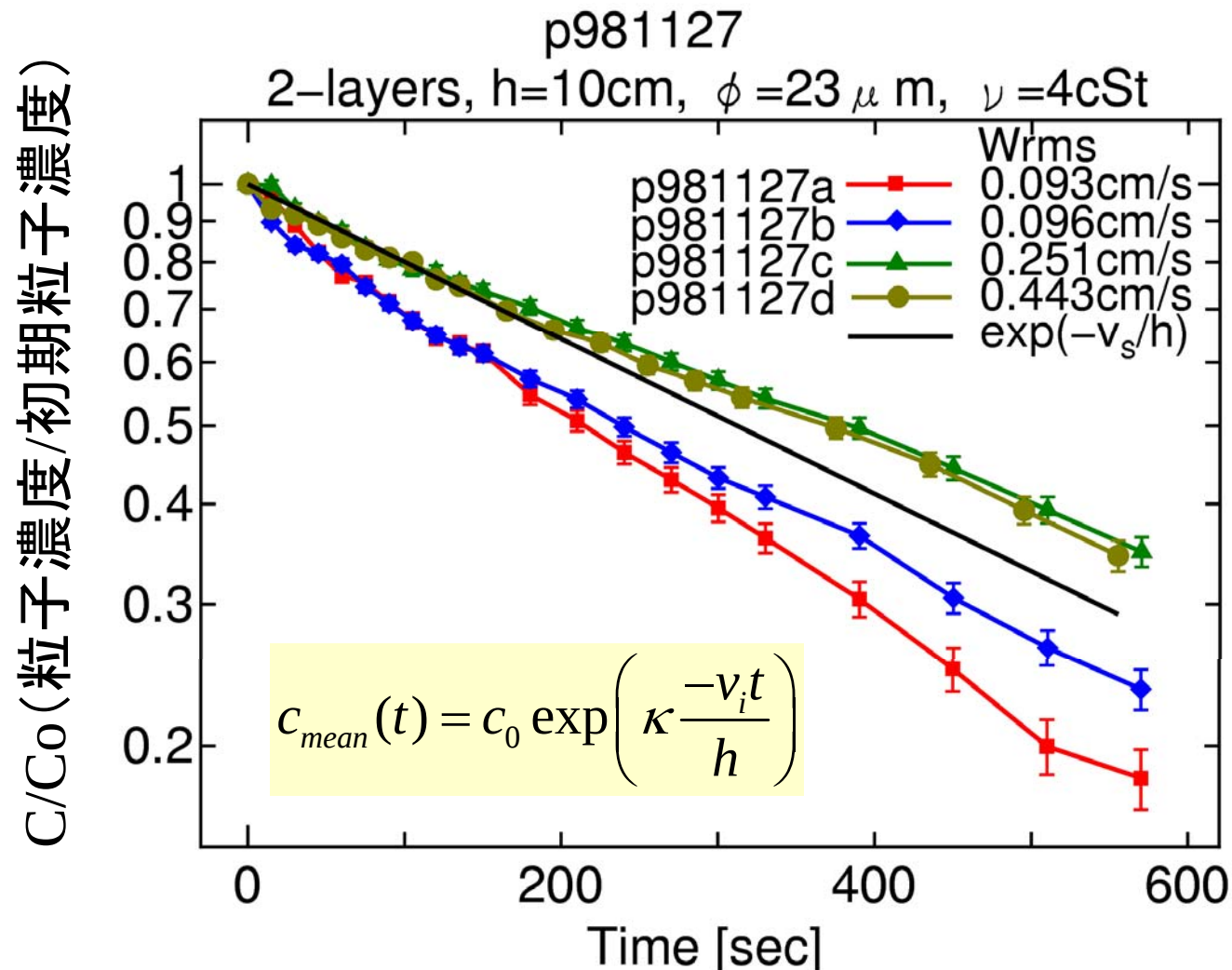


1分後



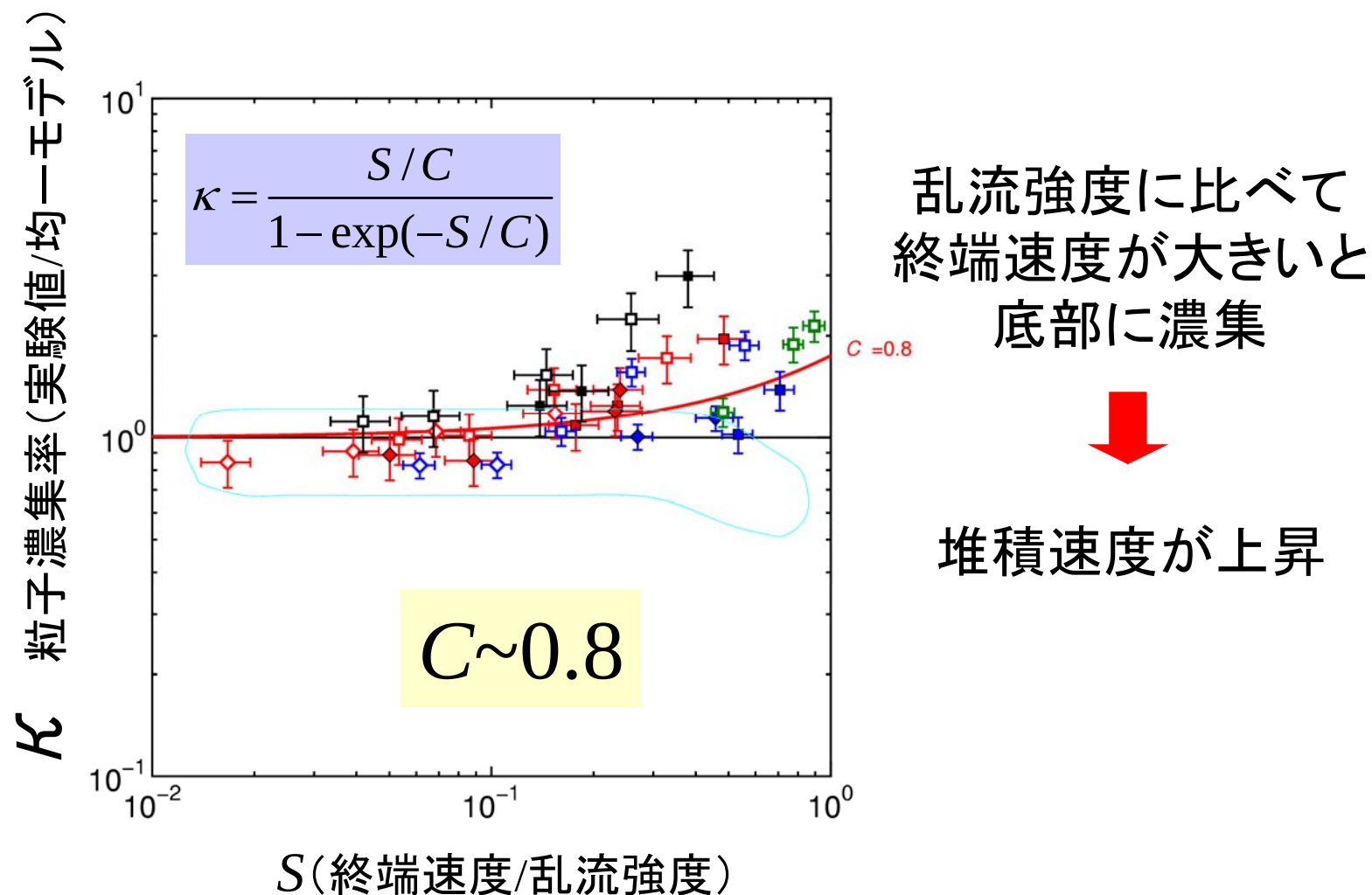
2分後

実験結果 (2/3: 粒子濃度の時間変化)



この結果から、粒子濃集率 κ が求まる

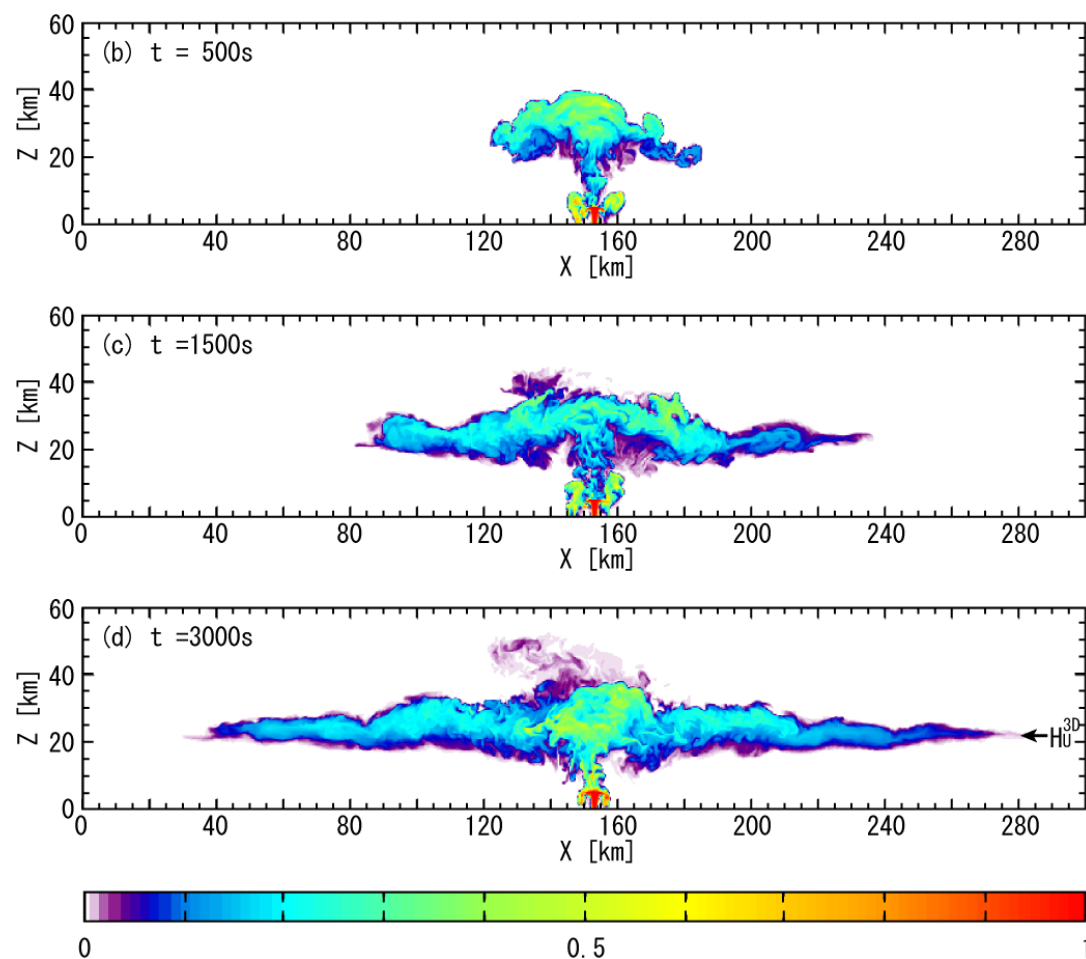
実験結果 (3/3: C の推定)



S の値を噴煙の3次元数値計算で求めれば、
噴煙内部の粒子の混合状態が分かる。

■ 50 μm, double, 10St
◇ 58 μm, single, 30St

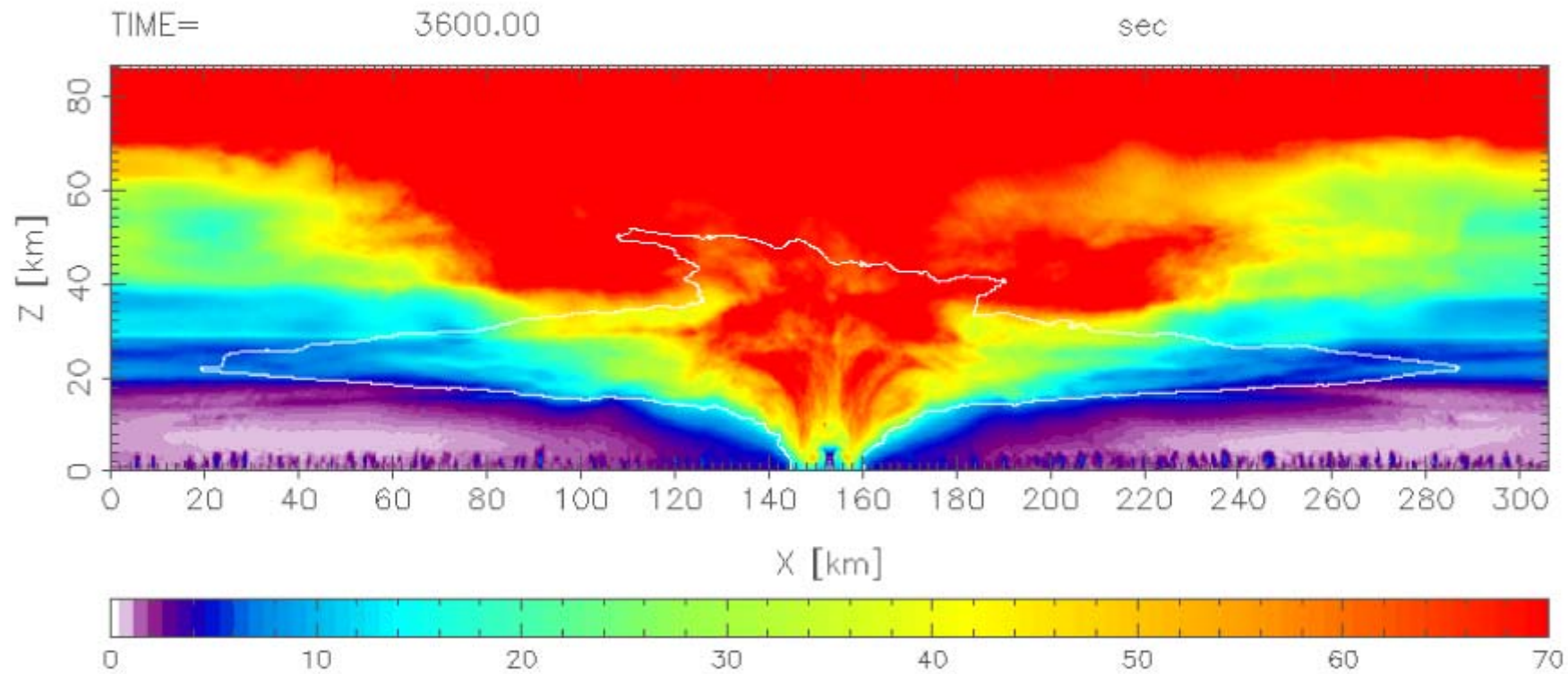
3次元火山噴煙計算結果



ほぼピナツボ噴火の条件
に合わせた計算結果

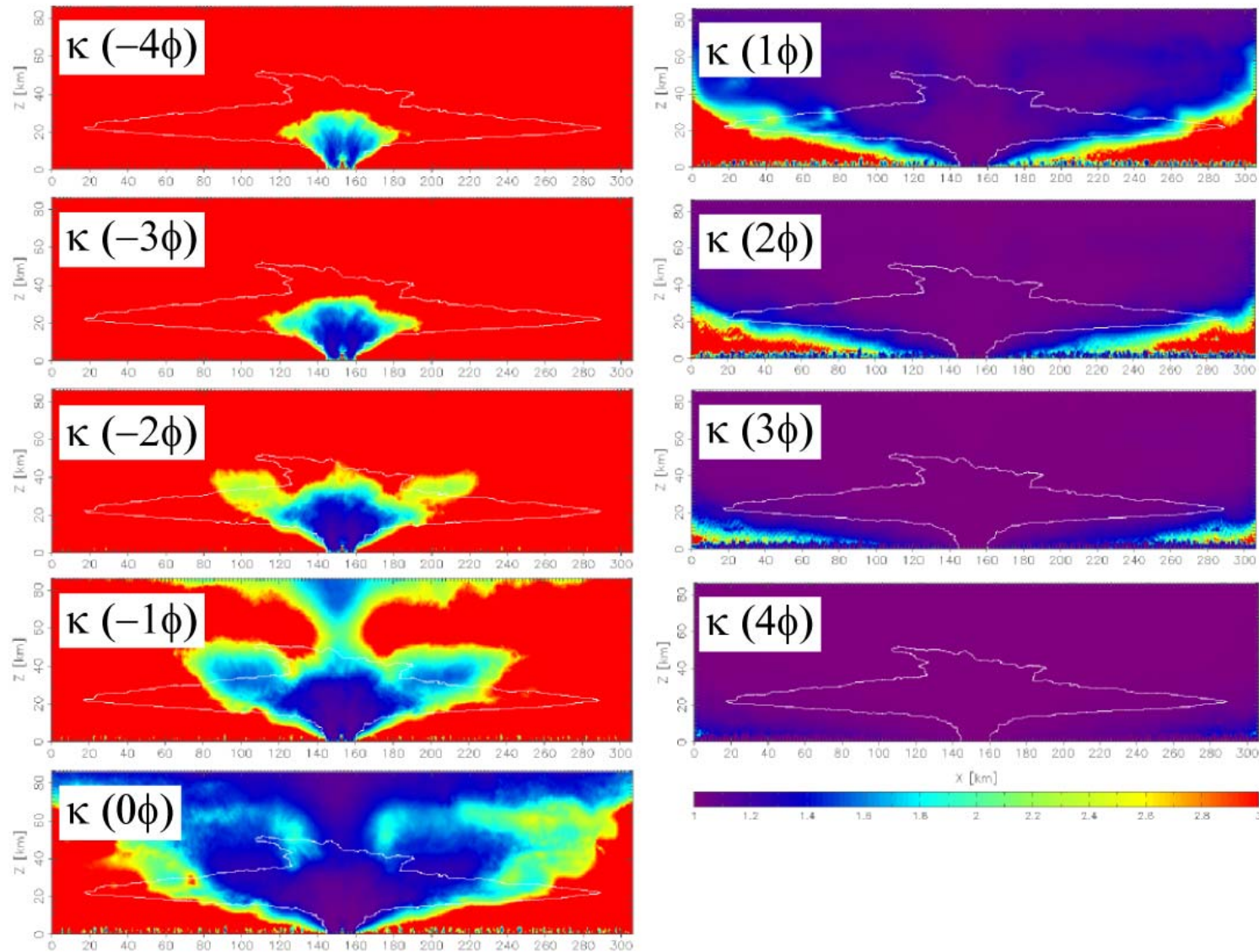
マグマ噴出率 : 10^9 kg/s
噴出温度 : 1000 K

噴煙計算における乱流強度分布

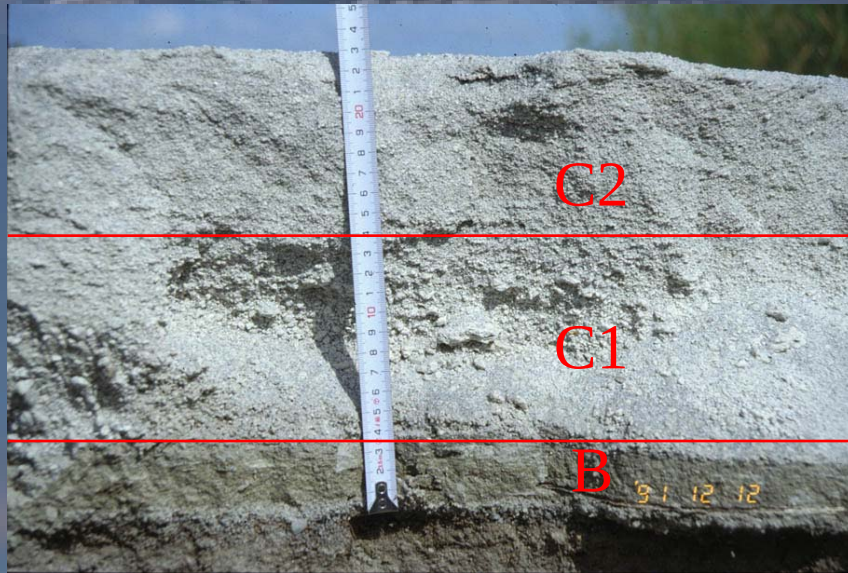


$$W_{\text{rms}} \equiv \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \quad (\text{m/s})$$

噴煙計算における乱流混合の状態

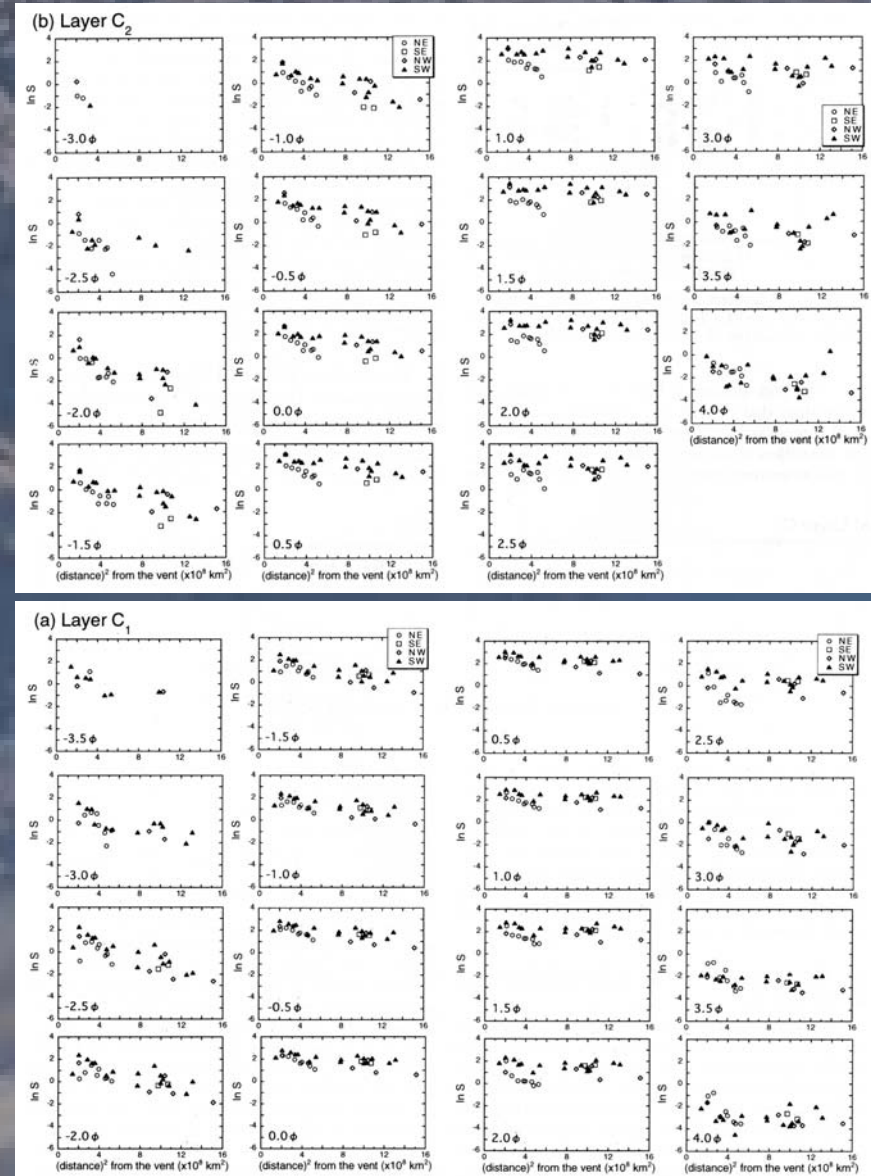


ピナツボ噴煙からの堆積物



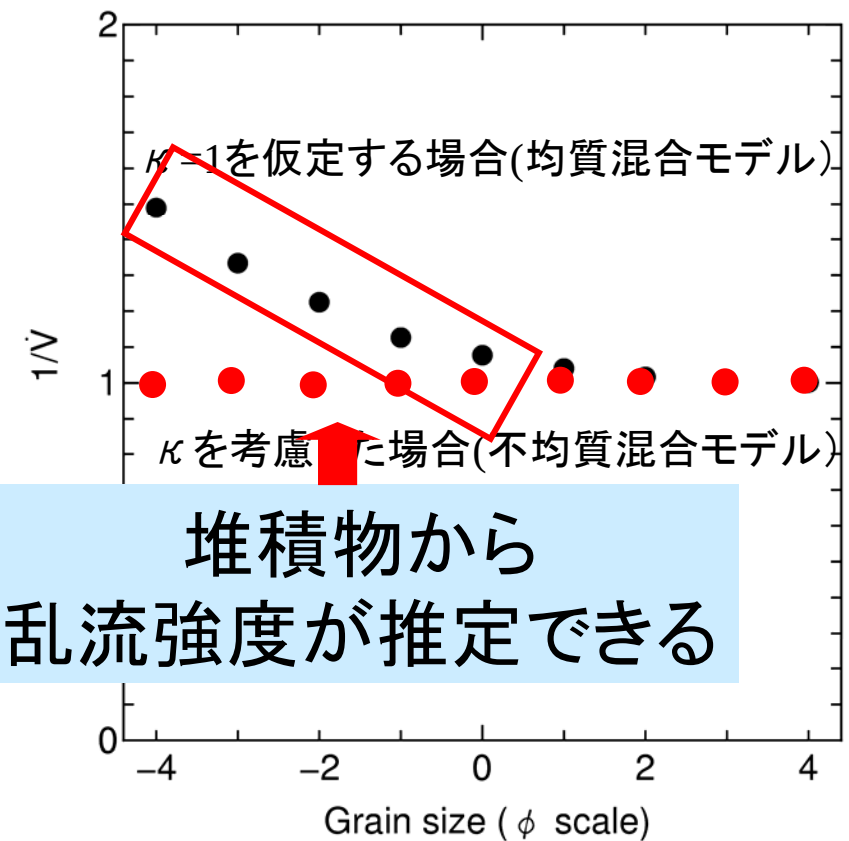
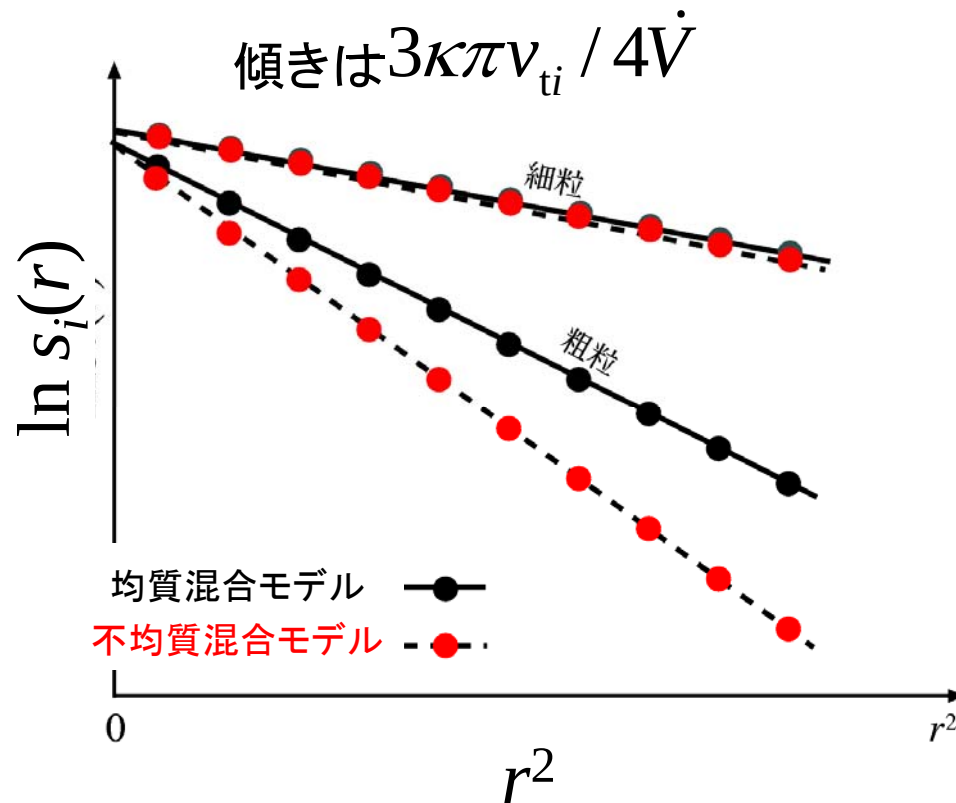
距離と各粒径の重量の関係

Koyaguchi and Ohno (2001)

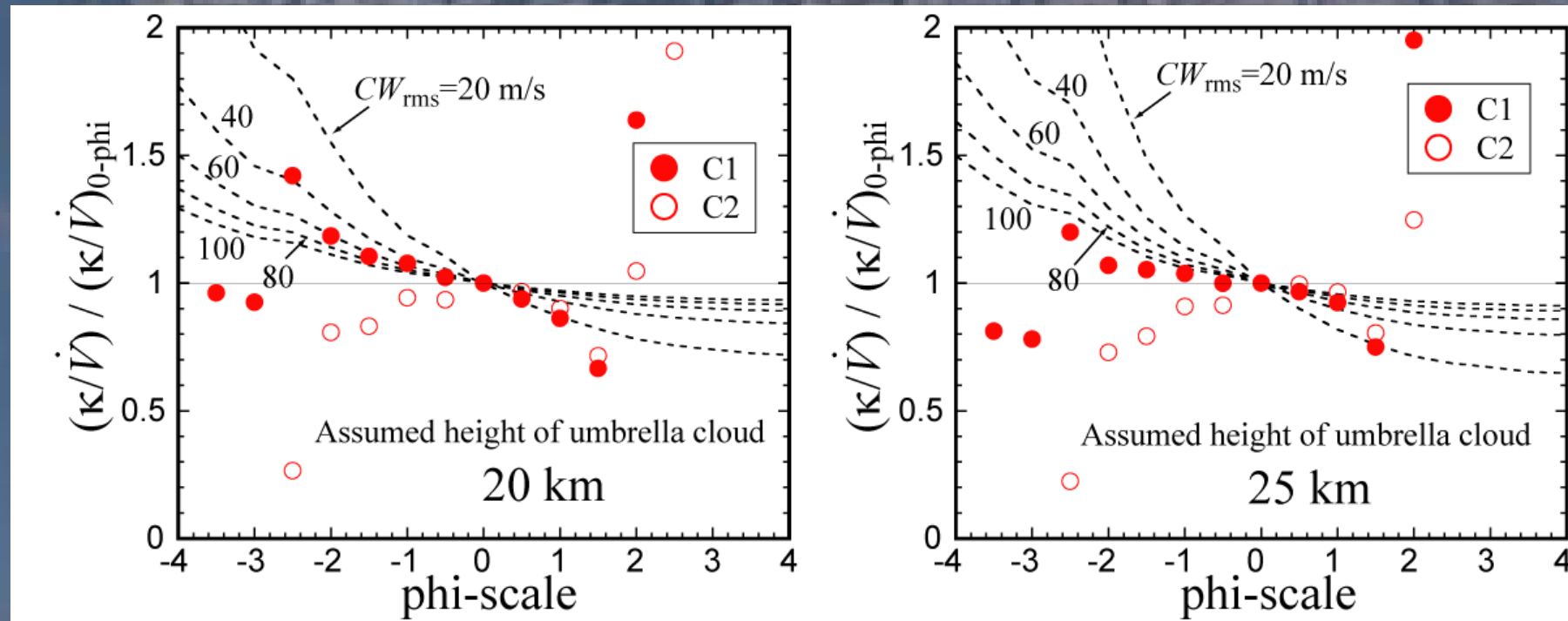


修正火砕物降下モデル

$$\ln s_i(r, v_{ti}) = -\kappa \frac{3\pi r^2 v_{ti}}{4\dot{V}} + \ln s_i(0, v_{ti})$$



ピナツボ噴煙の乱流強度



C1:1991年6月15日14:00頃の噴煙からの堆積物

C2 :1991年6月15日夕刻噴煙からの堆積物

まとめ

火山灰粒子を含む「固気混相噴煙モデル」の構築に向けて、

- 室内実験に基づいて粒子の沈降堆積に対する乱流強度の影響を見積った.
- 3次元噴煙数値計算に基づいて乱流強度を計算した.
- ピナツボ1991年噴火の堆積物に基づいてモデルの観測による実証性を確認した.

当面の課題

- C や W_{rms} を決定する要因を明らかにする.
- 観測事実を説明するために要求される精度を探る.