



火山灰の輸送シミュレーションと 降灰予報

気象庁 気象研究所
新堀 敏基

1. はじめに

- 2年前に開かれた当研究集会において、
気象庁における降灰シミュレーションの取組み
について紹介→右スライド

(補足)

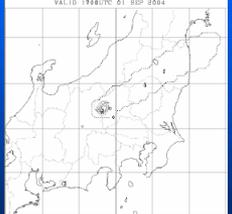
- VAA用ではなく、一般向けプロダクト「降灰予報」
 - 気象庁火山課・数値予報課と気象研究所の共同開発（石峯，火山シミュレーション研究集会2007より）
 - 大気中に放出された後の火山灰の輸送・降灰が予測対象
 - 2008年度末から運用開始
-
- その後の研究・開発および応用として、
火山灰の輸送シミュレーションに用いている
噴煙柱および火山灰移流拡散モデルとそのプロダクト：
降灰予報について紹介

NIED

VAAC用降灰モデルの更新

地震火山部火山課で新しい降灰
予測システムを開発中。

気象庁非静力学モデルを用いた
移流拡散シミュレーション。
水平721x577格子(間隔5キロ)
鉛直方向は約20キロまで50層。
2009年運用開始予定。



2004年浅間山噴火への適用事例
(清野・他 非静力学ワークショップ2007)

内 容

1. はじめに

2. 火山灰の輸送シミュレーションの方法

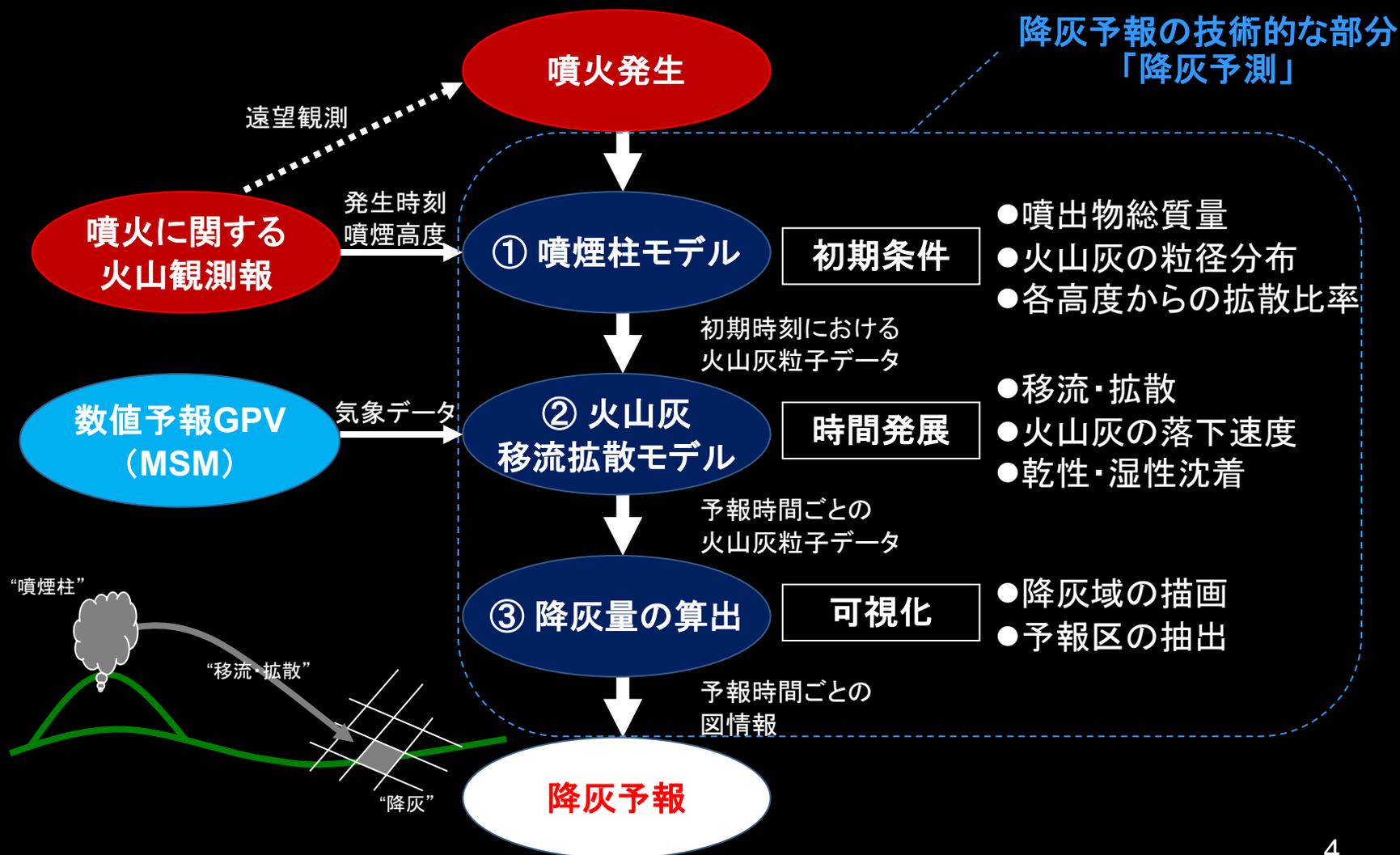
- 噴火に関する火山観測報
- 数値予報GPV(MSM)
- 噴煙柱モデル
- 火山灰移流拡散モデル
- 降灰量の算出

3. 降灰予報

- 発表状況
- 予報例:2009年2月2日浅間山噴火

4. まとめ

2. 火山灰の輸送シミュレーションの方法



●噴火に関する火山観測報

噴火に関する火山観測報 (第2報)

カザンゲンショウ1 キシヨウ

火 山: 浅間山

日 時: 2009年02月02日02時10分(011710UTC)

現 象: 噴火

有色噴煙: 火口上2000m(海拔15000FT)

白色噴煙:

流 向: 南東

--- =

(第1報)

カザンゲンショウ1 キシヨウ

火 山: 浅間山

日 時: 2009年02月02日01時51分(011651UTC)

現 象: 噴火

有色噴煙: 火口上300m(海拔9500FT)

白色噴煙:

流 向: 南東

---- =

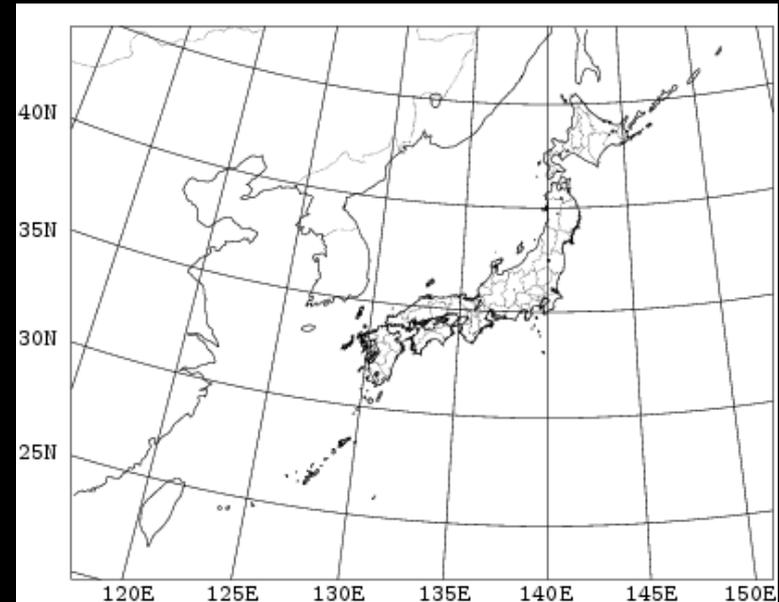
- 噴火が発生した場合などに、
気象庁火山監視・情報センター、
鹿児島地方気象台から発信される
(小規模なものは除く)
- 降灰予報は、基本的に
「噴火に関する火山観測報」を
トリガーとして実行

降灰予報で引用する情報

- ✓ 火山名
- ✓ 発生時刻
- ✓ 有色噴煙高度

●数値予報GPV(MSM)

GPV: Grid Point Value, MSM: Mesoscale Model



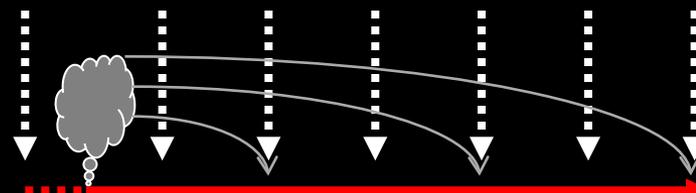
MSMの予報領域

- 気象庁非静力学モデル(JMA-NHM)
- 予報時間(1時間ごと)
 - 15時間(00, 06, 12, 18Z初期時刻)
 - 33時間(03, 09, 15, 21Z初期時刻)
 - 降灰予報は現在, 最新の15時間予報値のみ利用
- 降灰予測で使用するGPV
 - 水平格子間隔: 5 km(721 x 577)
 - 鉛直層数: 50(SURF~21801 m)
 - モデル地形: GTOPO30を約7.5 km相当に平滑化
 - 物理量: U, V, W, PT, PRS, SMQR, DNSG2
 - 噴火発生から6時間後までの予報値を, $\Delta t=3$ 分ごとに内挿して計算

MSMの初期時刻
00, 06, 12, 18Z

予報時間
15 hr

最新のMSM



MSM予報値を
移流拡散モデルに渡す

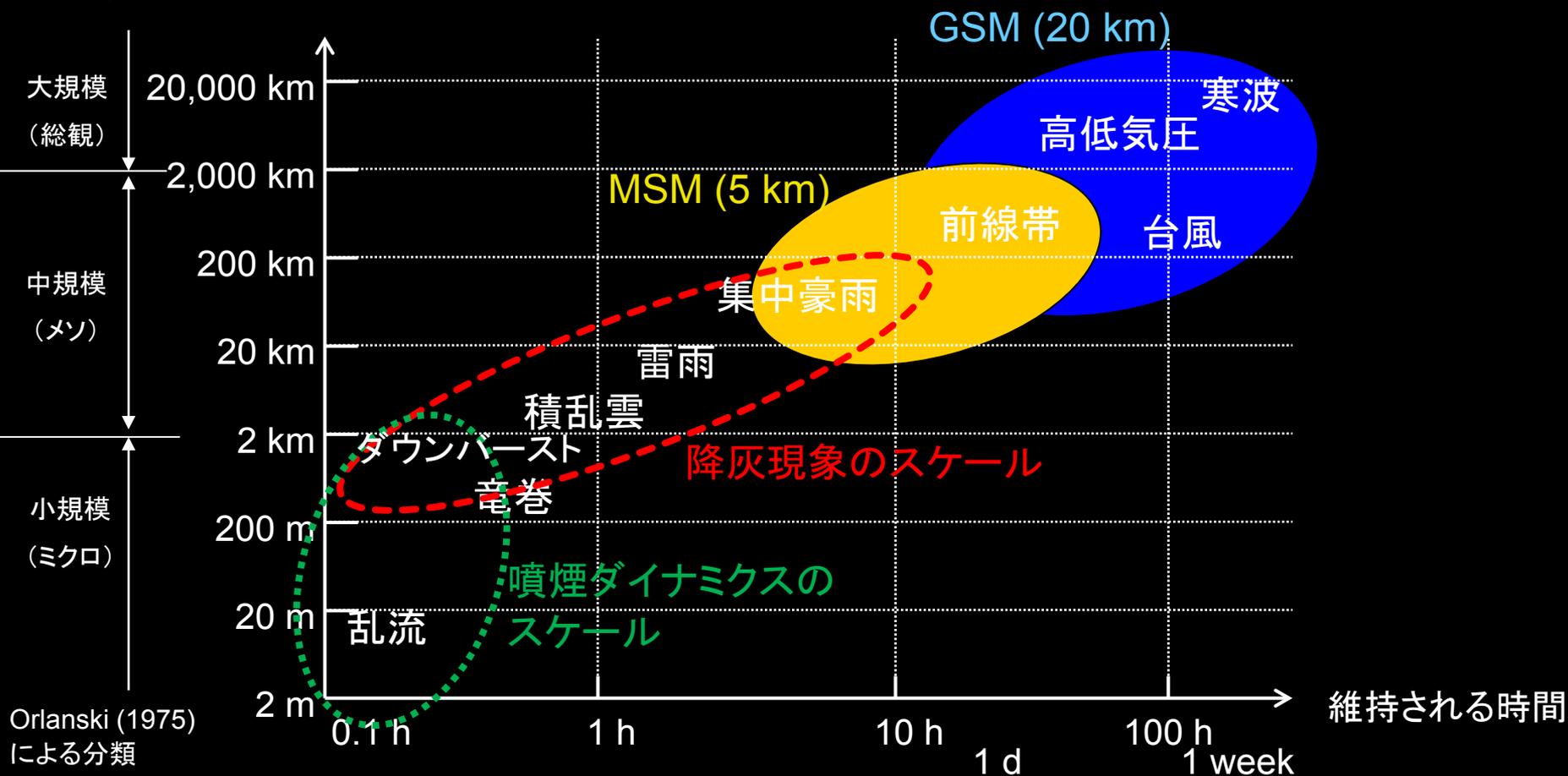
② 火山灰移流拡散モデルの実行

噴火発生
① 噴煙柱モデルの作成

③ 各時刻ごとに降灰量を算出

降灰現象の時空間スケールとモデル

水平方向への広がり



➤ MSMで表現可能な降灰現象のスケールは、10～100 km以上、数時間のオーダー

① 噴煙柱モデル

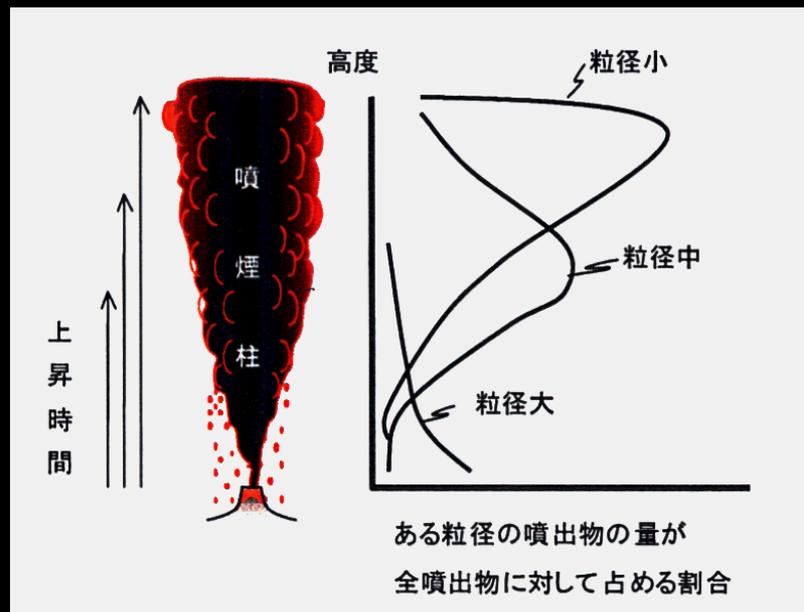
鈴木(1983, '85, '90), ハザードマップ作成指針(国土庁, 1992)

降灰現象の拡散源
降灰予測の初期条件

噴煙柱の構成要素

- 形状
- 噴出物総質量
- 火山灰の粒径分布
- 形成時間
- 噴煙の上昇速度
- 各高度からの拡散比率

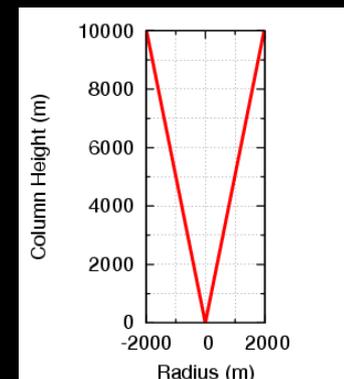
$$r = K_r z$$



(仮定)

- 鉛直軸のまわりに回転対称
- 半径 r は高さ z に比例

➤ エンtrainメント係数:
 $K_r = 0.198$



噴煙柱の高さと半径の関係

z (m)	3000	5000	10000
r (m)	590	990	1980

① 噴煙柱モデル

鈴木(1983, '85, '90), ハザードマップ作成指針(国土庁, 1992)

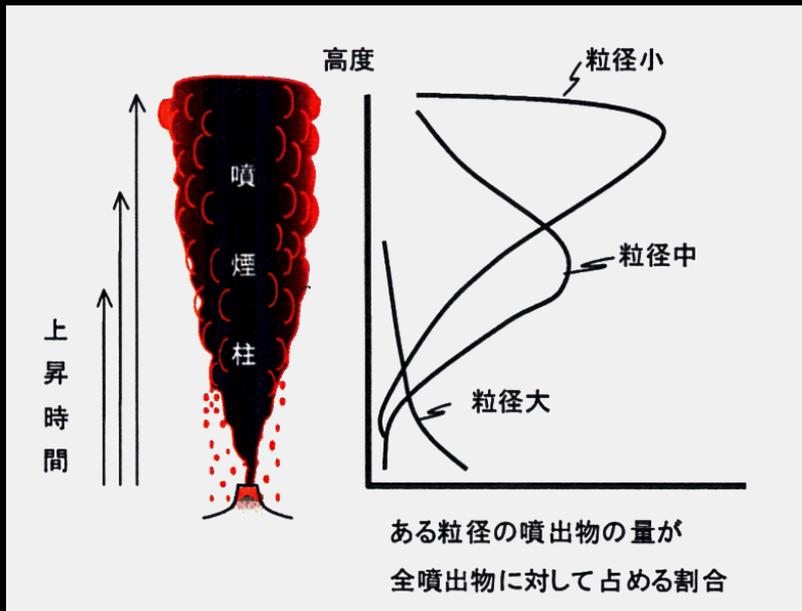
降灰現象の拡散源
降灰予測の初期条件

噴煙柱の構成要素

- 形状
- 噴出物総質量
- 火山灰の粒径分布
- 形成時間
- 噴煙の上昇速度
- 各高度からの拡散比率

$$r = K_r z$$

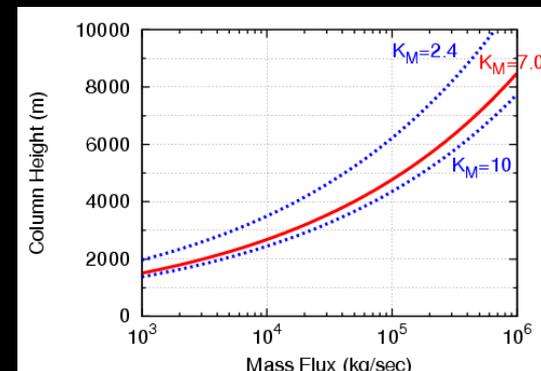
$$M = K_M H^4 T$$



- H : 噴煙柱の高さ
- $T = 10 \text{ min}$: 継続時間(仮定)
- $K_M = 6.95 \times 10^5 \text{ (kg / km}^4 \text{ / h)}$

● $T=10 \text{ min}$ の場合

$H \text{ (m)}$	$M \text{ (t)}$
3000	1,200,000
5000	72,000
3000	9400



噴煙柱の高さと噴出率の関係

① 噴煙柱モデル

鈴木(1983, '85, '90), ハザードマップ作成指針(国土庁, 1992)

降灰現象の拡散源
降灰予測の初期条件

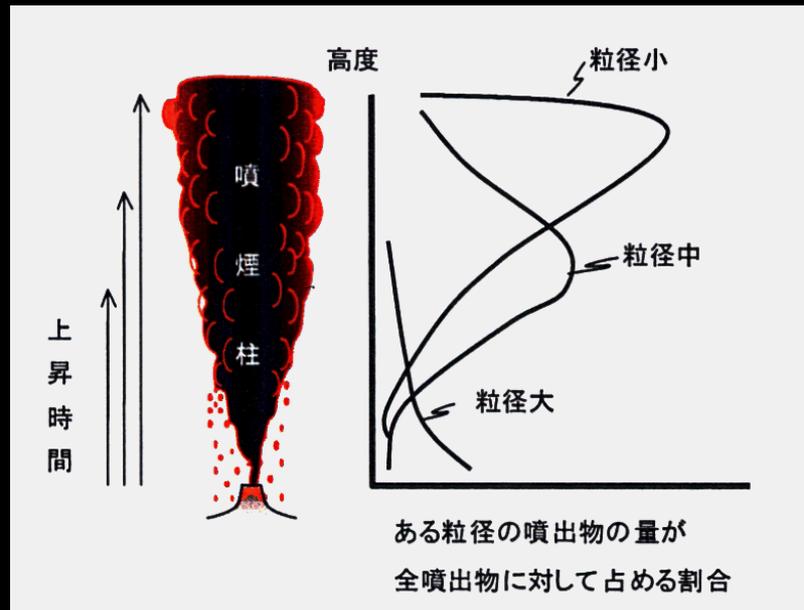
噴煙柱の構成要素

- 形状
- 噴出物総質量
- 火山灰の粒径分布
- 形成時間
- 噴煙の上昇速度
- 各高度からの拡散比率

$$r = K_r z$$

$$M = K_M H^4 T$$

対数正規分布



➤ 確率密度関数:

$$f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_D^2}} \exp\left[-\frac{\log^2(D/D_m)}{2\sigma_D^2}\right]$$

中央粒径:

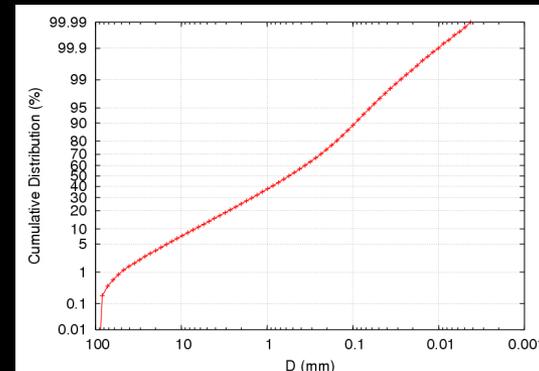
$$D_m = 0.25 \text{ mm}$$

“標準偏差”:

$$\sigma_D = 1.0$$

cutoff:

$$\max D = 96 \text{ mm}$$



積算粒径分布

① 噴煙柱モデル

鈴木(1983, '85, '90), ハザードマップ作成指針(国土庁, 1992)

降灰現象の拡散源
降灰予測の初期条件

噴煙柱の構成要素

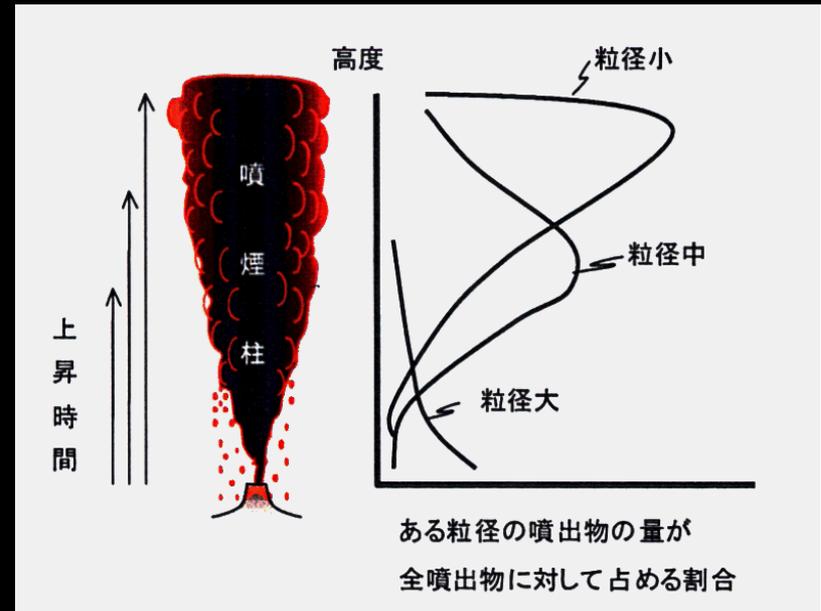
- 形状
- 噴出物総質量
- 火山灰の粒径分布
- 形成時間
- 噴煙の上昇速度
- 各高度からの拡散比率

$$r = K_r z$$

$$M = K_M H^4 T$$

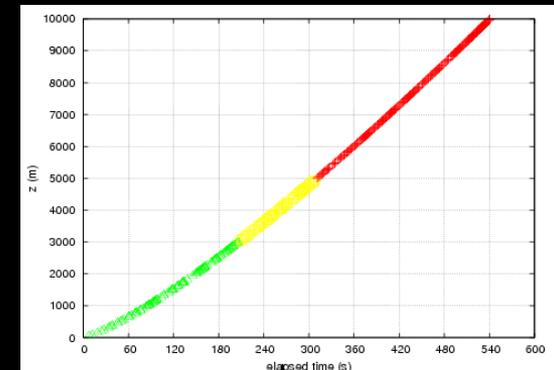
対数正規分布

$$t_s = C_s z^{4/5}$$



- 高度 z に半径 r の広がりが形成される時間
- 2次元拡散方程式の解で決める
- この時間以降に、火山灰が離脱すると考える

$$C_s = 0.34 \text{ s/m}^{4/5}$$



噴煙の上昇時間

① 噴煙柱モデル

鈴木(1983, '85, '90), ハザードマップ作成指針(国土庁, 1992)

降灰現象の拡散源
降灰予測の初期条件

噴煙柱の構成要素

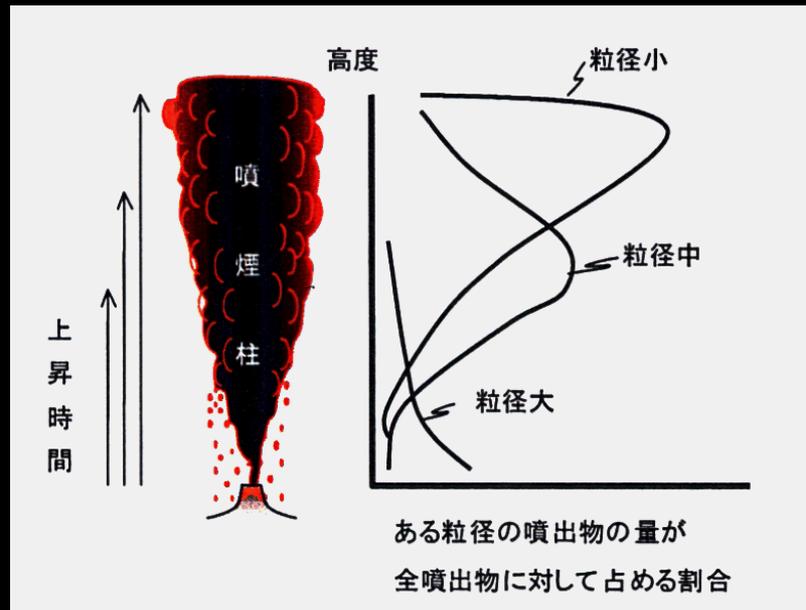
- 形状
 - 噴出物総質量
 - 火山灰の粒径分布
 - 形成時間
 - 噴煙の上昇速度
 - 各高度からの拡散比率
- 指数分布

$$r = K_r z$$

$$M = K_M H^4 T$$

対数正規分布

$$t_s = C_s z^{4/5}$$



拡散比率: $P(D, z) = AY(D, z)e^{-Y(D, z)}$

ここで,

無次元化した噴煙の上昇速度:

$$Y(D, z) = \beta \frac{W(z) - V_0(D)}{V_0(D)}$$

噴煙の上昇速度:

$$W(z) = W_0(1 - z/H)$$

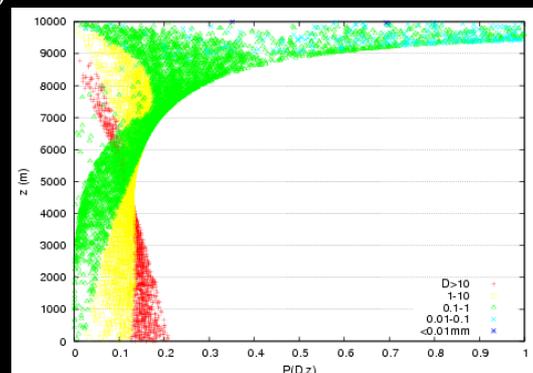
火山口における

噴煙初速度: W_0

火山灰落下速度: $V_0(D)$

離脱定数: $\beta = 0.069$

A は規格化定数



拡散比率 ($H=10000$ mの場合)

① 噴煙柱モデル

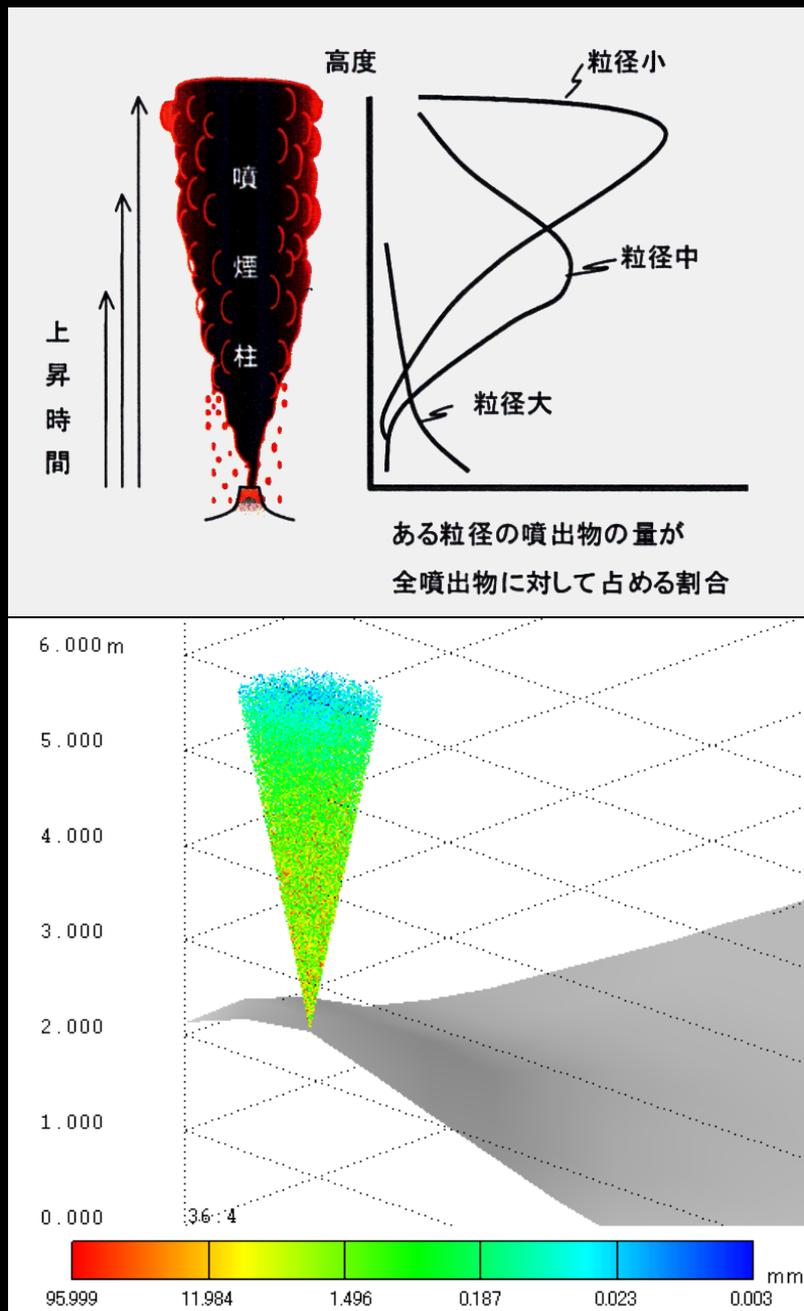
鈴木(1983, '85, '90), ハザードマップ作成指針(国土庁, 1992)

降灰現象の拡散源
降灰予測の初期条件

噴煙柱の構成要素

- 形状 $r = K_r z$
- 噴出物総質量 $M = K_M H^4 T$
- 火山灰の粒径分布 対数正規分布
- 形成時間 $t_s = C_s z^{4/5}$
- 噴煙の上昇速度
- 各高度からの拡散比率 } 指数分布

- 総数100,000のトレーサーで構成
- 可変パラメータは、高さ H と継続時間 T
- 上部ほど粒径小, トレーサー多
- 噴煙のダイナミクスは陽に扱っていないが、拡散比率に噴火時の数値予報GPVを使用
- 噴煙柱モデルの計算時間は、10秒程度



噴煙柱モデル(浅間山 $H=3500$ mの例)

② 火山灰移流拡散モデル

気象庁・気象研究所における移流拡散モデルの研究・開発・応用

- 全球版移流拡散モデル
GSMを用いた有害物質輸送予測 (Takasugi and Nakamura, 1988; Iwasaki *et al.*, 1998)
- 領域版移流拡散モデル
RSMを用いた2000年三宅島のSO₂濃度上昇予測 (Kawai, 2002)
- 長距離輸送モデル
ネスティングしたNHMを用いた,
1977年有珠山の降灰シミュレーション (山本・他, 気象学会2002, 2003秋)
2000年三宅島の火山ガスシミュレーション (Seino *et al.*, 2004)
- **メソ版移流拡散モデル**
MSMを用いたオキシダント予測 (Takano *et al.*, 2007), **降灰予報** (火山学会2008秋)
- **いずれも数値予報GPVでトレーサーの輸送を予測するLagrange型モデル**
- その他, VAA拡散モデル, 黄砂シミュレーションなど

② 火山灰移流拡散モデル

気象場の平均風速 ← MSM

水平風速のゆらぎ → Uliasz(1990)

● 移流・拡散過程

$$\begin{cases} x(t + \Delta t) = x(t) + \overline{u(t)} \Delta t + u'(t) \Delta t \\ y(t + \Delta t) = y(t) + \overline{v(t)} \Delta t + v'(t) \Delta t \\ z(t + \Delta t) = z(t) + \overline{w(t)} \Delta t + w'(t) \Delta t - V_t \Delta t \end{cases}$$

移流項
拡散項
降下項

鉛直風速のゆらぎ → MY2 (1974, '82)

● 火山灰の落下速度 Suzuki(1983)の実験式

(仮定) 火山灰は終端速度 V_t で落下

鉛直方向の運動方程式:

$$\frac{4}{3} \pi (D/2)^3 \rho_p g = \frac{1}{2} C_a \rho_a \pi (D/2)^2 V_t^2$$

空気の抵抗係数:

$$C_a = \frac{24}{Re} F^{-0.32} + 2 \sqrt{1.07 - F}$$

粘性抵抗
慣性抵抗

ただし,

$Re \equiv \rho_a V_t D / \eta_a$: Reynolds数

$F = 2/3$: 火山灰のform factor

$\rho_a(z), \eta_a(z)$

: 空気の密度と粘性率 ← MSM

$\rho_p(D)$: 火山灰の密度 ← 実験式

② 火山灰移流拡散モデル

● 移流・拡散過程

$$\begin{cases} x(t + \Delta t) = x(t) + \overline{u(t)} \Delta t + u'(t) \Delta t \\ y(t + \Delta t) = y(t) + \overline{v(t)} \Delta t + v'(t) \Delta t \\ z(t + \Delta t) = z(t) + \overline{w(t)} \Delta t + w'(t) \Delta t - V_t \Delta t \end{cases}$$

気象場の平均風速 ← MSM

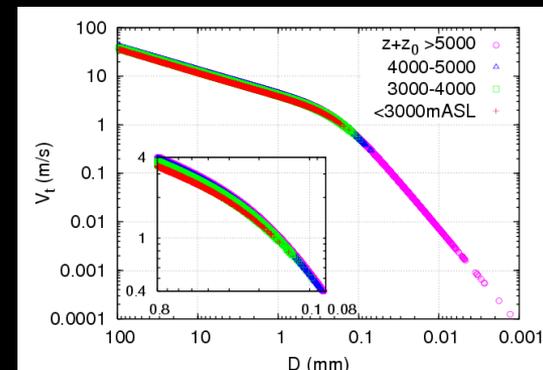
水平風速のゆらぎ → Uliasz(1990)

移流項

拡散項

降下項

鉛直風速のゆらぎ → MY2 (1974, '82)



噴煙柱から離脱するときの落下速度
(浅間山 $H=3500$ m の例)

● 火山灰の落下速度 Suzuki(1983)の実験式

(仮定) 火山灰は終端速度 V_t で落下

火山灰に働く重力と空気抵抗のつり合いから、

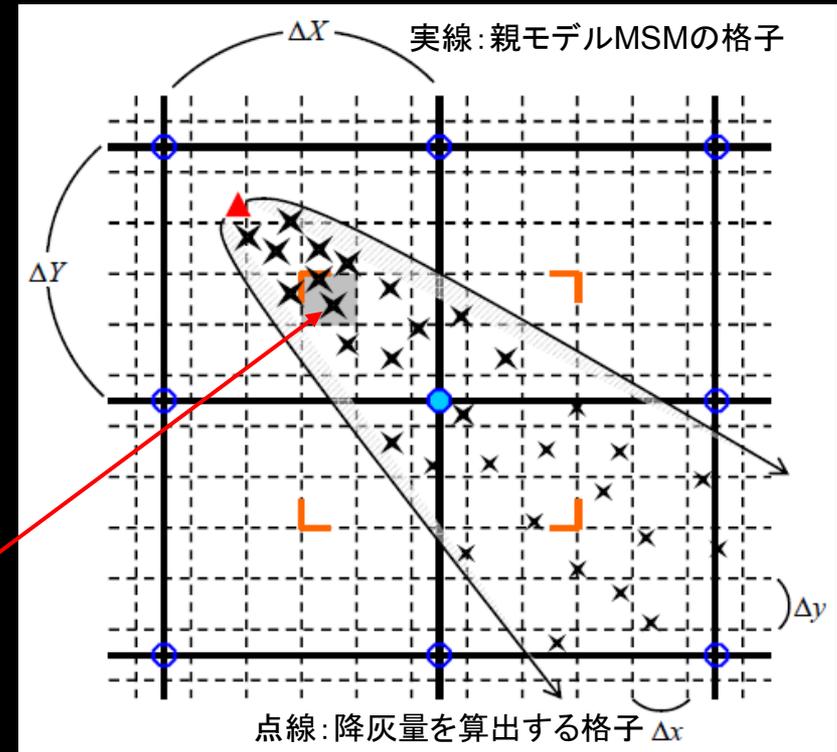
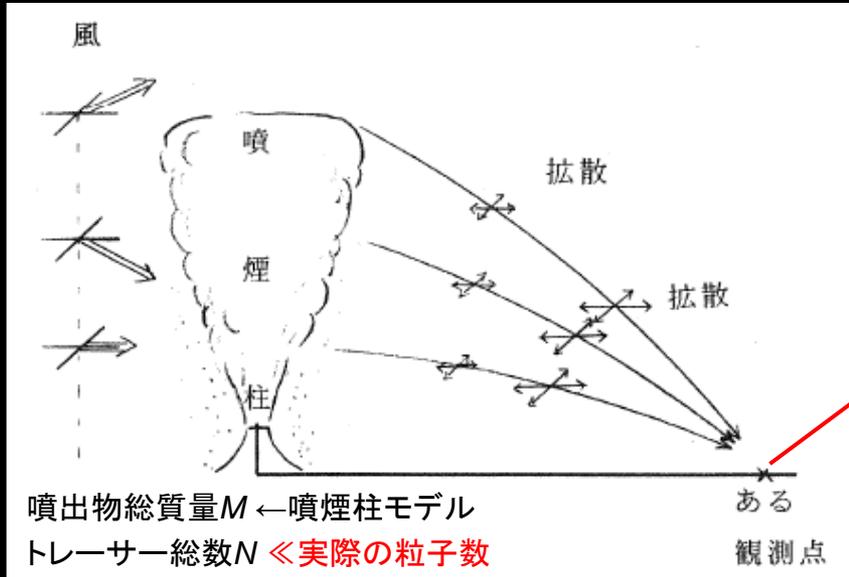
$$V_t(D, z) = \frac{\rho_p g D^2}{9\eta_a F^{-0.32} + \sqrt{81\eta_a^2 F^{-0.64} + (3/2)\rho_a \rho_p g D^3 \sqrt{1.07 - F}}}$$

- 大粒径ほど、落下速度大
- 同一粒径では、高層ほど大
- $D > 0.5$ mmでは慣性抵抗が、
 $D < 0.1$ mmでは粘性抵抗が卓越
- 6時間予測の計算時間は、約180秒
(ただし、 $\Delta x = \Delta y = 5$ kmの場合)

● 乾性・湿性沈着も考慮

湿性沈着はウォッシュアウトのみ ← MSMの積算降水量を使用

③ 降灰量の算出



- 沈着条件
 - トレーサーの高度が、モデル地表面以下に達したとき降灰と判断
- トレーサー1ヶあたりの仮想質量
 - 噴出物総質量 M を粒径分布 f で分配

$$\tilde{m}(D)dn(D) = Mf(D)d(\log D)$$
- 各格子における単位面積当たりの質量 (面密度)

$$\therefore \chi_{\square} = \sum_{\square} \tilde{m}(D) / \Delta x \Delta y$$
- 予測可能性
 - 予測可能な降灰量の最小値は、トレーサー総数と格子間隔のバランスで決まる

$$\min \tilde{m}(D) / \Delta x \Delta y \approx O(M / N \Delta x \Delta y)$$
 e.g. $M=10000 \text{ t}, N=100,000, \Delta x=\Delta y=1 \text{ km} \rightarrow 0.1 \text{ g/m}^2$

●シミュレーションの実行例

2009年2月2日浅間山噴火

(設定)

$H=3500$ m (噴煙エコー頂高度による)

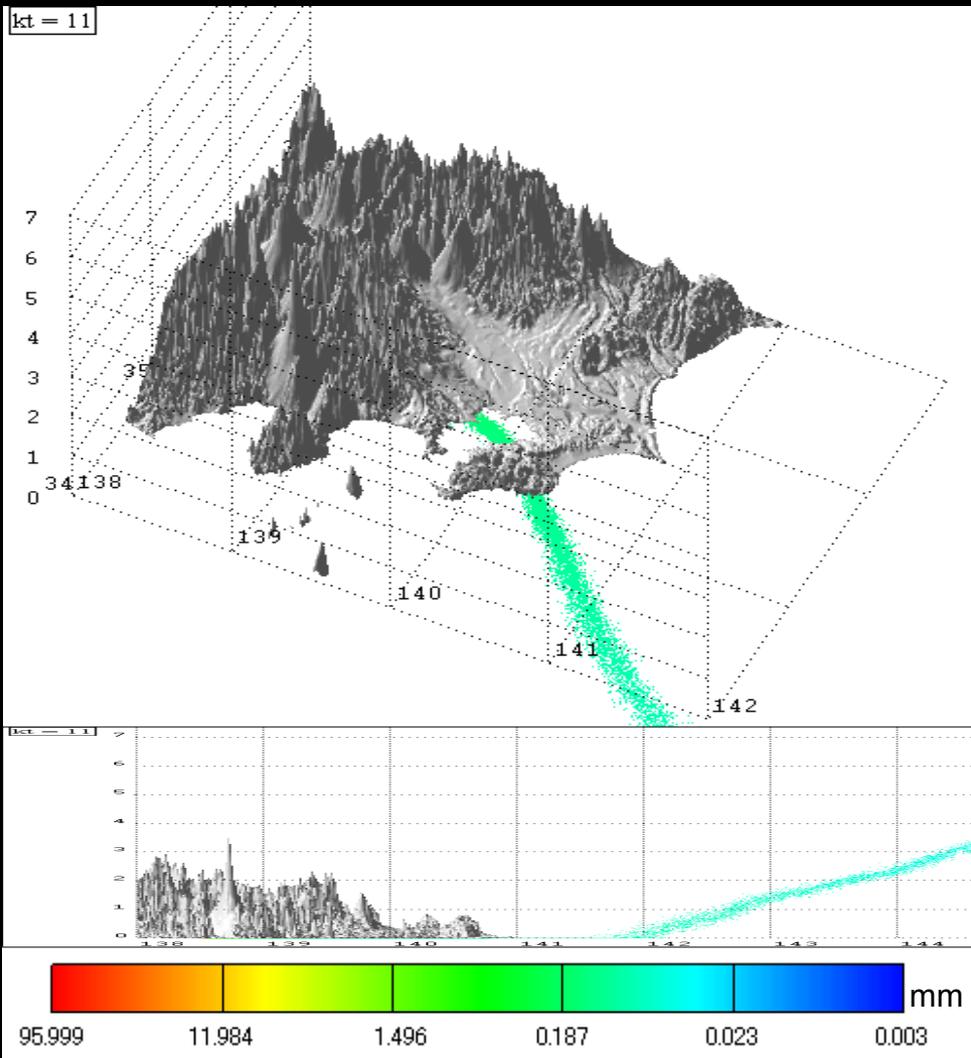
$T=8$ min (遠望観測による)

$\Delta x=\Delta y=1$ km

(火山学会2009秋)

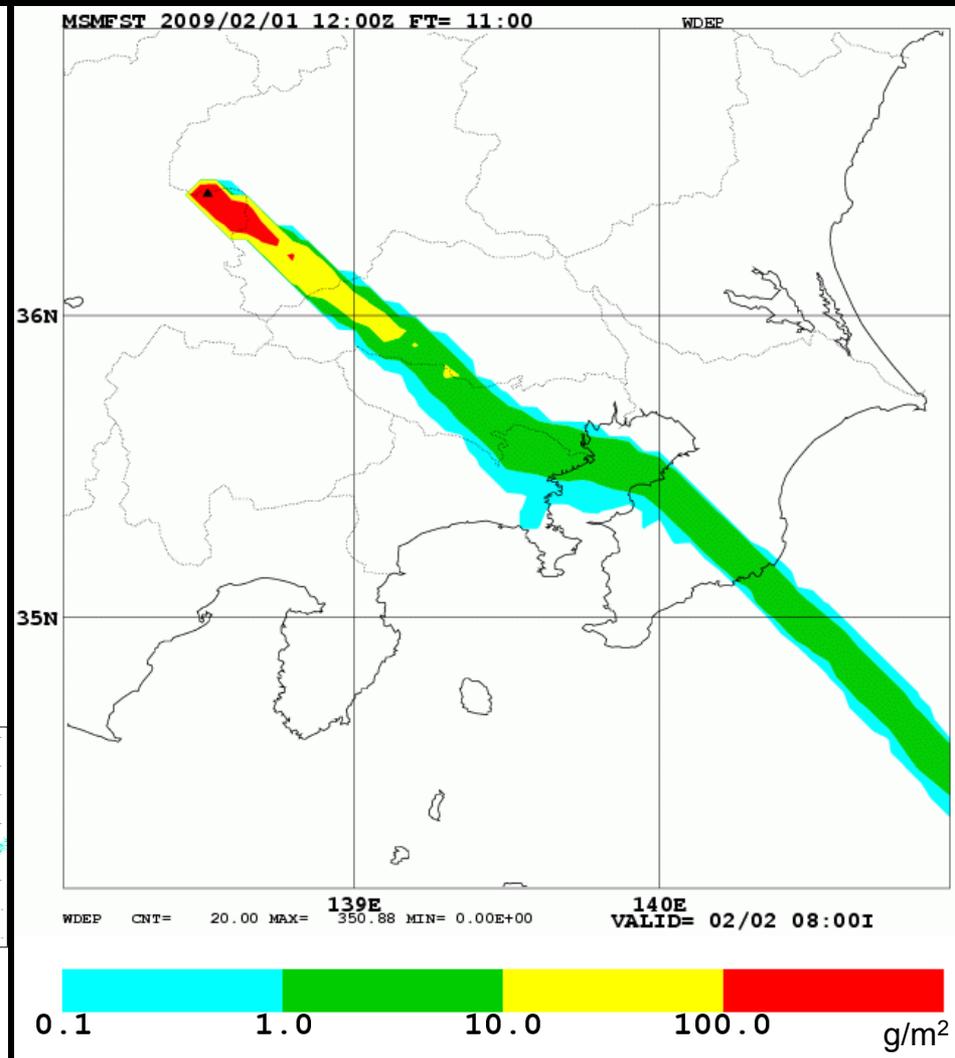
3D可視化

粒径別トレーサーの空間分布と東西断面図



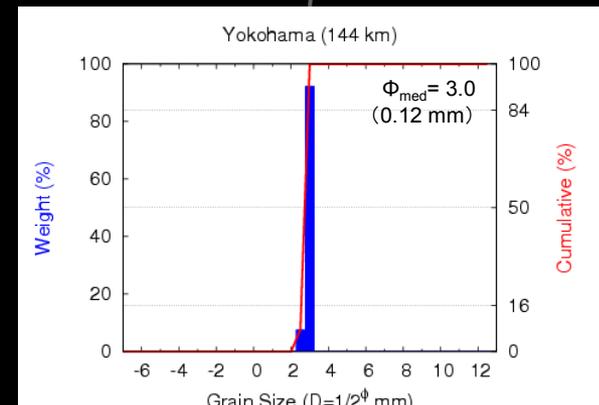
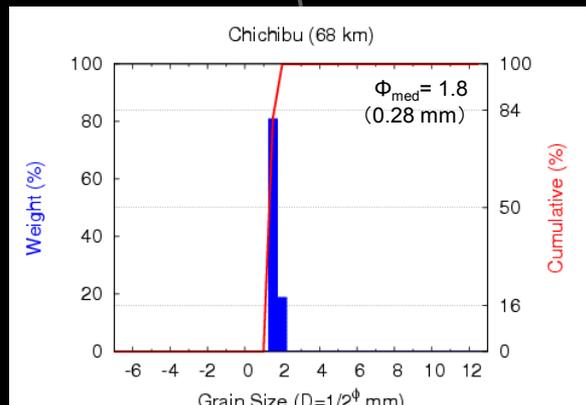
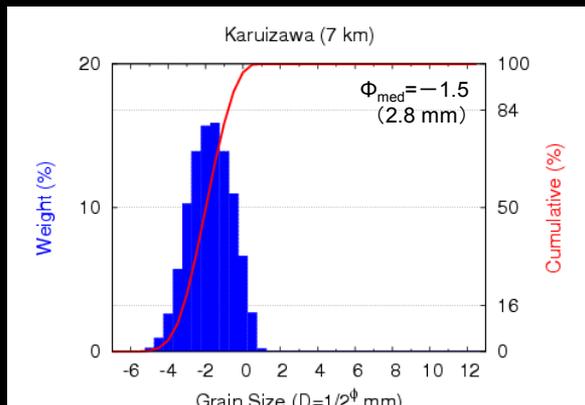
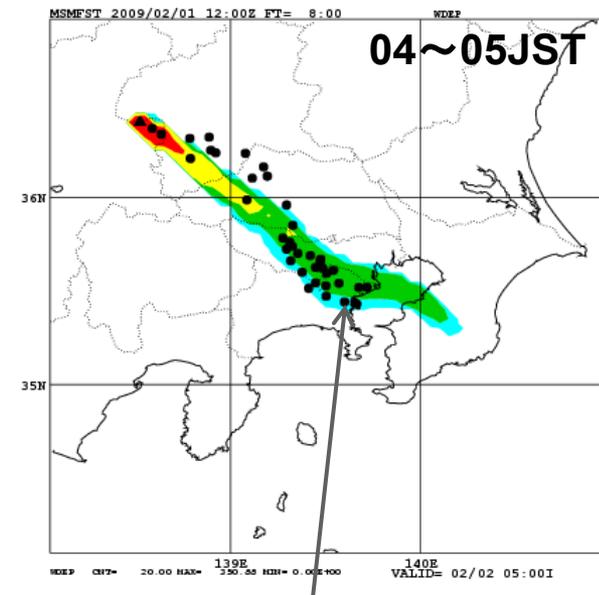
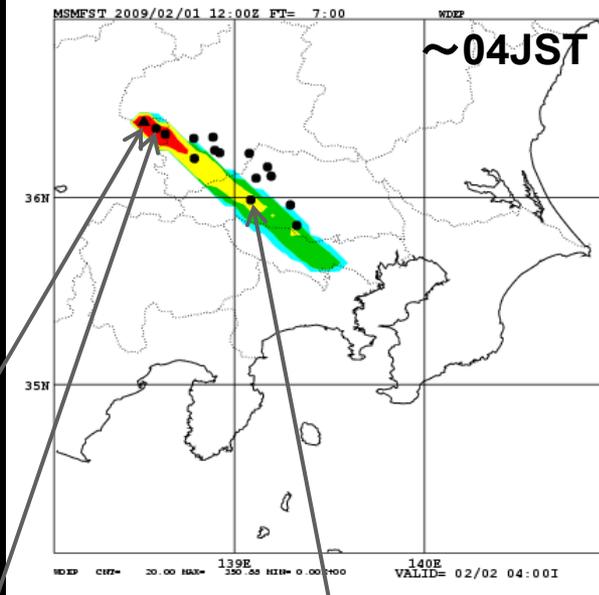
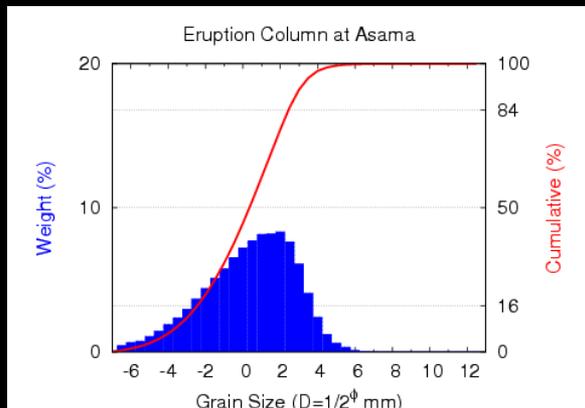
量的降灰予測

噴火発生から1時間ごとの積算降灰量

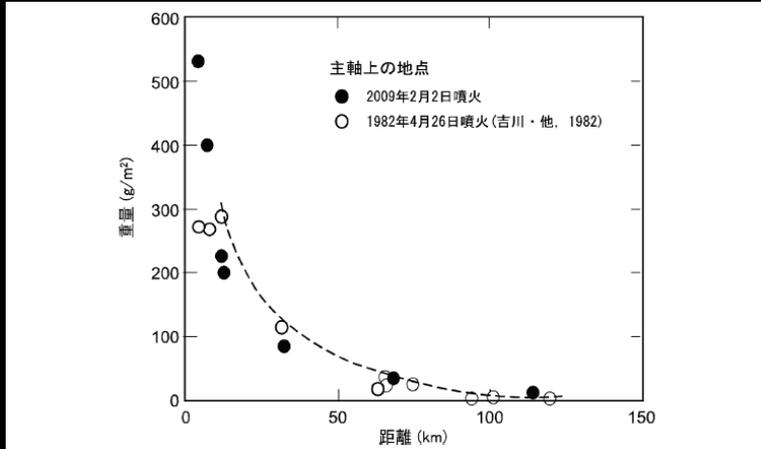


降灰の予測時刻と粒径分布

●: 花粉観測システム(環境省),
 粉塵・花粉・気象NW(横浜市)から
 推定された降灰開始時刻
 (及川・他; 宮地・他, 連合大会2009)

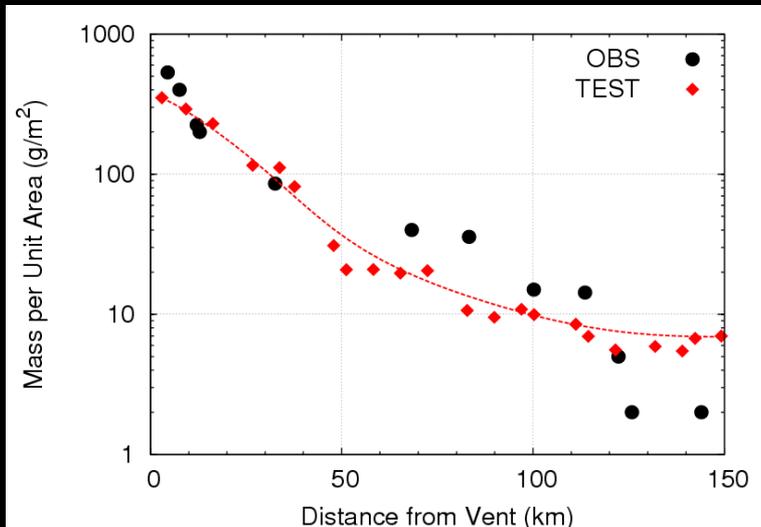


降灰量の観測値と予測値の比較



分布主軸上の降灰量の観測値

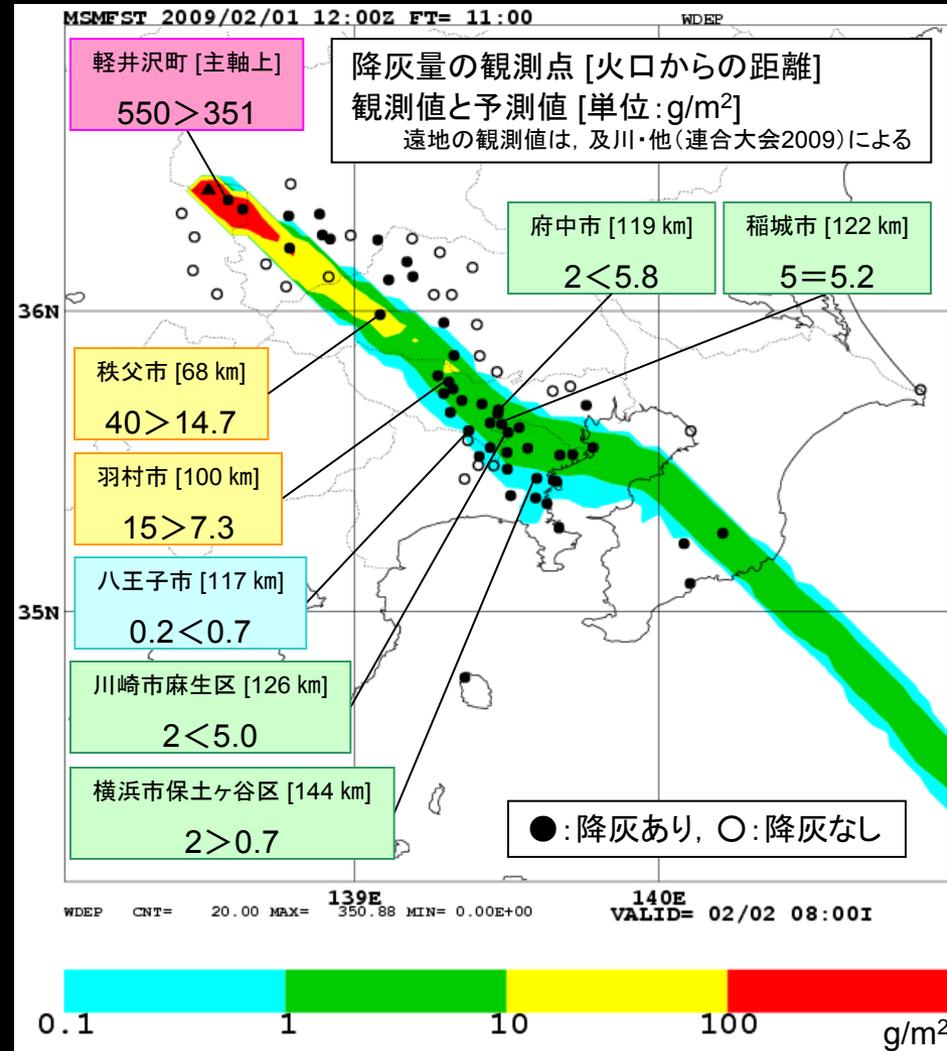
(震研, 112回噴火予知連資料)



予測した分布主軸上の降灰量

量的降灰予測

08:00JSTまでの積算降灰量



3. 降灰予報

- 火山現象予報の一つとして, 2008年3月31日から開始
- 国内火山の噴火により,
広範囲の地域に降灰の影響があると予想される場合に発表
- リアルタイムで火山灰の輸送シミュレーションを実行
- 予測結果を基に,
噴火から概ね6時間先までに降灰が予想される地域を, 図情報として発表

(現在の設定)

- 第1報で仮定する噴火の継続時間: 10分
- 降灰量を算出する格子間隔: 5 km (MSMと同じ)
- 表示しきい値: 0.1 g/m²
- 降り始めからの積算降灰域を図示

●これまでの発表状況 (2008/03/31~2009/11/15)

2009/11/15現在

No.	噴火に関する火山観測報					降灰予報				備考
	火山名	噴火発生日時 (JST)	現象	有色噴煙 (火口上)	入電時刻 (JST)	噴火の 継続時間	MSM 初期時刻	予想降灰域	発表時刻 (JST)	
1	桜島	2008/07/28 07:05	噴火 開始	3300 m	07:17 (第1報)	10分	07/27 18Z	2県(鹿児島, 熊本)	7:30	昭和火口
2	桜島	2008/07/28 10:10	爆発	3200 m	10:27 (第2報)	10分	07/27 18Z	2県(鹿児島, 熊本)	10:55	昭和火口 第1報(10:18入電)は、3000 mで上昇中
3	浅間山	2009/02/02 02:10	噴火	2000 m	2:49	10分	02/01 12Z	1都4県(長野, 群馬, 埼玉, 東 京, 神奈川)	2:40	第1報(02:01入電)は01:51噴火, 300 m
4	桜島	2009/04/09 15:31	爆発	4000 m以上	15:45 (第2報)	10分	04/09 00Z	1県(鹿児島)	16:05	昭和火口 第1報(15:36入電)は、2500 mで上昇中 5000 mを仮定して発表
5	桜島	2009/05/30 20:23	爆発	3700 m	20:38 (第1報)	10分	5/30 06Z	2県(鹿児島, 宮崎)	20:55	昭和火口 解説情報で、2500 mに修正
6	桜島	2009/10/03 16:45	爆発	3000 m	16:51 (第1報)	10分	10/03 00Z	2県(鹿児島, 宮崎)	17:20	南岳山頂火口

予報例

火山名 浅間山 降灰予報

平成21年2月2日 02時40分

気象庁地震火山部

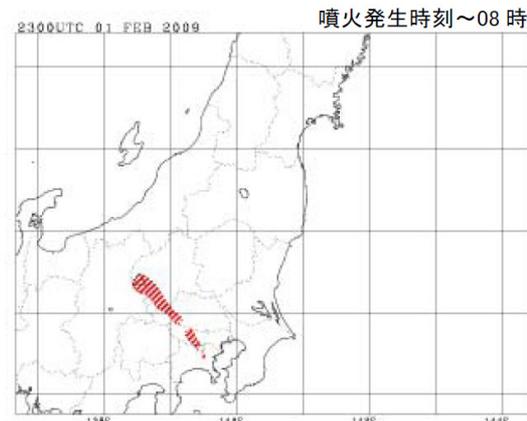
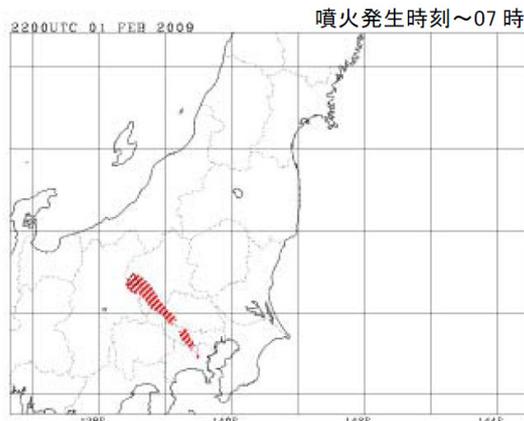
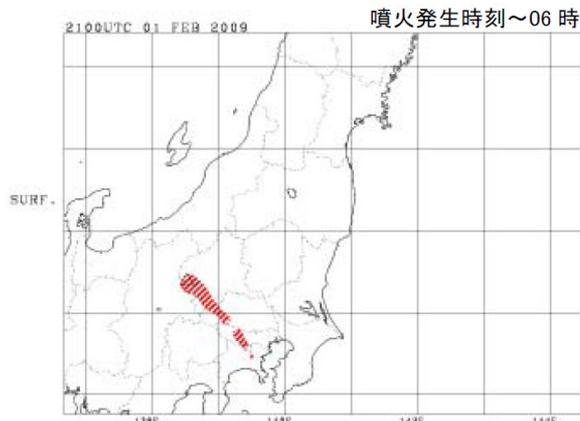
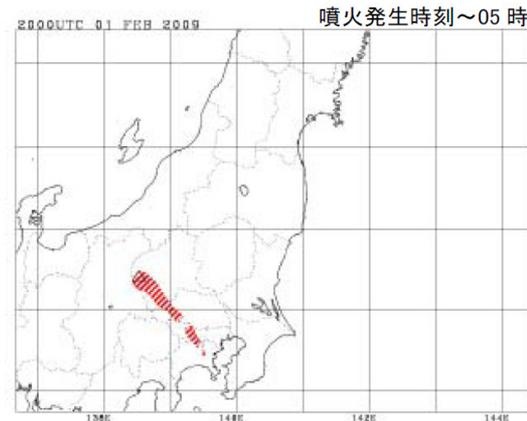
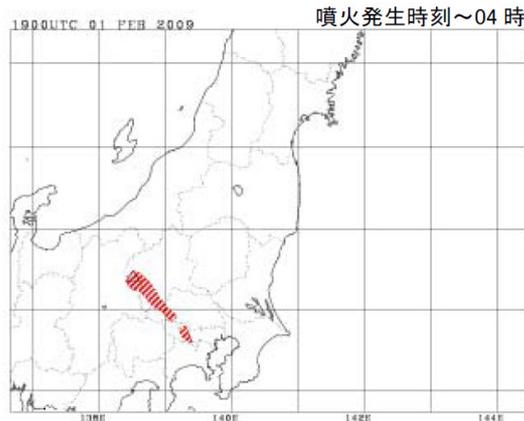
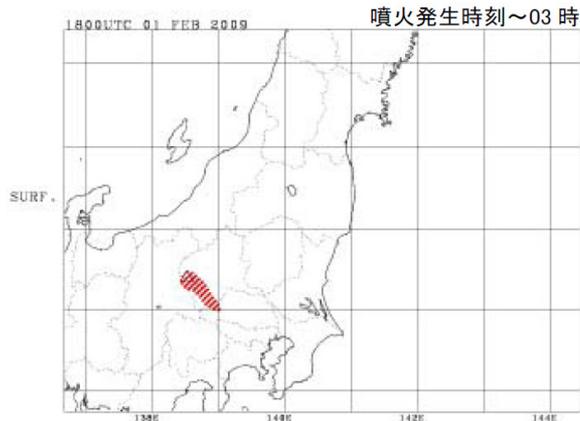
2日1時51分に浅間山で噴火が発生し、噴煙は火口縁上2000mまで上がりました。

以下の地域では、降灰が予想されます。

長野県 群馬県 埼玉県 東京都 神奈川県 [気象庁地震火山部 発表]

この予報は、2日8時までを対象としています。

■図の見方
各図には、噴火発生時刻から各図に示す当該時刻までに降灰が予想される領域を  で示しています。



4. まとめ

- 降灰予報を行うため、火山灰の輸送シミュレーションの方法を開発
- 降灰域の定性的な特徴は概ね予測
 - 引続き、事例の蓄積と精度の検証
- 量的降灰予測に向けて現在、検証中
 - 降灰量を算出する格子間隔などのキャリブレーション

今後の主な課題

- 噴煙柱モデル
 - 気象レーダーによる噴煙エコー頂高度などの火山灰データ同化
 - 噴煙モデルとの結合
- 火山灰移流拡散モデル
 - レインアウトの導入
 - 高分解能局地モデル(LFM)への移行



おわり