

降灰モデルにおける 鉛直拡散と噴煙形状の影響

清杉孝司, 小屋口剛博, 鈴木雄治郎
(東京大学地震研究所)

はじめに

- 降下火砕堆積物の分布に対する、噴煙柱の形状の影響や移流拡散プロセス・堆積プロセス等の影響を正確に理解することは、降下火砕堆積物の分布から噴煙柱の高さや噴煙柱内部での火砕物の分布を逆解析的に理解する上で必要不可欠である。
- 火山灰移流拡散モデルについては、これまでも航空安全や降下火山灰の分布予測のため、いくつかのモデルが開発されている(例:PUFF, TEPHRA2, FALL3D)が、噴煙柱、移流拡散・堆積という個々のプロセスが結果に及ぼす影響についてはあまり検討されていない。

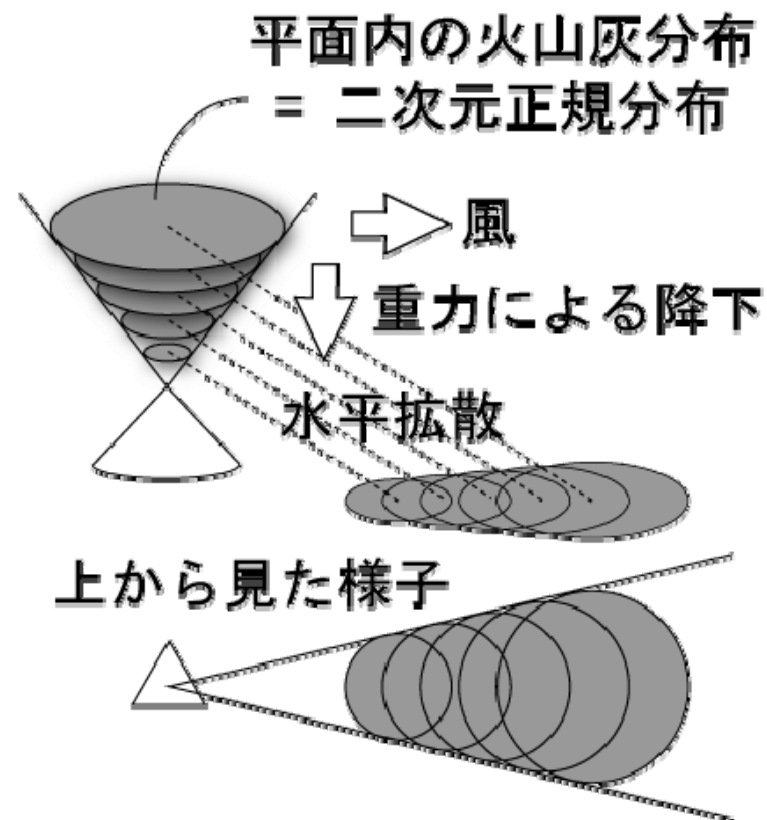
問題設定

これらの既存の火山灰移流拡散モデルのうち、TEPHRA2モデル(Bonadonna et al., 2005)は実際の堆積物評価に多く利用されている。

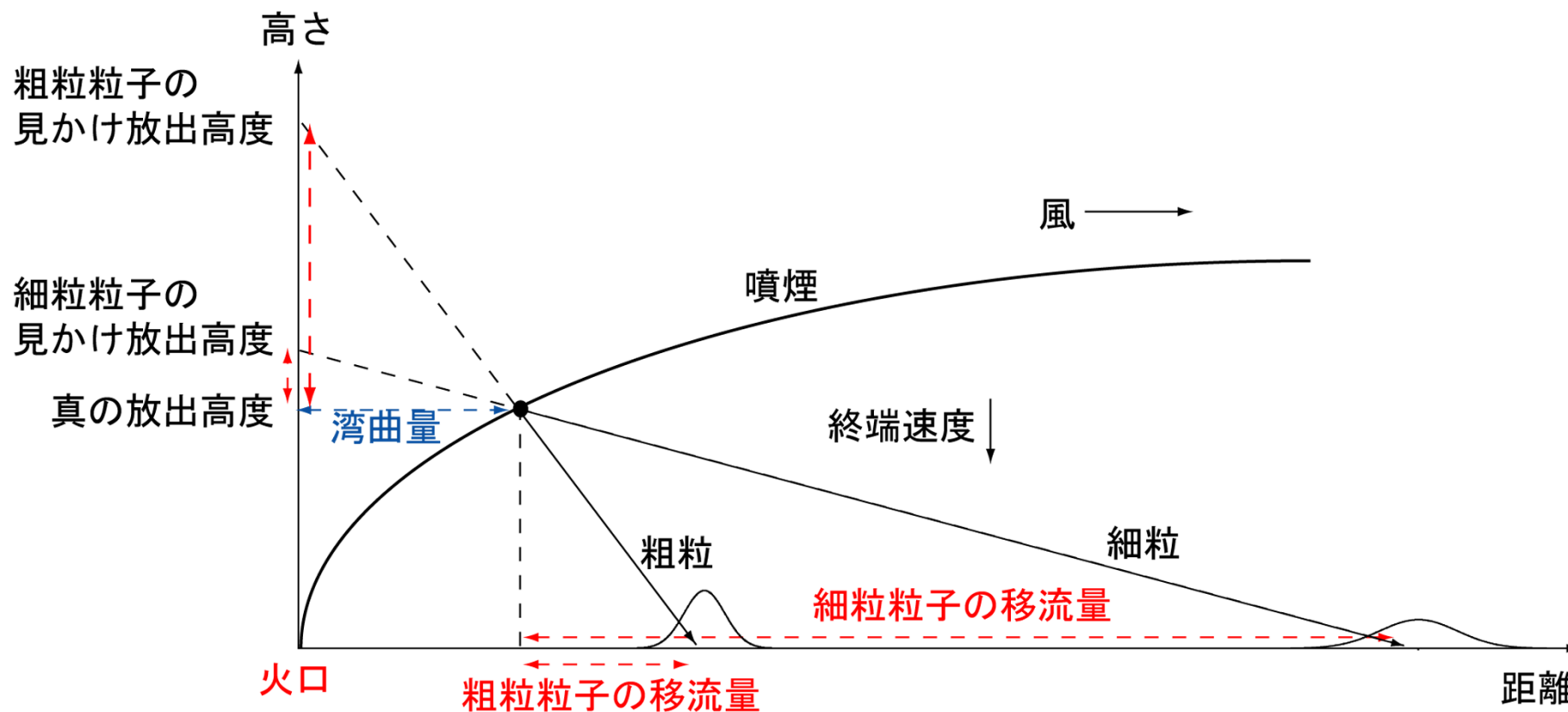
このモデルでは鉛直方向の粒子の拡散が小さく、無視できると仮定している。

また、噴煙柱の形状は鉛直を仮定している。

これらの仮定の影響について検証が不十分であるため、二つの仮定が粒子拡散に及ぼす影響を定量的に考察した。

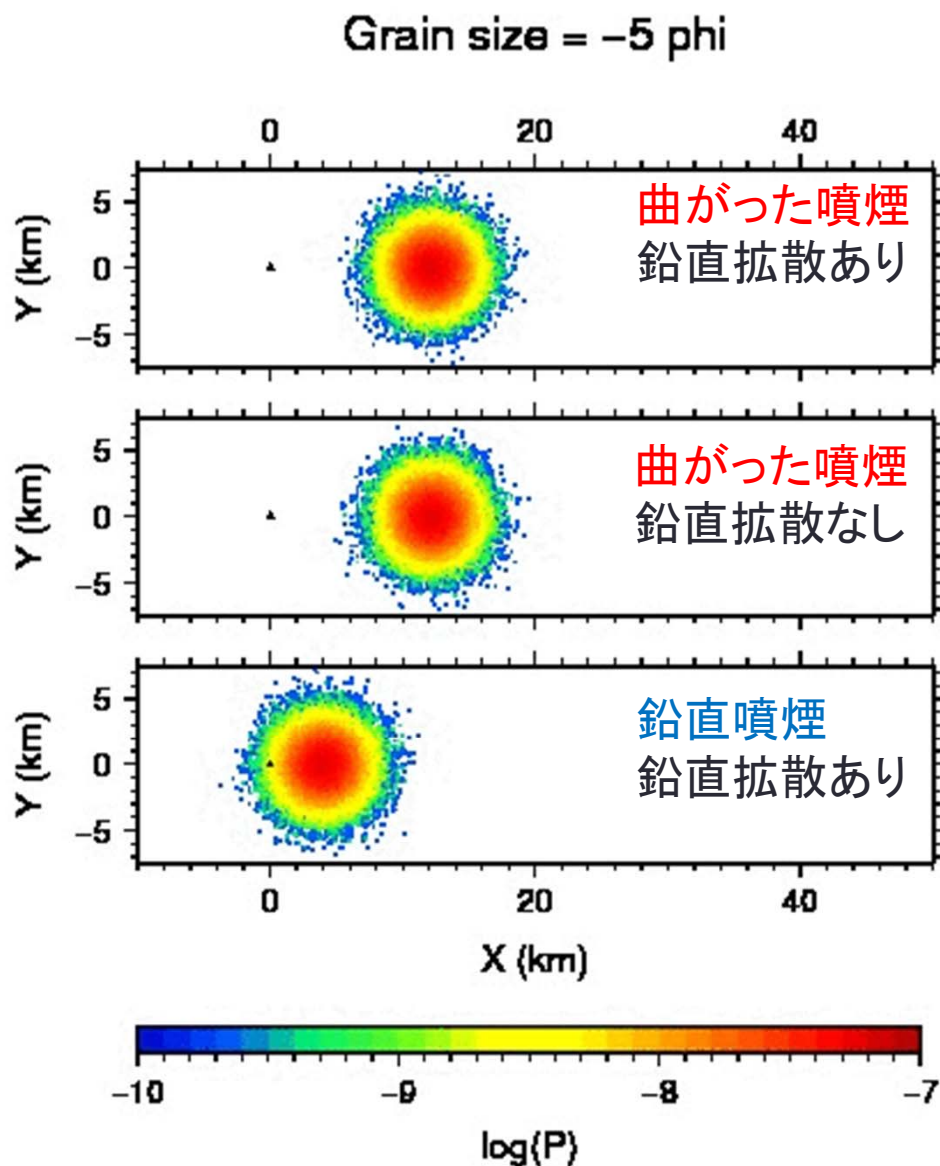


噴煙形状と鉛直拡散の影響



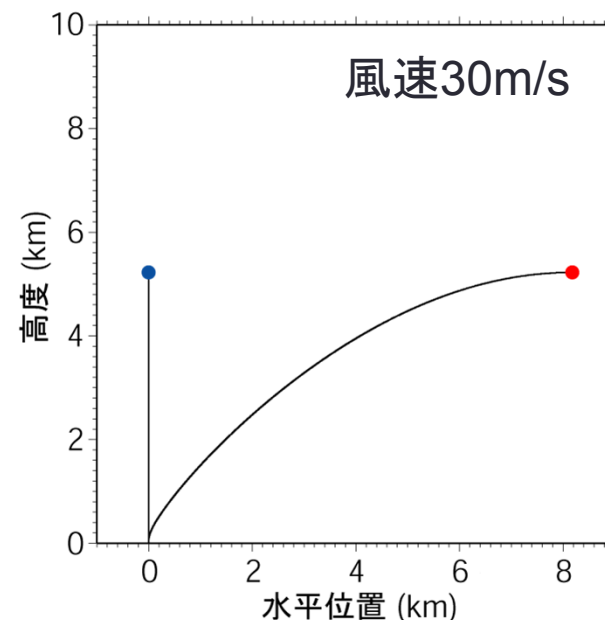
- ・噴煙の湾曲量が同じでも、粒子の移流量によって、その相対的な重要性が異なる。
→ 移流量に比べ、湾曲量が大きい場合、堆積物から噴煙を逆解析することは高さの過大評価につながる。
- ・粗い粒子では噴煙の湾曲の影響が大きい一方、拡散の影響は小さい。
- ・細かい粒子では、逆に噴煙形状の影響が小さく、拡散の影響が大きい。

噴煙形状と鉛直拡散の影響の例



例：新燃岳2011年噴火クラス

噴煙形状をBENTモデル(Bursik 2001)で
計算



パラメータ(Suzuki and Koyaguchi (2013)に基づく)

火口半径: 25m

初期速度: 134m/s

揮発性成分量: 3wt%

噴煙初期温度: 1273.15K

噴出物密度 1000kg/m³

地表大気温度 273.15K

地表大気圧: 101300Pa

乱流によるエントレインメント係数: 0.1

風によるエントレインメント係数: 0.05
Puffモデル(Searcy et al., 1998)で計算

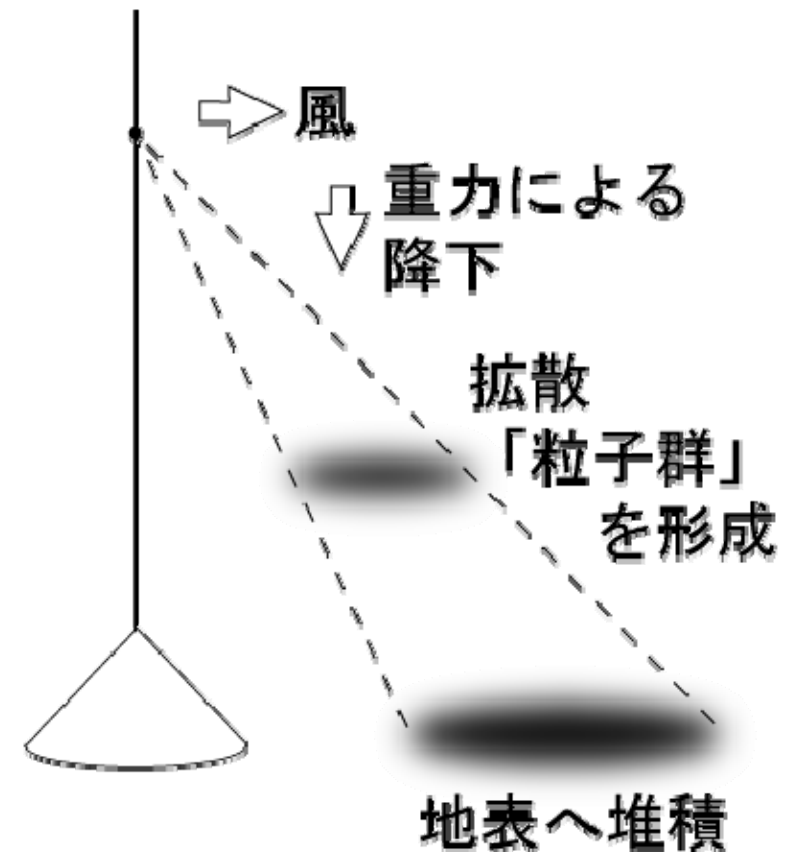
鉛直拡散が堆積物分布に及ぼす影響

鉛直方向の拡散も考慮したPUFFモデル(Searcy et al., 1998)を用いて、大気中の鉛直方向の粒子拡散が地表における堆積量分布に与える影響について系統的に調べた。

PUFFモデルは、ラグランジュ粒子の風と重力による移流と、大気中の乱流による拡散を計算することによって、火山灰粒子の動きを再現するモデルである。

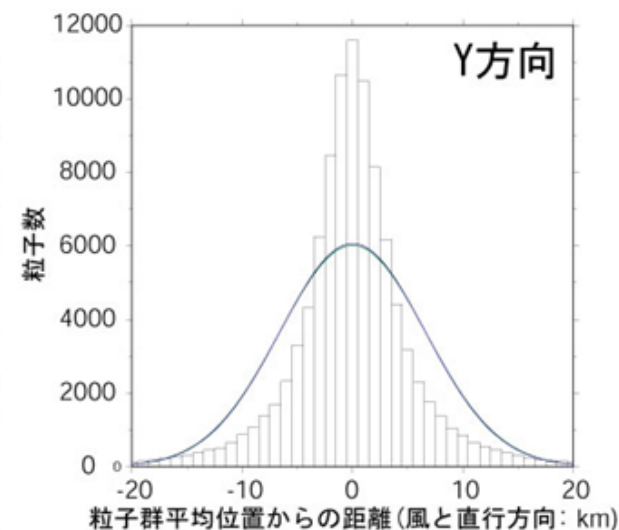
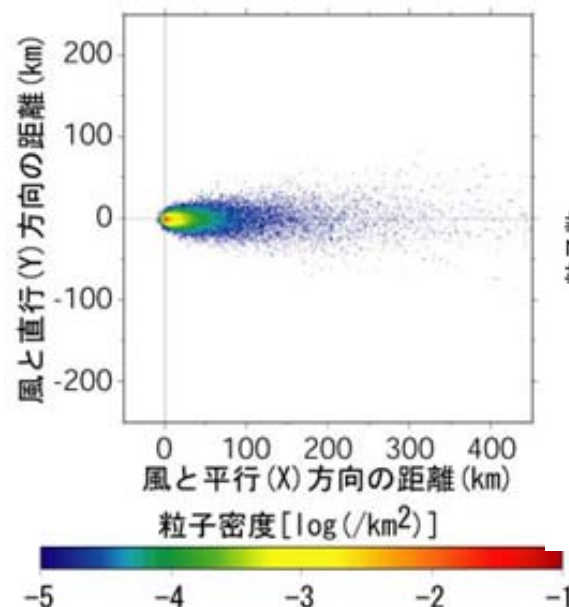
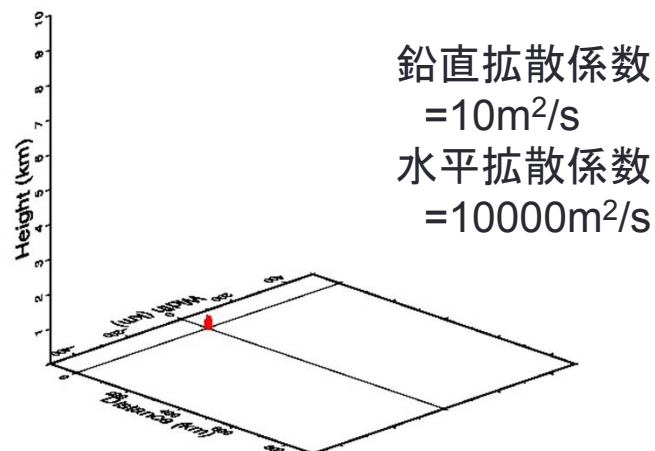
水平方向と鉛直方向の粒子の拡散は、それぞれの方に異なる歩幅を与えたランダムウォークモデルで再現される。

一様風速の大気中で火口上の一点から放出された単一粒径からなる複数の粒子の移流拡散を全粒子が地表に着地するまで計算した。

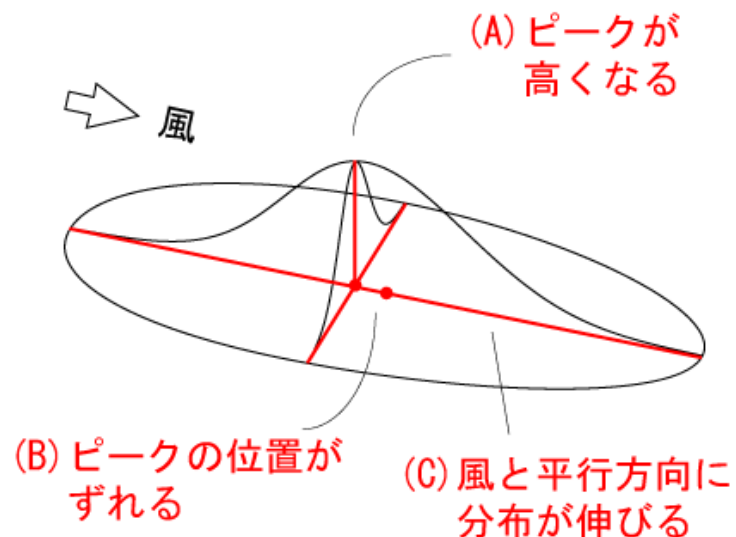


二次元正規分布からズれる例

例： 風速10m/s, 粒径5 μ m,
放出高度0.1km

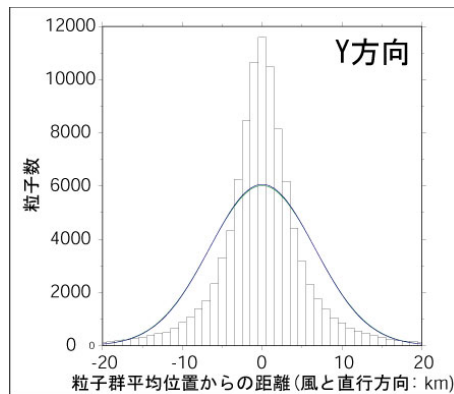


二次元正規分布からのズレ方には3通りある.

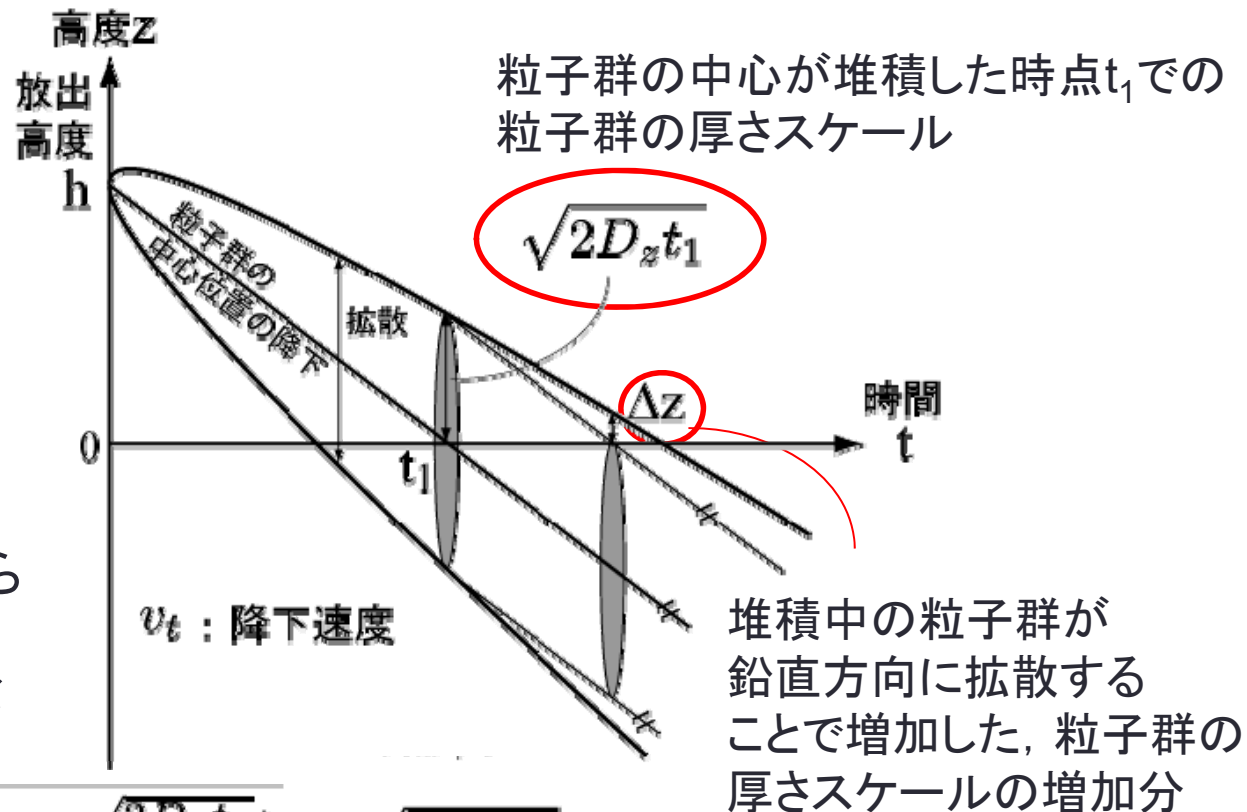


堆積した粒子分布の,
正規分布からのズレは,
低い放出高度,
細かい粒径(小さな降下速度),
大きな風速
の時に大きい.

(A) ピークの先鋭化



堆積物分布のピークが二次元正規分布よりも大きくなるのは、粒子群が堆積しながら鉛直方向に拡散し続け、全粒子の堆積に要する時間が伸びるためである。

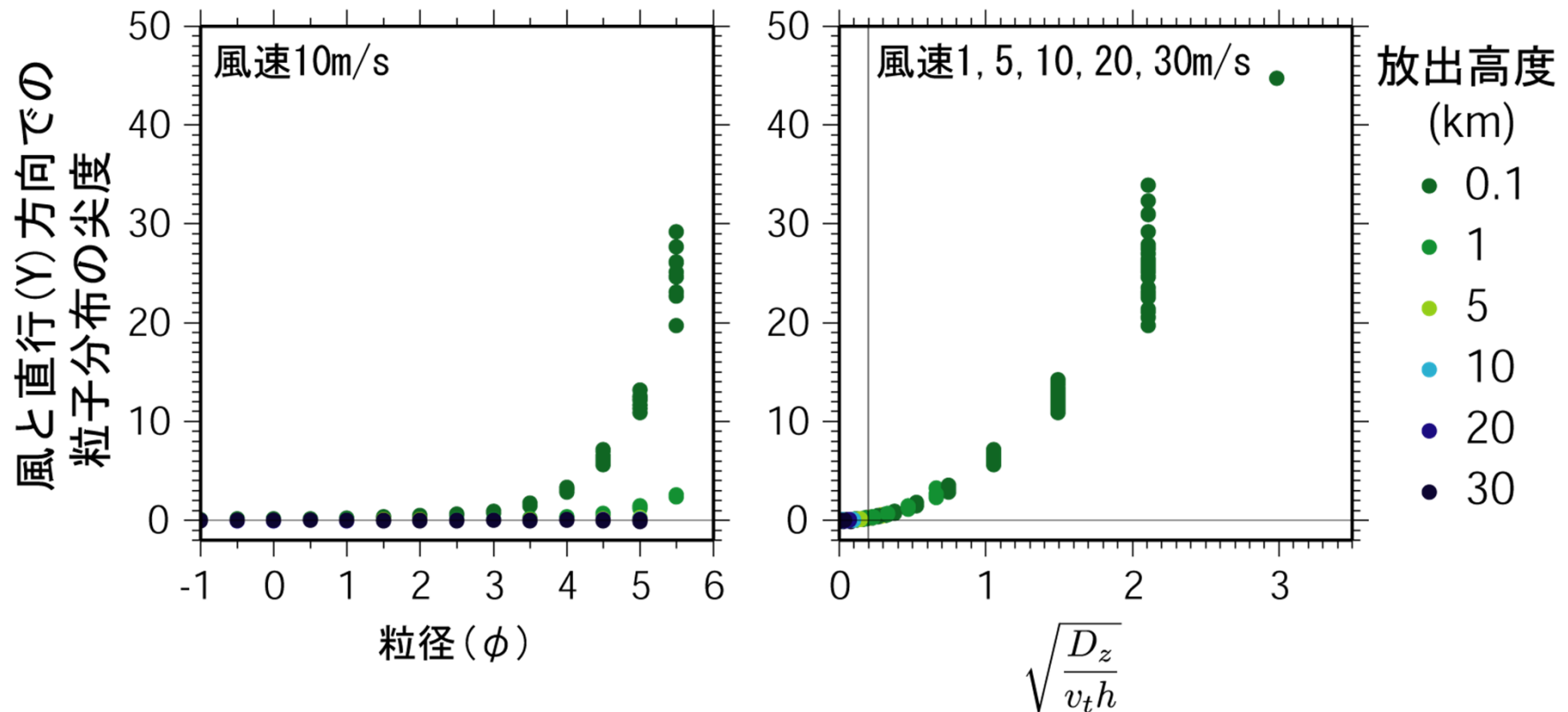


$$\frac{\Delta z}{\sqrt{2D_z t_1}} = \frac{\sqrt{2D_z \left(t_1 + \frac{\sqrt{2D_z t_1}}{v_t}\right)} - \sqrt{2D_z t_1}}{\sqrt{2D_z t_1}}$$

$$= \sqrt{1 + \frac{\sqrt{2D_z}}{v_t \sqrt{t_1}}} - 1 = \sqrt{1 + \sqrt{\frac{2D_z}{v_t h}}} - 1 \approx \sqrt{\frac{D_z}{2v_t h}} \quad \dots \text{パラメータ1}$$

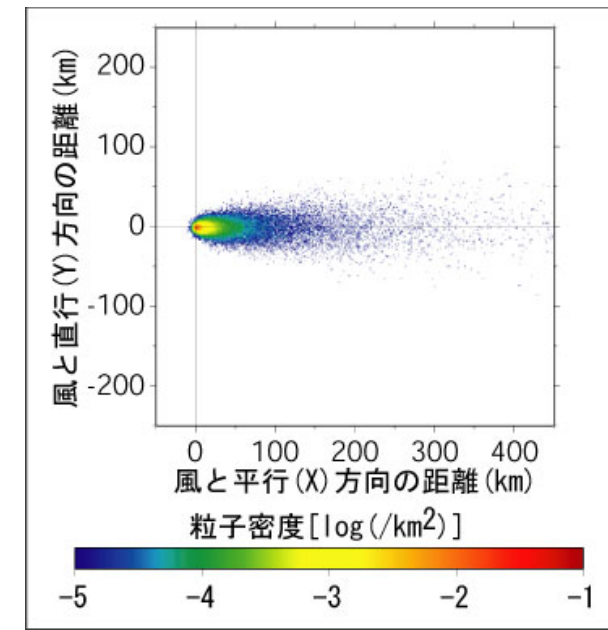
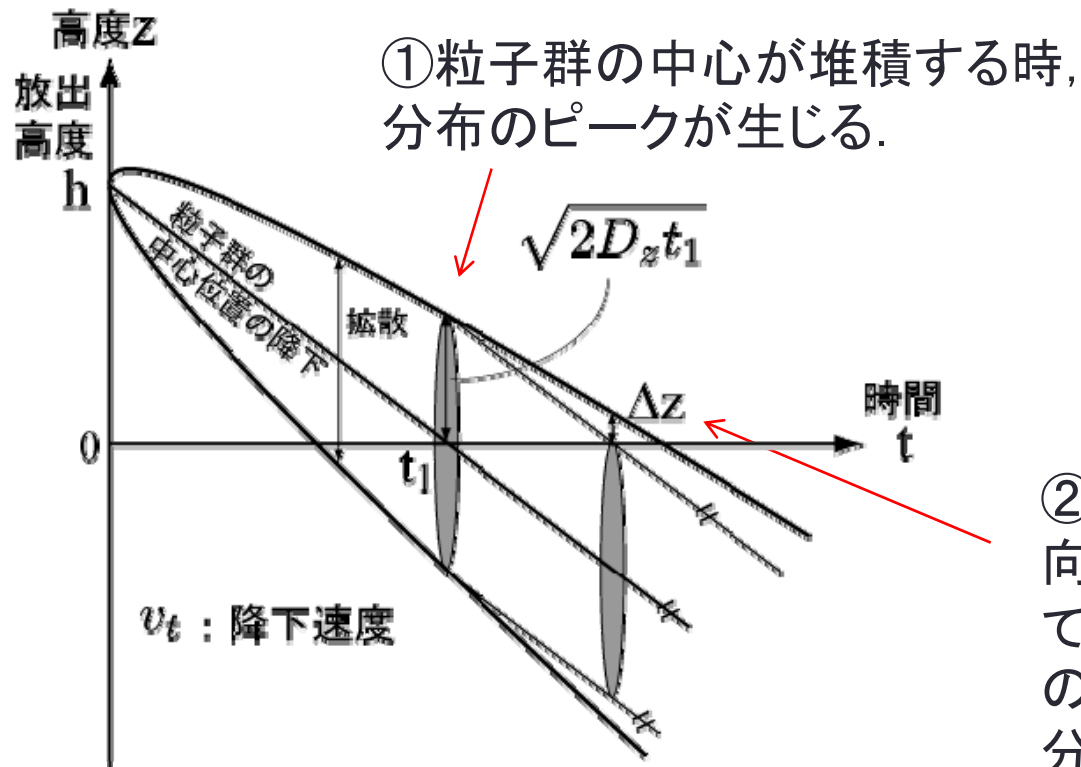
(A) ピークの先鋭化を整理

このパラメータで、異なる高度から放出され堆積した粒子分布のY方向の尖度を整理することができる。



尖度が二次元正規分布よりも大きくなる(>0)のは、このパラメータがおよそ0.2以上の時である。

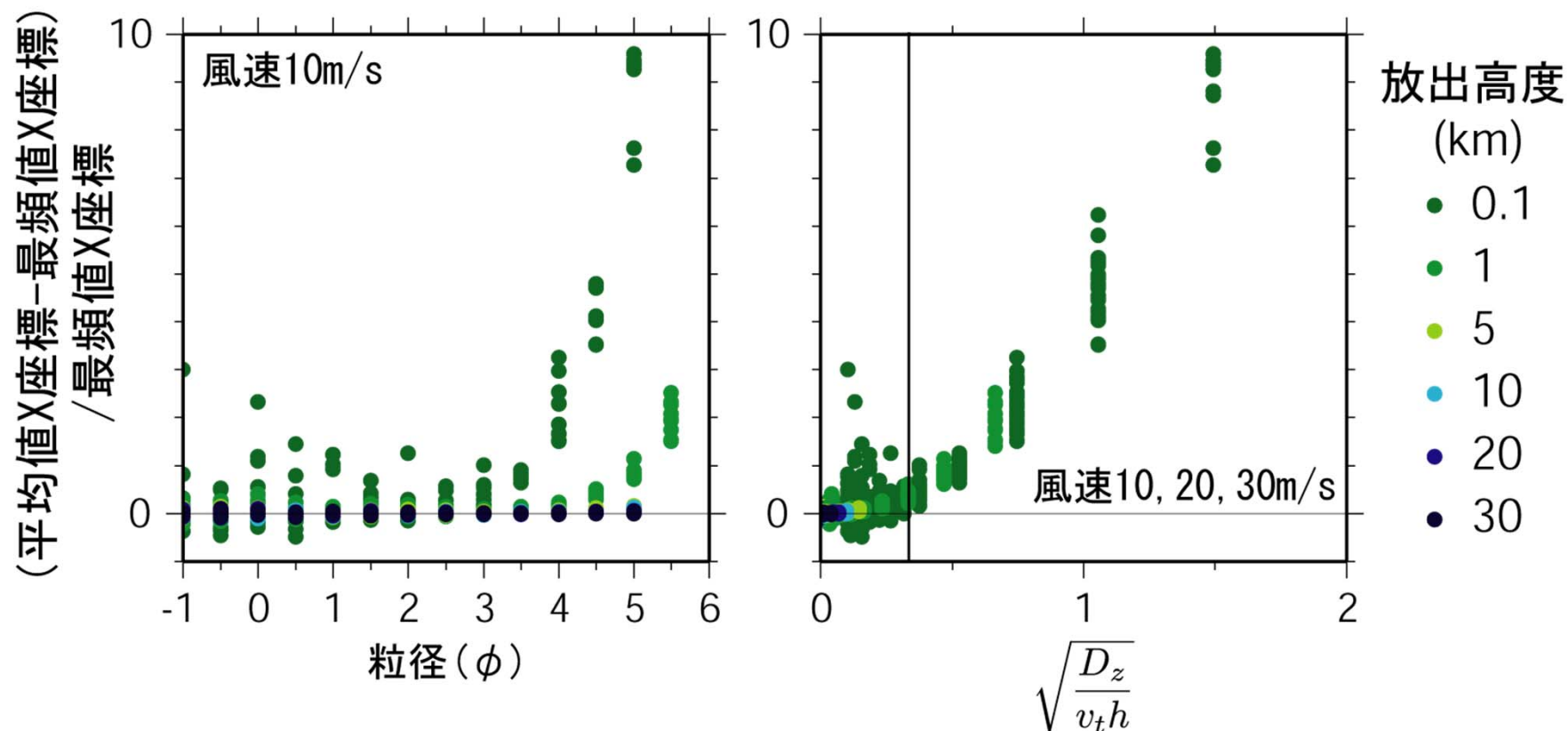
(B) ピークの位置のずれ



② 堆積する時に粒子群が鉛直方向に拡散すると、その粒子は遅れて堆積するので、風に流され、全体の堆積物の分布の中心(平均値)が分布のピーク的位置(最頻値)からずれる。

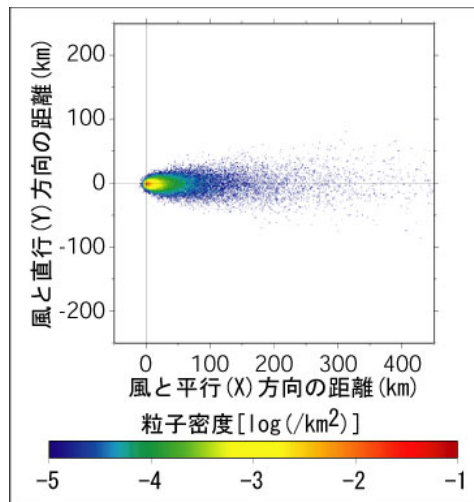
この仕組みは基本的にピークが先鋭化するメカニズムと同じであり、同じパラメータで平均値と最頻値のズレも整理できる。

(B) ピークの位置のずれの整理



ズレが大きくなるのはパラメータの値が
およそ0.3以上の時である.

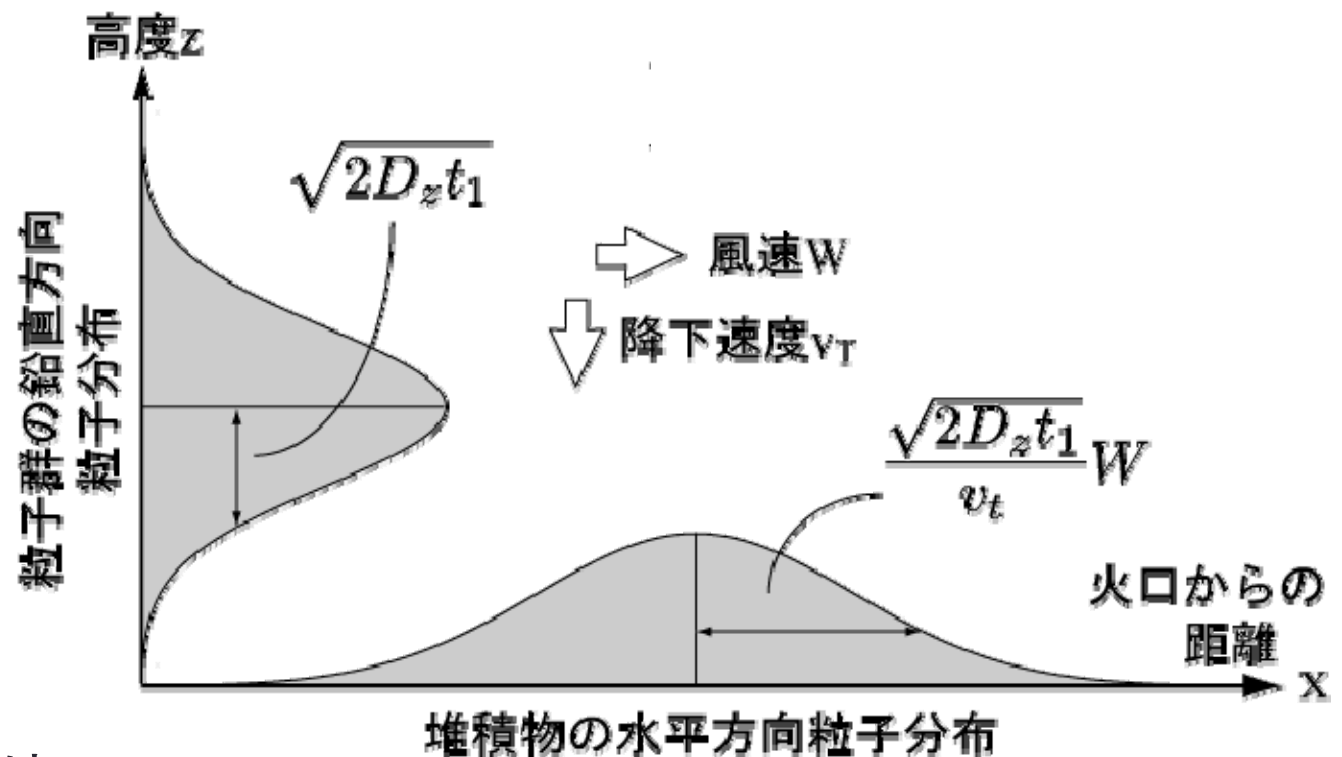
(C) 風と平行方向への分布の伸び



粒子群が堆積する時、
粒子群の厚さによる堆積の時間差が生じる。

そのため堆積物の分布は
風下方向へ伸びる。

そこで、風による堆積物の分布の伸びと
水平方向の拡散の比をとる。

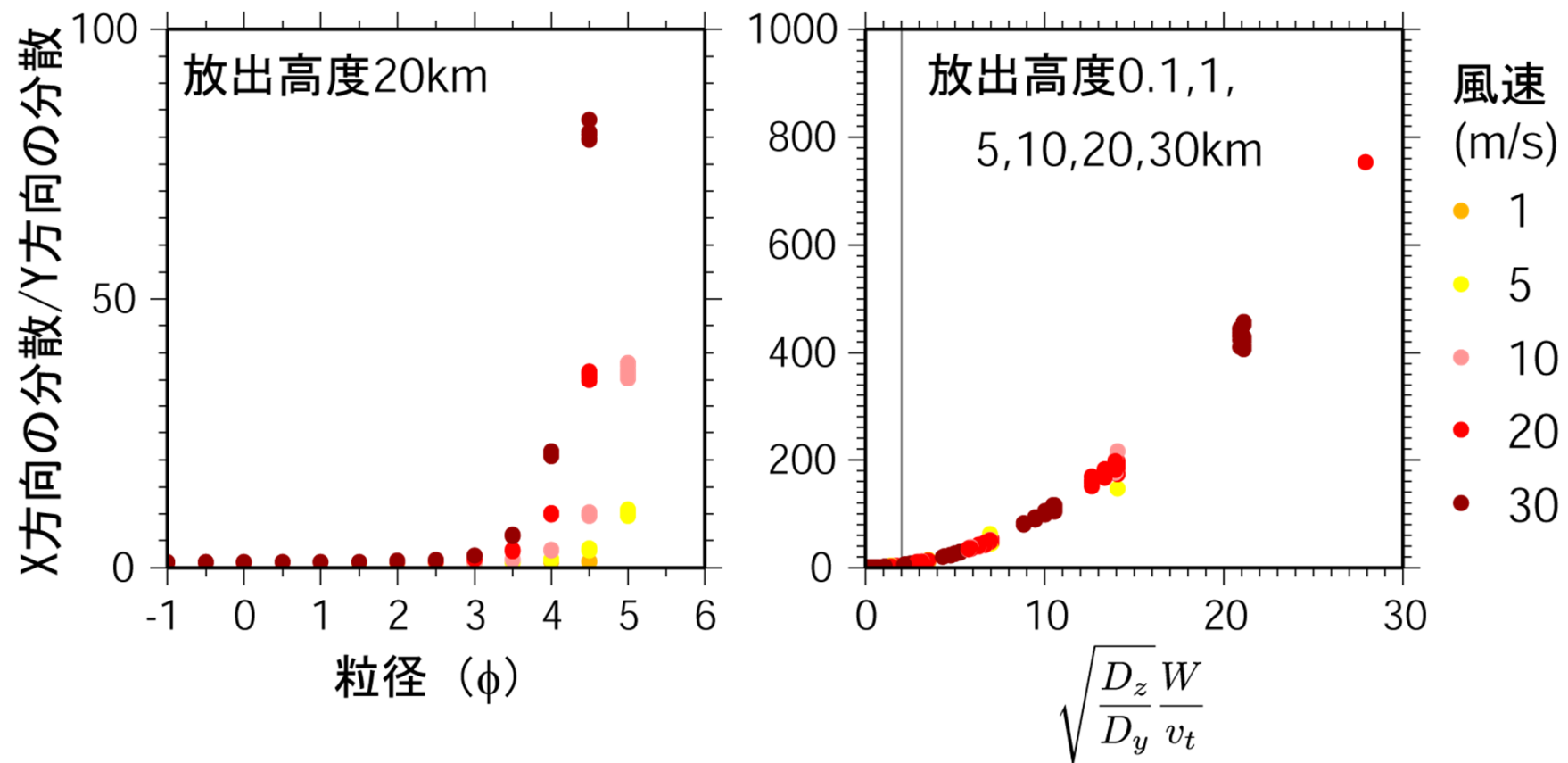


$$\frac{\sqrt{2D_z t_1} W / v_t}{\sqrt{2D_y t_1}} = \sqrt{\frac{D_z}{D_y} \frac{W}{v_t}}$$

・・・パラメータ2

(C) 風と平行方向への分布の伸びの整理

このパラメータで、異なる風の条件下で堆積した粒子分布のX, Y方向の分散の比を整理できる。



X, Y方向の分散の比が1より大きくなるのは、このパラメータがおよそ2以上の時である。

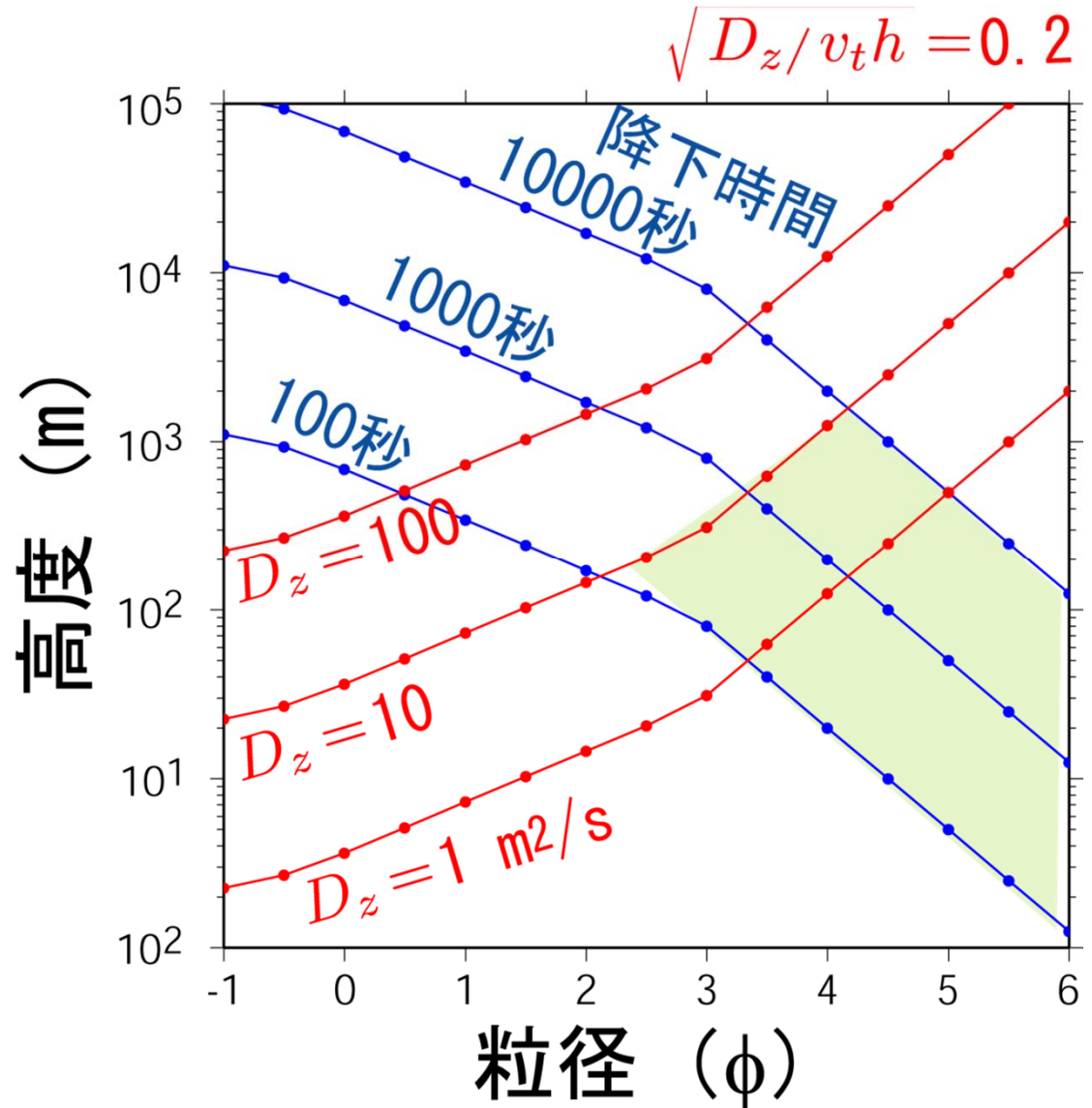
地質学的解釈1：粒径と放出高度の関係

パラメータ1 (赤線) の値が0.2よりも大きいとき、二次元正規分布と比べ火山灰の分布のピークが高くなり、位置がずれる。

一方、粒径と高度から、粒子が堆積するまでに要する時間 (青線) がわかる。

例えば、10m/sの風の条件では、100秒～10000秒の線の間で放出された粒子は火口から1～100kmの範囲に堆積する。

この時、野外で二次元正規分布からのズレが観察できるのはおおよそ緑色で示した条件の範囲と考えられる。

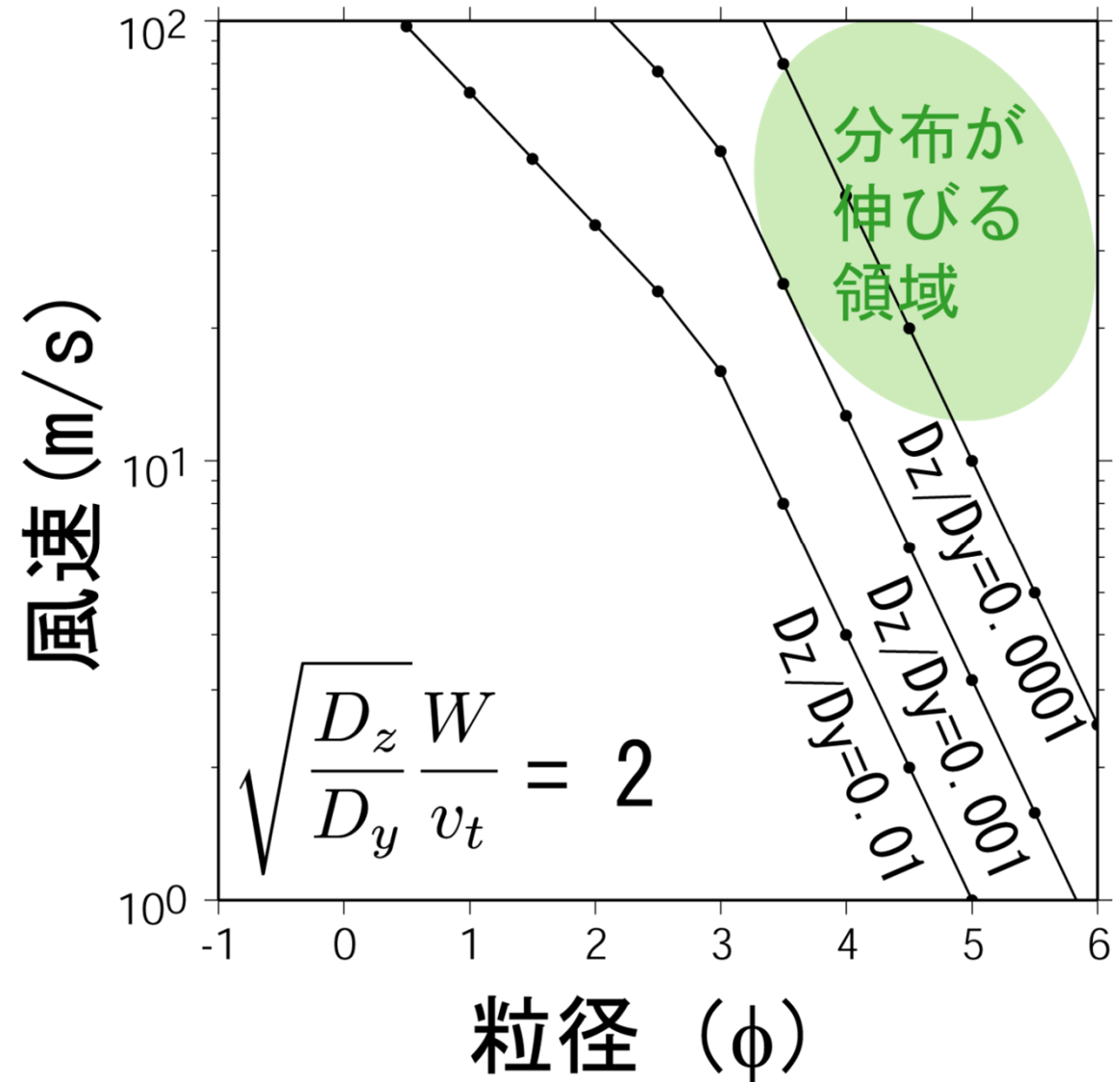


地質学的解釈2：粒径と風速の関係

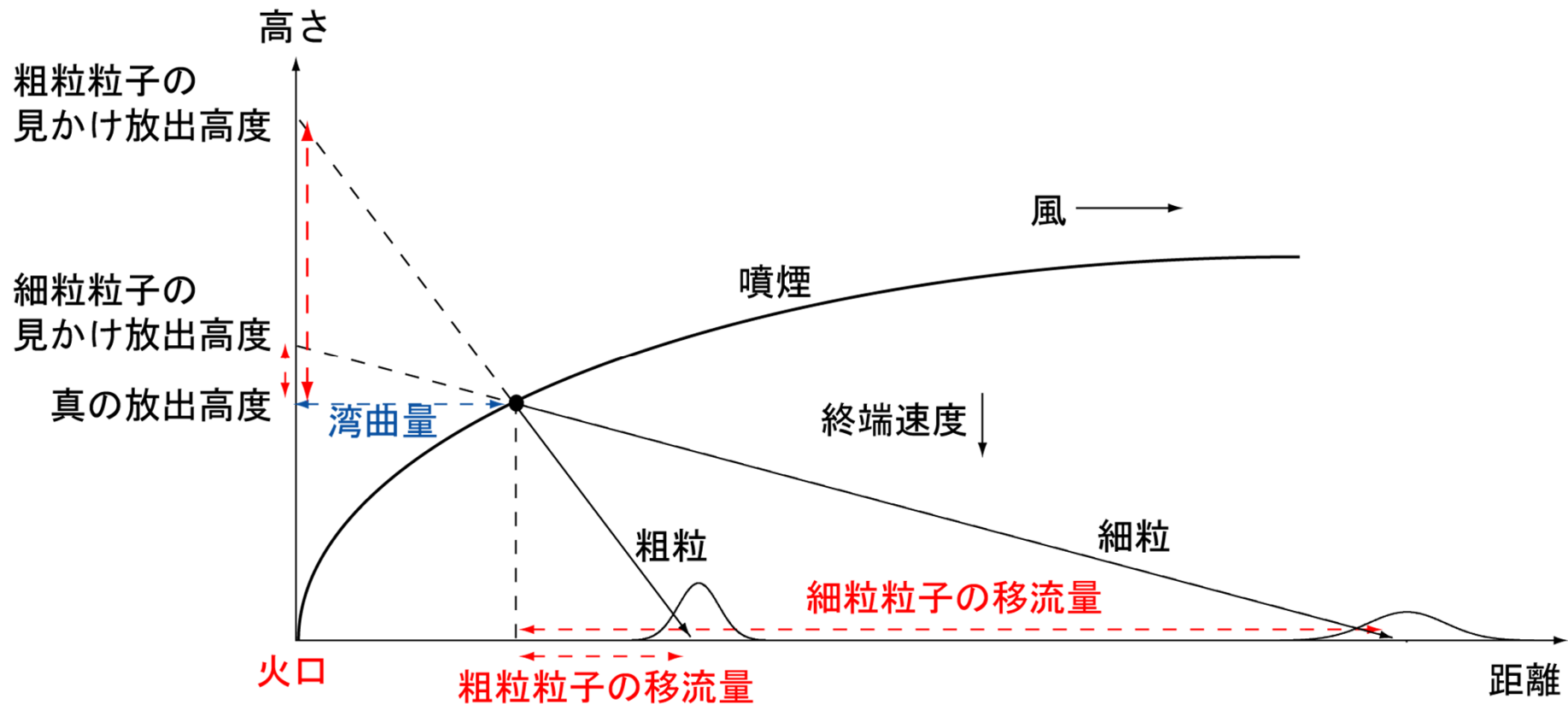
パラメータ2の値が2よりも大きいとき、二次元正規分布と比べ、火山灰の分布は風下側へ伸びる。

数m/s～数十m/sの風速場で、およそ3φよりも細かい粒子が堆積するときに風と平行方向に分布が伸びることがわかる。

以上の地質学的解釈1・2から、鉛直方向の拡散が無視できる条件が明らかとなった。野外調査では、(C)風と平行方向への分布の伸びの効果が、(A)分布のピークの値の増加や、(B)分布のピークの位置のズレよりも観察されやすい可能性がある。



噴煙形状が降灰分布に及ぼす影響



湾曲量の影響は粗い粒径(大きな終端速度), 大きな風速, 弱い噴煙, 高い高度の場合に相対的に大きくなることが定性的にわかる.

→ 今回の発表では定量化を行う.

曲がった噴煙のパラメタリゼーション

Wright (1984) による次元解析

風のある大気中での、浮力を原動力とする弱い噴煙

$$z = C_1 B^{1/3} W^{-1} x^{2/3} \quad B = \frac{g(\rho_{a0} - \rho_0)}{\rho_{a0}} v_0 r_0^2$$

v: 噴煙上昇速度	g: 重力加速度
C ₁ : 定数	ρ _{a0} : 初期大気密度
B: 浮力フラックス	ρ ₀ : 初期噴煙密度
W: 風速	T _{a0} : 初期大気温度
z: 噴煙高度	T ₀ : 初期噴煙温度
x: 湾曲量	

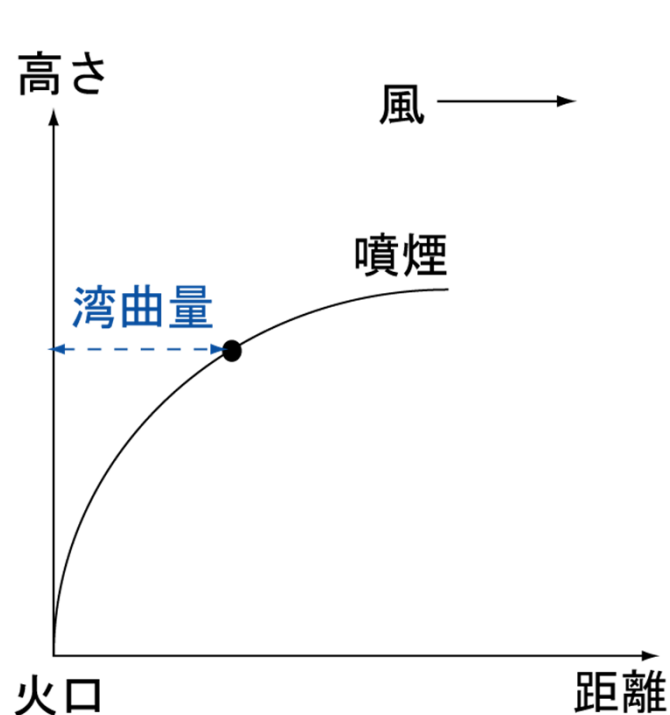
有効浮力フラックス(Sparks et al., 1997)

$$B = \frac{g \rho_0 (T_0 - T_{a0})}{\rho_{a0} T_{a0}} v_0 r_0^2$$

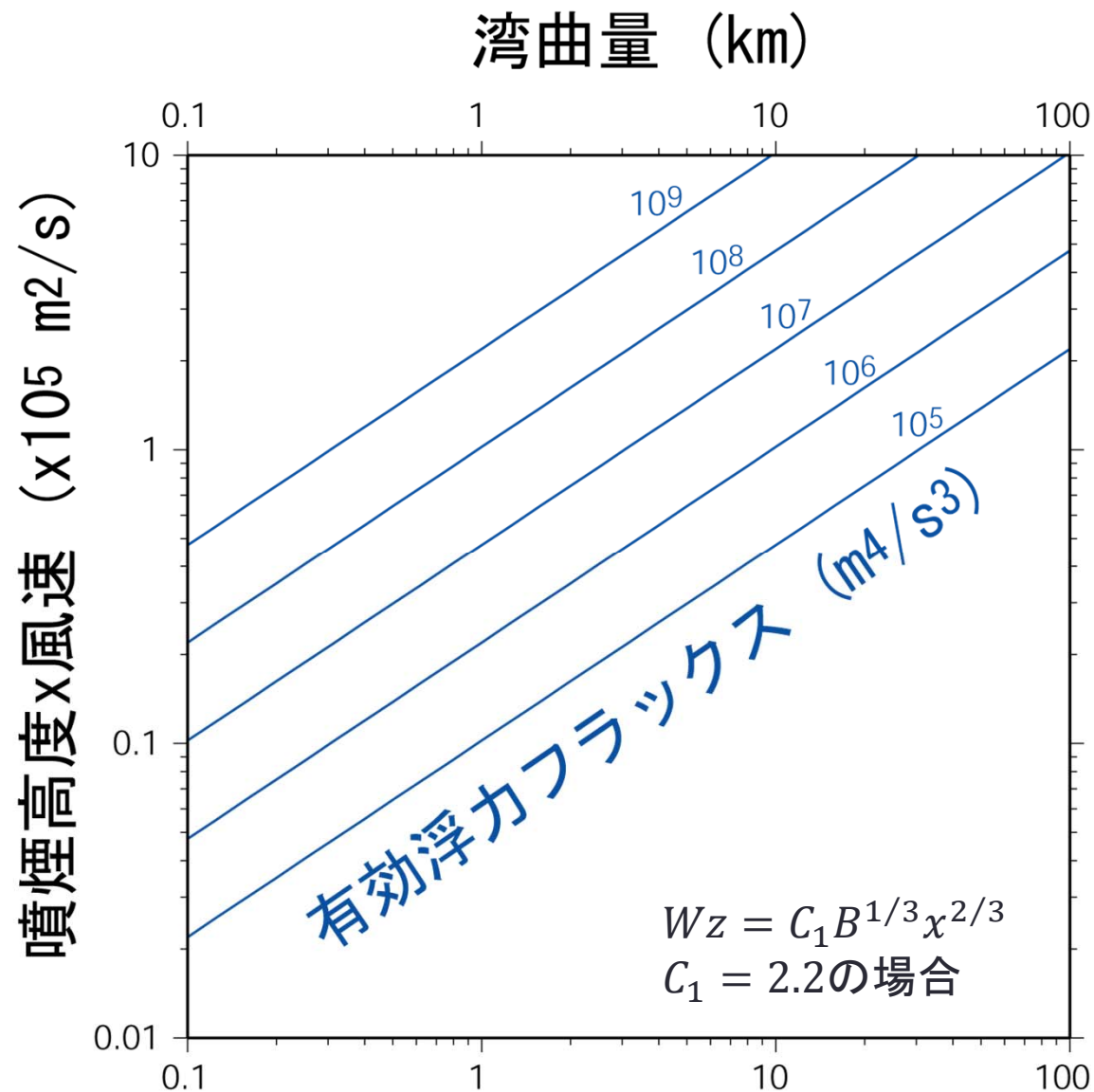
風の影響を考慮した一次元の噴煙モデルであるBENTモデル (Bursik 2011) を用いて、Wright (1984)のモデルが噴煙に適用可能であることを確認.

また、Wright (1984)のモデルにおいて定数C₁の値を2.2とすると、BENTモデルにおいて風によるエントレインメント係数を0.2とした場合とよく一致することがわかった.

湾曲量のパラメタリゼーション



- ・速い風速, 高い高度ほど, 湾曲量は大きい.
- ・弱い噴火ほど湾曲量が大きい.



移流量のパラメタリゼーション

移流量 b を支配する関係式

$$b = \frac{h}{v} w$$

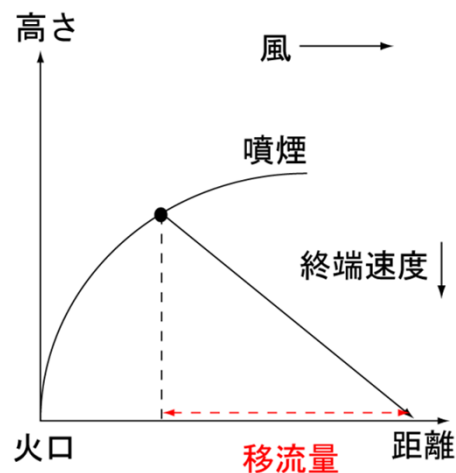
$$hw = bv$$

b : 移流量

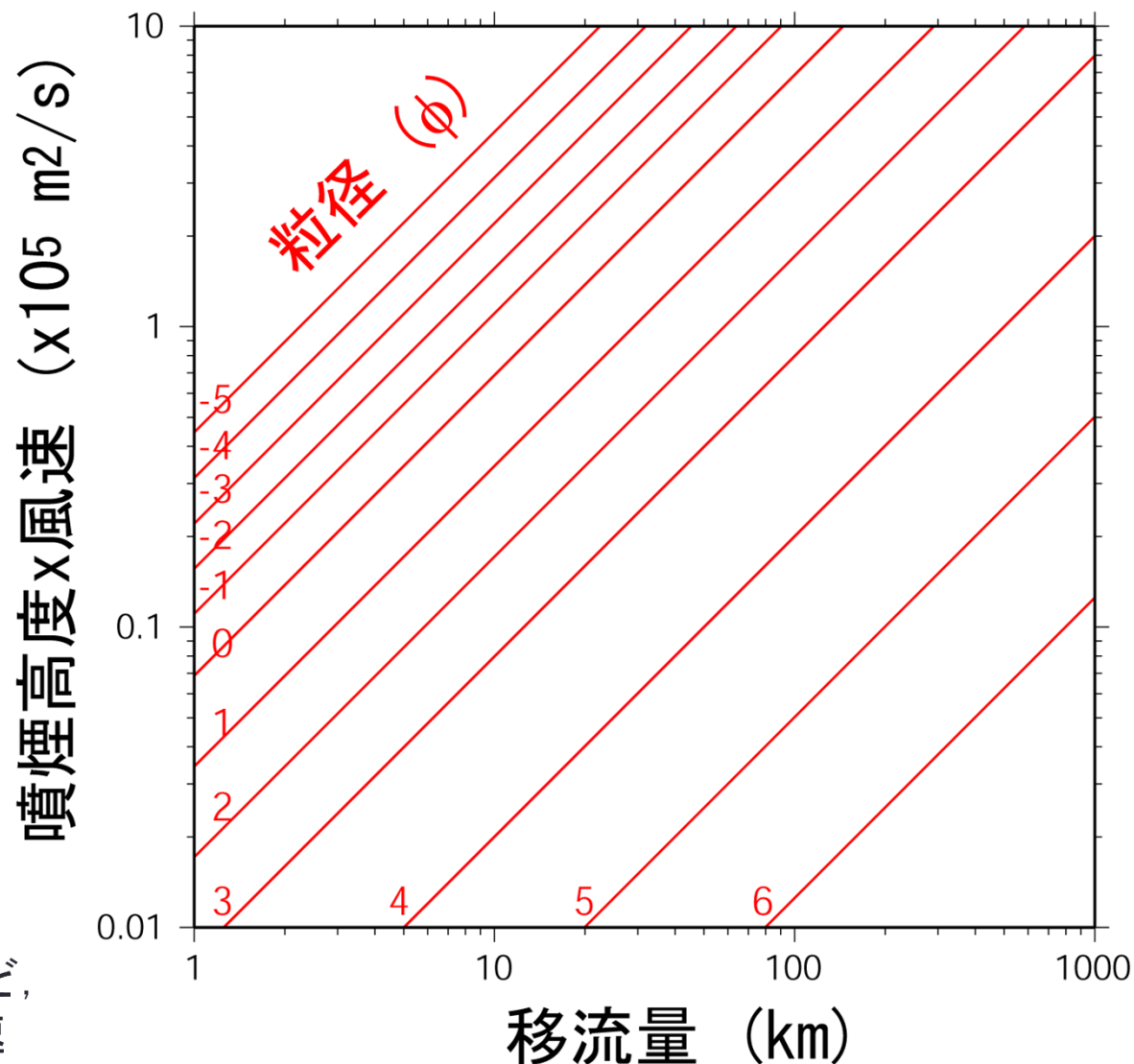
h : 放出高度

v : 平均終端速度

w : 風速



- ・放出高度10kmとしたときの平均終端速度(m/s)で計算.
- ・放出高度が低く, 風速が遅いほど, 粒径が大きい(平均終端速度が速い)ほど, 移流量は小さい.



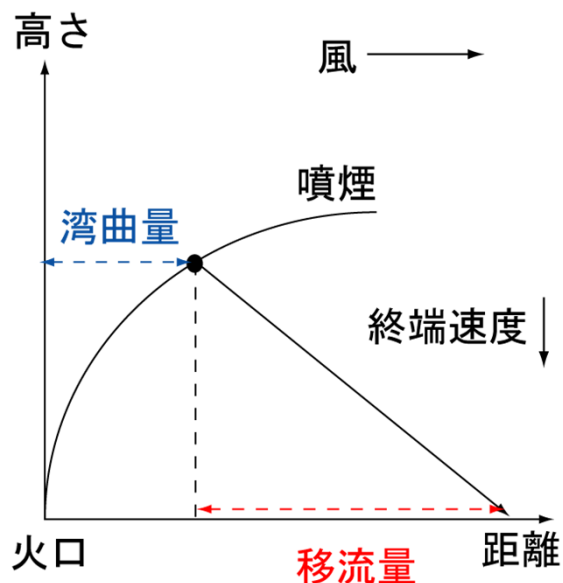
湾曲量と移流量の比較

等値線

青:有効浮力フラックス

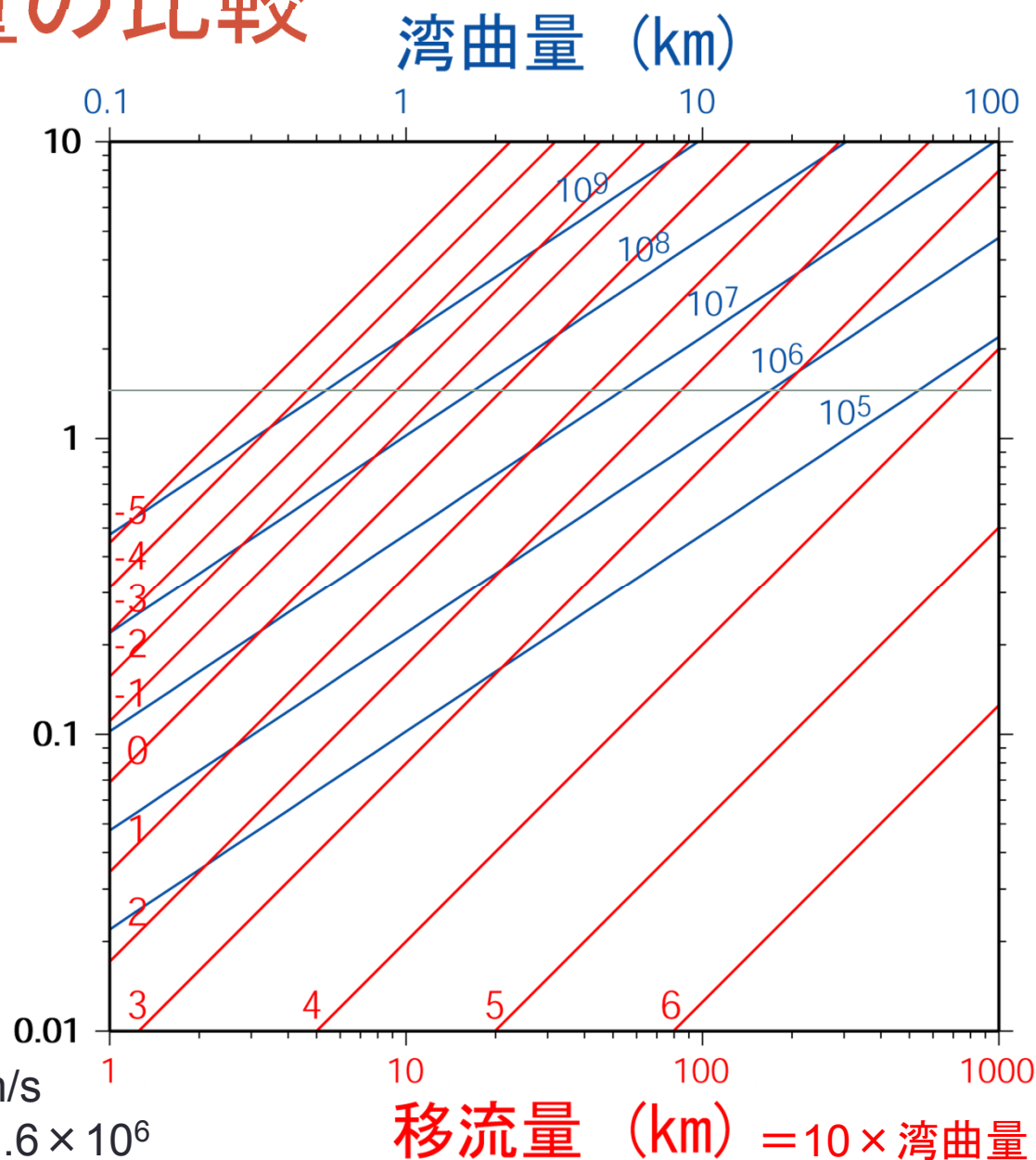
赤:粒径(Φ)

移流量が湾曲量の10倍以下
ならば、湾曲量の影響が現れる
とする。

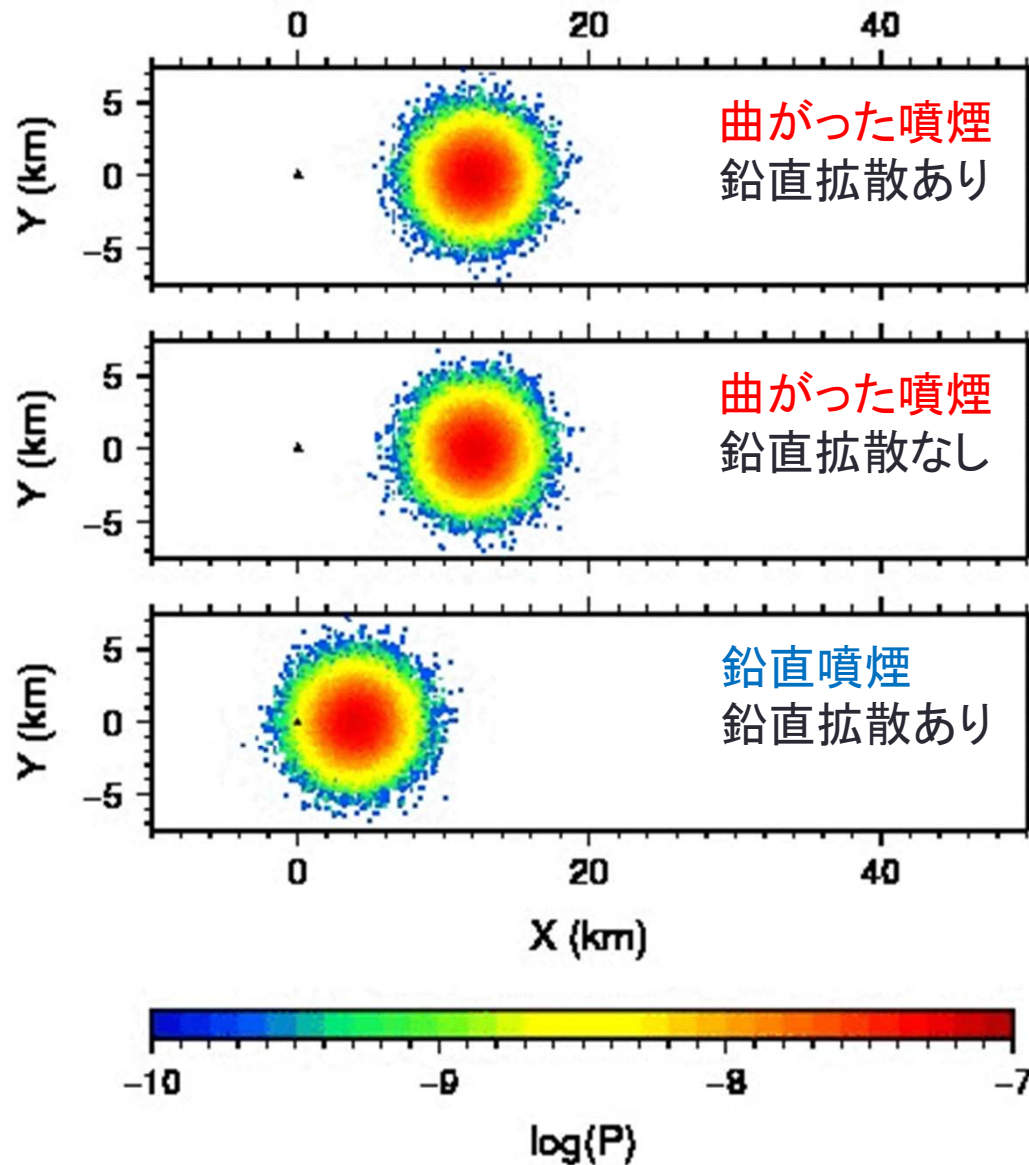


初めに見せたアニメーションの例
火口半径50m, 初期噴煙速度134m/s
有効浮力フラックス 1.3×10^7 , $hw = 1.6 \times 10^6$

噴煙高度×風速 ($\times 10^5 \text{ m}^2/\text{s}$)



Grain size = -5 phi



まとめ

粒子拡散に対する、噴煙形状と鉛直拡散の影響を定量的に評価した。

噴煙形状の影響は粗い粒径(大きな終端速度), 大きな風速, 弱い噴煙, 高い高度の場合に相対的に大きくなる。

鉛直方向の粒子拡散の影響は, 低い放出高度, 細かい粒径(小さな降下速度), 大きな風速の時に大きい。

二つの影響が共に小さくなる領域が中程度の粒径のときに存在する。