

降下火山灰シミュレーションコード Tephra2 の 理論と現状—第四紀学での利用を視野に

萬 年 一 剛*



移流拡散モデルを元にした降下火山灰シミュレーションコードである Tephra2 について、その歴史、理論、実行方法、最近の研究動向、今後の発展の方向性について記述した。Tephra2 では適当な初期パラメータを与えることにより、堆積物の分布を計算できる。また、堆積物の情報から、初期パラメータをインバージョンにより求めることもできる。しかし、火口の極近傍の堆積物をうまく再現できないことや、大きい噴火では噴煙の高さがほとんど決まらないなどの問題点が知られている。これらの解決のためには、粒子の高さ方向の放出量変化を解明すること、噴煙の傘型領域をコードで表現することが必要である。こうした課題には、よく知られている噴火のデータを多数利用する必要がある、この分野へ多くの研究者が参入することが期待される。

キーワード：Tephra2, 噴煙柱, 火砕噴火, 傘型領域, アイソバックマップ, 移流拡散モデル, 重力流モデル

I. はじめに

降下火山灰は短時間で広範囲に拡散するため、編年に重要な鍵層として優れた性質を持つ。特に我が国では、氷期でも氷床が大規模に発達することがなかったため、降下火山灰層が激しい浸食を受けることなく長期にわたって保存されている。このような地理的背景から、我が国の降下火山灰層序の研究は質量ともに世界最高水準にある。しかし、降下火山灰から引き出せる情報が編年だけにとどまらないことは明らかであろう。

たとえば、火山灰層から給源を求めることはできないだろうか。もちろん、若い降下火山灰であれば給源の火山は失われておらず、その場合は比較的容易に給源を決めることができるであろうが、すでに給源が浸食や埋没、プレートの沈み込みにより失われているケースはどうであろうか。火山地質学者は、粒径を中心とする火山灰層の「ツラツキ」から給源からの距離が 10 km のオーダーか、あるいは 100 km のオーダーかといった程度であれば、イメージをつけることができるが、そうしたイメージを何らかのモデルを根拠として定量的に表現することはできないだろうか。

あるいは、降下火山灰層の分布からその当時の風系を

明らかにすることはできないだろうか？ たとえば、沢山の火山灰層について分布を調べ、それを氷期と間氷期で比べた場合、風向や風速に違いが出ることはないだろうか？ そうした研究を進めることで、「古気象学」のような分野を切り開くことはできないだろうか？

1980 年代以降大きく発展した physical volcanology の研究により、我々は降下火山灰の粒径の空間変化からその火山灰をもたらした噴火の噴煙の高さや、噴火時の風速などを計算で求められるようになった。こうした成果は、噴火の実像を噴出物から具体的にイメージすることに大きく貢献したが、フィールドで得るべきデータは多数かつ高品質のものが求められる。このため適用できるのは歴史時代の噴火が主で、古い時代の噴火など露頭の数に大きな制限がある堆積物から噴火像を再現するのは、今日でも火山地質学者の経験と直感に頼らざるを得ない。

こうした状況を打破するには、実際に噴火を起こしてみて、ある地点における噴出物の粒度組成などを再現できる、「バーチャル火山」があるとよい。バーチャル火山の場所や噴煙高度、風向きや風速を自由に変えてやることで、観測された粒度組成や層厚が再現できれば、それは噴火を再現したということになる。もちろんこれだ

2013年1月11日受付。2013年5月22日受理。

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 小田原市入生田 586. E-mail : mannen@onken.odawara.kanagawa.jp

け現象に影響を及ぼす変数が多いので、観測を説明する噴火像はある程度の広がりを持っているかも知れない。ある意味、噴火像に「誤差」を含んでいるといえるが、しかしそうした「誤差棒付き」の噴火像のほうが、火山地質学者の経験と直感によって得られた噴火像より、ことによるとより客観的で科学的と言えるのではないだろうか。

降下火山灰シミュレーションコード Tephra2 はだれでもすぐに入手できる「バーチャル火山」である。Tephra2 は Linux 上で実行することができるコードで、マウスでアイコンやメニューを選択しながら作業を進めていく Windows や MacOS 上のソフトウェアに比べるとかなり取り付きにくい。加えて Tephra2 の噴煙モデルは現在主流の重力流モデルと異なるため、無批判に利用することは危険である。つまり、Tephra2 は降下火山灰であったら何でも簡単にシミュレーションできる夢のツールというわけでは決してない。

しかし、もし読者が噴出物から噴火の様子を再現したいという強い欲求を持っていれば、Tephra2 の限界を把握した上で自らの研究に生かし、あるいは限界を乗り越えるべく Tephra2 の改良に乗り出したいと考えるであろう。小論は、そのような読者に向けてその一助となることを目的として執筆された。

小論では、はじめに Tephra2 の歴史と基本的な考え方について述べる。つぎに、Tephra2 のコードがどのような機序で降下火山灰堆積物の分布を計算しているのかを検討をしていく。その後、Tephra2 の利用方法に

ついて、操作法を示しながら例示する。最後に、現在の噴煙柱モデルの主流である重力流モデルとの違いについて検討をして、Tephra2 の限界と今後の課題について考える。

II. 移流拡散モデル

Tephra2 は移流拡散モデルを元に行っている (図 1)。火山灰は噴煙から風によって風下に流れると同時に、重力の影響を受けて高度を減じて最終的に着地する。Tephra2 では火山灰粒子は風と一緒に移動すると考える。この風による輸送が、移流である。

相撲で力士が土俵に塩を撒くシーンを思い起こしてみる。塩ははじめ力士の手のひらの中に収まっているが空中で広がり、土俵では力士の手のひらよりも遙かに広い範囲に落下する。撒くのが塩ではなく、火山灰でも同じで一旦空中に放出されると勝手に拡がっていく。これが拡散である。

要するに移流拡散モデルとは、風による移動 (= 移流) と、空中で勝手に拡がる現象 (= 拡散) を盛り込んで作られたモデルのことである。しかし、実際の火山灰の動きに比べると、Tephra2 の移流拡散モデルは随分単純化されたものである。風による移動について言うと、風向きと風速は各高度範囲で一定と仮定される。実際には風は渦を巻いたり、蛇行をしたりするはずだが、そういう複雑な動きを盛り込むことはできない。また、拡散について言うと拡散が起きるのは水平方向だけで、垂直方向の拡散は考慮しない。

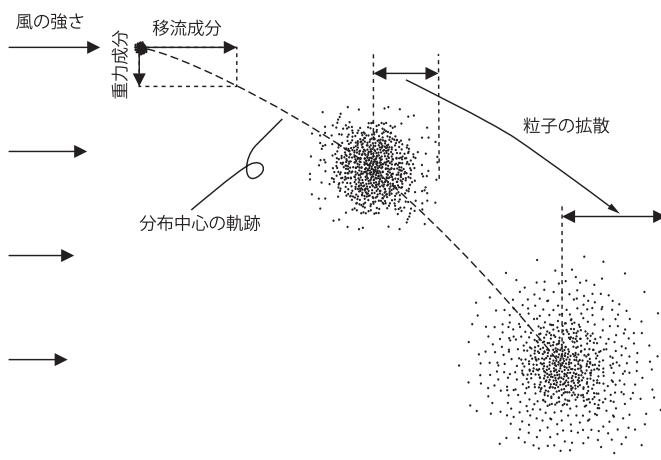


図 1 移流拡散モデルの概念図

粒子の分布中心の軌跡は、重力による落下と風による移流によって決まる。粒子の一群は時間 0 の時に点で表されるが、時間の経過とともに拡がっていく。

そういう事情で実際の3次元の大気場で噴煙の拡散を再現するといったようなことは Tephra2 では不可能である。もしこうした再現をしたいのであれば、PUFF (Tanaka, 1994) など別のコードを用いるのがよい。これは気象観測で得られる風の場の中に、数万個オーダーの粒子を放出し、その粒子がどういう挙動をするかひとつひとつを計算によって求める。噴煙に航空機が遭遇するか否かという問題にはきわめて有用なコードである。しかし、PUFF は降下火山灰の分布計算にはあまり向いているとは言えない。なぜならば、計算する粒子の数は、実際に火山が放出する粒子の数に比べると遙かに少ないので、各地点の堆積量を直接求めることができないからである。

Tephra2 は風について単純なモデルしか仮定できないが、それが大きな弱点と言えるかというところでもないだろう。なぜならば、火山周辺 100 km のオーダーで風向きが大きく変わるといえるのは考えにくいからである。したがって、100 km のオーダー以下で考える場合 Tephra2 は一定の実用性があると考えるべきである。100 km 以遠にラピリサイズの粒子を飛ばすのはかなりの大噴火であるから、逆に言うと、ラピリサイズの粒子が堆積している範囲について Tephra2 を適用して作業するのはほとんど問題ないと言えるだろう。

シミュレーションはコーディングの開発にかかる労力や計算速度を勘案しながら、天然現象のどこを単純化し、どのようにモデリングをするかということで、開発者の個性が出て、いろいろなコードが開発される。ここでは Tephra2 と PUFF の一長一短を述べたが、コードの利用者は再現したい現象や観測事実がどのような性質のものなのかを勘案し、適切なコードを選ぶ、そしてそのコードの限界を把握することが重要である。

III. Tephra2 の歴史

Tephra2 の元となった研究は Suzuki (1983) によるものである。Suzuki (1983) は、1) 大気中における粒子の拡散、2) 大気中での粒子の落下速度、3) 噴煙柱からの粒子離脱量の垂直分布、についてそれぞれ定式化を行い、地表での堆積量を解析的に求めた。

Tephra2 の初期バージョンは当時 South West Research Institute に在籍していた Connor ほかに (Connor *et al.*, 2001) によって開発されたが、これは Suzuki (1983) が定式化した3つについて数値的に求めたプログラムであった。本人の弁を借りると、このバージョンは「地質学者のプログラミング」で、コードが洗練されておら

ず、計算速度も遅かった。その後、これは Connor や Bonadonna により改善と並列演算化が行われ Tephra と呼ばれた (Bonadonna *et al.*, 2005)。Tephra2 はこのコードをシングルプロセッサ用に書き換えるなどの改良を施したものである。

Tephra2 と Suzuki (1983) は数値的か解析的かという違い以外に、2つほど違いがある。1つは、Tephra2 では噴煙柱からの粒子離脱量の垂直分布が一定としているという点である。Suzuki (1983) では噴煙柱からの粒子離脱量が、噴煙の垂直方向の速度分布と関係して定式化されている。Suzuki (1983) のアイディアは素晴らしいが、その独自の仮定が正しいと考える根拠はない (*cf.* Woods, 1988)。粒子離脱量の垂直変化はいまだによくわかっておらず、理論や観測による検討が必要な性格のものである。したがって、Tephra2 があえて踏み込まずに簡単な仮定をしているのは合理的である。

もう1つは、Suzuki (1983) の給源、すなわち噴煙が幅を持たない一方、Tephra2 では後述するように幅を持っているという点である (図2)。噴煙の幅は観測が充実しているとは言いがたいので、その確かさは検討の余地があるが、幅を持たせているために拡散係数を大気のそれに近く置けるという利点がある。Tephra2 に似た移流拡散モデルである Hazmap (Macedonio *et al.*, 2005) では給源が幅を持たない垂直な線であると仮定されているが、給源から噴煙の高さ程度の距離まで離れないとうまく堆積量が再現できないという報告がある (Pfeiffer *et al.*, 2005; Scollo *et al.*, 2007)。火口近傍で堆積量が良好に再現できないのは Tephra2 でも同様であるが

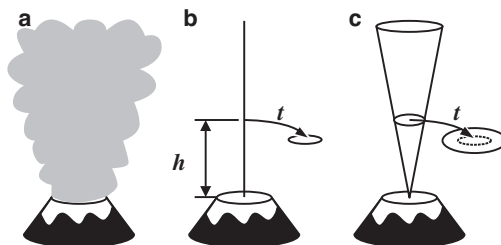


図2 給源モデルの概念図

a: 目で見た噴煙のイラスト。これを計算機の中でどう扱いかを示したのがbとcである。b: 給源が幅を持たないとするモデルで、高さ h から放出される噴煙物の広がりは初めに0で時間の経過とともに広がっていく。c: Tephra2 で用いられている給源が幅を持つとするモデルである。高さ h で放出される噴煙物は広がりを持っており、時間 t が立った時点で点線で示した元の幅よりも広がる。時間 t で広がる量は、拡散速度が同じであればどちらのモデルでも変わらない。

(Bonadonna *et al.*, 2005), Hazmap でその傾向がより顕著である。それは、噴煙の幅がないモデルだと、分布を再現しようとするとき噴煙の幅が拡散係数に押しつけられてしまうためであると考えられる。噴煙の幅を拡散係数で表現しようとするとき、これは空気中の実際の拡散より大きいので、分布全域にわたって破綻なく再現するのは難しいだろう。

なお、Tephra2 で公開されているのはシングルプロセッサ用のフォワードモデリング、すなわちあらかじめ初期パラメータを与えてやり、堆積物の分布を求めるというものである。これとは別に滑降シンプレックス法を用いたインバージョンコードも開発されている (Connor and Connor, 2006)。これは観測された堆積物の分布から逆に、噴煙の高さや噴出量などのパラメータを求めるものであるが、その現状については後述する。

IV. Tephra2 の理論

先の章では移流拡散モデルがいかなるものか解説をしたが、この章では実際に Tephra2 がどのような計算を行って各地点の堆積物を求めているのか解説する。

1. 落下の中心座標

移流拡散モデルでは、一団となって放出された粒子も着地時にはある程度の広がりを持つ。しかし、着地した粒子の濃度は平面的に見て濃淡があり、一番濃度が高い

のは分布の中心であろう。Tephra2 ではこの分布中心の座標が、風による移流を計算した結果得られる座標と考える (図 3)。この座標は以下の式 1 で表される。

$$\begin{aligned} x_v(\phi_i, jmax) &= \sum_{j=0}^{jmax} v_j \cos\theta_j t_j(\phi_i) \\ y_v(\phi_i, jmax) &= \sum_{j=0}^{jmax} v_j \sin\theta_j t_j(\phi_i) \end{aligned} \quad (1)$$

この式で、 $x_v(\phi_i, jmax)$ および $y_v(\phi_i, jmax)$ はそれぞれ、サイズ ϕ_i の粒子が高さ区間 $jmax$ から落下したときの火口の標高における分布中心の南北方向および東西方向の座標を示す (北方向が x の正、東方向が y の正ということに注意)。

j は高さ方向に一定の幅で設けられた区間を示し、その区間における風速を v_j 、風向を θ_j 、落下時間を t_j で示す。区間 j は $j=0$ のものが火口の高さ h_v から $h_v + \Delta h$ の範囲を示す。 j_{max} は落下開始高度 h_z から $h_z - \Delta h$ を示す。 Δh は噴煙の高さをいくつに分割するかによって変わり、たとえば噴煙の高さ h_t が 100 個に分割される場合は $\Delta h = (h_t - h_v) / 100$ になる。風速を v_j 、風向を θ_j はユーザーがファイルで与えるデータが元となる。 Δh ごとの風速・風向は Tephra2 が自動的に内挿を行って求めるので、ユーザーが与えるデータの高さや間隔が綺麗に揃っている必要はない。落下速度 v_j は、粒径と測候公式によって求められる所定の高さにおける空気密度によって計

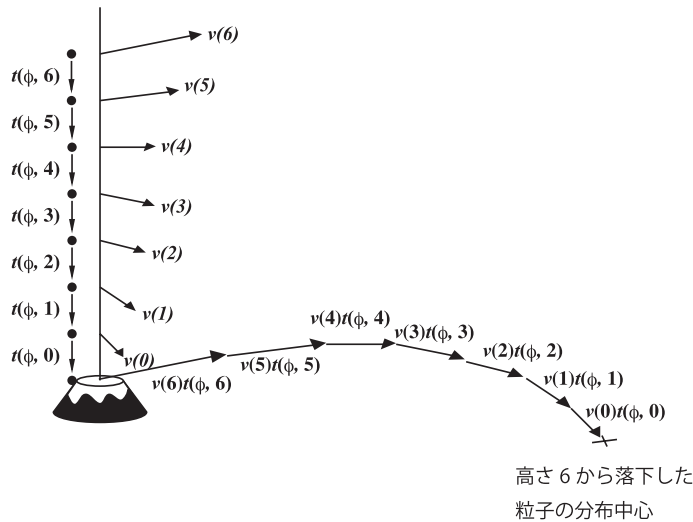


図 3 移流の概念図

火口直上の風が、高さ 0 から 6 までそれぞれベクトル $v(0) \sim v(6)$ で表されるとする。各高さ区間 n を落下する間に粒子が流されるベクトルは $v(n) t(\phi, n)$ で表されるので、高さ 6 から放出される粒子はこれら全ての積算が分布の中心のベクトルとなる。

算される。

さて、実際の計算では堆積量を知りたい点のリストまたは地表面の標高モデル (DEM ; Digital Elevation Model) を与える。これらの標高がすべて火口の標高というわけではない。計算で知りたいそれぞれの地点の堆積量を知るためには、まずその地点の標高における粒子の分布中心の座標を知る必要がある。

Tephra2 では海面における風速を 0 とし、標高が海面と火口の間にある地点の風速は以下のように表される

$$v(h) = \frac{h}{h_v} v(h_v) \quad (2)$$

Tephra2 火口から地表までの落下速度は一律にこの地表での落下速度と仮定されている。また、火口から地表までの風向は、火口における風向と変わらないという仮定もされている。この仮定は、火口と観測点の高度差が大きくなったとき問題となる。現在開発中の新しいバージョンでは、火口以下でもユーザーが与える風速・風向が計算に反映されるようになるが、現行の Tephra2 ではこの点が問題である。

なお、Tephra2 では火口よりも高いところにある点の計算はできない。したがって、ユーザーが与える地点のリストや DEM ファイルの標高は火口よりも高いものについては、それより低くする加工を施す必要がある。

2. 各地点の粒子の量

さて、前節である高さからもたらされたある粒径の粒子の分布中心の座標を求めた。このとき、ある地点の粒子の堆積量 $S(x, y)$ は 2 次元のガウス分布の式を用いて、

$$S(x, y) = \frac{M_{ij}}{\pi\sigma_{ij}^2} \exp\left(-\frac{Ar^2}{\sigma_{ij}^2}\right) \quad (3)$$

と表現される (S の単位は kg/m^2)。なお、 M_{ij} は粒径 i の粒子が高さ j から放出される量 (kg)、 r は分布中心と地点 (x, y) との距離 (m)、 σ_{ij} は粒径 i の粒子が高さ j から放出された時のガウス分布の分散 (m) である。

3. 分散と時間

分散 σ_{ij} は分布の拡がりを表す指標である。先ほどの力士の塩撒きのたとえで言えば、はじめは力士の掌の中に収まっていた塩が土俵で着地するまでに拡がるが、その拡がりの度合いが分散 σ_{ij} で表されるというわけである。その拡がりは落下に要した時間により決定されることは直感的に想像される。また、落下に要する時間が同じでも、たとえば空気の擾乱を非常に受けやすい細かい粒子と、そうでない粒子とでは異なるであろうことが想像される。

さらに、給源の大きさを考える必要がある。給源が力士の掌の場合は給源の大きさは 0 と考えて、そこからの経過時間や粒径により分散が決まる。しかし、噴煙の場合は噴煙柱が給源であるから、給源の大きさは噴煙柱の幅ということになる。

Tephra2 では分散について、粒径の大小、落下に要する時間に加え噴煙柱の幅が考慮されている。分散の基本的な式は粒径の大きい粒子に関しては次のように表される。

$$\sigma_{ij}^2 = 4K(t_{ij} + t_j^*) \quad (4)$$

ここで、 K は拡散係数、 t_{ij} は粒径 i の粒子が高さ j から落下して地表に到達するまでの時間を示す、 t_j^* は噴煙の幅を表現するために導入されている仮想的な時間で、噴煙が幅を持っているために放出時 ($t_{ij}=0$) すでに粒子の分布が拡がりを持っているということを表現している (図 2)。

噴煙の幅は高い噴煙であろうと低い噴煙であろうと、概ね相似であると考えられていて、噴煙の幅 (r_j) と火口からの高さ (h_j) の間には

$$r_j = 0.34h_j \quad (5)$$

の関係があるとされる (Sparks and Wilson, 1982)。

ここで言う噴煙の幅 r_j は目に見える噴煙の幅のことをさす。噴煙は密度や上向き成分の流れの平均速度が中心で一番大きく、中心から離れるほど減少するが、その様子はガウス分布で近似できるとされる。このとき、中心の速度や濃度の $1/e$ になる径が σ である (図 4)。Tephra2 という給源の幅はこの σ と仮定されている。目に見える噴煙の幅は 3σ と見られているので、 σ と高さの関係は、

$$\sigma = \frac{0.34h_j}{3} \quad (6)$$

ということになる。したがって、噴煙の幅を表すために設けられた t_j^* は、式 4 で $t_{ij}=0$ とすれば、

$$t_j^* = \frac{0.0032h_j^2}{K} \quad (7)$$

と導くことができる。

さて、これまでは粗い粒径の粒子の分散の時間変化を見たが、今度は細かい粒子の分散の時間変化を見る。それは、

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{8C}{5}(t_{ij} + t^*)^{2.5} \quad (8)$$

と表される。ここで、 C はみかけ渦拡散係数と呼ばれる

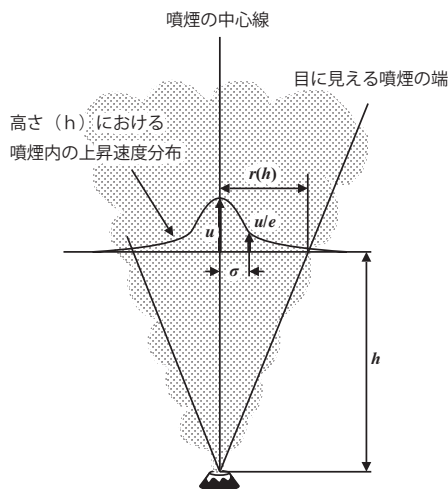


図 4 噴煙の概念図

噴煙の上向き速度は噴煙の中心軸で最大となるガウス分布をしているとするのが標準的な噴煙のモデルである。上向き速度が $1/e$ になる距離を σ と定義し、目に見える噴煙の幅 r が 3σ であるとするのが Tephra2 と噴煙の観測を結ぶ仮定である。

係数で、経験的に $C=0.04\text{m}^2/\text{s}$ という値が採用されている (Suzuki, 1983)。時間 t のべき数が式 4 より増えているが、これは粒子の落下時間が大きくなる時、粒子を輸送する乱流構造が落下時間とともに大きくなるという現象を記述しているためである。ここでも t_j^* はもちろん噴煙の幅を表すために設けられているが、先ほどと同様の操作によって、

$$t_j^* = (0.2h_j^2)^{\frac{2}{5}} \quad (9)$$

と導くことができる。

さて、分散の式は粗粒用の式 4 と細粒用の式 8 の二つが Tephra2 で用意されている。このどちらを取るかは粒径ではなく、落下時間で指定する。それは、式 4 を取るか、式 8 を取るかが落下時間によって支配されているためである。どちらの式を取るかをわかる時間のことを Tephra2 では Fall Time Threshold (FTT) と呼んでいるが、実際に FTT がどのような値を取るのはよくわかっておらず、1 時間 (=3,600 秒) が経験的に用いられている (Bonadonna *et al.*, 2005)

V. 計算の実際

1. Tephra2 の実行

Tephra2 は Linux 環境上で動作をする。したがって、

Linux の特にターミナル (端末) に触ったことがない人には敷居が高い。Linux ではマウスによるグラフィカルな操作も可能であるが、Tephra2 の動作にはコマンドと呼ばれる命令を、ターミナルというコマンドを入力する画面に打ち込む必要がある。これは人に教えてもらうのが一番ではあるが、周りに経験者がいない場合でも、最近は Linux が流行しているのでは本やネットで独習することも難しくはない。

さて、Tephra2 をホームページ (<http://www.cas.usf.edu/~cconnor/vg@usf/tephra.html>) からダウンロードするとすでに実行形式のファイルが /linux_files/tephra2 の下に存在する。これが何らかの理由で使えない場合は、ターミナル上で make と命令をすると、新たにコンパイルが行われて Tephra2 の実行形式ファイルができる。

実行するときはターミナル (端末) から次のように打ち込めばよい。

```
>./tephra2 configfile windfile demfile ◀
```

ここで、斜体で示した 3 つはそれぞれファイルであるが、どういうものかは次節以降で述べる。これらのファイルは tephra2 実行形式ファイルがあるディレクトリの中にある必要がある。上の命令をすると結果がターミナルに出力されてしまう。実行できるかどうかを見るだけならそれでもよいが、出てきた結果はその後解析をしたいのが普通である。その場合、出力はファイルにするとよく、

```
>./tephra2 configfile pointfile windfile>outputfile ◀
```

というように、出力ファイルを指定するために「>outputfile」という指示を命令の末尾に付け加えてやればよい (この「>」は後に続くファイルに出力を流し込みなさいという意味なので、文字通りに打ち込む)。なお、上記の命令文中イタリックで示したファイル名は任意なので、実際に使うファイル名を指定すればよい。

2. 入力ファイル

1) configfile

configfile はダウンロードしたファイル一式の中に、tephra2.conf というファイルがあるからそれを参考にするとよいが、ここでも説明を試みる (図 5)。まず PLUME_HEIGHT であるが、これは噴煙の海面からの高さを m で示したものである。ERUPTION_MASS は噴出量を kg で示したものである。

Tephra2 では噴煙から放出される粒子はガウス分布

```

1 PLUME_HEIGHT 23795↓
2 ERUPTION_MASS 1.08258e+11↓
3 MAX_GRAINSIZE -4.0↓
4 MIN_GRAINSIZE 4.0↓
5 MEDIAN_GRAINSIZE .1↓
6 STD_GRAINSIZE 1.1↓
7 ↓
8 # eddy diff for small particles in m2/s (400 cm2/s)↓
9 EDDY_CONST 0.04↓
10 ↓
11 # diffusion coeff for large particles (m2/s)↓
12 DIFFUSION_COEFFICIENT 142.6↓
13 ↓
14 # threshold for change in diffusion (seconds fall time)↓
15 FALL_TIME_THRESHOLD 188.6↓
16 ↓
17 # density model for the pyroclasts↓
18 LITHIC_DENSITY 2600.0↓
19 PUMICE_DENSITY 1000.0↓
20 ↓
21 #define column integration steps↓
22 COL_STEPS 200↓
23 ↓
24 # Note: 0 = uniform distribution using threshold at PLUME_RATIO, see below↓
25 #       1 = log-normal distribution using beta↓
26 PLUME_MODEL 0↓
27 ↓
28 # specify bottom/top of laterally spreading ash cloud↓
29 PLUME_RATIO 0.1

```

図5 configfile の一例

を持つと仮定されている。ガウス分布の中央と標準偏差はそれぞれ、MEDIAN_GRAINSIZE と STD_GRAINSIZE で表される。また、実際に計算する範囲は、MAX_GRAINSIZE と MIN_GRAINSIZE で定義をする。この MAX と MIN はそれぞれ粒径が大きい方と小さい方の限界である。粒径に関する数字はすべて ϕ スケールで入力をする。

次の3行 (VENT_EASTING, VENT_NORTHING, VENT_ELEVATION) は給源火口の座標である。座標は UTM 直交座標系で指定しなくてはならない。単位は m である。我が国では地形図が地図図法として UTM を用いているが、座標は度分秒で表されていて、一般的な地図からすぐに座標を得ることはできない。しかしあらかじめ「度」で座標のリストを作っておけば、proj4 という無料の変換ソフトを用いて UTM 直交座標系に変換できる (<https://trac.osgeo.org/proj/>)。このとき当該地域の UTM ゾーンをあらかじめ知っておく必要があるが、国内では地形図の端に「座標帯」としてその表示がある。

以下の行、EDDY_CONST は式8の C 、DIFFUSION_COEFFICIENT は式4の K に対応する。FALL_TIME_THRESHOLD もやはり先に説明をした。 K の値は、

100 から 500 くらいの値で計算をさせる。この範囲であれば、結果はほとんど変わらないので神経質にならなくてよい。アイソパックが上手く再現できない場合は、噴煙の傘型領域からの落下が卓越していると考えられる。その場合、 K がおそらく数千とか数万といった値でようやく再現できる。

LITHIC_DENSITY と PUMICE_DENSITY はそれぞれ放出する岩片と軽石粒子の密度を指定するもので単位は kg/m^3 である。Tephra2 のなかでは粒径により岩片と軽石の比率が変化すると仮定されていて、デフォルトでは +7phi よりも小さい粒子はすべて岩片、-1phi よりも大きい粒子はすべて軽石と仮定される。間のサイズでは、軽石と岩片は比例配分され、例えば 0phi の粒子は $2600/8 \times 7 + 1000/8 \times 1$ で $1,200 \text{ kg/m}^3$ の密度を持つとされる (図6)。

この仕様が気に入らない場合がありうる。その場合は LITHIC_DENSITY と PUMICE_DENSITY に同じ値を入力すれば、どの粒径でも粒子は同じ密度を持つことになる。また、config ファイルに LITHIC_DIAMETER_THRESHOLD と PUMICE_DIAMETER_THRESHOLD をという行を新たに設けて指定してやれば、ある粒径できっかりわけたり、あるいは上のような漸移幅を持た

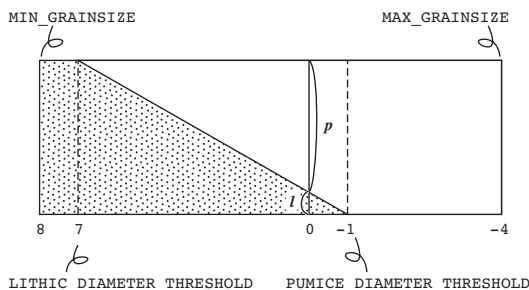


図 6 Tephra2 で用いられる粒子密度の概念図

Tephra2 では LITHIC_DIAMETER_THRESHOLD よりも小さい粒径では全てが岩片, PUMICE_DIAMETER_THRESHOLD より大きい粒径では全てが軽石とされ, それぞれ指定された密度が適用される. 両 threshold の間では, 岩片と軽石はそれぞれ図中 l と p のように比例配分され, 平均の密度がその径の粒子の密度とされる.

せることができる. コードをよく見るとわかるが, コードの中で LITHIC_DIAMETER_THRESHOLD が 7, PUMICE_DIAMETER_THRESHOLD が -1 と指定されているので上のような挙動を示すのである.

次に COL_STEPS であるが, これは噴煙柱の最上部から火口までをいくつのステップにわけて落下時間や移流の量を計算するかという指定である. すなわちこれは先にあげた Δh の大きさを決めるための指定である ($\Delta h = (h_t - h_v) / \text{COL_STEPS}$). Δh が 100m 程度になるよう設定すればよい.

PLUME_MODEL は現在実装されているのは 0 の均質モデルしかないので, これ以外の選択肢はない. Plume model とは粒子を噴煙柱のどこからどれだけ落とすかというものである. 均質モデルとは高さや粒径に関係なく, 噴煙の全長から同じ量だけ粒子が放出されるというものである. 現在開発中なのは, 改良鈴木関数 (Macedonio *et al.*, 2005) や β 関数などを用いて, 高さ方向に放出量のバリエーションを持たせるというものである.

最後の PLUME_RATIO であるが, これは噴煙の下側のいくらかからは粒子の放出がないようにできるためのものである. ある高さ h_b から下は粒子を放出しないと指定する場合, PLUME_RATIO は $(h_b - h_v) / (h_t - h_v)$ と定義される (図 7). つまり, 0 の時は全噴煙から粒子が放出され, 1 の時は放出する区間がなくなる. なお, 粒子の放出は PLUME_RATIO が 1 未満であればいくつに設定しても ERUPTION_MASS で指定した量だけ放出されるが, 1 にしてしまうと放出される区間その

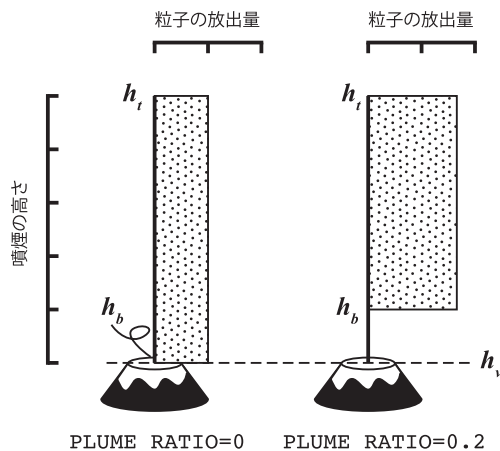


図 7 PLUME_RATIO パラメータの概念図

粒子の放出範囲と放出量を網掛けで示す. 面積として示される放出量は PLUME_RATIO の違いによって変化しないが, 各高さにおける放出量は PLUME_RATIO に従って大きくなる.

ものがなくなるので, 放出量は 0 になる. 噴煙の最上部のみから粒子を放出させたいケースなどで注意が必要な点である.

2) pointfile

pointfile は各点の座標 $x y z$ を羅列したものである (図 8). ここで x は東西方向, y は南北方向の UTM 座標で, z は標高である. それぞれの数値の間は tab またはスペースで区切ればよい. ファイルの文字コード UTF-8, 改行コードは Linux のデフォルトの形式の LF でないと実行できない. Windows や Mac のテキストファイルや Excel ファイルからコピー & ペーストで作成すると, 往々にして文字コードと改行コードの問題で動作しないことがあるので注意が必要である. その場合は一旦これらのコードも制御できるエディタ (Mac OSX の環境であれば, mi など) を利用するのがよい.

標高データについては, 日本国内の場合, 国土地理院のページからダウンロードできる (基盤地図情報 <http://fgd.gsi.go.jp/download/> の数値標高モデル). しかし, グリッドが細かすぎるので間引く必要があるだろう. また全球のものはアメリカ合衆国の国立海洋大気局 (NOAA) から ETOPO1 という 1 秒刻みのものが出ている. こちらもそのままでは細かすぎて, 間引く必要があるだろう. 国土地理院や NOAA の標高データの入手と加工は重要なトピックだが, 誌面の都合上ここでは割愛する.

3) windfile

windfile は標高、風速 (m/s)、風向を羅列したもので、標高が低いものから順に記述する (図 9)。Tephra2 では風向の表現が特殊で、風が向かっている方角を真北を 0 度とする時計回りで表現する点に注意したい。

風のデータは国内であれば、気象庁のホームページから国内に十数ヶ所ある高層気象観測官署の 1988 年以降のデータが Web 上に公開されている。また、University of Wyoming の Department of Atmospheric Science も全世界の高層気象観測データをデータベース化しており無料でダウンロードできる (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)。日本国内についても、こちらの方がカバーする年代が気象庁よりやや長い。より古い噴火の場合は紙ベースの高層気象観測年報が 1947 年以降の観測値をカバーしているのでそれを利用できる。

その他利用できるものとして、NOAA から Reanalysis という 2.5 度刻みの全球グリッドデータが公表されていてダウンロードが可能である。これは当時の観測データを最新の数値予報モデルに入力して大気場を再現したものである。

その他利用できるものとして、NOAA から Reanalysis という 2.5 度刻みの全球グリッドデータが公表されていてダウンロードが可能である。これは当時の観測データを最新の数値予報モデルに入力して大気場を再現したものである。

3. 出力ファイル

1) 出力ファイルとその処理

出力を先に述べたように `>outputfile` のようにファイルに指定すれば、テキスト形式のファイルができるのでこれをエディタで開く。この文書は空白区切りになっているので Excel など表計算ソフトでも開ける (図 10)。

ファイルの内容は pointfile で計算するように指定されたすべての点の座標と堆積量および各粒径区分の重量百分率が羅列されている。逆に言うと、pointfile で計算する点が指定されているということであるから、たとえば野外調査で得られた値と比べたいという場合は、pointfile を野外調査の点とすればよいし、コンターマップを書きたいという場合は対象地域の DEM を与えるといよい。

DEM を与えてコンターマップに出力したい場合は市販の Surfer や ArcGIS などのソフトウェアを利用できる人はそのようにすればよい。しかし、多少取り付きにくいハワイ大学 SOEST で開発されている GMT (Generic Mapping Tools) を用いる方が最終的には便利に思う (図 11)。GMT とは、あらゆる図法の図上に、点をプロットしたり、等高線を引いたり、陰影をつけたりすることができる命令のセットである (Wessel and Smith, 1991)。ユーザーは命令を順にファイルに書いておき、それを実行させる。こういうファイルは形式としてはただのテキストだが、シェルフファイルと呼ばれる。

GMT を実行するのに一番簡単なのは、目標とする図を見つけて、その図を書くときに使ったシェルフファイルをもってきて、その中にあるパラメータを自分用に書き換えていくことである。したがって、GMT に強い友人を一人確保することが喫緊の課題となる。地震学や気象学など地球物理系の 30 代~40 代の研究者はほとんど GMT を使えると思うので、そういう人とは仲良くしておいた方がよい。またそうでなくても、GMT に関しては日本語でもあらゆるページがあるので、そうしたペー

Line	Column 1	Column 2	Column 3
20	350938.84	3846458.46	156.0↓
21	350880.41	3846412.81	180.0↓
22	350938.08	3846411.88	178.0↓
23	350879.67	3846367.34	194.0↓
24	350937.35	3846366.40	204.0↓
25	350878.92	3846320.76	179.0↓
26	350936.59	3846319.82	185.0↓
27	350878.16	3846274.18	174.0↓
28	350935.84	3846273.24	184.0↓
29	350877.43	3846228.71	166.0↓
30	350935.10	3846227.77	171.0↓
31	350876.67	3846182.12	163.0↓
32	350934.35	3846181.19	180.0↓
33	350875.92	3846135.54	165.0↓
34	350933.59	3846134.61	180.0↓
35	350875.18	3846090.07	172.0↓
36	350932.85	3846089.14	181.0↓
37	350874.43	3846043.49	164.0↓
38	350932.10	3846042.56	176.0↓

図 8 pointfile の一例

Line	Column 1	Column 2	Column 3
1	151	2	180↓
2	214	3	199↓
3	313	5	231↓
4	643	7	247↓
5	1100	4	240↓
6	1334	2	234↓
7	1573	1	286↓
8	1688	1	310↓
9	2068	2	39↓
10	2374	8	100↓
11	3059	10	95↓
12	3143	10	99↓
13	3404	11	113↓
14	4097	15	90↓
15	4358	16	97↓
16	5329	5	109↓
17	5749	30	102↓
18	6810	48	85↓
19	7407	51	81↓
20	8229	55	76↓

図 9 windfile の一例

#EAST	NORTH	ELEV	MASS	[-8->-7]	[-7->-6]	[-6->-5]	[-5->-4]	[-4->-3]	[-3->-2]	[-2->-1]	
2	350850	3848200	0	9.33E-03	4.91E-09	2.09E-08	3.52E-08	5.27E-08	1.32E-07	1.14E-06	6.82E-05
3	351050	3848200	0	9.54E-03	2.56E-08	1.14E-07	1.97E-07	2.65E-07	6.12E-07	4.39E-06	1.86E-04
4	351250	3848200	0	9.78E-03	1.21E-07	5.45E-07	9.41E-07	1.17E-06	2.51E-06	1.54E-05	4.72E-04
5	351450	3848200	0	1.00E-02	4.76E-07	2.27E-06	4.01E-06	4.60E-06	9.32E-06	4.88E-05	1.09E-03
6	351650	3848200	0	1.02E-02	1.75E-06	8.36E-06	1.48E-05	1.74E-05	3.28E-05	1.41E-04	2.41E-03
7	351850	3848200	0	1.05E-02	5.55E-06	2.74E-05	4.85E-05	5.56E-05	1.02E-04	3.65E-04	4.68E-03
8	352050	3848200	0	1.07E-02	1.52E-05	8.05E-05	1.51E-04	1.71E-04	2.97E-04	9.02E-04	8.36E-03
9	352250	3848200	0	1.09E-02	3.78E-05	2.11E-04	4.10E-04	4.67E-04	7.83E-04	2.02E-03	1.40E-02
10	352450	3848200	0	1.11E-02	7.93E-05	4.65E-04	9.73E-04	1.16E-03	1.92E-03	4.25E-03	2.17E-02
11	352650	3848200	0	1.14E-02	1.49E-04	9.68E-04	2.12E-03	2.52E-03	4.21E-03	8.54E-03	3.17E-02
12	352850	3848200	0	1.18E-02	2.36E-04	1.68E-03	4.02E-03	5.03E-03	8.42E-03	1.59E-02	4.44E-02
13	353050	3848200	0	1.21E-02	3.39E-04	2.73E-03	7.02E-03	9.60E-03	1.56E-02	2.85E-02	5.85E-02
14	353250	3848200	0	1.23E-02	4.15E-04	3.77E-03	1.04E-02	1.51E-02	2.67E-02	4.83E-02	7.63E-02
15	353450	3848200	0	1.25E-02	4.63E-04	4.79E-03	1.63E-02	2.41E-02	4.29E-02	7.87E-02	9.89E-02
16	353650	3848200	0	1.28E-02	4.48E-04	5.51E-03	2.07E-02	3.54E-02	6.51E-02	1.18E-01	1.30E-01
17	353850	3848200	0	1.28E-02	4.08E-04	5.84E-03	2.53E-02	4.95E-02	9.49E-02	1.78E-01	1.76E-01
18	354050	3848200	0	1.31E-02	3.03E-04	5.07E-03	2.75E-02	6.09E-02	1.24E-01	2.42E-01	2.24E-01

図 10 出力ファイルを Microsoft Excel で開いたところ

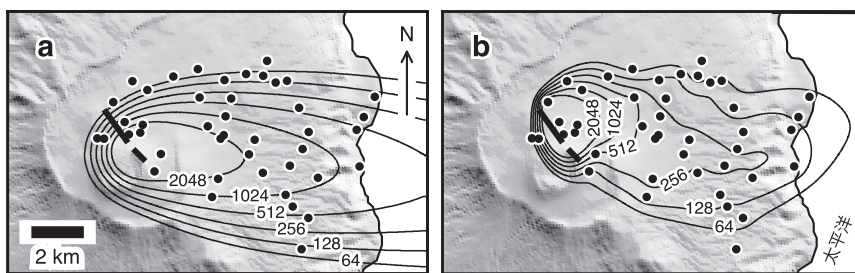


図 11 GMT で伊豆大島 1986 年 B 噴火のアイソパックを作成した例

a は Tephra2 による計算結果. 主なパラメータ: 高さ=9,000 m, 総噴出量と初期粒度分布は Mannen and Ito (2007), 粒子の密度=1,000 kg/m³, $K=500$, $FTT=3,600$. b は実際に各点で測定された堆積量 (Mannen, 2006; Mannen and Ito, 2007) をもとに作図したもの. 両図の黒丸は測定点. コントアの数字は堆積量 (単位は kg/m³). 背景の地形陰影図は国土地理院の国土基盤数値データによる.

ジを参考にできる.

2) node ファイル

さて, 上の出力ファイル以外にも Tephra2 を実行することにより node_ という名前のファイルができて (図 12), node ファイルは研究に利用するような情報を含んでいないが, 計算がどのように行われたかを知る上で重要なので, これの読み方について触れておきたい.

node ファイルでははじめに, 高度と風速, 風向が羅列される. これは実行時に与えた windfile を Tephra2 が読み取って, 一定間隔の標高における風速, 風向を計算した結果が出ている. ここでいう一定間隔とは, 火口の標高と, 噴煙最上部の標高の間を COL_STEPS でわけた間隔である.

風のデータの次は粒度ごとの放出量や分布中心, 落下時間などが記されたリストが出てくる. この読み方を紹介する.

まず Part_Ht とは噴煙の高度, Ash_Diam とはここで対象となっている粒子の粒径をさす (単位はいずれも m). 粒径は最初の行にしか記されておらず, それ以下はゼロが出力されているはずである.

Part-Den はその粒径の密度を示す (単位は kg/m³). これも最初の行にしか記されておらず, それ以下はゼロとなっている. 次は Falltime とあるがこれはその粒径の粒子をその高さで Δh だけ落下するときにかかる時間である (単位は秒). 空気の抵抗が小さくなるから, 同じ粒径でもこの値は高い高度ほど小さくなる.

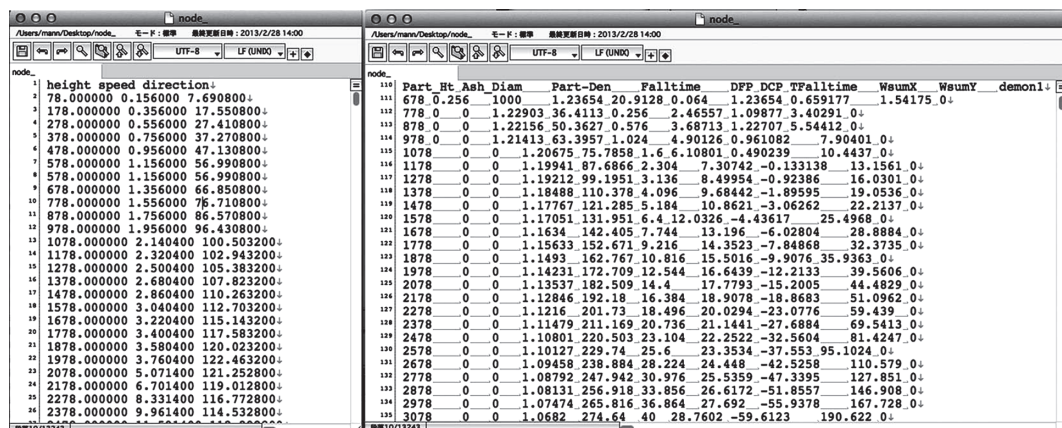


図 12 node ファイルの一例

左図は node ファイル冒頭部の風の計算結果. 右図は粒度ごとの放出量や分布中心, 落下時間などのパラメータを記した部分.

DFP および DCP は噴煙の幅を表現するために導入されている仮想的な時間 t^* であり, DFP は細粒の, DCP は粗粒の粒子のものをさす. DFP と DCP は Diffusion time of Fine/Coarse Particle の略である. ちなみに t^* は Tephra2 関係者の間では「ティープライム」とか「パーティクルディフュージョンタイム」などと呼ばれている.

TFalltime は Total fall time のことで Falltime を低い高度から積算したものである. 粒子をこの高さから落下させた際, 火口の標高に到達するまでの時間を示す.

WsumX および WsumY はその粒径の粒子をその高さから落とした際の火口の標高における分布中心を, 火口を起点とした座標で示している. ここで WsumX は東西軸で東が正, WsumY は南北軸で北が正となっている.

最後の demon とはその径の粒子がその高さ区間から放出される量を示しており, 単位は kg である. PLUME_MODEL が 0 の場合はこの数は高度にかかわらず一定のものとなっているはずだが, PLUME_RATIO が指定されている場合には指定された高度よりも下ですべて 0 となっているはずである.

なお, node ファイルで出力される内容は, コード内で風に関しては W , 各粒子の高度毎のパラメータに関しては T という構造体に格納されたものである. 特に構造体 T は重要なパラメータが格納されているが, そのパラメータがどのようにもたらされたかを知ることが, Tephra2 の計算方法をより深く知る鍵となる. 本稿では誌面の都合上, 実際にどのような計算が行われているか

についてはごく簡単にしか触れられなかった. ここでは, 構造体 T を軸としてコードを読み込んでいくと, 様々な発見があるだろうし, 改造のヒントとなるであろうことを指摘しておきたい.

4. 計算の検証

公開されている Tephra2 は公開前に計算結果が良好かどうかについて検証を行っているが, コードの改造を行ったときにはやはり同様の検証をしてみるのがよいだろう.

検証は 2 つの方法がある. 検証の手段の一つは前節で述べた node ファイルの検討である. もう一つの検証は, 標高が全て同じ (0 や火口の標高などの値) pointfile を与えて, 各点の堆積量 s に pointfile の単位グリッドの面積 $dxdy$ を掛けたものを計算の全領域で積分してやる方法である.

$$S = \sum_{i=0}^{imax} s_i dxdy \tag{10}$$

このとき, S は pointfile 全域に堆積した堆積物の量になるので, pointfile が十分に広ければ S は放出量と等しくならなくてはならない. ただし, 実際には pointfile を十分に広く取ることが難しい場合があるほか, あるいは火口の近くで厚さが急速に変化する場合がある.

pointfile を使った検証では, このようにグリッドを細かく取る一方で計算範囲を広く取る, しかし計算時間は現実的な範囲に抑える, というトレードオフの要求が含まれるため, 計算条件によっては S と放出量との差が 2~3% 程度ずれてしまうのは仕方がないことがある.

さて, ここで注意が必要なのは計算の検証の際に用い

る pointfile は同じ標高値を持っていないということである。その理由は、各地点の堆積量が式3で表されることと関係している。式3では簡単のため、粒径 i と放出高さ j の粒子の分散を単に σ_{ij} と表記している。しかし、Tephra2 のコードでは分散 σ_{ij} が地点の標高によってそれぞれ求められているからである。(式4および式8を参照すると、分散が落下時間 t で決まることわかるが落下時間 t は標高によって異なる)。検証の際、実際の DEM のように標高の値が点によって異なるものを与えた場合は、分散 σ_{ij} の値が同じ粒径の同じ放出高さからの粒子であっても各点で異なってしまうので、これを積分しても放出量に一致しないのである。

実際に Tephra2 を走らせてみると、pointfile に実際の DEM を用いて作成したアイソパックの方が、そうでないものよりも好ましく見えるという経験が、Tephra2 にかかわってきた研究者の間で共有されている。この経験に定量的な裏付けは現時点ではなされていないが、もし正しいとすると、粒子が落下していく際の拡散が、噴出物の厚さ分布に重要な要素を構成していることになる。一方で、拡散の重要性を認めた場合、本節で述べたように質量保存が成り立たなくなる。この矛盾をどう考えればよいか、著者にはアイデアがないが、Tephra2 のような、拡散を連続的に示す移流拡散モデルに共通する問題点であり、留意しておくべき点であろう。

VI. Tephra2 を使った研究—これまでとこれから

1. Tephra2 のインバージョン的利用とその問題

これまで見てきたように、Tephra2 は噴出物の移流拡散を単純化しているとはいえ、合理的にモデル化したコードである。したがって、Tephra2 に初期パラメータを与えて噴出物の分布を求めるというフォワード的な使用方法 (Bonadonna *et al.*, 2005; Scollo *et al.*, 2008a, b) だけでなく、噴出物の分布から逆に初期パラメータを求めるインバージョン的な使用方法に目が向くのは当然の流れである。しかし、噴出物の分布から初期パラメータを求めるという試みはあまりうまくいっていない。

Tephra2 では滑降シンプレックス法を用いたインバージョンにより、噴出量や噴煙の高さを求めるという試みがされており、高さ数 km 程度の小さい噴火では一定の成果を収めているようにも見えるが (Connor and Connor, 2006)、大きい噴火では噴煙の高さに関して精度がほとんどないことや、拡散係数 K が異常に高く求められるということが知られている (Volentik *et al.*, 2010)。

Tephra2 をインバージョン的に用いようとした途端、問題が百出するような現状ではあるが、これは Tephra2 の考える噴煙モデルが、実際の噴煙と異なっていることに起因していると考えられる (Scollo *et al.*, 2008b)。そこで考えるべきなのは、これまで標準的な噴煙モデルと考えられてきた重力流モデルとの比較である。

2. 重力流モデルと Tephra2

Tephra2 は垂直に上昇する噴煙柱から粒子が離脱するというモデルに基づいている。しかし、これまで標準的であった重力流モデルでは、噴煙柱からの粒子離脱は考えない (たとえば Ernst *et al.*, 1996)。それには理由がある。

噴煙柱は、周りの大気を巻き込みながら上昇するが、巻き込み速度は噴煙中心部の上昇速度の 0.1 倍程度とされる (e.g. Sparks, 1986; Suzuki and Koyaguchi, 2010)。この高い巻き込み速度により粒子は噴煙柱内に維持される。たとえ粒子が噴煙から飛び出たとしても、巻き込む風に流されて噴煙に逆戻りをするためである。これを re-entrainment と呼ぶ。この効果により噴煙柱からの離脱は考えられず、粒子の離脱は傘型領域から起きるといのが標準的な重力流モデルである (e.g. Bursik *et al.*, 1992)。

しかし実際にはプリニー式噴火でも火口の近傍で厚い堆積があるので、何らかの理由で粒子が離脱していることは否定できない (e.g. Houghton *et al.*, 2004; Carey *et al.*, 2007; Mannen and Ito, 2007)。また、噴煙が垂直に上昇せず、強い風の影響を受けて上空で曲がる場合は、re-entrainment が十分に起きないので粒子の離脱が進むことが考えられる。

いずれにしても、重力流モデルで噴煙柱から粒子が離脱しないという理論は検証の対象であることは間違いない。こうしたことから、むしろ Tephra2 を使って噴煙柱のどこからどれだけ粒子が離脱しているかを堆積物の分布から逆問題を解いて明らかにするという研究の方針があり得る。噴煙柱のどこからどれだけ粒子が離脱しているかという問題は、Tephra2 で火口近傍の堆積状況をうまく再現できない問題 (Bonadonna *et al.*, 2005) とも関わっていると考えられるので重要である。例として、図 11 に伊豆大島 1986 年 B 噴火の Tephra2 による計算結果と測定結果を示したが、両者はよく一致しているとは言えない。粒子の離脱問題は筆者が最近 2~3 年間取り組んでいる課題であるが、近いうちにその成果をご紹介します。

さて、傘型領域からの落下という重力流モデルの肝の

部分は、Tephra2に盛り込まれていない(図13)。我々はこの点こそが、Tephra2の現時点で最大の問題点であると同時に、今後大幅な改善が期待できる点でもあると考える。先に述べた、Tephra2のインバージョンでは小さい噴火の噴出量と噴煙高度を精度よく決めることに成功したが(Connor and Connor, 2006)、大きな噴火の場合は噴煙高度を決めることがほとんどできなかった(Volentik *et al.*, 2010)。

これは、大きな噴火の場合、噴煙柱より遙かに幅が大きい傘型領域からもたらされるために(図13)、噴煙柱の高さを調節するだけでは堆積物の分布を説明できず、拡散係数を大きく動かす必要があるためである。実際、経験的な方法で36~20 kmの噴煙高度があるエクアドルPululagua火山の2450BP噴火では、インバージョンにより $92,000 \text{ m}^2/\text{s}$ という異常に高い(弱い噴火では普通、数百 $\text{ m}^2/\text{s}$ としたとき良好な結果を得られる)値を得ている。

むしろこの「見かけ上」の拡散係数が傘型領域の幅を示しているとすれば、傘型領域の幅は噴煙高度に比例するので、噴煙高度を推定する手段として使える可能性がある。Tephra2での傘型領域の表現方法については筆者が研究を進めているが(萬年ほか, 2011; Mannen *et al.*, 2011)、再現された傘型領域のパラメータから噴煙高度を求めるスキームについては今後の課題である。

Tephra2と重力流モデルの統合に向けては、理論的な研究もさることながら、よく観察された噴火について、その噴煙の高さなど噴煙パラメータ、気象データを入力とし、計算結果と実際に地表で得られた層厚や粒度分析の結果と照らし合わせる作業が不可欠である。しかしこうした研究例は少なく、たくさんの研究者の参入が

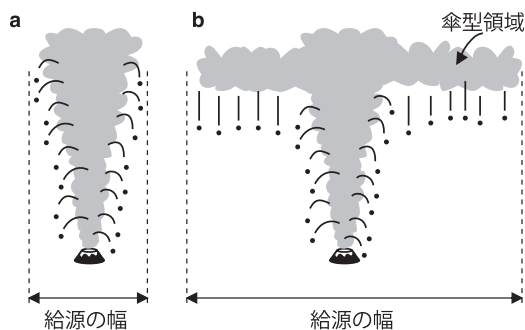


図13 粒子の落下が噴煙柱だけから起こるモデルaと、傘型領域からも起こるモデルb
傘型領域から粒子の落下があると、粒子の給源の幅が非常に大きくなる。

期待される。

VII. まとめ

降下火山灰シミュレーションコードTephra2について、そのよって立つ移流拡散モデルの解説、Tephra2の歴史、実行方法、現状と今後の課題について簡単に紹介した。

Tephra2の特徴は、給源が鉛直に延びる噴煙柱であること、また給源は線ではなく幅を持っていること、標高の効果を入れることができること、風の向きや強さの鉛直方向の変化は与えられるものの、これらの水平方向の変化は考えていないこと、拡散は水平方向のみを仮定していること、標高の効果を入れたときに質量保存がされていない、などの特徴がある。

コードを実行するためには、噴煙のパラメータを記述するconfigファイル、堆積量を求める点を与えるpointファイル(DEM)、風の条件を与えるwindファイルを用意する必要がある。本論ではこれらの作成方法について記述した。

計算結果はSurferなどの市販の3次元描画や等値線作成が可能なソフトウェアや、GMTを用いて図化できる。また、計算と同時に生成されるnodeファイルを読むことにより、計算がどのように実施されたかを詳しく知ることができる。

Tephra2は噴煙のパラメータを与えて、降下火山灰堆積物の分布を計算するフォワード的な利用法に加えて、インバージョン的な利用法も模索されてきたが、必ずしもうまくいっていない。噴煙からの粒子離脱様式や、噴煙の形状に関して、Tephra2が想定するモデルが現実の噴煙と異なっていることが、その原因として疑われる。そこで本論では、噴煙の標準的なモデルである重力流モデルとTephra2の仮定するモデルを比較し、Tephra2の改良や今後の利用法の方針についても示した。

謝辞 University of South FloridaのCharles B. Connor教授、Laura Connor博士、Université de GenèveのCostanza Bonadonna教授に、Tephra2の開発を進め広く共有されてきたことに感謝をしたい。特にConnor教授には筆者がUniversity of South Floridaに滞在中、何度も議論する機会を設けて頂き、Tephra2の詳しい内容を理解するのを助けて頂いた。また、滞在中、同大のインストラクターであるJudy McIlrath氏には生活面で多大なご支援を頂いたことに謝意を表したい。筆者

の米国滞在は、日本学術振興会の優秀若手研究者海外派遣事業の支援による。同会に感謝を申し上げる。

本稿により、Tephra2に興味を持ち、実際に使ってみるという研究者が少しでも増えれば大変嬉しい。移流拡散による降下火山灰のモデリングは本稿で述べたとおり、日本の鈴木建夫博士の研究が起点となっている。膨大な火山灰に関する蓄積情報を元に、この分野の研究が日本において新たな展開を見ることを期待したい。

引用文献

- Bonadonna, C., Connor, C.B., Houghton, B.F., Connor, L., Byrne, M., Laing, A. and Hincks, T. (2005) Probabilistic modeling of tephra dispersion : hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 110, B03203.
- Bursik, M.I., Sparks, R.S.J., Gilbert, J.S. and Carey, S.N. (1992) Sedimentation of tephra by volcanic plumes : I. Theory and its comparison with a study of the Fogo A plinian deposit, Sao Miguel (Azores). *Bulletin of Volcanology*, 54, 329-344.
- Carey, R.J., Houghton, B.F., Sable, J.E. and Wilson, C.J.N. (2007) Contrasting grain size and componentry in complex proximal deposits of the 1886 Tarawera basaltic Plinian eruption. *Bulletin of Volcanology*, 69, 903-926.
- Connor, L.J. and Connor, C.B. (2006) Inversion is the key to dispersion : Understanding eruption dynamics by inverting tephra fallout. Mader, H.M., Coles, S.G., Connor, C.B. and Connor, L.J. (eds.) *Statistics in Volcanology*, Special Publications of IAVCEI 1 : 231-242, Geological Society, London.
- Connor, C.B., Hill, B.E., Winfrey, B., Franklin, N.M. and LaFemina, P.C. (2001) Estimation of volcanic hazards from tephra fallout. *Natural Hazards Review*, 2, 33-42.
- Ernst, G.G.J., Sparks, R.S.J., Carey, S.N. and Bursik, M.I. (1996) Sedimentation from turbulent jets and plume. *Journal of Geophysical Research*, 101B, 5575-5589.
- Houghton, B.F., Wilson, C.J.N., Fierstein, J. and Hildreth, W. (2004) Complex proximal deposition during the Plinian eruptions of 1912 at Novarupta, Alaska. *Bulletin of Volcanology*, 66, 95-133.
- Macedonio, G., Costa, A. and Longo, A. (2005) A computer model for volcanic ash fallout and assessment of subsequent hazard. *Computers & Geosciences*, 31, 837-845.
- Mannen, K. (2006) Total grain size distribution of a mafic subplinian tephra, TB-2, from the 1986 Izu-Oshima eruption, Japan : An estimation based on a theoretical model of tephra dispersal. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 155, 1-17.
- Mannen, K. and Ito, T. (2007) Formation of scoria cone during explosive eruption at Izu-Oshima volcano, Japan. *Geophysical Research Letters*, 34, L18302.
- 萬年一剛・ローラ コナー・チャールズ コナー (2011) Tephra2 の改良と伊豆大島 1986 年噴火への適用. 日本地球惑星科学連合 2011 年度連合大会, SVC047-03.
- Mannen, K., Connor, L., Connor, C., Courtland, L., Volentik, A., Koyaguchi, T., Magill, C. and Bonadonna, C. (2011) Modifying Tephra2 to better describe a horizontally spreading umbrella cloud. *IUGG 2011 Abstract*, V09, 158.
- Pfeiffer, T., Costa, A. and Macedonio, G. (2005) A model for the numerical simulation of tephra fall deposit. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140, 273-294.
- Scollo, S., Del Carlo, P. and Coltelli, M. (2007) Tephra fallout of 2001 Etna flank eruption : Analysis of the deposit and plume dispersion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 160, 147-164.
- Scollo, S., Folch, A. and Costa, A. (2008a) A parametric and comparative study of different tephra fallout models. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 199-211.
- Scollo, S., Tarantola, S., Bonadonna, C., Coltelli, M. and Saltelli, A. (2008b) Sensitivity analysis and uncertainty estimation for tephra dispersal models. *Journal of Geophysical Research*, 113, B06202.
- Sparks, R.S.J. (1986) The dimensions and dynamics of volcanic eruption columns. *Bulletin of Volcanology*, 48, 3-15.
- Sparks, R.S.J. and Wilson, L. (1982) Explosive volcanic eruptions - V. Observations of plume dynamics

- during the 1979 Soufrière eruption, St Vincent. *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 69, 551–570.
- Suzuki, T. (1983) A theoretical model for dispersion of tephra. Shimozuru, D. and Yokoyama, I. (eds.) *Arc Volcanism : Physics and Tectonics* : 95–116, Terra Scientific Publishing.
- Suzuki, Y.J. and Koyaguchi, T. (2010) Numerical determination of the efficiency of entrainment in volcanic eruption columns. *Geophysical Research Letters*, 37, L05302.
- Tanaka, H.L. (1994) Development of a prediction scheme for volcanic ash fall from Redoubt volcano, Alaska. *Proceeding of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety*, US Geological Survey Bulletin, 2047, 283–291.
- Volentik, A.C.M., Bonadonna, C., Connor, C.B., Connor, L.J. and Rosi, M. (2010) Modeling tephra dispersal in absence of wind : Insights from the climactic phase of the 2450 BP Plinian eruption of Pululagua volcano (Ecuador). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 193, 117–136.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. (1991) Free software helps map and display data. *EOS Transaction*, 72, 441.
- Woods, A.W. (1988) The fluid dynamics and thermo dynamics of eruption column. *Bulletin of Volcanology*, 50, 169–193.

Theoretical background and recent progress of the pyroclastic fall simulation code Tephra2 : essence for application in Quaternary research

Kazutaka Mannen*

Ancient tephra fall units are important for Quaternary research, but most of the units have been only utilized as key beds and few attempts have been taken to quantitate eruption parameters such as erupted mass or column height, which are also important to obtain secular change of volcanic activity. Tephra2 is a code to simulate deposit distributions caused by pyroclastic eruptions (Connor *et al.*, 2001 ; Bonadonna *et al.*, 2005). The code, which is based on an advection-diffusion model, has a potential to reconstruct

ancient eruptions from limited deposit data. In this article, the theoretical background and recent progress in research using the code are reviewed. The author also compares the source column models of Tephra2 and the gravity current model (*e.g.* Bursik *et al.*, 1992). Based on the discussion, the author proposes that introduction of umbrella fallout to the code and analyses for vertical variation of particle release are keys to improve the simulation result.

Keywords : Tephra2, eruption column, pyroclastic eruption, umbrella cloud, isopach map, advection-diffusion model, gravity current model

* Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture. 586 Iriuda, Odawara, Kanagawa, 250-0031, Japan.
E-mail : mannen@onken.odawara.kanagawa.jp