

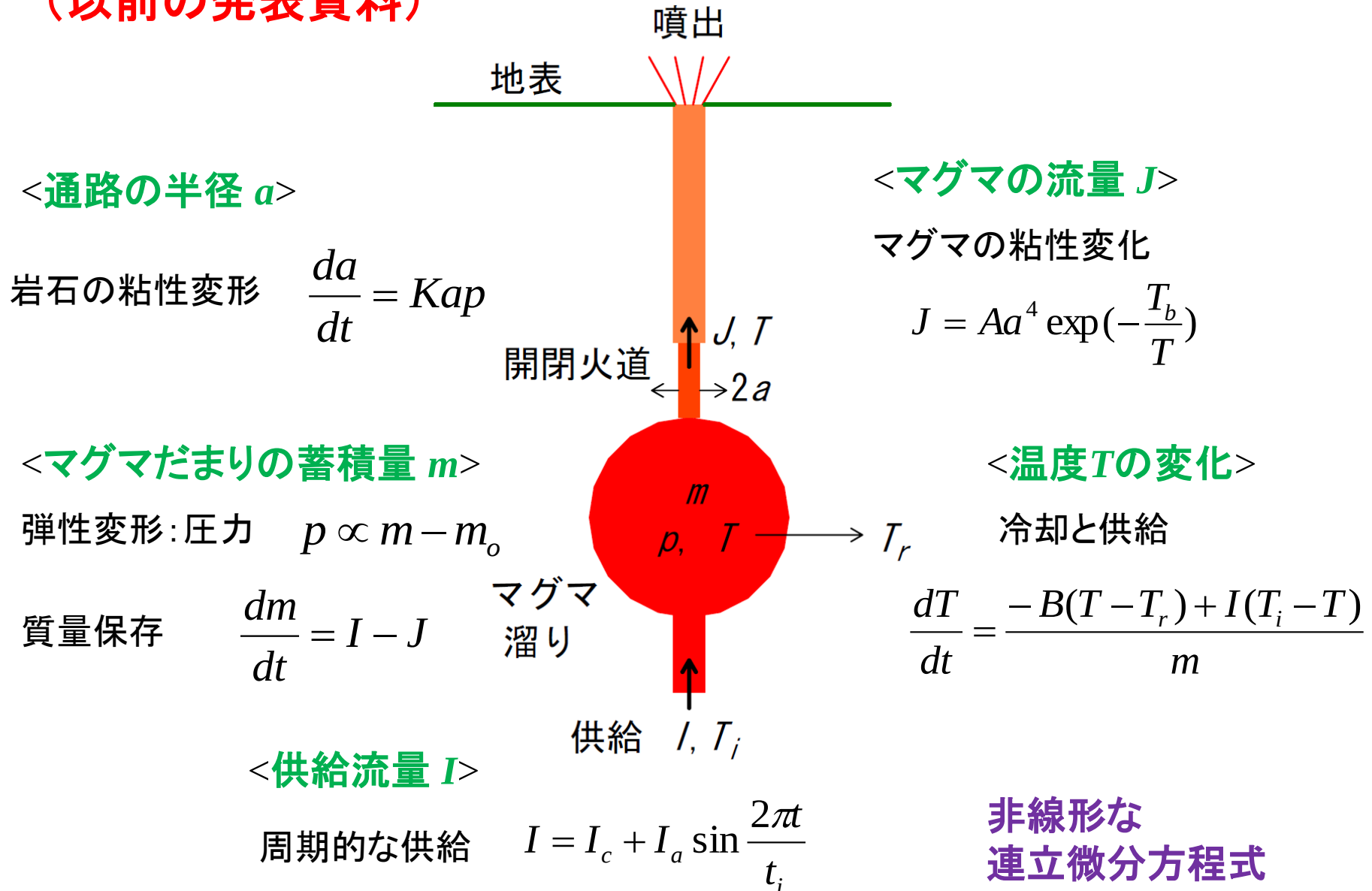
マグマ上昇過程の推移： 定常火道モデルの連結による表現

井田喜明（アドバンスソフト株式会社）

マグマ供給系と定常火道モデルを結合して、マグマの上昇から噴火に至る過程をモデル化し、噴火の発生や反復を準定常的に追跡する

噴火発生モデル (以前の発表資料)

Ida, GRL, 23, 1457-1460, 1996
に温度の効果を考慮



周期的な供給に対する噴出の変動

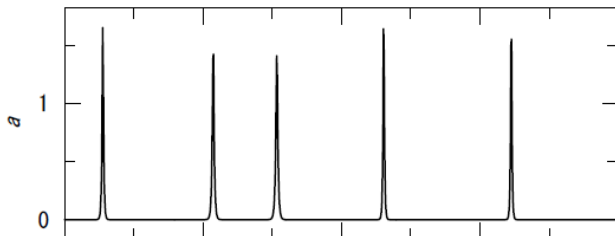
解析例B03a Ti=1300

供給の周期500、固有周期215

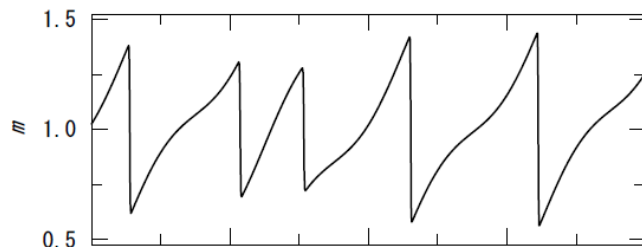
各変数の時間変化(部分)

K = 1.00e+000 A = 5.00e+000 B = 1.00e-001

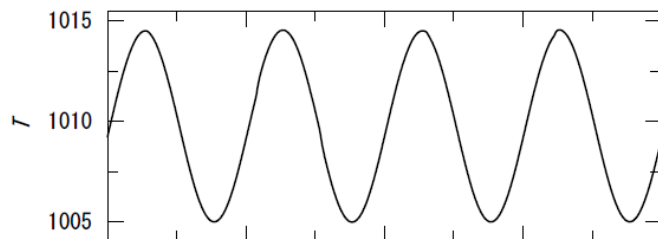
開閉通路
の半径



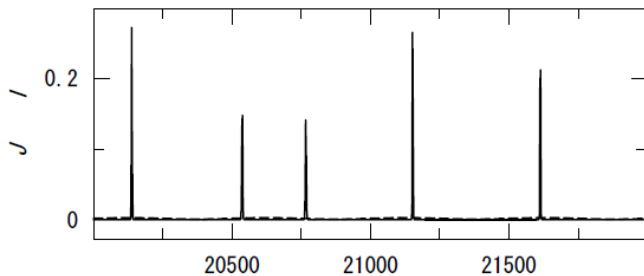
蓄積量
 $\propto$ 圧力



温度



供給率
噴出率

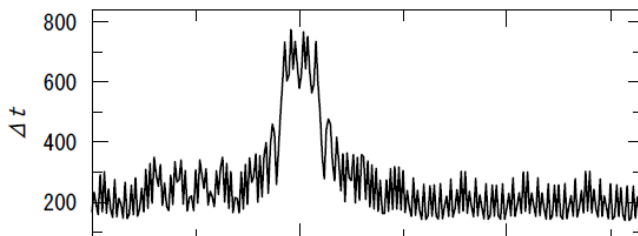


時間
 t

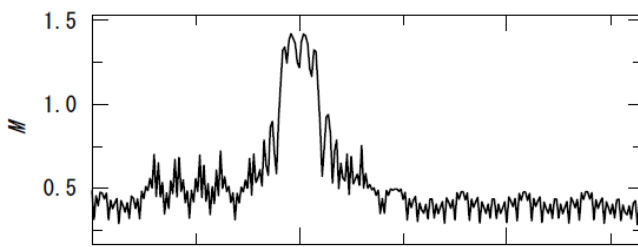
噴火毎の変数の変化

K = 1.00e+000 A = 5.00e+000 B = 1.00e-001

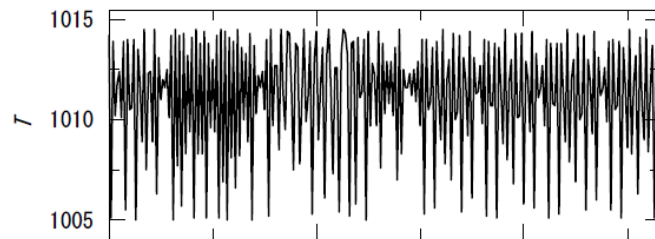
噴火間隔



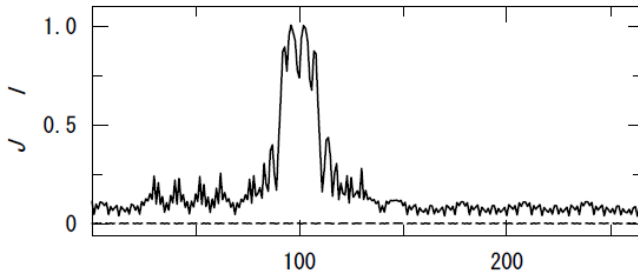
噴出量



温度



供給率
噴出率



噴火順序

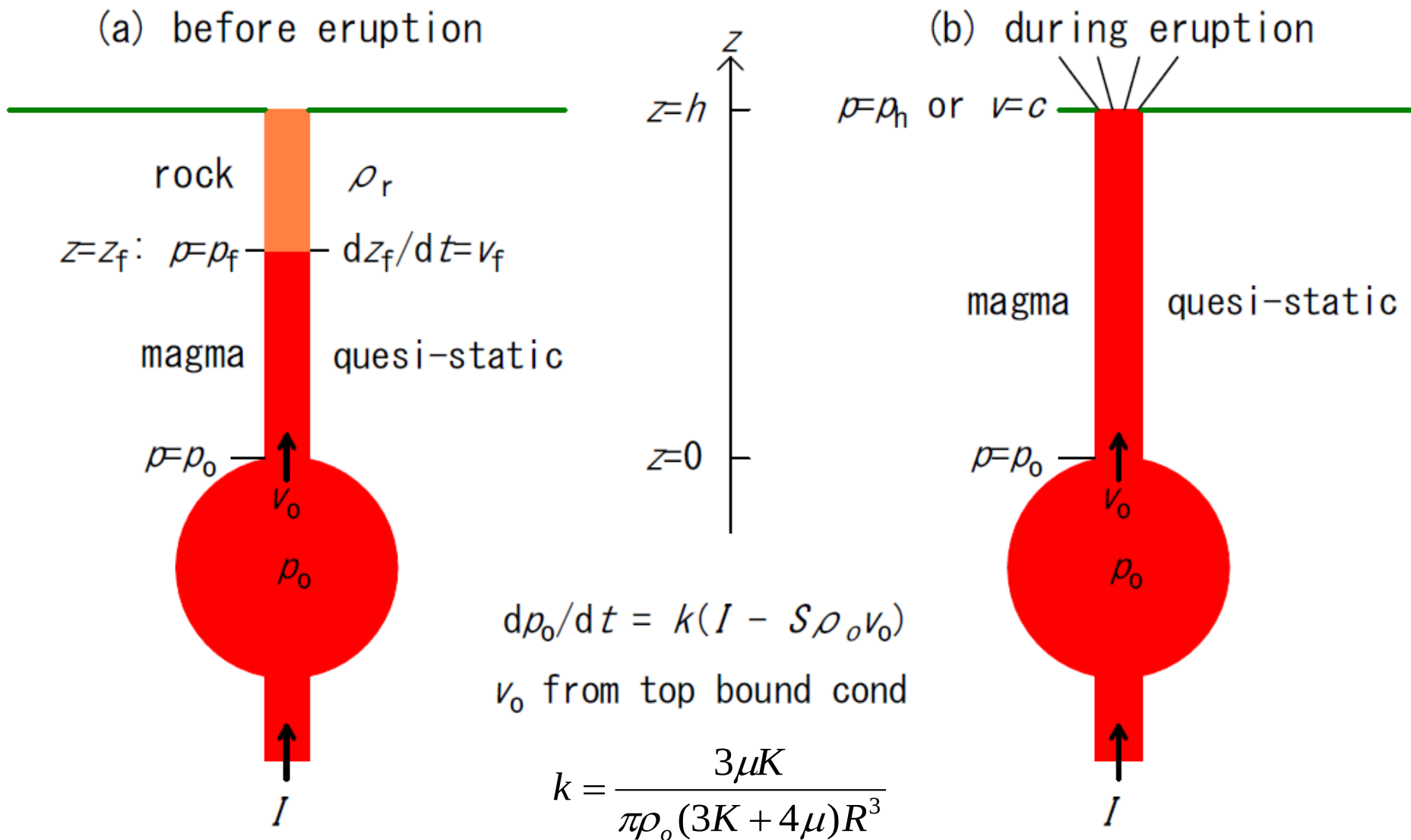
eruption sequences

今回考察するモデル

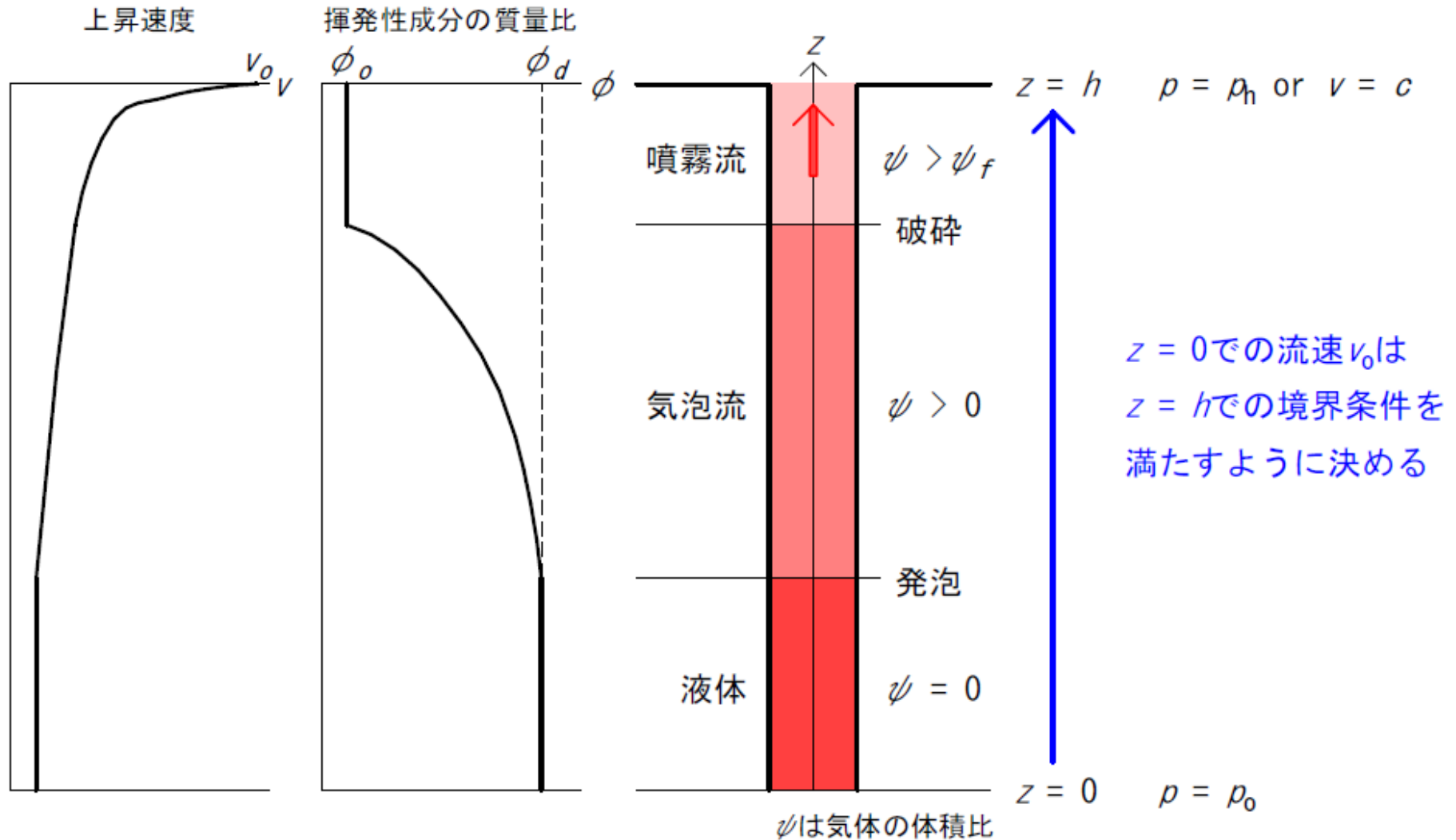
- マグマ供給系とマグマの上昇を記述する火道モデルを結合する
- 火道モデルは定常として、マグマの上昇から噴火の発生への推移を準定常的に追跡する
- 噴火の発生前は火道は一定な密度の物質で埋められるとして、マグマ上端の圧力を決める
- 1回の噴火の推移を考慮して、噴火が反復する条件を考える
- 火道への供給路の開閉はまだ考えない

噴火の時間依存性の解析

マグマの注入と放出に対応して、
 マグマだまりの圧力が弾性的に変化
 火道流は**準定常的**に状態を推移



火道流の計算



マグマだまりの圧力 p_0 は火道流下部の圧力と一致させる。
 火道流への流入速度 v_0 は、火道流上部の境界条件に適合するように決める。
 ?

噴火の解析に定常火道モデル

計算式: 温度効果、液体マグマと揮発性成分の相対運動を無視

質量保存則 ○ $\frac{d}{dz}(\rho v) = -J_g$ (全体) v は流速
○ $J_m = \frac{\rho v}{1 + \phi} = \text{一定}$ (液体マグマ) ϕ は揮発性成分の質量比
 ψ は気体の体積分率

密度 $\rho = (1 - \psi)\rho_m + \psi\rho_g$

気体の体積分率 $\psi = \frac{q}{1 + q}$ $q = \frac{(\phi - \phi_d)\rho_m}{\rho_g}$ ($\phi > \phi_d$) $\phi_d = \left(\frac{p}{p_d}\right)^\gamma$ (溶解度)

状態方程式 $\rho_m = \rho_o \left(1 + \frac{p}{K}\right)$ (液体マグマ) $\rho_g = \frac{p}{RT}$ (気体)

脱ガス率 (気泡流領域) $J_g = \frac{k_g \rho_g v}{\psi} \left(\frac{\psi - \psi_p}{1 - \psi_p}\right)^n \frac{\partial \psi}{\partial z}$ $k_g = \frac{4\pi\eta_m}{\eta_g S}$ (鉛直流速差による浸透流)

運動量保存則 ○ $\frac{d}{dz}(\rho v^2) = -\left(\frac{dp}{dz} + g\rho + f\right)$

摩擦力 $f = c_b v$ (気泡流; $\psi > \psi_f$) $f = c_g \rho v^2$ (噴霧流)

火道流の計算式

保存則、状態方程式を整理すると

$$\frac{d\rho}{dz} = \left[(1-\psi) \frac{d\rho_m}{dp} + \psi \frac{d\rho_g}{dp} - \frac{A(\rho_m - \rho_g)}{(1+q)^2} \right] \frac{dp}{dz}$$

$$\frac{dv}{dz} = -\frac{1}{J_m(1+\phi)} \left[(1-Dv^2) \frac{dp}{dz} + g\rho + f \right]$$

$$\frac{dp}{dz} = \frac{\rho(g\rho + f)}{J_m(1+\phi)E}$$

これを z で積分して変数の空間分布を求める

噴霧流の条件では

$$E = \frac{v^2 - c^2}{c^2 v}$$

z に関する積分は**流速 v** が**音速 c** に達するとできなくなる

定数の値

マグマだまりの弾性

$$\frac{dp_0}{dt} = k_s \left(\frac{I}{S\rho_o} - v_o \right) \quad k_s = 10^3 \text{ Pa/m}$$

火道中のマグマ

マグマの弾性 $\rho_o = 2300 \text{ kg/m}^3 \quad K = 10^{10} \text{ Pa} \quad RT = 6 \times 10^5 \text{ J/kg}$

ガスの溶解度 $\phi_d = \left(\frac{p}{p_d} \right)^\gamma \quad p_d = 6 \times 10^{10} \text{ Pa} \quad \gamma = 1/2$

破砕条件: $\psi > \psi_f \quad \psi_f = 0.75$

摩擦力: 気泡流 $f = c_b v \quad c_b = 1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$

噴霧流 $f = c_g \rho v^2 \quad c_g = 0.01 / \text{m}$

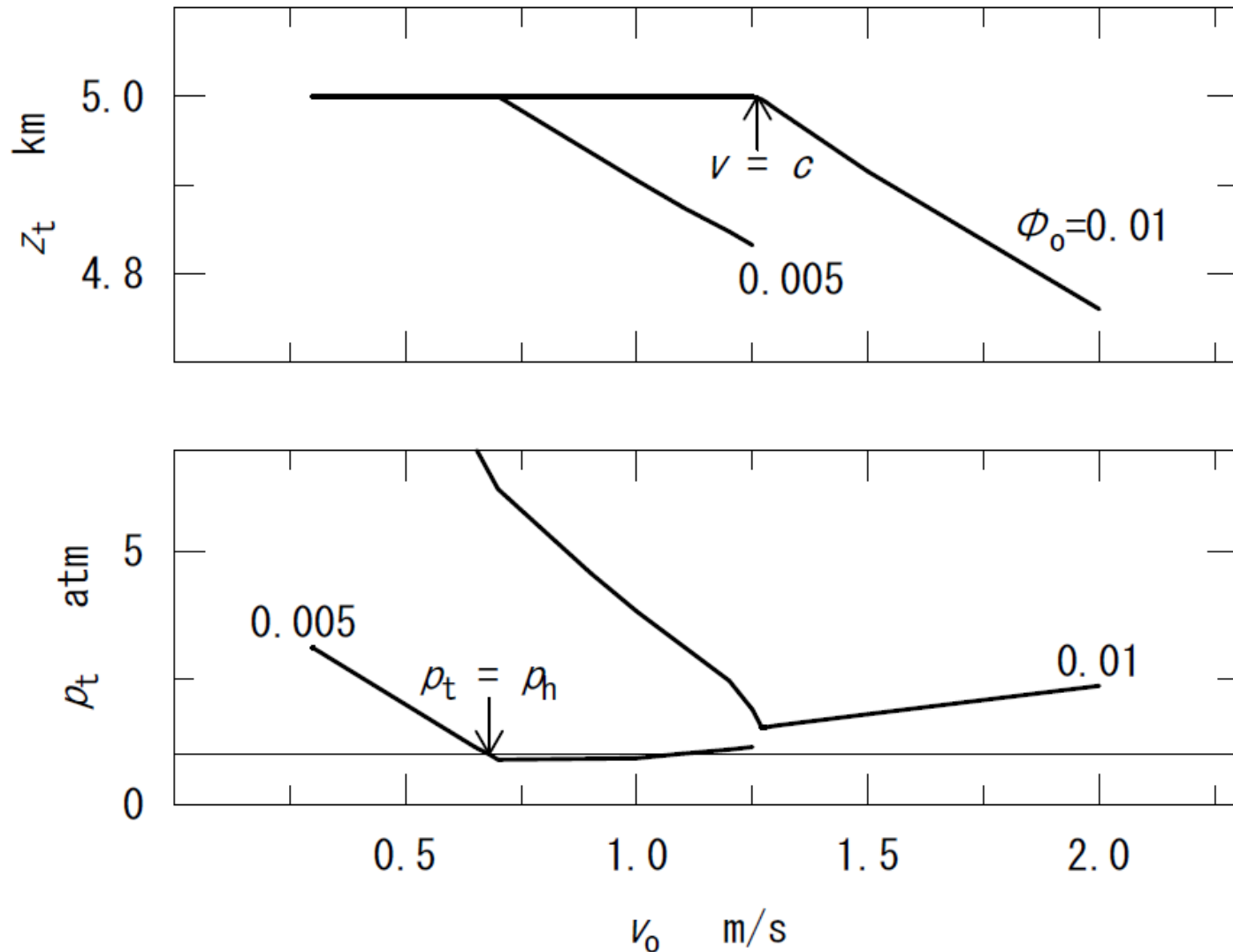
脱ガス率 $J_g = k_g v \left(\frac{\psi - \psi_p}{1 - \psi_p} \right)^n \quad k_g = 10 \quad \psi_p = 0 \quad n = 3$

火道上部の荷重を決める密度

$$\rho_r = 2200 \text{ kg/m}^3$$

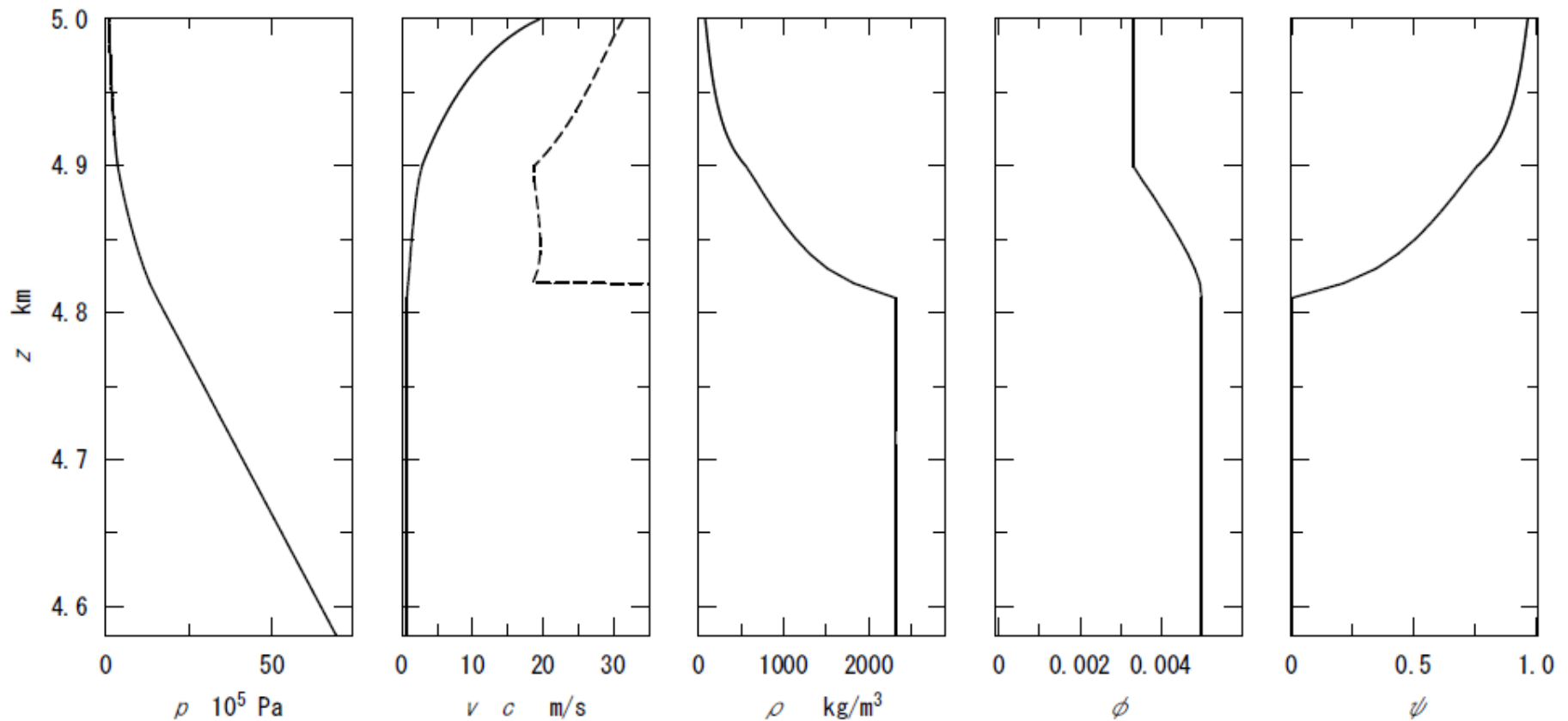
火道流の境界条件を満たす方法

深さ5kmで圧力を $1.145 \times 10^9 \text{ Pa}$ に固定し、速度を可変にして地表の圧力を見る
圧力条件と音速条件を満たす例として、揮発性成分量 $\phi_0 = 0.005$ と 0.01 を選択



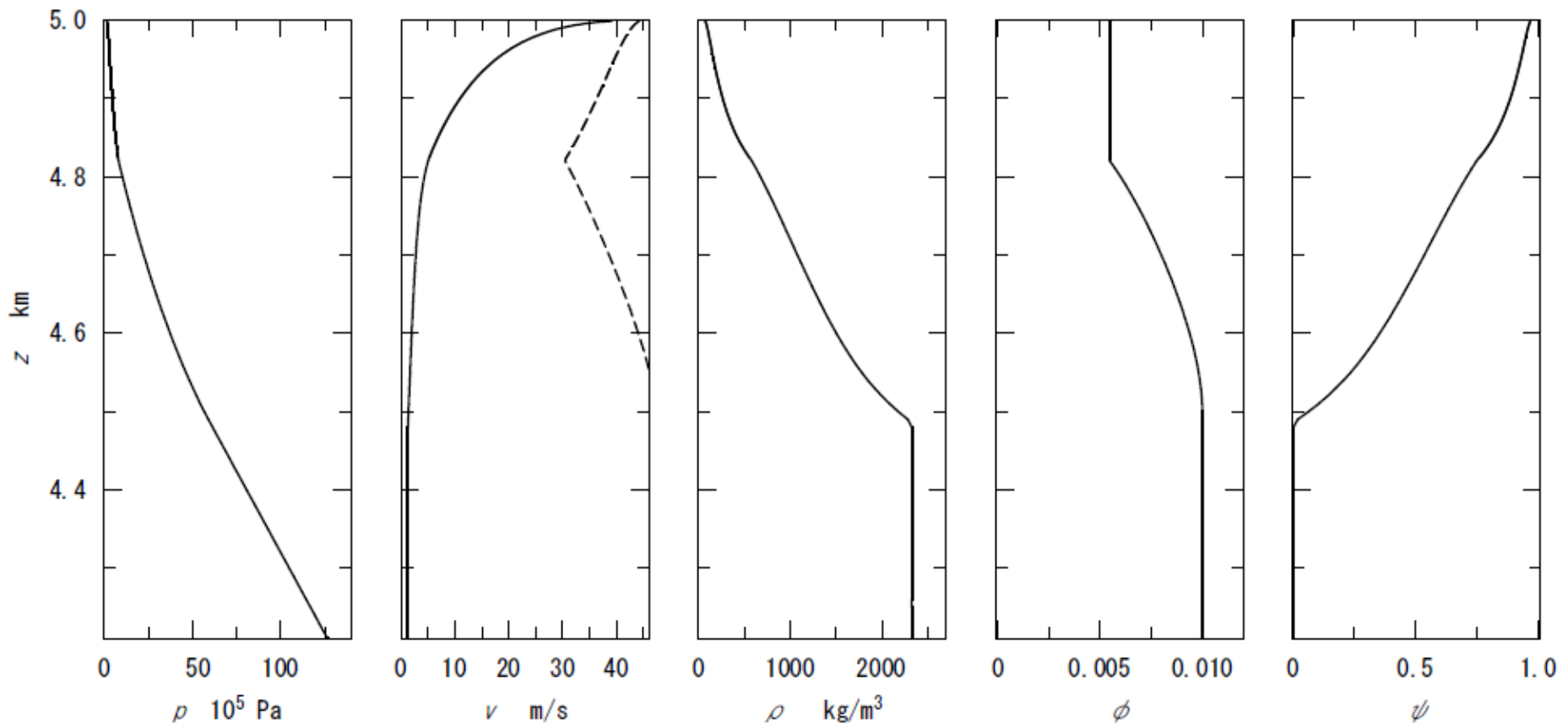
下端の流速が圧力条件から求まる場合

火道流計算をくりかえして、火道下端の流速の初期値から
上端の圧力を満たす解を探す（基本的にはニュートン法）



下端の流速が音速条件から求まる場合

火道流の上端が地表で流速が音速に一致する解を探す
上端の変数の値は直下の亜音速の領域から外挿



時間変化の追跡例

火道に流入するマグマ

$$p_o = 720 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Phi_o = 0.0014 \quad \text{at } t = 0$$

火道下端の深さは 3 km

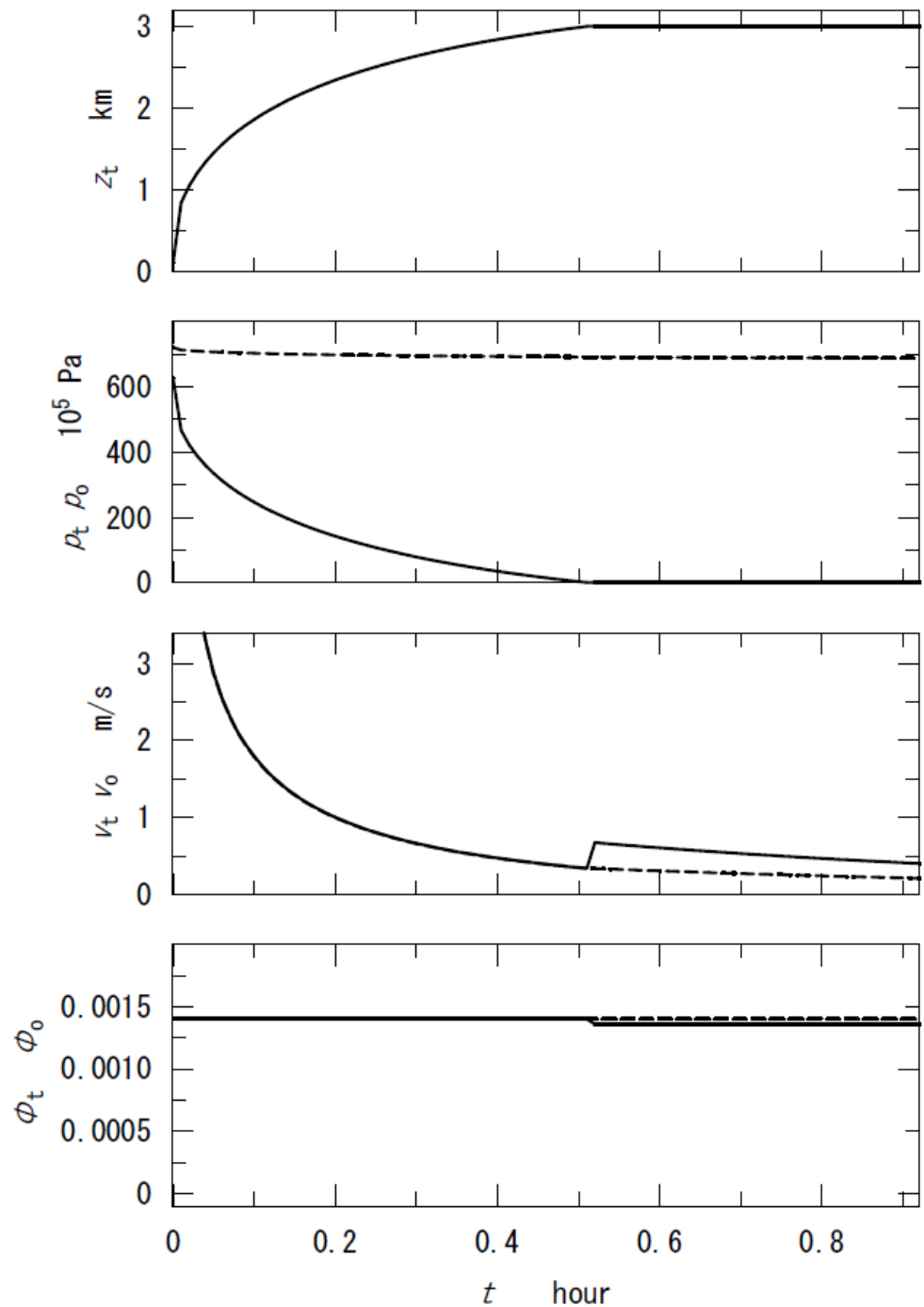
マグマだまりへの供給

$$I/S\rho_o = 10^{-4} \text{ m/s} \quad \text{一定値}$$

噴出流量は

噴出開始直後が大きく

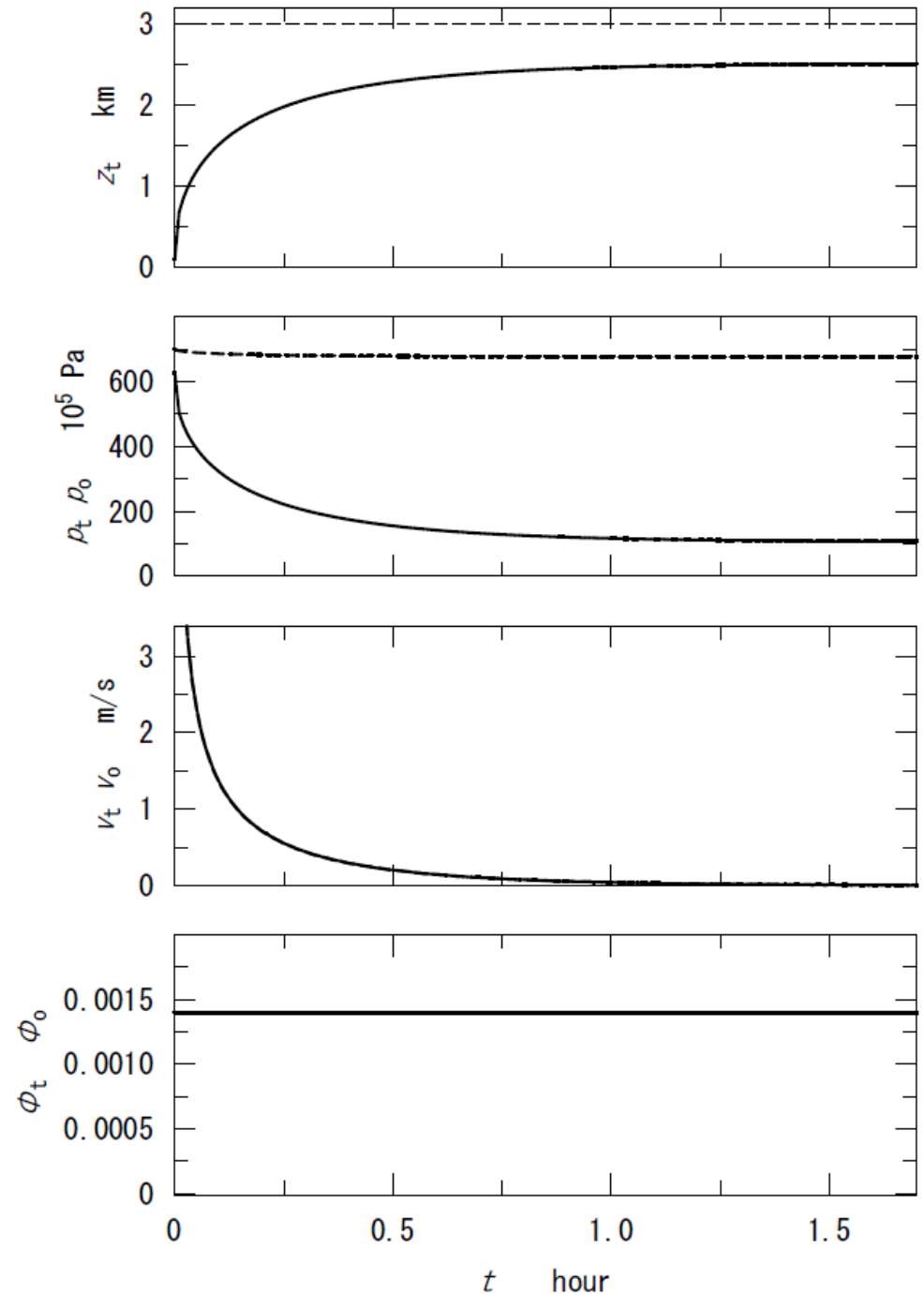
その後減少



噴火未遂の事例

$$p_o = 700 \cdot 10^5 \text{Pa}$$
$$\Phi_o = 0.0014 \quad \text{at} \quad t = 0$$

低い初期圧力から上昇が始まると、地表に達する前に上昇が止まる



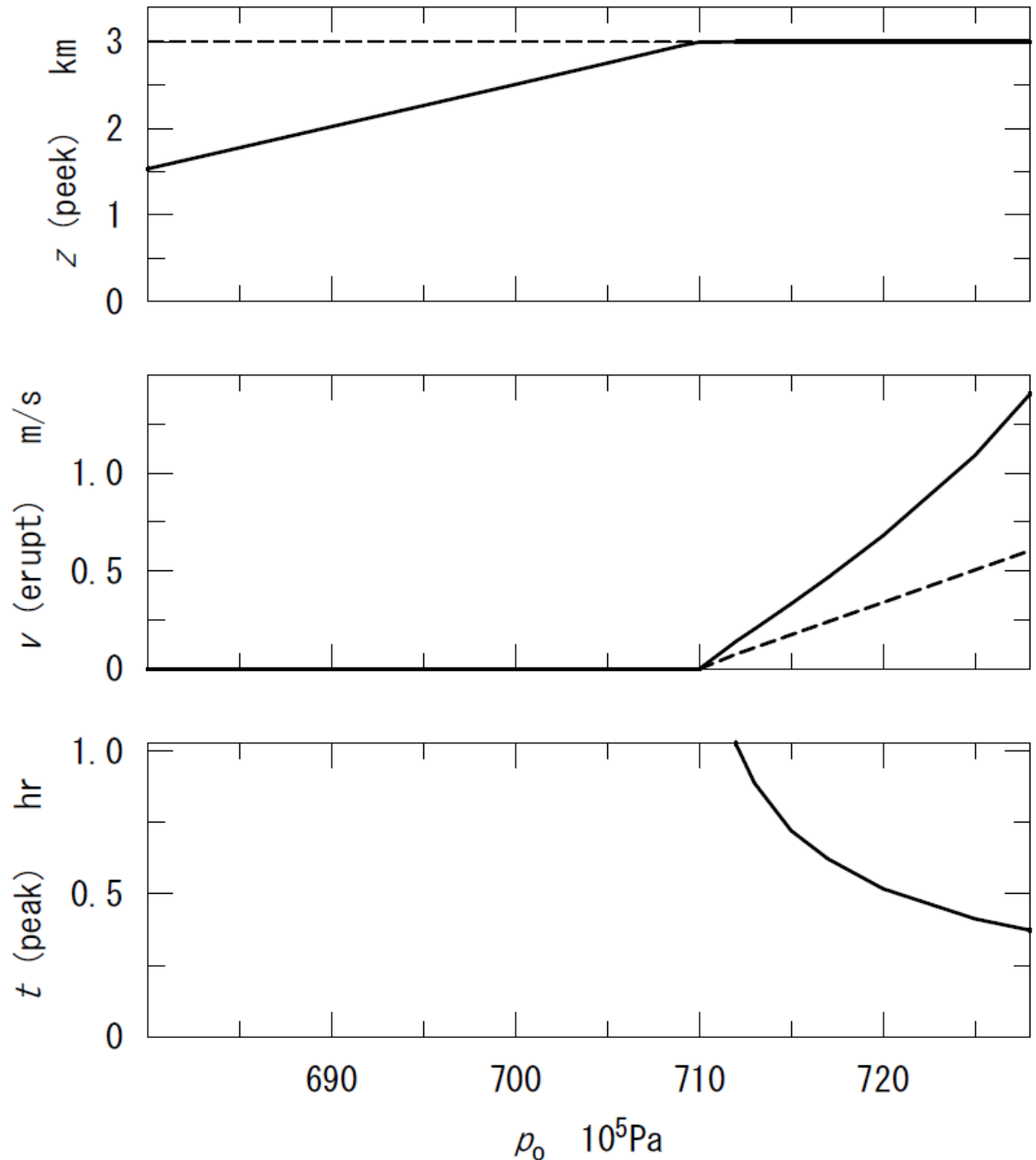
最高高度と初期圧力の関係

$\Phi_0 = 0.0014$ の場合

火道**下端の初期圧力** p_0
の効果

初期圧力の増加につれて
火道流の**最高高度**が
高まり、地表に脱する

初期圧力とともに
噴出速度は増加し
開始時間が早くなる



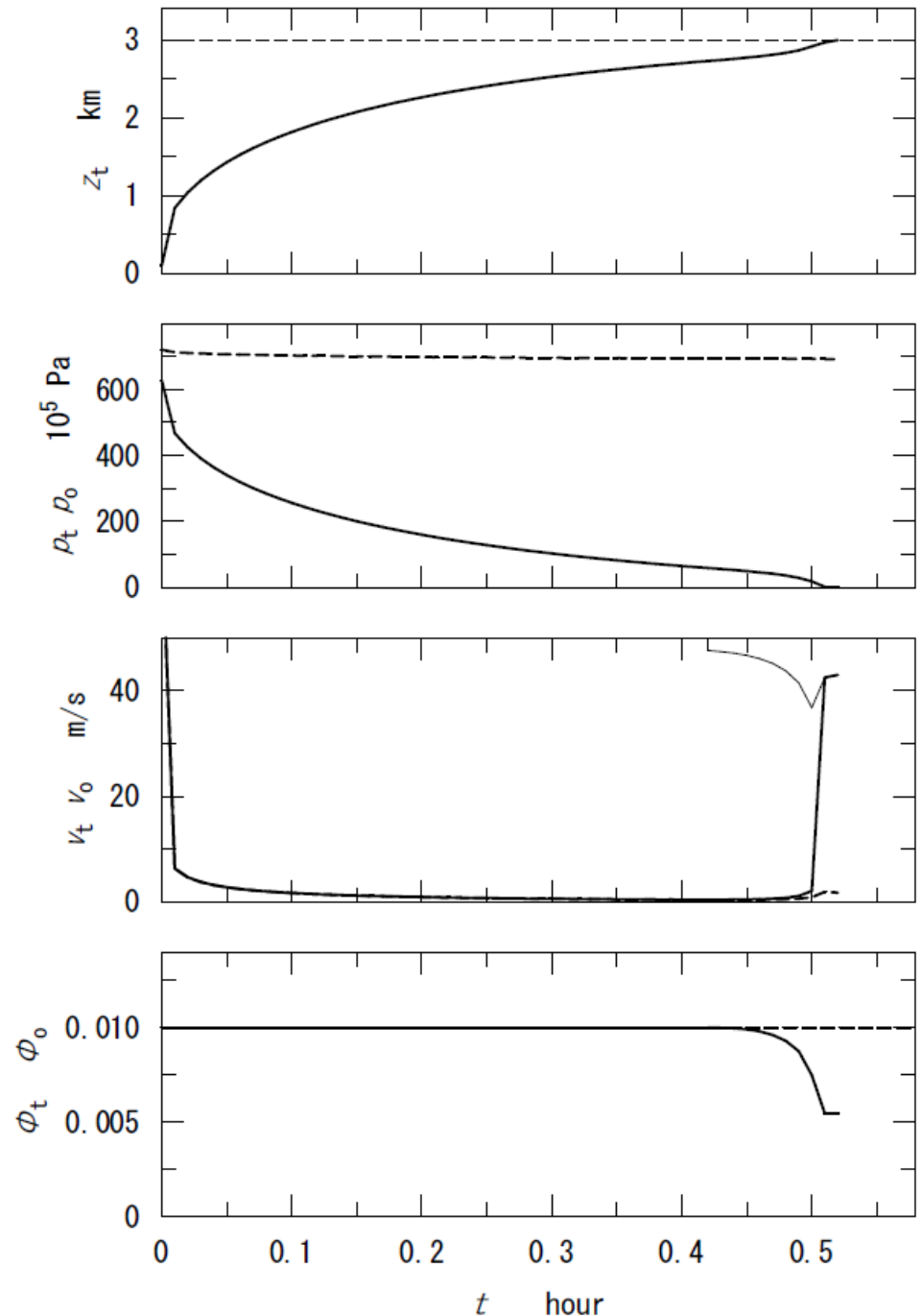
揮発性成分量が多い場合

$\Phi_0 = 0.01$ の場合

噴出直前に上昇は加速

火道流最上部が噴霧流になり、音速条件に移行

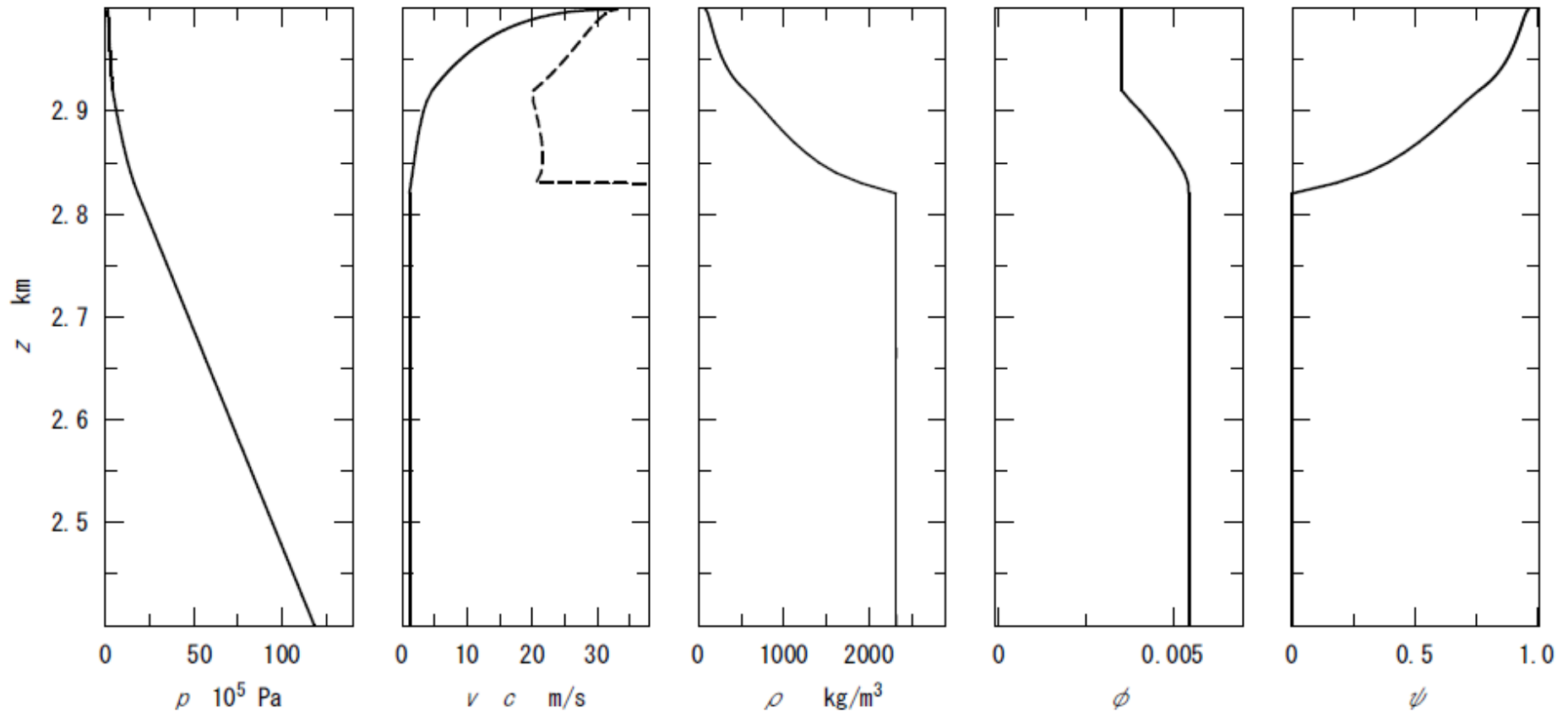
その時刻で追跡できなくなる
>> 追跡方法の改善が必要



揮発性成分量が多い場合(続き)

$\Phi_0 = 0.01$ の場合

追跡の最終段階での火道流の状態
火道最上部で音速条件を満たす
圧力もほぼ1気圧 (1.04×10^5 Pa)



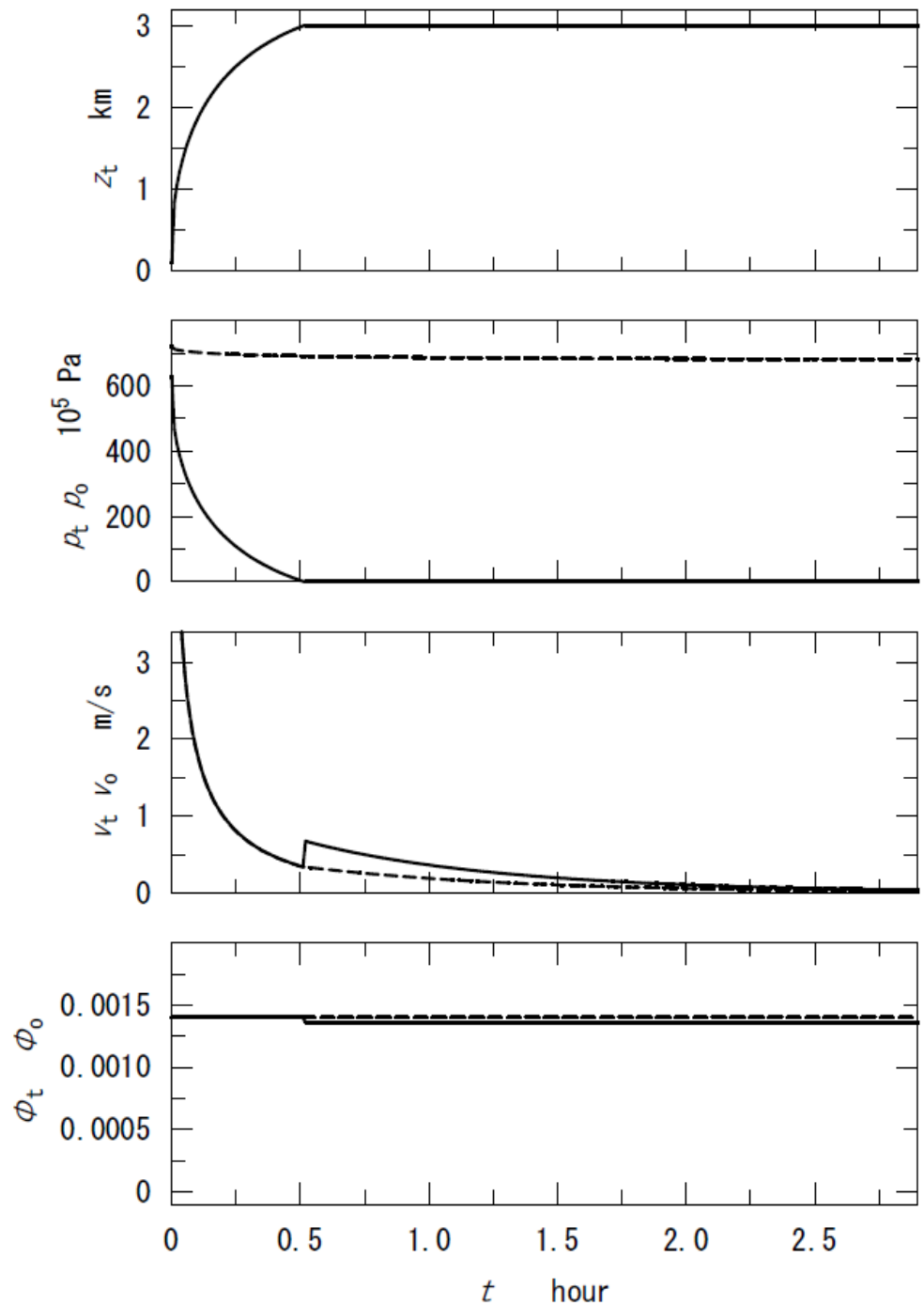
長時間にわたる追跡

$$p_o = 720 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\Phi_o = 0.0014 \quad \text{at} \quad t = 0$$

時間が経過すると、
流速は供給と釣り合う値
まで下がり、安定になる

マグマだまりに供給される
流量の分だけ、
いつまでも流出が続く



噴火の反復に関わる問題

実際の噴火はある時点で急に止まる

①固化や粘性の増加で火道内の流れが止まる？

②圧力の低下によって供給がとまる？

流速や圧力の低下に対応させて噴火を止める仕組みを導入
噴火の休止期は下部からの供給に比例して圧力が増加

次の噴火の発生

①火道内で直前の噴火でマグマは固化？

②マグマの上昇開始はマグマだまりの圧力で決まる？

適当な仮定の下に噴火が反復

単純な仮定では、噴火は周期的になる

実際の噴火は周期的とは限らない

物理的な条件と対応させて噴火の間隔をどう定式化するか

まとめと課題

- 弾性的に圧力を高めてマグマを蓄積するマグマだまりと、定常的にマグマが上昇する火道を組み合わせて、準定常的な噴火発生モデルを作成した。
- 揮発性成分量が多い場合にはマグマだまりと火道の接続がうまくいかず、方法の改良が必要。
- マグマが上昇を始める圧力によっては、マグマの上昇は途中で止まり、噴火に至らない。
- マグマの蓄積が噴火によって解消された後は、供給と釣り合う微量の噴出の解に落ち着く。
- 噴火の反復を記述するモデルには、噴火の開始や終了の条件を適切に設定する必要がある。