

噴火予知へのシミュレーションの 応用に向けて

井田喜明（アドバンスソフト株式会社）

御嶽山の噴火を見て、水蒸気爆発（水蒸気噴火）の
モデルを作り、その性質を調べた

発表の意図と内容

- 御嶽山の噴火災害を見て感じたこと
噴火予知はまだまだ未熟で多くの課題を抱える
噴火に関する興味がマグマ噴火に偏りすぎている
水蒸気爆発(水蒸気噴火)の理解やモデル化が必要
- シミュレーションは予知にどう貢献できるか
マグマ上昇流(火道流)の解析は予知への活用を試行せよ
噴火準備過程、水蒸気爆発との関係を考慮するモデルを
噴火時系列、噴火のタイプの予測などについても考察すべき
- 水蒸気爆発の発生過程を解明したい
工学分野の蒸気爆発との関連で理解を進める試みがある
火山噴火現象としての発生機構の考察は未発達

水蒸気爆発に関する問題点

- 水蒸気爆発(水蒸気噴火)とは何か
現象論的にはマグマ起源の噴出物を含まない噴火のこと
噴火現象としての理論的な解明は余り進んでいない
- 水蒸気爆発の発生機構は
マグマと水蒸気の接触面で起こる急発泡と**爆発**?
蓄積された水蒸気を急激に放出する**流れ**?
- マグマと地下水の配置と相互作用は
マグマから地下水に熱と水蒸気はどのように供給されるか?
火山灰などの粒子はどのようにつくられ混合するか?
- 水蒸気爆発、マグマ水蒸気爆発、マグマ爆発の関係は
移行はどのように進むか?
マグマと水蒸気の混合はどのように起こるか?

御嶽山9月27日の噴火

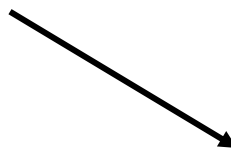
噴煙

27日午前11時55分



最初に出るのは火砕流

最初は火砕流
それが噴煙に移行



11時57分

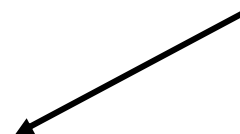


火砕流から噴煙に

正午



噴煙の上昇が続く



[ビデオ](#)

(国交省の映像)

[裏から](#)

御嶽山2014年の噴火と1979年の噴火



噴煙を上げる御嶽山＝9月27日午後2時14分、本社ヘリから、池永牧子撮影



1979年10月28日14時40分頃撮影
噴火は早朝に開始

[ビデオ](#)

水蒸気爆発(水蒸気噴火)の性質

御嶽山の噴火映像から噴火の性質について次のように推測

1. 噴火は**爆発というより水蒸気の急激な噴出**

マグマと地下水の接触面で起こる気化と爆発は本質でなさそう
蓄積した水蒸気が急に噴出した現象に見える

2. 水蒸気の**噴出は噴火初期が特に多く**、その後次第に衰える

噴出は短時間であるが、爆発というほど瞬間的ではない
蓄積された水蒸気が放出されきって、噴火が衰える

3. 初期の噴出気体や激しく噴出する部分は黒い

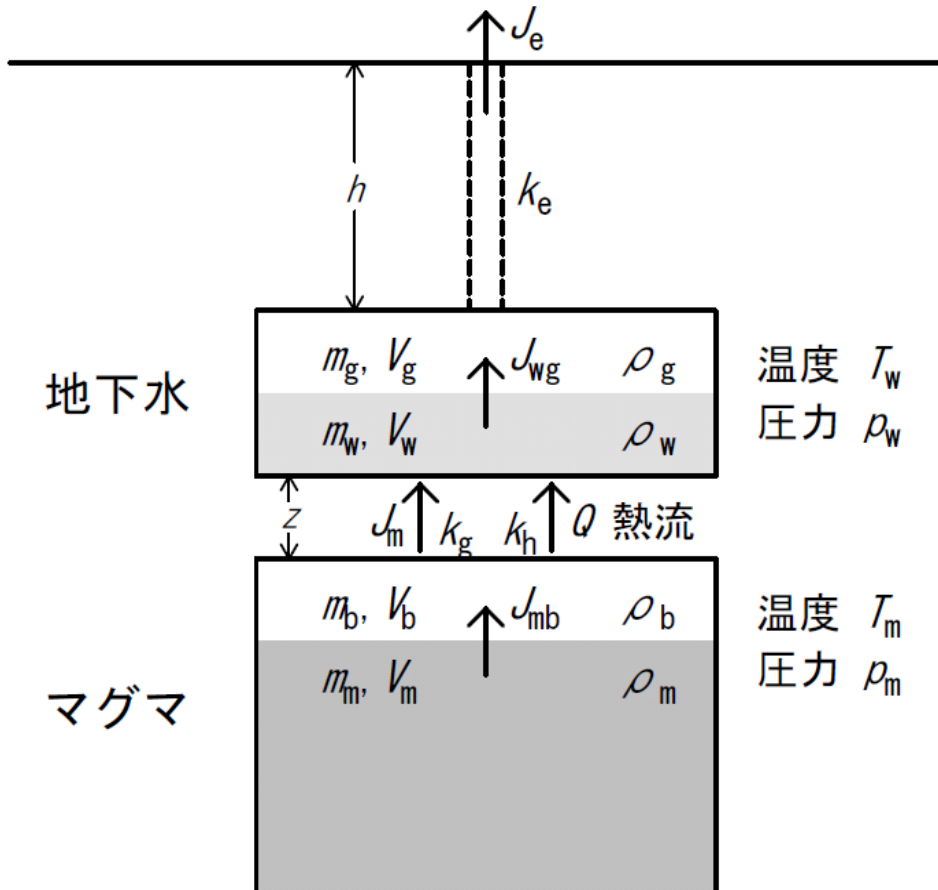
火山灰などの固体粒子が水蒸気に多量に吸収された
浸食による噴出孔の拡大が現象の本質である可能性

4. **最初は火砕流**として広がり、その後浮力を獲得して上昇

噴出開始直後の気体は重く; 固体粒子を多量に含む
その後上昇に転ずる; 気体から火山灰を堆積する。

蓄積された水蒸気が急激に噴出するモデルを構築する
モデルでは、浸食による通路の拡大を重視する

水蒸気爆発のモデル



水蒸気についての質量保存則

$$\bigcirc \frac{d\rho_g}{dt} = \frac{J_{wg} + J_m - J_e}{V_g} \quad \text{地下水系}$$

$$\bigcirc \frac{d}{dt}(r\rho_b) = \frac{J_{mb} - J_m}{V_g} \quad \text{マグマ系}$$

流量の表現

$$J_e = \frac{k_e(p_g - p_o)}{h} \quad \text{噴出流量}$$

$$J_m = \frac{k_m(p_b - p_g)}{z} \quad \text{マグマ系から}$$

$$Q = \frac{k_h(T_m - T_w)}{z} \quad \text{熱流}$$

水蒸気の発生

$$J_{wg} = \frac{c_g(T_m J_m - T_w J_e) + Q}{H} \quad \text{蒸発 (比熱、蒸発熱)}$$

$$J_{mb} = -m_m \frac{d}{dt} \left(\frac{p_b}{p_s} \right)^\gamma \quad \text{脱ガス (溶解度)}$$

マグマが速度 v で上昇

$$z = z_o - vt$$

$$r = \frac{V_b}{V_g} = r_o \left(1 + \frac{g\rho_c vt}{K_c} \right)$$

噴出孔の拡大

$$\bigcirc \frac{dk_e}{dt} = \alpha k_e \left(\frac{J_e}{J_u} \right)^\beta \quad \text{流れによる浸食}$$

計算方法と定数の値

計算方法

3変数 ρ_b , ρ_g , k_e に関する連立微分方程式を時間で積分する
流量 J_e , J_m , Q などは V_g で割って規格化する
初期条件は、可変にして計算から効果を見る
積分の時間きざみは急な変化に対応させて 10^{-4} s程度に設定

水蒸気とマグマに関する物性定数

熱力学定数; $R = 4.62 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{K}$, $c_g = (9/2)R$, $H = 2.4 \times 10^6 \text{ J/kg}$
マグマへの溶解度: $p_s = 6 \times 10^{10} \text{ Pa}$, $\gamma = 1/2$
温度: $T_w = 400 \text{ K}$ (沸騰状態の水), $T_m = 1200 \text{ K}$ (大容量のマグマ)

周辺岩石の密度や弾性 (圧力を見積もるために必要)

$$\rho_c = 2300 \text{ kg/m}^3, K_c = 4 \times 10^{10} \text{ Pa}$$

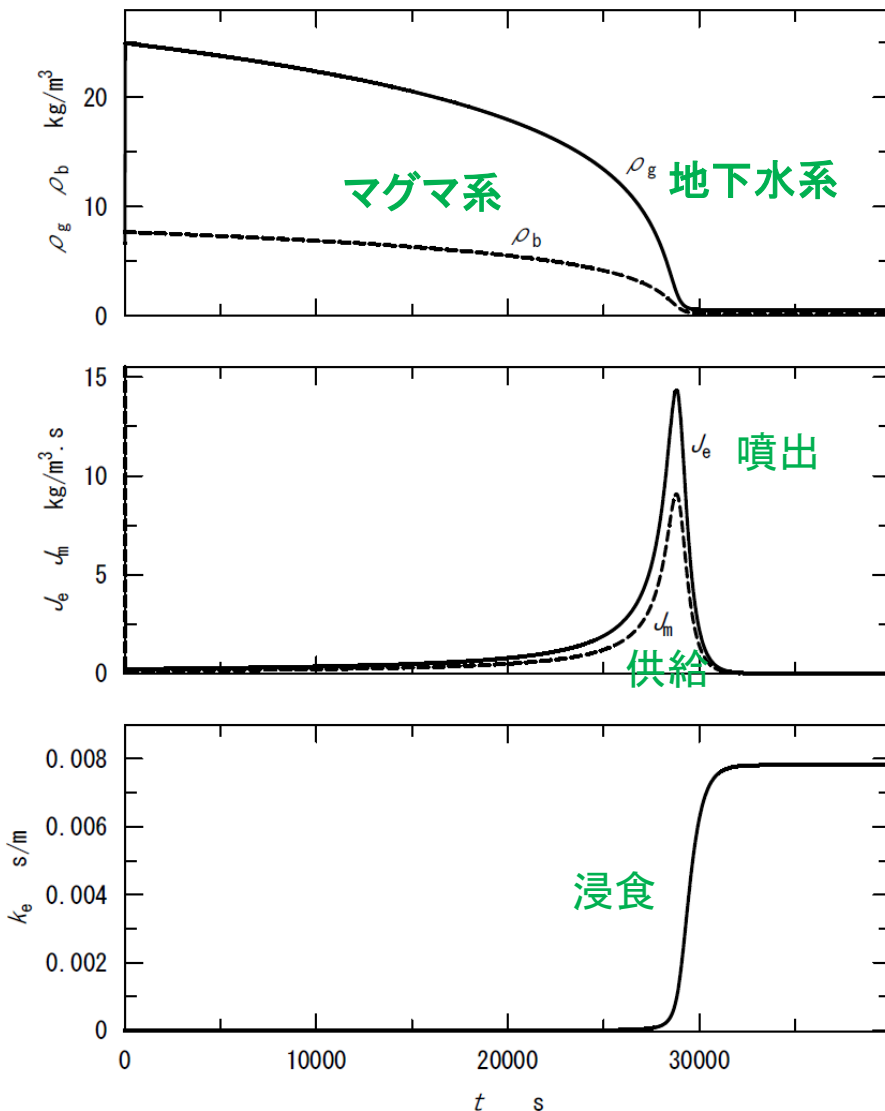
不確定な定数: 可変にして効果を見る

水蒸気の輸送係数: k_e , k_m
噴出孔拡大の定数: α , β , J_u
系の大きさ: $L = V_g^{1/3}$, $r = V_b/V_g$, h
マグマの上昇速度: v

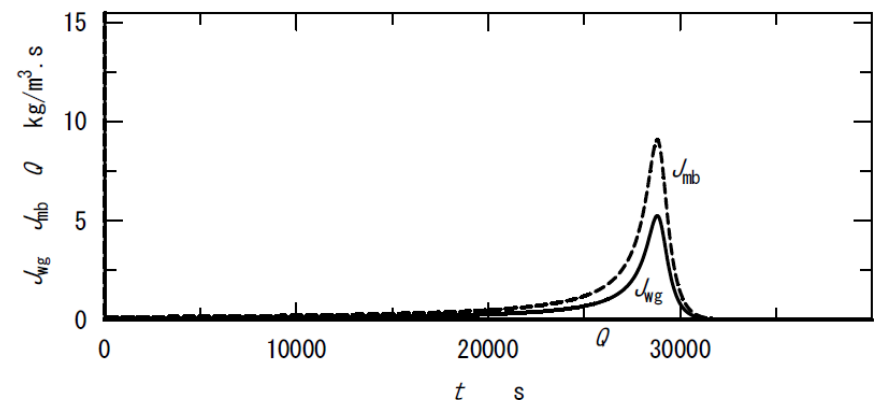
$$J_e = \frac{k_e(p_g - p_o)}{h} \quad \frac{dk_e}{dt} = \alpha k_e \left(\frac{J_e}{J_u} \right)^\beta$$
$$J_m = \frac{k_m(p_b - p_g)}{z}$$

基礎として参照する計算結果

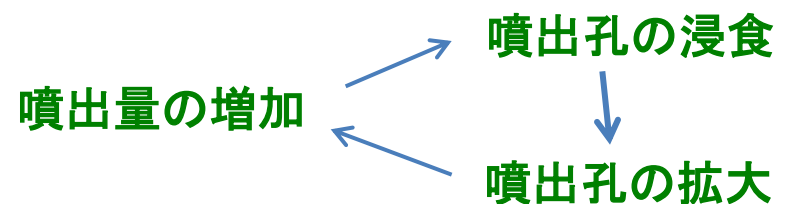
$L = 100 \text{ m}$, $h = 20 \text{ m}$, $z_0 = 20 \text{ m}$, $v = 10^{-4} \text{ m/s}$
 $k_m = 10^{-3} \text{ m/s}$, $J_u = 5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$



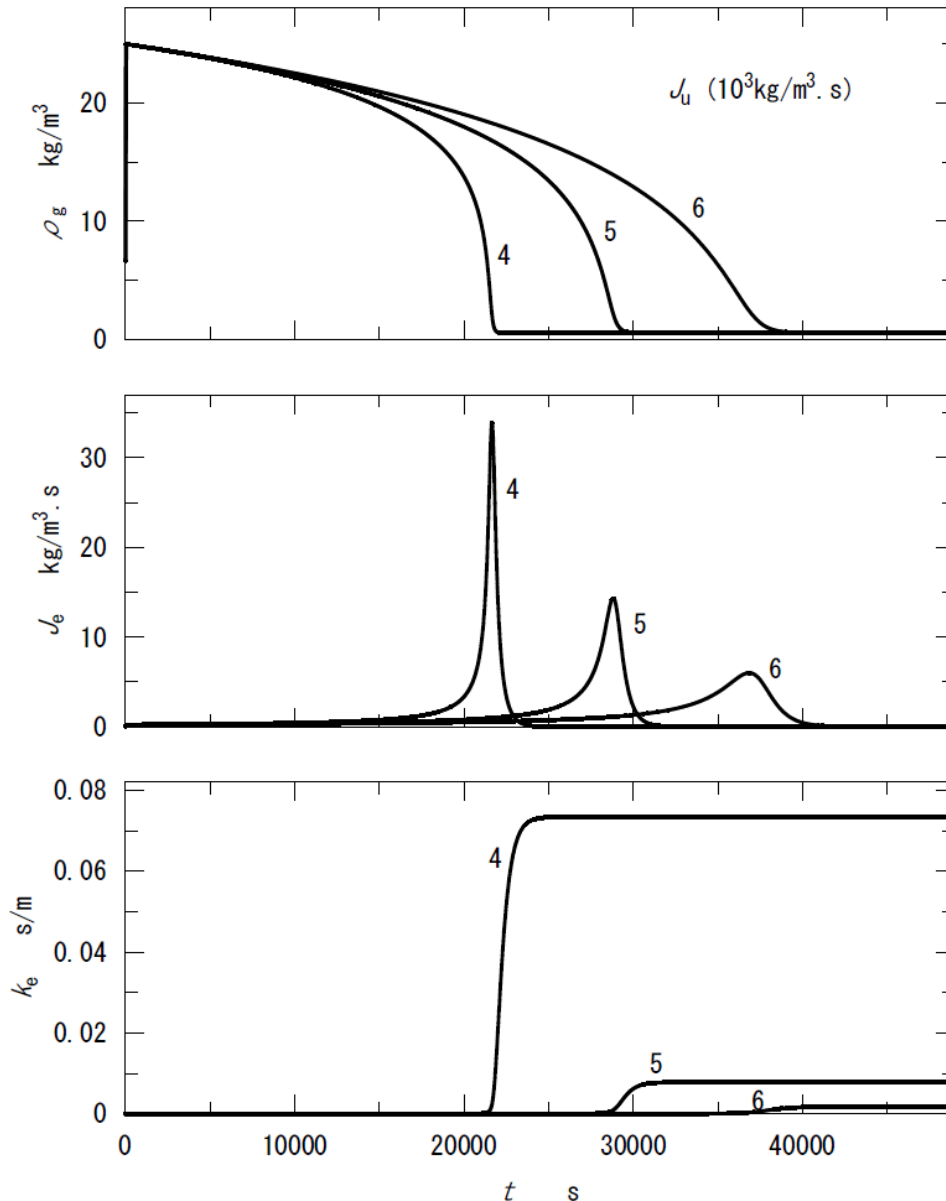
- * 水蒸気の**噴出に爆発的な増加**が生じる
水蒸気爆発(水蒸気噴火)に対応させる
- * 水蒸気の**圧力**は、初期の高い値が解消
(圧力は密度に比例、マグマ側が高い)
- * 流量の係数 k_e は急速に増大
噴出孔は急速に拡大して保持
- * 熱流量 Q の効果は無視できる



水蒸気爆発(爆発的な噴出)のメカニズム



噴出孔の浸食の効果(1): 定数 J_u への依存性



浸食による噴出孔の拡大

$$\frac{dk_e}{dt} = \alpha k_e \left(\frac{J_e}{J_u} \right)^\beta$$

α と J_u は独立でない

$\alpha = 1/m$ として J_u の依存性を見る

$\beta = 1$ は固定

噴出状態は J_u に強く依存

J_u が小さくなるほど

噴出は早く起こり

短時間に集中する

(噴出流量のピーク値は高まり

ピークの幅が狭くなる)

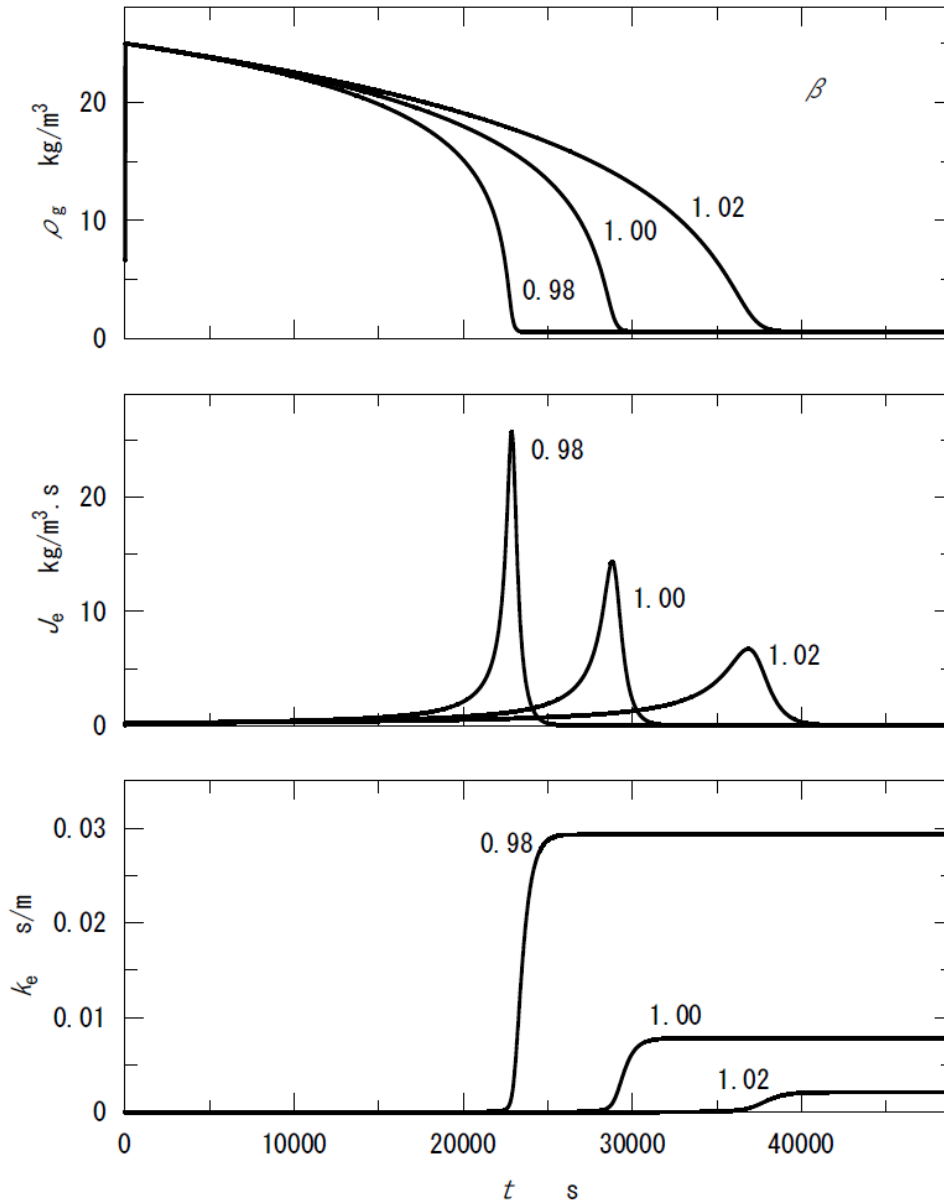
噴出孔の拡大は大きくなる

J_u が $10^4 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$ より大きくなると

J_e のピークがなまる

爆発的な噴出は見られなくなる

噴出孔の浸食の効果(2): 定数 β への依存性



浸食による噴出孔の拡大

$$\frac{dk_e}{dt} = \alpha k_e \left(\frac{J_e}{J_u} \right)^\beta$$

β の依存性を見る

$$\alpha = 1/m \quad J_u = 5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{s}$$

噴出状態は β に強く依存

β が小さくなるほど

噴出は早く起こり

短時間に集中する

噴出のピークは高くなる

β が1.1より大きくなると

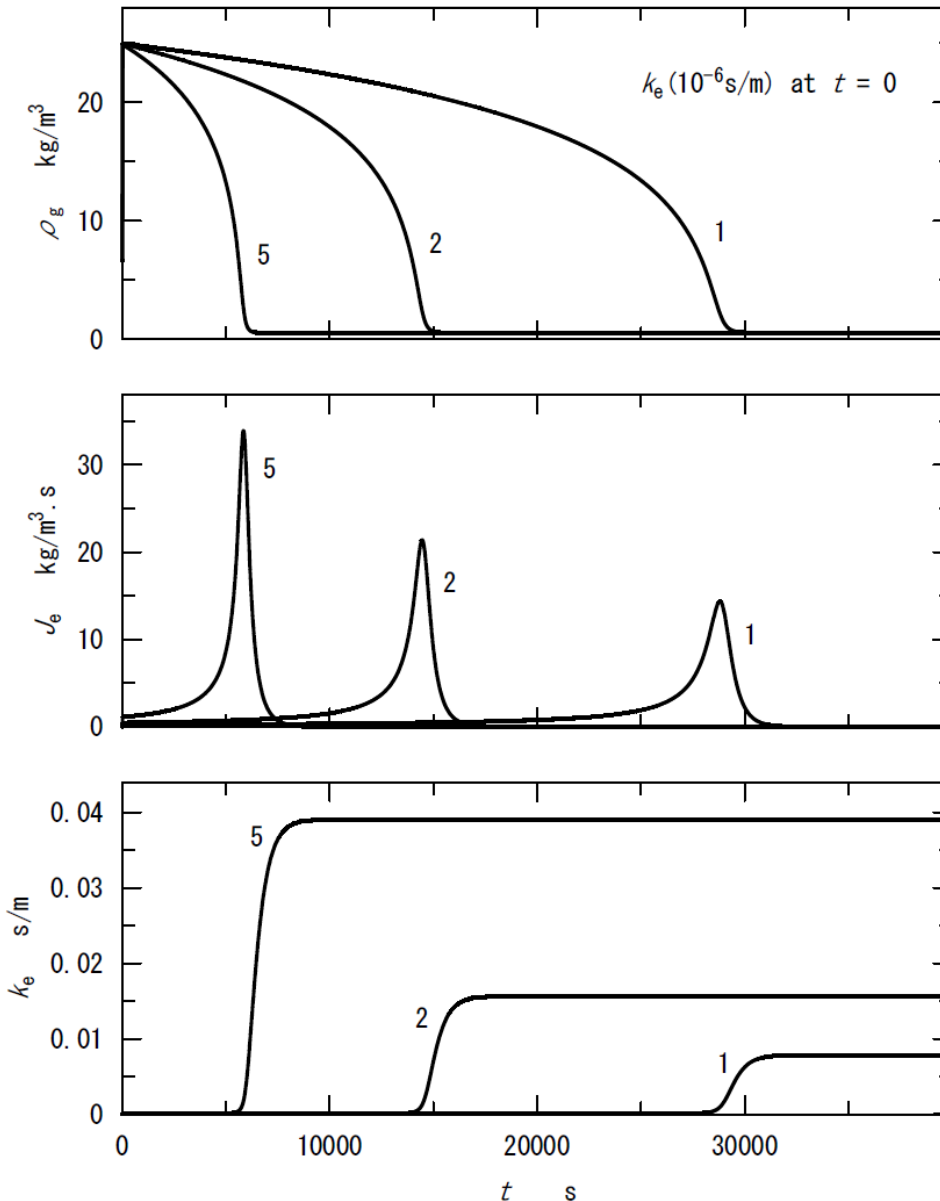
爆発的な噴出は見られなくなる

水蒸気の爆発的な噴出は

噴出孔の浸食の定数に強く依存

現象の発生に浸食が本質的

地下水系(1): 噴出流量の係数への依存性



k_e は噴出流量の比例定数

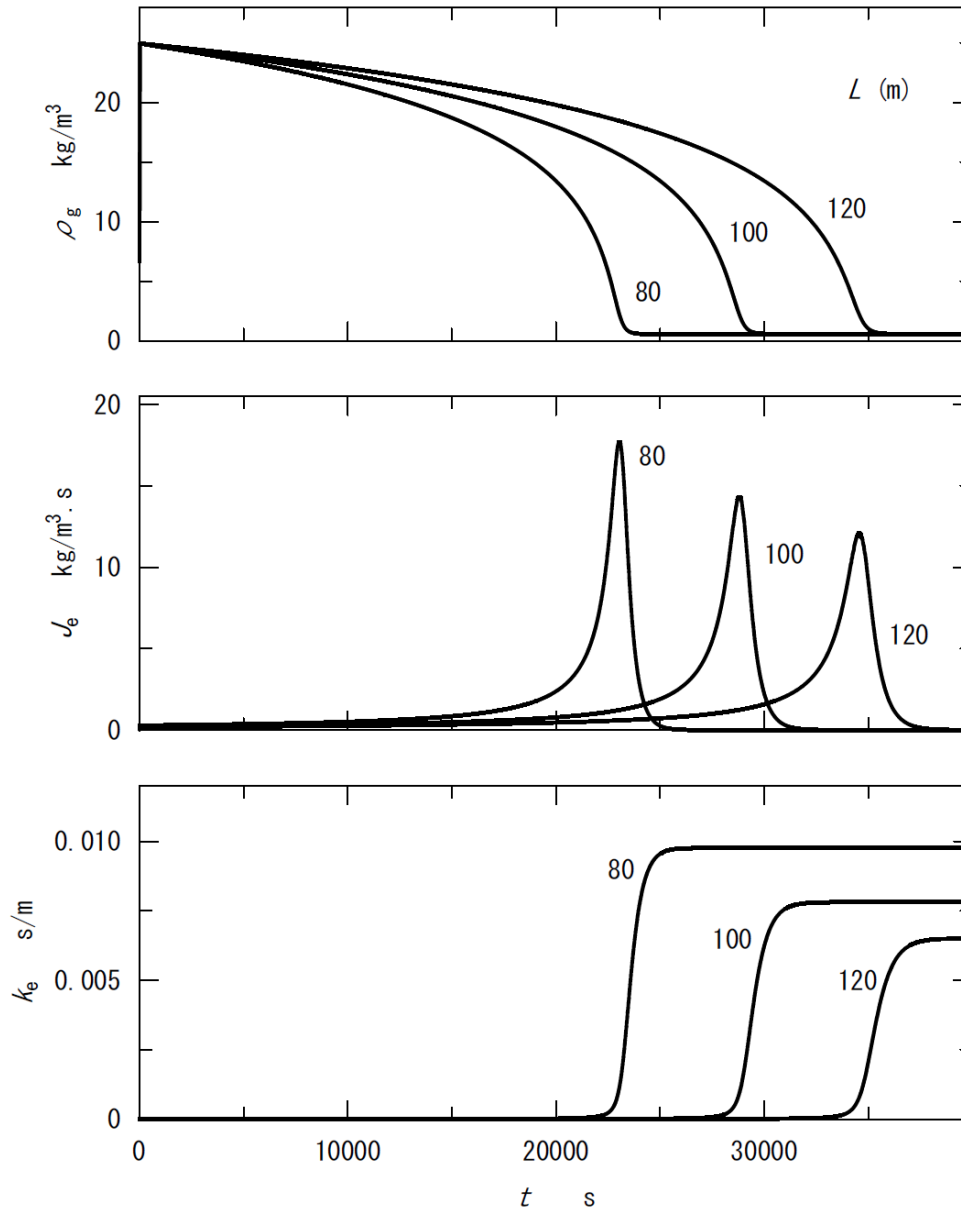
$$J_e = \frac{k_e(p_g - p_o)}{h}$$

k_e は噴出孔の拡大とともに増加する
その初期値の影響を見る

k_e の初期値が大きくなると
爆発的な噴出が速く起こる
噴出の準備が速く始まる
噴出のピークは高くなる

爆発的な噴出の準備に
計算が参入する時間の違いか

地下水系(2): 系の大きさへの依存性



地下水系の大きさを L とするとき

水蒸気の体積と質量 $\propto L^3$

噴出や供給の流量 $\propto L^2$

質量の代わりに密度を使っても

現象は規格化しきれず

L への依存性が残る

L が増加すると流量の寄与が減り

爆発的な噴出の発生が遅れ

ピーク値が小さくなる

なお

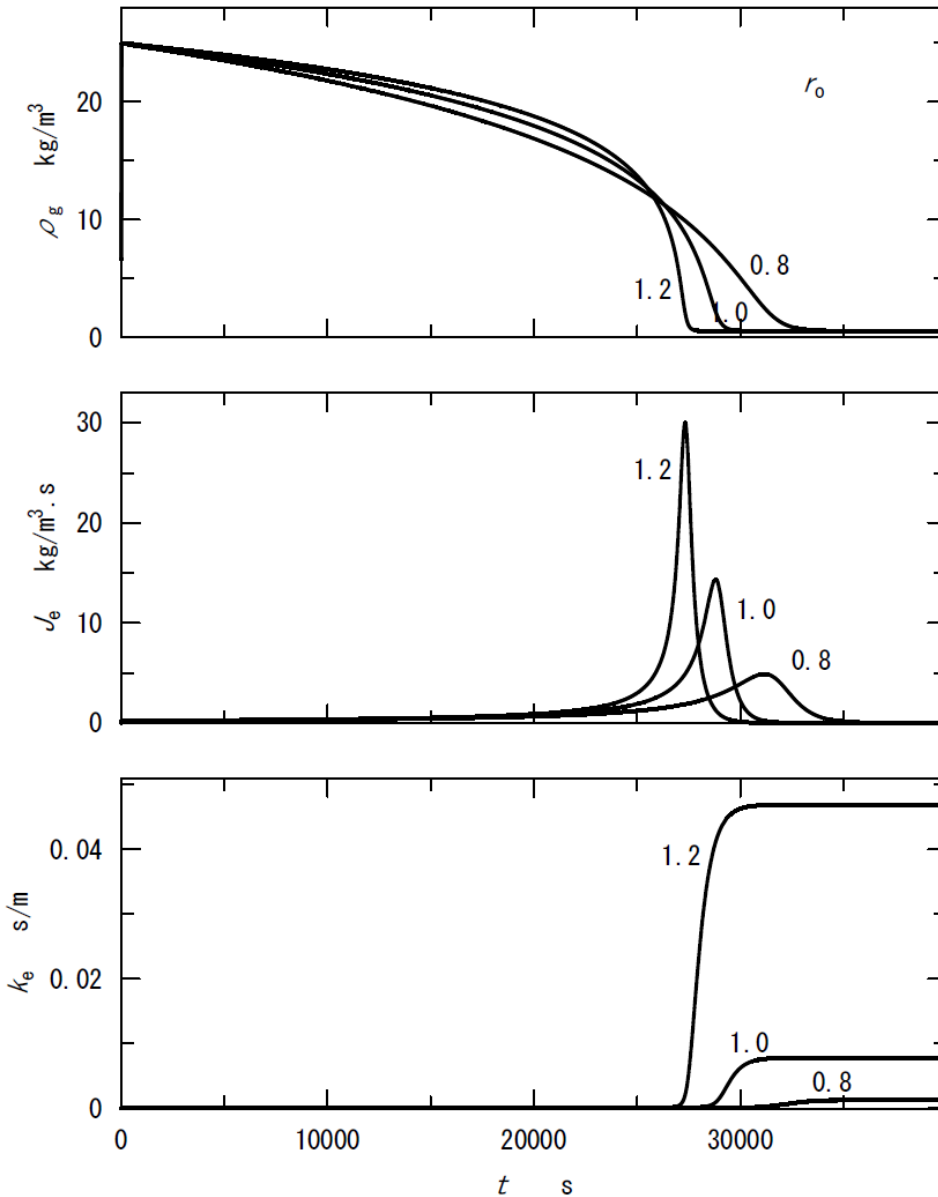
ρ_g の初期値は結果に影響しない

地下水系の状態は

爆発的な噴出に影響するが

その発生の可否は支配しない

マグマ系(1): 大きさへの依存性

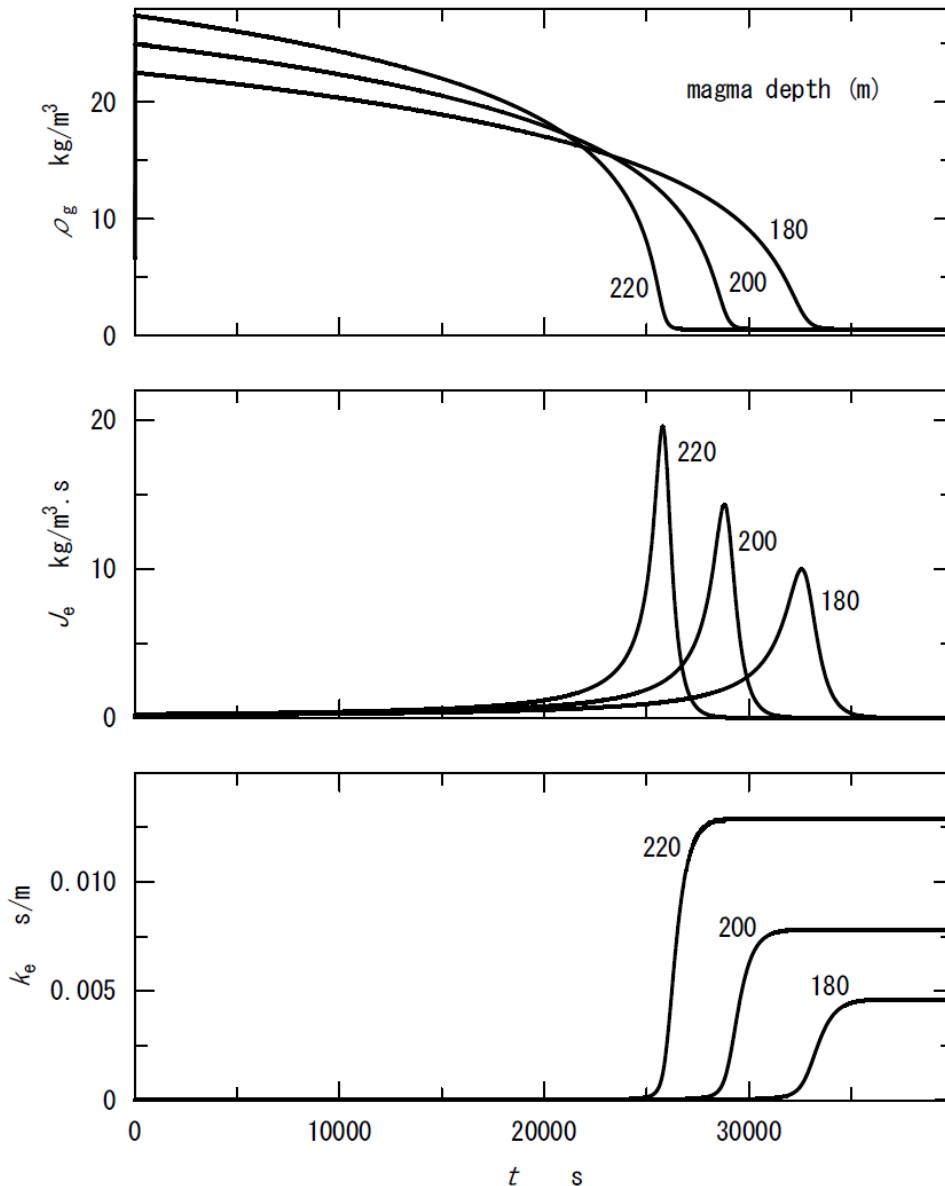


$r = V_b/V_g$: 水蒸気体積の比
 r_0 は r の初期値
マグマ系が大きくなると
 r は増加

r が小さくなると
噴出のピークがなまり
爆発的な噴出が起こらなくなる

マグマ系からの水蒸気の供給が
噴出の集中に本質的

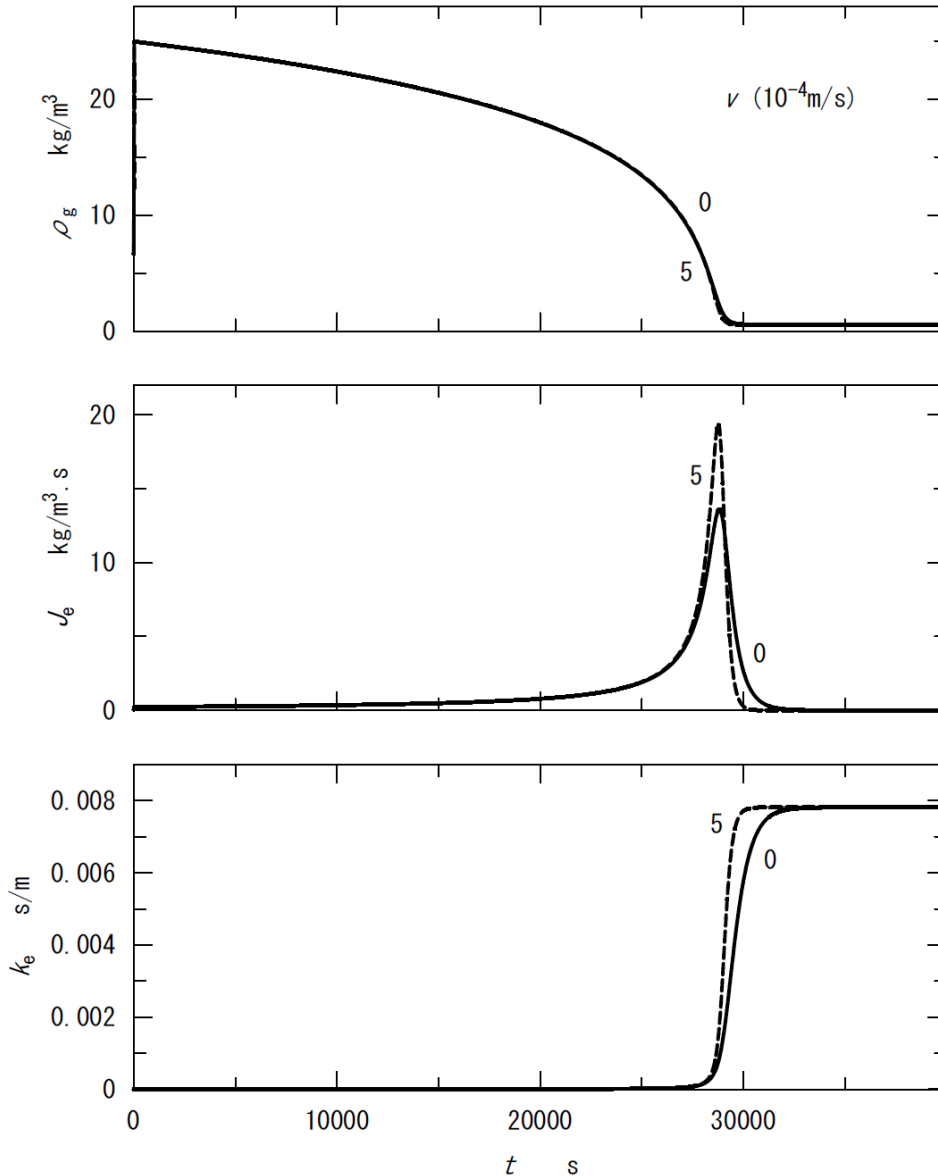
マグマ(2): 深さへの依存性



マグマの深さは
共存する水蒸気の圧力を通して
供給流量に影響する

マグマが深くなると圧力が高まり
供給流量が増える
爆発的な噴出の時期が早まり
噴出のピーク値も高まる

マグマ系(3):上昇速度への依存性



マグマ系と地下水系の距離 z

$$z = z_0 - vt$$

v は z が減少する速度

$z_0 = 20 \text{ m}$ に固定

z の減少とともに

マグマの発泡が進み

地下水系への水蒸気供給がふえる

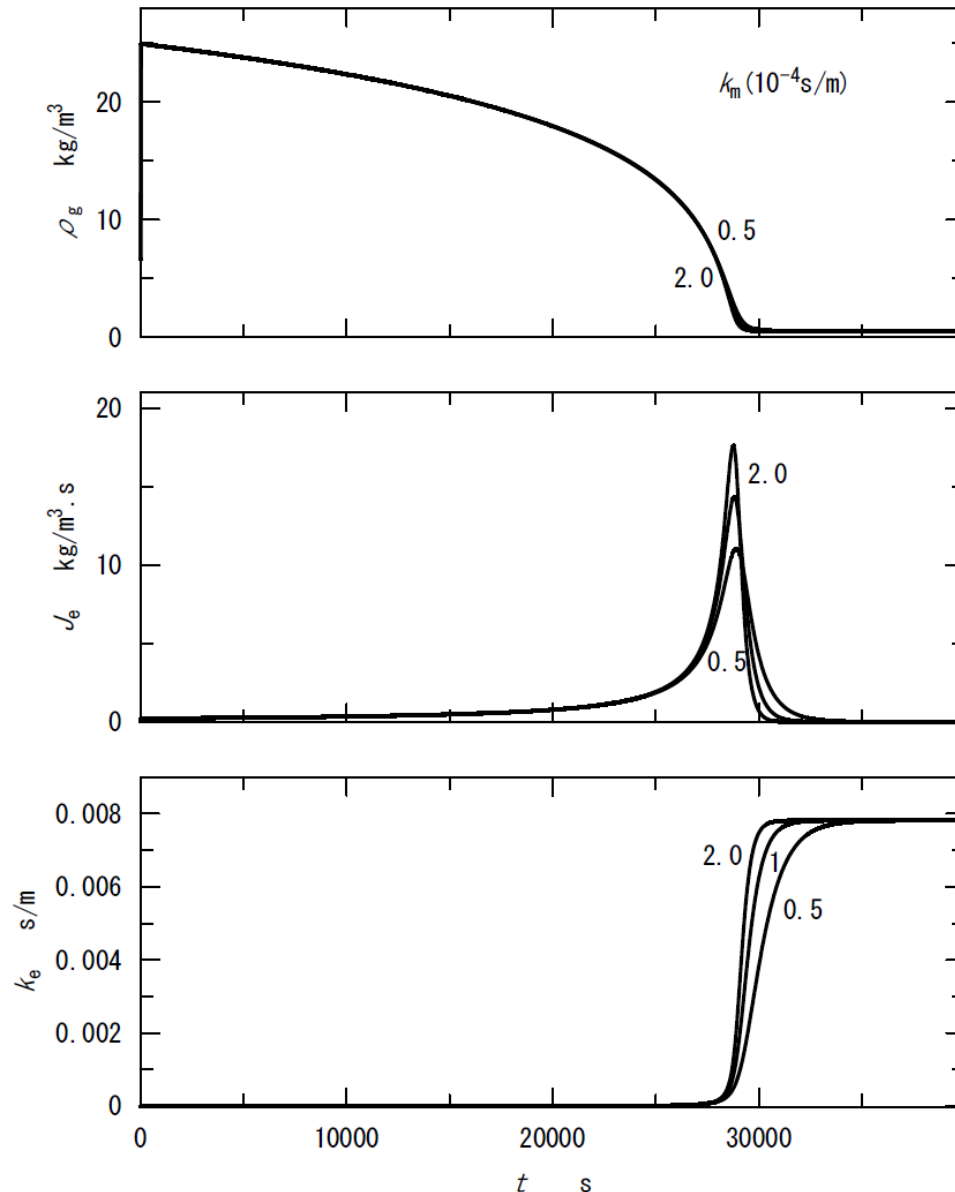
v の増加とともに

噴出時間が多少短くなり

噴出量が多少増加する

マグマ上昇の効果は小さい

マグマ系(4): 供給流量の係数への依存性



k_m は供給流量の比例定数

$$J_m = \frac{k_m(p_b - p_g)}{z}$$

k_m が大きくなると
噴出の集中度が多少増し
ピーク値が多少大きくなる
開始時間にはほとんど影響がない

マグマ系からの水蒸気の供給は
爆発的な噴出の発生に不可欠
マグマ系の個々の性質は
噴出に余り強く影響しない

計算結果のまとめ

- 地下水系に蓄積した水蒸気は、噴出孔を浸食して拡大させて爆発的に噴出する。この急激な噴出は水蒸気爆発（水蒸気噴火）と対応づけられる。
- 水蒸気の噴出は浸食による噴出孔の拡大、噴出流量の増加と相互に作用し、促進し合って加速的に進行する。
- 水蒸気の流量と噴出孔の浸食の相互作用が小さいと、爆発的な噴出は起こらない。
- 水蒸気の爆発的な噴出には、マグマ系からの水蒸気の供給が不可欠である。
- 噴出孔の浸食や水蒸気への粒子の混入については、物理的な意味をもつモデル化が必要である。

水蒸気爆発からマグマ噴火へ

1. 噴火の準備過程

マグマが上昇し、地下水に熱と水蒸気を供給
水蒸気の量が増え、温度と圧力が高まる

2. 水蒸気爆発（水蒸気噴火）の発生

噴出孔を拡大しながら水蒸気が爆発的に噴出
噴出する水蒸気には固体粒子が混入

3. マグマ水蒸気爆発に移行

マグマが地下水に接触し、水蒸気とともに噴出する
噴出が高温になり、噴火の規模が拡大

4. マグマ噴火に移行

地下水が枯渇し、マグマのみが噴出する
マグマの供給が続く限り、噴火は様々な形で継続

ここでは2のみを考察

1から2、2から3への移行は今後の研究が必要

まとめと課題

- 地下水の沸騰とマグマからの水蒸気の供給を考慮して、水蒸気の爆発的な噴出を記述する水蒸気爆発(水蒸気噴火)のモデルを作成し、その性質を調べた。
- このモデルでは、水蒸気の噴出が噴出孔を浸食して拡大する過程が重要。噴出と浸食は相互に強め合って加速的に進行し、水蒸気の爆発的な噴出を導く。
- 水蒸気の蓄積過程は、同じモデルで定数の値を変えることによって表現できそうだが、まだ十分な検討を行っていない。
- 水蒸気爆発からマグマ水蒸気爆発、マグマ噴火への移行は、このモデルでは記述できない。マグマが地下水と接触して流れに取り込まれる物理機構を組み入れる必要がある。
- 瞬間的に発生する単発的な爆発は、ここで記述する流れのモデルとは別な機構で発生するのかもしれない。「流れ」と「爆発」の関係を究明することも今後の課題である。