

爆発的な噴火を導く マグマ上昇流の3次元シミュレーション

主管技師長 湊 明彦

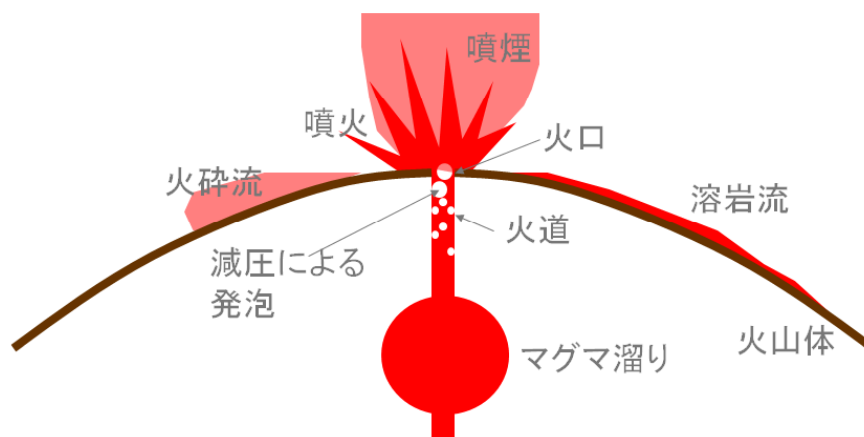
「地震・噴火現象の解析と数値シミュレーション」セミナー
2015年4月23日（木）開催
アドバンスソフト株式会社

内容

- 爆発的噴火とは
- マグマの運動方程式
- 減圧発泡実験のシミュレーション
- 発泡による破砕(フラグメンテーション)
- 臨界流(物理的に可能な最大流量)
- 発泡マグマ二相流の流動現象
- 気液二相流のモデル化
- 爆発的噴火のシミュレーション
- 水蒸気噴火と原子力安全研究
- 結言

爆発的噴火とは

マグマが地殻内を上昇し減圧発泡による膨張力に駆動され地表に噴出する現象。



マグマ: 高温高圧の岩石溶融物で揮発成分(大部分は水)を含む

マグマの運動方程式

$$\frac{dP}{dz} + \frac{d}{dz} \left[\frac{G^2}{\rho(P)} \right] = - \frac{\lambda}{D} \left[\frac{G^2}{\rho(P)} \right] + \rho(P)g$$

圧力勾配
慣性効果
摩擦効果
重力効果

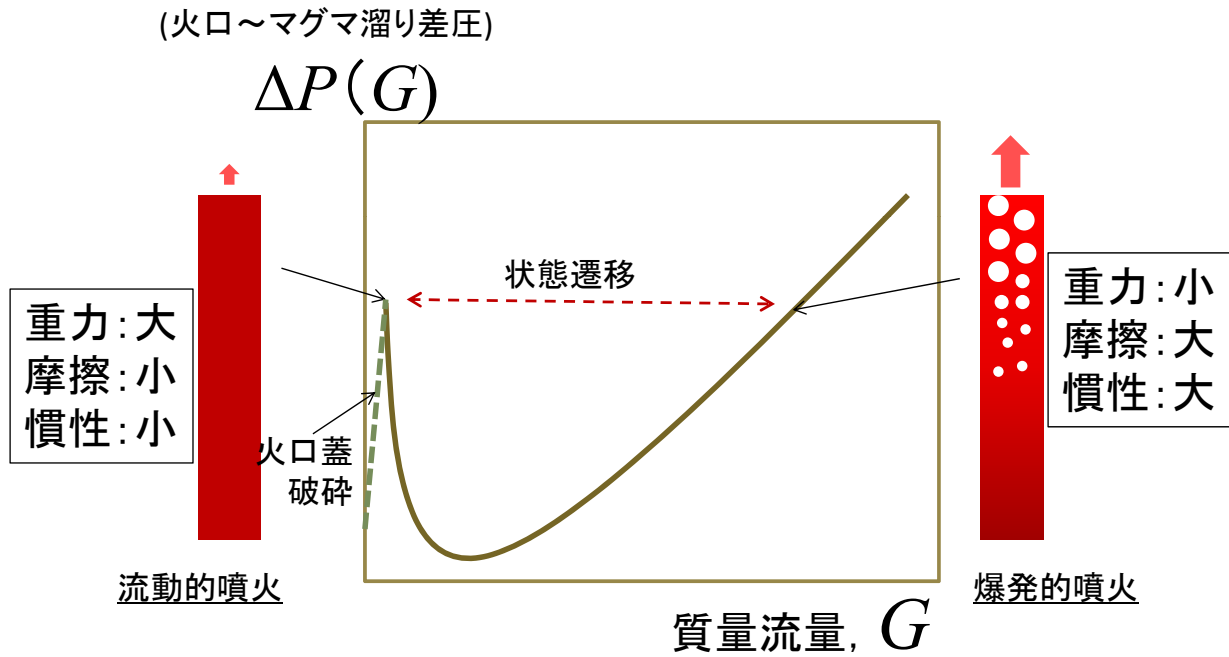
P : 圧力, z : 距離, G : 質量流量, ρ : 密度, u : 流速, g : 重力定数

準定常仮定 ⇒ 流量一定

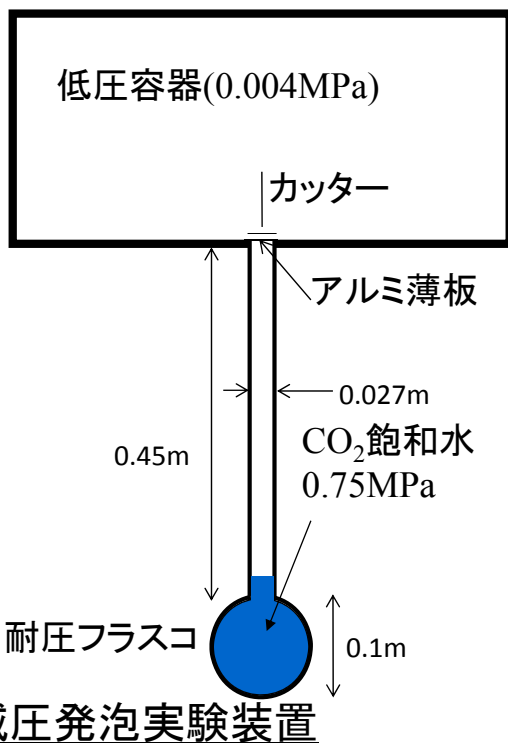
$$G = \rho u = const.$$

境界条件はマグマ溜り～火口(vent)間の差圧

$$\Delta P(G) = \int_{chamber}^{vent} \left\{ \frac{dP(G, z)}{dz} \right\} dz$$



減圧発泡実験のシミュレーション



CO₂ガス析出速度評価式

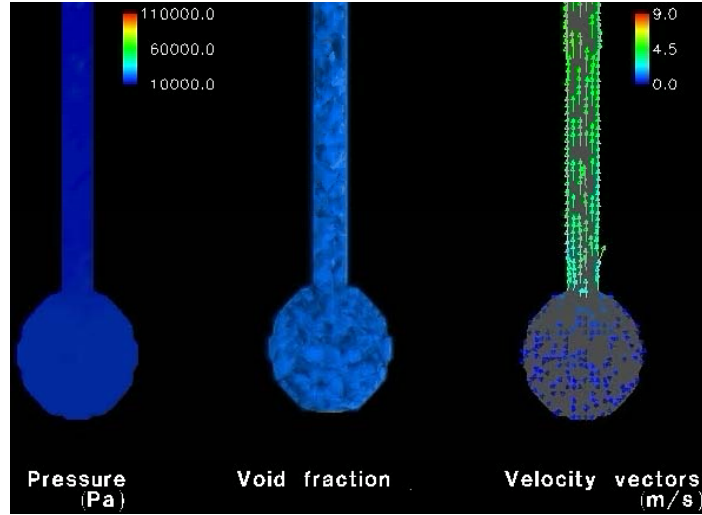
$$\frac{dW_{CO_2}}{dt} = -\frac{1}{\tau} (W_{CO_2} - W_{CO_2}^{Sat})$$

W_{CO_2} : 水中CO₂濃度
 $W_{CO_2}^{Sat}$: CO₂飽和濃度
 τ : CO₂析出時定数(10s)

*Mader, H.M., et al. : Nature, **388**[31]pp.462-464(1987)



実験のビデオ画像



(圧力)

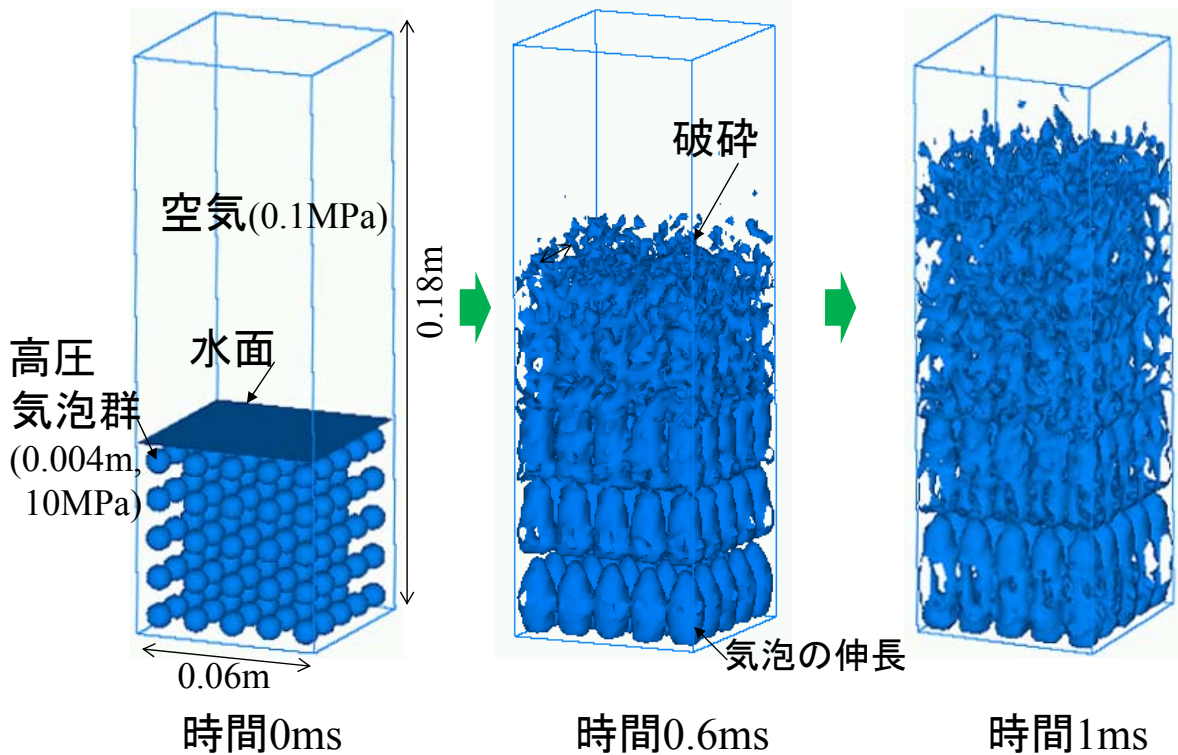
(ボイド率)

(流速)

シミュレーション結果

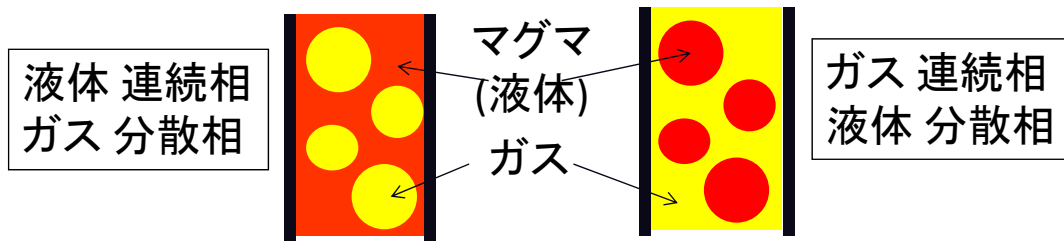
Minato, Toramaru, Ichihara, Fujita: Paper# V05/04A/A01-001, IYGG2003

発泡による破碎(フラグメンテーション)



Minato, Toramaru, Ichihara, Fujita: Paper# V05/04A/A01-001, IYGG2003

気泡流 $\xrightarrow{\text{破碎}}$ 噴霧流



混合流の粘性大

混合流の粘性小

臨界流 (物理的に可能な最大流量)

$$\frac{dP}{dz} + \frac{d}{dz} \left[\frac{G^2}{\rho(P)} \right] = - \frac{\lambda}{D} \left[\frac{G^2}{\rho(P)} \right] + \rho(P)g$$

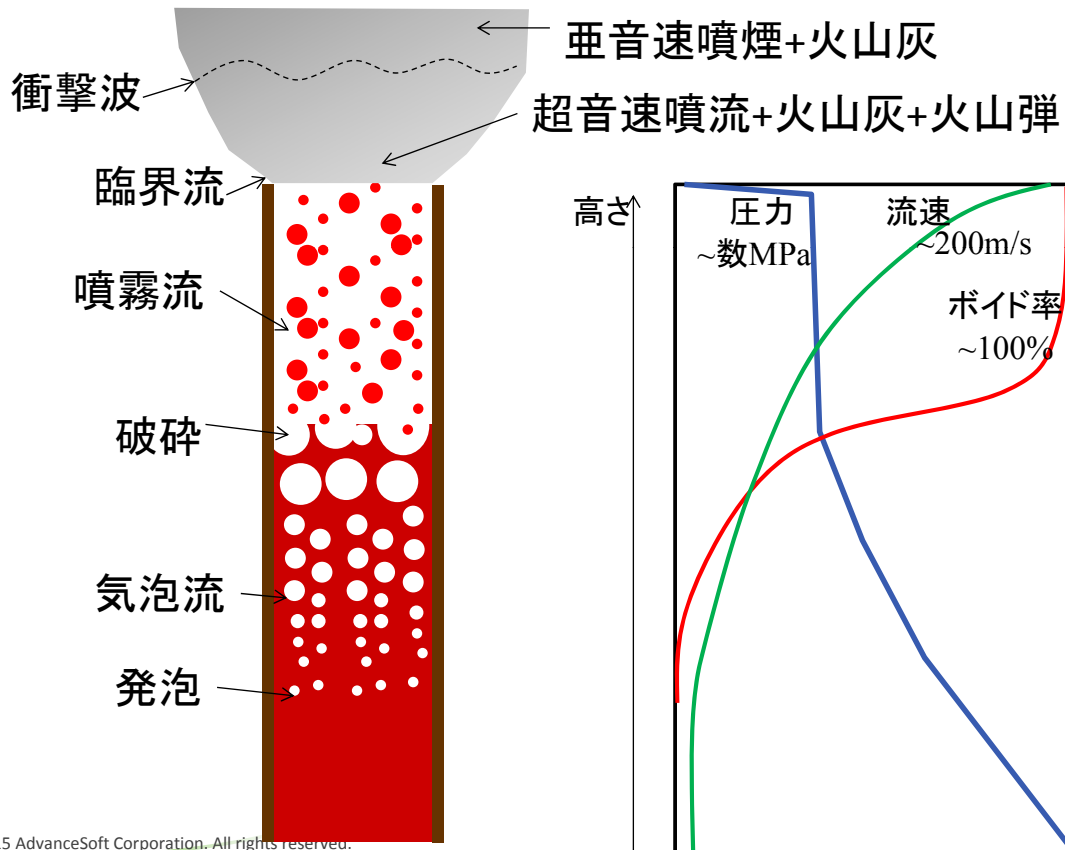
圧力勾配 慣性効果 摩擦効果 重力効果

流量が大きくなると流体慣性効果で(外部要因によらない)圧力変化
 ⇒ 圧力不定(物理的限界) ⇒ $dP/dz = \infty$ このときの流量を G_c とする

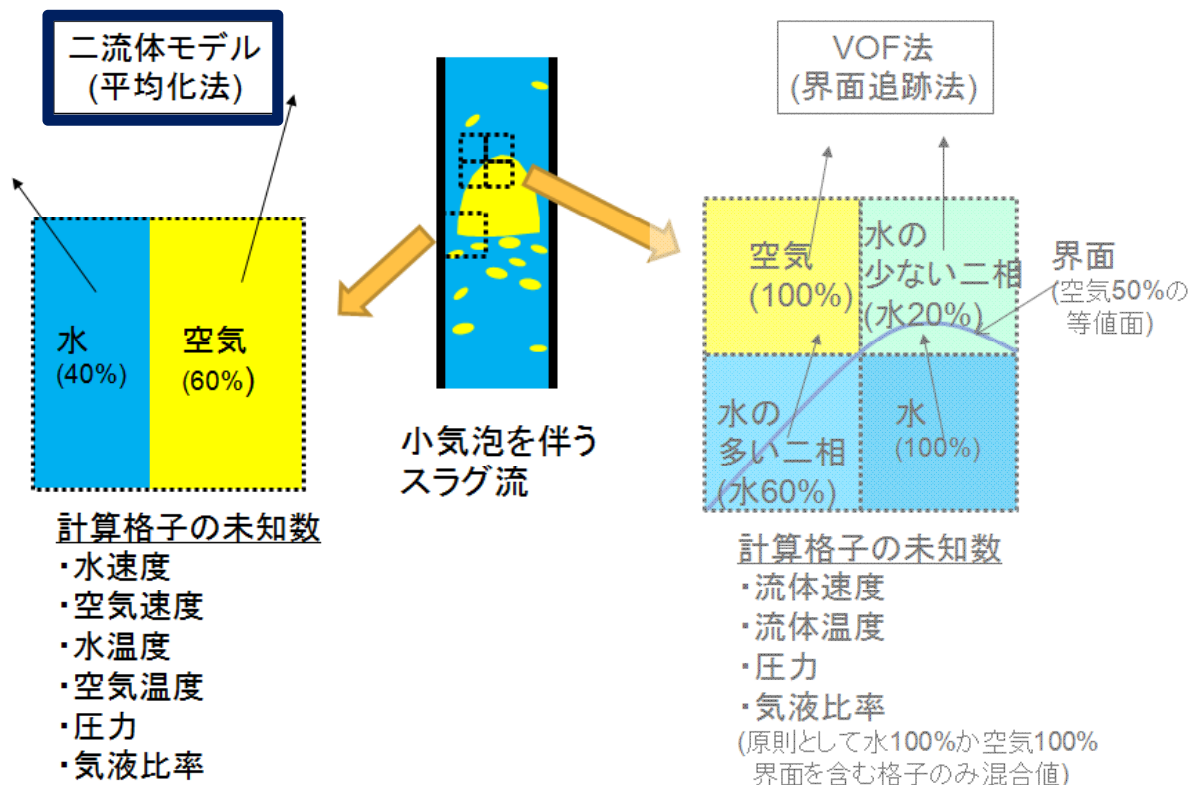
$$\frac{dP}{dz} + \frac{d}{dP} \left[\frac{G_c^2}{\rho(P)} \right] \frac{dP}{dz} = 0$$

$$\left\{ 1 + G_c^2 \frac{d}{dP} \left(\frac{1}{\rho(P)} \right) \right\} \frac{dP}{dz} = 0 \quad \text{従って} \quad G_c = \sqrt{\frac{-1}{\frac{d}{dP} \left(\frac{1}{\rho(P)} \right)}}$$

発泡マグマ二相流の流動現象



気液二相流のモデル化



爆発的噴火のシミュレーション

(解析条件の例)

解析モデル

三次元圧縮性二流体モデル

計算格子

ボクセル(立方体)格子(一辺2m)

約30,000個

タイムステップ

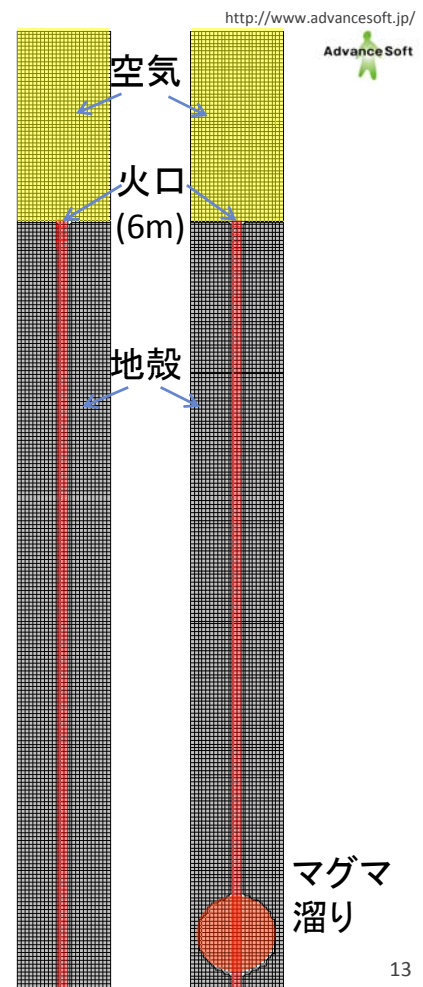
2×10^{-5} s, 40万ステップの計算(8秒)

マグマ初期圧力

火口で20MPa, 重力ヘッド考慮

(本解析は破砕モデルなし)

Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.



13

噴火の二相流解析で考慮すべき項目

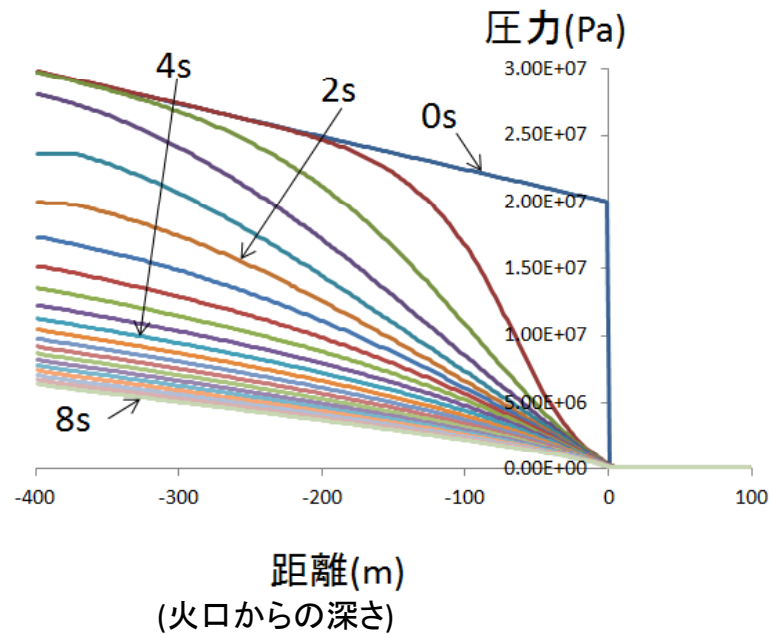
- マグマ物性(粘性,密度)
- 火道のスケール,形態
- 揮発性ガスの溶解度(温度,圧力依存)
- マグマの脱ガス
- 発泡の時間遅れ
- マグマ液相の破砕

Copyright ©2015 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

14

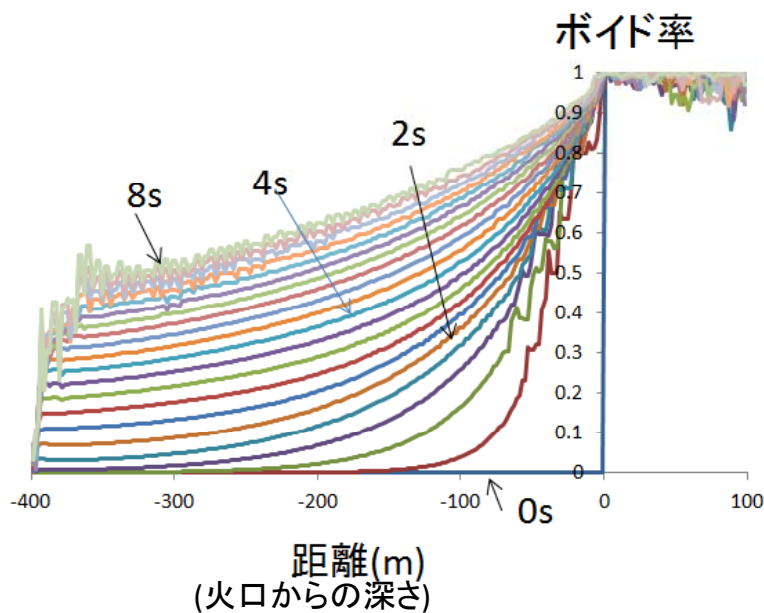
圧力分布の計算結果

(粘性係数 $10^3\text{Pa}\cdot\text{s}$)



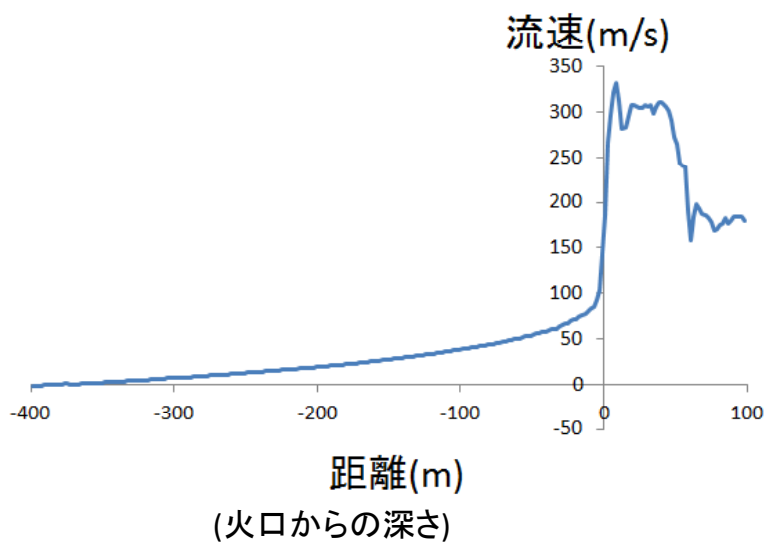
ボイド率分布の計算結果

(粘性係数 $10^3\text{Pa}\cdot\text{s}$)

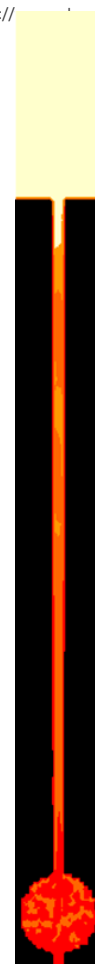
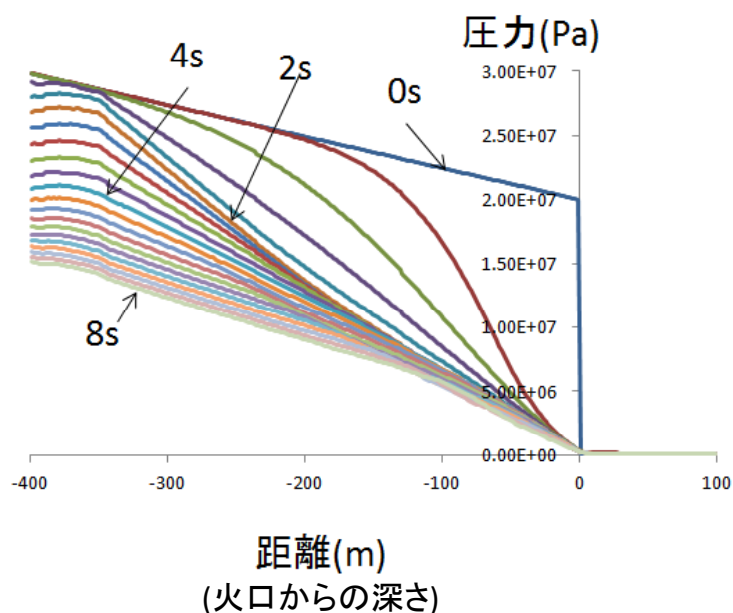


流速分布の計算結果

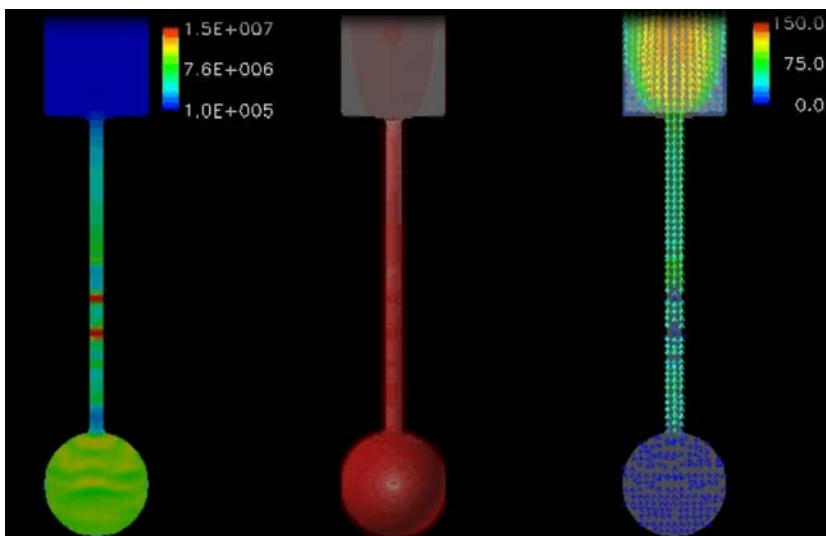
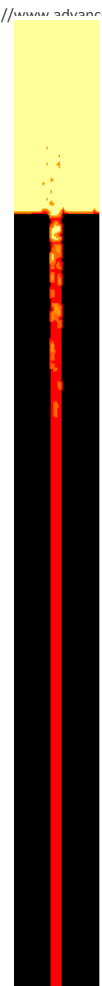
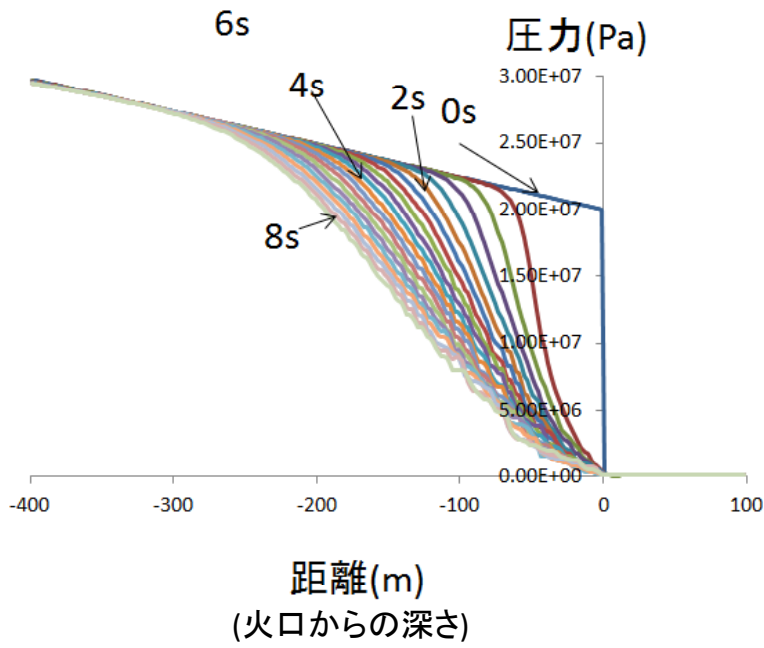
(粘性係数 $10^3\text{Pa}\cdot\text{s}$)



マグマ溜りのある噴火解析結果



高粘性マグマの解析結果 (粘性係数 $10^6 \text{Pa}\cdot\text{s}$)



圧力

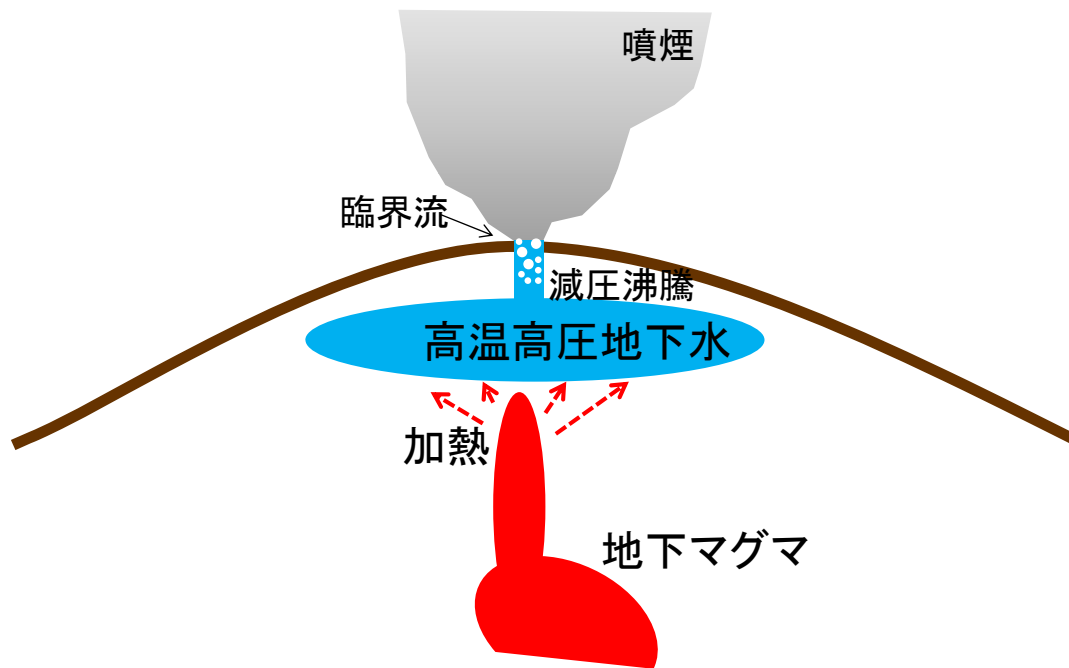
ボイド率

流速

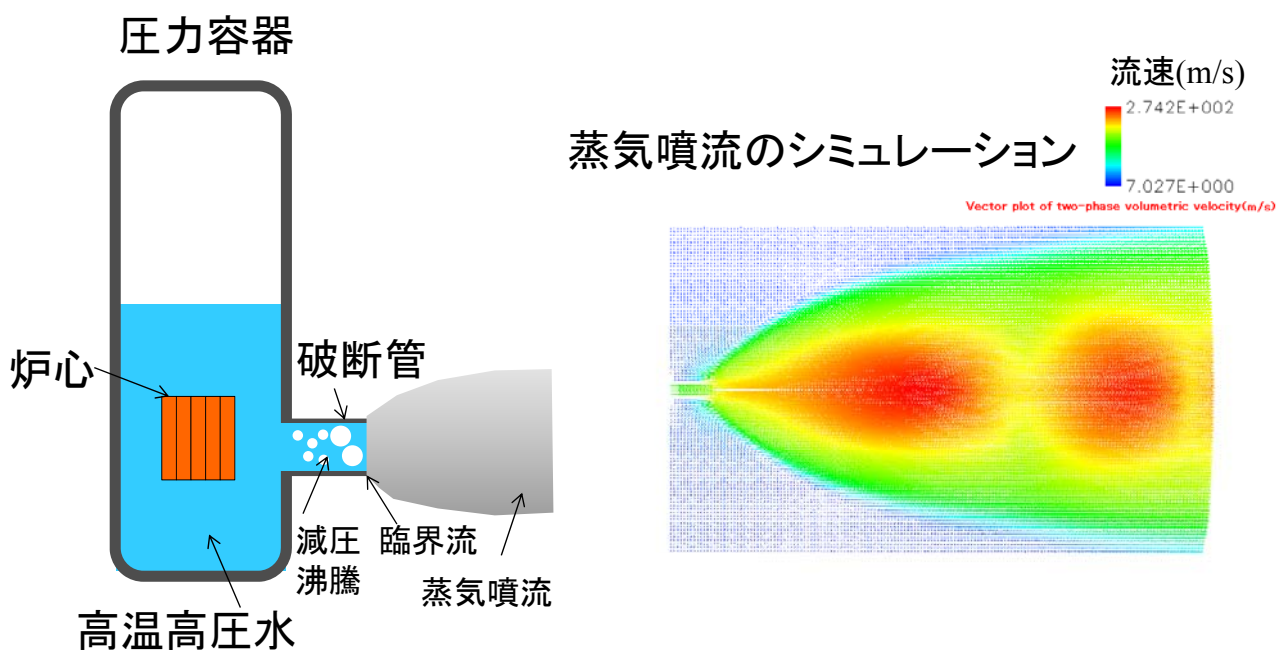
ボイド率分布の
3Dコンター



水蒸気噴火と原子力安全研究



配管破断による冷却材喪失事故(LOCA)の流動現象



Utsuno, Minato, et al.: Paper# N13P1368, NURETH13(2009)

結言

- 爆発的火山噴火はマグマの発泡,破碎,臨界流,噴流等の二相流現象の複合として理解できる。
- 原子力工学等の二相流シミュレーション手法が適用できる。
- マグマ物性(粘性,発泡),マグマ溜り,火道について不明な点が多い。
- 実条件の実験が不可能であり,実際の噴火の計測も限られているためシミュレーション技術の定量的な検証が困難
- 水蒸気噴火解明に原子炉配管破断事故研究が役立つ可能性