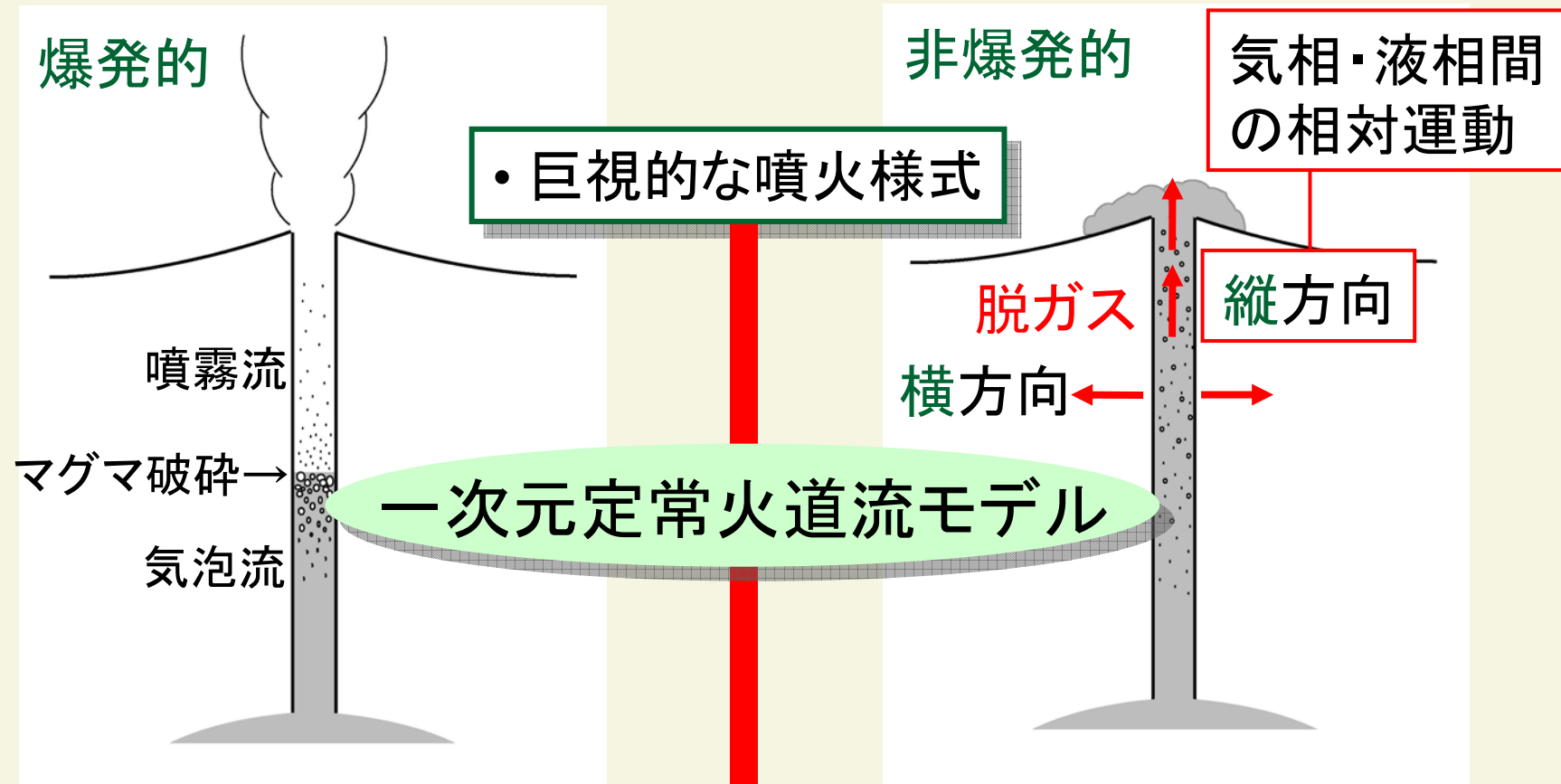


一次元定常火道流の解析的研究： 気相・液相間の相対運動が 噴火タイプの多様性に与える効果

小園 誠史・小屋口 剛博
(東京大学地震研究所)

Introduction



- ・ マグマの性質 (H_2O 量・マグマ粘性・浸透率etc.)
- ・ 地質条件 (火道径・火道長さetc.)
- ・ 気液二相マグマ上昇中の複雑な流動様式・微視的な素過程

火道流モデル (1/2)

•質量保存

$$\text{液相: } q_l = \rho_l u_l (1 - \phi) = (1 - n)q$$

$$\text{気相: } q_g = \rho_g u_g \phi = nq$$

•運動量保存

$$\text{液相: } \rho_l u_l (1 - \phi) \frac{du_l}{dz} = -(1 - \phi) \frac{dP}{dz} - \rho_l (1 - \phi)g + \underline{F_{lg}} - \underline{F_{lw}}$$

$$\text{気相: } \rho_g u_g \phi \frac{du_g}{dz} = -\phi \frac{dP}{dz} - \rho_g \phi g - \underline{F_{lg}} - \underline{F_{gw}}$$

•状態方程式

$$P = \rho_g RT$$

•気相の質量分率

$$n = \frac{n_0 - sP^{1/2}}{1 - sP^{1/2}} \quad (n \geq 0)$$

q : 単位面積あたりの噴出率

ρ : 密度 P : 圧力

u : 速度 T : 温度

ϕ : 気相の体積分率 (空隙率)

n : 気相の質量分率 (n_0 : 初期
H₂O量)

z : 鉛直上向きの座標

S : saturation constant

気液間の相互作用力 火道壁との摩擦力

火道流モデル (2/2)

・気液間の相互作用力

$$F_{lg} = \frac{3C_D}{8r_a} \rho_g \phi(1-\phi)(u_g - u_l)^2$$

← 気相粘性支配

$$F_{lg} = \frac{\mu_g}{k} \phi(1-\phi)(u_g - u_l)$$

← 気相粘性支配

$$F_{lg} = \frac{3\mu}{r_b^2} \phi(1-\phi)(u_g - u_l)$$

← 液相粘性支配

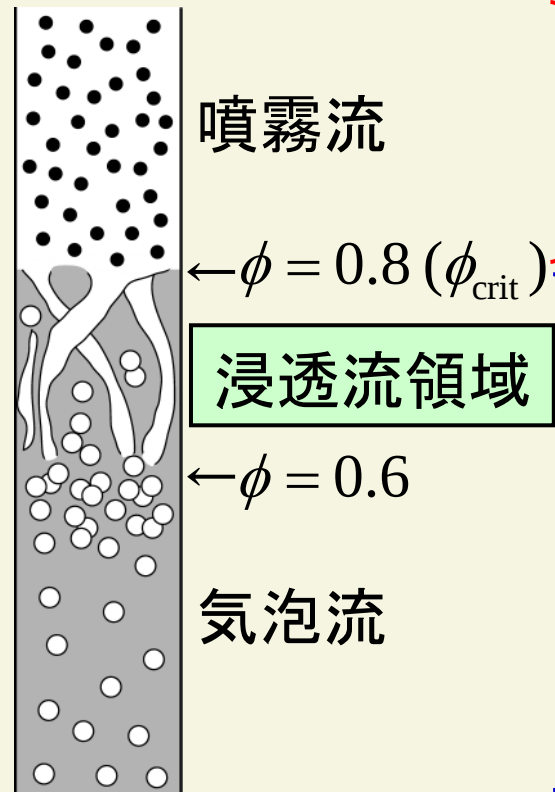
・火道壁との摩擦力

$$F_{gw} = \frac{\lambda_w}{4r_c} \rho_g u_g^2$$

← 気相粘性支配

$$F_{lw} = \frac{8\mu}{r_c^2} u_l$$

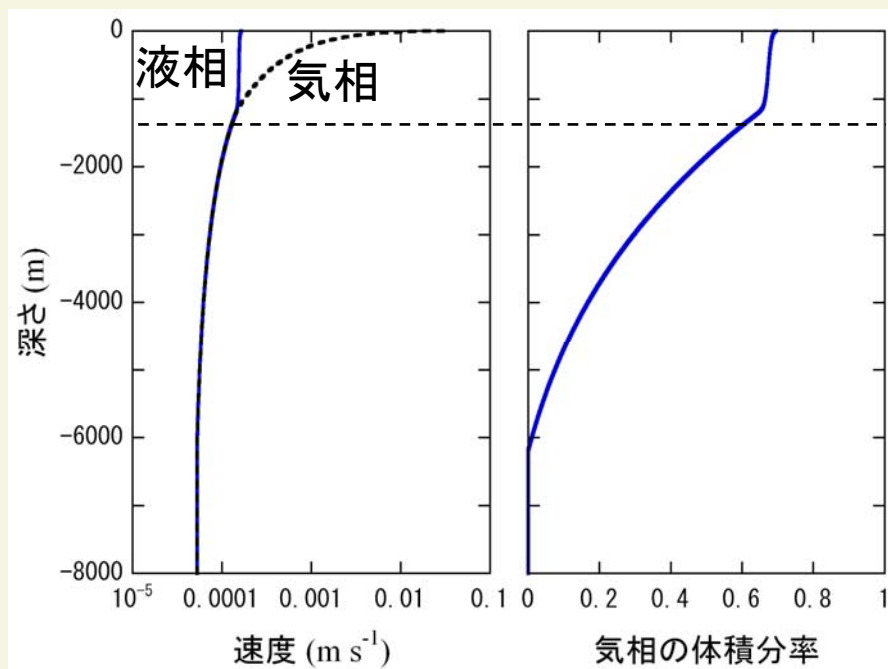
← 液相粘性支配



r_b : 気泡半径
 r_a : 火砕物の半径
 k : 浸透率

r_c : 火道半径
 μ : 液相の粘性
 μ_g : 気相の粘性

多様な噴火タイプを示す定常解

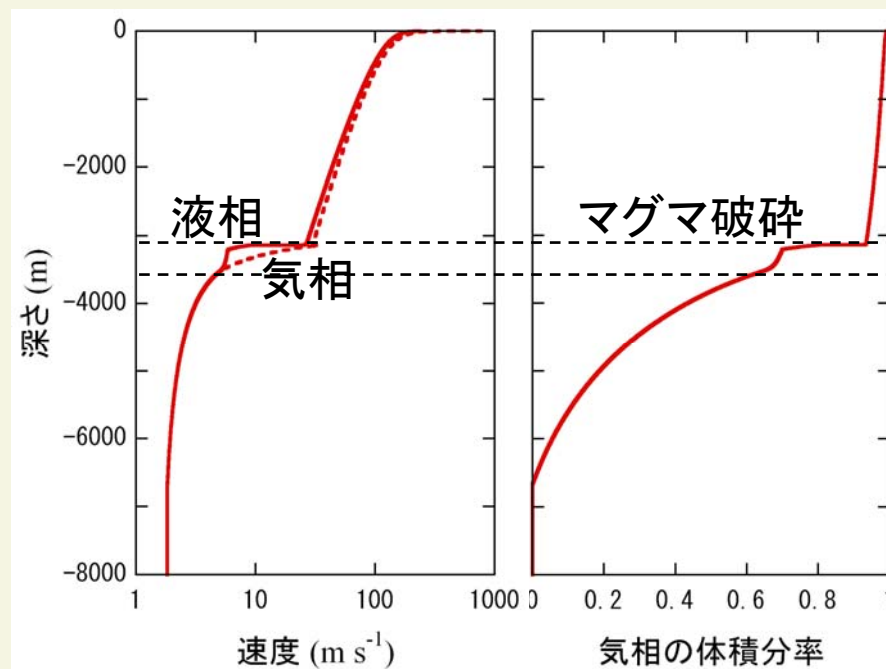


低噴出率

相対速度大 (脱ガス大)

マグマ破碎前に噴出

→ 非爆発的噴火



高噴出率

相対速度小

マグマ破碎後に噴出

→ 爆発的噴火

$$k = 10^{-11} (\text{m}^2)$$

$$\mu / r_c^2 = 10^7 (\text{Pa s m}^{-2})$$

$$q = 1.3 \times 10^{-1} (\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1})$$

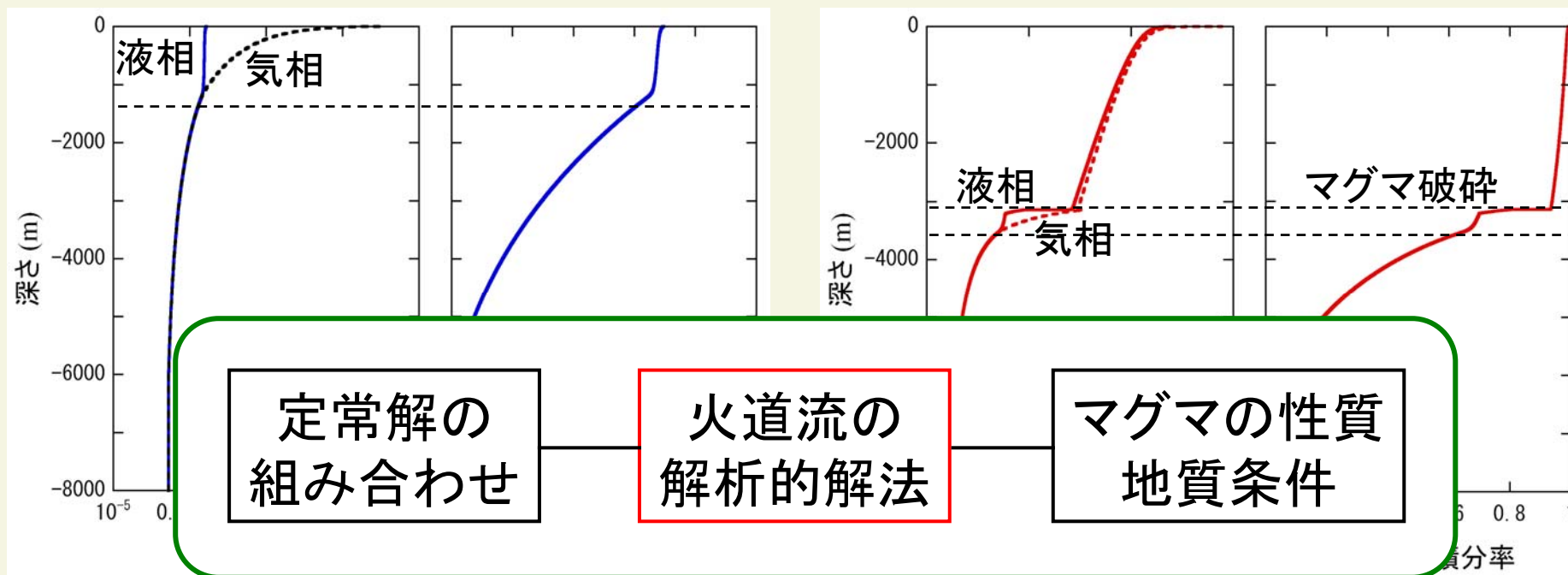
研究集会2008

$$r_p = 10^{-3} (\text{m})$$

$$\mu / r_c^2 = 10^3 (\text{Pa s m}^{-2})$$

$$q = 4.6 \times 10^3 (\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1})$$

多様な噴火タイプを示す定常解



低噴出率

相対速度大(脱ガス大)

マグマ破碎前に噴出

→ 非爆発的噴火

高噴出率

相対速度小

マグマ破碎後に噴出

→ 爆発的噴火

$$k = 10^{-11} (\text{m}^2)$$

$$\mu / r_c^2 = 10^7 (\text{Pa s m}^{-2})$$

$$q = 1.3 \times 10^{-1} (\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1})$$

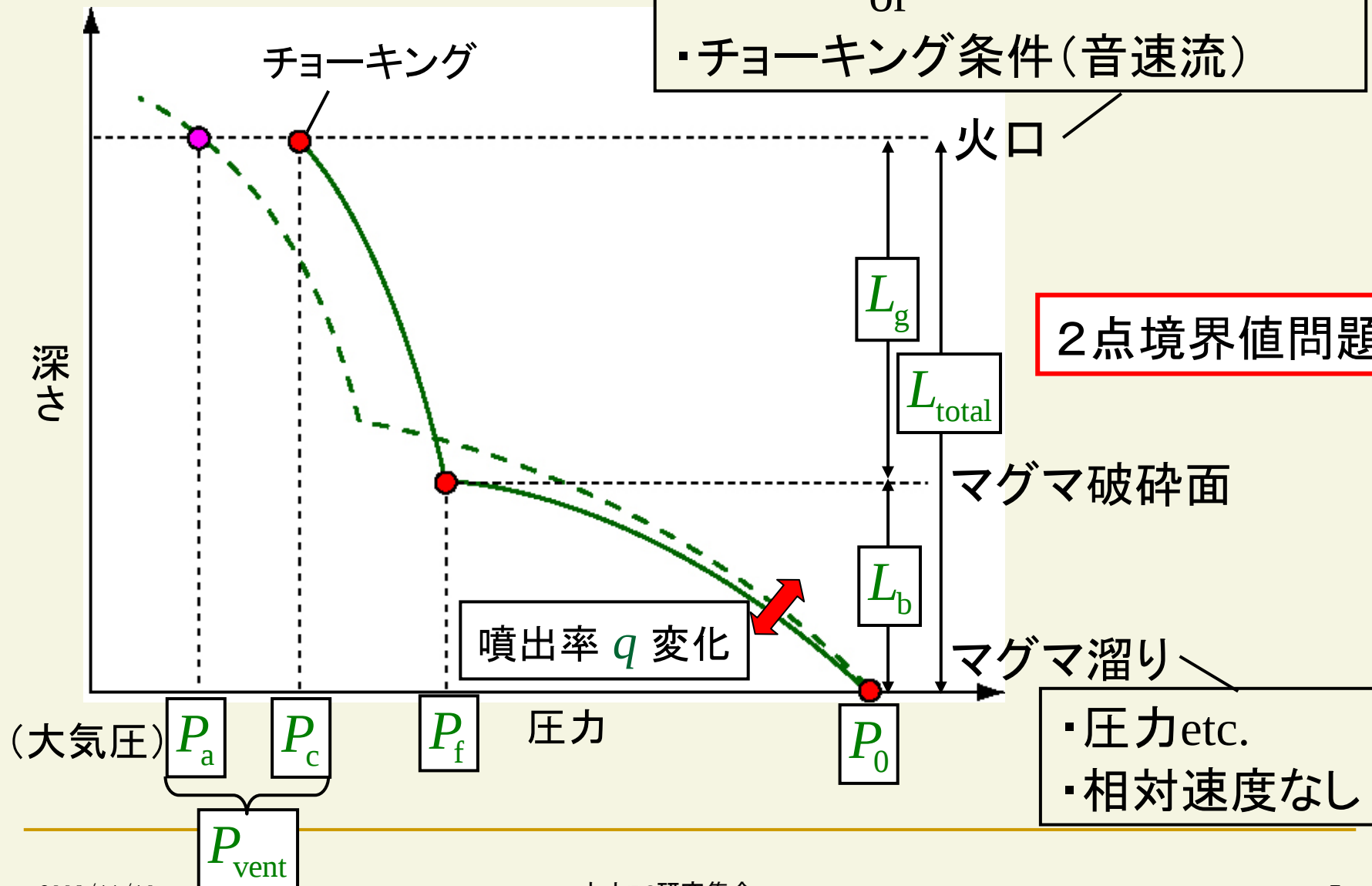
研究集会2008

$$r_p = 10^{-3} (\text{m})$$

$$\mu / r_c^2 = 10^3 (\text{Pa s m}^{-2})$$

$$q = 4.6 \times 10^3 (\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1})$$

境界条件・解法



火道流の解析的解法 (Koyaguchi, 2005)

火口圧力
破砕後の領域の長さ

$$L_g \sim -\frac{n_f RT}{g} \ln \frac{P_{\text{vent}}(\alpha, \gamma)}{P_f(\alpha, \varepsilon)}$$

マグマ破砕圧力

破砕前の領域の長さ

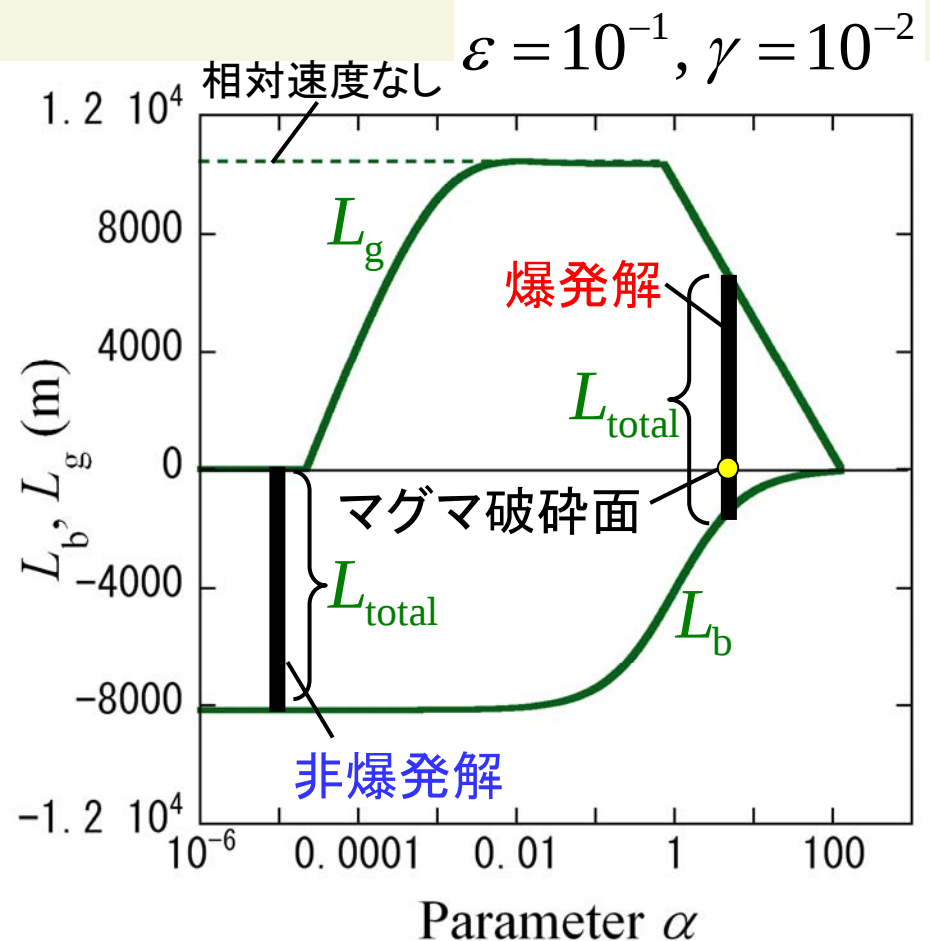
$$L_b \sim \frac{1}{1 + \alpha} \frac{P_0}{\rho_l g}$$

噴出率

無次元噴出率: $\alpha \equiv \frac{8\mu q}{\rho_l^2 g r_c^2} \sim \frac{F_{lw}}{\rho_l g}$

$$L_b + L_g = L_{\text{total}} \text{ (火道全体の長さ)}$$

定常解



L_g 曲線を支配するパラメータ

$$\varepsilon \equiv \frac{8\mu k}{\mu_g r_c^2 (1 - \phi_{\text{crit}})} : F_{\text{lw}} \text{ と } F_{\text{lg}} \text{ の効果の比}$$

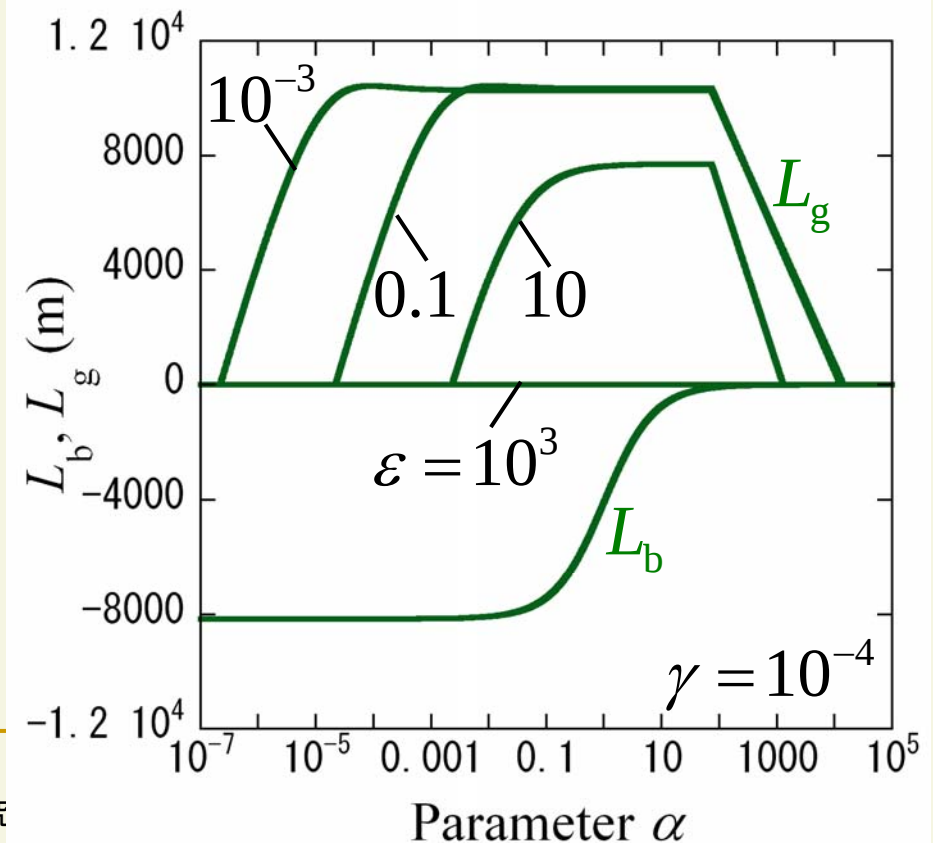
脱ガスの効率を表すパラメータ

$$\gamma \equiv \frac{\rho_1^2 g \sqrt{n_0 RT}}{P_f^*} \frac{r_c^2}{8\mu} : r_c^2 / 8\mu \text{ の効果を表すパラメータ}$$

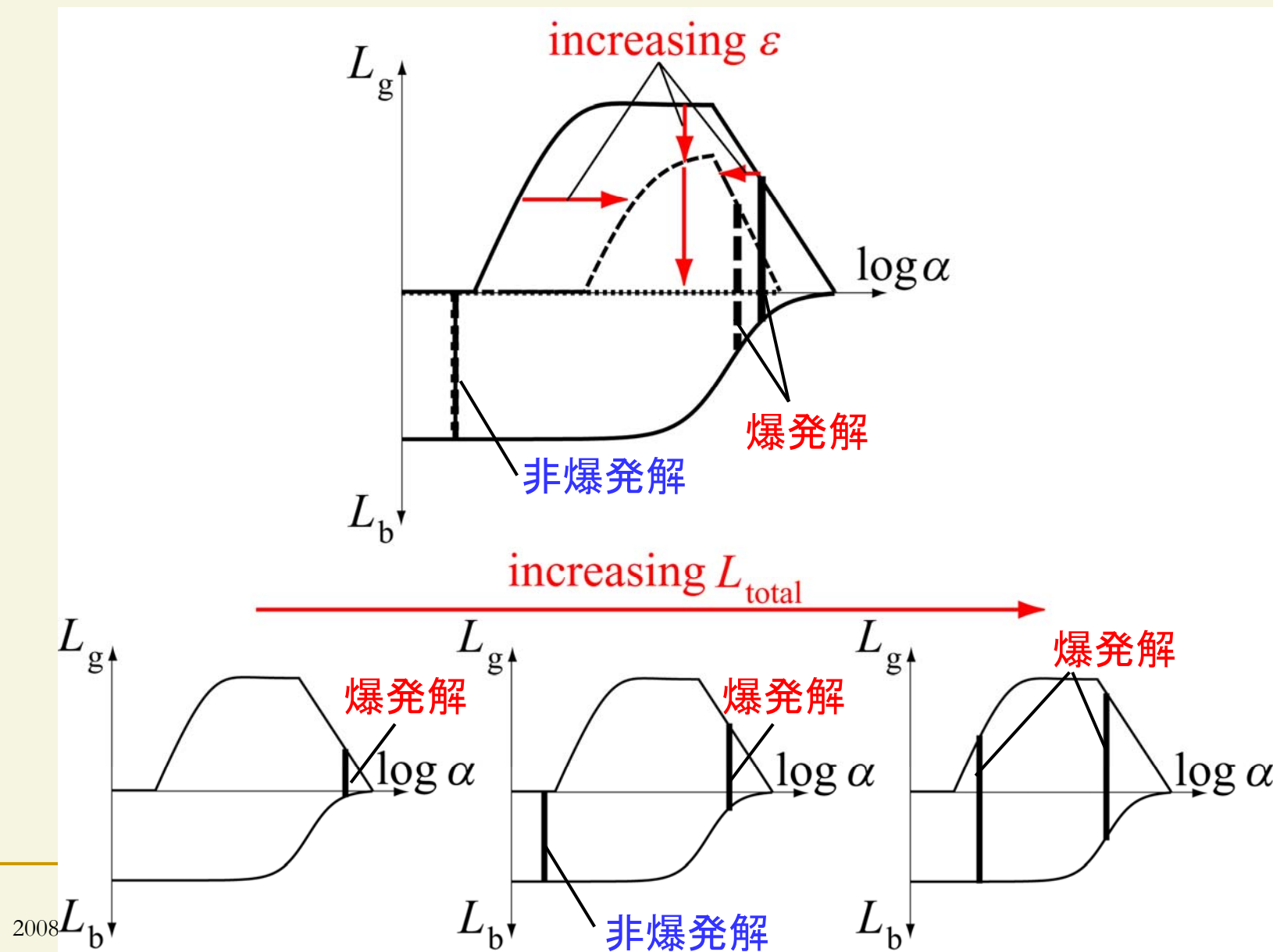
where $P_f^* = \left(\frac{-sA + \sqrt{(sA)^2 + 4n_0 A}}{2} \right)^2$

$$A \equiv \frac{\rho_1 (1 - \phi_{\text{crit}}) RT}{\phi_{\text{crit}} (1 - n_0)}$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{火道壁と} \\ \text{の摩擦力} : F_{\text{lw}} = \frac{8\mu}{r_c^2} u_1 \\ \text{気液間の} \\ \text{相互作用力} : F_{\text{lg}} = \frac{\mu_g}{k} \phi(1 - \phi)(u_g - u_1) \end{array} \right)$$



L_g 曲線・ L_{total} の変化に伴う定常解の変化

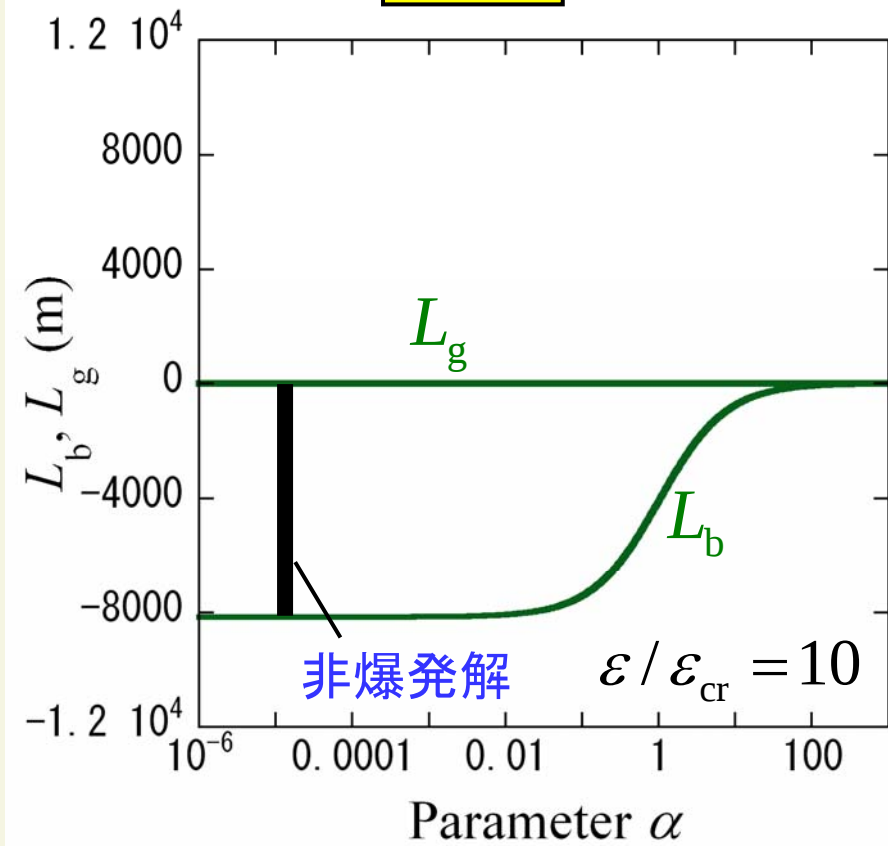
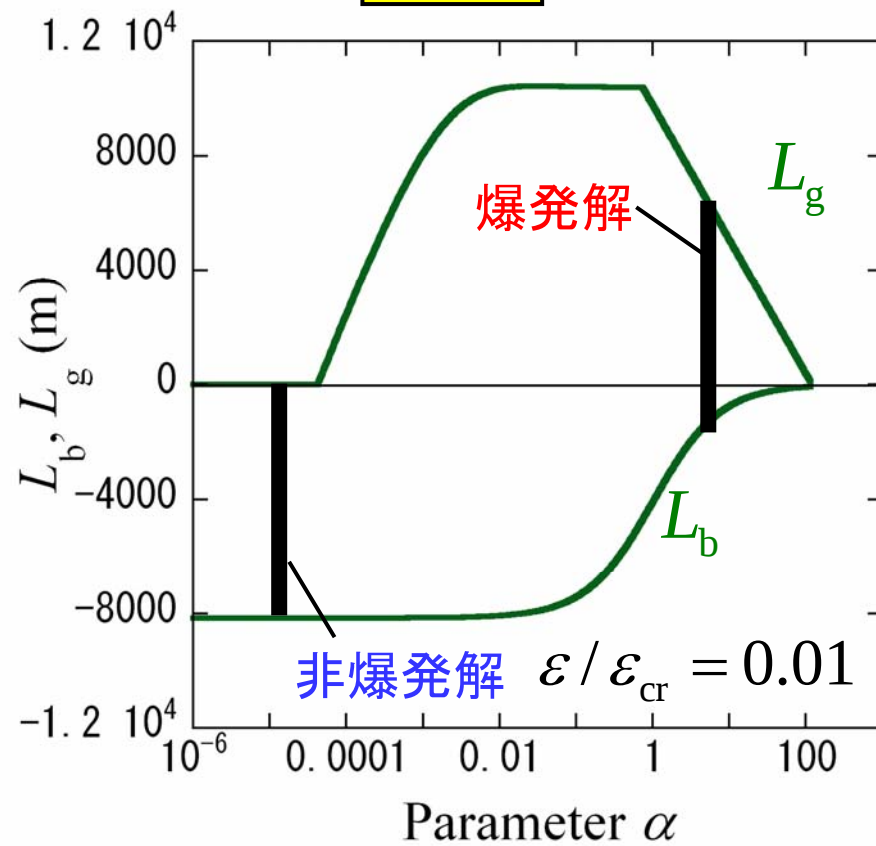


L_g 曲線の特徴

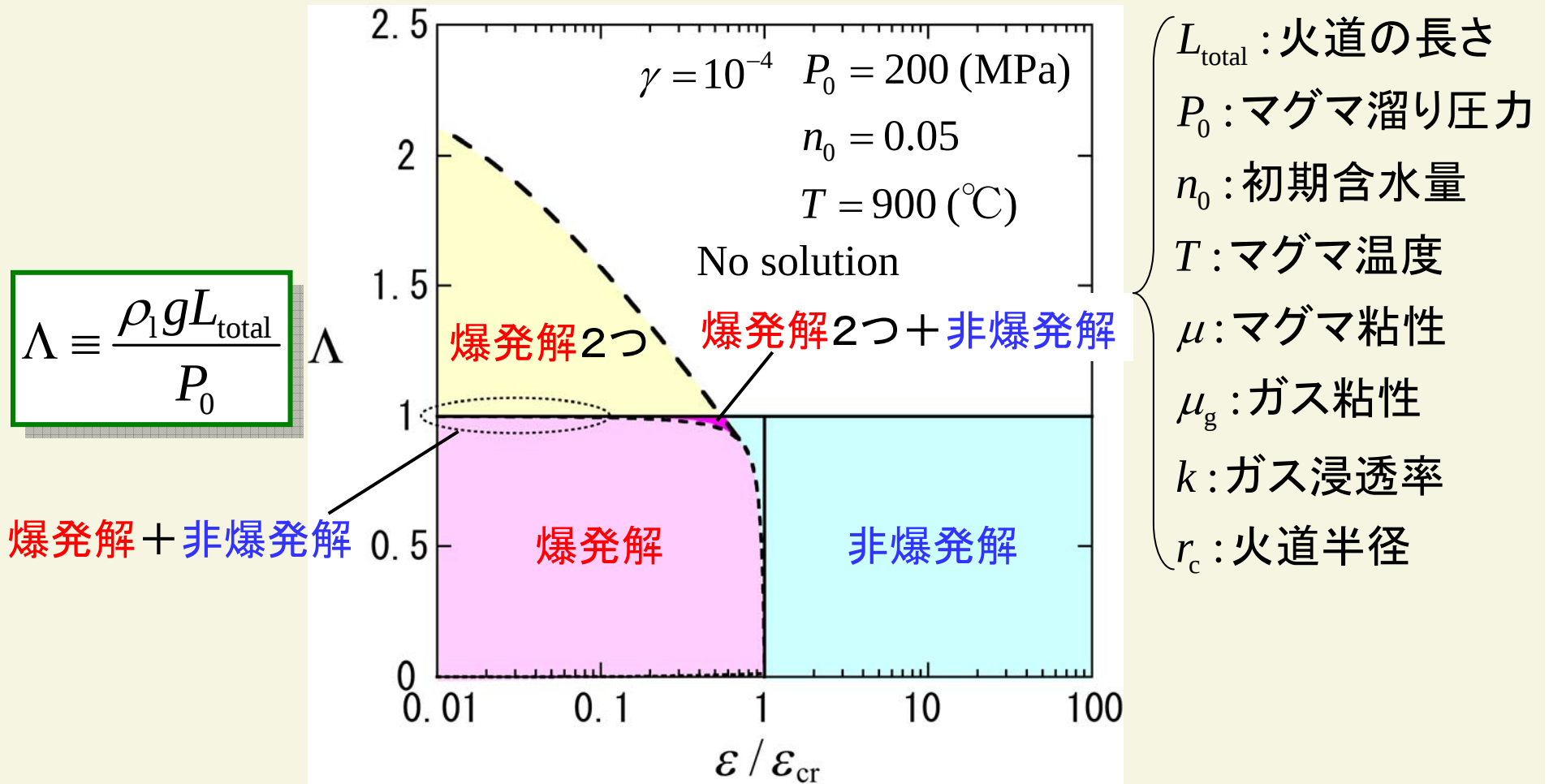
$$\varepsilon_{cr} \equiv \frac{n_0(1-\phi_{crit})\rho_l RT}{P_a(1-n_0)\phi_{crit}} - 1$$

$\varepsilon < \varepsilon_{cr}$

$\varepsilon > \varepsilon_{cr}$

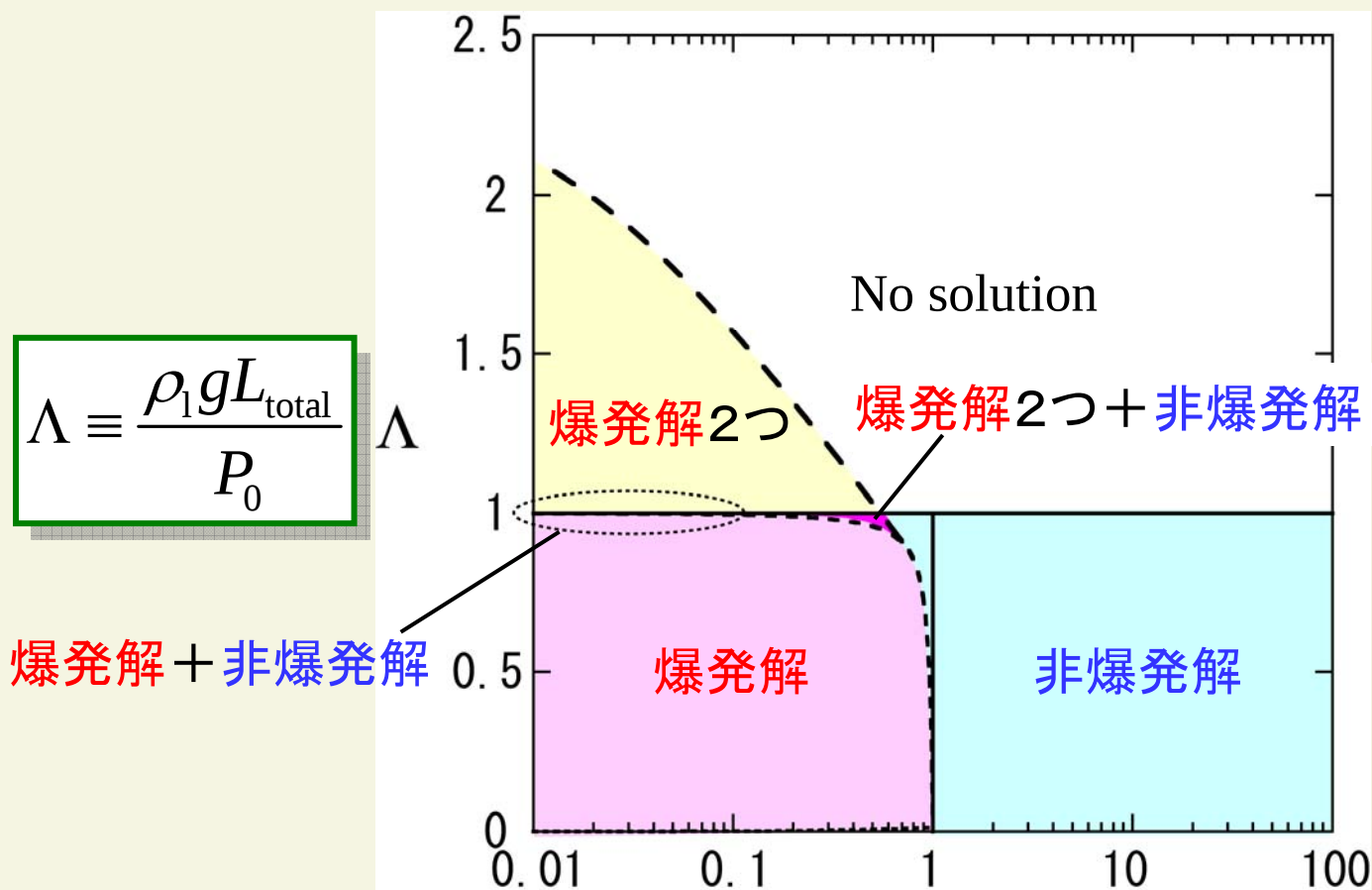


定常解の組み合わせを示すレジームマップ

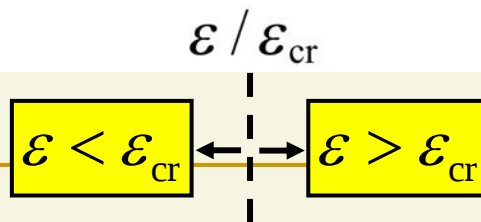


$$\varepsilon \equiv \frac{8\mu k}{\mu_g r_c^2 (1 - \phi_{\text{crit}})}$$

定常解の組み合わせを示すレジームマップ



- 爆発解が幅広く存在
- 非爆発解が $\Lambda \sim 1$ のみに存在



- 非爆発解が幅広く存在 ($\Lambda \leq 1$)

観測事実との比較

$$\varepsilon \equiv \frac{8\mu k}{\mu_g r_c^2 (1 - \phi_{\text{crit}})}$$

マグマ粘性
ガス浸透率
火道半径

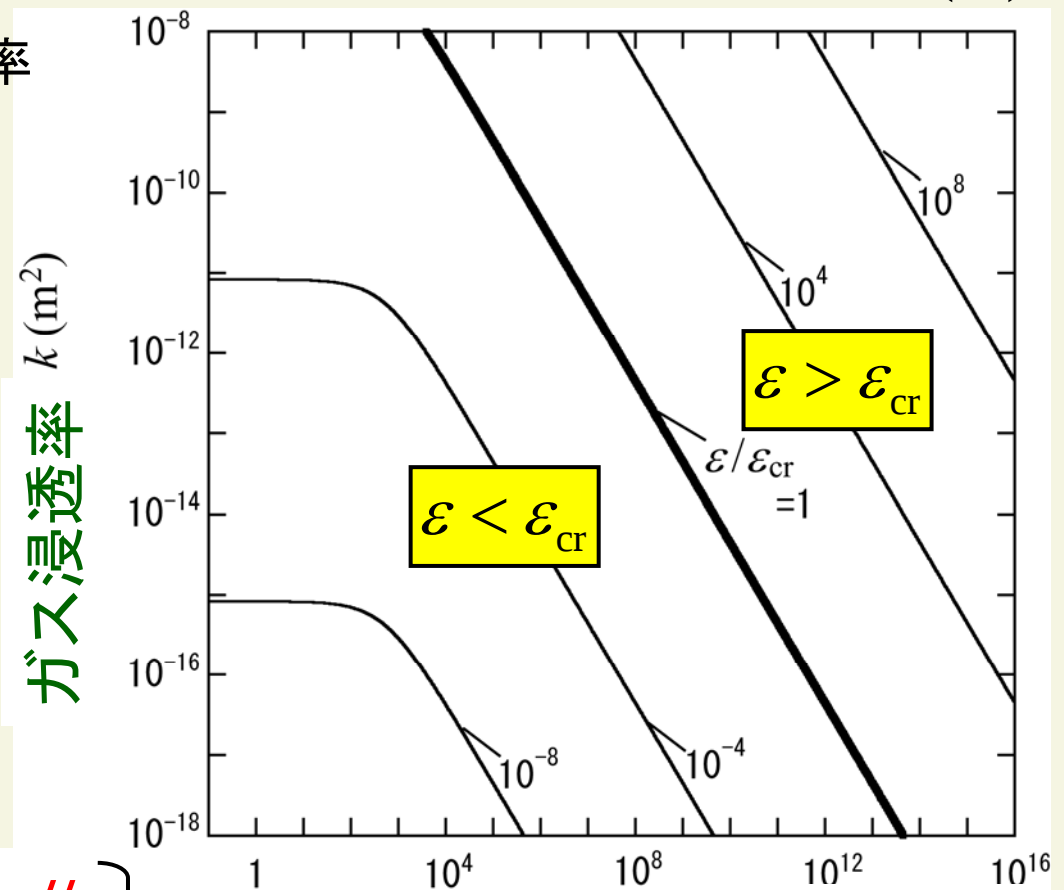
$$\left(\begin{array}{l} \varepsilon_H \equiv \frac{8\mu_H k}{\mu_g r_c^2 (1 - \phi_{\text{crit}})} \\ \varepsilon_L \equiv \frac{8\mu_L k}{\mu_g r_c^2 (1 - \phi_{\text{crit}})} \end{array} \right)$$

溶岩ドーム・溶岩流の粘性: μ_H
マグマ溜りにおける粘性: μ_L

マグマ粘性/(火道半径)²
 $\mu/r_c^2 (\text{Pa s m}^{-2})$

$$n_0 = 0.05$$

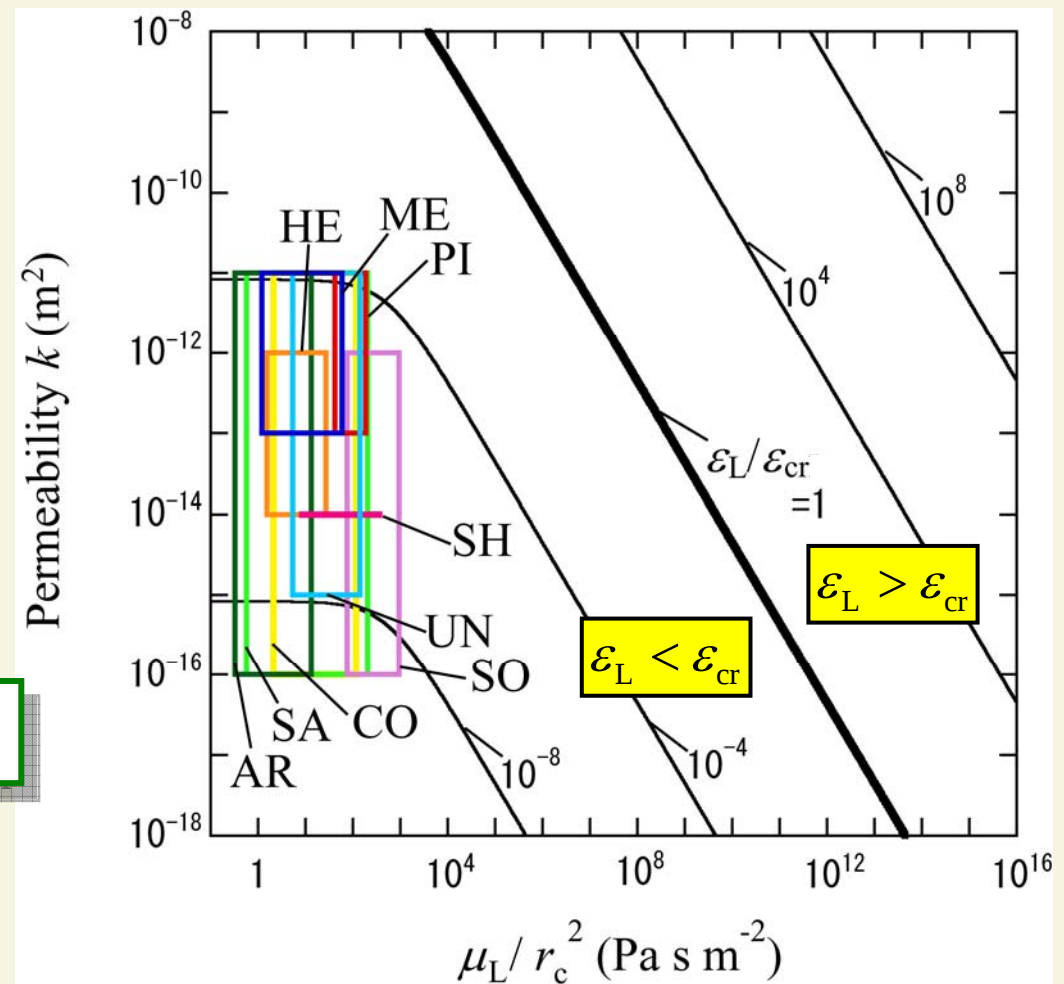
$$T = 900 (^\circ\text{C})$$



マグマ溜りにおける粘性を用いた比較

UN: Unzen (1991-1995)
ME: Merapi (1986-)
SO: Soufriere Hills (1991-1995)
HE: Mt. St. Helens (1980-1986)
PI: Pinatubo (1991)
SH: Shiveluch (2001-)
CO: Colima (1998-)
SA: Sakurajima (1914)
AR: Arenal (1968-)

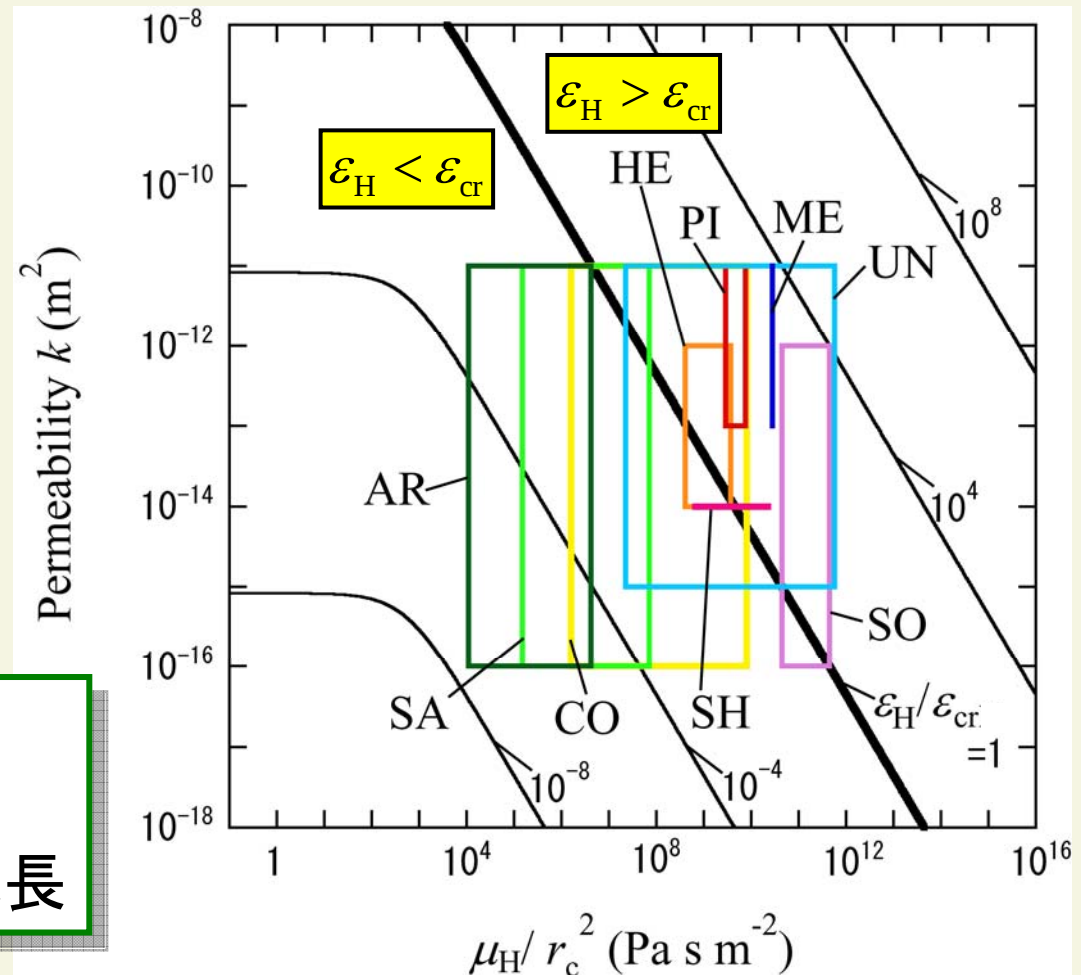
すべての噴火事例で: $\epsilon_L < \epsilon_{cr}$



溶岩ドーム・溶岩流の粘性を用いた比較

UN: Unzen (1991-1995)
ME: Merapi (1986-)
SO: Soufriere Hills (1991-1995)
HE: Mt. St. Helens (1980-1986)
PI: Pinatubo (1991)
SH: Shiveluch (2001-)
CO: Colima (1998-)
SA: Sakurajima (1914)
AR: Arenal (1968-)

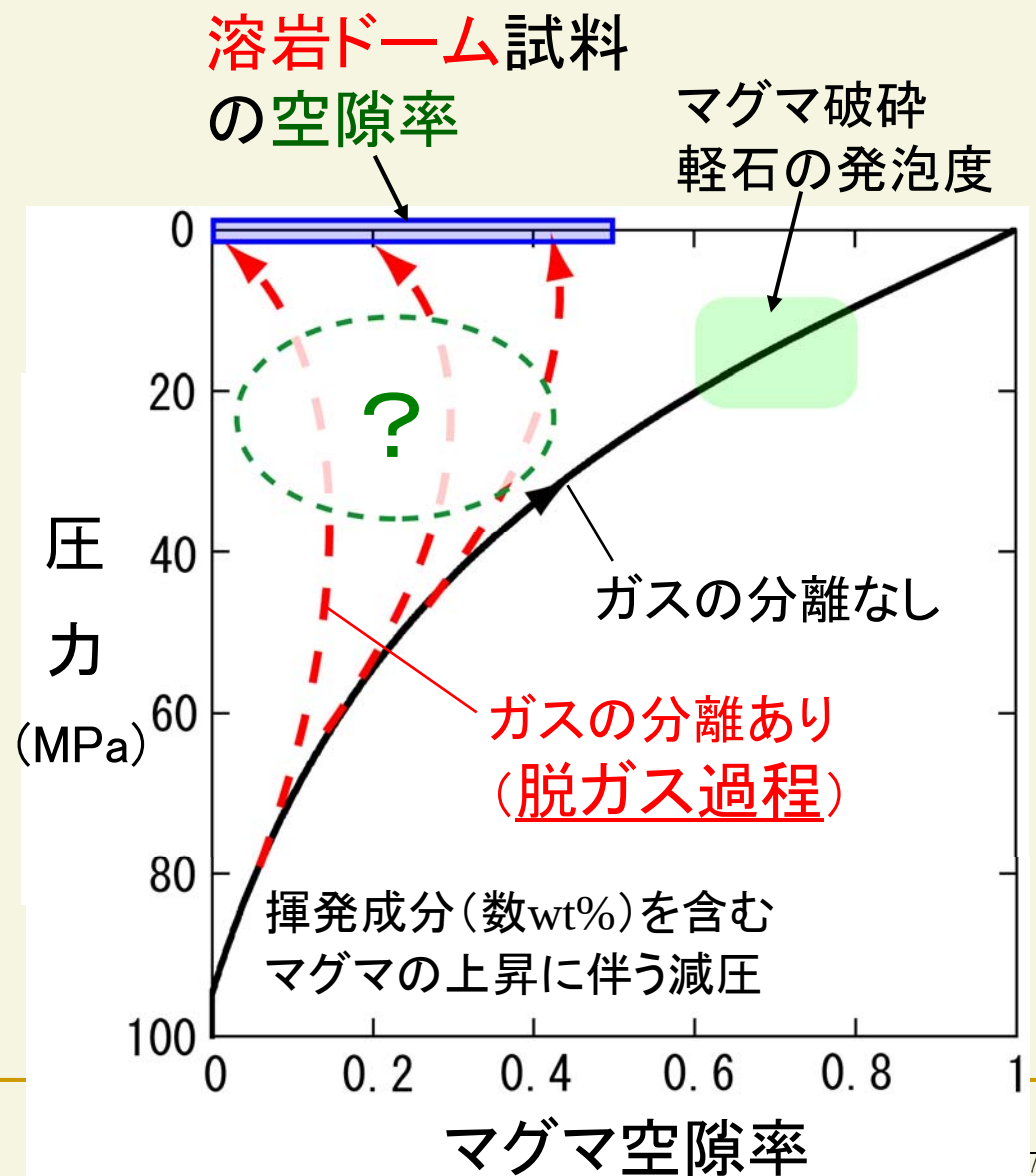
UN, ME, SO, HE: $\varepsilon_H > \varepsilon_{cr}$
= 非爆発的phaseが卓越
長期間の溶岩ドーム成長



「 $\varepsilon > \varepsilon_{cr}$ においては、非爆発解が幅広く存在」
というレジームマップの特徴と一致

溶岩ドーム噴火におけるマグマ空隙率変化

- 溶岩ドーム噴火における空隙率変化のメカニズム
- 低空隙率の溶岩ドームが形成されるメカニズム



マグマ空隙率変化の解析近似解

$$\frac{f_k(\phi)}{(1-\phi)^2} \frac{8\mu k_0}{r_c^2 \mu_g} + \frac{f_k(\phi)}{1-n(P)} \frac{\rho_l^2 g k_0}{q \mu_g} + \frac{1}{1-\phi} - \frac{n(P) \rho_l R T}{(1-n(P)) \phi P} = 0$$

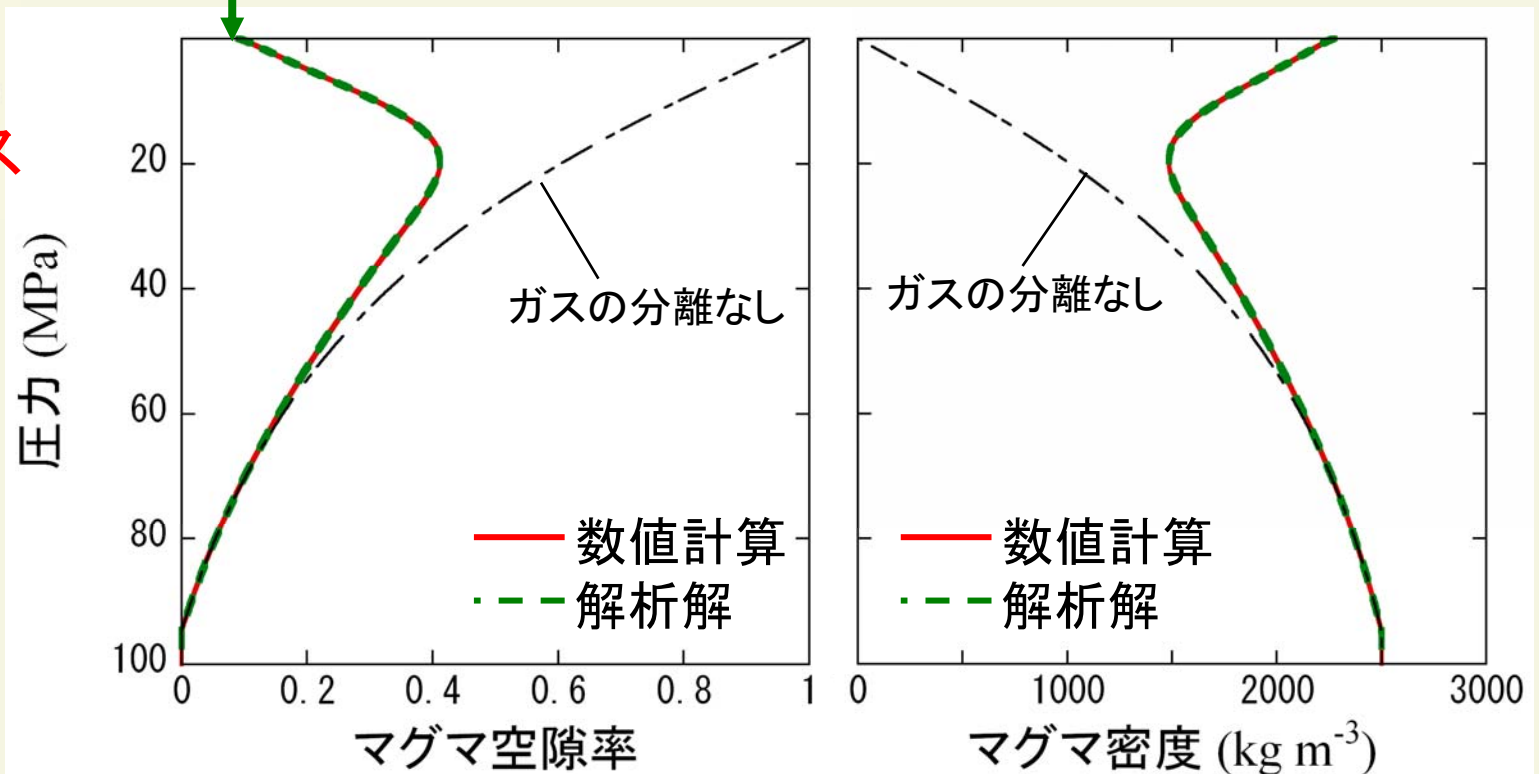
圧力

マグマ空隙率

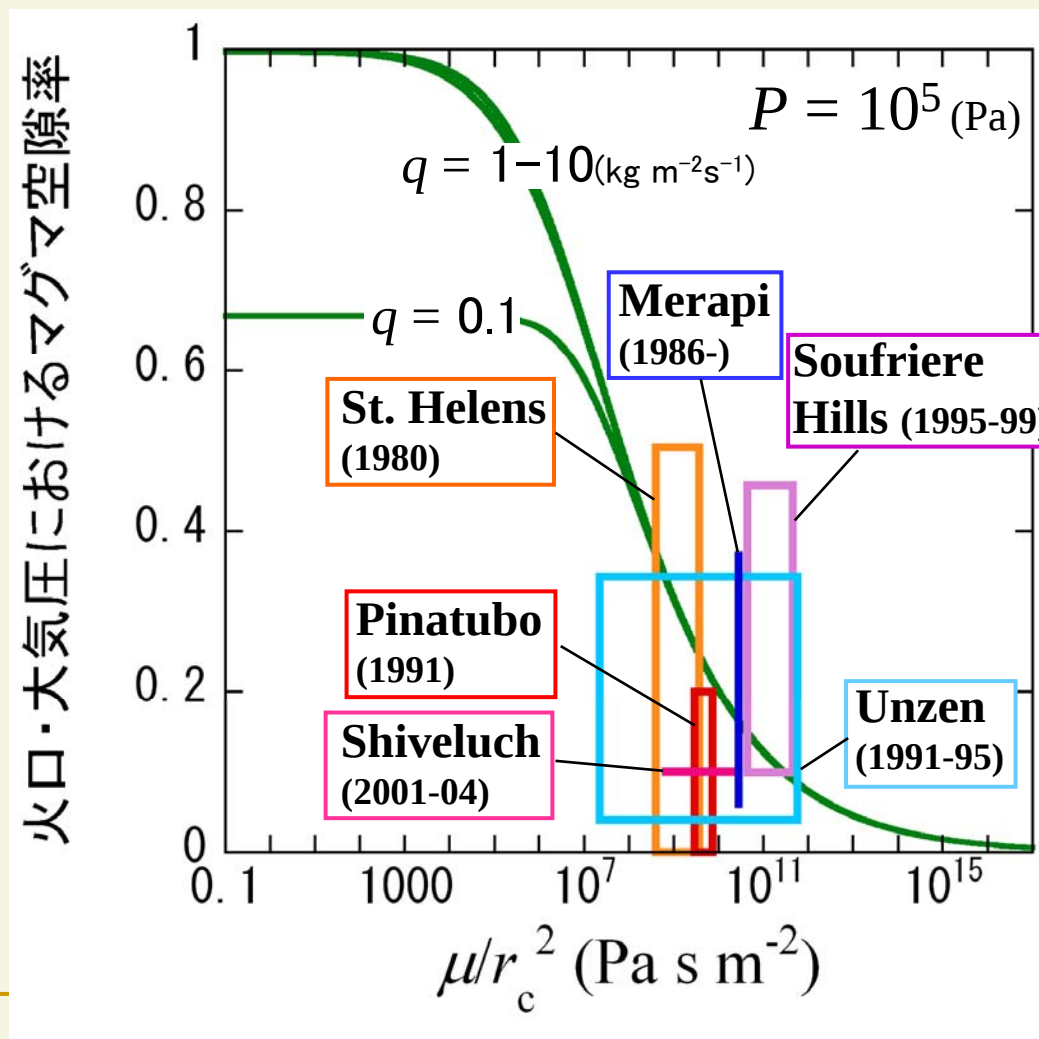
非爆発的噴火

脱ガス

火口・大気圧における
マグマ空隙率



観測事実との比較 (火口・大気圧におけるマグマ空隙率)



Conclusions

- 多様な噴火タイプに対応する定常解（爆発解，非爆発解）の組み合わせと，マグマの性質・地質条件の関係を示す**レジームマップ**を導出した．
- 溶岩ドーム噴火における火道内上昇中のマグマ空隙率，密度変化に関する**解析近似解**を導出した．
- 以上の解析によって，様々な火山観測データとの比較と火道流のダイナミクスとの比較が可能になり，噴火タイプの多様性の成因をより**実証的**に明らかにすることができる．