

# 一次元定常火道流の解析的研究： 溶岩ドーム噴火における火道中の マグマ空隙率変化

小園誠史 (防災科学技術研究所)

小屋口剛博 (東京大学地震研究所)

# Introduction

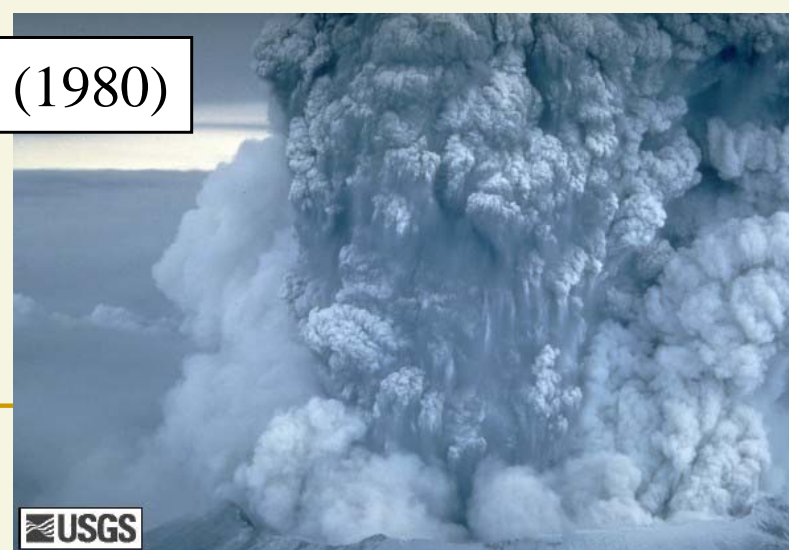
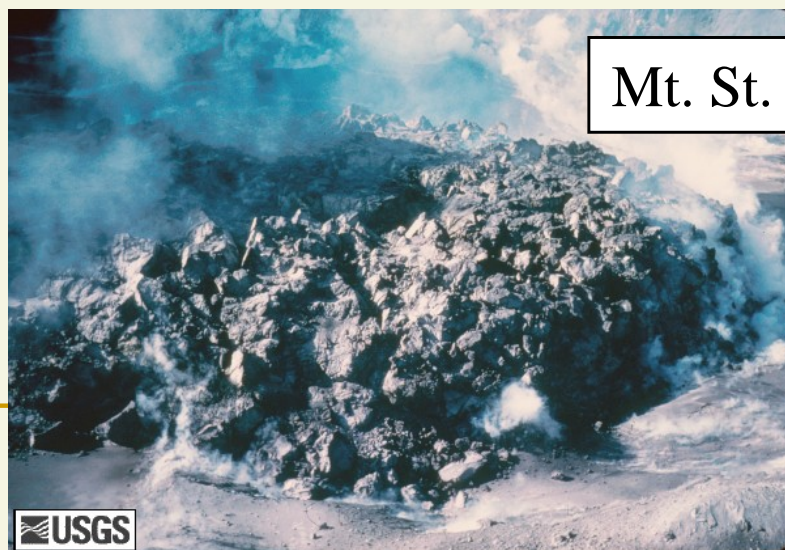
「火山噴火のタイプには多様性がある」



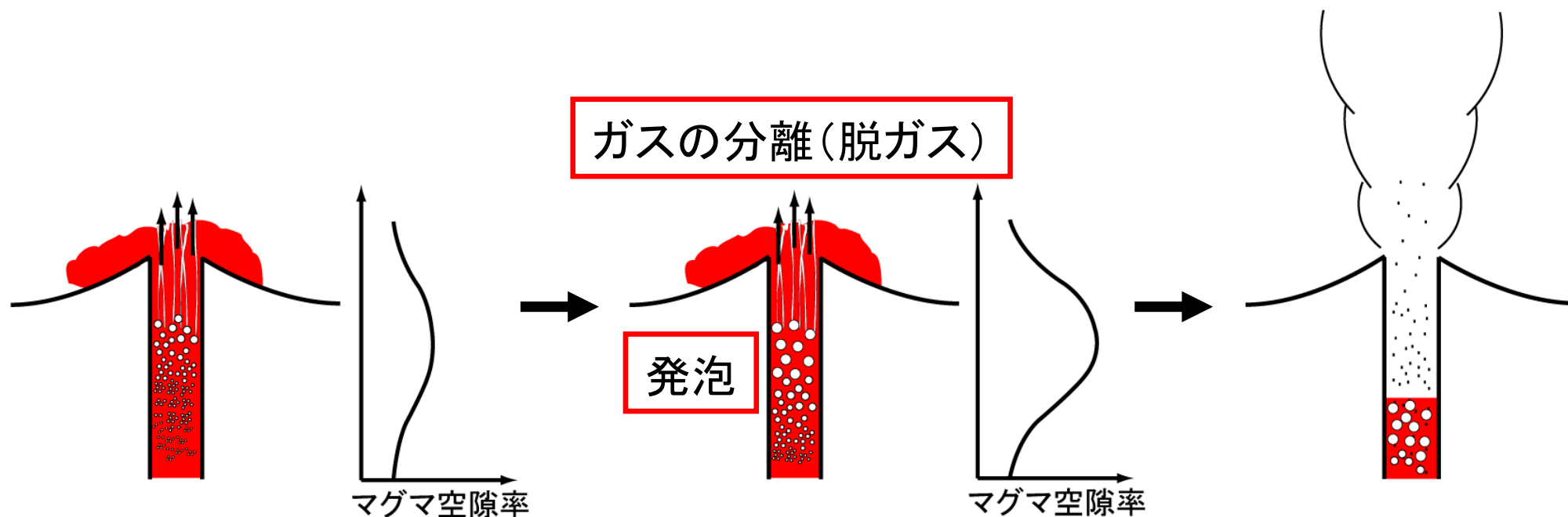
溶岩ドーム(非爆発的)噴火



爆発的噴火



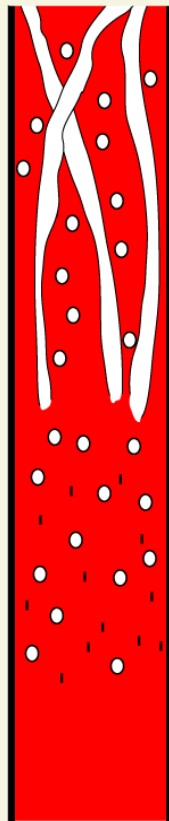
# Introduction: 溶岩ドーム噴火のダイナミクス



- 地表ではマグマ空隙率が変わらなくても、地下ではマグマ空隙率が変化している状況が考えられる。
- 発泡の進行→爆発的噴火へ遷移する可能性

# 火道流モデル

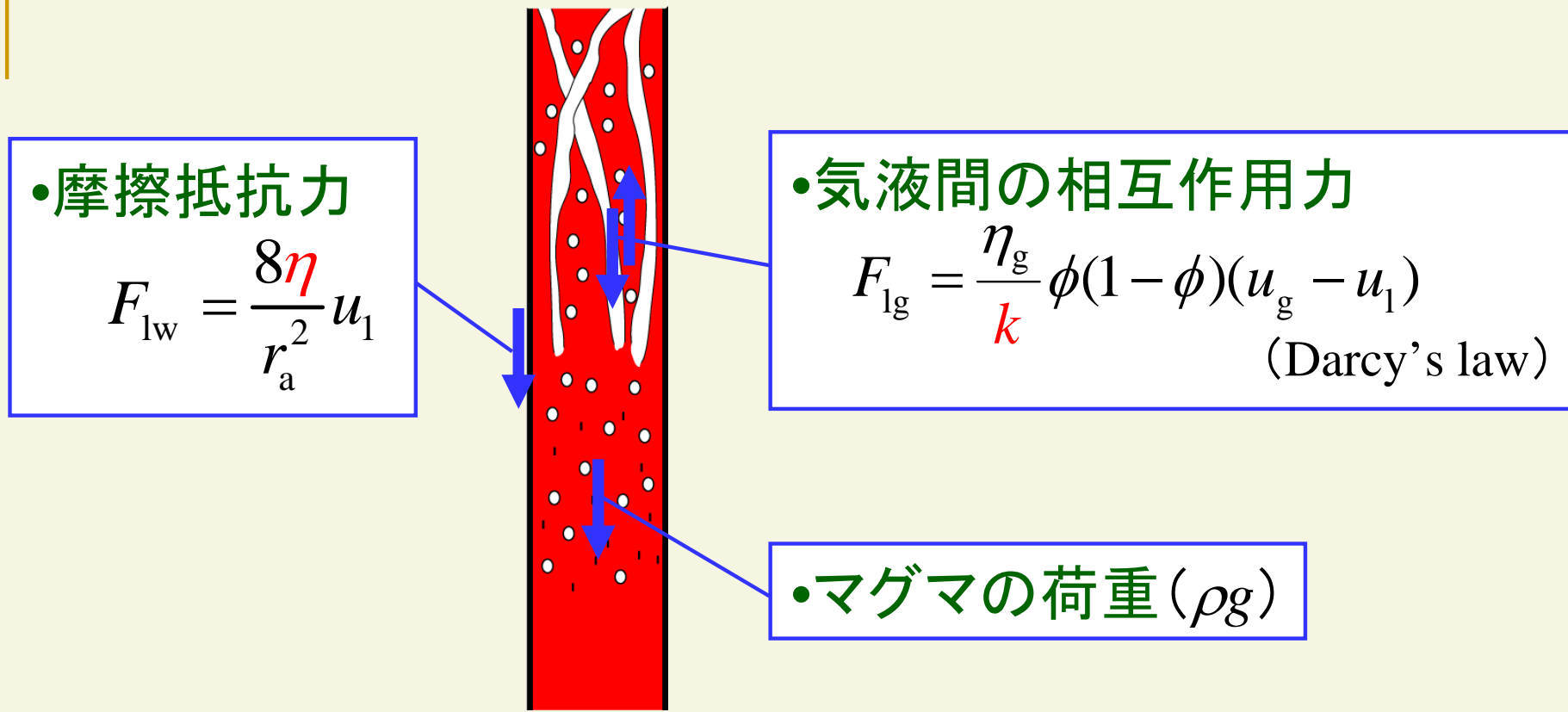
浸透流領域



基礎方程式 (Kozono and Koyaguchi, 2009a)

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1 = \rho_1 u_1 (1 - \phi) = (1 - n)q \quad : \text{質量保存} \\ q_g = \rho_g u_g \phi = nq \\ \rho_1 u_1 (1 - \phi) \frac{du_1}{dz} = -(1 - \phi) \frac{dP}{dz} - \rho_1 (1 - \phi)g + F_{1g} - F_{1w} \\ \rho_g u_g \phi \frac{du_g}{dz} = -\phi \frac{dP}{dz} - \rho_g \phi g - F_{1g} \\ P = \rho_g RT \quad : \text{状態方程式} \\ n = \frac{n_0 - sP^{1/2}}{1 - sP^{1/2}} \quad (n \geq 0) : \text{気相質量分率} \end{array} \right. \quad : \text{運動量保存}$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} q: \text{流量 (kg m}^{-2}\text{s}^{-1}) & P: \text{圧力} \\ \rho: \text{密度} & T: \text{温度} \\ u: \text{速度} & -z: \text{鉛直上向き} \text{の座標} \\ \phi: \text{空隙率} & \end{array} \right.$$



•摩擦抵抗力

$$F_{lw} = \frac{8\eta}{r_a^2} u_1$$

•気液間の相互作用力

$$F_{lg} = \frac{\eta_g}{k} \phi(1 - \phi)(u_g - u_1)$$

(Darcy's law)

•マグマの荷重 ( $\rho g$ )

マグマ粘性:  $\eta = \eta_1(c) f_\eta(\beta)$  (Hess and Dingwell, 1996; Costa, 2005; Couch et al., 2003)

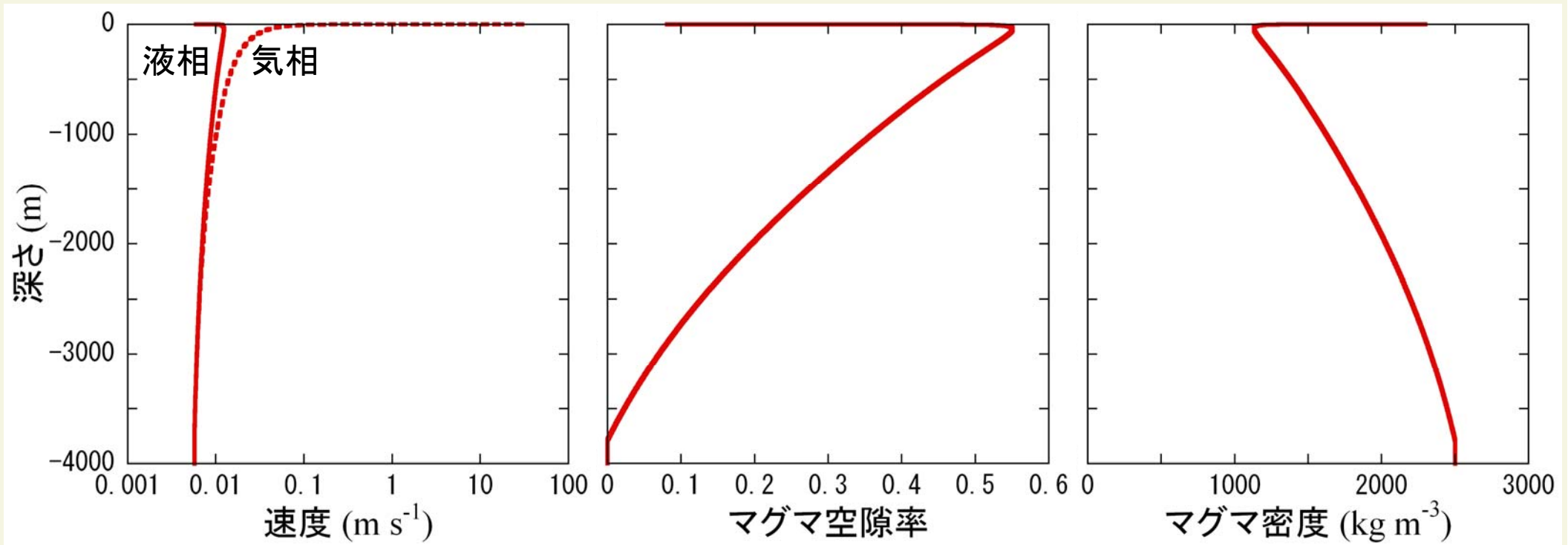
揮発分量      結晶量

ガス浸透率:  $k = k_0 f_k(\phi)$  (Mueller et al., 2005)

空隙率

- $r_a$  : 上昇流部の半径
- $r_b$  : 気泡半径
- $\eta_g$  : 気相の粘性

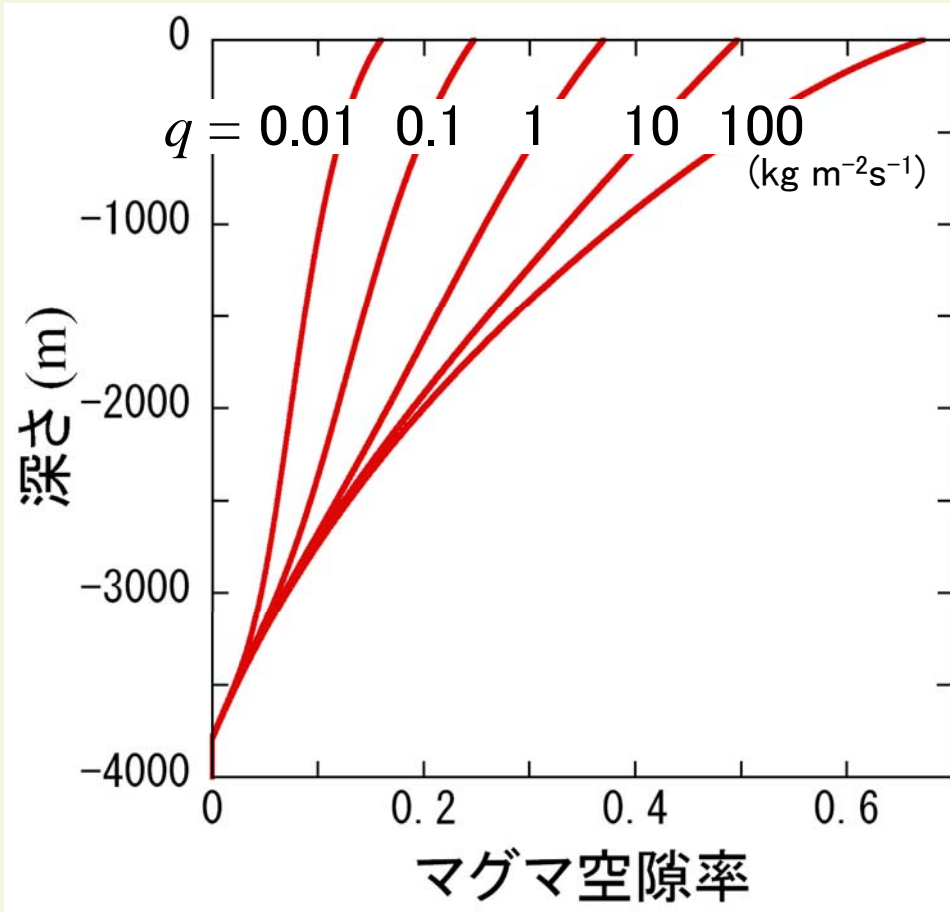
# 数値計算結果



## マグマ空隙率変化の特徴

- 深部ではマグマ上昇とともに増加
- 数百mの深さで最大になる
- 地表付近で急減

# マグマ空隙率の流量依存性



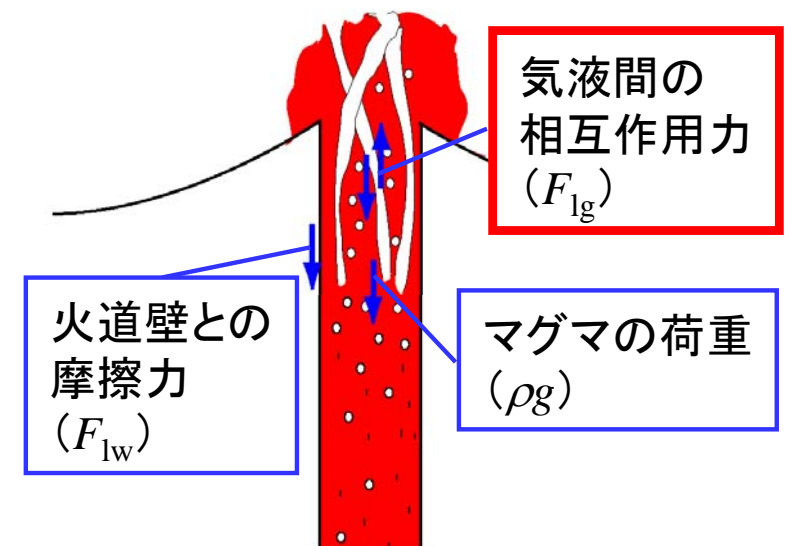
- マグマの流量が大きいほど、マグマ空隙率は増加する。

マグマ流量増加

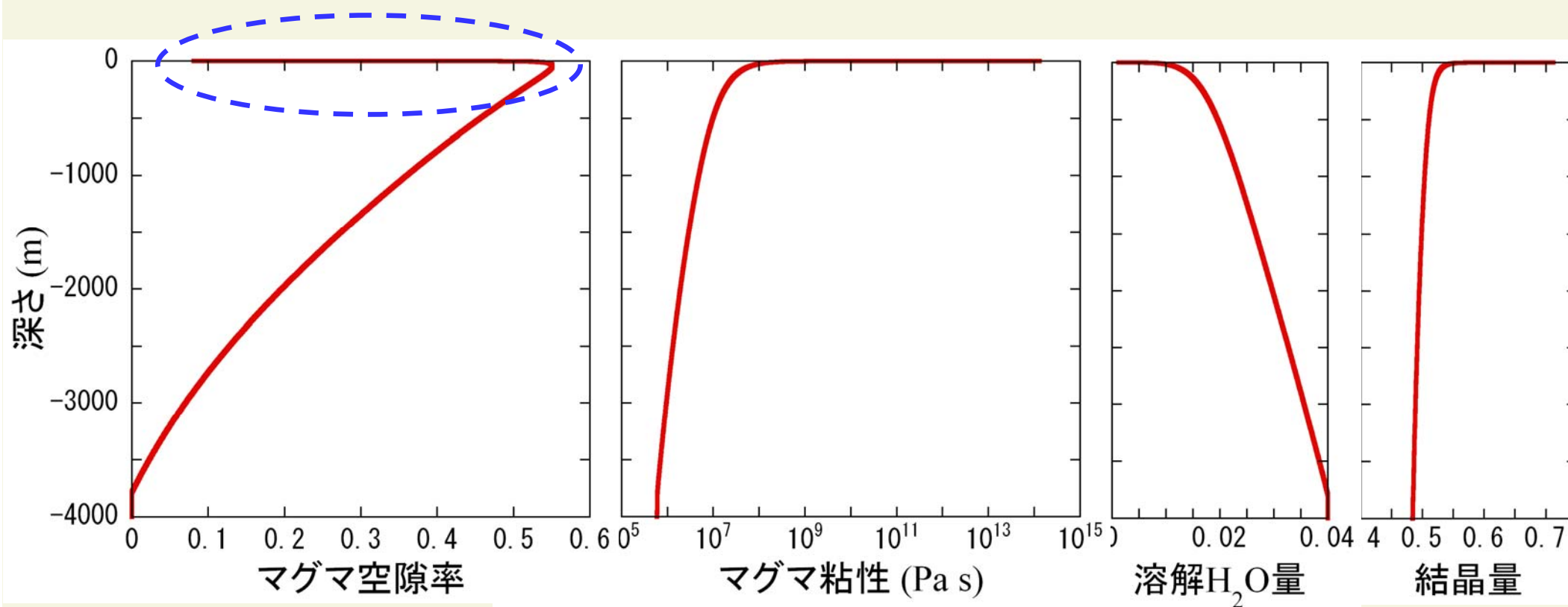
→ 気液間の相互作用力が増加

→ 気相に引っ張られて、液相も一緒に上昇

→ マグマ空隙率増加



# 地表付近におけるマグマ空隙率の急減



- 揮発性成分の析出，結晶化の進行によって，  
マグマ粘性が地表付近で急増



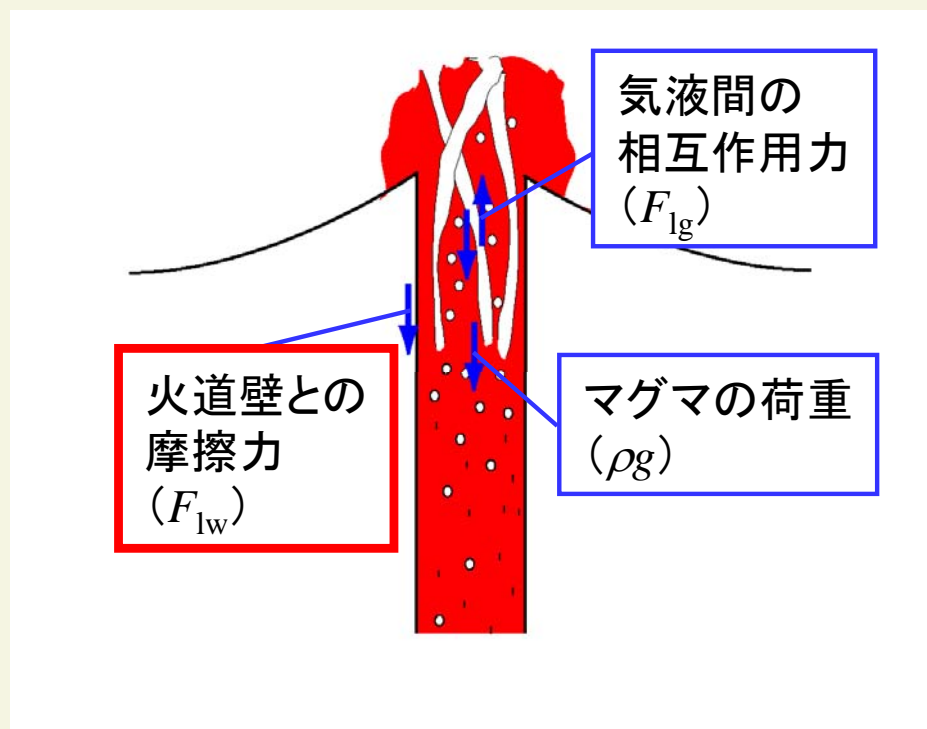
# 粘性増加による脱ガス促進のメカニズム

マグマ粘性増加

→火道壁からの摩擦抵抗が増加

→液相の上昇が抑制される

→脱ガスが促進され、マグマ空隙率減少



# マグマ空隙率変化の解析近似解

$$\frac{f_k(\phi)}{(1-\phi)^2} A + \frac{f_k(\phi)}{1-n(P)} B + \frac{1}{1-\phi} - \frac{n(P)\rho_l RT}{(1-n(P))\phi P} = 0$$

マグマ空隙率  
|  
圧力

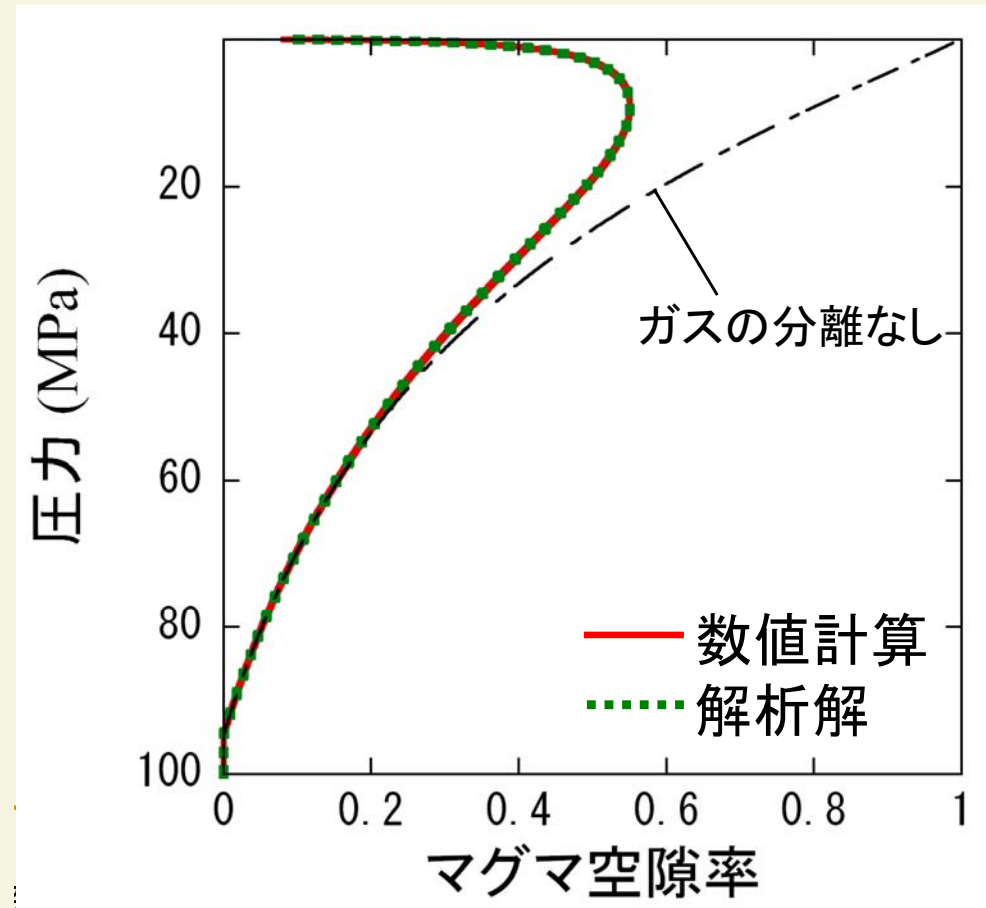
マグマ空隙率      圧力

$$A \equiv \frac{8\eta k_0}{r_c^2 \eta_g} \sim \frac{\text{火道壁からの摩擦抵抗}}{\text{気液間の相互作用力}}$$

$$B \equiv \frac{\rho_l^2 g k_0}{q \eta_g} \sim \frac{\text{マグマの荷重}}{\text{気液間の相互作用力}}$$

$\left\{ \begin{array}{ll} \eta : \text{マグマ粘性} & \eta_g : \text{気相粘性} \\ q : \text{マグマ流量} & \rho_l : \text{液相密度} \\ r_c : \text{火道半径} & k_0 : \text{浸透率に関する} \end{array} \right.$

定数 ( $k = k_0 f_k(\phi)$ )



# マグマ空隙率のパラメータ依存性

マグマ粘性

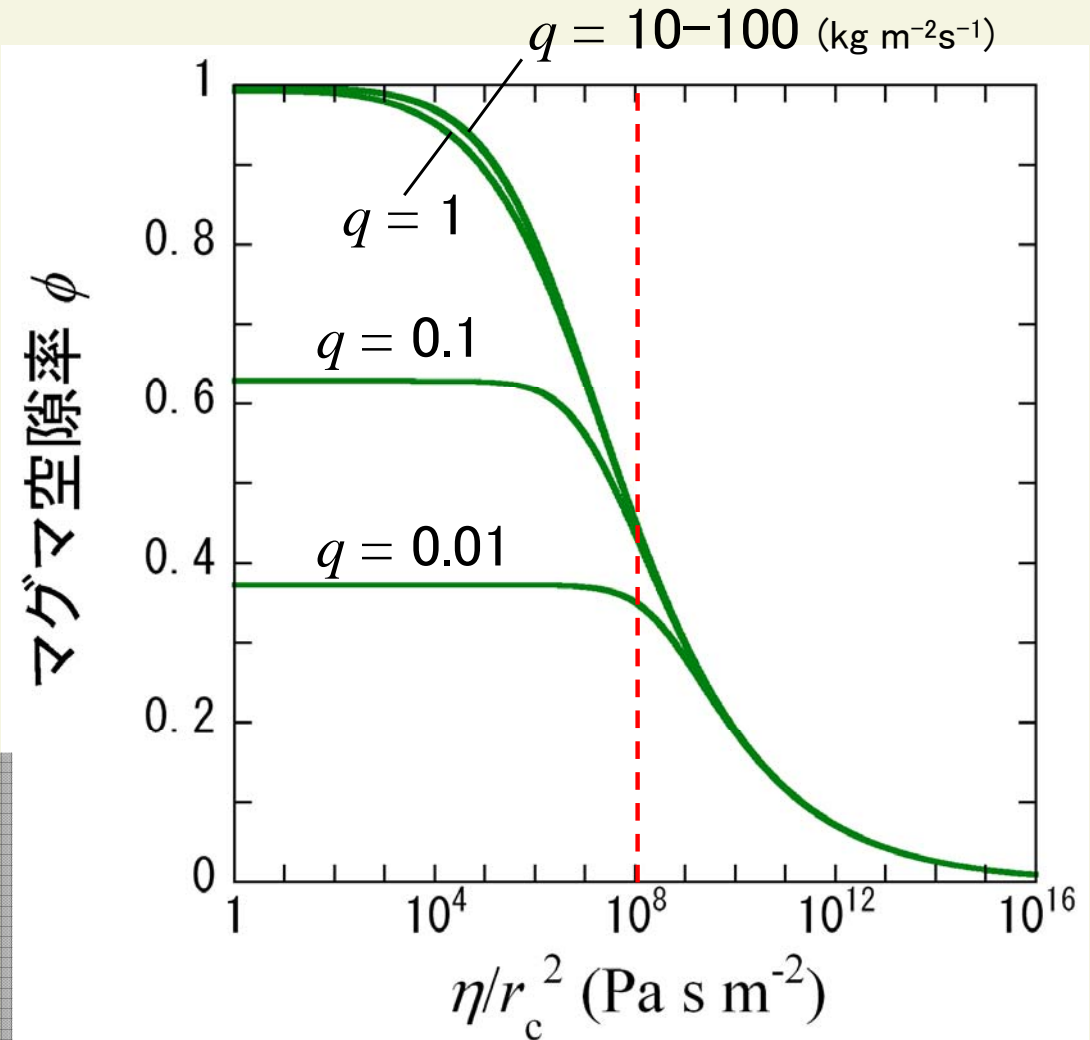
$$A \equiv \frac{8\eta k_0}{r_c^2 \eta_g} \sim \frac{\text{火道壁からの摩擦抵抗}}{\text{気液間の相互作用力}}$$

火道半径

$$B \equiv \frac{\rho_1^2 g k_0}{q \eta_g} \sim \frac{\text{マグマの荷重}}{\text{気液間の相互作用力}}$$

マグマ流量

- $\eta/r_c^2 < 10^8$   
: マグマ流量の増加とともに空隙率が増加する効果大
- $\eta/r_c^2 > 10^8$   
: マグマ粘性の増加とともに空隙率が減少する効果大



**Table 1**

Features of eruption style and parameters related to magma properties and geological conditions for the eruptions of Mount Pinatubo (1991), Sakurajima Volcano (1914), Colima Volcano (1951–1969), Helens (1980–1986), Soufrière Hills Volcano (1995–1999), Shiveluch Volcano (2001–present), Mount Unzen (1991–1995) and Merapi Volcano (1986–present)

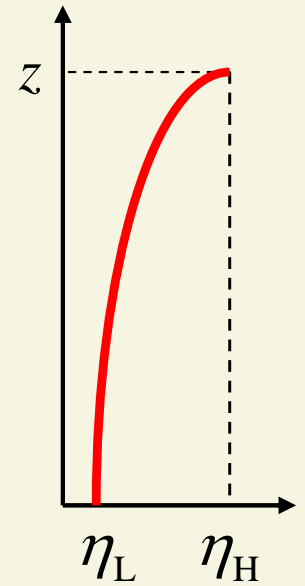
	Pinatubo, 1991 (MPT)	Mt. St. Helens, 1980–1986 (MSH)	Soufrière Hills, 1995–1999 (SHV)	Shiveluch 2001– (SVV)	Unzen, 1991–1995 (MUZ)	Merapi, 1986–(MRV)
Eruption style <sup>a</sup>	Ex with minor Ef	Ex and Ef	Ex and Ef	Ex and Ef	Ef with minor Ex	Ef with minor Ex
Permeability $k$ (m <sup>2</sup> )	$10^{-13}$ – $10^{-11}$	$10^{-14}$ – $10^{-12}$	$10^{-16}$ – $10^{-12}$	$10^{-14}$	$10^{-15}$ – $10^{-11}$	$10^{-13}$ – $10^{-11}$
Conduit radius $r_c$ (m)	50	50–55 (Ex), 12.5(Ef)	15	26–36	25	25
Initial H <sub>2</sub> O content $n_0$ (wt.%)	5.1–6.4	4.6±1	4.27±0.54	5.1	5.1–7.2	(3–7) <sup>d</sup>
Magma temperature $T$ (°C)	780±10	930±10	858±20	830–900	780–880	900
Crystal volume content $X$						
Phenocryst $X_{ph}$	0.39–0.42	0.3–0.44	0.35–0.45	0.33–0.52	0.23–0.28	0.3–0.5
Microlite/groundmass $X_{mi}$	0.25	–	–	0.3	0.33–0.5	–
Total $X_{to}$	–	0.6	0.85–0.95	–	–	0.7
$X_{ph} + (1 - X_{ph})X_{mi}$	av.0.55	–	–	av.0.6	av.0.56	–
Groundmass composition (wt.%)						
SiO <sub>2</sub>	70.9	69.90	71.41	68.55	69.2	59.96
TiO <sub>2</sub>	0.35	0.32	0.28	0.28	0.5	0.84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.79	13.86	13.58	16.28	14.8	15.49
FeO <sub>t</sub>	2.58	1.93	2.78	1.75	3.5	4.61
MnO	0.07	0.04	0.13	0.05	0.1	0.29
MgO	0.78	0.56	1.64	0.73	1.5	1.71
CaO	2.52	1.92	4.86	3.61	3.7	3.79
Na <sub>2</sub> O	2.19	4.77	3.73	5.53	3.5	6.82
K <sub>2</sub> O	2.95	1.87	1.60	1.68	2.9	4.89
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.13	0.00	0.25	0.1	0.49
total	97.24	95.30	100.01	98.71	99.8	98.89
Matrix glass composition (wt.%)						
SiO <sub>2</sub>	77.4	76.05	78.34	78.40	79.61	74.93
TiO <sub>2</sub>	0.53	0.15	0.42	0.31	0.45	0.53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.1	14.62	11.18	12.16	12.37	15.20
FeO <sub>t</sub>	1.48	0.44	1.64	1.08	1.50	2.20
MnO	0.03	0.04	0.06	0.04	0.07	0.08
MgO	0.33	0.02	0.12	0.12	0.28	0.14
CaO	0.85	3.01	0.93	0.66	0.81	0.52
Na <sub>2</sub> O	2.62	4.96	3.12	4.04	2.44	3.50
K <sub>2</sub> O	3.75	0.56	4.26	3.22	4.23	5.97
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.10	0.00	0.06	0.00	0.00
total	98.1	99.95	100.07	100.09	100.00	100.16
Measured dry melt viscosity (Pa s)					$10^{11}$ – $10^{13}$	
$\mu_L$ (Pa s)						
Hui and Zhang+Costa	$10^{5.02}$ – $10^{5.68}$	$10^{3.67}$ – $10^{4.83}$	$10^{4.23}$ – $10^{5.33}$	$10^{4.05}$ – $10^{5.38}$	$10^{3.53}$ – $10^{4.95}$	$10^{2.88}$ – $10^{4.57}$
$\mu_H$ (Pa s)						
Direct measurement	–	$10^{10.8}$	$10^{13}$ – $10^{14}$	–	$10^{10.15}$ – $10^{10.62}$	–
Hui and Zhang+Costa	$10^{12.86}$ – $10^{13.27}$	$10^{11.41}$ – $10^{11.76}$	$10^{18.26}$ – $10^{19.76}$	$10^{11.94}$ – $10^{13.18}$	$10^{11.46}$ – $10^{13.36}$	$10^{13.24}$
Goto+Costa	–	–	–	–	$10^{12.55}$ – $10^{14.55}$	–

<sup>a</sup>Ex: explosive eruption style, and Ef: effusive eruption style.

<sup>b</sup>Value of  $k$  that covers the measured values of volcanic rocks.

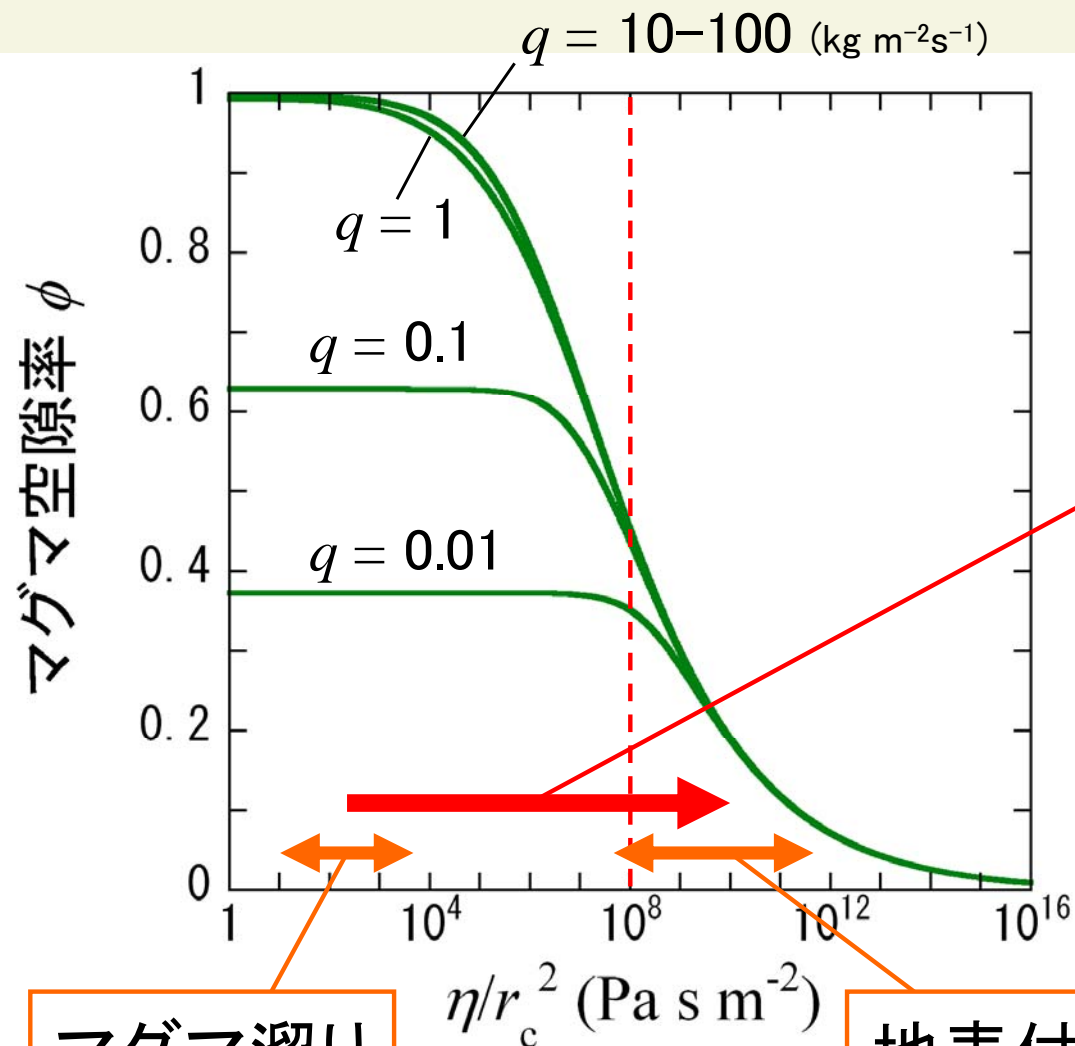
<sup>c</sup>Value of  $r_c$  that covers the estimated values for the other eruptions.

<sup>d</sup>Value of  $n_0$  that roughly covers the values of the other dome-forming eruptions.



(Kozono and Koyaguchi, 2009b)

# マグマ上昇過程との関係



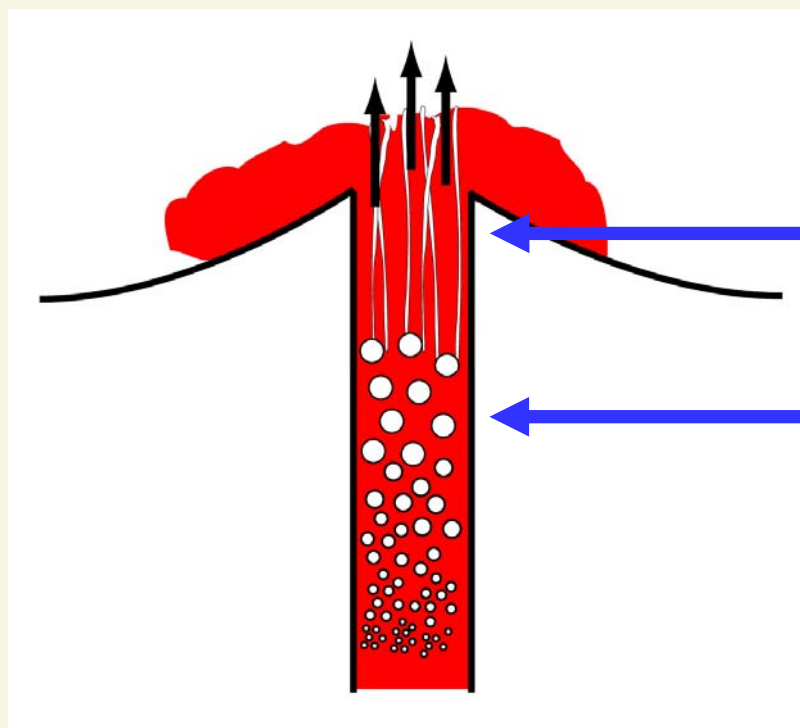
マグマ上昇中に,  
 $\eta/r_c^2 < 10^8$ の領域から  
 $\eta/r_c^2 > 10^8$ の領域へ遷移

マグマ溜りの  
 の粘性

地表付近  
 の粘性

- Unzen (1991-1995)
- Merapi (1986-)
- Soufriere Hills (1991-1995)
- Mt. St. Helens (1980-1986)
- Pinatubo (1991)
- Shiveluch (2001-)

# 溶岩ドーム噴火における マグマ空隙率変化のメカニズム



マグマ粘性の急増に伴う  
脱ガスの促進によって、  
低空隙率領域が形成される

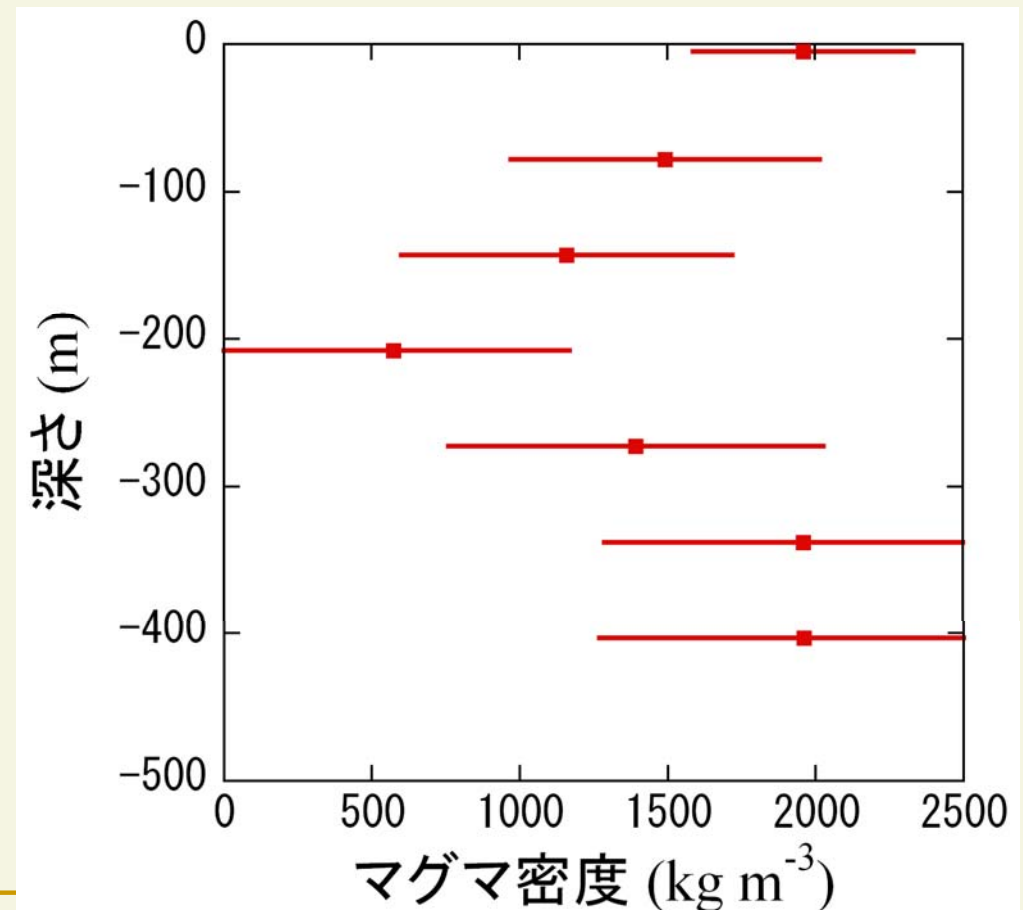
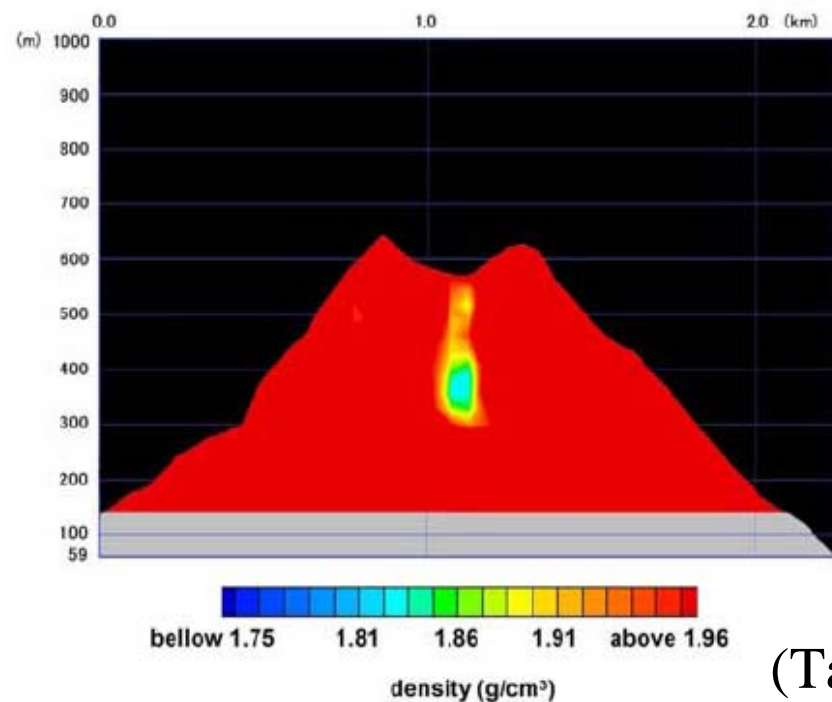
マグマ流量が比較的大きい  
効果によって、  
高空隙率領域が形成される

# 薩摩硫黄島におけるミュオンラジオグラフィ

- ミュオンラジオグラフィによる火道浅部密度分布の観測

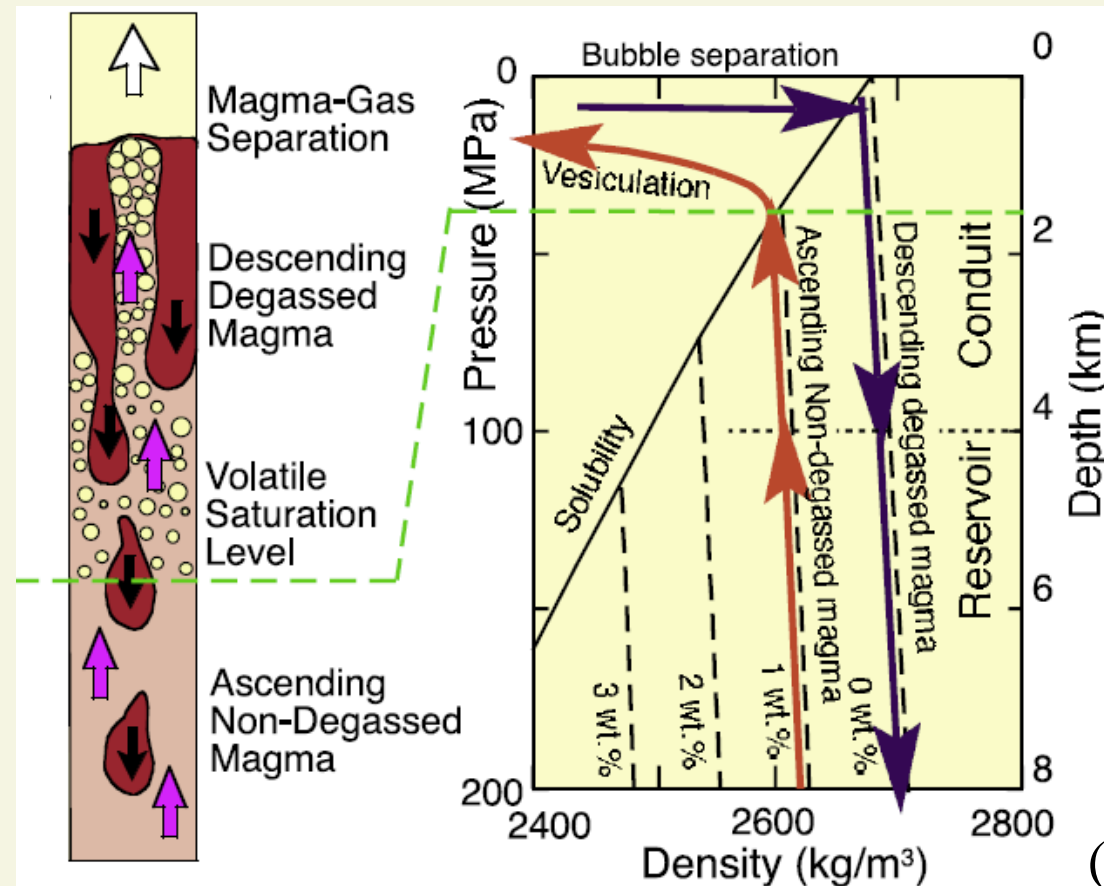
薩摩硫黄島火山硫黄岳：地表付近に高密度領域

火口直下数百mの深さに低密度領域



# 火道内マグマ対流モデル

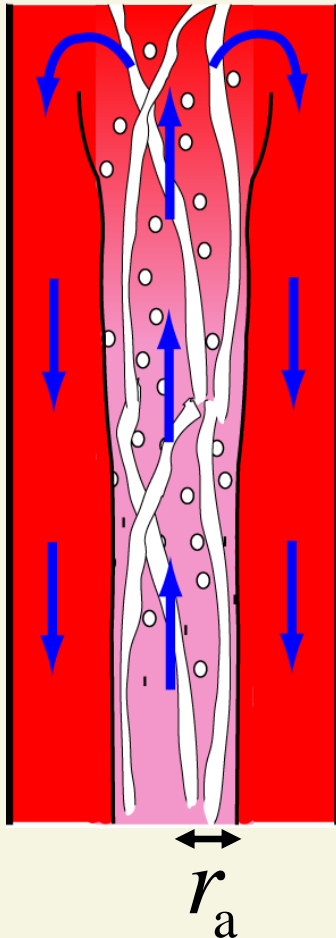
- 薩摩硫黄島火山硫黄岳：山頂からの火山ガスの連続的な放出などを説明するために、火道内でマグマが対流している可能性が示唆されている (e.g., Kazahaya et al., 2002; Shinohara, 2008).



(Shinohara, 2008)



# マグマ対流上昇部への1D火道流モデルの適用



## 基礎方程式

$$q_1 = \rho_1 u_1 (1 - \phi) \pi r_a^2 = (1 - n) Q \quad : \text{質量保存}$$

$$q_g = \rho_g u_g \phi \pi r_a^2 = n Q$$

$$\rho_1 u_1 (1 - \phi) \frac{du_1}{dz} = -(1 - \phi) \frac{dP}{dz} - \rho_1 (1 - \phi) g + F_{lg} - F_{lw}$$

: 運動量保存

$$\rho_g u_g \phi \frac{du_g}{dz} = -\phi \frac{dP}{dz} - \rho_g \phi g - F_{lg}$$

$$P = \rho_g R T \quad : \text{状態方程式}$$

$$n = \frac{n_0 - s P^{1/2}}{1 - s P^{1/2}} \quad (n \geq 0) : \text{気相質量分率}$$

$$r_a / r_c = f(\eta_a / \eta_d) \quad (\text{Kazahaya et al., 1994})$$

: 上昇流半径  
の変化

$$r_a : \text{constant} \quad (\text{Stevenson and Blake, 1998})$$

$Q$ : 流量 ( $\text{kg s}^{-1}$ )

$r_a$ : 上昇流部の半径

$r_c$ : 火道半径

$\rho$ : 密度

$P$ : 圧力

$\eta_a$ : 上昇流の粘性

$u$ : 速度

$T$ : 温度

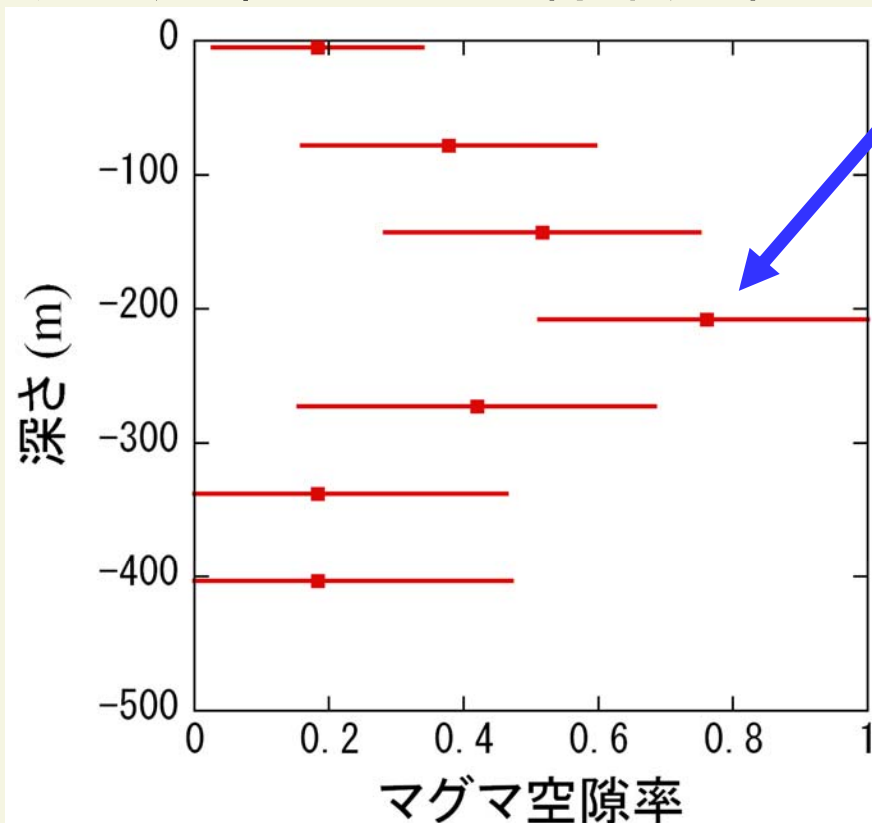
$\eta_d$ : 下降流の粘性

$\phi$ : 空隙率

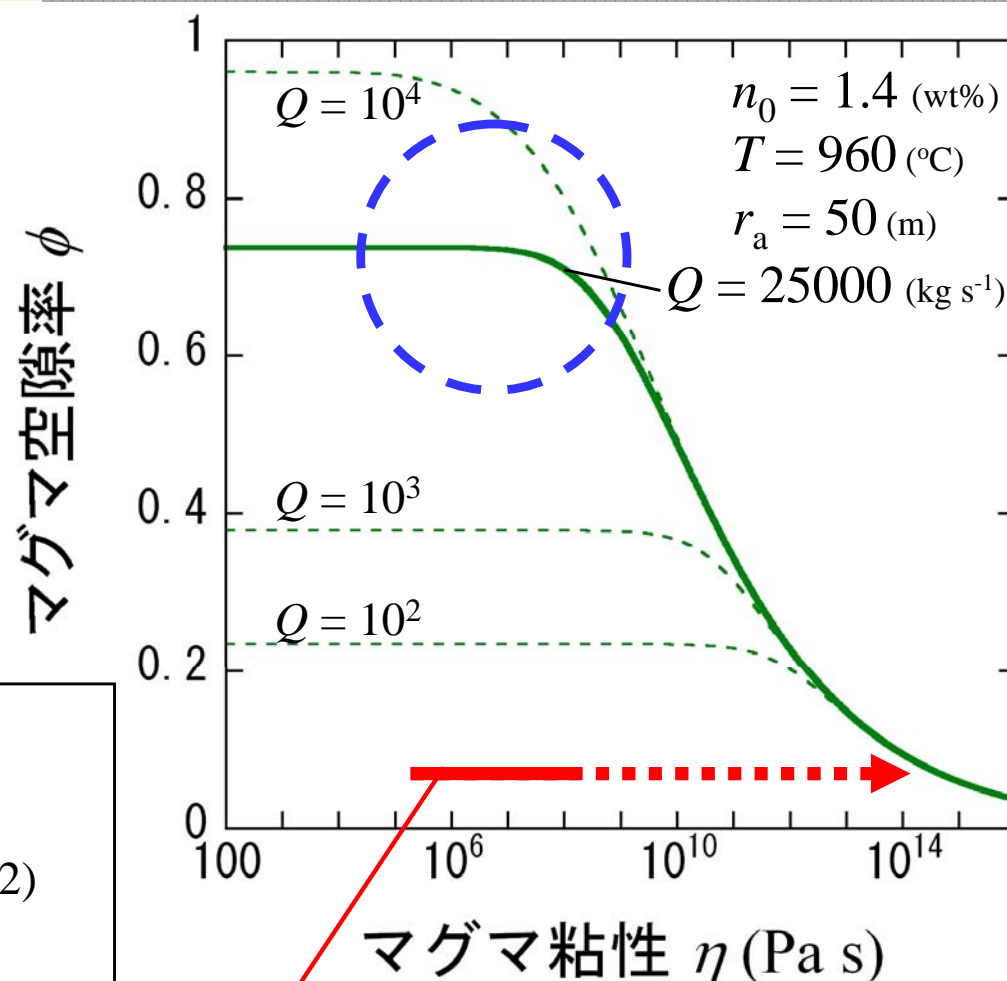
$z$ : 鉛直上向きの座標

# 薩摩硫黄島火山硫黄岳観測との比較

- 火道浅部のマグマ空隙率分布



マグマ流量が比較的大きい効果によって、高空隙率領域が形成



- H<sub>2</sub>O量 : 1.4 wt% (Saito et al., 2002)
- 温度 : 960 °C (Saito et al., 2002)
- マグマ流量 : 10 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (Kazahaya et al., 2002)  
( $Q \approx 2.5 \times 10^4$  kg s<sup>-1</sup>)
- 上昇流半径 :  $\approx 50$  m ?
- マグマ粘性 : 10<sup>5</sup> Pa s  $\sim$  (Kazahaya et al., 2002)

硫黄岳におけるマグマ上昇

# Conclusions

- 一次元定常火道流モデルの解析を基に、溶岩ドーム噴火における火道中のマグマ空隙率変化を支配するメカニズムを明らかにした.
- 火道流モデルの解析結果を用いることで、多岐にわたる火山観測データ(e.g., 物質科学的, 地質学的, ミュオンラジオグラフィー)との系統的な比較が可能となる.

