岩石学 II－11 (2006 年 1 月 13 日)

（8）噴火モデル（非爆発的噴火）

(i)　非爆発的噴火/爆発的噴火の違いの成因

図１にあるように，マグマ溜りで水が等ポテンシャルに従って分布すると上部で濃度が高く，下部では低くなる傾向がある．Kennedy(1955)はこの関係から，マグマ溜りでは水の分布は上部に濃集した成層構造を持ち，噴火の際に上部のマグマから順に吸いだされると，初期のマグマは含水量が高く爆発的で，後期のマグマはより深い含水量に乏しく非爆発的なものになると考えた．火山噴火について噴火輪廻という概念があるが，これは，一回の噴火で初期の爆発的なプリニー式噴火から火砕流を経て溶岩（ドーム）流出に至るものを云う．そのような噴火の例は多く（男体山末期噴火，浅間山 1973 年噴火，桜島 1914-1915 年噴火等）これは Kennedy のように解釈することができる．しかし，噴出物の岩石学的性質を検討すると，必ずしも，初期の含水量が違うために噴火様式が決まっている訳ではないことが示されるようになった．

Eichelberger ら(1986,Nature)は 600 年前の Obsidian Dome の噴出物の岩石学的性質を検討し，初期のプリニー式噴出物と末期のドーム溶岩では斑晶鉱物組み合わせは等しく，初期の含水量がほぼ等しいことを示した．さらに彼らは軽石のガスの浸透率(permeability)を計測し，発泡度が 60%を越えると数桁大きくなることから，火道を上昇するマグマが破砕前の foam(泡)状態で脱ガスし，その後溶結して溶岩流として非爆発的噴火を生じた可能性を示した．つまり，マグマが火道を上昇中に脱ガスしなければ爆発的，脱ガスすれば非爆発的になる．その後，Jaupart & Allegre(91)は計算機実験で火道中の初期上昇速度の僅かな違いで上昇速度の分岐(bifurcation)が生じ，上昇速度が小さいと脱ガスが可能となり非爆発的な噴火が生じ，上昇速度が臨界値を越えると脱ガスする余裕がなくなり爆発的噴火に至ることを示した．その後，Woods & Koyaguchi(1994Nature)はより一般的に火道流の方程式の解の分岐条件を求め，マグマ溜り圧の僅かな変動で爆発的/非爆発的噴火が生じることを示した．

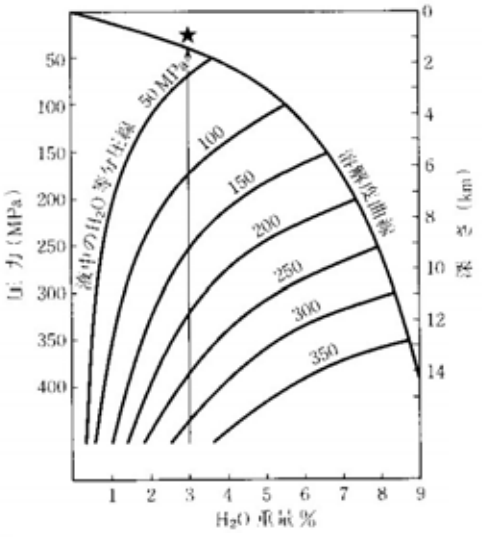

図１　マグマ中の水の溶解度と等分圧線（小屋口 1998）

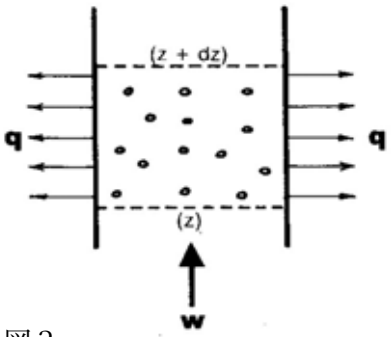

図２

Fig. 3. Diagram used to derive the variation of the mass of gas in an eruption conduit. q denotes the flux of gas through the permeable wall rocks.

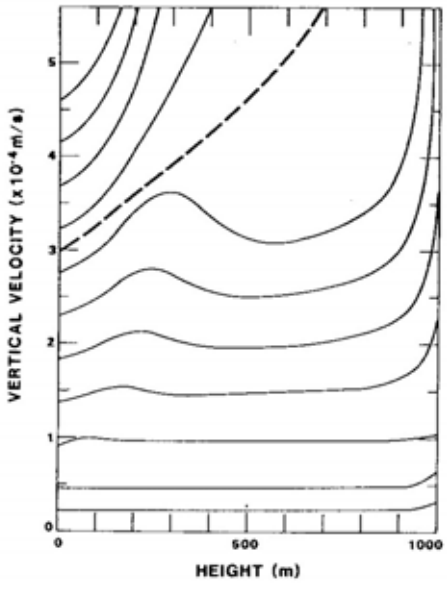

図３：火道流の解（Jaupart & Allegre, 1991）

(ii)　脱ガスのメカニズム

マグマからの脱ガス過程として水の拡散[D＝$10^{-10}m^2/s$（1000℃）：平均拡散距離は１年で 5㎝程度]はマグマの上昇速度と比べ遅いため有効ではない．マグマの脱ガスは発泡した気相が物理的に火道から外へ抜ける過程によって生じると考えられている．火道中のマグマが発泡すると浸透率が高くなりガスを容易に逃がすことが可能であることは実験的に示されているが，脱ガスが火道周囲の母岩に向かって生じているか，火道マグマ内で上方に脱ガスが生じているかについては，明瞭ではない．恐らく両方の機構で脱ガスが生じるのであろう．野外の観察や 2004 年雲仙火道掘削コアの観察からは火砕岩脈が火道側方に貫入しているのが見出されているが，一方，雲仙岳 91－95 年噴火時の脱ガスの大半は溶岩ドーム上部から生じており火道あるいはその縁を通って脱ガスが生じたと考えられた．火道を上昇するマグマの歪速度は火道周縁で大きな値となるため，その部分で気泡の合体が生じやすく浸透率が大きくなる可能性も考えられているが，これまでその検証は必ずしもされていない．(図４)

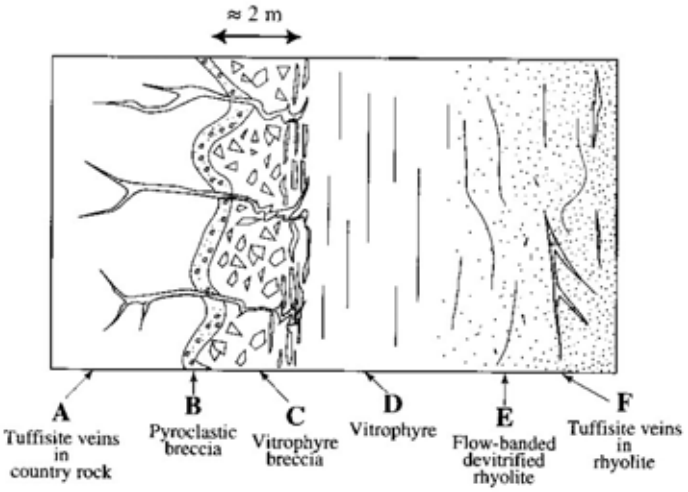

図４　Mule Creek での火道の産状.
(Stasiuk et al.1996)

(iii)　非爆発的噴火モデル

Stasiuk ら（1993）はドーム噴火に関する基本式の議論をおこなっている．Poiseuille 流として

$$Q=\pi r^4(\Delta P+\Delta \rho gh-\rho_s g h_L)/(8\eta gh)$$

Q: 体積流量（m^3/s）, r: 火道半径（m），ΔP:マグマ溜り過剰圧(Pa)，Δρ：マグマと火道壁岩の密度差(kg/m^3)，g: 重力加速度(m^2/s)，h：火道の高さ(m)，ρs: ドーム溶岩の密度(kg/m^3)，h_L: ドーム溶岩の高さ(m)，η: 粘性係数(Pa s)．マグマ溜りの過剰圧は周囲の岩石の弾性変形で表すと $\Delta P=\Delta Pi-K\alpha(V-Vi)$ となる．ここで ΔPiはマグマ溜りの初期過剰圧，K は弾性定数（Pa/m^3）, α：マグマと壁岩の密度比，V：マグマ溜り体積(m^3), Vi:マグマ溜り初期体積(m^3)．この式から，噴出率（m^3/s）は４つのパラメータによっていることが判る．つまり，火道径，マグマ溜りの過剰圧，ドームの高さ（と密度），マグマの粘性率，が主要な要素と言える．マグマ溜りの深さ，マグマと壁岩の密度差などはほぼ一定であると思われる．具体的に例えば，雲仙岳 1991‐1995 年噴火で最後にドーム成長が静止した原因として，これら４つのパラメータがそれぞれ働き，全体とし

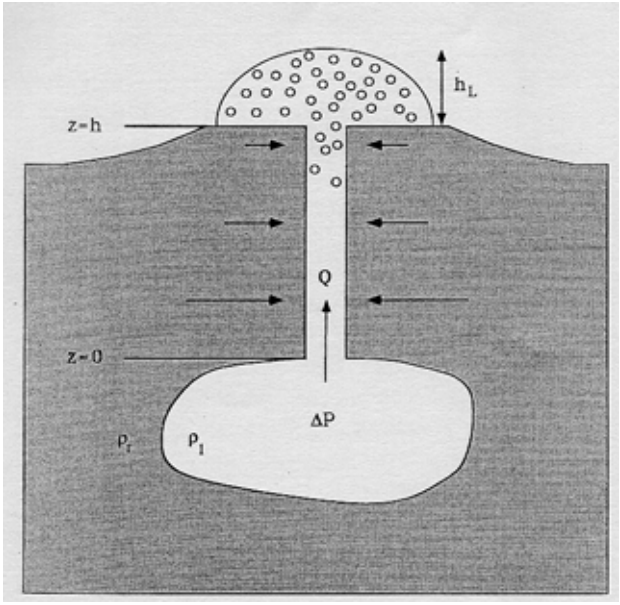

図５　ドーム噴火のモデル.
(Stasiuk,et al.1993)

て最終的に噴火が停止した．マグマ溜り過剰圧の減少が大きな要素ではあるが，他のパラメータが働いた可能性も大きい．噴火の推移を予測するためには，これらの要素の相対的な評価する必要がある．

（iv） 溶岩ドーム噴火での噴出率の変動

Melnik & Sparks（1999）はSoufriere Hills火山噴火で，特に1997年度に頻繁におきたドーム成長と爆発的噴火の繰り返しの原因として，火道を上昇するマグマの発泡・脱ガス・結晶作用の間の非線形な関係から周期解が生じることを示した．これは特にマグマの上昇⇒脱ガス⇒粘性の上昇＋結晶作用⇒メルトへの水の濃集⇒過剰圧の発生，というサイクルが非線形の関係を有しているため，マグマ溜りの僅かな圧力変動が火道上部での過剰圧の上昇をもたらし，その結果急激な噴出量の増加（爆発的噴火）⇒噴出率の減少（ドーム噴火）が繰り返す可能性を指摘した．具体的にはガス，メルトの保存則，運動量保存，ガスの浸透式，浸透率の式，結晶成長の式， 水の溶解度の式，等からなる．

$$(1-\alpha)(\rho_m(1-\beta)(1-c)+\rho_c\beta)V = Q_m \quad (1)$$

$$\rho_m(1-\alpha)(1-\beta)cV + \rho_g\alpha V_g = Q_g \quad (2)$$

$$V\frac{d\beta}{dz} = \beta^{2/3}\frac{\chi}{\mu_m}\left(1-\frac{c}{c_0}\right); \quad \chi = 4\pi\left(\frac{3}{4\pi N}\right)^{2/3}\xi \quad (3)$$

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g - \frac{32\mu V}{D^2} \quad (4)$$

$$V_g - V = -\frac{k(\alpha)}{\mu_g}\frac{dp}{dz} \quad (5)$$

$$\mu = \theta(\beta)\mu_m(c); \quad c = C_t\sqrt{p}; \quad p = \rho_g RT \quad (6)$$

$$\log[k(\alpha)/k_0] = -10.2(\alpha 10^2)^{1.4\times 10^{-2}\alpha^{-1}}; \quad \alpha > 0.03 \quad (7)$$

$$\log[\theta(\beta)/\theta_0] = \arctan[\omega(\beta-\beta_*)] + \pi/2 \quad (8)$$

Table 1 Parameters for the Soufrière Hills andesite eruption used in modelling

Parameter	Symbol	Value range	Information sources
Magma chamber depth	L	5 km	Earthquakes[32] and phase equilibria[33]
Magma chamber pressure	P_c	0–20 MPa	Range of crustal strengths
Melt water content	c_0	5%	Ref. 33
Magma temperature	T	850 °C	Refs 25, 33
Magma crystal content	β_0	0.6	Ref. 25
Conduit diameter	D	30 m	Dimensions of spines and early crater; hornblende reaction rims[34]
Viscosity coefficient	θ_0	1.6	From calculations
Viscosity coefficient	β_*	0.62	From calculations
Viscosity coefficient	ω	20.6	From calculations
Crystal growth rate coefficient	χ	7×10^{-9} s^{-1}	From calculations
Permeability coefficient	k_0	1	Regression through data
Density of melt	ρ_m	2,300 kg m^{-3}	
Density of crystals	ρ_c	2,700 kg m^{-3}	
Density of wallrock	ρ_r	2,600 kg m^{-3}	
Solubility coefficient	C_t	4.1×10^{-6} Pa$^{1/2}$	
Gas viscosity	μ_g	1.5×10^{-5} Pa s	

これらの式を解くと，図６，７のように結晶成長の非線形の効果で，マグマ溜りの過剰圧が上昇していくと非爆発から爆発に突然遷移し，その後再び非爆発的噴火に戻るという繰り返しが生じる．このモデルはSoufriere Hillsの1997年噴火での観察をかなりよく再現している．

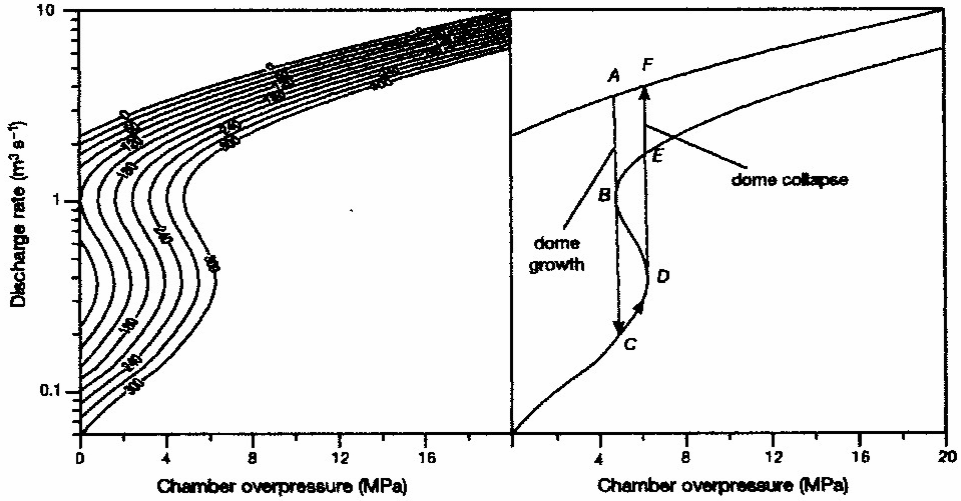

図６　Melnik Sparks(1999)

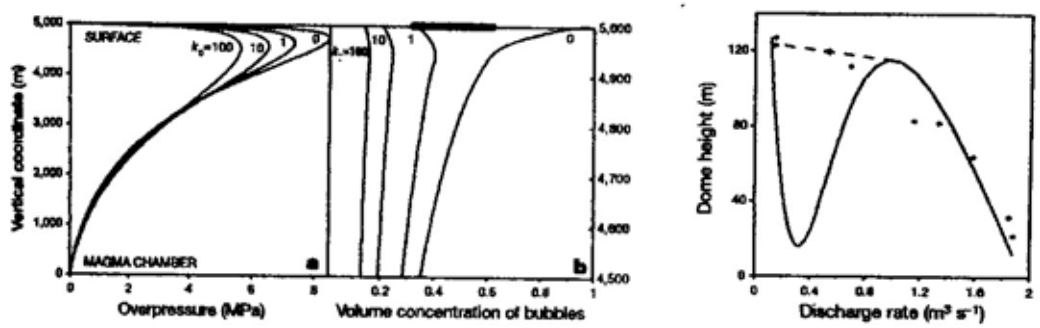

図７　Melnik Sparks (1999)

(iv)　1993 年に戻って, 雲仙 1991-1995 年噴火の終焉は予知できるか？

図８には雲仙岳噴火の噴出率とドーム高さの時間推移が示されている．噴出率は 1992 年末にほぼゼロになり噴火が停止するかと思われた．しかし 1993 年１月末に再度噴出率が増加し大規模火砕流が再度発生した．地元住民数千名の避難は長期に渡る状況で，噴火がどの程度継続するか，当時の火山学では予測できなかった．マグマ溜りのサイズ・過剰圧，火道の形状・サイズ，マグマの物性，ドームの高さと密度，のうち後者２つはかなりの精度で見積もれるが，マグマ溜り，火道等の地下の状況については不明な点が多い．この他，この噴火のデイサイトは２種のマグマ（高温マグマ 1050℃，低温マグマ 790℃）が火道中で混合しており，また初期含水量 6‐8wt%の大半が火道中で脱ガスしている．これらの過程は多くのドーム噴火に共通することである．1999‐2004 年の雲仙火道掘削プロジェクトでいくつかの発見があり，火道状況の手がかりが得られたが，予測可能なモデルの構築はこれらのドーム噴火を検討する中で得られると考えられる．

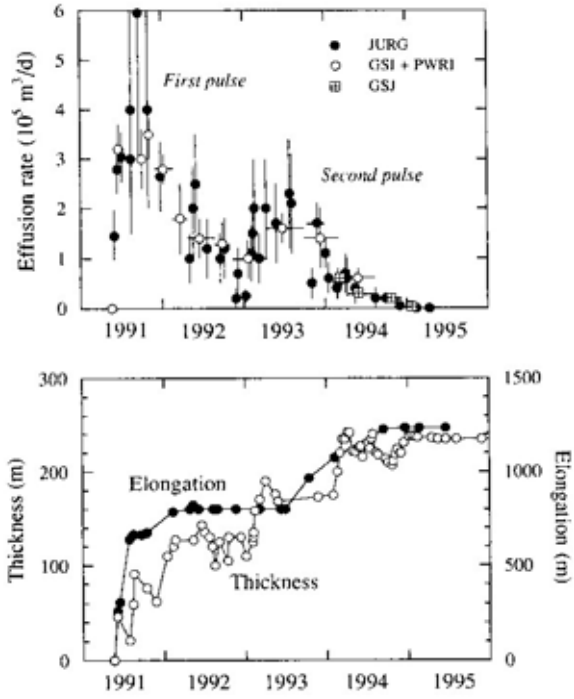

図８　雲仙岳 1991‐1995 年噴火の際の噴出率変動と溶岩ドームの高さ長さの変動
（Nakada et al.1999）

＜文献＞

Eichelberger, JC., et al.,(1986) Non-explosive silicic volcanism.　Nature, 323, 598-602.

Jaupart, C. Allegre, C. (1991) Gas content, eruption rate and instabilities of eruption regime in silicic volcanoes. Earth Plan. Sci. Lett., 102, 413-429.

Melnik, O. & Sparks, RSJ(1999) Non-linear dynamics of lava dome extrusion.　Nature, 402-37-41.

Stasiuk, MV, Jaupart, C., Sparks, RSJ (1993) On the variations of flow rate in non-explosive lava eruptions.　Earth Plan. Sci. Lett., 114, 505-516.