- (7)マグマの物性2:粘性 (viscosity)
- (i) 粘性係数の定義と単位:

## 定義: η=τ/ε

- η: (イェータ)粘性係数, τ: (タウ)ずれ応力, (イプシロン)歪速度 あるいは,F=ηsdv/dl F: 応力,s:面積,v:速度,l:距離
   単位: η: Pas(MKS) = 10 poise(cqs)
- マグマ等の粘性係数のおよその値 玄武岩マグマ: 10<sup>2-4</sup> Pa sec, 安山岩質マグマ: 10<sup>3-6</sup> Pa s, 流紋岩質マグマ: 10<sup>4-11</sup> Pa sec, マントルかんらん岩 10<sup>20-30</sup> Pa s,水: 10<sup>-3</sup> Pa sec. 空気: 10<sup>-5</sup> Pa s
- 動粘性係数() (粘性係数/密度) 動粘性係数の単位:m<sup>2</sup>/s (水)= 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, (空気)= 10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s 「空気は水よりも粘りがある」
- (ii) 粘性流体に関する概念・基本式
  - a. 流体のレオロジー的分類:(図1)

Newtonian 流体( 歪速度がずれ応力に比例)) Bingham 流体( 閾値応力 Yield strength ま では変位が生じない, あとは歪速度が ずれ応力に比例)、その他、

 b. Hagen-Poiseuilleの法則: 管中の層流 力の釣り合い式: 
 πr<sup>2</sup>(p<sub>1</sub>-p<sub>0</sub>)=πr<sup>2</sup>ΔP= 2πrLτ

 また, τ=η(du/dr)

 これらから,Hagen-Poiseuilleの式

 が導かれる.

 $Q = \pi \Delta P R^4 / (8 \eta L)$ 

- Q:流量, P:管の両側の圧力差,r:管の半径, L:管の長さ,η:粘性係数 層流の条件:レイノルズ数(無次元数) Re=2puR/η <2000
- <Quiz-1> 上記の式を導いてみよ.また,管内の流速の半径方向の分布はどのようになっているか?
- c.斜面での溶岩流の流下速度 傾斜の時、 v = ρgsin(α)\*(h<sup>2</sup>-z<sup>2</sup>)/(2η)
   ρ:溶岩の密度,g:重力加速度,h:溶岩の厚さ, z:溶岩流の上面からの深さ



Strain rate, č

図1.流体のレオロジー的分類



図2 管流,但しRe<2000



図3.斜面上の流れ.

- <Quiz-2> 角度 の斜面を流れるスライムの流速を測定してその粘性係数を求めなさい. 予め値を予想して実験してみること.
- <Quiz-3> 1991 年雲仙岳では溶岩流の観測から, 傾斜 30 度の斜面を流れる厚さ 70mの溶岩流の 先端上部が約 1m/1 時間の速度で流下した. この時,溶岩の粘性係数が一様としてその 粘性係数を求めなさい.
- (iii) 粘性係数の測定法:
   回転法,沈降法/釣り合い法,平行板法,貫入法,引っ張り法,曲げ法,等,粘性係数,環境条件によって多様な手法がとられる.
- (iv) マグマの粘性係数の温度・組成依存性:
- <u>組成依存性</u>: 他の条件が同じなら,珪長質マグマの方が 塩基性マグマよりも粘性係数が高い.これは粘性係数が メルトのSiO4四面体の重合の程度によっていると考え られる. AI もアルカリやアルカリ土類元素があると, NaAIO2, CaAI2O4のように四面体に入り重合を促進する ので粘性係数を増加させる.
- <u>温度依存性</u>: ある温度範囲では次のArrheniusの関係が 満たされる.

 $Ln \eta = A/T + B$ 

但し,Tは絶対温度(K)

Bottinga & Weill(1972)の方法:

それまでの実験データをコンパイ ルし,一般式を提案.各酸化物に ついて,部分モル粘性係数の式を 導く:Arrheniusの関係を仮定: それらの一次結合として多成分メ ルトの粘性係数を計算できる.

Ln η =∑Xi\*Di, Xiは各酸化物、但し、NaAIO<sub>2</sub>, KAIO<sub>2</sub>,CaAI<sub>2</sub>O<sub>4</sub>分子はX(SiO<sub>2</sub>)の各 範囲で Di の表を与える(各温度 毎).面倒、精度は Log η で±1

Shaw(1972)の方法:(表1,2)
Bottinga & Weill の関係が各酸
化物について,定点を通ることを
利用してより一般的な次の式を
与えた.水も含むので現在でも
利用される.但し含水量が少な
い部分では誤差が大きい.

 $Ln \eta = s (10000/T-1.5)-6.40$ 



(Bottinga & Weill, 1972)

表1.Shaw(19)	72)のパラメー	タと計算方法.
Metal oxide-silica pairs*	Slope intercept	Equivalent partial molar activation energy, keal mole-**

		-	
H.O.2	2.0	40	
5.0. No.0. Li.O.	2.8	56	
\$120 . FeQ.	3.4	68	
CaO. TIO	4.5	89	
CHOY:	6.7	104-**	

TAME 2 Example of conversion of a chemical analysis to the calculated slope of a viscosity curve on the Arrhenius plot illustrated in figure 2. The chemical data are from Shaw (1963). – Numbers are given to slide rule accuracy.

Constituent	Wt to	Moles	x Stors (5, Xanda )Xais, Xanad
SiO.	71.9	1.195	0.627
A1.0.	12.1	0.235**	0.125 0.7 4.20 0.53
Fe.O.	0.57	0.007**	0.004
FrO	0.52	0.007	0.001 54 - 2.13 0.02
MgO	0.04	0.001	0.001
00	0.27	0.605	0.003) 4.5 2.82 _0.01
TiO.	0.09	0.001	0.001
5.0	3.94	0.064	- 0.053 ] - 2.8 1.75 . 0.10
5.0	4.52	0.046	0.024 (
H <sub>O</sub>	6.20	0.344	0.580
Sum	99.95	1.908	9.87

Mean slope

statistics  $s_{1,0}$ ,  $s_{1,0}$ ,  $s_{2,0}$ ,  $s_{1,0}$ ,  $s_{1,0}$ ,  $s_{2,0}$ ,

かなり精度よく再現(±1) 但し, sの値は化学組成から表1,2のようにして求める.

<Quiz-4> 前回のメルト密度を求めた岩石のそれぞれの温度圧力含水量の条件での粘性係数を計算しなさい.但し,Shawの方法を用いなさい.

より低温では non-Arrhenian な関係がある。こ の場合の一般化は近年試みられているが水を含 む場合についてはまだ出されていない。VFT 式、WLF式等(Taniguchi, 1995; Giordano et al.2003 など) (図5)

 (v) 粘性係数に対する圧力の効果: 組成によって圧力 効果が異なる。
 長石質メルトでは圧力が上昇するとメルトの重合度 が下がり粘性係数も下がる.
 塩基性メルトでは圧縮により自由体積が小さくなり 粘性係数は大きくなる。



図 5. Non-Arrhenian な関係 (Richet, 1984)

 (vi) 水の効果: 水が入るとメルトの重合を切るので粘性係数が数桁下がる. この反応は Si-O-Si+ H<sub>2</sub>O = Si-OH, HO-Si とあらわされる.Shaw(1972), Hess & Dingwell(1996), 1wt%で1-5桁下がる。
 マグマ溜り中では含水量は1-7%:流紋岩質マグマでもかなり低い粘性マグマが上昇する と発泡・脱ガスして粘性係数は急激に増加する.(メルト中の水の飽和溶解度:圧力の平 方根に比例) (図6)



図6. 粘性への水の効果(Hess & Dingwell, 1996)

(vii) 結晶・気泡の影響: 実際のマグマは結晶や 気泡を有するのでその効果の補正が必要

## <u>結晶の存在の効果</u>:

- Einstein-Roscoe Equation:  $\eta_s = \eta (1 \phi/R)^{2.5}$   $\eta_s$  は固相を含め液全体の粘性係数,  $\eta$  は液の粘性係数 R は飽和固相の割合で,Marsh(1981)によると0.6 (60%の固相で粘性が無限大になる). 但し, $\phi$  は含まれる結晶の体積分率. 実際には結晶の形状の効果がさらに加わる. 例えば,薄板状の斜長石が存在すると, 粘性係数は大幅に増加する(図)
- 粘性係数への気泡の影響

キャピラリー数(Ca:粘性力/表面張力)に よって異なるが粘性係数の高い珪長質メルト では Ca は 1 以上で,気泡の存在は見かけの 粘性係数を下げる (Manga & Loewenberg, 2001).

## < 文献 >

- Costa, A. (2005) Viscosity of high crystal content melts: dependence on solid fraction. Geophy Res. Lett., 32, L22308,
- Giordano, G. and Dingwell, D.B.(2003) Non-Arrhenian multicomponent melt viscosity: a model. Earth Plan. Sci. Lett., 208, 337-349.
- Hess, K,-U., and Dingwell., D.B., (1996) Viscosities of hydrous leucogranitic melts: a non-arrhenian model. Amer. Mineral., 81, 1297-1300.
- Kushiro, I.et al. (1976) Viscosities of basalt and andesite melts at high pressures. J.G.R. 81, 6351-6356
- melts at high pressures. J.G.R. 81, 6351-6356
   Manga, M. and Loewenberg, M. (2001) Viscosity of magmas containing highly deformable bubbles. JVGR, 105, 19-24.
- Pinkerton, and Stevenson, R.J. (1992) Methods of determining the rheological properties of magmas at sub-liquidus temperatures. J. Volcanol. Geotherm. Res., 53, 47-66.
- Shaw, H.R. (1972) Viscosities of magmatic silicate liquids: an empirical method of prediction. Amer. J. Sci., 272, 870-893.
- Turcotte, DL and Schubert, G. (2002) Chapter 6 of Geodynamics, 2<sup>nd</sup> edit., Cambridge Univ. Press
- ・ 谷口宏充(2001)マグマ科学への招待. 裳華房

