



Title	6. 溶融岩石の粘性に及ぼす圧力の影響について
Author(s)	村瀬, 勉; MURASE, Tsutomu
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 15, 79-83
Issue Date	1966-03-14
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.15.79
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/13908
Type	departmental bulletin paper
File Information	15_p79-83.pdf



6. 溶融岩石の粘性に及ぼす圧力の影響について

村 瀬 勉

(北海道大学理学部地球物理学教室)

— 昭和 40 年 10 月受理 —

1. ま え が き

マグマ内部での結晶成長速度、拡散速度等は粘性の函数である。また地震波の伝播の助けをかりてマグマ溜りを探そうとすると矢張り溶けた部分の粘性が問題となる^{1),2)}。常圧での溶融岩石の粘性については比較的多くの実験結果がある。圧力効果については粘性を大きくすることが予想されるが高温高压に伴う実験的困難さのため定量的なことはまだ不明である。この論文では簡単な考察によって、この圧力効果を推算してみる。

2. 考察の方法及び結果

まず液体の粘性に及ぼす圧力効果をのべよう。Rate process としての流れを考えると、液体の粘性係数 (η) は cubic packing の場合一般に次式で表わされる³⁾。

$$\eta = 1.09 \times 10^{-3} \times \frac{M^{\frac{1}{2}} T^{\frac{3}{2}}}{V^{\frac{2}{3}} \Delta E_{\text{vap}}} e^{E/RT} \quad (1)$$

ここで M ; 液体の分子量

V ; 液体の分子容

E ; 粘性流動にたいする活性化エネルギー

ΔE_{vap} ; 1 分子当りの蒸発エネルギー

R ; 気体定数

T ; 温度

圧力 (P) の影響を考えると E は次式で置換えられる⁴⁾。

$$E_{\text{act.}} = E_{\text{vis.}} + P\Delta V$$

ここで $E_{\text{act.}}$; 見掛けの活性化エネルギー

- 1) T. MATUZAWA; S-Wellen an der Fest-Flüssigen Schichtgrenze, Bull. Earthq. Res. Inst. 32 (1954), 1-5.
- 2) Y. OGUCHI; Reflection of Elastic Waves at a Solid-Fluid Boundary (I). —On the Case of SH-Waves—, (in Japanese, with abstract in English), J. Seism. Soc. Japan, 11 (1958), 165-179.
- 3) S. GLASSTONE, K. J. LAIDLER, and H. EYRING; The Theory of Rate Process. MCGRAW-HILL Book Co. (1941) p. 486.
- 4) 前出 3). p. 506.

E_{vis} ; 粘性流動の活性化エネルギー

ΔV ; 流れにたいする活性状態の 1 mol 当りの体積増加

ΔV は分子容 (V) の数分の一で $\Delta V = V/n'$, また $E_{vis} = \Delta E_{vap}/n$ で表わされる。

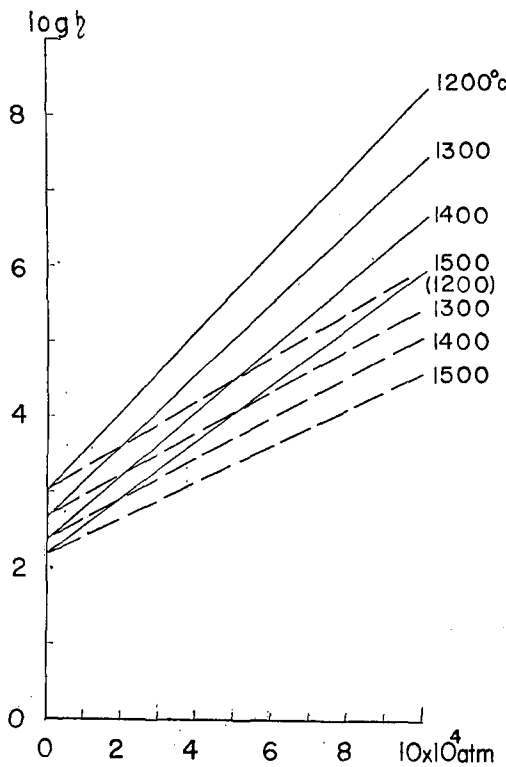
n 及び n' についての理論計算はないが、経験的に、異った液体で n, n' は変化するが n'/n は、約 1.75 である⁵⁾。ここでは粘性係数の桁数を問題とするので、 $n'/n = 2$ とおくと (1) 式は次のようになる。

$$\eta = 1.09 \times 10^{-3} \frac{M^{\frac{1}{2}} T^{\frac{3}{2}}}{V^{\frac{2}{3}} n E_{vis}} e^{(x_{vis} + \frac{PV}{2n})/RT} \quad (2)$$

従って圧力 P , 温度 T における粘性係数は M, V, n, E_{vis} , が知れると計算できる。

但し V, n が圧力によって変化しないとす。

(2) 式に従って、橄欖石, 玄武岩, 石英安山岩について計算してみよう。(第 1 表)。



第 1 図 橄欖石の粘性と圧力の関係

実線 $n = 2$, 点線 $n = 3$

Fig. 1. Viscosity vs. pressure for olivine.

Full line; $n = 2$

Dotted line; $n = 3$

第 1 表
Table 1.

	Olivine	Basalt	Dacite
SiO ₂	38.82	51.80	69.74
Al ₂ O ₃	0.20	15.00	15.59
Fe ₂ O ₃	1.65	3.68	1.52
FeO	14.93	10.14	2.59
MgO	42.51	5.36	0.85
CaO	0.40	9.77	3.63
Na ₂ O	—	1.76	3.43
K ₂ O	—	0.32	1.36
H ₂ O ₊	—	0.62	0.67
H ₂ O ₋	—		0.23
TiO ₂	none	0.60	0.45
P ₂ O ₅	—	0.31	0.22
MnO	0.23	0.20	0.08
L. I	0.90	—	—
Total	99.64	99.56	100.36

5) 前出 3). p. 508.

a) 橄欖石

三宅島産橄欖石は $23.1 \text{ Fe}_2\text{SiO}_4$, $76.9 \text{ Mg}_2\text{SiO}_4$ SiO_4 で、粘性係数と温度の関係から⁶⁾, $E_{\text{vis}} = 42 \text{ kcal/mol}$ と求められる。 M は Mg_2SiO_4 とすると 140, Fe_2SiO_4 とすると 205 であるが $M^{\frac{1}{2}}$ は 12, 14 で大差ないので今は $M=140$ とする。密度は約 2.8 故 $V=50 \text{ cm}^3$ となる。 n は (2) 式において $P=0$ とし M, V, E_{vis} , 及び $\eta-T$ の関係から求まり約 2 となる。従って橄欖石については

$$\eta = 1.2 \times 10^{-8} T^{\frac{3}{2}} e^{\frac{2.1 \times 10^4 + 0.2P}{T}} \quad (3)$$

P は気圧 (atm) で計算するようになっている。

第 1 図の実線は $1200^\circ - 1500^\circ \text{C}$ の温度範囲で 10^5 気圧まで計算した結果である。点線は $n=3$ とした場合について求めたものである。 $n=3$ は流れの単位として Mg_2SiO_4 を 10 分子一塊りとしたことに相当するもので圧力効果は減少している。

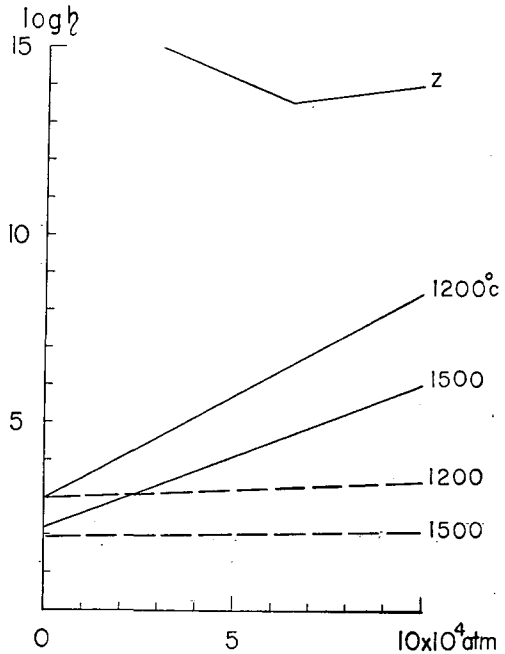
Pentane, Mercury, Ethyl ether 等につ

いての実験と理論の比較によれば、計算値は 10^4 気圧位までは約 10% 大きくなっている⁷⁾。ここでは桁数の推算なので 10^5 気圧まで求めてみた。

b) 玄武岩

伊豆大島元町産岩石について計算した。一般の岩石の場合、 M, V の値が問題となる。ここでは岩石を構成する各金属イオンの数を計算し、その平均原子量をもって $[\text{Metal}]_2 \text{SiO}_4$ として見掛けの分子量を計算した。今の場合 $M=162$, 密度は約 2.7 なので $V=61$ となる。 E_{vis} は粘性係数の温度変化⁸⁾ から 38 kcal/mol . 従って $n=33$ となり $n'=66$ である。これから

$$\eta = 5.4 \times 10^{-10} T^{\frac{3}{2}} e^{\frac{2.6 \times 10^4 + 1.1 \times 10^{-2} P}{T}} \quad (4)$$



第 2 図 玄武岩の粘性と圧力の関係 (点線)。比較のために橄欖石 ($n=2$) も示されている。Z は ZARKOV による地球内部の粘性分布。

Fig. 2. Viscosity vs. pressure of basalt (dotted line), olivine (full line) and ZARKOV's results (Z).

6) K. KANI and K. HOSOKAWA; On the Viscosities of Silicate Rock-Forming Minerals and Igneous Rocks, (in Japanese, with abstract in English), Res. Electrotech. Laboratory, No. 391. (1936), 1-105.

7) 前出 3). p. 509.

8) 前出 6).

この結果は第2図の点線で示されている。比較のために橄欖石の $n=2$ の場合が示されているが、圧力効果は僅少であることが知れる。

c) 石英安山岩

$M=154$, 密度 2.3 より $V=66 \text{ cm}^3$, $E_{\text{vis}}=92 \text{ kcal/mol}$ ⁹⁾, 従って $n=7 \times 10^3$ となり $n'=1.4 \times 10^4$ となる。

$$\eta = 1.3 \times 10^{-12} \times T^{\frac{3}{2}} e^{\frac{2.0 \times 10^4 + 2.5 \times 10^{-5} P}{T}} \quad (5)$$

この結果によると圧力効果は殆んどないので図示しなかった。

以上のことから一般に SiO_2 量の大きい岩石は少ない岩石に比し圧力効果は小さいことが解る。これは O/Si 比が小さい程 Si-O-Si bridge は結合していて圧力の影響を受け難い構造となっているためと考えられる。

3. あとがき

第2図には、ZARKOV¹⁰⁾ が diffusional viscosity を基礎とし地震波速度分布等から求めた地球内部の粘性係数も示してある。この値は地球内部で考えられる最高温度分布に対応したものの即ち粘性係数を最小とする分布である。横軸は密度を 3.3 として圧力に換算してある。橄欖石の $n=2$ の場合と比較すると、溶けた岩石が上部マントルあるいは地殻にあれば、その周囲の固体部分との粘性の差は、たとえ地球内部の最高温度分布と粘性への圧力効果を考えても非常に大きいので粘性係数に関係する手段で、その溶けた部分を探し求めることができそうである。

6. Effect of Pressure on the Viscosity of Molten Rocks

By Tsutomu MURASE

(Department of Geophysics, Faculty of Science, Hokkaido University)

The rate process (GLASSTONE et al) is applied to the problem of viscosity of molten rocks.

Upon taking the packing number as equal to 2, i. e., for cubic packing, inserting the known values for N and k and expressing R in calories, viscosity (η)-temperature (T) relation becomes Eq. 1, where M is the molecular weight, V is the molar volume, E is the activation energy per mole for viscous flow and ΔE_{vap} is the molar energy of vaporization. If ΔV represents the increase of volume per mole of activated state for

9) T. MURASE; Viscosity and Related Properties of Volcanic Rocks at 800° to 1400°C, Jour. Fac. Sci., Hokkaido Univ. Ser. VII (Geophys). Vol. I (1962), 487-584.

10) B. N., ZARKOV; Vyazkost' Nedr Zemli, (in Russian), Izv. AN. SSSR, Tryd. Inst. Phys. Zemli, im O. U. Schmidt. 11 (178) (1960), 36-60.

flow at constant external pressure P , $E_{act} = E_{vis} + P\Delta V$. The quantity ΔV will be some fraction of the molar volume V , so that ΔV may be replaced by V/n' ; hence Eq. 3 becomes Eq. 2, $\Delta E_{vap}/n$ being written for E_{vis} . There is no satisfactory way of estimating the values of n and n' theoretically, but they can be found empirically from the change of viscosity with temperature and pressure respectively. It appears that although n may vary between 3 and 11 for different liquids, the ratio n'/n has a remarkably constant value of about 1.75. By assuming n'/n to have the constant value of 2, it is possible to use Eq. 2 to express the variation of the viscosity of molten rocks with pressure.

The variation of olivine, basalt and dacite (Table 1) is estimated.

a) Olivine (Miyake-jima) $23.1 \text{ Fe}_2\text{SiO}_4$, $76.9 \text{ Mg}_2\text{SiO}_4$

$E_{vis} = 42 \text{ Kcal/mol}$ (estimated on the basis of KANI and HOSOKAWA's data), $M = 140$ (Mg_2SiO_4), $V = 50 \text{ cm}^3$ (density $\rho = 2.8$) and η at $P = 0$, give $n = 2$. It follows, therefore, that Eq. 2 may be written Eq. 3. The calculations have been made for a range of pressures and temperatures, and the results are shown in Fig. 1 (full line). The dotted line shows the result that would be obtained if $n = 3$, i.e., $10 \text{ Mg}_2\text{SiO}_4$ were the flow unit. It is evident result the effect of pressure on viscosity decreases with increasing n .

b) Basalt (Izu Oshima Moto-machi)

$E_{vis} = 38 \text{ Kcal/mol}$, the average atomic weight of metal ions in the rock is applied to M , i.e. 162 and $V = 61 \text{ cm}^3$ ($\rho = 2.7$), then $n = 33$. Eq. 2 becomes Eq. 4. The results obtained are shown in Fig. 2 (dotted line). The increase of viscosity with increasing pressure is relatively small for this rock.

c) Dacite (Showa-shinzan dome lava)

$E_{vis} = 92 \text{ Kcal/mol}$, $M = 154$ and $V = 66 \text{ cm}^3$, then $n = 7 \times 10^3$. Eq. 2 becomes Eq. 5. The effect of pressure on viscosity of this rock is very small, so the results obtained are not shown in figure.

The results obtained show that for rocks having a high silica content, i. e., a high bridge density, the effect of pressure on viscosity is considerably small, while for rocks having a low silica content, i. e., a low bridge density, the effect is great.

A part of ZARKOV's distribution of viscosity in the earth on the basis of the diffusional viscosity and the seismological results is shown in Fig. 2. The abscisa axis in the figure is replaced by pressure (density = 3.3). The distribution corresponds the maximum temperature distribution, i. e., the minumum viscosity distribution in the earth. The difference between the distribution and olivine's results is very remarkable, so it is suggested to be able to detect the molten parts in the crystalline parts of the earth by the difference of viscosity between them.