

(7) マグマの物性 1 : 密度

マグマの密度は、重力場で周囲の岩石との密度差から浮力を生み、マグマの分離・上昇・分化・噴出等で主要な働きをする。通常、マグマの密度が周囲の地殻物質と等しい位置を LNB(Level of Neutral Buoyancy)と呼び、マグマ溜りが形成されやすい。またマグマ溜り内部での組成勾配の不安定性(対流)や新たなマグマが貫入した際の混合/密度成層等の過程においてもマグマの密度が主要な要素となる。

< マグマの密度の計算 >

マグマ = メルト + 結晶 + 気泡であるので、それぞれについて評価する必要がある。

$1/\rho_{\text{bulk}} = m_{\text{crystal}}/\rho_{\text{crystal}} + m_{\text{melt}}/\rho_{\text{melt}} + m_{\text{gas}}/\rho_{\text{gas}}$ の関係がある。但し、 ρ , m は夫々相の密度と重量分率である。

メルトの密度については、ガラス工学の実験等で、成分の部分モル体積の加算性が成立することが知られている。

表 1 はLange(1994) が纏めた主要成分の部分モル体積である。各温度・圧力での液体の体積と質量(分子量×モル数の合計で求まる)から密度が計算できる。結晶の密度は、固溶体組成によってほぼ決まる。

それらのデータは、Clark, S.P.Jr edit., Handbook of Physical Constants, Geol. Soc. Amer. Memoir, 97, 587pp (1966)にある。

気泡の密度は、気泡が通常H₂O またはH₂O+CO₂が主成分であるため、それらのp-v-t関係式から計算することができる。但し、高压では理想気体として計算する場合が多い。

Quiz-1: プリント末尾の分析表(表 2)から一つを選び、そのマグマの密度を計算しなさい。但し、玄武岩では温度 1,150 , 含水量 1wt%, 安山岩では温度 1,050 , 含水量 3wt%, デイサイト, 流紋岩では温度 850 , 含水量 6wt%とし、圧力は 3000bar とする。

表 1 . メルト中の酸化物のモル体積

Table 1. Partial molar volumes, thermal expansions and compressibilities of oxide components.

	$V_{\text{liq}}(T,P,X_i) = \sum X_i [V_{i,1673K} + dV_i/dT (T-1673 K) + dV_i/dP (P-1\text{bar})]$			
	$V_{i,1673K}$ (cc/mole)	$(dV_i/dT)_{1\text{bar}}$ (10 ⁻³ cc/mole-K)	$(dV_i/dP)_{1673K}$ (10 ⁻⁴ cc/mole-bar)	$[(dV_i/dP)/dT]$ (10 ⁻⁷ cc/mole-bar-K)
SiO ₂	26.90 ± .06	0.00 ± 0.50	-1.89 ± .02	1.3 ± 0.1
TiO ₂	23.16 ± .26	7.24 ± 0.46	-2.31 ± .06	-----
Al ₂ O ₃	37.11 ± .18	2.62 ± 0.17	-2.26 ± .09	2.7 ± 0.5
Fe ₂ O ₃	42.13 ± .28	9.09 ± 3.49	-2.53 ± .09	3.1 ± 0.5
FeO	13.65 ± .15	2.92 ± 1.62	-0.45 ± .03	-1.8 ± 0.3
MgO	11.45 ± .13	2.62 ± 0.61	0.27 ± .07*	-1.3 ± 0.4
CaO	16.57 ± .09	2.92 ± 0.58	0.34 ± .05*	-2.9 ± 0.3
Na ₂ O	28.78 ± .10	7.41 ± 0.58	-2.40 ± .05	-6.6 ± 0.4
K ₂ O	45.84 ± .17	11.91 ± 0.89	-6.75 ± .14	-14.5 ± 1.5
Li ₂ O	16.85 ± .15	5.25 ± 0.81	-1.02 ± .06	-4.6 ± 0.4
Na ₂ O-Al ₂ O ₃	-----	-----	10.18 ± .50	-----

Volume and thermal expansion data from Lange and Carmichael (1987).
Compressibility data from Kress and Carmichael (1991).

*Fitted parameters should not be applied to pure MgO and CaO liquids.

H₂O 2.29504 (400C) 9.520.8 -3.2506 Ockys & Lange 92

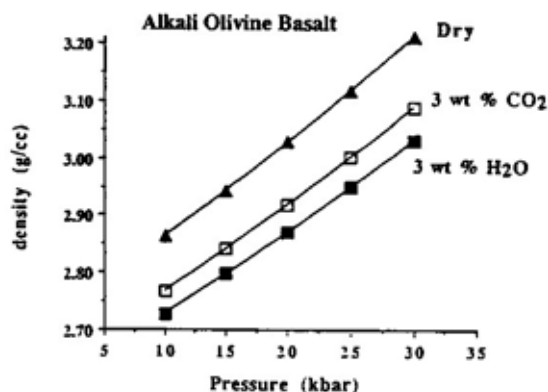


図 1 . 玄武岩メルトの密度の圧力変化

< 密度差の効果 >

- ・ マグマ中での結晶の沈降： 層流条件が成立する場合：レイノルズ数： $Re = \rho v r / \eta < 2000$

球に働く抵抗力： $6\pi\eta r v$ ， η ：粘性係数， r ：球の半径， v ：速度

これと密度差による重力（ $4/3(\pi r^3 \Delta \rho g)$ ）が釣り合うとして， $v = 2r^2 g \Delta \rho / (9\eta)$

Quiz-2: 半径 0.5mm のかんらん石 ($\rho = 3400 \text{ kg/m}^3$) の玄武岩質マグマ ($\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$, $\eta = 100 \text{ Pa s}$) 中での沈降速度を求めなさい。

Quiz-3: 直径 1000km のダイアピルはマントル中 ($\eta = 10^{22} \text{ Pa s}$) をどの位の速度で上昇するか？但し密度差を 50 kg/m^3 とする．またマントル中では重力加速度は殆ど変化しない。

- ・ 対流の臨界条件： レイリー数(Ra)により温度勾配による密度成層不安定の判別がされる．地球におけるプレート運動は基本的には密度成層不安定によっているが，その対流様式は物性の温度依存性のためスラブ沈み込みという特殊な形態をとっている．

$$Ra = \rho_0 g \alpha (T_1 - T_0) L^3 / (\eta \kappa) \quad \rho_0: \text{マグマの密度}, \alpha: \text{熱膨張率 } 10^{-5} / \text{K}$$

T_0 : 上方母岩の温度, T_1 : マグマ溜り底の温度, L : マグマ溜りの 1 辺の高さ,

η : 粘性係数, κ : 熱拡散率 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$

Quiz-4: 1 辺が 2km のマグマ溜りで対流が発生するか, Ra を求め議論しなさい．但し, 粘性係数は 10^4 Pa s , $T_0 = 600$, $T_1 = 1000$, マグマの密度は 2400 kg/m^3 とする．

< 応用 >

- ・ マグマと共存するかんらん岩との密度の逆転：

固体岩石と比べると，マグマは圧縮率が大いので地球内部で高圧がかかるとそれらの密度差が小さくなることが予想される．大谷栄治らはダイヤモンドを用いた実測によりマグマの密度を高圧で求めマントル遷移層付近ではマグマとかんらん岩組成の固体がほぼ同じ密度を持つことを示した．つまりこの付近でマグマが発生しても密度差がないため上下方向へ殆ど移動しないことになる．この関係は初期地球でマグマオーシャンが発達した時期のマントル・地殻の分化には極めて重要であると考えられ，この時期に密度差による重力分化が生じた可能性が指摘されている．（岩波講座地球惑星科学，1 巻，132 頁）

- ・ 月の斜長岩の形成：

月の海は玄武岩溶岩流が覆っているが，白っぽい陸の部分は斜長岩で構成されている．これは月形成初期にマグマオーシャンが生じ，その中で低圧部で斜長石が晶出しその密度が軽いために浮上して斜長岩を形成したと考えられている．特に月の玄武岩は鉄，チタンに富み密度が大きいために斜長石は浮上しやすい（重力加速度は 6 分の 1）．地球でも始生代には斜長岩が見出される．また，

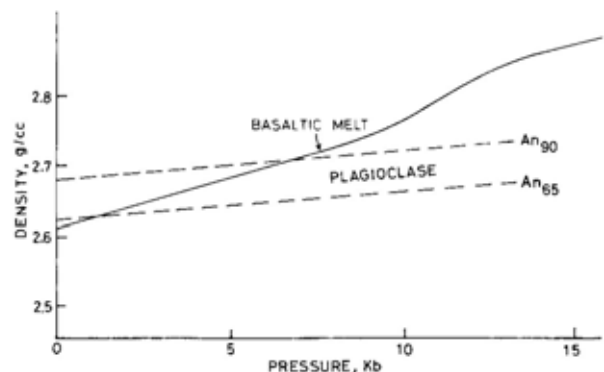


Figure 16. Density change of Kilauea olivine tholeiite melt and plagioclase of An_{90} and An_{65} with pressure.

図2 ハワイソレライトと斜長石の密度の圧力依存性
(Kushiro, 1980)

伊豆大島のソレライトでは斜長石の濃集が認められ、やや高圧のマグマ溜り中でマグマの密度が斜長石と等しくなり、かんらん石や輝石は沈降したためであると解釈されている。(図2)

・ 海嶺玄武岩での結晶分化過程での密度の最小値

海嶺では必ずしも初生マグマ ($\#Mg = Mg/(Mg+Fe)=0.70-0.75$) 組成のものは多くなく、やや分化した玄武岩($\#Mg=0.55-0.65$)が多く噴出する(右図)。この特徴について、Sparks らと Stolper & Walker は 1980 年にほぼ同時に次のような説明を与えた。つまり、海嶺玄武岩が海嶺下でのマグマ溜りで結晶分化すると最初、かんらん石(olivine)の結晶分別ではマグマの密度が減少するが、やや結晶化が進んで、斜長石と単斜輝石が晶出するようになると結晶分別による残液は鉄の増加に伴い密度が増大する。従って、密度の最も小さいやや分化したマグマ ($\#Mg=0.55-0.65$) がマグマ溜りの上部に位置し容易に噴出する。一方、初生マグマや分化して鉄に富んだマグマは特別な条件の場所ではしか噴出しない、という考え方である。(図3)

・ 島弧玄武岩の分化の程度とマグマ密度

Kushiro(1983) は、日本列島の玄武岩が火山フロントのソレライトでは分化した組成のものが多い ($Fe/(Mg+Fe)$ 比が大きい) のに対して、背弧側のアルカリ玄武岩では未分化な組成のもの ($Fe/(Mg+Fe)$ 比が小さい) のものが大きいことの説明として、マグマの密度と地殻物質の密度を比較したところ、ソレライトの方がやや密度が大きいため上部地殻では浮力を失い上昇の駆動力が乏しくなるためであると解釈した。地殻の密度は直接観測はできないが、間接的に地震波速度の観測から推定でき、今後マグマの成因や上昇・噴火機構を考える上で、マグマと周囲の岩石の密度や諸物性を定量的に扱う必要が大きくなると予想される。

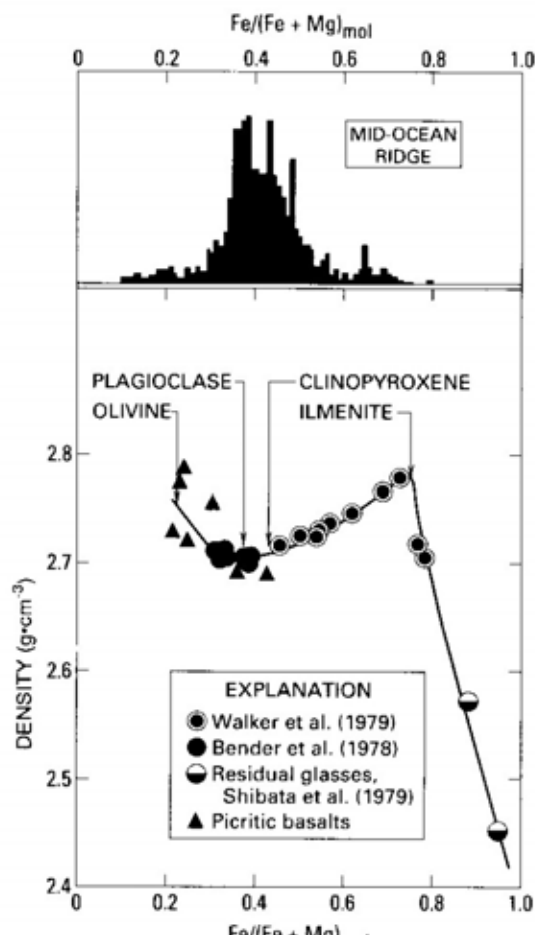


図3 MORBs の $Fe/(Mg+Fe)$ 比の頻度と密度の変化。(Sparks et al, 1980)

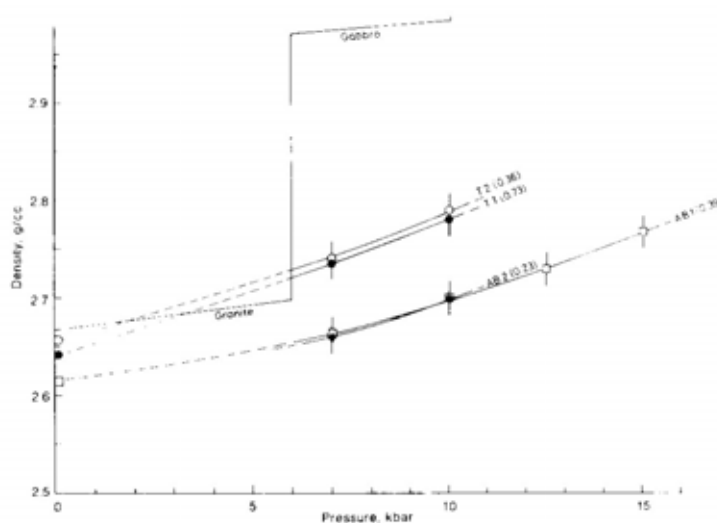
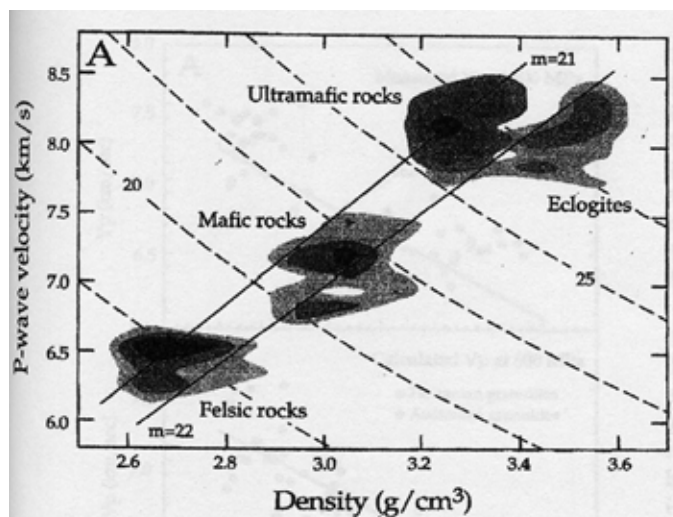


図4 マグマと地殻物質の密度の関係(Kushiro, 1983)

図5 地殻，マンツルの岩石の P 波速度と密度の関係 (Rudnick & Fountain, 1995)



<参考文献>

Lange, RA(1994) The effect of H₂O, CO₂ and F on the density and viscosity of silicate melts.

Reviews in Mineralogy, 30, 331-369.

Kushiro, I. (1980) Viscosity, density, and structure of silicate melts at high pressures, and their petrological

applications. In Hargraves edit, Physics of Magmatic Processes, Princeton Univ. Press, 93-120

Rudnick, RL, and Fountain, DM (1995) Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. Reviews of Geophysics, 33, 267-309.

Sparks, RSJ, et al.(1980) Density variation amongst mid-ocean ridge basalts: implications for magma mixing and the scarcity of primitive lavas. EPSL, 46, 419-430.

谷口宏充(2001) マグマ科学への招待．裳華房，179p．

表 2-1 火成岩の平均主化学組成

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
SiO ₂	49.20	57.94	65.01	72.82	50.14	57.48	66.09	71.30
TiO ₂	1.84	0.87	0.58	0.28	1.12	0.95	0.54	0.31
Al ₂ O ₃	15.74	17.02	15.91	13.27	15.48	16.67	15.73	14.32
Fe ₂ O ₃	3.79	3.27	2.43	1.48	3.01	2.50	1.38	1.21
FeO	7.13	4.04	2.30	1.11	7.62	4.92	2.73	1.64
MnO	0.20	0.14	0.09	0.06	0.12	0.12	0.08	0.05
MgO	6.73	3.33	1.78	0.39	7.59	3.71	1.74	0.71
CaO	9.47	6.79	4.32	1.14	9.58	6.58	3.83	1.84
Na ₂ O	2.91	3.48	3.79	3.55	2.39	3.54	3.75	3.68
K ₂ O	1.10	1.62	2.17	4.30	0.93	1.76	2.73	4.07
P ₂ O ₅	0.35	0.21	0.15	0.07	0.24	0.29	0.18	0.12
FeO*	10.54	6.98	4.49	2.44	10.33	7.17	3.97	2.73
FeO*/MgO	1.57	2.10	2.52	6.26	1.36	1.93	2.28	3.85
Na ₂ O/CaO	0.31	0.51	0.88	3.11	0.25	0.54	0.98	2.00
飽和度*	0.68	0.86	0.97	1.06	0.69	0.85	0.97	1.04

FeO*：全 Fe 含有量を FeO として計算した値 (FeO + 0.9 Fe₂O₃)；*：アルミナ飽和度；単位：アルミナ飽和度は Al₂O₃/(Na₂O + K₂O + CaO) で分子比. そのほかは重量%；分析値は Le Maitre(1976)による.
(1)：玄武岩；(2)：安山岩；(3)：デイサイト；(4)：流紋岩；(5)：ハンレイ岩；(6)：閃緑岩；(7)：カコウ閃緑岩；(8)：カコウ岩

表 2