

(3) 初生マグマの条件：海嶺玄武岩 (MORB) の話

地球上ではマグマの活動は主に、(i) 拡散境界：海嶺，(ii) 収束境界：島弧，背弧海盆，(iii) プレート内：ホットスポット，の三種類のテクトニックな場で生じている。ここで，噴出量を比較すると，年間(i)は 4km^3 ，(ii),(iii)は夫々 1km^3 程度であり，海嶺の火山活動は最も活発であると言える。

海嶺は拡散型プレート境界をなし，世界の海洋に総延長約 5 万 km に渡って連なっている。そこではプレートの拡大に伴ってマントルの上昇流が生じ，マグマが発生する。発生したマグマは集積・噴出し，厚さ 7 km 程度の海洋地殻第 2・3 層を形成する。海嶺で噴火するマグマは世界中で比較的均一な組成を有し，海嶺玄武岩 (Mid-Ocean Ridge Basalt: MORB)，深海ソレライト (abyssal tholeiite) 等と呼ばれる。これは比較的未分化で，揮発性成分や液相濃集元素に乏しく，また $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が低く，その給源マントルは枯渇した (低融点成分に乏しい) 組成を持っていると考えられる。

< 初生マグマの条件 >

上部マントルはその大半がかんらん岩 (Peridotite) から構成されていると考えられている。これは，地震波速度がほぼ対応し，実際にそのようなかんらん岩が採取され，また地震波速度異方性が説明できる，ということから信じられている。アルカリ玄武岩中の包有物や，造山帯のかんらん岩体ではかんらん岩にも種類があるが，その平均的な構成鉱物はかんらん石 (olivine: $(\text{Mg},\text{Fe})_2\text{SiO}_4$) 60%，斜方輝石 (ortho- pyroxene: $(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3$) 30%，単斜輝石 (clinopyroxene: $\text{Ca}(\text{Mg},\text{Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$) 10%，と Al 相として斜長石 (低圧 < 1 GPa)，スピネル (中圧)，柎榴石 (高压 > 2 GPa) が若干量含まれる。初生マグマはこのようなかんらん岩が部分溶融して発生したものを云う。つまりマントル条件でこれらの鉱物と相平衡，元素分配平衡にあるマグマを初生マグマと言うことが出来る。

かんらん岩では液が発生すると，ぬれ角は小さいので，鉱物粒間に液は浸透しやすく，比較的的部分溶融の程度が小さく (< 1%) でも液が連結して分離することが可能である。但し，MORB のようなソレライトは 10-30% の部分溶融で大半が生じると考えられている。このような条件では残留相はかんらん石 + 斜方輝石が残る。つまり，初生マグマはマントル条件で，かんらん石と斜方輝石を同時にリキダス相として持つ必要がある。一般に圧力が増加するとかんらん石に対して斜方輝石がより安定になる傾向があるので，ある組成のマグマに対して，リキダス相としてかんらん石と斜方輝石が同時にリキダスで共存できる圧力は一つしかない。高温高压実験でそのような条件を定めて，

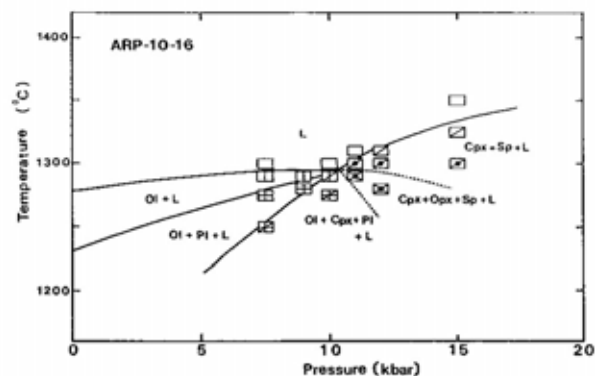


図1 MORB の相平衡図。L：液，Ol：かんらん石，Cpx：単斜輝石，Opx：斜方輝石，Sp：スピネル，Pl：斜長石。初生マグマはリキダスに Ol+Opx+Cpx が共存する (Fujii & Bougault, 1983)

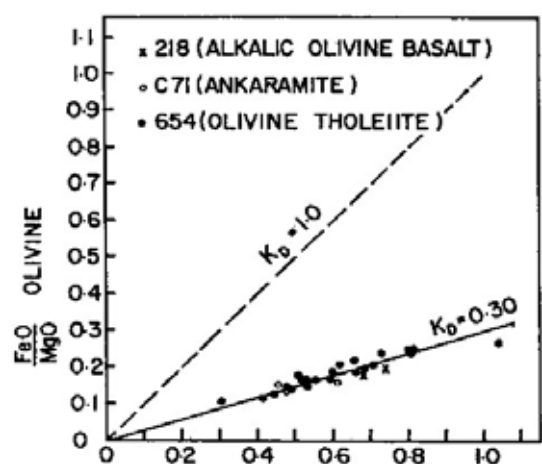


図2 Roeder & Emslie (1970) による，かんらん石 - メルト間の Fe-Mg 分配関係

初生マグマ生成の条件を知ることができる(図1)。

もう一つの初生マグマの条件である元素分配に関してはどうであろう。ペリドタイトに含まれるオリビンにMg/(Mg+Fe)比が0.88-0.93程度の範囲に入り平均0.90である。オリビンと液の間のMg-Feの元素分配に関しては、Roeder & Emslie(1970)が精密な1気圧実験で、その交換平衡分配定数($K_D = (Fe/Mg)_{ol}/(Fe/Mg)_{melt}$)が 0.30 ± 0.02 であることを決めた(図2)。その後、圧力効果、組成効果も検討されたが、交換平衡分配定数は単純な比の分配係数と比べると、組成、温度、圧力による変化が小さく、ほぼ一定とみなすことができる。そうすると、天然のオリビンのMg/(Mg+Fe)比0.90程度と共存できるメルトのMg/(Mg+Fe)比は0.73程度になる。これが元素分配からの制約条件である(図3)。一般に初生マグマは浮力で上昇すると減圧するのでオリビンの初相領域に入り、最初にオリビンが晶出する。その組成はMg/(Mg+Fe)比が0.9程度であり、オリビン中にMgが入るため結晶分化により液のMg/(Mg+Fe)比は下がっていく。つまりMgに富むオリビン斑晶は初生マグマから最初に晶出した初生斑晶ということができる。これと同じ議論がNiについても行われている。

< MORB の性質 >

MORB の性質は以下のように纏めることができる。

- (1) 比較的一様なアルカリに乏しいソレイト質組成を有し、未分化でMg値($100 \times Mg/(Mg+Fe)$)が50-70のものが多い。
- (2) 斑晶鉱物は、かんらん石、クロムスピネル、斜長石、単斜輝石などが含まれる。
- (3) K, Rb, Ba, H₂O等の液相濃集元素に乏しく、 $(La/Sm)_N < 1$, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比が0.702-0.703と低く、給源マントル物質が著しく枯渇していると考えられる(図4, 5)。
- (4) 海嶺軸に沿って、数10kmの周期で組成が変動し、マントル湧昇が海嶺軸に

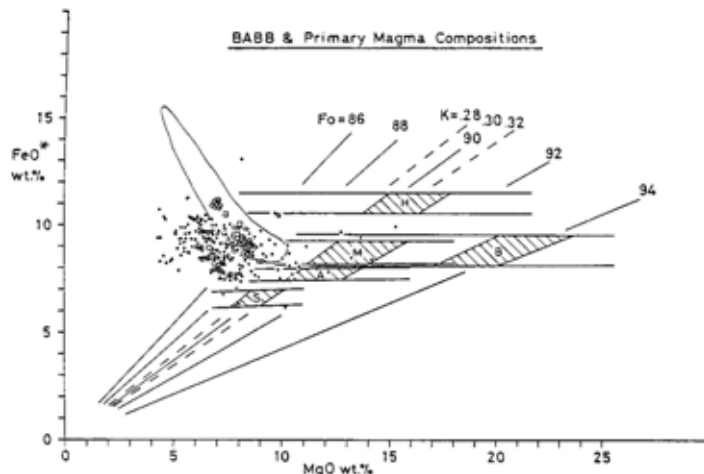


図3 初生マグマのFeO*-MgO濃度範囲。マントルかんらん石(Fo86-94)と共存する液は、原点を通る直線上に乗り、一方、天然の火山岩はFeO*がほぼ一定のかんらん石分別曲線を描く。初生マグマ組成はそれらの交点で求められる。

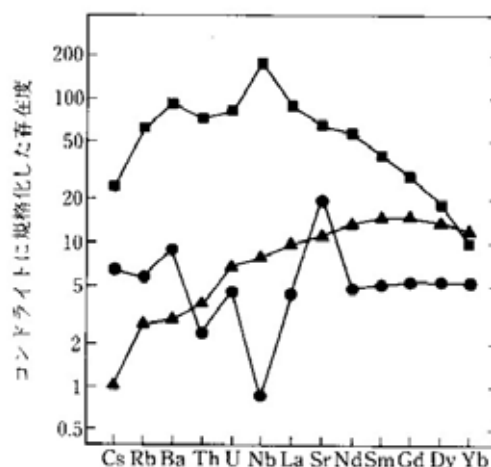


図4

地球上の代表的な火山岩の化学組成。▲：中央海嶺ソレイト系列玄武岩、■：火山島アルカリ系列玄武岩、●：島弧ソレイト系列玄武岩。(Arculus, R.J and Powell, R., *Journal of Geophysical Research*, 91, 5915 (1986))

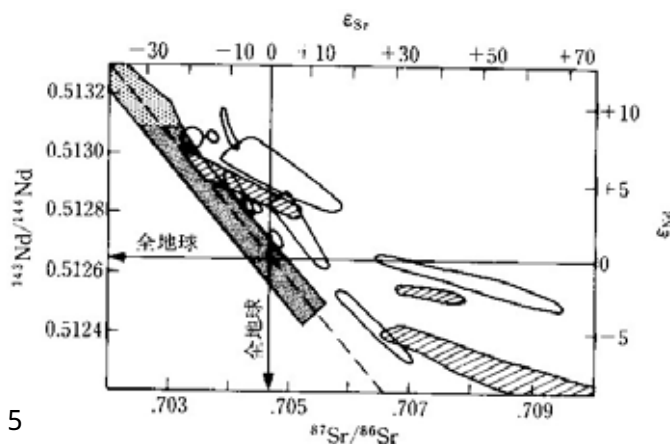


図5

▲：中央海嶺玄武岩、■：火山島の火山岩、□：世界各地の島弧および陸弧の火山岩、▨：アゾレス(左)およびイタリヤ中部(右2ヵ所)の火山岩。

図2.26 地球上の火山岩のSr-Nd同位体組成。

(Gill, J.B., *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*, p.152, Springer-Verlag (1981))

沿って不連続にくびれた構造を持つと考えられる。これはポテンシャルマン틀温度、かんらん岩の組成不均質、表層の断裂帯の分布等によっている。

<海嶺玄武岩の初生マグマ組成とポテンシャルマン틀温度>

海嶺の噴出物は大部分が液相濃集元素および揮発性成分の乏しいソレイト質玄武岩である。海洋底拡大によるマン틀の湧き上がりは、そのヌッセルト数（対流による熱輸送速度／熱伝導による熱輸送速度の比）が小さく、断熱的であると考えられる。マン틀での部分熔融液の集積は極めて低い部分熔融度で生じることがかんらん石—

メルトのぬれ角から推定されており、部分熔融液の分離効率は十分高いと考えられる。マン틀の断熱的上昇では、部分熔融度やマグマ発生量は、ポテンシャルマン틀温度によって決まり、これまでの高温高压実験によって較正すると、海洋地殻の厚さ約 6 - 7 km のマグマを発生する条件として海嶺のポテンシャルマン틀温度は約 1300 程度と考えられる（図 6）（McKenzie & Bickle, 1988）。ここでポテンシャルマン틀温度とは、融解の潜熱を無視した場合のマン틀温度を断熱的に地表迄外挿した温度である。この条件での初生マグマ組成は MgO 量は 10-12wt% 程度である。海嶺のマン틀上昇はホットスポットの影響のない部分では受動的にプレート拡大に伴って生じると考えられ、そのポテンシャルマン틀温度は 1,300-1400 程度であり、ホットスポットの影響のある海嶺では 1400-1500 である。ホットスポットではポテンシャルマン틀温度は約 1500-1600 で、通常のマン틀よりも 200 程度高温である。（図 6）

<参考文献>

<http://www.kobe-u.ac.jp/volcano/morb.pdf>

岩波講座地球惑星科学，第 1 巻，3 章「分化」

McKenzie, D. and Bickle, M.J. (1988) The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. J. Petrol., 32, 1021-1091.

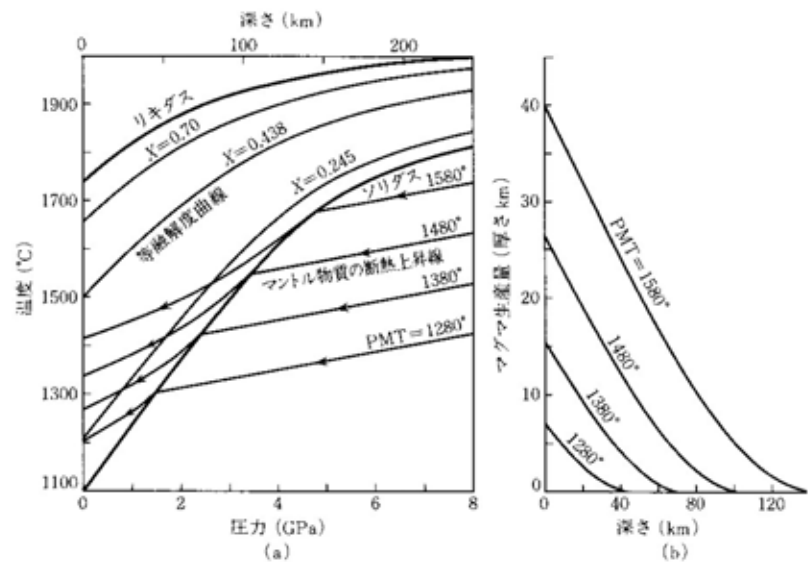


図 6 McKenzie and Bickle(1988)によるマン틀かんらん岩の部分熔融過程(左)と PMT によるメルトの生産量(右)

付表Ⅱ イオン半径

周期	族	Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIII	
1		H 1 ⁺ 1-38 II-18	この表は、元素を周期表の形式に配列して、それぞれのイオン半径を び配位数ごとに示したものである。イオン半径は Shannon と Prewitt d 参照) した経験的半径。単位は pm (1 pm=0.01 Å)。酸化数のうち地球化 オン半径のうち比較的信頼度の高いものは太字で示してある。ローマ数 対する配位数 (NSQ は平面 IV 配位)。 ² O ²⁻ : 140 pm, ² F ⁻ : 133 pm は定 斜体で示した値は Pauling (1960) または Ahrens (1952) による推定 N ³⁻ , Cl ⁷⁺ , Te ⁴⁺ , I ⁷⁺ , Xe ⁸⁺ , 3 価 配位の La およびランタニド, 5 Pu ⁴⁺ , Am ²⁺ に対する値は Shannon (1976) による。							
2		Li 1 ⁺ 59 VII-74	Be 2 ⁺ 27 VI-35							
3		Na 1 ⁺ 102 VI-116	Mg 2 ⁺ 72.0							
4		K 1 ⁺ 138 VI-151 VII-160	Ca 2 ⁺ 100 VI-112	Sc 3 ⁺ 74.5 VI-87	Ti 3 ⁺ 67 4 ⁺ 60.5	V 2 ⁺ 79 3 ⁺ 64.0	Cr 2 ⁺ 82 3 ⁺ 61.5 6 ⁺ 30	Mn 2 ⁺ 83.0 VI-93 3 ⁺ 64.5 4 ⁺ 54.0	Fe 2 ⁺ 78.0 3 ⁺ 78 VI-93 4 ⁺ 64.5	Co 2 ⁺ 74.5 3 ⁺ 61
5		Rb 1 ⁺ 152 VII-172	Sr 2 ⁺ 113 VI-125	Y 3 ⁺ 90.0 VI-101.5	Zr 4 ⁺ 72 VI-84	Nb 5 ⁺ 64	Mo 6 ⁺ 60	Tc 4 ⁺ 64	Ru 3 ⁺ 68 4 ⁺ 62.0	Rh 3 ⁺ 66.5 4 ⁺ 61.5
6		Cs 1 ⁺ 170 VII-188	Ba 2 ⁺ 136 VI-142	La 3 ⁺ 104.5 VI-116.0	Hf 4 ⁺ 71 VI-83	Ta 5 ⁺ 64	W 6 ⁺ 60	Re 4 ⁺ 63	Os 4 ⁺ 63.0	Ir 4 ⁺ 63
7		Fr 1 ⁺ 180	Ra 2 ⁺ 143 VII-148	Ac 3 ⁺ 118						

ランタニド (6 III a)	Ce 3 ⁺ 101 VI-114.5	Pr 3 ⁺ 99.7 VI-112.6	Nd 3 ⁺ 98.3 VI-110.9	Pm 3 ⁺ 97 VI-109.3	Sm 3 ⁺ 95.8 VI-107.9	Eu 2 ⁺ 117 VI-125 3 ⁺ 94.7 VI-106.6
アクチニド (7 III a)	Th 4 ⁺ 100 VI-104	Pa 5 ⁺ 78 VI-91	U 4 ⁺ 97 VI-100 6 ⁺ 73	Np 5 ⁺ 75 VI-75	Pu 4 ⁺ 86 VI-86	Am 2 ⁺ 126 VI-126 3 ⁺ 100

	Ib	IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	0
主要な酸化数 (電荷数) およ (1969, 1970) の集成 (§1.2- 学的に重要なもの、およびイ 字は最近接反対電荷イオンに 義定数。 値をそのまま流用したもの; 価 VI 配位の Pa と Np, Yb ²⁺ 。								He
	B 3 ⁺ III-2 VI-12	C 4 ⁺ III-8	N 3 ⁺ IV-146 5 ⁺ III-12	O 2 ⁺ III-136 VI-140 VII-142	F 1 ⁺ III-130 VI-133	Ne		
	Al 3 ⁺ IV-39 VI-53.0	Si 4 ⁺ IV-26 VI-40.0	P 5 ⁺ IV-17	S 2 ⁺ IV-184 6 ⁺ IV-12	Cl 1 ⁺ IV-181 7 ⁺ IV-8	Ar		
Ni 2 ⁺ IV-69.0	Cu 2 ⁺ IV-59.0 VI-73	Zn 2 ⁺ IV-60 VI-75.0	Ga 3 ⁺ IV-47 VI-62.0	Ge 4 ⁺ IV-40 VI-54.0	As 3 ⁺ IV-58 5 ⁺ IV-33.5 VI-50	Se 2 ⁺ IV-198 6 ⁺ IV-29	Br 1 ⁺ IV-196 7 ⁺ IV-26	Kr
Pd 2 ⁺ IV-86 4 ⁺ IV-62	Ag 1 ⁺ IV-115 VI-130	Cd 2 ⁺ IV-80 VI-95	In 3 ⁺ IV-80.0	Sn 4 ⁺ IV-69.0	Sb 5 ⁺ IV-61	Te 4 ⁺ IV-97 6 ⁺ IV-56	I 1 ⁺ IV-220 7 ⁺ IV-53	Xe 8 ⁺ IV-40 VI-48
Pt 4 ⁺ IV-63	Au 1 ⁺ IV-137	Hg 2 ⁺ IV-96 VI-102	Tl 1 ⁺ IV-150 VI-176	Pb 2 ⁺ IV-118 VI-149 4 ⁺ IV-77.5	Bi 3 ⁺ IV-102	Po 4 ⁺ IV-94 VI-108	At 7 ⁺ IV-62	Rn

Gd 3 ⁺ IV-93.8 VI-105.3	Tb 3 ⁺ IV-92.3 VI-104.0	Dy 3 ⁺ IV-91.2 VI-102.7	Ho 3 ⁺ IV-90.1 VI-101.5	Er 3 ⁺ IV-89.0 VI-100.4	Tm 3 ⁺ IV-88.0 VI-99.4	Yb 2 ⁺ IV-102 VI-114 3 ⁺ IV-86.6 VI-98.5	Lu 3 ⁺ IV-86.1 VI-97.7
Cm 3 ⁺ IV-98	Bk 3 ⁺ IV-96	Cf 3 ⁺ IV-95	Es	Fm	Md	No	Lr