

(2) 元素分配係数とアダカイト

A. 元素分配係数

太陽系の総化学組成は水素，ヘリウム等の揮発性元素を除くと，ほぼ始原的隕石の組成に近いと考えられる．始原的隕石の化学組成は太陽の外層の吸収スペクトルから推定される組成に一致する．地球もほぼそのような始原物質から形成され，その後重力分化が生じ，地殻・マントル・コアの成層構造が形成された．これらの分化過程で元素も分別されてきた．相分離が生じるとき，元素はそれらの相の間で分配される．分配係数は2つの相が共存する場合にそれらの元素濃度の比で表される．分配係数を D_i ，2つの相， m の元素濃度を C_m ， C_i とすると， $D_i = C_m / C_i$ と表される． D_i は温度・圧力一定ではほぼ一定の値を取る．地球の分化が生じた折に各元素が其々の相に分配され，地球の化学的分化が生じた．

特に火成岩の成因を考えるうえでは，結晶相とマグマ(液相)の間の元素分配係数が重要で，部分熔融過程，結晶分化過程，等でマグマの化学組成が変化する．結晶は酸素が最密充填であるため，陽イオンのサイズと電荷によって分配係数が左右されることが知られている．右図に示すように，縦軸に分配係数の対数を，横軸にイオン半径をとると，ある結晶相での結晶/液の分配係数は上に凸な二次曲線を描く．これはエネルギー的に説明されている(Nagasawa, 1966 Science; Onuma et al., 1968 EPSL; Blundy and Wood, 2003)．

一方，元素分配係数は温度・圧力の関数でもあり，それを利用して地質温度計，地質圧力計が開発されている．分配係数の温度・圧力依存性は一般に， $\ln D = H/RT - S/R + V(P-1)/T$ と表される． H ， S ， V は其々反応のエンタルピー，エントロピー，体積変化で， R は気体定数， T は絶対温度．

B. アダカイト問題

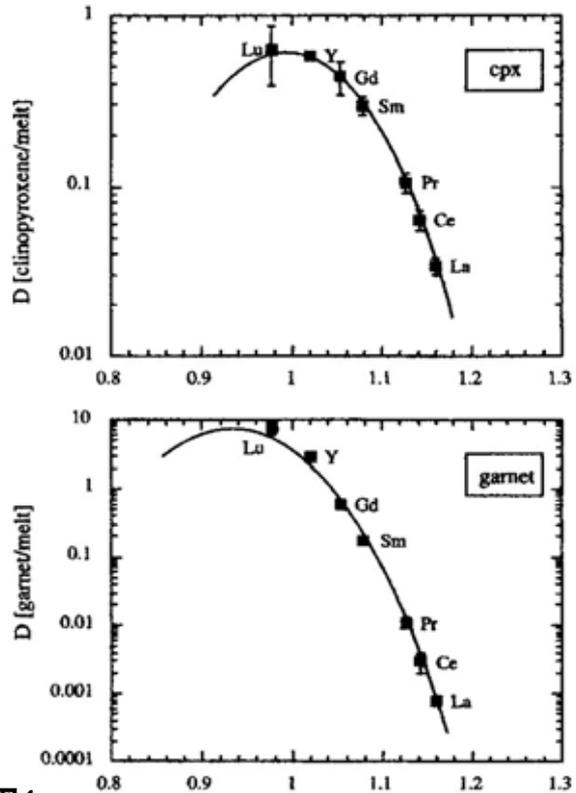


図 4 Fig. 4. Partition coefficients (D) for the 3+ ions entering the clinopyroxene (cpx) M2 site and the garnet X site plotted against ionic radius. Also depicted are least squares fits to Eqn. 1. See text for details and Table 3 for fit parameters.

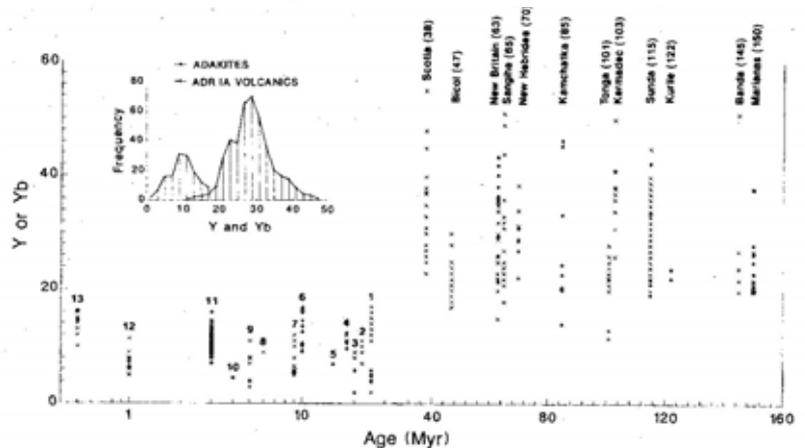


図 2 Defant & Drummond (1990) の図 1，沈み込みスラブの年齢により火山岩中の Y, Yb の量が系統的に異なる．

アダカイト (Adakite) とは Defant & Drummond (1990) が提唱した岩石名で、若いスラブ沈み込みにより海洋地殻が部分溶融して生じるマグマのことを云う。特徴としては、 $\text{SiO}_2=60-70\%$ のデイサイト質、カルクアルカリ質の主成分組成を持ち、微量元素組成が、石榴石 + 単斜輝石の部分溶融で

生じた特徴 (Sr/Y が高く、Y が低い、HREE に著しく乏しい REE パターン) を有する。日本では大山、三瓶、青野山等がそれらの特徴を有する (Morris, 1996)。

< 歴史的背景 >

1. プレートテクトニクスの誕生の頃、Green & Ringwood (1967, CMP) は沈み込みスラブの海洋地殻 (玄武岩) が高压でエクロジャイトに転移した後部分溶融するとカルクアルカリ安山岩が生じるというモデルを提唱した。しかし島弧カルクアルカリ安山岩の成因論に関しては、磁鉄鉱を含む結晶分別モデルが優勢で (Gill, 1981) あった。Kay (1980 JVG R)

は、アリューシャンの Adak 島に産する安山岩が $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が低く、HREE が乏しい等エクロジャイトの部分溶融で生じた特徴をもつことを指摘したが、その後放置されたままであった。アダカイトの名称は、Adak 島で最初に記載されたことに因んでいる。

Defant & Drummond (1990) は、世界各地の沈み込み帯の安山岩の微量元素組成を調べ、若いプレートが沈み込んでいる場合 (< 15Ma)、Sr/Y、La/Yb 比が高く、Y、Yb に乏しい安山岩 (デイサイト) が産することを明らかにし、若いスラブが沈み込むと海洋地殻が高温になり部分溶融で安山岩マグマが生じ特徴的な微量元素組成を有することを指摘した。これは沈み込み帯の温度計算機実験でも確かめられた (Peacock, 1994, 1999)。

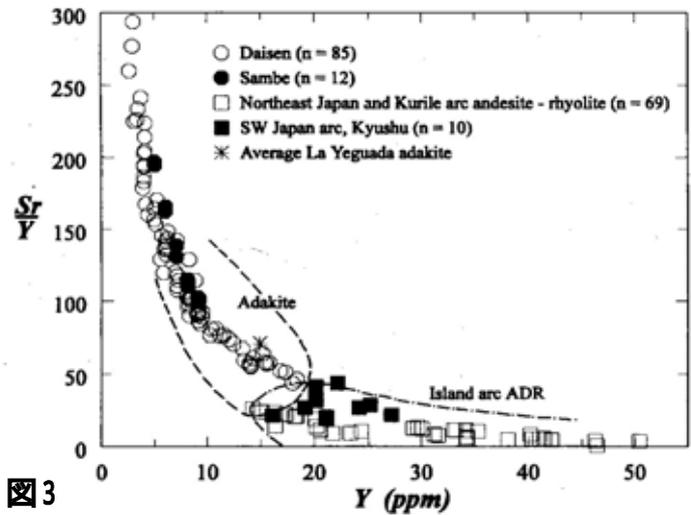


図3

Figure 3. Sr/Y vs. Y (ppm) for Daisen and Sambe; andesites, dacites, and rhyolites from northeast Japan; and arc volcanic rocks from Kyushu. Data sources: Daisen—Fuji (1992); Miyake (unpublished data); Sambe—Morris (unpublished data); northeast Japan—Shuto and Yashima (1990); Tamura and Shuto (1989); Togashi et al. (1992); Yoshida et al. (1992); Kyushu—Nakada and Kamata (1991). "Adakite" is average of five adakites from Defant et al. (1991). Also shown are fields for adakite and Archean high-Al TTD (trondhjemite-tonalite-dacite; dashed line) and island-arc ADR (i.e., andesite-dacite-rhyolite; dash-dot line) from Defant et al. (1991).

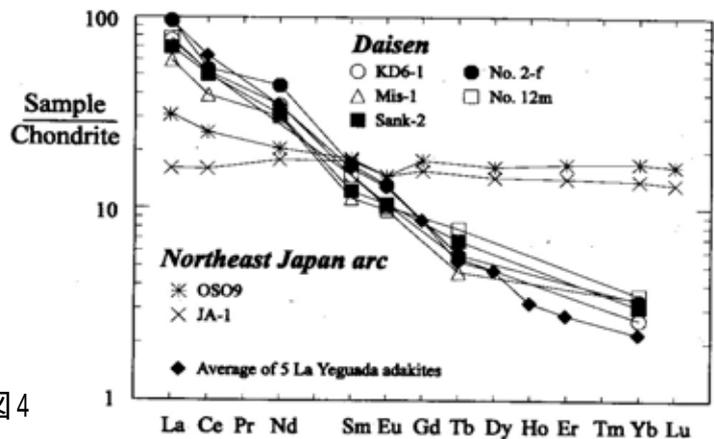


図4

Figure 2. Chondrite-normalized rare earth element abundances for samples from Daisen, and Osore (OSO9) and Asama (JA-1) from northeast Japan arc. Data sources: Daisen—Fuji (1992), Miyake (unpublished data); Osore—Togashi et al. (1992); Asama—Yoshida et al. (1992). Average young group adakite from La Yeguada (Defant et al., 1991) is also shown. Chondrite normalization factors from Boynton (1984).

2. 大陸地殻は平均組成として安山岩組成を有すると考えられている (大陸地殻の地震波速度分布、玄武岩包有物の研究から)。マントルで生じるマグマは通常玄武岩であり、それが上昇して大陸地殻が生じたとすると平均組成が説明できない。考えられるモデルとしては、(1) 加水マントルの部分溶融で初生安山岩マグマが生じた (2) スラブ溶融で生じたアダカイト質マグマが大陸地殻を形成した、(3) 玄武岩質地殻が部分溶融して花崗岩マグマを生じ、残りのエクロジャイトは剥がれてマントル中へ落下した (Delamination と呼ぶ)、(4) スラブの角閃岩が部分溶融して安山岩質マグマが生じた。等のモデルが考えられている。最近の研究で始生代の花崗岩は Sr/Y が高く、Y

の低いアダカイト質なものが多いことが指摘され(2)のモデルの重要性が指摘されている(Rapp et al., 2003)

<沈み込みスラブの相平衡と部分熔融条件>

海洋地殻は3層の分かれ, 第一層は堆積物(<1km), 第二層は玄武岩溶岩(2km), 第三層は斑レイ岩(5km)からなる. 堆積物は柔らかいため, 沈み込みに際しては上盤側に付加して沈み込みには必ずしも伴われない(侵食が生じて付加がない場合もある: 日本海溝, 堆積物中のBやBe-10が島弧火山岩に特徴的に含まれるのは堆積物がマントルの部分熔融に参加した証拠となっている). 沈み込みスラブの海洋地殻の大半は玄武岩質(MORB: 海嶺玄武岩)であり, それは高温高压条件では角閃岩(角閃石+斜長石), グラニュライト(Al輝石+スピネル+石英+長石等), エクロジャイト(柘榴石+オンファス輝石)に転移する. つまりAlを含む鉱物は斜長石 スピネル 柘榴石, と変化する. これらのAlを含む鉱物の違いが, 部分熔融で生じる液の微量成分組成を大幅に変える.

<エクロジャイト構成鉱物の元素分配係数と部分熔融液の組成>

エクロジャイトは主にザクロ石とNa単斜輝石からなる. ザクロ石は通常

$(Ca, Mg, Fe^{2+}, Mn)_3Al_2Si_3O_{12}$ の化学式を有するが, 2価元素は8配位であり, Alは6配位を占める. YAGレーザー(イットリア-アルミナ柘榴石Nb添加で紫色レーザー発振をする)で知られるようにこの結晶構造にはYや重希土元素が入りやすく, それらは高い柘榴石-メルト間の分配係数を有する. 但し, 分配係数は $D_i = C_{is} / C_{il}$ で定義する.

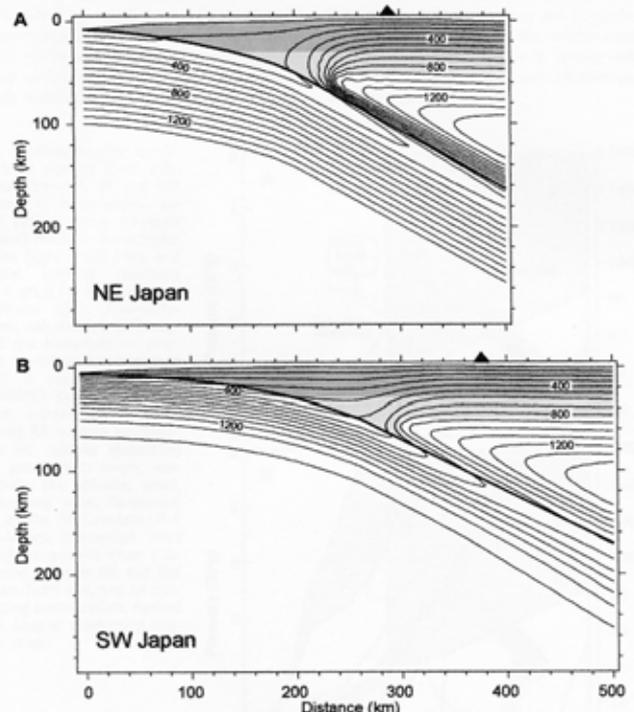


Fig. 2. Calculated thermal structure for (A) NE and (B) SW Japan subduction zones. Rigid Japan lithosphere is shaded with darker shading representing crust. Black triangles mark location of volcanic front. Contour interval = 100°C.

図5 Peacock(1999)による東北日本と西南日本沈み込みスラブの温度構造

Fig. 3. Metamorphic conditions in oceanic crust subducted beneath NE and SW Japan. (A) Metamorphic facies (21), hydrous minerals (italics) stable in the eclogite facies (light gray) (19), and partial melting reactions (dark gray) for basaltic compositions (21). Thermodynamic calculations (22) suggest the blueschist → eclogite transition (dark dashed line) is nearly isothermal (~500°C), but this has not been experimentally confirmed. EA, epidote amphibolite; EB, epidote blueschist; GS, greenschist; amph, amphibole; chl, chlorite; ctoid, chloritoid; laws, lawsonite; zoi, zoisite. (B) Calculated P-T conditions (horizontal lined area) for oceanic crust subducting beneath NE and SW Japan. Solid line, top of subducting oceanic crust; dashed line, base of subducting oceanic crust.

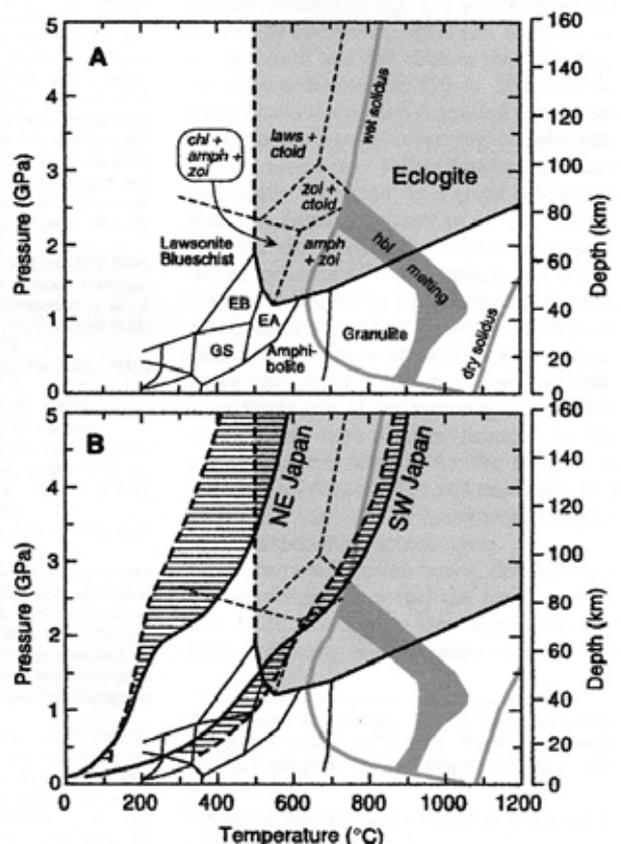


図6

イオン半径の比較的大きな軽希土元素はそれほど柘榴石には入らないため、柘榴石が残留相として存在する場合、液の希土類元素パターンが軽希土/重希土比の高いものになる。また、Sr、Yについてみると、Srは斜長石に大きな分配係数を有するが、柘榴石には分配せず、一方、Yは斜長石に小さい分配係数を有する一方、柘榴石に大きな分配係数をもつため、柘榴石が残留相に存在することにより、生じた液のSr/Y比が大きくなる。

Batch melting (系の組成が保存された条件での部分溶融過程)のモデルでは、初期濃度を C_{i0} として、分配係数を $D_{Sr,gar}$ 、 $D_{Y,cpx}$ な、鉱物の量比を X_{gar} 、 X_{cpx} 、部分溶融度を Y とすると、分配係数の式と質量保存から、 $D_{Sr}=D_{Sr,gar} * X_{gar} + D_{Sr,cpx} * X_{cpx}$ 、 $D_Y=D_{Y,gar} * X_{gar} + D_{Y,cpx} * X_{cpx}$
 $C_{Sr,L} * Y + C_{Sr,S} * (1-Y) = C_{Sr,0}$ 、 $C_{Y,L} * Y + C_{Y,S} * (1-Y) = C_{Y,0}$ であり、最終的に、 $C_{iL} = C_{i0} / (D_i + Y(1-D_i))$ となる

図7に計算結果の例を示すが、通常の海嶺玄武岩を出発物質 (Sr120ppm, Y30ppm) とした場合、部分溶融のモード比が重要であることが判る。すなわち、部分溶融度は30%以下、柘榴石量が30%以上、斜長石は10%以下である条件で液組成がアダカイト領域の組成を有するようになることがわかる。この計算では分配係数は一定として計算をおこなったが、実際には分配係数はある程度温度、圧力、組成の関数でありこの計算は第一近似のものであることを理解してください。

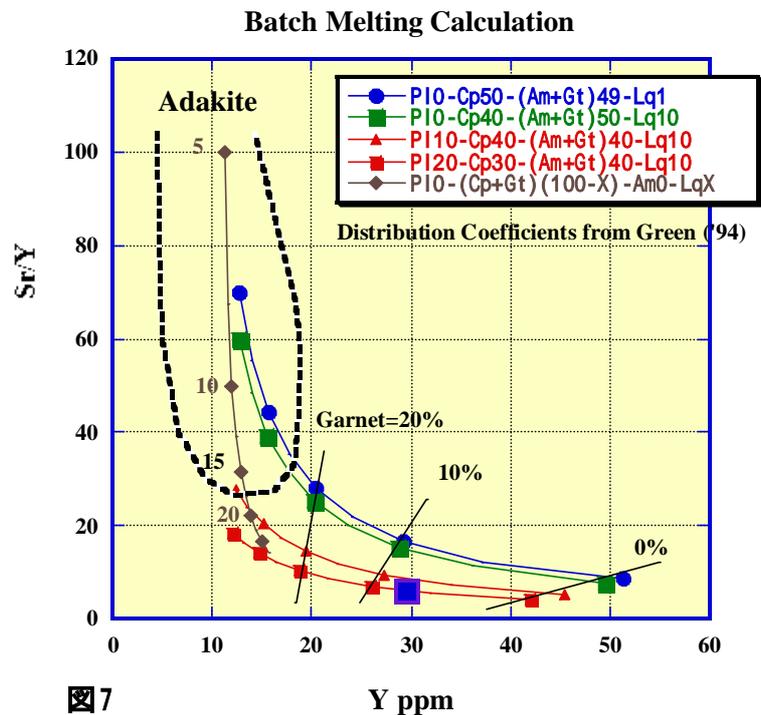


図7

Futher readings:

1. Defant, MJ and Drummond, MS(1990) Derivation of some modern arc magmas by partial melting of young subducted lithosphere. Nature, 347, 662-665.
2. Morris, PA (1995) Slab melting as an explanation of Quaternary volcanism and aseismicity in southwest Japan. Geology, 23, 395-398
3. Klemme, S., Blundy, J.D. and Wood, B.J.(2002) Experimental constraints on major and trace element partitioning during partial melting of eclogite. Geochimica et Cosmochimica Acta, 66, 3109-3123.
4. Blundy, J.D. and Wood, B.(2003) Partitioning of trace elements between crystals and melts. Earth and Planetary Science Letters, 210, 383-397.
5. Rapp, R.P., Shimizu, N., Norman, M.D.(2003) Growth of early continental crust by partial melting of eclogite. Nature, 425, 605-609.
6. Peacock, S.M.& Wang, K.(1999) Seismic consequences of warm versus cool subduction metamorphism: example from southwest and northeast Japan, Science, 286, 937