

古代中央海嶺火成活動：太古代マンツルの 組成と温度の束縛条件

小宮 剛*・丸山茂徳*

Igneous Scitibility of Archean Mid-Ocean Ridge : Constraints to
Composition and Temperature of Archean Mantle

Tsuyoshi KOMIYA* and Shigenori MARUYAMA*

1 : 5000 scale detailed mapping was performed in the Isua, southern West Greenland. The result shows that the Isua NE part is divided into three units by two low-angle thrusts, northern, middle, southern unit, respectively. The southern unit with the best exposures is underlain by twelve subunits (horses) with similar lithostratigraphy to one another and all of them are bounded by layer-parallel thrusts. The reconstructed lithostratigraphy of each horse reveals a simple pattern, in ascending order, greenstone with chemical affinities of low-K tholeiite, chert/BIF and mafic-felsic turbidite. The cherts and the underlying low-K tholeiites never include continent- or arc-derived materials. The lithostratigraphy is quite similar to the Phanerozoic oceanic plate stratigraphy forming accretionary complex. In addition, the faults formed by layer-parallel shortening are recognizable bounding each accretionary prism, and hence the so-called duplex structure is widespread all over the Isua belt, varying in size from a few meters to kilometers in scale. As recognized well on the map, basaltic flow layers tend to converge to the south. The similarities of field evidences in the mapped area to those in Phanerozoic accretionary complexes, for example, in terms of both duplex structure and oceanic plate stratigraphy, indicate that oceanic crust subducted beneath oceanic island arc to form an accretionary complex in the Early Archean.

The greenstones could be classified into two types based on geological criteria on the analogy of the Phanerozoic accretionary complexes. One is MORB-type rocks (IMORBs) that are overlain by thick, up to 50 m, bedded chert and often characterized by well-preserved pillow structure, suggesting that they were formed at mid-oceanic ridge. The other is OIB-type rocks (IOIBs), which are interlayered with thin chert or appears as sills or dikes into chert but not into the overlying terrigenous sediment, suggesting that they were derived from oceanic island volcanism.

Major element geochemistry shows that IMORBs and IOIBs are high-Fe and low-K tholeiites. IMORBs are enriched in FeO and Al₂O₃ compared with modern MORB, suggesting that source mantle of IMORBs was enriched in basaltic components. That is consistent with incompatible trace element chemistry. Siderophile elements (Ni and P) are not enriched compared with modern MORBs, suggesting that the formation of metallic core of the Earth had been completed by 3.8 Ga. Rare earth elements (REE) abundance of IMORBs and IOIBs is ten times more than that of chondrite respectively. The former is depleted in light to middle REE, and by contrast, the latter displays flat REE pattern, indicating that mantle had been already differentiated between MORB (shallow) and OIB (deep) source mantle through the formation of oceanic crust

1. はじめに

1960年代後半, 地球物理学者らによって地球表層で見られる地質現象を起こすメカニズムとして, プレートテ

クトニクスが体系化され, それが浸透するに従い, 70年代以降, 地球史の上でその開始の時期とメカニズムの議論が多くされた (Dewey & Spall, 1975). その中で極めて先進的なグループは緑色岩や花崗岩類の地球化学的特徴 (Hart *et al.*, 1970; Condie, 1972; Arth & Hanson, 1972), 地球物理学的考察 (Bickle, 1978; Nisbet & Fowler, 1983; Arndt, 1983) や粗雑ではあるがオフィオライトの存在を裏付けるような地質データのコンパイル

* 〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1
東京工業大学理学部地球惑星科学科
Department of Earth and Planetary Sciences,
Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama,
Meguro-ku, Tokyo 152, Japan.

(Burke *et al.*, 1976) から太古代プレートテクトニクスの存在を示唆した。ところが、主として地質調査をするグループは、その野外調査結果に基づき、垂直方向の運動によるモデルを提唱し(例えば Wyne-Edwards, 1976) それに反対した。近年、地球物理学的考察のみならず地質学的証拠からも、太古代の地質体をプレートテクトニクスに基づいて再解釈する動きがあるが(de Wit *et al.*, 1987; Hoffman, 1991; Kusky & Kidd, 1992), 緑色岩のテクトニックセッティングのような細部の解釈にいたってはまだ混沌としている(例えば Bickle *et al.*, 1994)。

冥王代から太古代初期にいたるテクトニクスとなると現在まだ激しく論戦がされている。地球が微惑星の衝突・集積により形成される過程でマグマオーシャンを経験し(Hayashi *et al.*, 1979), その末期にジャイアントインパクトが起こり月が形成された(Hartman *et al.*, 1986)。ここまでは一般に受け入れられているようではある。しかし、マグマオーシャンが地球のマントルの分化にどれほどの影響を及ぼしたかという点と難しい。あるグループはマグマオーシャン時にマントルは成層構造し大規模に分化すると考え(例えば Ohtani, 1985), また一方では分化してもその後すぐに破壊されてしまい、現在もしくは初期太古代のマントルで見られる分化はその後の大陸成長によると考えている人々がいる(例, Gruau *et al.*, 1990 や McCulloch & Bennett, 1994)。後者の考えは特に同位体研究グループに多い。冥王代末期から太古代にかけてのテクトニクスの議論は、いわばプレートテクトニクスの開始の時期についての議論ともいえる。本論文は四番目の条件として地質学的証拠をより明確に加えようとしているが、初期太古代テクトニクスを記述する上でのこれまでの制約条件は次の三つである。

(1) 大陸地殻の地温勾配は今と同じくらいである。(2) マントル自体は今よりも高温でコマチアイトをつくりうる。(3) 大規模に枯渇したマントルを生成する。現在これらを満足させるモデルには全く対極的な二つが考えられている。一方は今日のプレートテクトニクスに極めて類似したもので、海嶺での大量の海洋地殻(コマチアイト・玄武岩)の生成(Chase & Patchett, 1988)や沈み込み帯での現存以上の大陸地殻の生成(Armstrong, 1981)によってマントルを枯渇させる。もう一方は今日の金星表層でのテクトニクスに類似したもので垂直方向の物質移動を主体とし、下部マントル起源のプルーム活動による広大な海台の生成(Galer & Goldstein, 1991)や継続的なプルーム火成活動のため非常に厚い玄武岩やコマチアイト地殻がつくられ、その下部で部分溶融がおこ

り酸性マグマを生成する(Condie, 1986)などのモデルが考えられている。いずれにせよ、これらのモデルは太古代前期の変塩基性火成岩の全岩のNd同位体に見られる極めて高い正の異常をうまく説明するためという意味合いが強く(例えば Bennett *et al.*, 1993), 今後、そのNd同位体の信頼性を含めた再検討が必要になると思われる。

南アフリカ共和国のBarbertonで最初にコマチアイトが発見されて、もう30年近くになる(Viljoen & Viljoen, 1969)。その間、実験や理論の火成岩岩石学の進歩や分析技術の進歩とともに、たいていの地域の緑色岩の全岩の主成分・微量成分・同位体の研究がなされ、太古代の固体地球環境についての考察が数多くされてきた(例えば, Arndt & Nisbet, 1982; Hall & Hughes, 1990 や Condie, 1994)。しかし、これまでの研究で欠けていたことがある。それは、地質学・地球化学・岩石学を融合させた総合的な研究である。従来の太古代緑色岩の研究では、テクトニックセッティングの考慮があまりされておらず、たとえ太古代プレートテクトニクスを信ずるとしても漠然と海洋底玄武岩と同じであるとみなして議論される場合が多かった。しかし、顕生代の玄武岩をみると、テクトニックセッティング(マントルの組成、溶融時の温度や圧力の違いを意味する)の違いによって生じるマグマの組成は異なっている。その点に気づき、最初にそれを考慮してマントルの経年変化を論じたのはCondie(1985)であった。しかし、彼の論理の問題点は以降の論文でもそうだが、同地域で見られる全ての緑色岩の化学組成を平均して議論していること、顕生代の地球化学的判定図を用いて議論してしまったことにある。本研究では、先にも述べたように地球化学とは独立に地質学的にテクトニックセッティングを推定し、主に38億年前の中央海嶺玄武岩を用いて、(上部)マントルの組成や温度を推定し、今と比較する。

グリーンランド南西部はカナダのラブラドルからスコットランドに続く北大西洋クラトンの一部で太古代の岩石が広く分布する。そして、それは年代や変成度の違いによって北からアキア、アクレックとタジウサースアックの三つのテレーンに区分されている(Friend *et al.*, 1988)。そのうちアクレックテレーンには太古代初期の岩石が広く露出し、北東部には低変成度の地域も存在する(Fig. 1)。イスア地域はアクレックテレーンの最北東端に位置し、長径25 km、短径13 kmの卵形の擬ドーム状構造で特徴づけられ、おもに弓状のイスア表成岩帯とその両側で断層を境にして接するアミツオーク片麻岩体、それらを切っている太古代中期のターサートック岩脈やペグマタイト脈や原生代前期の高マグネシア安山岩

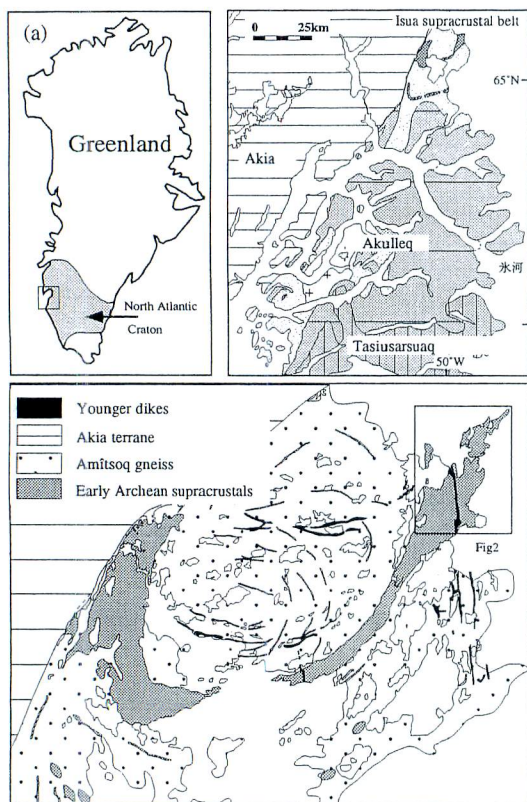


Fig. 1 (a). The map of Greenland, (b) Geotectonic subdivision of the southern West Greenland (Friend *et al.*, 1988), (c) The magnified map of Isua area.

岩脈からなる。イスア地域（38 億年前）は最古の地質体として長らく世界中に知られ（Moorbath *et al.*, 1973）、これまで地質学のみならず、生物学、同位体を含む地球化学、鉱床学、変成・火成岩岩石学など極めて学際的な研究が行われてきた。最近、オーストラリア国立大学を中心に太古代前期地質体発見の報告が多くされてはいるが（Nutman *et al.*, 1996）、イスア地域には極めて広い範囲にわたって表成岩を含む太古代初期の岩石が分布し、それらの岩石は変形・変成作用を受けてはいるが最高変成度が角閃岩相以下で（Boak *et al.*, 1983）、いまだ原岩の構造や組織を残している点から太古代初期の地球環境を知る上でその重要性は今だ衰えていない。

2. イスア地域の地質

Fig. 2 は 1993 年の夏の調査で完成したイスア表成岩帯の北東端の地域の、原岩に基づく 5000 分の 1 の地質図である（詳しくは小宮・他, 1995 参照）。この地域は東傾斜と北傾斜の低角なスラストによって三つのユニットに分けられ、それぞれ、北部、中部、南部ユニットと名付けることにする。北部ユニットの西部にはメランジュ構造が見られ、また多様な岩相変化の見られる南部ユ

ニットではデュプレックス構造が露頭スケールから地質図スケールまで確認された。南部ユニットの地質については少し詳しく説明する。

南部ユニットは主に、枕状熔岩やハイアロクラスタイトからなる塩基性火山岩、チャートや縞状鉄鉱層（BIF）、珪長質・苦鉄質な堆積岩を原岩とする変成岩からなり、その他、超苦鉄質岩、炭酸塩岩、礫岩やドレイイト質岩脈起源の変成岩も存在する。同ユニットには少なくとも 14 本の左横ずれの東から南東傾斜の層とはほぼ平行な低角なスラストが存在することが判明し、それにより 12 のホース（断層で区切られた小岩体）を定義することができる。褶曲構造や断層による欠損を考慮しその内部の層序を復元すると、それぞれの層序はみな同一で、下位から、枕状や塊状の溶岩とハイアロクラスタイトの層、チャート/BIF、苦鉄質な堆積岩である。この層序の重要な特徴は、その順序もさることながら、苦鉄質な堆積岩が陸源性堆積物質起源の石英・長石質な物質を含むのに対して、枕状溶岩層やチャート/BIF にはそれらの物質がいっさい含まれないことにある。このようにして復元された岩相層序は日本列島などの顕生代造山帯の付加体中で見られる海洋プレート層序にはかならない。

それぞれのホースの海洋プレート層序をチャート層の厚さや苦鉄質堆積岩の岩相に着目して比較するとそれらは八つのサブグループ（デュプレックス）に分類できる。つまり、南部ユニットの地質構造は、各々海洋プレート層序を持ついくつかのホースが低角な東傾斜の層理面と平行なスラストを介して積み重なり、そのようにして作られた八つのデュプレックスが同様なスラストで累積した覆瓦状構造をしている。また、各デュプレックス内の枕状溶岩層は南側に収斂する傾向をもっている。このような地質構造は水平方向の短縮によって生じるデュプレックス構造そのものである。この南部ユニットに最も良好な形で保存されているデュプレックス構造と海洋プレート層序という二つの特徴から同地域は典型的な付加体の構造をもつといえる。また、イスア表成岩帯の他の地域は岩相があまり多様でなかったり、変形による地質構造の乱れなどから、まだ完全には元の地質構造を解析できていないが、構成物質や地質構造はそれらも付加体起源であることを示唆している。

3. イスアの緑色岩の産状

これまでの研究ではイスア表成岩帯は BIF の特徴（Algoma タイプ）などから、すべて一連整合に浅海域で形成され、そのあとに玄武岩を主体とする大きな貫入岩体が定置したと考えられてきた（例えば Nutman,

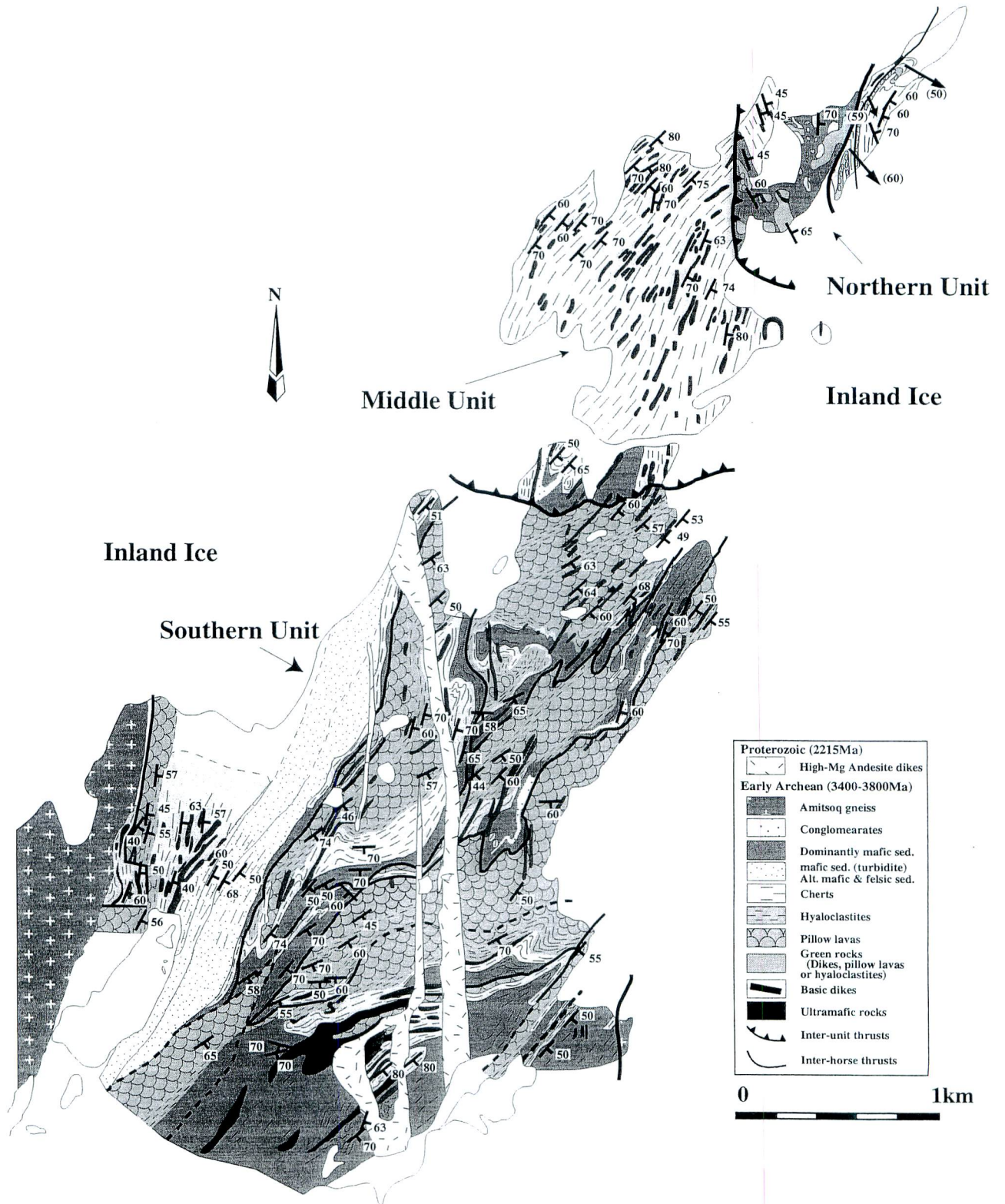


Fig. 2. Geological map of the northeastern part of the Isua supracrustal belt

1986). しかし、今回の調査結果は同地域が付加体起源であることを示しており、かつ、その特徴が顕生代のそれと極めて類似している点はイヌア表成岩帯の構成物も顕生代の付加体中のそれと同様なプロセスで形成されたことを示唆している。顕生代では、陸から離れた大洋内の

中央海嶺で枕状溶岩層が形成され、そのプレートが陸に近づくにつれてその上をチャート、半遠洋性堆積物、タービダイトが順次堆積する (Isozaki *et al.*, 1990). その結果、中央海嶺玄武岩起源の緑色岩は層序の最下層に位置し厚いチャートに覆われる。一方海洋島玄武岩起源

の緑色岩は比較的薄いチャートに挟まれていたり、またはチャート層を切る岩脈またはシル状の産状をする。しかし、そのときタービダイト層を貫くことはない。この考えをイスアの付加体に適用すると、枕状溶岩層は太古代初期の中央海嶺玄武岩（以後 IMORB と呼ぶ）であり、一方枕状溶岩層やその上位のチャート層を切るが、タービダイト層には切られている玄武岩岩脈は同時代の海洋島玄武岩（同 IOIB）であると類推される (Fig. 3)。その他、タービダイト層と周辺のアミツオーク片麻岩をも切る岩脈が存在するが、それらは島弧またはリフト火成活動起源であると考えられる。つぎに、これらの緑色岩の地球化学的研究から、太古代マンツルの温度、組成を見積もることとする。

4. イスアの緑色岩の地球化学

イスア表成岩帯で見られる二つのタイプの緑色岩の主成分、微量成分、希土類元素を東京工業大学の XRF、東京大学海洋研究所の XRF、東京工業大学の ICP-MS でそれぞれ測定した。サンプルはまず肉眼で石英脈や表層風化のないものを野外で選び、かつ、鏡下でも変質の程度が低いと思われるもののみが選出された。

顕微鏡下では、IMORB も IOIB もともに、緑色片岩相から角閃岩相程度の変成鉱物の組合せをしており、両者に顕著な相違はないが、IMORB の方が緑泥石にとむサンプルが多い傾向がある。その他、ザクロ石、くさび石、赤鉄鉱等が見られる。副成分変成鉱物としては、黒雲母、

リン灰石、方解石、柱石、白色雲母、電気石が見られた。

Fig. 4 は両者の主成分・微量成分元素を顕生代の MORB やソレライト質の OIB と比較したもので、MgO を分化の指標として横軸にとってある。IMORB も IOIB もともに、MORB と同じ分化トレンドを示し、顕著に OIB のそれとは異なる。IMORB と MORB を比べた場合、最も未分化であると思われるところでは、前者は Al_2O_3 、 FeO^* や MnO に富み、 TiO_2 、 CaO 、 Ni や Y に乏しい。 SiO_2 はほぼ同じである。IMORB と IOIB とを比べた場合、前者の方が Al_2O_3 に富み、 FeO^* に乏しい。 CaO は多少前者の方が多いがあまり変わらない。それら以外はほぼ同じである。Fig. 5 は横軸に親石難揮発性液相濃集元素 (Zr) をとり、縦軸には親石元素である Ti または親鉄元素である P の同様な元素をとった図である。比較のために、顕生代の MORB と OIB、同様な手法で推定した 33 億年前の中央海嶺玄武岩 (Ohta *et al.*, 1996) がともにプロットされている。図上の実線は CI コンドライトの値を通り MORB のトレンドと同じ傾きをもつ直線で、分別融解を仮定したとき、コンドライトと同じ液相濃集元素比をもつソースマンツルが MORB と同様な溶融や結晶分化プロセスを経験したときにもつトレンドを表している。Fig. 5 (a) では、縦軸にも親石元素 (Ti) がプロットされている。OIB に多少ばらつきが見られるが、38 億年前の緑色岩から現在の MORB まではほぼ同一の直線上で、かつコンドライトソーストレンド上にプロットされる。一方、Fig. 5 (b) では、縦軸に親鉄元素

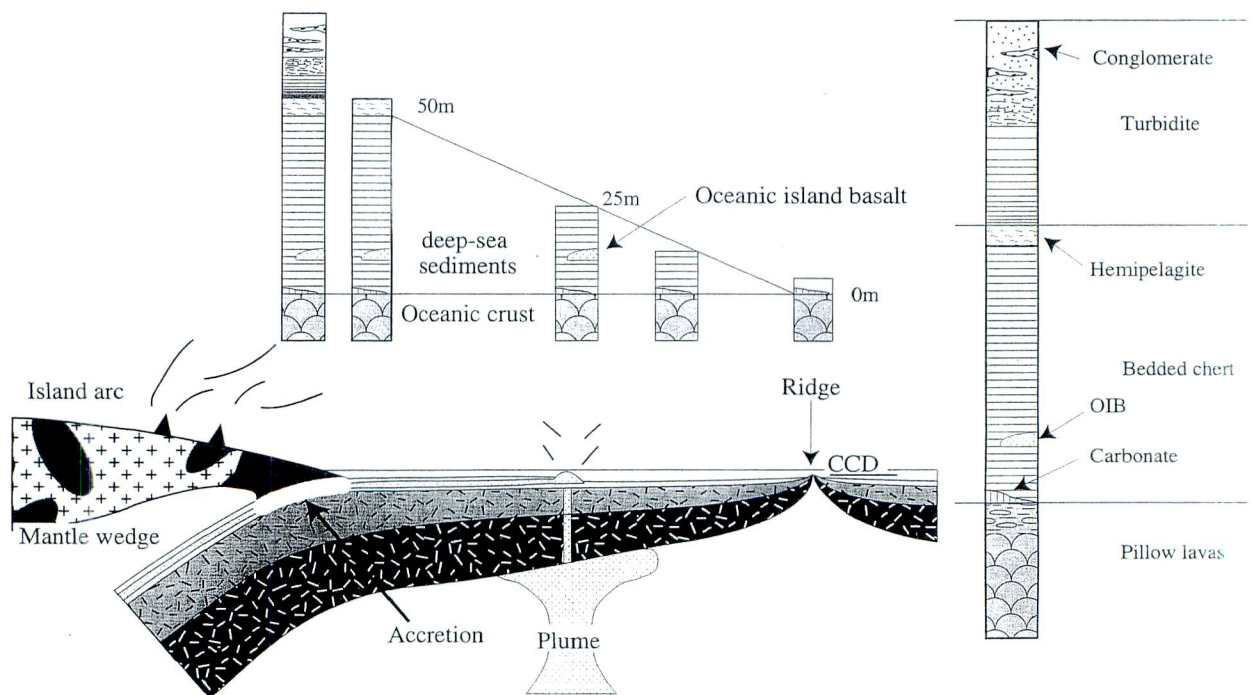


Fig. 3. Schematic diagram to show the formation of the Isua accretionary complex, and to show the origin of the greenstones by the analogy of the Phanerozoic accretionary complexes.

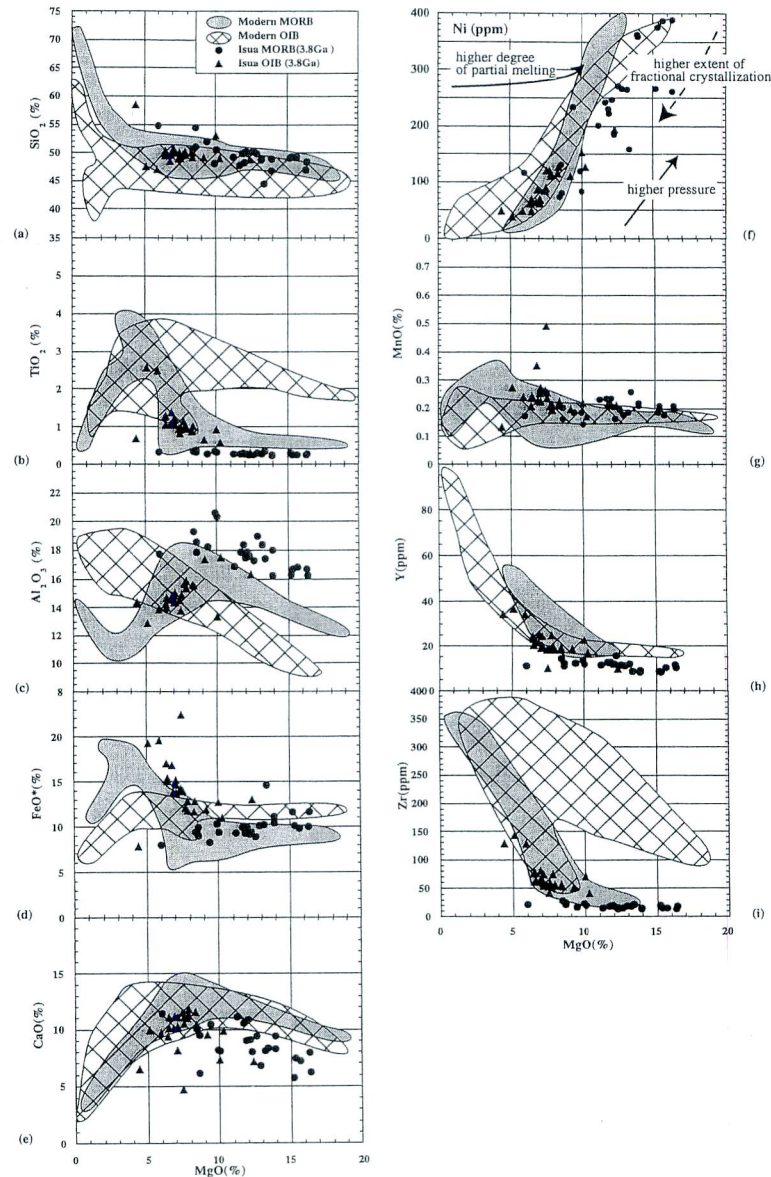


Fig. 4 Major and trace elements geochemistry of IMORBs and IOIBs compared with modern MORBs and OIBs.

(P) がプロットされている。同様に、OIBを除きすべてほぼ同一直線上にプロットされるが、その値は、全体的にコンドライトソーストレンジより低い。Fig. 6にはIMORBとIOIBのCIコンドライトで規格化された希土類元素(REE)パターンが示されている。存在量は重希土類元素側でコンドライトの10倍くらいである。前者は軽・中希土類元素が枯渇した、一方、後者ではほぼ水平なパターンを示す(Komiya & Maruyama, 1995)。

5. 考 察

(a) 太古代マンツルの組成と温度

イスアの二つのタイプの玄武岩(IMORBとIOIB)は顕生代の中央海嶺玄武岩(MORB)と似た分化トレンド

を示している(Fig. 4)。これは両者とも低圧下での結晶分化を経験したことを示す。次に、IMORBとMORBを較べてみる、両者は同じテクトニックセッティング下で生じたマグマであり、かつ、同程度のSiO₂含有量をもっている。このことは、IMORBとMORBは同じ圧力領域で、おそらく同じようなメカニズムで生じたマグマであることを示していると推察される。両者の主成分元素を最も未分化なところで比較すると、前者の方がAl₂O₃、FeO*やMnOに富み、TiO₂、CaO、Ni、ZrやYに乏しい。この点について以下では、適度にコンパチブルな元素(Al₂O₃、FeO*、MnO、CaO)、極めてコンパチブルな元素(Ni)と液相濃集元素に分けて考察する。

まず、適度にコンパチブルな元素について考察する。

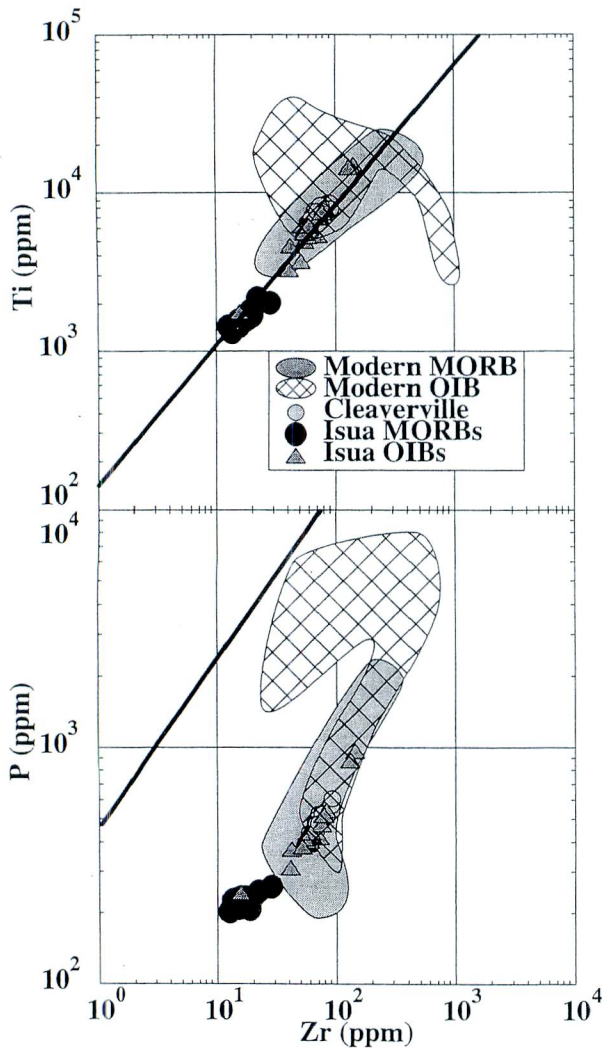


Fig. 5. Zr vs. Ti (above) and Zr vs P (below) diagrams to be complete mantle/core separation before 3.8Ga. Solid line is the melting trend of chondritic source mantle (See text in detail).

これらの元素は起源マンツル中の含有量とともに生じたマグマ中のそれらの含有量も増加する (Hirose & Kushiro, 1993; Baker & Stolper, 1994; Kushiro, 1996). よって, IMORBがMORBに較べて, Al_2O_3 や FeO^* に富むという特徴はIMORBのソースマンツルが現在のMORBのそれよりもこれらの元素に富むことを示している. つまり, 太古代前期のマンツルは今よりもメルト成分に富んでいたと考えられる.

Fig. 7はカンラン石の最大分別結晶のみを受けていると考えられるMgO含有量が12%以上のIMORBを, 様々な組成のペリドタイトの融解実験によって生じたメルトの組成と比較したもので, ソースマンツルの組成を見積もるのに使える. Fig. 7 (a)は横軸にMgO(結晶分化または融解の程度の指標)をとり, 縦軸には FeO^* 含

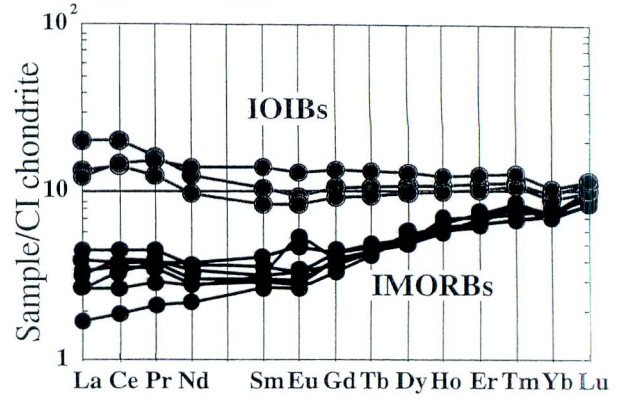


Fig. 6. REE patterns of IMORBs and IOIBs.

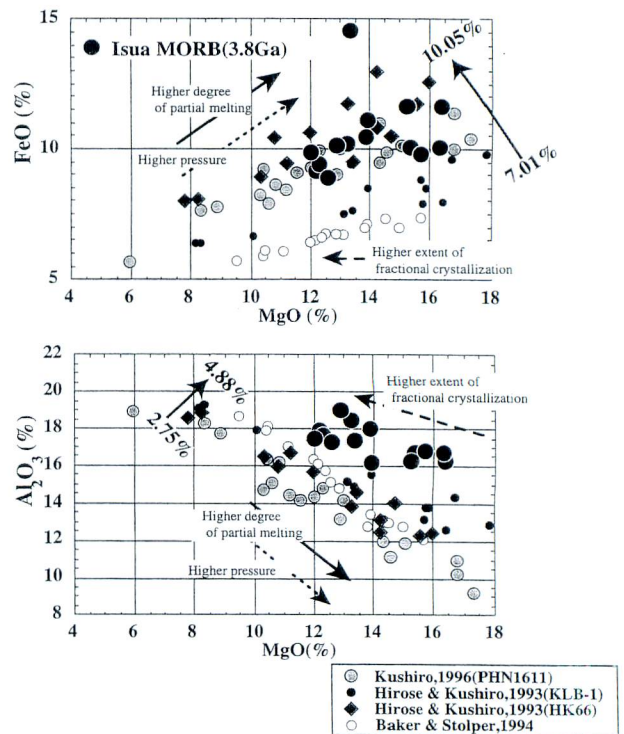


Fig. 7. Estimate of the source mantle composition of IMORBs.

有量がプロットされている. 融解時の融解度や圧力の上昇はMgO含有量の増加とともに, FeO^* の増加を招く(破線と実線). 一方, カンラン石の最大分別結晶作用は, MgOを急減させるが FeO^* にはあまり影響を起ささない. この図から, IMORBを生じさせるには, ペリドタイト中の FeO^* 含有量を10%程度と多くするか, または, 圧力や融解度を大きくし, かつ, 極度の結晶分化作用を経験させるという方法がある. ただし, 融解のプロセス(例, McKenzie & Bickle, 1988)を考慮した場合, 高圧下での溶融の開始は必然的に融解度の上昇を導く. つまり, 適当なMgO含有量(イヌアにはまだコマチアイトは記載されていない)を考えた場合, 後者のようなプロ

セスでは IMORB の組成を説明できない。Fig. 7 (b) では縦軸に Al_2O_3 含有量がプロットされている。融解時の融解度や圧力の上昇は MgO 含有量の増加とともに、 Al_2O_3 の減少を招く(破線と実線)。一方、カンラン石の最大分別結晶作用は、 MgO の急激な減少と Al_2O_3 の増加を起す。(a) の FeO^* の場合と基本的には同じだが、 Al_2O_3 の場合、ここにプロットされた実験データでは IMORB を作り得ない。この図は、IMORB のマントルソースが 5% 以上の Al_2O_3 含有量を必要とすることを示している。

これらの図は、 FeO^* や Al_2O_3 を独立のパラメーターとして扱っている点に問題があるのだが、これまでのデータをコンパイルした結果はおおよそうまくいく。ただし、 CaO の場合は、たとえソースペリドタイト中の CaO 含有量に富むとしても、メルトにそれがそのまま反映されない。最近の実験データはこれを支持しており (Kogiso & Hirose, 1996)、 CaO に関しては独立のパラメーターとして単純には取り扱えないことを示している。それは単斜輝石の消滅の時期やメルト中の他の元素、特に FeO^* 含有量によるのであろう。さらに、詳しい議論をするためには、ペリドタイト中の FeO^* 、 Al_2O_3 、 CaO などをランダムに変化させて、ペリドタイトの組成とメルトの組成の相関をみるという実験を必要とする。

一般に太古代緑色岩は親鉄元素である Ni に富み、それは核形成の途上のためペリドタイト中にそれらが多かったためと考えられてきた (Gill, 1979)。最近 Arndt (1991) はこれをコマチアイトと玄武岩の混合によると再解釈したが、現在もなお太古代緑色岩は一般に Ni の含有量が多いという定説は残されている。Fig. 4 (f) は横軸に MgO を縦軸に Ni をとった図で、ペリドタイト中の Ni 含有量を一定にしたときのメルトの溶融度、圧力の依存性及び結晶分化によるマグマの組成の変化を同時に示している。より未分化なところで IMORB と MORB を較べた場合、両者のトレンドの違いは融解度の違いで説明でき、少なくとも、IMORB の Ni 含有量は MORB のそれに較べて多くはない。Arndt (1991) を含むこれまでの研究では、横軸には Mg 値がとられてきた。しかし、 FeO^* に富む太古代マントルの場合、横軸に Mg 値をとると、見かけ上結晶分化の程度が高く見積もられ、同じ Mg 値で比較したときコンパチブルな元素の場合多く見積もられてしまうわけである。

次に、IMORB と MORB の液相濃集元素について比較検討する。同じ MgO 含有量で較べたとき、IMORB の液相濃集元素含有量は MORB のそれと較べて多くはない。この点は一見、適度にコンパチブルな主成分元素の結果と矛盾する。しかし、IMORB の方が融解度が高

く、かつ、早期にカンラン石のみの分別結晶作用を経験したことを考えると、たとえ IMORB のソースマントルの方が液相濃集元素に富んでいたとしても、生じたマグマの液相濃集元素含有量は同じ MgO 含有量で較べたとき見かけ上乏しくなってしまう。つまり、液相濃集元素含有量も、適度にコンパチブルな元素同様、38 億年前の(上部)マントルが現在よりもメルト成分に富んでいたことに矛盾しない。

Fig. 5 は液相濃集元素比の経年変化を表した図で、38 億年前以降の上部マントルは融解以外のプロセス(例えば、地球の金属核と上部マントルの相互作用)の影響を受けていないことを示す。つまり、少なくとも上部マントルに関する限り、金属核形成は 38 億年前には終了して、それ以降上部マントルの組成はマグマ生成のプロセスによって主に支配されてきたことを示している。

Fig. 8 は IMORB のソースマントルのポテンシャルマントル温度 (PMT) の推定のための図である。従来の PMT の推定はマグマの MgO 含有量のみか、または、最も未分化なマグマに似た組成の実験生成メルトの温度・圧力を用いてされる場合が多かった。しかし、前者は結晶分化の程度に、後者はソースマントルの組成の違いに大きく依存してしまう。また、融解のメカニズムを考慮すると融解柱でのメルトの積分量が最も少ない最高圧下で生じ分離したメルトの組成を用いた方がより適切に PMT を推定できうる。そのためには、融解時の圧力と融解度、ソースマントルの組成の違いがメルトの組成に及ぼす効果を分離して考慮する必要がある。Fig. 8 はカンラン石の結晶分化の程度には依存しないが圧力には敏感な SiO_2 を横軸にとり、同様に結晶分化の程度には依存しないが圧力と温度に敏感な FeO^* を縦軸に取って、IMORB の本源マグマと高圧実験によってつくられたメルトの組成を比較した図である。IMORB のデータは、カンラン石の分別結晶のみを受けていると考えられる

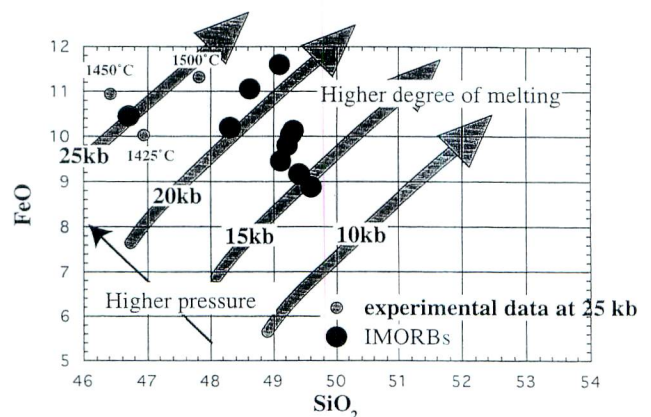


Fig. 8. Estimate of potential mantle temperature of 3.8 Ga IMORBs.

MgO 含有量が 12% 以上のものを用いて計算されている。このとき、IMORB の本源マグマの MgO 含有量は 15% であると仮定した。IMORB のソースマンツルの FeO* 含有量は上述のように 10% 程度であると推定し、比較となる実験データには PHN 1611 を使った、このとき、上述のようにメルトの FeO 含有量はペリドタイト中のそれのみ強く依存すると仮定している。その結果、最も高圧下で生じたと考えられる IMORB のメルトバッチは 25 kb, 1440°C で形成されたと求められる。平衡溶融を仮定し、Iwamori *et al.* (1995) のパラメーターを用いて計算すると、IMORB のソースマンツルの PMT は 1475°C である。

Fig. 9 はこれまでに出版された、太古代マンツルの PMT をコンパイルし、マンツルの PMT の経年変化を図にしたものである。本研究では我々による他地域の地質調査結果に基づき全てのコマチアイトは太古代の上部マンツルの深部もしくは下部マンツルプリューム起源であると解釈する (Campbell & Griffiths, 1993)。一方、IMORB や Cleaverville の玄武岩から推定される PMT は太古代の上部マンツルのそれを表していると解釈した。その結果は、太古代の上部マンツルの PMT は約 40 億年前でもせいぜい 150°C 程度しか高くないことを示している。これまでに太古代緑色岩 (主にコマチアイト) を用いて推定された太古代の PMT は、太古代の大陸の地温勾配 (Burke & Kidd, 1978; Richardson *et al.*, 1984) などから推定される PMT に較べて異常に高すぎた。しかし、この結果は、これらの地球物理のデータと矛盾せず、太古代マンツルの温度環境をよく示していると考えられる。

(b) 太古代マンツルの化学的不均質性

次に、IMORB と IOIB を比較する。主成分元素ではおそらく変質によると思われる組成のばらつきは見られるが、未分化な組成で較べたとき、IOIB の方が、Al₂O₃ に乏しく、FeO* に富む。もちろん、ソースマンツルの違い

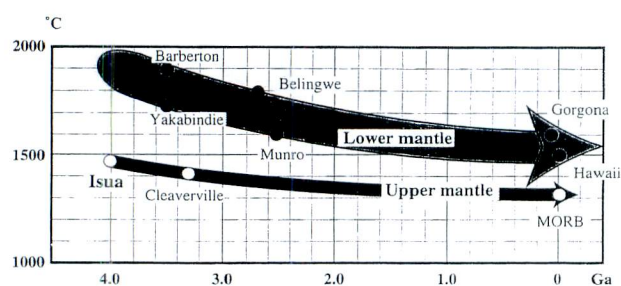


Fig. 9. Secular variation of potential mantle temperature of MORB and IOIB (Data source: Takahashi, 1990; Nisbet *et al.*, 1993; Ohta *et al.*, 1996).

によってもこの差は生じるが、圧力差によると考えることもできる。IMORB と IOIB の顕著な違いは希土類元素 (REE) パターンに見られる (Fig. 6)。前者は軽希土に枯渇し、後者はほぼフラットなパターンを示す。両者ともに、重希土の枯渇は見られない。IMORB には一部 Eu の正の異常が見られるが、これは変質によるのかもかもしれない。今後、同位体の研究が必要となるが、マンツルは 38 億年前の時点で既に分化を始めていたことは確かであろう。

それでは、その分化がいつからどのようなプロセスで起こりはじめたのであろうか。最近の研究ではイスアの表成岩や貫入岩には $\epsilon^{142}\text{Nd}$ の異常が見られないという報告が多い (McCulloch & Bennett, 1993)。また、3.45 Ga の Barberton の Al に枯渇したコマチアイトの Hf 同位体も異常を示していない (Gruau *et al.*, 1990)。これらの研究はマグマオーション時に分化が起きなかったかまたはその分化が 38 億年前の時点には均質化されてしまったことを示している。IMORB が MORB に較べてメルト成分に富むことから、太古代マンツルで見られる分化はプレートテクトニクスによる大量の玄武岩海洋地殻の生成がもっとも適当であると考えられる。しかし、一般にコマチアイトも枯渇しているという特徴から、プリューム活動に伴うコマチアイト地殻の生成もマンツルを分化させる重要なメカニズムであると思われる。また、同位体で検知される Nd の正の異常をつくり出すには、マンツルが均質化するまでに十分な滞留時間が必要である。つまり、沈み込んだ海洋地殻が上部マンツルに留まるのか、下部マンツルまで沈降するのかは今後、太古代のマンツルの分化だけでなくマンツル対流の様式を考える上でも重要になるであろう。従来、太古代マンツルは二層対流をしていて、原生代以降に全マンツル対流に移行したと考えられてきた (Breuer & Spohn, 1995)。このモデルは、原生代前期に見られる超大陸の成長や大量の BIF の存在をうまく説明しうる。しかし、太古代前期に大量につくられた、海洋地殻が上部マンツルと混ざらずに上部マンツル下底や下部マンツルに持ち込まれたとすると、太古代前期の緑色岩に見られる Nd の問題や、今日の海洋領域における熱流量の問題をうまく説明しうる (Fig. 10)。この点をさらに深く考察するためには、マンツルの組成の経年変化をより精度良く推定するとともに、推定された組成を用いた実験岩石学的研究や数値実験が必要となるであろう。

6. 結 論

(1) イスア表成岩帯は海洋プレート層序とデューブレックス構造によって特徴づけられる付加体起源の緑色

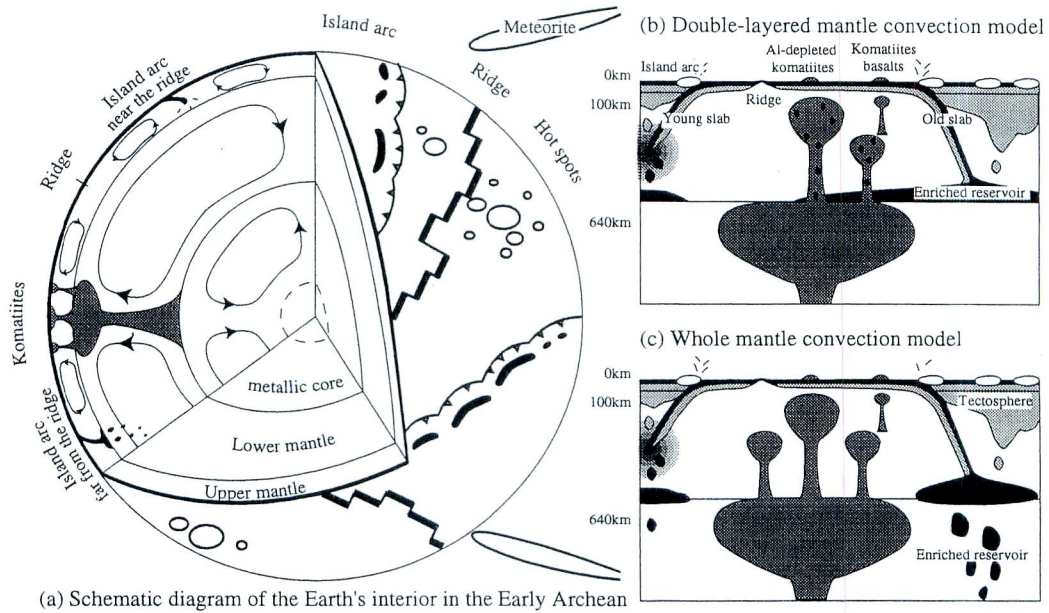


Fig. 10. Speculation cartoon to show the early Earth from Innermost core to the crust (a). If the mantle is convected by double-layered mode, the enriched mantle reservoir may be formed in the lower part of upper mantle, by the accumulation of Fe-rich MORB crust. The crust and subducted lithosphere is composed of ca. 20 km thick and ca. 30 km residual harzburgite, each of which may be mechanically separated after subduction. The buoyant harzburgite layer would uprise to form tectosphere, whereas the heavier garnetite layer converted from MORB crust would accumulate on the bottom of upper mantle (b). If mantle convection is whole mantle mode or episodic whole mantle like the modern Earth, enriched mantle reservoir may be in the lower mantle (c).

岩帯であり、そこに出現する緑色岩は産状から中央海嶺玄武岩起源の緑色岩 (IMORB) と海洋島玄武岩起源のもの (IOIB) とに分類できる。

(2) IMORB は顕生代の MORB に較べて FeO^* や Al_2O_3 に富む。ソースマントル中の含有量はそれぞれ、約 10% と 5% 以上と推定される。これは、IMORB のソースマントルが、MORB のそれに較べて、 FeO^* や Al_2O_3 などのメルトに濃集する成分に富むことを示している。

(3) IMORB の液相濃集元素は MORB のそれに較べて多くない、これは一見(2)と反するが、IMORBの方が高融解度である点を考慮すると矛盾しない。

(4) IMORB, IOIB, MORB と OIB の液相濃集元素比を比較すると、OIB には一部ばらつきがみられる (低圧下でのメルト生成以外のプロセスによると思われる) が、おおむね同一直線上にのる。これは、38 億年前以降の核とマントルの物質移動などのプロセスはたとえあったとしても、少なくとも上部マントルには影響せず、マントルの分化はメルトの生成のみによることを示す。

(5) IMORB の PMT は 1475°C である。これは太古代初期の上部マントルは今と較べても 150°C 程度しか高くはなかったことを示す。

(6) IMORB と IOIB の REE パターンは顕著に異なる。前者は軽希土に枯渇したパターンを示すが、後者はほぼフラットなパターンを示す。これは、当時既にマントルは分化を開始していたことを示す。

謝 辞

本研究の分析には東大海洋研の XRF (海洋研・石井輝秋氏) と東工大の XRF と ICP-MS (東工大・平田岳史氏) が使われた。筆者 (T.K.) は分析法を京大・巽好幸と平田岳史両氏に教授していただいた。筆者 (T.K.) は本論文をまとめる際、東工大の広瀬敬、小木曾哲両氏には貴重なご意見をいただきました。イスラ地域の野外調査は株式会社キューバス (代表: 伊藤笙) の全面的支持を受けて行われた。また、本研究を進める際の研究経費の一部として、文部省科研費「マグマ」を使用しました。深く感謝いたします。

引用文献

- Armstrong, R.L. (1981) Radiogenic isotopes: the case for crustal recycling on a near-steady state no-continental-growth Earth. *Philos. Trans. R. Soc. London.*, A 301, 443-472.
- Arndt, N.T. (1983) Role of a thin, komatiite-rich oce-

- anic crust in the Archean plate-tectonics process. *Geology*, **11**, 372-375.
- Arndt, N.T. (1991) High Ni in Archean tholeiites. *Tectonophysics*, **187**, 411-419.
- Arndt, N.T., and Nisbet, E.G. (1982) **Komatiites**. London, George Allen & Unwin, pp526.
- Arth, J.G., and Hanson, G.N. (1972) Quartz diorites derived by partial melting of eclogite of amphibolite at mantle depth. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **37**, 161-174.
- Baker, M.B., and Stolper, E.M. (1994) Determining the composition of high-pressure mantle melts using diamond aggregates. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 2811-2827.
- Bennett, V.C., Nutman, A.P., and McCulloch, M.T. (1993) Nd isotopic evidence for transient, highly depleted mantle reservoirs in the early history of the Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **119**, 299-317.
- Bickle, M.J. (1978) Heat loss from the Earth: A constraint on Archean tectonics from the relation between geothermal gradients and the rate of plate production. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **40**, 301-315.
- Bickle, M.J., Nisbet, E.G., and Martin, A. (1994) Archean greenstone belts are not oceanic crust. *J. Geol.*, **102**, 121-138.
- Boak, J.L., Dymek, R.F., and Gromet, L.P. (1983) Petrology and rare earth element geochemistry of clastic metasedimentary rocks from the Isua supracrustal belt, West Greenland. *Rapp. Grønlands geol. Unders.*, **112**, 23-33.
- Breuer, D. and Spohn, T. (1995) Possible flush instability in mantle convection at the Archean-Proterozoic transition. *Nature*, **378**, 608-610.
- Burke, K., Dewey, J.F., and Kidd, W.S.F. (1976) Dominance of horizontal movements, arc and microcontinental collisions during the later permobile regime, In Windley, B.F., ed., *The Earth history of the Earth*. London, John Wiley & Sons, 113-129.
- Burke, K., and Kidd, W.S.F. (1978) Were Archean continental geothermal gradients much steeper than those of today?. *Nature*, **272**, 240-241.
- Campbell, I.H., and Griffiths, R.W. (1993) The evolution of mantle's chemical structure. *Lithos*, **30**, 389-399.
- Chase, C.G., and Patchett, P.J. (1988) Stored mafic/ultramafic crust and early Archean mantle depletion. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **91**, 66-72.
- Condie, K.C. (1972) A plate tectonics evolutionary model of the South Pass Archean greenstone belt, southwestern Wyoming. *Proc. 24th Int. Geol. Congr.*, **1**, 104-112.
- Condie, K.C. (1985) Secular variation in the composition of basalts: an index to mantle evolution. *J. Petrol.*, **26**, 545-563.
- Condie, K.C. (1986) Origin and early growth rate of continents. *Precamb. Res.*, **32**, 261-278.
- Condie, K.C. (1994) **Archean Crustal Evolution**. Amsterdam, Elsevier, pp528.
- de Wit, M.J., Hart, R.A., and Hart, R.J. (1987) The Jamestown ophiolite complex, Barberton mountain belt: a section through 3.5 Ga oceanic crust. *Jour. Afr. Earth Sci.*, **6**, 681-730.
- Dewey, J., and Spall, H. (1975) Pre-Mesozoic plate tectonics: How far back in Earth history can the Wilson Cycle be extended?. *Geology*, **3**, 422-424.
- Friend, C.R.L., Nutman, A.P. and McGregor, V.R. (1988) Late Archean terrane accretion in the Godthåbregion, southern West Greenland. *Nature*, **335**, 535-538.
- Galer, S.J.G., and Goldstein, S.L. (1991) Early mantle differentiation and its thermal consequences. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 227-239.
- Gill, R.C.O. (1979) Comparative petrogenesis of Archean and modern low-K tholeiites. In *A critical review of some geochemical aspects*, Ahrens, L.H., ed., Origin and Distribution of the Elements (*Phys. Chem. Earth* **11**), Oxford, Pergamon, 431-447.
- Gruau, G., Chauvel, C., Arndt, N.T., and Cornichet, J. (1990) Aluminum depletion in komatiites and garnet fractionation in the early Archean mantle: Hafnium isotopic constraints. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 3095-3101.
- Hall, R.P., and Hughes, D.J. (1990) **Early Precambrian Basic Magmatism**. Glasgow and London, Blackie, pp486.
- Hart, S.R., Brooks, C., Krogh, T.E., Davis, G.L., and Nava, D. (1970) Ancient and modern volcanic rocks: a trace element model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **10**, 17-28.
- Hartmann, W.K., Phillips, R.J., and Taylor, G.J. (1986) **Origin of the Moon**. Houston, Lunar Planet. Inst., 781 p.
- Hayashi, C., Nakazawa, K., and Mizuno, H. (1979) Earth's melting due to the blanketing effect of the primordial dense atmosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **43**, 22-28.
- Hirose, K., and Kushiro, I. (1993) Partial melting of dry mantle peridotites at high pressures: Determination of compositions of melts segregated from peridotite using aggregates of diamond. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **114**, 477-489.
- Hoffman, P.F. (1991) On accretion of granite-greenstone terranes, in Robert, F., Sheahan, P.A., and Green, S.B., eds., *Greenstone gold and crustal evolution*. St. John's, Newfoundland, Geological Association of Canada., 32-45.
- Isozaki, Y., Maruyama, S., and Furuoka, F. (1990) Accreted oceanic materials in Japan. *Tectonophysics*, **181**, 179-205.
- Iwamori, H., McKenzie, D., and Takahashi, E. (1995) Melt generation by isentropic mantle upwelling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **134**, 253-266.
- Kogiso, T. and Hirose, K. (1996) Melting experiments on fertile and depleted mantle peridotites: impli-

- cations for the source composition of plume magmas. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, **77**, 759.
- Komiya, T., and Maruyama, S. (1995) Geochemistry of the oldest MORB and OIB of the World, Isua (3.8 Ga) Greenland. *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*, **76**, 700.
- 小宮 剛・能田 成・丸山茂徳・林 衛 (1995) 世界最古の付加体グリーンランド, イスア地域の地質—38億年前のプレートテクトニクス—. *地質ニュース*, **489**, 49-61.
- Kushiro, I. (1996) Partial melting of a fertile mantle peridotite at high pressures: an experimental study using aggregates of diamond, *In Earth processes: Reading the isotopic code* Basu, A. R., and Hart, S. R., eds., Washington D. C., AGU Monograph **95**, 109-122.
- Kusky, T. M., and Kidd, W. S. F. (1992) Remnants of an Archean oceanic plateau, Belingwe greenstone belt, Zimbabwe. *Geology*, **20**, 43-46.
- McCulloch, M. T., and Bennett, V. C. (1994) Progressive growth of the Earth's continental crust and depleted mantle. Geochemical constraints. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **58**, 4717-4738.
- McKenzie, D., and Bickle, M. J. (1988) The volume and composition of melt generated by extension of lithosphere. *J. Petrol.*, **29**, 625-649.
- Moorbath, S., O'Nions, R. K., and Pankhurst, R. J. (1973) Early Archean age for the Isua Iron Formation, West Greenland. *Nature*, **245**, 138-139.
- Nisbet, E. G., Cheadle, M. J., Arndt, N. T., and Bickle, M. J. (1993) Constraining the potential temperature of the Archean mantle: A review of the evidence from komatiites. *Lithos*, **30**, 291-307.
- Nisbet, E. G., and Fowler, C. M. R. (1983) Model for Archean plate tectonics. *Geology*, **11**, 376-379.
- Nutman, A. P. (1986) **The early Archean to Proterozoic history of the Isukasia area, southern West Greenland**. København, Denmark, Grønlands Geol. Unders. Bull., 80 p.
- Nutman, A. P., McGregor, V. R., Friend, C. R. L., Bennett, V. C., and Kinny, P. D. (1996) The Itsaq Gneiss Complex of southern West Greenland: The world's most extensive record of early crustal evolution (3,900-3,600 Ma): Precam. Res. Special Issue. *The oldest rocks on Earth*, **78**, 1-39.
- Ohta, H., Maruyama, S., Takahashi, E., Watanabe, Y., and Kato, Y. (1996) Field occurrence, geochemistry and petrogenesis of the Archean mid-oceanic ridge basalts (AMORBs) of the Cleaverville area, Pilbara craton, Western Australia. *Lithos*, **37**, 199-221.
- Ohtani, E. (1985) The primordial terrestrial magma ocean and its implication for stratification of the mantle. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **38**, 70-80.
- Richardson, S. H., Gurney, J. J., Erlank, A. J., and Harris, J. W. (1984) Origin of diamonds in old enriched mantle. *Nature*, **310**, 198-202.
- Takahashi, E. (1990) Speculations on the Archean mantle: missing link between komatiite and depleted garnet peridotite. *J. Geophys. Res.*, **95**, 15941-15954.
- Viljoen, M. J., and Viljoen, R. P. (1969) The geology and geochemistry of the lower ultramafic unit of the Onverwacht Group and a proposed new class of igneous rocks. *Geol. Soc. S. Afr. Spec. Publ.*, **2**, 55-86.
- Wynne-Edwards, H. R. (1976) Proterozoic ensialic orogenesis: the millipede model of ductile plate tectonics. *Am. J. Sci.*, **276**, 927-953.