

日本温泉科学会大会第51回大会

特別講演

スーパープルーム  
ー マントルダイナミクスを探る ー

京都大学地球熱学研究施設

巽 好 幸

Activity of Superplume :  
A Clue to Understanding Mantle Dynamics

Yoshiyuki TATSUMI

Institute for Geothermal, Sciences, Kyoto University

## Abstract

Understanding global changes within the Earth system through time with the aim of predicting future changes is one of the exciting frontiers in Earth sciences. Of particular interest, the timing of major convective pulses within the Earth's mantle may have coincided with major changes in climate, mass biological extinction, geomagnetic field reversal frequency, and important episode of continental breakup. The pulsation of the mantle has been recorded as massive igneous activity, known as large igneous provinces, and/or the formation of superswell with focusing of hotspot volcanism. Geochemical data for lavas from those regions should provide key insights into such dynamic processes in the Earth's interior. Hotspot basalts from the S Pacific superswell region are distinct in their high Pb isotopic ratios, known as HIMU character. Further, HIMU basalts have systematically different major, trace, and ultra-trace platinum group elements compositions from other oceanic basalts. One of the plausible processes causing such distinctive chemical compositions includes (1) selective depletion of Pb in the sinking oceanic crust during dehydration processes in subduction zones, (2) involvement of such subducting crustal components in forming HIMU mantle reservoir at lower mantle depths, and (3) the core-mantle interaction responsible for platinum group elements enrichment in HIMU basalts. Lavas displaying chemical signatures that typify whole-mantle-scale magmatism have been found among basalts from giant oceanic plateaus in the W Pacific Ocean, and greenstones from subduction zone complexes of eastern margin of the Asian continent. The occurrence of such characteristic rocks, together with estimates of the ages of magmatic activity for those basalts, may provide a rather compelling reason for believing that the pulsation of the mantle took place at 90-150 and 300-350 Ma. The onset of these mantle pulses may have preceded the commencement of the geomagnetic quiet zone, providing evidence for the primary importance of the mantle pulsation in triggering an anomalous state in the Earth's core.

Key Word : superplume, whole-mantle convection, HIMU basalts, S Pacific, global change  
キーワード : スーパープルーム, 全マントル対流, HIMU玄武岩, 南太平洋, 地球システム変動

## 1. はじめに

複数の圏で構成される地球システムは、その46億年の発達史の中で、幾度かの大事件を経験して現在の姿に至ってきた。例えば、地質時代の区分は、主として生物圏の大異変に基づいて設定されているし、通常逆転が繰り返される地球磁場が長期間にわたり一定の極性を示す地球磁場静穏期(スーパークロン)は、過去6億年間に数度認められている。これらの現象は、ある特定の圏で閉じた因果関係を見いだすことは困難であり、複数の圏の相互作用または全地球システムの変動として、その成因を考える必要がある。

地球システムの変動の本質的な要因の1つとして、マンツルのダイナミックな運動を最初に強調したのはSheridan (1987)であった。プレート運動速度・地球磁場静穏期・海水面変動などのグローバルな現象に同時性があることを示した彼は、間欠的に起こる全マンツル規模の高温物質の上昇(プルーム)が、他の変動のトリガーであると提案し、脈動テクトニクス(Pulsation Tectonics)という言葉を導入した。

現在のマンツルの構造・運動は、地震学的手法によって、相当詳しく理解されるようになってきた。しかしこの手法では、過去のマンツルの運動を明らかにすることは原理的に不可能である。ここで着目すべき現象は、マグマ活動である。火山活動として地表で認識されるマグマの活動は、マンツル物質の運動の結果引き起こされるのもである。従って、マグマの解析を行なうことによって、地球史スケールでのマンツルの運動や組成変化に関して、重要な束縛条件を得ることができる。ここでは、このような「マグマ学的手法」を用いたマンツルダイナミクスの解析、マンツル脈動が地球システムの変動に果たした役割、について、私達が最近得た知見を紹介する。

## 2. 白亜紀の地球システム変動とスーパープルームの概念

本論に入る前に、マンツルの脈動現象を引き起こす、スーパープルーム(superplume)の概念について述べておこう。白亜紀における地球システム内の変動の連動性については、古くから注目されていた。例えば、地上温度の上昇と海水面の上昇、還元性の環境を示す黒色頁岩の堆積、スーパークロンの存在、プレート生産率の上昇、などである(図1)。Larson(1991)は、これらの変動と、南太平洋域における巨大海台の形成の同時性を強調した(図1)。現在の西部太平洋域には、1億年前後の形成年代を示す、オントンジャワ海台・シャツキー海台などの巨大海台が点在する(図2)。例えば、オントンジャワ海台は、現存する火成岩岩体としては地球上で最大規模のものである。太平洋プレートの運動を考慮すると、これらの海台群は、現在ホットスポットが密集する南太平洋域で形成されたものであることが判る。Larson(1991)は、このような大規模なマグマ活動は、全マンツル規模の巨大プルームの上昇によってもたらされたと考え、それをスーパープルームと名づけた。全マンツル規模とした理由は、Sheridanと同様、外核流体

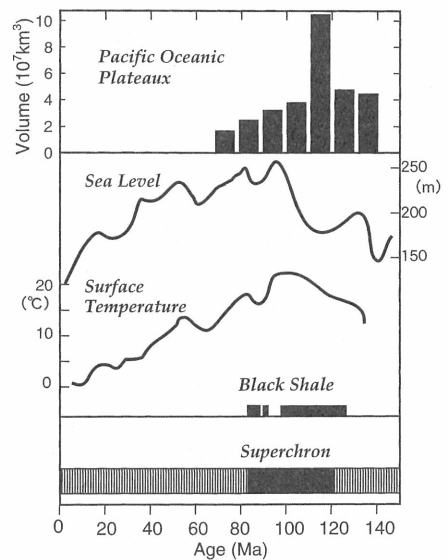


Fig. 1 Mid-Cretaceous pulse of the Earth, which includes coeval changes in the Earth system (after Larson, 1992).

運動の異常を示すと考えられるスーパークロンとの同時性である。

その後、南太平洋域には、superswellと呼ばれる海底の隆起が存在することが強調され (Coffin and Eldholm, 1994), D"層の下部に極めて低速度の層が存在していることが指摘されたり (Garnero and Helmberger, 1996), 全マントル規模の低速度異常が見いだされたり (Ritzwoller and Lavelly, 1995), スーパープルームの存在を匂わすような報告が相次いだ。しかし、このような地球物理学的データも、全マントル規模の上昇流であるスーパープルームの存在を確信させるものではない。この問題については、現在科学技術振興調整費によるプロジェクトが進行中であり、進展が期待される。

一方、物質科学的な立場からは、スーパープルームのキャラクター化は殆ど進んでいないのが現状である。全マントル規模の上昇流、という概念を支持するデータは、例えばCoffin and Eldholm (1994) が指摘した巨大海台の噴出量を説明するためのプルームの直径が1000km程度(つまり、上部マントル内には納まらない)、という程度のものである。しかしこれは、マグマの発生機構や、巨大海台のいくつかは海嶺3重点で形成されたことを考慮に入れると、強い束縛条件とはならない。

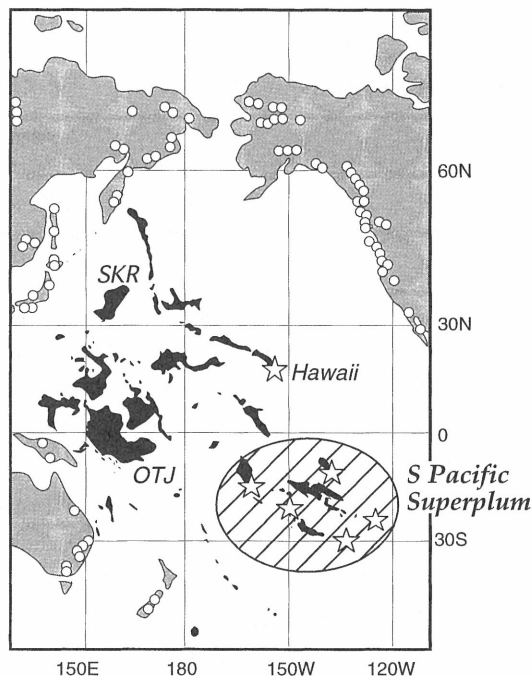


Fig. 2 Location of superswell region in the South Pacific (hatched) where superplume upwelling may take place, distribution of giant oceanic plateaus in the Western Pacific (filled), and occurrence of greenstones, i.e., metamorphosed oceanic basaltic materials, in the Circum-Pacific (open circles). Stars, hotspots; SKR, Shatsky Rise; OTJ, Ontong-Java Plateau.

### 3. スーパープルームの起源

#### 3.1 地球化学的貯蔵庫とHIMU玄武岩

地球上の大部分の玄武岩は、本質的にはマントル物質の部分融解によって生成される。従って、玄武岩の化学組成を用いて、ある程度マントル物質の化学的特徴を明らかにすることができる。しかし大陸域に産する玄武岩は、大陸地殻や大陸下最上部マントルの混染を受けるために、上記の目的のためには適切な試料とは言えない。この理由から、海洋域の玄武岩 (Mid-Oceanic Ridge Basalt, MORB; Ocean Island Basalt, OIB) の化学的特性を用いてマントルを探る研究が盛んに行なわれてきた。その結果、マントル内には、少なくとも4つの端成分的な化学的貯蔵庫 (Geochemical Reservoir) が存在するらしい、と考えられるようになった (図3)。これらの中で、スーパープルームの起源を明らかにする上で重要なものはHIMU貯蔵庫である。何故ならば、HIMU玄武岩の産地が、南太平洋 (ポリネシア) と南大西洋 (セントヘレナ島周辺) に限られ、この2地域では、下部マントルにおける低速度異常、superswellの存在など、スーパープルームの上昇が示唆されるからである。HIMU玄武岩の最大の特徴は、その高い鉛同位体比 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \sim 21$ ) である (図3)。 $^{206}\text{Pb}$ は $^{238}\text{U}$ の放射壊変によって形成される同位体であるので、高い $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比を有する玄武

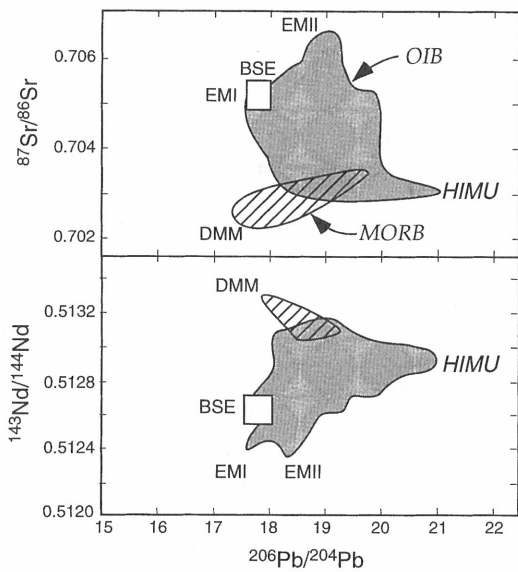


Fig. 3 Geochemical reservoirs in the Earth's mantle. BSE, Bulk Silicate Earth; DMM, depleted MORB mantle.

岩マグマは、高いU/Pb比 (high  $\mu$ ;  $\mu = ^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ) を有するマントル物質に由来する。以下、HIMU玄武岩の成因を考察して、スーパープルームの起源について議論を進めることにしよう。

### 3.2 海洋地殻物質の寄与とHIMU特性の成因

まず、HIMU玄武岩と非HIMU玄武岩の主要元素化学組成を比較してみよう。図4に示したように、これら

の玄武岩には系統的な化学組成の差が認められる。即ち、HIMU玄武岩は非HIMU玄武岩に比べて、Siに富み、Fe・Caに乏しい特徴を有する(Kogiso et al., 1997a)。このような化学組成の違いを生ずる要因の1つは、カンラン岩の化学組成の多様性である。多くの実験岩石学者たちが、多様な化学組成のカンラン岩を、さまざまなマントル温度・圧力条件下で部分融解させ、その過程で発生する玄武岩質マグマの化学組成を決定してきた。これらの実験結果を参照すると、図4に示された化学組成の違いは、HIMUマグマの起源マントルカンラン岩は、非HIMUマグマのそれに比べて、玄武岩成分に富むことに起因する、と考えることができる。即ち、非HIMUマグマを生成する通常のマントルカンラン岩に、玄武岩成分を加えたものが、HIMUマグマの起源物質である。このような玄武岩成分に富むカンラン岩の成因は、いくつかの可能なプロセスが考えられるが、その1つは、海嶺玄武岩(MORB)で構成される海洋プレート(海洋地殻)の関与である。沈み込む海洋地殻は深部マントルに対して、効果的に玄武岩成分を添加する役割を果たす。

もちろん、今述べた海洋地殻のマントル内への落下が、HIMU玄武岩の起源マントルの化学的特徴を作り出す唯一のメカニズムではない。従って、このメカニズムが合理的であるか否かを検証するためには、このプロセスによってHIMUの特性(高いU/Pb比)を獲得できることを示す必要がある。

マントル内に沈み込む前の海洋地殻は、海洋底変成作用の結果、角閃岩相の岩石によって構成さ

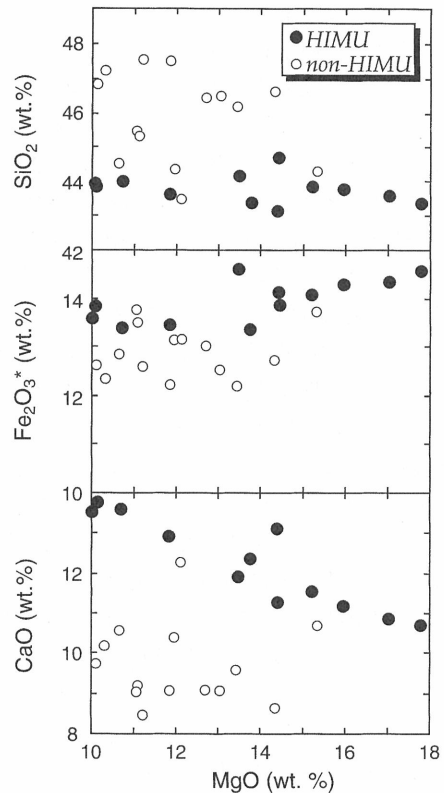


Fig. 4 Major element characteristics of HIMU basalts, which are more enriched in Fe and Ca and more depleted in Si than non-HIMU OIBs. Data from Kogiso et al. (1997a)



れている。マントル内に沈み込むにつれ高温・高圧条件下に置かれる角閃岩は、脱水分解反応によってより高密度のエクログイト相の岩石へと変化する。このようにして海洋地殻から放出されたH<sub>2</sub>Oを主成分とする流体相は、沈み込み帯におけるマグマの発生を引き起こす(例えば、巽, 1994)。超臨界状態にある流体相中には、さまざまな元素が溶け込むことが予想され、海洋地殻の脱水分解反応に伴う元素移送が、沈み込み帯マグマの化学的特徴(特に微量元素や同位体比)の主要な要因となっている(Tatsumi et al., 1986 ; Tatsumi and Kogiso, 1997; Aizawa et al., 1998)。一方、流体相の移動による元素分別は、海洋地殻そのものの化学組成も変化させる。図5に、角閃岩の脱水分解反応に伴う元素移動度についての実験結果(Kogiso et al., 1997b)を示す。ここで注目すべき点は、PbがUに対して極めて高い移動度を示すことである。つまり、沈み込みに伴う脱水分解反応の結果、海洋地殻は高いU/Pb比を有することになる。図6に示すように、このような脱水分解反応を経験し約10億年経た海洋地殻と始源的なマントルの混合によって、HIMU貯蔵庫の化学的特徴は定量的に理解することができる。

以上述べたように、海洋地殻物質(MORB)のマントル内への沈み込み、というメカニズムによって、スーパープルームを特徴づけるHIMU玄武岩の主成分元素・同位体比の特性を同時に説明することができる。

### 3.3 スーパープルームの発生深度

地震波トモグラフィが示す、全マントル規模の地震波低速度異常がスーパープルームの上昇に対応するのであるならば、スーパープルームの上昇はマントル最下部から起きていることになる。また、沈み込むプレートが上部マントル・下部マントル境界を超えて下部マントル内へ貫入しているらしいこと(Van Der Hilst, 1995)、おおよそ1000kmより深いマントルでは、海洋地殻物質またはその融解物に負の浮力が働くこと(Kesson et al., 1994; Yasuda et al., 1994)、を考えると、落下する海洋地殻物質はマントル最下部に蓄えられていると推察することができる。このことを物質科学的に検証するために、OIBの貴金属元素(白金属元素および金)含有量の測定を行なった。貴金属元素に着目した理由は、(1)これらの元素はsiderophile元素であるために、金属核内にマントルに比べて2桁以上高い濃度で存在するために、(2)マントル最下部における、核-マントル相互作用の影響を強く受けていることが予想されるからである。

図7に、南太平洋域のOIBについて貴金属元素を測定した結果の一部を示す(Tatsumi et al.,

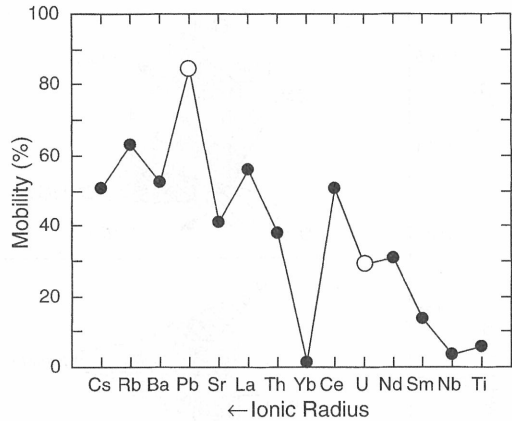


Fig. 5 Mobility of trace elements during dehydration process of amphibolite, metamorphosed MORB (after Kogiso et al., 1997b). Note that Pb is more readily transported with fluid phases than U, causing high U/Pb ratio in the subducting oceanic crust.

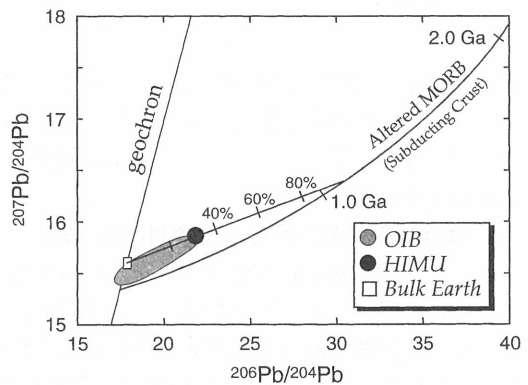


Fig. 6 Formation of HIMU reservoir by mixing of Bulk Silicate Earth and the dehydrated ancient MORB.

1998a). HIMU玄武岩では結晶分化作用の進行に伴い、貴金属元素含有量は単調に減少する。一方非HIMU玄武岩では僅かに増加する傾向が認められる。この2つの異なる分化トレンドは、HIMUマグマでは効果的な硫化物の分別が起こり、非HIMUマグマではSに不飽和であったために形成されたと考えられる。さらに重要な点は、岩石学的に推定される初生マグマ(HIMUではMgO

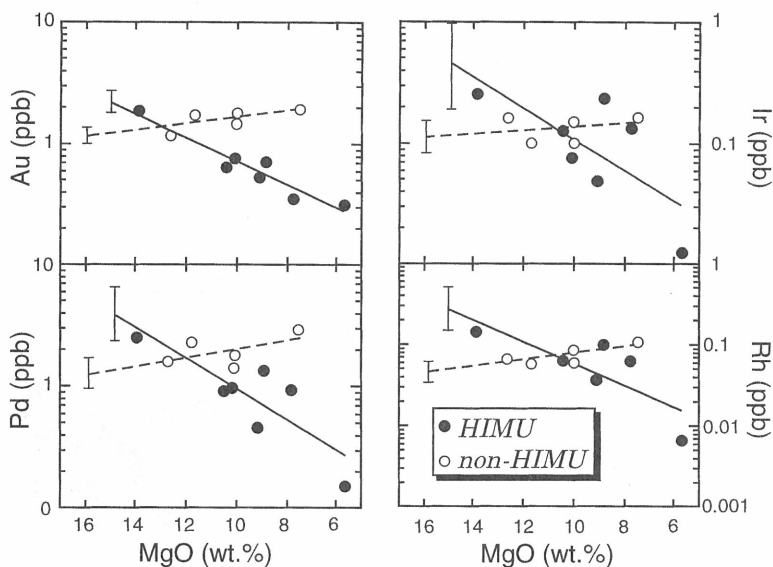


Fig. 7 Variation of noble metals during magmatic fractionation of HIMU and non-HIMU basalts from the South Pacific (after Tatsumi et al., 1998a).

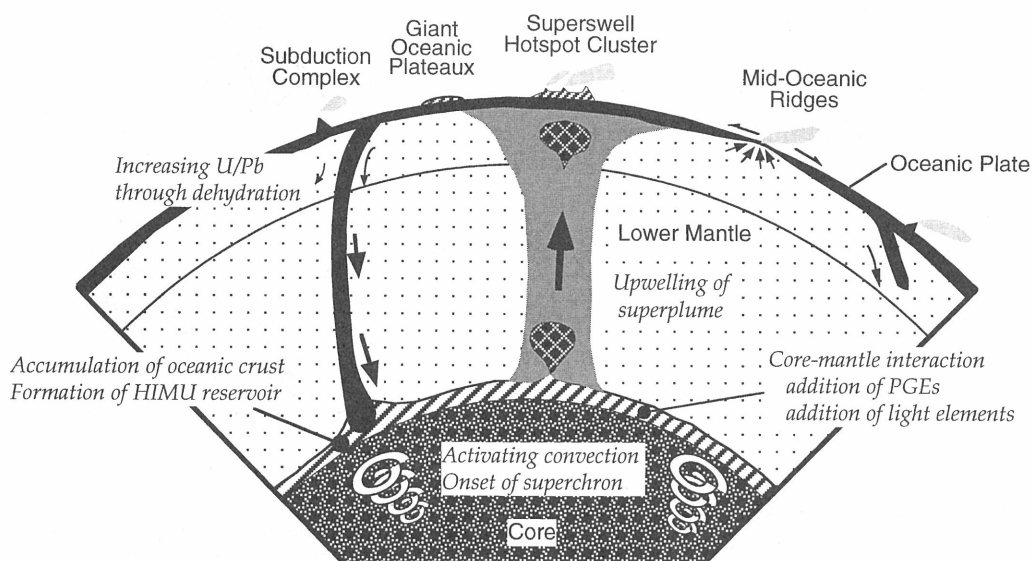


Fig. 8 A possible model for the origin of superplume, which taps the HIMU reservoir at the base of the lower mantle where addition of core materials may take place.

～14wt.%, 非HIMUではMgO～16wt.%)を比較すると, HIMUマグマのほうが貴金属元素に富む可能性が高いことである(図7). これらの元素に関して, マントル構成鉱物とマグマ間の分配係数が正確に見積もられていないことなど不確定な部分は多いが, 初生マグマにおける貴金属元素含有量の差は, 起源物質中の差を反映していると考えるのが, もっとも単純である. さらに, HIMUマグマがSに飽和していることを考慮に入れると, 起源物質中での貴金属元素濃度差は, さらに広がるセンスである. したがって, 図7で示される傾向は, HIMU貯蔵庫が非HIMU貯蔵庫よりも貴金属元素含有量が高いことを意味する可能性が高い. もしそうだとすれば, そして, これまで述べてきたようなHIMU貯蔵庫に関する他の束縛条件を同時に満たすメカニズムを考えるならば, マントルに比べて貴金属元素に富む核物質の添加が, このHIMU貯蔵庫の化学的特性の要因ではなかろうか. 極めて不十分ではあるが, これまでに得られている金属-シリケート間の貴金属元素の分配データを参照すると, 1重量%以下の核物質の添加によってHIMU貯蔵庫の貴金属元素含有量は説明することができる.

以上述べてきたこれまでの研究成果に基づいて, 現時点でもっとも可能なスーパープルームの活動モデルを図8に示す.

#### 4. スーパープルームの活動史

スーパープルームの上昇とそれに伴うマントル内下降流の活性化, 即ちマントルの脈動現象が, 地球システムの進化にどのような役割を果たしてきたかを解析するためには, まず, スーパープルームの発生時期を明瞭にする必要がある.

##### 4.1 スーパープルーム岩の識別法

これまで述べてきたように, スーパープルームを特徴づけるHIMU玄武岩は, 他のOIBと比較して, 特異な鉛同位体比・貴金属元素含有量などを有する. しかし, これらの特性をもちいて, 過去のスーパープルームの活動を識別することは現実的には困難である. なぜならば, これらの化学的特徴を検証するための分析には, 多大な労力が必要であるからである.

ここで私たちが着目した元素は, high-field-strength (HFS) 元素である. これらの元素は上部マントルでの部分融解および早期の結晶分化作用においては液相濃集元素として振舞い, HFS元素間の比はこれらの過程ではほぼ一定に保たれる. しかも, HFS元素は変質・変成作用の過程で移動しにくいことは, 図5の実験結果からも予想できる. さらに好都合なことに, 例えばNb, Zr, YなどのHFS元素は, 蛍光X線分析装置をもちいて簡便かつ高精度で分析が可能である. 図9に, 海洋域の玄武岩に対するNb/Zr-Nb/Y

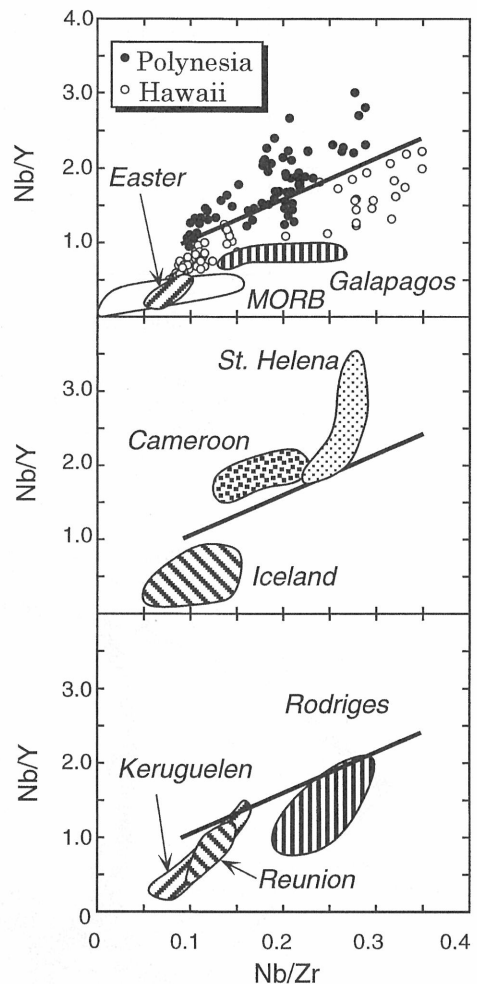


Fig. 9 Discrimination of superplume-related rocks from other normal hotspot rocks based on high-field-strength element systematics (after Tatsumi et al, 1998b). Superplume rocks are characterized by their relatively high Nb/Y ratios.

の相関を示す. この図から明らかのように, 現在のスーパープルームの活動によって形成されたと考えられる南太平洋ポリネシアおよび南大西洋のOIBは, 他の玄武岩に比べて相対的に高いNb/Y比を示す. もちろんこの傾向は, これまで述べてきたスーパープルーム岩(HIMU玄武岩)の化学的特徴, 特に, 玄武岩成分に富む起源マントルに由来する特徴とは整合的である(Tatsumi et al., 1998b).

4.2 南太平洋スーパープルームの活動史

スーパープルームの発生場所が, ある程度の長期間(億年オーダーで)固定されていたか否かは不明である. しかし, 少なくとも過去6億年は, 現在の南太平洋域でスーパープルームが活動したことが予想される. なぜならば, 約6億年前に起きた超大陸ゴンドワナの分裂は, 少なくとも緯度に関しては(古地磁気学的手法を用いるので経度は不明である)現在の南太平洋域で開始されたと考えられているからである(図10; Dalziel, 1992). その後大陸の分裂は進行し太平洋が広がり, 約4億5千万年前からは, 環太平洋域の沈み込み帯が形成されたと考えられている(図10). もしそうだとすれば, どのような岩石に対してスーパープルーム岩か否かの判定を行なえばよいのだろうか. プレートテクトニクスが作動しているために, 1億数千万年より古い太平洋の海底は全てマントル内へ沈み込んでしまっている. Larsonらが着目した西部太平洋の巨大海台群は別として, それより古いものに関しては, 海洋底にその痕跡を求めることは原理的に不可能である. ここで注目すべきことは, 海洋プレートの沈み込みに際して, プレート表層物質の一部は付加体として島弧地殻に付加

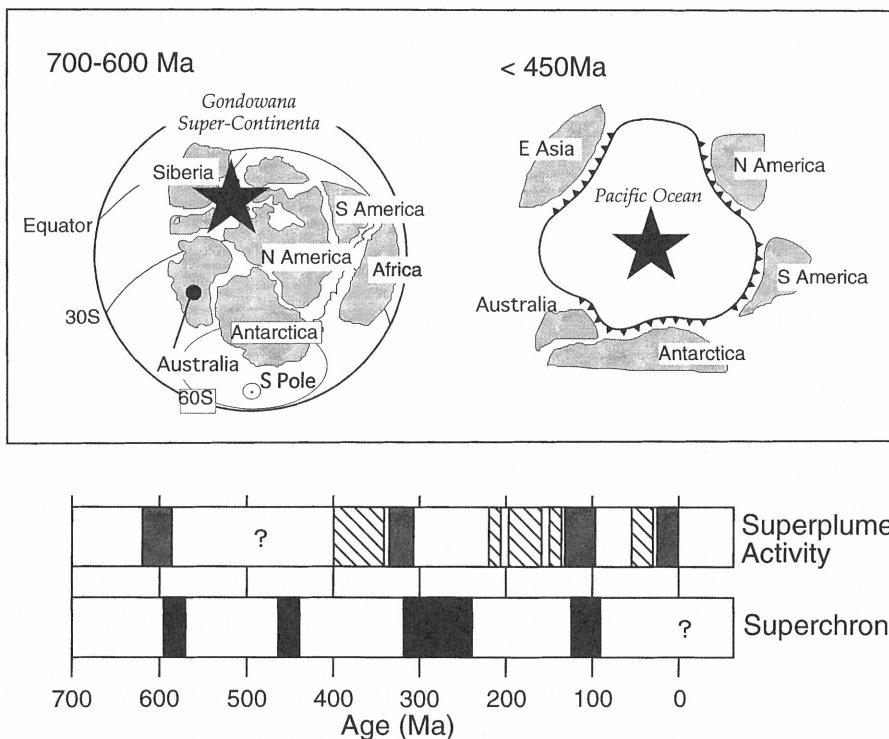


Fig. 10 Evolution of the Pacific Ocean since 700 Ma (after Dalziel, 1992) and the activity of S Pacific superplume suggested by the occurrence of high Nb/Y lavas (lightly filled in the lower figures). Hatched symbols in the lower figure indicate rocks with no signature of superplume chemistry. It should be stressed that the superplume activity may have proceeded the onset of superchron.

されていくことである。例えば、日本列島の非火山性の基盤岩類の大部分はこのような付加体によって構成されている。そして、付加体には、変成作用を受けて入るものの海洋域の玄武岩の破片（「緑色岩」と呼ばれる）が散在していることが、これまでの研究で明らかにされている（例えば、丸山, 1993）。さらに、緑色岩と密接に産する石灰岩（海洋島における珊瑚礁が付加したものの）から得られる化石年代により、火山活動の時期も比較的正確に推定されている。このような、緑色岩は図2に示すように、環太平洋域に広く分布している。私たちは、まず日本列島周辺の緑色岩、西部太平洋域の海台玄武岩、 Gondwana大陸分裂時の玄武岩類、について、先に述べた識別方法をもちいて、検討を行なった。

現在までに得られた予察的な結果から、図10に示すようなスーパーブルームの活動期が明らかになってきた。即ち、今から約1億年、3億年、6億年前にスーパーブルームを特徴づける岩石が見いだされた。そして重要なことは、これらのスーパーブルームの活動が、スーパークロンとほぼ対応し、さらにはその開始より先行している点である。このことは、外核の対流異常がスーパーブルームの上昇によって引き起こされたことを示している可能性が高い。

## 5. おわりに

全マントル規模のマントル上昇流（スーパーブルーム）が確かに存在すること、そして、その活動が過去6億年間に少なくとも4回起こったこと、などが明らかになってきた。しかし、より定量的な議論を行なうために必要な基礎データは明らかに不足している。強烈な目的意識をもった基礎研究を行なうことにより、スーパーブルームが地球進化に果たした役割を明確にしたいと考えている。

温泉科学会において講演の機会を与えてくださった由佐悠紀教授に感謝の意を表す。また、本研究に要した費用の一部は、科学技術振興調整費（スーパーブルーム）、三菱財団研究助成金によるものである。

## 文 献

- Aizawa, Y., Tatsumi, Y. and Yamada, H. (1998) Element transport during dehydration of subducting sediments : implications to origin of subduction zone and ocean island basalts. *The Island Arc*, in press.
- Coffin, M.F. and Eldholm, O (1994) Large igneous provinces : Crustal structure, dimensions, and external consequences. *Rev. Geophys.*, **32** : 1-36.
- Dalziel, I.W.D. (1992) On the organization of American plates in the Neoproterozoic and the breakout of Kaurentia. *GSA Today*, **2** : 93-100.
- Garnero, E.J. and Helmberger, D.J. (1993) Seismic detection fo a thin laterally varying boundary layer at the base of the mantle beneath the central-Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **23** : 977-980.
- Kesson, S.E., FitzGerald, J.D., and Shelley, J.M.G. (1994) Mineral chemistry and density of subducted basaltic crust at lower-mantle pressures. *Nature*, **372** : 767-769.
- Kogiso, T., Tatsumi, Y., Shimoda, G. and Barszczus, H.G. (1997a) Hig- $\mu$  (HIMU) ocean island basalts in southern Polynesia : new evidence for whole-mantle scale recycling of subducted oceanic crust. *J. Geophys. Res.*, **102** : 8085-8103.
- Kogiso, T., Tatsumi, Y., and Nakano, S. (1997b) Trace element transport during dehydra-

- tion processes in the subducted oceanic crust : 1. experiments and implications for the origin of ocean island basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **148** : 193-205.
- Larson, R.L. (1991) Geological consequences of superplumes. *Geology*, **19**, 547 : 963-966.
- 丸山茂徳(1993) 46億年地球は何をしてきたか? 138, 岩波, 東京.
- Ritzwoller, M.H. and Lavelly, E.M. (1995) Three-dimensional seismic models of the Earth's mantle. *Rev. Geophys.*, **33** : 1-66.
- Sheridan, R.E. (1987) Pulsation tectonics as the control of continental breakup. *Tectonophys.*, **143** : 59-73.
- 巽好幸(1994) 沈み込み帯のマグマ学, 186, 東大出版, 東京.
- Tatsumi, Y. and Kogiso, T. (1997) Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust : 2. origin of chemical characteristics in arc magmas. *Earth Plane. Sci. Lett.*, **148** : 207-221.
- Tatsumi, Y., Hamilton, D.L. and Nesbitt, R.W. (1986) Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas : evidence from high-pressure experiments and natural rocks. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **29** : 293-309.
- Tatsumi, Y., Oguri, K., Shimoda, G., Kogiso, T. and Barszczus, H.G. (1998a) Noble metal abundance in basalts from Cook Islands, Polynesia : evidence for core-mantle interaction ? submitted to *Geochem. Cosmochim. Acta*
- Tatsumi, Y., Shinjoe, H., Ishizuka, H., Sager, W.W. and Klaus, A. (1998b) Geochemical evidence for a mid-cretaceous superplume. *Geology*, **26** : 151-154.
- Van Der Hilst, R. (1995) Evidence for deep mantle circulation from global tomography. *Nature*, **374** : 154-156.
- Yasuda, A., Fijii, T. and Kurita, K. (1994) Melting phase relations of an anhydrous mid-ocean ridge basalt from 3 to 20 GPa : implications for the behavior of subducted oceanic crust in the mantle. *J. Geophys. Res.*, **99** : 9401-9414.

(日本温泉科学会第51回大会で発表, 平成10年8月21日)