

## “時間”を武器に地球を探る

### — 年代測定の現状と、同位体比による 地球深部の化学的環境の解明 —

兼 岡 一 郎\*

#### Research for the Earth Using “Time” as a Weapon: Present Status of Dating and Clarifying the Chemical State of the Earth's Deep Interior Based on Isotope Ratios

Ichiro KANEOKA\*

#### Abstract

Based on radiogenic isotopes, we can obtain information about the Earth related to time. Radiometric dating is a typical example. Due to the advanced development of current analytical techniques, radiometric ages covering the Earth's entire history can be obtained with an error of less than 1%, even for a mineral crystal. However, there still remain problems to be clarified including the reliability of decay constants and the meanings of value obtained.

In another approach, an isotope ratio including a radiogenic isotope can be used to clarify the evolution of the Earth. By applying multiple isotope systematics for typical volcanic rocks such as Mid-oceanic ridge basalts (MORBs) and oceanic island basalts (OIBs), we conjecture the chemical state of the Earth's interior such as the degree of chemical fractionation and degassing. As an additional material used for clarifying the Earth's deep interior, I demonstrate the significance of kimberlites which might reflect the state of the Earth's deep interior more directly than OIBs.

**Key words** : time, radiogenic isotope, dating, isotope ratio, Earth's deep interior, chemical state, kimberlite

キーワード : 時間, 放射性起源同位体, 年代測定, 同位体比, 地球深部, 化学的環境, キンバーライト

#### I. 地球科学における時間

地球は約 45 億年前に形成され, その後のさまざまな過程を経て現在の地球になったと見なされている。地球の進化は, 時間という要素なしでは

考えることはできない。放射壊変にかかわる放射性同位体およびそれから生じる放射性起源同位体は時間とともに変化するので, 地球進化をさぐるためのきわめて有力な手段となる。放射壊変にかかわる現象を利用し, ある時点から経過した時間

\* 独立行政法人海洋研究開発機構高知コア研究所 (ikaneoka@aol.com)

\* Kochi Institute for Core Sample Research, JAMSTEC

本稿は 2008 年 2 月 20 日に行われた地学クラブ講演会の講演報告である。

そのものを求めようとするのが年代測定である。一方、放射性起源同位体と同じ元素の安定同位体の比を用いて、年代を考慮した上でそれらを生じた要因に関連した地球進化をさぐることができる。放射壊変に関連した同位体を含む同位体比は、放射性同位体である親核種と放射性起源同位体である娘核種の最初の比が定まれば、その変化は時間のみの関数で温度や圧力、そのほかの二次的な影響を受けず、地球初期の状態や地球深部の状態をさぐるための強力な手段となる。

ここでは、放射壊変を利用した放射年代測定の現状について概括する。さらに放射性起源同位体を含む同位体比の応用例のひとつとして地球内部の化学的構造に関する問題を述べ、それとの関連で、ここ数年筆者がこだわりをもって仲間と調べているキンバーライトの示唆する意義を紹介する。

## II. 年代測定の現状と課題

地球において生じた現象の年代を知ることは、地球の進化を明らかにするために不可欠である。地質年代のように時間の前後関係を示す相対年代に対して、年代値を数値で表す年代が数値年代であり、年代測定は一般的には数値年代を得ることを意味する。現在、最も信頼性の高い年代測定法としては放射壊変を利用した放射年代測定法があり、そのなかでも対象とする年代範囲や試料の種類によってさまざまな方法が知られている。地球科学として意味のある年代を得るためにはそれぞれの方法においていくつかの前提条件を満足する必要があるが、それらについても現在ではかなり明らかになってきており、測定技術の発達によって測定精度も非常に向上している。

例えば火山岩などに適用される K-Ar 法では、1960 年代では 100 万年より若い対象の測定は容易ではなかったが、現在では数万年程度の試料の年代測定を行うことは分析技術的には難しいことではない。K 含有量の多い試料では、数千年オーダーの年代測定まで行われるようになってきている。また他の方法も含めて、得られる年代の有効数字としては 3 桁程度であったが、現在では 4 桁か

ら条件によっては 5 桁の有効数字をもつ年代値が報告されている。ただしこれらは精度 (precision) としての値であって、確度 (accuracy) を保証するものではない。

また測定機器の感度の向上により現在では用いる試料の量が非常に少なくすむようになり、1 個の粒子、あるいは方法によっては粒子内のスポット部分における年代数値も得られるようになってきた。放射性炭素年代測定でも、現在は加速器質量分析を行うことにより 1 mg 程度の炭素量で測定することが普通になり、従来の計数管を用いた方法の 1000 分の 1 以下の量で測定が可能となっている。

一方で、このことは得られた年代数値に対しての意味を問い直す必要も生じてきている。現在、地球物質として最も古い年代値が得られているのは、西オーストラリア、Jack Hills の数 100 ミクロン程度のジルコン粒子に対してイオンプローブを用いて U-Pb 法で得られた 4404 Ma (Ma:100 万年) の値である。しかしこれは一粒のジルコン粒子内の一部が示す数値であり、同じ粒子内の別の部分では 4283 ~ 4364 Ma の範囲の年代数値を示す (Wilde *et al.*, 2001)。すなわちこのジルコン粒子は二次的な影響を受けていて、その程度が部分によって異なっている。もしその粒子全体を 1 試料として扱った場合には平均的な数値が得られるので、4404 Ma という数値は得られない。レーザーを用いて変成岩中の K を含む鉱物粒子の一部から Ar をとりだして測定した Ar-Ar 年代でも同様に複数の年代数値が報告されており、粒子そのものの年代数値の意味を検討する必要があるだろう。

また岩石は鉱物粒子の集合体であるが、各鉱物は異なった閉鎖温度をもっているため、マグマなど閉鎖温度以上にある状態から冷却することによって生成された各鉱物の年代数値は異なっている。冷却速度がある程度遅い場合には、こうした要素も加味されるのでその意味づけは複雑になる。このように年代数値の測定精度が向上した結果、その差を生じるさまざまな要素について十分考慮しないとその意味を誤って解釈する恐れがある。

また測定精度が向上したことが、年代値の確度としての信頼性も向上しているとは限らない。各方法における前提条件も異なるので、確度のチェックのためにはその基準としての年代値に関する標準試料が重要となる。例えばフィッシュトラック年代や Ar-Ar 年代に対して用いる最も代表的な標準試料のひとつである Fysh Canyon Tuff の年代値は、個々の研究者の報告値では 1% 以下の分析精度と再現性を示す。しかし研究者間では 26.8 ~ 28.4 Ma のばらつきがあり、多くは 27.5 Ma と 28.0 Ma の値を中心とした 2 系統の報告値に集中するものの、研究者による系統的な差がある (Odin, 1999)。

放射年代値の計算には、IUGS, SOG (Sub-commission on Geochronology) が推薦した壊変定数 (Steiger and Jäger, 1977) が用いられる。しかし  $^{40}\text{K}$  の壊変定数については物理学分野で採用されている値の方が半減期としては約 2% ほど長く、その値を使用すべきであると主張しているグループがある。また  $^{87}\text{Rb}$  の半減期についても、現在用いられている値に対しては必ずしも絶対的な支持が得られているわけではない。このように、現在放射年代測定で使用されている放射性同位体の壊変定数の確度は年代数値の測定精度に比較してかなり不確定さがあり、年代測定に関して残されている大きな課題のひとつである。

### III. 放射性起源同位体を含む同位体比と地球内部の化学的構造

MORB (中央海嶺玄武岩) や OIB (海洋島玄武岩) などに対する固体元素の放射性起源同位体を含む同位体比 (Sr, Nd, Pb, Hf, Os など) を組み合わせた図から、マントル内に存在する特徴的ないくつかの成分が推定できる。それらの端成分として液相濃集元素に枯渇した状態を反映する DM, 逆にそれらに富んだ状態を反映した EM1 および EM2, Sr, Nd などは MORB に近い傾向を示すのに対し、U/Pb 比だけが低い傾向を示す HIMU などの成分が提唱されている (例えば, Zindler and Hart, 1986)。コンドライトなどの組成を基準としたとき、分化していないマン

トル成分が存在するとすれば BSE ないし BE などに相当するとされているが、それは DM と EM1 ないし EM2 成分が混合した場合と区別がつかず、固体元素同位体比の組み合わせだけでは BSE などに類似した成分の存在を判定することは難しい。BSE (BE) 以外の端成分は、地球の進化過程で分化した際に液相と固相に相当する部分ではそれぞれ放射性同位体と放射性起源同位体を含む各元素の比が異なり、時間の経過によって蓄積される放射性起源同位体の割合が変化することを反映している。この同位体比はマグマの形成過程や鉱物の晶出過程では変化せず、地球進化の過程で変化してきたマグマ源物質の特性ないしそれらが混合した結果を表す。

これらの同位体比に基づいて地球内部の化学的構造に関するさまざまなモデルが提唱されてきている。しかし固体元素同位体比に関するかぎり、基本的には液相濃集元素に乏しい成分 (DM) と濃集した成分 (EM: EM1 ないし EM2) があればよく、そのほかの成分は  $\text{H}_2\text{O}$  などの作用で変化した二次的なものと考えることができる。またこれらの成分のマントル内の分布に関しても特に強い制約はない。そのため地球内部の化学的構造に関しては、地震波トモグラフィーの結果などをとりいれやすいマントル全対流を主体にしたモデルなどが提唱されることが多くなってきているが、その際には未分化マントルは存在していないとして取り扱われている (例えば, Helffrich and Wood, 2001)。一方、従来から未分化マントルの存在を仮定したモデルも提唱されてきている (例えば, Allègre, 1987) が、固体元素同位体比のみを扱っている場合には同位体学的にはどちらのモデルも許容される。しかし希ガス同位体比を用いることにより、これらとは異なった新しい条件が与えられる。

地球進化などを明らかにする目的で用いられる希ガス元素としては He, Ne, Ar, Kr, Xe がある。これらは  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  などの放射壊変によって生じる放射性起源ないし核反応起源、自発核分裂起源同位体などのいずれかの同位体を含むので、時間変化を反映した同位体比を地球進化

に関連した現象に応用することができる。なかでも  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ ,  ${}^{21}\text{Ne}/{}^{22}\text{Ne}$ ,  ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ ,  ${}^{129}\text{Xe}/{}^{130}\text{Xe}$  比などがよく利用される。

希ガスは揮発性元素なので、マグマが地表に噴出した際には大気成分と交換してマグマ成分を失う。しかしマントル捕獲岩や枕状溶岩の急冷ガラス部分、巨大斑晶などは過剰  ${}^{40}\text{Ar}$  を生じることが知られており、それはマグマ成分が残ったものとして説明できる。このような試料を用いて、マグマ成分としての希ガス同位体比を知ることができる。MORB の急冷ガラスや、OIB のカンラン石斑晶などの希ガスの分析結果から、両者の希ガス同位体比には系統的な差があることが明らかになってきた。例えば  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比の場合、MORB は場所によらず約  $8 R_A$  ( $1 R_A$  は大気中の  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比:  $1.4 \times 10^{-6}$ ) の値を示すが、ハワイなど典型的なホットスポットにおける OIB では  $8 R_A$  より高い値を示し、ハワイやアイスランド周辺では  $35 \sim 40 R_A$  の値まで見出されている。固体同位体比の結果は、MORB のマグマ源は液相濃集元素に最も枯渇している部分であるマントル成分であることが予想され、少なくとも OIB のマグマ源の方が  ${}^4\text{He}$  をもたらす液相濃集元素である U, Th などにさらに枯渇しているとは非常に考えにくい。またそれぞれのマントル部分の存在が、地球史のスケールとして時間的に極端に異なるという可能性も非常に低い。

これらのことを考慮すると、上述した MORB と OIB の  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比の差を説明するには、地球形成時期に地球に保持された成分である始源的同位体  ${}^3\text{He}$  の濃度は、MORB よりも OIB のマグマ源の方が多くなければならないことになる。同様の議論から、OIB のマグマ源は MORB のそれよりも始源的希ガス同位体である  ${}^{22}\text{Ne}$ ,  ${}^{36}\text{Ar}$ ,  ${}^{130}\text{Xe}$  などを相対的に多く含んでいることが推定される。このことは、OIB のマグマ源であるマントル部分は MORB のマグマ源よりも脱ガスしていないことを示唆している (例えば, Kaneoka, 2008)。

一方、大気中の  ${}^{40}\text{Ar}$  は、 ${}^{40}\text{K}$  の壊変で生成された放射性起源同位体である  ${}^{40}\text{Ar}$  が地球の進化

を通じて地球内部から大気中に脱ガスした結果、大気組成の約 0.9% も存在するようになったと考えられている。その量を説明するためには 45 億年間に地球内部で生成された放射性起源  ${}^{40}\text{Ar}$  量の 40 ~ 50% 程度を脱ガスさせる必要がある (例えば, O'Nions *et al.*, 1979)。そのためには地球内部における K の分布を考慮しても、上部マントルのみならず下部マントルの一部から脱ガスさせる必要がある。すなわち、マントルの主要構成物質であるケイ酸塩中の拡散係数は、Ar よりも He の方がはるかに大きいにもかかわらず、地球内部には  ${}^3\text{He}$  を含む始源的希ガスなどを相対的に失わずにいる部分が存在し、一方で放射性起源  ${}^{40}\text{Ar}$  のかなりの部分を大気中に脱ガスさせなければならない。

この条件を満足するためには、マントル中に相対的に脱ガスに関与していない部分が下部マントル中に存在している必要がある。地球内部で大規模な分化を起こすと液相濃集元素である希ガスはほとんど液相に分配され、結果的には相対的に浅い部分に移動して脱ガスすることになる。そのため、脱ガスしていないマントルは相対的に分化にはあまり関与しておらず、マントル全対流の影響を受けにくい部分ということになる。このような条件を満足する地球内部の化学的構造モデルの例を図 1 に示す。

#### IV. キンバーライトのもつ地球科学的意義

MORB, OIB などの希ガス同位体比は、マントル内に相対的に脱ガスしていない部分が存在していることを示唆している。固体元素同位体比は、マントル内で液相・固相間に分離する分化過程を反映している。脱ガスしていないマントル部分は脱ガスの大きい部分よりも分化の程度が少なくてもよいはずだが、 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比の大きいハワイやアイスランドなどの OIB の示す固体元素同位体比は分化していない BSE よりもかなり DM の値に近い値を示し、必ずしも予想通りにはなっていないように見える。さらにハワイの火山岩などでは、沈み込み帯でマントル内に取りこまれた地殻物質 (いわゆる循環物質) の影響を受けている

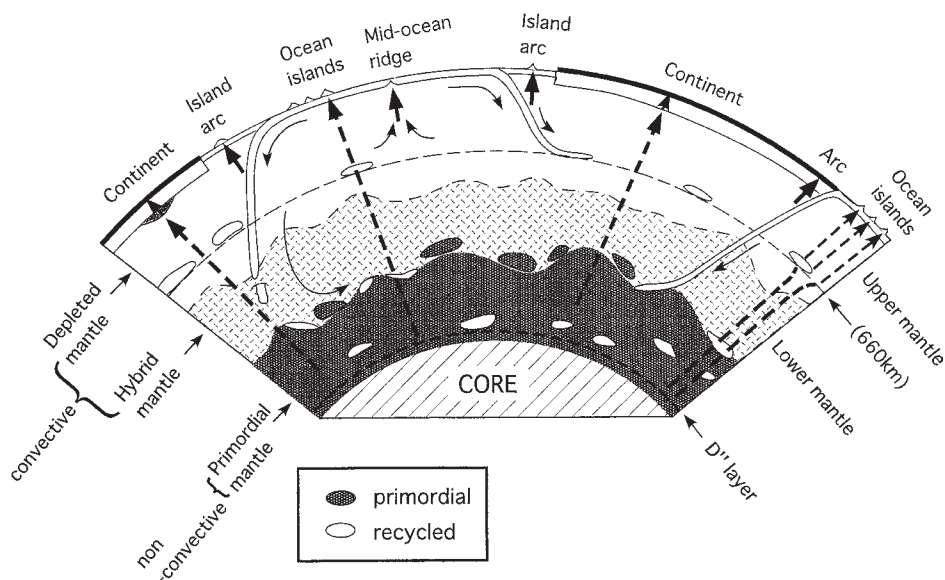


図1 放射性起源同位体比に基づいた地球内部の化学的構造モデル (Kaneoka, 2008).

Fig. 1 A model of the chemical structure of the Earth's interior based on radiogenic isotopes (Kaneoka, 2008).

ことが指摘されている。図1のモデルでは、地球深部では相対的に脱ガスの程度が少なく未分化のマンツルの存在を予想しているが、それではそのような部分の性質をもつ試料は地表で手にすることはできないのだろうか？

この問題に関連して、キンバーライトが非常に興味深い試料として注目される。キンバーライトは先カンブリア紀の大陸地域に噴出し、化学組成としてSiO<sub>2</sub>が40%以下でありながらH<sub>2</sub>Oやハロゲン元素などの揮発性元素を多く含み、Kや希土類元素などの液相濃集元素に富む。硫化鉍物のほか、多くのマンツル捕獲岩などのうちにダイヤモンドも含むので、そのマグマ源はMORB, OIBなどよりも還元的环境で、少なくとも150 kmより深部に存在すると考えられている。Sr, Nd, Pbなどの同位体比の組み合わせからキンバーライトはグループIとIIに分類できるが(Smith, 1983)、大部分を占めるグループIのキンバーライトは年代・産出地域に関係なくSr, Nd, Pb, Hfなどの固体元素の同位体初生比がBSEの値周辺に集中する。グループIIのキンバーライトは液相濃集元素に富んだ傾向を示す

が、これは地殻成分の寄与などで説明できるのでとりあえずは考察の対象外とする。

キンバーライトマグマの生成する深さに関しては、150 kmより深い可能性があるというだけで、これまではasthenosphereから核-マンツル境界付近までさまざまな可能性が提唱されてきている。BSEに近い固体元素同位体比ということだけでは、DM, EMの混合でも説明できるので関与しているマンツル成分を特定できない。しかしわれわれは、西グリーンランドの新鮮なグループIのキンバーライトからカンラン石斑晶を分離して希ガス同位体比測定を実施し、26 R<sub>A</sub>に達する<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比を見出した(図2, Tachibana *et al.*, 2006)。すなわちグループIのキンバーライトマグマは、希ガス同位体比に関するかぎりOIBと同様のマンツルに由来する。前述したとおりグループIのキンバーライトは、場所や噴出年代にかかわらず固体元素同位体の初生比はBSEに近い値に集中する。噴出年代や場所の異なるさまざまな物質同士の混合によってこのことを説明することは難しく、マグマ源物質自体の値である可能性を示唆する。OIBの固体元素同位体比の示す

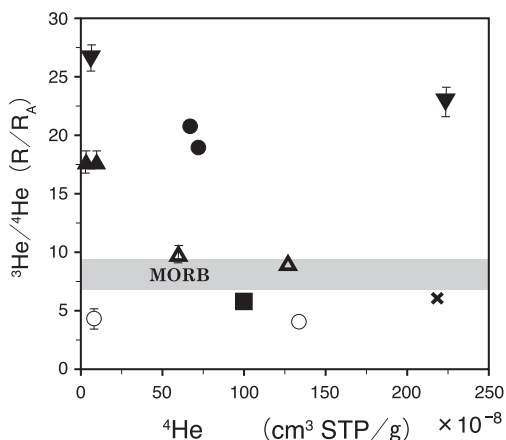


図2 西グリーンランドのキンバーライトに対する $^3\text{He}/^4\text{He} - ^4\text{He}$ 図 (Tachibana *et al.*, 2006). 現在の MORB の値 (約  $8 R_A$ ) より高い値を示すものが存在し、OIB と同様のマグマ源物質に由来することを示唆している。各シンボルは、試料採取地の違いを反映。

Fig. 2  $^3\text{He}/^4\text{He} - ^4\text{He}$  diagram of kimberlites from West Greenland (Tachibana *et al.*, 2006). Some samples show  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios higher than those of MORBs (about  $8 R_A$ ), indicating similar source materials to those of OIB magmas. Each symbol reflects a different sampling site.

ばらつきは、マントル上部において OIB マグマはキンバーライトマグマよりゆっくと上昇し、周囲の物質の影響を受けやすいと考えることで説明できるが、さらに全マントル対流の影響をより強く受けているだろう。一方、キンバーライトマグマは古い大陸地域の限られた地域にしか噴出しないが、同位体比から見るかぎりには OIB マグマと本質的な違いはない。しかし厚い lithosphere を突き破ってキンバーライトが噴出するためにはキンバーライトマグマのように揮発性元素に富んでいることが必要であろう。そのことは厚い lithosphere の存在と地球深部からのプレュームの存在によって、もともとは全マントル対流の影響が及びにくい地球深部に存在する OIB マグマと同様のマントル物質が、結果的にキンバーライトマグマを形成したとも考えられるのではなかろうか。

これらを考慮すると、OIB よりもキンバーラ

イトマグマの方が周囲の影響を受ける割合が少なく、キンバーライトの示すさまざまな特性は、地球深部の化学的状態をより直接的に反映している可能性がある (Kaneoka, 2008)。マグマ源が還元的事であることや、固体元素同位体比の初生比が BSE 周辺に集中することは、相対的にそのマグマ源が未分化に近いことを示唆している。キンバーライトに関してはまだ不明なことが多いが、ここで述べたように地球内部環境や進化などさまざまな問題に関係しており、それを調べることによってさらに新しい地球深部の状態が直接物質科学的な手法で明らかにできる可能性がある。その意味で、キンバーライトは今後さらに詳しい検討を要する重要な対象である。

## 文 献

- Allègre, C.J. (1987): Isotope geodynamics. *Earth and Planetary Science Letters*, **86**, 175–203.
- Helfrich, G.R. and Wood, C.J. (2001): The Earth's mantle. *Nature*, **412**, 501–507.
- Kaneoka, I. (2008): On the degassing state and the chemical structure of the Earth's interior inferred from noble gas isotopes—Past and recent views. *Geochemical Journal*, **42**, 3–20.
- Odin, G.S. (1999): Age values for the Fish Canyon Tuff minerals and intercomparison with other standard minerals. *Phanerozoic Time Scale, Bulletin of Liaison and Information, IUGS Subcommittee on Geochronology*, **15**, 22–24.
- O'Nions, R.K., Evensen, N.M. and Hamilton, P.J. (1979): Geochemical modeling of mantle differentiation and crustal growth. *Journal of Geophysical Research*, **84**, 6091–6101.
- Smith, C.B. (1983): Pb, Sr and Nd isotope evidence for sources of southern African Cretaceous kimberlites. *Nature*, **304**, 51–54.
- Steiger, R.H. and Jäger, E. (1977): Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, **36**, 359–362.
- Tachibana, Y., Kaneoka, I., Gaffney, A. and Upton, B. (2006): Ocean-island basalt-like source of kimberlite magmas from West Greenland revealed by high  $^3\text{He}/^4\text{He}$  ratios. *Geology*, **34**, 273–276.
- Wilde, S.A., Valley, J.W., Peck, W.H. and Graham, C.M. (2001): Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, **409**, 175–178.
- Zindler, A. and Hart, S.R. (1986): Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth Sciences*, **14**, 493–571.