地　球　の　年　令

木　越　邦　彦（学習院大・理）

地球の年令として通常与えられている、4.5×10^9年は地殻の分離生成と関連した年数で、その意味が不明確な点があるように思われるので、ここにそれらの点をあげてみることにする。考え方などに不備な点があるとも思われるので、批判あるいは解決を与えられることを期待します。

地球の年令の下限は、現在の地球上にある岩石について、その結晶生成の年代を測定した値の最大値以上であることは確実で、この方法で地球の年令は3.0×10^9年以上であることはいえる。年令の数字を出す方法としては、現在知られている唯一つの方法として、鉛の同位体組成によるものがある。その原理は1942～47年にGerling, Holmes., Houtermans がはじめて行つたものと現在でも変つていない。しかし最近では鉛の同位体組成についての新しい分析値や、地球についての組成の上での仮定（コンドライトモデル）などをつけ加えて、1940～50年に出された値から比較すると、一見正確となり、一定の値4.5×10^9年に近い値が、どのようにして求めても出てくるように見える。

Holmes., Houtermans がはじめに考えたモデルでは、地殻（$^{238}U/^{204}Pb\approx9$ の値を示すような物質）が地球の歴史の初期に分離し、その後地殻物質に大きな組成変化が平均としてなかつたと考えている。このような完全に閉じた系として地殻を考え、その系内で ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb が時間とともに ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th から供給されて変化すると考えれば、その変化は簡単な式で示される。実際に t 年前のその値は、t 年前に晶出した鉛鉱物中に化石化されて現在まで保存されるから、実測値が得られ、その変化のはじまつた時間 t_0 を求めることができる。

この方法では実際には地殻とマントルの組成の差は本質的重要性がなく、地殻を考える必要は必ずしもない。与えられた年代 t_0 は、鉛鉱物を晶出した母体が閉じた系で均一組成であつたとしたとき、その系の生成年代を与えること

になる。従つて、この t_0 は地球の組成についての仮定（コンドライトモデルなど）を含まないが、鉛鉱物の晶出した母体の系の均一性とか、閉じているといつた仮定が必ずしも成立しないため、一定した t_0 の値は実験的に出て来ない。測定値の選び方で、$t_0=2.8\sim4.6\times10^9$ 年にちらばつた値が算出される。系が閉じていたことについての条件をゆるめたモデルを用いても、同じ仮定の下では、同様に広はんいの t_0 の値を与える結果しか得られない。

鉛の同位体組成からもう少し正確な t_0 の値を求めるには、次のような仮定を導入しなければならない。

i）地球をつくる物質が凝集した時期、あるいは地殻のマントルから分離した時期に於ける鉛の同位体組成が、元素生成過程の終了直後のものと殆んど等しいと仮定し、更に

ii）隕鉄中の硫化物相中の鉛は、$^{238}U/^{204}Pb\approx0.5\sim0.01$ で鉛の同位体組成はウラン・トリウムの影響を殆んどうけていないと考えられる（少くとも硫化物相が出来てからは）。この鉛の同位体組成を元素生成過程の終了時の鉛の組成と等しいと仮定する。

この２つの仮定の下で前と同様に地殻中の鉛の同位体組成の分析値から t_0 を求めると、かなりよく一致した値 $4.5\sim4.7\times10^9$ 年が得られる。（4.7×10^9 年は最近Tiltonが鉛物質から出した値である。G.T.Tilton, R.H.Steiger Science 150 1805 (1965)）

このようにして出された t_0 について通常は、地球がマントルと地殻の区別がなかつたとき、$^{238}U/^{204}Pb\leq1$ で、それ以前には鉛の同位体組成に殆んど変化がなく、地殻物質（$^{238}U/^{204}Pb\approx9$）が分離して鉛の同位体組成がその中で変化しはじめた時期から現在までの時間を意味すると考えている。即ち t_0 は地殻の分離した年代だと考えている。しかしこの点について次のような不明確な点があり、大別して次のA) B) の二種の考え方が可能であるように思われる。

A）コンドライト中の鉛の含有量は分析値が多くなく、確実なことは言い難いが、0.05ppm 程度の低い値の一群と、0.2～0.5ppm を示す一群　あるいは炭質コンドライトのように1.5～2.5ppm を示すものがあり、いずれを地球についてコンドライトモデルをとつたときの鉛の含有量とすべきかによつて話

が全くかわつてしまう。

Modoc, Richardton (いずれも石質コンドライト) で代表される 0.05ppm の鉛含有量が地球全体の値に等しいとすれば、地球全体の平均として $^{238}U/^{204}Pb \approx 10$ となり、現在の地殻もマントルも $^{238}U/^{204}Pb$ 比に関して差がなくなつてしまう。また宇宙存在比も $^{238}U/^{204}Pb \approx 10$ となれば、i) の仮定も成立しなくなり、求められた t_0 (地球上の鉛のデーターから求めても) は隕鉄中のトロイライト相中の鉛同位体比を用いるかぎり、隕鉄の結晶生成年代を測定していることになる。t_0 は地球とは無関係な値となつてしまうわけである。

隕鉄の年代については石質隕石の場合のように多数の測定値はないが Re－Os 法による測定あるいは Pb-Sr 法による測定があり (後述) $4.0 \sim 4.7 \times 10^9$ 年が出されているので、この意味では t_0 についての値の上での矛盾はない。

(B) 鉛の存在量についてはAの場合のように小さい値を用いるのは不合理であると考えられる理由もある。鉛・(タリウム) 特に水銀など加熱によつて失われやすいものは隕石資料中の含有量は一定せず 10～100 倍位異る値が個々の隕石の種類で出る。これらのものは加熱によつて失われる可能性を考えれば高い含有量が元来の値と考える方が合理的かも知れない。鉛の含有量をAの場合の約１０倍とすれば、($^{238}U/^{204}Pb \approx 1$) i) の仮定は成立し、$t_0$ は地殻のマントルから分離した年代となる。しかし地殻物質がマントルから分離した過程が、地球の歴史の初期に殆んど完全に進行した (Holmes, Houtermans モデル) と考えることは一般に認め得ることではなさそうである。むしろ大陸の生成にともなつて現在まで殆んど一様の速度で分離が進行しつつあるほうが地質学的事実と一致するのかもしれない。

Holmes, Houtermans のモデルでは t_0 の意味は非常に明確で、短時間の間に行なわれた地殻分離の時期を示すことになる。これに反して地殻物質 ($^{238}U/^{204}Pb \approx 9$) がマントル ($^{238}/^{204}Pb \lesssim 1$) から一様な速度で分離して出来つつあるとすれば、求められた t_0 は現在の地殻物質が分離した時期の平均値を与えるから、分離のはじまつた年代は測定された t_0 の約２倍の年代となつてしまう。

Bate は (Russell, Farquhar "Lead Isotope in Geology" Interscience Pub. 1960) 地殻のマントルからの分離量が $e^{\mu t}$ に比例するとして

（tは現在を0とし、t年前を＋tとする。$\mu=0.625\times10^{-9}\,y^{-1}$）$t_0$ を求め、5.3×10^9 年を得ている。(一様な速度で地殻分離が行なわれるとして計算すると t_0 が大きくなりすぎるので、このような指数関係を仮定したのであろう)。均一なマントルからの地殻の分離が現在でも多量に行なわれていると考えると、地殻の分離のはじまつた年代は、石質隕石の生成年代 4.5×10^9 年に比してあまりにも大きくなりすぎる。(もつとも石質隕石の年代そのものにも(C)に述べるような問題点がある)

大陸の生成と地殻物質の分離の過程を直接むすびつける考え方はHurleyらの議論（Hurley et al. J. Geophys. Res. 67 5315 (1962)）が代表的なものと言えるであろう。これによれば、地殻中での平均の $^{87}Sr/^{86}Sr$ が年代とともにいかに変化するかを基礎として地殻物質の年代による増加を結論として出している。t年前の岩石晶出時の母体中の $^{87}Sr/^{86}Sr$ を測定し推定することは、測定と推定の際に大きな誤差を一般に含み、7.0~792 程度にひろがる値しか得られない。地殻中のRb/Sr を 1/4 程度として、また t_0 年前の $^{87}Sr/^{86}Sr$ を 7.00 (隕石から求めた値）とすれば、地殻が閉じた系であれば現在の平均値は 7.4 に増加していることになる。Hurleyらはこの増加が認められないから、マントルから多量の物質が地質年代を通じて供給されて来たものであると結論している。しかしこの結論のもととなる地殻中の平均のRb/Sr の値の推定値の不正確さ、$^{87}Sr/^{86}Sr$ のt年前の値の測定値の不確かさ更に資料として用いた岩石の生成過程が明確でないことを考えると、この結論は実験的根拠があるとはいい難い。更に測定された $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比の値が年代による変化がないとしても、地殻からの物質の供給と結びつける必然性は何もない。

鉛の同位体組成の年代による変化からも同じような推論ができる。Marshall (Geochim et Cos. Acta. 12 225 (1957)) は多数のいままで行なわれた鉛鉱物中の鉛の同位体組成の分析値を統計的に処理して、地殻中のウラン・トリウムが鉛に対して相対的に過去にさかのぼると増加していた（ウラン・トリウムの壊変ではなく）ことを出している。t×10^9 年前では

$$^{238}U/^{204}Pb = 9.31+0.162t,$$

$$^{232}Th/^{238}U = 4.10+0.198t,$$

と変化してきたことが結論として出されている。この組成変化は、時代とともに地殻中のウランが鉛を比較的多量に含むものでうすめられてきたことを示し地殻物質の増加とむすびつく。地殻に附加する物質中の $^{238}U/^{204}Pb$ を地殻の値とほとんど等しくえらべば、Hurleyらの結論と同じように多量の物質の附加を結論することもできるが、求められた t_0 は(A)の場合と同様に地球の年令とは無関係となつてしまう。附加される物質中の $^{238}U/^{204}Pb$ が ≈ 1 或はそれ以下であれば、上式で示される程度の組成変化を起させるために附加された物質の量は僅かのもので、大陸の生成と関係つける程の量にはならない。

大陸の生成を一様な組成のマントルからの物質の連続的供給とむすびつけることは、マントル中の $^{238}U/^{204}Pb \approx 1$ と考えたのではこのように鉛の分析値と一致しない。更に前に述べたように、地殻の年令が非常に大きくなる点でも困難がある。

地殻と同様の組成の部分が上部マントルにあり、上部マントルを含めた地殻物質が地球の歴史の初期に分離したとすれば、t_0 はその分離した年代を与えまた大陸の生成を上部マントルから地殻への物質の供給とむすびつけて考えても t_0 の意味には影響はない。しかもこのような考え方でMarshallの結論として得た $^{238}U/^{204}Pb$ および $^{232}Th/^{204}Pb$ の経年変化も説明することが可能であろう。ただし地球の組成についてコンドライトモデルを考えるかぎり、ウランの平均含有量は $10^{-8}g/g$ 以上とは考えられず、地殻中のウランの平均含有量を $10^{-6}g/g$ とすると、このウランを濃縮している層の厚さは平均として20Km以上とはなり得ない。これを越すとウランが全体として不足してしまう。少くともウランのように地殻に濃縮されている微量成分については、通常考えている地殻より更に深い所まで同じ組成だと考えることはむつかしい。この点をどのように考えるかは、マントル上部の物質が地上に出たものと確実にいえるような岩石について、ウラン・トリウムの分析および鉛の同位体比の測定値とその岩石の年令の測定値が充分にないと推論が進まないように思われる。

(C) 地球の年令と称する t_0 の値は鉛のDataから出すとき、測定値の選択でかなり大巾に変化し、どうも意識的に隕石の年代測定値と合うようにしている傾向があるのではなかろうか？ t_0 の値より一意的な解答の得られる隕石

の年代も実は不明確な意味をもつたものであることをAnders (Rev. Mod. Phys. 34 287 (1962)) が指摘している。

Rb-Sr 法も ^{207}Pb-^{206}Pb 法も石質隕石に適用する場合、一つの隕石から異つた鉱物成分を分離してその隕石の生成年代を出すのではなく、一つの隕石全体の中のストロンチウム或は鉛の同位体組成を測定した値をもととして年代が算出されている。種々のRb/Sr 比をもつ異つた隕石、あるいは、$^{238}U/^{204}Pb$ 比の異なる別々の隕石についてのこれらの測定値を比較して出した年代は、共通の母体からこれらの異つた隕石が分離したものであればその分離の年代を示すことになる。分析に用いられている種々の石質隕石がすべて共通の母体から分離して出来たかどうか、また少くとも2種の異るRb/Sr 比をもつ隕石が同一母体から出来たものかについてすら、その正否を判断する材料は殆んどない。もし異つた母体天体で試料として用いた種々の隕石がつくられたものであればよく一致して出されている $4.4 \sim 4.5 \times 10^9$ 年の意味は全く不明となつてしまう。

隕石についての年令もRe-Os 法とRb-Sr 法で測定値が出されているが、Re-Os 法では上述の場合と同様に、母体が共通であることが仮定としては入つている。最近出された、Weekeroo Station (隕鉄) についての測定は (Nasserburg et al. Science 150 1814 (1955)) この隕鉄中の2つ以上のsilicate nodules についてそれぞれ測定した $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比の値から年代が算出されているので、得られた年令 4.7×10^9 年は隕鉄中のsilicate nodules が分離生成した年代という明確な意味をもつている。

石質隕石に適用されたK－A法では、隕石が気体を保持するようになつた年代というかなり明確な意味をもつている。この値は従つて地球上の岩石の年代測定値が地殻の年令の下限を与えるのと同様に、気体保持の年令は隕石の生成年代の下限を与える。この見方からすれば隕石の生成年代は 4.3×10^9 年以上であることは比較的確実といえるであろう。