

10. 地球史

10-1 年代測定法

相対年代 地層累重の法則を利用. 異なる地域の地層の年代の対比には, 進化が早く全世界的に繁栄していた生物の化石が用いられる. このような時代の目安になる化石を**示準化石**という¹. また広範囲に降下した火山灰層も異なる地域の地層の年代の対比に用いられる (**鍵層**).

絶対年代 放射性同位体を用いて決定される年代. 放射性同位体は一定の速度で安定同位体へ壊変する. 前者を親核種, 後者を娘核種, 親核種がもとの量の半分になる期間を半減期という. 岩石が固化した時点での親核種 (または娘核種) の存在度と, 現在の親核種 (または娘核種) の存在度が分かれば, **火成岩が固化してから経過した時間が分かる**.

代表的な Rb-Sr 法を例にとる. ^{87}Rb は半減期 4.88×10^{10} yr 年で ^{87}Sr へ壊変する. 各核種濃度を $[X]$ で表し, 初期値に $_0$ を付ける. t を経過時間, λ を壊変定数とすると,

$$[^{87}\text{Rb}] = [^{87}\text{Rb}]_0 e^{-\lambda t} \quad (10.1)$$

$$[^{87}\text{Sr}] = [^{87}\text{Rb}]_0 (1 - e^{-\lambda t}) + [^{87}\text{Sr}]_0 = [^{87}\text{Rb}] (e^{\lambda t} - 1) + [^{87}\text{Sr}]_0 \quad (10.2)$$

半減期 $T_{1/2}$ と壊変定数には $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$ の関係がある. 便利のために ^{86}Sr (これは安定同位体で他の核種の壊変でも生じない, つまり $[^{86}\text{Sr}] = [^{86}\text{Sr}]_0$.) に対する相対濃度の形で表す.

$$\frac{[^{87}\text{Sr}]}{[^{86}\text{Sr}]} = \frac{[^{87}\text{Rb}]}{[^{86}\text{Sr}]} (e^{\lambda t} - 1) + \frac{[^{87}\text{Sr}]_0}{[^{86}\text{Sr}]} \quad (10.3)$$

すると $y = \frac{[^{87}\text{Sr}]}{[^{86}\text{Sr}]}$ と $x = \frac{[^{87}\text{Rb}]}{[^{86}\text{Sr}]}$ の間には $y = ax + y_0$ の関係が成り立つことが分かる. 火成岩は元素組成の異なる鉱物からなることを思いだそう. Rb と Sr は異なる元素なので鉱物の種類によってさまざまな x の値を持つ. 一方初期値 y_0 は同じ元素の同位体比なので, 鉱物の種類には依らない一定値になる (均質なマグマから固化するため). つまり岩石中のいくつかの鉱物を測定すると, 一本の直線上にプロットされる. この直線を等時線 (アイソクロン) とよび, その傾き a から, 岩石が固化してから現在まで経過した時間 t が分かる.

$$t = \ln(a + 1) / \lambda \approx a / \lambda \quad (10.4)$$

¹気候, 水温, 水深など地層の堆積環境を示す化石を**示相化石**という

年代測定に用いられる主要な元素²

| 親核種 | 半減期(年) | 安定娘核種 | |
|-------------------|-----------------------|------------------------------------|-------------|
| ¹⁴ C | 5.73×10 ³ | ¹⁴ N | |
| ⁴⁰ K | 1.25×10 ⁹ | ⁴⁰ Ar, ⁴⁰ Ca | 地球の熱源としても重要 |
| ⁸⁷ Rb | 4.88×10 ¹⁰ | ⁸⁷ Sr | |
| ¹⁴⁷ Sm | 1.06×10 ¹¹ | ¹⁴³ Nd | |
| ²³⁵ U | 7.04×10 ⁸ | ²⁰⁷ Pb | |
| ²³⁸ U | 4.47×10 ⁹ | ²⁰⁶ Pb | 地球の熱源としても重要 |

10-2 地質時代：大区分

大区分 大きく4つの時代に区分される。

冥王代 地球誕生～40億年前。

太古代 40億年前～25億年前。始生代ともいう。

原生代 25億年前～5.4億年前。

顕生代 5.4億年前～現在。

冥王代から原生代までの年代の境界は適当に定義されたもの。一方、顕生代と原生代の年代境界は動物の一種フィコデスの生痕化石が出現するイギリスの地層の最下部の年代として定義されている。そのためこの境界の年代の数値には不確定性がある。

冥王代 地球誕生から40億年前まで。

この時代に生じた岩石はほとんど残っていない

地球の形成は45億6千7百万年前に開始。この年代はコンドライト隕石³中の最古のCAIが示す年代。その後、数千万年でほぼ現在の大きさに集積(最古の月の岩石の年代は44.6億年前)。地球の基本構造(大気・マントル・核)と月はこの時に形成された。

現時点で最古の鉱物粒子は44億4百万年前、南オーストラリア・ジャックヒルズ産の碎屑性ジルコン。最古の岩石は40億3千万年前(最近42億8千万年という値も報告された)、北西カナダのアカスタ片麻岩。地球最古の物質

²各元素の読み方=Rb:ルビジウム, Sr:ストロンチウム, Sm:サマリウム, Nd:ネオジウム(ネオジウム), Pb:鉛

³原始太陽系星雲で固体粒子が集まって出来たままの状態を保存している。コンドライトと呼ばれるmmサイズの珪酸塩粒子, CAIと呼ばれるmm～cmサイズのCaとAlに富む粒子, 石基(μmサイズの粒子)から出来ている。このような特徴は微小重力下(宇宙空間)で固体粒子が集まったことを示す。

は当時すでに大陸地殻(散在する島弧として存在)や海が分化していたことを示す。

隕石爆撃に見舞われた混沌の時代。生命の誕生もこの時期かも知れない。

太古代 (または始生代)40億年前から 25億年前まで。

最古の化石の候補はこの時代。35億年前の微化石・ストロマイト様構造。核を持たない原核生物が主だった。光合成もこの時期にさかのぼる可能性がある。しかし当時の堆積物中に UO_2 が残っていることから酸素分圧は非常に低かったと推定される(酸素濃度が高いと U^{6+} となって水に溶けて流されてしまう)。

16S リボソーム RNA の塩基配列から推定された生命の系統樹から、太古代初期の地球の気温は高かったらしい(好熱性細菌が初期に出現している)。理論的に太陽は今より暗かったはずなので、当時は大気中に温室効果ガスが現在よりも相当多かったと推定される。おそらく CO_2 と CH_4 。

はじめ島弧が成長・合体して生じた小大陸が散在。この時代の後半にはじめて超大陸が形成されたらしい⁴(←過去の造山帯の調査から)。

その後、現在まで、超大陸の形成と分裂が数億年周期で繰り返されたとみられる。これをウィルソンサイクルという。

原生代 25億年前から 5億4千万年前まで。

原始的な生物の時代。もっとも古い真核生物化石(グリパニア・藻類の一種らしい)が21億年前。真核生物は好気性生物なので、それまでにやや酸素に富む(現在の1/100程度)環境になっていたとみられる。

原生代の大气中酸素濃度は大きく2段階を経て上昇したらしい。それぞれの証拠としては次のようなものがある。

約24—18億年前 世界の縞状鉄鉱床の大部分がこの時期に形成している。これは海水に溶けていた Fe^{2+} イオンが酸素により酸化されて Fe^{3+} イオンになり、磁鉄鉱などの形で沈殿したことを示す。また碎屑性のU鉱床にはこの時期よりも後に生じたものがない。これは大気酸素によってUが酸化され水溶性になったことで説明できる。他にも多くの証拠が酸素濃度の上昇を示すことから「大酸化イベント」と呼ばれている。酸素濃度はこのイベントによって現在のおよそ1割程度まで上昇したとみられる。

6億年前 大型の多細胞生物が出現した(代表例 エディアカラ動物群:6億から5億5千万年前)。それらの生育に必要な条件を考えると、酸素濃度は現在の値に接近したと考えられる。

⁴Vaalbara 31億年前, Kenorland 27億年前

これらの時期には全地球が氷床で覆われる大規模な氷河期の証拠があり、大気組成の変化と密接な関係があると考えられている。

顕生代 5億4千万年前までから現在まで

複雑な形態を持つ多様な多細胞生物が爆発的に増えた(バージェス動物群)。これをカンブリア爆発という。

その後生命は大絶滅と適応放散を繰り返しながら進化。この時代のさらに細かい時代区分は生物の出現と絶滅に対応。

問題

問題番号に★が一つ付けてあるものは難しいが現在の知識でもきちんと考えれば解ける問題。★が二つのものは現在の知識+アルファが必要な挑戦問題。

10.1 式(10.1)～(10.4)を確かめよ。

10.2 Rb-Sr法は ^{87}Rb が ^{87}Sr へ放射壊変する性質を用いた絶対年代測定法である。ある古い火成岩から取り出した鉱物A, B, Cの $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比を調べたところ、鉱物Aがもっとも大きく鉱物Cがもっとも小さかった。以下の問いに答えよ。

- i) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比がもっとも大きい鉱物はA, B, Cのうちどれか。その理由も述べよ。
- ii) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を縦軸に、 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 比を横軸にとったグラフ上で、鉱物A, B, Cはどのようにプロットされるか概形を図示せよ。またこの火成岩が10億年前に固化したものだとして、もしも今から10億年後に再び測定を行ったときに鉱物A, B, Cはどのようにプロットされるか同じ図上に示せ。

10.3 堆積層の絶対年代を知るにはどのようにすればよいか。

10.4 ★ 半減期の測定は、一定量の放射性核種試料から、どのくらいの頻度で放射壊変が起こるのかを測定することで求められる。 ^{14}C , ^{40}K , ^{87}Rb , ^{147}Sm のそれぞれについて、1時間に1回の確率で放射壊変が起こるためには、それぞれの放射性核種試料を何グラム準備すればよいか。