

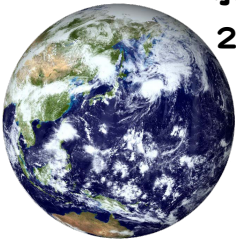
多文化共生・総合人間学演習V

「放射性同位体とその利用」

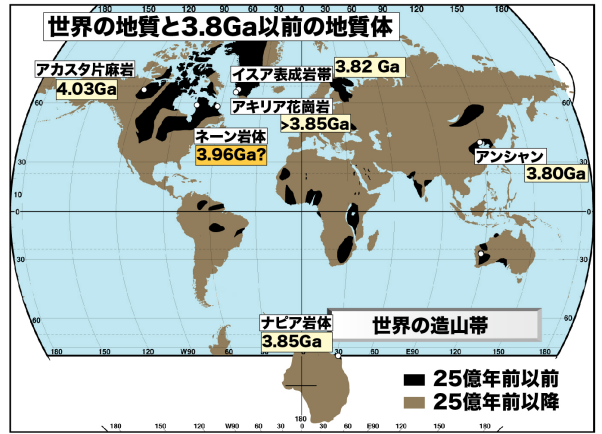
東京大学総合文化研究科：

小宮 剛 准教授

2015/11/12



カナダ アカスタ片麻岩(40.3億年前)



イスア地質(グリーンランド, 38億年前) -プレートテクトニクスの開始、海洋の存在と生命の痕跡-



地質年代区分

地質年代区分	地質年代	年代	地質年代	年代
最新紀	更新世	0.015	漸新世	23.03
	更新世	0.012	漸新世	23.03
	更新世	0.012	漸新世	23.03
	更新世	0.012	漸新世	23.03
	更新世	0.012	漸新世	23.03
	更新世	0.012	漸新世	23.03
	更新世	0.012	漸新世	23.03
	更新世	0.012	漸新世	23.03
	更新世	0.012	漸新世	23.03
	更新世	0.012	漸新世	23.03
中生代	白垩紀	65.5	白垩紀	65.5
	白垩紀	65.5	白垩紀	65.5
	白垩紀	65.5	白垩紀	65.5
	白垩紀	65.5	白垩紀	65.5
	白垩紀	65.5	白垩紀	65.5
	白垩紀	65.5	白垩紀	65.5
	白垩紀	65.5	白垩紀	65.5
	白垩紀	65.5	白垩紀	65.5
	白垩紀	65.5	白垩紀	65.5
	白垩紀	65.5	白垩紀	65.5
古生代	石炭紀	360	石炭紀	360
	石炭紀	360	石炭紀	360
	石炭紀	360	石炭紀	360
	石炭紀	360	石炭紀	360
	石炭紀	360	石炭紀	360
	石炭紀	360	石炭紀	360
	石炭紀	360	石炭紀	360
	石炭紀	360	石炭紀	360
	石炭紀	360	石炭紀	360
	石炭紀	360	石炭紀	360

年代測定の歴史

表1.1 近代的方法による年代測定の歴史

- 190 C 熱源がないと仮定した地球の熱伝導モデルによる地球の年齢の推定(Lord Kelvin)
- 1896 放射能の発見(H. Becquerel)
- 1906 U-Heの定置による年代測定(E. Rutherford) **U→Pbを用いた 1億年以下**
- 1907 放射性炭素を用いた年代測定(B. Boltwood)
- 1911 U-Pbの定置による岩石の年代測定。地質年代学の作成(A. Holmes)
- 1937 ⁴⁰K-⁴⁰Arの測定とK-Ar法による年代測定の可能性の示唆(G. F. von Weizsäcker)
- 1938 Rb-Sr法の試み(O. Hahn and S. Walling)
- 1940 Ne-Ar法による岩石の年代測定(O. Nier)
- 1946 ¹⁴Cの存在の確認。¹⁴C法による年代測定の基礎の確立(W.F. Libby)
- 1948 K-Ar法による鉱物の年代測定(L.A. Kirkich and A. O. Nier)
- 1953 熱ルミネッセンスを用いた年代測定の提案(F. Danil et al.)
- 1954 テラセヒエによる年代測定(H. Aebelen)
- 1955 ²⁶Al-²⁶Mg法による年代測定の試み(L. H. Hinnenberger, et al.)
- 1956 Pb-Pb法による隕石などの年代測定から、地球の年齢が約4.6 Gaであることが提唱(C. Patterson)
- 1960 Re-Os法による年代測定の試み(G. Wasserburg)
- 1960 隕石中の放射性²³⁵Uの存在による消滅核種の存在の確認(L. H. Reynolds)
- 1961 水と法による黒曜石の年代測定(I. Friedman and R. L. Smith)
- 1961 アイクン法による年代測定(L. O. Nicolayson, H. L. Allsopp)
- 1962 Ar-Ar法による年代測定の試み(T. Sigurdsson)
- 1962 フォトリソグラフィによる年代測定の試み(R. L. Fleischer, P. B. Price and R. M. Walker)
- 1963 電子スピントロニクス法による年代測定の試み(E. J. Zeller, et al.)
- 1963 火山岩に対する⁴⁰Arによる年代測定(本誌掲載)
- 1963 アンモニアによる年代測定(E. J. Hine and R. M. Walker)
- 1969 高精度表面質量分析計の開発(G. L. Wasserburg and D. A. Papanastassiou)
- 1971 1971年11月の月の地球への持ち帰り、その年代測定を通じての測定精度の向上
- 1973 Sm-Nd法の試み(野澤浩治)
- 1974 Rb-Sr法による年代測定(G. W. Lugmair)
- 1974 Sm-Nd法による年代測定(G. H. Meguire)
- 1976 加速器質量分析法(AMS)を用いた¹⁴C年代測定の開発(K. H. Purser)
- 1980 国際地質年代委員会(IGCP)の放射年代学の提議
- 1982 La-Hf法による年代測定(P. J. Pacher and M. Tassaro)
- 1982 La-Ce法による年代測定(田中利雄)
- 1983 オイオンマイクロプローブによる年代測定(W. Compston et al.)
- 1986 La-Ba法による年代測定(中井俊一)
- 1990 国際地質年代委員会(IGCP)の年代測定法の採用の勧告

年代測定

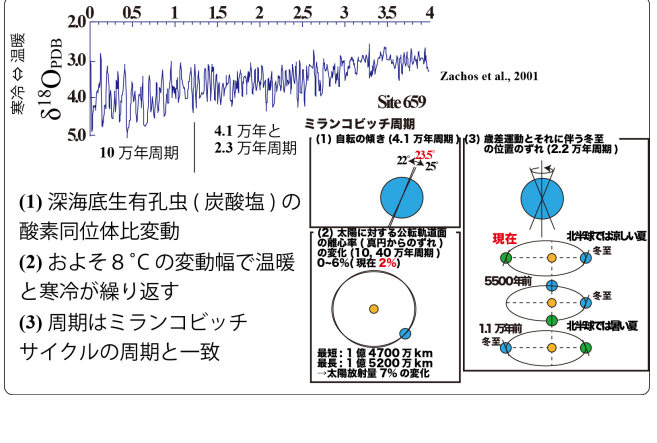
- ① 相対年代 ⇔ 絶対年代(数値年代)
- ② 原理的に4つのタイプ
 - a 物理的原理: 放射年代
 - b 化学的原理: 水法, ラセミ化年代
 - c 全地球的に共通して生じる現象の年代変化に基づく年代較正曲線と対比: 古地磁気や同位体層序

表1.2 年代測定で用いられる「年代」の主な区分

数値年代(絶対年代)	1. 放射年代
同位体(比)年代	同位体(比)年代
宇宙線生成核種の壊変を反映した時代	宇宙線生成核種の壊変を反映した時代
放射壊変系列の平衡からのずれを反映した年代	放射壊変系列の平衡からのずれを反映した年代
放射線照射年代	放射線照射年代
宇宙線照射年代	宇宙線照射年代
消滅核種による壊変生成核種量を反映した年代	消滅核種による壊変生成核種量を反映した年代

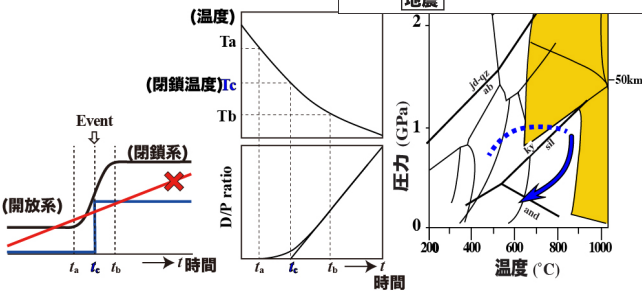
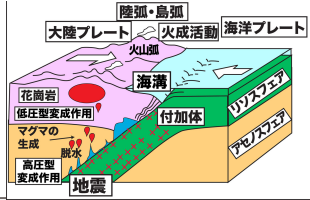
2. 化学反応現象を反映した年代	3. 天文現象を反映した年代	4. 年輪・年輪年代
水相法, ラセミ化年代	ミランコビッチサイクル	年輪・年輪年代

相対年代	1. 地質年代	2. 化石年代	3. 微化石年代	4. 古地磁気年代	5. 火山灰年代	6. 同位体比層序年代
夏王代	太古代(始生代)	原生代 Proterozoic	顕生代(累代)	中生代	中生代	中生代



放射年代測定法の仮定

- ①放射壊変定数の不変性
- ②年代変化を生じる現象の生成率が一定:
14C年代や放射線損傷年代等。
- ③閉鎖系。
- ④年代の起点が明確である。



放射性核種の親核種と娘核種の比を用いる年代測定

①アイソクロン年代

親核種 P → 娘核種 D 壊変定数 λ (半減期 $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$)

$$\frac{dP}{dt} = -\lambda P$$

$$P = P_0 \exp(-\lambda t) \rightarrow P_0 = P \exp(\lambda t)$$

$$D = D_0 + (P_0 - P) \rightarrow D = D_0 + P \{ \exp(\lambda t) - 1 \}$$

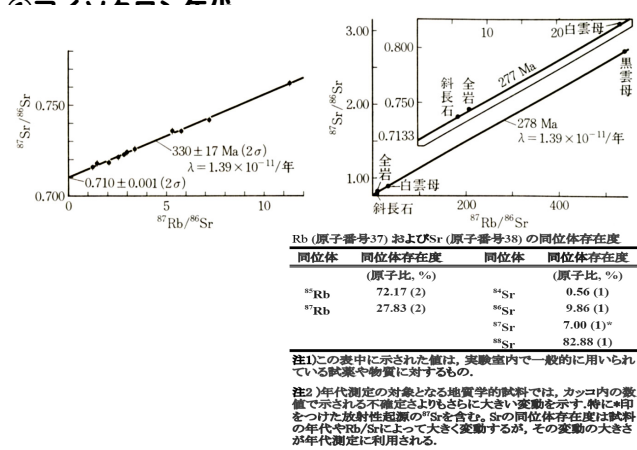
安定同位体 Ds で割る (比の方が精度良く分析できるので)。

$$\left(\frac{D}{D_s} \right) = \left(\frac{D}{D_s} \right)_0 + \left(\frac{P}{D_s} \right) \{ \exp(\lambda t) - 1 \} \rightarrow y = a + bx$$

切片: $\left(\frac{D}{D_s} \right)_0$
傾き: $\{ \exp(\lambda t) - 1 \}$

(a) 初生比 a が知られているとき (b) 初生比 a が未知アイソクロン

放射性核種の親核種と娘核種の比を用いる年代測定



放射性核種の親核種と娘核種の比を用いる年代測定

①アイソクロン年代

表2.2 放射性核種の親核種と娘核種の比を利用する年代測定法

方法	P	D	Ds	(D/Ds) ₀	壊変形式	半減期(年)
K-Ar (Ar-Ar)	⁴⁰ K	⁴⁰ Ar	³⁶ Ar	=295.5	電子捕獲(EC)	1.25 × 10 ⁹ *
Rb-Sr	⁸⁷ Rb	⁸⁷ Sr	⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) ₀	β	4.88 × 10 ¹⁰
U-Pb (Pb-Pb)	²³⁸ U	²⁰⁶ Pb	²⁰⁴ Pb	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) ₀	α, β	4.47 × 10 ⁹
	²³⁵ U	²⁰⁷ Pb	²⁰⁴ Pb	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) ₀	α, β	7.04 × 10 ⁸
Th-Pb	²³² Th	²⁰⁸ Pb	²⁰⁴ Pb	(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) ₀	α, β	1.40 × 10 ¹⁰
Sm-Nd	¹⁴⁷ Sm	¹⁴³ Nd	¹⁴⁴ Nd	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) ₀	α	1.06 × 10 ¹¹
Lu-Hf	¹⁷⁶ Lu	¹⁷⁶ Hf	¹⁷⁷ Hf	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) ₀	β	3.57 × 10 ¹⁰
La-Ce	¹³⁸ La	¹³⁸ Ce	¹⁴² Ce	(¹³⁸ Ce/ ¹⁴² Ce) ₀	β	9.87 × 10 ¹⁰ **
La-Ba	¹³⁸ La	¹³⁸ Ba	¹³⁷ Ba	(¹³⁸ Ba/ ¹³⁷ Ba) ₀	電子捕獲(EC)	
Re-Os	¹⁸⁷ Re	¹⁸⁷ Os	¹⁸⁶ Os	(¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁶ Os) ₀	β	4.23 × 10 ¹⁰

*⁴⁰Kとしての半減期、⁴⁰Kは電子捕獲のほかβ壊変して⁴⁰Caを生成するので、⁴⁰K-⁴⁰Ca系を利用した年代測定も原理的には可能である。しかし、天然の⁴⁰Caの存在割合が多いので放射性起源⁴⁰Caとの区別が困難なので、Kに言んだ特殊な試料以外には試みられていない。
**¹³⁸Laとしての半減期

鉛同位体

U(原子番号92)およびPb(原子番号82)の同位体存在度

同位体	同位体存在度 (原子比, %)	同位体	同位体存在度 (原子比, %)
²³⁸ U	0.0055 (2)	²⁰⁶ Pb	1.4 (1)
²³⁵ U	0.7200 (51)	²⁰⁷ Pb	24.1 (1)
²³⁴ U	99.2745 (106)	²⁰⁸ Pb	22.1 (1)
		²⁰⁹ Pb	52.4 (1)

(a) ²³⁸U-²⁰⁶Pb法
 $\frac{206\text{Pb}}{204\text{Pb}} = \left(\frac{206\text{Pb}}{204\text{Pb}} \right)_i + \frac{238\text{U}}{204\text{Pb}} \{ \exp(\lambda_{238}t) - 1 \}$

(b) ²³⁵U-²⁰⁷Pb法
 $\frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}} = \left(\frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}} \right)_i + \frac{235\text{U}}{204\text{Pb}} \{ \exp(\lambda_{235}t) - 1 \}$

(c) ²³²Th-²⁰⁸Pb法
 $\frac{208\text{Pb}}{204\text{Pb}} = \left(\frac{208\text{Pb}}{204\text{Pb}} \right)_i + \frac{232\text{Th}}{204\text{Pb}} \{ \exp(\lambda_{232}t) - 1 \}$

(d) ²⁰⁷Pb-²⁰⁶Pb法
 $\frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}} = \left(\frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}} \right)_i + \frac{238\text{U}}{204\text{Pb}} \{ \exp(\lambda_{238}t) - 1 \}$
 $\frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}} = \left(\frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}} \right)_i + \frac{235\text{U}}{204\text{Pb}} \{ \exp(\lambda_{235}t) - 1 \}$
 $\frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}} = \left(\frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}} \right)_i + \frac{1}{137.88} \left[\frac{\exp(\lambda_{235}t) - 1}{\exp(\lambda_{238}t) - 1} \right] \frac{238\text{U}}{235\text{U}} = 137.88$

一致年代、不一致年代

一致年代 (concordant age) と不一致年代 (discordant age) という。

(a) U-Pb年代

$$\frac{206\text{Pb}}{204\text{Pb}} = \left(\frac{206\text{Pb}}{204\text{Pb}} \right)_i + \frac{238\text{U}}{204\text{Pb}} \{ \exp(\lambda_{238}t) - 1 \} \rightarrow \frac{206\text{Pb}}{204\text{Pb}} = \left(\frac{206\text{Pb}}{204\text{Pb}} \right)_i + \frac{238\text{U}}{204\text{Pb}} \{ \exp(\lambda_{238}t) - 1 \}$$

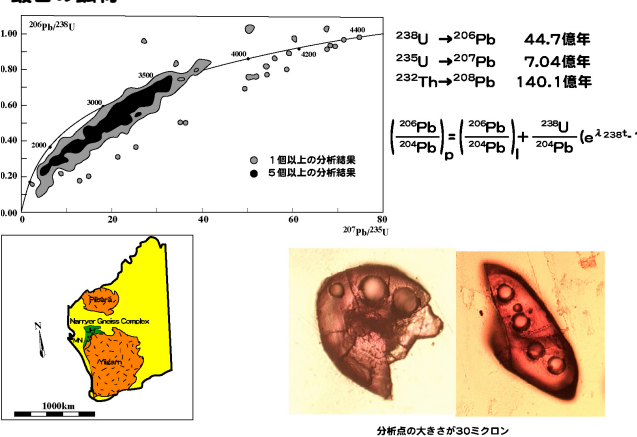
$$\frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}} = \left(\frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}} \right)_i + \frac{235\text{U}}{204\text{Pb}} \{ \exp(\lambda_{235}t) - 1 \} \rightarrow \frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}} = \left(\frac{207\text{Pb}}{204\text{Pb}} \right)_i + \frac{235\text{U}}{204\text{Pb}} \{ \exp(\lambda_{235}t) - 1 \}$$

元々 Pb (娘核種) が含まれない時

$$t = \frac{1}{\lambda_{238}} \ln \left[1 + \frac{206\text{Pb}}{238\text{U}} \right]$$

$$t = \frac{1}{\lambda_{235}} \ln \left[1 + \frac{207\text{Pb}}{235\text{U}} \right]$$

最古の鉱物



宇宙線生成放射核種を利用する年代測定

¹⁴C年代測定法 ¹⁴N(n,p)¹⁴C: ¹⁴Nが中性子(n)を捕獲して、陽子として放出し、¹⁴Cになる。
¹⁴Cは半減期5730年でβ壊変して¹⁴Nに戻る

宇宙線があたっているうちは同位体平衡に達していて、
 宇宙線量は緯度で異なるが大気循環により炭素同位体値は均質

宇宙線照射による生成 死んだりすると炭素の取り込みがなくなるのでC=0となる

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N + C$$

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \rightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + \left(\frac{N_0}{N} \right) \right]$$

○半減期はリビーの5568年を用いる(最近、¹⁴Cの半減期は改訂され、5730年とされているが、慣例として過去のデータに混乱を来すので5568年を使用)。
 ○年代は2000BP(Before Physics)のようにあらわすが、これは現在から2000年前という意味ではなくて、1950年から2000年前という意味。戦後の原子爆弾実験のために¹⁴C値が異常になってしまった。
 ○適用範囲: 現在から5~6万年前
 ○適用試料: 木炭など生物由来有機物、サンゴなど炭酸塩由来、鉄器、地下水・海水中の溶解炭素
 ○仮定 ①宇宙線量は一定(最近では補正がある:右図) ②生物の死後はCについて閉鎖系 ③生物は炭素の取り込みの際に同位体分別をする

δ¹⁴C (‰) = δ¹⁴C - 2(δ¹³C_{org} + 25) × (1 + $\frac{\delta^{14}\text{C}}{1000}$)
 $t = \frac{T_{1/2}}{0.693} \ln \left(1 + \frac{1}{1 + \delta^{14}\text{C}/1000} \right)$

宇宙線生成放射核種を利用する年代測定

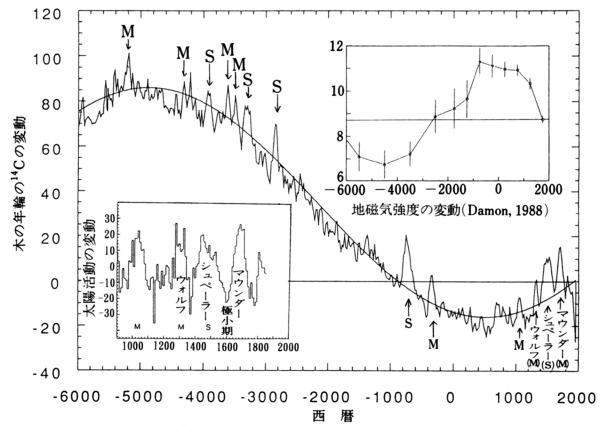
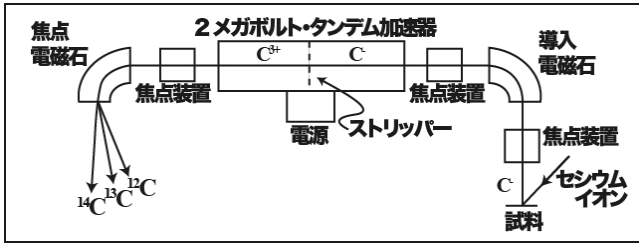
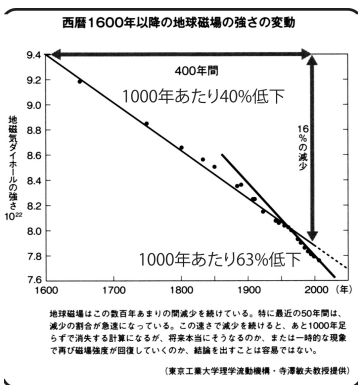
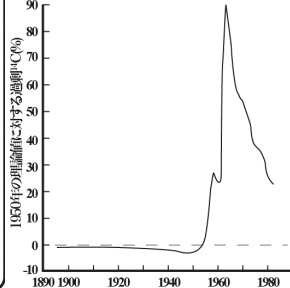


図 14.2 木の年輪の¹⁴C変化と太陽活動の変動 (Stuiver and Braziunas, 1988)
太陽活動の衰退期にはマウンダー・タイプ (M) とシュベラー・タイプ (S) がある。右下の太陽活動の変動曲線は木の年輪の¹⁴Cを基に補正を施し求められている。

環境(気候)の周期(地球磁場の変動)



核実験の影響



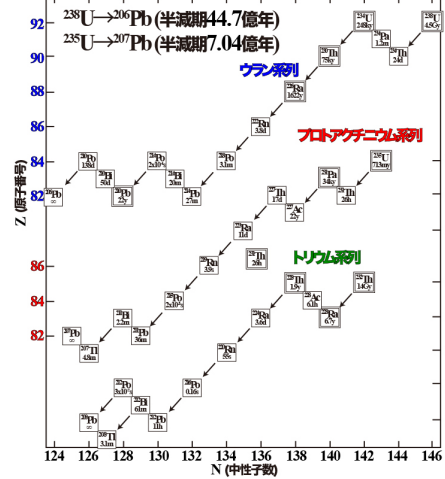
宇宙線生成放射核種を利用する年代測定

表 2.3 宇宙線により生成した核種を利用する年代測定法

方法	P	P ₀	核変後の核種	半減期(年)
¹⁴ C	¹⁴ C	¹⁴ Cが大気中で一定	¹⁴ N	5.73 x 10 ³
¹⁰ Be	¹⁰ Be	¹⁰ Beの生成率が一定	¹⁰ B	1.51 x 10 ⁶
²⁶ Al	²⁶ Al	²⁶ Alの生成率が一定	²⁶ Mg	7.16 x 10 ⁵
³ H	³ H	³ Hが大気中で一定	³ He	1.24 x 10 ¹⁰
³² Si	³² Si	³² Siの生成率が一定	³² P → β → ³² S (14.3d)	1.05 x 10 ²
³⁶ Cl	³⁶ Cl	³⁶ Clの生成率が一定	³⁶ Ar	3.01 x 10 ⁵
⁴¹ Ca	⁴¹ Ca	⁴¹ Caの生成率が一定	⁴¹ K	1.03 x 10 ⁵
⁵³ Mn	⁵³ Mn	⁵³ Mnの生成率が一定	⁵³ Cr	3.7 x 10 ⁶
¹²⁹ I	¹²⁹ I	¹²⁹ Iの生成率が一定	¹²⁹ Xe	1.57 x 10 ⁷
³⁹ Ar	³⁹ Ar	³⁹ Arの生成率が一定	³⁹ K	2.69 x 10 ²
⁸¹ Kr	⁸¹ Kr	⁸¹ Krの生成率が一定	⁸¹ Br	2.13 x 10 ⁵

表中にあげた方法のほか、これらの核種を組み合わせた年代測定法なども開発されている。(例) ³H/³He, ²⁶Al/¹⁰Be, ¹⁰Be/³⁶Clなど。

放射平衡からのずれを利用した年代測定



²³⁴U-²³⁸U法

$$\frac{d^{238}\text{N}}{dt} = -\lambda_{238}^{238}\text{N}$$

$$\frac{d^{234}\text{N}}{dt} = \lambda_{234}^{234}\text{N} - \lambda_{238}^{238}\text{N}$$

$$\frac{d^{230}\text{N}}{dt} = \lambda_{230}^{230}\text{N} - \lambda_{234}^{234}\text{N}$$

$$\frac{d^{226}\text{N}}{dt} = \lambda_{226}^{226}\text{N} - \lambda_{230}^{230}\text{N}$$

$$\frac{d^{210}\text{N}}{dt} = \lambda_{210}^{210}\text{N} - \lambda_{226}^{226}\text{N}$$

$$\frac{d^{206}\text{N}}{dt} = \lambda_{206}^{206}\text{N} - \lambda_{210}^{210}\text{N}$$

$$^{238}\text{N} = ^{238}\text{N}_0 \exp(-\lambda_{238}t)$$

$$^{234}\text{N} = \frac{\lambda_{238}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} ^{238}\text{N}_0 (\exp(-\lambda_{238}t) - \exp(-\lambda_{234}t)) + ^{234}\text{N}_0 \exp(-\lambda_{234}t)$$

$$^{234}\text{A}_0 = \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} ^{234}\text{N}_0$$

$$^{234}\text{A} = \frac{\lambda_{234} \lambda_{238}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} ^{238}\text{N}_0 (\exp(-\lambda_{238}t) - \exp(-\lambda_{234}t)) + \lambda_{234} ^{234}\text{N}_0 \exp(-\lambda_{234}t)$$

$$\frac{^{234}\text{A}}{^{238}\text{A}} = \frac{\lambda_{234} \lambda_{238}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} \frac{^{238}\text{N}_0}{^{238}\text{N}_0} \frac{(\exp(-\lambda_{238}t) - \exp(-\lambda_{234}t)) + \lambda_{234} \exp(-\lambda_{234}t)}{-\lambda_{238} \exp(-\lambda_{238}t)}$$

$$= \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} \left[1 - \exp\{-(\lambda_{234} - \lambda_{238})t\} \right] + \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{238}} \exp\{-(\lambda_{234} - \lambda_{238})t\}$$

$$= \{1 - \exp(-\lambda_{234}t)\} + \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{238}} \exp(-\lambda_{234}t)$$

$$= 1 + \left(\frac{\lambda_{234}}{\lambda_{238}} - 1 \right) \exp(-\lambda_{234}t)$$

²³⁰Th-²³⁴U法

$$\frac{d^{238}\text{N}}{dt} = -\lambda_{238}^{238}\text{N}$$

$$\frac{d^{234}\text{N}}{dt} = \lambda_{234}^{234}\text{N} - \lambda_{238}^{238}\text{N}$$

$$\frac{d^{230}\text{N}}{dt} = \lambda_{230}^{230}\text{N} - \lambda_{234}^{234}\text{N}$$

$$\frac{d^{226}\text{N}}{dt} = \lambda_{226}^{226}\text{N} - \lambda_{230}^{230}\text{N}$$

$$\frac{d^{210}\text{N}}{dt} = \lambda_{210}^{210}\text{N} - \lambda_{226}^{226}\text{N}$$

$$\frac{d^{206}\text{N}}{dt} = \lambda_{206}^{206}\text{N} - \lambda_{210}^{210}\text{N}$$

$$^{238}\text{N} = ^{238}\text{N}_0 \exp(-\lambda_{238}t)$$

$$^{234}\text{N} = \frac{\lambda_{238}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} ^{238}\text{N}_0 (\exp(-\lambda_{238}t) - \exp(-\lambda_{234}t)) + ^{234}\text{N}_0 \exp(-\lambda_{234}t)$$

$$^{230}\text{N} = \frac{\lambda_{234}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} ^{234}\text{N}_0 (\exp(-\lambda_{234}t) - \exp(-\lambda_{230}t)) + ^{230}\text{N}_0 \exp(-\lambda_{230}t)$$

$$\frac{^{230}\text{A}}{^{238}\text{A}} = \{1 - \exp(-\lambda_{230}t)\} + \frac{\lambda_{230}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} \left(\frac{\lambda_{234}}{\lambda_{234} - \lambda_{238}} - 1 \right) [1 - \exp\{-(\lambda_{234} - \lambda_{238})t\}]$$

表 2.4 放射崩壊系列における放射平衡からのずれを利用した年代測定法

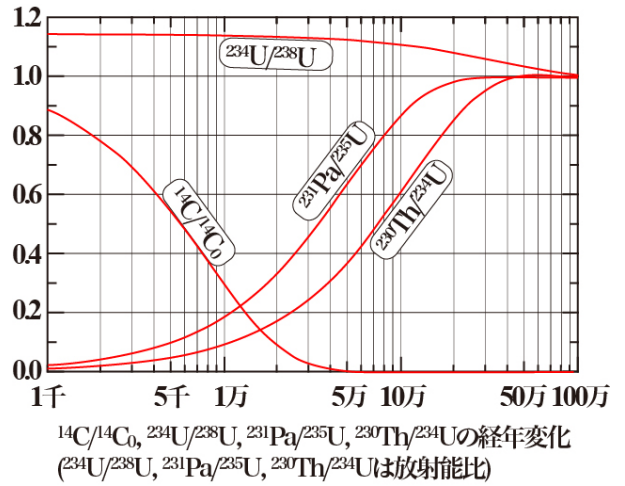
方法	原理	半減期(年)
²³⁰ Th(Io) - ²³⁴ U	²³⁰ Th/ ²³⁴ Uの年代変化を利用	²³⁰ Th: 7.54 x 10 ⁴ ²³⁴ U: 2.48 x 10 ⁵
²³¹ Pa - ²³⁵ U	²³¹ Pa/ ²³⁵ Uの年代変化を利用	²³¹ Pa: 3.28 x 10 ⁴ ²³⁵ U: 7.04 x 10 ⁸
²²⁶ Ra - ²³⁸ U	²²⁶ Ra/ ²³⁸ Uの年代変化を利用	²²⁶ Ra: 1.60 x 10 ³ ²³⁸ U: 4.47 x 10 ⁹
²³⁴ U - ²³⁸ U	²³⁴ U/ ²³⁸ Uの年代変化を利用	
²³⁰ Th(Io)	過剰 ²³⁰ Thの存在を利用	
²³¹ Pa	過剰 ²³¹ Paの存在を利用	
²¹⁰ Pb	過剰 ²¹⁰ Pbの存在を利用	²¹⁰ Pb: 2.23 x 10
²³⁰ Th(Io) - ²³² Th	過剰 ²³⁰ Th/ ²³² Thの存在を利用	²³² Th: 1.41 x 10 ¹⁰
²³¹ Pa - ²³⁰ Th(Io)	過剰 ²³¹ Pa/過剰 ²³⁰ Thの存在を利用	

これらの方法は、主として大気や海水中のように平衡状態になりやすい系に多く用いられるが、一部の方法は地下のマグマなどに関連した現象にも用いられている

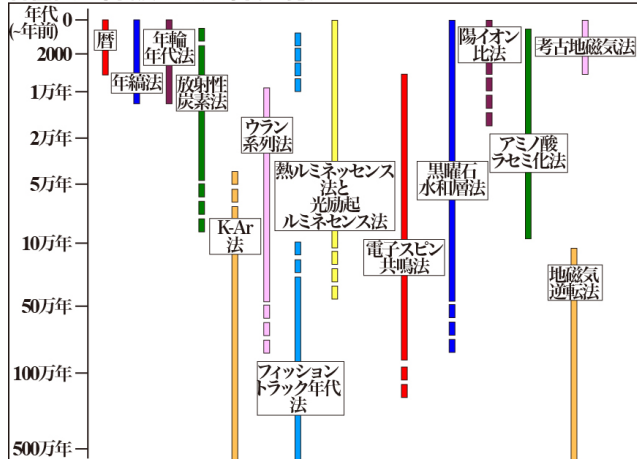
表2.5 放射線損傷を利用した年代測定法

方法	原理	関連する核種の半減期(年)
FT (フィッション・トラック)	^{235}U の自発核分裂反応の際に生じる飛跡の数が、年代とU含有量の関数であることを利用	^{235}U の自発核分裂反応 (0.8-1) $\times 10^{16}$
TL (熱ルミネッセンス)	放射性核種の衰変の際に放出されるエネルギーにより励起された遊離電子としての捕獲電子数が年代の関数になり、加熱による発光現象を測定に利用	^{238}U : 4.47×10^9 ^{235}U : 7.04×10^8 ^{232}Th : 1.41×10^{10} ^{40}K : 1.25×10^{10} など
ESR (電子スピン共鳴)	放射性核種の衰変の際の放出されるエネルギーにより生じる不対電子数が年代の関数となり、その量を電子スピン共鳴として測定	TLの場合と同様

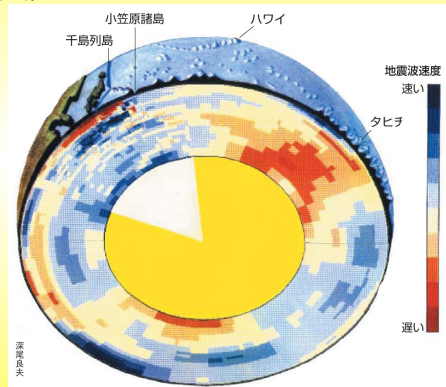
* ^{235}U の自発核分裂反応に関する半減期の値は測定方法などにより系統的な差があり、まだ統一された値は報告されていない。



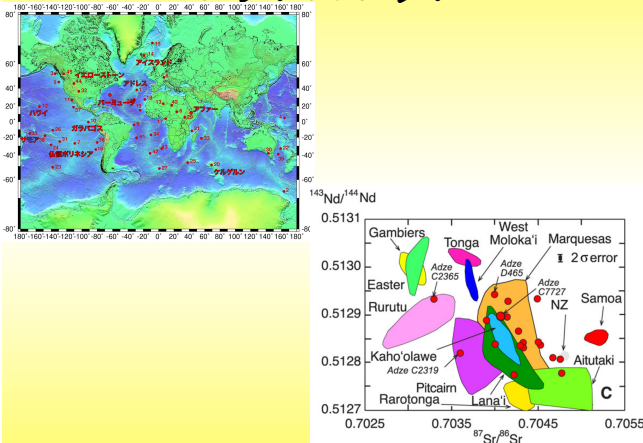
各種絶対年代法の適用年代一覧表



地球内部の微細構造
地球断面とブルームテクトニクス

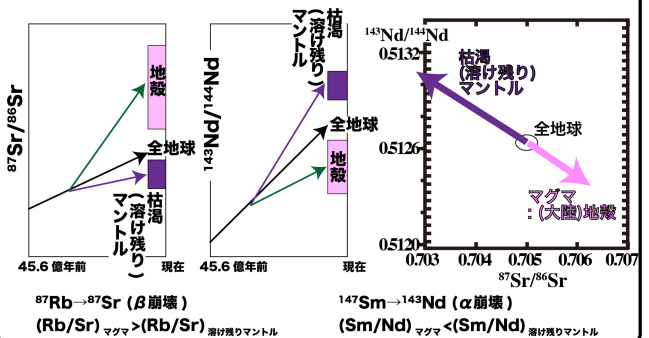


ホットスポット

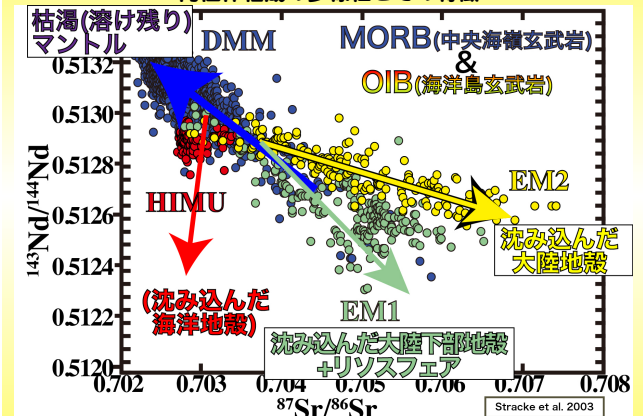


同位体の組成の多様性は
どのようにして生じるのか

大陸地殻成長とマンツルの同位体進化



中央海嶺玄武岩とホットスポットマグマの
同位体組成の多様性とその特徴



太平洋の文化交流

