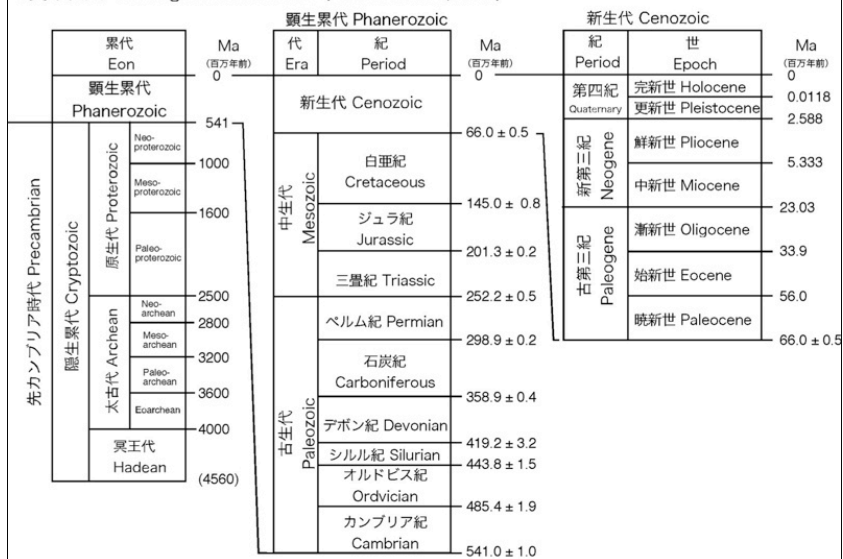


初期地球：放射年代、最古の岩石・鉱物、地球の年齢

地質年代尺 Geological Time Scale (Gradstein et al., 2012)



◆放射壊変

放射性元素



α壊変：α線 (He)
β壊変：β線 (e⁻)
γ壊変：γ線 (電磁波)
電子捕獲

Pが単位時間当たりに放射壊変していく割合は、

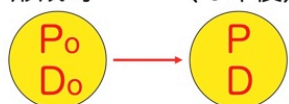
- ・物質固有
- ・自然界では、状態、温度、圧力等外界の条件に影響されない

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

λ：壊変定数 (／年)

◆放射年代測定

岩石・鉱物 形成時 現在 (t 年後)

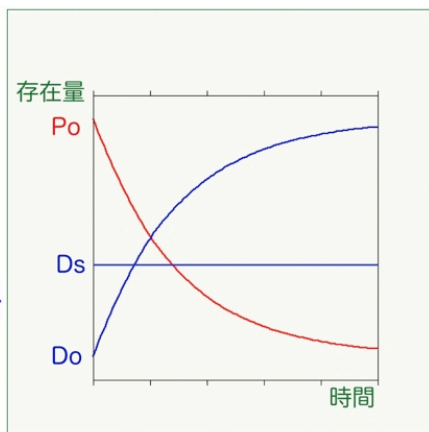


$$P = P_0 \exp(-\lambda t)$$

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

P, D：測定
λ：既知
Po, Do：推定

年代値 t



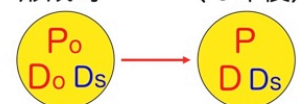
娘元素の安定同位体：Ds

$$D/D_s = \frac{D_0}{D_s} + P/D_s\{\exp(\lambda t) - 1\}$$

初生比 (Initial Ratio)

◆放射年代測定

岩石・鉱物 形成時 現在 (t 年後)



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

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

(兼岡, 1998)

方法	P	D	Ds	(D/Ds) ₀	半減期 (年)
K-Ar	⁴⁰ K	⁴⁰ Ar	³⁶ Ar	295.5 (大気中)	1.25x10 ⁹
Rb-Sr	⁸⁷ Rb	⁸⁷ Sr	⁸⁶ Sr	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) ₀	4.88x10 ¹⁰
U-Pb	²³⁸ U	²⁰⁶ Pb	²⁰⁴ Pb	(²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb) ₀	4.47x10 ⁹
	²³⁵ U	²⁰⁷ Pb	²⁰⁴ Pb	(²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb) ₀	7.04x10 ⁸
Th-Pb	²³² Th	²⁰⁸ Pb	²⁰⁴ Pb	(²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb) ₀	1.40x10 ¹⁰
Sm-Nd	¹⁴⁷ Sm	¹⁴³ Nd	¹⁴⁴ Nd	(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) ₀	1.06x10 ¹¹
¹⁴ C	P: ¹⁴ C	P ₀ : ¹⁴ C	大気中で一定		5730 年

◆放射年代測定

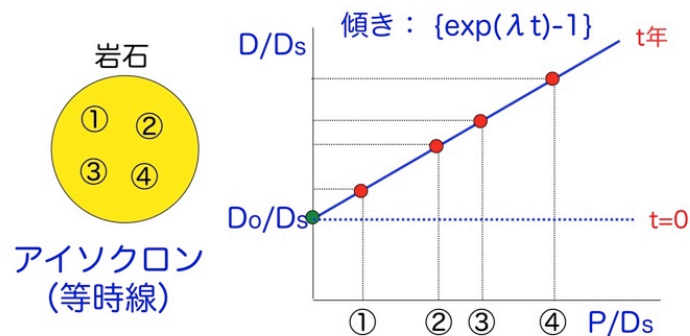
岩石・鉱物
形成時

現在
(t 年後)



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

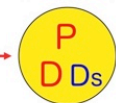
$$D/D_s = D_0/D_s + P/D_s \{ \exp(\lambda t) - 1 \}$$



◆放射年代測定

岩石・鉱物
形成時

現在
(t 年後)



・・・閉鎖系

ある温度以下: 閉鎖温度

同位体, 対象とする鉱物, 冷却速度, などで異なる

鉱物種	Rb-Sr法	K-Ar法
全岩	~700 °C	
普通角閃石	500-700 °C	
白雲母	500±50 °C	350±50 °C
黒雲母	300±50 °C	300±50 °C
長石類	~230 °C	
カリ長石	280-350 °C	110-180 °C

(兼岡, 1998)

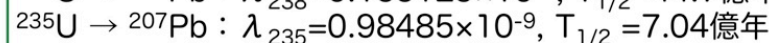
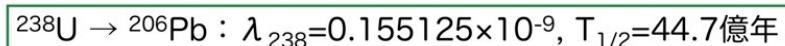
◆放射年代測定

U-Pb法: ジルコン ($ZrSiO_4$)

- ・風化, 変質に強い
- ・Uに富む
- ・形成時にPbをほとんど含まない
(現在のPbは放射性起源)



★ $D/D_s = D_0/D_s + P/D_s \{ \exp(\lambda t) - 1 \}$: $D_0/D_s = 0$ と見なせる



^{204}Pb : 安定同位体

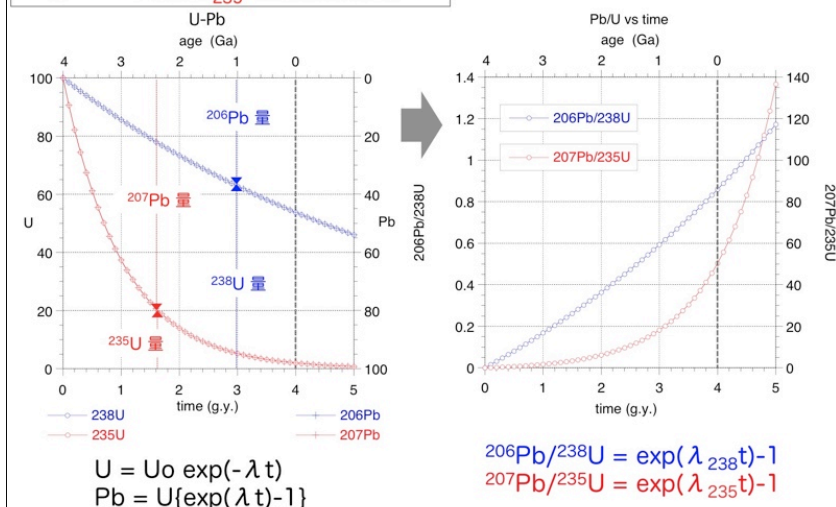
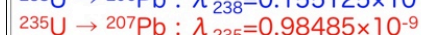
★ $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = (^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}) \{ \exp(\lambda_{238} t) - 1 \}$

★ $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = (^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb}) \{ \exp(\lambda_{235} t) - 1 \}$

★ $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = \exp(\lambda_{238} t) - 1$

★ $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} = \exp(\lambda_{235} t) - 1$

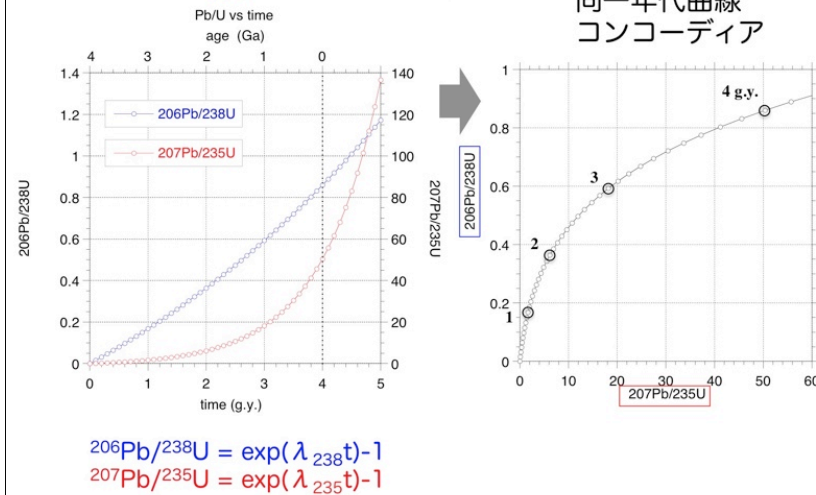
U-Pb法: ジルコン



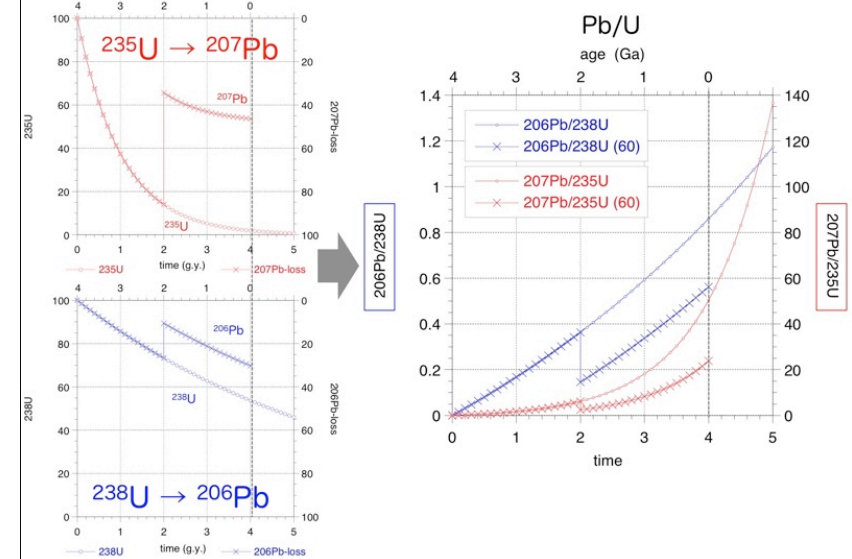
U-Pb法：ジルコン

$$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} : \lambda_{238} = 0.155125 \times 10^{-9}$$

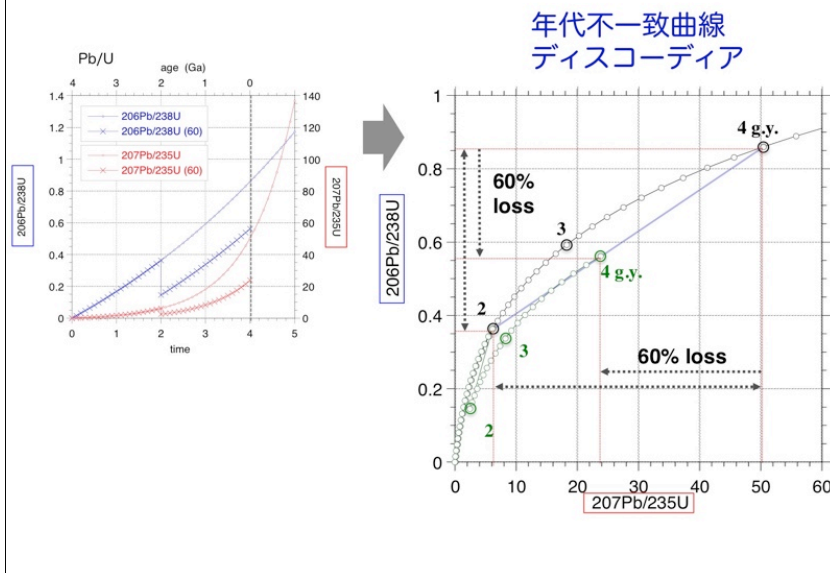
$$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb} : \lambda_{235} = 0.98485 \times 10^{-9}$$



ジルコン・・・40億年前に形成、20億年前に蓄積されていたPbの60%を消失



ジルコン・・・40億年前に形成、20億年前に蓄積されていたPbの60%を消失



U-Pb法：ジルコン

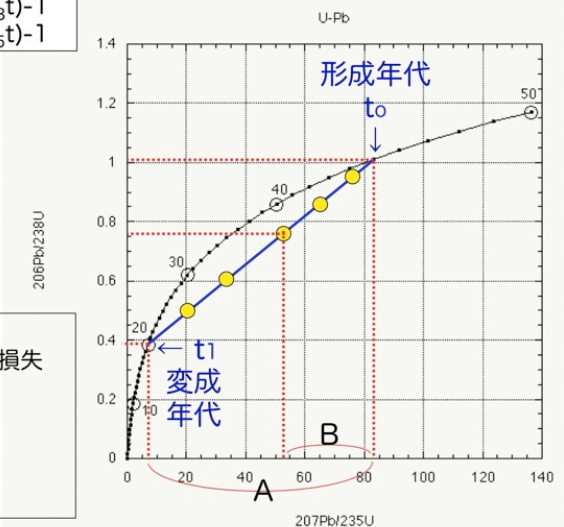
$$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = \exp(\lambda_{238}t) - 1$$

$$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} = \exp(\lambda_{235}t) - 1$$

同一年代曲線
コンコーディア

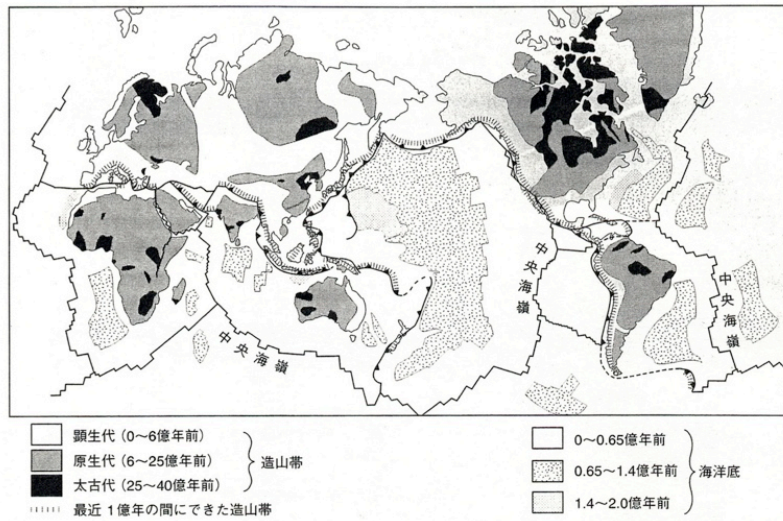
年代不一致曲線
ディスコディア

t_1 において、
($t_0 \sim t_1$)に貯まったPbを損失
全損： t_1 の点
B/Aを損失：黄色の点
→ t_1 = 変成年代
損失なし： t_0 の点
→ t_0 = 形成年代



世界の造山帯（地殻の年代分布）

(丸山, 1998)

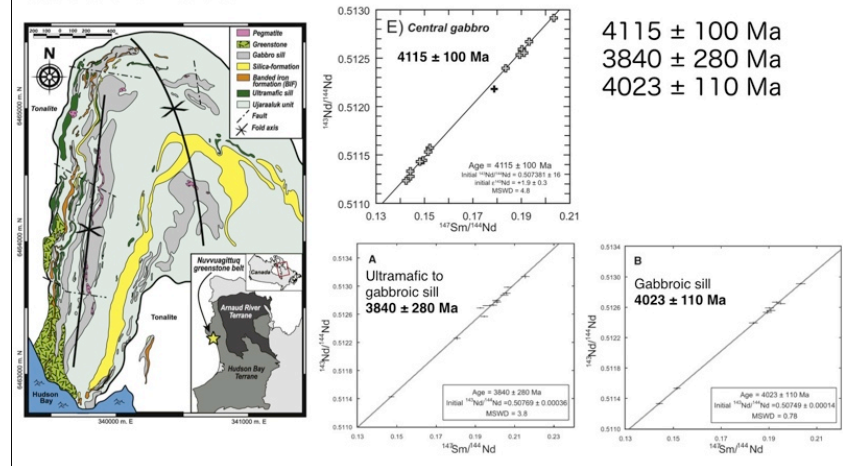


最古の岩石

O'Neil et al. (2008, 2012)

Nuvvuagittuq greenstone belt
(ヌヴァギック グリーンストーン帯)
[カナダ、ケベック]

^{147}Sm - ^{143}Nd アイソクロン年代
Ultramafic to gabbroic sills



最古の岩石

Bowring and Williams (1999)

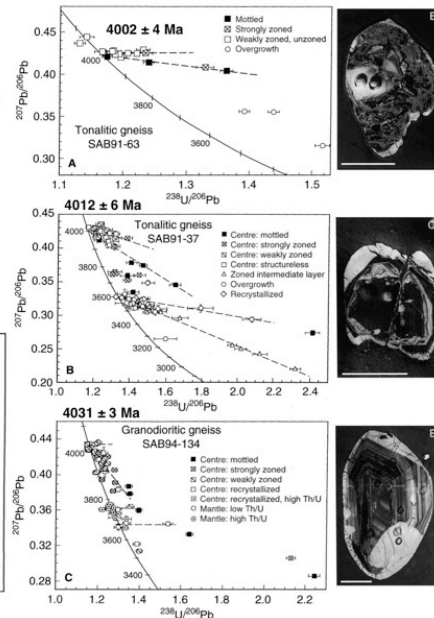
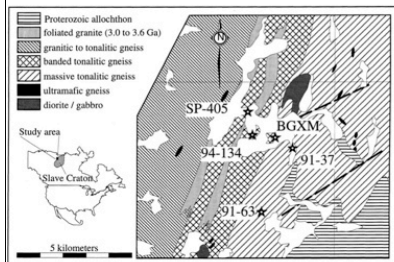
Acasta gneisses (アキャスタ片麻岩)
[カナダ、スレーブ区]

・トナール岩質片麻岩

ジルコン：中心部
4002 ± 4 Ma, 4012 ± 6 Ma

・石英閃緑岩質片麻岩

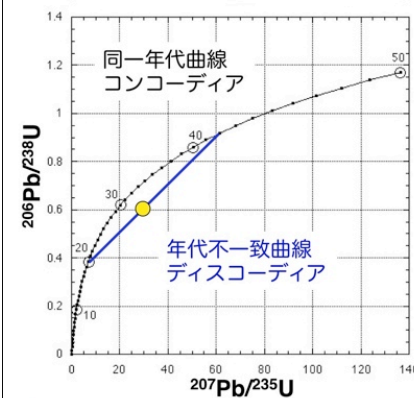
ジルコン：中心部
4031 ± 3 Ma



U-Pb法：ジルコン

$$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = \exp(\lambda_{238}t) - 1$$

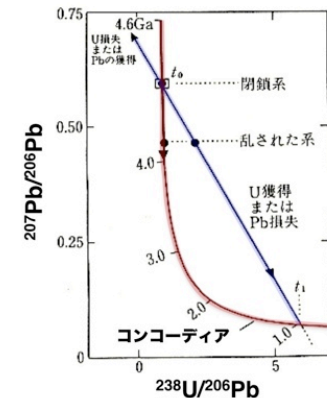
$$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} = \exp(\lambda_{235}t) - 1$$



$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 測定値
 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 測定値
 $^{238}\text{U}/^{235}\text{U} = 137.88$

$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$
 計算

Tera-Wasserburg コンコードシア図



$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 測定値
 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 測定値 (高精度)

[兼岡 (1998) 「年代測定概論」]

最古の鉱物

西オーストラリア Yilgarn (イルガルン) 地塊

・ Mt. Narryer (ナリア山)

珪岩中の碎屑性ジルコン:

4.1~4.2Ga (Froude et al., 1983)

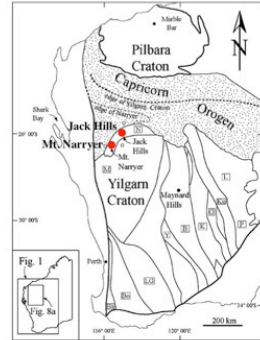
・ Jack Hill

礫岩・砂岩中の碎屑性ジルコン:

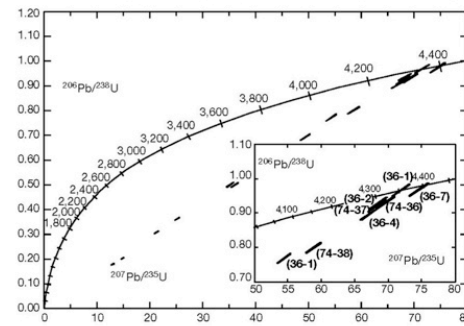
4276 ± 6Ma (Compston & Pidgeon, 1986)

4404 ± 8Ma (Wilde et al., 2001)

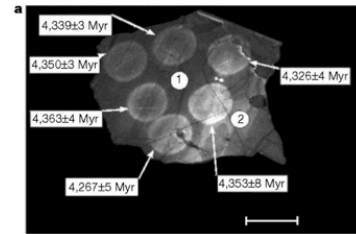
4374 ± 6Ma (Valley et al., 2014)



(Cavosie et al., 2004, Precam. Res.)



(Wilde et al., 2001, Nature)



最古の鉱物

西オーストラリア Yilgarn (イルガルン) 地塊

・ Mt. Narryer (ナリア山)

珪岩中の碎屑性ジルコン:

4.1~4.2Ga (Froude et al., 1983)

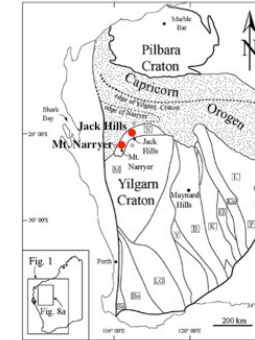
・ Jack Hill

礫岩・砂岩中の碎屑性ジルコン:

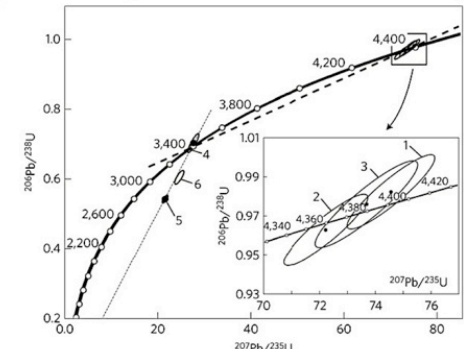
4276 ± 6Ma (Compston & Pidgeon, 1986)

4404 ± 8Ma (Wilde et al., 2001)

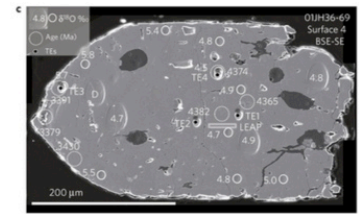
4374 ± 6Ma (Valley et al., 2014)



(Cavosie et al., 2004, Precam. Res.)

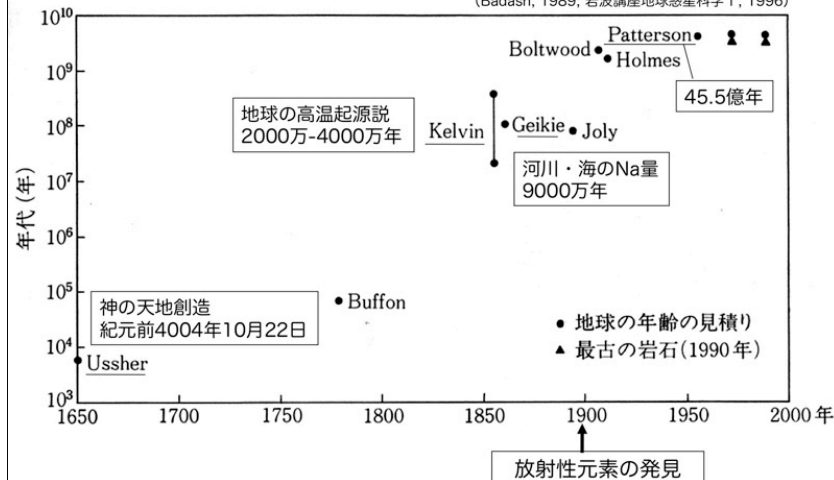


(Valley et al., 2014, Nature geoscience)



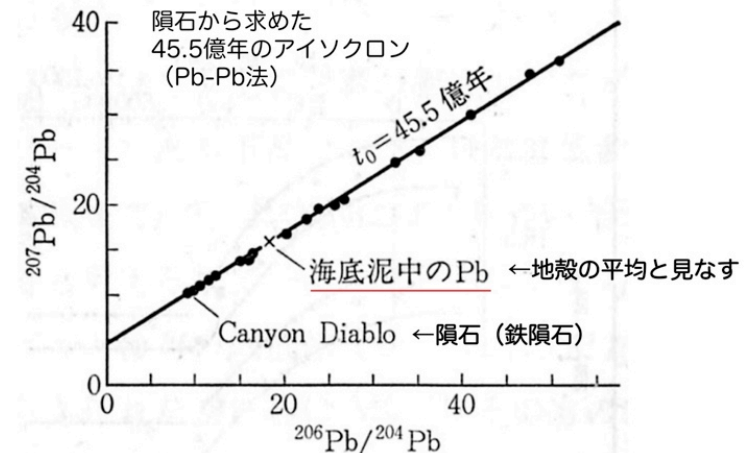
地球の年齢の見積

(Badash, 1989; 岩波講座地球惑星科学1, 1996)



地球の年齢の推定

Patterson (1956)



Pb-Pb法

$$D/D_s = D_0/D_s + [P/D_s]\{ \exp(\lambda t) - 1 \}$$

$$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = [^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_0 + [^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb}]\{ \exp(\lambda_{^{235}\text{U}} t) - 1 \}$$

$$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = [^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_0 + [^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}]\{ \exp(\lambda_{^{238}\text{U}} t) - 1 \}$$

年代 $t=0$ でのPb同位体比

$$\frac{^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - [^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_0}{^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - [^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}]_0} = \frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}} \cdot \frac{\{ \exp(\lambda_{^{235}\text{U}} t) - 1 \}}{\{ \exp(\lambda_{^{238}\text{U}} t) - 1 \}}$$

現在値：1/137.88

右辺は、同じ年代の試料では一定。

それら試料が年代 $t=0$ で同じPb同位体比を持つとすれば、

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ と $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ との関係は直線となる。

試料へのU、Pbの出入りがあっても、Pb同位体比の変化が無ければ、年代には影響を与えない。二次的な影響を受けにくい。

Pb同位体比の測定のみで良い。

隕石

- 石質隕石：ケイ酸塩鉱物主体

◆コンドライト [未分化]

コンドリュール（ケイ酸塩鉱物の集合体からなる小球、0.5~2mm）、
難揮発性包合物（Ca, Al, Tiなど難揮発性元素に富む塊、<1cm）、
鉄硫化物、Fe-Ni
マトリックス（ケイ酸塩鉱物）

- 炭素質 [C]（揮発性成分-H, C, -に富む、酸化鉄）
C1, C2, C3, C4（または、CI, CM, CV, CO, CR）
C1：揮発性成分に最も富む・始源的
- 普通 [O]・LL, L, H
- エンスタタイト [E]（金属鉄、硫化鉄-還元状態）

◆エコンドライト [分化]

- 石鉄隕石：ケイ酸塩鉱物+Fe-Ni・・・ほぼ等量 [分化]

- 鉄隕石：Fe-Ni合金 [分化]

[分化]：小天体として集積後、火成作用（融解）により元素分別を起こした。

隕石の年代

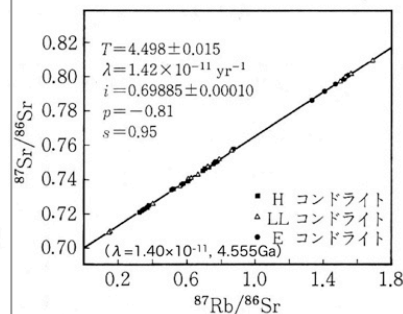
コンドライトのRb-Sr年代

種類 サンプル数 年代 (Ga)

普通コンドライト

H	13	4.59 ± 0.14
	8	4.52 ± 0.05
L	5	4.39 ± 0.14
LL	11	4.46 ± 0.06
	10	4.493 ± 0.028
エンスタタイト	8	4.44 ± 0.08
コンドライト	4	4.51 ± 0.04

(Torigoe, 1988)



(Minster et al., 1982; 岩波講座地球惑星科学12, 1997)

隕石の年代

Allende隕石(C1) Pb-Pb年代

難揮発性包合物 4.559 ± 0.004 Ga

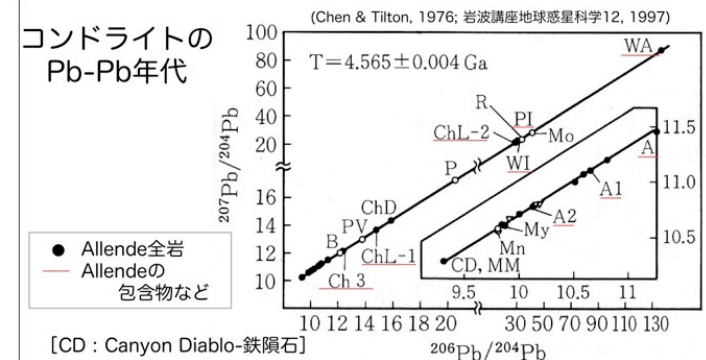
(Chen & Wasserburg, 1981)

マトリックス $4.481\text{--}4.459$ Ga

(Tatsumoto et al., 1976; Chen & Wasserburg, 1981)

4.502 ± 0.030 Ga (Arden & Cressley, 1984)

コンドライトのPb-Pb年代

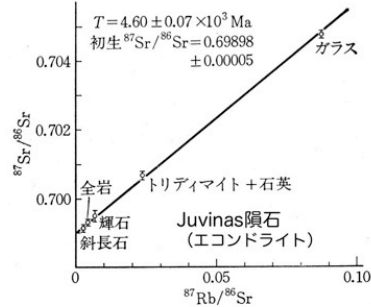


隕石の年代

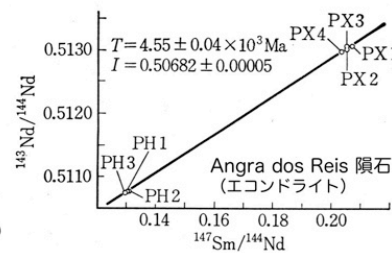
エコンドライト

隕石	Rb-Sr	Pb-Pb	Sm-Nd	Ar-Ar
Juvinus	4.50 ± 0.07	4.539 ± 0.004	4.56 ± 0.08	—
Bereba	4.08 ± 0.25	—	—	—
Pasamonte	disturbed	4.53 ± 0.03	4.58 ± 0.12	4.4
Moama	disturbed	disturbed	4.58 ± 0.05	—
Yamato	4.46 ± 0.06	—	4.52 ± 0.16	—
Petersburg	—	—	—	4.40 ± 0.03
Angra dos Reis	—	4.544 ± 0.002	4.56 ± 0.03	—

(Torigoe, 1988; 岩波講座地球惑星科学12, 1997)



(Allegre et al., 1975; 岩波講座地球科学 6, 1978)

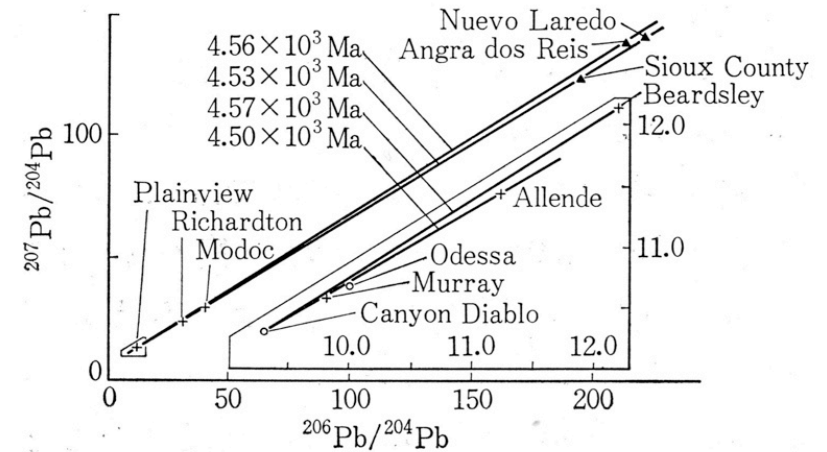


(Lugmair & Marti, 1977; 岩波講座地球科学 6, 1978)

隕石の年代

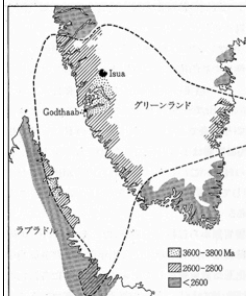
隕石のPb同位体比・Pb-Pb年代

+ : コンドライト
▲ : エコンドライト
○ : 鉄隕石

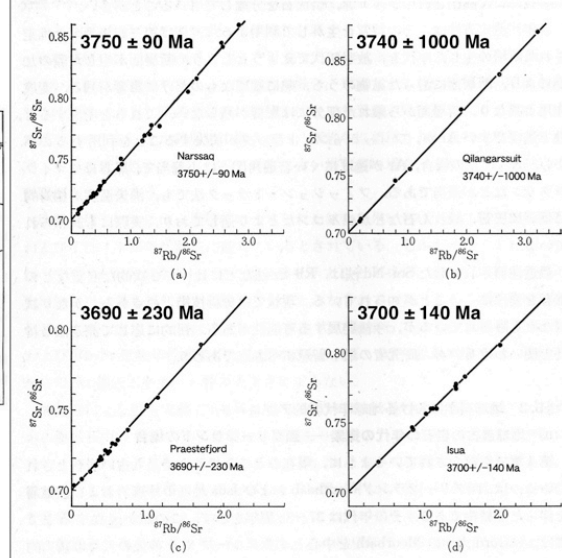


(Tatsumoto et al., 1973; 岩波講座地球科学 6, 1978)

◆ 西グリーンランド ゴットホープ地域 イスア地域 アミツォク片麻岩



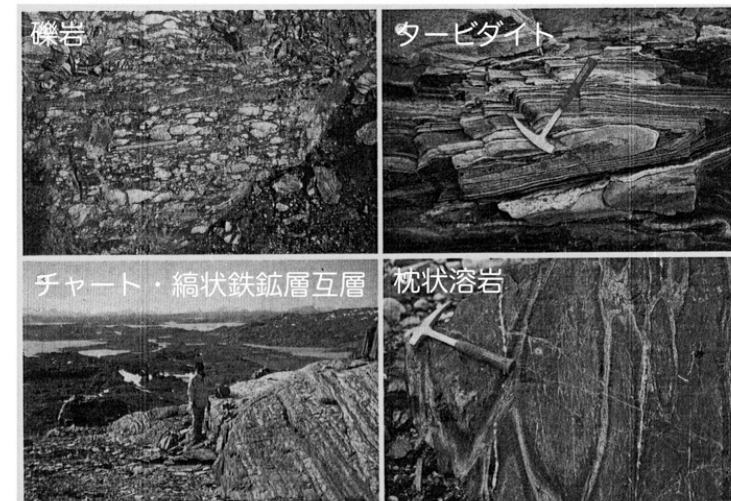
Rb-Sr法 全岩アイソクロン年代



(Moorbath et al., 1972; 岩波講座地球科学 6, 1978)

◆ 西グリーンランド：イスア地域・最古の付加体（38億年前）

(丸山・磯崎, 1992)



海洋（水）の存在，プレートテクトニクスの駆動