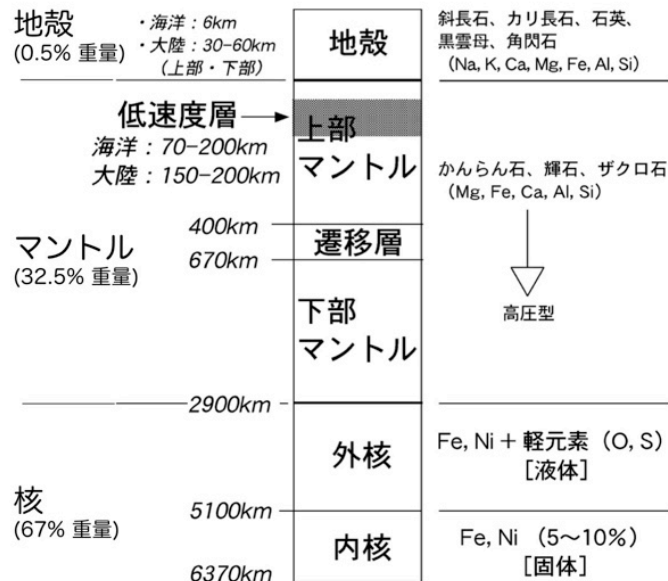


サブシステム：固体地球圏「岩圏」

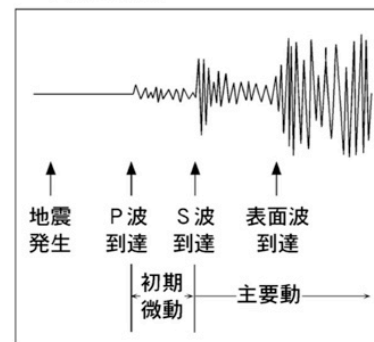
層構造



構成物

地球の層構造： 地球の内部を探る・地震波解析

地震波



P波：縦波 進行方向と同じ向きに振動



S波：横波 進行方向に直交する面内で振動



表面波



表面波は減衰が少ない
ので、遠くの地震では
大きく観測される

地表付近 P波：5~6 km/s S波：3~4 km/s
初期微動継続時間 = (震源までの距離) × (1/Vs - 1/Vp)
震源までの距離 = (初期微動継続時間) × (Vp · Vs) / (Vp - Vs)

地震波

P波

$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4\mu/3}{\rho}}$$

ρ : 密度

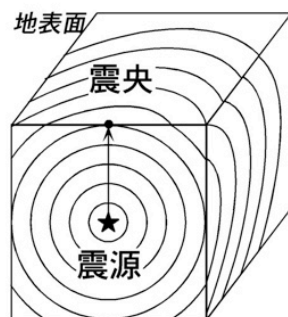
K : 断熱非圧縮率・・・圧力により縮む度合

μ : 剛性率・・・一定の横ずれ変形を起こすために必要な応力

[液体： $\mu = 0 \rightarrow V_s = 0$]

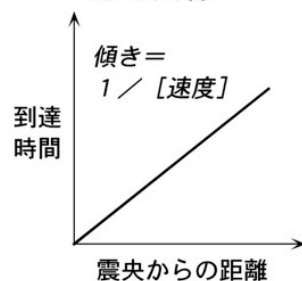
S波

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$



地震波が
最初に発生
した地点

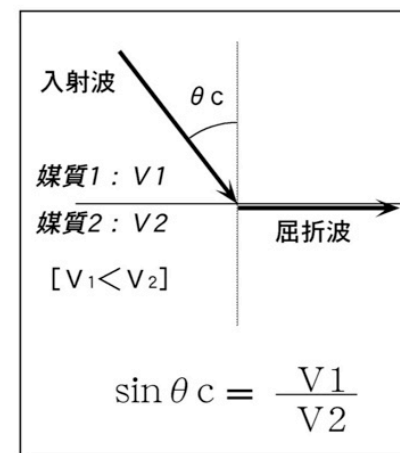
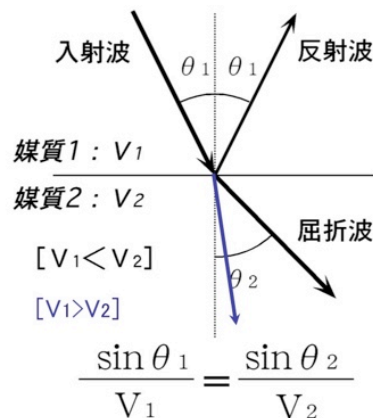
走時曲線



地震波の伝わり方

[2層構造]

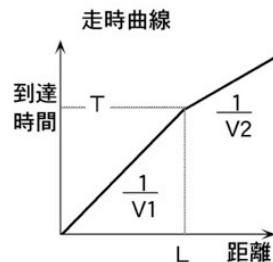
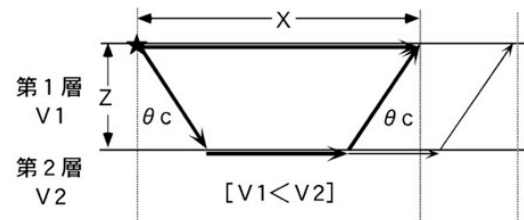
スネルの法則



地震波の伝わり方：2層構造、 $V_1 < V_2$ の場合

2層構造

●第1層のみ： $T_1 = \frac{X}{V_1}$



●第1層-第2層-第1層： T_2

$$T_2 = 2 \cdot \frac{Z}{\cos \theta_c} \cdot \frac{1}{V_1} + \frac{X - 2Z \tan \theta_c}{V_2}$$

$$= \frac{X}{V_2} + \frac{2Z \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 V_2}$$

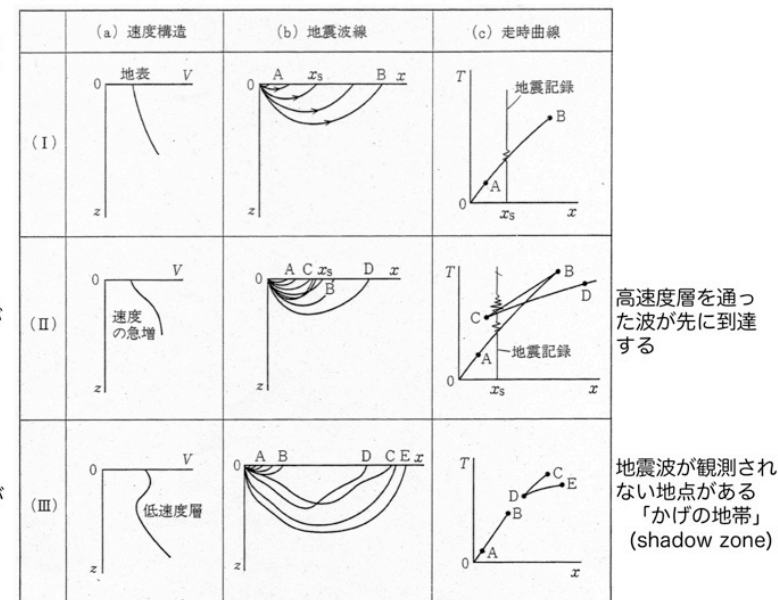
$$Z = \frac{L}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

$X = L$ の地点で、 $T_1 = T_2$ となる。

地震波

高速度層がある場合

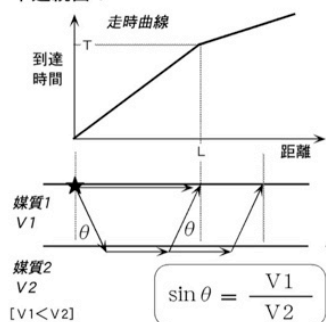
低速度層がある場合



(岩波講座地球惑星科学1, 1996)

地震波解析—地球の層構造

不連続面1

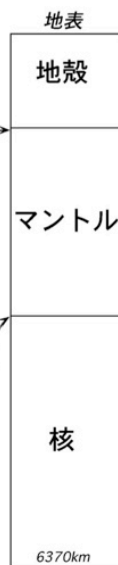
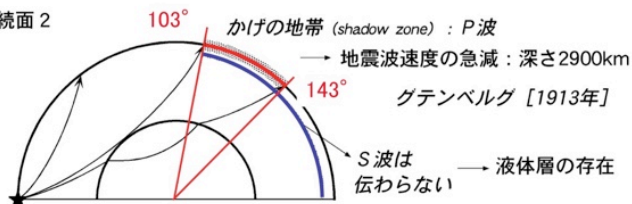


不連続面の深さ
大陸：30~60km付近
海洋：約6km

モホロビチッチ
不連続面 (モホ面)
[1909年]

$$\sin \theta = \frac{V_1}{V_2}$$

不連続面2



地震波速度構造—地球の層構造

(岩波講座地球惑星科学1, 1996)

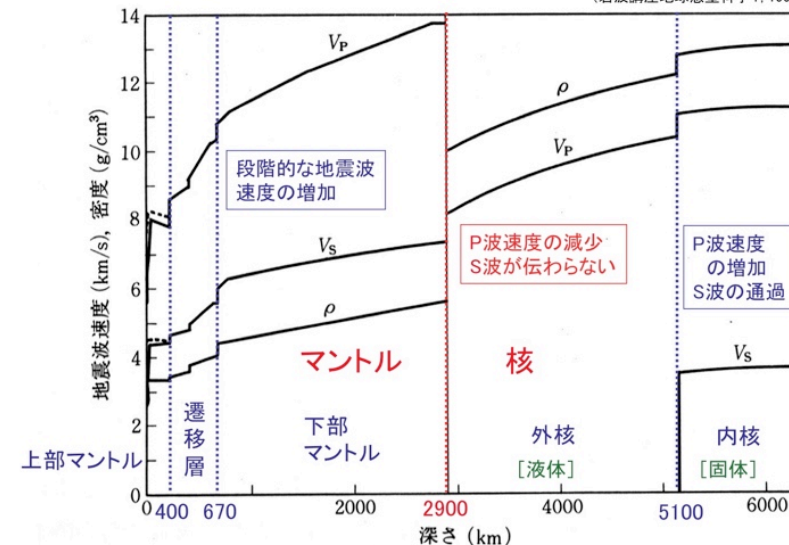
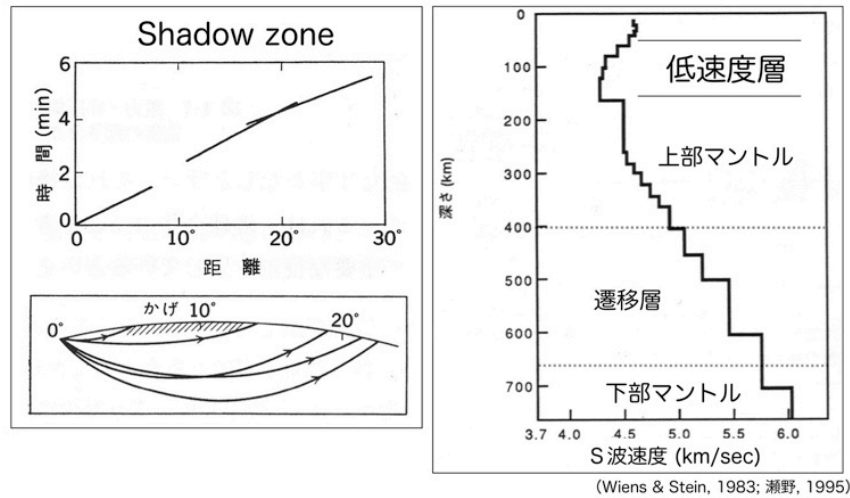
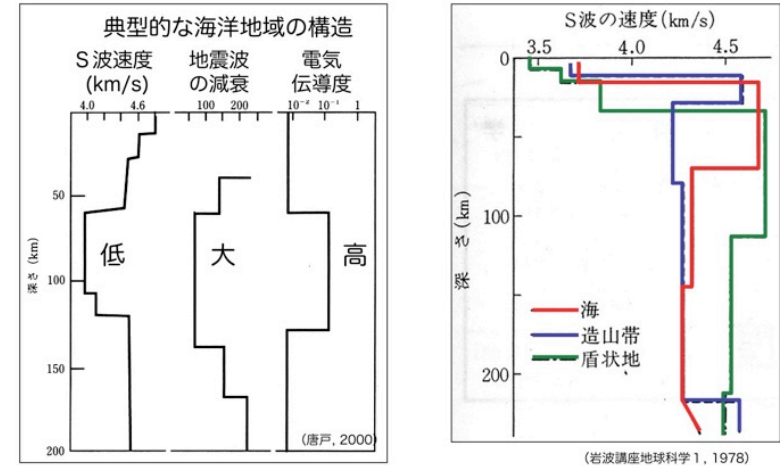


図 2.20 最近の標準モデルである PREM による、地球内部における地震波速度 (V_P , V_S), および密度分布 (ρ) (Dziewonski and Anderson, 1981).

上部マントル内の低速度層



上部マントル内の低速度層

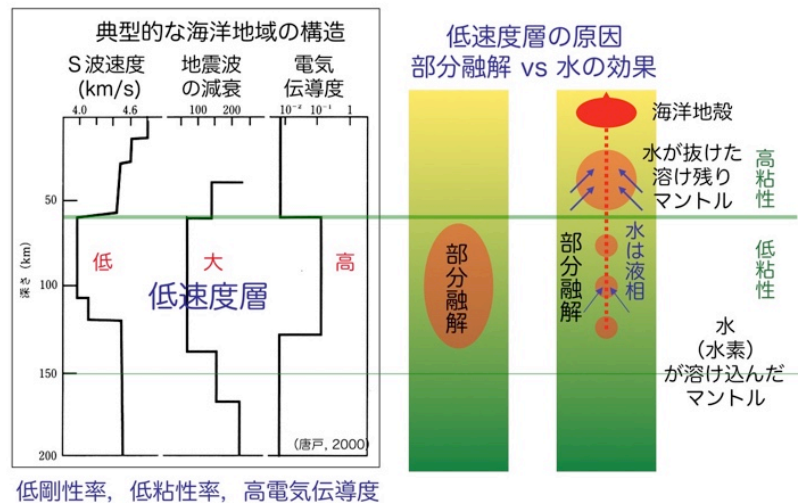


低剛性率, 低粘性率, 高電気伝導度

海洋: 平均70 km (明瞭) ~200 km
大陸: 150~200 km, 不明瞭

低速度層の原因・部分融解 (0.1~数%) vs 水の効果 (唐戸, 2000;ほか)

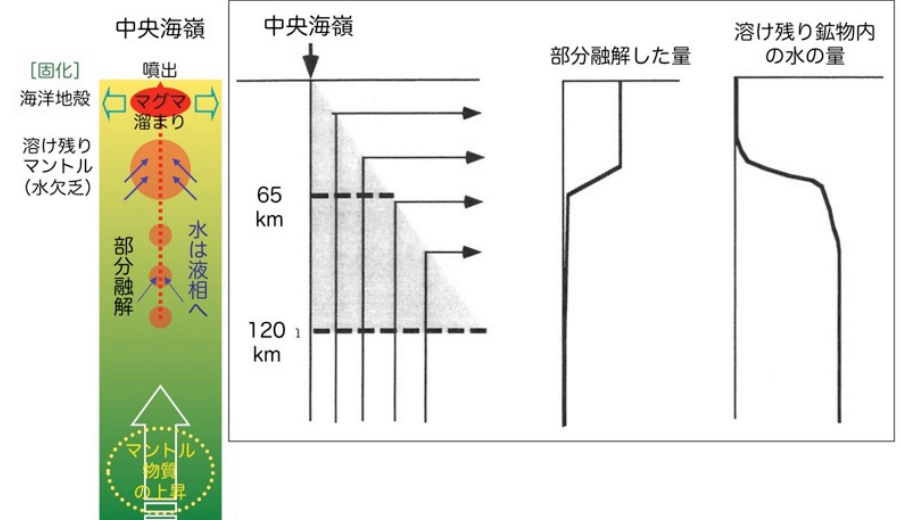
低速度層



低剛性率, 低粘性率, 高電気伝導度

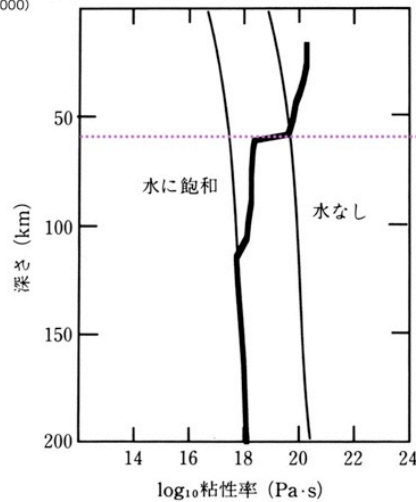
低速度層：水の効果

中央海嶺での部分融解と水の再分配 (唐戸, 2000)

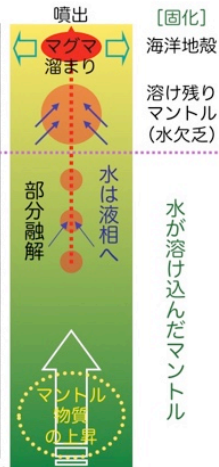


低速度層：水の効果

海洋地域のマントルの粘性率分布 (唐戸, 2000)



中央海嶺

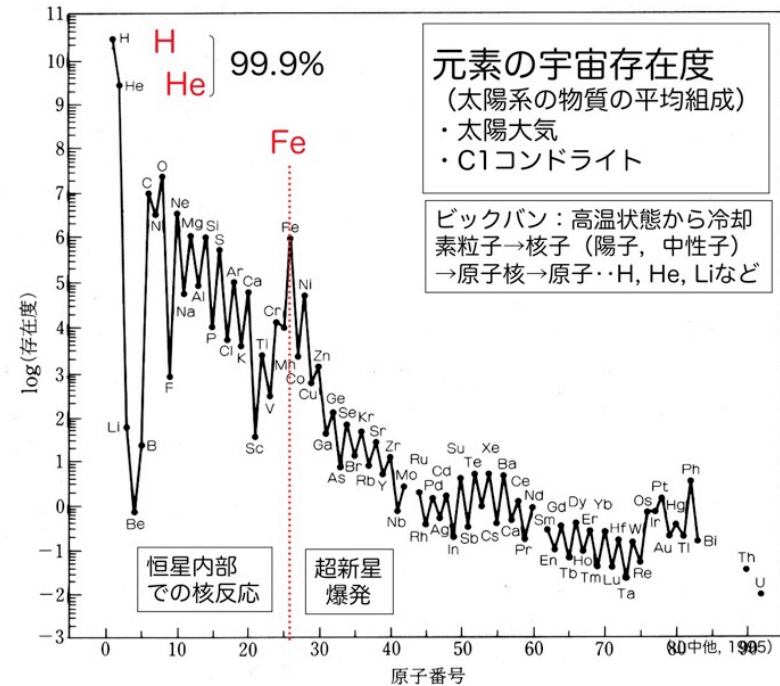


高粘性
[明瞭な境界]

低粘性

水(水素)
“不純物”
↓
鉱物の格子欠陥
の濃度の増加
↓
粘性流動の促進
地震波の減衰
低い地震波速度

水素の存在：
電気伝導度の上昇



元素の宇宙存在度
(太陽系の物質の平均組成)
・太陽大気
・C1コンドライト

ビックバン：高温状態から冷却
素粒子→核子(陽子, 中性子)
→原子核→原子・H, He, Liなど

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),
難揮発性包含物 (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)

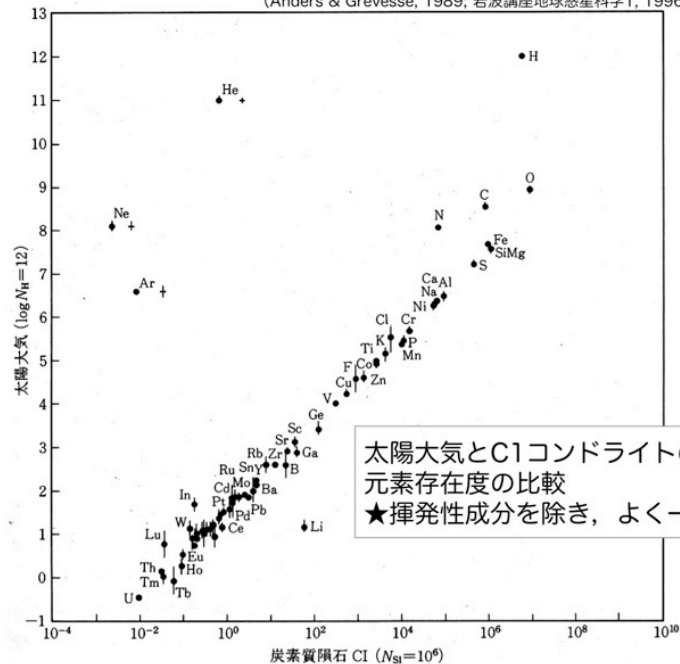
◆エコンドライト [分化]

・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。

(Anders & Grevesse, 1989; 岩波講座地球惑星科学1, 1996)



太陽大気とC1コンドライトの
元素存在度の比較
★揮発性成分を除き、よく一致する

◆無色鉱物・フェルシック鉱物

長石 カリ長石 KAlSi_3O_8

斜長石 $(\text{Na,Ca})\text{AlSi}_3\text{O}_8$

◆有色鉱物・マフィック鉱物

雲母 黑雲母 $(\text{K, Na, Ca})_2(\text{Al, Mg, Fe})_{4-6}(\text{Si}_8\text{O}_{20})(\text{OH})_4$

白雲母 $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$

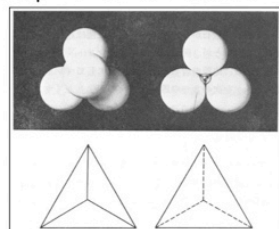
角閃石 $(\text{Ca}, \text{Na})_{2-3}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_5(\text{SiAl})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

輝石 斜方輝石 $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$

單斜輝石 $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$

カンラン石 $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$

ザクロ石 $(\text{Mg,Fe,Ca})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$



◆無色鉱物

石英··4角共有，立体構造

($\rho = 2.6 \text{ g/cm}^3$)

長石・・4角共有，立体構造

($\rho = 2.6$)

◆有色鉱物

雲母…3角共有，層狀構造

($\rho = 2.8 \sim 3.4$)

角閃石・・ 2角共有, 2重鎖状構造

($\rho = 2.9 \sim 3.5$)

輝石·2角共有、鎖狀構造

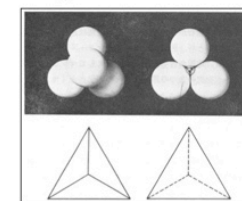
($\rho = 3.2 \sim 3.9$)

カンラン石…共有なし

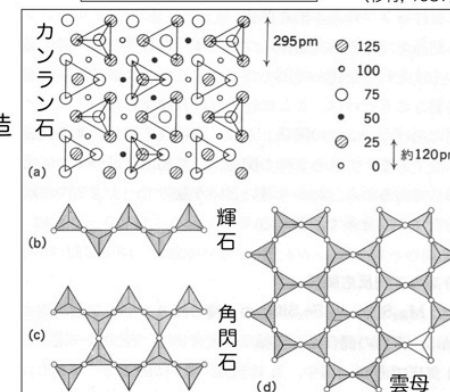
($\rho = 3.3 \sim 3.4$)

ザクロ石・共有なし

($\rho = 3.3 \sim 4.3$)



(杉村, 1987)



[塩基性岩]
玄武岩

[中性岩]
安山岩

[酸性岩]
流紋岩

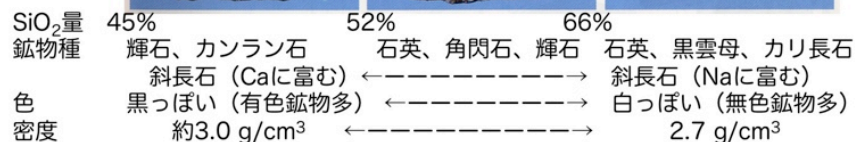
火山岩

はんれい岩

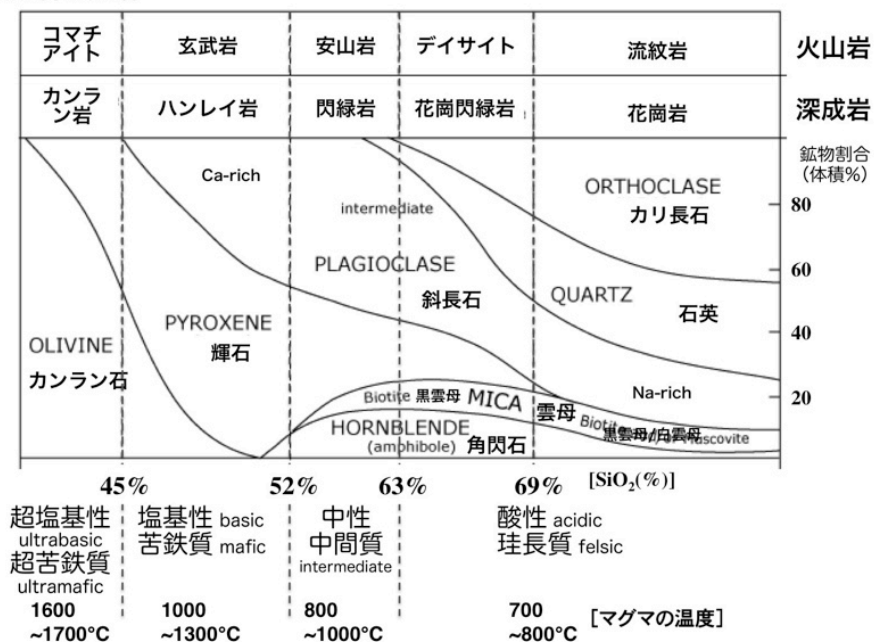
閃綠岩

花岗岩

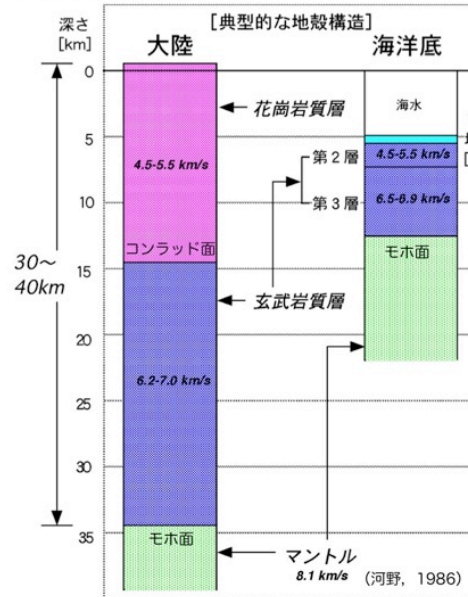
深成岩



火成岩の分類



地殻の構造



地殻

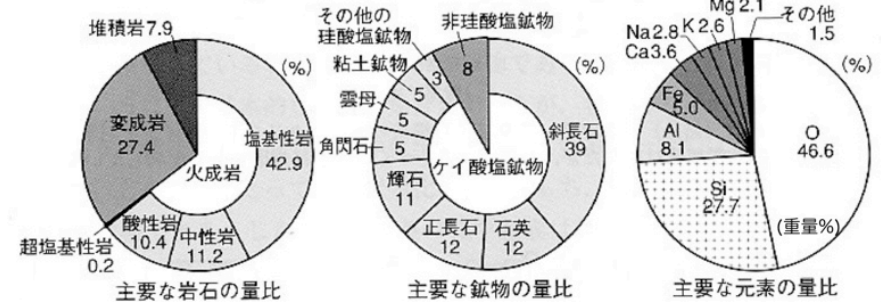
- ◆大陸地殻
 - 上部：花崗岩質
 - 下部：玄武岩質
- ◆海洋地殻
 - 玄武岩質

密度：

花崗岩質 < 玄武岩質
→ 大陸地殻 < 海洋地殻

大陸地殻：約2.7 g/cm³
海洋地殻：約3.0 g/cm³
マントル：約3.2 g/cm³

地殻を構成する岩石・鉱物・元素



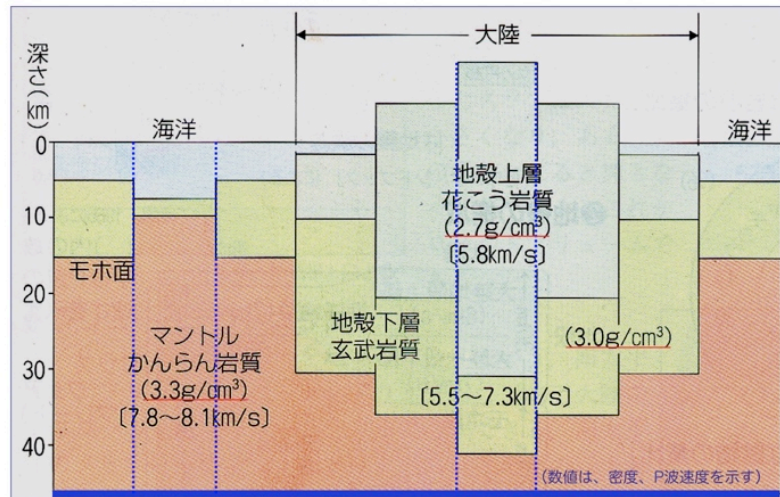
- ・火成岩：65%
マグマの冷却・固化
- ・堆積岩：8%
堆積物の集積・石化〔続成作用〕
- ・変成岩：27%
高温・高圧下での
鉱物・化学組成の変化
(融解は伴わない)〔變成作用〕

(酒井, 地球学入門, 2003)

- ・火成岩
塩基性岩：玄武岩質・43%
中性岩：安山岩質・11%
酸性岩：花崗岩質・10%

- ・鉱物：長石類で5割
- ・元素：酸素・ケイ素が主
・重量% 74%, 体積% 95%
* 石英の成分 (SiO₂) が主

アイソスタシー

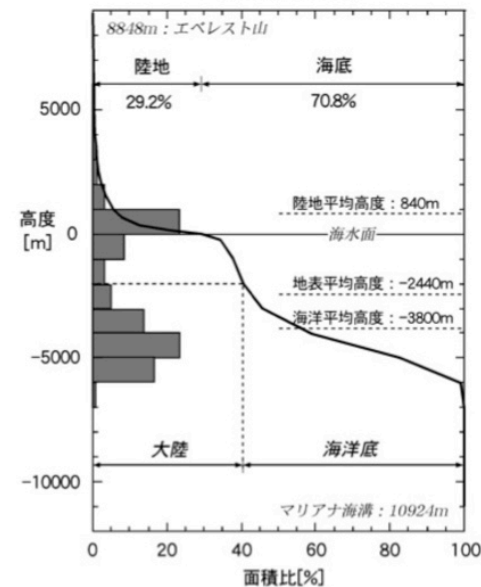


静水圧平衡 (補償面)

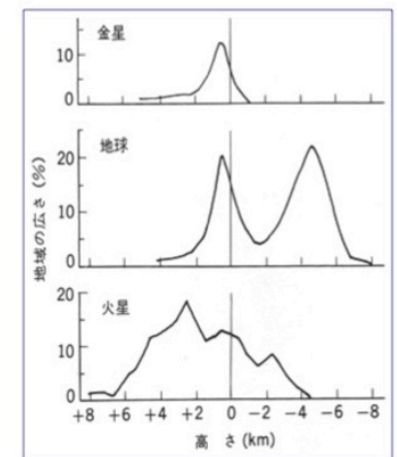
海水+海洋地殻+マントル=大陸地殻上部+大陸地殻下部+マントル

(浜島書店、最新図表地学)

地表の高度分布



地球表面の高度分布：双峰性



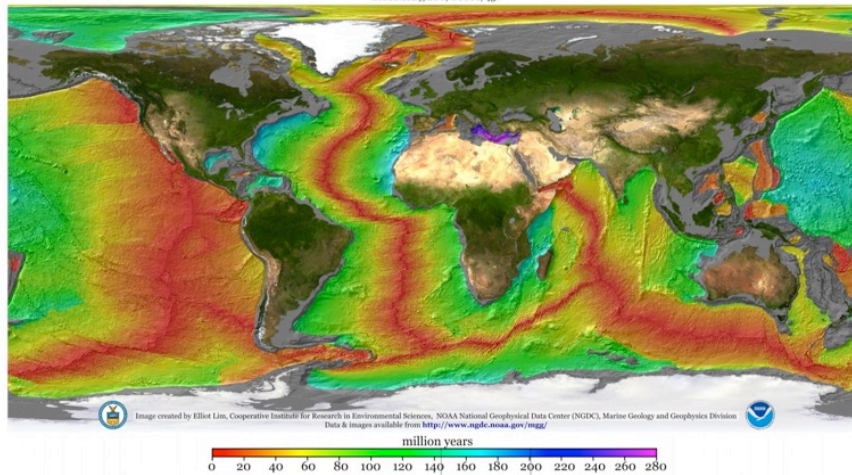
(杉村, 1987)

海洋地殻の年代 (単位: 百万年前)

Age of Oceanic Lithosphere (m.y.)

(Muller et al., 2008)

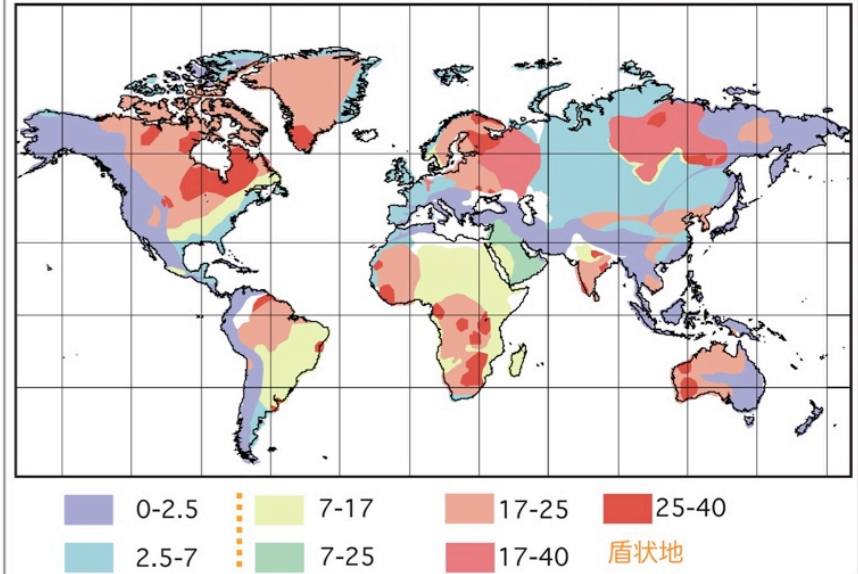
Data source:
Muller, R.D., M. Sdrolias, C. Gaina, and W.R. Roest 2008. Age, spreading rates and spreading symmetry of the world's ocean crust. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, Q04006, doi:10.1029/2007GC001743.



…2億年より若い, 数億年で更新

大陸地殻の年代 (単位: 億年前)

(岩波講座地球惑星科学 8, 1997)



地球の層構造

・海洋: 6km ・大陸: 30-60km (上部・下部)	地殻	斜長石、カリ長石、石英、 黒雲母、角閃石 (Na, K, Ca, Mg, Fe, Al, Si)
低速度層 海洋: 70-200km 大陸: 150-200km	上部マントル	かんらん石、輝石、ザクロ石 (Mg, Fe, Ca, Al, Si)
400km 670km	遷移層	↓ 高压型
	下部マントル	
2900km	外核	Fe, Ni + 軽元素 (O, S) [液体]
5100km 6370km	内核	Fe, Ni (5~10%) [固体]

マントル

超塩基性岩・カンラン岩

カンラン石
輝石
ザクロ石
…Mg, Fe, Ca, Al, Si
SiO₂量…<45%
密度…3.2 g/cm³<
(上部マントル)

上部マントル物質

●オフィオライト
海洋地殻と最上部マントルが大陸に付加し、現在露出している
●捕獲岩
上部マントル起源のマグマに取り込まれて、地表までもたらされた岩石 (火道壁構成)

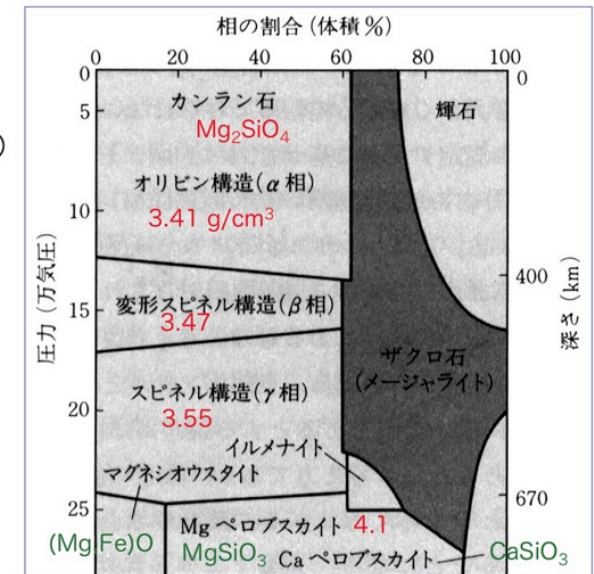
マントル構成鉱物相

◆上部マントル
パイロライト
カンラン石 (6割)
+輝石・ザクロ石 (4割)

高压型へ相転移
コンパクトな結晶構造
密度の増加

カンラン石: Mg₂SiO₄
α相: 3.41 g/cm³
β相: 3.47 g/cm³
γ相: 3.55 g/cm³
ペロブスカイト:
MgSiO₃: 4.1 g/cm³

◆下部マントル
ペロブスカイト
(Mg, Fe)SiO₃, CaSiO₃
酸化物 (Mg, Fe)O



(岩波講座地球惑星科学 1, 1996)

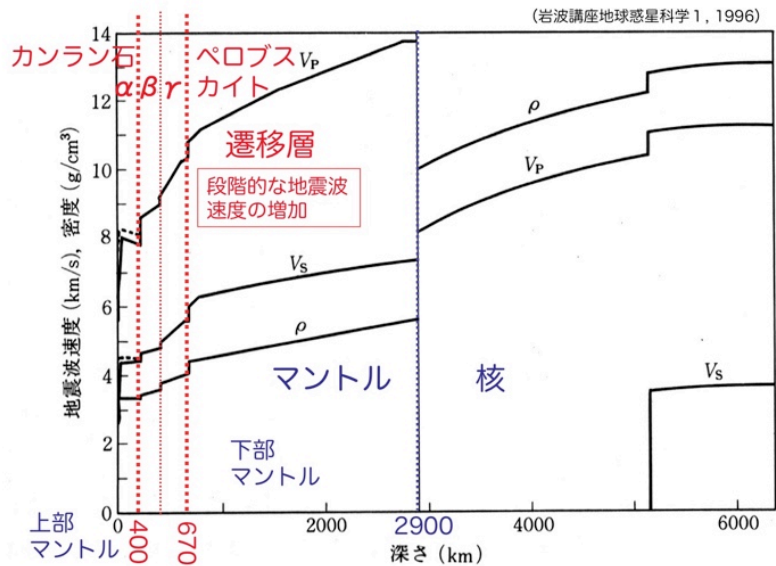


図 2.20 最近の標準モデルである PREM による、地球内部における地震波速度 (V_p , V_s), および密度分布 (ρ) (Dziewonski and Anderson, 1981).

地球の層構造

・海洋: 6km ・大陸: 30-60km (上部・下部)	地殻	斜長石、カリ長石、石英、 黒雲母、角閃石 (Na, K, Ca, Mg, Fe, Al, Si)
低速度層 海洋: 70-200km 大陸: 150-200km	上部 マントル	かんらん石、輝石、ザクロ石 (Mg, Fe, Ca, Al, Si)
400km 670km	遷移層	↓ 高压型
	下部 マントル	
—2900km—	外核	Fe, Ni + 軽元素 (O, S) [液体]
5100km	内核	Fe, Ni (5~10%) [固体]
6370km		

核

主成分: Fe, Ni

- ・地球の密度: 5.515 g/cm^3
深部に高密度物質の存在
・ Fe: 7.8 g/cm^3
- ・太陽系の原子存在度
Mg, Si, Fe, Al, Ca, Na, Ni
(揮発性成分以外)
- ・隕鉄: Fe-Ni合金

◆外核: 液体

Fe, Ni + 軽元素
(O, S, H, C, Si, ...)
対流 → 地球磁場の発生

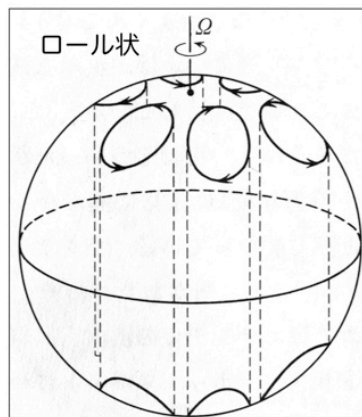
◆内核: 固体

Fe, Ni (5~10%)
融解した外核物質の
冷却・固化・沈積

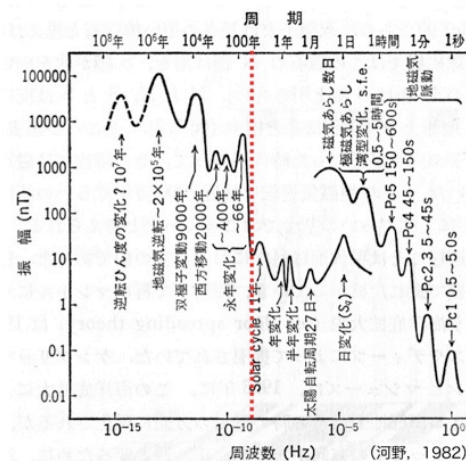
↓
内核の成長

外核の対流 → 地球磁場の発生, 変動

- ・熱対流 + 組成対流
- ・自転の効果



(岩波講座地球惑星科学2, 1996)

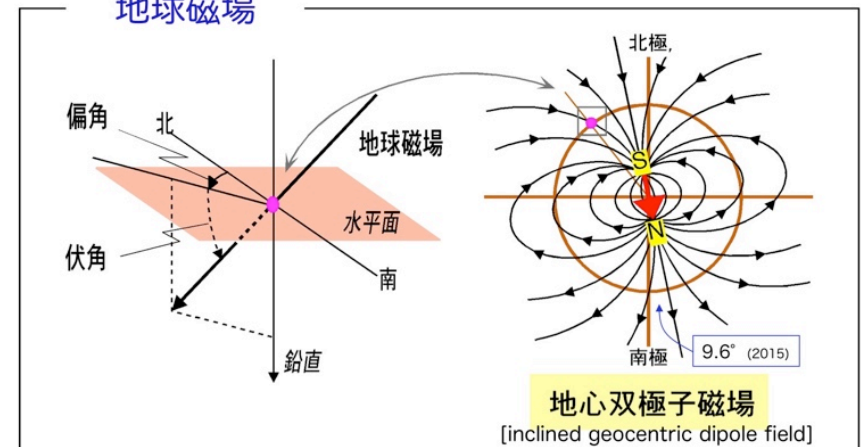


地球磁場の変動

◆地球内部の要因

- 永年変化: ~数千年周期
- 極性の逆転: ~数10万年周期

地球磁場



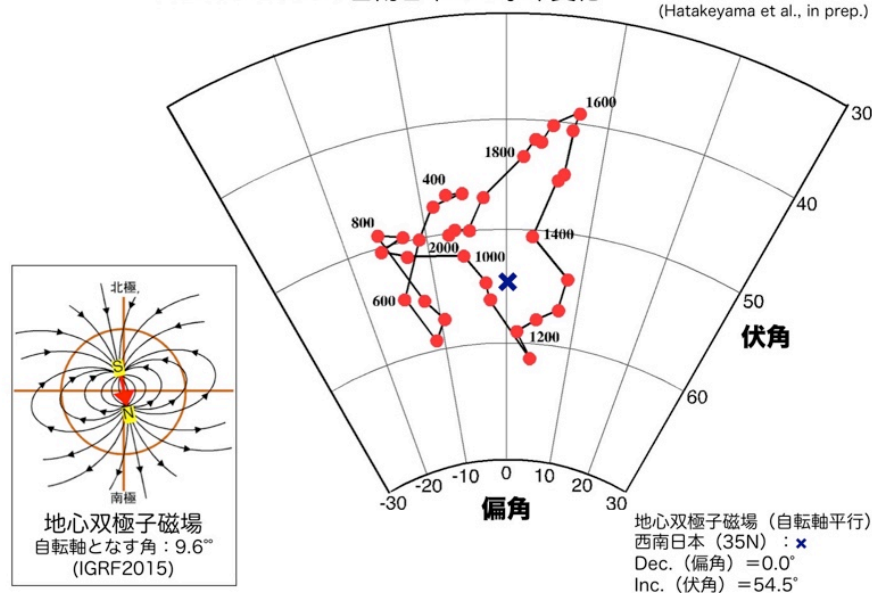
地心双極子磁場: 自転軸となす角: 9.6°
(IGRF2015)

現在の地球磁場分布の約80%の分布を表す
(残り: 非双極子磁場)

地球磁場の変動：永年変化・方向

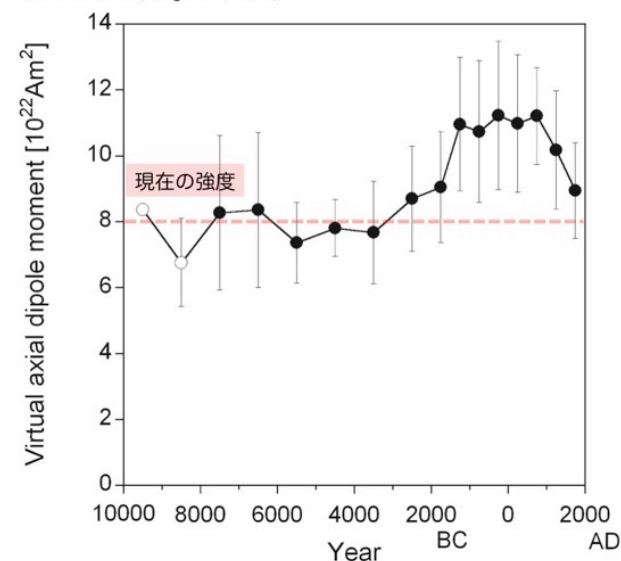
AD400-2000の西南日本での永年変化

JRFM2K.1
(Hatakeyama et al., in prep.)



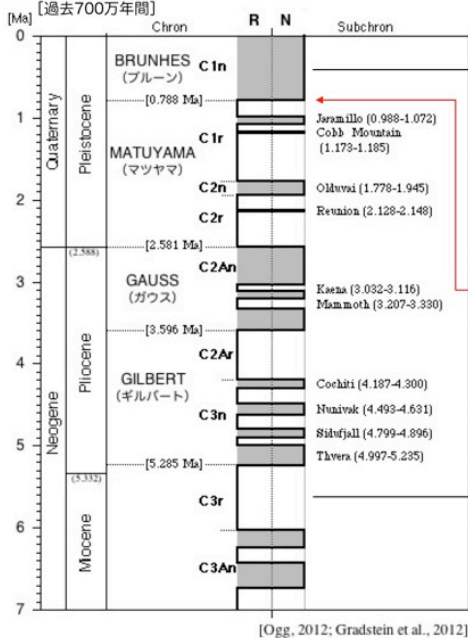
地球磁場の変動：永年変化・強度

過去1万年間の地球磁場強度の変動 (地心磁気双極子の磁気モーメント)
BC10,000~AD2000 (Yang et al., 2000)



地球磁場の変動：地球磁場の極性の反転

[過去700万年間]



Brunhes (1906): 逆帯磁岩石の発見
松山(1929): 年代による地球磁場の極性変化

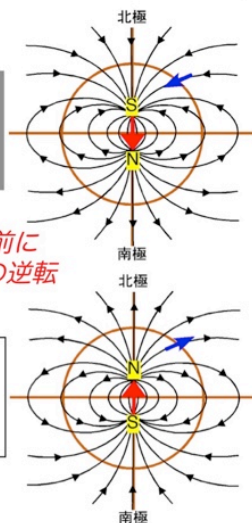
正磁極期

磁石のN極は北を向く

78.8万年前に
地球磁場の逆転

逆磁極期

磁石のN極は南を向く



地球磁場の変動：地球磁場の極性の反転

現在~8000万年前

