

地球科学概論

地球内部構造

どういう根拠でどこまで分かっているか

地球物質科学研究センター

桂 智男

地球の中はどんなになっているのか？

- どのような物質で構成されているのか？
- その化学組成は？
- 温度分布？
- どのような動きをしているのか？
- 地球内部に直接入って調べることはできない
 - 地球の半径6371 km、
 - ボーリング可能な深さ~10km
- 何らかの間接的な手法を組み合わせ推定

地球内部構造の推定

地球の材料物質の推定
(星間物質、太陽大気)

浅部の岩石の記載

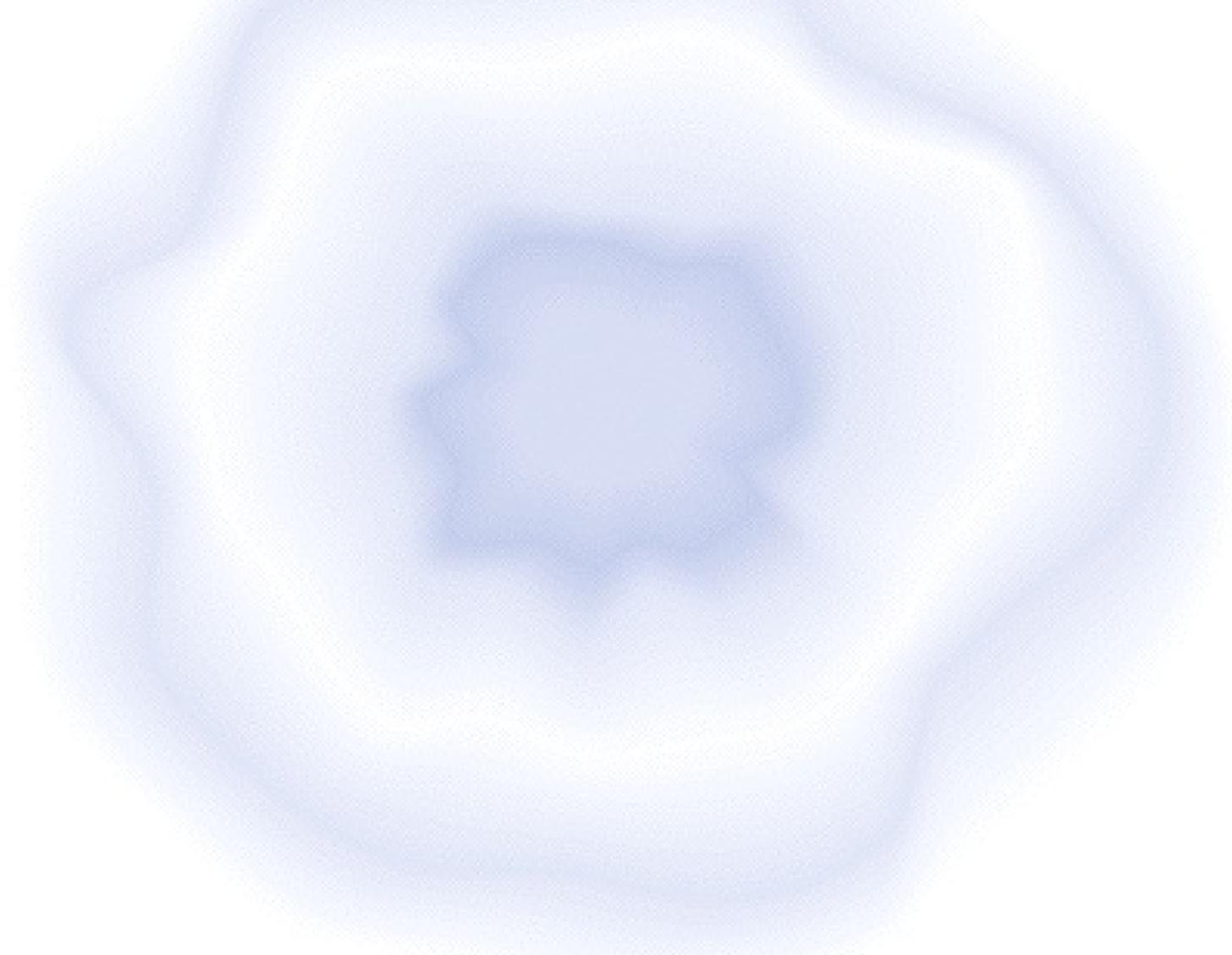
地球内部構成物の
候補の推定

地球物理学的観測
(地震波、電磁気、重力)
による地球内部構造モデル

地球内部構成物候補の物性
(相平衡関係、密度、
弾性的性質、電氣的性質)

もっとも確からしい
地球内部構造

太陽系の形成

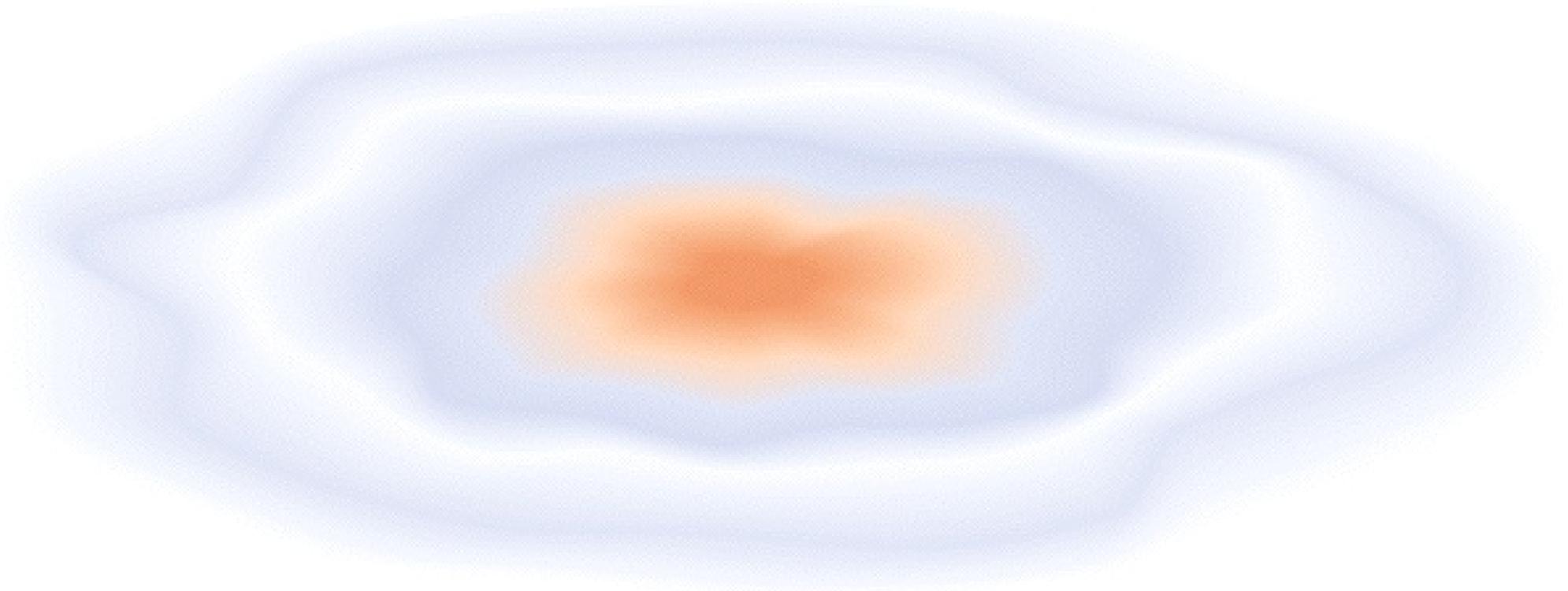


最初に薄いガスの集まりがある

(a)

Fig. 1.2a

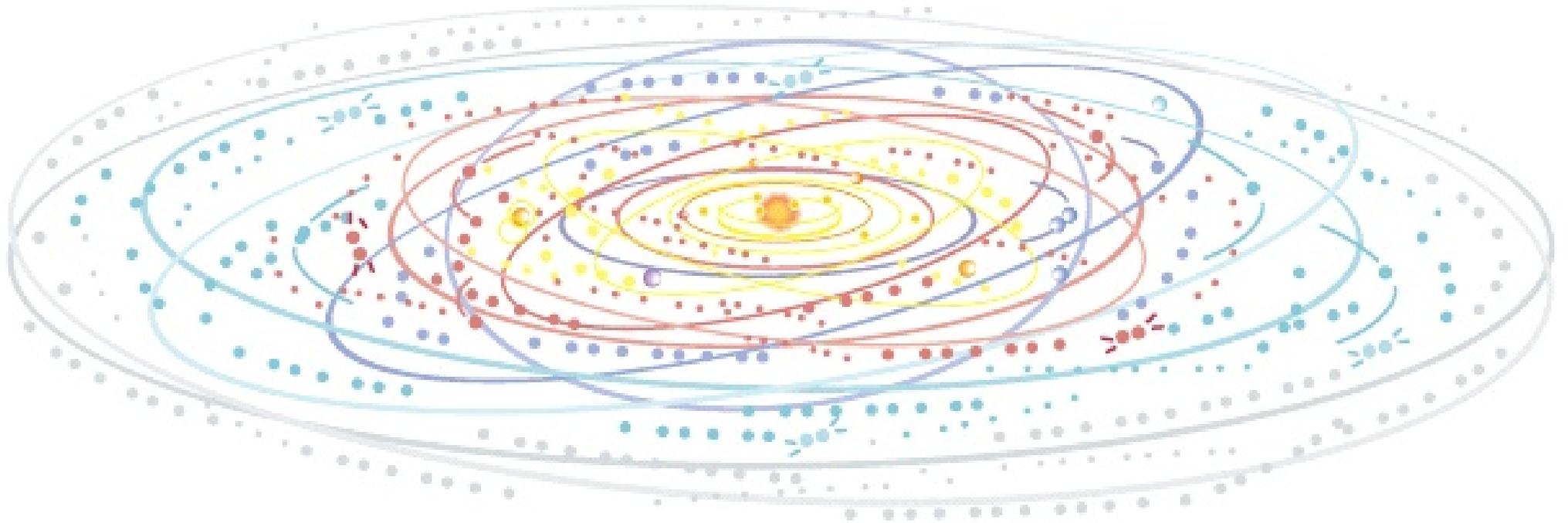
太陽系の形成



(b)

星間ガスが自分の重力で集まる

太陽系の形成

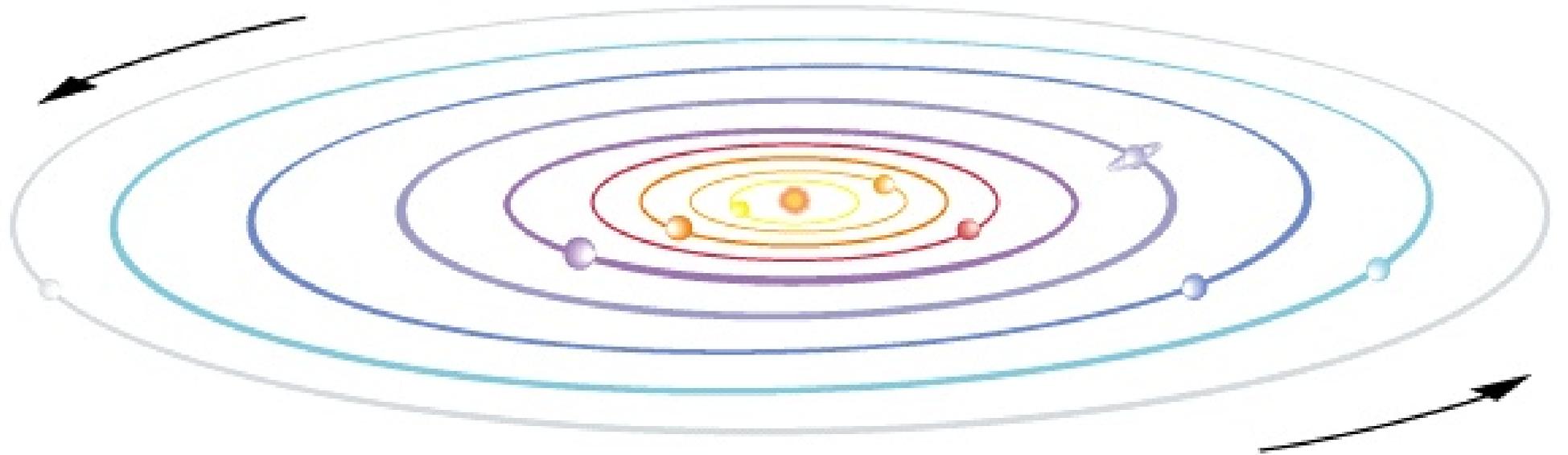


(c)

中心に原始太陽ができる
星間ガスが微惑星を作る

Fig. 1.2c

太陽系の形成



(d)

原始太陽形成運のほとんどすべては太陽に集まる
残った微惑星の多くが集まって、惑星を作る

Fig. 1.2d

地球の平均化学組成の推定

- 太陽： 太陽系の殆ど全ての質量
 - 太陽の化学組成～太陽系の化学組成
- 隕石： 惑星材料の残り
 - 隕石の化学組成～惑星の化学組成？
 - 隕石にもいろいろな種類がある
- 太陽に近い化学組成を持つ隕石⇒惑星を作った隕石？

コンドライト隕石



- 地球・惑星の材料物質
- 特に、炭素などの有機物を含んだ炭素質コンドライトが重要

太陽大気と炭素質隕石の組成比較

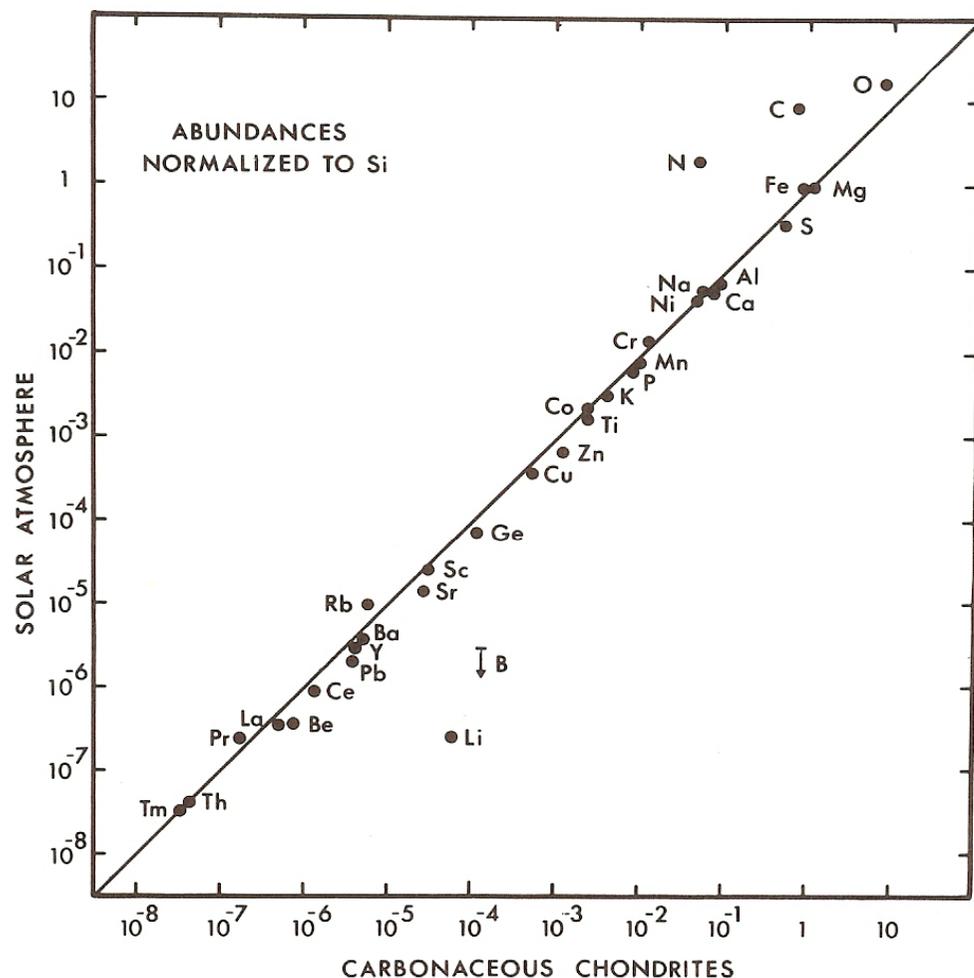


Figure 2.2 Comparison of elemental abundances in Type 1 carbonaceous chondrites with those in the solar photosphere. All abundances are normalized on the basis of Si = 10^6 . (From J. E. Ross and Aller, 1976.)

- 両者は、揮発成分(酸素、炭素、窒素など)を除いてよく一致している
- 炭素質隕石は、太陽系の固体部の平均組成を持っている。
- 炭素質隕石が惑星を作っただろう

炭素質コンドライトの組成

表 1.3 太陽系*の元素存在度 (Anders and Grevesse, 1989).

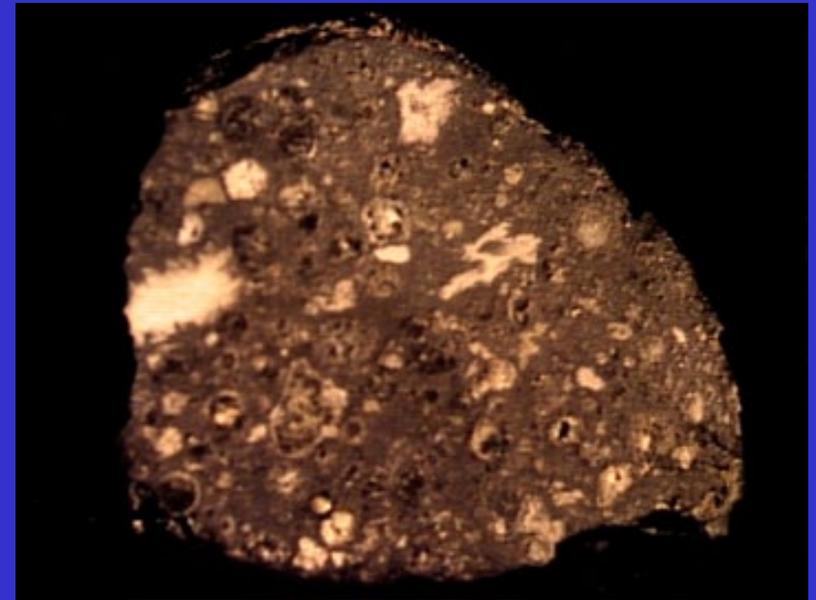
元 素	太陽系 (10^6 Si で規格 化した原子数)	CI コン ドライト	元 素	太陽系	CI コン ドライト	元 素	太陽系	CI コン ドライト
1 H	2.79×10^{10}	.....	29 Cu	522	126 ppm	58 Ce	1.136	603.2 ppb
2 He	2.72×10^9	.....	30 Zn	1260	312 ppm	59 Pr	0.1669	89.1 ppb
3 Li	57.1	1.5 ppm	31 Ga	37.8	10.0 ppm	60 Nd	0.8279	452.4 ppb
4 Be	0.73	24.9 ppb	32 Ge	119	32.7 ppm	62 Sm	0.2582	147.1 ppb
5 B	21.2	870 ppb	33 As	6.56	1.86 ppm	63 Eu	0.0973	56.0 ppb
6 C	1.01×10^7	.....	34 Se	62.1	18.6 ppm	64 Gd	0.3300	196.6 ppb
7 N	3.13×10^6	.....	35 Br	11.8	3.57 ppm	65 Tb	0.0603	36.3 ppb
8 O	2.38×10^7	.....	36 Kr	45	.....	66 Dy	0.3942	242.7 ppb
9 F	843	60.7 ppm	37 Rb	7.09	2.30 ppm	67 Ho	0.0889	55.6 ppb
10 Ne	3.44×10^6	.....	38 Sr	23.5	7.80 ppm	68 Er	0.2508	158.9 ppb
11 Na	5.74×10^4	5000 ppm	39 Y	4.64	1.56 ppm	69 Tm	0.0378	24.2 ppb
12 Mg	1.074×10^6	9.89 %	40 Zr	11.4	3.94 ppm	70 Yb	0.2479	162.5 ppb
13 Al	8.49×10^4	8680 ppm	41 Nb	0.698	246 ppb	71 Lu	0.0367	24.3 ppb
14 Si	1.00×10^6	10.64 %	42 Mo	2.55	928 ppb	72 Hf	0.154	104 ppb
15 P	1.04×10^4	1220 ppm	44 Ru	1.86	712 ppb	73 Ta	0.0207	14.2 ppb
16 S	5.15×10^5	6.25 %	45 Rh	0.344	134 ppb	74 W	0.133	92.6 ppb
17 Cl	5240	704 ppm	46 Pd	1.39	560 ppb	75 Re	0.0517	36.5 ppb
18 Ar	1.01×10^5	.....	47 Ag	0.486	199 ppb	76 Os	0.675	486 ppb
19 K	3770	558 ppm	48 Cd	1.61	686 ppb	77 Ir	0.661	481 ppb
20 Ca	6.11×10^4	9280 ppm	49 In	0.184	80 ppb	78 Pt	1.34	990 ppb
21 Sc	34.2	5.82 ppm	50 Sn	3.82	1720 ppb	79 Au	0.187	140 ppb
22 Ti	2400	436 ppm	51 Sb	0.309	142 ppb	80 Hg	0.34	258 ppb
23 V	293	56.5 ppm	52 Te	4.81	2320 ppb	81 Tl	0.184	142 ppb
24 Cr	1.35×10^4	2660 ppm	53 I	0.90	433 ppb	82 Pb	3.15	2470 ppb
25 Mn	9550	1990 ppm	54 Xe	4.7	.....	83 Bi	0.144	114 ppb
26 Fe	9.00×10^5	19.04 %	55 Cs	0.372	187 ppb	90 Th	0.0335	29.4 ppb
27 Co	2250	502 ppm	56 Ba	4.49	2340 ppb	92 U	0.0090	8.1 ppb
28 Ni	4.93×10^4	1.10 %	57 La	0.4460	234.7 ppb			

* ここで太陽系とは、太陽と隕石の両方のデータから求めたもの。具体的には H, C, N, O と希ガスは太陽あるいは他の恒星データ、それ以外は隕石の分析から求めたもの。

- 主要成分 (酸素を除いて)
 - Fe (19.04%)
 - Si (10.64%)
 - Mg (9.89%)
 - S (6.25%)
 - Ni (1.10%)
 - Al (0.89%)
 - Ca (0.93%)

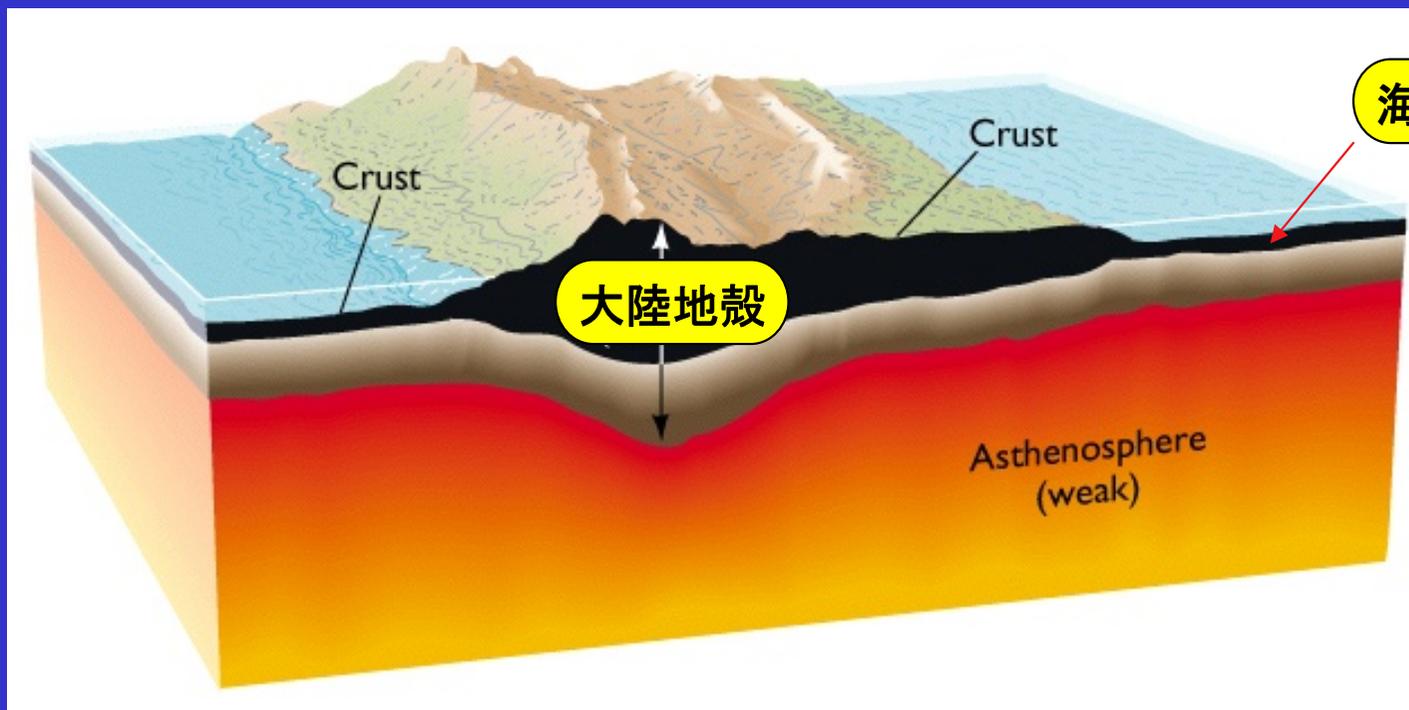
炭素質コンドライトの構成物

- 岩石部
 - 主にO, Si, Mg, Feからなる
 - カンラン石 $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$
 - 輝石 $(\text{Mg, Fe, Ca})\text{SiO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$
- 金属部
 - 主に、Fe, S, Niからなる
 - Fe-Ni合金、硫化物
- 有機質部
 - C, N, O, H,
 - 大気、海、宇宙へ散逸？



地球浅部の岩石

- 地球表層：大陸と海洋
 - 大陸地殻：厚い (20-50km) 全地球の0.374%
 - 海洋地殻：薄い (0-10km) 全地球の0.099%
 - いずれも、地球全体から見ると無視できる量



玄武岩： 地殻より下から来る マグマ

- 金属・硫化物は殆どない
- SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 CaO が主成分
- コンドライトの岩石部と似ているが若干違う



SiO_2	47.2
Al_2O_3	15.0
FeO	10.0
MgO	10.5
CaO	11.0
Na_2O	2.3
Total	96.0

地殻より下に由来する岩石

- 火山捕獲岩

- マグマが上昇中に周囲の岩石を取り込んでくる

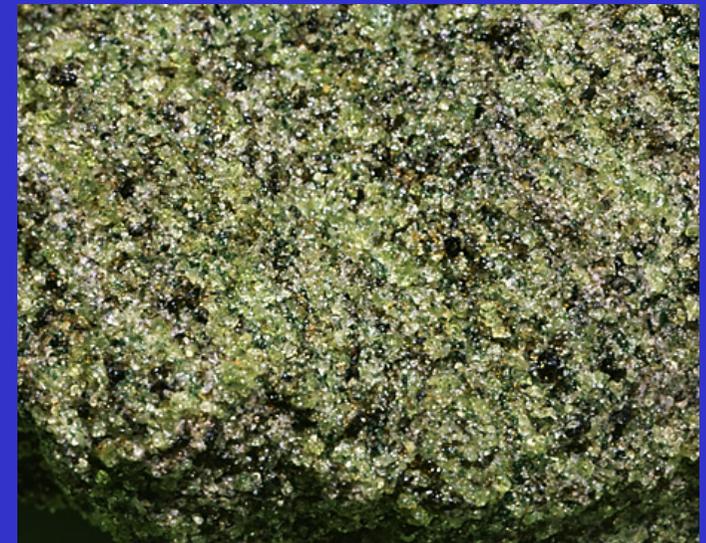


特に深いところに由来する捕獲岩

- カンラン岩

- カンラン石 $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
(60%以上)
- 斜方輝石 $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$
- 単斜輝石 $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ -
 Al_2O_3
- 柘榴石
 $(\text{Mg,Fe,Ca})_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

- 金属・硫化物は殆どない



化学組成の比較

	玄武岩	捕獲岩	隕石岩石部
SiO ₂	47.2	45.1	48.2
Al ₂ O ₃	15.0	3.3	3.5
FeO	10.0	8.0	8.1
MgO	10.5	38.1	34.0
CaO	11.0	3.0	3.0
Na ₂ O	2.3	0.4	1.6
Total	96.0	97.9	98.4

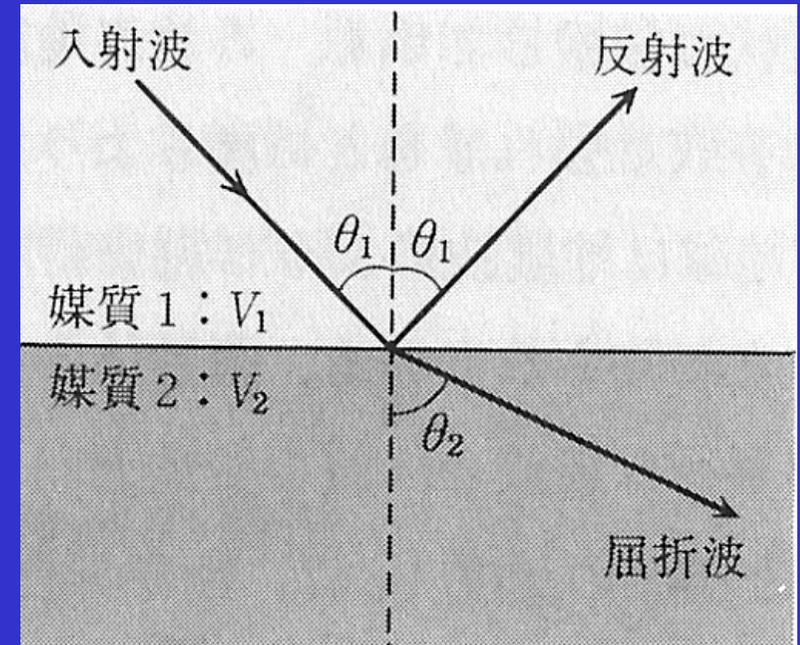
- 3種の岩石は、全てSi, Al, Fe, Mg, Ca, Oが主成分
 - 捕獲岩と隕石は特にSiとMgが多い。Feも多い。
 - 玄武岩はマグマ生成時に組成が大きく変わった？
- 地球の表面に近いところは、Si, Mg, Fe, Oを主成分とする岩石でできている
- 隕石の金属・硫化物の部分はどこに行ったか？
 - たぶん地球のもっと深部にある

地震波による地球内部の探査

- 地震波速度：物質の組成・温度・圧力による
 - － 硬い物質：高速度、特に横波。液体は横波を通さない
 - － 温度が高いと地震波速度は下がる。
 - － 同じ温度なら圧力が高いと地震波速度は上がる
 - － 地震波速度が連続的に変わると、波の進行方向が曲がる。
 - － 地震波速度が急激に変わると、反射波などが出る
- 地震波の伝播速度の観測：
 - － 地球内部構造を調べるための最も高分解能の観測

波の屈折と反射

- 下の媒質を伝播する速度が上の媒質より大きいと、波の進行方向はやや上を向く
 - $V_2 > V_1$ の時, $\theta_2 > \theta_1$
- 速度の変化が急だと、反射波が発生する
 - 入射波と反射波の反射面になす角度は同じ



地震波線と走時

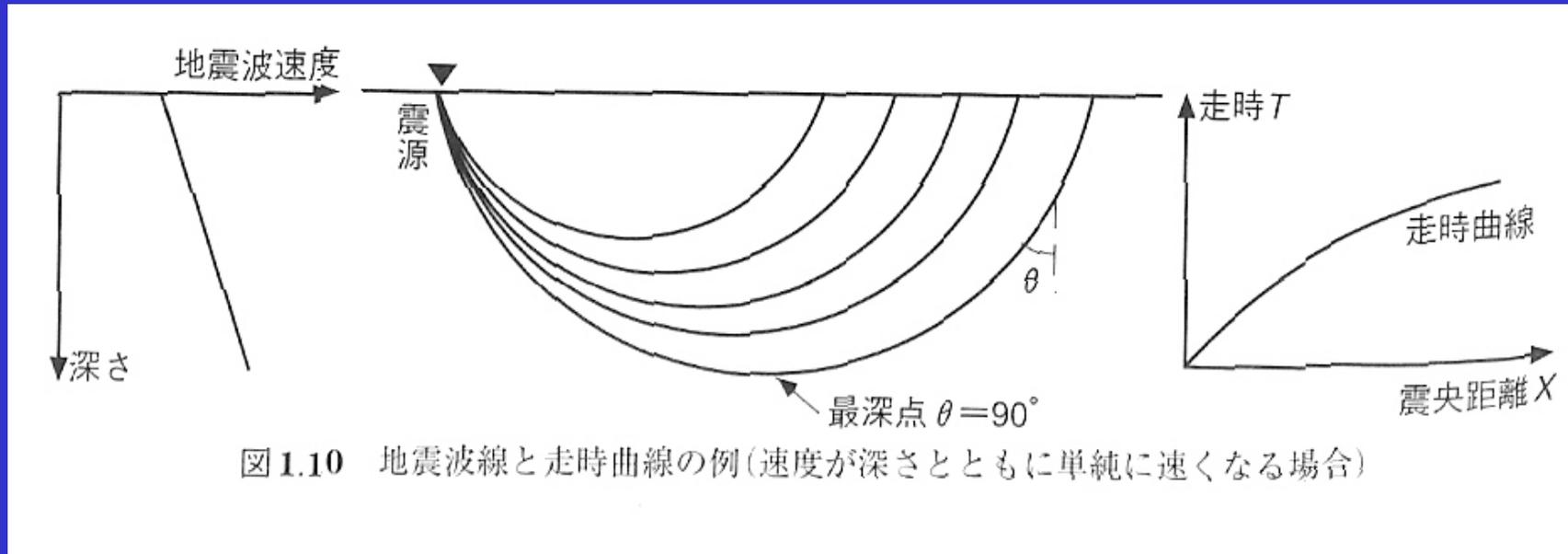
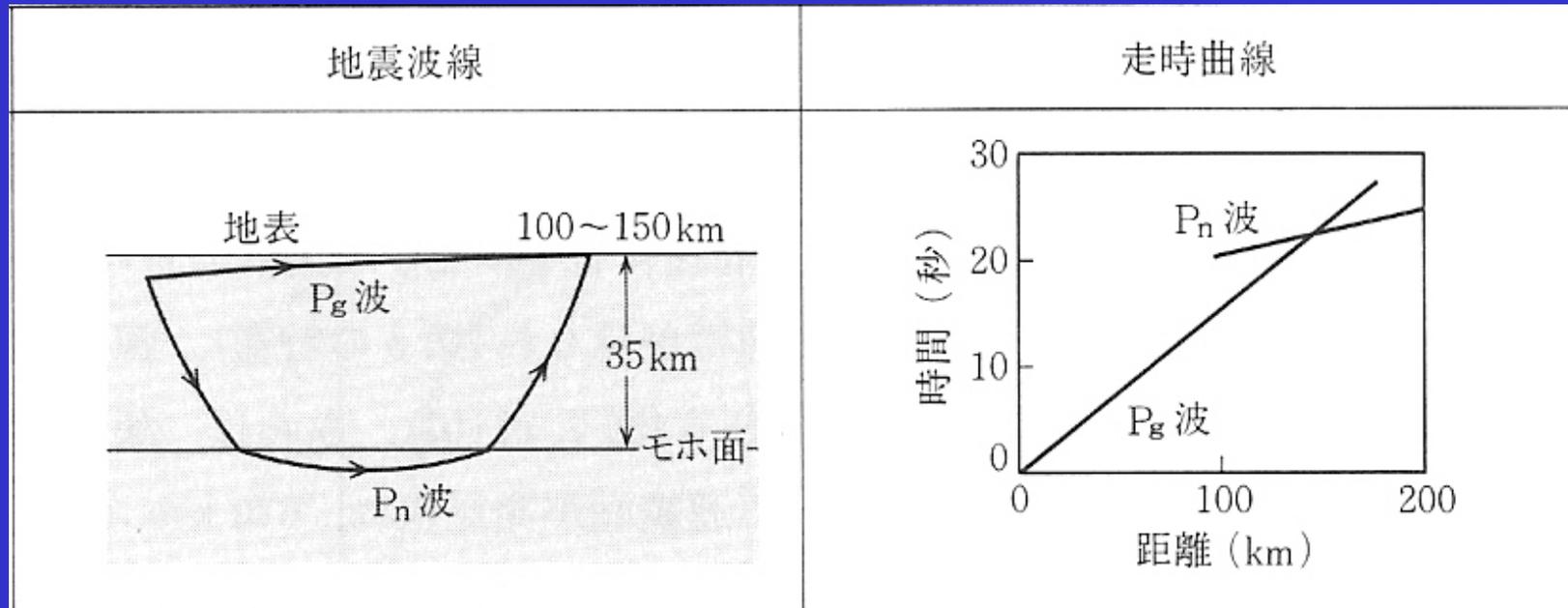


図 1.10 地震波線と走時曲線の例(速度が深さとともに単純に速くなる場合)

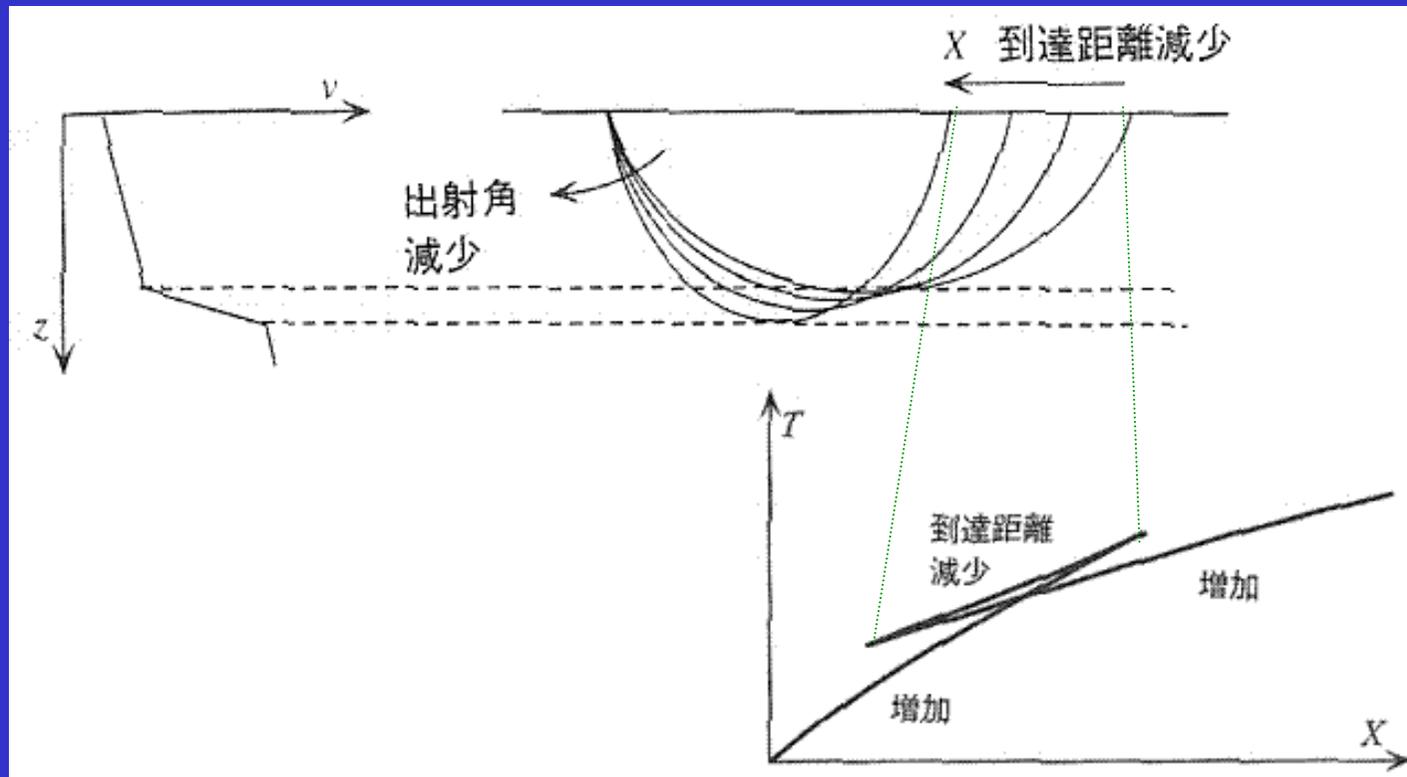
- 通常地球内部: 深さと共に徐々に地震波速度が増加
 - 波は少しずつ上を向く
 - 一度下に潜った波が地表で観測される
 - 震央距離(自身の震源と観測所の距離)が長いところで観測される波ほど深いところを潜った
 - 震央距離に対して走時(観測所に到達するのに要する時間)が単調に増加

2層構造の場合の地震破線と走時



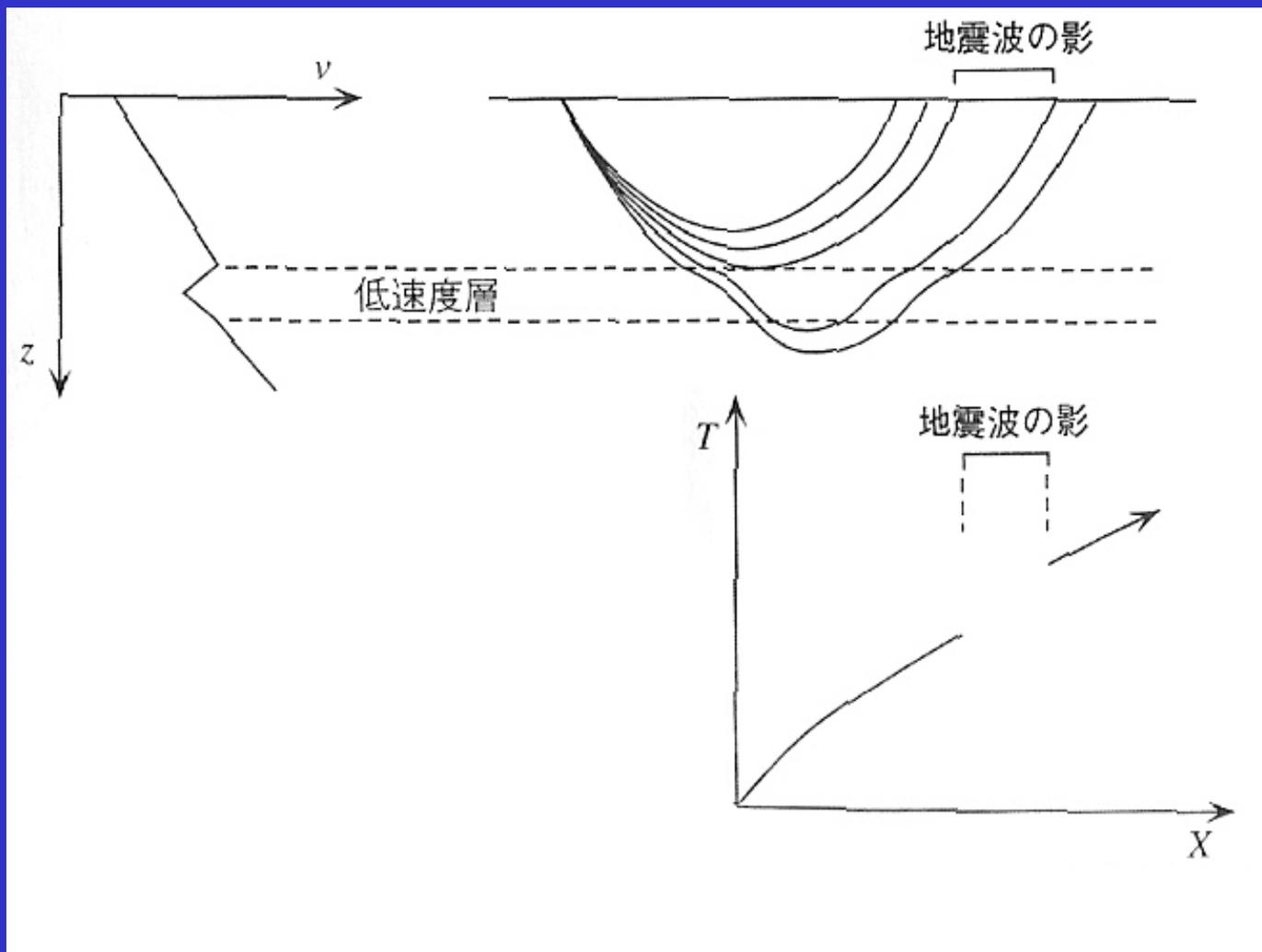
- 上層: 低速度、下層: 高速度の場合
- 低速度層のみを通る波と、高速度層を通ってくる波の二つが一つの観測所で観測

地震波速度急増層がある場合



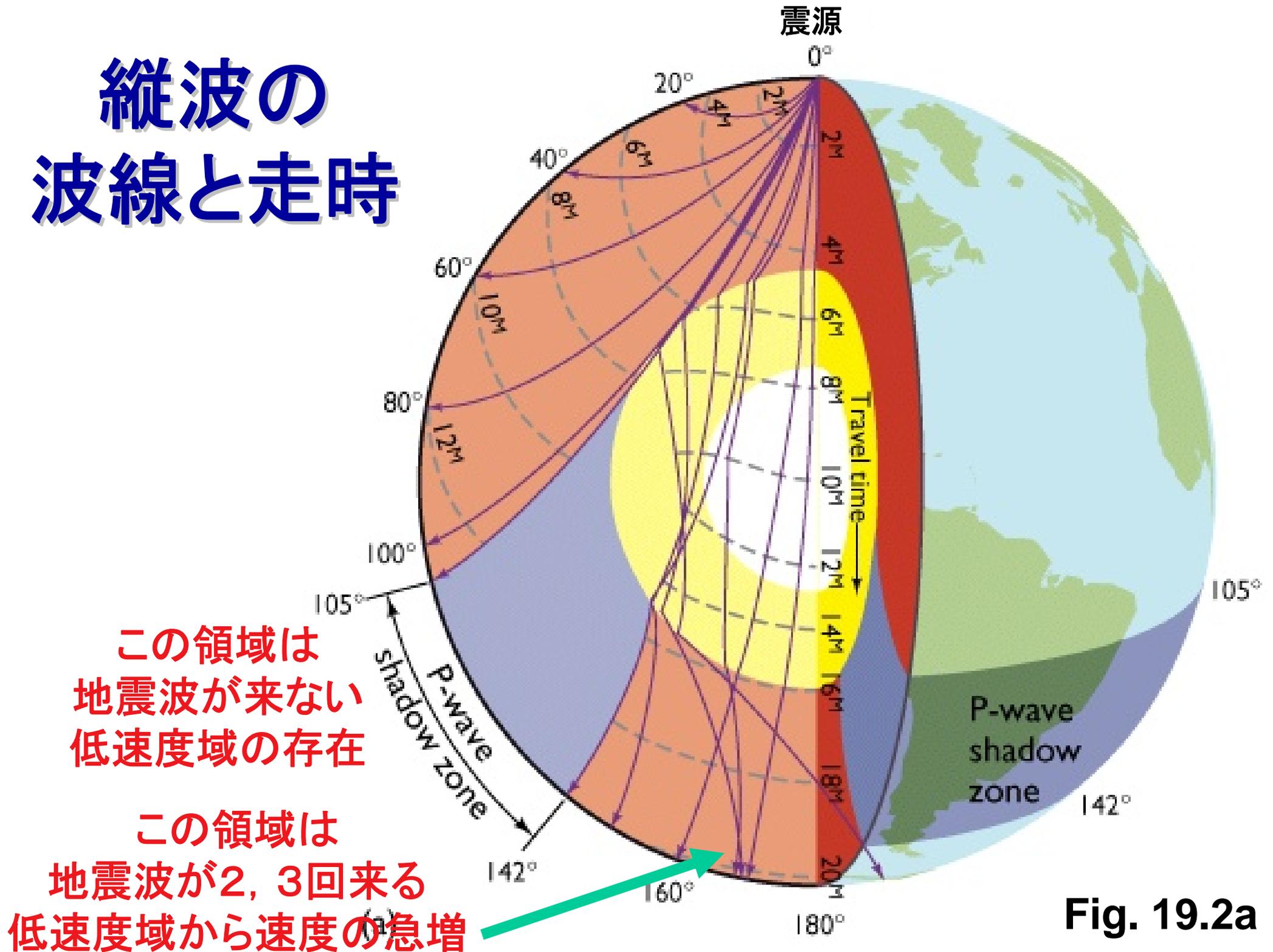
- 地震は急増層で波が大きく曲げられる
- 一つの観測所で3回地震波が来る

低速度層がある場合



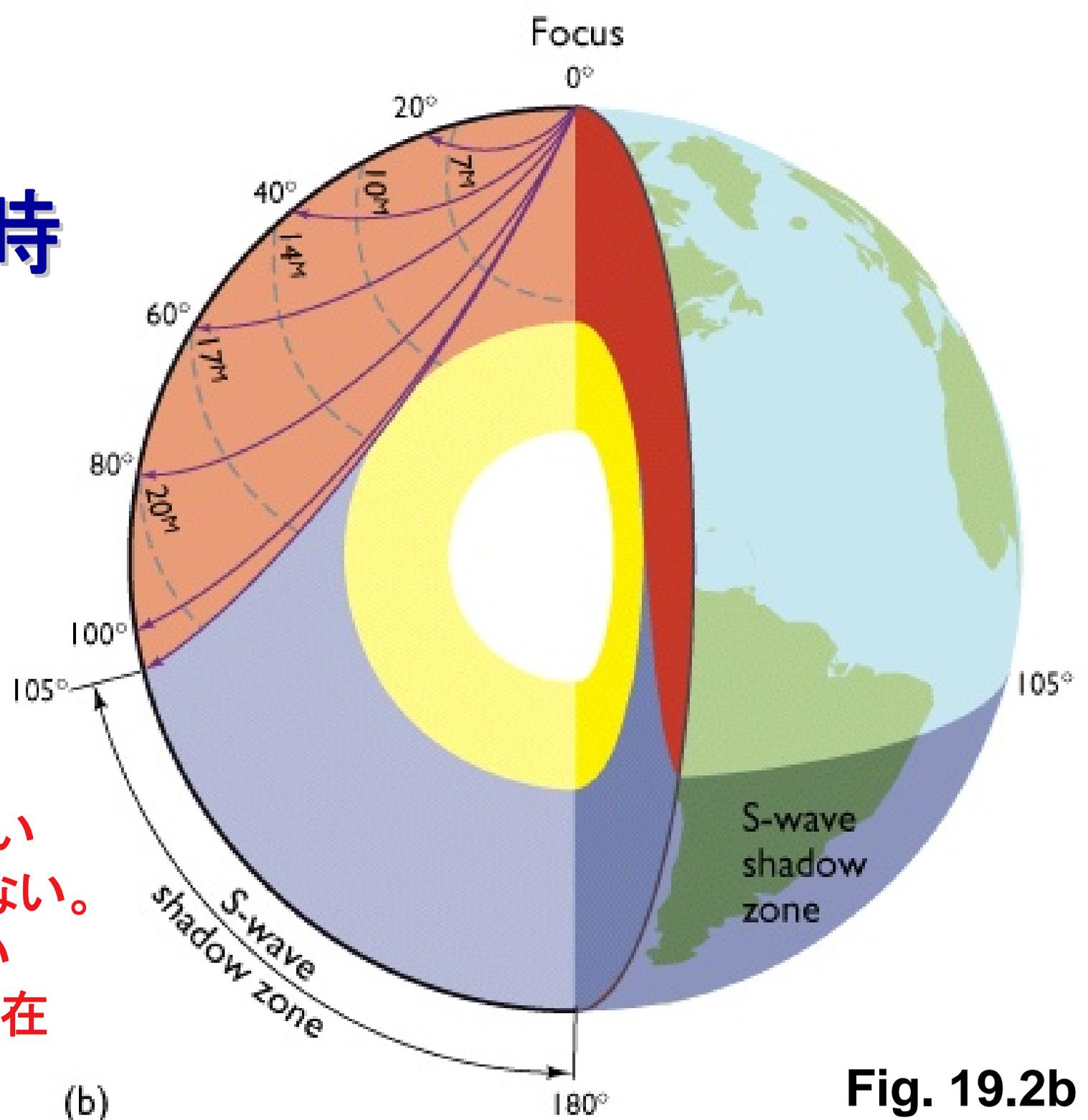
- 低速度層では、地震波は下を向く
- 地震波が来ない地域がある

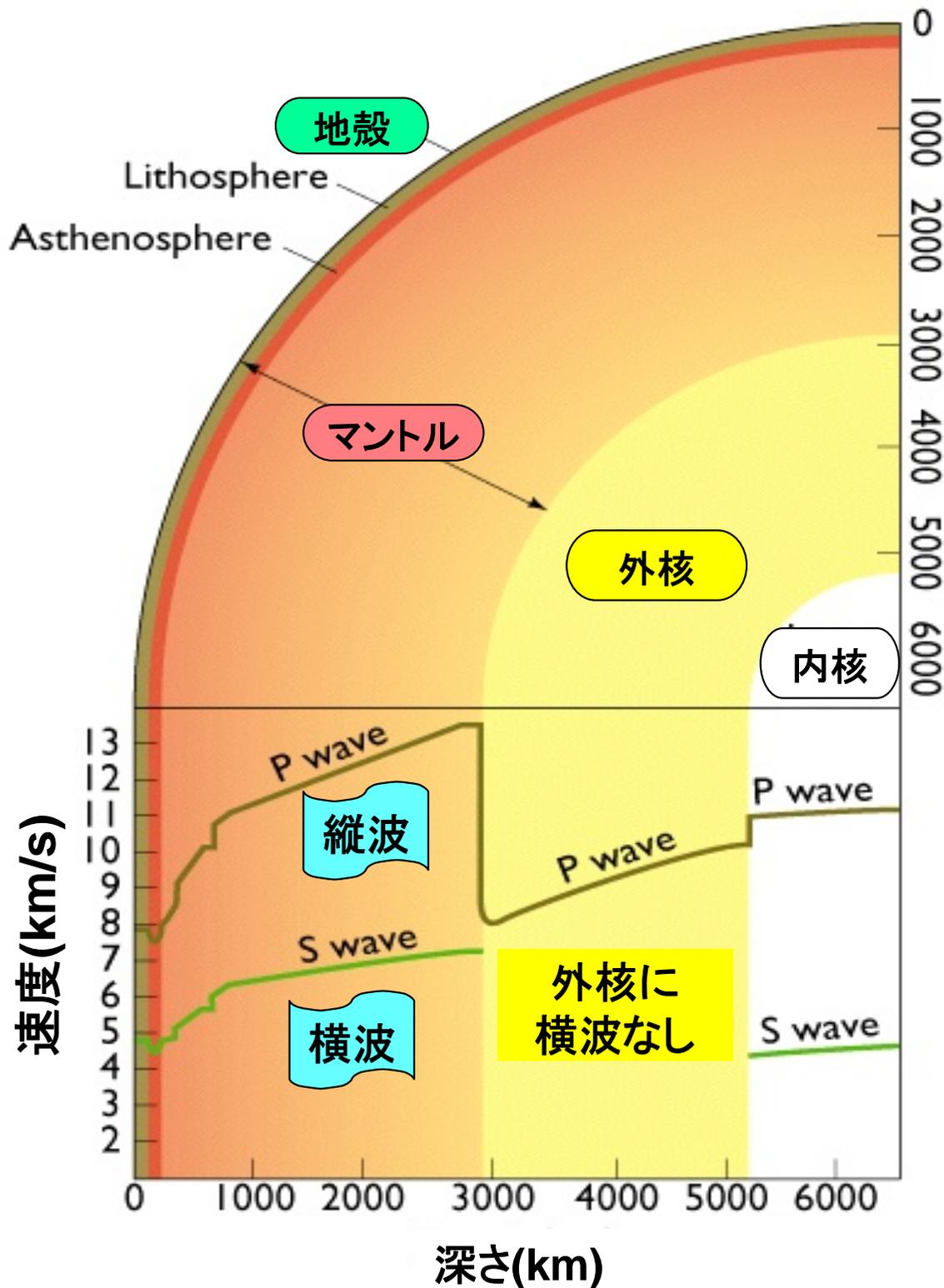
縦波の 波線と走時



横波の 波線と走時

この領域は
横波が全く来ない
真直ぐの波さえ来ない。
横波を通さない
物質(液体)の存在





地球は2891kmを境に、外側のマントルと内側の核に分けることができる。外側のマントルは地震波速度が大きい。核の外部は液体で外核と呼ばれる。核の内部(内核)は地震波速度が大きいので、固体と考えられている

Fig. 19.5

地球内部を通る様々な縦波・横波

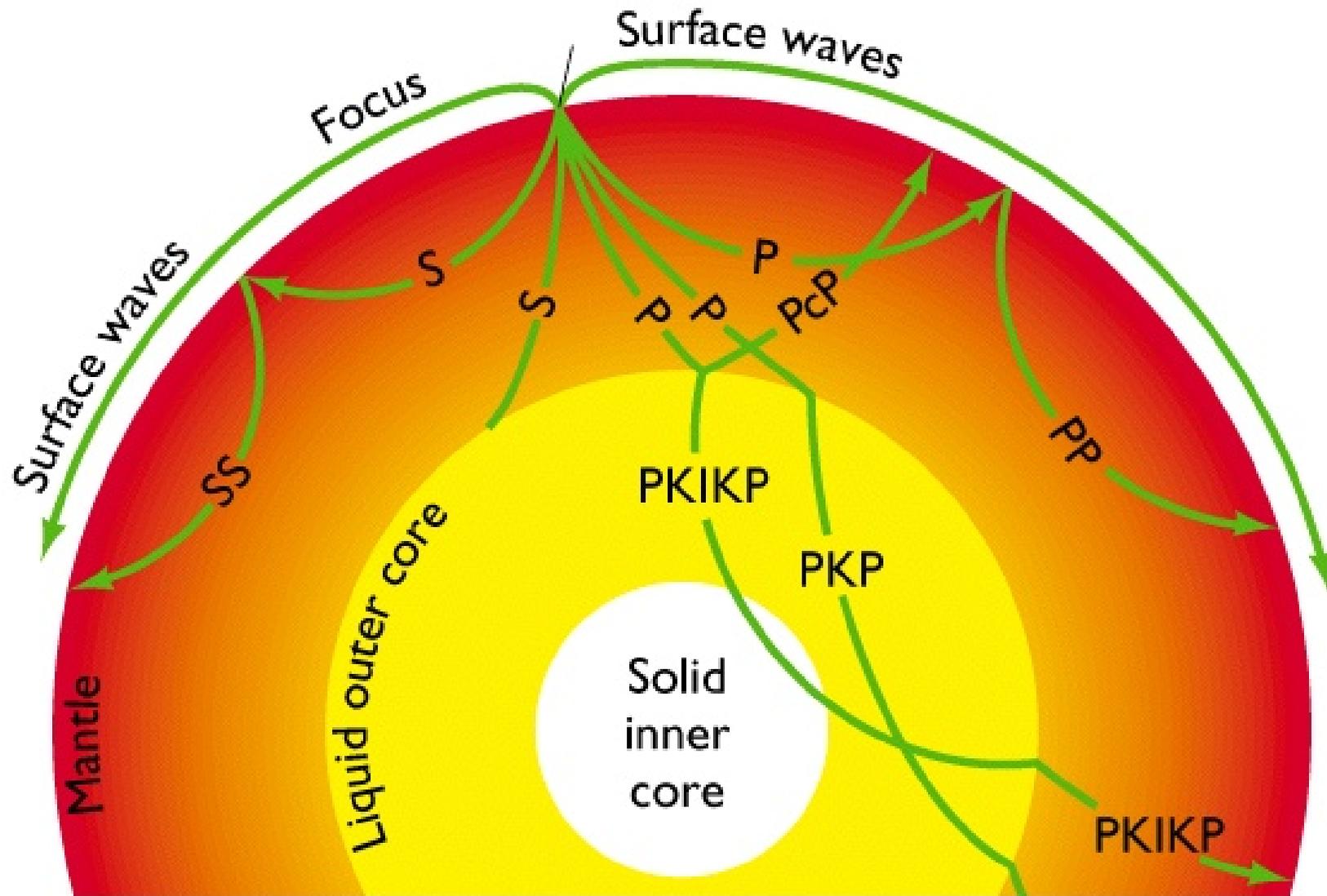


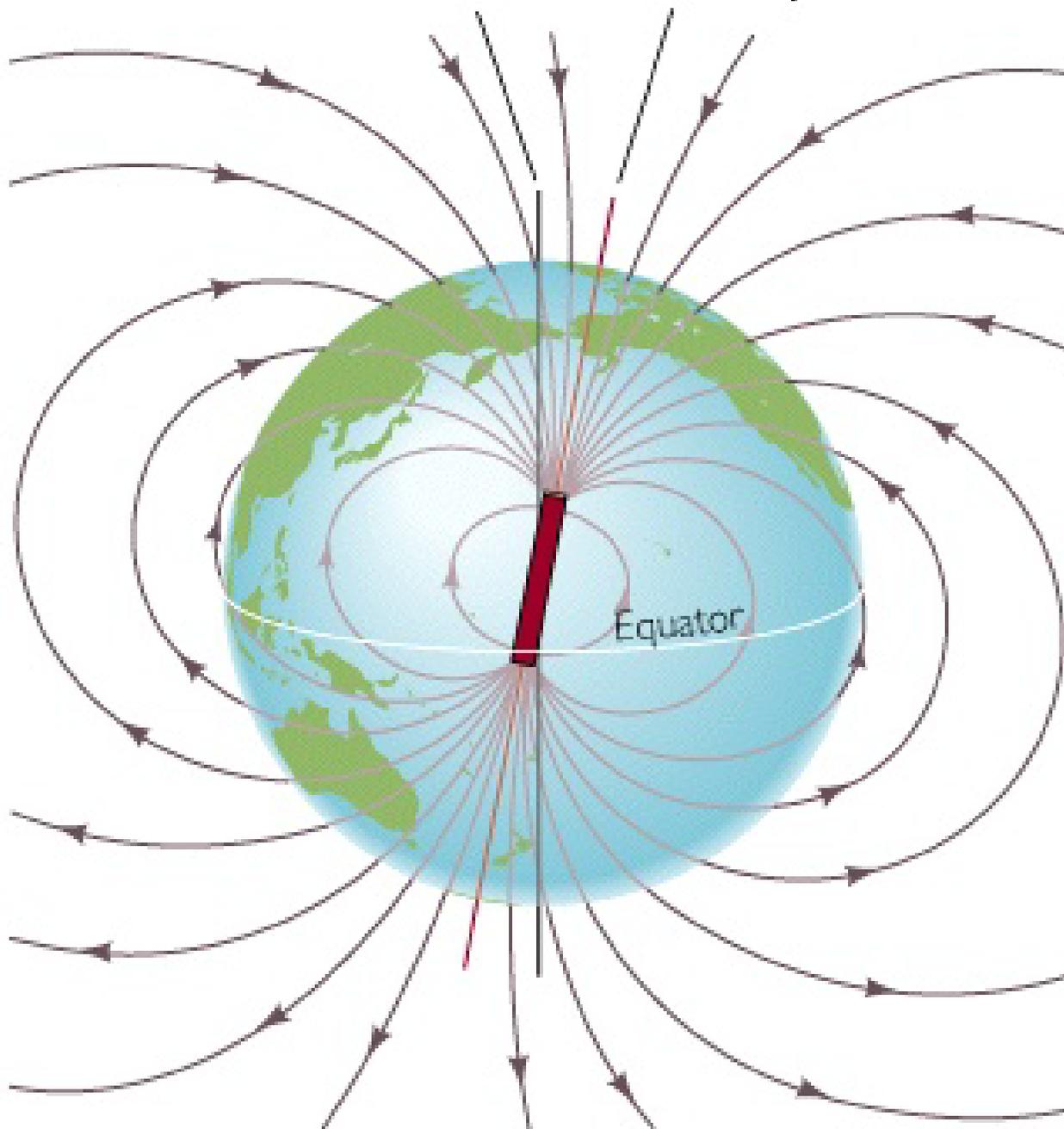
Fig. 19.3

核は何でできているか？

- 地球の原材料のコンドライト：岩石と金属（鉄ニッケル合金）からできている
- マントルは岩石で、核は金属でできているのではないだろうか？
- 金属は、岩石より高比重。地球の密度分布は？
- 地球が一様球なら慣性モーメント $9.7 \times 10^{37} \text{kgm}^2$
 - 慣性モーメント：独楽としての回りやすさ。同じ質量・同じサイズでも、慣性モーメントが大きいほど、質量が外に分布していて、回しにくい
 - 地球の全質量： $6 \times 10^{27} \text{g}$ 、平均密度 5.52g/cm^3
- 地球の慣性モーメントの： $8.1 \times 10^{37} \text{kgm}^2$
 - 地球の自転軸のふらつきから推定
 - 一様球よりはるかに小さな慣性モーメント
- 地球の質量は中心に集中している⇒中心に金属核の存在

Geographic
North Pole

Magnetic
north pole



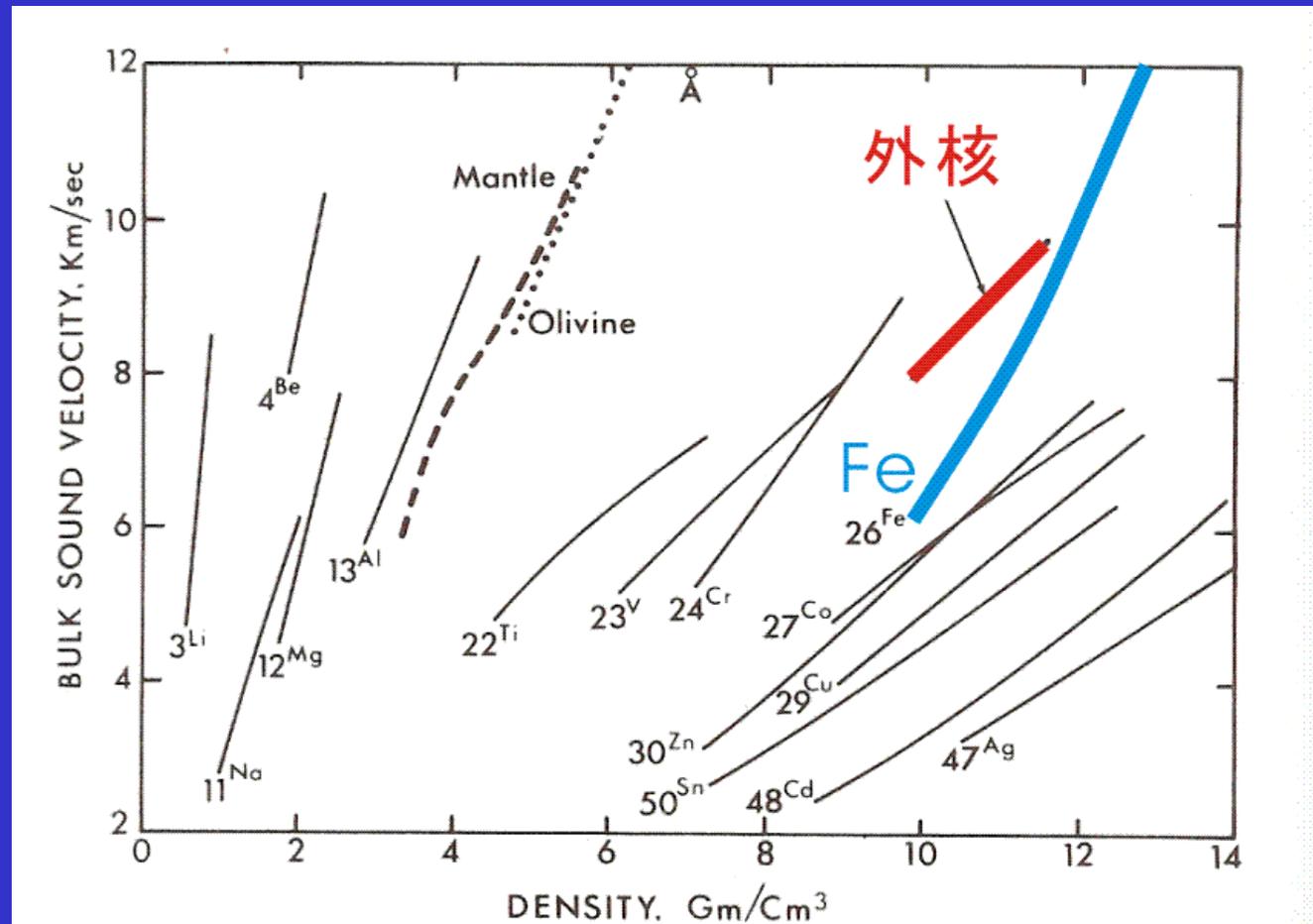
地球には磁
場がある！

磁石：地球内
部のような高
温では働かな
い

⇒地球内部に
金属の流れが
存在

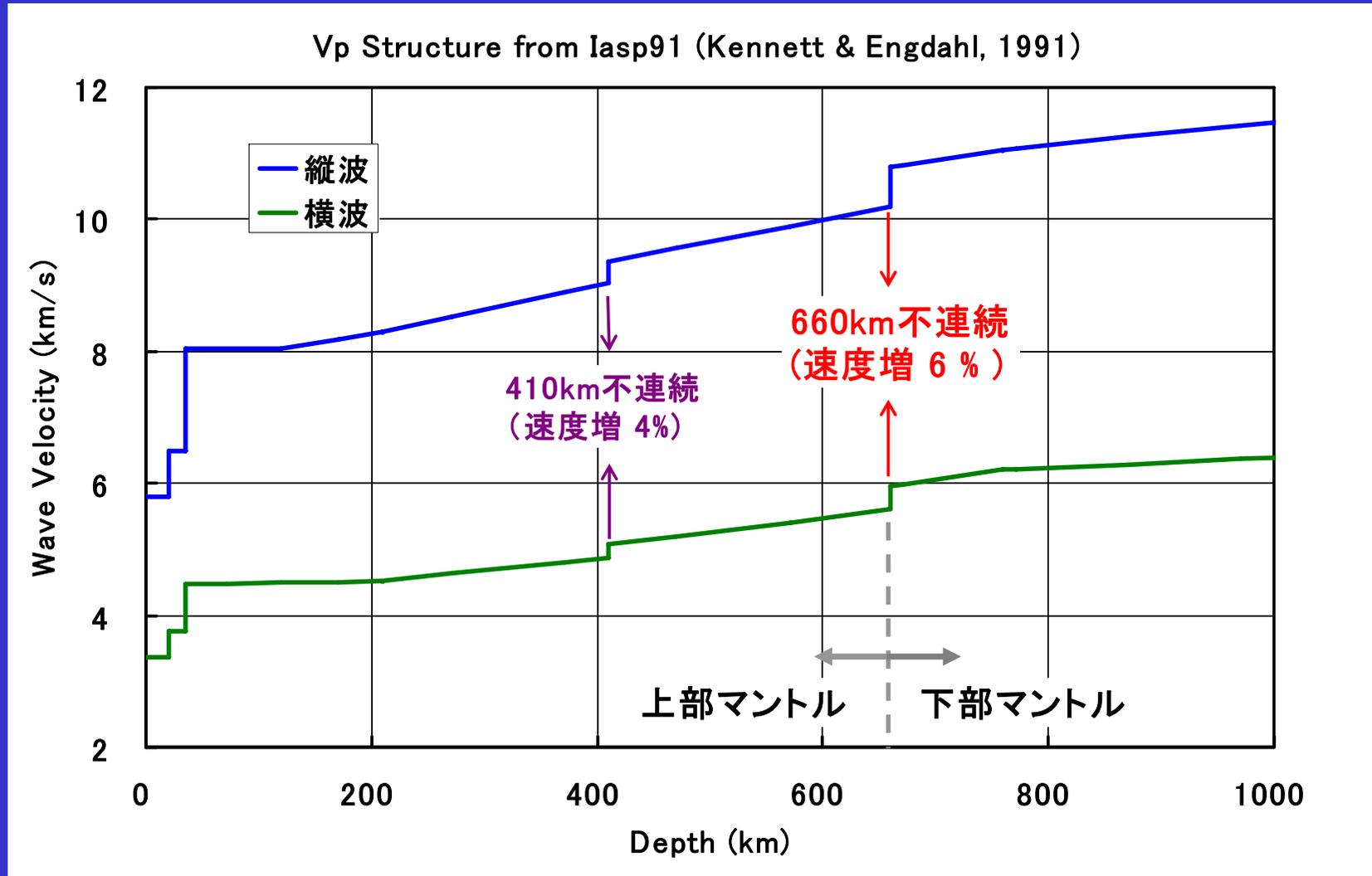
⇒外核は金属
？

外核は純粋な鉄ニッケル合金ではない



- 外核の密度は鉄より10%ほど軽い
 - 何らかの軽元素が外核に溶け込んでいる
 - 硫黄？酸素？

上部マントルの詳細な地震学的構造



深さ410kmと660kmで地震波速度が急上昇する。全地球的に存在 (410km不連続・660km不連続)。これはなぜか？

マントル構成している鉱物がこれらの深さで突然硬くなっている！

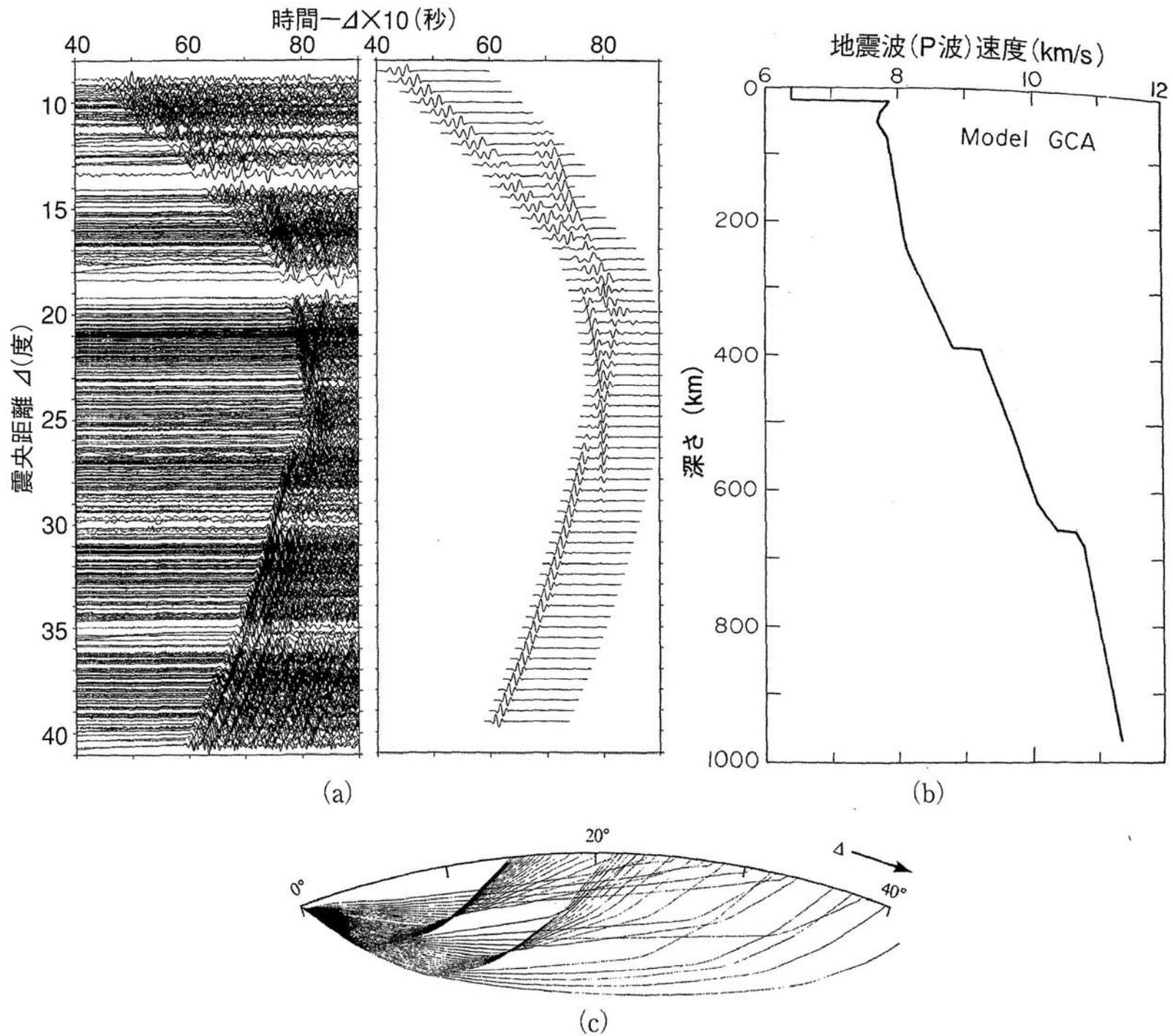
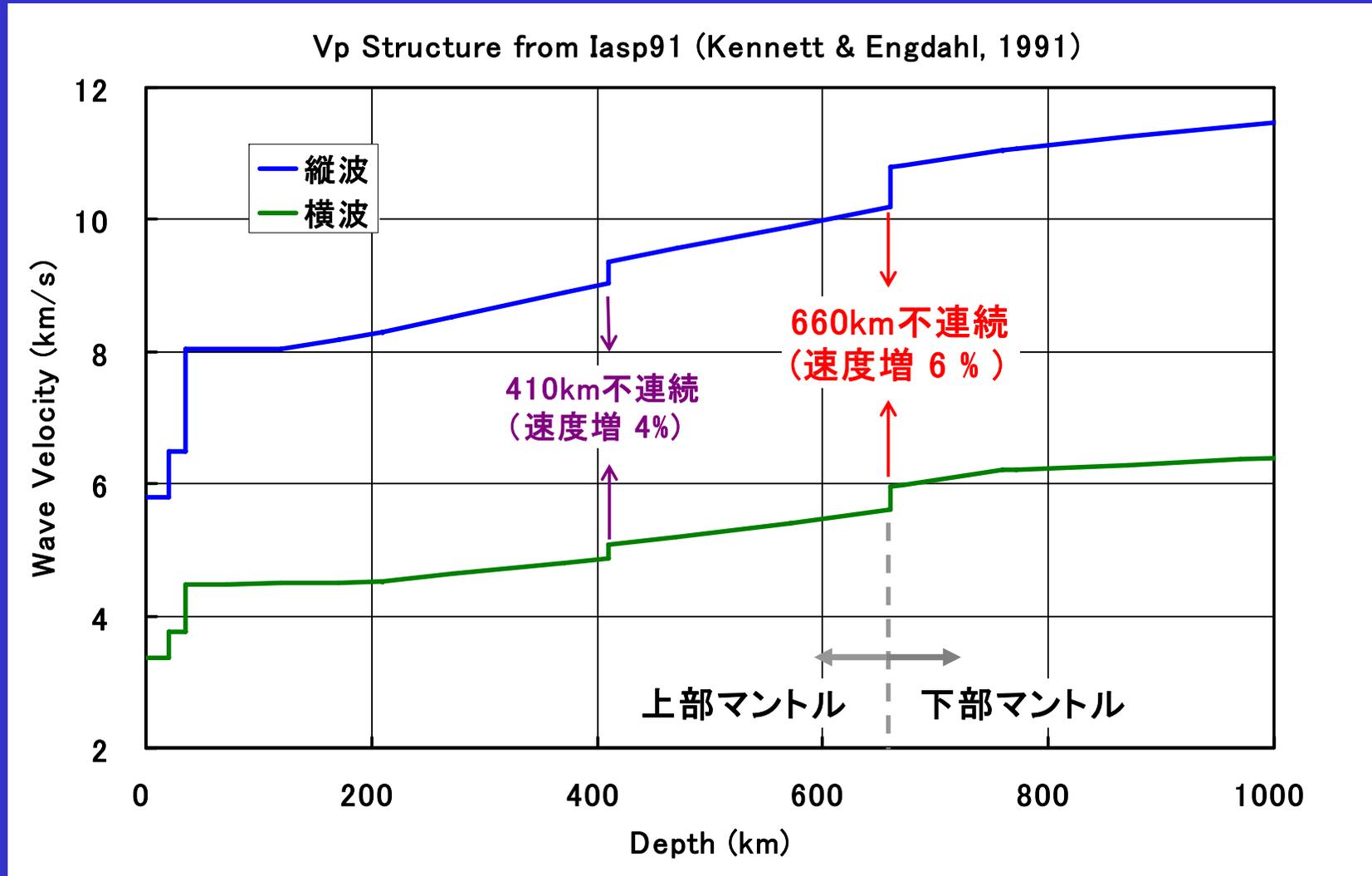


図6.3 (a)カリフォルニアで観測された地震波形と理論波形, (b)走時解析から求められた遷移層のモデルと(c)対応する地震波線

上部マントルの詳細な地震学的構造

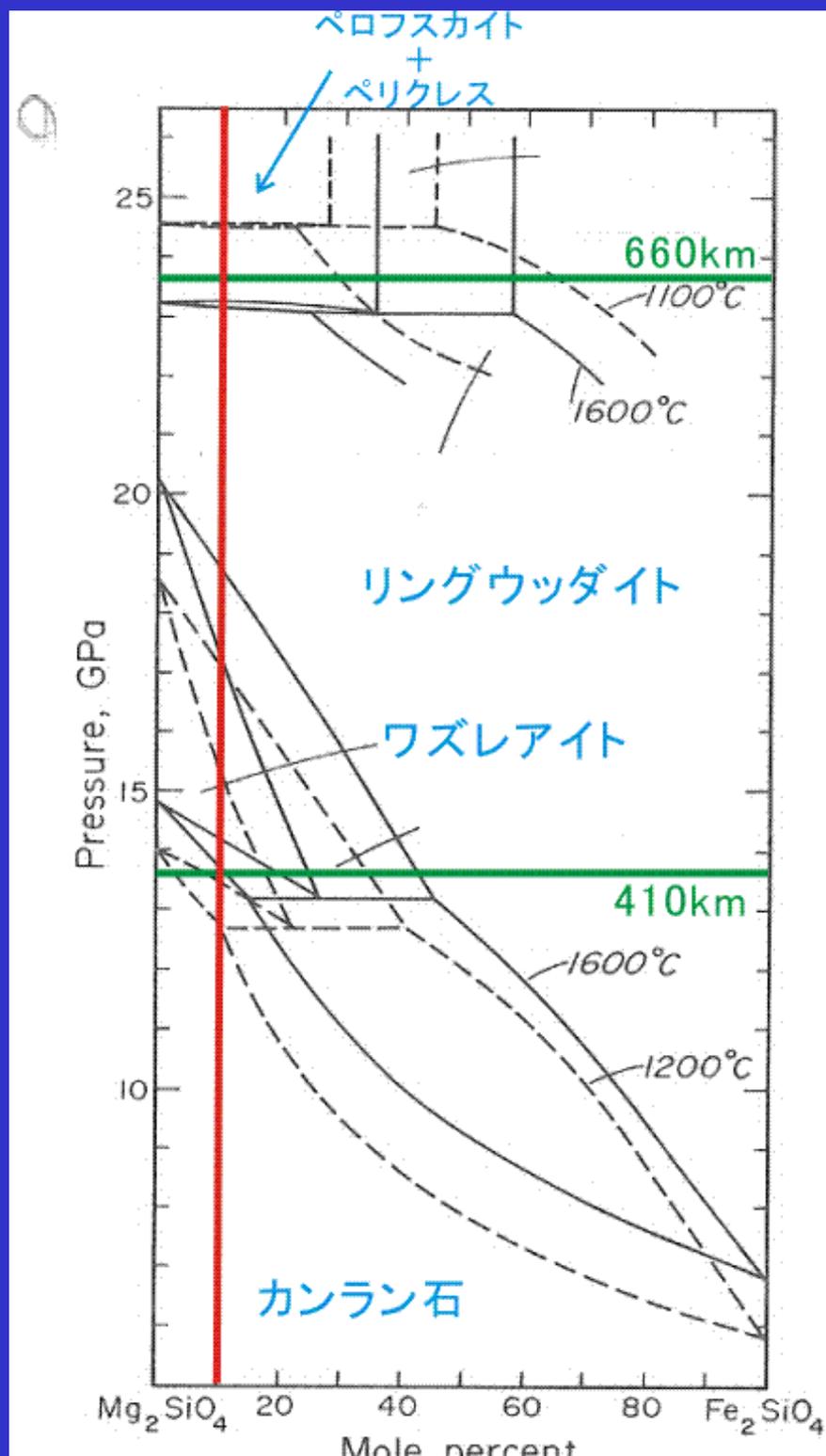


深さ410kmと660kmで地震波速度が急上昇する。全地球的に存在
(410km不連続・660km不連続)。これはなぜか？

マントル構成している鉱物がこれらの深さで突然硬くなっている！

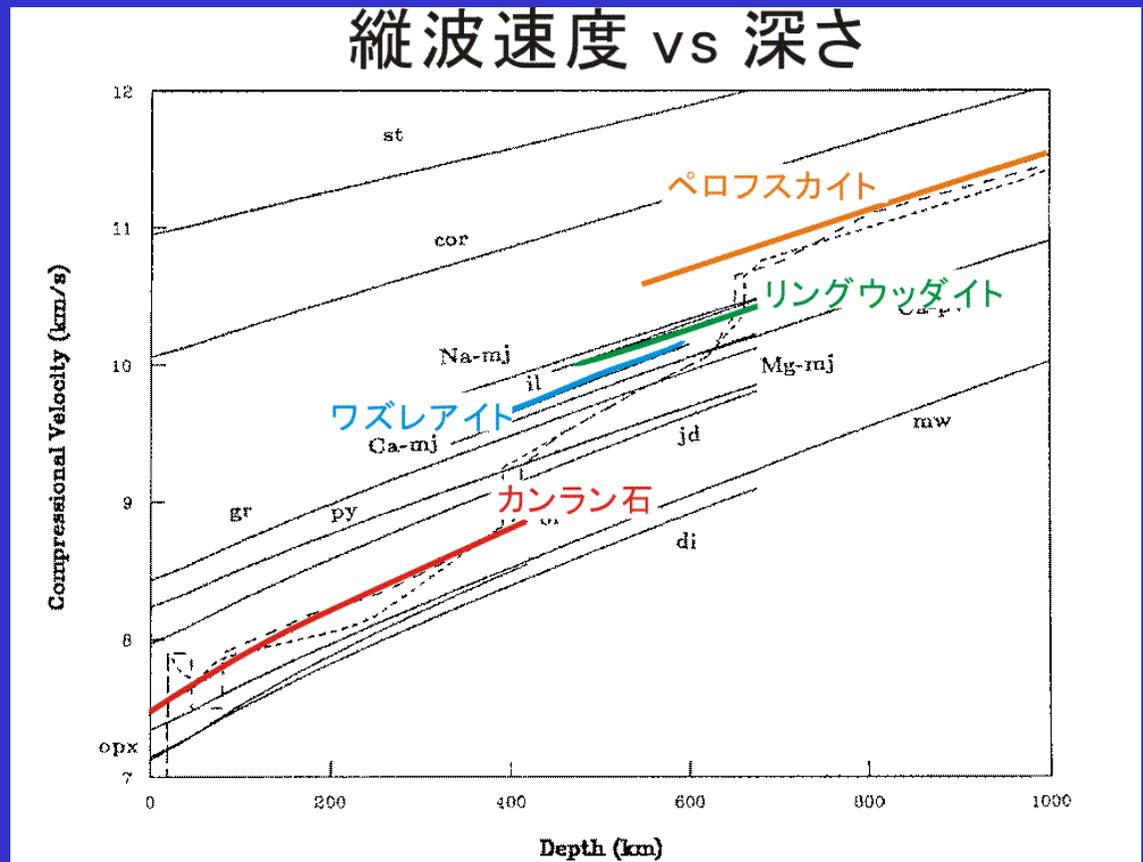
鉱物の高圧相転移

- 鉱物: 温度圧力に応じて相転移
 - 石墨からダイヤモンド
 - 約6万気圧
- マントルの主要構成鉱物の候補: カンラン石 $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
 - $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})=0.9$ なら...
 - 410kmで高圧相のワズレアイトへ転移
 - 520kmでワズレアイトからリングウッダイトへ転移
 - 660kmでリングウッダイトからペロフスカイト+ペリクレスに転移
- カンラン石が主成分であることを証明



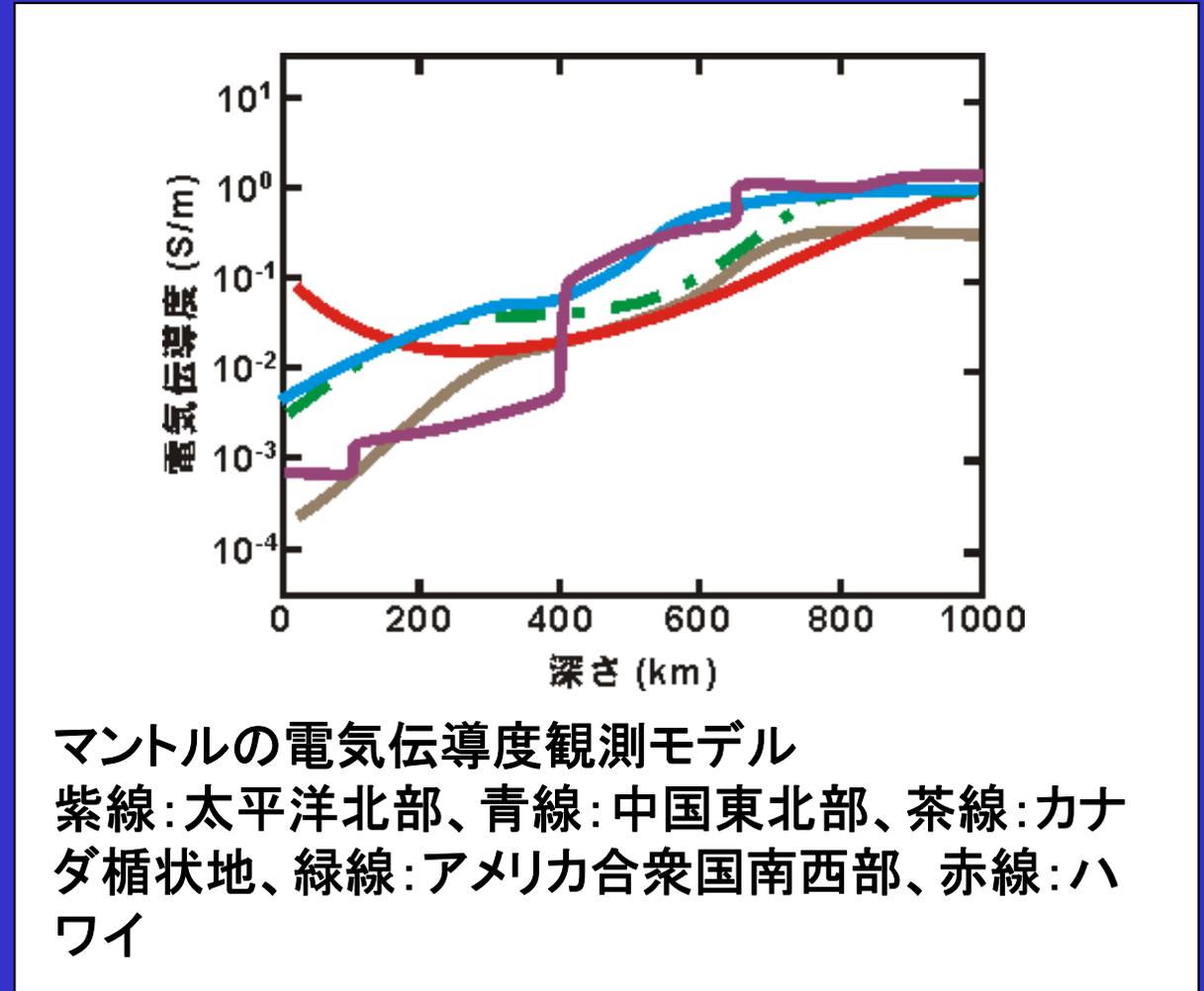
相転移に伴う速度増加

- カンラン石-ワズレアイト転移に伴い大きな速度増加
- ワズレアイト→リングウッドアイト転移の速度増加小
- ペロフスカイト: 高速度



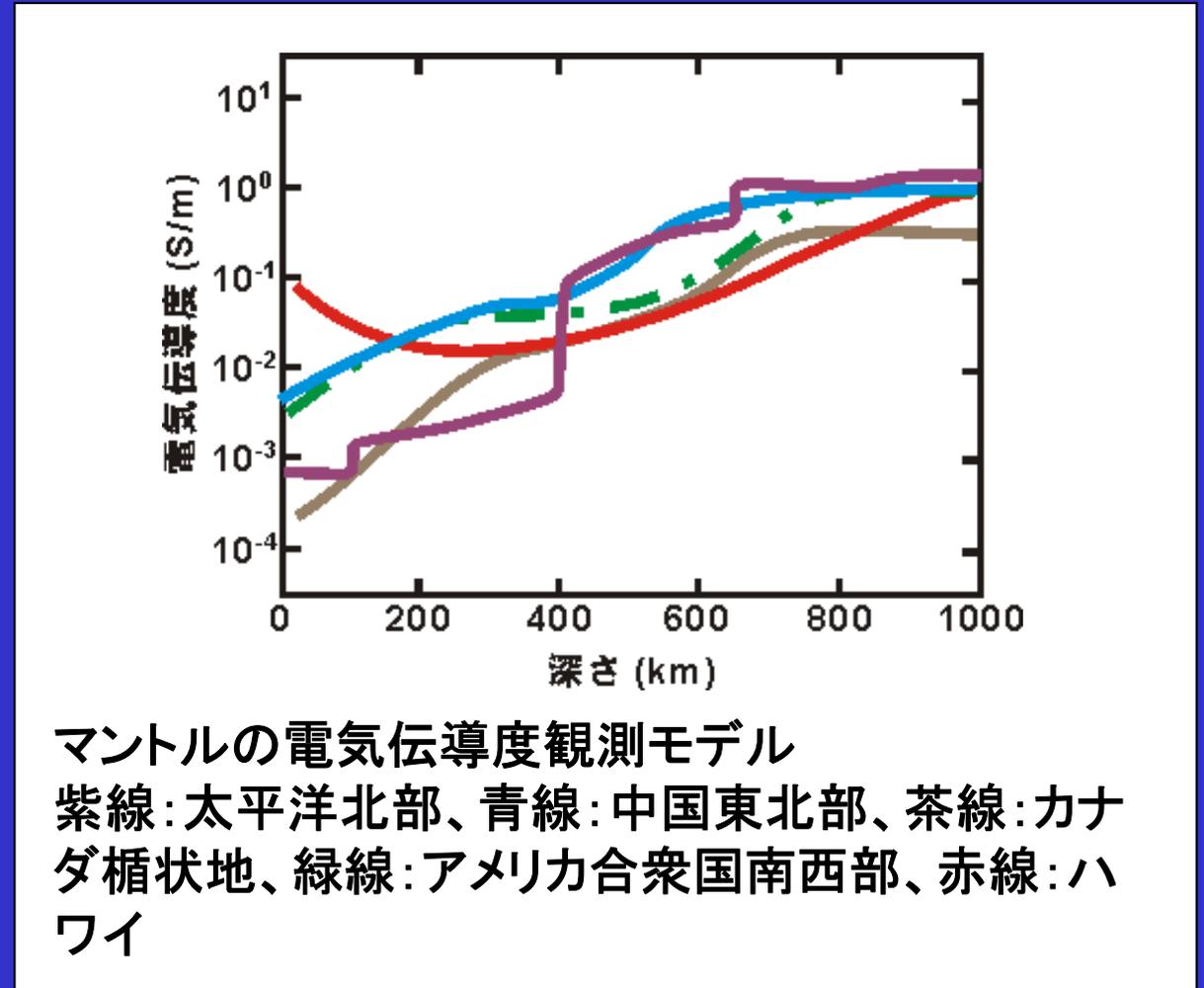
マントル上部の電気伝導度分布

- 地球内部の電気伝導度観測：地震に比べるとはるかに精度が悪い
- マントルの電気伝導度： 10^{-4} – 10^0 S/m
 - 金属(10^6 S/m)よりはるかに低い
 - マントルは金属ではなく、岩石



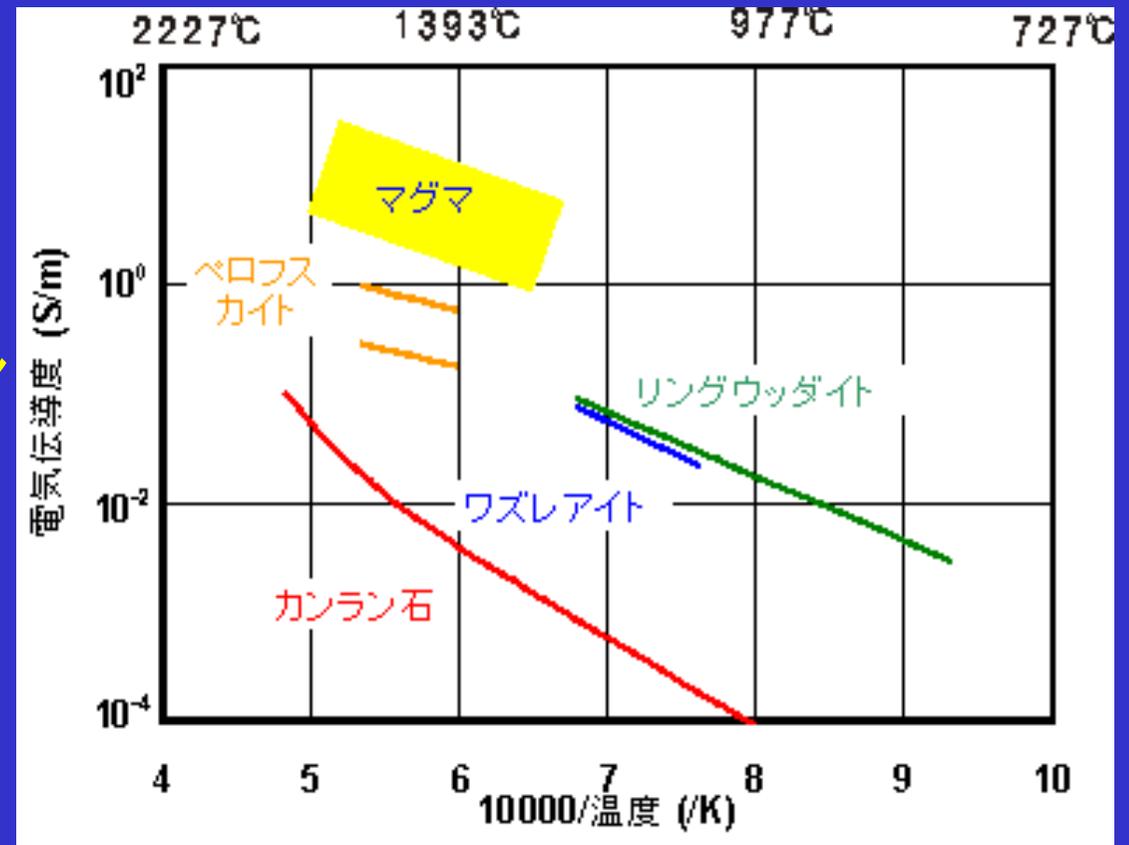
マントル上部の電気伝導度分布

- 深くなるに従って、電気伝導度が上がる
- 上部マントル: 地域的なばらつきが大きい
 - $10^{-4} \sim 10^{-1}$ S/m
- 下部マントル最上部: 地域的なばらつきが小さい
 - $10^{-1} \sim 10^0$ S/m
- 上部マントル最上部には、場所によっては高電気伝導度域が存在する。[HCLと呼ばれる]



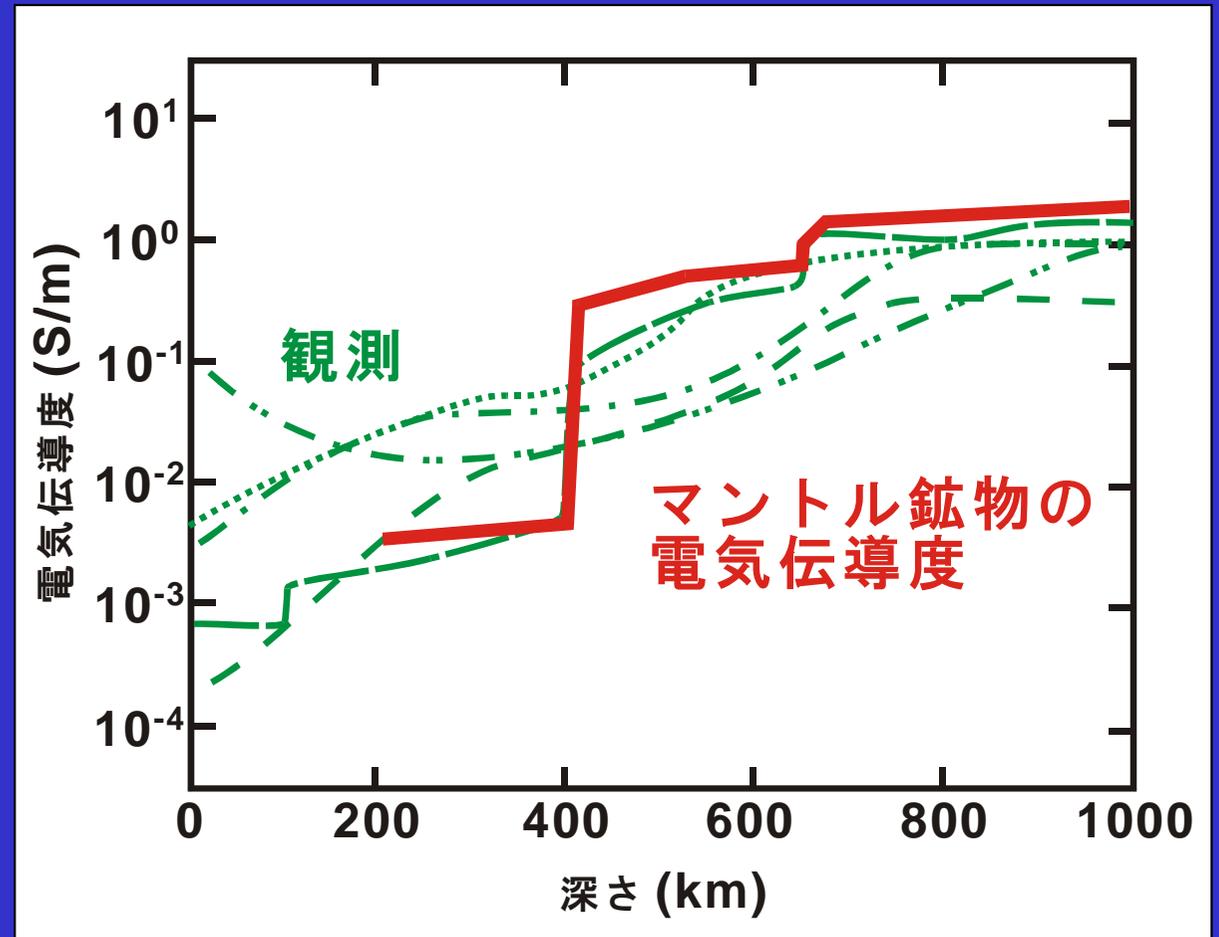
マントル主要構成鉱物の電気伝導度

- 高圧で安定な鉱物ほど高い電気伝導度
 - カンラン石 ⇒ ワズレアイト ⇒ リングウッドイト ⇒ ペロフスカイト
- 高圧で安定な鉱物ほど温度依存性が小さい



マントル上部の電気伝導度分布

- 赤線は、マントル鉱物の組成と量比を仮定し、常識的なマントルの温度分布を仮定して計算した、マントル岩石の予想電気伝導度分布
- マントルの電気伝導度の増加 ← マントル構成鉱物の相転移のため
- 深くなるに従って、電気伝導度の地域的な違いが小さくなる ← 高压鉱物ほど、電気伝導度の温度依存性が小さいため。



地球内部構造のまとめ

核

- 内核
 - 地球の総質量の1.7%、深さ5,150-6,370 km
 - 固体金属
 - マントルとはくっついておらず、溶けた外核中に浮いている
- 外核
 - 地球の総質量の30.8%、深さ 2,890-5,150 km
 - 金属の液体、
 - 純粋な溶融鉄より10%軽い。硫黄などの軽元素のため

地球内部構造のまとめ

マントル

- 下部マントル

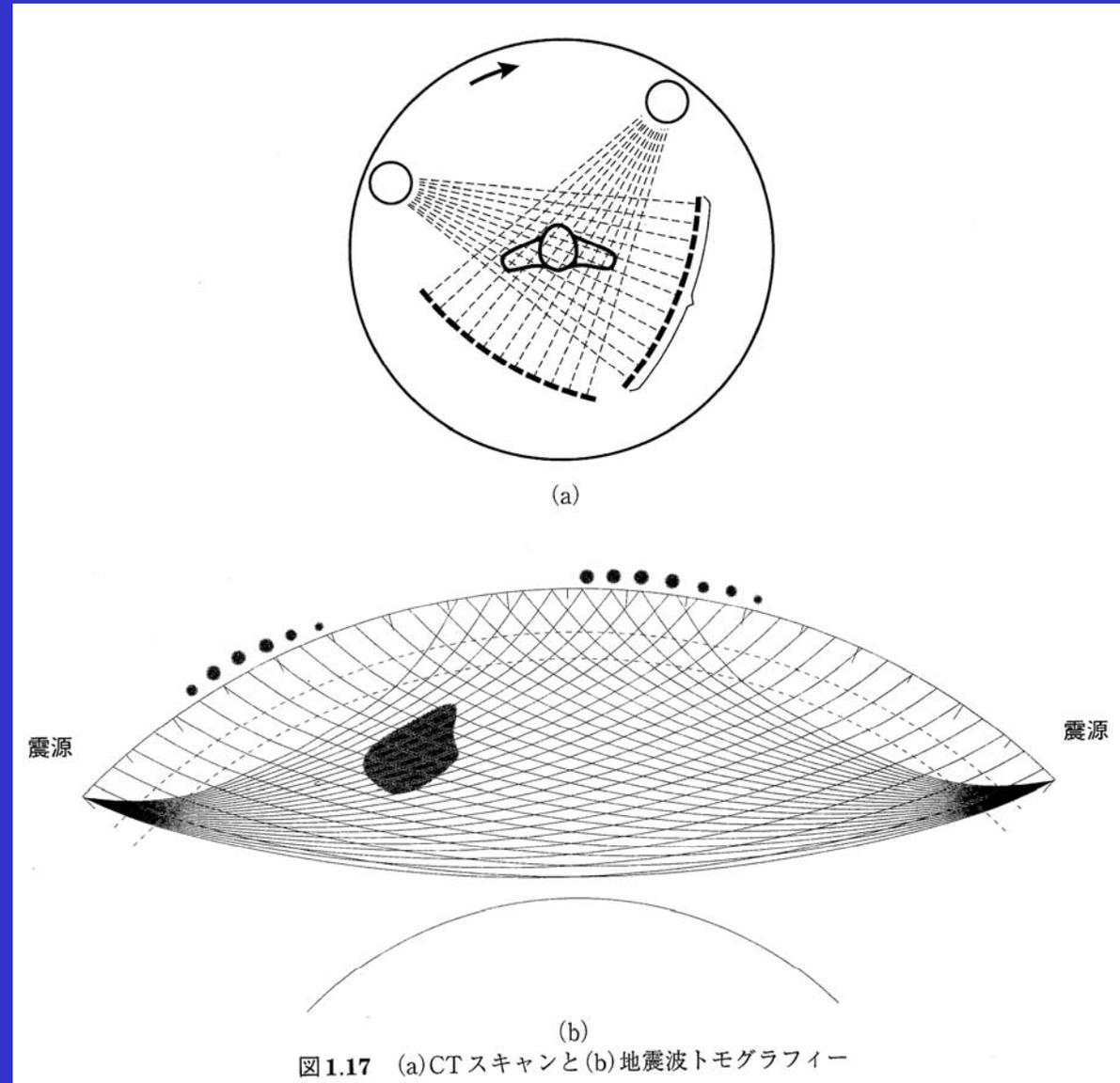
- 地球の総質量の52.2%、深さ660-2890 km
- ケイ素、マグネシウム、鉄、酸素が主成分、カルシウムとアルミニウムが副成分
- 特に $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ ペロフスカイトを主体とする岩石

- 上部マントル

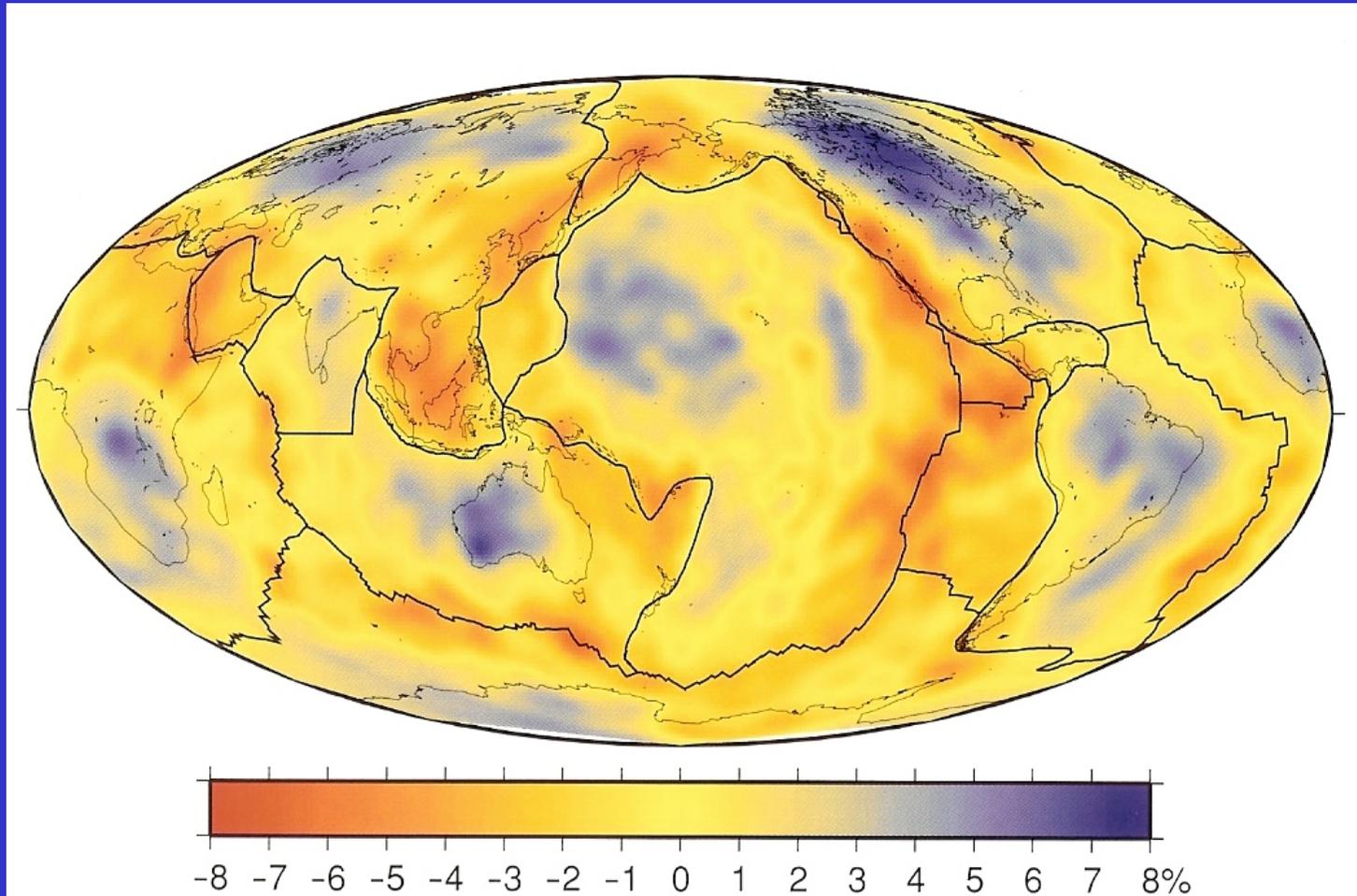
- 地球の総質量の17.8%、深さ ~660km
- ケイ素、マグネシウム、鉄、酸素が主成分、カルシウムとアルミニウムが副成分
- 特に $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ 鉱物を主体とする岩石

詳細な地震学的構造 マントルトモグラフィ

- 色々な方向を通る波を用いて解析することにより、地震波速度が他より速い領域・遅い領域の存在を検出する
- 高速度域：他より低温、低速度域：他より高温



マントル最上部の速度異常



(b)

図2 表面波トモグラフィ

(a) 35秒, (b) 90秒のレイリー波の伝播速度 (ハーバード大学のモデル).

- 安定大陸
下⇒高速度⇒低温
- 海嶺・造山帯下
⇒低速度⇒高温、火山活動

海嶺の生成と、海洋地殻の沈み込み

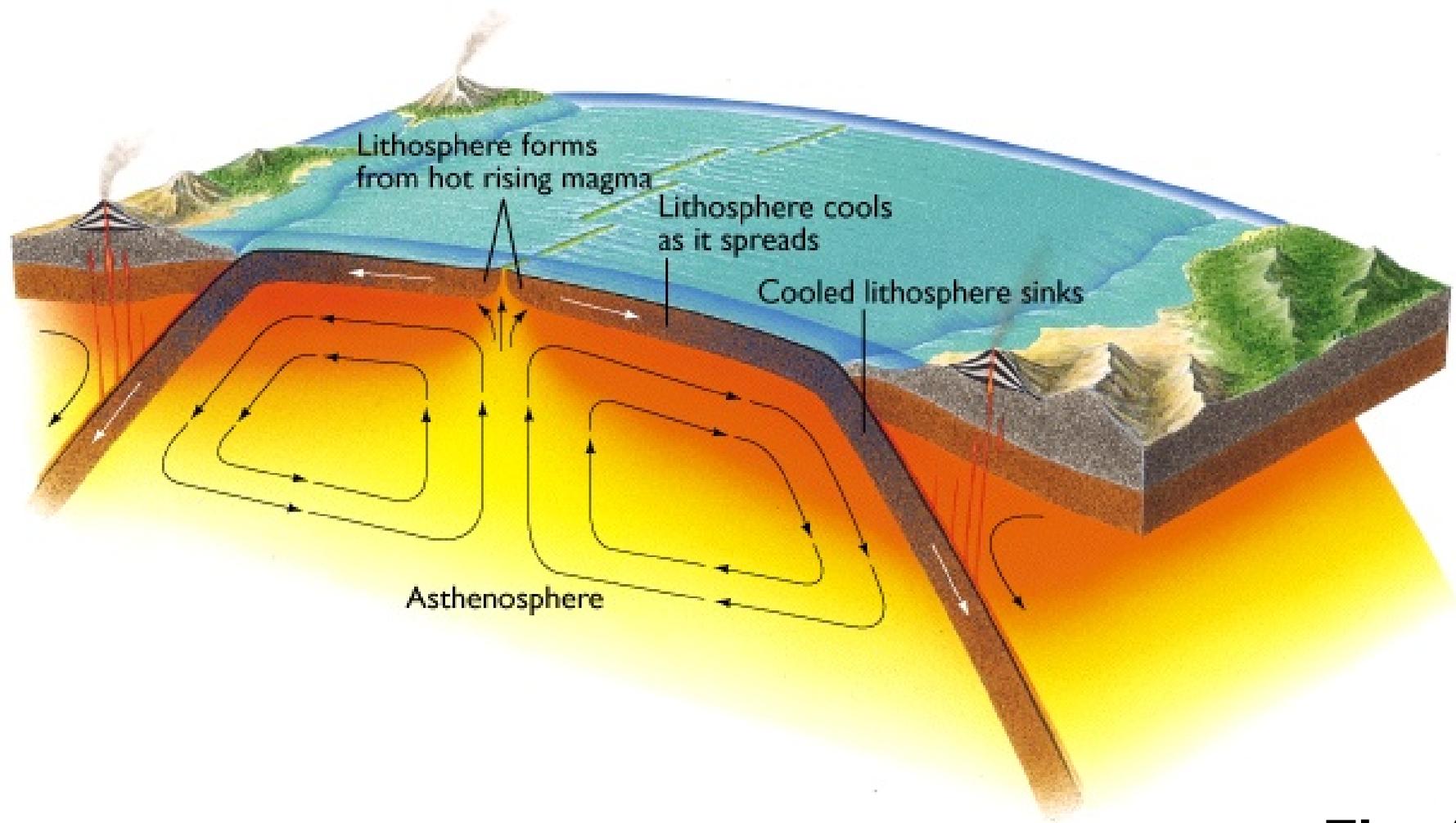
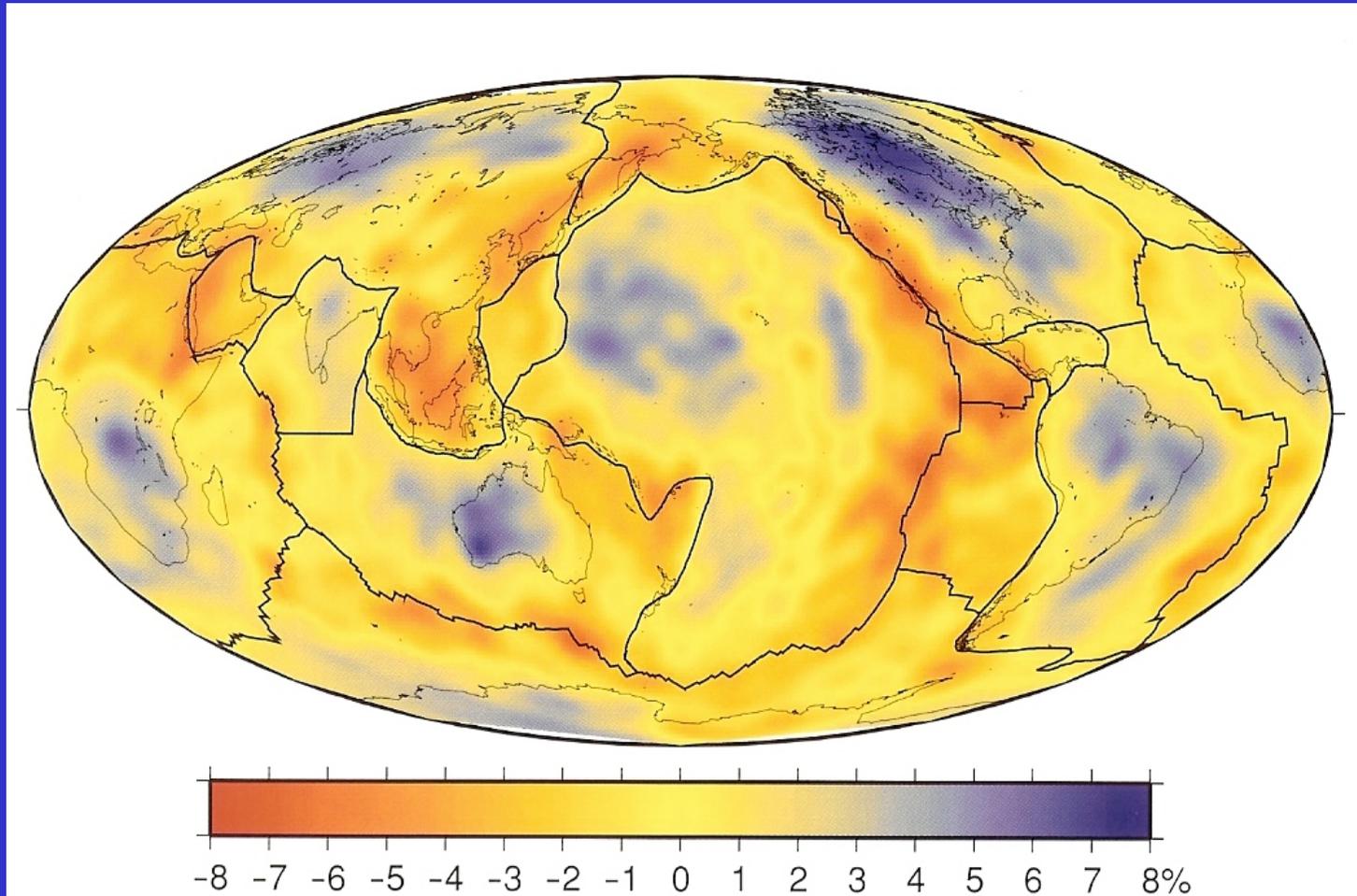


Fig. 19.8

マントル最上部の速度異常



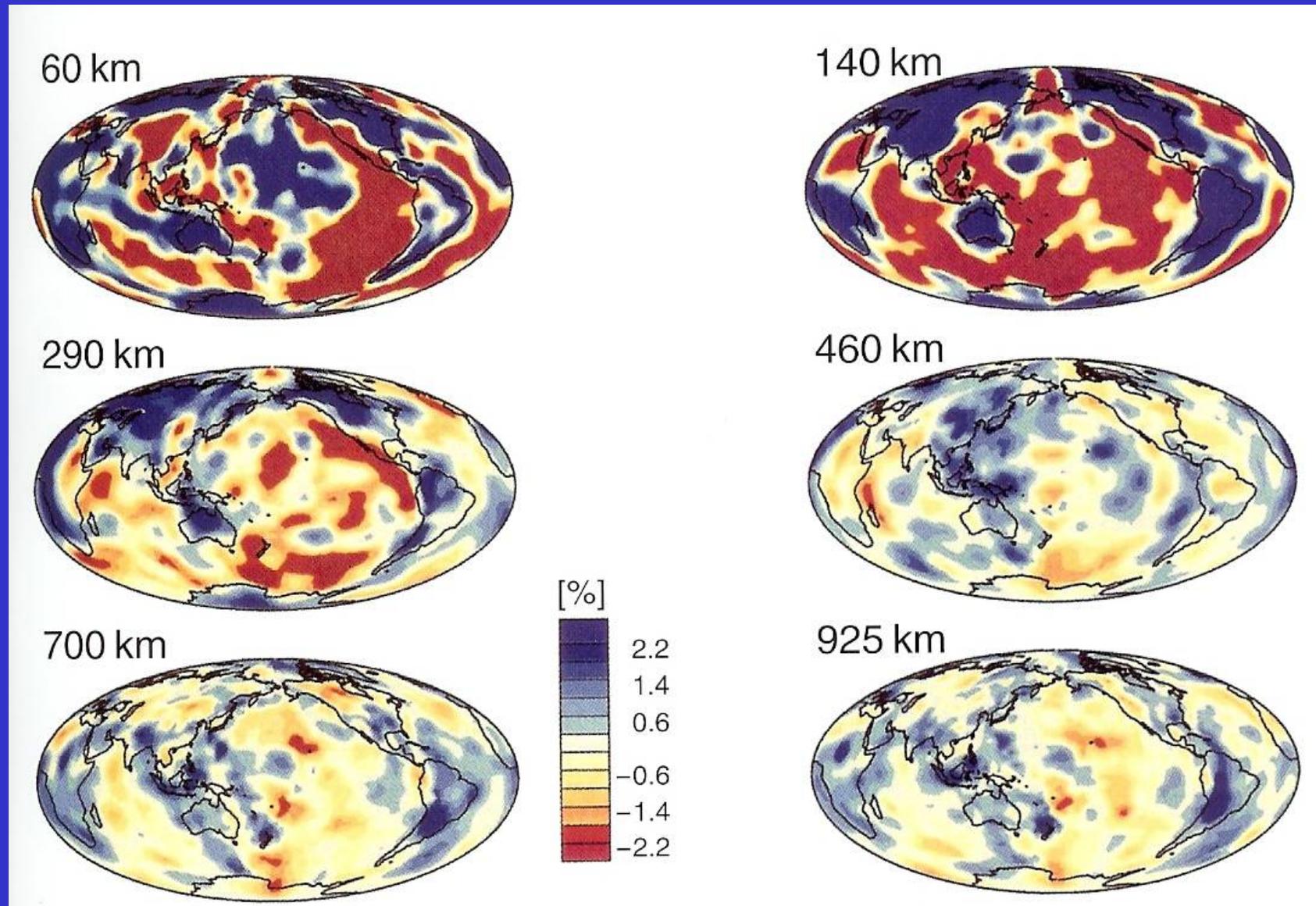
(b)

図2 表面波トモグラフィ

(a) 35秒, (b) 90秒のレイリー波の伝播速度 (ハーバード大学のモデル).

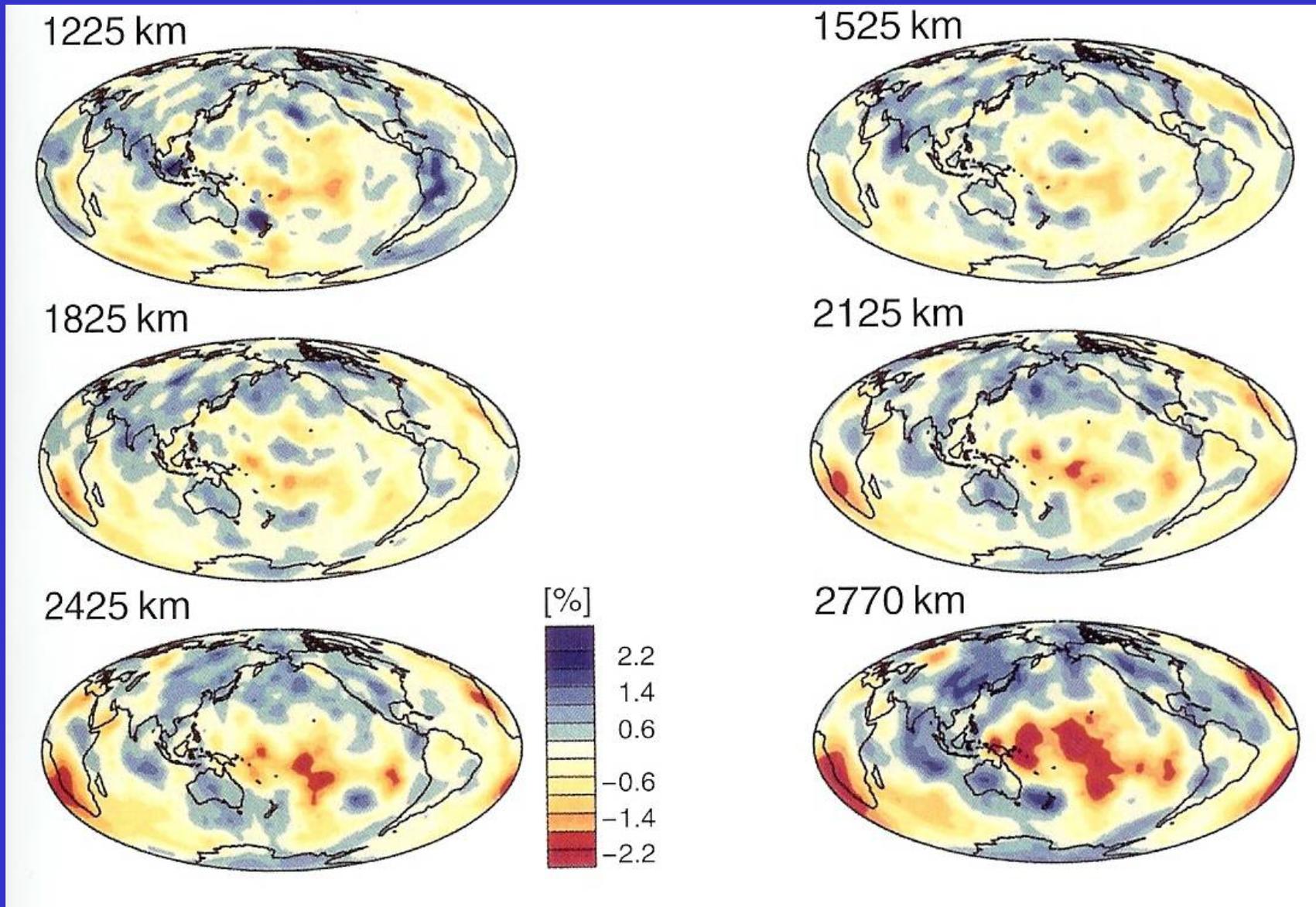
- 安定大陸
下⇒高速度⇒低温
- 海嶺・造山帯下
⇒低速度⇒高温、火山活動

上部マントルの速度異常



- 安定大陸下: 高速度(冷たい)、海嶺下: 低速度(熱い)
- この特徴は、深くなるに従って減少

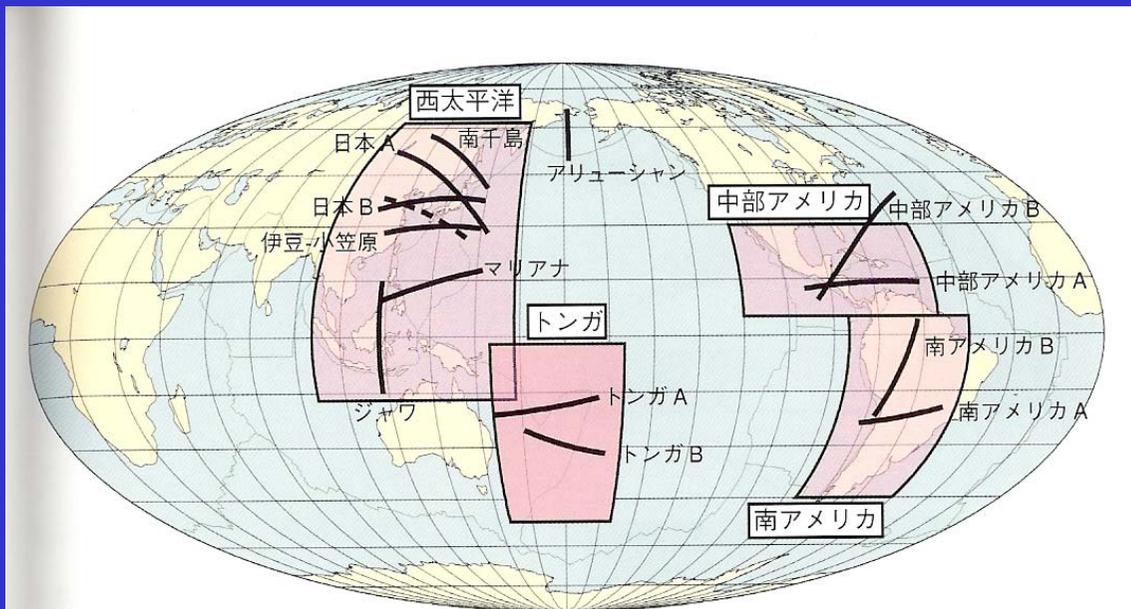
下部マントルの速度異常



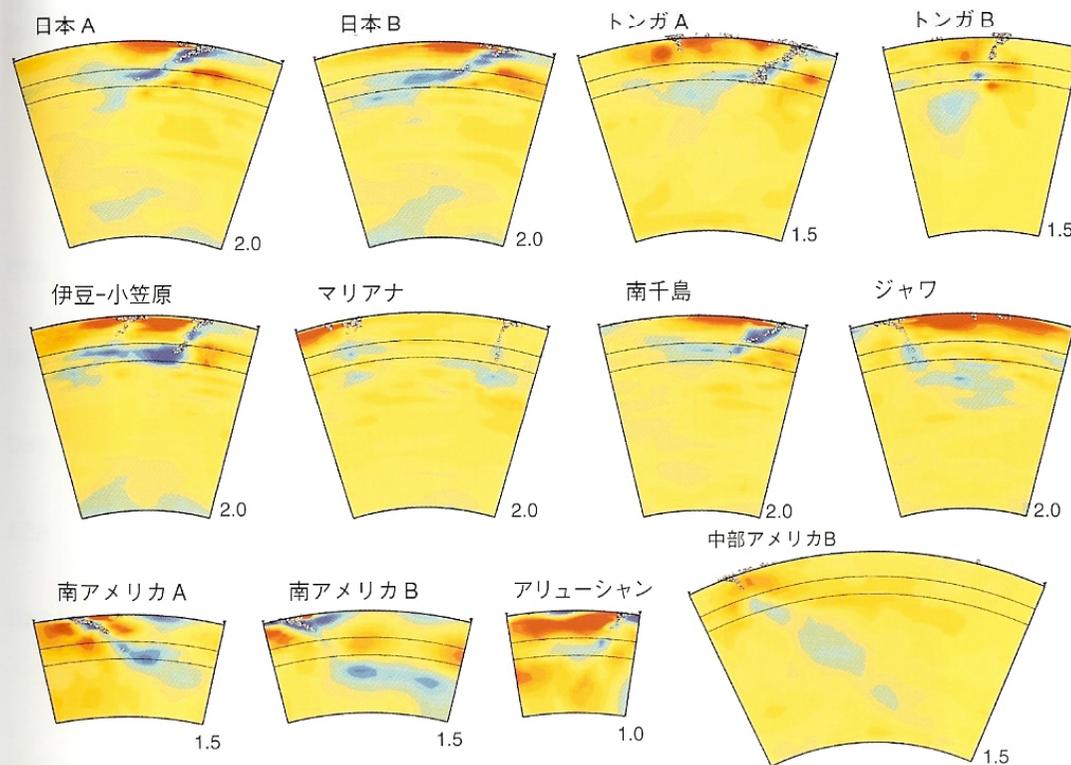
- 地表の特徴とは関係ない、下部マントル上部は速度が均一
- 最下部では巨大な低速度(高温)域がある(南太平洋と南アフリカ)

造山帯下の詳細な速度構造

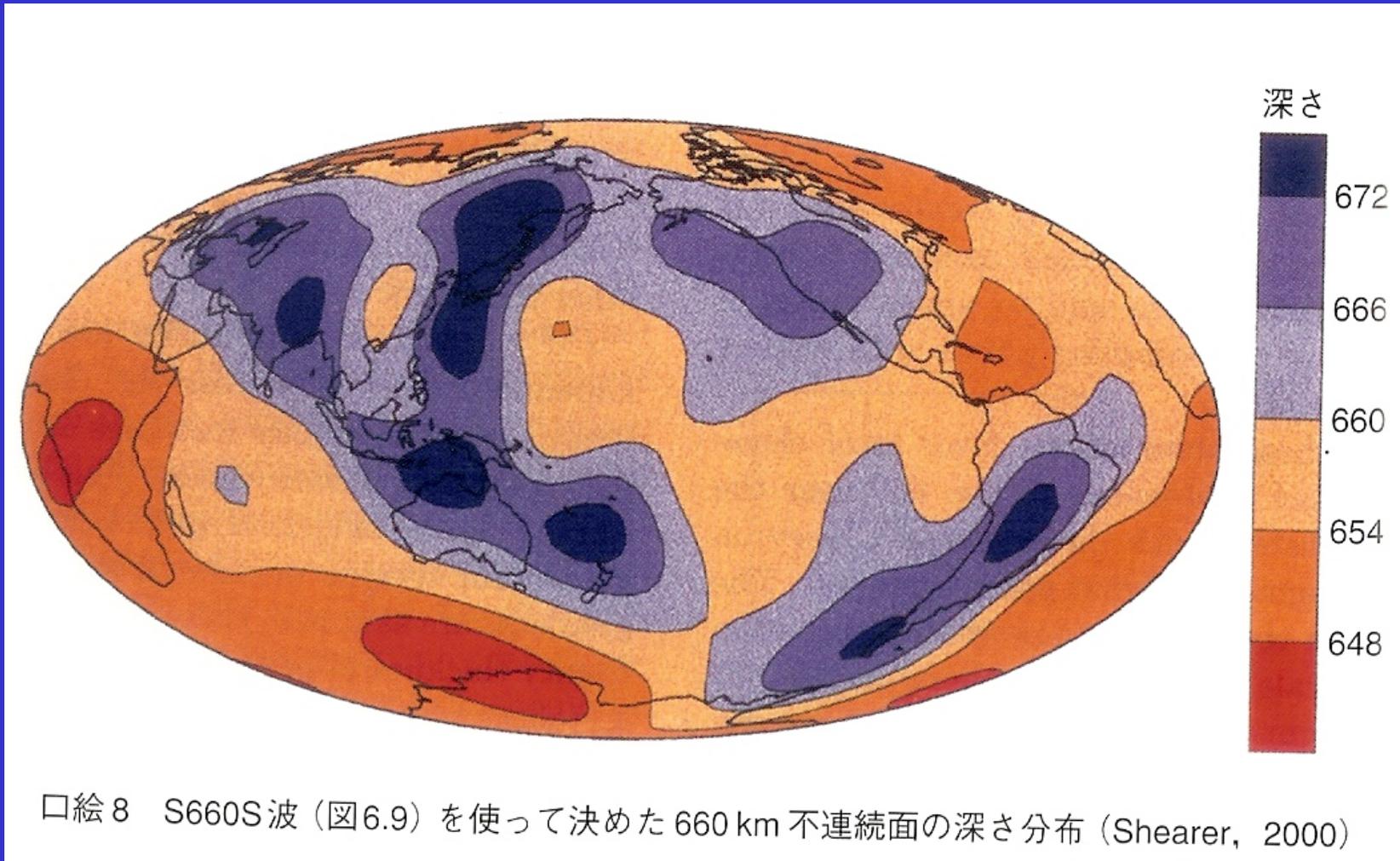
- 造山帯の下には地震波高速度域が存在
 - 板状をしている
 - 海洋地殻がマントルに潜りこんでいる為
 - 上部マントルに滞留しているものもあれば、下部マントル深部にまで入り込んでいるものもある



(a)



上部・下部マントル境界の起伏



- 西太平洋の造山帯の下では境界は沈んでいる
- その他は、陸・海に関係しない