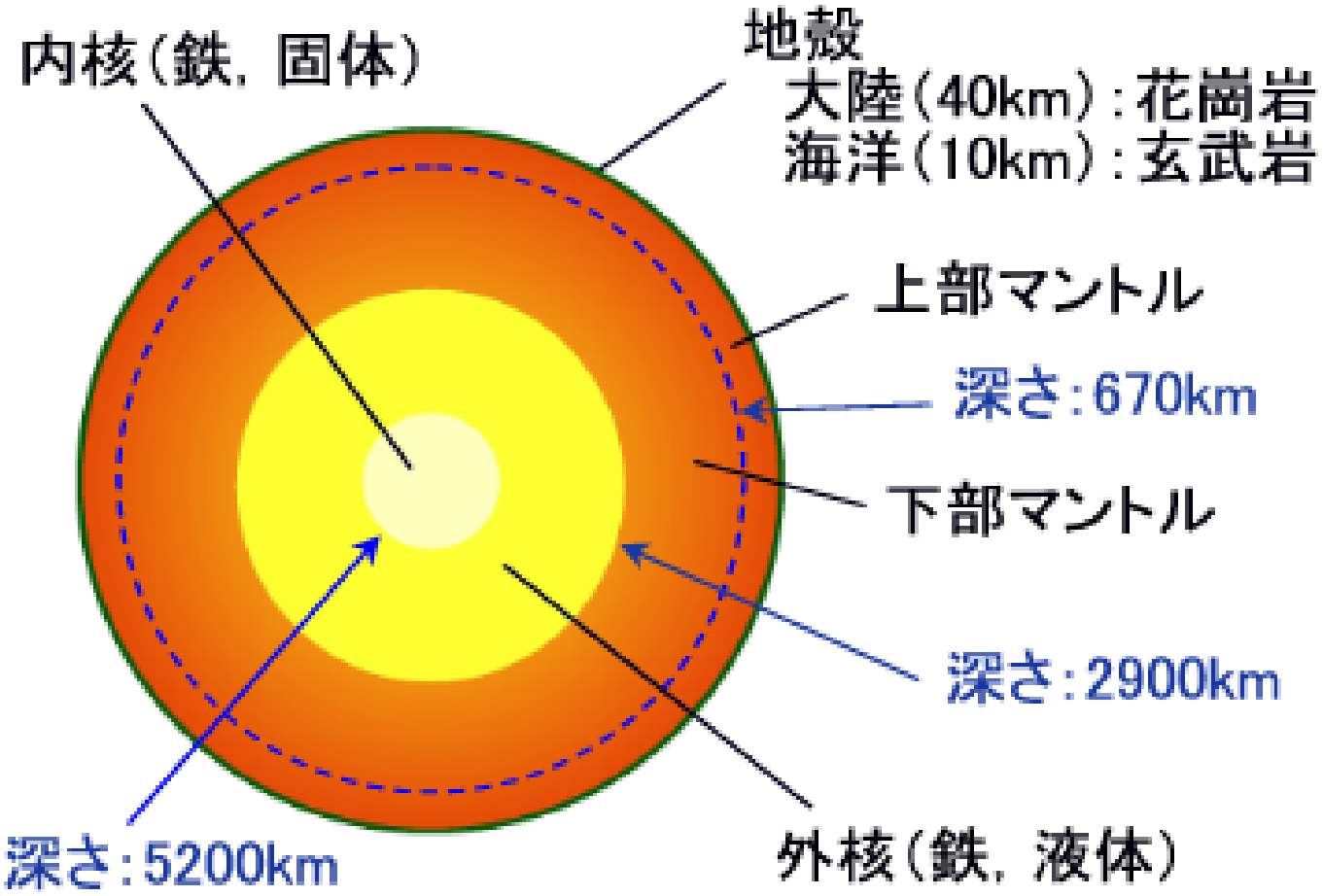
# 地球内部物理学

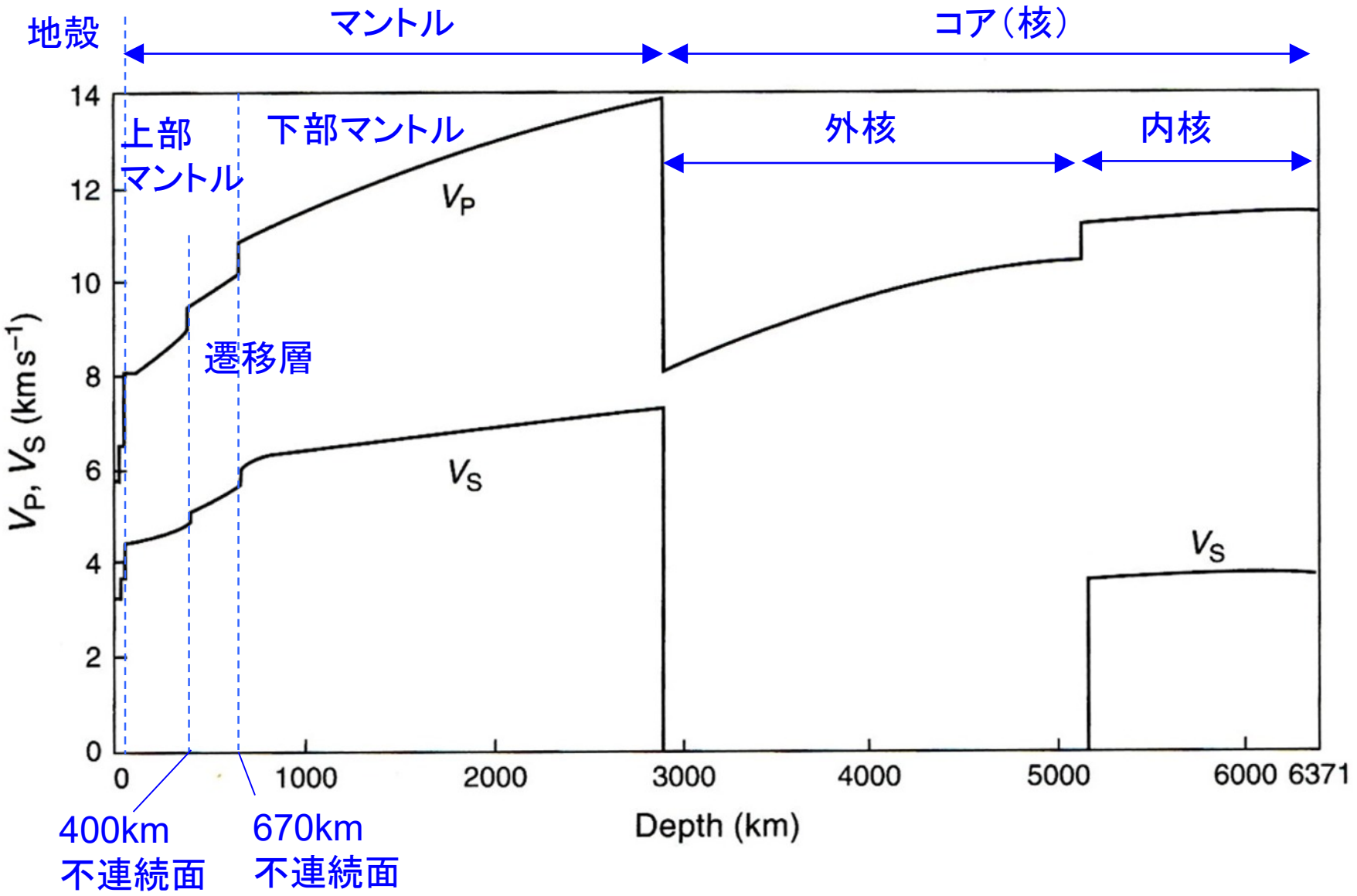
2020.1.10

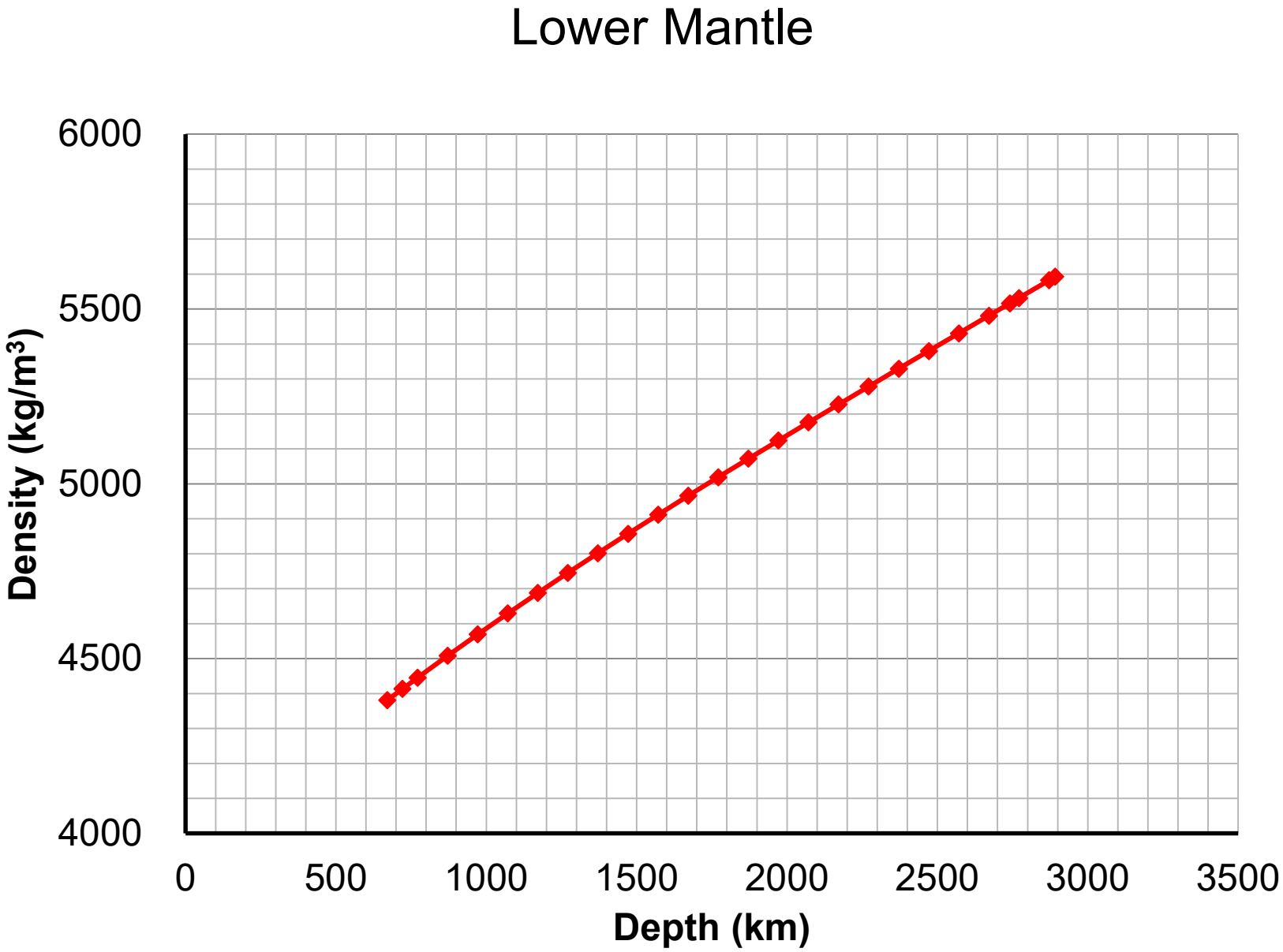
# 地球の層構造

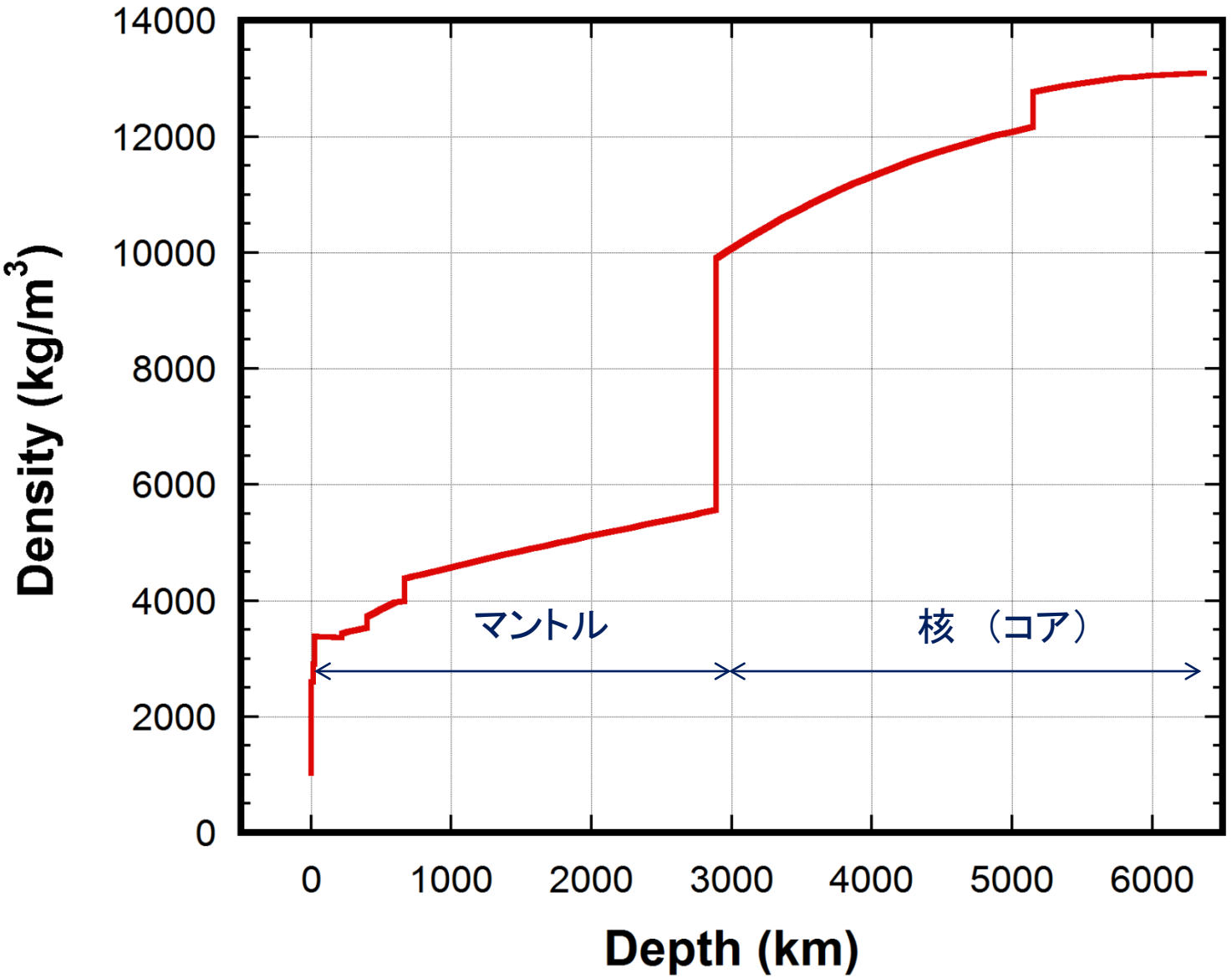

内核（鉄，固体）
地殻
大陸（40km）：花崗岩
海洋（10km）：玄武岩
上部マントル
深さ：670km
下部マントル
深さ：2900km
深さ：5200km
外核（鉄，液体）

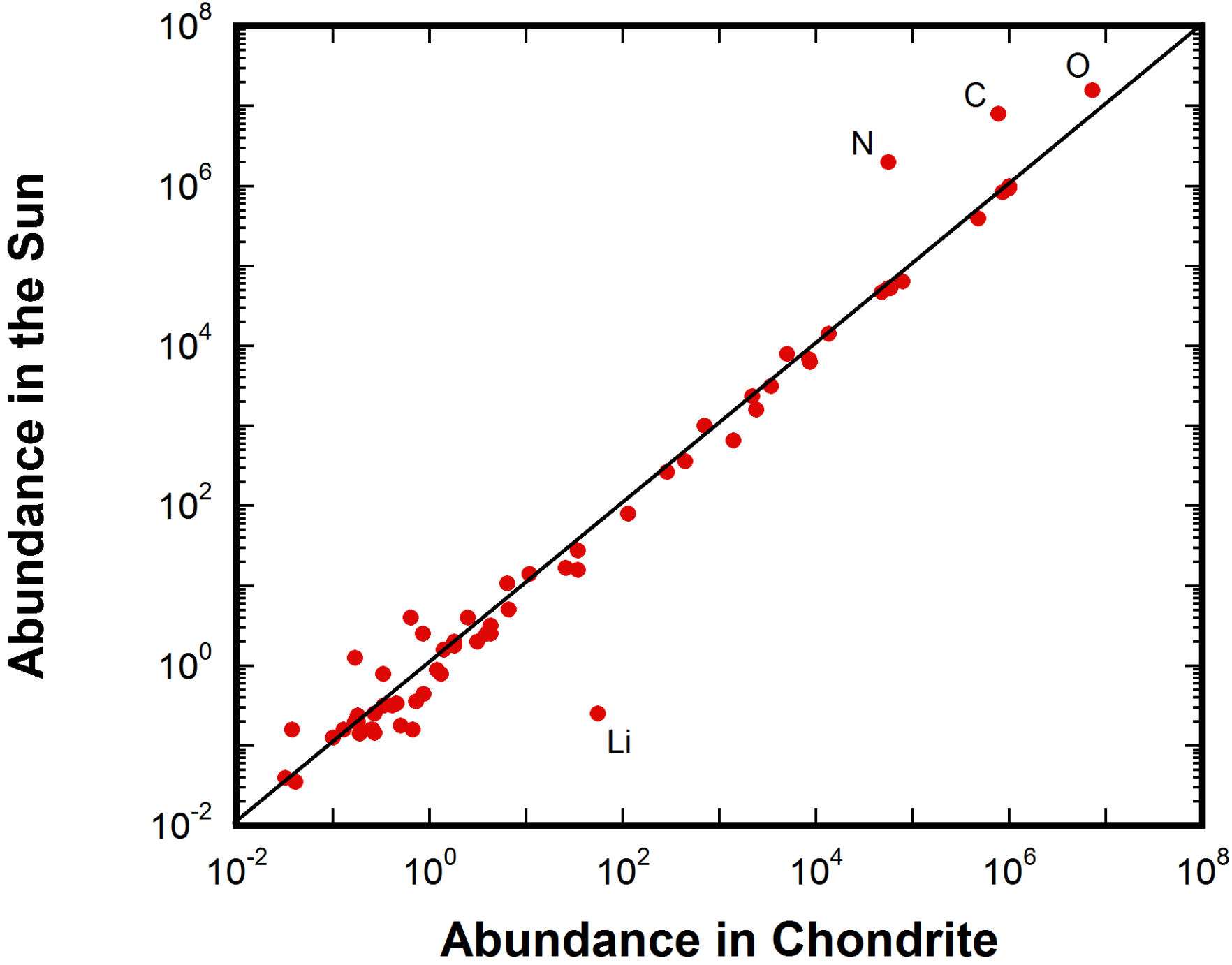
# 球対称地球モデル

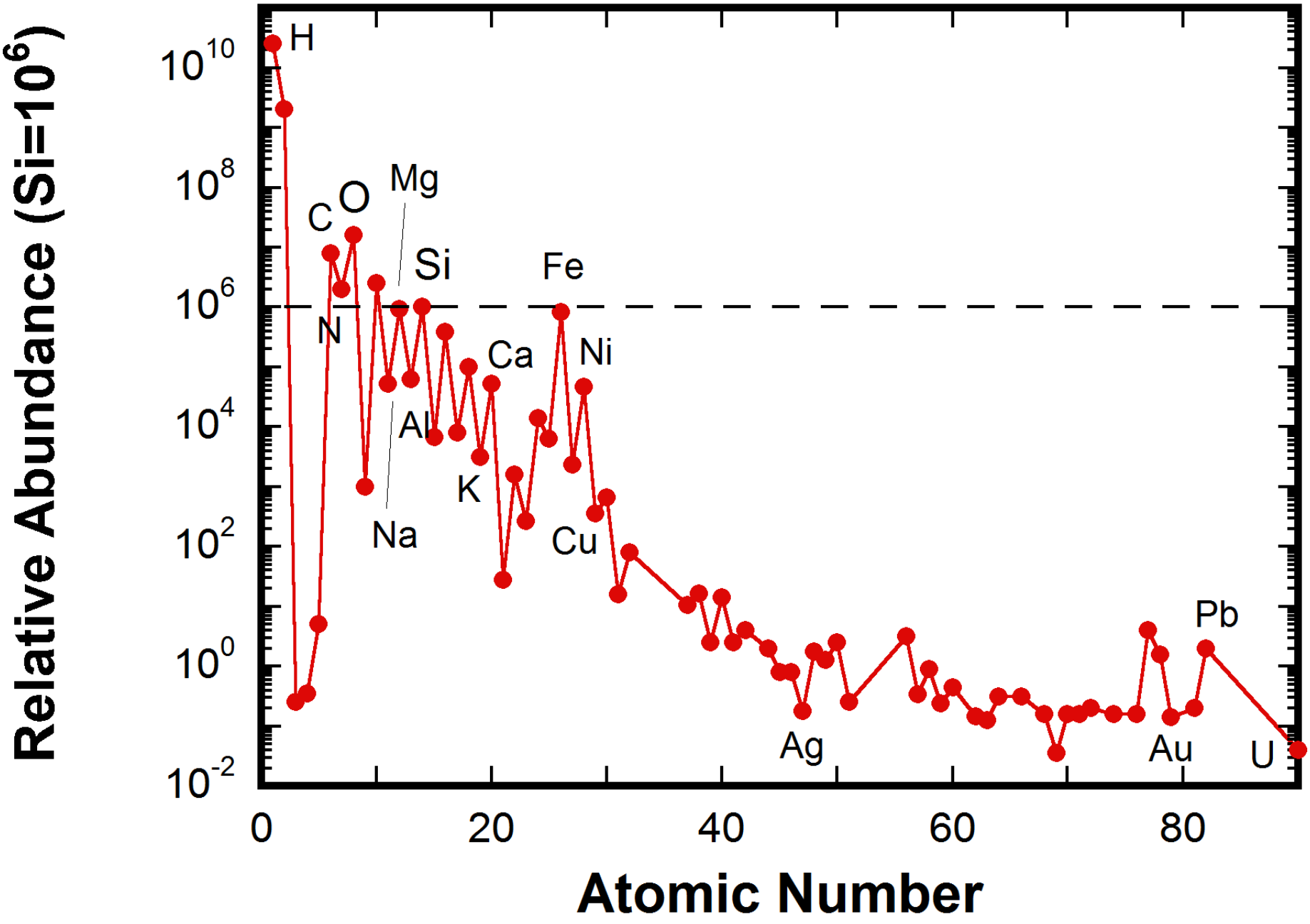
IASP91

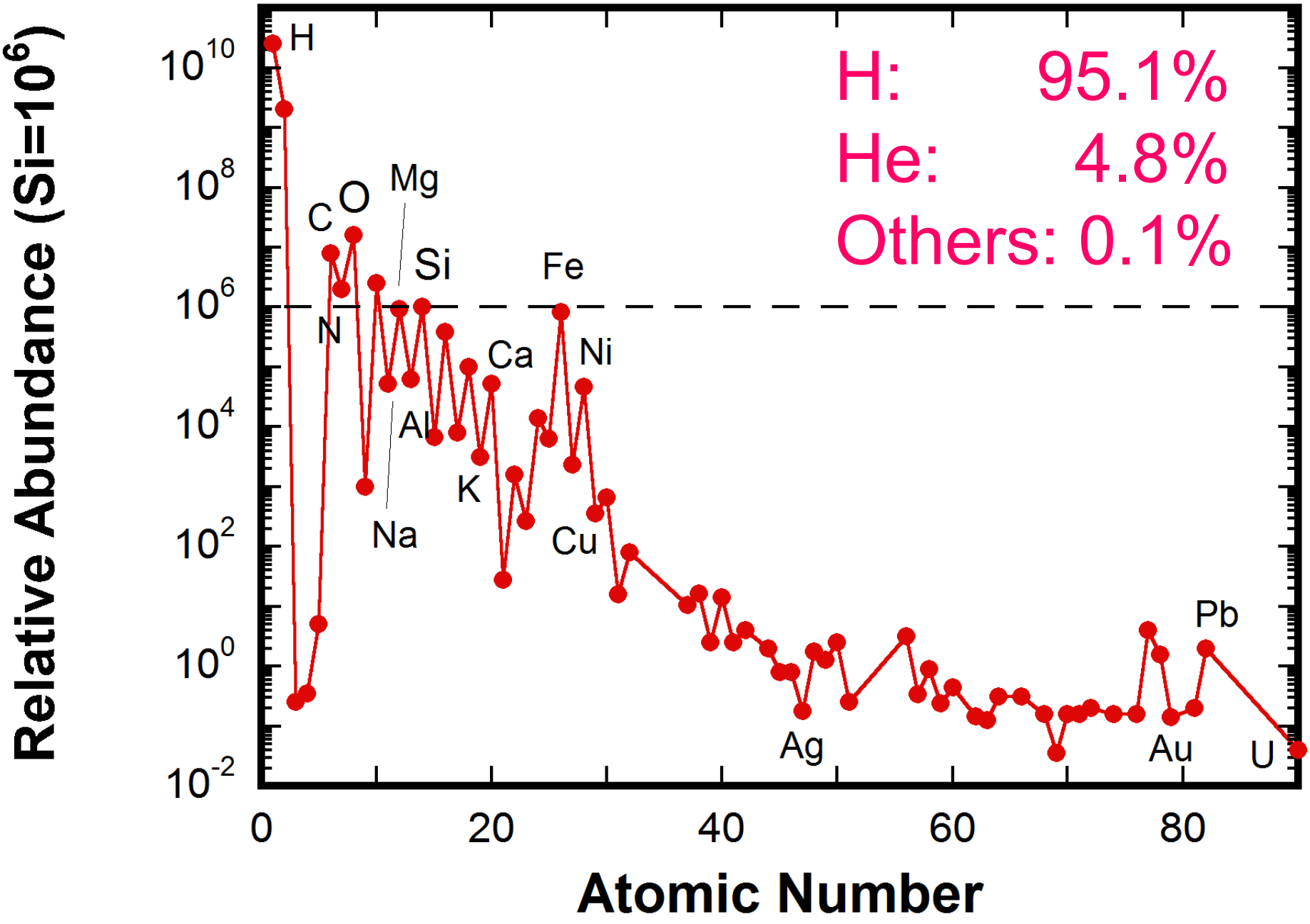



Lower Mantle
6000
5500
5000
4500
4000
Density (kg/m³)
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
3500
Depth (km)


14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
Density (kg/m3)
マントル
核 （コア）
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
Depth (km)

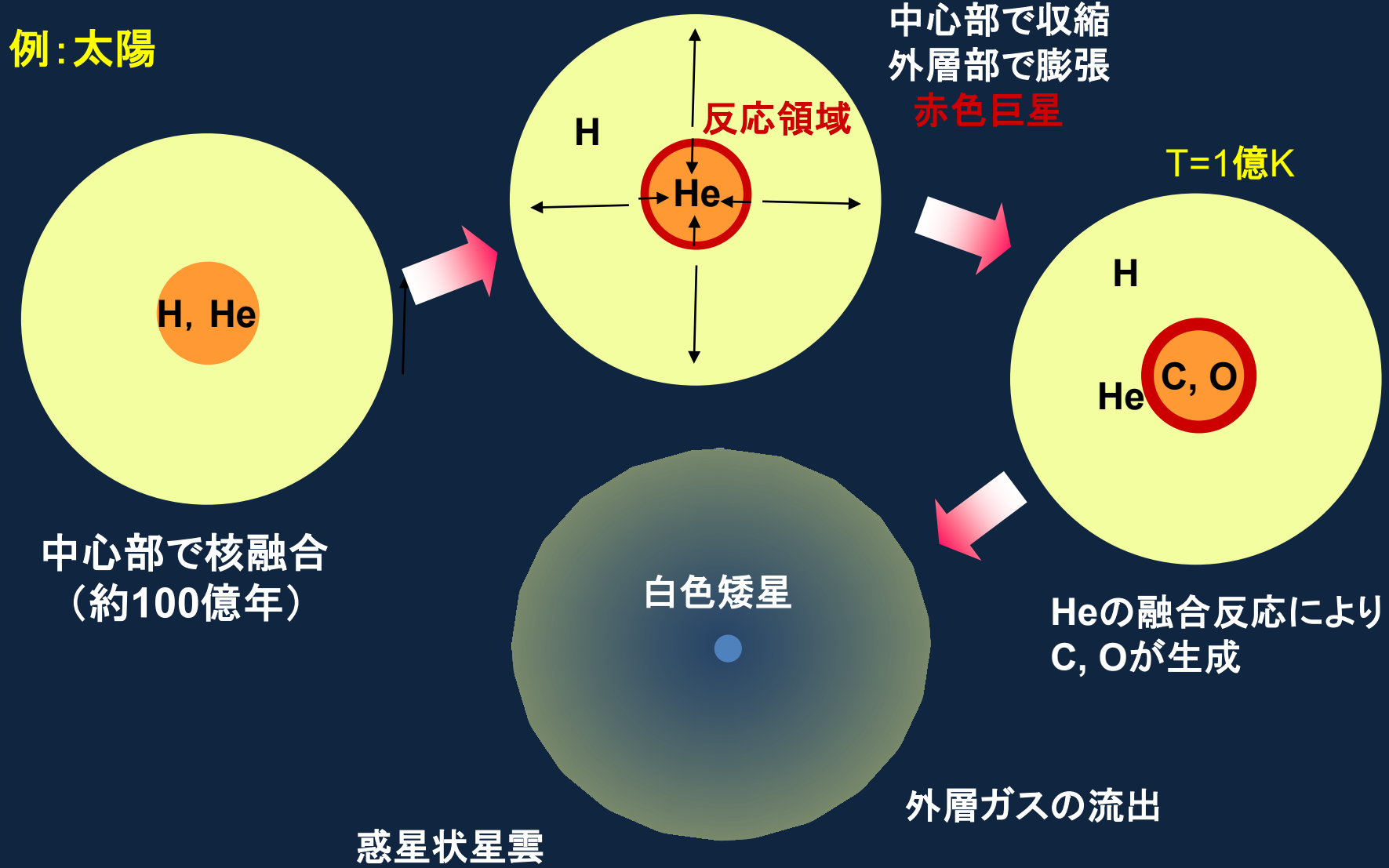

Abundance in the Sun
Abundance in Chondrite
$10^{8}$
$10^{6}$
$10^{4}$
$10^{2}$
$10^{0}$
$10^{-2}$
$10^{-2}$
$10^{0}$
$10^{2}$
$10^{4}$
$10^{6}$
$10^{8}$
O
C
N
Li


Relative Abundance (Si=10^6)
10^10
10^8
10^6
10^4
10^2
10^0
10^-2
0
20
40
60
80
Atomic Number
H
C
O
N
Mg
Si
Na
Al
K
Ca
Fe
Ni
Cu
Ag
Au
Pb
U

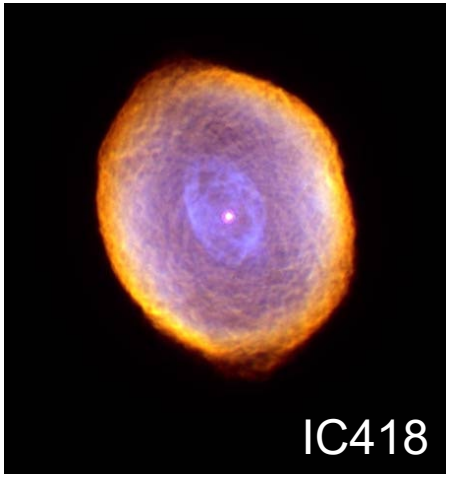

Relative Abundance (Si=10^6)
10^10
10^8
10^6
10^4
10^2
10^0
10^-2
0
20
40
60
80
Atomic Number
H
C
O
Mg
Si
Fe
N
Ca
Ni
Al
K
Na
Cu
Ag
Pb
Au
U
H: 95.1%
He: 4.8%
Others: 0.1%

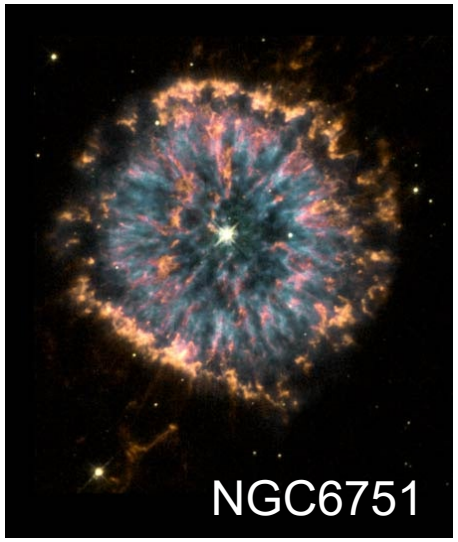

時間
プランク時代
$10^{-43}$秒
重力が分岐
大統一時代
T= $10^{32}$ K
インフレーション
$10^{-38}$秒
強い力が分岐
宇宙の高速膨張
ビッグバン
$10^{-10}$秒
電磁力と
弱い力が分岐
粒子の時代
クォークと反クォーク
が対生成される
0.001秒
物質が反物質を
上回る
素粒子が結合して
陽子，中性子を生成
T= $10^{12}$ K
元素合成
物質優勢の時代始まる
3分
T= $10^{9}$ K
ヘリウム原子核の
生成
陽子，中性子が結合して
重水素原子核，ヘリウム原子核
を生成
原子の時代
ヘリウムや重水素
などの原子核が出現
38万年
水素原子の生成
宇宙の晴れ上がり
暗黒時代
最初の星が形成
10億年
宇宙が完全電離
銀河系時代
銀河の形成
60億年
ダークエネルギー
の台頭
加速膨張
現在
（137億年）

# 星の進化： 0.8Ms<M < 8Ms

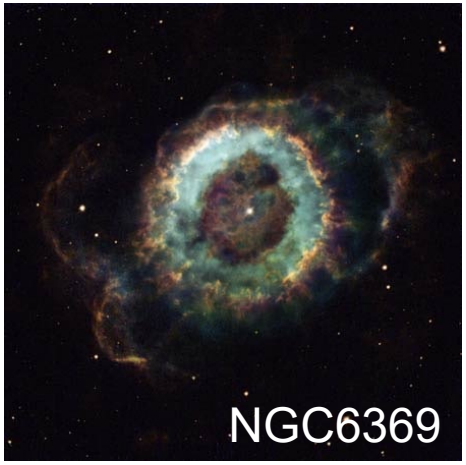


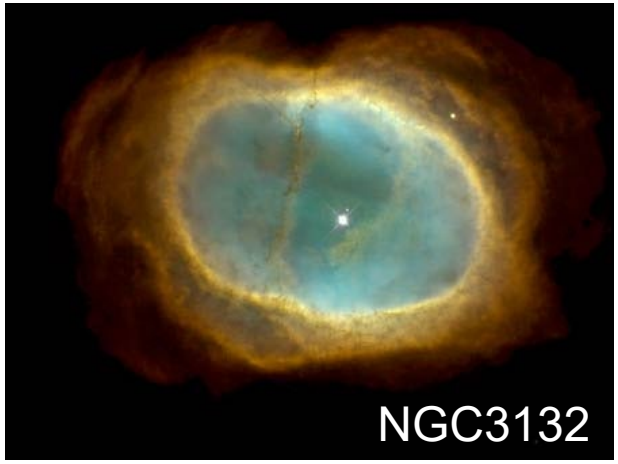
# Hubble Space Telescopeが捉えた惑星状星雲 (sci.esa.int/hubble/gallery)

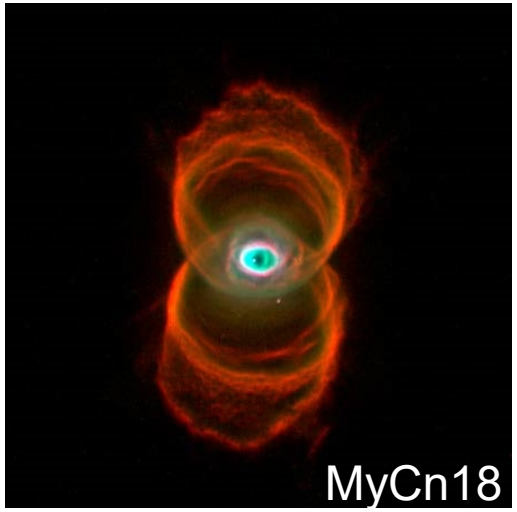


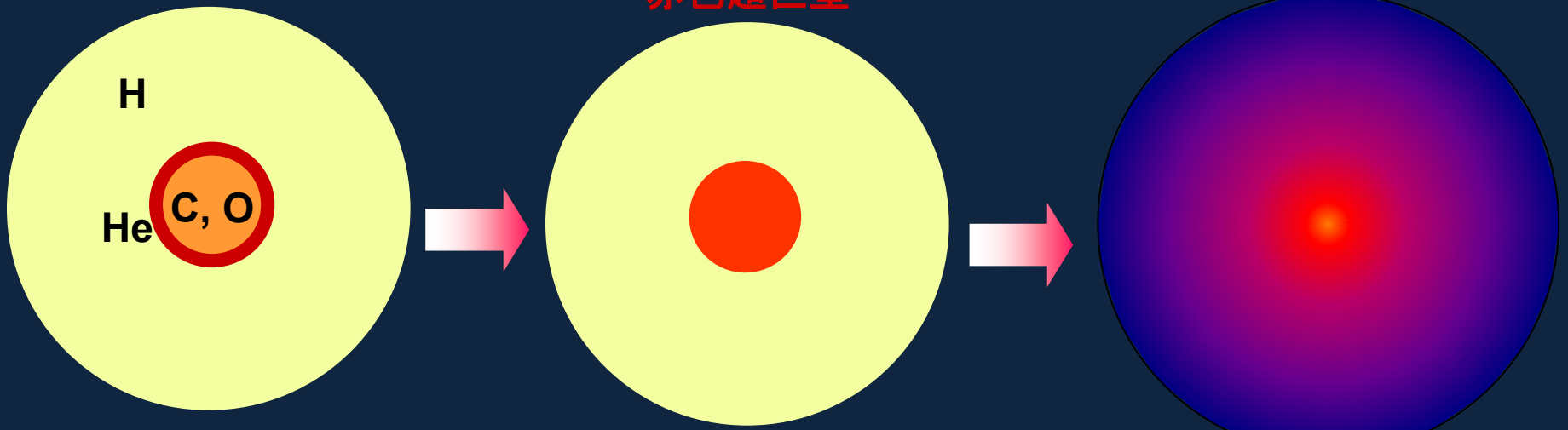




# 星の進化： M~10Ms の場合




赤色巨星

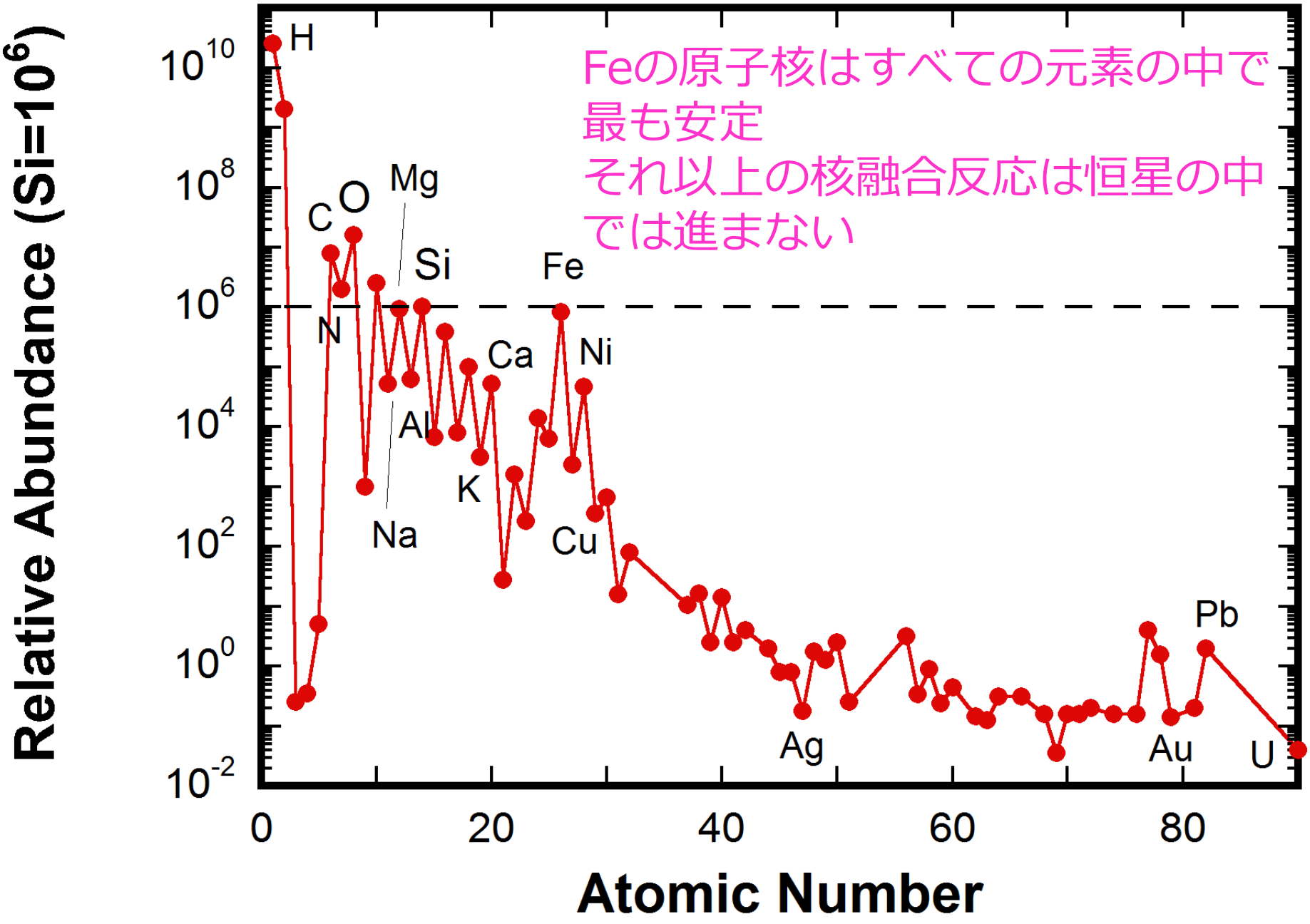
赤色超巨星

中心部でC, Oの融合反応が起き，Ne, Mg, Si, S, Ca, Feが合成される

超新星爆発

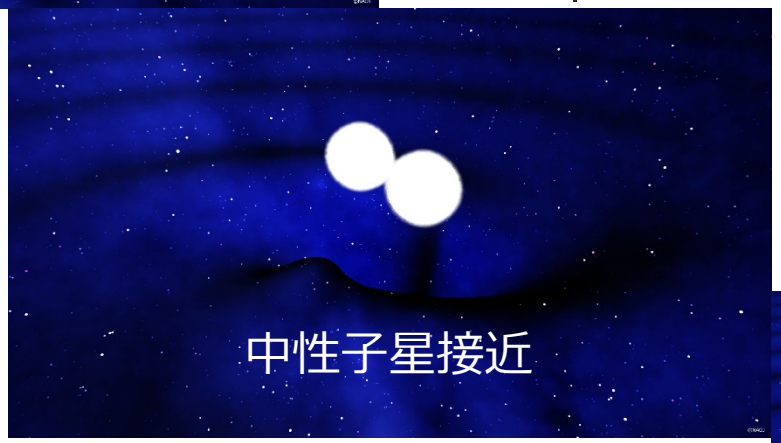
中心部が重力崩壊
Feよりも重い元素はこのプロセスでつくられる

中心は中性子星に

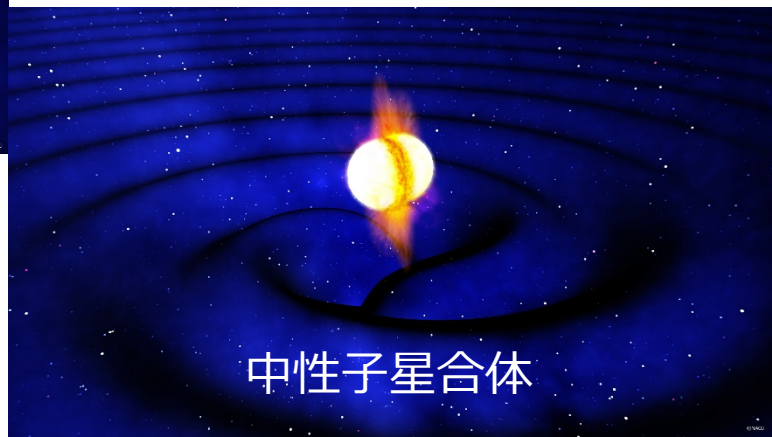

Relative Abundance (Si=10^6)
10^10
10^8
10^6
10^4
10^2
10^0
10^-2
0
20
40
60
80
Atomic Number
H
C
O
Mg
Si
Fe
N
Ca
Ni
Al
K
Na
Cu
Ag
Pb
Au
U
Feの原子核はすべての元素の中で最も安定
それ以上の核融合反応は恒星の中では進まない

# 中性子星の合体


中性子星　半径10 km程度
質量　太陽程度
高密度




Pt, Au, U　などを合成




合体に伴う重力波が
観測されている

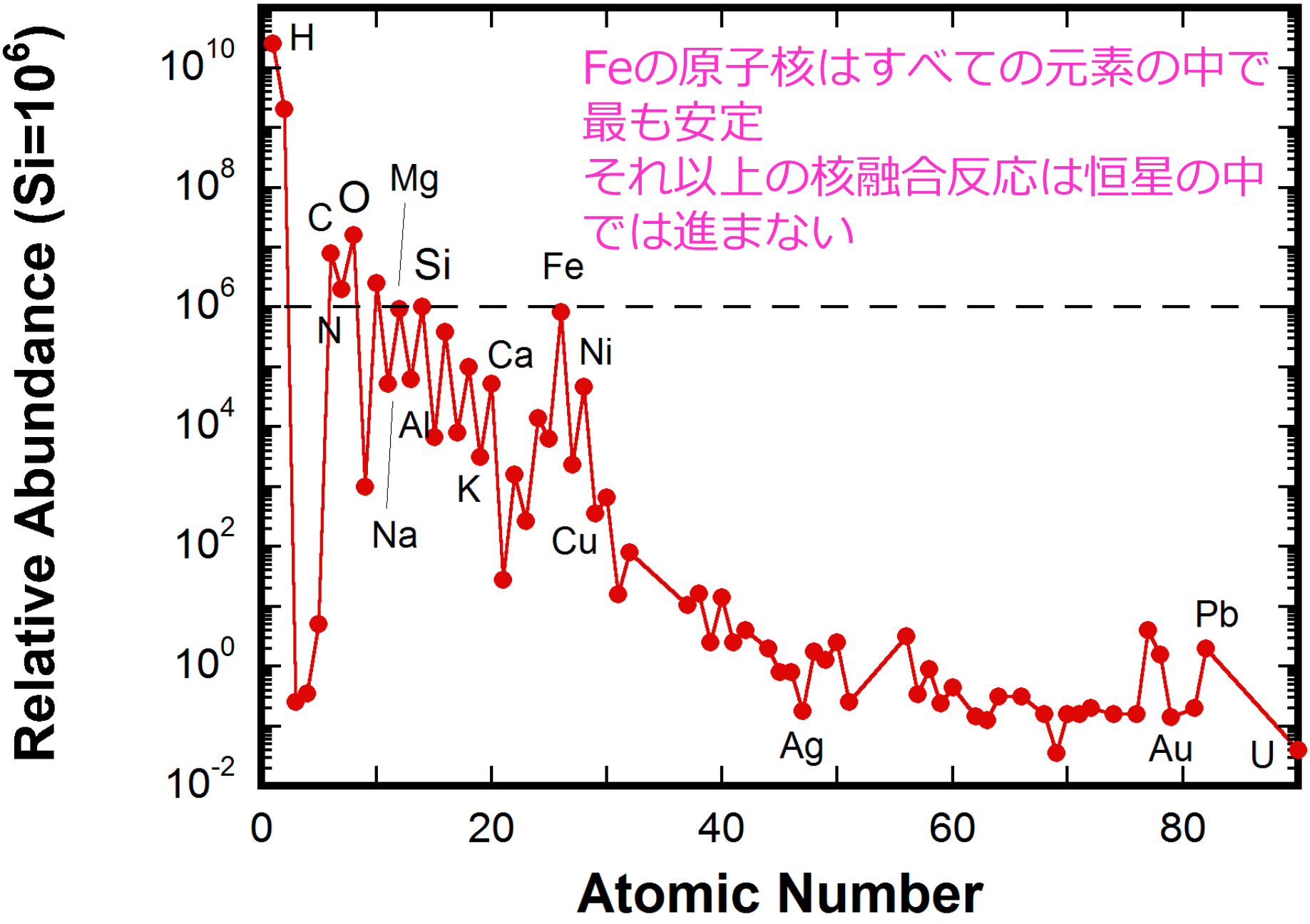
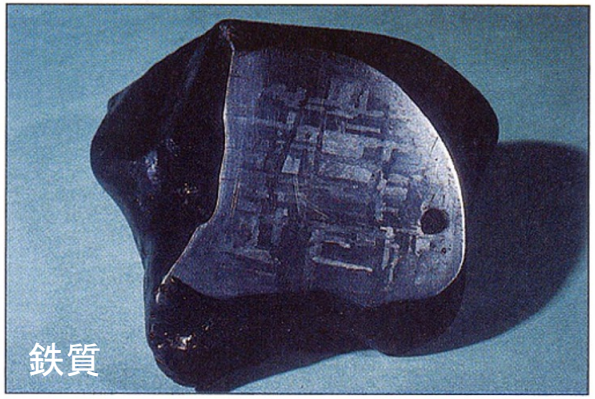
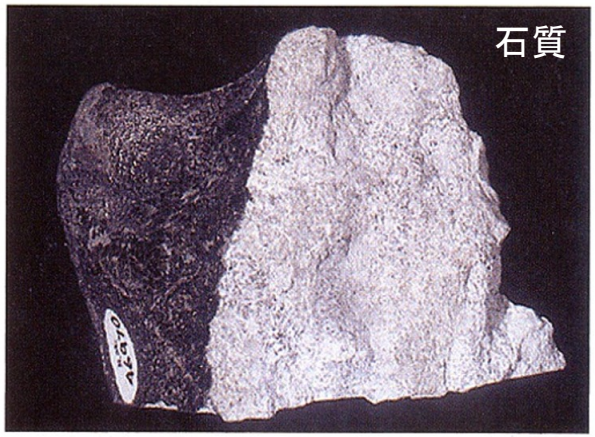

Relative Abundance (Si=10^6)
10^10
10^8
10^6
10^4
10^2
10^0
10^-2
0
20
40
60
80
Atomic Number
H
C
O
Mg
Si
Fe
N
Ca
Ni
Al
K
Na
Cu
Ag
Pb
Au
U
Feの原子核はすべての元素の中で最も安定
それ以上の核融合反応は恒星の中では進まない

**Figure 1.17** Different types of meteorites: (a) a cut and polished surface of an iron meteorite that has been etched with acid to reveal details of its internal texture; (b) a carbonaceous chondrite; (c) a stony meteorite with a basaltic composition; (d) a stony-iron meteorite, or pallasite, with olivine crystals set in a metal matrix; (e) a relatively large mm-sized chondrule from a carbonaceous chondrite (Bokkeveld meteorite), showing individual crystals within it; (f) a collection of individual chondrules, each less than 1 mm in diameter, from an ordinary chondrite (Sharps meteorite). (Natural History Museum)



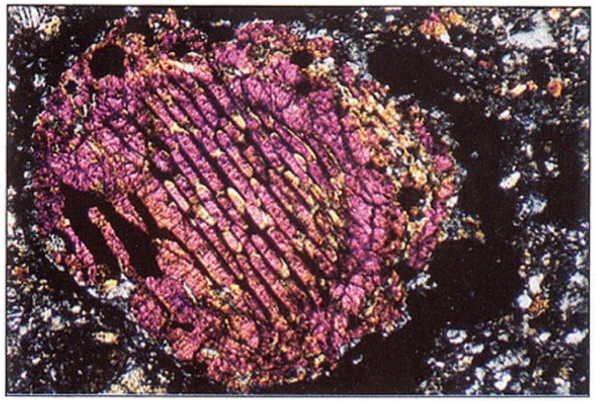
(a)

(b)

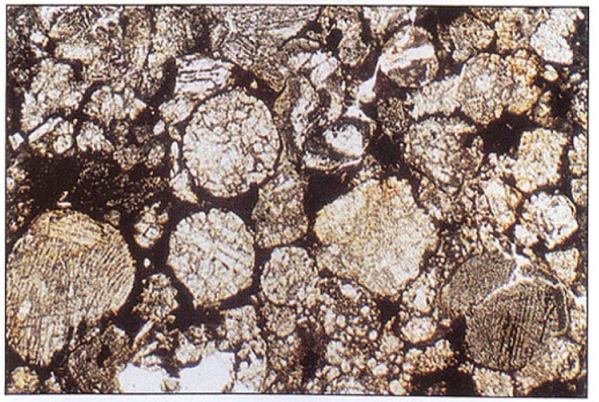


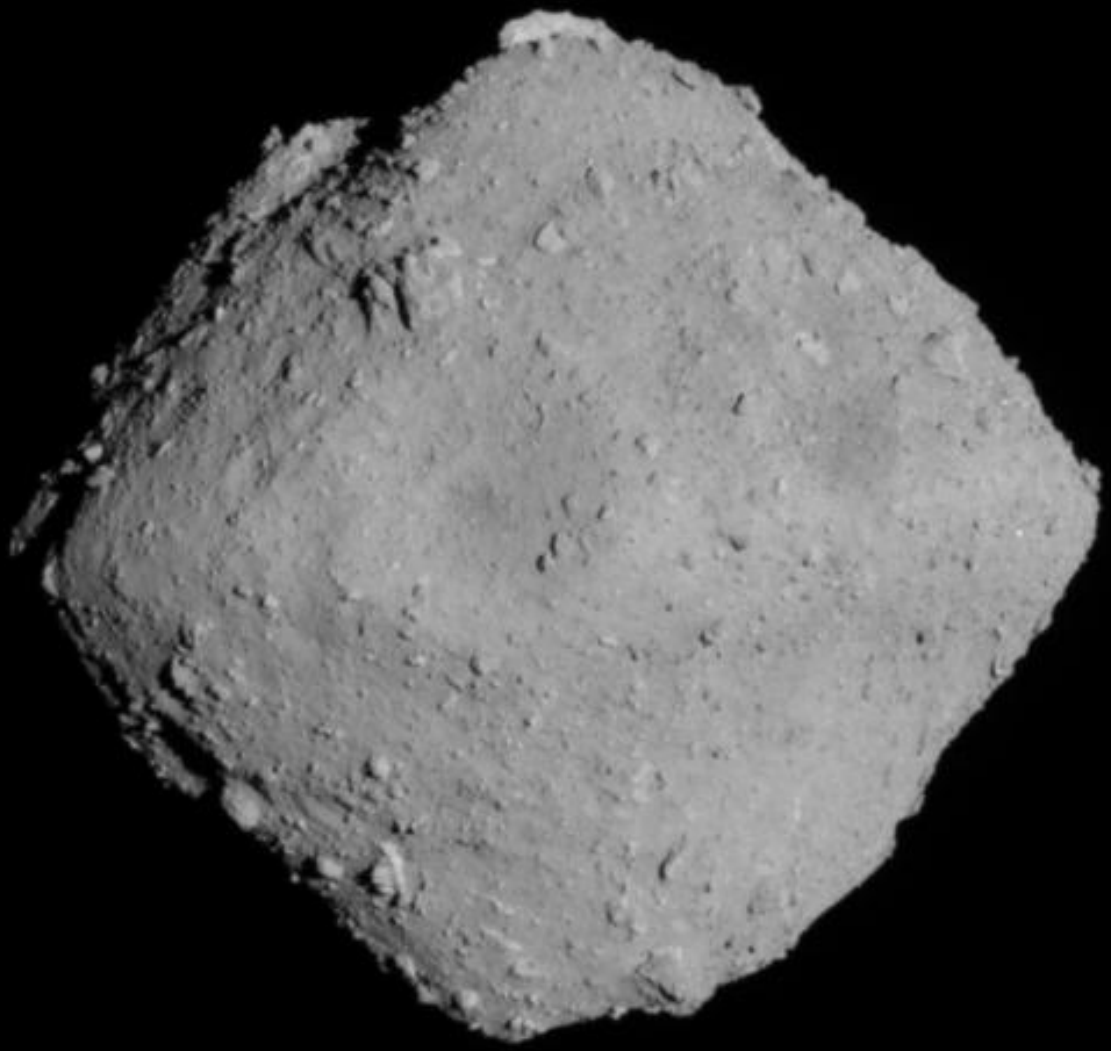
(c)

(d)


(e)

chondrule


(f)

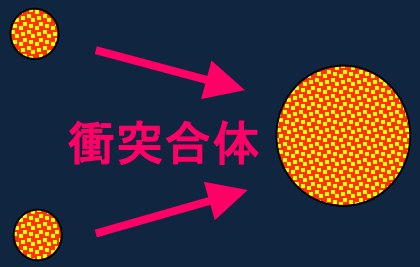


# 層構造の形成

微惑星

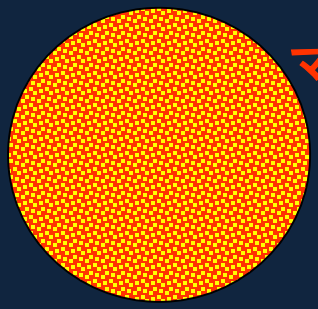
岩石質

鉄質



衝突合体

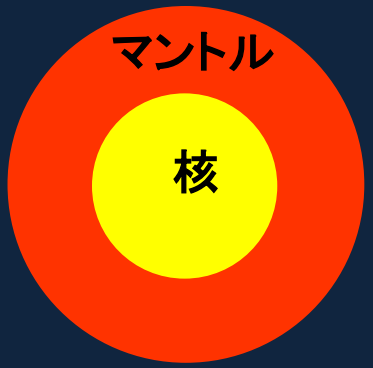
合体成長



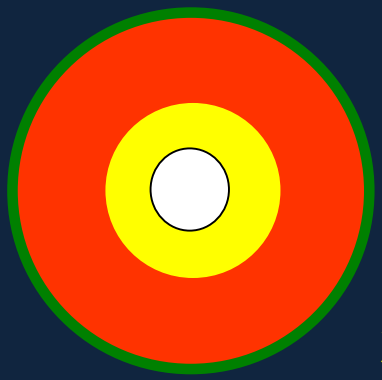
マグマオーシャン

重力分離

重力エネルギーの解放
⇒ 高温 ⇒ 部分融解




冷却 ⇒ 内核（固体）の形成




マントル低融点成分（マグマ，低密度）
の分離（火山活動）
⇒ 地殻の形成

１．地球のコアの主成分が鉄であると考えられる理由を説明しなさい。

２．（１）鉄は総質量の何%を占めるか？

（２）地球の質量を求めなさい。

（３）地震波速度構造から推定された密度構造を基にして，
コアの質量を求めなさい。概算でよいが，どのように考えたかを
きちんと示すこと。

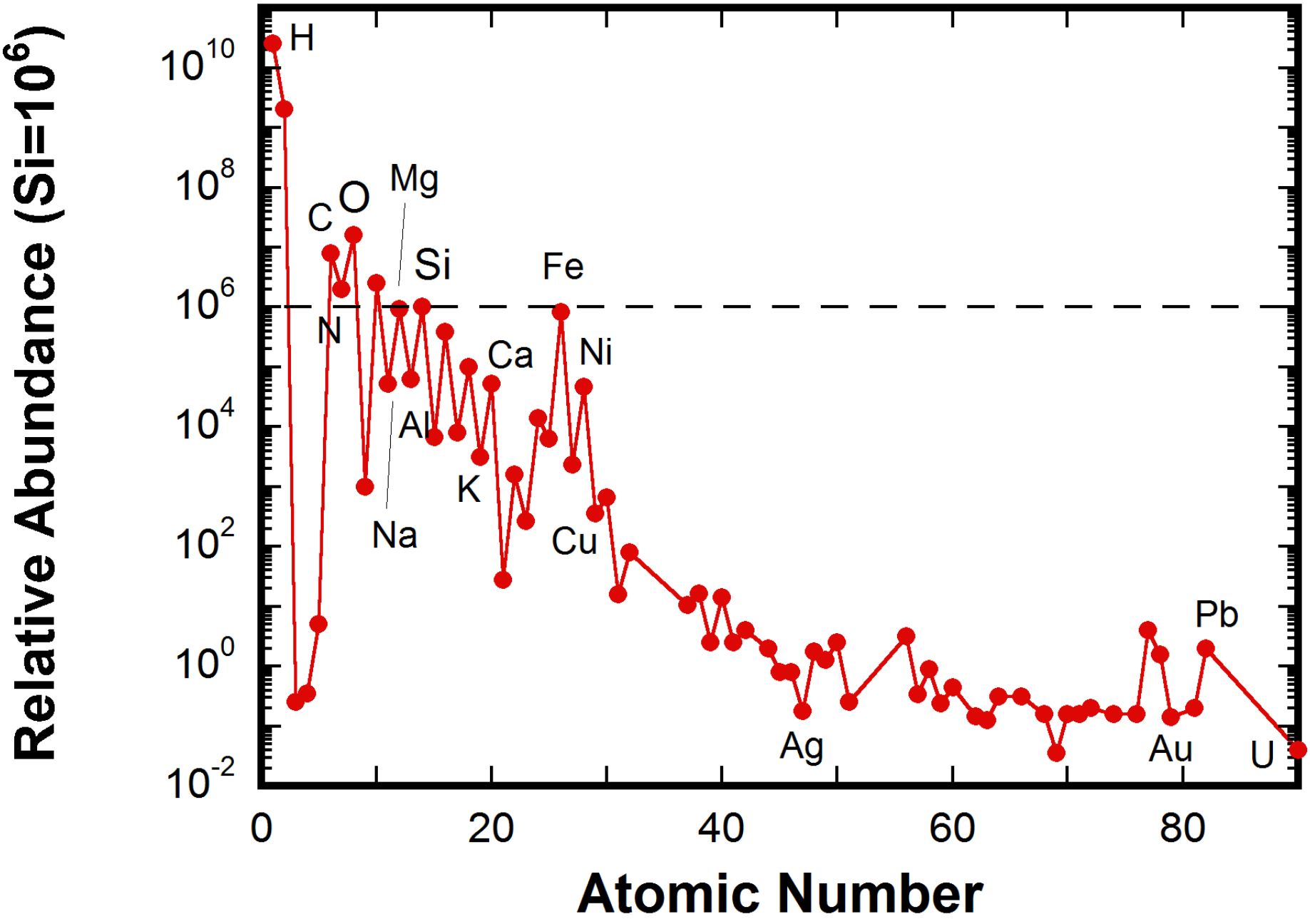
１．地球のコアの主成分が鉄であると考えられる理由を説明しなさい。

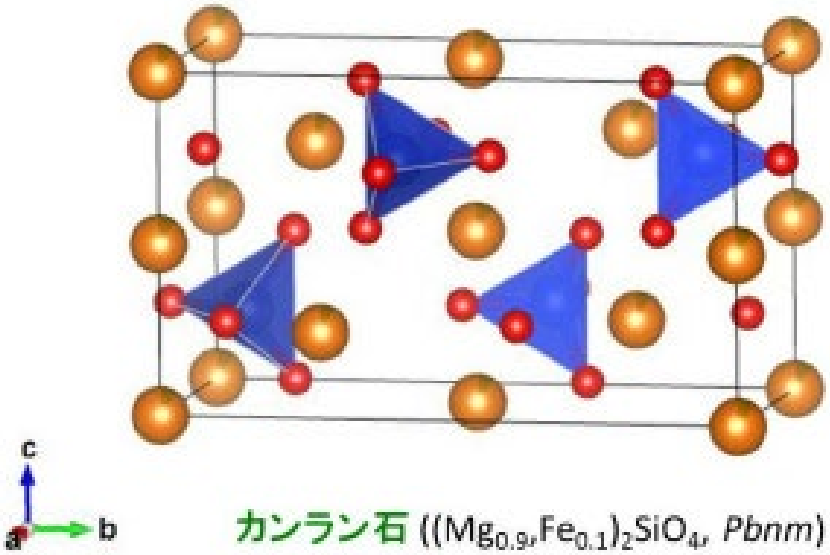
２．（１）鉄は総質量の何%を占めるか？

（２）地球の質量を求めなさい。

（３）地震波速度構造から推定された密度構造を基にして，
コアの質量を求めなさい。概算でよいが，どのように考えたかを
きちんと示すこと。

（４）コアを形成するのに十分な鉄があるかどうかを評価せよ。
不足する場合には，他にどのような元素がコアに含まれて
いると考えられるか。

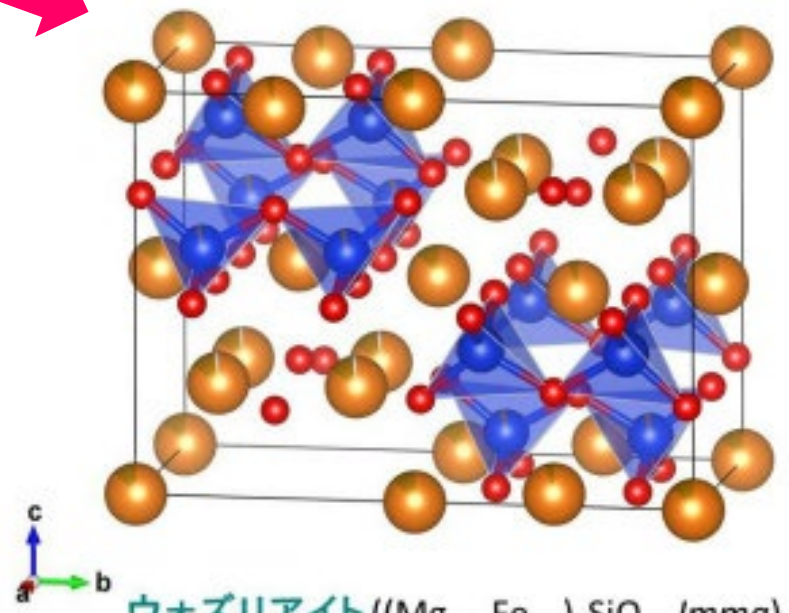

Relative Abundance (Si=10^6)
10^10
10^8
10^6
10^4
10^2
10^0
10^-2
0
20
40
60
80
Atomic Number
H
C
O
N
Mg
Si
Na
Al
K
Ca
Fe
Ni
Cu
Ag
Au
Pb
U




カンラン石 ($(Mg_{0.9},Fe_{0.1})_2SiO_4$, *Pbnm*)

密度８％増加

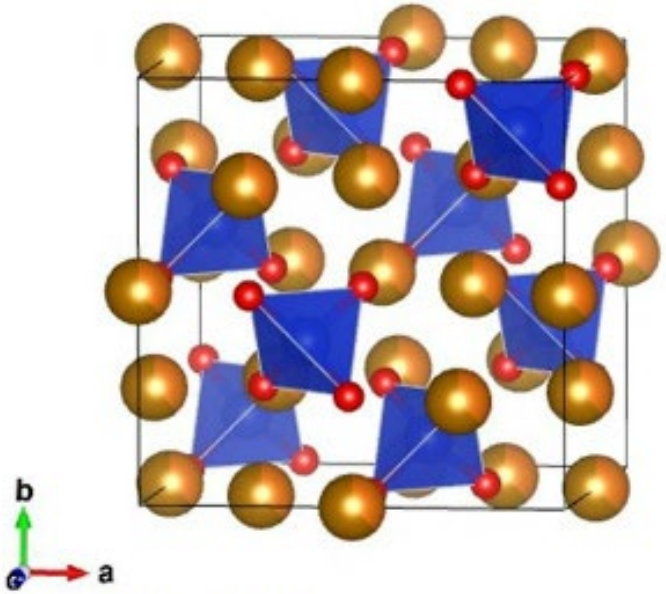
## 変形スピネル構造




ウォズリアイト ($(Mg_{0.9},Fe_{0.1})_2SiO_4$, *Imma*)

密度２％増加

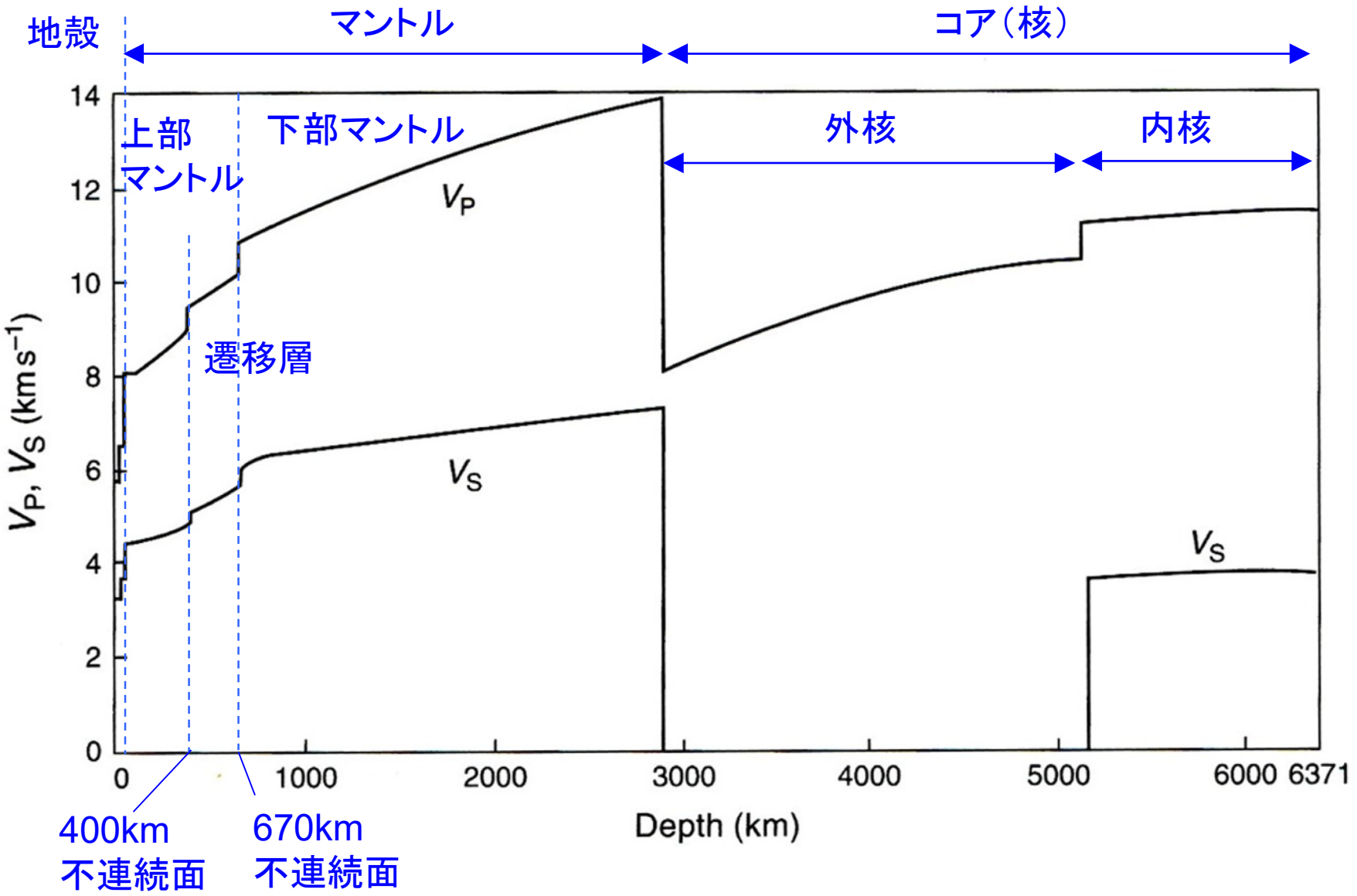
## スピネル構造



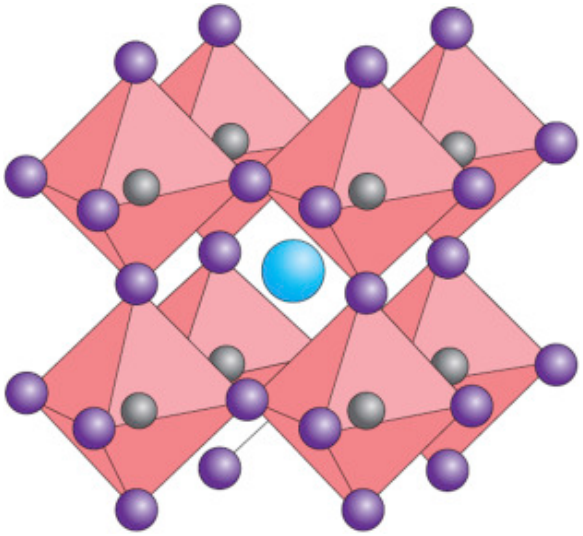

リングウッダイト ($(Mg,Fe)_2SiO_4$, $Fd\bar{3}m$)

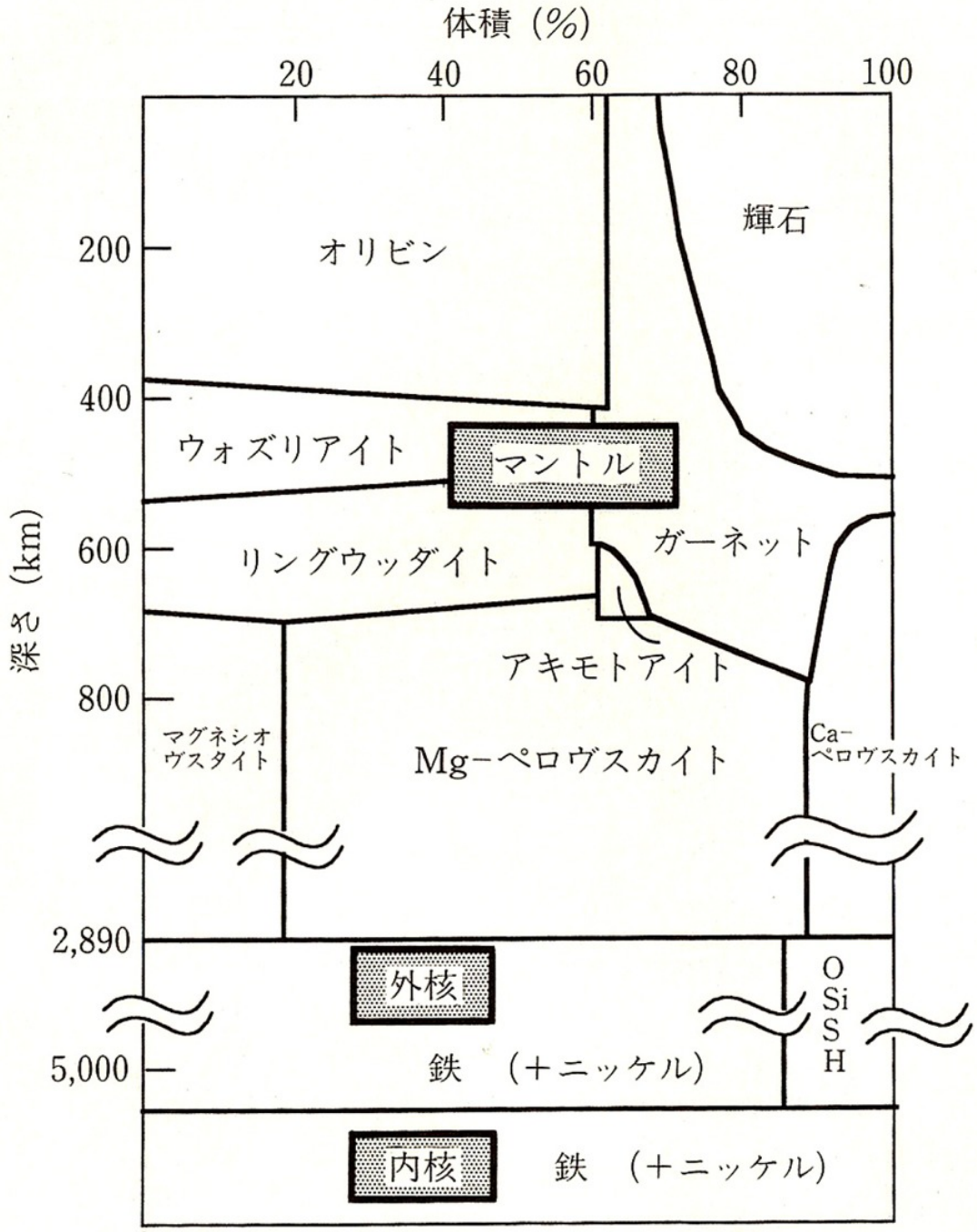
# 球対称地球モデル

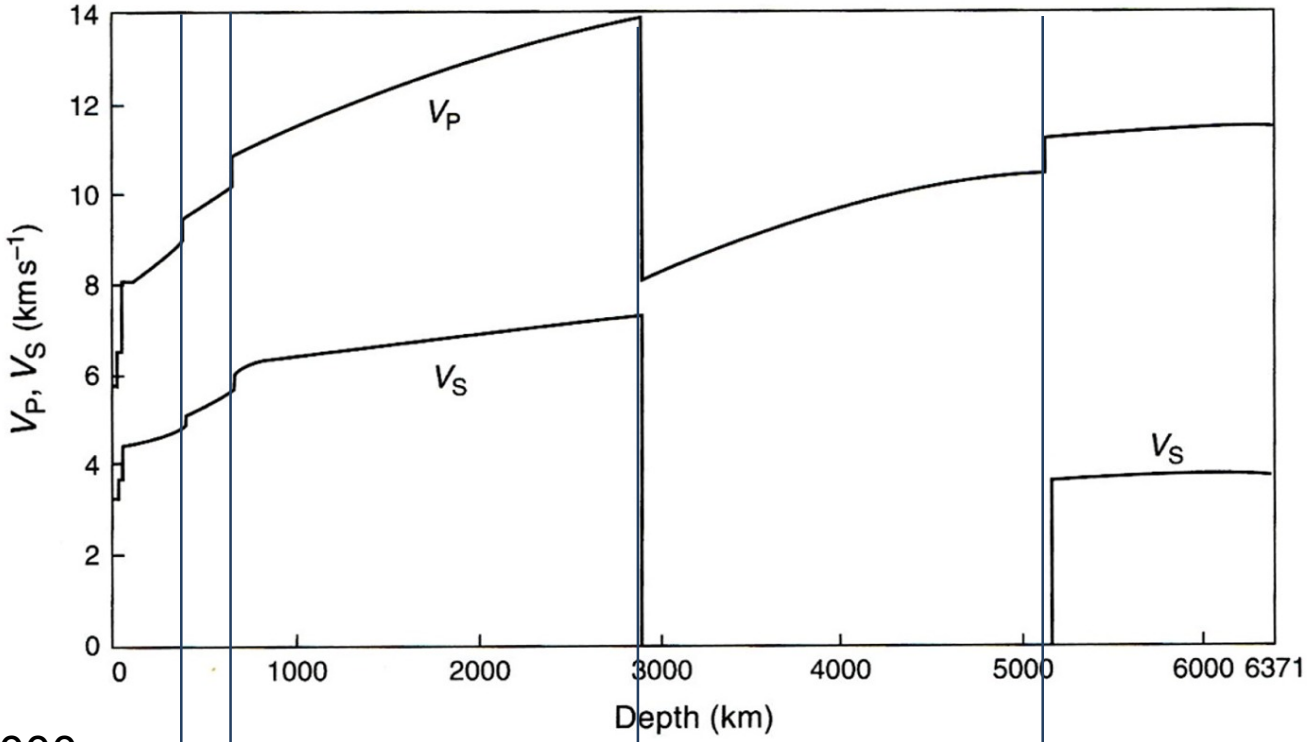
IASP91

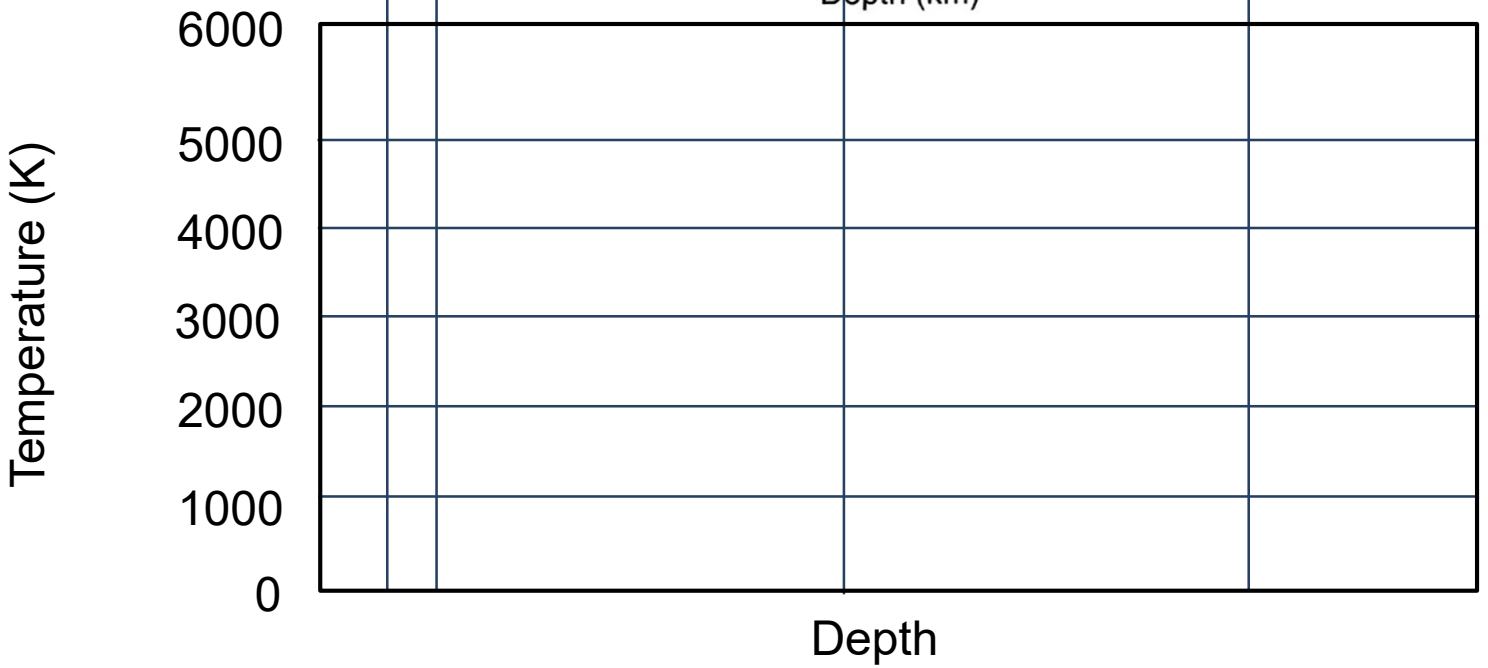


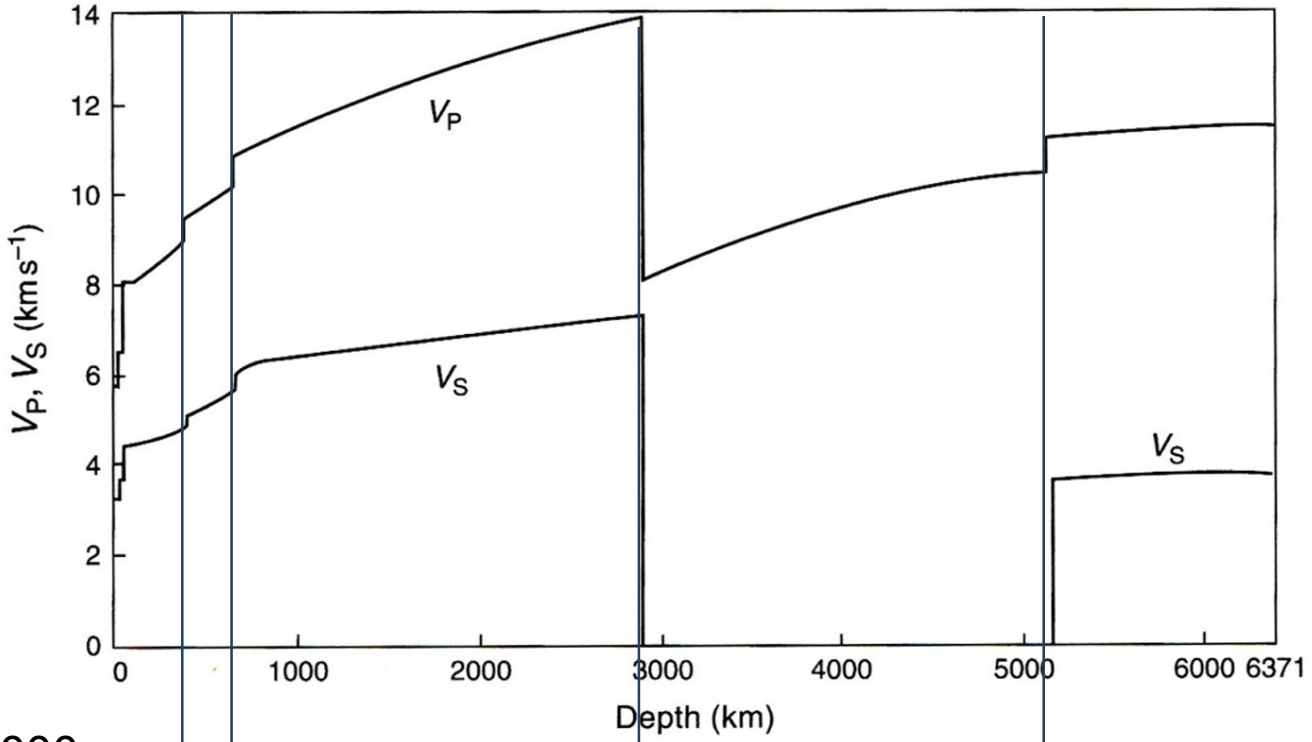
ペロブスカイト構造

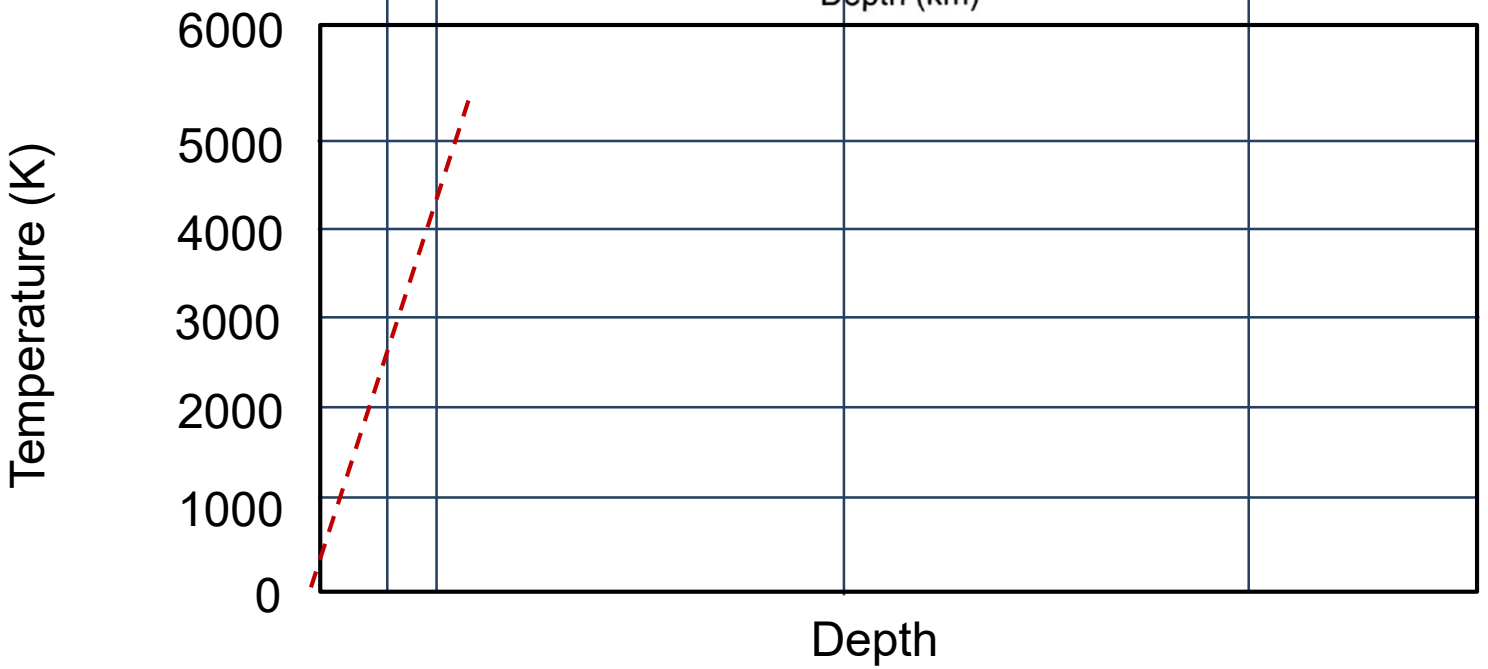

A
B
X
Mg
Si
O

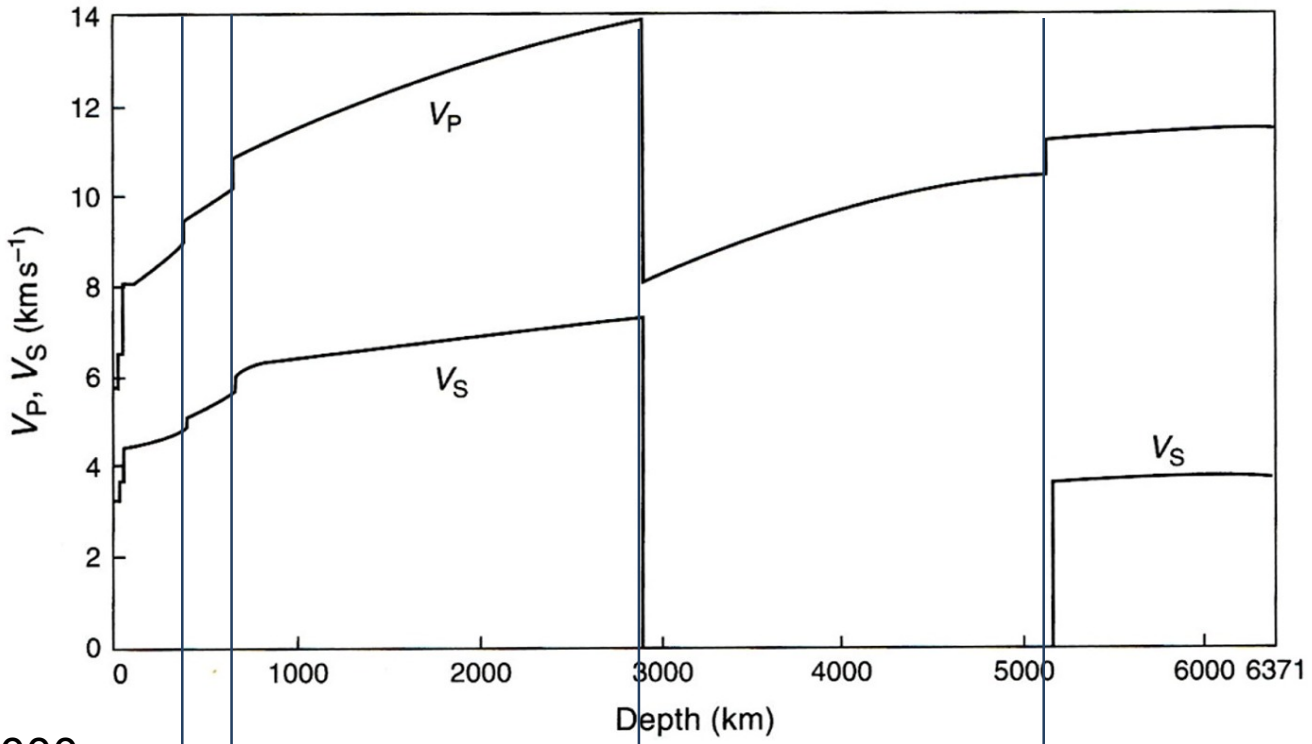

体積（%）
20
40
60
80
100
200
400
600
800
2,890
5,000
深さ（km）
オリビン
輝石
ウォズリアイト
マントル
リングウッダイト
ガーネット
アキモトアイト
マグネシオヴスタイト
Mg−ペロヴスカイト
Ca−ペロヴスカイト
外核
鉄　（＋ニッケル）
O
Si
S
H
内核
鉄　（＋ニッケル）

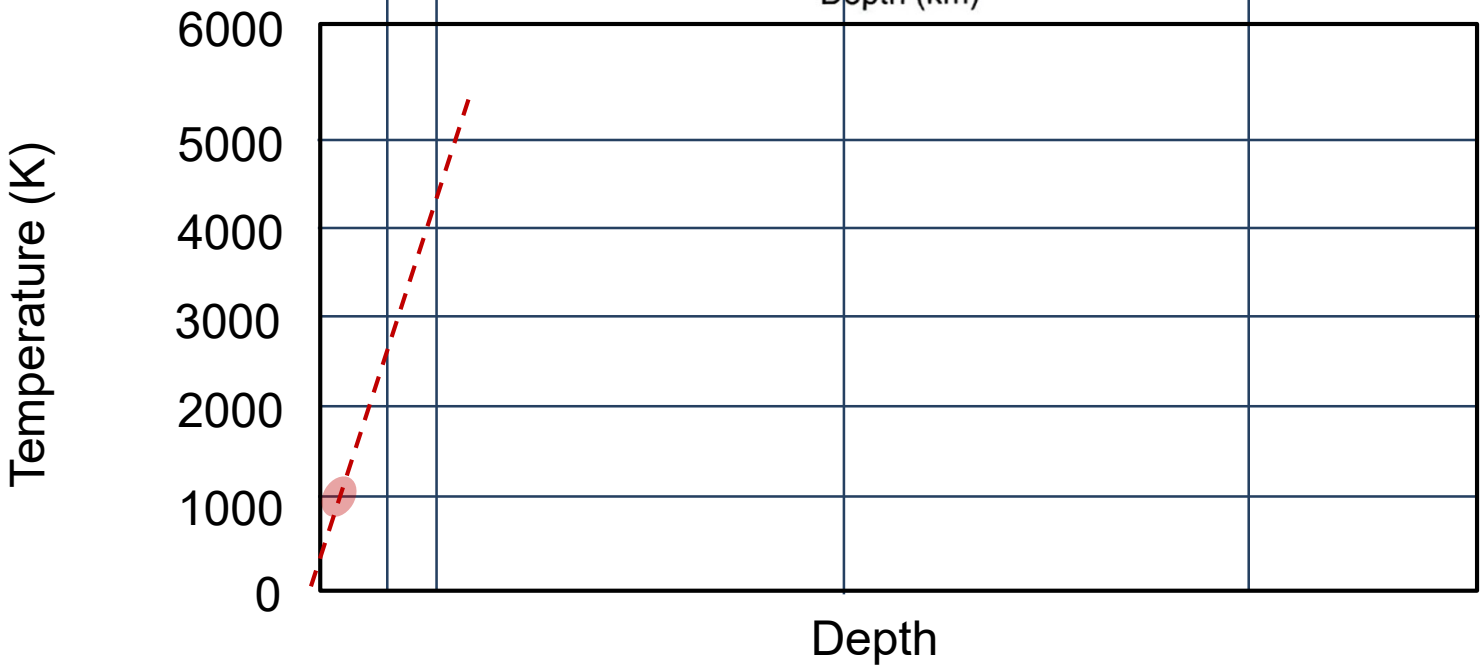

14
12
10
8
6
4
2
0
$V_P$, $V_S$ (km s$^{-1}$)
$V_P$
$V_S$
$V_S$
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000 6371
Depth (km)

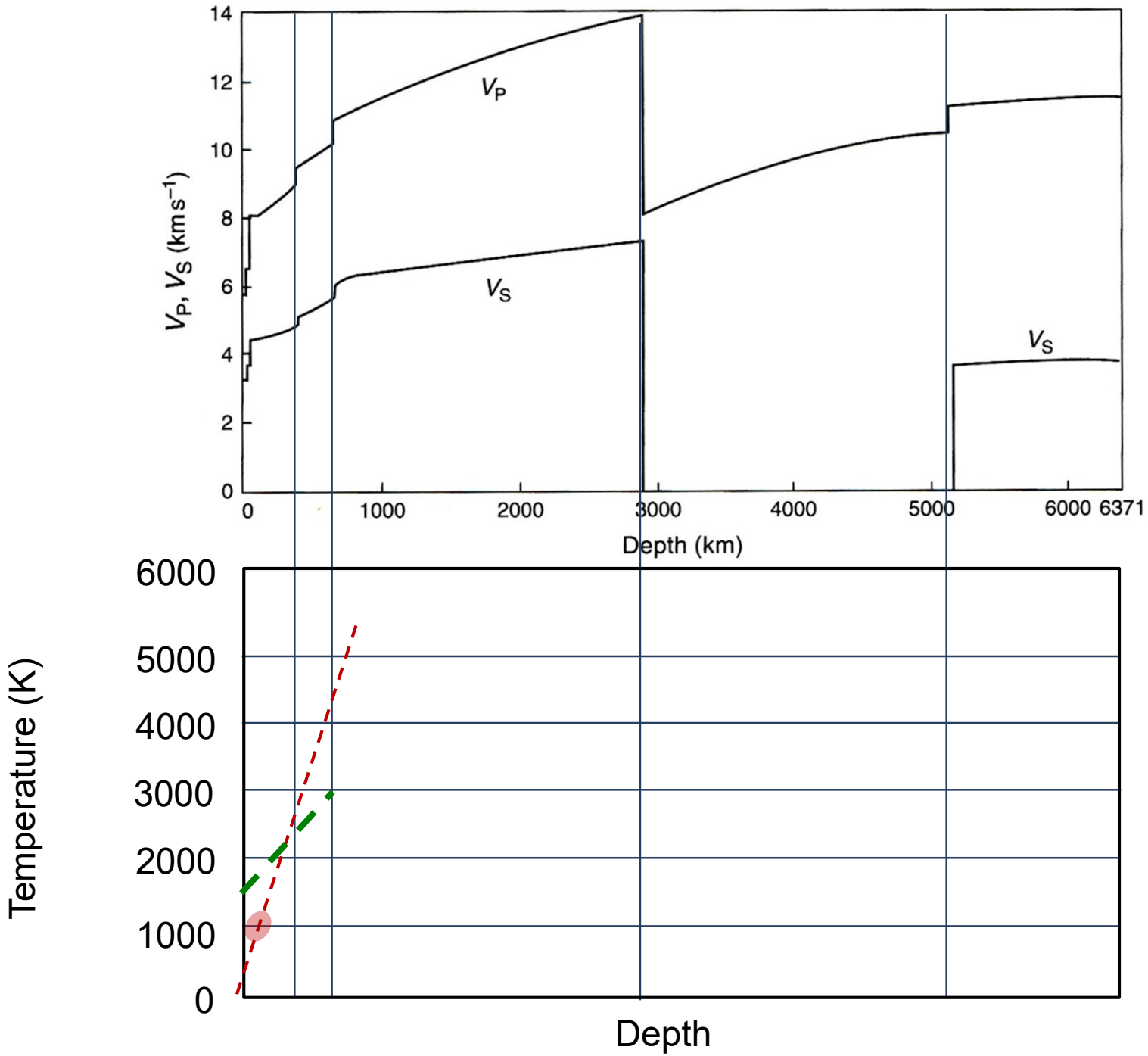

6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Temperature (K)
Depth

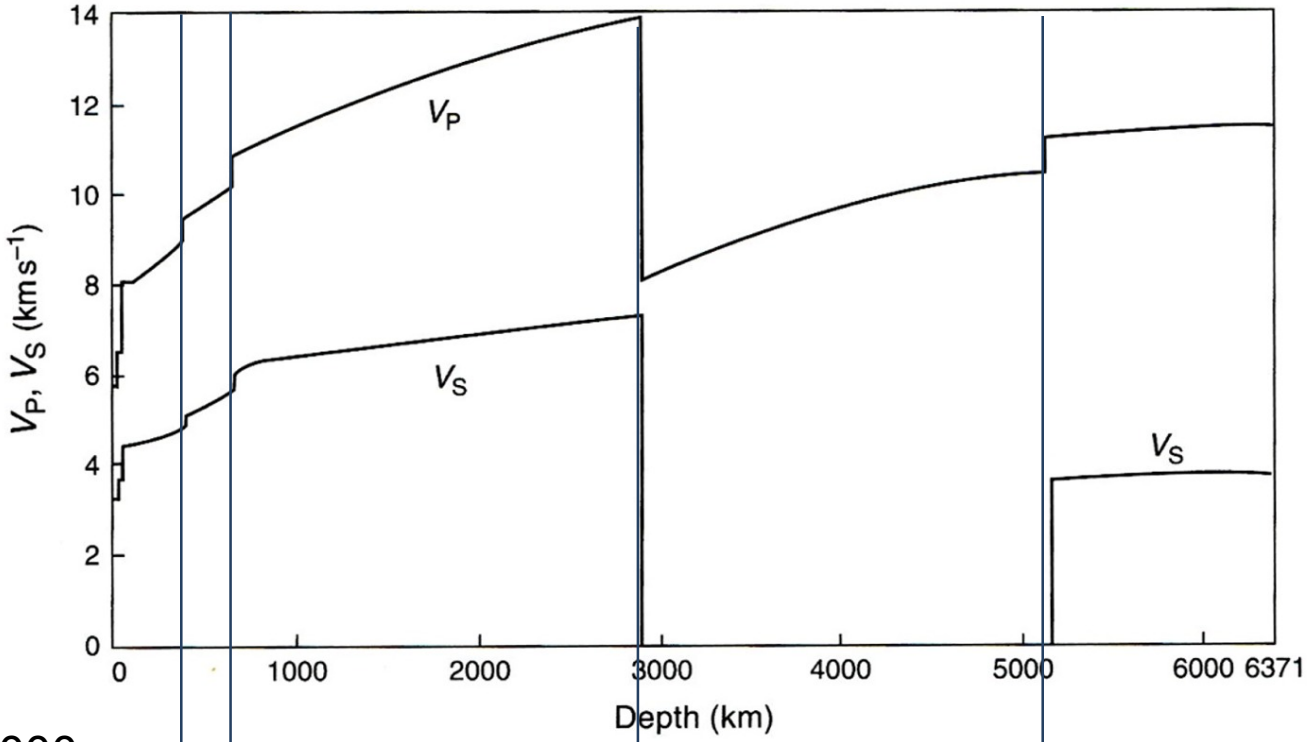

14
12
10
8
6
4
2
0
$V_P$, $V_S$ (km s$^{-1}$)
$V_P$
$V_S$
$V_S$
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000 6371
Depth (km)

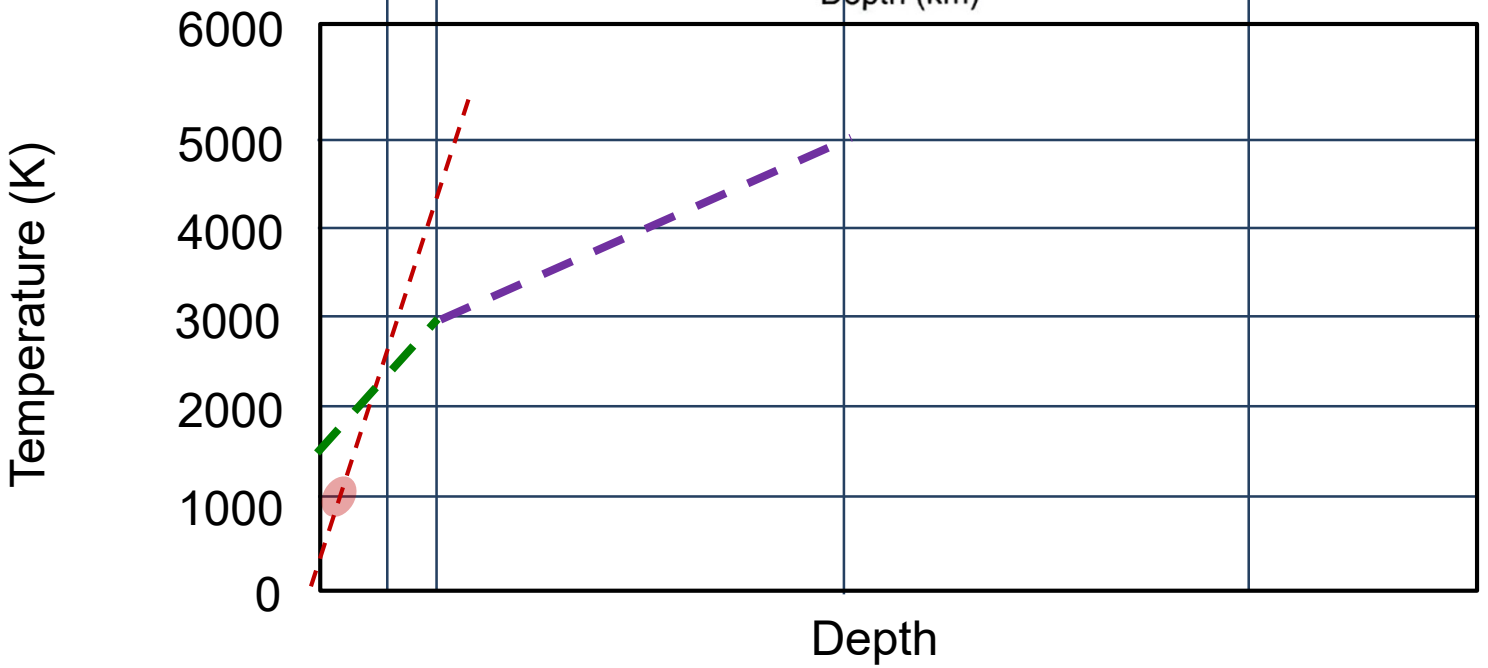

6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Temperature (K)
Depth

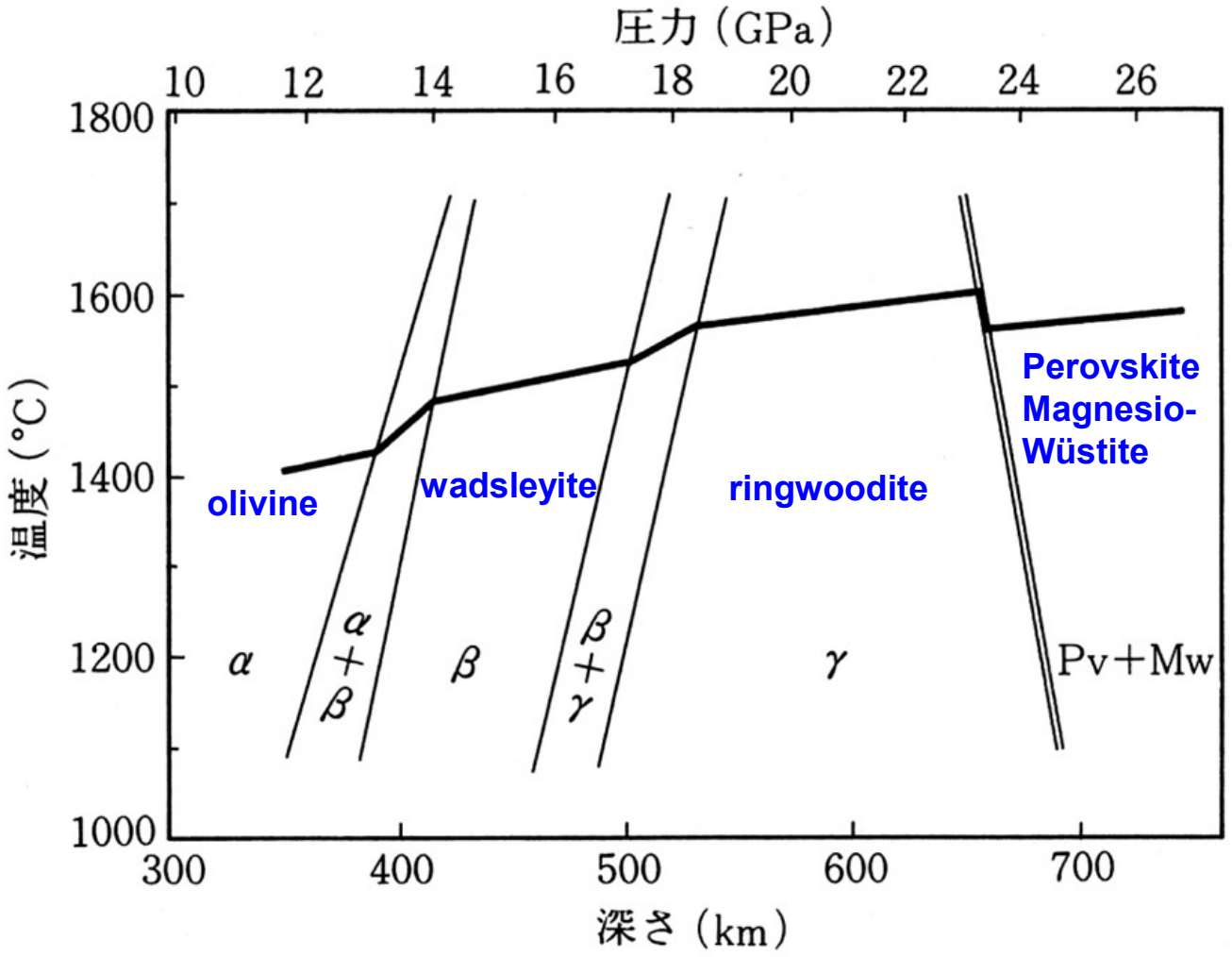

14
12
10
8
6
4
2
0
$V_P$, $V_S$ (km s$^{-1}$)
$V_P$
$V_S$
$V_S$
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000 6371
Depth (km)


6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Temperature (K)
Depth

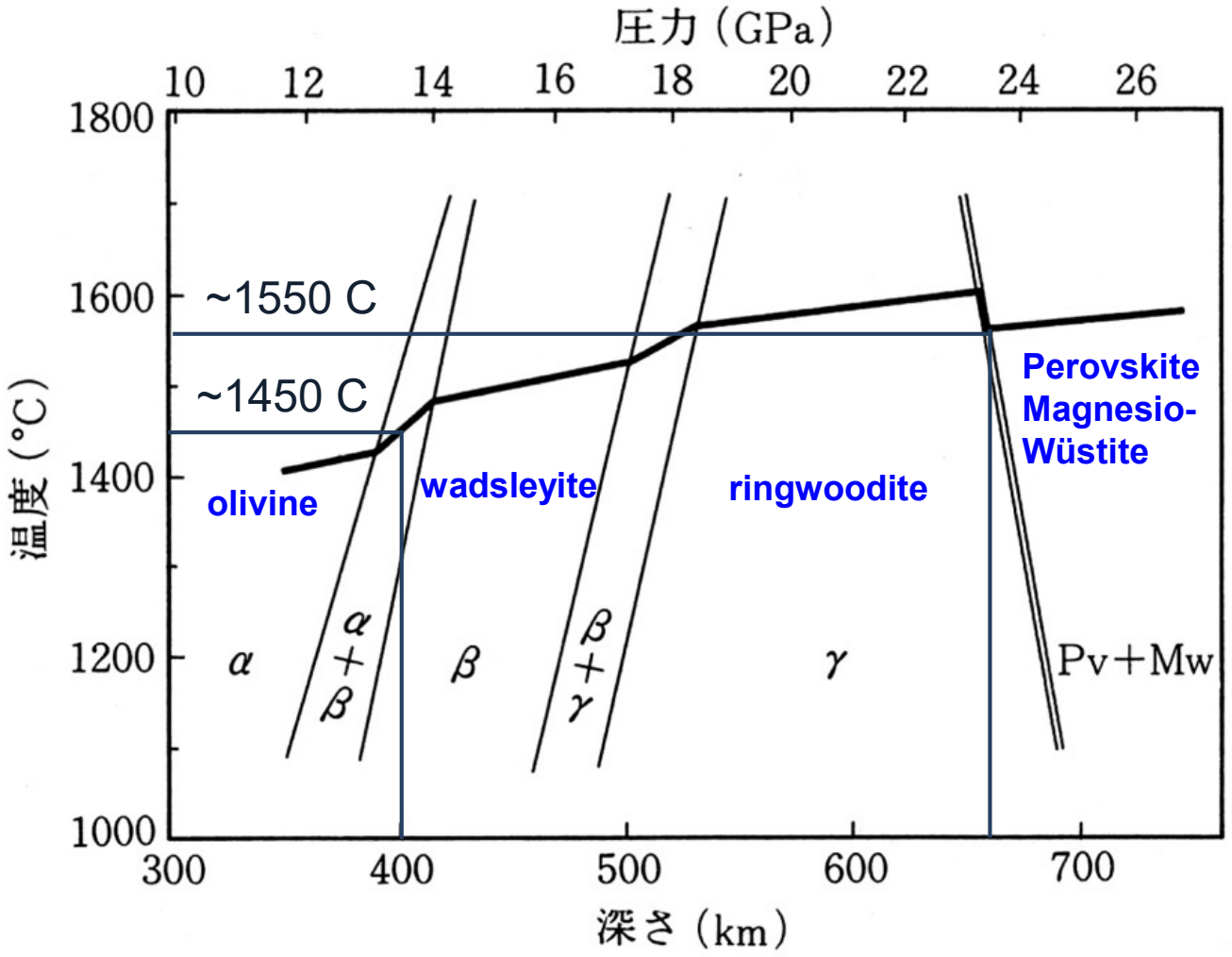

14
12
10
8
6
4
2
0
$V_P$, $V_S$ (km s$^{-1}$)
$V_P$
$V_S$
$V_S$
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000 6371
Depth (km)
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Temperature (K)
Depth


14
12
10
8
6
4
2
0
$V_P$, $V_S$ (km s$^{-1}$)
$V_P$
$V_S$
$V_S$
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000 6371
Depth (km)

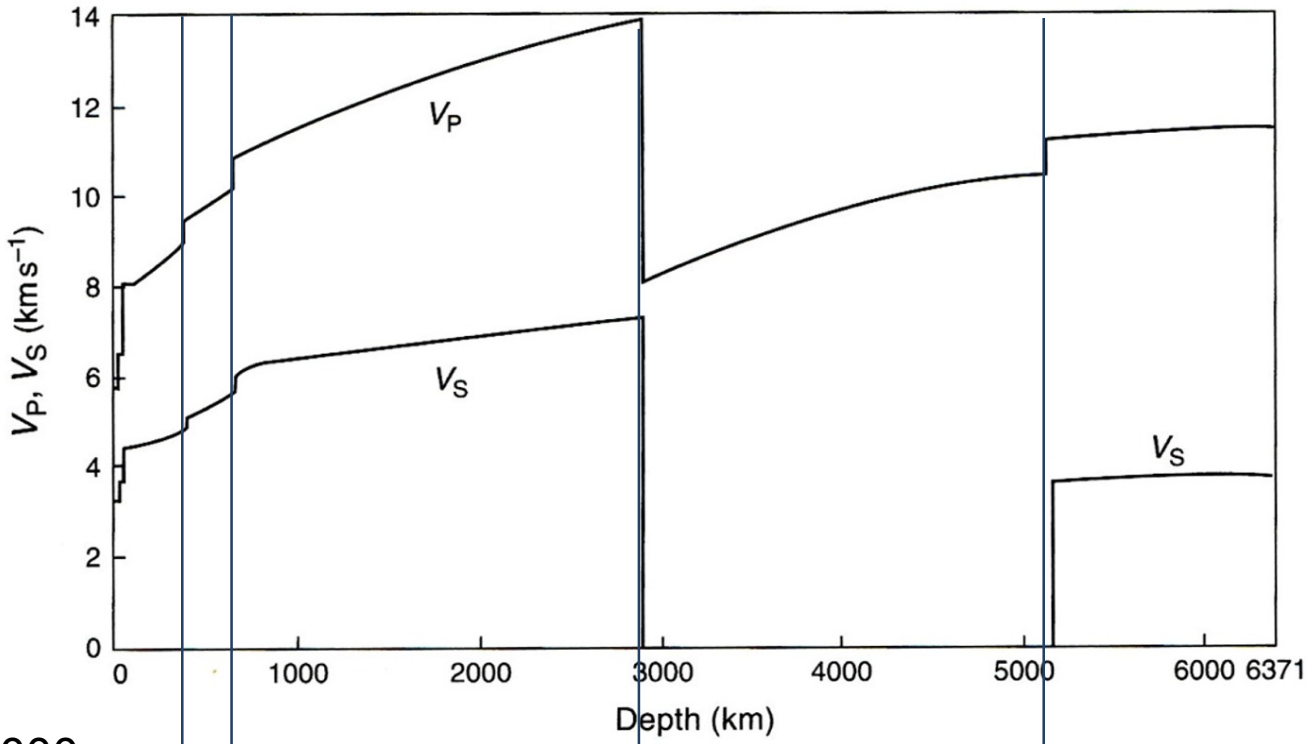

6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Temperature (K)
Depth

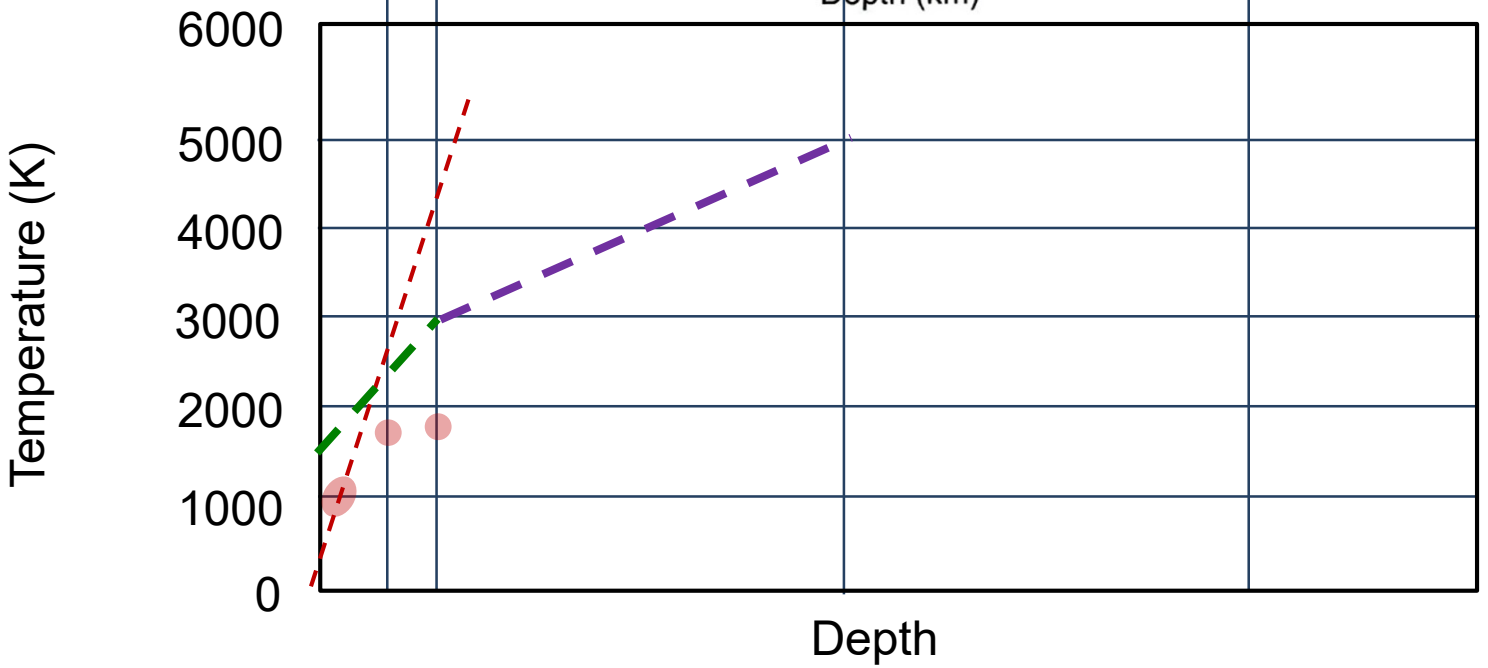


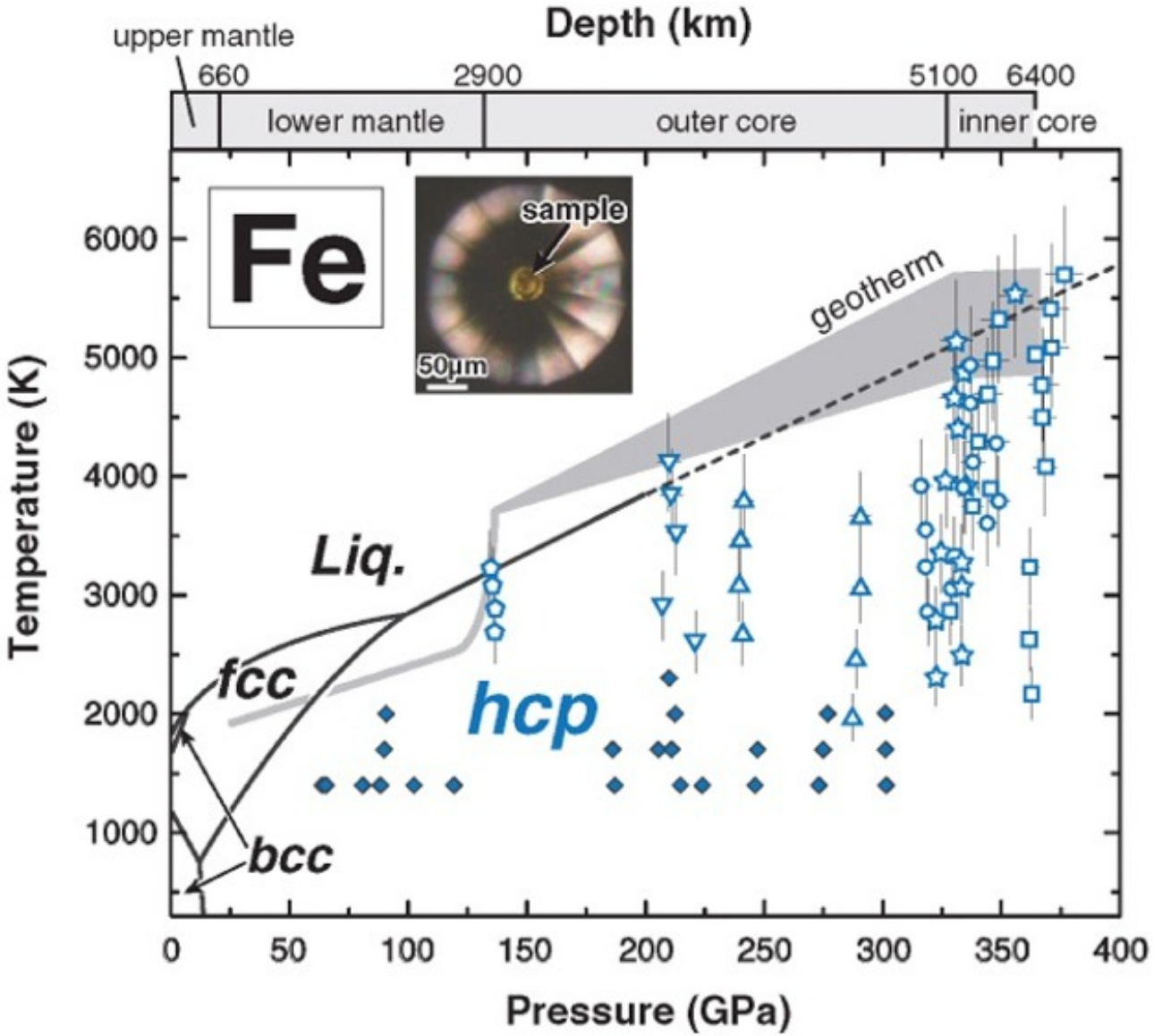

マントルオリビンの相転移境界線と温度分布（Akaogi et al., 1989 など




マントルオリビンの相転移境界線と温度分布（Akaogi et al., 1989 など


14
12
10
8
6
4
2
0
$V_P$, $V_S$ (km s$^{-1}$)
$V_P$
$V_S$
$V_S$
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000 6371
Depth (km)


6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Temperature (K)
Depth



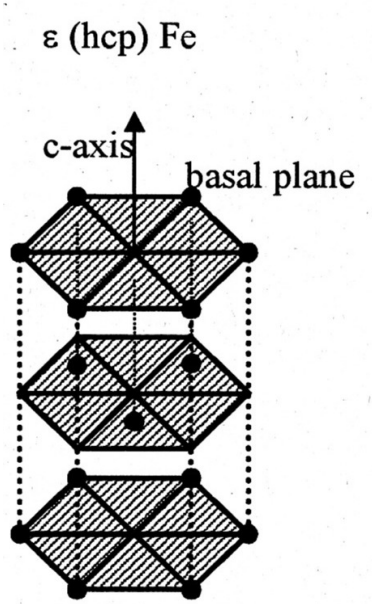
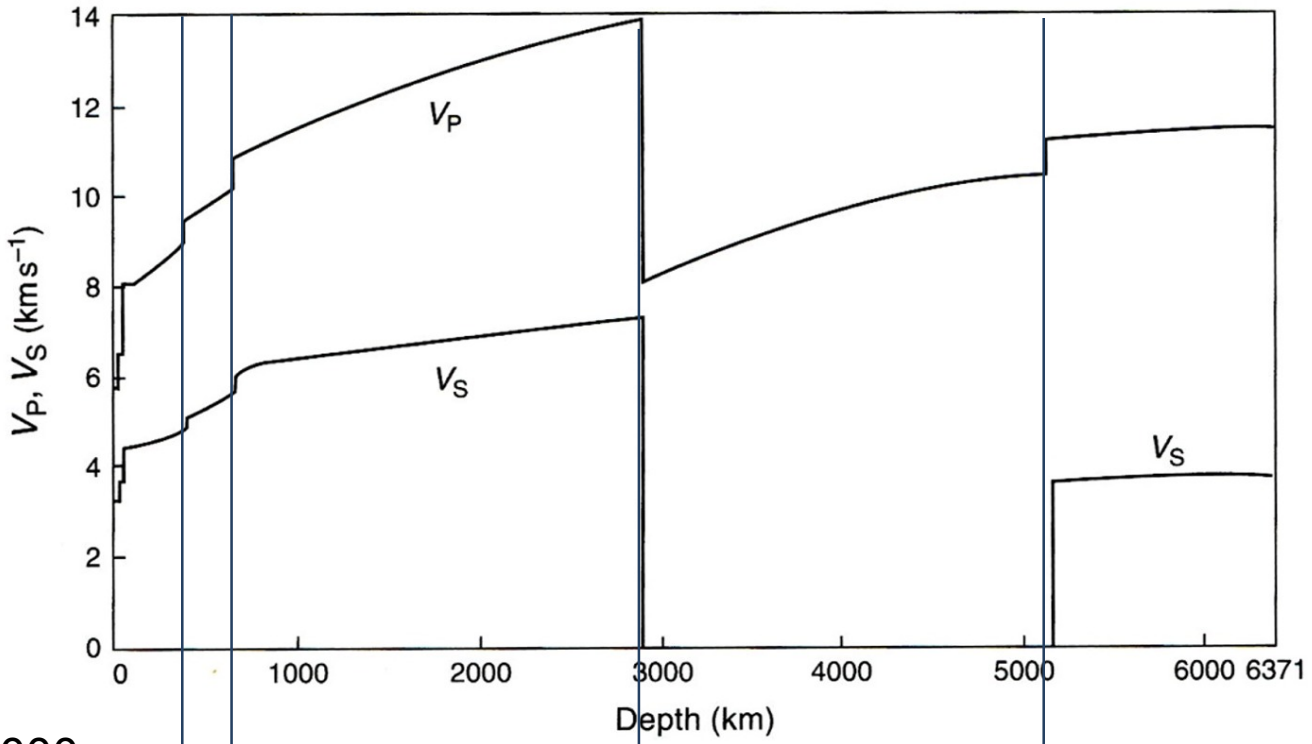
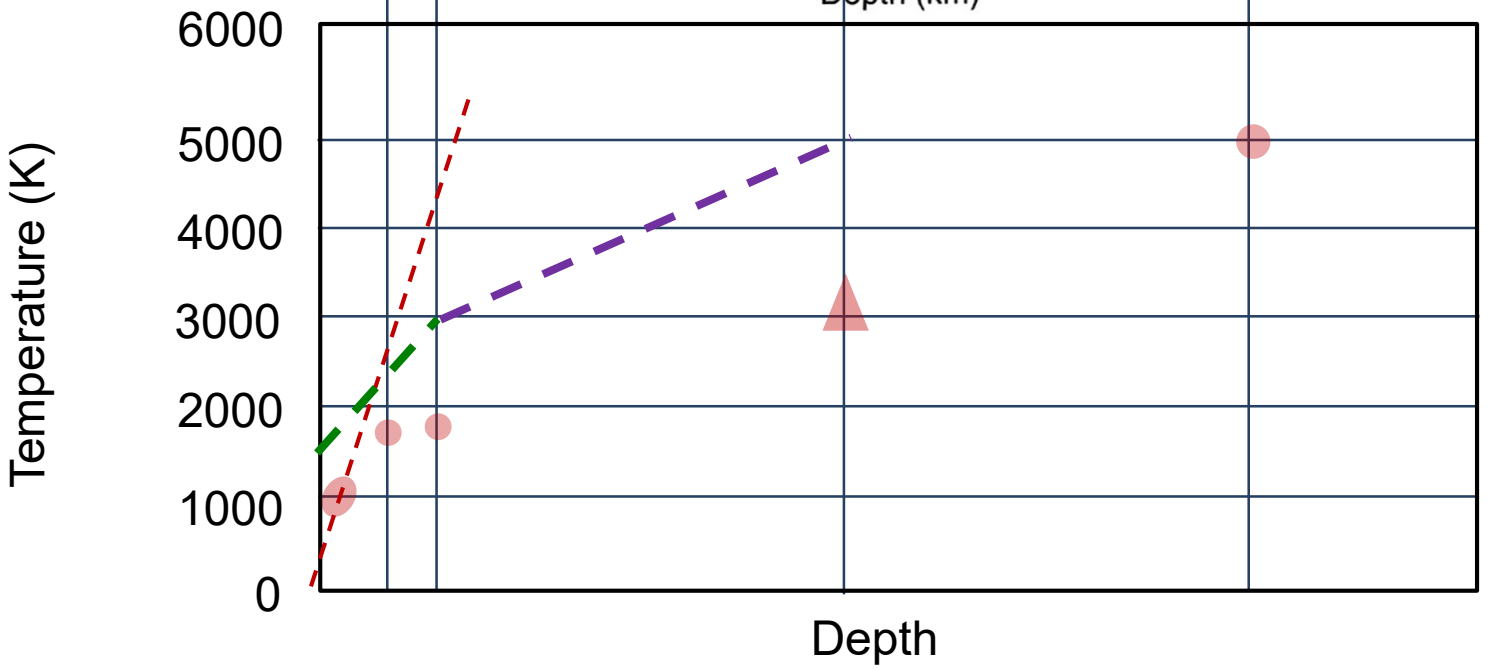
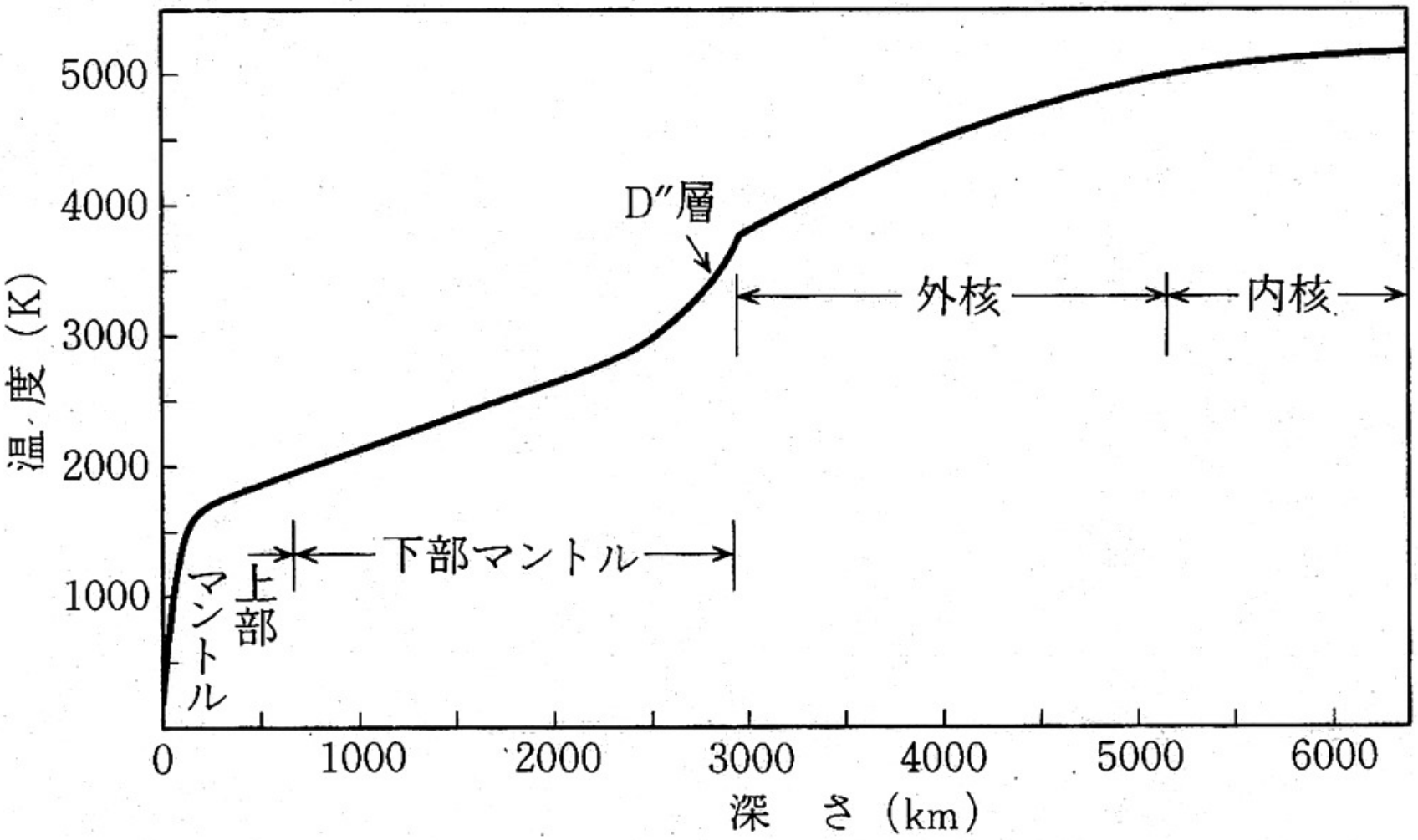



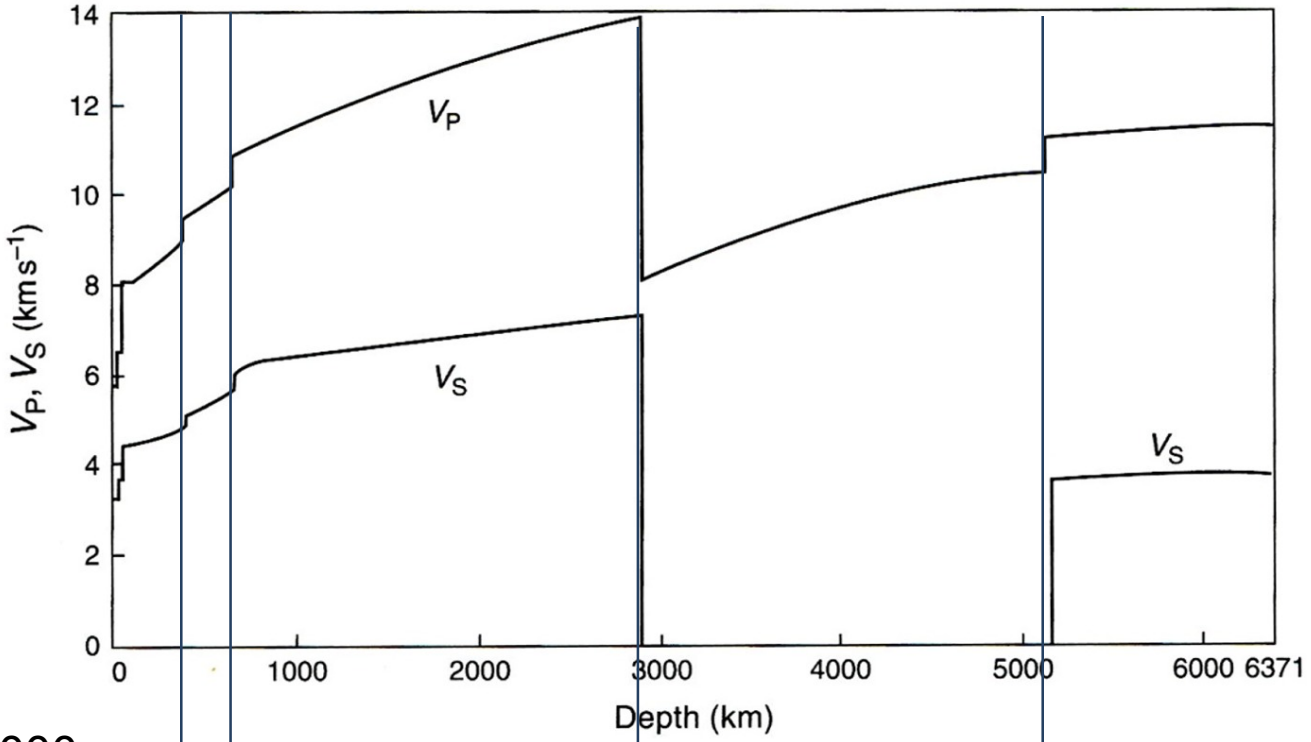

**Fig. 3.** Phase diagram of Fe and the inferred temperature profile inside Earth (*19*, *23*, *24*). Open symbols indicate the present results (different symbols indicate different runs), and solid diamonds indicate data from previous experimental work (*5*). The low-pressure solid-solid phase transition boundaries and melting curve are from Boehler (*19*). Liq., liquid. (**Inset**) Sample photograph at 335 GPa in the DAC.

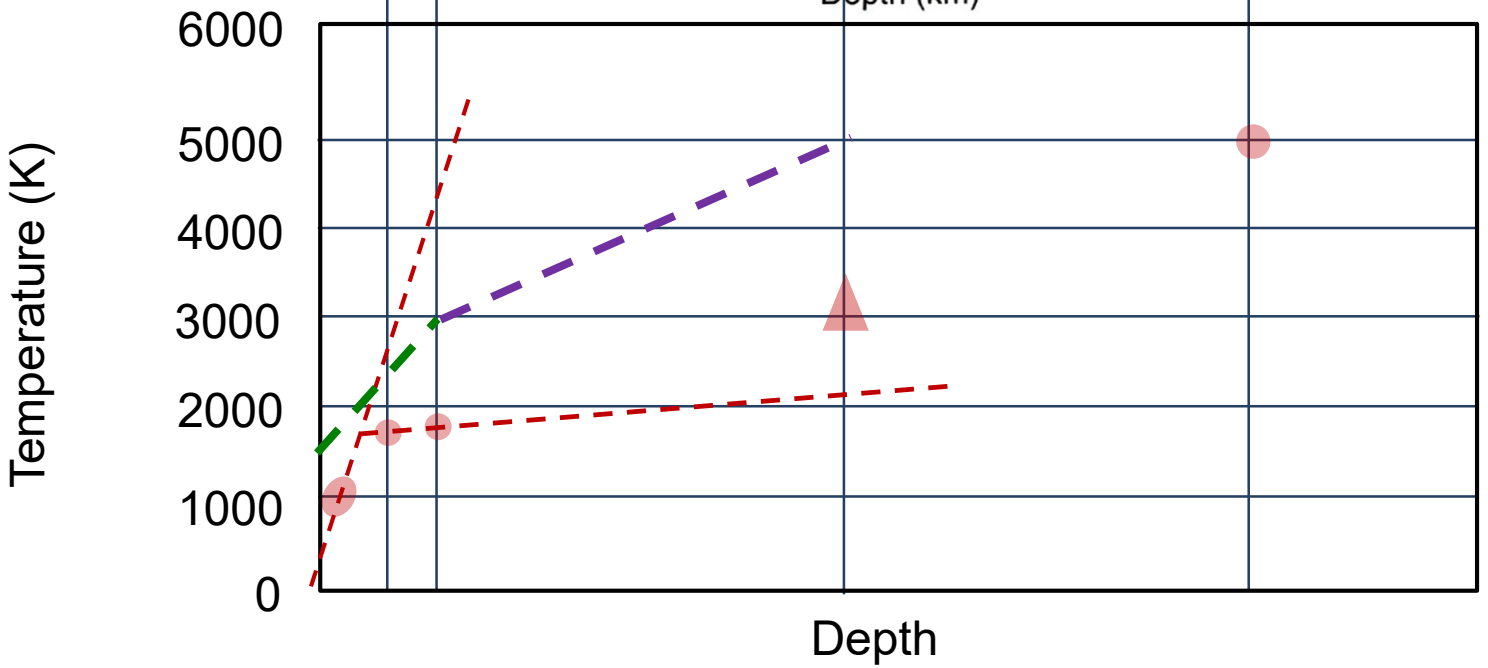
Tateno et al. (2010)

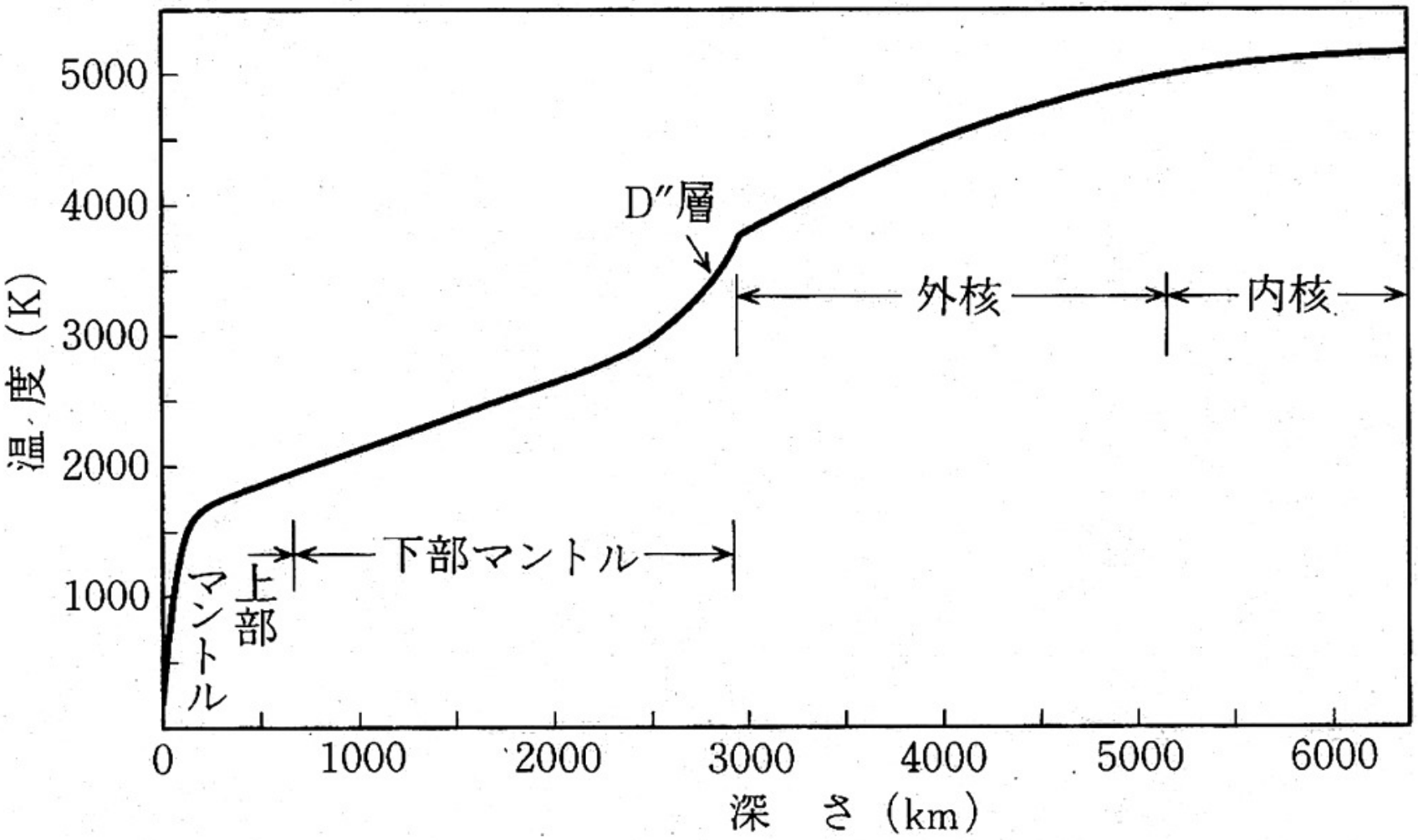

14
12
10
8
6
4
2
0
$V_P$, $V_S$ (km s$^{-1}$)
$V_P$
$V_S$
$V_S$
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000 6371
Depth (km)


6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Temperature (K)
Depth


5000
4000
3000
2000
1000
温度（K）
D″層
外核
内核
下部マントル
上部マントル
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
深　さ（km）


14
12
10
8
6
4
2
0
$V_P$, $V_S$ (km s$^{-1}$)
$V_P$
$V_S$
$V_S$
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000 6371
Depth (km)


6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Temperature (K)
Depth


5000
4000
3000
2000
1000
温度（K）
D″層
外核
内核
下部マントル
上部マントル
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
深　さ（km）