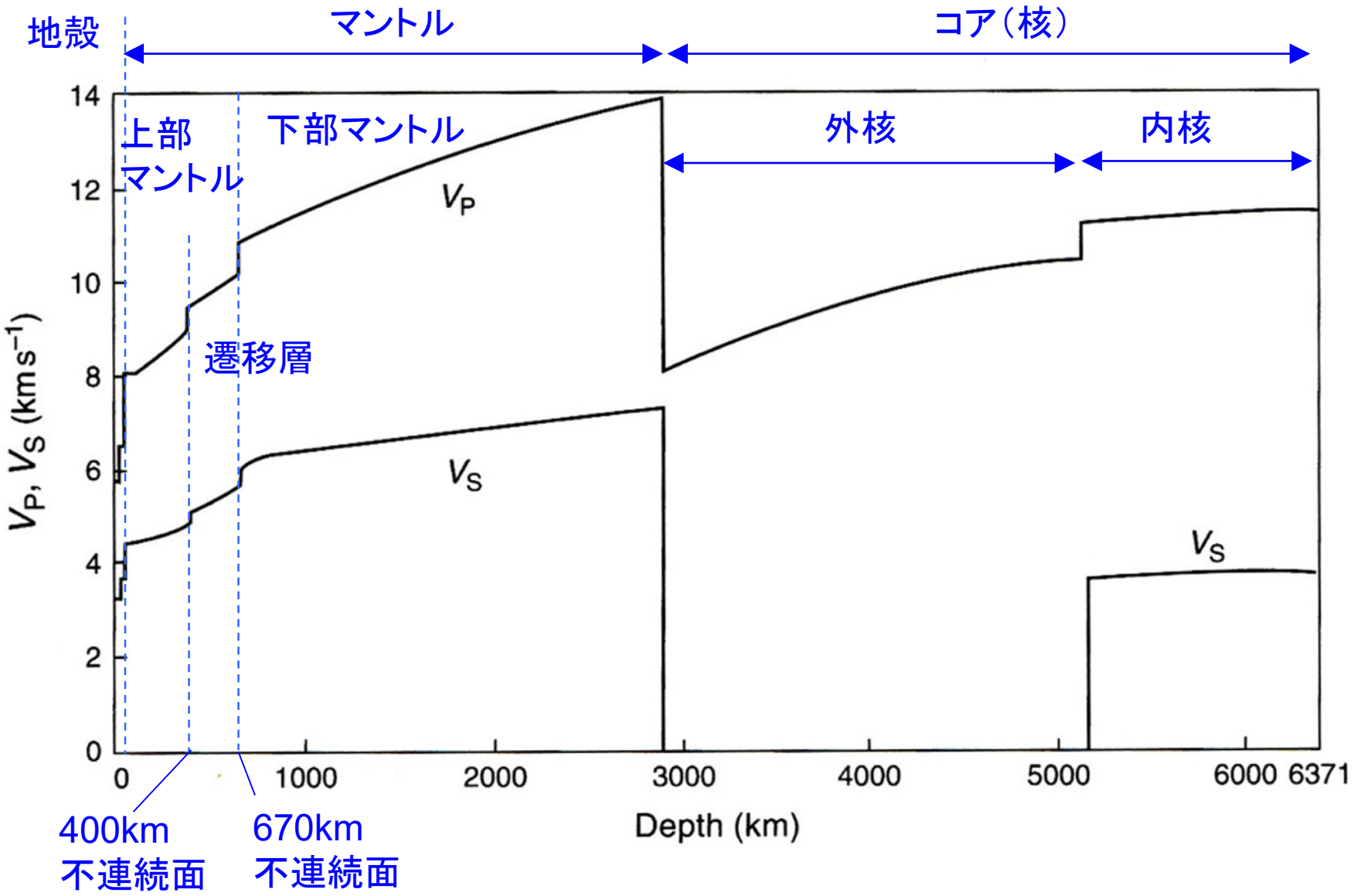
地球内部物理学

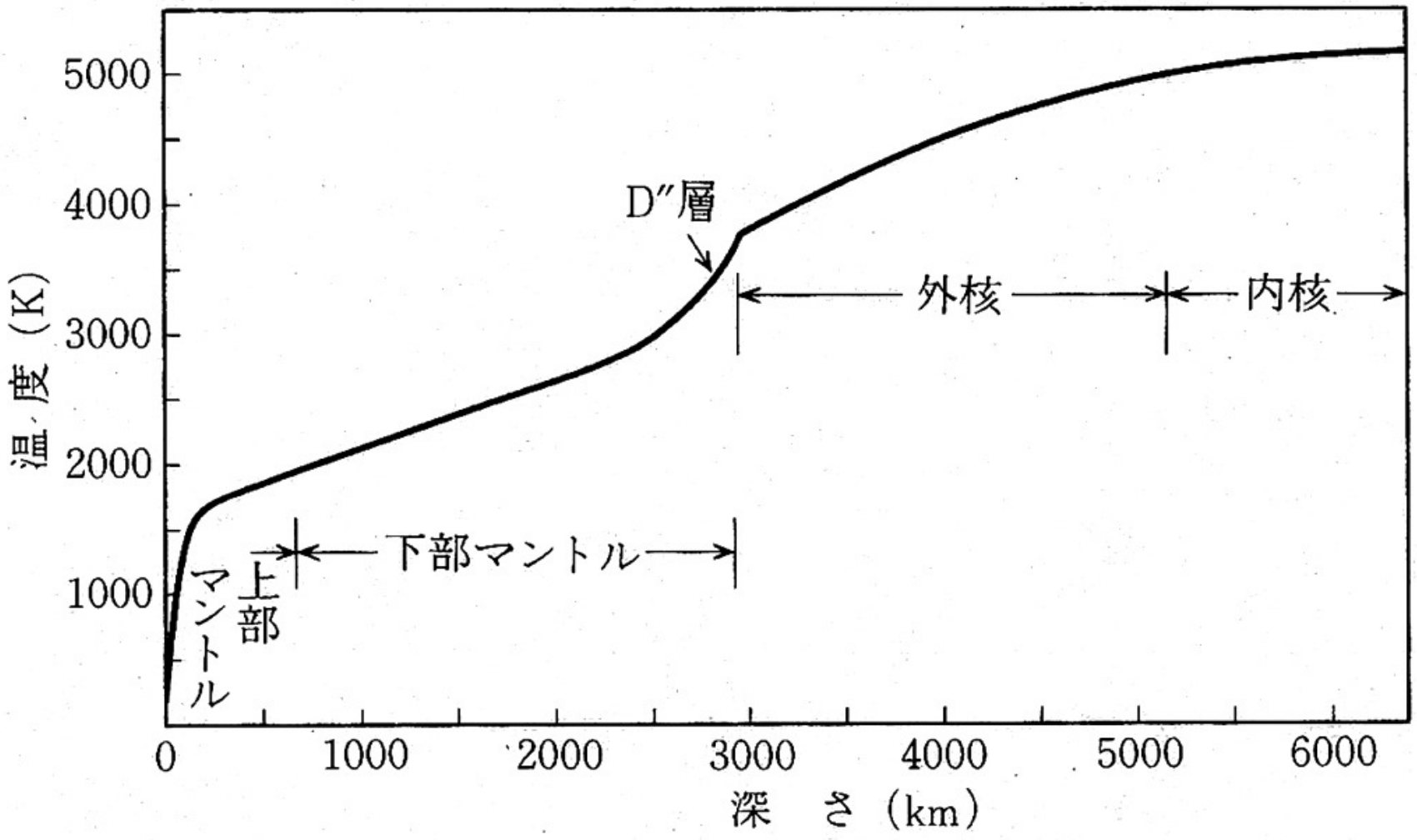
2020.1.20

球対称地球モデル

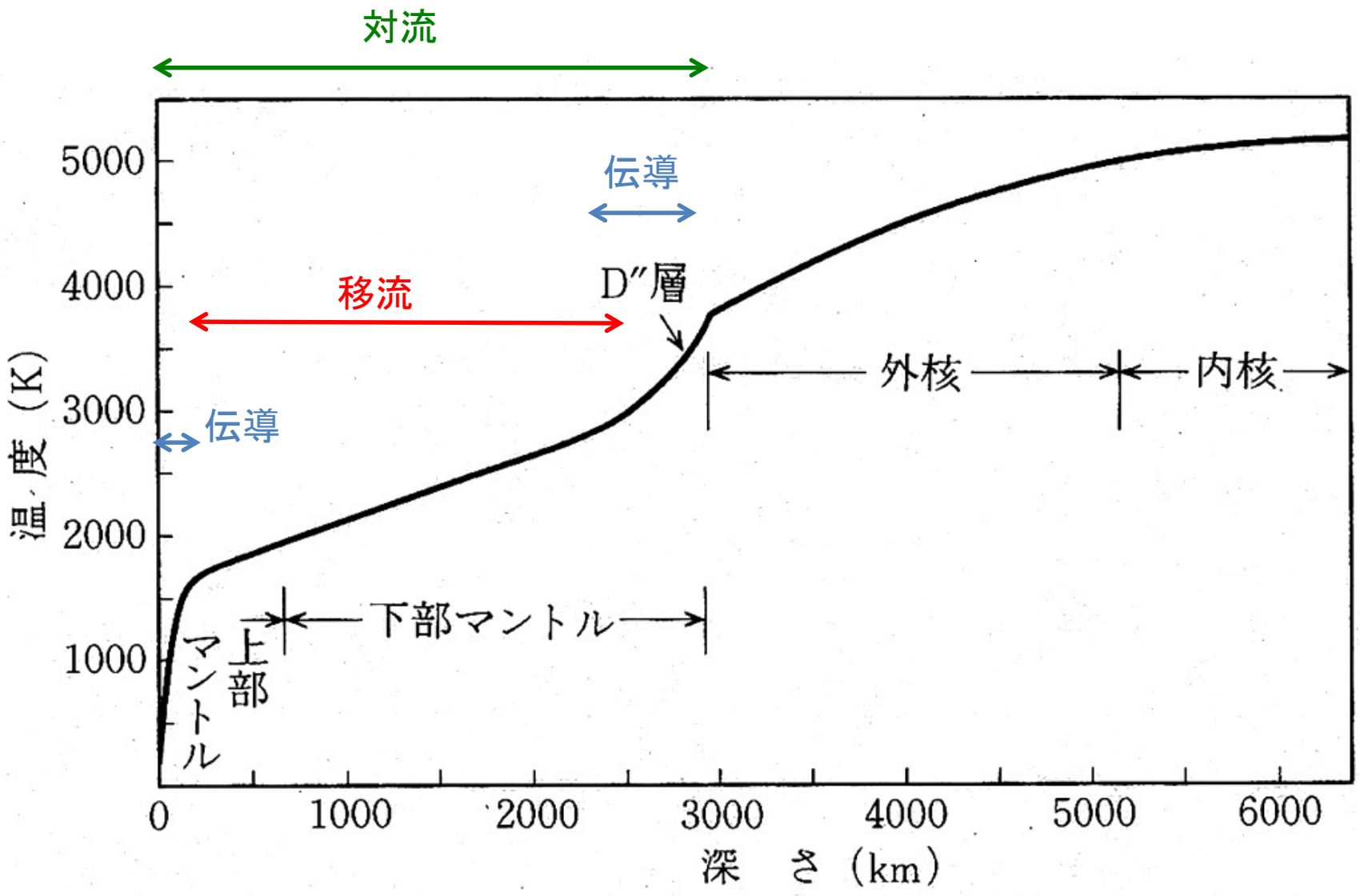
IASP91



地球内部の温度

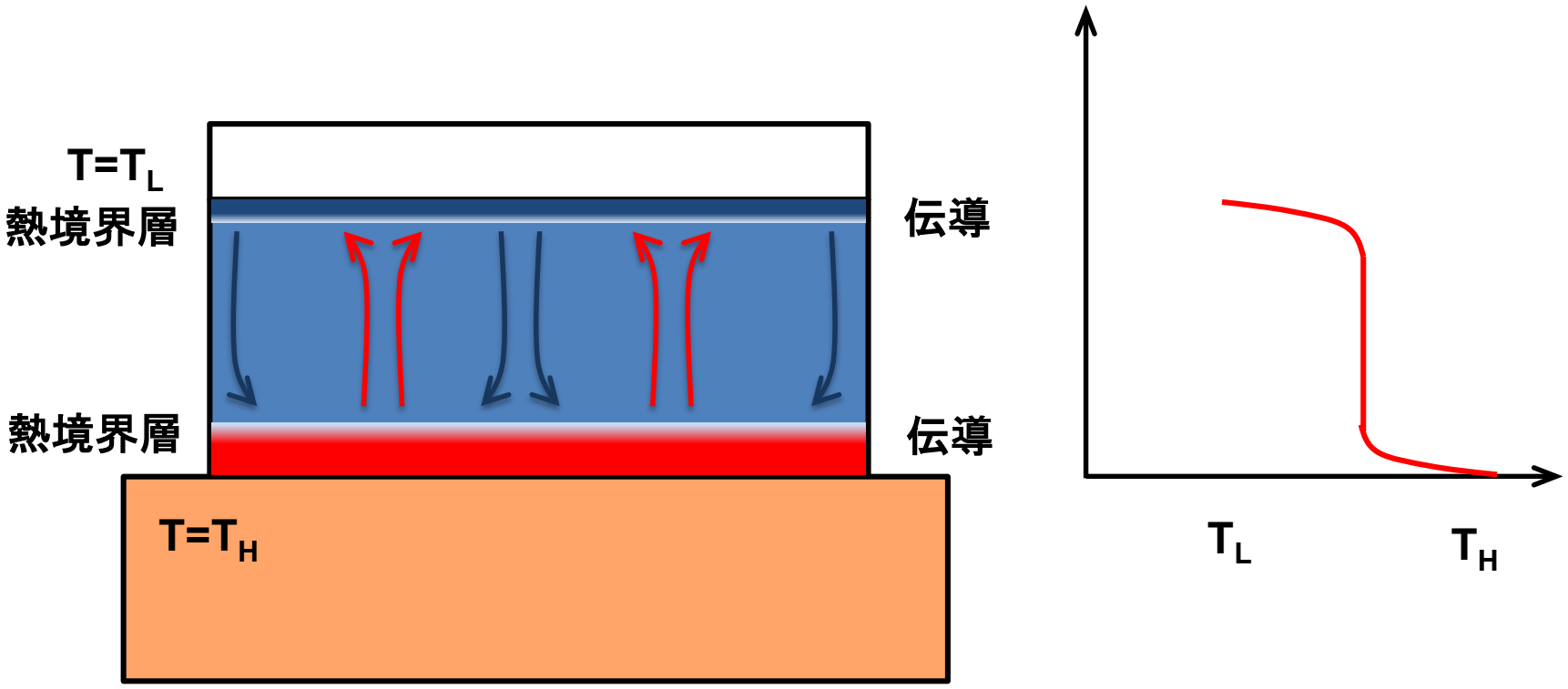

5000
4000
3000
2000
1000
温度（K）
D″層
外核
内核
下部マントル
上部マントル
0
1000
2000
3000
4000
5000
6000
深　さ（km）

地球内部の温度


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

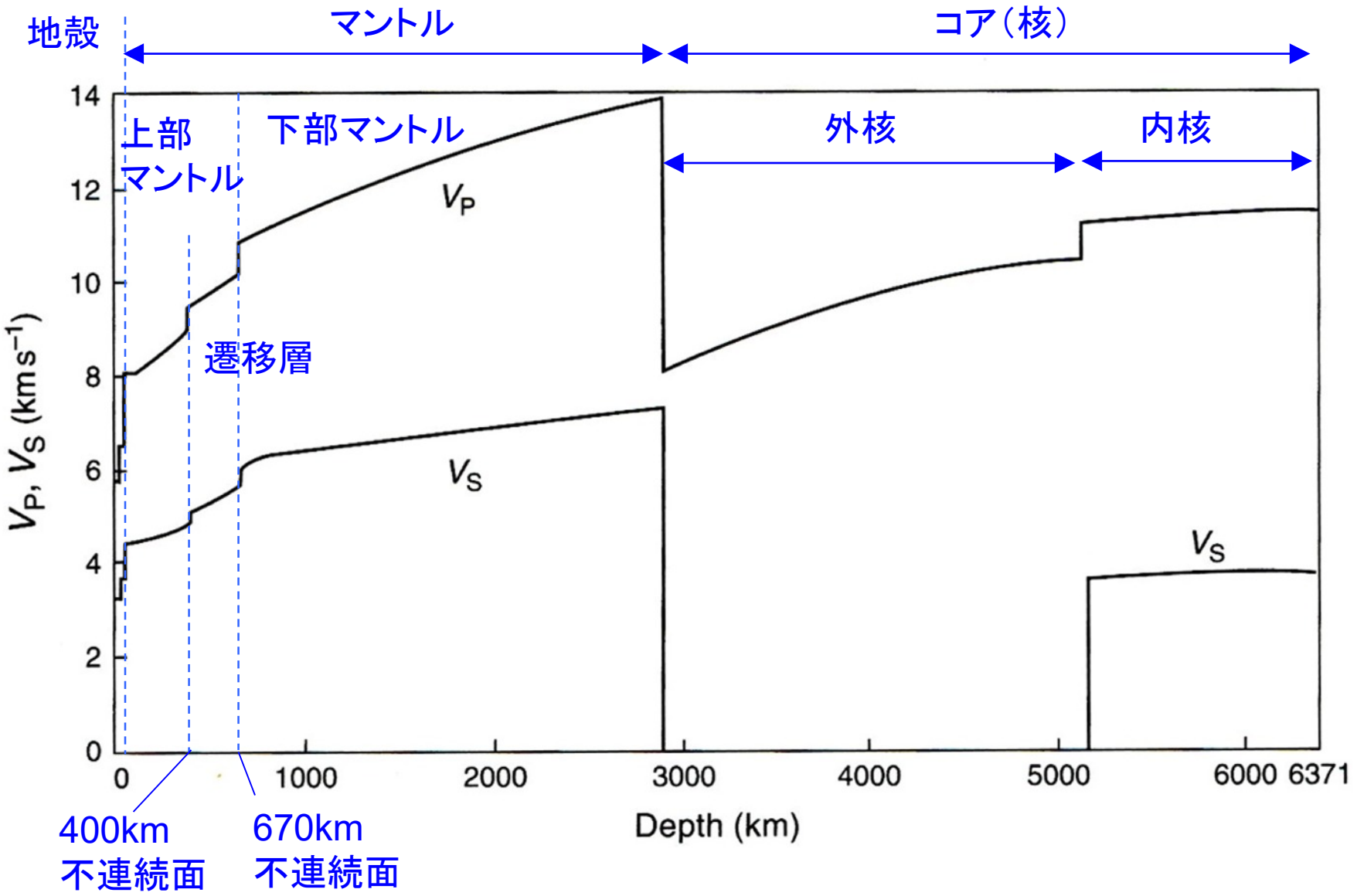
対流が起きているとすると. . .

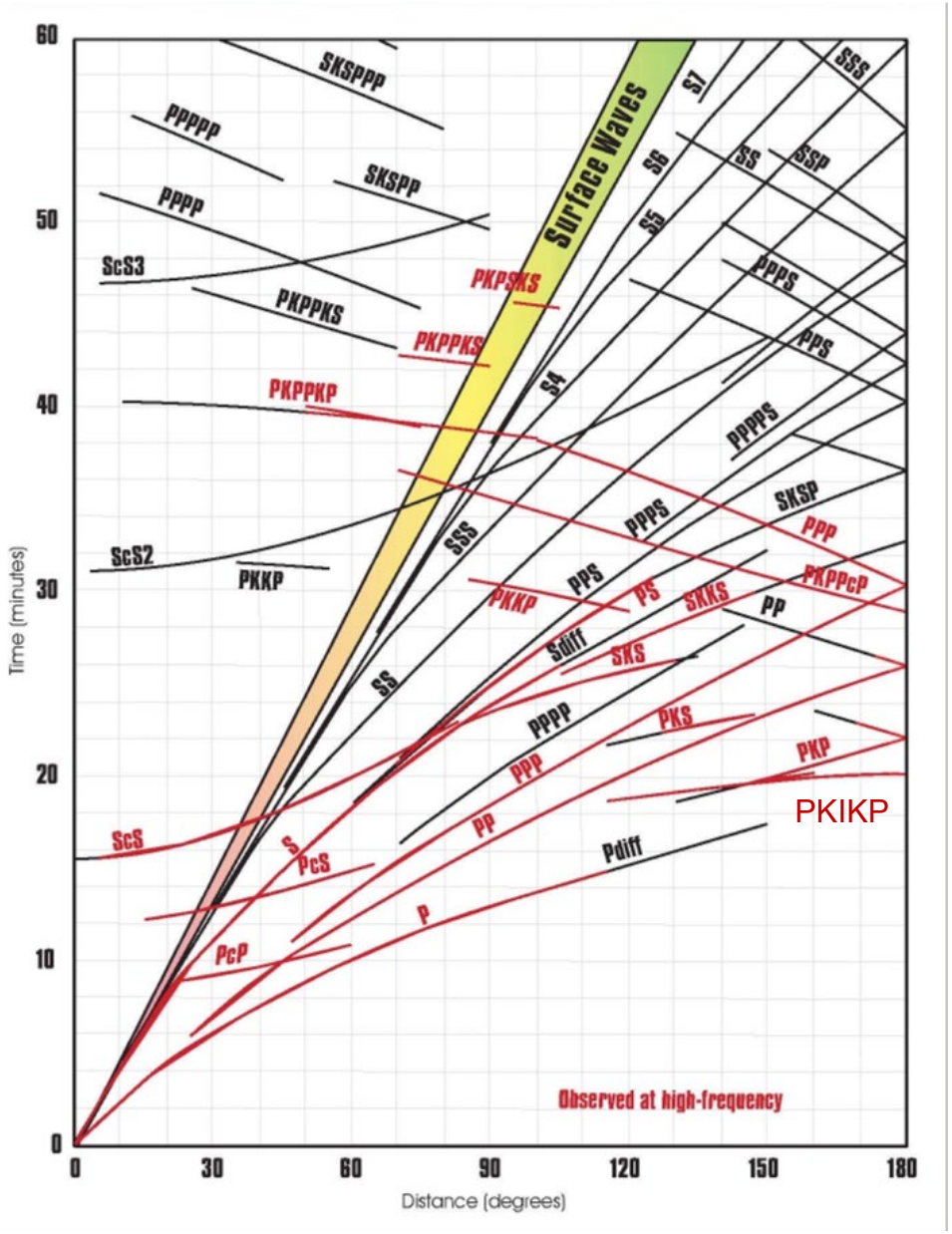
上昇流と下降流の部分で温度が違うはず
⇒　地震波速度が違うはず



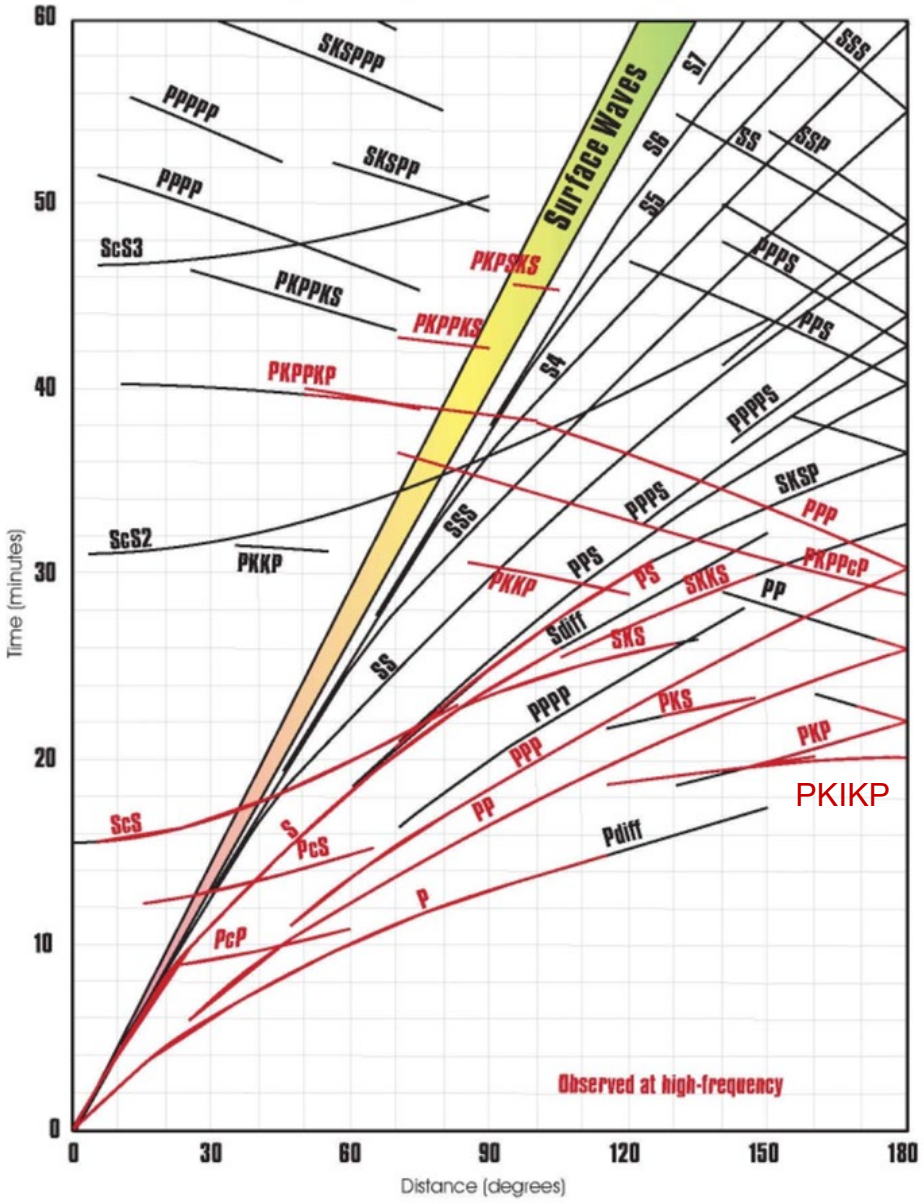
球対称地球モデル

IASP91





IASP91に基づいた
理論走時



IASP91に基づいた
理論走時

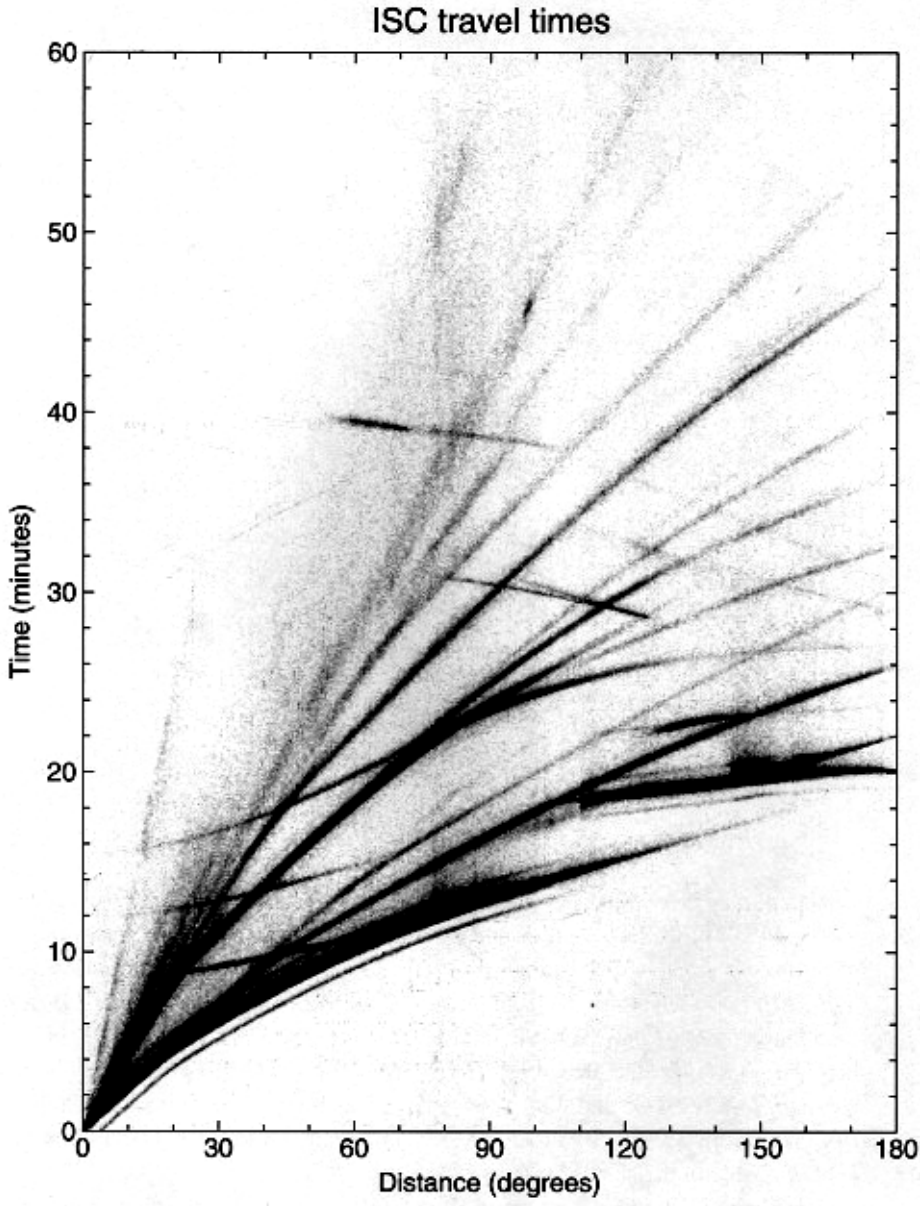
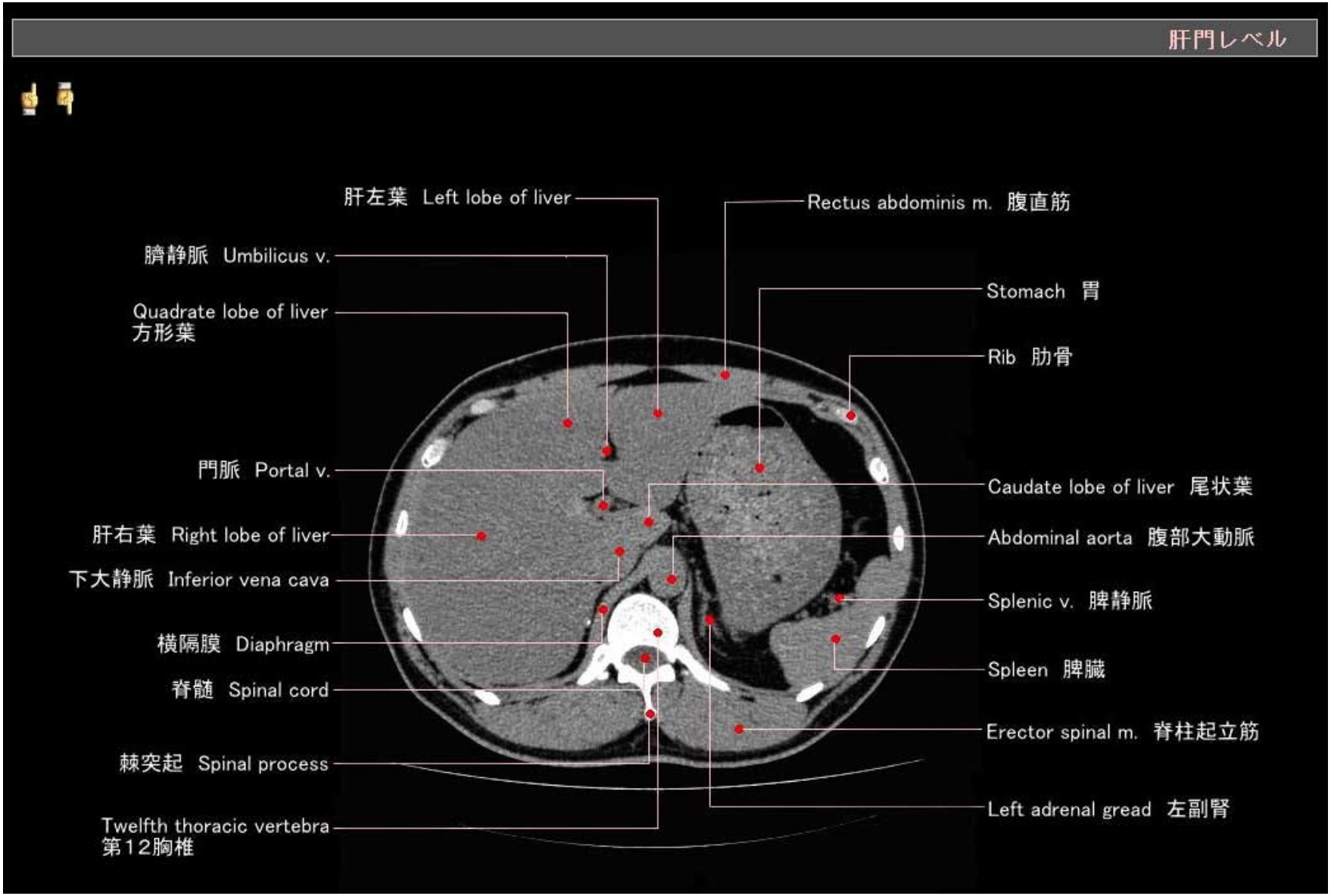


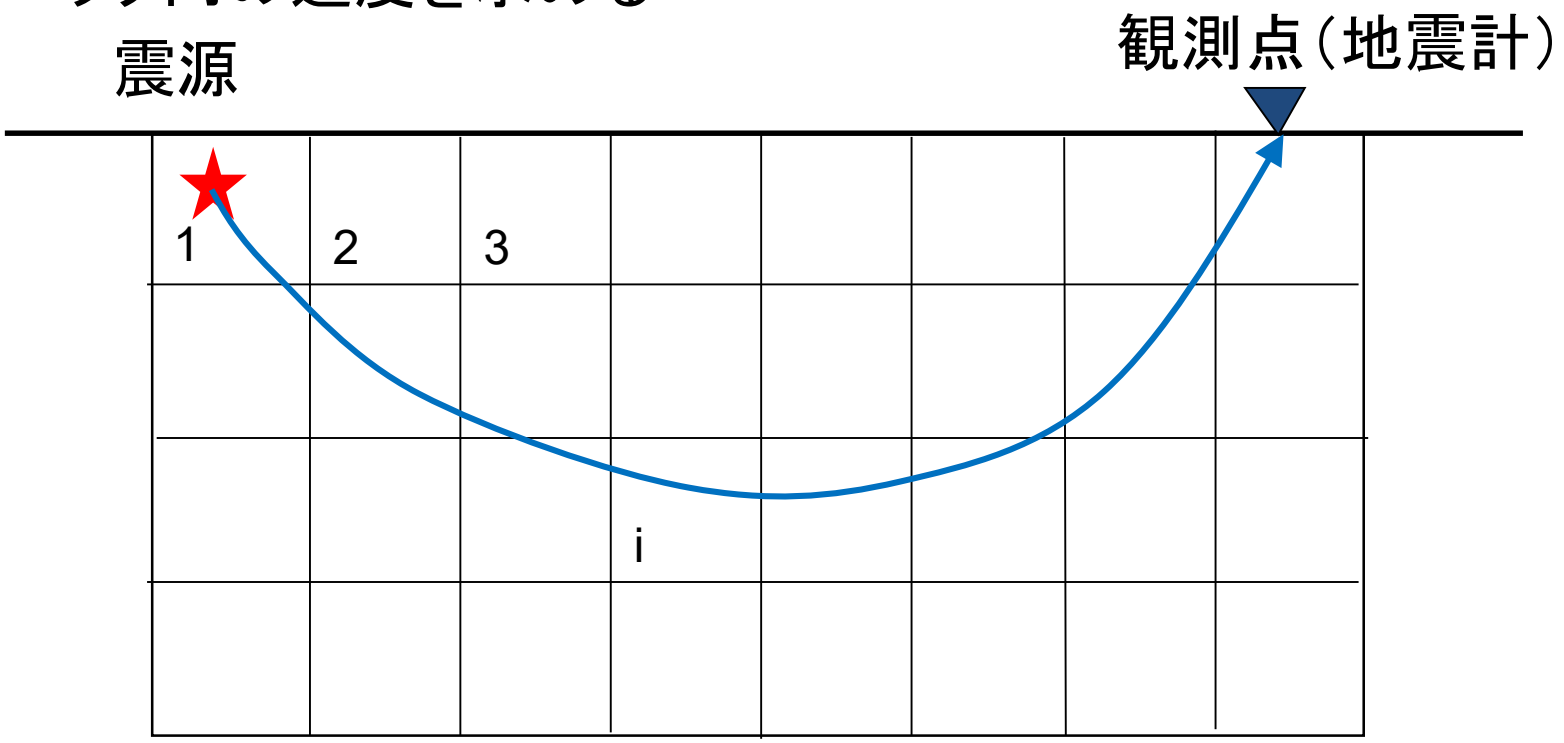
Fig. 4.17. Travel time picks collected by the ISC between 1964 and 1987 for events shallower than 50 km. Over five million individual picks are plotted, the bulk of which are *P*, *PKP*, and *S* arrivals. However, several later arriving branches can also be seen, including *PP*, *PKS*, *PcP*, *PcS*, *ScS*, *PKKP*, and *PKPPKP*. See Figures 4.19 and 4.23 for a key to the phase names. The phases visible at ±1 minute from the *P*-wave are due to errors in assigning times.

X線CT


肝門レベル
肝左葉 Left lobe of liver
臍静脈 Umbilicus v.
Quadrate lobe of liver
方形葉
門脈 Portal v.
肝右葉 Right lobe of liver
下大静脈 Inferior vena cava
横隔膜 Diaphragm
脊髄 Spinal cord
棘突起 Spinal process
Twelfth thoracic vertebra
第12胸椎
Rectus abdominis m. 腹直筋
Stomach 胃
Rib 肋骨
Caudate lobe of liver 尾状葉
Abdominal aorta 腹部大動脈
Splenic v. 脾静脈
Spleen 脾臓
Erector spinal m. 脊柱起立筋
Left adrenal gread 左副腎

水平方向不均質を探る:トモグラフィ

各ブロック内の速度を求める



理論走時

$$T = \sum_i \frac{x_i}{v_i}$$

トモグラフィの原理

震源ー観測点の組が十分あれば v_i が求められる

$$T^1 = \frac{x^1{}_1}{v_1} + \frac{x^1{}_2}{v_2} + \frac{x^1{}_3}{v_3} + \ldots + \frac{x^1{}_n}{v_n}$$

$$T^2 = \frac{x^2{}_1}{v_1} + \frac{x^2{}_2}{v_2} + \frac{x^2{}_3}{v_3} + \ldots + \frac{x^2{}_n}{v_n}$$

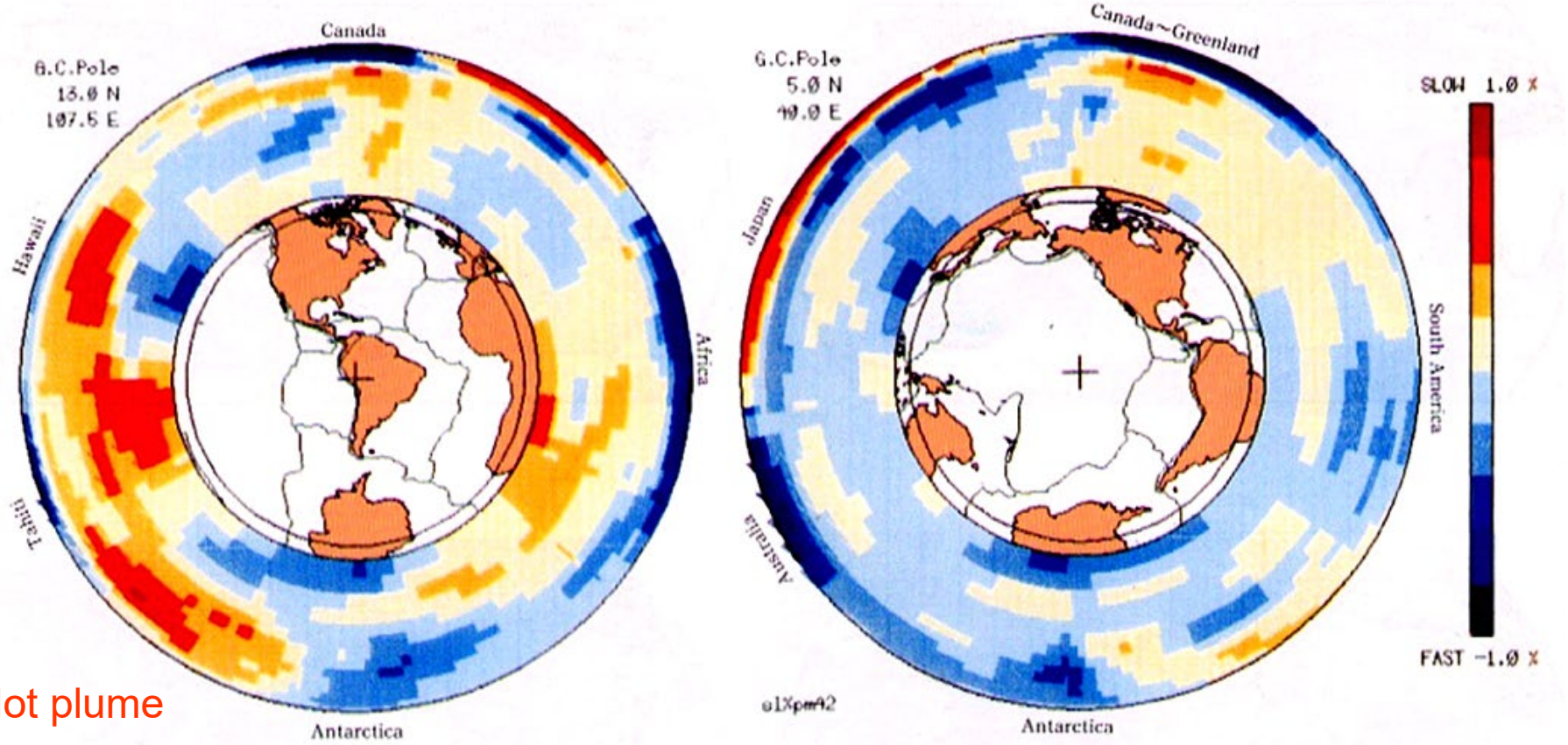
.....

$$T^k = \frac{x^k{}_1}{v_1} + \frac{x^k{}_2}{v_2} + \frac{x^k{}_3}{v_3} + \ldots + \frac{x^k{}_n}{v_n}$$

T^k, $x^k{}_i$ は既知

密な観測網，　高速計算機が必要

全マントル・トモグラフィ



Hot plume

Fukao et al. (1994)

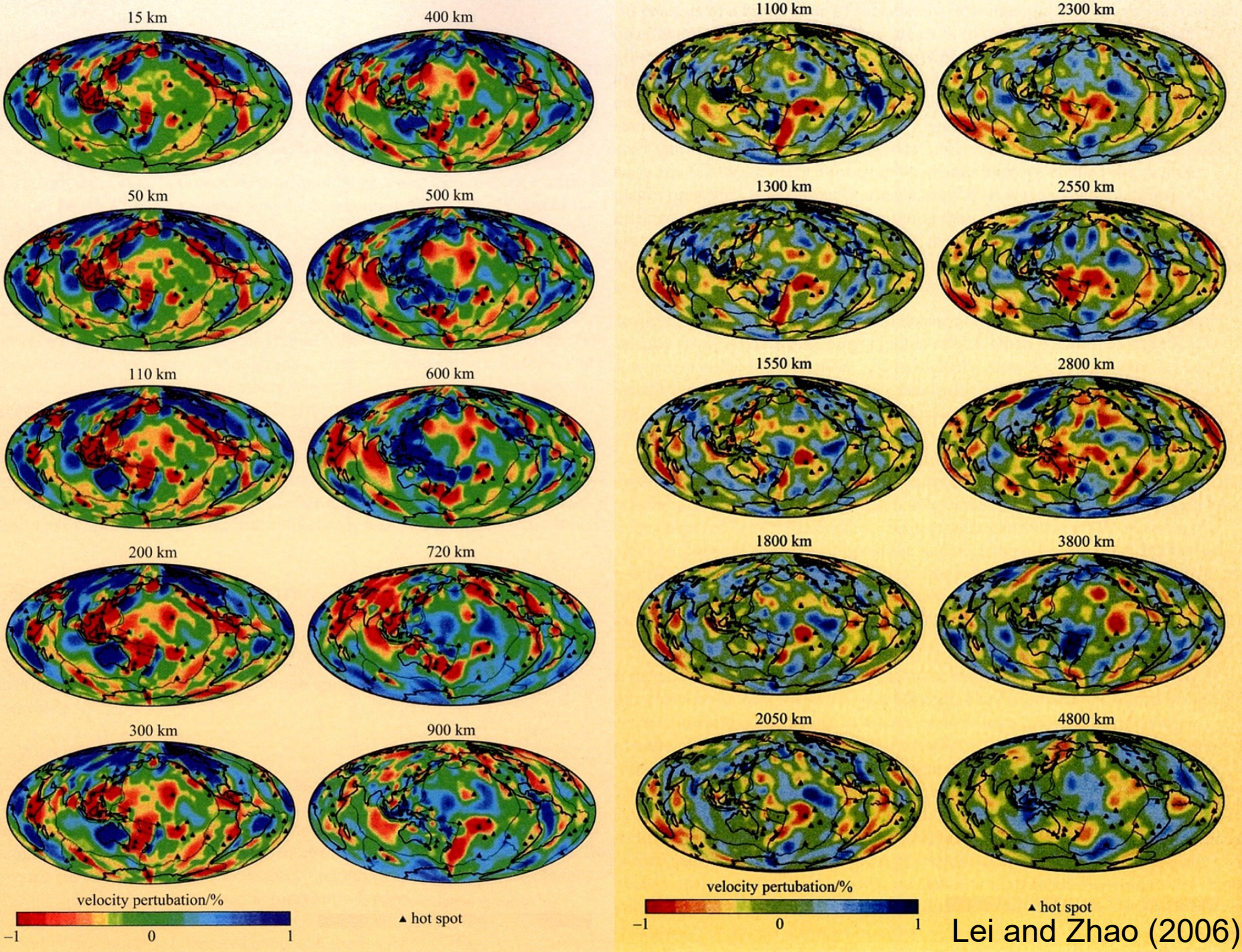
課題

（1）北米，オーストラリア，アフリカでは浅部の低速度異常あるいは高速度異常はどの深さまで続いているか？

（2）東太平洋海膨における浅部の低速度異常はどの深さまで続いているか？

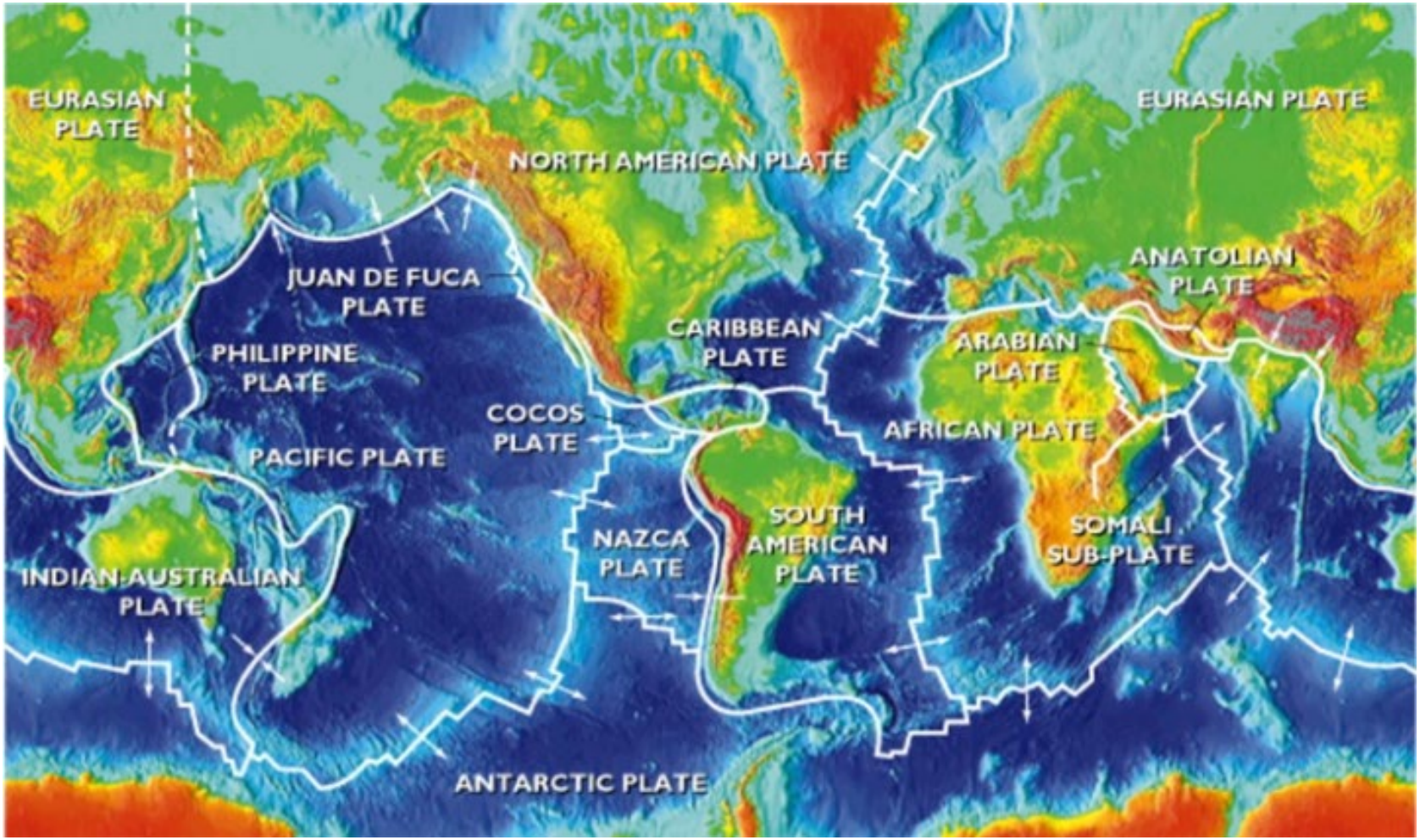
（3）ハワイの下の低速度異常はどの深さまで続いているか？

（4）深さ500-600kmで見えている北西太平洋（カムチャツカ―日本―インドネシア）の高速度異常はどの深さまで続いているか？



Lei and Zhao (2006)

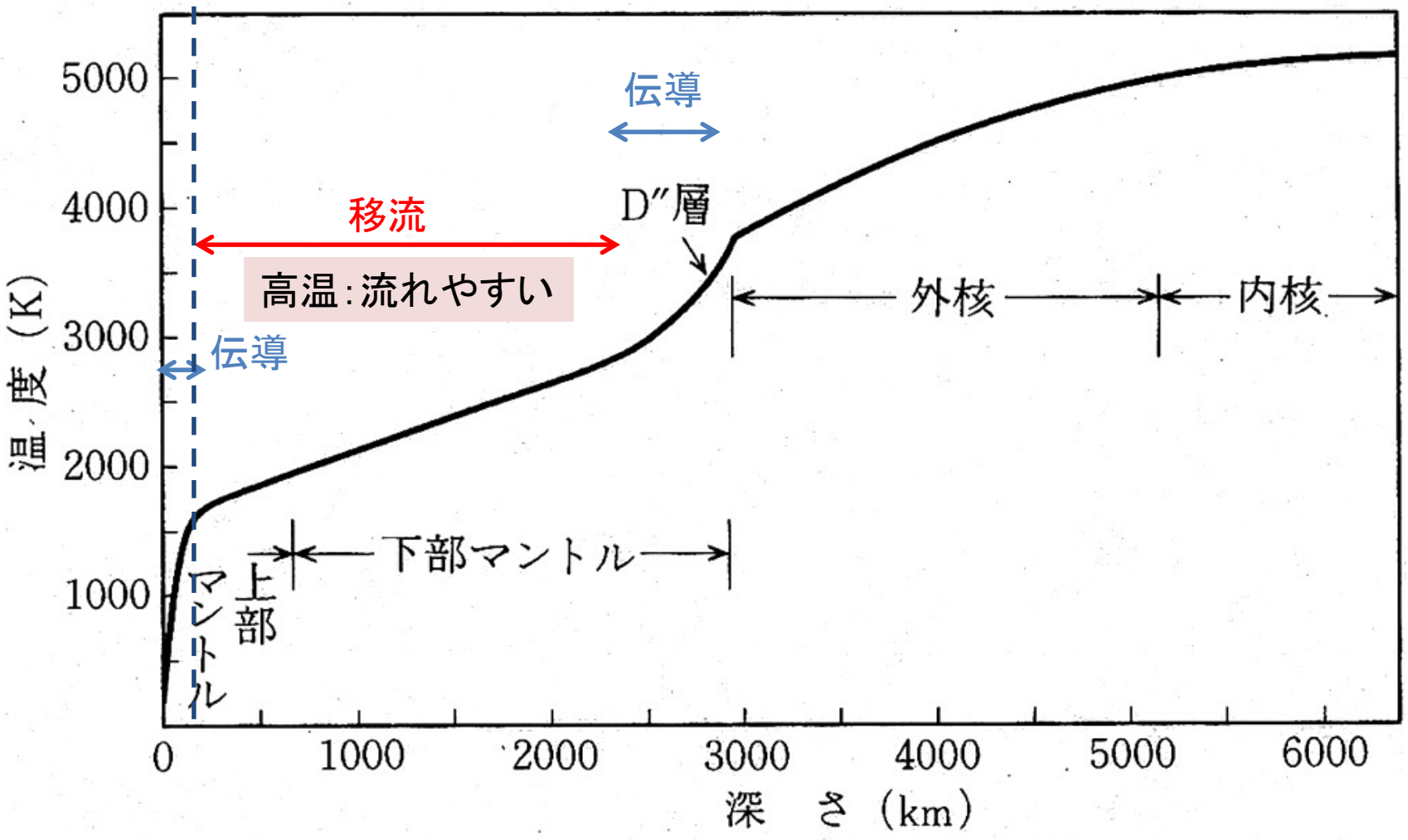
プレートテクトニクス



地球の表面は厚さ約100kmの10枚ほどの硬い板（プレート）で覆われており，プレートは互いに運動している．
造山運動，地殻変動，地震などの変動はプレート間の相対運動によって生じる．

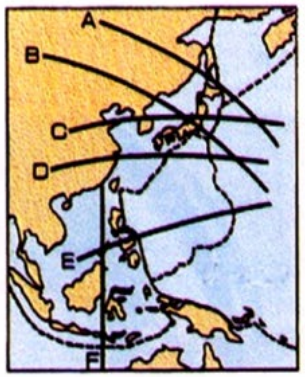
プレートとは？

プレート･･･　表層約100km　･･･熱境界層



Hawaii, Lava Lake

プレート: 滞留した後，下部マントルを下降



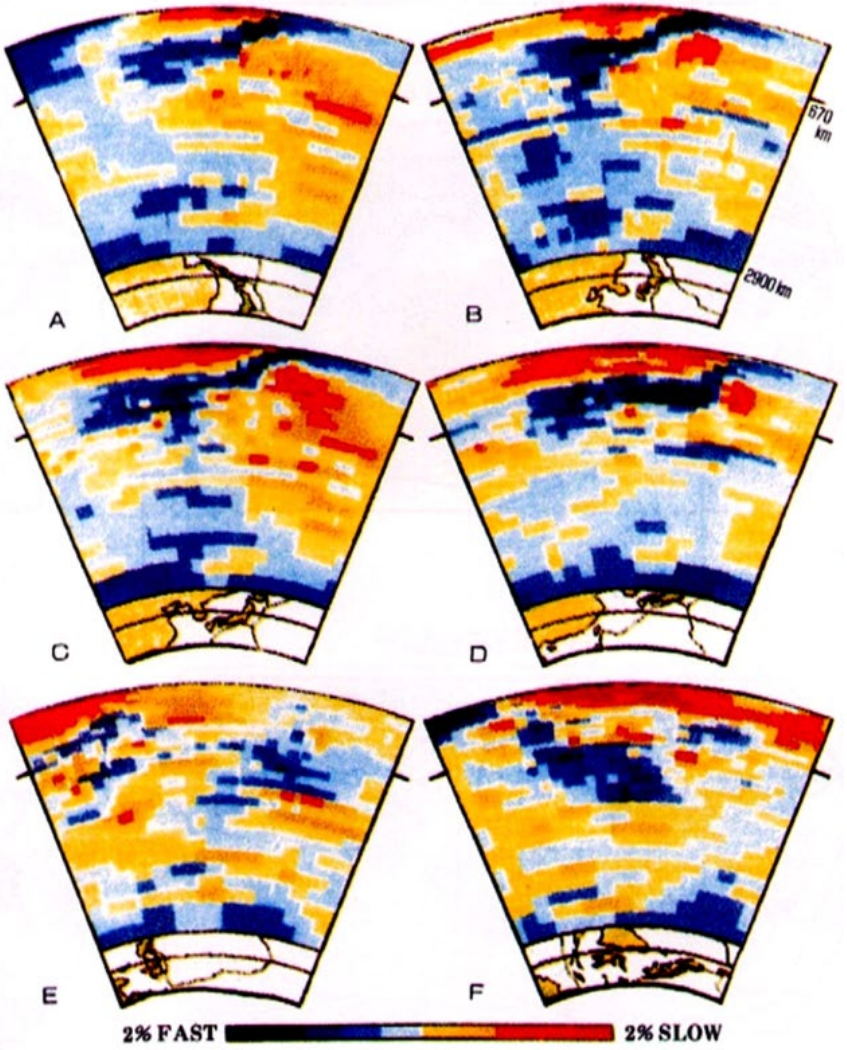
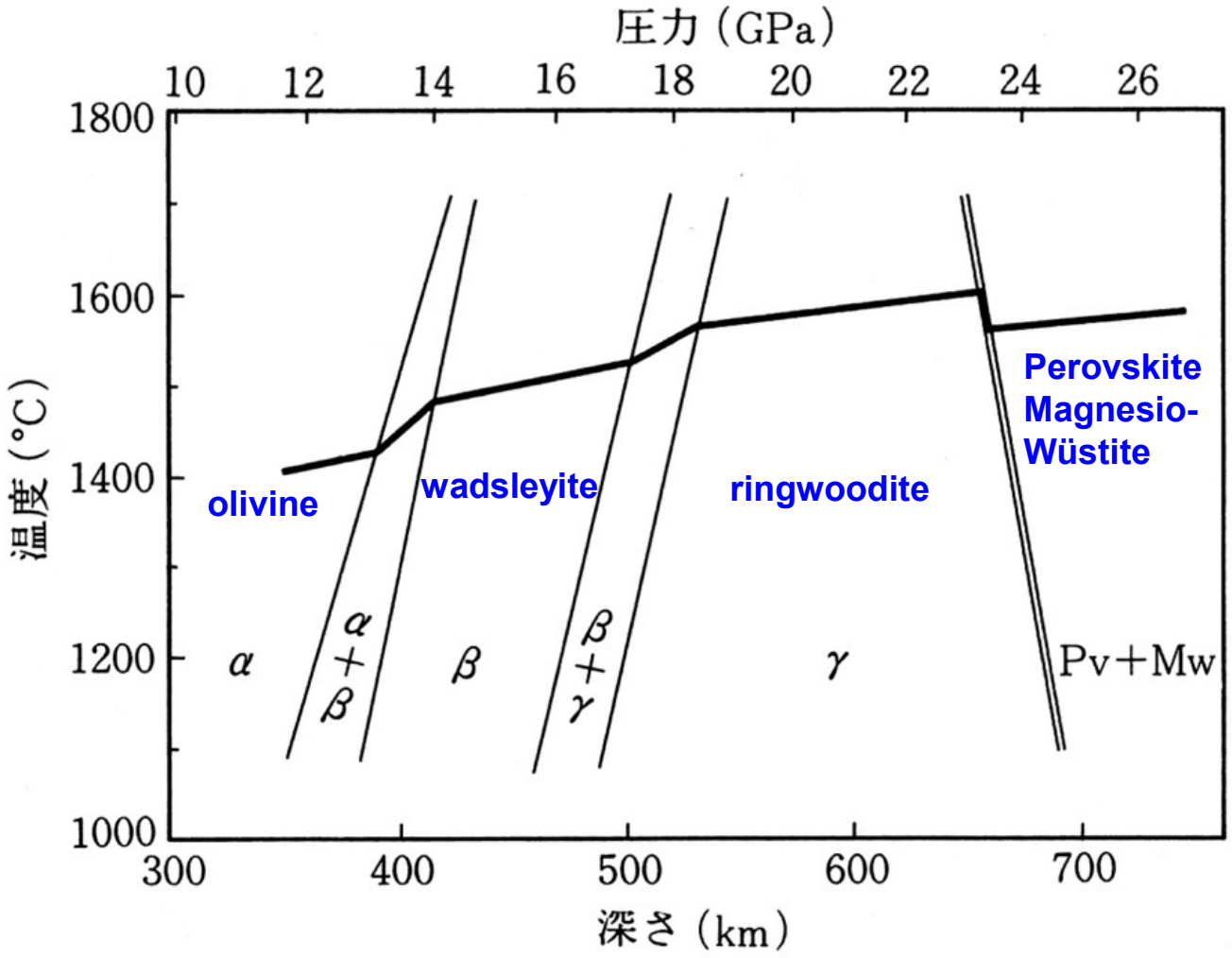


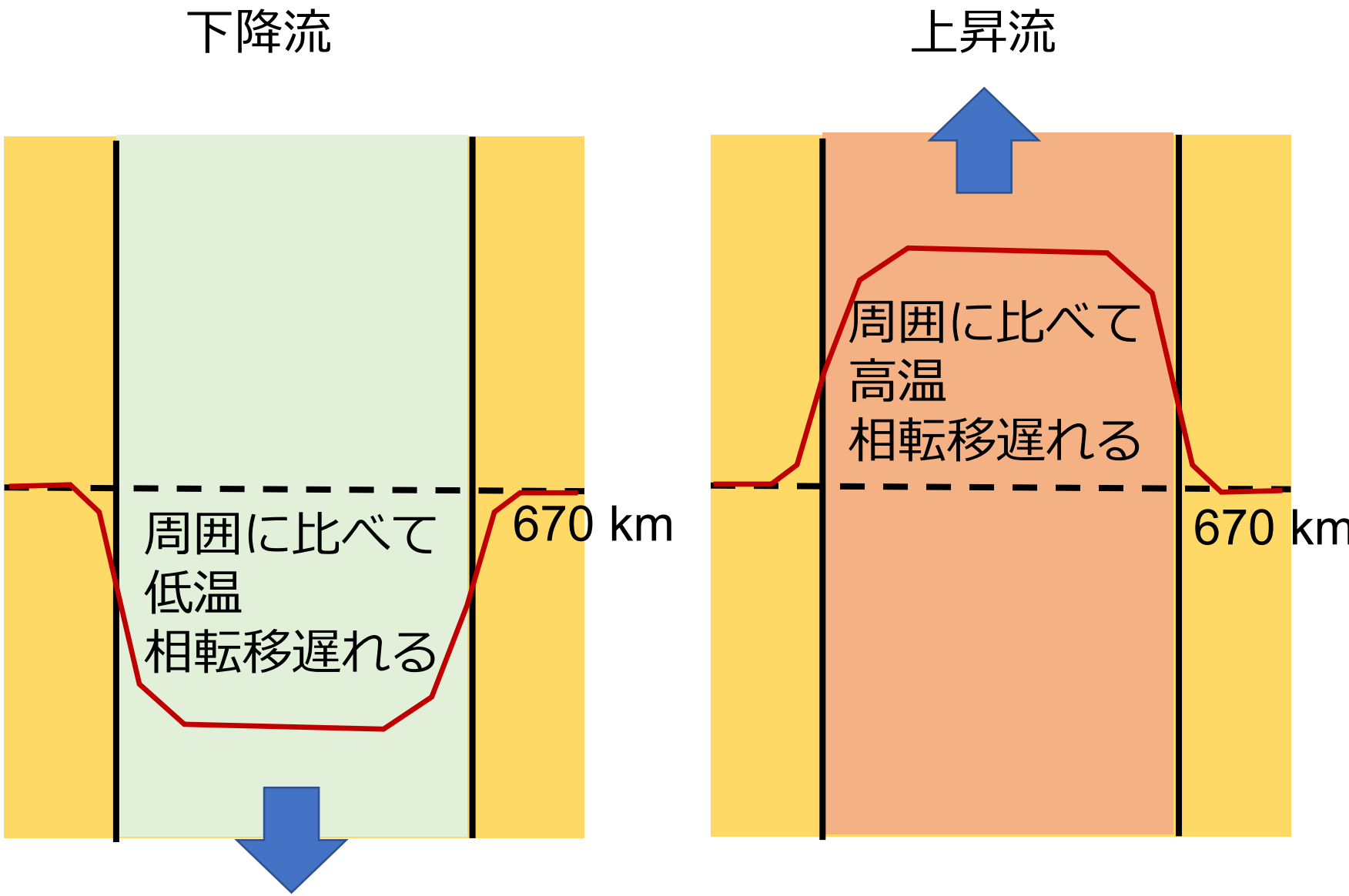
Fig. 17. Above : representative cross sections of P-wave velocity perturbations in the mantle along great circles. The position of cross section is shown as a circle in an inset world map. The scale of anomaly is as same as Fig. 16. Below : Two contrasting modes of occurrence of subducted slabs in the western Pacific region. Cross sections of the slowness anomalies in the mantle along the profiles shown in the inset map. Subducted slabs are stagnant right above 670 km discontinuity plane around Japan (A, B, C, D, and E), but are being sunken in the Sunda region (F).

Fukao et al. (1994)

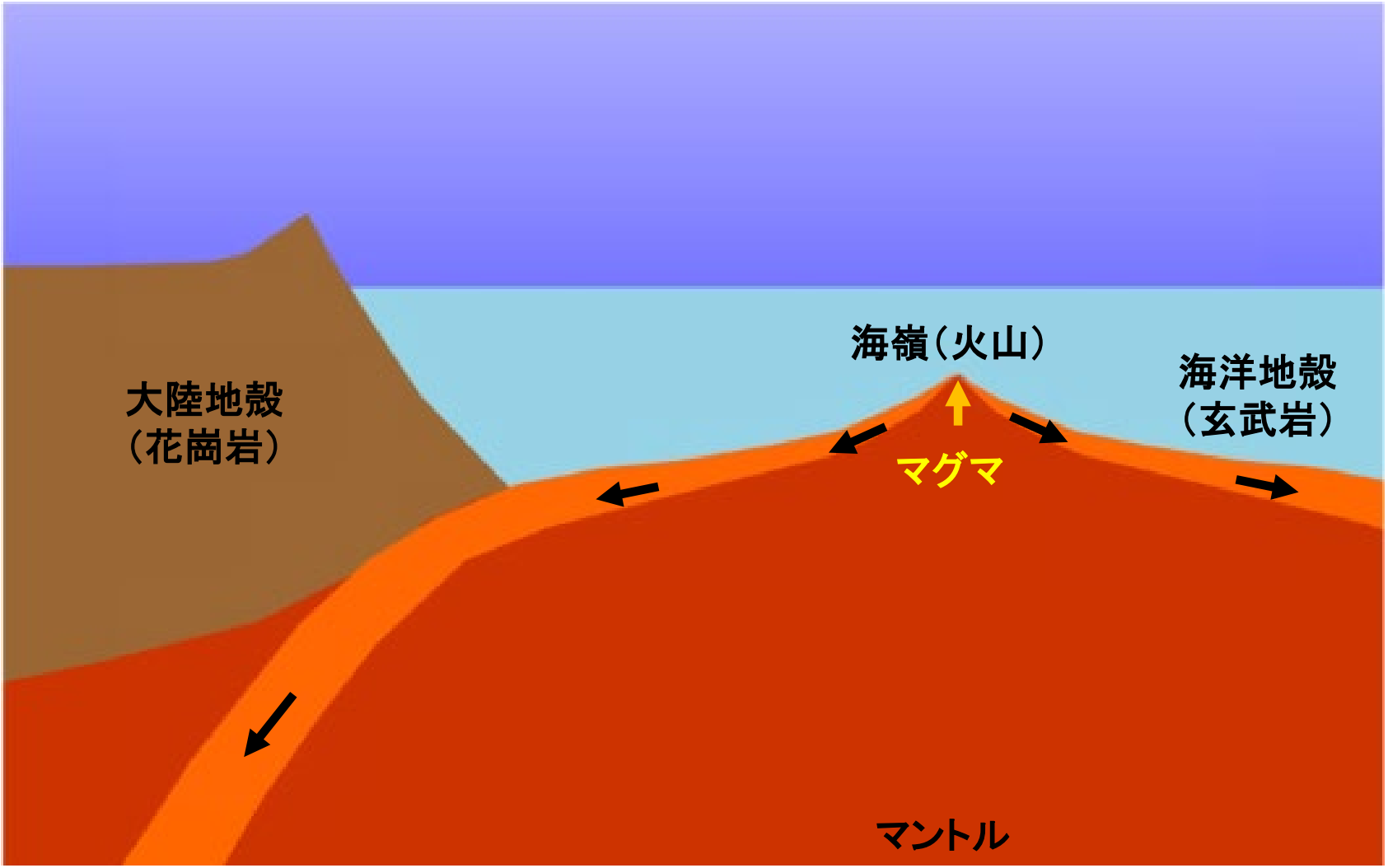


マントルオリビンの相転移境界線と温度分布（Akaogi et al., 1989 など

マントル対流への影響



海嶺とは？　上昇流？

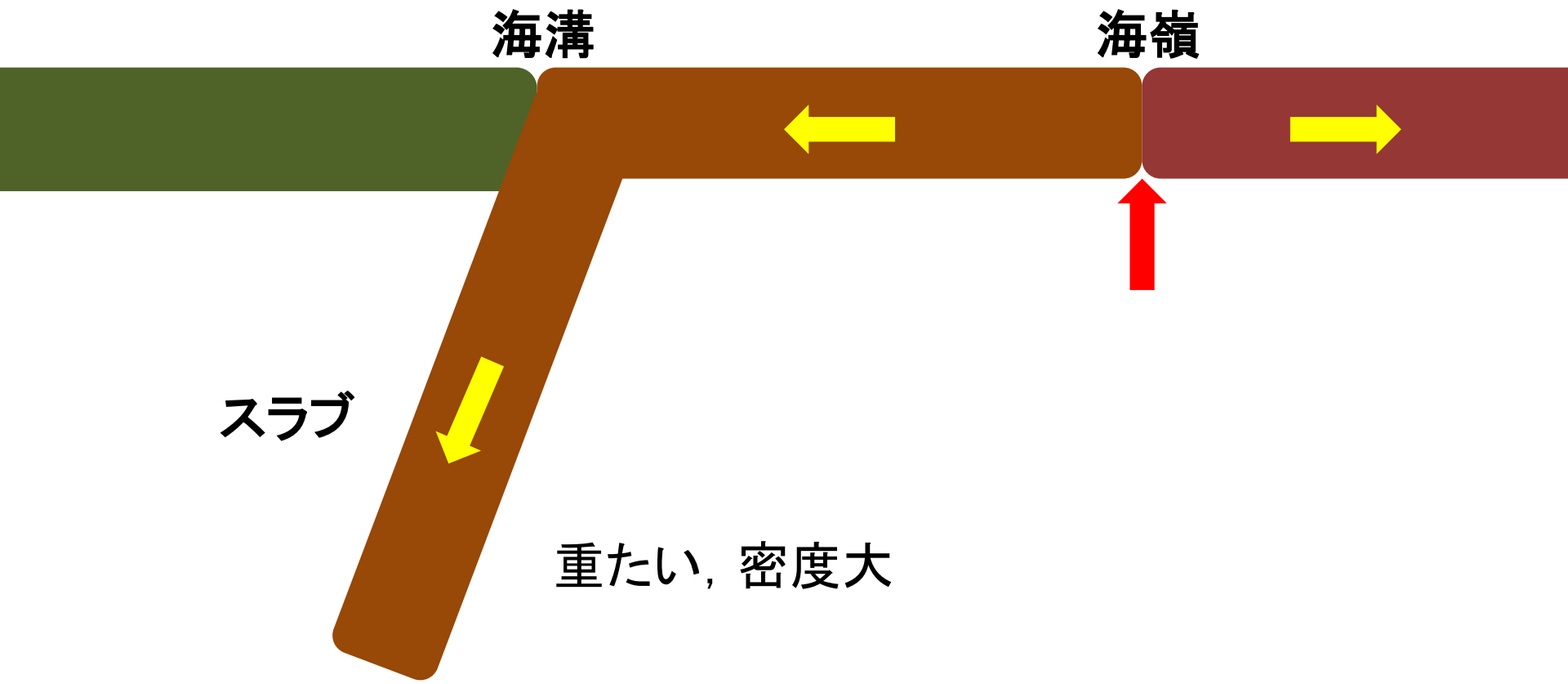


海嶺についての観察事実

- 海嶺の“沈み込み”が起きる
- 海嶺下の地震波速度
  低速度は浅部のみ

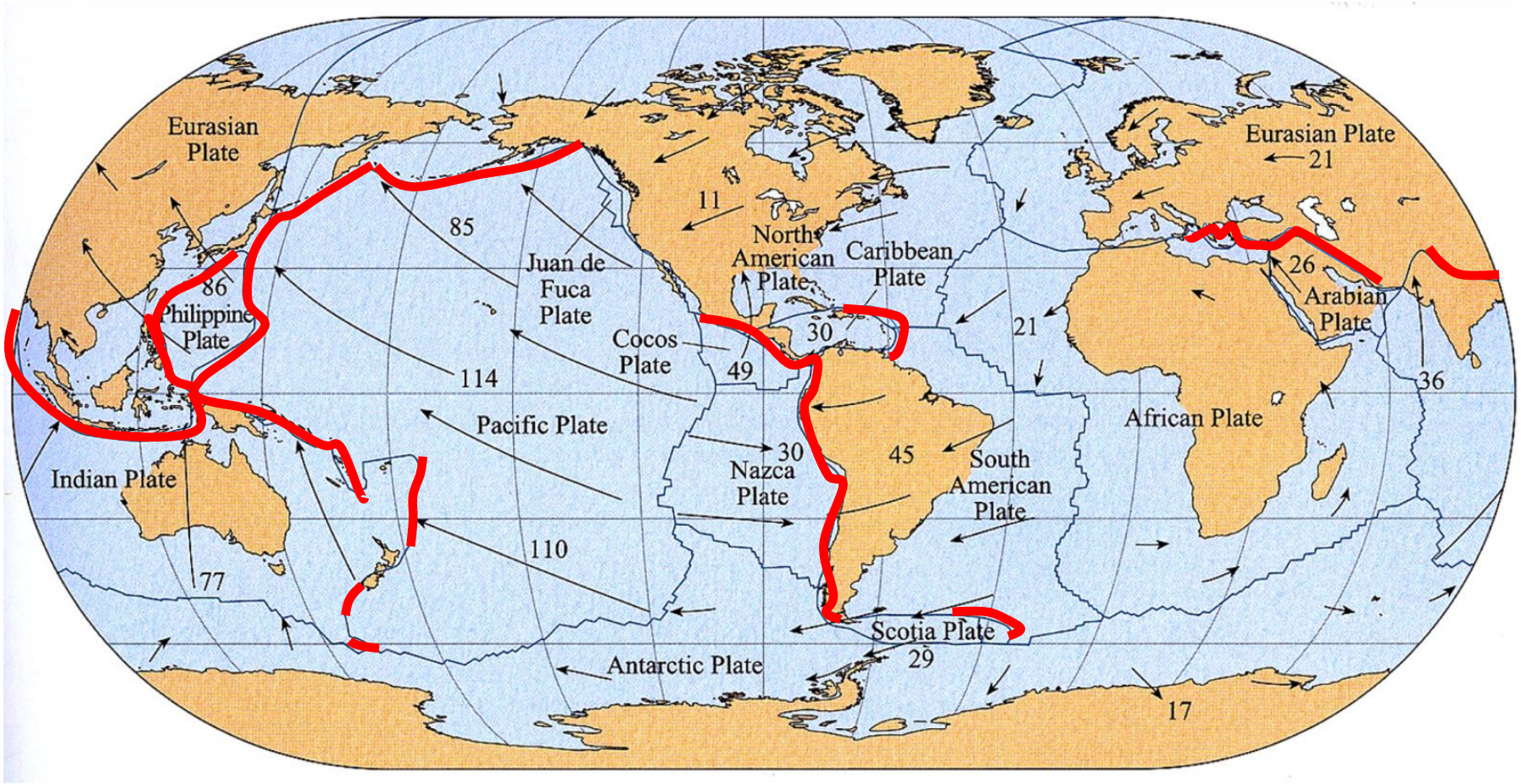
⇒ 大規模上昇流とは考えにくい

海嶺: 受動的上昇流



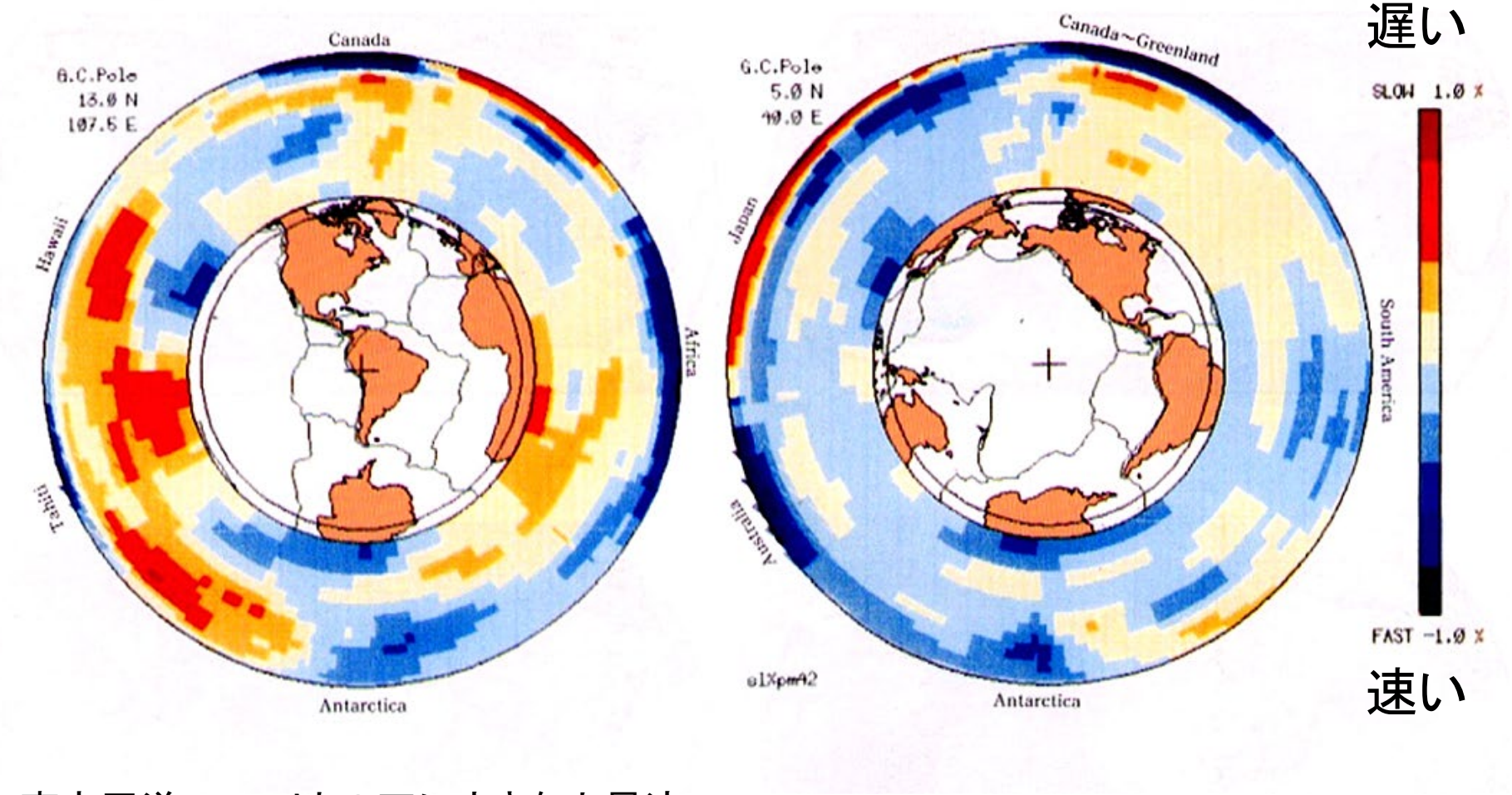
プレートの速度を決めているものは？

プレートの絶対速度　(mm/y)



沈み込んだプレートによる引っ張り

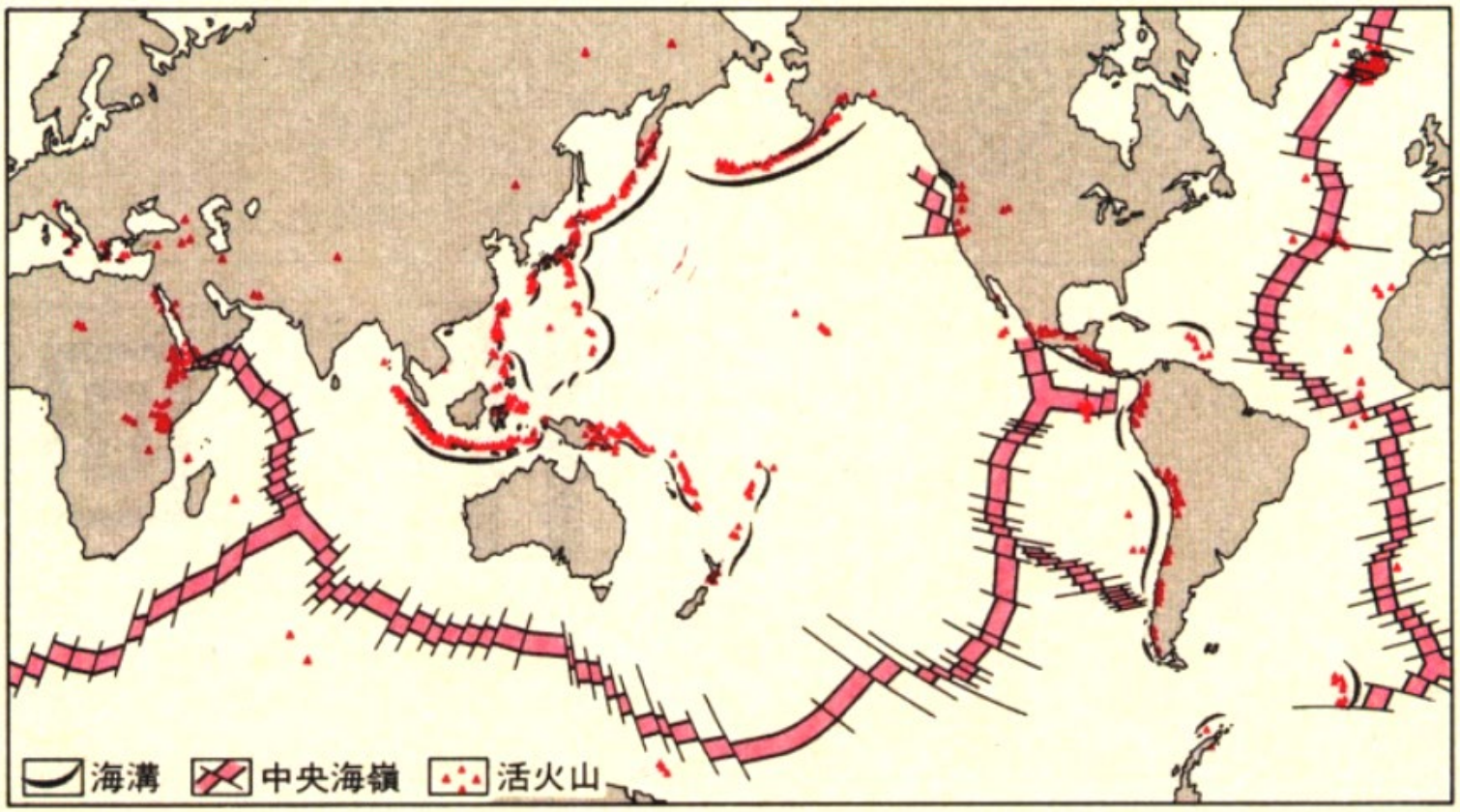
大規模上昇流に対応する現象は何か？



南太平洋，アフリカの下に大きな上昇流
（スーパー・プルーム）

Fukao et al. (1994)

火山の分布



●図36　世界の活火山の分布

海嶺，　沈み込み帯，ホットスポット

ホットスポットの例：ハワイ

ハワイ諸島ー天皇海山列

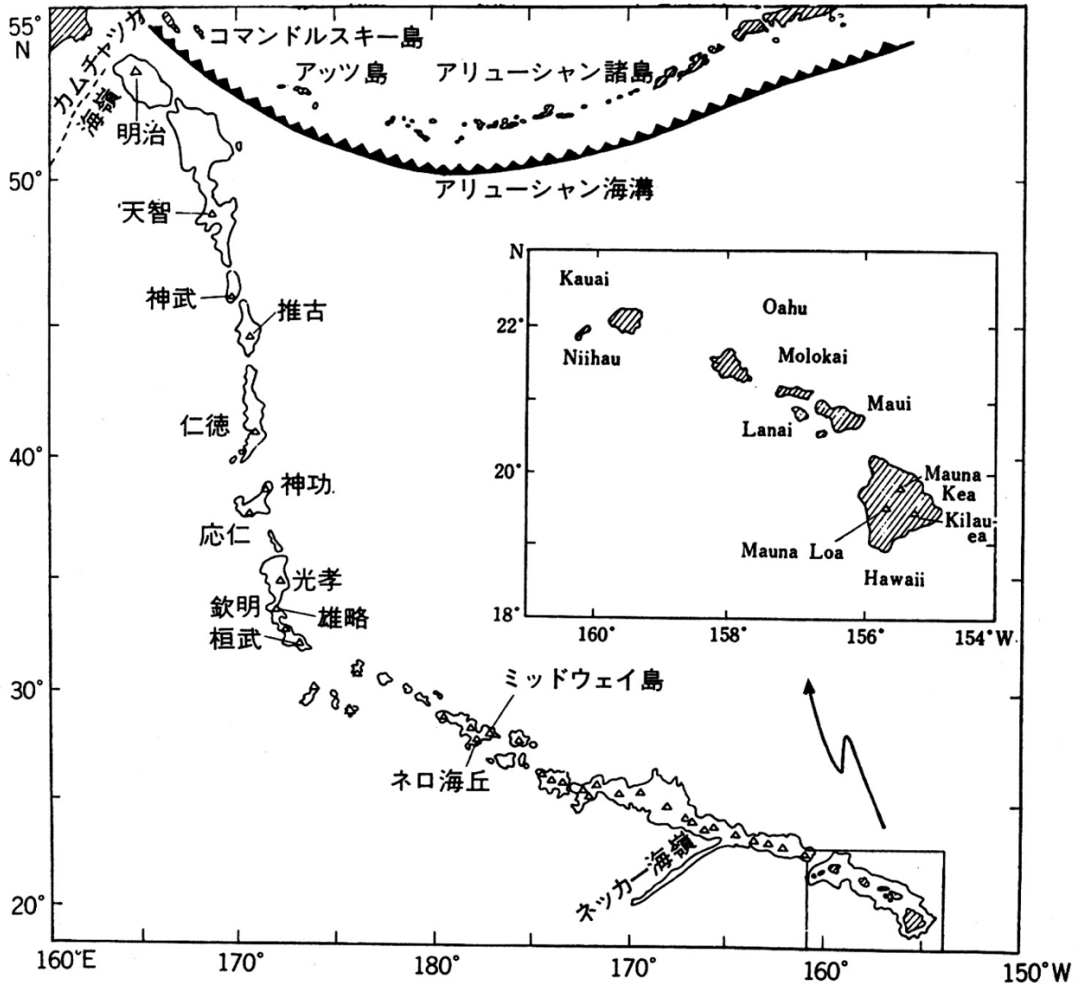


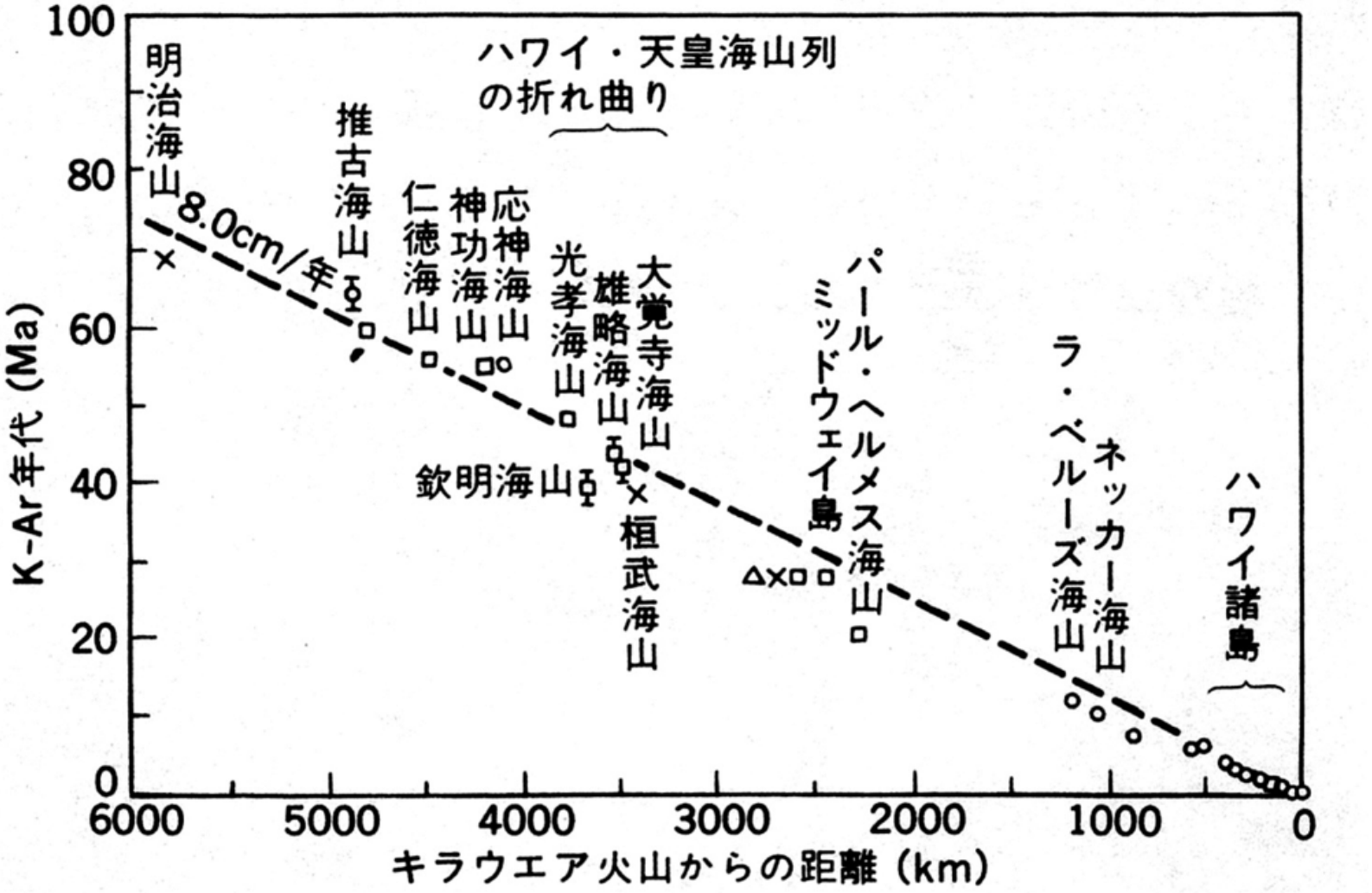
図 7·8　ハワイ諸島から天皇海山列に至る火山の軌跡
等深線は，ハワイ火山列・天皇海山列のまわりの，水深 2000m を示す．

ハワイ島からの距離と年代の関係

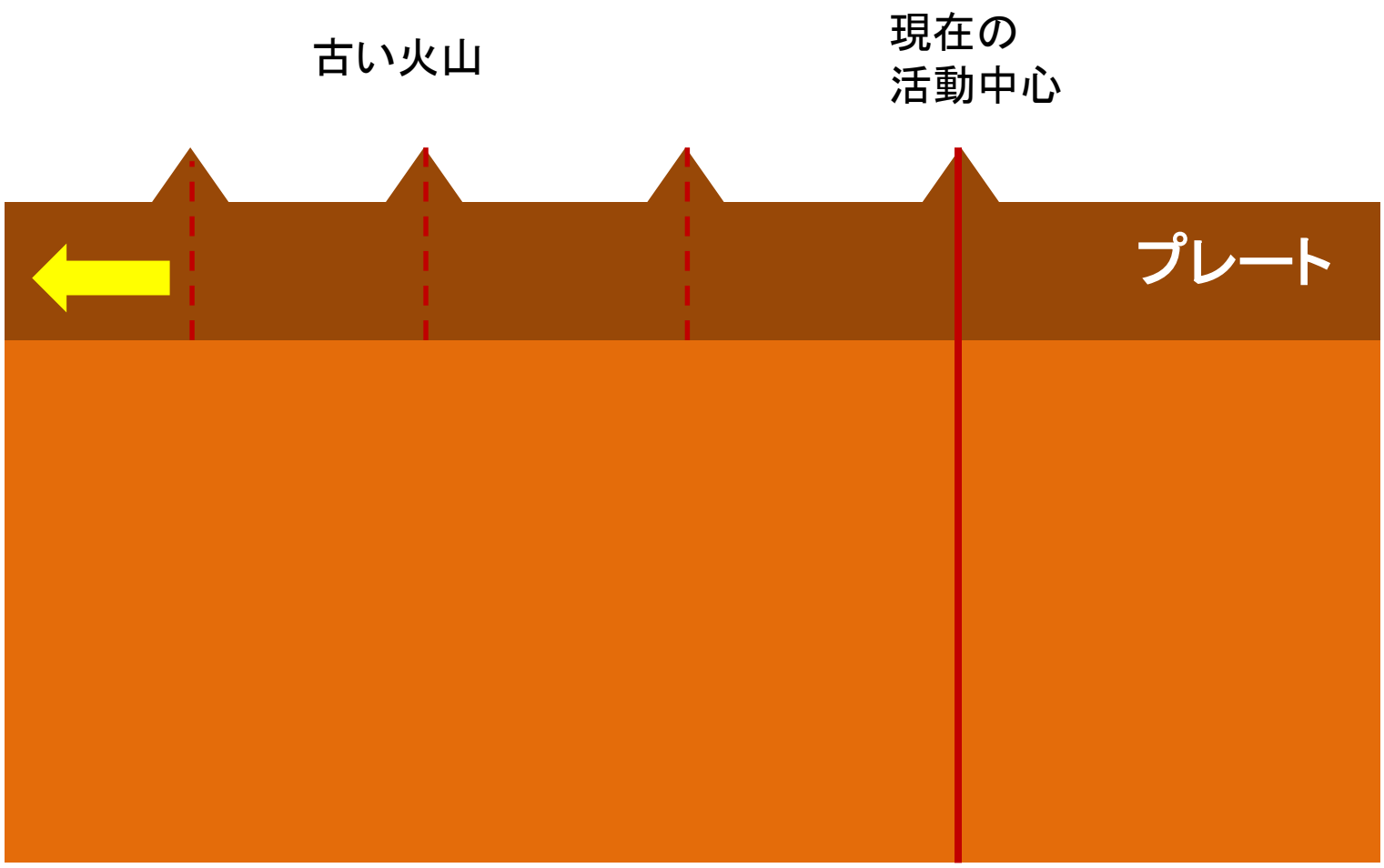
Ma = 100万年前

ハワイ島からの距離に比例して古くなる

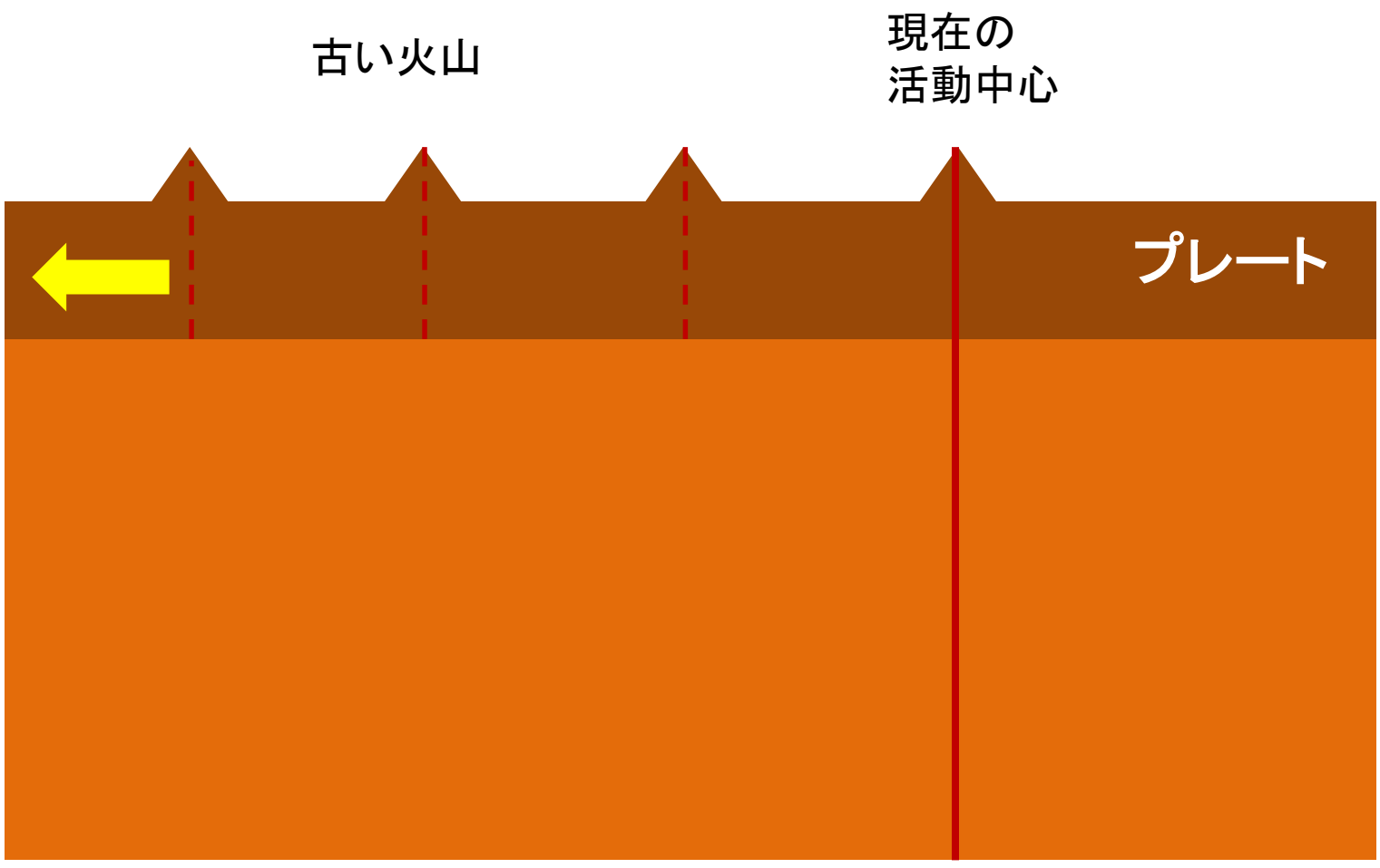
1年あたりの距離はプレートの移動速度に等しい



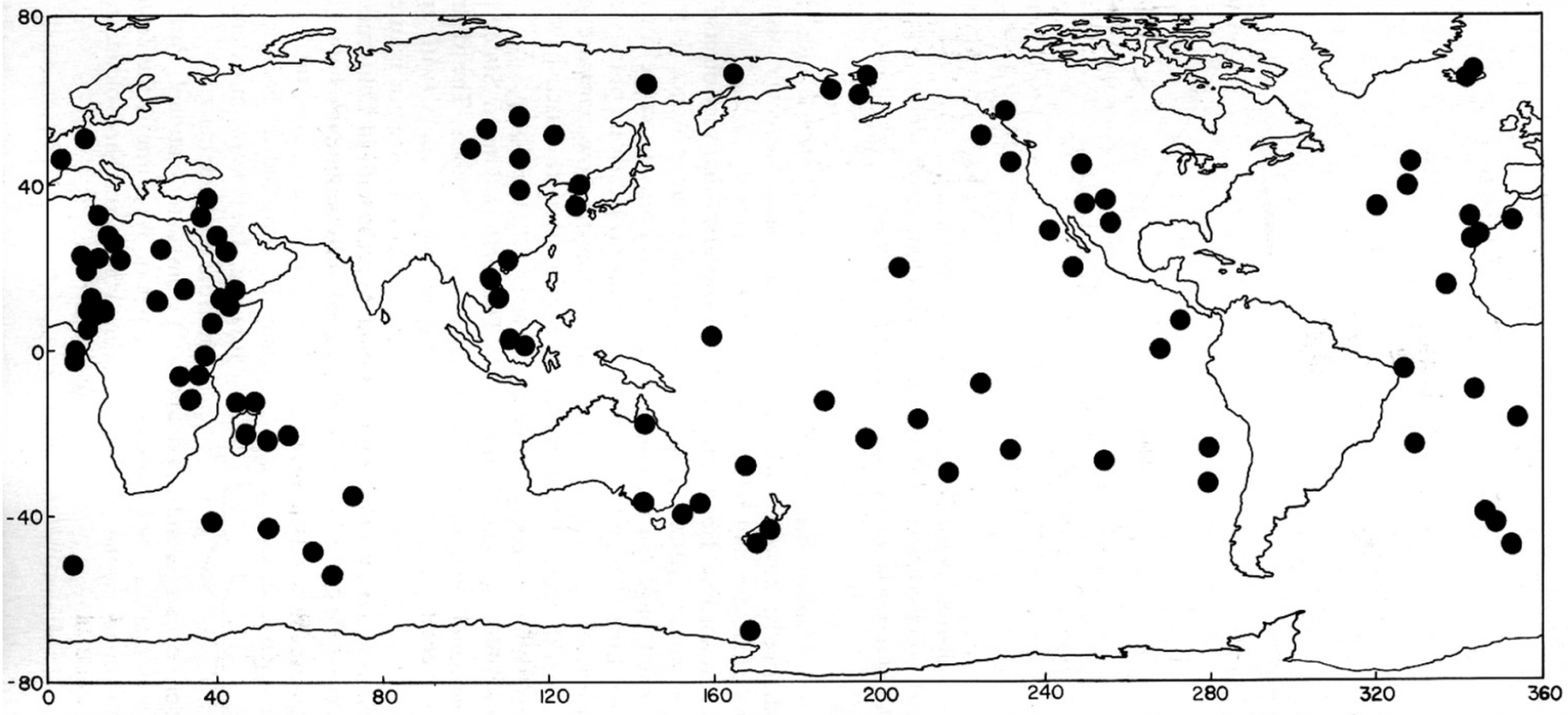
ホットスポットのモデル



ホットスポットのモデル



ホットスポットの分布



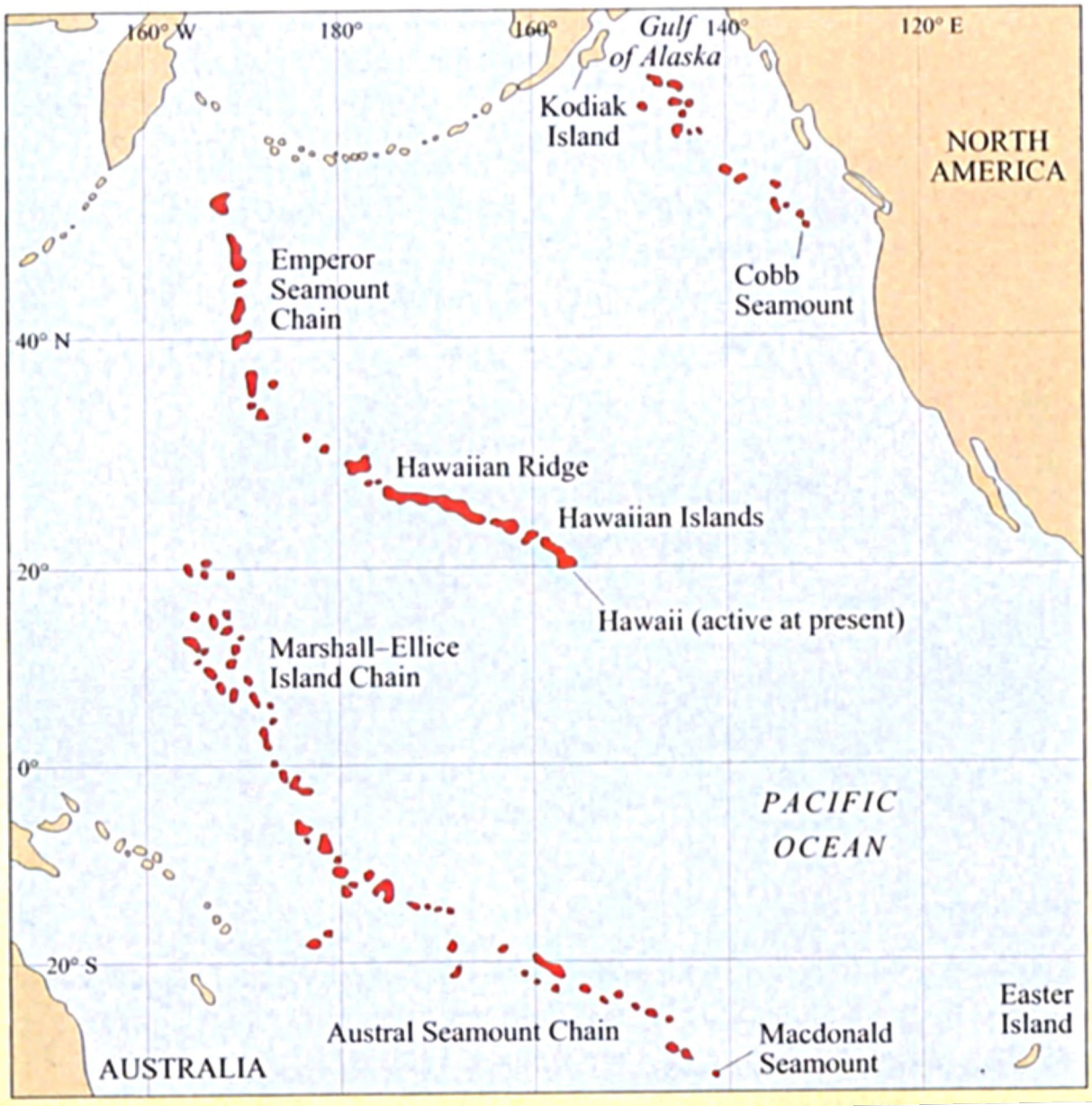
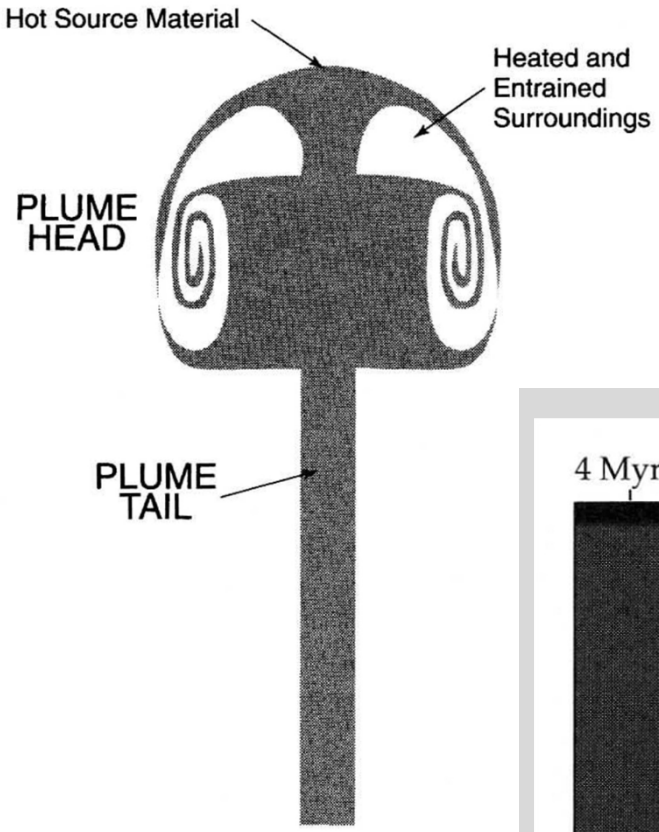
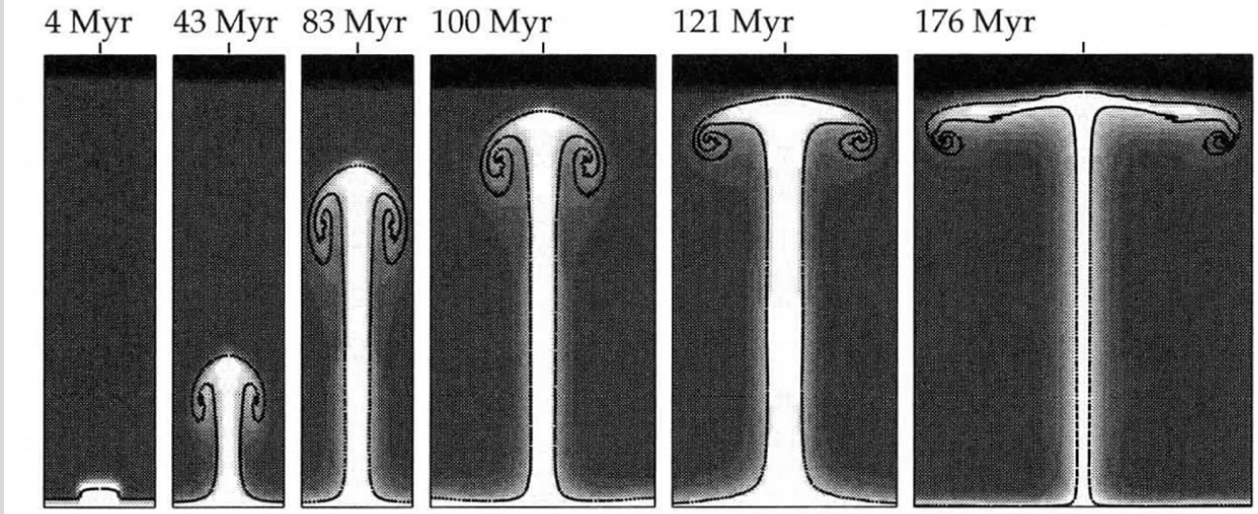


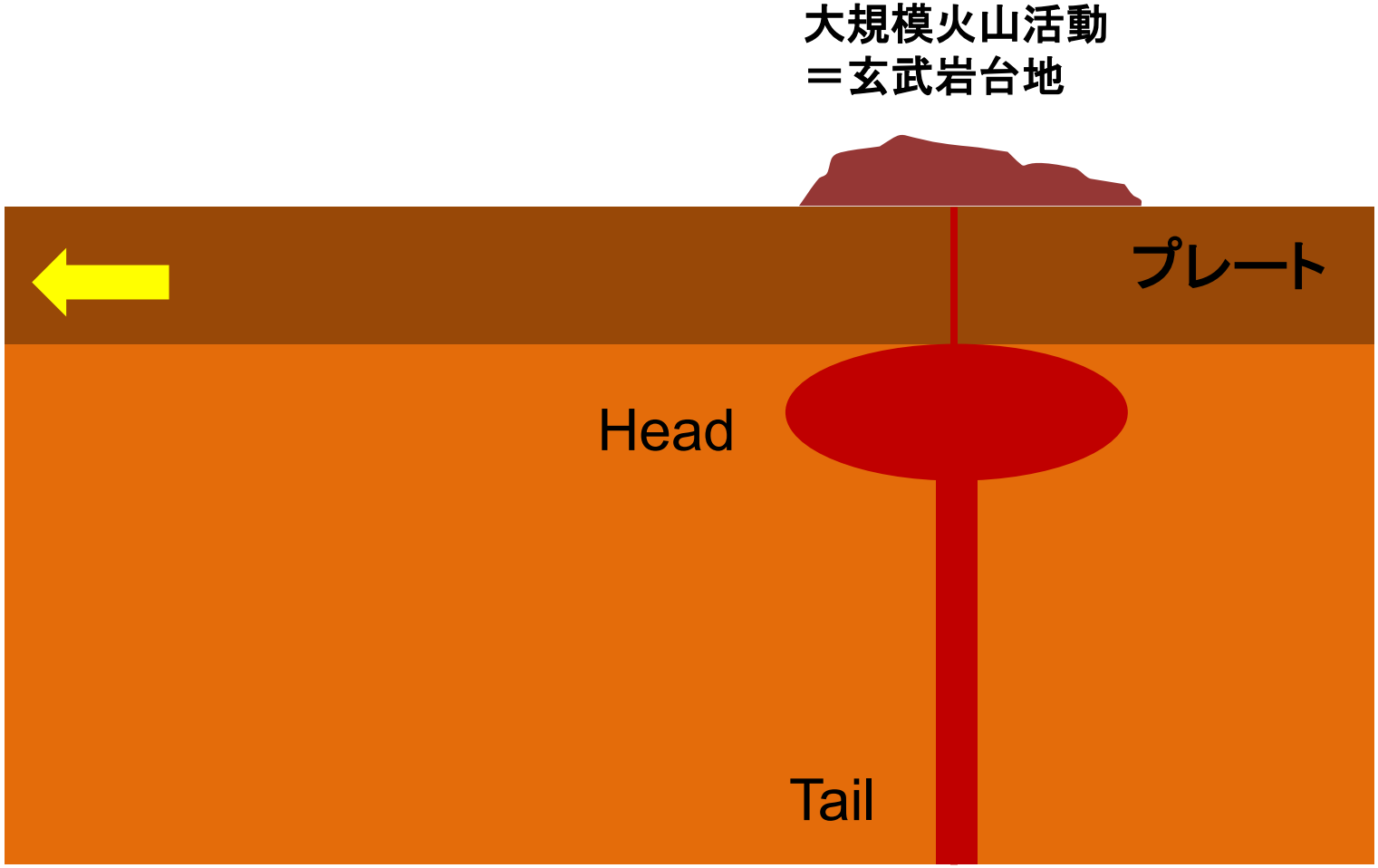
Figure 3.23 Map showing three of the major seamount and island chains in the Pacific Ocean. These are the Kodiak Island–Cobb Seamount Chain in the northeastern Pacific, the Marshall–Ellice Islands–Austral Seamount Chain of the southern Pacific, and the well-known Hawaiian Ridge–Emperor Seamount Chain in the central Pacific. The Hawaiian Islands are located at the southeastern end of the Hawaiian Ridge.

プルーム

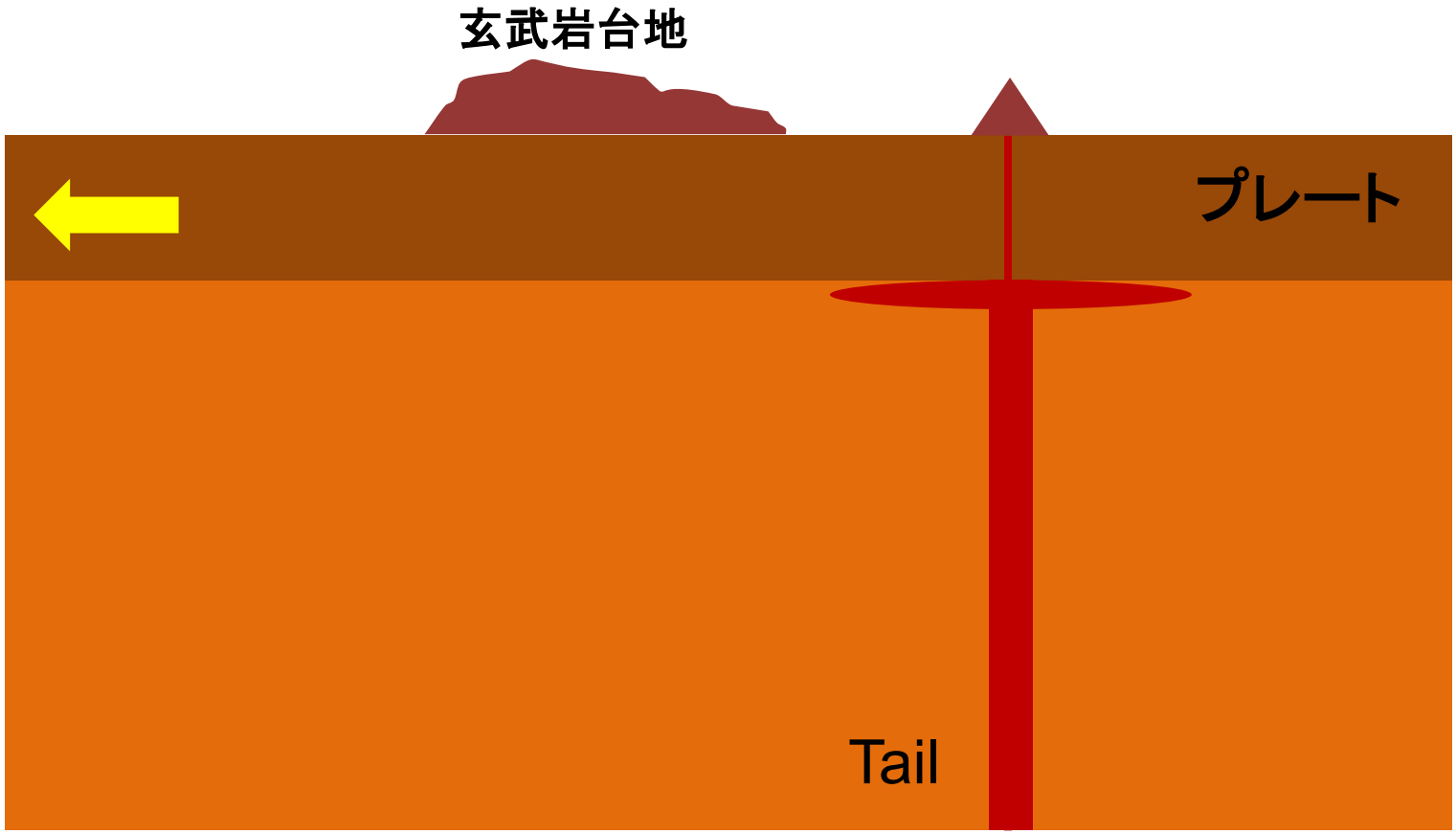

Hot Source Material
Heated and
Entrained
Surroundings
PLUME
HEAD
PLUME
TAIL


4 Myr
43 Myr
83 Myr
100 Myr
121 Myr
176 Myr
0
Temperature (°C)
1846

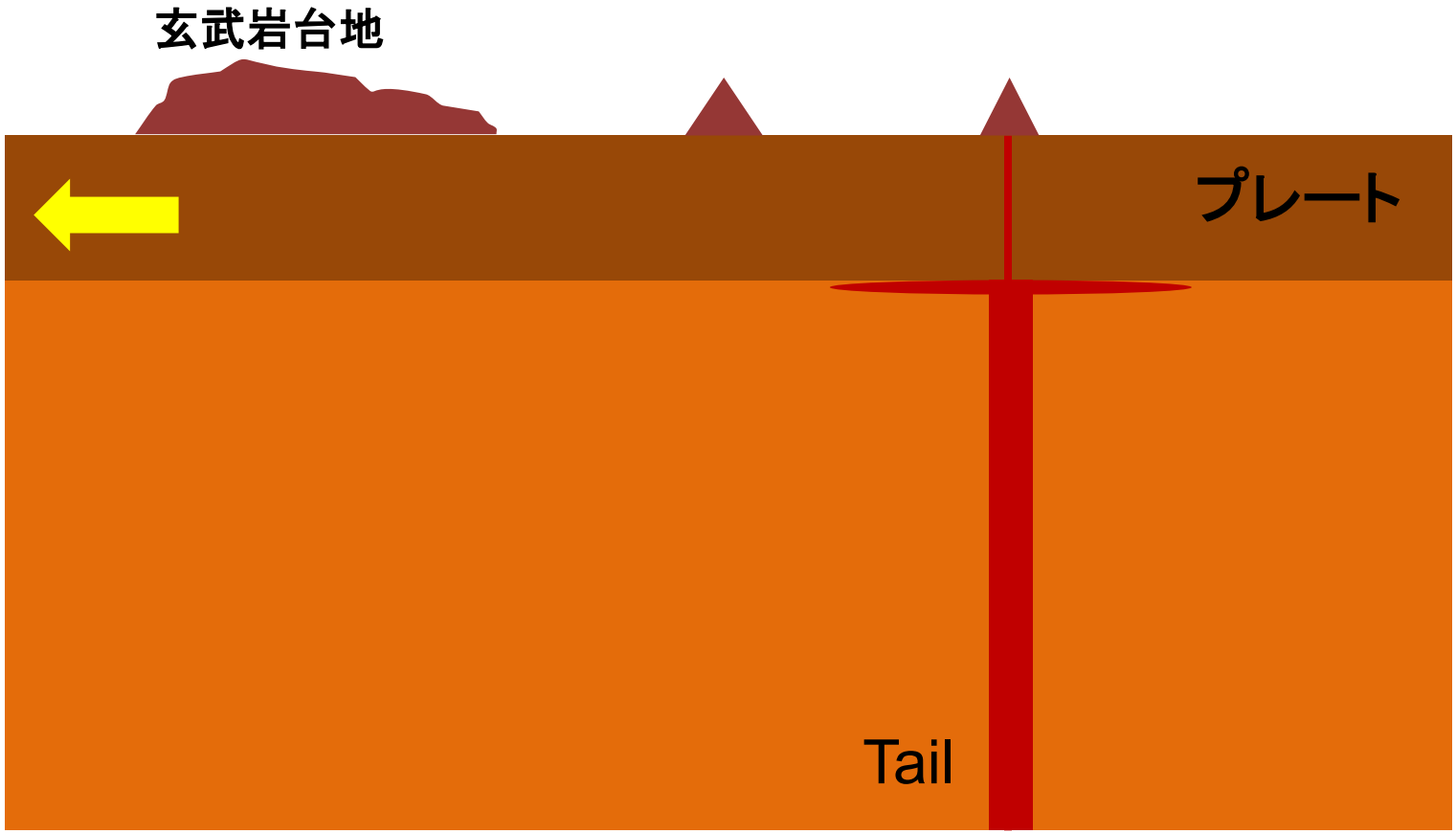
ホットスポットのモデル



ホットスポットのモデル



ホットスポットのモデル



玄武岩台地とホットスポット

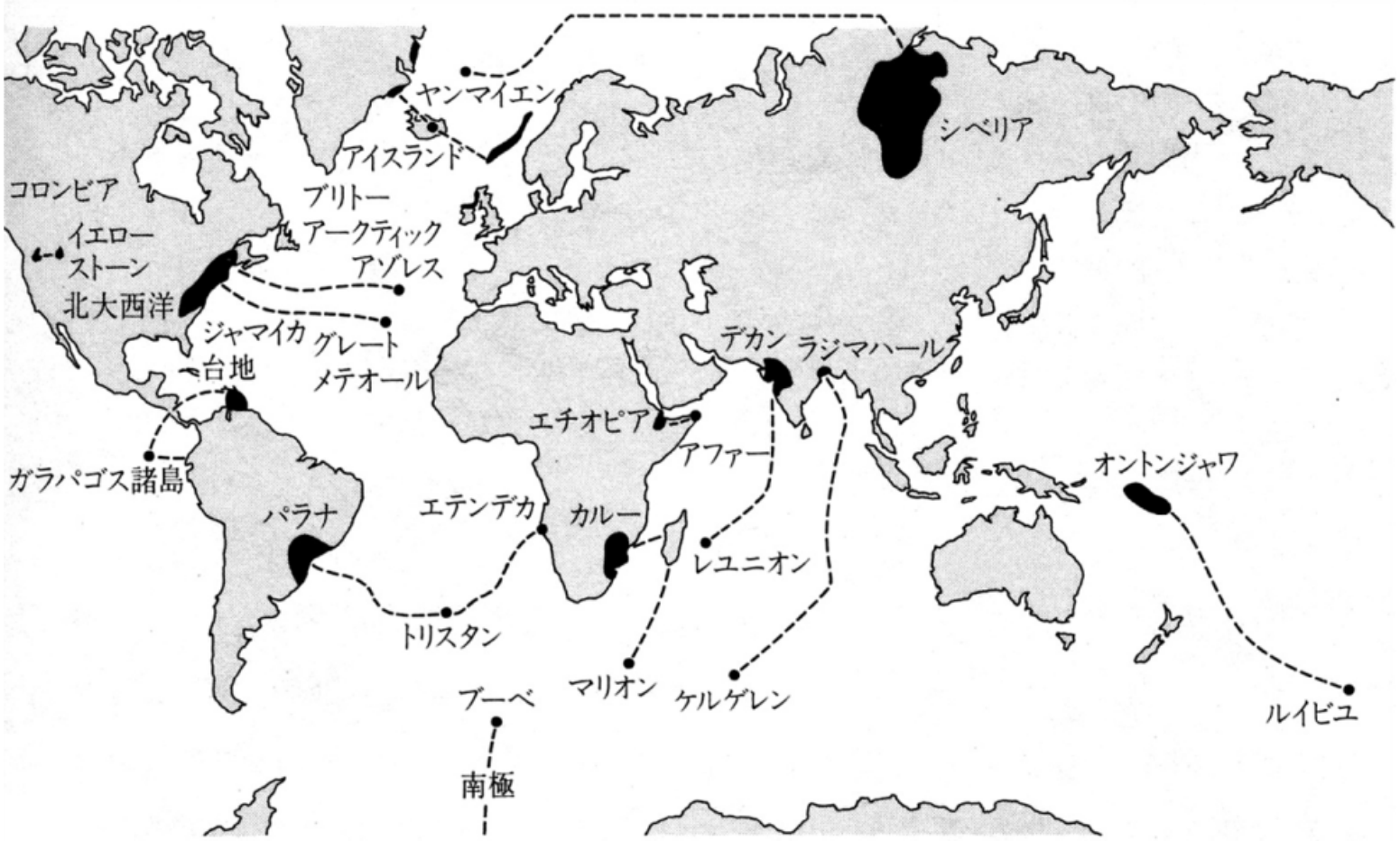


図 1.16　玄武岩台地(黒ぬり)，海山列(破線)，ホットスポット(黒点)(Duncan and Richards, 1991).

ホットスポットの例：ハワイ

ハワイ諸島ー天皇海山列

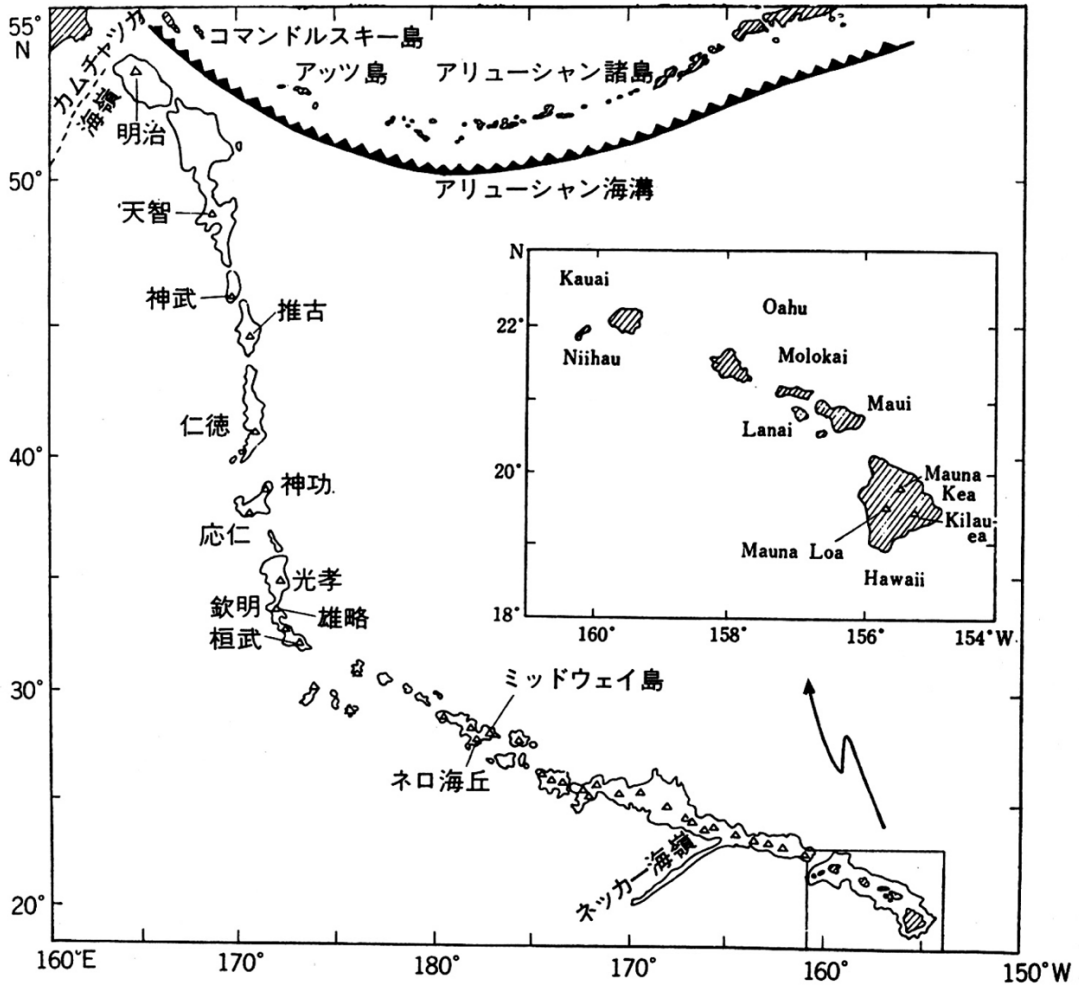
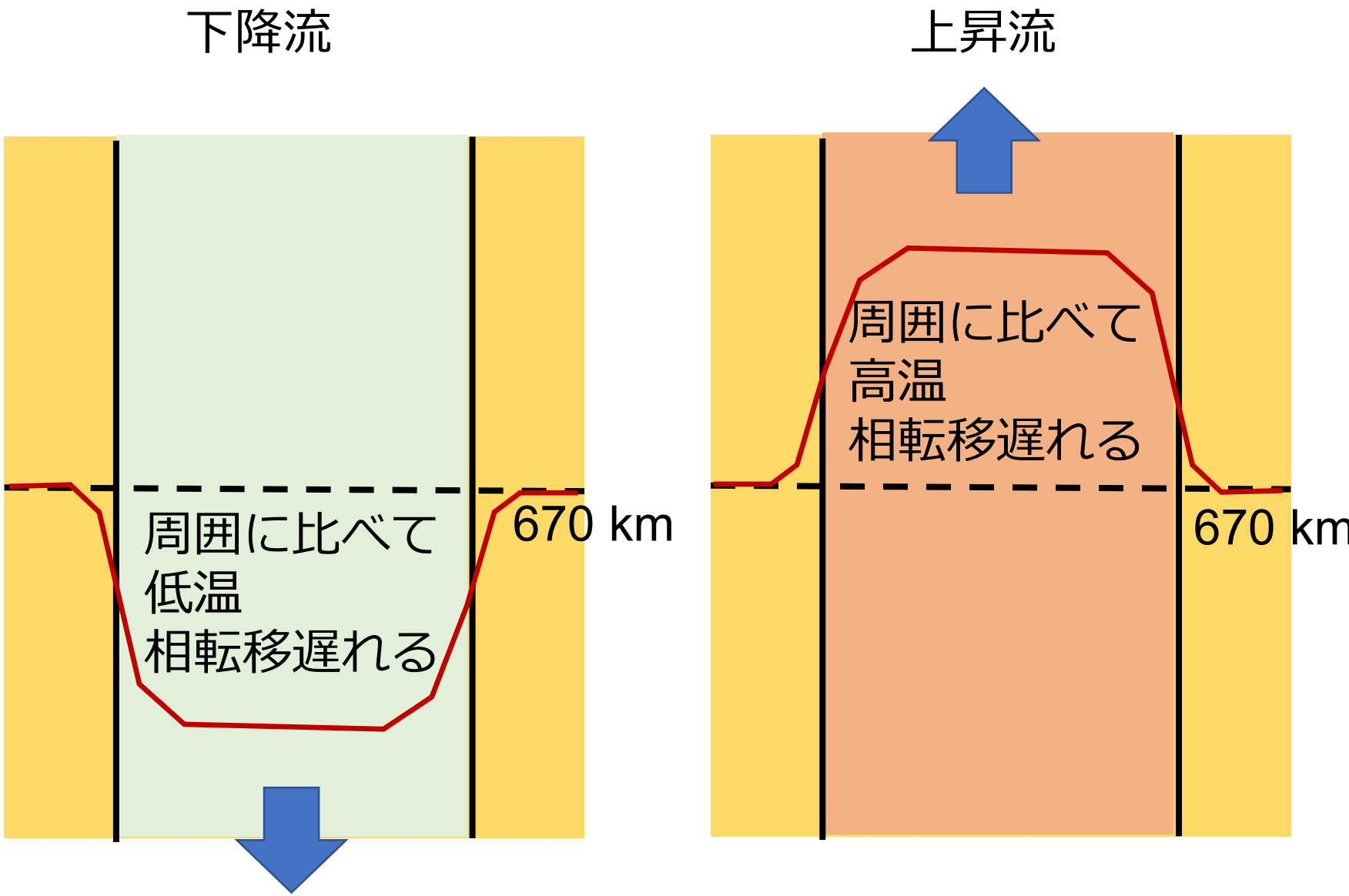
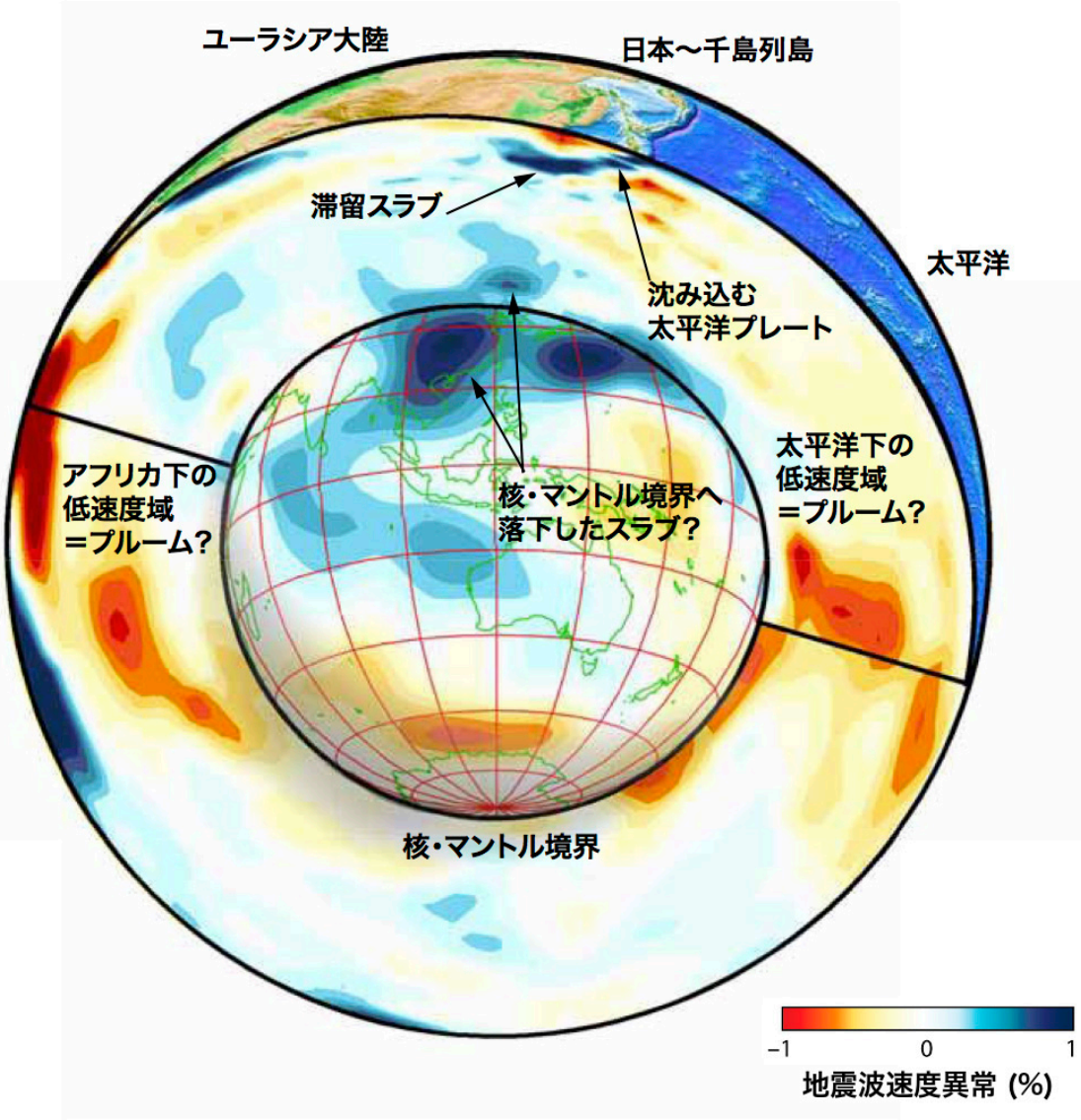


図 7·8　ハワイ諸島から天皇海山列に至る火山の軌跡
等深線は，ハワイ火山列・天皇海山列のまわりの，水深 2000m を示す．

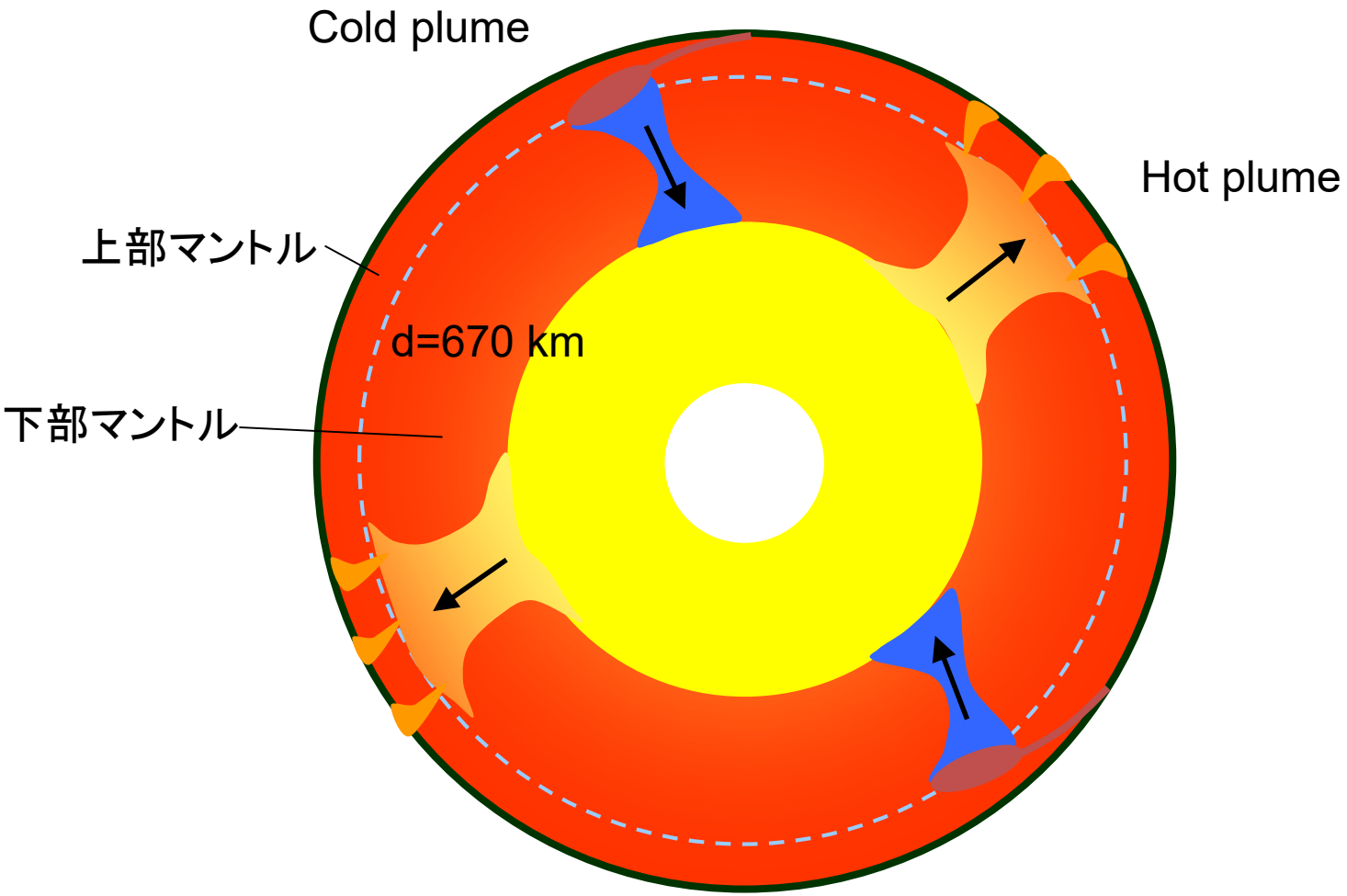
マントル対流への影響

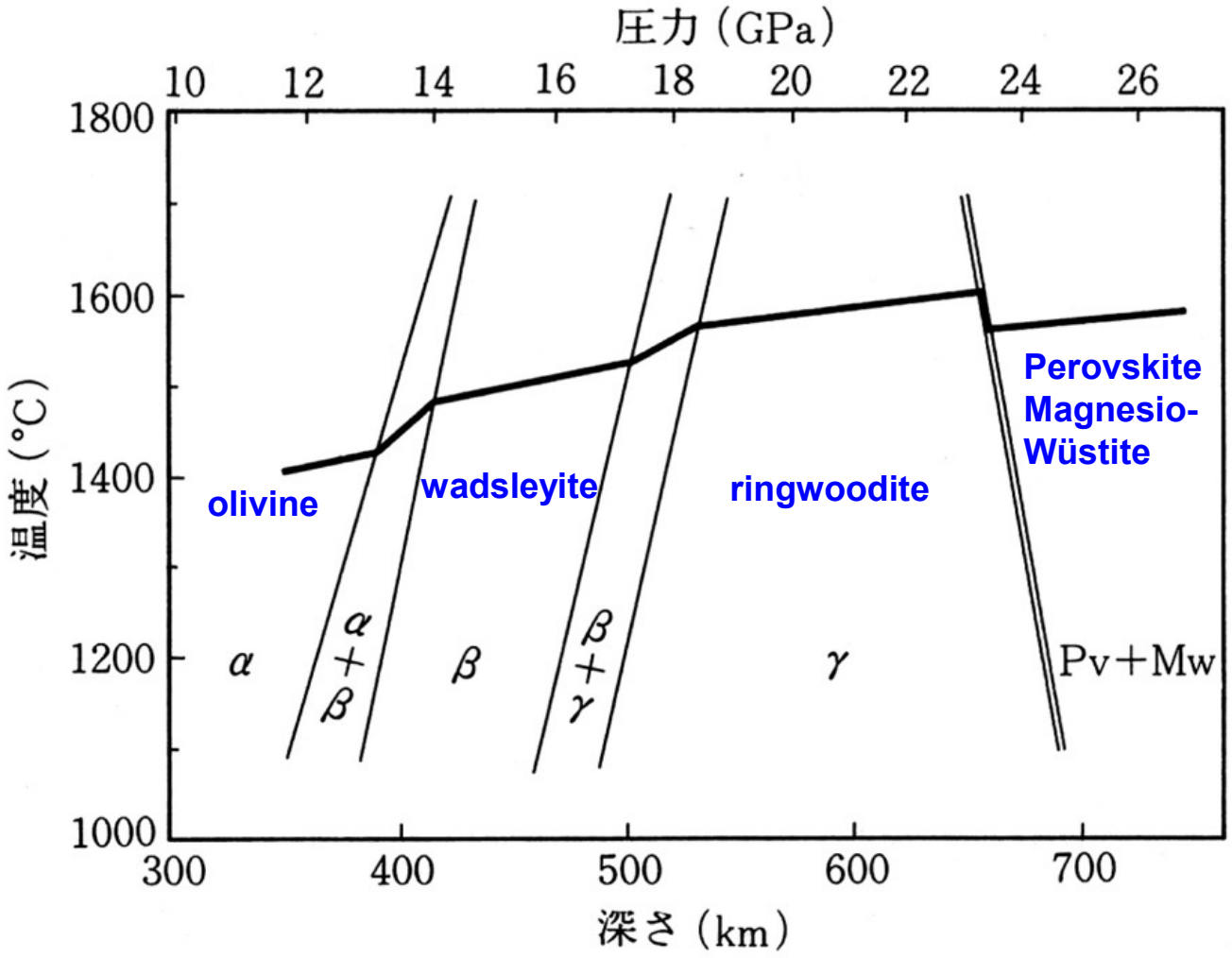


相転移による流れの阻害



現在の地球内部についてのイメージ





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

長い時間スケールで考える

大陸移動説 （ウェーゲナー Wegener, 1915）

“かつて超大陸パンゲアがあった”

根拠

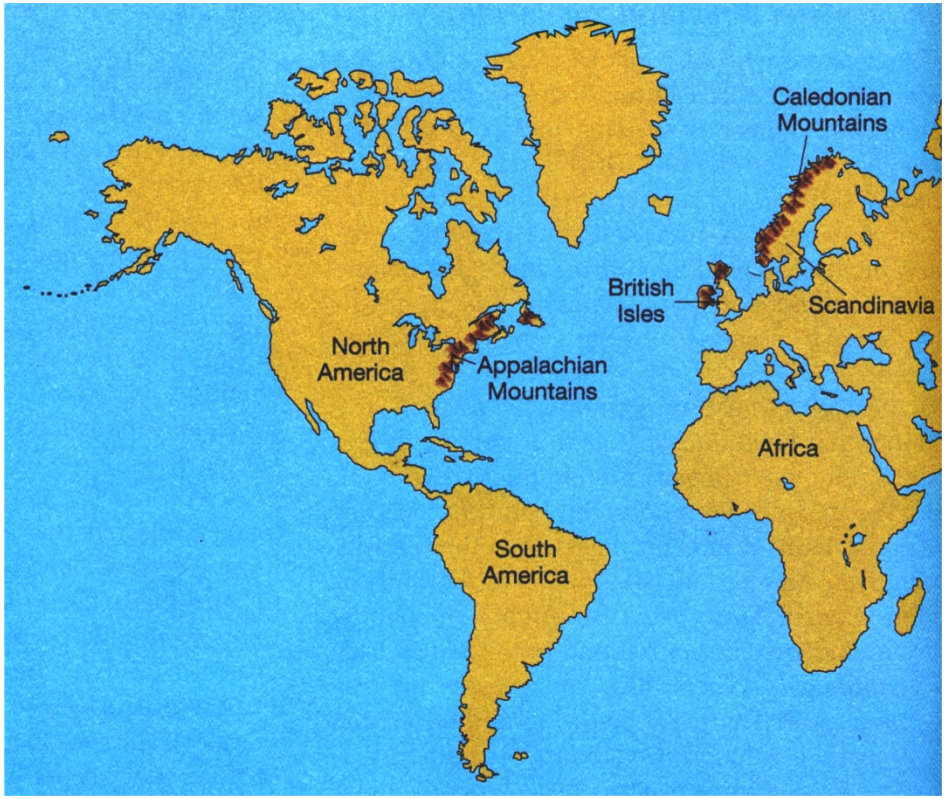
（1） 海岸線の相似性
（2） 地質の共通性
（3） 化石の共通性
（4） 過去の気候分布

根拠(1)　海岸線の相似性

コルディラ
アンデス
アルプス
アトラス
ヒマラヤ

North America
Europe
Africa
South America
Continental shelf
Matching ancient rock assemblages

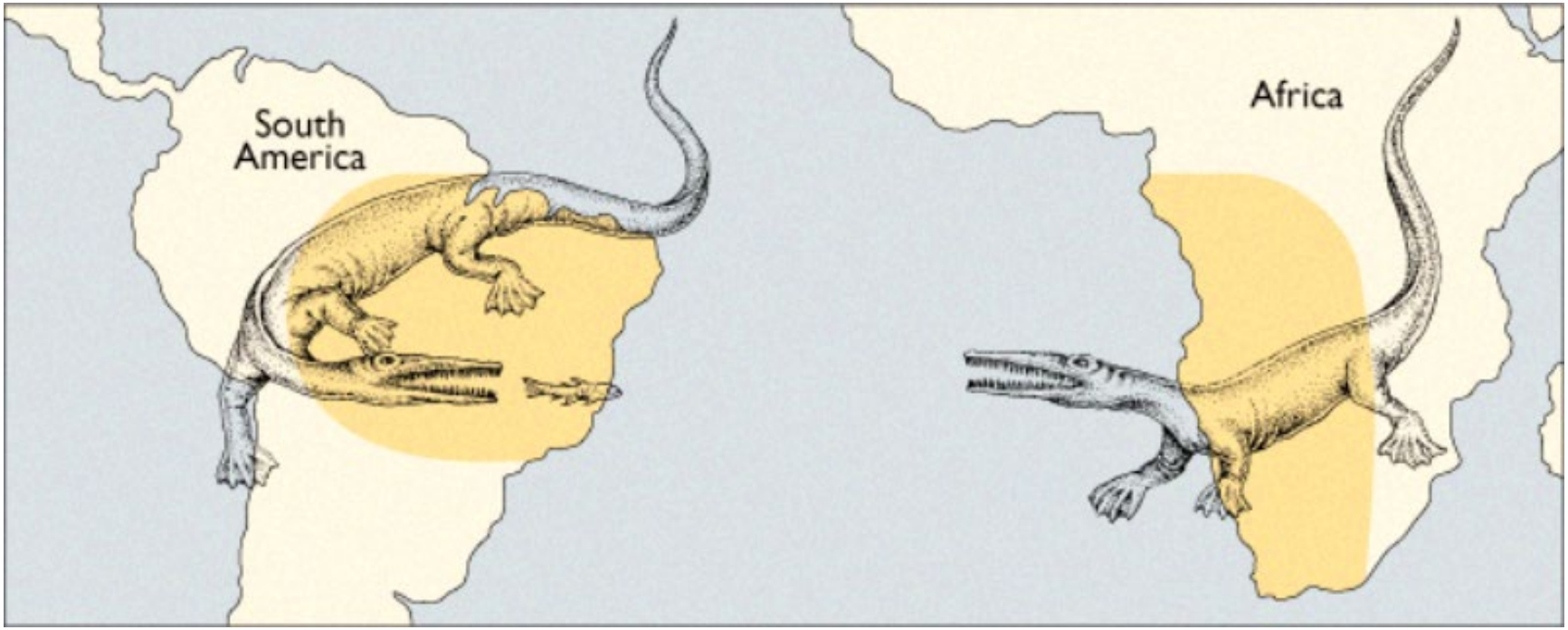
根拠(2)　地質の共通性



同じような特徴をもつ山脈

⇒　ひとつづきに

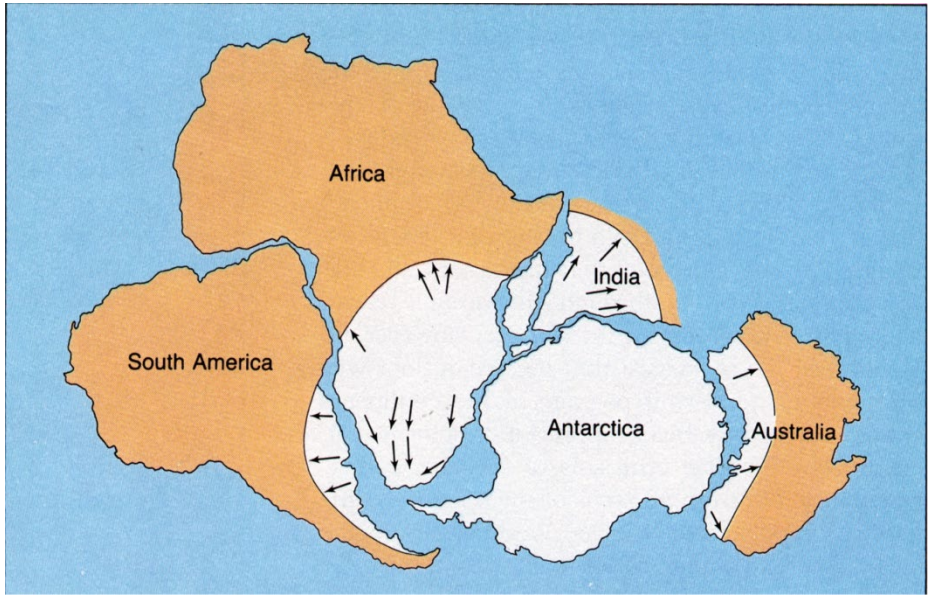
根拠(3) 化石の共通性



Mesosaurus

根拠(4) 過去の気候分布

氷河の分布



第2次大戦後

新たなデータ

（1）海底地形

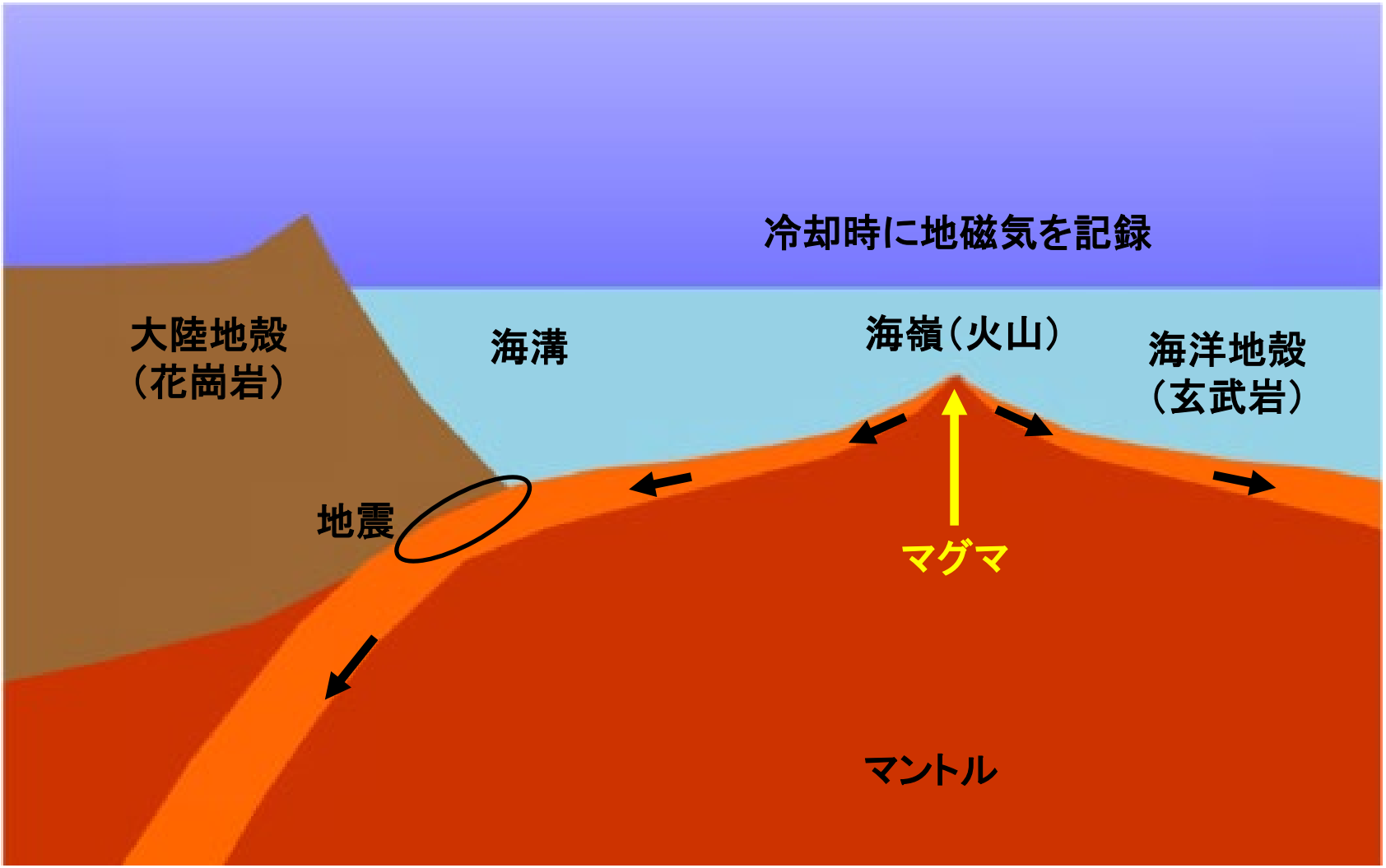
（2）海洋磁気異常

（3）海洋底の年代

（4）地震の分布

大陸移動説の復活　⇒　プレート・テクトニクス

海洋底拡大説



海洋底の年代

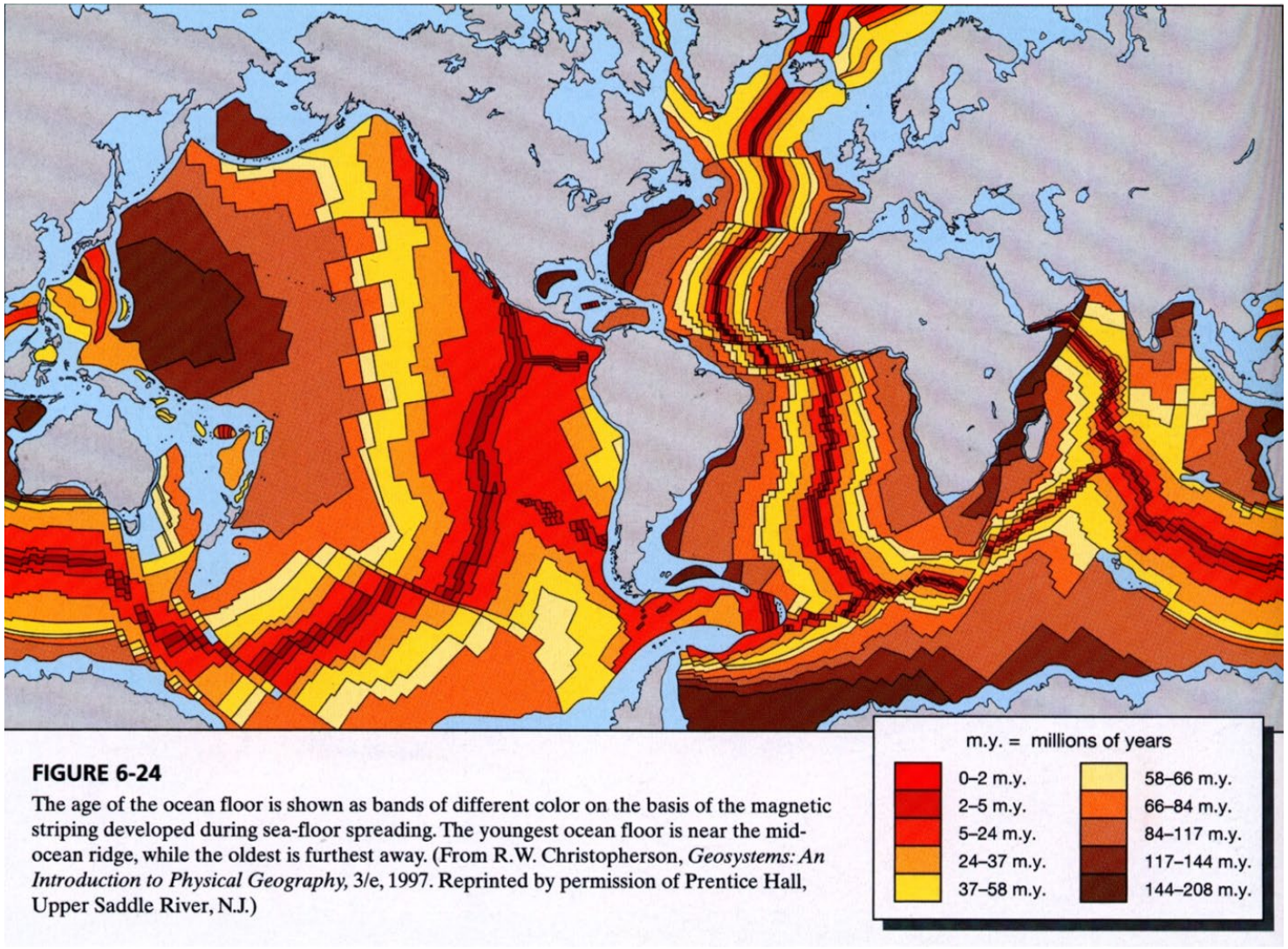
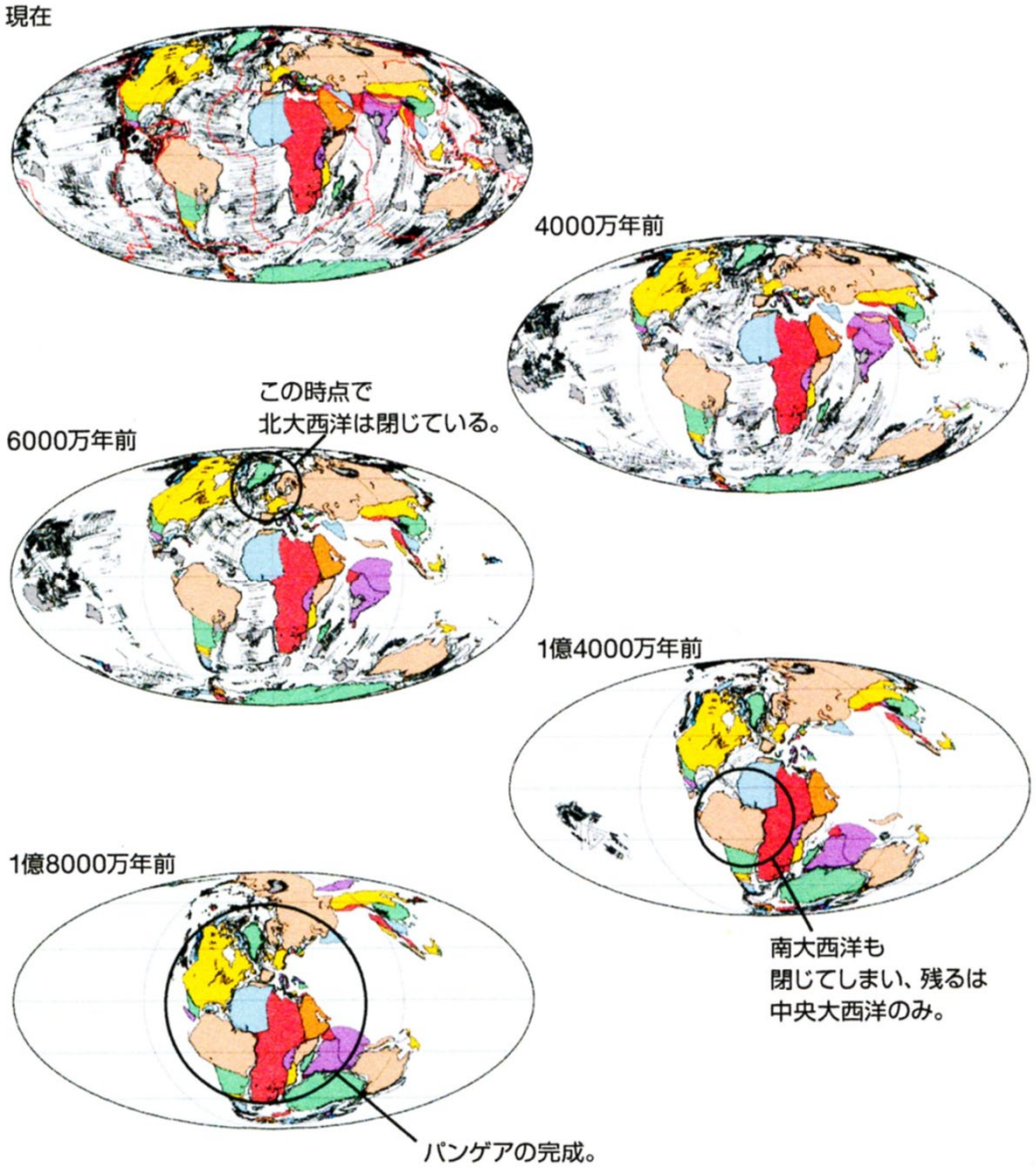


FIGURE 6-24

The age of the ocean floor is shown as bands of different color on the basis of the magnetic striping developed during sea-floor spreading. The youngest ocean floor is near the mid-ocean ridge, while the oldest is furthest away. (From R.W. Christopherson, *Geosystems: An Introduction to Physical Geography,* 3/e, 1997. Reprinted by permission of Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.)

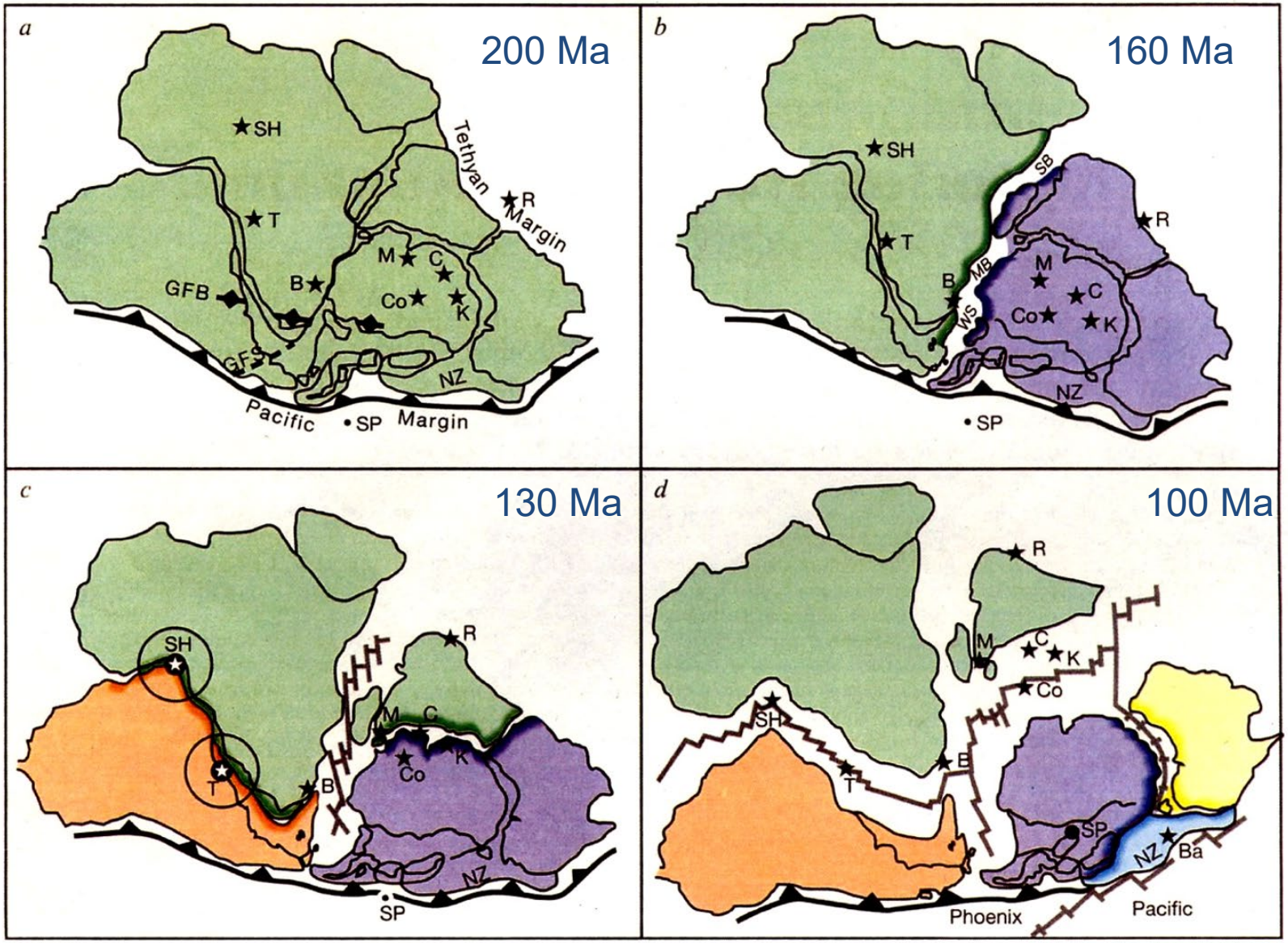
海嶺から離れるにしたがって古くなる（対称的）

Pangaeaの復元

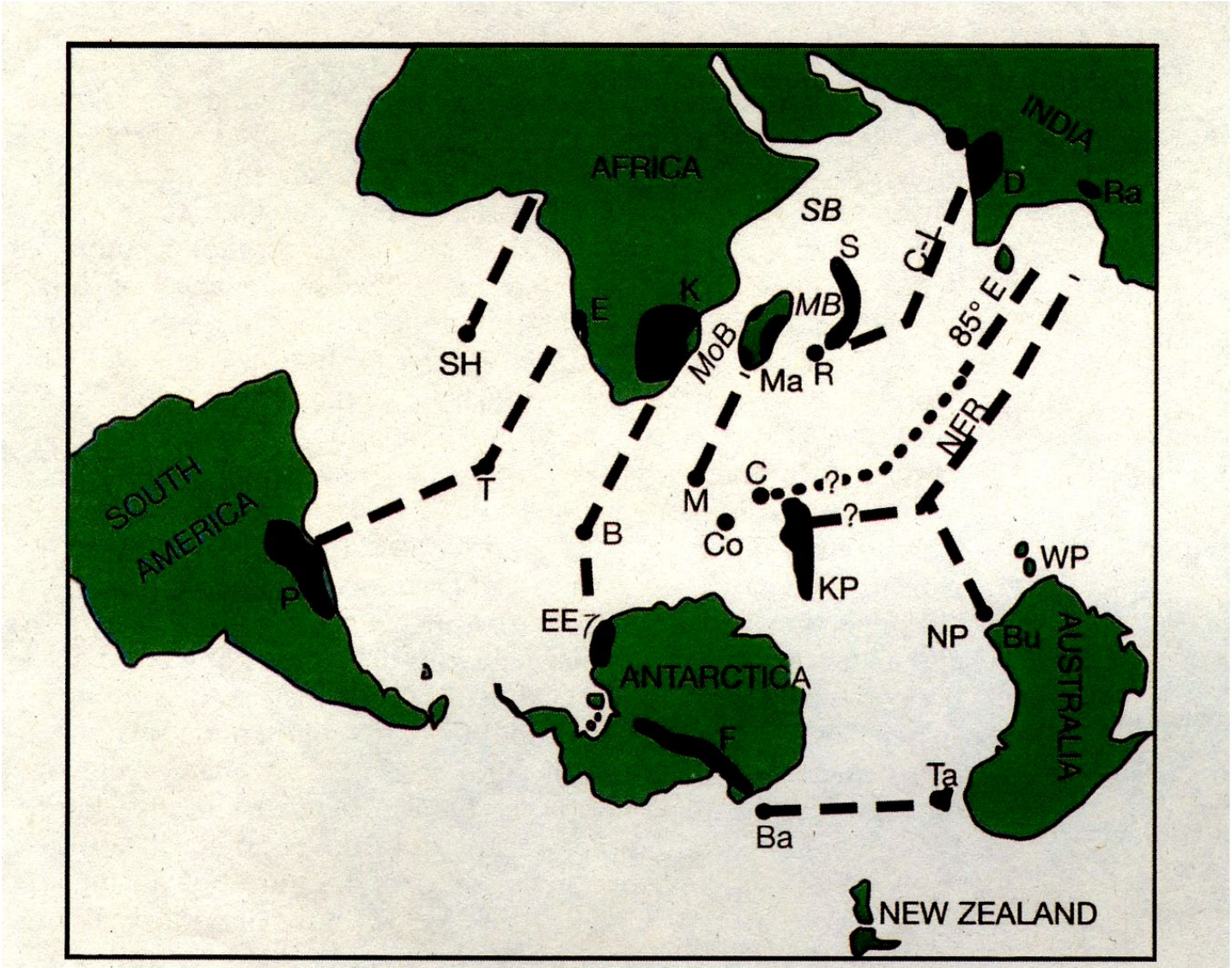

現在
4000万年前
この時点で
北大西洋は閉じている。
6000万年前
1億4000万年前
南大西洋も
閉じてしまい、残るは
中央大西洋のみ。
1億8000万年前
パンゲアの完成。

Pangaeaが分裂したのはなぜか？

Storey (1995)



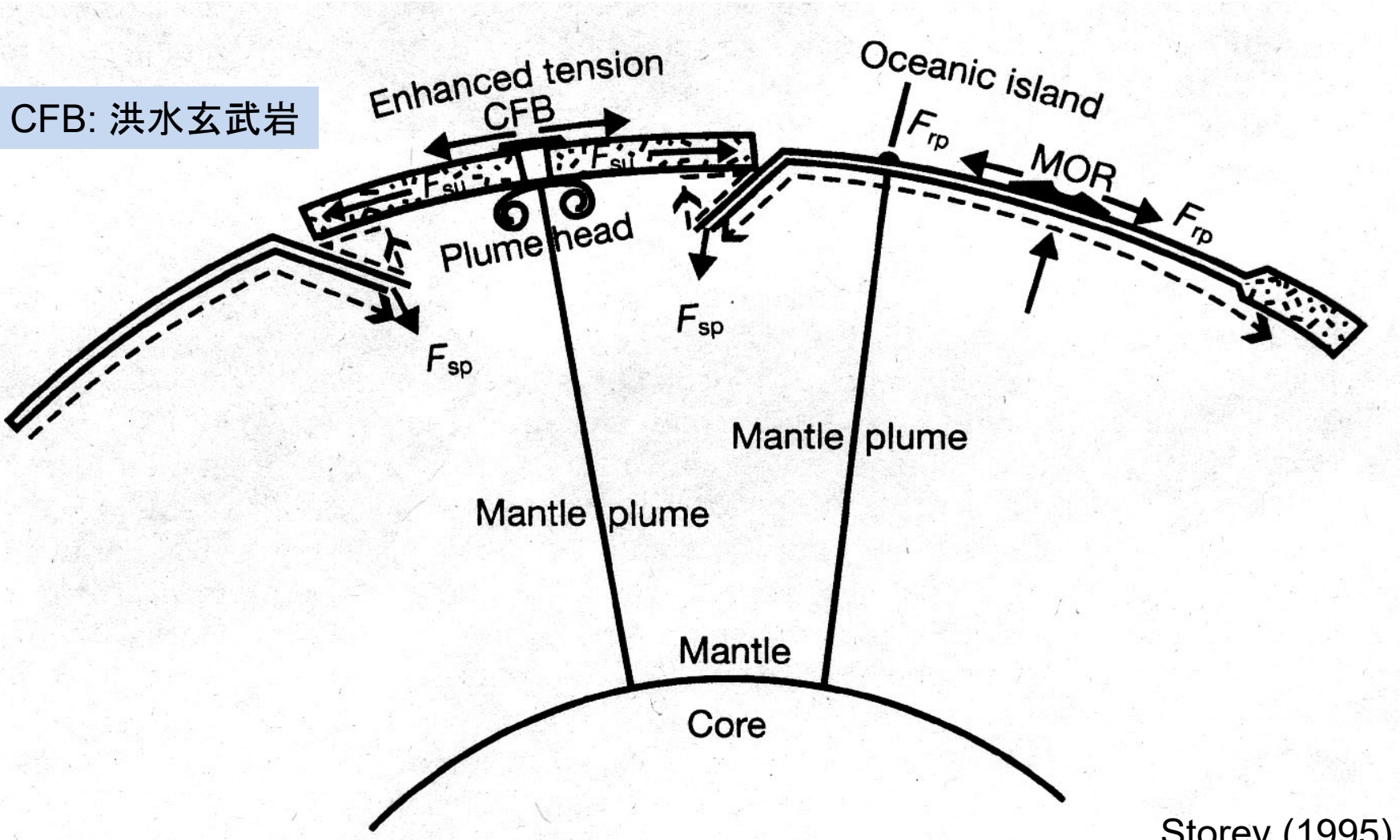
Pangaeaの分裂と洪水玄武岩



Storey (1995)

プルームヘッド ⇒ 超大陸の分裂

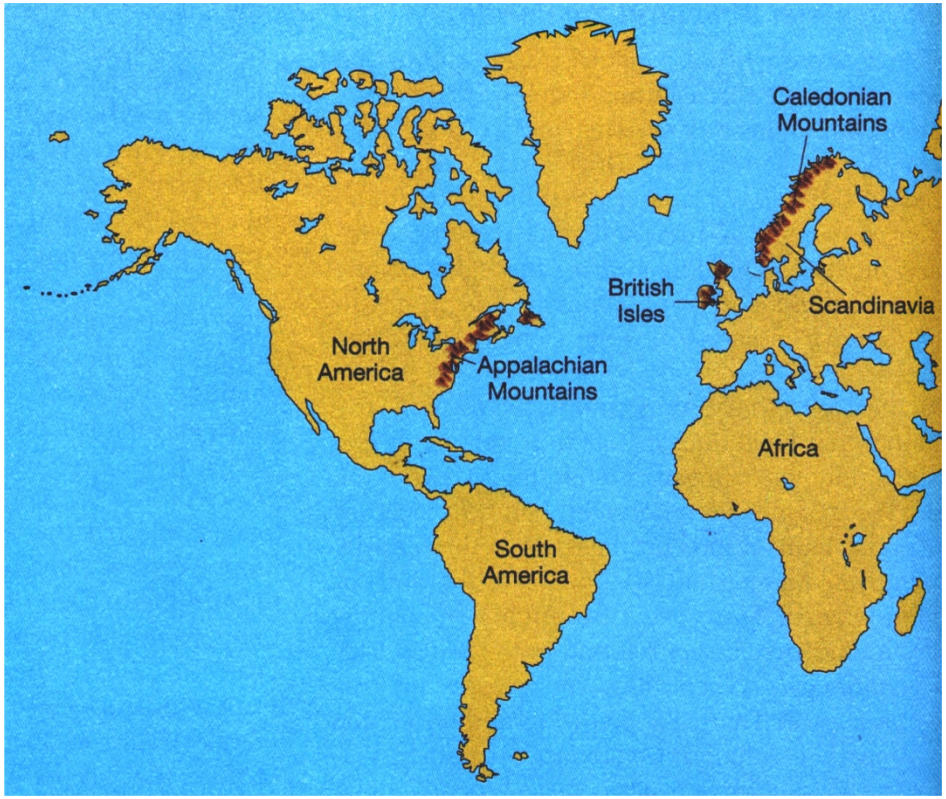
CFB: 洪水玄武岩



Storey (1995)

Pangaeaのできる前は？

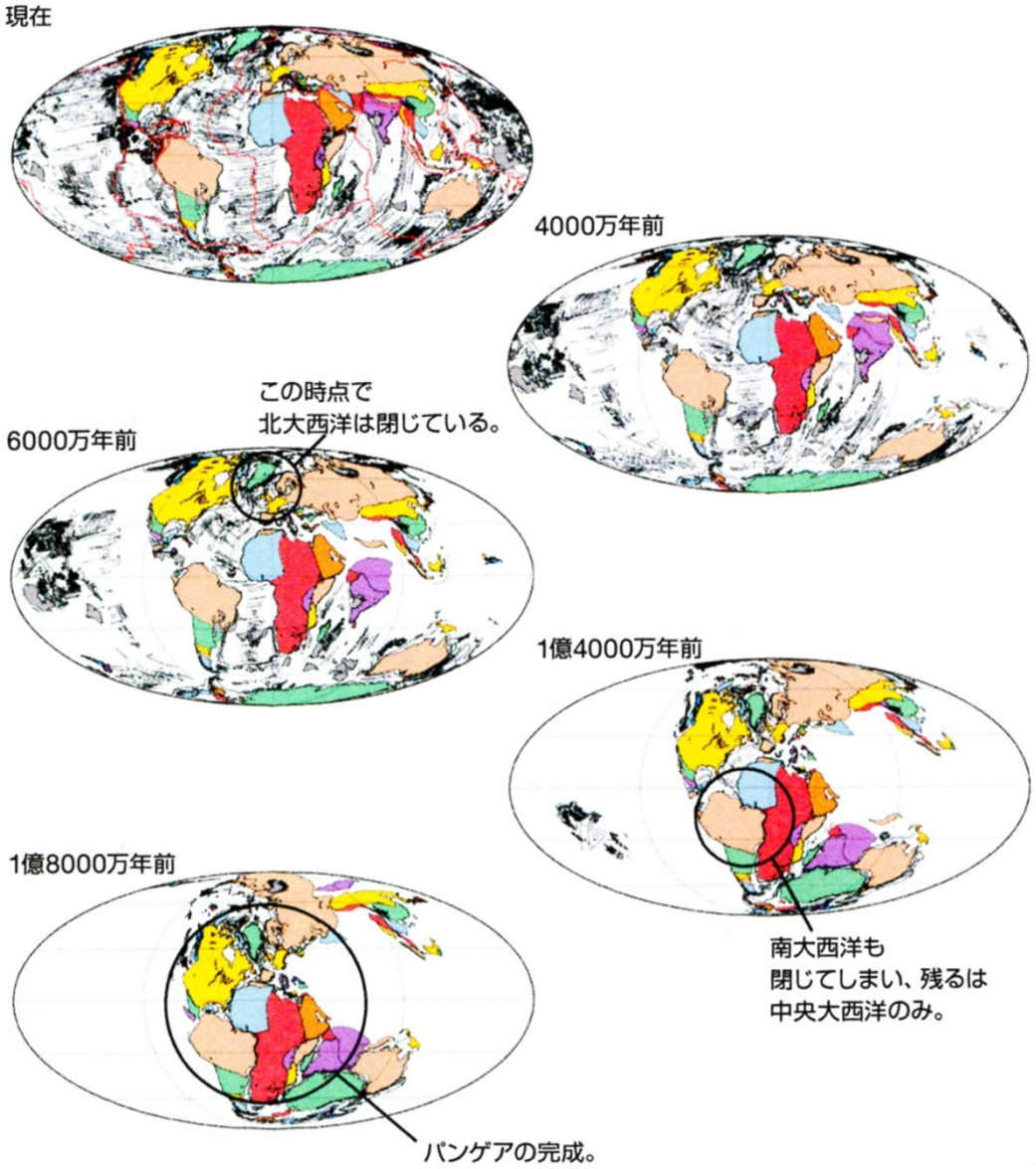
造山帯(山脈)の存在は何を意味するのか？



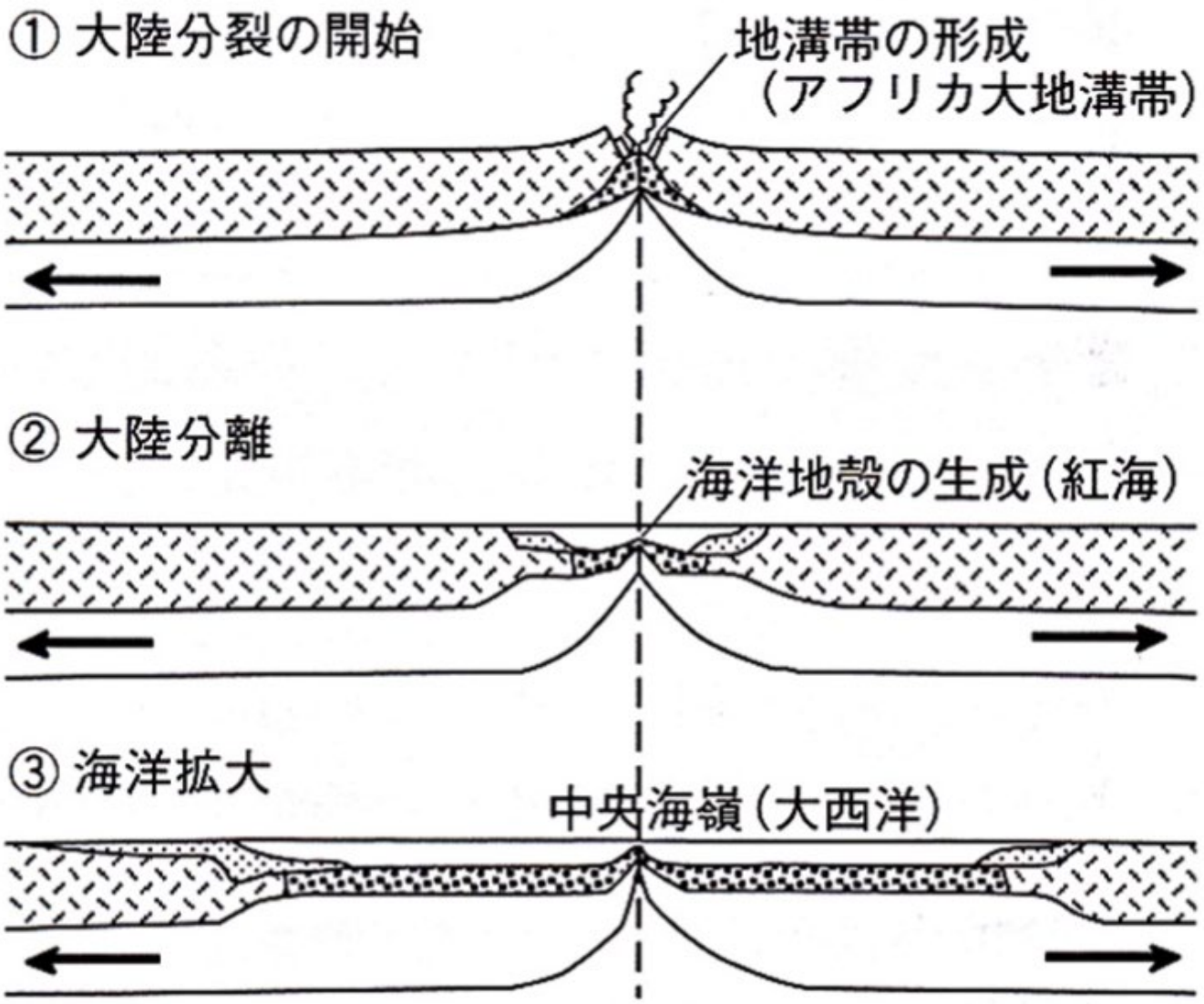
現在

Pangaea

Pangaeaの復元

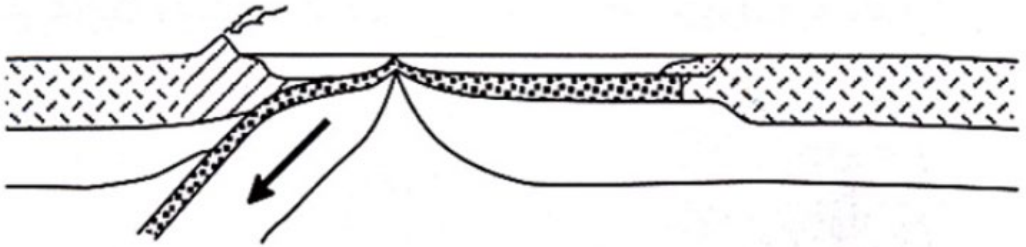

現在
4000万年前
この時点で
北大西洋は閉じている。
6000万年前
1億4000万年前
南大西洋も
閉じてしまい、残るは
中央大西洋のみ。
1億8000万年前
パンゲアの完成。

大陸の分裂と海洋の形成

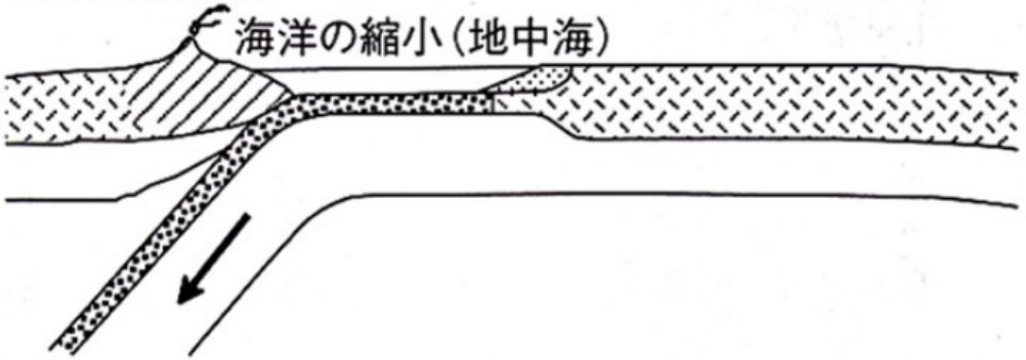


大陸の衝突と海洋の消滅

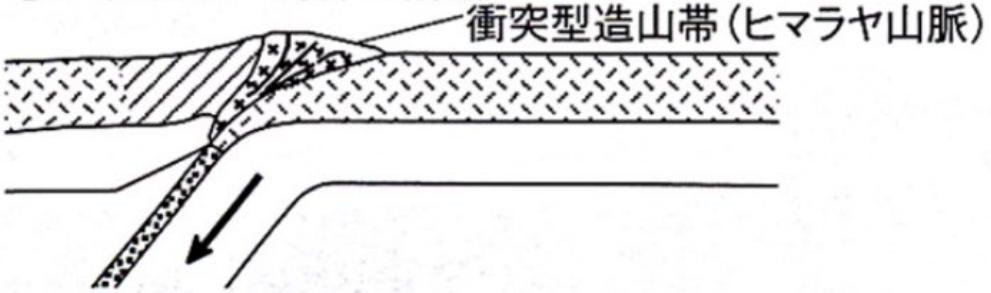
④ 沈み込み型造山帯（日本列島，アンデス山脈）



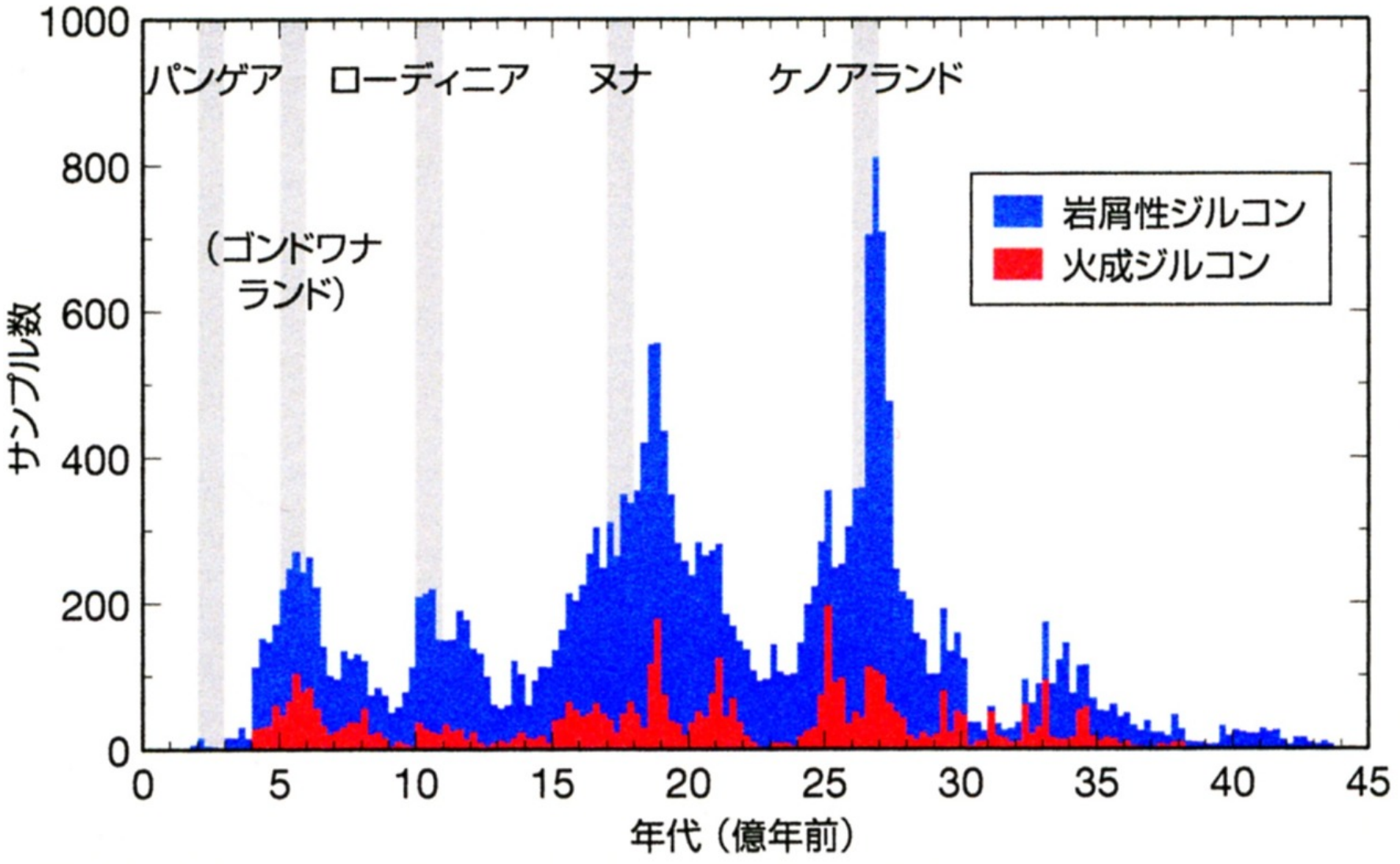
⑤ 大陸縁成長



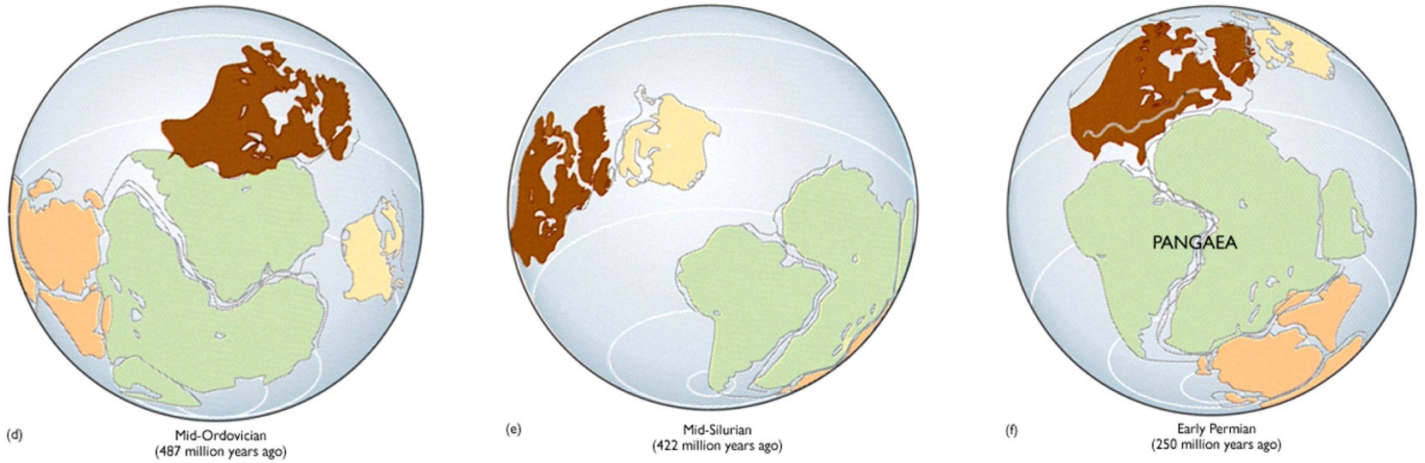
⑥ 大陸衝突・海洋の消滅



超大陸サイクル


パンゲア
ローディニア
ヌナ
ケノアランド
(ゴンドワナランド)
岩屑性ジルコン
火成ジルコン
サンプル数
年代（億年前）
0
200
400
600
800
1000
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45

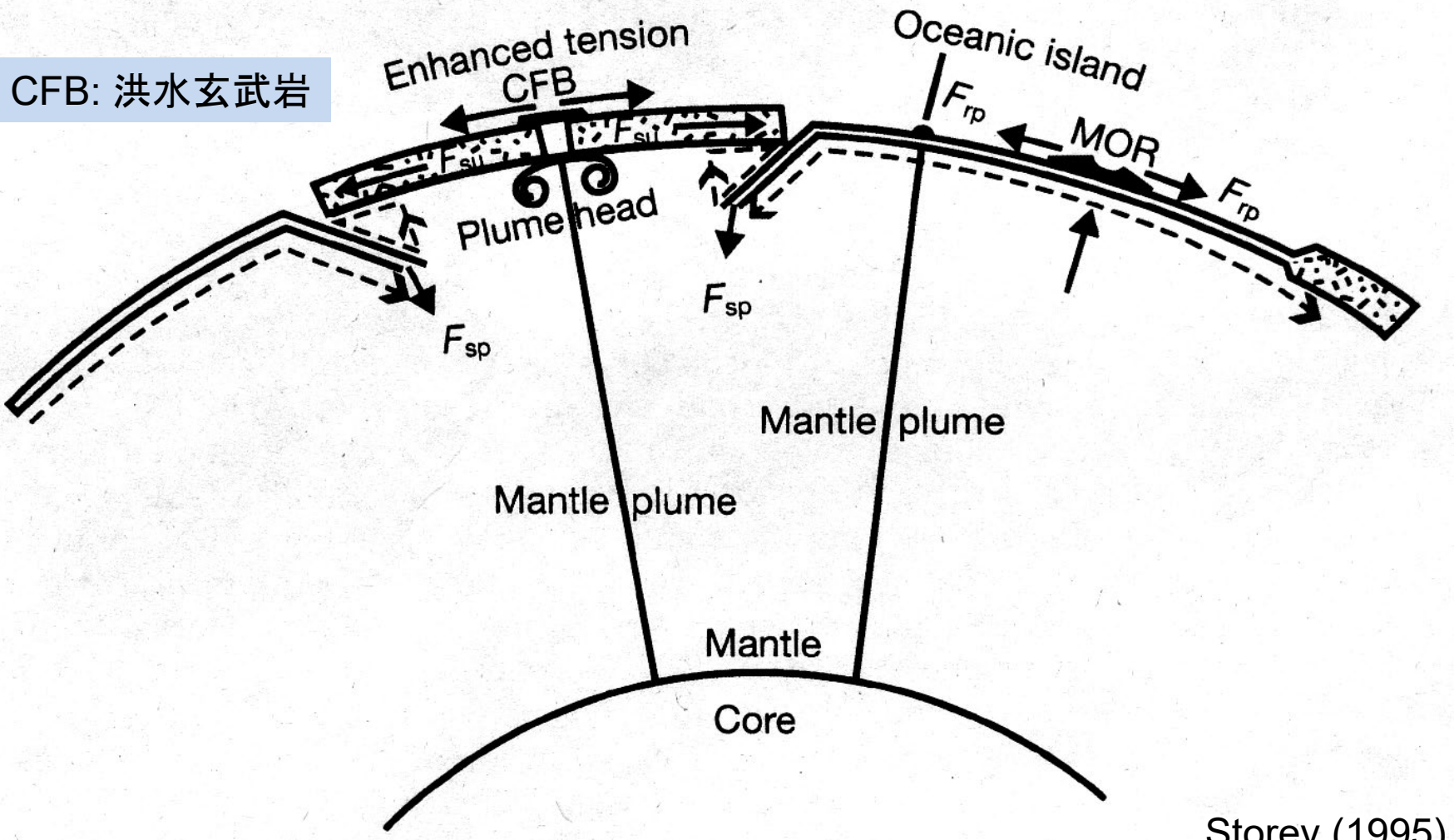
7.5億年前（ロディニア）　5.5億年前　5.3億年前



4.87億年前　4.22億年前　2.6億年前（パンゲア）

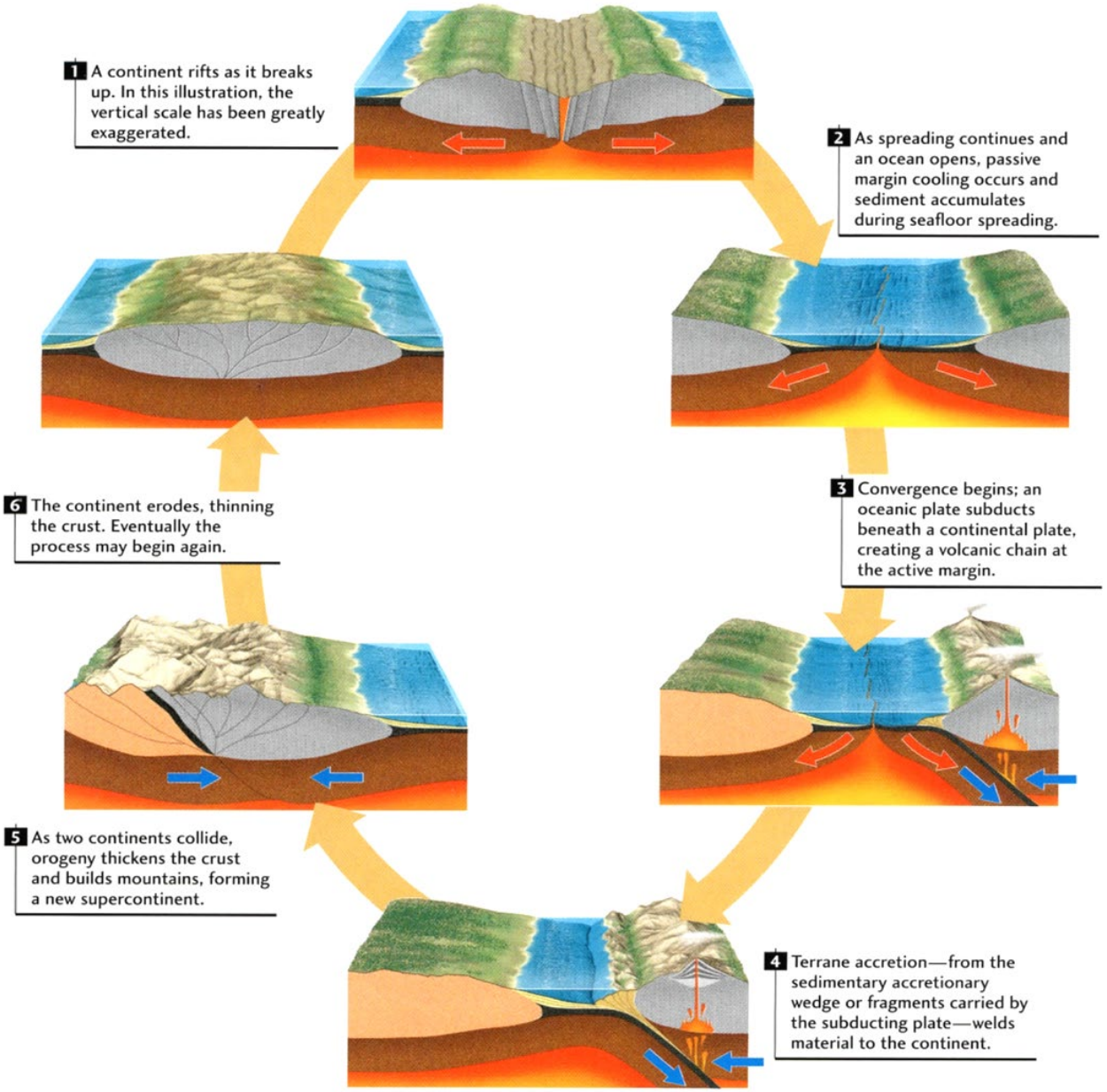
マントル対流 ⇒ 大陸の離合集散

CFB: 洪水玄武岩



Storey (1995)

Wilson Cyle


1 A continent rifts as it breaks up. In this illustration, the vertical scale has been greatly exaggerated.
2 As spreading continues and an ocean opens, passive margin cooling occurs and sediment accumulates during seafloor spreading.
3 Convergence begins; an oceanic plate subducts beneath a continental plate, creating a volcanic chain at the active margin.
4 Terrane accretion—from the sedimentary accretionary wedge or fragments carried by the subducting plate—welds material to the continent.
5 As two continents collide, orogeny thickens the crust and builds mountains, forming a new supercontinent.
6 The continent erodes, thinning the crust. Eventually the process may begin again.