

『地球はどうしてできたのかー マントル対流と超大陸の謎』 吉田晶樹著 講談社ブルーバックス



カバー画像：左は帯なし，中央，右はそれぞれ第1，第2刷の帯付き

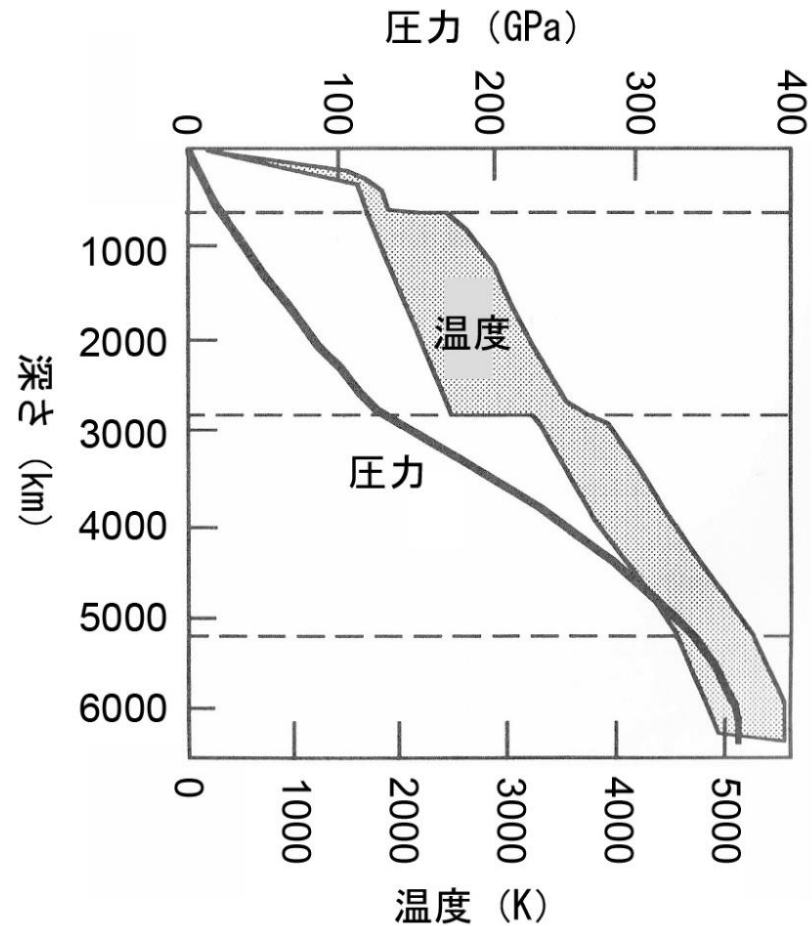
2014年9月20日発売，定価980円（税抜）

本資料を使用するにあたっての注意点

海洋研究開発機構 吉田晶樹

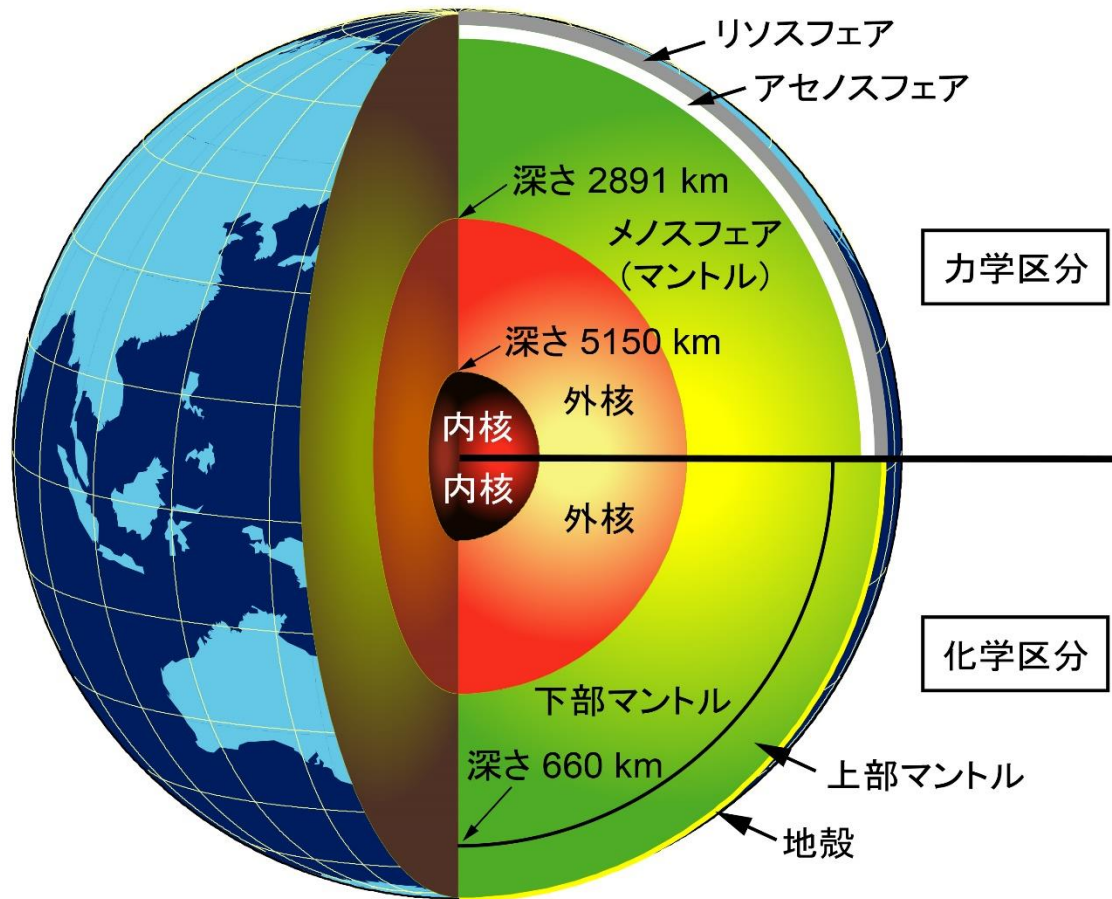
- ① 本資料は、『地球はどうしてできたのかーマントル対流と超大陸の謎』（講談社、ブルーバックスシリーズ、2014年）で使用した図版を収めたパワーポイントファイル、またはPDFファイルです
- ② オリジナルの図版がカラーの場合は、著作物に掲載しているモノクロの図をカラーの図に差し替えています。また一部の図は改変しています
- ③ 本資料に掲載している図を教育等非営利目的で出版物に利用する場合は、図の下に引用している文献の原図を使用して、必ず文献を引用して下さい
- ④ 本資料の図の一部は、英文文献（論文、教科書、ウェブページ）の原図に日本語説明を加えるなどの改変をしています
- ⑤ 本資料の問い合わせ先は、吉田晶樹（myoshida@jamstec.go.jp）まで

図1-1 地球内部での温度と圧力の分布



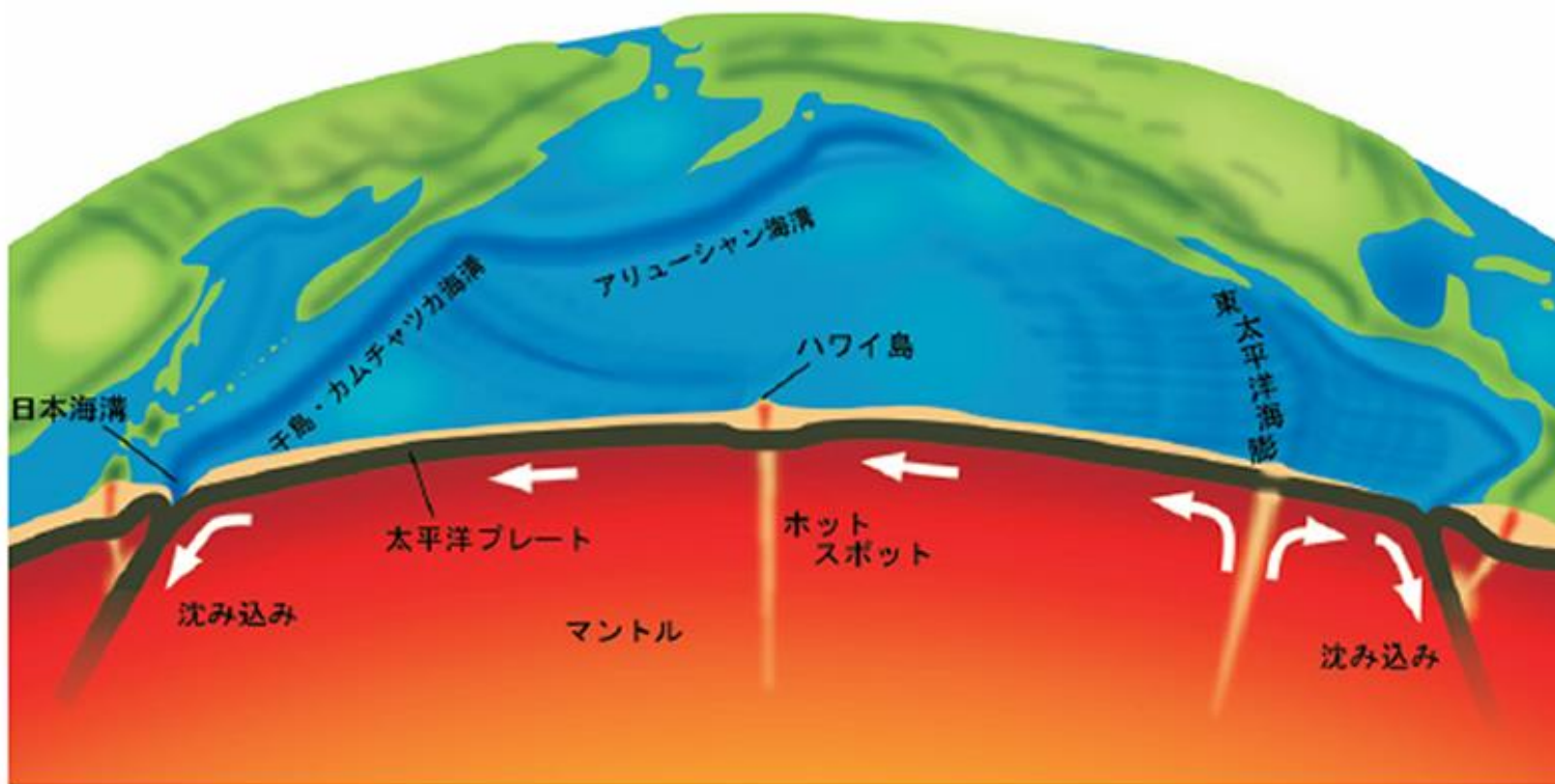
唐戸 (2000)

図1-2 地球内部の層構造



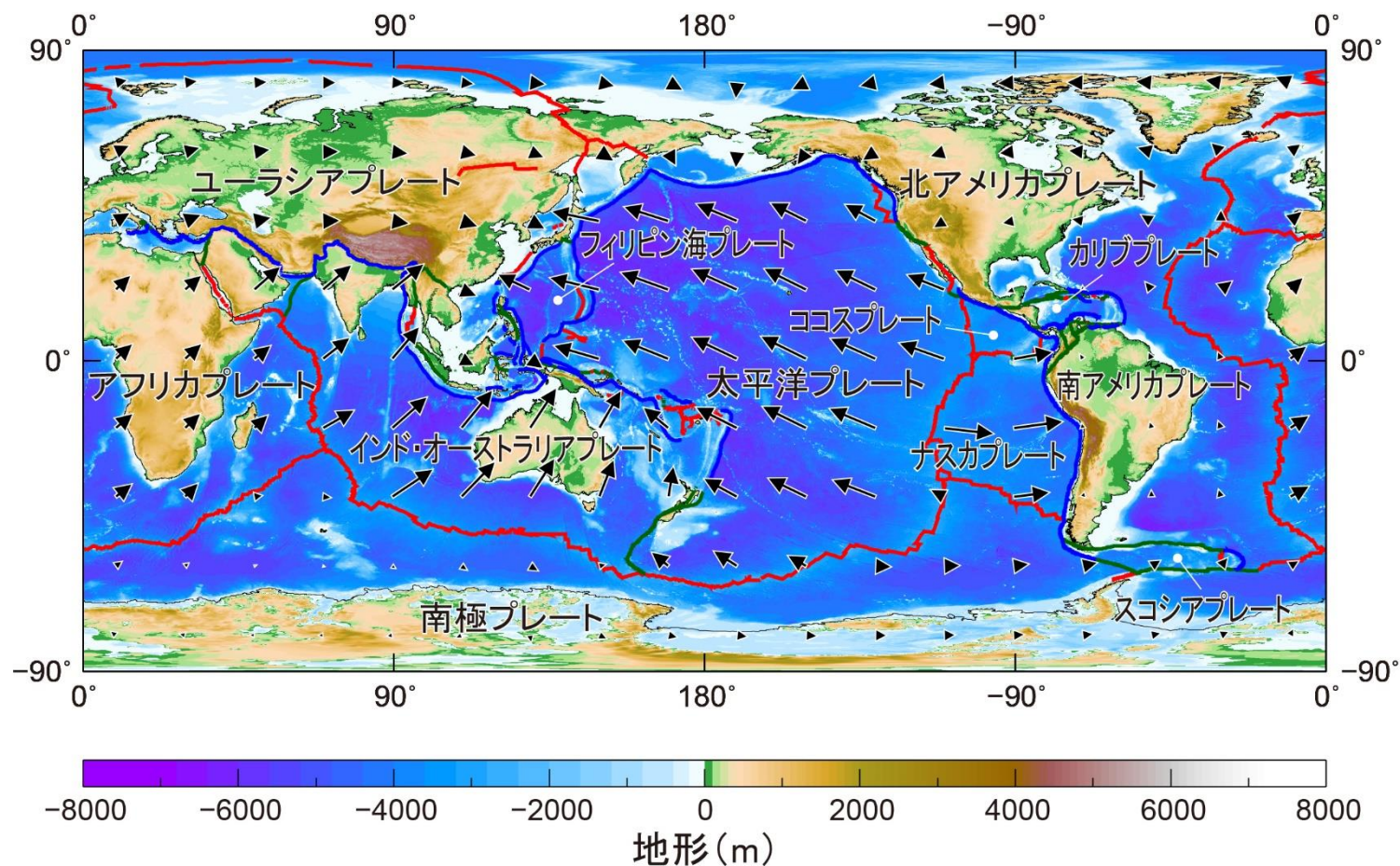
Edward Garnero 博士の図を改変

図1-3 プレート運動の模式図（太平洋の断面）



気象庁ウェブページより

図1-4 プレート境界とプレート運動速度



プレート運動速度 → 5 [cm/yr] 海嶺 トランスフォーム断層 海溝

図1-5 大陸棚の定義

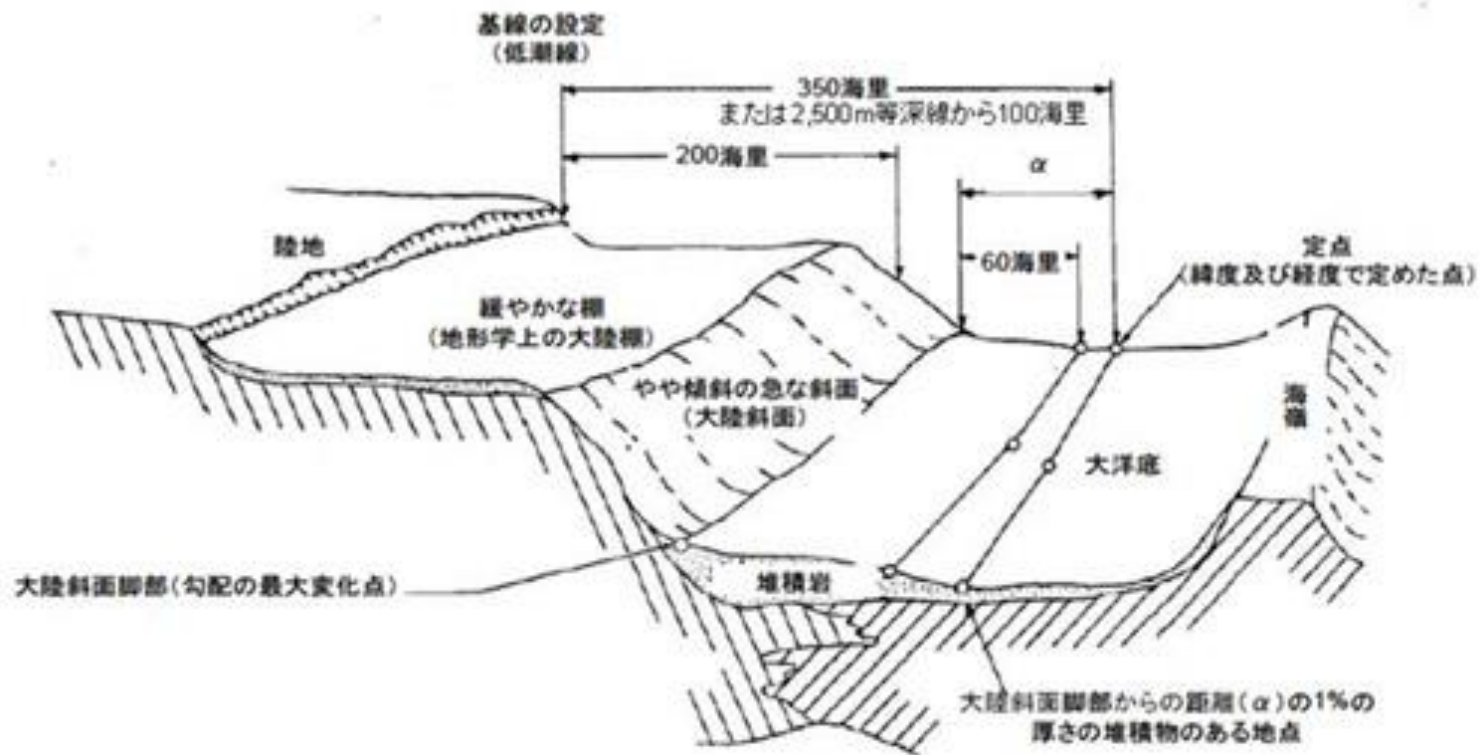


図1-6 地球型惑星（水星、金星、地球、火星）と月の 地形の高度頻度分布

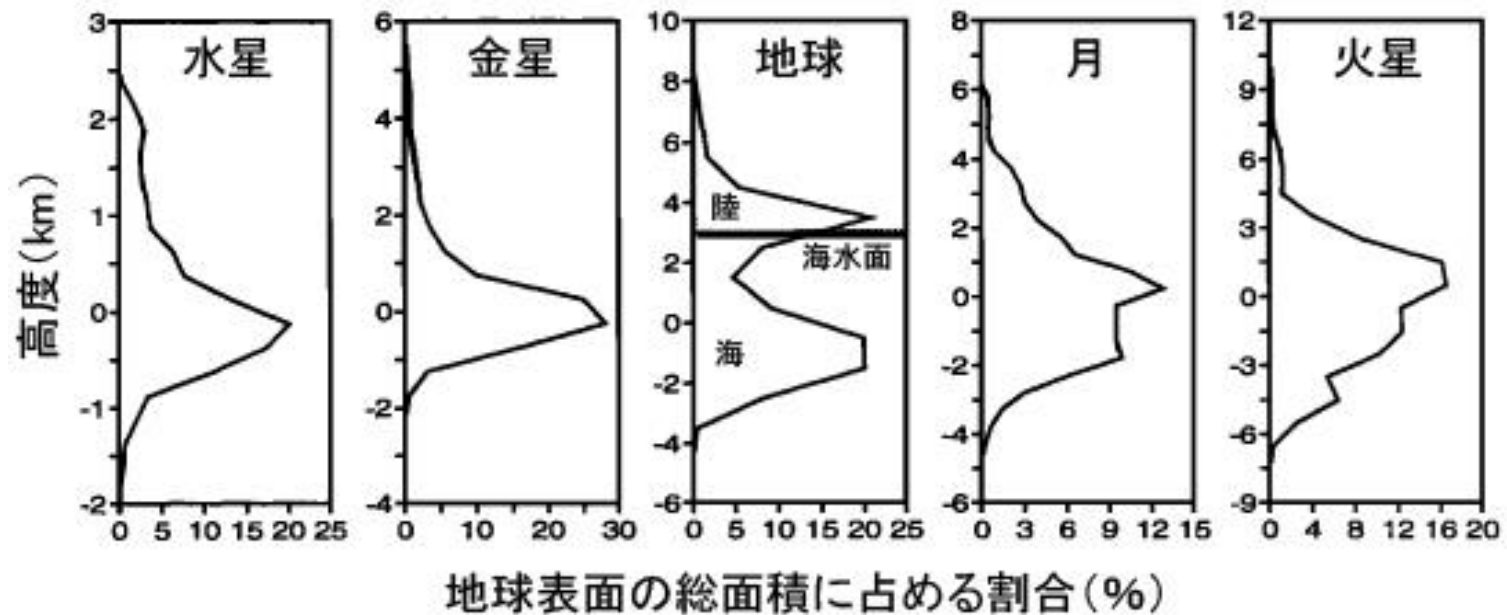
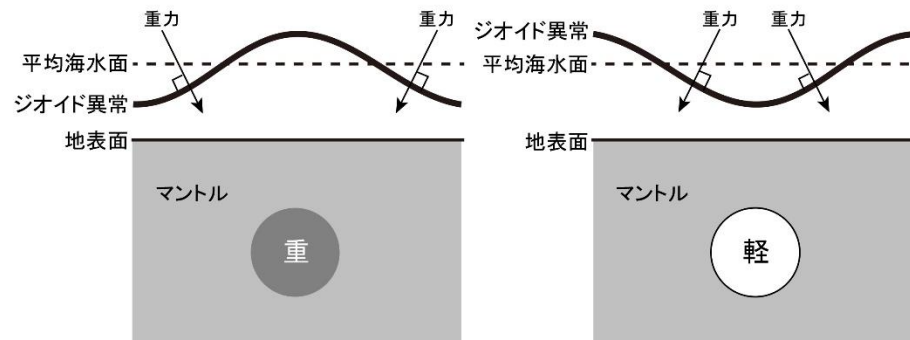


図1-7 ジオイド異常のパターン

地表面が平らな場合



地表面が凸凹している場合

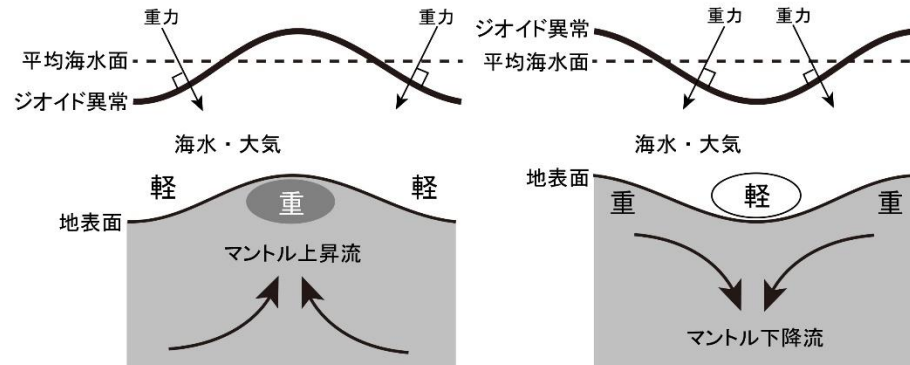


図1-8 ジオイド異常分布と地震波速度異常のパターン

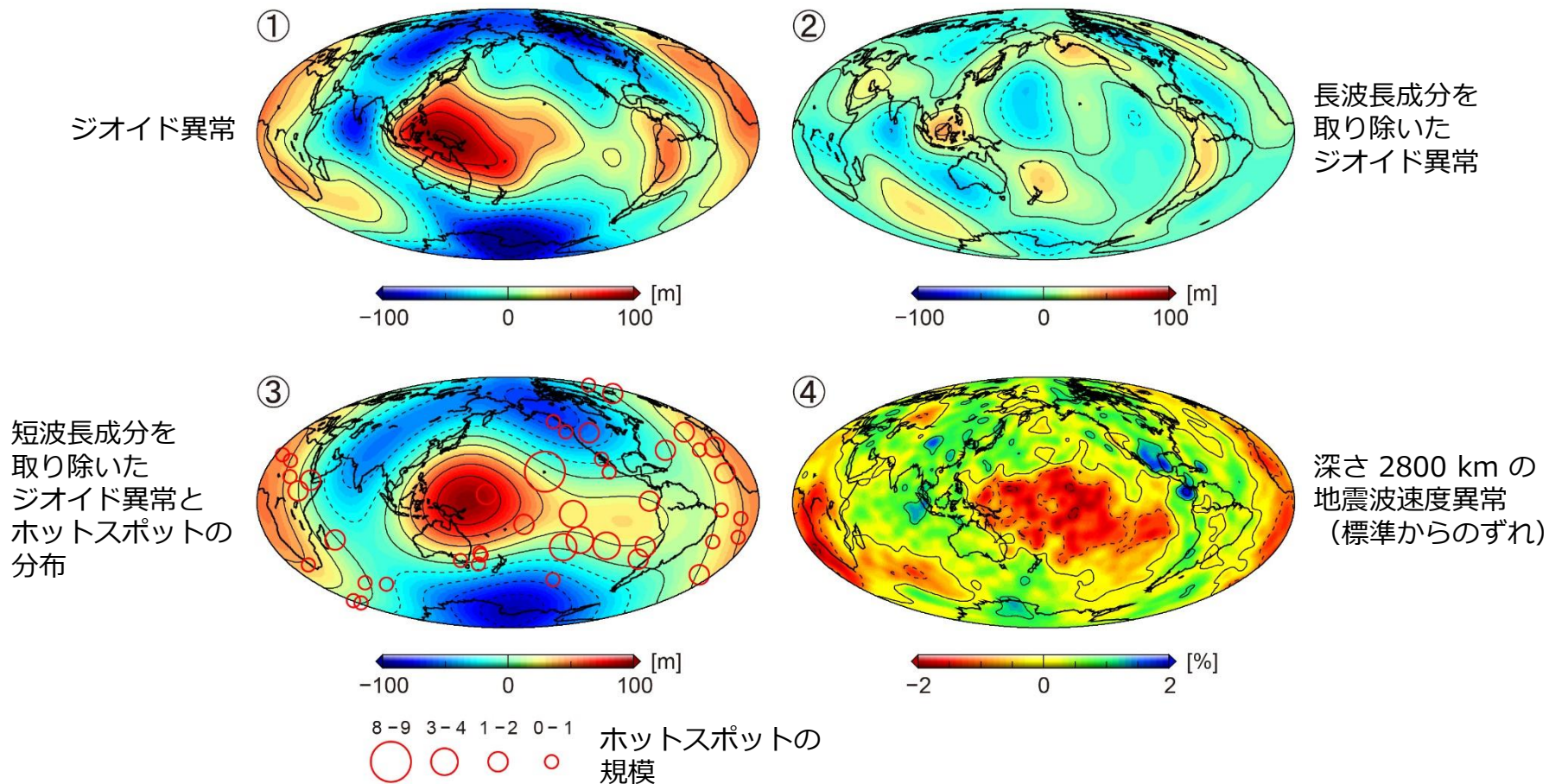
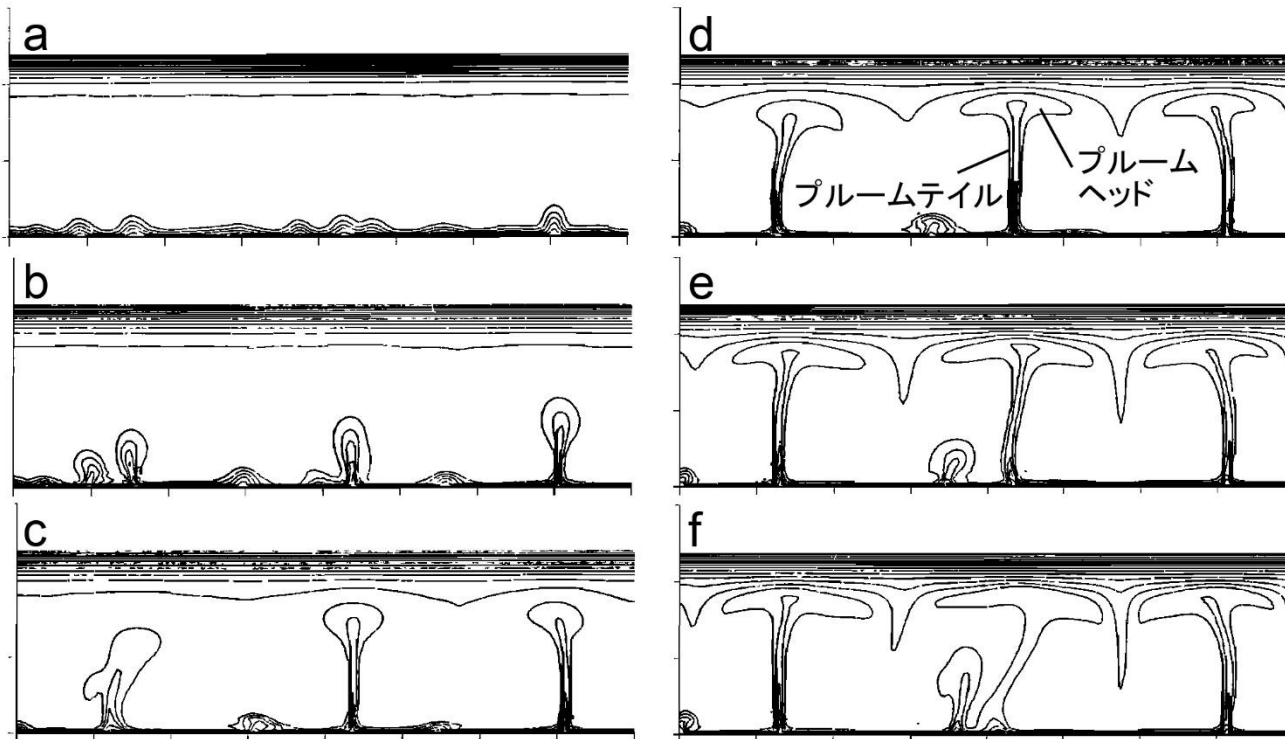


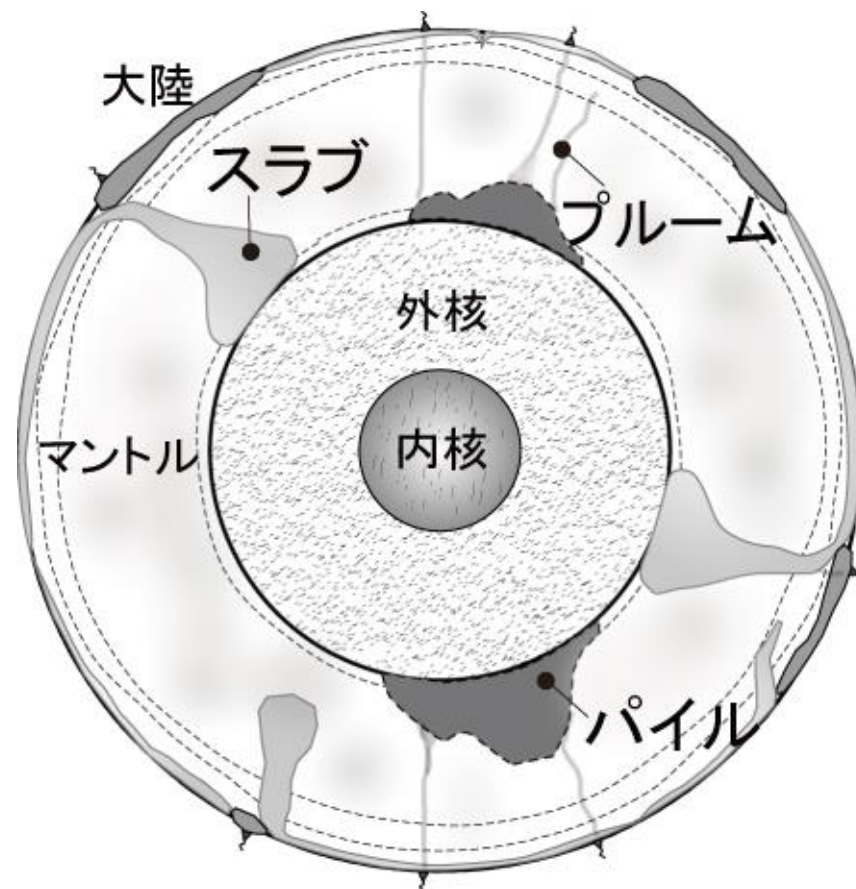
図1-9

マンツルの下部熱境界層から発生するブルーム



Olson et al. (1988)

図1-10 現在のマントル対流パターン



Edward Garnero 博士の図を改変

図1-S1 現在のマントル対流パターン

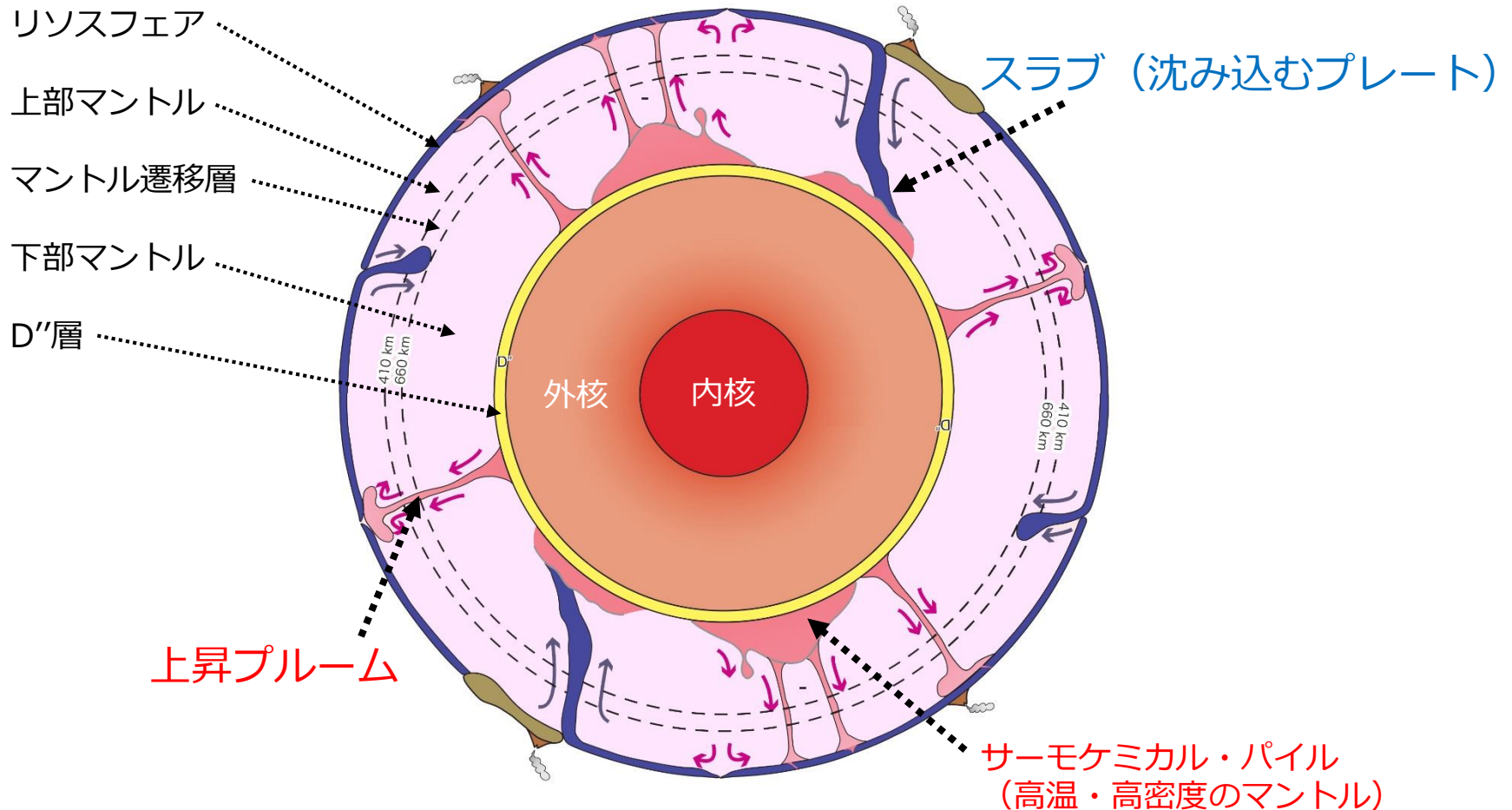
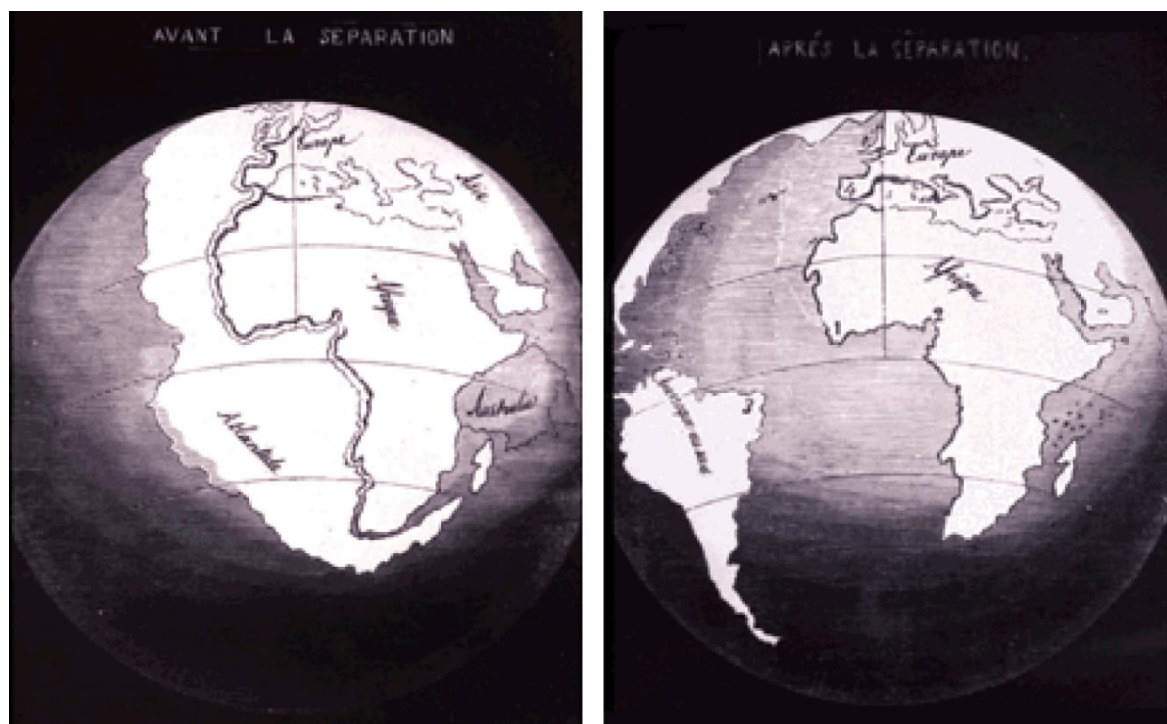


図2-1 アルフレッド・ウェゲナー（1880-1930）



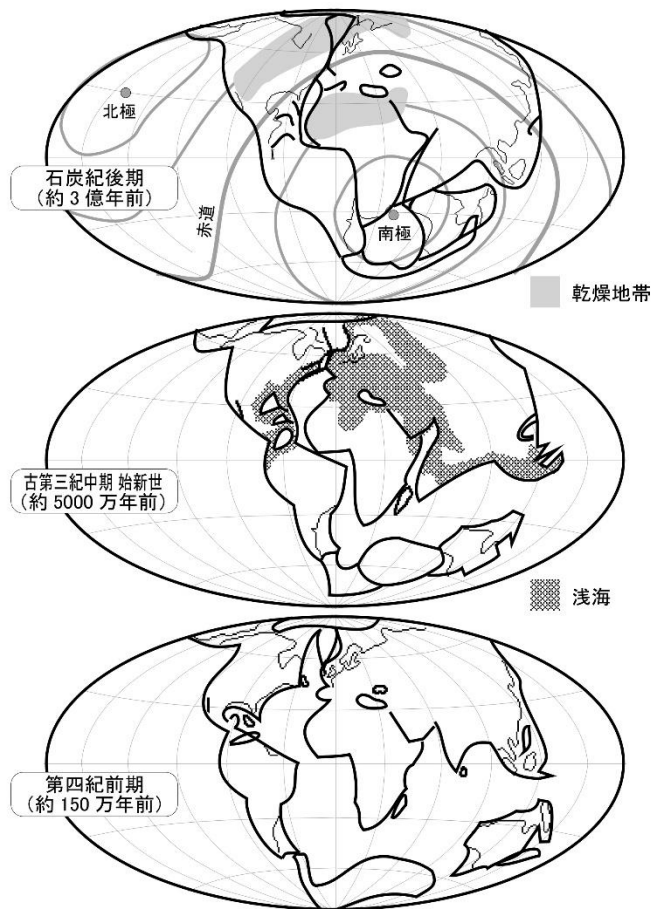
アルフレッド・ウェゲナー極地海洋研究所ウェブページより

図2-2 スナイダーが1858年に発表した大陸の復元図



アメリカ地質調査所ウェブページより

図2-3 ウェゲナーによる大陸移動の復元図



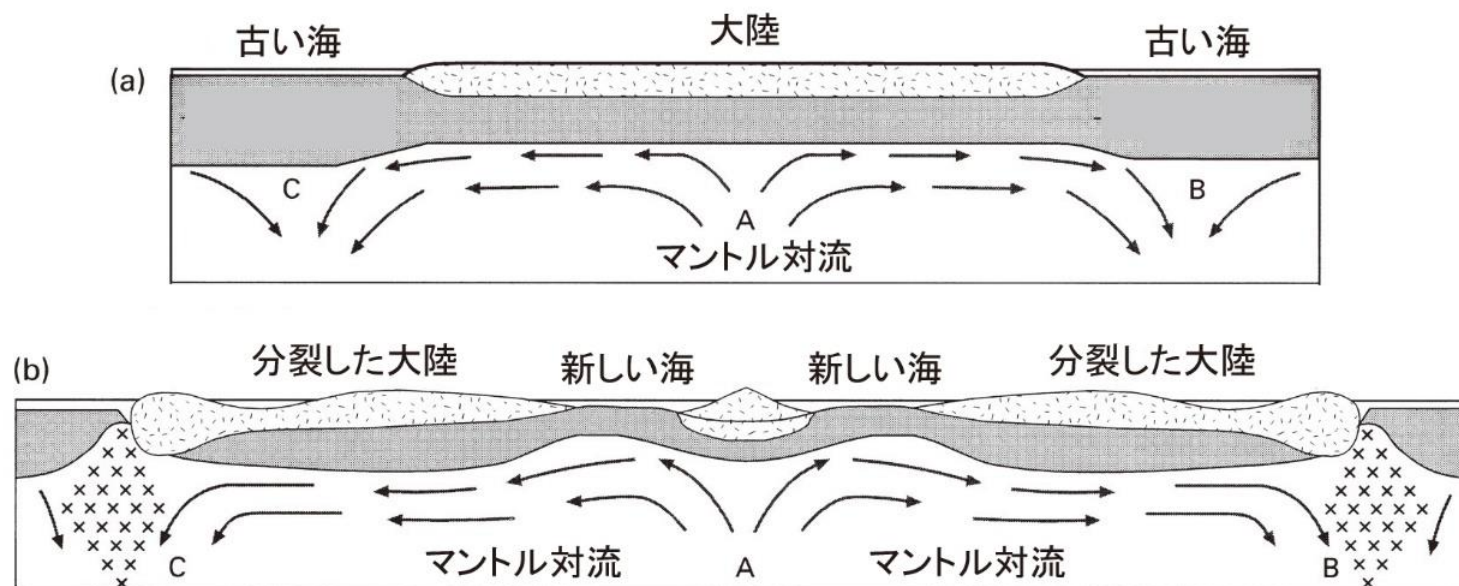
Lowrie (2007)

図2-4 アーサー・ホームズ（1890-1965）



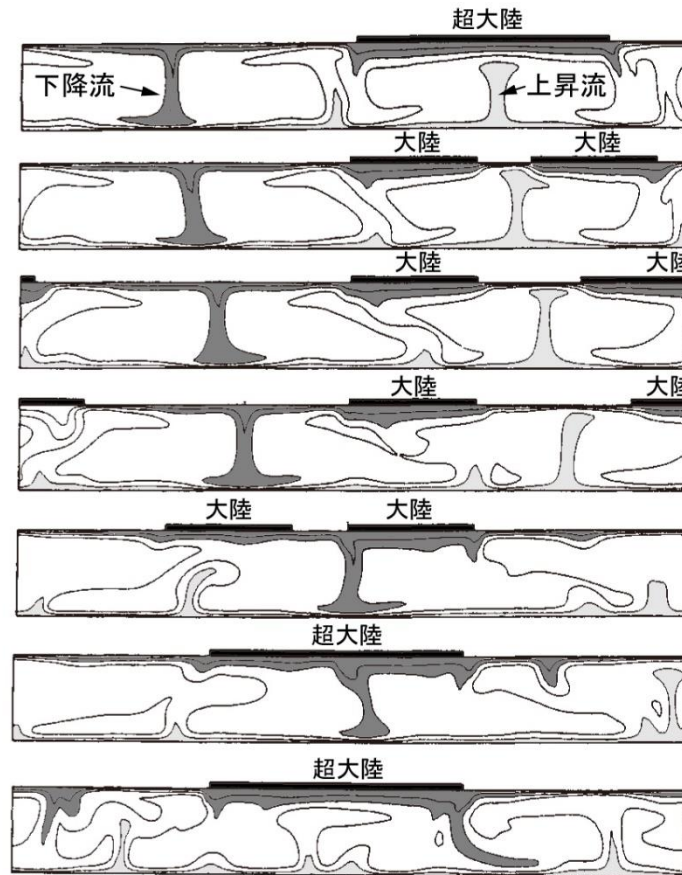
欧州地球科学連合ウェブページより

図2-5 ホームズによるマントル対流の概念図



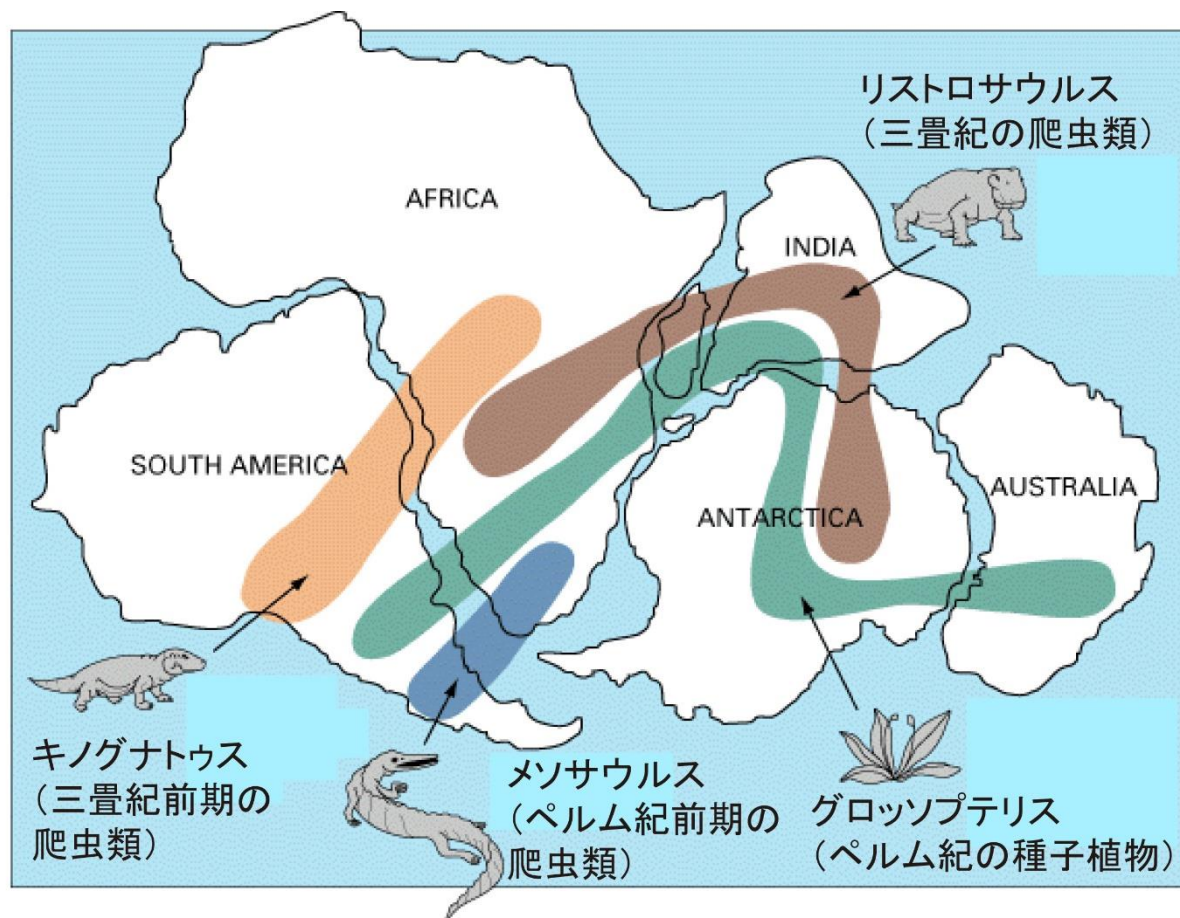
Holmes (1931)に基づく

図2-6 超大陸を考慮した2次元マンテル対流の コンピューター・シミュレーション



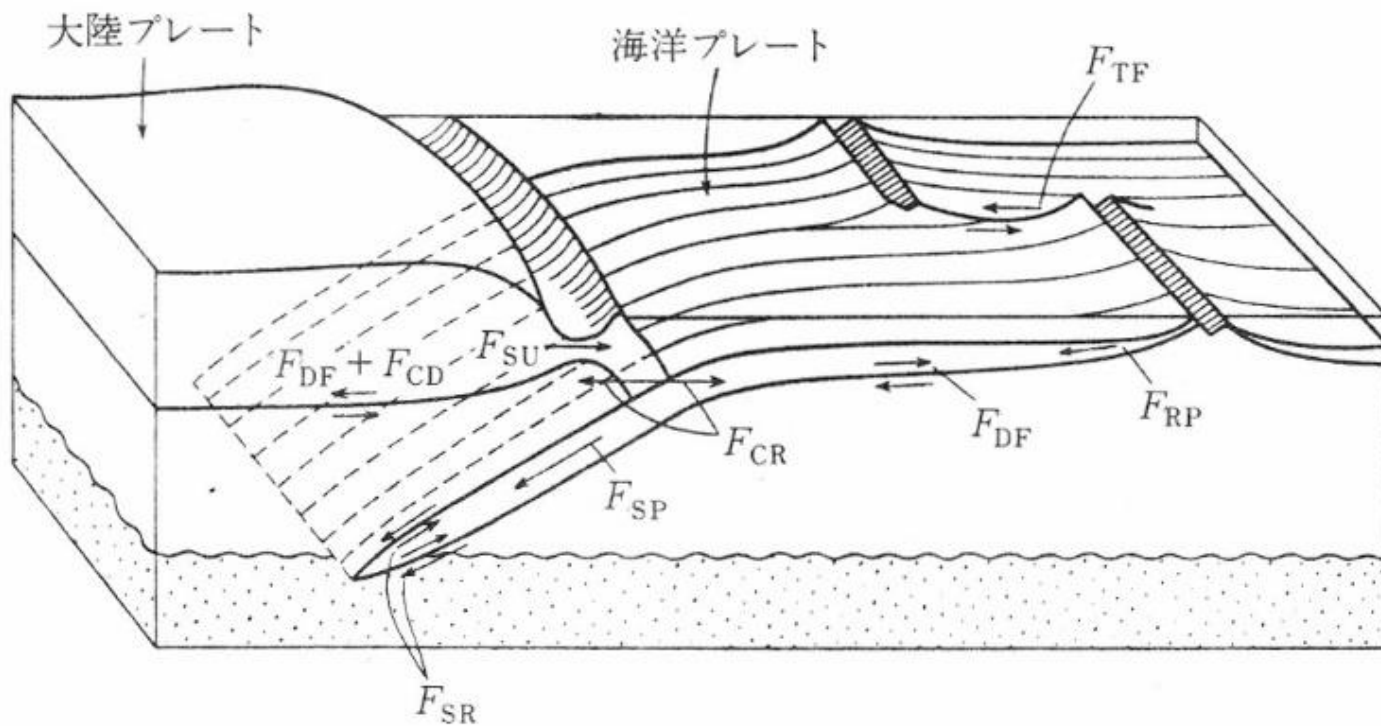
Gurnis (1988)

図2-S1 ゴンドワナ大陸の動植物の分布図



アメリカ地質調査所ウェブページの図を改変

図3-1 プレートに働くいろいろな力



上田 (1989), 元の図は Forsyth & Uyeda (1975)

図3-2 海洋プレートの運動速度と アセノスフェアの流れの速度との関係

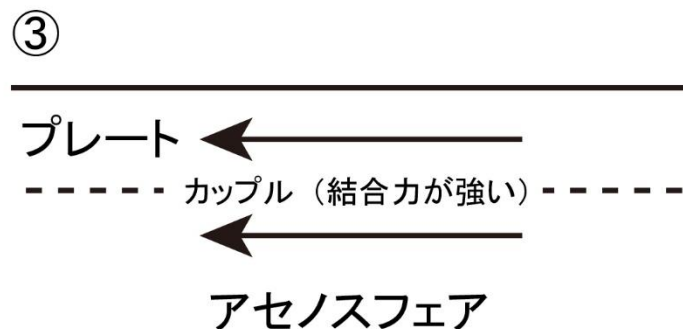
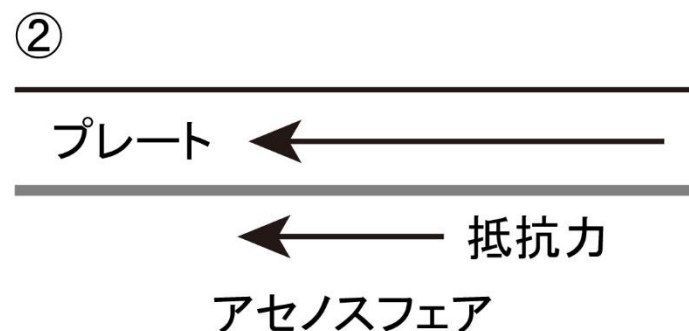
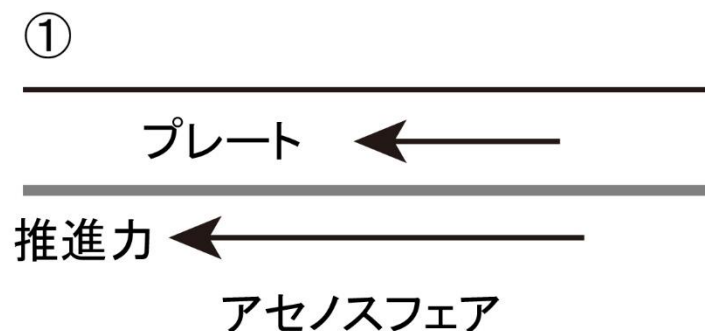
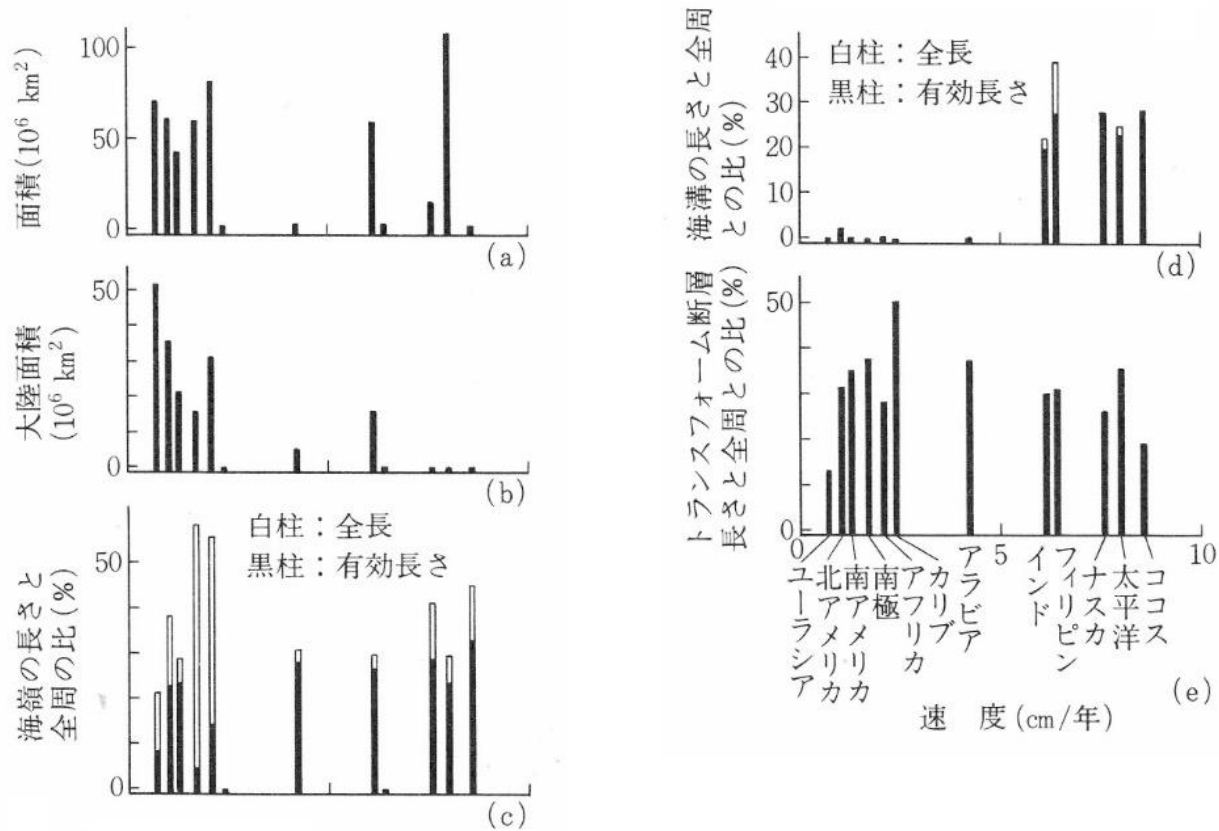
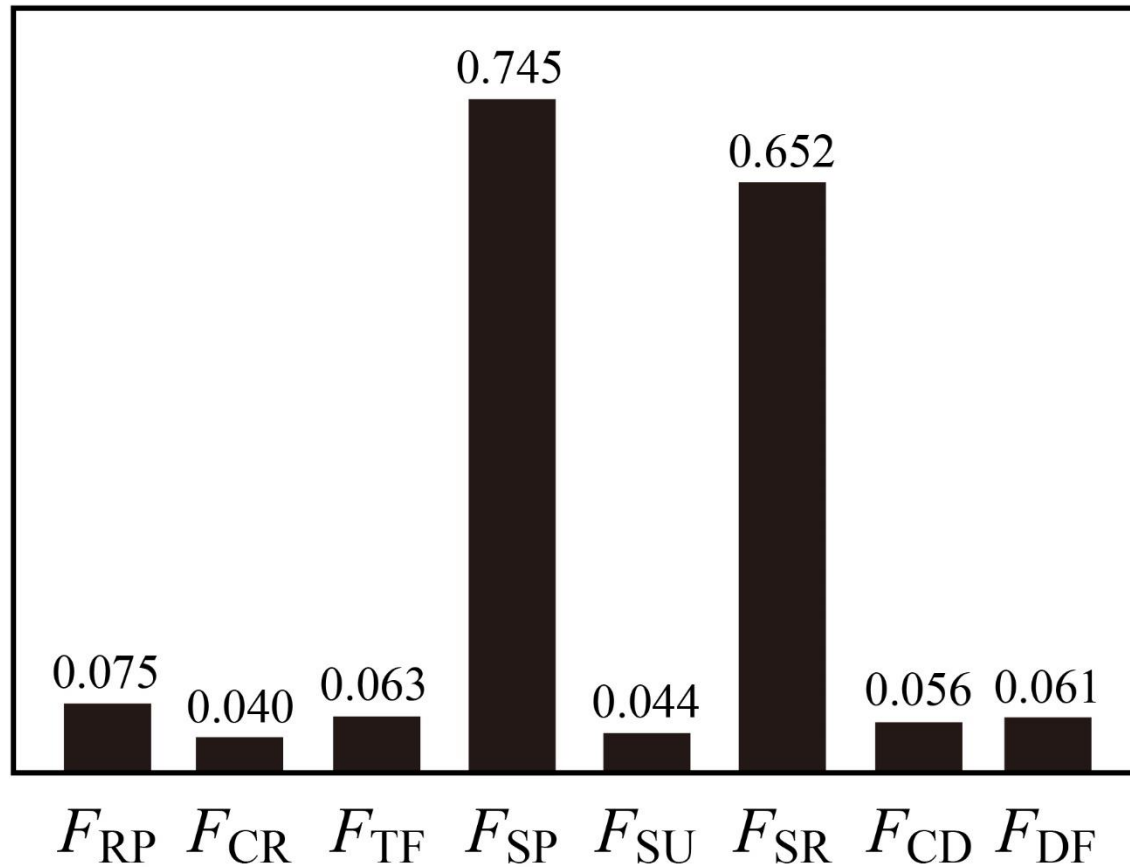


図3-3 各プレートの運動速度と さまざまなテクトニックな特徴との相関



上田 (1989) , 元の図は Forsyth & Uyeda (1975)

図3-4 プレートに働くそれぞれの力の“重要さ”



Forsyth and Uyeda (1975) のデータに基づく

図3-5 超大陸分裂の原動力の2つの考え方

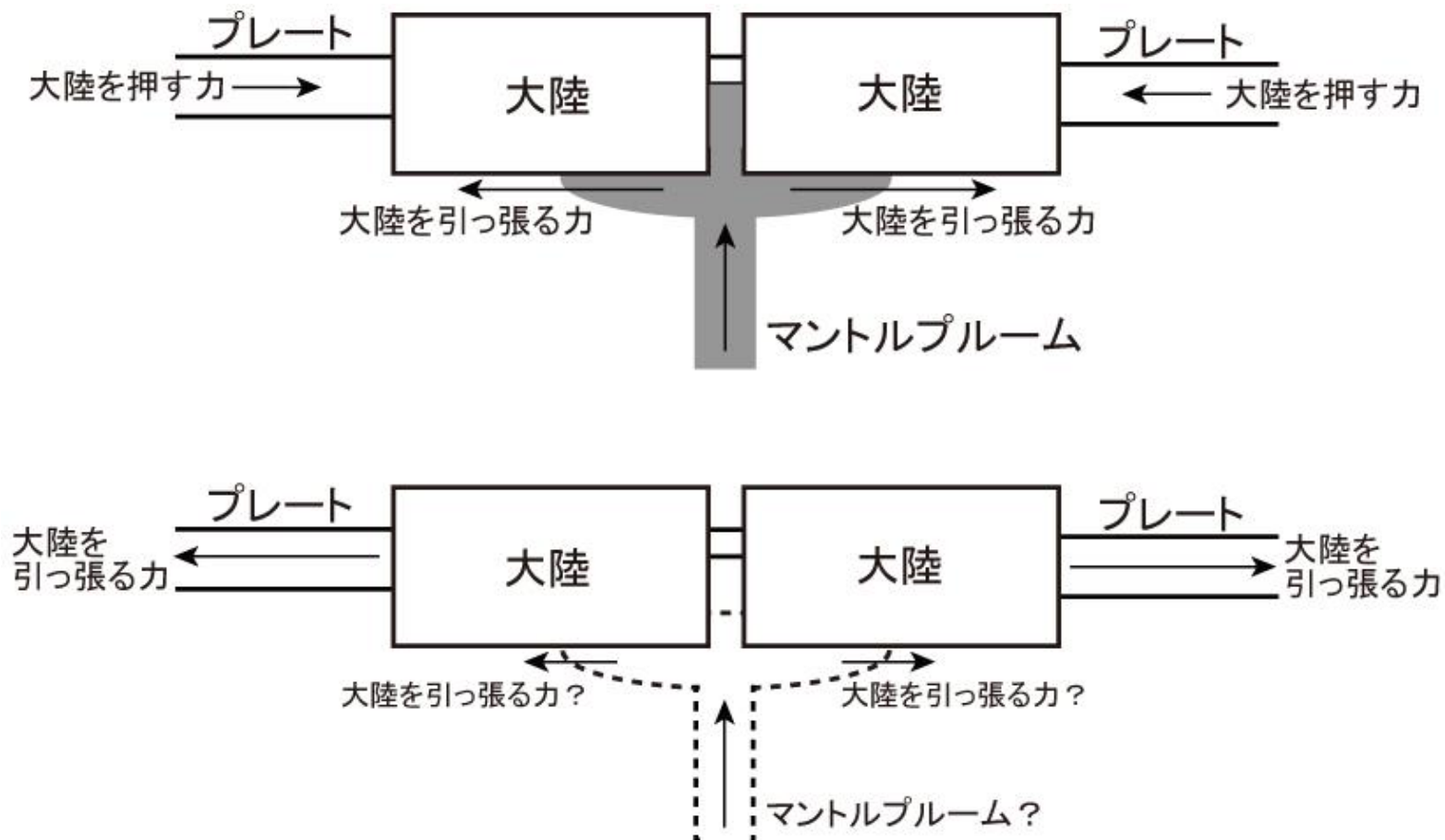
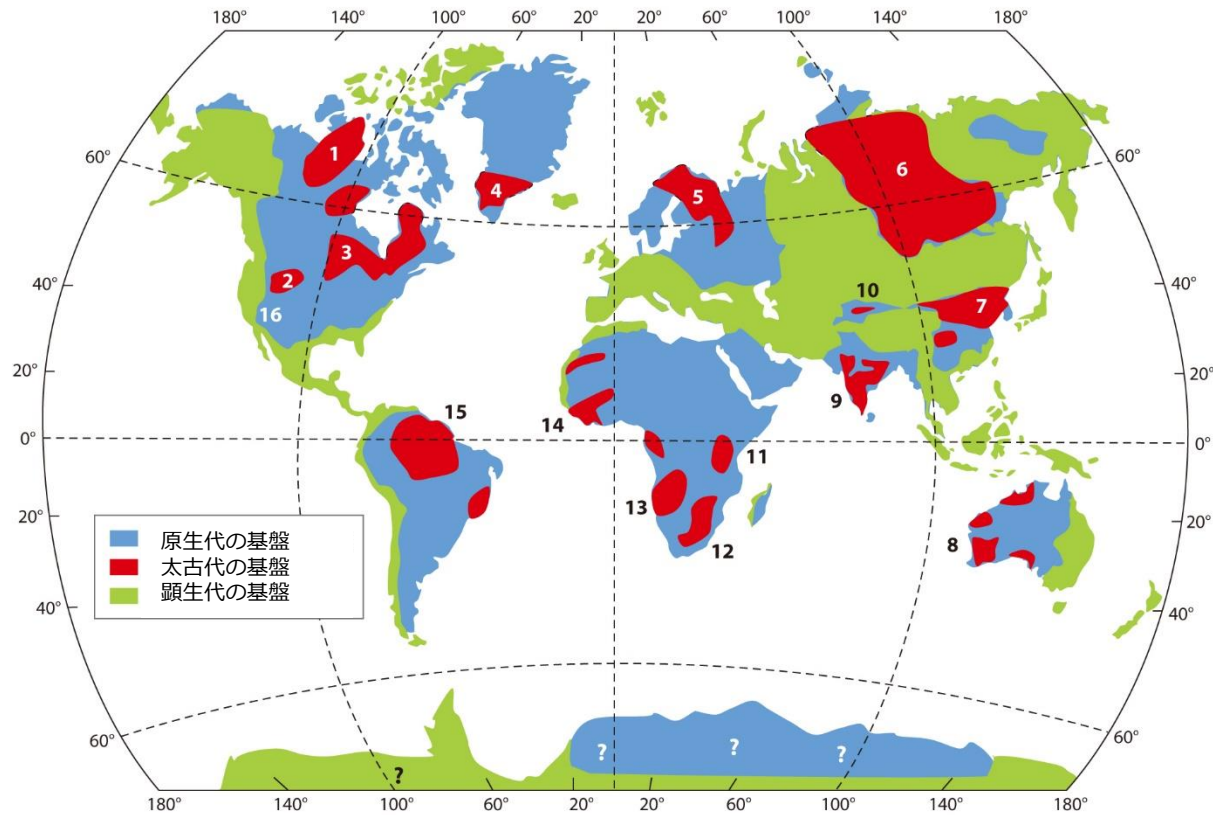


図3-6 沈み込み帯に囲まれたパンゲア超大陸



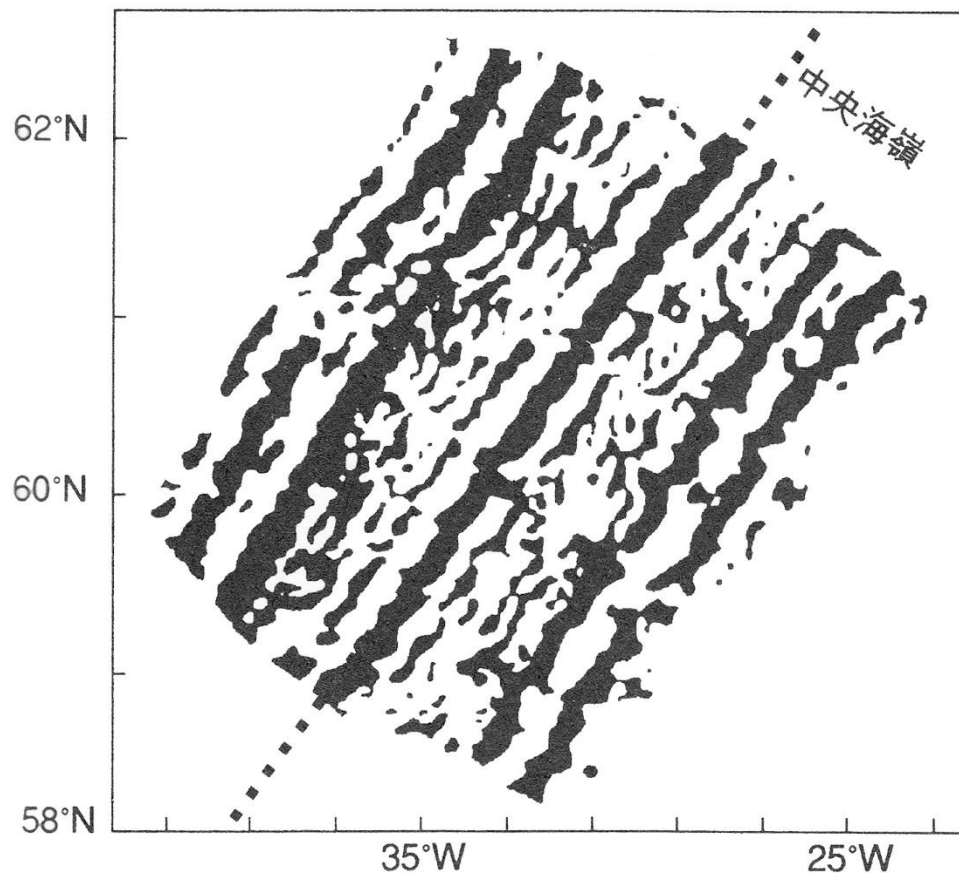
Frisch et al. (2011)

図3-7 大陸地殻の年代分布



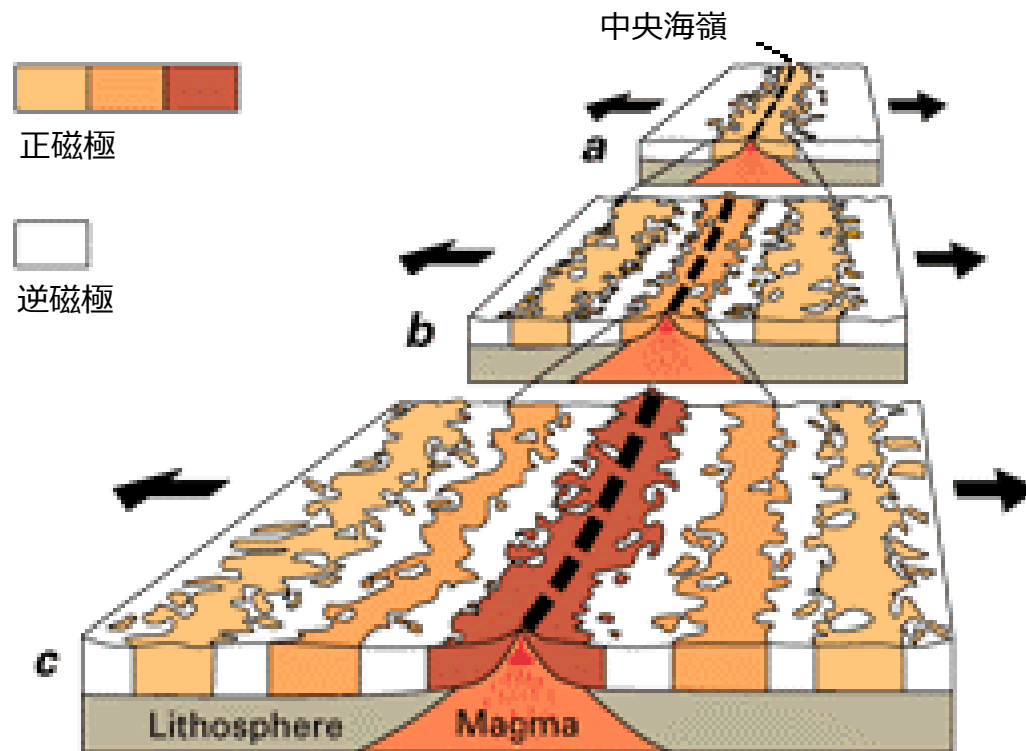
Lee et al. (2011)

図3-8 アイスランドの南西、レイキャネス海嶺周辺の 海底地磁気異常の縞模様



川上 (1995), 元の図は Heirtzler et al. (1966)

図3-9 地磁気縞模様ができる原理



アメリカ地質調査所ウェブページより

図3-10 海洋リソスフェアの年代

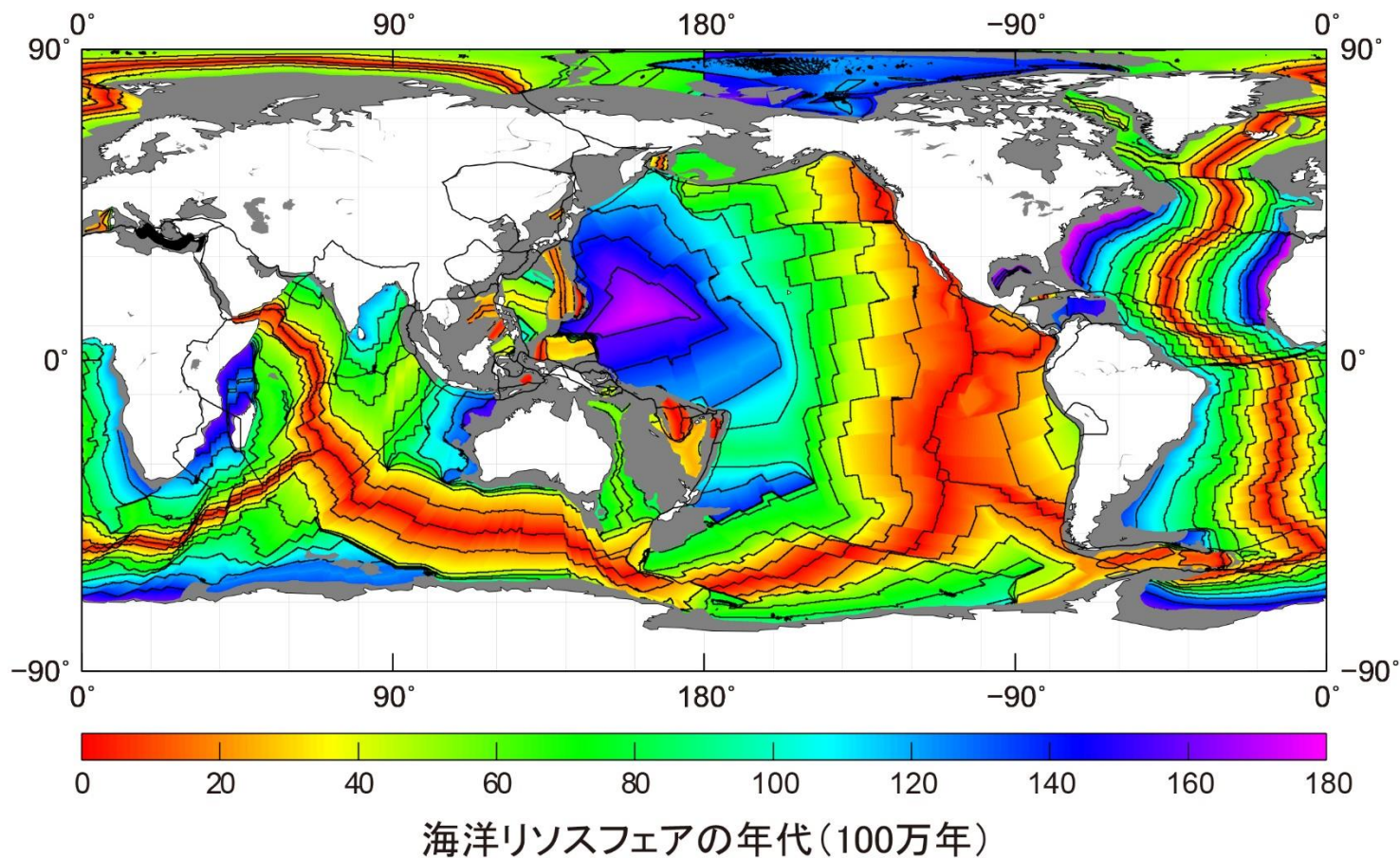
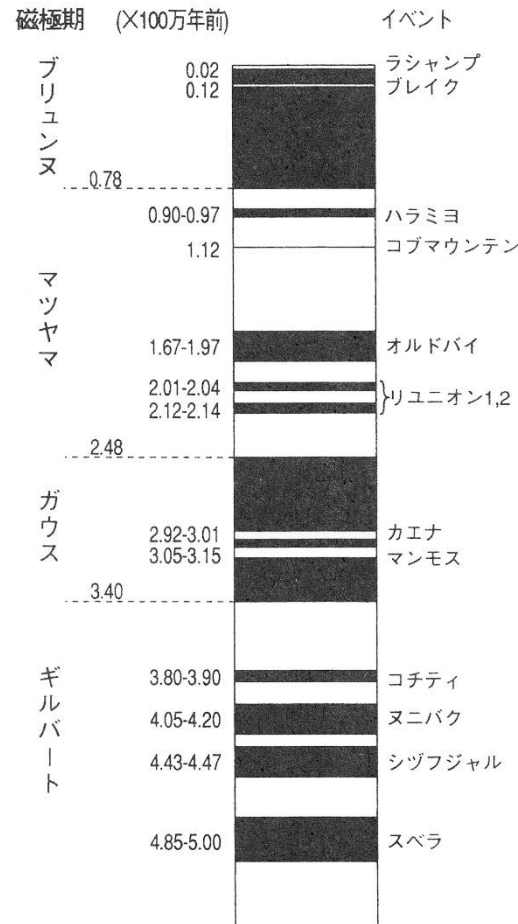
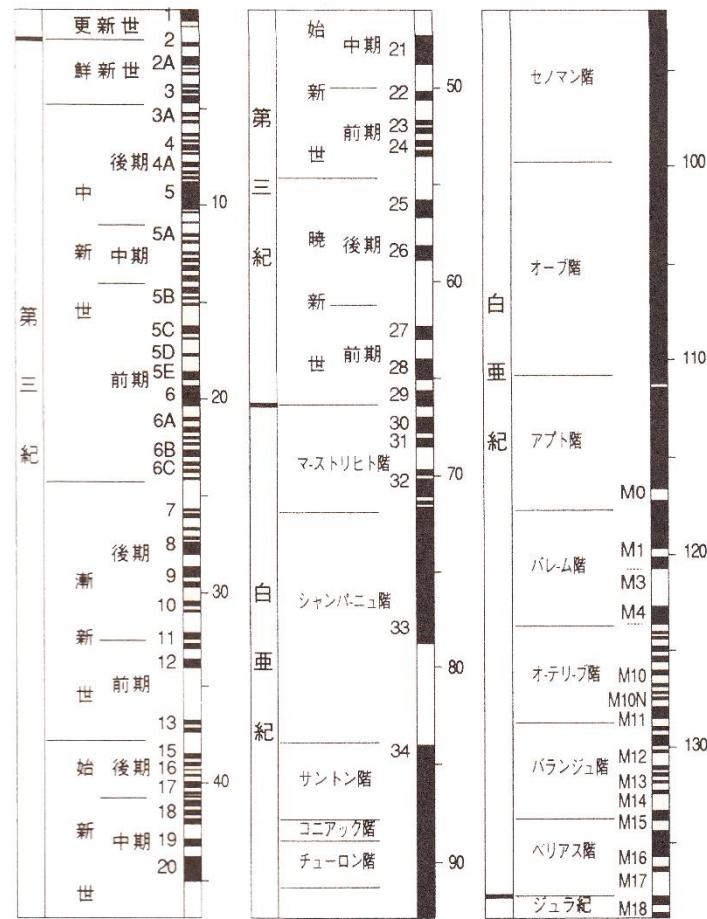


図3-S1 過去500万年間における地球磁場逆転の歴史



川上 (1995) , 元の図は Gubbins (1994)

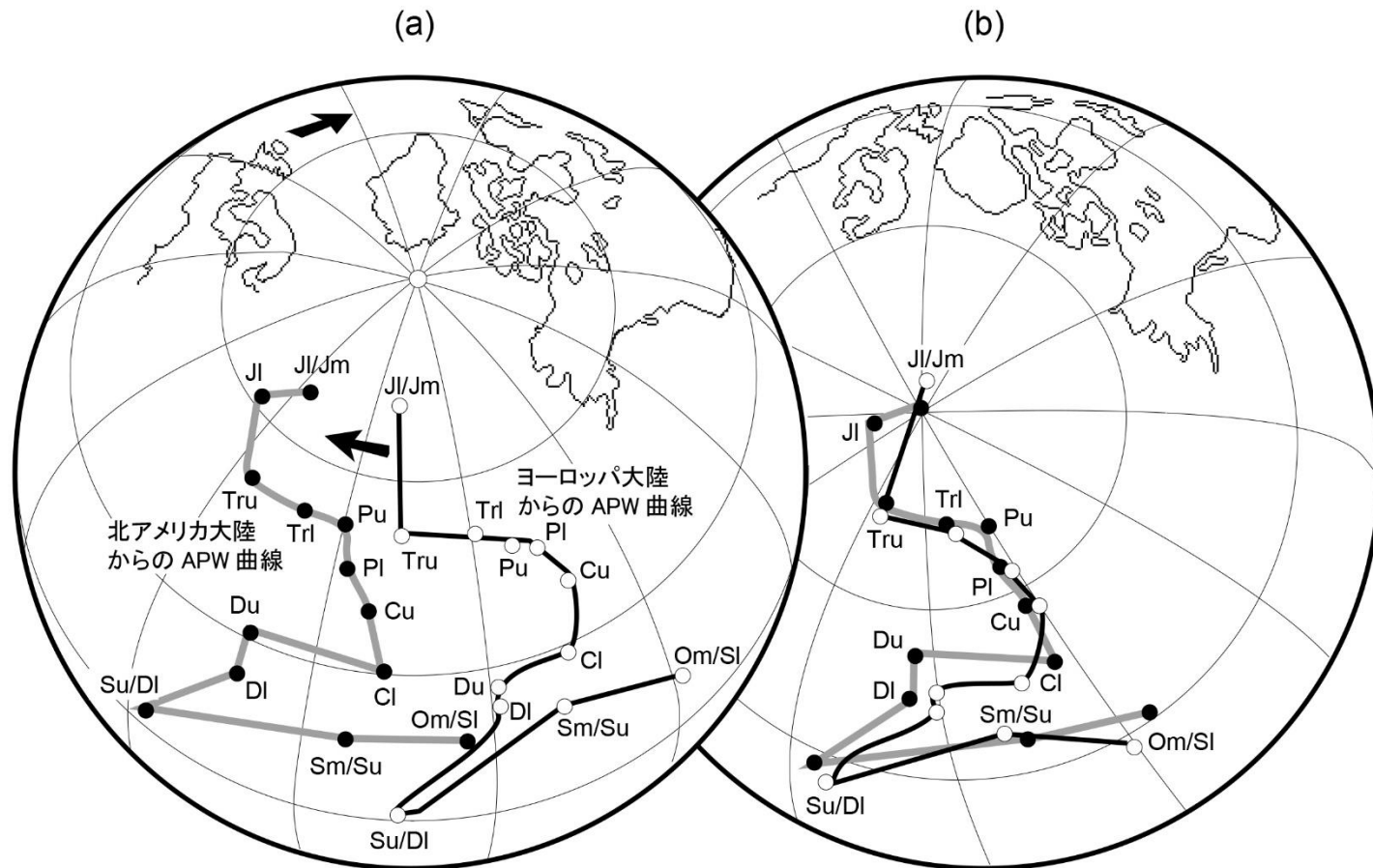
図3-11 中生代白亜紀から現在までの地球磁場



川上 (1995), 元の図は Gubbins (1994)

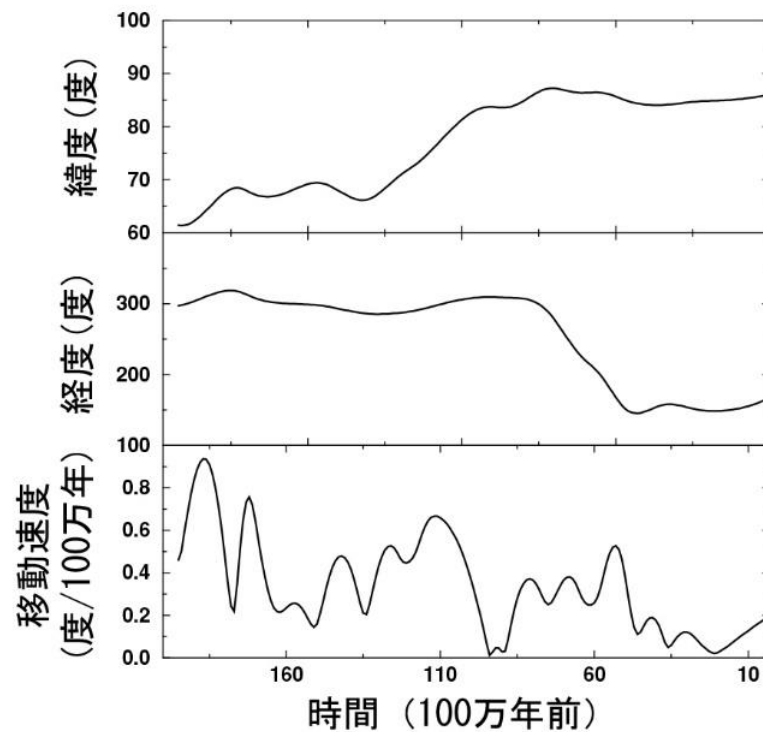
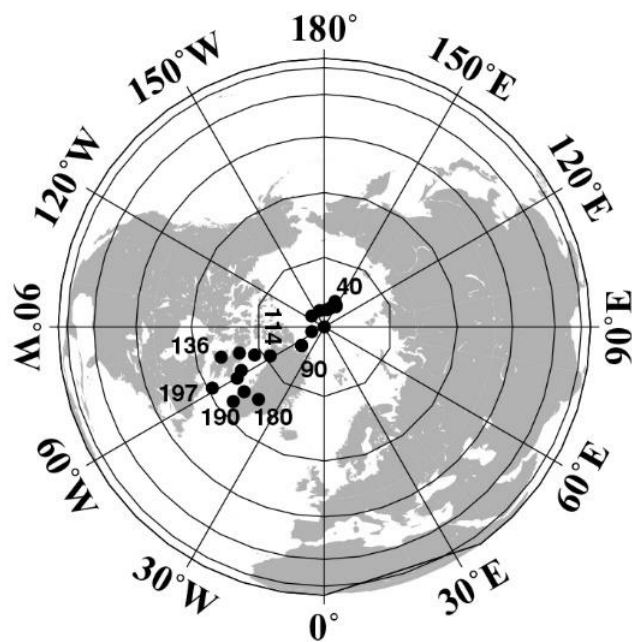
図3-12

北米大陸とユーラシア大陸からの見かけの極移動（APW）曲線と，大西洋を閉じた場合の曲線



Van der Voo (1990)に基づく

図3-13 古地磁気学で復元された真の極移動（TPW）



Greff-Lefftz (2004)

図4-1 ウィルソンサイクルの一連の過程

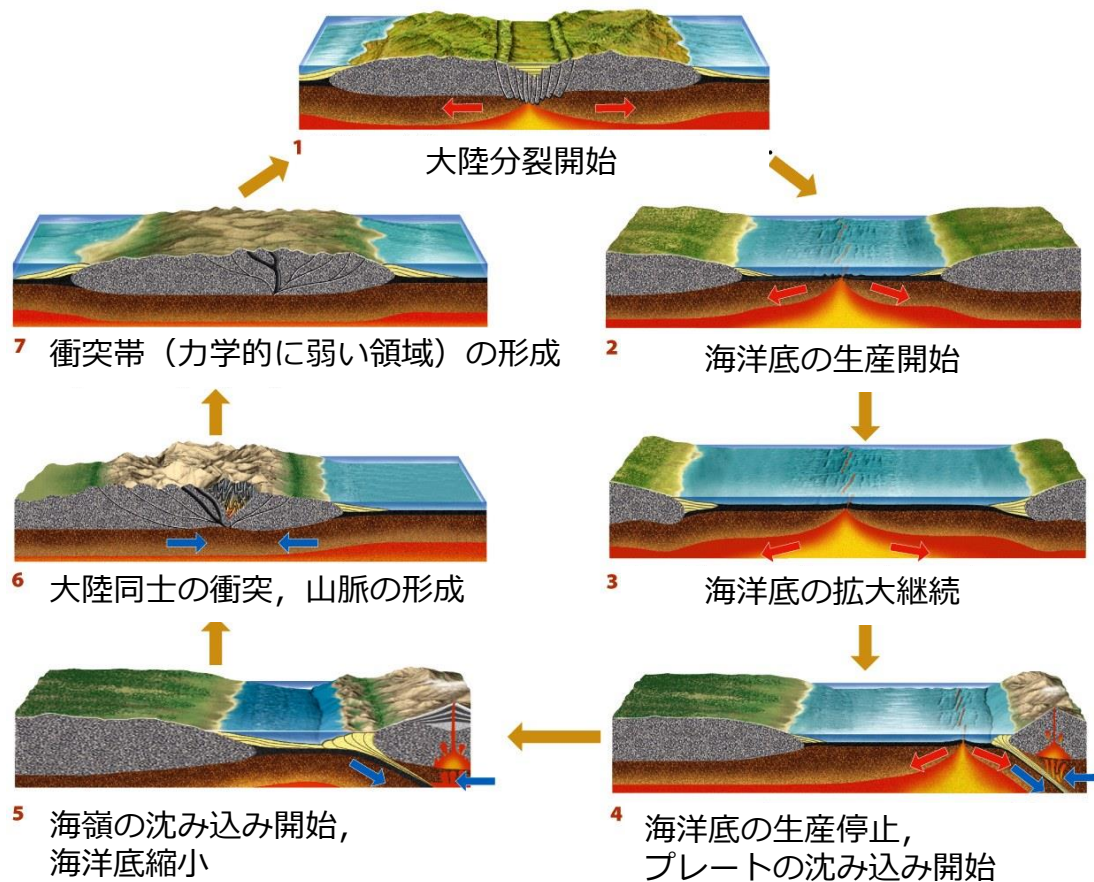
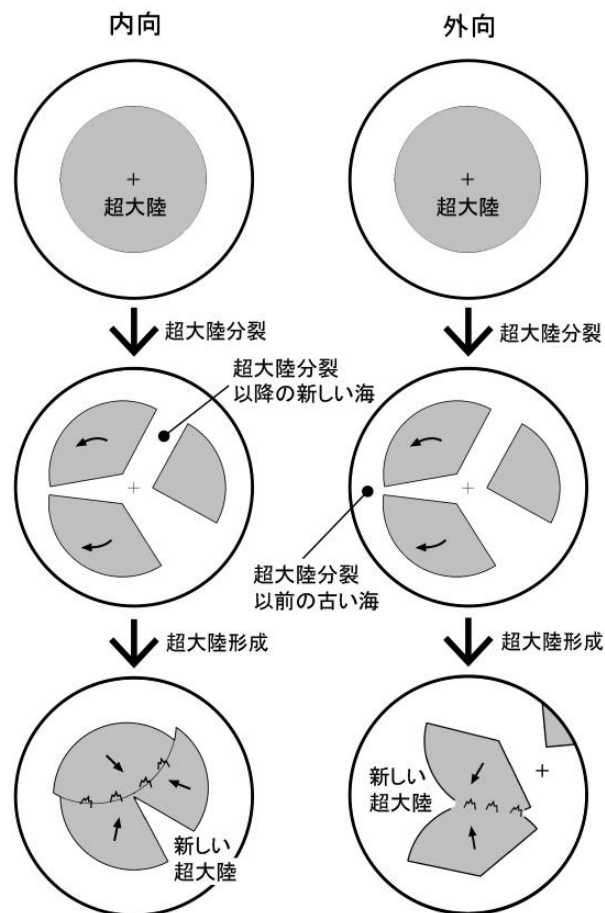


図4-2 超大陸サイクルの内向パターンと外向パターン



※「内向」 (introversion) ,
「外向」 (extroversion) は,
それぞれ「内転」, 「外転」
とも訳される

図4-3 超大陸の分裂・形成時代と オフィオライトの形成年代の関係

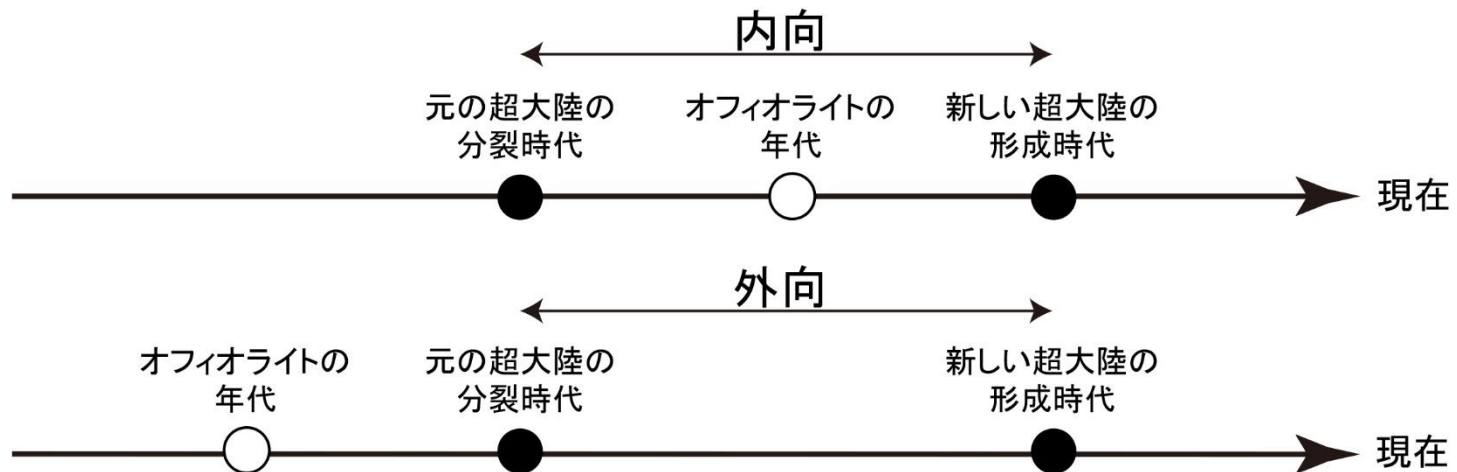
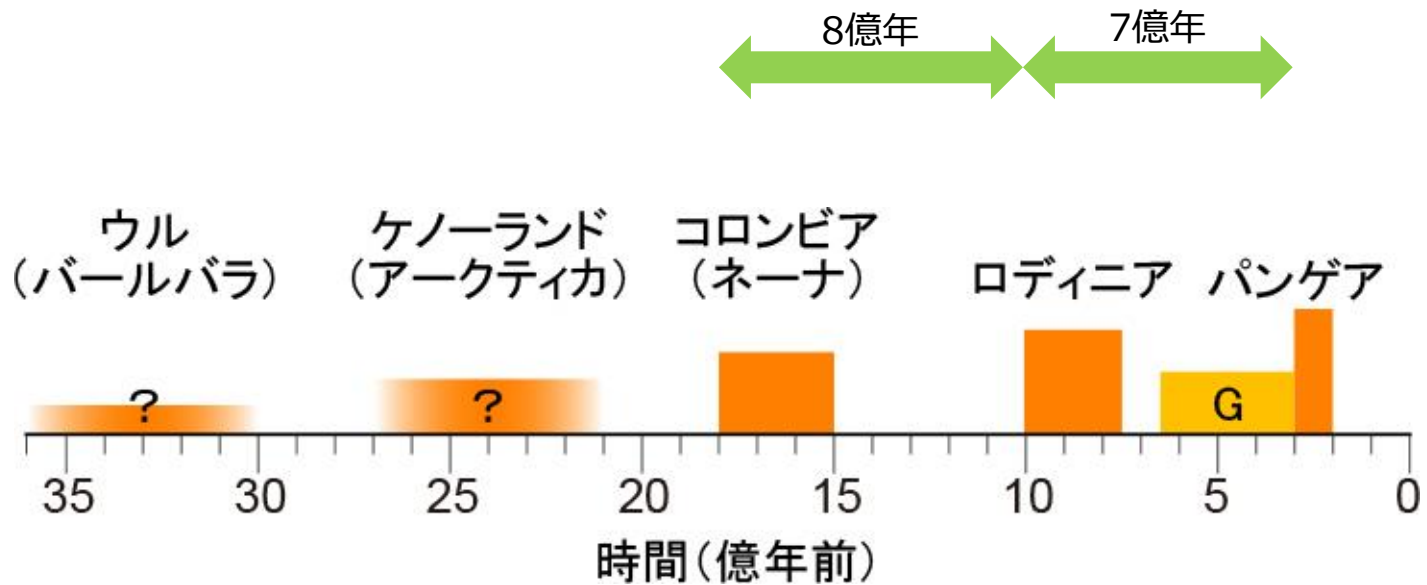


図4-4 地質年代区分表と地球史の主な出来事

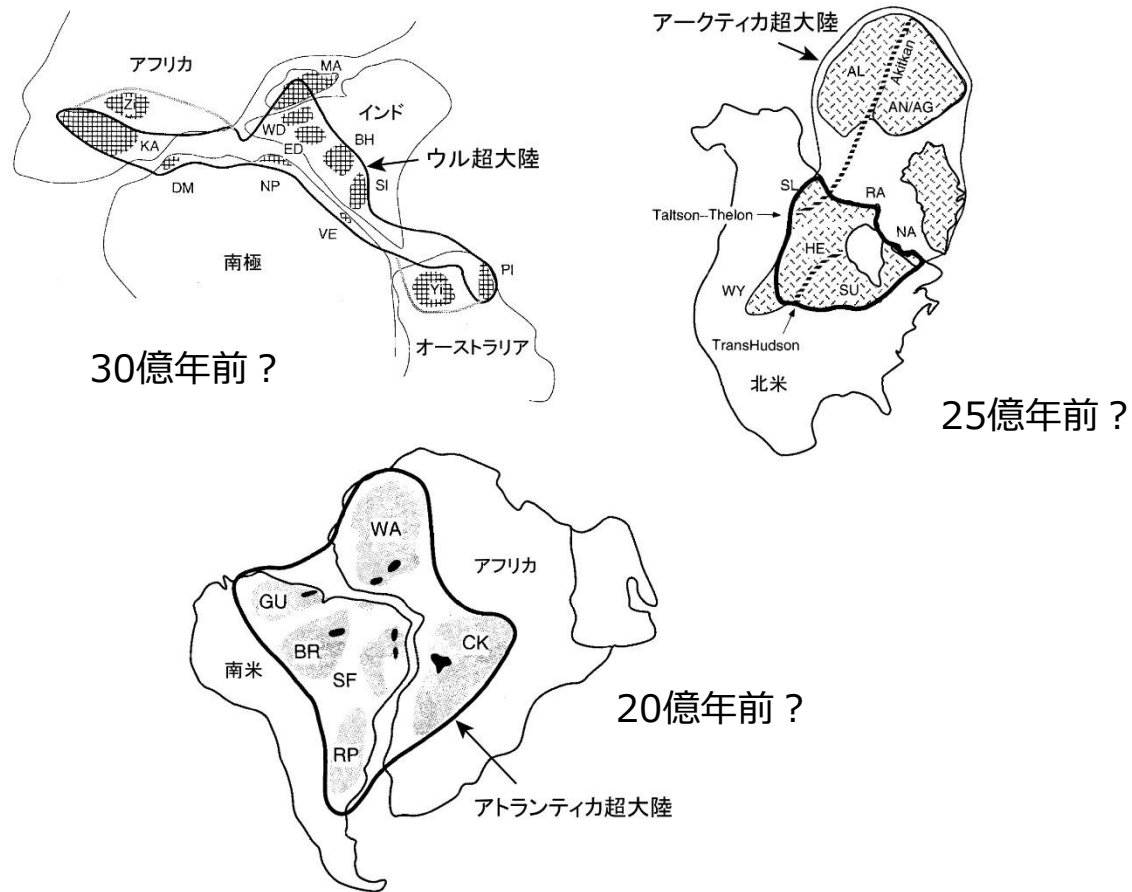
累代	代	紀	地球史の主な出来事
66 252 541	新生代	第四紀 2.6 新第三紀 23 古第三紀	人類の出現 (700 万年前?) 生物の大量絶滅、 霊長類の出現 (6500 万年前)
		白亜紀 145 ジュラ紀 201 三畳紀	恐竜の出現 (約 2 億年前) 海洋無酸素事変、 生物の大量絶滅 (約 2 億 5000 万年前)
		古生代 299 石炭紀 359 デボン紀 419 シルル紀 443 オルドビス紀 485 カンブリア紀	パンゲア超大陸形成 (約 3 億年前) カンブリア爆発 (約 5 億 4000 万年前)
	原生代	新原生代	全地球凍結 (約 6 億 3000 万年前 と約 7 億年前)
		1000 中原生代	ロディニア超大陸形成 (約 10 億年前)
		1600 古原生代	コロンビア(ネーナ) 超大陸形成 (約 18 億年前?) 全地球凍結 (約 23 億年前)
2500 4000 4600	先カンブリア時代	太古代 (始生代)	新太古代 2800 中太古代 3200 古太古代 3600 原太古代
			地球磁場強度の増大 (約 27 億年前) 最初の超大陸形成 (約 30 億年前?)
			生命の誕生 (38 ~ 40 億年前)
		冥王代	大陸の誕生 (40 ~ 44 億年前) マグマオーシャン・ 海の誕生 (45 ~ 46 億年前) 地球の誕生 (46 億年前)

図4-5 超大陸が存在していた時代



G=ゴンドワナ

図4-6 太古代から原生代初期の超大陸

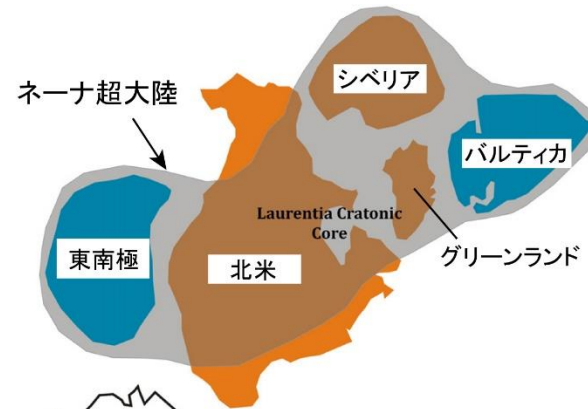


Rogers & Santosh (2003)

圖 4-S1-1



図4-7 原生代のネーナ超大陸とヌーナ超大陸



Rogers (1996)



Hoffman (1997)

Meert (2012)

図4-S1-2 原生代のコロンビア超大陸

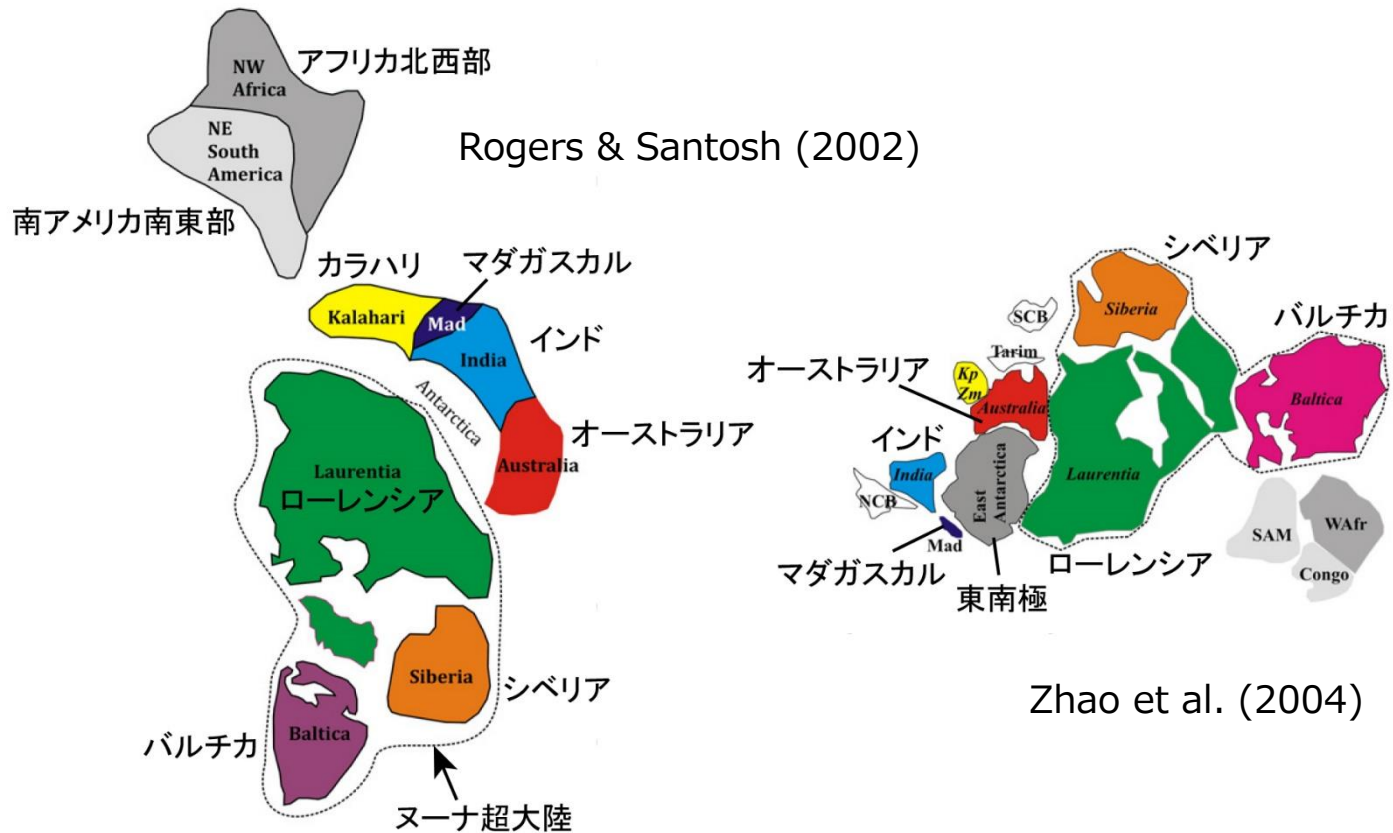
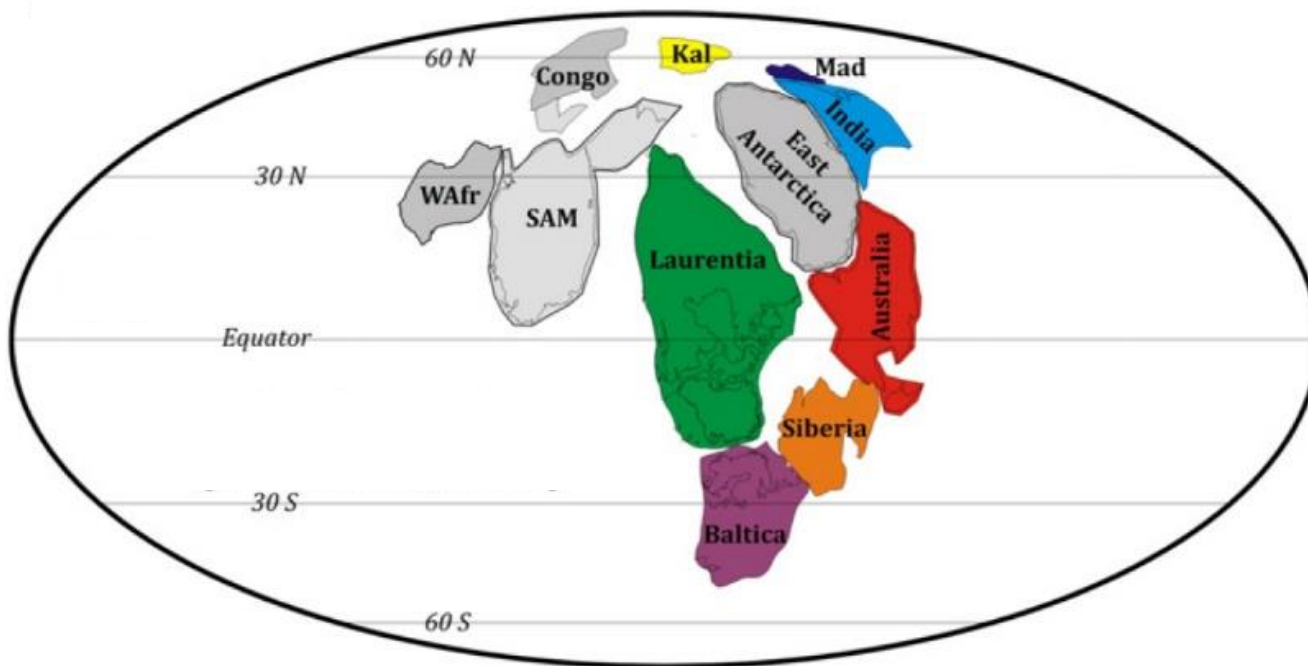


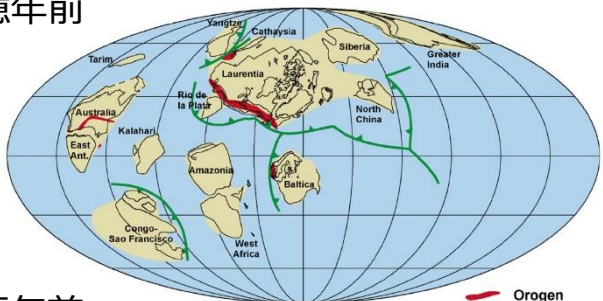
図4-S2-2 原生代のコロンビア超大陸



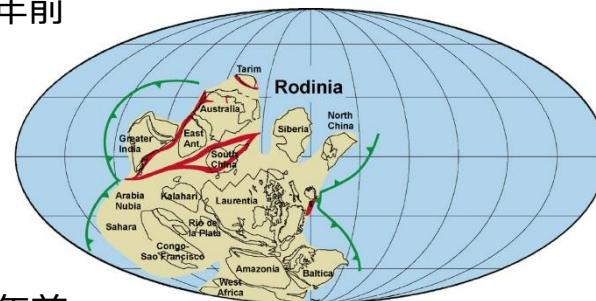
Meert (2012), Meert (2002)の復元図に基づく

図4-S3-1 ロディニア超大陸の形成と分裂

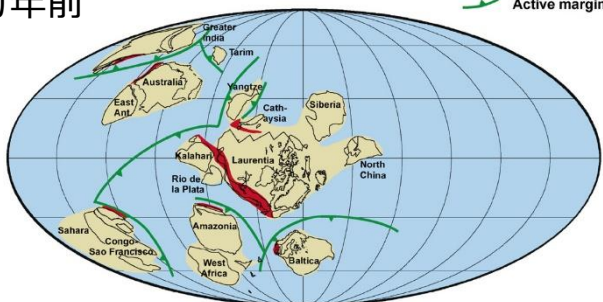
11億年前



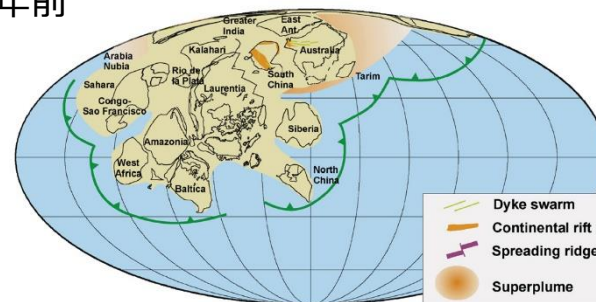
9億年前



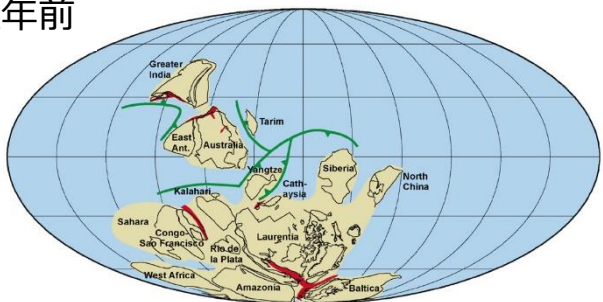
10億5000万年前



8億2500万年前



10億年前



7億8000万年前

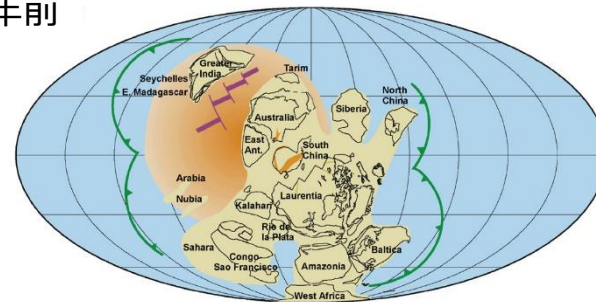
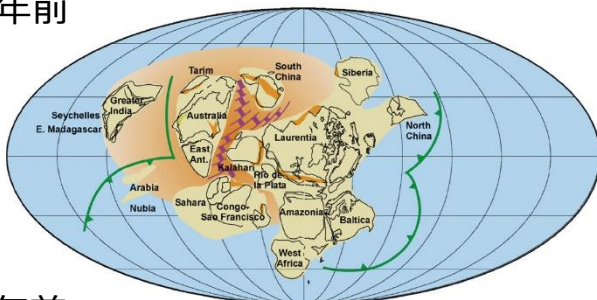
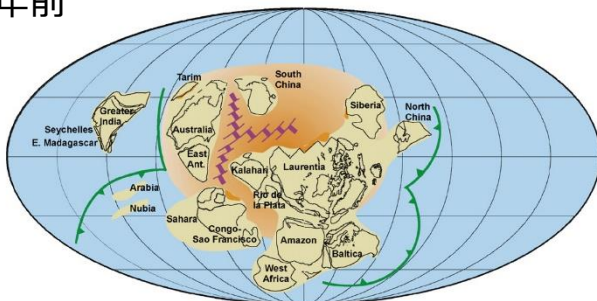


図4-S3-2 ロディニア超大陸の形成と分裂

7億5000万年前



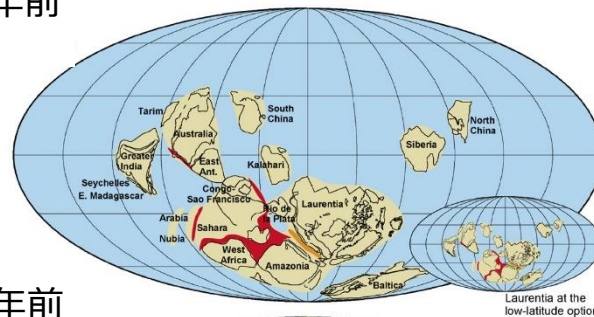
7億2000万年前



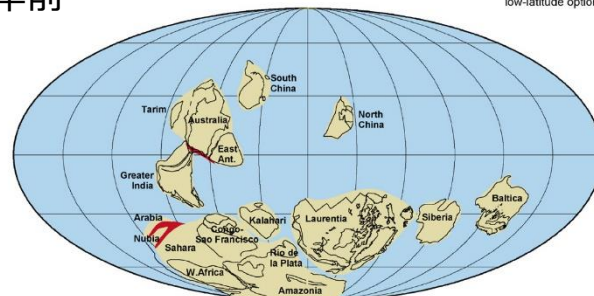
6億3000万年前



6億年前



5億5000年前



5億3000年前

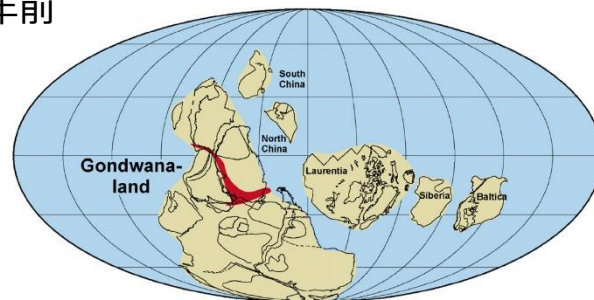
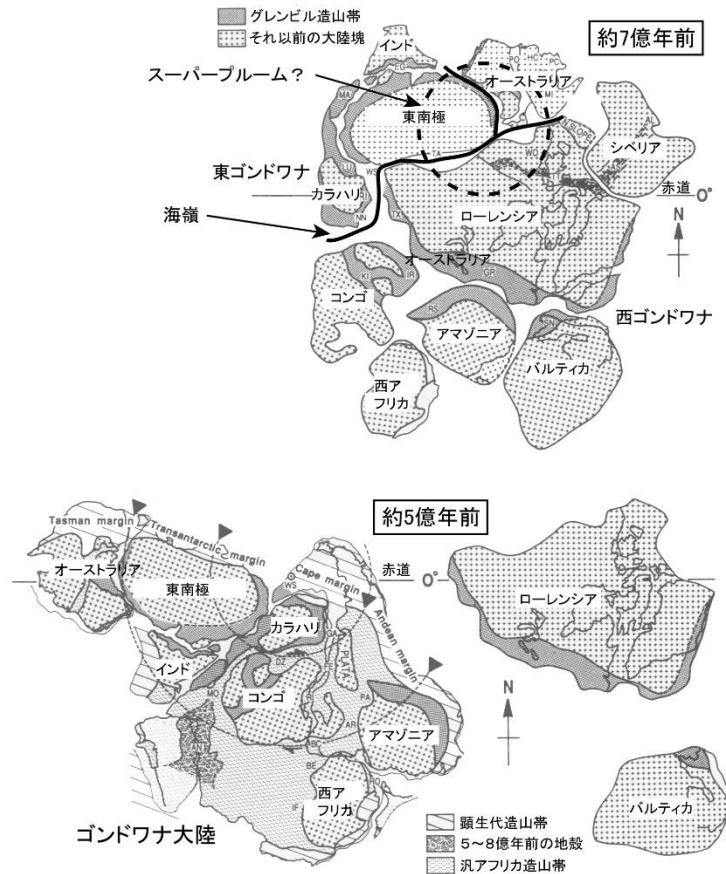
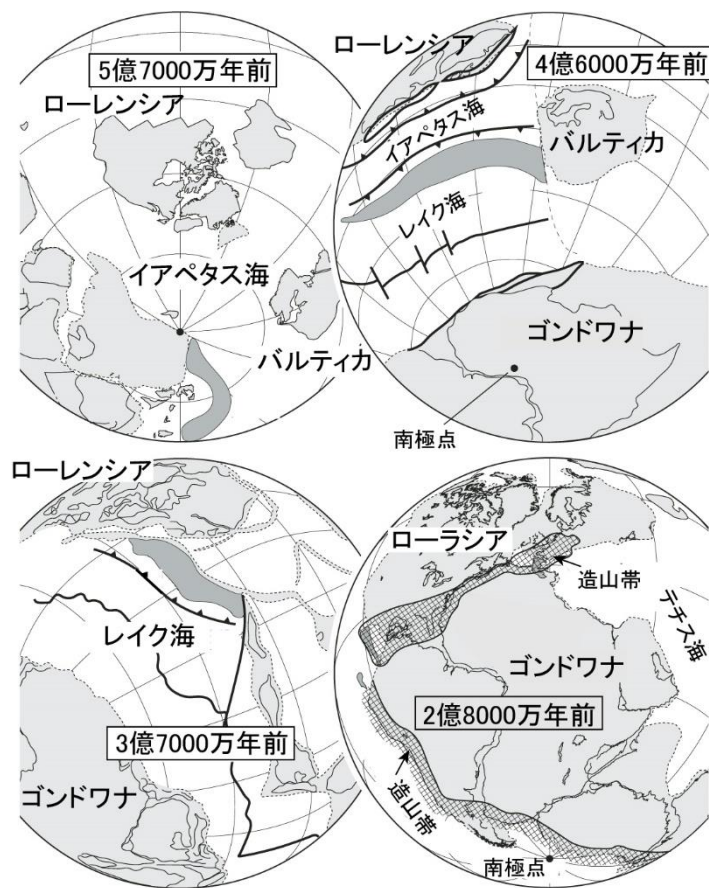


図4-8 ロディニア超大陸の分裂からゴンドワナ大陸の形成



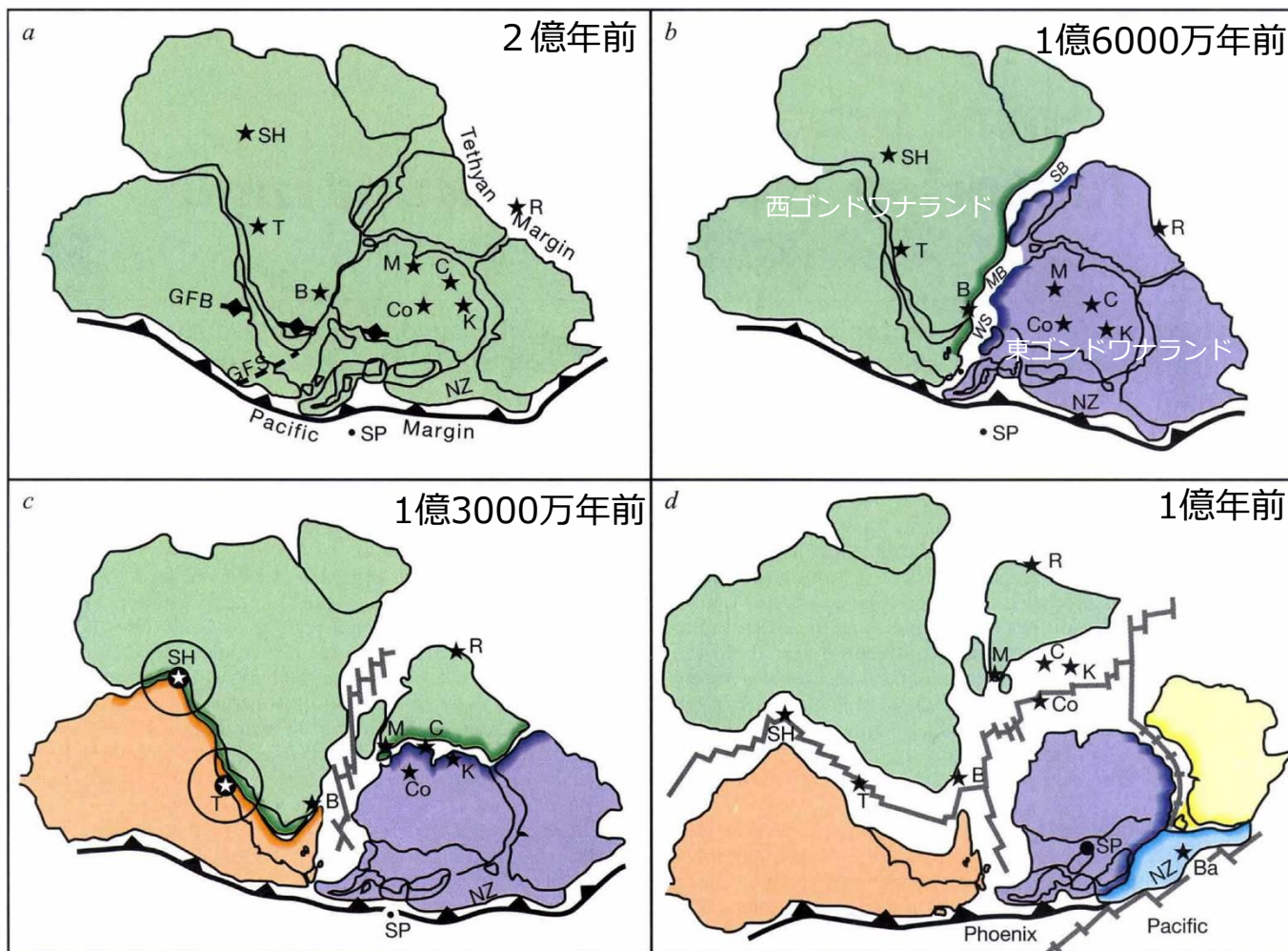
Hoffman (1991)

図4-S4 ゴンドワナ大陸の分裂からパンゲア超大陸の形成



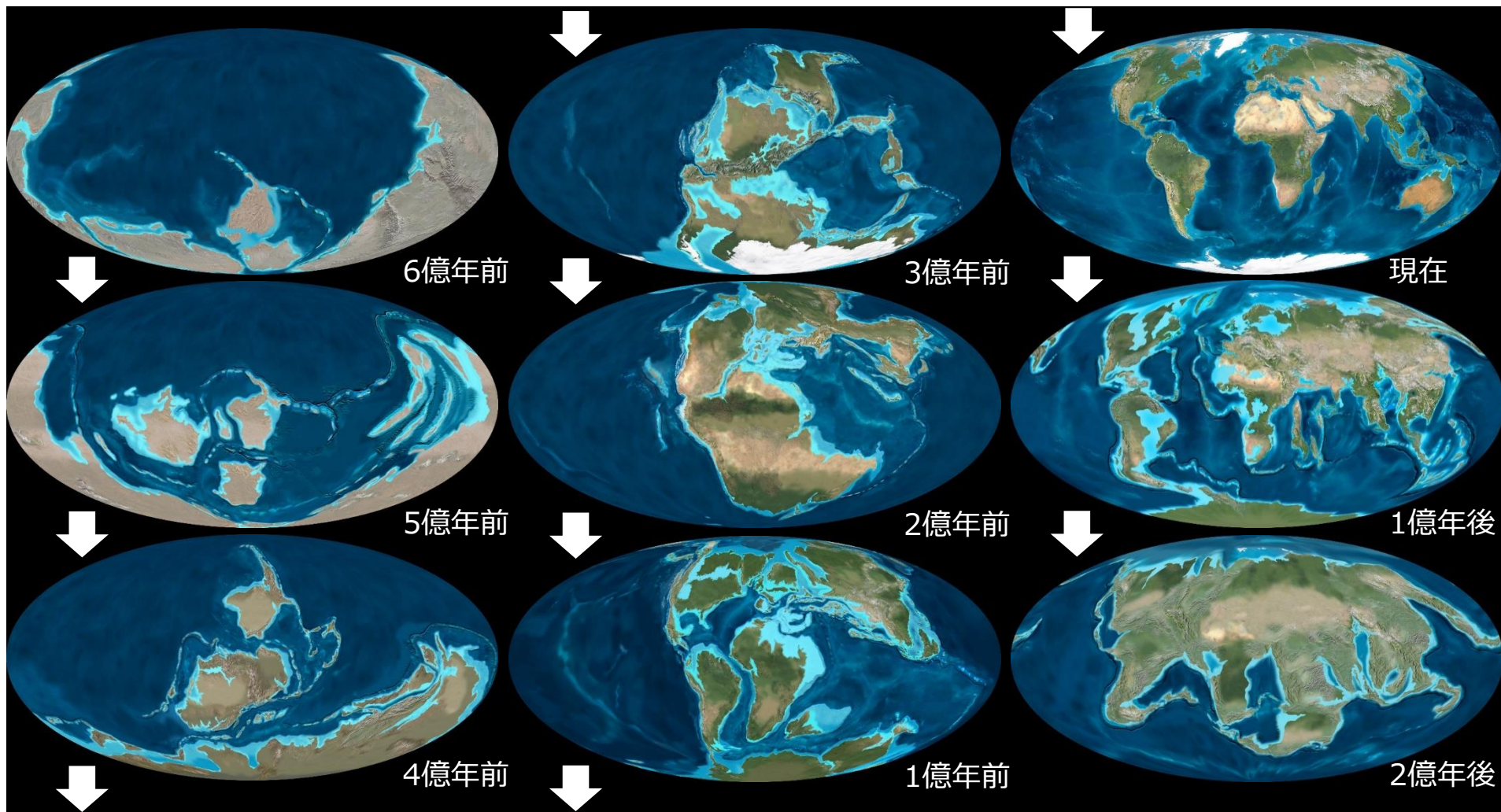
Murphy & Nance (2008)

図4-9 ゴンドワナ大陸(南パンゲア超大陸)の分裂過程



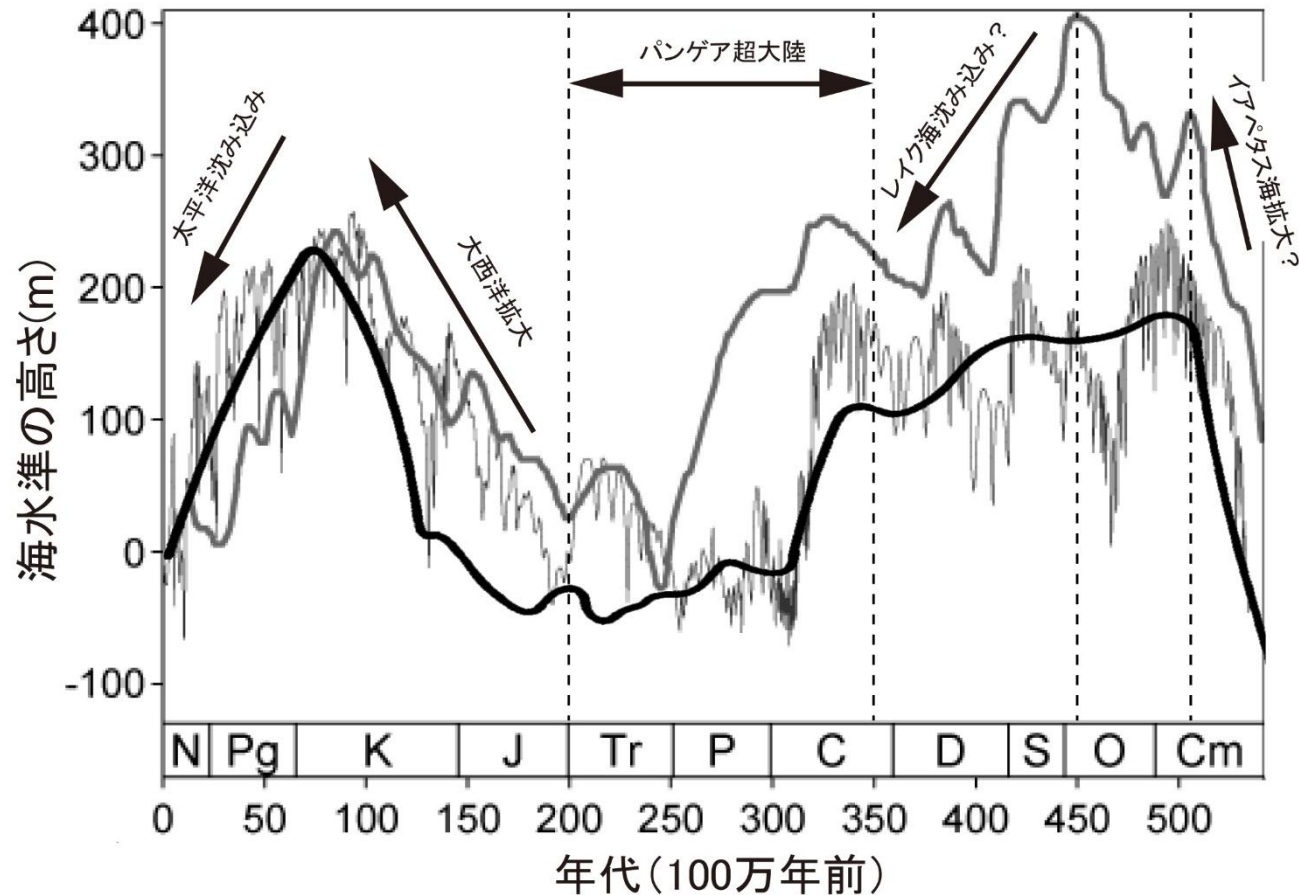
Storey (1995)

図4-S5 ゴンドワナ, パンゲア, 未来の超大陸の形成



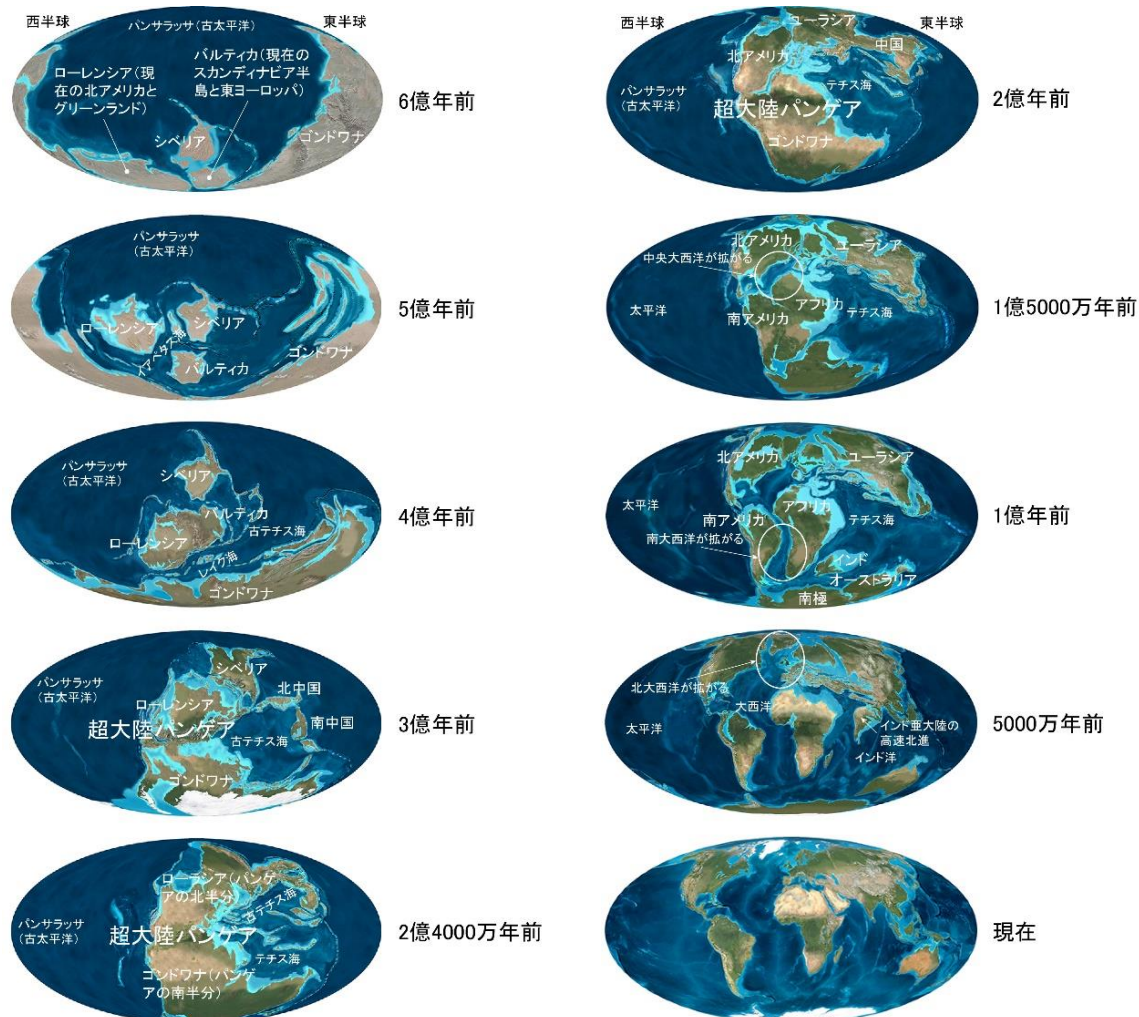
Ronald Blakey 博士提供

図4-10 5億5000万年前から現在までの海水準の変動



Turcotte & Schubert (2002) と Condie (2011) のデータに基づく

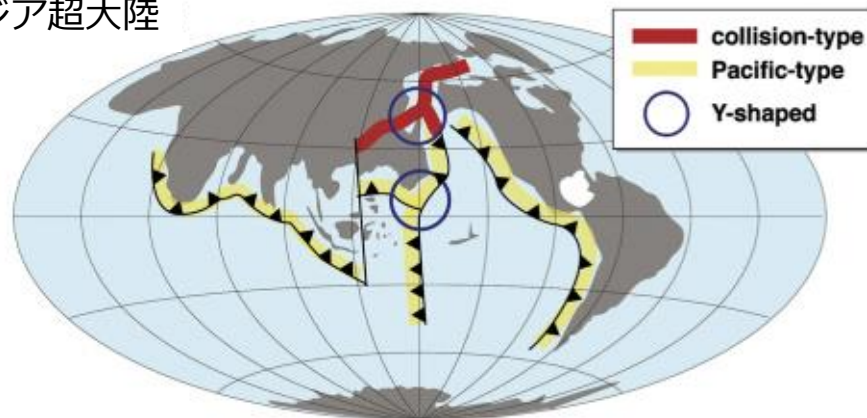
図4-11 6億年前から現在までの大陸移動の様子



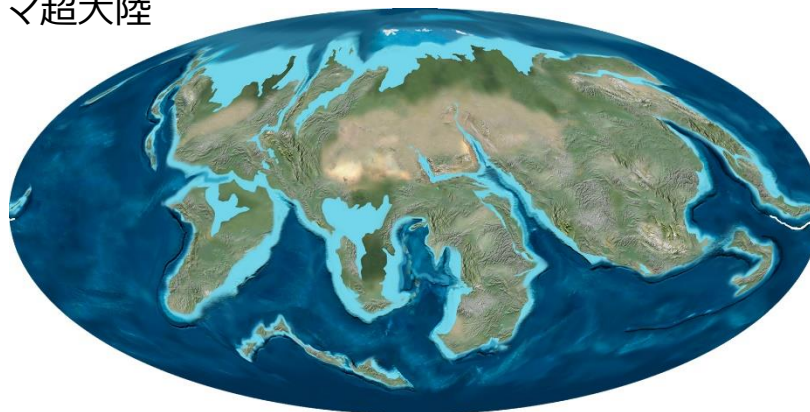
Ronald Blakey 博士提供

図4-12 未来(2億5000万年後)の超大陸の予想図

アメイジア超大陸



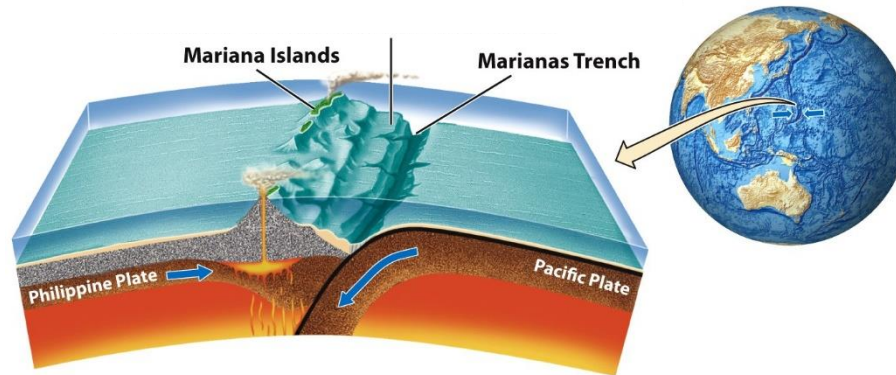
パンゲア・ウルティマ超大陸



(上) Maruyama et al. (2007), (下) Ronald Brakey 博士提供

図5-1 マリアナ海溝とペルー・チリ海溝

海洋プレートの下に沈み込む海洋プレート（マリアナ海溝）



大陸プレートの下に沈み込む海洋プレート（ペルー・チリ海溝）

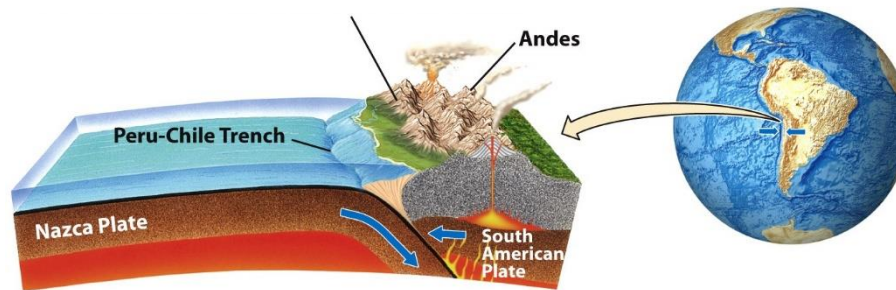
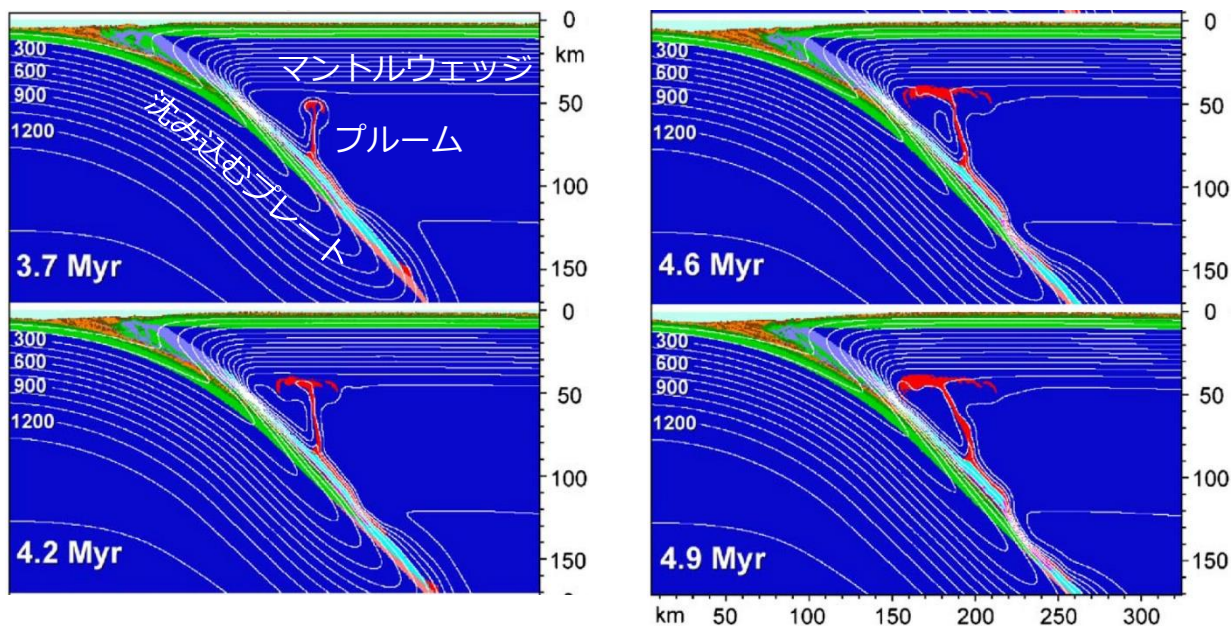
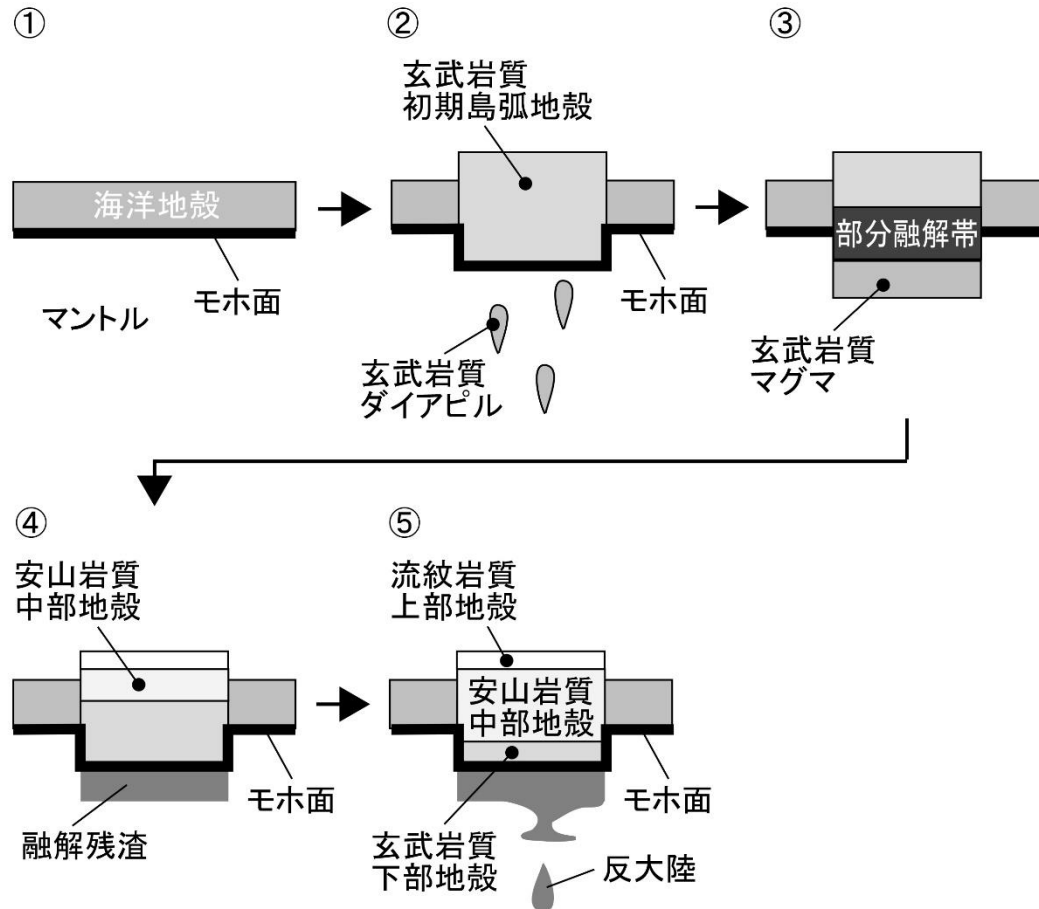


図5-2 沈み込み帯のコンピューター・シミュレーションの一例



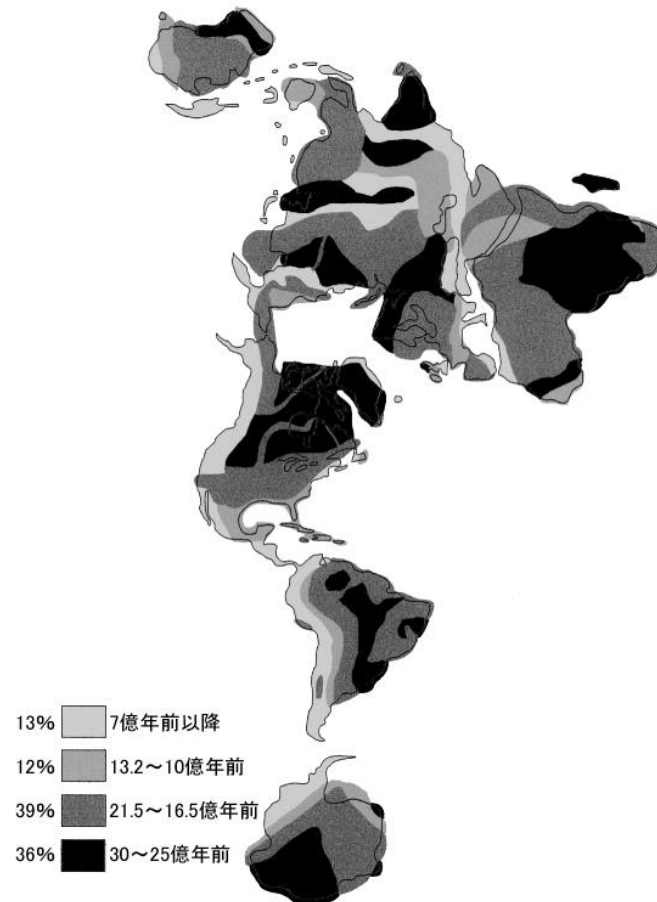
Gerya et al. (2006)

図5-3 大陸地殻形成モデル



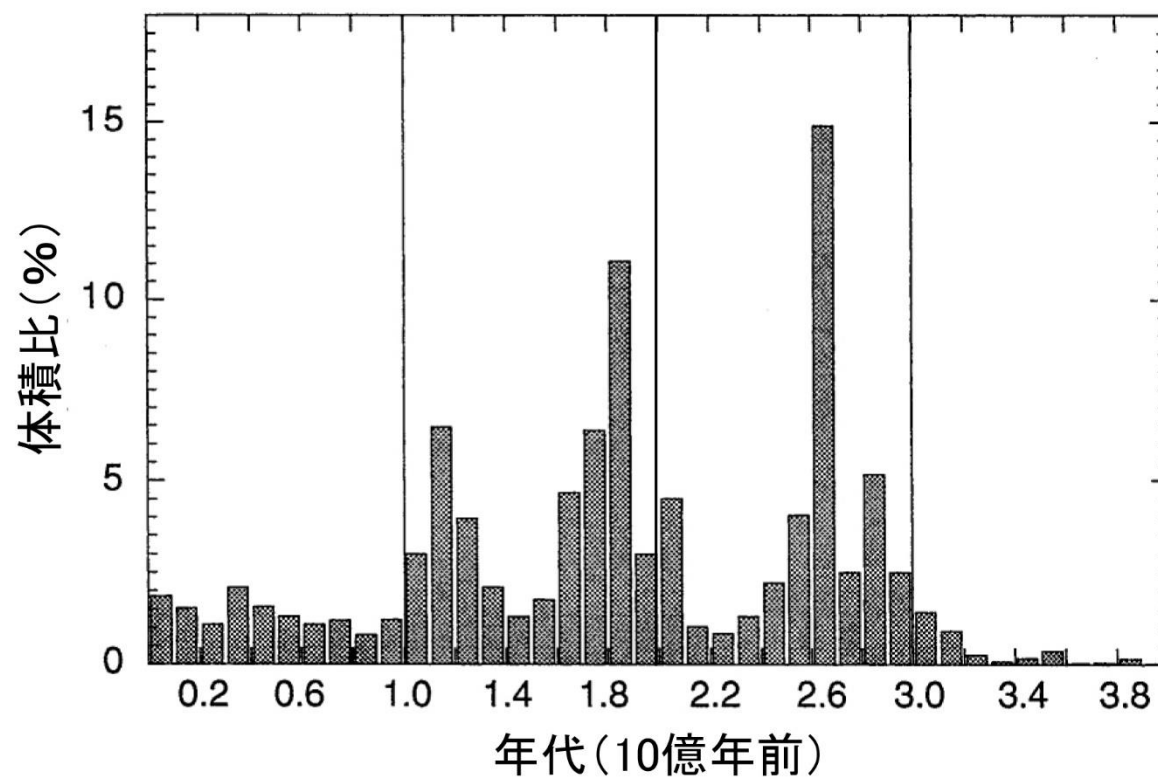
Tatsumi et al. (2008) に基づく

図5-4 各大陸の地殻の年代分布



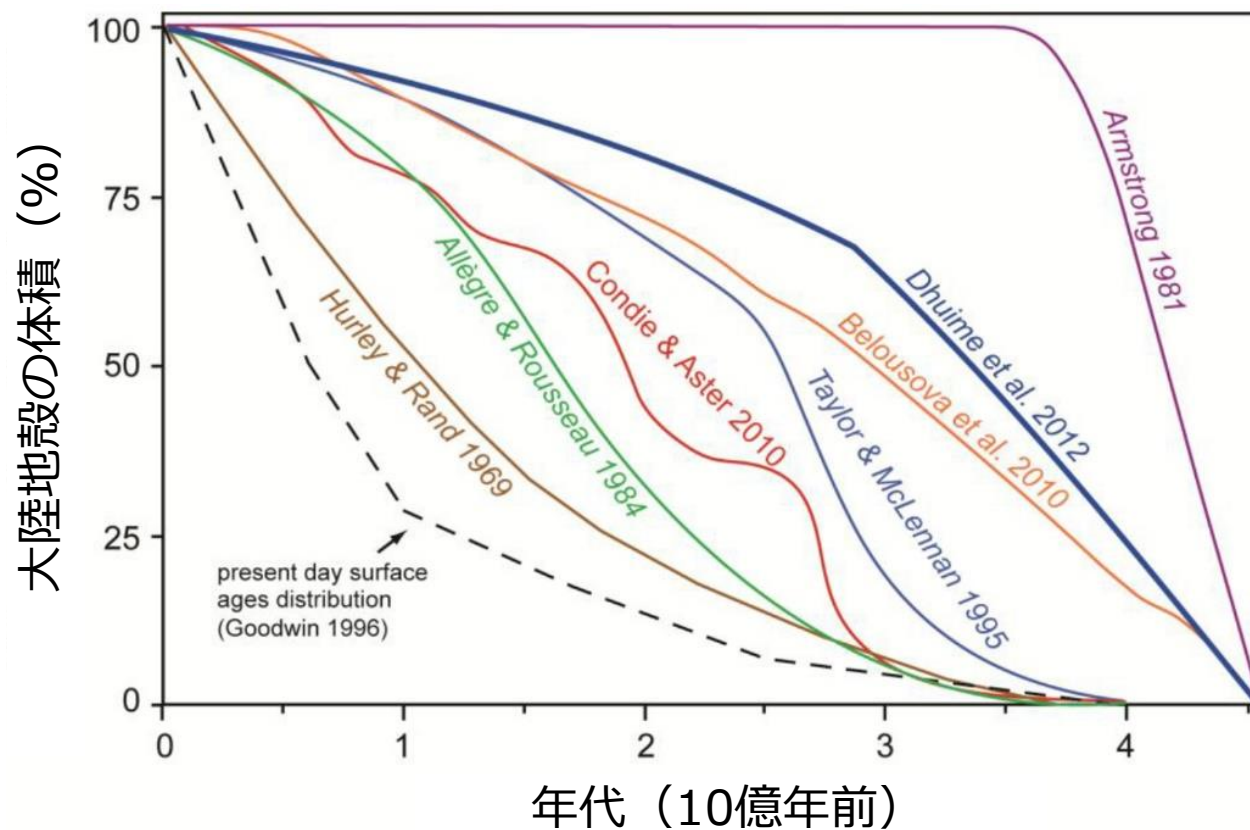
Condie (1998)

図5-5
大陸地殻の生産量



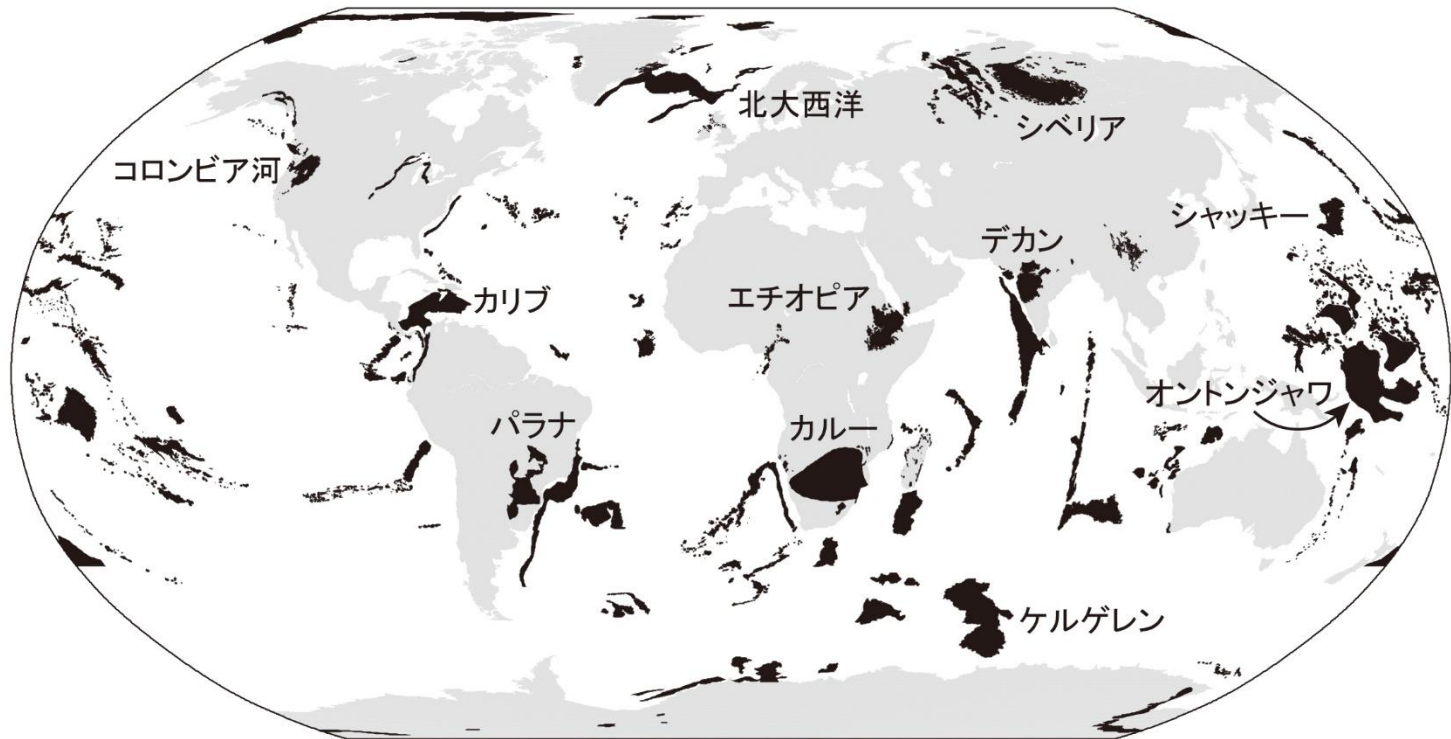
Condie (1998)

図5-S1 大陸地殻生産率のさまざまなモデル



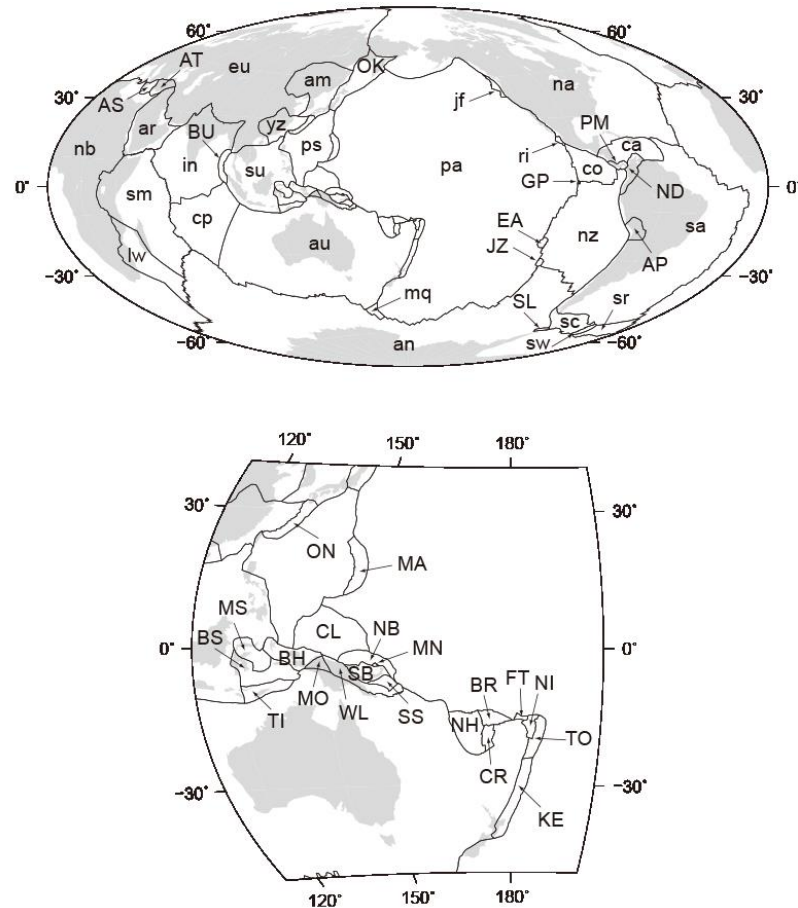
Hawkesworth (2013)

図5-S2 巨大火成岩岩石区(LIPs)の分布



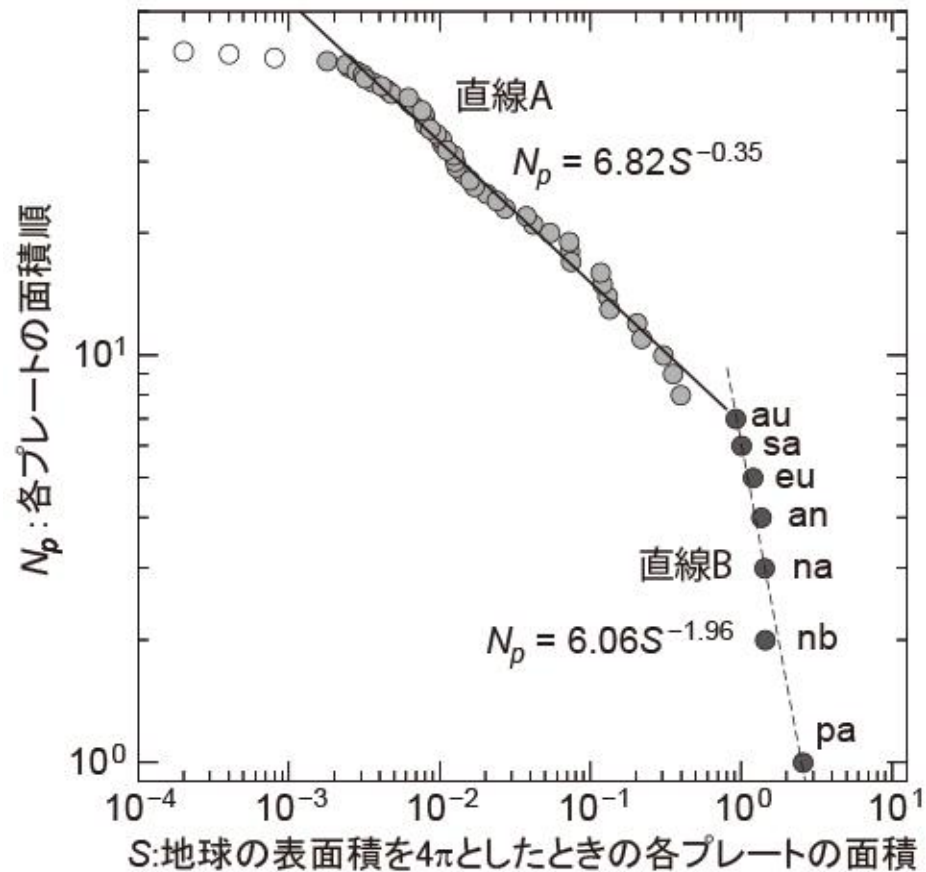
テキサス大学地球物理学研究所のデータから

図5-S3 世界の56枚のプレート



Argus et al. (2011) のデータに基づく

図5-6 プレート面積のべき乗則



Argus et al. (2011) のデータに基づく

図6-1
粘性率の深さ分布

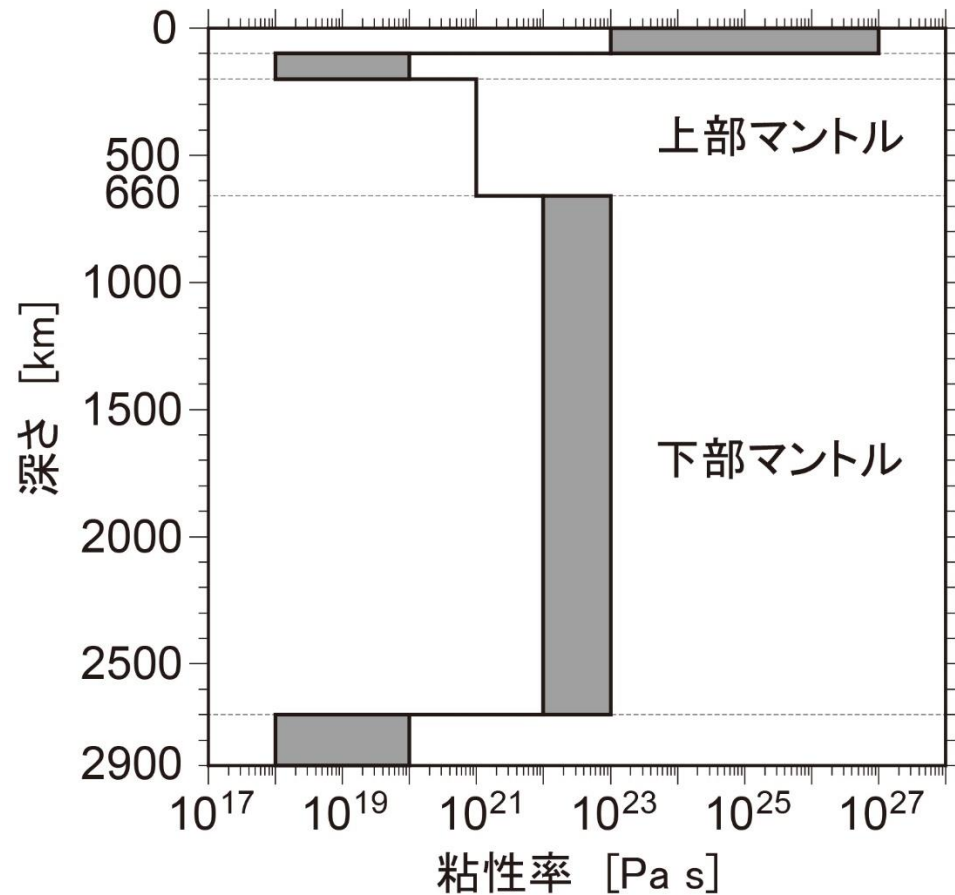
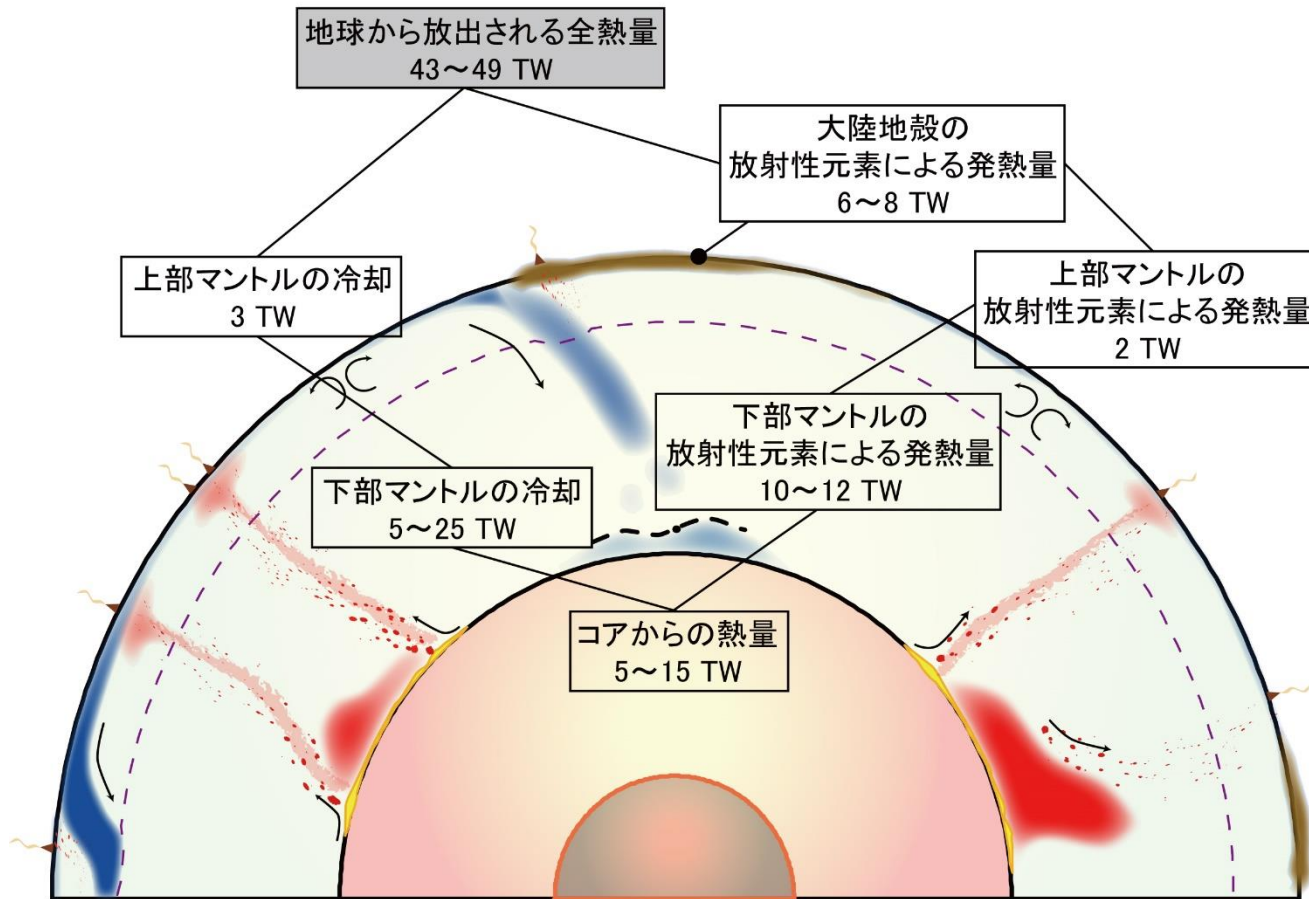
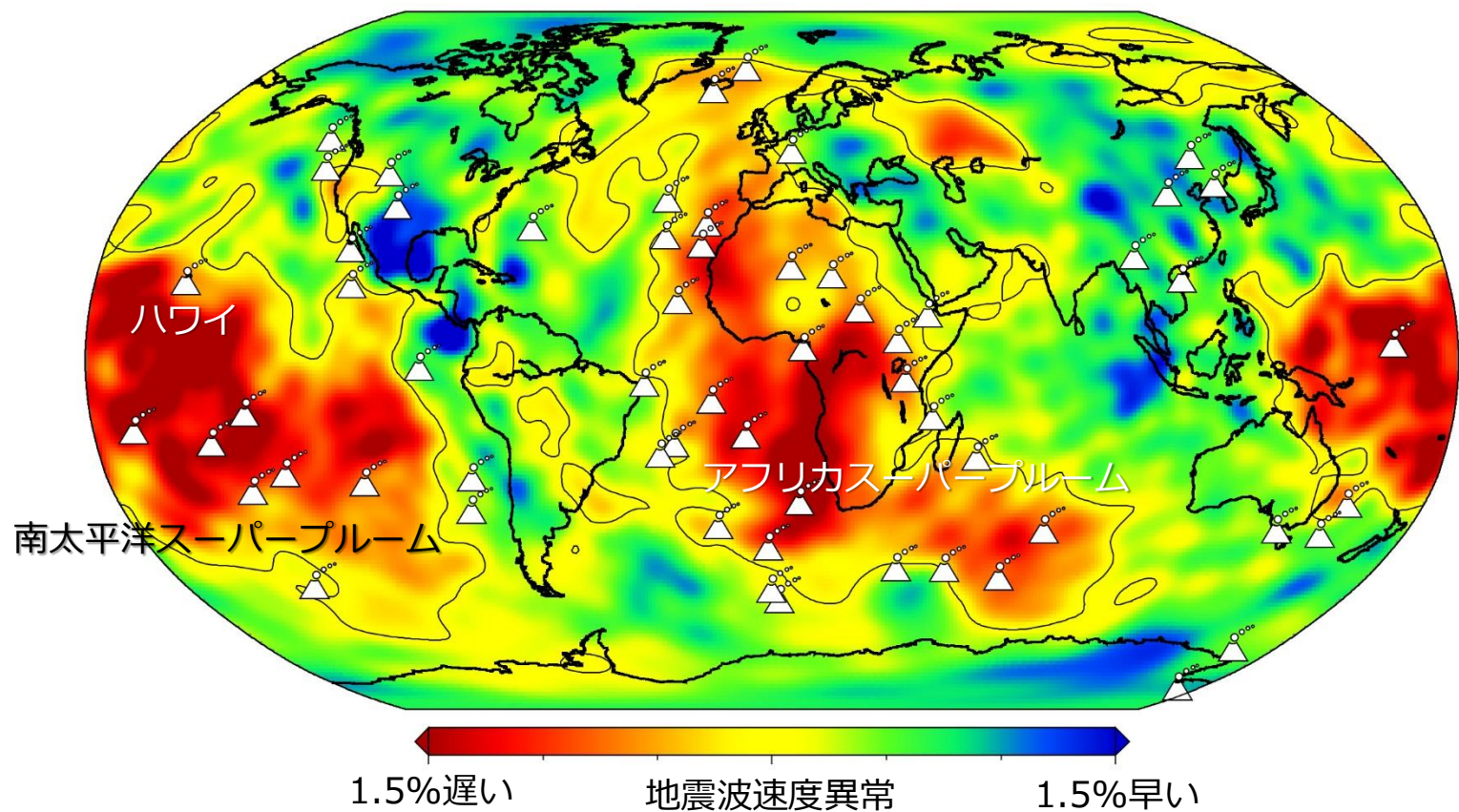


図6-2 マンツルの熱収支



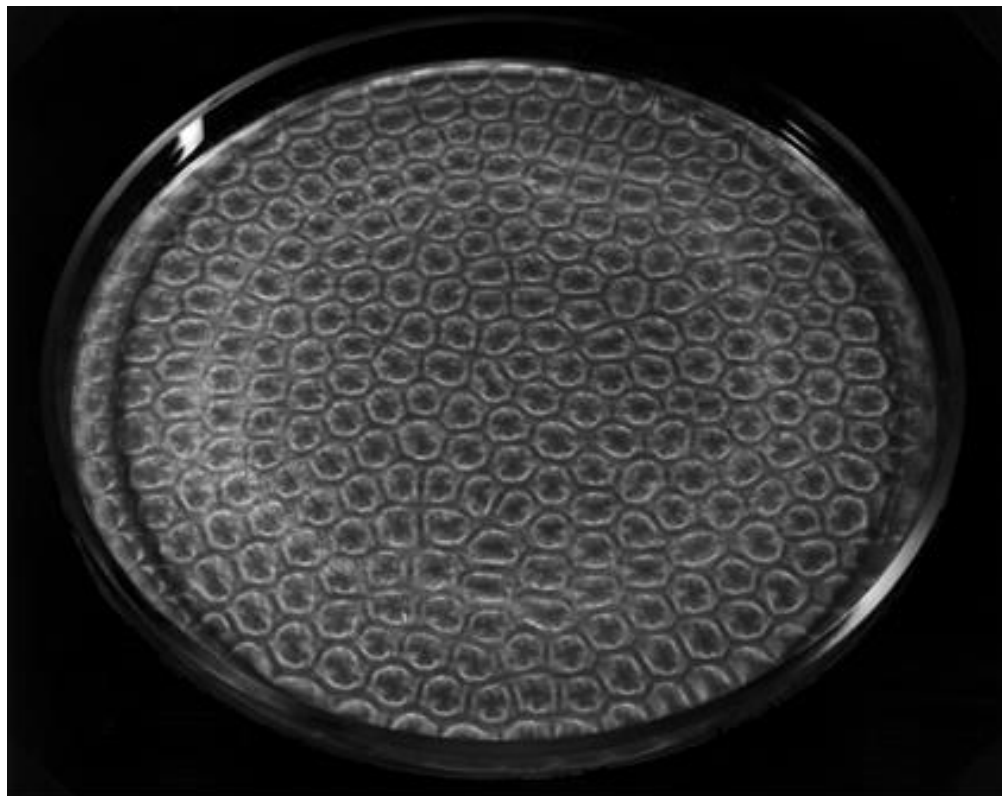
Lay (2008) に基づく

図6-3 ホットスポットの位置と コア・マントル境界上の地震波速度異常



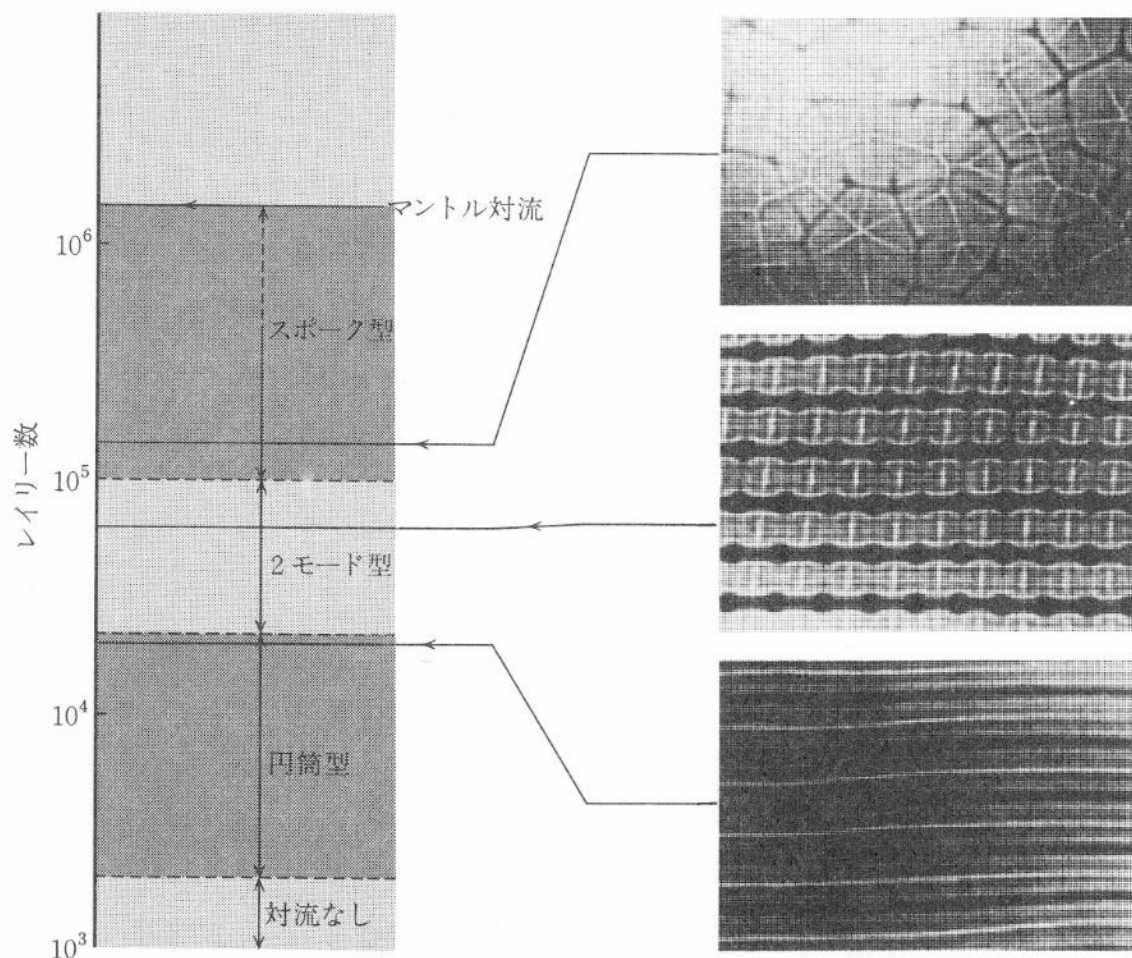
地震波速度異常は Ritsema et al. (2011) のデータに基づく

図6-4 シリコン油のベナール対流



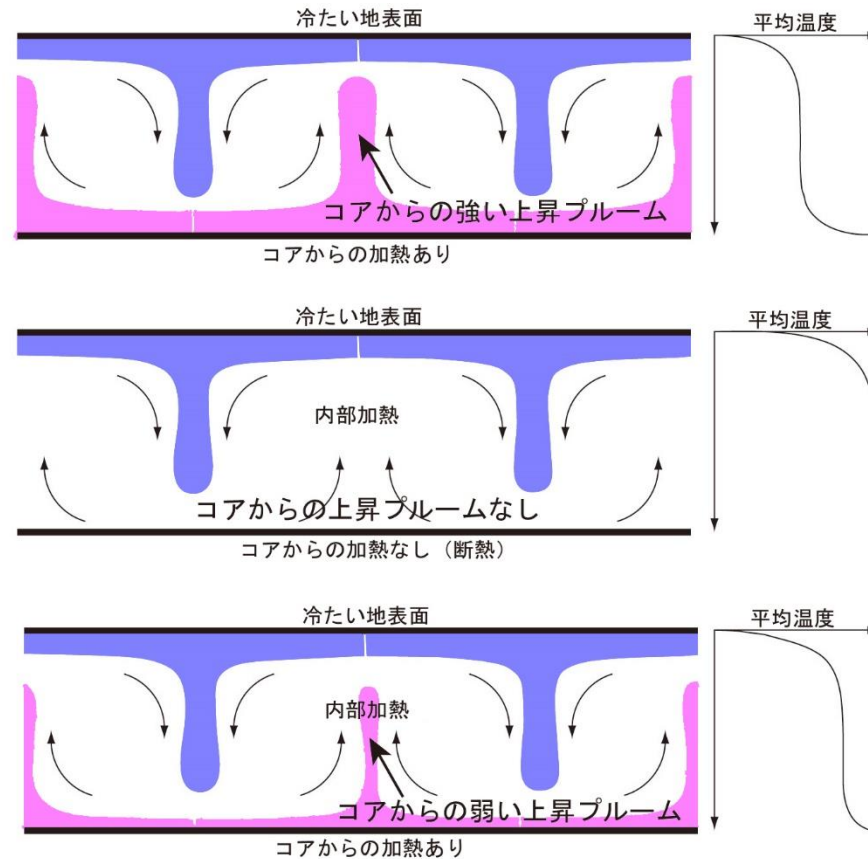
上面が空気に接しているシリコン油($0.5\text{cm}^2/\text{s}$)で温度勾配 5°C (槽の径 30cm , 深さ 0.5cm). (撮影: 三沢信彦)

図6-5 レイリー・ベナール対流のいろいろなパターン



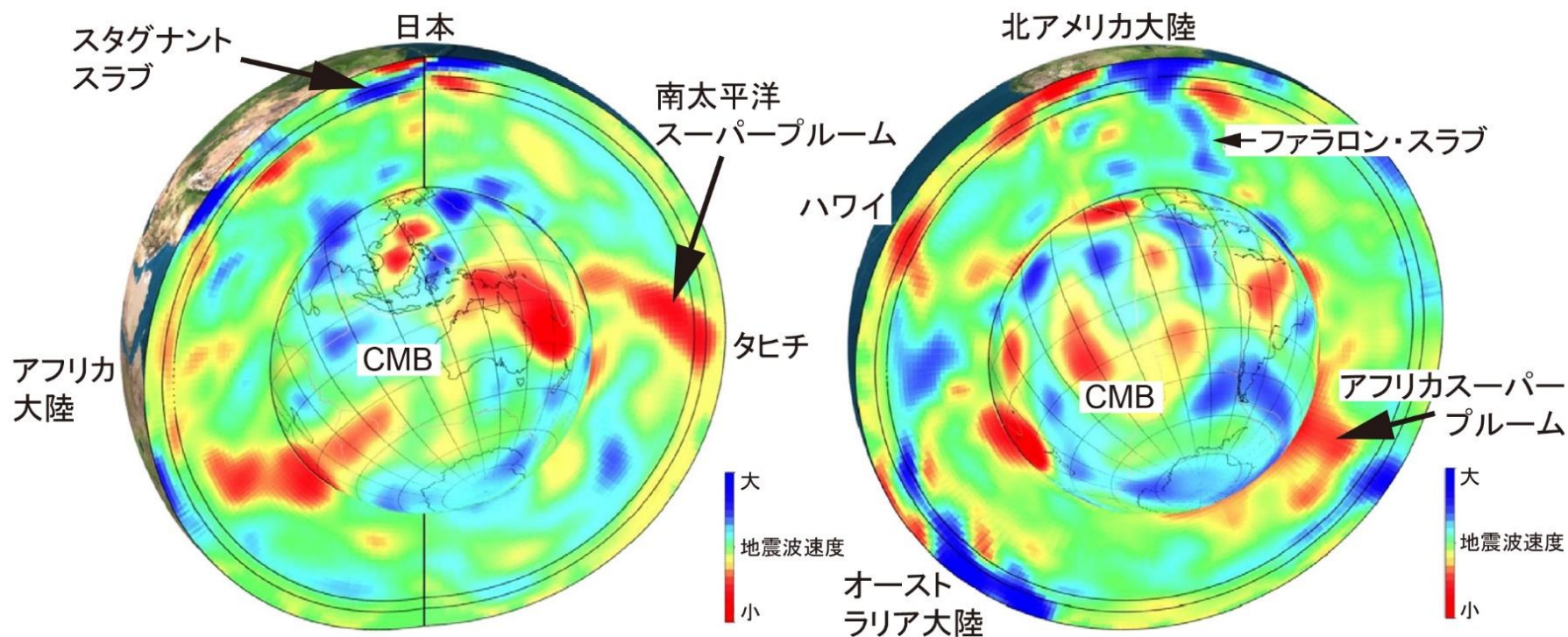
上田 (1989), 元の図は Parsons & Richter (1981)

図6-6 マントル対流の3種類のパターン



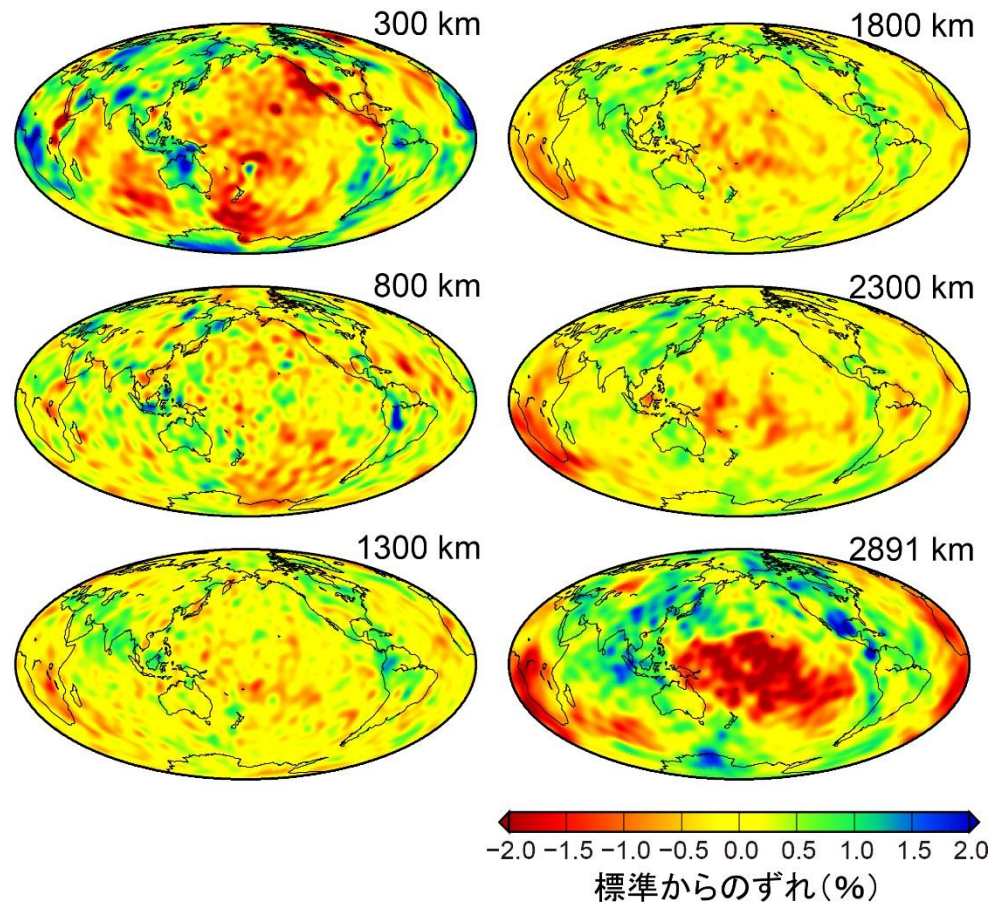
Kearey et al. (2009) に基づく

図6-7 地震波トモグラフィーによる マンツルの地震波速度異常構造



Zhao et al. (2013)

図6-8 地震波トモグラフィによる 各深さの地震波速度異常



Ritsema et al. (2011) のデータに基づく

図6-9 スーパーブルームとブルーム・クラスタの概念図

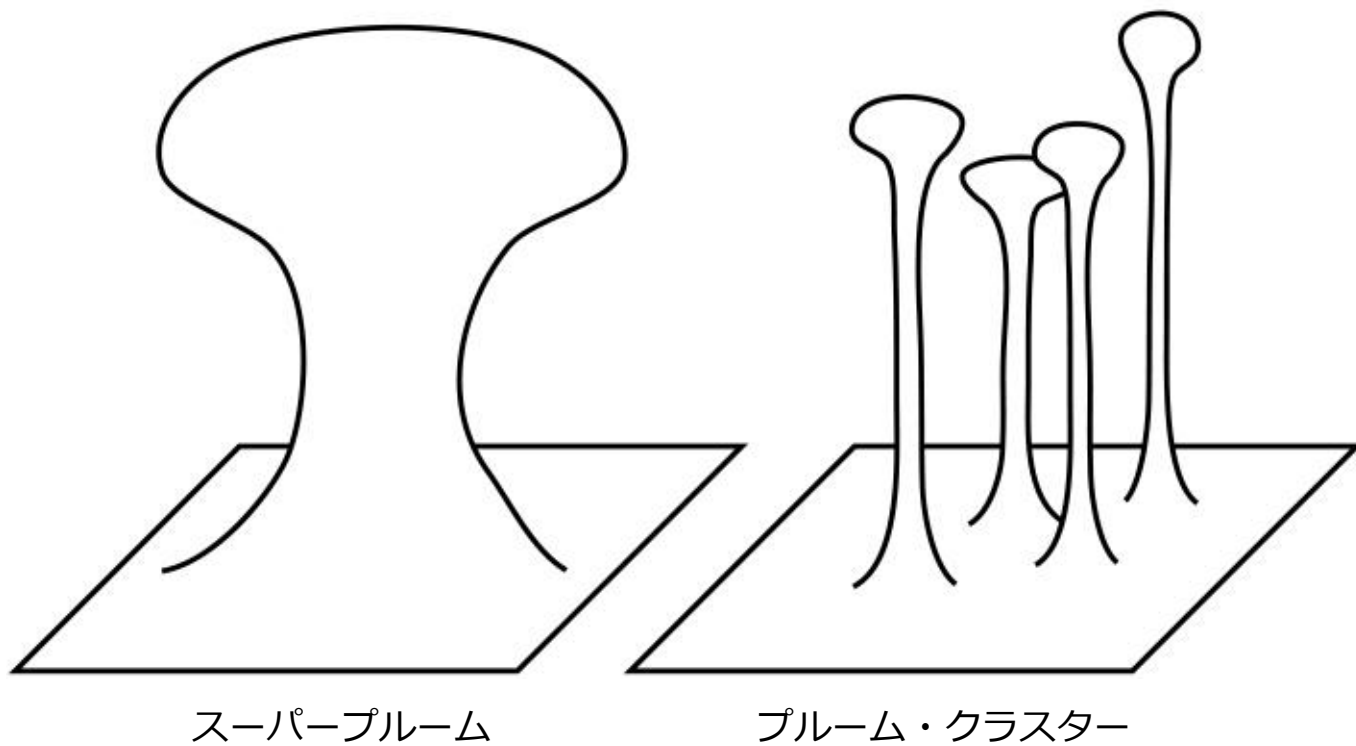


図6-S1 負のクラペイロン勾配とマンテル上昇・下降流の関係

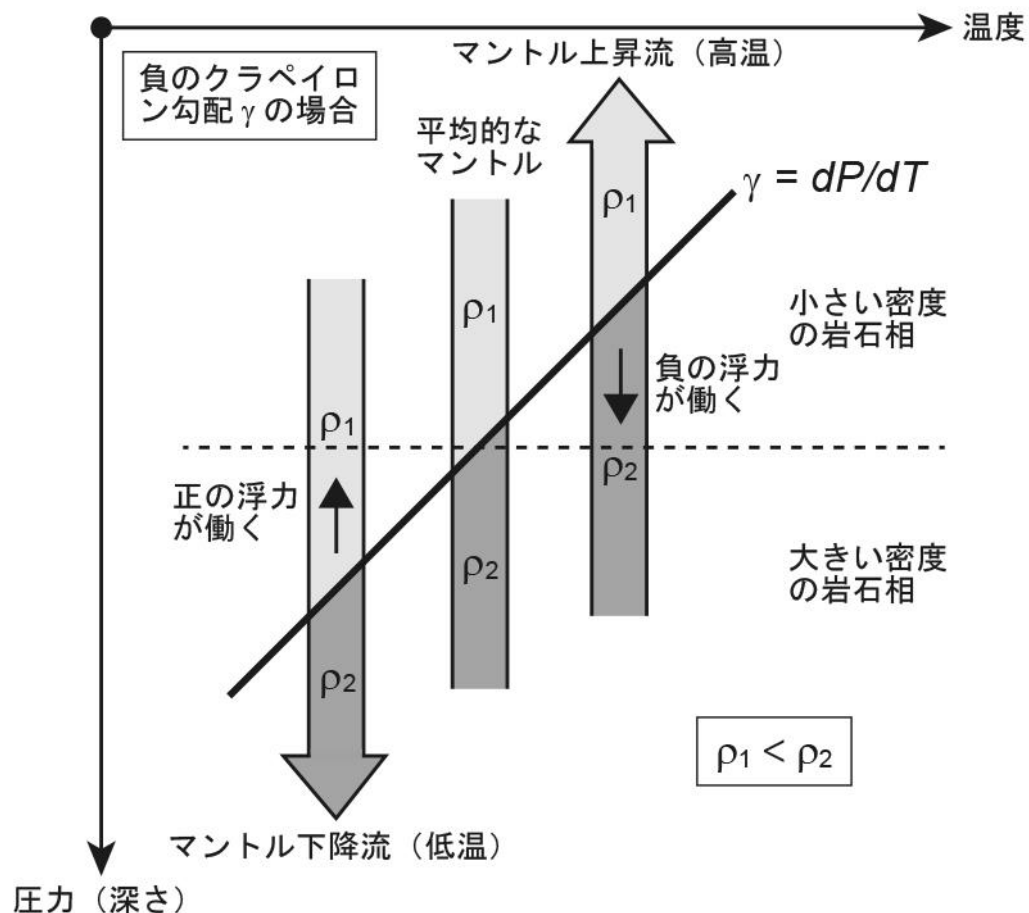


図6-10 660km相境界での 沈み込むスラブと上昇するプルームの様子

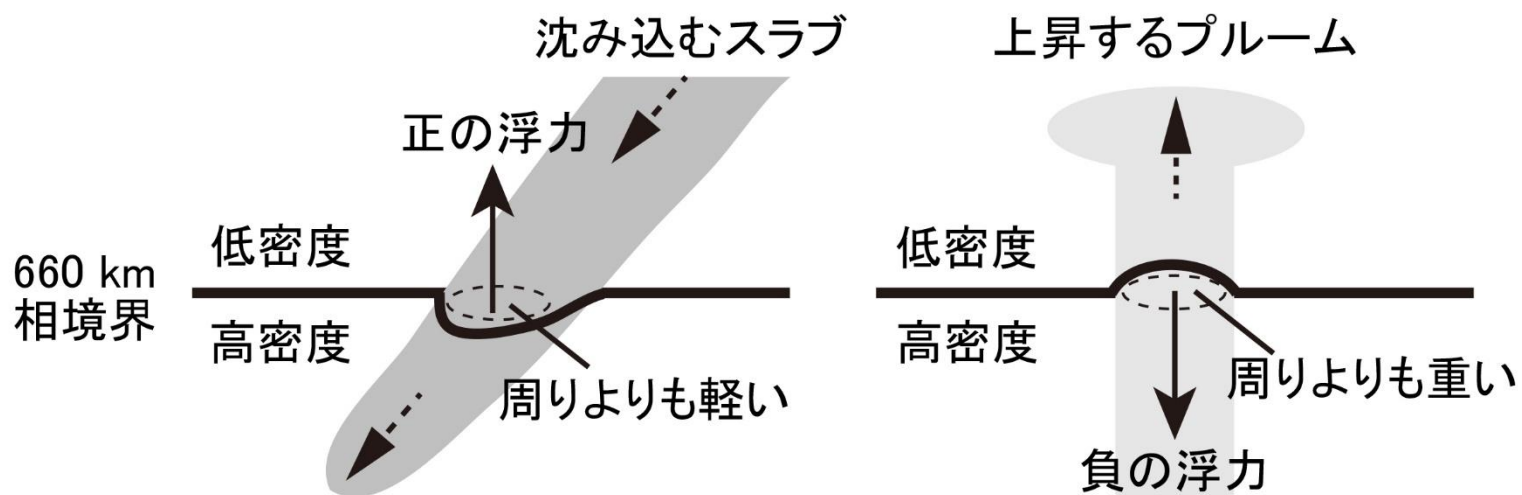
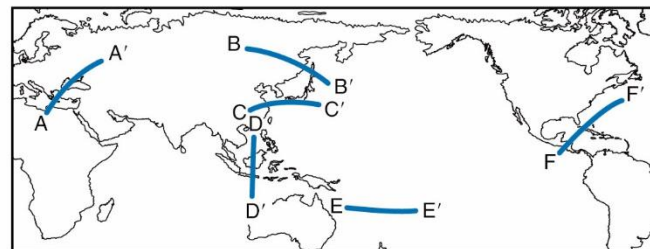
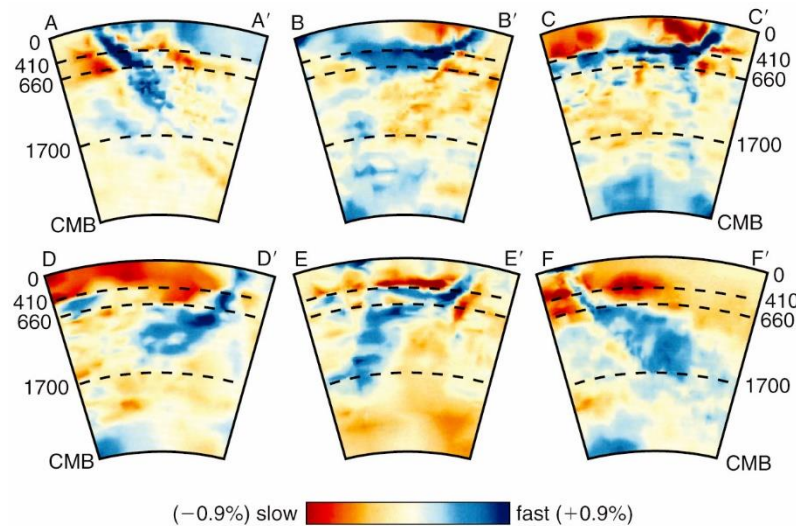


図6-11 地震波トモグラフィーによる 各地域の沈み込むスラブの形態



※最新の研究は補足資料A
(Fukao & Obayashi, 2013)
を参照

Kearey et al. (2009), 元の図は Kárason & van der Hilst (2000)

図6-12 コンピューター・シミュレーションで再現された スタグナントスラブ

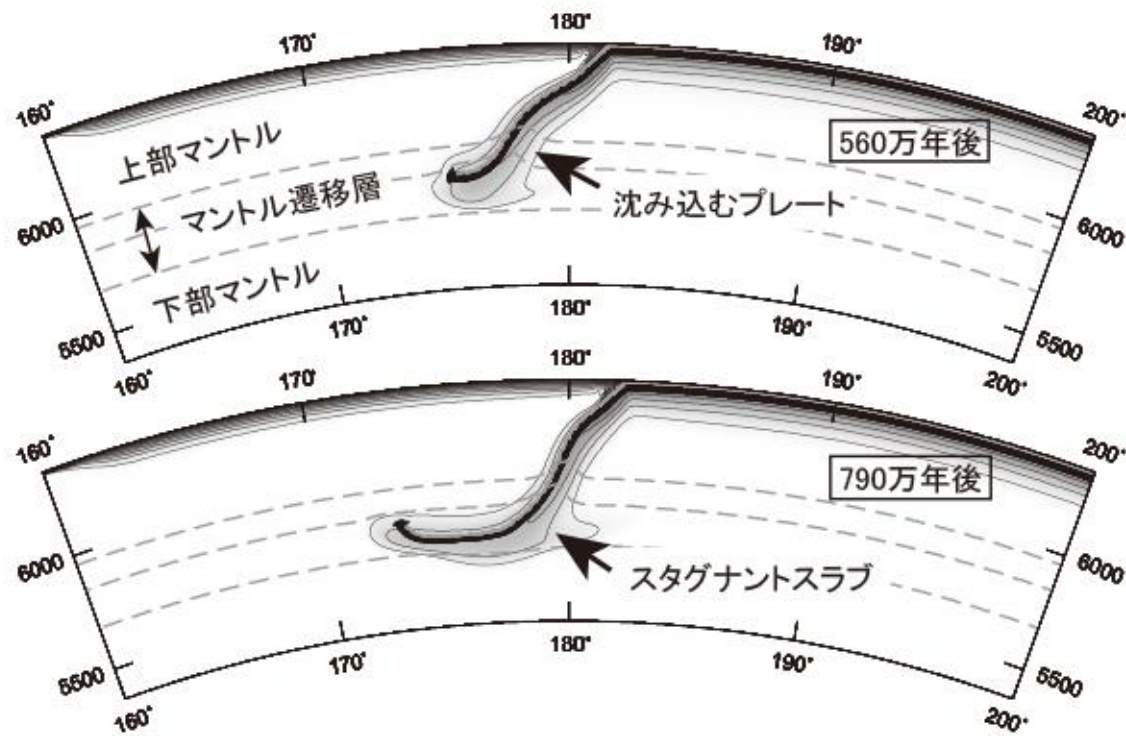
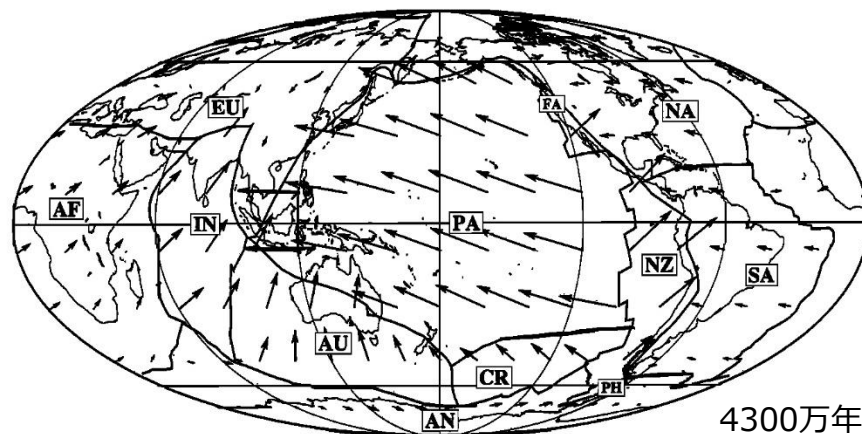
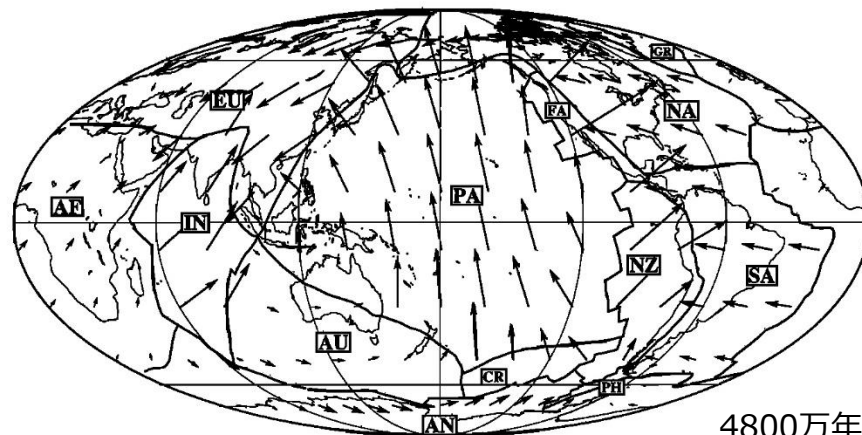


図6-13 4300万年前の太平洋プレートの運動方向の急変



4300万年前から2500万年前



4800万年前から4300万年前

Lithgow-Bertelloni & Richards (1998)

図6-14 ハワイ諸島-天皇海山列

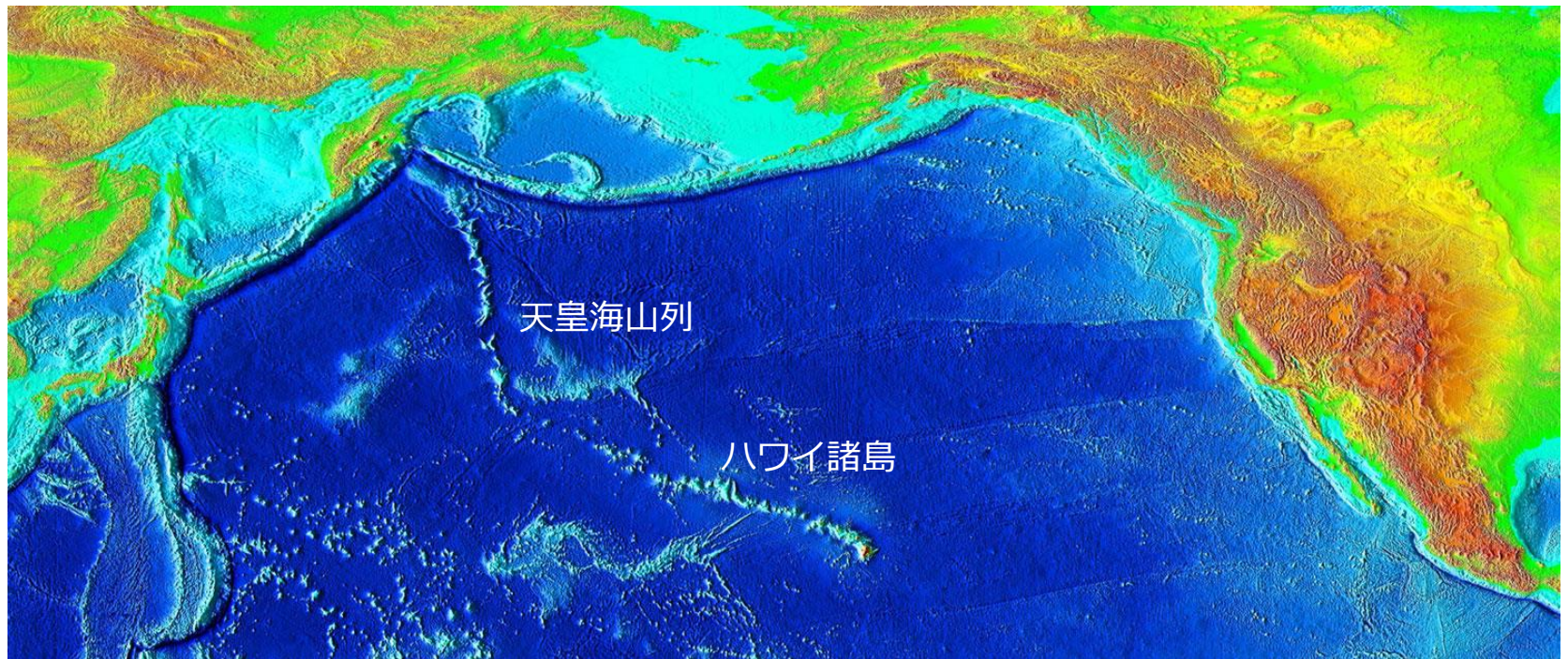
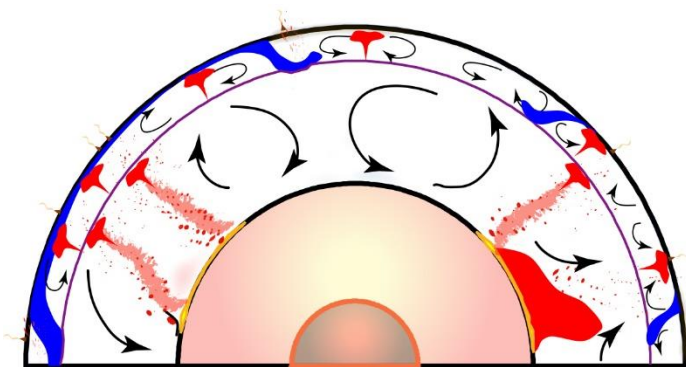
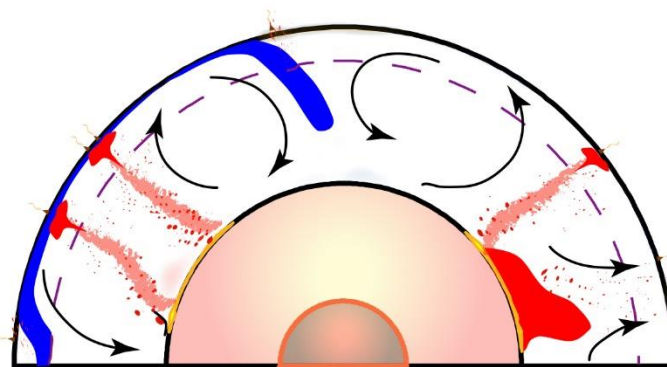


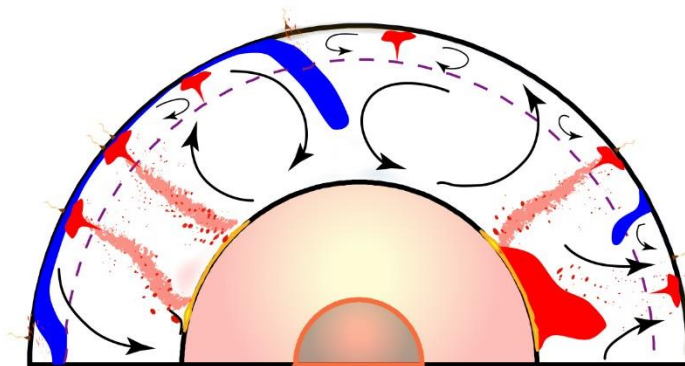
図6-15 二層マントル対流, 一層マントル対流, 一層・二層混合マントル対流



二層マントル対流

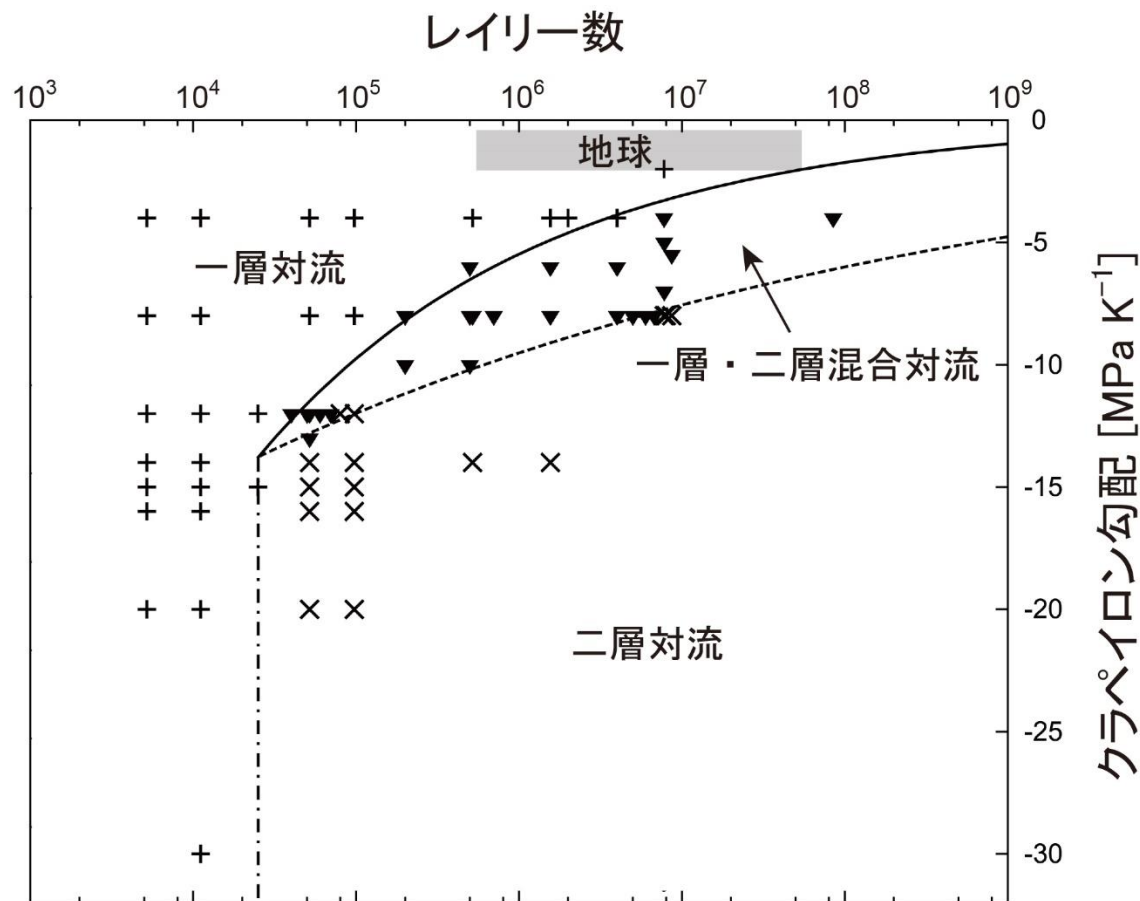


一層マントル対流



一層・二層混合マントル対流

図6-16 レイリー数と660km相境界のクラペイロン勾配の違いによるマントル対流パターンの分類



Wolstencroft & Davies (2011)

図6-17 地球磁気圏の構造模式図

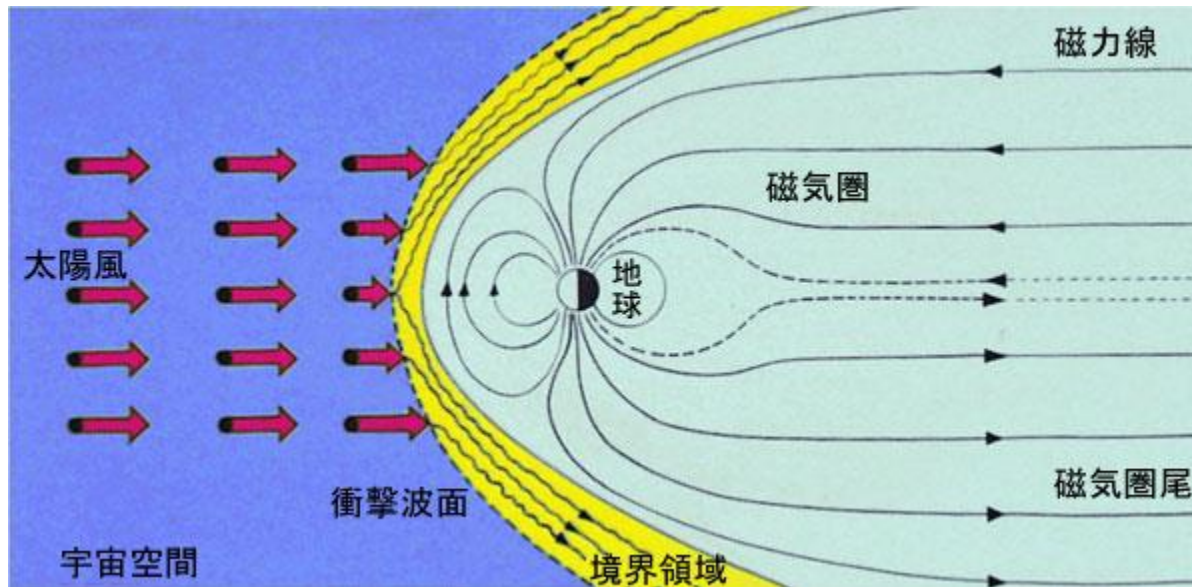


圖6-18
双極子磁場

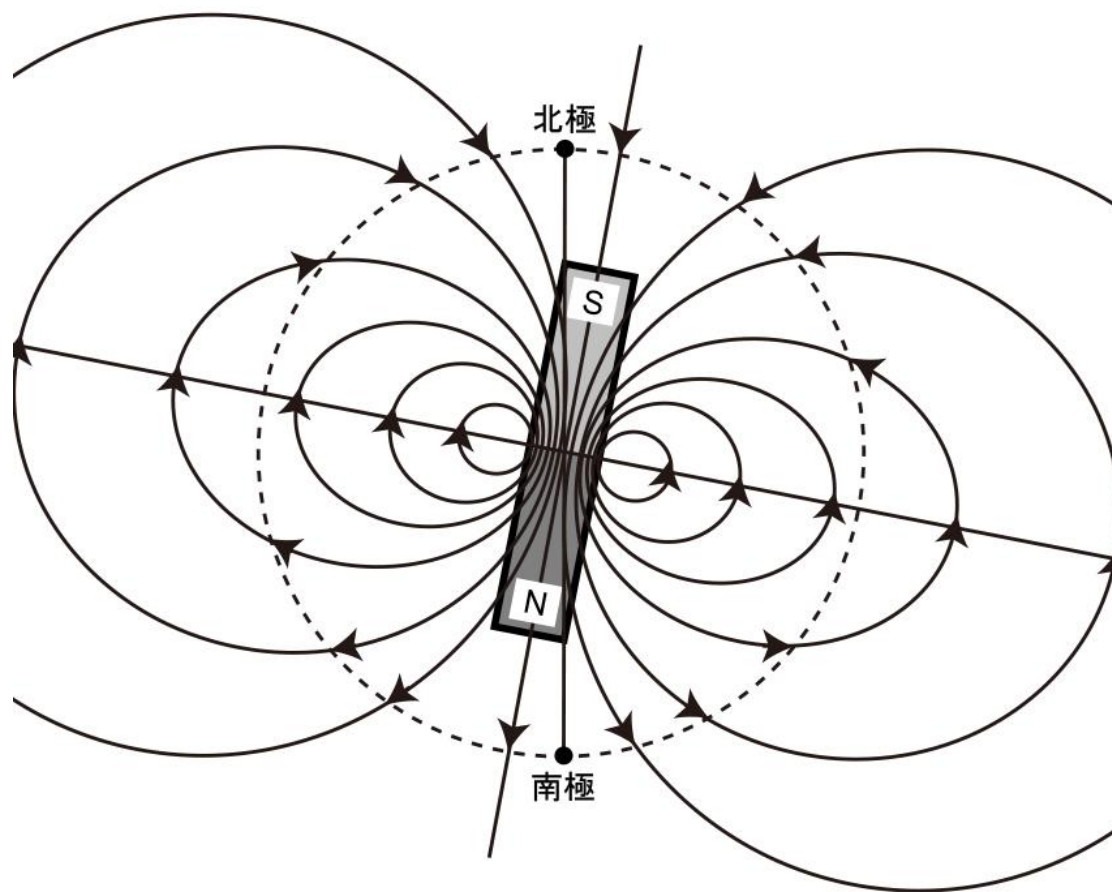
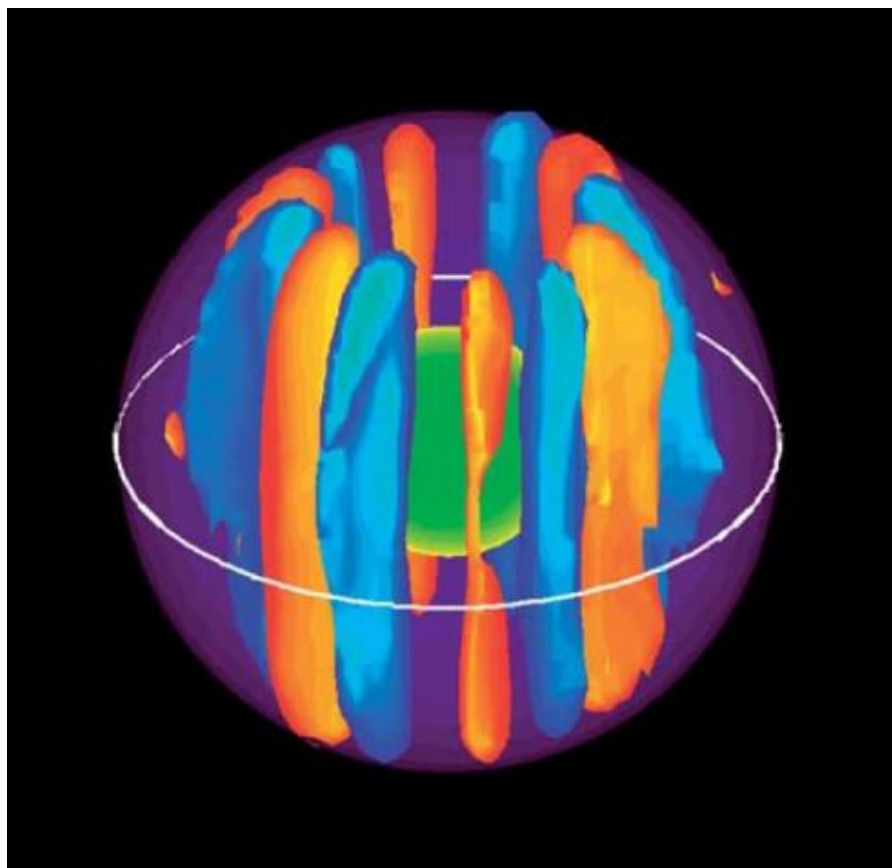


図6-S2

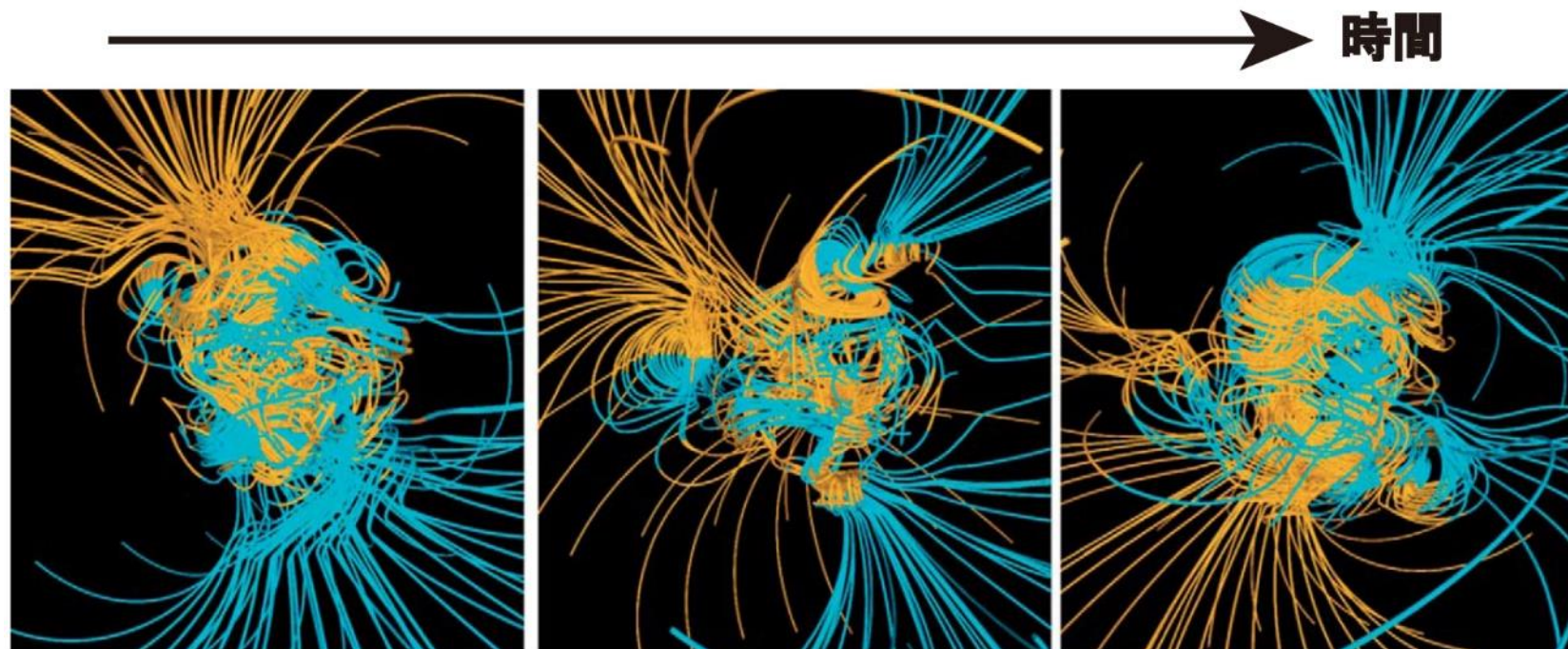
地球ダイナモのコンピューター・シミュレーションで 再現されたテイラー柱型対流



赤：正の渦度
青：負の渦度

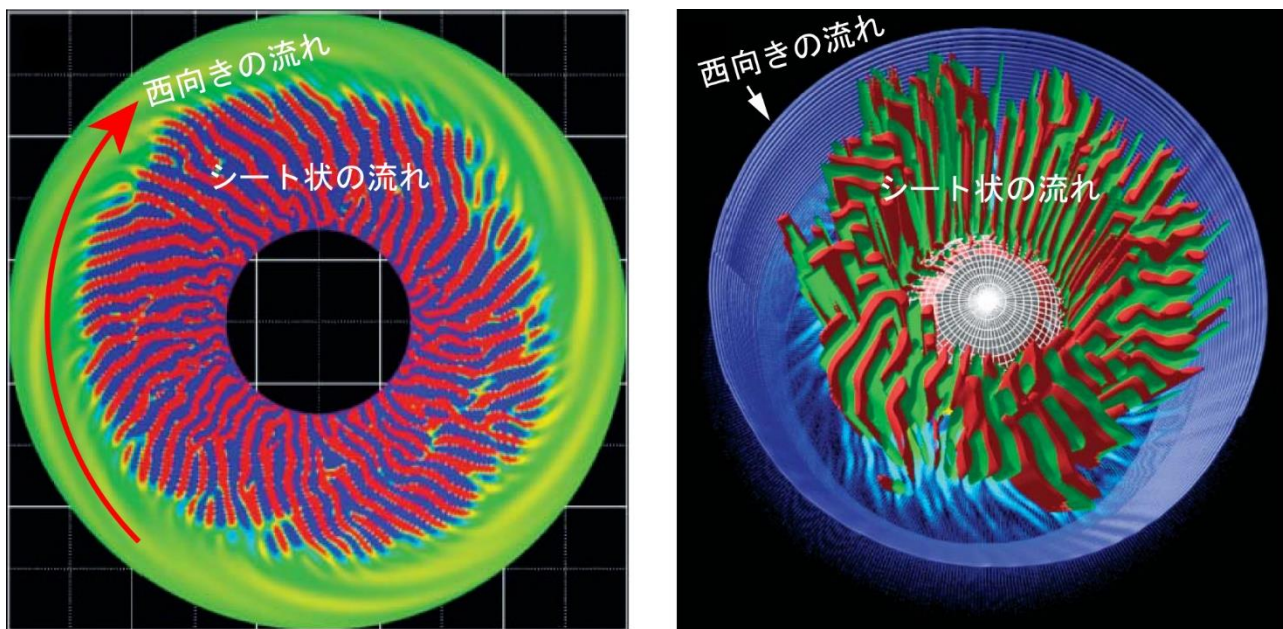
Olson (2007)

図6-19 地球ダイナモのコンピューター・シミュレーションで 再現された双極子磁場の逆転



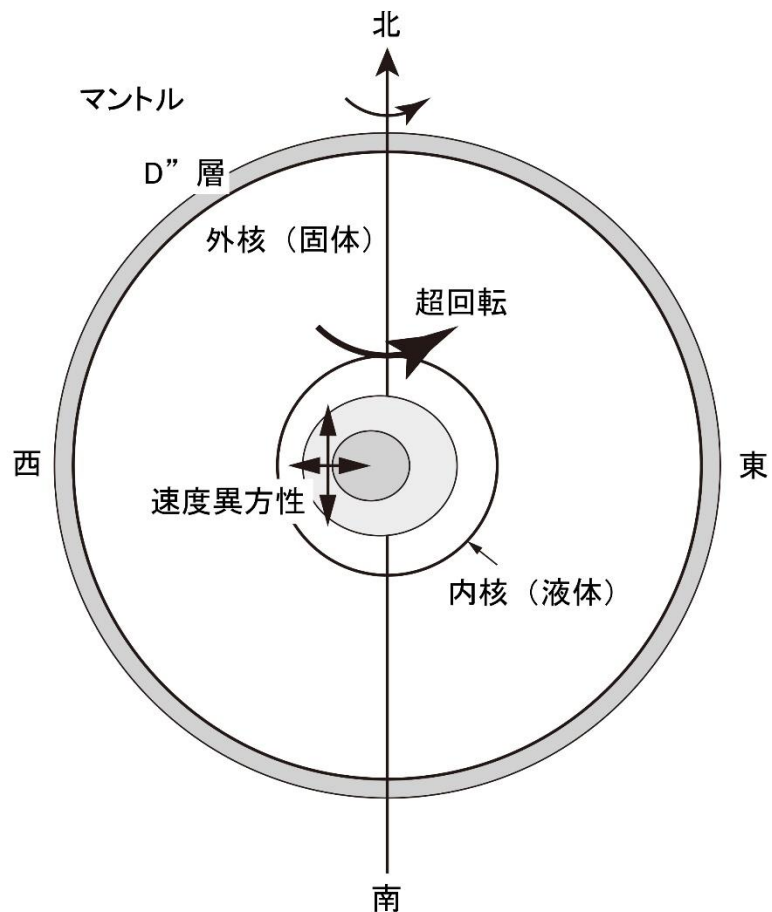
黄：地球から出て行く磁場
青：地球に入ってくる磁場

図6-20 地球ダイナモのコンピューター・シミュレーションで 再現された外核内の二層対流構造



Miyagoshi et al. (2010)

図6-21 内核の構造と性質



Souriau (2007) に基づく

図7-1 時間と深さに対する岩石学的・ 地球物理学的データ量の多さを示す模式図

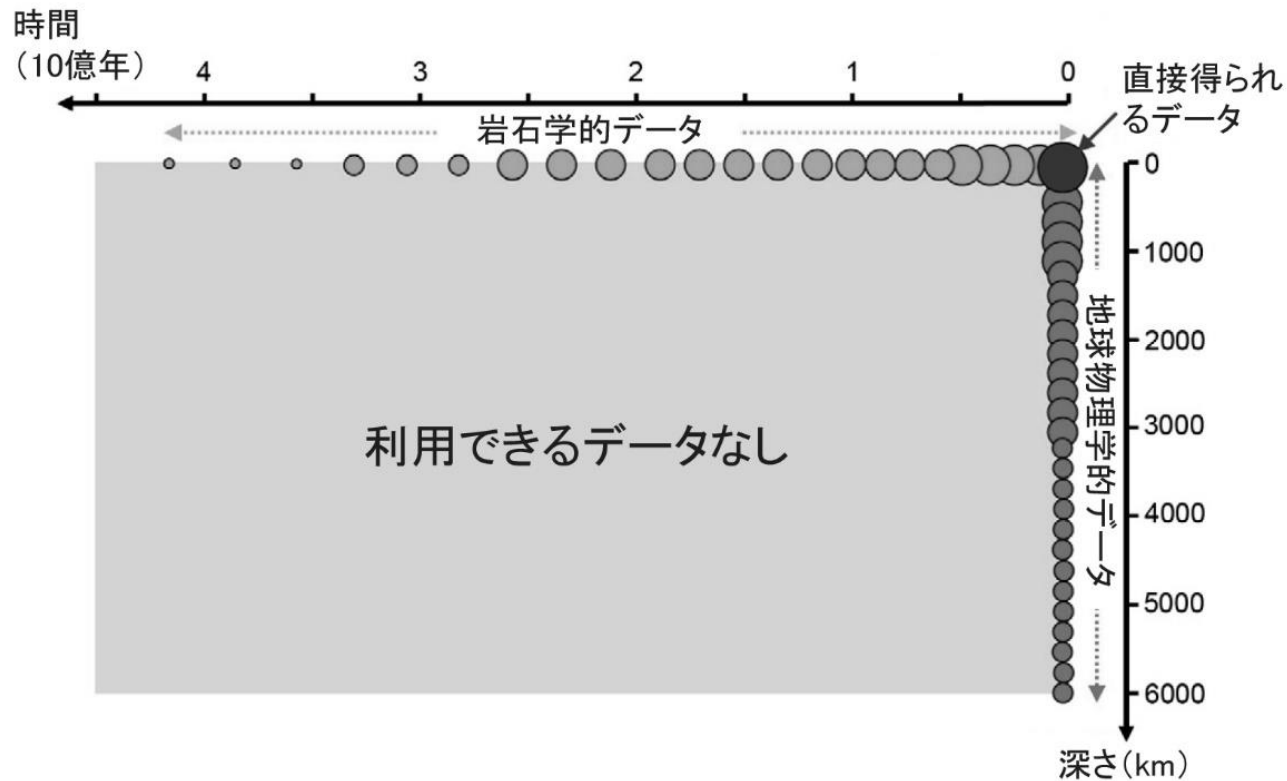
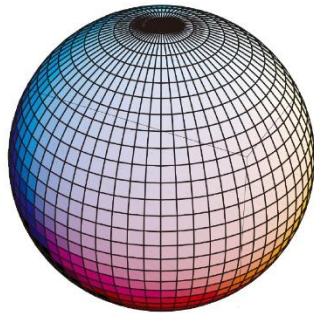
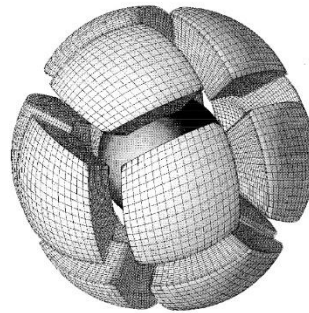


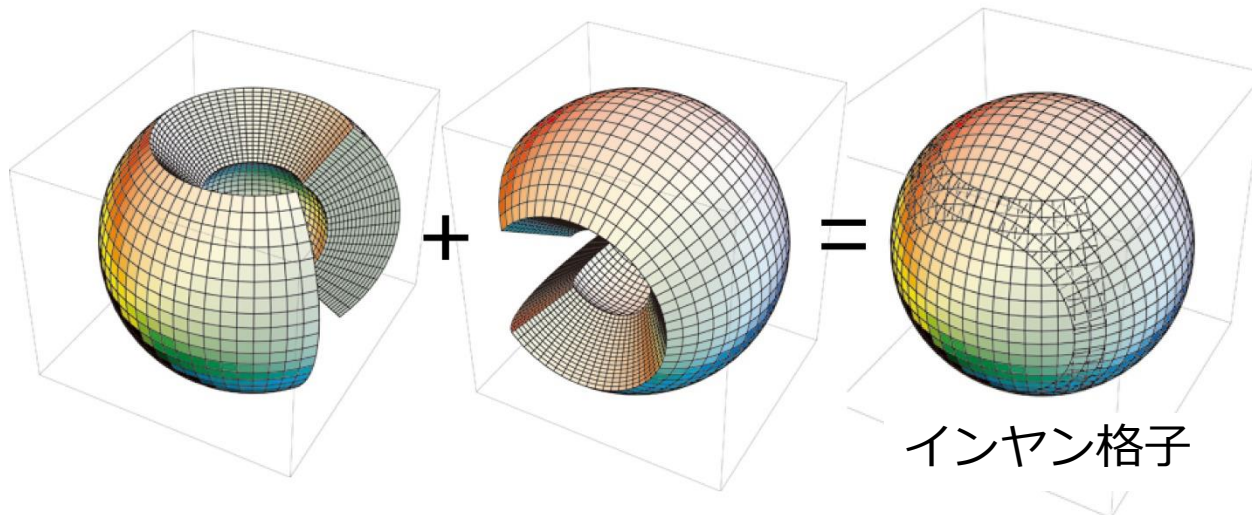
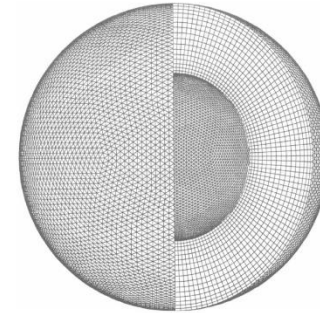
図7-2 マントル対流のシミュレーションで使用する 計算格子の例



極座標格子



有限要素法格子



(上段中央) Zhong et al. (2000), (上段右) Baumgardner (1993),
(下列) Yoshida & Kageyama (2004)

図7-S1 各格子における物理量の配置

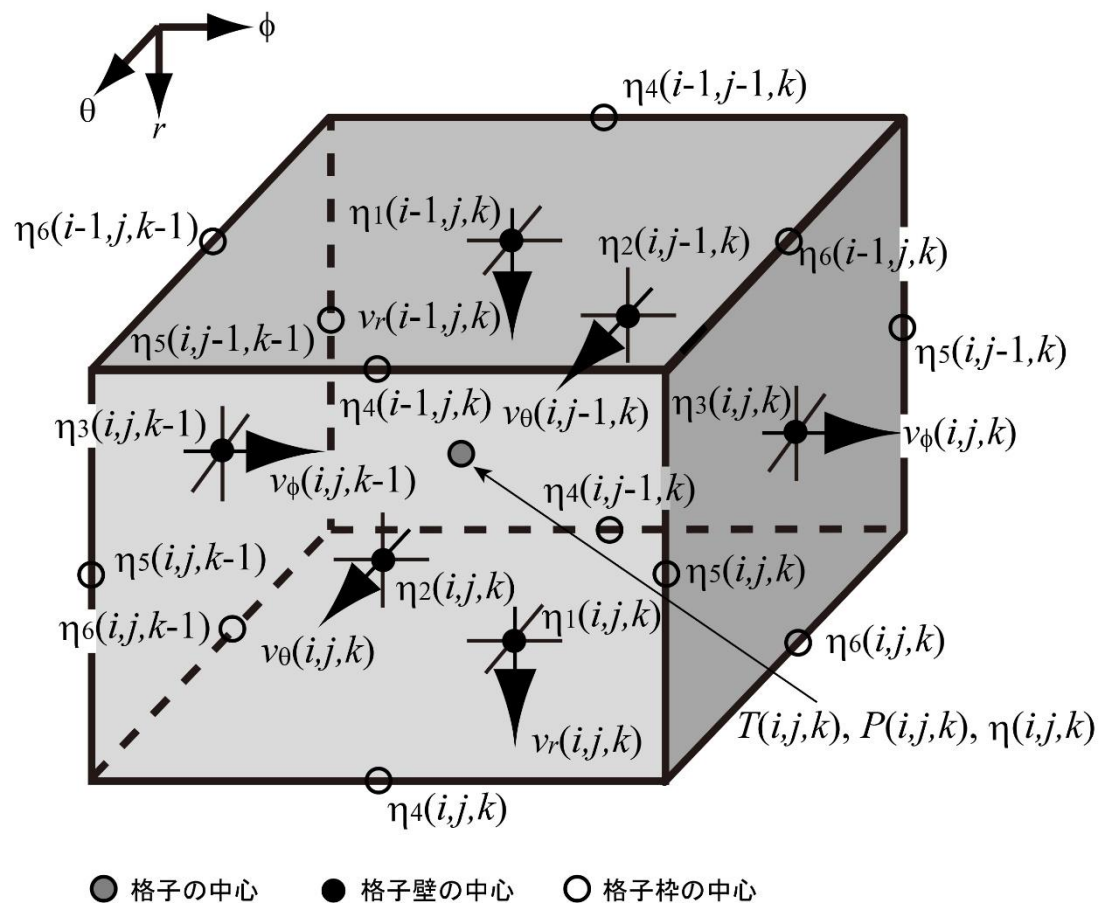
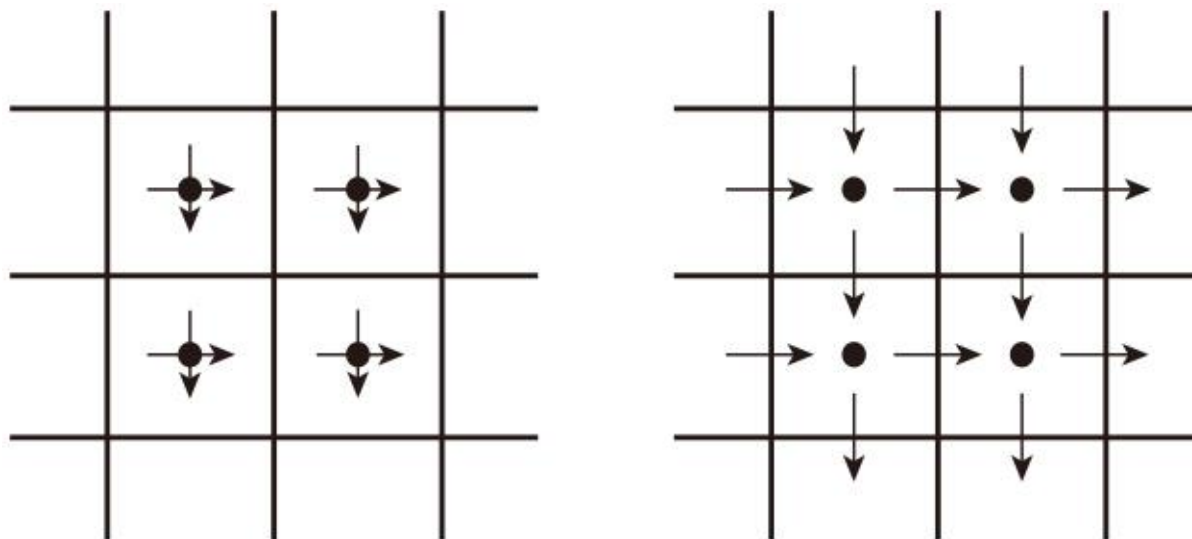


図7-S2 コロケート格子とスタッガード格子



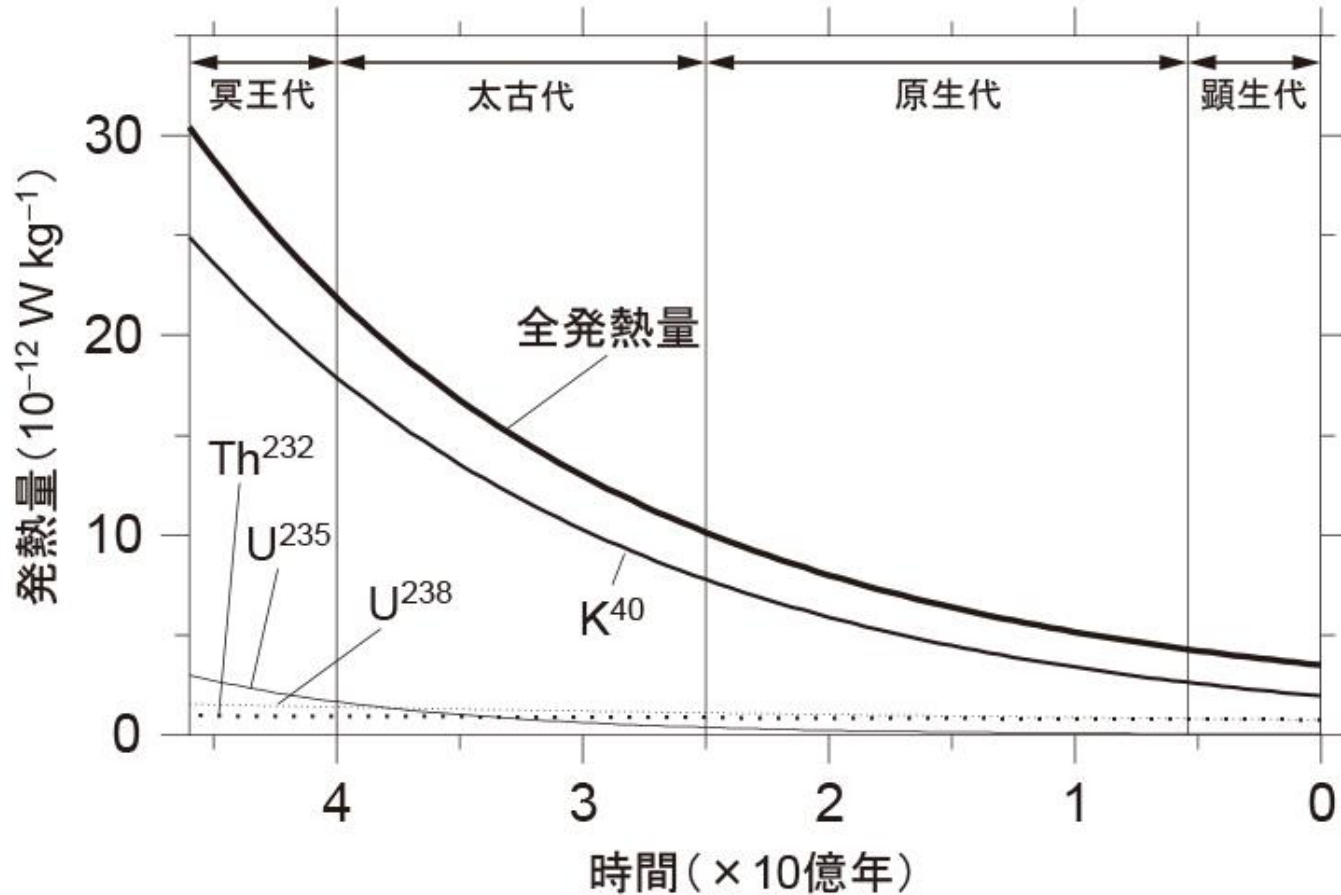
● スカラー量
→ ベクトル量

コロケート（集中）格子

スタッガード（食い違い）格子

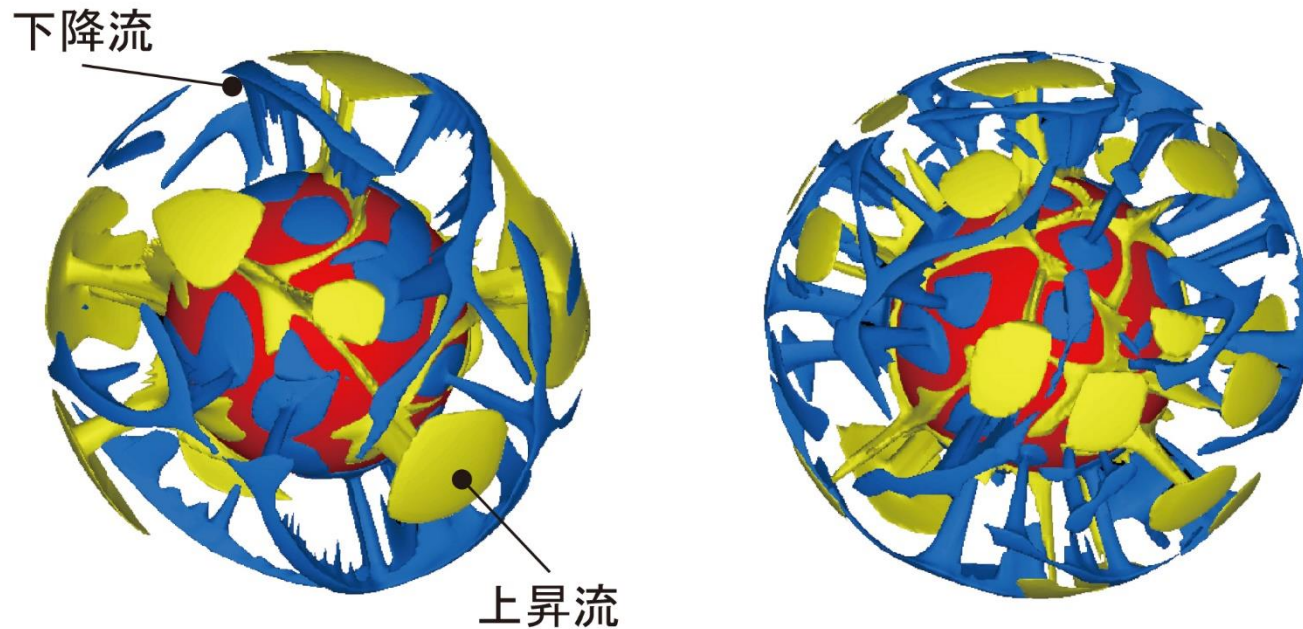
図7-S3

マントルに含まれる放射性元素の壊変による発熱量



Turcotte & Schubert (2002) のデータに基づく

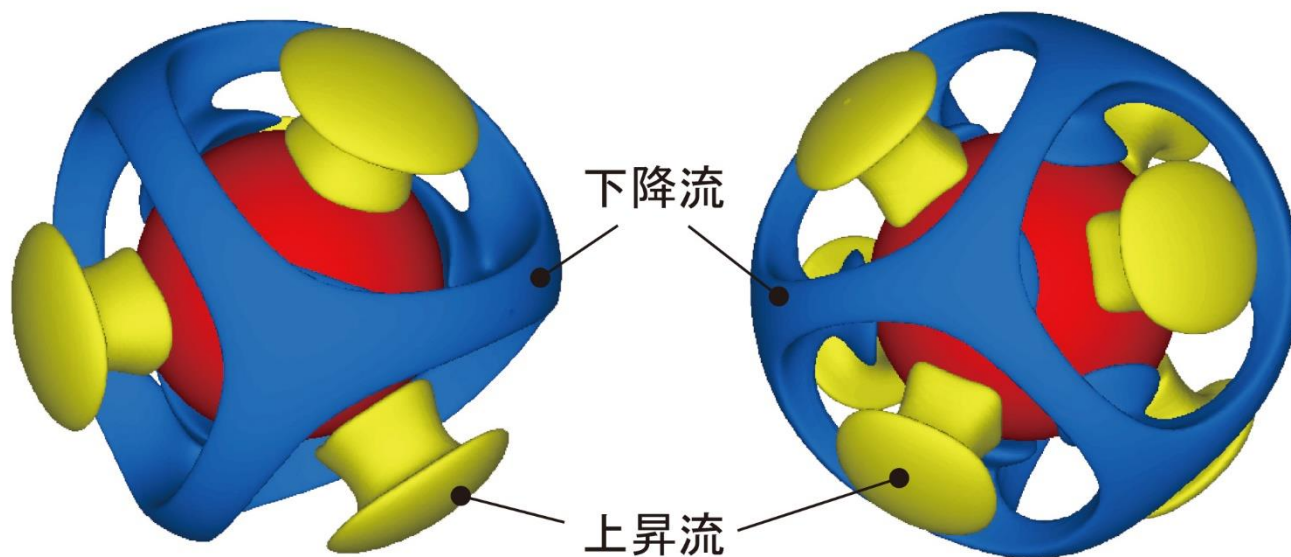
図7-3 レイリー数が 10^7 の場合の 非定常なマントル対流パターン



現在のマントルの内部発熱量を
考慮した場合

現在のマントルの2倍の内部発
熱量を考慮した場合

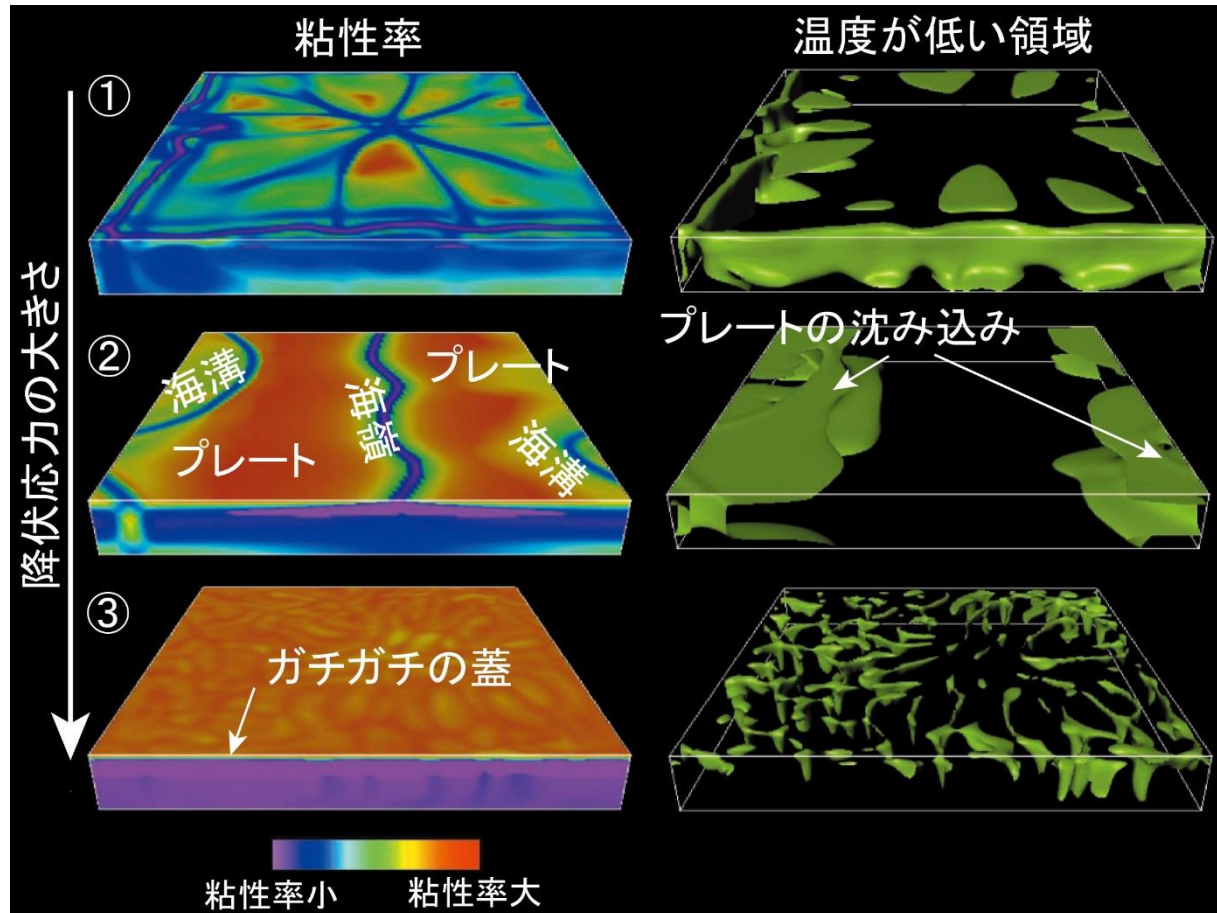
図7-4
レイリー数が 10^4 の場合の
定常的なマンテル対流パターン



「四面体型」マンテル対流

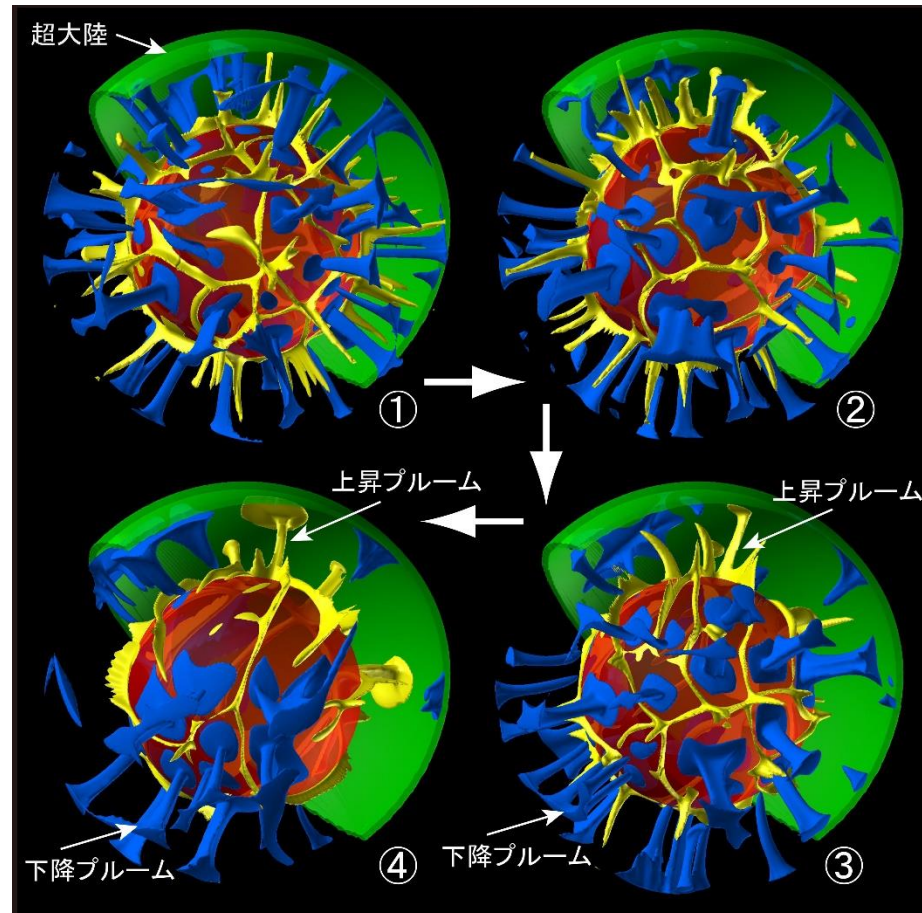
「六面体型」マンテル対流

図7-5 粘性率の温度依存性と降伏応力を考慮した 3次元箱型マントル対流のシミュレーション結果



Tackley (2000)

図7-6 超大陸を模した“蓋”を設置した場合の マントル対流のシミュレーション結果



Yoshida (2010)

図7-7 超大陸下に上昇流が発生するメカニズム

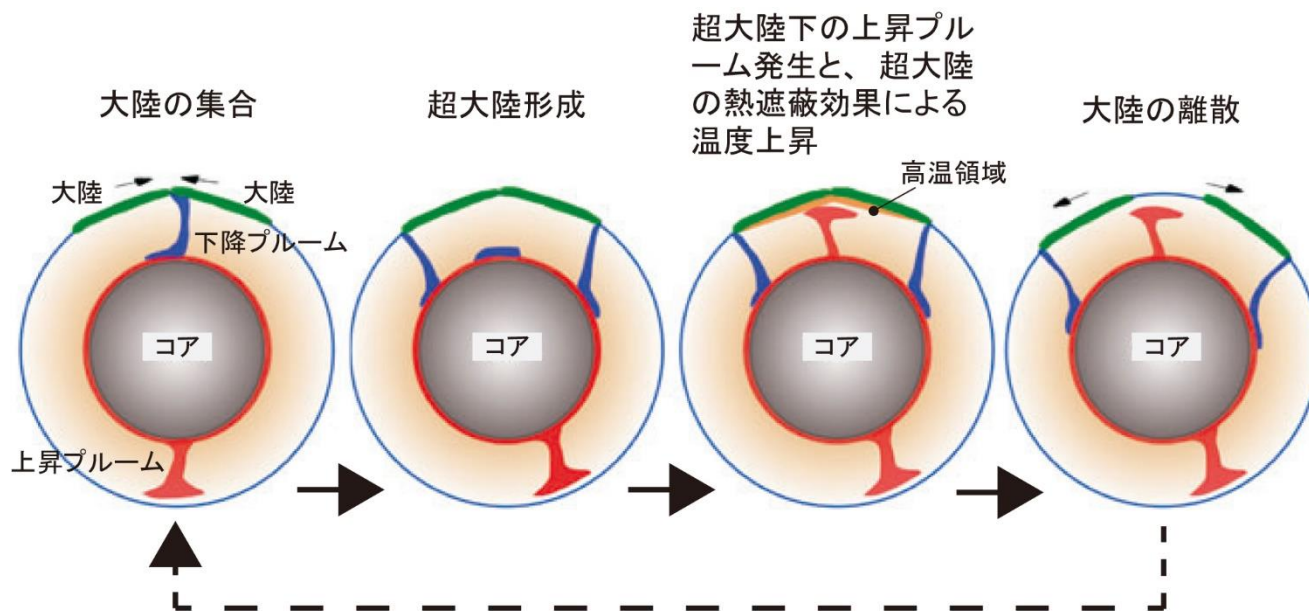


図7-8 剛体大陸の数とコアからの加熱の有無の違いによる 超大陸形成のタイミング

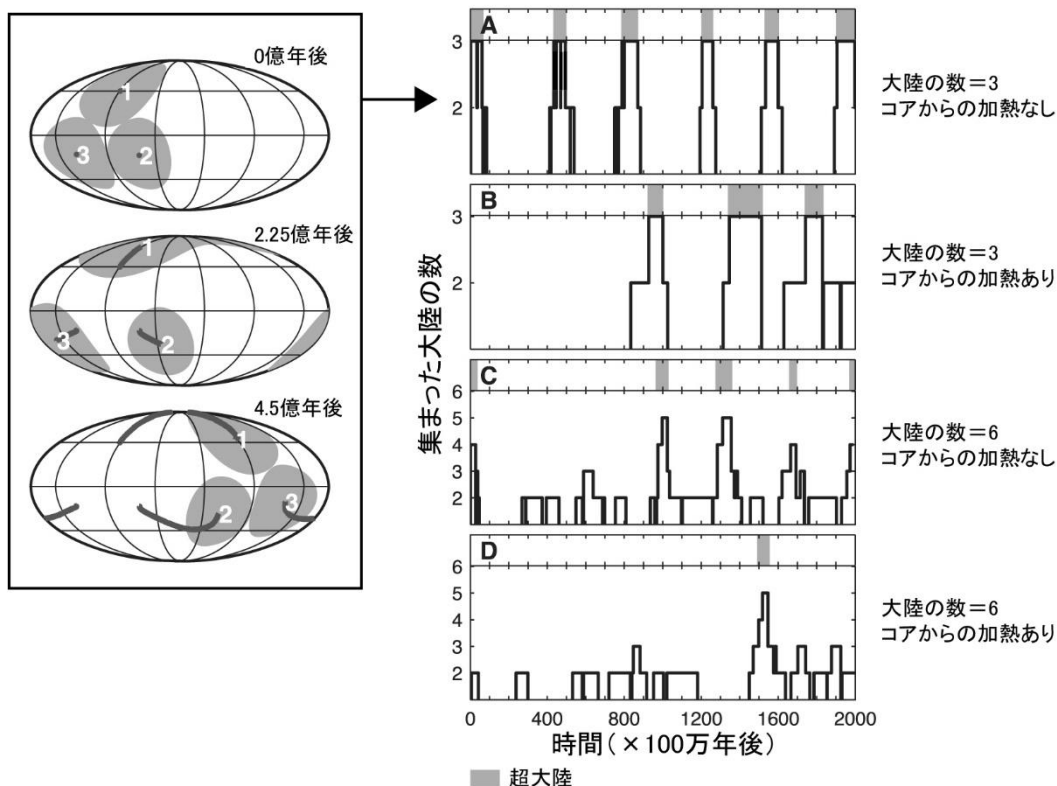


図7-9 自在に変形する大陸を考慮した マントル対流のシミュレーション結果の一例

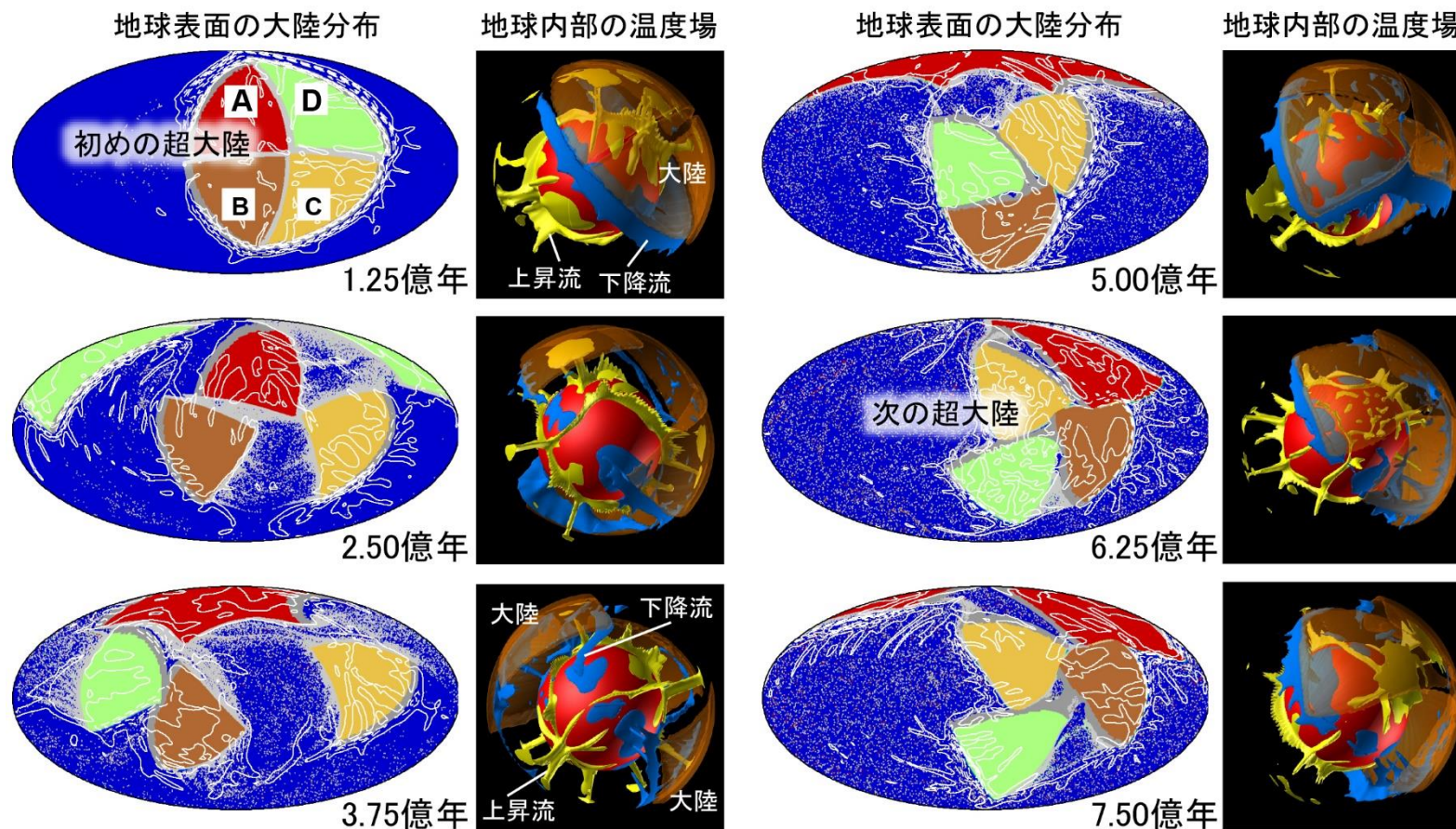
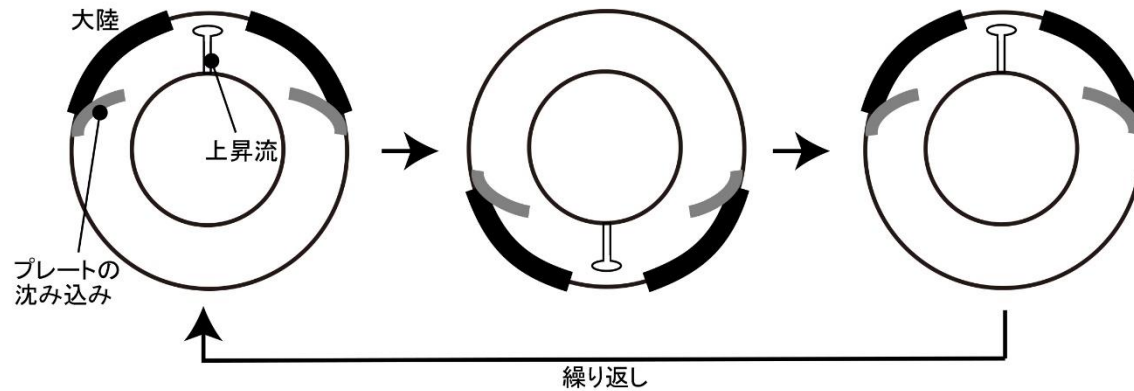


図7-10 大陸移動の様子の模式図

大陸移動の原動力がマンテル対流のみ



大陸移動の原動力がマンテル対流とプレート境界力の両方

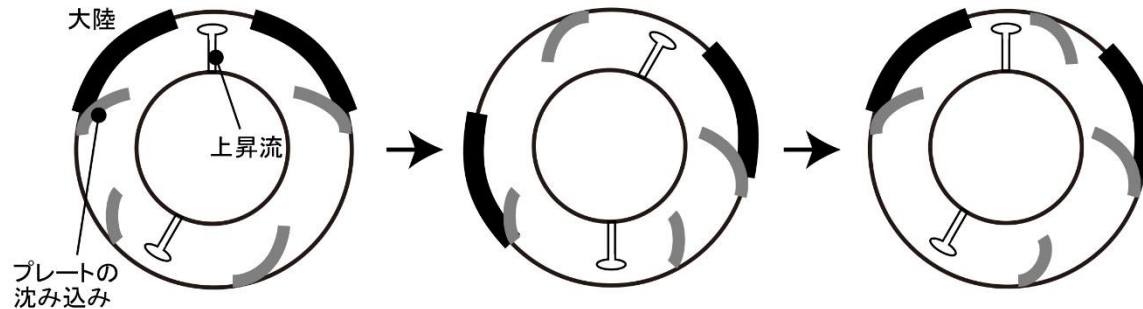
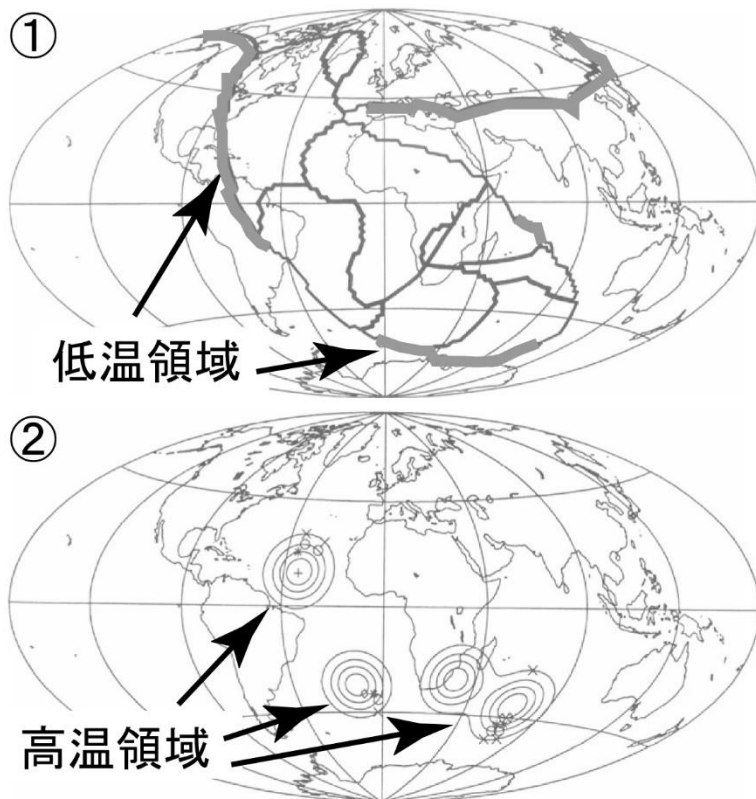


図7-11 パンゲア超大陸を構成する各大陸ブロックを 考慮したマンテル対流のシミュレーション

モデル（初期状態）



シミュレーション結果（8000万年後）

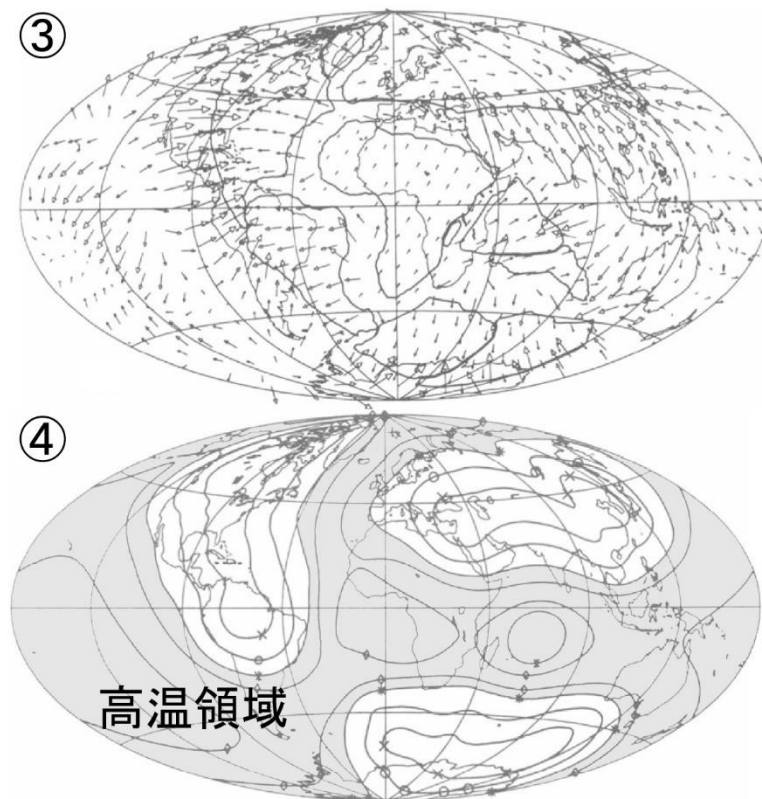


図7-12 2億年前のパンゲア超大陸の位置と 現在のジオイド異常パターン

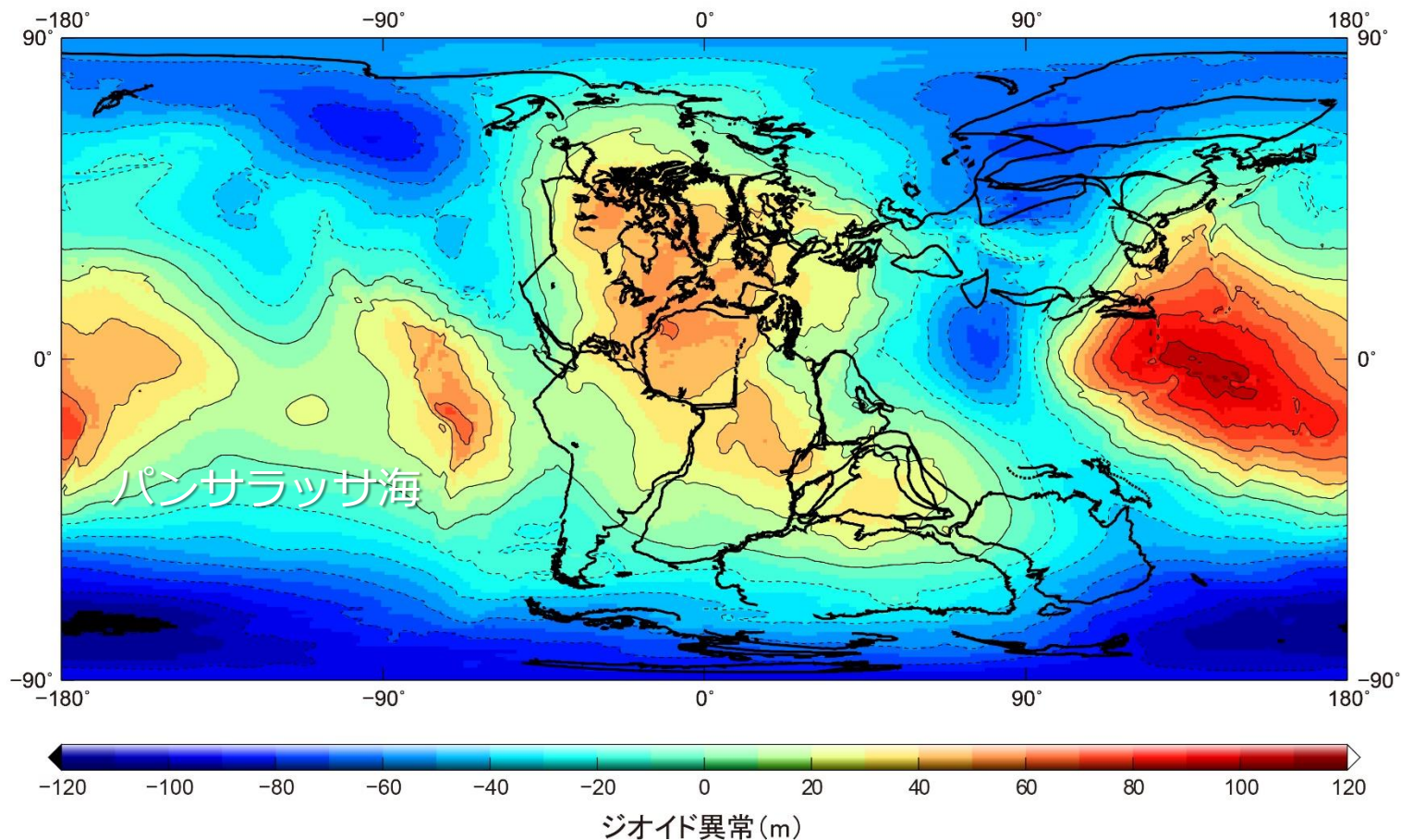
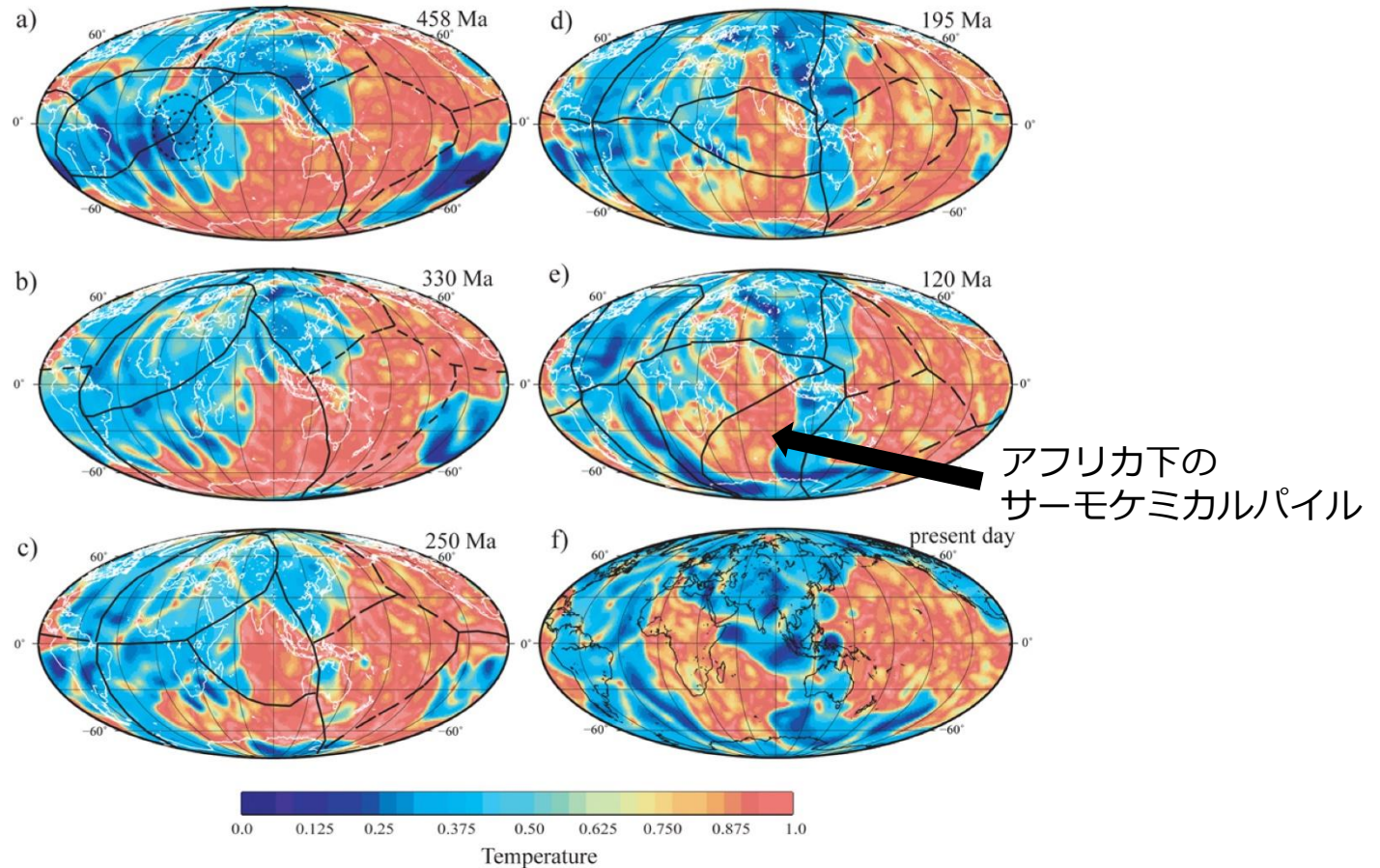


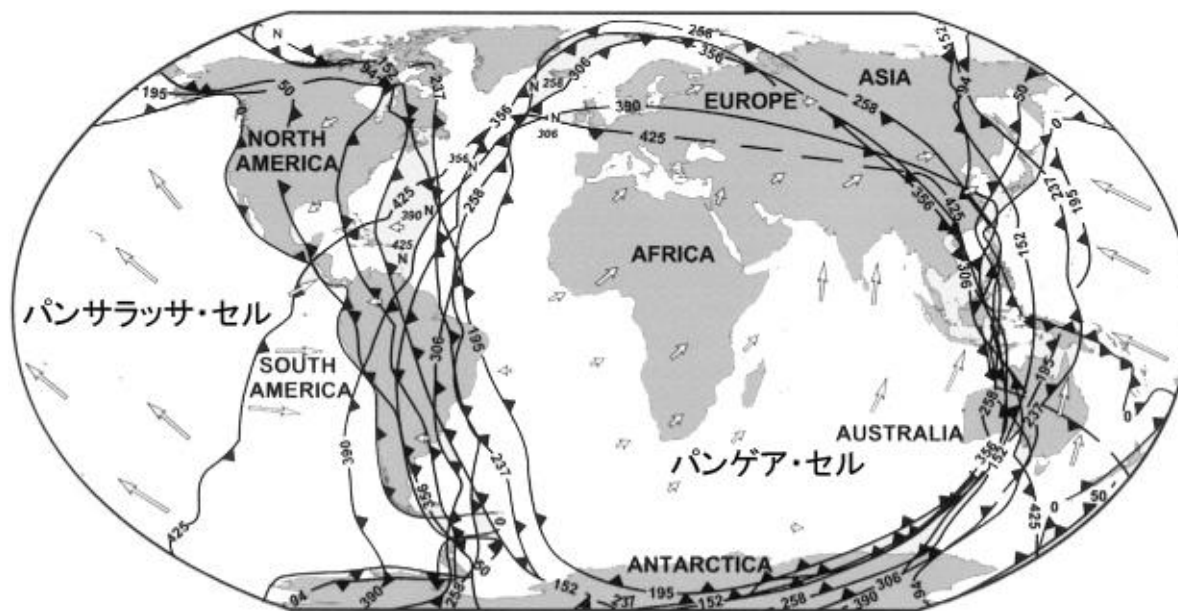
図7-13

約4億5000万年前から現在までのプレート運動の歴史を考慮したマントル対流のシミュレーション結果



Zhang et al. (2010)

図7-14 4億2500万年前以降の沈み込み帯の位置



Collins (2003)

図7-15

地震波トモグラフィーモデルに基づいて シミュレートした現在のマントル内部の流れ場の様子

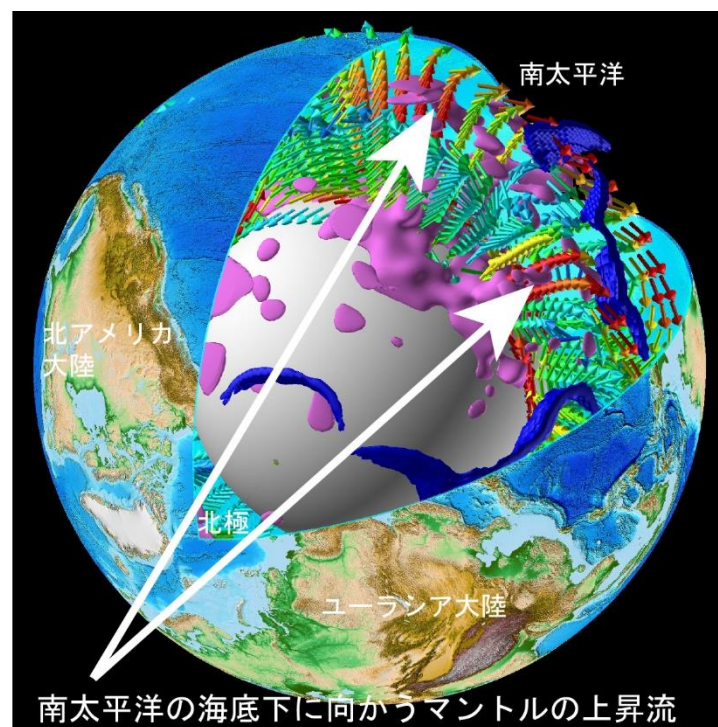
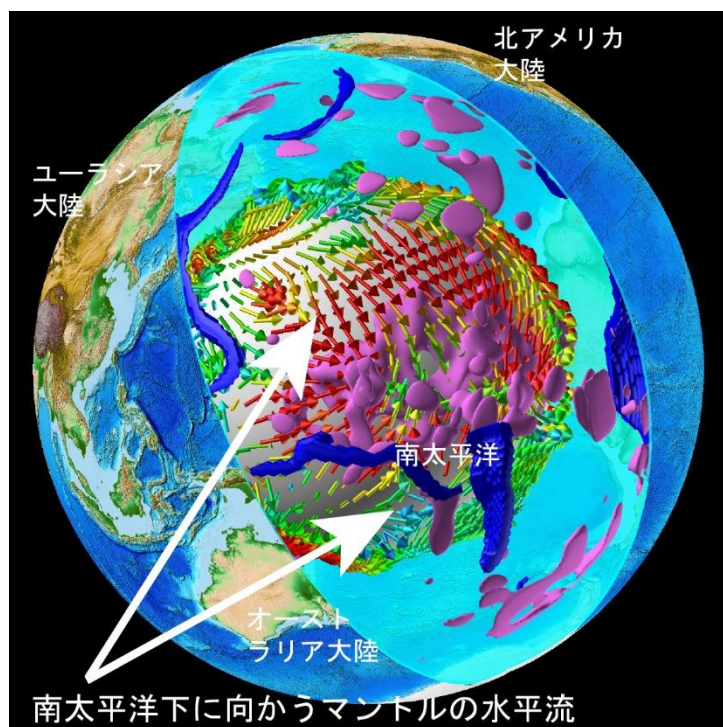
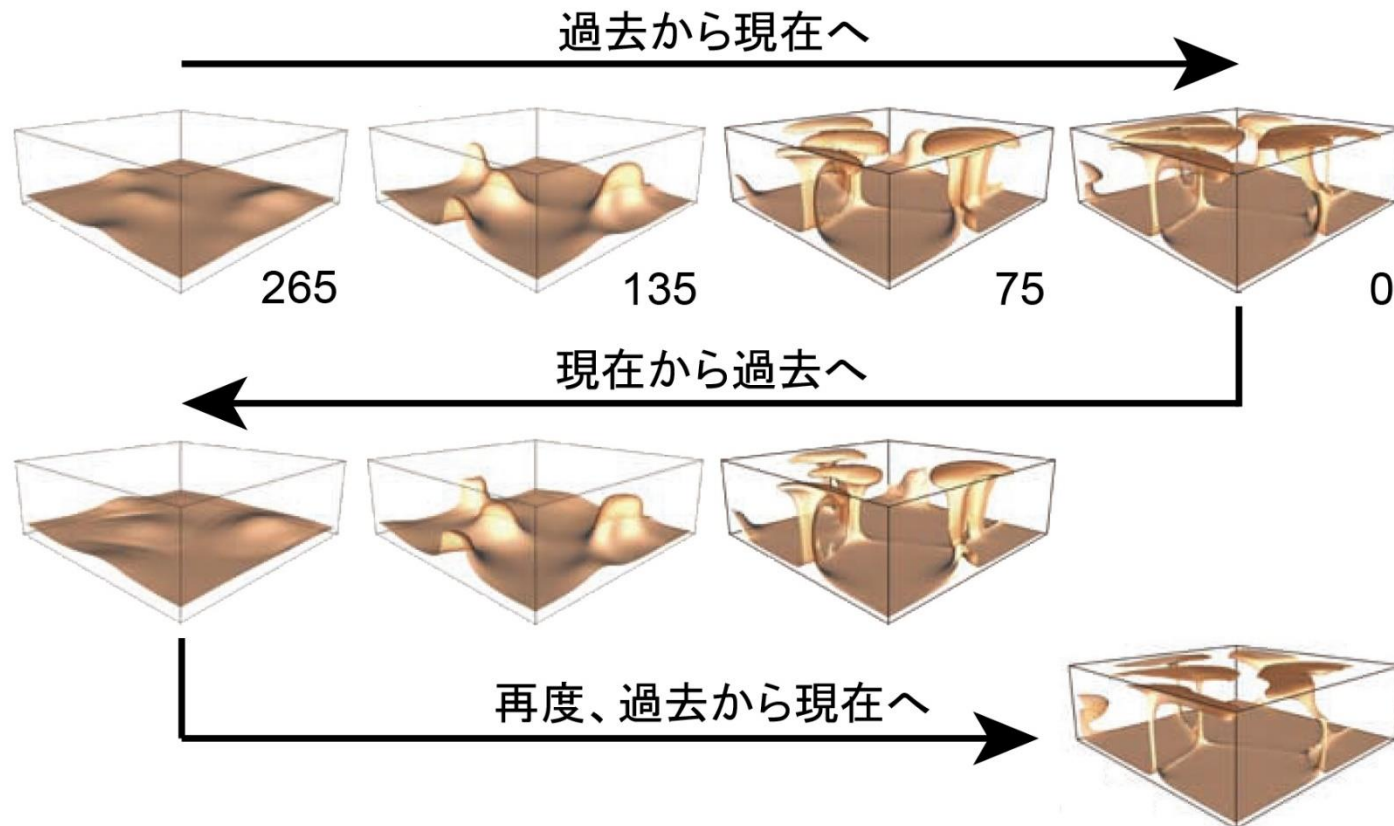


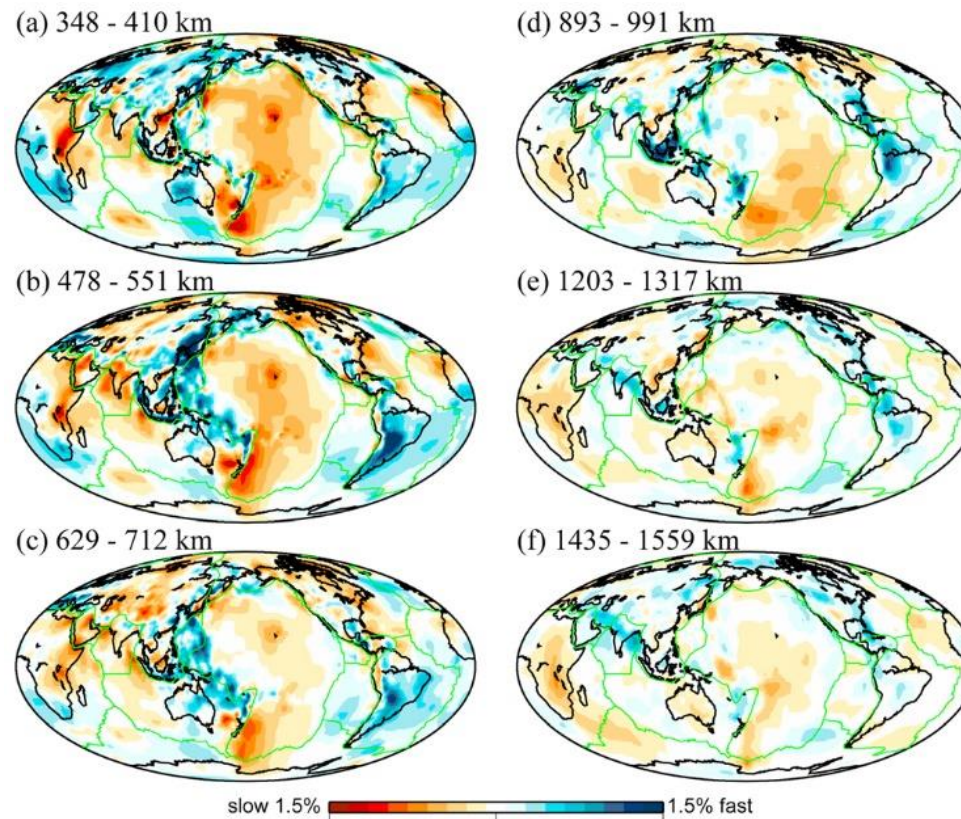
図7-16 マントル対流を過去に遡ってシミュレートした 結果の一例



補足資料A

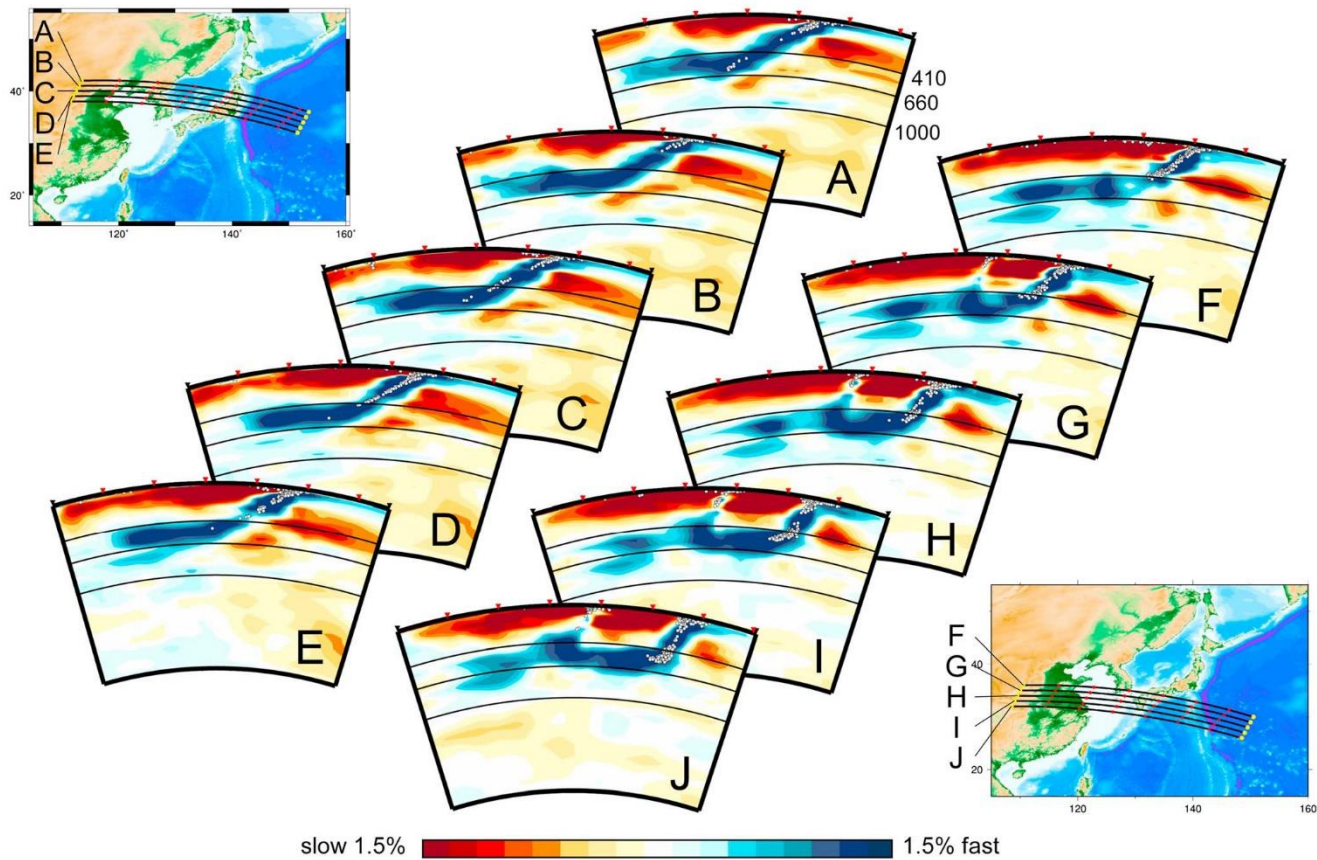
各沈み込み帯の沈み込むプレートの様子

図A-1 各深さの地震波速度異常構造



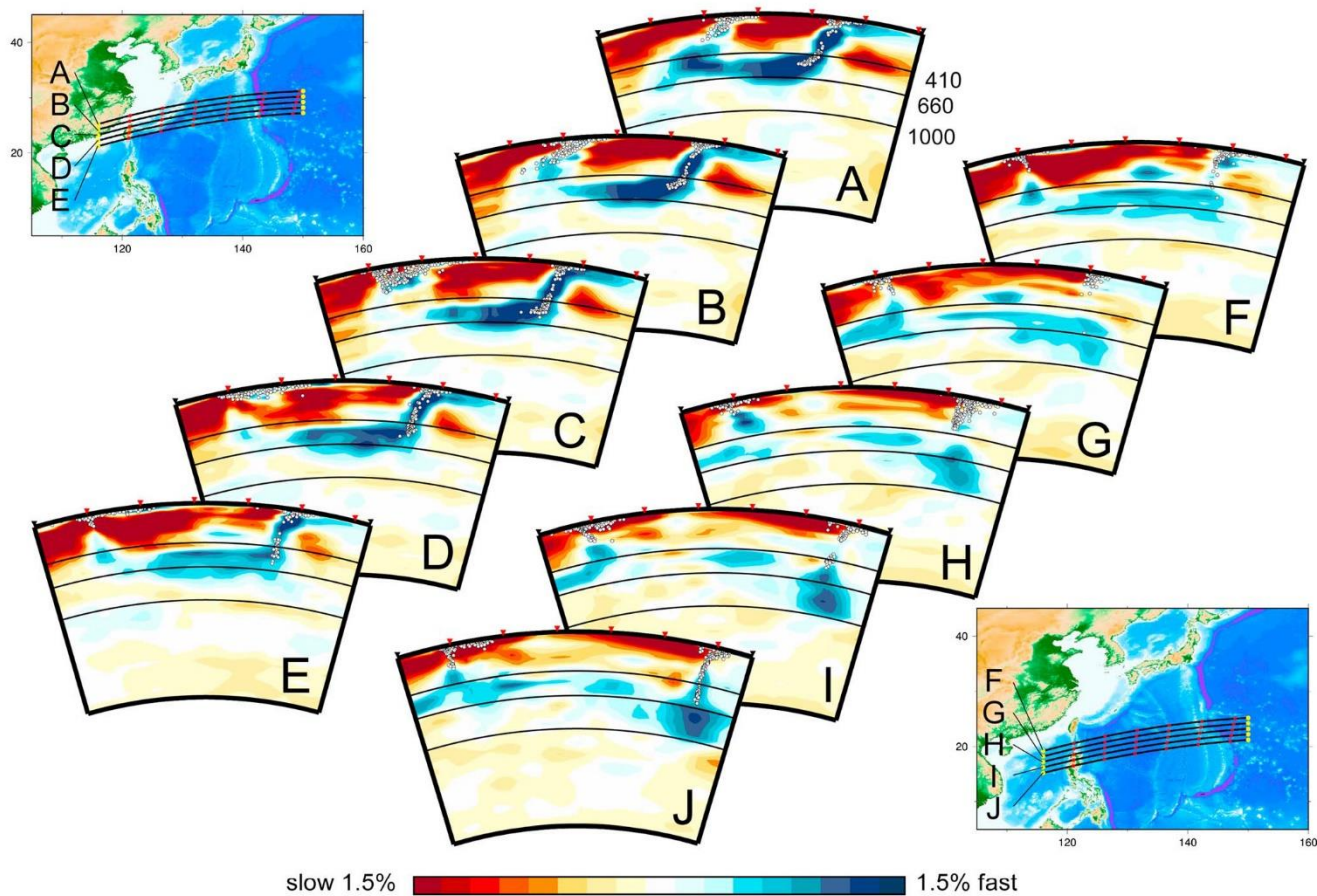
Fukao & Obayashi (2013)

図A-2 日本海溝と小笠原海溝



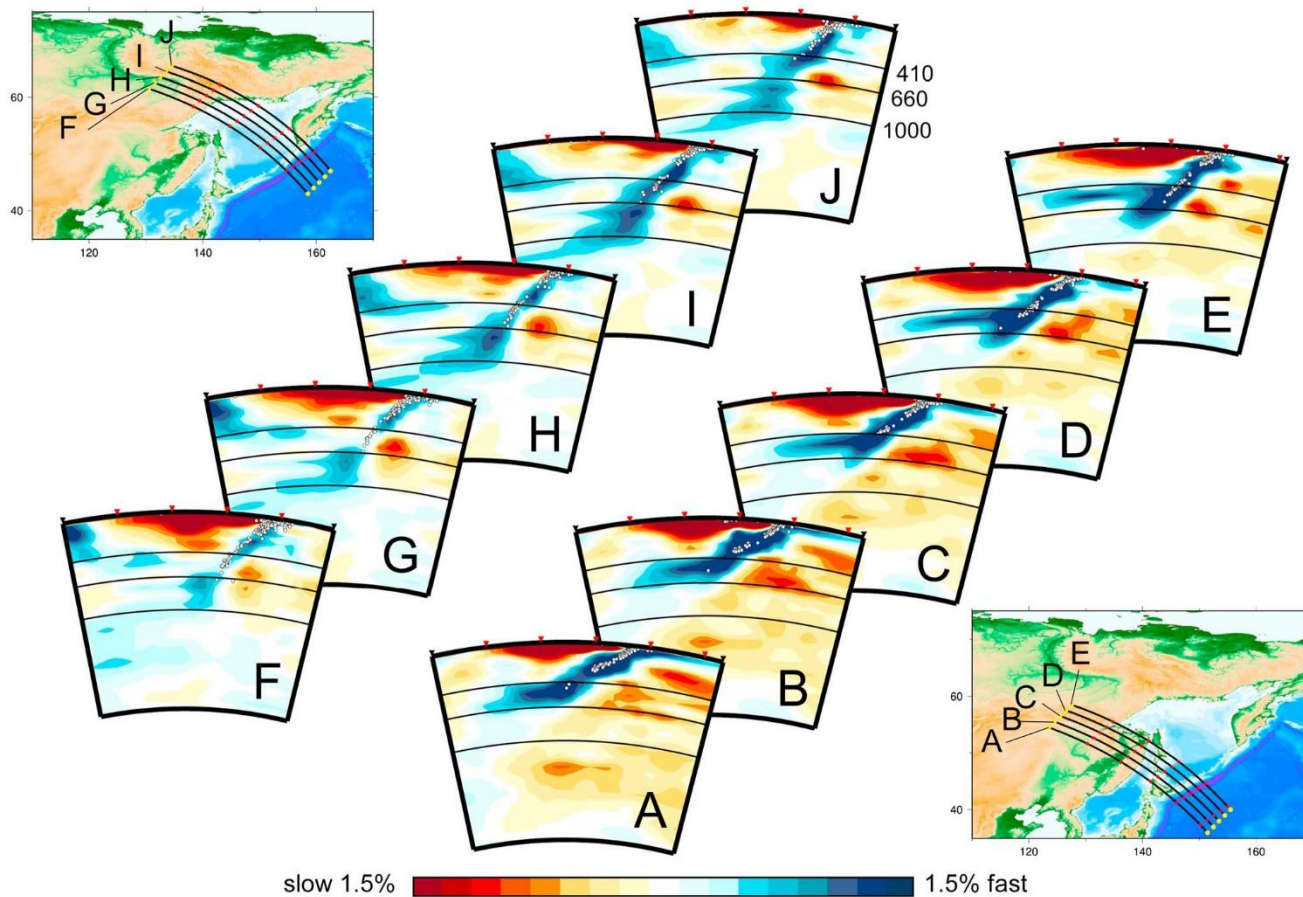
Fukao & Obayashi (2013)

図A-3 小笠原海溝とマリアナ海溝



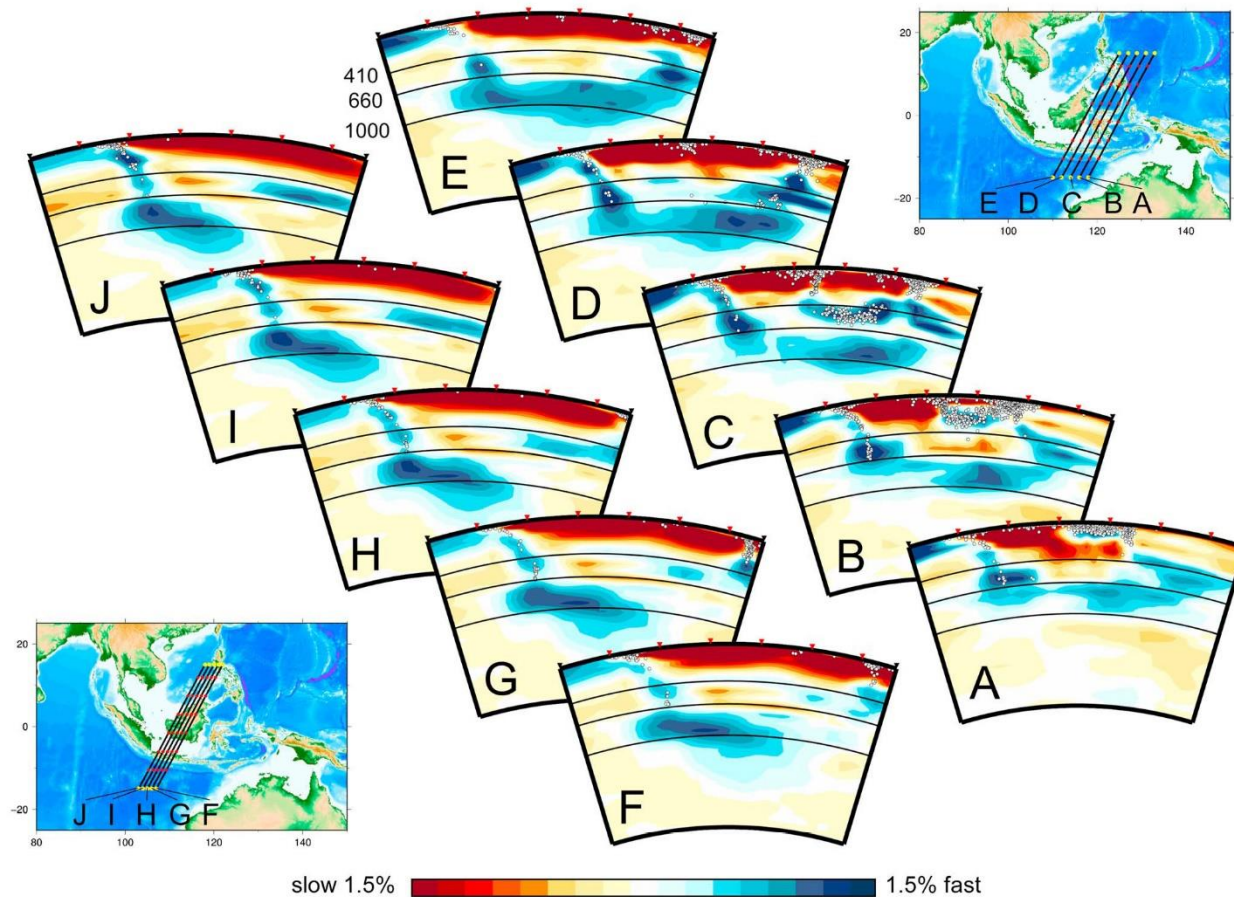
Fukao & Obayashi (2013)

図A-4 クリル海溝

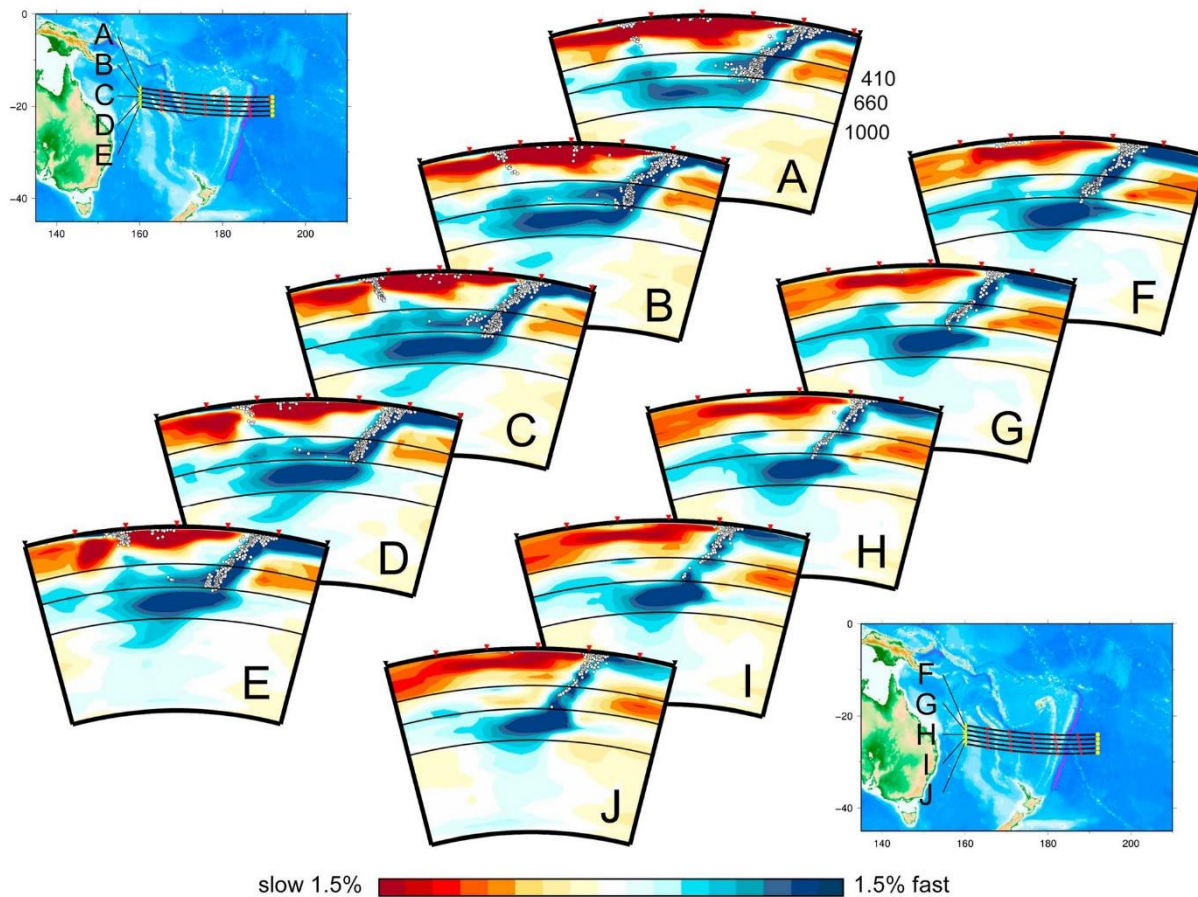


Fukao & Obayashi (2013)

図A-5 ジャワ海溝

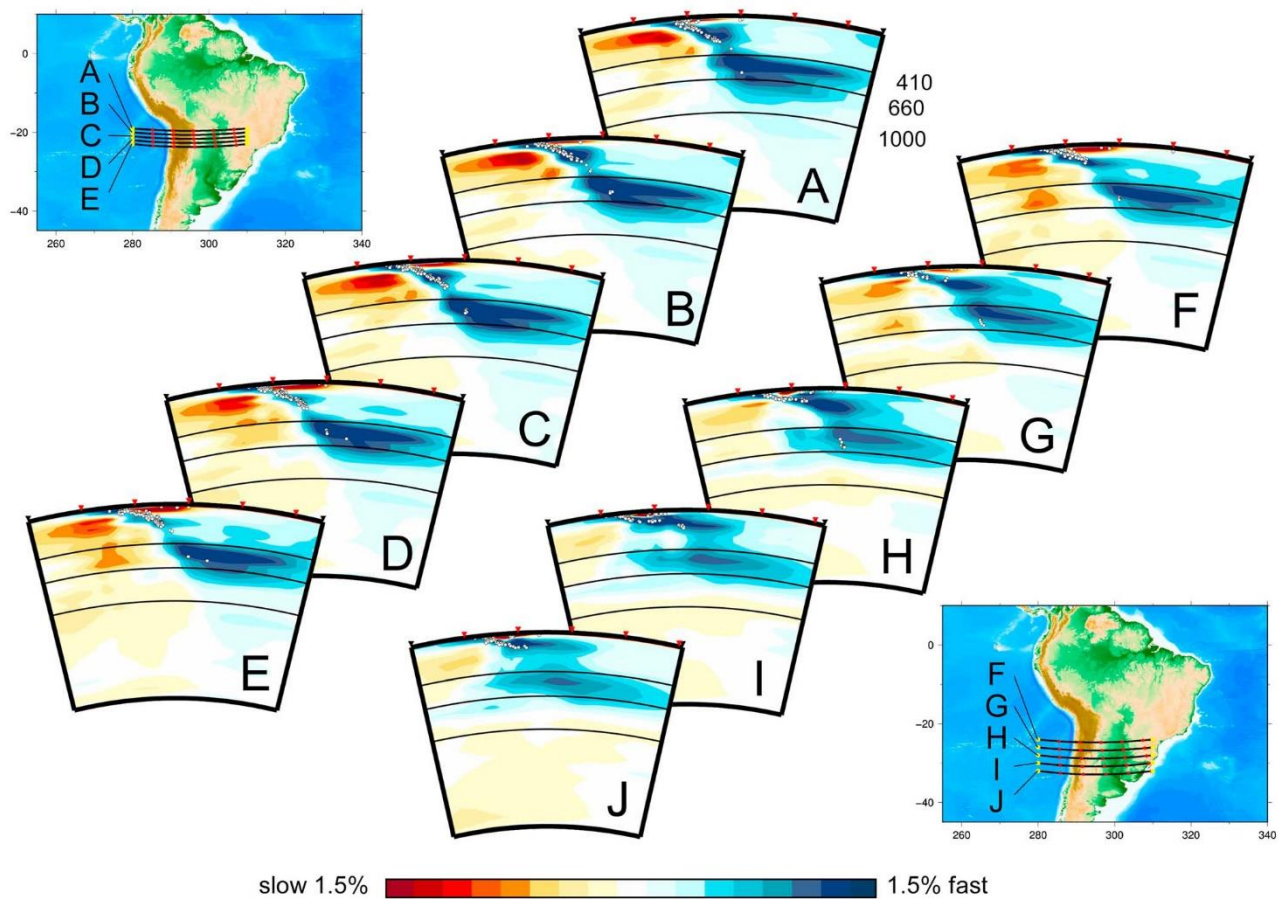


図A-6 トンガ海溝とケルマディック海溝



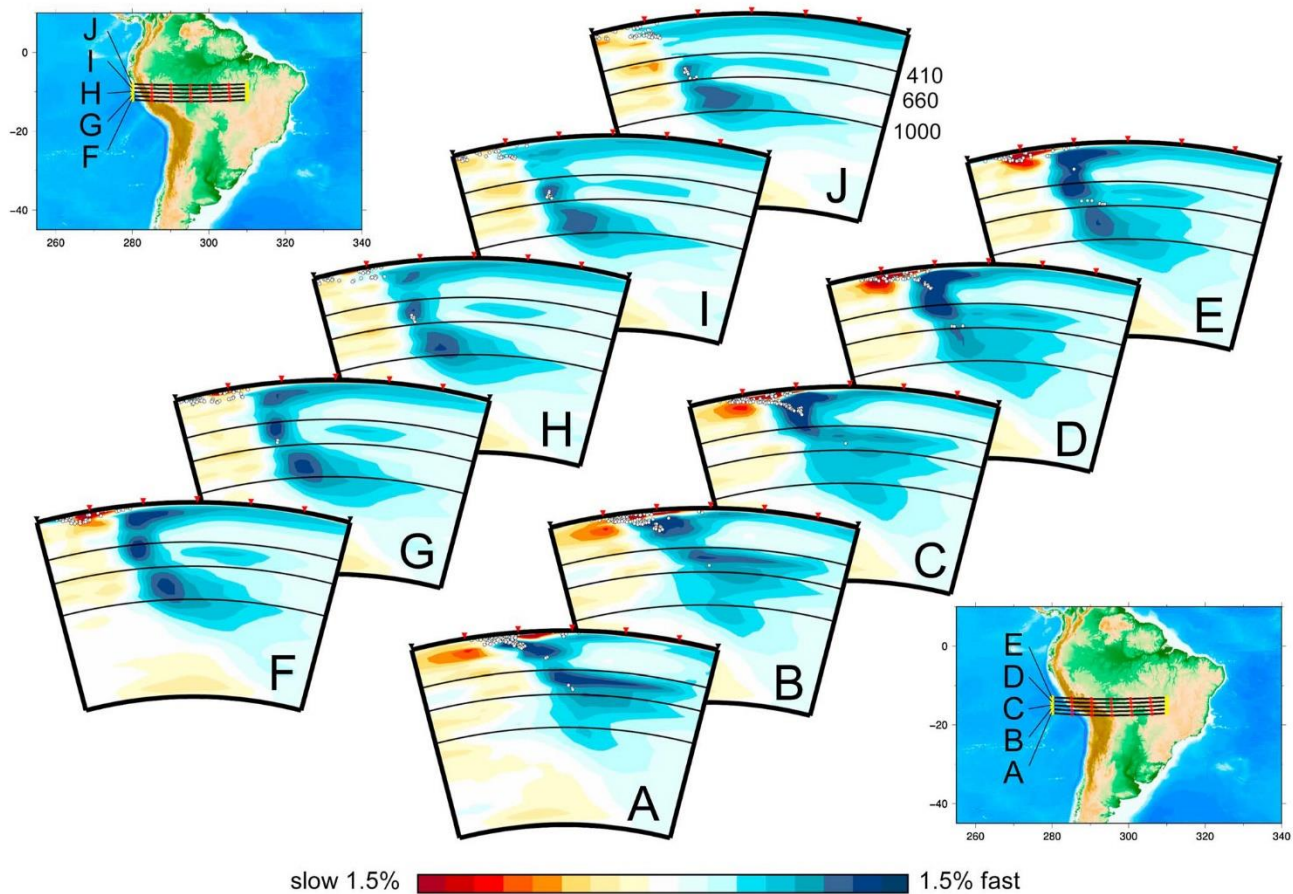
Fukao & Obayashi (2013)

図A-7 チリ海溝



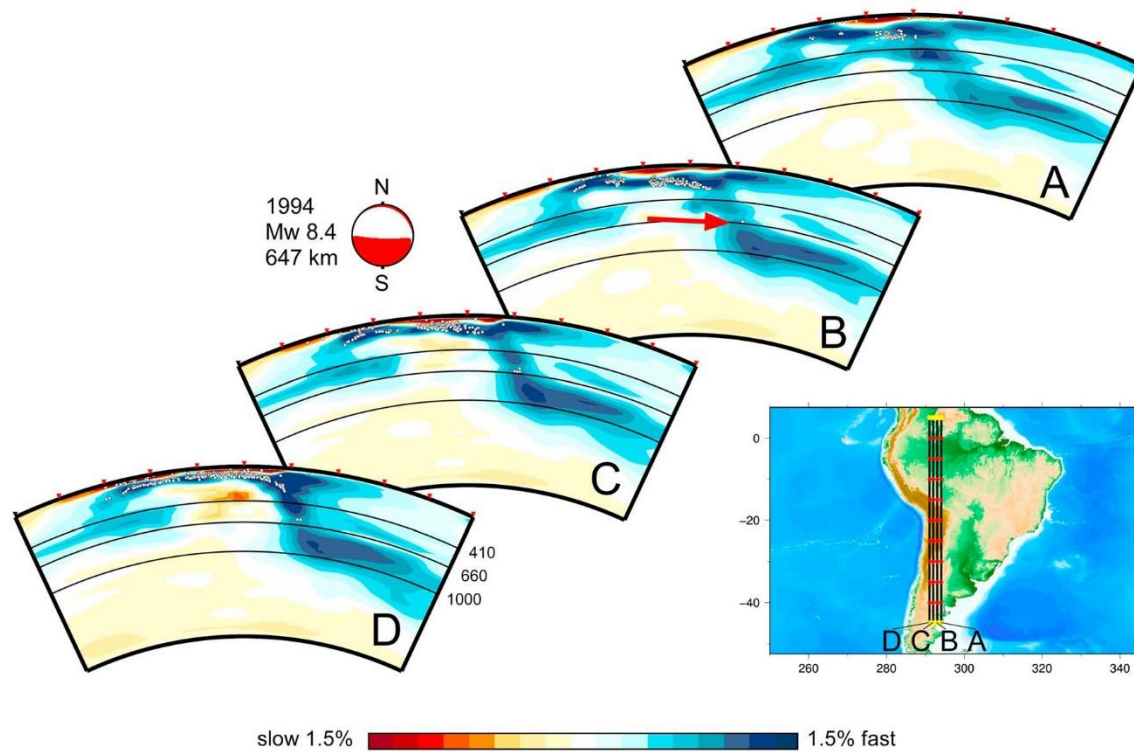
Fukao & Obayashi (2013)

ペルー海溝



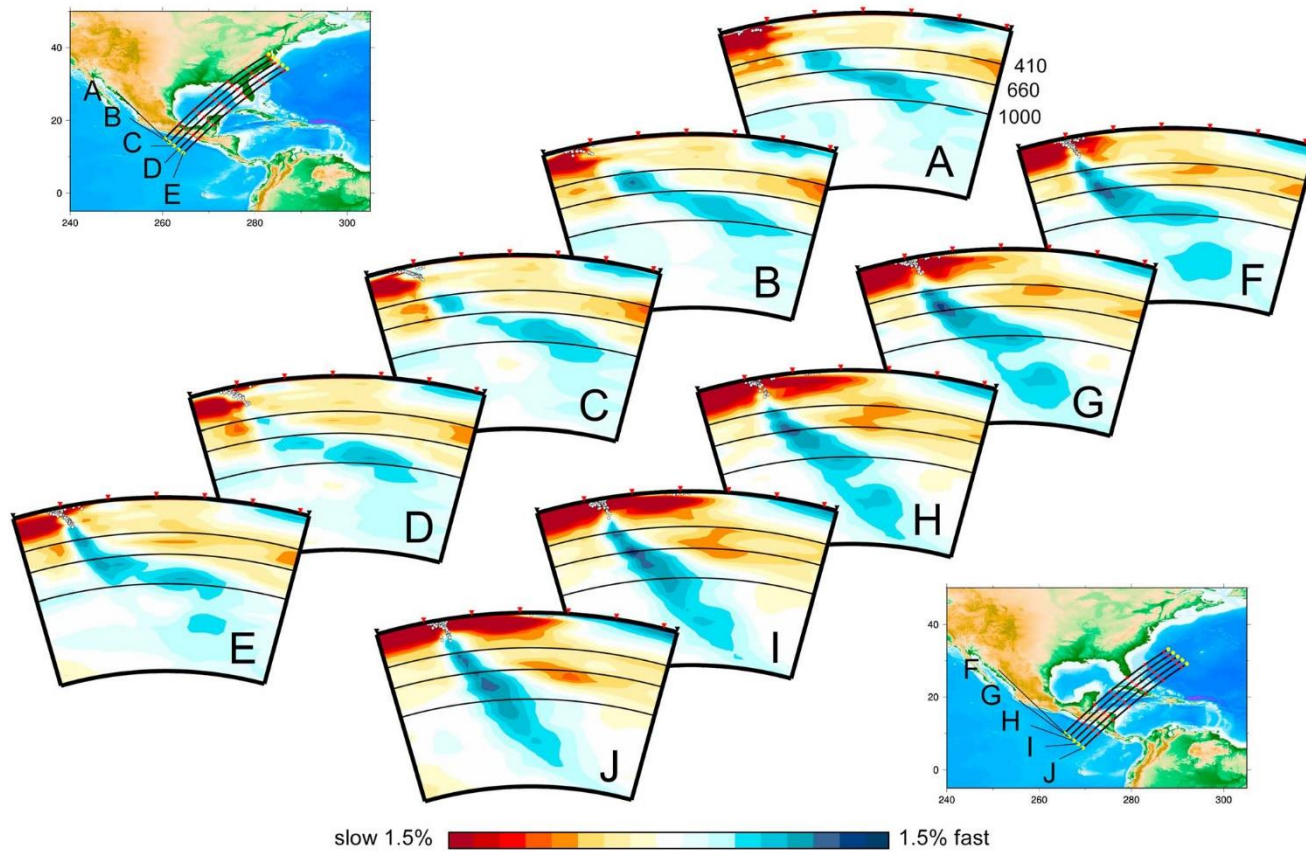
Fukao & Obayashi (2013)

図A-9 南アメリカ大陸の南北断面



Fukao & Obayashi (2013)

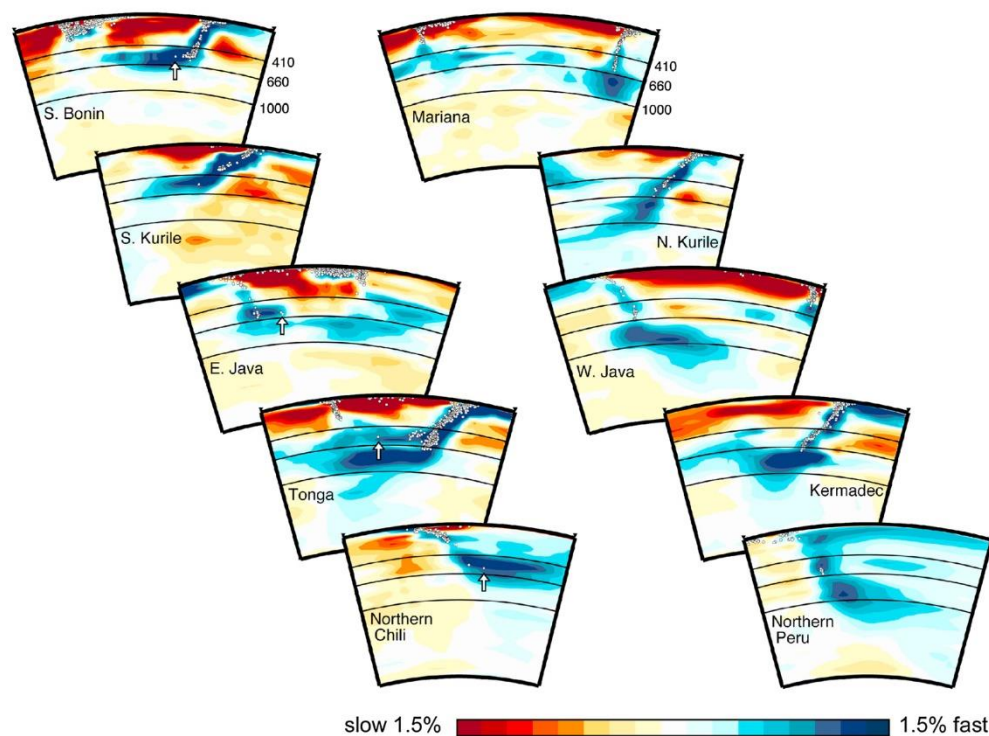
図A-10 中央アメリカ海溝



Fukao & Obayashi (2013)

図A-11

マントル遷移層で滞留するスラブと 下部マントル最上部に掛かるスラブ



Fukao & Obayashi (2013)