

0 章 地球の大局構造とプレート・テクトニクス (early draft 6/25/01)

はじめに

固体地球科学は 1960 年代に、プレート・テクトニクスという一大科学革命理論の登場を経験した。プレート・テクトニクス以前はばらばらに説明されていた様々な地質現象（例えば日本列島を含む「地震帯」というものがあり、それが地球上の限られた場所（例えば、環太平洋帯）に線状に連なっていること）が、プレートという概念によって統一的に説明されるその様は見事というほかなく、地質現象のような「雑多な」研究対象が、一つの理論の枠組みによって大枠が説明可能であることすら、プレート・テクトニクス以前の研究者は予想もしなかったのではあるまいか。このような意味で、全ての現象を説明する究極の理論を目指して学問体系を作り上げようとする物理学などの研究分野と固体地球科学（地質学）は、そもそもの研究のあり方が異なってきた面があったが、プレート・テクトニクスの登場によって始めて体系をもちうる研究対象としての認識が研究当事者の間に広がってきたのかもしれない。

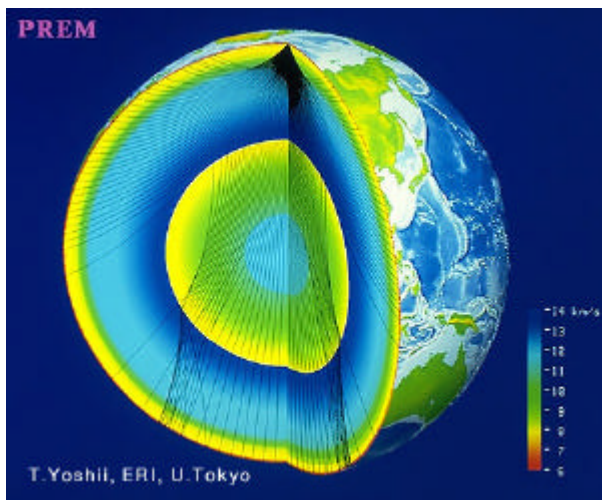
上に述べたような意味で、プレート・テクトニクスはまさに革命的な理論であるが、その本質は、地質現象を幾何学によって説明した現象論にすぎない。「地球の表層は、厚さ約 100km の剛体のプレート 20 数枚で構成されており、各プレートの相対運動によりその境界で地震・火山等の様々な地質現象が起きる」といった理論の根幹に、「なぜプレートが動くか」といった問いに対する答えは用意されていない。プレートが動くのは、マントルと呼ばれる地表から 2900km の深さまで続く岩石の層全体の運動（マントル対流）の結果であるが、どのようなマントル対流が実際に起きているのかは初期のプレート・テクトニクスでは議論されていない。

1980 年代に入り、全地球を覆うデジタル地震観測網の充実・地震データ解析手法の進展などにより、いわゆるグローバル地震学（地球全体を対象とした地震学）はひとつのピークを迎える。その成果の中心には、本巻のテーマである「地震波トモグラフィー」による地球内部の断層撮影が可能になったことがある。地震波トモグラフィーにより臆気ではあるが、現在我々はマントル対流のスナップショットを手にしつつあり、それを元にしたマントルのダイナミクス・進化の研究が日進月歩という形で進行しつつある。本巻では、80 年代・90 年代に明らかになったマントル・ダイナミクスの研究成果を、地震波トモグラフィーをキーワードにして解説する。本章はそのイントロダクションとして、地震波トモグラフィー以前の地球の大局的な構造（一次元的構造）、プレート・テクトニクスの枠組みなどをまとめて解説する。

地球内部の記述

地球の中の様子を知ることとはどういうことだろうか．

地上に住んでいる人間が地球の中身を知りたいというのは，八百屋の店先ですいか（趣味の高尚な人はメロンでもよい）の表面をみて品定めをしているのに状況が似ているかもしれない．その道の専門家（八百屋さん）は，皮の上からトントンすいかをたたき，その音を聞くことで味の良し悪しを判断できるという．ここで味の良し悪しとは，すいかの中身のみずみずしさ，甘さ（糖分の量）など皮の下の方の性質である．すいかの表面をたたき，中を通ってくる音波を聞いて，中身の性質を調べているのである．地球科学者も全く同じ原理を使い，地球中の物の性質を調べる．すいかをたたき代わりに自然に起こる地震を使い，音波の代わりに地震波を使うのである．その詳しい原理は1章で説明するとして，本章では，そのような地球物理的探査によって明らかになった地球の構造を整理しておこう．



地球内部は第一次近似的には球対称な構造をしており，地殻・マントル（上部マントル，下部マントル）・核（外核，内核）といった基本的な層（球殻）に分けることができる．その基本的な構造は1900年代前半にはだいたい確立されていたが，近年の標準モデルによれば，図1のような構造になっている．ここにあるのは地震波（P波，S波の2種類ある）の伝播速度と密度の深さ分布である．地震学的な探査から直接決まるのは以上のパラメーターであるが，それらから決まる物質の（弾性的）性質である体積弾性率（押し縮めにくさの指標）と剛性率（ずらしにくさの指標，流体でゼロ）も示してある．このような地球内部の弾性的性質は1%程度の誤差の範囲（後の章でわかるように地球内部にはそれ以上の大きさの水平方向の不均質が存在する）で決まっており，地球内部についてもっともよくわかっている物理パラメーターである．

すいかの中を伝わる音の速さがわかったからといって美味しいかがわからないの

と同様に、地震波速度構造がわかって地球の中がわかったことにはならない。どのような物質でそれぞれの層が出来ているのかを知らなければならない。そのためには人が手に出来る岩石（地表から 10km のものは採取可。その他、マントル深部から上がってきたと考えられるマントル捕獲岩、地球起源物質に近いと考えられている隕石など）をもとにして、それが地球内部の高圧・高温でどのような性質を示すかを調べる高圧（高温）実験を行い、様々な岩石・金属の物性を調べる必要がある。図 2 にはそのような実験によって決められた金属の性質（密度と体積弾性率で決まる地震波速度）と、地震波の解析からわかったマントルと核の性質を重ねて示してある（核の性質が鉄のものと近いことが見て取れるだろうか）。このような実験結果との比較により、地球内部を構成している物質が推定されることになる。

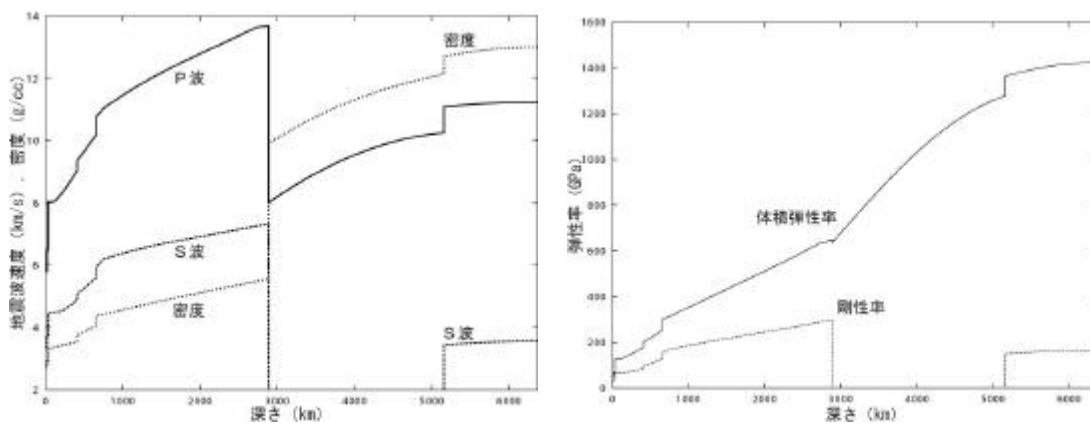


図 1．地球の地震学的構造

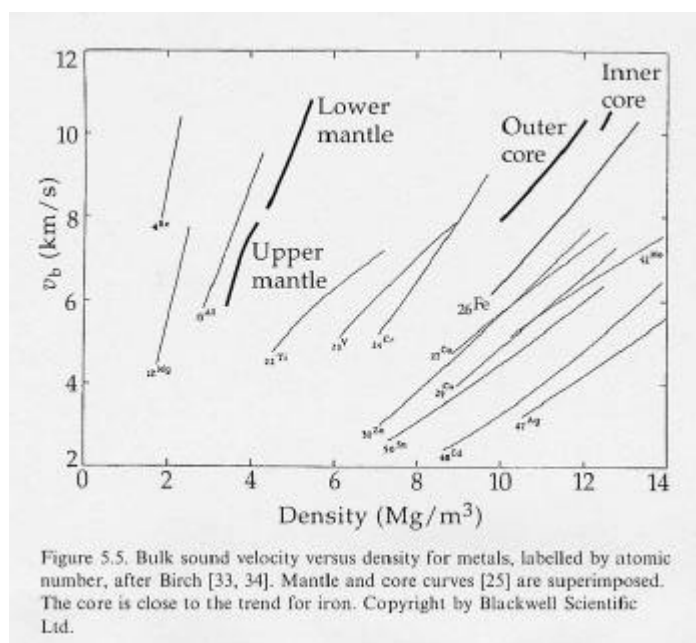


図 2．様々な金属における密度と地震波速度（体積弾性波速度）の関係

このように物質が決まると、あとは温度と圧力がわかれば、それぞれの物質がどのような状態であるかが原理的には既定でき、地球の内部は完全に記述されることになる（しかし実際には物質の同定には大きな誤差があり、岩石と金属の違いはわかるが、どのような比率で混ざり合っているかなどは今でも研究対象である）。このうち圧力は、密度がわかっているので精度良く決まっているが、温度に関しては非常に不確定性が高い（図3）。マントルがどのように対流するかを規定するマントルの粘性率は温度に強く依存するので、温度分布の正確な推定は本書のテーマであるマントルのダイナミクスを議論するに当たって極めて重要である。この分野の今後の研究の進展に期待しよう。

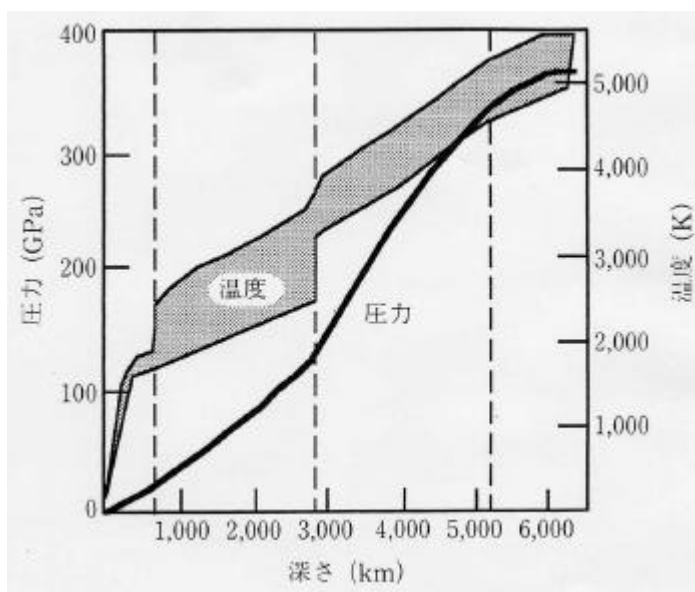


図3．地球内部の温度と圧力分布

地球の層構造

以上のように地球内部の状態を規定する物理パラメーターには、良く決まっているものとまだまだ議論の余地が多いものなど様々な信頼度のものがあるが、それらを総合して地球の層構造をまとめると図4のようになる。ここでは地震学的に決定された層構造、岩石学的な層構造、力学的な層構造と区別されており、それぞれ少しずつ異なっていることに注意をしながら地球の平均的な層構造を理解しよう。

地殻： 地殻とは、マントルの岩石がいったん溶けて軽くなり上昇し地表（付近）で固まった、いわば地球の皮に当たる部分をさす。マントルの岩石に比べて低密度（軽い）で、地震波速度も遅いのが特徴である。地殻は、主に玄武岩からなる海洋地殻と、花崗岩などのそれよりさらに軽い岩石からなる大陸地殻に分類される。海洋地殻の厚さは場

所によらずおおよそ 7km で一定であることが知られている．一方大陸地殻の厚さは地域により異なり，平均して 35km 程であるが一部ヒマラヤなどの地域では 70km に及ぶ場所もある．地殻とマンツルの境界は地震学的に明瞭に区別が付き，地震波速度などは 15% 程大きくなる．この境界面をモホロビチツチ面（Moho 面）とよぶ．

マンツル： マンツル最上部は，かんらん石（olivine）を 4-6 割ほど含むかんらん岩（peridotite）でできている．かんらん岩を構成する鉱物は，地球の深さ 350km ~ 750km あたりで様々な構造を持つ鉱物に相変化を起こし，最終的にペロブスカイトという安定な結晶構造を持つ岩石になると考えられている．地震学的にはこれに対応して，410km と 660km の深さに地震波速度の急増する場所があることが知られており，それぞれ「410km 不連続面」，「660km 不連続面」と呼ばれている．この相変化が起き，マンツル不連続面が存在する領域を「マンツル遷移層」と呼ぶ．さらに 660km 不連続面を境にして上を上部マンツル，下を下部マンツルと呼ぶのが一般的である．上部マンツルと下部マンツルの違いは，このような構造によるもの以外に，上部マンツルでは地震が起きるが下部マンツルでは地震は起きないことにもある．

近年になって，下部マンツルの最下部 250km 程に新たな地震波速度の急増する領域が発見され，オーストラリア生まれの黎明期の地震学者 Bullen の命名法に従い D"（D double prime と読む）領域と呼ばれる．D" 領域は水平方向に非常に不均質であることが地震学的にわかっており，マンツルの底の謎めいた領域である（8 章）．そしてマンツルの底は，「核-マンツル境界（CMB, Core-mantle boundary）」でその下の核と分けられている．地震学的には，P 波の速度が急激に減少し，S 波は通らなくなる境界である．

中心核： CMB の下は鉄を主成分とする「核（Core）」と呼ばれる領域である．核はさらに，内核-外核境界（ICB, Inner core boundary）で内核と外核に分けられる．外核は流体の鉄が高速の対流運動を起こす領域で，地球の磁場を生成している．内核は，外核が凍ってできた固体鉄の領域である．地球の歴史を通して成長し続けてきたと考えられている．

地殻とリソスフェア： 図 4 の右端上のリソスフェアとは，プレート・テクトニクスでいうところの剛体的に運動する「プレート」そのものであり，地殻とマンツルの最上部が一体となって構成している．地殻とリソスフェアはまったく異なる概念（前者は化学的分類，後者は力学的分類による地球の最表層）であるが，初学者はしばしば混同するので注意を要する．リソスフェアは，いわば地質学的時間スケール（～百万年）で見たときの地球の「硬い皮（板）」の部分である．地質学的時間スケールでみるとマンツルは流体として振る舞い，「マンツル対流」を起こしている．対流しているマンツルの最上部の，冷えて硬くなった部分と考えればよい．マンツルの硬さ・軟らかさは，岩石に

含まれる水の含有量または温度に強く依存するので，リソスフェアの厚さはそのどちらかが決めていると考えられる．

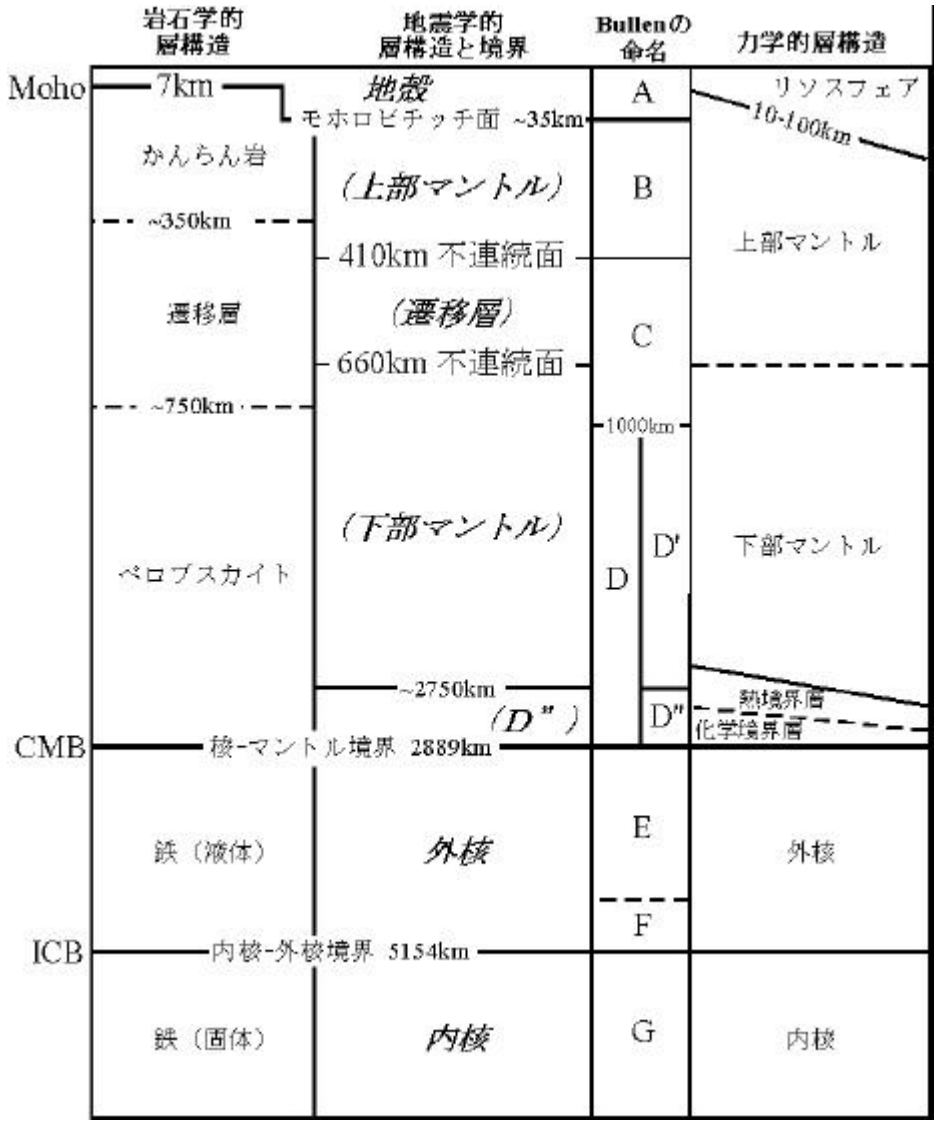
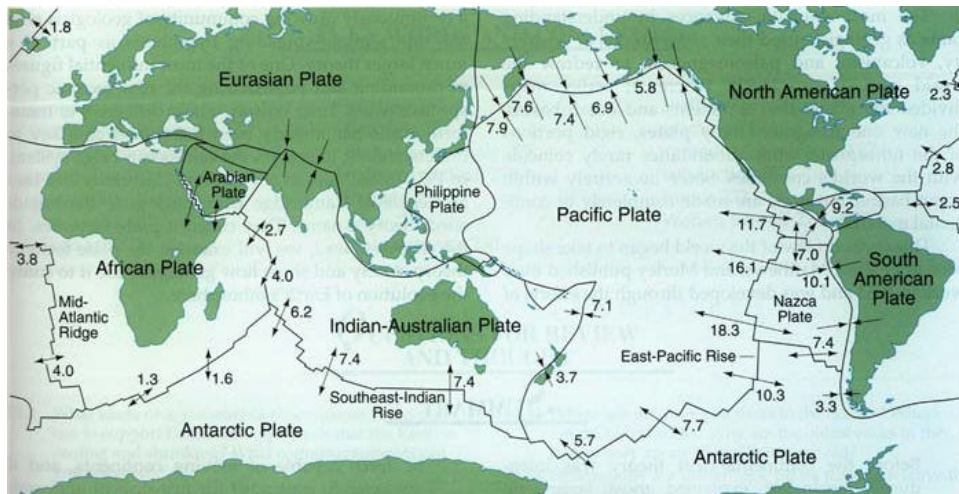
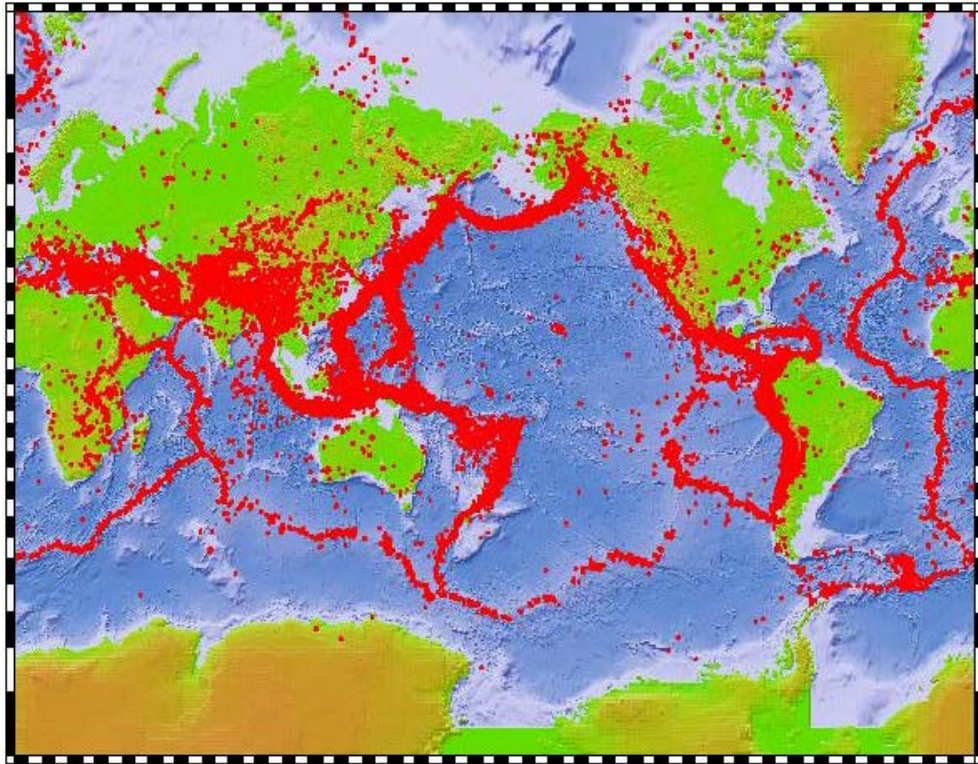
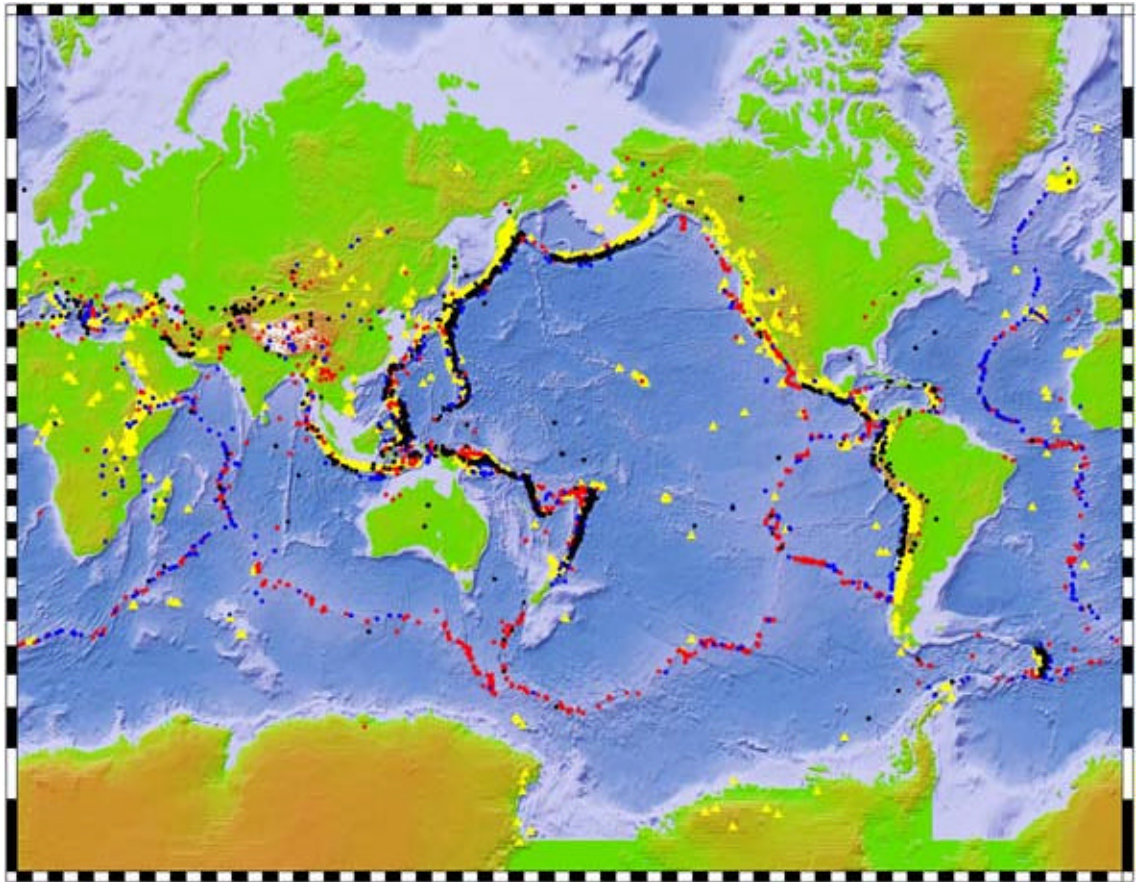


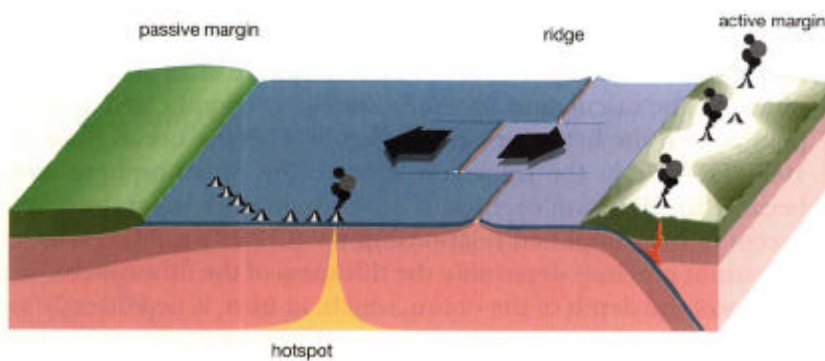
図4．地球の層構造．存在がはっきりしている層境界は実線で示してある．点線の境界は不確実性が伴う．力学的層構造で，上・下マントルの境界が点線になっているのは，マントル対流が上・下マントルで別々に起こっている可能性があるため（2，6章参照）．

プレート・テクトニクス：





図？ 地形と地震・火山の分布．地震は，黒：逆断層，赤：正断層，青：横ずれ断層，火山（黄三角）は過去1万年に活動したもの（“Smithsonian Institution, Global Volcanism Program”のデータをもとにしている）．



本書の構成：