

第12講 地球の構造と営み

http://ext-web.edu.sgu.ac.jp/koide/chikyu/

Email: chikyu2019@ykoide.com

▼ 常識とパラダイム

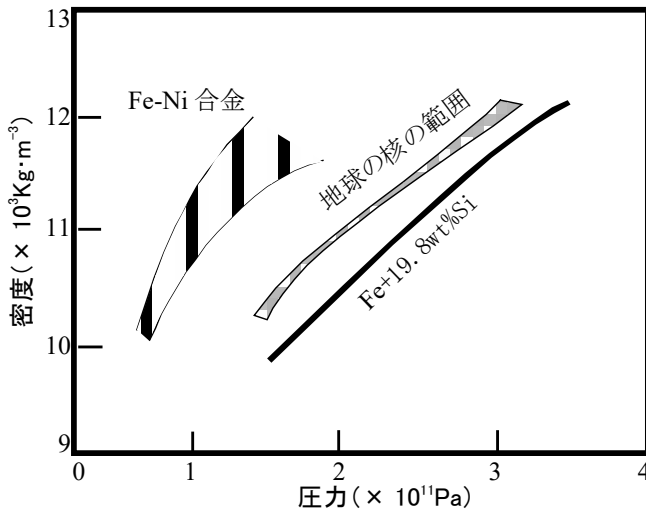
- 1 常識とは
- 2 常識の効用
- 3 常識の弊害と崩壊
- 4 パラダイム
- 5 科学革命を起こす人

▼ 地球の構造

- 1 求める情報と得られる情報
- 2 地球内部を調べる方法
 - 地震波の種類
 - たて波 (P波)
 - 横波 (S波)
 - 表面波
- 3 物質地球の層構造

▼ 核

1 核の構造



2 成分

3 地磁気

- 地磁気の起源：地球ダイナモ説
- 地磁気の移動
- 古地磁気
- 逆転のメカニズム

4 マントルと外核の境界

D''層

▼ マントル

- 1 マントルをつくるもの
 - 2 マントルの構造
 - ・モホロビッチ不連続面
 - ・ゲーテンベルグ不連続面
- 不連続面がある。
低速度層

遷移帯

▼ テクトニクスとは

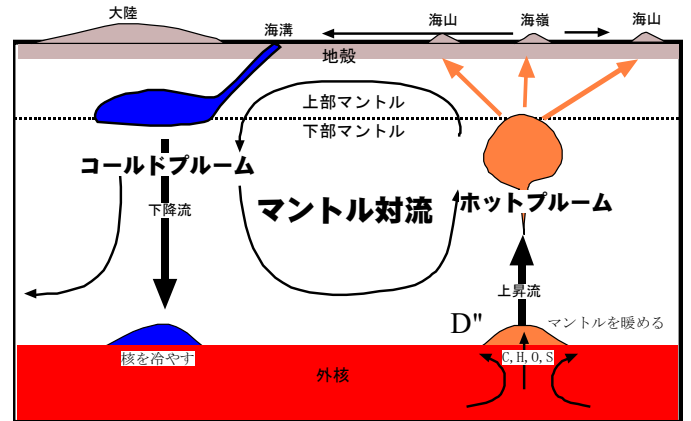
- 1 造山運動：大陸の成長運動
- 2 プレートテクトニクス：地球表層の運動
 - ・大陸移動説：1915年
 - ・マンテル対流説：1928年
 - ・海洋底拡大説：1950年代
 - ・プレートテクトニクスへ：1960年代
- 3 衝突集積テクトニクス：比較惑星学による惑星形成の運動
- 4 プルームテクトニクス：固体地球全体の運動論
- 5 全テクトニクスの時代：比較惑星学による、形

▼ プレートテクトニクス

- 1 プレートとは
- 2 プレートの境界
 - プレートの形成：発散
 - プレートの移動：すれ違い
 - トランスフォーム断層：不思議な断層
 - プレートの収斂（しゅうれん）：沈み込みと衝突
- 3 プレートテクトニクスの問題点：原動力

▼ プルームテクトニクスとは

- 1 プルームとは
 - スーパーホットプルーム
 - コールドプルーム
- 2 超大陸とコールドプルーム



▼ レポートについて

- レポートは**時間厳守**です。
- 第3回 人類と野生生物はどうすれば共存できるでしょうか
- 締め切り：7月18日（木）24：00（時間厳守）

第12講 地球の構造と営み

<http://ext-web.edu.sgu.ac.jp/koide/chikyu/> Email: chikyu2019@ykoide.com

▼ 常識とパラダイム

1 常識とは

多くの人が、持っている常識とは、ある社会がある時期に、自然発生的に生まれてきた考え、指針、行動、文化など大多数の人が無意識に持つものである。新しくその社会に参入する人は、その常識に基づいて教育を受け、その常識の範疇で、行動する。またある人は、その常識をより良きものにするために貢献する。そのような常識に基づいて社会は成り立っていく。

2 常識の効用

常識を基準に考えればいいので、基準となるものがあるので、判断に困ることはない。常識をマスターするには苦労はいらない。普通に生活するにもそれに困ることはない。さらに、その教育システムで優等生となれば、よりよい地位が確保されていくだろう。

3 常識の弊害と崩壊

その社会の住人は、常識の範囲内では、物事が考えられなくなっている。ところが、情報や知識が増えてくると、その常識に合わないものも見つかってくる。初期の頃は、常識を拡大していけば、より広い広範なものとして、常識はよりよいものになっていく。しかし、さらに時間が立つと、どうしてもその常識では説明できない事実や情報が見つかる。そんなとき、あることがきっかけで常識が崩壊することがある。

4 パラダイム

このような常識で大きなものを「パラダイム (paradigm)」という。パラダイムとは、トーマス・クーン著「科学革命の構造」(1962) で示した科学と科学の歴史についての見方である。

クーンのパラダイム論

クーンは、パラダイムを「一般に認められた科学的業績で、一時期の間、専門家に対して問い方や答え方のモデルを与えるもの」と定義している。

パラダイムは、3つのプロセスをへて崩壊し、新しいパラダイムへと転換する。

・通常科学

パラダイムに導かれた研究という意味で一種のパズル解き (puzzle solving) 状態となる。

・危機 (crisis)

パラダイムでは対処できない変則事例 (anomaly) が蓄積してきて、パラダイムは危機を迎える

・科学革命 (scientific revolution)

危機を回避するために、パラダイムにこだわらず新しい考え方が提示される。

5 科学革命を起こす人

パラダイムに忠実である場合：コペルニクス

「伝統に最も忠実なものこそ、その伝統を乗り越えることができる」

ただし、そのためには、パラダイムの中でもなんらかに秀でなければならない。

パラダイムから自由である場合：ガリレオ

▼ 地球の構造

1 求める情報と得られる情報

現在ある物質は、資料が入手可能である。物質は素材であって、情報を読み取るためには、それなりの労力を使わなければならない。求める情報と得られる情報は一致しない。それは、求める情報が、調べる能力と必ずしも一致してないからである。つまり、適切な情報は、適切に調べる能力がなければ得られない。

2 地球内部を調べる方法

見えないものの中を調べる方法は？

スイカを叩くのと同一方法を地球に対しておこなう。地球を響かせるほど、叩くことはできなが、地震ならば地球をかなり揺らすことができる。地震の波を利用して調べる。地震波によって地殻や地球内部の構造がわかる。ある前提（初期条件）を設定することによって、地殻や地球内部の密度構造、地殻や地球内部の温度構造、が推定することができる。地殻や地球内部を構成物の違いを地表から観察することができる。

地震波の種類

たて波（primary wave、略してP波）

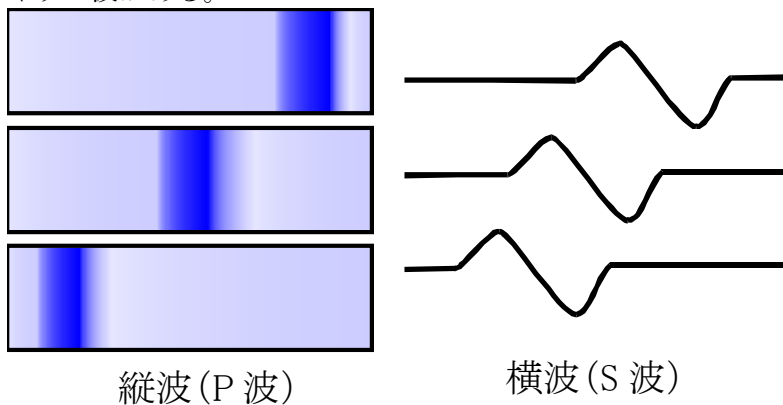
波の進む方向に対して並行に振動。体積変化が波として伝わる粗密波とも呼ばれる。気体でも、液体でも、固体でも伝わる。

横波（secondary wave、略してS波）

波の進む方向に対して垂直に振動。媒質のねじれとして波が伝わるので、固定の中だけを伝わる。

表面波（surface wave、M波と呼ぶこともある）

S波のあとに来る振幅が長く、周期の長い波。最初に来るのは水平動のラブ波、遅れてくる三成分のレイリー波がある。



3 物質地球の層構造

地球は視点によりさまざまな見え方をする。ここでは、実証性の高い、物質を中心とした地球を考える。

地球の物質の中心からみると、

核：鉄からできている

マントル：岩石からできていて、上部と下部に分かれる

地殻：次回の講義

生物圏

海洋

大気

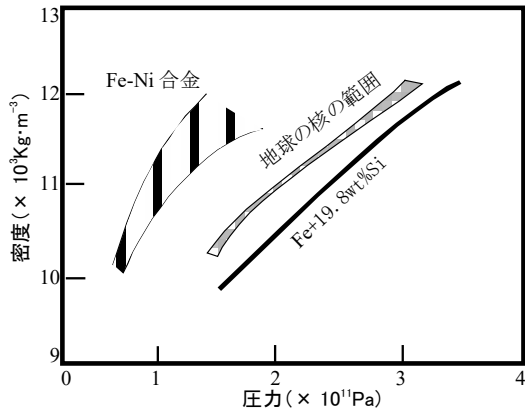
▼ 核

1 核の構造

外核（中心から 1222km～3480kmの間）

内核（中心から 1222kmまで）

に分けられる。



外核は、

液体の金属鉄。金属鉄が流動している。地震波のS波（横波）は通らないので、液体であることがわかる。P波（たて波）で調べる。

内核は、

固体の金属鉄。液体の外核があるので、主としてP波で調べる。内核も年間約 1° の速度で、東方に回転している。地磁気に関与している可能性あり。

2 成分

核は、主に鉄 (Fe) とニッケル (Ni) からできている。しかし、実際に測定された核と、Fe-Ni 合金と比べると、 $1\sim 2 \times 10^3 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 小さい。そのためには、Fe や Ni より軽い元素が、10wt%程度、核に入っている可能性がある。

その候補として、O、S、H、C、Si、Kなどが挙げられている。

軽元素の候補の条件

- ・地球内部にたくさんあること
- ・Feの密度と融点を下げること
- ・核の温度圧力条件でFe-Ni金属の液相に溶け込むこと

このような条件を満たす元素は、OとSであるが、他の元素との組み合わせも可能である。

3 地磁気

地磁気の起源：地球ダイナモ説

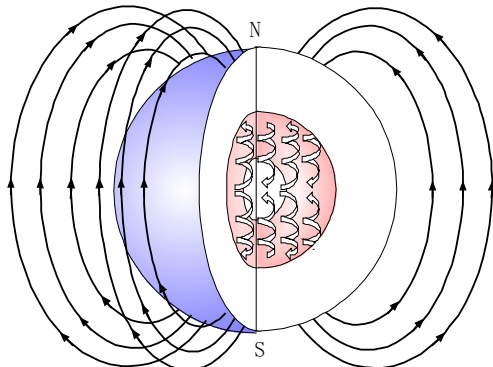
地球には磁場がある。その磁場の起源は、地球の外核にあると考えられている。外核の金属の鉄が流動することによって、磁場を発生している。その仮説を地球ダイナモ説という。まだその実態は解明されていない。

地磁気の移動

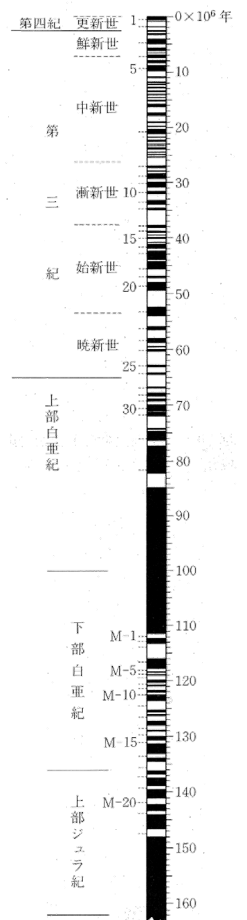
現在、地磁気は、年間 0.2° から 0.3° 程度のスピードで西に移動している。

古地磁気

岩石に地磁気の記録が保存されている。それを古地磁気という。岩石の古地磁気を調べると、地磁気の歴史がわかる。地磁気の逆転が起こることがある。長い時間スケールで見ると、地磁気は何度も逆転している。



逆転のメカニズム



内因説：非線形現象固有の自発的な現象

外因説：核-マントル境界の不均質な構造や状態、マントルの回転速度の変化など

4 マントルと外核の境界

マントルから外核の境界では、激しい変化がある。
つまり、ほかのどの境界より著しい相違がある。

表 マントルと核の違い

	マントル	外核
成分	岩石 (かんらん岩)	金属鉄
相	固体	液体
状態	酸化物 (酸化的)	金属 (還元的)
密度 ($\times 10^3 \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	5.5	10

D” 層

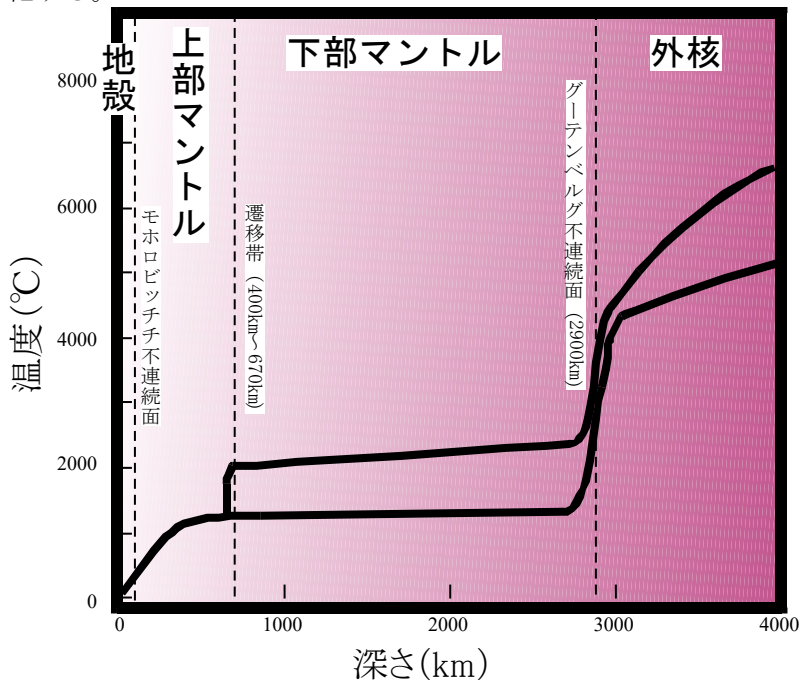
核-マントル境界 (CMB) には、地震波速度 (S 波) が異常に早い地域 (高速度領域) があり、D”層と呼ばれる。D”層は、核-マントル境界から約 300km のマントルの底は、非常に不均質である。そこは、沈み込んだ海洋プレートが落ち込んで溜まっていることがわかってきた。海洋プレートの墓場と考えられている。

そして、D”層と違って地震波速度 (S 波) が遅い地域 (低速度領域) は、スーパープルームが形成されている。プルームテクトニクスと関係ある。

▼ マントル

1 マントルをつくるもの

かんらん岩とよばれる岩石。かんらん石 (オリビン) を主成分鉱物とする岩石。その他に少量の鉱物が混在する。ただし、地球内部は、深くなるにつれて、高温高压になるので、鉱物もより高密度のものに変化する。



2 マントルの構造

マントルは、地震波によって、

- ・モホロビッチチ不連続面
- ・グーテンベルグ不連続面

の間とされている。

それぞれの境界では、物質、比重、温度、圧力、地震波速度などに大きな違いが生じる。

モホロビッチチ不連続面

海洋域では 5~10km の深さ、大陸地域では 30~60km の深さで、地殻とマントルの境界である。

ゲーテンベルグ不連続面

2900kmの深さで、マントルと核との境界部である。

その他にマントル内には、いくつかの地震波において、いくつかの不連続面がある。

低速度層

地震波が、急に速度が小さくなる場所がある。

海洋域では、70~200km付近、

大陸域では、100~200km付近（時には300km付近まで）、

で、地震波速度（特に V_s ）が遅くなる。このようなところを低速度層と呼んでいる。

海洋域では、マントル物質が少し（数%）融けている状態ではないかと考えられている。しかし、大陸域では融けそうもないと考えられている。だから、大陸域の低速度層の原因はよくわかっていない。

遷移帯

400kmから670kmの間には、遷移帯とよばれる不明瞭な境界がある。この遷移帯より上を、上部マントル、下を下部マントルと呼ぶ。遷移帯は、マントル構成鉱物がより高密度の鉱物に変化するところを示している。

▼ テクトニクスとは

1 造山運動：大陸の成長運動

地球の営みを考えるときに重要な考え方がある。それは、テクトニクスというものである。テクトニクスは、英語の「tectonics」そのままである。しかし、テクトニクスの意味するものは、時代と伴に変化してきた。かつて、テクトニクスは、造山運動（orogeny）という山脈をつくる運動、つまり、大陸を成長させる運動と理解された。陸から見た地球観であった。それは、パラダイムとなった。

2 プレートテクトニクス：地球表層の運動

その後、1960年代後半今まで欠けていた海洋からの情報が増大し、大陸と海洋、つまり地球表層の岩石圏全体の運動として捉えられるようになってきた。その結果、科学革命が起こり、プレートテクトニクスが登場した。

・大陸移動説：1915年

ウエゲナー（Alfred Wegener, 1880~1930）が1915年「大陸と海洋の起源」で大陸移動説を唱える。骨子は、超大陸パンゲアが中生代以後、分裂と移動を続け、現在の大陸と海洋の配置ができたというもの。大陸移動の原動力を離極力に求めたが、地球物理学的否定された。1930年、3度目のグリーンランドの探検中に遭難死したため、この説は、忘れ去られた。

・マントル対流説：1928年

ホームズ（A. Holmes, 1928）は、大陸の移動の原動力を、固体マントルの熱対流に結びつけた。しかし、大陸移動説自体が忘れ去られていたので、マントル対流説も注目されなかった。

・海洋底拡大説：1950年代

1950年代に入ると、海洋底の調査が進んだ。その時の成果のひとつとして、中央海嶺と海底の地磁気異常の縞模様の発見がある。中央海嶺では、モホ面直下で地震波のP波速度が異常に遅いこと、高い熱流量、ブーゲー重力異常の強い負の異常などのあることがわかった。これは、海嶺下に、低密度、高温の異常なマントルがあり、マントル最上部も含めてアイソスタシーが成立していることを示している。

これらを説明するために、ディーツ（R. S. Dietz, 1961）やヘス（H. H. Hess, 1962）は、海洋底拡大説を唱えた。中央海嶺で、マントル対流がわきあがり、そこで、新しい海洋底が形成され、マントル対流に乗って、海嶺の両側に海洋底が移動していくというものである。

・復活：1950年代末

古地磁気の研究から求められた、古磁極の移動曲線が、北アメリカとヨーロッパで一致しない。これを説明するには、大陸を移動させるとうまくいく。

・プレートテクトニクスへ：1960年代

1960年代中頃、トランスフォーム断層などの概念（Wilson, 1965）が提示され、プレートテクトニクス

が成立する。

プレートという用語は、マッケンジーとパーカー (D. McKenzie and R.L. Parker, 1967) である。モーガン (W. J. Morgan, 1967) は、プレートを球面幾何学として最初に解析する。スピション (X. Le Pichon, 1968) は、地球を6枚のプレートに区分し、全地球的テクトニクスとして解析した。

3 衝突集積テクトニクス：比較惑星学による惑星形成の運動

1970年代以降には、地球以外の惑星の情報も増加し、惑星形成初期や、他惑星との比較による研究などができるようになってきた。

惑星形成初期には、衝突集積テクトニクス (accretion tectonics) が作用していたことがわかってきた。

4 プルームテクトニクス：固体地球全体の運動論

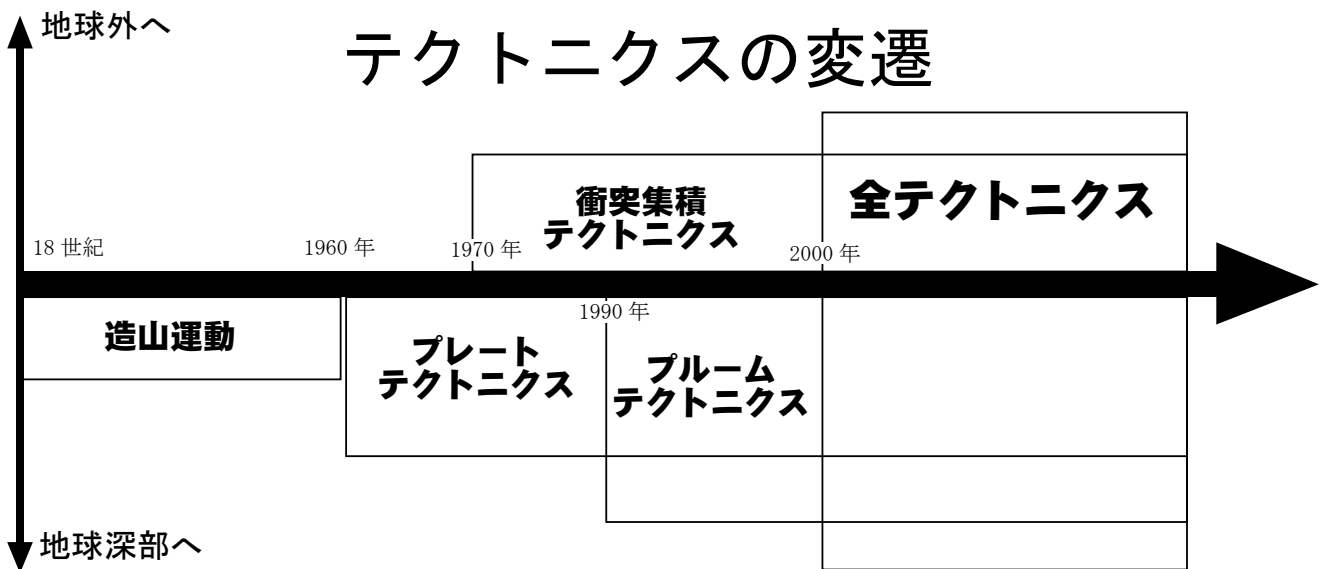
1990年代、地震波研究も進み、地球深部の情報も増加し、テクトニクスを地球深部の運動と物質と結びつけたものとして見られるようになってきた。地震波トモグラフィの発達で、大規模な物質の上下運動が見えてくるようになってきた。固体地球全体の運動論、プルームテクトニクスとして考えられるようになってきた。

プレートテクトニクスの問題を克服したパラダイムとなった。しかし、プルームテクトニクスは、プレートテクトニクスを含むより高次の発展的パラダイムとなっている。

5 全テクトニクスの時代：比較惑星による、形成から現在までの全運動論

今までの研究から、惑星は、衝突集積テクトニクス (月) の後、発達の違いによって、プルームテクトニクスのみの惑星 (金星)、プレートテクトニクスも伴う惑星 (地球、火星) などがあることがわかってきた。

3つのテクトニクスがどのように作用しているかわかるようになってきた。



▼ プレートテクトニクス

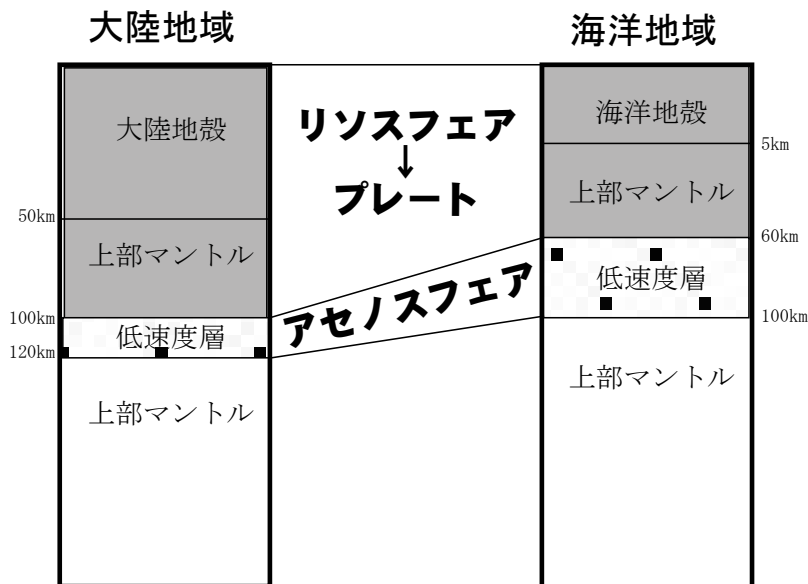
1 プレートとは

プレートとは、英語で「plate」(板) のことで、地学では、岩石の板状のものをいう。約100kmの厚さのプレートがある。これは、地殻とマントル上部をふくむものである。リソスフェア (岩石圏) とも呼ばれる。

境界は、低速度層より上の領域である。低速度層は、地震波 (P波、S波ともに) 速度が遅くなる100km付近の層である。

地震波速度は、物質の温度が高くなれば (軟らかく) ば、速くなる。したがって、低速度層は、温度が高く、軟らかく、流動しやすい (粘性率が低い) 部分である。その部分をアセノスフェアと呼んでいる。

リソスフェア、つまりプレートは、動きやすアセノスフェアの上を、板のように移動している。



2 プレートの境界

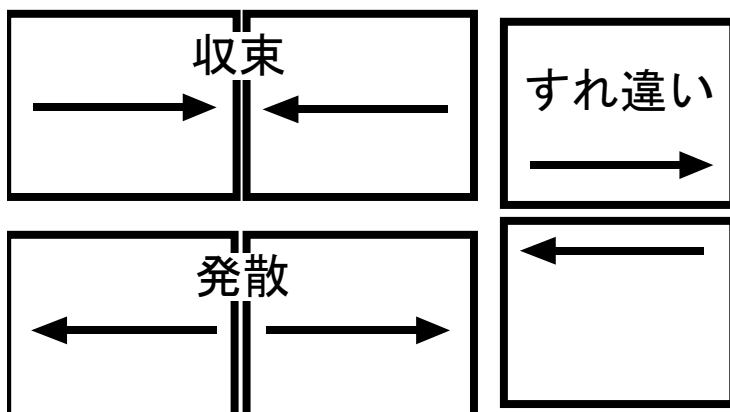
以上の関係から、プレートには、

発散：海嶺

すれ違い：トランスフォーム断層

収束：海溝、山脈、島弧

の3種類の境界があることがわかる。それぞれが、地球の重要な地質体に対応している。



プレートの形成：発散

プレートは、中央海嶺で形成される。そのときできる海洋地殻は、浅いほうから、チャート（堆積岩）、枕状溶岩（玄武岩）、岩脈玄武岩、斑れい岩、かんらん岩（マントル）、となっている。

深いほうは、マントルのかんらん岩で、低速度層までプレートが続く。

形成された海洋プレートは、両側に広がって、発散していく。

大陸地域で同じような作用があると、そこには、大陸を引き裂く、割れ目ができる。アフリカ大陸の大地溝帯（リフトバレー）は、現在、大陸が割れつつある。

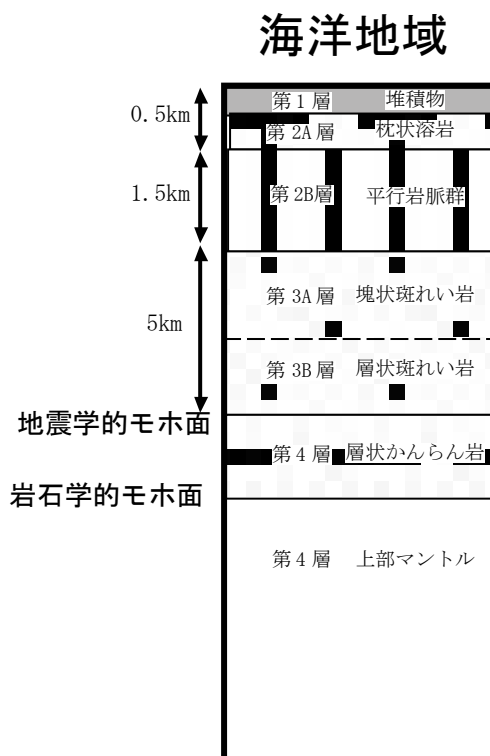
プレートの移動：すれ違い

海洋で形成されたプレートは、海底を移動する。移動する時、冷める

深度が低くなる

堆積物が溜まる

玄武岩が変質する



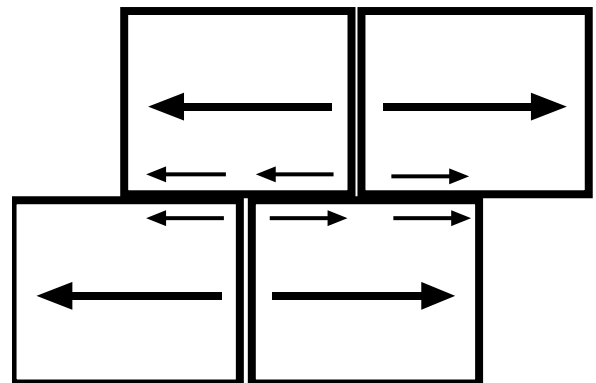
というような変化をする。

トランスフォーム断層：不思議な断層

海嶺は、長く伸びている。そのため、いたるところに海嶺を横切って走っている断層がある。そのような断層をトランスフォーム断層と呼ぶ。

トランスフォーム断層は、プレートテクトニクスの重要な概念である。単なる横ずれ断層だと、すべてのところで、ずれは同じ方向のずれとなる。しかし、トランスフォーム断層では、海嶺にはさまれている部分は逆の方向にずれる。トランスフォーム断層は、地球表面上のプレートが変形しないで運動していることを示す。これは、プレートの概念を象徴している。

トランスフォーム断層



プレートの収斂（しゅうれん）：沈み込みと衝突

海洋プレートは、やがて行き場をなくして、沈み込む。沈み込む相手に対して、

大陸に対して：南アメリカ大陸－太平洋

列島（島弧（とうこ）とよぶ）に対して：東北日本－太平洋

海洋に対して：小笠原－太平洋

のパターンがある。

大陸プレート同士は、お互いに沈み込めないで、衝突するのみ。

大陸プレート同士：ヒマラヤ（ユーラシア大陸とインド大陸の衝突）

3 プレートテクトニクスの問題点：原動力

プレートテクトニクスの原動力は、マンテル対流と考えられていた。

問題点

対流の上昇する場所は、地球表層の状態により変化するはずがないのに、移動しているような形跡がある。

- ・アフリカ大陸は、海嶺に囲まれている
→海嶺が大陸から外に向かって移動している。
- ・アラスカ沖の古地磁気の縞模様が曲がっている
マンテル対流の押し出しが、プレートを移動させていると考え、辻褄が合わない。

▼ プルームテクトニクスとは

1 プルームとは

プルームとは、プリュームとも発音する。英語で「plume」のことで、「煙や雲などの柱や、水柱」の原意で、地学では、マンテルの内部を上昇したり下降したりする流れのことをいう。マンテル内の岩石の流れをいう。

プレートテクトニクスは、地球表層のプレート運動による、地球の営みの説明であった。その原因をマンテル内の流れである、マンテル対流に求めた。プルームテクトニクスでは、マンテル全体におよぶ運動として、地球の営みを考えている。地球全体の運動として考えるとき、プルームテクトニクスは、非常に重要な考えとなる。

・地震波速度の速いところ：スーパーコールドプルーム

低温の部分。密度が大きい

シベリア、ヒマラヤ

現在の沈み込み帯（シベリア）：日本周辺の沈み込み帯

過去の沈み込み帯（ヒマラヤ）：テチス海の沈み込み帯

・地震波速度の遅いところ：スーパーホットプルーム

高温の部分。密度が小さい

南太平洋、アフリカ

スーパーホットプルーム

スーパーホットプルームは、核とマンツルの境界（D''層）から由来する温かいマンツル物質。核からはきだされた化学成分が混入している可能でもある。670kmまで（下部マンツル）、スーパーホットプルームが上昇していく。現在1個あるのみ。そこから上（上部マンツル）へは、小さな多数のホットプルームとして運動する。

なぜスーパーがつくのか

上昇するプルームを、ホットプルームといわず、スーパーをつけるのは、ハワイなどの火山をホットプルーム（ホットスポットともよぶ）と呼んでいるので、先に存在する言葉と区別するためである。

ちなみに現在、約50個のホット・スポットがある。

コールドプルーム

沈み込んだプレートは、670km付近に集まる。「プレートの墓場」と呼ばれる。沈み込んだプレートは、670kmより深いマンツル物質と比べると軽いため、そこより深くは沈めない。そこには、海洋プレートがたくさん溜り、強大な塊となる。これをメガリスともいう。

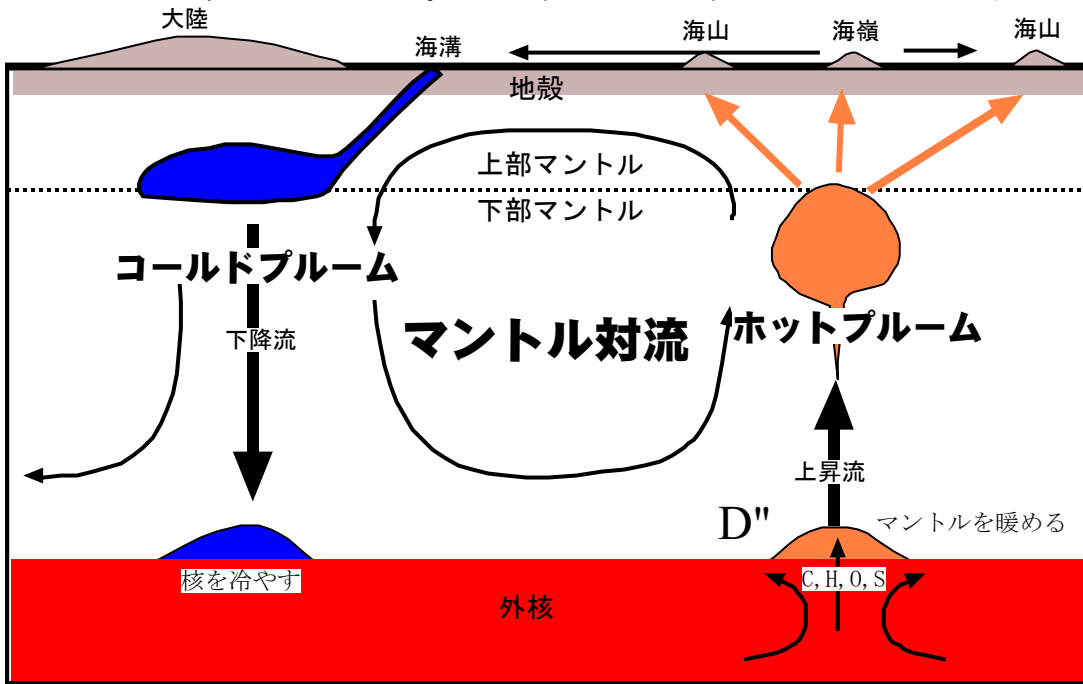
しかし、時間がたち、プレート物質の温度が上がると重い鉱物（γカンラン石からペロブスカイト+ウスタイト相転移）に変わることができ、沈む。その暖まる期間は、約1億年である。

コールドプルームは核とマンツル境界にまで落ち込む。落ち込んだコールドプルームは、核を冷やす。外核での対流を生む。上昇流が次のスーパーホットプルームの上昇地点となる。

2 超大陸とコールドプルーム

超大陸ができているとき、周辺から沈み込んだ海洋プレートが、いくつかのコールドプルームとしておちると、超大陸の下に、スーパーホットプルームが上昇してくる。このスーパーホットプルームが、超大陸を分裂させる。地球の温度が冷めるに従って、プルームの上昇できる位置が、だんだん地球深部に移動していった。

38億年前以降、地位表付近は、プレートの水平運動の働く場となる。現在では、670kmより深いところでのみはたらく状態になっている。しかし、その深さは、過去ほど深かったはずである。



プルームテクトニクス

▼ レポートについて

レポートは e-mail で提出して下さい。紙によるレポートも受けつけます。レポートは**時間厳守**です。少しでも遅れたら加点対象にしません。

第3回 人類と野生生物はどうすれば共存できるでしょうか

締め切り：7月18日（木）24：00（時間厳守）