

第2章 地球形成と冥王代（46億年前～40億年前）

46億年前に誕生した太陽を周回する惑星の一つとして地球は誕生しました。このときから地球の歴史が始まりましたが、最初の6億年間（46～40億年前）は、地質学的記録がほとんどない時代であり、冥王代と呼ばれています。英語では、ギリシャ神話の冥界（あの世）の神の名ハーデスにちなんで Hadean と名づけられています。

【2-1】地球の形成

人類が地球はいつできたのだろうかと思い、地球の年齢を知ったのは最近のことです。そもそも地球に起源があったということさえ、時代によってははっきりしていませんでした。「万学の祖」といわれたアリストテレスを始めとした古代ギリシャの哲学者たちは、この地球を永遠のもの、つまり、常に存在していてこれからも存在し続けると信じていました。

中世には創世記のような記述がよりどころになっていて、1645年にアイルランドの大司教ジェームズ・アッシャーは、聖書に出てくる系譜を用いて、地球創造の日を紀元前4004年10月23日と計算し、これが信じられていました。

近代になって、ニュートンが5万年、博物学者のビュフォンが7万4832年、1862年には熱力学の大家ウィリアム・トムソン（のちのケルヴィン卿）が初期の地球を球状の溶岩に見立てて、それが現在の温度まで冷えるのにかかる年数を計算し、2000万年～4億年という数字を出していました。これらは1896年にアンリ・ベクレルによって発見された放射能の影響を考慮していなかったからでした。

1960年代までに、岩石試料の年代を推定するために放射能を用いる数々の方法が考案され、それらの技術と精度と算出された年代の正確さは、着実に向上していきました。現在では地球が誕生してからの年数は45億4000万年（プラスマイナス5000万年）に近いということがわかっています。この数字は、地球よりも少しだけ古いと思われる隕石の年齢に

よって裏づけられています。

◇核、マントル、マグマオーシャン、原始大気の形成

地球は46億年前、太陽系が形成される時、その惑星の一つとして形成されたと述べましたが、ここではまさに地球が形成されている最中の45億年前の中頃から話をはじめましょう。

そのころの原始地球は、微惑星の衝突によって直径6000キロメートル（現在の地球の直径の2分の1）に達していましたが、のように平均して1年間に1000個以上の微惑星が衝突していました。しかも地球自身の重力が大きくなるにつれて、微惑星を引き寄せる力が増加するために、衝突の規模は大きく激しくなっていました。

地表の衝突面では非常に高温で高圧の状態が発生しました。微惑星に含まれていた水や二酸化炭素のような成分は瞬時に蒸発しました。衝突は、固体が含有していた揮発成分を外に放出する脱ガス過程でもありました。

図 2-1 地球の形成



浜島書店『ニューステージ地学図

表』

蒸発したガスは絶えず地表を漂い、次第に濃密さを増して、図 2-1 の②のように原始地球の大気が形成されていきました。原始大気は、水蒸気が最も多く、次に二酸化炭素、窒素が続きますが、その他に硫黄、フッ素、塩素なども含まれていたと考えられています。

原始地球はこれらの原始大気に厚くおおわれていました。これらはいずれも温室効果の高い気体でしたので、微惑星や小惑星の衝突・合体により発生した大量の熱を地表にためこむことになりました。このため、原始地球は表層温度が上昇し、やがて表面から岩石が溶け始め、図 2-1 の③のように岩石がどろどろに溶けた海の状態、マグマオーシャン状態になっていきました。

このような微惑星や隕石などの落下の最終段階で火星サイズの天体が原始地球に衝突し地球と月ができたことは述べましたが、米国航空宇宙局（NASA）の科学者が数学モデルを作製してその衝突を再現してみました。45 億 6700 万年前、直径 500 キロの隕石が衝突し、原始地球は想像を絶する激変を被りました。鉄とニッケルからなる双方の天体の核が合体しました。衝突後に地表をつくる岩石の広大な領域が蒸発し、数千度にもなる超高温の「岩石ガス」が発生し、それが原始地球を取り巻いて回転していましたが、やがて集まって凝固して月となりました。原始地球は膨大な熱量で全面マグマオーシャンになりました。

やがて太陽もほぼ完成して（当時の太陽は現在より 30% 少ないエネルギーでした）、太陽系はようやく一つの惑星系としての形が整いました。太陽系星雲ができてから 1 億年たったころ、つまり、今から 45 億年くらい前だったと考えられています。

最も軽い物質であるガスがマントルから放出されると、二酸化炭素が豊富だった大気の一部となりました。水素とヘリウムは太陽風によって吹き飛ばされたものの、地球の重力により、二酸化炭素、窒素、水蒸気、アルゴンは引き止められました。この大気に気体の酸素はありませんでした。地球の酸素はすべて岩石や水と結合していたからです。

そのころの原始地球では、マグマオーシャンの深さは 1000 キロメートルにも達し、このときの地表での水蒸気と二酸化炭素の圧力は、それぞれ約 180 気圧と 20 気圧でした。

原始地球に衝突する微惑星や隕石の中にはさまざまな成分、鉄、岩石などが混ざり合った状態が入っていて、普通の状態では鉱石から金属と岩石を分けるのは容易ではありませんが、マグマオーシャンができると高温の溶鉱炉の中のように、金属と岩石の分離は容易に進行したと思われます。

地球の表層は溶け、岩石から鉄が液体として分離し、鉄は岩石よりも重いのでマグマオーシャンの底に沈み、下部マントルも部分的に融解しましたので、その中をかき分けて、一気に地球の中心に向かって崩落してしまいました。すると、落下する鉄の重力エネルギーによって、地球の内部は急激に高温になるとともに金属核が形成されていきました。こうして、[図 2-1](#) の④のように、原始地球の中心から個体の内核、液体の外核、半固体のマントル、マグマオーシャン、原始大気の成層構造が生まれました。

地球の中心部の物質は、硬化して固体の内核（コア）になりました。内核は鉄ニッケル合金であると考えられています。その内核は液体状の外核（やはり鉄が主体）が包んでいて、この外核の流体は滑らかに流動していて、その中で起きる運動が地球の磁場をもたらす一因となったと考えられています。

その外核の外側にあるのが一番厚い層、マントルです。その次の層がマントルから噴出した溶岩によってできた地殻ですが、その厚さは地球の厚さのわずか 0.5% しかありません。

地球の構造はのちに詳述しますが、実は、鉄は地球の内部に豊富にあるだけでなく、宇宙全体のなかでも存在量が特異的に多い物質です。水素、ヘリウムはビッグバンでつくられ、宇宙の全物質の 98% を占めることは述べました。その後、ヘリウムより重い元素もつくられ超新星爆発で宇宙に拡散していったことも述べましたが、そのうちもっとも安定した原子核を持つ鉄が、宇宙には大量に残っているのです。

そのため、地球にも多くとりこまれ、核だけではなく、マントルや地殻にも鉄はたくさん存在し、酸素、ケイ素、アルミニウムの次に多く存在する元素です。鉄はケイ素や硫黄などの他の元素と結びつきやすい性質を持ち、地上にある岩石のほとんどに含まれています。鉄は地球の総重量の 34% を占めており、地球は「鉄の惑星」とも呼ばれます。

◇冷え始めた地球

このころの原始地球を宇宙からみると、地表は岩石の溶ける温度よりも高い 1700 度 C のマグマオーシャンになっており、原始大気の上層部はマイナス 270 度 C の極低温の宇宙空間と接していました。当時の原始地球の雲の高さは 500 キロメートル、現在の雲の高さはせいぜい 10 キロメートルですから、50 倍も高いところにあったことになります。その間の厚い原始大気層の中で激しい対流運動が起きていました（地表の熱を宇宙空間に逃がしていました）。そこでは大気は宇宙空間に接して急冷されて雨になり、地上に向かって落下しますが、地表近くに達すると高温のマグマオーシャンで熱せられるために、ふたたびガスとなって上昇するという奇妙な現象が起きていました。

やがて、地球軌道付近に存在する微惑星の量が減り、地球に落下する微惑星が少なくなり、地表で放出される衝突エネルギーも減少し、地球温度が下がりはじめ、さすがのマグマオーシャンもしだいに冷えて、雲もしだいに地表近くに降りてきました。

地表温度が低下し始めると、マグマオーシャンの固化が始まりました。鉱物はそれぞれ結晶化する温度が異なるため、まず、鉄などの金属質が原始地球の中心部に沈降し核を形成し、その周囲をカンラン岩などのマントルが取り囲みました。そして、この核（コア）とマントルの分離と並行して原始地球の上層部ではマグマオーシャンの固化による元素の分別が起きたと考えられています。マグマオーシャンはまず鉄、マグネシウム、カルシウムなどに富んだ鉱物を晶出しながら次第に温度を下げ、約 1500K（1500K は絶対温度で、約 1227 度 C です）で完全に固化してしまいました。

岩石の年齢というものは、岩が溶けた状態から固まって固体になった時点のことを指しています。

オーストラリア西部のジャック・ヒルズでは、地球最古の物質が発見されています。それが小さなジルコンの結晶で、大きさは 0.2~0.4 ミリメートルしかありませんが、ジャイアント・インパクトで月が生まれてから 1 億年後の 44 億年前に形づくられました。ジルコンとはジルコニウムという元素を含んだ鉱物のことで、耐熱性が高く、化学作用にも強く、非常に硬度の高い鉱物で、浸食その他の地質学的作用の影響を受けず、地球の歴史を記録できる優れた媒体となっています。この結晶の分析結果から地球は従来考えられていたより比較的速く冷えたのではないかという意見が変わってきています。

また、このジャック・ヒルズのジルコン結晶内にある酸素同位体の比率を比較したところ、44 億年前という早い段階から、地球には液体の水をたたえた海が存在していた可能性があると結論づけられました。この結晶にあった酸素 18 と酸素 16 の同位体の比は、液体の水が存在したことを示していました。

また、最近、カナダ・マギル大学などのチームによって、カナダ・ケベック州の北部で、42 億 8000 万年前の岩石が発見されました。これが現在のところ世界最古の岩石であります。ということは少なくともそれまでに地球の一部では地殻ができたということです。逆にいうと、それまでの 2 億年間（45~43 億年前）ぐらいは固定した地殻らしきものはなかったということになります。

これらの事実を踏まえて、原始地球に戻ります。

原始地球の地表温度は下がり続け 600K（330 度 C）になりました。原始地球のように約 200 気圧の大気に覆われている場合、水の臨界温度は 650K（377 度 C）でした。臨界温度とは、水が液体として存在するか、水蒸気になるかの分かれ目の温度です。つまり大気の底での温度が臨界温度を下まわるということは、水蒸気が液化しうる状態になることを意味していました。原始地球を包む濃密な水蒸気大気が、いつ雨となって降りそそいでもおかしくない状態になったのです。

◇海洋の誕生

地表の気温が 300 度 C になったとき、ついに、地表に雨が降り始めました。地球最初の雨は、300 度 C 近くもある高温の雨でした。地表に降り注ぐ雨は、焼けた鉄板に注がれた熱湯のように跳ね上がり雲となって舞い上がりまいた。熱湯の雨は滝のように降り注いで地表の温度を下げ、大気の温度も下げました。

こうして地上は大洪水が荒れ狂いました。しだいに低地に水がたまり、またあふれて流れていきました。やがて水は十分な広さと深さをもって原始地球の表面をおおってしまい、海が誕生しました（図 2-1 の④参照）。おそらく最初の海は 150 度 C ぐらいの熱湯の海であったと思われます。180 気圧もあった大気中の水蒸気はほとんど海水になってしまいました。大気は残った二酸化炭素（20 気圧）を主成分とするようになりました。

やがて、分厚く地球をおおっていた雲（水蒸気）が薄くなり、雲の切れ間から太陽が顔を出しました。できたばかりの海に太陽の日差しがまぶしく照りはえしました。この原始の海は見た感じでは、現在の海とほとんど見分けのつかないものとなりました。しかし、地球上のどこにも、まだ、陸地はなく、どこも水深 4000 メートルの海でした（現在と同じ水量で推定しています。現在の海は平均水深 3700 メートルという水の層が地球表面の 3 分の 2 を覆っています）。これを地球科学では「水惑星の誕生」と呼んでいます。

水が氷と液体と水蒸気という 3 つの状態をとり得る条件を備えているのは、太陽系ではこの地球以外にはありません（火星にも水はありますが凍りついています）。たまたま、地球が太陽の距離から、水が 3 態（固体、液体、気体）をとるような温度（絶対温度で $273\text{K} \pm 50\text{K}$ ぐらい）の位置にあったということが幸運でした。

水が太陽からのエネルギーを得て、地球の血液（物質とエネルギーの媒体物）のように地球の内外を循環し、地球の物質とエネルギーの循環を促し、活力を与えるように働き始めました。この変転きわまりない水の循環が、地球にその後のあらゆる特徴をもたらしてきました。

《二酸化炭素の吸収と大気圧の減少》

最初の海は高温で、雨に含まれていた塩化水素のために強い酸性を示していたと思われます。しかし、この原始の海水も、地球の表層に存在していたケイ酸塩岩石からカルシウムやマグネシウム、ナトリウム、アルミニウム、鉄などの陽イオンが溶け出して、海水の酸性度はしだいに中和されていきました。現在の海底にも、マントルが湧出する海嶺付近にマンガンをはじめとするさまざまな鉱床があり（これを熱水鉱床と呼んでいます）、熱水が噴出していますが、同じような現象が原始海洋底のそこそこで起こったことでしょう。

水蒸気が海水になった後の大気の主成分だった二酸化炭素は、中和された原始の海に溶け込むことができるようになり、すでに溶け込んでいたカルシウムイオンなどと化合し、炭酸カルシウム（石灰石）や炭酸マグネシウムといった炭酸塩鉱物をつくり、沈殿して、海の底に堆積していきました。

《10 気圧の二酸化炭素主体の大気》

このようにして大気中の二酸化炭素も徐々に除かれていきましたが、最終的に大気中に10気圧ほどの二酸化炭素が残りました。したがって、原始大気の成分は変化して、二酸化炭素が10気圧、窒素が1気圧程度となりました。

大気中の二酸化炭素が20気圧から10気圧に減少したために、温室効果が減少し、地球の表面は、1000度Cを超える高温状態から、1000年で一気に130度Cまで下がりました。

しかし、大気中の二酸化炭素は10気圧より下がることはありませんでした。それは海洋で炭酸塩となって海底に堆積し取り除かれる二酸化炭素の量と海底の地下に入った炭酸塩が高温で分解されて大気中へ帰ってしまう二酸化炭素の量がほとんど同じになって（平衡状態になって）、原始大気中の二酸化炭素の圧力は10気圧以下になることはなかったのです。

この大気中の二酸化炭素10気圧はまだ大変な温室効果をもっていました。このため地球の表面は130度Cより低くなることはありませんでした。次には陸地ができて海底に堆積した炭酸塩が取り除かれないかぎり、この平衡状態は続き大気中の二酸化炭素10気圧は変わりませんでした（現在の厚さ120キロメートルの空気の層には、窒素、酸素、アルゴン、それに少量の二酸化炭素が含まれています）。

【2-2】地球変動の原理（プレートテクトニクス）

◇大陸は長い間に移動する

地球の表層が一面水深4000メートルの海であったところに、どうしてはじめての陸が出現したか、次は陸の形成となるはずですが、それには地球内部の熱や物質の循環の仕組みともいべきプレートテクトニクス（プレート理論とも言います）について述べる必要があります。

私たちは動かないもののたとえとして「不動の大地」といいますが、そもそも地球の大陸も長年の間（億年の単位）には地球上を動いており、離合集散していることがわかりました。そのメカニズムを理論化したものが、プレートテクトニクス（その後プルームテクトニクスが追加されました）です。テクトニクスとは、地球の動きを研究する学問という意味です。日本語では「変動学」と訳されます。プルームについては後述します。

このプレートテクトニクスの発想の原点はドイツの気象学者アルフレート・ヴェーゲナー（1880～1930年）が約100年前の1912年に発表した「大陸移動説」にありました（新しい学説の常として、既存の学会がこれに反対したために葬り去られてしまいました）。

やがて1950年代になり、海底石油開発、潜水艦などの海洋軍事利用などいろいろな分野からの海洋調査研究が進み、その研究の結果から大陸移動説は見直されるようになりました。

1969年にカナダの地球物理学者のテューズ・ウィルソン（1908～1993年）がこれらの研究を集大成して、プレートテクトニクス（プレート理論）として発表しました。このプ

プレートテクトニクスが一般に受け入れられたのはようやく 1970 年代になってからでした。

これにより大地の見方がガラリと変わりました。それ以前の固くて動かない塊という見方から、軟らかくて動きやすいものへと、見方が 180 度転換したのです。この時も、新しい学説発表の常として、専門の地質学会においても（日本でも国際的にも）、この新学説に対する抵抗が強く、ほんとうに受け入れられるようになったのは 1980 年頃でした。

プレートテクトニクスの提唱は（これは日本からの提唱でした）、1990 年代のことで、まだ、きわめて新しい理論であります。したがって、一般の人がこれを広く知ることになったのは、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災のあとではないでしょうか。

◇プレートテクトニクス

プレートテクトニクスとは、現在の地球表面は十数枚のプレートにおおわれていて、プレートは大洋の海底の中央海嶺で生まれ、海底を水平方向に移動し、1 億年とか 2 億年という時間をかけて海溝に到着し、最後にマントルに沈み込むという理論です。

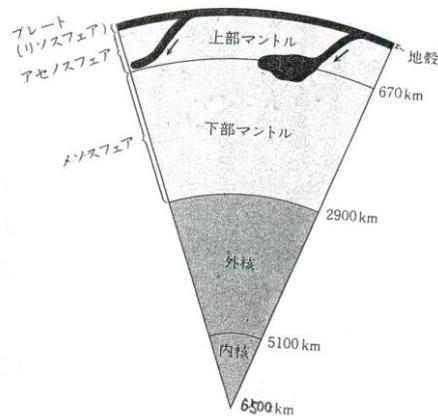
地球の表層である地殻は、主に 7 つのプレート（アフリカ、南極、ユーラシア、北アメリカ、南アメリカ、太平洋、インド・オーストラリア）と、いくつかの小さなプレートからなります。これらの固体のプレートは、マントルという半固体の層に浮かんでいます。プレートの動きは非常に緩慢なもので年間数センチメートル速さです（人間の爪や髪の毛が伸びる程度の速度と言われています）。この地球の層構造は 40 億年前に固定されて以来、これらのプレートは絶え間なく動きつづけています（プレートの数は初期には多く、だんだん減ってきています）。

まず、現在の地球の内部は、 2-2 のように半径約 6,500 キロメートルありますが、その内部構造を物質的に分類しますと、外から順に、①地殻（深さ約 10km~30km まで）、②上部マントル（深さ約 670km まで）、③下部マントル（深さ約 2,900km まで）、④外核（外部コア）（深さ約 5,100km まで）、⑤内核（内部コア）（6,500 キロメートルの地球中心まで）となっています。このように地球内部が層構造になっているのは、前述しましたように地球がマグマオーシャンから冷えて固まっていくときにできたものです（地球内部の探査は地震波によって行います。①~⑥の境界では岩石の密度や結晶構造によって地震波の速度が急に変化することからわかります）。

内核、外核は金属質であることは述べました。

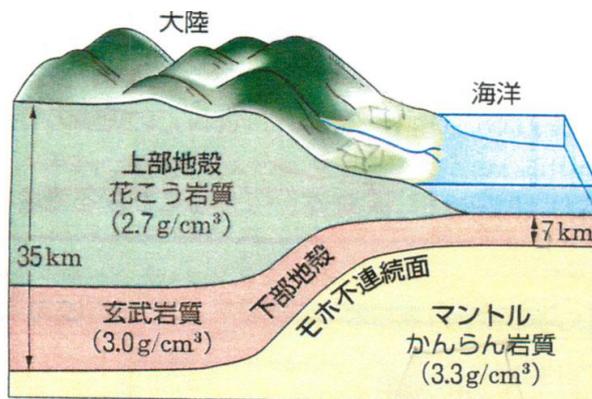
外核を取り巻いているのは、マントルと呼ばれるケイ酸塩岩石からなる固体層ですが、酸化鉄の量や結晶構造に違いがあり、上部マントルと下部マントルに区分されます。このようにマントルは岩石からなる個体ですが、中心核の熱によってマントル内に対流が生じていて、非常に長い時間（億年単位）をかけると、相当ゆっくり「流れる」（曲がる）性質を持っています（断層が出ている地形のところで地層が曲がっていることがわかります）。

図 2-2 地球の内部構造



そして上部マントルの表層部をおおっているのが地殻です。図 2-3 に現在の地殻の構造を示します。地殻も材質によって大陸地殻（上部地殻）と海洋地殻（下部地殻）の 2 種類があります。大陸地殻はアルミニウムなどの軽い元素を含む（軽い）岩石（花崗岩質の岩石。密度 2.75g/cm^3 ）からなっています。海洋地殻は、マグネシウムと鉄が豊富な高密度の（重い）岩石（玄武岩質の岩石。密度 3.0g/cm^3 ）からなっています。

図 2-3 地殻の構造



浜島書店『ニューステージ地学図表』

海洋地殻の下のマントルはかんらん岩質の岩石（密度約 3.3g/cm^3 ）からなっています。

このように地殻の種類によって比重が違いますので、図 2-3 からわかるように重いものが下に軽いものが上になるようになっています。つまり、軽い陸地（大陸）は、重い玄武岩質の上に浮いているようになっています。

また、大陸下の地殻の厚さは 35 キロメートルほどもあり、海の下では 5～10 キロメートルぐらいしかありません。

今度は流動性があるか、ないかによって見ますと、地殻は固く流動性はありません。その下のマントルの流動性は深さによって変化します。深くなるほど核に近く温度が高くな

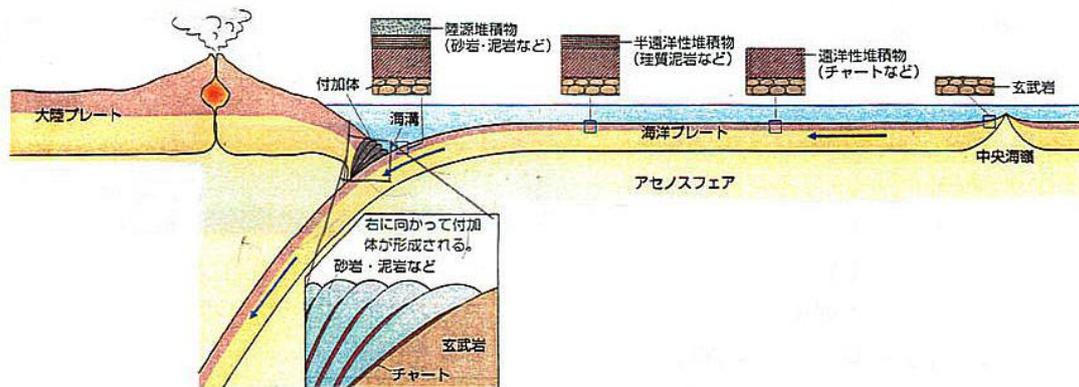
るので流動性が高く、上部マントルの最上部（深さ約 100 キロメートルまで）は固くてほとんど流れず、約 100～400 キロメートルまでの間は比較的流動性があります。

そこで地殻と上部マントル上端の固い部分を合わせてリソスフェア（岩石圏）と呼び、その下の流動性のある部分をアセノスフェア（岩流圏）と呼んで分類します。この表層に近い方のリソスフェアはカチカチのプレート（板）です。その厚さは 100 キロメートルほどです。

このリソスフェア（岩石圏）が地表をおおっていますが、その下部には、まだあまり固まっていない少し温度の高い、流動性のあるアセノスフェア（岩流圏）があります。アセノスフェアは地表から 300 キロメートルぐらいまでで、その下はまた硬くなるのでこの領域（外核まで）をメソスフェア（これに対応する日本語はありません）と呼びます。

そこで、プレートテクトニクスのメインフレームは、**図 2-4** のように、アセノスフェア（岩流圏）の上に、流動性のあるアセノスフェア（岩流圏）、つまり、プレートが載っています。中央海嶺でプレートが生まれ（離れていくプレートの隙間を上昇してきたマグマが埋め、これがまたプレートになります）、水平方向に年間数センチメートルの速度で移動し、海溝に到着し、最後にマントルに沈み込むという流れになります。

図 2-4 プレートの生成と沈み込み



浜島書店『ニューステージ地学図表』

プレートを動かす原動力は1つは重力です。プレートは、その下の層（アセノスフェア）よりも重いので、重力的に不安定であり、プレートがマントルに沈み込み始めると、**図 2-4** のように、ずっと沈み込み続けると考えられています。プレートの沈み込みが起きますと、その背後に隙間ができるから、それを埋めるために中央海嶺で火成活動が始まり新しいプレートが発生します。

この現象を身近な例で説明しますと、大きな机の上を覆うテーブルクロスがいったん机からはみだすと、下へ垂れて落ちていきますが、テーブルクロスは自分の重みで次から次へとずり落ちていきます。これと同じように、沈み込んだプレートでは連続的に下降が起こると考えられています。こうした運動は「テーブルクロス・モデル」と呼ばれており、プレート運動が継続するための第1の原動力と考えられています。

プレート動かすもう一つの原動力はマンツルの熱対流、マンツル対流にあると考えられています。このマンツル対流については、プレートテクトニクスを説明したあとで述べます。

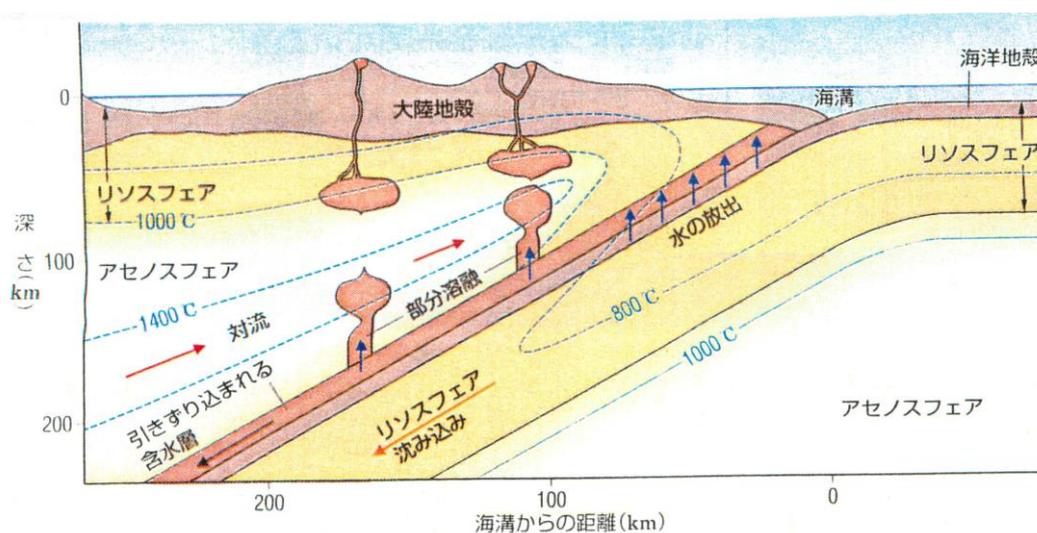
プレートテクトニクスを具体的に太平洋プレートについてみますと、太平洋の中央海嶺で、高温のマンツル物質が上昇しており、深さが200キロメートルより浅くなると、減圧にともなう融点の降下でマンツル物質の部分溶融が起きてマグマが生成され、これが海嶺から海底に出てプレートの材料として供給されます。

海洋プレートは図2-4のように広い海洋を移動していくあいだに多くの堆積物が堆積していきます（太平洋のような長いところでは最長2億年もの移動期間があります）。最初は放散虫などの遠洋性微生物の遺骸などが堆積して、やがてチャート（堆積岩）や珪質頁岩（遠洋性堆積物）がプレートの上になります。大陸に近づくと、大陸から運ばれてきた砂や泥などの碎屑物が堆積します。これらをのせた海洋プレートは、やがて大陸にぶつかり、地球内部に沈み込んでいきます。

プレートが地下に潜っていく領域は「沈み込み帯」といいます。ここでは、海洋地殻が比重の軽い大陸地殻の下へ押し込まれ（沈み込み）、深い海溝ができます（日本海溝）。

このとき、図2-4のようにプレート上の堆積物は沈み込み口付近で取り残され、大陸の下から付け加わります。この部分を付加体といいます。たとえば、日本列島の太平洋側の多くは付加体でできています。付加体は図2-4のように、ほぼ決まったパターンで層序を持った岩石が、ある角度で形成されています（四国の太平洋岸などに典型的にシマ模様の斜めの地層が現れています）。

図2-5 マグマと花崗岩の発生



浜島書店『ニューステージ地学図表』

さて、図2-4のように、（堆積物などが付加体としてそぎ落とされたあとの）プレートが海溝に沈み込み始めると、プレートを形成していた玄武岩質の海洋地殻は比較的比重

が高く、かつ薄いために地球内部に沈み込みます。玄武岩質の地殻は海嶺での形成直後に地殻の中にしみこんだ高温の海水である熱水と反応して含水鉱物をつくっています。水分を含んでいますと岩石が溶融する温度がいちじるしく低下するために、海溝で沈み込んだ含水地殻は図 2-5 のように約 30~50 キロメートルの深さで溶融してマグマを生じ、地表へと上昇していき、花崗岩になります。

花崗岩質の岩石は、前述しましたように玄武岩質岩石より比重が小さいので、花崗岩質岩石はいったん生成されると海底下にもぐり込むことが出来ず、互いに押し合いながら陸地に（再び）付加する形で、大陸に成長していくと考えられています。つまり上へ上へと火山になって出ていきます。

◇プルームテクトニクス

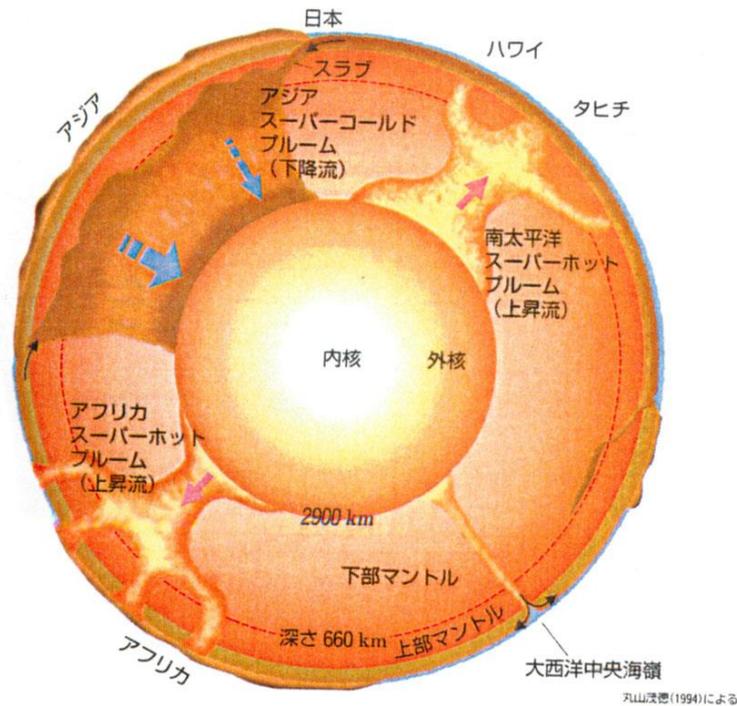
以上がプレートテクトニクスの説明ですが、プレートテクトニクスでわかることは、地球表面のプレートの動きだけです。地下へ沈み込んだプレートがどうなるかわかりません。地球の全体積の 8 割を構成するマンツルの内部で何が起きているかもわかりません。

そこでマンツル内の大規模な対流運動をプルームと呼び、この変動の理論をプルームテクトニクスと呼んでいます。プルームテクトニクスは 1990 年代はじめに日本の深尾良夫（元東京大学地震研究所）や丸山茂徳（東京工業大学地球生命研究所）が提唱しました。

プルームとは「羽のように舞い上がる煙」を意味しますが、図 2-6 のようにマンツル内の大規模な対流運動をプルームと呼んでいます。したがって、プルームテクトニクスとは、マンツル内の大規模な対流運動（プルーム）をつかみ、地球全体を解読しようというものです。

このプルームをとらえる技術がポイントで、医学の世界では CT スキャンの発明によって、切開しなくても人体の断層写真がとれるようになり、診断の分野で威力を発揮していますが、この原理を直接切り開いて見ることのできない地球に応用しようとしたところにポイントがあります。地震波を使って地球の断層写真、地震トモグラフィーをつくっていたのです。

図 2-6 プルームテクトニクス



浜島書店『ニューステージ地学図表』

マントルはかんらん岩などの堅固な岩石からなりますが、長い時間で見ますと「流れる性質」があります。これは「マントル対流」と呼ばれる現象ですが、地球内部の岩石は常にある種の流動性を持っています。マントルは地表からの深さによって、「流れやすい部分」と「流れにくい部分」があります。すなわち、柔らかくて流動性の高い部分と、固くて流動性に乏しい部分であります。こうした違いは、地球内部を通過する地震波を用いて調べることができます。

地下を伝わる地震波にはS波（横波）とP波（縦波）の2つがあります。これらが地球内部を伝わる速度を見ますと、両方とも深いところほど速度は速くなっています。また、地震波は固い場所ほど速く伝わり、逆に軟らかい場所では遅く伝わるという性質があります。したがって、S波が遅く進む場所の岩石は軟らかい、ということになります。

具体的には、マントルのなかで岩石が完全な固体として存在する場所と、一部が溶けかかっている場所とがあります。地表からの深さによって、マントルの温度によって溶け方が異なっています。すなわち、約2000度以下の温度では完全な固体として存在し、2700度まで上がると一部が溶け出し、これ以上に上がると全部が液体になってしまいます。

このような地震波の低温部（固体）で速く、高温部（液体）という性質によって、マントル内部の温度差を、地震波速度の遅速から割り出すことができます。このようにして、あたかもレントゲンで透視するように、図2-7のような断層写真にあたる地震波トモグラフィの作製に成功したのです。赤い部分（遅い部分）は高温域で、マントル物質が上昇しているところといえます。

このプレートテクトニクスでわかったことは、マントルはカンラン岩などの堅固な岩石からなりますが、長い時間で見ますと「流れる性質」があり、マントル内で「マントル対流」と呼ばれる現象が起こっています。

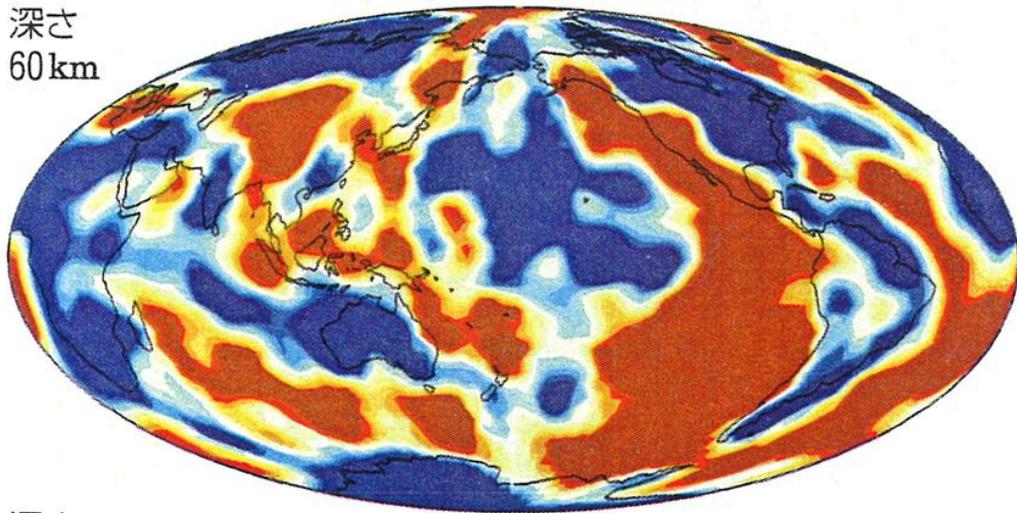
まず、沈み込んだプレート（スラブ）は、[図 2-8](#)の左の図のように、地表から 670 キロメートルの深さの境界（マントルの上下で密度など異なり境界をなしています）でいったん滞留し、たまっていきます。この滞留した低温のプレートの残骸の量にも限界があり、あまりにも多くなると、滞留物資が下部マントルへと雪崩^{なだれ}のように落ちていきます。この下部マントルへ落ち込むものをコールドプルーム（下降する冷たいマントルの塊）といいます。

このとき、入れ替わりに下部マントルから上部マントルへと熱くて軽い物質のホットプルーム（上昇する熱いマントルの塊）が上昇していきます。ホットプルームとは、深さ 2,900 キロメートルの地球の外殻との境目で外核の熱を受けて高温になったマントル成分が上昇するものです。長時間（億年単位）をかけての話ですが、マントルの入れ替わりによって、マントル対流が起きて、地球内部の熱が放出されているのです。

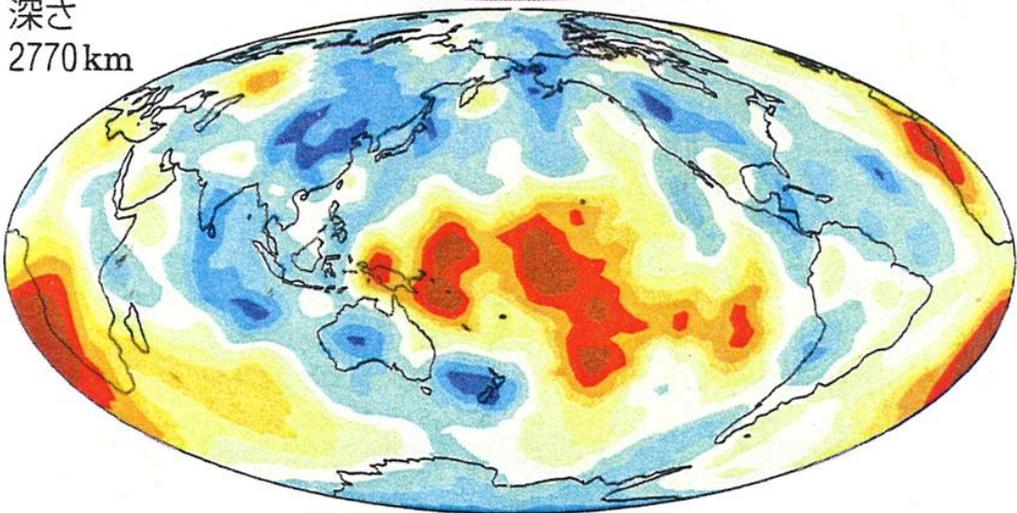
上昇するホットプルームは、深さ 670 キロメートルの部分に一旦滞留するため、通常では地上へ激甚な影響を与えることはありません。しかし大規模なホットプルームが直接地表に達すると、非常に激しい火山活動（当然、地震、津波などをもたないです）が発生すると考えられています。大きな入れ代わりのことをマントルオーバーターンと呼んでいて、その最初もものが 27 億年前に発生しました（第 3 章の太古代で詳述します）。

[図 2-7](#) 全マントルトモグラフィーモデル

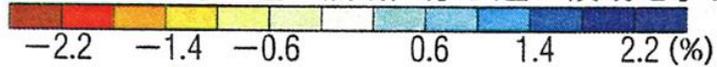
深さ
60 km



深さ
2770 km

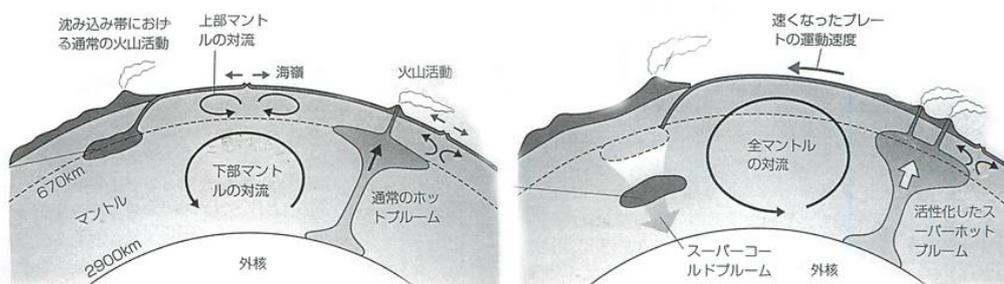


S波の速度。青が速い領域，赤が遅い領域を示す。



Masters, Laske, Bolton, Dziewonski(2000)による

図 2-8 2層対流と全マントル対流



こうして巨大なコールドプルームとホットプルームが、[図 2-6](#)、[図 2-8](#)のように地球内部で下降と上昇を繰り返しながら、物質が循環されています。これはマンテル対流によってもたらされているのです。

《地球プレートを動かす原動力》

さて、マンテル対流は、プレートを動かす「原動力」として重要な役割を果たしています。地表を覆うプレートが水平移動するのは、その下でマンテルが大規模に対流しているからです。いわば、プレートはマンテルの上に筏いかだのように乗りながら、何億年もかけて移動したり、地下に潜ったりしているのです。

約 100 年前、ヴェーゲナーが大陸移動説で大陸を動かす原動力を説明することができなかったため、彼の説は行き詰ってしまいました。その大陸を動かす原動力はマンテル対流だったのです。現在の地球では[図 2-8](#)の右の図のように、1層のマンテル対流（直径約 3000 キロメートル）であり、このマンテル対流の原動力は地球内部の熱エネルギーです。この熱エネルギーは、2つの原因によってもたらされています。

1つは地球ができたときの微惑星の衝突エネルギーでこれが地球内部に蓄えられたもの、もう1つは地球の内部に含まれるウランやトリウムなどの放射性元素が出すエネルギーです。これらの地球内部の熱は、マンテル対流によって地表へと運ばれ、火山活動や地熱として放出されるため、地球はしだいに冷えていきます。

もちろん、（46 億年たった）現在の地球もこの地球の体温というべきものをもっています。2011 年に東北大などのグループが突き止め『ネイチャー・ジオサイエンス』に発表したところによりますと、現在の地球の表面からは 44.2 兆ワットの熱が宇宙に放出されています。その熱源として、地殻やマンテルに含まれるウラン、トリウムなどの放射性物質の崩壊熱が考えられますが、東北大の井上邦雄教授らは、崩壊時に出る素粒子のニュートリノを観測することで、その熱量を 21 兆ワットと見積もりました。差し引き 23 兆ワットは、無数の小さな岩石が衝突して地球ができた当時の熱の残り（主に地球の核（コア）に蓄えられています）と結論づけました。つまり、地球内部の放射性物質が出す熱と地球形成時の余熱がほぼ半々で現在の地球の体温は保たれているということになります。もちろん、太陽からの熱を日々受けていますが、これは熱の形態（電磁波の波長）は変わってもすべて地球から宇宙に再び放熱されてしまうと考えられています。

《地球自身の熱源としての自然放射能》

ここで地球が持っている自然放射能について述べることにします。2011 年の 3.11 福島原発事故で放射能に対する関心が高まりましたが、のちに（第 17 章で）原子力についても述べますので、普段、見過ごされている自然放射線（放射能）について述べておきます。地球の体温の約半分を占めているのが地球の放射性物質が出す熱であると述べましたが、これが自然放射線となっているのです。

私たちは常時、自然界からやってくる放射線を受けています。自然放射線のもとには、①天然の岩石に含まれる放射性元素、②岩石から出る放射線の希ガス、③空から降ってくる

宇宙線の3つに大別されます。天然の放射性元素で代表的なものとしてウラン 238 やトリウム 232、カリウム 40 などがあります。これら元素を含む鉱物が多い地域は、大地からの放射線量が高くなります。

日本の事故前の大地からの放射線の平均値は年間 0.46 ミリシーベルト、1 時間当たりだと 0.052 マイクロシーベルトでした。

大地からの自然放射線は、地域別に見ると図 2-9 のように「西高東低」です。また、山岳地帯が高いことがわかります。日本列島の地質は、糸魚川—静岡構造線で東西に大別されます。西日本はみかげ石として知られる花崗岩が多いため、放射線量が東日本に比べ多くなっています。このほか、黄砂や黄砂にくっついて運ばれてくる鉱物から出る放射線もあります。

放射性の希ガスは、花崗岩やコンクリートに含まれる放射性元素が壊変する過程で生まれます。ウランが別の元素に変る過程でできるラドンが代表格です。屋内におけるラドン濃度の平均値は、屋外の 2 倍近くもあります。木造や鉄骨造り、プレハブ造りだと低め、コンクリート造りだと高めです。

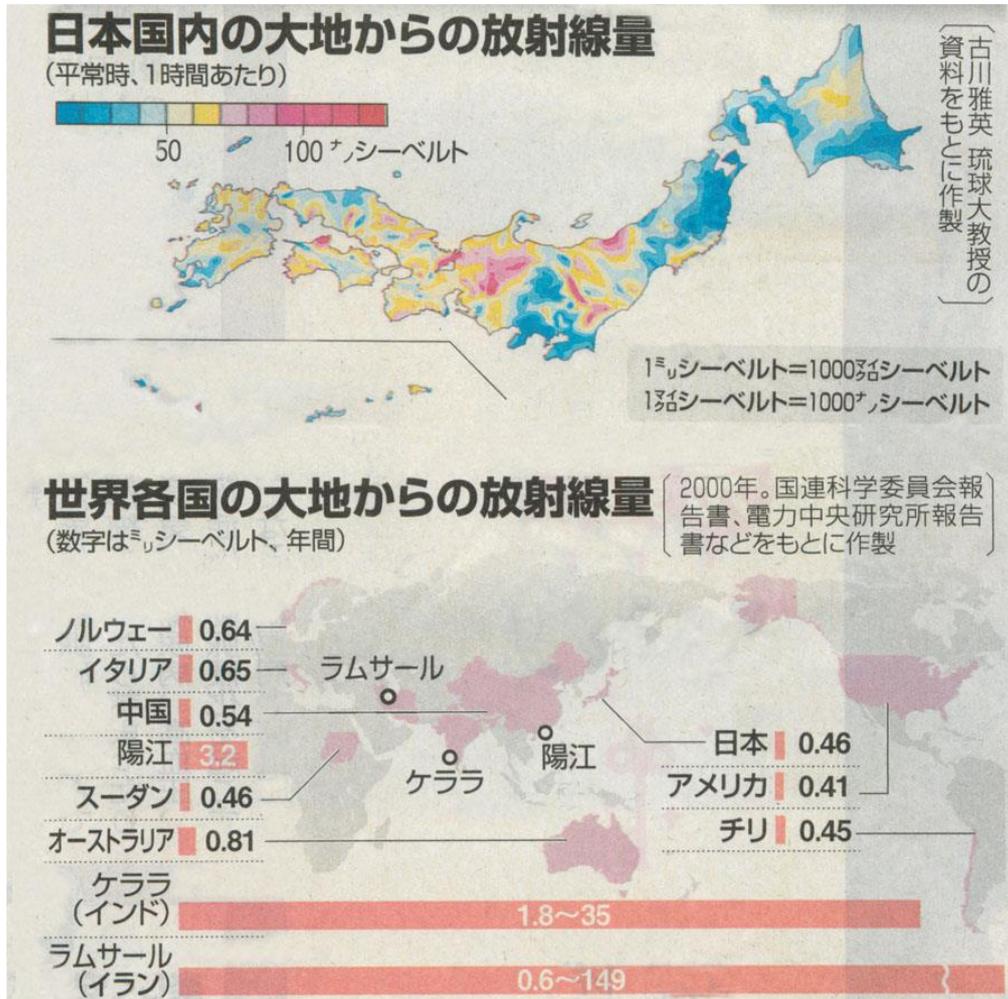
③の空から来る宇宙線がありますが、これはのちに述べますように地球には 5~4 億年前ごろまでオゾン層がなかったので、宇宙線が地球表面に直接降り注いでいました。生物は陸地には生きられず、すべて海中にすんでいました。その後、オゾン層ができて陸上に生物がすみはじめ、私たちも現在陸上で生活しているわけですが、やはり、高度が上がるほど線量は高くなります。飛行機の巡航高度 1 万~2 万メートルがピークで、成田とニューヨークを往復したときの総線量は 181 マイクロシーベルトで、海面高度の 200 倍です。富士山など登山でにぎわう高い山の上も、地上に比べると放射線量は高いのです。

世界的に見ますと、図 2-9 のように日本は平均的ですが、インド南部ケララ州の一部やイラン北部のラムサールの温泉地帯、中国の陽江やブラジルのガラパリなどが線量の高い場所として有名です。ケララでは年間 1.8~35 ミリシーベルト、ラムサールは年間 0.6~149 ミリシーベルトです。

どのくらいの線量でどのくらい健康に影響があるかは、このたびの事故で議論されたところですが、一応、年間 1 ミリシーベルト以下であれば健康に問題はないということのようで、日本国内の自然放射線量はすべてその範囲におさまっています（ケララやラムサールは問題がありそうです。毎時を年間に換算するには $24 \times 365 = 8760$ を掛ければよいのです）。

地球の自然放射能などなければよかったのにと思いたくなりますが、前述しましたように、現在の地球の熱源の半分は放射性物質のおかげだと考えます（過去もそうだったとしたら）、放射性物質がなかったら、とっくに地球は冷え切った星になっていて人類の時代まで到達していなかったと思われる。

図 2-9 自然放射線量



これから述べることですが、私たち生物は前述ぐらいの放射能を浴びても問題ない生物として進化してきています。しかし、急速に地球上で放射線量が増えたとしたら、私たちが安全で生活できるかどうかはわかりません。現在、地球上で 500 基近くの前発が稼働しています。その上、300 基ぐらいの計画もあります。これら前発が出す膨大な前発放射性廃棄物の万年単位の管理が安全に行えるのか、これが人類に可能であるか、できないとなれば、いずれ放射性廃棄物は世界の海に流れ込み、地球全体の放射線量を高めることになるでしょう。この件は第 18 章で詳述します。

マントル対流の熱源の話から横道に入りましたが、プレートテクトニクス、プルームテクトニクスの説明は以上で終わります。

いずれにしても、プレート・テクトニクスでは、数百キロメートルより浅い場所で起きる現象を統一的に説明することができるようになり、これに対して、プルームテクトニクスは、深さ 2900 キロメートルまでのマントル内部の物質循環を説明することができるようになりました。その結果、プルーム・テクトニクスは、かつて「地球科学の革命」として定着したプルームテクトニクスの根元を支える重要な学説となりました。

◇現在のプレートテクトニクス、プルームテクトニクスの実例

地球上では、造山運動、火山、断層、地震、津波等の種々の地殻変動が発生していますが、プレートテクトニクス、プルームテクトニクスはこれらの現象に明確な説明を与えることができるようになりました。従来の地質学ではそれらの現象を個別に説明してきましたが（説明ができなかったことも多かったのですが）、全体の仕組みがわかってきたので統一的な説明ができるようになってきました。以下その実例の一部を記します。

プレート同士が出合うところでは様々な地殻活動が起こりますが、その活動は正確には地殻の構成物質と運動方向によって決まります。プレート境界は、主に3種類あります。

- i) プレート同士が正面からぶつかる収束境界。
- ii) プレート同士が横ずれするトランスフォーム境界。
- iii) プレート同士が離れていき、開いた割れ目にマグマが入り込んで冷えて新たな地殻となる発散境界。

i) の2つのプレートがぶつかる場所では大陸地殻が押し上げられて、ヒマラヤ山脈のような山脈が形成されます。ヒマラヤ山脈の場合は、およそ5000万年前にインドプレートがユーラシアプレートにぶつかってできたものです。

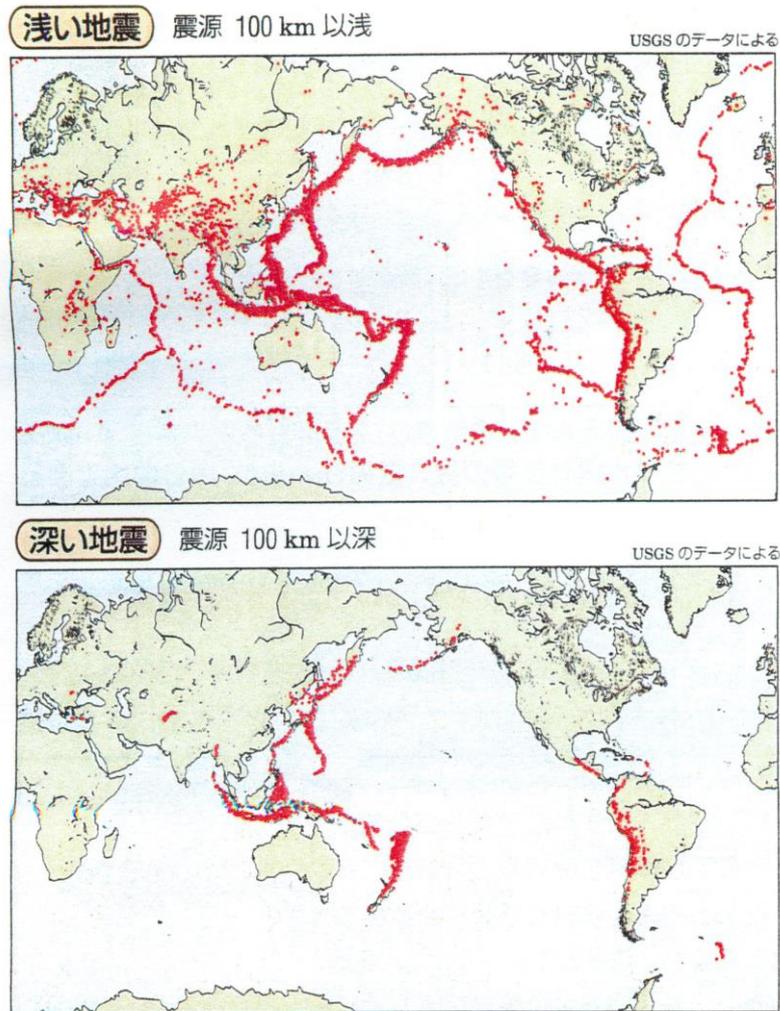
地殻の急激な動きである地震は、プレート境界で発生します。i) の収束境界におけるプレート衝突は極めて深い震源の地震を引き起こします。ii) のトランスフォーム境界とiii) の発散境界では、震源が浅くなりがちです。ii) のトランスフォーム境界は、プレート間の横ずれが発生した地殻の一带に、断層と呼ばれるひび割れが発生し、プレート上のひずみが限界に達して岩盤が破壊され、急にずれると、地震が発生します。

図2-10に世界の地震分布を示しますが、地震帯はプレートの境界に多いことがわかります。海洋プレートが他のプレートの下にもぐりこむ環太平洋地域は、震源が浅い地震（浅発地震）も深い地震（深発地震）もともに多いことがわかります。地震にともなう津波などの分布もプレートの境界に集中しています。

列島のでき方もプレートテクトニクスによって説明できます。地球上の火山は前述しました中央海嶺の火山、沈み込み帯の火山のほかに、大洋の真ん中に火山島や海山が形成されるホットスポットの火山があります。最近、このホットスポット火山の例が日本近海で起きました（太古の地球で起きていたことをこの目で見ることができました）。

2013年に日本の小笠原諸島にある無人の火山島・西之島の西方に出来た火口が噴火し、40年ぶりに新しい陸地を形成しました。当初は西之島から海面を隔てた「別の島」でしたが、溶岩の噴出や堆積が進んで西之島と一体化しました。一連の活動はなおも継続しており、陸地の規模は変化するとみられています。西之島から噴出しているマグマについて、伊豆諸島の島である三宅島、八丈島、青ヶ島、鳥島などは玄武岩マグマを噴出しますが、西之島では大陸地殻に似た安山岩マグマを噴出しているため、大陸形成過程の謎を解明する手がかりになるのではと研究者が注目しています。

図 2-10 世界の地震分布



浜島書店『ニューステージ地学図表』

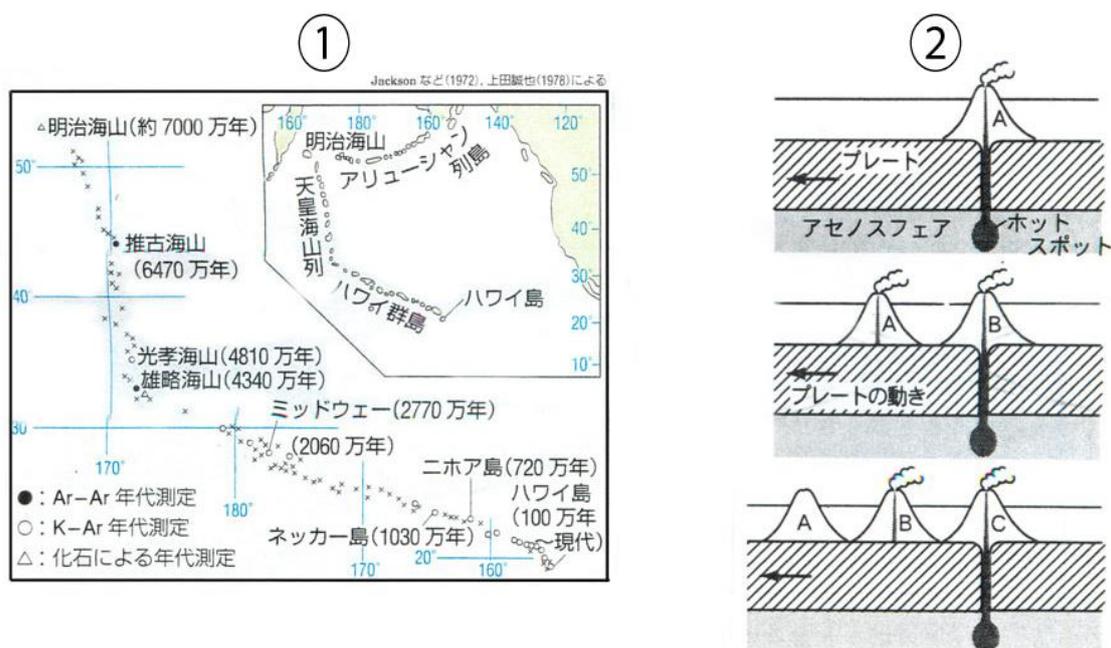
というのは、西之島周辺で噴出している岩石はすべて軽い成分が多い安山岩であることがわかりました。そもそも大陸と火山島では岩石の性質が違い、火山島が噴き出すのは重い岩石です。重い岩石の島は長い年月の間に自らの重みでマントルの中に沈み込んでしまいます。西之島は3~4000メートル級の巨大な海底火山でその本体がほぼ安山岩で出来ていることがわかりました。太古の時代には、いたるところにマントルが地表近くにせまっ
ていて、いたるところで西之島のような海底火山が表れて軽い岩石を吹き出し続け、それがしだいに集まり、大陸になったと考えられています。

このようなホットスポット火山は長年月でどうなるかということですが、図 2-11 のように、ハワイ島からミッドウェイ島付近まで（それから折れ曲がって天皇海山列まで）島々が続いています。これは、太平洋プレートが太平洋を西（日本の方向）へ移動する途中でつくったものです。

図2-11-②のように、地球内部の熱源により、マントルのある部分がより多く温められると、その部分は軽くなりますから、マントル内で上昇し、さらにマグマ化して、溶岩を地表に噴出させ火山（海底火山）となります。実はこのような位置は一定化されていると考えられています（ハワイ島があるところ）。このような不動の地点をホットスポットと呼んでいます。

ホットスポット自身は動かなくても、その上に乗っているプレートが移動すれば、図2-11-②のように、それに乗った火山島は他へ移動して、次々と新しい火山島ができていきます。古い火山はベルトコンベアに乗って、ホットスポットからどんどん離れていって図2-11-①のようなハワイ諸島ができたのです。ハワイ諸島と天皇海山列を合わせた長さは6000キロメートルに達します（途中折れ曲がっているのは、太平洋プレートの向きが変わったためです）。これらすべてホットスポット上にできた火山列です。7000万年にわたる火山の軌跡が、ハワイ島から明治海山まで残されています。太平洋プレートは1年に10センチメートルのスピードで動いていたことがわかります（伊豆七島なども同様にできました）。これはまさにプレートテクトニクスの考えを支持する現象です。

図2-11 火山列島のでき方



浜島書店『ニューステージ地学図表』

太平洋プレートと北アメリカプレートの場合は、片方が沈み込んでいますが、両プレートがまともにぶつかる衝突型の場合もあります。現在でも活発で大規模な大陸衝突が起きているのはヒマラヤです。元来、南極大陸と一緒だったインドプレートが分離・北上して、ユーラシアプレートと衝突し、現在もそのままゆっくり北上を続けています。大陸プレート同士の衝突のため、日本近海のような一方的な沈み込みとならず、インドプレ

トがユーラシアプレートの下に部分的にもぐりこみながら押し上げています。その結果 8,000 メートル級の高山が並ぶヒマラヤ山脈や広大なチベット高原が隆起していきました（現在も隆起を続けています）。

また、すれ違うプレート同士の間では、明瞭な横ずれ断層（トランスフォーム断層）が形成され、地震などが起きます。アメリカ西部のサンアンドレアス断層やトルコの北アナトリア断層などが有名で、非常に活発に活動しています。

プルームテクトニクスでわかったことは、現在の地球にはスーパーホットストリームが 2 つあり、その 1 つは図 2-5 のように、アフリカ大陸の下にあり、大地溝帯（グレート・リフト・バレー）が形成された原因です（現在も大地溝帯は拡大中です）。もう一つのスーパーホットプルームは南太平洋の下にあり、南太平洋に点在する火山（インドネシア周辺）の源であると考えられています。

スーパーホットストリームがあれば、スーパーコールドストリームもあります。大陸プレートと衝突した海洋プレートは海溝からマンテル中に沈み込み、沈み込んだプレートは徐々に周辺のマンテルと一体化していきませんが、大部分が比較的低温のまま、外部マンテルと内部マンテルの境目の深さ 670 キロメートルの部分で一旦滞留した後、更に内部マンテルの底を目指して沈んでいきます。

何かのきっかけで下降流が複数寄り集まった場合には、強く大きな下降流が発生します。これはスーパーコールドプルームと呼ばれ、現在はアジア大陸の下に存在しています（図 2-5 参照）。スーパーコールドプルームは周辺のプレートを吸い寄せするため、陸地を 1 ヶ所に集めて超大陸を形成する原動力にもなります。

たとえば浴槽に木の葉を浮かべて栓を抜いたときを想像しますと、水に浮いた木の葉は水栓の上に吸い寄せられて集まりますが、地球では比重の小さい大陸地殻がスーパーコールドプルームに吸い寄せられて集まってくるのです。

現在ではインド大陸がユーラシア（アジア）大陸と衝突し（なお、かつ、まだヒマラヤの方へ食い込んでいっています）、アフリカ大陸やオーストラリア大陸もアジア大陸に接近しつつあります。これはアジア大陸の下のスーパーコールドプルームに吸い寄せられてのことです。今は太平洋を隔てているアメリカ大陸もアジアに向かって移動しており（ということは大西洋が広がり、太平洋が縮まりつつあります）、約 2 億年（あるいは 2 億 5000 万年）後には（アジア大陸を中心に）ほとんどの大陸が合体した超大陸が生まれると想定されています（もちろん、その時には日本海は消失し日本列島も超大陸の一部となるでしょう）。

前述しましたようにプレートテクトニクスでは、大陸プレートや海洋プレートの動きから、地球表面で発生している造山運動・地震・火山などを説明できるようになりましたが、プレートが移動する方向について検討されておらず、超大陸の形成や分裂を説明することはできませんでした。しかし、このプルームテクトニクスによって、これらのことも説明できるようになりつつあります。

また生物の大量絶滅の原因についても、地球内部の動きに起因する大陸の離合集散や、大規模な火山活動による二酸化炭素濃度の上昇に端を発する気候変動と関連づけて、説明できるのではないかと現在鋭意、研究が進められています（これについては、これからの地球の歴史で述べていきます）。

従来のプレートテクトニクスは地球表面に存在するプレートの変動を扱うのに対し、このプルームテクトニクスでは、そのプレートを動かすマントル全体の動きを検討することができるので、プレートテクトニクスとプルームテクトニクスは相補いながら、今後、地球の解明がさらに進められると期待されています（このような理論が構築されはじめたのは前述しましたように最近のことで、これから実証研究が進むというところで2011. 3. 11の東日本の地震・津波が起きてしまったことは不幸なことでした。今後、人類は全力でこの分野の研究を進め、その対策をとる必要があります）。

《日本列島の形成（約2500万年前～）》

ここで、プレートテクトニクスとプルームテクトニクスの応用として、時代はずっと後の新生代になりますが、日本列島がどのようにして形成されたかを最新の研究から述べることにします。

日本列島の基盤は、中生代（2.5億年前～6600万年前）が始まる前にアジア大陸の東縁で形成されていました（だから、恐竜の骨も出土するのでしょう）。つまり、太平洋プレートの沈み込み運動によって、海洋底の堆積物がアジア大陸にも付け加わっていました。当時の日本列島はアジア大陸の一部でした。

新生代（6600万年前～）の中期以降にアジア大陸から切り離されるという新しい地殻運動が始まりました。今から3000万年前、太平洋プレートがアジア大陸地殻に沈み込んでいましたが、沈み込んだプレートは固い地層に阻まれて上方へ渦巻き状に曲げられ、逆方向に動き始め、大陸の縁に亀裂が入り始めました。今から2500万年前、[図2-12](#)の①のように、アジア大陸地殻に割れ目が入り、細長く陥没し、地溝帯ができました。

一方、現在の日本列島にあたる大陸の地下を構成する地殻の下部に、高温のプルームが上昇しはじめました。このプルームは幅が数百キロから1000キロメートルに達する巨大な上昇流でした。この活動によってアジア大陸の一部だった日本列島の地殻は、東西方向に引き裂かれ、大陸から分裂して弧状列島（島弧）になりました。

その後、1900万年前頃には、地溝帯の裂け目が水平に伸びて海まで達し、中に海水が侵入してくるようになり、深い海（日本海）ができ、アジア大陸の縁は細長い二つの島（西日本島と東日本島）になりました。

太平洋プレートはさらに大陸プレートの下に沈み込み続けたので、二つの島は大陸からますます離れて（裂けて）いきました。このとき、二つの島は、もともと同じ北を向いていましたが、[西日本島](#)にはフィリピン海プレートがぶつかってきたため、[長崎県対馬](#)南西部付近を中心に時計回りに40～50度回転し、同時に[東日本島](#)には北アメリカプレー

トがぶつかってきたため、北海道知床半島沖付近を中心に、こちらは反時計回りに40~50度回転しました。

これにより、[図2-12](#)の②のように、今の日本列島の関東以北は南北に、中部以西は東西に伸びる形になりました。いわゆる「観音開きモデル説」です。そして、およそ1500万年前には日本海となる大きな窪みが形成され、現在の日本海の大きさまで拡大しました。

[図2-12](#) 日本列島の形成



浜島書店『ニューステージ地学図表』

西日本島も、東日本島も、山はほとんどなく、一面の平原で、大型のゾウの仲間やワニの祖先が暮らしていました。ところがプレート・テクトニクス^{プレート・テクトニクス}の原理は休むことなく働いていて、フィリピン海プレートが西日本島に沈み込み続けましたので、西日本島の現在の紀伊半島あたりの地下に巨大なマグマがたまり、カルデラ噴火が起きました。

このようなカルデラ噴火は紀伊半島だけで他に2カ所、四国で2カ所（石鎚山^{いしづちやま}など）、九州で2カ所（宮崎の大崩山^{おおくえやま}など）、東海で1カ所などでも起こり、西日本島を山国に変えました。

そのころの日本列島とは、北向きの東日本と西向き^{西向き}の西日本であり、現在の関東地方はその二つの島を隔てる海峡で、まだ、何もありませんでした。

ところが、[図2-12](#)の③の500万年前には、フィリピン海プレートに乗っていた火山島（たとえば、丹沢山地のもととなった島など）が連続して二本の列島を埋めるように衝突しはじめました。最後に衝突したのは伊豆半島となった島でした（まだ、衝突していない島々として小笠原やマリアナの島々があります）。衝突したのは西日本の東端でしたが、山々からは大量の土砂が流れ出して関東平野のもととなり、二つの島を一本に繋げてしまいました。

こうしてできた関東平野は例外的に広く、フォッサマグナ（大きな溝）を形成しています。フォッサマグナとは、日本の主要な地溝帯の一つで、地質学においては東日本と西日本の境目となる地帯です。古い地層でできた本州の中央をU字型の溝が南北に走り、その溝に新しい地層が溜まっている地域です。本州中央部、中部地方から関東地方にかけての地域を縦断しています。全般的に地震の発生が多く、起伏の激しい地形が多いところです。

こうして、日本に不完全ながらも折れ曲がった弧状列島の形ができあがったのは、今からおよそ 500 万年前でした。

このようにして出来た日本列島は、[図 2-12](#) の③のように、西日本はほぼ陸地化していましたが、東日本は広く海に覆われ、多島海の状況でした。ところが、300 万年前には、フィリピン海プレートは太平洋プレートにぶつかり、それ以上北に進めなくなり、そこで北西に進み始めました。

かわって、太平洋プレートが東日本にぶち当たり、下に沈み始め、その分、東日本は押されて、東日本の山々は 2000 メートルも隆起しました。たとえば、300 万年前に日本海側は 2000 メートルも隆起したため、新潟県の八海山は 1778 メートルの山となりました。こうして現在の奥羽山脈・出羽丘陵、北海道の日高山脈などが形成され東日本も山に富んだ土地となりました（現在、太平洋プレートは年 10 センチ、フィリピンプレートは年 3~4 センチで動くため、移動量にずれがあるため、関東甲信越 - 東北周辺が強く圧迫されたり、内陸型地震になったりしています）。

[図 2-12](#) の④のように、200 万年前から東進していた日本海、北から割り込んできた北アメリカプレート、東からの太平洋プレート、北西からのフィリピン海プレートなどによって、日本列島は東西に押されて山脈が隆起し続けて、現在の日本列島が形作られました。このころは氷河時代であり、寒冷が厳しい氷期と温暖な間氷期とが交互に繰り返されました。

朝鮮海峡の最深部は 120 メートル、津軽海峡の最深部は 133 メートルでありますから、氷期に海面が 100~120 メートルも低くなると、日本列島で北と南でアジア大陸と陸続きになったり、離れたりし、陸続きの時は、日本海が大きな湖のような形となりました。63 万年前頃と 43 万年~10 万年前頃と 2 万年~1 万 8000 年前頃に陸続きであったとみられています。

後述しますが、最終氷河期の氷期が 1 万 5000 年前頃に終わると海面が高くなって、マイナス約 60 メートルの[宗谷海峡](#)が海水面下に没したのは、約 1 万 3000 年から 1 万 2000 年前ですから、ほぼこの時期に日本は、完全に大陸から離れて現在の姿と環境を整えたことになり、現在の姿の日本列島ができあがりました。

このように見てくると現在のような日本列島になったのは、まだ、たった 1 万年前で（後述しますように、4 万年前からホモ・サピエンスがすみついていたと考えられます）、今後も、また、やがて姿を変える可能性があるということです（地球温暖化の進行や現在の間氷期が終了して次の氷期がはじまってきたとき。プレート・テクトニクスによる地盤の変動など）。私たちは陸地を（どのくらいのスパンで見るとかにもよりますが）固定的なものと考えてはならないようです（「変わりゆく環境」に应变に対処する、それが人間であるということをおぼえてはならないようです）。

さて、ここまでの現在の（40 億年近くたち、かなり冷えた地球の）プレートテクトニクスとプレートテクトニクスをもとにした一般的な説明でした。近年の研究によりプレート

テクトニクスは、40 億年前ごろから始まっていたことが判明しました。

プレートテクトニクスとプルームテクトニクスの説明をここでしましたのは、冥王代の陸地の形成を説明するために必要でした。そこで冥王代に戻ります。

【2-3】冥王代の陸地の形成

◇陸地の形成

現在でも大西洋や太平洋の海底の中央海嶺付近では、マグマが海底付近にまで上昇し、熱水噴出孔があって、マグマに熱せられた海水や地下水が噴き出していますが、40 数億年前の原始地球は現在とは比較にならないほど大きな熱量をもっており、原始の海底では活発に熱が放出されていたでしょう。

マントル対流の上昇部では、熱は原始地殻を持ち上げ、海底を引き裂き（そのころ陸地はなく全地球が水深 4000 メートルの海底にありました）、そこから熱を海中に放出していたと考えられています。図 2-8 の左図のように、下部マントルと上部マントルの 2 層の対流を起こしながら多量の熱を多数の熱水噴出孔のような割れ目からさかんに放熱していたでしょう。当時の海底の表層は玄武岩によっておおわれ、大陸地殻をなす花崗岩はまだ形成されていなかったでしょう。

40 億年前ごろから初期のプレートテクトニクスが働き始めたといわれていますが、そのころには、無数の小さいプレートが海底にできていたでしょう。地殻変動により 2 つのプレートが正面からぶつかりあい、一方が他方の下に沈み込みました。マントル内では軽い物質が先に溶け、湧き上がるように地表（といっても海底）に出て、マグマが冷えて、結晶質岩（花崗岩）からなる海山（まだ、海面に顔を出していません）ができたでしょう。

これにプレートがぶつかり沈み込んでいくと、マントルの融点が下がり、マグマが生じ、マグマは周囲のマントルに比べ軽いので上昇していったでしょう。この高まりの所々では、マグマが海底に噴出して海底火山となったでしょう。この火山に海溝に沈みきれずに取り残された花崗岩の付加体が次々と付加して、ついに海の上に姿を現したでしょう。これが最初の陸地でした。陸地の多くは、プレートの境界域（海溝付近）に形成されたので、この種の列島は島弧または弧状列島と呼ばれます。

前述しましたように、2013 年、日本の小笠原諸島の西之島沖に新島が発見されました。激しい火山活動により溶岩が地殻を突き抜けてその後冷えるという、40 億年前に陸地ができたときと同じ過程をたどって新島が出現しました。

この熱量の多い冥王代から太古代初期には、そのプレートは、現在のプレートよりずっと小さく、地球には数百から 1000 のマイクロプレートがあり、それぞれのマイクロプレートごとに多数の孤状列島が出来、プレートテクトニクスもプルームテクトニクスも激しく稼働していたでしょう。冥王代と太古代初期は海洋マイクロプレートと孤状列島の時代であったと考えられています。

◇再び炭素循環システムの形成

地球の炭素の循環システムの中で、海水中に溶け込む二酸化炭素の量には限界があり、大気中の二酸化炭素はどうしても 10 気圧以下にならなかつたと述べましたが、前述しましたように陸地地殻が形成されはじめると、話が違ってきました。

海底に堆積した比重の低い石灰石は海底をプレートで運ばれ、[図 2-4](#)のように、陸地に付加されて、積みあがっていったので、この石灰石に含まれていた炭素が大気中にかえるという炭素の循環システムから外れてしまうようになりました（これが現在、地上で石灰石の鉱山となっています）。

石灰石が陸地に付加され、海底の石灰石が取り除かれると、再び海水中に溶けていた二酸化炭素が石灰石になり海底に沈殿し減少しました。海水中の二酸化炭素が減少すると、大気中の二酸化炭素が海水に溶け込みやすくなり、大気中の二酸化炭素の量も減っていきましました。こうして、石灰石が陸地に積みあがるごとに、その分、大気中の二酸化炭素が海中に溶けていくということが繰り返されました。

大気中の二酸化炭素は 10 気圧ぐらいから、ぐんぐん減って行って、35 億年前ごろには 1 気圧程度にまで下がりました。原始大気の温室効果もその分、減少して行って、地球はさらに冷えていきました。

この時点で大気中の二酸化炭素は 1 気圧程度になりましたが、現在と比べればまだ非常に高いものでした（現在の大気中の二酸化炭素量は約 400ppm=0.04%つまり 0.04 気圧程度です）。そのうち、生物が現れて生物によってつくられる石灰石（サンゴ礁など）、石炭層、石油貯留層の形成などによって炭素の循環システムはさらに複雑になり、大気中の二酸化炭素の量はさらに減っていきましましたが、それはもっとずっとあとのことであります（石炭は第 5 章の古生代、石油は第 6 章の中生代で述べます）。

実際に現在の地球では、全炭素の約 90%が堆積岩中に石灰岩や有機炭素（石油・石炭など）として貯蔵され、海洋底には 10%が存在するに過ぎません。

その後、また、数億年がたって、生物の中からヒトという種が現れて、数億年かかって地球が蓄積した炭素（石炭・石油などに含まれる炭素）をたった 200~300 年間で大気中に放出して地球温暖化という大問題を起こしています。それは 18 世紀後半から 21 世紀のことであり、これについては第 17 章で述べます。

この地球における炭素循環システムは、地球温暖化という形で、これからの地球の歴史の中で何度も出てきますが、ここでは、この冥王代から太古代初期にかけて、地球の（自然による）大まかな炭素循環システムの仕組みが動き始めたということを述べるにとどめておきます。

