

3章 地球史

地球の起源となった隕石の衝突によって作られた苛酷な環境は、生命が生き続けるには向いていなかった(Chapter2)。生命が厳密にどこでどのように誕生したのか—例えば浅海か、深海か—によって、隕石の衝突が44億年前～38億年前の間地球を不毛にし続けてきたのだろう。どうしてこんなに激しい時期に生命が誕生したのかを理解するために、この時期に起こった地質学的な自然現象を知る必要がある。35億年前に生命が発生したプロセスを特定するのを手助けするために、現在起こっている地質学的、地球物理学的な性質を考察し、これらのプロセスが地球史上の早い時期にどのように起こったのかを考察しなければならない。この関係がわかれば地球の地質学的な記録で示される生命の歴史について考察できるであろう(Chapter4)。それとともに、生命がいつ誕生したか、初期の時代にどんな特徴を持った生命がいたか、その環境でどのように影響しあっていたのかを、これらの考察が教えてくれるだろう。極端な環境で繁栄することができる今日のいくつかの生命体を観察することによって、生命が住み着くことのできる苛酷な環境の種類や、生命が使うことのできる化学的作用についての洞察を私達は得ることができる(Chapter5)。これらの概念によって生命の起源で役割を担ってきた多様なプロセスを観察することができる(Chapter6)。生命の起源について直接的な起源に飛ぶこともできるが、私達が初めに扱う多様なプロセスや観察によって、起源に対しての重要な制約条件がわかるであろう。

地球の変動現象

現在の地球の地質学的現象は変動するプロセスによって、また究極的には地球内部の熱によって支配されている。地球の核の進化、内部の放射壊変元素、熱を追い出すためのマントル対流、またこの対流の反動で地表面の大きなプレートが活動することを含むこの一連のプロセスは表面の自然現象において大事な役割を担ってきた。わかったのはたったの2、30年前だが。

地球物理学の考えは1950～1960年代に進化した。科学者たちは大陸や、山、海底など地球の表面が不動のものではなく、変動するということがわかったのだ。大陸が地表上を動き回ることができ、しかもたったの1千万年か1億年というタイムスケールでそのような動きが起きるという考えは、真実の科学的な改革の代表になった。大陸の活動と海洋底の創造と破壊を支持する証拠は非常に多くなった。

南アメリカとアフリカがパズルのようにぴったり合うというのは大陸には動く能力があ

ることを示す一例である (Figure3.1)。この一致は、これらの大陸はかつて大きな超大陸だった一部であり、その大きな大陸がその後ばらばらに引き裂かれて今のように断片に壊れてしまったということをほのめかしている。しかしこの証拠は地球を作っている岩石は強すぎておそらくどんな力で押しても動くことができないという有力な科学的意見を圧倒することができなかった。後になって追加された強力な地質学的な証拠がいくつかの大陸がかつて集まって位置していたという提案が確かであることを明らかにした。

Figure3.1 南北アメリカ、アフリカ、グリーンランド、ヨーロッパがパズルのよう一致している。これらはかつてどのように1つの大陸だったかということを示している。外側の線は現在の大陸の海拔線であり、かつての大陸の海拔線であったなら、もっとよく一致するであろう。また、ばらばらになった結果、大陸がゆがんだためぴったりは一致しない。

ある場所では、大陸が離れていても大陸境界の向こう側で同じ種類の岩石が出現している。南アメリカの岩石の種類はアフリカの同じ岩石の種類と合致する。重ねてこれは大陸がかつて一緒であり、間にある海洋底はそこにはなかったことを示唆している。大陸境界を渡って続いているように見える山地もある。似たような山脈が続いているのは、例えば北アメリカのアパラチア山脈、グリーンランド、アイルランド、イギリス、ノルウェイである (Figure3.2)。

Figure3.2 この図は、Figure3.1 に示されるように大陸がぴったり位置して並んでいるとき、大陸境界をまたがって山地が連続していることを示す図である。影の部分は山地である。

また、南アメリカとアフリカの南の大陸の端が氷床で覆われていた地質学的証拠がある。その氷の動く方向はむしろ陸に向かっていて。これは氷が海から陸に動いているようにみえ、実際に観察されることと逆なので、代替のメカニズムが必要とされる。そして次のような提案がされた、これらの地域はかつてすべて南極とつながっていた、南極は陸から離れるように北に向かって氷が流れる。もし大陸がかつてお互いに接していたら、氷は南極から直接南アメリカとアフリカの山頂に流れたはずである。

ある場所では、限られた地理的分布を持つ多様な動物の化石が見つけた。しかしその分布は大陸境界を超えている。これらの例すべては大陸がかつて一緒にその後ばらばらに離れたとしなければ説明がつかない。

大陸移動の最も強い証拠で、ついにこの革新的な考えの科学者達を納得させる十分に証明された証拠が、地球磁場によって示された。冷えて固まる火山岩にはその当時の地球磁場が保存される。地球の磁場の方位が時間によって様々だと、時代の違う岩石には異なっ

た方向を向いた磁場が保存されることになる。異なる時代の岩石の中の磁場の記録を読み取ることによって磁場の方向の歴史が再構築されることになる。つまり歴史上の磁場の北の位置がわかるのだ。

地球上のすべての岩石はどこにあっても同じ磁場を経験しているのです。例えば北アメリカの岩石から決めた歴史とヨーロッパの岩石から決めた歴史は一致するはずである。しかしながら、異なった大陸の岩石から決めたときこの歴史は違って見える。磁場の方向は一番最近の岩石だとお互いに一致して見えるが、より古い岩石を見ると大陸はいくらか異なった磁場の方向を向いているように見える。これらの結果は大陸が動いているという場合のみに両立させることができる。もっと古い岩石を調べれば、より磁場の違いがわかるであろう。

同時期に、磁場の研究は海洋底でも行われていた。そしてしましまに異なる磁場の方向を持つことが発見された。地球の磁場の方向が変わるだけでなく、同じ方向を持った一貫したストライプの形で方向を変えているということだ。さらに、これらのストライプは中央海嶺をまたいで鏡となっている。つまり磁場は海嶺の両側でちょうど同じパターンで見られるのだ (Figure3.3)。またこれらの岩石は異なった時代の岩石にも一致している。最近固化した最も若い岩石は中央海嶺の近くに位置し、より古くなるにつれてそこから離れたところで見つかる。時間とともに地殻に新しい火山岩が貫入してくることによってリッジに沿って海底の岩石が作り出され、これらの岩石はリッジから離れていく方向に動いているに違いない、というまさに信頼できそうな説明がすぐに明らかになった。このような中央海嶺は大西洋、インド洋、太平洋の一部にあり、その長さは20000 kmを超える。

Figure3.3 この略図は海洋底地殻における残留磁気を示している。溶けた岩石が地表へ注入されるマンテル湧昇流の上のリッジで地殻が作られる。そこで結晶化するとき地球磁場が保存される。場の極性の変化が地殻の岩石で見ることが出来る。縞々に、リッジに平行に一定に磁場が発生していることと、リッジの両側で同じように変化していることは、リッジで新しい地殻が作られ、リッジから離れて横のほうに広がっているということが一番説明がつく。

南アメリカとアフリカがぴったり合うという提案は20世紀の初頭にされたのだが、1960年代中盤になるまで変動する地表像は科学界に受け入れられなかった。そしてちょうどこの10年の間に大陸の運動は衛星観察によって直接測られた。今日私達は地球の表面について、より詳しい視点を持っている。上部マンテルからメルトが貫入することにより、中央海嶺では連続的に地殻の岩石が作られている。この新しい地殻の空間を作るために、古い地殻は外側へ動き、リッジから離れていく、その平均速度は10 cm/year (Figure3.4)。リッジはこの運動の発散境界として知られている。地球が大きく成長してい

るわけではないので、地殻を作る場所があれば、同じ量だけ地殻が破壊される場所もあってバランスをとっているはずだ。海洋地殻は大陸によって押されて、ある場所で消費されている。このプロセスを沈み込みという。地殻は大陸地殻の下に沈みこみ上部マントルにぶつかる (Figure3.4)。大陸地殻は海洋地殻や上部マントルよりも密度が低いいためそれらの上に浮いているようである。大陸地殻よりも密度が大きい海洋地殻は地表面の下に簡単に沈むことができる。この図は特定の沈み込み帯の詳細を見ると少し複雑であるが、この一般的な描像にはプロセスの基本性質が描写されている。

Figure3.4 この図は、マントルが湧昇してきたその上で海洋地殻の拡大が起こっていることと、大陸地殻に海洋地殻が沈み込んでいることを示したものである。この両方の現象は、部分的にはマントル対流によって起こっている。影の部分は沈み込み帯で岩石が溶けているところを示していて、その溶けた岩石は表面に向かって上がって行って、火山を形成したり大陸地殻の成長に寄与したりしている。

中央海嶺の拡大軸の典型的な例は大西洋中央海嶺である (Figure3.5)。それは大西洋の中央からひろがっていて、南北アメリカと、アフリカ・ヨーロッパの間のちょうど半分に位置している。新しい地殻はここで作られる。そして大西洋の両岸はリッジから一定に離れていっている。アイスランドではリッジ自体が海表面の上に突き出ている、これは地球上で唯一この種の地殻の生成が直接見られるところである。アイスランドの火山活動はこの拡大現象の結果である (Figure3.6)。

Figure3.5 地球上の沈み込み帯 (三角形の歯の方向に沈み込んでいる)、拡大軸 (点線)、横ずれ断層 (実線) を示したものである。大陸は普通の線でかかれている。

Figure3.6 アイスランドの火山、ヴァトナ氷河の空中写真。海表面より上で中央海嶺拡大軸が火山活動しているのが見られる唯一の場所である。

地殻が消滅する沈み込み帯は、太平洋の西岸のほぼ全域と東岸の一部に位置する (Figure3.5)。沈み込みが起こって少したってから突然、地殻の痙攣的な動きが起こる、それが地震の要因のひとつである。例えば、東端のアジアの下に太平洋プレートが沈み込むことによって起こる運動は、日本で破壊的な地震を起こしている。しかしながら、地殻の運動のすべてが破壊と創造ではなく、例えば、有名なカリフォルニアのサンアンドレアス断層は二つのプレートが横ずれしている (Figure3.7)。

Figure3.7 カリフォルニアのサンアンドレアス断層の空中写真。西がこの写真の左側である。西側の太平洋プレートが平均5～10 cm/yrの速さで北に向かって動いている。

中央海嶺、沈み込み帯、横ずれ断層は地殻物質でできた大きなプレートの境界に位置している。地表にはそのようなプレートがだいたい12個ある。プレートの大きさは様々で、全太平洋盆から太平洋の北西に位置するアメリカの下に沈み込むたった200 kmのファンデフカプレートまでの範囲にわたる。これらのプレートの運動とそれらを動かす力は、ひとまとめにしてプレートテクトニクスと呼ばれている。テクトニクスとは、地球表面での物質の運動のことを言い、プレートとは地殻物質の個々のプレートの存在を含む。

プレートは地表面を動いているが、大陸と海洋底はマントルの上部をすべり動いているのではない。むしろよこたわっているマントル物質がプレートに沿って動いているのである。この考えの動機はマントルが一定にオーバーターンしていることだ。地球内部での高温高压で石はストレスの下突然壊れるのではなく、むしろ滑らかに変形する。経験上、窓枠の接合剤や黒砂糖を溶かしたキャンディなども同じ振る舞いをする。接合剤をゆっくり引けば壊れずに伸びる。急に引っ張ったときには、ぽきっと折れるであろう。

マントルは地球内部からの熱を追い出すためにオーバーターンしている、これを対流という。この熱源には4つあり、現在も2つが熱源として働いている。

放射壊変は地球内部の重要な熱源である。放射性核種、ウラン、トリウム、カリウムはたいの岩石に汚染物質として微量に存在する。これらの原子核は不安定で、原子核から素粒子を放射することによって他の元素となることで時間を追って壊変する。どの壊変も少量の熱を放出する。単独でひとつの原子核の壊変から放出された熱は取るに足りない。しかし全地球で合計すると放射壊変元素は多量であるので、合計の発生熱量はかなりなものになる。例えば、現在の加熱率で、もしも時間を追うごとに地球内部の熱が取り除かれなかったとしたら、地球の温度は地球形成時から数千度上がっていただろう。これは、完全に地球を溶かすのに十分な熱であろう。もちろん元素は壊変しているので、まだ壊変していない元素はよりいっそう減る。これは壊変の割合と熱が作られる割合は過去にはもっと多かったことを意味している。

2つ目の熱発生メカニズムは地球の内核の固体化である。地球の内核は大部分が鉄とニッケルの合金で構成されている。内核は固体だが、外核は溶けている。時間とともに地球は熱を失うので、溶けている核が固体化し、その過程で熱を放出する。最終的には核の溶けている部分が完全に固体化し、この熱源は重要ではなくなるであろう。核の固体化や熱を取り除くための外核の対流は地球磁場の形成に一役買っていると思われる。一度完全に核が固体化すれば、もはや磁場発生のメカニズムはないであろう。しかしこれはずっと先のことである。

3つ目の熱源は地球が形作られたときのみはたらいていた。その熱は形成されている地

球の上に集積したもののすべての衝突によって供給された。2章で書いたとおり、それぞれの衝突によって惑星表面にいくらかのエネルギーをもたらし、それによってそこが加熱される。この熱源は単独で、成長する惑星の外側の部分を溶かすのに十分である。

4つ目の熱源もまた地球の歴史の初期にのみはたらいていた。地球はおそらく初めは均質であった。その後、より重い元素である鉄とニッケルが地球の中心に落ちていき、核を作った。そのようにして、位置エネルギーは熱として解放され、地球は熱された。このプロセスは簡単な方法に思われるかもしれない。より重い元素である鉄が地球の中心に向かって落ちるので、岩石的な物質の溜まり場を通して落ちていこうとすることによって熱が発生する。摩擦は高速で移動することを妨げ、この摩擦は落下エネルギーを熱エネルギーに変える。核の形成によってできる熱もまた全地球を溶かすのに十分なほどであった。しかしながら、核の形成と隕石の落下によって供給された熱は比較的早く放散してしまい、今日残っているのは非常にわずかである。現在の熱源は、放射壊変と核の固体化のみである。

この熱生成はすべて、地球内部を熱している。内部は熱されているので、少し膨張して密度が軽くなる。暖かくて密度の低いマントル下部近くの物質は上昇しようとし、一方、冷たくて密度が高いマントル上部の物質は沈もうとする。その結果、マントルの上部の岩石と下部の物質が入れ替わることによってマントルのオーバーターンが起こる。しかしそれは一回ではない。なぜなら熱は供給し続けられるので、熱を追い出すために常にオーバーターンする傾向にあるからだ。この連続的オーバーターンをマントル対流という (Figure3.8)。この対流は地球の深部からより地表に近いところへ暖かい物質を運ぶ。一度表面に近づいたら、その熱は地表面の熱伝導によって急冷されそれから宇宙空間へ逃げる、それによって過剰な熱が取り除かれる。

Figure3.8 この略図は地球マントル内でどのように固体物質が対流するのかを示したものである。熱はマントル下部で供給され、マントル上部との温度差を作り出す。この温度差によって、上部の冷たい物質とより下部のより暖かい物質が入れ替わることでオーバーターンを起こしている。表面近くにきた物質は熱伝導で冷やされる。下部では熱され、上部では冷やされるため、温度差が維持され、このオーバーターンは連続的に起こる。

マントル対流は表面では水平運動する地殻として表出する。マントルが湧き上がってくるところと、落ち込んでいくところの間にある表面の部分は、水平移動する地殻できている。湧き上がってきたマントルが表面に近付き、そして横方向へと広がり始めたところで、地殻はこの横方向の運動によって、引き離される。地殻が引き離されたことで、その溝を埋めるために新しい地殻が表面に貫入してきた、その結果、拡大軸ができる。新しく作られた地殻は大陸地殻よりも密度が高い岩石の種類である、結果としてマントルの上に浮か

ぶ大陸地殻よりも高度が高くない。海水はこのような低い位置に落ち着くため、それらの低地が海洋底となる。地表より上に岩石が存在するこの高さの差というのは、水の上に何か物が浮かんでいるのと似ている。例えば空気ですべてのボールは氷よりも密度が低い、氷は水よりも密度が低い。結果として、水に浮かせたボールは同じ大きさの氷よりも高く積み上げることができる。

二つの地殻のプレートがお互いに押し合っているところでは、何か起こっているはずだ。もし、より密度の高い海洋地殻が密度の低い大陸地殻を押ししたとすると前者が後者の下に押し込まれるであろう。海洋地殻は深部へ行き、上部マントルまで沈む。地殻の一部には、マントルの下に引っ張られていくものもある、なぜならその密度は沈み込むのに十分だからだ。上部マントルにとどまるか、最終的に下部マントルまで行って核-マントル境界にたまるのかは現在の論争のテーマである。海洋地殻がマントルの下に押されるこの現象を沈み込みという。またときには、二つの大陸がお互いに押し合うこともある。このケースでは、どちらも地表の下へと押されて、マントルまで行くのに十分な密度を持っていないため、両方とも一端を上にしてガリガリとお互いの上に動く。今日起こっている例は、アジア大陸に対するインドの衝上現象で、お互いがぶつかった結果、とても高い山ができあがる、例えばヒマラヤのような。

内部の熱が引き起こすもうひとつの側面は、地球表面で起こるホットスポット火山の形成である。これらは、熱い岩石の細かいプリュームがはるばるマントルから表面へ直接上がってくる場所に位置している。そこで、それらは非常に局所的な火山となる。これを穂とスポット火山と呼ぶ。地球上で最も良い2つのホットスポットの例は、ハワイ島とイエローストーンである。ハワイ島は火山列になっている。これはホットスポットプリュームの上を太平洋プレートが動いていることによってつくられた (Figure 3.9)。ホットスポットの源はマントル内深部から来ているため、プレートの表面はプリュームに関らず動くことができる。海山列をたどって戻っていくと初期の海面下の海山は、距離4500 km にわたるアラスカから並んだアリューシャン列島と同じくらい北にある。ハワイ火山列の最も南東の島だけ、今日活動的である (ハワイ島とマウイ島)。しかしハワイ島の南東の海岸に新しい海底火山が現在もできつつある。

Figure 3.9 この地図は太平洋中央からはるばるカムチャッカまで伸びているハワイ-天皇海山列を示したものである。この海山列の年齢は100万年単位で示されている、一番南東の火山は現在活動中である。この火山海山列が不連続なことで、年齢順に並んでいるということについての最も良い説明としては、火山岩の源がマントルの中から来ていることと、それが太平洋海底に相対的に動いているということである。

イエローストーンは北アメリカ大陸の下のマントルプリュームの上昇が引き起こしホッ

トスポット火山によって作られた。そこではホットスポットは、ワシントン州からワイオミング州まで過去2～3000万年かけて移動した。イエローストーンは今日活動的ではないが、溶けたマグマは比較的地表近くに今も存在している。この熱い貫入岩は地殻中の水の活動に働きかけ間欠泉や温泉水を作り出し、この地方を有名にした。イエローストーンが将来、地熱も火山も活動的であり続け、北東に移動し続けるだろうと予想する十分な理由がある。

プレートテクトニクスのある大事な側面は、地表面近くで温泉水を作ってくれるということだ。5, 6章で考察するが、この役割は生命の起源と初期の進化に重要であった可能性がある。中央海嶺では、海からの水は地殻に浸透することがある。そこで地表近くのマグマに温められる。温泉水が地殻で発生して上昇し、海に流れ込む。これはやはり海を暖める役割を担っているのではない。なぜなら熱はすぐに大気へ失われ、宇宙空間へ行くからだ。しかしながら、温泉水が海に入るところは極端に温度が高い、450度までの温度が測られた。高い温度ながら沸騰はしていない、なぜなら、海水の重量が温泉水を液体に保っているからだ。そして、この高温で、多量の鉱物が温泉水の中に溶けている。温泉水が冷えると鉱物の中には固体化して海洋底に小さな円錐状の岩石を作り出すものもある、これは温泉水が海に排出した証拠である。中央海嶺に表出した孔の数の概算とそれぞれの孔を通った温泉水の速さの概算を基にすると、すべての海水が孔を通してこの熱にさらされるのに、100万～1000万年しかかからない。

イエローストーンでは海の近くではないにもかかわらず温泉や地殻を通した水の循環が起こっている。ここでの水の源は、降雨である。海は地殻に浸透し、表層付近のマグマによって温められ、地表まで上がる。その地域の岩石の化学組成や、その地域の配管により多くの温泉孔は間欠泉の形である。その他は熱い温泉や、ぬるめの温泉として存在する、温泉水によってできた地表面の鉱物堆積物は魅惑的の構造をあとに残す (Figure3.10)。

Figure3.10 イエローストーン公園にある温泉水から沈殿したカルシウムに富む鉱物の温泉堆積物でできたテラス。表面に温泉水を放出している。個々の段は20cmほどの高さで、流れ出る温泉水によって満たされている。

プレートテクトニクスをつかって時間をさかのぼる

私達は現在、地表面のプレートが動く事を知っているだけではなく、時間をさかのぼってそれらの活動のあとをたどることもできる。それは磁場の歴史を計測することによってされた、その結果、時代が変われば位置が変わることがわかった。そして地質学的証拠によってそれぞれの時代の歴史と、岩石の年代がわかった。大陸とプレートの移動は約5億年さかのぼる事ができる、その他に、何が起こったのかを十分に解説する情報がない。約

2億年前、すべての大陸物質は超大陸に位置していた、その名をパンゲアという。パンゲアは2つの初期の大きな大陸の衝突によってできた、ローラシアと Gondwana 大陸だ。ローラシアは現在の北アメリカ、ヨーロッパ、アジアでできていた。Gondwana 大陸は現在の南アメリカ、アフリカ、インド、オーストラリア、南極でできていた。パンゲアは2つの大きな大陸に分かれて、これら2大陸はその後、現在の位置へと移動していった。

もちろん大陸は今も動き続けている。その証拠に世界中で地震による地殻の生成と破壊が進行中である。大陸は1年間に平均10cmの割合で動く、このスピードだと大陸が地球の反対側まで移動するのにたった2億年しかかからない。明らかに、次の5000万年で地球の大陸分布は今日とは極端に変わっているだろう。

マントルの活動によって大陸が動くので、新しい海洋底は継続的に作られ、古い海洋底は破壊されていく。その結果、今見つかっている一番古い海洋底地殻はたったの2億年前のものである。一番古い地殻はすべてもう消費された。地球はまさに変動する惑星である。

地球史の前半でのプレートテクトニクスの性質とは何だろうか。私達はマントル対流やプレートテクトニクスは地球の全史を通して起こっていると思っている。しかしながら、直接示されて知られている最も古いプレートテクトニクスはカナダのスペリオル市での地震観測からくるものである。これらが示しているのは、古代の沈み込み帯は27億年前から作動してきたのかもしれないということである。当時、放射性核種の存在量が今よりも多かった（現在ほど壊変してなかった）、だから地球内部は今よりもっと熱かったし、マントル対流も活発だった。

加えて、マントルの岩石の地球化学的分析によると、全地球にわたる重要な出来事が約20億年前に起こった。そのデータは出来事が起こった性質がどんなものかを指し示していないが、地球のプレートテクトニクスが始まり、マントルと地殻の岩石の混合が同時に始まった可能性がある。

2～30億年前以前は地表付近の冷たく脆性な部分は薄すぎて実際には表面の下に押し込まれなかったし、沈み込めなかった可能性がある。しかしながら、これは当時マントル対流が起こっていなかったことを意味しているのではない。当時は地球内部がもっと加熱されていたであろうという事実から考えると、熱の逃がすために今よりもっと早くマントル対流をしていたはずである。もしそのときプレートテクトニクスが起こっていなかったとすると、マントル対流の地表での現れ方が、現在とは違っていたことを意味する。太陽系内惑星のうち大きなものは（地球、金星、火星）内部で起こる熱生成の予想される割合に基づいてマントル対流をしていると思われる。しかしプレートテクトニクスの発生によって地表でこれが現れていたのは地球だけだった。このことは後で太陽系の他の惑星について触れるときに討論される。

大陸と海洋の初期の歴史

最後に、大陸と海洋の起源についての話をする。最も古い大陸の岩石は約40億年前である。おそらく海洋もこれと同じくらい古い。地殻を作る物質はおそらくほぼ地球の全史をかけて形成されてきた。

大陸と海洋底物質をすべて地殻と呼んでいるが、それらはまったく違った化学組成を持ち、まったく違ったプロセスによって形成されてきたものである。地球のマントルは主にオリビンによって作られている。オリビンとは、緑の鉱物で、Si、O、Fe、Mg でできている。しかしそこにはオリビンに他の鉱物が混合して存在している。火山活動は、この岩石の一部が溶けて、メルトが地表面に押し上げられたときに起こる。溶けた岩石が地表に出てきて、冷やされ、オリビン、輝石、長石の結晶が形成されるであろう。ほぼオリビン組成だったものからのこの変化が起こるのは次のような理由からである。マントルの熱で溶けるはじめの鉱物は一番低い温度で溶ける鉱物なので、部分溶融で作られたメルトははじめの岩石のすべてを含んでいるわけではないだろう。そのため、メルトが冷えて固化するとき、最初に存在した鉱物とはわずかに違う鉱物が形成される。マントルの岩石が部分溶融してできた特定の混合比をもつ鉱物をバサルトといい、それは中央海嶺の拡大軸で作られる地殻を構成している。

海洋底でのバサルトが上部マントルに沈み込むときに、バサルトは再び熱されて一部溶ける。この新しいマグマが表面に上がって火山を作り、冷却する。しかし再び部分溶融したバサルトはいくつかの鉱物しか溶けない。この溶融岩が表面に出てきて冷却するとき、わずかに違った鉱物が作られるだろう。この方法を何度も繰り返したバサルトは、石英、長石、わずかにあるかないかのオリビンか輝石を含んだ岩石ができる。この岩石は花崗岩として知られている。花崗岩は密度がバサルトより低いので、沈み込むよりも表面に留まろうとするであろう。最終的に花崗岩は集積して大陸を形成する。そして、もっと密度が軽くなり、より厚くなって、大陸の岩石はマントルの上に高く浮かぶ。だから海洋底よりも大陸のほうが高いのだ。大陸地殻形成の良い例に南アメリカの西岸に沿っているアンデス山脈がある。この山脈は、大陸の下に太平洋プレートが沈み込んでできた。他の例に北アメリカの下に太平洋プレートが沈み込んでできたロッキー山脈がある。

大陸地殻は海洋地殻が沈み込んでできるので、新しい大陸地殻は時間を追ってできる、また地球史の前半で現れた大陸地殻は非常に少ない。実際、2～30億年前に新しい大陸物質が爆発的に作られたとき、プレートテクトニクスの始まりとは同時期である。大陸地殻はバサルトから花崗岩がつくられる沈み込み帯で主に作られ続けている。

生命の発生と進化を理解するのに大きく関連している海と大気の形成時期は、地球上で起こっていた他の地質学的プロセスと関係している。地球が45億年前に集積したとき、個々の隕石は地球表面に物質をもたらし、おそらく大気に気体を放出した。加えて、隕石衝突の熱によって惑星の外側が溶けて鉄が中に沈んでいくことによって地球の核はとても

早くに形成された。このコア形成プロセスは全地球を溶かすのに十分なほどの熱を放出しただろうし、同じように地球内部にあったいくつかの気体が放出されただろう。

大気の気体の異なる同位体組成の証拠から、ごく初期に地球内部から放たれた気体が少なくともいくつかあるということがわかっている。同位体とは同じ原子の異なる型のことであり、原子核の中に異なった中性子数を持つ。例えばアルゴン40とアルゴン36は両方とも希ガスの原子である。それぞれ原子核の中に18個の陽子を持ち、化学的に同じように振舞う。アルゴン36は同じように核の中に中性子を18個持つ、一方アルゴン40は中性子を22個持つ(36, 40は陽子と中性子の和で示されている)。希ガスなので、アルゴンは他の原子と化学的に反応しない。これは、一度大気に行けばそのままそこにずっといることを意味している。アルゴン36は天然に存在する安定同位体で、一方アルゴン40はカリウム40が放射改変してできたものである。半減期12.5億年でカリウム40の壊変が起こる。それは、12.5億年後に今あるカリウム40の半分が壊変してアルゴン40になるという意味である。結果として、大気のアルゴン40の存在量によって脱ガスした時期を知ることができる。もしも地球内部からの気体の放出が地球の形成後すぐに起こったとしたら、非常にたくさんのアルゴン40を作るのに十分な時間はないので、その大気存在量も非常に小さくなるはずである。しかし、もしも脱ガスが歴史上非常に遅く起こったとしたら、十分な時間があるのでたくさんのアルゴン40ができるはずである。現在実際存在するアルゴン40の量は比較的少ないので、歴史上、非常に初期に地球内部からたくさんの脱ガスが起こったということがわかる。

また別の希ガスで大気中に残りやすいキセノンの同位体は、同じ事を違った理由から教えてくれる。異なる同位体を持つキセノンは、すべて放射壊変によって作られたものではなく、それぞれの同位体の質量に依存して損失する度合いを示す。これは、軽い同位体から選択的に大気中からキセノンが失われてきたことを示している。大気中からキセノンが取り除かれるというメカニズムは、膨大な量の水素が宇宙空間に失われる事を伴う。水素が逃げるとき、それとともにキセノンも引っ張っていかれただろう。より軽い同位体は一緒に引っ張っていかれやすいので、このプロセスによって選択的に取り除かれてきたのだろう。かなりの量の水素が地球の歴史上の早い時期だけで急速に失われた。つまり惑星の集積の一部として、集積した物質から大量の水素が開放されたのだ。これはいくらかのキセノンは歴史上初期に地球の大気にあつたに違いないことを示している。そして、少なくとも惑星の気体のいくつかは歴史上非常に早くに大気中に開放されてしまっているに違いないことをほのめかしている。

地質学的証拠から、海は初期に地殻ができたときにはもうすでに存在していたことがわかっている。その年代は約38~40億年前である。最も古い地殻の岩石は変成岩として見つかっている。変成岩とははじめは堆積岩だったものが熱と圧力を受けたことによって作られたものである。堆積物は水の底のほうで岩石に変わる。だからそのときまでに堆積岩が存在していたという事実は、少なくとも現在の海の一部がもう存在していたに違いな

いということを示している。また、炭酸塩岩の堆積物がこれと同じ時期に存在していた。炭酸塩岩は石灰岩などの鉱物でできている。石灰岩とはカルシウムなどの様々な元素と結びついた CO_2 ガスを含む。今日、石灰岩は海洋生物の殻でできている。しかし大気中の CO_2 が海に溶け込み、炭酸塩鉱物として沈殿することによって直接作られる場合もある。炭酸塩は水の中で作られるので、38億年前に炭酸塩岩が存在していたということはその当時海があったということである。

炭酸塩岩の化学組成が示すのは、その時期に大気中に CO_2 ガスが豊富に存在したということである。 CO_2 ガスは温室効果によって太陽の熱を閉じ込めて地表を温めている。驚くべきことに、地表を 85°C の温度にするのに十分なほどの大気中の CO_2 ガスがあったようである。

大気はここ40億年間進化し続けている。今日地球上の CO_2 のほとんどが炭酸塩堆積物（石灰岩）として存在している。しかしこの CO_2 は大気中に再循環される。 CO_2 を含んだ堆積物と水は沈み込み帯の下に沈みこみ、熱されることによって水と CO_2 ガスは開放され、火山を通過して大気中に帰っていく。また、地球深部から大気中にまだ循環したことがない、新しいガスが開放され続けている。この脱ガスは中央海嶺とホットスポットの火山に関連して起こっている。生物が今日存在する酸素を作りだし、大気に大きな影響を与えてきたことは後で学ぶ。

結論

初期の地球は今日私たちが知っている地球とは全然違った。今日の地球というのは、天候が比較的温暖で、大陸物質が広がり、地質学プロセスは比較的ゆっくりとしたペースで起こっている。むしろ初期の地球は今よりもっと変動していた。継続して起こる隕石衝突が実質天候を変え、大気に新しい気体をもたらした。海は約40億年間存在しているが、大陸物質はほとんどあるいはまったくなかったようである。火山活動は現在よりも活発であったであろう、今はほとんどあるいはすべてが海表面の下なので見ることはできないが。活発なマントル対流にもかかわらず、プレートテクトニクスは起こっていなかっただろう。地殻はおそらく薄く、ホットスポットは熱を取り除くのに、今よりもっと重要な役割を果たしていただろう。大気の温度はおそらく今よりも高く、 85°C くらいであっただろう。

一番重要なことは地球は40億年前おそらく生命が存在していなかった、少なくともそのときから現在まで生き残ることが出来たものはなかったということである。生命体のない大陸や海洋底を想像するのは難しいが、当時大陸はなく非常に火山活動が活発な海洋底があったことを思い出してほしい。なんとたったの約数千万年の間に生命は世界中に広まったのだ。