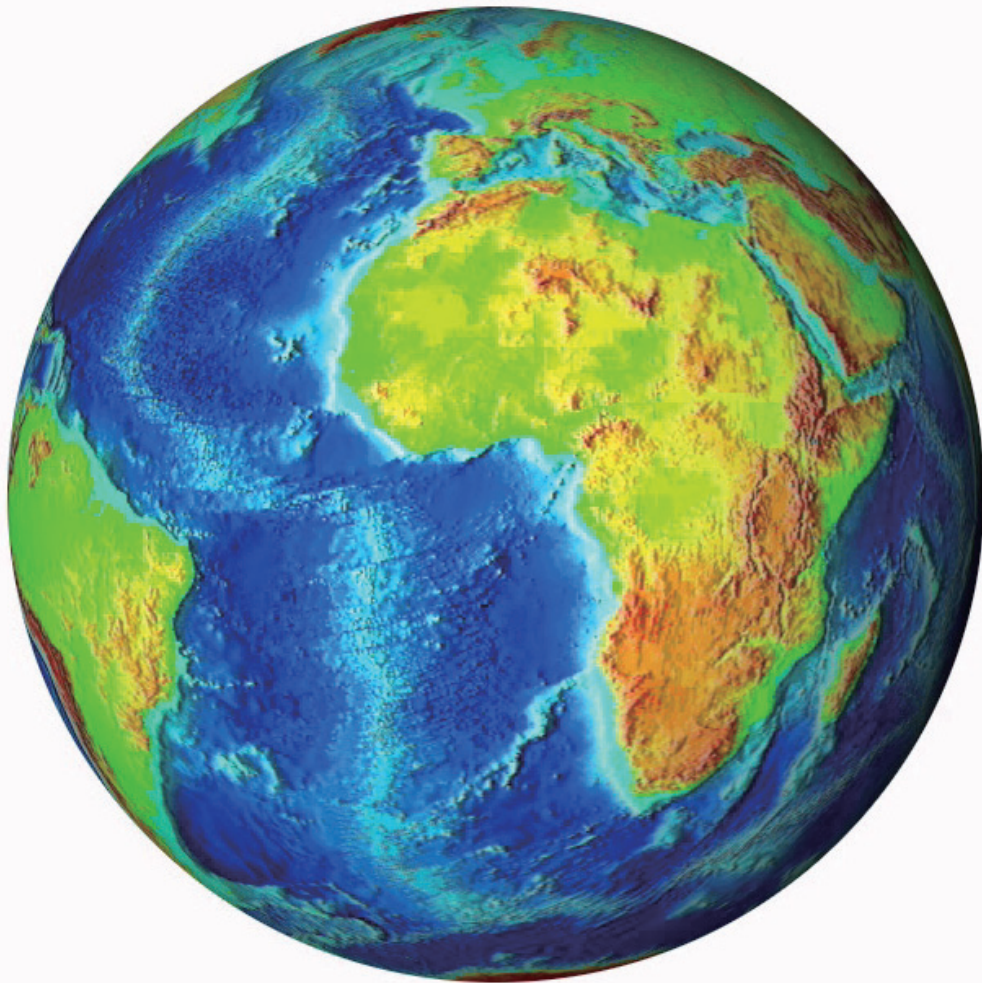


第19章 科学の革命 プレートテクトニクス

皆さんは小学生の頃から、地球内部の岩石が移動していくということを教えられてきました。そのため、プレートテクトニクスの考え方は常識に思えるかもしれませんが、常識的には岩石が動くということは俄には信じられず、そのメカニズムも不明でした。そのため、1950年代まで、プレートテクトニクスの考え方は信じられていませんでした。十分な証拠がそろって初めて、この考え方が認められたのです。20世紀中旬に、地球の構造についての考え方が革命的に変わりました。それまで、地上で起こっていた様々な現象が一つの理論で説明がついたのです。ここでは、地球科学でおきた革命、プレートテクトニクスについて見ていきましょう。



大陸の移動説

幾つかの大陸、たとえば南アメリカとアフリカがジグソーパズルのようにぴったり一致するということは知られていました。しかし、1915年に気象学者のアルフレート・ヴェーゲナー(1880 - 1930)が、1912年に『大陸と海洋の起源』という本を出版するまではあまり真剣にとらえていませんでした。ヴェーゲナーはそこで、大陸が移動するという過激な仮説を立てたのです。

ヴェーゲナーは、**パンゲア**と呼ぶ超大陸が存在したと提唱しました。また、今から2億年前にはこの大陸は分裂を始め、諸大陸は非常にゆっくりと現在の位置に移動したと仮定しました。



状況証拠

ヴェーゲナーやその支持者たちは、大陸移動の証拠を幾つか集めました。それらの証拠を見てみましょう。

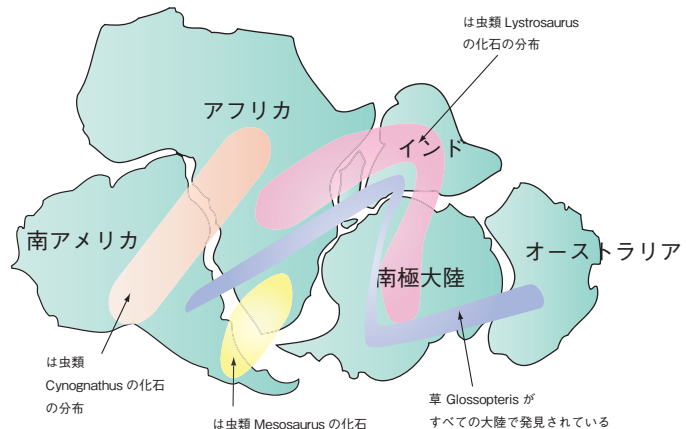
大陸の一致

ヴェーゲナーがジグソーパズルのように各大陸がつながっているといいましたが、海岸線は海水による風化で形が変わっていくはずです。そのため、現在の海岸線で一致したとしてもそれはあまりあり得ないことなのです。

科学者達は、こう考えました。大陸は大陸棚を伴っています。それは、現在水深数百メートルの位置にあります。もし、大陸通しがつながっていたとしたらそれは大陸棚でつながっていたはずです。1960年代に科学者が南アメリカとアフリカとを大陸棚でつなげてみたところ、その一致は今までよりもさらに良かったのです。角のところで一致していないのは、水流によって削られたためと解釈できます。

化石による証拠

ヴェーゲナーが大陸がパズルのようにつながることがわかったとしてもかれは、地球が動くことは不可能だと思っていました。しかし、南アメリカとアフリカで同じ生体の化石があるということを学んで、彼は大陸の移動ということを真剣に考えるようになっていきました。多くの化石学者は、大陸がつながっていたと考えるしかないと思っていたようです。図のように多くの動物や植物の化石が、諸大陸にまたがって発見されているのです。当時の科学者はこれらの化石の存在をどのように説明したのでしょうか？当時は、大陸間をつなぐ陸橋があったという考え方が支配的でした。もしそれらが存在していたら、現在も海面下に存在が確かめられるでしょう。



岩石の種類と構造の類似

もし大陸通しが連続的につながっていたとしたら、わかれば部分の双方で、岩石の種類が一致しているはずですが。ヴェーゲナーは、ブラジルの2億2千万年前の火山岩とアフリカの同じ年代の岩石が非常に似ていることを発見しました。

古気候学的証拠

ヴェーゲナーは気象学者ですので、古い気候の解析にも興味を持っていました。古生代末期（約3億年前）に南半球とインドが氷河に覆われ、氷河の移動が確認できる地層があります。この地層は、同じ時期に南アメリカや南アフリカ、またオーストラリアでも見られます。インドや南アフリカ、アマゾンなど現在の熱帯地方に氷河など考えられるのでしょうか？これらの証拠は、かつては別に位置にあったことを示唆しています。

大陸移動仮説の拒否と科学的方法

ヴェーゲナーの仮説は、1924年に、英語を始め各国語に翻訳されると、世界中から非常に敵対的な批評にさらされました。数多くの地球学者の権威達はその考え方に反対したのです。

ヴェーゲナーの仮説に対してもっとも強い反対の理由の一つには、大陸移動のメカニズムにありました。ヴェーゲナーが言うように大陸が移動するには非常に強い力が必要になります。そうした力がなぜどこから生まれてくるのでしょうか？ヴェーゲナーはその理由を月や太陽の潮汐力のためなど幾つか述べましたがいずれも不可能であることが証明されてしまったのです。

科学的方法は、観測や実験を元に、仮説を出し、その理論に基づいて予言をし、それを実験や観測で実証するという手続きに基づいています。彼が他の皆を説得できなかったのは、科学的方法として何が間違いだったのでしょうか？彼の仮説の革新的な部分は正しかったのですが、大陸移動の理由を潮汐力とするなど間違いを含んでいました。またそれらの仮説を検証するすべを当時は知らなかったのです。

ヴェーゲナーは、1930年グリーンランドに研究のための調査に行きました。彼の主要な目的はグリーンランドの厳しい冬の気候調査でしたが、彼は、グリーンランドのある地点が、ヨーロッパからどのくらい移動しているのかの調査もそのねらいだったようです。もっとも、それまでのデンマークの研究者による調査では、移動は確認できていませんでした。ヴェーゲナーは、グリーンランドから帰る途中に、心臓発作のため帰らぬ人となりました。

大陸移動と地磁気

いったんは見捨てられた大陸移動説ですが、1950年代中頃、新しい証拠が出てきました。

第2次世界大戦が終わると、冷戦の時代を迎えます。そこで、戦略的に、的の潜水艦の潜む地域などを特定したり、安全な運行をするためにするために、海底の地図を作る必要がありました。そのため、海底の調査に軍事的資金が投入されて大規模な調査が行われました。

その結果わかったことは、各大海には、**中央海嶺**という海底山脈があり、陸地の地球を分割するように連なっていることがわかったのです。

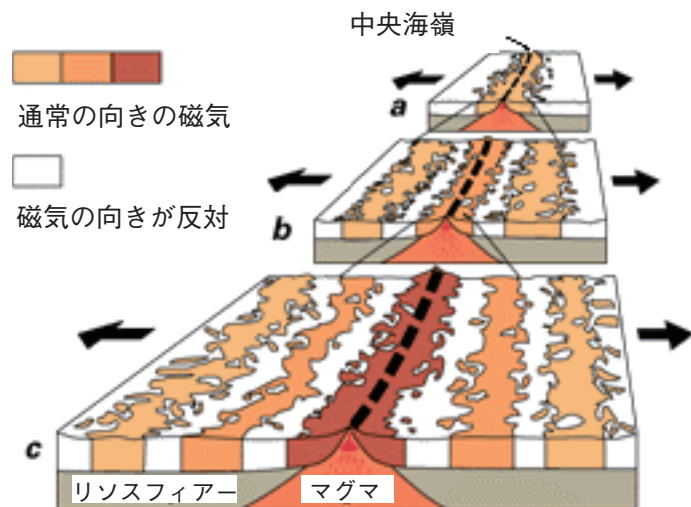
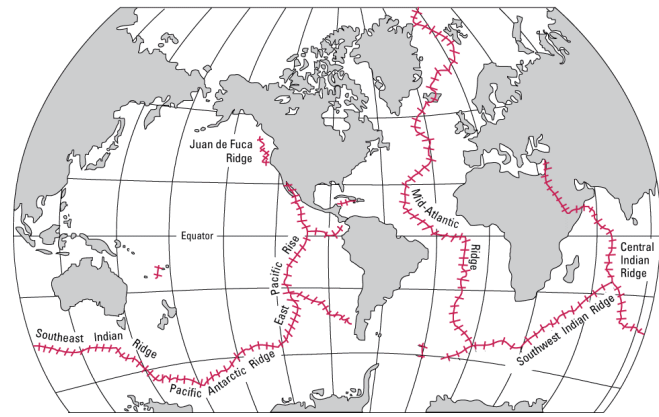
中央海嶺の近くの鉄鉱石を調査したところ、その磁石の極の向きは、海嶺にそって帯状に図のように反転した地域が続きます。しかも、海嶺を挟んで、左右が対称なのです。

これは、次のように解釈できます。第5章で見たように、磁鉄鉱は585℃以上では磁石としての性質はありません。マグマから生成された磁鉄鉱は熱く、海底表面で冷えていくときに磁石になります。地磁気がありますので、コンパスが地磁気の方角を向くと同様に、それと同じ方向にそろった方が安定です。そのため、冷えて磁石になるときには、地磁気の方角にそろって磁石となります。地磁気は数万年に一回の割合でN極とS極の向きが逆転することが知られています。マグマから陸地が吹き出すと共に、元あった陸地は海嶺から離れて移動していきます。このため、磁石の向きが逆転した地層が帯状に伸びることになります。

この地磁気の逆転した地層の存在という結果は、大陸移動説でなければ説明が困難なものであり、大陸移動説の決定的な証拠となりました。

1965年に、カナダの物理学者、ジョン・ツゾー・ウィルソンが、地面の生成を伴う**プレートテクトニクス**の理論を打ち出し、それまでの研究者達の考え方を革命的に変えていったのです。プレートテクトニクスとは、大陸移動や海底の生成を含む様々現象を説明する理論です。こうした理由付けがないかぎり、固く重い地面が移動するという事は俄には信じられなかったでしょう。

現在では、GPSの利用により、年間の大陸の移動が確かめられています。たとえば、ハワイは日本に向かって、1年に8.3cmの割合で近づいて来ていることが確認されています。



中央海嶺での地殻の移動

地球の時間スケール

ここで少し、地球の時間的スケールと人間の時間的スケールの違いを見てみましょう。それは、人間の持っている感覚では、大陸の移動や、山脈の形成などで俄には信じられないことが多いからです。

まず、地球は約46億年前に、太陽系の形成と共に生まれました。地球はまだ壮年で働き盛りの年と言って良いでしょう。つまり、数億年というスケールが。人類の1年に相当します。

たとえば、ハワイが一年に約8cm日本に近づいています。このままいったらどうなるのか見てみましょう。

1年8cm、10年80cm、100年8m、千年で80m、1万で800m、10万年で8km。やっと8kmまで来たのかという感じですが、1億年はまだまだ遠いですよ。100万年80km、1000万年800km、1億年8000kmとなります。日本とハワイの距離は約6000kmですから、1億年かからずに日本まで来てしまいます。いずれにせよ、大陸は1億年の単位で、地球上を移動していきます。またこのことは、ヴェーゲナーが言うように、2億年前のパンゲアという超大陸の前にも大陸があり、移動を繰り返していたことが予想されます。

このように、地球上では大陸は、およそ1億年のスケールで衝突や分裂を繰り返しているのです。

プレートテクトニクス理論の重要性

プレートテクトニクス理論は、地上での主要な自然現象の過程を理解するのに重要な理論です。この理論が出される前までは、地上のある点の現象が、他の地域の現象と関連があるなどとは誰も思っていなかったのです。プレートテクトニクスの理論によって、地震、火山、山脈などの分布がすべて説明されてしまいます。また、過去にさかのぼったときの動植物の分布や、石油や石炭、鉱物資源の分布なども説明できるようになったのです。

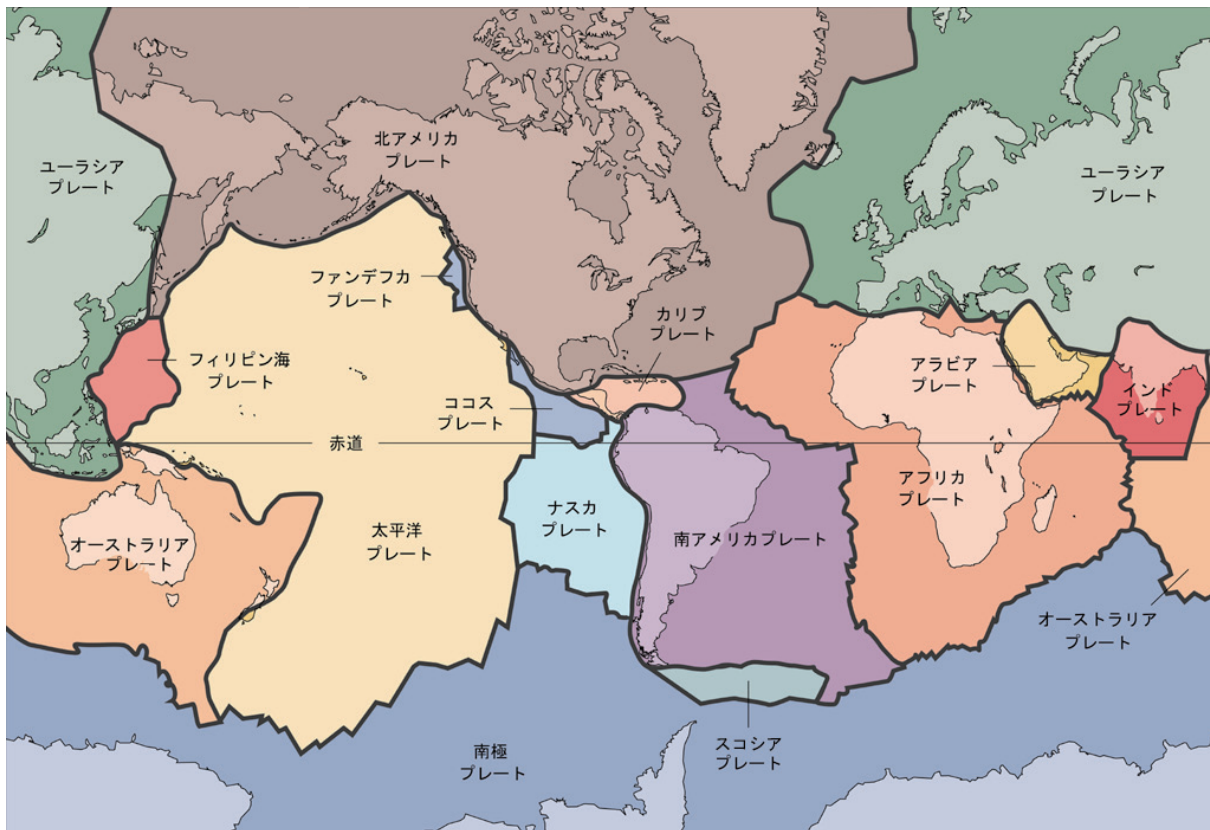
プレートテクトニクス理論とは？

地球の地面は、十数個の**プレート**と呼ばれる部分に分割されます。その熱さは、海底では10kmと薄いのですが、大陸では、100kmにもなる部分があります。これらのプレートは、その下の比較的流動的な岩石の層に乗って移動していきます。プレート下層の温度は高く、岩石が溶ける温度に近いので、比較的柔らかくなっています。

日本の周りには、フィリピン海プレートと北アメリカプレート、ユーラシアプレートがあり、複雑になっています。

プレートテクトニクス理論では、プレートは、内部での位置関係を保ったまま移動していきます。そのため、異なるプレート間での距離は変化していきます。

プレートは、平均しておよそ年間5センチの割合で移動していきます。このプレートが移動する力は、地球内部のマントルの対流によって起こります。マントルの主要成分の2酸化ケイ素などは、ガラスがそうであるように熱伝導率はそれほどよくありません。そのため、対流によっても放熱が起こります。対流は熱によって膨張して軽くなった（密度が小さくなった）ものが上昇し、冷たいものが重く、下に行こうとすることによって起こります。岩石は熱で熱くなると膨張してほんのわずかですが、上昇します。また冷えた岩石は、収縮して密度が高くなり地球内部に沈み込もうとし、この重力により対流が起こります。ただし、もちろん固体は非常に動きにくいので、全体としては非常にゆっくりとした対流となるわけです。

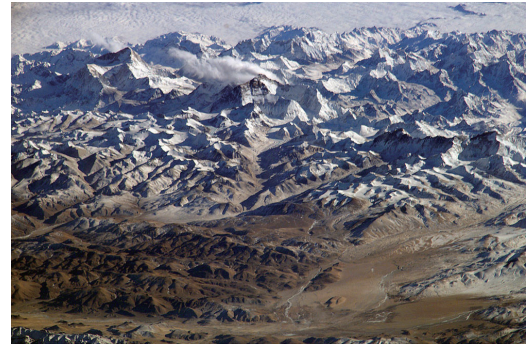


世界のプレート

プレートの境界

プレートの境界では、様々な活動があります。

海嶺では、マントル対流によって上昇してきた熱により岩石が上昇していきます。他の海底より盛り上がり山脈のようになっているのは、新しく上がって来た岩石は熱く、膨張して、他の固まった岩石より密度が小さくなり上に追いやられます。この熱くなった物体が上昇する浮力が海底面を移動させる力となります。海底を作る速さは遅いのですが、最後には沈み込んでしまうため、現在ある地球上の海底はここ2億年の間に作られたものです。また、こうしたマントルの吹き上がりは大陸内でも起こり、大陸の分裂を引き起こします。



ヒマラヤ山脈
ている

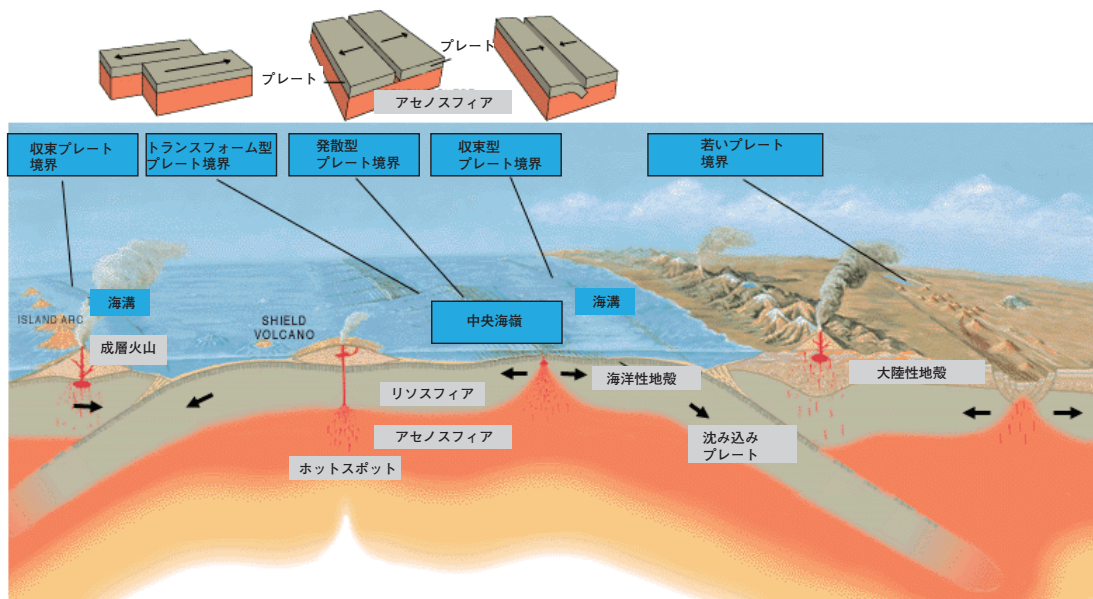
二つのプレートが衝突するところでは、一方が他方のプレートの下に潜り込みます。どちらが下に潜り込むかは、主にその岩石の温度によります。温度が低い方が密度が大きくなり、下に沈み込む大陸同士の衝突で今も盛り上がり続けています。大陸と大陸の衝突では、岩石ができてから、完全に冷却するまで数千年かかるので、衝突時に古く冷たい岩石が下に潜り込みます。このような大陸同士のプレートの衝突により衝突では、ヒマラヤ山脈が形成されました。

また、海底と大陸プレートの衝突では、海水で冷えた海底のプレートが潜り込みます。むしろ、冷えた重いプレートは、その重力により地球に潜り込む場所を探して移動しているとも言えます。このとき、海水を境界面にそって巻き込んで行きます。海水をふくんだ岩石は、岩石の分子が水と引き合うため岩石から離れやすく、比較的低い温度で溶けるようになります。そのため、潜り込んでいき熱くなり、水を含んで溶けた溶岩が、上昇していき、火山活動を引き起こします。

また、境界面のずれが地震を起こすのです。

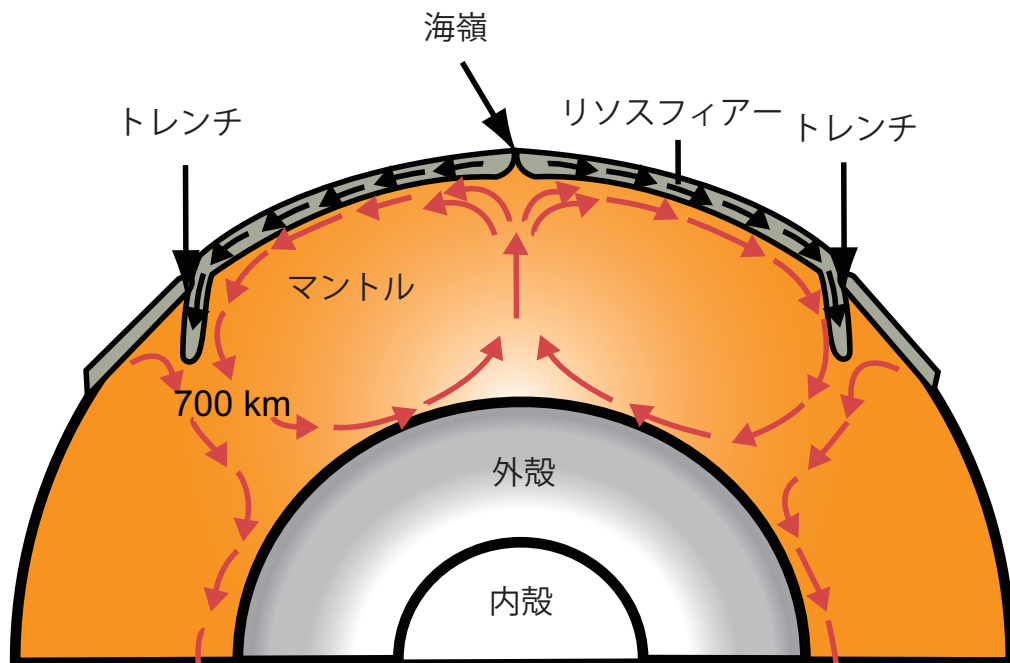
このように、プレートテクトニクスの理論では、地震、火山、海嶺など様々な活動が統

一的
に説
明で
きる
ので
す。



マンツルの動きは？

マンツルは、熱による対流ですが、固体である岩石が移動しています。マンツルは固体であり、溶岩のように液体ではないので注意してください。マンツルは非常に厚いのですが、重い岩石の下にあり、圧迫されているので、熱による運動が妨げられ溶けないで固体のお状態なのです。外殻の他より熱くなった部分の土は膨張して比重が軽くなり上に上がっていきます。またマンツルは、プレートが滑り込むところで地球の中心に向かってに潜りますが、これは主にマンツルが冷えて密度が高くなり、重くなって下に滑り込むためです。この動きにより地殻も移動していくことになります。



マンツルの対流

溶けた液体が移動するものと誤解しやすいので注意

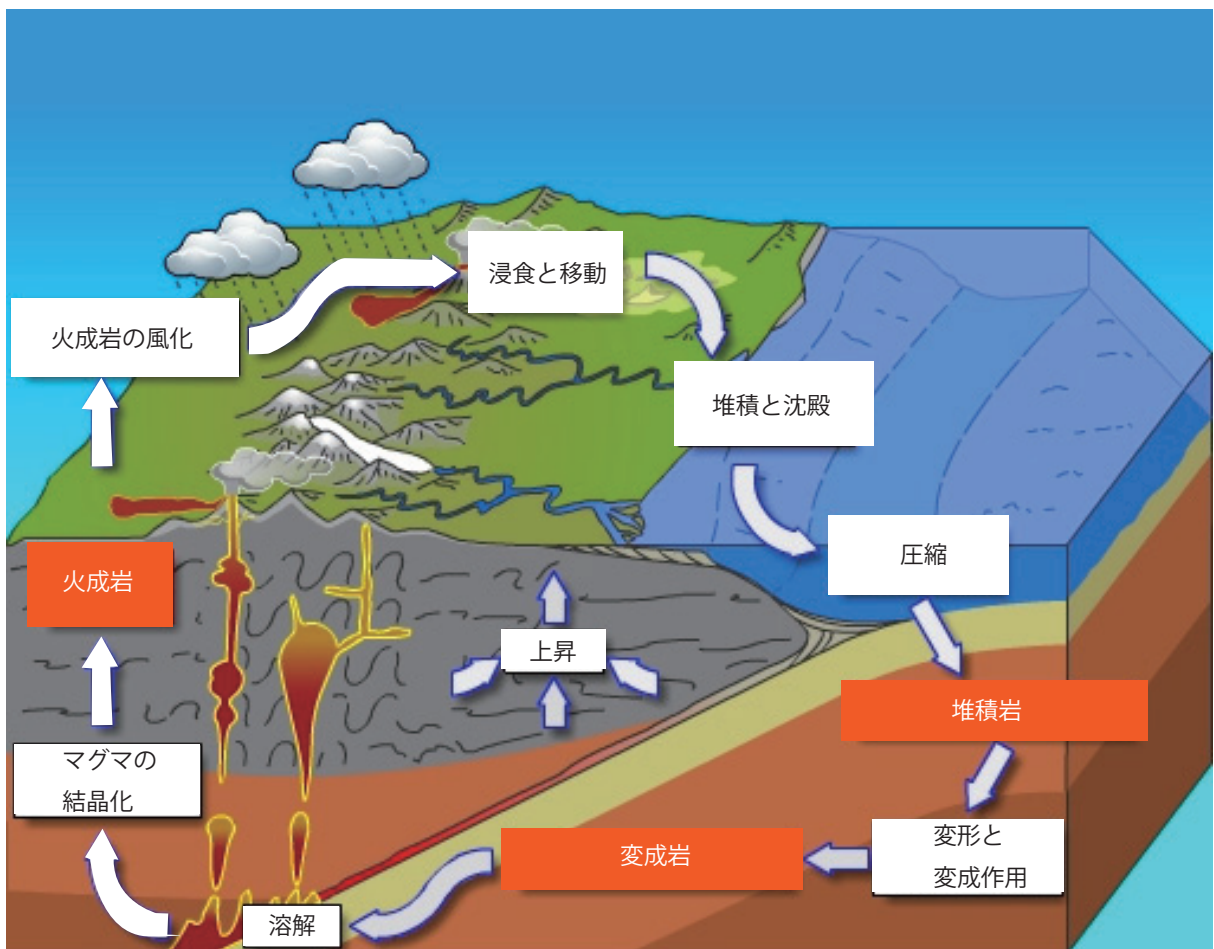
ロックサイクル

地殻の岩石は、地殻の移動によって作られ、循環しています。この循環の様子を見てみましょう。マグマで溶けた岩石は、密度が小さくなるので、上昇していきます。この溶けたマグマには様々な鉱物からなりますが、融点の小さいものから順に結晶化します。また急激に地上に吹き出ると、結晶のような構造を作る前に固まります。このようにマグマが固まってできた岩石を**火成岩**と言います。

この火成岩は、雨や風にさらされるため次第に風化して、川を流れ落ちたり空を砂が舞うようにして海へと運ばれたりして、海に堆積していきます。この堆積した上にまた土砂が堆積していき、圧縮されて固まり岩となります。また、カルシウムなどの殻を持つバクテリアが死んで堆積したものが固まると石灰岩を作ります。このように風化した砂が堆積してできた岩石を、**堆積岩**と言います。この堆積岩は、プレートの移動の圧迫で一部は上昇していき地上で再び風化を受けます。

また、堆積岩がプレートの移動でより地中に運ばれると、非常に強い圧力により、また新たな岩石が生まれます。このように、堆積岩が圧縮されたり変形されたりしてできる岩石を**変成岩**と言います。そしてこの変成岩がさらに圧縮されて高熱になると、再び溶けてマグマとなります。

このように岩石は循環して行きます。これを**ロックサイクル**と言います。



地球初期

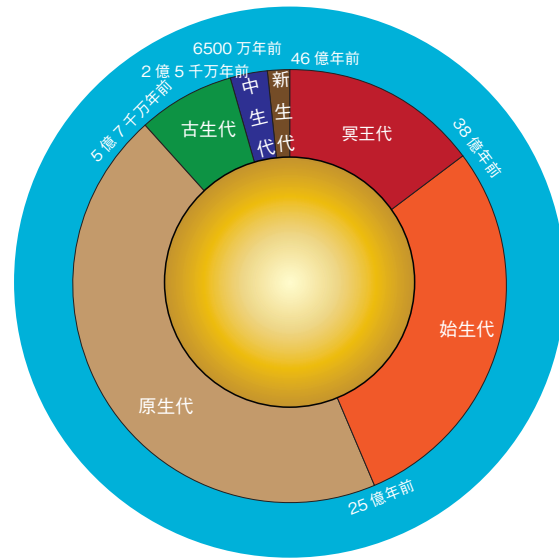
初期の地球では、多数降り注ぐ隕石や放射性元素の崩壊が激しく、地球の温度が上昇していきました。この熱で、鉄やニッケルが溶け、その重さで地中にしみこんでいき、地球中心部に沈み、地球の核を形成しました。この熱により、おそらく深さ数百メートルにも及ぶマグマの海があったものと考えられます。中でも軽い物質はその水面に顔を出し、冷えて薄い地殻を作ります。重い鉄の核と、薄い地殻の間には、比較的軽い元素、酸化ケイ素を多く含むマントルができます。

地球が作られたときには、水素、ヘリウム、メタン、アンモニア、二酸化炭素や水蒸気などがありましたが、水素やヘリウムは軽いので宇宙に逃げていってしまいました。また、その頃できた太陽の放射は非常に強かったので、ほとんどの気体は逃げて、大気のない状態から地球は出発したとされています。その後、太陽の活動が落ち着き、地球の大気は、地中に含まれていた物質が気体として逃げていくことによって作られました。そうした過程は現在でも数百におよぶ火山活動によって行われています。しかし、地球の温度が高かった当時には、火山活動は現在よりも相当活発であったと思われます。それらは、現在でも、火山は水蒸気、二酸化炭素、硫化水素をはき出していますが、当時でも同じでしょう。そのため、当時の大気は主にその3種類の気体で構成されていたと思われます。

地球が冷えると、水蒸気は雲を形成し、さらに冷えていき雨となり、地上に海を作りました。ところで、鉄の錆は鉄を水に触れさせて、それが空気に触れておこります。これは、水の中に鉄のイオンが溶け出し、そのイオンが空気中の酸素として結合して二酸化鉄となりさびるのです。初期の海にも、鉄が多量に溶けていました。しかし、当時の大気中には酸素がないのでそれが溶けたままです。

当時の大気はオゾン層がなく、有害な紫外線を遮るものがなかったので、38億年前に現れた生命体は海の多少深いところで暮らしていたと思われます。およそ35億年前に、バクテリアの一種が、光合成を始めました。光合成によって、抱負存在する二酸化炭素を酸素に変えて行きました。この酸素は海水中の鉄と結合し、海の底にさびた層を作りました。35億年前から20億年くらい前まで、海の底に鉄の地層が形成されていきました。これが現在の鉄鉱石が採取できる層なのです。

海水に鉄イオンが少なくなると、今度は大気中に酸素が増加していきます。今から20億年くらい前から15億年くらい前まで増加し続け、ほぼ一定の値になりました。また、酸素は大気中の高エネルギーの紫外線を吸収して電離し、それがオゾン層を作りました。このオゾンはDNAを損傷させる紫外線を吸収してくれるので、生命体にとって有益となりました。



海の進化

初期の大気は、二酸化炭素や二酸化硫黄を多く含んでいたため、現在の雨とは比べものにならないくらいの、酸性の海でした。そのため、岩の表面が溶け、ナトリウム、カルシウム、カリウムが海にとけ込みました。そのため塩分濃度が上がりました。

初期の海は二酸化炭素が大量にとけ込み、それは今も同じです。このため、大気中の二酸化炭素濃度が下がり、大気が熱くなりすぎるのを防ぎました。海水の溶け込んだ二酸化炭素は、カルシウムと結合し、炭酸カルシウムなどを作ります。海に住む殻をもつ生物はこの炭酸カルシウムを取り込み、殻に利用しました。そして、死に絶えると地層を作りました。これが、石灰石となります。このため、空気中の炭素はさらに減少しました。

大陸の形成と超大陸のサイクル

海底の地殻は、海嶺かあの吹き出しで起こりましたが、大陸の地殻はどのようにして起こったのでしょうか？実は見た人はいないし、様々な可能性がありはっきりとわかりません。しかし、現在よりも活発な地熱により、火山活動によって海面の上に出て冷えて固まっただけの大陸性地殻は、できたとしてもそれは小さかったものと推定されます。いったん上にでた大陸の地殻は、海底からのプレートが下に落ち込むため、比較的長く陸地のままでいられます。

一説では、これらの小さな大陸の地殻が衝突して大きな地殻を形成していきました。もちろん逆に消えていく大陸もあったでしょう。そして、今から数十億年前までには、現在の大陸の80パーセント以上があったものと考えられています。

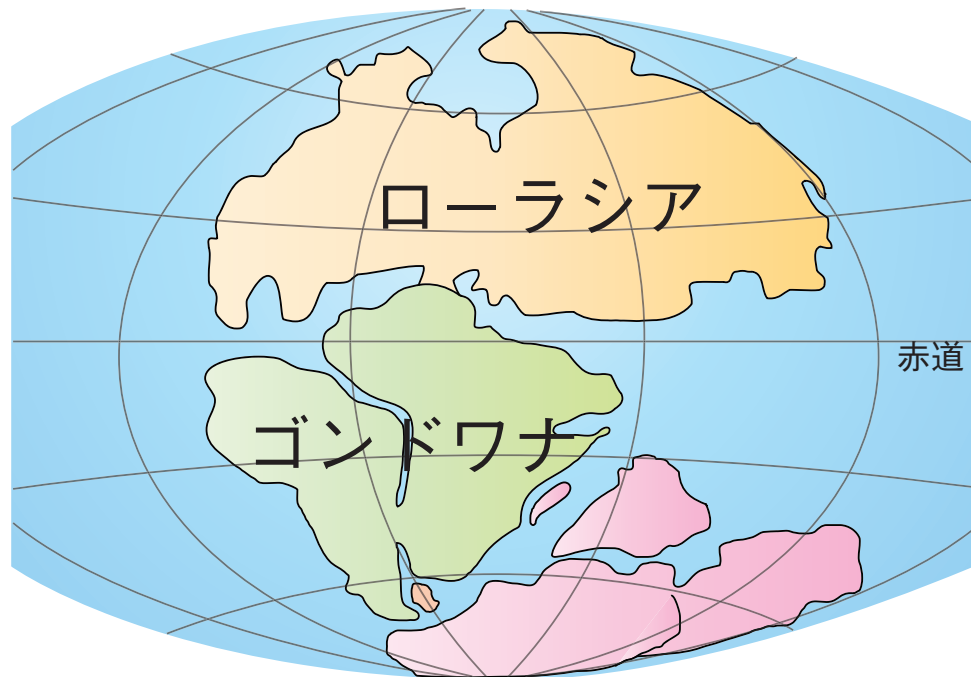
超大陸とは、非常に大きな大陸で、その頃の多くの大陸がまとまっているものを言います。パンゲアも超大陸ですが、それ以前にもあったと考えられます。現在の大陸を調べてみると、できた時期の異なる、多数の部分で成り立っています。鉄鉱石の地磁気の向きなども大陸がつながっていたものかを判断する指針になります。これらの情報を元に、パンゲア以前の大陸もある程度推測できるのです。

確認されている最初の超大陸は、11億年前のロディニアです。これが、8億年前から6億年前のあいだに分裂を始め、ふたたび集まり Gondwana という超大陸になります。またその後、3億年前にはパンゲアが現れ、それが分裂して今日に至ります。今から数億年後には、再び超大陸が生まれる可能性があります。このように、超大陸が分裂し再び超大陸になるのを

超大陸サイクルと言います。



このような、超大陸の形成は、気候にも大きな影響を及ぼします。たとえば、南極大陸は落ち億年以上前から、南極に居続けていますが、2500万年前まで氷に覆われてはいませんでした。それは、他の大陸とつながっており、大陸性の風が吹いていた他、赤道付近の海流が、大陸を回り込むように流れて、南極まで届いていたからです。南アフリカが南極大陸を離れると、暖かい海流から切り離された南極大陸は、氷に覆われるようになったのです。



三畳紀
約2億年前

ミランコビッチサイクル

地球の平均気温は、周期的に変化することが知られています。これは、何らかの理由で日照量が増えていることが理由の一つであると考えられます。

1920年代にセルビアの地球物理学者、ミランコビッチは、地球が太陽を回っている軌道などの変化を考えました。

地球は、他の惑星がなければニュートンが示したように楕円軌道を回り続けます。しかし、他の惑星の影響で、この軌道がずれてきます。特に大きな、木星や土星の重力が影響します。楕円軌道が中心からずれてくると、太陽から遠方で長く滞在するようになります。このとき、日照量が少なくなります。これはおよそ10万年周期で起こります。

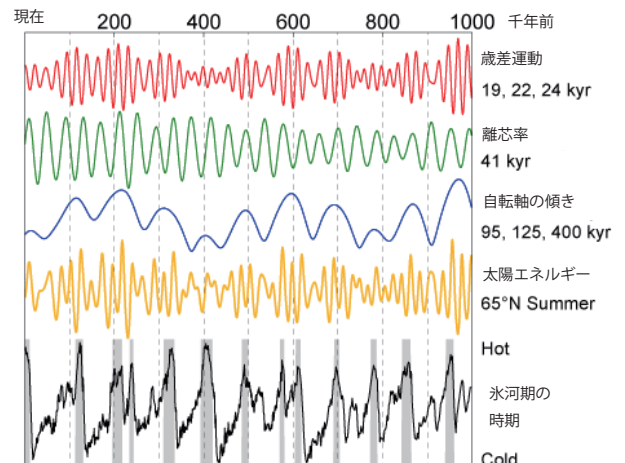
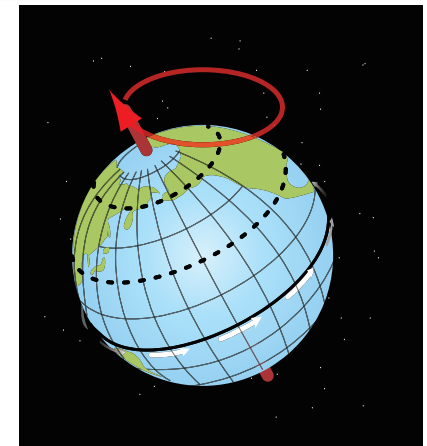
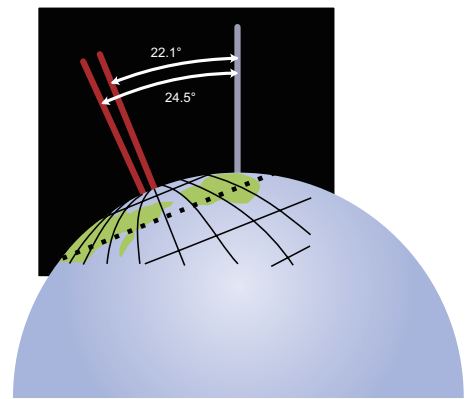
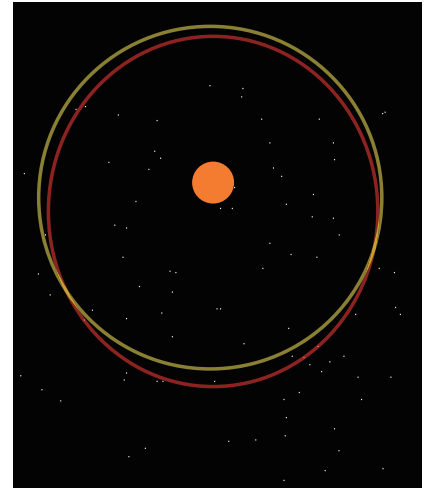
現在は、地球は公転の軌道面に対して、2.4度傾いています。日本に季節があるのもこのおかげです。また、北極や南極地域では、暖かいシーズンには氷が溶け、寒いシーズンには氷が凍ることを繰り返しています。しかし、地球のこの回る軸は、およそ4万1千年で22.1°から24.5°を行ったり来たりします。現在は、2.344°傾いていますが、22.1°では季節変動が少なくなり、寒い夏になります。その結果、極地の氷は溶けることなく、次第に増大していく可能性が高くなります。ちなみにあと1万年後に22.1°になります。

また、月などの影響で地球の自転軸が図のように回転します。この周期はおよそ26,000年です。

このように、太陽からの日照量は周期的に変動することがわかります。これを**ミランコビッチサイクル**といいます。

これらのことを考慮すると、ミランコビッチの結果は、過去の氷河期の起こり方をほぼ再現することがわかりました。

いったん地球が氷河で覆われ始めると、氷河の氷により太陽光線は反射され、太陽の熱を地表が吸収しにくくなります。そのため、氷河ができるとそれはさらに増幅されがちになります。

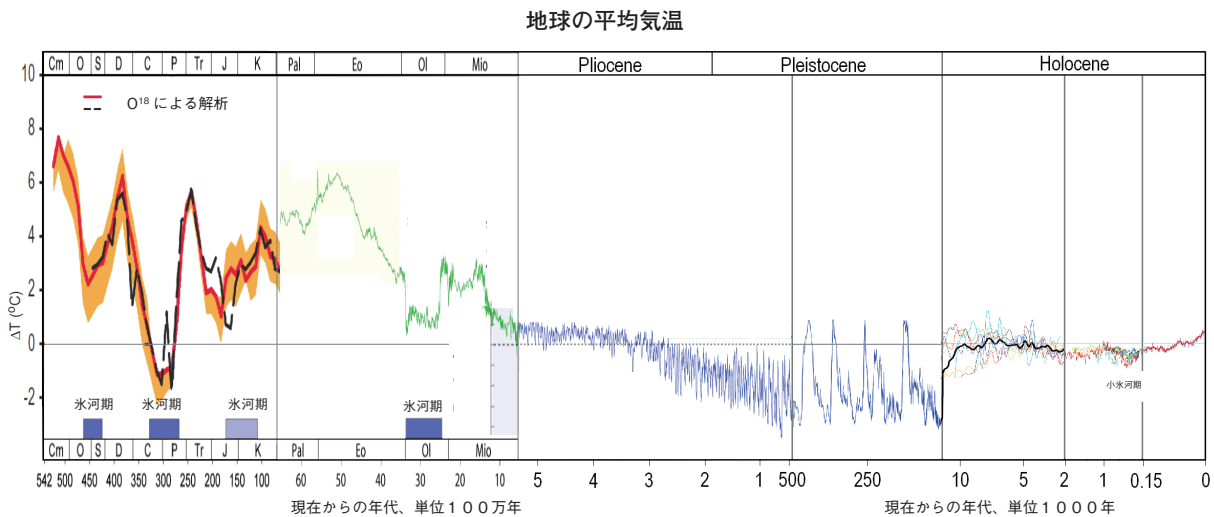


地球の歴史中での天候変化

近年、世界各地で異常気象が報告されています。氷河が毎年減少してきているのはニュースでも聞いたことがあるでしょう。2003年にはスイスで250年ぶりという熱さが報告されました。異常気象の頻度の上昇は平均気温の上昇と関係があるのでしょうか。しかし、現在の気候変化を考える上で重要なのは、現在の姿からだけではありません。地球の歴史の時間スケールにおいてどのような気候変動があったのかを見るのが、現在の姿を正確に把握するために重要です。ミランコビッチサイクルの結果は、大まかに日照量を予測したわけですが、これで気候変動がすべて説明できたわけではありません。ここでは過去の気候変動について見ていきましょう。

非常に初期のできたての太陽は今よりずっと激しくエネルギーを放出していましたが、その後落ち着き、30億年ほど前までは太陽は、太陽の放出するエネルギーは現在よりも20パーセントから30パーセントも弱かったと推測されています。地球の初期の大気は、炭素の酸化（燃焼）により、二酸化炭素と水蒸気が主な構成要素でした。これらは、13章でもみたように、赤外線を吸収するため温室効果ガスと呼ばれています。このため、海は凍りませんでした。光合成をする生物の発生で二酸化炭素が取り除かれると平均気温は下がっていきましたが、その後太陽はその放出のエネルギーを増加させていき、幸運にも生命にとって快適な気候が維持されました。

地球の歴史を見ると、現在までの平均気温はかなり変動しているのがわかります。それ



でも過去に、海が凍り付いてしまう現象が少なくとも5回はあったものと推定されています。特に、7億年前から6億年前までに起こった氷河期では、北極から南極まで氷つき、地表の多くが氷河に覆われました。その後、現在よりも平均気温が高い状態が続きました。しかし、200万年後から平均気温が下がり氷河期となりそれが最後の氷河期でした。ここ1万年の間は非常によい気候に恵まれ、人類の発展にとって非常によかったわけです。

どのようにして過去の温度を測るの？

信頼できる温度計で温度を測るようになったのはここ数百年のことです。それ以前の温度を知るにはどうしたらいいのでしょうか？まず、ここ千年くらいの間であれば、歴史的な記述が役に立ちます。たとえば、985年にバイキングがグリーンランドに数百人の移民を連れて行きました。そこでバターやチーズを作り、人工が増えていきました。しかし、その後300から400年の間にその植民地は消え去ってしまいました。夏にも流氷があり、穀物が育たずに死に絶えてしまいました。ちょうど同じころ、1450年頃から1850年ころまでヨーロッパの氷河が拡大し、小氷河期と呼ばれました。日本の記録でも当時は現在よりも寒冷であったことが伺えます。このように、比較的最近であれば記録から当時の気温を推定することが可能です。しかし、それでは、何億年も前の温度はどのようにして推測したのでしょうか？

その一つの方法は、木の年輪です。木は寒冷なときにはあまり育たず、暖かいときには良く育ちます。氷に閉じこめられた古代の木の年代を炭素14の割合により割り出します。そして年輪により当時の気温を推定していきます。

また、植物の花粉は幅広く飛び散り、しかも比較的丈夫です。そのため、堆積層の中に花粉を見ることができます。たとえば、ある植物の花粉が現在よりも緯度の低いところで発見された場合、その堆積層ができたころの気候は温暖であるとわかります。

また、氷河中の酸素18の割合を測定すると、気温を推定できます。酸素18は通常の酸素16同様安定な同位体同位体です。違いは普通の酸素よりも重いだけです。常温では水分子はお互いに引き合って水の状態を維持します。この同位体で作られた水分子は、海の表面の温度が低いと熱運動による空気の衝突では、重いために空気中に出にくくなります。一方温度が高いと、エネルギーが高い空気の衝突により酸素のわずかな質量の違いに関係なく蒸発してしまいます。このように、温度によって蒸発するときに含まれる酸素18の割合が異なるのです。この蒸発した水は寒冷地では雪となり氷河になります。したがって、氷河の氷に含まれる酸素18の割合を計測することにより気温を推定します。氷の年代は、氷に含まれる花粉中の炭素14の割合を計測して決定します。

その他、化石の比較なども温度の推定に用いたりします。生物が適応できる平均気温は限られているため、同じ化石が出た地域は、気温がほぼ同じと推定できるのです。

このように、様々な方法で科学者達は過去の気温を推定してきています。



氷のサンプル調査

炭素循環

今からおよそ1億年前、恐竜がいたころには、非常に気温が高い時期がありました。海水面は高く、極地ですら氷がありませんでした。大気中の二酸化炭素の量が現在の2倍はあったと推定されます。この二酸化炭素が多い理由はなぜだったのでしょうか？いやむしろ、その頃多量にあった二酸化炭素は現在ではどこにいつってしまったのでしょうか？こうしたことを考えるためには地球の**炭素循環**を考える必要があります。

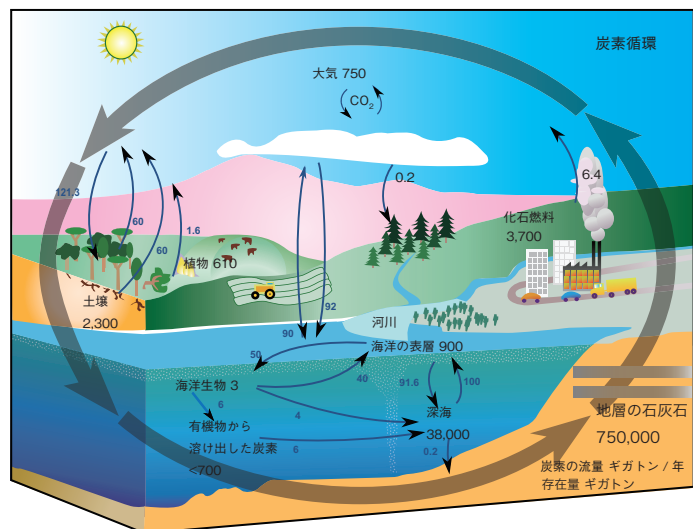
まず、大気にあったほとんどの炭素は、実は炭酸 HCO_3^- として海水に溶け込んでいます。その量はおよそ40兆トンに上ります。もちろん、生命体にもあります。この海と生命体によって蓄えられた炭素は大気との間で年間およそ1200億トンを循環させています。海から二酸化炭素が逃げていくこともあれば、逆に大気中の二酸化炭素は水に溶け、炭酸となり海に溶けていきます。これが第一の炭素の循環経路です。

また、地球内部からの循環経路もあります。それは、地球内部にある炭素が火山によって二酸化炭素として大気に放出されるのです。それが、雨により海に溶けます。それは、カルシウムと反応し、炭酸カルシウムとなります。そしてこれは石灰石として海底に蓄積されます。そしてこれは海底面の移動により、地中深く返され、それが再び火山の噴火と共に空気中に放出されます。これが第2の炭素循環経路です。

大気に含まれる二酸化炭素は、地球の中の炭素のわずか0.1パーセント程度でしかありません。炭素のほとんどは地面の中にあります。地球規模で炭素の循環を長期的に担ってきたのは生命です。炭素は生命の基本要素であり、生命活動が炭素の循環に非常に大きな役割を果たしています。石灰石などには、大気の1000倍もの炭素が蓄積されています。これはプランクトンの堆積などでできたものです。もしこうした炭素のごくわずかでも地上に戻る出来事があれば気候に大きな効果を及ぼします。もちろん、化石燃料にも蓄えられています。現在最も重要だと考えられているのがこの化石燃料の燃焼によって大気中の炭素量が増加していることです。また、海底に有機物が堆積し、汚泥に埋められた状態になると、微生物の働きによりメタンが発生します。このメタンが天然ガスです。このメタンは海底の大きな範囲に分布していると考えられ、その総量は石油などの化石燃料の2倍ほどであると推定されています。ただし、海底に少量ずつ大規模に分布していて、ほとんどの天然ガスは採掘にコストがかかります。そのためこれらのメタンのほとんどは利用できません。

このように、地上にある炭素は、全体の炭素の量から比べるとまさに氷山の一角であり、生命の活動によってほとんどの炭素は地下に閉じこめられてきたのです。

このように、地上にある炭素は、全体の炭素の量から比べるとまさに氷山の一角であり、生命の活動によってほとんどの炭素は地下に閉じこめられてきたのです。



気候の変動とプレートテクトニクス

さて、それではプレートテクトニクスが二酸化炭素の量にどのように関係しているのを見参みましょう。今から1億8000万年から1億5千万年くらいまで、気候が次第に暖かくなって行きました。これは、当時火山活動が活発に行われた時期であることがわかっています。このため、二酸化炭素の量が増加します。また、温度が高い海水には二酸化炭素は溶けにくくなり大気中の二酸化炭素の量に拍車をかけます。

しかし、数十億年の歴史をみると、大陸間の衝突が起こったときには、地球全体の平均気温が低くなっているのです。それは、石灰石として蓄えられた炭素は、地中に戻されることなくむしろ山の上のほうに蓄えられることになったからです。たとえば、もしインドとアジアの衝突によってヒマラヤができなければ、二酸化炭素の量が予想を上回っており、ミランコチツピサイクルが予言する、氷河期は起こらなかったかもしれないのです。

また、海底のプレートに閉じこめられたメタンの放出も過去の極端な温暖化の引き金になったという推定もあります。

このようにプレートテクトニクスは、大気中の二酸化炭素の量を通して、地球全体の気候にも大きく影響しているのです。

天候と人類の歴史

ここでは、天候の変化が人類の歴史にどのようにかかわってきたのかを見てみましょう。

10万年ぐらい前に、ホモサピエンスがアフリカに出現し、これは12万年前から9万年前に起こったと思われる、氷河期によって、大きな脳を持つ種が自然選択されたためと言われています。おそらく、アフリカのごく少数の地域以外では同様にいた種は死滅してしまいました。

6万年から4万年ぐらい前には、非常に季候が良くなり、ホモサピエンスは地球上のあちこちに散らばっていきました。海水面は非常に低く、大陸の多くは陸続きでした。

1万6千年ぐらい前に、気温が急激に上昇しました。しかし、1万3千年前には気温の上昇は止まり、1200年ほど、気温が寒い時期を迎えました。この理由は現在もよくわかっていません。

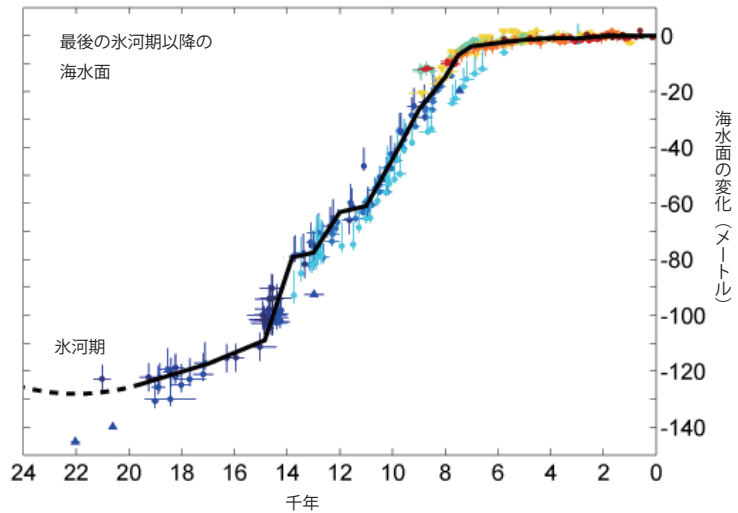
1万年くらいまえから農業が始まり、この頃には地球は温暖な時代を迎え、それは現在も続いています。

6000年くらい前、人類は様々なところでほぼ同時に文明を持ちました。これはどうしてでしょうか？その一つの原因は、海水面の高さに関係していると思われます。図のように、6000年くらいまでに海水面が上昇をし続けました。海の近くやその近くの川が住みやすい場所ですが、海水面が上昇すると、川の流れも変わっていきます。そのため、多くの人々は移住を繰り返していたはずですが、海水面が一定になると、そこに定住することができます。また、定住により農作物も良く取れるように改良が進むのです。

海水面の上昇は、幾つかの地域では大災害を引き起こしました。昔は地中海と黒海とはつながっていませんでした。一説によると黒海は今の半分くらいの大きさで多くの人々がその沿岸に住んでいました。地中海の水位が上昇し、黒海への水路が開けると、黒海に一斉に流れ込みました。ヨーロッパでは、ノアの洪水などのように、洪水の話が多いのは、こうした移住しなければならなかった過去の歴史があるからかもしれません。

紀元前800年頃からローマ文化が盛んになります。アジアでも温暖な時期が続き、ヨーロッパとのシルクロードによる貿易が始まりました。起源世紀にはローマ帝国が最盛期を迎えますが、西暦400年には、非常に寒い時期を迎えます。植えたヨーロッパ人は、南に移住し、ローマ帝国は衰退していきます。

中国では西暦1332年には、中国の黄河で大洪水が起こります。そしておよそ700万



海水面の水位

6000年前まで上昇し続けている。文明の発達と関連があると推測される

人が死にました。そんなにたくさんを埋めることはできませんので、その死体はうち捨てられ、ネズミが大量に繁殖しました。ネズミは、その頃黒死病と呼ばれたペストを媒介するのみを運びました。その他の地域でも、天候不良が続いていたので、穀物を中国から輸入し、ネズミも一緒についてきたのです。

そのため、ほとんどの皆とのある町にペストが流行しました。その世紀の終わりまでに、イギリス人の70パーセントを死に至らしめ、神郷が激減しました。ペストで働き手を失った荒れ地が世界中に増加し、田畑や木が枯れたまま放置されました。このため、多量の枯れた木に炭素が閉じもめられました。そのためこの洪水はまた、その後、小氷河期と呼ばれる期間の訪れの原因となったかもしれません。この小氷河期は黒点の数が非常に少なく、このことから太陽活動が何らかの原因で非常に少なかったと推定されています。この小氷河期には、疫病が盛んに起こる反面、人々は家にこもりがちになり、このためバロックやサイエンスなどが盛んに行われるようになったのかもしれません。

西ヨーロッパでは、疫病による人口の減少は、安い労働力を奪い、労働者階級の地位を高めました。このため、王制の力を弱め、市民革命の原動力になりました。おそらく、自由な市民の登場が、ルネッサンスや産業革命の登場に影響したことでしょう。実際、港がなく疫病の被害が少なかった、東ヨーロッパではそれまでの王制が19世紀終わりまで続きました。

このように、気候変動は人類の歴史にも大きく影響してきたのです。

キーワード