

5回 地球の大気と水／大気の大循環と水循環による気象現象

(1) 大気循環

wikipedia 抜粋

地球の大気の大規模な循環のことである。太陽から地球への熱の供給が原因となって発生する現象。「大気大循環」、「大気の大循環」、また地球表面を南北方向に割った断面（子午面）の循環であることから「平均子午面循環」「子午面循環」とも呼ばれる。一見、大気の流れは絶えず移り変わっているように見えるが、地球規模で数週間から数か月の長いスパンで見ると大気の流れは基本的には一貫しており、大規模な循環の構造を成している。

地球の熱輸送を担う大気循環

気象現象の原動力となるのは太陽から地球への熱供給、つまり太陽からの光（太陽放射）である。

太陽放射を受ける量は平均すると赤道付近で最も多く、緯度が高い北極や南極に近づくほど少なくなる。一方、地球から出ていく熱（地球放射）の緯度による差は同じような変化をするものの、太陽放射に比べて変化が小さい。よって、約 40° より低緯度では出ていく熱より入ってくる熱の方が多く、高緯度では逆に出ていく熱の方が多い。これを聞くと低緯度は温度が上がり続けて高緯度は温度が下がり続けるように思えるが、実際はそうはならない。熱が低緯度から高緯度へ輸送されているからである。

緯度方向、つまり南北方向の熱輸送を担う機構は大きく分けて 3 つある。

①海流による輸送

②大気の流れによる輸送

③潜熱（状態変化に伴い熱を吸収放出し、大気とともに水蒸気や雲として）輸送

全体的に海流よりも大気と潜熱による輸送の方が量は多い。

大気循環モデルの提唱

18 世紀にイギリスの気象学者ジョージ・ハドレーは、当時知られていた貿易風と偏西風を説明する理論的な大気循環モデルを提案した。

低緯度で暖まった大気が上昇して高緯度に向かい冷やされて下降することで、大気上層では低緯度から高緯度へ、地表付近を含む大気下層ではこれを補うために高緯度から低緯度へ大気が移動する。

そして地球の自転により高緯度から低緯度へ向かう下層の風は西向き（東風）に、低緯度から高緯度へ向かう上層の風は東向き（西風）に曲がるが、運動量保存の法則から風はだんだんと加速されるため、高緯度では下層でも西風が卓越する。また低緯度の下層の実際の東風は運動量保存を考えた時よりも遅いが、これは摩擦による減速の為だと考えた。ここでハドレーが考えた運動量保存は正しくなく、実際には角運動量が保存されるのだが、モデル自体は一部正しかった。

(a) 現在の大気循環モデル

実際の大気では、ハドレーのモデルと異なり、極付近の風は西向きの風（東風）、中緯度の風は低緯度から高緯度へ向かう東向きの風（西風）である。また循環構造も、単純に赤道と極の間で循環している

のではなく、3つの大きなセル（ハドレー循環、フェレル循環、極循環）からなっていることが、後の研究で分かった。

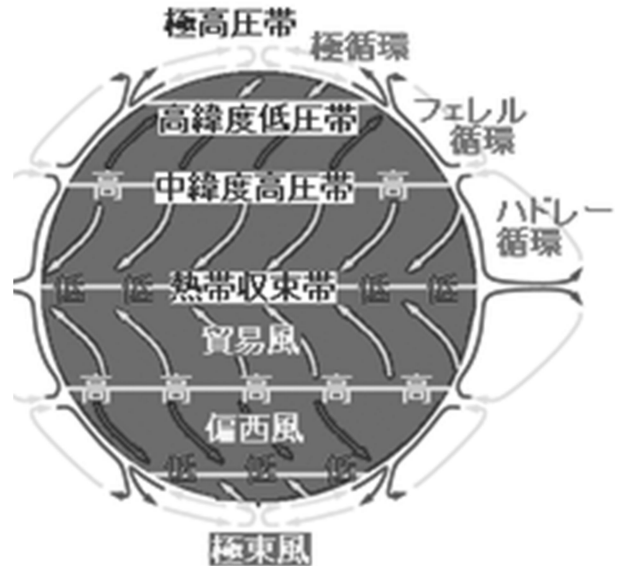
ハドレー循環

ジョージ・ハドレーがその理論を提唱したことからこの名が付いた。

太陽熱で暖められた空気は上昇するが、赤道付近には地球上で最も多くの太陽熱が供給されるため、「熱帯収束帯」と呼ばれる恒常的な低気圧帯が発生する。

熱帯収束帯では巨大な積乱雲の群れが収束帯に沿って連っており、気象衛星画像などでその姿を見る事が出来る。

地球表面を長い距離移動する風は自転の影響（コリオリの力）を受けて、高緯度から低緯度へ向かう風は西向きに曲げられるため、貿易風は北半球では北東貿易風、南半球では南東貿易風となる。ただし、地軸（赤道傾斜角）の傾きにより季節によって太陽が天頂へ来る地域（太陽熱を多く受ける地域）は変わるため、熱帯収束帯は季節によって南北へ移動する。このことから、厳密には熱帯収束帯が位置するのは「赤道」ではなく「熱赤道」となる。

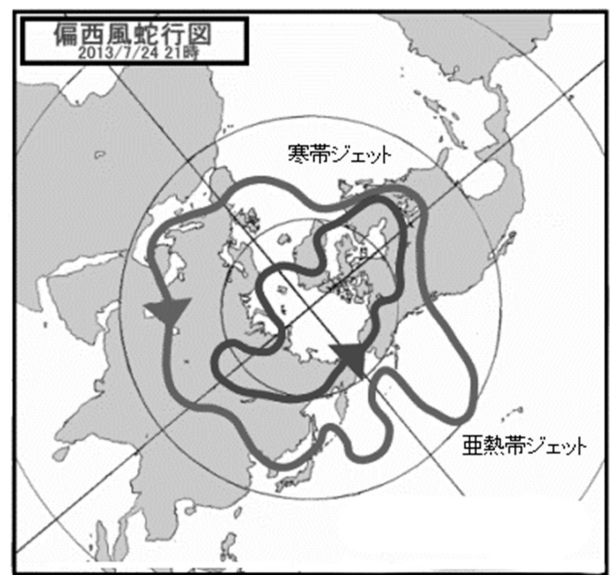


フェレル循環

19世紀にアメリカの気象学者ウィリアム・フェレルによって理論付けられたためこの名が付いた。ハドレー循環で生じる中緯度の亜熱帯高気圧は赤道だけではなく高緯度にも風を吹き出していて、高緯度（北緯・南緯 60度付近）の「亜寒帯低気圧」と呼ばれる低気圧帯に向かって偏西風として吹きこみ、そこで上昇し、上空で再び中緯度まで戻ってくる。こうして、上空では高緯度から中緯度へ、地上付近では中緯度から高緯度へ向かう、1つの閉じた循環ができる。これを「フェレル循環」という。

フェレル循環は、熱力学的に見るとハドレー循環と極循環の2つの大循環によって引き起こされる2次的な循環で「間接循環」と呼ばれる。

間接循環であるフェレル循環は、偏西風そのものが熱を運ぶのではなく、「偏西風波動」と呼ばれる偏西風帯の南北への蛇行によって熱を運ぶ。低緯度の暖かい空気が高緯度に流れ込み、高緯度の冷たい空気が低緯度に流れ込むことによって、低緯度側から高緯度側に熱を運んで



いる。偏西風は上空でも吹いており、北緯・南緯 30 度付近（フェレル循環との境界）で最も強く、北緯・南緯 60 度付近（極循環との境界）付近でも強い。これらをジェット気流という。

極循環

極地域の寒冷な空気は下降し「極高圧帯」と呼ばれる高気圧帯になっている。ここから吹き出す風は極東風として高緯度低圧帯へ吹きこむ。一方上空ではこれを補うため高緯度から極地域に風が吹く。これが「極循環」である。極循環は他の 2 つの循環よりも弱い。

中層大気の流れ

ハドレー循環、フェレル循環、極循環は対流圏内の循環である。

これより上空の中層大気（成層圏と中間圏）では、主に成層圏内で低緯度から中緯度への風、成層圏と中間圏にまたがる規模で夏極から冬極への風の 2 つの風系がある。これを「ブリューワー・ドブソン循環」といい、オゾン層を構成する成層圏オゾンの生成に深く関連している。

（b）東西の循環

海陸風

陸の比熱容量は海より少ないため温まりやすいことから、地上では日中は海から陸へ、夜は陸から海へ、上空ではこれらと逆の向きに風が吹く。この風を海陸風と呼ぶ。

同じように、季節の変化においても似た現象が起こり、これを季節風という。季節風は大陸規模であり、地上では夏は海洋から大陸へ、冬は大陸から海洋へ風が吹く。

ウォーカー循環

太平洋と周辺の大陸の間では、海陸分布により「ウォーカー循環」と呼ばれる東西の循環が存在する。赤道付近の太平洋で暖められた大気は西太平洋で上昇し、東と西に分かれて循環している。東に向かった大気は東太平洋で下降し、西へ向かった大気はインド洋や大西洋で下降する。この循環によって、西太平洋と東太平洋の間で大きな海水温の差ができ、冷たい東太平洋から暖かい西太平洋への海水の流れが生じる。20 世紀前半にイギリス人気象学者ギルバート・ウォーカーにちなんで名づけられた。ウォーカーの研究が、後に「南方振動」と呼ばれる太平洋・インド洋間の気圧変化の関係性の発見につながる事となった。海水温が変化するとウォーカー循環にも異常が現れる。何らかの原因で西太平洋での大気の上昇が弱まると、貿易風が弱まって東太平洋の海水温が上昇し、ウォーカー循環が崩れる。海洋と大気の両方で異常が生じ、これらを総称して「エルニーニョ・南方振動」と呼ぶ。

エルニーニョ・南方振動

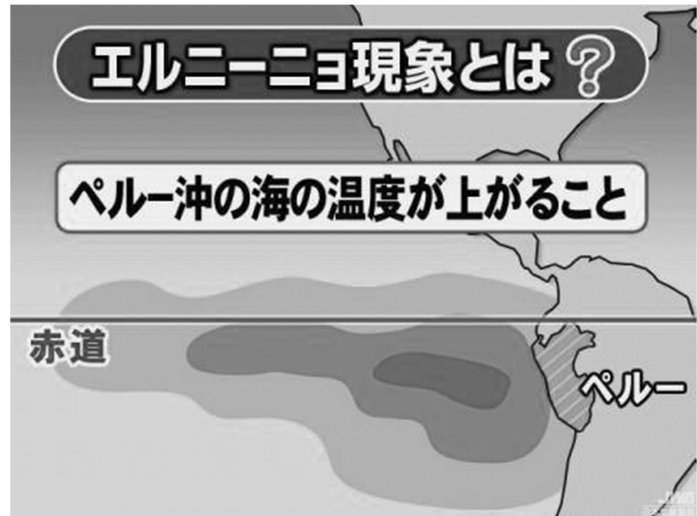
大気ではインドネシア付近と南太平洋東部で海面の気圧がシーソーのように連動して変化し、海洋では赤道太平洋の海面水温や海流などが変動する。

大気に着目した場合には「南方振動」、海洋に着目した場合には「エルニーニョ現象」（もしくは、単に「エルニーニョ」）と呼び分ける場合がある。エルニーニョ現象と南方振動は当初は別々に議論されて

いたが、研究が進むにつれて両者が強く関係していることが明らかになり、「エルニーニョ・南方振動(ENSO)」という言葉が生まれた。

ENSOは、大気と海洋が密接に連動した現象(大気海洋相互作用)の代表であるとともに、それが世界的な天候変化に波及するテレコネクションである。

現在学術的には、この一連の変動現象を「エルニーニョ・南方振動(ENSO)」とし、その振れ幅の両端にあたるのが、太平洋赤道域東部の海水温が上昇する「エルニーニョ現象」、およびその正反対で太平洋赤道域東部の海水温が低下する「ラニーニャ現象」、とする考え方が一般的である。



(2) 水循環

Wikipedia 抜粋

太陽エネルギーを主因として引き起こされる、地球における継続的な水の循環のこと。固相・液相・気相間で相互に状態を変化させながら、蒸発・降水・地表流・土壌への浸透などを経て、水は地球上を絶えず循環している。水文学的循環(すいもんがくてきじゅんかん)と呼ばれることもある。

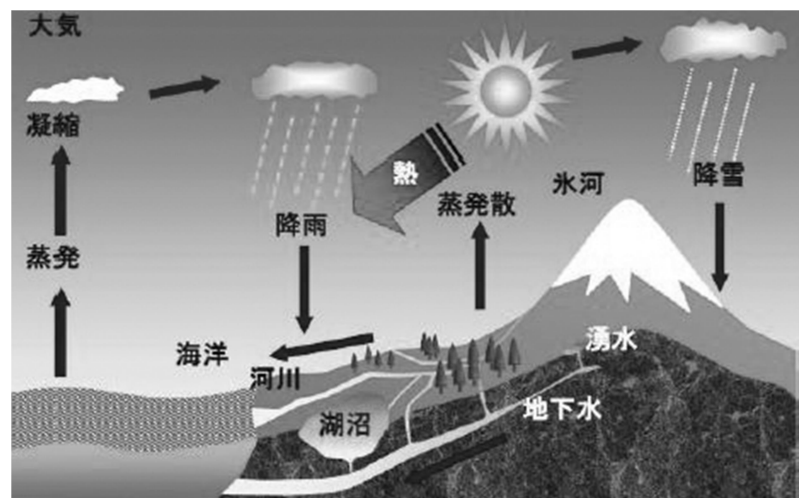
※水文学 地球上の水循環を対象とする地球科学の一分野で、主として、陸地における水をその循環過程より、地域的な水のあり方・分布・移動・水収支等に主眼をおいて研究する科学である。研究対象は、水の供給源としての降水の地域的・時間的分布特性、蒸発、浸透、陸水や地下水の移動等が中心となる。

水循環のプロセス

水循環の主要な流れは、「蒸発→凝結→雲の形成→降水→地表流→海」である。

太陽エネルギーと重力により、このサイクルが止めどなく繰り返される。

なお、降水のうち、河川となって、海へ戻るのは、全体の三分之一であって、残りは、再び蒸発して、大気中に溶け込んでいるとする見解がある。



蒸 発 蒸発とは、地表部の水が水蒸気へと変化する現象のこと。蒸発の主となるエネルギー源は太陽放射である。植物における蒸発は蒸散という。両者は密接に関係しているため、合わせて蒸発散と呼ぶこともある。大気中に含まれる水の 90%は蒸発によるもので、残りの 10%は蒸散によるものである。

凝結・凝固 凝結とは、空気中の水蒸気が雲や霧を形成しながら液体へと相転移することを指す。いわゆる暖かい雨の場合は凝結のみだが、冷たい雨の場合は低温の環境下において凍結して固体へとさらに相転移する。また、量は少ないが、凝結した後すぐ生物に利用されたり、地中に浸透する露という形態もある。

昇 華 昇華とは、液体を経由せず、固体－気体間で状態変化する現象。氷河では固体から気体への昇華が起こっている。気体から直接固体となる現象（霜、氷霧など）も含む。

移 流 移流とは、その相を問わず、大気中を水が移動する現象のことを指す。地表の 70.6%を占める海は蒸発源の 86%を占める大リザーバーであり、海上で蒸発した水が移流によって陸地まで移動することでもたらされる水の量は多い。

※リザーバーとは、水循環の過程で水が存在する各空間を表す言葉である。水の最大のリザーバーは海であり、地球上の水の約 97%が存在する。次に大きなリザーバーは氷冠や氷河で、約 2%の水が存在する。ちなみに、生物の体内に存在する水の割合が最も小さい。

降 水 降水とは、雨雲となった水が降り注ぐことである。降水現象は雨として生じることが最も多いが、雪やあられ、みぞれ、ひょうなどの状態で降り注ぐこともある。地球全体で $4 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{年}$ と推定される。

地表流 地表流とは、高低差にしたがって地表を流れる水のこと、川などもこの地表流に該当する。地表を流れながら水は地中に浸透し、空気中に蒸発し、湖沼や他のリザーバーに貯えられ、農工業に利用される。

積雪（堆積） 寒冷地では、雪は融けずに堆積していく。すぐに融解するものもあるが、冬季の間残る根雪、年をまたいで残る万年雪、万年雪は毎年の新雪に圧縮されて氷河となる。

浸透・涵養 水循環における浸透とは、水が地中にしみ込む現象のこと。浸透速度はその土壌が既に含んでいる水分の量、ならびに浸透能に左右される。地下水の帯水層へ水が供給される現象は、涵養と言う。

融 雪 雪解けに伴い、地表流が発生する。

地下流 地下流とは、地下の帯水層における地下水の流れのこと。地下流となった水は湧水などのかたちで再び地表に戻るほか、最終的には海に浸出する。地下流の流速は遅いため、大規模な帯水層の地下水にあっては、何千年にもわたって滞留することもある。