

水循環と大気

羽角 博康（東京大学気候システム研究センター）

1 はじめに

天気や気候という言葉によって私たちが普段意識するものは、気温・湿度・降水量・風といった地表付近大気の物理的状态であり、水との関わりが深いものです。地表付近大気の状態は上空とつながっていることはもちろん、陸面の植生や雪氷分布、そして海洋の状態にも依存しており、これらの気候をコントロールする要素をすべて含んだ系を気候システムと呼びます。陸面や海洋の組成や物理的特徴は大気と大きく異なりますが、それらが大気の状態として認識される気候に影響を与えるのは、主としてこれらの中で熱と水が交換されることによります。ここではそのうちの水の交換に着目して、大気の状態と海洋の関わりを見ていきます。

大気中にはおよそ 15 兆トン（ 1.5×10^{13} トン）の水蒸気が含まれていますが、その水は蒸発と降水を通して常に陸面や海洋との間で交換されています。全地球表面からは毎年およそ 500 兆トン（ 5×10^{13} トン）の割合で蒸発が生じています。もちろん降水も同じだけあって、蒸発した水はいずれ陸面や海洋に帰ってくるわけですが、その結果として大気中の水が一年間に 30 回以上入れ替わるほど活発な水交換が生じているという換算になります。そして、言うまでもなく海洋は気候システムにおける最大の水の貯蔵庫で、大気中のおよそ 100 万倍の水を貯えたとともに、先ほどの蒸発量の 8 割は海洋から生じています。

こうした水の交換や大気中の水輸送は、降水量など水そのものの意味でも重要ですが、ここで扱わないもうひとつの重要要素である熱交換とも不可分の関係にあります。陸上や海洋に存在する水の多くは液体であるのに対し、大気中では雲や雨粒を除いて気体として存在します。この気体と液体の間の相変化においては潜熱の吸収・放出が伴います。すなわち、陸面や海洋から水が蒸発する際にはそれらから熱が奪われ、逆に大気中の水蒸気が凝結して雲ひいては降水になる際には周囲の大気を暖めることとなります。この水の相変化に伴う熱交換は気候システム全体の熱交換の中でも大きな部分を占めています。

2 海から大気へ

地球表面からの蒸発量の分布を図 1 に示します。この図からまず、蒸発のほとんどは海上で生じており、陸上で海上に匹敵するほどの蒸発量があるのは熱帯の一部の降水量が多い地域（後述）に限られることがわかります。これは、単純なことです。陸上では水が

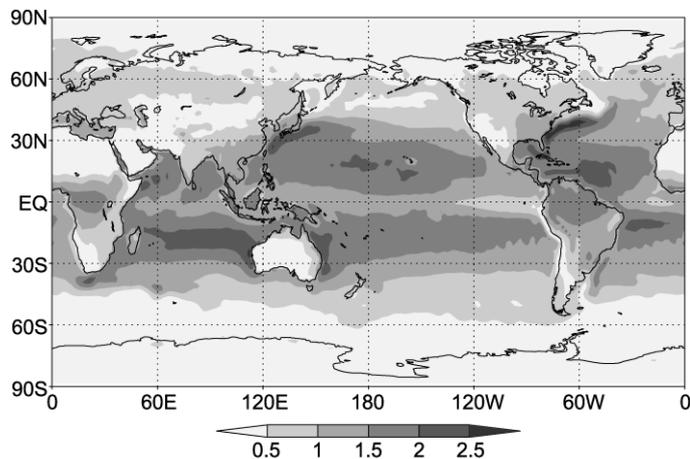


図 1 年平均蒸発量（メートル／年）

豊富にある場所に限られるためです。

一方、海洋上の蒸発も場所によって大きな違いがあり、第一の大きな特徴として、緯度帯で蒸発量の大小が分かれています。海上の蒸発量は海面水温と海上大気湿度に依存し、海面水温が高いほど、もしくは海上大気湿度が低いほど大きな蒸発をもたらします。高緯度ほど蒸発量が少なくなっているのは、海面水温が低いことを反映しています。一方、低緯度地域を見ると、赤道付近の熱帯地域よりも緯度 20～30 度の亜熱帯地域で蒸発量が多くなっています。海面水温は熱帯地域の方が高いのですが、後で述べる大気の循環のために亜熱帯地域の海上には乾燥した空気が存在しており、この逆転を招いています。なお、太平洋の赤道付近では海面水温に大きな東西差があり、西側では熱帯地域の方で海面水温が高い一方、東側ではエルニーニョ（東部赤道太平洋の海面水温が通常よりも高くなる現象）時以外は亜熱帯地域の方が高くなっています。しかし、この事情は先述の事情を根本的には覆しません。

海上の蒸発量に見られるもうひとつの顕著な特徴は、日本沿岸やアメリカ東海岸などの狭い領域に特別に蒸発が多い場所が存在していることです。これらの場所には黒潮や湾流といった暖流が存在しており、低緯度から運ばれる高温水のために大きな蒸発が生じています。海洋表層の海流は基本的に海上を吹く風によって決まっています。とはいえ、風の向きそのままに海流ができるわけではありません。特にここで注目している黒潮や湾流の向きや強さは、その直上を吹く風によってではなく、太平洋や大西洋といった大洋全体を吹く風がどのように空間変化しているかによって決まっています。海上の風は全体的に南北方向よりは東西方向に強く吹いており、緯度が高くなるにつれて西風が強まっていくような緯度帯では大洋の西端に低緯度から高緯度へ向かう強い海流が形成されます。黒潮と湾流はともにこうしたメカニズムによって存在しています。

3 大気の水輸送

降水量の分布（図 2）は蒸発量と大きく違ったものになっており、これは大気の循環とそれに伴う水蒸気輸送を色濃く反映しています。その第一の特徴は熱帯地域に非常に強い降水が存在することです。これは熱帯収束帯と呼ばれ、地表付近の風がここで収束して上昇することで作られています。気候システムは太陽から放射エネルギーを受け取り、それが大気や海洋の循環を駆動する究極的なエネルギー源となっています。受け取る太陽放射量

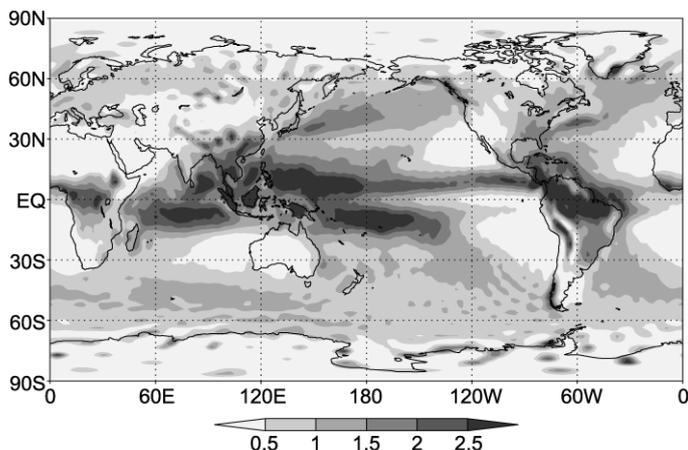


図 2 年平均降水量（メートル／年）

は年平均では赤道で最大となり南北両極で最小となりますが、太陽放射のほとんどは大気を透過して陸面・海洋に吸収され、大気は暖められた地表から熱を受け取る仕組みになっています。大気は熱帯地域で最も下方から暖められ、その結果として軽くなった空気が上昇します。熱帯での上昇流は地表付近で低緯度向きに吹き込む風と上空で高緯度向きに吹き出す風を伴い、さらに緯度 20~30 度での下降流をともなって、ハドレー循環と呼ばれる緯度-鉛直方向の循環を形成しています。地表付近で低緯度向きに吹き込む空気は海洋と接しているために多くの水蒸気を含み、それが上昇して断熱膨張に伴う冷却で水蒸気が凝結することで、熱帯では強い降水が生じます。一方、これによって水蒸気を失った乾いた空気はハドレー循環によって緯度 20~30 度の地表付近に下降します。このため、亜熱帯の陸上は降水が少ない砂漠になりやすく、亜熱帯の海上では大きな蒸発が存在します。

降水量分布のもうひとつの特徴は、北太平洋に顕著に見られるように、緯度 40~50 度で降水の多い地域が東西方向に帯状に伸びていることです。これはストームトラックと呼ばれ、文字通り嵐をもたらす低気圧の通り道に対応しています。太陽放射による大気の加熱が緯度に依存することは、この緯度帯では偏西風を形成し、それに沿って日本の天候と馴染み深い温帯低気圧をもたらします。水循環の観点から見ると、温帯低気圧は低緯度側で蒸発した水蒸気を高緯度側に運んで降水させるように働いています。

これらを合わせて、大気の循環に伴う水輸送を大きく見ると、緯度 20~30 度の海上で蒸発した大量の水蒸気が低緯度・高緯度両側に運ばれ、熱帯と緯度 40~50 度において多くの降水をもたらすという形になっています (図 3)。大気の諸物理量は東西方向に一様になる傾向があるため、こうした南北方向の輸送を考えると、こうした南北方向の輸送を考えることが気候システムの水循環を考える上でまず重要になります。なお、大気が東西一様になる傾向があるのは、先述した南北風よりも東西風が卓越することに関連しますが、東西風が卓越するのはむしろ結果で、本質は受け取る太陽エネルギーが東西方向に一様であることと地球が東西方向に回転していることにあります。

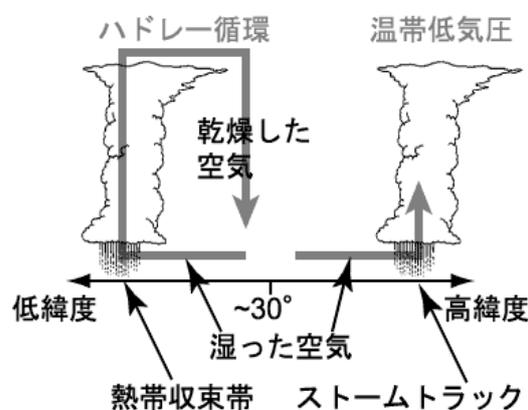


図 3 大気の循環と緯度方向の水輸送の概念図

4 そして大気から海へ

海洋が海面水温分布を通して蒸発量に、引いては大気の循環に影響を及ぼすことはこれまでに見た通りですが、逆に蒸発や降水は海洋の循環に影響を及ぼすのでしょうか。先ほど、海洋表層の海流は基本的に海上を吹く風によって決まっていると述べましたが、この部分に対して降水・蒸発は影響を及ぼしません。海洋の性質の中で降水・蒸発によって顕著に変化するものは塩分です。塩分は温度とともに海水の密度を決める重要な要素であり、海

面での加熱・冷却および降水・蒸発の分布によって海水の密度が空間的に変化することが原因となって、海洋には表層と深層をつなぐ循環が形成されています。この循環は大まかには、北大西洋高緯度で高密度の海水が沈み、大西洋深層を南下し、南大洋を通して太平洋・インド洋へと流れ、それが上昇して再び北大西洋高緯度へ戻るという形になっています(図4)。この循環では年間300兆トン以上の海水が運ばれており、これに伴う熱輸送が存在しなければ北部ヨーロッパの気温は5°C以上も低くなるというほど、気候における重要性を持つものです。この循環の維持にとっては、大気による水蒸気輸送、しかも先ほどは考えなかった東西方向の輸送が本質的に重要な役割を果たしています。

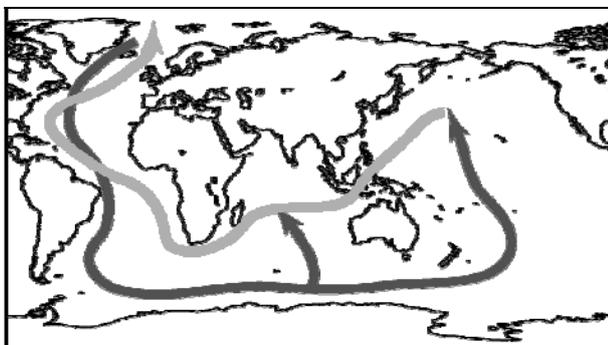


図4 表層と深層をつなぐ海洋大循環の模式図。薄い色の矢印は表層、濃い色の矢印は深層の流れを表す。

熱帯の海上には東風である貿易風が吹いていますが、熱帯で太平洋と大西洋を区切るパナマ地峡の細さにより、大西洋上の亜熱帯で蒸発した水蒸気のうち少なからぬ部分は太平洋上での降水になります。エルニーニョ時には東部熱帯太平洋の海面水温が高くなって大西洋から太平洋へ吹き込む風が強くなるため、この傾向が一層顕著になります。一方、太平洋上の亜熱帯で蒸発した水蒸気はというと、陸塊の存在によって太平洋の西端で東風が卓越しなくなることなどのため、太平洋の外へはあまり運ばれません。その結果、大西洋では蒸発量が降水量を年間数兆トン程度上回る一方、太平洋では降水量が蒸発量を上回っています。そのために北大西洋高緯度の塩分は同じ緯度の北太平洋よりも顕著に高く、密度の高い海水が存在するため、北大西洋高緯度で深層へ下降するような循環が可能になっています。

5 おわりに

ここで述べたのは気候システムにおける水循環のうちのごく限られた側面についてですが、これだけでも、大気と海洋は水を介してお互いに影響を及ぼし合い、それが気候の状態を決めるのに重要な役割を果たしていることが伺えると思います。ここでは全く触れませんでした。河川や陸上植生の役割も気候システムの水循環にはとても重要であること(実は上述のことも本来は河川を含めて論じる必要があります、それを無視したためにやや不正確な言い方になっている部分があります)、そして雪氷という形での水の存在を考慮するとさらに複雑な様相を見せることを申し添えて、この文章を結びたいと思います。