

# 「水」を素材とした理科の学習文脈（地学領域）

— 地球表層におけるエネルギー循環 —

吉 富 健 一

(2015年12月7日受理)

## Learning context in Earth Science education using “water” as a material: the function of the water in the Energy circulation of the Earth’s surface

Kenichi YOSHIDOMI

**Abstract.** It is considered that the current school education is not sufficient to motivate children’s interest and concern and consequently their learning can hardly be proactive. In order to perform motivation of study, it is considered important to understand the meaning of why they should study. For this reason, in the present report, the author has rearranged the knowledge of systematic learning in the meteorological field which is learned during the course of elementary and junior high schools, and has also shown an example of a learning style to continue to expand study along the context, in order to clarify the meaning of learning knowledge.

### 1 はじめに

“文脈学習”とは、学習する際「なぜこれを学ばなければならないのか？」という意味探求を重視した学習方法である(佐藤, 2001)。これに対し、日本において小学校から始まる学習の基本形態は、明治の末期に確立された“系統学習”となっている。系統学習とは学習指導要領により定義される系統立てて配置された学習内容を、生徒の発育・発達に沿って順番に学習していく学習形態である。

系統学習の良い点として、教師から子供に対して短時間で多くの情報を伝達できることが挙げられる。その反面、教師主体で授業が行われやすく、価値注入的な授業となりやすいという指摘がある(宮原, 2003)。また、一方的に伝達し記憶する形態の学習であるため、子供の興味や関心が引き出されにくく、主体的な学びとなりにくいとされる(宮原, 2003)。しかし、進学を目的とした現在の中高等教育においては、試験で高得点をとるために系統学習によりできる限り多くの知識を伝え、数多くの演習を行わせるのが学習の基本となっている。

教師は自分の得意とする教科を担当しているため、生徒たちがみな自分と同じような興味・関心や、おもしろさを感じてくれていると思込みがちであるが、生徒の中には学習に対し「なぜこんな勉強をしなくてはいけないのか？」という疑問を抱くことが少なくない。この疑問に対し「いつか必要になることがある」という、多くの生徒が満足できないような答えは「冷凍庫モデル」として批判される(Parnell, 1995)。

学習事項の定着という観点から調査を行った脳科学分野の研究成果に基づくと、過去の経験や認識された価値と関連した達成や経験は定着する傾向があるのに対して、意味のない情報は廃棄されるという調査結果(佐藤, 2001)がある。これにより学習の動機づけにおいては「なんのために学ぶのか？」という学ぶことの意味(Why)を知ることが重要であるとされ、学習内容の系統性よりも、学習の意味探求を重視した“文脈学習”という学習形態が、オレゴン州立大学名誉教授のパネルによって提唱されてきている。

筆者らは、現状を考えた際、二者択一的に系統

学習と文脈学習のいずれかが優れているということではなく、現実問題として系統学習だけでは失われがちな学習の意味づけを、単元の終わり等に文脈学習を用いて効果的に補完する形で、車輪の両輪のように学習を進めていくのが学習形態としてもっとも適切なのではないかと考えた。

本論は、中等科学教育における将来像として、系統的な単元構成を基本とする系統学習と、文脈を基盤とした学習の二重構造による教科システムの構築を目指し、系統学習で学んだ内容をもとに、地球表層におけるエネルギー循環について、水の性質という視点から明らかになる事象をまとめた。地球表層における大気や海水の循環は、人類の生活環境や持続的な発展において非常に重要な役割を果たしており、その実態を理解することは理科の学習にとどまらず、環境問題を考える上でも重要な知識となる。

本研究はこれらのことをふまえ、小・中学校を通して学ぶ気象分野における系統学習の知識を再整理するとともに、その知識を学ぶことの意味を明らかにするため、文脈に沿った形で学習を展開していく学習形態の一例として示したものである。

## 2 地学教育における「水」の取り扱い

初等・中等教育における地学領域の学習は科学の基本的な見方や概念の一つである「地球」を柱として、学習内容や対象に応じて「地球の内部」、「地球の表面」、「地球の周辺」の3つに区分されている。また、それぞれの区分における学習内容が、小学校から高等学校まで系統的に配置されている。小中高における各区分での「水」の扱いについて以下に述べる。

「地球の内部」の学習では、小学校第5学年で学習する“流れる水の働き”において、河川の観察・実験を通して体験的に学習することに始まり、第6学年の“土地のつくりと変化”で、地層の縞が水の働きによって形成されることを学ぶ。中学校では第3学年の“自然の恵みと災害”において、我々は生活に必要な水を主に河川から得ているが、時には雨や川そのものが災害の原因となることを学ぶ。高等学校の地学基礎では、「移り変わる地球」として、地球には海洋があることによって、同じ太陽系の惑星である金星や火星と異なる地形的特徴を持つことや、マグマの発生や火山活

動をもたらす水的作用、陸上で生活する我々の体内と海水の構成元素が似ていることから、生命が原始海洋の中で生まれ、海の中で紫外線から守られてはぐくまれてきたことなどを学習する。

「地球の表面」の学習では、まさに水を直接の学習対象としており、小学校では第4学年で、雨が降った後の校庭の地面の変化の様子や洗濯物が乾く様子から、液体の水が水蒸気になることを学習し、その過程で海から陸へと水が移動していることを学習する。第5学年では、蒸発した水が雲を作り天気を変化させることを学ぶ。

中学校では第2学年で、空気を含むことのできる水蒸気の量が温度によって変化することを学び、それらが大気の動きとして天気の変化に結びつくことを学習する。高等学校の地学基礎では、地球全体のエネルギー収支を学習する上での一環として、地球放射を吸収する存在としての水蒸気や、赤道と極域での熱の循環を行う大気の大循環や、海水の循環として水の働きを学習する。

「地球の周辺」いわゆる天文分野の学習では、直接水を学習の対象として扱う内容は、高等学校の地学基礎において太陽系の構成員としての惑星や、水星・小天体における水の存在等を扱う程度である。

ところで、地学領域の学習における「水」の位置づけとしては、まず、水が生命および地球環境の維持に不可欠であり、また、形を変えながら地球表層を循環する物質であることを認識することにある。堆積物の記録によると、約40億年前から海洋が存在することが明らかになっている。海が形成されて以来、水は蒸発しては雲となり雨となって陸域に降り注ぎ、長い年月をかけて地表を絶え間なく変化させてきた。その水が循環する原動力は、太陽からの受けるエネルギーの量が、緯度によって異なることに起因する。そして水の循環は、太陽から受けるエネルギーの分配機能をも果たす。

地学領域の学習は、これらの前提をもとに地球の内部および表面において地球および生命の進化に不可欠な水が、どのような現象を引き起こしているかを学習することにほかならない。

## 3 地学領域における文脈学習の例

地学という教科は、自然現象の全てを対象とし、自然科学において扱われる天文・気象・海洋・地球物理・地質・鉱物などの分野を包括して学習

する日本独自の教科である。海外では天文や気象は物理学において、鉱物は化学、化石など生命の進化にかかわる内容は生物学として取り扱われることが多い。

文脈学習の素材としてのオゾン層の破壊や酸性雨に関する環境問題等は、化学分野の内容として扱われることが多い課題である。そのため過去に地学の領域としての文脈学習の例は、あまり見受けられない。

#### 4 「水」を素材とした学習の文脈

地表が受け取ることのできる太陽からのエネルギーは、図1に示すように太陽光線に対して垂直なほど大きく、角度が小さくなるほど少なくなっていく。そのため、太陽光線に対して地表が高角度となる赤道を中心とした低緯度の地域は暑く、低角度となる高緯度の地域は寒い傾向にある。

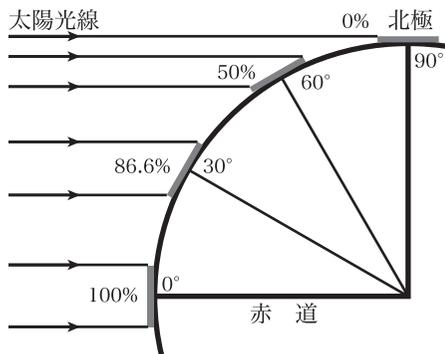


図1 地表に届くエネルギーの緯度による差

太陽から受け取るエネルギーとは別に、地球から宇宙に向けて赤外線としてエネルギーを放出することで、エネルギーの収支を保っている。赤外線として放出するエネルギーの量は、緯度の違いにより多少の差はあるものの、太陽から受け取るエネルギー量の差ほど大きな違いはない(山内, 1999)。

そのため、低緯度地域では、慢性的なエネルギーの供給過多、高緯度地域ではエネルギー不足に陥る。それでも地球の気候が、高温および低温の温度差に限界があり、生命の存在に適さないほど極端にならないのは、熱が余っている低緯度域から熱が不足する高緯度域へ、熱の輸送が行われているおかげである。そこで主役となるのが熱を輸送する媒体としての「水」である。

エネルギーの輸送が空気を媒体とした循環として行われるのが、大気圏における気象としての現象であり、海水を媒体として行われるのが、海洋における海流などの現象である。いずれにしても地球規模の循環の多くは、太陽から受け取るエネルギーの過不足を補うことを目的としている。そのため、気象や海洋で起こる諸現象は、地球を取り巻くエントロピーを増大させようとするシステムの一つ一つとして理解することが重要となる。

ところが地学分野の学習において、地球の公転と自転軸の傾きに伴って発生する季節の変化は、中学校第3学年の「地球と宇宙」の単元において取り扱われる。大気の循環は、主に中学校第2学年における「気象とその変化」について扱われ、海洋の循環に関しては、気象に関わる発展的内容として、世界の気象に影響を及ぼすエルニーニョ現象など一部が紹介されるのみである。

特に、海流の基本的な動きに関する学習単元は、中学校理科には存在せず、どちらかという社会における地理の分野に該当し、中学校第2学年の「日本の地域的特色」の単元において、日本の地形や気候の特色を学習する過程において、日本周辺の海流の動きが扱われるのみである。

このように、大気と海流の循環は元来、低緯度地域の余剰な熱を高緯度地域に運ぶという、一つのプロセスであるものを、別の学年、別の単元として学習を行うことで相互の関連性を捉えにくく、理解を難しくする原因となっていることが考えられる。

#### 4.1 水の持つ性質の理解

本研究においては、地球表層での熱収支を支えるエネルギー循環という観点から、「水」を学習の素材として気象や海流の動きの理解を目指す。まず、それらの動きを理解する上で必要となる「潜熱」「比熱」などの水の持つ特性、および回転座標系で移動する物体に対して働く「コリオリの力」、コリオリの力によって等圧線と平行に吹く「地衡風」についてそれぞれ解説を行う。

##### 4.1.1 水の比熱

大気の循環において、風の流れが発生する原因は、水の持つ比熱の大きさに由来するところが多い。比熱の概念に関しては、小学校で「1gの水の温度を1℃あげるのに必要なエネルギーは1カロリー」とし

て学習するのに始まり、物質によって暖まり方が異なることを示す指標として利用される。

例えば夏に海水浴に行った際、砂浜の砂が足の裏をやけどしそうなほど熱くなっていたとしても、海水が足をつけられないほど温まっていることはない。これは砂を構成する鉱物と、水で暖まりやすさが大きく異なることが原因である。この物質のもつ固有の暖まりやすさ、冷えやすさの性質の違いを“比熱”と呼び「1gの物質の温度を1℃上げるために必要な熱量」として示される。

水の比熱が1 cal/gであるのに対して、空気の比熱は4分の1程度の約0.23cal/g、海岸の砂を構成する石英にいたっては、およそ6分の1となる。同じ熱量が加わった際、空気なら水の4倍、砂なら水の6倍の重さの温度を上昇させることができる計算になる。

重さを揃えた場合、水の温度を10℃上げる熱量があれば、空気の温度は40℃、砂の温度は60度上昇する。密度も考えた場合、水の密度が1 g/cm<sup>3</sup>であるのに対し、空気の密度は0.0012 g/cm<sup>3</sup>である。したがって水1gの温度を1℃上昇させる熱量があれば、約3,600cm<sup>3</sup>の空気の温度を1℃上昇させることができる。

環境問題等で海水温の上昇が指摘されることが多いが、水と空気の比熱と密度の違いを考慮した場合、海水温の1～2℃の温度の変化は、空気に伝わった際に比較にならないほど大きな熱として環境に影響を与えるという点に注意する必要がある。

#### 4.1.2 水の状態変化と潜熱

水の比熱の大きさに起因して発生する大気の流れとは別に、水の状態変化に伴って移動する“潜熱”と呼ばれる熱により、激しい気象現象が引き起こされることがある。

一定の温度の空気に1 m<sup>3</sup>に含むことができる水蒸気の質量は“飽和水蒸気量”と呼ばれ、気温によってその量が異なる。飽和水蒸気量に対する空気中の水蒸気量の割合をパーセント(%)で示したものを“相対湿度”と呼ぶ。飽和水蒸気量は、気温が低くなるにつれて減少するため、気温が下がると相対湿度は上昇する。

空気が冷えて、含まれている水蒸気量が飽和水蒸気量を上回る状況になると、含みきれない水蒸気は凝結して液体の水となる。この湿度が100%

に達する温度のことを“露点温度”と呼ぶ。露点温度は、どれくらいの水蒸気もとの空気に含まれていたかによって異なる。このように物質の状態が気体から液体のように変化することを“状態変化”と呼ぶが、水の状態変化に伴って移動する“潜熱”と呼ばれるエネルギーが存在する。

水を例にした場合、水(液体)を冷却すると氷(固体)となり、温めると沸騰して水蒸気(気体)へと状態変化する。水を冷やして凍らせる際、氷ができて水と共存している間は、どんなに冷やしても水の温度を0℃以下に下げることができない。同様に水を沸騰させ熱を加え続けても、水の温度を100℃以上に上げることはできない。

熱を奪っている、あるいは加え続けているのに物質の温度が変わらないということは、水が凍る際に、水から奪っている熱と同じ量の熱が水の中からでてきていることになる。同様に沸騰する際には、加えているのと同じ量の熱が水の中へ消えていることになる。

液体が固体に変わる変化を凝固と呼ぶが、凝固する際に液体から放出される熱は“凝固熱”と呼ばれる。水の凝固熱は、1gあたり約80カロリーで、水の比熱の80倍に相当する。1gの水の温度が単純に1℃下がる場合に1カロリーの熱量が放出されるに対し、氷に変化する際には、その80倍の熱を放出する。

同様に液体が蒸発して気体になる変化を気化と呼ぶが、水が蒸発して水蒸気となる際に吸収する熱は“気化熱”と呼ばれる。水の気化熱は約600カロリーであり、1g 0℃の水を100℃に加熱するのに必要な熱量が100カロリーなのに対し、100℃の水を水蒸気として蒸発させるためには、さらに6倍の熱量を必要とする。この際、水に加えた熱エネルギーは無駄になっているのではなく、水の状態変化に使われる。水は、水蒸気の状態にいるだけで、液体の水とは比べものにならないほど多くの熱量を含んでいる。

生活の場面で知らず知らずのうちに潜熱を利用している例として、夏場の打ち水が挙げられる。打ち水が効果的なのは、水をまくことで地面の温度が下げる効果より、まかれた水が蒸発する際に潜熱として地面の熱を多く奪う効果によって涼しく感じる。汗をかくことで体温を調節したり、注射の際のアルコールがスッと感じたりするのも、

液体が蒸発する際に潜熱として熱を奪うことが影響している。

#### 4.1.3 コリオリの力

水の作用とは直接関係はないが、地球表層で運動する物体の動きを正確に把握するためには“コリオリの力”による働きを理解しておく必要がある。地球が自転している影響で、北半球では運動する物体に対して、進行方向に対して直角右向きに力が働いているように見える。この特殊な力は“コリオリの力”と呼ばれ、1835年にフランスの科学者ガスパー＝ギュスターヴ・コリオリが導いた。

コリオリの力は、自分は静止していると考えて物体の運動を観察した際に、観測している人が受けている力とは逆向きに力が働いて見える見かけの力であって、何か具体的な力が働いているわけではない。地球が日周運動していることを知識として理解していても、普段は自分が地球とともに回転していることを意識せず、自分は止まっていると考えている。

ところが実際には、1周4万kmの地球が24時間で1回転するため、赤道上では1,700km/h、日本付近の緯度でも1,400km/hという高速で移動していることになる。移動速度は、緯度が高くなるにつれ小さくなり、北極点では0となる。

赤道上にあるボールは、地表に静止した状態で1,700km/hという大きな回転速度を持っている。このボールを真北に向かって投げた場合、緯度が上がってくるにつれ遅くなっていく地球表面を追い越してしまうという現象が発生する。

つまり自分は静止していると思い込んでいる地表の観測者から見ると、真北に投げたはずのボールが東（右）にそれていくように見える。

もし、回転していない宇宙から観察できたとすれば、投げたボールは、北に向かってまっすぐに飛んでいく様子が観察できる。

このように自転する地球上で、物体の進行方向がそれていくように見える見かけの力を、コリオリの力と呼び、北半球では移動する物体の運動をベクトルで考える際に、進行方向に対して直角右向きにコリオリの力が働いているとして理解する。

#### 4.1.4 地衡風

風の吹く向きは「気圧傾度力」「コリオリの力」「摩

擦力」によって決まる。気圧傾度力によって気圧の高い方から低い方に流れ出した空気の流れは、最初は等圧線に対して直交する方向に吹く。ところが北半球ではコリオリの力が働くことによって右向きに進路が変わる。右に向かってそれた風向きに対して、さらにコリオリの力が直角右向きに働くことにより、風向きはさらに右にそれていく。

次第に風の吹く方向と等圧線との角度が小さくなっていき、やがて風の進行方向に対して、右向きにコリオリの力、左向きに気圧傾度力が働いた状態で力が釣り合う。このように等圧線とほぼ平行な向きに吹く風を“地衡風”と呼ぶ。

地表付近では摩擦力が働くため、風向は等圧線に対して一定の角度を持つが、上空では風の流れを妨げるものがないため、いったん力が釣り合い地衡風となると、空気の塊に対して力がかかっていないのと同じ状態で風が吹き続ける。

図2に示すように東（右）側の気圧が高い場合、風は気圧の高い所から低い所に向かって吹き始める。吹き始めの風向きは、東よりの風となるが、吹き始めた風に対し進行方向右側にコリオリの力が働くため、風向きは次第に南東よりへと変化する。そして南東よりの風に対してさらにコリオリの力が働くことにより、最終的には南風となる。右向きにコリオリの力、左向きに気圧傾度力が働いた状態で力が釣り合い、安定した状態となる。

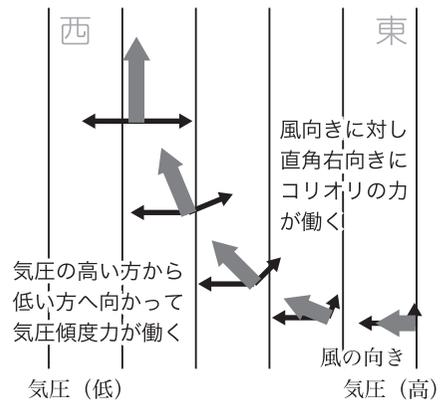


図2 傾度風から地衡風にいたる過程

## 4.2 大気の循環

水の性質や、物体の運動に必要な基礎知識を身につけたところで、そもそもなぜ風が吹くのか？という問題について考える。風として空気の流れ

が発生する最も大きな原因は「熱」である。空気が暖められたり、冷やされたりすることで流れが生じ、風となる。この熱の不均衡を生み出す原因は、水の持つ比熱の高さに由来することが多い。

空気が暖められると膨張して密度が低くなることに始まる。暖められて膨張した空気は、周囲の空気より密度が低く軽くなるため、たき火の灰が舞い上がるのと同様に、浮力を得て上昇する。そのため暖められた地表では上昇気流が生じ、周囲より気圧の低い“低気圧”となり、周囲から空気が流れ込む。逆に冷やされた地表では、空気が収縮し密度が高くなるとともに、重たくなった空気が下降するため“高気圧”となり、周囲に空気が吹き出す。

地表の暖まり方冷え方に差がある時、上記の理由により上昇気流や下降気流が生じて気圧の差ができ、高気圧側から低気圧側に向かって空気が移動する“風の流れ”が生じる。この気圧差によって生じる力を“気圧傾度力”と呼ぶ。以下に、陸と海での暖まりやすさの違いによって、熱の不均衡から風が発生する仕組みについて説明する。

#### 4.2.1 海陸風

海（水）と陸（岩石）の比熱の違いに起因して、地域的に吹く風を“海陸風”と呼ぶ。海水は岩石に比べるとずっと暖まりにくく冷めにくいので、昼間は、海水の温度変化に比べると、昼間は陸地の方が熱くなり、夜には陸の方が強く冷却されるという現象が発生する。

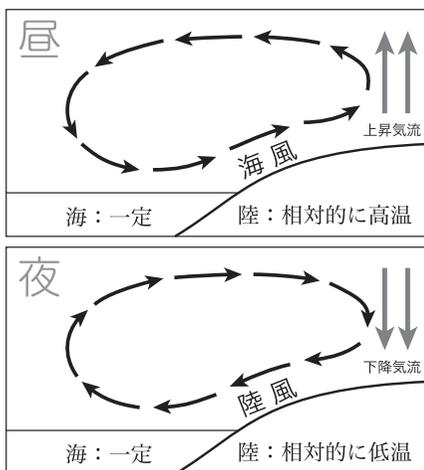


図3 海陸風の吹くメカニズム

図3に示すように日中は、陸の上で空気が暖められて上昇し、足りなくなった空気を補うために海側から風が吹き込んでくる“海風”となる。夜になると今度は海に比べて陸の方がぐっと温度が下がるため、陸の上の空気も冷やされて重くなり下降気流となる。すると気圧が上昇するため、海に向かって風が吹き出す（陸風）。

この入れ替わりで、一時的に風が止み、夕暮れ頃に蒸し暑くなる現象が“夕風”と呼ばれる。

#### 4.2.2 季節風（モンスーン）

より大きな規模での海陸風と呼べる現象が“季節風”（モンスーン）である。季節によって風向きが大きく変化する季節風は、日本列島では夏に南東から湿った空気が吹き、ジメジメとした暑い夏をもたらす。冬には北西の日本海側からの湿った風によって、日本海側の大雪の原因となることで有名である。

季節によって変わる風向きは、海陸風による1日の風向きの変化を、そのまま大洋と大陸での1年を通しての海と陸の温度の変化へと置き換えたものである。夏季には、日射によって暖められた大陸上空で上昇気流に伴う低気圧が発生し、太平洋側から風が吹き込む。冬季には大陸内部の温度が非常に低くなるため、冷たく重たい空気が大陸から周囲に向かって吹き出す。

冬に大陸から吹き出す風は、本来、冷蔵庫の中のように低温で乾燥しているが、日本海上空を吹き抜ける過程で対馬暖流から大量の水蒸気を吸収し、冷たく湿った風となる。この風が日本列島にぶつかり、上昇気流となって雲を発生させることで、日本海側に大雪をもたらす原因となる。

#### 4.2.3 地球規模の大気の大循環

この季節風の規模をさらに大きくした地球規模の大循環が生じるはずと、地球規模の大気の大循環（ハドレー循環）を1735年に提唱したのが、イギリスのジョージ・ハドレーである。低緯度地域で暖められた空気は上昇気流となって上空を両極に向かって移動し、両極付近で冷却され密度が高くなって下降し、地表付近を通過して再び赤道に戻るといった循環である。赤道付近では、高緯度地域よりも自転速度が速いため（コリオリの力の原型）、赤道から極に輸送された空気は地表から見ると西風

（偏西風）となり、極から赤道に輸送された空気は東風（貿易風）となる、というアイデアであった。

その後、コリオリの力が発見されることによって、図4に示すような大気の大循環が、より詳しく理解されることとなった。赤道で暖められた空気は上昇気流となり、南北に分かれて流れ出す。ハドレーの想定が実際の現象と異なっていたのは、北に向かって流れ出した風は、コリオリの力をうけて風向きが徐々に東向きにそれていき、北緯20°～30°付近ではほぼ真東に向かって吹くようになることである。この東向きの風に向かって働くコリオリの力は南向きであるが、南からはほとんど風が押し寄せてきているため、南下することができない。そのため空気は下降気流へと転じ、亜熱帯高圧帯と呼ばれる北緯20°～30°周辺は、一年中高気圧が居座るため降水量が極端に少なく、多くの砂漠はこの亜熱帯高圧帯に位置する。

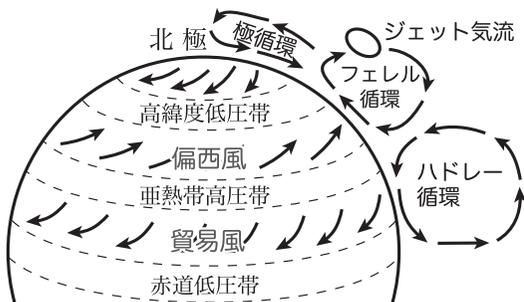


図4 大気の大循環

亜熱帯高圧帯の地表付近から南に向かって吹き出す風は、やはりコリオリの力を受けて西向きに方向を変え、“貿易風”と呼ばれる東よりの風となる。貿易風は、赤道付近で再び上昇気流へと転じる。この低緯度地域の循環は、ハドレーの提案より小規模ではあるものの、彼の唱えた原理によって生じる循環に近いので、“ハドレー循環”と呼ばれ、大気の大循環という形で赤道付近の余剰な熱を中緯度にもたらしている（図4）。

高緯度地域では熱の供給が少ないため、冷やされた空気が重くなって地表付近に集まる“極高圧帯”を形成している。極高圧帯から吹き出した風は、緯度60°付近まで吹き出すと再び上昇気流となり、空気が地表付近に集まって気圧の下がった極上空に向けて再び循環する。この循環は“極循

環”と呼ばれ、空気の上昇によって高緯度低圧帯が形成される。地上付近で、極高圧帯から高緯度低圧帯に向かって吹く風は、自転の影響で東よりの極東風となる。

中緯度では理論的には、南側に亜熱帯高圧帯、北側に高緯度低圧帯が発生し、この気圧帯によって引き起こされる気圧の不均衡によって“フェレル循環”と呼ばれる循環を発生させる。フェレル循環では、ハドレー循環のような鉛直方向の対流運動は存在せず、地表から上空まで一様に西よりの風が吹いている。この風は“偏西風”と呼ばれ、亜熱帯高圧帯から吹き出す北向きの気圧傾度力と、南向きに働くコリオリの力が釣り合って吹いている。偏西風は、フェレル循環と極循環の境界付近で最も強くなり、ジェット機並の速度で流れているので“ジェット気流”と呼ばれるが、この偏西風の蛇行が、南北の熱輸送に多大な影響を与えていることが明らかとなってきている。

地球の大気は温度差に起因して空気の流れが発生し、北半球と南半球でそれぞれ赤道域の熱を高緯度に運ぶシステムとなっている。このような地球規模の空気の流れのことを“大気の大循環”と呼ぶ。その流れを生み出す源となっているのは、水の持つ暖まりにくく冷めにくいという性質である。

### 4.3 潜熱に伴う熱の輸送

水の比熱の大きさに起因して循環する大気の運動とは別に、潜熱により赤道域の余剰なエネルギーを高緯度側へ輸送するシステムの代表的な例が台風である。以下に台風の発生する仕組みについて説明する。

#### 4.3.1 台風

台風の定義は、東経180度より西の北西太平洋および南シナ海で発生した熱帯低気圧のうち、中心付近の最大風速が約17.2m/s以上になったものを指す。アメリカなどの北中米で発生したものはハリケーン、その他の地域のもはサイクロンと呼ばれている。台風の発生するプロセスは様々で不明な点も多いが、小さいもので直径数百km、大きいものでは数千kmにも及ぶ台風の成長において、潜熱が大きく寄与していることは明らかである。

台風のもととなる熱帯低気圧は、海水の表面温度が26～27℃となる北緯5～20°の海域で発生す

る。発生した熱帯低気圧が、猛烈な風を伴う台風へと成長するためにはコリオリの力を必要とするため、図5に示すように赤道付近では熱帯低気圧は発生しない。

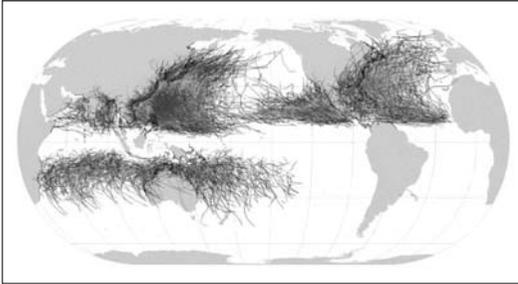


図5 1945～2006年に発生した台風の経路  
(出典：Wikipedia)

温度の高い海水の蒸発によってできた暖かい空気は、上昇気流となって雲をつくる。海洋上の空気は、陸域に比べるとはるかに多くの水蒸気を含んでおり、水蒸気形で存在するだけで潜熱の形で膨大な熱エネルギーを含んでいる。この水蒸気が雲となって凝結する際に大量の潜熱が放出され、周りの空気をあたためるため、さらに上昇気流が強くなり発達する。強い上昇気流によって足りなくなった空気を補うために、周囲から風が吹き込んでくる。この風にコリオリの力が働き、形成された低気圧は反時計周りの空気の渦となる。

高気圧から時計まわりに吹き出す風に働く力を考えた場合、気圧傾度力と遠心力の合力が外側に向かって働き、中心方向に向かって働くのはコリオリの力だけとなるので、気圧傾度力が強くなり過ぎた場合は、外向きに吹き出す力が強くなり、そのまま周囲に吹き出す風となるため高気圧が時計まわりの暴風として発達することはない。これに対し、低気圧のまわりに反時計まわりに吹き込む風に働く力は、中心方向に対して働く気圧傾度力と、外側に向かって働くコリオリの力と遠心力の合力がつり合っている状態である。このため、気圧傾度力が強まり風速が速くなってくると、この風に働く遠心力も相まって強まり、低気圧は暴風として発達する。

熱帯低気圧は、発生・成長の過程において赤道付近の暖かい海水から気化熱を奪い、発達した台風となって周囲の空気をかき混ぜるとともに、中緯度付近まで移動し水蒸気から水滴になる際に潜熱を

放出する。このように、台風の原因力となって低緯度から中緯度地域への熱の輸送を行うのは、水の状態変化に伴って移動する潜熱の働きである。

#### 4.4 海洋の循環

大気とは別に、海水も海流として地球規模で循環し、赤道付近の暖められた海水が高緯度地域に流れていき、陸地を暖める仕組みとなっている。海流の流れは北半球では時計回り、南半球では反時計回りの循環となっている。低緯度から高緯度に向かって流れる海流を“暖流”、逆に高緯度から低緯度に向かって流れる海流を“寒流”と呼ぶ。

海水の持つ比熱は、空気に比べて非常に大きい。暖流や寒流が沿岸の気候に与える影響は大きい。日本列島近海では、暖流として黒潮が、寒流の代表として親潮が流れている。

##### 4.4.1 海流の流れるしくみ

川の水が流れる仕組みは単純で、高いところから低い方に向かって流れている。その原理は、水を持つ位置エネルギーが運動エネルギーへと変化するもので、実験室や砂場等でも容易に再現可能である。ところが海流が流れる仕組みは、川の流れるように単純ではなく、地球という大きな球体が自転することで初めて形成される循環現象である。

川の流れるように、運動エネルギーのもととなる位置エネルギーを生み出す高低差のない海の中を海流が流れ続ける仕組みは、黒潮の場合、黒潮の循環する内側の海域が、その周囲の陸側の海域より海水面にしておよそ1m程度高くなっていることが原因。海の広さにしてこのわずかな高低差によって生じる水圧の差によって海流が循環している。日本付近では黒潮の流れに対して太平洋側の水位がわずかに高く、日本列島側の水位がわずかに低い。その海面の高さの差に応じて0.1気圧分の水圧の差が生じる。この水圧の差によって、太平洋側から日本列島側に流れだそうとする海水の流れに対し直角右向きにコリオリの力が働く。次第に右にそれていく海水の流れは、西に比べて東側の気圧が高い場合に生じる地衡風と同様に、北向きの流れとなって北上を始める。

海流は中心部の水面のわずかな高さの違いによって周囲に流れだそうとする水の流れに対し、コリオリの力が働くことにより、北半球では時計

まわりに流れている。海水と空気は密度が異なるだけで、圧力の差によって生じる流れにコリオリの力が働くことによって流れる方向が決まるという点では共通している。

太平洋の海面に、わずかな高まりを作り出す原因は、貿易風と偏西風である。図4に示したように北半球の場合、低緯度には東よりの貿易風が吹き、中緯度では逆方向の西よりの偏西風が吹いている。それぞれの方向の風が海面を風の吹く方向に動かすことで、時計まわりの流れを作り出せるように感じるが、実際にはコリオリの力が働くため、このようなメカニズムで海流の流れを作り出すことはできない。

#### 4.4.2 吹送流（エクマン輸送）

風に吹かれて海水が動く場合、風と同様に進行方向に対して右向きに向きを変えようとするコリオリの力が働く。そのため海面の水の流れは、図6に示すように風の向きに対して時計まわりに右にずれることになる。海面の下にある水は、上の水に引きずられて流れ始めるが、この流れに対してやはりコリオリの力が働くため、上の水より流れる方向がさらに時計まわりに右にずれる。さらにその下の水の流れが右側にずれるといった具合に、海水の流れの向きは、深さが増すにつれて時計回りに少しずつ向きを変え、ある深さでは最初の風向きとは逆の向きに流れることになる。

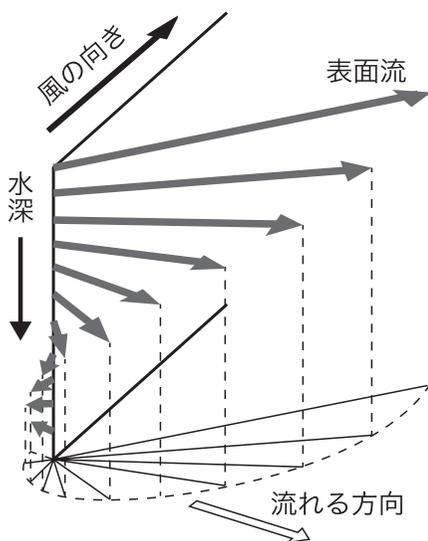


図6 エクマン輸送による海水の移動方向

このようにコリオリの力によって水深の違いにより、らせん階段を描くように水の流れる向きが変わる現象のことを“エクマンらせん”と呼ぶ。エクマンらせんの海面から深い部分までの水の流れ全体を足し合わせると、水は全体として原動力となる風の方向に対し、直角右向きに流れている。風によって運ばれる海水の向きは、風の吹く方向ではなく風向きに対して直角右向きとなるこの海水の動きを“エクマン輸送”と呼ぶ。

先ほどの貿易風と偏西風を考えると、エクマン輸送により低緯度では海水は北向きに、中緯度では南向きに運ばれることになる。いずれにしても太平洋の中央に海水が集まるように動くため、中心部の水位がわずかに高まる。

この水の高まりによって、時計回りに流れ続ける海流が生み出され、低緯度で暖められた海水が中緯度地域の陸地を温めるエネルギーの運搬システムを形成している。

## 5 まとめ

今回述べたように大気や海流の循環は、太陽からのエネルギーが余剰となる地球の低緯度側から、不足している高緯度側に向かって、熱を移動させる現象である。このエネルギーの循環は、水の熱しにくく冷めにくいという比熱の大きさや、日常生活の範囲において固体・液体・気体という物質の三態をとり、その状態変化に伴って移動する“潜熱”と呼ばれる熱に起因することを示した。

地球規模のエネルギーの循環は、ハドレーが提唱したような単純な循環ではなく、緯度によって強さが異なるコリオリの力の影響により、複雑な循環となっている。コリオリの力は、観察者が地球の自転を意識しないことにより働いて見える見かけの力であるため、これによって引き起こされる地球規模の複雑なエネルギー循環は、知識として学習しまとめることはできても、実験室でモデル実験の形で容易に再現することができないという特徴を持つ。

大気と海流の循環によって引き起こされる地球表層のエネルギー循環は、水を主役とした大きな一つのプロセスである。また、大気や海水の循環は、人類の生活環境や持続的な発展において非常に重要な役割を果たしており、その動きを理解することは理科の学習にとどまらず、環境問題を考

える上でも重要な知識となる。にもかかわらず、系統学習として別の学年、別の単元としてそれぞれの知識が学習されるため、相互の関連性を捉えにくく、本質がわかりにくくなるような場合、今回のように文脈を通して再編成・再構成を行うことで、全体としてどのような働きをしているのか見通せるようになるとともに、個々の学習内容に関してもさらに理解が深めることができるようになると思われる。

## 謝 辞

本研究は科学研究費補助金（課題番号：25242015）の助成を受けたものである。また、本稿の執筆にあたっては、山崎博史教授を始めとした広島大学大学院教育学研究科自然システム教育学の各先生方に多くのご意見・ご助言をいただいた。お世話になった皆様方に心より御礼を申し上げる。

## 引用文献

- Dale Parnell (1995) "Why Do I Have to Learn This?: Teaching the Way People Learn Best". Center for occupational research and development.
- 佐藤浩章 (2001) 学習の意味探求を重視した文脈学習 (Contextual Learning) 理論: デイル・パネル著『なぜこれを学ばなければならないの?』を読んで, 公教育システム研究, **1**, 173-178.
- 宮原 修 (2003) 系統学習, 『新版 学校教育辞典』今野喜清・新井郁夫・児島邦宏編, 教育出版, p260.
- 山崎博史・吉富健一 (2014) 地学教材の開発と学習指導. 磯崎哲夫編著, 教師教育講座第15巻中等理科教育, 253-277.
- 山内 恭 (1999) 地球放射収支, 日本赤外線学会誌, **9**, 26-33.