

第1章 気候変化の科学に関するこれまでの概要

概要

気候と気候変化を支配する、地球システム内部の相互作用プロセスの概要について認識し、部分的ながらも理解する試みは、IPCC 以前からあり、数十年前にさかのぼるものもある。1990年のIPCC第1次評価報告書以来、これらのプロセスについての理解・定量化や、気候モデルへの統合が急速に進んでいる。

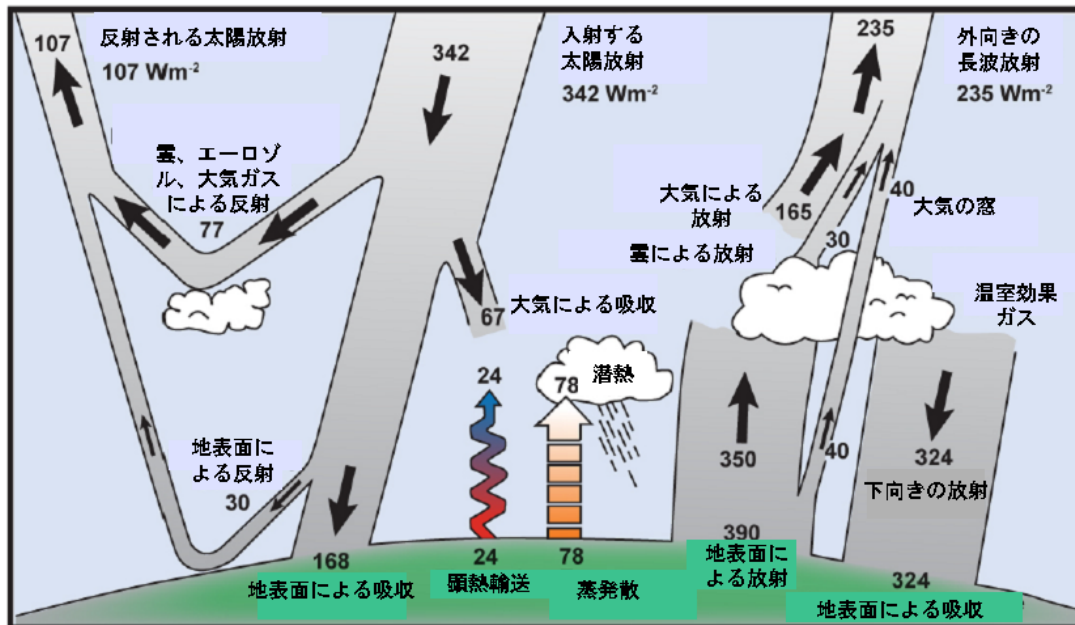
この数十年における気候学の進展と地球の気候の変化に伴い、気候変化への人為的な影響を示す証拠がより多く発見されている。それに伴い、IPCCでは、気候に与える人間の影響について、次第に断定的な見解を発表してきた。

議論を通じて、広範な分野の気候変化に関する研究が進展した。本調査により、これまでの一連のIPCCの評価で得られた主な科学的結論の方向に大きな変化はなく、その内容がさらに精緻になってきた。

よくある質問と回答

FAQ1.1：地球の気候を決める要因は何か？

気候システムは、大気、陸面、雪氷、海洋やその他の水、生物の各要素が、複雑に相互作用するシステムである。気候をしばしば「平均的な気象」と定義するように、気候システムを最も明確に特徴づける要素は大気である。気候は通常、月から数百万年にわたる期間（古典的には30年間）の気温、降水量、風の平均や変動として表現される。気候システムは、それ自身が内包する力学作用と、気候を左右する外的な要因（いわゆる「強制力」）の変化によって、時間とともに変化する。外的な強制力としては、火山の噴火、太陽活動の変動などの自然現象や、人為的な大気組成の変化などが挙げられる。太陽放射は、気候システムの駆動力である。地球の放射収支が変化する要因は基本的には以下の三つである：1) 入射する太陽放射の変化（例；地球の軌道や太陽自身の変化）。2) 太陽放射の反射率（アルベド）の変化（例；雲量、大気粒子、植生の変化）。3) 地球から宇宙空間へ戻る長波放射の変化（例；温室効果ガス濃度の変化）。さまざまなフィードバック過程を通じて気候は、これらの変化に直接あるいは間接に反応する。



FAQ1.1 図 1 年平均した地球全体のエネルギー収支の見積もり。長期的には、入射した太陽放射のうち地球と大気によって吸収された分は、地球と大気から放射される同じ量の外向きの長波放射とつり合う。入射する太陽放射のおよそ半分は地表面で吸収される。このエネルギーは、地面に接する大気の加熱（顕熱輸送）、蒸発散過程、雲と温室効果気体に吸収される長波放射などによって、大気へと輸送される。一方、大気は、宇宙空間だけでなく地球へも長波放射を放射して返す。出典：Kiehl and Trenberth (1997)。

日中の地球大気上端の太陽に垂直な面に到達するエネルギーは、1 平方メートル当たり約毎秒 1370 ワット (W/m^2) であり、全地球で平均するとこの 4 分の 1 となる (FAQ1.1 図 1)。大気上端に達した太陽光線の約 30% が宇宙空間に反射される。この反射の約 3 分の 2 は、雲や「エアロゾル」と呼ばれる大気中の微粒子によるものである。残りの約 3 分の 1 は、主に雪、氷、砂漠からなる、地球表面の明るい部分で反射される。エアロゾルによる反射が最も劇的に変化するのは、大規模な火山噴火が、大気中の相当な高さまで物質を噴出するときである。エアロゾルは通常、一、二週間で雨により大気中から除去されるが、激しい火山噴火によって、最も高い雲のさらに上まで物質が吹き上げられた場合、これらのエアロゾルは、対流圏に下りて、降水によって地表面に落とされるまでの 1~2 年の間、気候に影響を与える。このように、大規模な火山噴火は、数か月、場合によっては数年にわたって、世界平均で約 0.5°C の地上気温の低下をもたらすことがある。人為起源のエアロゾルの中にも、著しく太陽光線を反射するものがある。

宇宙空間へ反射されなかったエネルギーは、地球表面と大気に吸収される。この量は約 240W/m^2 である。入射エネルギーと平衡するには、地球自身も、平均して同じ量のエネルギー

ギーを宇宙空間へ放射する必要がある。このため地球は、外向きの長波放射を射出している。地球上のあらゆるものは、常に長波放射を射出している。これは、炎から放射されて体感できる熱エネルギーと同じものであり、高温のものほどより多くの熱エネルギーを放射する。 240W/m^2 を放射するには、表面温度は -19°C くらいでなければならないだろう。これは、実際の地球表面よりずっと低温である(世界平均地上気温はおよそ 14°C である)。必要条件の -19°C となっているのは、地上約 5km の大気である。

地上気温がこのように高い理由は、温室効果ガスが存在するためである。温室効果ガスは、自然の温室効果として知られるように、地表面からの長波放射に対して部分的な毛布のように作用する。最も重要な温室効果ガスは水蒸気と二酸化炭素である。大気中に最も多く存在する窒素と酸素にはこのような効果はない。一方、雲は温室効果ガスと同様の毛布効果を及ぼすが、この効果は雲の反射作用によって打ち消され、平均すれば、雲は気候を冷却する効果を持っている(しかし、局地的には、温暖化の効果を感じることもあるだろう。例えば雲は長波放射を地表面に放射し返すので、曇った夜は、晴れた夜よりも暖かい)。人間活動により温室効果ガスが排出されることによって、毛布効果が強まる。例えば、大気中の二酸化炭素量は、工業化以来約 35% 増加しており、この増加は、主に化石燃料の燃焼や森林の消失などの人間活動によるものであることが知られている。このように人類は、地球大気の化学的組成を大きく変えてしまい、その結果気候に相当な影響を与えてしまった。

地球は球形なので、太陽光線が低い角度で大気へ入射する高緯度帯よりも、熱帯の地表面の方へ、単位面積当たりでは多くの太陽エネルギーが到達する。エネルギーは、低気圧を含む大気と海洋の循環によって、赤道域から高緯度帯へ輸送される。海面や陸面から水が蒸発するときにもエネルギーが必要である。このエネルギーは潜熱と呼ばれ、雲の中で水蒸気が凝結するとき放出される(FAQ1.1 図 1)。大気循環は、主にこの潜熱の放出によって駆動される。そして大気循環は、海面を吹く風や、海面水温や塩分を変化させる降水や蒸発の作用を通じて海洋循環の大部分を駆動している。

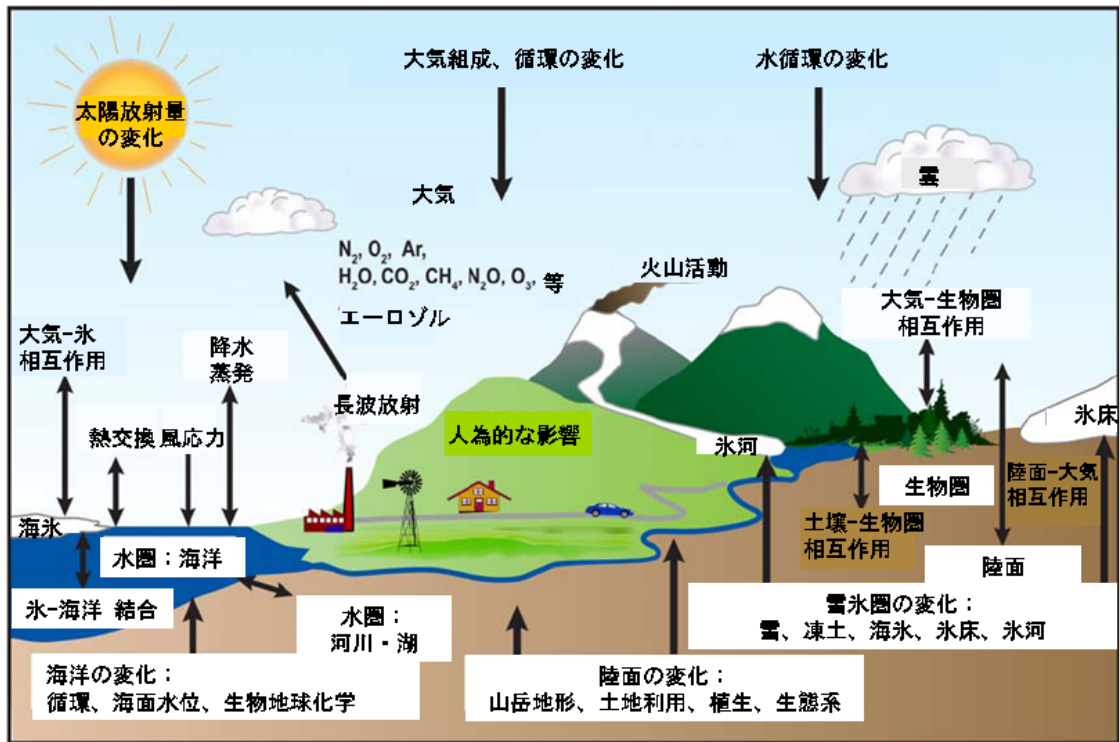
地球の自転のために、大気循環は、南北のパターンよりも東西のパターンを示す傾向が強い。中緯度帯の西寄りの風系には、極地域への熱輸送を担う大規模な気象システムが組み込まれている。これらの気象システムは、馴染みのある移動性の低・高気圧や、それに伴う寒冷・温暖前線から成っている。惑星スケールの大気循環システムの波は、時間とともに振幅が変化しつつ、陸と海の温度差や、山岳や氷床などの障害物のために、大陸や山によって位置が固定される。このような波のパターンのため、北アメリカが冬季に特に低温となるのに連動して、北半球の他の地域は特に高温となる。氷床の大きさや植生の型や分布、大気や海洋の温度など、気候システムのさまざまな要素の変化は、大気と海洋の大

規模循環の特徴に影響を与える。

気候システムには、気候強制力の変化の効果を強めたり（正のフィードバック）、弱めたり（負のフィードバック）するフィードバック機構が多くある。例えば、温室効果ガスの濃度が上昇すると地球が温暖化し、雪や氷が融け始める。この融解に伴い、雪や氷の下から暗い地面や水面が現れ、より多くの太陽光線を吸収するため、さらなる温暖化がもたらされ、このことがさらに融解を進める、というような自己強化循環になっている。「雪氷-アルベド・フィードバック」として知られるこの一連のフィードバックは、温室効果気体の濃度上昇による最初の温暖化を増幅する働きを持つ。気候システムの複雑さの解明を目指す科学者たちの多大な研究努力は、気候フィードバックの検知、理解、正確な定量化に集中している。

FAQ1.2： 気候変化と気象にはどのような関係があるか？

気候とは、一般的には平均的な気象と定義されるように、気候変化と気象は密接に関わっている。観測結果をみると気象に変化が起こっていることが分かるが、気候変化が起きていることを示すのは、長期にわたる気象の変化の統計である。気象と気候は深く関わっている一方で、両者には重要な違いがある。よく見受けられることだが、気象と気候を混同して、これから二、三週間先の天気予報できないのに、なぜ 50 年後の気候を予測することができるのか、と科学者が問われることがある。気象のカオス性によって、数日より先の気象は予測できない。大気組成やその他の要因の変化による、気候（つまり長期間平均した気象）の変化を予測することは、それとは全く異質で、ずっと扱いやすい問題である。たとえていえば、ある男性が死亡する年齢を当てることは不可能だが、工業化された国の男性の平均死亡年齢はおよそ 75 歳である、とかなり確実に予測することができるようなものである。この問題に関する、また別のよくある混同は、寒い冬や地球上どこかにある低温の場所が地球温暖化に対する反証だ、という考えである。極端な高温や低温は（その頻度や強弱は気候変化とともに変わるが）常に起こっている。しかし、空間的、時間的に気象を平均してみれば、地球が温暖化していることは、データから明白に分かるのである。



FAQ1.2 図1 気候システムを構成する要素とその過程、相互作用のあらまし

気象学者は、気象システムの日々の変化を観測し、理解し、予想することに多くの労力をはらっている。大気の運動、加熱、冷却、降雨、降雪や水の蒸発を支配する物理法則を利用して、気象学者は通常、今後数日間の気象を正しく予測することができる。数日を超える気象の予測可能性の限界となる大きな要因は、大気が原理的に持つ力学的属性にある。1960年代に気象学者のエドワード・ローレンツは、初期状態におけるほんのわずかな違いが、全く異なる予測結果をもたらすことを発見した。これはバタフライ効果と一般にいわれており、どこかで蝶が羽を羽ばたかせると（あるいは何か小さな現象が起こると）、理論上は、別の場所のその後の気象パターンを変化させ得る、というものである。この効果の核心にあるのがカオス理論である。これは、ある変数のごく小さな変化が、複雑系に不規則性らしきものを引き起こすというものである。

しかし、カオス理論が意味するものは完全な無秩序ではない。例えば、過去の状態のわずかな差から、嵐がやってくる日や、その正確な経路が変わったとしても、その地域のその期間での平均の気温や降水量（つまり気候）はほとんど変わらないだろう。天気予報にとっては、予報期間の初期状態をすべて知ることが大きな問題であるため、気候とは気象にとってのバックグラウンドの状態を表していると考えるのが有益であろう。さらに正確に言えば、気候は、大気、陸、海洋、雪氷、生物を包括する地球システム全体の状態（FAQ 1.2 図1）（これは気象パターンを決定する地球のバックグラウンドとして機能する）に関

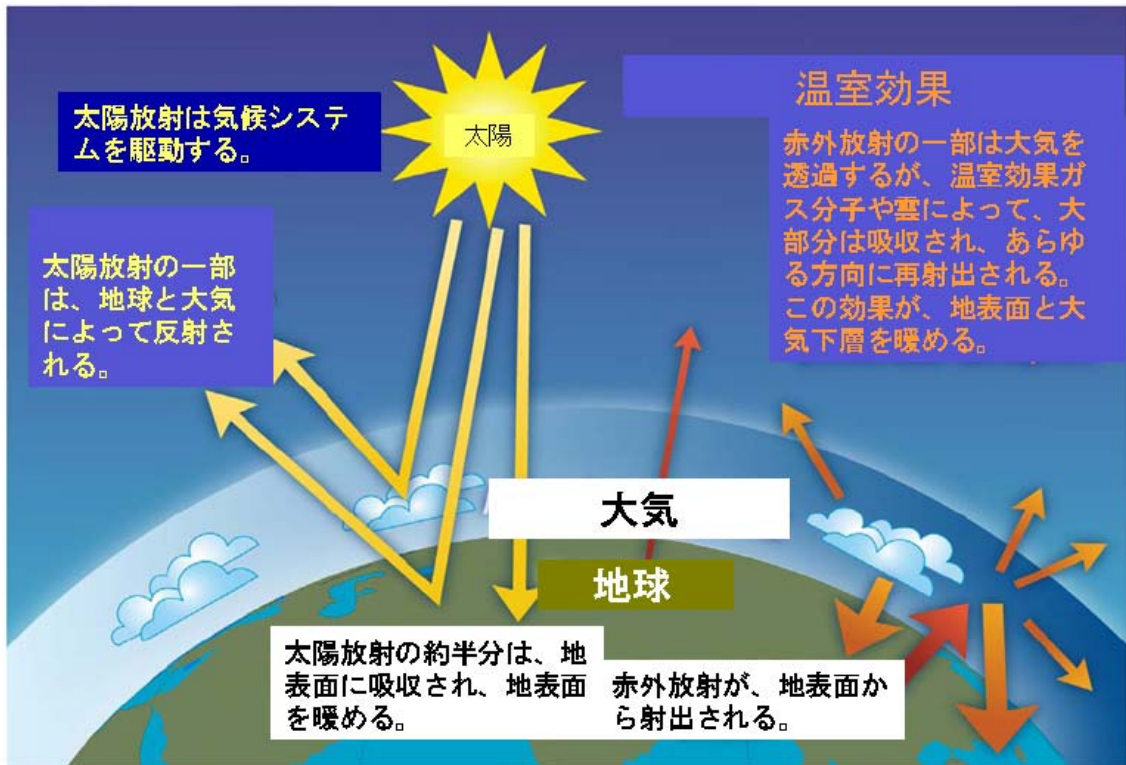
連しているとみなせる。この例としては、ペルー沿岸の気象に影響を与えるエルニーニョ現象が挙げられる。エルニーニョ現象が起こると、不規則性の結果として実現し得るさまざまな気象パターンの中から、一部のものだけが実現しやすくなる。ラニーニャ現象が発生すると、また異なる気象パターンが実現しやすくなる。

もう一つの例として、身近にある夏と冬の違いが挙げられる。季節の進行は、地球システムに吸収されたり放出されたりするエネルギーの地理的分布の変化によって起きる。同様に、気候の将来予測は、地球システム内の熱エネルギーの根本的な変化によって定まり、特に地表面付近に熱を蓄える温室効果の強化の度合いによるが、これは大気中の二酸化炭素などの温室効果ガスの量によって決まる。この先 50 年後の、温室効果ガスの変化による気候変化を予測することは、わずかに数週間先の気象パターンを予測することとは全く別で、ずっと簡単に解ける問題である。言い換えれば、大気組成の変化からもたらされる長期間の変動は、個々の気象現象よりもはるかに予測可能なのである。例えば、1 回きりのコイン投げやさいころ振りの結果を当てることはできなくても、何回も試行したときの統計的な結果を予測することはできるといったものである。

多くの要因が気候に影響を及ぼし続ける中で、人間活動が主要な影響力になってきており、これが過去 50 年に観測された温暖化の大半の原因となっていることを科学者たちは明らかにした。人為的な気候変化は、大気中の温室効果ガスの量の変化という主要なものだけでなく、微粒子（エアロゾル）の変化や、土地利用の変化などの結果である。気候の変化に伴い、特定の気象現象が発生する確率が変化している。例えば、世界平均気温の上昇に伴い、気象現象の中には、以前より頻繁で激しくなったもの（例 熱波や豪雨）もあれば、低頻度になって弱まったもの（例 極端な寒冷現象）もある。

FAQ1.3： 温室効果とは何か？

太陽は地球の気候の駆動源であり、ごく短い波長帯（主に可視あるいは近可視（紫外線など）域）でエネルギーを放射している。地球の大気上端に達する太陽エネルギーの約 3 分の 1 が宇宙空間へ直接反射される。残りの 3 分の 2 は、地球表面に吸収され、またわずかながら大気にも吸収される。吸収された入射エネルギーと平衡するため、地球は、平均すれば、同じ量のエネルギーを宇宙空間へ放射しなくてはならない。地球は、太陽よりもずっと温度が低いので、主に赤外域の、より長い波長の放射を射出している（FAQ1.3 図 1）。陸や海から射出される熱放射の多くが、雲を含む大気に吸収され、地球へと放射し返される。これが、温室効果といわれるものである。温室のガラスの壁は、空気の入りを抑え、中の気温を上昇させる。物理過程は異なるが、地球でも温室効果により、同様に地表面が昇温する。この自然の温室効果がなかったとしたら、地表面の平均気温は氷点より



FAQ1.3 図1 理想化した自然の温室効果のモデル。説明は本文を参照。

も低くなってしまいうだろう。このように、地球の自然な温室効果によって、今日のような生物の存在が可能になっている。しかし、主に化石燃料の燃焼や森林の伐採といった人間活動は、この自然の温室効果を大いに強化し、地球温暖化を引き起こしてきた。

大気中に最も多く含まれる気体である、窒素（乾燥空気中の78%を占める）と酸素（21%を占める）の二つはほとんど温室効果に寄与しない。温室効果の原因となるのは、より複雑だがずっと量は少ない分子である。最も重要な温室効果ガスは水蒸気であり、二酸化炭素（CO₂）がその次に重要である。大気中に微量に含まれる、メタン、一酸化窒素、オゾンやその他の気体も温室効果に寄与する。湿潤な赤道域では、大気中に大量の水蒸気が含まれているので温室効果は非常に大きく、二酸化炭素や水蒸気を少量加えても、下向きの赤外放射に与える影響はごく小さいものでしかない。ところが、寒冷で乾燥した極域では、二酸化炭素や水蒸気のわずかな増加はもっと大きな効果を及ぼす。同じように、低温で乾燥した上層の空気では、水蒸気のわずかな増加が及ぼす温室効果は、地球表面付近で起きる場合よりもさらに大きい。

気候システムの幾つかの要素、特に海や生物は、温室効果ガスの大気中濃度を左右している。この主な例としては、植物が、大気中の二酸化炭素を取り込み、光合成によって二

酸化炭素（と水）から炭水化物を合成することが挙げられる。工業化の時代にあっては、人間活動は、主に化石燃料の燃焼と森林の伐採によって、大気中に温室効果ガスを追加してきた。

二酸化炭素などの温室効果ガスをさらに大気中に追加することで、温室効果が強化し、地球の気候が温暖化することになる。温暖化の程度は、さまざまなフィードバック機構に依存する。例えば、温室効果ガスの増加によって大気が暖まると、水蒸気の濃度が上昇し、さらに温室効果を強めることになる。そしてこれがさらに温暖化を促し、そのことで、水蒸気がさらに増加するという自己強化循環を形成する。この水蒸気のフィードバックは、二酸化炭素の追加だけによる温室効果をおよそ倍増するほど大きいと考えられる。

もう一つの重要なフィードバック機構として、雲が関わるものがある。雲は、効果的に赤外放射を吸収するため大きな温室効果があり、地球を暖めている。一方雲は、入射する太陽放射を効率的に反射するため、地球を冷やしている。雲の型、位置、雲水量、雲高、雲粒の大きさや形、寿命といった、雲に関わるおよそすべての属性の変化が、雲が地球を加熱、あるいは冷却する度合いを左右している。それらの変化の中には、温暖化を促進するものも、抑制するものもある。地球温暖化に対応してどのように雲が変化するか、そして雲の変化が、さまざまなフィードバック機構を経て、どのように気候に影響するのかをさらに理解するために、多くの研究が進められているところである。