

# IPCC 第 4 次評価報告書 第 1 作業部会報告書

## 概要及びよくある質問と回答

### 注意

この資料は、IPCC 第 4 次評価報告書第 1 作業部会報告書のうち、Executive Summary（概要）及び Frequently Asked Question（よくある質問と回答）について、気象庁が翻訳したものである。この翻訳は、IPCC ホームページに掲載されている第 4 次評価報告書：

<http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>

を基にしている。

気象庁記

平成 19 年 11 月 14 日

## 謝辞

本日本語訳の作成に当たっては、気象庁及び気象研究所が翻訳作業を行った。

なお翻訳に当たっては、IPCC WG1 国内支援事務局の協力のもと、以下の方々に訳文の査読を頂いた。ここに記してお礼申し上げます。

井上 元	名古屋大学大学院環境学研究科 教授
江守 正多	独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター温暖化リスク評価研究室 室長
小川 利紘	宇宙航空研究開発機構 主幹研究員
鬼頭 昭雄	気象研究所 気候研究部長
小池 勲夫	東京大学海洋研究所 教授
小池 俊雄	東京大学 大学院工学系研究科 教授
近藤 洋輝	独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター 地球環境モデリング研究プログラム 特任研究員
住 明正	東京大学 サステイナビリティ学連携研究機構 地球持続戦略研究イニシアティブ 統括ディレクター・教授
時岡 達志	独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター長 地球温暖化予測研究プログラム プログラムディレクター
中島 映至	東京大学気候システム研究センター長
野沢 徹	独立行政法人国立環境研究所 大気圏環境研究領域大気物理研究室 室長
野尻 幸宏	独立行政法人国立環境研究所 地球環境研究センター 副センター長
野田 彰	独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター 地球環境モデリング研究プログラムディレクター
花輪 公雄	東北大学大学院 理学研究科 教授
藤井 理行	国立極地研究所 所長
松野 太郎	独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター 特任研究員
丸山 康樹	財団法人電力中央研究所環境科学研究所 「温暖化影響の科学的評価と適応」重点プロジェクト課題責任者

(敬称略 五十音順)

第1章	気候変化の科学に関するこれまでの概要 .....	1
第2章	大気成分と放射強制力の変化 .....	9
第3章	観測結果：地表面及び大気中の気候変化 .....	19
第4章	観測結果：雪氷及び凍結した地表面の変化 .....	33
第5章	観測結果：海洋の気候変化と海面水位 .....	38
第6章	古気候 .....	43
第7章	気候系変化と生物地球化学過程の結合 .....	52
第8章	気候モデルとその評価 .....	61
第9章	気候変化の理解と要因評価 .....	70
第10章	世界的な気候の予測 .....	79
第11章	地域的な気候の予測 .....	95

# 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。

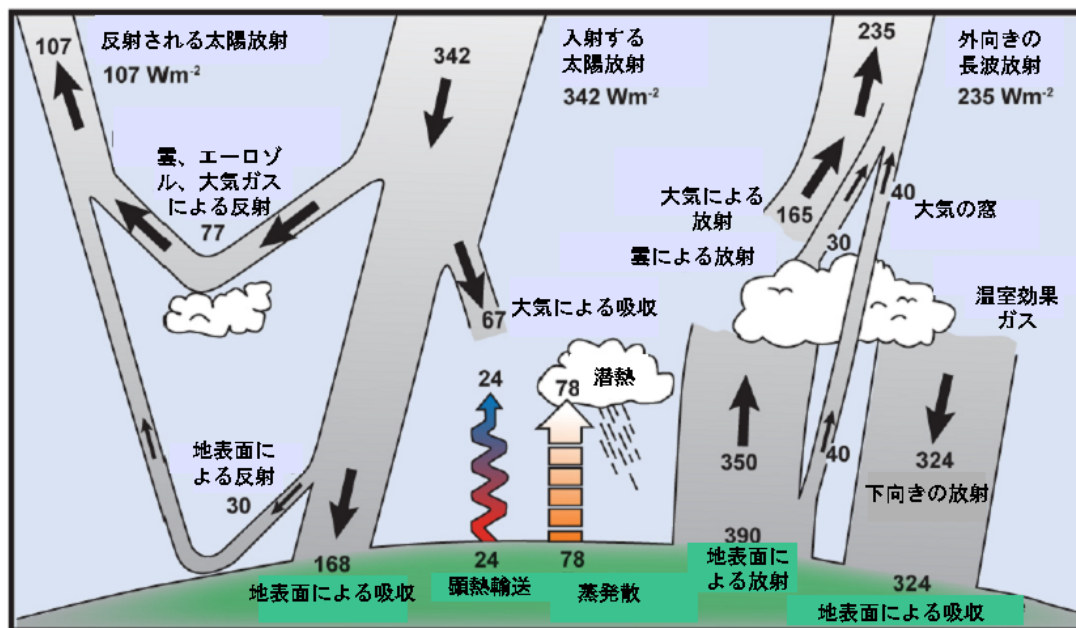
この数十年における気候学の進展と地球の気候の変化に伴い、気候変化への人為的な影響を示す証拠がより多く発見されている。それに伴い、IPCCでは、気候に与える人間の影響について、次第に断定的な見解を発表してきた。

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  $0.5^{\circ}C$  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。 $240\text{W/m}^2$  を放射するには、表面温度は $-19^\circ\text{C}$ 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 $14^\circ\text{C}$ である)。必要条件の $-19^\circ\text{C}$ となっているのは、地上約  $5\text{km}$  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。

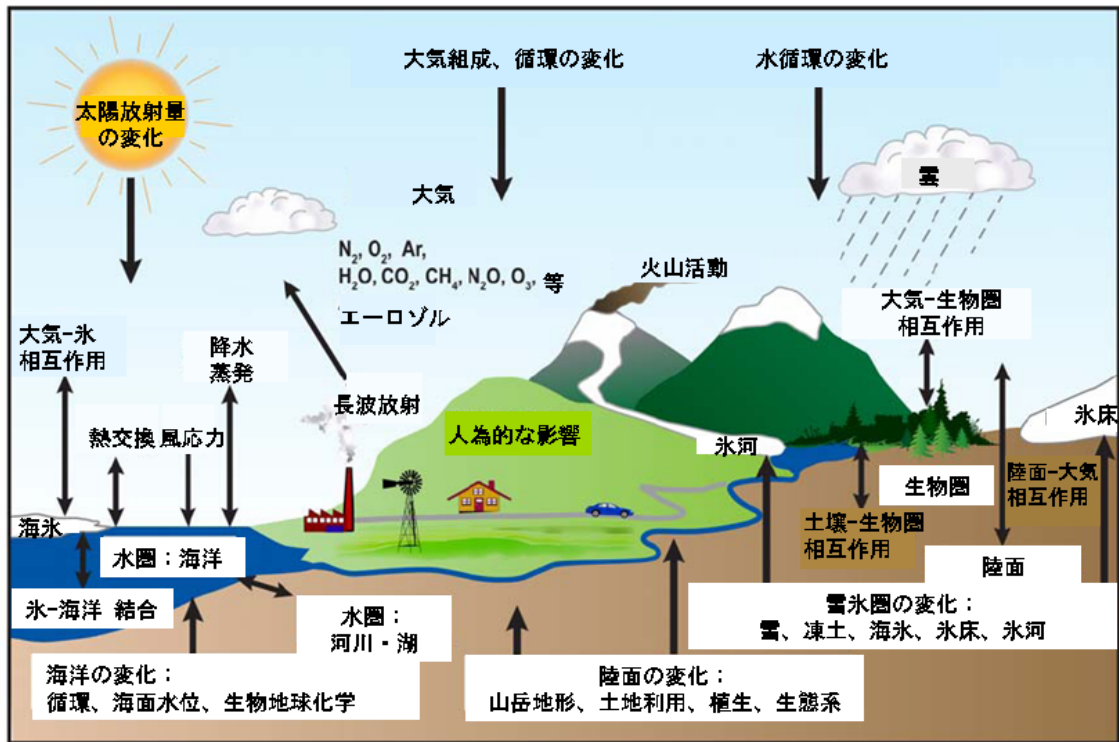
地球の自転のために、大気循環は、南北のパターンよりも東西のパターンを示す傾向が強い。中緯度帯の西寄りの風系には、極地域への熱輸送を担う大規模な気象システムが組み込まれている。これらの気象システムは、馴染みのある移動性の低・高気圧や、それに伴う寒冷・温暖前線から成っている。惑星スケールの大気循環システムの波は、時間とともに振幅が変化しつつ、陸と海の温度差や、山岳や氷床などの障害物のために、大陸や山によって位置が固定される。このような波のパターンのため、北アメリカが冬季に特に低温となるのに連動して、北半球の他の地域は特に高温となる。氷床の大きさや植生の型や分布、大気や海洋の温度など、気候システムの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



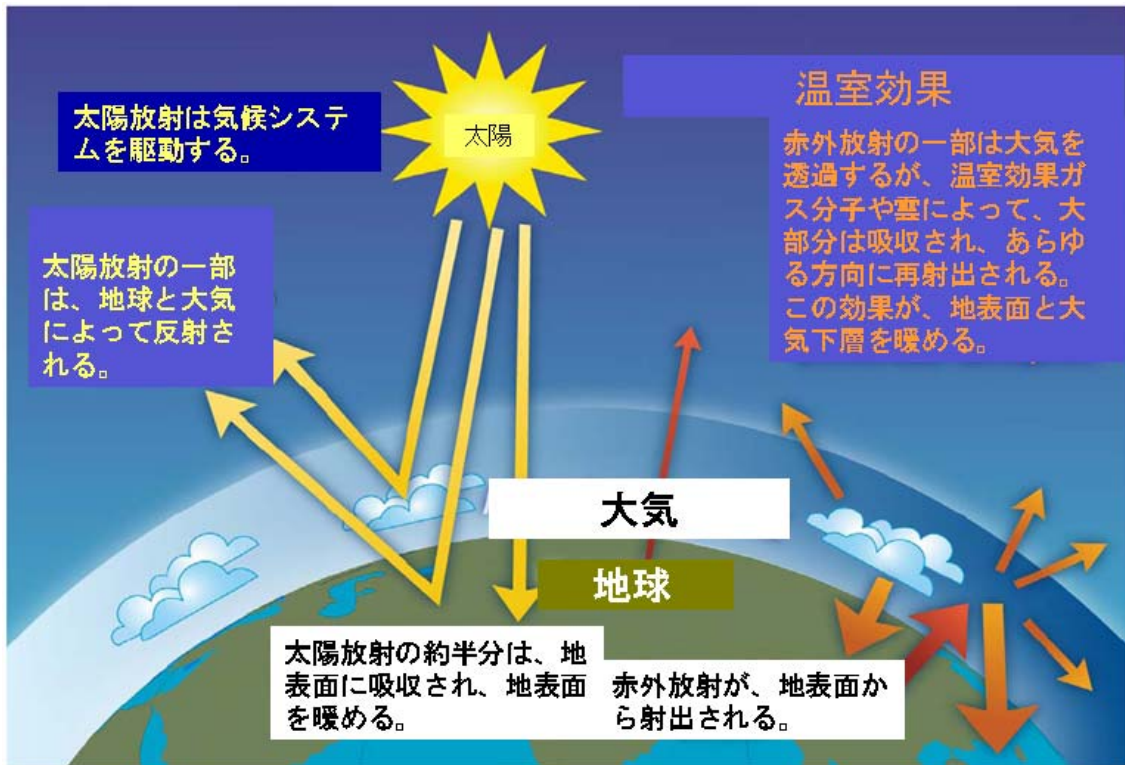
連しているとみなせる。この例としては、ペルー沿岸の気象に影響を与えるエルニーニョ現象が挙げられる。エルニーニョ現象が起こると、不規則性の結果として実現し得るさまざまな気象パターンの中から、一部のものだけが実現しやすくなる。ラニーニャ現象が発生すると、また異なる気象パターンが実現しやすくなる。

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（CO<sub>2</sub>）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。工業化の時代にあつては、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。

## 第2章 大気成分と放射強制力の変化

### 概要

放射強制力<sup>1</sup>は、気候変化を引き起こすさまざまな人為起源及び自然起源の因子の強度を、定量的に比較するための概念である。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第1作業部会による第3次評価報告書（IPCC,2001）（以下、「第3次評価報告書」という）以降の気候モデルによる研究では、ある放射強制力に対する平衡世界平均気温の応答が、ほとんどの気候変動の駆動源に対してほとんど同じ（25%以内）であることを中程度の信頼性で示している。

すべての人為起源の因子を合わせた放射強制力が得られたのは、これが初めてである。おのおのの物質の排出と関連付けた個別の放射強制力も初めて見積もられる。

人為起源の放射強制力は合計で $+1.6[-1.0,+0.8]^2$  W/m<sup>2</sup>と見積もられている。これは、1750年以降、人類が気候に対して、かなりの温暖化影響を及ぼしている可能性が極めて高い<sup>3</sup>ことを示している。人為起源の放射強制力についてのこの推定値は、太陽放射の変化によるものより、少なくとも5倍より大きい可能性が高い。1950～2005年の間、自然起源の放射強制力の合計（太陽放射と火山性エアロゾル）の温暖化への影響が、人為起源の放射強制力と同程度であることはほとんどあり得ない。

長寿命の温室効果ガス（二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、ハロカーボン類及び六フッ化硫黄）濃度の増加による放射強制力は、全体で $+2.63[\pm 0.26]$ W/m<sup>2</sup>である。この放射強制力についての科学的理解度<sup>4</sup>は高い。第3次評価報告書に比べて放射強制力が9%増加して

<sup>1</sup> 放射強制力は、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第1作業部会第3次評価報告書（IPCC,2001）で定義されているように、対流圏界面における、成層圏の調節を経た放射フラックスの変化量として定義されている。正の放射強制力は地球全体で平均して地表の温暖化を、負の放射強制力は地球全体で平均して地表の寒冷化をもたらす。しかしながら、放射強制力は、気候応答の詳細な側面の指標として企図されたものではない。ここでは、特記がない限り、放射強制力は地球全体で平均された値とする。放射強制力は、排出量の変化、濃度の変化、観測、気候変化の駆動要因に関するその他の知識から、因子ごとにさまざまな方法で計算される。本報告書では、特記がない限り、各因子による放射強制力を、現在（およそ2005年）と工業化時代の開始（およそ1750年）の差として記述しており、その単位はW/m<sup>2</sup>である。

<sup>2</sup> 信頼度90%の範囲を角括弧内に示している。信頼度90%の範囲が、最適な推定値から非対称であった場合、 $A[-X,+Y]$ と表記しており、これは範囲の下限が $(A-X)$ で、上限が $(A+Y)$ ということである。

<sup>3</sup> 「可能性が極めて高い」という表現は、本文書で比較のため使用している表現の例で、信頼度が95%以上で使用している。他の例として「可能性が高い」（信頼度が66%）がある。

<sup>4</sup> 放射強制力の見積りには、不確実性の範囲（量的不確実性）と科学的理解度の水準（構造的な不確実性）が伴う。量的不確実性は、過去に発表された研究を基に信頼度が5～95（90）%の範囲で表現されている。科学的理解度の水準は構造的な不確実性の主観的な尺度であり、関係する諸過程がどれだけ理解されているかを表現している。科学的理解度の水準が高い気候変化の因子は、放射強制力がそれぞれの不確実性の範囲内であると期待される（詳細については、2.9.1及びTS.1の不確実性に関する表を参照）。

いるのは、1998年以降の濃度変化の結果である。

- 2005年の世界平均の二酸化炭素濃度は379ppmであり、その放射強制力は+1.66[±0.17] W/m<sup>2</sup>であった。現在の放射強制力の約4分の3が過去の化石燃料やセメント生産に起因する排出が原因で、残りの4分の1が土地利用の変化が原因である可能性が高い。1995～2005年の10年間の大気中二酸化炭素濃度の年増加率は1.9ppmであり、二酸化炭素による放射強制力は20%増加した。これは少なくとも過去200年間のどの10年間で観測もしくは推測された中で、最も大きな変化である。1999～2005年で、化石燃料及びセメント生産からの世界的な排出は、およそ年3%の割合で増加している。
- 2005年の世界平均のメタン濃度は1774ppbであり、その放射強制力は+0.48[±0.05] W/m<sup>2</sup>であった。過去20年間にわたって大気中メタン濃度の増加率は、総じて減少している。この理由はよく理解されていないが、このメタン増加率が減少していることとメタンの主な消滅源(OH)に長期変動がほとんどないことは、メタンの総排出量が増加していないことを示唆している。
- モントリオール議定書で規制されているガス(CFC類、HCFC類及びクロロカーボン類)による2005年の放射強制力は全体で+0.32[±0.03] W/m<sup>2</sup>であった。これらによる放射強制力は2003年が極大で、現在は減少し始めている。
- 一酸化二窒素(N<sub>2</sub>O)濃度はほぼ直線的に増加し続けている(0.26%/年)。2005年の世界平均濃度は319ppbであり、その放射強制力は+0.16[±0.02] W/m<sup>2</sup>であった。最近の研究は、観測された空間的な濃度勾配に熱帯域からの排出が大きな役割を果たしていることを裏付けている。
- 京都議定書で削減対象となっているフッ素含有ガス(ハイドロフルオロカーボン類、パーフルオロカーボン類、六フッ化硫黄)の多くは、1998～2005年の間に高い割合(1.3～4.3倍)で濃度が増加した。2005年のこれらによる放射強制力の合計は+0.017[±0.002] W/m<sup>2</sup>であり、およそ年10%の割合で急速に増加している。
- 反応ガスであるOHは、メタン、HFC類、HCFC類及びオゾンの寿命や放射強制力に影響する主要な化学種である。OHはまた、硫酸塩、硝酸塩やその他の有機エアロゾルの形成についても、重要な役割を果たしている。世界平均OH濃度の推定によると、1979～2004年の間に正味の変化は検出されていない。

第3次評価報告書のときに利用できたモデルより、新しく、改良された化学輸送モデルによると、対流圏オゾンの増加による放射強制力は $+0.35[-0.1,+0.3]$  W/m<sup>2</sup>と見積もられており、その科学的理解度は中程度である。低緯度では対流圏オゾンの有意な増加傾向が現れている。

1980年代から1990年代にかけて観測された、成層圏オゾンの極めて大きな減少はもはや起こっていない。しかしながら、最近の変化がオゾンの回復の兆しかどうかは、まだはっきりしない。放射強制力は、モントリオール議定書で規制されたガスによる成層圏オゾンの破壊が主要因であり、 $-0.05[\pm 0.10]$  W/m<sup>2</sup>と再評価された。その科学的理解度は中程度である。

化学輸送モデルを用いた研究によると、メタンの酸化から生じる成層圏水蒸気の増加による放射強制力は、 $+0.07[\pm 0.05]$  W/m<sup>2</sup>と見積もられているが、その科学的理解度は低い。放射強制力に影響する水蒸気量の増加を引き起こす恐れのあるその他の人為的要因については、よく分かっていない。

モデルや観測から得られた、エアロゾルの直接効果による放射強制力の合計は $-0.5[\pm 0.4]$  W/m<sup>2</sup>と見積もられているが、その科学的理解度はやや低い。水雲の中の雲のアルベド効果（エアロゾルの第一間接効果またはTwomey効果とも呼ばれている）による放射強制力は $-0.7[-1.1,+0.4]$  W/m<sup>2</sup>と見積もられているが、その科学的理解度は低い。

- ・ 大気モデルは向上しており、現在では多くのモデルがすべての主なエアロゾルを取り扱っている。現場観測、衛星観測、地上観測が改善されたことによって全球エアロゾルモデルの検証が可能になった。エアロゾル直接効果の放射強制力の合計の、最良の推定と不確かさの幅は、モデル研究と観測を合わせた結果に基づいている。
- ・ 個々のエアロゾル種による直接の放射強制力は、エアロゾルによる直接効果の放射強制力の合計ほどはよく分かっていない。硫酸塩は $-0.4[\pm 0.2]$  W/m<sup>2</sup>、化石燃料起源の有機炭素は $-0.05[\pm 0.05]$  W/m<sup>2</sup>、化石燃料起源の黒色炭素は $+0.2[\pm 0.15]$  W/m<sup>2</sup>、バイオマス燃焼は $+0.03[\pm 0.12]$  W/m<sup>2</sup>、硝酸塩は $-0.1[\pm 0.1]$  W/m<sup>2</sup>、鉍物粒子は $-0.1[\pm 0.2]$  W/m<sup>2</sup>と見積もられている。バイオマス燃焼に関する推定値は、エアロゾルを覆う雲の影響を強く受ける。硝酸塩と鉍物粒子に最良の推定値が与えられたのはこれが初めてである。
- ・ より多くのエアロゾル種の導入とエアロゾル - 雲相互作用の扱いの改善により、雲

アルベド効果の最良の推定が可能となっている。しかしながら、まだ大きな不確実性が残っている。より多種のエロゾルを取り扱っているモデルや、衛星観測データによって束縛されたモデルは、比較的小さい放射強制力を算出する傾向にある。また、エロゾル-雲相互作用に関する他の効果（例えば、雲の寿命、準直接効果）は放射強制力として考慮されていない（第7章参照）。

主に正味の森林破壊による土地被覆の変化は、地表アルベドの上昇により、 $-0.2[\pm 0.2]$   $\text{W/m}^2$ の放射強制力をもたらした。その科学的理解度はやや低い。雪に付着した黒色炭素エロゾルは地表アルベドを減少させ、 $+0.1[\pm 0.1]$   $\text{W/m}^2$ の放射強制力をもたらしたが、その科学的理解度は低い。その他の地表特性の変化も、放射強制力による定量化ができないようなさまざまな過程を通して気候へ影響を与えるが、それらの科学的理解度は非常に低い。

持続する線状の飛行機雲による放射強制力は $+0.01[-0.007, +0.02]$   $\text{W/m}^2$ であるが、その科学的理解度は低い。最良の推定は第3次評価報告書の値よりも小さくなっている。広がった飛行機雲からの正味の放射強制力やそれらの飛行機雲が巻雲の雲量に与える影響の最良の推定値はない。

1750年以降の太陽放射の増加による直接的な放射強制力は $+0.12[-0.06, +0.18]$   $\text{W/m}^2$ と見積もられているが、その科学的理解度は低い。この値は第3次評価報告書の値の半分以下である。

- 放射強制力がこのように小さくなったのは、太陽放射の長期変動を再評価したことによる。つまり、マウンダー極小期から現在までの太陽放射の増加量が従来の推定よりも小さくなった。しかしながら、放射強制力の不確実性は大きいままである。過去30年間の宇宙からの観測によって、太陽放射の総量が、極小値の有意な変化傾向なしに0.08%の幅（周期の最小値から最大値までの値）で変動していることが明らかになった。
- 11年周期で変化する紫外域日射による世界平均のオゾン全量の変化（数%程度）の理解は進んでいるが、オゾンの鉛直分布の変化はそれに比べてよく分かっていない。宇宙線による大気のイオン化の太陽活動による変動と、世界平均雲量の低下の間の経験的な関係についてはあいまいなままである。

2005年の世界全体の成層圏エロゾル濃度は、1980年前後に始まった衛星による観測開始以来最も低かった。これは、1991年のピナトゥボ火山の噴火以降、大きな火山の爆発

的噴火がないためと考えられる。このような突発的な火山活動から発生したエアロゾルは、一時的に負の放射強制力をもたらすが、ピナトゥボ火山以前の火山噴火による放射強制力に関する知識は限られている。

比較的信頼性が高い長寿命の温室効果ガスと比べて、それ以外のオゾン、エアロゾルの直接効果、雲のアルベド効果及び土地利用の変化による放射強制力の空間分布にはかなりの不確実性がある。南半球の正味の放射強制力はエアロゾルの寄与が小さいため、北半球より大きい可能性が非常に高い。放射強制力の空間分布は、気候応答の分布を示しているわけではない。

世界平均の地表面強制力<sup>5</sup>の合計は負である可能性が非常に高い。成層圏及び対流圏エアロゾルの増加は、地表面での短波放射フラックスを減少させることにより、地表面強制力に対して主に負の効果を与える。これは、正の人為起源の放射強制力に主に寄与する長寿命の温室効果ガスの増加と対照的である。

## よくある質問と回答

### FAQ2.1: 人間活動はどのように気候変化に寄与するのか、またそれをどのように自然の影響と比較するのか?

人間活動は、温室効果ガス、エアロゾル（微粒子）や雲の量の変化を通じて大気を変化させることにより、気候変化に寄与する。最も良く知られている寄与は、大気中に二酸化炭素を排出する、化石燃料の燃焼である。温室効果ガスやエアロゾルは、地球のエネルギーバランスの一部を担っている、入射する太陽放射と外向きの赤外（熱）放射を変えることで気候に影響を及ぼす。これらの気体や微粒子の大気中の量や性質が変わることにより、気候システムは温暖化したり寒冷化したりし得る。工業化時代の開始（1750年頃）以来、人間活動が気候に及ぼした総合的な効果は温暖化の方向に効いている。この期間の気候に関する人類の影響は、太陽放射の変化や火山噴火のような自然な過程による変化として知られているものをはるかに超えている。

## 温室効果ガス

人間活動の結果として、四つの主要な温室効果ガス：二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、ハロカーボン類（フッ素、塩素、臭素を含む気体のグループ）が排出されている。これらの気体は大気中に蓄積し、時が経つにつれて濃度が増加している。これらの気体はど

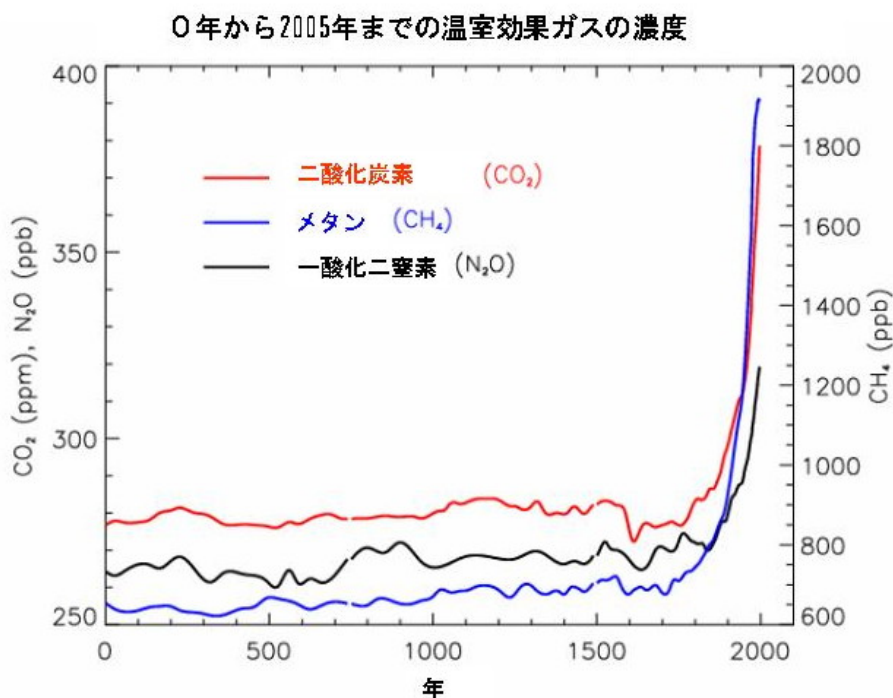
---

<sup>5</sup> 地表面強制力は地表面における瞬間的な放射フラックスの変化量であり、熱と水分の地表面での収支の変化を診断する便利な手段である。しかしながら、放射強制力とは異なり、地表面強制力では、平衡世界平均地上気温の変化をもたらすさまざまな因子の効果の定量的な比較はできない。



れも、工業化時代に入ってから著しく増加した（FAQ2.1 図1 参照）。これら増加のすべては人間活動に原因を求めることができる。

- 二酸化炭素は、運輸、建物の冷暖房、セメント等の製造における化石燃料使用により増加してきた。森林破壊は二酸化炭素を排出し、植物による二酸化炭素吸収を減らした。二酸化炭素は植物の腐敗などの自然の過程でも排出される。
- メタンは、農業、天然ガスの輸送、ごみの埋め立てに関連した人間活動の結果として増加してきた。また、メタンは、例えば湿地において起こるような自然の過程でも排出される。メタン濃度は、この20年間にわたり濃度増加率が減少したので、現在は増加していない。
- 一酸化二窒素もまた、肥料の使用や化石燃料燃焼のような人間活動により排出される。土壌と海洋における自然の過程もまた一酸化二窒素を排出する。



FAQ2.1 図1 過去2000年間の重要な長寿命温室効果ガスの大気中濃度。1750年頃からの増加は工業化時代の人間活動に起因する。濃度の単位は100万分の1 (ppm) あるいは10億分の1 (ppb) で、大気分子それぞれ百万個あるいは十億個中の温室効果ガスの分子数を表す。(データは本報告書の6章と2章から結合され簡略化されている)。

- ・ ハロカーボンガスの濃度は主に人間活動が原因で増加してきた。小さいながら自然起源の排出源もある。主要なハロカーボンにはクロロフルオロカーボン（例えば CFC-11、CFC-12）が含まれる。クロロフルオロカーボンは、大気中にあることで、成層圏オゾン破壊の原因となることが明らかになる以前は、冷媒として、また他の工業過程において広く使われた。オゾン層保護を目指した国際規制の結果、クロロフルオロカーボンガスの量は減少しつつある。
- ・ オゾンは大気中の化学反応により連続的に生成、破壊される温室効果ガスである。対流圏では、化学反応によりオゾンを生成する、一酸化炭素、炭化水素、窒素酸化物のような気体の排出を通じて、人間活動はオゾンを増加させてきた。前述の通り、人間活動により排出されたハロカーボンは、成層圏においてオゾンを破壊し、南極上空でオゾンホールを引き起こしている。
- ・ 水蒸気は大気中で最も量が多く重要な温室効果ガスである。しかしながら、人間活動は、大気中の水蒸気量に対して、わずかな直接的影響を持つに過ぎない。間接的には、人類は、気候を変化させることにより、水蒸気に大きな影響を及ぼす可能性がある。例えば、暖かい大気はより多くの水蒸気を含む。また、メタンは成層圏において化学反応で消滅し少量の水蒸気を生成するため、人間活動はメタン排出を通じて水蒸気に影響を及ぼす。
- ・ エ어로ゾルは、大きさ、濃度、化学成分ともさまざまな大気中の微粒子である。エアロゾルには、直接大気に排出されるものと、排出された化合物から生成されるものがある。エアロゾルは自然起源の化合物と人間活動の結果として排出された化合物の両方を含む。化石燃料燃焼やバイオマス燃焼は、硫黄化合物や有機化合物、黒色炭素（すす）を含むエアロゾルを増加させてきた。露天掘りや工業過程のような人間活動は大気中のダストを増加させてきた。自然起源エアロゾルには、地表面から排出される鉱物ダスト、海塩エアロゾル、陸地や海洋から排出される生物起源のもの、火山噴火による硫酸塩やダストエアロゾルを含む。

### 人間活動により影響を受けた要因の放射強制力

人間活動により影響を受けた幾つかの要因の放射強制力の寄与を **FAQ2.1 図 2** に示す。値は工業化時代の開始（1750 年頃）に対する強制力の合計を反映している。すべての温室効果ガス増加による強制力は、人間活動に起因する強制力の中で最もよく理解されており、この放射強制力は、個々の気体は大気中の外向き赤外放射を吸収するため、正の値をとる。温室効果ガスの中で、二酸化炭素の増加は、この期間の最も大きい強制力を引き起こしてきた。対流圏オゾン増加もまた温暖化に寄与してきたが、成層圏オゾンの減少は、寒冷化

に寄与してきた。

エアロゾル粒子は、大気中の太陽放射と赤外放射の反射と吸収を通じて、直接的に放射強制力に影響する。エアロゾルによっては正の強制力をもたらすものも、負の強制力をもたらすものもある。すべての種類のエアロゾルの直接的な放射強制力を合わせると負の値となる。エアロゾルはまた、雲の特性を変化させて、間接的に負の放射強制力を引き起こす。

== 【FAQ2.1、BOX1】 ==

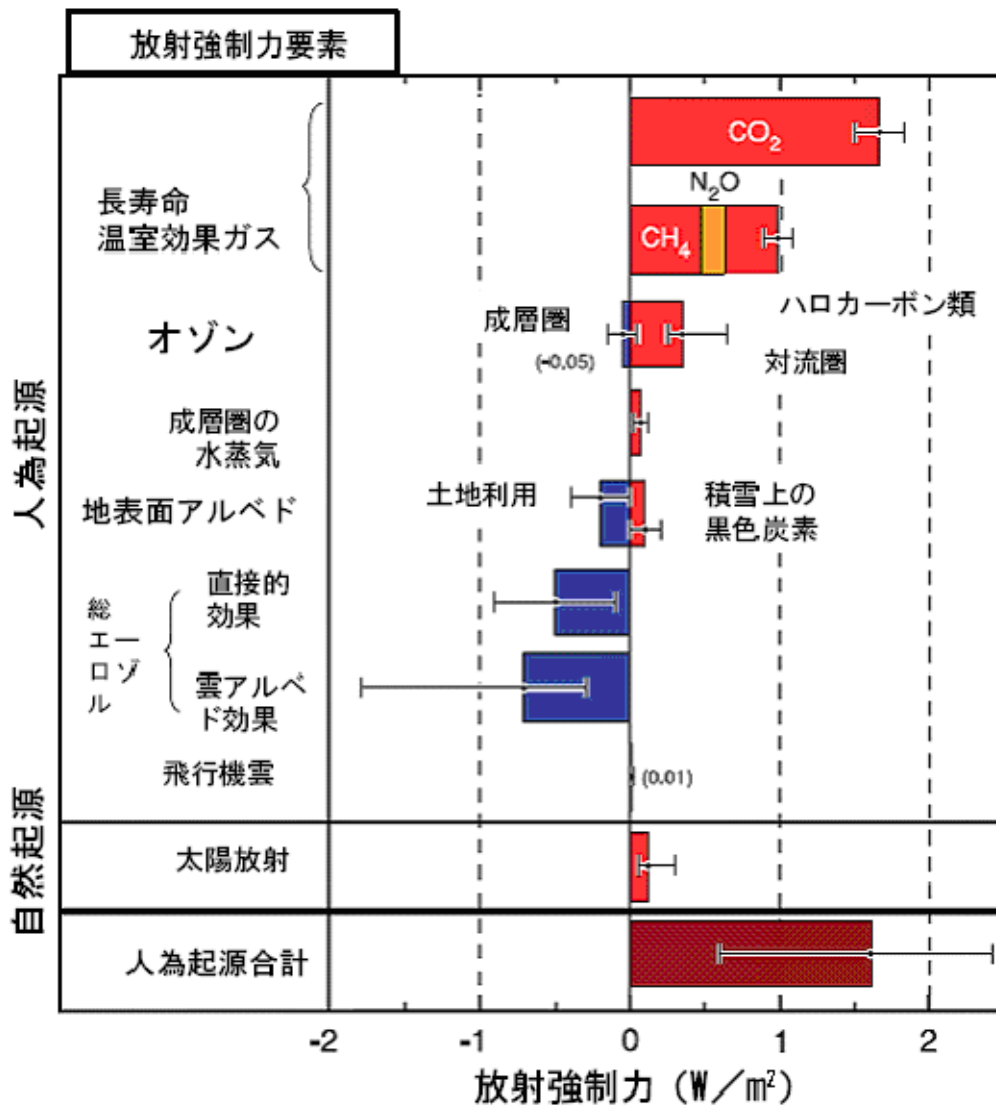
放射強制力とは？

温室効果ガスのような気候変化を引き起こす要因の影響は、しばしばその放射強制力として評価される。放射強制力とは、気候に影響を及ぼす要因が変化したときに、地球-大気システムのエネルギーバランスがどのように影響を受けるかを測る尺度である。「放射」という語が入るのは、これらの要因が、入射する太陽放射と、地球大気内の外向き赤外放射の間のバランスを変化させるからである。この放射バランスが地球の地上気温を制御する。

「強制力」という語は、地球の放射バランスがこれにより通常からずれた状態に押しやられていることを示すために用いられる。

放射強制力は通常、「大気上端で測った地球の単位面積当たりのエネルギー変化率」として定量化され、「W/m<sup>2</sup>」で表される（FAQ2.1 図2参照）。ある要因や要因グループの放射強制力が正と評価されたならば、地球-大気システムのエネルギーは最終的に増加し、このシステムの温暖化をもたらす。対照的に、負の放射強制力は最終的にエネルギーを減少させ、システムの寒冷化をもたらす。気候研究者にとって重要な課題は、気候に影響を及ぼすすべての要因と強制力として働くメカニズムを明確にし、各要因の放射強制力を定量化し、要因グループからの総放射強制力を評価することである。

## 1750年から2005年にかけての気候の放射強制力



FAQ2.1 図2 気候変動の放射強制力の主要要素。文中に示すように、これらの放射強制力はすべて人間活動または自然要因に伴う気候に影響を及ぼす一つまたは複数の因子の結果である。これらの値は、工業化時代の始まり（1750年頃）を基準とした、2005年の強制力を示している。人間活動は、長寿命ガス、オゾン、水蒸気、地上アルベド、エアロゾル及び飛行機雲にかなりの変化をもたらす。1750年から2005年にかけての自然起源の強制力で増加したのは、太陽放射だけである。正（負）の強制力は気候を温暖化（寒冷化）させる。おのおのの色つきの棒グラフについての細い黒線は、個々の値の不確実性の範囲を示す（本報告書図2.20を転載）

工業化時代以降の人間活動は、主に耕作地、牧場、森林の変化を通して、地球上の土地被覆の性質を変えてきた。また人間活動は、雪氷の反射特性も変えてきた。全体として、人間活動の結果、現在では、より多くの太陽放射が地球表面から反射されている *可能性が高い*。この変化は負の放射強制力となる。

航空機は十分低温で高湿度の領域で、持続する線状の凝結の軌跡（飛行機雲）を生成する。飛行機雲は、太陽放射を反射し赤外放射を吸収する巻雲の一つの形状である。全世界の航空機の運航による線状の飛行機雲は、地球の雲量を増加させており、小さい正の放射強制力を引き起こすと推定されている。

### 自然変化による放射強制力

自然の強制力は、太陽の変化と爆発的な火山噴火により生起する。太陽放射量は、工業化時代に徐々に増加し、小さい正の放射強制力を引き起こした（FAQ2.1 図 2 参照）。これは、太陽放射の 11 年周期の変化に追加されるものである。太陽エネルギーは、気候システムを直接加熱するばかりでなく、成層圏オゾンのような幾つかの大気中の温室効果ガスの量に影響を及ぼすことができる。爆発的な火山噴火は、成層圏中の硫酸塩エアロゾルの一時的な増加を通して、短期間（2～3 年）の負の強制力をもたらすことがある。最後の大きな噴火は 1991 年（ピナトゥポ火山）であり、それ以来今まで成層圏は、火山噴火の影響を受けていない。

太陽放射変化と火山に対して見積もられた放射強制力の、今日と工業化時代の初期の間の差は、人間活動から見積もられた放射強制力の差と比べて、どちらも非常に小さい。従って、今日の大気では、現在と将来の気候変化に対する人間活動に伴う放射強制力は、自然過程による変化に起因すると見積もられる放射強制力よりずっと重要である。

### 第3章 観測結果：地表面及び大気中の気候変化

#### 概要

世界の平均地上気温は、過去100年間（1906～2005年）で線形の長期変化傾向（トレンド）を推定すると、 $0.74 \pm 0.18^\circ\text{C}$ 上昇した。最近50年間の昇温率は、過去100年間の約2倍となっている（10年当たり  $0.13 \pm 0.03^\circ\text{C}$  対 10年当たり  $0.07 \pm 0.02^\circ\text{C}$ ）。陸上と海上で平均した世界の平均気温は、さまざまな均一性の問題を、それぞれ独自に補正している三つの異なる推定値から求められている。1901～2005年の期間について、これらの推定は不確実性の範囲で一致しており、最近の上昇率も同様の値を示している。トレンドは線形ではなく、測器による観測が始まった最初の50年（1850～1899年）から最近の5年（2001～2005年）までの昇温は、 $0.76 \pm 0.19^\circ\text{C}$ だった。

2005年は観測史上最も気温の高い2年のうちのひとつであった。測器による観測が始まって以来、世界の平均地上気温が最も高かったのは、1998年と2005年である。一つの推定では1998年が最も気温が高く、残りの二つの推定では2005年の方がわずかに高かった。2002～2004年の3年は、1850年以降で、3番目、4番目、5番目に気温の高い年だった。最近12年間（1995～2006年）のうち、1996年を除く11年は、1850年以降の記録で、高い方から12位の記録に入っている。1998年は大規模な1997～1998年エルニーニョ現象の影響で地上気温が高くなったが、2005年はこのような強い偏差はなかった。2006年の気温は過去5年の平均と同程度である。

陸域は海洋よりも速く昇温している。陸域も海洋域も昇温しており、海洋では海面水温も夜間の海上気温も昇温している。しかし、世界全体でみると、陸上の地上気温は、1979年以後、海洋の2倍の速さで上昇している（陸上：10年当たり  $0.27^\circ\text{C}$ 以上 対 海洋：10年当たり  $0.13^\circ\text{C}$ ）。また、北半球の気温は、冬（12～2月）から春（3～5月）にかけて大きく上昇している。

気候の温暖化に伴って極端な気温の発生も変化している。データのある陸域の70～75%で、中緯度では広く霜の降りる日が減少するとともに、極端な高温の増加や極端に寒い日の減少がみられる。最も特徴的な変化は、寒い夜（1961～1990年を基準として最も低温の10%）の出現頻度が、1951年から2003年にかけて減少していることである。暑い夜（1961～1990年を基準として最も高温の10%）はより頻発している。日較差は、1950年から2004年にかけて、平均で10年当たり  $0.07^\circ\text{C}$ の割合で減少している。しかし、1979～2004年の期間は、最高気温と最低気温が同様の割合で上昇しているので、日較差はほとんど変化していない。2003年夏のヨーロッパ西部・中部における記録破りの熱波は、近年

のひときわ顕著な極端現象の例である。その夏（6～8月）は、1780年頃に比較可能な形で測器観測が始まって以来最も暑く（以前の記録である1807年よりも1.4℃高い）、少なくとも1500年以降で最も暑かった可能性が非常に高い。

**近年、各海洋の海面水温は、すべての緯度で非常に明瞭に昇温している。**大西洋では、両半球で昇温に違いがある。太平洋では、エルニーニョ現象や、赤道対称の太平洋十年規模変動による中断がある。一方、インド洋では着実に昇温している。これらの特徴が、海面水温の地域的な昇温率の違いをもたらし、ひいては大気循環に影響が及ぶ。

**都市のヒートアイランドの効果は実際にあるものの、局地的であり、大規模スケールのトレンドには影響しない。**最近の多くの研究が示すように、半球規模や大陸規模でみる限り、（1950年以降の）陸上気温の記録に、都市化や土地利用の変化が及ぼす効果は無視できる。なぜならば、実際にあるとはいえ局地的な効果は、用いられるデータセットの中で無効となるか補正の対象となってしまふからである。いずれの場合でも、これらの効果は、海面水温の記録には現れない。都市のヒートアイランドの効果が、降水量や雲や日較差にも変化をもたらすことを示唆する証拠が増えている。それは、汚染物質の濃度が低くなるなどの週末に現れる効果のために、「週末効果」として検出される。

**北極域の平均気温は、過去100年の世界の平均気温の上昇率のおよそ2倍の速さで昇温している。**北極域の気温には大きな十年規模の変動がみられる。1920年代の後半から1950年代の前半にかけては、現在と同程度の温暖期が比較的長く続いたが、空間分布は近年の温暖化とは異なっていた。

**1958～2005年における下部対流圏の昇温率は、地上気温の昇温率よりわずかに大きい。**高層気象観測用ラジオゾンデの記録は、地上の観測記録に比べると空間的に極めて不十分である。特に熱帯では、多数の記録に負のバイアスが含まれている可能性が非常に高いことを多くの証拠が示唆している。1979年以降の衛星マイクロ波探査計（MSUや改良型マイクロ波探査計（AMSU））の測定から推定された対流圏の気温トレンドには、手法によって相違がみられる他、説明のつかない誤差が含まれている可能性が高いものの、気温トレンドの推定値は、衛星の交代、軌道縮小、（日射の効果に伴う）現地通過時刻のドリフトの修正を通じて改善され（データセット間の違いが少なくなり）つつある。MSUチャンネル2データへの成層圏の影響を考慮すれば、衛星による対流圏の気温の記録は地上気温のトレンドとおおむね一致する。1979年以降の世界の地上気温の昇温の（データセットの違いによる）幅は、10年当たり0.16～0.18℃で、MSUによって推定された対流圏気温の上昇率である10年当たり0.12～0.19℃とほぼ匹敵する。しかし、対流圏の昇温は地上より少し大きく、また成層圏のはっきりした寒冷化の影響もあって、圏界面高度も上昇した可

能性が高い。

**下部成層圏は1979年以來、寒冷化している。**高層観測用ラジオゾンデや衛星(MSUチャンネル4)や再解析による推定は量的にほぼ一致して、1979年以降、下部成層圏が10年当たり0.3~0.6°Cの割合で寒冷化していることを示唆している。1958年にさかのぼる、より長期の高層観測用ラジオゾンデの記録でも寒冷化がみられるが、気温の低下率は、1958年から1978年にかけてよりも1979年以降の方がかなり大きい。ラジオゾンデの記録は、まだ考慮できていないラジオゾンデの変化のため、成層圏の寒冷化を過剰に見積もっている**可能性が高い**。大きな火山噴火に続いて成層圏の昇温が起こったため、成層圏の気温トレンドは直線的ではない。

**1900~2005年の降水量は、一般的に北緯30度以北の陸上で増加した。**しかし、**熱帯では1970年代以降、減少傾向が卓越している。**北緯10~30度では、降水量が1900年から1950年代にかけて顕著に増加したが、1970年頃以後は減少している。北緯10度から南緯10度にかけての熱帯地方では、特に1976/1977年以後、降水量が減少する傾向がみられる。熱帯の値が世界平均を支配している。北米東部と南米東部、ヨーロッパ北部、北・中央アジアでは、かなり湿潤化の傾向がみられ、サヘル、地中海、アフリカ南部、南アジアの一部では、乾燥化の傾向がみられる。降水量変化の分布は、気温変化に比べて場所や季節的による変動が大きい。しかし、降水量が著しく変化する場所では、測定された気流の変化とよく合う。

**大雨の頻度は大いに増加した。**大雨の頻度(例えば95%パーセンタイル)は、多くの陸域で、総降水量が減少している地域でも、増加している**可能性が高く**、気候の温暖化や観測された水蒸気量の増大とよく合う。(再現期間が50年に1回の)よりまれな現象もまた増加している。しかし、このようなトレンドが信頼できるか検証するほど十分なデータが存在する地域は、ほんのわずかしかない。

**干ばつは、1970年代以降、特に熱帯や亜熱帯でより一般的になっている。**広い範囲で干ばつを表すしきい値を超えたのに伴い、より厳しく、より長期間にわたる干ばつが観測された地域が過去30年で拡大した。Palmer Drought Severity Index (PDSI)の形で定量化される、陸上の降水の減少と蒸発散を増大させる昇温や乾燥が、干ばつの発生地域拡大に寄与する重要な因子である。干ばつが発生した地域は、特に熱帯の海面水温の変化とそれに関連した大気循環及び降水の変化に主に決定付けられるように見える。米国西部では、雪塊氷原が消えたことに続く土壌水分量の減少も干ばつに寄与する因子の一つのようである。オーストラリアやヨーロッパの最近の干ばつについては、異常高温や熱波に伴って発生していることから、地球温暖化と直接的に関連していることが推測される。



**対流圏の水蒸気は増加している。**陸上や海上の高温に深く関連して、1976年以後、地上の比湿は次第に増加している。世界の海上における気柱内の総水蒸気量は、海面水温の分布の変化や量の変化、そして相対湿度がほぼ一定であることと一致して、1988年から2004年にかけて10年当たり $1.2\pm 0.3\%$ の割合で上昇した。海面水温と強い相関があることから、気柱内の総水蒸気量が1970年以降に4%増加したことが示唆される。対流圏上部の比湿にも、1982年から2004年にかけて同様の上昇トレンドが検出され、これにより温室効果がかなり強まった。

**「地球薄暮化」は世界全体でみられる現象ではなく、1990年以後は収束してきた。**報告されてきた、1970年から1990年にかけての、地球表面に到達する太陽放射の減少は、都市に偏っており、符号は反転してきた。観測記録はまばらであるが、多くの場所では、雲量の増加、雲の性質の変化、及び大気汚染（エアロゾル）の増加に伴い、特に1970年から1990年にかけて蒸発計の蒸発量が減少した。しかし、そのような場所の多くでは、実際の蒸発散量が蒸発計で測定された蒸発位に近くなるにつれて、降水量の増加で土壌の水分量が増えるのに伴い、地表面の水バランスから推測される実際の蒸発散量は増加する。ゆえに、蒸発散量を決定するにあたっては、太陽放射の減少と地上降水量の増加がトレードオフの関係にあるが、一般的には後者の方が卓越する。

**雲はエルニーニョ南方振動（ENSO）の影響を受けて変化し、陸と海では逆の変化がみられる。**1950年代以降、広い範囲で（しかし遍在的ではない）、雲量の増加と同時に、陸上の日較差が減少している。海上における全雲量や下層雲の変化は、地上観測と衛星観測とでは結果が一致しない。しかし、1980年代から1990年代にかけての大気の上端における放射の変化は、一部はエルニーニョ現象に関連し、熱帯の上層雲量の減少と関連しているようにみえる。また、この放射の変化は、地上のエネルギー収支と観測された海洋貯熱量の変化と関連している。

**大規模な大気循環は明らかに変化している。**大気循環の変動性や変化は、比較的少数の大規模なパターンによっておよそ説明される。ENSOは、明瞭でないときもあるものの、世界規模の年々変動において卓越するモードである。太平洋十年規模振動（PDO）の位相の変化に関連した1976/77年の気候シフトや、より頻繁に起こるエルニーニョ現象は、多くの地域、特に熱帯モンスーンに最も影響を与えてきた。例えば、北米大陸では、ENSOや太平洋・北大西洋パターン（PNA）に関連した変化のため、東部で雲が多く湿潤になる一方、西部では東部よりも温暖になるような、大陸規模の対照的な変化がみられた。20世紀に太平洋域では、循環が弱まる時期（1900～1924年、1947～1976年）と、循環が強まる時期（1925～1946年、1976～2005年）の数十年周期変動が明瞭だった。大西洋の数十

年周期の変動は、大西洋数十年周期振動（AMO）として、大気と海洋のいずれにおいても明らかである。

**中緯度の偏西風は両半球でおおむね強まっている。**大気循環の変化は、主に中緯度の偏西風の緯度帯平均に関連する「環状モード」として観測される。偏西風は、大西洋や南半球の極前線ジェット気流の極方向への移動と、低気圧経路の活動の強まりを伴い、ほとんどの季節で1960年代から少なくとも1990年代の半ばまで強まった。これらは対流圏や成層圏下部における冬季の極渦の強化傾向を伴っている。月の時間規模では、南半球環状モードや北半球環状モード（それぞれSAMとNAMと呼ぶ）及び北大西洋振動（NAO）は、温帯の変動で卓越するパターンである。NAMとNAOは密接に関連している。北半球の偏西風は、NAOやNAMの変化の一部として、1960年代から1990年代に強まったものの、その後は平年並に戻った。北半球の、海洋から大陸への偏西風は変化し、特にヨーロッパでは、冬季に観測された低気圧の経路の変化や、それに関連した降水量や気温偏差のパターンの変化の主な原因となる。南半球では、SAMが1960年代から現在まで強化しており、南極半島での強い昇温やいくらかは南極大陸の一部の寒冷化に関連している。風や有義波高の解析により、再解析に基づいて明らかになった、1990年代後半までの北半球の温帯における低気圧の活動度の増加が裏付けられる。

**1970年代以降、熱帯低気圧は強まった可能性が高い。**熱帯低気圧についての変動は、ある海域における増加がしばしば別の海域での減少を補うような形の、数や経路の変化として現れる。そのような熱帯低気圧、ハリケーンや台風の変動では、ENSOや十年規模の変動が卓越している。熱帯の雷雨や熱帯低気圧の発達に影響を与える海面水温等の重要な変数には明瞭なトレンドがある。世界的にみて、ハリケーンの寿命がより長くなるとともに強度が増すにつれ、その潜在的な脅威に、1970年代中期以降かなりの上昇傾向があると推定されている。そして、その傾向は熱帯の海面水温と非常に強い相関がある。ほとんどの地域でわずかに熱帯低気圧の数や活動日数が減っているにもかかわらず、カテゴリ4と5に達するハリケーンの数と割合が、1970年代以降に全世界的に大幅に増加したことで、この関係は、さらに強力に裏付けられた。最も増加の大きい地域は、北太平洋、インド洋及び太平洋南西部であった。しかしながら、2005年の空前の記録を頂点として、北大西洋のハリケーン数についても、最近11年のうち9年で平年（1981～2000年の平均値に基づく）以上になっている。さらに、ブラジル沖で2004年3月に南大西洋で初めての熱帯低気圧が発生した。

**気温の上昇と、観測された雪氷圏や海洋の変化はよく一致している。**20世紀には、氷河や小さい氷帽（南極やグリーンランドは含まない）の質量や面積の減少が、ほぼ世界的にみられ、これは観測された地上気温の変化と一致していた。積雪面積は北半球の多くの地

域で減少し、海氷面積は北極域の特に春と夏に減少し（第4章）、海洋が昇温し、海面水位が上昇している（第5章）。

## よくある質問と回答

### FAQ3.1： 地球の気温はどのように変化しているのか？

過去157年間の測器による観測結果によれば、地上気温は、重要な地域的変動を伴いつつ、世界的に上昇している。世界平均すると、20世紀の昇温は、1910年代から1940年代にかけて(0.35℃)と、1970年代から現在まで(0.55℃)のより強い昇温の2段階で起こっている。ここ25年で昇温率が増加しており、記録上の最も暖かい12年のうちの11が、過去12年間で起こった。上層については、1950年代の後半以来の世界的な観測結果によれば、対流圏(高度約10km以下)が地表よりわずかに大きな割合で昇温している一方、成層圏(高度約10~30km)が1979年以来著しく降温している。これは物理的な予想やほとんどのモデル結果と一致する。海洋の昇温、海面水位の上昇、氷河の融解、北極地方での海氷後退及び北半球における積雪面積の減少から、地球温暖化が起こっていることは明白である。

一つの温度計で世界の気温を測定することはできない。代わりに、毎月の世界平均気温を算出するために、世界の陸域の数千の観測点での毎日の気温の測定値と、海上を移動する船からの、数千以上の海面水温の測定値が結合される。時間とともに一貫した変化を得るために、実際は、利用できるデータ数の変化に対して影響を受けにくい偏差(おのおのの観測点の気候値からのずれ)で主に解析を行う。現在では、1850年から現在までの記録を使うことができる。しかし、データの被覆率は19世紀の後半には全世界というにはあまりに少なく、南極大陸で観測が始まった1957年以後にかなり改善され、1980年頃に衛星観測が始まって以後は最良の状態となった。

世界平均として表したとき、地上気温は過去100年間(1906~2005年)に約0.74℃上昇した(FAQ3.1 図1参照)。しかしながら、昇温の割合は常に一定ではないし、季節や場所によっても異なっている。1850年から1915年頃にかけては、自然変動に起因する上昇や下降(一部は貧弱なサンプリングにも起因する変化もある)の他に、大きな世界的な変化はみられなかった。世界平均気温は、1910年代から1940年代にかけて(0.35℃)上昇し、その後は1970年代にかけて幾分(0.1℃)低下した後は、2006年末までは急激に(0.55℃)上昇した(FAQ 3.1 図1)。この期間中最も気温が高かったのは1998年と2005年である(統計的には区別がつかない)。最も暖かい12年のうちの11が、過去12年間(1995~2006年)で起こった。特に1970年代以降、一般に海上よりも陸上で昇温が大きい。季節的には、冬半球の方がわずかに昇温は大きい。都市や市街地域では、(都市のヒートアイランドの効果と呼ばれる)さらなる昇温が起こっているが、空間的には限られている。世

界の気温データから影響を受けている観測点をできるだけ多く除去し、誤差幅（図の淡灰色のバンド）を広げることによって、都市のヒートアイランドの効果を考慮に入れることができる。

1901年以降、一部の地域で寒冷化がみられた。最も顕著なのは、グリーンランド南部付近の北大西洋北部である。この期間の昇温は、アジアや北米大陸の北部の内陸部で最も著しい。しかし、それらの地域は年々変動が大きいいため、昇温のシグナルが最も明瞭なのは中・低緯度の一部、特に熱帯の海洋である。1979年以降の気温のトレンドを示している

**FAQ 3.1** 図1の左下図では、太平洋にエルニーニョに関連する温暖化と寒冷化の分布がみられる。

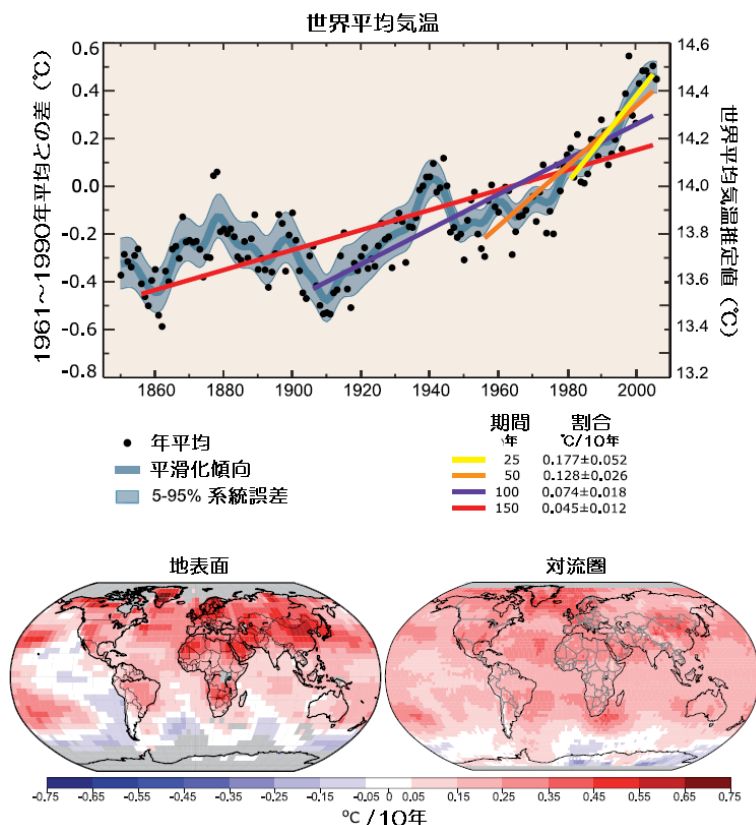
世界の多くの地域（北米大陸の一部、南米大陸南部、ヨーロッパ、アジア北部及び東部、アフリカ南部、オーストラリア）では、最近、日別気温の極値の長期変化の解析が可能となった。特に1950年以降、これらの記録は、非常に寒い昼や夜の数次第に減少し、極端に暑い昼や夜の数が増加していることを示している（FAQ 3.3 参照）。両半球の中・高緯度のほとんどの地域で霜のない期間が長くなっている。北半球では春の訪れがかなり顕著に早まっている。

上記で述べた地上データに加え、1958年以降は陸上でかなりの被覆率となったラジオゾンデと、1979年以降は衛星データから、上空の気温の測定記録が作られている。すべてのデータは、必要に応じて、観測手法や測器の変化の影響を補正している。マイクロ波の衛星データを用いて、対流圏（地上から約10km上空まで）と下部成層圏（約10~30km）を含む厚い大気の“衛星気温記録”が作成されてきた。1979年以降のさまざまな衛星に搭載された13の測器の相互校正手法を改良するとともに、衛星高度や観測時間の変化を補正した新しい解析結果が幾つか得られたものの、トレンドにはいくらかの不確実性が残っている。

1950年代後半以降の世界的な観測について利用可能なすべてのデータの最新版によると、対流圏の昇温の割合は、地上に比べて幾分大きい。一方、1979年以降、成層圏は顕著に寒冷化している。これは、温室効果ガスの増加に伴い、対流圏の昇温と成層圏の降温が引き起こされるとするモデル実験の結果や物理学的な予想と一致する。また、オゾン層破壊もまた、成層圏の降温にかなり寄与する。

観測された地上気温の上昇と一致して、川や湖が結氷する期間が短くなった。加えて、20世紀は、氷河の質量や面積がほぼ世界的に減少した。グリーンランドの氷床の融解が最近明らかになり、北半球の多くの地域では雪氷面積が減少してきた。北極では、すべての

季節で海氷の厚さや面積が減少し、特に春や夏には激減している。海洋は昇温し、海水の熱膨張や陸氷の融解のため、海面水位が上昇している。



FAQ3.1 図1 上段：観測された年間の世界平均気温（黒点）（Had CRUT3 データセットより）及びデータの単純な近似。左縦軸は1961～1990年平均からの偏差を、右縦軸は気温の推定値（°C）を示す。直線近似は過去25年（黄）、過去50年（橙）、過去100年（紫）、過去150年（赤）の値を与えており、それぞれ1981～2005年、1956～2005年、1906～2005年、1856～2005年の期間である。近年の、より短い期間の方が傾きが急で、気温上昇の加速を示していることに注意。青い曲線は、十年規模の変動をみるために平滑化された曲線である。変動に意味があるかどうかを考慮するため、10年間で5～95%の誤差幅（淡灰色）を示している（従って、年ごとの値はこれらの幅を超越する）。20世紀における放射強制力を推定することによって得られた気候モデルの結果（第9章）によれば、1915年ころまでの期間はほとんど変化がなく、20世紀初頭の変化のほとんどは、太陽放射の変化、火山活動などの自然の変化が大きく寄与していることが示唆される。1940年頃から1970年頃までは、第二次世界大戦に続く工業化によって増加した北半球の大気汚染によって寒冷化し、1970年代中頃以降、二酸化炭素等の他温室効果ガスの増加に伴う気温の上昇が観測されている。

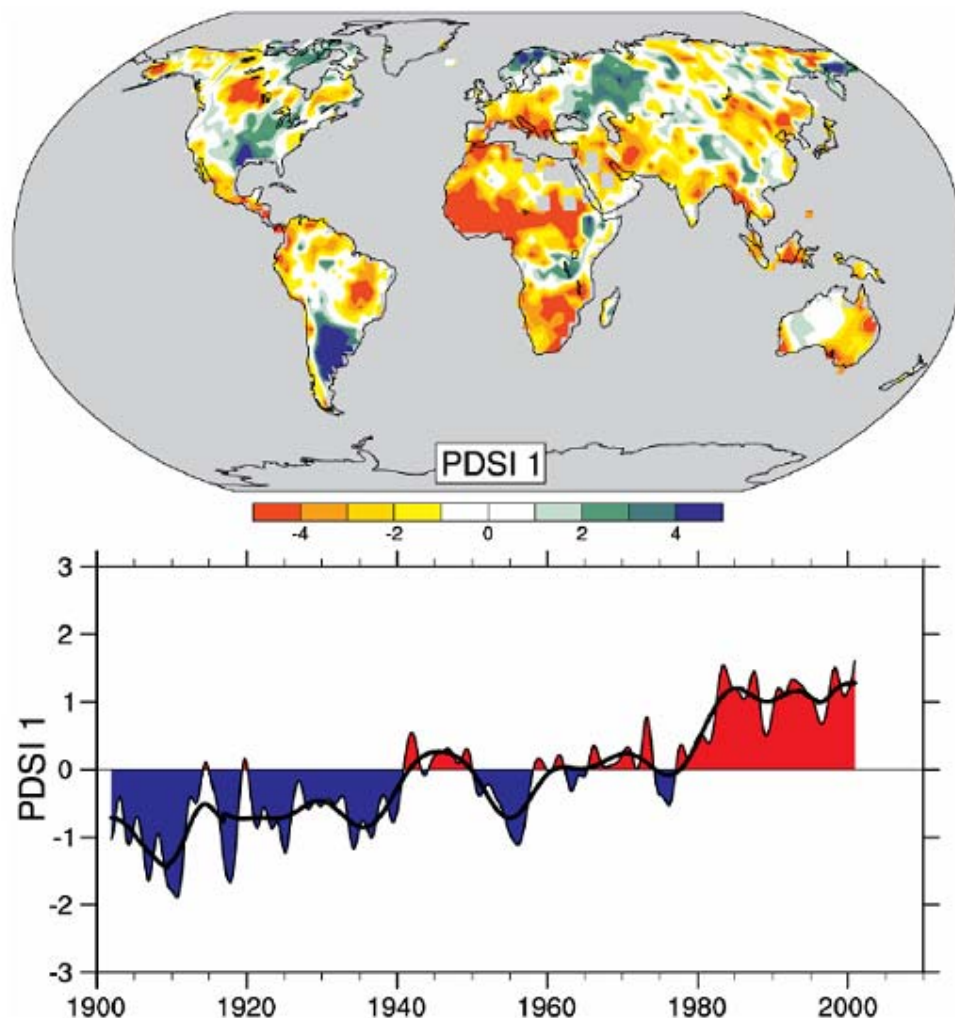
下段：地表（左）及び対流圏（地上から高度10kmまでの範囲。衛星による観測。）（右）において推定された、1979～2005年の直線的な気温上昇傾向の分布。灰色の区域は、データが不完全な地域。衛星による対流圏の記録では、空間的に均一な気温上昇を示している。一方、地表付近では、陸上と海洋の関係により明確に表れていることに注意。

### FAQ3.2： 降水量はどのように変化しているのか。

観測結果によると、降水の量、強さ、頻度とタイプが変化している。降水のこれらの特徴は、一般的に大きな自然変動の現れであり、エルニーニョ現象と、北大西洋振動 (NAO) のような大気循環のパターンの変化がこれらの変動に相当な影響を及ぼす。1900年から2005年にかけて、降水量にはっきりした長期傾向がみられたのは以下の地域である：北米東部と南米東部、ヨーロッパ北部、北/中央アジアではかなり湿潤化し、サヘル、アフリカ南部、地中海、南アジアでは乾燥化の傾向がみられる。北部地域では今や、降水量のうち、雪よりむしろ雨として降る量が増えている。降水量の総量が減少した場所でさえ、大雨現象が広範囲にわたり増加している。これらの変化は、特に低緯度の世界の海洋の昇温に起因する大気中の水蒸気の増加に関連する。干ばつと洪水の両方の発生が増加している地域も幾つかある。

降水は、雨や雪等の、雲から降る液体あるいは固体の水の総称である。降水は断続的で、降水が起きたときの特徴は、温度と天気状況に強く依存する。天気状況により、風と地表面からの蒸発を通じた水蒸気の供給と、その水蒸気がいかに低気圧内で集まり、雲を形成するのかが決まる。上昇した空気は膨張して冷却されるため、水蒸気が凝結して降水が形成される。上昇気流ができるのは、山で上昇する場合、暖かい空気が冷たい空気に乗り上げる（温暖前線）場合、冷たい空気が暖かい空気の下に潜りこむ（寒冷前線）場合、地表面の局地的な加熱によって対流が起きる場合、その他の天気や雲システムから生じる場合がある。それゆえに、これらのいずれかが変化すれば、降水量は変化する。降水量観測の分布はまばらな傾向があるので、蒸発の変化のおおまかな推定値と降水量を用いて計算した、土壌水分量の指標である Palmer Drought Severity Index (FAQ 3.2 図 1 を参照) によって、降水量の全体的なトレンドを示す。

人為起源で増大した温室効果のために加熱が増えた結果、(洋上及び湿った地面の上がいっつもそうであるように) 地表面に適度な水分があれば蒸発は増加する。蒸発熱は、空気を暖めるよりむしろ空気を湿らせるために働くため、地表面の水分は「エアコン」として効果的に機能する。この結果、夏に温暖で乾燥か、冷涼で湿潤のどちらかになるという傾向がしばしば観測される。従って、北米東部及び南米東部が湿潤化した場合 (FAQ3.2 図 1)、他の場所よりも気温上昇は小さかった (FAQ3.3 図 1 の暖かい日の変化を参照)。しかし、冬の大陸北部では、より暖かくなることによって大気の水蒸気量を保持する能力が高まるため、気温が高くなるにつれて降水量が多くなる。しかし、一般に、降水量が幾分増加したこれらの地域では、FAQ3.2 図 1 のように、降水量の変化がそれほど明白でなかったために、温度の上昇 (FAQ3.1) で乾燥化が進んだ。



FAQ3.2 図1 1900~2002年の、月ごとのPalmer Drought Severity Index (PDSI)の空間分布の第一主成分(上段)。PDSIは、有名な干ばつの指標で、以前の降水量と、(気温に基づいて推定された)大気中への水分移動量を水文収支システムに組み込むことで算出される、(各地点における平均状態からの)表面水分の累積欠如量である。下段の図は、1900年以降、この分布の符号と強さがどのように変化したかを示したものである。下段のグラフの値が正(負)のときに、上段の図の赤やオレンジの区域は平均より乾燥化(湿潤化)、青や緑の区域は平均より湿潤化(乾燥化)する。時系列は、おおまかには長期変化傾向と一致しており、この分布及び分散で、1900~2002年のPDSIの直線的傾向の67%の要因となっている。従って、例えば特にサヘル地域などのアフリカの広範囲の干ばつの強化をよく示している。また、特に北米及び南米の東部、ユーラシア北部で湿潤化していることに注意。Daiら(2004b)から転載。

気候が変動するにつれて、幾つかの直接的な影響のため、降水の量、強さ、頻度とタイプが変化する。昇温によって地面は乾燥し、世界中の多くの場所（FAQ 3.2 図 1）で観測されるように、干ばつの潜在的な発生率と深刻さが増した。しかし、確立した物理法則（クラウジウス-クラペイロンの関係）によれば、気温が 1°C 上昇するごとに大気が水蒸気量を保持できる能力はおよそ 7% 増加する。相対湿度の観測結果のトレンドは不明だが、相対湿度が地表から対流圏で全体的にほぼ一定であることから、気温の上昇に伴い水蒸気が増加したことが示唆される。海面温度の変化に基づく推定によれば、20 世紀中に洋上大気中の水蒸気がおおよそ 5% 増加した。降水は主に、大気に含まれる水蒸気を供給する気象システムにより生じるので、水蒸気の増加のために、降水強度の増加と大雨や大雪の危険性が一般的に増加する。温暖化に伴い水蒸気が増加することによって、年間総降水量がわずかに減少するときでもより強い降水現象が起き、全体的な降水量が増加する場合はさらに強い降水現象が予想されることは、基本的な理論、気候モデルシミュレーション及び経験的な証拠で確認されている。従って、気候の温暖化に伴い、雨が降っていないところでは干ばつの、降っているところでは洪水の両方の危険性が増加するが、発生する場所や時刻はそれぞれ異なっている。例えば、ヨーロッパでは 2002 年夏に、広範囲にわたる洪水が起こったが、1 年後の 2003 年には、記録破りの熱波と干ばつに見舞われた。洪水と干ばつの分布とタイミングは、特に熱帯や環太平洋の中緯度の多くの国々で、エルニーニョ現象の周期に最も大きな影響を受ける。

エアロゾルによる汚染が地表面を覆い、直射日光が遮られる地域では、蒸発の減少によって大気への全体的な水分の供給が抑制される。従って、水蒸気量の増加に伴い、より強い降水が起きる可能性が増加するとしても、大気の水蒸気を再び蓄えるのに時間がかかるので、強雨の持続時間と頻度は減少するかもしれない。

降水の特徴の局地的・地域的な変化は、エルニーニョ現象や北大西洋振動（NAO：冬の北大西洋上空の偏西風の強さの指標）によって決まる大気循環のパターンやその他の変動のパターンにかなり依存する。これらの観察された循環の変化の中には、気候変動と関係しているものもある。低気圧の経路の変化に伴って、湿潤化する地方もあれば、しばしば隣接する地域では乾燥化も起き、変化は複雑なパターンを示す。例えば、ヨーロッパ地方では、1990 年代には正の NAO が明瞭だったので、ヨーロッパ北部で湿潤化し、地中海とアフリカの北部では乾燥化した（FAQ 3.2 図 1）。1960 年代後半から 1980 年代後半に明瞭だったサヘルにおける長期間の干ばつ（FAQ 3.2 図 1）は、当時ほど顕著ではないものの、現在も続いており、大気循環の変化を通して、太平洋、インド洋及び大西洋の熱帯の海面水温パターンの変化に関連している。干ばつは、アフリカで広範囲にわたって発生し、熱帯地方と亜熱帯地方でよく起こるようになった。



気温が上昇すると、特に雪シーズンの初めと終わりである秋と春、また気温が 0℃に近い地域で、降水が雪よりもむしろ雨となる可能性が高まる。このような変化は、特に北半球の中・高緯度の多くの場所でみられ、雨は増えたものの、雪塊氷原が減少したため、結果的に、最も必要とされる夏の水資源が減少した。それでも、降水には、分布がまばらで、断続的という性質があり、このため観測された変化のパターンは複雑である。長期的な記録によれば、降水のパターンが年々変動することや、例えばエルニーニョ現象の影響があると、複数年続く干ばつでさえ大雨の年のため中断されることがはっきり分かる。米国南西部では、干ばつと平年よりも少ない降雪量が 6 年間観測された後、2004 /2005 年に湿潤な冬となったことがその例になるかもしれない。

### FAQ3.3 : 熱波、干ばつ、洪水そしてハリケーンのような極端現象に変化があったか？

1950 年以來、熱波の発生数は増加し、そして高温の夜の数が広範囲に増加してきた。より温暖な環境になるにつれて、蒸発量が増加してきた一方で、陸上の降水量がわずかに減り、干ばつの影響を受ける地域の範囲も増加した。概して洪水をもたらすような日単位での大雨の数は増加したが、すべての地域で増加したというわけではない。熱帯低気圧やハリケーンの頻度は年ごとに著しく変化するが、1970 年代以降、強度と持続期間ともに著しく増加した形跡がみられる。温帯での低気圧の進路と強度の変動は、北大西洋振動のような大気循環特性の変動を反映している。

世界の中では、さまざまな種類の極端現象の変化の兆候がみついている地域がある。「異常」については一般的に発生頻度の値が 1%、5%そして 10%未満となる場合（一方の極端について）、もしくは 90%、95%、そして 99%を超過した場合（もう一方の極端について）とみなされている。高温の夜もしくは暑い日については気温の 90 パーセンタイルを超過した場合とされている（次に議論）。一方で低温の夜、もしくは寒い日は、10 パーセンタイル以下になったときを指す。大雨については日降水量が 95 パーセンタイル（豪雨は 99 パーセンタイル）のときと定義される。

サンプルとして抽出されている陸域では、最近 50 年で、低温の夜の年発生数は著しく減少、高温の夜の年発生数は著しく増加してきた（FAQ 3.3 図 1）。寒い日の日数の減少と高温の日の日数の増加については、現象の広がり大きい一方で概してあまり顕著ではない。最低、最高気温分布については、世界的な温暖化と一致して、値がより高くなっているだけでなく、最近 50 年の異常高温と比較して、寒い方の極値の方がより昇温している（FAQ 3.3 図 1）。異常高温がより多く発生していることから、熱波の発生数が増加していることがうかがえる。さらに裏付けとなる兆候として、中緯度地域で平均的に温暖化が進むことに伴い、霜の降る日がほとんどなくなったという傾向が観測されている。

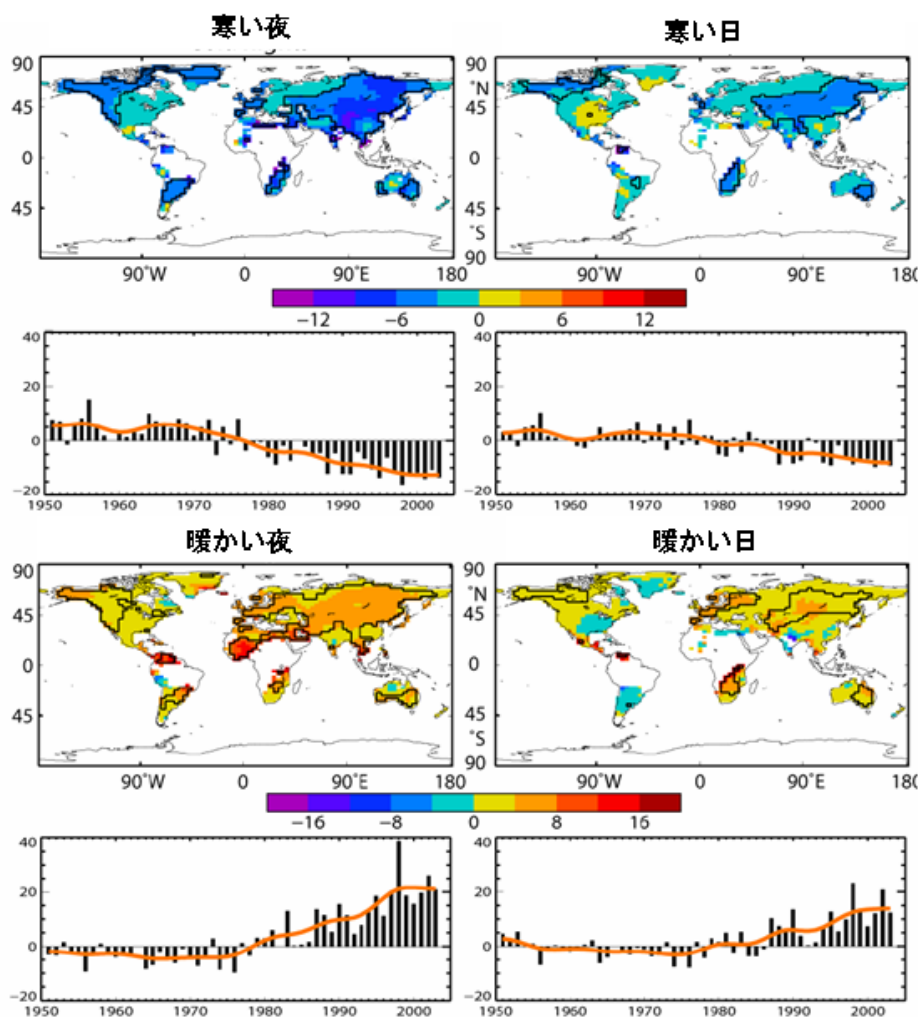
極端な現象の変化を著しく示すものとして、平均降水量が増えていない場所においても、最近 50 年で中緯度帯での大雨頻度が増加したことがある（FAQ 3.2 参照）。豪雨については、同様に増加している傾向にあると報告されているが、調査結果が得られた地域は少ない。

干ばつは、それが長期的な現象のため、比較的検知しやすい。干ばつに関する指数、指標は多くあるが、多くの調査では、月総降水量や平均気温を組み合わせた、Palmer Drought Severity Index（PDSI）と呼ばれる指標を使用している。PDSI は 20 世紀半ばから計算されており、この指標から 1950 年中頃以降多くの北半球の陸域で乾燥傾向が進んでいることが分かる。特に、ユーラシア南部、アフリカ北部、カナダ、アラスカの多くの地域で広く乾燥しており（FAQ 3.2 図 1）、北米東部及び南米東部では逆の傾向が広がっている。南半球の陸域については、1970 年代が湿潤である一方、1960 年代、1990 年代は比較的乾燥していた。そして 1974 年から 1998 年までは乾燥傾向にあった。ヨーロッパでの長期にわたる記録からは、20 世紀全体について重要な傾向はほとんど読み取れない。1950 年代以降陸面で降水が減少していることがこの乾燥傾向の主要な原因となっているようであるが、ここ 20～30 年の地表面気温上昇も寄与しているようである。ある調査によると、エルニーニョ南方振動に伴う陸域での降水の減少や、主として地表面の昇温の結果として乾燥域が増加することにより、地球全体で（PDSI が -3.0 以下の地域と定義される）非常に乾燥した陸域の面積が、1970 年代以降で 2 倍になった。

熱帯低気圧とハリケーンの発生頻度と強度の変化については、大きな自然変動の中にまぎれてしまっている。ENSO は世界中の熱帯低気圧の位置と活動に大きな影響を与えている。世界的にみて、1970 年代中期以降に低気圧の持続期間がより長くなり、またその強度が強まるにつれ、ハリケーンの潜在的な脅威はかなりの上昇傾向にあると評価されている。そして、その指標は熱帯の海面水温と非常に強い相関がある。ほとんどの海盆で低気圧の数や活動日数がわずかに減っているにもかかわらず、1970 年代以降、低気圧の数と割合が世界的に増加したことによって、この関係はさらに強力に裏付けられてきた。具体的には、カテゴリ 4 と 5 のハリケーンの数が増加した。最も増加の大きい地域は北太平洋、インド洋、そして南西太平洋であった。しかしながら、2005 年の記録破りを頂点として、北大西洋のハリケーンの数も、最近 11 年のうち 9 年について平年以上だった。

地表面と対流圏上部でのさまざまな観測から判断すると、20 世紀後半に、北半球冬の低気圧の進路の極方向への移動及び活動度の増加があった可能性が高い。これらの変化は北大西洋振動と関連して起こっている変動の一部である。ジェット気流の極方向への移動と

低気圧活動の強化に伴い、対流圏及び成層圏下部の、12～2月周極偏西大気循環が強まっていることが、1979年から1990年中頃までの観測によって明らかになった。小規模の激しい気象現象（竜巻、雹、雷雨など）に関する観測事実はほとんど局地的かつ散在しており、一般的な結論を引き出すことはできない。また、これらの現象に対する一般の知識が深まり、報告を集める努力も改善されたことで多くの地域でこれらの現象が増加しているように見える。



FAQ3.3 図1 1951～2003年に観測された極端な気温の頻度の傾向（10年当たりの日数）。1961～1990年の値を基に、10パーセンタイルを（a）寒い夜、（b）寒い日、90パーセンタイルを（c）暖かい夜、（d）暖かい日とそれぞれ定義する。少なくとも1999年までのデータがあり、データ期間が40年以上存在する格子についてのみ傾向を計算している。黒線は、5%の危険率で有意である地域を囲んでいる。また、それぞれの地図の下に示している図は、地球全体の平年差（1961～1990年を基準）を年ごとの時系列として表したものの。赤い線は、十年規模の変化を表しており、長期変化傾向は、示された地球全体のすべての項目で5%の危険率で有意である。Alexanderら（2006）より転載。

## 第4章 観測結果：雪氷及び凍結した地表面の変化

### 概要

気候システムの中で、雪氷圏（雪、河川氷、湖沼氷、海氷、氷河、氷帽、棚氷、氷床、凍結した地面から成る）は地表のエネルギー収支、水循環、海面水位変化、地表面での気体の交換と複雑にからみあっている。雪氷圏は、幅広い時間スケールにわたる気候変動を重ね合わせることで、気候の変動性の自然センサーとなるとともに、気候変化を目にみえる形で示してくれる。雪氷圏は過去に、氷河期や、ヤンガードライアス期や小氷期のようなより短期間の変動といった、多くの時間スケールの大変動を経験してきた（第6章参照）。近年の氷量減少は、地上気温の上昇と関連がある。このことは、1965年から2005年にかけて、気温が世界平均の約2倍上昇した北緯65度以北の地域に特にあてはまる。

- ・ 積雪面積はほとんどの地域で減少しており、春季と夏季に顕著である。1966～2005年の衛星観測結果によれば、北半球の積雪面積は、11月と12月を除くすべての月で減少しており、1980年代後半には年平均値が5%急激に減少した。南半球においては、わずかな長期観測データもしくは代替データをみると、過去40年以上にわたり、おおむね減少しているか変化がない。積雪の減少しているところでは、気温がしばしば支配要因である。一方、積雪が増加しているところは、ほとんど降水量の増加が要因である。例えば、北半球の4月の積雪面積は、雪と気温の間のフィードバックも反映して、北緯40度から60度の4月の気温と強い相関がある。さらに北米西部の山岳地帯とスイスアルプスにおける積雪面積の縮小は、標高が低い場所で最も大きくなる。
- ・ 河川と湖沼の結氷日及び解氷日には、かなり大きな空間的変動がみられる（正反対の傾向がみられる地域もある）。北半球で、過去150年にわたる利用可能なデータを平均すると、結氷日は100年当たり $5.8 \pm 1.6$ 日の割合で遅くなっている。一方、解氷日は100年当たり $6.5 \pm 1.2$ 日の割合で早くなっている。（この章において、誤差幅は5%の信頼限界を示す）。
- ・ 衛星データによれば、1978年以来、北極の年平均海氷面積は10年当たり $2.7 \pm 0.6\%$ の割合で減少し続けている。夏季の海氷面積の減少は冬季よりも大きく、1979年以降、夏季の最小海氷面積は10年当たり $7.4 \pm 2.4\%$ の割合で減少している。他のデータは、夏季の減少が1970年付近から始まったことを示している。南極大陸における同様の観測では、年々変動が大きく、長期的な変化傾向はみられない。

- 北極海中央部における潜水艦による観測によれば、1987～1997年にかけての北極域中央部の平均海氷厚の減少は、1mに達する可能性が非常に高い。モデルによる再現実験もこれを支持し、同期間に北極の全域で0.6～0.9m以上の減少を示している。1987年以前の長期間のトレンドは明瞭でない。
- 氷河と氷帽の質量欠損は、1961～2004年にかけて、海面水位の変動に換算して年 $0.50\pm 0.18\text{mm}$ 、また1991～2004年にかけては年 $0.77\pm 0.22\text{mm}$ と見積もられる。20世紀末の氷河の消耗は、1970年以前の温暖化の影響である可能性が高い。単位面積当たりで最も大きな質量欠損（負の質量収支）は、パタゴニア、アラスカ、アメリカ北西部/カナダ南西部で観測されている。面積が大きいことに対応して、アラスカ、北極域、アジア高山地域が海面水位上昇に最も寄与している。
- グリーンランドと南極の氷床が、1993～2003年にかけての海面水位上昇に寄与した可能性が非常に高い。グリーンランド中央部では氷厚が増加しているが、海岸付近の融解の増加分はそれを上回っていた。氷床内陸部を源流域とする、グリーンランドや南極の氷河（氷流とも呼ばれる）の中には、流速が増加しているものがある。加速する氷床質量の減少は、しばしば棚氷の厚さや面積の縮小を伴ったり、あるいは氷河浮氷舌の消失が引き続いて起きた。データと技術を評価した結果によれば、グリーンランド氷床の質量収支は、1961～2003年で年間 $+25\text{Gt}\sim -60\text{Gt}$ （海面水位に換算して $-0.07\sim -0.17\text{mm}$ ）で、1993～2003年では年間 $-50\text{Gt}\sim -100\text{Gt}$ （海面水位換算で $0.14\sim 0.28\text{mm}$ ）と推定され、2005年では欠損はさらに大きい。南極氷床すべての質量収支は、1961～2003年で年間 $+100\sim -200\text{Gt}$ （海面水位換算で $-0.28\sim 0.55\text{mm}$ ）で、1993～2003年で年間 $+50\sim -200\text{Gt}$ （海面水位換算で $-0.14\sim 0.55\text{mm}$ ）である。氷河の流動の最近の変化は、南極の氷量の収支不均衡のすべてまたは大部分を説明するのに十分な大きさである可能性が高い。一方、グリーンランドの氷量の収支不均衡は、氷河の流動、降雪及び融解水の流出の変化によって十分説明できる可能性が高い。
- 北極地方における永久凍土の表層部の温度は、1980年代以降最大 $3^{\circ}\text{C}$ 上昇した。永久凍土の底面は、アラスカでは1992年以降年当たり $0.04\text{m}$ 、また1960年代以降、チベット高原では年当たり $0.02\text{m}$ に達する割合で融解している。永久凍土の変化は、地表面特性や排水機構の変化を引き起こしている。
- 北半球において季節的に土壌凍結する地域の最大面積は、1901～2002年の間に約7%減少し、春季における減少は15%に達した。また、ユーラシアにおける最深の深さも20世紀半ば以降、約 $0.3\text{m}$ 減少した。加えて、ロシアの北極域では、1956～1990

年にかけて、永久凍土上部の季節的な融解層の最大の厚さが約 0.2m 増加した。ユーラシアでは、1988～2002 年にかけて、春季に融解が始まる日と秋季に凍結が始まる日はともに 5～7 日早まった。そのため植物の生育時期が早まったが、生育期間の長さには変化はない。

- ・ まとめると、全雪氷圏は、1961～2003 年にかけて、年当たり 0.2～1.2mm の海面水位の上昇に、1993～2003 年にかけては年当たり 0.8～1.6mm の上昇にそれぞれ寄与している。1993～2003 年の上昇率の増加は、主として山岳氷河や氷帽、グリーンランド氷床の表層面の融解、並びにグリーンランド及び南極大陸氷床の部分的な流速増大に伴う質量損失の増加によるものである。氷床の変化の見積もりには、大きな不確実性があり、質量の増加・減少量に関する良い推定値はない。しかし、海面水位収支への寄与度を考慮するためだけに限れば、全雪氷圏の寄与度は、1993～2003 年に海面水位に換算して年当たり  $1.2\pm 0.4\text{mm}$  (中央値平均 $\pm$ 不確実性とガウス誤差の総和) と見積もられる。

## よくある質問と回答

### FAQ4.1： 地球上の雪氷の量は減っているか？

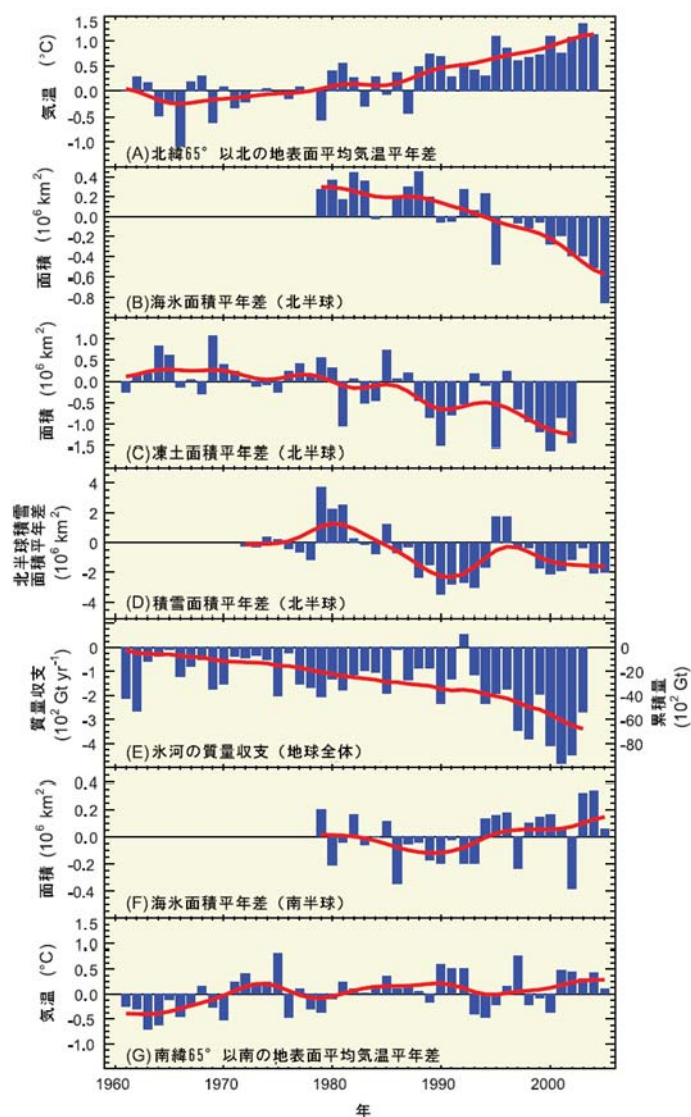
その通りである。観測結果によれば、雪氷は、一部に増大している地域やほとんど変化のない地域があるものの、世界的な規模で多年にわたり減少しており、特に 1980 年以降に顕著で、ここ 10 年はさらに大きく減少している。ほとんどの山岳氷河は縮小しつつある。春季の積雪面積の縮小は早まっている。北極域の海氷はすべての季節を通じて縮小しており、特に夏季に顕著である。永久凍土や季節的な凍土、河川、湖沼の氷の縮小が報告されている。グリーンランドや西南極の氷床の主な沿岸部、南極半島の氷河は薄くなり、このため海面水位が上昇している。氷河、氷帽、氷床が融けることによる、海面水位上昇へ及ぼす寄与度の合計は、1993～2003 年の期間で年当たり  $1.2\pm 0.4\text{mm}$  と見積もられている。

衛星による連続観測によって、地球上の大部分の季節的な積雪がとらえられ、その結果、北半球春季の積雪面積が 1966 年以降 10 年当たり約 2% の割合で減少してきたことが明らかになった。しかし、秋季や初冬にはほとんど変化がない。多くの場所で、春季の減少は、降水量が増加しているにもかかわらず起こっている。

衛星データでは、湖沼や河川、あるいは季節的な凍土や永久凍土の氷の状態に関して、積雪と同程度の信頼度で測定することがまだできない。しかし、局地的あるいは地域的な報告が多く公表されており、それらは総じて、永久凍土の昇温や永久凍土表層部の夏季に

融解する層の厚さの増加、季節的に凍結する地域の冬季の凍結深の減少、永久凍土面積の減少、河川や湖沼の結氷期間の減少を示している。

1978年以降、衛星による両極地域の海氷面積の観測が継続的に行われている。北極域では、年平均海氷面積は10年当たり $2.7 \pm 0.6\%$ 減少している。一方、夏季の海氷面積は10年当たり $7.4 \pm 2.4\%$ 減少している。南極域の海氷面積に目立った変化傾向はない。氷厚については、潜水艦による観測データが北極域中央部に限って得られており、1958～1977年と比較すると1990年代には約40%薄くなった。しかし、これは北極域全体の見積もりとしては過大である可能性が高い。



FAQ4.1 図1 極域の地表付近の気温 (A, G)、北極域及び南極域の海氷面積 (B, F)、北半球の凍土面積 (C)、北半球の積雪面積 (D) 及び氷河の質量収支 (E) の年差時系列。赤線は図Eについては、地球全体の累積氷河収支を示し、その他のグラフについては、十年規模の変動を示す。

山岳氷河や氷帽のほとんどが縮小している。この傾向はおそらく 1850 年頃から始まっている。北半球の多くの氷河は、1970 年頃の数年間はほぼ平衡状態を保っていたが、その後縮小が加速した。氷河と氷帽の融解は、1991～2004 年にかけて、年当たり  $0.77\pm 0.22\text{mm}$  の海面水位上昇に寄与した。

まとめると、グリーンランドと南極の氷床は縮小している可能性が非常に高く、1993～2003 年で、グリーンランドは年当たり  $0.2\pm 0.1\text{mm}$ 、南極は年当たり  $0.2\pm 0.35\text{mm}$  の海面水位上昇にそれぞれ寄与している。2005 年については縮小が加速していることを示す事実がある。グリーンランドや東南極の標高の高い寒冷な地域では、おそらく降雪量の増加が原因で氷厚が増しているが、氷河の流出の増大やグリーンランドでの表層の融解によるグリーンランド沿岸部や西南極の氷厚の減少分はこれを上回っている。

氷は、周囲の気候と複雑に影響しあう。そのため、特定の変化の原因は必ずしも明瞭ではない。それでもなお、その場所の気温が氷点以上であれば氷が融けることは間違いない事実である。積雪面積や山岳氷河の減少は、多くの場合、降雪量が増加しているにもかかわらず起こっており、それは気温の上昇を示唆している。同様に、積雪面積の変化は凍土や河川・湖沼の氷に影響を及ぼすが、これだけでは観測された変化を説明するのに十分ではないと思われ、これは局地的な気温変化の重要性を示している。観測された北極域の海氷の減少は、過去の循環や気温変化によって駆動されるモデルでかなりよく再現することができる。寒冷な地域の中心部にある氷床上の降雪の増加、沿岸部の表層の融解、海岸沿いの棚氷下部の融解などの観測結果はすべて温暖化と矛盾していない。これら雪氷変化が地理的に広範に起こっているという特徴は、広範囲にわたる昇温が地球全体の氷の減少の原因であることを示唆している。



## 第5章 観測結果：海洋の気候変化と海面水位

### 概要

- ・ 海洋は温暖化している。海面から700m深までの世界の海水温は、1961～2003年にかけて0.10℃上昇した。同じ期間に、海面から3000m深までの世界の海洋貯熱量も増加しており、これは世界の全地表面で平均して $0.21\pm 0.04 \text{ W/m}^2$ の割合でエネルギーを吸収したことに相当する。このことは第3次評価報告書の記述と整合している。このエネルギーの3分の2は海面から700m深までの層で吸収されている。観測結果によれば、世界全体の海洋貯熱量には、より長期の変化傾向に重なって、数年及び数十年規模のかなり大きな変動がみられる。1961～2003年の期間に比べて1993～2003年の期間の方が昇温の割合が高いが、2003年以降はいくらか降温した。
- ・ 亜寒帯緯度帯での低塩分化和熱帯・亜熱帯域表層の高塩分化を特徴とする、大規模で一貫した塩分の長期変化が1955～1998年にかけて観測されている。太平洋で低塩分化がみられる一方、大西洋やインド洋ではほぼ全域にわたって塩分が増加している。これらの長期変化傾向は、降水量の変化と整合しており、低緯度から高緯度への、また、大西洋から太平洋への大気水輸送量の増大が推定される。全世界で平均した海洋塩分の変化については、観測結果からはまだ信頼できる推定ができていない。
- ・ 海洋の主要な水塊に変化が起こっているものの、海洋循環が変化しているという明白な証拠はない。南大洋モード水や上部南極周極流深層水は1960年代から2000年頃にかけて昇温した。北大西洋の湾流及び北太平洋の黒潮のモード水にも、程度は小さいながら同程度の昇温パターンが観測されてきた。北大西洋亜寒帯循環と中央北太平洋では長期にわたる低温化が観測されている。1995年以来、北大西洋亜寒帯循環上部は高温・高塩分化している。大西洋子午面循環が、年々から十年規模で、20世紀の終わりまで有意な変化をしてきた可能性は非常に高い。過去50年にわたって、大西洋子午面循環の強さに長期傾向があるかどうかについて一貫した証拠は得られていない。
- ・ 海洋の生物地球化学過程が変化している。海洋の全無機態炭素含有量は産業革命直前(1750年頃)から1994年までの間に $118\pm 19\text{GtC}$ 増加しており、さらに増加し続けている。二酸化炭素排出のうち海洋が吸収した割合は1750～1994年の $42\pm 7\%$ から、1980～2005年の $37\pm 7\%$ にどちらかといえば減少した。このことは、海洋の炭素吸収速度として推定される値と整合しているが、この推定には不確実性があるため、確実には結論付けられない。海水中の全無機態炭素の増加により、炭酸カル

シウムが溶解する深さが浅くなったとともに、海洋の表面水中 pH が、1750 年以降今日まで、平均で 0.1 だけ減少した。過去 20 年の、データが取得できる長期観測点における、pH の直接観測結果でも、10 年当たり 0.02 の割合で減少する傾向が現れている。1970 年代の初めから 1990 年代の終わりにかけて、ほとんどの海盆における水温躍層（100～1000m）内で、酸素濃度の減少を示す事実がある。この酸素濃度の減少は、水温躍層内における水の更新速度が減少したことによる可能性が高い。

- 地球全体の平均海面水位は上昇を続けている。1961～2003 年にかけての海面水位の平均上昇率は  $1.8 \pm 0.5$  mm/年だった。20 世紀では、平均上昇率は  $1.7 \pm 0.5$  mm/年 であって、第 3 次評価報告書で推定した  $1 \sim 2$  mm/年 と整合している。海面水位上昇率が 19 世紀中頃から 20 世紀中頃にかけて大きくなったことについては信頼性が高い。海面水位の変化は空間的に極めて不均一で、世界全体で平均した海面水位上昇率より数倍大きな上昇率を示す海域もあれば、海面水位が下降している海域もある。高潮に伴う高極潮位の発生が世界的に増加していることを示す証拠がある。そしてこの期間の極値の変動が、平均海面水位の上昇や地域的な気候の変動と関係付けられている。
- 世界平均海面水位上昇にはかなり大きな十年規模変動が伴っている。1993～2003 年にかけての海面水位上昇率は、衛星高度計による観測から  $3.1 \pm 0.7$  mm/年 と推定されており、この値は平均上昇率より有意に高い。潮位計の記録によれば、10 年ごとに区切ったとき、同様に大きな上昇率を示す期間が、1950 年以降過去何度か起きていることが分かる。1993～2003 年の大きな上昇率が十年規模の変動によるものか、もっと長い変化傾向が加速したことによるものかは不明である。
- 海面水位変化への寄与の推定にはまだ不確実性が残るものの、近年はずっと理解が進んできた。1961～2003 年にかけての期間で平均すると、海面水位上昇への熱膨張の寄与は  $0.4 \pm 0.1$  mm/年 である。第 3 次評価報告書で報告した通り、この期間の海面水位上昇への既知の寄与をすべて合わせても観測された海面水位上昇よりは小さい可能性が高いため、海面水位上昇の原因となっている諸過程を十分評価することはできない。しかし、1993 年から 2003 年にかけては観測システムがずっと良くなっていて、熱膨張の寄与（ $1.6 \pm 0.5$  mm/年）に、氷河・氷帽やグリーンランド氷床及び南極氷床の質量減少による寄与を合わせると  $2.8 \pm 0.7$  mm/年 となる。この期間では、気候が、既知の誤差内で一致している海面水位収支に寄与する主要な要素となっている。
- この章で記述されている、世界の海洋貯熱量、塩分、海面水位、熱膨張、水塊の変

化、及び生物地球化学的パラメータについての変化に関する観測結果のパターンは、観測された海面の変化や大規模な海洋循環の既知の特性とおおむね整合している。

## よくある質問と回答

### FAQ5.1：海面水位は上昇しているのか？

その通り。世界の海面水位は、西暦0～1900年にかけてほとんど変化しなかったが、20世紀に徐々に上昇し、その率を上げながら現在も上昇している。今世紀には海面水位の上昇はさらに加速すると予測されている。世界の海面水位上昇をもたらす二大要因は、海洋の熱膨張（水は暖まると膨張する）と融解が進むことによる陸氷の減少である。

世界の海面水位は最終氷期の終わり（約2万1000年前）に続く数千年の間に120m程度上昇し、3000年前から2000年前にかけて安定した。海面水位の指標によれば、その後19世紀末まで、世界全体の海面水位は有意には変化しなかったことが示唆される。近年の検潮記録によると、19世紀の間に海面水位の上昇が始まったという証拠が示されている。20世紀には、世界平均海面水位は約1.7mm/年の割合で上昇したと推定されている。

1990年代初めに始まった、新しい人工衛星による観測はほぼ世界全体をカバーし、より正確な海面水位データを提供している。この10年にわたる衛星高度計データによれば、海面水位は1993年以来約3mm/年の割合で上昇していて、その前の半世紀の平均より有意に高い。沿岸の潮位計観測は同程度の水位上昇が数十年前から起きていることを示しており、この観測結果を裏付けるものとなっている。

気候モデルの結果でも示される通り、衛星データと海洋観測データによって、海面水位上昇は世界中で一様に起こっているわけではないことが明らかになっている。世界平均海面水位上昇率より数倍大きな上昇率を示す海域もあれば、海面水位が下降している海域もある。海面水位変化率にかなりの空間変動があることは海洋観測からも推測される。海面水位変化率の空間変動は、主に水温・塩分の不均一な変化に起因し、海洋循環の変化と関連がある。

近年利用できるようになった、ほぼ世界全体の海洋の水温データセットを使うと、熱膨張を直接計算できる。1961年から2003年にかけては、平均すると、観測された海面水位上昇の約4分の1が熱膨張による一方、陸氷の融解の寄与は半分以下と考えられている。従って、第3次評価報告書でも述べられた通り、この期間に観測された海面水位上昇の全体の大きさをこれらのデータセットでは満足に説明できない。

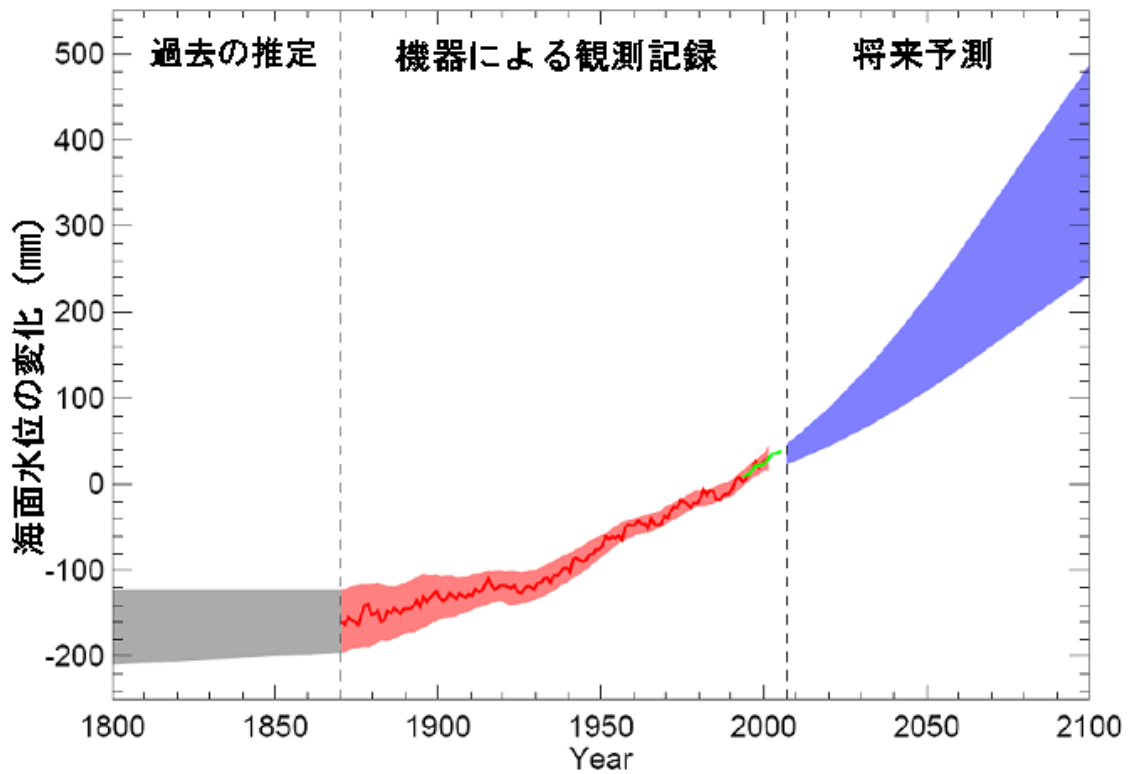
近年（1993～2003年）では、観測システムがずっと良くなり、その推定には幾分不確

実性が残っているものの、熱膨張と陸氷の融解が、観測された海面上昇のそれぞれほぼ半分であると評価される。

最近では、海面水位上昇率の観測結果は、熱膨張と陸氷損失を合わせた量とよく合っている。このことは、相対的に理解が不足している、陸水の貯水量の変化の規模の上限を示唆する。モデル結果によると、陸水の貯水量には、気候変動に起因する正味の長期変化はないが、大きな年々変動や十年規模の変動はあることが示唆されている。しかしながら、1993～2003 年の近年では、海面水位上昇の観測結果と既知の寄与の総和の間にある小さな違いは、人為起源でかつ定量化されていない過程（例えば、地下水の汲み上げ、貯水池の貯水、湿地の排水、森林破壊等）によるものかもしれない。

全世界の海面水位上昇率は、21 世紀には 1961～2003 年より大きくなると予想される。SRES A1B シナリオによると、例えば 2090 年代半ばまでには、地球全体の海面水位は、1990 年に比べて 0.22～0.44m 上昇し、年当たり約 4mm の割合で上昇する。過去と同様に将来の海面水位変化も地理的に一様ではなく、代表的なモデルによると、平均値に最大  $\pm 0.15\text{m}$  程度の地域差があるだろう。平均的な水位上昇の半分以上は熱膨張による寄与となることが予想されるが、陸氷の減少は今世紀中加速度的に進むだろう。不確実性のうち重要なものとしては、近年観測されている氷の流れの加速の結果、氷床からの氷の流出が引き続き増えるかどうかがある。もしそうであれば、これは海面水位上昇をさらに加えることとなるが、関連する諸過程についての理解が不足しているため、信頼できる定量的な見積もりはできていない。

図は世界平均海面水位について、過去の推移と SERS A1B シナリオに基づく 21 世紀の予測を示す。



FAQ5.1 図1 世界平均海面水位の過去及び将来予測における時系列。1870年以前は、海面水位の地球全体における観測データがない。灰色で示した陰影は、海面水位の長期的な推定上昇率の不確実性を表す。(第6章 6.4.3)。赤線は、潮位計による世界平均海面水位を再構成したものであり(第5章 5.2.1)、赤い陰影は平滑化された曲線から算出された変動範囲を示す。Y軸は、1980~1999年の平均をゼロとしている。緑色の線は、人工衛星の高度計によって観測された世界平均海面水位である。青い陰影は、SRES A1Bシナリオに対する、1980~1999年を基準としたモデルによる21世紀の予測範囲であり、観測データからは独立して計算された。2100年以降の予測は、さらにシナリオに依存する。他のシナリオに対する海面上昇予測に関する議論は、10章を参照。数世紀もしくは千年を超える期間で、海面水位は数m上昇し得る(第10章 10.7.4)。

## 第6章 古気候

### 概要

#### 過去の温室効果ガス濃度と気候の間にはどのような関係があるか

- ・ 大気中でよく混合した三種類の温室効果ガスである、二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素を合わせた放射強制力の、過去一世紀間にわたっての一貫した増加率は、少なくとも過去1万6000年に前例のないものである*可能性が非常に高い*。過去1万年間の観測結果によれば、工業化以前の温室効果ガスの大気中濃度の変動は、工業化時代の温室効果ガスの増加に比べると小さく、その大部分が自然起源のものであった*可能性が高い*。
- ・ 現在の二酸化炭素（379 ppm）とメタン（1774 ppb）の大気中濃度が、過去65万年間の自然変動幅をはるかに超えるものである*可能性が非常に高い*。氷床コアデータによれば、この間に二酸化炭素は180~300 ppm、メタンは320~790 ppbの間でそれぞれ変動していた。同期間の南極の気温と二酸化炭素濃度の変動は同期しており、気候と炭素循環に密接な関係があることを示している。
- ・ 氷期-間氷期間の二酸化炭素の変動が気候変動を強く増幅した*可能性は非常に高い*が、二酸化炭素変動が氷期の終わりを引き起こした*可能性は低い*。過去の氷期終焉時において、南極の気温は大気中二酸化炭素より数世紀早く上がりはじめた。
- ・ 大気中二酸化炭素濃度が現在より高かった過去の時代には、現在より高温だった*可能性が高い*。このことは、数百万年続いた気候状態（例えば約500万年前から300万年前の鮮新世）や数十万年続いた温暖期（例えば5500万年前の暁新世-始新世温暖期）のどちらにもあてはまる。どちらの場合にも、低緯度に比べて北半球高緯度において昇温が強く増幅された*可能性が高い*。

#### 氷期-間氷期気候変動の重要性は何か？

- ・ 気候モデルによれば、最終氷期最盛期（約2万1000年前）には、温室効果ガス強制力と氷床の状態の変化により、現在より3~5°C低温だった。大気中のちりと植生変化の効果を入れるとさらに1~2°Cの世界的な寒冷化をもたらされるが、これらの効果についての科学的理解は大変低い。最終氷期最盛期以降の4~7°Cの地球全体の温暖化は、20世紀の温暖化より10倍ゆっくと起った*可能性が非常に高い*。

- 海洋の代替データによれば、最終氷期最盛期に、熱帯では海面水温が低下（平均で2～3℃）し、高緯度海域ではより大きな降温と海氷の拡大が起こった。気候モデルは、地球軌道要素、温室効果ガスと地表面変化への応答として、これら緯度方向の海洋の変化の大きさを再現できることから、過去の気候状態を決める主な過程の多くが適切に表現されていることが分かる。
- 最終氷期最盛期の陸上データは、熱帯の（5℃にも及ぶ）顕著な降温と、高緯度でのより大きな降温を示している。気候モデルがこれらの応答を再現する能力は一様でない。
- 来る数世紀間の世界的な気温が、自然的な軌道要素起源の降温に顕著な影響を受けることがないことはほぼ確実である。少なくとも今後3万年に地球が次の氷期に入る可能性は非常に低い。
- 最終氷期の間、急激な地域的温暖化（グリーンランドでは数十年間で16℃に達した可能性が高い）と寒冷化が北大西洋域で何度となく起った。これらは熱帯の降雨分布の大規模な移動のような、世界的な規模での連関を伴っていた可能性が高い。これらの出来事が世界平均地上気温の大きな変化に伴っていた可能性は低い、代わりに大西洋の循環の変化に伴う、気候システム内の熱の再配分に関連していた可能性が高い。
- 約12万5000年前の最終間氷期の世界平均海面水位は、20世紀より4～6m高かった可能性が高い。古気候証拠と一致して、気候モデルによるシミュレーションでは、最終間氷期における5℃にのぼる北極夏季気温の昇温が再現されている。昇温はユーラシアとグリーンランド北部で最大だったと推定され、グリーンランドの最高部は現在に比べて2～5℃高温だったと再現されている。これは、南グリーンランド氷床と他の北極氷原の大規模な後退が、最大で2～4mの、最終間氷期の海面水位上昇に寄与し、残りの大部分が南極氷床によるとの氷床モデルによる結果と整合している。

#### 間氷期の気候研究から何が分かるか？

- 時間解像度が百年規模の古気候記録をみると、工業化以前の過去1万年の間に、地域的で一過性の温暖期があったことが分かるが、これらのよく知られた温暖期が世界的に同時に起っていた可能性は低い。同様に、時間解像度が十年規模の、間氷期の古気候記録は、地域的で周期性のある気候変動が起こったことを支持しているが、これらの地域的なシグナルが世界的に同時に発生していた可能性は低く、また、過去100年間の地球全体の温暖化の大部分を説明できる可能性も低い。

- ・ 北半球の幾つかの山岳域の氷河は 1 万 1000~5000 年前にかけての軌道要素起源の地域的昇温に応答して後退し、5000 年前以前には、20 世紀末より小さかった（または存在すらしていなかった）。北半球の過去数千年の夏季太陽入射量の減少は氷河の成長に有利なはずであるので、現在のほぼ世界的な山岳氷河の後退の原因を同じ自然起源に求めることはできない。
- ・ 大循環モデルを用いると、完新世中期（約 6000 年前）について、気候変化に関する観測結果の、確かで定性的な大規模な特徴の多くを再現することができる。そのような特徴としては、世界平均気温の変化をほとんど伴わない（0.4℃以下）中緯度の昇温や、軌道要素強制力についての理解と整合するモンスーンの変化がある。記録がよく整備された地域をみると、モデルの結果は水文学的变化を過小評価する傾向にある。結合気候モデルは大気のみモデルより一般に成績が良く、このことは海洋と陸面のフィードバックに気候変化を増幅させる役割があることを示している。
- ・ 気候・植生モデルを用いて、温暖化に伴う、北方樹木限界線の過去の北上が再現されている。古気候結果はまた、これら樹木限界線の移動が顕著な正の気候フィードバックをもたらした可能性が高いことを示している。このようなモデルはまた、気候境界条件や強制力（例えば氷床、軌道変化）の大きな変化に伴う、植生の構造や陸上炭素貯蔵の変化をも再現することができる。
- ・ 古気候の観測によれば、過去 1 万年の間に、熱帯低気圧、洪水、十年規模の干ばつやアフリカ-アジア夏季モンスーン強度の地域的頻度に、十年から百年規模の急激な変化が起った可能性が非常に高い。しかしながら、これらの急激な変化の背後にあるメカニズムはよく分かっておらず、最新の気候モデルを使った徹底的な調査も行われていない。

## 20 世紀の気候変化は過去 2,000 年の気候とどう比較されるか？

- ・ 二酸化炭素の平均増加率及び二酸化炭素、メタンと一酸化二窒素が合わさった放射強制力の平均的増加率は、1960~1999 年にかけては、工業化以前の過去 2000 年間の内のどの 40 年間よりも少なくとも 5 倍速かった可能性が非常に高い。
- ・ グリーンランドと北半球中緯度の氷床コアデータは、工業化以前と比べて工業化以降には硫酸塩濃度が急激に増加した可能性が非常に高いことを示している。
- ・ 第 3 次評価報告書以降の研究の中には、過去 1000 年間における数百年スケールの北半球気温変動度が、第 3 次評価報告書の結果より大きいものがあり、このことは、



代替データの選択とこれらのデータを処理して過去の気温にスケーリングする統計手法によって結果が変わることを示している。新しい研究は主に低温の期間（主として12～14世紀、17世紀及び19世紀）の存在を示しており、新しい復元データのうち一つだけが若干高温の期間（11世紀、ただし第3次評価報告書で示された不確実性の範囲に収まっている）を示唆している。

- 第3次評価報告書は「過去1000年に比べての、20世紀後半の異例な高温」を指摘した。その後明らかになった事実はこの結論を強化している。20世紀後半の北半球平均気温が過去500年間の内のどの50年間よりも高かった可能性が非常に高い。この50年の期間が過去1300年間に北半球で最も高温な期間で、この高温の領域が過去1300年間のどの50年間よりも大きく広がっている可能性も高い。これらの結論は、初期にはデータ範囲が乏しいために、中緯度の夏季の陸上で、またより最近の期間において、最も確かである。
- 過去1000年における、工業化以前の二酸化炭素とメタン濃度の変動が小さかったことは、代替データから復元された千年規模の北半球気温と整合している；復元データで示されたよりも気候変動が大きければ、濃度変化もより大きい可能性が高い。工業化以前の温室効果ガスの変動が小さいことも、世界平均気温の十年から百年規模の変動が限定的だった間接的な証拠になる。
- 古気候モデルによるシミュレーション結果は、過去1000年の北半球気温再現データとほぼ整合している。1950年以降の地上気温の上昇は、モデル強制力に人為起源の温室効果ガスを含まないと再現できない可能性が非常に高く、この温暖化が20世紀以前の寒冷期からの単なる回復である可能性は非常に低い。
- 南半球と熱帯の過去1000年の気候変動の知識は、古気候記録の密度が低いため、かなり限られている。
- 過去1000年にわたり復元された気候データによれば、エルニーニョ南方振動現象に関連した空間的気候テレコネクションは、20世紀の測器記録で示されるものより変化に富んでいたことが、高い信頼度で示される。
- 北部及び東部アフリカと南北アメリカの古気候記録によれば、数十年以上続く干ばつが繰り返し起こったことが、これらの地域における過去2000年の特徴であることが高い信頼度で示される。

古気候記録により、フィードバック、生物地球化学過程と生物地球物理過程について明らかになることは何か？

- ・ 広く受け入れられている軌道理論によれば、軌道強制力への応答として氷期-間氷期サイクルが起ったことが示唆される。気候システムが大きく応答するということは、この強制力に強い正の強化が働くことを意味している。主たる要素である温室効果ガス濃度の変化と氷床の成長・縮小に加えて、海洋循環と海氷の変化、生物物理的フィードバック、エアロゾル（ちり）の量もまた、この強化に影響した可能性が非常に高い。
- ・ 最終氷期における、個々の南極昇温イベントに伴う、大気中二酸化炭素の千年規模の変化が 25 ppm 未満であったことはほぼ確実である。このことは、ともに起こった北大西洋深層水生成や南大洋での大規模な風成鉄の沈殿の変化が二酸化炭素に及ぼした影響が限定的だったことを示唆している。
- ・ 海洋炭素循環過程が氷期-間氷期間の二酸化炭素変動の主原因だった可能性が非常に高い。個々の海洋過程の定量化は困難な問題として残っている。
- ・ 古環境データによれば、地域的な植生の構成と構造は気候変化に敏感である可能性が非常に高く、ときには数十年以内に気候変化に応答し得る。

## よくある質問と回答

### FAQ6.1： 氷河期など、工業化以前の重要な気候変化の原因は何か？

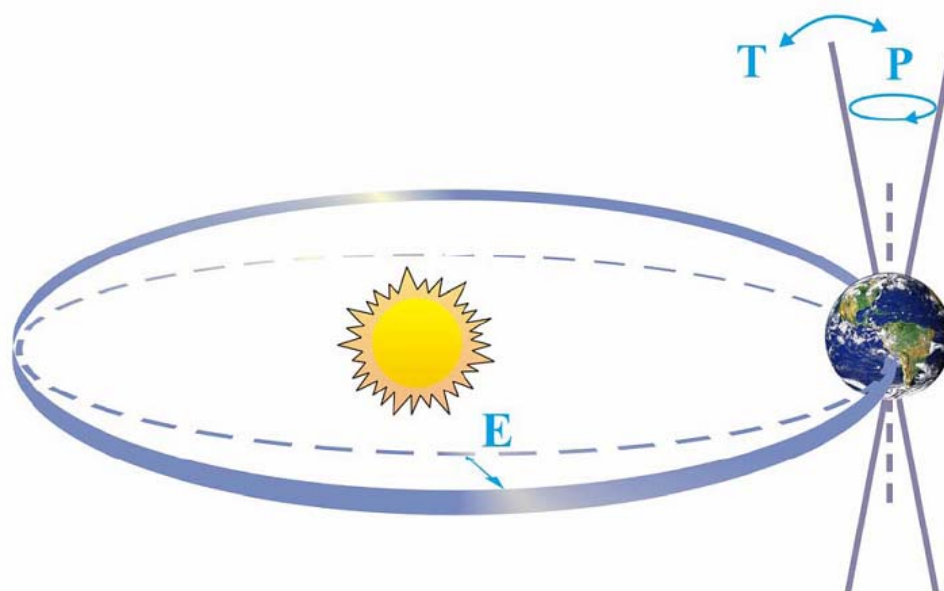
地球上の気候は、人間活動が役割を演じるよりずっと以前を含むあらゆる時間スケールで変化してきた。これらの気候変化の原因とメカニズムの理解は大きく進展してきた。地球の放射収支の変化が過去の気候変化の主たる駆動源であるが、そのような変化の原因はさまざまである。それぞれのケース-それが氷河期や恐竜のころの温暖期や過去千年期の変動であれ-について、固有の原因が個々に特定されねばならない。多くの場合において、これは今では十分な信頼性でなされ、多くの過去の気候変化が定量的モデルで再現できる。

世界の気候は地球の放射収支によって決まる (FAQ 1.1 参照)。地球の放射収支が変化し、それゆえに気候変化を引き起こす三つの基本的な過程がある：(1) 入射する太陽放射の変化 (例えば地球軌道要素の変化や太陽自身の変化)、(2) 太陽放射が反射される割合の変化 (この割合はアルベドと呼ばれる-これは雲量、エアロゾルと呼ばれる微粒子や地表面状態などで変化する)、(3) 宇宙空間へ戻る長波エネルギーの変化 (例えば温室効果ガス濃度の変化による)。さらに、局所的な気候は、風や海流による熱の移動のあり方にも依存

する。これらすべての要素が過去の気候変化で役割を演じてきた。

過去のほぼ 300 万年間に、規則的な周期で消長のあった氷河期から始めると、これらの周期が太陽の周りを回る地球の軌道の規則的な変動、いわゆるミランコビッチサイクルに関係していることを示す強い証拠がある (FAQ6.1 図 1)。これらの周期的な変化により、季節ごとに各緯度で受け取る太陽放射量に変化し (ただし地球全体の年平均値にはほとんど影響を及ぼさない)、その量は天文学的正確さで計算できる。このような変化により、氷期の初めと終わりがどの程度精確に決まったかについては依然議論があるが、多くの研究によれば、北半球の大陸の夏季の日射量が決定的であると示唆されている: もしこの日射量があるしきい値を下回ると、前年の冬の雪が夏に融けきらず、雪が積もるにつれ氷床が成長し始める。気候モデルによる再現実験は、氷河期がまさにこのように始まり得ることを確認しており、また簡単な概念モデルは、軌道要素変化に伴う、過去の氷河形成開始を「予測」することに成功している。過去の氷河期を開始させたと同様の、北半球夏季太陽入射量の次の大きな減少は 3 万年後に始まるはずである。

主原因ではないものの、大気中二酸化炭素も氷河期において重要な役割を果たしている。南極氷床コアデータによれば、二酸化炭素濃度は、寒冷な氷期には低く (~190 ppm)、温暖な間氷期には高い (~280 ppm); 大気中二酸化炭素は南極の気温変化に数百年の遅れで



FAQ6.1 図 1 氷期サイクルを駆動する地球の軌道変化 (ミランコビッチサイクル) の模式図。” T” は地軸の傾き (または傾斜角)、“ E” は軌道離心率の変化 (楕円の短軸の変化による)、“ P” は歳差運動、すなわち軌道上のある時点での地軸の方向の変化。出典 : Rahmstorf and Schell Inhuber (2006)

追隨している。氷期の始まりと終わりの気候変化には数千年かかるので、これらの変化の多くは正の二酸化炭素フィードバックに影響されている；すなわち、ミランコビッチサイクルによる初期の小さな寒冷化が、次に二酸化炭素濃度が下がることで増幅される。氷河期の気候のモデルシミュレーション（6.4.1 節の議論参照）では、二酸化炭素の役割が考慮されているときにのみ現実的な結果が得られる。

北大西洋周辺の記録で特に明らかなように、20 以上の急激で劇的な気候シフトが最終氷期に起こった（6.4 節参照）。これらは、おそらく世界平均気温の大きな変化を伴わない点で、氷期-間氷期サイクルとは違う：グリーンランドと南極の変化は同期しておらず、南大西洋と北大西洋では変化は逆向きである。このことは、これらのシフトをもたらすには、地球全体の放射収支の大きな変化は必要とせず、気候システム内の熱の再配分で十分なのであろうことを示している。海洋循環と熱輸送の変化でこれらの急激な出来事の特徴の多くを説明できるという強い証拠がある；堆積物データとモデルによる再現実験によれば、これらの変化の幾つかは、当時の大西洋をとりまく氷床の不安定性とそれに伴う海洋への淡水供給がきっかけになって引き起こされた。

気候史上、ずっと温暖な時期もあったーグリーンランドと南極が氷で覆われている現在とは異なり、地球は、過去 5 億年のほとんどの期間、おそらく氷床がまったくなかった（地質学者は氷が岩に残す痕跡から見分けることができる）。南極氷床コアで分かる範囲を超えた 100 万年以上さかのぼる温室効果ガス量のデータは依然としてかなり不確かだが、地質標本の解析では、温暖で氷のない期間は、大気中二酸化炭素が高水準の期間と一致することが示唆される。百万年の時間規模では、造山活動は固体地球と海洋・大気間の二酸化炭素交換率に影響しており、二酸化炭素水準は造山活動により変化する。これらの古代の気候については BOX6.1 を参照のこと。

過去の気候変化の原因のもう一つの可能性は、太陽のエネルギー出力の変動である。最近数十年の観測は、太陽出力は 11 年周期でわずかに（約 0.1%）変動することを示している。太陽黒点の観測（17 世紀までさかのぼる）及び宇宙線で生成される同位体データは、より長期間の太陽活動の変化の証拠となる。データ相関法及びモデルによる再現実験は、太陽変動と火山活動が、工業化開始以前の過去 1000 年の気候変動の主要な理由である可能性が高いことを示している。

これらの例は過去のいろいろな気候変化には、それぞれ異なる原因があることを示している。自然の要素が過去の気候変化を引き起こしたという事実は、現在の気候変化が自然のものであることを意味するわけではない。山火事が従来自然の落雷で引き起こされてきた事実が、火事が不注意なキャンパーによっても引き起こされないことを意味しないこと

が類推となろう。FAQ 2.1 は最近の気候変化への貢献度を、人間の影響と自然の影響を比較した結果について答えている。

#### FAQ6.2：現在の気候変化は地球史におけるこれまでの変化と比べて特異か？

地球の歴史を通して、あらゆる時間スケールで気候は変化してきた。現在の気候変化には、特異なものもそうでないものもある。大気中の二酸化炭素濃度は、過去 50 万年以上で記録的に高くなっており、かつ異例の速さで高くなってきた。現在の世界平均気温は少なくとも過去 5 世紀の、おそらく過去 1000 年以上のどの時期よりも高い。もし温暖化が止まらずに続けば、その結果として本世紀中に起こる気候変化は地質学的にみても極端に特異となろう。最近の気候変化のもう一つの特異な点はその原因である；過去の気候変化は自然起源であった (FAQ 6.1 参照) が、過去 50 年の温暖化のほとんどは人間活動に原因が特定できる。

現在の気候変化を以前の自然要因の変化と比べるときには、三つの区別をする必要がある。第一に、どの変数を比較するのかを明確にする必要がある：温室効果ガス濃度なのか気温なのか (あるいは何か他の気候パラメータか)、その絶対値なのか変化率なのか？第二に、局所的変化と地球全体の変化を混同してはならない。局所的要因 (例えば海洋や大気の循環の変化) は、熱や水蒸気のある場所から別の場所への輸送を変化させることができ、局所的フィードバック (例えば海水フィードバック) も働くので、局所的変化はしばしば地球全体の変化よりもかなり大きくなる。対照的に、世界平均気温の大きい変化には (温室効果ガス濃度や太陽活動の変化のような) 地球全体の強制力を必要とする。第三に、時間スケールを区別する必要がある。数百万年以上にわたる気候変化は、百年規模の気候変化に比べてより大規模で、かつ原因 (例えば大陸移動) も異なっている。

気候変化について現在懸念が抱かれていることの主な理由は、大気中二酸化炭素 (及び他の温室効果ガス) 濃度の上昇であり、これは第四紀 (これまでの約 200 万年) において大いに異例である。南極氷床コアから、過去 65 万年間の二酸化炭素濃度については精度良く分かっている。この期間中、二酸化炭素濃度は、低いときには寒冷な氷期の 180 ppm から、高いときには温暖な間氷期の 300 ppm の間で変化してきた。二酸化炭素濃度は、過去百年にこの範囲を超えて急激に上昇し、今では 379 ppm になっている (第 2 章参照)。比較してみると、過去の氷河期の終わりの二酸化炭素濃度の約 80 ppm の上昇には 5,000 年以上の期間がかかっている。現在より高い値は数百万年以前に起こったのみである (FAQ 6.1 参照)。

気温は、地球上で同じ値はとらないため、(地球全体でよく混合した) 二酸化炭素より再

現の困難な変数であり、一つの記録（例えば氷床コア）の価値は限られている。局地的な気温の変動は、ほんの数十年の間でも数度にもなり、これは、過去 100 年で約 0.7℃の、世界平均温暖化シグナルより大きい。

地球全体の変化にとってより意味があるのは、局地的変動が平滑化されて変動が小さくなる、大規模な空間範囲（地球全体か半球）で平均した解析である。十分な測器記録はほんの 150 年しかさかのぼれない。より古い時代になると、樹木年輪、氷床コアなどからの代替データの編集物で 1000 年以上さかのぼれるが、時代をさかのぼるにつれ、空間的にカバーする範囲が限られてくる（6.5 節参照）。復元データ間には違いがあり、顕著な不確実性が残るが、公表された復元データはすべて、中世は温暖で、17, 18, 19 世紀には寒冷化し、その後急激に昇温したことを示している。中世における温暖の度合いは不確かだが、20 世紀半ばには同じ水準に達しその後上回った可能性がある。これらの結論は気候モデルを使った調査でも支持されている。今から 2000 年前以前の気温変動については、大規模スケールの平均値が得られるような系統的な編集は行われていないが、完新世（最近の 1 万 1600 年；6.4 節参照）を通じて、世界年平均気温が現在より高かったことを示す証拠はない。世界的に氷床が縮小し、海面水位が高い温暖な気候が約 300 万年前まで続いたことを示す強い証拠がある。従って、現在の温暖な状態は、過去千年間では異例だが、（自然要因により温室効果ガス濃度をゆっくりと変動させる）造山活動が関連してくる、より長い時間スケールでは異例なことではない（BOX6.1 参照）。

現在の温暖化の速度は別の問題である。これ以上に急激な世界的な気候変化が代替データに記録されているだろうか？過去 100 万年で最大の気温変化は氷期サイクルで、氷期と温暖な間氷期の間で世界平均気温は 4~7℃ 変化した（大陸氷床周辺など局所的変化はより大きい）。しかしデータによれば、氷期の終わりの地球全体の温暖化は約 5000 年かけて起こったゆっくりとしたプロセスであった（6.3 節参照）。従って、現在の世界平均気候変化率は、過去のいかなる変化よりもはるかに急激で異例なものである。しばしば議論される、氷期における急激な気候シフト（6.3 節参照）は、おそらく海洋熱輸送の変化によるもので、世界平均気温に影響を及ぼす可能性は低いので、反例にはならない。

氷床コアデータで明らかになる時期よりもさらに過去にさかのぼると、堆積物コアや他の記録の時間解像度では、現在の温暖化のように速い変化を分離できない。そのため、過去に大きな気候変化が起こったとしても、それらが現在の温暖化より速い速度で起こったことを示す証拠はない。もし今世紀中に約 5℃の温暖化（範囲の上限）との予測が現実になると、地球は最終氷期の終わりに起こったのと同等の世界平均昇温を経験することになる；将来起こり得るこの世界的な変化の速度に匹敵する世界平均気温上昇が、過去 5000 万年にあったことを示す証拠はない。

## 第7章 気候系変化と生物地球化学過程の結合

### 概要

二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素の排出及び、エアロゾル粒子や対流圏オゾンを含む二次的汚染物質の形成をもたらす、二酸化硫黄、窒素酸化物、一酸化炭素、炭化水素等の反応性ガスの排出は、人間活動に応じてかなり増加してきた。その結果として、生物地球化学サイクルは重大な擾乱を受けてきた。気候システムと生物地球化学システムの非線形相互作用は、人間活動によって生み出された擾乱を、強める（正のフィードバック）ことも弱める（負のフィードバック）こともあり得る。

### 地表面と気候

- ・ 人間活動に起因する地表面（植生、土壌、水）の変化は、放射、雲量や地上気温の変化を通じて地域的な気候に影響を与え得る。
- ・ 植生被覆の変化は、亜寒帯から熱帯の森林において、地域的なスケールで地表面のエネルギーと水のバランスに影響を与える。モデルは、亜寒帯の森林の増加は積雪のアルベドの効果を減少させ、地域的な温暖化を引き起こすことを示している。熱帯森林についての観測結果もモデル実験も、地表面におけるエネルギーと水のバランスの変化の効果を示している。
- ・ エネルギーと水のバランスに対する土地利用変化の影響は、数十年以上にわたって、地域的なスケールで気候にとって非常に重要になるかもしれない。

### 炭素循環と気候

- ・ 大気中の二酸化炭素濃度は増加し続けており、現在は工業化時代以前の濃度をほとんど100ppm上回っている。2000～2005年の二酸化炭素の平均年増加率（年当たり $4.1\pm 0.1\text{GtC}$ ）は、1990年代（年当たり $3.2\pm 0.1\text{GtC}$ ）よりもかなり大きい。化石燃料燃焼とセメントの生成による、二酸化炭素の年間排出量は、1990年代の年当たり平均 $6.4\pm 0.4\text{GtC}$ から2000～2005年の年当たり平均 $7.2\pm 0.3\text{GtC}$ へと増加した<sup>1</sup>。
- ・ 二酸化炭素は大気、海洋、陸上生物圏の間を循環している。それぞれ異なる時間スケールのさまざまな過程を通じて、二酸化炭素は大気中から除去される。二酸化炭

---

<sup>1</sup> ここや表 7.1 や 7.2 において示されている不確かさの幅は、現在利用可能な各研究に基づいて、著者らによって可能性が高い（66%）と推定される範囲の評価である。炭素循環のすべての主要な項目に対して、可能性が非常に高い（90%）という評価が可能になるほど十分な研究成果が集まっていない。

素の増加量のうち、約 50%は 30 年以内に大気から除かれ、さらなる 30%が数世紀のうちに除去されるであろう。残りの 20%は何千年にもわたって大気中にとどまるかもしれない。

- 海洋による二酸化炭素吸収の、改善された推定結果によると、1990 年代から 21 世紀の最初の 5 年間にかけて、海洋の炭素吸収量は年当たり  $2.2\pm 0.5\text{GtC}$  でほとんど変わっていないことが示唆される。モデル実験によれば、もし大気中の二酸化炭素が増え続けるなら、化石燃料の燃焼とセメント生成により排出される二酸化炭素のうち海洋に吸収される部分は減少するであろう。
- 大気中の二酸化炭素の増加率にみられる年々～数十年規模の変動では、気候変動に対する陸上生物圏の応答が支配的要因である。正味の陸上生物圏の炭素吸収量は、1980 年代には年当たり  $0.3\pm 0.9\text{GtC}$ 、1990 年代には年当たり  $1.0\pm 0.6\text{GtC}$ 、2000～2005 年には年当たり  $0.9\pm 0.6\text{GtC}$  と推定され、これは、この炭素吸収量に十年規模の変化が観測された証拠である。
- 幾つかの手法を組み合わせることにより、土地利用変化に起因する大気への二酸化炭素フラックスは、1990 年代には年当たり  $1.6 (0.5\sim 2.7) \text{GtC}$  だったと推定される。第 3 次評価報告書からの変更点として、1980 年代に対する推定値が年当たり  $1.4 (0.4\sim 2.3) \text{GtC}$  へと減少したことは、1980 年代と 1990 年代でほとんど変化がなかったことと、土地利用変化に起因する正味の二酸化炭素排出量が依然不確実であり続けていることを示唆している。
- 自然の原因と人間活動に起因する火災は、放射的、光化学的に活性な微量気体とエアロゾルを相当量大気中に排出する。もし、火災の頻度や規模が気候変化に伴って増加するとすれば、その期間中は、二酸化炭素排出量が正味で増加することが予想される。
- 1958 年の大気中二酸化炭素濃度の観測開始以来、大気中二酸化炭素濃度の増加率の中に、化石燃料の燃焼とセメントの生成による二酸化炭素排出が占める割合には、有意な変化傾向はない。この“大気中の割合”はこの期間ほとんど変化していない。
- 海洋による二酸化炭素の吸収は、海洋の平均 pH を、1750 年よりほぼ 0.1 下げている（酸性度の増加）。海洋生態系への波及効果として、有殻類の石灰化の減少と、より長期的には炭酸塩沈殿物の分解が起きるかもしれない。



- ・ 第一世代の気候・炭素循環結合モデルの結果によると、地球温暖化によって人為起源の二酸化炭素が大気に残留する割合が増加する。この気候・炭素循環の正のフィードバックにより、IPCC（2000）の排出シナリオに関する特別報告（SRES）A2 排出シナリオでのモデル予測結果において、大気中の二酸化炭素は、2100年までに20～224ppm 追加的に増加する。

## 反応性ガスと気候

- ・ 大気中のメタン濃度は、工業化時代以前の推定値と比べて増加したことが観測されており、これは、農業、エネルギー生産、廃棄物処理、バイオマス燃焼等の人間活動に直接関連している。メチルクロロホルムの観測結果から、過去数十年間にわたってヒドロキシルラジカル（OH）の濃度、すなわちメタンの除去率に有意な傾向はないことが示される（第2章参照）。1993年頃からの大気中メタン濃度の増加率減少は、全排出量がほぼ一定の間に、大気が平衡状態に近づいていることが原因である可能性が高い。しかしながら、より高温多湿の気候のもとでは、湿地からのメタン排出量は将来増加し、より高温乾燥の気候では減少する可能性が高い。
- ・ 対流圏のOH濃度には、窒素酸化物、一酸化炭素、有機物の排出の変化と、気候変化の効果が打ち消し合うため、今後数十年にわたって長期トレンドはないとみられる。OHの年々変動はメタンの変動に引き続き影響を与えるかもしれない。
- ・ モデルによる対流圏オゾンの世界的収支の新たな推定結果は、成層圏からのオゾンの流入（年当たり約500 Tg）は、第3次評価報告書の推定値（年当たり770 Tg）より小さくなったことを示している。一方、光化学的な生成率と破壊率（それぞれ年当たり約5000 Tgと約4500 Tg）は、第3次評価報告書の推定値（年当たりそれぞれ3400 Tgと3500 Tg）より大きくなっている。このことは、対流圏の化学過程や排出の変化に対して、オゾンがより敏感であることを意味している。
- ・ 工業化時代以前の推定値に比べて、窒素酸化物と一酸化窒素の排出量の観測された増加は、肥料使用の増加、農業の集約化と化石燃料燃焼を含む人間活動によりもたらされる窒素循環の‘加速’と直接関連している可能性が非常に高い。
- ・ 将来の気候変動により、水蒸気の増加と、成層圏からの流入増大の効果が競合し、バックグラウンドの対流圏オゾンは増加するかもしれないし、減少するかもしれない。気温の上昇と循環の弱まりにより、地域的なオゾン汚染の悪化が予想される。
- ・ 将来の気候変動により、汚染物質の拡散率の変化、オゾンとエアロゾルを生み出す

化学的環境の変化及び生物圏、火災、ダストの排出強度の変化によって、大気質に顕著な悪化が起きるかもしれない。これらの効果の符号と大きさは、かなり不確実でかつ地域によって異なるであろう。

- ・ 成層圏オゾンの将来の変化、すなわち、工業的に製造されたハロカーボン類による破壊からの回復は、二酸化炭素濃度増加による成層圏の寒冷化と大気循環の変化に影響されるだろう。極域の下部成層圏（より低温であることが、極成層圏雲の雲粒上で活性化された塩素によるオゾンの破壊に好都合である）をおそらく例外として、成層圏の寒冷化は、オゾン破壊を減少させ、オゾン全量を増加させるであろう。

### エアロゾルと気候

- ・ 硫酸塩エアロゾルのために、世界平均気温は温室効果ガス濃度のみから期待される気温よりも低くなっている。
- ・ エアロゾルは、太陽放射を散乱・吸収することにより放射フラックスに影響を及ぼす（直接効果、第2章参照）。またエアロゾルは、雲凝結核や氷晶核として作用することから、雲や水循環と相互に影響しあう。ある与えられた雲水量に対して、多量の凝結核は雲のアルベドを増加させ（間接的な雲アルベド効果）、降水効率が減少する（間接的な雲の寿命効果）。これら二つの効果は、大気上端での地球全体の年平均の正味の放射を減少させる可能性が高い。しかしながら、これらの効果は、エアロゾルを吸収することによる雲粒の蒸発（準直接効果）と氷晶核の増加（氷結効果）の両方、またはいずれかにより、幾分相殺されるかもしれない。
- ・ 主に雲のパラメタリゼーションの改良により、推定された総エアロゾル効果の大きさは第3次評価報告書の値よりも小さくなった。しかし、なお大きな不確実性が残っている。
- ・ 第2章では、間接的雲アルベド効果による放射強制力は $-0.7\text{W/m}^2$ （90%信頼区間で $-0.3\sim-1.8\text{W/m}^2$ ）と推定されている。雲の寿命効果や準直接効果、エアロゾルの氷晶雲に対する効果によるフィードバックは、雲のアルベド効果を強める方向と弱める方向のどちらにも働き得る。気候モデルによれば、工業化時代以前からの大気上端での正味放射の変化へのエアロゾルによる全効果（間接効果と直接効果）の合計は、 $-1.2\text{W/m}^2$ （ $-0.2\sim-2.3\text{W/m}^2$ ）と推定される。一方、逆解析による推定では、間接的なエアロゾルの効果は $-0.1\sim-1.7\text{W/m}^2$ と推定されている（第9章参照）。
- ・ 降水に対するエアロゾルの効果の総量はさらに不確実で、モデルの結果は、降水量

はほとんど変わらないとするものから 1 日当たり 0.13mm 減少するというものまである。大気大循環モデルを、海面水温と蒸発量に変化し得る海洋混合層モデルと結合すると、降水量の減少はより大きくなる。

- ・ 不足栄養物質を含む土壌粒子の沈着は、海陸双方において、光合成による炭素固定を強化し得る。気候変化はダスト粒子の発生源に影響を及ぼす可能性が高い。
- ・ 第 3 次評価報告書以来、エアロゾル循環を介した、海洋生物圏と陸上生物圏の気候システムへの関連付けに進展がみられた。植物や海洋生物圏からのエアロゾル前駆物質の排出量は気候変化に応答すると思われる。

### よくある質問と回答

#### FAQ7.1: 工業化時代の間の大気中の二酸化炭素等の温室効果ガスの増加は、人間の活動に起因するものか?

そうである。工業化時代の間、大気中の二酸化炭素等の温室効果ガスの増加は、人間の活動に起因するものである。実際には、観測された大気中の二酸化炭素濃度の増加量は、1959 年以降の人間活動によって排出された二酸化炭素量の 55% に過ぎないため、人間活動による排出を完全に反映しているものではない。残りは、地上の植物と海洋によって吸収された。いかなる場合でも、大気中の温室効果ガスの濃度とその増加は、発生源（人間活動と自然のシステムからのガスの排出）と吸収源（異なる化合物への転化による大気からのガスの除去）の間のバランスで決定される。化石燃料の燃焼（及びセメント製造からのより小さな寄与を加えて）は、人間による二酸化炭素排出量の 75% 以上を占めている。残りは、土地利用変化（主に森林破壊）である。もう一つの重要な温室効果ガスであるメタンについては、人間活動による排出は、過去 25 年にわたって自然起源の排出を上回った。一酸化二窒素については、人間活動による排出と自然起源の排出は等しい。ほとんどの寿命の長いハロゲン含有ガス（例えばクロロフルオロカーボン類）は大部分人間によって生産されたもので、工業化時代以前の大気には存在していなかった。平均すると、現在の対流圏オゾンは、工業化時代以前から 38% 増加した。この増加は、人間活動によって排出される寿命の短い汚染物質の大気中での反応の結果である。現在、二酸化炭素の濃度は 379ppm、メタンの濃度は 1774ppb 以上で、どちらも少なくとも過去 65 万年間（その間、二酸化炭素は 180~300ppm、メタンは 320~790ppb にとどまっていた）のどの時よりも非常に高い可能性が非常に高い。最近の変化率は劇的で、前例のないものである。二酸化炭素が 1000 年間当たり 30ppm を上回って増加することは一度もなかったが、現在、二酸化炭素はわずか過去 17 年で 30ppm 上昇した。

## 二酸化炭素

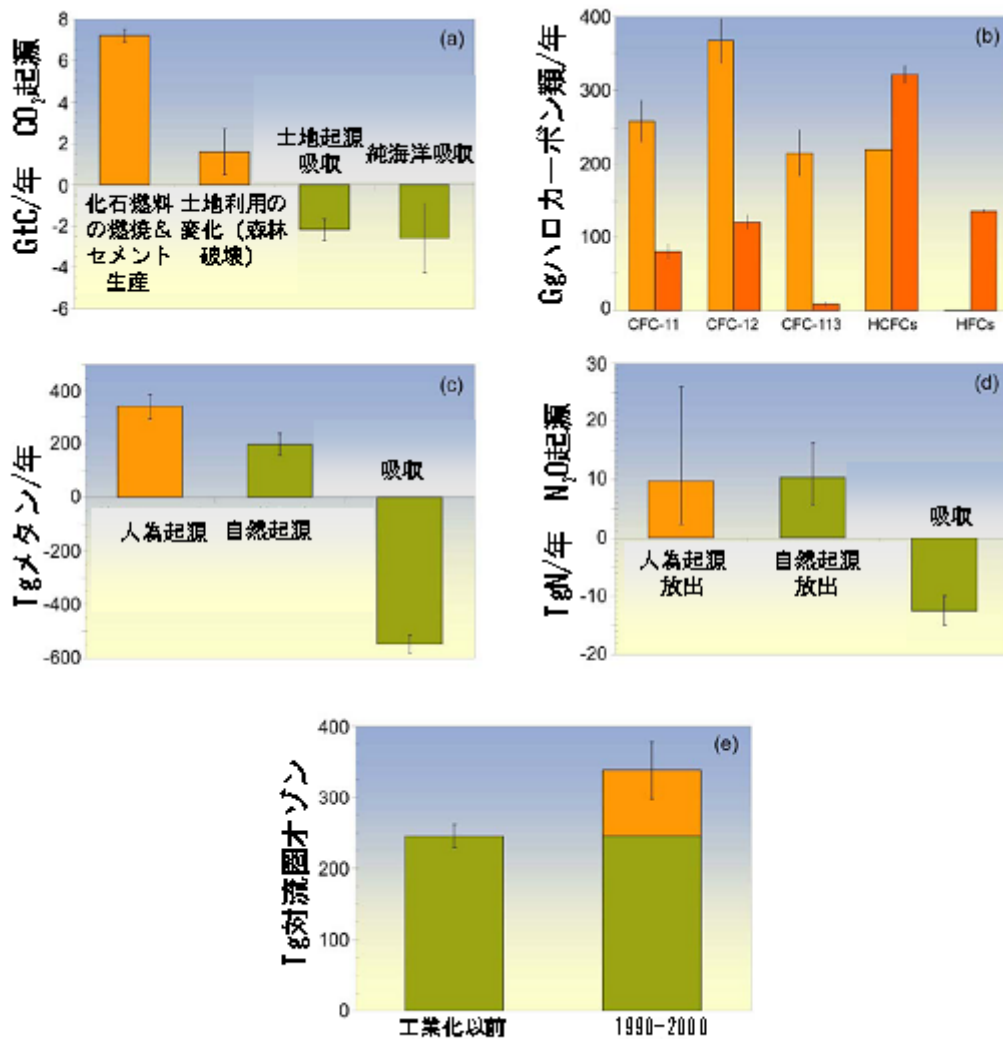
セメント製造からの寄与と化石燃料燃焼に起因する二酸化炭素排出 (FAQ7.1 図 1a) は、工業化時代以前からの大気中の二酸化炭素濃度の増加の 75%以上を占めている。残りの増加は、農法の変化による寄与を含めて、森林破壊を主とした土地利用変化 (と関連するバイオマス燃焼) によるものである。これらの増加はすべて人間の活動に起因する。自然の炭素循環では、大気中の二酸化炭素での過去 25 年間にわたる年当たり 3.2~4.1GtC (1GtC は、10 の 15 乗グラム (10 億トン) の炭素を表す) の観測された増加を説明することができない。

光合成、呼吸、腐敗、海面におけるガス交換などの自然過程は、陸と大気 (年当たり約 120GtC と推定)、海と大気 (年当たり約 90GtC と推定、本報告書図 7.3 参照) の間の二酸化炭素の大規模な交換、つまり排出と吸収を引き起こしている。炭素の自然の吸収源は、この 15 年にわたって、正味で年当たり約 3.3GtC の二酸化炭素を取り込み、人為起源の排出の一部を相殺している。過去 15 年にわたって人為的に生み出された二酸化炭素のほぼ半分を吸収してきた自然の吸収源がなかったら、大気中の二酸化炭素濃度はさらに劇的に上昇していただろう。

大気中の二酸化炭素の特徴、特に軽い炭素原子に対する重い炭素原子の比が変化してきており、これは化石燃料起源の炭素が加わったためであると説明できることから、大気中の二酸化炭素の増加が人間の活動に起因することが分かっている。さらに、化石燃料の燃焼に伴い酸素が減少することから予想されてきた通り、二酸化炭素の増加につれて、大気中の窒素に対する酸素の比率が減少した。C<sup>13</sup> 同位体と呼ばれる重い炭素は、植物及び過去の植物から作られた化石燃料では少なく、海中の炭素、火山または地熱による排出には多く含まれている。大気中の C<sup>13</sup> 同位体の相対的な量は減少してきており、これは炭素の増分が化石燃料と植物に由来することを示している。炭素にはまた、微量の放射性同位体 (C<sup>14</sup>) が存在し、それは大気中の二酸化炭素には存在するが、化石燃料には存在しない。大気中の核実験以前には、C<sup>14</sup> の相対的な量が減少し、化石燃料起源の炭素が大気に加わっていたことが分かった。

## ハロゲン含有ガス

大気中の寿命の長いハロゲン含有ガス濃度の大部分は人間の活動によるものである。工業化時代以前には、ほんの数種類の自然起源のハロゲン含有ガス (例えば臭化メチルと塩化メチル) しか存在しなかった。化学合成の新しい技術の発達により、20 世紀後半に、化学的に合成されたハロゲン含有ガスが急増した。主要な合成ハロゲン含有ガスの排出量を FAQ7.1 図 1b に示す。図中のクロロフルオロカーボン (CFCs) の大気中の寿命は 45~



FAQ7.1 図1 第4章と第7章で詳述される情報に基づく、大気中の温室効果ガス濃度の変化に対する寄与の内訳。

(a) ~ (d) では、人為的な排出源をオレンジで、自然の発生源と消失源を緑で示す。(e) では、人為起源の対流圏のオゾン量をオレンジで、自然のオゾン量を緑で示す。

(a) 二酸化炭素の排出源と吸収源 (GtC)。二酸化炭素は、化石燃料の燃焼や土地利用の変化等の人間活動により、毎年大気中に排出されている。人間活動に伴い排出された二酸化炭素のうち 57~60%のみが大気中にとどまる。海洋に溶解するものや、植物の生長につれて取り込まれるものもある。土地に関するフラックスは 1990 年代のもの。化石燃料、セメント、海洋による正味の吸収は 2000~2005 年のもの。数値と不確実性は表 7.1 による。

(b) CFC 及びその他のハロゲン含有物質の世界的排出量 (1990 年が明るいオレンジ、2002 年が暗いオレンジ)。これらの化学物質は全く人工物質である。この図で、'HCFCs' は、HCFC-22, -141b, -142b の総称。'HFCs' は HFC-23, 125, 134a, 152a の総称。1Gg は 10<sup>9</sup>g (1000 トン)。ほとんどのデータは第 2 章に引用さ

れた報告書からの引用。

(c) 1983～2004年の、メタンの排出量と吸収量。人間活動によるメタンの排出源は、エネルギー生産、埋め立てによるゴミ処理、反芻動物（牛や羊）、稲作及びバイオマス燃焼である。1Tgは $10^{12}$ g（100万トン）。数値と不確実性は表7.6で対応する数値の合計の平均値と標準偏差。

(d) 一酸化二窒素の排出量と吸収量。人間活動による一酸化二窒素の排出源は、肥料に含まれる窒素の一酸化二窒素への変化及びその農地からの排出、バイオマス燃焼、家畜、ナイロン生産等の工業過程である。排出量の数値と不確実性は、表7.7の中央値と幅。吸収量は第7.4章より。

(e) 19世紀から20世紀初頭にかけてと、1990～2000年の対流圏オゾン。対流圏オゾン生成の増加は人間活動（化石燃料やバイオ燃料の燃焼により排出される汚染物質の化学反応）に起因する。工業化以前の値と不確実性は、第3次評価報告書の表4.9により、再構成された観測結果から推定された。現在の合計及びその不確実性の幅は、本報告書表7.9のモデル結果（第3次評価報告書のものを除く）の平均と標準偏差。

100年、ハイドロクロロフルオロカーボン（HCFCs）は1～18年、ハイドロフルオロカーボン（HFCs）は1～270年である。パーフルオロカーボン（PFCs、図に示されていない）は、数千年間大気中にとどまる。

CFCsを含む幾つかの重要なハロゲン含有ガスの地表での濃度は、「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」とその改正議定書の結果として、安定または減少している。生産が2030年までに段階的に廃止されることになっているHCFCの濃度、京都議定書の対象ガスであるHFCs、PFCsの濃度は現在も増加している。

## メタン

大気中のメタン（ $\text{CH}_4$ ）の発生源は、人間の活動起源によるものが、自然起源によるものを上回っている（FAQ7.1 図1c）。1980年以降のメタン濃度増加率がほぼゼロであるにもかかわらず、1960～1999年間のメタン濃度は、1800年までの2000年間のどの40年間と比べても、平均で少なくとも6倍の速さで増加した。大気中メタンの主な自然発生源は湿地である。他の自然の発生源としては、シロアリ、海、植生、メタンハイドレートなどがある。メタンを発生させる人間活動には、石炭と天然ガスからのエネルギー生産、埋め立てによるゴミ処理、牛と羊などの反芻動物の飼育、稲作、バイオマス燃焼などがある。一度排出されると、主に対流圏での化学酸化によって除去されるまで、メタンはおおよそ8.4年間大気中にとどまる。メタンの副次的な消失源として、土壌による吸収と成層圏での破壊がある。

### 一酸化二窒素

大気中の一酸化二窒素 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) の発生源は、人間の活動起源によるものが、自然起源によるものとほぼ等しい (FAQ7.1 図 1d)。一酸化二窒素の濃度は、1960~1999 年の間に、1800 年より前の 2000 年間のどの 40 年間と比べても、少なくとも平均で 2 倍の速さで増加した。大気中の一酸化二窒素の主な自然の発生源は、海洋、大気中のアンモニアの酸化及び土壌である。大気中の一酸化二窒素の自然の発生源として熱帯の土壌は特に重要である。一酸化二窒素を排出する人間活動としては、窒素肥料の一酸化二窒素への転化とその農地土壌からの排出、バイオマス燃焼、牛の飼育及びナイロン製造などの工業活動がある。一度排出されると、主に成層圏での破壊によって除去されるまで、一酸化二窒素は約 114 年間大気中にとどまる。

### 対流圏オゾン

対流圏オゾンは、一酸化炭素、メタン、揮発性有機化合物、窒素酸化物のような大気中の前駆化学物質の光化学反応によって作られる。これらの化学物質は、自然の生物過程から排出されるとともに、土地利用の変化と燃料燃焼を含む人間活動から排出される。対流圏オゾンは、大気中では数日から数週間という比較的短い寿命のため、その分布は非常に変動しやすい上、前駆化学物質、水蒸気、日射量に大きく左右される。対流圏オゾン濃度は、都市大気中、都市の風下域、バイオマス燃焼地域で極めて高くなる。工業化以前から対流圏オゾンは 38% (20-50%) 増加した (FAQ7.1 図 1e) が、これは人為起源によるものである。

二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素を合わせた放射強制力の増加は、1960~1999 年の間に、1800 年より前の 2000 年間のどの 40 年間と比べても、6 倍以上速かった可能性が非常に高い。

## 第 8 章 気候モデルとその評価

### 概要

この章では、本報告書内で将来気候を予測するために用いられている全球気候モデルの性能について評価する。第 3 次評価報告書以降、気候モデルによる将来気候の予測評価の信頼性は、広範な進歩を通じて高まってきた。

気候モデルは、確固とした物理法則に基づいており、最近の気候（第 8、9 章参照）や過去の気候変化（第 6 章参照）について観測された特徴を気候モデルが再現できることを示している。特に大陸規模以上の規模において、全球大気海洋結合モデル（AOGCM）が将来の気候変化について信頼性の高い定量的な推定ができることにはかなりの信頼性がある。これらの評価における信頼性は、幾つかの気候要素（例えば気温）で他の要素（例えば降水量）より高い。この概要では、第 3 次評価報告書以降に進展した分野に焦点を当てる。

- ・ 気候モデルによる実験を同じ条件下で行った結果を収集・配布する国際共同計画の成果として、モデルの精密調査や気候モデルの挙動についての診断的解析がますます進展してきた。このことにより、より包括的で開かれたモデル評価が進んでいる。多様な見通しを得るための、さらに広範な評価の努力によって、モデルの重大な誤りが見落とされる可能性は低くなっている。
- ・ 気候モデルは、例えば数日から 1 年にかけての時間スケールにおける予測の評価を含む、ますます包括的なテストを受けている。これらの、より多様な一連のテストによって、気候予測に影響を与える過程をどのモデルが再現しているかという正確さにおいて信頼性が高まっている。
- ・ 平衡気候感度に関するモデル間の差異についての理解において、相当な進展があった。低層雲の寄与が最も大きい雲のフィードバックがこれらの違いの主要な原因であることが確認された。新しい観測や気候モデル実験の結果は、全球気候モデルでみられたものと同程度の水蒸気-気温減率フィードバック（約  $1\text{W/m}^2\text{K}$ 、平均的な温暖化の約 50%の強化に対応）を強く支持している。雪氷圏フィードバックの規模にはまだ不確実性が残っており、中・高緯度でのモデルの気候応答の幅の原因となっている。
- ・ 解像度や数値計算法、パラメタリゼーションの改良は進んでおり、より多くの気候モデルで、付加的な過程（例えば相互に作用するエアロゾル）を取り入れている。



- **AOGCM** では、以前は安定した気候を維持するためにフラックス調整が必要とされていたが、今はほとんど行われていない。同時に、現在気候の多くの様相の再現性が改良された。それゆえ、フラックス調整を用いることによる不確実性は小さくなっているが、**AOGCM** によるコントロール実験では、バイアスと長期変化傾向が残っている。
- 気候変動の重要なモードのシミュレーションにおける進展により、重要な気候過程の、モデルによる再現性についての総合的な信頼性が高まってきた。着実な進歩の成果の一例として、幾つかの **AOGCM** で、エルニーニョ南方振動現象 (**ENSO**) の重要な様相を再現できる。マッデン・ジュリアン振動 (**MJO**) のシミュレーションはまだ満足できるものではない。
- 特に高温や低温の継続といった極端現象を再現する **AOGCM** の能力は向上した。激しい現象における降水の頻度と量は過小評価されている。
- 温帯低気圧のシミュレーションは改良された。熱帯低気圧の変化の予測に用いられたモデルには、熱帯低気圧の観測された頻度や分布をうまく再現できるものがある。
- 南大洋のシミュレーションには、ほとんどのモデルで系統的なバイアスがみられる。南大洋は海洋の熱の取り込みにとって重要なので、このことにより、遷移的な気候応答にいくらかの不確実性が生じる。
- 観測結果を基にした基準がモデルによる気候変化予測の幅を絞り込むのに用いられ得る可能性が、モデルのアンサンブル・シミュレーションの解析によって、初めて調査された。にもかかわらず、信頼できる気候予測の幅を狭めるのに役立つ、モデルの適切な基準はまだ開発されていない。
- 気候システムにおける炭素循環フィードバックの潜在的な重要性を調査するために、幾つかの **AOGCM** や中程度に複雑な地球システムモデル (**EMIC**) で、炭素循環を陽に扱うことが導入された。
- **EMIC** は、以前よりもさらに徹底的に評価されてきた。相互比較共同計画により、これらのモデルが、取り扱う時間スケールが長い問題や多数のアンサンブル・シミュレーションや感度実験が必要な問題に取り組む際に有用であることが示されている。

### モデルの定式化における進展

大気モデルにおける改良には、力学スキームと輸送スキームの再定式化、水平、鉛直分解能の向上が含まれている。相互作用するエアロゾル・モジュールは、幾つかのモデルに組み込まれており、今やエアロゾルの直接、間接効果がより広く含まれている。

陸面過程の再現については大きな進展があった。個々の構成要素は、観測結果やより包括的なモデルによる組織的な評価を通して改良され続けている。今後数十年にわたって大規模な気候に大きな影響を与え得る陸面過程が現在の気候モデルに含まれている。さらに長い時間スケールで重要な幾つかの過程にはまだ含まれていないものがある。

AOGCM の海洋部分における進展は続いている。解像度は向上し、モデルでは一般的に、海水面の rigid lid 近似（【訳注】：自由表面でないこと）の扱いを行っていない。新しい物理パラメタリゼーションや数値では、真の淡水フラックス、河川や河口における混合スキームの改良や、正の有限移流スキームの使用を含んでいる。断熱的な等密度混合スキームは今や広く使われている。これらの改良が、性能の低いパラメタリゼーション（例えば仮想的な塩分フラックス）に起因する不確実性の低減に繋がっている。

AOGCM の雪氷圏部分の開発における進展は、海氷において最も明らかである。今やほとんどの先進的な AOGCM に、非常に精巧な海氷の力学が組み込まれており、幾つかのモデルでは、海氷の厚さにおける幾つかのカテゴリーや比較的進んだ熱力学を取り入れている。AOGCM における陸域の積雪過程のパラメタリゼーションは、その定式化がかなり異なっている。季節的な積雪の観測結果を再現するためには、サブグリッドスケールの不均質性が重要であることを、積雪の系統的な評価は示唆している。氷床の力学を取り扱っている AOGCM はほとんどない。この章で評価され、10 章で 21 世紀の気候変化予測に用いられた AOGCM はすべて、陸上の氷被覆はあらかじめ規定されている。

今のところ、シミュレーションをより良いものとする数値グリッドの細密化、不確実性の統計的な評価をより良いものとするアンサンブルメンバー数の増加、より複雑な過程（炭素フィードバック、大気化学相互作用）の組み込みにおいて、コンピュータ資源を分配する最適な方法についての合意はまだない。

### モデルの気候シミュレーションにおける進展

幾つかの重要な大気場における季節的な変動の大規模なパターンは、今や AOGCM によって、第 3 次評価報告書の時点よりもよく再現されている。特に、月平均した降水量、海面気圧、地上気温の世界的な分布の再現誤差はすべて小さくなった。幾つかのモデルでは、気候変化時における海面水温や雲フィードバックを正しく再現するのに重要な洋上の

低層雲のシミュレーションもまた改良された。にもかかわらず、雲や熱帯の降水のシミュレーション（及びそれらの重要な地域的・世界的な影響）には、重大な欠陥が残っている。

南大洋において、幾つかの共通のモデル・バイアスが認められ、海洋の熱の取り込みや遷移的な気候応答に不確実性を残している。シミュレーションにおいて、水温躍層が厚すぎることと、大西洋の循環と熱輸送がともに弱すぎることは、多くのモデルでかなり改良された。

海氷の形成の定式化に顕著な進展があったにもかかわらず、AOGCMによる、観測された海氷のシミュレーションは、第3次評価報告書以降あまり進歩していない。相対的に進歩が遅れていることは、海氷のシミュレーションを改良させるには、海氷部分自体のみならず大気部分と海洋部分ともに改良する必要があるという事実によって部分的に説明される。

第3次評価報告書以降、AOGCM開発の進展に伴い、幅広い時間スケールにわたる大規模な変動の再現性が向上してきた。北半球や南半球の環状モード、太平洋十年規模変動、太平洋・北大西洋パターン（PNA）、Cold Ocean-Warm Landパターンを含めた顕著な温帯変動パターンをモデルはとらえている。AOGCMでは、大西洋の数十年変動が再現できるが、低緯度過程と高緯度過程の相対的な役割はモデル間で異なっている。熱帯では、ENSOの空間的なパターンや頻度のAOGCMによるシミュレーションは全般的に向上したが、その季節的な位相の固定や、エルニーニョとラニーニャの非対称性のシミュレーションにはまだ問題が残っている。MJOの幾つかの特徴的な変動はほとんどのAOGCMで再現されているが、それらは概して発生頻度が低すぎ、また弱すぎる。

AOGCMは極端な高温、寒気の出現、氷点下となる日を程よく再現することができる。熱帯低気圧の変化予測のために本報告書で使われているモデルは、熱帯低気圧の現在の頻度と分布を再現できるが、強度はあまりよく再現されていない。極端な降水のシミュレーションは、解像度、パラメタリゼーション、選択されたしきい値に依存する。一般的に、モデルでは、弱い降水日（日降水量10mm未満）の日数は多過ぎて、強い降水日（日降水量10mm超）における降水量は少な過ぎる。

EMICは、包括的なAOGCMでは計算コストが過大となるため扱うことのできない、過去と将来の気候変化の調査のために開発された。解像度が低いことと、幾つかの物理過程の表現を単純化したために、EMICは非常に大規模の現象についてのみ推測することができる。第3次評価報告書以降、EMICは幾つかのモデルの相互比較共同計画によって評価され、EMICによる結果は、大きなスケールでは、観測データやAOGCMの結果とよく比

較できることが明らかになった。このことは、EMICが、現在のAOGCMで扱うことのできる時間スケールを超えたスケールで変化する気候システム内部の諸過程や相互作用を理解するために使われ得るという見方を支持するものである。長期的な気候変化予測における不確実性も、EMICによる多数の実験のアンサンブルを用いることにより、より包括的に調査することができる。

### **解析手法における発展**

第3次評価報告書以降、モデリング・センター外の科学者たちによる精密な調査のため、新しいモデルの結果を提供するための前例のない努力が始められている。18のモデリング・グループが、統合的、標準的な一連の実験を実施し、世界中の数百もの研究者によって解析されたそれらの結果のモデル出力は、現在のIPCCによるモデル結果の評価の大部分の基礎となっている。調整されたモデル相互比較の利点としては、モデリング・グループ間のコミュニケーションの強化、より早い誤差の検知と修正、標準化されたベンチマーク計算手法の作成、モデル作成の進歩をより完全に組織的に記録することにある。

幾つかの気候モデルでは、初期値予測における性能を、天気予報（数日）から季節予報（年）の時間スケールでテストされており、（また、その能力があることが示されている）。これらの条件下でモデルが示した能力により、それらのモデルが、気候システムにおける重要な過程やテレコネクションの幾つかを再現できるという信頼性が高まっている。

### **気候フィードバックの評価における進展**

水蒸気フィードバックは気候感度を強める最も重要なフィードバックである。このフィードバックの強さはモデル間でやや異なるが、モデルの気候感度のスプレッドに及ぼす全体的な影響は、気温減率フィードバックによって小さくなっており、逆相関の傾向がある。幾つかの新たな研究結果によれば、モデル化された対流圏下層、上層の湿度は、観測結果と一致するように、季節や年々の変動、火山噴火による低温化、気候トレンドにตอบสนองすることが示されている。最近の観測、モデル実験の結果はこのように、水蒸気-気温減率フィードバックの強度が、AOGCMによって再現されたものと同程度であることを強く支持する。

気候感度推定値のモデル間のスプレッドは、主に雲フィードバックのモデル間の違いによって生じていることが、最近の研究で再確認されている。境界層の雲の変化や、それより影響は小さいながら中層雲の変化の短波放射の影響は、全地球的な雲フィードバックのモデル間の違いに最も大きく寄与している。現在気候において、これらの雲の再現性が比較的低いことがこういった懸念の理由である。現在のモデルでは、深い対流雲に対して予測される応答がモデルごとに異なるので、地球温暖化に対するこれらの雲の応答もまた、

予測の不確実性をもたらす大きな原因である。観測結果に基づく雲フィードバックの評価は、気候モデルによってフィードバックの強さが異なることを示しており、気候変化の雲フィードバックのどの評価が最も信頼できるかをまだ決定することができていない。

第3次評価報告書以降進展があったにもかかわらず、AOGCMにおける雪氷フィードバックの規模には、依然としてかなり大きな不確実性が残っている。このことは、特に高緯度において、モデルによる気候応答のスプレッドに寄与している。地球スケールでは、地表アルベドのフィードバックはすべてのモデルで正であり、雲フィードバックよりずっと小さく、モデル間で異なっている。海氷のフィードバックの理解と評価は、極域の雲過程と、海洋の熱や淡水の輸送と強く結びついているため困難な作業である。極域での観測不足もまた評価の妨げとなる。地表面のアルベド・フィードバックを評価する新しい技術が最近開発されている。モデルの性能が陸域の積雪面積の観測された季節サイクルを再現するに至れば、再現された気候変化における雪のアルベド・フィードバックについて、間接的な評価を与えるかもしれない。

組織的なモデル間の比較は、気候変化への海洋の応答にモデル間での違いをもたらす重要な過程を明らかにするのに役立っている。表面でのフラックス変化が深層循環に及ぼすフィードバックの重要性が多くのモデルで確認されている。現在では、これらのフィードバックは利用できる観測結果によって強く拘束されていない。

モデルにおける気候フィードバックへ寄与する諸過程の解析、モデルの多数のアンサンブルに基づく最近の研究によって、将来、モデルの気候変化予測における現在のスプレッドを狭めるために観測結果を使うことができる可能性が指摘されている。

## よくある質問と回答

### FAQ8.1: 将来の気候変化の予測をするのに使われるモデルはどの程度信頼できるのか？

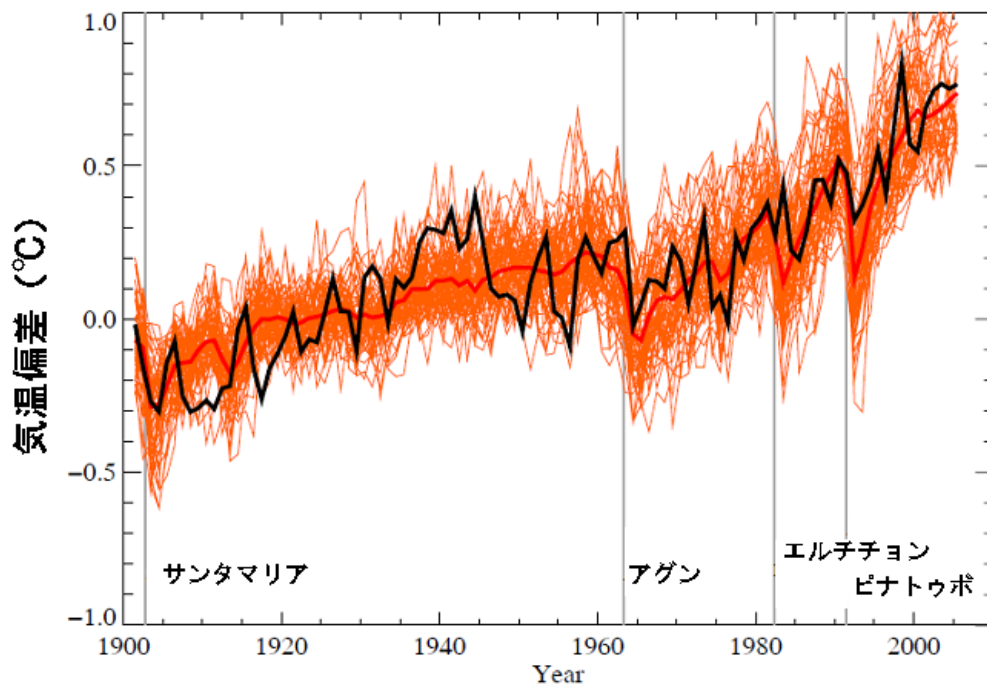
特に大陸規模以上の規模では、気候モデルが将来の気候変化について信頼できる定量的な評価を提供しているというかなりの信頼性がある。この信頼性は、広く受け入れられた物理法則に基づいてモデルが構築されていることと、現在気候と過去の気候変化についての観測結果をモデルが再現できることを根拠としている。モデル評価における信頼性は、幾つかの気候要素（例えば気温）では他の気候要素（例えば降水量）よりも高い。数十年にわたる開発の結果、モデルは一貫して、温室効果ガスの増加に対応した、著しい気候の温暖化を、はっきりとした、あいまいさのない形で示している。

気候モデルは気候システムの数学的な表現であり、コンピュータ・プログラムで表され、

強力なコンピュータ上で計算される。モデルに信頼性があることを示す一つの根拠は、モデルの基礎が豊富な観測事実とともに、質量保存やエネルギー運動量の保存といった確立した物理的な法則に基づいているという事実から生じる。

信頼性の第二の根拠は、現在の気候の主要な様相を再現できる能力にある。モデルは常にかつ広範囲にわたって、その再現結果を大気や海洋、雪氷、地表面の観測結果と比較することによって評価される。最近 10 年間に、組織的なマルチ・モデル相互比較により、空前の水準で評価が行われてきた。大気温度、降水量、放射、風、海水温、海流、海氷被覆の大規模な分布といった平均的な気候についての多くの重要な特徴を再現することでは、モデルの能力はかなり高かつさらに強化しつつある。モデルはまた、さまざまな時間スケールにわたって観測された気候変動のパターンの多くの重要な様相を再現できる。例として、大規模なモンスーンシステムの進行や後退、気温、ストームトラック、雨域帯の季節的な移動、温帯の地上気圧における半球スケールのシーソー（北半球や南半球の環状モード）がある。幾つかの気候モデルまたはごく近縁の変種は、天気予報や季節予報に用いることでもまたテストされている。これらのモデルは、季節や年々の変動の様相はもとより、より短い時間スケールでの大循環の重要な特徴を再現できることで、そのような予測にスキルがあることを示している。モデルが、これらの重要な気候の特徴を再現する能力を持っていることで、将来の気候変化のシミュレーションにとって重要な物理過程をモデルが再現できることに対する信頼性が増加している（気候モデルで、数日を超える天気を予報する能力が限られていることは、長期の気候変化の予測能力に限りがあることとはならない。なぜなら、両者の予測はとても異なっているからである。FAQ 1.2 を参照）。

信頼性を示す第三の根拠は、過去の気候や気候変化の特徴をモデルが再現できることから生じる。モデルは 6000 年前の完新世中期の高温期や 2 万 1000 年前の最終氷期最盛期のような過去の気候を再現するのに使われている（6 章参照）。それらは（過去の気候の再構築における不確実性を考慮しても）最終氷期における海洋の冷却の規模や広さのパターンといった多くの特徴を再現できる。モデルは、測器による観測記録における気候変化の多くの様相も再現できる。一つの例は、気候に影響を及ぼす人為的要因と自然的要因をともに含めたとき、20 世紀における世界平均気温のトレンド（FAQ8.1 図 1 参照）がかなり高い精度で再現できることである。モデルはまた、日中よりも夜間の気温上昇が大きいことや、北極域で温暖化の程度が大きいこと、1991 年のピナトゥポ火山の噴火のような大きな火山の噴火による、世界的ではあるが小さく短期的な寒冷化（とそれに続く復元）といった、観測された他の変化も再現できる（FAQ8.1 図 1 参照）。モデルによる最近 20 年の世界全体の気温の予測はその期間における観測結果と一致している（第 1 章）。



FAQ8.1 図1 観測（黒線）及び、14 の気候モデルを用いて、自然起源と人為起源の放射強制力とともに考慮した 58 のシミュレーションから得られた、20 世紀の地表面付近の平均気温（赤細線）。すべての実験の平均を太い赤線で表す。気温は、1901～1950 年の平均からの偏差で表している。縦の灰色の線は、火山の大きな噴火時期を示す。（図は第 9 章、図 9.4.1 を転載。さらなる詳細については対応する見出しを参照）

それにもかかわらず、モデルはいまだに大きな誤差を示す。一般的に、規模が小さくなるほどそれらの誤差は大きくなるが、大きな規模の重大な問題もまた残っている。例えば、熱帯の降水、ENSO、MJO（30～90 日の時間スケールで観測される熱帯の風や降水の変化）のシミュレーションには依然として不確実性が残っている。そのような誤差の根本的な原因は、多くの重要な小規模の過程がモデルにおいて陽に表現できていないことにあり、これらの過程が、大規模な特徴と相互作用するような適切な形でモデルに含められなければならない。これは部分的にはコンピュータの能力の限界に起因するが、幾つかの物理過程について、科学的な理解や詳細な観測結果が利用できないことから生じている。主要な不確実性は特に、雲の再現性やその結果としての気候変化への雲の応答に関連している。結果として、特定の温室効果ガスの放射強制力に対応して、モデルが示す全地球的な気温変化にはかなりの幅がある（第 10 章参照）。しかし、そのような不確実性にもかかわらず、温室効果ガスの増加に伴い、気候がかなり温暖化するという予測については各モデルは一致しており、この温暖化は気候変化の観測結果や過去の気候再現といった他の資料から引き出された独立した評価と一致している。

全球モデルによって予測された変化の信頼性は、規模が小さくなるほど低くなるので、地域気候モデルやダウンスケーリング手法の使用といった他の技術が地域的、局所的な規模の気候変化の研究のために特別に開発されている（FAQ11.1 参照）。しかし、全球モデルの高度化と解像度の細密化が続けられているので、これらのモデルは、極端現象の変化といった重要な小規模の特性の調査にますます有用になっており、コンピュータの性能の増加とともに、地域的規模の再現性のさらなる改良が期待されている。モデルによる気候システムの扱いは、ますます包括的になってきた結果、特に長い時間スケールでの気候変化に潜在的に重要だと考えられている、物理的、生物学的な過程や相互作用は陽に再現されている。近年、植生反応、海洋の生物学的、化学的相互作用、氷床の力学が幾つかの全球気候モデルに盛り込まれているのがその例である。

まとめると、モデルの信頼性は、それらの物理的な基礎や観測された気候や過去の気候変化を再現する能力から生じる。モデルは気候を再現し、理解するための極めて重要な手段であることを示しており、特に将来の大規模な気候変化について、信頼できる定量的な評価をモデルが提供できることについてはかなりの信頼性がある。モデルには、雲の再現性などに重大な問題が引き続き残っており、そのことはその地域的な詳細同様に、気候変化の規模やタイミングの予測における不確実性に繋がる。それにもかかわらず、数十年にわたる開発の結果、モデルは一貫して、温室効果ガスの増加に対応した著しい気候の温暖化を、はっきりとした、あいまいさのない形で示している。



## 第9章 気候変化の理解と要因評価

### 概要

気候システムに、外部要因が影響を及ぼしていることを示す事実が、第3次評価報告書以降も集まり続けている。現在得られている証拠はこれまでよりはるかに強力なもので、気候システム全体にわたる広範な温度上昇などの気候変数の変化の解析に基づいている。

*人間活動による気候系の温暖化は広範囲に及ぶ。* 地表面や対流圏、海洋の温度観測を通じて、人為起源の気候システムの温暖化を検出することができる。多様なシグナルの検出作業や原因特定分析により、観測された変化に対する自然及び人為的な放射強制力の寄与を定量化することができるが、過去半世紀の間の温室効果ガスによる放射強制力だけによる昇温は、エアロゾル等の放射強制力が昇温を打ち消す効果がなかったとしたら、観測された温暖化よりも大きかった*可能性が高い*ことが明らかになった。

過去半世紀の温暖化の世界的なパターンを、外部放射強制力なしで説明できる*可能性は極めて低く* (5%以下)、また既知の自然起源の外部放射強制力のみによる*可能性も非常に低い*。温暖化は、海洋及び大気両方で現れ、しかも、自然起源の外部放射強制力因子が寒冷化を引き起こしたかもしれないときに起きた。

温室効果ガスによる放射強制力は、過去50年にわたって、観測された昇温の原因の大部分を占める*可能性が非常に高い*。この結論は、観測結果や放射強制力の不確実性を考慮しているとともに、気候モデルが太陽の放射強制力に対する応答を過小評価している可能性を考慮している。気候モデルや外部放射強制力に対する応答を見積もる手法や、解析技術が異なっても、同じ結論が得られている。

ラジオゾンデや人工衛星による観測から、自由大気的气温に人為起源の影響が及んでいることを示す証拠が蓄積されてきた。対流圏の昇温と成層圏の降温というパターンが観測されており、これは、人為起源の放射強制力、特に温室効果ガスと成層圏オゾン破壊の影響による*可能性が非常に高い*。対流圏の昇温と成層圏の降温という組み合わせが、対流圏界面高度の上昇をもたらした*可能性が高い*。人為起源の放射強制力が、20世紀後半に観測された、海洋上部数百メートルの全般的な昇温に寄与してきた*可能性が高い*。人為起源の放射強制力は、海洋の昇温による熱膨張や氷河の質量損失をもたらし、20世紀後半の海面水位上昇に寄与した*可能性が非常に高い*。これまでの、検出や原因特定に関する研究では、海洋貯熱量の増加と氷河の融解への人為起源の放射強制力の寄与を定量化することは困難である。

**20世紀半ば以降、南極を除くすべての大陸における地上気温の上昇にかなりの人為起源の寄与があった可能性が高い。**人為起源の影響は、南極を除くすべての大陸（南極は、評価するに十分な観測がない）と幾つかの亜大陸規模の陸域で検出されている。結合気候モデルを用いると、大陸規模の温度変化と六大陸おのおのに対する人為的効果の検出を再現することができ、その結果、世界の気候に人為的影響が及んでいることが、第3次評価報告書のときよりも明白に示される。自然起源の放射強制力のみを考慮した気候モデルで、20世紀後半の、観測された世界平均の温暖化傾向や南極を除く個々の大陸における大陸平均の温暖化傾向を再現しているものはない。

大陸より小さい規模で、50年以下の時間スケールの気温変化の原因特定はいまだに困難である。これらの規模では、限られた例外を除いて、原因はいまだに特定されていない。小さい地域で平均すると、大きな地域で平均するときと比べて自然の変動を取り除きにくく、その結果、異なる外部放射強制力から予想される変化を識別したり、外部放射強制力と自然の変動を分離することが難しくなる。また、地域や季節によっては、自然の変動の何らかのモードと関連している気温変化は、モデルでよく再現されない。さらにその上、小さな規模での詳細な外部放射強制力やモデルで再現された応答は、大きな規模の場合より信頼性が低い。

**地上気温の極端な現象は、人為起源の放射強制力に影響されている可能性が高い。**霜が降りる日、暑い日や寒い日・夜の年間日数など、極端な気候や変動を表す指標の多くは、温暖化と一致した変化を示している。これらの指標の中には、人為起源の影響が検出されたものもあり、また、人為起源の放射強制力が、2003年のヨーロッパの熱波のように、極端に暑い夏をもたらす危険性を地域的にかなり増加させた可能性があることを示す証拠がある。

**気候システムの他の部分で人為起源の影響を示す証拠がある。**最近の北極の海氷域の減少や氷河の後退に、人為起源の放射強制力が寄与している可能性が高い。観測されている世界的な積雪面積の減少や氷河の広範囲の後退は、温暖化と一致しており、これらの融解が海面水位の上昇に寄与している可能性が高いことを示す証拠がある。

極域の海面気圧の低下と対応している南半球・北半球環状モードの最近数十年の傾向は、人間活動と部分的に関係する可能性が高く、両半球における低気圧経路、風、気温のパターンに影響を及ぼしている。モデルでは、北半球環状モードの変化傾向の向きを再現できるが、再現された応答は観測結果よりも小さい。温室効果ガスと成層圏オゾンの変化を取り入れたモデルを使うと、南半球環状モードの現実的な傾向を再現することができ、世界の海面気圧パターンに検出可能な人為的影響があることを示している。

20 世紀後半における全世界の陸域の年平均降水から、幾つかのモデルによって再現されている火山起源の放射強制力に対する応答が検出できる。20 世紀における、陸域の降水の緯度方向の変化パターン及び観測された大雨の増加は、人為起源の放射強制力に対する応答として予測されているものと一致しているようにみえる。人為起源の影響が、強い熱帯低気圧の頻度の増加に、寄与している可能性がどちらかといえはる。人為起源の要素をこれ以上明確に原因として特定することは現状では不可能である。なぜなら、観測されている強い熱帯低気圧の増加は、理論的研究やモデル研究で示されているよりも大きく、また過程に関する知見や自然変動に対する理解の不足、強い熱帯低気圧のモデリングにおける不確実性、過去の熱帯低気圧データの不確実性などがあるからである。

**古気候データの解析により、気候に対する外部影響の役割に関する信頼性が高まった。** 未来の気候を予測するために用いられる結合気候モデルが、最終氷期極大期及び完新世中期という過去の気候状況を理解するために使われた。これら過去の気候には、多くの面でまだ不確実な部分があるものの、主な特徴は、これらの時代に対する境界条件と放射強制力を気候モデルに適用することで再現された。1950 年以前の 7 世紀間の北半球の数十年規模の温度変動が再現されたが、そのかなりの部分は自然起源の外部放射強制力によるものである可能性が非常に高く、また、人為起源の強制力が、これらの記録で明らかな 20 世紀初めの昇温に寄与している可能性が高い。

**現在では、気候感度の推定値は、観測結果によってさらに狭められた。** 観測結果に基づく見積もりでは、平衡気候感度は、 $1.5^{\circ}\text{C}$  以上である可能性が非常に高く、 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$  の範囲に入る可能性が最も高い。上位 95% 限界を観測結果から決めることは依然困難である。このことは、平衡気候感度は  $2\sim 4.5^{\circ}\text{C}$  の可能性が高く、およそ  $3^{\circ}\text{C}$  である可能性が最も高いという、モデル実験及び観測研究に基づく総合的な評価を支持している (第 10 章、Box10.2)。観測結果から決まる過渡的な気候の応答は、 $1^{\circ}\text{C}$  より大きい可能性が非常に高く、また二酸化炭素が年率 1% で増加したときの二酸化炭素倍増時に  $3.5^{\circ}\text{C}$  以上である可能性は非常に低い。これは、過渡的な応答は  $3^{\circ}\text{C}$  より大きくなる可能性は非常に低いという総合的な評価を支持している (第 10 章)。

**証拠の全体的な一貫性。** 20 世紀における、地表面及び自由大気の温度、海洋の温度と海氷面積の変化に関する多くの観測結果や大気大循環の変化の幾つかは、内部変動とは別のもので、人為起源の放射強制力に対する応答として予測されるものと一致する。気候システムのすべての主要な要素のエネルギー量が同時に増加していることに加えて、気候システムのそれぞれ異なる要素及び要素間にわたる温暖化の規模やパターンは、温暖化の原因は内部過程の結果である可能性が極めて低い (5% 以下) という結論を支持する。積雪、氷河後退、大雨など、その他の観測でも定性的には一致している。

**残された不確実性。**第3次評価報告書以降、モデルや解析技術のさらなる改善により、外部放射強制力が気候に及ぼす影響の理解についての信頼性が増した。しかしながら、放射強制力の中には、エアロゾルの放射強制力や太陽の放射強制力の数十年規模変動など、見積もりがいまだ不確実なものがある。観測された温暖化に基づき、逆解析法を用いて推定した、20世紀のエアロゾルによる正味の放射強制力は、 $-1.7\sim-0.1\text{ W/m}^2$ である可能性が高い。この結果が、総エアロゾルによる放射強制力の、順解析法による見積もり（第2章）と一致していることは、不確実性は残されているものの、総エアロゾルによる放射強制力の推定の信頼性を高めている。それにも関わらず、地表気温の原因特定の結果が、放射強制力や応答の不確実性にも揺らぐことなく信頼できるものか、さまざまなモデル、放射強制力の表現及び解析手順を用いて見積もられてきた。残された不確実性の潜在的な影響は、上に挙げた証拠をすべて総合的に評価するときに、できる限り考慮されてきた。地上気圧や降水など他の変動因子に関する、放射強制力による変化及び空間規模がより小さな変化に関する理解の信頼性はそれほど高くない。

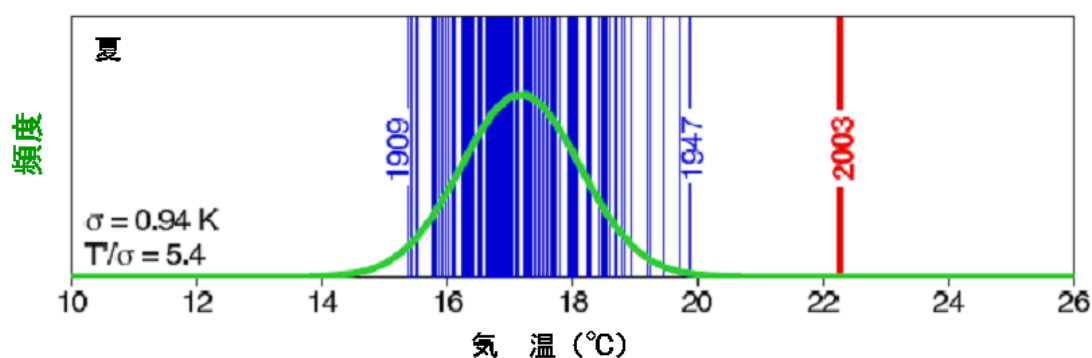
測器及び代替気候記録の理解の改善と気候モデルの改良により、気候モデルで再現される内部変動の信頼性が増してきた。しかしながら、不確実性は残ったままである。例えば、海洋貯熱量の変動の推定値について、モデルと観測では明らかに相違があった。ラジオゾンデと衛星の記録の不確実性は、第3次評価報告書のときと比べて減少してはいるが、なお対流圏の気温変化に対する人為起源の寄与の見積もりの信頼性に影響を与える。極端現象の強度、頻度及び危険性の変化に関する理解には改善がみられたものの、地球規模のデータセットの不完全性とモデルに残っている不確実性により、極端な現象の変化や変化の原因特定に関する我々の理解はなお限られている。

## よくある質問と回答

### FAQ9.1： 個々の極端な現象は、温室効果ガスによる温暖化で説明できるか？

化石燃料の使用といった人間活動から出る温室効果ガスの増加に応答した気候の温暖化に伴って、極端現象に気候的な変化が現れると予測される。しかしながら、ある特定の極端現象が、温室効果ガスの増加のような特定の原因の結果であるかどうかを決めることは、以下の二つの理由により、不可能とはいわないまでも、困難である。第一に、極端現象は、通常、幾つかの要因が複合して起きる。第二に、さまざまな極端現象は、変化しない気候においてさえ通常起こるものである。しかしながら、前世紀に観測された温暖化の解析では、極端現象の中には、温室効果ガスによる温暖化により、例えば熱波のように、起こりやすくなってきたものや、例えば霜あるいは極端に寒い夜のように起こりにくくなったものがあることが示唆される。例えば、最近の研究によれば、人類の影響により、2003年のようなヨーロッパの非常に暑い夏が起こる危険性は倍以上になったという推定もある。

極端な気象現象の影響を受けた人はしばしば、人類が気候に及ぼす影響が、ある程度は極端現象の原因であるといえるのか尋ねる。近年、極端な現象が発生すると、温室効果ガスの増加と結びつけてコメントされることが多くみられる。これらの現象には、オーストラリアの長期の干ばつ、2003年のヨーロッパの極端に暑い夏（FAQ9.1 図1 参照）、北大西洋における2004年及び2005年の強いハリケーンのシーズン、インドのムンバイにおける2005年7月の極端な降雨現象などがある。大気中の温室効果ガス濃度の増加のような人類による影響は、これらの現象の原因たり得るのだろうか？



FAQ9.1 図1 スイスの1864年から2003年の夏の気温は、緑色の線で示されるように平均で約17°Cである。2003年の極端に高温だった夏では、平均気温は赤い線で示すように22°Cを超えた。（縦の線は、137年間の年々の記録を示す。ガウス分布近似を緑色の線で示す。記録的な年であった1909年、1947年及び2003年を特に記す。左下隅の値は、標準偏差（ $\sigma$ ）と、1864～2000年の標準偏差で規格化した2003年の偏差（ $T'/\sigma$ ））。Schär et al.（2004）による。

極端な現象は、通常、さまざまな要因が複合した結果発生する。例えば、2003年夏のヨーロッパの極端に暑い夏は、晴天と土壌の乾燥（土壌水分の蒸発に使われるエネルギーが少なくなるので、太陽エネルギーが土壌を暖める方により多く振り向けられる）をもたらした持続的な高気圧システムを含む幾つかの要因が寄与していた。同様に、ハリケーンの形成には、海面水温が高いことに加えて、大気循環がある決まった条件を満たしている必要がある。海面水温のように、人間の活動に強く影響される可能性のある要因がある一方、そうでないものもあり、ある特定の極端現象から人為的影響を検出するのは簡単ではない。

しかしながら、人為的影響により、ある種の極端現象の発生しやすさが変わったかどうかを明らかにするために気候モデルを使うことは可能かもしれない。例えば、2003年のヨーロッパの熱波の場合、火山活動及び太陽放射の変動のような、気候に影響を与える自然の要因の時間的変化のみを含む気候モデルが実行された。次に、人間及び自然の要因の両方を含めて再度モデルが実行され、その結果、現実には起きた気候にはるかに近いヨーロッ

パリの気候が再現された。これらの実験に基づいて、人為的影響により、ヨーロッパの夏が2003年程度に高温になる危険性が倍以上になり、しかも、人為的影響がなければ、この危険性はおそらく数百年に一度程度のものであったことが推測された。パリのような都市域で非常に暑い夜が続くといった、具体的で強いインパクトを持つ現象の危険性の変化を見積もるため、さらに詳細なモデル研究が必要となる。

「人為的影響によって、ある現象の起こりやすさが変わるのか？」といった、確率に基づいて議論を進めることの利点は、温室効果ガスの増加のような外部要因が、熱波や霜のような特定の種類の現象の発生頻度に及ぼす影響を評価するときに利用できるということである。しかしながら、遅霜のような個々の極端現象の起こりやすさは、平均的な気候状態の変化ばかりでなく、気候の変動性の変化によっても変化し得るので、注意深い統計解析を行う必要がある。このような解析は、気候モデルによる気候の変動性の見積もりに頼っているため、気候モデルは、そのような変動性を適切に表現できなければならない。

大雨や洪水の頻度の変化を調べるためにも、同様の起こりやすさに基づく手法を使うことができる。気候モデルは、人為的影響により、大雨を含むさまざまな極端現象が増加することを予測している。最近数十年において、地域によっては大雨が増加しており、洪水の増加をもたらしていることを示す証拠がある。

#### **FAQ9.2： 20世紀の温暖化は自然の変動で説明できるか**

20世紀の温暖化を自然の原因によって説明できる可能性は非常に低い。20世紀の終わりは、異例に高温だった。再構築した古気候によれば、20世紀後半の北半球は、50年の期間としては、最近1300年で最も高温だった可能性が高い。この急速な温暖化は、前世紀に起きたような温室効果ガスの急速な増加に対して起こるべき気候の応答として科学的に理解されているものと一致し、かつ、太陽放射や火山活動の変動のような、自然起源の外部要因に対して、科学的に起こるべきと理解されている気候の応答とは一致していない。気候モデルは、地球の気候に及ぼすさまざまな影響の研究に適切な道具である。自然の外部要因に加えて温室効果ガスの水準が増加している効果がモデルに組み込まれた場合、前世紀で起きた温暖化がモデルで良く再現される。自然要因しか用いないと、モデルは観測された温暖化を再現することはできない。人為起源の要因を取り入れると、最近数十年に起きた地球全体の気温変化の地理的パターンに類似したパターンもモデルで再現される。この空間パターンには、北半球高緯度で、より顕著に昇温するといった特徴があり、エルニーニョのような、内的な気候過程と関係して起こる自然の気候変動の最も主要なパターンとは違っている。

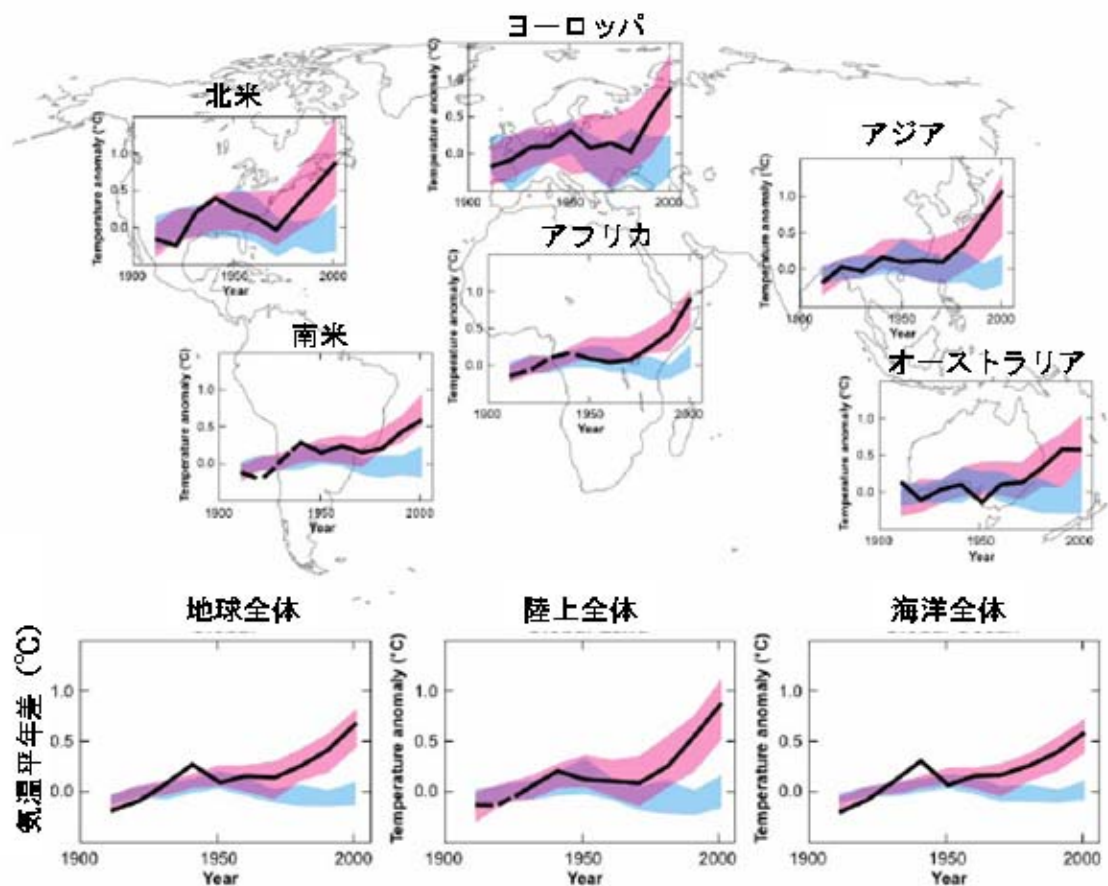
地球の気候の時間変動は、外部影響の変化のみならず、エルニーニョのような自然の内

部変動によっても引き起こされる。これらの外部影響には、火山活動及び太陽放射変動のような自然起源のものもあり、また、温室効果ガス排出、人為起源のエーロゾル、オゾン層破壊、土地利用変化のような人類の活動によってもたらされるものもあり得る。気候の変動性の観測結果を研究するとともに、気候に影響する外部要因を一定に保ちつつ気候モデルを実行することによって、自然の内部過程の役割を評価することができる。外部の影響を評価するためには、モデルでこれらの要因を変化させるとともに、そのような過程に関する物理的知見をモデルに組み入れれば良い。自然の内部変動と外部要因が合わさった効果は、工業化時代より前では、年輪、氷床コア等の天然の「温度計」に記録されている気候情報から評価することができる。

気候に影響を与える自然の外部要因には、火山活動や太陽放射変動などがある。爆発的な火山噴火は、ときに大量のちりや硫酸塩エーロゾルを大気中に排出して、一時的に地球を覆い、太陽光を宇宙に反射する。太陽放射には 11 年周期があり、さらに長い周期の変動もあり得る。過去 100 年間の人類の活動、特に化石燃料の燃焼は、二酸化炭素など大気中の温室効果ガスの急増をもたらした。産業時代前、これらのガスは、数千年間、ほぼ安定した濃度を保ってきた。人類の活動は、特に 1950 年代～1960 年代の間、大気中の微小な反射粒子である「エーロゾル」の濃度の増加をももたらしてきた。

エルニーニョのような自然の内部変動過程は、比較的短い期間にわたって、地球の平均温度の変動をもたらすものの、解析によれば、20 世紀の地球の平均気温の変化の大部分は外部要因によってもたらされた。1991 年のピナトゥボ山のような大規模な火山噴火のあとに、短期間の世界的な寒冷化が起こった。20 世紀初めに世界平均の気温は上昇したが、その間に温室効果ガス濃度は上昇し始め、太陽放射はおそらく増加し、火山活動はほとんどなかった。1950 年代から 60 年代にかけては、化石燃料その他の排出源から出るエーロゾルの増加が地球を冷却し、世界平均気温は横ばいとなった。1963 年のアグン山の噴火でも、大気上層に反射性のちりが大量に排出された。1970 年代以降に観測された急速な温暖化は、他のすべての要因に卓越して温室効果ガスが増加した時期に起きた。

20 世紀の気候変化の原因を明らかにするために、気候モデルを使った数値実験が数多く行われてきた。これらの実験では、太陽放射や火山活動の変動を考慮しただけでは、最近数十年に観測された急速な温暖化を、モデルでは再現できないことが示される。しかしながら、FAQ9.2 図 1 に示すように、温室効果ガス等を原因とする人為起源の影響や自然の外部要因といった、最も重要な外部要因をすべて組み込めば、モデルは観測された 20 世紀の気温変化を再現することができる。モデルで見積もったこれらの外部要因に対する応



FAQ9.2 図1 各大陸、地球全体、陸域、海洋それぞれにおける前世紀の10年単位の気温(摂氏)の変化。黒い線は、観測された気温変化を示す。色の付いた帯は、最近のモデルによる再現結果の9割をカバーする範囲を示す。赤は自然及び人為起源の要因を含むシミュレーション、青は自然の要因のみを含むシミュレーションの結果を示す。黒い破線は、観測がかなり少ない地域、期間を示す。この図の詳しい説明及びこの図の作成に用いた手法は付録9.Cで説明する。

答は、20世紀の気候において、地球規模でも、観測が不十分な南極を除くそれぞれの大陸でも検出可能である。気候に及ぼす人為起源の影響は、過去半世紀の間の世界平均の地上気温の変化の原因として、他のすべての原因を凌駕している可能性が非常に高い。

人為起源のエロゾルのように、理解が不十分な外部要因があることが、不確実性が生じる大きな理由の一つである。また、気候モデル自身も不完全である。しかしながら、モデルが再現した、人間活動による温室効果ガス増加に対する応答のパターンはどれも、海洋よりも陸の方が昇温量が大きいことなど、観測された変化パターンと類似している。この変化パターンは、エルニーニョのような自然の内部変動に伴う温度変化の主要なパター



ンとは異なっており、温室効果ガスに対する応答と自然の外部要因の応答を識別する一助となる。もう一つの例は、モデルと観測の両方が大気下層（対流圏）の温暖化と、それより上層の成層圏の寒冷化を示していることである。これは、人類の気候への影響の効果を示す、もう一つの変化の証拠である。もし、例えば、太陽活動の活発化が最近の気候の温暖化の原因だったとすると、対流圏と成層圏の両方が昇温していただろう。加えて、人為起源の影響と自然の外部影響のタイミングの違いが、これらの要因に対する気候の応答を識別するのに役立つ。このような考察により、自然要因よりは人為的な要因の方が、過去 50 年間に観測された地球温暖化の支配的要因であったという説の信頼性が高まっている。

過去 1000~2000 年の北半球の気温は、気温の変化に伴って幅や密度が変化する年輪のような天然の「温度計」及び歴史的な気象の記録に基づいて推定される。これらの記録は、20 世紀の温暖化が、自然の内部変動と自然の外部放射強制力だけでは説明できないとの推測を裏付ける追加的な事実となる。工業時代以前の北半球平均気温の変動は、火山の大噴火によって発生した一時的な寒冷化や太陽放射の変化によっておおむね説明できるため、これらの気温推定の信頼性は高い。残りの変動は、気候モデルで、自然及び人為起源の外部要因を除いたときに再現される変動とおおむね一致している。過去の気温の推定値には不確実性があるが、そのような推定によれば、20 世紀後半は、過去 1300 年で最も暖かい 50 年であった可能性が高い。20 世紀の顕著な温暖化に比べると、自然の要因によって起こる気候変動は小さいと見積もられている。

## 第 10 章 世界的な気候の予測

### 概要

この章で評価する将来の気候変化に関する結果は、大気海洋結合大循環モデル (AOGCM) や、中程度に複雑な地球システムモデル (EMIC) から、簡易気候モデル (SCM) にわたる一連のモデル階層を用いた研究に基づくものである。気候緩和策を含まないシナリオから理想化された長期シナリオにまで及ぶ、多様な排出シナリオから得られる、温室効果ガスや他の大気成分の濃度が、これらのモデルにおける強制力として用いられる。ここでは総じて、緩和策を含まない場合の将来の気候変化を地球全体から数百 km までのスケールで評価する。地域的及び局地的な気候変化に関するさらに詳細な評価は第 11 章において記述される。世界中のモデル研究グループによる前例のない共同作業により、今では、気候変化の予測は多数のモデルの平均に基づくものとなり、モデル間の違いを定量的に評価することが可能となり、場合によっては重要な気候システムの要素が変化する確率の推定が、専門家の判断を補完している。新たな研究結果は、第 3 次評価報告書で記述された研究結果を裏付けるものである。温室効果ガスの排出が現在の水準あるいはそれ以上で続けば、21 世紀の間に地球全体の気候システムにさらなる温暖化を起こす原因となり、多くの変化が引き起こされる。それが 20 世紀に観測された変化よりも大規模なものとなる可能性は非常に高くなる。

### 平均温度

この章で評価の対象としたすべてのモデルは、考慮した気候緩和策を含まないシナリオで考察の対象となったすべてのものについて、世界平均地上気温の上昇が 21 世紀中において継続することを予測している。この昇温は、主に温室効果ガスの人為的な濃度上昇によって引き起こされるもので、それに伴う放射強制力に比例した温暖化として説明される。緩和策を含まない三つの SRES シナリオ (B1, A1B, A2。いずれも人為起源の放射強制力のみを含む) から得られた濃度について、AOGCM 実験から得られた、21 世紀初めにおける世界平均地上気温上昇量をみると、同一シナリオについての多数のモデルの平均値はシナリオ間でよく一致している (1980~1999 年を基準とした 2011~2030 年のモデルの平均昇温量は  $+0.64^{\circ}\text{C}$  から  $+0.69^{\circ}\text{C}$  であり、その幅はわずか  $0.05^{\circ}\text{C}$ )。従って、この昇温率は仮定するシナリオの違い、あるいは、モデルの気候感度の違いにもほとんど影響されておらず、過去数十年間に観測された昇温率 (第 3 章を参照のこと) とも整合的である。これらの昇温率は、自然起源の放射強制力が変動する可能性 (例えば大規模な火山噴火) があるため多少変化するかもしれないが、21 世紀初めに予想される昇温率の約半分は既定的なものである。なお、ここで既定的なものとは、仮に大気中濃度が 2000 年の水

準で保持された場合にも生じるであろうことを意味している。（【訳注】第1作業部会報告書の「用語集」では、「既定的な気候変化」（Climate change commitment）を以下のように定義している：海洋の熱的慣性及び生物圏・雪氷圏及び地表面のゆっくりとした過程により、たとえ大気組成が現在の値で固定されたとしても、気候は変化し続けるだろう。大気組成の過去の変化により、既定的な気候変化が引き起こされ、それは放射平衡が崩れている限り、気候システムのすべての要素が新たな状態に調整されるまで継続する。大気組成を一定にした後に起こるさらなる温度変化を既定的な昇温と呼ぶ。既定的な気候変化には、水循環、極端現象、海面水位変化等、その他の将来変化も含む。）21世紀の半ば（2046～2065年）を対象とした、多数のモデルで平均した、世界平均地上気温上昇については、どのシナリオを選択したかが重要となる。その上昇量は、AOGCMによれば B1, A1B, A2 の各シナリオに対してそれぞれ +1.3°C, +1.8°C, +1.7°C である。これらの昇温量の約3分の1は、既定的な気候変化によりもたらされると予測される。21世紀末（2090～2099年）には、シナリオ間の違いが大きくなり、また、既定的な気候変化によりもたらされる昇温は約20%に過ぎない。

AOGCM、確率論的な手法、EMIC、AOGCMの応答に合うように調整された簡易モデル及び気候-炭素循環結合モデルによる予測に基づいた評価が示唆するところによると、緩和策を含まない単一のシナリオに対する将来の世界平均地上気温上昇量は、多数のAOGCMの平均値を基準として-40%から+60%の範囲に収まる可能性が高い。この範囲のうち高い方については不確実性が大きく、その一部は炭素循環のフィードバックに関する不確実性によるものである。1980～1999年を基準とした、2090～2099年の平均地上気温の昇温量に関する、多数のモデルの平均値とその不確実性の幅は、B1シナリオ：+1.8°C（1.1～2.9°C）、B2シナリオ：+2.4°C（1.4～3.8°C）、A1Bシナリオ：+2.8°C（1.7～4.4°C）、A1Tシナリオ：2.4°C（1.4～3.8°C）、A2シナリオ：+3.4°C（2.0～5.4°C）、A1FIシナリオ：+4.0°C（2.4～6.4°C）である。これらの幅の上限値や下限値を、第3次評価報告書に記された単一の幅（【訳注】1.4～5.8°C）と比較することは不適當である。なぜなら、第3次評価報告書における幅は、SRESシナリオ全体に対し、簡易気候モデルを利用して得られた値であったのに対し、ここでは、SRESの六つの例示シナリオを別々に、多くの異なる独立なモデルの結果を組み合わせることにより見積もった幅であるからである。さらに、第3次評価報告書とは異なり、ここでは炭素循環の不確実性が考慮に入れている。なお、これらの不確実性の幅は、人為起源の放射強制力のみを考慮して得られたものである。

予測された地上気温上昇量の地理的分布によると、陸上（地球全体の平均昇温量の2倍程度）及び北半球高緯度において最も昇温が大きく、南の大洋と北大西洋で小さい。この結果は、20世紀後半の観測結果と整合している（第3章参照）。東西平均した大気中の昇

温量のパターンは、熱帯対流圏上部において最大である一方、成層圏では全体にわたって降温するが、これは 21 世紀初めにおいて早くも顕著となっている。一方、東西平均した海洋中の昇温は、21 世紀初めに海面付近と北半球中緯度から始まり、21 世紀にわたって徐々に下向きに広がっていく。

利用可能な観測データによる制約（第 9 章にて評価）と、この章で気候変化予測のために用いられるモデルのシミュレーションによって得られた既知のフィードバックの強さを組み合わせることに基づいた専門家の評価によると、二酸化炭素倍増時の世界平均地上気温の平衡上昇量である「平衡気候感度」は 2~4.5°C の範囲内である可能性が高く、このうち最も可能性が高いのは約 3°C である。平衡気候感度が 1.5°C より高い値である可能性は非常に高い。データに限界があることに加え、基本的な物理的理由により、平衡気候感度が 4.5°C よりもずっと高い可能性も排除することはできないものの、2~4.5°C の範囲に比べ、値がそのように高くなると、観測結果や代替データとの整合性は総じて悪化する。「気候の漸増応答」（年 1%の増加率で二酸化炭素濃度を漸増させる実験における、二酸化炭素倍増時の世界平均地上気温上昇量）は、平衡気候感度に比べ、観測データによる制約をより良く適用できる。気候モデル実験によると、気候の漸増応答は 1°C よりも大きい可能性が非常に高く、3°C よりも大きい可能性は非常に低い。これらは地上の昇温に関する観測結果による制約とも整合している。

#### 気温に関する極端現象

将来の温暖化した気候において、熱波がより激しく、より頻繁に、より長続きするものになる可能性は非常に高い。将来の温暖化した気候では、寒波はかなり減少すると予測される。ほとんどの地域では、日最低気温は、日最高気温よりも急速に上昇すると予測され、このため気温の日較差は減少する。霜日数は中高緯度のほとんどの地域において減少し、また、植物の生長期間はそれと同程度長くなると予測される。

#### 平均降水量

現世代のモデルによる予測によると、将来の温暖化した気候において、地球規模の水循環は総じて強まり、その結果として、熱帯の降水極大域（モンスーン域など）及び特に熱帯太平洋において総じて降水量が増加し、亜熱帯地域では総じて減少、高緯度地域で増加する。地球平均の水蒸気量、蒸発量、降水量は増加すると予測される。

## 降水に関する極端現象及び干ばつ

特に、平均降水量が増加する熱帯と高緯度地域において、降水現象の強度は増加すると予測される。平均降水量が減少する地域（多くの亜熱帯と中緯度域）においても、降水の強度は増加するが、降雨現象の間隔は長くなると予測される。大陸の内部域では夏季に乾燥する傾向があり、これらの地域で干ばつの危険が増大することを示している。多くの熱帯と中高緯度地域において、平均降水量よりも、降水現象の極値の増加の方が顕著である。

## 雪氷

温暖化に伴い、積雪と海氷の面積は減少する。また、冬の降水量増加よりも夏の融解の方が優勢となるため、氷河と氷帽の質量は減少する。第3次評価報告書において前世代のモデルを用いた結果が記述されているが、これは海面水位上昇に寄与する。21世紀中に北極と南極の海氷がともに縮小すると予測されるが、モデル結果の間にはかなり大きい幅がある。北極では、海氷の減少が加速すると予測され、また、排出量の大きいA2シナリオでは、モデルによっては、21世紀後半に夏の海氷が完全に消滅すると予測しているものもある。来世紀にわたる温暖化に伴い、ほとんどの永久凍土地域において、融解深が大規模に増加することが予測される。

## 炭素循環

将来の気候変化により、地球システム（陸域と海洋）が人為起源の二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を吸収する効率が低下するという点において、これまでの排出シナリオを与えた気候-炭素循環結合モデルによる実験結果は現時点ですべて一致している。温暖化に伴い吸収効率が低下する結果、人為起源の二酸化炭素のうち大気中に残存する割合が増加していくことになる。このような正のフィードバックのため、大気中の二酸化炭素濃度はさらに高くなり、排出シナリオA2の場合は、2100年までの二酸化炭素濃度上乗せ分は20~220 ppmと予測される。この計算で用いられた気候-炭素循環結合モデルによる、2100年の大気中二酸化炭素濃度は730~1020 ppmである。この値を標準的な値である836 ppm（炭素循環との相互作用を考慮しないBern炭素循環-気候モデルによってあらかじめ計算されたもの）との比較は、将来の炭素循環の変化による温暖化予測の不確実性の指標となる。大気中二酸化炭素濃度の安定化シナリオを考える際、気候-炭素循環の正のフィードバックが、陸域と海洋の二酸化炭素吸収を減らす効果を持つため、ある水準での濃度安定化を実現するには排出量をそれに応じてより低い水準に下げることが示唆される。安定化シナリオの濃度水準が高くなるほど、引き起こされる気候変化は大規模で、炭素循環への影響も大規模になり、そのゆえ、排出量もより大規模に引き下げる必要があることとなる。

る。

### 海洋の酸性化

大気中二酸化炭素濃度の増加は、直接、海洋表層の酸性化を引き起こす。多数の SRES シナリオに基づいた複数のモデルによると、pH は、工業化以前から現在までの 0.1 の低下に加えて、さらに 21 世紀中に 0.14~0.35 低下すると予測される。南極海の表層水は、二酸化炭素濃度が 600 ppm を超えると炭酸カルシウム (CaCO<sub>3</sub>) に対して不飽和になると予測される。ほとんどの SRES シナリオでは、この 600 ppm を超えるのは 21 世紀の後半である。低緯度域や深海にも影響が及ぶ。海洋の酸性化は、浅い海における炭酸塩沈殿物の溶解をもたらし、海洋石灰化生物への影響を及ぼす可能性もある。しかしながら、海洋の生物学的な炭素循環に与える正味の影響は良く分かっていない。

### 海面水位

現在 (1980~1999 年) と 21 世紀末 (2090~2099 年) の間に予測される海面水位上昇は、SRES の B1 シナリオ 0.18~0.38 m、B2 シナリオ 0.20~0.43 m、A1B シナリオ 0.21~0.48 m、A1T シナリオ 0.20~0.45 m、A2 シナリオ 0.23~0.51 m、A1FI シナリオ 0.26~0.59 m である。これらの数値は、AOGCM の計算結果に基づいた中位推定値と 5~95% の範囲であり、炭素循環のフィードバックに関する不確実性は考慮されていない。これらの範囲の中間点は、いずれのシナリオについても、第 3 次評価報告書における 2090~2099 年のモデル平均値の 10%以内に収まっている。また、これらの範囲は第 3 次評価報告書に示された範囲の幅よりも狭くなったが、それは海面上昇予測に関わる幾つかの不確実性についてより良い情報が得られたことが主な要因である。すべてのシナリオにおいて、21 世紀の平均海面上昇率が 1961~2003 年の平均海面上昇率 (年当たり 1.8±0.5 mm) を超える可能性は非常に高い。A1B シナリオの 2090~2099 年では、上昇率の中位推定値は年当たり 3.8 mm である。ある平均的なモデルでの海面水位上昇について、21 世紀半ばにおけるシナリオ間の幅はわずか 0.02 m で、21 世紀末までにはシナリオ間の幅は 0.15 m である。

熱膨張は、予測される海面水位上昇の最大の要因であり、すべてのシナリオについて中位推定値のうち 70~75%の寄与がある。氷河、氷帽、グリーンランド氷床も、海面水位上昇への正の寄与があると予測される。大循環モデルによる予測では、降雪が増加する一方、南極氷床では顕著な表面融解は起こらないため、南極氷床の質量は増加し、海面水位には負の寄与がある。グリーンランドの幾つかの流出氷河や、西南極の氷流において最近観測されているような氷の流出がさらに加速すれば、海面水位上昇への氷床からの寄与は顕著

に増大する可能性がある。例えば、もしこれらの過程に伴う氷の流出が、将来の（地球の気候変化の尺度として）世界平均地上気温の上昇に比例して増大すると仮定すれば、2090～2099年の海面水位の上限値は0.1～0.2mさらに上昇することになる。この例では、2090～2099年の南極氷床において増加した流出率は、南極での雪の蓄積率（A1Bシナリオの場合、近年に比べて5～10倍程度）とだいたい釣り合うことになる。このような効果に関する理解は進んでいないため、その可能性の大きさを評価したり、最良の推定値を提示することはできない。

21世紀の海面水位上昇は、地理的にかなり異なることが予測される。A1Bシナリオの場合、空間的な標準偏差のモデル間の中央値は0.08mである。予測された空間パターンの詳細はモデルによってそれほど似通っているわけではないが、南極海では平均海面水位上昇よりも低い、北極海では平均よりも高い、顕著な上昇域が南大西洋からインド洋にわたって細長く広がる、といった共通の特徴がある。

#### 熱帯太平洋の平均気候変化

多数モデルの平均によると、赤道域太平洋において、西部より中部・東部の方で大きな海面水温上昇、熱帯の大気循環の弱まり、平均的な降水の東向きへの移動を伴った「エルニーニョ的」と表現し得る平均気候状態への弱い変化が示されている。

#### エルニーニョ現象

将来、平均気候に変化があっても、エルニーニョ・南方振動（ENSO）の年々変動が継続することを、すべてのモデルが示しているが、その年々変動がどのように変わるのかについてはモデルにより異なる。第3次評価報告書で用いられたモデルより、エルニーニョ現象をずっとうまく再現する、現在の多数モデルによるさまざまな評価に基づいても、21世紀中のENSOの規模や頻度の変化予測に、識別可能な一貫した傾向は現時点では見いだされていない。

#### モンスーン

温暖化予測によると、北半球の夏には、アジアモンスーンの降水量増加（季節平均降水量の年々変動の増加を伴う）、西アフリカモンスーン南部の降水量増加、サヘル地方の降水の若干の減少が予測される。南半球の夏には、オーストラリアモンスーンの降水量が増加する。メキシコと中央アメリカにおけるモンスーンの降水量は減少すると予測されるが、それは、ウォーカー循環や局地的なハドレー循環の変化を通じ、東部赤道域太平洋におけ

る降水量の増加と関連している。しかしながら、一般にエーロゾル、特に炭素エーロゾルの影響の不確実性は、将来のモンスーン、とりわけアジアモンスーンに伴う降水の予測を複雑にしている。

### 海面気圧

海面気圧は、亜熱帯と中緯度域において上昇し、高緯度域で低下（21世紀末までに数hPa程度）すると予測される。それは、ハドレー循環が極向きに伸びて弱まること、低気圧経路（ストームトラック）が緯度にして数度、極向きに移動する結果、北極と南極の高緯度域において低気圧性の循環パターンが強まることと関連している。これらのことから、北半球環状モード（NAM）、それと密接に関連した北大西洋振動（NAO）及び南半球環状モード（SAM）は正の変化傾向を示すと予測される。NAOについては、モデル間でかなりのばらつきがあるが、SAMの大きさが増加する度合いは、モデル間で総じて一貫している。

### 熱帯低気圧（ハリケーン、台風）

領域を限定した高分解能モデル及び全球モデル（格子間隔は100kmから9km）を用いた結果によると、将来の熱帯低気圧に関して、ピーク時の風速は増大するとともに、解析が行われた研究では、中心付近の降水が顕著に増加する可能性が高い。熱帯低気圧の発生頻度に関して論文発表された最新のモデル研究によれば、熱帯低気圧の総発生数は減少するとの結果が得られている。ただし、これらの予測及びほとんどの海域において最も強い熱帯低気圧の出現数は増加するが、比較的弱い熱帯低気圧の発生数が減少するという予測についての信頼度は強度の予測と比べると低い。

### 温帯低気圧

モデル予測によると、半球ごとに平均した中緯度の低気圧の数は少なくなることが示されており、それは、特に南半球で顕著な、低気圧経路の極向きの移動と関連するものである。また、極向きに移った低気圧の中心気圧は深まると予測される。風速が強まるため、低気圧周辺での極端に高い波も激しくなる。

### 大西洋の深層循環

現世代のモデルによると、大西洋の深層循環（MOC）は、21世紀のうちに弱まる可能性が非常に高い。2080～2099年の平均MOCについて、多数モデルの予測は、ほとんど



ど変化のないものから 50%以上弱まるものまで幅広いが、それらを平均すると 25%弱まるという結果であった。ほとんどのモデルで MOC が弱まるにもかかわらず、温室効果ガス増大による放射の影響がずっと大きいため、北大西洋やヨーロッパの周辺でも温暖化が起こると予測される。ここで考慮した三つの SRES シナリオのもとで実行された、ほとんどのモデルで MOC は弱くなるが、2100 年までに MOC が停止することを示すモデルは皆無であった。また、2100 年までに、地球温暖化に伴って大西洋で MOC が平均的に強くなることを示すモデルもなかった。21 世紀中に MOC が大規模で急激な遷移を示す可能性は非常に低い。それ以降の、MOC の大規模で急激な遷移の起こりやすさを評価するのは、現時点では時期尚早である。排出量の低いシナリオ (B1) と中程度のシナリオ (A1B) で、2100 年以降は大気中温室効果ガス濃度を一定に保つという実験では、一度弱まった MOC が 2100 年以降の数世紀以内に回復するという結果となったモデルがある。他のモデルでは、MOC の弱まりが持続した。

#### 放射強制力

第 4 次評価報告書で用いられている AOGCM のうち、20 のモデルに含まれる放射伝達コードを用いて、長寿命温室効果ガスによる放射強制力を計算した結果が、基準となるライン・バイ・ライン (LBL) 型の複数のモデルによる計算結果との間で比較された。1860～2000 年の期間、対流圏界面での放射強制力に関して、AOGCM の放射伝達コードによる結果の平均は、LBL モデルの結果の平均と、誤差  $0.1 \text{ W/m}^2$  以内で合っていた。しかし、1860 年時点の二酸化炭素濃度を倍増させたときの長波放射の強制力には、AOGCM の放射伝達コードの間で 25%の幅があった。A1B シナリオの 2100 年時点のすべての温室効果ガスによる長波放射の強制力には、AOGCM のシミュレーションの間に、相対値で 47%の幅があった。この結果は、この章で論じられる気候感度や気候応答の AOGCM 間の違いは、部分的に、放射過程の定式化や扱い方の違いによるものかもしれないことを意味している。

#### 既定的な気候変化 (気温と海面水位)

多数の AOGCM による既定的な気候変化に関する実験 (20 世紀に起因する既定的な変化としては 2000 年時点の濃度を、B1 シナリオと A1B シナリオに起因する既定的な変化としては 2100 年時点の濃度を、それぞれ 100 年間保つ) の結果によれば、温室効果ガス濃度を安定化した場合でもさらに  $0.5^\circ\text{C}$  の温暖化が起こるのであろう。しかし、「既定的な気候変化」と、今後半世紀において「避けられない気候変化」とを混同すべきではない。放射強制力を即座に安定化することはできないことから、「避けられない気候変化」の方がより大きなものとなるであろう。非常に長い期間においては、放射強制力を現在よりも低くすることは可能であるため、既定的な気候変化の実験よりも気候変化を小規模に抑えるこ

とが可能であるというのはいまもっともらしい。上記の既定的な昇温のほとんどは、濃度安定化の直後の数十年間に起こり、それ以降の昇温率は次第に低下していく。温室効果ガス濃度を安定化させた時点に比べ、その 100 年後の世界平均降水量はさらに 1~2%程度増加する。

A1B シナリオの 2100 年時点で濃度を安定化させた場合、熱膨張による 22 世紀中の海面水位上昇は 21 世紀と同程度となり、2300 年までに現在より（1980~1999 年に比べ）0.3~0.8 m 高い水準となるであろう。モデルの不確実性が大きいので、この水位上昇の範囲は、異なる濃度水準に安定化させた場合のものとはかなり重なっているが、ここで A1B シナリオを取り上げたのは、ほとんどのモデルの結果がこのシナリオに対して得られているためである。熱膨張による海面水位の上昇率は徐々に低下しつつ、何百年にもわたって上昇が持続し、最終的には現在と比べ、世界的には、昇温 1°C 当たり 0.2~0.6 m 高い水位に達するであろう。高温が持続すると、一部の氷河は高地において存続するかもしれないが、ほとんどの氷河は数百年間に消失し得る。

もし温室効果ガス濃度を減少させることができれば、地球規模の気温は 10 年以内に低下を始めるであろうが、熱膨張による海面水位上昇は、少なくとも 22 世紀にも続くであろう。炭素循環モデルを結合した EMIC によると、2100 年に排出量をゼロまで減らした場合、気候が安定化するまでに千年のオーダーの期間が必要である。この EMIC の予測は、西暦 3000 年に、気温上昇について 1.1~3.7°C、熱膨張による海面水位上昇について 0.23~1.05 m の範囲となり、工業化以前の値よりもかなり高い水準にとどまると予測される。

グリーンランド氷床からの、2100 年以降の海面水位上昇への寄与は、A1B シナリオの 2100 年時点で濃度を安定化させた場合、当初は 100 年当たり 0.03~0.21 m となると予測される。現在のモデルには含まれていない力学過程が、近年観測されているのと同様の氷流の加速をもたらすならば、この寄与はさらに大きなものとなるであろう。もし十分に温暖な気候が数千年続けば、グリーンランド氷床は大規模に消失し、山岳に氷河を残すのみとなり、約 7 m の海面水位上昇をもたらすであろう。氷流が加速するならば、このような消失はさらに急速に引き起こされるであろう。モデルにより、このような消失が生じるのに必要な地球規模の昇温は、工業化以前を基準として 1.9~4.6°C の範囲であることが示唆される。もし後から気温を低下させたとしても、このような氷床の大規模な縮小は元に戻らない可能性がある。

南極氷床については、十分に低温であるため広範囲の表面融解は起こらず、降雪が増加するために氷の質量が増加すると予測される。棚氷の底や表面で融解が起こることにより棚氷が弱くなり、氷床から海へ向かう流出量が増加することがあれば、氷の質量が減少す

る可能性はある。現在のモデルによると、今後数百年間の海面水位上昇への寄与は負の値になると予測されるが、氷の流出の加速が主要な要因となり、正の寄与がもたらされる可能性はある。これに関連する氷流の過程についての理解は限られているため、将来の長期的な氷床の変化や海面水位変化への寄与に関して、現状では一致した見解はない。

## よくある質問と回答

### FAQ10.1： 地球の気候が変化すると、熱波、干ばつ、洪水といった極端な現象は変化すると考えられるのか？

その通りである。地球の気候が変化すると、極端な現象の種類、出現頻度、強度が変化すると考えられる。このような変化は、平均気候の変化が比較的小規模であっても起こる可能性がある。熱波と大雨の出現頻度及び強度の増大など、幾つかの種類 of 極端な現象についてはすでに変化が観測されている (FAQ3.3 参照)。

将来の温暖化した気候では、熱波がより厳しく、より頻繁に、より持続期間の長いものとなる危険性が増大する。2003年に発生したヨーロッパの熱波は、極端な高温が数日～1週間以上持続する例であり、将来の温暖化した気候ではこのような熱波がより一般的なものとなる可能性が高い。極端な気温に関連して、ほとんどの地域で気温の日較差が減少する可能性が高い。将来の温暖化した気候では、霜日数（夜間の最低気温が氷点下となる日数）が減少する可能性も高い。霜日数に関係して、気候の温暖化に伴い、植物の生長期間は長くなると予測される。北半球のほとんどの地域では、冬季の寒波（極端な低温が数日～1週間以上持続すること）の出現頻度は減少する可能性が高い。北米西部、北大西洋、ヨーロッパ南部及びアジアは例外で、大気循環の変化に伴い極端な低温の出現頻度はほとんど減少しない可能性がある。

ほとんどの AOGCM による予測では、将来の温暖化した気候において、北半球のほとんどの中・高緯度地域で、夏はより乾燥し、冬はより湿潤になる。夏の乾燥は、干ばつの危険性の増大を意味する。乾燥化の危険と同時に、温暖化すると、大気には含み得る水蒸気量がより大きくなるため、強い降水や洪水の可能性も増大する。このような傾向はすでに観測されており、今後も続く予測される。それは、温暖化した世界では、降水は集中してより激しくなるとともに、その間のほとんど降水のない期間が長くなる傾向があるためである。このため、長びく比較的乾燥した期間の合間に激しい豪雨が散在することになるだろう。このような変化の別の側面として、平均降水量が増加する地域では極端な降水現象がより強くなり、平均降水量が減少する地域では極端な乾燥化がより強くなることが予測されている。

強い降水という極端な現象が増えるという上記の結果に加え、たとえ、将来の気候での極端な嵐に伴う風速が現在とあまり変わらないとしても、それに伴う降水強度は増加するだろう。特に北半球の陸上では、ヨーロッパ中部・北部の大部分で、冬季の降水量が非常に多くなる可能性が高まると予測される。これは嵐に伴う強い降水現象が増えることによるもので、雨や雪が強まって流出量も増加することにより、ヨーロッパやその他の中緯度地域で洪水が起こる可能性が増加することを示唆している。夏の降水についても同様な結果が得られており、アジアモンスーン地域やその他の熱帯地域で洪水が増えることを示唆している。将来の温暖化した気候では、多くの大河川流域で洪水の危険性が增大するが、それは嵐に伴う、強い降水現象と洪水の危険性の増大に伴い、河川流量が増加することに関係している。このような変化の一部は、すでに進行中の変化傾向を延長したものとなるであろう。

モデル研究により、将来の熱帯低気圧がより激しいものとなり、それに伴う風速と降水が強くなる可能性が明らかになっている。また、このような変化がすでに進行している可能性を示唆する研究があり、そのような研究では、過去 30 年間にカテゴリ 4 と 5 のハリケーンの年平均出現数が増加してきたことが示されている。幾つかのモデル研究では、温暖化した気候において熱帯対流圏の安定度が高まるため、世界的な熱帯低気圧発生数が減少すると予測されている。その予測の特徴は、熱帯低気圧のうち、弱いものが減少し、強いものが増加するという特徴がある。多くのモデル研究では、熱帯以外の低気圧について、数は少なくなるがより激しくなるという全般的な傾向が予測されている。そのような予測では、低気圧の強化に伴い、より激しい風、海上ではより高い波が出現する傾向が予測される地域がある。モデルによると、両半球で、低気圧の経路が、緯度にして数度、極向きに移動することも予測されている。

#### FAQ10.2： 氷床の消失、地球規模の海洋循環の変化といった、大規模または急激な気候変化が起こる可能性はどの程度か？

現在利用可能なモデル予測によれば、西南極氷床の崩壊、グリーンランド氷床の急速な消失、海洋大循環の大規模な変化といった急激な気候変化が、21 世紀中に起こる可能性は高くないと考えられている。しかし、気候システムの攪乱が進むにつれて、このような変化が起こる可能性は増大している。

グリーンランドの氷床コア、北大西洋などの海底堆積物などの、多くの古気候記録の物理的、化学的、生物学的な分析により、局地的な温度・風系・水循環がわずか数年間で急速に変化する場合があることが明らかになっている。世界の異なる場所での記録を比較すると、半球から地球規模の広がりを持った大規模な変化が過去にあったことが分かる。こ

これらのことから、過去の気候は、急激な変化を起こす不安定なものであったということが考えられる。従って、大気中の温室効果ガス濃度の上昇が続けば、気候システムの急激な変化を誘発するのに十分な強い攪乱要因となり得るとということが重大な関心事となる。このような気候システムへの干渉は、大規模で世界的な影響を引き起こす可能性があるため、危険なものと考えられる。

このような変化の例について論ずる前に、「急激」及び「大規模」という用語を定義しておくことは有用である。「急激 (abrupt)」とは、変化が、その原因となっている強制力に比べてずっと急速に起こる、言い換えれば、応答が非線形であることことを意味する。「大規模 (major)」な気候変化とは、現在の自然変動の幅を超える大きさで、空間的な広がり数千 km から地球規模の変化を意味する。局地的あるいは地域的スケールでは、自然要因の気候変動の性質として、急激な変化は普通である。ここでは、「極端な現象」と呼ぶ方が適当な、個別的に発生する短寿命の現象ではなく、急速に発達し、数年から数十年持続する大規模な変化について考える。この項目の主題である、より大規模で、より長期にわたる現象とは対照的な、局地的・地域的な影響をもたらす急激な変化の具体的な例としては、1970年代半ばの東太平洋における海面水温の変化や、1980年代半ば以降のラブラドル海の、表面から水深 1000m までの塩分低下があげられる。

人々から広く関心を持たれている、メキシコ湾流の崩壊や停止の可能性がその一例である。メキシコ湾流は、風によって駆動され、大西洋北西部を流れる、基本的には水平に流れる海流である。メキシコ湾流の北端部は、グリーンランド海ーノルウェー海ーアイスランド海における深層水の形成につながり、これらの海域とその周辺の陸域へ大量の熱を供給している。海洋大循環の安定した性質にも関わらず、メキシコ湾流北端部は、この海域の表層水の密度変化に大きな影響を受けている。この海流は、大西洋西岸に沿って形成された海盆規模の深層循環 (MOC) の北端となっている。気候モデルの一致した結果によると、もし北大西洋表層において、温度上昇または塩分濃度低下のために海水の密度が小さくなれば、深層循環が弱くなり、それに伴いこの海域へ運ばれる熱も小さくなる。塩分濃度の大きな低下が持続すれば、すべての気候モデルで、深層循環のさらなる弱まり、または完全な停止が起こり得ると予測されている。遠い過去には、このような変化が実際に起こった。

現在の問題は、次第に大きくなっている人間活動が大気に及ぼす影響が、上記のような深層循環の変化を引き起こすのに十分な強さの攪乱要因となるのかどうか、という点である。大気中の温室効果ガスが増加すると、地球は温暖化し、水循環は強まる。水循環が強化すると、降雨量の増加により、河川から北大西洋に流入する淡水が増加し、北大西洋表層の塩分濃度が低下する。温暖化によって陸氷が融解して、さらなる淡水が供給され、表

層水の塩分はさらに低下する。これら両方の効果が表層水の密度低下をもたらし、21世紀中に深層循環が弱まるだろう（深層循環を駆動するためには、表層水が沈降するほど密度が大きくなければならない）。深層循環の弱まりは温暖化と歩調を揃えて進行すると予測されており、現在のモデルで、21世紀中に深層循環の急激な（非線形な）弱まりや完全な停止を予測するものはない。このような深層循環の弱まりについてのモデル予測には、21世紀末までにほとんど変化がないという予測から50%以上弱くなるという予測まで、まだ大きな幅がある。このモデル間の予測の幅は、モデルで再現されている大気と海洋のフィードバックの強さに違いがあるためである。

深層循環の長期的な動向についても不確実性がある。気候が安定化すれば深層循環は回復すると予測するモデルが多いが、幾つかのモデルでは、放射強制力が十分に強く、長く続いた場合に超えてしまうような深層循環の限界が存在する。このようなモデルのシミュレーション結果では、気候が安定化しても深層循環が徐々に弱まり続ける。現時点では、このようなことが起こる可能性を定量的に示すことは不可能だが、仮にこのような事態が起こったとしても、深層循環が弱まることによる冷却効果よりも、温室効果ガス増加による放射強制力の影響が大きく上回るために、ヨーロッパでは昇温が続くだろう。深層循環の停止により氷河期が始まることを示唆する破滅的なシナリオは単なる憶測であり、そのような結末を予測する気候モデルはない。実際のところ、氷河期に至る過程は十分理解されており、それは上で述べたものとはまったく異なるため、このシナリオは確信を持って否定することができる。

深層循環の長期的な変化には関わりなく、温暖化とそれに伴う塩分低下により、ラブラドル海で形成される深層水・中層水の量が今後数十年間にわたって著しく減少する点で、モデルシミュレーション結果は一致している。これは北大西洋中層水の性質を変化させ、いずれは深層海洋にも影響を及ぼす。このような変化の長期的な影響は分かっていない。

急激な気候変化として広く議論されているもう一つの例は、グリーンランド氷床や西南極氷床の急速な崩壊である。モデルシミュレーション及び観測データにより、北半球高緯度の温暖化がグリーンランド氷床の融解を加速しており、水循環の強化による降雪量の増加によってこの融解量を相殺することはできないことが示されている。その結果、グリーンランド氷床は今後数世紀で大きく縮小するかもしれない。さらに、その温度を超えるとグリーンランド氷床が完全な消滅に向かうという限界温度が存在し、21世紀中にはその限界値を超えることを示唆する研究がある。しかし、世界平均海面水位を約7m上昇させるほどの大きさを持つグリーンランド氷床全体が融解するのはゆるやかな過程であり、完全に融解するまでには多くの世紀を経ることになるだろう。

崩壊する棚氷の上流側に位置する氷流についての最近の人工衛星観測と現場観測により、氷床システムの急速な反応に関心が持たれている。これは、西南極氷床全体の安定性に新たな懸念をもたらすもので、この氷床が崩壊すると 5~6m のさらなる海面上昇を引き起こすことになるだろう。これらの氷流は、その前面の棚氷によって支えられているようだが、西南極氷床の比較的狭い地域で、このような支えが減少または消滅することが、多くの氷流の大規模な流出、さらには西南極氷床全体の不安定化を引き起こす引き金となるのか、現時点では分かっていない。氷河の底や氷床周囲の海洋との複雑な相互作用を含む、このような小スケールの力学過程は、氷床モデルでの取り扱いがようやく始まったところである。そのため、現世代の氷床モデルでは、このような現象が起こる可能性やその時期についての定量的な情報は得られていない。

### FAQ10.3： 温室効果ガスの排出量を削減すると、その大気中濃度はどのくらいの速度で低下するか？

温室効果ガスの排出削減に応じた大気中濃度の変化は、それぞれのガスを大気から除去する化学的・物理的過程に依存する。温室効果ガスの中には、排出削減とほぼ同時に大気中濃度が減少するものがある一方、排出量を削減しても大気中濃度が数百年にわたって増加を続けるものもある。

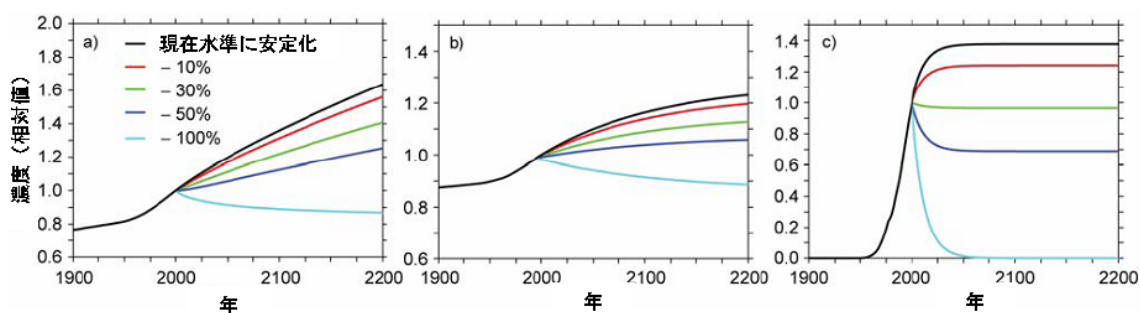
温室効果ガスの大気中濃度は、そのガスが大気中に排出される速度と大気からの除去過程の速度との兼ね合いに左右される。例えば二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) は、大気-海洋間のガス交換、化学的過程 (例：風化)、生物学的過程 (例：光合成) などにより、大気・海洋・陸の間で交換されている。排出された二酸化炭素のうち、現在では半分以上が百年以内に大気から除去されるが、ある割合 (約 20%) については、何千年にもわたって大気中に残る。たとえ二酸化炭素排出量を現在の水準からかなり削減したとしても、除去過程がゆるやかであるため、大気中の二酸化炭素濃度は長期的に上昇を続けるだろう。メタン (CH<sub>4</sub>) は、大気中の化学過程によって除去され、一酸化二窒素 (N<sub>2</sub>O) と一部のハロカーボン、高層大気において太陽放射によって壊される。これらの過程の時間スケールは、数年から数千年とそれぞれ異なるが、その尺度となるのが大気中のガスの寿命である。ガスの寿命は、偏差が減少して、初期の量の 37% になるまでの時間として定義される。メタン、一酸化二窒素及び冷媒である HCFC-22 のような微量気体については、かなり適切に寿命を定めることができる (メタンは約 12 年、一酸化二窒素は約 110 年、HCFC-22 は約 12 年) が、二酸化炭素については寿命を定義することができない。

いずれの微量気体についても、濃度変化は、ある程度、そのガスの排出量が時間的にどのように経過するかによって決まる。もし排出量が時間とともに増加すると、大気中での

ガスの寿命にかかわらず、大気中濃度も時間とともに増加する。しかし、もし排出削減の活動が行われた場合は、そのガスの濃度変化は、排出量だけではなく除去過程の相対的な変化に依存する。ここでは、異なるガスの寿命と除去過程に応じた、排出減少時の濃度変化について説明する。

例として、FAQ10.3 図 1 は、3 種類の微量気体について、例示的な排出量の変化に応じて将来の濃度がどのようになると予測されるか（ここでは排出量を瞬間的に変化させた際の応答を表している）を示したものである。ここでは、特定の寿命を持たない二酸化炭素、寿命が百年程度の長期間の微量気体（例：一酸化二窒素）、寿命が十年程度の短期間の微量気体（メタン、HCFC-22 または他のハロカーボンなど）について考察する。それぞれのガスについて、将来の排出量の例示的なケースを五種類示す。すなわち、排出量を現在の水準で安定化するケース、排出量を直ちに 10%、30%、50%、100%それぞれ削減するケースである。

二酸化炭素のふるまい（FAQ10.3 図 1a）は、寿命が定義・特定されている微量気体とはまったく異なっている。二酸化炭素排出量を現在の水準に安定化した場合、21 世紀及びそれ以降も大気中の濃度は増加し続けるが、一方、寿命が 100 年程度（FAQ10.3 図 1b）または 10 年程度（FAQ10.3 図 1c）のガスの排出量を現在の水準に安定化した場合は、それぞれ 200 年程度、20 年程度の期間内に、大気中濃度が現在よりも高い水準で安定化する。大気中の二酸化炭素濃度を最終的に一定水準に安定化することができるのは、実際のところ、二酸化炭素の排出をほぼ完全に止めてしまうケースのみである。それ以外の、二



FAQ10.3 図 1

- a) シミュレーションによる大気中二酸化炭素濃度の変化。現在の水準に対する比として示す。排出量の条件は、現在の水準に安定化したもの（黒）、及び、現在より 10%（赤）、30%（緑）、50%（濃い青）、100%（薄い青）それぞれ低下させた水準で安定化したもの。
- b) 同上。ただし、寿命 120 年の微量気体についてのもので、自然起源及び人為起源のフラックスを考慮。
- c) 同上。ただし、寿命 12 年の微量気体についてのもので、人為起源のフラックスのみを考慮。



酸化炭素排出量を中程度に削減するケースではすべて、気候システムにおける炭素循環にかかわる特徴的な交換過程のため、二酸化炭素濃度は増加する。

より具体的に述べると、現在の二酸化炭素排出速度は除去速度を大きく上回っており、除去速度が遅くて不十分であるため、排出量を小幅または中程度に削減しても、二酸化炭素濃度は安定化せず、数十年にわたって濃度上昇率が小さくなるに過ぎないであろう。二酸化炭素排出量の 10%削減により濃度上昇率の 10%減少が、同様に二酸化炭素排出量の 30%削減により濃度上昇率の 30%減少がそれぞれ期待される。二酸化炭素排出量を 50%削減した場合は、大気中の二酸化炭素濃度は安定化するが、それは十年未満の期間に過ぎず、その後は、良く知られた化学的・生物学的な調整過程によって陸域と海洋での吸収量が低下するため、大気中の二酸化炭素濃度は再び上昇するようになると考えられる。二酸化炭素の排出を完全に止めると、大気中の二酸化炭素濃度は 21 世紀中に約 40 ppm ゆるやかに低下すると見積もられる。

寿命が定義・特定される微量気体については、状況はまったく異なる。寿命が百年程度の微量気体（例：一酸化二窒素）の例では、大気中濃度を現在の水準に近い値で安定化するためには 50%以上の排出削減が必要である（FAQ10.3 図 1b）。一定量の排出を続けた場合、数百年のうちに大気中濃度が安定化する。

例示した寿命が短いガスのケースでは、現在は、排出された量の 70%程度が除去されている。その場合、排出量の削減が 30%未満では、大気中濃度は、短期的には上昇が続くが、二酸化炭素と対照的に 20 年程度で濃度が安定化する（FAQ10.3 図 1c）。安定化したときのこのようなガスの濃度水準の低下量は、排出削減量に比例する。この例については、この微量気体の濃度を現在よりも低い水準で有意に安定化させるためには、30%超の排出削減が必要になるだろう。寿命が 10 年程度の微量気体の排出を完全に止めた場合、濃度は、100 年未満で工業化以前の水準に戻るだろう。

## 第 11 章 地域的な気候の予測

### 概要

信頼性の増した地域気候変化予測が、今や世界の多くの地域について得られるようになった。これはモデリングの進歩と、気候システムの物理過程に対する我々の理解の進歩によるものである。その結果、幾つかの重要な論点が現れてきた。

- 陸上の多くの地域で、温暖化は世界平均よりも大きい。これは陸上が海上に比べ、蒸発により冷却に使える水が少ないこと、また熱容量が小さいことによる。
- 温暖化によって、降水量分布の空間的非一様性が全般に増す。これにより、亜熱帯域の降雨量は減り、高緯度域と熱帯域の一部では降雨量は増加する。明瞭に増加する地域と減少する地域との境界は依然として不確実であり、全球大気海洋結合モデル (AOGCM) の予測も一致しない。
- 亜熱帯高気圧の極方向への張り出しと、亜熱帯域の降水量の減少が相まって、亜熱帯高気圧の極側の縁辺部での降水量が減少すると、特にはっきりと予測されている。21 世紀に降水量が減少すると予測されている地域のほとんどは、これら亜熱帯高気圧の周辺に分布している。
- モンスーン循環そのものは弱まる傾向にあるにもかかわらず、水蒸気収束が強化されるために、モンスーン循環域の降水量は増加する傾向にある。しかしながら、温暖化に対する熱帯の気候の応答の様子は多くの場合不確実である。

AOGCM はなお、将来起こり得る気候の幅についての地域的な情報の主要な源である。モデルの解像度が上がり、また気候変化にとって重要なさまざまな過程についてのシミュレーションが進み、また、シミュレーション数が増加するにつれ、地域気候変化の特徴を明確に描写することが可能となってきた。AOGCM のシミュレーションの結果から、地域規模の確率的な情報を引き出す技術に進歩がみられたが、これらの手法はまだ研究段階にとどまっている。この情報を地域の情報にダウンスケーリングする技術はまだあまり進んでいない。しかし、ダウンスケーリングの技術は第 3 次評価報告書 (IPCC, 2001) で降達し、その結果一部の地域には限られるが、ダウンスケーリング手法は広く適用されるようになってきた。

ここで提供された地域気候変化予測は、以下の四つの情報源候補から評価される：AOGCM シミュレーション；AOGCM で再現されたデータから、地域的に詳細な情報を引き出す技術を用いてダウンスケールした情報；地域的な応答を支配している過程

についての物理的理解；近年の歴史的気候変化についての情報である。

ここまでの章では、第 3 章で、過去から現在にかけての地域規模の気候変化に関する観測結果が、また、第 9 章で、これらの変化と全球モデルシミュレーション結果の比較が述べられてきた。気温の変化に関するモデルシミュレーション結果を観測と比べることにより、将来の地域的な気温予測の幅を絞り込むことに役立てることができる。降水量変化の地域的な評価は、主に、物理的洞察に沿って、全球モデルとダウンスケーリングモデルから同じ結果が得られることを根拠としている。複数のモデル間で一致した結果が得られ、その結果が物理的な議論によって支持されるならば、—これは中・高緯度で典型的なのだが—そういった要素は、地域的な気候変化の見通しについて明確な見解を示す上での後押しとなる。またある場合には、物理的洞察のみで将来の気候変化の方向を明確に示すこともできる。

可能性の高い地域的気候予測は以下のように要約される。

- 気温予測：予測の規模は第 3 次評価報告書と同程度である。シミュレーションの数と種類の増加、モデルの改良、モデルの欠点をもたらす効果に関するより深い理解、結果のより詳細な解析が進んだことにより、地域的な予測の信頼性が増している。気温上昇（しばしば地球全体の平均より大きい）の可能性は、陸域では非常に高い。
- 降水量予測：変化の全般的なパターンは第 3 次評価報告書と同程度であり、一部地域で予測信頼性は高まっている。より多くの、かつ広い地域で、モデル間の結果が一致してきている。一部の地域では、降水量が変化する可能性が高い、あるいは非常に高いとの予測への根拠が得られている。その他の地域では、変化予測の信頼性は依然として低い。
- 極端現象：極端現象の変化に関する解析結果は大幅に増加した。その結果、ほとんどの地域でより総合的な評価が可能になった。判明したことのあらまは第 3 次評価報告書の評価と同様であり、情報源が増えたことでその信頼性は上がっている。地域的な見解で最も顕著に信頼性が上がったのは、熱波・大雨・干ばつに関するものである。これらの進歩にもかかわらず、一部の地域では、極端現象に関する明確な見解に繋がるような、モデルの個別の解析は依然として得られていない。特に、熱帯の極端現象に関する予測には不確実性が残る。熱帯低気圧の分布の予測の難しさが、この不確実性に輪をかけている。温帯低気圧の変化は、大気循環の地域的な細かな応答に依存しているが、このような応答にも一部依然として不確実な部分がある。

ー21世紀の地域的气候変化の将来予測について明確に予想されることを以下に要約する。11.2～11.9節に根拠が記述されている。これらの気候変化は、モデルの気候感度あるいは温室効果ガス排出シナリオ（SRES B1/A1B/B2間での）の不確実性を考慮に入れた上で、なおかつ、可能性が高い、ないしは可能性が非常に高いと評価されたものである。

ー全陸域：すべての陸上の地域は21世紀に昇温する可能性が非常に高い。

ーアフリカ：アフリカ大陸全土ですべての季節にわたって、昇温は地球全体の平均と比べて大きくなり、乾燥した亜熱帯域での昇温は湿度の高い熱帯域に比べて大きくなる可能性が非常に高い。年降雨量は、アフリカの地中海沿岸地方の大部分と、北部サハラ地域で減少する可能性が大きく、その可能性は、地中海沿岸域に近づくにつれて大きくなる。南アフリカの降雨量は、冬季降雨域と西縁域で減少する可能性が高い。アフリカの東部では、年平均降雨量は増加する可能性が高い。これに対して、サヘル（【訳注】：サハラ砂漠の南縁に位置する草原域）、ギニア海岸、南部サハラの降雨量がどう変わってゆくのかは不明である。

ー地中海地域とヨーロッパ：ヨーロッパの年平均気温の上昇量は地球全体の平均に比べ大きくなる可能性が高い。季節的にみると、一番昇温が進むのは、冬季のヨーロッパ北部と夏季の地中海地域である可能性が高い。ヨーロッパ北部では、冬季の最低気温の上昇量は年平均と比べて大きい可能性が高い。ヨーロッパ南部及び中部では、夏季の最高気温の上昇量は年平均と比べて大きい可能性が高い。年降水量は、ヨーロッパ北部のほとんどの地域で増加、地中海地方のほとんどの地域で減少する可能性が非常に高い。ヨーロッパ中部では、降水量は冬季には増加するが、夏季には減少する可能性が高い。ヨーロッパ北部では、日降水量でみた極端現象が増加する可能性が非常に高い。地中海地方では、年降水日数の減少する可能性が非常に高い。ヨーロッパ中部と地中海地方では、夏季に干ばつが生じる危険性が增大する可能性が高い。ヨーロッパのほとんどの地域で、積雪期間は短くなり、積雪深も減少する可能性が非常に高い。

ーアジア：気温上昇は、中央アジア、チベット高原、アジア北部では世界平均よりもかなり大きく、東アジアと南アジアでは地球全体の平均より大きく、東南アジアでは世界平均並である可能性が高い。冬季の降水量は、アジア北部とチベット高原では増加する可能性が非常に高く、東アジアと東南アジアの南部では増加する可能性が高い。夏季の降水量は、アジア北部、東アジア、南アジア及び大部分の東南アジアでは増加する可能性が高いが、中央アジアでは減少する可能性が高

い。東アジアでは、夏季の熱波／継続的な高温が長引くとともに強さ及び頻度が高まる *可能性が非常に高い*。東アジアと南アジアでは非常に寒い日は減少する *可能性が非常に高い*。南アジアの一部と東アジア域では強い降水が増加する *可能性が非常に高い*。東アジア、東南アジア及び南アジアでは熱帯低気圧に伴う極端な降雨と強風が増大する *可能性が高い*。

ー北アメリカ：ほとんどの地域で、年平均気温の上昇量は、地球全体の平均を上回る。季節的にみると、北部では冬季、南西部では夏季に最も大きく昇温する *可能性が高い*。北アメリカの北部では冬季の最低気温の上昇は平均よりも大きくなる *可能性が高い*。南西部では夏季の最高気温の上昇は、平均よりも大きくなる *可能性が高い*。年間降水量は、カナダと米国北東部で増加する *可能性が非常に高く*、南西部では減少する *可能性が高い*。カナダ南部では、冬季と春季の降水量は増加するが、夏季の降水量は減少する *可能性が高い*。北アメリカの大部分の地域では、積雪期間の長さも積雪深も減少する *可能性が非常に高い*。ただし、カナダの最北部だけは別で、ここでは最大積雪深は増加する *可能性が高い*。

ー中央アメリカ及び南アメリカ：南アメリカ南部での年平均気温の上昇は地球全体の平均と同程度である *可能性が高い*が、他の地域での昇温は地球全体の平均を上回る *可能性が高い*。中央アメリカとアンデス南部で、年降水量は減少する可能性が高いが、大気循環の変化により、山岳地域での降水の応答に大きな地域的な違いがもたらされる可能性がある。フェゴ島における冬季の降水量と、南アメリカの南東部での夏季の降水量は増加する *可能性が高い*。アマゾンの熱帯雨林を含む南アメリカ北部の年平均・季節平均降雨量がどのように変化するのは不確実である。しかしながら、エクアドル、北部ペルーでの降雨量の増加、大陸の北縁とブラジル北東部の南部での降水量の減少といった、一部の地域を対象にした複数のシミュレーションの結果は定性的に一致している。

ーオーストラリア・ニュージーランド：この地域の昇温は周辺の海洋よりも大きいですが、その値は地球全体の平均と同程度である *可能性が高い*。昇温は、この地域の南部で特に冬季に小さい。ニュージーランド南島の気温の上昇は地球全体の平均よりも小さい *可能性が高い*。オーストラリア南部での冬季と春季の降水量は減少する *可能性が高い*。オーストラリア南西部の冬の降水量は減少する *可能性が非常に高い*。ニュージーランド南島の西部では、降水量は増大する *可能性が高い*。オーストラリアの北部と中央部の降雨量の変化ははっきりしない。ニュージーランド南島の、特に冬季の平均風速は増加する *可能性が高い*。オーストラリア及びニュージーランドでの日平均気温が極端に高い日の頻度は増大し、極端な低温の

頻度が減少する *可能性が非常に高い*。平均降水量がかなり減少する地域（冬季と春季のオーストラリア南部）を除き、日降水量の極端現象は増加する *可能性が非常に高い*。オーストラリア南部では干ばつの危険が増大する *可能性が高い*。

—極域：今世紀の北極域の昇温は地球全体の平均よりも大きい *可能性が非常に高い*。昇温は冬季に最大で、夏季には最小と予測される。北極域の年降水量は増加する *可能性が非常に高い*。相対的な降水量の増加は、冬季に最大で夏季に最小である *可能性が非常に高い*。北極域の海氷は面積、厚さともに減少する *可能性が非常に高い*。北極海の循環がどのように変化するのかは不確実である。南極域では、大陸上で昇温するとともに降水量が増加する *可能性が高い*。極域における、気温・降水量の極端現象の起こる頻度変化についてはよく分かっていない。

—島嶼域：カリブ海、インド洋、南北太平洋の島嶼周辺では、今世紀、海面水位は平均として上昇する *可能性が高い*。海面水位の上昇は、地域的に一様とはならない *可能性が高い*が、モデルごとの結果の違いが大きいため、カリブ海、インド洋、太平洋における地域的な予測は不確実である。カリブ海、インド洋、南北太平洋の各地域の島嶼では、今世紀昇温が続く *可能性が非常に高い*。気温上昇量は世界年平均よりも小さい *可能性が高い*。カリブ海での夏季の降雨は、大アンチル諸島の周辺では減少する *可能性が高い*が、この地域の冬季、また、他の地域については不確実である。年間降雨量は、インド洋北部で増加する *可能性が高い*。セイシェル周辺では12月から2月にかけて、また、モルディブ周辺では6月から8月にかけて降水量は増加する *可能性が高く*、モーリシャス周辺では6月から8月にかけて減少する *可能性が高い*。太平洋赤道域では年降雨量が増加する *可能性が高い*が、ほとんどのモデルで、12月から2月にかけて、フランス領ポリネシアの東で減少することが予測されている。

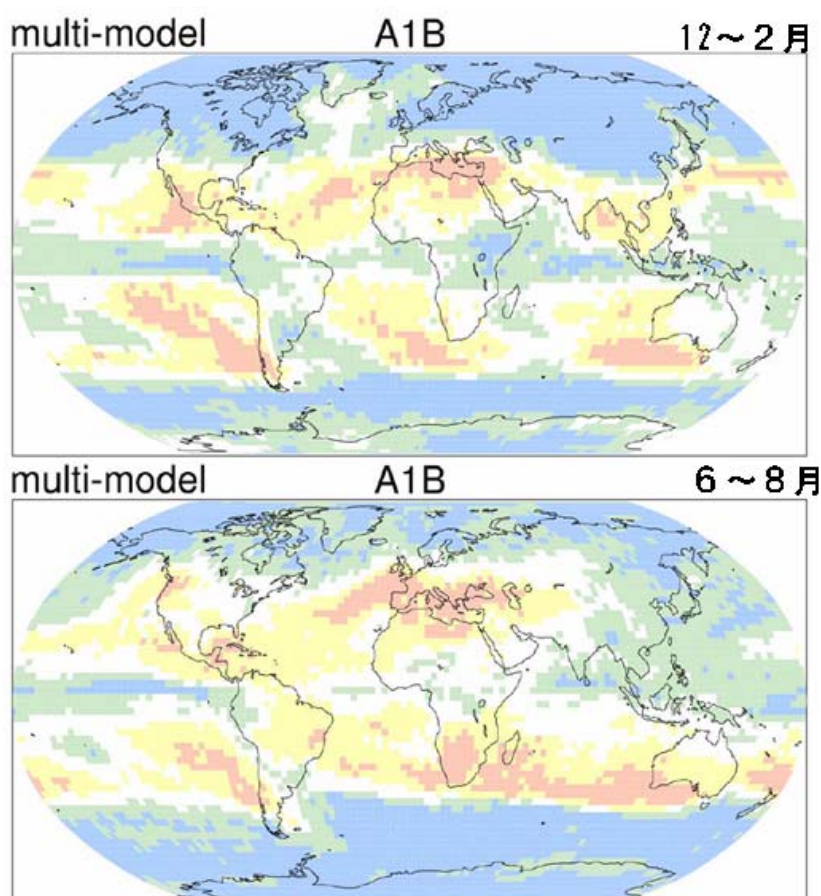
## よくある質問と回答

### FAQ11.1： 予測される気候変化は地域ごとに異なるのか？

気候は地域ごとに異なる。その違いは、場所による太陽加熱の違い、大気・海洋・陸面それぞれの応答、それらの相互作用、また、地域ごとの物理的な特性の違いによって生じている。世界的な気候変化を引き起こす大気組成の変動は、このような複雑な相互作用のある側面に影響を及ぼす。気候に影響を及ぼす人為起源の要素（強制力）には、全地球的なものも、地域ごとに分布が異なるものもある。例えば、温暖化を引き起こす二酸化炭素は、どこに排出源があろうとも地球全体に一様に分布するが、温暖化を部分的に相殺する硫酸エアロゾル（微粒子）の分布には地域的な偏りがある。

さらに、これらの強制力に対する応答の一部は、その強制力が最も強い場所とは異なった地域で働くフィードバック過程に支配されている。従って、予測された気候変化も、地域によって異なっている。

気候変動が地域ごとに異なっていることを考えるのには、まず「緯度」から入るのが良からう。例えば、温暖化は地球上すべての地域で予測されている一方、予測される昇温量は、北半球では一般に赤道から極に向かい増加する。降水量はもっと複雑であるが、やはりいくばくかは、緯度に従って変化している。極に近い緯度帯では降水量は増加する。一方、熱帯に近い多くの地域では降水量は減少すると予測されている（FAQ11.1 図1 参照のこと）。熱帯の降水量は、雨期（例えばモンスーン期）に増え、また、熱帯太平洋で特に増加すると予測されている。



FAQ11.1 図1 地図上の青と緑の領域は降水量が増加すると予測される地域で、黄色とピンクの領域は降水量が減少すると予測される地域

海洋や山脈の位置関係も重要な要素である。一般的に、大陸内部の昇温は海岸地域の昇温よりも大きいと予測されている。降水量の応答は、大陸規模の地形のみならず、近くの山脈の形と風向に敏感である。モンスーン、温帯低気圧、熱帯低気圧などはすべて、こういった地域ごとの特性にそれぞれ異なる形で影響を受けている。

地域的な気候変化を理解・予測する上で最も難しい点は、大気・海洋循環及びその変動の変化に関係したものである。定性的に同様の気候の地域を包括した一般的な見解を示すことが可能な場合もあるが、どの地域もそれぞれ何らかの独自性がある。特徴的な亜熱帯地中海をとりまく沿岸地域であろうと、メキシコ湾からの水蒸気輸送に依存する、北米内陸部の極端現象であろうと、サハラ砂漠の南端の位置を決める、植生分布・海水温・大気循環相互作用であろうと等しく正しい。

全地球的な要素と地域的な要素の正しいバランスについての知識を深めることは依然として難しいことだが、これらの要素についての理解は着実に進んでおり、地域的な予測の信頼性は高まりつつある。