

2.3

20 世紀中盤以降のグローバルな環境問題

本節では主に 20 世紀中盤以降に顕著となったグローバルな環境問題について解説する。この時代は、人間活動が対流圏内の地球のシステムに大きな影響を与える新たな要素となったため、特に人類世（人新世）とも呼ばれている。

2.3.1 人口爆発と人間活動の拡大

20 世紀の中盤から後半にかけて、資本集約的農法が世界的に普及した。これにより、食糧生産量が大幅に増大すると（これは「緑の革命」と呼ばれる。7.2 節）、公衆衛生の向上と相まって、爆発的な人口増が生じた。世界人口は、産業革命前の 1750 年頃には 8 億人だったが、産業革命がドイツ・フランス・米国といった国々への波及が完了した 1900 年頃には 16.5 億人に倍増し、1950 年には 25 億人、そして緑の革命を経て 2000 年には 61 億人、2011 年には 70 億人を突破した（図 2.3.1）。この 20 世紀後半の人口爆発においては、緑の革命の影響を大きく受けたアジア・中南米における人口増大が特に著しいことが特徴である。

この時期は同時に、中近東諸国などにおける石油生産の増大と、大型石油タン

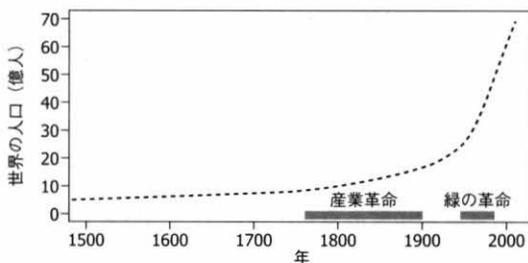


図 2.3.1 1500 年から 2010 年までの世界人口推移

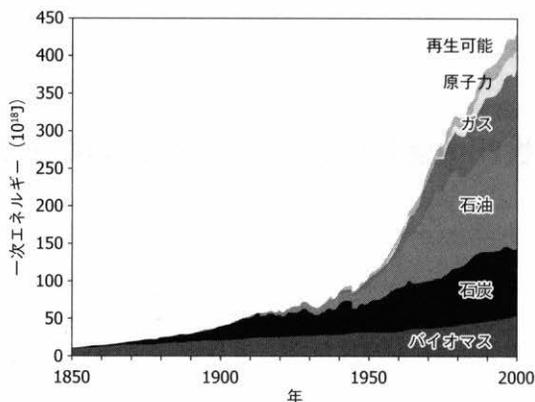


図 2.3.2 1850 年から 2000 年までの世界のエネルギー構成変化。化石燃料の消費は、産業革命以降、特に 20 世紀中盤以降に急速に拡大し、2000 年までに世界のエネルギー消費の約 80% を占めるようになった (Steffen et al. 2007)

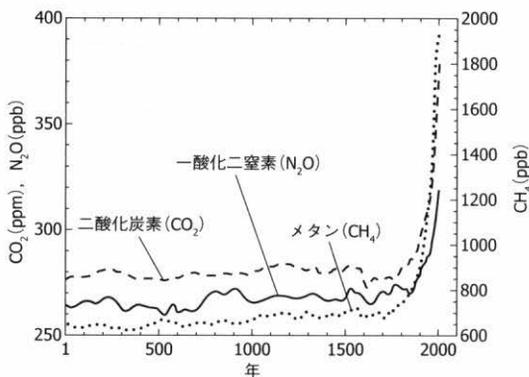


図 2.3.3 西暦 1 年から 2005 年までの主な温室効果ガスの大気中の濃度の変化 (IPCC 2007)

カーやパイプラインといった石油の輸送技術の発達を背景として、産業や社会が石油への依存度を高めたことでも特徴づけられる。図 2.3.2 は 1850 年以降の世界の一次エネルギー消費量変化であるが、特に 1950-1960 年頃以降のエネルギー量増加は顕著である。このような石油消費量の急速な増大は、大気中の CO_2 、 CH_4 、 N_2O といった温室効果ガスを大幅に増加させている (図 2.3.3)。たとえば CO_2 で

は、1850年頃に280ppm程度、第二次大戦が終結した1945年には310ppm程度であったのが、第二次世界大戦後の世界的な高度経済成長に伴って急増し、2013年5月には400ppmに達している。また、これとほぼ同様の時系列変化が、 CH_4 と N_2O についても観察されている。この400ppmという CO_2 濃度は、過去数十万年続いた氷期-間氷期サイクルに伴う CO_2 濃度変化のサイクル(180-280ppm)を大きく逸脱する値であり、少なくとも過去数十万年の気候サイクルにおいては異常な値であると言える。このような20世紀中盤以降の、人口爆発と、人間活動の幅と量の拡大により、人間活動による環境への影響は、それら以前とは異なる様相を呈するに至った。

2.3.2 森林破壊

過剰な森林伐採は、文明黎明期からの主要な環境破壊である(2.1節)。しかし産業革命以降、特に20世紀後半以降における人間活動の増大に伴って、南米やアフリカなど、これまで文明の影響が比較的小さかった地域における森林破壊が顕著となった。1990-2010年における世界各地の森林面積変化の推定では、ヨーロッパとアジア域では耕作地の放棄や植林などの影響により森林面積が回復する傾向も見られるが、南米とアフリカにおいて依然として大規模な森林破壊が生じている(図2.3.4)。南米・アフリカ・東南アジアに分布する熱帯林は、2007年の推定値で世界の森林バイオマスの約72%を占めており(Pan et al. 2011)、また

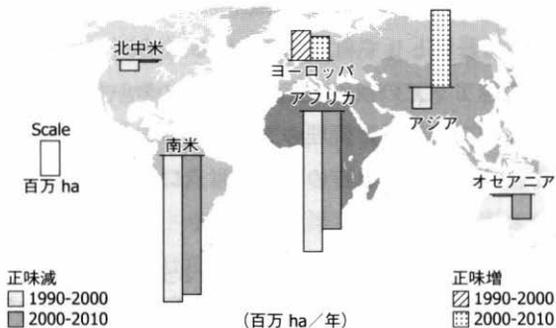


図 2.3.4 1990-2010年の世界各地における森林面積の変化 (FAO 2010)

世界の動植物の過半数の種数を含み、その破壊が地球の炭素循環や生物多様性に与える影響は甚大である。

森林は、降水の土壌への浸透を促し（地表が林床植生や枯死物で覆われていると、降水は効率的に土壌へ浸透される）表層流失を防ぎ、また根が土壌表層を保持することによって、土砂流出の抑制や山崩れを防止する機能を持つ。ローカルに見ても、太平洋戦争直後の日本では、戦時中の無秩序な伐採などにより全国の山林が荒廃した状態におかれたが、これは1945年9月の枕崎台風において広島県を中心に大規模な山崩れや洪水を頻発させた。その後も、1947年のキャスリーン台風による関東地方の未曾有の大氾濫をはじめ、連年のように土砂水害に見舞われる状況にあった（太田 2012）。このため、保安林整備臨時措置法（1954年）や治山・治水緊急措置法（1960年）などの計画的な事業制度が始まり、特に後者は砂防事業や河川事業を含んだ水系一貫の治山治水事業として、その後の日本における国土保全政策の基本方針となった¹⁾。また、森林における降水の土壌への浸透促進は、上記のような土砂流出の抑制や山崩れの防止機能だけではなく、河川流量の極端な変動を抑制し、洪水緩和や河川水の資源としての価値を高めるといふ、いわゆる「緑のダム」機能をもたらしている。現在においては、日本の保安林の67%が、緑のダム機能を期待した水源涵養保安林に指定されている（蔵治・保屋野 2004）。

森林破壊の要因は、酸性雨による間接的なものもあるが、現在までの最も主要な要因は、農地・放牧地などの用途への土地利用転換と、暖房や調理のための薪炭の入手である。暖房や調理のための熱源は、20世紀以降、薪炭から化石燃料、そして電気へと移行してきた。しかし、現在においても、世界の木材生産量の63%程度（210万 m^3 ）は薪炭として利用されている（Botkin & Keller 2010）。特に、サハラ以南、中米、東南アジアの多くの発展途上国において、薪炭は依然として主要な燃料である。適切な伐採量と管理の下における、森林からの燃料採取は持続可能な営みである。しかし、これらの国々では人口の増加速度が高く、それに

1) しかし、このような戦後の治山事業と森林の回復による土砂流出の抑制は、海岸浸食という別の環境問題を生じさせることとなった（太田 2012）。わが国においては、1978年から92年までの年平均で、毎年160ヘクタールの浜辺が消失しており、それ以前の70年間の平均値の2倍以上の速度である。また、治水事業に伴った河川の護岸化は、生き物のすみかを奪うことにより、都市近郊において生物多様性の低下をもたらすことともなった。

伴って必要な燃料の量も増加してきており、薪炭林は過剰に利用されているケースが多い。同様に、放牧や焼畑といった、適切な頻度と方法においては持続的な伝統的営みであっても、人口増によって、それらが過度に行われると、土壌流失などが起きることで、不可逆的な森林・植生の破壊が生じる。

2.3.3 オゾン層の破壊

大気上端における太陽放射エネルギーのうち6.8%が、紫外線（波長 $0.38\mu\text{m}$ 以下の光線）によるものである（真木 2000）。しかし大気は紫外域の光線、とりわけ $0.315\mu\text{m}$ 以下の短波長の紫外線を吸収する性質があり、そのために地表付近においては $0.29\mu\text{m}$ 以下の紫外線は通常ほぼ検出されない。このような大気の役割は、陸上で生物が活動する基本的な環境を整える上で重要な役割を果たしている。なぜならば紫外線（とりわけ $0.26\mu\text{m}$ 付近の紫外線）は、遺伝子の本体であるDNAによく吸収され、この吸収された紫外線のエネルギーが、DNA分子を不安定にすることで遺伝子の正常な機能を損なうからである。大気中で、紫外線を主に吸収しているのはオゾン分子（ O_3 ）であるが、陸上生物の最初の証拠が得られているのは、大気中のオゾン濃度が徐々に増加し、それが現在の50-60%程度に達したシルル紀（4.43-4.19億年前）である（岩坂 2010）。

大気中オゾン分子濃度のピークは、緯度や季節によって異なるが高度20-25km付近の成層圏にある。このオゾン分子は、 $0.24\mu\text{m}$ 以下の紫外線をエネルギーとして大気中の酸素分子（ O_2 ）から生成され、そしてできたオゾン分子はより波長の長い $0.32\mu\text{m}$ 以下の紫外線を吸収して酸素分子に分解される。大気中のオゾン濃度は、この生成と消失のバランスにより決まっている（真木 2000）。

フロンなどの塩化化合物から出る塩化酸化物 ClO_x などの微量気体成分は、この消失反応の触媒として働くことにより、大気中のオゾン濃度を低下させる。フロンは化学的に安定、人体に無害、安価という特長を持つため、冷蔵庫やエアコンの冷媒、スプレーのガス、半導体の洗浄などに広く利用されてきた。地表で廃棄されたフロンは対流圏ではほとんどが分解されず、成層圏に達し、特に最も気温の低い両極の成層圏に集積される。その結果、南極の上空でオゾン密度が異常に小さい状態（オゾンホール）が、南極の春にあたる9-10月に発生することが、1970年代の終わりに発見された（和田 2002）。その後、フロンの生産と使用はモ

ントリオール議定書などで国際的に規制されることとなり、その結果、フロンの大気中濃度は1990年代以降ピークを過ぎ緩やかに減少している。しかしそれは2010年現在でも依然として高い状態にあり、南極上空では大規模なオゾンホールが毎年発生している（気象庁 2012）。

2.3.4 海洋酸性化

過去の人間活動（化石燃料の燃焼と土地利用）によって放出されたCO₂のうち、累積で約20%が陸域に、約31%が海洋にそれぞれ吸収され、その残余の約48%が大気中CO₂濃度を上昇させている（図1.1.3）。このうち海洋に吸収されたCO₂は、水と反応して水素イオンを生じさせることで（ $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}^- + \text{H}^+$ ）、**海洋酸性化**を生じさせている。酸性化が進行した海水には炭酸カルシウム（CaCO₃）が溶けやすくなるため、海洋酸性化は、炭酸カルシウムの殻や骨格を有するサンゴや貝類といった生物に悪影響を与える（野尻 2007）。このような海洋酸性化による海水pHの低下幅は、産業革命から2010年現在までに0.1程度であるが、海洋生態系への影響が少しずつ報告されはじめている。現在のペースで大気中CO₂濃度が増大し続けた場合には、海洋表層のpHは最大0.4程度減少すると予想されており（Feely et al. 2004）、その場合の海洋生態系への影響は大きいと考えられている。たとえば、海洋酸性化と海水温の上昇（海水温度が30℃以上の状態が続くと、サンゴに白化と呼ばれる現象が発生し死滅する場合がある）の双方の影響によって、日本近海の熱帯性・亜熱帯性サンゴの生息可能な海域は、2030年代か2040年代までに消失する可能性も指摘されている（Yara et al. 2012）。

2.3.5 絶滅と生物多様性の低下

絶滅とは、ある生物種のすべての個体が消え去ってしまうことである。絶滅は、自然現象の1つであるが、近年の人間活動は絶滅速度を2桁以上高めていると推定されており（Leadley et al. 2010）、私たちは地球史的な大絶滅の最中に生きている。絶滅を生じさせる人間活動は、産業革命以前には乱獲が中心であったが、産業革命以降には、農地や放牧地の拡大などによる生息地の破壊と分断、侵略的外来種、農薬などのさまざまな要因が加わり、そして今後は気候変動が加わると考

えられている（佐藤他 2012）。

絶滅は生物多様性の大きな減少要因となることで、人間が生態系から受け取る恩恵、すなわち生態系サービスを縮小させる場合がある。ここで生態系サービスとは、生態系の働きのうちで、人間の便益に適うものをすべて包括した概念である。ここには、土壌形成や栄養塩の循環といった生態系全体の基盤を整える機能、土壌・大気・水循環・気候の調整機能、食料・燃料・さまざまな材料の供給機能、また文化やレクリエーションの場の提供などが含まれる（Costanza et al. 1997）。ただし、人間の生態系の仕組みに関する知見は限定的であり、絶滅や生物多様性の減少が、今後人間社会にもたらす影響については、不明な点がきわめて多いことに留意する必要がある。すなわち、思いもかけない災難を人間社会にもたらす可能性もあるし、さして影響しない可能性もある。しかし、一度絶滅させた種を取り戻すことができないという不可逆性がある以上、予防原則的な観点から、生物多様性を保全する努力は怠ってはならない。また、現在の生物多様性は、40億年にわたる生命進化の産物であり、その存在自体が貴重であり、人間の経済的利害のみから価値を論ずることは倫理的な問題もあるだろう。

以下、現代において絶滅や生物多様性の減少を生じさせている2つの主要な人為要因について、解説する。先史時代に人類が絶滅させた大型草食動物と、それが生態系へ与えた影響については、2.1節にて例を挙げた。

(a) 生息地の破壊と分断

近世から現在にかけての絶滅の最大要因は、土地利用に伴う生息地の破壊と分断化である。特に森林は、高い生物多様性を有するため、森林の破壊は絶滅や生物多様性の縮小に直接的な影響を与える。Living Planet Index (LPI) は、広く利用されている生物多様性の指標の1つであり、世界各所の陸上・海洋の脊椎動物の個体群サイズを集計したものである。WWF (2012) は、このLPIの時系列変化を2688種・9014集団もの大規模な調査から算出し、1970年から2008年までに世界全体で約28%（陸上生物だけの場合約25%）の減少、熱帯域の生物だけを対象に算出した場合は約61%（陸上生物だけの場合約45%）もの減少になると報告している。他方で、温帯域の生物を対象に算出した場合には31%（陸上生物だけの場合約5%）の増加になるという結果も示している。これらの結果は、先に述べたように、近年の森林破壊が特に熱帯域を中心に生じており、逆に温帯域で

は森林面積の増大が見られているというトレンドに一致するものである。

生息地の縮小が限定的であっても、生息地が農地や都市などによって細かく分断され、そのような生息地の間で個体群が往来できなくなる場合には、絶滅が生じやすくなる。なぜならば、分断された小個体群は、さまざまな集団遺伝学的要因（近親交配率の増加、弱有害突然変異遺伝子の蓄積、人口統計学的リスクの増大）が重なることで脆弱になることが知られ、それにより個体群数が減少して、それらの要因がさらに強く働くようになるという、いわゆる「絶滅の渦」と呼ばれる個体群縮小のフィードバックが生じるからである（佐藤他 2012）。たとえば、タイの国立公園においてインドシナトラとアジアゾウの生息有無を調査した結果によると、1400km²以上の公園では両種とも生息していたが、500km²以下の公園では、その2/3以上でいずれの種も生息が認められなかった。また、面積が小さくとも、これらの動物の生息が確認された公園は、いずれも大きな国立公園と隣接しているという（湯本 1999）。そのため、種多様性を安定的に保持するためには、なるべくまとまった面積の保護区を設定するか、保護区の間で動物の移動ができるように留意することが大切である。

(b) 外来種

本来の生息地の外から、人為的に移動された種は外来種と呼ばれる。人間は、食用、観賞用、ペットとして、多くの生物種を移動させてきた。たとえば北米の農作物と家畜の大半は、欧州や南米などから運ばれた外来種である。また、海洋生物の場合は、船舶のバラスト（おもり）水や、船底への生体の付着によって、意図せずに運搬された外来種も多い。世界有数の国際港湾であるサンフランシスコ湾では、その一部水域においては、生息する種の90%までもが外来種であるという（マグラス 2005）。外来種のうち、個体数を大幅に増加させ、在来の生態系に大きな影響を与えるものは**侵略的外来種**と呼ばれる。米国では、侵略的外来種による被害額は年間1400億ドル以上と推定され、また絶滅が危ぶまれている動植物種の40%以上が、何らかのかたちで侵略的外来種の影響を受けているという。

一度定着させてしまった侵略的外来種の駆除は、きわめて困難である。オーストラリアでは、19世紀中頃にイギリスからアナウサギが導入されたが、やがて定着に成功し個体数を増やしたアナウサギは、既存の生態系を破壊したのみなら

ず、農作物に多大な被害を与えるようになった。第二次大戦後、農地における人手不足と気候条件の両要因が重なり、耕作地帯におけるアナウサギの数は記録的に増加してしまった。そこで1950年に、ウサギに感染するミクソーマウイルスの散布を行ったところ、それは野火のように拡がりアナウサギに99%以上もの高い死亡率をもたらし、その個体数を大幅に減少させることに成功した。しかし、アナウサギがミクソーマウイルスに対する耐性を獲得したことで、数年後には死亡率は約50%にまで低下し、その後も死亡率は下がり続けた(Fenner 1983)。同時に、ミクソーマウイルスにも弱毒化した進化が生じたため(「宿主であるアナウサギの死亡率を下げるという突然変異がこのウイルスの拡散に有利であったため、そのような弱毒株が元々の強毒株と入れ替わった」と説明されている)、やがてオーストラリアのアナウサギ個体数は回復に向かった。

2.3.6 人間活動による気候変化

2.2節において、アジアモンスーン気候は、すでに18世紀までにはこの地域の土地利用改変により変化していた可能性があることについて述べた。しかし産業革命以降、特に20世紀中盤以降の大気中の温室効果ガスとエアロゾルの顕著な増加、および土地利用による地表面改変といった人為的な環境変化は、ほぼ間違いなく現在の気候に影響を与えていると考えられている。

(a) 人間活動による地球温暖化

図2.3.5は、複数の大気海洋結合大循環モデル²⁾(以下気候モデルと略する)を用いて、1900年からの全球平均気温変化をシミュレートした結果である(IPCC 2007)。これによると、実測されている1960年頃からの顕著な温暖化傾向は、太

2) 地球全体における大気と海水の循環をシミュレーションするための、コンピュータープログラム。ここでは大気と海洋を三次元の格子で表現し、各格子をシミュレーションの単位としている。そして大気や海水の流れを記述する運動方程式に、太陽放射・蒸発・雲の生成・降水に伴うエネルギーの変換や移動という熱力学的要素を加えて、地球という回転球体の表面に広がる大気と海水の流れを数値的に計算している。なお、海水の流れは膨大な熱エネルギーを輸送しており、気候形成に大きく影響しているため、これを扱うことは気候シミュレーションにおいて欠かせない。

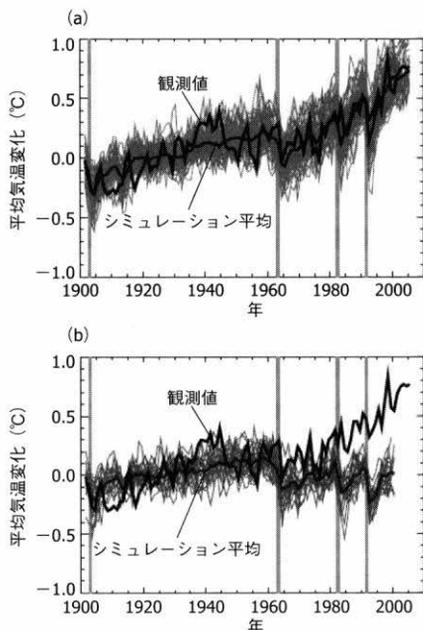


図 2.3.5 全球の平均気温変化を観測値とシミュレーション出力との間で比較した。(a)には、自然要因と人間活動による放射強制力変化の両方を考慮した計算結果が示されており、細線は個々のシミュレーション出力、太線は全シミュレーションの平均値を示している。(b)は、自然要因による放射強制力変化のみを考慮した計算結果であり、細線・太線は(a)と同様である。灰色の縦線は、大規模な火山噴火が生じたタイミングを示している (IPCC 2007)

陽活動や火山噴火などの自然の気候変動要因のみを考慮したシミュレーション (図 2.3.5b) では再現されず、そこに人間活動の影響 (温室効果ガス+エアロゾル) を加えたシミュレーション (図 2.3.5a) で再現されることが示された。なお、1960-70 年頃に、実際の気温がやや下降傾向になっているが、これはインドネシアのアグン火山の噴火の影響に加え、人間活動起源のエアロゾルが非常に増えた時期に対応している。1970 年以降には再び温暖化傾向が生じているが、この時期の温暖化は北半球の中・高緯度の特にユーラシア大陸上で強いことが観測されており、そしてこれと似た空間分布が気候モデルからも再現されている。図 2.3.6 は、この人間活動の影響を加えたシミュレーションにおいて、人為的な環境変化の各要素が、地球の放射強制力に与えた変化量を見積もったものである。それによると、温室効果ガスはプラス、エアロゾルはマイナス、土地利用変化などによるアルベド変化はマイナスに

なっているが、合計すると、温室効果ガスの効果が効いて、プラス、すなわち、地表面を暖める方向に働いていたことが示されている。

これらの気候モデルに、今後の温室効果ガス増加のパターンから計算される放射強制力の変化を与えることで、将来の気候を予測することが可能である。温室効果ガスの増加パターンは、今後の人間活動のあり方に大きく依存するため、IPCC の気候変動予測では、グローバルスケールでのいくつかの産業活動の規制 (計画) ごとに複数の温室効果ガス排出シナリオを用意し、それぞれのシナリオ

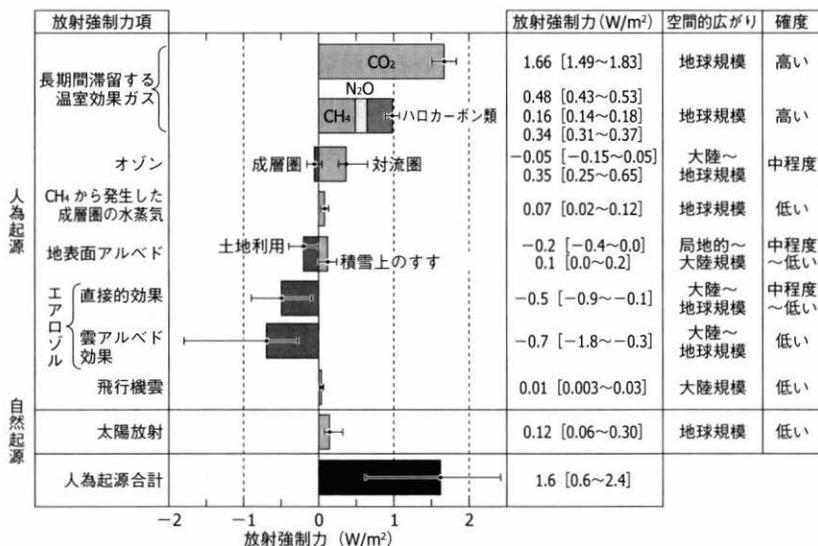


図 2.3.6 1750年から2005年までの人間活動が、地球の放射強制力に及ぼした影響の推定平均値、およびその90%信頼区間。火山エアロゾルは、影響が一時的であるためこの図には含まれていない。科学的理解水準の非常に低い放射強制力要素についても、この図に含まれていない (IPCC 2007)

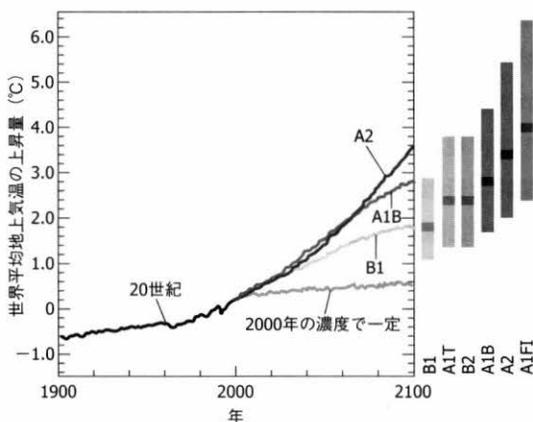


図 2.3.7 いくつかの温室効果ガス排出シナリオにもとづいた2000年から2100年までの全球地上平均気温の変化予測。それぞれの線は複数の気候モデルの出力を平均したものであり、それらの陰影は±1標準偏差の範囲を示している (IPCC 2007)

ごとに予測のシミュレーションを行っている。図 2.3.7 は、シナリオごとの 2100 年までの全球地上気温の予測を示している。産業活動への規制が最も厳しいシナリオである B1 シナリオは、温室効果ガスの排出量は 2050 年までは緩やかに増加するが、その後は減少し、2100 年には 1980 年頃のレベルに戻るというものであるが、それでも、全球の地上平均気温が 1.8°C 程度の上昇が予測されている。より現実的な温暖化ガス排出シナリオである A1B シナリオに沿った予測では、2-3°C 程度の上昇が予測されている。このような気温変化（地球温暖化）予測は、政府間の温室効果ガス規制に関する国連の条約（気候変動に関する国際連合枠組条約；UNFCCC）の締約国会議（COP）において、議論の出発点になる数値となっている。

(b) 気候変動予測における信頼性

気候変動予測において常に問題になるのが、予測に用いられている気候モデルの信頼性（あるいは不確実性）である。IPCC 第四次報告書の気候変動予測に利用されている気候モデルからは、全球スケールの平均気温予測において、互いによく似た傾向が出力されており（図 2.3.7）、これはこれらの気候モデルが一定の信頼性を持つことを示唆している。しかし、地域ごとの気候予測の信頼性は、未だに高いとは言えない。特に、対流性の雲と降水が卓越する熱帯やモンスーン地域においては、気候モデルの格子点以下の小さなスケール（1-100km 程度）で生じる放射や潜熱のエネルギー過程が卓越している。そのため、現在の気候モデルは、これらのプロセスの再現について、限られた観測データに基づくパラメタリゼーションという経験的な近似を行っており、系統的な再現・予測の不確実性が排除できない。そのため、これらの地域においては、特に降水現象の予測信頼性は高くない。

気候変動に伴って、降水を含む水循環システムがどう変化するかという問題は、人間活動のみならず、生態系全体へ強く影響する重要な問題である。とりわけ、干ばつ・洪水の頻度や程度の変化、あるいは氷河への影響を含む雪氷圏への影響とフィードバックは、重要性の高い問題である。「地球温暖化」の深刻さは、この水循環システムへの影響がどの程度かということにかかっているとすら言えよう（沖 2012）。しかしながら、気候システムにおける水循環の役割は非常に複雑であり、その気候へのフィードバックを含んだ仕組みは十分に理解されておらず、

これが気候変動予測における大きな不確実性要因にもなっている。

2.3.7 人類世（人新世）の到来

1.15万年前から現在にかけての完新世（Holocene）においては、気候も物質循環も、比較的安定な状態が続いていた。しかし産業革命以降、これらは徐々に変化し、その変化の割合は20世紀に入るとさらに大きくなり、そして20世紀後半に入ると、この節で述べてきたように、大気圏・水圏・地圏・生命圏の全てにおいて劇的なシステムの変化が生じた。例えば、主要な温室効果ガスの1つであるCO₂は、これまでに過去数十万年続いてきた氷期-間氷期サイクルの変動幅を大きく逸脱するレベルにまで上昇しており、しかもその濃度はさらに増大することが見込まれており、このような大気の化学組成の大きな変化は、現在と将来の気候システムに大きな影響をもたらすものと考えられている。また、CO₂のような温室効果ガスの増加に加えて、エアロゾルの増加や地表面改変とそれらの複合的なプロセスも、地球表層あるいは気候システムへ大きなインパクトを与える可能性が指摘されている。オゾンホール研究で有名なノーベル賞科学者P.クルツェンは、現在を人間活動が地球システムに大きな影響を与える新たな地球史時代に突入したと捉え、これを**Anthropocene（人類世あるいは人新世）**と命名している（Crutzen 2002）。

気候システムは、これまでも自然要因による変動を繰り返してきた。すなわち大陸移動や火山活動、あるいは隕石衝突などの地球内外からの大きなインパクトで改変され、ここにゆっくりとした生命圏の進化も加わって、次の準平衡的なシステムへと進化することを繰り返してきた（丸山・磯崎 1998）。産業革命以降、とりわけ20世紀後半以降の人間活動は、ここに新たに加わった気候システムの変動要因である。人類は、完新世を通してほぼ維持されていた水・物質循環系や生態系の準平衡状態のいくつかについて、すでに限界あるいは**急激な転換点（tipping point）**を超える変化を与えた可能性が指摘されている。国際科学会議（ICSU）は人間活動による地球システム変化を示す重要な指標として10の事象（気候変化・海洋酸性化・成層圏オゾン減少・窒素循環変化・リン循環変化・全球的な淡水利用変化・土地利用変化・生物多様性減少・大気へのエアロゾル負荷増加・化学物質汚染）を取り上げ、その中で特に生物多様性・窒素循環・気候変化（温暖化）

については、すでにこれまでの準平衡状態が維持できる限界を大きく超えてしまっているとの警告を発している (Rockstrom et al. 2009)。

これらの変化は個別に生じているわけではなく、地球システムにおける相互作用の結果として生じている。そのため、今後の人間活動が、非線形な地球システムにどのような影響を与えるのかについては、不確実な点も多い。しかし、このような現状を理解し、その変化を予測し、そして対策を立てることができるのは人類だけである。人類が地球を理解するという試みは、したがって、人類にとって地球はどのような存在であり、どうあるべきかを考える行為にもつながるものである。人類世とは、人類がそのような認識を持つに至った時代としても定義できるだろう。

参考文献

- 岩坂泰信 (2010) : オゾン層の破壊. 住明正・松井孝典・鹿園直建他著『地球環境論 (新装版 地球惑星科学 3)』, 6章, 岩波書店, pp. 139-170.
- 太田猛彦 (2012) : 『森林飽和』, NHK ブックス.
- 沖大幹 (2012) : 『水危機, 本当の話』, 新潮社.
- 気象庁 (2012) : オゾンホールを経年変化. 気象庁ホームページ, http://www.data.kishou.go.jp/obs-env/ozonehp/diag_o3hole_trend.html
- 蔵治光一郎・保屋野初子編 (2004) : 『緑のダム』, 築地書館.
- 佐藤永・嶋田正和・竹門康弘他 (2012) : 生態系の保全と地球環境. 日本生態学会編『生態学入門 第2版』, 10章, 東京化学同人, pp. 227-263.
- 野尻幸宏 (2007) : ココが知りたい温暖化, 海洋と大気の大気炭素の交換. 国立環境研究所地球環境研究センター『地球環境研究センターニュース』, 2007年4月号, http://www.cger.nies.go.jp/ja/library/qa/6/6-1/qa_6-1-j.html
- 真木太一 (2000) : 『大気環境学』, 10章, 朝倉書店.
- マグラス, スーザン (2005) : 侵略しつづける外来生物. ナショナルジオグラフィック日本語版, 2005年3月号, 日経ナショナルジオグラフィック社.
- 丸山茂徳・磯崎行雄 (1998) : 『生命と地球の歴史』, 岩波書店.
- 湯本貴和 (1999) : 『熱帯雨林』, 岩波書店.
- 和田英太郎 (2002) : 『地球生態学 (環境学入門3)』, 岩波書店.
- Botkin, D. B. & Keller, E. A. (2010) : *Environmental Science, Seventh Edition*, Chapter 13, Wiley, pp. 242-263.
- Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., et al. (1997) : The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, 387, 253-260.
- Crutzen, P. J. (2002) : Geology of Mankind : the Anthropocene. *Nature*, 415, 23.
- FAO (2010) : *Global Forest Resource Assessment 2010*.
- Feely, R. A., Sabine, C. L., Lee, K., Berelson, W., Kleypas, J., Fabry, V. J. & Millero, F. J. (2004) :

- Impact of Anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ System in the Oceans. *Science*, 305, 362-366.
- Fenner, F. (1983) : Biological Control, as Exemplified by Smallpox Eradication and Myxomatosis. *Proc. R. Soc. Lond.*, B218, 259-285.
- IPCC (2007) : *Climate Change 2007 : the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press.
- Leadley, P., Pereira, H. M., Alkemade, R., et al. (2010) : *Biodiversity Scenarios : Projections of 21st Century Change in Biodiversity and Associated Ecosystem Services*, Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal. Technical Series no. 50.
- Pan, Y., Birdsey, J. F., Houghton, R., et al. (2011) : A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333, 988-993.
- Rockstrom, J., et al. (2009) : Planetary Boundaries : Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14, 32.
- Steffen, W., Crutzen, P. J. & McNeill, J. R. (2007) : The Anthropocene : Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature. *AMBIO*, 36(8), 614-621.
- WWF (2012) : *Living Planet Report 2012*.
- Yara, Y., Vogt, M., Fujii, M., et al. (2012) : Ocean Acidification Limits Temperature : Induced Poleward Expansion of Coral Habitats around Japan. *Biogeosciences*, 9, 4955-4968.