

**気候変動と地球の未来  
— 科学的見地から —**

土井 勝

**The Climate Change and the Future of the Earth  
— From the Scientific Viewpoint —**

Masaru Doi

*Osaka University of Pharmaceutical Sciences, 4-20-1, Nasahara, Takatsuki, Osaka 569-1094, Japan*

(Received October 31, 2017 ; Accepted November 27, 2017)

## 気候変動と地球の未来 — 科学的見地から —

土井 勝

### The Climate Change and the Future of the Earth — From the Scientific Viewpoint —

Masaru Doi

*Osaka University of Pharmaceutical Sciences, 4-20-1, Nasahara, Takatsuki, Osaka 569-1094, Japan*  
( Received October 31, 2017 ; Accepted November 27, 2017 )

**Abstract** The climate change is the most urgent environmental issue to be resolved in the world. In this paper, the global warming is discussed from the scientific point of view. The current situation of the global warming is reviewed according to the Assessment Reports by IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). The mechanism how the global average surface temperature is fixed by the solar and terrestrial radiations is explained, and then the importance of the greenhouse effect and the carbon cycle is emphasized quantitatively. After the climate model and its computer simulation are outlined, the prediction about the future climate are presented and the influences of the global warming are reviewed according to the IPCC's report. In order to have deeper understanding of the climate change, the controversy between people suspecting the global warming and people accepting the IPCC's report will be taken up.

**Key words** — global average surface temperature; global warming; greenhouse effect; carbon cycle; climate model; future climate; influence of the global warming; IPCC

#### はじめに

森羅万象一切を包み込む宇宙も、生命が宿る地球も、無限にして悠久不変であるという思い込みは、ビッグバン宇宙論（1953年）によって、完全に打ち碎かれてしまった。宇宙は始まりがあり、有限で、ずっと膨張を続けている。

宇宙の開闢から138億年、地球の誕生から46億年、生命の誕生から35億年である。私たちが住むかけがえのない地球は、宇宙の進化の過程で、偶然と必然の織りなす結果として生み出されたものである。地球環境の変化は、地球の歴史とともにあり、生物の進化の方向と種の盛衰を決定づけてきた。宇宙と地球と生命の進化の歴史は、大自然の霊妙さを私たちに教えてくれる。

人類（ホモサピエンス）は今からわずか16万年前に生物の一つの種としてアフリカに生まれ、自然の一要素として存在している。人類が自然を

有効に活用する能力を身につけ、豊かな生活を享受するようになったのは、人類の歴史のなかでもごく最近のことである。ところが現在、人間による資源の浪費と環境の破壊、そしてそれらがもたらす影響が懸念され、今やその克服が国際社会の最重要課題の一つとなっている。

18世紀にイギリスに興った産業革命は、物質とエネルギーに価値を置く大量生産、大量消費、そして大量廃棄の社会を生み出した。しかし、人類を豊かにしてくれるはずの物質機械文明は、限りある資源を浪費するばかりでなく、知らず知らずのうちに地球環境に負荷をかけ続け、多くの生物種の生存を脅かすに至ってしまった。人類にとっても、地球の食料生産力の低下、生態系の破壊、健康被害、社会インフラの破綻などにより社会が脆弱化し、下手をすると、文明の衰亡に繋がりがねない事態になっている。

人類による環境破壊は、近年に特徴的な事件で

はない。人類史のそこかしこで何度も起こり、文明を滅亡に導いた原因の一つであるとされる。ある研究者によると<sup>1)</sup>、文明は段階的に築き上がり、より豊かで強力になるが、繁栄の頂点に達したとき衰退の兆しが見え始め、何かを引き金に短期間に崩壊するという。衰退の原因となるのは、①人間による環境破壊、②自然の気候変動、③周辺の敵対集団、④周辺からの支援の途絶、⑤政治・経済・文化に由来する行動様式であるとされる。文明が衰退するのは、これらの要因が複合的に相互作用して、社会が変化に適応できず、脆弱化するためだという。いずれにしても、人間の営みが環境の中で行われる限り、環境と共生できない文明は衰退し、終には滅びる可能性が高いとされる。

最古のシュメール文明は、大河沿いの肥沃な三日月地帯に興り、灌漑農業によって栄え、都市が発達した。気候が乾燥化する中で灌漑を続けたために、次第に土地が塩化したが、その原因を理解しないまま更に灌漑を続け、土地の生産力が低下して民を支えきれなくなり、文明は滅んだ。絶海の孤島に栄え巨石を使ったモアイ像で知られるイースター文明は、石を運ぶ材木を調達するために、次々と森林から樹を切り出した。そして、何らかの理由から石像を作り続け、森林の樹木を最後の一本まで切り尽くし、石切場に300以上の未完成の石像を残したまま崩壊した。

現代に目を転じよう。環境問題が人類の大きな課題として浮上したのは、20世紀も半ばを過ぎてからである。先進工業諸国が第二次世界大戦からの立ち直りを急ぎ、産業経済の復興と発展を目指している間に急激に進行し、1970年代に歪みが顕わになって、真剣に取り上げられるようになった。その嚆矢となったのが、ローマ・クラブによる『成長の限界』である<sup>2)</sup>。現代の体制が永続するかという疑問が真剣に検討され、「現在の人口増加と経済成長が今後も持続すれば、食糧不足、資源の枯渇、汚染の拡大により、地球と人類は100年以内に成長の限界に達する」と警鐘を鳴らしたのである。

過去に滅亡した文明に対し、後世の人々は、なぜ問題を認識できなかったのか、なぜ解決に取り

組まなかったのかと不思議に思う。しかし、人間というものは、当たり前となっている生き方や時代の社会通念から抜け出すことは、なかなか難しい。今を生きる私たちも、文明を崩壊させてしまった過去の人々の轍を踏んでいないと断言できるだろうか。

環境問題とは、原因が人間活動に由来するものであって、生物に悪影響を及ぼす環境変化のことである。環境問題は、汚染源の広がりや影響が及ぶ範囲によって、3つに分類される。第一の局所環境問題は、汚染源が局所的でその影響も限定的なものをいい、騒音、振動、悪臭などが該当する。第二の地域環境問題と呼ばれるものは、発生源と影響が及ぶ範囲が地域的な広がりを持つもので、水質汚染、大気汚染、土壌汚染、森林破壊、土地の砂漠化、生態系の破壊、放射能汚染などが該当する。第三の地球環境問題は、発生源や被害の範囲が大陸規模または地球規模となるもので、オゾン層破壊、酸性雨、地球温暖化などがある。現代に固有の環境問題は、第二、第三のものである。

現代の環境問題の中で、影響が及ぶ範囲が地球全体であるという意味において、解決が難しく影響が深刻であるという意味において、また、その影響が何世紀も続くという意味において、解決を急がねばならない最大のものであるのは、地球温暖化による気候変動であることは疑いがない。

## ● IPCC とその役割

近年の気候変動に関する評価は、国連に設置されているIPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change = 気候変動に関する政府間パネル) によって、継続的に行われている。IPCCは、世界気象機関 (World Meteorological Organization) と国連環境計画 (United Nations Environment Programme) により、1988年に設立された専門家と政府関係者で構成される国際機関である。

IPCCは、既存の膨大な知見を調査し評価して、政策立案者をはじめ広く一般に有用な情報を提供することを任務とし、国際政治と各国の政策に大きな影響力を持っている。IPCCは次の3つの作業部会からなる。

第一部会：気候システム及び気候変化について科学的根拠を評価する。

第二部会：生態系，社会・経済等への影響と適応策を評価する。

第三部会：気候変化に対する緩和策について評価する。

評価結果は AR (Assessment Report = 評価報告書)<sup>3)</sup>として発行され，第1次 (FAR) が1990年，第2次 (SAR) が1995年，第3次 (TAR) が2001年，第4次 (AR4) が2007年，最新の第5次 (AR5) が2014年である。

本論考では，環境問題の中から地球温暖化を取り上げ，主として科学的な立場から論じる。気候変動の歴史と温暖化の現状についての説明から始め，地球の気温はどのようなメカニズムで定まるか，気候はどのような要因によって変動するか，気候モデルとはどのようなものか，気候モデルは将来の気候をどのように予測しているかについて述べる。最後に，地球が温暖化していることについて根強い懐疑論があり，懐疑派と IPCC の報告を受け入れる肯定派の間の論争を，科学的な視点から探る。

なお，本論考では，必要なデータは，原則として IPCC の AR から引用する。

## 1. 地球の進化と気候変動

宇宙は，超高温・超高密度の火の玉が，大爆発を起こして始まった。誕生から  $10^{-4}$  秒後に陽子と中性子が，3分後にリチウムまでの軽い原子核が，40万年後に原子核と電子が結合して原子が生まれた。数億年後に，宇宙の物質分布にゆらぎがあることで星が生まれ，星の内部で鉄までの元素が作られた。恒星が死滅する際の超新星爆発により，鉄より重い元素が生まれ，あらゆる種類の元素が宇宙空間にまき散らされた。太陽のまわりを回転するガス雲が収縮して微惑星となり，微惑星が衝突と合体を繰り返して地球が生まれた。

地球が46億年前に誕生したとき，なおも続く微惑星の衝突で発生した熱による脱ガスの影響で，地球は数千度のマグマの海であった。微惑星

の衝突が減るにつれて地球は次第に冷え，脱ガス中の水蒸気は雨となって降りそそぎ，原始の大気と海が生まれた。大気中の二酸化炭素が海に吸収されてさらに冷え，地表の温度は  $100 \sim 200^{\circ}\text{C}$  に下がり，生命が存在できる環境が備わった。

太陽放射が遮られる海の中で35億年前に生命が誕生し，藍藻類が出現するに及んで，それが行う光合成によって酸素が増え始める。酸素が大気中に出ることで，太陽光を受けて酸素はオゾンに変化し，大気上空にオゾン層が形成された。オゾン層は生物に有害な紫外線を吸収するため，陸上に生物が生息する環境が整えられ，先ず植物が，続いて動物が海から陸に進出したのである。

生物の出現以降は概して温暖で，緯度による差が少ない様な気候であった。しかし，生命誕生から約35億年の間に，大規模な火山噴火あるいは隕石の衝突に起因すると思われる地球環境の激変が5回あり，生物の大量絶滅が起きている。

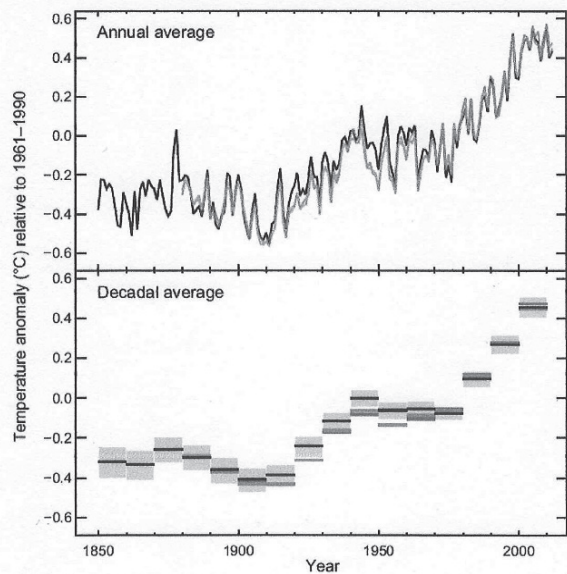
原生代末期 (6億年前)，古生代末期 (3億年前)，新生代 (0.65億年前以降) は低温期であった。これに対して，古生代のデボン・石炭紀 (4～3億年前)，中生代のジュラ・白亜紀 (2～1億年前) は著しい高温期で，雨が多く森林が豊かで，恐竜や爬虫類の全盛期であった。

地質時代のこうした気候変動は，大陸移動に伴う分裂・合体・造山運動，大陸と海洋分布の変化，二酸化炭素濃度の変化，火山の噴火や小天体の衝突で発生したエアロゾルなどが原因と考えられている。

現代が属する新生代第4期の100万年は低温期で，4回の氷期と間氷期があった。最後の氷期は約7～1万年前に出現したウルム氷期で，これ以降は概して温暖である。5000～3000年前は世界的に高温，多湿であったが，500年前に一転して寒冷，多雨となった後は，200～300年周期で小きざみな寒暖を繰り返している。

### ●温暖化の現状

では，近年の地球の気候はどうなっているか。IPCCの一連のARにおいて，温暖化についての科学的評価の方向は一貫しており，報告書が新し



くなるにつれ、結論はより精緻で、確信に満ちたものになっている。IPCCのAR5は、次のように結論している。

気候システムの温暖化に、疑う余地はない。気温、海水温、海水面水位、雪氷減少などの観測事実から、温暖化していることが再確認された。人間活動が、20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な要因である（可能性95%以上）。

陸域と海上を合わせた世界平均気温は、1880年から2012年の期間に0.85 [0.65 ~ 1.06] °C上昇している。最近30年のいずれの10年間も、1850年以降のどの10年間より高温であった。上に示した図（IPCCのAR5より）は、こうした結論を図示したものである（濃さの異なる曲線は、解析グループの違いである）。

グリーンランド及び南極の氷床は減少し、北極海の海氷面積も減少を続け、また、氷河も世界中で縮小している。

海洋は、気候システムに蓄えられたエネルギーの大部分を吸収し、水温が上昇している。19世紀半ば以降の海面水位上昇率は、それ以前の2000年間のどの期間よりも大きい。特に、1905～2010年の間に、0.19 [0.17 ~ 0.21]m 上昇している。また、海洋は排出された人為起源二酸化炭素の約30%を吸収し、海面付近の海水は、工業化時代の始まり以降にpHが0.1低下して酸性化している。

## 2. 地球表面温度と温室効果

地球の表面温度が定まるメカニズム、また、温室効果の果たす役割について述べる<sup>4)</sup>。

どのような物体も、その温度に応じて様々な波長の電磁波を放射する。電磁放射と呼ばれるこの現象は、量子論により、完全な理解が得られている。物質表面の単位面積から単位時間に放射される電磁波エネルギー $\varepsilon$ は、その物体の表面温度 $T$ の4乗に比例する（ステファン・ボルツマンの法則）。

$$\varepsilon = \sigma T^4 \quad (\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4)$$

また、電磁放射の最大強度となる波長 $\lambda_m$ は、物体の表面温度 $T$ に反比例する（ウィーンの変移法則）。

$$\lambda_m = (\text{一定}) / T$$

このため、表面温度 $T = 6000\text{K}$ の太陽からの太陽放射は、可視光を最も多く含むのに対し、地球放射は、平均表面温度が $T_s = 288\text{K} = 15^\circ\text{C}$ であることから、赤外線を最も多く含む。

太陽は、宇宙空間に電磁波を放射して光り輝く。そのエネルギーの源は、太陽内部で起こる水素核の核融合反応 $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$ のである。

地球が地球外から受けるエネルギーは太陽放射だけである。地球と太陽の平均距離の地点において、太陽光に垂直な単位平面が単位時間にうける太陽放射は太陽定数 $S_0$ と呼ばれ、その値は次のとおりである。

$$S_0 = 1.37 \text{ kW/m}^2$$

地球が太陽放射を受け取るだけでは、地球の温度は上がる一方であるのに、実際には、地球の平均表面温度は $T_s = 15^\circ\text{C}$ で安定している。表面温度の安定性を解決する最初の一步は、数学者フーリエが行った考察である（1827年）。フーリエは、地球の温度は太陽放射と地球放射がバランスすることで定まると考え、地球の平均表面温度を計算した。

### ●大気を考慮しない計算

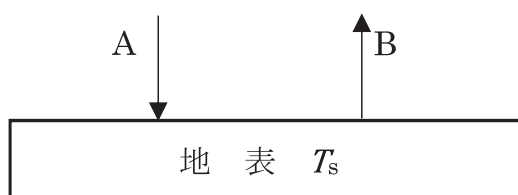
単位時間に地球全体に降りそそぐ太陽放射は、太陽定数 $S_0$ に地球の断面積をかけた量である。

観測によると、太陽放射のうち約 30% は雲や地球表面によって宇宙に反射され、残り 70% が地球に吸収される。太陽放射の地球による反射率（アルベド：記号  $\alpha$ ）は、 $\alpha = 0.3$  である。地球（半径を  $r$  とする）が吸収する太陽放射は、

$$A = (1 - \alpha) S_0 (\pi r^2).$$

一方、地球表面の温度を  $T_s$  とすれば、地球が宇宙に放射する地球放射は、

$$B = \sigma T_s^4 (4 \pi r^2).$$



放射バランスの条件は  $A = B$  で、次の計算が成り立つ。

$$(1 - \alpha) S_0 (\pi r^2) = \sigma T_s^4 (4 \pi r^2) \text{ より,}$$

$$T_s = \left( \frac{1 - \alpha}{4 \sigma} S_0 \right)^{\frac{1}{4}} = 255\text{K} = -18^\circ\text{C}.$$

上で得た値は実測値  $T_s = 15^\circ\text{C}$  より低い。そこで、フーリエは、上の計算が大気を無視していることから、実際には大気が地球放射のエネルギーが宇宙に逃げるのを防いでいると考えた（大気の温室効果を指摘した最初である）。大気の果たす役割は、温室を囲むガラスに例えて、温室効果と呼ばれる。

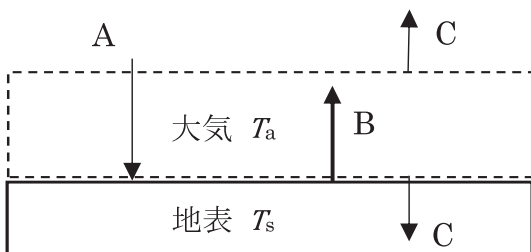
● 温室効果を取り入れる計算

大気は等温で、太陽放射を吸収せず、地球表面からの放射をすべて吸収すると仮定する。大気温度を  $T_a$ 、地球表面温度を  $T_s$  とすれば、

$$\text{太陽放射は } A = (1 - \alpha) S_0 (\pi r^2),$$

$$\text{地表放射は } B = \sigma T_s^4 (4 \pi r^2),$$

$$\text{大気放射は } C = \sigma T_a^4 (4 \pi r^2).$$



地表の放射バランスより  $A + C = B$ 、大気の放射バランスより  $B = 2C$  である。これらの関係式から、次の結果が得られる。

$$T_a = \left( \frac{1 - \alpha}{4 \sigma} S_0 \right)^{\frac{1}{4}} = 255\text{K} = -18^\circ\text{C},$$

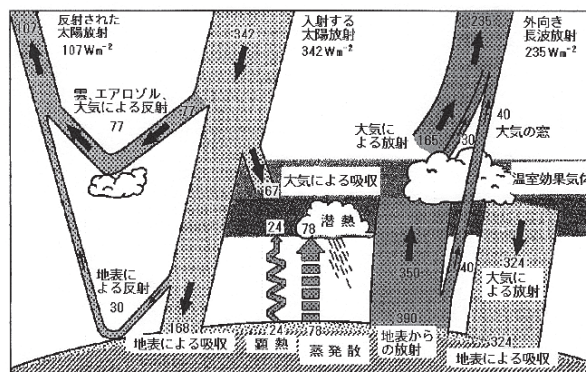
$$T_s = 2^{\frac{1}{4}} T_a = 303\text{K} = 30^\circ\text{C}.$$

大気を無視した計算と比べ、地球大気による温室効果は、地球の表面温度を  $-18^\circ\text{C}$  から  $30^\circ\text{C}$  まで約  $50^\circ\text{C}$  も押し上げる（実測値との違いは、このモデルが簡単すぎるためである）。このモデルは、大気による温室効果が地球表面温度の決定に本質的な役割を演じていることを示している。

宇宙から眺めたときの地球最外面の温度は、温室効果の有無に無関係に、太陽放射とのバランスから、 $-18^\circ\text{C}$  である。しかし、地球表面の温度は、大気があるかないかで劇的に変わる。大気があるときの地球表面は、太陽放射と大気放射の両方を受けるために、これらとバランスするだけの赤外線を出すには、温度を上げざるを得ないのである。

物理学者チンダルは、各種の気体がどの程度赤外線を吸収するかを測定し、窒素  $\text{N}_2$  や酸素  $\text{O}_2$  に温室効果はなく、水蒸気  $\text{H}_2\text{O}$ 、二酸化炭素  $\text{CO}_2$ 、メタン  $\text{NH}_4$  に温室効果があることを発見した（1865 年）。続いて物理化学者アレニウスは、大気中の  $\text{CO}_2$  が 2 倍になると、気温は  $5 \sim 6^\circ\text{C}$  上昇すると予測し警告したが（1896 年）、それを信じるものはほとんどなかった。

上で考察したモデルは単純すぎる。実際に起きている地球のエネルギー収支を、単位面積あたりの平均値に換算して下図（IPCC の SAR に基づき気象庁が作成）に示した。



入射する太陽放射  $342\text{W/m}^2$  の中で、 $107\text{W/m}^2$  は宇宙空間に反射するが、残り  $235\text{W/m}^2$  (のうち  $168$  は地表、 $67$  は大気) が地球に吸収される。一方、地表面から、地表放射  $390\text{W/m}^2$  が出るが、大気の窓を通じて  $40$  が宇宙に逃げ、 $350$  が大気中の温室効果ガスに吸収される。その他に、顕熱(昇温)として  $24\text{W/m}^2$  が、潜熱(蒸発散)として  $78\text{W/m}^2$  が地表から大気に移る。そして、大気からは、上向き放射  $195\text{W/m}^2$  は大気圏外に飛散するが、下向き放射  $324\text{W/m}^2$  が地表に吸収される。

大気圏外、大気圏、地表のそれぞれでエネルギー収支がバランスし、結果として、大気のある地球の表面温度は、大気がない場合より高温に保たれ、平均表面温度が  $T_s=15^\circ\text{C}$  になる。

### ●惑星の温度

惑星の表面温度も、太陽放射と惑星大気の温室効果による放射バランスで決まる。金星、地球、火星について、太陽定数、アルベド、気圧(ほぼ大気の質量に比例する)、主要な温室効果ガス、大気がない場合の表面温度と実際の表面温度を次の表<sup>4)</sup>に示した。

惑星の温室効果						
	太陽定数 [地球比]	アルベド	気圧 [atm]	温室効果ガス	表面温度	
					gassless	観測値
金星	1.91	0.78	90	$\text{CO}_2 > 90\%$	$-40^\circ\text{C}$	$477^\circ\text{C}$
地球	1	0.30	1	$\text{CO}_2 \approx 0.04\%$ $\text{H}_2\text{O} \approx 1\%$	$-18^\circ\text{C}$	$15^\circ\text{C}$
火星	0.43	0.16	0.007	$\text{CO}_2 > 80\%$	$-57^\circ\text{C}$	$-47^\circ\text{C}$

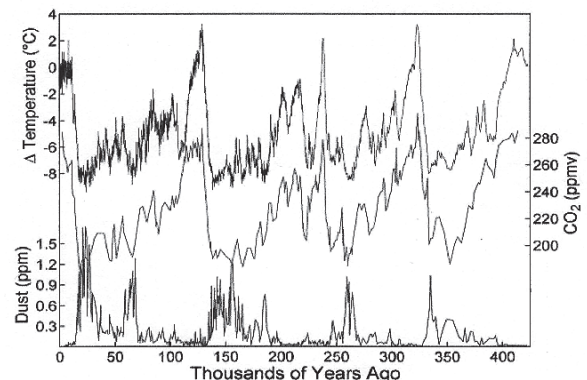
これらのデータは、温室効果が宇宙で成り立つ基本原理であることを示している。濃密な  $\text{CO}_2$  に囲まれた金星は、温室効果が約  $500^\circ\text{C}$  にも達し、灼熱の惑星となっている。火星は、 $\text{CO}_2$  が大気の  $80\%$  も占めるのに、大気が極めて薄く、 $\text{CO}_2$  の絶対量が少なすぎるために、温室効果はわずかである。地球は、 $\text{CO}_2$  の量は金星の  $10$  万分の  $1$  に過ぎないが、大気の約  $1\%$  が水蒸気であるために、温室効果が約  $30^\circ\text{C}$  に達する。生命が存在できる奇跡の地球環境は、地球と太陽の距離が絶妙であることに加え、大気成分が適度であることで生み出されている。

### ●氷床コアの気候データ

南極とグリーンランドに大きな氷床がある。氷床は、降り積もった雪が圧縮されることをくり返し、幾層にも成長した氷塊で、形成当時の大気や様々な環境成分を閉じ込めている。

氷床から取り出した筒状の氷の柱(氷床コア)の1枚の層が1年に相当し、風成塵、火山灰、大気成分、放射性物質を含む。これらの分析から、数10万年分の大気成分、気温、化学物質、火山活動、太陽活動など、気候に関する様々な情報が得られる。年代は層の数または大気に含まれる $^{14}\text{C}$ による炭素年代測定法から、また、気温は雪に含まれる酸素同位体比からわかる(低温期に高分子量の水は蒸発しにくいいため、雪の酸素同位体比 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ は、氷期に小さく、間氷期に大きい)。

次に示す図(Wikipediaより転載)の3曲線は、ボストーク氷床コアより復元された過去42万年の気温(上)、二酸化炭素濃度(中)と塵(下)を示したものである。



この図から次の事実がわかる：

- ①地球の気温と  $\text{CO}_2$  濃度は連動している。
- ②  $\text{CO}_2$  濃度は、温暖な間氷期に高く、寒冷な氷期に低い。最寒冷期と間氷期の間で  $\text{CO}_2$  濃度に約  $100\text{ppm}$  の差がある。
- ③間氷期と氷期の温度差は、約  $10^\circ\text{C}$  である。

約10万年の周期で氷期と間氷期が繰り返されているが、地球の公転軌道や自転軸の周期的な変動に起因するミランコビッチサイクルをきっかけに、温室効果ガス濃度が変化し、それが気候変動を促進する正のフィードバックがはたらいた結果と考えられている。

### 3. 気候の変動要因

天気は大気の状態のことである。『気象はある場所の、ある時刻における大気の状態』のことであり、『気候はある場所の、ある期間について平均した大気の状態』のことをいう。気候は気温や降水量などの平均値や変動幅によって表される。長期的にみれば、気候は様々な変化を示し、これを気候変動と呼ぶ。

気候を決定する総体は、気候システムと呼ばれる。地球は大気圏、水圏、陸圏、雪氷圏、生物圏から成り、それらの振る舞いや相互作用が気候に影響するから、これらがそのまま気候システムである。太陽は気候システムの駆動力としてはたらく。

気候変動を引き起こす要因として、内部要因と外部要因とがある。

#### ●内部要因

気候システムが内包する力学作用によるものをいう。エルニーニョ及びラニーニャ現象は、海洋と大気の相互作用によって起こり、内部要因による気候変動の典型である。

南米西海岸のペルー沖は、沖（東）に向かう海流があり、深海から冷水が湧き上がり、周辺部より海水温が低い。ところが、数年に一度、冷水の湧き上がりが減って海面水温が異常に上昇し、エルニーニョとなる。エルニーニョが発生すると、赤道付近を吹く東風（貿易風）が弱まり、雲が活発に発生する低気圧地帯が赤道太平洋西部から中部へ移動して、異常気象となる。ラニーニャは、エルニーニョと反対に、ペルー沖の海水温が低下して起こる。エルニーニョとラニーニャは、数年周期で交互に起こる。

太平洋の東と西の気圧差は、数年の周期で南方振動を起こし、気圧差で生み出される東風に影響して、これがエルニーニョ及びラニーニャによる異常気象を引き起こしている。エルニーニョ・南方振動は、海洋と大気の相互作用による気象現象であり、離れた地域間の気候が影響し合うテレコネクション（遠隔結合）の代表である。

#### ●外部要因

気候システムにはたらく外的強制力によるものをいう。自然起源のものとして、太陽活動の変動、地球の軌道や自転軸の変化、火山灰の噴出によるエアロゾルなどがある。人為起源のものとして、人間活動による大気組成の変化、エアロゾルの増加などがある。

ミランコビッチは、地球の公転軌道の離心率の周期的変化（周期 10 万年）、自転軸の傾きの周期的変化（周期 4.1 万年）、自転軸の歳差運動（周期 2.6 万年）の 3 つの要因が重なって、数万年周期で日射量の変動することを指摘した（1930 年）。氷床コアデータが示す約 10 万年の周期で繰り返される氷期と間氷期は、ミランコビッチサイクルによるものされている。

太陽の黒点は、平均すると周期 11 年で増減し、黒点数が多いとき太陽活動は活発である。黒点数の増減による太陽放射強度の変動幅は約 0.2% である。また、太陽フレアは宇宙の磁場を大きく乱し、惑星軌道付近の宇宙線の挙動に影響して、地球に降りそそぐ宇宙線が減少することが観測されている。スベンスマルクは、宇宙線により大気中に生成されたイオンが凝結核となって雲が発生する可能性を指摘し、活発な太陽活動で地球を覆う雲の量が減り、地表に到達する日射量が増加する（スベンスマルク効果）との説を提唱している（1997 年）。

エアロゾルは大気中に浮遊する微粒子である。エアロゾルには、硫酸液滴のように太陽放射を散乱するがほとんど吸収しないものから、煤のように太陽放射を大部分吸収するものまで、いろいろある。エアロゾルは、あたかも日傘で地球表面を覆うように日射を遮り（日傘効果）、地球の気温を低下させる。地質時代に、火山噴火や隕石の衝突で発生したエアロゾルにより、地球が寒冷化したことが知られている。

以上は外的要因が自然起源のものであるが、人為起源のものがある。化石燃料を燃やすことで硫黄成分が大気中に出て、それが化学反応を起こして硫酸エアロゾルとなり、気候に影響を及ぼす。また、人間活動が大気成分を変化させ、温室効果



要 因	放射強制力 (W/m <sup>2</sup> )	理解度
●人為起源		
二酸化炭素	+1.68 [+1.33~+2.03]	非常に高い
メタン	+0.97 [+0.74~+1.20]	高い
ハロカーボン類	+0.18 [+0.01~+0.35]	高い
一酸化二窒素	+0.17 [+0.13~+0.21]	非常に高い
一酸化炭素	+0.23 [+0.16~+0.30]	中程度
非メタン有機化合物	+0.10 [+0.05~+0.15]	中程度
窒素酸化物	-0.15 [-0.34~+0.03]	中程度
エアロゾルと 直接効果	-0.27 [-0.77~+0.23]	高い
前駆物質 雲効果	-0.55 [-1.33~-0.06]	高い
土地利用によるアルベド変化	-0.25 [-0.25~-0.05]	中程度
●自然起源		
太陽放射照度変化	+0.05 [+0.00~+0.10]	中程度
人為起源放射強制力	2011年: +2.29 [+1.13~+3.33]	高い
(1750年比)	1980年: +1.25 [+0.64~+1.87]	高い
	1950年: +0.57 [+0.29~+0.85]	中程度

【注】放射強制力とは、気候変動要因によってもたらされる放射エネルギー収支 (W/m<sup>2</sup>) のことである。放射強制力が正の要因は温暖化を、負の要因は寒冷化を引き起こす。

に影響して気候変動を引き起こす。

気候変動の外部要因が、気温が一定であった1750年を基準に、2011年の時点で地球温暖化にどの程度の寄与をするか、また各要因が科学的に理解されている程度を表 (IPCC の AR5 を基に論者が編集) に示した。

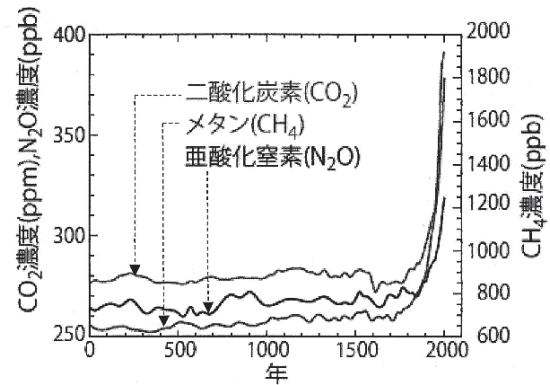
バイオマス焼却 (植物などの焼却、森林火災など) のように、まだ定量的にはよく知られていない原因も残っているが、現時点において、温暖化の要因の第一は、人為起源の二酸化炭素 CO<sub>2</sub>、メタン CH<sub>4</sub>、ハロカーボン類 CFCs 及び一酸化二窒素 N<sub>2</sub>O の温室効果であり、その科学的な理解のレベルも高い。

#### 4. 二酸化炭素と炭素循環

近年の地球温暖化が、人為起源の温室効果ガスの増加によるものである可能性が極めて高い。これを裏付けるデータとして、温室効果ガス濃度の年平均値について、過去 2000 年間の変化を図 (IPCC の AR4 より) に示した。

図の示すところを定量化して要約すれば、下記のとおりである。

- ① いずれの温室効果ガスも、産業革命 (1750 年頃) を境に増加傾向を示し、特に最近 50 年間で急激である。
- ② CO<sub>2</sub> 濃度は、産業革命前に 280ppm であった



ものが、2015 年にほぼ 400ppm となった。濃度の年平均増加率は、1990 年代に 1.5ppm であったが、21 世紀に 2.0ppm に増加している。

- ③ メタン CH<sub>4</sub> の濃度は 1840ppb (2015 年) となり、産業革命前と比較して 2.5 倍に増加した。
- ④ 一酸化二窒素 N<sub>2</sub>O も濃度が増加し、328ppb (2015 年) となり、産業革命前と比較して 1.2 倍に増加した。

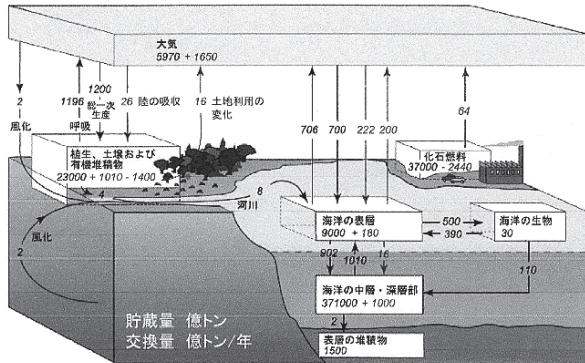
#### ●炭素循環

大気中の二酸化炭素は、濃度が他の温室効果ガスの 500 倍以上あり、放射強制力も最も大きいことから、その増加が温暖化の第一の要因である可能性が非常に高い。そこで問題となるのは、人間活動で大気中に放出される CO<sub>2</sub> のうち、大気中に留まるのはどれだけかである。

炭素は生体に不可欠な有機物の構成元素である。このため、地球上の炭素は、大気や水中ばかりでなく、生物・土壌・水中堆積物の有機物や、化石燃料、石灰質岩や堆積物の無機物などの成分として存在し、これらの中で炭素が交換される。大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は、炭素循環の結果として決まる。

陸域では、陸上植物の光合成により大気中の CO<sub>2</sub> が有機物として取り込まれ、土壌有機物や腐食物質に変化する。土壌中の有機物の一部はバクテリアの分解によって大気に排出され、一部は河川に流れ出し、海洋へと注ぐ。海洋では、海面で大気との間で CO<sub>2</sub> が交換される。また、海水中の CO<sub>2</sub> は、海洋生物の光合成により有機物として取り込まれ、これら生物の死骸や排泄物が海流

循環によって海洋内部へ運ばれ、海底に堆積物として沈殿する。また、CO<sub>2</sub>は、海洋や湖沼の表面から大気に放出される。一連の循環の中で、海洋、陸域生態系そして大気が炭素の主要な貯蔵庫となっている。



【注】蓄積量（億 t-C）を示す箱中の数字で、最初の数は産業革命前の定常値を、それに続く数は人間活動による増減を表す。また、交換量（億 t-C/年）を示す矢印の数字の内、左の2つは産業革命前の値を、右の2つは人間活動による変化分を表す。

炭素循環の様相を図（IPCC の AR4 より）に示す。人間活動が活発でなかった産業革命前までは、大気と海洋及び陸域生態系の間で交換される炭素の量が釣り合い、大気中の濃度はほぼ一定に保たれていた。しかし、人間活動による化石燃料の大量使用や森林破壊などが進んだ結果、CO<sub>2</sub>の大気中への放出と大気からの吸収のバランスが崩れ、大気と海洋及び陸域との間の定常状態が破れている。

●人為起源二酸化炭素

IPCC の AR5 では、化石燃料消費とセメント製造から出る CO<sub>2</sub> と、農地拡大等による土地利用変化で増える CO<sub>2</sub> を人為起源二酸化炭素としている。2000 年代の平均で、人為起源二酸化炭素は 89 億 t-C/年である。大気中の CO<sub>2</sub>が増えるに伴い、森林光合成の活発化でより多くの CO<sub>2</sub> を吸収するようになるために、産業革命前に比べ、吸収量が 26 億 t-C/年だけ増加した。その一方で、土地利用変化で 11 億 t-C/年だけ排出量が増加し、森林関係で差し引き 15 億 t-C/年の吸収増となった。海洋については、産業革命前に比べ、大気からの CO<sub>2</sub>の吸収は 23 億 t-C/年増えている。こうした状況を次表（AR5 から論者が作成）にまとめた。

人為起源炭素収支(単位: 億t-C)

		1750~	1980~	1990~	2000~
		2011年	1989年	1999年	2009年
排出源	化石燃料とセメント製造	3750±300	55±4	64±5	78±6
	土地利用変化	1800±800	14±8	16±8	11±8
吸収源	陸域生態系	1600±900	15±11	27±12	26±12
	海洋	1550±300	20±7	22±7	23±7
大気CO <sub>2</sub> 増加量 (排出源-吸収源)		2400±100	34±2	31±2	40±2

このように、近年では、大気中に排出された人為起源二酸化炭素の半分強が海洋や陸域生態系の吸収源に吸収されるが、半分弱は大気中にとどまり、大気 CO<sub>2</sub>の増加量は 40 億 t-C/年（2000 年代平均）である。人為起源の CO<sub>2</sub>は、大気中に留まることで温室効果としてはたつき、また、海洋に吸収されることで海洋の pH を低下させている。

5. 気候モデル

気候の将来予測は、気候モデルによって行われる。気候モデルとはどのようなものか、その概要を説明する。

天気予報を物理法則の初期値問題と捉える考えは、20 世紀初頭に芽生えた。予報結果を求めるには膨大な計算が必要なことから、目立った成果は得られず、しばらく研究は途絶えた。電子計算機が開発された 1940 年代後半に、開発者であるノイマンは、非線形偏微分方程式の数値解として天気予報を行った。これは、気象現象を数値的に計算できることを実証した点で画期的であった。

気候モデルは、大気・海洋・陸地・雪氷などの変化を考慮して、コンピューター シミュレーションにより、疑似的に地球の気候を再現する数理モデルである<sup>5)</sup>。世界で最初の気候モデルは、1960 年代の米国で、真鍋淑郎とカーク・ブライアンが数年間かけて開発した。その後、気候研究の進展とスーパーコンピューターのめざましい発達により、気候モデルが精密化され、その性能が向上していった。

●基礎方程式

気候モデルは、物理学の法則に基づいて気候を

予測する。気候モデルで使われる法則を以下に示す。

#### (1) 気体の状態方程式

大気は理想気体として振る舞うと仮定される。大気の密度  $\rho$ 、圧力  $p$ 、温度  $T$  の間に状態方程式が成り立つ。

$$p = \rho RT$$

ここで、 $R$  は大気の気体定数である。

#### (2) 運動方程式

大気の流れ（風  $\mathbf{v}$ ）に関する方程式である。

$$\rho \frac{d}{dt} \mathbf{v} = -\nabla p + \mathbf{F}$$

ここで、 $-\nabla p$  は気圧傾度力、また、 $\mathbf{F}$  は単位体積の大気にはたらく外力（重力、地球の自転によるコリオリ力、粘性力など）を表す。

なお、静力学平衡を仮定する場合には、鉛直速度の時間変化率を無視して、気圧傾度力と外力の鉛直成分が釣り合う条件から、気圧の鉛直分布が求められる。

#### (3) 連続の方程式

大気の質量が保存することを表す。

$$\frac{d}{dt} \rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

静力学モデルでは、連続の方程式と風の水平流の計算結果から、鉛直流が求められる。

#### (4) 熱力学第一法則

エネルギー保存則から導かれるもので、大気温度  $T$  の変化に関する方程式である。

$$C_p \frac{d}{dt} T = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + Q$$

ここで、 $C_p$  は大気の変比熱、 $Q$  は単位時間に外部から大気に流入する熱量を表す。

#### (5) 水蒸気の方程式

大気の水蒸気量  $q$  の変化に関する方程式である。

$$\frac{d}{dt} q = S_q$$

ここで、 $S_q$  は相変化に伴う加湿効果を表す。なお、水物質は、水蒸気・雲水・雨・雲氷・雪・霰のカテゴリーに分類され、カテゴリーごとに水蒸気と同様の方程式を考える。

以上の諸方程式は、粒子論的な見方（ラグランジュ形式）で書かれ、大気粒子塊を経時的に追跡する形になっている。一方、流体力学の一般理論に従えば、大気を場と捉える見方（オイラー形式）があり、空間の点ごとの大気の状態を時系列で把握することもできる。後者の立場での基礎方程式は、前者の基礎方程式で、時間に関する全微分（左辺）を時間と位置に関する偏微分（右辺）で置き換えることで得られる。

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla$$

大気循環モデルの予報変数（時間発展を求め変数）は、水平運動量、気温、水蒸気量の4つで、これらは運動方程式の水平成分、熱力学第一法則、水蒸気の方程式から求められる。気圧と密度は状態方程式と静力学平衡式で気温と関係づけられ、天気を大きく左右する鉛直運動量は連続方程式を用いて診断変数として求められる。

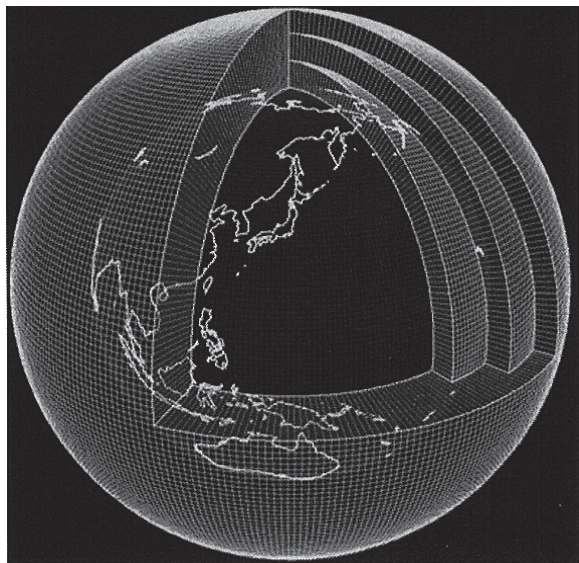
### ●実際の計算

現実の気候現象では、温室効果ガスの濃度が増加すれば、放射バランスが変化し、気温が変化する。気温が変われば、気圧分布や大気循環が変わり、雲や降水が変化し、森林や植生も変化する。雪や氷の分布も変化し、太陽放射及び地球放射も変化する。また、これらの変化によって炭素循環が変化し、それがまた気候の変化を引き起こす。地球の気候はこうした変化が複雑に絡み合う連立の非線形過程である。

気候モデルの計算では、地球を格子に細分し、偏微分方程式を差分方程式に置き換える。格子の細かさを解像度といい、格子の一辺の長さで表される。

未来予測のために、現時点  $t$  での気温、風、水蒸気量などの気象条件（これらを  $M$  で代表させる）を格子ごとに入力し、現時点におけるそれらの変化率を割り出し、これらの変化率を基礎に、近未来  $t+\Delta t$  における新たな気象情報  $M'$  を数値計算で近似的に求める。

$$M' \cong M + \left( \frac{dM}{dt} \right) \Delta t$$



(上図は気象庁のホームページから引用)

次に、その結果から出発して、同様の手続きをくり返すことで、次の未来の気候を予測する。現在の最高速スーパーコンピューターを用いる計算では、100年先の気候を予測するのに、格子間隔として100km程度、時間間隔として10分程度が採用されている。

格子モデルでは、格子間隔より狭い領域で起こる局所的現象を記述することができない。この難点は、現在のコンピューター速度に由来する制約から、格子間隔を狭められない点に一因がある(予測精度を上げるために格子間隔を $1/m$ 、時間間隔を $1/n$ にすれば、計算時間は $m^3n$ 倍になる)。ところが、局所的現象が、格子スケールより大きい大域的現象に影響を及ぼす場合がある。たとえば、低層大気の大気対流や渦運動、雲の形成過程などは、いずれも局所的現象でありながら、運動方程式の外力 $F$ に影響し、また、太陽放射による加熱や雲の凝結過程も、同様に、エネルギー保存則の熱源 $Q$ や水蒸気量の源 $S_q$ に影響する。

このような場合に、局所的現象が大域的現象に及ぼす効果を、大域的な量を使って表現することで、気候モデルに組み込むことが方便として行われる(パラメーター化と呼ばれる)。

パラメーター化では、大域的な物理量を局所的な素過程から理論的に導くというより、現実を反映するように経験則として定式化される。これらの経験則はいくつかの未定係数を含み、気候モデ

ルの開発者に依存したものとなる。

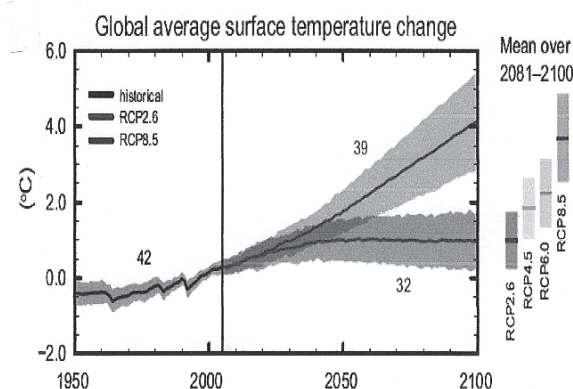
## 6. 気候の未来と温暖化の影響

地球の未来は、世界の経済情勢、技術開発、生活様式、温暖化対策などに大きく依存する。気候の未来予測を行うには、これらの成り行きについて、何らかの見通し(シナリオ)を設けなければならない。

IPCCのAR4では、経済優先か環境重視か、国際化が進むか地域主義か、化石燃料重視か新エネルギー移行かに応じて、6つのシナリオが設けられた。AR5では、気候の長期安定化を図るための対策を立てやすくするため、代表的濃度経路シナリオRCP(Representative Concentration Pathways)が採用された。新たなシナリオは、CO<sub>2</sub>の放出ピークを2100年前におく抑制型RCP2.6から、2100年後も増加を続ける放置型RCP8.5まで、4通りある(RCPに続く数値は2100年時点の人為起源放射強制力[W/m<sup>2</sup>]を表す)。

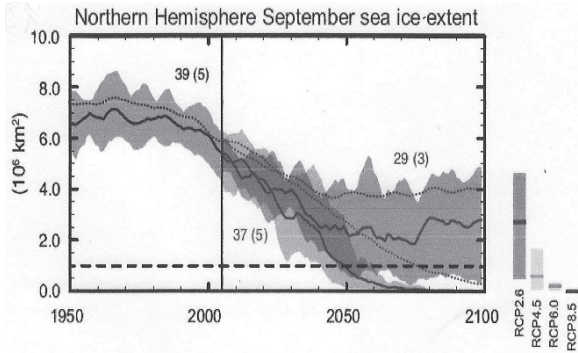
21世紀末の地球の気候について、大規模な火山噴火や自然発生源の変化がないこと、太陽放射照度の変化がないことを仮定して、IPCCの第一部会はAR5で次のように予測している(図はAR5からの引用である)。

(1)世界平均気温は、1986～2005年の平均より、0.3～4.8℃上がる可能性が高い。上昇は海洋より陸域で、また、極域で著しい。気温変化はCO<sub>2</sub>の累積排出量にほぼ比例し、最終の気温上昇は累積排出量に依存する。

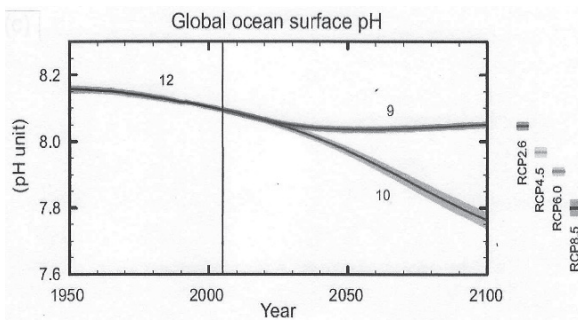
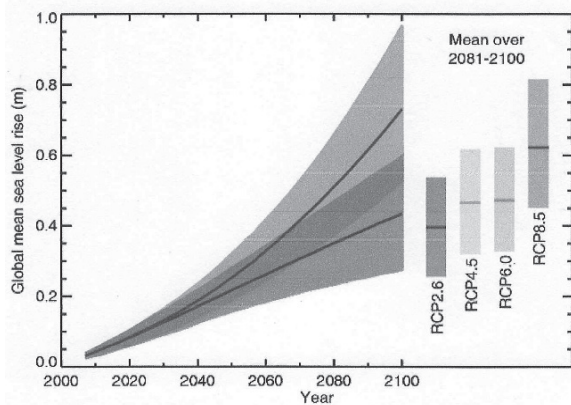


【注】曲線に添えた数字は平均値を算出するために使用した気候モデルの数を、また陰影は不確実性の幅を表す。

(2) 北極海の海水は縮小する。北極域の夏季の海水面積は、43～100%減少する可能性が高い。影響は北半球全体に及び、積雪面積が減少する可能性が非常に高い。



(3) 海洋の平均海面は26～82cm上がる可能性が高い。また、海洋は酸性化するが、RCP2.6シナリオでは、今世紀半ばからゆっくりと回復する。



### ●温暖化の影響とリスク

IPCCの第二部会は、温暖化の影響について、AR5で次のように総括している。

温室効果ガスの継続的な排出により、さらに温暖化が進み、気候システムに長期にわたる変化が

生じて、広範囲の人々や生態系に深刻で不可逆的な影響を生じる可能性が高い。気候変動は、自然と人間システムの既存のリスクを増幅するばかりでなく、新たなリスクをもたらす。リスクは偏在し、恵まれない境遇の人々やコミュニティに対してより大きいものとなる。

異常気象が増え、気候は極端化する。全体的に昇温傾向となり、北極圏や高山などで氷河・氷床・永久凍土が融解する。また、大気中の水蒸気量が増し、全般的に降水量が増加するが、豪雨が増加する地域が多い反面、雨量が減少する地域がある。海水温は世界全域で上昇するが、熱帯域と北半球亜熱帯域でもっとも大きいことが予測される。

多くの生物種が絶滅のリスクに直面する（確信度が高い）。植物種のほとんどは、気候変動の速度に対応できず、生息域を転換することができない。また、小型哺乳類や淡水軟体動物も、RCP4.5以上のシナリオで、変動速度に順応できなくなる（確信度が高い）。海洋生物は、極端な海水温の上昇、酸素レベルの低下、海洋酸性化に直面するが（確信度が高い）、サンゴ礁や極域の生態系は極めて脆弱である。

気候変動は食料の安全保障を低下させる。海洋生物種の分布が変化し、多様性が低減して、漁業生産性や生態系サービスの持続的供給が課題になる（確信度が高い）。小麦、米及びトウモロコシの生産については、気温上昇が20世紀末より2℃以上になると、便益となる可能性はあるものの、気候変動は負の影響を及ぼすことが予測される（確信度が中程度）。気温上昇が4℃以上になれば、食料需要が増大する状況では、世界規模で食料安全保障に大きな脅威となる（確信度が高い）。

水資源については、乾燥亜熱帯地域において地表水及び地下水が減少し（証拠が確実、見解一致度が高い）、今世紀中葉までに、人の健康に影響が及ぶ（確信度が非常に高い）。

経済損失総計額は、気温上昇に伴い拡大するが（証拠が限定的、見解一致度が高い）、気候変動による世界経済への影響を現時点で予測することは困難である。気候変動により経済成長が減速し、貧困の削減がより困難となり、食料安全保障が脅

威にさらされるだろう。

人々の強制移転が増加することが予測されるが（証拠が中程度、見解一致度が高い）、特に移住のための資金が不足する開発途上国の人々は、危険にさらされる。気候変動が駆動要因となって、暴力的紛争のリスクが増大する（確信度が中程度）

気候変動がもたらすリスクを総括して、次の8項目が挙げられている。

1. 海面上昇、高潮被害などによるリスク：高潮、沿岸洪水、海面上昇により、沿岸の低地や小島嶼国において死亡、負傷、健康被害または生活崩壊が起きる可能性がある。
2. 大都市部への洪水による被害のリスク：いくつかの地域において、洪水によって、大都市部の人々が深刻な健康被害や生計崩壊に遭うリスクがある。
3. 極端な気象現象によるインフラ等の機能停止のリスク：極端な気象現象が、電気、水供給、医療、緊急サービスなどのインフラネットワークと重要なサービスの機能停止をもたらし、社会システム全体に影響を及ぼすリスクがある。
4. 熱波による特に都市部の脆弱層における死亡や疾病のリスク：極端に暑い期間においては、特に脆弱な都市住民や屋外労働者に対する死亡や健康障害のリスクがある。
5. 気温上昇、干ばつ等による食料安全保障が脅かされるリスク：気温上昇、干魃、洪水、降水量の変動や極端な降水により、特に貧しい人々の食料安全保障が脅かされるとともに、食料システムが崩壊するリスクがある。
6. 水資源不足と農業生産減少による農村部の生計及び所得損失リスク：飲料水や灌漑用水への不十分なアクセスと農業の生産性の低下により、半乾燥地域において、特に最小限の資本しか持たない農民や牧畜民の生計や収入が失われる可能性がある。
7. 沿岸海域における生計に重要な海洋生態系の損失リスク：特に熱帯と北極圏の漁業コミュニティにおいて、沿岸部の人々の生計を支える海洋・沿岸の生態系と生物多様性、生態系便益・機能・サービスが失われる可能性がある。

8. 陸域及び淡水生態系がもたらすサービスの損失のリスク：人々の生計を支える陸域及び内水の生態系と生物多様性、生態系便益・機能・サービスが失われる可能性がある。

IPCC の調査報告書では、悪影響やリスクが指摘される一方で、温暖化によるベネフィットはほとんど取り上げられていない。余りに急激な気候変動には植物、動物ともに対応できないが、ゆるやかな温暖化によって、寒冷地が穏やかな気候に変化して居住域が広がったり、植生が変わることで食料生産性が上がる地域があったりすることは、十分考えられる。気候変動の影響は、リスクとベネフィットの兼ね合いの中で論じられるべきである。

## 7. 温暖化論争

産業革命後の人間活動が温暖化を引き起こしているとする IPCC の報告に対し、世界中で少なからぬ人々が疑念を抱いている。温暖化は疑わしいとする懐疑派と、IPCC の報告を受け入れる肯定派との間で、論争がある<sup>6)</sup>。

懐疑派の疑念は、結局のところ、次の3点に集約してよいだろう。

Q1. 温暖化しているというデータは正しいか？

Q2. 温暖化しているとして、それは人為起源であるか？

Q3. 気候モデルの将来予測は信頼できるか？

こうした諸点について、様々な論争が繰り広げられている。以下では、根本的と思われる懐疑論（D を付して示す）を取り上げ、これに対する肯定派の反論（R を付して示す）を示す。

### ● Q1 に関して

D1. 観測による地球全体の温度測定は、衛星による 1979 年以降分しかない。世界各地で行われてきた地表温度測定には、①観測値の妥当性、②都市化によるヒートアイランド現象といった観測環境の劣化、③海上気温測定上の誤差などがあり、地球が温暖化していることを示すデータは疑わしい。

R1. 観測環境の劣化は確かに問題である。しかし、世界平均気温を算定する際には、周囲と大きく異なったり、大きな不連続があったりする不自然なデータは除去あるいは補正されている。

陸上観測データの中には、ヒートアイランド効果など、環境変化の影響が大きいところもある。しかし、ユーラシア大陸など都市化が進んでいない地域でも大きな上昇トレンドが観測され、温度上昇と都市化の間に相関はない。温暖化が激しいのはむしろ都市化が進んでいない場所である。

全球平均地上気温の算出には、陸上気温データと、船で観測された海面水温データの両方が使われる。海洋は地表の7割を占めるため、海面データは重要である。海上データの観測方法の変化による問題が指摘され、IPCCのAR4にあった1940年代の異様に高い気温ピークは、補正が行われた結果、AR5では気候モデルと観測値の整合性が増す結果となった。

地球温暖化の指標は全球平均地上気温だけではない。地表から高さ約数kmまでの対流圏下層の気温にも、海の深さ3kmまでの蓄熱量にも、上昇傾向が見られる。

D2. 衛星及び気球による観測データでは、温度上昇が見られない。気象衛星NOAAの計測による南半球の気温は、25年間変わっておらず、エルニーニョ現象がなかったら逆に微かに下がり気味である。

R2. 衛星による気温データは、対流圏下層（高さ約2kmを中心として数kmの厚さの大気）の平均気温であり、地上気温（地面及び海面から高さ2mでの気温）と同じではない。

確かに、2000年ごろのデータでは、対流圏下層に明瞭な気温上昇がなく、気候モデルによる予測計算と違っていた。しかし、最近の研究で、衛星観測、気球観測それぞれの観測機器の誤差およびその補正手順に誤謬が見つかり、対流圏下層気温にも上昇傾向があることが判明している。

## ● Q2 に関して

D3. 20世紀後半の気温上昇は、小氷期（時期1400～1800年）からの気温の回復基調に、準周

期変動（周期は50～60年）が重なったもので、自然変動である可能性が高い。小氷期からの回復は直線的であり、回復率は $0.5^{\circ}\text{C}/100$ 年である。これに対し、準周期変動は低温（1910年）、高温（1940年）、低温（1975年）、高温（2000年）とほぼ60年の周期で変動し、変動率は $0.1^{\circ}\text{C}/10$ 年である。このため、世界の平均気温は、2000年にピークに達した後、上昇が鈍っている。気温上昇が人為起源の $\text{CO}_2$ 増加に由来するものならば、 $\text{CO}_2$ が増加を続ける2000年以降も、気温上昇が続くはずではないか。

R3. 過去の気温および強制力の復元には不確実性がともなう。気候モデルでは、小氷期を含む気温変動を、太陽活動の変化や火山噴火によるエアロゾル効果などの外部強制力により、不確実性の範囲内で、整合的に説明できている。また、準周期変動といった自然変動も、内部要因によるものとして、大気と海洋の方程式を解くことで、自動的に再現できる。こうした点を踏まえた上で、20世紀後半の気温上昇は、温室効果ガスの増加を考慮しなければ説明できない。

気候モデルの予測は、カオスの性質が反映される短期の気候を必ずしも再現するものではないが、2000年以降に気温上昇が鈍った点についても、長期的なトレンドは再現する。1977年から2007年まで世界平均気温の変化では、火山噴火やエルニーニョ、ラニーニャなどの自然変動に対応した気温の変動があるものの、15年の変化率で見ると、ほとんど同じ率で気温上昇が続いている。

D4. 太陽活動と気温との間に相関関係があり、過去1万年の間に両者は数百年単位で変動している。11年周期の黒点数変化は、2000年頃にピークとなり、それと歩調を合わせるように、その後の気温上昇も停滞している。近年の温暖化は、主に太陽活動の影響であり、人為起源の $\text{CO}_2$ の増加によるものではない。

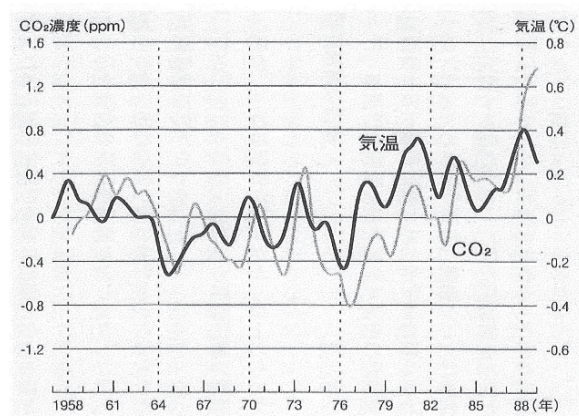
R4. 太陽活動が気候に影響することは確かである。しかし、観測によると、最近100年間の太陽放射の変化量は0.1%程度にすぎず、太陽活動が20世紀後半から顕著に進行している温暖化の主

因とは考えられない。なお、気候モデルの計算には、太陽放射の変化も取り込まれており、現在の温暖化は温室効果ガスの増加に原因を求めなければ説明できない。

D5. 宇宙線の量と気温の間に、相関関係が見いだされている。太陽活動が変化すれば太陽磁場が変化し、その影響が地球に降りそそぐ宇宙線量にまで及ぶ。地球の温度変化は、宇宙線が低層雲の形成に影響して日射量が変化するというスベンスマルク効果によるものである。

R5. 気候への影響が大きい低層雲の形成と宇宙線との間の因果関係は、未だ確立していない。欧州原子核研究機構 CERN で行われた検証実験（大気に人工放射線を当て、凝結核と水滴の形成を確認する）で、雲を形成できるような大きさの水滴の生成は確認できていない。雲微物理の数値モデルによる研究でも、宇宙線の量を 20 世紀に起こった程度に増加させても、生じる雲凝結核は 0.1% 程度増えるだけで、20 世紀後半の気温上昇を説明するには不十分である。

D6. 短期間（1958～1988 年）のデータでは、平均気温の上昇・下降に追従して、半年ほど遅れて大気中の CO<sub>2</sub> が増減している。大気中の CO<sub>2</sub> が増えて気温が上がるのではなく、気温が上がることで、海水中の炭酸ガスが大気に出て、CO<sub>2</sub> 濃度が上がる。



R6. 疑念は、データの意味を正しく把握していないことから出た誤解である。

上に示した問題のグラフ（参考資料 6c から引用）は、気温と二酸化炭素の双方について、長期的な上昇傾向（人間活動の影響）を除いた場合に、

短期の気温変動（± 0.2°C 程度）と CO<sub>2</sub> 濃度変動（± 0.6ppm 程度）との関係を示したものである。換言すれば、自然現象に由来する CO<sub>2</sub> の増減と気温変動の関係を表す。

大気中 CO<sub>2</sub> 濃度変化は、人為起源の排出と自然（海洋および陸上生態系）の排出および吸収の和で決まる。自然変動の CO<sub>2</sub> の動向を支配しているのは、海ではなく、陸域生態系である。この場合には、CO<sub>2</sub> は受動的に振る舞い、気温や降水といった環境条件の変動の影響を受けて、気温変化に対してタイムラグがある。この傾向は気候モデルでも再現されている。

図で温度上昇が CO<sub>2</sub> の濃度上昇に先行しているように見える理由は、この現象がエルニーニョによる自然変動と考えられるからである。実際、エルニーニョで気温が上がれば、乾燥による光合成の抑制、土壌有機物の分解の促進、森林火災の増加などが起こり、結果的に大気中の CO<sub>2</sub> は増加に転ずる。

なお、季節変動以外に特別なデータ処理を施さず、CO<sub>2</sub> 濃度と海面水温の時間変化を比較すると、海水温の上昇・下降に無関係に、CO<sub>2</sub> 濃度は一貫して増加している。この海面水温の変化に無関係な CO<sub>2</sub> 濃度の増加こそが、人間活動による排出分である。

### ● Q3 に関して

D7. 気候モデルは、最大の温室効果ガスである水蒸気を無視している。

R7. 単純な誤解である。気候モデルは、水物質の効果をきちんと取り入れている。

気温が上がると大気中の水蒸気量が増え、増えた水蒸気の温室効果でさらに気温が上がる。この過程は非常に重要であり、気候モデルに取り入れられている。なお、大気中の水蒸気量は、気温と相対湿度で決まってしまう、人間活動によって変化させられるものではない。温暖化論の中で、水蒸気がことさらに取り上げられないのは、このためである。

D8. 天気予報は 1 週間先までしか当たらないのに、気候モデルは今後 100 年間もの気候を予測で



きるか。

R8. 気象予報では、短期の大気の状態を問題にする。現在の世界中の大気、海面及び陸面の状態を初期条件とし、大気モデルの基礎方程式を用いて、大気の状態の時間変化を数値的に求める。

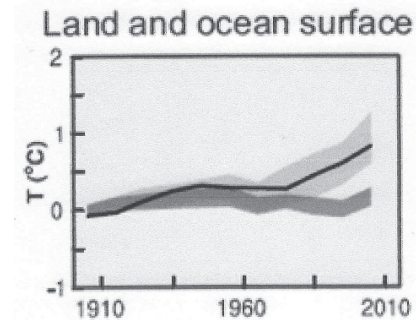
気象予報で1週間より先の予報が難しいのは、大気モデルの方程式が非線形で、カオスの性質を内包するからである。基礎方程式は決定論的で因果律にしたがうが、方程式の解は初期値に極めて鋭敏である（初期値鋭敏性）。未来の振る舞いを知るために解を求めるとき、対象が複雑系であるために解析解を得ることができず、数値解析に頼らざるを得ない。しかし、完全な初期値を与えることが難しい上に、数値解析の過程で誤差が累積し、わずかな初期条件の違いで、計算結果と真の値とのずれが時間とともに指数関数的に増幅される。気象予報では、初期条件がきわめて重要であり、方程式の持つカオス性のために長期予報が不可能になる。

一方、気候予測では、大気だけでなく、海と陸の変化も取り入れて、数値解析で解を求める。こうして得られる解にもカオス的な変動が現れるが、気候を求めるために、これらの解を数十年の期間にわたって平均すると、カオス的な変動は打ち消しあい、初期値に依存しない値が得られる。気候予測は、気象予報と同様な方程式系を使用しながら、未来予測の方法がまるで違うために、予測可能性が回復する。

世界中の研究機関が独自の気候モデルを使って将来予測を行っているが、モデルの特性やシナリオ（温室効果ガス濃度の見通し）によって結果が異なる。それらを総合することで、ある幅の不確実性の範囲内で、将来の気候を予測している。

気候モデルの信頼性を確かめるために、現在の気候をどの程度再現するかの検証が行われている。地表温度、降水量、日射の反射、地球の赤外放射の水平分布、また、大気温度と水蒸気量、海水温度の鉛直分布は、現実をよく再現することが確認されている。また、過去の気候変化を再現できるかどうか確かめられている。過去百数十年の間の温室効果ガス濃度、エアロゾル排出量、太

陽活動の各変化、火山噴火などのデータを条件として与え、20世紀（1906～2005年）の陸面及び海面の平均気温の変動をシミュレーションした結果を図（IPCCのAR5より）に示す。



実線は観測データを表し、濃い帯は自然起源の放射強制力だけを考慮した気候モデルのシミュレーション、薄い帯は自然起源と人為起源の強制力を共に考慮したシミュレーションである。現在の気候モデルは、少なくとも過去100年間の気温を再現できていることから、未来の気候についても、100年先まで予測可能と考えられる。

以上が懐疑派と肯定派の主たる論争の概要である。気候は極めて複雑で予測が難しいのに、身近で日々の生活に密着した現象であるために、人々の関心事ともなり、論争の種ともなる。このこと自体は決して悪いことではなく、気候現象をより深く理解する役割を演じることもある。

実際、懐疑論のほとんどは、気象学あるいは気候学の専門家でない人々から出たもので、素人目には、確かにもっともらしい指摘が含まれている。しかし、懐疑論は一面的で、気候についての体系づけられた理論から出たものではない。しかも、懐疑論の主張は定性的なレベルに留まり、定量的な裏付けを欠いている。疑念の内容をデータまで立ち入って検討してみると、既存の知見や観測データを誤解又は曲解している場合がほとんどである。

これに対して、IPCCの報告は、気候変動のさまざまな要因について多数の事例と根拠に基づいて細かく検討され、不確かさの程度を含めた定量

的な報告がなされている。

それでは、IPCCの未来予測は正しいかと問われれば、「一定の確率の範囲内で正しい」と言わざるを得ない。それというのも、気候モデル自体は決定論としての性格を有するが、すべての気候変動要因を完璧には取り入れることができない事情と、パラメーター化という便法を導入せざるを得ない事情があるからである。もっとも、パラメーター化自体は、自然現象の解析においてしばしば導入される常套手段の一つであって、気候モデルが内蔵している格別な欠点とは言えない。パラメーター化においては、現実の現象に適合するように未定係数が決定され、そこに解析者の意図が入り込む余地がある。これらの点を割り引いても、気象現象は様々な要因が複雑に絡み合った非線形過程であるにもかかわらず、100年もの期間の気候変動を趨勢において再現できている点で、気候モデルを評価すべきであろう。

## おわりに

論者（私）は気候学あるいは環境学を専門とする者ではない。にもかかわらず、気候変動という大それたテーマを取り上げた背景について、また、本論考で触れられなかった課題について述べておきたい。

私と環境問題との最初の係わりは、平成10年前後だったと思うが、大阪薬大でカリキュラム改正があり、高校までの学習方法から抜け出せない新生入生に対し、大学での自主自律的な勉学態度を養うことを目的に『基礎ゼミ』が開講されることになった時である。教養基礎科目を担当する総合科学系教員と薬学基礎科目を担当する薬学系教員が、それぞれの守備範囲に応じてテーマを定め、それらの中から学生が自分の関心に応じて授業を選択する試みであった。

私は、自身の周辺にあって、学生の興味を引きそうないくつかのテーマ（情報理論、自然の対称性など）を年度ごとに取り上げたが、その一つが環境問題であった。当時の私は、環境問題についての知識も理解の程度も学生と大同小異で、学生

と一緒に勉強するつもりであった。いくつかの環境問題（当時は、環境ホルモンへの関心が高かった）の中から学生各人に一つを自由に選択してもらい、自分でその原因から影響、対策までを調べ、文書のレポートに仕上げると同時に、口頭で他の受講生達に説明してもらった授業であった。

そうこうするうち、薬学教育改革が叫ばれるようになった。薬学教育のあり方について、薬学教育モデル・コアカリキュラムが公表され、臨床薬学の重要性が指摘されるようになった。大阪薬大でも急遽カリキュラム改正が行われ、教育の重心が実地科目や実務研修に傾いていった。履修しなければならない科目が増え、座学より実務に関心が向くのは無理もないが、学生の基礎ゼミへの参加度が低下し、所期の目標が達成されないとの理由で、基礎ゼミは廃止されてしまった。基礎ゼミでの経験は、私が環境問題に関心を抱くきっかけになった。

次の係わりは、私が大阪薬大に在職した最後の平成25年度に、2年次生を対象に『人間と地球環境』を担当した時である。理系を自認する薬学生が対象であるから、地球科学の視点から環境論を講ずることとし、地球の誕生とその進化から始め、地球環境が生命の進化にどのように影響してきたかを説明した後に、主要な地球環境問題をひとつおとり概説することにした。授業では地球規模の環境問題を重点的に取り上げ、地域環境問題に分類される諸項目に対しては扱いを軽くした。取り上げた地球環境問題については、原因と背景、現状とリスク、解決のための方策について論じることにした。

1回の授業に1テーマとし、講義内容を書物形式に仕立てて授業で配布し、11回の授業分をすべて集めれば一冊の環境論の教科書ができあがることを目論んだ。環境問題の素人が、1週間で1テーマを調べ上げ、体裁の整った印刷物に仕上げた配布する作業は、相当にハードであった。1年限りの担当でしかなかったが、私自身が環境問題全般を大筋で把握することができた。今も保存している当時の講義録は、荒削りではあるが、その後の講義のベースとなっている。

大阪薬大を退職後に、文系大学（奈良大学）から『環境論』の非常勤講師の依頼があり、現在も継続している。教養教育に理系科目が必要だが、理系分野であることが明らかな科目名では学生が敬遠するので、環境論の授業の中で理系の素養を身につけさせることを目標に、物理学とエネルギーの視点から環境問題を論じてもらいたいとの要請を受けた。

この大学では、『環境論Ⅰ』から『環境論Ⅷ』まで8科目が開講され、多少の重なりがあるにしても、科目ごとに焦点の当て方が異なっている。基盤となる学問領域は、科目により物理学（地球温暖化、放射能汚染、エネルギー問題）、化学（オゾン層破壊、酸性雨）、生物学（生物多様性喪失、生態系破壊）、社会学（環境開発、自然保護）と多彩である上に、近くの川の生態系調査を行うフィールドワークを取り入れたものまである。

私が担当しているのは、『環境論Ⅰ』である。その科目名から環境論シリーズの導入部としての役割も担っていると考え、物理学を基軸に据えてはいるが、環境問題全体を俯瞰的に捉え、環境問題を克服するために必要な基礎知識と考え方を身につけてもらうことも役割の一つと心得ている。

本論考は、以上のような私の教育活動から得た知見の中から特に気候変動を取り出し、さらに肉付けして仕上げたものである。

ところで、一口に環境問題と言っても、どのような切り口で取り上げるかによって、アプローチも様々である。実際、科学的な側面以外に、環境問題を解決する上で検討しなければならない論点は、次に列挙するように数多い。

環境破壊を招いた人間中心主義の源流は何処か（倫理）。環境保全と経済発展を共存させられないか（経済政策）。環境保全に向けて規制と国際協調はいかにあるべきか（法と条約）。脱炭素社会のエネルギー源をどこに求めるか（エネルギー政策）。未来社会は環境破壊にどのように対処していくか（緩和策と適応策）。持続可能な社会における人間と社会の規範はいかにあるべきか（環境倫理）。

地球環境問題は様々な分野にまたがる大テーマ

であり、個人の守備範囲を超えて、学際的な取り組みを必要とする。自省を込めて言うことだが、少なくとも大学の環境教育においては、学生をして環境破壊を現代社会の構造的な問題と捉えせしめ、環境保全のための方策を多面的に考察できる素地を養わせしめることが、教育に当たる者の責務であろう。

翻って、世界の現状はどうか。残念なことに、物質的な豊かさを追い求める余り、経済成長が優先され、人間の真の豊かさとは何かを問うことが、なおざりにされてしまっている。グローバル化が進む現代は、世界中が激しい経済競争の渦の中にある。世界の人口は増加の一途をたどり、先進工業国と発展途上国の間の格差は解消されないままである。温暖化を食い止めるためのパリ協定（今世紀末の気温上昇を産業革命前の2℃以下に抑制するための枠組み）が2016年に発効したが、肝腎の米国が離脱を表明して、前途に暗雲が立ちこめている。

ローマ・クラブの警鐘は、半世紀近く経った今も、鳴り止んではない。資源とエネルギーに依存しない経済価値の無限の創出は不可能であろう。また、二酸化炭素を回収して貯留する技術を開発するとしても、技術革新にも限界があろう。だとすれば、環境問題は、これまで近代人が当たり前のように考えてきた価値観や行動様式、また、社会のありように反省と転換を迫るものであり、「持続可能な社会」を実現するために、人間に対しても、社会に対しても、新しい規範が必要とされている。それは、結果において、文明のあり方と現代文明の行く末に影響をもたらすものであるまいか。

こうした思いがあって、筆を執った当初には、人文社会学的な側面にも多少なりとも立ち入る予定でいたのだが、如何せん、私の力量が不足しているが故に、また、予定の紙数を超えてしまったが故に、果たせずに終わってしまった。所期の目論見を完遂することは、とても私の能力が及ぶところでないけれども、機会があれば、その一端なりとも論考することにした。

## 参考資料

1. ジャレド・ダイヤモンド：『文明の崩壊』，草思社（2005）
2. デニス・メドウズ他：『成長の限界』，ダイヤモンド社（1972）
3. IPCC の調査報告書は，気象庁のホームページに公開されている。  
[http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/index\\_temp.html](http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/index_temp.html)
4. 気候変動の科学的側面を簡潔に解説したものに，下記がある。  
二宮洸三：『気象と地球の環境科学(改訂3版)』，オーム社（2012）
5. 気候モデルの平易な解説は，下記にある。  
江守正多：『地球温暖化予測は正しいか？』，化学同人（2008）
6. 温暖化論争について，次の諸資料を参考にした。
  - a) 物理科学雑誌『パリティ』，03, 11, 12, 丸善（2011），01, 02, 03, 05, 06, 07, 09, 12, 丸善（2012）.
  - b) エネルギー・資源学会のホームページに掲載された討論  
<http://www.jser.gr.jp/activity/e-mail/boutou2.pdf>  
<http://www.jser.gr.jp/activity/e-mail/honbun.pdf>  
<http://www.jser.gr.jp/activity/e-mail/2009.3/09.03honbun.pdf>
  - c) IR3S/TIGS 叢書，『地球温暖化懐疑論批判』，東京大学（2009）