

自然科学的事実としての地球温暖化

-----地球温暖化ノート(1)-----

前市岡 楽正

【要旨】

- ・温室効果の存在に疑いの余地はない。他の条件が一定であれば、温室効果ガス濃度が上昇していけば、時間の遅れを伴って、地表気温が上昇していく。
- ・産業革命以降、温室効果ガス濃度が急増している。したがって、温室効果の促進は確実である。
- ・最も重要な温室効果ガスである二酸化炭素の濃度は、主に化石燃料の使用と森林伐採によってもたらされた。大気中の二酸化炭素濃度が上昇しているという事実は、二酸化炭素の排出量が、大気中の二酸化炭素濃度を一定化させようとする自然のメカニズム（炭素循環）の許容水準を超えていることを示している。
- ・過去の二酸化炭素濃度やIPCCシナリオ等を勘案すると、現在の排出レベルを削減することが必要である。
- ・近年（特に20世紀後半）の排出量の増加基調、ツケが後へ回る構造や温暖化の影響の大きな不確実性を考量するなら、早急に行動を起こすことが必要である。

【本文】

はじめに

地球温暖化問題は、最大の環境問題であるということとどまらず、21世紀の最大の問題の一つであるといっても大きな異論はなさそうである。IPCC（気候変動に関する政府間パネル）（*1）の第1次報告書は次のように述べている。「ある特定の影響が発生する時期、発生す場所及びその内容を正確に予測するには科学的な不確実性が残っているものの...人類が本格的な予防及び適応対策を講じない限り、地球の環境には重大かつ破滅的ともいえる変化が生じるだろう」（[9]p151）。

本連載「地球温暖化ノート」の究極の目的は、地球温暖化問題にどう対応すべきかを検討することにある。地球温暖化問題はきわめて広範囲にわたる問題である。そのうち、本連載では、重要だと考えられるテーマを順次取り上げていく予定である。それぞれのテーマを考えるに当たって知っておくべき基本的な事項をコンパクトに整理し、それに基づいてどう考えるべきかを検討していきたい。

筆者は地球温暖化問題の専門家ではないし、専門家たらしとする者でもない。そもそも「地球温暖化問題の専門家」などは存在しないのではなかろうか。もちろん、各分野やテ

ーマについての専門家は数多く存在する。しかしそうした専門家が専門家としての立場において、この問題について語れることはきわめて限られたものに過ぎないだろうし、各分野の専門家のそうした発言を寄せ集めてみても、有意義な対応策が得られるとは思われない。専門家が見出す個々の事実（の一部）は重要である。しかし、それに基づいて問題への対応を考えるのは、専門家の仕事ではない。健全な常識を持つ個々人の仕事である。

もう一つ注意しておくべき点は、問題解決への唯一の正解は存在しないということである。たとえば、21世紀末の二酸化炭素濃度をどのレベルにすべきかについて、一つの答えがあるわけではない。それは選択の問題である。何に優先順位を与えるかを抜きにして、答えはない。すなわち、明示的にせよ暗黙のうちにおいてにせよ、価値観を離れることは不可能である（上記の2点は地球温暖化問題についてだけの問題ではない）。

第1回目の今回は、自然科学的事実としての地球温暖化に取り上げる。何よりも問題が自然を舞台として現れるものだからである。とはいえ筆者は自然科学については全くの門外漢である。以下で取り上げる事実のほとんど全ては末尾の参考文献から得たものに過ぎない。ただし、多くの事実の中から何をポイントとみるか、それから何を読み取るかは筆者自身のものである。

1. 温室効果

(1) 温室効果の存在

惑星は、太陽からのエネルギーを受けることによって温められ、そのエネルギーを宇宙に放出することによって冷却される。惑星表面の平均温度は、それが吸収するエネルギーと放射するエネルギーが等しくなるような水準に決定される。もしも両者がバランスしていないとすれば、惑星の表面温度は最終的には宇宙空間の温度（3 K）近くまで下がってしまうか、太陽の表面温度（6000 K）に等しくなるかのいずれかであろう（* 2）。なお、地球表面の平均温度に影響を与える要因として、地球内部からの熱流と人類によるエネルギーの使用が考えられるが、その大きさは、太陽からのエネルギーのそれぞれ 0.004%、0.01%程度であり、ともに地球全体の平均温度の決定という点からは無視できる。

惑星が太陽から受けるエネルギー（太陽放射エネルギー）は、太陽からの距離によって決定される。地球の場合は $1367 \text{ W} / \text{m}^2$ である（Wは1秒間1ジュール<4.19ジュール = 1cal>の仕事量）。正確に言えば、この数字は、地球が太陽からの平均距離にあるとき、地球大気圏の上限で、太陽光線から垂直な単位面積の平面が、単位時間に受けるエネルギーである。したがって、地球全体が太陽から受けるエネルギー総量（毎秒）は、

$$1367 \text{ W} / \text{m}^2 \times R^2 (\text{地球の断面積})$$

となる。

上記は、地球の大気圏上限に達したエネルギー総量（毎秒）であるが、このうちの 30% は、反射・散乱により大気圏外へ戻される（惑星の反射率はアルベドと呼ばれる）。すなわち、大気圏上限に達したエネルギー総量を 100 とすると、そのうちの 30 は、大気および地表に吸収されることなく、宇宙に出ていく（その内訳は、地表での反射 4、雲の上面での反射 20、大気中の微粒子による散乱 6 とされている）。残りの 70 のうち、20 は大気圏で吸収され、50 は地表で吸収される。

要するに、地球の大気および地表が吸収するエネルギー総量（毎秒）は、

$$1367 \text{ W / m}^2 \times R^2 \times 0.7$$

である。

ある物体の、単位面積・単位時間当たりの放射エネルギー（ E ）は、その物体の絶対温度（ T ）の 4 乗に比例する。すなわち、

$$E = k T^4 \quad (k = 5.67 \times 10^{-8} \text{ J / (m}^2 \text{ s K}^4))$$

である。なお、 k は固体の性質によらない定数で、ステファン = ボルツマン定数と呼ばれる。地球全体の放射エネルギー総量（毎秒）は、

$$k T^4 \times 4 \quad R^2 (\text{地球の表面積})$$

である。

既述のように、地表温度は、吸収される太陽放射エネルギーと地表および大気からの放射エネルギー（地球放射エネルギー）が等しくなるような水準に決定される。すなわち、

$$1367 \text{ W / m}^2 \times R^2 \times 0.7 = k T^4 \times 4 \quad R^2$$

である。この式から、吸収された太陽放射エネルギーから算出される地表温度は、

$$T = 255 \text{ K (- 18)}$$

ということになる。しかし、実際の地球の平均気温は 15 である。この差の 33 は温室効果によものである。換言すれば、温室効果がなければ、地球の熱収支がバランスするためには、地表温度は - 18 でなければならない。因みに、この場合、 H_2O は氷の状態であるから、人類を始めとする生物が生存するのは極めて困難となる。

温室効果の存在は、金星や火星への太陽放射の大きさと反射率（アルベド）から計算される気温と、実際の気温および大気の性状からも確認される。例えば、金星への太陽放射は 2610 W / m^2 、アルベドは 0.71（太陽放射の 29% が吸収される）であるから、温室効果がなければ金星の温度は 240K と計算される。しかし実際の温度は 703K であり、この差の 463K が温室効果によるものである。なお、金星の大気は 90 気圧でその大部分は二酸化炭素からなっている ([3]p15 ~ 16)。

(2) 温室効果のメカニズム

太陽放射エネルギーの中心は、可視光線の領域（波長 0.4 ~ 0.8 μm ）で放射されている。一方、地表および大気からの放射（地球放射）は、赤外線（波長 0.8 ~ 1mm）の形で行われる。ところで、大気中に微量に存在する H_2O （水蒸気や雲）、 O_3 （オゾン）、 CO_2 （二酸化炭素）、 N_2O （亜酸化窒素または一酸化二窒素）、 CH_4 （メタン）、CFC（フロン）などは、波長の短い紫外線や可視光線は通すが、波長の長い赤外線は吸収するという性質を持っている。これらは温室効果ガスと呼ばれる。温室効果ガスの分子によって吸収された放射エネルギーは、あらゆる方向に再放射される。その一部は宇宙に出ていくが、残りは地表に放射される。要するに、大気は、太陽放射エネルギーをかなりよく通すが、大気中に温室効果ガスが存在するために、地球放射エネルギーを逃がしにくい仕組みになっている。

温室効果ガスの働きにより、地表が吸収するエネルギーは、温室効果ガスがない場合に比べて大きくなる。なぜなら、既述のように、地表温度は、吸収するエネルギーと放射するエネルギーが等しくなるような水準に決まるから、地表が吸収するエネルギーが大きくなれば、それに見合っただけでより多くのエネルギーを放射するためには、地表気温は高くならなければならないからである（「 $E = k T^4$ 」においてEが大きくなるためには、Tが大きくならなければならない）。これが温室効果である。温室効果は「単純明快な物理法則の結果」（[3]p18）であり、その存在に疑いの余地はない。

温室効果ガス濃度と地表気温の関係は次のようになる。他の条件が一定であれば、高い温室効果ガス濃度には高い地表気温が対応し、低い温室効果ガス濃度には低い地表気温が対応する。したがって、他の条件が一定であれば、温室効果ガス濃度が上昇していけば、時間の遅れを伴って（後述）、地表気温が上昇していく。

2 . 地球温暖化

(1) 地表温度

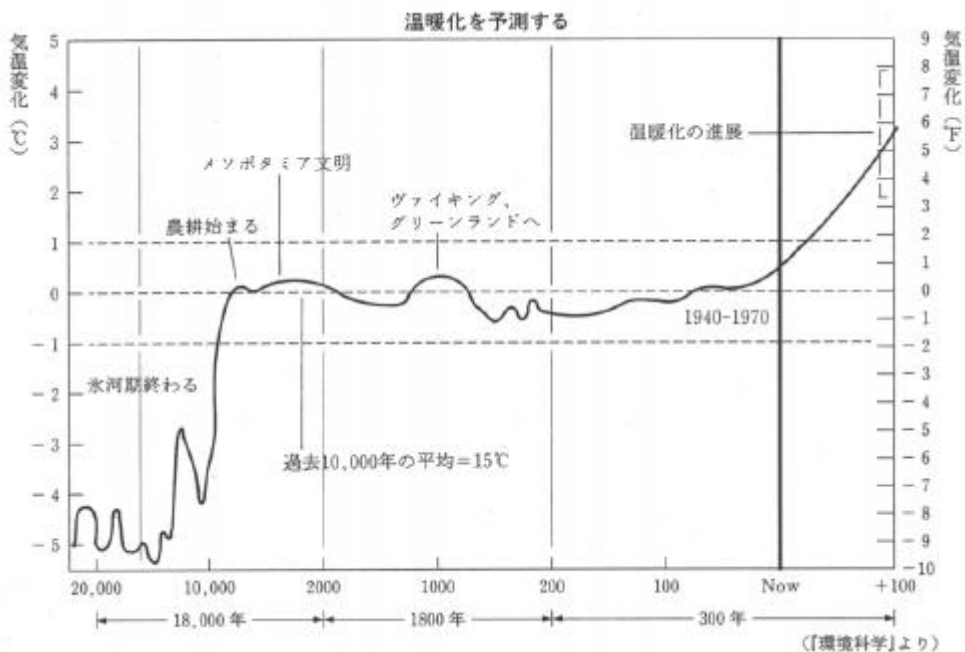
最初に過去の気温の推移をみておこう。地球の誕生は 46 億年前である。このうち、170 万年前から現在に至る時期は、地質時代区分で新生代第 4 紀と呼ばれる。この時期の地球は、4 回の氷期と、その間に挟まれた間氷期を経験した。氷期には北半球の多くの部分が氷河で覆われた。その原因として様々な仮説が提出されているが、有力なのは気候学者ミランコビッチの説で、氷期と間氷期の反復を地球の公転運動と自転運動の変化の複合作用で説明している。最後の氷期（ウルム氷期）は 1 万年前に終わった。図 1 は過去 2 万年ほどの気温(* 3) の推移を示している。これによると、氷期の気温は現在のそれより約 5

低かったこと、その後急速に温暖化し、約7～8000年ほど前には現在の気温の約15℃に達していること、それ以降は多少の変動はあるものの概ね安定的に推移してきたことがわかる。しかし、最近の100年ほどに注目すると、気温の上昇傾向が認められる(図2)。

地表気温に影響を与える基本的な要因は次の3つであった(第1節)。すなわち、地球の大気圏上限に到達する太陽放射エネルギーの量、地球の反射率(アルベド)、温室効果。前者は大気と地表に吸収されるエネルギー量を変え、後者は地球の放射エネルギー量を変える。前者には、太陽の黒点活動(*4)や地球の地軸の変動などが影響を与える。後者では、火山噴火による大気中のエアロゾル(微粒子)の増減が重要である(ただしその影響は数年であるとされる)。人間活動に係わるものとしては、化石燃料使用によるエアロゾルの放出や砂漠化・森林伐採による反射率の変化などがある。前者については既述。

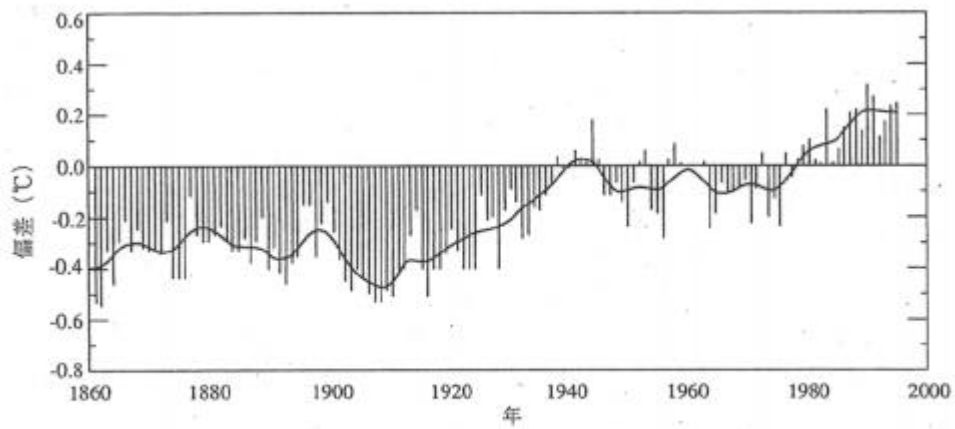
過去100年間の気温変化は、図3にあるように、太陽活動()、火山噴火()、大気中二酸化炭素濃度()の3要因でうまく説明できる([2]p33、[3]p21、[4]p27)。これによると、短中期的には火山噴火と太陽活動の変化が、趨勢的には二酸化炭素濃度が、気温に影響を与えていることが分かる([4]p27)。

図1 過去2万年の気温の推移



* 出所：参考文献[5]p40

図2 1860年以降の気温の推移

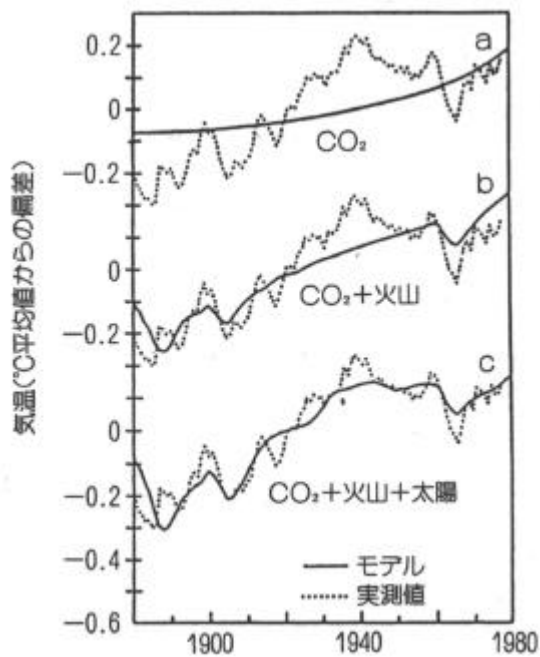


1861～1994年の陸上気温と海面水温を結合したもの（全球平均）の1961～90年の平均値からの偏差（℃）

出典：IPCC(1995)；気象庁訳

* 出所：参考文献[1] p38

図3 過去100年間の気温の太陽活動・火山噴火・二酸化炭素濃度による説明



- a : 二酸化炭素の増加を考慮した場合
- b : 二酸化炭素と火山噴火の効果を考慮した場合
- c : さらに太陽活動の長期変化を考慮した場合

* 出所：参考文献[3] p21

(2) 問題の限定と検出

地球温暖化とは、字義どおりには、地球全体の年平均地上気温の上昇をいう。この広義の温暖化は、自然的要因によるものと人為的要因によるものに分類できる。しかし、一般

に地球温暖化あるいは地球温暖化問題という場合には人為による温暖化を指す。以下でもこの用法に従う。具体的には、人間活動に基づく大気中の温室効果ガスの濃度上昇によって、地表気温が上昇することをいう。

人為による地球温暖化は既に顕在化しているのだろうか。図2にみたように、地球の平均気温は過去1世紀の間に0.3~0.6 上昇している。また、IPCCによれば、20世は西暦1400年以來のどの世紀よりも暖かいとみられる(*5)。さらに、樹木の年輪を利用した米MITの研究では(*6)、1998年の北半球の平均気温は過去1000年間で最高で、20世紀の北半球の平均気温(1998年まで)も過去1000年間で最高だという。

過去1世紀の温度上昇のすべてが人為によるものでないことは明らかである(図3)。では人為による温度上昇は検出されているか。この点に関してIPCCが1995年に出した第2次報告書(*7)は次のように述べている。これらから、慎重な表現ながら、人為による温暖化が既に存在することがかなりの程度確実であることが読み取れる(*8)。

「地球表面の平均温度は19世紀の終わりより0.3~0.6 上昇したが、この変化は、その全部を気候系の自然変動によるものとは考えにくい。...地球の気候に対する検出可能な人間の影響が示唆される」([6]p16)。

「観測された全球平均気温の過去1世紀にわたる変化傾向の統計的有意性の評価には、自然に内在している気候の変動性と外的に強制された変動性の様々な新しい評価が使用されてきた。...これらの研究のほとんどが重要な変化を検出しており、観測された温暖化の傾向がすべて自然起源によるものであるとはいえないことを示している」([6]p58)。

「全球の気候に対する人間の影響を定量化する我々の能力は、今のところ限られている。なぜなら、予想される信号は自然の変動性の雑音から依然として生じつつあり、また主要な要因に不確実性があるからである。...しかしながら、様々な証拠を考慮すると地球の気候に対する検出可能な人間の影響が示唆される」([6]p58)。

人為による温暖化の検出の意味を確認しておくことは重要である。人為による温暖化が既に生じているかどうかの確認作業が重要であることは疑いを入れない。しかし、現段階でそれが検出されなかったとしても、そのことは問題の重要性を減じるものではない。なぜなら、既述のとおり、他の事情が一定であれば、高い温室効果ガス濃度には高い気温が対応することは確実であり、そしてすぐ後で述べるように、温室効果ガス濃度が上昇しつづけていることは確認済みの事実であるからである。したがって、仮に現段階において人為による温暖化が検出されないとしても、それは、温室効果ガス濃度の上昇と気温の上昇と

の間の時間のずれ（後述）によるものか、または人為による温暖化を打ち消す自然起源の作用の存在によるものかのいずれか（あるいは両方）であると考えらるべきであろう。いずれにしても、現段階での存在の未検出は、将来における顕在化の危険を減ずるものではない。それは何の慰めにもならない。したがって、温室効果ガス濃度が現に上昇しているにもかかわらず将来も温暖化が起こらないと主張する者は、温室効果の促進を打ち消している要因は何かを解明し、それが将来も続くということを立証しなければならない。

(3) 温室効果ガス

以下では、人為による温暖化の犯人である温室効果ガスの大気中濃度の上昇を、二酸化炭素を中心に見ておきたい。

「産業革命以前の1000年間は、温室効果ガスの総量は比較的一定であった」（IPCC第1次報告書）（[9]p46）。産業革命以降、人類は、大気中の温室効果ガスの濃度を上昇させることを通じて、地表気温を上昇させてきたといわれている。表1は、人為的に排出される主な温室効果ガスについて（*9）、産業革命以前と現在との大気中濃度を比較している。また図4は、4つの温室効果ガスについて産業革命以降の濃度の推移を示している。

表1 主な温室効果ガスの濃度比較（産業革命以前 vs 現在）

	二酸化炭素	メタン	CFC-11	CFC-12	一酸化二窒素
大気中濃度	ppmv	ppmv	pptv	pptv	ppbv
産業革命以前 (1750~1800)	280	0.8	0	0	288
現在(1990)	353	1.72	280	484	310
現在の年変化率	1.8 (0.5%)	0.015 (0.9%)	9.5 (4%)	17 (4%)	0.8 (0.25%)
大気中における 寿命(年)	(50~200)*	10	65	130	150

ppmv=parts per million by volume ;

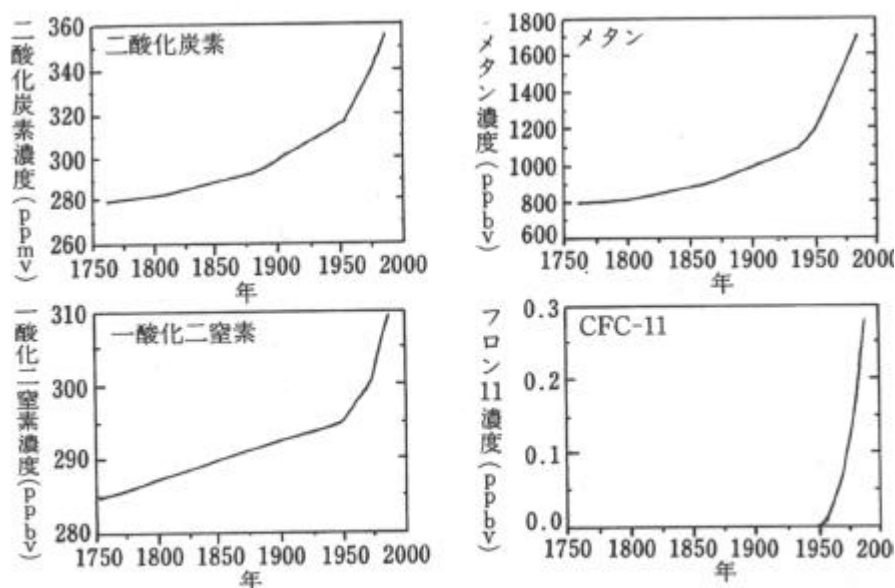
ppbv=parts per billion (thousand million) by volume ;

pptv=parts per trillion (million million) by volume.

* 海洋と生物圏にCO₂がどのように吸収されるかは単純ではなく、ひとつの値を与えることはできない。詳細については、本報告書参照。

* 出所：参考文献[9]p45

図4 産業革命以降の主な温室効果ガスの濃度の推移



19世紀まで比較的一定にとどまっていた二酸化炭素とメタンの濃度は、人間活動に伴って急激に上昇した。一酸化二窒素濃度は、18世紀中ごろから増加し、特に最近20～30年の増加が著しい。フロンは、1930年代以前は大気中には存在しなかった。

* 出所：参考文献[9]p46

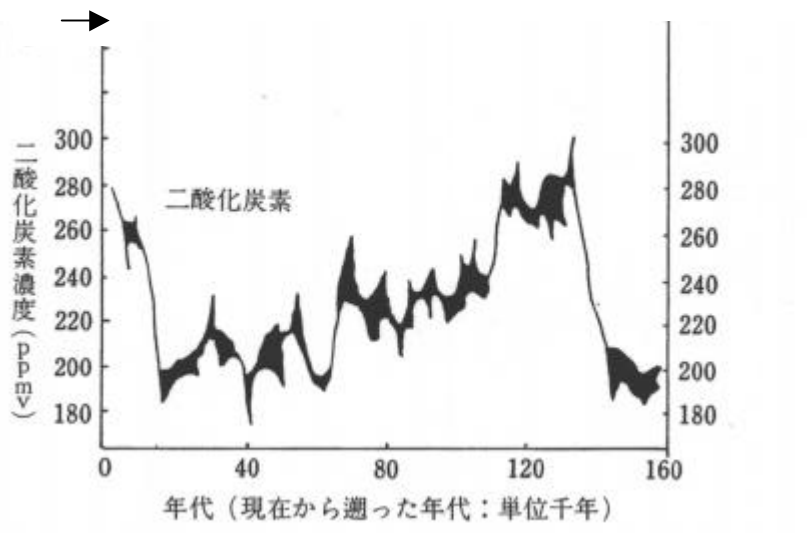
地球温暖化問題にとって、温室効果ガスの中でも、二酸化炭素が最も重要であったし、将来も中心的である。その理由の第1は、温暖化への寄与率が高いことである。IPCCによると、産業革命以降人為的に排出された温室効果ガスによる地球温暖化への寄与率は、二酸化炭素 63.7%、メタン 19.2%、亜酸化窒素 5.7 %、フロン・代替フロン 10.2%、その他 1.2%となっている([1]p31)。また、IPCCによる温室効果ガス排出の中層シナリオ(後述)における二酸化炭素の寄与率は、現在の60%から2100年には約75%へと増大する([6]p28)。1980～2030年の温度上昇を1.5℃であるとした別の推定は、二酸化炭素の寄与度を0.7前後、したがって寄与率は約50%であると見積もっている([4]p33)。さらに別の推定は、1986～2100年の二酸化炭素の寄与率を94.7%としている([4]p35)。このように、二酸化炭素の寄与率の推定値には大きな幅があるが、それが温室効果ガスの中で最も重要なものであることにはかわりはない。二酸化炭素が重要である第2の理由は、それが現代文明の基盤ともいべき化石燃料の燃焼に必然的に伴うということである。第3として、二酸化炭素を有用な物質に変換したり(有用な物質に変換するには膨大なエネルギーが必要)、無害な物質にして封じ込めるのが他の温室効果ガスに比して非常に困難であることが挙げられる([4]p43～45)。以下では、最も重要な温室効果ガスである二酸化炭

素に焦点を絞る。

過去の大気中二酸化炭素濃度はどのように変化してきたのだろうか。地質学的時間でみると、その濃度は大きく変化してきた。地球誕生時の原始大気は、水蒸気を除くと、約 97% が二酸化炭素であったと推定されている ([7]p10)。原始大気中の二酸化炭素は海水に溶け込み、炭酸カルシウム (CaCO_3) の沈殿 (*10) となって海底に堆積され、大きくその濃度を低下させる。海中に生命が誕生 (約 38 億年前) してからは、海中生物による取り込み (貝殻・珊瑚礁・プランクトンの殻など) が行われ、生物の陸上進出 (4 億 2000 万年前) 後は、植物による取り込み (光合成) が続く。要するに、地球誕生以来、二酸化炭素濃度は「無機化学的過程と生物活動の二段階によって激減し、その後小さな増減を繰り返してきた」 ([7]p13)。

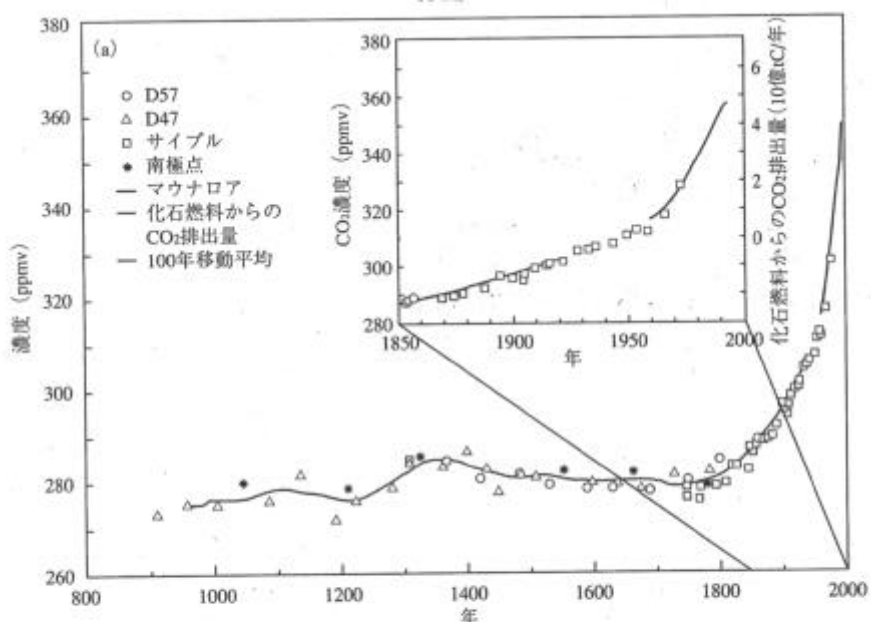
図 5 は、南極の氷床コアに捉えられた空気の分析によって得られた二酸化炭素濃度を示したもので、過去 16 万年間の推移を示している ([9]p43)。過去 16 万年間の二酸化炭素濃度は概ね 180 ~ 300ppm の範囲で変動している。また、ここ 1 万数千年の間に二酸化炭素濃度は 100ppm 程度上昇している。図 6 は、過去 1000 年余りの間の二酸化炭素濃度の推移を示している ([1]p36)。図 6 から明らかのように、産業革命以降の二酸化炭素濃度の上昇は著しい。

図 5 過去 16 万年間の二酸化炭素濃度の推移



* 矢印は 1990 年における二酸化炭素濃度。出所：参考文献[9]p43

図6 過去1000年間の二酸化炭素濃度の推移



氷床コアの記録 (D47、D57、サイプル (Siple) 基地、南極点) による過去1000年間のCO₂濃度と、ハワイのマウナロア (Mauna Loa) 観測所における1958年以降のCO₂濃度。氷床コアはすべて南極大陸で採取された。滑らかな曲線は100年移動平均。産業革命が始まって以降の急速なCO₂濃度の上昇は明白であり、化石燃料からのCO₂排出量の増加にはほぼ追従している (1850年度以降の拡大図参照)。
出典：IPCC (1995)；気象庁訳

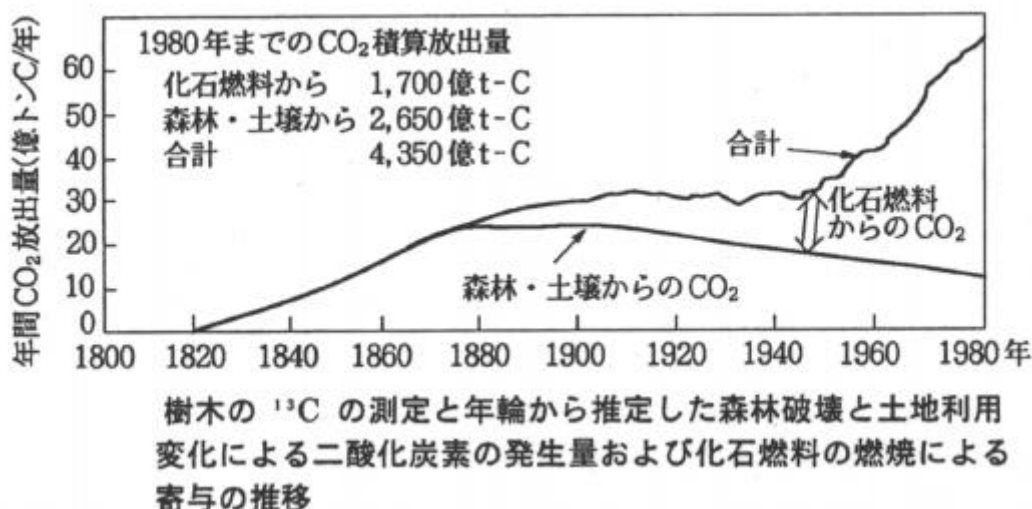
* 出所：参考文献[1]p36

図5には、比較のために矢印で1990年の濃度も示されている。まず、現在の水準の異常さが注目される (さらに後述のように今後も上昇していくのはほぼ確実とみられる)。第2に、上昇速度の異常さにも目を見張るものがある。表1でみたように、わずか200年ほどの間に73ppmの上昇がみられた (中でも特に、1950年以降の上昇が著しい。図4)。これと、過去16万年間の変動幅 (概ね120ppm程度、図6) を比較すれば、いかに近年の二酸化炭素濃度の上昇速度が異常なものであるかは一目瞭然である (200年で70ppmの上昇速度とすると1万年では3500ppmの上昇となる)。

産業革命以降の二酸化炭素濃度の上昇は、主に化石燃料の使用と森林伐採によってもたらされた (*11)。まず有機物 (生物に由来する炭素原子を含む物質) である化石燃料の燃焼が二酸化炭素の発生を伴うのは当然である。森林伐採はどうか。植物は光合成によって大気中の二酸化炭素を吸収し、炭素を固定する ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$)。すなわち、森林には炭素が固定されている。主に農地開発や燃料獲得のために森林が伐採されると、表土 (土壌の最上層) に蓄積されていた有機物が太陽光に暴露され、急速に酸化される結果、二酸化炭素が放出される ($\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) (*12)。図7は、

1820年以降の化石燃料の使用と森林伐採による二酸化炭素の放出量の推移を示している。これによると、数十年前までは、森林伐採による二酸化炭素排出の方が中心的であったことがわかる([3]p62)。但し、森林伐採による炭素放出量の推定値には大きな幅がある([4]p61)。

図7 1820年以降の化石燃料の使用と森林伐採による二酸化炭素の放出量



* 出所：参考文献[4]p62

[補] その他の主な温室効果ガス

・メタン (CH₄)

有機物が酸素のある状態で分解すると二酸化炭素が発生するが、酸素のない状態で分解するとメタンが発生する([5]p100)。自然の発生源としては、湿地やシロアリ等の昆虫がある。人間活動による発生源としては、牛などの家畜の腸内発酵作用、稲作水田、ゴミの埋立地、天然ガスの漏出などがある([4]P39)。大気中に排出されたメタンは最後は二酸化炭素になる([5]P101、[3]P32、[4]P39)。

・フロン (CFC)

フロンはオゾン層破壊物質として知られているが、温室効果ガスでもある。フロンは1920年代に開発された物質で、元々自然界には存在しなかった。冷蔵庫やエアコンの冷媒、スプレーなどの噴霧剤、精密機械の洗浄剤として利用された。1987年に採択された「オゾン層破壊物質に関するモントリオール議定書」により、CFC11やCFC12など5種類の特定フロンの段階的削減が合意され、その後の規制強化を経て1995年末に生産が打ち切られた。

・亜酸化窒素または一酸化二窒素 (N₂O)

自然のものとしては土壌・海洋・沿岸などから発生する([4]P41)。人為的な発生因と

しては、農業における窒素肥料の使用(*13)、化石燃料の燃焼(*14)、バイオマス(生物。特に植物体で燃料に転化できるもの)の燃焼などがある。

排出量と濃度の関係はどうなっているのだろうか。放出された二酸化炭素はいつまでも大気中に留まるわけではない。炭素はその化学的形態を変えながら、大気・陸上・海中の間を循環している(炭素循環)。大気中では二酸化炭素、陸上では植物と土壌有機物、海中では重炭酸イオンがその主な形態である。それぞれにおける炭素存在量は、大気 7000 億トン、陸上 2 兆トン、海中 40 兆トンと推定されている。これ以外に地中には大量の化石燃料が存在している。産業革命以前の大気中二酸化炭素濃度がほぼ一定であったということは、この炭素の循環が安定した状態にあったことを意味している。産業革命以降、その平衡が森林伐採と、それまで炭素循環に参加していなかった化石燃料の燃焼によって攪乱されたことが、大気中の二酸化炭素濃度上昇の意味である。いったん上昇した大気中の二酸化炭素濃度も、十分に長い時間が経過すれば、海がその大部分を吸収し、元の状態に戻ると考えられる。なお、海が均一に混ざるには 1000 年程度の時間が必要と推定される。有史以来の森林伐採による二酸化炭素の放出にもかかわらず、産業革命以前の濃度がほぼ一定であったのは、排出速度が比較的遅かったため大気中の二酸化炭素濃度を一定化させようとする上記の自然のメカニズムによって吸収されたためと考えられる(以上[3]p33~39)。

表 2 人為起源の炭素の年平均収支 (1980 ~ 1989)

CO ₂ の発生源	
(1) 化石燃料燃焼およびセメント製造からの排出	5.5±0.5*
(2) 熱帯の土地利用変化による正味の排出	1.6±1.0
(3) 人為的排出の総計=(1)+(2)	7.1±1.1
貯蔵場所への配分	
(4) 大気中への蓄積	3.3±0.2
(5) 海洋の吸収	2.0±0.8
(6) 北半球の森林再生による吸収	0.5±0.5 [#]
(7) 推定される吸収源: (3)-((4)+(5)+(6))	1.3±1.5 [§]

大気中のCO₂の発生源、吸収源、貯蔵を10億tC/年で表した。

* 参考までに1994年の排出量は6.1 (10億tC/年)だった。

この数字は、中・高緯度における森林の吸収が0.7±0.2(10億tC/年)であるという、IPCC WG II (1995)の独自の見積もりと合致している。

§ この推定される吸収源は、IPCC WG I (1995)の第9章での独自の見積もりと合致している。この見積もりでは、窒素施肥による炭素の取り込み(0.5±1.0(10億tC/年))に、二酸化炭素施肥と気候の影響による他の取り込みの範囲(0~2(10億tC/年))を加えている。

出典: IPCC(1995); 気象庁訳

出所: 参考文献[1]p34

IPCCの推定によれば、現在の人為起源の炭素収支は表2のとおりである([1]p34)。すなわち、人間の活動によって年間71億トンの炭素が大気中に排出され、そのうち33億トンの炭素が大気中に蓄積されている。残りは、海や陸上生態系が吸収している。大気中に蓄積される分は、海や陸上生態系が吸収できなかった分である。

3. 影響予測

(1) 排出量・濃度と気温・海面水位 (IPCC第1作業部会報告書の要旨)

IPCC第2次報告書(第1作業部会報告書)から、二酸化炭素の排出量と濃度、気温と海面水位の上昇に関する部分を要約してみよう。

現在の排出レベルが継続される場合の二酸化炭素濃度

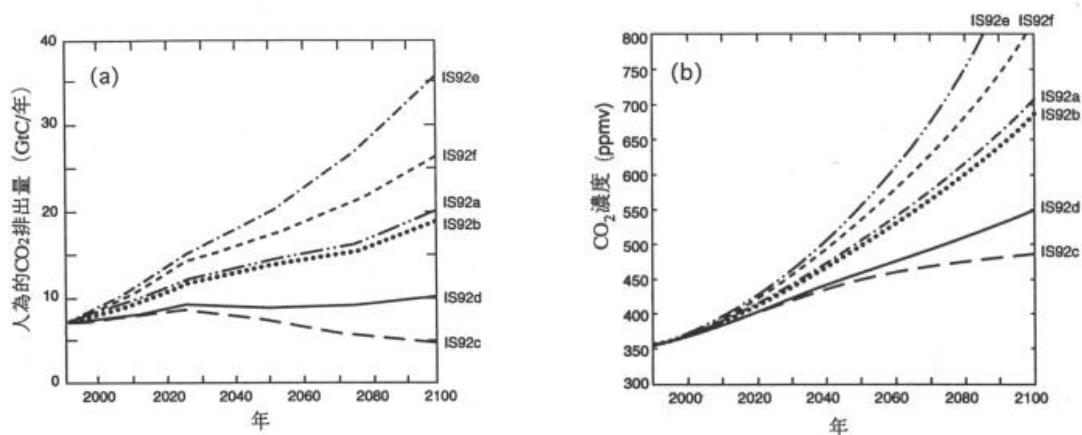
- ・二酸化炭素の排出量が現在のレベルに固定されるとすると(1994年=炭素換算約70億トン)、少なくとも今後2世紀にわたって大気中濃度がほぼ一定の割合で増加し、21世紀末までには約500ppmv(産業革命以前の280ppmvの約2倍)に達する。

6つの排出シナリオ

- ・将来の経済・人口・政策についての一定の仮定に基づいて、二酸化炭素の人為的排出量について、2100年までの6つの排出シナリオ(IS92a~f)が提示されている(*15)。
- ・各シナリオにおける排出量と大気中濃度はそれぞれ図8、図9のとおり。また、1991~2100年の累積二酸化炭素排出量は表3のとおり。

図8 6つの排出シナリオにおける二酸化炭素排出量(a)

図9 6つの排出シナリオにおける二酸化炭素濃度(b)



* (a) IS92 排出シナリオに基づく人為的な CO2 の全排出量と(b)それに基づいて計算した大気中 CO2 濃度。

出所：参考文献[10]p22

表 3 二酸化炭素の累積排出量と気温・海面水位の上昇

	累積排出量	気温上昇	海面水位上昇	備考
IS92c	770GtC	1.0	15 cm	最小排出シナリオ
IS92d	980			
IS92b	1430			
IS92a	1500	2.0	50	中庸排出シナリオ
IS92f	1830			
IS92e	2190	3.5	95	最大排出シナリオ

* 累積排出量は 1991～2100 年、気温・海面水位の上昇は 2100 年（対 1990 年比）

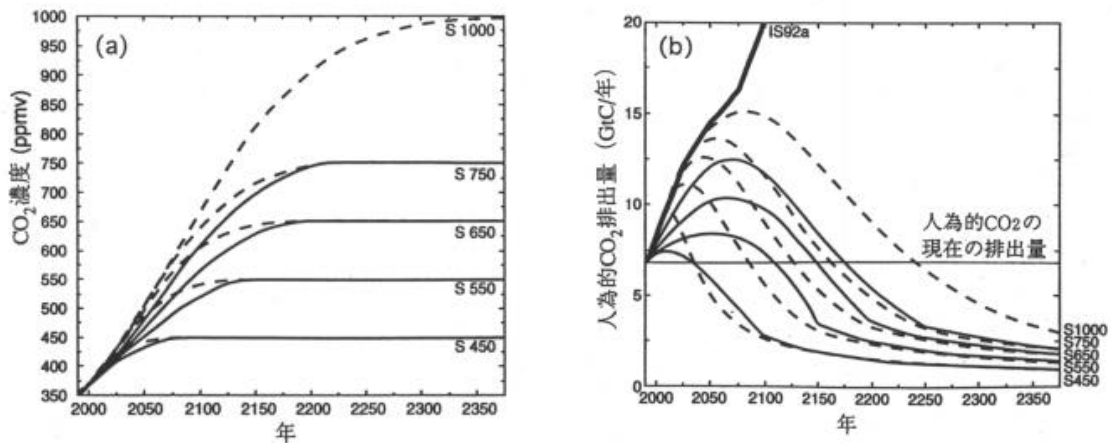
出所：参考文献{6}p31, p59～60 より作成。

大気中濃度を一定レベルに安定化させるための排出量

- ・ 気候変動枠組み条約は「気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととならない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを究極的な目的」（第 2 条）としている（[6]p3）。しかしながら、「気候系に対して危険な」水準がいかなる水準であるかについての合意は得られていない。
- ・ そこで IPCC は、ある一定の大気中濃度が与えられた場合の累積排出量と排出量の経年変化を、450～1000ppmv の 5 つの安定化水準について示している。なお、一定の安定化水準が与えられても、経年変化が一様に決まるわけではない。達成時期によっても経年変化は異なるし、達成時期が与えられたとしても、選択的である。IPCC は、現在の平均的濃度の増加率から安定化するまでの滑らかな変化を仮定している。
- ・ 濃度と排出量の推移は図 10、図 11 のとおり。また、累積排出量は表 4 のとおり。

図 10 特定のレベルに濃度を安定化させる場合の濃度の経路（a）

図 11 特定のレベルに濃度を安定化させる場合の排出量の経年変化（b）



* (a) CO₂濃度を450、550、650、750ppmvに安定化させるための濃度変化。IPCC(1994)で定義した濃度変化の経路(実線)と、少なくとも2000年まではIS92aに従った排出を許容する経路(破線)について示す。さらに、CO₂濃度を1000ppmvに安定化させ、少なくとも2000年まではIS92aの排出に従う濃度変化を破線で示す。(b)(a)で示された濃度変化に従って濃度を450、550、650、750、1000ppmvに安定化させるためのCO₂排出量。現在的人為的CO₂排出量とIS92aの排出量を比較のため示す。計算にはベルン(Bern)の炭素循環モデルと表2に示した1980年代についての炭素収支を使用した。出所：参考文献[10]p24

表4 安定化濃度と累積排出量

安定化濃度	1991～2100の累積	
	CO ₂ 排出量 Aプロファイル	CO ₂ 排出量 Bプロファイル
450ppmv	630GtC	650GtC
550	870	990
650	1030	1190
750	1200	1300
1000	--	1410

*プロファイルは図11の実線、Bプロファイルは破線。出所：参考文献{6}p31

気温と海面水位の上昇

- ・各シナリオにおける気温上昇と海面水位の上昇は、表3の右欄のとおり。
- ・どの場合についても、平均的な昇温率はおそらくこれまでの1万年間のなかで最も大きなものになると考えられている。海洋の熱的な慣性のため、2100年までには最終的な平衡温度の50～90%だけが現実に現れるに過ぎず、温室効果気体の濃度が2100年まで安定化されたとしても気温はそれ以降も上昇を続けると見込まれる。
- ・たとえ温室効果気体の濃度が2100年まで安定化されたとしても、海面水位はそれ以降数世紀も同程度の割合で上昇を続け、全球平均気温が安定化した後でも上昇を続けると見込まれる。

る。なお、海面水位の上昇は、主として海水の温暖化にともなう熱膨張によるものであるが、氷河の融解の増加によるものも含んでいる。

(2) 生態系・社会経済への影響(IPCC 第 2 作業部会報告書の要旨)

生態系および社会経済への影響について、IPCC は「おおむね大気中の二酸化炭素濃度が 2 倍となった時の影響」を推定している[24]5。以下、「政策決定者のための要約」から重要と思われる部分を摘記しよう。

天候災害

- ・生態系や社会経済システムに対する気候変動の影響は、まず暴風雨、洪水、干ばつなど一般的な天候災害の強さや季節的・地理的分布の変化として現れる可能性が高い([6]p71)。

森林

- ・多くのモデルは、地球の年間平均気温が持続的に 1℃ 上昇しただけで多くの地域の森林の生育・再生能力に影響を与える地域気候の変動を引き起こすのに十分であると予測している。いくつかの例では、これは森林の機能と構成を大幅に変更するだろう。二酸化炭素 2 倍等価濃度(*16) の平衡条件下で、気温と降水量の変化の結果として、現存する森林のかなりの部分(世界平均で 3 分の 1、場所によっては 7 分の 1 から 3 分の 2) が広範な植生タイプの大きな変化にさらされるであろうとモデルは予測する。
- ・森林の喪失率が大きい時期に炭素が失われる速度は森林の生育・成長による増加率よりも大きいいため、森林形の転換期には大量の炭素が大気中に放出される可能性がある。

氷雪圏

- ・今後 100 年間で山岳氷河の 3 分の 1 から 2 分の 1 が消失、氷河・降雪の減少は河川流量の季節変化・水供給に影響。
- ・永久凍土の融解等の変化による炭酸ガス・メタンの放出。

水資源

- ・すでに今日でも水質及び水供給の面で深刻な問題を抱えている地域が低位沿岸地域、デルタ地帯、小島しょなど数多くあり、これらの地域にある国は、それぞれの地域の水供給力のわずかな減少にもきわめて脆弱になっている。
- ・特に総合水管理システムのある豊かな国々のケースでは、管理の改善によって最小限の費用で利水者を気候変動から守れるかもしれない。しかし、その他の多くの国々、特にすでに水資源が限られ、利用者間での競争が激しい地域では、大きな経済的・社会的・環境的費用がかかる可能性がある。

農業

- ・大循環モデルによる二酸化炭素 2 倍等価濃度平衡時条件での予測によれば、地域的な差異は大きいものの、農業生産は全般的には気候変動がない場合の生産見通しを維持できる可能性があることをこれまでの調査は示している。この結論は二酸化炭素の肥沃効果の恩恵を考慮に入れているが、農作物の病虫害の変化や気候変動性の変化によって生じる可能性のある影響は考慮していない。
- ・一部の地域では飢餓や飢饉のリスクが高まる可能性があり、特に世界の多くの最貧の人々、特に亜熱帯や熱帯地域に暮らし、半乾燥及び乾燥地域で孤立した農業に依存している人々は、サハラ以南のアフリカ、南アジア、東アジア、太平洋諸島に住んでいる。

林産品

- ・21 世紀の地球全体の木材供給は、気候及び非気候要因の双方によって、推定消費を満たすことがますます困難になるかもしれない。

インフラストラクチャー

- ・気候変動と、その結果としての海面上昇は、エネルギー、産業、輸送施設、人間の居住地、損害保険業、観光、文化システムと価値に多くの悪影響を与える可能性がある。
- ・気候変動は明らかに洪水や浸食からくる土地喪失によって沿岸地域の人々への脆弱性を増大させる。推定によると、現在は年間 4600 万人の人々が暴風の高波による洪水の危険にさらされている。...適応策がない場合、海面が 50 cm 上昇するとこの数字は約 9200 万人に、1 m の上昇では 1 億 1800 万人となる。予測される人口の伸びを考慮すると、推定は大幅に増加する。
- ・多くの研究は 1 m の海面上昇に対する感受性を評価している。この海面上昇は、IPCC 第 1 作業部会の推定範囲の上限である。しかし、海面は実際には 2100 年以降も継続して上昇すると予測されていることに留意しなければならない。

人の健康

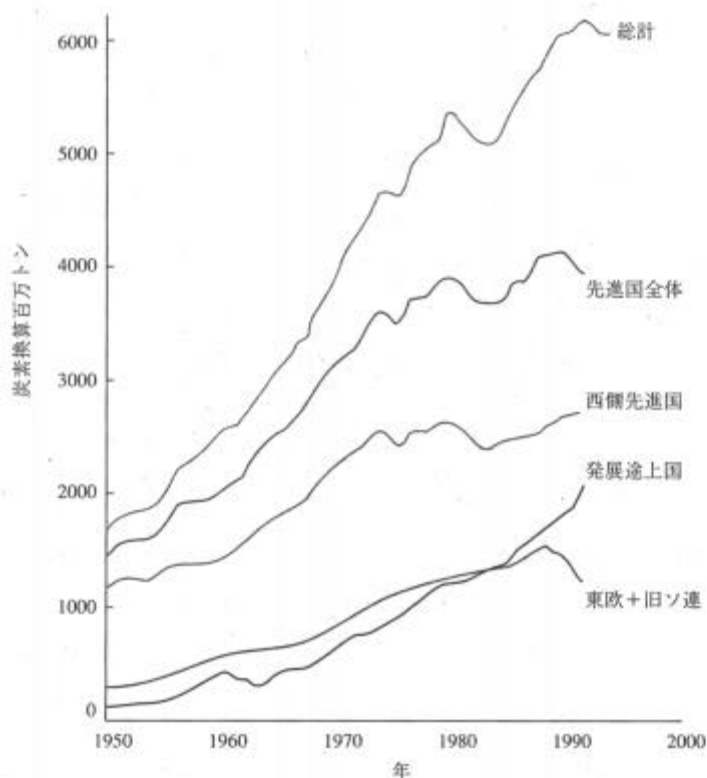
- ・気候変動の健康影響は広範に及びその多くは悪い影響で、人命の顕著な損失を伴うものとなる。
- ・モデル(かなり単純化した仮定に基づくもの)の予測によれば、2100 年までに 3 ~ 5 という気温上昇を想定すると、マラリア伝染の可能性のある地域は拡大し、この地域内の人口は世界人口比で現在の約 45% から 21 世紀後半には約 60% に増加することを示している。...温暖化しない場合の発症人口推定である 5 億人に対して、年間 5000 万 ~ 8000 万件の発症例の増加をもたらす可能性がある。非媒介性伝染病 - - 例えばサルモネラ感染症、コレラ、ランブルベン毛症など - - の増加も、温度上昇や洪水増加によって起こりうる。

(3) ポイントは何か

現在の排出量は許容水準を超えていること

- ・まず、現在の大気中の二酸化炭素濃度(1994年 358ppmv)は、少なくとも過去16万年間で最高水準にあることを確認しておくべきである(図5)。
- ・しかしながら、二酸化炭素濃度を現在のレベルに維持することは不可能である。IPCCは「二酸化炭素濃度を現在のレベルで安定化するためには、その排出をただちに50~70%削減し、さらに削減を強化していく必要がある」([6]p25)としている。

図12 1950年以降の二酸化炭素排出量の推移



出典：オーケッツリッジ国立研究所(米国)

出所：参考文献[1]p58

- ・「濃度を現在のレベルに維持する」どころか、一人当たりの所得水準が未だ低く、今後大きな人口増加が見込まれる発展途上国の事情を考慮するだけでも、しばらくの間、世界の二酸化炭素排出量が増加することは不可避であろう。図12は1950年以降の二酸化炭素排出量の推移を示している。そのことはまた、すべてのISシナリオにおいて、少なくとも21世紀末まで、現在と比べて濃度が増加していることから窺える(図9)。
- ・たとえば、現在の排出レベルを維持できたとしても、2100年に約500ppmvとなり、「少なくとも今後2世紀にわたって大気中濃度がほぼ一定の割合で増加し」とあるから、単純計算すれ

ば、2200年には634ppmv となってしまう（ $(500-358) \times 100/106 + 500$ ）。

- ・6つの排出シナリオのうちの「中庸排出シナリオ」であるIS92aであっても、その累積排出量は1500GtC（GtC:炭素質量で10億トン）である。これは1000ppmv安定化における許容排出量（1410GtC）を既に超えてしまっている。また、その2100年における濃度は約700ppmvであり、現在の約2倍である（図9）。「中庸排出シナリオ」であるIS92aと、1000ppmv安定化における許容排出量を比べると（図11）、「中庸」な見通しがもたらす尋常ならざる事態が理解できる。

ツケが後へ回る構造

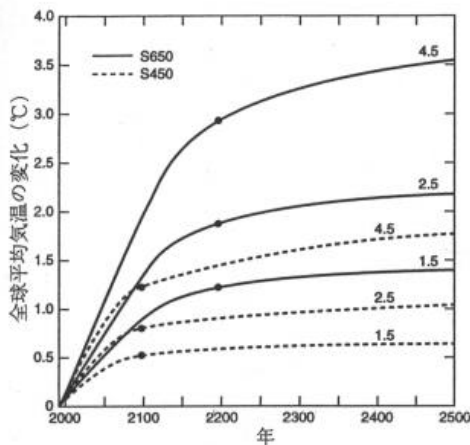
- ・最終的な濃度が、第一次近似として、累積排出量で決まるという事実(*17)は、一定の濃度で安定化するには、早い時期に多く排出するとその後の排出は少なくしなくてはならないことを意味している(*18)。
- ・さらに、<排出量の安定 濃度の安定 気温の安定 海面水位の安定>という一連の変化は、時間のズレを伴うということである([6]p67)。まず、排出量の安定と濃度の安定には時間のズレがある。このことは、図8および図9から窺える。次に、濃度の安定と気温の安定には時間のズレがある（図13）。これは海洋が大きな熱容量を持つためである。第3に、気温の安定と海面水位の安定には時間のズレがある（図14）。このことは、現在の濃度に対応する気温や海面水位等の水準はそのすべてが未だ顕在化していないということの意味する。

図13 濃度の安定と気温の安定の関係（a）

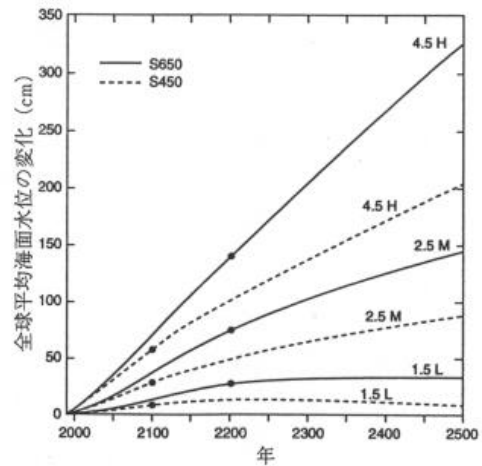
図14 気温の安定と海面水位の安定（b）

（a）

（b）



CO₂濃度の安定化に対する全球平均地上気温の応答。気候感度が1.5、2.5、4.5°Cの場合について、CO₂濃度をそれぞれ、450ppmv (破線)、650ppmv (実線)に安定させる場合(図7(a)参照)。CO₂の増加のみを考慮している。濃度が安定化する時期を黒丸で示す。計算では、1990年まではエアロゾルの影響を含めた強制力の観測値を与え、1990年以降はCO₂濃度の増加のみを仮定。



CO₂濃度の安定化に対する全球平均海面水位の応答。気候感度が1.5、2.5、4.5°Cの場合について、CO₂濃度をそれぞれ、450ppmv (破線)、650ppmv (実線)に安定させる場合(図7(a)参照)。CO₂の増加のみを考慮している。濃度が安定化する時期を黒丸で示す。計算では、1990年まではエアロゾルの影響を含めた強制力の観測値を与え、1990年以降はCO₂濃度の増加のみを仮定。

不確実性

- 第3は、大きな不確実性の存在である。報告書は次のように述べている。「ほとんどの生態系と社会システムでは、気候によって引き起こされる変化を明白に検知することは、今後数十年にわたり極めて困難であろう。なぜなら、これらの系が複雑で、多くの非線型フィードバックを持っており、かつ非常に多くの気候的及び非気候的要因により変化を受けられるためであり、しかもこれらすべての原因が同時に変化し続けることが予想される。将来の気候が、経験的な知識(すなわち記録されている過去の気候変化の影響)の範囲外へ変化するに従って、実際に現れる結果には突発事や予想できない急激な変化が含まれる可能性が高くなりそうである」([6]p71)。

要するに、世界全体として増加基調にある排出量を早急に安定させ、減少へと逆転さなければならぬ。

4. 政策体系

(1) CO₂ 排出抑制策

[目標の分割]

CO₂ E GNP

$$CO_2 = \frac{E}{GNP} \times \frac{GNP}{人口} \times 人口$$

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E_1} \times \frac{E_1}{E_2} \times \frac{E_2}{GNP} \times \frac{GNP}{人口} \times 人口$$

または、 $CO_2 = \frac{CO_2}{E_1} \times \frac{E_1}{E_2} \times \frac{E_2}{GNP} \times \frac{GNP}{人口} \times 人口$

(E_1 :投入エネルギー、 E_2 :利用エネルギー)

[抑制策]

一次エネルギー供給の変更

化石燃料間での構成変化、原子力、再生可能エネルギー、高速増殖炉、核融合技術によるエネルギー利用効率の向上

設備・機器効率、断熱、未利用エネルギーの利用

エネルギー利用水準の削減

個人（ライフスタイル）

社会制度（産業部門、運輸部門、民生部門）

時短選択（成長から時短へ）

人口抑制（目標としての高齢社会）

[抑制のための手法]

炭素税・エネルギー税、排出権取引、共同実施など

(2) 森林の保護育成（ CO_2 の排出抑制および除去）

保護（伐採の抑制） = CO_2 排出の抑制、育成 = CO_2 の除去

(3) CO_2 の固定

(4) CO_2 以外の温室効果ガス対策

[注]

(* 1) 地球温暖化問題に関する政府レベルの検討の場として、1988年に設けられた国連の組織。地球温暖化問題に関する最新の自然科学的及び社会科学的知見をとりまとめ、地球温暖化防止政策に科学的な基礎を与えることを目的としている。1990年に第1次評価報告書を、1995年に第2次評価報告を提出している。IPCC報告書で述べられている科学的知見は「現時点で人類が入手しうる最も確からしい知見」とあるとされている（[1]p35）。

(* 2) 地球全体として熱収支はバランスしているが、緯度別にはバランスしていない。

すなわち、緯度 38 度を境に、低緯度地方は「受熱量 > 放熱量」、高緯度地方は「放熱量 > 受熱量」。低緯度地方の過剰エネルギーは、大気の流れ、海流、水蒸気の移動の形で、高緯度地方へ輸送されている。[8]p114

- (* 3) 正確には地球全体の年平均地上気温。全球平均気温、全球気温などともいう。
- (* 4) 平均周期 11.2 年。黒点の多いときは太陽の活動が活発。[8]p259
- (* 5) 「気候の指標の代用となるものによる利用可能な限られた証拠が示すところでは、20 紀の全球平均気温は西暦 1400 年以來のどの世紀よりも少なくとも暖かい。1400 年以前のデータはあまりに少ないので、全球平均気温の信頼すべき評価をすることができない」 ([6]p57 ~ 58) 。
- (* 6) 日本経済新聞 1999 年 3 月 4 日夕刊。
- (* 7) 第 2 次報告書は、I P C C の 3 つ作業部会 - - すなわち、地球温暖化の科学的評価を担当する第 1 作業部会、環境的・社会経済的影響を担当する第 2 作業部会、対応戦略を担当する第 3 作業部会 - - - の各報告書と、それらを踏まえた「気候変動枠組条約第 2 条の解釈に関する科学的・技術的情報の I P C C 第 2 次総合評価」と題する総合報告書からなる。最初の引用は総合報告書のもの、あとの 2 つは第 1 作業部会の報告書の「気候変動の科学に対する政策決定者のための要約」による。
- (* 8) 総合報告書の「第 2 次総合評価の概要」には、「19 世紀以降の気候を解析し、人為的影響による地球温暖化が既に起こりつつあることを確認」という表現が見られる [6]p2。また、第 1 作業部会報告書(「政策決定者のための要約」)には、「産業革命以前の時代以降(すなわち約 1750 年以降)の温室効果ガス濃度の増加によって正の放射強制力が生じ、地表が暖まって他の気候の変化が現れるようになった」という表現が見られる [6]p54。これらを踏まえてか、『平成 9 年版環境白書』は「I P C C 第 2 次総合評価は地球温暖化が既に起こりつつあることを確認している」と述べている [1]p35 。
- (* 9) 水蒸気は最大の温室効果ガスであるが、表 1 や図 4 に含まれていない。その理由は、地球規模での水蒸気の濃度は気候システムの中で決定され、人間活動による影響を受けない(水の蒸発量や雨雪の量はコントロールできない)からである。温暖化に伴って水蒸気の濃度は上昇し、温暖化が一層促進されると考えられる。他方、雲の増加はアルベドを大きくするので冷却効果を持つ。[5]p56 ~ 57、[9]p45 オゾンも重要な温室効果ガスであるが、「現在の観測からその変化を定量化するのは難しい」。 [9]p45

- (*10) 石灰岩（炭酸カルシウム CaCO_3 が重量で 50% 以上を占める堆積岩）。石灰石も主成分は CaCO_3 。
- (*11) セメントの製造も二酸化炭素排出要因である。セメント(主成分は CaO)は原料の石灰石(CaCO_3)から、 CO_2 を除くことによって製造される。[5]p76 (*12) 伐採以前には、表土に到達する太陽光は少なく、表土中の有機物の分解速度は遅く、栄養として樹木の成長に使用される。[5]p79
- (*13) 土壌に流出した窒素肥料がバクテリアによって分解される際に発生する[5]p102
- (*14) ボイラー等の排気ガス中の窒素酸化物を窒素に還元する際に、十分還元されない場合、亜酸化窒素が発生する([5]p102)。
- (*15) 二酸化炭素以外に、メタン、亜酸化窒素なども考慮されている。各シナリオの仮定の要旨は[6]p68。
- (*16) すべての温室効果ガスの複合効果は、しばしばそれと同じ強制力を持つ二酸化炭素の等価濃度を指標として表される。[6]p28
- (*17) 最終的に安定化する濃度は、安定化するまでの排出量の経年変化よりは、累積積算量に大きく左右される。[6]p26。
- (*18) 今後数年以内に下される決定は、近い将来の排出量を大きくすれば、所与の目標濃度を満たすまでに将来より大幅な削減を必要とすることから、将来の対策の範囲を制約する可能性がある。行動を遅らせれば、技術の進歩によって削減対策の総費用は減少するかもしれないが、気候変動の速度と最終的な規模を増加させ、したがって適応費用や損害額を増大させる可能性がある。[6]p67～68

〔参考文献〕

- [1]環境庁『平成9年版環境白書 総説』（大蔵省印刷局 1997）
- [2]後藤則行『やさしい地球温暖化入門』（あすなる書房 1998）
- [3]小宮山宏『地球温暖化問題に答える』（東大出版会 1995）
- [4]小島紀徳『二酸化炭素問題 ウソとホント』（アグネ承風社 1994）
- [5]柳沢幸雄『 CO_2 ダブル』（三五館 1997）
- [6]I P C C 編『I P P C 地球温暖化第2次レポート』（中央法規 1996）
- [7]北野康・田中正直『地球温暖化がわかる本』（マクミン・リサーチ研究所 1990）
- [8]石田志郎『理解しやすい地学・B』（文英堂 1995）
- [9]霞が関地球温暖化問題研究会編訳『I P C C 地球温暖化レポート』（中央法規 1991）
- [10]気象庁編『I P C C 第2次報告書 地球温暖化の実態と見通し』（大蔵省印刷局 1996）

以上

【本稿は筆者個人の見解に基づく】