

地球温暖化の原因を再考する

御園生 誠

これまでにずいぶん議論があったのに、何をいまさらと思う人もおられるかもしれないが、パリ協定が発効し各国に対策の強化が求められるなか、改めて温暖化の原因について、事実と考え方をできるだけ客観的にかつ割り切って整理した。諸兄諸姉のご批判に供したい。

温暖化の原因について、筆者は、「自然変動要因と人為起源の要因がともにあるが、20世紀の気温上昇に対しては前者の寄与が少なくとも半分程度ある」と考えている。もしそうなら、とるべき対策もおのずと違って、巷でよく聞く劇薬のような対策でなく、漢方薬のように穏やかな対策で済むであろう。“角を矯めて牛を殺してしまう”ことは避けたいものである。なお、本稿は、近刊予定の拙著「現代化学環境学入門(仮題)」の一部を編集したものである。

肝心の対策は省略するが、簡単に言えば、“正味の”省エネ、節エネ、効率向上、化石エネルギーの低炭素化を、組織的に実施し(生活が窮屈になりすぎない範囲で)、新・再生可能エネルギー(太陽光、風力など)は、技術進歩、コストダウンの進捗に合わせ緩やかに普及拡大することが良いと考えている。“正味”とは、全ライフサイクルでの評価の意。この対策は21世紀中盤までを考えたも

ので、未来型技術には21世紀終盤での出番を期待する。

1. 気候変動と温室効果

気候とは長期間にわたる大気の平均的な状態、そして、その変動が気候変動である。変動の時間軸は数十日(季節の変化)のものから数万年(氷期、間氷期のサイクル)のものまである。なお、異常気象は、25-30年に一度の気象の揺らぎであり、それ自身に特別な問題はない。その頻度や強度が顕著に変化する場合に問題になるが、世界気象機構や気象庁によれば、まだ顕著にはなっていない。

地球温暖化(註1)に関して、過去約20年間、様々な対策がとられてきた。温暖化防止に関するパリ協定の合意(COP21, 2015年12月)により、対策はさらに新しい段階に入るものと予想される。

20世紀半ば(1940-1960)に地球平均気温が低下した時は、地球寒冷化騒動があったそうだが、そのカラ騒ぎを繰り返すことは避けたい。といって、対策が不十分で後悔することになっては困る。21世紀末を迎えた時、人類は、21世紀初頭(つまり現在)を振り返って昔の人はよくやったと称賛するのだろうか、それともカラ騒ぎをしたと

慨嘆するのだろうか。

そこで、改めて地球温暖化の原因を見直してみたい。地球温暖化を理解するには、(1) 温室効果ガスによる地球温暖化のメカニズム、(2) 温室効果ガスの濃度変化、(3) 過去の地球気温の変化、(4) 温室効果ガス以外の気候変動要因を知る必要がある。

いまさらながらであるが、地球に降り注ぐ太陽エネルギーは紫外線と可視光線が多く(波長分布は太陽表面の温度 6,000°Cで決まる)、地表は、この光を吸収して温まっから再び宇宙へエネルギーを放出するが、これは主に赤外線である(波長分布は地表温度で決まる)。そして、地表は、地球が放出するエネルギーと入射する太陽エネルギーとがバランスする温度に落ちつく。

このとき、大気中に CO₂、水蒸気、メタンなどの温室効果ガスが存在すると、これら分子が地表からの赤外線を吸収し、そのエネルギーを宇宙と地表の両方向へ放射する。温室効果ガスが増えると地表へ戻るエネルギーが増えて地表温度が上昇する。これが温室効果である。

温室効果ガスが存在しないと、地表温度は約 255 K (= -18°C) だが、温室効果があるおかげで、地表が約 15 °C になり生物が棲むことができる。なお、CO₂ の温室効果を 1 としたときの、他の温室効果ガスの相対的な温室効果(同じ濃度で比較)を地球温暖化係数というが、メタン 25、亜酸化窒素 298、CFC (フロン類。分子種で異なる) 10⁻¹⁰ と見積もられている。温室効果の大きさはこの値と大気中濃度で決まる。水蒸気の温室効果は最大であり、CO₂ の約 4 倍であると推定されている。

2. 気候変動に関する見解の乖離

現在に至る気候の変化についても、将来の予測についても、様々な見解が出されている。とくに関心が高い産業革命以降から現在に至る地球の気温上昇の原因に関して、見解は次の二つに大別される。なお、19 世紀末からの測定値についても論争があったが(“Climategate”事件)、ここでは、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) や気象庁のデータに従う。

第 1 の見解 (かりに人為派とよぶ)、人間活動の影響を重視するもので、IPCC が中心である。この見解は、地球平均気温は、19 世紀から上昇し 20 世紀後半に顕著に上昇したとする。20 世紀の 100 年に 0.6・0.7 °C 上昇した。そして、20 世紀後半の気温上昇は、ほぼ間違いなく人間活動の急拡大ともなって排出された温室効果ガス (CO₂ が主) の急増が原因だと主張する。

図 1 は、5 次 IPCC 報告書 (5IPCC, 2014) で証拠として示されたもので (4IPCC (2007) もほぼ同様)、この図をもとに、20 世紀後半の気温上昇は、人間活動が主因である結論している。すなわち、20 世紀後半に観測された気温上昇は、自然変動だけを考えたシミュレーションでは再現できないが、人為的起源の温室効果ガスを加えたシミュレーションによりはじめて観測結果と合う。

新聞報道によれば、IPCC 関係者は、産業革命頃から 20 世紀末までについても、気温は単調に上昇し、それが人為的な温室効果ガスによると主張しているという。しかし、下記「要約」には 20 世紀後半についてだけ述べられている。実際、20 世紀前半から中

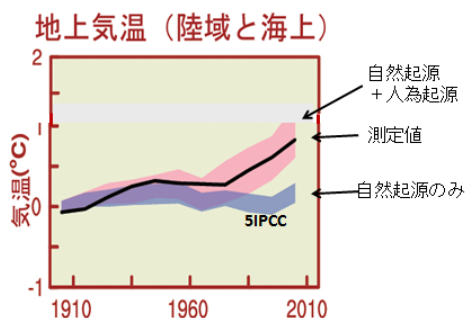


図1 地球温暖化のシミュレーション

測定された地球平均気温とシミュレーション結果を比較したもの(1900-2010, 5IPCC)。自然起源だけでは合わないが、人為起源を加えると観測値(実線)とわりとよく合う。気候モデルの違いによりシミュレーション結果には幅がある。

盤については、シミュレーション結果が測定値を再現しているとは言い難い。

なお、IPCC 報告の全体は膨大なので、ここでの議論は IPCC 報告の「政策決定者向け要約」(和訳)とこれに関連するいくつかの解説書を参考にした。この「要約」は国際政治による調整の産物であるが、それには、「人類が排出する二酸化炭素などの温室効果ガスが前世紀より増加し、地球温暖化が起こっている。従って、人為的な CO₂ の排出を大幅に低減して、21 世紀末までの気温上昇を 2 度以下にすべきである」とある。しかし、元来、IPCC は、科学的成果のとりまとめが目的なので、報告書の本体で気温上昇の許容限度について断言しているか定かでない。

もう一つの見解(自然派)は、近年の気温上昇の主因が過去に見られる自然変動の続きであると主張する。これは赤祖父俊一氏に代表されるもので、伊藤公紀(「地球温暖

化」, 2003)、丸山茂徳氏(「地球温暖化論に騙されるな!」, 2008)、渡辺正氏(「地球温暖化神話」, 2012)も自然変動を重視する。

赤祖父氏によれば(「正しく知る地球温暖化」2008)、1880 年以降の気温上昇は、16、17 世紀にあった地球の小氷期(英国のテムス川の凍結や日本の諏訪湖の御神渡り多発の時期)からの緩やかな気温上昇が主要な過程である。地球気温は 18 世紀ごろから約 0.5°C/100 年の速度でほぼ直線的に上昇していて、全体の気温変化は、この直線的变化に十数年周期で起こる別の自然変動が重なったものとして理解される(図 2)。

この変動は、人間活動による CO₂ 排出が増加した時期よりも以前から存在するので、自然変動である。自然変動には、太陽の活動(活動が活発な時に増える黒点や太陽風)、

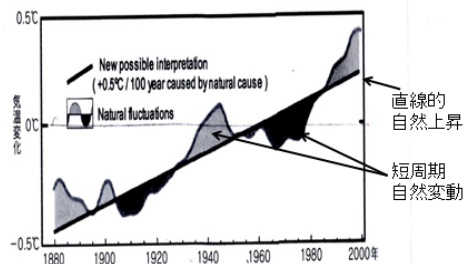


図2 地球気温の変化(1880-2000)

自然変動による小氷期からの直線の上昇に、同じく自然起源の周期的変動(正負)を重ねると、観測結果が説明できる(赤祖父, 2008)

地球の公転や自転の変動(ミランコビッチ・サイクル(註 2)、火山活動などがある。

赤祖父氏の評価では、20 世紀後半は人為的な原因も寄与しているが、18 世紀以降の自然現象による直線的気温上昇が 0.5°C/

100年、20世紀の気温上昇が0.6 - 0.7°C/100年を考えると、人為起源の影響は全体の1/6 (から2/7)程度にとどまる(図2参照)。今後の予測はしていないが、将来の課題は地球温暖化よりエネルギーと食糧であるとした。丸山氏は、将来の気温低下を心配している。

両見解の一番の違いは、20世紀全般にみられる気温上昇を19世紀以降の産業革命の発展によるとみるか(人為派)、16, 17世紀の小氷期からの回復期とみるか(自然派)という点にある。これに加え、20世紀中盤(20-30年間)の気温下降を、過去に続く短周期の自然変動とみるか(自然派)、そうでないとみるか(人為派。火山活動や測定法の変更)の違いがある。

なお、5IPCC報告によると、放射強制力(気温の変化を起こす効果を放射エネルギーの収支であらわした地球温暖化効果)は、CO₂が最大で、メタン、ハロカーボン類がこれに続く。水蒸気の放射強制力は示されていないが、水、水蒸気の総合的な効果は小さいとしている。

3. よくある誤解

気候変動とその原因を考える前に、地球温暖化に関する明らかな誤解に改めて注意を喚起したい。一時、身の回りの不都合な現象を何でも地球温暖化のせいだとする言説が新聞やテレビによく登場した。その後、この手の言説は影をひそめていたが、最近になってまた流行の兆しがある。

たとえば、

(1) 地球温暖化を肌で感じるという人がいるが、それはあり得ない。地球の平均気温上昇は1年間で0.01°C程度である。毎日毎

年の気温変化が10°C以上あるなかで、0.1°C以下の変化を肌で感じることはない。たしかに、東京の気温がこの半世紀で上昇しているとは感じる。おそらく、これは、大都市特有のヒートアイランド現象と地域的偏りが重なったもので、地球全体で起きている現象ではないであろう。

(2) 氷河が崩落する写真や氷河が後退する話題もよく出るが、これは温暖化のせいとはいえない。氷河は川であり、氷河が流れて崩落するのは当たり前自然現象である。なお、19世紀以前に始まった氷河の後退も少なからずあるという。

(3) 海面の上昇により、南洋の小さい島々が水没の危機にあるという記事や映像を今でもよく見る。地球温暖化のせいで海水面が上昇したためだという。しかし、これもありえない。20世紀の平均の海面上昇は、100年で20センチメートル以下、10年に2センチメートル以下。干満の差が数メートルに達するのにくらべれば、さざ波程度でしかない。水没の本当の原因は、おそらく、地盤沈下か土地の乱開発か暴風雨による高波であり、地球温暖化とは無縁であろう(杉山大志「地球温暖化とのつきあいかた」2014)。

4. 過去の気候変動 — 測定値と推定値

まず過去の気温変動をいくつかの図を通して俯瞰的に眺めてみよう。とくに、図の横軸(時間目盛)の違いに注意していただきたい。ただし、古い時代は、氷床中の気体分析、年輪の解析、古文書の記述からの推定値である。また、データが地球全体の代表としてよいかという点にも注意を要する。現在も気温が上昇する地域と低下する地域が共存

している。

地球は、46億年前の誕生以来、劇的な気候変動を度々経験した。最近の80万年を見ても、図3aのように約10万年を周期とする氷期と間氷期があり、約10°Cの変化がみ

られる（氷期・間氷期サイクル）。面白いことに大気中のCO₂濃度もほぼ同じ周期の変動がある（因果関係は未解決）。最終の氷期は約1万年前に終了し、その後の温暖な気候の恩恵を受けて人類は文明を育てた。

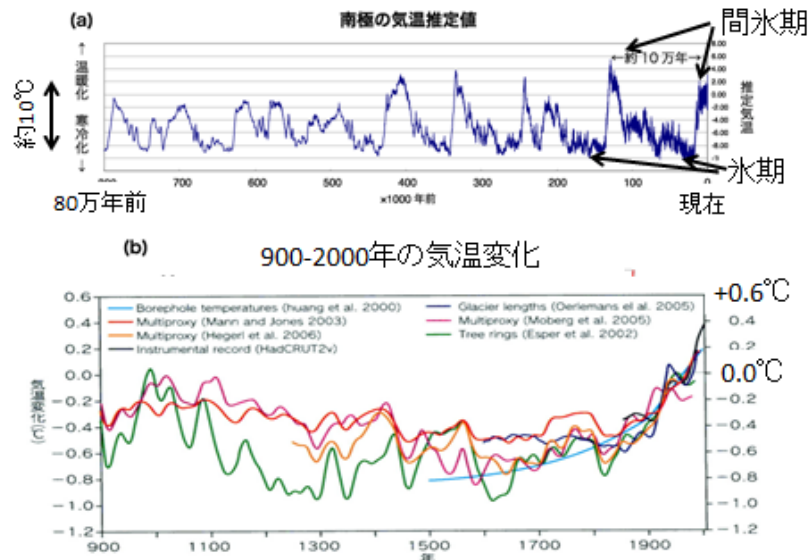


図3 a. 80万年前からの地球気温の変化

南極気温の推定値（阿部学、国立環境研 HP）。気温の低い期間が氷期、その間のやや短い気温が高い期間が間氷期である。氷期、間氷期とも多数の気温の小変動がある。

図3 b. 過去1200年の気温変化8（米国科学アカデミー、2006）

図3aの横軸幅を拡大したデータを見ると（拡大図は示していない）、氷期にも間氷期にも数十年周期と千年弱周期の数°Cの気温変動が多数ある。当然ながら推定値にバラツキはある。問題にしている16、17世紀の小氷期は、この変動の一つと考えられる。

温暖化により氷河が解けた時代には海面が大きく上昇した。「縄文海進」と呼ばれる気温の高い時期には（約6000年前）、日本付近の海面は今より数十メートル高かったという。実は、世界全体では海面は百数十メートル上昇したのだが、ちょうど日本列島

が隆起した時期なので、この程度の上昇ですんだという考えもある。この時代、関東平野の半分は海の底にあった。

地球温暖化問題に関係の深い紀元900年から今に至る気温変化について、米国科学アカデミー（NAS）がまとめたものを図3bに示す。NASの作業の契機となったのが、1998年のMannらの報告である。気温が900年ごろから緩やかに直線的に低下した後、20世紀になって急激に上昇したとする。その形からホッケー・スティック曲線とよばれ、いかにも近年の人間活動の急拡大に

より気温が上昇したように見えたため、地球温暖化論争の火付け役の一つとなった。そして、初期の IPCC 報告で重要な役割を果たした。

ところが、その後、この報告にはいくつかの重大な誤りが指摘された。そこで、NAS が、地球温暖化の議論を適正化するため、既往の報告の中から比較的信頼性の高いものを集めてまとめたのが図 3b である。ここでもかなりバラツキがあることに驚く。この図には、上述の Mann らの報告も採用されているが、多くの曲線が交錯する中に埋没してホッケー・スティック曲線の存在はよく見えない。

図 3b から全体の傾向を導き出すのは容易ではないが、紀元 1000 年前後に気温の高い時期があり（中世温暖期）、いったん、気温が低下した後（16, 17 世紀の小氷期）、1800 年頃から再上昇し始めている傾向が

読み取れるのではないだろうか。20 世紀後半の気温上昇が加速して見える点は、今後注視する必要があるだろう。

20 世紀中の変化を図 4 に示す（毎年の変動が大きいので、前後 5 年計 10 年分の変動を平均して表示し長期の変化を見やすくしたもの。10 年平均）。全体の変化を直線で近似したものがあるが（気象庁ホームページ）、この図の変化をよく見ると、おおよそ 4 本の折れ線からなることが分かる。つまり、1900 年から 1940 年頃まで上昇（30-40 年間）、1940 年頃から 1960 年頃は下降（20-30 年間）、そしてその後 2000 年頃までの再上昇である（30-40 年間）。そして、2000 年からしばらく停滞していた（約 15 年間）。折れ線（破線）は筆者が加えたもの。図 1, 2 の傾向とほぼ合っている。2014-16 年は再び上昇したが、数年の変動だけで長期の変化を判定することはできない。

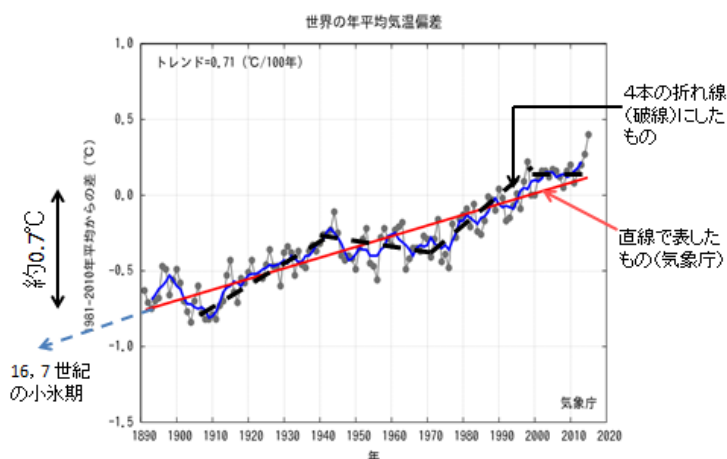


図 4 20 世紀の地球平均気温の変化（1890-2015 年の各年平均値と 10 年平均）

黒丸（各年）、曲線（10 年平均）、直線は気象庁 HP から。4 本の折れ線（破線）は筆者が加筆。

5. 過去における気温以外の変化

5 IPCC 報告は、1950 年以降、気温、大雨、

干ばつなどの異常現象の強度や頻度が増えたと述べている。しかし、気象庁のレポート

によると、異常気象は、兆候はあるものの明確ではないという。

世界の平均海面水位は徐々に上昇している。海水温上昇による海水の膨張と陸地からの雪氷の流入によるとされる。しかし、その変化は、既述のように、波の高さや干満の差に比べるとはるかに小さい。

北半球の積雪面積は徐々に減少している。北極海の海氷面積は、もともと季節変動が非常に大きいのだが、全体として少しずつ減少する傾向にある。この原因として 5IPCC 報告は地球温暖化を示唆している。ただし、南極では雪氷が増加したとの報告があるという。

大気中の CO₂ 濃度は、1900 年から 2015 年まで毎年の季節変動を繰り返しながら（植物のライフサイクルによる）、300 ppm 弱から 400 ppm 超に増加した。大昔には、CO₂ 濃度が今の 10 倍あったそうだが（その頃は気温も海面も高かったらしい）、1 万年前から 19 世紀に至るまでは 300 ppm を越えず、産業革命以前の 1000 年間は、270-290 ppm でほぼ一定であったと推定されている。したがって、近年の濃度上昇が顕著であることは確かである。

6. 過去の気温変動の原因と未来予測

a. 過去の気温変動のまとめ

既述のように、過去には大きな気温変動が度々あった。10 °C 程度の気温変化を伴う約 10 万年周期の氷期・間氷期サイクルがあり、これとともに、大気中の CO₂ 濃度も変化した。両者はほぼ同期しているが、どちらが先行し、どちらが原因なのかについて議論はあり、結論は出ていないようである。今後、このサイクルが繰り返されるとすれ

ば、今は、小さな変動を繰り返しながら次の氷期（10 万年後？）に向かう長期的な気温下降の途中ということになる（図 3a 参照）。これらはいずれも自然要因による変化である。

最後の氷期以後（つまり間氷期）にも自然要因による小変動が多数ある。中世温暖期（5IPCC 報告は懐疑的だが、おそらく存在した）とその後の小氷期（16, 17 世紀。存在はほぼ確か）はそれらの小変動の一つである。19 世紀ごろからの地球気温の緩やかな上昇が、人為的な原因なのか、それとも自然変動なのかで見解が分かれる。両方の要因とも気温上昇に寄与していると思われるが、その大小関係が問題である。

筆者は、以下を理由に、20 世紀における 0.6 – 0.7°C の気温上昇のうち、自然要因が少なくとも半分程度あると考えている。まず、過去に見られた変動は将来も繰り返されるに違いないこと。つぎに、自然説（0.5°C / 100 年の直線の上昇と ±0.2°C の短期変動の重なり）は半定量的であるものの過去数百年の気温変化を無理なく説明できること（図 2、図 4）。他方、シミュレーションを基礎にした人為説は、1950 年前後と直近との 2 回あった気温停滞を合理的に説明できない。1950 年頃から CO₂ 排出量は急増したが、気温変化には対応する変化が見られないことも、人為起源が最大要因とは考え難い理由である

太陽活動の盛衰（黒点や入射光の強度）と気温の間に見られる強い相関は、気候変動のすべてを説明できるわけではないが（他の仮説も同様だが）、注目すべき事実で、自然変動の重要性を示唆する。もうひとつ忘れてならないのが水蒸気と水の影響である。

水蒸気の温室効果は最大で、その濃度は変動する。また、寒冷化効果があるとされる局所的な雲などの影響を、粗いメッシュ（100 km² 格子）のシミュレーションでどのように処理できたのか判然としない。

b. 未来予測

5IPCC 報告で予測された 21 世紀末（80 余年後の未来）の気候がしばしばマスメディアを賑わせる。これは、IPCC がコンピューターシミュレーションの結果をとりまとめたものである（註 3）。第 5 次報告で想定された未来シナリオ群は、CO₂ 濃度の変化の程度を変えたもので結果のまとめを表 1 に示す（高位 2、中位、低位の 4 つの代表的濃度経路、鬼頭昭雄「異常気象と地球温暖化」2015）。第 4 次報告と異なり社会経済的な変化には直接的にはふれていない。

これらシミュレーションによれば、21 世紀末には 20 世紀末に比べて 0.3–4.8 °C 上

表 1 5 IPCC の未来予測（大気中の二酸化炭素濃度と気温上昇）

	21 世紀末 CO ₂ 濃度 ppm	2081-2100 まで の気温上昇（カ ッコ内は平 均）°C
低位安定	421	0.3 - 0.7 (1.0)
中位安定	538	1.1 - 2.6 (1.8)
高位安定	670	1.4 - 3.1 (2.2)
高位参照	936	2.6 - 4.8 (3.7)

昇する。また、海水面は 0.40–0.82 m 上昇すると予測されている。ただし、これらのうち最大値の 4.8°C と 0.82 m は、二酸化炭素濃度が 21 世紀末に 936 ppm になるシナリオであり、最近の CO₂ 濃度の上昇速度や

CO₂ の排出削減努力を考えると可能性は小さい。低濃度シナリオも、すでに 400 ppm を超えているので可能性は低い。

肝心の IPCC 予測の確かさであるが、これは二つの要因に左右される。第一は、コンピューターシミュレーションの信頼性である。その信頼性は、過去の観測データをどの程度再現できたかにより判定するしか方法はない。頼りは再現性だけなので、各気候モデルの再現性の詳しい検証が重要である。要因の第二は、二酸化炭素排出量を左右する経済成長とエネルギーの低炭素化率など社会経済的要因の予測である。これらの予測はきわめて難しく、信頼性が高いとは言えない。

5IPCC 報告によれば、1870 年以降の人為的に排出した CO₂ の累積量と気温上昇との間に、最近よく引用される図 5 の相関がある。この図の初めの 2010 年までが観測データである。それ以降は、CO₂ を気温上昇の主因とした気候モデルによる計算値であるから（4 つのシナリオにより 4 つの終点がある）、CO₂ 排出量とよい相関があつてむしろ当然であろう。

7. まとめ

これらの予測をもとに、気温上昇を抑制する手段（緩和策）や気温上昇による各種被害を低減する手段（適応策。註 4）を論じることになるが、すでに温暖化の原因について長々と書いたので、この論は別の機会に譲りたい。気候は、膨大な数の要素が複雑に絡んだシステムで、未解明の部分が多い。数年先の天候の予報もそうは当たらないことを思えば、超長期の予想が困難なことは想像に難くない。

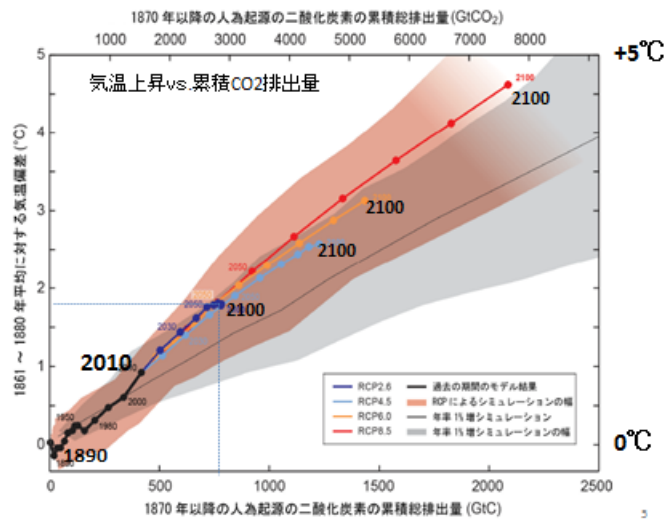


図5 気温上昇と二酸化炭素の累積排出量（1870-2100年、5IPCC）

2010年までが実測値。それ以後は予測値で、4つのシナリオで異なる（表1参照）。

まずは、気候の科学が、若い学問であり地球温暖化について断言するには力不足であることを認めるべきであろう。そして、予測には大きな不確実性があることを前提に、気候変動のリスクと対策を考えるべきである。この点に関しては、地震学と地震予知の関係が教訓的である。今は、予知より防災・減災が重視されている。

初めに述べたように、筆者は、「自然変動要因と人為起源の要因があるが、20世紀の気温上昇に対しては前者の寄与が少なくとも半分程度ある」と考える。それゆえに、穏やかだが確実な対策を選ぶのが良いと思っている。

この問題で科学者が果たす役割は非常に大きいが、政治と国民感情の強い影響のもとで、科学者がその責任をしっかりと果たせるか大いに危惧される。科学者は、分からないことを分かったように発言したり、いたずらに不安を煽ったりしてはならない。

分からないことや不確実なことをありのまま正直に社会に提示することが、科学者倫理の基本である。

2017.3.7

註1) 地球平均気温の求め方

世界の約6,000か所の観測データをもとに算出される。これは、時代による観測法、測定点の変化の影響を受けている。1980年ごろからは人工衛星の観測データもある。ヒートアイランド現象は補正したとされる。

註2) ミランコビッチ・サイクル

氷期の周期的発現を説明する仮説。(1)地球公転軌道の偏り(離心率)の変化(約10万年周期)、(2)地球自転軸の歳差運動(約2万年周期)、(3)地球自転軸の傾きの変化(約4万年周期)と地表との相互作用により、氷期、間氷期が周期的に訪れるとするもので、実際とかなりよく合うとされる。

註 3) 気候モデル

IPCC では、20 機関による 40 の気候モデルのシミュレーション結果を図 1 のようにまとめた。20 世紀後半については、シミュレーションの結果は実測された気温上昇とほぼ合っている。しかし、19 世紀末から 20 世紀半ばにかけての観測データを再現しているかどうかは判然としない。少なくとも 20 世紀における 2 回の気温停滞をシミュレーションが再現したとはいえない。

また、数多い気候モデルの中で、どのモデルの再現性が良かったのかが分からない。再現性の良いモデルを採用して将来予測をするのがよいのではないか。

註 4) 温暖化リスクと適応策

5IPCC 報告で予想された気候変動による被害は、海面上昇による一部地域の水没、生態系の変化（北へ移動。感染症領域の拡大）、農耕・生活適合地域が現在の温暖地域から寒冷地域へと移動、気候変動（異常気象の頻度および強度）の増大などである。これに対して日本政府は品種改良、堤防整備、健康管理などを含む国家戦略「適応計画」を発表した（2016 年）。