

大気と海洋はどのように変化したか

江守正多 (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)

えもり せいだ

IPCC 第4次評価報告書は、温暖化の観測事実に関して「気候システムの温暖化には疑う余地がない」、[20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性がかなり高い]と結論づけた。異常気象に関しても、高温日の増加は人為起源である可能性が高いとした。さまざまな不確実性が科学的に検討された後に、このような強い表現が採用されたことの意義はきわめて大きい。

IPCC 第4次評価報告書の観測事実に関わる部分について紹介する機会を与えられたが、筆者自身はこの部分の執筆に関わったわけでもなく、また、筆者の専門は温暖化の観測事実よりもむしろ将来予測である。とはいえ、温暖化の研究を行っている、一般の方やマスコミの方から、観測事実に関するご質問を受けることは多い。最もよくある質問は次の二つである。

(1) 温暖化は人間のせいなのですか？ 自然のサイクルの一部ではないのですか？

(2) 近年の異常気象の増加は温暖化のせいですか？

両者はある意味で対照的である。前者は、温暖化が本当に問題かまだ少し疑っている人の質問であり、後者は温暖化が大問題だと既に強く信じている人に多い質問である。どちらもシンプルな質問であるが、科学的・客観的に答えるのはなかなか難しい。

温暖化の観測事実に関する問題を難しくしている原因のひとつは、気候はさまざまな外部的、内部的要因で絶えず変動していること、もうひとつは、われわれに利用できる観測データは常に限られていることである。すなわち、気候がさまざまな要因で変動しているがゆえに、温暖化の傾向を見極めるためには、できる限り長期間・広範囲・

高空間密度かつ高精度のデータが必要である。しかし、一般に、時間を過去に遡るほど測定されているデータは少ない。代替データから推定する試みも数多くなされているが、多くの場合は高い精度の推定を得ることが難しい。

世界の研究者は、この困難な問題にどのように取り組んできたのだろうか。そして、IPCC 第4次評価報告書では、6年前の第3次報告書以降、観測事実に関する知見にどんな進歩があったのだろうか。そのあたりを軸に、最新の報告の内容を紹介する。以下で、箇条書き部分はIPCC 第4次評価報告書第1作業部会の政策決定者向け要約を気象庁が日本語訳したもののから文単位で抽出したものである。また、雪氷圏に関する観測事実は本特集の藤井氏の解説に譲るため、ここでは大部分を割愛する。

最近数年間の変化

当然ながら、第3次報告書以降の6年間にも気候は変化し、解析可能なデータが6年分追加された。これが観測事実に関する新たな知見をもたらすことは自明である。そこで、まずはここ数年の新たな気候変化が、われわれの事実認識にどのような影響を与えたかを見ておこう。以下で、[]

内は推定の90%信頼区間を表す。ppmは存在比100万分の1, ppbは存在比10億分の1, GtCは炭素に換算した排出量(10億トン単位), GtCO₂は二酸化炭素排出量(10億トン単位)を表す。

- 二酸化炭素の世界的な大気中濃度は、工業化以前の約280 ppmから2005年には379 ppmに増加した。二酸化炭素濃度の増加率は、年ごとの変化が大きいものの、最近10年間の上昇率(1995~2005年平均:年当たり1.9 ppm)は、連続的な大気の直接観測を開始して以来の値(1960~2005年平均:年当たり1.4 ppm)と比べて大きい。
- 化石起源の二酸化炭素の年間排出量は、1990年代の年当たり6.4[6.0~6.8]GtC(23.5[22.0~25.0]GtCO₂)から、2000~2005年には、年当たり7.2[6.9~7.5]GtC(26.4[25.3~27.5]GtCO₂)に増加した(2004, 2005年のデータは暫定値)。
- 世界的な大気中のメタン濃度は、工業化以前の約715 ppbから、1990年代のはじめには1732 ppbに増加し、2005年には1774 ppbとなった。メタン濃度の増加率は1990年代のはじめ以降鈍化した。これは、この期間の総排出量(人為起源および自然起源の排出量の合計)がほぼ一定であったことと整合している。

メタンの大気中濃度増加率が鈍化しているのは科学的には興味深い³⁾が、より重要であるのは、二酸化炭素の化石起源排出量と大気中濃度上昇率がともに増加していることである。すなわち、温暖化の主要な原因である二酸化炭素濃度の増加は加速しているらしい。

- 最近12年間(1995~2006年)のうちの11年間の世界の地上気温は、測器による記録が存在する中(1850年以降)で最も温暖な12年の中に入る。
- 過去100年間(1906~2005年)の長期変化傾向の最新値である100年当たり0.74[0.56~0.92]°Cは、第3次評価報告書で示された1901~

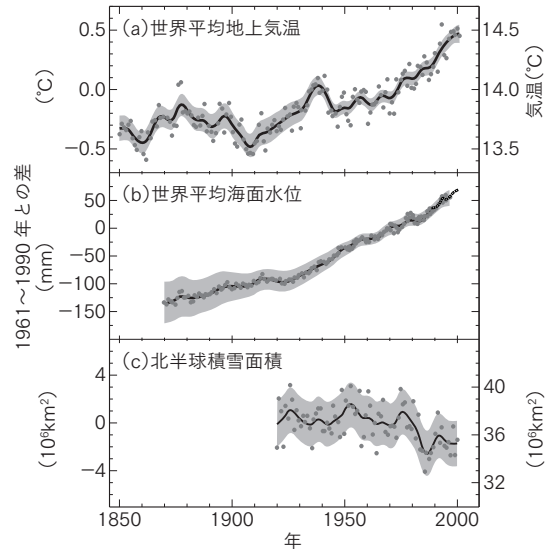


図1—(a)世界平均地上気温; (b)潮位計(●)と衛星(破線)データによる世界平均海面水位; (c)3~4月における北半球の積雪面積、それぞれの観測値の変化。すべての変化は、1961年~1990年の平均からの差である。滑らかな曲線は10年平均値、丸印は各年の値をそれぞれ示す。陰影部は(a, b)既知の不確実性の包括的な分析から推定された不確実性の幅、(c)時系列から得られた不確実性の幅。(IPCC第4次報告書第1作業部会政策決定者向け要約の気象庁による日本語訳より。)

2000年の変化傾向である100年当たり0.6[0.4~0.8]°Cよりも大きい(図1(a))。

- 世界平均海面水位は1961年から2003年にかけて、年平均1.8[1.3~2.3]mmの割合で上昇した。1993年から2003年にかけての上昇率はさらに大きく、年当たり3.1[2.4~3.8]mmの割合であった。1993年から2003年にかけての海面水位上昇率の増加が10年規模の変動なのか、より長期的な上昇傾向の加速なのかは不明である(図1(b))。

世界平均の気温と海面水位はここ数年も上昇を続けており、その上昇率は加速する傾向にあることが示唆されている。しかしそれが「温暖化の加速」であるのか、自然の変動であるのかは明らかでない。ともあれ、追加されたここ数年のデータは、控えめにいっても、温暖化が引き続き確実に進行していることを確認するのに十分なものといっていよう。

気候のさまざまな要素の整合的变化

その他に第3次報告書以降の進歩として大きいのは、データセットの整備や解析方法の改良などにより、地上気温や海面水位以外の気候のさまざまな要素に変化が検出され、それらが互いに整合的に、温暖化が進んだときに期待されるような変化傾向を示していることである。いくつかを拾い出してみよう。

- 高層気象観測用のラジオゾンデ観測と衛星観測の新たな解析によれば、下部・中部対流圏の気温は、地上気温の記録と同様の昇温傾向を示す。また、両観測の解析結果は不確実性の範囲内で一致し、その結果、第3次評価報告書で指摘された不一致が大幅に軽減した。
- 大気中の平均水蒸気量は、陸域および海洋上ならびに上部対流圏で、少なくとも1980年代以降上昇している。この水蒸気量の増加は、昇温に伴って空気が保持できる水蒸気量の増分とおおまかには一致している。
- 1961年以降の観測によれば、少なくとも水深3000 mまでの層の全海洋の平均水温は上昇し、気候システムに加えられた熱の80%を超える部分は海洋が吸収していたことが示される。
- 南北両半球において、山岳氷河と積雪面積は平均すると縮小している(図1(c))。

とくに、第1点の衛星観測による中部対流圏の気温変化傾向は、以前の解析では上昇傾向が見られないとされており、温暖化懐疑論者がたびたび指摘する点のひとつであったが、解析方法の改良により地上気温と同様の上昇傾向が認められた。このように気候のさまざまな要素が整合的に変化していることは、温暖化が進んでいることの強い裏づけとなる。それぞれの要素の変化に関しては、データの期間・空間被覆・精度などが限られていることから、小さくない不確実性が存在するが、こうして多くの証拠を組み合わせることで、全体としての証拠能力が高まっていることに注意

してほしい。結果として、第4次報告書には次の結論が記されるに至った。

- 気候システムの温暖化には疑う余地がない。このことは、大気や海洋の世界平均温度の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることから今や明白である。

さまざまな不確実性が科学的に検討された後に、このような断定的な表現が採用されたことの意義はきわめて大きいだろう。

温暖化は人間のせいかな？

次に、よくある質問のひとつである「温暖化は人間のせいかな？」について見てみよう。この件についてIPCC第4次評価報告書には、国内の報道でもよく紹介された以下の結論が記されている。

- 20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性がかなり高い。これは、第3次評価報告書での「過去50年にわたる、観測された昇温のほとんどが温室効果ガス濃度の上昇によるものであった可能性が高い」との結論を進展させるものである。

では、第3次報告書以降に一体どんな進歩があったのだろうか。そのことを見る前に、「温暖化が人間のせいである」ことを科学的に示すためにはどのような要件が必要かを考えてみよう。

第一に、観測された気候変化が、内部的な自然変動では考えられないほど大きいことを示す必要がある。これを気候変化の「検出」(detection)という。内部的な自然変動とは、エルニーニョ現象に代表されるような、大気、海洋、陸面、あるいはその結合系のもつ自励的でランダムな揺らぎのことである。つまり、観測された気候変化が、ランダムな偶然によっては起こりえない「異常」な

ものであるかどうかを統計的に検定するのである。この際、内部的な要因のみにより変動する(しかも長期の)観測データというものは存在しないため、自然変動の範囲は気候モデルのシミュレーション結果で代用することが多い。ともあれ、前節までで紹介したさまざまな変化は、そのようなテストを経て「検出」されたものである。

次に、検出された変化が、気候を変化させるさまざまな外部的要因(これを「強制力」とよぶ)のうち何によって説明でき、何によっては説明できないかを調べる必要がある。これを気候変化の「原因特定」(attribution)という。ここでは再び気候モデルによるシミュレーションの助けを借りることになる。たとえば、自然起源の(人間のせいではない)強制力である太陽活動や火山噴火の履歴を条件として与えて気候モデルによる20世紀の気候再現シミュレーションを行った場合、観測された変化傾向と整合的な結果が得られるか、一方、人為起源の(人間のせいである)強制力である大気中二酸化炭素濃度等の履歴を条件として与えた場合はどうか、といったことを、やはりランダムな変動の不確実性を考慮しつつ統計的に検定するのである。すなわち、ある観測された気候変化が「人間のせいである」とは、人間のせいである強制力を与えたシミュレーション結果と観測データが整合的であり、かつ、人間のせいでない強制力のみを与えたシミュレーション結果と観測データが整合的でない、ということである。

さて、このロジックを用いて近年の気候変化を「人間のせいである」と原因特定する仕事の根幹は、基本的には第3次報告書の時点で完了していたといつてよい。第4次報告書までの6年間で新たに行われたことは、その「ダメ押し」である。具体的にいうと、第3次報告書までには、英国のひとつの気候モデルを用いて、20世紀の世界平均地上気温の上昇は人間のせいであるという原因特定が成功していた。これに続いて行われた多くの研究により、世界の複数の気候モデルを用いて、第4次報告書までに新たに以下のような知見が得られた。

- 地上および大気の気温、海洋の上部数百メートルの水温、および海面水位上昇への寄与に、気候システムの温暖化が検出された。また、原因特定の研究により、これらの変化すべてに対する人為的な寄与が確認された。対流圏の昇温と成層圏の降温の観測されたパターンをもたらした要因は、主に温室効果ガスの増加と成層圏オゾンの破壊の複合的な影響である可能性がかなり高い。
- 過去50年にわたって、南極大陸を除く各大陸において、大陸平均すると、人為起源の顕著な温暖化が起こった可能性が高い。観測された温暖化の分布(海上よりも陸域の昇温のほうが大きい)やその時間的な変化は、人為起源の強制力を取り入れたモデルによってのみ再現される(図2)。

このダメ押しによって、第3次の「可能性が高い」(IPCCでは可能性66%以上を表す)が第4次の「可能性がかなり高い」(可能性90%以上)に押し上げられたと考えてよいだろう。

ここでぜひ注意してほしいのは、シミュレーションと観測データの整合性といった場合、定性的にだけでなく、定量的にも整合することを求めているということである。すなわち、人間活動による大気中二酸化炭素の増加等がもたらした放射効果は、観測された気温上昇等の傾向を不確実性の範囲内で「量的にも」よく説明することがここでは主張されている。このことは、定性的な議論のみの場合と比較して、われわれの理解の信頼度を格段に押し上げている。ただし、ここでの量的な不確実性は決して小さくなく、なかでも人間活動がもたらしたトータル放射効果の見積りに不確実性が大きいことを併せて指摘しておこう。第4次報告書には次の一文がある。

- 第3次評価報告書以降、人為起源の温暖化や寒冷化が気候に及ぼす影響についての理解は向上した。その結果、1750年以降の人間活動は、世界平均すると温暖化の効果を持ち、その放射

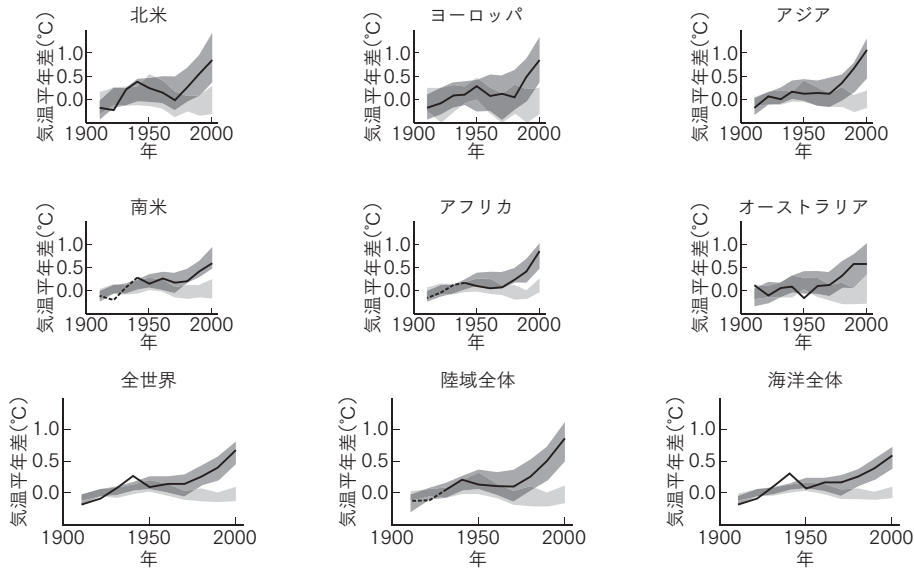


図2—観測された大陸規模および世界規模の地上気温の変化と自然起源および人為起源の放射強制力を用いた気候モデルによるシミュレーションの比較。観測された10年平均値は、1906～2005年の期間について示され(太線)、1901～1950年の平均と比較した各10年ごとの値を年代の中央にプロットしている。観測面積が全体の50%未満の期間は破線で示す。■帯は、太陽活動と火山による自然起源の強制力のみを考慮した5つの気候モデルによる19のシミュレーションの5～95%が含まれる範囲を示す。また、■帯は、自然起源と人為起源の放射強制力を共に考慮した、14の気候モデルによる58のシミュレーションの5～95%が含まれる範囲を示す。(IPCC第4次報告書第1作業部会政策決定者向け要約の気象庁による日本語訳より。)

強制力は $+1.6[+0.6\sim 2.4]Wm^{-2}$ であるとの結論の信頼性はかなり高い。

理解は向上したものの、この部分の不確実性を減らす努力は依然重要と見るべきであろう。

異常気象は増えているか？

もうひとつのよくある質問である「異常気象は増えているか」あるいは「異常気象の増加は温暖化のせいなのか」についてみてみよう。日本ではよく「異常気象」というが、これは気象庁の定義では30年に一度の極端な現象のことである。IPCCでは稀さを限定せずに「極端現象」(extreme event)という用語をよく用いる。いずれも、先ほど説明した気候の内部的な自然変動がランダムに揺らんでいるうちに、たまたま極端に振れた場合のことをいう、と理解しておけばよいだろう。したがって、温暖化しようがしまいが、30年に一度の豪雨や30年に一度の猛暑は定義上必ずやってくる。問題は、温暖化によって、過去には30年に一度

だった強さの豪雨や猛暑が、たとえば近年は10年に一度といった具合に、より頻繁にやってきているかどうかである。

温暖化は大問題だと強く信じている一般の方の中には、温暖化するとありとあらゆる異常気象が増えるというイメージをもっている人が多いようだが、第4次報告書の結論はどうだろうか。表1は、極端現象に関する第4次報告書の見解をまとめたものである(右端には将来予測の欄があるが、この部分については本特集の木本氏の解説に譲る)。いくつか記述を拾ってみよう。

- 過去50年間に極端な気温の広範な変化が観測された。寒い日、寒い夜および霜が降りる日の発生頻度は減少した。一方、暑い日、暑い夜および熱波の発生頻度は増加した。

温暖化によって暑い日は増えて、寒い日は減ったというわけであり、直感的にわかりやすい。これらの変化については、先ほど説明した統計的な原因特定の研究がなされており、人間のせいであ

表1——極端な気象現象のうち20世紀後半の観測から変化傾向が見られたものの最近の傾向、その傾向に対する人間活動の影響評価、および予測。(IPCC第4次報告書第一作業部会政策決定者向け要約の気象庁による日本語訳より。)

現象および傾向	20世紀後半(主に1960年以降)に起こった可能性	観測された傾向に対する人間活動の寄与の可能性	SRESシナリオを用いた21世紀の予測にもとづく傾向の継続の可能性
ほとんどの陸域で寒い日や夜の減少と昇温	可能性がかなり高い	可能性が高い	ほぼ確実
ほとんどの陸域で暑い日や夜の頻度の増加と昇温	可能性がかなり高い	可能性が高い(夜)	ほぼ確実
ほとんどの陸域で継続的な高温/熱波の頻度の増加	可能性が高い	どちらかといえば	可能性がかなり高い
ほとんどの地域で大雨の頻度(もしくは総降水量に占める大雨による降水量の割合)の増加	可能性が高い	どちらかといえば	可能性がかなり高い
干ばつの影響を受ける地域の増加	多くの地域で1970年代以降可能性が高い	どちらかといえば	可能性が高い
強い熱帯低気圧の活動度の増加	いくつかの地域で1970年代以降可能性が高い	どちらかといえば	可能性が高い
高潮の発生の増加(津波を含まない)	可能性が高い	どちらかといえば	可能性が高い

る可能性が高いと結論されている。気候変化によって揺らぎの振幅が大きくなり、寒い日も増えるという説もたまたま聞くが、そのような変化は報告されていない。第1近似としては、平均気温が上昇しながら、気候はそのまわりを今までと同じように揺らぐと思っておけばよさそうである。

- 大雨の頻度はほとんどの陸域において増加しており、これは昇温や観測された大気中の水蒸気量の増加と整合している。
- 1970年代以降、とくに熱帯地域や亜熱帯地域では、より厳しく、より長期間の干ばつが観測された地域が拡大した。昇温や降水量の減少に関係した乾燥の強化が干ばつの変化に寄与した。

これらの降水に関する変化については、統計的な原因特定は行われておらず、どちらかといえば人間のせいであるという半ば主観的な「専門家判断」が与えられている。

2005年にアメリカを襲ったハリケーン・カトリーナが大きな被害をもたらし、注目が集まる熱帯低気圧の変化傾向については、以下のような慎重な表現をとった。

- 1970年頃以降、これは熱帯の海面水温の上昇と関連して、北大西洋の強い熱帯低気圧の強度

が増してきたことを示す観測事実がある。この他、強い熱帯低気圧の活動度に増加傾向が示唆される地域がいくつかあるが、データの品質にはより大きな懸念がある。数十年周期の変動があることや、1970年頃に開始された定常的衛星観測以前の熱帯低気圧データの品質は、熱帯低気圧の活動度の長期変化傾向の検出を難しいものになっている。熱帯低気圧の年間発生数に明確な傾向はない。

検出に関してはいくつかの留保がついており、原因特定についても、どちらかといえば人間のせいであるという専門家判断に留まる。

以上のように、温暖化によって高い可能性で増加した異常気象(主に高温)と、温暖化の影響が比較的不明な異常気象(熱帯低気圧など)を分けて考えることが、冷静な議論を行う上で重要であろう。

* * *

以上見てきたように、世界の研究者が、限られた観測データを最大限に活かし、高度な統計手法やシミュレーションを援用しつつ、個々のデータのもつ不確実性を慎重に吟味した上で導き出した結論が、「気候システムの温暖化には疑う余地がない」であり、「20世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガスの増加によってもたらされた可能性が

なり高い」だったわけである。この強い結論を導くに至った背景にある膨大な科学的作業を想像すれば、このシンプルな記述の発するメッセージの意味はきわめて重いと受け取られるべきであろう。

むろん、個々の観測データの不確実性や期間・空間被覆の不十分さを指摘するのはたやすい。原因特定に用いられるモデルシミュレーションの不完全さを指摘するのも、あるいは現時点では十分に検討されていない過程(たとえば太陽活動の変化が宇宙線を通じてもたらす影響など)が存在する可能性を指摘するのも、またたやすい。しかし、これらの指摘が IPCC の主要な結論を揺るがすこ

とは、きわめて考えにくい。なぜならば、観測された気候のさまざまな要素の変化を整合的に、しかも量的に説明する統一的な自然描写・自然理解の体系は、人間活動による二酸化炭素等の増加によって地球が温暖化しているということを前提とすることによってのみ可能であるように見えるからだ。この前提に取って代わり、同様に統一的な説明を与えるような対立仮説は今のところ皆無である。人為起源の温暖化を未だ疑っている方がいるとしたら、ぜひこのような観点から、IPCC の結論を改めて評価してほしい。