

地球温暖化を気候モデルで予測する

吉森 正和

1. はじめに

「今世紀末、気温 4.8 度・海面 82 センチ上昇」、こんな見出しが昨年 9 月、新聞を賑わせました。これらの数字は人間の生活、生態系や生物多様性に深刻な影響を与える大きさです。根拠とされたのは、IPCC 第 5 次評価報告書の「自然科学的根拠」を担当する第一作業部会による報告書です。その「政策決定者向け要約」が昨年 9 月、100 を超える国の政府によって承認され、公表されたのです¹。

報告書によると、複数の社会経済想定の下で、21 世紀における地球平均の気温上昇は 0.3~4.8℃、海面上昇は 26~82 cm の範囲に入る可能性が高いとされています。したがって、上の見出しの数字は、正確には最大値に近く、実際、そのように記載している新聞もありました。氷河期の気温が今と比べて 5℃程度低かったと言われることから、4.8℃の上昇と聞くといかにも深刻そうですが、0.3~4.8℃と聞くとどう捉えてよいか戸惑ってしまいますね。

いったい、なぜこんなに予測の幅は広いのでしょうか。そもそも、こうした予測はどのように行われて、どの程度信頼できるのでしょうか。その中心的な役割を果たすのが、コンピュータの中に作られた仮想の地球、「気候モデル」なのです。本講義では、気候モデルを使った将来予測の世界を紹介します。

2. 気候モデル

気候モデルと専門家が呼んでいるものの実態は、コンピュータ・プログラムに過ぎません。モデルという言葉から連想されるように、このプログラムは現実の大気や海洋の流れといった、気候システムの挙動を再現するようにデザインされています。その骨格となるのが、物理法則、特に保存則です。保存則は、たとえば食べると直後に体重が増え、運動すると脂肪を燃焼するといった具合に、質量やエネルギーの収支のつじつまが合うことを意味します。これは、古今東西破られたことのない確かな法則です。ところが、こうした気候システムを表現する物理法則は、性質の悪い数式で表されていて、大数学者を持ってしても将来の状態を表す厳密な解を見つけることができません。そこで、コンピュータの力を借りて、力づくで役に立つ近い答えを求めめるのです。

しかし、コンピュータといえども、その計算能力には限界があります。雨粒の大きさはせいぜい数 mm くらいですが、地球をこんなに細かく区切って一つ一つ計算する

¹要約、全文ともに www.ipcc.ch から入手可能。要約については、<http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/> にて気象庁が邦訳を提供。

ことはとてもできません。実際には、100 km かそれより大きいくらいの格子に区切ってその平均状態を計算します。このとき、格子の中で現実には起きるけれども計算していない小さな現象が格子よりも大きな空間に及ぼす効果を的確に表現する必要が出てきます。これが簡単ではないのです。また、数式でどう表現してよいかまだよくわからない過程もあります。たとえば、最近、グリーンランド氷床などで、藻類などの微生物の繁殖が表面での太陽光の反射率を下げる可能性が指摘されています。この過程は現在の気候モデルではまだ表現されていません。このような理由から、気候モデルの予測には不確かさが生じます（図 1）。重要なことは、何が確かで、何がどれくらい不確かかを見極めることなのです。

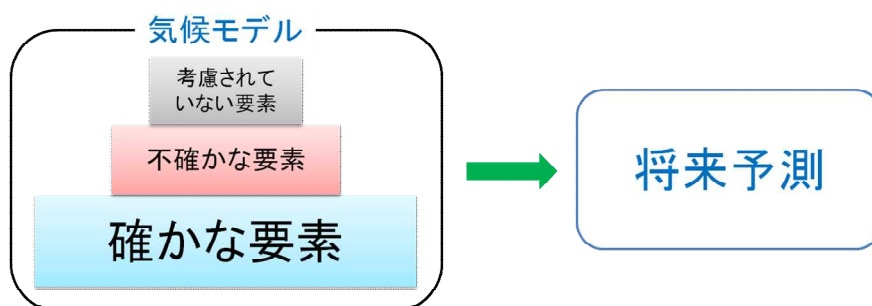


図 1：気候モデルの構成要素と将来予測（イメージ図）

3. 地球温暖化の予測

将来の気候を予測するのに最もオーソドックスな手順は、（1）まず、社会経済がどのように発展していくかという想定をし、（2）人間活動による二酸化炭素（CO₂）などの排出量を見積もり、（3）排出された CO₂ のうちどのくらいが大気中に濃度として残るかを計算し、（4）気候モデルを用いて気温や降水量などを計算するというものです。しかし現実には、気候の変化が植物の成長に影響を与え、さらに CO₂ 濃度を変化させたりするため、最近では（3）と（4）を同時に計算する地球システムモデルも利用されます。さて、第 4 次報告書では、実際このオーソドックスな方法がとられ、（1）と（2）から出てきた「排出シナリオ」に基づいて予測が行われました。一方、第 5 次報告書では、本来（1）～（3）の結果として出てくるべき「代表的濃度経路（RCP）シナリオ」を設定して予測が行われました。これは気候モデルの計算をできるだけ早く開始するための実務的な工夫であった一方で、第 5 次報告書の結果には（3）で生じる不確かさが直接は含まれていないことを意味します。また、第 4 次報告書の排出シナリオでは排出削減などの温暖化対策を考慮していないのに対して、第 5 次報告書の濃度シナリオでは対策をとった場合も含めてシナリオが設定されています。これらの違いが、21 世紀の温暖化が第 4 次報告書では 1.1～6.4℃と評価されたのに対して、第 5 次報告書では 0.3～4.8℃と評価された主な原因となっています。シナリオは予測というよりも、我々に与えられた「選択肢」と考えた方が良さそうです。

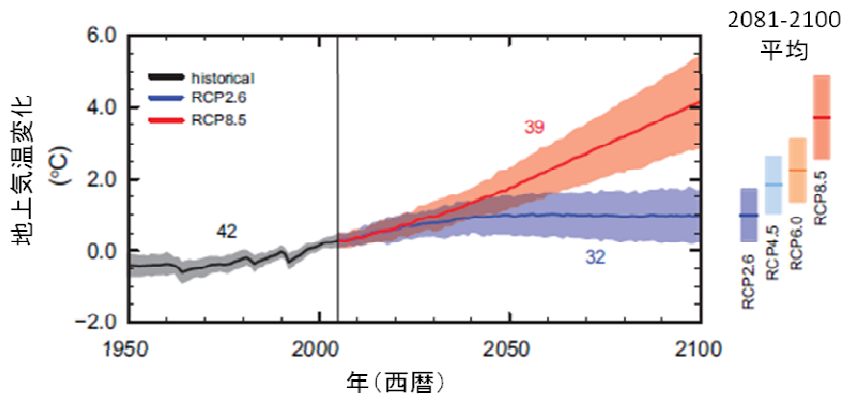


図 2：20 世紀後半から 21 世紀末までの気候モデルによる地球平均気温の再現と予測 (IPCC 第 5 次評価報告書 WGI 政策決定者向け要約 Figure SPM.7(a)を一部日本語化)

4. 天気予報との違い

「二週間先の天気も予報できないのに、百年先の気候を予測できるわけがない」、という不満を耳にすることがあります。尤もらしく聞こえるのですが、実は事情が違うのです。子供の行く先を考えてみましょう。北にも南にも公園がある場合、どちらの公園に行くかは、今どちらの方角へ歩いているかが重要な目安となります。しかし、何日も経った後に行く公園は、今歩いている方角ではなく、気まぐれという「揺らぎ」によって決まるのです。したがって、二週間後にどちらの公園に行くかを予報するのは難しくなります。一方で、日が暮れると、家に向かうことが予測されます。これは今どちらの方角に歩いているかに関わらず、暗くなると家路に着くからです。おそらく、二週間後もそうでしょう。今の状態よりも日が暮れるという「外的要因」に支配されているのです。天気予報は前者、気候予測は後者の例に近いのです。つまり、百年先の気候には今の天気の状態や揺らぎよりも CO₂ 濃度がどのくらい高くなるかがよっぽど重要なのです。別の例で言えば、今年の冬が去年の冬よりも平均して暑くなるか寒くなるか (季節予報) は難しい問題ですが、日射の違いという外的要因によって支配されているため、今年の冬が平均して今年の夏よりも寒くなることは確かに言えることなのです。

実は、図 2 に示されている温暖化の程度と予測のばらつきを調べると、21 世紀の初期には自然の「揺らぎ」の影響が大きく、中期になると気候モデルの不確かさの効果が大きくなり、末期になるとシナリオによる違いが効いてくるのがわかっています。図 3 に示されているのは、あるモデルで「今の状態」を変えてみたときにどのくらい将来予測に影響がでるかを見たものです。21 世紀の温暖化に今の状態が大局的にはあまり影響しないことがわかります。気候モデルで予測された地球温暖化を理解するためには、いろいろな要因が、いろいろな時間スケールで不確かさをもたらすことを知る必要があるのです。

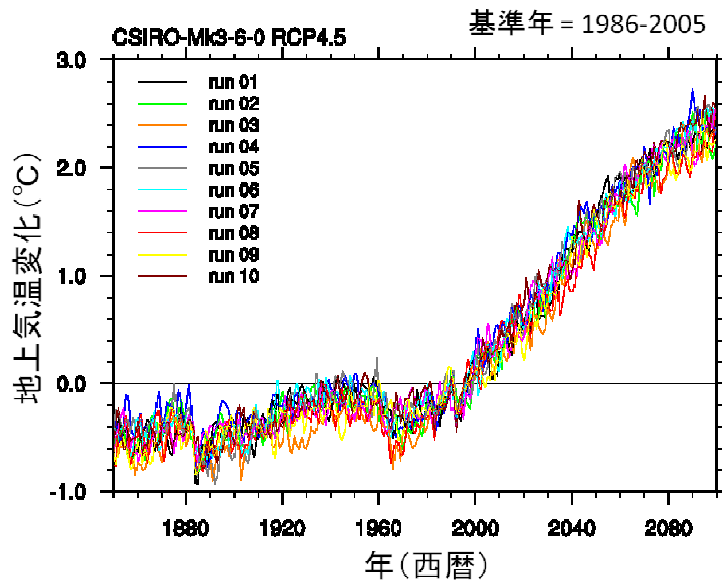


図 3：一つのモデルで 10 の異なる「今の状態」（1850 年初期値）から始めたときの RCP4.5 シナリオ下での地球平均地上気温の年々変化（CMIP5²データより作成）

5. IPCC のことば

これまでの知識を持って、もう一度、政策決定者向け要約に目を向けてみましょう。要約には「可能性が高い」あるいは「非常に高い確信度」といった表現が使われています。たとえば、将来の地球平均気温については、

- 2081～2100 年の世界平均地上気温の 1986～2005 年平均に対する上昇量は、濃度で駆動される CMIP5 モデルシミュレーションから得られる幅によれば、RCP2.6 シナリオでは 0.3～1.7°C、RCP4.5 シナリオでは 1.1～2.6°C、RCP6.0 シナリオでは 1.4～3.1°C、RCP8.5 シナリオでは 2.6～4.8°C の範囲に入る可能性が高いと予測される

と書かれています（気象庁訳）。IPCC を「読み解く」には、この表現規則とその背後にある統計的意味を知ることが大切です。

6. おわりに

本テキストでは、新聞の見出しや政策決定者向け要約の中の一文が持つ意味について、少し掘り下げてみました。実際に、非専門家が IPCC 報告書を読み解くことは難しいと思いますが、一文一文ごと各国政府から承認を得た文章には、深い意味が隠されていることが垣間見られたのではないかと思います。講義では、もう少し気候モデルの説明に重心を置きつつ、具体的な将来予測の結果も紹介したいと考えています。

² 「第 5 次結合モデル相互比較プロジェクト」のことで、世界中の気候モデルで共通の実験を行い、IPCC 第 5 次評価報告書の基礎となるデータを提供した国際プロジェクト。