

本予測計算での不確実性の考慮

~どうやって変化の「幅」を算出しているの？

なぜ複数シナリオ、複数ケースの予測計算が必要なのか

気候変動予測は、さまざまな要因により不確実性を持ちます。そのため、予測情報を用いて有効な意思決定に結びつけるためには、この不確実性を適切に把握し、解釈することが必要です。

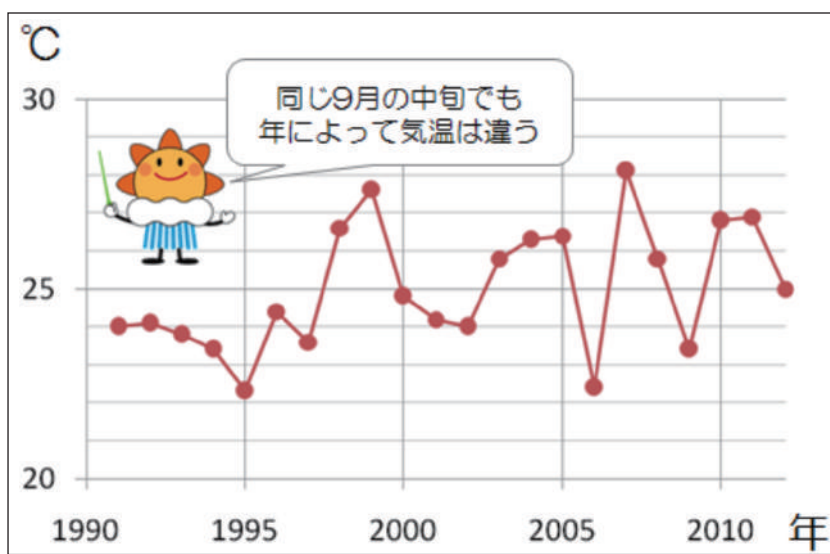
気候変動予測が持つ不確実性のうち、主要なものとして以下が挙げられます。

1 自然変動に伴う不確実性

人間活動の影響が無くとも、気候は自然要因により絶えず変動しています。自然変動の中には、日々の天気の変化を生み出すような短い時間スケールのものであれば、猛暑や冷夏といった年ごとの特徴を生み出すような変動もあります。さらに長期の変動としては、数年～10数年単位の変化も生じています。

このような自然変動が存在することにより、ある一年のみの気温や降水量の傾向を調べて、その結果により温暖化の存在を議論することは適切ではありません。それが自然変動により偶然生じたものであるか、温室効果ガスの排出量の変化によるものであるかを判別できないためです。

そのため、気候変動予測のシミュレーションにおいては、長期（20～30年程度）について平均値などの統計をとることにより、自然変動の影響を除いた上で気候変動による長期的な変化が生じているかを把握するのが一般的です²⁰。



1991～2012年の福岡における9月中旬(9月11～20日)の平均気温の年ごとの変動

出所：気象庁

2 将来の温室効果ガス排出量の不確実性

気候変動予測における将来の条件は、一定の想定のもとでの温室効果ガス排出量を設定することにより考慮されています。将来の温室効果ガス排出量は人口や経済発展、政策、技術の進展などに左右されますが、これらの条件について長期間にわたる単一の精度の良い予測を提示することは困難です。従って、社会科学的な観点から考えられる複数のシナリオを想定し、それぞれが実現した場合の気候への影響を気候変動予測モデルにより評価します。

20---- 一方で、統計をとる期間が限られていることによる統計的な不確実性も存在する。

3 気候変動予測モデルの不確実性

気候変動予測モデルは、大気・海洋・陸面をはじめとする地球の気候システムに関する科学的な理解をもとに、それを計算可能な数式で表現し、コンピュータで計算できるプログラムとしたものです。ただ、気候システムは極めて複雑であり、全てが完全に理解されているわけではないため、現実を完全に再現できている気候モデルはありません。将来の科学的知見の進展により、現実と気候モデルの差が縮小できる可能性はあります。

また、数式をもとにシミュレーションプログラムを構築する際にも、現在のコンピュータで実行可能な計算量という意味での制約があり、空間解像度（格子サイズ）等の限界として現れます。こちらは今後のコンピュータの能力の向上により改善される可能性があります。

本予測計算においては、このような不確実性の存在を前提とし、それぞれの不確実性について可能な限り考慮するために、複数シナリオ、複数ケースの予測計算を行い、その分析を実施しています。



写真：北海道ニセコの積雪

積雪・降雪の多い地域では特に、その将来変化がレジャーや文化等に影響を及ぼすことも考えられる。ただし、本予測計算の積雪・降雪に関しては、観測と気候モデルの差が大きく、気候変動予測モデルの不確実性が大きいため、利用には注意が必要である。

本予測計算での不確実性の取り扱い

本予測計算では複数のケース設定により予測計算の不確実性の一部を考慮していますが、現実的に計算可能なケース数の限界などにより、考慮されていない不確実性が存在します。特に、IPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書（IPCC, 2013）等で示されている不確実性幅の全体を考慮するようなケース設定では無いことに注意が必要です。

本予測計算での不確実性の取り扱いについては以下のとおりです。

1 自然変動に伴う不確実性

自然変動に伴う不確実性に対しては、20年間の予測計算の平均的な傾向を対象として評価を行うとともに、不確実性幅の設定において年々変動の大きさを定量的に評価し、不確実性幅として考慮しています。ただし、将来気候の海面水温の設定において、自然変動成分は「現在気候での自然変動成分を使用して」設定されており、結果として将来発生し得る自然変動の一部が過小評価されている可能性があります。

2 将来の温室効果ガス排出量の不確実性

本予測では、IPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書（IPCC, 2013）で用いられたRCP（代表的濃度経路）シナリオ（van Vuuren et al., 2011）のうち4つ（RCP2.6、4.5、6.0、8.5）の各条件のもとで予測計算を行いました。ただ、将来どのシナリオが実現するか現時点で判断できない（あるいは別のシナリオが実現し得る）という点で、不確実性は残存すると言えます。ただし、今後の意思決定により特定のシナリオを選択できる余地が残されています。

3 気候変動予測モデルの不確実性

本予測においては、全球気候モデルにおいて複数の積雲対流スキーム（YS、AS、KF）及び海面水温（SST1、SST2、SST3）を設定して予測計算を実施することにより、気候変動予測モデルの不確実性を考慮しています。一般に、気候変動予測モデルには多数のパラメータ及び手法の選択肢があり、これらについて「真の設定」がまだ分かっていないために不確実性が生じます。

積雲対流スキームは空間スケールの小さい積雲の生成・消滅に関する評価手法の選択肢であり、海面水温の設定は海洋モデルが持つ不確実性に関する選択肢と言えますが、当然この2項目以外にも不確実性の要因は存在します。

あらゆる不確実性の組み合わせを考慮してシミュレーションを実施することは時間的に不可能であるため、本予測計算では、気候学的な知見及び経験から、日本付近の気候変動予測において重要と考えられる降水プロセスに注目し、それに特に重要な影響を与えられとされる2つの項目（積雲対流スキーム及び海面水温）を選択しました²³。一方で、将来予測計算において海面水温上昇量を設定する際に、気温上昇量の空間的なパターンのみ注目するために、3パターンとも平均的な気温上昇量が同じとなるよう規格化を行っています。その結果として、IPCC第5次評価報告書で表現されているような異なる気候モデルでの気温上昇のしやすさの違い（気候感度）が考慮されていません。

23---- 本設定は「文部科学省 気候変動リスク情報創生プログラム 領域テーマC：気候変動リスク情報の基盤技術開発」と同一としている。

本予測計算での不確実性の表現方法

今回の予測計算では、複数ケースの計算結果を用いて不確実性を統計的な幅で表現することを試みました。それぞれの不確実性を以下のように考慮します。

1 自然変動に対する不確実性

自然変動に対する不確実性について、年々変動の分散により考慮します。また、統計期間が有限であることによる不確実性をブートストラップ法²⁴により考慮します。

2 将来の温室効果ガス排出量の不確実性

4種類の排出シナリオに対する予測結果を使用しますが、異なる排出シナリオによる結果をまとめて幅を示すことはしません。これは前述の通り、今後の温室効果ガス対策に対する選択の余地を示すものであり、気候予測計算結果を扱う中で確からしさを考慮できるものではないためです。

3 気候変動予測モデルの不確実性

複数のケースの結果をまとめて不確実性幅を設定します。RCP8.5については9通り（3種の積雲対流スキーム×3種の海面水温）、複数シナリオ間の比較には3通り（3種の海面水温）の結果がありますが、各ケースの「確からしさ」は同一であるという想定を置いて分析します。ケースごとの特徴（気温が若干高い、特定の季節で降水量が多いなど）がばらつくほど、不確実性幅が大きくなります。

まとめると、本手法では、以下の3種類の異なる不確実性を足し合わせるにより、予測結果全体の不確実性を評価しています²⁵。

- 年々変動の不確実性 (上記区分では①に相当)
- 20年平均値を採用したことによる不確実性 (上記区分では①に相当)
- 複数ケース間の傾向の違いによる不確実性 (上記区分では③に相当)

なお、本手法においては以下の点を仮定していることに留意が必要です。

- 異なる年、異なるケースの計算結果について統計的に独立であると仮定
- 標本平均及び分散を、母集団の平均及び分散の近似値として使用
- 各ケースの確からしさを同程度と仮定²⁶

24----- ブートストラップ法：有限のデータ（例えば20年分の年別値）から、そのデータの個数と同じ回数などのあらかじめ定めた回数（例えば20回）で、無作為に重複を許した抽出を行うことを十分に繰り返して（例えば1万回）大量の標本を生成し、それらの標本を利用して母集団の性質を分析する方法。

25----- これらの和の平方根の1.64倍が、4ページ、6ページ、7ページ、12ページのグラフにある縦線（エラーバー）に相当する。

26----- 既存の研究事例では、現在気候において観測データをより精度よく再現できているモデルの重みを大きくするという手順もある。