

## 第 8 章 気候モデルとその評価

### 概要

この章では、本報告書内で将来気候を予測するために用いられている全球気候モデルの性能について評価する。第 3 次評価報告書以降、気候モデルによる将来気候の予測評価の信頼性は、広範な進歩を通じて高まってきた。

気候モデルは、確固とした物理法則に基づいており、最近の気候（第 8、9 章参照）や過去の気候変化（第 6 章参照）について観測された特徴を気候モデルが再現できることを示している。特に大陸規模以上の規模において、全球大気海洋結合モデル（AOGCM）が将来の気候変化について信頼性の高い定量的な推定ができることにはかなりの信頼性がある。これらの評価における信頼性は、幾つかの気候要素（例えば気温）で他の要素（例えば降水量）より高い。この概要では、第 3 次評価報告書以降に進展した分野に焦点を当てる。

- ・ 気候モデルによる実験を同じ条件下で行った結果を収集・配布する国際共同計画の成果として、モデルの精密調査や気候モデルの挙動についての診断的解析がますます進展してきた。このことにより、より包括的で開かれたモデル評価が進んでいる。多様な見通しを得るための、さらに広範な評価の努力によって、モデルの重大な誤りが見落とされる可能性は低くなっている。
- ・ 気候モデルは、例えば数日から 1 年にかけての時間スケールにおける予測の評価を含む、ますます包括的なテストを受けている。これらの、より多様な一連のテストによって、気候予測に影響を与える過程をどのモデルが再現しているかという正確さにおいて信頼性が高まっている。
- ・ 平衡気候感度に関するモデル間の差異についての理解において、相当な進展があった。低層雲の寄与が最も大きい雲のフィードバックがこれらの違いの主要な原因であることが確認された。新しい観測や気候モデル実験の結果は、全球気候モデルでみられたものと同程度の水蒸気-気温減率フィードバック（約  $1\text{W/m}^2\text{K}$ 、平均的な温暖化の約 50%の強化に対応）を強く支持している。雪氷圏フィードバックの規模にはまだ不確実性が残っており、中・高緯度でのモデルの気候応答の幅の原因となっている。
- ・ 解像度や数値計算法、パラメタリゼーションの改良は進んでおり、より多くの気候モデルで、付加的な過程（例えば相互に作用するエアロゾル）を取り入れている。

- **AOGCM** では、以前は安定した気候を維持するためにフラックス調整が必要とされていたが、今はほとんど行われていない。同時に、現在気候の多くの様相の再現性が改良された。それゆえ、フラックス調整を用いることによる不確実性は小さくなっているが、**AOGCM** によるコントロール実験では、バイアスと長期変化傾向が残っている。
- 気候変動の重要なモードのシミュレーションにおける進展により、重要な気候過程の、モデルによる再現性についての総合的な信頼性が高まってきた。着実な進歩の成果の一例として、幾つかの **AOGCM** で、エルニーニョ南方振動現象 (**ENSO**) の重要な様相を再現できる。マッデン・ジュリアン振動 (**MJO**) のシミュレーションはまだ満足できるものではない。
- 特に高温や低温の継続といった極端現象を再現する **AOGCM** の能力は向上した。激しい現象における降水の頻度と量は過小評価されている。
- 温帯低気圧のシミュレーションは改良された。熱帯低気圧の変化の予測に用いられたモデルには、熱帯低気圧の観測された頻度や分布をうまく再現できるものがある。
- 南大洋のシミュレーションには、ほとんどのモデルで系統的なバイアスがみられる。南大洋は海洋の熱の取り込みにとって重要なので、このことにより、遷移的な気候応答にいくらかの不確実性が生じる。
- 観測結果を基にした基準がモデルによる気候変化予測の幅を絞り込むのに用いられ得る可能性が、モデルのアンサンブル・シミュレーションの解析によって、初めて調査された。にもかかわらず、信頼できる気候予測の幅を狭めるのに役立つ、モデルの適切な基準はまだ開発されていない。
- 気候システムにおける炭素循環フィードバックの潜在的な重要性を調査するために、幾つかの **AOGCM** や中程度に複雑な地球システムモデル (**EMIC**) で、炭素循環を陽に扱うことが導入された。
- **EMIC** は、以前よりもさらに徹底的に評価されてきた。相互比較共同計画により、これらのモデルが、取り扱う時間スケールが長い問題や多数のアンサンブル・シミュレーションや感度実験が必要な問題に取り組む際に有用であることが示されている。

### モデルの定式化における進展

大気モデルにおける改良には、力学スキームと輸送スキームの再定式化、水平、鉛直分解能の向上が含まれている。相互作用するエアロゾル・モジュールは、幾つかのモデルに組み込まれており、今やエアロゾルの直接、間接効果がより広く含まれている。

陸面過程の再現については大きな進展があった。個々の構成要素は、観測結果やより包括的なモデルによる組織的な評価を通して改良され続けている。今後数十年にわたって大規模な気候に大きな影響を与え得る陸面過程が現在の気候モデルに含まれている。さらに長い時間スケールで重要な幾つかの過程にはまだ含まれていないものがある。

AOGCM の海洋部分における進展は続いている。解像度は向上し、モデルでは一般的に、海水面の rigid lid 近似（【訳注】：自由表面でないこと）の扱いを行っていない。新しい物理パラメタリゼーションや数値では、真の淡水フラックス、河川や河口における混合スキームの改良や、正の有限移流スキームの使用を含んでいる。断熱的な等密度混合スキームは今や広く使われている。これらの改良が、性能の低いパラメタリゼーション（例えば仮想的な塩分フラックス）に起因する不確実性の低減に繋がっている。

AOGCM の雪氷圏部分の開発における進展は、海氷において最も明らかである。今やほとんどの先進的な AOGCM に、非常に精巧な海氷の力学が組み込まれており、幾つかのモデルでは、海氷の厚さにおける幾つかのカテゴリーや比較的進んだ熱力学を取り入れている。AOGCM における陸域の積雪過程のパラメタリゼーションは、その定式化がかなり異なっている。季節的な積雪の観測結果を再現するためには、サブグリッドスケールの不均質性が重要であることを、積雪の系統的な評価は示唆している。氷床の力学を取り扱っている AOGCM はほとんどない。この章で評価され、10 章で 21 世紀の気候変化予測に用いられた AOGCM はすべて、陸上の氷被覆はあらかじめ規定されている。

今のところ、シミュレーションをより良いものとする数値グリッドの細密化、不確実性の統計的な評価をより良いものとするアンサンブルメンバー数の増加、より複雑な過程（炭素フィードバック、大気化学相互作用）の組み込みにおいて、コンピュータ資源を分配する最適な方法についての合意はまだない。

### モデルの気候シミュレーションにおける進展

幾つかの重要な大気場における季節的な変動の大規模なパターンは、今や AOGCM によって、第 3 次評価報告書の時点よりもよく再現されている。特に、月平均した降水量、海面気圧、地上気温の世界的な分布の再現誤差はすべて小さくなった。幾つかのモデルでは、気候変化時における海面水温や雲フィードバックを正しく再現するのに重要な洋上の

低層雲のシミュレーションもまた改良された。にもかかわらず、雲や熱帯の降水のシミュレーション（及びそれらの重要な地域的・世界的な影響）には、重大な欠陥が残っている。

南大洋において、幾つかの共通のモデル・バイアスが認められ、海洋の熱の取り込みや遷移的な気候応答に不確実性を残している。シミュレーションにおいて、水温躍層が厚すぎることと、大西洋の循環と熱輸送がともに弱すぎることは、多くのモデルでかなり改良された。

海氷の形成の定式化に顕著な進展があったにもかかわらず、AOGCMによる、観測された海氷のシミュレーションは、第3次評価報告書以降あまり進歩していない。相対的に進歩が遅れていることは、海氷のシミュレーションを改良させるには、海氷部分自体のみならず大気部分と海洋部分ともに改良する必要があるという事実によって部分的に説明される。

第3次評価報告書以降、AOGCM開発の進展に伴い、幅広い時間スケールにわたる大規模な変動の再現性が向上してきた。北半球や南半球の環状モード、太平洋十年規模変動、太平洋・北大西洋パターン（PNA）、Cold Ocean-Warm Landパターンを含めた顕著な温帯変動パターンをモデルはとらえている。AOGCMでは、大西洋の数十年変動が再現できるが、低緯度過程と高緯度過程の相対的な役割はモデル間で異なっている。熱帯では、ENSOの空間的なパターンや頻度のAOGCMによるシミュレーションは全般的に向上したが、その季節的な位相の固定や、エルニーニョとラニーニャの非対称性のシミュレーションにはまだ問題が残っている。MJOの幾つかの特徴的な変動はほとんどのAOGCMで再現されているが、それらは概して発生頻度が低すぎ、また弱すぎる。

AOGCMは極端な高温、寒気の出現、氷点下となる日を程よく再現することができる。熱帯低気圧の変化予測のために本報告書で使われているモデルは、熱帯低気圧の現在の頻度と分布を再現できるが、強度はあまりよく再現されていない。極端な降水のシミュレーションは、解像度、パラメタリゼーション、選択されたしきい値に依存する。一般的に、モデルでは、弱い降水日（日降水量10mm未満）の日数は多過ぎて、強い降水日（日降水量10mm超）における降水量は少な過ぎる。

EMICは、包括的なAOGCMでは計算コストが過大となるため扱うことのできない、過去と将来の気候変化の調査のために開発された。解像度が低いことと、幾つかの物理過程の表現を単純化したために、EMICは非常に大規模の現象についてのみ推測することができる。第3次評価報告書以降、EMICは幾つかのモデルの相互比較共同計画によって評価され、EMICによる結果は、大きなスケールでは、観測データやAOGCMの結果とよく比

較できることが明らかになった。このことは、EMICが、現在のAOGCMで扱うことのできる時間スケールを超えたスケールで変化する気候システム内部の諸過程や相互作用を理解するために使われ得るという見方を支持するものである。長期的な気候変化予測における不確実性も、EMICによる多数の実験のアンサンブルを用いることにより、より包括的に調査することができる。

### **解析手法における発展**

第3次評価報告書以降、モデリング・センター外の科学者たちによる精密な調査のため、新しいモデルの結果を提供するための前例のない努力が始められている。18のモデリング・グループが、統合的、標準的な一連の実験を実施し、世界中の数百もの研究者によって解析されたそれらの結果のモデル出力は、現在のIPCCによるモデル結果の評価の大部分の基礎となっている。調整されたモデル相互比較の利点としては、モデリング・グループ間のコミュニケーションの強化、より早い誤差の検知と修正、標準化されたベンチマーク計算手法の作成、モデル作成の進歩をより完全に組織的に記録することにある。

幾つかの気候モデルでは、初期値予測における性能を、天気予報（数日）から季節予報（年）の時間スケールでテストされており、（また、その能力があることが示されている）。これらの条件下でモデルが示した能力により、それらのモデルが、気候システムにおける重要な過程やテレコネクションの幾つかを再現できるという信頼性が高まっている。

### **気候フィードバックの評価における進展**

水蒸気フィードバックは気候感度を強める最も重要なフィードバックである。このフィードバックの強さはモデル間でやや異なるが、モデルの気候感度のスプレッドに及ぼす全体的な影響は、気温減率フィードバックによって小さくなっており、逆相関の傾向がある。幾つかの新たな研究結果によれば、モデル化された対流圏下層、上層の湿度は、観測結果と一致するように、季節や年々の変動、火山噴火による低温化、気候トレンドにตอบสนองすることが示されている。最近の観測、モデル実験の結果はこのように、水蒸気-気温減率フィードバックの強度が、AOGCMによって再現されたものと同程度であることを強く支持する。

気候感度推定値のモデル間のスプレッドは、主に雲フィードバックのモデル間の違いによって生じていることが、最近の研究で再確認されている。境界層の雲の変化や、それより影響は小さいながら中層雲の変化の短波放射の影響は、全地球的な雲フィードバックのモデル間の違いに最も大きく寄与している。現在気候において、これらの雲の再現性が比較的低いことがこういった懸念の理由である。現在のモデルでは、深い対流雲に対して予測される応答がモデルごとに異なるので、地球温暖化に対するこれらの雲の応答もまた、

予測の不確実性をもたらす大きな原因である。観測結果に基づく雲フィードバックの評価は、気候モデルによってフィードバックの強さが異なることを示しており、気候変化の雲フィードバックのどの評価が最も信頼できるかをまだ決定することができていない。

第3次評価報告書以降進展があったにもかかわらず、AOGCMにおける雪氷フィードバックの規模には、依然としてかなり大きな不確実性が残っている。このことは、特に高緯度において、モデルによる気候応答のスプレッドに寄与している。地球スケールでは、地表アルベドのフィードバックはすべてのモデルで正であり、雲フィードバックよりずっと小さく、モデル間で異なっている。海氷のフィードバックの理解と評価は、極域の雲過程と、海洋の熱や淡水の輸送と強く結びついているため困難な作業である。極域での観測不足もまた評価の妨げとなる。地表面のアルベド・フィードバックを評価する新しい技術が最近開発されている。モデルの性能が陸域の積雪面積の観測された季節サイクルを再現するに至れば、再現された気候変化における雪のアルベド・フィードバックについて、間接的な評価を与えるかもしれない。

組織的なモデル間の比較は、気候変化への海洋の応答にモデル間での違いをもたらす重要な過程を明らかにするのに役立っている。表面でのフラックス変化が深層循環に及ぼすフィードバックの重要性が多くのモデルで確認されている。現在では、これらのフィードバックは利用できる観測結果によって強く拘束されていない。

モデルにおける気候フィードバックへ寄与する諸過程の解析、モデルの多数のアンサンブルに基づく最近の研究によって、将来、モデルの気候変化予測における現在のスプレッドを狭めるために観測結果を使うことができる可能性が指摘されている。

## よくある質問と回答

### FAQ8.1: 将来の気候変化の予測をするのに使われるモデルはどの程度信頼できるのか？

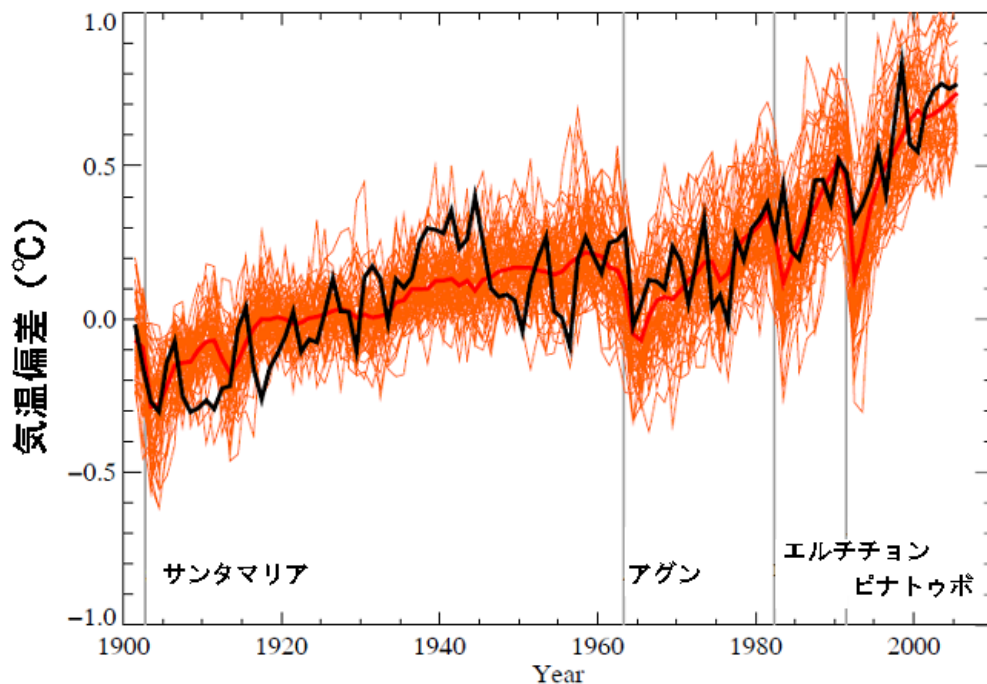
特に大陸規模以上の規模では、気候モデルが将来の気候変化について信頼できる定量的な評価を提供しているというかなりの信頼性がある。この信頼性は、広く受け入れられた物理法則に基づいてモデルが構築されていることと、現在気候と過去の気候変化についての観測結果をモデルが再現できることを根拠としている。モデル評価における信頼性は、幾つかの気候要素（例えば気温）では他の気候要素（例えば降水量）よりも高い。数十年にわたる開発の結果、モデルは一貫して、温室効果ガスの増加に対応した、著しい気候の温暖化を、はっきりとした、あいまいさのない形で示している。

気候モデルは気候システムの数学的な表現であり、コンピュータ・プログラムで表され、

強力なコンピュータ上で計算される。モデルに信頼性があることを示す一つの根拠は、モデルの基礎が豊富な観測事実とともに、質量保存やエネルギー運動量の保存といった確立した物理的な法則に基づいているという事実から生じる。

信頼性の第二の根拠は、現在の気候の主要な様相を再現できる能力にある。モデルは常にかつ広範囲にわたって、その再現結果を大気や海洋、雪氷、地表面の観測結果と比較することによって評価される。最近 10 年間に、組織的なマルチ・モデル相互比較により、空前の水準で評価が行われてきた。大気温度、降水量、放射、風、海水温、海流、海氷被覆の大規模な分布といった平均的な気候についての多くの重要な特徴を再現することでは、モデルの能力はかなり高くかつさらに強化しつつある。モデルはまた、さまざまな時間スケールにわたって観測された気候変動のパターンの多くの重要な様相を再現できる。例として、大規模なモンスーンシステムの進行や後退、気温、ストームトラック、雨域帯の季節的な移動、温帯の地上気圧における半球スケールのシーソー（北半球や南半球の環状モード）がある。幾つかの気候モデルまたはごく近縁の変種は、天気予報や季節予報に用いることでもまたテストされている。これらのモデルは、季節や年々の変動の様相はもとより、より短い時間スケールでの大循環の重要な特徴を再現できることで、そのような予測にスキルがあることを示している。モデルが、これらの重要な気候の特徴を再現する能力を持っていることで、将来の気候変化のシミュレーションにとって重要な物理過程をモデルが再現できることに対する信頼性が増加している（気候モデルで、数日を超える天気を予報する能力が限られていることは、長期の気候変化の予測能力に限りがあることとはならない。なぜなら、両者の予測はとても異なっているからである。FAQ 1.2 を参照）。

信頼性を示す第三の根拠は、過去の気候や気候変化の特徴をモデルが再現できることから生じる。モデルは 6000 年前の完新世中期の高温期や 2 万 1000 年前の最終氷期最盛期のような過去の気候を再現するのに使われている（6 章参照）。それらは（過去の気候の再構築における不確実性を考慮しても）最終氷期における海洋の冷却の規模や広さのパターンといった多くの特徴を再現できる。モデルは、測器による観測記録における気候変化の多くの様相も再現できる。一つの例は、気候に影響を及ぼす人為的要因と自然的要因をともに含めたとき、20 世紀における世界平均気温のトレンド（FAQ8.1 図 1 参照）がかなり高い精度で再現できることである。モデルはまた、日中よりも夜間の気温上昇が大きいことや、北極域で温暖化の程度が大きいこと、1991 年のピナトゥボ火山の噴火のような大きな火山の噴火による、世界的ではあるが小さく短期的な寒冷化（とそれに続く復元）といった、観測された他の変化も再現できる（FAQ8.1 図 1 参照）。モデルによる最近 20 年の世界全体の気温の予測はその期間における観測結果と一致している（第 1 章）。



FAQ8.1 図1 観測（黒線）及び、14 の気候モデルを用いて、自然起源と人為起源の放射強制力とともに考慮した 58 のシミュレーションから得られた、20 世紀の地表面付近の平均気温（赤細線）。すべての実験の平均を太い赤線で表す。気温は、1901～1950 年の平均からの偏差で表している。縦の灰色の線は、火山の大きな噴火時期を示す。（図は第 9 章、図 9.4.1 を転載。さらなる詳細については対応する見出しを参照）

それにもかかわらず、モデルはいまだに大きな誤差を示す。一般的に、規模が小さくなるほどそれらの誤差は大きくなるが、大きな規模の重大な問題もまた残っている。例えば、熱帯の降水、ENSO、MJO（30～90 日の時間スケールで観測される熱帯の風や降水の変化）のシミュレーションには依然として不確実性が残っている。そのような誤差の根本的な原因は、多くの重要な小規模の過程がモデルにおいて陽に表現できていないことにあり、これらの過程が、大規模な特徴と相互作用するような適切な形でモデルに含められなければならない。これは部分的にはコンピュータの能力の限界に起因するが、幾つかの物理過程について、科学的な理解や詳細な観測結果が利用できないことから生じている。主要な不確実性は特に、雲の再現性やその結果としての気候変化への雲の応答に関連している。結果として、特定の温室効果ガスの放射強制力に対応して、モデルが示す全地球的な気温変化にはかなりの幅がある（第 10 章参照）。しかし、そのような不確実性にもかかわらず、温室効果ガスの増加に伴い、気候がかなり温暖化するという予測については各モデルは一致しており、この温暖化は気候変化の観測結果や過去の気候再現といった他の資料から引き出された独立した評価と一致している。



全球モデルによって予測された変化の信頼性は、規模が小さくなるほど低くなるので、地域気候モデルやダウンスケーリング手法の使用といった他の技術が地域的、局所的な規模の気候変化の研究のために特別に開発されている（FAQ11.1 参照）。しかし、全球モデルの高度化と解像度の細密化が続けられているので、これらのモデルは、極端現象の変化といった重要な小規模の特性の調査にますます有用になっており、コンピュータの性能の増加とともに、地域的規模の再現性のさらなる改良が期待されている。モデルによる気候システムの扱いは、ますます包括的になってきた結果、特に長い時間スケールでの気候変化に潜在的に重要だと考えられている、物理的、生物学的な過程や相互作用は陽に再現されている。近年、植生反応、海洋の生物学的、化学的相互作用、氷床の力学が幾つかの全球気候モデルに盛り込まれているのがその例である。

まとめると、モデルの信頼性は、それらの物理的な基礎や観測された気候や過去の気候変化を再現する能力から生じる。モデルは気候を再現し、理解するための極めて重要な手段であることを示しており、特に将来の大規模な気候変化について、信頼できる定量的な評価をモデルが提供できることについてはかなりの信頼性がある。モデルには、雲の再現性などに重大な問題が引き続き残っており、そのことはその地域的な詳細同様に、気候変化の規模やタイミングの予測における不確実性に繋がる。それにもかかわらず、数十年にわたる開発の結果、モデルは一貫して、温室効果ガスの増加に対応した著しい気候の温暖化を、はっきりとした、あいまいさのない形で示している。