

## 第9章 気候モデルの評価

### 概要

第4次評価報告書以降、気候モデルは引続き開発、改善されており、気候変動に重要な生物地球化学的循環の表現を組み込むことにより、多くのモデルが地球システムモデルに拡張されている。こうしたモデルでは、特定の気候安定化目標に適合する二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量のような、政策関連の計算が可能になる。さらに、これまで評価されてきた気候の変数や過程の範囲が大幅に拡大されたことに加え、「性能測定基準」を用いてモデルと観測間の違いの定量化が進んでいる。本章において、モデル評価では平均的な気候、過去の気候変動、複数の時間スケールに関する変動性、地域的な変動モードのシミュレーションを含んでいる。この評価は、過去の気候及び古気候のシミュレーション、主要な気候過程やフィードバックを理解する手がかりを得る目的に特化した実験、地域的な気候のダウンスケーリングを含む、国際的な協調により行われている最新のモデル実験に基づいている。図9.44は本章で評価したモデル性能の概観を表したもので、第4次評価報告書で評価したモデルと比較して改善した部分あるいは不足した部分も示している。章の最後は、モデルの性能と将来予測、及びモデルの性能と気候変動の検出と原因特定を関連づける最近の研究の評価で締めくくっている。{9.1.2、9.8.1、表9.1、図9.44}

第4次評価報告書の評価対象とされたモデルの世代に比べると、気候モデルが地上気温を再現する能力は、全てではないにせよ多くの重要な側面でも向上している。観測された大規模な年平均地上気温分布をモデルが再現(空間分布相関はおおよそ0.99)することについては引き続き非常に高い確信度<sup>1</sup>がある。ただし、特に標高の高い地形、北大西洋の氷縁付近、赤道近くの海洋湧昇域をはじめ一部の地域においては数°Cの系統誤差が見出される。地域規模(亜大陸及びそれ以下の規模)になると、モデルの地上気温再現能力に対する確信度は大規模の場合よりも低くなる。しかし、地域的な偏りは平均でゼロに近く、モデル間のばらつきはだいたい±3°Cとなっている。地域規模の地上気温のシミュレーションが第4次評価報告書当時よりも向上していることの確信度は高い。現在のモデルは最終氷期最盛期(LGM)の大規模な気温分布を再現することもでき、現在とは大幅に異なる気候状態を再現する能力があることを示している。{9.4.1、9.6.1、図9.2、図9.6、図9.39、図9.40}

20世紀後半のより急速な昇温や、大規模な火山噴火直後の寒冷化を含め、モデルが過去の期間における地球規模の年平均地上気温の上昇の一般的な特徴を再現していることについての確信度は非常に高い。過去の期間についてのシミュレーションのほとんどは、最近10～

15年間の世界平均地上昇温トレンドに観測されている減少を再現していない。1998～2012年のモデル及び観測間のトレンドの差異は、かなりの程度まで内部変動によって生じており、可能性として強制力の誤差と、温室効果ガス(GHG)による強制力の増大に対する応答を一部のモデルが過大評価していることも原因になっていることの確信度は中程度である。全てではないにせよほとんどのモデルは、最近30年間に熱帯対流圏において観測されている温暖化傾向を過大評価し、下部成層圏の長期的寒冷化傾向を過小評価する傾向がある。{9.4.1、Box 9.2、図9.8}

降水量の大規模な分布のシミュレーションは第4次評価報告書以降やや改善しているが、モデルの降水量の再現性能は依然として地上気温ほど高くない。年平均降水量のモデル結果と観測結果の空間分布の相関関係は、第4次評価報告書当時に利用可能だったモデルでは0.77だったのに対し、現行モデルでは0.82に上昇している。地域規模では降水量はそれほどうまく再現されておらず、観測の不確実性があるために評価は依然として難しい。{9.4.1、9.6.1、図9.6}

気候モデルにおける雲のシミュレーションは、依然として課題が多い。モデルによる気候感度のばらつきの大部分は、雲過程における不確実性が原因であることの確信度は非常に高い。しかし、第4次評価報告書当時に利用可能だったモデルに比べれば気候モデルにおける雲のシミュレーションはわずかに改善を示しており、これは新しい評価手法と雲についての新しい観測結果による。とはいうものの、雲のシミュレーションにバイアスがあるために、雲の放射効果について1平方メートル当たり数十ワットの地域誤差が生じている。{9.2.1、9.4.1、9.7.2、図9.5、図9.43}

モデルは低気圧経路と温帯低気圧の一般的特徴を捉えることができおり、第4次評価報告書以降改善していることの証拠がある。北大西洋における低気圧経路のバイアスはわずかに改善したが、モデルが生成する低気圧経路はまだ帯状に偏り過ぎており、温帯低気圧の強度を過小評価している。{9.4.1}

多くのモデルは、1961年から2005年にかけて観測された海洋表層貯熱量の変化を再現することができており、マルチモデル平均<sup>[脚注1]</sup>時系列は、同期間の大部分について利用可能な観測による推定幅の範囲に収まっている。モデルが海洋による熱吸収を再現できる能力(大規模火山噴火によって課せられる変動を含む)を有していることによって、地球全体のエネルギー収支の評価や、海面水位上昇の熱的な要素のシミュレーションにこうしたモデルを使用することへの信頼性が増す。{9.4.2、図9.17}

<sup>1</sup> 本報告書では、利用できる証拠を記述するために、「限られた」、「中程度の」、「確実な」を、見解の一致度を記述するために、「低い」、「中程度の」、「高い」といった用語を用いる。確信度は、「非常に低い」、「低い」、「中程度の」、「高い」、「非常に高い」の5段階の表現を用い、「確信度が中程度」のように斜体字で記述する。ある一つの証拠と見解の一致度に対して、異なる確信度が割り当てられることがあるが、証拠と見解の一致度の増加は確信度の増加と相関している(詳細は1.4節及びBox TS.1を参照)。

熱帯太平洋の平均状態のシミュレーションは第4次評価報告書以降改善し、結合モデルで広く見られるバイアスである赤道付近における冷舌の西方向へのみかけの張り出しにおける誤差が30%減少した<sup>〔訳注2〕</sup>。熱帯大西洋のシミュレーションは依然として不完全で、多くのモデルは基本的な東西方向の温度勾配を再現できていない。{9.4.2、図 9.14}

現在の気候モデルは、全ての月について約10%以下のマルチモデル平均誤差により、北極域の海水域面積の季節変化を再現する。北極域における夏季海水域面積の減少傾向のシミュレーションが第4次評価報告書当時よりも向上していることについては**確実な証拠があり、シミュレーションの約4分の1が、衛星時代(1979年以降)について観測と同程度又はより強い変化傾向を示している**。モデルには、冬季と春季における北極域の海水域面積をわずかに(約10%)過大評価する傾向がある。南極域については、マルチモデル平均の季節変化は観測値とよく一致しているが、モデル間の幅は北極域の場合よりおよそ2倍の開きがある。南極域の海水域面積については、観測結果では小さな増加傾向となっていることと対照的に、モデル間で大きなばらつきがあるものの、大半のモデルは小さな減少傾向を示している。{9.4.3、図 9.22、図 9.24}

モデルは、世界及び北半球(NH)の平均気温について、観測された年々から百年の時間スケールにおける変動の多くの特徴を再現することができ**(高い確信度)**、現在ほとんどのモデルは、熱帯太平洋のエルニーニョに関連して観測された変動のピーク(2~7年周期)を再現することができる。千年規模のシミュレーションから変動性を評価する能力は第4次評価報告書以降に新たに加わったものであり、長周期の気候変動のモデルによる推定値を定量的に評価することが可能になっている。検出と原因特定の研究(第10章)においてシグナルとノイズを分けるために気候モデルを使うときには、この能力が重要となる。{9.5.3、図 9.33、図 9.35}

気候の変動性と季節内から季節の現象までの多くの重要なモードがモデルによって再現されており、第4次評価報告書以降いくつか明らかな改善も見られる。地球規模のモンスーン、北大西洋振動、エルニーニョ・南方振動(ENSO)、インド洋ダイポール、準2年周期振動の統計値が、いくつかのモデルによって良く再現されている。ただし、これまで公表されている分析の範囲が限られていることや観測が限られていることによって、この評価は低めに考えるべきである。十分に再現されていない変動のモードもある。具体的には、第11章の近未来予測に関連する大西洋の変動のモードや、第14章に関連する熱帯太平洋以外の場所における ENSO によるテレコネクションが挙げられる。モンスーンと ENSO に関するマルチモデルによる統計が第4次評価報告書以降改善していること**の確信度は高い**。とはいえ、この改善は全てのモデルで現れているわけではなく、諸過程に基づく分析では、基準状態及び関連するフィードバックの強さにバイアスが残っていることを示している。{9.5.3、図 9.32、図 9.35、図 9.36}

極端現象のモデルシミュレーションの評価においては、第4次評価報告書以降かなりの進歩が見られる。一連の指数の評価に基づく、再現された気候の極端現象のモデル間の幅は、ほとんどの地域において観測結果に基づく推定値の幅と同程度である。さらに、20世紀後半における極端に暑い日と夜及び極端に寒い日と夜の頻度の変化は、モデルと観測結果の間で整合しており、アンサンブルした世界平均の時系列はおおむね観測推定値の範囲内に収まっている。モデルの大多数は、特に熱帯地域をはじめとして気温の変動や変化傾向に対する極端な降水現象の感度を過小評価しており、このことは、予測されている将来における極端な降水現象の増加をモデルが過小評価している可能性を示唆している。いくつかの高解像度の気候モデルは、観測された海面水温によって強制した場合に、観測されている大西洋ハリケーン発生数の年々変動を再現することが示されているが、これまでのところこの種の研究はごく少数しか利用できない。{9.5.4、図 9.37}

第4次評価報告書以降の重要な進展の一つが、炭素循環の相互作用を含んだ地球システムモデルのさらなる普及である。こうしたモデルの過半数において、再現された20世紀後半にわたる世界の陸域と海洋の炭素吸収量は、観測結果の推定範囲内に収まる。しかしながら、炭素の取り込みと放出の地域分布はさほど良く再現されていない。特に北半球の陸域の場合、モデルは気候モデルによる逆推定法によって推定された吸収量に対し系統的に過小評価している。これらのモデルは「適合排出量」(特定の気候変動目標に適合した二酸化炭素排出経路、第6章参照)の推定に用いられるため、モデルの炭素フラックスの再現能力は重要である。{9.4.5、図 9.27}

現在、地球システムモデルの大半はエアロゾルの相互作用の表現を含んでおり、人為起源の二酸化硫黄排出と整合した仕様となっている。しかしながら、硫黄循環過程と自然の発生源及び吸収源については不確実性が残っており、このため、例えば、再現された海上のエアロゾルの光学的厚さが0.08~0.22の範囲に及び、衛星による推定値の0.12に対し過大評価したモデルと過小評価したモデルがおおよそ同数あるという状況である。{9.1.2、9.4.6、表 9.1、図 9.29}

現在、一連の最新モデルには、規定された又は相互作用計算によるオゾン<sup>1</sup>の時間依存性が含まれている。一部のモデルでは、観測された気柱内のオゾン全量の変化について**中程度の一致度**しかないが、成層圏オゾンの時間依存性を含んでいることは、モデルの半数が一定の気候値を与えていた第4次評価報告書から比べると大幅な改善となっている。その結果として、成層圏オゾンによる気候強制力の表現が第4次評価報告書以降改善したことの**確実な証拠**がある。{9.4.1、図 9.10}

地域的ダウンスケーリング手法は、多くの気候影響研究に必要なより小さいスケールでの気候情報を提供するの**に利用されており、変化に富んだ地形を持つ地域においても、多様な小規模の現象についても、ダウンスケ**

ーリングが付加価値を与えることの**確信度は高い**。地域モデルはどうしても、境界条件を提供するために用いられる全球モデルのバイアスを受け継いでしまう。さらに、調整された相互比較研究はまだあまり行われていないため、地域気候モデルや統計的ダウンスケーリング法を系統的に評価する能力には限界がある。とはいえ、いくつかの研究は、地形や海岸線などの静止した地物の高解像度化や、対流性降水のような小規模過程の表現が改善することによって付加価値が生じることを実証している。{9.6.4}

**中程度に複雑な地球システムモデル(EMICs)は、千年規模の気候変動のシミュレーションを提供し、より包括的なモデルの結果を解釈したり、それを拡張したりする道具として利用されている。**与えられる情報の範囲や解像度に限界はあるが、EMICによる20世紀の世界平均地上気温、海洋貯熱量、炭素循環応答のシミュレーションは、過去の記録やより包括的なモデルとも整合しており、長期的な過渡的気候応答や安定化についてのよく較正された予測や、多数のアンサンブル及び政策関連シナリオの選択肢の提供に利用できることを示唆している。{9.4.1、9.4.2、9.4.5、図9.8、図9.17、図9.27}

**第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)モデルの平衡気候感度におけるばらつきは2.1°Cから4.7°Cの範囲にあり、第4次評価報告書の評価とほぼ同程度である。**世界平均地上気温のバイアスと平衡気候感度に相関関係は見いだせないことから、平均気温のバイアスは温室効果ガスによる強制力に対するモデルの応答に明らかな影響は与えていない。平衡気候感度におけるばらつきに寄与している主要な因子は相変わらず雲フィードバックであることの**確信度は非常に高い**。このことは、現代の気候と最終氷期最盛期の両方に当てはまる。同様に、観測結果と整合して、モデルでは地域規模から地球規模にわたり対流圏温度と水蒸気との間に強い正の相関関係を示していることにも**非常に高い確信度**がある。したがって、モデルと観測結果の両方において正の水蒸気フィードバックが示唆されている。{9.4.1、9.7.2、図9.9、図9.42、図9.43}

気候モデル及び地球システムモデルは物理的原理に基づいており、観測された気候の多くの重要な特徴を再現する。どちらの特徴も、検出と原因特定の研究(第10章)への応用や、定量的な将来予報<sup>[訳注 3]</sup>及び予測(第11~14章)へのモデルの適合性に対する我々の信頼に寄与している。一般に、過去の気候に関する性能の定量的尺度を、将来の気候予測の信頼性についての確かな記述に直接翻訳する手段はない。しかし、観測された変動性やトレンドの一部の側面が、北極域の夏季の海水トレンド、雪アルベド・フィードバック、熱帯陸域からの炭素損失などの数量に対する予測のモデル間の差異とよく相関していることの証拠は増えている。このような関係は、原則として、観測可能な数量を将来予測に対する拘束

条件に変換する方法を提供するが、そうした拘束条件の応用はまだ新しい研究分野の域を出ない。マルチモデルアンサンブルの信頼性の評価方法において第4次評価報告書以降かなりの進歩が見られているほか、マルチモデル予測の精度を高めるための様々な手法が現在探求されている。しかし、様々なモデルから得た予測を各モデルの過去の気候に関する性能に基づいて重み付けするための普遍的な戦略はまだない。{9.8.3、図9.45}

[訳注 1] マルチモデル平均: 多数のモデルの平均のこと。

[訳注 2] マルチモデル平均の海面水温による評価を指していると考えられる。

[訳注 3] 数十年先の近未来予報(Near-term prediction, 第11.2節)のことを指している。