



気候モデル：誰もが知っておくべき 10 項目

アンドリュー・モンフォード

監訳 杉山大志 訳 木村史子

TEN THINGS  
EVERYONE SHOULD KNOW  
ABOUT CLIMATE MODELS

Andrew Montford

With a foreword by Steve Baker MP

# 気候モデル：誰もが知っておくべき 10 項目

アンドリュー・モンフォード

監訳 キヤノングローバル戦略研究所研究主幹 杉山大志 訳 木村史子

本稿は、Andrew Montford, Ten Things Everyone Should Know About Climate Models, The Global Warming Policy Foundation Note 32

[Ten Things Everyone Should Know About Climate Models \(thegwpf.org\)](https://www.thegwpf.org/ten-things-everyone-should-know-about-climate-models) を、The Global Warming Policy Foundation の許可を得て翻訳したものである。

## 目次

著者について.....	2
序文.....	3
気候政策が必要だという主張は、気候モデルに大きく依存している.....	4
気候モデルは非常に複雑である.....	4
気候モデルはそれほど複雑ではない.....	5
気候モデルはチューニングされ、ごまかされている.....	6
気候モデルは地球の温度を正しく計算できない.....	7
気候モデルは他にも多くの点で間違っている.....	8
気候モデルはエネルギーを保存しない.....	8
気候モデルは未来を予測できない.....	9
気候モデルが失敗していることは誰もが知っているが、誰もそれを指摘しない.....	9
気候モデルは有害である.....	10

## 著者について

アンドリュー・モンフォードは Global Warming Policy Foundation (地球温暖化対策基金) の副理事を務めている。

## 序文

スティーブ・ベイカー、英国下院議員（保守党）

国会議員になる前、私は英国空軍の技術士官として耐空性に関わる仕事をした。その後、コンピュータ・サイエンスの修士課程を修了し、ソフトウェア・エンジニアリングの分野でキャリアを積んできた。そのため、ソフトウェア、基幹システム、リスクマネジメント、つまり危機に瀕したときに何をすべきかを定める方法に強い関心を抱いている。

耐空性工学（訳注：航空機の安全性に関する工学）は重大なビジネスであり、セーフティ・クリティカル・ソフトウェア工学（訳注：安全性確保のための工学）は極めて厳格なものだ。しかし、学問の世界ではむしろ異なることが多いという認識が広まっている。大学の研究室で行われていることは、象牙の塔の外ではほとんど関心を持たれないことが多いので、科学者のソフトウェア工学への取り組み方が、広い世界で起こっていることとやや異なるのは当然かもしれない。なぜ、誰も見ようとしないコンピュータのコードをわざわざ文書化する必要があるのだろうか？なぜ、ユニットテストや包括的なバージョン管理システムを使って開発を管理する必要などがあるのだろうか？コーディングの標準？そんなものはない。実験的なアプローチが取られることが多く、コードはしばしば創造の航海の旅の中で書かれ、書き直され、通常、ほとんどあるいは全く文書化されず、厳密なあるいは他の方法での検証も行われないうままである。コードの巨大なブロックが、何の説明もなくコメント・アウト（訳注：注積分に代えることで事実上削除すること）されているのを発見することもある。これではソフトウェア工学とは言えない。善良な愛好家にはふさわしくないハッキング行為である。

しかし、我々の自由と繁栄に最も重大な影響を与える政策の裏付けや正当化あるいは政策の実質的な方向付けを、大学の研究者に求める大臣が増えている今、こうした非専門的な基準はもはや容認できるものではない。

私たちは、新型コロナウイルスのパンデミックの際にそのことを身をもって体験している。政府の科学顧問が提供したコンピュータ・シミュレーションは、そのコードの質の低さと、予測とその後の現実との乖離の大きさから、広く批判を浴びた。ロックダウンを鼓舞し、正当化するために使われた不正確なモデルがもたらす副次的なコストについては、現在もその事後評価が続けられている。

長期的には、気候モデルの影響の方が、さらに甚大かもしれない。気候モデルの予測に基づき設定されたネット・ゼロ目標は、現在生きている地球上のすべての人類と、まだ生まれてもいない何十億もの人々に影響を与える。もしこれを誤れば、現在も将来も、人類全体がその結果に苦しむことになる。状況はこれ以上ないほど深刻なものとなっている。

しかし、気候モデルは、多くの新型コロナウイルスのモデルと同じようにエラーが多く、不適切にコード化されていることが明らかになっている。気候モデルの予測が現実と乖離

している兆候は以前からあったが、事態は好転していないようだ。ネイチャー誌に掲載された最近の論文によれば、最新のモデルの多くは観測記録と全く相容れないという。しかし、論文では、それにもかかわらず、モデルが環境影響の評価や環境政策の内容に利用されていることも指摘されている。

アンドリアンドリユー・モンフォードのこの論文は、それゆえタイムリーである。この論文では、気候モデルの問題点をわかりやすく説明し、私たちがどこで間違っているのかを一般の人々に教えてくれている。これを読めば、コンピュータ・シミュレーション（気候やその他のもの）を良い政策の指針として受け入れる前に、格別の注意を払ってもう一度考える必要があると確信できる。

## 気候政策が必要だという主張は、気候モデルに大きく依存している

気候が大きく変化しているとの見方が一般的である。このような見方は、異常気象と呼ばれ、しばしば異常な天候が続いているという見解として表現される。しかし、気候は常に変化しているため、最近の動向が異常であると自信を持って言うことは困難である。

そのため、気候学者は、人間が排出する二酸化炭素がもたらす影響の度合いを把握し、将来どうなるかを予測するために、コンピュータによるシミュレーションに頼らざるを得ないのである。

これらのシミュレーションは、全球気候モデルや地球システムモデル<sup>1</sup>（以下「気候モデル」）などと呼ばれ、政策決定過程において中心的な役割を担っている。気候が異常な動きをしているとか、将来悪い影響を及ぼすという主張は、その背後にある気候モデルの信頼性に基いているに過ぎない。したがって、政策立案者は気候モデルの弱点を理解することが重要であり、また、それを大きく示すことも重要である。

## 気候モデルは非常に複雑である

最初に気候のシミュレーションが開発されて以来、気候モデルは、大気・海洋システムのものより多くの側面を取り入れ、非常に洗練されたものとなっている。現在では非常に複雑で、通常、100万行のコンピュータコードを含んでいる。このモデルには、大陸、海洋、大気、太陽からの熱など、科学者が理解する気候システムの主要な構成要素が組み込まれている。このコンピュータモデルの仮想地球の表面は格子状に区切られており、上部には大気の格

---

<sup>1</sup> 両者は異なる概念である。地球システムモデルは海洋大気系と生物圏の相互作用を組み込んでいるが、全球気候モデルはそうではない。

子が並んでおり、下部には海水の格子が並んでいる。これらの格子のそれぞれで、気候システムの各構成要素とその相互作用を計算し、複雑な数学を使って気候の変化を計算しなければならない。

これは決して簡単なことではなく、コンピュータモデルが実際の気候と近似的な出力になる段階まで持ってきたことは、科学的に驚くべきことである。気候モデル内の仮想上の惑星では、実際の地球と同じように熱帯でサイクロンが発生し、極地に移動する。しかし気候モデルは、モンスーン（季節風）は存在するものの、こまかな点、例えば東アフリカ（！<sup>2</sup>）に短い雨を降らせる風の向きなどについては、まるで逆の答えを出したりする。

そして、表面的な類似性は、モデルが現実の気候を正しく表現していることを示すものではない。実際、シミュレーションを研究している人たちの間では、複雑なモデルよりも単純なモデルの方が望ましいとも考えている。しかし、複雑さのレベルを適切に選択するには、システムを詳細に理解することが重要であり、気候モデル開発者はそのような能力を必ずしも持っているわけではない<sup>3</sup>。

## 気候モデルはそれほど複雑ではない

気候モデルは非常に複雑ではあるが、その複雑さは必ずしもそれほど十分とはいえない。気候モデルの格子の大きさは、幅が 50km にも及ぶ。この尺度で気候システムのいくつかの側面については、基礎物理学的原理から計算することが可能であり、実際、気候モデルは基礎物理学から導かれたものであると熱心に主張している著名な科学者もいる。しかし、気候システムのいくつかの構成要素については、この方法で扱うには小さすぎる尺度で物理現象が起こっている。例えば、温室効果は原子レベルで起こっているし、雲、植物、地形の多くの特徴は、キロメートルではなくメートルやセンチメートルで測定しなければならない。イギリス気象庁の HadCM3 モデルの格子間隔は粗過ぎて、切り立ったアンデス山脈の地形が表現できないため、アンデス山脈の大部分を見逃している<sup>4</sup>。このため、南米の気候予測の妥当性には、明らかに疑問符がつく。モデルは、気候システムの多くの部分について、格子

---

<sup>2</sup> Hirons L and Turner A (2018). 'The impact of Indian Ocean mean-state biases in climate models on the representation of the East African short rains'. Journal of Climate, 31(16): 6611--6631.

<sup>3</sup> Chwif L and Paul RJ. On simulation model complexity. <http://www.simul8.com/support/newsletter/chwif.pdf>.

<sup>4</sup> Smith L, The user made me do it: Seamless forecasts, higher hemlines and credible computation. Available at: <http://www.eas.gatech.edu/sites/default/files/SmithTalkGT.pdf>.

この中でこのシミュレーションにおけるアンデス山脈の地表は、実際の山よりも 2 キロメートルも低いことが指摘されている。

内の平均的な数値を用いることしかできない。これによって、モデルには大きな不確かさが内在することになる。なぜなら、気候が変化しても、これらのいわゆる「パラメタリゼーション（訳注：モデルを作成する際にパラメータの設定をすること。観測によることが望ましいが、任意性があることも多い）」が有効であり続けるかどうかを知ることができないからである。最近のある論文では、気候モデルでパラメタリゼーションを計算する順番を変えると、大きく異なる答えが得られることがわかった<sup>5</sup>。どの順番が正しいかは、誰にもわからない。さらに、科学者が気候に影響を与える可能性があるとは指摘しながらも、その影響の大きさ（もしあれば）がまだ確定していない要素も数多く存在する。多くの例があるが、そのうちの一つを紹介すると、2013年のNASAのワークショップでは、太陽からの紫外線の強さが時間とともに1桁も変化する可能性があることが示された。紫外線は大気の化学、ひいては物理に影響を与えるが<sup>6</sup>、この変動が気候に何を意味するのか、もしあるとすれば、それはどういうものなのか不明であり、これらの「既知の未知」のどれが何を意味するのかも同様に不明なままである。また、「未知なる未知」があることはほぼ間違いないだろうという指摘は、あえてする必要もないだろう。

このように、気候モデルにはギャップ（知識の欠落）や過度な単純化があるため、人為的な炭素排出に対して地球がどのように反応するかをしっかりと予測できる気候システムの有効な表現として受け入れることはできないのである。

## 気候モデルはチューニングされ、ごまかされている

気候モデルが複雑なためか、あるいは人類が気候システムについてあまり知らないためか、実際のところ大気による熱の保持量が多すぎたり少なすぎたりして、組み上げた気候モデルがすぐに現実的に機能することは滅多にない。その結果、実際の気温とモデルの気温がどんどんずれていってしまう。

この問題に対処するために、気候モデルは「チューニング」される。つまり、いくつかのパラメータを任意に調整し、より現実的な速度で温暖化させるのである<sup>7 8</sup>。その一例が、モ

---

<sup>5</sup> Donahue A and Caldwell M (2018) Impact of physics parameterization ordering in a global atmosphere model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*; 10: 481–499.

<sup>6</sup> ここでの議論は、紫外線そのものではなく、「異常な紫外線」についてのもの。

‘Solar variability and terrestrial climate’. *NASA Science News*, 8 January 2013.

[http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2013/08jan\\_sunclimate/](http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2013/08jan_sunclimate/).

<sup>7</sup> Mauritsen T, et al. “Tuning the climate of a global model.” *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 4.3 (2012).

<sup>8</sup> Voosen P (2016) “Climate scientists open up their black boxes to scrutiny”. *Science*; 354(6311): 401--402.

デル内の雲の表現方法を調整することである。雲は、気候システムにおいてもっとも不確かな要素の一つであり幅広いパラメータ設定が許容されている。このため、入力値の様々な組み合わせによって過去の気温と似たようなモデルの計算結果が得られるものの、将来の温暖化については全く異なる出力になってしまう<sup>9</sup>。どの未来の気候が本物であるかは、これもまた、だれも分からず、したがって、単に自分が欲しい答えを選ぶことも可能なのだ。

このように出力を調整する能力は、気候学者に「ごまかしの要素」を与え、気候モデルが「基礎物理学に基づいている」という主張をむしろ無意味なものにしてしまっている。せいぜい物理学に「おおむね」基づいているというだけなのだ。

もう一つのごまかし要素として、大気汚染、いわゆる「エアロゾル」による冷却効果がある。二酸化炭素に対する温度変化の感度が高い気候モデルは、エアロゾルの冷却効果も高く見積もる傾向にあることが指摘されている。一方、感度の低いモデルではエアロゾルの効果は低く見積もられている。つまり、高感度モデルも低感度モデルも最近の気温の歴史を再現することができるけれども、二酸化炭素とエアロゾルによる合計の気温変化の出力については、観測や物理学から導かれたものではなく、要求された答えによって決定されているのは明らかなのである。

## 気候モデルは地球の温度を正しく計算できない

気候学者は、温暖化の速度を適当にごまかすことはできても、地球の温度については誤った計算をしている。とりわけ地表に降り注ぐ太陽エネルギーの量を大きく間違えているため、これは当然といえば当然の結果かもしれない<sup>10</sup>。

地球の表面温度の記録と気候モデルの出力は、温度としてではなく、長期間にわたる平均からの偏差（アノマリー）として表現されるのが普通である。しかし、このような表示方法では、気候モデルの計算結果における仮想上の気温が3°Cも異なるという重要な事実が隠されてしまう<sup>11</sup>。多くの重要な気候プロセスは気温に依存しているため、モデルがすべて正しいということはあるえないし、間違っていた場合の影響も大きい。例えば、極地の氷冠から

---

<sup>9</sup> Zhao M, et al. "Uncertainty in model climate sensitivity traced to representations of cumulus precipitation microphysics". *Journal of Climate*, 29, 543–560.

<sup>10</sup> 平均誤差は約  $7\text{Wm}^{-2}$  である。一方で、地球温暖化の原因と言われるエネルギー不均衡は  $0.5\sim 1\text{Wm}^{-2}$  に過ぎない。

Wild M, et al. (2015) 'The energy balance over land and oceans: an assessment based on direct observations and CMIP5 climate models'

*Climate Dynamics*, 44: 3393-3429 によると、これは「気候モデルにおける長年の問題」であるとのこと。

<sup>11</sup> IPCC WGI, AR5 Chapter 9, Figure 9.8.

反射される熱量は、そこの氷の面積に依存し、仮に気温が 3°C 変化すると大きく変化する。

このような難しい問題があるにもかかわらず、気候モデルは 20 世紀の気温史を再現してきたとしばしば言われている。しかし、最新世代の気候モデルの多くは、観測と全く相容れない気候史を作り出している<sup>12</sup>。さらに、上述したように、様々な「ごまかし要因」が利用できるため、うまく機能しているように見えても、実は誤解を招いている恐れがある。コンピュータモデルの信頼性の真のテストはその予測能力であり、ここでも気候モデルは観測された地表温度は IPCC が「ありそうだ」と考える温度予測の範囲からしばしば外れ、大気圏上層部の予測についてはさらに悪い結果を出している。

## 気候モデルは他にも多くの点で間違っている

気候モデルは、単純に地表の気温を正しく計算できないだけではない。気候システムには、他にも多くの誤ったシミュレーションが存在する。気候学者の中には、地表温度が正しく算出できないのは、実際の気候が深海に熱を伝えているからだと言っている人もいるが、この説明が正しいとしても、気候の主要なサブシステムが正しく捉えられていないことを示唆している。

気候モデルは、地表が温暖化すると成層圏が冷えるはずだと予測しているが、実際に観測されたのは、火山噴火の後だけである。それ以外では、逆に成層圏は温暖化している。対流圏も同様で、気候モデルは急激な温暖化を予測しているが、実際にはそんなことは起きていない。

気候モデルは気温の予測も苦手だが、降雨の予測はもっと苦手だ。IPCC でさえ、その能力は「そこそこ(modest)」としか言っていない。一方、他の人々は「役に立たない」と言い、その予測能力は長期平均の推定に基づく単純な予測よりさらに悪いと指摘している。

気候モデルは、ある特定の世界的な平均値に調整される傾向があるため、最近の気温上昇の観測を「逆算」することができる。しかし、その出力をより詳細なレベルで比較すると、平均値の使用が多くの偏りや誤りを隠していることが明らかになる。どの気候モデルも、地域レベルの気候を巧みに予測することはできない。

## 気候モデルはエネルギーを保存しない

エネルギーが保存されるというのは、物理学の基本的な原則であり、言い換えれば、あるシステムの総エネルギーは一定でなければならない。つまり、気候モデルが均衡を保つこと

---

<sup>12</sup> Z Hausfather et al. (2022) 'Climate simulations: recognize the "hot model" problem'. Nature, 4 May.



ができれば、仮想上の太陽から仮想上の大気へ入る熱と、出て行く熱は等しくなるはずである。しかし、最新の気候モデルは、この2つの数字が等しくないときに平衡に達する傾向があることが観察されている。モデルでのほとんどの仮想上の世界では、平衡時に到達する熱量が、出て行く熱量よりも大きい。これは、この熱の一部が「失われ」ていることを示しており、基本的な物理原則に反していることになる<sup>13</sup>。このことは、気候モデルによる予測の妥当性に大きな疑問を投げかけている。

## 気候モデルは未来を予測できない

この論文の前半で述べた問題点から、少なくとも現時点では、コンピュータモデルは将来の気候について多くを語るができないと読者は確信しているはずである。IPCCはこのことを一部認めており、気候はカオス的なシステムであるため、将来のどの時点の気候の状態も予測することは理論的にも不可能であることを指摘している。その代わりに、将来起こりうる気候の範囲について予測し、それぞれに確率を割り当てることに焦点を当てるべきであると提案している。しかし、過去20年の経験から、気候モデルによって予測される可能性の範囲でさえも十分ではなく、地球温暖化が起きすぎる一方で、自然変動の表現が全く不十分な傾向があることが示されている。

## 気候モデルが失敗していることは誰もが知っているが、誰もそれを指摘しない

気候モデルの不適切さは、この分野において十分に認識されている。しかし、著名な（主流派の）研究者であるレナード・スミスが指摘するように、不適切であるにもかかわらず、モデルの出力結果は、「もっともらしい反証」を可能にする言葉で表現され、政策立案者に意思決定を支援するのに十分であるとして提供されている<sup>14</sup>。さらに、スミス氏によれば、ある学会のグループによる気候モデル支持の共同声明は、その起草に関わった人々が、結果を偏差（アノマリー）として提示することによって体系的な誤りが隠されていることを知る

---

<sup>13</sup> Mauritzen T et al. (2012) 'Tuning the climate of a global model'. Journal of Advances in Modeling Earth Systems; 4: M00A01.

<sup>14</sup> Smith L, 'The user made me do it: Seamless forecasts, higher headlines and credible computation'.

<http://www.eas.gatech.edu/sites/default/files/SmithTalkGT.pdf>.にて入手可能。'目的に対して適切でない'我々が供給している情報は、あたかもそうであるかのように解釈されている。"Plausible Deniability" [sic] は、私には悪い目的のように思える'。

やいなや取り止められたのである<sup>15</sup>。

統計学者ジョージ・ボックスの有名な言葉に、「モデルはすべて間違っているが、いくつかは有用ではある」というものがある。気候学者がよく口にするこの言葉は、間違いなく正しいのだが、むしろそれが何のために有用なのか、という疑問を投げかけている。気候学者は、地球がどのように機能しているかを理解するためにコンピュータモデルを使う以外に選択肢はないのだから、この目的のためにはコンピュータモデルは有用であるだけでなく、実際には必要不可欠なものだ。

一方、気候モデルが政策決定に使われるべきものかどうか (relevance) はまったく明確ではない。政策立案者は、気候モデルが将来について確実な予測をしていると誤解しがちである。あまり評判の良くない科学者が責任ある立場にいることが多く、20 世紀の気温と気候モデルとの一致を指摘して、自分たちの主張を強調しようとするのである。

チューニングとごまかしの度合い、気温以外の気候指標がモデルと現実で一致しないこと、モデルの大失敗の例を目の当たりにして、初めて、これがいかに誤解を招くものであるかを知ることができる。

## 気候モデルは有害である

気候モデルには多くの欠陥があるにもかかわらず、その予測は政治家に有用であるとして受け入れられ続けている。政策立案者は、気候モデルの計算結果を、発展途上国にとって直ちに恐ろしい結果をもたらす決定を正当化するための根拠として利用している。これは気候変動というさらに大きな悪を回避するための、残念ながら必要な、不幸な措置とされる。

その一例が、2007 年に行われた、世界の作物の大部分をバイオ燃料に転用するという決定である。この決定は、貧しい国々に広く飢餓をもたらし、ある国連高官の言葉を借りれば「人道に対する罪」であった。また、英国と米国が化石燃料による発電所の開発プロジェクトに対する海外援助を打ち切ったことは、世界の最貧困層からエネルギーへのアクセスを奪い、囲炉裏で調理することを余儀なくさせる。これは間違いなく、室内大気汚染による早死の原因となることは広く知られている。

---

<sup>15</sup> 出典は今回も以下のスミス氏の談話。

'少なくとも一つまとまった (複数の団体の) 支持声明は、偏差 (アノマリー) がプロットされたときに系統的な誤差を「覆い隠す」ことを学習したため、表示されなくなった'