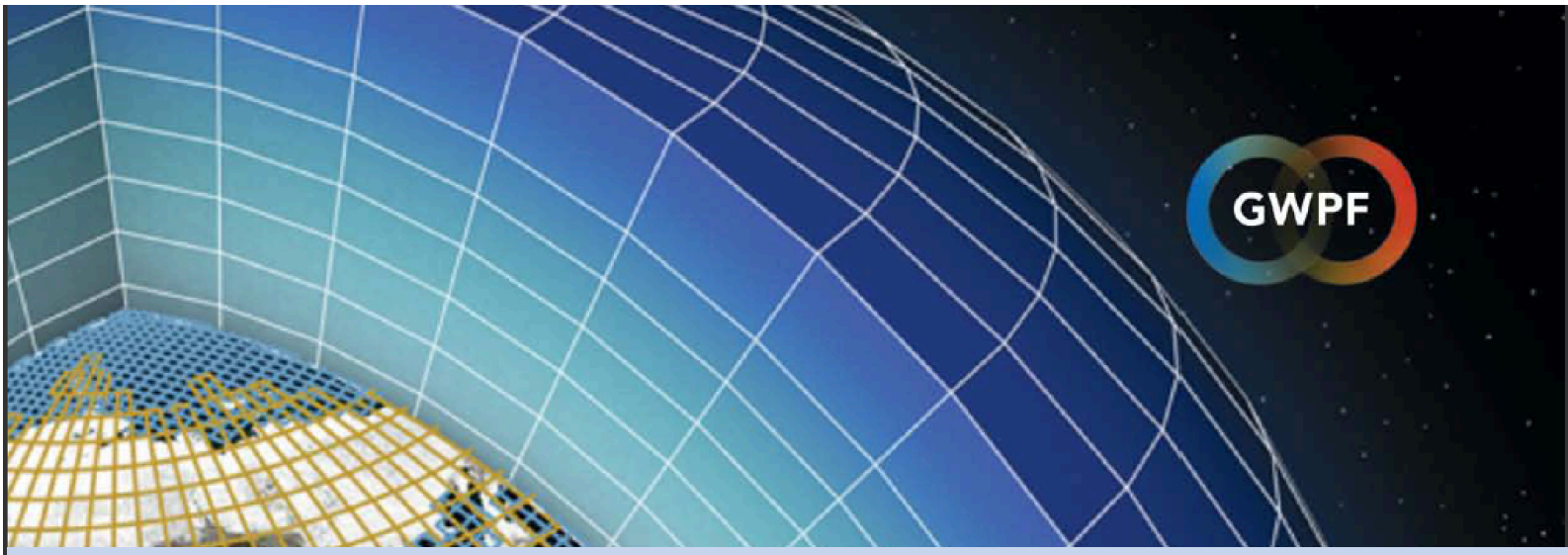
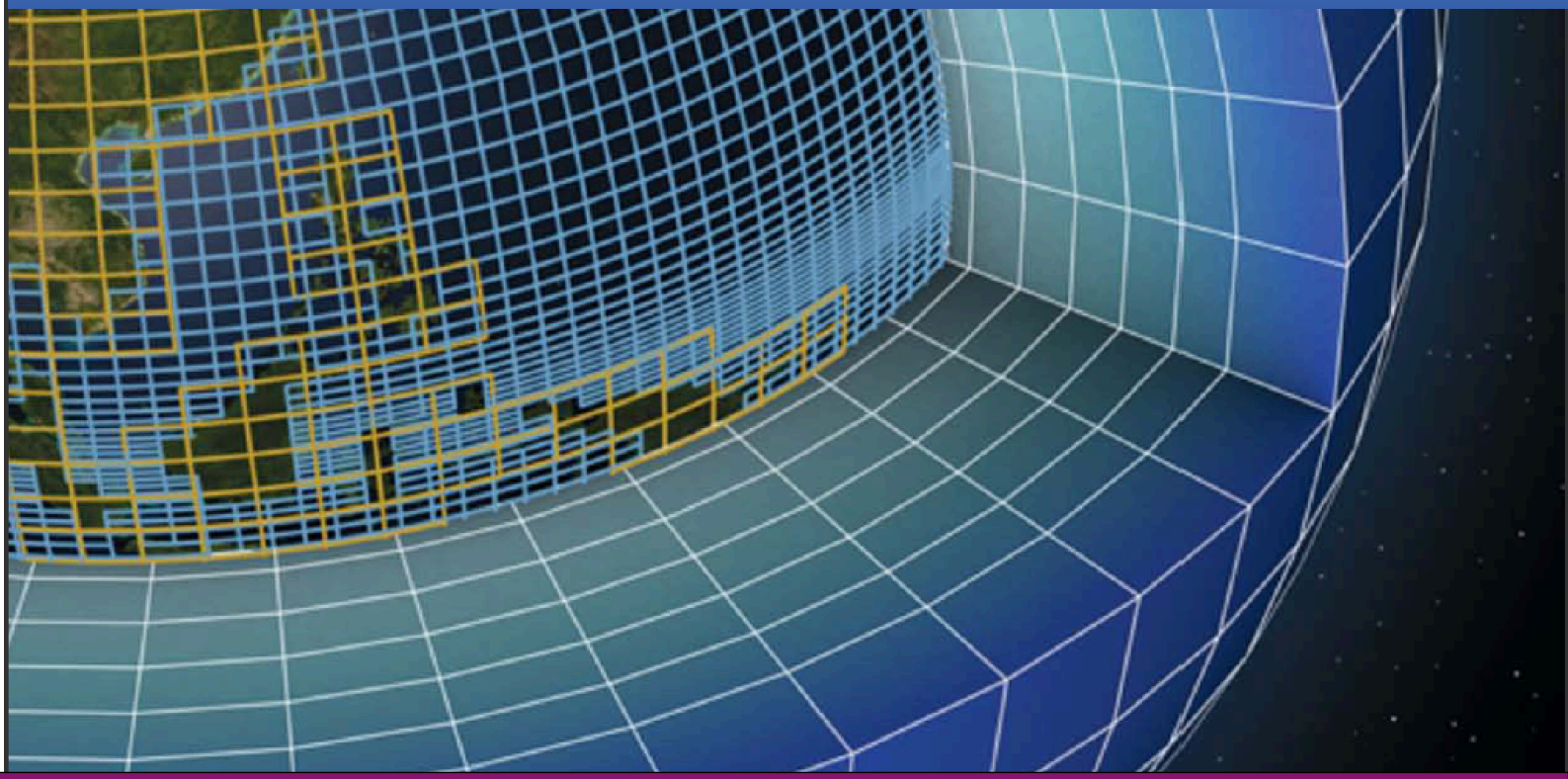


CLIMATE MODELS for the layman

だれにでもわかる
気候モデルの問題点

Judith Curry

ジュディス・カリー



The Global Warming Policy Foundation

GWPF Briefing 24

GWPFレポート

地球温暖化政策財団の刊行物での見解は、著者のものであり、GWPFおよびその評議員、学術諮問評議会委員、理事たちの見解ではありません。

地球温暖化政策財団 THE GLOBALWARMING POLICY FOUNDATION

局長

Benny Peiser

理事会

Lord Lawson (Chairman)
Lord Donoughue
Lord Fellowes
Rt Revd Dr Peter Forster, Bishop of Chester
Sir Martin Jacomb
Peter Lilley
Charles Moore
Baroness Nicholson
Graham Stringer MP
Lord Turnbull

学術諮問評議会

Professor Christopher Essex (Chairman)
Sir Samuel Brittan
Sir Ian Byatt
Dr John Constable
Professor Vincent Courtillot
Professor Freeman Dyson
Christian Gerondeau
Dr Indur Goklany
Professor William Happer
Professor David Henderson
Professor Terence Kealey
Professor Deepak Lal
Professor Richard Lindzem
Professor Robert Mendelsohn
Professor Ross McKitrick
Professor Garth Paltridge
Professor Ian Plimer
Professor Paul Reiter
Dr Matt Ridley
Sir Alan Rudge
Professor Nir Shaviv
Professor Philip Stott
Professor Henrik Svensmark
Professor Richard Tol
Professor Anastasios Tsonis
Professor Fritz Vahrenholt
Dr David Whitehouse

CLIMATE MODELS for the layman

だれにでもわかる
気候モデルの問題点

Judith Curry

ジュディス・カリー

(翻訳: 山形浩生)

© Copyright 2017 The Global Warming Policy Foundation

目次

著者について II

概要 III

1 地球気候モデルとは何だろうか？ 1

2 GCM はどこまで信用できるのか？ 4

なぜ科学者は GCM に自信があるのか？ 4

なぜ一部の科学者は GCM の信頼性に懸念を抱いているのか? 4

まとめ 5

3 気候モデルの欠陥 6

二酸化炭素に対する気候感度 6

カオスと自然の内部気候変動 8

意図的な適合性：20 世紀温暖化の要因 9

まとめ 11

4 GCM は気候変動予測のツールとして信頼できるか？ 12

21 世紀初頭についての温暖化予測 12

21 世紀末についての予測 14

5 まとめ 16

注: 17

著者について

ジュディス・A・カリー教授は天候と気候に関する科学論文を 180 本執筆し、1992 年にはアメリカ気象学協会からヘンリー・G・ホートン研究賞を受賞している。ジョージア工科大学で地球大気科学学部教授および学部長を務め、最近引退。現在は気候予測応用ネットワークの会長を務める。

概要

地球気候モデル（GCM）の信頼性と有用性についてはかなりの論争がある。この論争は気候科学者の間でも起きていて、観測に基づく分析に比べて気候モデルをどの程度重視すべきか意見がわかれている。また GCM の結果は経済学者や規制当局、政策担当者にも使われるので、さらに広い科学者、エンジニア、ソフトウェア専門家、科学哲学者たちからもかなりの指摘を受けている。この報告は、GCM を取り巻く論争について、素養はあっても専門家ではない人々に向けて説明する。

主要論点

- GCM はエンジニアリングや規制科学で一般に求められる、厳密な検証や裏付けを受けていない。
- 複雑で非線形の気候システムがそもそも予測できるのかという、もっともな懸念も存在する。
- 気候モデルは、20 世紀の温暖化のどこまでが人為的でどこまでか自然由来かを高い確信度で同定するには適さないという結論を支持する議論が無数にある。
- 気候モデルが大気中の二酸化炭素増加に基づいて予測する温暖化が大きすぎるという証拠が増えている。
- 気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が報じる 21 世紀についての気候モデルシミュレーション結果は、気候の変動を左右する決定的な要素をいくつか含んでおらず、したがって 21 世紀の気候が実際にどう推移するかという予測として役に立たない。

気候モデルは、気候システムを理解するための科学研究には便利なツールである。しかし上の論点から考えて、現在の GCM は 20 世紀の温暖化原因を同定したり、何十年、何百年という時間軸で世界や地域の気候変動を予測したりするには適さない。つまり GCM は世界の社会、経済、エネルギーシステムを根本的に変えるような政策を正当化するには適さない。そんな気候モデルから得られた結果を使おうとするから、気候モデルを取り巻く論争もなおさらとげとげしいものになってしまうのだ。

1 地球気候モデルとは何だろうか？

地球気候モデル（GCM）は、コンピュータを使って地球気候システムの粗いシミュレーションを作り出そうとするものだ。GCM には大気、海洋、地表、海氷、氷河をモデル化したモジュールがある。大気モジュールは風、温度、湿度、大気圧の推移を、コンピュータでしか解けない複雑な数式でシミュレートする。GCM はまた、海洋循環、それが熱をどう運ぶか、海洋が大気と熱や湿気をどうやりとりするかを表す数式も持っている。気候モデルの地表サブモデルは、植生、土壌、雪や氷による被覆が、大気とエネルギーや湿度をどうやりとりするかを記述する。GCM はまた、海氷や氷河のサブモデルも持っている。気候モデルの数式の一部は、ニュートンの運動法則や熱力学第一法則といった物理法則に基づいているが、モデルの主要プロセスの中には、物理法則に基づかない近似もある。

コンピュータでこうした方程式を解くため、GCM は大気、海洋、陸地を三次元のグリッドに切り刻む（図 1)。そしてグリッドのそれぞれのセルごとに方程式が計算される。これがシミュレーション期間を構成する時間ステップのそれぞれについて繰り返される[1]。

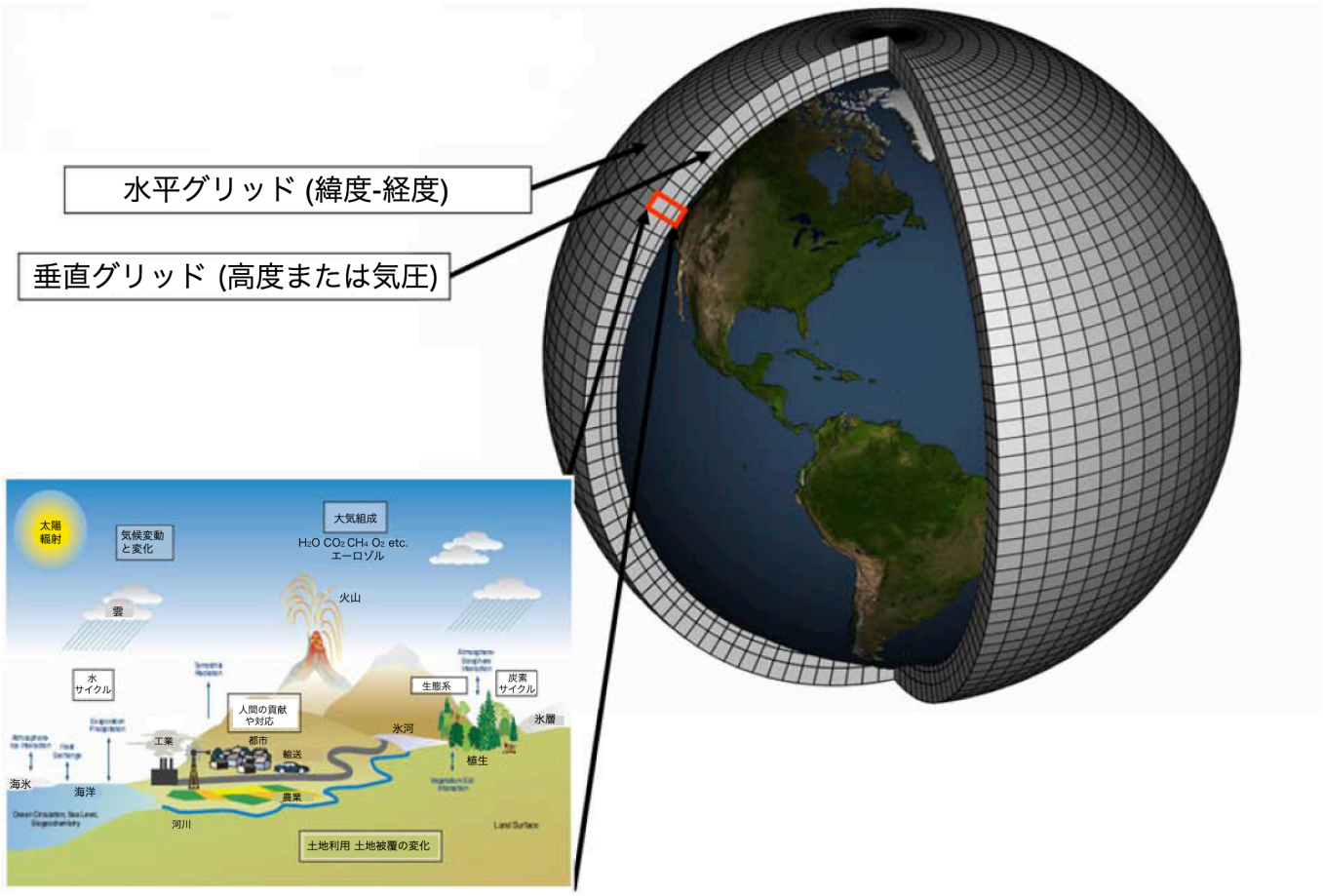


図 1 地球気候モデルの図式化

グリッドシステムに含まれるセルの数が、モデルの「解像度」(あるいは粒度)を決める。こうしたグリッドセルの中は、それぞれ同じ温度その他を持つと想定されるわけだ。GCM で一般的な解像度は、水平方向 100-200km、垂直方向は 1km、時間ステップは 30 分ごとが多い。解像度が高くなると、GCM はプロセスをもっとリアルに示すようになるが、それに伴い計算時間も激増する——解像度を 2 倍にすると、必要な計算能力は 10 倍になるので、現在のほとんどの気候モデルセンターでは処理できない。モデル解像度の粗さは、手持ちのコンピュータリソースに左右され、モデルの解像度と複雑性は、シミュレーションの長さと回数とのトレードオフ関係にある。モデルの空間的、時間的解像度がかなり粗いため、重要なプロセス（たとえば雲や降雨：図 1 の左側の図を参照）はモデル解像度より小さい規模で起こる。こうしたグリッド以下の規模のプロセスは、「パラメータ化」により表される。これは実際のプロセスを近似しようとする単純な数式で、実測に基づいたり、もっと詳細なプロセスモデルから導かれたりする。こうしたパラメータ化は、過去の観測値と気候モデルの出力とを近づけるために「補正」「調整」される。

GCM コンピュータソフトで使われる実際の数式は、気候システムで生じる物理プロセスの近似でしかない。こうした近似の一部はきわめて精度が高いが、一部はどうしても粗雑になる。これはその数式が表すプロセスが、あまりよくわかっていなかったり、コンピュータシステムの制約のためモデルに含めるには複雑すぎたりするせいだ。気候変動にとって重要なプロセスの中で、最も課題が多いのは雲と降雨に関連するパラメータ化で、各種 GCM の出力結果の差に最も大きく影響している。

GCM は以下のような目的で使われている：

- 気候システムの仕組みを理解する：感度実験で、一部の物理プロセスや外部強制（たとえば二酸化炭素、火山、太陽の出力）を消したり、抑えたり、増やしたりして、システムがどう反応するか調べる。
- 過去の気候状態を再現：過去の気候変動や変化の原因を理解する(たとえば、変化のうちどのくらいが二酸化炭素のような人間由来ものか、どのくらいが太陽の変化や火山噴火、海洋の循環鈍化といった自然要因か)
- 地球気候変動：数十年から数世紀にわたる将来気候状態のシミュレーション。たとえば各種排出シナリオの下で将来の気候状態をシミュレーションする。
- 極端な天候の見極め：極端な天候事象（たとえば熱波、干ばつ、ハリケーン）などの予測と統計的な見極め
- 地域機構変動：気候変動への適応をめぐる意志決定を支援するような、地域的な気候変動の予測
- 排出削減政策へのガイダンス
- 炭素の社会的費用：GCM の出力は、炭素の社会的費用を計算する生データとなる

GCM の具体的な狙いは、シミュレーションの目的次第となる。一般に、GCM で過去の気候をシミュレーションするときには、何か平均的な意味での気候状態の空間的変動を、正確に再現するのが狙いだ。将来の気候を予測するときには、ある特定の日における気候システムの条件をシミュレーションしたいのではなく、長期――通常は数十年かそれ以上――にわたる条件をシミュレーションして、その結果として得られた気候を実際の将来気候の統計と一致させることだ。

IPCC 評価報告書には、20 以上もの国際気候モデルグループが気候モデルシミュレーション結果を提出している。その多くの個別気候モデルグループは、複数のちがうモデルでシミュレーションを出す。どうしてそんなにちがう気候モデルがあるのだろう？ 「最高の」気候モデルを選べないのだろうか？

気候モデル構築には、文字通り何千ものちがう選択が存在する（たとえば解像度、サブモデルやパラメータ化の複雑性など)。選び方がちがうから、モデルがちがえば感度もちがってくる。さらにそれぞれのモデルグループは、注目したい部分もちがう。長期の古気候シミュレーション、海洋循環の細部、エーロゾル微粒子と雲との相互作用の細部、炭素サイクルなど、調べたいものは様々だ。こうした注目点のちがいのため、限られた計算資源を気候システムシミュレーションの特定の側面に集中させて、その他の部分は簡略化することになる。

「最高のモデル」を選べないのだろうか？ 確かに、いくつかのモデルは実測値と比べると全般にあまりよい結果となっていない。だが最高のモデルは「最高」の定義次第なので、あらゆる面で最高のモデルというものはない。

2 GCM はどこまで信用できるのか？

GCMは複雑なので、正しいモデルとか、正しくないモデルとかいう考え方にはあまりなじまない。重要な点は、モデルが現実をどこまでうまく再現するか、そしてそのモデルが意図した狙いにとって適切か、ということだ。

統計学者ジョージ・ボックスの有名な言葉がある。「あらゆるモデルはまちがっているが、中には役に立つものもある」[2] 。あらゆるモデルは不完全だ。完全なモデルは必要ない。目的にあったモデルさえあればいい。飛行機の設計で使われるモデルは、乱流のシミュレーション能力が不十分だ。人間行動の粗雑な想定に基づく金融モデルが、リスク管理に何十年も使われてきた。意志決定プロセスでは、モデルの利用は各種の要因に左右される。そうした要因の一つが、信頼性だ。

気候モデル開発は、おおむね科学的好奇心と計算能力の制約に左右されてきた。GCM はもともと、気候システムの仕組みを理解するツールとして設計されたものだ。気候の中で、実際の観察がとても困難な部分を表し、それまで実行困難だった計算を可能にすることで理論を試し、手に負えないほど複雑な方程式のシステムを理解し、気候システムを検討して予想外の結果を見つけたりするのに使われる。だから GCM は気候研究の重要な要素だ。

なぜ科学者は GCM に自信があるのか？

気候モデルを開発し、その結果を使う科学者たちは、それが研究に役立つと（少なくともある程度は）確信している。それは、各種プロセスの物理的理解がモデルに反映されていること、各種モデルや同じモデルの別バージョンでのシミュレーション結果が整合していて、モデルやその構成要素が過去の実測値を再現できているからだ。

予測モデルの信頼性は、その予測結果と現実世界の観測との対比で決定的に決まる。これは過去データの再現 (ハインドキャスト) と、実際の予測との両方について言える。短い時間幅では予測評価もできる (つまり天気予報だ)。ハインドキャストで現象を再現したり、過去の事象をそれ以前のデータから予測したりするのは、将来の事象をモデルが予想できるかどうかについて、必要条件ではあっても十分条件ではない。

なぜ一部の科学者は GCM の信頼性に懸念を抱いているのか?

GCM の不確実性は、モデル構造の不確実性、モデルのパラメータやパラメータ化の不確実性、初期状態の不確実性から生じる。そのモデルの解像度ではわからなかったり、適用できなかったりするパラメータの処理や、サブモデルとの接続には、補正――恣意的な調整や「チューニング」――が必要となる。モデルの絶え間ない恣意的な調整は、根底にあるモデ

ル構造の欠陥がごまかされてしまう。

こうしたモデルの補正／チューニングため、気候モデルの評価について懸念が提起されてきた。最近『サイエンス』で「気候科学者がブラックボックスを開けて検証を受ける」[3]という見事な論文が発表された。

> *実際、気候科学者たちが認めたがるかどうかはさておき、ほとんどあらゆるモデルは20世紀の気候記録にあわせて厳密に補正してある――そうでなければゴミ箱行きとなっていただろう。地球物理流体力学研究所（ニュージャージー州プリンストンにある、有力なモデリングセンターの一つ）の科学者アイザック・ヘルドは「すべてのモデルは補正を受けていると言ってまちがいないでしょう」と述べる。*

いまや 20 世紀の歴史的な温度と一致するというだけでは、モデルの良し悪しを決める指標にならない。つまり、20 世紀のデータを使って補正すれば、モデルの出す結果がその同じデータと一致するのはあたりまえだ。そんなモデルが示す 20 世紀気候変動の原因は、かなり怪しげなものとなってしまう。

複数のモデルシミュレーションやデータが一致するからといって、モデルが正解を正しい理由で出しているとはいえない。たとえば、IPCC 第 4 次評価報告（2007）のカップリングされた気候モデルは、どれも20世紀の世界平均地表温度変動の時系列を再現できるが、21 世紀の気候についてはまったくちがうシミュレーション結果を出す。さらに気候モデルを 1975－2000 年の観測値にあわせてチューニングすると、モデルは自然内部変動の温暖化フェーズにあわせて補正されてしまい、結果としてモデルは二酸化炭素に対して過剰に敏感となる。だから過去の状態を再現できても、将来の状態に関するシミュレーションについては、信頼度がきわめて限られてしまう。

まとめ

GCM は気候システム理解の重要なツールだが、その信頼性については広い懸念がある。

- 二酸化炭素増大が気候に与える影響についてのGCM の一世紀に及ぶ予測は、厳密な評価に耐えられない
- GCM の不確実性について十分に検討されていない
- モデルのパラメータやパラメータ化は、まったく制約なしに選択されているものが極度に多い
- エンジニアリングや規制科学ではあたりまえの、正式なモデル検証や確認がない
- GCM はモデルの補正に使うのと同じ観測値について評価されている
- 複雑な非線形システムは根本的に予測不可能だという懸念もある

3 気候モデルの欠陥

GCM が成熟するにつれて、政策担当者が参考にする例がますます増えてきた。国際気候エネルギー政策の根拠にされているのだから、本当にこの目的に適切かどうか評価が重要だ。特に GCM モデルの適切さを以下の二点について評価する必要がある。

- 20 世紀気候変動の原因を理解する
- 各種の排出シナリオの下で、21 世紀の気候状態をシミュレーションする

この節では、GCM の欠陥として大きな二つの問題に話を絞る。

- 増加する二酸化炭素に対する気候感度の決定
- 気候システムと内部の気候変動性が持つカオス的な性質

二酸化炭素に対する気候感度

人為的温暖化は、大気に追加された二酸化炭素の量だけでなく、気候がその二酸化炭素に対してどのくらい「敏感か」でも変わる。大気中の二酸化炭素濃度が 2 倍になったときの、平均地表温度の上昇を気候感度と呼ぶ。気候感度が高ければ、排出が増えるにつれて、今世紀中にかなりの温暖化が予想される。気候感度が低ければ、将来の温暖化はかなり低くなる。

平衡気候感度（ECS）は、大気中の二酸化炭素濃度が 2 倍になって、気候系が数世紀がかりでそれに反応した結果として生じる地球平均地表温度の変化と定義されている。ECS は直接計測できない。気候モデルシミュレーションと、過去の実測値とを元に、簡単なエネルギー収支モデルを使って推計する。

IPCC 第 4 次評価報告書（2007）での気候感度に関する結論は次の通り。

> *平衡気候感度は（…）2℃ から 4.5℃ の範囲内にある可能性が高く、最もよい推計値は 3℃ ほどで、1.5℃ 未満である可能性は非常に低い。4.5℃ 以上の数字も排除できない。*

IPCC 第 5 次評価報告書（2013）での気候感度に関する結論は次の通り。

> *平衡気候感度は（…）1.5℃ から 4.5℃ の範囲内にある可能性が高く（高い確信度）、1℃ 未満の可能性は極めて低く(高い確信度)、6℃ 以上の可能性は極めて低い（中程度の確信度)。*

この可能性が高い ECS の範囲は 3 倍の開きがある。人為的地球温暖化が危険かどうかは、ECS が 1.5℃ に近いか 4.5℃ に近いかで決定的に変わる。過去 30 年にわたる研究でも、この幅は絞られていない——1979 年全米科学アカデミーの研究（通称「チャーニー報告」）は、可能性が高い ECS の範囲として 1.5-4.5℃ を挙げている。

それどころか、2007 年第 4 次評価以来、ECS の値を巡る不確実性はかえって***高まった***らしい。「可能性が高い」範囲の下限は、2013 年第 5 次評価報告書で 2℃ から 1.5℃ に引き下げられたのに、第 4 次評価報告書では 1.5℃ 未満の可能性は非常に低いとされている。また第 4 次では、最もよい推計値として 3℃ が挙がっていたのに、第 5 次評価報告書ではそれがないのも重要だ。公式の理由は、実測による ECS 推計（低い）と気候モデルからの推計 (高い) が大幅に食いちがっているからだという。

表 1 で各種の ECS 推計値を比較した。挙げたのは、IPCC 第 4 次評価報告書（2007)[4]、第 5 次評価報告書（2013)[5]、第 5 次評価報告書に挙がった CMIP5 気候モデル[6]、Lewis and Curry 論文（2014)[7]の観測分析、それを低いエーロゾル強制を使って更新した Lewis 論文 (2016)[8]だ。

表 1：平衡気候感度の値

	最もよい推計	百分位	
	(℃)	第5位 (℃)	第95位 (℃)
第 4 次評価報告書(2007)	3.0	1.5	-
第 5 次評価報告書(2013)	-	1.0	6.0*
CMIP5気候モデル(2013)	3.22	2.1	4.7
Lewis and Curry論文(2014)	1.64	1.05	4.05
Lewis論文(2016)	1.54	1.12	2.38**

*第90百分位　**2015年まで更新

Lewis and Currey 論文（2014）は観測に基づくエネルギー収支アプローチを使って ECS を推計した。温室ガス変化といった気候変動の要因については第 5 次評価報告書での設定通りの値を使った。この論文で得られた ECS 値は、CIMPS5 気候モデルのほぼ半分だった。さらに値の幅も IPCC 報告よりずっと狭く、上限値ははるかに低かった。

最近の他の論文[9,10]も、同じように低い ECS を得ている。最新の研究から得られる値は***さらに低い***。ECS 推計で最も不確実なのは、大気中のエーロゾル微粒子（公害や自然由来のもの）の影響だ。微粒子は、気候を冷却させる(そして温室効果による温暖化をある程度相殺する)。IPCC 代表著者スティーブンスによる最近の論文[11]は、エーロゾルが気候に与える影響を第 5 次評価報告書より大幅に小さく想定している。Lewis 論文は、スティーブンス論文と同じエーロゾルの影響推計を使って Lewis and Curry 論文（2014）での計算をやりなおした[12]。最も大きな点として、上限（第95百分位）は 2.38℃ に下がった（表 1)。

第 5 次評価で使われた気候モデルシミュレーションの多く（CMIP5）では、エーロゾル強制値があまりに高すぎるらしい。低いエーロゾル強制値を使って再評価・再補正された気候モデルシミュレーションを使うと、ECS 上限を明らかにできる。最近のワークショップでの

発表[13]で、スティーブンスは気候モデル分析に基づき、ECS 上限を 3.5℃ にすべきだと主張した。気候感度の推計手法評価について研究は続いている。だがエーロゾル冷却推計が下がると、どうしても気候感度の推計上限も下がる。

GCM では、平衡気候感度は直接的に補正したりチューニングしたりできない「計算結果」となる。とはいえモデル化された気候感度の範囲は多少せばまりつつあるが、それでもモデルのパラメータ化を変えれば、各種モデルが出す感度の幅はいくらでも広がる。そしてモデルの各種バージョンの棄却/採用は、ECS の結果についてのモデル作成者自身の思いこみ、期待、偏見で決まってしまう。

各種気候モデル同士や気候モデルと実測とで、なぜ ECS は大幅にちがうのか？ 「気候モデルが見落としているものは？」という論文[14]で、スティーブンスとボニーはこう論じる:

> *雲と湿度の対流、あるいはもっと一般的に大気中の水と循環のカップリングの表現不適切が、現在の気候システム表現における主要な制約だという証拠がいまや大量にある。*

こうした ECS 値の乖離の意義とは？ もし ECS が 4℃ 以上ではなく 2℃ 以下なら、20 世紀の温暖化要因や、21 世紀の温暖化見通しは根本的に変わる。さらに気候感度の実測推計と GCM 推計の乖離はきわめて大きく、政策担当者にも大きな重要性を持つ。ECS とその不確実性は、費用便益分析や炭素の社会的費用推計の経済モデルでも重要な入力なのだから。

カオスと自然の内部気候変動

気候の変動は太陽の変化、火山噴火、あるいは二酸化炭素増加などの大気組成変化といった外部強制により起こることもある。気候はまた気候システムの内部プロセスで変わることもある (内部変動)。気候の内部変動として最も有名な例は、エル・ニーニョ/ラ・ニーニャだ。海洋のゆっくりした循環からは、十年単位、百年単位、千年単位の内部変動モードが生じる。このため海洋は気候変動の「フライホイール」となり、熱を長期にわたり貯蔵放出して気候を安定させる。そのタイムラグと海洋への熱貯蔵のため、気候システムは決して平衡しない。

IPCC 報告では、この数十年単位の内部変動は背景「雑音」だとされ、人為的な温暖化信号がそれを上回る形で検出可能かという検討が行われている。しかし自然の内部変動こそが最も重要な気候変動を生み出しているのだという主張も存在する。

大気と海洋の多くのプロセスは非線形だ。つまり原因と結果の間に単純な比例関係はない。大気と海洋の非線形力学は、ナビエ＝ストークス方程式[15]で表され (これはニュートンの運動法則に基づく)、これが風や、大気と海洋の循環を予測する基礎となる。ナビエ＝ストークス方程式の一般解は数学で最もむずかしい問題で、クレイ数学研究所[16]による数学の七大問題の一つだ。解けたら 100 万ドルの賞金が出る。

二つのカオス的流体、つまり海洋と大気をどう組み合わせるかという問題こそ GCM の最

も根本的な課題だとさえいえる。天候は決定論的カオス状態にあるとされる。つまり気象予測は大気の初期条件がわずかにちがうだけで激変してしまう。カオスの根源は、ナビエ＝ストークス方程式の非線形性だ。初期条件に敏感なので、ある期間より先になるとこの系はもはや予測不可能となる。天候の場合、この予想可能な期間は数週間程度だ。

GCM シミュレーションも初期条件（平均についてですら）に敏感だ。非線形のカオス的大気モデルを非線形のカオス的海洋モデルと組み合わせると、気象モデルの決定論的カオスよりはるかに複雑なものとなり、外部強制による変化（たとえば二酸化炭素濃度の上昇）という条件下ではそれがさらにひどくなる。大気/海洋を組み合わせると、数週間、年、十年、世紀、千年単位の内部変動が生じる。こうした組み合わせモデルは不安定性とカオスを引き起こす。これは現在の非線形動学系の理論ではほぼ表現できないし、パラメータ値が時間と共に変化する状況ではなおさらだ。Stainforth *et al.* 論文[18]はこの状況を「煉獄」と呼ぶ。

意図的な適合性：20 世紀温暖化の要因

すると気候モデルは、20 世紀温暖化の原因を明らかにできるのだろうか？ ここでは短期的な気候反応（感度）の不確実性と、自然の内部変動性の大きなモードが持つ規模や増減タイミングの不確実性が組み合わさっている。このため、外部から強制された気候変動と自然の内部変動とを、きれいに仕分けするのは不可能だ。実際の気候感度が推計値の最低値に近く、自然の内部変動が各種気候モデルでの想定の中で強いほうに偏っていたら、20 世紀の人間由来の温暖化は、実はあまり大きくないという結論になってしまう。

図 2 に 1850 年以来の地表温度の変動を示した。同じ時期についての気候モデルシミュレーションを図 3 に示す。モデルの出力は、1970－2000 年については観測された温度ととてもよく一致している。でも気候モデルは、1910 年から 1940 年にかけての大幅な温暖化、1940 年から 1970 年代末までの寒冷化、21 世紀初頭の温度停滞は再現できていない。

第 5 次評価報告書[20]の重要な結論は、1950 年以来の温暖化の半分以上が人為的なものである可能性がきわめて高いというものだ。そして気候モデルシミュレーションはこの温暖化がすべて人為的だと示唆している。

1950 年代以来の温暖化が人為的なら、1910－1940 年の温暖化を引き起こしたのは何だろうか？ 1910－1940 年は1900 年以来の温暖化の約 40%を占めるが、1900 年以来の二酸化炭素増加のうちこの時期のものはわずか 10% だ。明らかに、人間の温室ガス排出はこの初期の温暖化にまるで寄与していない。また 20 世紀半ば、1940－1975 年のわずかな寒冷化――「大停滞/大ハイエイタス（grand hiatus)」と呼ばれる――も十分な説明がない。

20 世紀温度のこうした説明のつかない変動に加え、地球気候が過去 200 年かそれ以上にわたり、一貫して温暖化してきたという証拠もある。19 世紀になると過去データはますます少なくなるが、バークレー地球表面温度プロジェクトは 1750 年までさかのぼる陸地の温度

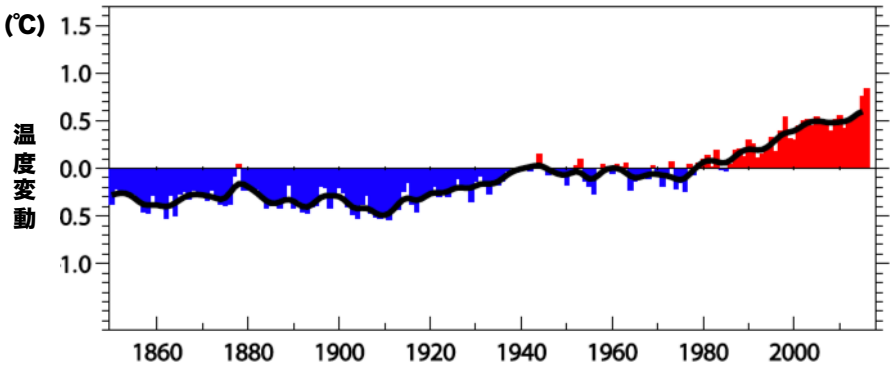
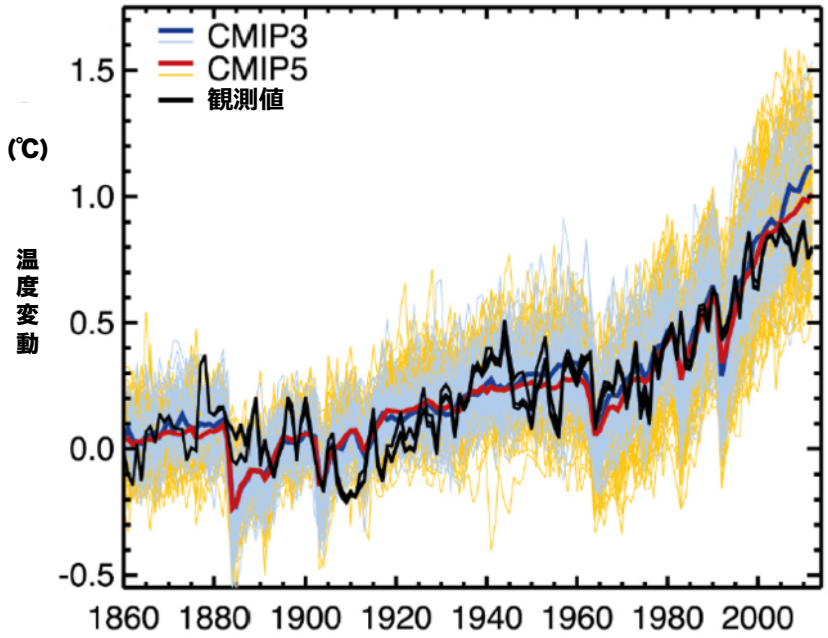


図 2：UK HadCRUT4 データセットによる温度の変動



出所：IPCC AR5 図10.1

図 3：世界地表温度の変動の CMIP3 と CMIP5 シミュレーションを観測値と比較

データを集めた（図 4)。この分析によれば、1800 年以来温暖化が続いており、19 世紀初頭にかなりの変動がある。この一部は巨大な火山噴火のせいだ。また、ダルトン太陽活動極小期（1791-1825 年）もあった。北半球気候の古気候学による復元――たとえば樹木の年輪やボーリングによるもの――は、温暖化がおおむね過去 300-400 年続いていたのではと示唆している[22]。この初期の地球温暖化には、人類はまったくと言っていいほど寄与していない。

300-400 年にわたる地上温暖化の原因は？ 答は太陽と海洋にありそうだ。海洋循環パターンは一世紀単位から千年単位で気候に影響する。全米アカデミー作業部会報告「地球気候における太陽変動の影響」[23]からもわかるように、太陽と気候のつながりに対する関心も復活しつつある。過去 400 年の、1950 年以前の気候変動に関する理解や説明は、これまであまりに無視されてきた。この理解がない以上、IPCC による 1950 年以降の温暖化の説明もまったく信用すべきではない。

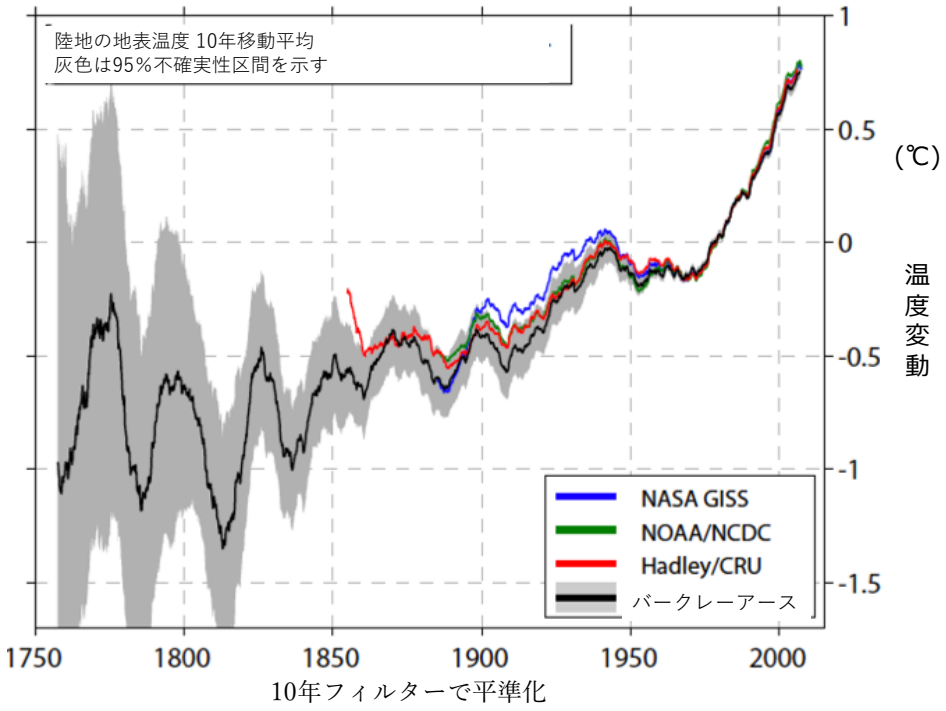


図 4 : 1750 年以来の世界地表温度の変動 [21]

まとめ

人為的気候変動は、基本的な仕組みは理論的によく理解されているが、その潜在的な規模はきわめて不確実だ。これまでの分析は、1950 年以来の人為的温暖化に IPCC が与えている「高い確信度」という評価にとってどんな意味を持つだろうか？ 気候モデルは、1950 年以来の温暖化すべてが人間のせいだと匂わせる。だが 30 年単位で見ると、全世界や半球毎の気候には大きな変動がある。これは 20 世紀末の温暖化と同じ期間だ。IPCC は、20 世紀のそれ以前の 30 年期について納得できる説明を持っていない。特に 1910-1940 年の温暖化と、1940-1975 年の大停滞（大ハイエイタス）が説明できていない。さらに少なくとも1800年以来（ヘタをすると 400 年前から）の地表温暖化トレンドがあり、これは二酸化炭素では説明がつかず、火山噴火でも部分的にしか説明できない。

20 世紀の温暖化の自然由来と人間由来の相対的な比率について、高い確信度で決定するのに気候モデルが適さないという証拠は以下の通り：

- 平衡気候感度（ECS）の大幅な不確実性
- GCM は十年から百年単位で起こる自然内部変動の規模や増減タイミングをシミュレーションできない
- GCM の補正/チューニングに 同じ20 世紀の観測データを使っている
- 気候モデルは 20 世紀初頭の温暖化や中期の寒冷化をまともに説明できない

4 GCM は気候変動予測のツールとして信頼できるか？

IPCC は、二酸化炭素排出を減らさないと 21 世紀末までに 4℃ かそれ以上の温暖化が起こるという恐ろしい予測を出した。

21 世紀初頭についての温暖化予測

この主張の信頼性を評価するには、まず GCM が 21 世紀初頭の気候変動シミュレーションでどのくらいの成績を挙げたか評価するべきだろう。IPCC 第 5 次評価報告書[24]の第11章は、2030 年までの短期の気候変動に注目している。図 5 は GCM 予測と、世界地表温度の変動の最近の実測値とを比べたものだ。

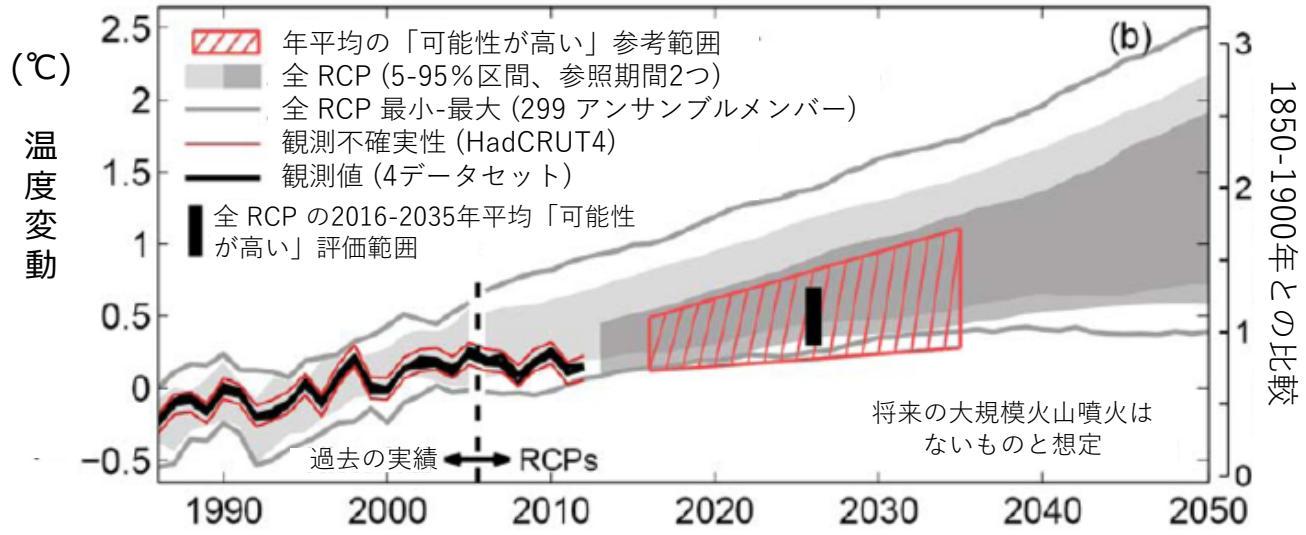


図 5：世界地表温度変動の CMIP5 気候モデルシミュレーションを 2014 年までの実測値（HadCRUT4）と比較したもの。出所: IPCC AR5 の Figure11.25

過去 10 年の実測世界温度は、CMIP5 気候モデルシミュレーションの 5-95%区間の下限にある。全体として、気候モデルシミュレーションのトレンドは、過去 15 年の実測トレンドを大幅に上回る。2015-2035 年期の予測を見ると、CMIP5 気候モデルシミュレーションの5-95%トレンド幅は、10 年あたり 0.11-0.41℃ となっている。でもそこで、IPCC は「専門家の判断」なるものを挙げて、予測を引き下げている（図 5 の赤い斜線部分):

> *しかし 1986-2005 年および 2016-2035 年で含意されている温暖化速度は、停滞（ハイエイタス）の結果 10 年あたり 0.10-0.23℃ という低い水準になっている。これは 第 4 次評価がこの個別期間における当時の予想の上限に近かったことを示唆している。*

この生の CMIP5 モデルシミュレーション結果からの予測引き下げは、一部のモデルが人為的な（二酸化炭素とエーロゾルによる）強制に敏感すぎるという専門家の判断に基づいて行われた。上図を作成した IPCC 著者エド・ホーキンスは、2015 年末までの地表温度観測結果を使って図を更新した（図 6)。2015 年エル・ニーニョによる地球温度急上昇でモデルと実測値は少し近づいたが、まだかなり開きがある。2015 年の温度上昇は、気候モデル予測の中間点にすら届かなかった。これに比べて 1998 年エル・ニーニョによる温度急上昇は、温度予測範囲の上限に達した。いまのところ 21 世紀の GCMは 、実測値の 2 倍程度の温暖化速度を示している。21 世紀初頭における実測値とモデルシミュレーションが乖離しているのは、どうやら自然内部変動のシミュレーションが不適切で、二酸化炭素増加に対してモデルの感度（ECS）が過大なせいらしい。

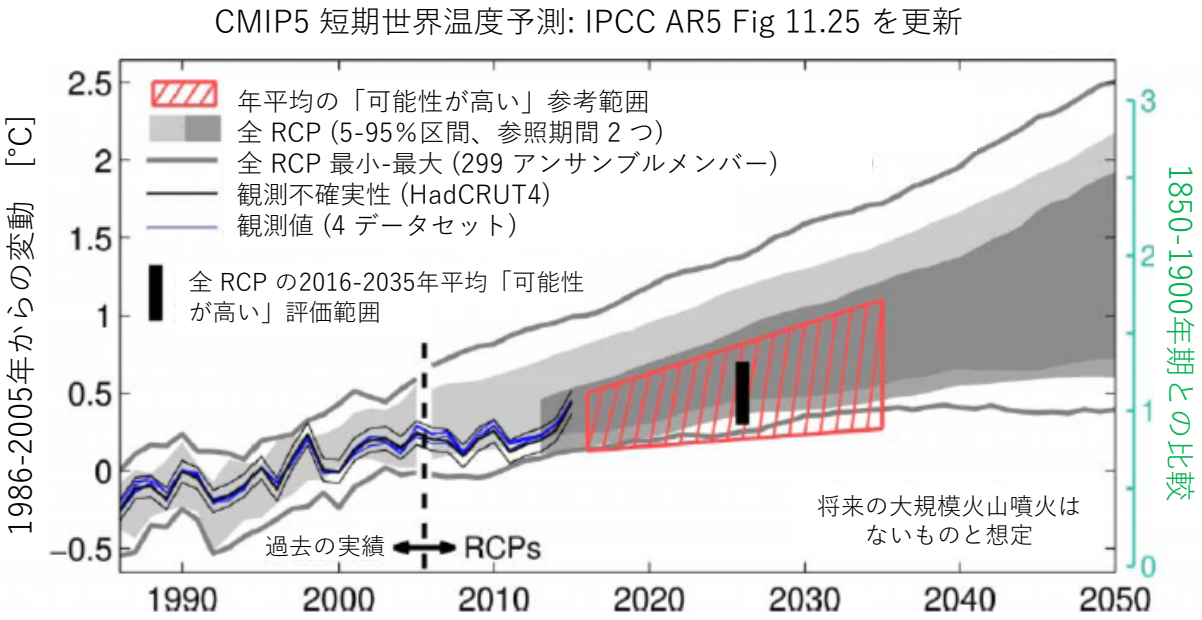
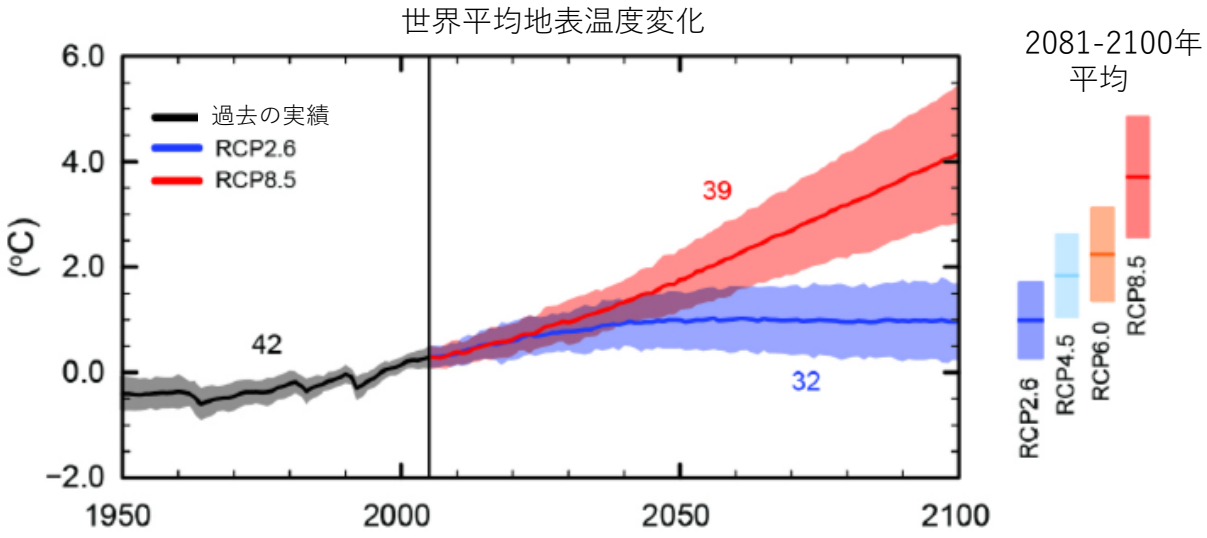


図 6：世界地表温度変動の CMIP5 気候モデルシミュレーションを 2015 年までの実測値（HadCRUT4)と比較したもの。IPCC AR5 の Figure11.25 を更新

この生の CMIP5 モデルシミュレーション結果からの予測引き下げは、一部のモデルが人為的（二酸化炭素とエーロゾルによる）強制に敏感すぎるという専門家の判断に基づいて行われた。上図を作成した IPCC 著者エド・ホーキンスは、2015 年末までの地表温度観測結果を使って図を更新した。2015 年エル・ニーニョによる地球温度急上昇でモデルと実測値は少し近づいたが、まだかなり開きがある。2015 年の温度上昇は、気候モデル予測の中間点にすら届かなかった。これに比べて 1998 年エル・ニーニョによる温度急上昇は、予測範囲の上限に達した。いまのところ 21 世紀の GCM は、実測値の 2 倍程度の温暖化速度を示している。21 世紀初頭における実測値とモデルシミュレーションが乖離しているのは、どうやら自然内部変動のシミュレーションが不適切で、二酸化炭素増加に対するモデルの感度（ECS）が過大なせいらしい。

21 世紀末についての予測

21 世紀末の世界温度変化に関する気候モデル予測は、気候変動に関する国際連合枠組条約[26]に基づいた二酸化炭素排出削減をめぐる国際交渉を左右している。図 7 に 21 世紀温暖化の気候モデル予測を示した。RCP8.5 は温室ガス排出が極端に増えるシナリオで、RCP2.6 は排出が 2015 年頃にピークとなり、その後急激に減るというシナリオだ。



1986-2005 年を基準とした 1950-2100 年世界年間平均地表温度変化の CMIP5 マルチモデルシミュレーション時系列データ。RCP2.6（青）とRCP8.5（赤）で予測の時系列データと不確実性指標（影の部分)を示した。黒（グレーの影）は過去を再現した強制を使った、モデルによる過去の推移。平均とそれに伴う不確実性を 2081-2100 年について平均したものを、すべての RCP について色つき垂直の棒で示した。

図 7 : IPCC AR5 WG1 の Figure SPM.7

RCP8.5 シナリオだと、CMIP5 気候モデルによれば 21 世紀ずっと温暖化が続き、はやくも 2040 年には「危険」とされる 2℃ の温暖化しきい値を超える。ちなみに CMIP5 シミュレーションは将来の温室ガス排出シナリオしか考慮しない。将来の火山噴火シナリオ、太陽変動や長期的な海洋振動のシナリオは含めない。ロシアの科学者たち[27]は、21 世紀半ばに大太陽極小期（冷却に貢献）がピークを迎えるはずだと論じている。

短期の温度予測は CMIP5 シミュレーションから引き下げられたが（図 5)、IPCC 第 5 次評価の政策立案者向け要約[28]は、長期的な温暖化について以下のように述べる。

> *2046-2065 年について可能性がある範囲は、短期（2016-2035 年）世界平均地表温度変化の評価範囲をモデル範囲の 5-95% より低いものとした各種要因の影響として考えられるものを考慮していない。これはそうした要因が長期予測に与える影響が、科学的理解の不足により定量化されていないためである。*

つまるところ、IPCC 第 5 次評価の第 1 作業部会*報告には、困った内部不整合が見られる。気候感度には大幅な不確実性があると結論し、2016-2035 年の公式温度予想を気候モデル予想から引き下げた。だが GCM が出す温度が高すぎるという認識にもかかわらず、2100 年までの残りの期間については、気候モデルの予測をそのまま維持しているのだ。

さらに困るのは、「気候変動緩和」に関するIPCC 第 3 作業部会報告書の分析がすべて、ECS の「最もよい推計」である 3.0℃ に基づいている点だ。科学評価では ECS の「最もよい推計」を選ばないことにした。これは GCM 推計と実測値の乖離のせいだった。温暖化は気候モデル推計の半分でしかないので、CMIP5 モデルが出す温暖化は、気候感度が低い場合の 2 倍になっている。 気候変動緩和に関する予測では、IPCC も認める気候感度の大きな不確実性が、まったく反映されていない。

IPCC の 21 世紀気候変動予測は、二酸化炭素こそが世界気候を左右すると明示的に想定している。だが 21 世紀気候に関する気候モデル予測に説得力がないのは以下の理由からだ：

- 21 世紀初頭の温暖化の減速を予測できていない
- 数十年単位の海洋振動のパターンやタイミングをシミュレーションできていない
- 将来の太陽変動や太陽が気候に与える間接的影響を考慮していない
- 比較的静かだった 20 世紀より火山活動が活発になる可能性を無視
- 温室ガス増大に対する明らかな過敏性

* 第 1 作業部会は科学評価。

5 まとめ

気候モデルがあまりに暑い予測値を出しており、二酸化炭素に対する気候感度は IPCC が提示した幅の下限にあるという証拠がますます増えている。それでもこうした気候感度の低い値は、21 世紀末の温度に関する IPCC 気候モデル予測には反映されておらず、また二酸化炭素排出削減が温度に与える影響の推計にも採り入れられていない。IPCC 気候モデル予測は、気候が各種排出シナリオにどう反応するかにばかり注目している。21 世紀の気候モデル予測は以下を含んでいない。

- 火山噴火の各種シナリオ（モデルはどれも、火山活動が 20 世紀と同程度と想定している。だが 20 世紀は 19 世紀よりも火山活動がずっと低かった）
- ロシア科学者たちが予測する太陽極小期などに見る、太陽冷却の可能性
- 気候感度がほとんどの気候モデルによるシミュレーションの半分程度だという可能性
- 十年から数世紀単位での自然内部変動の増減のタイミングや増幅に関する現実性あるシミュレーション

気候モデルコミュニティは、気候が人為的排出増加にどう反応するかにばかり注目し、政策コミュニティは（明示的にせよ暗黙にせよ）21 世紀 GCM シミュレーションを本当の予測として受け入れている。このため、私たちは上のような条件が気候に与える相対的な影響や、それが 21 世紀気候の展開にもたらす影響について、まともな理解が得られていない。

注:

1. J Curry (2016). Schematic of a global climate model. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/73/AtmosphericModelSchematic.png/350px-AtmosphericModelSchematic.png.
2. Wikipedia article, 'All models are wrong'. https://en.wikipedia.org/wiki/All_models_are_wrong.
3. P Voosen (2016), 'Climate scientists open up their black boxes to scrutiny'. *Science* 354:401–402. http://www.sciencemagazinedigital.org/sciencemagazine/28_october_2016?sub_id=rhBdITkIMETR&u1=16468821&folio=401&pg=17#pg17
4. IPCC (2007). Summary for Policy Makers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/spm.html.
5. IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf.
6. G Flato *et al*. (2013). 'Evaluation of climate models'. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5_WGI-12Doc2b_FinalDraft_Chapter09.pdf.
7. N Lewis and JA Curry (2014) 'The implications for climate sensitivity of AR5 forcing and heat uptake'. *Climate Dynamics*
8. N Lewis (2016) Updated climate sensitivity estimates. Climate Etc blog, 25 April 2016. https://judithcurry.com/2016/04/25/updated-climate-sensitivity-estimates/.
9. RB Skeie, T Berntsen, M Aldrin, M Holden, and G Myhre, 2014. 'A lower and more constrained estimate of climate sensitivity using updated observations and detailed radiative forcing time series'. *Earth System Dynamics*, 5, 139–175.
10. T Masters (2013) 'Observational estimates of climate sensitivity from changes in the rate of ocean heat uptake and comparison to CMIP5 models'. *Climate Dynamics*, doi:101007/s00382-013-1770-4
11. B Stevens (2015) 'Rethinking the lower bound on aerosol forcing'. *J. Climate*, http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-14-00656.1.
12. N Lewis (2015) 'Implications of lower aerosol forcing for climate sensitivity'. http://judithcurry.com/2015/03/19/implicationsof-lower-aerosol-forcing-for-climate-sensitivity/.
13. G Stephens (2015). `A more mechanistic view of ECS'. Grand Challenge Workshop: Earth's Climate Sensitivities, Max-Planck-Institut für Meteorologie. http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/atmosphaere/WCRP_Grand_Challenge_Workshop/Ringberg_2015/Talks/Stephens_24032015.pdf.
14. B Stevens and S Bony (2013). What are climate models missing? *Science* 340(6136): 1053–1054. http://science.sciencemag.org/content/340/6136/1053.summary.
15. Multiphysics Cyclopedia article, `Navier–Stokes equations'. https://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations.
16. Clay Mathematics Institute, `Millennium Problems'. http://www.claymath.org/millennium-problems.
17. C Oestreicher (2007). `A history of chaos theory'. *Dialogues in Clinical Neuroscience* 9(3): 279–289. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3202497/.
18. DA Stainforth, MR Allen, ER Tredger and LA Smith (2007). `Confidence, uncertainty and decision-support relevance in climate predictions'. *Philosophical Transactions of the Royal Society* A 365: 2145–2161. http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/365/1857/2145.full.
19. http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/HadCRUT4.pdf.
20. IPCC (2013). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf.
21. R Rohde, RA Muller, R Jacobsen *et al*., 'A new estimate of the average Earth surface land temperature spanning 1753 to 2011'. *Geoinformatics and Geostatics: An Overview* 2013, 1:1 http://dx.doi.org/10.4172/2327-4581.1000101.
22. IPCC (2013). Figure 5.7, Chapter 5. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. http://www.climatechange2013.org/report/reports-graphic/ch5-graphics/, Figure 5.7
23. National Academy of Sciences (2012). 'The effects of solar variability on the Earth's climate: A workshop report'. National Academies Press. http://www.nap.edu/read/13519/chapter/1#xi.

24. IPCC (2013). Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 953–1028. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter11_FINAL.pdf.
25. http://www.climate-lab-book.ac.uk/comparing-cmip5-observations/
26. http://unfccc.int/2860.php.
27. Abdussamatov, H (2013) 'Current long-term negative energy balance of the earth leads to the new little ice age'. *Journal of Geology and Geophysics* 2: 113. http://omicsgroup.org/journals/grand-minimum-of-the-total-solar-irradiance-leads-tothe-little-ice-age-2329-6755.1000113.pdf.
28. IPCC (2013). Table SPM.2. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf.

GWPF BRIEFINGS

1 Andrew Turnbull	The Really Inconvenient Truth or 'It Ain't Necessarily So'
2 Philipp Mueller	The Greening of the Sahel
3 William Happer	The Truth about Greenhouse Gases
4 Gordon Hughes	The Impact of Wind Power on Household Energy Bills
5 Matt Ridley	The Perils of Confirmation Bias
6 Philipp Mueller	The Abundance of Fossil Fuels
7 Indur Goklany	Is Global Warming the Number One Threat to Humanity?
8 Andrew Montford	The Climate Model and the Public Purse
9 Philipp Mueller	UK Energy Security: Myth and Reality
10 Andrew Montford	Precipitation, Deluge and Flood
11 Susan Crockford	On the Beach
12 Madhav Khandekar	Floods and Droughts in the Indian Monsoon
13 Indur Goklany	Unhealthy Exaggeration
14 Susan Crockford	Twenty Good Reasons not to Worry about Polar Bears
15 Various	The Small Print
16 Susan Crockford	The Arctic Fallacy
17 Indur Goklany	The Many Benefits of Carbon Dioxide
18 Judith Curry	The Climate Debate in the USA
19 Indur Goklany	The Papal Academies' Broken Moral Compass
20 Donoughue and Forster	The Papal Encyclical: a Critical Christian Response
21 Andrew Montford	Parched Earth Policy: Drought, Heatwave and Conflict
22 David Campbell	The Paris Agreement and the Fifth Carbon Budget
23 Various	The Stern Review: Ten Years of Harm
24 Judith Curry	Climate Models for the Layman

地球温暖化政策財団（The Global Warming Policy Foundation）は、すべての党を含む無党派シンクタンクであり、登録済み教育慈善団体です。地球温暖化についての議論の分かれる科学については多様な見方を採る一方、現在促進されている多くの政策が持つ、費用面などの影響について深く懸念しています。

主な活動は、地球温暖化政策とその経済などの含意についての分析です。狙いは、最も頑健で信頼できる経済分析と提言を行うことです。何よりも私たちは、メディア、政治化や社会に対し、この問題全般と、彼らが現在あまりに曝されることの多い誤情報について、ニュースにふさわしい形で情報提供を行うことです。

GWPFの成功の鍵は、ますます多くの政策担当者やジャーナリスト、関心ある一般市民たちから私たちが獲得してきた信頼と信用です。GWPF の資金は圧倒的に、数多くの民間個人や慈善信託基金からの自発的な寄付からのものです。完全な独立性を明確にするために、エネルギー企業やエネルギー企業に大きな利害関係を持つ寄付は受け付けません。

地球温暖化政策財団の刊行物での見解は、著者のものであり、GWPF およびその評議員、学術諮問評議会委員、理事たちのものではありません。

発行：地球温暖化政策財団（GWPF）

GWPF についての追加情報およびこの報告書の印刷版をご希望の方は、以下までご連絡ください:

The GlobalWarming Policy Foundation
55 Tufton Street, London, SW1P 3QL
T 0207 3406038 M 07553 361717
www.thegwpf.org

Registered in England, No 6962749
Registered with the Charity Commission, No 1131448