

# 気候変動の科学と経済学\*

阪本浩章

神戸大学 経済学研究科

初稿：May 31, 2024 改訂：August 22, 2024

## Abstract

本稿では、気候変動問題を例に、社会科学の研究者が自然科学の知見を活用する方法について議論する。具体的には、気候モデルを用いた実験について解説した上で、実験データを活用するためのツールとして簡易気候モデルを取り上げる。応用例として、温室効果ガスの社会的費用を推定する。

Keywords: 気候変動, 簡易気候モデル, 温室効果ガスの社会的費用

# Science and economics of climate change

Hiroaki Sakamoto

Graduate School of Economics, Kobe University

## Abstract

This paper discusses the integration of natural science knowledge into social science research, particularly focusing on climate change. It highlights how social scientists can use natural science insights, specifically through climate models, to study and address climate-related issues. As an application, the paper explains how one can estimate the social cost of greenhouse gases by combining the output of climate models, climate emulators, and economic models.

Keywords: Climate change, Climate emulators, Social cost of greenhouse gasses

---

\*本論文は科学研究費補助金および住友財団環境研究助成の成果の一部である。執筆にあたって編集長の笹尾俊明氏と匿名の査読者から有益な助言を頂いた。ここに記して感謝申し上げます。

# 1 はじめに

気候変動政策は、人為起源の温室効果ガスの排出によって地球が温暖化するという、自然科学の知見に動機づけられたものである。ただその中で、社会科学が果たせる役割も決して小さくない。科学的な知見がどれほど蓄積されようとも、何をすべきかを自然科学に決めてもらうことはできないからである。自然科学で決められるのは「事実」であって、そこから直接的に「規範」が導かれるわけではない。明らかにされた（暫定的な）事実に基づき、社会を構成する人々自身が、この問題に対してどのような行動を取るべきかを選びとらねばならない。そのような主体的な意思決定が可能となるよう、自然科学（である）と規範分析（べき）との橋渡しを行うのが、社会科学が果たすべき役割であろう。本稿では、主に経済学への応用を念頭に、社会科学の研究者が科学的知見を活用する方法について議論する<sup>1)</sup>。

## 2 気候科学の知見

気候変動に関する自然科学的な知見と言うと、IPCC の評価報告書を思い浮かべる人も多いかもしれない。実際、「信頼できる科学的知見」として IPCC の報告書を引用し、それを議論の出発点とすることも多い。ただ、IPCC の報告書は既に解釈が加えられた二次資料であり、その内容が更新されるのにも時間がかかる。研究の自由度という観点からは、取捨選択がなされた後の資料に頼るのではなく、自然科学の一次資料に触れられるようになっておくほうがよい。そこで、そもそも気候変動に関する科学的な知見がどのように生み出されるのかを、気候モデルのシミュレーション実験を例に説明する。

### 2.1 気候モデル

気候モデルとは、端的に言えば、気候に関わる様々な変数（温度、圧力、速度、密度など）を支配する微分方程式体系のことである。具体的なイメージを持ってもらうために、経度を  $\lambda$ 、緯度を  $\phi$ 、標高を  $r$ 、時点を  $t$  として、座標  $(\lambda, \phi, r, t)$  における気候変数の値をベクトル  $\mathbf{x}(\lambda, \phi, r, t)$  で表す。我々が知りたいのは、この  $\mathbf{x}(\lambda, \phi, r, t)$  の値が位置  $(\lambda, \phi, r)$  や時点  $t$  に応じてどのように変化するのかということである。もちろん、気候の変化は外的な要因（太陽放射の周期変化や温室効果ガスなど）によっても影響を受ける。そこで、気候に影響を及ぼし得る外生的な変数のベクトルを  $\mathbf{u}(\lambda, \phi, r, t)$  と書く。すると、 $\mathbf{x}(\lambda, \phi, r, t)$  の変化は一般に、何らかの関数  $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  を用いて

$$\frac{d}{dt}\mathbf{x}(\lambda, \phi, r, t) = f(\mathbf{x}(\lambda, \phi, r, t), \mathbf{u}(\lambda, \phi, r, t)) \quad \forall \lambda, \phi, r, t \quad (1)$$

のような微分方程式によって表現できる。ただしここで、左辺の  $d/dt$  は物質微分である。この微分方程式について  $\mathbf{x}$  の初期値を与えた上で時間積分をとれば、任意の位置  $(\lambda, \phi, r)$  と任意の時点  $t$  における気候変数  $\mathbf{x}(\lambda, \phi, r, t)$  の値を求めることができる。実用上は、物理法則（運動量保存則、質量保存則、エネルギー保存則など）とパラメタリゼーション（理論や観測データに照らして妥当と考えられる関係式）によって関数  $f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  を定め、(1) を離散化した上でその解を初期時点から逐次的に数値計算することになる。モデルによって離散化やパラメタリゼーションの手法に違いはあるが、基本的な構造は同じと考えてよい。

気候モデルは、モデル内で内生的に扱われるプロセスの範囲に応じて、いくつかのクラスに大別される。中核をなすのは、大気大循環モデルと呼ばれるものである。このクラスのモデルは、海

や陸の状態を外生変数として、大気に関わる変数の値を内生的に決定する。これに対して、逆に大気の状態を外生的に与えた上で、海洋の循環プロセスを内生的に扱おうとするモデルが海洋大循環モデルである。さらに、大気大循環モデルと海洋大循環モデルとを結合し、陸海空の相互作用も含めた物理プロセス全体を記述したモデルは大気海洋大循環モデルと呼ばれる。大気海洋大循環モデルは気候変動のシミュレーションで中心的な役割を果たしており、太陽放射やエアロゾル、温室効果ガスの濃度等を入力  $u(\lambda, \phi, r, t)$  として、気温や水温、風速、水蒸気量といった変数  $x(\lambda, \phi, r, t)$  を出力する。ここで、温室効果ガスの大気中濃度がモデルの入力に含まれていることに注意しておく。大気海洋大循環モデルでは、温室効果ガスの濃度はモデルの外側から与えられる外生変数（つまりシナリオ）である。

人為起源の気候変動を念頭に置いた場合、温室効果ガスの濃度も内生的に決定されるようなモデルが望ましい。というのも、排出された温室効果ガスが大気中にどれだけ残留するかは地球の物質循環に依存しており、さらにその物質循環の働きも気候変動の影響を受けるからである。つまり、大気中濃度が気温に影響を及ぼすというだけでなく、逆に気温が大気中濃度に影響を及ぼす経路（フィードバック）も存在する。そのような物質循環を媒介としたフィードバック効果を捉えるために、近年では地球システムモデルと呼ばれるより包括的なモデルの開発が活発化している。地球システムモデルでは、大気海洋大循環モデルで描かれる力学的・物理的なプロセスに加えて、物質循環に関わる生物・化学的なプロセスも内生的に取り扱われる。地球システムモデルを用いたシミュレーションでは、温室効果ガスの大気中濃度はモデルの内部で決定される内生変数となり、代わりに温室効果ガスの排出量が外生的な入力として求められる。物質循環に関するモデルは、現時点では大気や海洋に関するモデルほど洗練されたものではないが、研究のポテンシャルも大きく残されており、今後の発展が期待される分野である。

## 2.2 気候モデルを用いた実験

上述のようにして構築された気候モデルは、様々な実験に活用されることで科学的知見を生み出す。気候モデルを用いた実験と言っても、基本的なアイデアは社会科学の実証実験と同じである。実証実験で何らかの介入の効果を測ろうと思えば、対象を「介入を受けるトリートメントグループ」と「介入を受けないコントロールグループ」とに分け、両者を比較することになる。これと同様に、人為起源の二酸化炭素の排出（介入）が気候に及ぼす影響を測るには、「介入を受ける地球（トリートメント）」と「介入を受けない地球（コントロール）」を用意して、ふたつの地球で気候の振る舞いがどのように変わるのを見ればよい。もっとも、現実には地球はひとつしか存在しないため、これを字義通りに実行することは難しい。そこで気候モデル、すなわち計算機の中で動く「もうひとつの地球」を使って実験するのである。

まず、気候モデルを使って「介入を受けない地球」を用意することを考えよう。気候の変動には、システムの非線形性などに起因する内部変動（例えばエルニーニョ）と、外的な強制力（太陽放射や温室効果）への応答として起こる変動とがあり、我々が捉えたいのは後者である。ただ、現実的な想定の下で実験を行っても、これらの変動が同時に起こるため、外部強制力への応答だけを切り出して捉えることは難しい。そこでまず、外的な要因（温室効果ガス濃度など）を基準となる時点の値で固定してシミュレーション実験を行う。基準年としては1850年（産業革命前の状態）が用いられることが多く、そのような条件で実施されるシミュレーションを産業革命前コントロール実験（piControl）などと呼ぶ。図1のパネルAは、この種のコントロール実験の結果を示したものである。コントロール実験で観察される気候の変動は、システムの内部変動のみを反映したものになり、これが「介入を受けない地球」の振る舞いと解釈される。

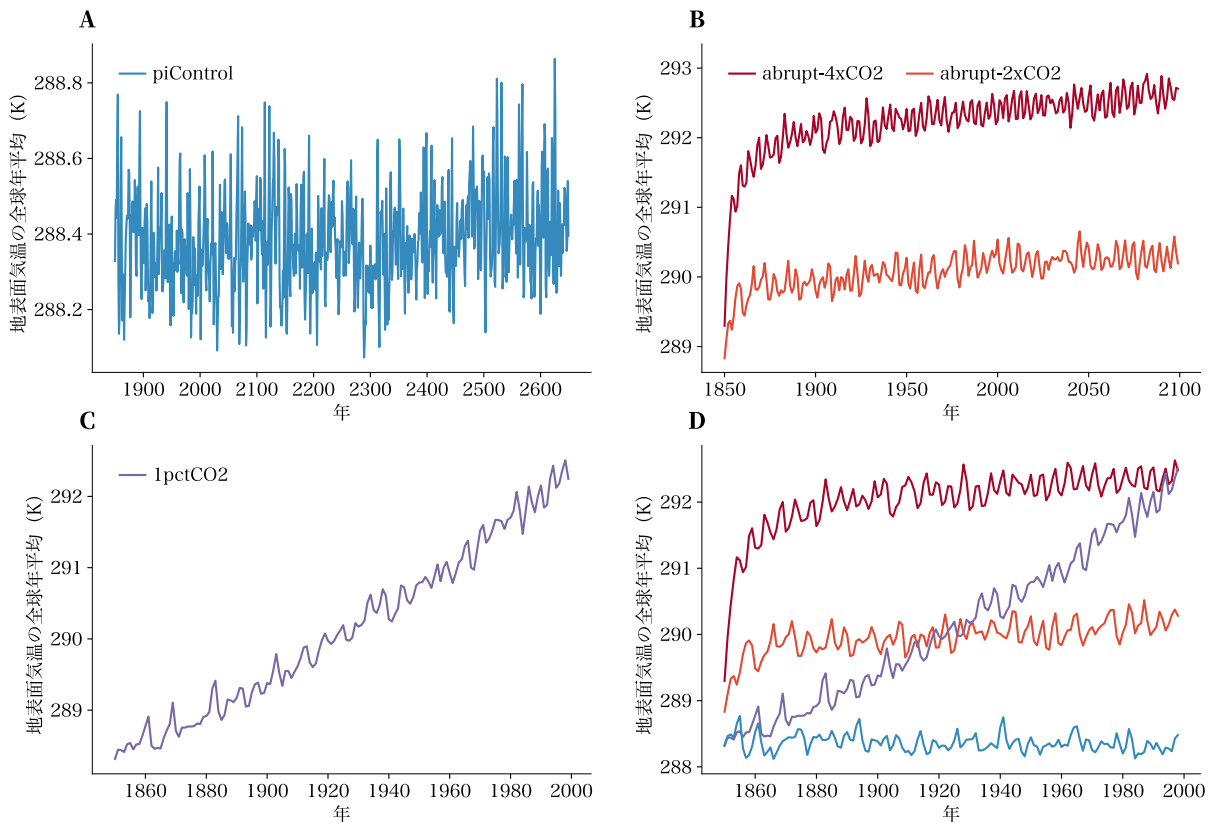


図 1: 気候モデル (MIROC6) の実験データ。  
出典: 著者作成。

一方の「介入を受ける地球」については、どのような想定で実験を行うべきであろうか。実験は計算機の中で自由に行えるものであるから、原理的にはどのような介入実験を考えてもよい。ただ、数値計算にもそれなりの時間がかかるため、必要な情報をなるべく効率的に引き出せるような実験が望ましい。そこで多くの場合、性質の異なる 2 種類の実験が用いられる。ひとつ目の実験は、大気中の二酸化炭素濃度を産業革命前の水準から 2 倍（あるいは 4 倍）に増やして固定し、そのような急激な強制力変化に対する気候の応答を見るというものである。この種の実験は倍増実験 (abrupt-2xCO<sub>2</sub>) や 4 倍増実験 (abrupt-4xCO<sub>2</sub>) と呼ばれる。現実とはかけ離れた想定であるが、外部強制力に対する気候の応答を理解する上で有用な情報を与えてくれる。気候の応答には、相対的に短い期間で起こるもの（大気や海面の応答など）もあれば、時間をかけてゆっくりと生じるもの（深海の応答や一部のフィードバック効果など）もある。倍増実験では、急激な濃度上昇に対する経時的な応答を見ることで、速い応答（直接的な影響）と遅い応答（間接的な影響）をある程度分離して測ることができる。また、2 倍や 4 倍という十分に強い強制力を与えることで、実験結果のシグナルノイズ比を高める（内部変動の影響を相対的に小さくする）という意図もある。倍増実験の出力結果の例を図 1 のパネル B に示した。この結果を見ると、強制力に対する応答の大部分は最初の数十年間で起こり、その後ゆっくりと時間をかけて長期的な均衡まで移行することが分かる。なお、倍増実験の出力結果は均衡気候感度を見積もるためにも用いられる。均衡気候感度とは、大気中の二酸化炭素を倍増した結果として長期的に生じる気温の上昇幅（パネル B のシミュレーションを遠い将来まで継続した時の収束先）のことである。

もうひとつの実験は、大気中の二酸化炭素濃度を産業革命前の水準から徐々に（年率 1% で）増加させるというもので、1% 漸増実験 (1pctCO<sub>2</sub>) と呼ばれる。こちらの実験も仮想的ではある



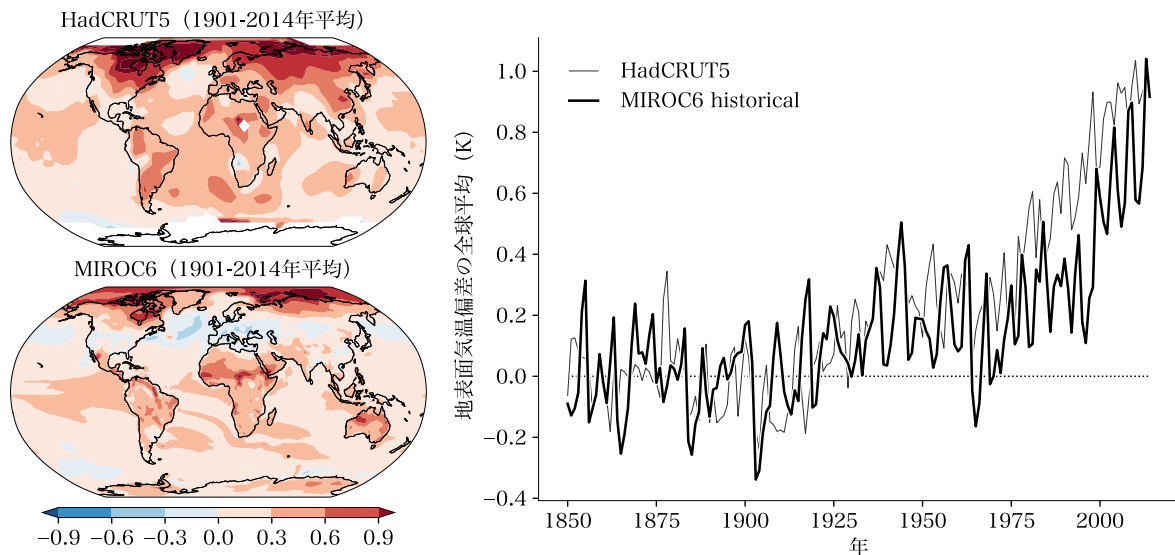


図 2: 気候モデルによる歴史実験.

出典: 著者作成.

が、比較的最ももらしい状況での気候システムの振る舞いを理解するために行われる。とくに、この実験で初期時点から約 70 年後に観察される気温上昇幅は過渡的気候応答と呼ばれ、強制力による直接的な影響と間接的な影響とが渾然一体となって生じるケースにおける気候システムの応答を測る尺度となる。70 年後に注目する理由は、その時点で二酸化炭素濃度が 2 倍に達する ( $e^{0.01t} = 2 \Leftrightarrow t = 100 \ln(2) \approx 69.3$ ) からである。図 1 のパネル C に、1% 漸増実験の出力例を示した。漸増実験では、倍増実験とは異なり、気温の応答がおおよそ線形になることが見て取れる。隣のパネル D は、三つの実験結果を比較したものである。これらの結果をコントロール実験の結果と比べることで、介入実験に見られる小幅の上下動の大部分は気候システムの内部変動によるものだと分かる。

### 2.3 歴史実験とシナリオ実験

上記の介入実験はいずれも仮想的な状況を想定したものであったが、より現実的な想定の下での実験も行われる。例えば歴史実験 (historical) と呼ばれる実験では、過去に観測された太陽放射やエアロゾル、温室効果ガス濃度を入力 (境界条件) として、1850 年から現在にかけてのシミュレーションを行う。気候モデルが現実の気候システムを正しく表現しているならば、この実験から得られる出力は過去の気候を再現するものになるはずである。当然ながら、モデルを用いた実験が意味を持つのは、そのモデルが記述対象の振る舞いを適切に捉えている場合に限られる。その意味で、歴史実験の結果が過去の観測データと整合的であるかどうかは、気候モデルの性能を評価するための重要な指標であり、当該モデルから出力される結果全般に対する信頼性を左右する。具体例として、図 2 に MIROC6 (海洋研究開発機構, 国立環境研究所, 東京大学を中心に開発されている大気海洋大循環モデル) の実験結果を示した (Tatebe and Watanabe, 2018)。同じ図に、英国気象局のハドレーセンターとイーストアングリア大学の気候研究ユニットが提供する観測データ (HadCRUT5) も示してある (Morice et al., 2021)。気候モデルの出力は、観測データと完全に一致するわけではないが、過去に起こった気温の上昇傾向を地理的な分布も含めて概ね再現できていることが分かる。

気候モデルを用いた実験は、過去を再現するというだけでなく、将来を「予測」するためにも

行われる。もっとも、将来については観測に基づく入力データは存在しないため、何らかの形で外部強制力に関するシナリオを作成し、それをインプットとしてモデルに与える必要がある。そのような将来シナリオの代表例に、共通社会経済経路がある。共通社会経済経路とは、人口変化や経済成長、技術発展、社会情勢といった、将来の排出量を決定付ける諸々の要因の組み合わせについて、複数の「可能性」を列挙したものである。例えば、人口があまり増加せず、経済は安定的に成長し、廉価な削減技術も利用可能となり、社会の中で環境問題を解決することの優先順位が高くなるというような将来は、ひとつの可能性として考えられる。あるいは別の可能性として、人口増加が続き、経済成長は不安定で、目ぼしい削減技術も開発されず、他の社会問題が深刻化する中で環境問題への対応が後回しになるということも考えられる。このような可能性の中から、十分なバリエーションを持たせた5つの筋書き（SSP1からSSP5まで）を選び、各筋書きについて統合評価モデルを使ってベースラインの排出量（およびそのシナリオの下で実現可能な削減が進められた場合の排出量）を定量化したものが共通社会経済経路である。

統合評価モデルから出力された排出量データは、気候モデルを使ったシナリオ実験の入力として用いられる。歴史実験で計算された最終年の出力を初期値に、各シナリオに対応する排出量データを境界条件として、2100年までシミュレーション実験を行うのである。地球システムモデルであれば、排出量データをそのまま入力として用いることができる。大気海洋大循環モデルの場合には、簡易気候モデル（MAGICC）を用いて排出量を濃度に変換し、それがシミュレーションの入力となる。このようなシナリオ実験の結果を図4のパネルCに示した。図中のssp119は、ベースラインの排出量が低く、削減を容易にする環境も整っているケース（SSP1）で、なおかつ十分な削減政策が実施される（その結果として2100年時点の放射強制力が $1.9\text{W}/\text{m}^2$ に抑えられる）場合のシナリオである。一方、図の上端に位置するssp585は、ベースラインの排出量がそもそも高く（SSP5）、その上で削減政策も実施されない（その結果として放射強制力が $8.5\text{W}/\text{m}^2$ まで上昇する）場合のシナリオである。各シナリオ実験の出力は、仮にその排出シナリオが現実のものとなった場合に実現するであろう気候の状態を示している。その意味で、これらの実験結果は将来時点の気候変動を「予測」するものと言えなくもない。ただ、入力として用いられる共通社会経済経路自体は将来を予測するものではなく、あくまで可能性を列挙したものであるということに注意しなければならない。つまり、純粋な将来予測というよりも、社会経済的な要因や我々の選択によって起こりうる気候変動の範囲を定量的に示したものと解釈されるべきである。

## 2.4 実験データの取得と加工

気候モデルが出力した実験データの多くは、気候科学の研究者以外にも広く公開されている。とくに、結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP）と呼ばれる国際プロジェクトを通じて大量の実験データが生成・蓄積されており、その全てがESGFと呼ばれる分散型のデータグリッドを介して入手可能である。CMIPは、異なるモデルの出力を比較することを通して、実験結果の信頼性を評価したり気候モデルを改良するための指針を得たりすることを目的としている。そのため、入力データや実験プロトコル、出力フォーマットが統一されており、複数の気候モデルを同一条件で比較することが可能になっている。第6期相互比較プロジェクト（CMIP6）では、2023年末時点で49の機関が131のモデルを用いて322種類の実験を行い、合計で635万を超えるデータセットを公開している。なお、このデータベースは気候科学に携わる研究者の基礎資料となるだけでなく、IPCCの評価報告書の主たる情報源としても利用される。実際、CMIPはIPCCと独立したプロジェクトではあるが、実質的には評価報告書の出版サイクルを強く意識して進められるようになっている。図3に、CMIPを通じた実験データの生成プロセスの概要を示した。

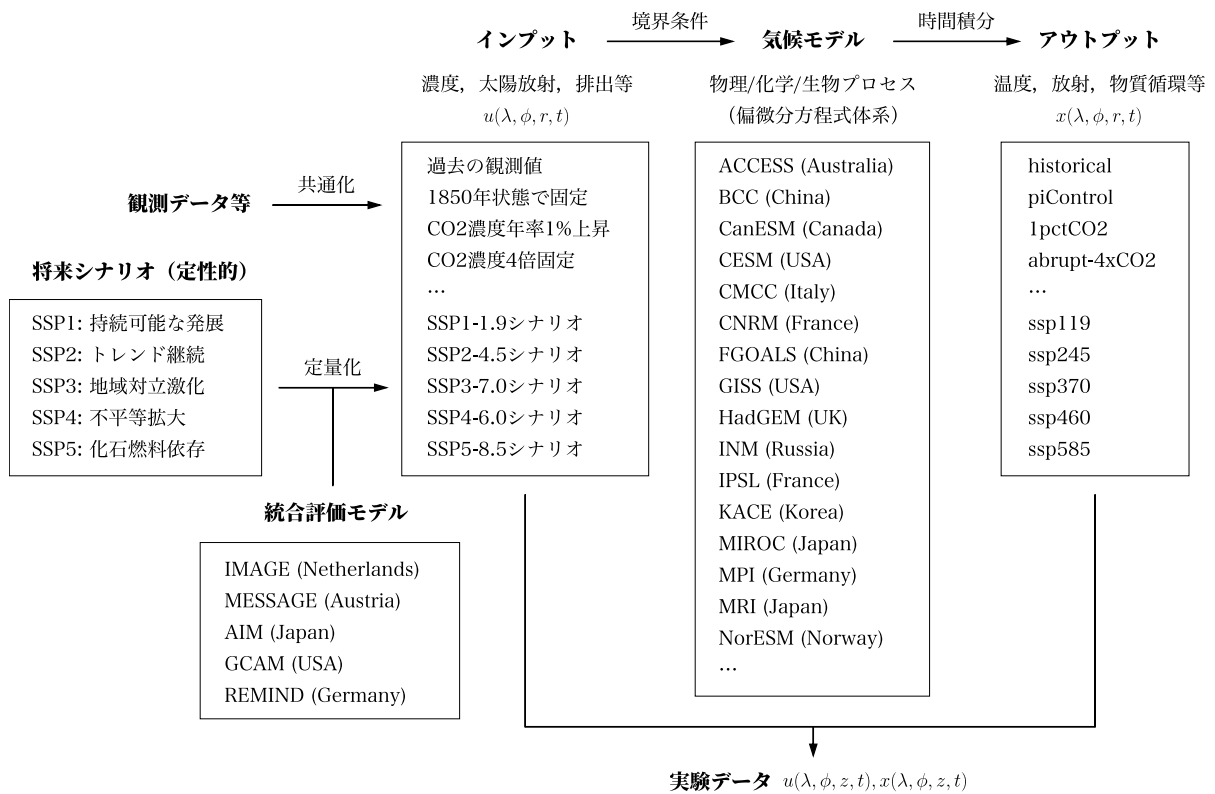


図 3: 気候モデルを用いた実験データの生成プロセス

出典: 著者作成.

気候モデルの実験結果を活用するためには、出力データの中から必要な情報を見つけ出し、それを分析に適した形に加工するスキルが求められる。例えば、特定の気候モデルの実験データを使って、歴史実験における地表面温度の全球年平均を時系列で求めたいとしよう。まずはモデル名（例えば MIROC6）や実験名（historical）、変数名（地表面温度は tas）などを指定し、ESGF から該当する実験データを取得する。実験データは netCDF 形式の多次元配列データ  $x(\lambda, \phi, r, t)$  になっており（tas については  $r$  は地表面 2m に固定）、時点  $t$  だけでなく、緯度  $\lambda$  と経度  $\phi$  ごとに異なる値（格子内平均値）が格納されている。したがって、ある時点  $t$  における全球の平均値  $x(t)$  を得るためには、 $x(t) = \sum_{\lambda, \phi} w(\lambda, \phi) x(\lambda, \phi, t)$  のように、適切な重み  $w(\lambda, \phi)$  を用いて各格子の値を集計しなければならない。気温の例では、重み  $w(\lambda, \phi)$  にはその座標における格子の面積（を合計が 1 になるように規準化したもの）を用いる。重みが緯度や経度に依存するのは、座標によってひとつの格子がカバーする地表面積が異なるからである。例えば単純な 1 度 × 1 度の格子であっても、高緯度地域ではひとつの格子が相対的に狭い地表面を表すため、低緯度地域の格子に比べて小さい重みが与えられなければならない。大気変数用の格子面積データ（CMIP の変数名は areacella）が出力データに含まれている場合には、それを重み付けの計算に用いることができる。そうでない場合、地球を回転楕円体と仮定して各格子の座標から格子面積を近似的に求めればよい。また、多くの実験データは月次データ（あるいはそれより短い時間間隔）で提供されるため、時間次元での集計も必要である。

### 3 簡易気候モデル

前節で述べたような気候モデルを、社会科学の研究者がそのまま応用研究に用いるのは現実的ではない。大規模なモデルを走らせるためには膨大な計算機資源が必要で、そのような研究環境にアクセスできる人間は限られているからである。さらに、近年の大気海洋大循環モデルや地球システムモデルは高度に複雑化しており、専門家以外がモデルの内容を理解した上で応用することは極めて困難と言えよう。そこで、分野外の研究者が気候科学の知見を活用するための「インターフェイス」が必要になり、それが簡易気候モデルと呼ばれるものである。

#### 3.1 一般モデル

微分方程式 (1) で表現される気候モデルは、空間的な広がりを持つ 3 次元モデルである。一方、応用的な研究ではそのような空間な広がりを捨象して、気候変数の集計値（あるいは平均値）のみを考えることが多い。そこで、(1) を大幅に簡略化した

$$\frac{d}{dt}\mathbf{x}(t) = \bar{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \quad \forall t \quad (2)$$

というモデルを考えよう。ここで  $\mathbf{x}(t)$  と  $\mathbf{u}(t)$  は、(1) における  $\mathbf{x}(\lambda, \phi, r, t)$  と  $\mathbf{u}(\lambda, \phi, r, t)$  を空間座標に関して集計したものである。このようなモデルは、気候システムの振る舞いを集計レベルで捉えようとするもので、簡易気候モデルと呼ばれる。簡易気候モデルは、3 次元モデルとの対比で 0 次元モデルと呼ばれたり、「本格的な」気候モデルを模倣するものという意味でエミュレータと呼ばれたりすることもある。一口に簡易気候モデルと言っても、(2) の  $\bar{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u})$  をどのように選ぶかに応じて、幅広いバリエーションが存在する。

いくつかの簡易気候モデルは、(2) を均衡状態のまわりで線形近似することから出発する。ここで言う均衡（自然科学分野では「平衡」と訳されることが多い）とは、外的な要因  $\mathbf{u}(t)$  が一定の水準  $\bar{\mathbf{u}}$  で推移した時に長期的に実現する  $\mathbf{x}(t)$  の値のことである。すなわち、 $\mathbf{0} = \bar{f}(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{u}})$  を満たす  $\bar{\mathbf{x}}$  が均衡状態における  $\mathbf{x}(t)$  の値である。この均衡状態  $(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{u}})$  のまわりで (2) を線形近似すると、 $\bar{f}_{\mathbf{x}}$  と  $\bar{f}_{\mathbf{u}}$  をそれぞれ  $\mathbf{x}$  と  $\mathbf{u}$  に関する  $\bar{f}$  の微分として、

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{x}(t) - \bar{\mathbf{x}}) \approx \underbrace{\bar{f}_{\mathbf{x}}(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{u}})}_{\mathbf{A}}(\mathbf{x}(t) - \bar{\mathbf{x}}) + \underbrace{\bar{f}_{\mathbf{u}}(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{u}})}_{\mathbf{B}}(\mathbf{u}(t) - \bar{\mathbf{u}}) \quad (3)$$

を得る。これは、簡易気候モデルの最も基本的な形であり、ボックスモデルなどと呼ばれる。(3) は線形システムであるから、数値計算に頼らず、解析的にシステムの挙動を特徴づけることができる。

またボックスモデル (3) は、インパルス応答表現と呼ばれる形に書き直すこともできる。具体的には、 $\mathbf{A} = \mathbf{P}\mathbf{\Lambda}\mathbf{P}^{-1}$  のように固有値分解すると、 $\mathbf{Q} := \mathbf{P}^{-1}\mathbf{B}$  として、(3) は

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{z}(t) - \bar{\mathbf{z}}) = \mathbf{\Lambda}(\mathbf{z}(t) - \bar{\mathbf{z}}) + \mathbf{Q}(\mathbf{u}(t) - \bar{\mathbf{u}}) \quad (4)$$

および

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{P}\mathbf{z}(t) \quad (5)$$

のように書き換えられる。ここで  $\mathbf{z}(t)$  は、(5) によって  $\mathbf{x}(t)$  と関連付けられる仮想的な（対応する物理量が現実には存在しない）変数で、(4) の微分方程式に従って時間変化する。具体的には、



$\Lambda$  が  $A$  の固有値を並べた対角行列であることから、 $z(t)$  の第  $i$  成分は、 $q_{ij}$  を行列  $Q$  の要素として

$$z_i(t) - \bar{z}_i = \int_0^t e^{-\frac{t-s}{\tau_i}} \sum_j q_{ij} (u_j(s) - \bar{u}_j) ds, \quad \text{ただし } \tau_i := -\frac{1}{\lambda_i} \quad (6)$$

と書ける。すなわち、 $z_i(t)$  は互いに独立したプロセスで、その時定数  $\tau_i$  が固有値  $\lambda_i$  の逆数で与えられるものである。したがって (5) は、 $\mathbf{x}(t)$  を応答速度の異なる独立プロセス  $z_1(t), z_2(t), \dots$  に分解したものと解釈できる。(5) と (6) を合わせることで、 $\mathbf{x}(t)$  の第  $i$  成分は

$$x_i(t) - \bar{x}_i = \sum_{i'} p_{ii'} \int_0^t e^{-\frac{t-s}{\tau_{i'}}} \sum_j q_{i'j} (u_j(s) - \bar{u}_j) ds \quad (7)$$

のように表すことができ、これを線形システム (3) のインパルス応答表現と呼ぶ。

簡易気候モデルの中には、(3) ではなく (7) を分析の出発点として与えるものもあり（例えば近年広く用いられるようになった FaIR モデルなど）、そのようなモデルはインパルス応答モデルと呼ばれる。インパルス応答モデルは、背後にある線形システムを明示的に扱う必要がない分、より簡便なアプローチと言える。例えば、ベクトル  $\mathbf{x}(t)$  の中で特定の成分  $x_i(t)$  のみに関心があるような場合には、 $x_i(t)$  のみを切り出してそれをモデルの全体とする（他の成分との相互作用を明示的に記述しない）ことも可能である。ボックスモデルでは  $A$  や  $B$  の要素を全て決めなければならないが、インパルス応答モデルでは (7) を直接カリブレイト（後述）すればよく、識別が必要なパラメタの数は潜在的に少なくなる。

### 3.2 エネルギーバランスモデル

簡易気候モデルの具体例として、次のようなものを考えよう。最も興味のある変数として、時点  $t$  における地表面（大気と海面の混合層）の平均的な温度を  $T_s(t)$  で表す。また大気海洋大循環モデルを念頭に、深海の平均的な水温を  $T_d(t)$  と書こう。さらに、時点  $t$  において大気層の上端で作用する強制力（単位面積あたりの下向き放射エネルギー）を  $F(t)$  と書く。表記を簡単にするために、全ての変数を産業革命前の均衡水準からの偏差で表すことにする。つまり、例えば  $T_i(t) - \bar{T}_i$  を単に  $T_i(t)$  と書く。また、変数の時間微分を  $dT_i(t)/dt$  ではなく  $\dot{T}_i(t)$  と表記する。

これらの状態変数の時間変化が、次のような微分方程式体系に従うと仮定しよう。

$$\dot{F}(t) = -\gamma(F(t) - F_{\text{ex}}(t)) \quad (8)$$

$$\chi_s \dot{T}_s(t) = F(t) - \kappa_s(T_s(t) - T_d(t)) \quad (9)$$

$$\chi_d \dot{T}_d(t) = \kappa_d(T_s(t) - T_d(t)) \quad (10)$$

ここで、 $F_{\text{ex}}(t)$  は大気中の温室効果ガス濃度などに起因する強制力への影響を捉えたものである。具体的には、温室効果ガス  $i \in \{\text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}\}$  の濃度を  $M_i(t)$  として、

$$F_{\text{ex}}(t) = \sum_i F_i(t) + F_o(t), \quad F_i(t) = \phi_i \frac{(M_i(t))^{1-\zeta_i}}{1-\zeta_i} - \phi_i \frac{\bar{M}_i^{1-\zeta_i}}{1-\zeta_i} \quad (11)$$

によって決まると仮定する。 $F_i(t)$  は温室効果ガス  $i$  による放射強制力の変化を捉えており、 $\bar{M}_i$  は基準年（例えば 1850 年）における温室効果ガス  $i$  の大気中濃度である。パラメタの  $\zeta_i$  にはガスごとに異なる値が用いられ、とくに二酸化炭素についてはしばしば  $\zeta_{\text{CO}_2} = 1$  が用いられる。 $F_o(t)$

は、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素以外の、外生的な強制力因子の影響を表す。

上の状態方程式の中で、(8)は温室効果ガス濃度等に応じて大気層上端の強制力  $F(t)$  が調整されるプロセスを記述しており、 $\gamma$ はその調整の速さを表すパラメタである。(9)と(10)は、異なる層(地表と深海)の温度が相互作用的に調整される様子を表す。パラメタ  $\chi_i$ は層  $i$ の熱容量(温度を1度上昇させるために必要なエネルギー)で、したがって  $\chi_i \dot{T}_i(t)$ は層  $i$ 全体の温度を  $\dot{T}_i(t)$ 度だけ上昇させるために必要なエネルギーを表す。右辺の  $\kappa_d(T_s(t) - T_d(t))$ は隣接層の温度差に応じて地表から深海に移動するエネルギーである。一方の  $\kappa_s(t)T_s(t)$ は地表面から地球システムの外側に放射されるエネルギーで、係数の  $\kappa_s(t)$ はその放射の効率を表す「気候フィードバックパラメタ」である。この  $\kappa_s(t)$ を時点  $t$ に依存させる理由は、気候フィードバックの効果がシステムの状態に応じて変化する様子を捉えるためである。具体的には、均衡における放射効率を  $\bar{\kappa}_s$ として、 $\kappa_s(t)$ を

$$\kappa_s(t) := \bar{\kappa}_s + \varepsilon \left( \frac{T_s(t) - T_d(t)}{T_s(t)} \right) \quad (12)$$

のように定式化しよう。パラメタ  $\varepsilon$ がゼロでない限り、システムが均衡(ここでは  $T_s(t) = T_d(t)$ となる)に至るまでの間、深海の熱吸収量に応じて放射効率が変化することになる。

上の(8)–(12)で表されるモデルは、エネルギー収支(太陽から流入する下向きの放射量と地球から流出する上向きの放射量の収支)という観点から気候システムの振る舞いを捉えようとするもので、エネルギーバランスモデルと呼ばれる。エネルギーバランスモデルは

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{F}(t) \\ \dot{T}_s(t) \\ \dot{T}_d(t) \end{bmatrix}}_{\dot{x}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\gamma & 0 & 0 \\ \frac{1}{\chi_s} & -\frac{\bar{\kappa}_s + \varepsilon + \kappa_d}{\chi_s} & \frac{\kappa_d + \varepsilon}{\chi_s} \\ 0 & \frac{\kappa_d}{\chi_d} & -\frac{\kappa_d}{\chi_d} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} F(t) \\ T_s(t) \\ T_d(t) \end{bmatrix}}_{x(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} \gamma \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_B \underbrace{F_{\text{ex}}(t)}_{u(t)} \quad (13)$$

のように書き直すことができるため、上で述べたボックスモデルの一種である。

### 3.3 カリブレーションと検証

簡易気候モデルは、大気海洋大循環モデルのような気候モデルと比べて格段に計算コストが低く、したがって他分野の研究者が応用研究に用いるのに適している。その一方で、現実の物理プロセスを直接描写したものではないため、モデルの振る舞いが現実を捉えたものになる保証はない。そこで、簡易気候モデルの信頼性を担保するために、カリブレーションと呼ばれる作業が必要になる。カリブレーションとは、何らかの基準に基づいてパラメタの値を定めることを指し、信頼できる先験的な情報を用いて値を決める場合もあれば、統計的な手法によって推定する場合もある。以下では、統計的な手法を用いた簡易気候モデルのカリブレーションを考えよう。

(13)で表現されるエネルギーバランスモデルは、時系列モデルの一種であるから、時系列分析の手法を用いたパラメタの推定が可能である。ただし、現実に観察されたデータではなく、気候モデルから出力される実験データを推定に用いることになる。具体的には、倍増実験や4倍増実験、漸増実験のような仮想的なシミュレーションの結果を活用する。これらの実験では強制力に影響を及ぼす他の要因がコントロールされており、温室効果ガスに対する気候モデル(したがって近似的には現実の気候システム)の応答をよく捉えているため、少ないデータで簡易モデルのパラメタを効率よく識別することができる(内的妥当性)。一方、歴史実験やシナリオ実験の結果は、簡易気候モデルの性能を評価するために用いられることが多い。つまり、カリブレイトされた簡易モデルを使って、カリブレーションには使われていない実験結果を上手く再現できるかど

A

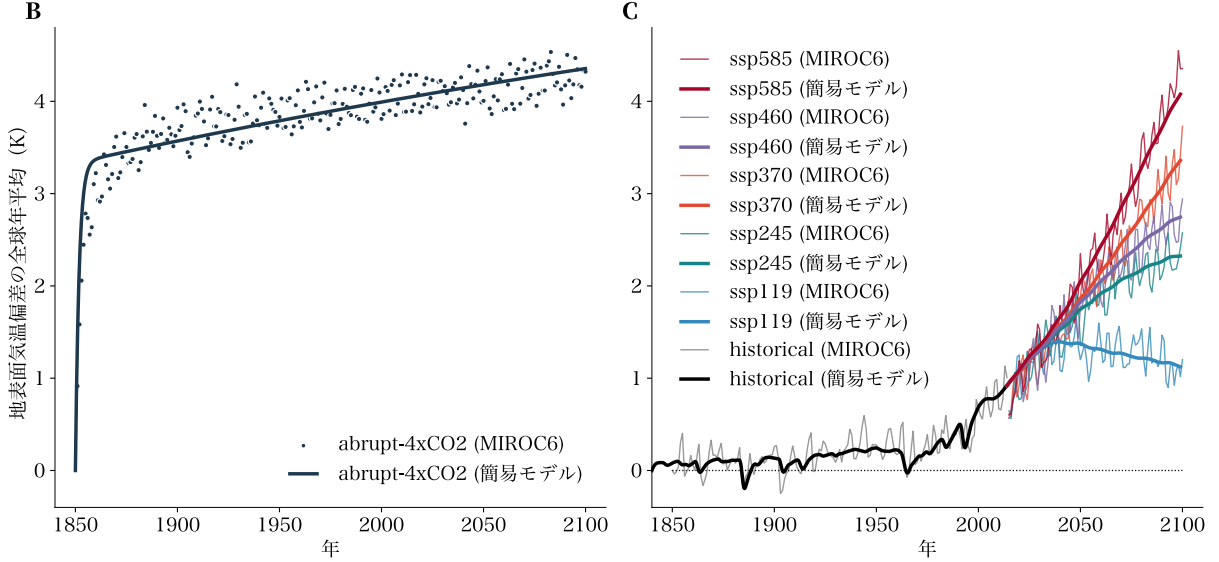
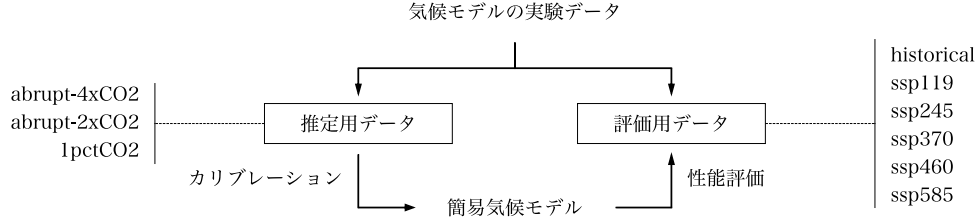


図 4: 簡易気候モデルのカリブレーションと性能評価.

出典: 著者作成.

うか検証するのである. これらの実験結果を再現できるのであれば, データが存在しないような別の文脈でも簡易モデルが妥当性を持つと期待される (外的妥当性). カリブレーションの一般的な手続きを図 4 のパネル A に示した.

ここでは Cummins et al. (2020) に従い, (13) を状態空間モデルと見なしてパラメタを推定してみよう. 状態空間モデルを用いる理由は, 直接的な実験データが存在するのが地表面温度  $T_s(t)$  と温室効果ガス濃度  $M_i(t)$  のみで, 強制力  $F(t)$  や深海水温  $T_d(t)$  はその値を直接的に知ることができない潜在変数だからである. 潜在変数を含むモデルの構造パラメタを識別するには, 状態方程式 (13) に加えて, 観測方程式 (観察可能な変数の挙動から背後にある状態変数の値を間接的に推し量る仕掛け) が必要になる. そのような仕掛けとしてしばしば用いられるのは, 太陽からの正味のエネルギー流入量が地球のエネルギー蓄積量の変化と一致しなければならないという, 次のような関係である.

$$\underbrace{R_{\text{sdt}}(t) - R_{\text{sut}}(t) - R_{\text{lut}}(t)}_{\text{正味のエネルギー流入 } R_{\text{ndt}}(t)} = \underbrace{\chi_s \dot{T}_s(t) + \chi_d \dot{T}_d(t)}_{\text{地球のエネルギー蓄積量の変化}} \quad (14)$$

正味のエネルギー流入量は, 太陽から地球に注がれる下向きの短波放射  $R_{\text{sdt}}(t)$  から, それを雲などが反射することによる上向きの短波放射  $R_{\text{sut}}(t)$  と, 地球自体が発する上向きの長波放射  $R_{\text{lut}}(t)$  を差し引いたものである. これらはいずれも気候モデルの出力に含まれる変数 (CMIP の変数名はそれぞれ rsdt, rsut, rlut) であるため, (14) の左辺は実験データから計算することができる. 右辺のエネルギー蓄積量については, (9) と (10) とを足し合わせればよい. よって, 正味のエネ

ルギー流入を  $R_{\text{ndt}}(t)$  と書けば, (14) は結局

$$R_{\text{ndt}}(t) = F(t) - (\bar{\kappa}_s + \varepsilon)T_s(t) + \varepsilon T_d(t)$$

のように, 観察可能な変数  $R_{\text{ndt}}(t)$  と (一部しか観察できない) 状態変数とを結びつける関係式となる. したがって, 観察可能な変数ベクトルを  $\mathbf{y}(t) := (T_s(t), R_{\text{ndt}}(t))$  と書くと, 観測方程式は

$$\underbrace{\begin{bmatrix} T_s(t) \\ R_{\text{ndt}}(t) \end{bmatrix}}_{\mathbf{y}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -\bar{\kappa}_s - \varepsilon & \varepsilon \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \underbrace{\begin{bmatrix} F(t) \\ T_s(t) \\ T_d(t) \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}(t)} \quad (15)$$

と表せる. 以上から, (13) と (15) を合わせ,  $\boldsymbol{\nu}(t) \sim N(0, \mathbf{V})$  を状態攪乱項,  $\boldsymbol{\omega}(t) \sim N(0, \mathbf{W})$  を観測誤差項として,

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \boldsymbol{\nu}(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \boldsymbol{\omega}(t)$$

のような状態空間モデルを得る. あとは, 気候モデルの実験データをこの状態空間モデルへの入力として, 最尤法などを用いてパラメタを推定すればよい.

図4のパネルBに示したように, カリブレイトされた簡易モデルは4倍増実験の結果をよく説明できる. さらに隣のパネルCに示したように, カリブレーションには直接用いていない歴史実験やシナリオ実験の結果についても, 簡易モデルによって十分な精度で再現することができる. これは, 極めて複雑な構造を持つ気候モデルの集計的な振る舞いを, 単純なモデルによってかなりの程度捉えられることを意味する. 紙幅の制限があって本稿では扱わないが, 炭素循環などの物質循環についても, 同様のアイディアに基づいて簡易モデルを構築することが可能である. 物質循環を含む簡易気候モデルの例としては Tsutsui (2022) が分かりやすい.

## 4 温室効果ガスの社会的費用

上記のようにして「手元で使える気候科学」が手に入れば, 今度はそれを社会科学的研究に応用することが可能になる. ここでは応用例のひとつとして, 温室効果ガスの社会的費用を推定することを考えよう.

### 4.1 社会的費用の役割

温室効果ガスの社会的費用とは, 二酸化炭素やメタン, 亜酸化窒素のような温室効果ガスの排出によって社会全体に生じる損害を金銭価値で表したものである. この社会的費用は, 多くの場合「排出1トンあたりで  $X$  ドルの費用が生じる」という形で表現され, 温室効果ガスの「価格」に相当する.

温室効果ガスの価格を提示することは, 単に排出量を削減するためのインセンティブを生み出すというだけでなく, 削減すべき排出とそうでない排出とを峻別するという意味で重要な意味を持つ. 効率性という観点から考えると, 温室効果ガスの排出はそれ自体に問題があるわけではない. 温室効果ガスが排出されることにはそれなりの理由があり, 端的に言えば, それは排出 (を許容



すること)が便益を生むからである。ただ、同じ温室効果ガスの排出であっても、社会に大きな便益を生むものもあれば、大した便益も生み出さないものもある。後者のような排出は削減すべきであろうが、前者のような排出は逆に削減すべきでない。そのような「必要な排出」と「不必要な排出」とを峻別するための基準を与えてくれるのが、温室効果ガスの社会的費用である。社会的費用に基づいて温室効果ガスに価格が付けば、費用が便益を上回る「不必要な排出」だけが削減され、逆に便益が費用を上回る「必要な排出」は削減されずに済む。もちろん、どの排出が「必要」でどの排出が「不必要」であるかは事前には分からない。しかしそれで構わない(そのような情報がなくとも結果的に両者を峻別できる)というのが、価格メカニズムが持つ優れた性質である。

また、たとえカーボンプライシングのような形で実際に価格が付かなかつたとしても、社会的費用を可視化することの意味は大きい。多くの経済主体にとって、温室効果ガスを排出することの私的便益は容易に理解される一方で、その排出が社会全体に強いるコストを実感するのは難しい。これは逆に言えば、たとえ私的な便益を犠牲にして排出を削減したとしても、それがどれだけの社会的便益を生み出せるのか見当が付かないということである。そのような状況では、排出を削減する意思のある個人であっても、その削減意欲を適切な行動変化に結びつけることは容易でない。あるいは自発的な削減努力を通して社会的責任を果たしたいと考える企業にとっても、削減の便益が定量的に示されていなければ、それが費用に見合うものであるかを判断することは難しいだろう。本来は削減すべきでない排出を削減してしまう可能性もある。社会的費用の推定によって削減の便益が具体的に示されれば(それは「2度安定化」や「ネットゼロ」のような長期目標を示すだけでは提供できない情報である)、各主体が個別に費用と便益とを比較することが可能になり、削減の意思を実際の行動に結び付けることができるようになる。その意味で、温室効果ガスの社会的費用は、科学的な知見をアクションナブルな情報に翻訳して社会に提示するものだと言える。なお、社会的費用に関する最近の研究動向については、例えば小西(2024a,b)や山口(2022)に詳しい。

## 4.2 社会的費用の定義

具体的な推定の手順を説明する前に、温室効果ガスの社会的費用にフォーマルな定義を与えておこう。まず、時点 $t$ における消費を $C(t)$ 、人口を $N(t)$ として、社会全体が $(C(t), N(t))_{t \geq t_0}$ という経路を辿った場合の社会厚生(その経路の望ましさを表す指標)を

$$\int_{t_0}^{\infty} e^{-\rho(t-t_0)} N(t) u(c(t)) dt, \quad u(c) := \frac{c^{1-\eta} - 1}{1-\eta} \quad (16)$$

で定義しよう。ここで $u(c(t))$ は、一人当たりの消費量が $c(t) := C(t)/N(t)$ であった時に、それが社会的にどれだけ望ましいものであるかを捉えるための関数である。パラメタの $\eta$ は、異なる時点における消費の代替をどれだけ許容するか(あるいは許容しないか)を制御する指標である。また $\rho$ は、時間選好率と呼ばれ、将来の消費よりも現在の消費の方がより好まれるという傾向を考慮するためのパラメタである。多くの場合、将来の消費 $C(t)$ や人口 $N(t)$ には不確実性が存在するため、(16)の期待値をとった $W(t_0) := \mathbb{E} \left[ \int_{t_0}^{\infty} e^{-\rho(t-t_0)} \tilde{N}(t) u(\tilde{c}(t)) dt \right]$ を社会厚生と見なす。変数の上に付したチルダは、その変数が確率変数であることを示す。

話を簡単にするために、各時点の総生産量を $\tilde{Y}(t)$ として、そのうちの一定割合 $\alpha \tilde{Y}(t)$ を消費に振り分け、残りの $(1-\alpha)\tilde{Y}(t)$ を貯蓄にまわすと考えよう。実際、集計レベルの貯蓄率はおおよそ一定( $1-\alpha \approx 0.25$ )であることが知られている。また、時点 $t$ における気候変動の悪影響(を金



銭価値に換算したものを  $\tilde{D}(t)$  と書き、これは消費から差し引かれるものと仮定する。すると、各時点の正味の消費は  $\tilde{C}(t) = \alpha\tilde{Y}(t) - \tilde{D}(t)$  で決まる。さらに、 $\tilde{D}(t)$  は時点  $t$  における地表面温度  $\tilde{T}_s(t)$  と経済規模  $\tilde{Y}(t)$  に依存すると考え、

$$\tilde{D}(t) = \tilde{Y}(t)\Delta(\tilde{T}_s(t)), \quad \Delta(T_s) := d_1T_s + d_2T_s^{d_3} \quad (17)$$

のように表せるとしよう。関数  $\Delta(T_s)$  は損害関数と呼ばれ、気候変動による経済への悪影響を集計レベルで捉えるものである。いま、時点  $t_0$  において温室効果ガス  $i$  の排出量を  $E_i(t_0)$  から  $E_i(t_0) + dE_i(t_0)$  に変化させた時、将来の各時点  $t$  に生じる気温の変化を  $d\tilde{T}_s(t)$  と書く。このとき、温室効果ガスの追加的な排出  $dE_i(t_0)$  が十分に小さければ、それが社会厚生に及ぼす悪影響は

$$-dW(t_0) = \mathbb{E} \left[ \int_{t_0}^{\infty} e^{-\rho(t-t_0)} u'(\tilde{c}(t)) \tilde{Y}(t) \Delta'(\tilde{T}_s(t)) \frac{d\tilde{T}_s(t)}{dE_i(t_0)} dt \right] dE_i(t_0) \quad (18)$$

でよく近似されよう。これを金銭価値に換算したものが、温室効果ガスの社会的費用に他ならない。

社会厚生への影響を金銭価値に直すには「それと等価な消費の変化分」を考えれば良い。時点  $t_0$  における消費量を  $C(t_0)$  から  $C(t_0) - dC(t_0)$  に減少させた場合、それによって失われる社会厚生は  $u'(c(t_0))dC(t_0)$  で近似できる。したがって、(18) と同等の影響をもたらす消費の減少分は  $-dW(t_0) = u'(c(t_0))dC(t_0)$  を満たす  $dC(t_0)$ 、つまり (18) と合わせて

$$dC(t_0) = \mathbb{E} \left[ \underbrace{\int_{t_0}^{\infty} e^{-\rho(t-t_0)} \frac{u'(\tilde{c}(t))}{u'(c(t_0))} \tilde{Y}(t) \Delta'(\tilde{T}_s(t)) \frac{d\tilde{T}_s(t)}{dE_i(t_0)} dt}_{\text{温室効果ガス } i \text{ の社会的費用 SC-GHG}_i(t_0)} \right] dE_i(t_0) \quad (19)$$

である。 $dE_i(t_0)$  単位の温室効果ガス  $i$  を排出することは、この  $dC(t_0)$  だけの消費（金銭価値）を現時点で失うことと等価であり、これが温室効果ガスの社会的費用に相当する。

また、(19) を書き換えると、温室効果ガス  $i$  の社会的費用は

$$\text{SC-GHG}_i(t_0) = \mathbb{E} \left[ \int_{t_0}^{\infty} \underbrace{e^{-\tilde{r}(t)(t-t_0)}}_{\text{割引因子}} \underbrace{\tilde{Y}(t)}_{\text{経済予測}} \underbrace{\Delta'(\tilde{T}_s(t))}_{\text{損害関数}} \underbrace{\frac{d\tilde{T}_s(t)}{dE_i(t_0)}}_{\text{気候モデル}} dt \right] \quad (20)$$

のように表現することもできる。ここで  $\tilde{r}(t)$  は、 $\tilde{g}(t) := \dot{\tilde{c}}(t)/\tilde{c}(t)$  を一人当たり消費の成長率として  $\tilde{r}(t) := \rho + \eta \frac{1}{t-t_0} \int_{t_0}^t \tilde{g}(\tau) d\tau$  によって定義される割引率で、時点  $t$  における消費の価値が時点  $t_0$  の消費と比べてどれだけ割引されるべきかを年率で表したものである。(20) のような表現は、全米アカデミーズの報告書 (NASEM, 2017) が推奨する「モジュラーアプローチ」に対応している。モジュラーアプローチとは、社会的費用の主要な決定要因を気候、損害、経済、割引という4つの「モジュール」に分割することで、推定プロセスの透明性と速報性を高めようというものである。(20) から明らかなように、温室効果ガスの社会的費用は事実（気候モデルや経済活動）だけでなく価値（損害評価や割引）を反映したものになる。

### 4.3 社会的費用の推定

温室効果ガスの社会的費用を推定するためには、人口  $N(t)$  や総生産  $Y(t)$ 、排出  $E_i(t)$  がこの先どのような経路を辿るのかについて、何らかの想定を置かなければならない。前節で触れた共

通社会経済経路はそのような想定の例であり、実際、社会的費用の推定に SSP1 や SSP5 といった将来シナリオが用いられることもある。ただ、共通社会経済経路はあくまで「可能性」を離散的に列挙したものであり、どの経路がどの程度の確率で実現するのかという、不確実性に関する情報を含まない。したがって、不確実性の影響を理論に忠実な形で（つまり定義 (20) に従って）加味すべきだと考えるのであれば、共通社会経済経路のような将来「シナリオ」ではなく、不確実性に関する情報を含んだ将来「予測」が必要になる。そのような将来予測の例としては、米国のシンクタンクである RFF が作成した RFF 社会経済予測が挙げられる (Rennert et al., 2022)。RFF 社会経済予測は、人口、総生産、排出量のそれぞれについて、2020 年から 2300 年までの経路  $(N(t), Y(t), E_{CO_2}(t), E_{CH_4}(t), E_{N_2O}(t))_{t=2020}^{2300}$  を確率的に生成する同時確率分布として与えられる。図 5 のパネル A, K, M は、この確率分布から生成された将来予測（サンプルサイズ 10000）を示したものである。

気候変動の損害については、個別の研究によって局所的に推定された損害額を大域的にエミュレートできるように (17) のパラメタを定める。ここでは、Barrage and Nordhaus (2024) が作成した文献リストに従って損害関数をカリブレイトしよう。図 5 のパネル J に、個別の研究から得られた 52 の推定値（気温変化と損害額のペア）を示してある。研究によっては、推定に用いるデータソースが似通っていたり、定量化の手法が必ずしも信頼できるものでなかったりするため、全ての推定値を等しく扱うことは適当でない。そこで Barrage and Nordhaus (2024) は、手法の信頼性や独立性などに応じて各推定値の「ウェイト」を定めている（図の色の濃い点ほどウェイトが大きい）。このウェイトで重み付けられた 2 乗誤差を最小にするように損害関数のパラメタの値を決めると、図に示したような曲線を得る。

割引率については、その「適切な値」について議論があるが、ここでは利子率に関する実証研究に基づいてパラメタの値を決めることにする。基本的なアイデアは、利子率の将来予測と成長率の将来予測とを突き合わせることで、 $\rho$  と  $\eta$  の値を「実証的に」定めるというものである。時点  $t$  における実質利子率を  $\tilde{R}(t)$  と書こう。資本市場が十分に機能していると仮定すれば、この  $\tilde{R}(t)$  と消費の成長率  $\tilde{g}(t)$  との間には

$$\tilde{R}(t) = \rho + \eta \tilde{g}(t) \quad (21)$$

のような関係が成立すると考えられる。したがって、 $\tilde{R}(t)$  と  $\tilde{g}(t)$  の将来予測を比較すれば、 $\rho$  と  $\eta$  の値を決められそうである。もっとも、利子率の将来予測（ここでは Bauer and Rudebusch (2023) の予測を用いる）と RFF の成長率予測は独立に作成されたものであるため、 $\tilde{R}(t)$  と  $\tilde{g}(t)$  の「値」を突き合わせることはできない。ただ、ふたつの将来予測が互いに整合的であると仮定すれば、(21) の「分布」は左辺と右辺で等しくなるはずである。そこで、将来の各時点で  $\tilde{R}(t)$  の分布と  $\rho + \eta \tilde{g}(t)$  の分布の「距離」がなるべく小さくなるように  $\rho$  と  $\eta$  を選ぶことを考える。具体的には、平均値、標準偏差、四分位 (25%, 50%, 75%) について、両辺の 2 乗誤差を最小にする  $\rho$  と  $\eta$  の組を採用する。

以上で準備が整ったので、簡易気候モデルを使って温室効果ガスの社会的費用を推定してみよう。推定のプロセスは図 5 に示した通りである。まず、ベースラインの排出予測（10000 サンプル）を簡易気候モデルに与えて、サンプル経路のそれぞれについて大気中濃度と気温変化の将来予測を生成する（パネル A–C）。次に、現時点 ( $t_0 = 2020$ ) で温室効果ガス  $i$  の排出量をベースラインから  $dE_i(t_0)$  単位だけ（図の例では 1GtCO<sub>2</sub> だけ）増加させた排出経路を考え、こちらについても大気中濃度と気温変化の将来予測を生成する（差分をパネル D–F に示した）。気温の将来予測（パネル C）と総生産の将来予測（パネル M）を損害関数（パネル J）と組み合わせれば、将来の各時点でどれだけの損害が生じるかを計算できる。追加的な排出を行ったケースとベース

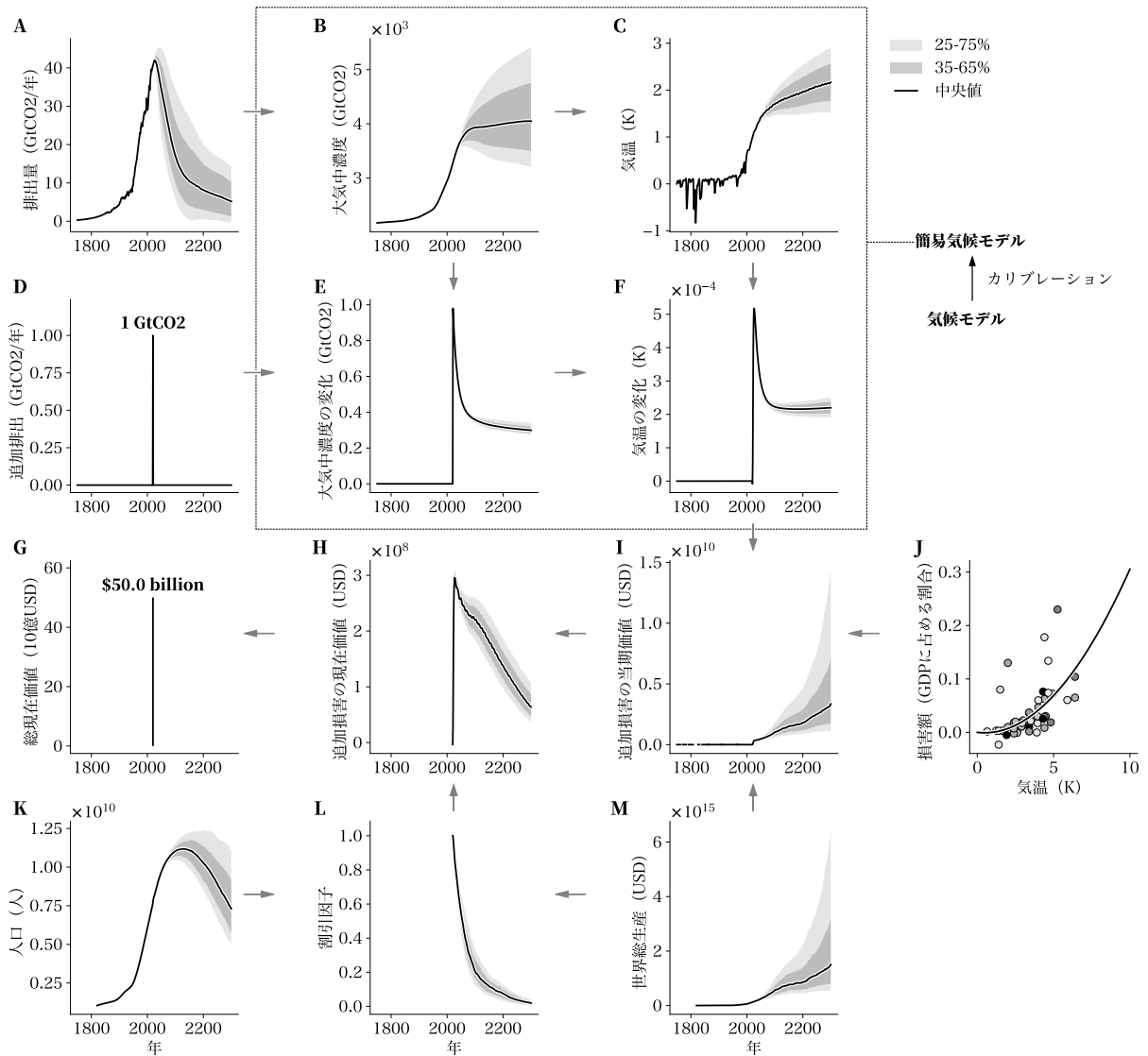


図 5: 温室効果ガスの社会的費用の推定.

出典: 著者作成.

ラインとでこの損害を比較することで、将来の各時点で生じる「追加的な損害」を得る（パネル D）。ただ、将来時点の損害は当期価値で表されているため、人口の将来経路（パネル K）と総生産の将来経路（パネル M）などから割引因子を計算し（パネル L）、これを用いて各時点の損害を現在価値に換算する（パネル H）。あとは、現在価値で表された各時点の損害をサンプル経路ごとに足し上げ（時間積分）、10000 サンプル全体の平均値を計算すれば（期待値計算）、最終的に (19) の  $dC(t_0)$  を得る。図の例では、この  $dC(t_0)$  は約 500 億ドルと計算された（パネル G）。つまり、二酸化炭素を 1GtCO<sub>2</sub> だけ追加的に排出することは、世界全体で 500 億ドル相当の消費を諦めることと等価である。二酸化炭素 1 トンあたりに直すと  $dC(t_0)/dE_i(t_0) = 50$  ドルとなり（1Gt は 10 億トン）、これが二酸化炭素の社会的費用の推定値である。同様の手続きから、メタンの社会的費用（367.8 ドル/tCH<sub>4</sub>）や亜酸化窒素の社会的費用（11988.5 ドル/tN<sub>2</sub>O）も計算できる。このようにして排出の帰結を具体的な金銭価値にして示すことができるのは、社会的費用を推定することの大きな利点であろう。

図 5 では MIROC6 の実験データを用いた例を示したが、全く同じ手順により、他の気候モデルを用いて社会的費用を計算することもできる。CMIP に参加している気候モデルであれば、当

該モデルの実験データを ESGF から取得し、そのデータを使って簡易気候モデルのパラメタを改めて推定すればよい。同様に、新たな実験データが提供された場合にも、それを社会的費用の計算に反映させることは容易である。さらに、上の例では (13) のような簡易気候モデルを採用したが、一連の推定プロセス自体はエミュレータの選択に依存しない。自前の簡易気候モデルを開発し、それを社会的費用の推定に応用することも可能である。いずれにしても、重要なことは、自らの研究のパイプラインを特定のデータやモデルに依存させないということである。自然科学の一次資料を持つ可能性を認識し、それを主体性を持って活用できるようになれば、社会科学における研究の幅も大きく広がるはずである。

## 5 おわりに

社会科学の研究者は、自然科学の知見に対して受け身になりがちである。自然科学が不完全であることを殊更に強調したり、逆に必要以上に有難がったりするのは、科学にものごとを決めてもらおうという受動的な態度の裏返しと言える。しかしながら、事実の解明を超えて、政策的な含意（我々が何をすべきか）を導くのは社会科学にこそ期待される役割である。実際、気候変動のような第一義的には自然科学の課題であっても、社会科学の研究者が専門性を活かしながら関わることで、学術的にも社会的にも意義の大きい成果を生み出すことができる。温室効果ガスの社会的費用に関する研究などは、そのよい例であろう。そのような「科学の共創」を機能させるべく、自然科学の知見をより能動的に活用しようという姿勢が、社会科学の側に求められている。

## 注

- 1) 紙幅の関係で本文中に記載できなかった情報（補足、図表、文献、コード等）は GitHub ([https://github.com/skmthrk/climate\\_emulator](https://github.com/skmthrk/climate_emulator)) で公開している。

## 参考文献

- Barrage, L. and Nordhaus, W. (2024) “Policies, projections, and the social cost of carbon: Results from the DICE-2023 model,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(13), e2312030121.
- Bauer, M. D. and Rudebusch, G. D. (2023) “The rising cost of climate change: Evidence from the bond market,” *Review of Economics and Statistics*, 105(5), 1255–1270.
- Cummins, D. P., Stephenson, D. B., and Stott, P. A. (2020) “Optimal estimation of stochastic energy balance model parameters,” *Journal of Climate*, 33(18), 7909–7926.
- Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., Winn, J. P., Hogan, E., Killick, R. E., Dunn, R. J. H., Osborn, T. J., Jones, P. D., and Simpson, I. R. (2021) “An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: The HadCRUT5 data set,” *Journal of Geophysical Research*, 126(3).
- NASEM (2017) “Valuing Climate Damages: Updating Estimation of the Social Cost of Carbon Dioxide,” National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.

- Rennert, K., Errickson, F., Prest, B. C., Rennels, L., Newell, R. G., Pizer, W., Kingdon, C., Wingenroth, J., Cooke, R., Parthum, B., Smith, D., Cromar, K., Diaz, D., Moore, F. C., Müller, U. K., Plevin, R. J., Raftery, A. E., Ševčíková, H., Sheets, H., Stock, J. H., Tan, T., Watson, M., Wong, T. E., and Anthoff, D. (2022) “Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO<sub>2</sub>,” *Nature*, 610(7933), 687–692, October.
- Tatebe, H. and Watanabe, M. (2018) “MIROC MIROC6 model output prepared for CMIP6 CMIP,” DOI: <http://dx.doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.881>.
- Tsutsui, J. (2022) “Minimal CMIP Emulator (MCE v1.2): A new simplified method for probabilistic climate projections,” *Geoscientific Model Development*, 15(3), 951–970.
- 小西祥文 (2024a) 「気候変動の社会的費用を考える (1) : これまでの SCC」『経済セミナー』 第 736 巻, 110-121 頁.
- 小西祥文 (2024b) 「気候変動の社会的費用を考える (2) : 新しい SCC へ」『経済セミナー』 第 737 巻, 78-94 頁.
- 山口臨太郎 (2022) 「気候変動の社会的費用」『地球環境』 第 27 巻第 2 号, 155–160 頁.