

「気候変動の経済学」： 欧米における主要研究の紹介

あるが りょう いけだだいすけ しのはらたけし
有賀 涼／池田大輔／篠原武史／
ふえきたくじ むとういちろう よねやましゅんいち
笛木琢治／武藤一郎／米山俊一

要 旨

気候変動問題に対するグローバルな関心が急速に高まっている。気候変動とマクロ経済の関係を分析し、政策評価を行うためには、これらの間の相互作用を適切にモデル化し、分析の枠組みを作る必要がある。「気候変動の経済学」は、そのフレームワークを提示するとともに、気候変動問題に対処するための政策を考える手掛かりを提供している。本稿では、欧米における主要な研究をいくつか取り上げ、そのエッセンスを解説する。具体的には、気候変動問題をマクロ動学モデルで捉えた基本となるモデル、温室効果ガスの負の外部性に対応するための最適課税、グリーン部門の技術進歩に伴う正の外部性を活用するための研究開発補助金、金融政策の位置づけ、最近の実証分析を順に紹介する。

キーワード： 気候変動、DICE モデル、炭素税、クリーン・エネルギー、技術進歩、非伝統的金融政策、異常気象

本稿は、日本銀行金融研究所が2021年10月に公表した金研ニュースレター特別号「気候変動の経済学」(5回連載シリーズ)の内容を集約し、加筆修正したものである。本稿の作成に当たっては、福田慎一教授(東京大学)、塩路悦朗教授(一橋大学)に査読を頂き、多岐にわたる貴重なコメントを頂戴した。また、トアン・ファン氏(リッチモンド連邦準備銀行)、モニカ・ピアゼッシ教授(スタンフォード大学)からは、本稿で紹介する研究に関する講義やセミナーを通じて、多くの知見を得た。記して感謝の意を表したい。ただし、本稿で示されている意見は、筆者たち自身に属し、日本銀行や金融研究所の公式見解を示すものではない。また、ありうべき誤りは筆者たち個人に属する。

- 有賀 涼 日本銀行金融研究所企画役補佐
(現金融市場局企画役補佐、E-mail: ryou.aruga@boj.or.jp)
- 池田大輔 日本銀行金融研究所企画役
(現金融機構局企画役、E-mail: daisuke.ikedada@boj.or.jp)
- 篠原武史 日本銀行金融研究所 (E-mail: takeshi.shinohara@boj.or.jp)
- 笛木琢治 日本銀行金融研究所企画役 (E-mail: takuji.fueki@boj.or.jp)
- 武藤一郎 日本銀行金融研究所経済ファイナンス研究課長
(現青森支店長、E-mail: ichirou.mutou@boj.or.jp)
- 米山俊一 日本銀行金融研究所企画役 (E-mail: shunichi.yoneyama@boj.or.jp)

1. はじめに

近年、気候変動問題に対するグローバルな関心が急速に高まっている。気候変動は人々の経済活動に広範な影響をもたらすと同時に、人々の経済活動も温室効果ガスの排出などを通じて気候変動に影響を与えている。したがって、気候変動とマクロ経済の関係を分析し、政策評価を行うためには、これらの間の相互作用を適切に捉えた分析の枠組みを作る必要がある。

気候変動に関する経済学的な分析、すなわち「気候変動の経済学」は、2018年にノーベル賞を受賞したウィリアム・D・ノードハウス（イエール大学）らによって、1970年代半ばから研究が行われ、理論モデルと定量分析ともに発展を続けている。経済学が蓄積してきた知見は、気候変動と経済活動の関係を捉えるためのフレームワークを提示するだけでなく、気候変動問題に対処するための政策を考えるうえでも有益な手掛かりとなっている。

中央銀行にとっても、マクロ経済動向に影響を及ぼす要因は重要な関心事項である。このため、各国の中央銀行は、近年、気候変動問題への関与を強めている。例えば、2017年には世界の中央銀行・金融監督当局によって「気候変動リスク等に係る金融当局ネットワーク（Network for Greening the Financial System: NGFS）」が創設され、活動が本格化している。日本銀行も2021年7月に気候変動に関する「取り組み方針」を公表し、その施策の一環として調査研究を掲げ、研究分析に着手している。

本稿は、そうした調査研究活動の一部を活用したものであり、気候変動の経済学で特に重要と思われる研究について、幅広い読者を念頭にそのエッセンスを解説することを試みている。まず、気候変動とマクロ経済の相互関係を捉えるための基本モデルを紹介し、気候変動政策の考え方やその効果について考察した欧米の代表的な研究を取り上げた¹。その際、発展の過程が理解しやすいような並びで順に解説を行っている。なお、気候変動政策は、課税や補助金のような産業・財政政策として捉えられてきたが、中央銀行の関心の高まりや政策対応を受けて金融政策に焦点を当てた研究もごく最近になって登場しており、そうした論文の一部も紹介している。また、実証研究の紹介においては、気候変動がマクロ経済の生産性に与える長期的な影響を検証した論文や、自然災害の発生が経済・物価に及ぼす短期的な影響を検証した論文も紹介する。気候変動の経済学では膨大な蓄積があり、本稿では主要なものの一部、とりわけ著名学術誌などに掲載された欧米の研究を取り上げて

.....
1 これらの選定に当たっては、近年、米国地区連銀における気候変動関連のリサーチの中核人物となっているトアン・ファン氏（リッチモンド連邦準備銀行）の知見が参考となった。金融研究所では2021年9月に同氏を招いて集中連続講義を開催し、多くの学びを得ている。

いる。そこで、論文の最後では、本稿で取り上げなかった主な論点についても言及する。

本稿の構成は以下のとおり。2節では、気候変動とマクロ経済の関係を捉える最も基本的なモデルとして「DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy)」モデルを解説する。前出のノードハウスが DICE モデルを開発・発展させ、これを基礎として政策対応などを考察するモデル分析が登場してきた。3節では、気候変動は負の外部性問題であること、そしてピグー税と呼ばれる課税が負の外部性問題への対応政策であり、気候変動問題では炭素税がこれに相当することを紹介する。また、その最適課税方法を分析した研究を解説する。4節では、気候変動と技術進歩に関する研究を紹介する。代替エネルギーのように技術革新が気候変動問題を克服する手掛かりとなるため、技術開発を促す補助金も政策対応となりうる。その役割についての理論研究が進んでいる。5節では、気候変動政策において中央銀行の果たす役割を考察した最近の研究を紹介する。非伝統的金融政策として実行された一部の中央銀行の政策評価がなされており、これを解説する。6節では、気候変動がマクロ経済や物価に対して与える影響に関する実証研究について紹介する。7節では、本稿で十分に取り上げることができなかった主な論点について言及する。8節は、本稿の内容を踏まえた結びである。

2. 気候変動とマクロ経済の関係を捉える：DICE モデル

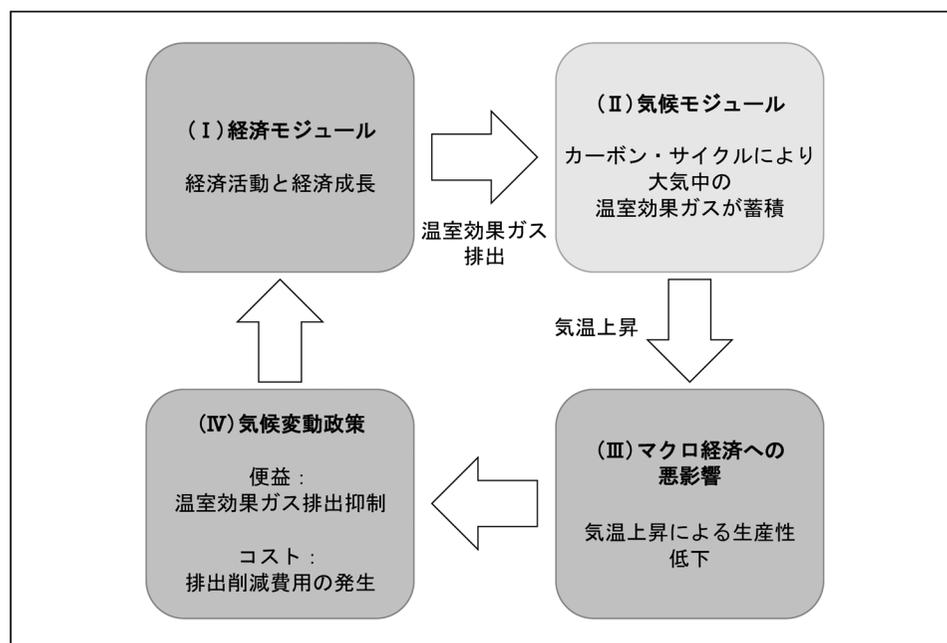
本節では、ノードハウスによって開発された基本モデル「DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy)」が、気候変動と経済、政策対応の相互依存関係をどのようにモデル化しているか、その概要を紹介する^{2,3}。

気候変動が経済活動にもたらす悪影響や、炭素税など気候変動政策がもたらす便益とそのコストを定量的に評価するには、気候変動と経済活動の双方向の影響を考える必要がある。このため、気候変動の経済学では、マクロ経済モデルと気候科学に基づく気候変動モデルを統合し、両者が相互に作用するプロセスを描写する数理モデルが開発されてきた。こうしたモデルは「統合評価モデル (Integrated Assessment Model: IAM)」と呼ばれる。最もシンプルで代表的な IAM の 1 つが、本

2 Nordhaus [1993] の論文のタイトルが「Rolling the ‘DICE’」となっているように、DICE モデルの名称は、気候変動が確率的な事象であるという意味で、サイコロを意識してつけられたようである。DICE モデルは、その後も最新の理論・実証研究を基にモデルの更新が続けられている。本稿では Nordhaus and Sztorc [2013] を参考に解説する。気候変動問題に関するノードハウスの考え方について日本語で読める文献としては、ノードハウス [2015] がある。

3 DICE モデルは、グローバル経済全体を 1 国のようにみなしている。複数の地域や国の存在を想定したモデルは RICE (Regional Integrated Climate-Economy) モデルと呼ばれている。

図表 1 DICE モデルの大枠



資料：Nordhaus [2019] を基に筆者が作成。

節で紹介する DICE モデルである。DICE モデルは研究者による分析だけでなく、気候変動に関する政府間パネル (Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC) や米国政府の環境関連部会などで、気候変動政策効果のシミュレーションなどに頻繁に用いられている⁴。

DICE モデルは、①経済活動が気候変動に及ぼす影響、②気候変動が経済にもたらす損失、③気候変動政策が経済損失を抑制する便益と政策実行のコストをきわめて簡潔に定式化した動学モデルである。図表 1 では Nordhaus [2019] を参考に、DICE モデルの大枠を示した。DICE モデルは、世界経済を描写した「経済モジュール」と、気候科学に基づき気候システムを記述した「気候モジュール」で構成される。また、「経済モジュール」と「気候モジュール」が相互に作用する循環的な構造となっている点が特徴である。

.....
 4 DICE モデル以外の IAM としては、地域間の相互作用を加味したうえで最適エネルギー政策を分析する REMIND (Regional Model of Investments and Development)、経済活動や気候変動に加え、エネルギー・水資源・農地との相互作用も加味された GCAM (Global Change Analysis Model)、日本を対象とした AIM/CGE (Asia-Pacific Integrated Model/Computable General Equilibrium) などがある。また、エネルギー利用にも焦点を当てた MESSAGE (Model for Energy Supply Systems and Their General Environmental Impact) や、生物圏・生物多様性の要素もモデル化した IMAGE (Integrated Model to Assess the Global Environment) など、さまざまな発展を遂げている。

DICE モデルは多数の連立方程式で構成されるが、そのなかでも鍵となる式は以下に紹介する 4 本である。(1) 式は、図表 1 (I) の経済モジュールに含まれるマクロ生産関数を表している。

$$Q = 1/G(T) \times [1 - \Lambda(\mu)] \times A \times K^\gamma \times L^{1-\gamma}. \quad (1)$$

生産関数は、標準的なマクロ経済学で用いられるコブ・ダグラス型であり、全要素生産性 (Total Factor Productivity: TFP、 A)、資本 (K)、労働 (L) からなる。ここで γ は正のパラメータである。これに、気温上昇 T に伴う経済損失効果を示す $G(T)$ と、温室効果ガスの排出削減 (μ) に伴う費用が産出量を減少させる影響 $\Lambda(\mu)$ が加わり、GDP (Q) が決定される。

このように、DICE モデルでは気温上昇と温室効果ガス削減費用が経済全体の産出量を低下させるメカニズムが導入されている。言い換えれば、気候変動の経済に対する悪影響は、経済全体の生産性 (TFP) の低下と同様の効果を持つ形でモデル化されている。

また、DICE モデルは生産活動により温室効果ガスが排出される効果を取り込んでいる。(2) 式は、温室効果ガス排出量 E がどのように決まるかを示している。

$$E = \sigma \times (1 - \mu) \times A \times K^\gamma \times L^{1-\gamma}. \quad (2)$$

(2) 式では、経済活動から生み出される産出量 ($A \times K^\gamma \times L^{1-\gamma}$) に比例して温室効果ガスの排出量が増加し、その程度は炭素強度 σ という外生的なパラメータで決められている。一方で、温室効果ガス削減率 μ はコントロール可能であり、 $(1 - \mu)$ の項は排出量の削減効果を表している。ただし、排出削減には費用 $\Lambda(\mu)$ を要し、(1) 式で表されているとおり、その費用が生産性の低下を通じて GDP を抑制する。

排出された温室効果ガスは、図表 1 (II) の気候モジュールを通じて気候に影響を及ぼす。(3) 式は、温室効果ガスが排出されるほど気温が上昇することを示している。

$$T = F(E). \quad (3)$$

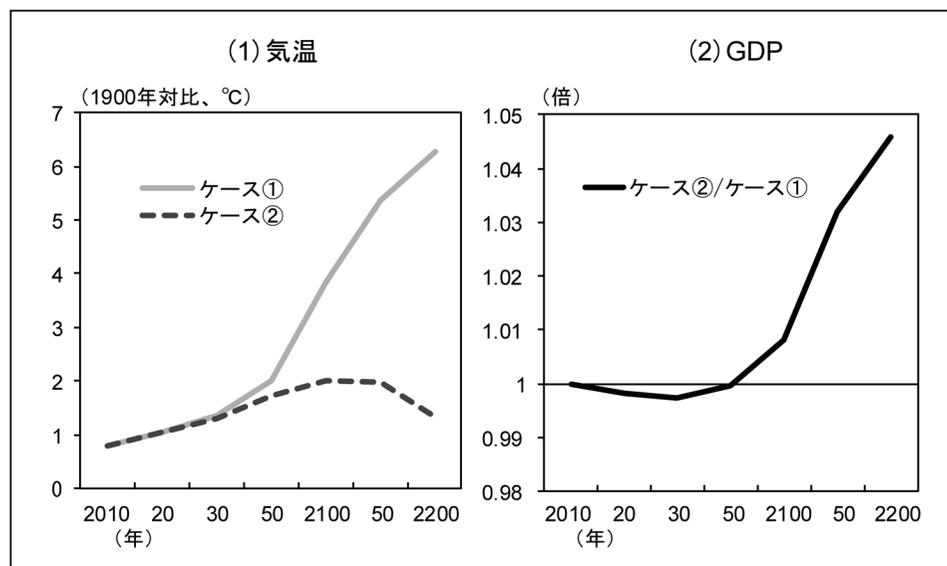
ここで、関数 $F(\cdot)$ は、温室効果ガス排出量 E と気温 T の関係を表す増加関数である。そして、気温の上昇は (4) 式のように 2 次関数として定式化された損失関数 $G(\cdot)$ を通じて損失 $G(T)$ を生み出す。

$$G(T) = 1 + \alpha_1 \times T + \alpha_2 \times T^2. \quad (4)$$

ここで、 α_1 と α_2 は、一定のパラメータである。気温 T によって生じる損失 $G(T)$ は、(1) 式に表されているように生産性を低下させ、GDP の減少をもたらす⁵。

.....
5 DICE モデルでは、自然災害増加などの物理的リスクは、気温上昇による損失として (1) 式の $1/G(T)$

図表 2 DICE モデルによるシミュレーション



資料：Nordhaus and Sztorc [2013] のデータを基に筆者が作成。

このように、生産活動に伴って発生する温室効果ガスが気温上昇をもたらす一方、気温上昇が生産を低下させるようなモデル設定により、気候変動と経済活動間の相互フィードバックが DICE モデルに取り込まれている。また、温室効果ガス削減率 μ をコントロールすることで、現在の生産を犠牲にして温室効果ガスの発生を抑制しつつ将来の生産を増加させるといったように、気候変動から経済活動への悪影響を抑制できる仕組みも導入されている。

DICE モデルを用いると、気候変動がマクロ経済に与える悪影響や、気候変動政策の効果を定量的にシミュレーションすることができる。図表 2 は、Nordhaus and Sztorc [2013] で行われたシミュレーション例を示している。ここでは、政策対応として、ケース①「2010 年以降、追加的な気候変動政策を行わなかった場合」と、ケース②「気温上昇を 1900 年対比で 2°C 以下に抑えるような対策が取られた場合」を比較している。

図表 2 (1) を見ると、ケース①では気温が大きく上昇する一方、ケース②では気温上昇が抑えられている。この結果、図表 2 (2) で GDP を確認すると、2030 年頃まではケース①の GDP が若干上回るものの、その後はケース②の方が上回ってくる。これは、ケース②の GDP は短期的には温室効果ガスの排出量削減コストによって若干押し下げられるが、長期的には気温上昇が抑えられることで、気温上昇

に含まれている。また、移行リスクを環境負荷低減に伴うコストとみなせば、移行リスクは (1) 式の $\Lambda(\mu)$ としてモデル化されている。

による損失が低減するためである。

以上のように、DICE モデルは気候変動と経済の相互依存関係を定量的に理解するのに有益である。実際、米国政府の環境関連部会（Interagency Working Group [2021]）は、DICE モデルを使って将来にわたり発生する温室効果ガス排出による損失額（Social Cost of Carbon: SCC）を算出し、気候変動政策導入の正当性を評価している⁶。また、3 節で紹介するように、DICE モデルに基づいて炭素税などの最適課税に関する研究が行われるなど、DICE モデルを拡張したさまざまな分析例がみられる。

なお、DICE モデルは、非常にシンプルな数理モデルで利便性が高いが、問題点も指摘されている。Pindyck [2013, 2017] は、DICE モデルのみならず IAM 全般について、定式化がアド・ホックである点や、重要なパラメータの値に実証的な裏づけが乏しい点を指摘している。例えば、気温上昇による経済的損失の程度を表す関数（(4) 式）の定式化がアド・ホックで、理論的・実証的な裏づけが不足していることや、気温上昇があるレベルを超えると地球環境が大きくバランスを崩して甚大な影響が生じるという非線形的なテールリスクを十分に考慮できていない点を指摘している。

また、DICE モデルを含む IAM では、将来損失額を現在価値に割り引いて評価する際、割引率の設定が定量的な分析結果に大きな影響を及ぼす。この点は、早くから学界で議論の対象となってきた。気候変動問題の場合、その時間的視野が 50 年ないし 100 年程度先と長期にわたるだけに、1%の割引率の設定の違いが、将来損失額の現在価値にきわめて大きな差を生み出す。ノードハウスの一連の研究では、米国における資本収益率のデータなどを踏まえて 4%程度に設定しているが、この水準の高さ（高いほど将来の利得や損失を大きく割り引いて評価する）については、英国の経済学者ニコラス・スターンによる英国政府への報告書『スターン報告』（Stern [2007]）などにおいて、将来世代の負担を軽視することにつながるとして批判を受けてきた^{7,8}。ただし、未来と現在の価値評価にかかわる割引率の設定は、経済学を超えた範疇にある問題である。社会によって、豊かさの程度や時代環境によって大きく異なりうるものであり、適切な水準を論じることは難しい。

このほか、Nordhaus [2008] が自ら指摘しているように、DICE モデルでは技術進歩のペースが外生的に与えられており、気候変動政策の実施が技術進歩に影響を及ぼしうることが考慮されていない。例えば「クリーン・エネルギー技術に対する補

6 このほか、IPCC や NGFS でも DICE モデルを活用しており、複数の IAM の分析結果を比較検討し、最終的な想定シナリオを作成している。

7 『スターン報告』では、割引率を 1.5%程度と設定している。50 年後の 1 億ドルの現在価値は、割引率を 4%とすると 1,407 万ドルであるが、割引率を 1.5%とすると 4,750 万ドルである。割引率を高めに設定することは、気候変動に伴う将来損失が小さいと見積もることになる。

8 気候変動問題が世代間の不平などに与える影響については、世代重複モデルを用いた研究も存在する（例えば、Schneider, Traeger, and Winkler [2012]、Karp and Rezaei [2014] など）。

助金の導入などにより、温室効果ガスの排出量削減に資する技術開発が促される」といったメカニズムは取り込まれていない。このように、DICE モデルは気候変動政策の多様な波及経路を捨象している面もある。

こうした問題点や限界もあり、DICE モデルによる分析結果は定性・定量の両面で相当の幅を持つてみる必要がある。もっとも、DICE モデルは、気候変動と経済の相互依存関係を統合的に定式化した先駆的な試みであり、定量評価が可能となったことで政策効果を検討するフレームワークを提供し、後続のモデル発展の礎となったことから、その意義は高く評価されている。

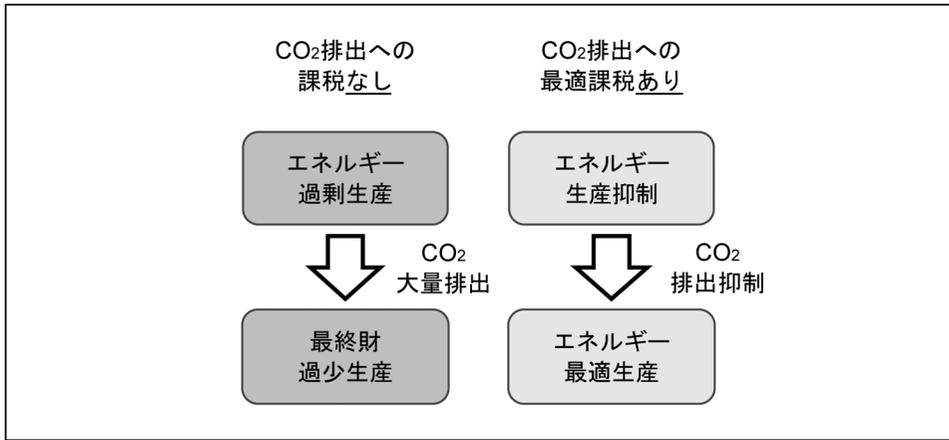
3. 気候変動と最適課税

本節では、気候変動と最適課税に関する研究を紹介する。温室効果ガスの排出がもたらす地球環境問題は、ある経済主体の活動が市場メカニズムの外側を通じて、他の主体の経済厚生に影響を及ぼすという意味で、典型的な負の外部性問題である。経済学では、負の外部性がある場合、それがもたらす社会厚生上のコストにちょうど見合う大きさの課税を行うことで、社会厚生を最大化できることが知られている。これは、考案したイギリスの経済学者アーサー・セシル・ピグーにちなみ、ピグー税と呼ばれている。気候変動の経済学分野でも、温室効果ガス排出にピグー税（気候変動問題では炭素税に相当）を課すことで、経済活動とその負の影響のバランスを取る最適課税の議論が行われてきた。本節では、簡便な統合評価モデルに基づき、温室効果ガスへの最適課税を理論的に明快な形で導いた Golosov *et al.* [2014] の研究を解説する⁹。

最初にゴロソフらのモデルを簡単に紹介する。彼らのモデルは、DICE モデルのアイデアに政策手段としてのピグー税を明示的に取り込んだものである。モデルを扱いやすくするため、DICE モデルと比べて気候モジュールが簡便化されている。DICE モデル同様、経済モジュールと気候モジュールがあるが、経済モジュール相当の企業部門に最終財生産部門とエネルギー生産部門を導入した点が異なる。エネルギー生産部門は、エネルギー生産に伴って CO₂ を排出する部門と、排出ゼロのクリーン・エネルギー部門に分けられている。気候モジュールは DICE モデルと比較して簡便に表現されており、同モジュールは大気中の炭素濃度というストック変数に集約されており、炭素濃度の上昇が最終財生産部門の生産に直接負の影響を与えると想定されている。炭素濃度というストック変数を用いることで最適課税

⁹ 気候変動の負の外部性を内部化するもう 1 つの主要な手段としては、温室効果ガスの排出権取引の市場を創設することが挙げられる。ノードハウス [2015] などで論じられているように、これも温室効果ガスの排出を価格面から抑制する点で、理論的には炭素税と同様の効果を持つとされている。

図表 3 二酸化炭素排出の外部性と最適課税



問題に動学的な側面を取り入れている一方、炭素濃度上昇が気温上昇や自然災害などを通じて生産に悪影響を及ぼすといったプロセスを明示的に扱わないことで、動学モデル内での取扱いを容易にしている。

以上のようなモデルから CO₂ 排出への最適課税がどのように導出されたのかを説明する。各部門における個別の経済主体が自らの目的関数を最大化するよう行動する場合、CO₂ 排出の社会的なコスト (Social Cost of Carbon: SCC)¹⁰ は考慮されない。すなわち、利潤最大化を志向するエネルギー生産企業は、CO₂ 排出がもたらす負の影響を考慮せずエネルギーの生産を行う。その結果、大気中の炭素濃度が上昇し、最終財生産部門の生産活動が阻害される。エネルギー価格に SCC は反映されず、これを前提に生産量や財価格が決定されるため、社会厚生を最大化するような資源配分が達成されない。結果的にエネルギーの過剰生産が行われていることになる。

経済学では、負の外部性による市場の失敗が生じている場合、負の外部性による社会厚生上のコストに見合う課税 (ピグー税) を行うことで、社会厚生を最大化できることが知られている。ゴロソフらは、CO₂ 排出を伴うエネルギー生産部門に SCC 相当の税を課すことで、最適な資源配分・生産量が達成できることを示した (図表 3)。

彼らのモデルでは、追加的な炭素排出 1 トンに伴う最終財損失の拡大分を現在価値に割り引くことで SCC を定義している。炭素濃度をストック変数としているため、今期の排出フローは将来にも影響を及ぼす。追加的な排出 1 トンは将来に渡っ

10 Nordhaus [2019] は、SCC を追加的な CO₂ 排出に伴う経済コストと捉え、SCC の推計値は気候変動政策において重要な要素であると指摘している。

図表 4 ゴロソフらによる理論的な最適課税額

$$\begin{aligned}
 & \text{最適課税 (CO}_2\text{排出1単位当たり)} \\
 & = \text{GDP} \times \\
 & f \left[\begin{array}{l} \ominus \text{ 将来の割引率、} \\ \oplus \text{ 炭素濃度上昇に対する} \\ \text{生産の減少度合い、} \\ \ominus \text{ 炭素が大気中で自然} \\ \text{減少する速度} \end{array} \right]
 \end{aligned}$$

て最終財損失を拡大させるため、その割引現在価値の合計が今期の SCC となる。

さて、エネルギー生産部門に SCC 相当の課税が行われるとエネルギー生産が抑制される。その結果、CO₂ 排出に伴う最終財生産の減少幅が小さくなる。もちろん、課税によるエネルギー価格の上昇は、財価格の上昇や生産量の減少に寄与する。しかし、個別の経済主体が CO₂ 排出の社会的な負の側面まで考慮した経済活動を行うようになる (SCC が内部化される) ため、社会全体の厚生は改善する。言い換えると、将来の損失と現在のコストの最適なバランスが価格メカニズムを通じて発見される。

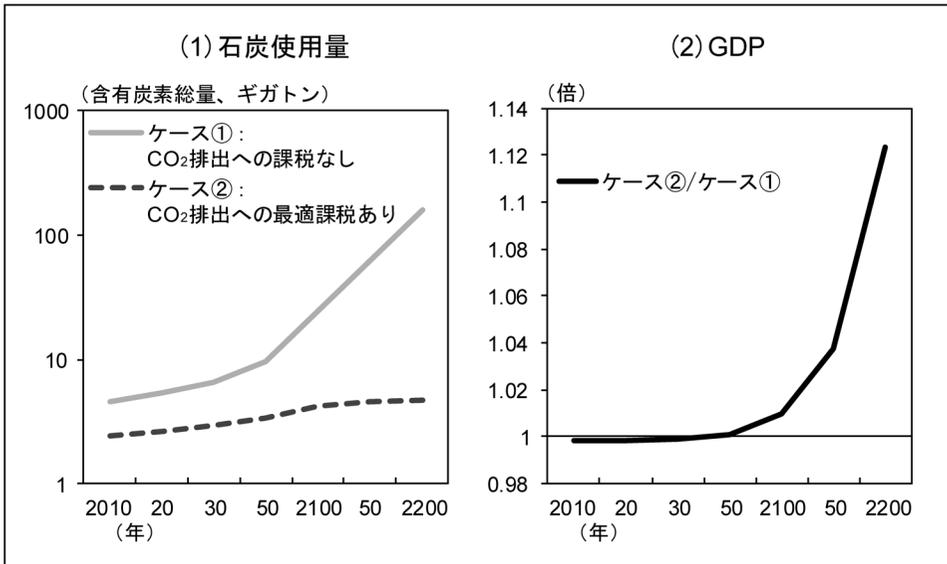
ゴロソフらの貢献は、モデル化に伴う一定の仮定のもとで、最適課税を理論的に明快な形で導出した点にある。すなわち、CO₂ 排出 1 単位当たりの最適な課税額は GDP の一定割合として求められること、その割合は、①将来生産物がもたらす効用の割引率、②大気中炭素濃度上昇に対する生産量の減少度合い、③炭素が大気中で自然減少する速度、の 3 点のみに依存することを示した (図表 4)。

関数 $f(\cdot)$ 内の符号条件を順に解説する。まず、割引率が低いことは経済主体が将来の影響をより重視することを意味している。このため、割引率が低いほど、CO₂ 排出により将来失われる生産の現在価値が大きくなることから、SCC が上昇し、これを映じて最適課税も高まる。また、大気中の炭素濃度上昇に伴って生産損失が大きくなりやすいほど (生産の炭素濃度変化に対する弾性値が高いほど)、最適課税は高まる。そして、炭素が大気中で自然減少する速度が遅いほど (生物圏や深海に吸収されにくいほど)、最適課税は高まることを示している。注目すべきは、最適課税の導出に他の重要な変数、例えば将来の生産や消費、大気中炭素濃度などが必要ない点である。そのため、将来の技術革新や生産性、労働供給など、予測が難しい変数を考慮することなく、今日の最適な課税額を決められる点が、ゴロソフらの

図表 5 各エネルギーの特性

	石油	石炭	クリーン
埋蔵量	少ない	豊富	—
コスト	高	低	中

図表 6 最適課税のシミュレーション



資料：Golosov *et al.* [2014] のデータを基に筆者が作成。

研究の重要な発見であった。

ゴロソフらは彼らのモデルを用いた定量評価も試みており、最適課税がある場合と全く課税を行わない場合を比較することで最適課税の効果を数値検証している。エネルギー生産部門として、石油、石炭、CO₂を排出しないクリーン・エネルギーの3つを想定し、先行研究に基づいて各部門の特性を図表5のように設定した。各エネルギーには埋蔵量というストック変数が設定されており、これが企業のエネルギー選択に影響を与える。

図表6は、ゴロソフらのシミュレーション結果を示している。ここでは、政策対応として、ケース①「CO₂ 排出への課税を行わない場合」と、ケース②「CO₂ 排出への最適課税を行った場合」を比較している。ケース①では石炭の使用量が大きく増加する一方、ケース②では使用量が抑えられている。なお、ケース②では石油およびクリーン・エネルギーの使用量も大きく増加しているわけではなく、全体的に

エネルギー節約が進むとの結果が得られている。図表 6 (2) で将来の GDP をみても、炭素濃度上昇が抑制されることの正の効果が課税による負の効果を上回り、相対的に高い GDP をもたらしめている。

モデルのシミュレーションから 2 つの示唆が得られる。第 1 の示唆は、エネルギー生産に対する課税効果（エネルギー利用量の減少幅）は、エネルギーの種類によって大きく異なり、エネルギー価格（コスト）だけでなく埋蔵量の多寡にも依存する点である。石油は、もともと埋蔵量が少なくコストも高いため、課税による利用量の減少幅はさほど大きくない。一方、石炭は、埋蔵量が豊富でコストも割安なため、課税などの政策対応を行わない限り、長期にわたって利用が増大し続け、結果として、地球温暖化を進展させてしまう。そのため、石炭のようなエネルギー資源に課税を行うことが望ましいという結果が得られている。

第 2 の示唆は、モデルでは外生的に与えられるエネルギー供給や技術進歩についての想定が、将来の気候変動や経済損失の算出に甚大な影響を持つという点である。特に、各エネルギーの代替の弾力性（相対価格が変化した場合の代替の起こりやすさ）をさまざまに変化させた場合、エネルギー選択のみならず全体の CO₂ 発生量や生産への影響に大きな違いが生じる。エネルギー間の代替が生じやすいモデル想定では、コストの安い石炭がその他のエネルギーを代替し、課税を導入しない限り、石炭の利用が大きく増加する。この場合には、最適課税の役割がさらに重要になるとゴロソフらは指摘している。このように、DICE モデルと同様、外生的に与えられるモデル想定やパラメータ設定に分析結果が強く依存している。これは、定量的な結果の解釈には慎重でなければならないことを示唆している。

ゴロソフらのモデルは非常に明快な形で最適課税を示しているが、いくつか重要な問題点も指摘されている。例えば Nordhaus [2014] は、大気中炭素濃度上昇に対する生産の減少度合いは計算がきわめて難しく不確実性が大きい点や、過度に簡便化された気候システムでは炭素濃度上昇の影響が長いラグをもって現れる側面を捉えきれない点などを指摘している。こうした限界はあるが、ゴロソフらの研究は、CO₂ 排出の負の外部性をもたらす経済的成本をモデル化し、最適課税を明快な形で導出したことで、後の経済学者が気候変動の経済分析を発展させる基礎となっている¹¹。

.....
11 例えば、Barrage [2020] は資源配分に歪みをもたらす税が別途ある場合の CO₂ 排出最適課税を、Li, Narajabad, and Temzelides [2016] は気候変動の経済への影響の度合いに不確実性がある場合の CO₂ 排出最適課税を分析している。

4. 気候変動と技術進歩

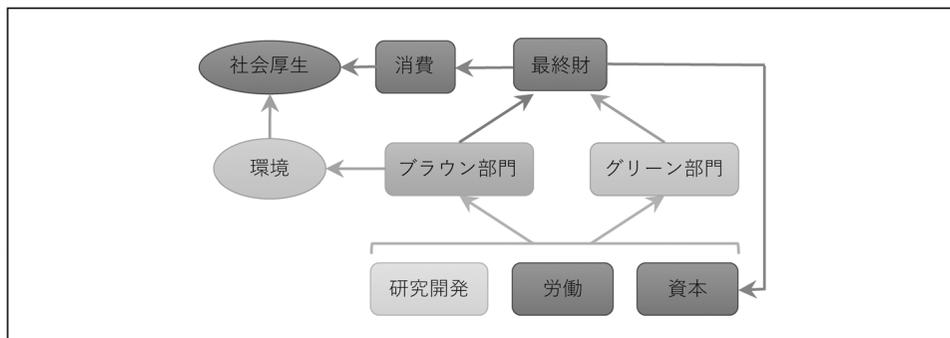
前節までで紹介したモデルは、技術進歩を外生的に与えており、技術進歩がもたらす役割を考慮していなかった。一般に、技術進歩は経済にプラスに働く。しかし、環境負荷を高める分野での技術進歩は同分野の経済活動を活発化させ、気候変動や環境悪化を通じて長期的には経済にマイナスとなる。一方、環境に負荷を与えないグリーン産業での技術進歩は、経済活動を大きく犠牲にすることなく環境負荷を抑制することにつながる。ただし、グリーン産業で得られる利潤の規模が小さいと、研究開発や技術革新が自発的には進展しにくいという問題がある。本節では、ピグー税に加えて研究開発補助金という政策手段をモデルに取り込んだ Acemoglu *et al.* [2012] を紹介する。

アセモグルらの研究も、DICE モデルと同様に、気候変動と実体経済の相互作用を取り込んだモデルに基づいている。新機軸は、研究開発投資によって技術進歩が内生的に生じるよう変更した点と、グリーン財とブラウン財を導入し、どちらの財部門で技術進歩が生じるのかという技術進歩の方向性をモデル化した点にある。こうしたモデルの拡張によって、炭素税や研究開発補助金が、グリーン産業へのシフトに及ぼす効果の分析が可能となっている。

モデルの構造を概観すると、生産部門は、中間投入財部門と最終財部門から構成される。さらに、中間投入財部門は、汚染物質の発生を通じて環境に負の影響を与える「ブラウン部門」と、汚染物質の発生を伴わない「グリーン部門」の2部門からなる。両部門から産出される中間投入財を用いて最終財が生産される（図表7）。

おのおの中間投入財部門の技術水準は研究開発に依存する。経済全体で研究・技術開発に従事できる研究者が一定数存在し、これが両部門に振り分けられる。その人数に応じて技術水準の成長率が決定される。ここでの技術進歩は、汚染物質の

図表7 モデル経済の概念図



排出抑制（ブラウン部門が生産する中間投入財 1 単位を生産する際に排出される汚染物質の量の減少）をもたらすのではなく、一定の資本や労働の投入量当たりの産出量の多寡を決めるものと設定されている¹²。グリーン部門に多くの研究者が割り当てられると、同部門の技術進歩は高まる一方、ブラウン部門の技術進歩は低下する。資本・労働の投入配分が変わらなくとも、グリーン部門の産出量が増加する一方、ブラウン部門の産出量は相対的に減少し、環境への負の影響も抑制される。

しかし、グリーン部門の中間投入物ばかりが生産され、ブラウン部門の生産が過少になると最終財の生産に制約が生じかねず、環境面ではプラスだが経済が縮小することで社会厚生はかえって低下してしまう可能性がある。このため、気候変動と経済の関係をみるうえで重要になるのは、中間投入財の代替性（最終財の生産関数における中間投入財の代替の弾力性）である。

中間投入財の代替性が低い（代替の弾力性が 1 より小さい）経済では、最終財を生産するためにグリーン部門とブラウン部門の中間投入財がバランスよく必要となり、経済成長には両部門の拡大が求められる。したがって、この経済では、経済成長と環境の維持はトレードオフの関係にあり、両者を同時に達成することはできない¹³。一方、中間投入財の代替性が高い（代替の弾力性が 1 より大きい）経済では、グリーン部門がブラウン部門の中間投入財を代替しやすく、グリーン部門により多くの研究開発が割り当てられれば、グリーン部門の拡大を通じて、長期的にみて環境を維持しつつ経済成長を達成することが可能になる。

アセモグルらは、中間投入財の代替性が高く（代替の弾力性が 1 より大きく）、経済成長と環境の安定が同時に達成可能な経済を想定している。彼らのモデルでは、研究開発が一定の確率で成功し、成功した場合は中間投入財の生産性が向上することで企業利潤が高まる。研究開発の期待利潤はこの成功確率に基づき算出される。企業はこの期待利潤に基づいてどの部門に研究者を振り分け研究開発を行うかを決定する。例えば、グリーン部門への研究開発による期待利潤が、ブラウン部門へのそれを上回る場合は、グリーン部門に集中的に研究開発が行われることになる。このほか、中間投入財の生産や生産要素（資本と労働）の投入も企業の利潤最大化によって決定される。

このモデルでは、研究開発により得られる期待利潤の決定要因として 3 つの効果が存在している。第 1 の効果は「価格効果」である。これは、中間投入財の価格が高い部門ほど期待利潤が高くなるため、資本や労働力の投入だけでなく、研究開発

.....
12 前者の技術進歩は、ブラウン部門がグリーン部門に変貌することを捉えたものとも考えられる。これは、ここで紹介しているモデルが想定しているように、グリーン部門に技術進歩が集中することによってブラウン部門の生産量が相対的に低下し、グリーン部門の生産量が増大していく現象と実質的に同じであると考えられよう。

13 一般的には、両中間投入財の代替性を高めていくような技術進歩も考えられる。アセモグルらの研究では、同代替性は一定と仮定されている。

投資も行われやすくなる効果である。第2の効果は「規模効果」であり、市場規模が大きい部門のほうが、新技術が開発されたときに得られる期待利潤も高くなるという効果である。第3の効果は「生産性効果」であり、すでに技術水準（生産性）が高い部門の方が、新技術開発による期待利潤が高くなりやすいという効果（いわば「巨人の肩の上に立つ」効果）を想定したものである。

これらの3つの効果は独立ではなく関連している。市場規模は生産性が高いほど大きくなるため、規模効果と生産性効果は、すでに発展している部門の技術水準をさらに高めるように作用する。一方で価格効果は、逆に作用する。価格は生産性が低いほど高止まりしてしまうため、生産性が低い部門ほど研究開発投資が行われ技術水準を高めるように作用する。

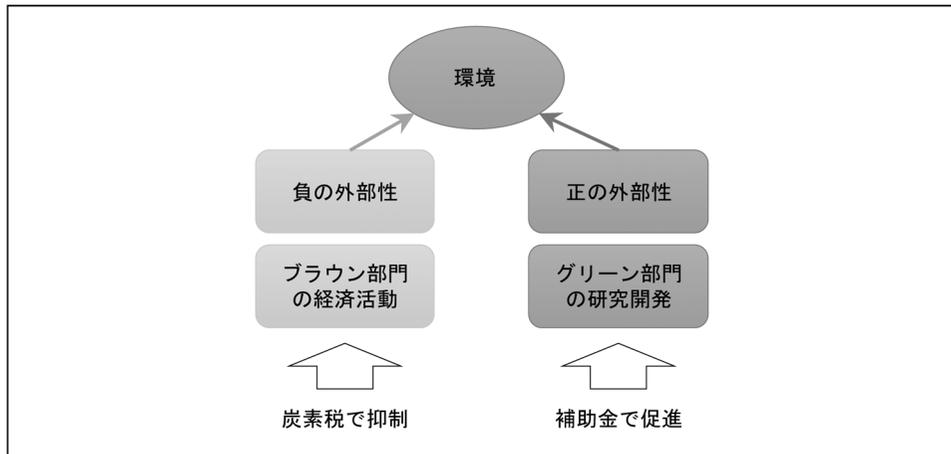
アセモグルらは、上記3つの効果を考慮した場合、技術開発を市場に任せたままで、技術進歩がグリーン部門ではなく、ブラウン部門のみで生じてしまう可能性がある」と指摘している。現実の経済では、グリーン部門よりもブラウン部門の方において市場規模が発達し、研究開発が長年行われ生産技術が蓄積していることが多い。そのような現実的な想定のもとでモデルを数値計算すると、ブラウン部門において規模効果と生産性効果が強く働き、同部門の期待利潤が押し上げられることが示される。アセモグルらは、この2つの効果は、相対的に発達が遅れているグリーン部門における価格効果を上回るとのモデル数値計算結果を報告しており、その結果、自由放任ではブラウン部門に研究開発が集中することを指摘している¹⁴。

同研究は、市場の自由選択では社会的に望ましい状態が達成できないことを示している。グリーン部門の研究開発には正の外部性があるにもかかわらず、市場の自由選択では必ずしも十分に活用されないことがその原因となっている。この正の外部性は、グリーン部門の研究開発への補助金によって経済に取り込むことができる。このように、社会厚生上望ましい気候変動政策には、汚染物質排出への課税だけでなくグリーン部門の研究開発への補助金という2番目の政策手段が必要とされる（図表8）。

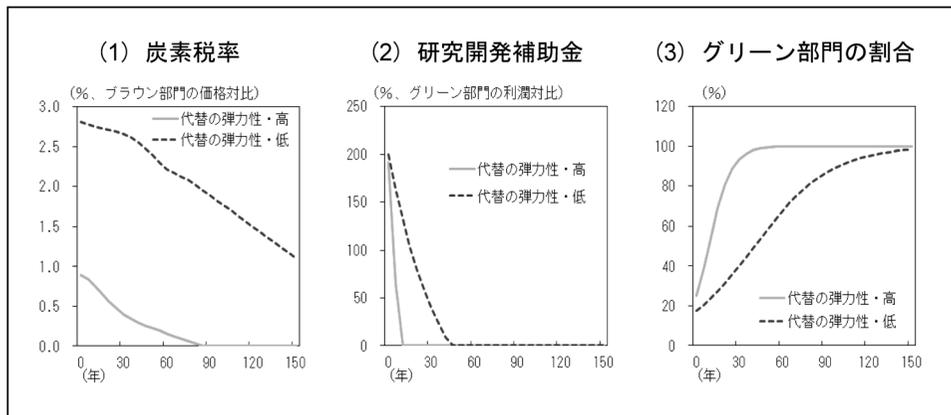
アセモグルらは、補助金と炭素税を組み合わせた最適政策を分析している。図表9にその結果を示した。パスが2つ示されており、グリーン部門とブラウン部門の中間投入財の代替の弾力性の高いケース（実線）と低いケース（破線）が試算されている。このシミュレーションからは主に3つの政策的示唆が導かれる。第1に、研究開発補助金は恒久的である必要はない。図表9（2）をみると、代替の弾力性が高いケース・低いケースともに、最適な補助金はシミュレーション期間中にゼロまで低下している。補助金が提供されている間にグリーン部門の技術水準が向上

14 一例として、通常のプラスチック製品と生分解性プラスチック製品を考えてみよう。一般的に価格は後者が高い。しかし、市場規模は前者が圧倒的に大きいほか、既存技術のストックも多いため「巨人の肩」効果が大きく作用すると推測される。

図表 8 外部性と政策ツールの対応関係



図表 9 最適政策シミュレーション



備考：「代替の弾力性・高」と「代替の弾力性・低」のケースは、代替の弾力性をそれぞれ 10 と 3 に設定。

資料：Acemoglu *et al.* [2012] のデータを基に筆者が作成。

し、同部門の市場規模も拡大する。このため、補助金がなくても、生産性効果と規模効果により同部門の研究開発が自発的に推進されるようなフェーズに転じることになる。実際、図表 9 (3) をみると、補助金がゼロになった後も、グリーン部門の割合は 100% に向けて上昇を続けることが確認できる。

第 2 に、グリーン部門への代替が進展すると、ブラウン部門に対する炭素税も、ある時点で不要になる。代替の弾力性が高いケースをみると (図表 9 (1))、炭素税もシミュレーション期間中にゼロまで低下している。これは、補助金や炭素税がブ

ラウン部門からグリーン部門への移行を促進し、ブラウン部門が縮小することで、ブラウン部門の経済活動による負の外部性の影響が小さくなり、炭素税がなくても、市場メカニズムを通じた社会厚生最適化が行われるようになるためである。

第3に、研究開発補助金と炭素税の政策パスは、グリーン部門とブラウン部門の中間投入財の代替の弾力性の値に大きく依存する。代替の弾力性が高い場合、ブラウン部門からグリーン部門への代替が進みやすいことから、研究開発補助金と炭素税の水準は総じて低めに抑えられ早期にゼロまで低下する。一方、代替の弾力性が低い場合は、グリーン部門への移行に時間を要し、それと並行して、研究開発補助金や炭素税の水準も総じて高く、それらの政策がより長期にわたって必要とされる¹⁵。

アセモグルらは、上記の結果が、さまざまなモデルの拡張・変更に対しても、概ね頑健であることを確認している¹⁶。こうした政策的示唆は、グリーン部門とブラウン部門の中間投入財の代替の弾力性が1より大きいという前提のもとで導出されているが、その前提が実証的に支持されることを示した分析結果も報告されている¹⁷。また、6節で紹介する Aghion *et al.* [2016] は、ブラウン部門とグリーン部門の技術進歩の方向性に関する決定要因を実証的に検証している。

本節で紹介したモデルでは、ブラウン部門・グリーン部門の中間投入財の代替の弾力性が重要な役割を果たしていた。技術進歩を考える場合、中間投入財の生産効率だけでなく、この代替性を高めるような技術進歩も考えられるかもしれない。いずれにしても、本節で紹介した分析では、技術進歩が果たす役割を明示的にモデル化することで、クリーン・エネルギー分野の技術開発を促す「正の外部性を活用した政策」も有効なことが示されている。

5. 気候変動と非伝統的金融政策

本節では、気候変動と金融政策に関する研究を紹介する。気候変動の経済学では、炭素税の導入やグリーン産業の技術開発投資に対する補助金といった産業・財

15 この場合、大幅に炭素税と補助金を引き上げることでグリーン部門への移行をより早めることも可能ではあるが、それに伴う経済成長の低下によるコストが、長期的な環境改善による便益を上回ることから、そのような極端な政策は最適政策として導かれていない。

16 例えば、以下の場合を勘案しても、ここでの結論は概ね頑健であるとしている。第1に、ブラウン部門での生産活動に化石燃料などの枯渇性資源が生産要素として必要になる場合。第2に、中間投入財を生産するグリーン部門とブラウン部門という「財の区別」ではなく、生産性を改善しつつ環境も改善するグリーン技術と、生産性は改善するが環境を汚染してしまうブラウン技術といった「技術の区別」をモデル化した場合。第3に、生産性のみを改善する技術と環境のみを改善する技術に分けて考えた場合。

17 例えば、Papageorgiou, Saam, and Schulte [2017] を参照。

政政策が提案されてきた。一方、金融政策は基本的には物価の安定を実現するツールであり、気候変動問題に対応する政策手段ではないと考えられてきた。しかし、近年、中央銀行による資産買入れなど非伝統的金融政策が広範化するなかで、気候変動問題に配慮した金融政策への関心が高まり、グリーン量的緩和（Quantitative Easing: QE）などのコンセプトが語られるようになった。

ピアゼッシらによる最近の研究（Papoutsi, Piazzesi, and Schneider [2021]）では、理論モデルに金融市場の摩擦を導入したうえで、非伝統的金融政策の設計について考察を行っている。非伝統的金融政策にはさまざまな類型があるが、この研究ではそのうちの1つとして、中央銀行による民間社債の買入れを分析対象としている。そのうえで、①企業間の資本コストの相対値に影響を与えないという意味での「市場中立的」な政策と、②環境問題をめぐる金融市場の摩擦（歪み）によりブラウン企業に過大に生じやすい資本コスト上のリスク・プレミアムを排除する政策、の2種類の政策を比較検討している。さらに、欧州中央銀行（European Central Bank: ECB）が行っている社債購入プログラムが、「市場中立的」な政策と、市場の摩擦の解消を優先する政策のいずれに相当するかを検証している。また、政策実施の技術的な困難さや、財政政策と金融政策の役割分担、金融政策が財政政策の肩代わりはできないことなど多くの示唆を与えている。

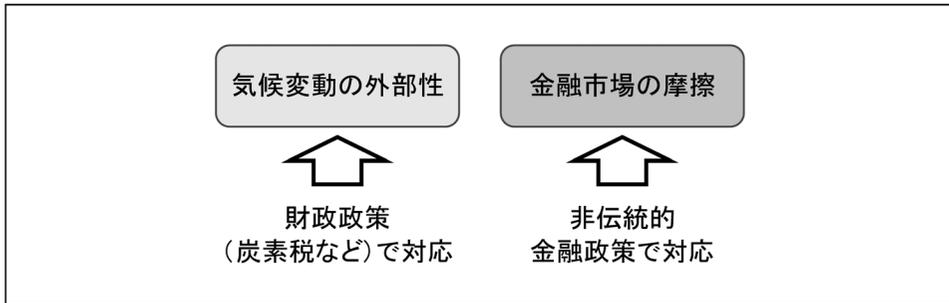
この論文では、金融市場の摩擦として環境問題を巡って企業の資本コストに過大なリスク・プレミアムが生じている事態を想定している。環境に悪影響を及ぼす企業ほど、将来の規制対応コストなどによって業績が悪化するリスクがあり、これを企業の環境関連リスクと呼んでいる。こうした環境関連リスクは企業の資本コストに反映され、リスク・プレミアムを生じさせる¹⁸。

投資家と企業の間情報非対称性といった市場の摩擦があると、ブラウン企業ほど過大なリスク・プレミアムが生じやすいと考えられる。このリスク・プレミアムは、金融市場の摩擦により生じている歪みである。その歪みによって、金融市場が提供する最適な資源配分機能が阻害されているならば、中央銀行が金融政策で歪みを取り除く対応が、市場効率性の点では望ましいと考えられる。中央銀行による社債買入れは、市場の摩擦によって生じたリスク・プレミアムを適正な水準まで押し下げることにより、市場機能の回復に寄与しうる。ピアゼッシらはこうした考えに沿って、金融市場の摩擦をモデルに導入した。

本研究でも、気候変動の外部性については財政政策（炭素税など）で対応することが望ましいとされており、金融政策は金融市場の摩擦に対処するものと位置づけられている（図表 10）。気候変動・環境問題に対する金融政策の議論では、グリー

.....
18 このプレミアムは Pollution premium と呼ばれている。プレミアム発生源となる将来の不確実性には、企業業績に影響を及ぼす環境関連の規制変更なども含まれる。Pollution premium に関する実証研究としては、例えば Hsu, Li, and Tsou [2021] がある。

図表 10 政策目的の想定



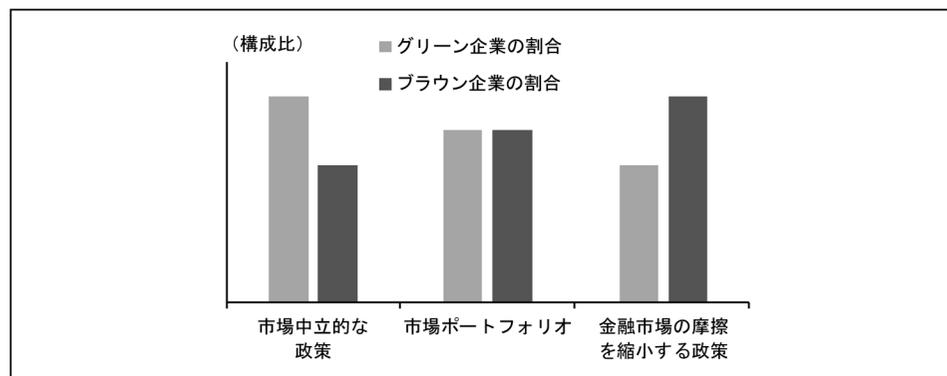
ン企業を優遇することで環境問題の改善に貢献するという発想で語られる場合があるが（一種の財政政策）、市場機能に注目したピアゼッシらの視点はこれとは異なっている。

この論文では、気候変動にかかわる金融政策の市場中立性についても議論している。具体的には、「中央銀行による社債買入れが、民間企業の資本コストの相対価格に影響を与えないこと」を「市場中立性」と定義している。言い換えれば、「市場中立的」な政策とは、すべての企業の資本コストを比例的に低下させる金融政策のことである。ピアゼッシらは、中央銀行がどのようなルールで民間企業の社債買入れを行えば、「市場中立的」な政策となるかを考察した。1つの単純なアイデアは、中央銀行が、資本市場における民間企業の調達金額（市場ポートフォリオ）と比例的な割合で民間企業の社債を購入するという制度設計であろう。ここでは、グリーン企業とブラウン企業の社債購入比率をおのおのの企業の資本調達額と同じ割合になるように設定することにあたる。

しかし、ピアゼッシらは、こうした設計では「市場中立的」にならないと指摘している。中央銀行による社債買入れは、金融市場全体のリスクを公的部門が吸収する効果（論文では一般均衡効果と呼称）を持ち、環境関連リスクの高いブラウン企業のリスク・プレミアムを相対的に大きく低下させる効果があると考えられるためである¹⁹。この一般均衡効果の特性を前提とすると、中央銀行が、市場ポートフォリオと同じ割合でグリーン企業とブラウン企業の社債を購入した場合、相対的にリスクの高いブラウン企業の資本コストのリスク・プレミアムがより大きく圧縮され、ブラウン企業に傾斜した緩和効果が生じることになる。以上の議論を踏まえる

.....
 19 この論文の理論モデルでは、中央銀行が民間社債を国債と交換することで、民間企業のリスクを吸収するように描写されている。しかし、中央銀行による民間社債の買入れが金融機関の準備預金（リザーブ）の増額をもたらす設定のほうが、現実の非伝統的政策に近い。この場合においても、社債購入政策が公的部門による民間部門のリスク吸収となる結果、一般均衡効果が生じると考えられる。例えば、金融システム危機時の中央銀行の流動性供給は、システム全体のリスクを低減させるが、これによって、破綻に直面している企業により大きな恩恵が及ぶことを想起するとわかりやすい。

図表 11 2つの買入政策の比較



と、「市場中立的」な政策とは、市場ポートフォリオと比べて、グリーン企業の社債購入割合を多めに設定するものとなる。これが、ピアゼッシらが指摘した1つの重要な帰結である。

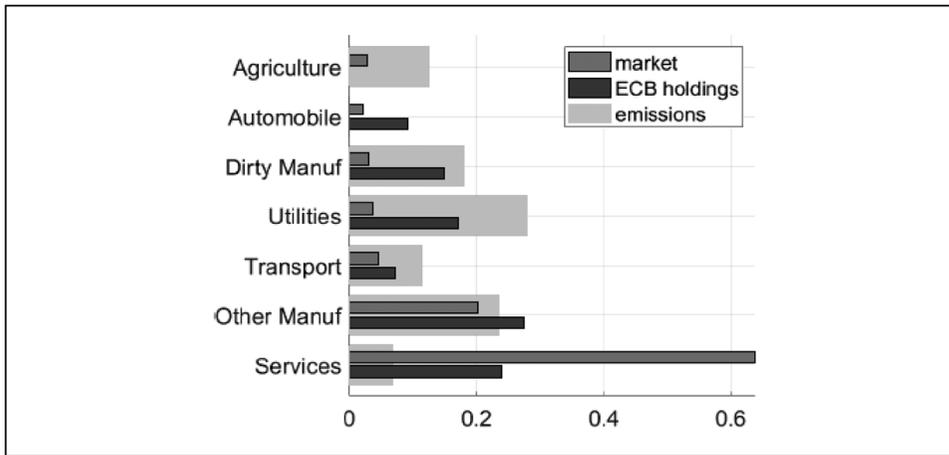
もっとも、金融市場の摩擦が大きい場合、「市場中立的」な政策以外の視点もありうる。すなわち、摩擦の悪影響が大きいのであれば、「市場中立性」にはこだわらず、リスク・プレミアムを適正な水準まで圧縮する政策を優先することや、問題の発生源となっている金融市場の摩擦を取り除く政策のほうが、社会厚生全体の改善にとって望ましいケースも想定されうる。ピアゼッシらは金融市場の摩擦の影響を取り除く政策を「最適政策」と呼んでおり、その政策は、相対的にリスクの高いブラウン企業の資本コストのリスク・プレミアムを縮小するために、市場ポートフォリオと比べて、ブラウン企業の社債を多めに購入するものとなることを示している（図表 11）。

なお、ここでの分析は、気候変動の負の外部性に対して炭素税などの財政政策が適切に発動されていることが前提となっている。ピアゼッシらは、炭素税などの財政政策によって気候変動の外部性への対応が行えないような事情がある場合にはグリーン企業に傾斜した社債買入れを行うことが望ましいと述べている。

こうした理論的な考察を踏まえ、論文中では ECB による社債購入割合の評価も行っている。2016～18 年を対象に ECB が社債購入プログラムを通じて保有した民間社債のセクター別シェアを算出し、ユーロ圏企業の資本調達構成（市場ポートフォリオ）と比較している。企業の資本調達手段には社債だけでなく株式も含まれるため、市場ポートフォリオの算出では両市場を合算している²⁰。また、各セク

20 ユーロ圏民間企業の株式市場価値については適切なデータが入手できないことから、市場ポートフォリオの算出に複数の代替的な指標を用いている。いずれの指標を用いても概ね同様な結果となっている。

図表 12 ECB の社債購入割合と市場ポートフォリオ



備考：「market」は市場ポートフォリオ（社債+株式）、「ECB holdings」はECBのセクター別社債保有割合、「emissions」は各セクターの温室効果ガス排出量の割合。

資料：Papoutsi, Piazzesi, and Schneider [2021]

ターの企業がグリーン企業であるかブラウン企業であるかを確認するため、セクター間の温室効果ガス排出量割合も調べている（図表 12）。

その結果、市場ポートフォリオでは温室効果ガス排出量の少ないサービス業のシェアが非常に大きいのに対し、ECBの民間社債保有残高に占めるサービス部門の割合は相対的に少なく、温室効果ガス排出量の多い製造業（図中 Dirty Manufacturing と Other Manufacturing。前者は石油・石炭、化学、金属など）や、公益事業（図中 Utilities。電力、ガスなど）の割合が多くなっていることを確認している。

ピアゼッシらは、ECBの社債購入プログラムがブラウン企業に傾斜していることを指摘したうえで、その理由として、社債市場のみのセクター別残高に比例させてプログラムが運営されている点を挙げている。実際、欧州の社債市場では、ECBのセクター別社債保有割合と概ね同様に、温室効果ガス排出量の多い製造業や公益事業の発行額が大きい一方、排出量の少ないサービス業の発行額は小さくなっている²¹。

つまり、欧州社債市場ではブラウン企業の社債発行額が相対的に大きく、これと概ね比例的な形で社債買入れを行った結果、社債・株式の合算市場ポートフォリオで評価するとブラウン企業に傾斜した金融政策になっているのではないかとピアゼッシらは推察している。資本コストに働きかける政策は、社債・株式の両者を対

21 この背景として、①製造業や公益事業では、工場などの固定資産が多く、社債発行に際して担保として利用できること、②サービス業は固定資産をあまり有さず、株式調達に依存する傾向がみられることを論文中で指摘している。

象に制度設計すべきであるという指摘と解釈することができよう。

前述したように、ピアゼッシらは、中央銀行の社債買入れが彼らのいう意味で「市場中立的」であるためには、市場ポートフォリオ対比でグリーン企業に傾斜した社債買入れを行う必要があると考えている。しかし、確認されたエビデンスからは、ECBの社債購入は「市場中立的」ではなく、ブラウン企業の資本コストを低下させる政策になっていると指摘している。なお、この論文では、「市場中立的」な政策と金融市場の摩擦に起因する歪みを取り除く政策のどちらが望ましいかについては言及していない。後者であった場合、結果的にブラウン企業偏重となった政策は正当化されうることになる²²。

最後に、この研究を理解し、その示唆を汲み取るうえでの重要な論点を示す。第1に、この研究は、中央銀行が民間企業の社債買入れを通じて、気候変動に配慮した非伝統的金融政策を行う状況を想定している。このもとで、中央銀行が仮に「市場中立的」な政策を志向する場合、中央銀行は、①どの企業がグリーン企業でどの企業がブラウン企業であるかを正確に知る必要があるとともに、②自らの社債買入れが各企業の資本コストにどの程度の影響を与えるかという点を正確に知る必要がある²³。現実には、グリーン企業とブラウン企業をどう分類するかという、いわゆるタクソノミーの問題があるほか、上述した「一般均衡効果」の大きさも含めて、中央銀行の社債買入れが各企業の資本コストに与える影響を正確に見積もることは難しい。また、金融市場の摩擦に対応する場合を考えても、その程度を計測するのは困難である。市場がミスプライスしていることを何らかの理由で中央銀行が知りうるケースはあまり多くなさそうである。

第2の留意点は、この研究では、気候変動の負の外部性に対して、炭素税の導入など財政政策による対応が既に行われていると想定されている点である。その前提のもとでは、財政政策は気候変動の負の外部性に対処し、金融政策は金融市場の摩擦に対処するという役割分担ができる。もっとも、こうした財政政策による対応が行われていない場合、中央銀行が、財政政策の文脈において、気候変動の負の外部性に対処するという考え方も存在しうる。しかし、ピアゼッシらは、「中央銀行の資産買入れが、炭素税などの財政政策を完全に代替できるものではない」こともあわせて強調している。社債購入などの非伝統的金融政策は、民間企業の資本調達に

22 ただし、ECBは、この研究の文脈での政策意図には言及していない。また、2021年7月に公表した戦略レビュー（European Central Bank [2021]）において、ECBは、金融政策目的での社債買入れについて、今後、気候変動対応の実施状況に関する基準を踏まえた配分となるような調整を行う旨を表明している。

23 日本銀行が2021年末に開始した「気候変動対応を支援するための資金供給」では、中央銀行自身が民間企業に直接資金を供給するのではなく、気候変動対応に資するための取組みについて一定の開示を行っている金融機関を対象に、そうした取組みの一環として実施する投融資をバックファイナンスすることが想定されており、グリーンかブラウンかの具体的な判断を中央銀行が金融機関に委ねている点に特徴がある。

かかるコストを限界的に変化させることはできる。しかし、企業の生産活動における意思決定全般（生産量や労働投入量の決定など）において、気候変動の負の外部性を十分に勘案させる（内部化させる）には、外部性がもたらす社会的コストに対応した課税（ピグー税）で対応する必要があるとしている。

2013年ノーベル経済学賞受賞者のハンセンは、こうしたピアゼッシらの見解と同様に、「気候変動問題に対して、金融政策は財政政策と同程度の潜在力は有さない」と端的に指摘している（Hansen [2022]）。金融政策を、気候変動の負の外部性に対処する主たる政策手段としては考えないのが、経済学者に共通して窺われる見解のようである。

6. 気候変動の経済学：実証分析編

本節では、気候変動や政策対応がマクロ経済に及ぼす影響を検証した最近の実証分析を紹介する。以下、(1) 気温上昇が長期的な経済成長に与える影響、(2) 異常気象が短期的に経済・物価に与える影響、(3) 炭素税が短期的に経済・物価に与える影響、(4) 炭素税が技術進歩に与える影響の順に紹介する。

(1) 気温上昇が長期的な経済成長に与える影響

2節で紹介した DICE モデルなどでは、気温上昇がマクロ経済の生産性を低下させることにより、GDP を押し下げることが想定されている。ここでは、この点に関する実証研究を2つ紹介する。

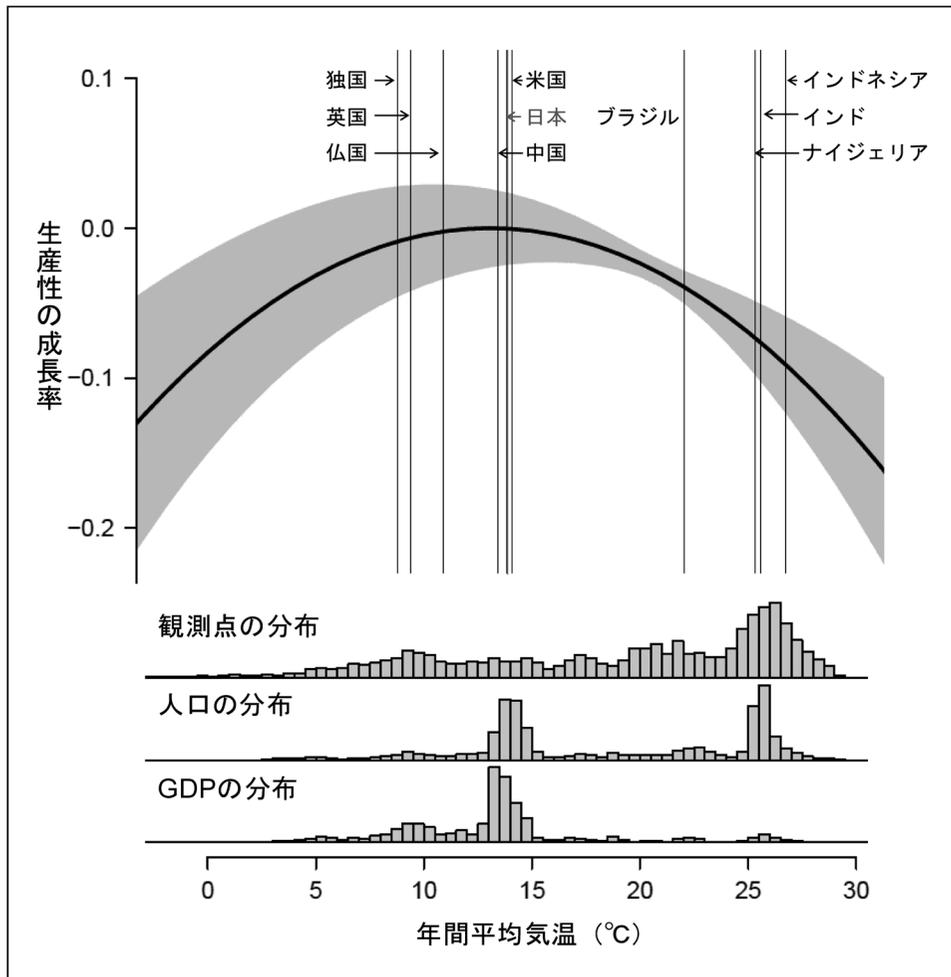
イ. クロスカントリー・データを用いた分析

1つ目は、クロスカントリー・データを用いて気温と生産性成長率の関係を明らかにした Burke, Hsiang, and Miguel [2015] である。彼らは、世界 166 カ国を対象にしたパネルデータを用いて、年間平均気温と生産性成長率との関係を分析した（図表 13）。

図表 13 から、各国の年間平均気温と生産性成長率との間には非線形な関係があることがわかる。具体的には、年間平均気温が 13℃ 付近までは、気温の上昇に伴い生産性成長率は改善する。しかし、気温がそれを上回ると、生産性成長率が非線形的に低下する²⁴。こうした関係を前提にすると、地球温暖化は、気温がかなり低

24 気候変動とマクロ経済の関係が非線形であるという点は、例えば Tol [2009] でも指摘されている。

図表 13 年間平均気温と生産性の成長率の関係



備考：シャドーは90%信頼区間、縦線は各国の平均気温を表す。

資料：Burke, Hsiang, and Miguel [2015] の複製データから筆者が作成。

い国では生産性成長率への影響が小さい（あるいはプラスになる）一方、もともと気温の高い国では生産性成長率を大きく低下させる要因になりうることを示唆される。

バークらはこの推計結果に基づいて、気候変動抑制策を導入せず、化石燃料に依存した経済活動が続くような世界をシミュレーションしている。その結果は、多くの国で生産性が低下し、世界の平均所得が大きく減少するだけでなく、グローバルな所得格差拡大を招くものであった。

ロ. 米国の州別データを用いた分析

2つ目は、気温と GDP 成長率の関係を分析した Colacito, Hoffmann, and Phan [2019] である。コラシートらは、同じ国や地域でも季節によって気温がマクロ経済へ与える影響が異なる点に注目し、趨勢的な気温上昇の影響を推察している。

まず、米国の州・セクターレベルのデータを用いたパネル分析を行い、夏の平均気温と GDP 成長率の間には、統計的に有意な負の関係があることを明らかにしている。具体的には、夏の平均気温が 1°F (約 0.56°C) 上昇すると、米国における州ごとの GDP 年間成長率が 0.15~0.25% ポイント低下するとの推計結果を示している²⁵。コラシートらは、これらの推計結果を気温の将来予測に当てはめた場合、米国の経済成長率は次の 1 世紀で、気温上昇がなかった場合と比べて最大 1/3 程度下押しされると推計している。

(2) 異常気象が短期的に経済・物価に与える影響

気候変動は、長期的な経済成長への影響だけでなく、短期的にも、異常気象の発生を通じて自然災害をもたらし、経済・物価に影響を及ぼす。以下、異常気象が実際に発生した場合の影響を分析した研究と、異常気象の可能性が企業や家計の意思決定に織り込まれることで生じる影響を分析した研究を紹介する。

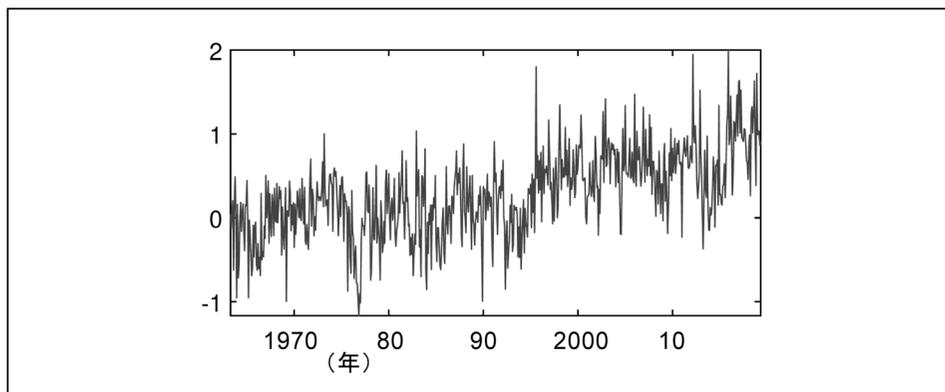
イ. 異常気象の経済への影響

最近の研究では、Kim, Matthes, and Phan [2021] が注目されている。彼らの研究の特徴は、気候変動によるマクロ経済への影響が時間とともに変化する可能性を考慮した点にある。キムらは、異常気象を表す指標として、気温や降水量、風速、海面上昇などのデータから気候変動の度合いを指数化した Actuaries Climate Index (ACI) を用いている (図表 14)。米国の ACI の推移をみると、短期的な振幅だけでなく趨勢的な上昇が読み取れる。分析期間の後半では ACI の平均値が高くなっており、過去 10 年間で極端な気象現象の発生が増えたことを示している。

キムらは、米国を対象に、ACI と経済・物価に関するデータを用いて非線形の時系列モデル (ベクトル自己回帰モデル) を推計している。分析の結果、ACI の高まりは、工業生産成長率の低下など实体经济に悪影響を及ぼしており、また、その影響は近年強まっていることを確認している (図表 15)。物価については、ACI の上昇がインフレ率を押し上げるという実証結果を示している。キムらは、インフレ率の上昇について、異常気象の影響を受けた供給制約の強まり (生産や流通の停止・

²⁵ 気温と GDP 成長率の関係をセクター別にみると、夏の平均気温の上昇は、金融・不動産・保険やサービス、農業、小売りなど多くの主要業種にマイナスの影響を及ぼす一方、ポジティブな影響を受ける業種はごくわずかであることが報告されている。

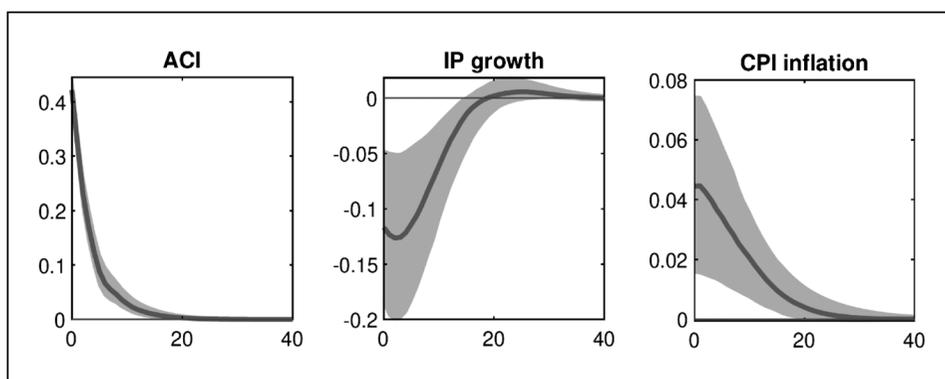
図表 14 ACI の推移



備考：対象は米国本土。

資料：Kim, Matthes, and Phan [2021]

図表 15 ACI 上昇時の鉱工業生産とインフレ率



備考：横軸の単位は月。鉱工業生産成長率とインフレ率の単位は%ポイント。サンプル終期による推定値。シャドーは68%信頼区間。

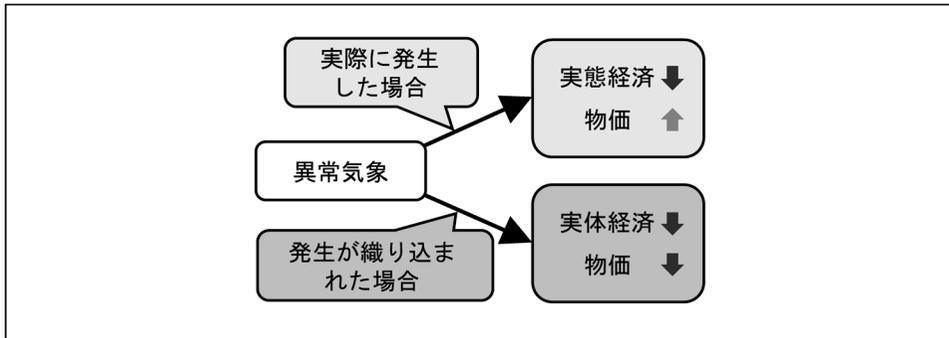
資料：Kim, Matthes, and Phan [2021]

停滞) が食料品とエネルギー品目で生じている面が強いとの解釈を提示している。

ロ. 自然災害の可能性を織り込むことの影響

Dietrich, Müller, and Schoenle [2021] は、自然災害の可能性を前提に経済活動が行われるようになると、マクロ経済にどのような影響が及ぶのかを検証している。気候変動によって、将来、洪水などの自然災害が増加する懸念が高まると、人々は災害に備えようと貯蓄を増やし、消費財・サービスの需要が低下する可能性がある」と指摘している。

図表 16 異常気象の影響



資料：Kim, Matthes, and Phan [2021] と Dietrich, Müller, and Schoenle [2021] の結果を基に筆者が作成。

彼らはまず、米国人を対象にしたサーベイ調査に基づき、近い将来、気候変動により大規模な自然災害が起こりうると多くの人が想定していると指摘している。例えば、「被害額が GDP の 5% に相当する自然災害が 12 ヶ月以内に起こる確率」という質問への回答をみると、中央値で 12% という結果が得られている。そのうえで、自然災害発生の可能性が織り込まれると経済活動にどう影響するかを、ニューケインジアン・モデルを用いて定量的に評価している。このモデルでは、自然災害が発生した場合、生産設備の一部が毀損すると想定している。これを織り込んで企業や家計が意思決定を行うと、総需要が低下し、自然利子率（マクロ経済の需給を一致させる実質金利の水準）が低下する。分析に際しては、人々が想定する自然災害の発生確率を 12% とするなど、サーベイ調査の結果をもとにパラメータの値を設定している。

シミュレーションの結果、自然災害の可能性を織り込むケースでは、そうでないケースと比べて自然利子率が 0.65% ポイント低下することが示されている。また、需給ギャップは 0.2% ポイント拡大し、その結果、インフレ率が 0.3% ポイント低下するとの試算結果を得ている。ディートリッヒらの分析は、生産設備にマクロ経済レベルで大きなダメージが生じるような自然災害が「将来生じうると人々が意識するようになる」だけで経済が縮小してしまうロジック（あるいはすでにそうなっている可能性）を示した研究であるといえる。

以上、異常気象が経済・物価に短期的に与える影響についての研究を紹介してきたが、その結果をまとめると図表 16 のようになる。異常気象は、実際に発生するだけでなく、発生の可能性が織り込まれるだけでも、実体経済に対して負の影響を与える。一方、インフレ率については影響の現れ方が異なっており、異常気象が実際に発生すれば供給制約の強まりからインフレ率は押し上げられるが、発生の可能性が織り込まれるだけの場合には逆に押し下げられるとみられる。

(3) 炭素税が短期的に経済・物価に与える影響

3節で解説したように、気候変動の経済学では、気候変動を通じた負の外部性に対する有効な政策手段として炭素税が提案されている。しかし、その導入に際しては実体経済への負のインパクトが懸念される。

Metcalf and Stock [2020] は、1990年代初頭から炭素税が導入されてきた欧州のデータを用いて分析を行っている。その結果、炭素税の導入・引上げがGDPや雇用の成長率に対して負の影響を与えているという統計的な確証は得られなかったと報告している。

Konradt and Mauro [2021] は、物価への影響を検証している。炭素税の導入によりエネルギー関連コストが上昇すれば、企業は消費財価格に転嫁するため、インフレ率が上昇すると予想される。しかし、欧州とカナダのデータを用いた分析では、炭素税の導入はインフレではなく物価の小幅下落をもたらしたことが示されている。予想と逆の結果が得られた理由として、炭素税の導入はエネルギー価格を上昇させる一方、所得を低下させ、家計消費を抑制するため、サービスや非貿易財の価格がむしろ下落する可能性を指摘している。

(4) 炭素税が技術進歩に与える影響

炭素税の導入・引上げによりグリーン産業での技術進歩が加速することが考えられる。Aghion *et al.* [2016] は、自動車産業に焦点を当て、企業単位のパネルデータを用いて炭素税導入の効果を検証している。特許データは長期かつ多数の国で観察可能である。そこで、電気・ハイブリッド・水素自動車関連の特許と内燃機関関連の特許に注目し、前者をグリーン技術開発の代理変数、後者をブラウン技術開発の代理変数とみなして分析している。

アギオンらの分析では、企業は、炭素税導入・引上げに伴う燃料価格の上昇に直面すると、グリーン技術の開発に積極的になることが示唆されている。また、ブラウン技術への投資から利益を得てきた企業ほどブラウン技術の開発を志向し続けるという経路依存性があることも指摘されている。アギオンらは、こうした経路依存性から企業を離脱させ、グリーン技術の開発を促すことが、気候変動政策の重要な役割であると述べている。

7. その他の主要な論点

本稿では、「気候変動の経済学」に関して、欧米の主要な研究をピックアップして、そのエッセンスを紹介してきた。しかし、同分野の研究には膨大な蓄積があり、前節までの紹介で取り上げられなかった研究や論点は多数存在する。また、本稿では欧米の経済学者による主要な研究を紹介したが、わが国でも気候変動問題に取り組んでいる研究者は少なくない²⁶。そうした研究のなかから、(1) 社会的共通資本の視点と、(2) 国家間の協調に関する問題を取り上げて簡単に紹介する。

(1) 社会的共通資本の視点

地球温暖化問題を「社会的共通資本」という概念から分析した宇沢弘文の研究(例えば、宇沢 [1995])は、わが国の経済学者が気候変動問題について行った研究として、とりわけ重要なものと位置づけられる²⁷。宇沢のいう社会的共通資本は、個々の経済主体に分属されることなく、社会にとっての共通資本として社会的に管理されているような希少資源のことを指しており、大気をはじめとする自然環境は社会的共通資本の重要な構成要素と位置づけられる。

宇沢が提唱した社会的共通資本は、経済学的には「公共財」に近い概念である。ただし、公共財の特徴である非競争性と非排他性という観点で見ると、大気などの自然環境は、それを利用したい人を排除できないという意味で非排他性を満たすが、消費が増えると本来の便益を享受できないという意味で非競争性が満たされず、「準公共財」に相当する。この場合、いわゆる「共有地の悲劇」問題が生じやすくなる。これは、高速道路の消費量が増えると渋滞により本来の便益を享受できなくなる現象や、家畜の放牧が増えると牧草の再生が間に合わなくなる現象と同じである。人間の経済活動が大気に及ぼす影響が無視できるほど小さかった時代には、こうした問題は生じなかった。しかし、現代においては、大気という公共財は非競争性を失い、気候変動問題をもたらすようになった。宇沢は大気という社会的共通資本におけるこの問題を解消する手段として炭素税の導入を提唱している。

本稿の3節では、温室効果ガスの発生を、それを排出する加害者と、その悪影響を受ける被害者の間での「負の外部性問題」と捉え、その問題への対応として炭素税の導入を提唱する研究を紹介した。これに対し、宇沢の議論では、自然環境とい

26 近年、多数の業績を上げているわが国の研究者としては、例えば、馬奈木俊介(九州大学)、有村俊秀(早稲田大学)などが挙げられる。

27 英語版の著作としては、Uzawa [2003] が公刊されている。

う準公共財の利用に関して、社会的に効率的な利用を行うための制度設計の観点から、各経済主体がその便益に応じて費用を負担すべきと考え、炭素税の導入を提唱している。結果的に炭素税の導入を提唱している点では共通するが、想定している問題が外部性と準公共財では異なるだけに、炭素税の導入方法や経済主体間での費用負担のあり方について異なる結論が生じうる点は留意が必要である²⁸。

(2) 国家間の協調に関する問題

本稿では、気候変動問題への対応を巡る国家間の協調問題については取り扱ってこなかった。しかし、現実の国際会議で視られるように、気候変動政策の実施に当たっては国家レベルでの対立が生じ、その利害調整が重要な問題となりうる。その理由は、大気をはじめとする自然環境が準公共財としての性格を有するため、炭素税の負担に関する国際的な取決めがひとたび定められても、各国は、自国の負担を回避して、自然環境の便益のみを享受しようという、いわゆるフリー・ライダーの誘因を持つことによる²⁹。

Nordhaus [2015] は、気候変動問題に関して国家間で生じるフリー・ライダー問題を解決する方法について、ゲーム理論の枠組みを用いて考察している。それによれば、気候変動問題に関するフリー・ライダー問題を克服するには、気候変動問題への対応に合意する国家間で「気候クラブ (Climate Club)」を作り、クラブに参加する国の間で共通の炭素税を課すとともに、クラブに参加しない国に対しては、貿易関税 (いわゆる国境税調整) などの形でペナルティを課すことが、理論的には望ましいとしている。もっとも、ノードハウスは、その具体的な実施に当たっては、クラブ非加盟国への課税額の設定方法 (CO₂ 排出量に応じて課税額を変えるか否か) や、関税対象とする財の範囲 (炭素含有量などに応じて設定するか否か) などの論点があるほか、過度な課税が保護貿易主義を招くことなどに配慮し、慎重な設計を行う必要があるとの見解を示している³⁰。

また、国際協調の点では、先進国と途上国の利害対立も重要な論点である。温室効果ガスの発生を地球規模で防ぐためには、国際協調は先進国だけでなく、排出量の大きな途上国も含む形で行われる必要がある。しかし、成長途上にある国々に厳しい排出削減目標を課すことは、これらの国々の経済成長を阻害するため、当該国

28 共有地の悲劇問題の場合、非パレート効率的なナッシュ均衡をパレート効率的な均衡にどのように誘導するかという問題設定となる。

29 外部性の問題として捉える場合、コースの定理がパレート効率的な資源配分の達成を示しても、所得分配については別の判断基準 (例えば排出権の割振り) が必要となることに相当する。詳細は、例えば奥野・鈴村 [1988] などマイクロ経済学のテキストを参照。

30 これらの点に関しては、ノードハウス [2015] の第 21 章で詳しく議論している。

から受け入れられない可能性が高い³¹。ノードハウスは、これらの途上国を国際協調に取り込むには、途上国にとって過度な負担とならないよう最低限の炭素税率を適用するとともに、低炭素技術の導入に向けた経済的・技術的な支援を行うことが有効であるとの見方を示している（ノードハウス [2015]）³²。

8. おわりに

本稿では気候変動の経済学における代表的な研究や最近の研究をいくつか紹介した。こうした研究は、今後さらに進展することが予想される。温室効果ガスの発生や気温上昇、異常気象は、近年になるほど顕著になっており、今後、デジタル化の恩恵もあって、これまでとは異なる結果や新しい発見などさまざまな知見が積み上げられていくとみられる。

こうした研究の基礎になるのが経済学の視座である。複雑な相互依存関係をモデル化し、全体像を捉える理論的な枠組みの提供は、経済学の得意分野である。経済活動、CO₂ 排出、気温上昇、異常気象、経済的被害、政策対応、企業や家計の反応など、気候変動問題においてはさまざまな要素が相互に関係しており、個々の要素間の関係性を捉えることすら容易ではない。そして、スーパーコンピュータを利用するような大規模で精密な気候モデルに比べ、経済モデルではパーツの分析精度は粗い。これは、要素全体の関係をモデル化するに当たって、扱いやすさを重視し極端な簡素化を図っているためである。

しかし、適切な気候変動政策の策定においては、パーツの精度だけでなく、気候変動問題を構成する要素全体の複雑な絡み合い方を大局的に捉えることが重要となる。この点こそが経済学的手法を気候変動問題に適用する最大のメリットであると考えられる。

.....
31 現在から未来にかけての排出を議論するのか、先進国が無コストで享受してきた過去の排出まで考慮するのかによって、途上国と先進国の負担割合は大きく異なる。本文の問題は、これから排出を伴う成長を期待している途上国にとって前者の立場は受け入れ難いと言い換えることができよう。また、この論点は、脚注 29 で触れたようにコースの定理において所得分配問題が切り離されている（別途、判断基準が必要である）ことに相当している。

32 環境経済学の分野では、先進国と途上国の間での環境政策の違いを生じさせる要因として、「環境クズネツ曲線」について議論する文献が多い。環境クズネツ曲線とは、一国の経済成長の初期段階では環境負荷が増加するものの、所得がある水準（転換点）を超えると環境負荷が低下する傾向があるという経験則を指す。この関係性が存在する場合、経済成長と環境は長期的に見て必ずしもトレードオフ関係にないため、先進国は途上国への経済協力などを通じて、途上国の経済成長を抑制しないよう配慮する形で、環境保全に努めることが望ましいという政策的示唆が得られる。もっとも、気候変動問題で主として想定する温室効果ガスの発生に関して、環境クズネツ曲線の議論が当てはまるか否かは多くの文献で論争されており、必ずしも見解の一致はみられていない。

気候変動問題が深刻化するなか、炭素税や技術開発への補助金といった政策対応がグローバルに進展していくことが予想される。その際、気候変動問題の複雑な全体像を経済モデルで把握し、実証分析で定量的な検証を進めていくことは、①適切な政策手段が選択され、②過小もしくは過大な政策対応や思わぬ副作用の発生を回避していくために、ますます重要となっていくとみられる。気候変動の経済学のさらなる発展が期待される。

参考文献

- ウィリアム・ノードハウス、藤崎香里訳『気候カジノ 経済学から見た地球温暖化問題の最適解』、日経 BP 社、2015 年
- 宇沢弘文、『地球温暖化の経済分析 宇沢弘文著作集—新しい経済学を求めて 第 XI 巻』、岩波書店、1995 年
- 奥野正寛・鈴木興太郎、『ミクロ経済学 II』、岩波書店、1988 年
- Acemoglu, Daron, Philippe Aghion, Leonardo Bursztyn, and David Hemous, “The Environment and Directed Technical Change,” *American Economic Review*, 102(1), 2012, pp. 131–166.
- Aghion, Philippe, Antoine Dechezleprêtre, David Hémous, Ralf Martin, and John Van Reenen, “Carbon Taxes, Path Dependency, and Directed Technical Change: Evidence from the Auto Industry,” *Journal of Political Economy*, 124(1), 2016, pp. 1–51.
- Barrage, Lint, “Optimal Dynamic Carbon Taxes in a Climate–Economy Model with Distortionary Fiscal Policy,” *The Review of Economic Studies*, 87(1), 2020, pp. 1–39.
- Burke, Marshall, Solomon M. Hsiang, and Edward Miguel, “Global Non-Linear Effect of Temperature on Economic Production,” *Nature*, 527, 2015, pp. 235–239.
- Colacito, Riccardo, Bridget Hoffmann, and Toan Phan, “Temperature and Growth: A Panel Analysis of the United States,” *Journal of Money, Credit and Banking*, 51(2–3), 2019, pp. 313–368.
- Dietrich, Alexander, Gernot J. Müller, and Raphael Schoenle, “The Expectations Channel of Climate Change: Implications for Monetary Policy,” CEPR Discussion Paper No. DP15866, 2021.
- European Central Bank, “ECB Presents Action Plan to Include Climate Change Considerations in Its Monetary Policy Strategy,” European Central Bank, 2021 (available at https://www.ecb.europa.eu/press/pr/date/2021/html/ecb.pr210708_1~f104919225.en.html, 2022 年 4 月 20 日).
- Golosov, Mikhail, John Hassler, Per Krusell, and Aleh Tsyvinski, “Optimal Taxes on Fossil Fuel in General Equilibrium,” *Econometrica*, 82(1), 2014, pp. 41–88.
- Hansen, Lars Peter, “Central Banking Challenges Posed by Uncertain Climate Change and Natural Disasters,” *Journal of Monetary Economics*, 125, 2022, pp. 1–15.
- Hsu, Po-Hsuan, Kai Li, and Chi-Yang Tsou, “The Pollution Premium,” 2021 (available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3578215>).
- Interagency Working Group, “Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990,” United States Government, 2021 (available at https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/02/TechnicalSupportDocument_SocialCostofCarbonMethaneNitrousOxide.pdf,

- 2022年4月20日).
- Karp, Larry, and Armon Rezai, “The Political Economy of Environmental Policy with Overlapping Generations,” *International Economic Review*, 55(3), 2014, pp. 711–733.
- Kim, Hee Soo, Christian Matthes, and Toan Phan, “Extreme Weather and the Macroeconomy,” Federal Reserve Bank of Richmond Working Paper Series No. 21-14, 2021.
- Konradt, Maximilian, and Beatrice Weder di Mauro, “Carbon Taxation and Inflation: Evidence from the European and Canadian Experience,” CEPR Discussion Paper No.16396, 2021.
- Li, Xin, Borghan Narajabad, and Ted Temzelides, “Robust Dynamic Energy Use and Climate Change,” *Quantitative Economics*, 7(3), 2016, pp. 821–857.
- Metcalfe, Gilbert E., and James H. Stock, “The Macroeconomic Impact of Europe’s Carbon Taxes,” NBER Working Paper No. 27488, 2020.
- Nordhaus, William D., “Rolling the ‘DICE’: An Optimal Transition Path for Controlling Greenhouse Gases,” *Resource and Energy Economics*, 15(1), 1993, pp. 27–50.
- , *A Question of Balance*, Yale University Press, 2008.
- , “Estimates of the Social Cost of Carbon: Concepts and Results from the DICE-2013R Model and Alternative Approaches,” *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 1(1/2), 2014, pp. 273–312.
- , “Climate Clubs: Overcoming Free-riding in International Climate Policy,” *American Economic Review*, 105(4), 2015, pp. 1339–1370.
- , “Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics,” *American Economic Review*, 109(6), 2019, pp. 1991–2014.
- , and Paul Sztorc, *DICE 2013R: Introduction and User’s Manual*, 2nd edition, 2013 (available at http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf, 2022年4月20日).
- Papageorgiou, Chris, Marianne Saam, and Patrick Schulte, “Substitution between Clean and Dirty Energy Inputs: A Macroeconomic Perspective,” *The Review of Economics and Statistics*, 99(2), 2017, pp. 281–290.
- Papoutsis, Melina, Monika Piazzesi, and Martin Schneider, “How Unconventional Is Green Monetary Policy?” 2021.
- Pindyck, Robert S., “Climate Change Policy: What Do the Models Tell Us?” *Journal of Economic Literature*, 51(3), 2013, pp. 860–872.
- , “The Use and Misuse of Models for Climate Policy,” *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 2017, pp. 100–114.
- Schneider, Maik T., Christian P. Traeger, and Ralph Winkler, “Trading off Generations: Equity, Discounting and Climate Change,” *European Economic Review*, 56(8), 2012,

pp. 1621–1644.

Stern, Nicholas, *The Economics of Climate Change: The Stern Review*, Cambridge University Press, 2007.

Tol, Richard S. J., “The Economic Effects of Climate Change,” *Journal of Economic Perspectives*, 23(2), 2009, pp. 29–51.

Uzawa, Hirofumi, *Economic Theory and Global Warming*, Cambridge University Press, 2003.

