



日本銀行金融研究所
Institute for Monetary and Economic Studies,
Bank of Japan

気候変動の経済学

初回号：気候変動とマクロ経済の関係を捉える



金研ニューズレター特別号
2021年10月

1



日本銀行金融研究所
Institute for Monetary and Economic Studies,
Bank of Japan

金研ニュースレター

特別号 気候変動の経済学（1） 2021年10月

金融研究所(Institute for Monetary and Economic Studies, IMES)は、1982年10月に日本銀行創立100周年を記念して、日本銀行の内部組織の1つとして設立されました。金融研究所は、金融経済の理論、制度、歴史に関する研究を行っているほか、金融経済に関する歴史的資料の収集・保存・公開を行っています。

ハイライト

- ✓ 気候変動と経済活動の関係のモデル化
- ✓ 気候変動の負の外部性
- ✓ 気候変動政策の便益とコスト



気候変動とマクロ経済の関係を捉える：DICEモデル

金研ニュースレター特別号「気候変動の経済学」シリーズでは、近年関心が高まっている気候変動問題について、経済学の主要な研究成果を順に紹介していきます(計5回予定)。本シリーズの内容や意見は金融研究所員によるものであり、日本銀行や金融研究所の公式見解を示すものではありません。

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、人々の経済活動もマクロ的に見ると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と考えられる。したがって、気候変動とマクロ経済の関係を分析し、政策評価の枠組みを得るためには、これらの間の相互作用を適切にモデル化し、定量評価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は早くから行われており、2018年には William D. Nordhaus (イエール大学) がノーベル賞を受賞している。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どう捉え、政策決定にどう活用していくかを考える際、有益な手掛かりとなる。そこで、本シリーズでは特に重要と思われる研究を取り上げ、そのエッセンスを簡潔に解説していく。

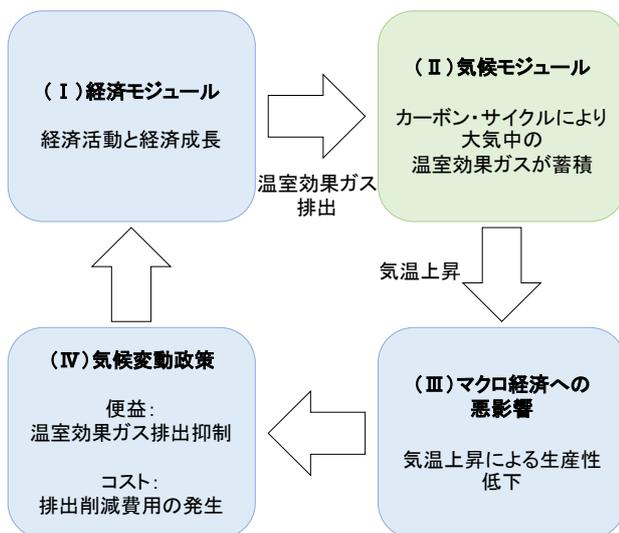
初号では、Nordhaus によって開発された基本モデル「DICE (Dynamic Integrated Climate-Economy)」が、気候変動と経済、政策対応の相互依存関係をどのようにモデル化したか、その概要を紹介する^{i,ii}。

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コストを定量的に評価するには、気候変動と経済活動の連関を考慮に入れる必要がある。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を開発してきた。

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、本稿で紹介する 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ⁱⁱⁱ。

DICE モデルは、①気候変動が経済にもたらす損失、②気候変動政策の便益とコスト、③経済と気候変動が連関するメカニズムをきわめて簡潔に定式化した動学モデルである。Nordhaus (2019)^{iv}を参考に、図 1 に DICE モデルの大枠を示した。

【図 1 : DICE モデル】



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。

DICE モデルは多数の連立方程式で構成されるが、その中でも鍵となる式は以下の 4 本である。

DICE モデルの中核

(1) マクロ生産関数

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

気温上昇による損失 排出削減費用

[Q : GDP、T : 気温、 μ : 温室効果ガス削減率、
A : TFP、K : 資本、L : 労働、 γ : 資本分配率]

(2) 温室効果ガス排出量決定式

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

[E : 温室効果ガス排出量、 σ : 炭素強度]

(3) 気温決定式

$$T = F(E)$$

[F : 気温と温室効果ガス排出量
の関係を表す関数]

(4) 気温上昇による損失関数

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

[α_1 、 α_2 : 定数]

式(1)は、図 1(I)の経済モジュールに含まれるマクロ生産関数を表す。生産関数は、標準的なマクロ経済学で用いられる TFP (全要素生産性、A)、資本 (K)、労働 (L) からなるコブ・ダグラス型生産関数を用いる。これに、気温上昇に伴う経済損失効果を示す $G(T)$ と、生産物の一部が温室効果ガスの排

出削減費用に充当される効果 $\Lambda(\mu)$ が加わり、産出量 GDP の追加的な決定要因となっている。

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。式(2)の温室効果ガス排出量決定式は、生産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表現されている。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、その費用が生産性の低下を通じて生産量を抑制する。

排出された温室効果ガスは、図 1(II)の気候モデルを通じて気候に影響を及ぼす。式(3)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。そして、気温の上昇は式(4)のように 2 次関数として定式化された損失関数を通じて生産性を低下させ、生産量の減少をもたらす。

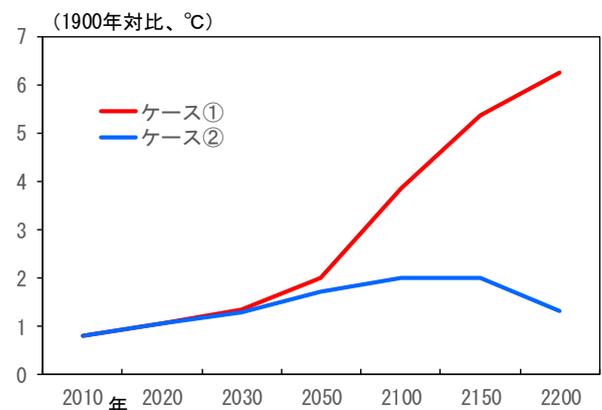
このように、生産活動に伴って発生する温室効果ガスが気温上昇をもたらす一方、気温上昇が生産を低下させるようなモデル設定により、気候変動と経済活動間の相互フィードバックが DICE モデルに取り込まれている。また、温室効果ガス削減率 μ をコントロールすることで、現在の生産を犠牲にして温室効果ガスの発生を抑制しつつ、将来の生産を増加させるといったように、気候変動から経済活動への悪影響を抑制できる仕組みも導入されている。

同モデルを用いて、気候変動の悪影響や、気候変動政策効果の定量評価をシミュレーションするこ

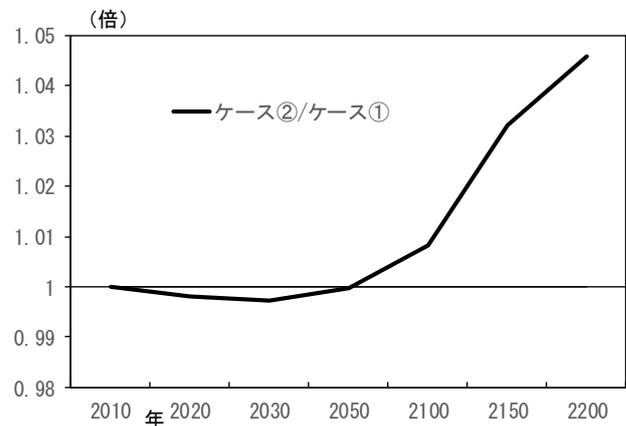
とができる。図 2 は、Nordhaus and Sztorc (2013)で行われたシミュレーション例を示している。ここでは、政策対応として、ケース①「2010 年以降、追加的な気候変動政策を行わなかった場合」と、ケース②「気温上昇を 1900 年対比で 2°C 以下に抑えるような対策が取られた場合」を比較している。

【図 2：DICE モデルによるシミュレーション】

(1) 気温



(2) GDP



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 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 が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よる損失が低減するためである。負の外部性を組み込んだモデル設定から自明であるが、どのような気候変動政策を採ろうとも、気候変動の影響や政策に伴う費用は（気候変動の影響を組み込む前の経済モデルに比べて）生産水準を低下させる方向に働く。もちろん、気候変動対策（温室効果ガス排出削減技術への補助金）が正の外部性をもたらすようなシミュレーションを行うことも可能であり、それは分析の視点設定や政策効果の想定に依存する。

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では、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^{vi}。また、DICE モデルに基づいて炭素税等の最適課税に関する研究が行われており（Golosov et al. (2014)^{vii}等）、DICE モデルを拡張した様々な例がみられる。

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)^{viii}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付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（式(4)）の定式化がアド・ホックで、理論的・実証的な裏付けが不足していることや、将来損失額を現在価値に割引いて評価する場合、割引率の設定が定量的な分析結果に大きな影響を与えている可能性を指摘している。

また、Nordhaus (2008)^{ix}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を表現できていない。例えば「クリーンエネルギー技術に対する補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 モデルには、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^x。

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はじめ統合的に定式化したものであり、政策効果を検討するフレームワークとなったこと、定量評価が可能となったこと、後続のモデル発展の礎となったことから、その意義は非常に大きいものであったと評価できよう。

（次回に続く）

* 本号の執筆は主として笹木琢治、篠原武史が担当した。

ⁱ DICE モデルは、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。本稿では下記の Nordhaus and Sztorc (2013)を参考に解説する。

Nordhaus, W., & Sztorc, P. (2013). DICE 2013R: Introduction and user's manual. Yale University and the National Bureau of Economic Research, USA.

ⁱⁱ DICE モデルは、グローバル経済全体を一国とみなして作成した世界経済モデルである。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。

ⁱⁱⁱ 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、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、日本を対象とした AIM/CGE などがある。また、エネルギー利用にも焦点を当てた MESSAGE や、生物圏・生物多様性の要素もモデル化した IMAGE など、様々な発展を遂げている。

^{iv} Nordhaus, W. (2019). Climate change: The ultimate challenge for economics. *American Economic Review*, 109(6), 1991-2014.

^v 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式(1)の $1/G(T)$ 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、移行リスクは式(1)の $\Lambda(\mu)$ としてモデル化されている。

^{vi} このほか、IPCC や、気候変動リスク等に係る金融当局ネットワーク (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。

^{vii} Golosov, M., Hassler, J., Krusell, P., & Tsyvinski, A. (2014). Optimal taxes on fossil fuel in general equilibrium. *Econometrica*, 82(1), 41-88.

同論文については、本シリーズ第 2 号でも取り上げている。

^{viii} Pindyck, R. S. (2013). Climate change policy: what do the models tell us? *Journal of Economic Literature*, 51(3), 860-872.

Pindyck, R. S. (2017). The use and misuse of models for climate policy. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 100-114.

^{ix} Nordhaus, W. D. (2008). *A question of balance*. Yale University Press.

^x 気候変動と技術進歩については、本シリーズ第 3 号で詳しく説明する。

金研ニュースレター特別号

気候変動の経済学

(2) 気候変動と最適課税

(1) 気候変動とマクロ経済の関係を捉える: DICE モデル

金研ニュースレター 2021 年 10 月

※本誌に関する照会は、日本銀行金融研究所までお寄せください。

無断での転載・複製はご遠慮ください。

日本銀行金融研究所 (IMES)

〒103-8660 東京都中央区日本橋本石町 2-1-1

TEL: 03-3279-1111 (大代表)

FAX: 03-3510-1265

E-mail: imes.journals-info@boj.or.jp

ホームページ: <https://www.imes.boj.or.jp/index.html>