



日本銀行ワーキングペーパーシリーズ

## 気候関連リスク分析のためのシナリオ作成 — 統合評価モデルの応用と課題 —

竹山梓\*

azusa.takeyama@boj.or.jp

松井祐依\*\*

ymatsui@imf.org

南井敬晶\*\*\*

takaaki.minamii@boj.or.jp

No.23-J-8  
2023年12月

日本銀行  
〒103-8660 日本郵便（株）日本橋郵便局私書箱30号

\* 金融機構局

\*\* 金融機構局（現・国際通貨基金）

\*\*\*金融機構局（現・総務人事局）

日本銀行ワーキングペーパーシリーズは、日本銀行員および外部研究者の研究成果をとりまとめたもので、内外の研究機関、研究者等の有識者から幅広くコメントを頂戴することを意図しています。ただし、論文の中で示された内容や意見は、日本銀行の公式見解を示すものではありません。

なお、ワーキングペーパーシリーズに対するご意見・ご質問や、掲載ファイルに関するお問い合わせは、執筆者までお寄せ下さい。

商用目的で転載・複製を行う場合は、予め日本銀行情報サービス局（post.prd8@boj.or.jp）までご相談下さい。転載・複製を行う場合は、出所を明記して下さい。

# 気候関連リスク分析のためのシナリオ作成\*

## — 統合評価モデルの応用と課題 —

竹山 梓<sup>†</sup>      松井 祐依<sup>‡</sup>      南井 敬晶<sup>§</sup>

2023年12月

### 【要旨】

気候関連リスクは、ヒストリカルデータに基づく従来型のリスク計測・管理手法が適用できないため、シナリオ分析による計測と管理が有効であるとの見方が有力となっている。もっとも、気候変動及び気候変動対策の経済活動へのモデル化については多様なアプローチがあり、これらを集約してシナリオを作成する作業は金融機関が従来実施してきたストレステストにおけるシナリオ作成とは大きく異なる点が多数ある。本稿では、多くの気候関連リスクのシナリオ分析においてシナリオ作成で活用されている統合評価モデル（Integrated Assessment Models：IAMs）の概観を通じて、気候関連リスクの定量的評価のためのシナリオ作成にかかる論点やすでに提案されているシナリオの含意についてまとめていく。

**JEL 分類番号:** H23、O44、Q54

**キーワード:** 統合評価モデル、気候関連リスク、シナリオ分析

---

\* 本稿の作成にあたっては、岡川梓氏、山口臨太郎氏、増井利彦氏、高橋潔氏、岡和孝氏、高倉潤也氏、一上響氏、筒井純一氏、富田基史氏、口野智広氏、今井亮介氏、稲村晃希氏、宮原亜季氏、宮本孝男氏、朝倉利恵氏、小川和彦氏、フランス銀行でのセミナー参加者、欧州中央銀行でのセミナー参加者から有益なコメントを頂戴した。さらに、高口博英氏、峯岸誠氏、西崎健司氏、種村知樹氏、吉村研太郎氏、平形尚久氏、須藤直氏、仲智美氏、松村浩平氏、平尾碧菜氏、杉萌氏をはじめとする日本銀行のスタッフから有益なコメントを頂戴した。また、大河内有香氏、渡辺飛鳥氏、西野璃美氏から論文作成にあたり支援を頂いた。ここに記して感謝したい。ただし、残された誤りは筆者たちに帰する。なお、本稿の内容や意見は、筆者たち個人に属するものであり、日本銀行の公式見解を示すものではない。

<sup>†</sup> 日本銀行金融機構局（[azusa.takeyama@boj.or.jp](mailto:azusa.takeyama@boj.or.jp)）

<sup>‡</sup> 日本銀行金融機構局（現・国際通貨基金）（[y matsui@imf.org](mailto:y matsui@imf.org)）

<sup>§</sup> 日本銀行金融機構局（現・総務人事局）（[takaaki.minamii@boj.or.jp](mailto:takaaki.minamii@boj.or.jp)）

# 1 はじめに

2015年にCOP21（第21回国連気候変動枠組条約締結国会議）で採択されたパリ協定<sup>\*1</sup>において、気温上昇目標<sup>\*2</sup>が定められ、協定批准国は、目標達成のための温室効果ガス削減<sup>\*3</sup>に取り組んでいくことが求められている。これらの目標を達成するには、化石燃料の消費量の大幅削減などによる抜本的な二酸化炭素等の温室効果ガス排出量削減（低炭素社会への移行）が必要となる。Carney (2015) や Bolton et al. (2020) をはじめとする中央銀行・金融監督当局関係者は、このようなエネルギー資源構成（エネルギーミックス）の転換は、社会・経済システムの大きな変革を引き起こすことから、金融機関がこれに適切に対処しないと、化石燃料関係の企業・プロジェクトへの投融資の価値が棄損し、金融システムの安定を損なう可能性もあると警告を発してきた。

もっとも、低炭素社会への移行には、長期間にわたるエネルギーミックスをはじめとする社会・経済のあり方の抜本的な変化が求められることから、Campiglio et al. (2018) が指摘するように、既存の経済分析や金融リスク計測の枠組みで扱える範囲を超えている。このため、その重要性は繰り返し指摘されてきたが、金融の安定に及ぼす影響を定量的に評価することは困難であるとして、低炭素社会への移行が金融システムの安定に及ぼす影響の分析は、定性的なものが多かった。

気候変動や気候変動対策の影響（気候関連リスク）の定量的な分析を実施するためには、今後想定される気候関連リスクの影響は少なくとも近代的な統計システムが整備されて以降に経験のない規模となると予想されること点に留意する必要がある。すなわち、近年観測されている世界的な温暖化は、少なくとも過去数千年で経験のないペースで進んでいると考えられている（IPCC, 2023）。また、地球温暖化のペースを緩和するための温室効果ガス排出量削減やそのための化石燃料使用量削減は、近代的な統計システムが整備されて以降、経験のない規模のエネルギーミックスをはじめとする社会・経済システムの変革を必要とする。したがって、気候関連リスクの金融システムへの影響を評価する際には、VaR (Value at Risk) に代表されるような、過去のリスクイベントにおける損失額に基づいて将来予想される損失を推計するという金融リスク評価の枠組みは適切ではない。

一方、環境団体を中心として、気候変動や気候変動対策の影響を受ける蓋然性の高い資産（座

---

\*1 パリ協定（和訳）<https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/000197312.pdf>

\*2 「世界全体の平均気温の上昇を工業化以前よりも摂氏二度高い水準を十分に下回るものに抑えること並びに世界全体の平均気温の上昇を工業化以前よりも摂氏一・五度高い水準までのものに制限するための努力を（中略）継続する」（第二条1(a)）

\*3 「今世紀後半に温室効果ガスの人為的な発生源による排出量と吸収源による除去量との間の均衡を達成するために、（中略）世界全体の温室効果ガスの排出量ができる限り速やかにピークに達すること及びその後は利用可能な最良の科学に基づいて迅速な削減に取り組む」（第四条1）

礁資産)の規模やその所有者を特定しようとする取り組みは広がりつつある。座礁資産の推計は多岐にわたるが、Semieniuk et al. (2022)のように、潜在的な座礁資産による損失は、2007年～08年にかけて発生した国際金融危機時に世界の金融機関が被った損失の規模を上回る可能性があるとの指摘もある。

リスク分析を実施するにあたり参照すべき適当なイベントの設定が困難である場合、将来起こりうるイベントについて一定の見通しを設定して、その下での影響分析を行うシナリオ分析というアプローチによるリスク分析や影響評価が考えられる。もっとも、これは、参照可能なイベントがない場合でも分析を試みることが可能であるということに過ぎず、気候関連リスクという不確実性の高い現象とその社会・経済への数十～数百年にわたる影響を分析するという作業の難易度を引き下げるものではない。

実際、気候関連リスクのシナリオ分析を実施するには、パリ協定を踏まえると、少なくとも数十年にわたるシナリオを作成する必要があるが、これは多くの金融関係者にとって非常に負担の大きな作業となる。NGFS (Network for Greening the Financial System <気候変動等に係る金融当局ネットワーク>)は、シナリオ分析を幅広い中央銀行・監督当局・金融機関が実施するためには、実用性のあるシナリオの開発が必要であると指摘し (NGFS, 2019)、2020年に気候関連リスクを分析するための「共通のスタート地点 (common starting point)」として、気候シナリオ (NGFS シナリオ)\*4を公表し、その後、3度にわたり更新を実施している。

近年、多くの中央銀行・金融監督当局が自法域の金融システムへの気候関連リスクの影響を分析するために同シナリオに基づくシナリオ分析を実施している。もっとも、シナリオ分析については、将来的に気候関連リスクの影響を評価することを志向しているものの、現段階では「試行的な (exploratory)」取組と位置づけている法域が多い (FSB and NGFS, 2022)。また、同シナリオは、気候関連リスクに関する自然科学・社会科学にわたる知見に基づくものであるとはいえ、起こりうる可能性の一つを表現したものに過ぎない。実際、シナリオ設計についての課題を指摘する意見もみられる (Monasterolo et al., 2022; Reinders et al., 2023)。したがって、シナリオ分析を通じて検証したいストレスがシナリオで想定されていない場合には、シナリオを修正・補完して、シナリオのバリエーションを増やすことも選択肢の一つとなる。

本稿では、NGFS シナリオをはじめとする多くの気候シナリオの作成で利用されている統合評価モデル (Integrated Assessment Models: IAMs) の構造を特に経済モデルの観点から概観するとともに、これらのモデルの構造に起因するシナリオの特徴を整理していく。さらに、統合評価モデルで捉えることが難しい事象・リスクを他のモデルを用いて捉えることで、気候関連リスク

---

\*4 <https://www.ngfs.net/ngfs-scenarios-portal/>

の影響を定量的に捉えるためのシナリオのバリエーションを増やすための論点を整理していく。

一連の検証を通じて得られた知見は、主に以下の二つである。

第一に、統合評価モデルのうち、社会・経済の動向に関するシナリオをシミュレーションにより作成する機能は、経済成長や枯渇性資源の配分に関する標準的な経済理論に基づいて設計されている。したがって、同モデルを用いたシミュレーションにより作成されたシナリオは、企業・家計が長期的に見れば概ね合理的に行動すると想定する場合に実現すると考えられる社会・経済の展開を描き出したものとなっている。金融機関や中央銀行・金融監督当局が実施するシナリオ分析は、社会・経済の将来の姿を関連変数のパスとして想定し、その下での金融機関の業績や財務健全性への影響を分析するものである。特に、リスクやリスクに対する頑健性分析を目的とするシナリオ分析においては、厳しいが起りうる（severe but plausible）状況における影響を評価することが求められる。厳しいが起りうる状況とは、企業や家計が、標準的な経済理論で想定される合理的な反応を取ることを何らかの形で阻害されている状況として与えられることも多い。また、厳しいが起りうる状況における影響を評価するためには、ベンチマークとなる実現の蓋然性が高いシナリオ（ベースラインシナリオ）の下での影響との比較が必要となる。統合評価モデルにより作成されたシナリオは、同モデルの設計思想を踏まえると、ベースラインシナリオに近い位置づけのシナリオであるといえる。

しかし、このことは、統合評価モデルを用いて作成されたシナリオの気候関連リスクのシナリオ分析における意義を否定するものではない。シナリオ分析は、分析作業に注目すれば、金融機関や中央銀行・金融監督当局が、仮想的なショック下での個別金融機関の資本充実度や金融システムの頑健性を検証するために実施するストレステストと共通する点が多い。多くのストレステストにおいては、分析対象期間が3年～5年程度であることもあり、ベースラインシナリオは、変数間の整合性を確保するために補完的にモデルを利用することもあるが、一般に、モデルに拠らず、市場参加者の平均的な見通しやエコノミストのサーベイなどにより作成されることが多い。これに対して、気候関連リスク分析のためのシナリオは、低炭素社会への移行というこれまで経験したことのない大規模かつ長期間にわたるプロジェクトの遂行という複雑な事象を表現することが求められる。したがって、このベースラインシナリオにおいても、長期にわたる複雑なメカニズムを反映させるため、モデルを用いて見通しを作成する必要がある点が、気候関連リスクのシナリオ分析の特徴といえる。

第二に、ベースラインに加えてリスク分析を目的にシナリオ分析を実施する場合、既存の気候シナリオを修正するなどして、より影響の大きなリスクが発現した状況を描き出すシナリオを追加することが必要となりうる。NGFS シナリオをはじめとする既存の気候シナリオにおいても「無秩序な移行（disorderly transition）」のリスクを分析するためのシナリオなどが含まれている。



ただし、例えば、政府の気候変動対策の実施が遅延したり、不完全なものであった場合でも、政府の対策の混乱に対する企業・家計の過剰反応（オーバーシュート）は一時的なものに止まり、比較的短時間で標準的な経済理論で想定されている成長経路に戻ると想定されている。この結果は、安定した経済活動を支える要素として、市場メカニズムが非常に強力であり、温暖化対策を考えるとうえでも重要な役割を果たすことを示唆していると解釈できる。

もっとも、市場メカニズムが部分的にでも機能不全に陥ると、国際金融危機のように経済理論が想定するよりも大規模かつ長期間にわたる経済活動の混乱や停滞を招くことは過去の経験が示すところでもある。市場メカニズムが長期間にわたり全面的に機能しないことを想定することは不合理だが、市場メカニズムの機能度について過度に楽観視することにもリスクが伴うことに留意すべきである。したがって、気候変動のみならず、気候変動や気候変動対策に対する社会・経済の反応の規模や期間についても不確実性があることを踏まえ、既に発表されているシナリオを作成する際の前提条件が満たされない場合の影響について把握することも重要である。

次節以降の本稿の構成は、以下の通りとなっている。2節では、シナリオ分析のプロセスについて概観し、シナリオ作成を実施する上での課題を確認する。3節では、まず、気候変動と経済の関係に注目した代表的なモデルの特徴を紹介する。次に、気候関連リスク分析のためのシナリオ作成において、統合評価モデルのうち特にプロセス細分化型モデルと呼ばれるモデルが頻繁に採用されている背景を説明した上で、同モデルを用いたシナリオ作成の特徴を述べる。これを踏まえて、4節では、気候関連リスクに対する金融システムの頑健性を検証するためのシナリオ作成上の論点を挙げていく。5節では、一連の検討を通じた発見をまとめる。

## 2 気候関連リスクの定量的把握 – シナリオ分析

気候関連リスクは、移行リスク（transition risk）と物理的リスク（physical risk）に大別されるが、いずれも信用リスク、市場リスク、オペレーショナルリスク、流動性リスクといった金融リスクの中に追加される新たなリスクではなく、これらの既存の金融リスクのドライバーに過ぎない（BCBS, 2021）。しかしながら、気候関連リスクがドライバーとして金融リスクに及ぼす影響を既存の金融リスク分析の枠組みで計測・把握することは、困難であることが知られている。

例えば、市場リスク管理手法として広く知られている VaR をはじめとして、既存の金融リスク管理手法は、基本的に過去に観測されたデータ（ヒストリカルデータ）に基づいて将来の損失分布を設定し、そこから一定の蓋然性の下で発生しうる損失を評価する仕組みとなっている。しかし、気候関連リスクのうち、特に移行リスクは近代的な統計システムが整備されて以降初めて経験するタイプの社会・経済システムの大規模な転換がもたらすリスクである。また、物理的リス

クについても、過去数千年で経験のないペースで進んでいるとみられる気温上昇の下では、過去に例のない規模での自然災害が増加する可能性もある。このような状況においては、ヒストリカルデータから参照すべきイベントを定めたうえで、想定される損失を推定していく既存の金融リスク計測のアプローチのみに頼ることは適切とはいえない。

ヒストリカルデータを用いて気候関連リスクを分析することの難しさを示す一例として、株式等の金融資産に対する移行リスクの影響に関する議論を紹介する。[Bolton and Kacperczyk \(2021\)](#)をはじめ多くの文献で、温室効果ガス排出量の多い企業の株式・債券の収益率を低排出企業と比較し、リスクプレミアム（カーボンプレミアム: carbon premium）の存在が指摘されている。一方、[Aswani et al. \(2023\)](#)によれば、カーボンプレミアムの分析に使用されているデータは、7割程度が金融データベンダーによって推計されたデータであり、発行体企業が開示したデータは3割程度に過ぎない。このうち、発行体企業による開示データのみを用いてカーボンプレミアムを推計すると、統計的に有意な結果が得られないことが報告されている。また、カーボンプレミアムは高排出企業に対するリスクプレミアムではなく、ESG投資家による低排出企業への選好を表している可能性があるとの指摘もある（[Pástor et al., 2021](#)）。一方で、温室効果ガス排出量の大きい企業の株価のディスカウントは、今後発生すると見込まれる温室効果ガス排出量削減コストや排出量に伴う負担（カーボンプライシング\*5など）を反映しているとの解釈もある。

いずれの見方も、実際に観測されている金融市場における価格形成と矛盾するものではなく、ヒストリカルデータからは、これらの仮説のいずれが妥当か判断することは容易ではない。なお、[Bolton et al. \(2022\)](#)は、金融データベンダーの推計データの質の問題には直接触れていないものの、一連の指摘を踏まえて、同データを用いた推計結果をより多角的に検討した上で依然として整合的な結果となっていると述べている。

このように、気候関連リスクの影響分析においては、単に今後30年程度という通常の企業の意思決定やその基礎となる分析で想定される期間よりも大幅に長い時間軸の下で分析することの困難に加え、現時点で利用可能なデータには反映されていないイベントの影響を評価するという根源的な制約に直面することになる。無論、ヒストリカルデータの分析が全く無意味なわけではなく、産業革命以降繰り返されてきたエネルギー構造の転換が経済活動に及ぼしてきた影響などを参考にすることは、気候関連リスクの波及経路を特定するうえで有用である。ただし、いずれの波及経路がどの程度の規模で影響するか予測するためには、ヒストリカルデータに基づく分析とは異なるアプローチを取り入れる必要がある。

---

\*5 カーボンプライシングは、排出権取引 (Emission Trading Scheme)、炭素税 (Carbon Tax)、カーボンクレジット (Carbon Credit) などの総称 ([World Bank, 2023](#))。それぞれ異なる仕組みを有しているが、以下、本稿では、特に断りがない限り、これらを特に区別しない。

こうした状況を踏まえて、気候変動対応に関する国際フォーラムである TCFD (Task Force on Climate-related Financial Disclosures <気候関連財務情報開示タスクフォース>) や UNEP FI (United Nations Environment Programme - Finance Initiative <国連環境開発計画 金融イニシアティブ>) において、気候関連リスクの計測手法として、シナリオ分析が提案されている。

シナリオ分析は、歴史的には、1950年代に米国の RAND 研究所のハーマン・カーン等によって「想定し難い事態について考察する (think unthinkable)」方法として提案されたアプローチで、その後、企業の経営戦略立案などで活用されてきた (Chermack et al., 2001; Kosow and Gassner, 2008)。金融リスク計測においても、全ての分析をヒストリカルデータに基づいて行うのではなく、シナリオベースの情報を用いて、過去に経験のない規模・パターンのリスクに対しても対応できるように既存の枠組みを修正・拡張する方法が提案されている (Markowitz and Perold, 1981)。実際、Dietz et al. (2016) により提案された気候関連リスク計測手法である Climate VaR は、ヒストリカルデータに基づく既存の金融リスク分析の手法とシナリオ分析のハイブリッド的な手法として Jamshidian and Zhu (1996) により提案された VaR のシナリオ法による推計の応用例の一つといえる\*6。

気候関連リスクのシナリオ分析とは、将来の気温上昇や気候変動、各国政府の政策対応等に関し、いくつかのシナリオを仮定したうえで、シナリオで想定されているイベントが及ぼす影響の波及経路についてある程度合理的と考えられる仮定を置きつつ、ある事業体の収益や財務に与える影響のタイミングや規模について定量的な評価を行うものである。TCFD は、気候変動に関する予測自体に不確実性があるだけでなく、その社会・経済への影響も不確実性が高いもとの、将来の可能性を戦略的に検討するためのツールとして活用するために、シナリオ分析は、表 1 で挙げたような特性を備えるべきであると指摘している。

上述の通り、気候関連リスクに関するシナリオ分析を実施する際には、まずシナリオを設計し、そのシナリオに基づきリスク・影響を分析することになる。シナリオ分析の実施結果が多数公表される下で、分析手法については、研究の進展がみられる (Belloni et al., 2022; Acharya et al., 2023)。これに対して、シナリオ設計に関する調査研究はこれまでのところ限定的である。気候関連リスクを分析する際のシナリオ設計は、中央銀行・金融監督当局・金融機関がすでに相応の経験と知見を有する従来型の景気後退や金融市場の混乱の影響を検証するストレステストと共通点も一部にあるものの、分析対象期間や不確実性の大きさから、決定的に異なる点も多い。特に、従来のストレステストのシナリオ設計においても、変数間の整合性やシナリオの客観性を確保す

---

\*6 Climate VaR は、シナリオ法を用いて、先行きの企業業績やマクロ経済に関する情報を取り入れている。シナリオ法は、VaR 推計における計算負荷を削減する方法として提案されたものであるが、シナリオベースのリスク分析・評価を可能にする方法である。結果として、本稿で検討するシナリオ作成における論点への対応が必要となる点は Climate VaR とシナリオ分析に共通する課題といえる。



表 1: シナリオ分析に求められる特性

妥当性 (Plausible)	<ul style="list-style-type: none"> <li>シナリオで想定されるイベントは起こりうるものである</li> <li>シナリオのナラティブは信頼できるものである (想定されるイベントの発生原因、発生仮定は真実味がある)</li> </ul>
特徴的 (Distinctive)	<ul style="list-style-type: none"> <li>各シナリオでそれぞれ主要な要素の異なる組み合わせを採用する</li> <li>各シナリオはそれぞれ明確な構造とメッセージを備えている</li> <li>複数のシナリオを用いて相互依存関係を多面的に分析している</li> </ul>
整合性 (Consistent)	<ul style="list-style-type: none"> <li>各シナリオは強固な論理的整合性を備えているべきである</li> <li>シナリオは各要素の相互依存関係を明らかにしている</li> <li>現在の傾向・状況を覆す外生的な要因を持ち込むべきではない</li> </ul>
適用性 (Relevant)	<ul style="list-style-type: none"> <li>シナリオは将来の見通しに関する具体的な洞察を含んでいる</li> </ul>
挑戦的 (Challenging)	<ul style="list-style-type: none"> <li>社会通念や将来に関する単純化された想定 of 妥当性を問うている</li> <li>不確実性を踏まえ、平時の想定が覆る可能性を考慮している</li> </ul>

出所. TCFD Knowledge hub (<https://www.tcfddhub.org>) をもとに作成

るためにモデルを利用しているが、気候関連リスク分析のためのシナリオ設計ではモデルへの依存度がより高くなる傾向がある。シナリオ分析に用いられている代表的なモデルである統合評価モデルについては、経済学の視点から政策分析での使用上の留意点をまとめた論文 (Metcalf and Stock, 2017) や、統合評価モデルを用いて作成されたシナリオの解説 (富田ほか, 2022) もあるが、シナリオ設計上の論点には触れられていない。次節では、統合評価モデルの構造・特徴を概観し、その構造・特性に起因するシナリオ作成上の論点を整理していく。

### 3 統合評価モデルの基本的な構造

2 節で述べたように、気候関連リスクのシナリオ分析においては、金融・経済変数だけでなく、環境・気候に関する変数を含めたシナリオの作成が必要となるため、両者の関係に着目したモデルを用いる必要がある。加えて、気候関連リスクは、一般的な経済政策の効果などと比べると、非常に長期間にわたってその効果が発現していくと考えられるため、中央銀行やシンクタンクがこれまで開発してきたマクロ経済モデルをシナリオ作成に用いることは様々な困難が伴うことが指摘されている (NGFS, 2020)。

このため、これまでに世界各国の中央銀行・金融監督機関により実施された気候関連リスクのシナリオ分析の結果を見ると、統合評価モデルの中でもプロセス細分化型モデル (Detailed-processing models) と呼ばれるモデルや気候変動の影響の分析を目的に開発された応用一般均衡モデルをシナリオ作成ツールとして利用している事例が多い (FSB and NGFS, 2022)。

本節では、これらの気候変動と経済活動の関係に着目したモデルの構造や特徴を概観した上で、その代表例である統合評価モデルについて検討を行う。気候変動と社会・経済活動の相互依存関係という複雑な現象を明らかにするため、多くの統合評価モデルは巨大かつ複雑なモデルとなっている。このため、まずは費用便益分析型モデルと呼ばれる相対的にシンプルなモデルを例にその構造を解説する。最後に、実際にシナリオ作成ツールとして利用されることが多いプロセス細分化型モデルと呼ばれる統合評価モデルの特徴を費用便益分析型モデルとの比較で明らかにしていく。なお、費用便益分析型モデルをはじめとして統合評価モデルに対しては批判的な検討を行っている文献も多数存在する。補論 A で、主要な論点を整理している。さらに、実際のシナリオ作成のプロセスについては、補論 B で紹介している。

### 3.1 代表的な気候・経済モデル (Climate-Economy Models)

自然環境と経済活動の相互依存関係や汚染物質排出がもたらす環境破壊の影響を経済モデルで評価しようとする試みの歴史は長く、1960年代には初期の研究は発表されている (Hafkamp, 1991)。更に、van Beek et al. (2020) によれば、環境科学に基づくモデルを拡張し、気候変動や気候変動対策の社会・経済活動への影響も分析対象とする、今日、統合評価モデルと呼ばれるモデルの第1世代は、1970年代に提案されている。当初、これらのモデルは、酸性雨等の環境破壊の影響に着目していたが、1980年代後半から、温室効果ガス排出量増加に伴う地球温暖化の影響分析にも応用されるモデルに拡張され、IPCCによる評価報告書の作成にも貢献してきた。

Weyant (2014) や Nikas et al. (2019) は、このような複数の分野にわたる研究の発展を概観し、このような気候変動と経済活動の関係を分析するモデルを、その設計思想や目的により、(1) 費用便益分析型統合評価モデル、(2) プロセス細分化型統合評価モデル、(3) 応用一般均衡モデル、(4) マクロ計量モデルの4つに分類している (各グループの代表的なモデルは表 2 の通り)。以下では、上述の4つのグループに基づき、それぞれの特徴を紹介し、NGFS シナリオなど多くの気候関連リスクのためのシナリオ作成において、プロセス細分化型統合評価モデルが採用されている背景を明らかにする。

なお、異なるタイプのモデルを組み合わせてシナリオを作成することも広く行われている。例えば、表 2 にもあるように、国立環境研究所の AIM は、中核となるプロセス細分化型統合評価モデルに加えて、応用一般均衡モデルも開発し、これらを組み合わせて分析を行う体制を構築している。さらに、NGFS は、プロセス細分化型統合評価モデルにマクロ計量モデルを組み合わせてシナリオを作成している (詳細は、補論 B.2 参照)。

また、本節ではモデルの機能やカバーする範囲の違いに注目しているが、補論 B で紹介するよ

表 2: 代表的な気候・経済モデル (Climate-Economy Models)

	代表的なモデル
費用便益分析型統合評価モデル	DICE (Nordhaus, 1992b) RICE (Nordhaus and Boyer, 2000) PAGE (Hope et al., 1993) FUND (Tol, 1997)
プロセス細分化型統合評価モデル	REMIND (独 ポツダム気候影響研究所) MESSAGE (澳 国際応用システム分析研究所) GCAM (米 メリーランド大学) AIM (日 国立環境研究所)
応用一般均衡モデル	G-Cubed (McKibbin and Wilcoxon, 2013) IMF ENV (Chateau et al., 2022) OECD ENV Linkages (OECD) AIM (CGE) (日 国立環境研究所)
マクロ計量モデル	NiGEM (英 NIESR)

出所: Weyant (2014)、Nikas et al. (2019) をもとに作成

うに、モデルの間の差異よりも共通点に着目し、分析結果のモデル間の比較可能性を高め、モデルに依存しない普遍的な分析上の含意を導き出そうとする取り組みも活発である。このために、共通のベースラインシナリオの開発などの国際的な取り組みが進められてきた。このような取り組みを反映して、例えば、統合評価モデルを開発・運用する研究機関の国際団体である IAMC (Integrated Assessment Modelling Consortium) のメンバーにより開発されている 75 のモデルを見ると、開発者は応用一般均衡モデルと定義しているものも含まれている。

したがって、気候変動に関連する分析で利用されている多様なモデルについて、相互に矛盾しない定義や特徴付けを行うことは容易ではないし、この点に拘ることは必ずしも有益ではない。ただし、これらのモデルの結果をインプット (シナリオ) として利用する気候関連リスクのシナリオ分析においては、代表的なモデル間においても、モデルの選択がシナリオ分析の結果に相応の影響を及ぼしうる差異があることが指摘されている (Bertram et al., 2022)。したがって、気候関連リスクの分析のためのシナリオ設計においては、それぞれのモデルの大まかな特徴に把握しておくことは、有益である。

### 費用便益分析型統合評価モデル (Benefit-Cost Models)

費用便益分析型統合評価モデル (以下、BC 型モデル) は、ラムゼーモデルをはじめとする新古典派経済成長モデルを拡張したモデルで、気候変動対策の限界便益 (気候変動による経済損失の低減) と限界費用 (温室効果ガス削減費用) のバランスをとることで長期的に見て最適な経済成長の径路を求めることを志向している。

BC型モデルは、原則として、代表的個人の異時点間の消費水準の最適化が図られた場合の経済変数の動向を記述するモデルであり、小規模で気候変動と経済活動の相互関係についてその波及経路も含めて把握が容易なモデルである。このため、透明性の高いモデルと評価されることもある。もっとも、化石燃料消費量の削減をはじめとする低炭素社会への移行プロセスで求められる対策の影響は、産業セクターごとにその影響が大きく異なると見込まれる。BC型モデルは、地域・産業ごとに異なる影響を、世界全体の全産業・全地域を表象する少数のパラメータに集約して表現するモデルであるため、産業セクター別の影響分析等においては、複数の産業セクターによって構成されている経済を対象としている他のモデルを用いる必要がある。

### プロセス細分化型統合評価モデル (Detailed-Processing Models)

プロセス細分化型モデル（以下、DP型モデル）は、歴史的にはBC型モデルと独立して提案・開発されたモデルであるものの、構造的にはBC型モデルの拡張といえる。BC型モデルと比較すると、DP型モデルは、主に以下の5つの特徴がある。まず、DP型モデルは、単一の代表的個人で構成される経済を対象としていたBC型モデルと異なり、複数の産業セクターで構成される多部門モデルである。第2に、DP型モデルは、資本（K）と労働（L）だけでなく、エネルギー（E）なども投入要素とする生産関数を用いて、経済活動を記述している。第3に、エネルギーシステムをモデル化し、1次エネルギーや2次エネルギー構成の変化が経済活動に及ぼす影響を考慮している。第4に、土地利用についても考慮したモデルであり、植林による二酸化炭素をはじめとする温室効果ガス吸収等についても植林に利用可能な土地面積などを踏まえたシミュレーションを可能にしている。最後に、多くのDP型モデルにおいて、大型の気候モデルの挙動を再現する小型気候モデルを取り入れ、例えば、炭素回収技術等が将来的に実用化された際の影響を評価することも可能になっている。

ただし、モデルを大型化させ、経済システムを構成する各部門のメカニズムの詳細な描写に重点を置いている反面、経済全体への影響は必ずしも明示的に考慮されていないモデルも少なくない。このような側面に着目して、[Nikas et al. \(2019\)](#) はこれらのモデルを部分均衡モデルと分類している。実際、一部のDP型モデルはGDP等のマクロ経済変数が外生変数（モデルの内生的なメカニズムに拠らず、ベースラインシナリオで設定された水準で固定）となっている。

### 応用一般均衡モデル (Computable General Equilibrium Models)

応用一般均衡モデル（以下、CGEモデル）は、一般均衡モデル（以下、GEモデル）と同様、複数の財・サービスの価格・需要といった経済変数間の相互依存関係を方程式体系として表現し、その関係を分析するモデルである。ただし、GEモデルは、一般に経済政策等の効果について、定性的な評価しか出来なかったのに対し、GEモデルを一定の条件の下で変換したCGEモデルは、



政策効果等の定量評価も可能となっている<sup>\*7</sup>。特に、温暖化防止策の一つとして注目されているカーボンプライシングについては、多くの文献で、これらの政策の「導入前の均衡」と「導入後の均衡」の比較を通じて政策効果を評価するために CGE モデルが用いられている (Wing, 2011)。

CGE モデルは、GE モデルと同様に、カーボンプライシング導入の直接的な影響 (化石燃料価格上昇に伴う需要減少等) に加えて、間接的な影響 (再生可能エネルギーやその他の財・サービスの価格・需要の変化や国際貿易の増減) も分析可能となっている。この際、CGE モデルは、一般に統合評価モデルのように気候モジュールを含んだモデルではないため、温室効果ガス排出量の気候変動への影響などは、気候科学の知見に基づいて外生的に与えられているケースが多い。なお、CGE モデルのパラメータは、必ずしも統計的手法によって推計するのではなく、類似の既存研究における実証分析の結果などを参照しながら設定することが多い。

### マクロ計量モデル (Macroeconometric models)

マクロ計量モデルも、複数の財・サービスの価格・需要といった経済変数間の相互依存関係を方程式体系として表現するモデルであるという点は CGE モデルと同様のモデルである。ただし、CGE モデルでは、パラメータをデータから推計するのではなく、主に既存の実証分析の結果を参照して設定することが一般的であるのに対し、マクロ計量モデルでは、実際のデータから統計的手法によってパラメータを推計することが一般的である。結果として、モデルの構造は、パラメータの識別可能性の制約を受けることになり、CGE モデルよりも簡易なモデルとなる傾向がある。

このようなパラメータ設定方法の違いから、マクロ計量モデルは、実際のデータにおいて観測されるような長期間にわたる各市場での調整も再現できる。一方、CGE モデルは、財・サービス市場、労働市場などいずれの市場においても、原則として每期価格・数量による調整を通じて基本的に調整 (新たな均衡へ移行) が完了することが想定されている<sup>\*8</sup>。

### その他のモデル

現在公表されている気候シナリオは、基本的に以上の 4 つのグループのモデルを組み合わせ

---

<sup>\*7</sup> Shoven and Whalley (1992) によれば、古典的な GE モデルでは方程式の関数形を特定することなく微分可能性など緩やかな制約条件の下で定性的な含意しか得られなかったのに対して、CGE モデルでは、Scarf (1967) により提案されたアルゴリズムを用いることで、方程式の関数形を特定して均衡解を数値的に得られるため、政策的含意などを定量的に評価することが可能になった。もっとも、この点だけに着目すれば、確率的動学一般均衡モデル (Dynamic Stochastic General Equilibrium Models、以下、DSGE モデル) も同様である。HMRC (2013) は、DSGE モデルと比較した場合の特徴として、CGE が一般に全ての財・サービス市場で需給を一致させる比較静学的な意味合いを持つ均衡解を求めているため、摩擦のない中長期の分析に適しているのに対し、DSGE モデルでは景気循環など短期的な変動を捉えることを主眼としている点を挙げている。このほかに、Burfisher (2021) が指摘するように、産業連関表などに基づくデータベースを整備することによって、数十～数百部門のモデル化が可能になっている。

<sup>\*8</sup> 新たな経済政策の導入を受けた調整が多期間にわたることが想定されているモデル (Dynamic CGE) も存在する。もっとも、気候変動対策の影響分析の検討で採用されている CGE の多くはこのようなモデルではない (Static CGE と呼ばれる)。



作成されている。もっとも、これらのモデルの発展系として以下の気候・経済モデルも提案されている。

まず、Traeger (2023) 等により、BC 型モデルの機能の一つである炭素の社会的費用 (Social Cost of Carbon : SCC、詳細後述) を解析的に求めることに特化した Analytical Climate Economy (ACE) Model あるいは Analytic IAM と呼ばれるモデルが提案されている。また、DP 型モデルの計算負荷を軽減するために、DP 型モデルの挙動をより簡易なモデルで再現する (emulate) ことにより、より低コストでの気候変動対策の経済費用などについて分析を行うモデル (emulator for IAM) が Takakura et al. (2021) や Xiong et al. (2022) 等により提案されている。さらに、気候変動が金融政策をはじめとするマクロ経済政策に及ぼす影響を分析するために DSGE モデルを拡張した環境 DSGE モデル (Environmental-DSGE < E-DSGE > モデル) が Annicchiarico et al. (2022) 等により提案されている。

以上のように、気候変動と社会・経済活動の相互依存関係に関する分析ツールとして広く利用されているモデルに限っても様々なアプローチがある。これは、モデル開発者の多様な問題意識を反映したものと見える。すなわち、気候変動のメカニズムについては、解明が進んできているものの、気候変動の規模やタイミングの予測は依然として不確実性が大きいことに加え、気候変動の経済・社会活動への影響についても不確実性が高い。こうした下で、長期間にわたる影響の分析を行うために、想定されるすべての波及経路を単一のモデルに取り込むことは依然として困難であり、モデル開発者の問題意識を反映した様々なアプローチが目的に応じて使い分けられているのが現状といえる。

各国の中央銀行・監督当局が実施している気候関連リスクのシナリオ分析においては、これまで公表されている結果を見ると、シナリオ作成ツールとしては、DP 型モデルと CGE モデルを選択している事例が多い。低炭素社会への移行に向けた温室効果ガス削減費用 (移行リスク) は、社会・経済システム全体に影響が及びうるものの、特に温室効果ガス排出量やエネルギー消費量が大きい産業セクターへの影響が大きいと考えられる。このようなセクター間の異質性を捉えることを重視する場合、DP 型モデルと CGE モデルが優位に立つといえる。さらに、気候変動による経済損失 (物理的リスク) も分析対象とする場合、DP 型モデルが有力な選択肢となる。

### 3.2 費用便益分析型統合評価モデルの特徴

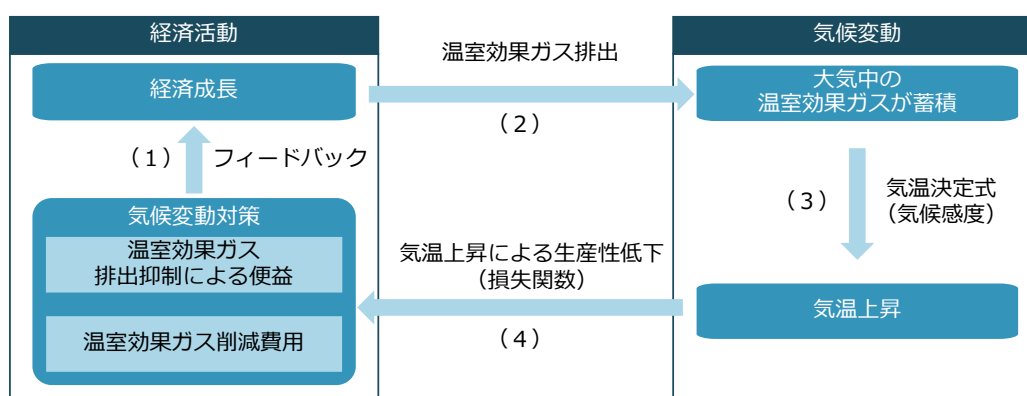
本節では、DICE モデルを例に BC 型モデルの特徴とその政策分析への応用例を紹介する。3.1 節で指摘しているように、BC 型モデルは構造の把握が比較的容易であり、一部から複雑で透明性を欠くとの批判もある統合評価モデルについてその全体像を理解するための好材料といえる。特

に、BC 型モデルを代表するモデルの一つであるウィリアム・D・ノードハウス（2018 年のノーベル経済学賞受賞）によって提唱された DICE モデル (Dynamic Integrated Climate-Economy Model)\*<sup>9</sup>は、モデルの基本設計は 4 本の基本方程式に基づく直観的把握が容易なモデルとなっている。これら 4 本の基本方程式で記述されている構造が、DP 型モデルにおいてどのように拡張されているのか検証することで、複雑かつ巨大な DP 型モデルについて、少なくとも経済モデルとしての側面を理解する一助となる。

### 3.2.1 DICE モデルの基本的な構造とその機能

3.1 節でまとめたように、BC 型モデルは温室効果ガス排出量削減費用と温暖化の進行による経済損失の低減のバランスを取ることで、最適な経済成長の径路を求めるモデルであり、経済モジュールと気候モジュールという 2 つのモジュールで構成される。経済モジュールは、ラムゼー型の経済成長モデルに基づいて経済活動を記述し、気候モジュールは、気候科学の研究成果を反映する形で気候変動を記述する。BC 型モデルは、気温上昇による経済損失と気温上昇を抑制するための温室効果ガス削減費用という 2 つの波及経路を導入し、2 つのモジュールを通じて、気候変動と経済活動の相互依存関係を分析している（図 1）\*<sup>10</sup>。

図 1: DICE モデルの基本的構造



出所. Nordhaus (2013b) および有賀ほか (2022) をもとに作成

#### 生産関数（経済モジュール）

経済活動の水準 ( $Q_t$ 、GDP に相当) は、TFP (全要素生産性、 $A$ )・投入要素 (資本 ( $K_t$ )、労

\*<sup>9</sup> DICE モデルは、Nordhaus (1992b) で提案されて以降、更新が繰り返され、Nordhaus (1994); Nordhaus and Boyer (2000); Nordhaus (2008, 2018) 等で機能の拡張やパラメータの更新が紹介されてきた。最新版の詳細はイェール大学のウェブサイトで開催されているテクニカルドキュメントで確認できる。

\*<sup>10</sup> 以下の説明は、Nordhaus (2013b) および有賀ほか (2022) に基づく。

働 ( $L_t$ ) からなるコブ・ダグラス型の生産関数を基にしつつ、気温上昇 ( $\Delta Tm_t$ ) に伴う経済損失 ( $G(\Delta Tm_t)$ ) と温室効果ガス削減割合 ( $\mu$ ) に応じた削減費用 ( $\Lambda(\mu)$ ) を反映している。

$$Q_t = \frac{1}{G(\Delta Tm_t)} (1 - \Lambda(\mu)) AK_t^\gamma L_t^{1-\gamma} \quad (1)$$

### 温室効果ガス排出量（経済活動から気候への影響）

温室効果ガス排出量 ( $Em_t$ ) は、経済全体で見た経済活動の 1 単位当たりの温室効果ガス排出量（炭素強度 (carbon intensity) :  $\eta$ ) と排出量削減割合 ( $\mu$ ) を踏まえつつ、経済活動の水準に比例する。

$$Em_t = \eta(1 - \mu) AK_t^\gamma L_t^{1-\gamma} \quad (2)$$

### 気温上昇（気候モジュール）

工業化（1850 年前後）以降の気温上昇 ( $\Delta Tm_t = Tm_t - Tm_0$ 。ここで、 $Tm_0$  は、1850 年時点の地球の平均気温) は概ね温室効果ガスの累積排出量の正の線形関数として近似できることが明らかになっている (IPCC, 2023)。このような関係に基づいて、温室効果ガス排出量の増加により、大気中の温室効果ガス濃度が上昇し、気温が上昇する。

$$\Delta Tm_t = F(Em_t) \quad (3)$$

なお、本稿では割愛するが、実際の DICE モデルでは、気候科学の研究の進展に合わせて、その知見を反映する形で更新が繰り返されてきた。具体的には、化石燃料の燃焼等により排出された温室効果ガスが、大気、陸上（森林・土壌・河川及び湖沼など）、海洋、地圏（岩石や堆積物）の間を交換・移動しながら、大気中の濃度の上昇に至る炭素循環 (carbon cycle) と呼ばれるプロセスのうち主要なものを再現し、温室効果ガスの累積排出量と気温上昇の関係を定式化している。

### 経済損失（気候から経済活動への影響）

気温上昇は、生産性の低下などを通じて、経済損失をもたらす。この関係性を表しているのが、損失関数である。DICE モデルにおいては、気温上昇 ( $\Delta Tm_t$ ) の 2 次関数として定式化されている。

$$G(\Delta Tm_t) = 1 + \beta_1 \Delta Tm_t + \beta_2 \Delta Tm_t^2 \quad (4)$$

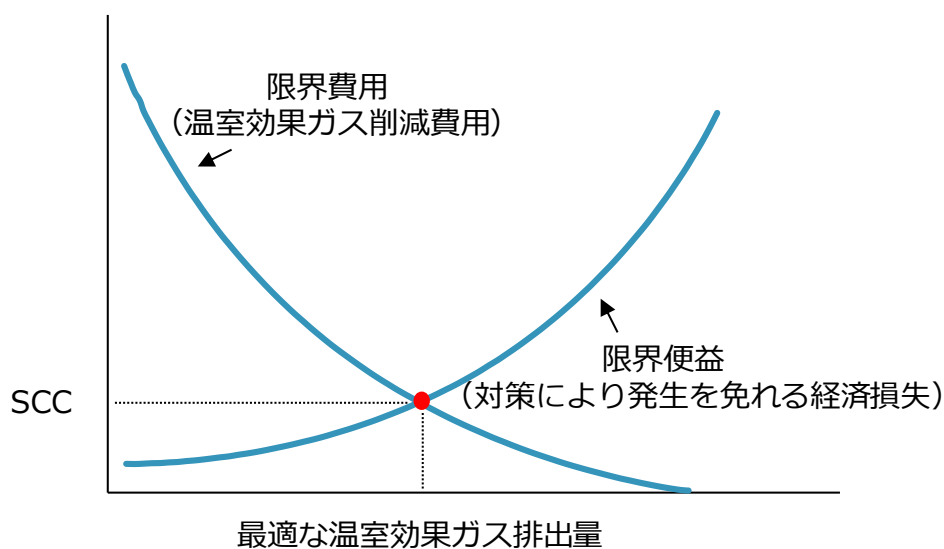
DICE モデルのもう一つの特徴は、このように少数の基本方程式で構成されていることに加

え、1990年代前半に発表されて以降、基本方程式のパラメータや関数が、批判的検討によって明らかになった論点を克服するために継続的にアップデートされてきたことである（詳細は補論 A 参照）。

このような発展により、BC型モデルは、費用便益分析の観点に基づく最適な温室効果ガスの排出削減目標（および排出削減目標と統合的な気温目標）の設定や、これらの目標を達成するために必要なカーボンプライシングの設定といった政策分析に活用されてきた（Weyant, 2014）。

費用便益分析の観点に基づく最適な温室効果ガス排出量は、限界費用と限界便益（の割引現在価値）がバランスする水準として、概念的には次のように設定することができる（図 2）。気温上昇によって発生すると見込まれる経済損失は、(4) 式で定式化しているように、気温上昇とともに逡増していく。したがって、温暖化抑制の限界的な便益である経済損失の低減幅は、気温目標を低水準（野心的な水準）にするほど逡減していく。一方、温室効果ガスの削減費用（(1) 式の  $\Lambda(\mu)$ ）は、高めの（より野心的ではない）気温目標では低水準であるのに対し、より低めの（野心的）気温目標では高水準になっていく。結果として、最適な温室効果ガス排出量は、これらの限界便益と限界費用が一致する水準として求めることができる。

図 2: 費用便益分析の観点から最適な温室効果ガス排出量



出所. Nordhaus (2013a) をもとに作成。

温室効果ガス排出量増加（気温上昇）による損失は、排出量に関する規制がなければ、その影響の帰属先を特定することが困難であるため、財・サービスの生産費用に直接反映されない典型的な外部不経済である。温室効果ガス排出の将来にわたる損失を内部化（internalize）する、すなわち、排出者に負担させる仕組みとして世界各国で導入が検討されているのが、カーボンプライシン

グである。炭素の社会的費用 (Social Cost of Carbon: SCC) は、上記のように求められた費用便益分析の観点から最適な水準まで排出量を削減するための仕組みである。すなわち、温室効果ガス排出者に課税等を通じて、その社会的損失の補償を求めることで、この負担を回避するための温室効果ガス排出削減技術を導入する動機づけとなることを目指している (Nordhaus, 2013a)。

もっとも、気候変動とその社会・経済への影響に関する分析については、分析期間が他の経済分析と比べると極めて長いことに加え、不確実性も大きいことから、BC型モデルから得られた結果を直ちに政策立案・決定に活用することは困難であるとの批判もある。次節で見ていくように、DP型モデルはBC型モデルの問題点自体を克服できないまでも、その問題の根源を特定し、不確実性の評価 (パラメータ等が想定と異なる場合の影響の評価) を可能にするための拡張を行っている。

### 3.3 プロセス細分化型統合評価モデルの特徴とシナリオ分析への応用

3.1節で述べたように、BC型モデルとDP型モデルは、独立に開発されてきた。特に、歴史的に見れば、初期のDP型モデルは、BC型モデルよりも先行して開発されているため、DP型モデルは、厳密にはBC型モデルの発展形ではない。もっとも、大規模かつ複雑なDP型モデルの構造を3.2節でまとめたBC型モデルの構造と比較し、拡張された部分を明らかにすることで、DP型モデルの構造の理解が容易になる。

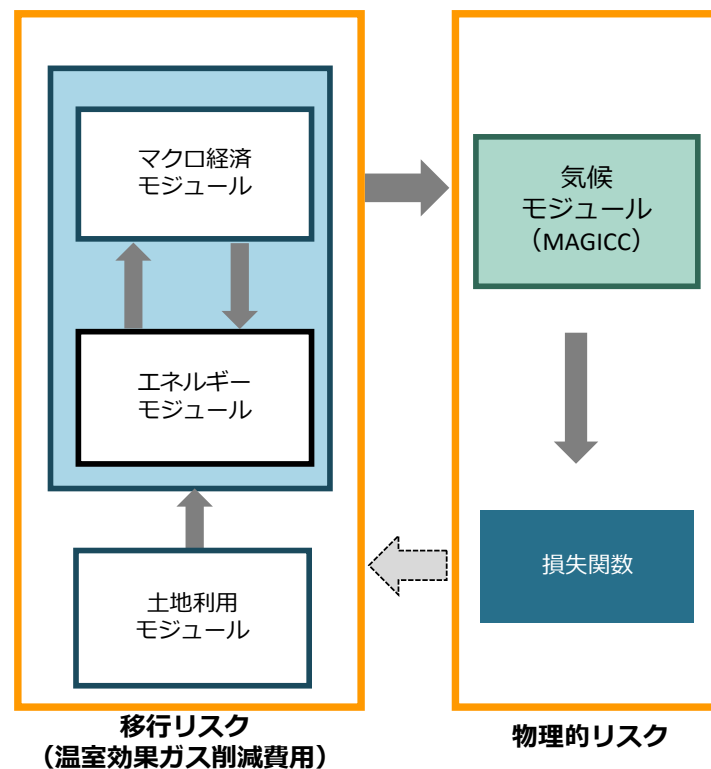
BC型モデルとの比較でみたDP型モデルの特徴としては、基本的に誘導形の定式化により記述されていた緩和 (mitigation) と適応 (adaptation) について、エネルギーや土地の利用状況を反映した構造を記述したモデル (構造形モデル) をとして、より詳細かつ現実的な記述が可能となることが挙げられる。一例として、ドイツのポツダム気候影響研究所 (PIK) が開発したREMIND-MAgPIEでは、BC型モデルの経済モジュール一つでカバーされていた領域をマクロ経済モジュールとエネルギーシステムモジュールと土地利用モジュールによってカバーしている。加えて、気候モジュールについても、気候科学の最新の成果を反映すべく大型モデルの挙動を近似できるモデル (MAGICC) を導入するなどしている。これらの関係は、図3のようにまとめることができる。以下では、これらの追加モジュールの構成と特徴を検討していく。

#### 3.3.1 マクロ経済モジュール

3.2.1節で見たように、DICEモデルの経済モジュール ((1) 式) の原型は、資本 (K) と労働 (L) の2要素を投入要素とするコブ・ダグラス型生産関数である。ここに、温室効果ガス削減費用 ( $\Lambda(\mu)$ ) と温暖化による経済損失 ((4) 式) を反映させることで、気候変動や気候変動対策の経



図 3: 典型的な DP 型モデルの構造



出所. 筆者作成

注. 多くの DP 型モデルは緩和策（移行リスク）の評価に重点を置いていたため、必ずしも物理的リスクの影響が明示的に考慮されていない。NGFS は、シナリオ改訂の度に物理的リスクを金融経済変数に反映させるための取り組みを続けている。

経済活動への影響を踏まえた経済活動の水準を決定する仕組みとなっている。もっとも、このアプローチでは、現在、緩和策の策定において検討されているような、費用対効果等に応じて異なる温室効果ガス排出削減技術が選択される可能性は考慮されていない。すなわち、Nordhaus (2008) によれば、DICE モデルにおいて想定されている削減費用は、「最後の一単位の排出量削減にかかる限界費用」に相当するものであり、他の削減技術が利用できない場合に適用される最も割高な削減手段（back stop）による削減費用との位置づけである。温室効果ガス削減の費用便益の分析を行う上では、このような取り扱いは過度に保守的なものとなっている可能性がある。

DP 型モデルは、エネルギーを生産要素の一つとする生産関数を用いて、産業部門別にエネルギー源の変化の影響をモデル化することで化石燃料から再生可能エネルギー（太陽光発電や風力発電等）への移行に伴うコストの詳細なシミュレーションを可能にしている。ただし、コブ・ダグラス型関数を用いてこれらの現象を表現することは困難であるため、より柔軟なモデル化が可能な入れ子型の CES 型生産関数（nested CES production function）を採用している DP 型モデ

ルが多い。以下では、入れ子型の CES 型生産関数への拡張の理論的背景と実証面での課題を整理し、そのシミュレーション結果（シナリオ）の特徴について検討する。

## 経済成長とエネルギーの関係

エネルギーは、投入要素におけるシェアは小さいものの、経済活動の水準を規定するため、エネルギー供給制約が経済活動の停滞をもたらす可能性については、様々な検討がなされてきた。例えば、ローマクラブの「成長の限界」(Meadows et al., 1972) では、生態系の墓に加えて、化石燃料の枯渇が経済活動を停滞させるリスクが指摘されている。これに対して、Nordhaus (1992a) は、Meadows et al. (1972) がシミュレーションで採用しているコブ・ダグラス型生産関数の定式化を実証的な側面から精査し、シミュレーション結果は妥当性を欠くと批判している。具体的には、全要素生産性の上昇（技術革新などによりもたらされる生産要素の投入量の増加以外の要因による産出量の増加）が、過去の平均的な実績の 4 分の 1 程度にまで低下しない限り経済成長を維持できることを指摘し、仮に化石燃料が枯渇しても GDP が大幅に減少する可能性は低いと述べている。もっとも、この検証は、Meadows et al. (1972) による生産関数の定式化が適切ではないことを明らかにしているにすぎない。エネルギー消費と経済成長の持続可能性の関係については、以下のように長年の研究の蓄積に基づく知見がある。

上述の通り、Nordhaus (1992a) は、コブ・ダグラス型生産関数を用いて全要素生産性の上昇として一括りで扱っている。しかし、投入要素の増加以外の要因による経済成長への寄与は、狭義の技術革新（新技術の発明など）に加えて、投入要素間の相対価格の変化を受けて割安となった投入要素への代替の寄与が大きいことが知られている。この投入要素の（相対）価格の変化を受けた市場メカニズムを通じた資源の配分の調整の経済成長への寄与については、特に化石燃料のような枯渇性資源に関して、理論的に次のように整理されている。

まず、枯渇性資源の残存埋蔵量について情報が共有されていれば、枯渇性資源の価格は残存量の減少に基づく希少性の高まりを反映して、毎年利子率分だけ上昇していく（ホテリング・ルール、Hotelling, 1931）。こうした下で、化石燃料が最終的に枯渇する場合でも、その採掘量は徐々に減少していくと考えられる。したがって、希少性の高まりを反映した化石燃料価格の上昇に応じる形で、技術進歩と設備投資によるエネルギー節約的な技術が導入されていく。結果として、経済成長を維持することは理論的に可能である (Solow, 1974; Stiglitz, 1974; Hartwick, 1977)。

低炭素社会への移行過程における化石燃料使用量の削減は、化石燃料の枯渇ではないが、温室効果ガス排出量の削減のために自発的かつ段階的に化石燃料消費量を削減していく取り組みである。しかし、消費可能な化石燃料が減少していく点では同じである。また、現在想定されている有力な化石燃料消費量削減手段の一つが、カーボンプライシングであることから、使用可能量の

減少に伴う希少性の高まりを反映して化石燃料価格を上昇させていくことが可能であるため、上述の化石燃料枯渇の場合と同様のメカニズムが機能していくことが期待される。

### 投入要素間の代替関係をシナリオ作成に反映するための実証的枠組み

以上の理論的含意を実証的に検証し、シナリオ作成に反映させるためにするために、生産関数の拡張が必要となる。コブ・ダグラス型関数においては、投入要素間の代替弾性値（ある投入要素の相対価格が1%上昇（下落）した際の当該投入要素の減少（増加）幅）が1になることが仮定されている（このため、このため、コブ・ダグラス生産関数においては、生産要素間の代替の弾性値は同関数のパラメータに含まれず、生産要素間の費用シェア（ $\gamma_i$ ）のみである）。もっとも、実証的には代替弾性値は1を下回ることが幅広い実証分析で確認されている（Duffy and Papageorgiou, 2000）。

この投入要素間の代替弾性値を用いて、投入要素の相対価格の変化に応じた生産技術（投入要素の組み合わせ）の選択を描写することを試みたのが、CES（Constant Elasticity of Substitution）型生産関数である（(5)式）。

$$Y_t = \left( \sum_i^N \gamma_i X_i^\rho \right)^{\frac{1}{\rho}}, \quad (5)$$

ここで、 $Y_t$  は気温上昇に伴う経済損失を反映しない GDP の水準、 $\sum_i^N \gamma_i = 1$ 、 $\sigma = (\rho - 1)/\rho$ 、 $\sigma$  は投入要素間の代替弾性値を示す。

ただし、CES 型生産関数は、投入要素が3以上のケースでは、すべての生産要素間のペアで、代替弾性値が等しい場合においてのみ生産フロンティアが一意に定まる（Uzawa, 1962）など、DP 型モデルにおけるシミュレーションで採用するには制約が大きい。この制約を緩和するために、多くの DP 型モデルでは、入れ子型の CES 型生産関数を用いて、資本（K）、労働（L）、エネルギー（E）など3つ以上の投入要素のペア（KとE、LとE、KとL）ごとに異なる代替関係を設定している。一例として、資本とエネルギー、資本及びエネルギーによる疑似的な中間投入と労働の代替関係（先行研究では（KE）L型と表記される）を想定する場合、入れ子型の CES 型生産関数を用いて (6)-(7) 式のように定式化される。

$$X_t = (\gamma_2 K_t^{\rho_2} + (1 - \gamma_2) E_t^{\rho_2})^{\frac{1}{\rho_2}} \quad (6)$$

$$Y_t = A (\gamma_1 L_t^{\rho_1} + (1 - \gamma_1) X_t^{\rho_1})^{\frac{1}{\rho_1}} \quad (7)$$

ここで、 $\sigma_i = (\rho_i - 1)/\rho_i$ 、 $\sigma_i$  は投入要素ペア  $i$  の代替弾性値を示す。

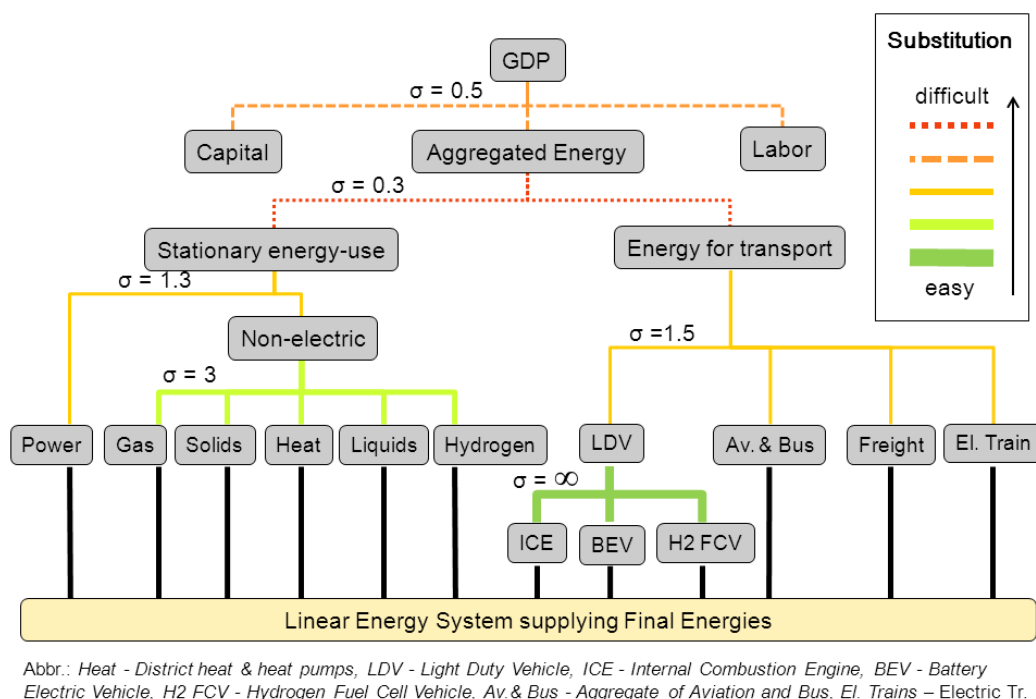
このような定式化を通じて、投入要素価格の変化を受けた生産技術の選択が地域・業種によっ

て異なるメカニズムを描写することが可能となる。なお、既存の DP 型モデルの生産関数の構成を見ると、生産技術の選択において、資本や労働が調整に時間を要するにせよ、余剰が生じた業種から不足する業種への転換が原則として可能であるとの前提に立つモデルと、異業種間の転換は原則として不可能であるとの前提に立つモデルがある。

例えば、独ポツダム気候影響研究所が開発した REMIND においては、「運輸 (Transportation)」、「産業 (Industry)」、「不動産・建設 (Building)」についてその活動で必要とされる 1 次エネルギー源間の代替関係や 2 次エネルギーにおける電力との代替関係がモデル化されている (図表 4)。したがって、いずれの部門で利用されているエネルギーも部門間の代替弾性値に規定されるものの、多部門において利用され、GDP に寄与することが想定されている。

一方、国立環境研究所が開発した AIM の統合評価モデルパートにおいては、国民経済計算の産業連関表に基づいて 33 業種についてそれぞれ「合成中間投入財」、「エネルギー」、「付加価値」、「汚染処理のための投入」を投入要素とする最終付加価値を生み出すプロセスのモデル化がなされている (増井ほか, 2014)。このため、合成中間投入財を構成する資本 (K) については、他業種への転換が想定されていない。

図 4: REMIND-MAgPIE モデルの生産関数



出所. Luderer et al. (2015)

以上のような入れ子型の CES 型生産関数を用いた温室効果ガス削減コストの推計のニーズに応

えるために、入れ子型の CES 型生産関数に関する実証研究の蓄積が進んでいる (van der Werf, 2008; Okagawa and Ban, 2008; Shen and Whalley, 2017)。推計対象期間、地域、業種が異なるため、単純な比較はできないが、いずれの文献においても (1) 代替弾性値は 1 を下回っている (コブ・ダグラス型関数は実証的に支持されない)、(2) 入れ子構造は実際のデータとの適合度で見れば (KL) E 型か (LE) K 型が選択される (Solow, 1974; Stiglitz, 1974; Hartwick, 1977 などが示唆する資本とエネルギー間の代替関係は中心的なメカニズムとはいえない)、といった点は共通している。

もっとも、依然として、温室効果ガス削減コストの推計のためには、情報が不足しているとの指摘も多い。まず、一般に、設備投資の調整等に時間を要することを考慮せずに代替弾性値を計測すると、例えば、資本 (K) の水準を書とした短期的な調整による変動だけを捉える可能性がある<sup>\*11</sup>。このため、短期的な変動の影響を除去するための様々な調整方法が提案されている (Chirinko, 2008)。特に、過去のエネルギー価格の大幅な上昇は、化石燃料枯渇によるものではなく、石油危機など突然のエネルギー供給懸念の高まりを反映したものも含まれていることに留意する必要がある。天野 (2003) によれば、1978 年～2000 年における日本の部門別のエネルギー消費の価格弾性値を見ると、短期的には低水準 (▲ 0.15～▲ 0.28) だが、その後、長期的には部門ごとにばらつきがあるものの、相応の代替関係 (▲ 0.51～▲ 1.07) が確認される。この結果、エネルギーと他の投入要素間の代替に要する平均的な期間は最大で 5 年程度、すべての効果が出尽くすまでに 10 年程度となっている。また、米国での原油価格と景気循環の関係も同様に一定のラグがあることが指摘されている (Hamilton, 1983, 1996) ほか、先進国では概ね同様の傾向が確認されている (OECD, 2002)。実際に入れ子型の CES 型生産関数の推計結果を見ると、データへの適合度から (KL) E 型か (LE) K 型が選択されるのは、このように投入要素間の代替は時間を要することが影響している可能性がある。さらに、この他にも CES 型生産関数の下では、パラメータが固定されるため、中長期的な技術変化などの構造変化が反映されず、気候変動対策のコストが過大評価される可能性が指摘されている (Kaya et al., 2017)。

### 入れ子型の CES 型生産関数による簡易的なシミュレーションに基づく考察

これらの議論を踏まえて、DP 型モデルで採用されている多階層の入れ子型の CES 型生産関数の特徴を検証するために、DP 型モデルの生産関数の特徴を踏まえつつも、簡略化したモデルを用いて入れ子型の CES 型生産関数の挙動について簡単な分析を行った。

まず、生産関数の構造は、4 つの投入要素による 2 階層の入れ子型としている。第 1 段階におい

---

<sup>\*11</sup> こうした事情を反映して、米国の政府機関は、経済予測において、理論・実証の両面から整合性において問題があることは認識しているものの、パラメータ推計に関する問題がないコブ・ダグラス型生産関数を用いている事例が多いことが知られている (Miller, 2008; Stiroh, 1998)。



て非再生可能エネルギー（NRE）と再生可能エネルギー（RE）により、エネルギー供給量（E）が決定され（(8)式）、第2段階で資本（K）と労働（L）に加えて、エネルギー（E）を投入要素として経済全体の産出量（Y）が決定される（(9)式）。

$$E_t = (\beta_3 NRE_t^{\rho_2} + (1 - \beta_3) RE_t^{\rho_2})^{\frac{1}{\rho_2}} \quad (8)$$

$$Y_t = A (\beta_1 L_t^{\rho_1} + \beta_2 K_t^{\rho_1} + (1 - \beta_1 - \beta_2) E_t^{\rho_1})^{\frac{1}{\rho_1}} \quad (9)$$

ここで、 $\sigma_i = (\rho_i - 1)/\rho_i$ 、 $\sigma_2$  は再生可能エネルギー（RE）と非再生可能エネルギー（NRE）間の代替弾性値、 $\sigma_1$  は資本（K）、労働（L）、エネルギー（E）間の代替弾性値となっている。（8）-（9）式は、REMINDの生産関数の構造（図4）などと比べると簡略化されているが、多階層の入れ子型の生産関数において複数のエネルギー源を投入要素とする生産関数の単純な定式化として、その挙動の特徴を確認することができる。

次に生産関数のパラメータについては、NGFSシナリオなど公表されているDP型モデルを用いて作成されたシナリオにおける日本のGDPのパスを再現するために、以下のような想定としている\*12。

1. 労働力（labor）は毎年▲0.3%減少、資本（capital）は毎年0.3%増加、全要素生産性（TFP）は毎年0.4%上昇。
2. 投入要素にしめる労働力のシェア（ $\beta_1$ ）は0.55、資本のシェア（ $\beta_2$ ）は0.35。
3. 特に断りがない限り、投入要素間の代替弾性値（ $\sigma$ ）は0.9とする。
4. 再生可能エネルギーの供給は毎年3%増加する一方、非再生可能エネルギーの供給は毎年▲7%減少する。
5. 再生可能エネルギーのシェアは10%、非再生可能エネルギーのシェアは90%とする（ $\beta_3 = 0.9$ ）。

以上の想定の下で、代替弾性値の水準に応じて30年累積のGDP成長率を試算した結果は、ほぼNGFSシナリオ第3版のNet Zero 2050シナリオの累積成長率を概ね再現できている（図5）。代替弾性値の変化に応じた累積成長率の変化を見ると、以下の特徴が確認できる。

まず、エネルギーに関する代替弾性値（ $\sigma_1$ ）については、Chirinko（2008）をはじめとする既存研究で妥当とされている水準（0.5）を大きく下回らない限り、経済成長に及ぼす影響は限定的と

\*12 NGFSシナリオをはじめとする世界全体をカバーするシナリオを作成する場合、個別の国・地域のために推計法をカスタマイズすることなく、労働力については国連経済社会局人口部の世界人口推計（UN DESA, 2022）における中位推計など幅広いクロスカントリーデータが利用可能なデータを参照し、資本ストックについては、過去の長期平均（30年～40年）をもとに実施したシミュレーションに拠るものとなっている。以下の数値例は、NGFSシナリオ等で採用されているパラメータ設定と概ね整合的なものとなっている。

なっている。一方、資本、労働、エネルギー間の代替弾性値 ( $\sigma_2$ ) については、僅かな変化も経済成長に影響を及ぼす。すなわち、投入要素におけるエネルギーのシェアは、業種や地域によりばらつきがあるものの、概ね 10 % 以下であり、残りの 90 % の投入要素についての伸び率や代替弾性値が不変であれば、エネルギー間の代替関係が経済全体に及ぼす影響は軽微にとどまるといえる<sup>\*13</sup>。

3.1 節で指摘したように、CGE モデルや DP 型モデルは、分析の目的によっては、複雑な構造を採用しているため、計量経済学的手法でパラメータ推計を行うことが困難なものもみられ、関連する既存研究の結果を参照しながら、パラメータを設定することが一般的である。この点をこれらのモデルの弱点として指摘する文献もみられる。しかしながら、今回の数値例が示すように、エネルギー供給・構成の変化に注目してモデル構築を行う限り、GDP などマクロ経済活動についてのシミュレーション結果に及ぼす影響の大きさを評価すれば、エネルギー間の代替弾性値の選択は、既存研究で報告されているレンジ (0.5 以上) を大きく外れない限り、必ずしも深刻なものではないケースが多いといえよう。

もちろん、次節で検討するように、投入要素に占めるシェアは 10 % 程度であるとしても、その代替が円滑に進まない (代替弾性値が非常に低い) もとで非再生可能エネルギーの供給縮小と再生可能エネルギーの供給拡大が進むと経済成長を大きく阻害する可能性があることに留意する必要がある。

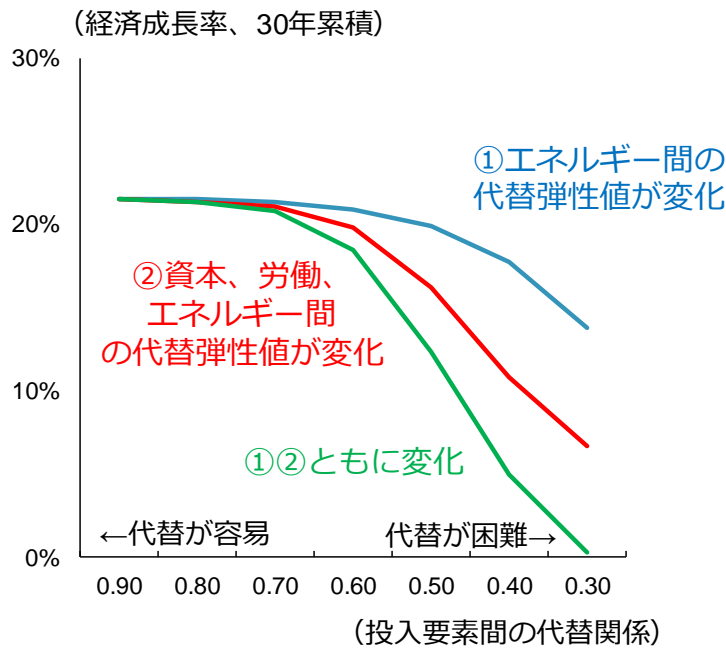
以上の結果をまとめると、DP 型モデルによるシミュレーションに基づくシナリオは、個別にみれば様々な特徴があるものの、限定的なマクロ経済への負担の下で低炭素社会への移行の可能性 (feasibility) を示唆するものであるといえる。特に、GDP の水準を決定する生産関数の背景にあるメカニズムは、理論的な裏付けを備えている。したがって、DP モデルを用いて作成されたシナリオは、先行きの経済成長について過度に楽観的な見通しに基づくものではなく、経済理論が示唆する関係から長期にわたって乖離し続けると考えることは合理的ではないと想定していると解釈すべきである。

なお、これらの結果は、技術革新の生産性上昇への寄与が非常に長期間にわたって実現していく傾向があるとの観察とも整合的である。内燃機関をはじめとする産業革命以降の主要な技術革新は、当初はそのアイディアは画期的であっても、生産性の向上にはほとんど寄与しなかったこ

---

<sup>\*13</sup> Weyant (2014) や Nikas et al. (2019) などにより DP 型モデルとして分類されるモデルの中には、GDP などマクロ経済変数は外生変数であり、共通社会経済経路 (Shared Socioeconomic Pathways; SSP) で設定されている水準から不変のモデルもある (SSP については補論 B.1 参照)。このようなモデルにおいては、代替弾性値等の変化は、GDP の水準ではなく、所与の GDP の水準を達成するために最も効率的な投入要素等の組み合わせ (費用最小化のパターン) に影響を及ぼす。このようなアプローチを取るモデルにおいても、エネルギー部門内の代替関係の変化が多部門に及ぼす影響が限定的であるとの結論は変わらない。

図 5: 入れ子型の CES 型生産関数による経済成長の試算



出所. 筆者作成

とが知られている。しかし、長い期間をかけて改良が重ねられ、既存の技術を凌ぐ生産性の改善をもたらしてきた。このように、産業革命期の様々な発明（プロダクト・イノベーション）は、その後の長期間にわたる地道な改良（プロセス・イノベーション）によってはじめて生産性の向上や経済成長に結実してきた (Utterback and Abernathy, 1975)。

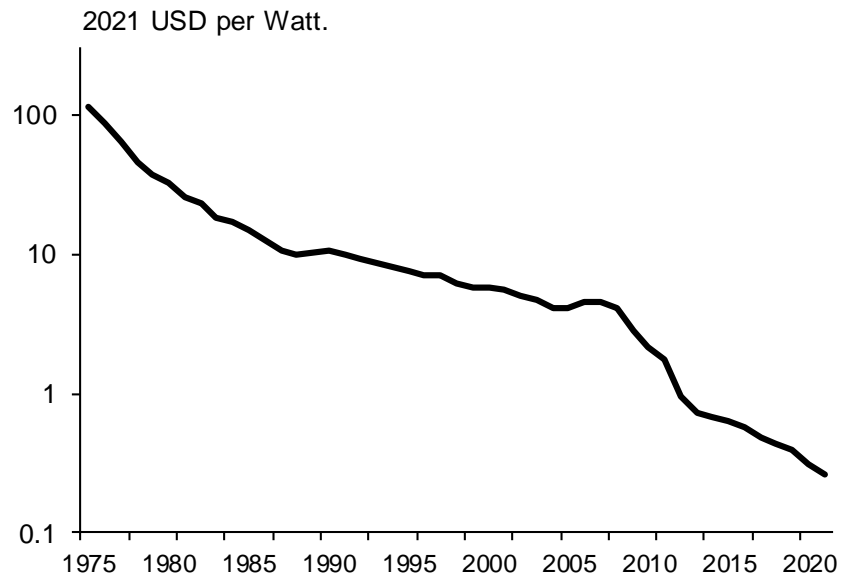
このように、産業革命以降の経済成長の原動力となってきた化石燃料から再生可能エネルギーにエネルギー源を転換する過程においても、これまでと同様にプロセス・イノベーションによる生産性の向上が実現すれば、経済成長を維持できるというのが、経済理論の含意といえる。IAMCに参加している DP 型モデルの多くは、このような考え方を反映しており、DICE モデルをはじめとする BC 型モデルの前提となっている考え方とも整合的である (Nordhaus, 2021a)。

### 3.3.2 エネルギーモジュール

既に述べた通り、マクロ経済モジュールが標準的な経済成長のパスとして想定している持続可能な成長は、再生可能エネルギーの普及により化石燃料からの代替が円滑に進んでいくことを想定している。Nordhaus (2013b, 2021b) をはじめとして多くの経済学者が注目するように、太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギーの導入コストの持続的な低下は、多くの国で観測されている現象であり、習熟曲線と呼ばれている (図 6)。DP 型モデルのエネルギーモジュールでは、想定される習熟曲線の下で、再生可能エネルギーの普及や化石燃料からの代替を進めていく

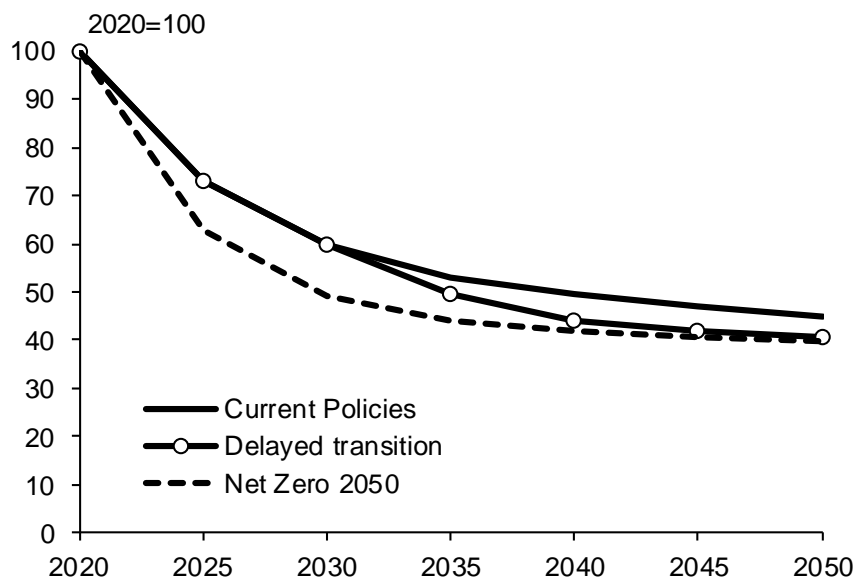
ことで実現するエネルギー供給のシミュレーションを行っている（図 7）。

図 6: 太陽光パネルの価格推移



出所. [Our World in Data](#)

図 7: 再生可能エネルギーの導入コストの見通し（習熟曲線）（REMIND）



出所. [NGFS シナリオ第 3 版](#)

低炭素社会への移行の可能性に懐疑的な見方は、パリ議定書の発効後も少なからず存在するが、一例として、[Pindyck \(2022\)](#) をはじめとして、再生可能エネルギーは、新興国における経済成長に伴うエネルギー需要の増加に対応できないとの見方がある。

A.2 節でも指摘しているように、統合評価モデルはこのような対立する見解のいずれが正しいか判定することはできないが、両者の見解の相違がどのような想定の違いによるものか明らかにすることは可能である。すなわち、習熟曲線の形状やエネルギー源間の代替可能性について、どの程度現在の想定を下回ると、化石燃料への依存から脱却することが困難になるのか、そのような想定が過去に経験したイベントと比べてどの程度の蓋然性があるといえるかといった検証は可能である。

### 3.3.3 土地利用モジュール

また、環境保全状況の詳細な把握も DP 型モデル開発者たちが重視してきた点であった。van Beek et al. (2020) などで最初の統合評価モデルとして紹介されている World 3 モデルを用いて、「成長の限界 (The Limits to growth)」(Meadows et al., 1972) は、人類の経済活動がもたらす環境負荷 (ecological footprint) が地球の収容能力を超えてしまい、長期的には経済活動の大幅な縮小が余儀なくされる可能性を指摘していた。このような問題意識を反映して、土地利用モジュールによって森林など追加開発可能な土地面積、現在利用している土地の土壌の状況などを把握している。

BC 型モデルにおいては、温室効果ガスの削減費用は (1) 式で導入されているのみで、削減方法により異なる削減コストの差が考慮できていないことはすでに指摘した通りである。再生可能エネルギーのように、削減コストの低い (化石燃料価格が高騰している時期においては、化石燃料からの転換コストは限界的にマイナスになる) 削減方法は、土地利用制約を考慮せずに最適な導入量を求めると、無制限に導入されることになりかねない。土地利用制約と整合的な水準で導入されるように制約を課すことで、現実的な削減対策の検討が可能になる。

### 3.3.4 気候モジュール

DP 型モデルにおいてもマクロ経済モジュールで決定された累積温室効果ガス排出量に基づいて気温上昇幅が決定されていく点は BC 型モデルと同じである。多くの DP 型モデルにおいては、Meinshausen et al. (2011) による MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse Gas Induced Climate Change) が採用されている。気候変動のコンピュータシミュレーションによる分析は、大気-海洋循環モデル (Atmosphere-Ocean General Circulation Model, AOGCM) と呼ばれる大型モデルを用いて実施されることが一般的である。しかし、AOGCM は、依然として計算負荷が大きいため、気候変動や気候変動対策の社会・経済への影響の分析を目的とする統合評価モデルにおいては、MAGICC のような相対的に計算負荷の軽い低複雑性 (reduced complexity) モデルを用いて、AOGCM の挙動を再現している。



3.2 節でも簡単に説明している通り、DICE モデルにおいても大気-海洋循環を再現したモデルが導入されている。少なくとも、21 世紀中に想定されている温室効果ガスの累積排出量の増加の下で予想される気温上昇のシミュレーションにおいて、MAGICC と BC 型モデルの気候モジュールで決定的な差は生じない。もっとも、MAGICC は、温室効果ガスの排出量の増加、大気中濃度の上昇、放射強制力の推移などを簡易的ながらもシミュレーションしているモデルであるため、各種の緩和策の効果をモデル内に取り込んで評価していくことが可能となっている点が DP 型モデルの利点として挙げられる。

## 4 シナリオ作成における論点

3 節では、気候関連リスクのシナリオ分析においてシナリオ作成の基礎となっている統合評価モデルの構造を概観するとともに、同モデルを用いて作成したシナリオの特徴を GDP を中心に検証した。改めて、これらのモデルの経済学的側面から見た中核的なロジックをまとめると、以下の通りである。

まず、DICE モデルをはじめとする BC 型モデルは、[Ramsey \(1928\)](#) に基づく新古典派成長モデル（ラムゼー型モデル）を拡張する形で気候変動および気候変動対策の費用便益を分析する枠組みを提供している。この枠組みを大枠で維持しながら、DP 型モデルにおいては、カーボンプライシングの導入により化石燃料価格が上昇する結果、枯渇性資源の配分に関するホテリング・ルール ([Hotelling, 1931](#)) が予測するように、温室効果ガス排出量の削減が進むことがシミュレーションによって示されている。

このような分析を踏まえると、各国政府が作成している温室効果ガス削減計画で示されているエネルギー構成の変化の下でも経済成長が維持できるとの見通しは、明示されていないものの、過去、長期的に観測されてきた実績と同等の投入要素間の代替関係が維持されると想定されているといえる。これは、[Stiglitz \(1974\)](#)、[Solow \(1974\)](#)、[Hartwick \(1977\)](#) における投入要素間の代替関係が果たす役割についての知見と整合的である。

すなわち、市場メカニズムが適切に機能する環境が整っていれば、温室効果ガス削減目標を明確にし、その削減目標と整合的な政策を導入することで、経済成長は維持され、[Semieniuk et al. \(2022\)](#) などが想定するような化石燃料関連資産の陳腐化・座礁資産化により金融の安定が大きく棄損するような事態に陥る蓋然性は低いといえる。実際、これまで公表された各国の中央銀行・監督当局によるシナリオ分析の結果もこのような見方と整合的なものとなっている。もっとも、3.3 節で検討したように、上記の古典的ともいえる経済学の理論的帰結は、いくつかの前提条件が満たされる理想的な環境の下でもたらされるものである。したがって、気候関連リスクの影響を

検証するためのシナリオを設計する観点からは、これらの前提条件が現実には成立しない場合の影響についても検討することは有益であると考えられる。

以下では、投入要素間の代替関係が短期的には長期的に想定される水準から大きく乖離した場合の影響と温室効果ガス排出削減目標や削減策について社会全体で共通の見通しが共有されず将来の資源配分について市場メカニズムが十分に機能しない場合の影響についての評価を簡単に行い、NGFS シナリオ等でカバーされていないシナリオの可能性について若干の考察を行う。

### 一時的な均衡経路からの逸脱に起因するショック

DP 型モデルをはじめとする統合評価モデルに基づいて作成されたシナリオは、低炭素社会へ移行するプロセスを一定の理論的な前提の下で描き出したものとなっている。3.3 節でまとめたように、DP 型モデルの構造やパラメータ設定は、標準的な経済理論の知見に基づくものとなっている。

もっとも、このような長期的な均衡経路上で実現すると期待されるように経済活動が推移していく保証はない。過去のエネルギー価格の上昇時においても、直ちにエネルギー消費量が大きく変化せず、設備投資などの増加による投入要素間の代替が進展するまでに平均で数年を要することはすでに述べた通りである。もちろん、過去のエネルギー価格上昇は、オイルショックのような、少なくとも発生時点においては、予想外かつ一時的と考えられるエネルギー価格の上昇であったことも関係していると考えられる。もっとも、国際的な温室効果ガス削減の取り組みやそれを受けた各国政府の対応について、導入時点において、企業や家計がその意義や持続性を疑問視し、期待される対応を直ちに取らなければ、結果として、過去のエネルギー価格上昇時と同様の帰結となる可能性もある。

NGFS シナリオに収録されている「無秩序な移行 (disorderly transition) シナリオ」の一つである「移行遅延 (delayed transition) シナリオ」は、低炭素社会への移行プロセスについて着手が遅れることを想定している。加えて、企業・家計は「政府が低炭素社会への移行プロセスに着手することはない」と錯覚していたものが、突如この期待が裏切られることに伴う混乱を描き出そうとしている。同シナリオでは、これを一過性のショックとして描いている。しかし、このような企業・家計の見通しの修正の影響は、同シナリオの想定よりも長期にわたる可能性もあることは、3.3.1 節で紹介した通りである。

このような状況の描写の一例として、3.3.1 節で数値例を示すのに用いた入れ子型の CES 型生産関数 ((8)-(9) 式) を用いて、過去のエネルギー価格上昇に対する反応と同程度の期間を要するため、投入要素間の代替が本格的に進展するまでにカーボンプライシングの導入後 5 年程度を要するケースが考えてみる。具体的には、当初 5 年の (8) 式の代替弾性値 ( $\sigma_1$ ) は 0.3 まで低下し、

5年後に3.3.1節の試算で想定していた水準（0.9）にまで弾性値が回復する場合、わが国のGDPは5年間で最大▲3%、累計で▲6%程度代替弾性値が長期平均程度の水準を維持できたケースよりも落ち込む可能性がある\*14。

### 経済成長の持続可能性を長期間にわたり脅かすショック

上記の追加シナリオは、低炭素社会への移行という社会・経済の構造変化に対応するために要する調整について、過去のエネルギー価格上昇に対する適応と同程度の期間を要すると想定し、短中期的なショックとその影響に注目したものである。更にもう一段進めて、化石燃料の消費量の削減が進む下でも経済成長を支えるメカニズムの中核をなすホテリング・ルールが機能する前提条件が長期間にわたり満たされない場合の影響について整理してみたい。

パリ協定などで定められている気温目標を達成するために温室効果ガス排出量削減に取り組む際、気温目標と統合的なカーボンバジェット（許容される累積温室効果ガス排出量）が決定・共有されれば、今後消費可能な化石燃料の量が求められる。これは、化石燃料を消費する企業・家計にとって枯渇性資源の残存埋蔵量と同等な情報である。したがって、カーボンプライシングの導入による化石燃料価格の上昇が、カーボンバジェットの下での化石燃料の希少性に関する評価と統合的な水準であれば、化石燃料から再生可能エネルギーへの移行やエネルギー節約的な生産技術の導入を促される。この結果、経済成長を維持できる可能性があることは、3.3.1節で見えてきたとおりである。もっとも、このようなホテリング・ルールや投入要素間の代替の寄与は、情報の非対称性がなく、市場メカニズムを通じた効率的な資源配分が達成される場合に実現すると期待されることに注意が必要である。

現実の世界を見ると、例えば、2050年時点の原油需要の見通しについては、公的機関に限っても、新型コロナウイルス感染症拡大前の2019年には9,760万バレル/日（経済産業省, 2022）に達していた世界の石油消費量は、2050年に1,200万バレル/日にまで減少するとの見通し（国際再生エネルギー機関（IRENA））から、むしろ1.17億バレル/日にまで増加するとの見通し（米国エネルギー情報局（EIA））とばらつきが大きい（IEF, 2022）。ここで比較されているシナリオは、低炭素社会への移行を想定するシナリオと想定しないシナリオが含まれているが、同じ想定シナリオ間で比較しても相応の差異がある。

このように大きく異なる見通しが併存する背景としては、新興国の経済成長に伴うエネルギー消費量の拡大や再生可能エネルギーの普及などに関する想定の違いがある。エネルギー需給に関する見通しの隔たりが長期間にわたり解消されていない場合は、ホテリング・ルールに基づく資源配分が達成される前提条件である枯渇性資源の残存埋蔵量に関する情報の共有が満たされて

\*14 安部ほか（2023）は、同様の問題意識でトップダウン型のシナリオ分析を実施し、短期間の影響を分析している。

いるとはいえない。また、再生可能エネルギーや電気自動車の導入コストは引き続き低下していくとみられるものの、これらに使用される希少金属の供給が再生可能エネルギーや電気自動車向けの需要を満たすほど拡大しない可能性も指摘されている (Boer et al., 2021)。以上のように、長期的なエネルギーや関連資源需給の見通しについては、極めて不確実性が大きい下では標準的な価格理論で想定されている経済の基礎的条件に関する情報の社会的な共有は容易に期待できるものではないといえる。

このように理論モデルが想定する条件が満たされない下では、化石燃料・再生可能エネルギーともに将来の需要を満たすために必要な投資が行われず、エネルギー供給制約に直面し、経済活動が制限される可能性がある。一例として、低炭素社会への移行プロセスにおいてエネルギー供給制約に直面した場合の影響を分析した MEDEAS モデル (Nieto et al., 2020) によるシミュレーション結果を見ると、世界経済の成長率は長期にわたり 0 % 程度 (その際、わが国は小幅のマイナス成長) で推移する可能性が示唆される。

カーボンバジェットあるいはそれに基づく気温上昇目標を制約条件としたある種の最適化問題の解として導き出された SSP2 (あるいは SSP1) に基づくシナリオとの結果が大きく異なるのは、NGFS シナリオの作成で採用されている DP 型モデルと MEDEAS モデルが描写しようとしている現象が異なり、そのため異なるメカニズムに立脚しているモデルであるからに他ならない。つまり、ある種の協調・調整の失敗をモデル化したのが MEDEAS モデルであり、このような問題は国際的な協調によって長期的に見れば解決可能であるとの見方に立っているのが SSP に基づいて作成されたシナリオといえる。気候関連リスクのうち、特に移行リスクの分析や緩和策の効果の分析においては、通常、カーボンプライシング導入のペースや範囲といった政策に関する不確実性 (policy uncertainty) と再生可能エネルギーの導入コストの低下ペースなど技術に関する不確実性 (technology uncertainty) があると整理されているが、技術に関する不確実性に加えて国際的な協調の失敗という政策に関する不確実性に直面した場合の、いわば複合的な影響を試算したのが MEDEAS モデルの結果といえる。実際、MEDEAS モデルの結果は、SSP3 (地域分断) や SSP4 (格差) よりも厳しい結果となっている。

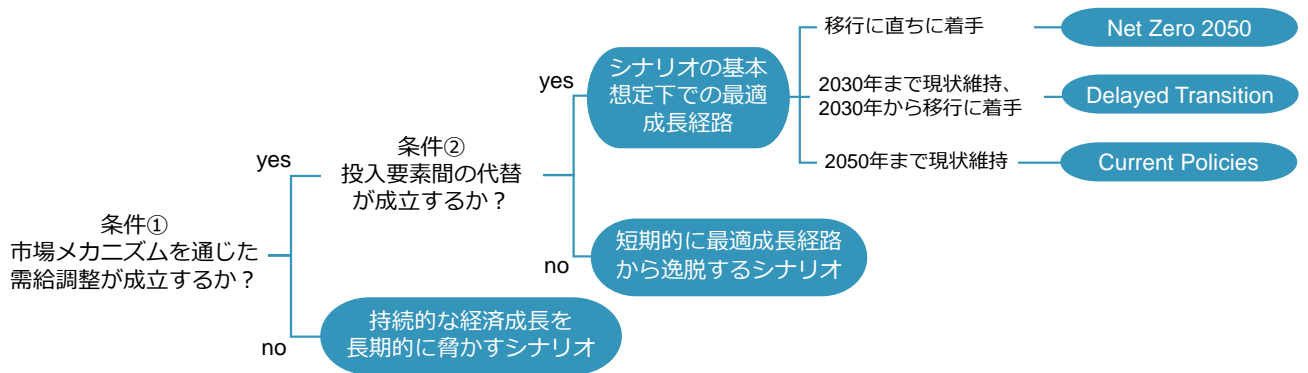
### シナリオ分析で考慮すべきショックの範囲・ストレスの強度

本節で紹介した 2 つのショックは、NGFS シナリオや IEA シナリオとの概念的な関係を整理すると図 8 のように整理でき、GDP の推移はそれぞれ図 9 の通りとなっている。これらのショックは、現在公表されている世界全体をカバーする気候シナリオでは明示的に考慮されていない。このうち、一時的な均衡経路からの逸脱に起因するショックについては、エネルギー価格上昇に対する反応としては、オイルショックなど過去のエネルギー価格上昇時と同様の反応が起きた場合



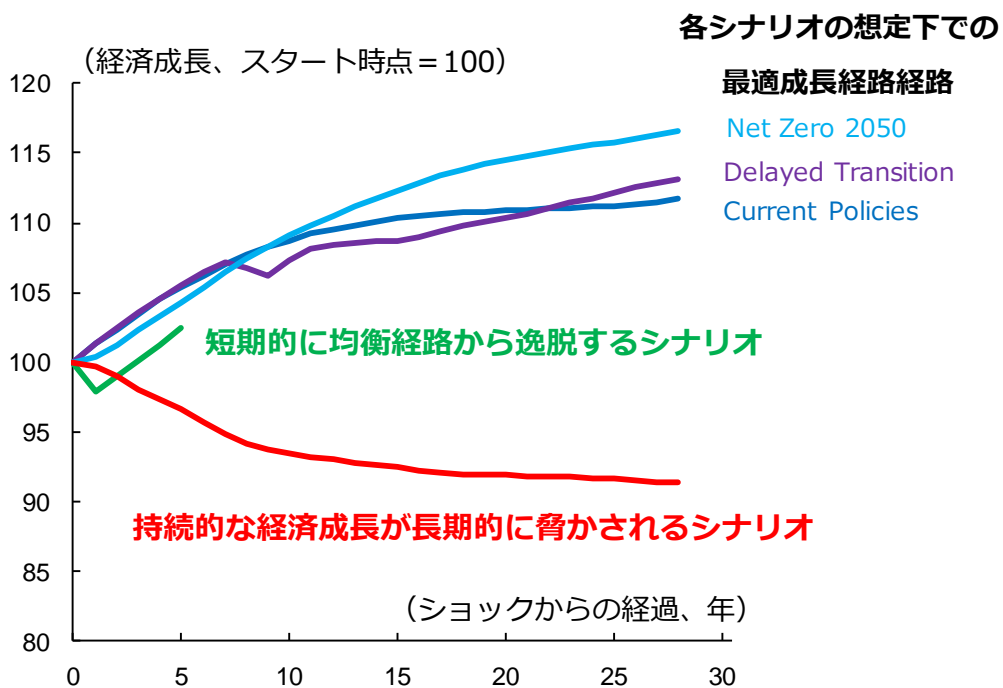
に平均的に想定されるものといえる。もっとも、過去のエネルギー価格の上昇の原因は、低炭素社会への移行プロセスにおけるカーボンプライシングの導入など気候関連リスクのシナリオ分析の考察対象とは異質のショックであることに留意が必要である。

図 8: 本節で取り上げたシナリオと既存シナリオとの関係



出所. 筆者作成

図 9: 本節で取り上げたシナリオと既存シナリオにおける GDP の推移



出所. 筆者作成

もう一つの「経済成長の持続可能性を長期的に脅かすショック」については、短中期における



家計・企業の対応の遅れよりもより深刻な政府を含むあらゆる経済主体の見通しが長期間にわたり一致しない下で生じるものであり、前者に比べると極端な想定の下でのリスクといえる。シナリオ分析を実施する際にこのようなショックも取り入れた強めのストレスを想定したシナリオを採用するか否かは、分析対象となるポートフォリオのリスクプロファイルやシナリオ分析の目的やカバーしたいと考えているリスクの範囲などに応じて決定すべきであると考えられる。

このように、シナリオ設計・選択は、気候関連リスクの特性を踏まえる必要がある。すなわち、既存のストレステストにおいては、想定されるストレスに対する現在のビジネスモデルの回復力（resilience）やリスクプロファイルの頑健性（robustness）を検証することが目的であるため、ビジネスモデルやリスクプロファイルの変化を明示的に想定しないことも多い。一方、気候関連リスクのうち、特に移行リスクについては、低炭素社会への移行という変化が起点となって生じているリスクであるため、金融機関や企業が現時点で抱えるリスクの大きさだけでその影響を判断すべきではなく、社会構造の変化への対応力も踏まえて判断されるべきものである。

なお、その際にも、実際のシナリオ分析に採用されたシナリオで考慮されているストレスを相対的に評価するためには、異なる強度のストレスを想定するシナリオを比較検討することが有用である。また、単に主要変数で想定されているショックの大きさを比較するだけでなく、どのようなショックやメカニズムを想定して導き出されたシナリオであるか把握するため、シナリオ設計のために利用されているモデルの構造を解明していくことは重要である。

## 5 まとめ

本稿では統合評価モデルの開発・発展に貢献してきた研究者達の間で交わされてきた議論をもとに統合評価モデルの基本的な構造を明らかにし、統合評価モデルを用いた気候関連リスク分析のためのシナリオ作成における論点を明らかにしてきた。特に DP 型モデルをはじめとする大型モデルについては、その全体像の把握が難しいことに加え、パラメータの設定の仕方などを個別にみれば、恣意的な設定がなされているとの指摘もみられる。これらの点に注目して、統合評価モデルはブラックボックス化しているとの批判も一部にある。本稿では、BC 型モデルとの比較を通じて、DP 型モデルの経済モデルとしての構造を中心に検討してきた（3 節）。特に 3.3.1 節で検討したように、DP 型モデルは、標準的な経済理論に基づいて構築されているモデルであるといえる。

ただし、ストレステストやシナリオ分析において採用されているシナリオは「将来起こりうる事象」を捉えることを目指しているだけで、シナリオで想定されるイベントが実現する蓋然性を評価しているわけではない。この意味でストレステストやシナリオ分析におけるシナリオは、「将来の予測」ではなく、シナリオ作成において前提となっている条件下で起こりうる先行きの見通しの範

圏 (“a range of plausible pathways”) やその範囲の中でも例外的 (“plausible but exceptional”) であったり、厳しい (“severe but plausible”) ものを設定しているに過ぎない。

シナリオの中で想定されるストレスの強度は、経済成長の持続可能性や低炭素社会への移行プロセスにおけるエネルギーシステムの転換に関する想定に大きく依存する。この点、NGFS シナリオを含む DP 型モデルに基づいて作成されるシナリオは、標準的な経済理論に基づいて、企業・家計が合理的に気候変動対策に反応していくとの想定の下で作成されたシナリオであるといえる。このような認識のもとで、(1) 概ね長期的な均衡経路に沿って推移するケース< DP 型モデルで作成されたシナリオ>に加えて、(2) 一時的な均衡経路からの逸脱に起因するショック、(3) 経済成長の持続可能性を長期間にわたり脅かすショックといった形で金融システムへの影響を検証する観点から複数のシナリオの可能性を示した (4 節)。

「低炭素社会への移行」というプロジェクトを推進する際のマクロ経済や金融システムへの影響を検証する観点からは、(2) や (3) の影響を検証する以前に、(1) において、まず、大きな負担を伴うことなく移行が可能であることを検証することが重要である。したがって、(1) についても単により強いショックを想定するシナリオにおける結果と比較するためのベンチマークとなるベースラインシナリオ以上の意義があるといえる。また、このベースラインシナリオですら複数のモデルを組み合わせて作成する必要があるということが気候関連リスクのシナリオ分析の特徴といえる。NGFS シナリオをはじめとする世界全体をカバーするシナリオは、中央銀行・金融監督当局・金融機関にとってなじみの薄い統合評価モデル当の利用が必要となる主に (1) に相当するシナリオの提供を通じて、シナリオ分析実施の負担を軽減するために大きな貢献があったといえる。

もっとも、金融システムへの影響や個別金融機関の財務の健全性への影響を検証する観点からは、(1) における影響の検証に加え、必要に応じて (2) や (3) のようなシナリオ下での影響を検証することが気候関連リスクのシナリオ分析においては重要となることはすでに述べた通りである。これらのダウンサイドリスクの影響を分析するための追加シナリオについては、ベースラインシナリオである (1) との整合性も意識しながら、国・地域ごとの事情に応じて独自モデル・データに基づいてシナリオを作成していくことも認められるべきであろう<sup>\*15</sup>。このような複層的な枠組みに基づいて各国でそれぞれの経済環境や産業構成を反映したシナリオ分析を実施していくことが、気候変動対策という世界的な取り組みの金融システムへの影響を検証するためには有用であろう。

最後に残された課題を指摘しておきたい。気候関連リスクがもたらすショックが、既存の気候シナリオで想定されている以上の規模のストレスとなる可能性も考えられる。本稿では、移行リ

---

<sup>\*15</sup> バーゼル銀行監督委員会は、2022 年に公表された「気候関連金融リスクの実効的な管理・監督に関する諸原則」(BCBS, 2022) において、監督当局が実施するシナリオ分析について、監督当局間の国際的な連携・協力を促進する観点から必要に応じて共通のシナリオを用いることが推奨されるとしている。

スクに関するリスク評価のために、特にパリ協定等で定められている温室効果ガスの削減目標と統合的な追加シナリオについて検討してきた。更に、[Gardes-Landolfini et al. \(2023\)](#) も指摘するように、資源制約や技術制約が想定通りに解消せず、低炭素社会への移行の取り組みが残念ながら不十分なものとなり、温室効果ガスの削減が進まない懸念もある。こういった点を踏まえると、移行リスクと物理的リスク双方が経済活動・金融システムの負荷となるシナリオについても想定以上のストレスとなるケースについて検討を行うことが有益となりうる。実際、NGFSはシナリオ第4版において、従来の温暖化進行シナリオに加えて、気温目標などの政策目標と結びついていないシナリオを追加したほか、短期シナリオ ([NGFS, 2023a](#)) の開発に着手することを公表しているなど、多様な分析ニーズに応えるためにシナリオの多様化を図る取り組みは続いている。

## 参考文献

- Acharya, V. V., R. Berner, R. Engle, H. Jung, J. Stroebel, X. Zeng, and Y. Zhao (2023). Climate Stress Testing. Federal Reserve Bank of New York Staff Reports no. 1059, Federal Reserve Bank of New York.
- Annicchiarico, B., S. Carattini, C. Fischer, and G. Heutel (2022). Business Cycles and Environmental Policy: A Primer. *Environmental and Energy Policy and the Economy* 3, 221–253.
- Aswani, J., A. Raghunandan, and S. Rajgopal (2023). Are carbon emissions associated with stock returns? *Review of Finance*, Forthcoming.
- Basel Committee on Banking Supervision (BCBS) (2021). Climate-related risk drivers and their transmission channels.
- Basel Committee on Banking Supervision (BCBS) (2022). Principles for the effective management and supervision of climate-related financial risks.
- Belloni, M., F. Kuik, and L. Mingarelli (2022). Euro Area Banks' Sensitivity to Changes in Carbon Price. ECB Working Paper No. 2022/2654, European Central Bank.
- Bertram, C., A. Boirard, J. Edmonds, R. Fernando, D. Gayle, I. Hurst, L. W. Liu, W. McKibbin, C. Payerols, O. Richters, and E. Schets (2022). Running the NGFS Scenarios in G-Cubed: A Tale of Two Modelling Frameworks. NGFS Occasional Paper, NGFS (Network for Greening the Financial System).
- Boer, L., A. Pescatori, and M. Stuermer (2021). Energy Transition Metals. Working Paper WP/21/243, International Monetary Fund.

- Bolton, P., M. Despres, L. A. P. Da Silva, F. Samama, and R. Svartzman (2020). The green swan. *BIS Books*.
- Bolton, P., Z. Halem, and M. Kacperczyk (2022). The financial cost of carbon. *Journal of Applied Corporate Finance* 34(2), 17–29.
- Bolton, P. and M. Kacperczyk (2021). Global pricing of carbon-transition risk. Working Paper 28510, National Bureau of Economic Research.
- Burfisher, M. E. (2021). *Introduction to Computable General Equilibrium Models* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Burke, M., S. M. Hsiang, and E. Miguel (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature* 527, 235–239.
- Campiglio, E., Y. Dafermos, P. Monnin, J. Ryan-Collins, G. Schotten, and M. Tanaka (2018). Climate change challenges for central banks and financial regulators. *Nature climate change* 8(6), 462–468.
- Carney, M. (2015). Breaking the tragedy of the horizon—climate change and financial stability. *Speech given at Lloyd’s of London* 29, 220–230.
- Chateau, J., F. Jaumotte, and G. Schwerhoff (2022). Economic and Environmental Benefits from International Cooperation on Climate Policies. IMF Departmental Paper No 2022/007, International Monetary Fund.
- Chermack, T. J., S. A. Lynham, and W. E. A. Ruona (2001). A review of scenario planning literature. *Futures Research Quarterly (currently World Futures Review)* 16(Summer), 7–31.
- Chirinko, R. S. (2008).  $\sigma$ : The long and short of it. *Journal of Macroeconomics* 30(2), 671–686.
- Dell, M., B. F. Jones, and B. A. Olken (2012). Temperature Shocks and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century. *American Economic Journal: Macroeconomics* 4(3), 66–95.
- Dietz, S., A. Bowen, C. Dixon, and P. Gradwell (2016). ‘Climate value at risk’ of global financial assets. *Nature Climate Change* 6.
- Duffy, J. and C. Papageorgiou (2000). A Cross-Country Empirical Investigation of the Aggregate Production Function Specification. *Journal of Economic Growth* 5(1), 87–120.
- Financial Stability Board (FSB) and Network for Greening the Financial System (NGFS) (2022). Climate Scenario Analysis by Jurisdictions – Initial findings and lessons–.
- Fujimori, S., T. Hasegawa, T. Masui, K. Takahashi, D. S. Herran, H. Dai, Y. Hijioka, and

- M. Kainuma (2017). SSP3: AIM implementation of Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change* 42, 268–283.
- Gardes-Landolfini, C., P. Grippa, W. Oman, and S. Yu (2023). Energy Transition and Geoeconomic Fragmentation: Implications for Climate Scenario Design. Staff Climate Note 2023/003, International Monetary Fund.
- Giglio, S., M. Maggiori, and J. Stroebel (2014). Very Long-Run Discount Rates. *The Quarterly Journal of Economics* 130(1), 1–53.
- Glanemann, N., S. N. Willner, and A. Levermann (2020). Paris Climate Agreement passes the cost-benefit test. *Nature Communications* 11(1).
- Gollier, C. and M. L. Weitzman (2010). How should the distant future be discounted when discount rates are uncertain? *Economics Letters* 107(3), 350–353.
- Hafkamp, W. (1991). Three Decades of Environmental-Economic Modelling: Economic Models of Pollutant Emissions. In F. J. Dietz, F. van der Ploeg, and J. van der Straaten (Eds.), *Environmental Policy and the Economy*, Volume 206 of *Contributions to Economic Analysis*, pp. 19–45. Elsevier.
- Hamilton, J. D. (1983). Oil and the Macroeconomy since World War II. *Journal of Political Economy* 91(2), 228–248.
- Hamilton, J. D. (1996). This is what happened to the oil price-macroeconomy relationship. *Journal of Monetary Economics* 38(2), 215–220.
- Hamming, R. W. (1962). *Numerical Methods for Scientists and Engineers*. New York: McGraw-Hill.
- Hartwick, J. M. (1977). Intergenerational Equity and the Investing of Rents from Exhaustible Resources. *The American Economic Review* 67(5), 972–974.
- HM Revenue & Customs (2013). HMRC’s CGE model documentation.
- Hope, C., J. Anderson, and P. Wenman (1993). Policy analysis of the greenhouse effect: An application of the PAGE model. *Energy Policy* 21(3), 327–338. Policy modelling for global climate change.
- Hotelling, H. (1931). The Economics of Exhaustible Resources. *Journal of Political Economy* 39(2), 137–175.
- Hsiang, S., R. Kopp, A. Jina, J. Rising, M. Delgado, S. Mohan, D. J. Rasmussen, R. Muir-Wood, P. Wilson, M. Oppenheimer, K. Larsen, and T. Houser (2017). Estimating economic damage from climate change in the United States. *Science* 356(6345), 1362–1369.



- Hsiang, S. M. and A. S. Jina (2014). The Causal Effect of Environmental Catastrophe on Long-Run Economic Growth: Evidence From 6,700 Cyclones. Working Paper 20352, National Bureau of Economic Research.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023). Synthesis Report of the Sixth Assessment Report.
- International Energy Forum (IEF) (2022). IEF RFF Outlooks Comparison Report.
- Jamshidian, F. and Y. Zhu (1996). Scenario Simulation: Theory and methodology. *Finance and Stochastics* 1(1), 43–67.
- Kalkuhl, M. and L. Wenz (2020). The impact of climate conditions on economic production. Evidence from a global panel of regions. *Journal of Environmental Economics and Management* 103, 102360.
- Kaya, A., D. Csala, and S. Sgouridis (2017). Constant elasticity of substitution functions for energy modeling in general equilibrium integrated assessment models: a critical review and recommendations. *Climatic Change* 145(1), 27–40.
- Kosow, H. and R. Gassner (2008). *Methods of Future and Scenario Analysis: Overview, Assessment, and Selection Criteria*, Volume 39 of *DIE Studies*. Deutsches Institut fuer Entwicklungspolitik gGmbH.
- Luderer, G., M. Leimbach, N. Bauer, E. Kriegler, L. Baumstark, C. Bertram, A. Gianousakis, J. Hilaire, D. Klein, A. Levesque, I. Mouratiadou, M. Pehl, R. Pietzcker, F. Pi-

- ontek, N. Roming, A. Schultes, V. J. Schwanitz, and J. Strefler (2015). Description of the REMIND Model (Version 1.6). Technical report, Social Science Research Network.
- Markowitz, H. M. and A. Perold (1981). Portfolio analysis with factors and scenarios. *The Journal of Finance* 36(4), 871–877.
- McKibbin, W. J. and P. J. Wilcoxon (2013). A Global Approach to Energy and the Environment: The G-Cubed Model. In P. B. Dixon and D. W. Jorgenson (Eds.), *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*, Volume 1B, pp. 995–1068. Elsevier.
- Meadows, D. H., D. L. Meadows, J. Randers, and W. W. Behrens III (1972). *The Limits to growth*. Universe Books.
- Meinshausen, M., S. C. B. Raper, and T. M. L. Wigley (2011). Emulating coupled atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6 – Part 1: Model description and calibration. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11(4), 1417–1456.
- Metcalf, G. E. and J. H. Stock (2017). Integrated Assessment Models and the Social Cost of Carbon: A Review and Assessment of U.S. Experience. *Review of Environmental Economics and Policy* 11(1), 80–99.
- Metcalf, G. E. and J. H. Stock (2023). The Macroeconomic Impact of Europe’s Carbon Taxes. *American Economic Journal: Macroeconomics* 15(3), 265–86.
- Miller, E. (2008). An Assessment of CES and Cobb-Douglas Production Functions. Working Papers 19992, Congressional Budget Office.
- Monasterolo, I., M. J. Nieto, and E. Schets (2022). The Good, the Bad and the Hot House World: Conceptual Underpinnings of the NGFS Scenarios and Suggestions for Improvement. Banco Espana Working Paper No. 2302, Banco Espana.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM) (2017). *Valuing Climate Damages: Updating Estimation of the Social Cost of Carbon Dioxide*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Network for Greening the Financial System (NGFS) (2019). A call for action: Climate change as a source of financial risk.
- Network for Greening the Financial System (NGFS) (2020). Guide to climate scenario analysis for central banks and supervisor.
- Network for Greening the Financial System (NGFS) (2022a). NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors (3rd edition).
- Network for Greening the Financial System (NGFS) (2022b). Not too late – Confronting the

- growing odds of a late and disorderly transition.
- Network for Greening the Financial System (NGFS) (2023a). Conceptual note on short-term climate scenario.
- Network for Greening the Financial System (NGFS) (2023b). NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors (4th edition).
- Nieto, J., O. Carpintero, L. J. Miguel, and I. de Blas (2020). Macroeconomic modelling under energy constraints: Global low carbon transition scenarios. *Energy Policy* 137(C), 111090.
- Nikas, A., H. Doukas, and A. Papandreou (2019). A detailed overview and consistent classification of climate-economy models. In *Understanding risks and uncertainties in energy and climate policy*, pp. 1–54. Springer, Cham.
- Nordhaus, W. D. (1992a). Lethal Model 2: The Limits to Growth Revisited. *Brookings Papers on Economic Activity* 23(2), 1–60.
- Nordhaus, W. D. (1992b). The ‘DICE’ model: background and structure of a dynamic integrated climate-economy model of the economics of global warming. Cowles Foundation Discussion Papers 2-1-1992, Cowles Foundation.
- Nordhaus, W. D. (1994). *Managing the Global Commons: The Economics of Climate Change*, Volume 31. MIT press Cambridge, MA.
- Nordhaus, W. D. (2007). A review of the Stern review on the economics of climate change. *Journal of Economic Literature* 45(3), 686–702.
- Nordhaus, W. D. (2008). *A question of balance: Weighing the options on global warming policies*. Yale University Press.
- Nordhaus, W. D. (2013a). *The climate casino: Risk, uncertainty, and economics for a warming world*. Yale University Press.
- Nordhaus, W. D. (2013b). Integrated economic and climate modeling. In *Handbook of Computable General Equilibrium Modeling*, Volume 1B, pp. 1069–1131. Elsevier.
- Nordhaus, W. D. (2018). Evolution of modeling of the economics of global warming: changes in the DICE model, 1992–2017. *Climatic change* 148(4), 623–640.
- Nordhaus, W. D. (2021a). Are We Approaching an Economic Singularity? Information Technology and the Future of Economic Growth. *American Economic Journal: Macroeconomics* 13(1), 299–332.
- Nordhaus, W. D. (2021b). *The Spirit of Green: The Economics of Collisions and Contagions in a Crowded World*. Princeton University Press.

- Nordhaus, W. D. and J. Boyer (2000). *Warming the world*. Cambridge: MIT Press.
- Okagawa, A. and K. Ban (2008). Estimation of substitution elasticities for CGE models. Discussion Papers in Economics and Business 08-16, Osaka University, Graduate School of Economics.
- O’Neill, B. C., E. Kriegler, K. L. Ebi, E. Kemp-Benedict, K. Riahi, D. S. Rothman, B. J. van Ruijven, D. P. van Vuuren, J. Birkmann, K. Kok, M. Levy, and W. Solecki (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change* 42, 169–180.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2002). Environmentally Related Taxes in OECD Countries.
- Pástor, L., R. F. Stambaugh, and L. A. Taylor (2021). Sustainable investing in equilibrium. *Journal of Financial Economics* 142(2), 550–571.
- Peace, J. and J. Weyant (2008). Insights Not Numbers: The Appropriate Use of Economic Models. White paper, Pew Center on Global Climate Change.
- 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.
- Pindyck, R. S. (2021). What we know and don’t know about climate change, and implications for policy. *Environmental and Energy Policy and the Economy* 2(1), 4–43.
- Pindyck, R. S. (2022). *Climate Future: Averting and Adapting to Climate Change*. Oxford University Press.
- Ramsey, F. P. (1928). A Mathematical Theory of Saving. *The Economic Journal* 38(152), 543–559.
- Reinders, H. J., D. Schoenmaker, and M. A. van Dijk (2023). Climate Risk Stress Testing: A Conceptual Review. CEPR Press Discussion Paper No. 17921, Centre for Economic Policy Research.
- Riahi, K., D. P. van Vuuren, E. Kriegler, J. Edmonds, B. C. O’Neill, S. Fujimori, N. Bauer, K. Calvin, R. Dellink, O. Fricko, W. Lutz, A. Popp, J. C. Cuaresma, S. KC, M. Leimbach, L. Jiang, T. Kram, S. Rao, J. Emmerling, K. Ebi, T. Hasegawa, P. Havlik, F. Humpenöder, L. A. Da Silva, S. Smith, E. Stehfest, V. Bosetti, J. Eom, D. Gernaat, T. Masui, J. Rogelj, J. Strefler, L. Drouet, V. Krey, G. Luderer, M. Harmsen, K. Takahashi, L. Baumstark, J. C.

- Doelman, M. Kainuma, Z. Klimont, G. Marangoni, H. Lotze-Campen, M. Obersteiner, A. Tabeau, and M. Tavoni (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change* 42, 153–168.
- Scarf, H. (1967). The Approximation of Fixed Points of a Continuous Mapping. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 15(5), 1328–1343.
- Semieniuk, G., P. B. Holden, J.-F. Mercure, P. Salas, H. Pollitt, K. Jobson, P. Vercoolen, U. Chewpreecha, N. R. Edwards, and J. E. Viñuales (2022). Stranded fossil-fuel assets translate to major losses for investors in advanced economies. *Nature Climate Change* 12(6), 532–538.
- Shen, K. and J. Whalley (2017). Capital–Labor–Energy Substitution in Nested CES Production Functions for China. In M. Agarwal, J. Wang, and J. Whalley (Eds.), *The Economies of China and India*, Volume 2, Chapter 2, pp. 15–27. World Scientific.
- Shoven, J. B. and J. Whalley (1992). *Applying General Equilibrium*. Cambridge University Press.
- Solow, R. M. (1974). Intergenerational Equity and Exhaustible Resources. *The Review of Economic Studies* 41, 29–45.
- Steffen, W., J. Rockström, K. Richardson, T. M. Lenton, C. Folke, D. Liverman, C. P. Summerhayes, A. D. Barnosky, S. E. Cornell, M. Crucifix, J. F. Donges, I. Fetzer, S. J. Lade, M. Scheffer, R. Winkelmann, and H. J. Schellnhuber (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115(33), 8252–8259.
- Stern, N. H. (2007). *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University press.
- Stiglitz, J. (1974). Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths. *The Review of Economic Studies* 41, 123–137.
- Stiroh, K. J. (1998). Long-run Growth Projections and the Aggregate Production Function: A Survey of Models Used by the U.S. Government. *Contemporary Economic Policy* 16(4), 467–479.
- Takakura, J., S. Fujimori, N. Hanasaki, T. Hasegawa, Y. Hirabayashi, Y. Honda, T. Iizumi, N. Kumano, C. Park, Z. Shen, K. Takahashi, M. Tamura, M. Tanoue, K. Tsuchida, H. Yokoki, Q. Zhou, T. Oki, and Y. Hijioka (2019). Dependence of economic impacts



- of climate change on anthropogenically directed pathways. *Nature Climate Change* 9(10), 737–741.
- Takakura, J., S. Fujimori, K. Takahashi, N. Hanasaki, T. Hasegawa, Y. Hirabayashi, Y. Honda, T. Iizumi, C. Park, M. Tamura, and Y. Hijioka (2021). Reproducing complex simulations of economic impacts of climate change with lower-cost emulators. *Geoscientific Model Development* 14(5), 3121–3140.
- Tol, R. (1997). On the Optimal Control of Carbon Dioxide Emissions— An Application of FUND. *Environmental Modeling and Assessment* 2, 151–163.
- Traeger, C. P. (2023, August). ACE—Analytic Climate Economy. *American Economic Journal: Economic Policy* 15(3), 372–406.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). World Population Prospects 2022: Data Sources (UN DESA/POP/2022/DC/NO. 9).
- Utterback, J. M. and W. J. Abernathy (1975). A Dynamic Model of Process and Product Innovation. *Omega* 3(6), 639–656.
- Uzawa, H. (1962). Production Functions with Constant Elasticities of Substitution. *The Review of Economic Studies* 29(4), 291–299.
- van Beek, L., M. Hajer, P. Pelzer, D. van Vuuren, and C. Cassen (2020). Anticipating futures through models: the rise of Integrated Assessment Modelling in the climate science-policy interface since 1970. *Global Environmental Change* 65, 102191.
- van der Werf, E. (2008). Production functions for climate policy modeling: An empirical analysis. *Energy Economics* 30(6), 2964–2979.
- Weitzman, M. L. (1998). Why the Far-Distant Future Should Be Discounted at Its Lowest Possible Rate. *Journal of Environmental Economics and Management* 36(3), 201–208.
- Weyant, J. (2014). Integrated assessment of climate change: state of the literature. *Journal of Benefit-Cost Analysis* 5(3), 377–409.
- Weyant, J. (2017). Some Contributions of Integrated Assessment Models of Global Climate Change. *Review of Environmental Economics and Policy* 11(1), 115–137.
- Wing, I. S. (2011). Computable General Equilibrium Models for the Analysis of Economy–Environment Interactions. In *Research Tools in Natural Resource and Environmental Economics*, Chapter 8, pp. 255–305. World Scientific Press, Singapore.
- World Bank (2023). State and Trends of Carbon Pricing 2023.
- Xiong, W., K. Tanaka, P. Ciais, D. J. A. Johansson, and M. Lehtveer (2022). emIAM v1.0:

- an emulator for Integrated Assessment Models using marginal abatement cost curves.
- Yamaguchi, R. (2019). Intergenerational Discounting with Intragenerational Inequality in Consumption and the Environment. *Environmental and Resource Economics* 73, 957–972.
- 安部 展弘、川澄 祐介、高野 優太郎、仲 智美、橋本 龍一郎、平形 尚久、松村浩平、宗像 晃 (2023). 気候関連金融リスクに係るトップダウン型シナリオ分析—シナリオの時間軸と産業間波及の考慮—. 日本銀行 調査論文, 日本銀行.
- 環境省 (2023). IPCC 第 6 次評価報告書の概要 – 第 1 次作業部会 (自然科学的根拠) –.
- 経済産業省 (2022). 令和 3 年度エネルギーに関する年次報告 (エネルギー白書 2022) .
- 増井 利彦、日比野 剛、大城 賢 (2014). 技術選択を考慮した応用一般均衡モデルによるわが国の温室効果ガス排出削減目標の評価. *土木学会論文集 G (環境)* 70(5), I43–I51.
- 天野 明弘 (2003). *環境経済研究 – 環境と経済の統合に向けて*. 有斐閣.
- 富田 基史、坂本 将吾、筒井 純一、上野 貴弘 (2022). 2021 年度委託成果報告書：気候変動関連リスクに係るシナリオ分析に関する調査. 金融庁委託調査 (一般財団法人電力中央研究所受託), 金融庁.
- 有賀 涼、池田 大輔、篠原 武史、笛木 琢治、武藤 一郎、米山 俊一 (2022). 「気候変動の経済学」：欧米における主要研究の紹介. *金融研究* 41-3, 87–121.

## 補論 A 統合評価モデルへの批判とそれを受けた研究の展開

### A.1 費用便益分析型統合評価モデルに対する批判

3.2 節で紹介した BC 型モデルを用いた政策分析については、DICE モデルが提案された直後から様々な批判的見解がある。Weyant (2014) は、BC 型モデルを中心とする統合評価モデルに対する批判を、(1) これまで観測されていない劇的な気候変動が起きる可能性が考慮されていない (“extremes-oriented critics”)、(2) 世代間・地域間の衡平性を考慮していない (“environmental/generational justice critics”)、(3) 社会・経済状況や技術進歩の長期見通しを立てることが困難であるため、モデルを構成する基本的な要素 (the baseline element of the models) の作成が極めて困難であること (“the devil is in the details critics”)、(4) モデルとその推計結果が不確実性の高いパラメータや外生変数に強く依存している (“incomplete uncertainty characterization critics”) という 4 点に集約している。

このうち、ロバート・ピンダイクは、主に (3) と (4) の観点から、BC 型モデルが政策分析や意思決定のツールとしては依然として発展途上であり、科学的根拠を欠くものであると指摘してきた (Pindyck, 2013, 2017, 2021, 2022)。例えば、Pindyck (2013) は、以下で述べるよう

に、基本方程式 (1)-(4) を構成する気候感度、損失関数、温室効果ガス削減費用といった主要なパラメータ・関数はいずれも非常に不確実性が大きく、その選択によって結果が大きく異なってしまうため、「IAM は気候変動対策の評価や SCC の推計になんら貢献するものではない (“IAMs are of little or no value for evaluating alternative climate change policies and estimating the SCC.”)」と指摘している。個別の論点の詳細と Pindyck (2013) の批判を受けた後の研究の進展を概観すると以下の通りとなっている。

### 平衡気候感度 (Equilibrium climate sensitivity)

平衡気候感度 (以下、気候感度) とは、「大気中の二酸化炭素 ( $CO_2$ ) 濃度が工業化以前と比べて 2 倍になった後、平衡に達した世界平均気温の上昇量」(環境省, 2023) として定義される。気候感度は、(3) 式の気候モジュールを特徴づけるパラメータである。

気候感度次第で、所与の累積温室効果ガス排出量に対する気温上昇のペースは大きく異なるため、温暖化を予測する際の鍵となるパラメータである。しかし、その不確実性の幅は大きく、IPCC の第 4 次評価報告書 (IPCC, 2007) では、気候感度の最良推定値を、 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$  と推計しているが、5 % 程度の確率では  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  超となる。Pindyck (2013) は、気候感度の不確実性の大きさを踏まえると、温室効果ガス排出量増加に伴う気温上昇の見通しを立て、温暖化を防止するための排出量削減計画を策定することは困難である、と批判している。

なお、2021 年～2022 年にかけて公表された第 6 次評価報告書においては、気候感度の最良推定値は  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  程度、5 % 程度の確率で生じる気温上昇も  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  程度と見込まれ、不確実性の程度は減少しつつあるが、引き続き、将来の気温上昇の予測のバラつきは大きい<sup>\*16</sup> (IPCC, 2023)。

### 経済損失関数 (Damage function)

経済損失関数とは、気温上昇が、生産性低下などを通じて、経済的損失をもたらす関係を表した関数である。ノードハウスが DICE モデルにおいて、同関数を気温上昇の 2 次関数として定式化して以降、多くの統合評価モデルでこれと同様もしくは拡張させた定式化となっている。

特に DICE モデルでは、工業化以前対比、 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  上昇した場合、GDP が 1 % 低下し、 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  上昇した場合、GDP が 3 % 低下することを想定している。しかし、例えば  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  上昇など、これまで経験したことのない気温上昇については関係性を検証できず、Pindyck (2013) は、この定式化に裏付けはない (“there is no economic theory”) と述べている。実際、DICE モデルが最初に提案さ

---

<sup>\*16</sup> 気候感度のバラつきが大きい原因の一つとして、Steffen et al. (2018) が指摘するような温室効果ガスの排出量増加が非連続かつ不可逆な気温上昇をもたらす転換点 (tipping point) の扱いについて研究者間でも見解が大きく分かれていることが挙げられる。大型のコンピュータを駆使した気候変動モデルにおいてもその予測は大変困難であるため、3.3.4 節で紹介している MAGICC などでも基本的に考慮されていない。結果として、温室効果ガスが引き起こす気候変動の影響が過小評価されているとの批判もある。

れた際に、損失関数は損失の規模 (scale) を表すパラメータ ( $\theta_1$ ) と非線形性を表すパラメータ ( $\theta_2$ ) により  $G(\Delta T m_t) = \theta_1 \Delta T m_t^{\theta_2}$  と定式化され、特にシミュレーションにおいては、 $\theta_2 = 2$  と設定されているが、 $\theta_2$  の根拠は特に示されていない (Nordhaus, 1992b)。

ただし、近年は、Dell et al. (2012) や Burke et al. (2015) のように本格的に世界中の気象データが利用可能となった 1960 年代以降のデータを用いて、気温上昇が経済成長を下押しすること、その影響は、気温上昇幅の大きい国ほど大きいなど非線形性が認められること、年間平均気温の高い国ほど気温上昇の影響が大きいことなどが確認されている。更に、より粒度の高い地域レベルのデータによる検証も行われているほか (Hsiang and Jina, 2014)、年次データによる検証に加え、10 年程度の長期間にわたる関係を見ても気温が上昇すると経済成長が低下する傾向は認められ、気候変動への適応 (adaptation) で解決できない影響があることが確認されている (Hsiang et al., 2017; Kalkuhl and Wenz, 2020)。

以上のように、気温上昇と経済成長の関係については、実証的な知見の蓄積がかなり進んだといえる一方、GDP 成長率のクロスカントリーデータとの関係を検証できる期間においては、 $2^\circ\text{C}$  以上の気温上昇が観測されておらず、依然として不確実性は大きい。この点について、複数のモデルを比較しつつ、モデル間のパフォーマンスの違いの検証が続けられている (NASEM, 2017)。さらに、気温上昇や降雨量など気象・気候データのみを用いた誘導形の損失関数としてモデル化することに留まらず、Takakura et al. (2019) のように空調費用の増加など気温上昇に伴う損失・費用の増加を社会・経済変数を取り入れて構造モデルとして推計する試みもみられる<sup>\*17</sup>。

### 温室効果ガス削減費用 (Abatement cost)

温室効果ガス削減にかかる費用は、政策オプションや技術進歩の想定、その実現可能性の想定により大きく変動する。Weyant (2017) によれば、今世紀を通じて温室効果ガスの大気中濃度を 550ppm 程度<sup>\*18</sup>に安定させるのに要する費用は世界の GDP の 0.1 %~10 %と文献により大きな開きがある。

なお、温室効果ガスの削減費用については、過去の IPCC の評価報告書でも、WG3 で検討が重ねられ、DP 型モデルをはじめとする大型モデルで分析が重ねられてきた (van Beek et al., 2020)。特に、IPCC の第 5 次評価報告書 (IPCC, 2014) の WS3 の報告では、排出量削減手段が

<sup>\*17</sup> Burke et al. (2015) においても、気温上昇の GDP への影響が二次関数で近似できることを示している一方で、データセットを先進国と発展途上国に分割すると、先進国の結果については異なる解釈が可能となることが示唆されている。

<sup>\*18</sup> 工業化以前の大気中の二酸化炭素濃度は、280ppm と推定されており、550ppm は、工業化以前の大気中濃度からほぼ倍増する想定 (概ね気候感度が想定する水準と同等)。IPCC の第 3 次評価報告書 (IPCC, 2001) では、2020 年~2030 年に年間排出量をピークアウトさせれば、2100 年時点の気温上昇は  $2.2^\circ\text{C}$  程度となると見込まれ温室効果ガス削減目標の目安の一つとして示されていた。なお、パリ議定書で合意された目標を達成するための二酸化炭素の大気中濃度は 450ppm とされている。

特定されることで、削減費用の推計幅は半減する可能性が指摘されている。このように、自然科学の知見の蓄積により不確実性が解消されていくのではなく、複数の排出量削減オプションについて、DP型モデル等の大型モデルを用いて社会的コストをシミュレーションしつつ、それを踏まえてオプションを絞り込むことで、より蓋然性の高い見通しの作成が可能になっていくと考えられる。このような観点から、BC型モデルのような小型モデルにおいて少数のパラメータで記述することの限界を認識する必要がある。

### 割引率 (Discount rate)

一般に、費用便益分析においては、費用が生じる時点と便益が生じる時点は異なるため、両者の割引現在価値で比較することが必要となる。しかし、気候変動対策が議論の対象としている超長期（30年超）の割引率は、市場データなどのベンチマークはないため、替わってラムゼールール (Ramsey, 1928) に基づいて、時間選好率 ( $\phi$ )、期待成長率 ( $g^*$ )、消費の限界代替率 ( $\eta$ ) によって定められた社会的割引率 ( $r^*$ ) を用いている文献も多い。

$$r^* = \phi + \eta g^* \quad (10)$$

長期にわたる費用便益の分析においては、割引率の水準の設定が決定的な影響を及ぼすことがしばしばある。例えば、コペンハーゲン合意を巡る Nordhaus (2013a) による分析結果 (図 10) を見ると、高めの割引率を採用すると、各時点における温室効果ガス排出により被る経済損失の削減幅が同じであったとしても、その割引現在価値は減少するため、現時点における限界便益曲線が下方にシフトする。その結果、温室効果ガス削減目標は下がる (温度目標は高くなる)。逆に、割引率の想定を低くした場合、限界便益曲線は上方にシフトし、削減目標は上がる (温度目標は低くなる)。

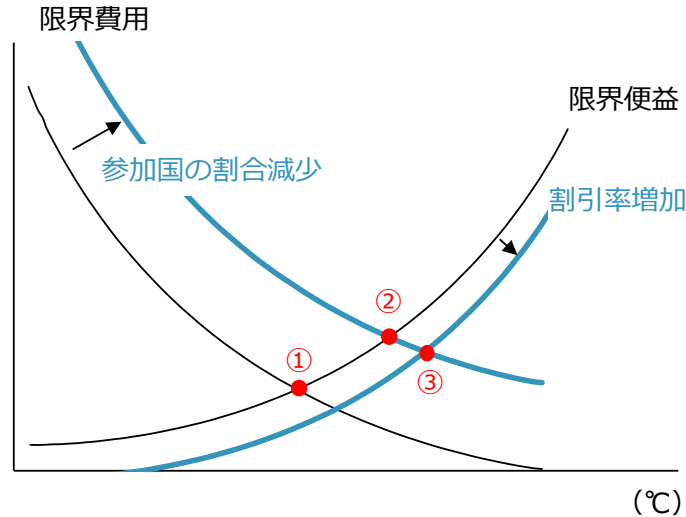
イギリスの財務大臣の諮問を受けて作成されたスターン報告 (Stern, 2007) は、初めて、費用便益分析の観点からも気候変動対策が正当化されると主張した経済分析の一つであり、具体的には、BC型モデルの一つである PAGE を用いて、気候変動の影響は大きく、早期かつ強力な気候変動緩和策が支持されるとしている。これは、一連の DICE モデルによる結果と大きく異なるものであるが、このような差をもたらした背景としては、同報告は、将来世代の負担を軽視すべきではないとして、倫理的な割引率 (ethical discount rate) として 1.4% (時間選好率を 0.1%) と低い水準に設定し、費用便益分析を行っていることが挙げられる。

Nordhaus (2007) は、スターン報告は、市場金利と比較して、割引率を不当に低く設定し、気候変動対策による便益を過大に評価しているため、「この報告書は、政治的な文書にすぎない ("the Review should be read primarily as a document that is political in nature and has advocacy



図 10: 費用便益分析の観点からみた最適な温度目標

	割引率	参加国の割合	最適な温度目標
①	0%	100%	2.3℃
②	0%	50%	3.8℃
③	4%	50%	4.0℃



出所. Nordhaus (2013b) をもとに筆者作成

as its purpose.”)」と批判している。一連の議論を踏まえ、Pindyck (2013) は、将来世代の負担の考慮といった倫理的な観点とマーケットデータのいずれに基づいて設定すべきか明確な指針がないことから、割引率は恣意的なものにならざるを得ない、と指摘している。

気候変動対策に限らず、長期間にわたる費用便益分析を行う際の割引率の選択は長く経済学者の間で議論されてきた論点である。近年、Giglio et al. (2014) をはじめとして、超長期の不動産賃貸契約など債券以外の金融取引から求めた超長期の割引率についての知見が蓄積されつつある。

もっとも、気候変動の影響分析で考察されているような数十年、長いものでは数百年にわたる異時点間の費用便益の分析を代表的個人の異時点間の消費選択の問題として定式化することは不適切であると Ramsey (1928) において既に指摘されている。したがって、Weitzman (1998) や Gollier and Weitzman (2010) で考察されているように、不確実性の高い状況では単純にラムゼールールに則って割引率を設定することが適切とはいえないケースもあることに加え、Yamaguchi (2019) が考察している通り、単純な割引率の水準の設定の問題というよりも、世代間の衡平 (intergenerational equity) を考慮するための定式化が必要になる。このような要素を勘案する場合、Stern (2007) が提案したような設定が支持される可能性も指摘されている。



## 気候変動対策への費用便益分析への応用に関する留意点

以上のように、気候変動対策について BC 型モデルを用いた費用便益分析を実施して、温室効果ガスの削減目標や気温目標を検討することについては、BC 型モデルについて不確実性が大きくその結果について多様な解釈が可能であることから懐疑的な見方も少なくない。こうしたこともあり、パリ協定をはじめとするこれまでの温室効果ガス削減目標や温度目標は、「科学的知見が出揃うまで待つべきではない」との観点から予防原則 (precautionary principle) に基づいて設定されている。

実際、初期の DICE モデルの結果を見ると、費用便益分析の観点から最適な気温目標は 2100 年時点で工業化以前からの気温上昇幅は 3 度超と一切削減努力を行わないケースで想定される気温上昇 (3.4 °C) をわずかに下回る水準となっている (Nordhaus, 1994)。近年、Glanemann et al. (2020) をはじめとして、パリ協定で設定されている温度目標が費用便益分析の観点からも望ましいものであることを示す研究が発表されているが、これらの結果は、既存の BC 型モデルに Stern (2007) などで提案された追加的な設定を導入したものである。もっとも、Nordhaus (2013a) など近年の著作においては、再生可能エネルギーの導入コスト低下により排出削減費用の低下が続いていることを踏まえ、DICE モデルの見直しを行っていることから、最適気温目標は 2 °C 台半ばとする推計結果に基づいて、より低い気温目標を目指すことの合理性を主張している。加えて、不確実性が大きい下では単に期待値に基づいて意思決定を行うこと (期待値原則 < expected value principle >) が不適切であることを認め、予防原則に基づく目標設定に一定の合理性があることに同意している。

## A.2 統合評価モデル開発者達の見解

前節で取り上げた一連の論文における Pindyck の主張は「気候変動の影響を正確に評価することは極めて困難である (不確実性が大きい)」ということであって、温室効果ガスの排出量増加によって地球温暖化が進行していることや地球温暖化が社会・経済活動に大きな被害もたらすリスクを否定しているわけではないことに注意する必要がある。

むしろ、多くの統合評価モデルの開発者たちは、Pindyck の一連の指摘に同意した上で、研究の進展に伴い、知見が蓄積されてきていること、指摘された限界や問題点を根本的に克服できているわけではないものの、なお統合評価モデルが気候変動について議論するうえで多くの貢献があったと主張している (Weyant, 2014, 2017)。敢えて、両者の相違点を求めると、Pindyck が温室効果ガス排出量の削減など緩和策 (mitigation) の効果には不確実性が大きいことから、より適応策 (adaptation) を重視している点 (Pindyck, 2022) が挙げられるが、一連の論争はあくまで

地球温暖化問題に関する共通の理解に立ったものの範囲といえる<sup>\*19</sup>。

こうした限界を踏まえつつも統合評価モデルの開発とその政策への応用に向けた取り組みを支えてきたのは、[Peace and Weyant \(2008\)](#) のタイトルとしても掲げられているようにモデルの開発を通じて追及しているのは「洞察であって単なる数字ではない (“Insights Not Numbers”）」という信念にあるといえよう。同論文のタイトルは、[Hamming \(1962\)](#) で掲げられている「コンピュータによる計算の目的は洞察を得ることであって、単なる数字を求めることではない (“The purpose of computing is insights not numbers”）」に基づくものであることを踏まえ、[Hamming \(1962\)](#) の主張に即して解釈すると、統合評価モデルの意義は以下の通りである。

まず、統合評価モデルに限らずいかなるモデルも、実世界の複雑な事象の指導原理 (guiding principles) を特定し、抽象化したものである。様々な作用の総体として実現している実世界の現象から指導原理を特定し、抽象化するプロセスは、モデル開発者の洞察を反映したものに他ならない。したがって、そこから得られた計算結果 (computing) は、モデル開発者の洞察を具現化したものであることから、計算結果に洞察が的確かつ明解に表現できていることこそが、予測の精度と同様にモデルの巧拙の判断基準となる。

また、[3.3](#) 節で紹介した DP 型モデルのような大規模かつ複雑なモデルにおいても、実際に観測される現象を構成する要素の全てをモデルに盛り込むことは困難なことから、必ずしも予測精度が小規模なモデルと比べて向上することが期待できるわけではない。それでも、気候科学をはじめとする自然科学に加えて社会科学に跨る既存研究から得られた知見に基づいて設定された変数間の相互依存関係から導き出された気候-社会・経済システムの全体像こそが統合評価モデルが導き出そうとしている洞察といえる。

すなわち、モデルの精緻化・大型化を通じて、必ずしも先行きの予測精度の向上に寄与しない場合でも、BC 型モデルのように、少数の変数・方程式に集約された誘導形として表現されていたメカニズムについて、DP 型モデルでは、その構造についても再現することが可能になる。上述のように、気候変動の影響を評価するうえで鍵を握る変数やパラメータについて専門家間でも見解が大きく分かれるなど不確実性が依然として大きい。しかし、DP 型モデルをはじめとする大型モデルを通じて、それぞれの見解と整合的な技術・投資規模等といった背景を明らかにし、大きな隔たりのある見解が具体的にモデルの想定のうちどの点の乖離に基づくのかなどについて理解を共有することが期待される。

また、このようなプロセスを通じて、個別の気候変動対策の効果が従来の想定よりも異なるケー

---

<sup>\*19</sup> 実際、[Pindyck \(2017\)](#) と [Weyant \(2017\)](#) は、同じシンポジウム (The use of integrated assessment models for climate policy) で報告された論文として同じ学術雑誌の同一号に掲載されている。対立ではなく、立場を異にする研究者間の論争がこの分野を発展させてきたことを紹介しようとする意図が読み取れる。なお、もう一本の報告論文は、[Metcalfe and Stock \(2017\)](#) であった。

スについての検証（感応度分析：sensitivity analysis）や気候変動対策の取り組みのペースや規模を変更した場合の影響の検証（反実仮想分析：counterfactual analysis）等によって、不確実性の評価を含む形で当事者間で目標と目標達成に向けた手段について認識共有を図ることが可能になる。

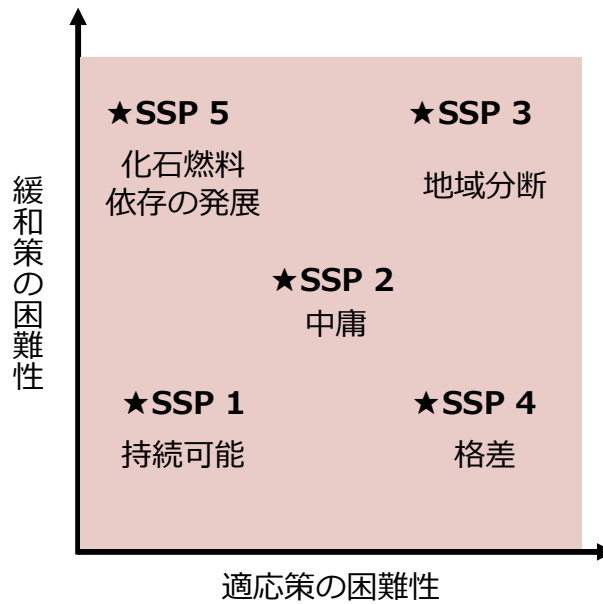
## 補論 B 気候関連リスク分析のためのシナリオ作成への応用

### B.1 共通社会経済経路（SSP）を用いたシナリオ作成

IPCC の評価報告書の WG2 と WG3 は、DP 型モデルなどを用いた適応と緩和の効果に関する学術論文のサーベイから研究者間のコンセンサスといえる見解をまとめている。もっとも、DP 型モデルのような大型の複雑なモデルによる分析については、異なるモデル・異なる前提条件において得られた結果の比較において、その差異の原因を特定し、複数のモデルによるシミュレーションに共通する見解を導き出すことは容易ではない。このため、地球温暖化と関連性が低いと考えられる社会・経済変数について、気候変動研究のために共通のシナリオとして提案されたのが共通社会経済経路（Shared Socioeconomic Pathways: SSP）である (Riahi et al., 2017)。共通社会経済経路は、それぞれ持続可能 (Sustainability) < SSP1 >、中庸 (Middle of the Road) < SSP2 >、地域分断 (Regional Rivalry) < SSP3 >、格差 (Inequality) < SSP4 >、化石燃料依存の発展 (Fossil-fueled development) < SSP5 > という異なる適応と緩和の難易度を想定した 5 つのシナリオから構成されている (図 11)。

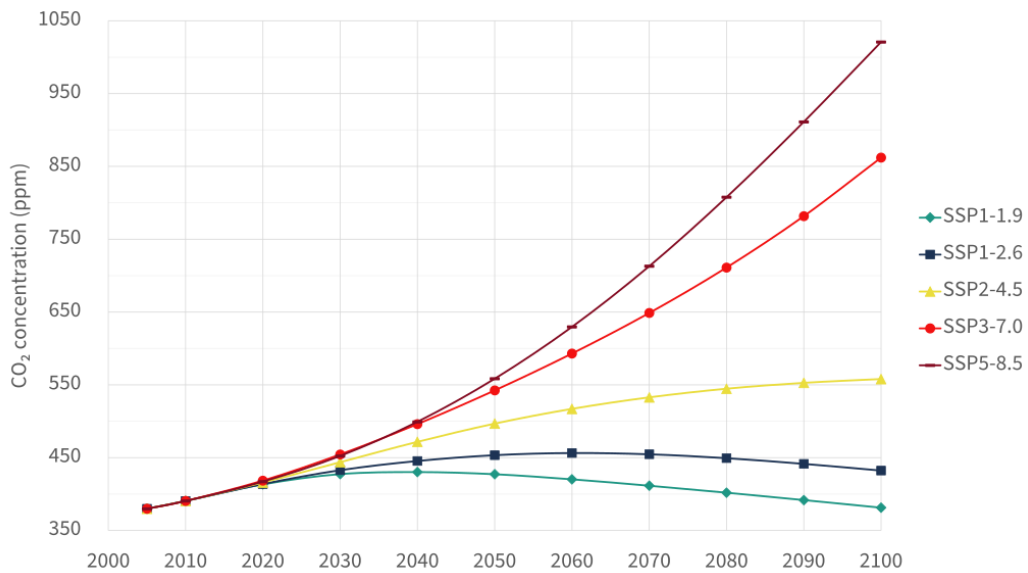
経済活動の共通シナリオである共通社会経済経路に大気中の温室効果ガスの推移とそれに伴う気温上昇に関する代表的なシナリオである代表的濃度経路 (Representative Concentration Pathways: RCP) と組み合わせることで、人口や GDP といった社会・経済変数に関する共通の前提の下で、共通の気温上昇目標における適応・緩和の影響の評価が可能になる。IPCC5 次評価報告書 (IPCC, 2014) で提示された気温上昇シナリオはこのように作成されたものである (図 12)。また、Fujimori et al. (2017) は、国立環境研究所が開発した DP 型モデルである AIM を用いて、SSP3 の下ではパリ協定で定められた温度目標 (2℃以下) は達成できないことを示し、社会全体での行動変容の重要性を指摘している。以上のように、DP 型モデルを用いた分析においては、適応策・緩和策のマクロ経済への影響は社会・経済共通経路の選択による外生的な設定に依拠したものとなっているものもみられる。また、マクロ経済の活動水準 (GDP など) へのフィードバックが考慮され、内生化されているモデルにおいても、ベースラインシナリオとして共通社会経済経路のいずれかのシナリオが採用され、政策効果の検証については、ベースラインからの乖離幅を評価することが多い。

図 11: 共通社会経済経路 (5つのシナリオの関係)



出所. O'Neill et al. (2017)

図 12: 社会経済共通経路と代表的濃度経路の組み合わせによる適応・緩和のシナリオ



出所. Riahi et al. (2017)

## B.2 NGFS シナリオ

B.1 節で示した枠組みに則って作成されたシナリオの典型が、NGFSにより2020年に公表され、その後も更新が続いているNGFSシナリオ (NGFS Climate Scenarios) である。2023年

11月公表のNGFSシナリオ第4版においては、移行リスクと物理的リスクの組み合わせに基づいて、(1) 低炭素社会への移行に着実に取り組むことで両リスクがともに低水準に留まる「秩序だった移行シナリオ (Orderly transition)」、(2) 低炭素社会への移行に取り組むものの、その取り組みにおいて政策的な不確実性が伴うため、物理的リスクは低水準に留まるが、移行リスクは高まる「無秩序な移行シナリオ (Disorderly transition)」、(3) 低炭素社会への移行に向けた取り組みが停滞し、物理的リスクが高まる「温暖化進行シナリオ (Hot house world)」、(4) 低炭素社会への移行の取り組みが途中で頓挫するため、移行リスク・物理的リスクの双方が高まる「移行手遅れシナリオ (Too little, too late)」の4グループについて合計7シナリオが提供されている(図表13)<sup>\*20</sup>。

図13: NGFSシナリオの枠組み



出所: NGFS (2023b)

シナリオ作成モデルとしてのDP型モデルの特徴を理解するうえで重要なNGFSシナリオの特徴として以下の2点が挙げられる。

NGFSシナリオは、ドイツのポツダム気候影響研究所(PIK)が開発したREMIND-MAGPIE、

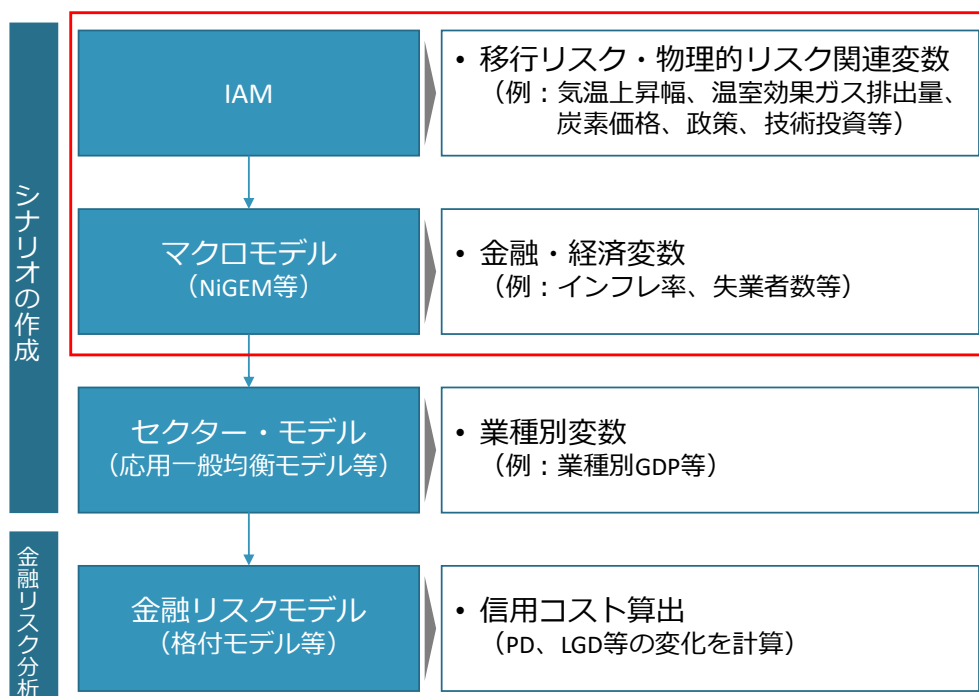
<sup>\*20</sup> NGFSシナリオ第3版(NGFS, 2022a)までは、移行リスクと物理的リスクの双方が高まる「移行手遅れシナリオ(Too little, too late)」の可能性に言及されているものの、シナリオは提供されていなかった。もっとも、同時に公表されたNGFS(2022b)は、2022年以降のエネルギー市場の混乱や温室効果ガス排出量の増加を受けて、同シナリオが現実のものとなるリスクについて警告を発していた。



オーストリアの国際応用システム分析研究所 (IIASA) が開発した MESSAGEix-GLOBIOM、米国のメリーランド大学と地球変動共同研究所 (JGCRI) が開発した GCAM といった DP 型モデルを用いて作成されている。これに加えて、気候関連リスクの金融システムや個別金融機関の財務の健全性に与える影響を分析するために、英国の国民経済社会研究所 (NIESR) が開発したマクロ経済モデル (NiGEM) を用いて金融経済変数を補完している。

もっとも、NiGEM は、CGE モデルのような業種別変数を幅広くカバーしているモデルではないため、NGFS シナリオには、業種別 GDP などの業種別変数が一部の業種を除いて含まれていない。こうしたこともあり、NGFS シナリオを用いた気候関連リスクのシナリオ分析は、すでに公表されている各中央銀行・監督当局が実施した結果を見る限り、図 14 のように、業種別変数を補完するモデルを各機関が追加的に開発しているケースがある<sup>\*21</sup>。その上で、シナリオ下における信用コストなど財務損益への影響の試算などの金融リスク分析を実施している。

図 14: 気候関連リスクの典型的な手順 (赤枠内を NGFS シナリオで提供)



出所. 筆者作成

### 気温上昇目標が設定されている下での炭素価格 (SCC との違い)

3.2 節で示したように、Nordhaus (1994, 2007, 2013a) 等で算出されている SCC は、温室効果

<sup>\*21</sup> NGFS は、2024 年に予定されているシナリオ第 4 版の追加公表分において、業種別変数を追加するとしている。

ガス排出量に制限が課されていない下で生じる追加的な温室効果ガス排出による社会的損失の負担に相当するものである。いわば、温室効果ガス排出の影響を規制等の導入により排出者に帰着させた場合の温室効果ガス排出の限界費用といえる。一方、NGFS シナリオをはじめとする気候関連リスクのシナリオ分析で想定されているカーボンプライシングの役割は、パリ協定などで定められた気温目標と統合的な範囲（カーボンバジェット）に累積温室効果ガス排出量を抑えるためのツールである。特に、NGFS シナリオでは、カーボンプライシングは、移行リスクの大きさを表す変数として用いられている。このため、現実に導入が想定されるカーボンプライシングの水準をとの乖離がある<sup>\*22</sup>ことを意識して、「（カーボンプライシングに限定されない）広義の限界的な温室効果ガス削減費用」である「shadow carbon price」と表記している。

したがって、温度目標が設定されている下では、カーボンプライシングの設定は、[Hotelling \(1931\)](#) で示された枯渇性資源の最適生産（ホテリング・ルール）に類似する問題となる。同ルールによれば、枯渇性資源の価格は、毎年利子率分だけ上昇していく。DP 型モデルのような大規模かつ複雑なモデルのもとでホテリング・ルールのような理想化された状況で成立する関係が厳密な意味で成立しているわけではない。しかしながら、NGFS シナリオの炭素価格の年率換算上昇率は、利子率と一致するわけではないが、ほぼ定率となっている。

### CGE モデルと DP 型モデルの比較

G-cubed モデルは、カーボンプライシングをはじめとする気候変動対策の経済効果の分析に関する機能が豊富な CGE モデルである ([McKibbin and Wilcoxon, 2013](#))。 [Bertram et al. \(2022\)](#) は、G-cubed モデルを用いて、NGFS シナリオ第 3 版に収録されている 6 つのシナリオと同じナラティブの下でシナリオを作成し、DP 型モデルと CGE モデルの特徴を比較している。

両者の結果を見ると、まず、電源構成、化石燃料・再生可能エネルギーの消費量などといったエネルギーシステムに関する変数について NGFS シナリオの作成で採用されている 3 つの DP 型モデルと G-cubed モデルが取り扱える変数の種類・粒度に大きな差はない。また、気温上昇目標等のシナリオ作成上の主要な制約条件が等しい下では、ほとんどのシナリオにおいて、エネルギー関連変数については両者の結果に顕著な違いはない。一方、GDP については、G-cubed モデルの結果の方が、カーボンプライシング導入に伴う落ち込み幅が幾分大きい。もっとも顕著な差が見られたのは、それぞれのシナリオで気温目標を達成するために導入されるカーボンプライシングの水準で、秩序だった移行シナリオと無秩序な移行シナリオのいずれにおいても、G-cubed

---

<sup>\*22</sup> [Metcalf and Stock \(2023\)](#) は、すでにカーボンプライシングを導入している欧州のデータからは、カーボンプライシングのマクロ経済指標（GDP、失業率、インフレ率など）への影響は確認できないと指摘している。もっとも、欧州においても、カーボンプライシングの対象は、これまでのところ、大企業が多い高排出セクターに限られている。今後予定されている家計や中小企業も対象とするカーボンプライシングの影響が同様に軽微にとどまるかどうかは、更なる検証が必要であるとみられる。

モデルの結果は、NGFS シナリオの作成で採用されている 3 つの DP 型モデルの結果よりも大幅に低い水準に留まっている。

このような違いは、DP 型モデルが、総じて SSP で与えられたベースラインの GDP 等のパスを実現するエネルギーシステムを選択することを重視したモデルである一方、CGE モデルはカーボンプライシング負担のマクロ経済活動へのフィードバックを相対的に重視したモデルであるが一因となって生じていると考えられる。結果として、DP 型モデルにおけるカーボンプライシングの役割は、再生可能エネルギーが、化石燃料と比べて十分に割安となるまで化石燃料由来のエネルギーのコストを引き上げることで再生可能エネルギー投資を促進するメカニズムに重点が置かれているといえる。一方、G-cubed モデルでは、これに加えて、経済活動の下押しによる温室効果ガス排出量の減少によって、カーボンバジェット内に累積温室効果ガス排出量を抑えるために必要なカーボンプライシングの水準が低めとなっているとみられる。