

限界削減費用曲線の概要と推計手法（モデル等）の紹介

Research Report
2024年3月資産運用研究所
森田 和喜
武田 泰典

要 約

限界削減費用曲線は、排出削減目標を達成するのに必要な費用の見積もり、炭素税や排出量取引などにおける検討材料、企業が排出削減を事業の意思決定に反映させるための ICP など幅広く利用することができる。限界削減費用曲線の推計結果は手法によって大きく異なり、推計結果の利用の際にはその手法の特徴や前提条件などを把握しておく必要がある。そこで、本稿では、限界削減費用曲線について、代表的な推計手法を紹介する。

本稿では推計手法を大きくエキスパートベースとモデルベースに区分し、モデルベースは更にボトムアップモデル、トップダウンモデル、ハイブリッドモデルに分類した。そのうちエキスパートベース、ボトムアップモデルおよびトップダウンモデルについて紹介する。

エキスパートベースは専門家が試算した個々の GHG 削減技術に係る削減費用を用いて限界削減費用曲線を作成する。ボトムアップモデルには様々なモデルがあるが、TIMER モデル、MARKAL モデル、TIMES モデルを紹介する。例えば、TIMER モデルは段階的に課される炭素税を限界削減費用とみなして GHG 削減量との関係を用いて限界削減費用曲線を導出する。また、トップダウンモデルはマクロ経済に主眼を置き、生産額や効用と GHG 排出量の関係などから限界削減費用曲線を導出する。トップダウンモデルでは、一般均衡理論を用いた CGE モデル（本稿では GREEN モデル、EPPA モデル、AIM/CGE モデルを紹介）と距離関数を用いた DDF モデルを紹介する。

本稿では、これらのモデルの特徴や使用例を紹介するとともに、推計手法（エキスパートベース、ボトムアップモデル、トップダウンモデル）ごとの長所や短所を挙げて比較を行う。

目次

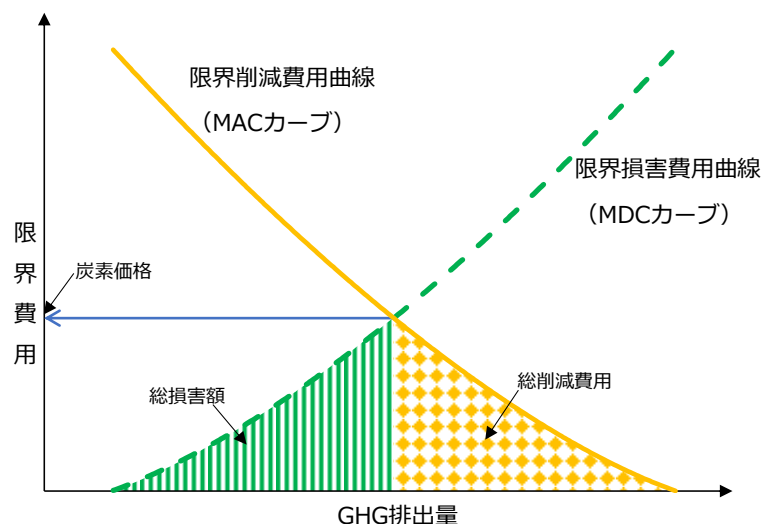
- はじめに
- 限界削減費用曲線推計手法の分類
- 推計手法と代表的なモデル
 - エキスパートベース
 - ボトムアップモデル
 - トップダウンモデル
- 推計手法の比較
- まとめ

1. はじめに

日本は2050年までに温室効果ガス（以下、GHG）の排出を全体でゼロにするカーボンニュートラルの実現を目指すことを宣言しているが、その達成には巨額のGHG削減費用が必要であり、炭素税や排出量取引の導入により排出企業にその負担を求めることが不可欠である。ノーベル経済学賞を受賞したW.ノードハウス氏もその著書「気候カジノ」でGHG排出という負の外部性を内部化する方法としてはその2つ以外に選択肢がないと指摘しており、2023年4月時点で73（前年比+5）の国・地域が炭素税または排出量取引を導入している¹。

経済学的には、炭素価格（炭素税や排出量取引の価格）の理論値は一般に限界削減費用曲線²と限界損害費用曲線³の交点として示される（図表1）。これは、各主体が経済合理性に基づき、総損害額と総削減費用⁴の合計額が最小になるよう行動することを前提とした場合、その合計額が最小となる点が2つの曲線の交点だからである。

図表1 限界削減費用曲線と限界損害費用曲線による炭素価格の推計



（出所）仏政府「The Value for Climate Action A shadow price of carbon for evaluation of investments and public policies」等より日興リサーチセンター作成

ただし、現実の国や企業レベルの気候変動対策では、パリ協定等で採択された目標に応じて、具体的な排出量（または排出削減量）の目標値を設定することが多い。このように具体的な排出量の目標値が決まっている場合の炭素価格の理論値は限界削減費用曲線と削減目標値の交点として示される

¹ 世界銀行「State and Trends of Carbon Pricing 2023」。

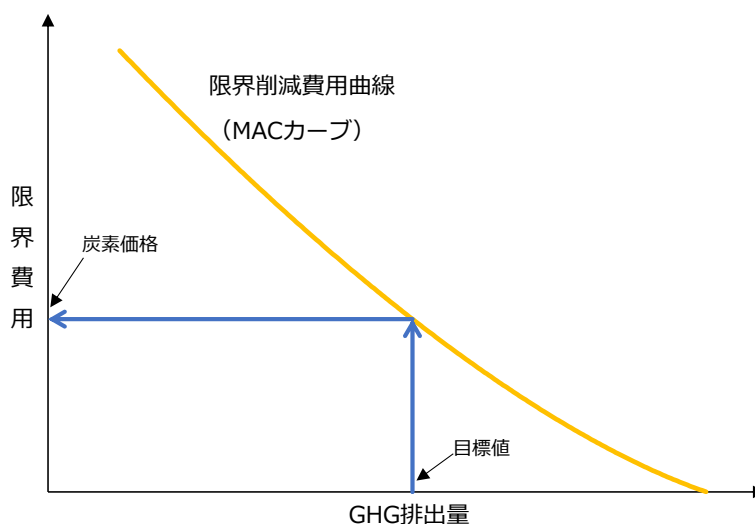
² 企業は削減費用が小さいものから削減していくため、排出量が減少（削減量が増加）するに従って、追加的な削減費用（限界削減費用）は増加していく。

³ 排出量が増加するに従って、気候変動による追加的な被害（限界損害費用）は大きくなる。

⁴ 交点において左側の限界損害費用曲線より下側部分の面積が総損害額、右側の限界削減費用曲線より下側部分の面積が総削減費用に相当。

(図表 2)⁵。こうしたことから、限界削減費用曲線は国や企業が排出削減目標を達成するために必要な排出削減費用の見積もり、政府が排出企業に対して排出削減を促すための炭素税や排出量取引の政策などにおける検討材料、企業が排出削減を事業における投資などの意思決定に反映させるためのインターナルカーボンプライシング (ICP) など幅広く利用することができる (2 つの推計手法の比較や使用例は Appendix)。一方で限界削減費用曲線の推計には多くの手法があり、推計結果はその手法によって大きく異なるため、推計結果を利用する際には各手法の特徴や前提条件、適した用途などを把握しておく必要がある。そこで、本稿では、限界削減費用曲線について、代表的な推計手法を分類・紹介し、分類ごとの特徴を比較する。

図表 2 限界削減費用曲線による炭素価格の推計



(出所) 仏政府“The Value for Climate Action A shadow price of carbon for evaluation of investments and public policies”等より日興リサーチセンター作成

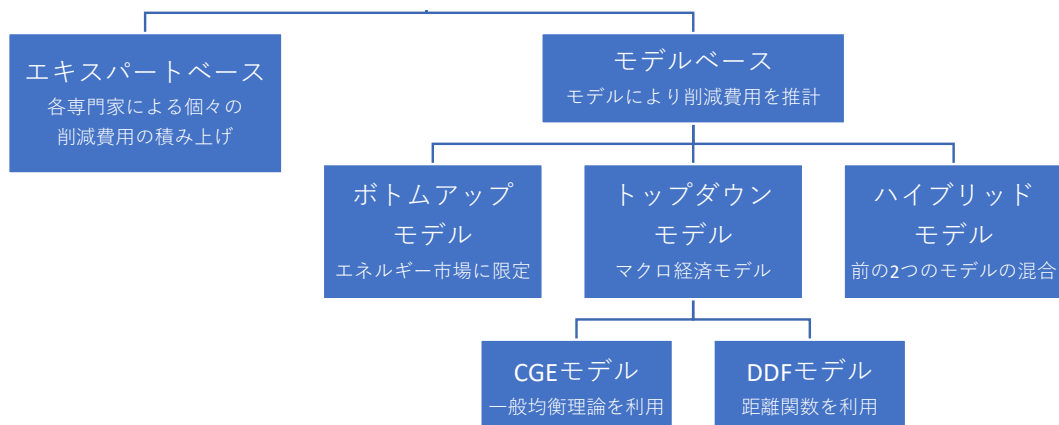
2. 限界削減費用曲線推計手法の分類

限界削減費用曲線の推計手法は、様々な分野の専門家や実務者が試算した削減費用を直接用いるエキスパートベースと削減費用をモデルによって推計するモデルベースに分けることができる。モデルベースは更に、ボトムアップモデル、トップダウンモデル、ハイブリッドモデル⁶の 3 つに分けられる。そして、トップダウンモデルは、応用一般均衡理論を用いた CGE モデルと、距離関数を用いた DDF モデルの 2 つが代表的なモデルであり、本稿ではこの 2 つを紹介する (図表 3)。

⁵ 炭素税を例に考えてみたい。限界削減費用曲線において、炭素税を「横軸の排出量 (または削減量) 目標値に対応する縦軸の限界削減費用の値」に設定することで、排出量目標値が達成されることになる。なぜならば、仮に炭素税をこの値より高く設定した場合、経済合理的な企業は負担の小さい限界削減費用を支払って排出削減を実施する (= 排出量目標値を超えて排出削減が行われる) 一方、炭素税をこの値より低く設定した場合、企業は排出削減をせずに、排出した分だけ炭素税を支払う方が負担は小さくなる (= 排出削減が行われず排出量目標値は達成できない) からである。

⁶ ボトムアップモデルとトップダウンモデルの混合モデル。

図表3 限界削減費用曲線の推計手法の分類図



(出所) 日興リサーチセンター作成

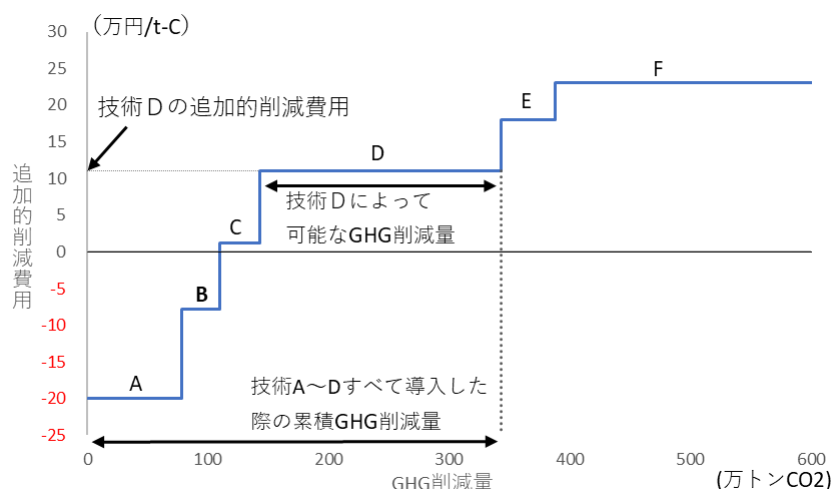
Misonel et al.[2022]は、1995~2021年に公表された限界削減費用曲線に関する分類可能な98の文献を調べた結果、22%がエキスパートベース、31%がポトムアップモデル、32%がトップダウンモデル（そのうち23%がDDFモデル、8%がCGEモデル）、6%がハイブリッドモデル、9%が限界削減費用曲線に関する理論研究だったと報告している。

3. 推計手法と代表的なモデル

3.1 エキスパートベース

エキスパートベースでは、各専門家が試算した個々のGHG削減技術（対策）に係る追加的削減費用を用いて、限界削減費用曲線を作成する。具体的には、追加的削減費用の低い削減技術から実施される想定のもと、その技術によって削減可能なGHG排出量と追加的削減費用の関係を連続的に表した曲線が限界削減費用曲線となる（図表4）。

図表 4 エキスパートベースの作成イメージ



(出所) 日興リサーチセンター作成

追加的費用については、排出量を削減する新規技術とそれに代替される既存技術の設備投資費用（投資回収期間を考慮）・維持管理費用等の差額に加え、省エネによって軽減されるエネルギー費用、化石燃料の利用減少に伴う大気汚染防止や都市緑化などの副次的効果等がある場合はそれを差し引いて算出される。なお、費用には実績値だけでなく、予測値を用いることも可能である。副次的効果は推計が困難なためにその効果等を加味することができない場合もある。

エキスパートベースは限界削減費用曲線の基礎的な作成方法であり、各国で使用されているほか、日本では環境省[2001]、環境省[2012]や国立環境研究所[2009]などが利用している。また、企業がICPの推計に応用している事例もある。

3.2 ボトムアップモデル

ボトムアップモデルはある特定の分野（主にエネルギー分野であり、以下、エネルギーモデルについて記述）のみを対象としたモデルであり、個々のエネルギー技術の変化を記述することができる。代表的なモデルとしては、TIMER モデルや MARKAL モデル、TIMES モデルなどがあり、本稿ではこの3つのモデルを紹介する。

TIMER モデルは、オランダ環境評価庁（PBL）によって開発された IMAGE モデルに組み入れられている。IMAGE モデルは経済活動と自然環境の相互作用に関する包括的な統合モデルであり、TIMER モデルはその枠組みの中で、各エネルギーの需要と供給における長期的な傾向を分析するために使用されている。限界削減費用曲線は、モデルにおいて、段階的に課される炭素税（インプット）を限界削減費用とみなして縦軸に、炭素税を課した際に削減される排出量（アウトプット）を横軸にプロットしたものである。図表 5 には、炭素税が課された際の低炭素排出への移行について、代表的な 2 つの経路と推計方法をまとめた。1 つ目は「高炭素排出エネルギーの市場シェア低下」である。炭素税を課

した際に、高炭素排出エネルギーの生産コストが上昇して、低炭素排出または排出しないエネルギーに需要がシフトする。2 つ目は「エネルギー需要の減少」である。炭素税が導入されると、エネルギー価格の上昇により、省エネルギーに対する投資が拡大してエネルギー効率が改善するため、エネルギー全体の需要が減少する。

図表 5 炭素税を課した際の低炭素排出への代表的な移行経路と推計方法

移行経路	推計方法
高炭素排出エネルギーの市場シェア低下	各エネルギーの生産コストを反映させた多項ロジットモデルによって市場シェアを推計。
エネルギー需要の減少	各セクターの経済活動指標やセクター内の構造変化、エネルギー効率の向上に関する指標等を反映したモデル式によって、エネルギーの需要を推計。

(出所) 日興リサーチセンター作成

MARKAL モデルは、IEA（国際エネルギー機関）のプロジェクト ETSAP（Energy Technology Systems Analysis Program）のもとで開発が進められたモデルであり、GHG 排出量の制約下において総コスト（各エネルギー分野の設備費や燃料費、メンテナンス費など）が最小となるエネルギーシステムを設計するためのモデルである。モデルにおいて、GHG 排出量の制約を厳しくする（排出削減量を増やす）ごとに総コストが増加する関係を利用し、各排出削減量に対応した総コストを連続的にプロットすることで、限界削減費用曲線が作成される。MARKAL モデルでは、電気などの一部のエネルギーの生産において、季節性や昼夜区分を考慮できる。これは風力発電や流れ込み式水力発電などにおいて、時期によって変動する生産コスト（単位生産量当たりのコストであり、生産量によっても変動）に大きな影響を与える。MARKAL モデルの利用は 37 개국、77 機関となっており、利用先の多くは発展途上国である⁷。

TIMES モデルは MARKAL モデルの後継であり、ETSAP は、2008 年より新規の利用者に対して TIMES モデルを推奨している（MARKAL モデルもサポートは継続）。TIMES モデルが MARKAL モデルと異なる点は、期間を自由に設定できる点（MARKAL モデルは期間固定）や、季節性や昼夜、休・平日区分を全てのエネルギー生産に適用できる点（MARKAL モデルは一部のエネルギーのみで休・平日は考慮不可）などがある。

3.3 トップダウンモデル

トップダウンモデルはマクロ経済の分析に主眼を置いたモデルであり、限界削減費用は、消費や価

⁷ <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/markal>

格、人口などの集計されたデータを用いて、生産量や効用と GHG 排出量の関係などから推計される。本稿では、一般均衡理論を用いた CGE モデルと距離関数を用いた DDF モデルの 2 つのモデルを紹介する。

(1) CGE (Computable General Equilibrium) モデル

CGE モデルは、一般均衡理論の骨組みに実体経済のデータを加えたシミュレーション手法であり、複数の財・産業など経済指標間の相互依存関係⁸を方程式として表し、その関係を分析するモデルである。特徴は、財の消費者（家計）は予算制約等のもとで効用を最大化するように消費（需要）を決定し、財の生産者（企業）は技術的制約のもとで利潤を最大化するように生産（供給）を決定するという一般均衡理論に加え、政策分析を行う目的のために、環境制約（炭素排出量の制約等）などの通常の一般均衡理論にはない制約条件を課す。そして、全ての財の市場で需要と供給が一致するように価格が決定されるというメカニズムに基づいている。環境制約として、例えば、炭素排出量の制約を考えると、制約がない場合と比較して炭素を排出する財・サービスの生産や消費は縮小する一方、脱炭素設備への投資が増えれば、その資本財の生産が増え（経済活動も変化）、所得も増加するであろう。CGE モデルはこうした経済指標間の相互作用が考慮されている点が長所である。CGE モデルにおける限界削減費用は、炭素排出量の制約に伴う利潤や効用の減少分であり、理論上、制約のために排出量に課される税や排出権の価格に等しくなる。

CGE モデルはパラメータや制約条件、モデルの関数式などが各モデルによって様々であるが、本稿ではその代表的なモデルとして、GREEN モデルと EPPA モデル、AIM/CGE モデルを紹介する。これらのモデルは、新しい発電技術の考慮や電源区分の有無などに違いがあり、それによって GHG 排出量や限界削減費用の推計結果も大きく異なると考えられる。

GREEN モデルは、OECD が排出抑制対策による影響などを評価するために開発した CGE モデルである。GREEN モデルでは世界経済を 12 の地域に分割、7 つのバックストップテクノロジー（代替エネルギー）⁹を含む 15 の業種区分がある。GREEN モデルは OECD の 2020 年までの環境見通し（OECD Environmental Outlook to 2020）において活用されたのち、ENV-Linkages モデルに継承しており、その後のバージョンは OECD の環境局（Environment Directorate）で使われているほか、世界銀行による研究などでも利用されている（OECD[2008]）。

EPPA モデルは、マサチューセッツ工科大学（MIT）のジョイントプログラム（Joint Program on

⁸ 相互依存関係の例として、例えば、家計と企業において、家計から企業へと労働が提供され、その対価に家計は企業から資本を受け取る。また、企業は生産を行い、それを家計へ提供することで、その対価に企業は家計から資本を受け取る、という事が考えられる。

⁹ バックストップテクノロジーは従来型燃料の代替という意味で使用されている。オイルサンド（あるいはタールサンド）のような GHG を排出するものと、バイオマスや太陽光等のような GHG を排出しないものがある。

the Science and Policy of Global Change) が開発した CGE モデルである。EPPA モデルは GREEN モデルから派生したモデルであり、対象とする地域数は GREEN モデルの 12 から 18 に拡大している。GREEN モデルと比較して、EPPA モデルは電源の違いや CCS (CO₂を回収して貯留する技術) を組み合わせた発電手法を考慮している。EPPA モデルはホームページにてプログラムのダウンロードを申請することが可能¹⁰であるため、多くの研究・分析に利用されている。

AIM/CGE モデルは、国立環境研究所を中心に国内外の研究機関が共同で開発した、世界 (AIM/CGE[Global]) または日本 (AIM/CGE[Japan]) を対象とした CGE モデルである。AIM/CGE[Global]は、世界を 24 地域に分割し、セクターは 21 個を想定している。EPPA モデルとの違いとしては、電源で廃棄物や地熱を考慮している点などがある。また、AIM/CGE と技術選択 (需要を所与として総コストが最小となる技術を選択する) モデルである AIM/Enduse や簡易気候モデル AIM/Climate などとの統合によって、個別の気候シナリオに対応した分析が可能である。AIM/CGE[Global]は、IPCC において気候モデルの入力となる RCP (代表的濃度経路シナリオ) の推計に用いられ、AIM/CGE[Global]の対象地域別に排出量を計算した (国立環境研究所[2010])。また、AIM/CGE[Japan]は、カーボンプライシングの定量化 (国立環境研究所[2021]) などにも使用されている。

その他、均衡理論が用いられている代表的なモデルとしては、NGFS (気候変動リスク等に係る金融当局ネットワーク) シナリオで利用されている REMIND-MAgPIE や MESSAGEix-GLOBIOM などがある。当該モデルにおけるマクロ経済の構造は、一般均衡モデルで表現されており¹¹、REMIND-MAgPIE はドイツのポツダム気候影響研究所 (Potsdam Institute for Climate Impact Research) が開発した統合評価モデルであり、CGE モデルとエネルギーモデルを組み合わせた REMIND をはじめ、気候モデルである MAGICC など 4 つの主要なモデルで構成される。このモデルでは気候モデルによる推計結果 (気候変動による経済的な損失を算出するための気温上昇値等) が REMIND にフィードバックされる。MESSAGEix-GLOBIOM はオーストリアの国際応用システム分析研究所 (International Institute for Applied Systems Analysis) が開発した統合評価モデルであり、エネルギーモデルである MESSAGE を、MAGICC などの異なるモデルにリンクさせている。REMIND-MAgPIE との違いは、MESSAGEix-GLOBIOM では気候モデルによる推計結果はフィードバックされない点である。また、近年のバージョン¹²では、どちらのモデルも世界を 12 地域に分割しているものの、REMIND-MAgPIE は日本を単独の地域として取り扱っているのに対し、MESSAGEix-GLOBIOM では日本をオーストラリアやニュージーランドと同じ地域に区分している点でも違いがある。その他、代替燃料や技術オプションの種類、技

¹⁰ <https://globalchange.mit.edu/research/research-tools/human-system-model/download>

¹¹ REMIND-MAgPIE は経済の表現などの特徴が異なる REMIND と MAgPIE が連結されている。経済の表現では REMIND が一般均衡であるのに対し、MAgPIE は農業部門に関する部分均衡モデルである。

¹² NGFS[2023], “NGFS Climate Scenarios Technical Documentation”

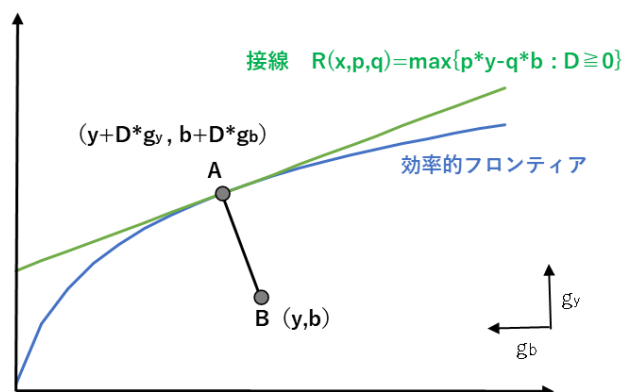
術変化の扱いなどにも違いがある。

(2) DDF (Directional Distance Function) モデル

DDF モデルは複数の組織の相対的な効率性を測定する手法の一つであり、気候変動に関わらず様々な問題に活用されている。DDF モデルには複数のモデルが存在するものの、基本的な構造に大きな違いはなく、本稿では、気候変動問題に対する応用として限界削減費用の推計方法を紹介する。なお、本稿では DDF モデルの詳細な計算過程は省略する¹³。

DDF モデルは「望ましい出力（アウトプット）の増加と、望ましくない出力の減少の両方を追求する。そして望ましい出力がこれ以上増加せず、かつ望ましくない出力がこれ以上減少しない点が、効率的フロンティア上の点である。」というコンセプトのもと開発された (Wei[2020])。

図表 6 DDF モデルの概念図



(出所) 日興リサーチセンター作成

DDF モデルの概念図を図表 6 に示す。ある企業の生産量（望ましい出力）が y 、GHG 排出量（望ましくない出力）が b であり、これを点 B (y, b) とする。この時、GHG 排出量が b より小さい b' で同じ生産量 y を達成できる点がこの範囲に存在すれば、その観測点は効率的ではない。

DDF モデルでは、生産と GHG 排出量の動く方向を定めるために方向ベクトル (g_y, g_b) を導入する。これは研究や政策の方向性に応じて決められる。ここで、現状の観測点 B から効率的フロンティア上の点 A までの距離を D で定義すると、 D は効率的フロンティア上まで現状の生産量、GHG 排出量をどのくらい増加、減少できるのかという度合いを意味する。この値が大きいほど、非効率性が大きく、すなわち生産量を増加させ、GHG 排出量を減少させることのできる余地が大きいことを意味する。

次に、生産物の価格 p と GHG 排出量の価格（以下、炭素価格） q を導入し、企業の利潤を $p \cdot y - q \cdot b$ とする。これを最大化する関数 R は生産者である企業が得る最大の利潤であり、効率的フロンティアの接線に相当する。DDF モデルでは、効率的フロンティアまでの距離（非効率性）である D と、

¹³ 詳細な計算過程は Wei[2020]や地球環境戦略研究機関[2012]などを参照されたい。

この企業の最大の利潤を表す R の関係式を導出し、炭素価格 q について解くことで、炭素価格 q が生産額に対する GHG 排出量の相対価格で表すことができる（下記式）。

$$q = -\frac{\partial D/\partial b}{\partial D/\partial y} \cdot p \geq 0$$

q : 炭素価格

b : GHG 排出量

y : 生産量

D : 効率的フロンティアまでの距離（非効率性）

p : 生産物の価格

この導出で得た炭素価格 q は、「GHG 排出量を減らした際に失われる生産額」を示しており、限界削減費用に相当する。具体的に確認すると、企業が生産額（①）を増やすと GHG 排出量が 1 単位増えるとした場合、排出量を一定に保つためには、GHG 排出量を 1 単位減らすのにかかる費用である限界削減費用（②）が必要なため、企業の利潤は①－②となる。ここで、①>②の時は、企業は生産を増やし②を支払う方が利潤は増えるため、生産を増やす。反対に①<②の時は、企業は生産を縮小させるだろう。従って、企業が経済合理性に基づいて行動する際、効率的フロンティア上では①=②となる。このように、限界削減費用は GHG 排出量の削減のために、（生産を行わないため生じる）失われる生産額を反映している。

DDF モデルは、地球環境戦略研究機関（IGES）において企業ごとの炭素価格や、効率的な経営を行った際の排出削減量および売上高増加分の推計に用いられている（地球環境戦略研究機関[2012]）ほか、インド準備銀行（Reserve Bank of India）では環境外部性を考慮したうえでの TFP（全要素生産性）成長率を推定する際、DDF を通じてフロンティアと比較した効率性の測定をしている（Joshi et al.[2023]）。

4. 推計手法の比較

本章では、①エキスパートベース、②ボトムアップモデル、③トップダウンモデルの3つについて、それぞれの長所および短所¹⁴を挙げて比較を行う（図表 7）。

¹⁴ 近年、各手法の進歩により、本稿で述べる各分類の区別は曖昧になっていると指摘されている。

図表 7 推計手法ごとの特徴

	①エキスパートベース	②ボトムアップモデル	③トップダウンモデル
限界削減費用曲線の推計方法	各専門家が試算した個々の削減技術（手段）の費用を用いる	エネルギー市場のモデルで、各エネルギーの生産コスト等から推計	マクロ経済の分析に主眼を置くモデルで、生産量や効用とGHG排出量の関係などから推計
削減技術の具体的な情報	◎	○	
技術革新		○	
経済指標間の相互作用			◎

（注）各項目について、考慮または反映の可否、情報へのアクセスの良し悪しで判断。

（出所）日興リサーチセンター作成

①エキスパートベースは GHG 削減目標達成のための具体的な削減技術（対策）が明確で詳細もわかるため、政策プランを立てやすく、改良のための対策や研究もしやすい。また、削減目標に合わせて手段の追加や削除が容易であるほか、マクロ市場に反映されない技術も考慮することが可能である。一方、短所としては副次的効果等（3.1 節参照）を算定することができずそれを費用から差し引いていないケースがある点や、特定の産業や技術に対する補助金、税金で費用や削減量の変動する点が挙げられる。このほか、投資回収期間の前提によって設備投資費用が異なる点、各専門家によって算出基準が異なる可能性や、積み上げる削減技術に限界がある点なども短所に挙げられる。

②ボトムアップモデルは主にエネルギー分野を対象としたモデルで、しばしばトップダウンモデルと対比されるが、トップダウンモデルと比較して、各エネルギー技術に関する詳細な情報を持つ点が長所に挙げられる。また、ボトムアップモデルは技術革新による再生可能エネルギーの生産コスト減少などを考慮することができる。一方で、エネルギー関連に限定されており、それ以外の削減手段が考慮されていない点やマクロ経済のフィードバックを考慮できない点などが短所に挙げられる。

③トップダウンモデルの長所は経済指標間の相互作用が考慮されている点である。例えば、エキスパートベースやボトムアップモデルでは投資はコストとして計上されてしまうが、トップダウンモデルであれば、投資は資本財を供給する企業の生産拡大、更にはその労働者等への分配や消費拡大を通じて GDP を押し上げるため（投資額＋乗数効果）、便益としてコストを相殺する。一方、短所は限界削減費用曲線のもととなる削減手段に関して詳細な情報がない点などが挙げられる。

5. まとめ

GHG 排出という負の外部性を内部化する方法としては、炭素税と排出量取引の 2 つがあり、その価格の理論値算出には、一般に限界削減費用曲線が用いられることが多い。しかし、限界削減費用曲線

の推計結果は手法によって大きく異なることから、推計結果の利用の際にはその手法の特徴や前提条件などを把握しておく必要がある。そこで本稿では、限界削減費用曲線について、代表的な推計手法を分類・紹介した。

本稿における推計手法は大きくエキスパートベースとモデルベースに区分しており、モデルベースは更にボトムアップモデル、トップダウンモデル、ハイブリッドモデルに分けた。このうち、エキスパートベースと、モデルベースのうちボトムアップモデルおよびトップダウンモデルについて紹介した。

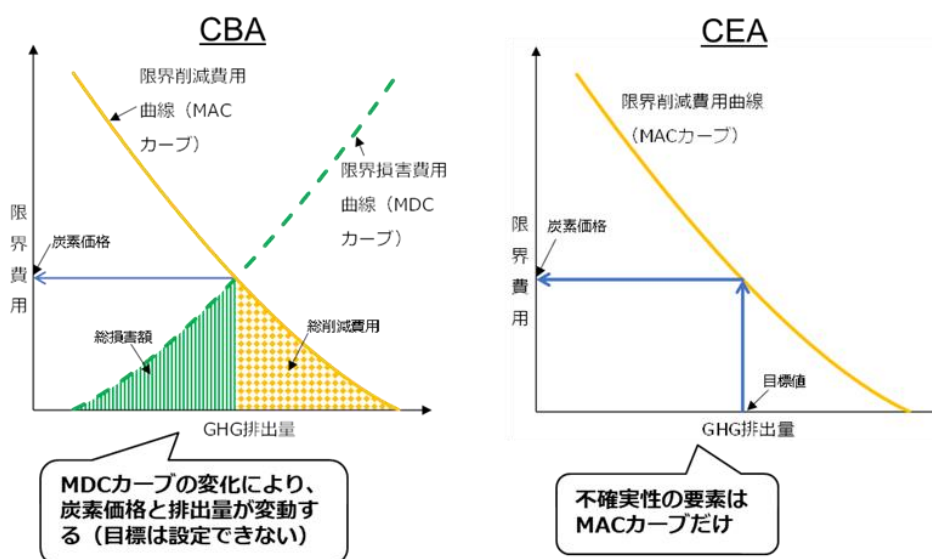
エキスパートベースは専門家が試算した個々の GHG 削減技術に係る削減費用を用いて限界削減費用曲線を作成する。ボトムアップモデルはエネルギー分野を対象に GHG の制約とコスト・排出量の間を用いて限界削減費用曲線を作成し、トップダウンモデルはマクロ経済に主眼を置き、生産額や効用と GHG 排出量の関係などから限界削減費用曲線を導出している。

最後に、それぞれの特徴をまとめると、エキスパートベースは、個々の削減技術の特性を重視して削減費用や削減量が評価されており、各技術を整理して可視化できるため分かりやすい。そのため、具体的な導入技術を選定する際などには、エキスパートベースによる限界削減費用曲線が理解しやすいだろう。ボトムアップモデルは、主にエネルギー分野を対象としたモデルであり、個々のエネルギー技術の変化を記述できる上に、トップダウンモデルと比較して、各エネルギー技術に関する詳細な情報を持っている。トップダウンモデルは、マクロ経済の分析に主眼を置くモデルであり、経済指標間の相互作用を考慮できる。そのため、エキスパートベースやボトムアップモデルでは考慮することができない、投資のプラスの面を考慮することが可能となっている。なお、紹介した推計手法のうち、エキスパートベースと、トップダウンモデルである DDF モデルは、企業の炭素価格の推計も可能である。

【Appendix】CBA と CEA との比較

本稿の第1章では、炭素価格の理論値が限界削減費用曲線と限界損害費用曲線の交点であることや、削減目標値が決まっている際にはそれと限界削減費用曲線との交点が炭素価格となることを説明した。炭素価格の推計方法として、前者のアプローチはCBA¹⁵（Cost Benefit Analysis）、後者のアプローチはCEA¹⁶（Cost Effectiveness Analysis）と呼ばれている¹⁷。ここではCBAとCEAを比較し、違いや採用状況を確認する。

図表8 CBAとCEAの炭素価格算出手法の違い



(出所) 日興リサーチセンター作成

両アプローチとも限界削減費用曲線は共通しているが、CBAは限界損害費用曲線も算出するため、その分CEAに比べてより広範囲の分野を扱う。加えて、不確実性の高い変数として指摘されている気温上昇値や物理的被害額などのデータ¹⁸を扱っていることから、より不確実性の大きいモデルであるといえよう。また、CBAでは算出された炭素価格はGHG削減目標値と関係なく決定されるのに対して、CEAはGHG削減目標値との整合性が高い。

そのため、CO₂削減量の目標値を既に設定している政府が導入する炭素税や、政策の影響を受けやすい排出量取引の適正価格の推計等では、CEAが有用といえよう。実際に、イギリス政府やフランス政府、アイルランド政府などでは、CEAとCBAを比較したうえで、不確実性や、GHG削減目標値との整合性の観点から、CEAを採用している。

¹⁵ このほか、SCC (social cost of carbon) アプローチやMDC (marginal damages cost) アプローチなどとも呼ばれる。

¹⁶ このほか、MAC (marginal abatement cost) アプローチなどとも呼ばれる。

¹⁷ ここでは、IPCC (気候変動に関する政府間パネル) の「1.5°C特別報告書」や、ニューヨーク州政府 (New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA)) の資料 (Estimating the Value of Carbon Two Approaches) 等で紹介されているアプローチについて論じている。

¹⁸ CBAで用いている気候感度 (CO₂濃度が倍増した際の長期的な地表の温度変化) や温暖化による物理的被害額などが不確実性の大きい変数として指摘されている。

参考文献

(エキスパートベース)

環境省[2001], 「中央環境審議会 地球環境部会 目標達成シナリオ小委員会 中間取りまとめ (詳細版)
_5.温暖化対策の費用評価」

https://www.env.go.jp/council/content/i_05/900422753.pdf

環境省[2012], 「中央環境審議会 地球環境部会 (第104回) 2013年以降の対策・施策に関する検討小委員会における議論を踏まえたエネルギー消費量等の見通しの仮試算(その2) (国立環境研究所 AIM プロジェクトチーム)」

<https://www.env.go.jp/council/06earth/y060-104.html>

国立環境研究所[2009], 「日本温室効果ガス排出量 2020年 25%削減目標達成に向けた AIM モデルによる分析結果 (中間報告)」

https://2050.nies.go.jp/report/file/20091119_report.pdf

(ボトムアップモデル)

PBL Netherlands Environmental Assessment Agency[2014], “Integrated Assessment of Global Environmental Change with IMAGE 3.0”

https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/PBL-2014-Integrated_Assessment_of_Global_Environmental_Change_with_IMAGE_30-735_1.pdf

PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, “TIMER 3.0 archive”

https://models.pbl.nl/image/images/b/bb/TIMER_3.0_archive.pdf

Vuuren, V. [2007], “TIMER MODEL DESCRIPTION”

Vries, B., D. Vuuren, M. Elzen, and M. Janssen[2001], “The Targets IMage Energy Regional (TIMER) Model Technical Documentation”

<https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/461502024.pdf>

Brink, C., A. Hof, and H. Vollebergh[2013], “Cost of greenhouse gas mitigation - comparison between TIMER and WorldScan”

<https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2013-working-paper-15-cost-of-greenhouse-gas-mitigation-comparison-between-timer-and-worldscan.pdf>

Vuuren, D., and H. Vries[2000], “Mitigation scenarios in a world oriented at sustainable development the role of technology, efficiency and timing”

<https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/490200001.pdf>

Elzen, M. [2006], “Meeting the EU 2C climate target Global and region”

https://www.researchgate.net/publication/232105777_Meeting_the_EU_2C_climate_target_Global_and_regional_emission_implications

MARKAL - IEA-ETSAP (ホームページ)

<https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/markal>

Loulou, R., G. Goldstein, and K. Noble[2004], "Documentation for the MARKAL Family of Models"

https://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/mitigation/Module_5/Module_5_1/b_tools/MARKAL/MARKAL_Manual.pdf

Loulou, R., G. Goldstein, A. Kanudia, A. Lettila, and U. Remme[2016], "Documentation for the TIMES Model PART I"

https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I_July-2016.pdf

(DDF モデル)

藤井、馬奈木、金子[2011], 「CO₂ 排出量を考慮した生産性の評価—国内製造業 10 業種の比較研究—」

<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00571/2011/39-0099.pdf>

地球環境戦略研究機関[2012], 「日本の国際競争力 世界 1000 社のカーボンコスト」

https://www.iges.or.jp/jp/publication_documents/pub/discussionpaper/jp/2564/IntlCompetitiveness.pdf

Wei, C.[2020], "CO₂ marginal abatement cost and determinants: an empirical analysis of sample cities in China"

https://www.researchgate.net/publication/347885625_CO2_marginal_abatement_cost_and_determinants_an_empirical_analysis_of_sample_cities_in_China

Joshi, Shruti, Nath, Siddhartha, Ranjan, and Abhishek[2023], "Green Total Factor Productivity for India: Some Recent Estimates and Policy Directions"

<https://mpr.ub.uni-muenchen.de/117717/1/Green%20TFP%20India-Joshi%2C%20Nath%20and%20Ranjan-MPRA.pdf>

Boyd, G., J. Molburg, and R. Prince[1996], "Alternative methods of marginal abatement cost estimation: Non- parametric distance functions"

<https://www.osti.gov/servlets/purl/449842>

Marklund, P. [2003], "Analyzing Interplant Marginal Abatement Cost Differences :A Directional Output Distance Function Approach"

<https://core.ac.uk/download/pdf/6993978.pdf>

Xiao, B., D. Niu, H. Wu, and H. Wang[2017], "Marginal Abatement Cost of CO₂ in China Based on Directional Distance Function: An Industry Perspective"

<https://www.mdpi.com/2071-1050/9/1/138>

Zhao, J. [2017], “The Carbon Emissions Efficiency and Marginal Abatement Cost in Urban of China: Non-Parametric Directional Distance Function Method”

https://www.researchgate.net/publication/314262287_The_Carbon_Emissions_Efficiency_and_Marginal_Abatement_Cost_in_Urban_of_China_Non-Parametric_Directional_Distance_Function_Method

(CGE モデル)

環境省[2012], 「2013 年以降の対策・施策に関する報告書 別冊 経済モデル分析について」

<https://www.env.go.jp/earth/report/h24-03/app02.pdf>

国立環境研究所[2021], 「AIM/CGE [Japan]を用いたカーボンプライシングの定量化」

https://www-iam.nies.go.jp/aim/projects_activities/prov/2021_carbon_tax/20210621_masui.pdf

国立環境研究所[2010], 「統合評価モデルを用いた気候変動統合シナリオの作成及び気候変動政策分析」

https://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/kadai/syuryo_report/pdf/A0808-1.pdf

国立環境研究所[2011], 「AIM 経済モデルによるエネルギー供給の構成」

<https://www.aec.go.jp/jicst/NC/tyoki/sakutei/siryu/sakutei3/siryu2-2.pdf>

国立環境研究所[2019], 「環境儀」

<https://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/74/74.pdf>

国土交通省[2002], 「政策効果の分析システムに関する研究」

<https://www.mlit.go.jp/pri/houkoku/gaiyou/pdf/kkk13.pdf>

電力中央研究所[2022], 「気候変動関連リスクに係るシナリオ分析に関する調査」

<https://www.fsa.go.jp/common/about/research/20220412/01.pdf>

武田, 川崎, 伴[2007], 「温暖化対策分析用 CGE モデルへの新技術・新エネルギーの導入方法」

https://www.esri.cao.go.jp/jp/esri/archive/new_wp/new_wp010/new_wp005.pdf

増井[2021], 「AIM を用いた炭素税による CO2 排出削減効果の試算」

https://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/stage2/pbfile/m000371/pbf20210927091314.pdf

MIT[2005], “The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: Version 4”

https://globalchange.mit.edu/sites/default/files/MITJPSPGC_Rpt125.pdf

OECD[1994a], “The OECD Green Model : An Updated Overview”

https://www.oecd-ilibrary.org/development/the-oecd-green-model_272425468524

OECD[1994b], “GREEN : THE REFERENCE MANUAL”

<https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/054442860076.pdf?expires=1709025791&id=id&accname=guest&c>

[checksum=1E5235F03EC0B500D2A9787F7A7E8422](#)

OECD[2008], “Background report to the OECD Environmental Outlook to 2030”

https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/500113001_0.pdf

Chateau, J., R. Dellink, and E. Lanzi[2014], “An Overview of the OECD ENV-Linkages Model”

<https://ledsgp.org/app/uploads/2015/09/an-overview-of-the-OECD-ENV-Linkages-model.pdf>

Klepper, G., and S. Peterson[2004], “Marginal Abatement Cost Curves in General Equilibrium :The Influence of World Energy Prices”

<https://www.econstor.eu/bitstream/10419/3418/1/13604.pdf>

Martins, J., and P. Sturm[1998], “EFFICIENCY AND DISTRIBUTION IN COMPUTABLE MODELS OF CARBON EMISSION ABATEMENT;ECONOMICS DEPARTMENT WORKING PAPERS NO. 192”

<https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/840432141271.pdf?expires=1677642670&id=id&accname=guest&checksum=69747ADFEA310634C37990D67FC2002D>

IPCC[2022], “IPCC_AR6_WGIII_FullReport”

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf

U.S. Environmental Protection Agency[2010], “Peer Review of ADAGE and IGEM”

https://archive.epa.gov/epa/production/files/2016-07/documents/final_peer_review_report_for_igem_and_adage.pdf

MIT – EPPA Model Structure (ホームページ)

<https://globalchange.mit.edu/research/research-tools/eppa>

Chen, Y., S. Paltsev, A. Gurgel, J. Reilly, and J. Morris[2022], “A Multisectoral Dynamic Model for Energy, Economic, and Climate Scenario Analysis”

https://www.scrip.org/pdf/lce_2022062915071335.pdf

NGFS[2022], “NGFS Climate Scenarios Database”

https://www.ngfs.net/sites/default/files/media/2022/11/21/technical_documentation_ngfs_scenarios_phase_3.pdf

NGFS[2023], “NGFS Climate Scenarios Technical Documentation”

https://www.ngfs.net/sites/default/files/media/2024/01/16/ngfs_scenarios_technical_documentation_phase_iv_2023.pdf

IIASA – MESSAGEix-GLOBIOM documentation (ホームページ)

<https://docs.messageix.org/projects/global/en/latest/#>

(その他、全般)

ウィリアム・ノードハウス[2015], 「気候カジノ」(日経 BP 社)

秋元[2021], 「2050年カーボンニュートラル実現のための技術とコスト」

<https://www.rite.or.jp/news/events/pdf/akimoto-ppt-kansaisympo2021.pdf>

World Bank[2023], “State and Trends of Carbon Pricing 2023”

<https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/58f2a409-9bb7-4ee6-899d-be47835c838f>

IPCC[2018], “1.5°C特別報告書 (SR15_Full_Report)”

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_HR.pdf

the New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA) and Resources for the Future (RFF)[2021], “Estimating the Value of Carbon Two Approaches”

https://www.dec.ny.gov/docs/administration_pdf/vocmemorev.pdf

Misonel, S., H. Hobbie, D. Möst, M. Prina, and W. Sparber[2022], “How to determine bottom-up model-derived marginal CO2 abatement cost curves with high temporal, sectoral, and techno-economic resolution?”

[https://www.econstor.eu/bitstream/10419/260472/1/Working_paper_Misonel_et_al.%20\(2022\).pdf](https://www.econstor.eu/bitstream/10419/260472/1/Working_paper_Misonel_et_al.%20(2022).pdf)

Svensson, M., and L. Hultkrantz[2017], “A Comparison of Cost-Benefit and Cost-Effectiveness Analysis in Practice: Divergent Policy Practices in Sweden”

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1176031/FULLTEXT02.pdf>

Bueb, J., B. Hir, B. Mesqui, A. Pommeret, and M. Combaud[2019], “The Value for Climate Action”

<https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-the-value-for-climate-action-final-web.pdf>

Kesicki, F. [2012], “Decomposing long-run carbon abatement cost curves - robustness and uncertainty”

<https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1338584/1/1338584.pdf>

Kesicki, F. [2011], “Marginal abatement cost curves for policy making – expert-based vs. model-derived curves”

https://www.homepages.ucl.ac.uk/~ucft347/Kesicki_MACC.pdf

UK Department of Energy and Climate Change[2009], “Carbon Valuation in UK Policy Appraisal: A Revised Approach”

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/245334/1_20090715105804_e____carbonvaluationinukpolicyappraisal.pdf

Kevany, L. (Ireland Department of Public Expenditure and Reform) [2019], “Valuing Greenhouse Gas Emissions in the Public Spending Code”

<https://assets.gov.ie/19749/77936e6f1cb144d68c1553c3f9ddb197.pdf>

(END)