

## DICE モデルによるカーボンプライシング

Short Review  
2021年10月投資工学研究所  
伊藤 央峻

## 1. はじめに

脱炭素の実現に向け、炭素に価格をつけて温室効果ガス排出を抑制するカーボンプライシングが注目されている。世界銀行によると、64の国・地域に炭素税または排出量取引によるカーボンプライシングが導入され、世界の排出量の21.5%がカバーされている<sup>1</sup>。この分野で先行するのは欧州だが、中国でも2021年7月に二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）の排出量取引が始まったほか、日本も2022年度の排出量取引市場の実証開始を目指している<sup>2</sup>。

炭素にはどれくらいの価格をつけるのが適正だと考えればよいだろうか。安過ぎると排出抑制効果が薄れるが、高くなるほど支払う側の負担は大きくなる。

本稿では、2018年にノーベル経済学賞を受賞した米イェール大学のウィリアム・ノードハウス教授が開発した「DICEモデル」<sup>3</sup>を使い炭素価格や気候変動について考察する。DICEモデルはマクロ経済学や地球物理学に基づく関係式で構成されている。より複雑なシミュレーションに用いられる手法と比べると小規模になるものの、炭素価格を計算でき、経済と気候変動との関係の理解にも役立つ。

第2章でDICEモデルの概要と計算内容について説明し、第3章でモデルの出力結果及び炭素価格について述べる。第4章では割引率を変更した場合の出力の変化を考察する。

## 2. DICEモデルの概要と計算内容

DICEモデルは統合評価モデル（Integrated Assessment model, IAM）と呼ばれるモデルの一種で、経済と気候という2つの領域のグローバルな相互作用を1つにまとめている。ノードハウス教授は1970年代にこのテーマに取り組み始め、1990年代半ばに世界で初めての統合評価モデルとして開発した。その後も改良が続けられており、最新版はDICE-2016R2モデル<sup>4</sup>となっている。

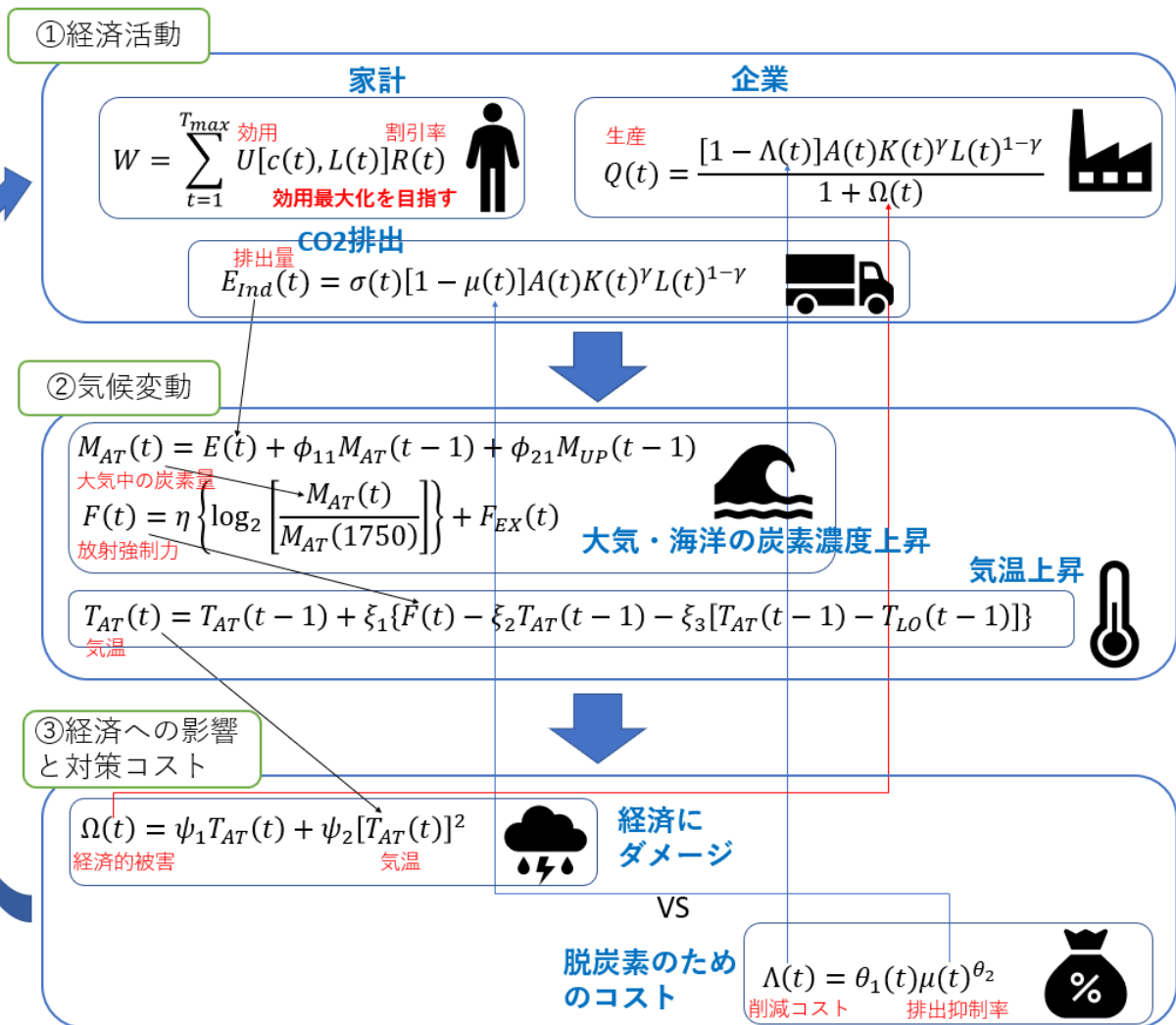
<sup>1</sup> World Bank[2021], “State and Trends of Carbon Pricing 2021,”  
<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620>

<sup>2</sup> 経済産業省[2021], “世界全体でのカーボンニュートラル実現のための経済的手法等のあり方に関する研究会 中間整理,”  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/carbon\\_neutral\\_jitsugen/20210825\\_report.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_neutral_jitsugen/20210825_report.html)  
なお、日本では東京都と埼玉県が独自の排出量取引制度を既に実施している。

<sup>3</sup> “Dynamic Integrated model of Climate and the Economy(気候と経済の動的統合モデル)”の略称

<sup>4</sup> ノードハウス教授のHP (<https://williamnordhaus.com/dicerice-models>) に公開されている。本稿におけるDICEモデルの計算には当該HPに公開されているGAMSのソースコード（DICE-2016R2-083017.gms）をもとに日興リサーチセンターが作成したPythonのプログラムを用いる。モデルに入力する各変数もそのソースコードにある値を使用する。

図表1 DICEモデルが想定する経済と気候変動の概念図



(出所) Nordhaus/Sztorc[2013]より日興リサーチセンター作成

DICEモデルで想定する経済と気候変動の関係を図表1<sup>5</sup>に示した。図表1の①経済活動の中で家計は長期間の効用（満足度）の合計 $W$ を最大化させるように消費し、企業は生産活動を行い、その過程でCO<sub>2</sub>が排出される。

経済活動によるCO<sub>2</sub>排出量 $E_{ind}(t)$ に経済活動以外の排出量を加えた $E(t)$ は、②気候変動において大気中の炭素量 $M_{AT}(t)$ を算出する要素として組み込まれている。大気中の炭素量 $M_{AT}(t)$ が増加すればCO<sub>2</sub>の温室効果により、地球のエネルギー収支を示す放射強制力 $F(t)$ が上昇し、これにより気温 $T_{AT}(t)$ が上昇する。

次に③経済への影響と対策コストをみると、地球温暖化の経済的被害率 $\Omega(t)$ は気温 $T_{AT}(t)$ の2次関数で表されている。温暖化が進むと豪雨や海面上昇といった被害が遡増すると想定している。経済的

<sup>5</sup> 図表に挿入した数式はモデルから一部を抜粋している。各変数の定義及びすべての数式等のモデルの詳細はDICEモデルのユーザーマニュアル（Nordhaus/Sztorc, 2013）等を参照されたい。

被害率 $\Omega(t)$ は生産の計算式に組み込まれており、気温が上昇するほど企業の生産活動に大きな負担を及ぼす。

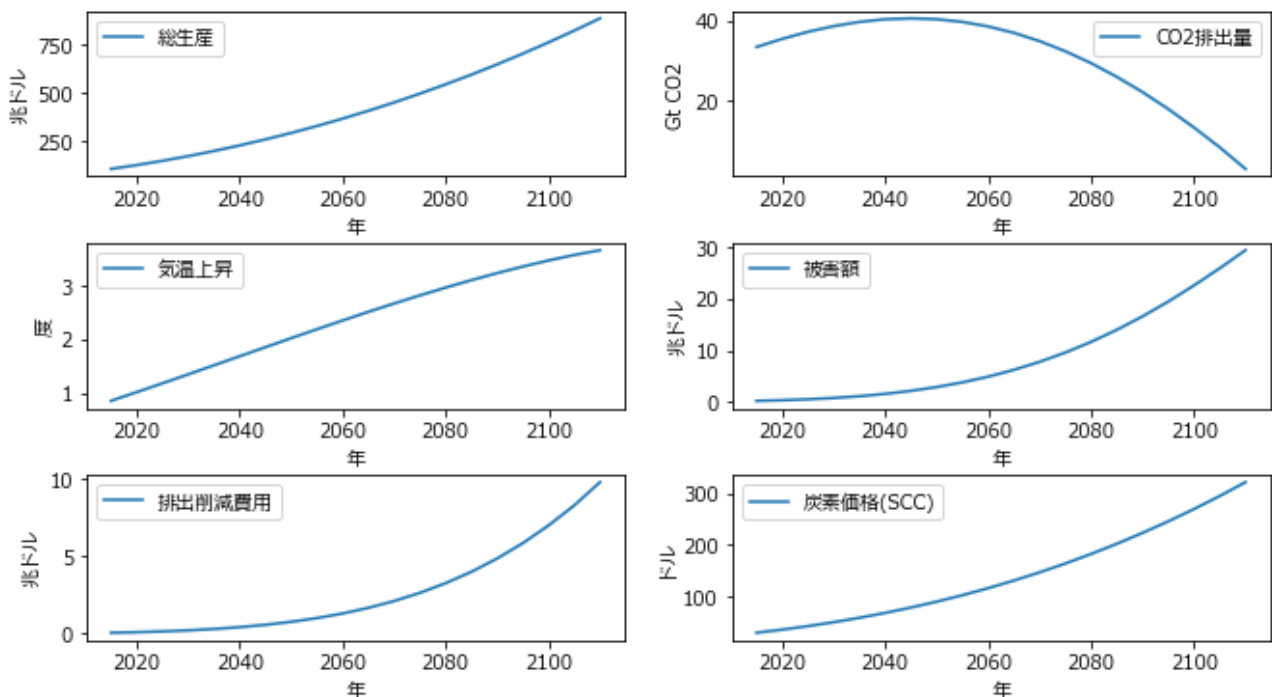
③では脱炭素のためのコストも計算される。CO<sub>2</sub>削減にかかる費用率 $\lambda(t)$ は目標とする排出抑制率 $\mu(t)$ の関数となっている。高い削減目標を掲げるほど生産額に占める負担も大きくなるが、その分CO<sub>2</sub>排出も抑えられ経済的被害率 $\Omega(t)$ が減るトレードオフの関係となっている。

以上のようなモデルで人々の満足度が最も大きくなるような配分を導出し、経済活動と気候変動の相互作用をシミュレーションできる。モデル内の変数の値は実際に観測されたデータや将来の予測値をもとに決めている。

### 3. DICE モデルの出力結果と炭素の社会的費用

DICE モデルの出力結果を図表 2 に示した。世界の総生産が増え続けていくなか、CO<sub>2</sub>排出量<sup>6</sup>は 2050 年頃にピークを迎え、その後は減少に転じ 2100 年を過ぎたあたりでネットゼロになる。一方、気温<sup>7</sup>は 2100 年にかけて一貫して上昇し、被害額や排出削減費用も次第に増えていく。

図表 2 DICE モデルの出力結果



(出所) DICE モデルより日興リサーチセンター作成

炭素価格は、追加的な炭素排出 1 単位が経済に与える影響の大きさを示す炭素の社会的費用 (Social

<sup>6</sup> CO<sub>2</sub>排出量は経済活動による排出量 $E_{ind}(t)$ に経済活動以外の排出量を加えた総排出量 $E(t)$

<sup>7</sup> 気温上昇は 1900 年を基準とした数値。

Cost of Carbon, SCC) という概念で算出できる (Nordhaus, 2017)。CO<sub>2</sub>排出量 $E(t)$ が追加的に1単位増えるごとにどれだけ消費 $C(t)$ が減少するかが計算される。式で示すと以下のような形になる。

$$SCC(t) = \frac{\frac{\partial W}{\partial E(t)}}{-\frac{\partial W}{\partial C(t)}} = -\frac{\partial C(t)}{\partial E(t)}$$

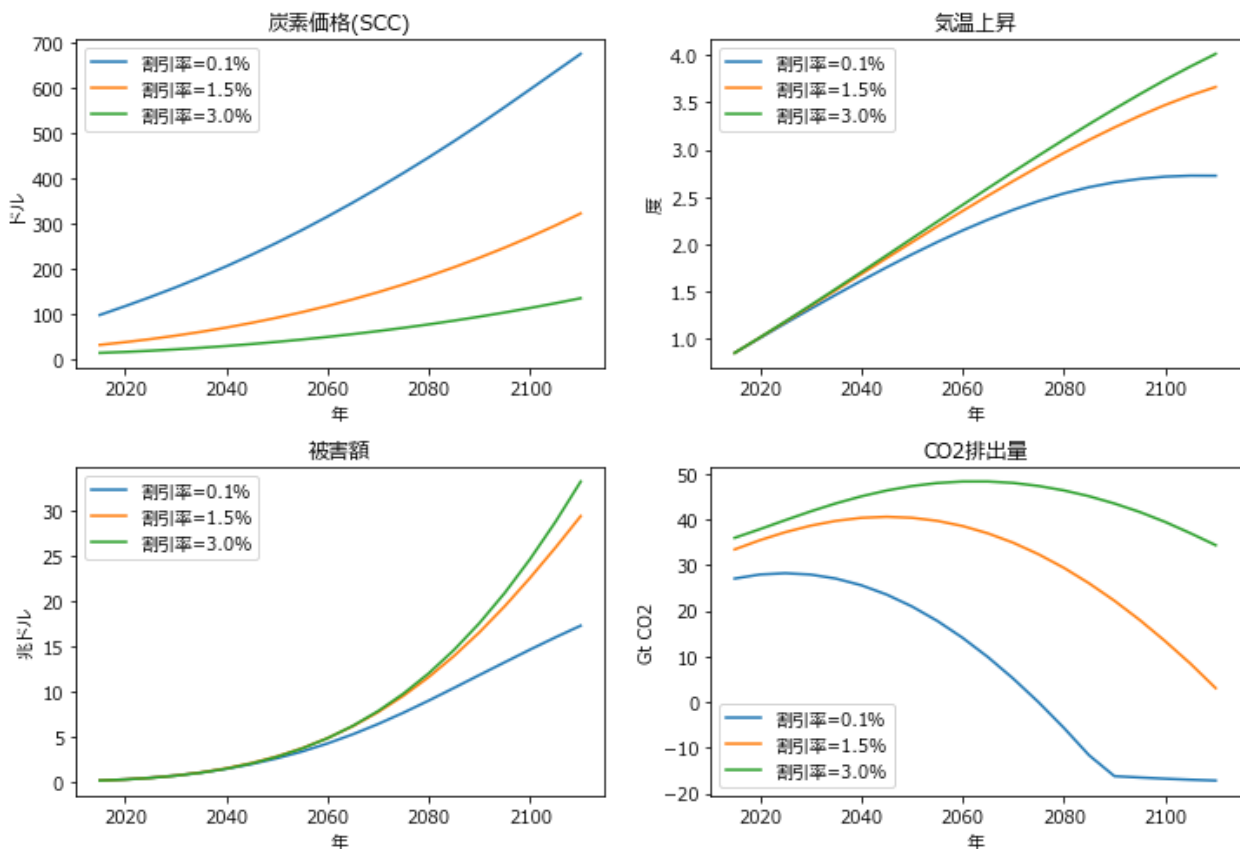
DICE モデルで算出した SCC は前出の図表 2 の右下に示している。2020 年時点では CO<sub>2</sub>排出量 1 トンあたり約 40 ドルとなっている。また 2050 年に約 90 ドル、2100 年には約 270 ドルと上昇していく傾向がある。

#### 4. 異なる割引率でのシミュレーション

DICE モデルによる炭素価格の難点として、人間の主観等によって価格が大きく変わってしまう点が挙げられる。一例として、割引率に関する議論がある。

一般に、人には将来よりも今受け取れる利益のほうをより好む「時間選好」の傾向がある。気候変動対策によって CO<sub>2</sub>を減らしたとしてもその恩恵を受けられるのは将来のことであり、したがって将来の価値をどれだけ割り引くかによって炭素価格は変わってくる。

図表 3 割引率による出力結果への影響



(出所) DICE モデルより日興リサーチセンター作成

DICE モデルでは、市場金利や投資収益率に基づき、割引率を 1.5% に設定している。一方、英国の経済学者ニコラス・スターン氏が発表し世界の気候変動への見方に大きな影響を与えた「スターン報告」(Stern, 2007) では、割引率を 0.1% に置き、将来世代の受け取る価値は自分達の世代と等しく扱われるべきだと主張した。スターン氏は、割引率を 1.5% と置くと 50 年後の価値が半分以下に割り引かれてしまうことから、あたかも祖父母が 50 歳若い孫の消費行動を半分に見積もるようなものだと批判している。

図表 3 に割引率を 0.1%、1.5%、3.0% とした場合の各変数の推移を示した。スターン報告の仮定である割引率 0.1% を適用すると、SCC は 2020 年時点で 1 トンあたり 100 ドルを突破し 2100 年には約 600 ドルとかなり高額な負担になるが、その分気温上昇はゆるやかになり被害額が抑えられ 2075 年頃にカーボンニュートラルが達成される。一方、割引率を高めていくと炭素価格は下がり負担が減るが、CO<sub>2</sub>排出量は増えていき、気温は大きく上昇する。将来世代をどこまで慮るかという価値観は炭素価格だけでなく気候変動の目標達成状況を強く左右する。

## 5. おわりに

本稿では DICE モデルとそれを用いた炭素の価格付けなどについて考察した。試算では、炭素価格は 2020 年時点で排出量 1 トンあたり約 40 ドルとなり、今後の上昇傾向が示された。また、割引率などパラメータ次第で炭素価格や気候変動に関するシナリオが変わることを確認した。

IMF によると現在の炭素価格は世界の平均で約 3 ドルしかなく<sup>8</sup>、統合評価モデルによる試算とはギャップがある。日本の炭素税にあたる地球温暖化対策税も排出量 1 トンあたり 289 円に留まっている。脱炭素の目標達成に向け、本格的なカーボンプライシングの導入に向けた議論が続きそうだ。

地球温暖化は世界全体の問題であり、DICE モデルも単一の世界を想定している<sup>9</sup>が、現実には国際的な協調は大きな課題である。CO<sub>2</sub>を削減していない国が削減している国と同じく恩恵を受ける「フリーライド (ただ乗り)」問題の解決策について、ノードハウス教授は対策に取り組む国同士の貿易同盟を提案している (Nordhaus, 2020)。カーボンプライシングを実施している国で同盟を組み、同盟に参加しない国との貿易には輸入関税をかけることでインセンティブを働かせるという発想だ。近い動きとして、欧州連合 (EU) は環境規制の緩い域外からの輸入品に関税をかける炭素国境調整措置 (CBAM) を導入する方針を示している。こうしたカーボンプライシングをめぐる国際動向に今後も注目していきたい。

<sup>8</sup> Parry, I., Simon, B., and James, R. [2021], "Proposal for an International Carbon Price Floor among Large Emitters," IMF Staff Climate Notes 2021(001)

<sup>9</sup> DICE モデルをベースとして世界を 12 の地域に分割した RICE (Regional Integrated model of Climate and the Economy) モデルもノードハウス教授は開発している。

## 参考文献

- Nordhaus, W.D., and Sztorc, P.[2013], "DICE 2013R: Introduction and User's Manual," [http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE\\_Manual\\_100413r1.pdf](http://www.econ.yale.edu/~nordhaus/homepage/homepage/documents/DICE_Manual_100413r1.pdf)
- Nordhaus, W.D.[2017], "Revisiting the social cost of carbon," *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(7), 1518.1523.
- Nordhaus, W.D.[2020], "The Climate Club: How to Fix a Failing Global Effort," *Foreign Affairs* May/June, <https://www.foreignaffairs.com/articles/united-states/2020-04-10/climate-club>
- Stern, N.[2007], "The Economics of Climate Change: The Stern Review," Cambridge University Press