

## 気温上昇を前提にしたマクロ経済成長モデル

Short Review  
2021年10月投資工学研究所  
主任研究員  
本山 真

## 1. はじめに

世界的に地球温暖化の影響と考えられる異常気象や自然災害が発生し、その規模は拡大し、頻度も増加している。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない」とし、世界の気温上昇が産業革命前と比べて2021~40年には1.5℃に達することを予測した「第6次評価報告書」の一部を8月に公表した。2018年にIPCCが公表した「1.5℃特別報告書」における想定より地球温暖化は10年程度早く進行しており、その影響の深刻さが増している。

地球温暖化対策として、気温上昇の原因とされる二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出削減が喫緊の課題となり、さらに二酸化炭素を回収・貯蔵する技術等の開発、実用化が求められている。世界各国は、温室効果ガスの大幅な排出削減を政治目標とし、日本は「2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」とし、2030年度には2013年度比で46%削減することを目標としている。また、企業や金融機関は排出削減に取り組み、気候変動リスクをコストとしてだけでなく、ビジネス機会とする経営への転換が課題になっている。そのためには、気候変動による経済への影響を定量的に把握することが重要だろう。

気候モデルと経済モデルを組み合わせたモデルは、統合評価モデルと呼ばれ、ノーベル経済学賞を受賞したWilliam NordhausのDICEモデル(Dynamic Integrated model of Climate and the Economy)等の多くのモデルがあり、政策の決定や政策評価に用いられている。気候変動が地球全体の事象であるため、通常、統合評価モデルは世界を一つ、あるいはいくつかの地域に分割して世界全体を対象とするが、本稿ではこのようなグローバルな分析ではなく、国内経済や特定の地域経済を対象にした分析を行うためのモデルを提示する。国や地方公共団体、企業、金融機関等の多くの主体が温室効果ガスの排出削減への取り組みが求められる中、気候変動による経済への影響を考慮した意思決定のためにはシンプルなモデルが役立つと考える。そこで、次章において具体的なモデルを提示し、3章でそのモデルを用いて数値計算を行った結果を示し、考察を加える。

## 2. 気温上昇を前提にしたマクロ経済成長モデル

世界全体の気候変動と経済活動を分析対象にした統合評価モデルは、世界全体をいくつかの地域に分割することや経済における複数の産業部門を考慮することによってモデルの大規模化が進んでいる。また、気候変動に関連する地球物理学的な現象は各専門分野の高度化により新たな知見が解明されている。

一方、初期の統合評価モデルである DICE モデルは、世界を一つとし、経済主体も家計と企業のためのシンプルなモデルである。世界全体の気候変動と経済活動を組み込み、二酸化炭素の排出・蓄積や気温上昇、そして気温上昇による経済への影響が一つのモデルとして定式化されている<sup>1</sup>。気候変動による経済への影響を理解するためには優れたモデルであると考えられる。しかし、気温上昇等に関する見通しは新しい研究成果によって変化していくが、DICE モデルでその成果を考慮することは難しい。そこで、以下では DICE モデルをもとにして気温上昇を所与としたマクロ経済成長モデルを提示する<sup>2</sup>。

DICE モデルが想定する経済活動を簡潔に示すと図表 1 の (1) から (5) であり、気候変動を示す (a) から (c) が二酸化炭素の排出が大気中の気温変化に与える影響として、モデル内で（内生変数として）気温上昇を導出し、経済への影響である (3) で利用される。

図表 1 DICE モデルにおける気候変動と経済活動の概要

(1)	企業は、技術力等、蓄積された資本、労働力を使って生産する
(2)	企業の生産活動によって二酸化炭素が排出される
(a)	大気中に排出された二酸化炭素は、大気、海洋、深海で循環して蓄積、あるいは吸収される
(b)	大気中に蓄積された二酸化炭素量の増減等によって地球に出入りするエネルギーの収支が変化し、気温に影響を与える
(c)	気温は、海洋の温度の影響を受ける
(3)	経済活動による生産は、気温上昇による災害等の経済的な被害と二酸化炭素の削減費用によって減少する
(4)	生産は、消費と投資として支出される
(5)	家計は、将来にわたった消費による効用の現在価値の合計値が最大になるように消費と貯蓄を行う

(出所) 当社作成

<sup>1</sup> 本章以降では、二酸化炭素は温室効果ガスと同じ意味で用いる。

<sup>2</sup> DICE モデルは、バージョンアップを続けているが、本稿では DICE モデルのユーザーマニュアル(Nordhaus,Sztorc(2013))と以下のソースコードをもとに定式化する。計算には HP(<https://williamnordhaus.com/dicerice-models>)に公開されている GAMS のソースコード(DICE-2016R2-083017.gms)を参考に当社が作成したプログラムを用いた。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した。

しかし、気温上昇については、IPCC 等による最新の気候変動の研究成果等、科学的な知見が絶えず更新されていく。また、DICE モデルが前提としているグローバルな分析ではなく、本稿が目的とする国内経済や特定の地域経済の場合は、二酸化炭素の排出によって世界全体の気温上昇に与える影響は大きくない。そこで DICE モデルにおいて気候変動を示す (a) から (c) の代わりに、気温上昇については気候変動に関する研究成果や想定したシナリオ等のモデルの外で決まる値（外生変数）を用いることを提案する。具体的な計算式は以下の (1) から (5) に示す<sup>3</sup>。

(1) 企業は、技術力等（全要素生産性） $A(t)$ 、蓄積された資本（資本ストック） $K(t)$ 、労働力 $L(t)$ を使って $Q_{GROSS}(t)$ の生産をする<sup>4</sup>

$$Q_{GROSS}(t) = A(t)K(t)^\gamma L(t)^{1-\gamma} \quad (1-1)$$

$$A(t) = A(t-1)[1 + g_A(t)] \quad (1-2)$$

$$g_A(t) = \frac{g_A(t-1)}{1 + \delta_A} \quad (1-3)$$

$$L(t) = L(t-1)[1 + g_L(t)] \quad (1-4)$$

$$g_L(t) = \frac{g_L(t-1)}{1 + \delta_L} \quad (1-5)$$

$$K(t) = I(t) + (1 - \delta_K)K(t-1) \quad (1-6)$$

コブ・ダグラス型の生産関数（資本分配率 $\gamma$ 、労働分配率 $1 - \gamma$ は一定の値）を利用し、全要素生産性 $A(t)$ 、労働力 $L(t)$ は、現時点での値からそれぞれ変化率 $g_A(t)$ 、 $g_L(t)$ で増加していくことを仮定する。資本ストック $K(t)$ は、同じ期の投資 $I(t)$ に、前期までの資本ストック $K(t-1)$ が減耗（減耗率 $\delta_K$ ）することを考慮した値を加える。

(2) 企業の生産活動によって二酸化炭素 $E_{IND}(t)$ が排出される

$$E_{IND}(t) = \sigma(t)[1 - \mu(t)]Q_{GROSS}(t) \quad (2-1)$$

$$\sigma(t) = \sigma(t-1)[1 + g_\sigma(t)] \quad (2-2)$$

$$g_\sigma(t) = \frac{g_\sigma(t-1)}{1 + \delta_\sigma} \quad (2-3)$$

生産 $Q_{GROSS}(t)$ が大きくなるほど、生産活動による二酸化炭素排出量 $E_{IND}(t)$ は増加するが、生産 1 単位当たりの二酸化炭素排出量 $\sigma(t)$ が低下すれば、生産が同じであっても二酸化炭素排出量は減少する<sup>5</sup>。

<sup>3</sup> DICE モデルと同じ計算式は式の番号をカッコあり、異なる計算式はカッコなしで表す。

<sup>4</sup>  $Q_{GROSS}(t)$ は災害等の経済的な被害と二酸化炭素の排出費用を考慮する前の生産（GDP）である。

<sup>5</sup> エネルギー転換等によって二酸化炭素排出量が減ることをモデルで考慮することができる。

$\sigma(t)$ は現時点での値から変化率 $g_\sigma(t)$ で変化していくことを仮定する。また、排出削減率 $\mu(t)$ はモデルで推定されるパラメータであり、 $\mu(t)$ が大きくなるほど、二酸化炭素排出量 $E_{IND}(t)$ は減少する。

- (3) 経済活動による生産 $Q(t)$ は、気温上昇による災害等の経済的な被害と二酸化炭素の削減費用によって減少する

$$Q(t) = \frac{[1 - \Lambda(t)]Q_{gross}(t)}{1 + \Omega(t)} \quad (3-1)$$

$$\Omega(t) = \psi_1 T_{AT}(t) + \psi_2 [T_{AT}(t)]^2 \quad (3-2)$$

$$\Lambda(t) = \theta_1(t)\mu(t)^{\theta_2} \quad (3-3)$$

$$\theta_1(t) = \frac{P_{BST}(t)}{\theta_2} \sigma(t) \quad (3-4)$$

$\Omega(t)$ は、生産 $Q_{GROSS}(t)$ に対する災害等による経済的な被害の比率を表し、気温上昇 $T_{AT}(t)$ の2乗のオーダーで増加すると仮定する。DICE モデルでは二酸化炭素の排出が大気の気温変化に影響を与えることがモデルに組み込まれているが、ここでは気温上昇 $T_{AT}(t)$ は、モデルから計算される値ではなく、気候変動に関する研究成果やシナリオにもとづく所与の値とする。

$\Lambda(t)$ は、生産 $Q_{GROSS}(t)$ に対する二酸化炭素の削減費用の比率であり、モデルのパラメータである排出削減率 $\mu(t)$ の $\theta_2$ 乗のオーダーで増加すると仮定する。 $P_{BST}(t)$ は William Nordhaus が導入したバックストップ・テクノロジーの価格である<sup>6</sup>。例えば、バックストップ・テクノロジーの価格が二酸化炭素 1t 当たり 500 ドルである場合、500 ドルの費用で二酸化炭素 1t の排出がない技術に代替できることを意味し、この価格が低下すると同じ排出削減率であっても $\Lambda(t)$ が小さくなり、より低い削減費用で二酸化炭素の排出削減が達成できる。 $\sigma(t)$ は前出((2-2)式)の生産 1 単位当たりの二酸化炭素排出量である。

そして、生産 $Q(t)$ は、二酸化炭素の削減費用と災害による経済的な被害を控除した金額になる。

- (4) 生産 $Q(t)$ は、消費 $C(t)$ と投資 $I(t)$ として支出される。ここで、二酸化炭素の排出に対する経済的な負担 $G(t)$ を導入する

$$Q(t) = C(t) + I(t) + G(t) \quad 4-1$$

$$I(t) = s(t)[Q(t) - G(t)] \quad 4-2$$

$$G(t) = P_H(t) \cdot E_{IND}(t) \quad 4-3$$

$$P_H(t) = P_H(t-1)[1 + \rho] \quad 4-4$$

上記の下線部が本稿のモデルの特徴であり、二酸化炭素の排出に対する経済的な負担 $G(t)$ としてモデ

<sup>6</sup> 二酸化炭素を排出しない代替技術の普及等をモデルで考慮することができる。

ルに組み込む。 $G(t)$ は、二酸化炭素排出 1 単位当たりの価格 $P_H(t)$ （以下、炭素価格）と生産活動による二酸化炭素排出量 $E_{IND}(t)$ の積であり、 $G(t)$ が正の時期には家計の消費 $C(t)$ が減少し、家計にとっては経済的な負担になる。炭素価格 $P_H(t)$ は、初期時点の炭素価格 $P_H(0)$ が金利 $\rho$ で上昇すると考える<sup>7</sup>。

また、貯蓄率 $s(t)$ は家計の行動としてモデルで推定されるパラメータであり、資本ストックとして蓄積される当期の投資 $I(t)$ を決める役割を果たす。

(5) 家計は、将来にわたった消費による効用の現在価値の合計値が最大になるように消費と貯蓄を行う

$$W = \sum_{t=1}^{Tmax} U[c(t), L(t)]R(t) \quad (5-1)$$

$$U[c(t), L(t)] = L(t) \frac{c(t)^{1-\alpha}}{1-\alpha} \quad (5-2)$$

$$c(t) = \frac{C(t)}{L(t)} = \frac{Q(t) - I(t) - G(t)}{L(t)} \quad (5-3)$$

$$R(t) = \left( \frac{1}{1+\rho} \right)^t \quad (5-4)$$

家計の最適化行動として目的関数 $W$ を最大化する。家計の効用 $U[c(t), L(t)]$ として相対的リスク回避度一定(CRRA 型)の効用関数を仮定する。 $W$ の最大化により未知のパラメータであった排出削減率 $\mu(t)$ と家計の貯蓄率 $s(t)$ が推定され、(1) から (5) の連立方程式における未知数（内生変数）を求めることができる。

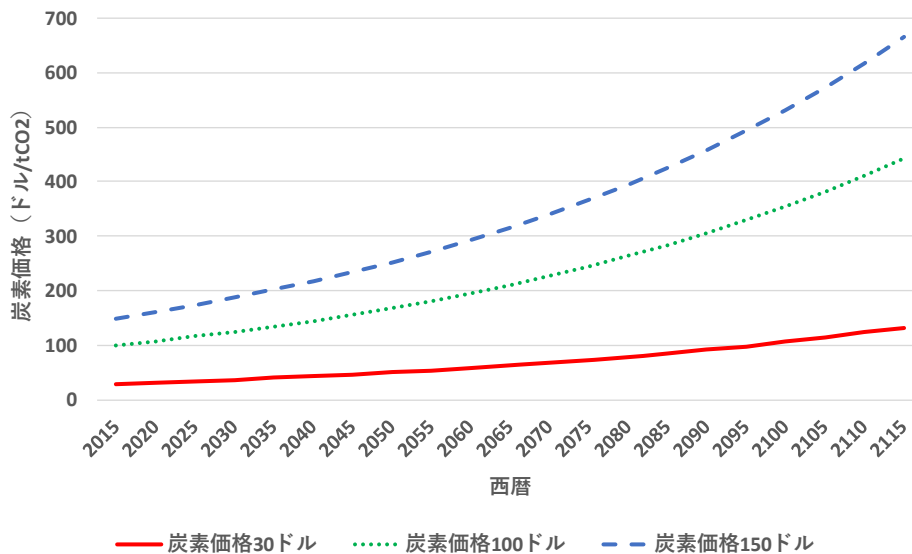
### 3. 数値計算の結果と考察

前章のモデルを用いて初期時点の炭素価格 $P_H(0)$ を 30 ドル、100 ドル、150 ドルの 3 通りとしたときに、将来の二酸化炭素排出量の経路がどのように変化し、どの程度の経済的な影響があるかを数値例で確認する。気温上昇については単純な想定とし、初期時点を 1℃として、5 年ごとに 0.1℃ずつ上昇し、上限を 3℃として計算する。

(5-1)式の最大化は 5 年刻みの 100 期分 (500 年間) のデータを用いて行うが、以下の図表では 100 年後までの結果を示す。図表 2 は計算の前提とした炭素価格であり、時間の経過とともに 4-4 式にしたがって上昇する。図表 3 は計算の前提とした気温上昇である。

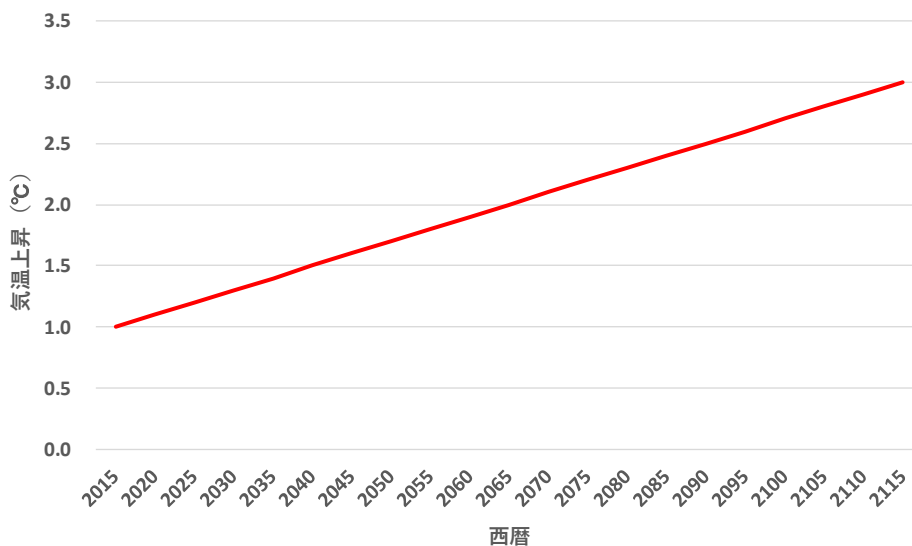
<sup>7</sup> ホテリングの定理 (Hotelling(1931)、前田(2009)) を援用する。

図表 2 計算の前提とする炭素価格



(出所) 当社作成

図表 3 計算の前提とする気温上昇



(出所) 当社作成

図表 2 の炭素価格と図表 3 の気温上昇を前提として前章のモデルで得られる二酸化炭素排出量  $E_{IND}(t)$  の経路が図表 4 である。

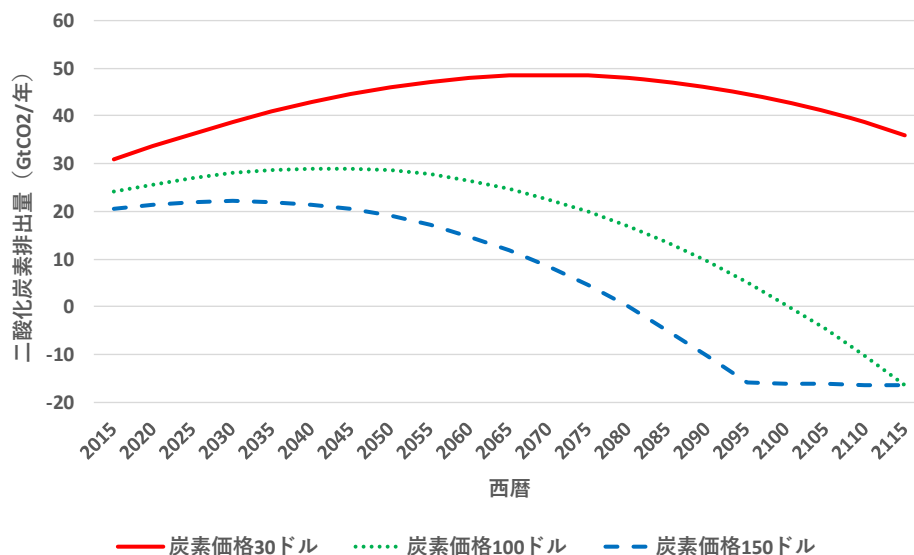
炭素価格  $P_H(0)$  を 150 ドルとした場合が二酸化炭素の排出削減は最も早く進み、2080 年でほぼ排出量がゼロとなり、その後は排出量がマイナスとなる。今回の計算では、将来、二酸化炭素の回収・貯蔵等により排出量がマイナスになることも想定し、排出削減率  $\mu(t)$  の上限を 120% としたため、上限に達した 2095 年以降は二酸化炭素排出量 (吸収量)  $E_{IND}(t)$  が横ばいになっている。

炭素価格  $P_H(0)$  を 30 ドルとした場合は、二酸化炭素排出量  $E_{IND}(t)$  は 2070 年をピークに減少に転じる

が、100年後の2115年においても現在より排出量が多い。

ここでは、炭素価格 $P_H(0)$ を前提として、二酸化炭素排出量の経路を計算したが、二酸化炭素の排出削減目標がある場合は、その目標を達成する炭素価格 $P_H(0)$ を見つけることにも利用することができる。

図表 4 二酸化炭素排出量の経路

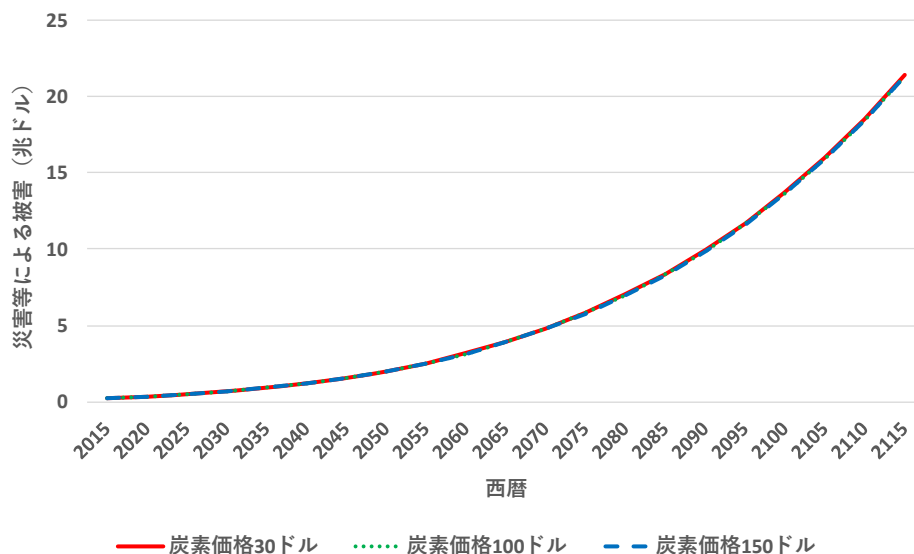


(出所) DICE モデルのデータより当社作成

災害による経済的な被害と二酸化炭素の削減費用の経路が図表 5、6 である。災害による経済的な被害は、DICE モデルのように二酸化炭素の排出削減が気温上昇の緩和に結びつかないため、炭素価格の 3 通りのケースでの差異は大きくない(図表 5、グラフは 3 通りでほぼ重なっている)。本稿のモデルでは、災害による経済的な被害と二酸化炭素の削減費用のトレードオフの関係がなくなるが、二酸化炭素を排出する主体が大きい場合は、二酸化炭素の排出が世界全体の気温上昇に与える影響は少なく、このような結果が得られることは現実的なものだろう。そのため、二酸化炭素の排出削減のためには、排出に対して経済的な負担を課すことがより重要になるが、本モデルでは4-1式で二酸化炭素の排出に対する経済的な負担 $G(t)$ として考慮される。

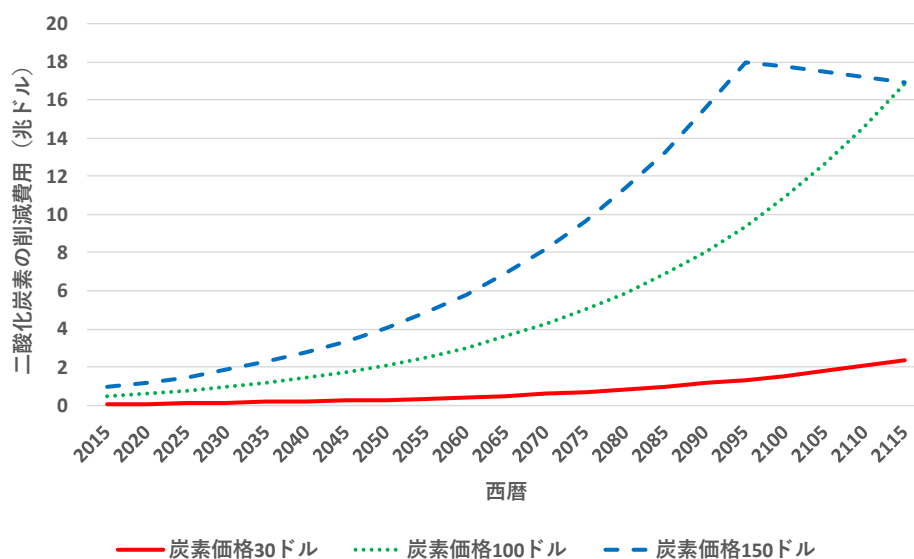
二酸化炭素の削減費用は、炭素価格 $P_H(0)$ を 150 ドルとした場合、最も大きくなり、排出削減率 $\mu(t)$ の上限に達した 2095 年がピークになる(図表 6)。そのときの削減費用は生産 $Q(t)$ の 2.5%程度である。

図表 5 災害等による被害の経路



(出所) DICE モデルのデータより当社作成

図表 6 二酸化炭素の削減費用の経路

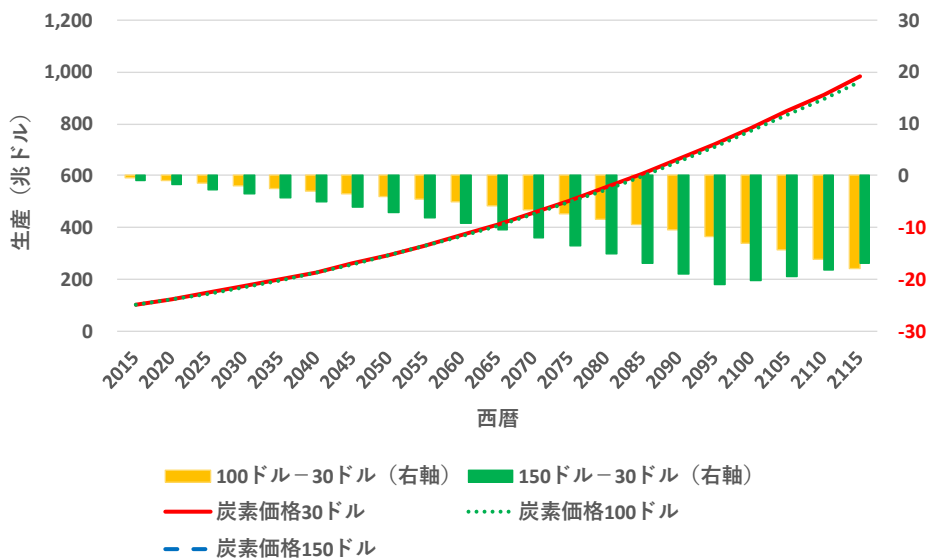


(出所) DICE モデルのデータより当社作成

最後に、炭素価格の3通りの生産 $Q(t)$ を比較したものが図表7である。炭素価格 $P_H(0)$ を30ドルとした場合の生産 $Q(t)$ を基準にして、炭素価格 $P_H(0)$ を100ドル、150ドルとした場合の生産 $Q(t)$ がどれだけ減少するかを示したものが図表7の棒グラフである(軸は右側)。100年後の2115年にわずかではあるが、炭素価格 $P_H(0)$ を100ドルとした場合より150ドルとした場合の方が、生産が大きくなることが確認できる(2115年の黄色の棒グラフより緑色の棒グラフの方が、マイナスが小さい)。



図表 7 生産の経路と3つのケースの比較



(出所) DICE モデルのデータより当社作成

#### 4. おわりに

DICE モデルを参考にして、二酸化炭素の排出によって世界全体の気温上昇に与える影響が大きくない国内経済や特定の地域経済を対象にした分析を行うためのモデルを提示した。そして、炭素価格と気温上昇について複数のケースを前提として、二酸化炭素排出量の経路と経済的な影響として災害等による被害と二酸化炭素の削減費用、生産の経路について数値計算の結果を示した。また、二酸化炭素の排出削減目標がある場合、このモデルを使えば、その目標を達成する炭素価格 $P_H(0)$ を見つけることができる。

本稿では、モデルに用いる変数等は DICE モデルのものをそのまま利用したが、今後は、経済変数等を国内のものにして、気温上昇が国内経済に与える影響を分析することを課題としたい。

## 参考文献

Hotelling, Harold(1931), "The Economics of Exhaustible Resources", Journal of Political economy, Vol.39, pp137-175.

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)

ウィリアム・ノードハウス (2015) , 「気候カジノ」 , 日経 BP

前田章(2009), 「排出権制度の経済理論」 , 岩波書店

伊藤央峻(2021), 「DICE モデルによるカーボンプライシング」 , 日興リサーチレビュー

<https://www.nikko-research.co.jp/library/10425/>

後藤誠也, 川崎正勝(2021), 「EU ETS を参考にした排出量取引市場の多期間分析」 , 日興リサーチレビュー

<https://www.nikko-research.co.jp/library/10487/>

(END)