

# 炭素の社会的費用 (SCC) は使えるか How should we use the social cost of carbon ?

岡敏弘<sup>1</sup>

OKA Toshihiro

地球温暖化対策の政策手段として炭素価格づけが最善の手段であるということに、極めて多くの経済学者が同意している<sup>2</sup>。その価格水準をどう決めるかは重大問題だが、これに2つの考え方がある。1つは、何らかの数量目標を達成するために必要な価格水準に決めるというものであり、もう1つは、CO<sub>2</sub>を1単位排出することがもたらす被害額に等しく価格水準に決めるというものである。後者の考え方で、その「被害額」として使われるのが、炭素の社会的費用 (SCC: social cost of carbon) である。これは、今1tのCO<sub>2</sub>を排出することが将来にわたって世界に与える被害の費用だと見なされている。これを炭素価格に設定して炭素税をかければ、限界排出削減費用がちょうどそのSCCに等しくなるところまで排出削減が行われるというわけである。ノードハウスは、京都議定書やパリ協定のような数量目標政策を批判して、炭素価格づけだけをやるべきだと主張した (Nordhaus 2015)。ノードハウスのような統合評価モデル (IAM) に基づくSCCの推定を否定するピンディク (Pindyck 2017a, 2017b) も、独自のSCCによって炭素に価格づけすることを提唱している。

SCCは果たしてそのような政策の基礎になりうるのかというのがこの研究の課題である。SCC概念と厚生経済学で確立された費用や便益の概念との乖離に焦点を当てる。すなわち、SCCに基づく炭素価格づけは、SCC概念と整合的な意味での純便益を最大にする行動を起こさないということを明らかにする。

初めに、上で触れた、炭素価格づけの2つの考え方の区別が重要であり、被害額に基づいた炭素価格づけにこそ意味があることを明らかにする。次に、ノードハウスによるSCC推計を紹介する。次いでそれに対するピンディクの批判と彼の独自のSCC推計を紹介する。その上で、どちらの方法で求められたSCCも、価格づけの根拠として用いることはできないということを明らかにする。その理由は、SCCに基づいて決められた炭素価格の下での人々の行動が、SCC概念と整合的な意味での純便益を最大にしないということである。

## 1 炭素価格づけの2つの考え方

二酸化炭素のような環境負荷に人為的な価格づけをするというアイデアの源流は、言うまでもなく、ピグーにある。ピグーは、私的限界生産物価値と社会的限界生産物価値との乖離を埋めるような課税・補助金政策を提唱したが、それは、環境外部性を与える行為に当てはめると、環境負荷の限界被害費用—それが負荷量に応じて変化する場合には限界排出削減費用と一致する水準でのそれ—に等しい税率で課税することに等しい。そのような課税政策のもとでは、環境負荷削減の純便益が最大になるという意味でのパレート最適な汚染水準が実現する。しかし、ほとんどすべての環境問題で、限界被害費用 (しかも最適水準での) を確かめるのが難しいことから、このような課税政策の実施が極めて難しいということが明らかだったの

<sup>1</sup> 京都大学公共政策大学院・経済学研究科 oka@econ.kyoto-u.ac.jp.

<sup>2</sup> ソロー、セン、カーネマン、セイラー、マクファデンら27人のノーベル経済学賞受賞者やバーナンキ、イエレンらを含む全部で3555人が2019年1月17日に 'Economists' Statement on Carbon Dividends' を出した (The Wall Street Journal)。The Economist 誌は、2020年5月23日の 'Seize the moment' と題する記事で、新型コロナ危機でCO<sub>2</sub>排出量が急減し、化石燃料価格が下がった今こそ、長年経済学者が提唱してきた炭素価格づけの好機だと主張したが、政治家には人気がないと言っている。

で、課税政策の別の根拠が求められるようになった。

クネーゼは1964年の『広域的水質管理の経済学』で、河川の基準点での水質の目標を、排水負荷を課税ベースにして排水者に一律の課税をすることによって達成する制度を提案した (Kneese 1964, p.111-118)。その制度の利点は、一律の税率が排出者の限界排出削減費用を均等にすることを通じて、水質目標を最小の費用で達成できることにある。ポーモルとオーツが後にこれと同じ制度を提案し、「価格づけ基準アプローチ」と呼んだ (Baumol and Oates 1971)。

重要なことは、本来のピグー的課税と違って、この価格づけ基準アプローチでは、パレート最適な汚染水準を達成するということをあきらめていることである。汚染水準は、被害費用も汚染削減費用も考慮することなく「基準」として決められる。基準は、科学的・社会的な考慮によって決められるが、ポーモルとオーツは「受入可能な基準」と言い、それが「幾分恣意的だ」とも言っている (Baumol and Oates 1971, pp.44,45)。

これと独立に、デールズは、同じくピグー的課税政策が実現不可能であるという認識から出発し、さらに、環境に所有権を設定して市場メカニズムで最適な利用水準を実現しようとする政策もまた不可能であると言ひ、環境の質をどの水準にするかを決められるのは政府だけだと述べた上で、それが決まれば、排出できる環境負荷の総量が決まり、そこまで決まれば、そこから先に市場の出番もあると言って、政府が許容する排出総量に等しい汚染権を発行してこれを競売に付すと同時に、汚染権を所有していなければ排出してはいけないという規制を導入する政策を提案した (Dales 1968)。そうすれば、政府が目標とする排出削減は確実に達成され、汚染権に価格がつき、汚染者は、その価格と限界排出削減費用とを比較して、後者が前者を下回る限り排出を減らし、両者がちょうど等しくなったところで排出削減をやめ、残りの排出量に見合った汚染権を購入するということを通じて、政府が目指す環境の水準が最小の費用で達成される。

この汚染権制度—「汚染」と呼ぶのがふさわしくない環境問題もあるから、「排出権制度」と呼んでもよい—も、上の価格づけ基準アプローチと同じく、パレート最適な環境の水準を追求しない。そもそもその追求が難しいところから出発し、環境の水準をどこにするかは政府に任せ、政府が決めた基準を最小費用で達成する役割だけを市場に期待するのである。その意味で、価格づけ基準アプローチと排出権制度とは同類である。すなわち、環境の基準やそれによって決まる排出総量といった数量の方に、何らかの根拠があり、価格は、追隨して変化する。価格水準そのものには根拠はない。それに対して、ピグー的課税では、価格自体に限界被害費用という根拠がある。

数量に根拠を求めて数量を決める政策を採用するか、価格に根拠を求めて価格を決める政策を採用するかは、ワイツマン (Weitzman 1974) が追求した課題なので、ピグー的課税か、価格づけ基準アプローチか、排出権制度かの選択が、ワイツマンの命題と関係があると思われるかもしれない。しかし、ワイツマンの問題は、限界排出削減費用が不確実な時、価格を政策指標にした場合と、数量を政策指標にした場合とで、どちらが、パレート最適からの逸脱による厚生損失を小さくできるかというものであり、パレート最適の追求を前提にしている。その意味では、ピグー的課税政策を行う状況下で、数量を指標に政策を採用可能性も考慮に入れた時にどちらを選ぶかの選択に関わる議論である。答えは限界被害費用曲線の傾きによって決まり、その傾きが急峻であれば、数量を指標にとった政策の方が損失が小さくなる。

そもそも限界被害費用曲線がどこにあるかわからない場合は、価格をとっても数量をとっても結果に違いはないので、ワイツマンの問題は関係なくなる。そして、限界被害費用がわからないからこそ、価格づけ基準アプローチや排出権制度が考案されたのである。

「炭素価格づけ」は、ピグー的課税と価格づけ基準アプローチと排出権制度をすべて指して使われている。しかしそのうちどれを想定しているかによって、炭素価格の意義は変わるし、価格水準も変わる。例えば、スティグリッツとスターンが議長を務める炭素価格づけリーダーシップ連合の報告書は、温度上昇を 2°C

以内に抑える目標と統合的な炭素価格水準として、2020年まで40~80米ドル/t-CO<sub>2</sub>、2030年まで50~100米ドル/t-CO<sub>2</sub>といった値を挙げ、その他技術の切り替えをもたらすいくつかの炭素価格水準の例を挙げている。これは、価格づけ基準アプローチである。今後、技術の変化があれば、2°Cの目標と統合的な炭素価格水準は、被害費用と関係なく変わってよいのである。27人のノーベル経済学賞受賞者や多数のエコノミストが2019年に出した‘Economists’ Statement on Carbon Dividends’も、「排出削減目標」に言及していることから、目標-税アプローチを念頭に置いていると思われる。しかし、目標がどの水準で、税率をいくらにすべきかについて、何も言われていない。

排出権制度では、デールズの発想の出発点からわかるように、汚染権に価格がつくことは付録のようなもので、総量の目標が確実に達成できることが最も重要なことである。そして、価格は変化して構わない。ところが、EUの排出権制度(EU ETS)では、2009年から2016年頃まで排出権価格が5ユーロ/t-CO<sub>2</sub>台に低迷したことが問題視され、競売の後ろ倒しや市場安定在庫制度(MSR: market stability reserve)などが導入された。イギリスでは最低炭素価格維持制度(CPF: carbon price floor)が2013年から実施されており、EU全体でもその導入が議論されている。これらの動きは、価格維持のために排出総量の規制値を変化させるもので、この制度を、デールズの発想から遠く離れたものにする。

デールズの発想などにこだわらない人は、価格と数量のハイブリッド政策を体現するものとして、この動きを正当化しようとする。CEPS (Centre for European Policy Studies) のエルカーバウトラは、価格支持政策が、EU ETSを数量政策から価格づけ政策に変質させるものではないかという批判に反論して、ロバーツとスペンスの論文(Roberts and Spence 1976)やヘプバーンの論考(Hepburn 2009)に依りながら、短期には限界被害費用曲線が平坦だから価格づけ政策が適しているが、長期には気候システムの転換点に達するから数量を管理する政策が適しており、価格と数量とを組み合わせた政策には意味があると論じた(Flachsland et al. 2018)。しかし、気候変動問題では、大気中CO<sub>2</sub>濃度は累積排出量にほぼ比例し、気温上昇は大気中CO<sub>2</sub>濃度によって決まるから、長期に被害に閾値があるのなら、閾値に当たる累積排出量以下に抑えるように、フローの排出量を管理する数量管理政策が適しており、価格政策が優位になる余地はない。ロバーツのスペンスの枠組は、価格と数量とを組み合わせた政策が、排出削減費用が不確実な下での厚生損失を最小にする可能性を示しているが、それも、限界被害費用の方はわかっている、設定される総量規制水準や設定される価格が、限界費用曲線の近くにあることを前提にした議論である。EU ETSの排出権総枠も維持しようとする価格水準も、温暖化の被害費用に基づいて決められた形跡はないので、EU ETSの現状での価格制御の導入を正当化する理論的根拠は見出せない。

これらに対して、ノードハウスやピンディクは、明らかにピグー的課税政策を意図している。その税率の根拠としてSCCを追求しているのである。つまり、限界被害費用としてSCCが求められている。この場合の炭素価格にはそれ自体に根拠があり、結果として実現する排出量の方が従属的である。限界被害費用が排出量に応じて変化し、かつ、限界排出削減費用に不確実性がある場合には、ワイツマンが問題視したような厚生損失が生じるが、ワイツマンが明らかにしたように、限界被害費用が平坦なら、損失は小さいし、さらに、限界被害費用が問題となる範囲でほとんど水平と見なせるなら、それによって決まった炭素価格に固執しても損失はなく、結果として実現する排出量は必ずパレート最適になる。そして、ノードハウスでは、実際、SCCは、考えられる排出量の範囲でほとんど水平と見なせるようなモデルになっている。そして、ノードハウスもピンディクも、価格づけ以外の数量目標政策(温度の目標も含む)を否定している。これこそ数量の目標にも数量の制御にも頼らなくてすむ真の炭素価格づけであり、このとき炭素価格づけの利点が十全に発揮できる。

## 2 ノードハウスの SCC

ノードハウスは、京都議定書が失敗した原因は、公共財へのただ乗りであると述べ、「気候クラブ」を提案した (Nordhaus 2015)。「クラブ」というのは会員だけに「クラブ財」と呼ばれる公共財を供給し、非会員はそのサービスを受けられないという形でただ乗りを排除する組織である。気候クラブでは、会員になった国は国内の CO<sub>2</sub> 排出者に、一律の税率の炭素税を課す。そして、加盟しない国に経済制裁を課す。制裁は 1~10% の関税で、例えば、非加盟国からの輸入品すべてに 3% の関税を課せば、二酸化炭素排出に最低 25 ドル/t の税をかける義務を負う気候クラブに、すべての国が加盟するだろうと言う。

炭素税の税率は炭素 1t 排出がもたらす被害額に等しく設定する。その被害額が炭素の社会的費用 (SCC: social cost of carbon) である。SCC は 2015 年で \$31/t-CO<sub>2</sub> である。年 3% 上昇していき、2050 年に \$100/t-CO<sub>2</sub> になる (Nordhaus 2017)。

SCC は次のように推計される。

- 今 CO<sub>2</sub> を出すと、それは大気と海と生物とに分配される。次の年、海と生物からいくらか大気に戻る。そうして翌年の大気中存在量が決まる。それによって放射強制力が決まる。それによって平衡気温が決まる。大気中 CO<sub>2</sub> 濃度が、1750 年の 280ppm の 2 倍になった時の平衡気温上昇、つまり気候感度が 3°C(移行期 1.7°C) と想定される。
- 被害は世界平均気温の上昇分だけによって決まる。被害は

$$D(t) = 0.00236T_{AT}(t)^2$$

という被害関数によって与えられる。 $D(t)$  は総生産額 (GDP) 減少率、 $T_{AT}(t)$  は地球平均気温上昇— $T_{AT}(t) = 3[^\circ\text{C}]$  なら  $D(t)=2.1\%$ 、 $T_{AT}(t) = 6[^\circ\text{C}]$  なら  $D(t)=8.5\%$ —。

- 係数 0.00236 は 26 の研究から得られる 36 の値から回帰して求めたものに 25% 上乗せしたものである。1 つ前のバージョン DICE-2013R では、Tol のサーベイ (Tol 2009) を基にしたが、Tol のサーベイに間違いがあったので、独自に推計したと言う (Nordhaus 2017, Nordhaus and Moffat 2017)。
- 25% の上乗せは、Tol のサーベイに含まれていた研究もだが、26 の研究も、温暖化被害の重要な要素を含んでおらず過小評価であるということ考慮したものである (Nordhaus 2013, p.11, 2017, Nordhaus and Moffat 2017)。重要な要素とは
  - 生物多様性損失、海の酸性化、政治的反応
  - 極端な事象—海面上昇、海流の変化、気候変動の加速—
  - モデル化の難しい影響—カタストロフィックな事象、超長期影響—
  - 不確実性

である。この 25% 加算は、‘largely a judgmental adjustment’ だと言う (Nordhaus 2013, p.11)。

- 被害関数  $D(t)$  が決まると、産出額が

$$Q(t) = [1 - \Lambda(t)]Y(t)/[1 + D(t)]$$

によって決まる。 $\Lambda(t)$  は排出削減対策による産出減少分、 $Y(t)$  は資本、労働、技術によって決まる産出額 (GDP)(コブ・ダグラス型関数と言われている)(Nordhaus 2017, 2014)。

- 経済は現在から将来にわたる消費がもたらす効用の現在価値を最大にするように成長すると仮定され

ている（つまりラムゼー・モデルに従って成長）。社会厚生関数が

$$W = \sum_{t=1}^{T_{max}} U[c(t)]L(t)R(t)$$

と定義される。 $c(t)$  は 1 人あたり消費額、 $L(t)$  は人口、 $R(t)$  は割引因子 ( $= (1 + \rho)^{-1}$ ,  $\rho = 0.015$ ) (Nordhaus 2014)。 $U[c(t)]$  は効用関数で  $U(c) = c^{1-\alpha}/(1-\alpha)$  と与えられている (Nordhaus 2017, 2014)。

- SCC とは、今 ( $t = 0$ )  $\text{CO}_2$  を 1t 出したとき、それによる  $D(t)$  ( $t = 1, 2, \dots, T_{max}$ ) の上昇による  $W$  の低下をちょうど補うに足る  $t = 0$  での消費増加分のことである (Nordhaus 2017, 2014)。
- これが、2017 年の推計では、2015 年で 31 ドル/t- $\text{CO}_2$  だった。これが年々 3% 上がり 2050 年に 100 米ドルに達する。

以上がノードハウスの SCC である。ノードハウスは、気候クラブを設立してその加盟国が SCC に等しい率での炭素税を排出者に課すことを義務づけ、加盟しない国に経済制裁を課す制度を提唱した。

### 3 ピンディクの批判と提案

ピンディクは、(2017a) は統合評価モデル (IAM) を用いた SCC の推計を次のように批判した。

- いくつかのインプット—モデルの関数形とパラメーターが恣意的である。割引率をどの水準にするかについていかなる合意もない。そして割引率の差が結果を大きく変える。スターン報告とノードハウスのように (Stern 2007, Nordhaus 2008)。
- われわれは、IAM の鍵となるインプットである気候感度についてほとんど知らない。
- 被害関数は経験的にも理論的にも根拠を欠く。GDP 損失と気温上昇との関係についてわれわれは事実上何も知らない。
- IAM は「テール・リスク」について何も教えない。つまり、気候変動のカタストロフィックな帰結が、どれくらい起こり、その被害がどのようなものであるかについて。

ピンディクは、IAM を擁護する議論として

1. どんなモデルにも欠点はある。
2. 気候感度と被害関数の不確実性には、確率分布とシミュレーションで対処できる。
3. 他に良い方法がないとしたら、IAM に頼るのが最善の手だ。
4. IAM なくして SCC の値を得られない。それなしに GHG 削減の諸政策を比較できない。

というのがありうると述べた上で、次のように論じる (Pindyck 2017a)。

1. IAM は、気候変動問題の様々な変数の間の関係を論理的に理解するのを助ける。つまり、IAM には教育的効果がある。だが、現実の意思決定に使うと、問題点が明白になる。政策主張を科学の衣で包んで特定政策の正当化もできるが、理論的根拠も現実の根拠も欠いていて評価もできない多くの方程式を含んだブラックボックスだ。
2. IAM は SCC を得る最善の手段ではない。
  - (a) 入力変数の値や関数形の選択は、IAM モデラーの思うままだ。スターンは SCC が 200 ドルだと言い (Stern 2007)、ノードハウスは 11 ドルだと言う (Nordhaus 2008)。米省庁間作業班 (U.S.

Interagency Working Group on Social Cost of Carbon 2010, 2013) は 33 ドルだと。違いは主に割引率から生じ、それについての合意はない。

(b) SCC は割引率に強く依存する。それは、遠い将来に起こる損失を補償する現在の消費として定義されているからだ。割引率だけでほとんど決まるのならモデルは要らない。

(c) DICE モデルでは、1~4°C での GDP 損失が、既存文献と整合的な数 % になるように、温度の 2 乗の係数が決まる。5~7°C 上昇したらどうなるかも、その係数で決まる。3 乗の項があったらそれは極めて大きくなるし、それを含めるかどうかは任意である。だから、IAM はカストロフィの影響について何も教えない。それが含まれたとしても、極めて低い割引率を仮定しないと、ほとんど効いてこない。

ピンディックは、IAM による推計に代えて、次のような方法を提唱する。

1. カタストロフィックな結果を中心に置く。
2. IAM ではなく専門家の判断に頼る。
3. 限界 SCC ではなく平均 SCC に基づいて炭素価格づけをする。限界 SCC は、毎年上がるし、最適経路に乗っているときの最適税率しか教えない。だから、限界 SCC は IAM がないと求められない。

平均 SCC とは「かなり大きな排出削減から現在およびそれ以降に生じる便益のフローの現在価値を、同じ期間の排出削減量で割ったもの」(Pindyck 2017b, p.351) である。平均 SCC は時間を通じてあまり変動しないし、割引率にもそれほど影響されないと言う。そして、IAM によらない様々な方法で求めることができる。彼は、平均 SCC を専門家判断に頼って推計した。そのために、彼は、(i)BAU での GHG 排出はどうか、(ii) 特に対策がとられなかった場合、50 年後および 134 年後の気候変動による GDP 減少率はいくらか、またその分布はどうか、(iii)50 年後に GDP が 20% も減るような大変動を回避するために GHG 排出増加率をどこまで抑えなければならないか、(iv) 妥当な割引率はいくらかについて、専門家の判断を聴く調査を実施した。そして、11 の経済学者の回答から 101.24 米ドル/t-CO<sub>2</sub> という SCC の値を得たことを示した。

## 4 ノードハウスの反論

ピンディックの以前の批判 (Pindyck 2013) へのノードハウスの反論がある。まず割引率に合意がないという点について、それは十分わかっていて割引率について慎重に検討したと言っている (Nordhaus 2014, p.299)。ノードハウスが自信を持っていると思われる事実は次のことである。ラムゼー・モデルを仮定すると、市場の資本収益率 (利潤率と思ってよい)  $r$  と効用割引率 (「純粋割引率」とも言っている)  $\rho$  と経済成長率  $g$  と消費の限界効用の消費弾力性  $\alpha$  との間に

$$r = \rho + \alpha g$$

の関係がある。スターンは 0.001 という極めて低い  $\rho$  を仮定しながら、 $\alpha = 1$  の効用関数を仮定し、また消費が年 1.3% で成長すると仮定しているから、 $r = 0.014$  になってしまうが、これは観察事実と反すると彼は批判していた (Nordhaus 2007)。もし、スターンの  $\rho = 0.001$  を採用し、現実の利潤率 4.5% 程度を仮定すると、 $\alpha = 2.0$  にならなければならないが、この想定の下で SCC を計算すると、自分の (この段階では 18.6 ドル) とあまり違わない 20.6 ドルになる (Nordhaus 2014, p.284)。これで割引率の違いによる結果の違いは、スターンの恣意的な  $\alpha$  想定によるものということになったわけである。

次に、本当は重要なカタストロフィを IAM が扱えていないではないかという点については、まず、それ

を考慮に入れるために、被害関数を極端な形

$$\frac{D}{Y} = 0.01 \left( \frac{T}{T^*} \right)^8$$

にして ( $T^* = 2[^\circ\text{C}]$ ) 計算すると、最適経路に乗っていない場合は SCC が 1046 ドルという高い値になるけれども、最適経路に乗っていれば 54 ドルという穏当な値になることを示して、政策が正しければ、カタストロフィは極端な SCC を生み出すことはないと言い、その上で、IAM がカタストロフィを扱っていないのではなく、それは科学が十分な知識を与えてくれない問題であって IAM の問題ではないと言っている (Nordhaus 2014, p.299)。

そして、IAM が弱点をもつからといって、役に立たないというのは、この IAM という企てを誤解するものだと言い、「IAM と SCC は、高度に複雑で非線形で動学的で不確実な系を扱う観念的な枠組である。人間精神は方程式を同時に解くことはできず、モデルは、様々な要素の影響の ‘if...,then’ 分析を可能にする。モデルは、気候変動政策の多くの側面についての重要な洞察を与えてくれた。SCC という概念は、地球外部性とこのような市場の失敗に対する政策の経済学の自然な帰結である。」と述べている (同 p.301)。また、「IAM は、費用効果の重要性、直接規制に比べて市場を利用した制度がもつ価値、新技術や進歩した科学に関する知識の重要性、多数参加の重要性、キャップ・アンド・トレード制度 (排出権制度) で価格が乱高下する可能性、排出削減の様々なアプローチにかかる費用についての我々の理解を改善した。おそらくその最重要の貢献は、体系的モデル化によって、割引とか被害といった重要論点に光を当てることができて、新たな知見が現れるとそれをきちんと考慮に入れることができるということだろう。」(同) と述べている。

これは、IAM には教育的効果しかないということを白状しているようなもので、むしろ、現実には使いものにならないというピンディクの批判を裏付ける記述である。それも経済学の教育に有効なものでしかなく、そんなことを言われても経済学教育の外にいる人にとっては何もありがたくないことばかりである。割引率の問題を解決したかのような先の議論も、ラムゼー・モデルという、特に現実的な根拠のないモデルを仮定して、さらに、効用関数が、限界効用の消費弾力性  $\alpha$  一定という特殊な形をしていると、これも別に根拠なく仮定したから言えることで、そこから導かれる SCC の値を現実の政策に使うことを正当化する力をもつ議論ではない。

ピンディクの批判のうち妥当でないことが明らかなのは、限界 SCC が最適経路でしか定義できないという点である。2017 年の推計でノードハウスが求めたのは、現在の政策の下での SCC である (Nordhaus 2014, p.274)。最適経路でのそれも求めているが、中心的結果としてそれを提示してはいない。現在の政策のもとでの推定を「ベースラインの推定」と呼んでいる。そして重要なことは、ベースラインの SCC が最適経路下のそれと非常に近い値であるということである。2013 年の推計では、2015 年のベースラインの SCC が 18.6 ドル/t-CO<sub>2</sub> だったのに対して、最適経路でのそれは 17.7 ドル/t-CO<sub>2</sub> であった。年 3% の率で上昇していくが、2050 年の SCC は、ベースラインで 53.1 ドル/t-CO<sub>2</sub>、最適経路下で 51.5 ドル/t-CO<sub>2</sub> である (Nordhaus 2014, p.284)。その理由について、ノードハウスは、「この 2 つのシナリオの間で被害関数が線形に近いからだ」と言っている (同 pp.284-285)。

実際、彼の被害関数は、線形に近くなる要素を持っている。上で見たように、GDP 減少率が温度上昇の 2 乗に比例するという被害関数が想定されている。これは一見逡増的な被害費用が仮定されているように、つまり、限界被害費用が増加していくと仮定されているように見える。しかし、気温上昇が排出量とどのような関係にあるかまで遡れば、必ずしも逡増的な被害関数とは言えない。排出された CO<sub>2</sub> は大気と海洋と生物とに分配されるが、そのうち時点  $t$  に大気中にとどまった量  $M_{AT}(t)$  と放射強制力  $F(t)$  とが、

$$F(t) = \eta \log_2 \frac{M_{AT}(t)}{M_{AT}(1750)} + F_{EX}(t)$$

によって結びつけられる ( $F_{EX}(t)$  は外生的強制力)(Nordhaus 2013, p.17)。そして、放射強制力と気温上昇  $T_{AT}(t)$  とが

$$\begin{aligned} T_{AT}(t) &= T_{AT}(t-1) + \xi_1 \{F(t) - \xi_2 T_{AT}(t-1) - \xi_3 [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)]\} \\ T_{LO}(t) &= T_{LO}(t-1) + \xi_4 [T_{AT}(t-1) - T_{LO}(t-1)] \end{aligned}$$

で結びつけられている ( $T_{LO}(t)$  は海水温上昇)。ここから定常状態では、 $T_{AT}(t)$  は  $F(t)$  に比例する。排出  $E$  (どの年でもよい) のうち一定量が大气に分配されるから、

$$M_{AT}(t) = M_{AT}(1750) + \sigma E$$

と書いてよいだろう。よって、外生的強制力の項を無視すれば、

$$T_{AT}(t) = \mu \log_2 \frac{M_{AT}(1750) + \sigma E}{M_{AT}(1750)}$$

と書いてよいだろう。被害関数は  $D(t) = \varphi T_{AT}(t)^2$  の形をしていたから、

$$D(t) = \varphi \left[ \mu \log_2 \frac{M_{AT}(1750) + \sigma E}{M_{AT}(1750)} \right]^2$$

したがって、

$$\frac{\partial D(t)}{\partial E} = 2\varphi\sigma\mu \frac{T_{AT}(t)}{\log 2 M_{AT}(t)}$$

となり、排出に関する限界被害  $\partial D(t)/\partial E$  は、初め上昇するが、 $T_{AT} = \mu/\log 2$  で最大になり、その後下降する (図 1)。つまり、排出量に関して被害関数は、ある値を超えると逓減的になる。その境目の値の近辺

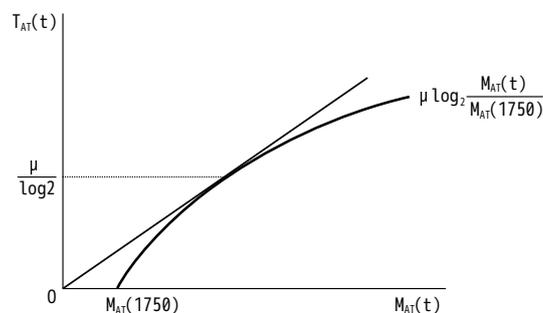


図 1 大気中 CO<sub>2</sub> 量と気温上昇

では限界被害はほぼ水平と見なせるし、それを超えるとずっと逓減的である。

このことは、SCC に等しい税率でピグー的課税を行うだけで十分で、その結果として実現する排出量がどうなっても気にしなくてよく、気温とか排出量といった数量を制御しようとする政策を採ることが有害であるといった主張にとって、大変都合のよい枠組になっていることを示している。実際、ノードハウスの結果では、現在の政策の下での SCC の方が、最適経路での SCC よりも若干高いのだから、現在の政策を前提として推計された SCC を税率として炭素税をかけておけば、排出削減が少なすぎることは決してないのである。

## 5 SCC 使用の真の問題

数量目標枠組よりも炭素価格づけの方が勝っているという点で、ノードハウスとピンディクは一致している。ピンディクは、 $2^{\circ}\text{C}$  目標も根拠がなく、世界中が一致して SCC で課税しさえすればよいと言う。こんなにすぐれた炭素価格づけ政策が採用されないのは、IAM で推計された SCC の値を誰も信じないからだというのがピンディクの見解である。だから、もっと信頼できる SCC を出すというわけだ。

この、SCC 推計の信頼性というのは重大問題だが、ここでは理論上の問題に焦点を当てる。SCC では、費用は消費の減少（ノードハウスの場合）または GDP の減少（ピンディクの場合）で捉えられている。排出の便益がそれに対置され比較されるとしたら、その便益も消費増加または GDP 増加で測られなければならない。そして、SCC を使って行われる政策は、いやしくも最適経路を実現するというのなら、現在の消費または GDP を、その  $\text{CO}_2$  1t 当たり限界減少額（ピンディクの場合は「平均減少額」だが）がちょうど SCC に等しくなる所まで犠牲にするものであるはずだ。問題は、SCC に等しく設定された炭素価格がそのような状態を引き起こすのかということである。

それを探求する前に、なぜ費用が GDP または消費の減少で測られ、便益がその増加で測られているのかを考えておく。伝統的な厚生経済学では、補償原理に基づいて、潜在的パレート改善が生じるかどうかによって効率性を判定するために、変化の費用も便益も補償変分で測る。良くなる変化の便益はそれへの WTP で測られ、悪くなる変化の費用はそれへの WTA で測られる。例えば、100 年後、温暖化によって、ある消費財  $X$  の生産費が上がるでしょう。簡単のために費用は労働費用だけからなり、長期限界費用は一定としよう。温暖化の被害で労働の生産力が落ちて、図 2 の左図のように、財  $X$  の限界費用が  $\Delta p$  だけ押し上げられたとしよう。元の均衡が  $E$  点で、補償需要曲線（ヒックスの需要曲線）が  $D_{Hx}$  であれば、 $ABEC$

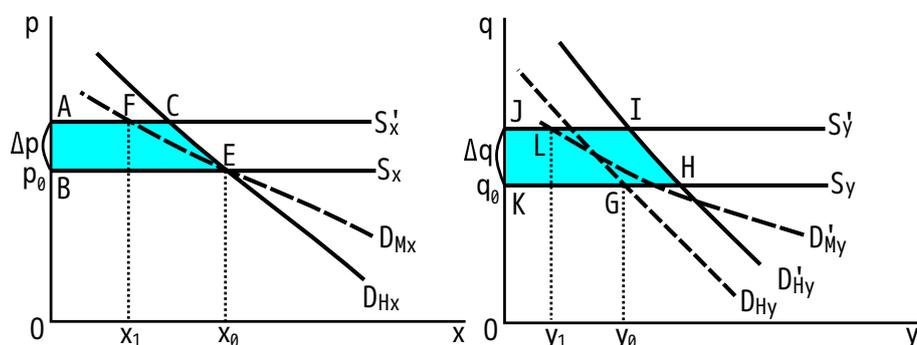


図 2 温暖化被害の部分分析的表現

の面積にマイナスをつけたものがこの変化の補償変分で、マイナスを外したものが、財  $X$  についての温暖化の被害費用を表す。

温暖化は、財  $Y$  の生産力も低下させ、その限界費用を上げるだろう。  $Y$  が  $X$  の代替財であれば、  $X$  の価格上昇で、消費者の選ぶ点が  $E$  点から  $C$  点へ、消費者の効用を低下させることなく移動した時、財  $Y$  の補償需要曲線が  $D_{Hy}$  から  $D'_{Hy}$  へとシフトしているだろう。この時、消費者が選ぶ点は、  $G$  から  $H$  へ移動している。それは、財  $X$  の価格が上昇したにもかかわらず、消費者の効用が変化しないように  $X$  の数量が変化したという架空の想定の下で、財  $Y$  の価格が  $q_0$  のとき消費者が選ぶであろう点である。温暖化が財  $Y$  の生産にも被害を与え、財  $Y$  の生産力が低下して限界費用が上がり、価格が  $\Delta q$  だけ上がるとしよう。このとき、消費者が選ぶ架空の点は右図の点  $H$  から点  $I$  へ動く。この変化の補償変分は  $JKHI$  の面積にマイ

ナスをつけたもので、そのマイナスを外したものが  $Y$  の被害費用だろう。

この  $q$  の変化は  $X$  の需要曲線をシフトさせるだろうが、それを考慮してはいけない。それが部分分析の仮定であり、 $X$  に関する費用は、 $ABEC$  ですでに完全に測られている。それ以上調整してはいけないし、調整のしようもない。実際、 $q$  の変化前の、 $X$  に関して消費者が選ぶ点は、効用不変の下での点  $C$  ではなく、通常の需要曲線（マーシャルの需要曲線）に沿った点  $F$  になっているだろう。この点から補償需要曲線を引かなければならないし、そうすると、元の  $ABEC$  は放棄しなければならなくなる。正しく調整する方法はないのである。

さて、第3の財  $Z$  が現れたら、 $Y$  と同じような手続きで架空の補償需要曲線を引いて補償変分を測ればよい。その時、 $Z$  の価格変化の  $X, Y$  への影響は当然考えてはいけない。これが、温暖化被害費用の部分分析的な正しい測り方である。被害回避の便益は、起点が、点  $E$ 、点  $G$  ではなく、点  $F$ 、点  $L$  になるので、費用とは大きさが変わる（所得効果が正なら小さくなる）だろうが、補償変分でなければならないという点は変わらない。

さて、そのような被害回避の便益と対比されるべきは、例えば現在採られるであろう  $CO_2$  削減対策の費用である。例えば、現在石油の消費量を図3の  $u_0 - u_1$  だけ減らす規制が導入されると、それによって消費者が被る損失は、補償需要曲線  $D_{Hu}$  に沿って測られる補償変分の符号を変えたもので、図の  $MNP$  によって測られる。消費者から石油供給者への支払  $r_0(u_0 - u_1)$  も減るが、それは移転支払なので、費用でも便益

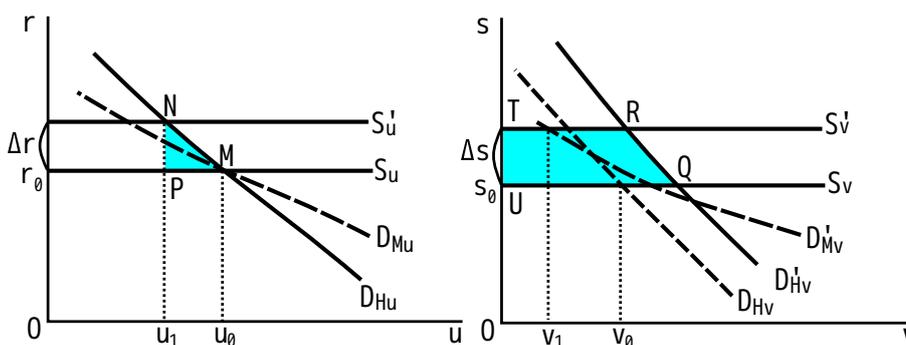


図3 温暖化対策費用の部分分析的表現

でもない。その分の資源が解放されるが、それは他に使われるだろう。あるいは、 $\Delta r$  だけの石油価格上昇をもたらす炭素税によって、石油消費が減らされると考えてもよい。この場合も、消費者の損失は  $MNP$  である。炭素税支払も消費者から政府への移転なので、その分は費用でも便益でもない。

この石油消費抑制は、他の財の需要曲線をシフトさせるだろう。例えば、電力が元価格  $s_0$  で  $v_0$  だけ消費されていたとして、その補償需要曲線が  $D_{Hv}$  から  $D'_{Hv}$  へシフトするだろう。電力でも、エネルギー源の非化石燃料化によって価格が  $\Delta s$  だけ上がるとしたら、このシフトした補償需要曲線の下で、消費者の損失が  $QRTU$  によって測られるだろう。これらが、 $CO_2$  排出削減の費用である。

先の  $CO_2$  排出削減による被害回避便益を現在価値に直したものが、これらの排出削減費用を上回れば、100年後の人々から現在の人々への何らかの補償によってパレート改善が可能なので、潜在的パレート改善が生じるということになる。100年後の人から現在の人への補償をどういう方法とするのかという根本問題があるが、とにかく、以上が、補償原理に基づいて、潜在的パレート改善が起こるかどうかで効率性を論じるというやり方と整合的な、費用と便益の測り方である。

ノードハウスもペンディクも、そのようなものとして費用と便益を測ってはいない。なぜそうするのか。

それは、気候変動のような、消費者が消費するすべての財に影響が及ぶような問題で補償変分を測るのが、実際のみならず理論的にも無理だからである。実際上無理というのは、まず、上の手続きからわかるように、架空の点や架空の補償需要を曲線を次々に引かなければならないからである。現実に観察されるのは、せいぜい温暖化が起こる前の点 E、点 G(それぞれ供給量  $x_0$ 、 $y_0$  に対応する) と、温暖化が起こった後の点 F と点 L(供給量  $x_1$  と  $y_1$ ) である。架空の補償需要曲線  $D'_{Hy}$  はもちろん、点 E を通る  $X$  の補償需要曲線  $D_{Hx}$  ですら、観察はほとんど不可能だろう。これは、ピグーが、マーシャルの消費者余剰や「進んで払おうとする価格」という概念を役に立たないとして、国民分配分の変化によって経済的福祉の変化を捉えようとした理由でもあった (Pigou 1932, p.57)。国民分配分とは国民所得のことだから、GDP や消費額で経済的福祉を捉えようとするのと同じである。ピグーは、現在の経済的福祉を測ることを考えて実際上無理だと言ったのだが、100 年後の需要曲線となると、架空のものでなくても、引けはしないだろう。

そればかりでなく、ピグーもそうだが、気候変動問題でのノードハウスやピンディクのように、全ての財を対象にして、国民分配分で経済的福祉を考えようとする立場からすると、補償変分とか消費者余剰といった尺度には根本的な問題がある。図 2 の財  $X$  と財  $Y$  が、社会の消費財の全てだとしよう。人々は、もっている労働やその他の資源を投入して  $X$  と  $Y$  を各々  $x, y$  だけ生産し、それを購入して消費する。それぞれの価格が  $p, q$  なら、総購入額は  $px + qy$  である。そしてこれが総所得 (国民分配分) に等しい (消費財だけ考えているから)。所得を全てそれらに支出しており、それを超える支払能力はない。支払能力がないところに支払意思額はないから、補償変分の支払額を超える部分 (消費者余剰と言ってもよい) の支払意思額も存在しない。消費者余剰を支払意思額の一部とみなせたのは、実際には  $X$  と  $Y$  が、膨大な財の中の一部に過ぎなくて、それへの支出額が総支出額の一部に過ぎず、他の財一般を「貨幣」の中に押し込むことができたからである。つまり、補償変分は部分分析の概念なのである。それは、国民分配分を経済的福祉の現れと見る立場とは相容れない。

こうして、ノードハウスもピンディクも、費用と便益を、GDP または消費額の変化として捉える。図 2 に即して言えば、この方法は福祉変化を次のように捉えている。まず、温暖化が  $X$  の生産を阻害し、その費用を  $\Delta p$  だけ上げる。これによって、消費者の購入量が変わらなければ、支出が  $\Delta px_0$  だけ増える。また、 $Y$  の支出も  $\Delta qy_0$  だけ増える。消費者の名目所得が変わらなければ (労働量が変わらず賃金一定ならそうなる)、 $X$  と  $Y$  への支出増は、他の財の購入量を減らさずにはおかないだろう。こうして他の財の購入量 (物量) が減る。 $X$  と  $Y$  の購入量もいくらかは減っているだろう。この様な諸財の物量の低下が温暖化の被害であると。

もっとも、温暖化によって特定の財— $X$  とか  $Y$  とか—の生産の限界費用がどれくらい上がるかを推定するのもほとんど無理なので、ノードハウスはそんなことはしていない。ただ被害関数  $D(t) = 0.00236T(t)^2$  によって GDP 減少率を与え、シナリオに沿った GDP を  $1 + D(t)$  で割ったものと割る前の値との差を被害額としているだけである。

ノードハウスは、以前のモデルでは、分野ごとに生産減少分を推定するというやり方を取り、また、消費減少で福祉変化を測るという方法に徹していなくて、WTP でしか測れない便益を含めていた。ノードハウスとボイヤー (Nordhaus and Boyer 2000) は、例えば農業について、CO<sub>2</sub> 濃度が 2 倍になったとき (2.8~5.6°C 上昇) のいくつかの地域の農業収入の減少率についての推定結果に、地域ごとの農業の対 GDP 比を組み合わせ、温暖化影響指数の値を得た (Nordhaus and Boyer 2000, pp.74-76)。例えば 1995 年の 1 人あたり所得での 2.5°C 上昇の場合の、米国、中国、日本のこの指数は 0.07%、-0.51%、-0.55% となっている。マイナスがついているのは、温暖化によって正の便益があるということで、日本の場合、GDP の 1% 程度を占める農業の生産 (所得) が 5 割程度増えることを示している。農業影響以外に、海面上昇、その他市場経済部門、健康、非市場アメニティ、居住地・生態系、カタストロフィの分野の影響指数が推計された。

このうち、健康、居住地・生態系、カタストロフィについては、被害回避への WTP の推定値に基づいて指数が作られた。

例えば健康については、温暖化による生存年の短縮に、1 年生存延長に対する WTP が所得の 2 年分であるという想定を結びつけて指数が作られた (同 pp.80-82)。居住地・生態系については、気候変動に対して脆弱な資産および生態系が地域の総生産の 5~25%(平均 10%) であると見なし、どの地域の人も、2.5°C の気温上昇による影響を避けるために、その 1% を支払う意思をもっていると仮定して指数を算出している (同 pp.85-87)。急激な海面上昇や季節風の変化や南極の氷の崩壊や海流の変動といったカタストロフィについては、それが起こる確率を、2.5°C 上昇で 1.2%、6°C 上昇で 6.8% とし、それが起きたときの世界の平均所得損失を GDP の 30% とし、これを地域の脆弱性に応じて各地域に割り振り、相対的リスク回避度 (所得  $y$  の効用を  $u(y)$  として  $-yu''(y)/u'(y)$ ) を 4 とし、ある確率で起こる所得損失を回避するために人々がいくら支払う意思をもつかが計算された。それによると、米国では 2.5°C 気温上昇の下で 22.1% の所得損失が 1.2% の確率で起こり、それを避けることへの WTP は所得の 0.44% である (同 p.90)。

以上を合計すると、2.5°C の気温上昇で、例えば米国では GDP の 0.45% の損失があるが、その内の 98% に当たる 0.44% がカタストロフィ被害である (同 p.91)。日本は GDP の 0.50% の損失のうち 9 割の 0.45% がカタストロフィ被害である。世界全体では、GDP の 1.5% の損失のうちの 68% に当たる 1.02% がカタストロフィ被害である。このカタストロフィ被害と健康被害と居住地・生態系被害は、それを回避することへの WTP で測られている。これらの金額が、農業生産の減少などの GDP 減少と足し合わされて、総被害額とされているのであるが、この 2 つは別物である。GDP は実際に支払われた金額の集計値であるが、健康や生態系保全やカタストロフィ回避への WTP は支払われていない。この部分について支払われていない便益を GDP に加えるのなら、農業生産物や他の生産物についても、支払われていない消費者余剰分を加えないと整合的でなく、それらを全部加えた額は GDP をはるかに超えるが、その額を支払う能力はないのだから、それは支払意思額ではありえない。

GDP や消費額で経済的福祉を捉えるのはピグー流であり、WTP で経済的福祉を捉えるのはマーシャル流である。両者は別物で混ぜて使ってはいけない。ノードハウスは 2013 年以降の計算では、以前の方法を捨てたと言っている。すなわち、「[DICE/RICE の] 以前の版は、ノードハウスとポイヤー (2000) による分野別の詳細な推定値に頼っていたが、それらの推定値は古びて信頼できないことがわかった。2013 年モデルは、現在得られる諸推定値に基づいた単純な被害関数を用いる。」(Nordhaus 2013, p.11) と。そして、それらの推定値がカタストロフィ被害を含まないから、25% 加算したと言う (同)。しかし、ノードハウスとポイヤーの 2000 年の推定値は、「現在得られる諸推定値」に含まれており、しかも、重み 1 を与えられる重要結果として被害関数推定に入っている。そして、上で見たように、その被害額の大半がカタストロフィ被害である。少なくとも、2000 年の結果からカタストロフィ被害分を除いて推定して、25% 加算をしなければならなかったのではないかと思われる。

このように、依拠した諸研究の一部に WTP に基づく被害額が入っており、カタストロフィ被害が二重計算されているといった矛盾が含まれていると思われるが、現在のノードハウスの SCC が、消費損失で定義されていると仮定して、最初に提起した問題に戻ろう。すなわち、SCC に等しく設定された炭素価格が、現在の消費または GDP を、その CO<sub>2</sub>1 トンあたり減少額が SCC に等しくなるまで減らすのかという問題である。

例えば、税率 100 米ドル/t-CO<sub>2</sub> で炭素税がかけられたとき、それは炭素を含有する燃料の価格をその分押し上げるだろう。例えば、ガソリンなら 0.2 米ドル/L 程度である。それは、補償需要曲線に沿ったガソリン需要減少に伴って、図 4 の網掛け部分で測られる消費者損失 (補償変分の符号を変えたものである) をもたらす。限界においてその損失は 0.2 米ドル/L である。生産者余剰もあればそれも失われるが、生産の

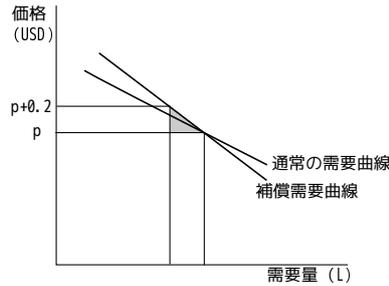


図4 炭素税による消費減

限界費用が一定なら生産者余剰はないから、消費者余剰だけ見ればよい。

この消費者損失は消費損失でも GDP 損失でもない。それは、消費者が、限界においてガソリン 1L を失うと同時にその対価の支払を免れるとき、消費者の心理の中に生まれる効用低下の貨幣等価物である。ガソリン生産の減少によって誰かの所得が減るが、その大きさは 0.2 米ドル/L と何の関係もない。中間投入を無視すれば、限界においてそれは  $p$  米ドルである。限界において、消費額は  $p + 0.2$  米ドル減っているが、そのうち  $p$  ドル分の資源が解放され、他の活動に従事して所得と消費支出を生んでいるだろう。0.2 ドルは炭素税として支払われるが、それは移転支払であり、経済全体ではどこかで支出されて所得を生んでいるだろう。

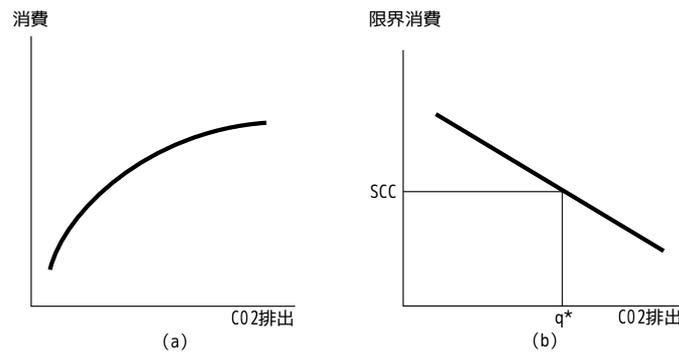


図5 SCCを機能させる消費源とCO<sub>2</sub>排出との関係

ノードハウスが定式化したとおりの SCC が気候政策を導いて最適排出削減をもたらすためには、図 5 の (a) のような消費と CO<sub>2</sub> 排出量との関係があって、そこから (b) 図のような限界消費曲線が導かれ、SCC と限界消費とが等しくなる消費量  $q^*$  が選ばなければならない。税率が SCC に等しく設定された炭素税がこの結果を導くには、図 4 に示された人々の行動が図 5 の結果をもたらすという関係が必要だが、そのようなものはない。よって、炭素価格づけは基礎を失い、政策としての優位性も失うのである。

以上、主に限界 SCC について述べたが、ペンディクの平均 SCC では、それを炭素税として課したときに起こる行動と、最大化されるべき純便益概念との乖離はもっと大きくなる。

図 5 で示される行動を引き起こすように炭素価格づけ政策に何らかの工夫ができたとしたら、そのような炭素価格づけは消費額で測られる純便益を最大化するという目的に資するだろう。そうして実現する経路は、何もしない場合と比べて、将来の消費を増やし、現在の消費を減らすだろう。これは世代間の分配変化をひきおこす。分配変化を伴った経済的変化の是非を、通常のコスト便益分析は、補償原理に頼って、分配を

効率性から切り離す論理を使って云々することができるようにしている。補償原理を世代間に当てはめるには、世代間では金銭補償は無意味なので、例えば、現在世代が貯蓄を減らして将来に残す資本を減らすという形での補償を考えるしかない。そのようなことを考える必要性自体が、気候変動問題を効率性で捉えることの妥当性に疑問を投げかけられると思われるが、SCC 概念では、そのようなことを一切考えなくてよくなっている。なぜなら、社会的厚生関数の定式化からわかるように、世界は1人の消費者からなり、その消費者が永遠の生命をもつと仮定されているからである。分配問題は存在しない。マーシャル、ピグー、ロビンズ、ハロッド、カルドア、ヒックス、リトル、ミシャンらを悩ませた厚生経済学の大問題が、数行の式で消し去られたわけである。

## 6 まとめ

SCC に基づく炭素価格づけは、実現できれば、ピグー的課税の理念に最も合致したものである。しかし、将来の消費と現在の消費とを用いて定義されているように見える SCC の内実は、その中に、消費とは異質の WTP を含んだ混合物であり、仮にそのような混在を無視して、言われている通りに計測された消費減少分であったとしても、それを税率に炭素税を課したとき、限界において、現在の消費の減少分を将来消費増加分の現在価値と等しくするような行動を引き起こさず、消費で定義された純便益を最大化するものではないということを明らかにした。SCC に頼ることができなければ、炭素価格づけが他の政策手法に対してもっているとされた優位性は失われるのである。

## 参考文献

- [1] Baumol, W. J. and Oates, W. E. (1971), 'The use of standards and prices for protection of the environment', *Swedish Journal of Economics*, 73, March, 42-54.
- [2] Dales, J. H. (1968), 'Land, water and ownership', *Canadian Journal of Economics*, 1, 791-804.
- [3] Flachsland, C., Pahle, M., Burtraw, D., Edenhofer, O., Elkerbout, M., Fischer, C., Tietjen, O. and Zetterberg, L. (2018), 'Five myths about an EU ETS carbon price floor', *CEPS Policy Insight*, No. 2018-17.
- [4] Hepburn, C. (2009), 'Carbon taxes, emissions trading, and hybrid schemes', in *The Economics and Politics of Climate Change*, edited by D. Helm and C. Hepburn, 365-384. Oxford: Oxford University Press.
- [5] Kneese, A. (1964), *The Economics of Regional Water Quality Management*, the Johns Hopkins Press, Baltimore.
- [6] Nordhaus, W. (2007), 'The *Stern Review* on the economics of climate change'.
- [7] Nordhaus, W. (2008), *A Question of Balance: Weighing the Options on Global Warming Policies*. New haven, CT: Yale University Press.
- [8] Nordhaus, W. with Sztorc, P.(2013), *DICE 2013R: Introduction and User's Manual*.
- [9] Nordhaus, W. (2014), 'Estimates of the social cost of carbon: concepts and results from the DICE-2013R model and alternative approaches', *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, Vol. 1, No. 1/2 (Spring/Summer 2014), pp.273-312.
- [10] Nordhaus, W. (2015), 'Climate clubs: overcoming free-riding in international climate policy', *American Economic Review*, 105(4): 1339-1370.

- [11] Nordhaus, W. (2017), 'Revisiting the social cost of carbon', *PNAS*, 114(7): 1518-1523.
- [12] Nordhaus, W. and Boyer, J. (2000), *Warming the World: Economic Models of Global Warming*, MIT Press.
- [13] Nordhaus, W. and Moffat, A. (2017), 'A survey of global impacts of climate change: replication, survey methods, and statistical analysis', NBER Working Paper Series, No. 23646.
- [14] Pigou, A. C. (1932), *The Economics of Welfare*, 4th edition, Macmillan から。邦訳は、ヒグウ『厚生経済学』全4冊、気賀健三・千種義人・鈴木諒一・福岡正夫・大熊一郎訳、東洋経済新報社1953年。
- [15] Pindyck, R. S. (2013), 'Climate change policy: What do the models tell us?' *Journal of Economic Literature*, 51, no. 3: 86072.
- [16] Pindyck, R. S. (2017a), 'The use and misuse of models for climate policy', *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1): 100-114.
- [17] Pindyck, R. S. (2017b), 'Coase Lecture—Taxes, targets and the social cost of carbon', *Economica*, 84: 345-364.
- [18] Roberts, M. J. and Spence, M. (1976), 'Effluent charges and licenses under uncertainty', *Journal of Public Economics*, 5 (3-4): 193-208.
- [19] Stern, N. (2007), *The Economics of Climate Change: the Stern Review*. Cambridge University Press.
- [20] Tol, R.S.J. (2009), 'The economic effects of climate change', *J. Economic Perspectives*, 23: 29-51.
- [21] U. S. Interagency Working Group on Social Cost of Carbon (2010), Social cost of carbon for regulatory impact analysis under Executive Order 12866.
- [22] U. S. Interagency Working Group on Social Cost of Carbon (2013), Technical support document: technical update of the social cost of carbon for regulatory impact analysis.
- [23] Weitzman, M. L. (1974), 'Prices vs. Quantities', *Review of Economic Studies*, 41, October, 477-491.