

論文

石油のノーブルユースが原油生産と炭素排出に及ぼす影響に関する理論分析

有井 哲夫

アブストラクト：気候変動問題に起因する化石燃料削減の世界的な潮流に対して、産油国は石油製品の多様化—ノーブルユースと呼ばれる新用途開発—によって、原油生産を継続し経済成長を維持しようとしている。この産油国の資源戦略が、原油生産と炭素排出にどのような影響を及ぼすかは重要かつ興味深い研究課題である。本論文ではこの課題を理論的に分析し、独占的石油生産者による最適石油生産経路を、単一用途（燃料利用）のみの場合と複数用途の場合（燃料及び化学製品利用）について導出し比較した。その結果、化学製品の生産は燃料需要が存在する期間、最適石油生産量を増加させるという理論的結果を得た。また、燃料と化学製品の資源枯渇までの生産期間に関して、燃料および化学製品の価格から生産費用を差し引いたマージンが重要なパラメーターであることを確認した。

1. はじめに

温室効果ガス（GHG）排出削減は、世界各国が直面する最も重要な課題の一つである。石油は温室効果ガスの主な発生源の一つであり、原油市場は不完全競争状態にあり、供給者は生産量を調整することでGHG排出量に影響を与える¹。しかし、GHG排出量削減のための政策手段は、カーボンプライシングや再生可能エネルギーへの補助金など、主として需要サイドに焦点が当てられており、供給側メカニズムは実際の政策設計においてほとんど考慮されていない。

既往研究には、GHG排出削減を供給側から論じる文献も一部ある。Sinn (2008, 2012) は、炭素税の増税は非再生可能資源の生産を増加さ

せるというGreen Paradoxを論じている。以下に示すように、いくつかの論文では、様々な条件下で動的生産モデルを用いてGreen Paradoxの存在を検証した。ただし、これらの論文はいずれも単独の資源の市場だけに焦点を当てたものである。

現実には、原油は主として燃料製品に利用されるが、一部は化学製品にも利用される。現在、多くの産油国が原油の高付加価値化、産業構造の多様化のためにノーブルユースすなわち化学製品生産への投資を拡大している。また、GHG削減の観点から、燃料生産から化学製品生産に投資をシフトしている。このような政策の方向性は、二酸化炭素排出量削減を促進することになるのだろうか、あるいはその排出を促進することになるのだろうか？この点に関して、燃料市場と化学製品市場の両方を並行して

1 石油市場のメカニズムに関する実証分析については、有井 (2022) を参照。

分析した既往研究はほとんどない²。

本論文では燃料生産に加えて、こうした化学製品生産を燃料生産と並行させた動的最適生産モデルを分析した。その結果、化学製品生産は原油の初期生産量を増加させ、枯渇までの時間を短縮し、その結果、炭素排出量を増加させる可能性があることを示した。

前述のように、Green Paradoxに関する文献では、気候変動政策が化石資源市場の供給サイドに与える影響を分析している。Gerlagh(2011)は、「弱いGreen Paradox」と「強いGreen Paradox」という概念を導入した。前者は短期的な炭素排出量の増加を表し、後者は累積的な排出量の増加を意味する。Gronwald et.al. (2017) は、クリーンエネルギー補助金が弱いGreen Paradoxにつながることを検証している。Andrade and Daubanes (2016) は、backstop priceにより炭素税が短期・長期の生産に影響を与えることを示した。石油（製品）には完全代替品³が存在し、石油（製品）価格がそれら代替品の価格を超えると需要がゼロとなる。この需要がゼロとなる価格を backstop 価格と称している。Van der Meijden et.al. (2018) は、それぞれの気候政策が異なる2地域の設定において、Green Paradoxを防ぐための条件を導いた。Van der Meijden and Withagen(2019) は、不完全代替において、炭素税と再エネへの補助金による初期生産量の増加を防ぐための条件を示した。Van der Meijden and Withagen(2020) は、backstop price を利用した枠組みで、気候政策が異なる2地域に直面する独占企業の行動を明ら

2 同分野の文献サーベイについては有井 (2019) を参照。

3 具体的には再生可能エネルギーやバイオプラスチック等がある。

かにした。

これらの文献は、炭素税が初期排出量や累積排出量を増加させるか減少させるかを論じているが、いずれも単独製品の市場を対象としており、原油からの化学製品生産は考慮されていない。燃料市場における価格は原油市場にリンクしており、有井 (2022) の実証研究により、原油市場が独占者とプライステイカーからなる競争的プレイヤーによって構成されるとみなされる⁴。また、化学製品市場は基礎化学品から機能性化学品まで多段階あるが、産油国が目標としているのは付加価値の高い機能性化学品であり、機能性化学品市場は市場集中度が高い。

そこで、本論文では、燃料生産と並行して化学製品生産を行う最初のアプローチとして、両市場とも独占市場を分析する。本論文では、独占企業の原油枯渇までの生産経路を分析するために、backstop price の枠組みを採用した。その結果、以下の分析結果を得た。

原油の初期資源量の燃料および化学製品生産の期間への影響を確認し、特に、化学製品の市場条件が原油資源の長期的な生産経路に影響があることを示した。また、枯渇までの期間は化学製品と燃料のマージン⁵比率で決定されることを示した。

4 Green Paradox 研究では、独占とともに寡占モデルの研究もあるが、主要な結果である Sinn のコンジェクチャーが成立する条件は、市場構造の違いによらない。寡占—複占モデルの文献としては、Van der Meijden G, Withagen C, Benckekroun (2022), Benckekroun H, Van der Meijden G, Withagen C (2020) がある。

5 マージンとは価格から単位費用を差し引いたものを指す。資源経済学においてレントと呼ばれるものと同義である。

特に一定の条件のもとでは、化学製品単独ケースの方が燃料単独ケースよりも原油資源が早く枯渇すること、燃料生産期間に関しては2用途製造ケースの方が燃料単独ケースよりも短いことを示した。また、燃料・化学製品2用途利用ケースは、燃料単独ケースに比較して各時点生産量が大きくなることを示した。さらに、燃料排ガスの炭素固定費用、および、化学製品に関する炭素循環の費用が、各マージンの減少を通じて、backstop priceへの到達時間を短縮する可能性があることを示した。これらの結果から、炭素税によるGreen Paradoxの可能性が示唆され既往論文と整合的な結果となった。

以下、本論文は次のように構成されている。第2節ではモデルを示す。第3節では、モデルの分析から化学製品利用が原油生産に及ぼす影響を明らかにする。第4節では、第3節の結果を利用して、石油の化学製品利用が炭素排出削減に及ぼす影響を論じる。第5節で本論文をまとめる。

2. モデル

本モデルでは、独占企業は原油を採掘し、燃料または化学製品に変換して販売する。それぞれの市場において完全代替品の存在、したがってbackstop priceの存在を仮定する。独占企業はそれぞれの製品価格がbackstop priceに達するまで、その生産経路に沿って利潤を最大化する。以上から、原油生産者の問題は次のように記述される。

$$\max_{r_f, r_c} \int_0^{\bar{t}} [r_f(t) \{p_f(r_f(t)) - c_f\} + r_c(t) \{p_c(r_c(t)) - c_c\}] e^{-\rho t} dt \quad (1)$$

subject to

$$\dot{S}(t) = -r_f(t) - r_c(t) \quad (2)$$

$$S(t) \geq 0, \quad S(0) = S_0 > 0, \quad (3)$$

$$0 \leq r_f, \quad 0 \leq r_c \quad (4)$$

ここで、 p_i , c_i , r_i ($i = f, c$)は、それぞれ、価格、単位費用、生産量を表し、 S は資源賦存量を表す。添字 f (fuel)は石油の燃料利用を表し、 c (chemical)は化学製品利用を表す。原油からの燃料製造プロセスと化学製品製造プロセスは通常異なる技術を利用しており、したがって、その費用も異なる。

独占者が直面する石油製品価格(逆需要関数)は、既存研究にならない、線形の逆需要関数を仮定する。

$$p_f(r_f) = \bar{p}_f - a_f r_f, \quad p_c(r_c) = \bar{p}_c - a_c r_c \quad (5)$$

ここで、 \bar{p}_f , \bar{p}_c は、それぞれ燃料および化学製品のbackstop Priceを表す。化学製品のbackstop priceは燃料のそれよりも高いと仮定する。

$$\bar{p}_f < \bar{p}_c \quad (6)$$

これは実際の市場において、化学製品は機能的な付加価値が高く、燃料に比べて高価格で取引されているという定型化された事実に基づく。以上の前提において次を仮定する。

仮定 1

$$\bar{p}_f - c_f < \bar{p}_c - c_c \quad (7)$$

上記仮定は、実際の市場では化学製品は燃料に比較して収益性が高く、マージンもより大きいという定型化された事実に基づく。

この問題のHamiltonianを次のように定義する。

$$H = r_f(t) \{p_f(r_f(t)) - c_f\} + r_c(t) \{p_c(r_c(t)) - c_c\} - \omega(t) \{r_f(t) + r_c(t)\} \quad (8)$$

ここで、 ω は資源のshadow priceを表す。最適解の必要十分条件は次の式で表される。

$$\frac{\partial H}{\partial r_f} = -2a_f r_f(t) + \bar{p}_f - c_f - \omega(t) \leq 0 \quad (9)$$

with equality if $r_f(t) > 0$

$$\frac{\partial H}{\partial r_c} = -2a_c r_c(t) + \bar{p}_c - c_c - \omega(t) \leq 0 \quad (10)$$

with equality if $r_c(t) > 0$

$$\dot{\omega} = -\rho\omega \quad (11)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} S(t) \omega(t) e^{-\rho t} = 0 \quad (12)$$

これより次の命題を得る。

命題 1

初期資源賦存量 S_0 に依存して、原油資源枯渇時点 $\bar{T}_c \in [0, \infty]$ が存在する。また、 $S^* > 0$ が存在して、 $S_0 < S^*$ ならば、化学製品利用のみが行われ、他方、 $S_0 > S^*$ ならば、時点 $\bar{T}_f \in (0, \bar{T}_c)$ が存在して、 $t \in (0, \bar{T}_f)$ では、燃料利用と化学利用の両方が行われ、 $t \in (\bar{T}_f, \bar{T}_c)$ では化学製品のみ生産される。 S^* は次式で与えられる。

$$S^* = \frac{(\bar{p}_c - c_c)}{2a_c} \left\{ \ln \frac{(\bar{p}_c - c_c)}{(\bar{p}_f - c_f)} + \frac{(\bar{p}_f - c_f)}{(\bar{p}_c - c_c)} - 1 \right\} \quad (13)$$

証明

shadow price ω の初期値を ω_0 とする。(11)式より、

$$\omega(t) = \omega_0 e^{\rho t} \quad (14)$$

\bar{T}_f , \bar{T}_c を燃料、化学製品のbackstop priceへの

到達時点とすると、 \bar{T}_f , \bar{T}_c は(9)式、(10)式から次式で与えられる。

$$\bar{p}_f - c_f = \omega(\bar{T}_f) = \omega_0 e^{\rho \bar{T}_f} \quad (15)$$

$$\bar{p}_c - c_c = \omega(\bar{T}_c) = \omega_0 e^{\rho \bar{T}_c} \quad (16)$$

ただし、初期shadow price ω_0 は次式で表される。

$$\omega_0 = \omega(\bar{T}_f) e^{-\rho \bar{T}_f}, \quad \omega_0 = \omega(\bar{T}_c) e^{-\rho \bar{T}_c} \quad (17)$$

上記関係を(14)式に代入すると、各時点のshadow priceは次式で表せる。

$$\omega(t) = \omega_0 e^{\rho t} = \omega(\bar{T}_f) e^{-\rho(\bar{T}_f - t)} = (\bar{p}_f - c_f) e^{-\rho(\bar{T}_f - t)} \quad (18)$$

$$\omega(t) = \omega_0 e^{\rho t} = \omega(\bar{T}_c) e^{-\rho(\bar{T}_c - t)} = (\bar{p}_c - c_c) e^{-\rho(\bar{T}_c - t)} \quad (19)$$

仮定1より、

$$\bar{p}_f - c_f < \bar{p}_c - c_c = \omega(\bar{T}_c) \quad (20)$$

(10)式の関係から、

$$\bar{p}_f - c_f < \omega(\bar{T}_c) e^{-\rho(\bar{T}_c - t)} \quad (21)$$

したがって、 t 時点の右辺shadow priceが上記関係を満たす範囲で、燃料は生産されず化学製品のみ生産される。そこで、 t^* を次の式で定義すると、

$$\bar{p}_f - c_f = \omega(\bar{T}_c) e^{-\rho(\bar{T}_c - t^*)} \quad (22)$$

$t > t^*$ の範囲では化学製品のみ生産され、 $t < t^*$ の範囲では燃料と化学製品の両方が生産される。

次に t^* 時点の資源賦存量 S^* を導出する。

$$T^* = \bar{T}_c - \bar{T}_f, \quad t^* = 0 \text{ とおくと,}$$

$$\begin{aligned}
S^* &= \int_0^{T^*} r_c(t) dt \\
&= \int_0^{T^*} \{\bar{p}_c - c_c - \omega(t)e^{-\rho(T^*-t)}\} dt \\
&= \frac{(\bar{p}_c - c_c)}{2a_c} \int_0^{T^*} (1 - e^{-\rho(T^*-t)}) dt \\
&= \frac{(\bar{p}_c - c_c)}{2a_c} \left\{ T^* - e^{-\rho T^*} \frac{e^{\rho T^*} - 1}{\rho} \right\} \\
&= \frac{(\bar{p}_c - c_c)}{2\rho a_c} (\rho T^* + e^{-\rho T^*} - 1) \quad (23)
\end{aligned}$$

初期時点の shadow price は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
\omega(0) &= \bar{p}_f - c_f = \omega(T^*) e^{-\rho T^*} \\
&= (\bar{p}_c - c_c) e^{-\rho T^*} \quad (24)
\end{aligned}$$

上記より、次式の関係を得る。

$$\rho T^* = \ln \frac{\bar{p}_c - c_c}{\bar{p}_f - c_f} \quad \text{or} \quad e^{-\rho T^*} = \frac{\bar{p}_c - c_c}{\bar{p}_f - c_f} \quad (25)$$

(25) 式に代入し、次式を得る。

$$\begin{aligned}
S^* &= \frac{(\bar{p}_c - c_c)}{2\rho a_c} (\rho T^* + e^{-\rho T^*} - 1) \\
&= \frac{(\bar{p}_c - c_c)}{2\rho a_c} \left(\ln \frac{\bar{p}_c - c_c}{\bar{p}_f - c_f} + \frac{\bar{p}_c - c_c}{\bar{p}_f - c_f} - 1 \right) \quad (26) \\
&\text{QED}
\end{aligned}$$

命題2

$S_0 = S^*$ のとき、原油は次式で示される T^* の時点で枯渇する。

$$T^* = \frac{1}{\rho} \ln \frac{\bar{p}_c - c_c}{\bar{p}_f - c_f} \quad (27)$$

証明

命題1の証明における、(25)式による。

QED

3. 化学利用が原油生産に及ぼす影響

本節では、化学製品利用が新用途として開発されることが石油生産にどのような影響を及ぼすかを明らかにする。具体的には、燃料利用のみ（すなわち化学製品利用が新用途として開発

されていない状態）と、燃料および化学製品の2種類の利用が存在する場合の最適石油生産経路を比較する。

以下、初期資源量の大小により2ケースに分けて考察を行う。すなわち、初期資源量が S^* より小さいケースと大きいケースである。

(1) 初期資源量が S^* より小さいケース

$$S_0 \leq S^* \quad (28)$$

この場合、燃料または化学製品のどちらかの単一用途のために原油は生産される。単一製品生産モデルの最適生産経路が満たす必要十分条件は、命題1の証明に示した通り、次式で表せる。

$$\begin{aligned}
S_0 &= \int_0^{\bar{T}_i} r_i(t) dt \\
&= \frac{\bar{p}_i - c_i}{2a_i} \int_0^{\bar{T}_i} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_i - t)}) dt \\
&\quad i = f, c \quad (29)
\end{aligned}$$

関数 $g_i(S_0, \delta, T_i)$ を次で定義する：

$$\begin{aligned}
g_i(S_0, \delta, \bar{T}_i) \\
= S_0 - \delta \int_0^{\bar{T}_i} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_i - t)}) dt \quad (30)
\end{aligned}$$

g_i は次を満たす。

$$\frac{\partial g_i}{\partial S_0} > 0, \quad \frac{\partial g_i}{\partial \delta} < 0, \quad \frac{\partial g_i}{\partial \bar{T}_i} < 0 \quad (31)$$

ただし第3式は以下のように導出される。

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial \bar{T}_i} \int_0^{\bar{T}_i} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_i - t)}) dt \\
&= 1 - \frac{\partial}{\partial \bar{T}_i} e^{-\rho \bar{T}_i} \int_0^{\bar{T}_i} e^{-\rho t} dt \\
&= 1 + \rho e^{-\rho \bar{T}_i} \int_0^{\bar{T}_i} e^{-\rho t} dt - e^{-\rho \bar{T}_i} e^{\rho \bar{T}_i} \\
&= \rho e^{-\rho \bar{T}_i} \frac{(e^{\rho \bar{T}_i} - 1)}{\rho} = 1 - e^{-\rho \bar{T}_i} > 0 \quad (32)
\end{aligned}$$

以上より次の結果が得られる。

命題3

$S_0 \leq S^*$ の時、次の条件式が成立するならば、化学製品利用（新用途）のある場合の方が化学製品、燃料のみが利用されるケースよりも早く石油資源が枯渇する。また、逆の不等号が成立するときは燃料利用のみの場合においてより早く石油資源は枯渇する。

$$\frac{1}{a_c}(\bar{p}_c - c_c) > \frac{1}{a_f}(\bar{p}_f - c_f) \quad (33)$$

証明

$S_0 \leq S^*$ の時、初期資源は単一製品で利用し尽される。

$$\begin{aligned} g_i(S_0, \delta, \bar{T}_i) \\ = S_0 - \delta \int_0^{\bar{T}_i} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_i - t)}) dt = 0 \end{aligned} \quad (34)$$

(34) 式の関係より次の関係式を得る。

$$\frac{\partial \bar{T}_i}{\partial \delta} = -\frac{\partial g_i / \partial \delta}{\partial g_i / \partial \bar{T}_i} < 0 \quad (35)$$

QED

(2) 初期資源量が S^* より大きいケース

$$S_0 > S^* \quad (36)$$

2種類の用途の場合の石油の賦存量を $S_2(t)$ とすると、化学製品利用がある場合には $S_2(t) \in [S_0, S^*)$ の範囲では燃料利用と化学製品利用の2種類の用途に原油が利用される。その生産量の合計を $r_2(t)$ と表す。これまでの議論により、 $r_2(t)$ は次のように表される。

$$\begin{aligned} r_2(t) &= r_f(t) + r_c(t) \\ &= \frac{(\bar{p}_f - c_f)}{2a_f} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_f - t)}) \\ &\quad + \frac{(\bar{p}_c - c_c)}{2a_c} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_c - t)}) \\ &\text{for } t \in [0, t_f] \end{aligned} \quad (37)$$

燃料だけの生産の場合、石油賦存量 $S_1(t)$ 、その各時点生産量を $r_1(t)$ と表す。 $r_1(t)$ は次のように表される。

$$r_1(t) = \frac{(\bar{p}_f - c_f)}{2a_f} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_f - t)}) \quad (38)$$

命題4

$S_0 > S^*$ のとき、 $\bar{T}_1 > \bar{T}_f$ すなわち、燃料単独利用の場合の石油枯渇時点は、燃料・化学用途の場合の燃料利用終了後となる。

証明

$[0, \bar{T}_f]$ における化学製品利用と燃料利用による石油生産量は次式で与えられ、

$$\begin{aligned} r_2(t) &= r_f(t) + r_c(t) \\ &= \frac{(\bar{p}_f - c_f)}{2a_f} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_f - t)}) \\ &\quad + \frac{(\bar{p}_c - c_c)}{2a_c} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_c - t)}) \\ &\text{for } t \in [0, t_f] \end{aligned} \quad (39)$$

$[0, \bar{T}_1]$ における燃料利用による石油生産量は次式で与えられる。

$$r_1(t) = \frac{(\bar{p}_f - c_f)}{2a_f} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_1 - t)}) \quad (40)$$

$T_1 \leq \bar{T}_f$ を仮定すると、 $\bar{T}_1 - t \leq \bar{T}_f - t$ となり、(39)、(40) 式より

$$\begin{aligned} r_1(t) &< r_f(t) < r_2(t) \\ &\text{for all } t \in [0, \bar{T}_1] \end{aligned} \quad (41)$$

$t = \bar{T}_1$ における2用途利用の石油残存量は $S_2(\bar{T}_1) > S^* > 0$ であり、一方、燃料利用のみの場合は、 $S_1(\bar{T}_1) = 0$ である。以上を合わせると、

$$\begin{aligned} 0 &= S_0 - \int_0^{\bar{T}_1} r_1(t) dt > \\ &S_0 - \int_0^{\bar{T}_1} r_2(t) dt = S_2(\bar{T}_1) > 0 \end{aligned} \quad (42)$$

となり矛盾を生じる。したがって、 $\bar{T}_1 > \bar{T}_f$ でなければならない。 QED

命題5

$S_0 > S^*$ のとき、(33) の不等式が成立するとする。このとき、 $r_1(t) < r_2(t)$ for all $t \in [0, T^*)$ 。すなわち、燃料・化学2用途のケースの各時点生産量は、燃料単独利用のケースの各時点生産量よりも増加する。

証明

両ケースの各時点生産量の差をとって整理し、(33) を代入すると下記 (46) 式が得られる。

$$\begin{aligned} r_2(t) &= r_f(t) + r_c(t) \\ &= \frac{(\bar{p}_f - c_f)}{2a_f} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_f - t)}) \\ &\quad + \frac{(\bar{p}_c - c_c)}{2a_c} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_c - t)}) \end{aligned} \quad (43)$$

$$r_1(t) = \frac{(\bar{p}_f - c_f)}{2a_f} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_1 - t)}) \quad (44)$$

$$\begin{aligned} r_2(t) - r_1(t) &= \frac{(\bar{p}_f - c_f)}{2a_f} (-e^{-\rho(\bar{T}_f - t)} + e^{-\rho(\bar{T}_1 - t)}) \\ &\quad + \frac{(\bar{p}_c - c_c)}{2a_c} (1 - e^{-\rho(\bar{T}_c - t)}) \\ &= \frac{(\bar{p}_f - c_f)}{2a_f} (-e^{-\rho\bar{T}_f} + e^{-\rho\bar{T}_1}) e^{\rho t} \\ &\quad + \frac{(\bar{p}_c - c_c)}{2a_c} (e^{-\rho t} - e^{-\rho\bar{T}_c}) e^{\rho t} \end{aligned} \quad (45)$$

$$\geq \frac{(\bar{p}_f - c_f)}{2a_f} \left(-\frac{1}{e^{\rho\bar{T}_f}} + \frac{1}{e^{\rho\bar{T}_1}} + \frac{1}{e^{\rho t}} - \frac{1}{e^{\rho\bar{T}_c}} \right) \quad (46)$$

さらに命題4を利用して、 $t \leq \bar{T}_1$ 、 $\bar{T}_f < \bar{T}_c$ を考慮すると、

$$\begin{aligned} &\left(\frac{1}{e^{\rho t}} - \frac{1}{e^{\rho\bar{T}_c}} \right) - \left(-\frac{1}{e^{\rho\bar{T}_f}} + \frac{1}{e^{\rho\bar{T}_1}} \right) \\ &= \left(\frac{1}{e^{\rho\bar{T}_f}} - \frac{1}{e^{\rho\bar{T}_c}} \right) + \left(\frac{1}{e^{\rho t}} - \frac{1}{e^{\rho\bar{T}_1}} \right) > 0 \end{aligned} \quad (47)$$

(33) 式の関係から、次式の不等号を得る。

$$r_2(t) - r_1(t) > 0 \quad (48)$$

QED

4. 燃料および化学製品の炭素排出削減

原油生産および消費に伴い、石油起源の炭素が主として二酸化炭素の形で温室効果ガス (GHG) として大気に排出されることから、その排出削減が気候変動政策として重要な課題となっている。本節では、燃料・化学製品の2用途を考慮したモデル検討結果における、排出抑制に関する考察を行う。

(1) 化学製品製造による炭素排出増加

命題5の結果に示したとおり、化学製品を製造し燃料との2用途の生産を行うと、一定の条件のもとで、石油が増産され炭素排出量が増加することが示された。したがって、産油国で石油の付加価値向上のために、化学製品を生産する場合、炭素排出抑制の追加的施策を行うことが炭素排出削減には必要になる。

(2) 炭素税の影響

燃料、化学製品両製品のbackstop時点でのshadow priceは命題1の証明における(15)、(16)式でそれぞれ表される。これらの式から、炭素税導入によるマージン低下が示唆され、その結果、Hotellingルールにより各製品のbackstop priceへの到達時間が短縮される。この結果は既往のGreen paradoxの議論と整合的である。

本論文における2製品モデルにおいては、命題1の初期資源量の多いケース ($S_0 > S^*$) において、燃料・化学製品の両方生産する期間の終了時点 T^* は (27) 式で示された。 T^* は化学製品・燃料のマージンの比率で決定される。したがって、炭素税が従量税として賦課される場合は両製品の生産に中立的だが、従価税として

賦課される場合は中立的ではないことが示唆される。

(3) 炭素固定および炭素循環

石油燃料の炭素排出削減に関しては、二酸化炭素を地中貯留するCCS（炭素固定：Carbon Capture and Storage/Sequestration）が対策として検討されている。他方、化学製品の排出削減に関しては、プラスチックリサイクル等の炭素循環⁶が検討されている。

本モデルでは、(15)、(16)より、両政策とも燃料・化学製品の費用を通して、それぞれの製品マージンが減少する。このことは、炭素税同様、Hotellingルールにより各製品のbackstop priceへの到達時間が短縮することを示唆する。したがって、政策的には排出削減効果と費用削減のコントロールが重要となる。また、両政策の相対的費用は、(27)式により化学製品単独での生産期間への影響を与える。

5. まとめ

本論文では、GHGの主要排出源である原油から、燃料だけでなくノーブルユース（新用途）として化学製品を生産する場合の、独占的生産者の生産経路について動的最適モデルを用いて理論的分析を実施した。前提として、実市場での定型的事実として、化学製品のマージンが燃料のマージンよりも大きいことを仮定した。

命題1において、原油の初期資源量の大きさにより、燃料生産および化学製品生産の2用途を生産する期間と化学製品単独で生産する期間が存在することを示した。また、2用途の生産

期間が存在するための分岐資源量を燃料、化学製品の需要曲線のパラメーターで明示的に示した。近年、多くの産油国で付加価値向上のため化学製品の製造を拡張しているが、この結果は化学製品の市場条件が原油資源の長期的な生産経路に影響があることを示唆している。

命題2において、初期資源量が上記の分岐資源量であるとき、原油は化学製品単独で消費されるが、このときの枯渇に到達する期間を市場条件により明示的に示した。この結果、枯渇までの期間は、化学製品と燃料のマージンの比率で決定され、化学製品の相対的なマージンが大きいと生産期間が長くなることを示した。

命題3では、初期資源量が分岐資源量と同じである場合、マージンを需要曲線の傾きで割った値⁷に関して、化学製品のそれが燃料のそれよりも大きい場合、化学製品単独ケースの方が、燃料単独ケースよりも原油資源が早く枯渇することを示した。このことは、化学製品が高収益で付加価値が高い場合、燃料生産から化学製品に生産をシフトすると、原油の枯渇が早くなり炭素排出が早まることを示唆している。

命題4では、初期資源量が分岐資源量よりも大きく2用途生産期間があるケースの燃料用途の終了時期は、燃料単独ケースよりも早まることを示した。このことは化学製品製造により、燃料の使用が早く終了することを示しており、炭素排出削減政策、特にCCSの推進を早める必要があることを示唆している。

命題5では、燃料・化学製品2用途利用のケースは、燃料単独ケースに比較して、各時点生産量が大きくなることを示した。したがって、化

6 マテリアルリサイクルとヒートリサイクルがある。

7 マージンがゼロの場合の最大需要量に相当する。

学製品製造は各時点の炭素排出量を増加させる可能性があり、炭素循環等の炭素排出削減政策の推進を平行して進める重要性を示唆している。また、解析結果から炭素税による Green Paradox の可能性が示唆され、既往論文と整合的な結果を得た。さらに、燃料の排ガスの炭素固定、プラスチックに関する炭素循環の費用が、各マージンの減少を通じて backstop price への到達時間を短縮する可能性があることを示唆している。

本研究はモデル単純化のためにいくつかの仮定を置いた。燃料や化学製品の市場は独占生産者、線形需要曲線を仮定している。また、費用の時間変化、数量による変化等については考慮していない。モデルの精緻化のためにはこうした点の詳細検討が重要となる。

本論文の分析を通して、産油国の脱炭素に伴うノーブルユース政策、すなわち、化学製品製造による石油の付加価値向上政策は、炭素排出を増加させる可能性を示した。また、炭素排出の削減に関して、燃料のマージンに加えて化学製品のマージンが影響することが示された。したがって、今後の炭素排出削減政策として、炭素循環政策の重要性が示唆される。今後、カーボンプライシング政策の導入のためには、燃料市場だけでなく、化学製品の市場条件を考慮した統合的な研究がより重要となると考えられる。

謝辞

産油国の政府、国営石油会社の経営幹部の皆様には、各種議論を通じて示唆をいただき感謝いたしております。また、本論文作成にあたり、ご助言をいただいた赤尾教授に感謝申し上げます。

[投稿受理日2022.11.7/掲載決定日2022.12.16]

文献

- Andrade de Sá S., Daubanes, J. (2016), "Limit pricing and the (in) effectiveness of the carbon tax," *Journal of Public Economics*, 39, 28-39.
- Asker, J., Collard-Wexler, A., De Loecker, J. (2019), "(Mis) Allocation, market power, and global oil extraction," *American Economic Review*, 109, 1568-1615.
- 有井哲夫 (2019), 「原油市場の構造と OPEC 産油国の生産行動」, 『社会学研論集』, 第33巻, 30-46.
- 有井哲夫 (2022), 「OPEC 原油生産枠と産油国の生産行動—原油供給メカニズムの実証的研究」, 『ソシオサイエンス』, 第28巻, 75-97.
- Belifort, M.E. (2021), "Fossil Fuel Subsidies, the Green Paradox, and the Fiscal Paradox," *Economics of Energy & Environment Policy*, Vol.10, No.1, 183-192.
- Benchekroun, H., Van der Meijden, G., Withagen, C. (2020), "OPEC, unconventional oil and climate change—On the importance of the order of extraction," *Journal of Environmental Economics and Management*, 104, 102384.
- Benchekroun, H., Van der Meijden, G., Withagen C. (2019), "An oligopoly-fringe non-renewable resource game in the presence of a renewable substitute," *Journal of Economic Dynamics & Control*, 105, 1-20.
- Benchekroun, H., van der Meijden, G., Withagen, C. (2011), "The optimal depletion of exhaustible resources: A complete characterization," *Resource and Energy Economics*, 33, 612-636.
- Cairns, R. D. (2019), "The Green Paradox, A Hotelling Cul de Sac," *Economics of Energy & Environmental Policy*, Vol.8(2), 1-20.
- Cairns, R. D. (2014), "The green paradox of economics and exhaustible resources," *Energy Policy*, 65, 78-85.
- Chakravorty, U., Moreaux, M., Tidball, M. (2008), "Ordering the extraction of polluting nonrenewable resources," *American Economic Review*, 98: 3, 1128-1144.
- Gerlagh, R. (2011), "Too much oil," *CESifo Economic Study*, 57(1), 79-102.
- Gronwald, M., Ngo Van Long, L. Roepke. (2017), "Simultaneous Supplies of Dirty Energy and Capacity Constrained Clean Energy: Is There a Green Paradox," *Environmental and Resource Economics*, 68, 47-64.

- Jaakkola, N. (2019), "OPEC and the end of oil," *Journal of Environmental Economics and Management*, 94, 101-117.
- Long, V. N. (2011), "Dynamic Games in the Economics of Natural Resources: A Survey," *Dynamic Games and Application*, 1, 115-148
- Sinn, H-W. (2008), "Public policies against global warming: a supply side approach," *International Tax and Public Finance*, 15(4), 360-394.
- Sinn, H-W. (2012), *The Green Paradox: a supply-side approach to global warming*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Van der Meijden, G., Withagen, C, Benchekroun. (2022), "An Oligopoly-Fringe Model with HARA preferences," *Dynamic Games and Application*, published online 19.
- Van der Meijden, G., Withagen, C. (2020), "Monopoly, unilateral climate policies and Limit pricing," *Journal of Economic Dynamics & Control*, 120, 103995.
- Van der Meijden, G., Withagen, C. (2019), "Limit pricing, climate policies, and imperfect substitution," *Resource, and Energy Economics*, 58, 101118.
- Van der Meijden, G., Ryszka, K., Withagen, C. (2018), "Double limit pricing," *Journal of Environmental Economics and Management*, 89, 153-167.
- Van der Ploeg, F., Withagen, C. (2015), "Global Warming and the Green Paradox: A Review of Adverse Effects of Climate Policies," *Review of Environmental Economics and Policy*, 9(2), 285-303.