

〈研究ノート〉

戦略的な環境投資と排出量取引

井上知子

1. はじめに

2019年12月1日、ウルズラ・フォン・デア・ライエン氏が、EUの行政執行機関である欧州委員会の委員長に就任し、5年間の在任期間におこなう6つの優先課題を表明した。それらのうち、最優先課題として掲げられたのが、2050年までにEUが世界で最初に気候中立を実現するという「欧州グリーン・ディール」である。2019年12月11日に欧州委員会が発表した「欧州グリーン・ディール」についての政策文書¹⁾の「3. The EU as a global leader」では、他国が国別貢献（NDC²⁾）を見直したり実行したり、さらには、野心的な長期戦略を考案することに対して、EUは積極的に関わっていききたいとあり、EUが世界のリーダーシップをとり、他国の手本になりたいということが記されている。1年後の2020年12月18日、欧州連合理事会は、それまで1990年比で40%削減するとしていた2030年の温室効果ガスの排出削減目標を55%以上の削減に引き上げたNDCを国連気候変動枠組条約（UNFCCC）事務局に提出した。当時、パリ協定の締約国はNDCを2020年までに提出することになっていたが、EUによる提出は、主要排出国の中では最初であった。

パリ協定では、先進国、途上国に関わらず、すべての締約国が自国の排出削減目標を策定してそのNDCを提出するという仕組みが取り入れられた。現状は、EUのようなリーダーが世界に先駆けて野心的な目標を提示することで、他の国がより野心的な排出削減目標を設定するように促している。本稿では、先進国と途上国が同時に排出削減目標を提示する状況を想定したGreaker and Hagem（2014）のモデルにおいてゲームのタイミングを変更し、排出削減目標の提示を上で述べたように先進国が途上国よりも前におこなう場合を検討する³⁾。

1) European Commission（2019）

2) NDC（Nationally Determined Contributions）とは、パリ協定に基づいて、各国が各々自国の排出量の削減や気候変動に関する取り組みを定めるものであり、パリ協定の締約国は5年毎に国連気候変動枠組条約（UNFCCC）事務局に提出する義務を負っている。

3) なお、Greaker and Hagem（2014）では、各国が排出削減目標を決定する前に、先進国が自

本稿の構成は以下の通りである。第2節では、まずGreaker and Hagem (2014) の3段階ゲームを簡単に紹介した後、本稿での設定を説明する。第3節ではゲームの第3段階で排出量取引がおこなわれない場合を検討し、続く第4節では排出量取引がおこなわれる場合を検討する。第5節は結びである。

2. モデル

本稿では、Greaker and Hagem (2014) のモデルにおいて、ゲームのタイミングを変更して議論をおこなう。そこで最初に、Greaker and Hagem (2014) のモデルを簡単に説明する。

Greaker and Hagem (2014) は、先進国 (H国) と途上国 (A国) をプレイヤーとする次のような3段階ゲームを考えている。

第1段階：H国は自国だけでなくA国向けにもR&D投資をおこなう。それに対しA国はR&D投資をおこなわないと仮定されている。H国による自国向けおよびA国向け投資の大きさをそれぞれ k_h, k_a で表す。

第2段階：両国が同時にそれぞれの排出削減目標 \bar{e}_h, \bar{e}_a を決定する。

第3段階：両国が各々の排出削減目標を達成するように排出削減をおこなう。第3段階について (i) 排出量取引をおこなわない場合と (ii) おこなう場合の2つの場合を考えている。排出量取引をおこなわない場合は、各々の国は排出削減目標を自身で達成するように排出削減量 e_h, e_a を決める。すなわち、 $e_h = \bar{e}_h, e_a = \bar{e}_a$ である。排出量取引をおこなう場合には、各国の排出削減量の決定と同時に排出量の取引がおこなわれる。

なお、Greaker and Hagem (2014) は、H国としてEU、アメリカ、および日本の共同体、A国として中国を想定しており、数値例のパラメータの値に反映させている。

本稿では、第1節で述べた先進国がリーダーシップをとる状況を議論するため、Greaker and Hagem (2014) のタイミングを変更すると結果がどのように修正されるかを検討する。本稿では、Greaker and Hagem (2014) のゲームの第1段階および第2段階を次のように変更する。

国だけでなく途上国に対してもR&D投資をおこなう状況を想定している。例えばStranlund (1996) で指摘されたように、途上国が排出削減目標を決定する前に先進国が無償でR&D投資を申し出るのは、それにより途上国の排出削減に伴う費用を低下させ、結果的に途上国の排出削減目標を引き上げさせることが先進国の便益の上昇につながると考えられるからである。また、Buchholz and Konrad (1994), Stranlund (1996), Greaker and Hagem (2014) ではR&D投資の後に排出削減目標が決定される場合が議論されているのに対し、Helm and Pichler (2015) は排出削減目標を決めた後に環境投資がおこなわれる場合を分析している。

第1段階：H国は自国向けおよびA国向けのR & D投資をおこなうと同時に、自国の排出削減目標 \bar{e}_h を決定する。

第2段階：A国が排出削減目標 \bar{e}_a を決める。

第3段階については、Greaker and Hagem (2014) と同様に排出量取引がある場合とない場合を考える。

Greaker and Hagem (2014) は、第3段階で排出量取引がおこなわれるかおこなわれないかにかかわらず、先進国が途上国へのR & D投資をおこなう場合の方がおこなわない場合よりも、総排出削減量は増加し、両国の厚生も上がることを数値例を使った議論の中で指摘している。また、排出量取引がおこなわれる場合、先進国は常に排出枠の買い手となることが示されている。

Greaker and Hagem (2014) では、排出削減目標の決定が、逐次的ではなく、両国同時におこなわれている。本稿では、EUのような先進国が先導者として行動し、その行動を観察してから途上国が行動する場合を考える。先進国は途上国に対してもR & D投資をおこなった方がよいという結果は本稿の設定でも成り立つ。しかし、本稿の設定では、排出量取引がおこなわれる場合について、先進国は必ずしも排出枠の買い手とはならないことが示される。本稿で示す数値例では、先進国が排出枠の売り手となる。

本稿で用いる各関数の設定はGreaker and Hagem (2014) と同様であるが、以下で簡単に説明する。なお、H国に関わる変数や関数には添え字 h 、A国に関わる変数や関数には添え字 a を付けて表す。

i 国 ($i = h, a$) の便益 b_i は両国による総排出削減量の増加関数と仮定される。総排出削減量は排出削減目標の合計に等しくなることから、

$$b_h = b_h(\bar{e}_h + \bar{e}_a)$$

$$b_a = b_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a)$$

で表される。ただし、限界便益は正であり ($b'_i > 0$)、また、限界便益は逓減する ($b''_i < 0$)。さらにH国の方がA国よりも常に限界便益が大きい、すなわち $b'_h > b'_a$ と仮定されている。

排出削減に伴う費用については、排出削減量の増加関数であり、かつ逓増的である。また、R & D投資により排出削減にかかる費用は低下するがその効果は逓減すると仮定されている。さらに、R & D投資により限界排出削減費用が低下することも仮定される。また、各国が必要とするR & D投資の内容は両国で異なっており、R & D投資のスピルオーバーはないと仮定される。各国の費用関数は次のように表される。

$$c_h = c_h(e_h, k_h)$$

$$c_a = c_a(e_a, k_a)$$

ただし、 $\frac{\partial c_i}{\partial e_i} > 0, \frac{\partial^2 c_i}{\partial e_i^2} > 0, \frac{\partial c_i}{\partial k_i} < 0, \frac{\partial^2 c_i}{\partial k_i^2} > 0$ 、および、 $\frac{\partial^2 c_i}{\partial k_i \partial e_i} < 0$ である。なお、本稿でも Grecker and Hagem (2014) と同様に以下の略号を用いる。

$$\frac{\partial c_i}{\partial e_i} \equiv c'_i, \quad \frac{\partial^2 c_i}{\partial e_i^2} \equiv c''_i, \quad \frac{\partial c_i}{\partial k_i} \equiv c'_{ik}, \quad \frac{\partial^2 c_i}{\partial k_i^2} \equiv c''_{ik}, \quad \frac{\partial^2 c_i}{\partial k_i \partial e_i} \equiv c''_{iek}$$

各国の厚生を w^i ($i = h, a$) で表す。 p_i を i 国向け R & D 投資 1 単位あたりの費用、 t を排出枠の価格とすると、各国の厚生は、それぞれ

$$w^h = b_h(\bar{e}_h + \bar{e}_a) - t(\bar{e}_h - e_h) - c_h(e_h, k_h) - p_h k_h - p_a k_a, \\ w^a = b_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a) - t(\bar{e}_a - e_a) - c_a(e_a, k_a)$$

と表される。ただし、第3段階に排出量取引がない場合は、 $e_h = \bar{e}_h, e_a = \bar{e}_a$ であり、上の各式の右辺第2項はともにゼロである。

3. 第3段階で排出量取引がおこなわれない場合

後ろ向き帰納法によって問題を解く。本節では、ゲームの第3段階で排出量取引がおこなわれない場合を考える。この場合には、ゲームの第3段階において両国はそれぞれ自国が第2段階で定める排出削減目標に等しいだけ排出削減をおこなう。すなわち、 $e_h = \bar{e}_h, e_a = \bar{e}_a$ である。

次に、ゲームの第2段階を考える。A国はH国が第一段階で決めるR & D投資の量 k_h, k_a とH国の排出削減目標 \bar{e}_h を所与として、自国の厚生 w^a を最大化するように自国の排出削減目標 \bar{e}_a を決める。すなわち、次の最適化問題を解く。

$$\max_{\bar{e}_a} b_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a) - c_a(\bar{e}_a, k_a)$$

このとき最適のための一階の条件は次式で与えられる。

$$\frac{\partial w^a}{\partial \bar{e}_a} = b'_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a) - c'_a(\bar{e}_a, k_a) = 0 \quad (1)$$

(1) より、 \bar{e}_a と k_a および \bar{e}_h の関係は、それぞれ

$$\frac{\partial \bar{e}_a(k_a, \bar{e}_h)}{\partial k_a} = \frac{c''_{aek}}{b''_a - c''_a} > 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{e}_a(k_a, \bar{e}_h)}{\partial \bar{e}_h} = \frac{-b''_a}{b''_a - c''_a} < 0 \quad (3)$$

で与えられる⁴⁾。

次に、ゲームの第1段階におけるH国の行動を考える。H国は第3段階の結果および第2段階におけるA国の最適反応を考慮しつつ、R&D投資の価格である p_h と p_a を所与として、自国の厚生 w^h を最大にするようにR&D投資の量 k_h, k_a および自国の排出削減目標 \bar{e}_h を決定する。すなわち、H国の最適化問題は次のように表される。

$$\max_{k_h, k_a, \bar{e}_h} b_h(\bar{e}_h + \bar{e}_a(k_a, \bar{e}_h)) - c_h(\bar{e}_h, k_h) - p_h k_h - p_a k_a$$

最適のための一階の条件は、

$$\frac{\partial w^h}{\partial k_h} = -c'_{hk} - p_h = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial w^h}{\partial k_a} = b'_h \cdot \frac{\partial \bar{e}_a(k_a, \bar{e}_h)}{\partial k_a} - p_a = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial w^h}{\partial \bar{e}_h} = b'_h \left(1 + \frac{\partial \bar{e}_a(k_a, \bar{e}_h)}{\partial \bar{e}_h} \right) - c'_h = 0 \quad (6)$$

で与えられる⁵⁾。

ここまで、関数を特定化せず考えてきたが、以下では、Greaker and Hagem (2014)の数値例の計算で用いられた関数やパラメータを使って議論を進めたい。Greaker and Hagem (2014)は数値例の計算に際して、便益関数 b_i および費用関数 c_i を次のように特定化している。

$$b_h(\bar{e}_h + \bar{e}_a) = \eta_0(\bar{e}_h + \bar{e}_a) - \frac{\eta_1}{2}(\bar{e}_h + \bar{e}_a)^2$$

$$b_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a) = \alpha_0(\bar{e}_h + \bar{e}_a) - \frac{\alpha_1}{2}(\bar{e}_h + \bar{e}_a)^2$$

$$c_h(e_h, k_h) = \frac{c_h}{2}(e_h)^2 - \sqrt{k_h} \cdot e_h$$

$$c_a(e_a, k_a) = \frac{c_a}{2}(e_a)^2 - \sqrt{k_a} \cdot e_a$$

上で述べたように、Greaker and Hagem (2014)は、H国としてEU、アメリカ、日本の共同体、A国として中国を想定しており、各パラメータの値をそれぞれ、 $\eta_0 = 219$,

4) 第2段階では k_h, k_a, \bar{e}_h が所与であるから、 $\bar{e}_a = \bar{e}_a(k_h, k_a, \bar{e}_h)$ である。ただし、技術のスピルオーバーがない(i.e. $\frac{\partial \bar{e}_a}{\partial k_h} = 0$)ため、ここでは $\bar{e}_a = \bar{e}_a(k_a, \bar{e}_h)$ と表記している。

5) 排出削減目標を両国で同時に決定するGreaker and Hagem (2014)では、第3段階に排出量取引がおこなわれない場合、R&D投資の費用削減効果が投資価格より大きくなる($-c'_{hk} > p_h$)という意味でH国による自国向けのR&D投資は過少であった。しかし、本稿では $\frac{\partial \bar{e}_a}{\partial k_h} = 0$ より(4)すなわち $-c'_{hk} = p_h$ が成立するため投資が過少にはならない。

$\eta_1 = 0.0049$, $\alpha_0 = 50$, $\alpha_1 = 0.0011$, $c_h = 0.1$, $c_a = 0.014$ と設定している。H国向けのR&D投資の価格として、 $p_h = 50$ から $p_h = 102$ の範囲を考慮しており、また、 p_h と p_a の比率を $p_a = 7p_h$ で固定している。本稿では、排出量取引がおこなわれる、おこなわれない、いずれの場合においてもR&D投資の値が負とならないことを保証するため、 $\alpha_0 = 150$ としている。その他のパラメータの値については、Greaker and Hagem (2014)と同じ値を用いている。なお、本稿における数値例の計算は、限界便益が正であること

$$b'_h(\bar{e}_h + \bar{e}_a) = \eta_0 - \eta_1(\bar{e}_h + \bar{e}_a) > 0, \quad b'_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a) = \alpha_0 - \alpha_1(\bar{e}_h + \bar{e}_a) > 0$$

H国の限界便益がA国の限界便益より大きいこと

$$b'_h(\bar{e}_h + \bar{e}_a) > b'_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a)$$

そして、費用が正の範囲であること

$$c_h \cdot e_h > 2\sqrt{k_h}, \quad c_a \cdot e_a > 2\sqrt{k_a}$$

の3つの条件が満たされる範囲でおこなっている。

これらの関数の特定化の下では、(1)～(6)はそれぞれ次のようになる⁶⁾。

$$\bar{e}_a = \frac{\alpha_0 - \alpha_1 \bar{e}_h + \sqrt{k_a}}{\alpha_1 + c_a} \quad (1')$$

$$\frac{\partial \bar{e}_a(k_a, \bar{e}_h)}{\partial k_a} = \frac{1}{2\sqrt{k_a}(\alpha_1 + c_a)} > 0 \quad (2')$$

$$\frac{\partial \bar{e}_a(k_a, \bar{e}_h)}{\partial \bar{e}_h} = \frac{-\alpha_1}{\alpha_1 + c_a} < 0 \quad (3')$$

$$\frac{\partial w^h}{\partial k_h} = \frac{\bar{e}_h}{2\sqrt{k_h}} - p_h = 0 \quad (4')$$

$$\frac{\partial w^h}{\partial k_a} = \{\eta_0 - \eta_1(\bar{e}_h + \bar{e}_a)\} \cdot \frac{1}{2\sqrt{k_a}(\alpha_1 + c_a)} - p_a = 0 \quad (5')$$

$$\frac{\partial w^h}{\partial \bar{e}_h} = \frac{c_a}{\alpha_1 + c_a} \{\eta_0 - \eta_1(\bar{e}_h + \bar{e}_a)\} - (c_h \cdot \bar{e}_h - \sqrt{k_h}) = 0 \quad (6')$$

第2段階の結果である(1')、および第1段階の結果である(4')、(5')、(6')より、 $\sqrt{k_h}$ と $\sqrt{k_a}$ に関する次の連立方程式(7)が得られる。

6) $1 + \frac{\partial e_a(k_a, \bar{e}_h)}{\partial \bar{e}_h} = 1 + \frac{-\alpha_1}{\alpha_1 + c_a} = \frac{c_a}{\alpha_1 + c_a}$

$$\begin{pmatrix} 2c_a\eta_1p_h + \frac{(\alpha_1 + c_a)^2}{c_a}(2c_hp_h - 1) & \eta_1 + 2(\alpha_1 + c_a)^2p_a \\ 2c_a\eta_1p_h & \eta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{k_h} \\ \sqrt{k_a} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{pmatrix} (\alpha_1 + c_a)\eta_0 - \eta_1\alpha_0 \\ (\alpha_1 + c_a)\eta_0 - \eta_1\alpha_0 \end{pmatrix}$$

(7) より $\sqrt{k_h}$ と $\sqrt{k_a}$ が求まる。そして、(4) より、 \bar{e}_h が、

$$\bar{e}_h = 2p_h\sqrt{k_h} \quad (4'')$$

と求まり、また、(1') より、 \bar{e}_a も求まる。

ここまでH国がA国にR&D投資をすることを想定していた。ここで、Greaker and Hagem (2014) と同様に、比較のため、H国が自国に向けてのみ投資をして、A国には投資をしない場合を考えよう。 $k_a = 0$ の場合、上の (5) は考慮する必要がないため、(7) は修正され、 $\sqrt{k_h}$ は

$$\left(2c_a\eta_1p_h + \frac{(\alpha_1 + c_a)^2}{c_a}(2c_hp_h - 1) \right) \sqrt{k_h} = (\alpha_1 + c_a)\eta_0 - \eta_1\alpha_0 \quad (8)$$

より求められる。そして、(4') および (1') より、 \bar{e}_h 、 \bar{e}_a が次のように求まる。

$$\bar{e}_h = 2p_h\sqrt{k_h} \quad (9)$$

$$\bar{e}_a = \frac{\alpha_0 - \alpha_1\bar{e}_h}{\alpha_1 + c_a} \quad (10)$$

(7)、(4'')、(1') ($k_a > 0$ の場合) および、(8)、(9)、(10) ($k_a = 0$ の場合) を用いて数値例を計算した結果を示したものが図1から図4のグラフである。なお、実線はH国

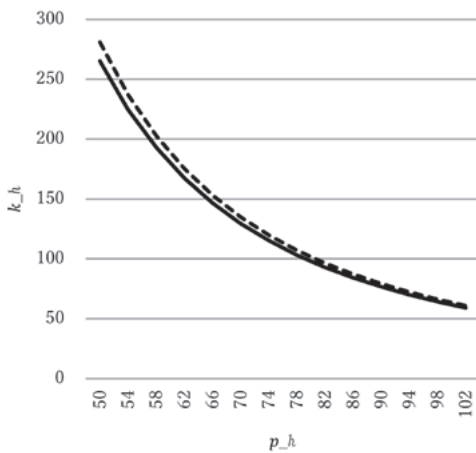


図1 H国向けの投資量

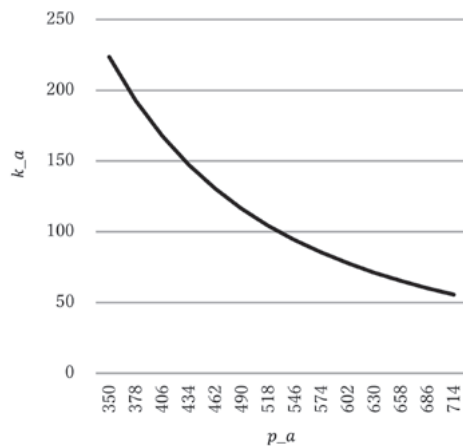


図2 A国向けの投資量

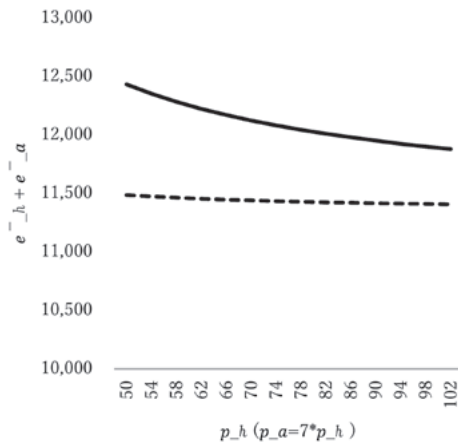


図3 排出削減目標の合計

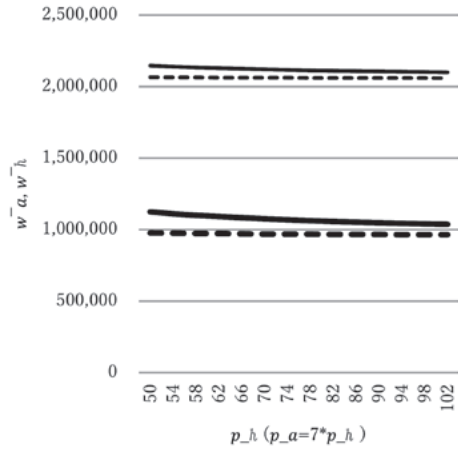


図4 H国の厚生（上）とA国の厚生（下）

がA国向けに投資をおこなう場合を表し、破線は自国向けの投資のみおこなう場合を表している。図1の横軸にはH国向け投資の価格 p_h 、縦軸にはその投資量 k_h をとっている。また、図2では横軸にA国向け投資の価格 p_a 、縦軸にH国によるA国向けの投資量 k_a をとっている。図1と図2は、Greaker and Hagem (2014) のFig. 1の右図およびFig. 3の右図に対応しており、図1において、 $k_a = 0$ の場合と $k_a > 0$ の場合を比較すると、各価格の下で後者の方がH国の自国向け投資の水準が低くなることを確認できる。

図3は両国の排出削減目標の総量を表しており、また、図4の上2つの線はH国の厚生、下2つの線はA国の厚生を表している。このように、どちらの図も実線の方が破線よりも上側にある。すなわち、排出削減目標の総量や各国の厚生は、 $k_a > 0$ の場合の方が、 $k_a = 0$ の場合よりも高くなる。したがって、 \bar{e}_h が \bar{e}_a より先に決定される本稿の設定でも、H国がA国に向けて投資をすることには両国にとってメリットがあることわかる。このように、第3段階で排出量取引がおこなわれない場合、結果はGreaker and Hagem (2014) と定性的には同じである。

4. 第3段階で排出量取引がおこなわれる場合

続いて本節ではゲームの第3段階において両国間で排出量取引がおこなわれる場合を考える。排出枠市場における需給均衡条件は次式で与えられる。

$$e_h + e_a = \bar{e}_h + \bar{e}_a \quad (11)$$

ゲームの第3段階において各国は、R&D投資 k_h, k_a 、排出削減目標 \bar{e}_h, \bar{e}_a 、および排出枠価格 t とR&D投資の価格 p_h, p_a を所与として、自国の厚生を最大化するように排出削減量を決定する。

$$\begin{aligned} \max_{e_h} b_h(\bar{e}_h + \bar{e}_a) - t[\bar{e}_h - e_h] - c_h(e_h, k_h) - p_h k_h - p_a k_a, \\ \max_{e_a} b_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a) - t[\bar{e}_a - e_a] - c_a(e_a, k_a) \end{aligned}$$

最適のための一階の条件はそれぞれ,

$$t - c'_h(e_h, k_h) = 0 \quad (12H)$$

$$t - c'_a(e_a, k_a) = 0 \quad (12A)$$

で与えられる。(11), (12H), (12A) より, e_h, e_a, t はそれぞれ, $\bar{e}_h + \bar{e}_a, k_h, k_a$ の関数として

$$e_h = e_h(\bar{e}_h + \bar{e}_a, k_h, k_a)$$

$$e_a = e_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a, k_h, k_a)$$

$$t = t(\bar{e}_h + \bar{e}_a, k_h, k_a)$$

のように得られる。またここで, Grecker and Hagem (2014) と同様に,

$$\begin{aligned} \frac{\partial e_h}{\partial \bar{e}_h} = \frac{\partial e_h}{\partial \bar{e}_a} = \frac{c''_a}{c''_h + c''_a} > 0, \quad \frac{\partial e_a}{\partial \bar{e}_h} = \frac{\partial e_a}{\partial \bar{e}_a} = \frac{c''_h}{c''_h + c''_a} > 0 \\ \frac{\partial t}{\partial \bar{e}_h} = \frac{\partial t}{\partial \bar{e}_a} = \frac{c''_h c''_a}{c''_h + c''_a} > 0 \\ \frac{\partial e_h}{\partial k_h} = -\frac{\partial e_a}{\partial k_h} = \frac{-c''_{h ek}}{c''_h + c''_a} > 0, \quad \frac{\partial e_a}{\partial k_a} = -\frac{\partial e_h}{\partial k_a} = \frac{-c''_{a ek}}{c''_h + c''_a} > 0 \\ \frac{\partial t}{\partial k_h} = \frac{c''_a c''_{h ek}}{c''_h + c''_a} < 0, \quad \frac{\partial t}{\partial k_a} = \frac{c''_h c''_{a ek}}{c''_h + c''_a} < 0 \end{aligned}$$

である。

次に, ゲームの第2段階におけるA国の行動を考える。A国は第3段階の結果を考慮に入れて, R & D投資量 k_h, k_a , およびH国の排出目標 \bar{e}_h を所与として自国の厚生 w^a を最大化するように \bar{e}_a を決定する。すなわち, 第2段階におけるA国の最適化問題は次のように表される。

$$\max_{\bar{e}_a} b_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a) - t(\bar{e}_h + \bar{e}_a, k_h, k_a)[\bar{e}_a - e_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a, k_h, k_a)] - c_a(e_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a, k_h, k_a), k_a)$$

最適のための一階の条件は,

$$b'_a - \frac{\partial t}{\partial \bar{e}_a}(\bar{e}_a - e_a) - t \left(1 - \frac{\partial e_a}{\partial \bar{e}_a} \right) - c'_a \frac{\partial e_a}{\partial \bar{e}_a} = 0 \quad (13)$$

であり, 第3段階の最適条件 (12A) を考慮すれば,

$$b'_a - t - \frac{\partial t}{\partial \bar{e}_a}(\bar{e}_a - e_a) = 0 \quad (13')$$

となる。

そして最後に、ゲームの第1段階におけるH国の行動を考える。H国は第3段階の結果と第2段階におけるA国の最適反応を考慮に入れて、R&D投資の価格 p_h, p_a を所与として自国の厚生 w^h を最大化するようにR&D投資量 k_h, k_a と自国の排出削減目標 \bar{e}_h を決める。すなわち、H国の解く最適化問題は次のように表される。

$$\begin{aligned} \max_{k_h, k_a, \bar{e}_h} & b_h(\bar{e}_h + \bar{e}_a(k_h, k_a, \bar{e}_h)) \\ & - t(\bar{e}_h + \bar{e}_a(k_h, k_a, \bar{e}_h), k_h, k_a)[\bar{e}_h - e_h(\bar{e}_h + \bar{e}_a(k_h, k_a, \bar{e}_h), k_h, k_a)] \\ & - c_h(e_h(\bar{e}_h + \bar{e}_a(k_h, k_a, \bar{e}_h), k_h, k_a), k_h) - p_h k_h - p_a k_a \end{aligned}$$

このとき、一階の条件は、

$$\frac{\partial w^h}{\partial k_h} = \left(b'_h - \frac{\partial t}{\partial \bar{e}_a} (\bar{e}_h - e_h) \right) \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial k_h} - \frac{\partial t}{\partial k_h} (\bar{e}_h - e_h) - c'_{hk} - p_h = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial w^h}{\partial k_a} = \left(b'_h - \frac{\partial t}{\partial \bar{e}_a} (\bar{e}_h - e_h) \right) \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial k_a} - \frac{\partial t}{\partial k_a} (\bar{e}_h - e_h) - p_a = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial w^h}{\partial \bar{e}_h} = b'_h \left(1 + \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial \bar{e}_h} \right) - \left(\frac{\partial t}{\partial \bar{e}_h} + \frac{\partial t}{\partial \bar{e}_a} \cdot \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial \bar{e}_h} \right) (\bar{e}_h - e_h) - t = 0 \quad (16)$$

となる。ただし、ここでは第3段階における一階の条件 (12H) を考慮している。

$\frac{\partial t}{\partial \bar{e}_h} = \frac{\partial t}{\partial \bar{e}_a} = \frac{c'_h c''_a}{c'_h + c''_a}$ と (16) から

$$b'_h - \frac{t}{1 + \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial \bar{e}_h}} = \frac{\partial t}{\partial \bar{e}_a} (\bar{e}_h - e_h) \quad (16')$$

という関係式を得る。ここで、(16') と第2段階の一階の条件である (13') $b'_h - t = \frac{\partial t}{\partial \bar{e}_a} (\bar{e}_a - e_a)$ を使って、排出枠の売り手と買い手がそれぞれどちらの国になるかを考える。Greaker and Hagem (2014) では、第2段階においてH国とA国が排出削減目標を同時に決めている。そこでのH国にとっての最適条件は $b'_h - t = \frac{\partial t}{\partial \bar{e}_a} (\bar{e}_h - e_h)$ であった。このため、先進国の限界便益が途上国の限界便益よりも大きいならば、必然的に $\bar{e}_h - e_h > 0$ かつ $\bar{e}_a - e_a < 0$ 、すなわち先進国が排出枠の買い手となる (Greaker and Hagem (2014, p.73, Lemma 1))⁷⁾。しかし、以下で示すように、Greaker and Hagem (2014) が用いた関数を使った場合、 $\frac{\partial \bar{e}_a}{\partial \bar{e}_h} \in (-1, 0)$ より、 $\frac{t}{1 + \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial \bar{e}_h}} > t$ であることから、 $b'_h > b'_a$ であったとしても、(16') の左辺が (13') の左辺よりも小さくなる可能性がある。よって、 $\bar{e}_h - e_h < 0$ 、すなわち、先進国が排出枠の売り手となる場合があることがわかる。

7) $\frac{\partial t}{\partial \bar{e}_h} = \frac{\partial t}{\partial \bar{e}_a} = \frac{c'_h c''_a}{c'_h + c''_a} > 0$

ここで、(16') を (14) と (15) に代入して、

$$\frac{\partial w^h}{\partial k_h} = \frac{t}{1 + \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial \bar{e}_h}} \cdot \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial k_h} - \frac{\partial t}{\partial k_h} [\bar{e}_h - e_h] - c'_{hk} - p_h = 0 \quad (14')$$

$$\frac{\partial w^h}{\partial k_a} = \frac{t}{1 + \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial \bar{e}_h}} \cdot \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial k_a} - \frac{\partial t}{\partial k_a} [\bar{e}_h - e_h] - p_a = 0 \quad (15')$$

を得る。

以下では、第3節と同じ関数の特定化を使って、本稿の議論を数値例で確認する。

関数を特定化した下で、連立方程式 (11), (12H), (12A) を解くと

$$\begin{aligned} e_h &= \frac{c_a(\bar{e}_h + \bar{e}_a) + \sqrt{k_h} - \sqrt{k_a}}{c_h + c_a} \\ e_a &= \frac{c_h(\bar{e}_h + \bar{e}_a) - \sqrt{k_h} + \sqrt{k_a}}{c_h + c_a} \\ t &= \frac{c_h c_a (\bar{e}_h + \bar{e}_a) - c_a \sqrt{k_h} - c_h \sqrt{k_a}}{c_h + c_a} \end{aligned}$$

が得られる。また、(13') を解くと

$$\bar{e}_a = \frac{(c_h + c_a)^2 (\alpha_0 - \alpha_1 \bar{e}_h) - c_h (c_a)^2 \bar{e}_h + (c_a)^2 \sqrt{k_h} + (c_h + 2c_a) c_h \sqrt{k_a}}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)} \quad (17)$$

が得られる。ここで、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial k_h} &= \frac{(c_a)^2}{2\sqrt{k_h}((c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a))} > 0 \\ \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial k_a} &= \frac{(c_h + 2c_a) c_h}{2\sqrt{k_a}((c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a))} > 0 \\ \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial \bar{e}_h} &= \frac{-\alpha_1 (c_h + c_a)^2 - c_h (c_a)^2}{\alpha_1 (c_h + c_a)^2 + c_h c_a (c_h + 2c_a)} \in (-1, 0)^{8)} \end{aligned}$$

となり、 $\frac{\partial \bar{e}_a}{\partial \bar{e}_h} \in (-1, 0)$ であることが確認できる。

さらに、(14'), (15'), (16') はそれぞれ次のようになる。

8) $1 + \frac{\partial \bar{e}_a}{\partial \bar{e}_h} = \frac{c_h c_a (c_h + c_a)}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)} > 0$ より、 $\frac{\partial \bar{e}_a}{\partial \bar{e}_h} > -1$ である。

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{-c_h(c_a)^3}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)} - (c_h - c_a) + 2c_h(c_h + c_a)p_h \right) \sqrt{k_h} \\
 & + \frac{c_h(c_h + c_a)^2 \alpha_1}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)} \sqrt{k_a} \\
 & + c_h c_a \left(\frac{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h(c_a)^2}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)} + 2 \right) \bar{e}_h \\
 & = \frac{\alpha_0 c_h c_a (c_h + c_a)^2}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)}
 \end{aligned} \tag{14''}$$

$$\begin{aligned}
 & \left(2 - \frac{c_h(c_a)^2}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)} \right) c_a \sqrt{k_h} \\
 & + \left(\frac{-(c_h + 2c_a)(c_h)^2 c_a}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)} + c_h + 2c_a(c_h + c_a)p_a \right) \sqrt{k_a} \\
 & + c_h c_a \left(\frac{\alpha_1(c_h + c_a)^2 + c_h(c_a)^2}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)} - 2 \right) \bar{e}_h \\
 & = \frac{\alpha_0 c_h c_a (c_h + c_a)^2}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)}
 \end{aligned} \tag{15''}$$

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{c_h(c_a)^2((c_h + c_a)(\eta_1 + \alpha_1) + c_h c_a)}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)} - (c_h + c_a)\alpha_1 - 2c_h c_a \right) c_a \sqrt{k_h} \\
 & + \left(\frac{c_h c_a (c_h + 2c_a)((c_h + c_a)(\eta_1 + \alpha_1) + c_h c_a)}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)} - (c_h + c_a)\alpha_1 - c_h c_a \right) c_h \sqrt{k_a} \\
 & + \left((c_h + c_a)(\eta_1 + \alpha_1) + 2c_h c_a \right. \\
 & \left. - \frac{(\alpha_1(c_h + c_a)^2 + c_h(c_a)^2)((c_h + c_a)(\eta_1 + \alpha_1) + c_h c_a)}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)} \right) c_h c_a \bar{e}_h \\
 & = c_h c_a (c_h + c_a) \eta_0 - \frac{\alpha_0 c_h c_a (c_h + c_a)^2 ((c_h + c_a)(\eta_1 + \alpha_1) + c_h c_a)}{(c_h + c_a)^2 \alpha_1 + c_h c_a (c_h + 2c_a)}
 \end{aligned} \tag{16''}$$

したがって、H国がA国に対して無償でR&D投資をする $k_a > 0$ の場合においては、(14''), (15''), (16'') より、R&Dの投資量 k_h, k_a とH国の排出削減目標 \bar{e}_h が求められる。また、A国の排出削減目標 \bar{e}_a は、上で得られた k_h, k_a, \bar{e}_h を(17)に代入することで得られる。そして、H国が自国向けの投資のみをおこなう $k_a = 0$ の場合については、(14'') と (16'') から $\sqrt{k_h}$ と \bar{e}_h が決まり、これらと $k_a = 0$ を(17)に代

入することで、A国の目標削減量が得られる。

第3段階で排出量取引がおこなわれる場合の数値例の結果が図5から図9である。なお、図5から図8については、第3節のグラフと同様、実線はH国がA国向けに投資をおこなう場合を表し、破線は自国向けの投資のみおこなう場合を表している。

図5の縦軸はH国向けの投資の量を、図6の縦軸はA国向け投資の量を表している。図5と図6はGreaker and Hagem (2014) のFig. 1の左図とFig. 3の左図に対応しており、図5より、本稿の設定でも $k_a > 0$ の場合の方が、 $k_a = 0$ の場合よりもH国の自国向け投資の水準は高くなることを確認できる。

図7は両国の排出削減目標の和を表しており、各価格の下で、 $k_a > 0$ の場合の方が

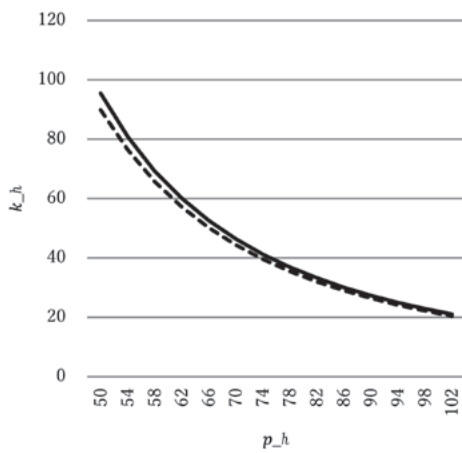


図5 H国向けの投資量

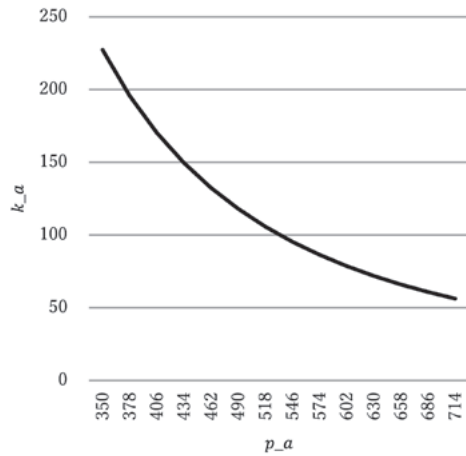


図6 A国向けの投資量

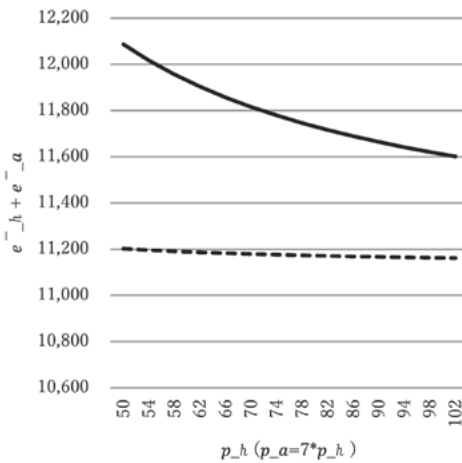


図7 排出削減目標の合計

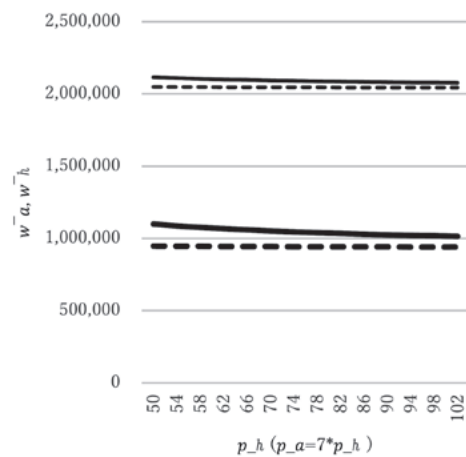


図8 H国の厚生（細）とA国の厚生（太）

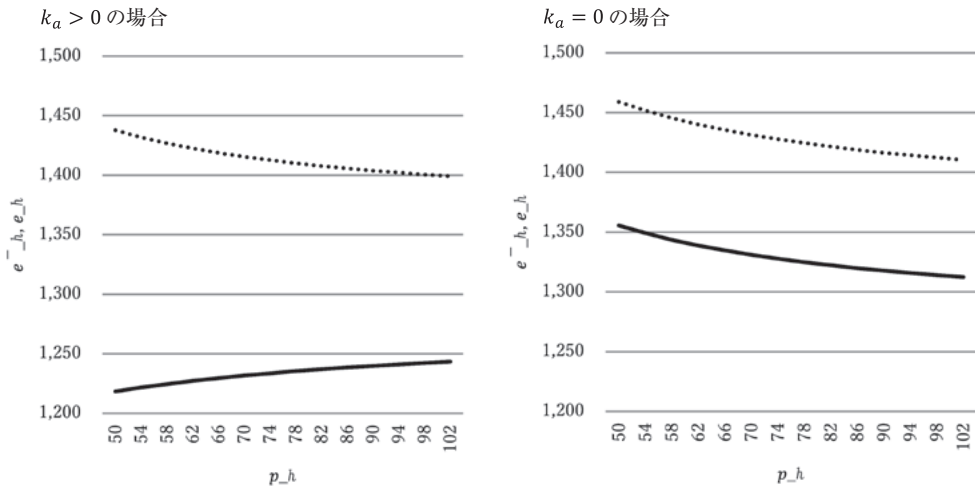


図9 H国の排出削減目標（実線）と排出削減量（破線）

$k_a = 0$ の場合よりも上に位置している。また、図8の上2つはH国の厚生を、下2つはA国の厚生を表しており、それぞれの国について、実線の方が破線よりも上側にあることから、 $k_a > 0$ の場合の方が $k_a = 0$ の場合よりも厚生が高いことがわかる。このように、排出削減目標の合計や各国の厚生は、 $k_a > 0$ のケースの方が高くなる。すなわち、第3段階で排出量取引がおこなわれる場合についても、H国がA国にR&D投資をすることは両国にとってメリットがあるという Grecker and Hagem (2014) の結果は、本稿の設定の下でも変わらない。

しかし、先に指摘したように、本稿の設定では、先進国が排出枠の売り手となる可能性がある。図9において、実線はH国の排出削減目標を、破線はH国の排出削減量を表している。実際に、 α_0 以外はパラメータを Grecker and Hagem (2014) と同じ値に設定して計算したところ、 $k_a > 0$ の場合と $k_a = 0$ の場合の両方において、H国はゲームの第1段階に自身が提示した排出削減目標よりも多くの排出削減をおこなう、すなわち、H国は排出量取引の売り手となる。

最後に、H国がA国にR&D投資をした際に、結果としてA国の厚生が増えるかどうかについて確認をする⁹⁾。

A国の厚生 w^a を k_a で微分し、第3段階の一階条件 (12A) および 第2段階の一階条件 (13')、また本稿の設定では \bar{e}_h と k_a を同時に決定することから、 $\frac{\partial \bar{e}_h}{\partial k_a} = 0$ であることを考慮すると、

$$\frac{\partial w^a}{\partial k_a} = -\frac{\partial t}{\partial k_a}(\bar{e}_a - e_a) - c'_{ak}$$

9) それが確認されれば、A国もH国の投資の申し出を受け入れるであろう。

となる。よって、数値例のように、A国が排出枠の買い手になる場合は、常に $\frac{\partial w^a}{\partial k_a} > 0$ であることがわかる。

5. おわりに

本稿では、先進国が自国向けだけでなく途上国に対しても戦略的にR&D投資をおこなう場合に、先進国が自らの排出削減目標を途上国よりも前に提示する状況を考えた。その先に排出量取引が予定されている場合、先進国は排出枠の売り手となる可能性があることが示された。すなわち、先進国は自分が掲げた目標以上に排出を削減し、他方で途上国は先進国からのR&D投資を受け入れることで排出削減目標を上げるがその一部は排出枠の購入で補う。この結果は、先進国が常に排出枠の買い手になるというGreaker and Hagem (2014) の結果と異なっている。先進国が途上国に先駆けて排出目標を提示する場合、先進国が排出枠の売り手になり得ることは、Greaker and Hagem (2014) と同様のパラメータを用いた数値例によっても確認された。さらに、本稿の設定の下でも、排出枠の取引がおこなわれるかおこなわれないかに関わらず、先進国が途上国への投資をすることは、両国による排出削減目標の合計、および各国の厚生を引き上げるため、両国にとって望ましいことが確認された。これは、排出削減目標の決定が同時におこなわれるGreaker and Hagem (2014) の結果と同じである。

本稿では、Greaker and Hagem (2014) と同様に、途上国自身による排出削減費用を引き下げようとするR&D投資については考えていない。パリ協定が採択される以前は、多くの途上国は先進国のみが排出削減義務を負う枠組みの延長を望んでおり、排出削減をすることは自国の経済成長を阻害すると考えていた。このため、途上国は、排出にかかる費用を節約的にする技術への投資については消極的であったと考えられる。しかし、2021年末のCOP26で中国とインドはそれぞれ2060年、2070年までの炭素中立を達成すると表明しており、次のNDCの提出が2025年に迫っているいま、これらの国々は以前よりも積極的に自国に向けてのR&D投資をおこなうかもしれない。本稿の設定の下で途上国自身によるR&D投資を明示的に考慮に入れた分析をおこなうことは今後の課題である。

参考文献

- Buchholz, Wolfgang and Kai A. Konrad (1994), "Global Environmental Problems and the Strategic Choice of Technology", *Journal of Economics*, vol. 60, pp. 299-321.
- European Commission (2019), *Communication from The Commission: The European Green Deal* (COM (2019) 640 final), Brussels.

- Greaker, Mads and Cathrine Hagem (2014), “Strategic Investment in Climate Friendly Technologies: The Impact of Global Emissions Trading”, *Environmental Resource Economics*, vol. 59, pp. 65-85.
- Helm, Carsten and Stefan Pichler (2015), “Climate Policy with Technology Transfers and Permit Trading”, *Environmental Resource Economics*, vol. 60, pp. 37-54.
- Stranlund, John K. (1996), “On the Strategic Potential of Technological Aid in International Environmental Relations”, *Journal of Economics*, vol. 64, pp. 1-22.

『南山経済研究』掲載論文の中で示された内容や意見は、南山大学および南山大学経済学会の公式見解を示すものではありません。また、論文に対するご意見・ご質問や、掲載ファイルに関するお問い合わせは、執筆者までお寄せ下さい。

(井上 知子, E-mail: inouet@ic.nanzan-u.ac.jp)