

## 越境汚染と技術進歩

—国際的排出権取引と技術革新が厚生に与える効果について—

関西学院大学 河野正道

### 要旨

越境汚染の存在下で、排出権の国際的取引導入により、国によってはかえって厚生が低下することがあることをHoltmark & Sommervoll (2012)は示した。2つの国を考えると、規模が小さい国の厚生が向上し、大きな国の厚生が小さくなるという。本論文では、このモデルに削減費用を下げるためのR&D投資を導入し、排出権取引が両国の厚生に与える効果が、R&D投資前と比較してどのように変化するかを分析する。

排出権取引導入の結果、大国の厚生は減少し、小国の厚生は上昇するが、両国の厚生の合計は増加する。よって、小国から大国へ謝金を支払うことによって排出権取引制度の導入が可能である。しかし、R&D投資があるときには両国の厚生の和は排出権取引導入後も変化はしない。よって、排出権取引制度の導入は不可能である。

キーワード：越境汚染、排出権取引、技術進歩

JEL classifications: H23, Q54, Q55

Transboundary Pollution and Technological Progress  
—International Trade of Emission Rights and the  
Impact on the Welfare—

Masamichi Kawano  
Kwansei Gakuin University

Abstract:

In the presence of transboundary pollution, by introducing international emission rights trade, Holtmark & Sommervoll (2012) showed that the welfare of the bigger country decreases, while that of the smaller country increases. However, since the sum of the welfare of the two countries increases, it is possible to introduce the emission rights trade by bribing from the smaller to the bigger country. There is no R&D activities in their model. We try to extend their model by introducing the R&D activity to decrease the cost of abating emissions. We show that under the existence of R&D activities, the effect of the emission right trade on the welfares of the two countries is the same in directions, but that on the sum of the welfare of both countries is not the same. Without R&D, the effect of the emission trade on the sum of the welfare is positive, but under the R&D, the effect is zero. Hence, under R&D activities, the introduction of the international emission trade by bribing is impossible.

Keywords: transboundary pollution, emission rights trade,  
technological progress.

JEL classifications: H23, Q54, Q55

**越境汚染と技術進歩**  
**—国際的排出権取引と技術革新が厚生に与える効果について—**

関西学院大学 河野正道

**I. 序論**

越境汚染の存在下で、排出権の国際的取引導入により、国によってはかえって厚生が低下することがあることをHoltmark & Sommervoll (2012)は示した。2つの国を考えると、規模が小さい国の厚生が向上し、大きな国の厚生が小さくなるという。本論文では、このモデルに削減費用を下げるためのR&D投資を導入し、排出権取引が両国の厚生に与える効果が、R&D投資前と比較してどのように変化するかを分析する。まずは排出権の国際的取引を考える前に、その制度がないときの基本モデルを考える。 $i$ 国( $i=1,2$ )には $b_i$ の人口があり、従って、 $i$ 国が $a_i$ を削減するときには、 $i$ 国は、これらの削減によって $b_i(a_1+a_2)$ のメリットを受ける。なお、両国は非対称であり、 $b_1 > b_2$ であるとする。

また、それぞれの国は削減のために費用がかかり、削減量 $a_i$ の2乗に比例する費用 $\gamma_i a_i^2 / 2$ が必要となる。ここで $\gamma / 2$ は係数であり、この値が小さいほど、高度な削減技術であることを示す。R&Dがない場合は $\gamma$ は両国でともに同一であるが、R&Dを考えると、 $\gamma_i = 1/x_i$ , ( $i=1,2$ )となり<sup>1</sup>、R&D投資 $x_i$ の減少関数として与えられている。

なお、通常の生産活動によって両国企業が通常排出する量は $e_i$ で一定であるとし、

政府の排出許可量 $l_i$ , 排出削減量 $a_i$ , の間には、 $l_i = e_i - a_i$  の関係がある。つまり、政府が排出許可量 $l_i$ を決定するということは、排出削減量 $a_i$ を決定することを意味する。

その結果、大国の厚生は減少し、小国の厚生は上昇するが、R&D投資があるときには両国の厚生の和は排出権取引導入後も変化はしないことが明らかとなる。以上の理由によって、R&D存在下では、排出権取引の導入は不可能であることを示す。

**II. モデル**

**II-1 R&D活動がない場合**

**II-1-1 排出権取引がない場合**

R&D活動はなく、排出権取引もないときは、各国の費用関数はその国の政府が決める排出許容量によって一意的に決定され

$$c_i = (\gamma/2) a_i^2 \quad (1)$$

となり、その結果、社会的厚生は以下のように定義される。

$$w_i = b_i(a_1 + a_2) - c_i \quad (2)$$

ここで  $b_1 > b_2$  (3)

である。政府は $a_i$ を用いて $w_i$ を最大化するので、その結果、均衡値を $a_i^0$ とすると

$$a_i^0 = b_i / \gamma \quad (4)$$

となる。この均衡における社会的厚生を $w_i^0$ とすると

$$w_i^0 = \frac{b_i(b_i + 2b_j)}{2\gamma} \quad (5)$$

となる。(3)の条件より、

$$w_1^0 - w_2^0 = \frac{(b_1 - b_2)(b_1 + b_2)}{2\gamma} > 0 \quad (6)$$

<sup>1</sup>以下、( $i=1,2$ )の表記は省略。

となり、以下の命題が成立する。

**命題1** R&Dがなく、かつ、排出権取引がないとき、大国が社会的厚生は大きい。

### II-1-2 排出権取引がある場合

このとき  $p$  を排出権の価格とする。 $i$  国が  $j$  国から購入する量を  $a_o$  とすると、1,2国の総費用は

$$c_1 = \frac{\gamma}{2}(a_1 - a_o)^2 + pa_o \quad (7)$$

$$c_2 = \frac{\gamma}{2}(a_2 + a_o)^2 - pa_o \quad (8)$$

となる。

この問題は2段階に分解して解く。まず、政府はシュタッケルベルグのリーダーの役割を演じているのであり、先に排出権削減量を決定して各企業に指示する。それを受けて、各国企業は排出権取引量を彼らの費用が最小化されるように決定する。論理の順序としては、先に政府が排出許容量を決定し、次に、排出権取引量が企業によって決定されるのであるが、解き方としては後ろ向きに解き、解き方としての第1段階では、企業の費用最小化行動を分析し、第2段階で政府の厚生最大化行動を検討する。

#### 1) 第1段階：企業の費用最小化

第1段階では、両企業は  $a_o$  と  $x_i$  に関して各自の費用を最小化する。このとき、両企業は排出権取引価格を一定と受け取る。つまり、議論を単純化するために完全競争的に企業は行動すると仮定する。この最適化問題の最適のための一階の条件は

$$\frac{\partial c_1}{\partial a_o} = -\gamma(a_1 - a_o) + p = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial a_o} = \gamma(a_2 + a_o) - p = 0 \quad (10)$$

となる。(9),(10)より

$$a_o = \frac{a_1 - a_2}{2} \quad (11)$$

となり、ここで価格  $p$  も決定され

$$p = \gamma \left( \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \quad (12)$$

となる。なお、均衡における費用は

$$c_1^1 = \frac{\gamma}{8}(a_1 + a_2)(3a_1 - a_2), \quad (13)$$

$$c_2^1 = \frac{\gamma}{8}(a_1 + a_2)(3a_2 - a_1) \quad (14)$$

となる。

#### 2) 第2段階：政府の厚生最大化

両国政府が持つ社会的厚生関数は

$$w_1 = b_1(a_1 + a_2) - \frac{\gamma}{8}(a_1 + a_2)(3a_1 - a_2), \quad \text{と}$$

$$w_2 = b_2(a_1 + a_2) - \frac{\gamma}{8}(a_1 + a_2)(3a_2 - a_1)$$

なる。ここで  $i$  国政府が  $a_i$  を用いてそれぞれ最大化する。その結果、 $a_i$  の均衡値を  $a_i^1$  とする。

$$a_1^1 = \frac{3b_1 - b_2}{2\gamma} \quad (17)$$

$$a_2^1 = \frac{3b_2 - b_1}{2\gamma} \quad (18)$$

となる。先に求めた排出権取引の均衡値と比較すると

$$a_1^1 - a_1^0 = \frac{b_1 - b_2}{2\gamma} > 0,$$

$$a_2^1 - a_2^0 = -\frac{b_1 - b_2}{2\gamma} < 0$$

となり、 $a_1^1 > a_1^0, a_2^1 < a_2^0$  となる。また、

$a_1^1 + a_2^1 = a_1^0 + a_2^0$  が成立する。よって、次の命題が成立する。

**命題3** 1国は排出権取引の結果、削減量を増やし、2国は減少する。両国の変化分の合計は0となり、削減量の合計は排出権取引を導入しても変化はない。

均衡における社会的厚生を  $w_i^1$  とすると

$$w_1^1 = w_2^1 = \frac{3(b_1 + b_2)^2}{8\gamma}, \quad (19)$$

となり、以下の命題が成立する。

**命題4** R&Dがないとき、排出権取引を導入すると、大国と小国は社会的厚生が同一となる。

また、排出権取引がある場合とない場合を比較してみると、

$$w_1^0 - w_1^1 = \frac{(b_1 - b_2)(b_1 + 3b_2)}{8\gamma} > 0, \quad (20)$$

$$w_2^0 - w_2^1 = -\frac{(b_1 - b_2)(b_2 + 3b_1)}{8\gamma} < 0 \quad (21)$$

となり、次の命題が成立する。

**命題5** R&Dがないとき、排出権取引を導入すると、大国は社会的厚生が低下し、小国が上昇する。

社会的厚生の合計を比較する。

$$(w_1^1 + w_2^1) - (w_1^0 + w_2^0) = \frac{(b_1 - b_2)^2}{4\gamma} > 0 \quad (22)$$

となり、よって、以下の命題が導かれる。

**命題6** R&Dがないとき、排出権取引を導入すると、両国の社会的厚生は上昇する。

命題5より、大国は排出権取引を導入すると不利益を被る。よって、排出権取引にはそのままでは応じない。ところが、命題6によって、合計の厚生では向上しているのであるから、2国から1国へと適当な謝金を支払うことによって、排出権取引の導入は可能となる。

## II-2 R&Dがある場合

$x_i$  は  $i$  国のR&D投資である。この投資が増えると費用係数  $\gamma$  が低下するので

$$\gamma_i = 1/x_i \quad (23)$$

と設定する。なお、R&D投資の費用は  $x_i^3/6$  である。<sup>2</sup>

II-1と同様に第1段階で企業の費用最小化行動を分析し、そこでのNash均衡を求め、第2段階において、政府がその均衡を排出許可量を用いてコントロールし、自分の厚生を最大化しようとする。

### II-2-1 排出権取引がない場合

#### 1) 第1段階：

企業  $i$  は費用を最小化する目的でR&D投資  $x_i$  を定める。よって、費用は

$$\bar{c}_i = \frac{a_i^2}{2x_i} + \frac{x_i^3}{6} \quad (24)$$

となる。これをR&D投資  $x_i$  で最小化する。

$$\frac{\partial \bar{c}_i}{\partial x_i} = \frac{-a_i^2}{2x_i^2} + \frac{x_i^2}{2} = 0 \quad (25)$$

$$\text{より、} \quad x_i = \sqrt{a_i} \quad (26)$$

を得る。つまり、企業は政府によって与え

<sup>23</sup> 乗とした理由は後々の計算の便宜のためである。

られた  $a_i$  を所与としてそれに依存する R&D投資  $x_i$  を行う。

## 2) 第2段階

第2段階では、政府が削減許可量を配分する。これは、(5)より、排出量を割り当てるものである。これはカ国には自国の厚生を最大化するように配分量を決定する。すでに第一段階で  $x_i$  は  $a_i$  の関数として決まっているので、

$$\bar{c}_i = \frac{a_i^2}{2\sqrt{a_i}} + \frac{a_i\sqrt{a_i}}{6} = \frac{2a_i\sqrt{a_i}}{3} \quad (27)$$

であり、これより

$$\bar{w}_i = b_i(a_1 + a_2) - \frac{2a_i\sqrt{a_i}}{3} \quad (28)$$

となり、自分が決定する  $a_i$  の関数として  $i$  国の社会的公正が決定される。その最大化の一階の条件は、

$$\frac{\partial \bar{w}_i}{\partial a_i} = b_i - \sqrt{a_i} = 0 \quad (29)$$

となり、これを  $a_i$  について解いてそれを  $a_i^0$

$$\text{とすると } a_i^0 = b_i^2 \quad (30)$$

となる。これより、

$$a_1^0 - a_2^0 = (b_1 - b_2)(b_1 + b_2) > 0$$

であり、大国の削減量が小国より大きい。

すると均衡における社会的厚生を  $w_i^0$  とすると、(27),(29)より

$$w_i^0 = \frac{b_i}{3}(b_i^2 + 3b_j^2) \quad , (i \neq j) \quad (31)$$

となる。<sup>3</sup> ここで両国の社会的厚生の比較を行う。(3)より、

$$w_1^0 - w_2^0 = \frac{1}{3}(b_1 - b_2)^3 > 0 \quad (32)$$

となり、次の命題が成立する。

**命題7** R&Dがある場合、大国である1国は、小国である2国よりも社会的厚生は大きい。

## II-2-2 排出権取引が存在する場合

このとき  $p$  を排出権の価格とする。 $i$  国が  $j$  国から購入する量を  $a_o$  とすると、 $i$  国の総費用は

$$\bar{c}_1 = \frac{1}{2x_1}(a_1 - a_o)^2 + pa_o + \frac{x_1^3}{6}, (32)$$

$$\bar{c}_2 = \frac{1}{2x_2}(a_2 + a_o)^2 - pa_o + \frac{x_2^3}{6}, (33)$$

### 1) 第1段階

第1段階では、両企業は  $a_o$  と  $x_i$  に関して各自の費用を最小化する。このとき、両企業は排出権取引価格を一定と受け取る。つまり、議論を簡単化するために完全競争的に企業は行動すると仮定する。この最適化問題の最適のための一階の条件は

$$\frac{\partial \bar{c}_1}{\partial a_o} = -\frac{a_1 - a_o}{x_1} + p = 0 \quad (34)$$

$$\frac{\partial \bar{c}_2}{\partial a_o} = \frac{a_2 + a_o}{x_2} - p = 0 \quad (35)$$

となる。(34),(35)より

$$a_o = \frac{x_2 a_1 - x_1 a_2}{x_1 + x_2}, \quad (36)$$

$$p = x_1 = x_2 \quad (37)$$

となる。ここで価格  $p$  も需要供給の均衡において決定される未知数であり、この均衡値は(19)ですでに与えられたとおりである。また、 $x_i$  について費用最小化を行い、その最適の一階の条件は

<sup>3</sup>以下、 $(i \neq j)$  の表記は省略。

$$\frac{\partial \bar{c}_1}{\partial x_1} = -\frac{(a_1 - a_o)^2}{2x_1^2} + \frac{x_1^2}{2} = 0 \quad (38)$$

$$\frac{\partial \bar{c}_2}{\partial x_2} = -\frac{(a_2 + a_o)^2}{2x_2^2} + \frac{x_2^2}{2} = 0 \quad (39)$$

である。これを解くと

$$x_1^2 = a_1 - a_o = \frac{x_1}{x_1 + x_2} (a_1 + a_2) \quad (40)$$

$$x_2^2 = a_2 + a_o = \frac{x_2}{x_1 + x_2} (a_1 + a_2) \quad (41)$$

となり、最終的には

$$x_1 = \frac{a_1 + a_2}{x_1 + x_2} \quad (42)$$

$$x_2 = \frac{a_1 + a_2}{x_1 + x_2} \quad (43)$$

となる。つまり、両企業ともに同一のR&D投資を行うのであり、その値は

$$x_1 = x_2 = \sqrt{\frac{a_1 + a_2}{2}} \quad (44)$$

となる。

## 2) 第2段階

両国政府が持つ社会的厚生関数は

$$\bar{w}_1 = b_1(a_1 + a_2) - \sqrt{\frac{a_1 + a_2}{2}} \left( \frac{5a_1 - a_2}{6} \right) \quad (45)$$

$$\bar{w}_2 = b_2(a_1 + a_2) - \sqrt{\frac{a_1 + a_2}{2}} \left( \frac{5a_2 - a_1}{6} \right) \quad (46)$$

となる。この厚生を政府が  $a_i$  を用いてそれぞれ最大化する。排出量削減量  $a_i$  に関する厚生を最大化のための一階の条件は

$$\frac{\partial \bar{w}_1}{\partial a_1} = b_1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{a_1 + a_2}{2}}} \left( \frac{5a_1 + 3a_2}{8} \right) = 0 \quad (47)$$

$$\frac{\partial \bar{w}_2}{\partial a_2} = b_2 - \frac{1}{\sqrt{\frac{a_1 + a_2}{2}}} \left( \frac{3a_1 + 5a_2}{8} \right) = 0 \quad (48)$$

である。これを  $a_i$  について解いてそれを  $\bar{a}_i^{-1}$

とすると

$$\bar{a}_1^{-1} = \frac{(5b_1 - 3b_2)(b_1 + b_2)}{4}, \quad (49)$$

$$\bar{a}_2^{-1} = \frac{(-3b_1 + 5b_2)(b_1 + b_2)}{4} \quad (50)$$

となる。これより、 $\bar{a}_1^{-1} > \bar{a}_2^{-1}$  が成立するのは

(3)より明らかである。排出権取引がない場合と比較して

$$\bar{a}_1^{-1} - \bar{a}_1^{-0} = \frac{(b_1 - b_2)(b_1 + 3b_2)}{4} > 0,$$

$$\bar{a}_2^{-1} - \bar{a}_2^{-0} = -\frac{(b_1 - b_2)(3b_1 + b_2)}{4} < 0$$

となり、大国の削減量は上昇し、小国の削減量は減少する。また、1, 2国の合計の

$$\text{量は} \left( \bar{a}_1^{-1} + \bar{a}_2^{-1} \right) - \left( \bar{a}_1^{-0} + \bar{a}_2^{-0} \right) = -\frac{(b_1 - b_2)^2}{2} < 0$$

となり、排出権取引導入後は削減量の合計は低下する。なお、社会的厚生は

$$\bar{w}_1^{-1} = \frac{(5b_2 - b_1)(b_1 + b_2)^2}{12}, \quad (51)$$

$$\bar{w}_2^{-1} = \frac{(5b_1 - 3b_2)(b_1 + b_2)^2}{12}, \quad (52)$$

である。この両者を比較してみると、

$$\bar{w}_1^{-1} - \bar{w}_2^{-1} = \frac{-(b_1 - b_2)(b_1 + b_2)^2}{2} < 0, \quad (53)$$

となり、次の命題が成立する。これは、先に求めて命題7で示した排出権取引がない場合と比べて異なる結果である。

**命題8** R&D、排出権取引の双方があるとき、小国が大国よりも社会的厚生が大きい。

次に、排出権取引がないときとの厚生を比較を行う。取引がないときは、

$$w_i^{-0} = \frac{b_i}{3}(b_i^2 + 3b_j^2) \quad (54)$$

排出権取引がある場合の社会的厚生と比較してみる。

$$w_1^{-1} - w_1^{-0} = \frac{-1}{12}(b_1 - b_2)(5b_1^2 + 2b_1b_2 + 5b_2^2) < 0,$$

$$w_2^{-1} - w_2^{-0} = \frac{1}{12}(b_1 - b_2)(5b_1^2 + 2b_1b_2 + 5b_2^2) > 0$$

これより明らかに

$$\left( \frac{-1}{w_1 - w_2} - \frac{-1}{w_1 + w_2} \right) - \left( \frac{-0}{w_1 + w_2} - \frac{-0}{w_1 + w_2} \right) = 0, \quad (57)$$

となり、次の命題が成立する。

**命題9** R&Dがあり、排出権取引を導入すると社会的厚生は大国については小さくなるが小国は大きくなる。

**命題10** R&Dがあるとき、排出権取引を導入しても両国の社会的厚生の和は同じである。

### III. 厚生と比較

それぞれの場合の社会的厚生の大小関係を下の図で示した。この論文の大きな関心ごとは、排出権取引を導入することによって、両国の社会的厚生が上昇するのか否かである。下の表のように、排出権取引の導入によって大国は厚生が減少し、小国は上昇する。しかし、R&Dがないときは、排出権取引導入後には、両国の厚生の合計が上昇しているのであるから、小国が謝金を支払うことによって、排出権取引導入を大国に認めさせることができる。一方、R&Dがあるときには、両国の厚生の合計は排出権取引を導入しても変化はない。よって、謝金を支払って取引の導入を認めさせることはできない。よって以下の定理が成立する。

#### 定理1

R&Dがないときは、排出権取引を導入することができる。しかしR&Dがあるときには、謝金によっては排出権を導入することはできない。

	R&D なし	R&D あり
排出権取引なし	$w_1^0 > w_2^0, (w_1^0 - w_2^0)$	$w_1^{-0} > w_2^{-0}, (w_1^{-0} - w_2^{-0})$
排出権取引あり	$w_1^1 = w_2^1, (w_1^1 + w_2^1)$	$w_1^{-1} = w_2^{-1}, (w_1^{-1} + w_2^{-1})$
	排出権取引導入可能	排出権取引導入不可能

### IV. 結語

以上の命題1~10、定理1,2で示された結果はモデルで特定化された排出量削減費用関数、R&D投資費用関数などの形状に依存しているため、どれほど一般化できるものかは今後のテーマである。

#### 参考文献

Holtmark, B., Sommervoll (2012), 'International Emissions Trading: Good or Bad?,' *Economics Letters*, vol.117,pp.362-364.