環境システム研究 Vol. 24 1996年10月

ゲーム理論による排出権取引問題
ー 工業排水処理に関する適用 ー
Discharge Permit Trading Problem Analyzed by Game Theory
−Application to Industrial Wastewater Treatment−

○見市 晃*, 木田 雅司**, 盛岡 通***
Akira MIICHI*,Masasi KIDA**,Tohru MORIOKA***

ABSTRACT; Recently, it has been shown that an idea of discharge permit trading proposed in the United States is useful for the environmental conservation. This paper discusses a discharge permit trading problem arising between makers and a local government. The former generate large amount of wastewater due to their production activities and the latter is responsible for environmental conservation. There exists a case where the commission for the public sewerage plant services of the wastewater due to the production activity is cheaper than the treatment cost in the maker's own wastewater treatment plant. The local government is assumed to have a public wastewater treatment plant having enough capacity to treat not only residential wastewater but also industrial wastewater by trading the discharge permit to the makers. The above problem is formulated into a simplified competitive model under the reasonable cost structure. The discharge permit trading condition is given as Nash equilibrium solution of the problem. Finally, the utilization of the discharge permit is confirmed by applying the derived results to the case of prefecture governments and their industrial sectors in Seto Inland Sea area.

KEYWORD: Discharge Permit, Game Theory, Industrial Wastewater, Local Government and Maker

1 はじめに

日本の社会資本、たとえば、下水道普及率を西欧並に近づけるため処理場や管渠の建設が進められているが、平成7年度末における下水道処理人口普及率の目標は55%にとどまっているにすぎない。下水道統計によれば、下水道関連事業を実施している市町村は51%と年を追う毎に増加しているが、人口規模が小さいほど実施率は低くなっている。また、地方都市では、経済不況や産業の海外移転により財政規模が縮小し環境保全への投資も難しくなってきている。地方の製造業も保有する水質浄化設備の処理能力の強化はおろか、設備にも負担を感じていると予想される。そこで、米国の排出権取引制度[1,2,3]に着目し、これを日本に持ち込んだ場合の理論的裏付けと施策執行時の試算を行った。

2 研究の概要

環境庁による公害防止の法規制[4,5]の整備から始まった環境保全の考え方は、大企業による公害防止技術の開発を始めとして一定の効果をあげてきているが、生活環境には積み残した問題が多く残されている。これは一般国民が加害者と被害者を演じるという広く拡散された制御しにくいものであるとともに原資の不足という解決しにくい問題でもある[6]。 下水道施設の建設に当てる原資をまかない、かつ環境保全を行う

*追手門学院大学経営学部 Department of Management, Otemon-gakuin University.
**日本圧着端子製造(株) Nihon-acchakutansi-seizou Co., Ltd.
*** 大阪大学工学部 Department of Environmental, Osaka University.

ために以下に述べる排出権取引制度について考える。倉阪[7]によると、米国では１９７４年に大気浄化法（Clean Air Act）により企業内で排出権の売買が認められたのを始め、水質浄化法（Clean Water Act）のもと州レベルで排出権売買の実例も若干ではあるが認められていると報告されている。これらによると、出権売買は排出権市場で自由に取引されるのではなく水質浄化法の水質のガイドラインのもと、基準を超えない範囲で最大限度の汚濁物質量の排出を認めるというものである。また、細田[8]は排出権売買制度のメカニズムを経済学の立場から議論しているし、末石らは排出権について引用文献[9]で定義している。

本論文では、日本でこの排出権取引制度を実施する際の前提として、製造業の生産による汚濁水が一定の水質基準を満たしている場合には、その工業排水を下水管に直接放流する有償の権利と定義している。ここでは、地方行政機関（以下行政という）は生活排水処理のため下水処理場を建設する場合、その処理能力に十分余裕があるものと想定し、工業排水の処理を引き受けることによる利益を管渠の敷設工事などの費用に充当するものと考える。本論文で水質改善計画を行政による一方的な施策ではなく、汚濁物を出す側と行政の間の競合状態としてとらえる観点からゲームの理論を用いることにする[10,11]。

製造業は、これまで環境改善のため排水の処理技術の向上を心がけているので日常的に処理を行なえるようになっている。しかし、工学的にみて濃度の高い汚濁物を取り除くことは容易であるが、残りの汚濁物を除去することは濃度が低くなるにつれ技術的にも経済的にも困難となっている。そこで過大な投資や多くの技術開発時間の負担を緩和するために工場排水をある期間公共下水道に放流することを黙認してもらう代わりに、環境改善のための原資を目的税の形で支払うとするという考えがある。一方、製造業は限界まできた汚濁処理装置を前に、増産を行なうことにより汚濁物をさらに処理するのにどのように対処すべきかの問題に直面している。増産を行うには新たに発生する汚濁物に対する処理装置に投資を行うことが必要となるが、将来生産量を下げる必要が生じた場合は処理装置への投資は無駄となる。そこで製造業は有害物質の除去は自前で行うとしても、排出権の考え方にしたがって残りの排水処理を行政に依頼することにより、過剰投資のリスクを回避したいという考え方がある。一方、行政にとっては環境改善のため下水道普及率の向上が愁眉の目的であると共に製造業の増産による雇用の向上や地域の活性化は望ましいことである。このように両者の間には、基本的な利害が一致するということで、相互交渉により増産と下水道普及率向上を計ろうとする。もちろん、交渉の場においては、互いに戦略を駆使して自らの陣営に有利な条件で落ちつくように導くという局面が考えられる。そこで本論文では、この局面をゲームの理論（非協力非ゼロ和連続ゲーム）で問題を定式化することによって解析することにした。

ゲームの理論[12,13]でなされているように生産に伴い汚濁物を発生する製造業をプレーヤー１、公共下水道において処理を行う行政をプレーヤー２と呼ぶことにする。この両者の間で排出権取引が行われるとき、各プレイヤーは以下のように振る舞うと考えられる。

・製造業（プレイヤー１）

自社で汚濁物質を処理するよりも、排出権を購入しそれを行使して処理を地方行政機関に委託したほうが安上がりであると判断されるなら、できるだけ多く排出権を購入して増産したいと考える。しかし相手プレイヤーである行政が提示した排出権売却量が希望購入量未満であれば、残りの汚濁物質は自社で処理せざるを得ない。もちろん、有害物質に関しては製造業が責任をもって処理することとする

・行政（プレイヤー２）

製造業が得た排出権を行使して下水管へ排水を放流した場合、それに含まれている汚濁物質の処理を肩代わりするわけであるから、排出権を大量に行使されると、生活排水の処理を圧迫しそれらを処理しきれないという状況に陥る可能性がある。しかしながら、排出権を売却して下水道敷設工事費などを捻出しようとするなら、ある程度の量の排出権は売らなければならないであろうし、増産によって地方産業の活性化や雇用の促進が図られるのであれば、なおさら増産による

汚濁物の排出を認めることもやむえないとも考える。

このように両者の関係は一見非協力的ではあるが一部協調という面をもっていることがわかる。つまり利害において両者の関係は完全に対立しているわけではない。そこが問題を非ゼロ和ゲームとして解析する最大の理由であるといえる。ゲームの理論では両プレイヤーの利得関数に互いに相手プレイヤーのとる戦略が入るものである。そこで次節にそれぞれの利得関数を定式化することにする。このモデルでは生産量を製造業（プレイヤー１）の戦略とし、行政（プレイヤー２）の戦略は排出権販売量である。このモデルに基づき生産量と排出権取引量の理論的均衡解を求める。さらに、現実をより反映するような条件とパラメータを設定した上で、お互いの具体的な均衡解の形として導いている。その後、解の検証と本モデルの現実的な適用例として瀬戸内海沿岸地域について数値計算を行い、この提案の有意性を確認する。

3　モデルの定式化

前節で述べたように本論文で考察する問題は、製造業の生産によって得られる利益とその生産に伴って生じる汚濁物の処理費用を勘案して自社で処理する方が得策であるか、排出権を購入して公共下水処理設備を利用した方が有利であるかを分析する。一方行政は、下水処理場で引き受けるとしたら、どの程度の排出権を販売すればよいかを考える。問題を定式化するために下記の記号を使用することが必要である。

3．1　使用記号の説明

- 生産によって得られる製造業の利益を $r_1(w)$ 〔円〕と表す。ただし発生する汚濁物の処理費用を含むとする。$r_1(w)$ は発生する汚濁物の量 w に依存する関数である。
- 汚濁物を自社で処理する場合に要する費用を $s(w)$ とする〔円〕。これは処理の対象となる汚濁物の量 w に依存する関数となる。
- 排出権、すなわち汚濁物を未処理のまま下水管に排出できる権利の価格を h と表す〔円／トン〕。
  h は、排出の対象となる汚濁物の量に依存する関数となるが、ここでは定数とする。
- 製造業の生産活動によって得られる行政の利益を $r_2(w)$ とする〔円〕。これは生産により生じる汚濁物の量 w に依存する関数である。
- 行政機関の下水処理場で汚濁物を処理するのに要する費用を $\alpha(w)$ 〔円〕と表す。これは処理の対象となる汚濁物の量 w に依存する関数になる。
- 製造業（プレイヤー１）の戦略、すなわち生産によって発生する総汚濁物量を a と表すとする〔トン〕。
  これは発生する汚濁物の総量がどの程度の量となるように生産目標をたてればよいかという戦略を意味している。
- 製造業（プレイヤー１）の戦略、すなわち排出権の希望購入量を x と表す〔トン〕。これは直接生産量を規定しないで、解析容易のために生産に伴って排出される汚濁物の量に注目しているためである。すなわち、汚濁物を何トン排出したいと行政に申し出ればよいかという戦略である。
  ただし、当然のことながら $x \leq a$ でなければならない。
- 行政（プレイヤー２）の戦略、すなわち排出権の売却決定量〔トン〕を y と表す。これは、排出権を売ってほしいと申し出た製造業に対して、何トン分の排出権を売ればよいかという戦略である。
- 製造業側が排出権を x トン購入したいと申し出て行政側が排出権を y トンなら売ってもよいと提示した際に、実際に両者の間で取り引きされる排出権の量を $z(x,y)$ と表す〔トン〕。

3．2　前提条件

前提条件として、製造業の利益 r_1 ,製造業自体の処理費用 s ,排出権の価格 h ,生産活動にともなう行政の利益 r_2 ,行政による処理費用 α は以下のような性質を持つと仮定される。

- $r_1(w)$ ：ある程度以上大量生産すると生産が困難となるため生産物一単位当たりの利益は減少すると考える。すなわち $r_1(w)$ は単調増加の凹関数である。

・$s(w)$ ：汚濁物の量が増えるに従い、汚濁物一単位当たりの処理費用は増加すると考える。
すなわち単調増加の凸関数である。

・h ：排出権一単位当たりの価格は一定であるとする。すなわちhは線形増加関数である。

・$r_2(w)$ ：製造業の生産活動によって得られる行政の利益を雇用と考えると、生産活動に伴い最初のうちは人手不足の為多くの雇用が確保されるだろうが、やがて人員過剰となり雇用の確保は徐々に縮小されていくと考える。単調増加凹関数である。

・$\alpha(w)$ ：$s(w)$と同様に、汚濁物の量が増えるに従い汚濁物一単位当たりの処理費用は増加するとする。
すなわち単調増加凸関数である。

ただし、製造業が単独で汚濁物を処理する場合には、公共下水処理場において一括集中処理するよりも高い費用を要するものとする。すなわち、公共下水処理場では集中効果が存在すると考える。この条件は全てのwに対して$s(w)>\alpha(w)$ と表される。

3．3 モデル式

先述した前提条件をもとに製造業（プレイヤー1）が生産目標をa（生産を実行したとき発生する汚濁量に換算していることに注意）に設定し、そのうちx量の排出権を希望し、一方行政がyだけの量の排出権を提示したとき両者で取引された排出権の量は$z(x,y)$となり残りの$a-z(x,y)$は自社で処理することより、両者が得る利得はつぎのように定式化される。まず、製造業の利得M_1はaだけ生産したことによる利益から、自社での処理費用sと排出権購入に対する費用を差し引いたものとなり、$M_1(a,x;y)=r_1(a)-s(a-z(x,y))-h(z(x,y))$と表せる。

一方、行政の利得M_2はaだけ生産による行政の利益r_2および排出権を売ることによる利益hから排出権を売却したために行政の引き受ける工業排水の処理費用を減じたものとなるから$M_2(a,x;y)=r_2(a)+h(z(x,y))-\alpha(z(x,y))$がえられる。ただし、行政の処理費用には下水処理場の建設費は含めない。問題は$a\geq 0, 0\leq x\leq a, y\geq 0$のもとに利得関数$M_1(a,x;y)$を最大にするような$a,x$の値および利得関数$M_2(a,x;y)$を最大するような$y$の値を同時に求めるということになる。すなわち、問題は次のように表される。

$$
\begin{cases}
M_1(a,x;y)=r_1(a)-s(a-z(x,y))-h(z(x,y)) \longrightarrow \max\limits_{a,x} \\
M_2(a,x;y)=r_2(a)+h(z(x,y))-\alpha(z(x,y)) \longrightarrow \max\limits_{y} \\
\textit{subject to} \\
\quad a\geq 0,\quad 0\leq x\leq a,\quad y\geq 0
\end{cases}
$$

ここで$z(x,y)$に関しては、市場経済における売買の自然な法則に基づき、$z(x,y)=x\wedge y$ のケースを考えていくことにする。

次節では上記のモデルの解析を行い、互いに相手の戦略に対する最適反応戦略を求め、両プレイヤーの平衡戦略を示すことにする。

4 モデルの解析

4．1 製造業の利得関数について

まず、製造業の利得について考える。製造業（プレイヤー1）の利得関数$M_1(a,x;y)$はxとyの大小関係により以下のように与えられる。

$$
M_1(a,x;y)=\begin{cases}
r_1(a)-s(a-x)-hx \to \max\limits_{a,x} & \text{if} \quad x\leq y \\
r_1(a)-s(a-y)-hy \to \max\limits_{a,x} & \text{if} \quad x\geq y
\end{cases}
$$

相手プレイヤーすなわち行政の戦略yを固定して考える。

$M_1(a, x\,;\,y)$を単に$M_1(a,x)$と表せる。$x \le y$の領域においてaを固定（固定したaをa^0とおく）し、このa^0に関して、製造業の利得$r_1(a^0) - s(a^0 - x) - hx$ を最大にするようなxを求める。もちろんそのxの値はa^0の値によって変化すると考えられるので、aの関数として$\tilde{x}(a)$と表すことにする。まず、

$M_1(a^0, x) = r_1(a^0) - s(a^0 - x) - hx$ を最大化する問題を解くために利得M_1のxに関する第一次導関数および第二次導関数を求める。

ただし、前提条件として関数$s(\cdot)$は凸としているので、第二次導関数は常に正であることが容易に示される。よって、$M_1(a^0, x)$はxについて凹であることが示された。すなわち$M_1(a^0, x)$を最大にするxの値は第一次導関数を0とする方程式より得られ, $s'(a^0 - x) = h$ の解xが求めるものであり、それを$\tilde{x}(a^0)$とおく。

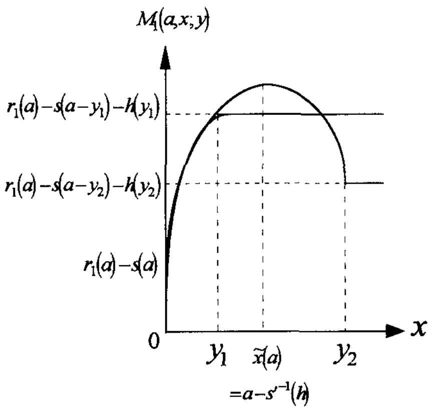


図1 aを固定したときのxについての$M_1(a, x\,;\,y)$の変化

ところで、$s(w)$が凸関数であることより$s'(w)$は増加関数であるから、その逆関数が存在する。そこで、$s'(a^0 - x) = h$を解くために$s'(w)$の逆関数を以下のように定義する。

$$s'^{-1}(u) = \begin{cases} 0 & \text{if} \quad 0 \le u \le s'(0) \\ s'^{-1}(u) & \text{if} \quad s'(0) < u < s'(\infty) \\ \infty & \text{if} \quad s'(\infty) \le u \end{cases}$$

このように$s'(w)$の逆関数を定義すると、hの逆関数$s'^{-1}(h)$は$0 \le h < \infty$ の範囲において$0 \le s'^{-1}(h) \le \infty$ となり、一方$s'(a^0 - x) = h$の解に関して、$a^0 - x = s'^{-1}(h) \ge 0$ より $a^0 - x \ge 0$ の条件と矛盾しない。したがって、$x = a^0 - s'^{-1}(h)$ すなわち $\tilde{x}(a^0) = a^0 - s'^{-1}(h)$が最適解となる。ただし、$0 \le s'^{-1}(h)$より$\tilde{x}(a) = a - s'^{-1}(h) \le a$が成立する。以上の議論から、生産目標を$a$を固定したときの$M_1(a,x;y)$の$x$についての変化を図1に示す。図1より製造業の最適戦略$x^*(a)$は行政の売る排出権yより等しいか小さくなければならないため

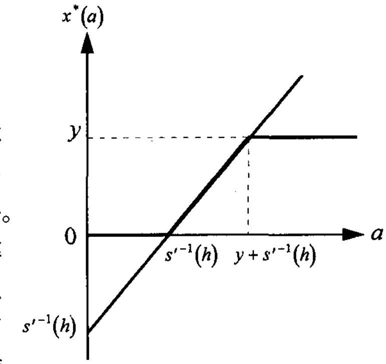


図2 aの値による$x^*(a)$の変化

$$x^*(a) = \tilde{x}(a)^+ \wedge y = \{a - s'^{-1}(h)\}^+ \wedge y$$
$$= \begin{cases} 0 & \text{if} \quad a - s'^{-1}(h) \le 0 \\ y & \text{if} \quad y \le a - s'^{-1}(h) \\ a - s'^{-1}(h) & \text{if} \quad a - s'^{-1}(h) \le y \end{cases}$$

と与えられる。aの値による$x^*(a)$の変化がより分かり易くなるように条件を書き換えると、

$$x^*(a) = \left\{ \begin{array}{lll} 0 & \text{if} & 0 \le a \le s'^{-1}(h) \\ a - s'^{-1}(h) & \text{if} & s'^{-1}(h) \le a \le y + s'^{-1}(h) \\ y & \text{if} & y + s'^{-1}(h) \le a \end{array} \right\} \tag{1}$$

となる。これを図示すると、右上の図2が得られた。

つぎに、aによって変化する$x^*(a)$の中でも最適な$x^*(a)$が存在する、つまり最適なaが存在する条件を求める。$x^*(a)$が(1)式で表されるときの$M_1(a, x^*(a); y)$はそれぞれつぎのようになる。

$$M_1(a, x^*(a); y)$$
$$= r_1(a) - s(a - x^*(a)) - h \cdot x^*(a)$$
$$= \begin{cases} r'_1(a) - s(a) & \text{if} \quad 0 \le a \le s'^{-1}(h) \\ r'_1(a) - s(s'^{-1}(h)) - h \cdot (a - s'^{-1}(h)) & \text{if} \quad s'^{-1}(h) \le a \le y + s'^{-1}(h) \\ r_1(a) - s(a - y) - hy & \text{if} \quad y + s'^{-1}(h) \le a \end{cases}$$

$M_1(a,x^*(a);y)$の最大を解析的に求めるために、aに関する第一次導関数、第二次導関数を求めることにする。以下の式は容易に示される。

$$\frac{\partial}{\partial a}M_1(a,x^*(a);y)$$
$$=\begin{cases} r'_1(a)-s'(a) & if \quad 0\le a\le s'^{-1}(h) \\ r'_1(a)-h & if \quad s'^{-1}(h)\le a\le y+s'^{-1}(h) \\ r'_1(a)-s'(a-y) & if \quad y+s'^{-1}(h)\le a \end{cases}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial a^2}M_1(a,x^*(a);y)$$
$$=\begin{cases} r''_1(a)-s''(a) & if \quad 0\le a\le s'^{-1}(h) \\ r''_1(a) & if \quad s'^{-1}(h)\le a\le y+s'^{-1}(h) \\ r''_1(a)-s''(a-y) & if \quad y+s'^{-1}(h)\le a \end{cases}$$
$$\le 0$$

$M_1(a,x^*(a);y)$は第二次導関数が常に負であるからaについて凹である。したがて、製造業の利益を最大にするようなaの値は第一次導関数を0とおくことにより求められる。すなわち、

$$\frac{\partial}{\partial a}M_1(a,x^*(a);y)$$
$$=\begin{cases} r'_1(a)-s'(a) & if \quad 0\le a\le s'^{-1}(h) \\ r'_1(a)-h & if \quad s'^{-1}(h)\le a\le y+s'^{-1}(h) \\ r'_1(a)-s'(a-y) & if \quad y+s'^{-1}(h)\le a \end{cases}$$
$$=0$$

より、最適なaの値が求まる。そこで、

$r'_1(a)=s'(a)$　の解a をa_1

$r'_1(a)=h$　の解a をa_2

$r'_1(a)=s'(a-y)$ の解aを$a_3(y)$ とおく。

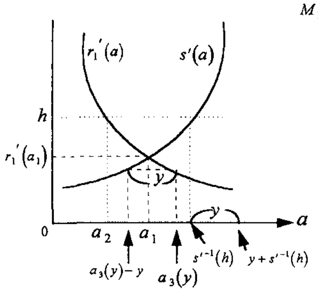
$a_1, a_2, a_3(y)$の関係を図示すると、図３のようになる。この図は、a_1と$a_3(y)$の間には常に$a_1\le a_3(y)$の関係があることを示している。したがって、$r'_1(a_3)\le r'_1(a_1)$が常に成り立っている。

よってa_2がどこにくるかによって以下の３つのケースに分けられ、最適生産目標a^*は３通りに表示される。

$$\begin{cases} ケース(1):\ a_2\le a_1 \quad (\ r'_1(a_2)=h\ \ge\ r'_1(a_1)\ ) \\ ケース(2):\ a_1\le a_2\le a_3(y) \quad (\ r'_1(a_3(y))\le r'_1(a_2)=h\le r'_1(a_1)\ ) \\ ケース(3):\ a_3(y)\le a_2 \quad (\ r'_1(a_2)=h\le r'_1(a_3(y))\ ) \end{cases}$$

最適生産目標a^*を３つのケース毎に図示すると、以下の図のようになる。

ケース(1)：　$a_2\le a_1$　($r'_1(a_2)=h\ \ge\ r'_1(a_1)$)



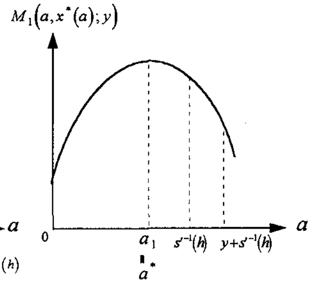
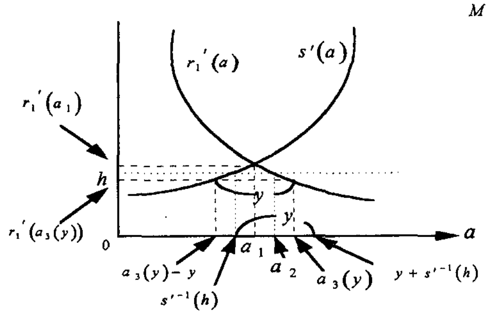


図３－１ａ　$a_1,a_2,a_3(y)$の関係（$a_2\le a_1$の場合）　図３－１ｂ　$h\ge r_1'(a_1)$の場合のa^*

ケース(2)： $a_1 \leq a_2 \leq a_3(y)$　（ $r'_1(a_3(y)) \leq r'_1(a_2)=h \leq r'_1(a_1)$ ）



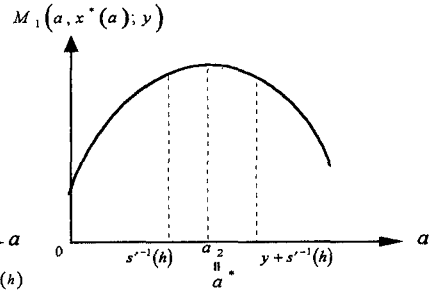
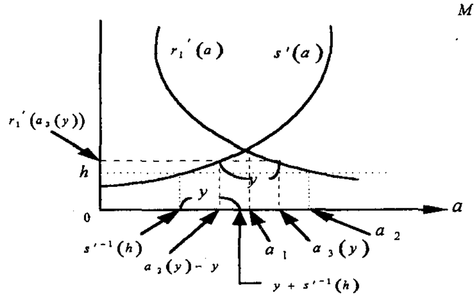


図３－２ａ　$a_1,a_2,a_3(y)$ の関係　　　　図３－２ｂ　$r_1'(a_3(y)) \leq h \leq r_1'(a_1)$ の場合の a^*

$(a_1 \leq a2 \leq a_3(y)$ の場合$)$

ケース(3)： $a_3(y) \leq a_2$　（ $r'_1(a_2)=h \leq r'_1(a_3(y)$ ）



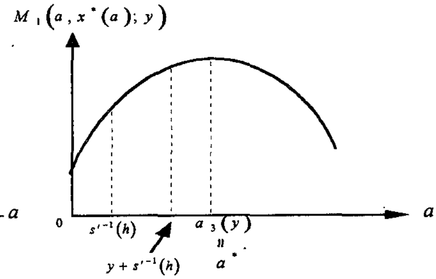


図３－３ａ　$a_1,a_2,a_3(y)$ の関係　　　　図３－３ｂ　$h \leq r_1'(a_3(y))$ の場合の a^*

$(a_3(y) \leq a_2$ の場合$)$

以上の結果をまとめると、製造業にとって最適な生産目標 a^* は以下のように与えられる。

$$a^* = \begin{cases} a_1 & \text{if} \quad h \geq r'_1(a_1) \quad \text{このとき} \quad 0 \leq a_1 \leq s'^{-1}(h) \\ a_2 & \text{if} \quad r'_1(a_3(y)) \leq h \leq r'_1(a_1) \quad \text{このとき} \quad s'^{-1}(h) \leq a_2 \leq y+s'^{-1}(h) \\ a_3(y) & \text{if} \quad h \leq r'_1(a_3(y)) \quad \text{このとき} \quad y+s'^{-1}(h) \leq a_3(y) \end{cases} \quad (2)$$

４．２　行政の利得関数について

つぎに、行政の最適戦略について議論するために行政の利得関数 $M_2(a,x\,;y)$ について分析する。行政、すなわちプレイヤー２の利得関数 $M_2(a,x\,;y)$ は x と y の大小関係により以下の２通り書くことができる。

$$M_2(a,x\,;y) = \begin{cases} r_2(a)+hx-\alpha(x) \to \max\limits_{y} & \text{if} \quad x \leq y \\ r_2(a)+hy-\alpha(y) \to \max\limits_{y} & \text{if} \quad x \geq y \end{cases}$$

$x \leq y$ のとき $M_2(a,x\,;y)$ は y に無関係な式であるので、$M_2(a,x\,;y)$ は y について定数となる。したがって、$x \geq y$ のときの $M_2(a,x\,;y)$ に対して解析を行えばよい。そこで、$M_2(a,x\,;y)$ の最大値を求めるために第一次導関数、第二次導関数を計算する。

$$\frac{\partial}{\partial y} M_2(a,x\,;y) = h-\alpha'(y)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} M_2(a,x\,;y) = -\alpha''(y) \leq 0$$

ここで、$\alpha(\cdot)$ は凸関数であるのでその二次導関数 $\alpha''(\cdot)$ は常に正であることに注意すると、行政の利得関数 $M_2(a,x\,;y)$ は y について凹であることが示された。そこで $M_2(a,x\,;y)$ の y について最大となるような y の値を求めるため

$$\frac{\partial}{\partial y} M_2(a,x;y) = h - \alpha'(y) = 0$$

となる y を求めればよい。すなわち $\alpha'(y)=h$ の解 y を $\tilde{y}$ とおくと、$\tilde{y}$ が与えるが $\tilde{y}=\alpha'^{-1}(h)$ となる。ここで、$M_2(a,x;y)$ の y についての変化を右の図４に示す。

図４に示されている、$\tilde{y}$ と x の大小関係によって求める最適戦略 y^* が次のように定められる。

$$y^* = \left\{ \begin{array}{lll} \tilde{y} & if & \tilde{y} \le x \\ x & if & x \le \tilde{y} \end{array} \right\} = \tilde{y} \wedge x \qquad (3)$$

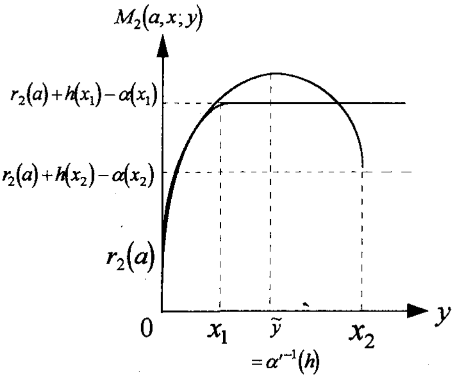


図４　$M_2(a,x;y)$ の y についての変化

４．３　Ｎａｓｈ均衡点

(1),(2),(3)式で表される製造業と行政それぞれの最適戦略 a^*, $x^*(a)$, y^* を排出権の価格 h に関する条件別にまとめると以下のようになる。ただし、最適戦略は $(a^*, x^*(a), y^*)$ とベクトル形式で表現されている。

$$(a^*, x^*(a), y^*) = \left\{ \begin{array}{l} (a_1,\ 0,\ \tilde{y}\wedge x) = (a_1,\ 0,\ 0) \\ \qquad if \quad 0 \le a_1 \le s'^{-1}(h) \quad \text{このとき} \quad h \ge r'_1(a_1) \\ \\ (a_2,\ a_2 - s'^{-1}(h),\ \tilde{y}\wedge x) = (a_2,\ a_2 - s'^{-1}(h),\ \tilde{y}\wedge(a_2 - s'^{-1}(h))) \\ \qquad if \quad s'^{-1}(h) \le a_2 \le y + s'^{-1}(h) \quad \text{このとき} \quad r'_1(a_3(y)) \le h \le r'_1(a_1) \\ \\ (a_3(y),\ y,\ \tilde{y}\wedge x) = (a_3(\tilde{y}),\ \tilde{y},\ \tilde{y}) \\ \qquad if \quad y + s'^{-1}(h) \le a_3(y) \quad \text{このとき} \quad h \le r'_1(a_3(y)) \end{array} \right.$$

この結果を図示すると、以下の図５が得られる。この図から、h つまり排出権一単位当たりの価格の与え方によって、３通りのＮａｓｈ解が存在することがわかる。

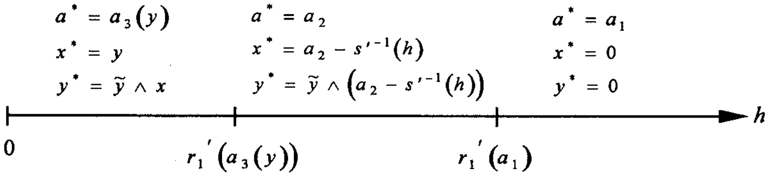


図５　排出権価格 h の変化に対する Nash 均衡点

５　数値計算

本節では上記の議論にしたがって実際の局面について解析した例を示す。

５．１　対象地域と計算条件

ここでは、これまで解析を行ってきたモデルに対して数値計算を試みる。本モデルの行政を瀬戸内海沿岸地域の各府県と考える。製造業の排出する汚濁物の指標として環境庁が水質指標の一つとしている化学的酸素要求量(Chemical Oxygen Demand:ＣＯＤ)を用いる。瀬戸内海沿岸には多業種の製造業が存在し、それぞれ異なった濃度のＣＯＤを工業排水として排出している。建設省都市局下水道部監修の資料などによると工業排水汚濁負荷量、排水原単位が産業中分類の項目毎に記載されているので、これを用いて瀬戸内海沿岸の４９工業地区における総排出フラックス量を計算した。さらに、瀬戸内海沿岸の産業を、産業中分類より皮革産業とその他の産業を除いた平均値で代表させても良いかどうかの検討を総フラックス排出量より行い、可能と判ったので瀬戸内海の産業を上記の平均値の産業と仮定して計算することにする。また、

製造業ならびに下水処理場から排出される処理水の濃度は規程通りとし下水処理場の処理費用は下水道要覧[1)]より求め、集中効果を考慮して製造業の半分の処理費でまかなえると仮定している。行政の利益$r_2(w)$は陽に現れない値を含んでいるので、ここでは$r_1(w)$の１０分の１として分析を行っている。

5．2　Ｎａｓｈ解の感度解析

以上の条件のもとで数値計算を行い、数値例としてのＮａｓｈ解およびプレイヤー１の期待利得$M_1(a,x\,;y)$，プレイヤー２の期待利得$M_2(a,x\,;y)$を求めた。

３節２項で示した関数のうち、関数$r_1(w)$、関数$s(w)$および関数$\alpha(w)$に関しては、実データに基づき回帰分析を行い各府県毎に具体的な関数形が得られた。代表例として大阪府について図６ａに関数$r_1(w)$を、図６ｂに関数$s(w)$を示す。

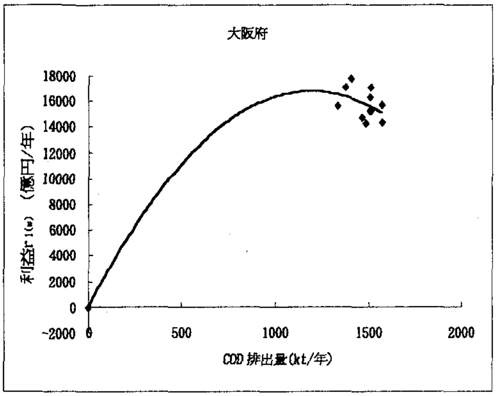


図 6a 物質量(COD)と利益$r_1(w)$の関係

回帰曲線 $y=-0.039x^2+9.265x-0.492$

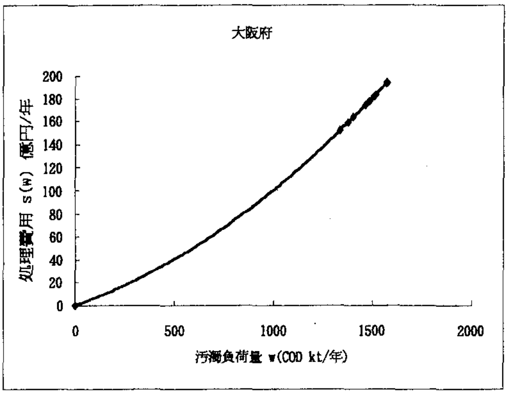


図 6b 汚濁物量(COD)と処理費用$s(w)$の関係

回帰曲線 $y=-0.00004x^2+0.06x+0.0012$

３節２項で理論的に求めたＮａｓｈ均衡解は排出権１単位の価格hによって異なった解を示した。そこで、モデル内に示された幾つかの関数形とhの値を与えれば自動的に解が得られるようなプログラムを作成した。このプログラムを用いてhを変動させ、それによって$M_1(a,x\,;y)$や$M_2(a,x\,;y)$がどのような変化を示すかをhの感度分析という形で行った。その結果を図で示したものが以下の図７ａ、図７ｂである。hは行政（プレイヤー２）が決定する定数であるので、行政の利得$M_2(a,x\,;y)$が最大となるようなhを求めた。

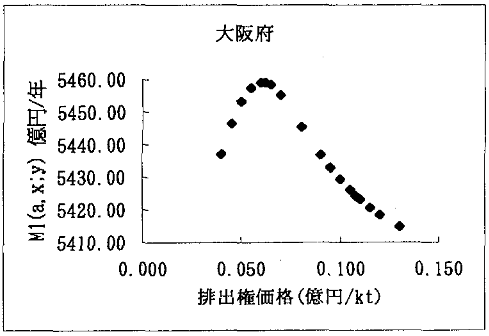


図 7a 排出権価格ｈと製造業の期待利得

$M_1(a,x\,;y)$の関係

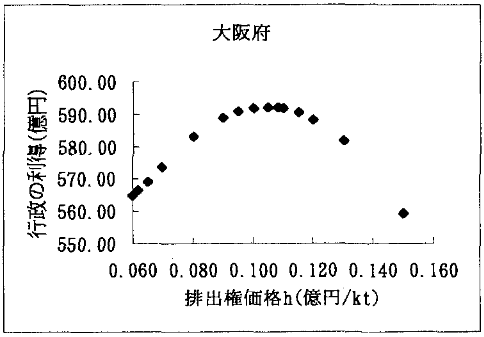


図 7b　排出権価格ｈと地方行政機関の期待利得

$M_2(a,x\,;y)$の関係

Ｎａｓｈ解の感度分析により、行政（プレイヤー２）の期待利得 $M_2(a, x; y)$ を最大にする排出権価格 h と、h がその値をとるときの製造業の最適戦略 a^*、排出権取引量 $x^* = y^*$ は 1993 年を例に計算したところ表１のような結果がえられた。

表１　各府県で排出権取引が行われた場合の結果

	h〔億円/kt〕	a^*〔kt〕	x^*〔kt〕	hx^* (=hy^*)〔億円〕
京都府	0.11	321.9	295.2	32.47
大阪府	0.11	1178.3	615.7	64.65
兵庫県	0.52	10228.8	5549.8	2858.12
奈良県	1.60	1999.1	1005.2	1608.34
岡山県	0.10	1054.5	659.5	62.66
広島県	0.29	4959.2	2571.2	732.78
山口県	0.14	1907.2	918.2	132.22
徳島県	0.09	2121.0	1786.0	164.31
香川県	0.10	1093.4	618.4	59.98
愛媛県	0.21	4520.0	2596.3	537.42
福岡県	0.08	358.7	281.2	22.50
大分県	0.08	743.6	532.0	44.15
合　計			17428.6	6319.60

５．３　排出権取引の効果

前節で得られた h および x^*（$=y^*$）の積を本論文の２節「研究の概要」で述べた目的税のように、下水道建設資金に充てると考える。

本数値計算では、本論文のモデルにしたがって各行政が独立して取引を行うとしている。いま瀬戸内海沿岸の行政それぞれが排出権取引を行ったとして右表をみると、取引される排出権の量 x^* の項の合計は、ＣＯＤ量に換算して約 1.7 万ｷﾛﾄﾝとなることが判る。各府県の期待利得である $M_2(a,x;y)$ を最大にする排出権価格 h は、その行政の置かれてい　る社会的な状況、すなわち下水道建設に投入している金額、工業生産額、瀬戸内海へ汚濁物を流している量などにより差違がみられる。また、このモデルにより排出権取引が行われた場合、単年度で hx^* が行政の得ることになる金額である。たとえば、大阪府の場合は７０億円、兵庫県では６７８億円と推定される。ただし、表１の数値は丸められているため $h \times x^*$ の値と hx^* の値とは完全には一致していない。参考のために 1993 年度の各府県の下水道建設費を表２に示す。表２は、これまでの実績を示したものであり、表１の右欄は将来の上乗せ額を示している。

表２　下水道建設費

1993年	〔億円〕
京都府	926.3
大阪府	3055.4
兵庫県	1621.8
奈良県	224.6
岡山県	733.7
広島県	918.2
山口県	334.1
徳島県	59.4
香川県	196.0
愛媛県	343.0
福岡県	164.2
大分県	206.6

６　結論

１９９３年度末のの日本の総人口下水道普及率は 42%で、瀬戸内海沿岸では大阪府の 69%%、兵庫県の 66%という全国平均を上回る府県から徳島県の 9%、香川県の 21%と相当な格差が存在すると指摘される[1]。

社会資本の投入の遅れている日本にとって、下水道処理区域の拡大は優先順位が必ずしも高いとはいえない。前出の下水道要覧 によると直径 1.65m の下水道本管を 1m 敷設するための費用は 100 万円から 120 万円を要するとある。さらに、建設費に加えてほぼ同等の管理費が必要となってくる。一方、製造業は２節で述べたように汚水処理設備を整備して処理を行っているが、処理能力を上回る一時的な増産や高度処理の費用などの点で、より有利な道があるのであれば取引に応じる可能性がある。

本論文では、この両者の間に排出権という新しい概念を導入した。２節では排出権取引制度に関する前提条件を述べた。３節においては本論文で提案したモデルについて、製造業が生産量を生産に伴う汚濁物量に置き換えて戦略とし、行政は排出権取引量を戦略としてそれぞれの利得関数を導き、４節で互いの理論的均衡解を求めた。均衡解としては、排出権１単位の価格によって異なる一群の解を示した。５節１項では、この解の中から行政の期待利得を最大にする解を最適解として与えるために、すなわち、行政に排出権取引の主導権を与えるという立場からＮａｓｈ解の感度分析を行い行政の最適解を与えた。結果として製造業，行政がともに得策であるという排出権価格の値があるという理論的な根拠が得られた。本論文では一行政機関を取り扱ったが数値として、複数県複数企業を対象とした。すなわち、瀬戸内海沿岸の各府県を行政として取り扱った。この数値分析によると、下水道の普及状況、すなわち建設費の投入姿勢により最適排出権価格 h の値に若干の差違がみられることがわかった。行政の単位を府県ではなくもう少し規模の小さい市町村で行い積み上げげた方が望ましかったのかもしれない。

以上のように日本では未だ一般的でない排出権の売買による成果を予想したわけであるが、米国では、わずかであるが排出権市場が出現し企業間で取引が行われたという報告[7]もなされているし、将来は企業が余裕のある内に先行投資によって排出権を入手したり、生産効率の高い企業が排出権を買い占めたりする事態

も出現するかもしれない。これに対しては排出権取引において行政が主導的立場をとることが必要と考えられる。

参考文献

1) Alexandra Teitz 『Assessing Point Source Discharge Permit Trading: Case Study in Controlling Selenium Discharges to the San Francisco Bay Estuary』 Ecology Law Quarterly: pp79162, vol. 21, No. 79, 1994.

2) Robert W. Hohn & Gordon L. Hester『Marketable Permits: Lessons for Theory and Practice』 Ecology Law Quarterly: pp361-406, Vol. 16, No. 36, 1989.

3) Robert W. Hahn & Gordon L. Hester『Where Did All the Markets Go? An Analysis of EPA's Emission Trading Program』 The Yale Journal Regulation: pp109-153, vol. 6, No. 109, 1989.

4)塩谷　宏他編「六法全書 1, 2」有斐閣, 1996.

5) 宮本 忠 , 立石 雅彦『現代の公害と法規制 －水質汚濁問題を中心にして－』高文堂出版社, 1983.

6) 宇井純『NHK 人間大学 日本の水を考える』日本放送出版協会, 1994.

7)倉阪秀史『アメリカにおける水質保全のための排出権売買の実際』資源環境対策, pp935-939, Vol. 31, NO. 11, 1995.

8)細田衛士『排出権売買の経済的基礎』環境研究, pp. 63-71, No. 97, 1995.

9)末石富太郎他「環境計画論」森北出版, pp. 124-128, 1993.

10)岡田憲夫, M. M. Kilgour『水資源配分問題のコンフリクト分析 -環境負荷量配分のゲーム論的アプローチ－』地域学研究, pp. 113-124, Vol. 18, 1988.

11)盛岡通, 内海秀樹『コンフリクト解析に基づく地球温暖化防止行動の評価に関する研究』土木学会論文集, pp13-22, No. 515/2, 1995.

12) 西田 俊夫『ゲームの理論』日科技連, 1992.

13) 鈴木 光男『ゲーム理論入門』共立出版, 1994.

参照資料

a) 下水道協会 編『下水道統計要覧 平成5年度版』, 1993

b) 建設省下水道法令研究会 編日本下水道協会『下水道法』ぎょうせい, 1992

c) 厚生省生活衛生局水道環境部計画課 編『廃棄物六法』中央法規出版, 1994

d) 環境庁規格調整局 編『環境基本法の解説』大蔵省印刷局, 大蔵省印刷局

e) 環境庁水質保全局 監修『水質汚濁防止法の解説』中央法規出版, 1988

f) 下水道協会 編『流域下水道整備総合計画調査　－指針と解説－』日本下水道協会, 1990

g) 通産省調査統計部 編『工業統計表（用地・用水編)』大蔵省印刷局, 1983-1993

h) 通産省調査統計部 編『工業統計表（用地・用水編)』大蔵省印刷局, 1983-1993

i) 下水道協会 編『下水道統計（財政編)』日本下水道協会, 1983-1993

j) 自治省行政局編『住民基本台帳に基づく 全国人口・世帯数表 人口動態表』国土地理協会, 1983-1993

k) 三菱総合研究所『企業経営の分析　平成6年度版』,1995