

東京湾流域の下水処理場を対象とした排出権取引制度導入による汚濁負荷削減費用の節約効果の推定

Estimation of cost-saving effect for reduction of pollutants discharged from sewage treatment plants by implementing Tradable Permit System in Tokyo Bay Watershed

石田 整<sup>1</sup>

花木 啓祐<sup>1</sup>

荒巻 俊也<sup>2</sup>

Sei Ishida

Keisuke Hanaki

Toshiya Aramaki

**ABSTRACT:** Application of Tradable Permit System to water quality management in closed water bodies was simulated using actual operational data of sewage treatment plants. Using a case of Tokyo Bay where COD(Chemical Oxygen Demand) discharged has been regulated as an example, framework of Tradable Permit System was assumed and a simulation model of trading was developed to calculate its economic effect. There are four government groups in Tokyo Bay watershed, Saitama prefecture, Chiba prefecture, Metropolis of Tokyo and Kanagawa prefecture, they are assumed to trade permits with foundation. In our simulation model, sewage treatment plants are subjects to regulation, and the way to reduce pollutants is introduction of advanced wastewater processes. Using actual data, total costs to reduce amount of pollutants (COD, nitrogen, phosphorus) between under Tradable Permit System and under uniform discharge regulation was compared in each treatment plant.

The simulation results demonstrated 27% of costs was saved in the whole watershed. Saitama, Tokyo and Kanagawa sold permits, and Chiba bought permits. Scale economies of treatment plants have large impact on this result. There are some large sewage treatment plants in Saitama and Tokyo, and their unit cost of reducing pollutants was calculated lower than other plants in this simulation.

**KEYWORD;** Tradable Permit System, sewage treatment plant, pollution reduction cost, Tokyo Bay watershed

## 1. 背景と目的

これまでの日本の水環境保全策には排水基準の設定や総量規制などの直接規制が主に適用されてきた。その結果、8割近くの水域において環境基準（BOD（生物学的酸素要求量）又はCOD（化学的酸素要求量））が達成されている。しかし、内湾、内海、湖沼等の閉鎖性水域においては、依然として環境基準の達成率は低い状態である<sup>1)</sup>。CODの総量規制が実施されている東京湾においても、環境基準の達成率は60%程度と低い状態であり、1970年代後半以降大きな改善は見られていない。このような閉鎖性水域においては、栄養塩類の流入による富栄養化が進行しており、赤潮や青潮の発生による水環境への悪影響が生じている<sup>2)</sup>。このような背景の中、閉鎖性水域における水環境保全策として排出権取引制度が注目を集めている。排出権取引制度とは各排出源に初期配分した排出量と実排出量の差を排出源同士で取引することを認める制度であり、各排出源が効率的に実排出量を削減することで、全体として目標とする排出総量を最小費用で達成することができる。さらに、流入してくる栄養塩類の総量を管理することが可能であることから、閉鎖性水域の水環境保全策として有効であると考えられている。

本研究では、排出権取引制度を日本の閉鎖性水域に対して適用することを検討する。先述した東京湾の流

<sup>1</sup> 東京大学大学院工学系研究科 Graduate School of Engineering, Tokyo University

<sup>2</sup> 東京大学先端科学技術研究センター Research Center for Advanced Science and Technology, Tokyo University

域に存在する下水処理場を対象とし、各処理場での現状の処理施設と処理状況に基づいた排出権の取引モデルを構築することで、制度導入による経済的な効果を推定する。本来は、下水処理場以外の汚濁源についても制度に組み込み、流域全体として汚濁負荷の削減に取り組むことが望ましい。しかし、工場などの他の点源や面源などについては、発生する汚濁負荷量や汚濁負荷削減に係る費用が把握できないこと、全体の中で下水処理場から発生する汚濁物質の割合が高いことなどから、今回の研究では下水処理場のみを制度の対象とし、高度処理技術導入による汚濁物質削減を想定したモデルを構築した。制度導入による経済的な効果については、一律規制を課した場合と比較して、汚濁物質削減に係る費用がどの程度節約されるかを試算することで考察した。

## 2. 排出権取引制度の枠組み

### 2.1 対象地域

東京湾の流域を対象地域として想定する。東京湾の流域には埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県 の4都県が存在している。東京湾流域の詳細な範囲については文献<sup>3)</sup>による。東京湾における環境基準(COD)の達成率は総量規制後も依然として低く、赤潮、青潮の発生が問題となっている。陸地からのCOD負荷量は総量規制の効果があがって減少してきているものの、COD濃度にはあまり変化が見られない。このことは窒素、リンなどの栄養塩類による一次生産(内部生産)の占める割合が大きいことを示唆しており、東京湾内のCOD内部生産の割合は40~60%と言われている<sup>4)</sup>。従って、CODと同時に窒素、リン対策が重要であり、2004年を目標に窒素とリンの総量規制も始められている<sup>5)</sup>。

### 2.2 対象汚濁物質発生源

東京湾流域に存在する82の下水処理場を対象汚濁物質発生源とした。

### 2.3 取引対象汚濁物質

現在東京湾で総量規制の対象となっているCODに加え、窒素、リンについても取引対象汚濁物質とした。これは前述したように、東京湾ではCOD濃度のうち内部生産が占める割合が非常に高いため、CODを削減するだけでは環境基準(COD)の達成は難しいと考えられるためである。実際には窒素とリンのうち制限栄養塩となっている物質のみを削減することが効率的である。しかし、長期的な視点で汚濁負荷削減を考えた場合、現在の制限栄養塩となっている物質だけでなく、栄養塩全般を削減することが望ましいと考えられる。そのため、窒素とリンの両物質を対象汚濁物質とした。

### 2.4 取引の方法

制度導入時に東京湾流域に取引を行うための協議会を設置し、全ての取引は協議会との間で行うことが望ましいと考える。この協議会の設置によって、排出権の管理が容易となり、取引に係る費用を大幅に削減することが可能であると考えられる。また、取引に係る手間を省くため、各下水処理場が個別に協議会と取引をするのではなく、都県ごとに一括して協議会と取引することが望ましいと考える。

## 3. 取引モデルの構築

### 3.1 取引モデルの前提

#### (1) 汚濁物質排出量の試算

各処理場からのCOD、全窒素(TN)、全リン(TP)の発生量は、日平均処理水量に各物質の処理水中の濃度を掛け合わせた値とした。また、排出権取引制度に利用される各排出源からの汚濁物質排出量は、浄化残率を考慮に入れて東京湾への流入量ベースで試算した。つまり、各排出源からの汚濁物質排出量は発生量に浄化残率を掛けた値で試算される。この排出量を基に排出権の取引が行われるものとした。

各処理場から排出される汚濁物質の浄化残率は文献値<sup>3)</sup>を用いた。文献値には浄化残率が1を超えた値もあるが、これらは地下水流入による影響があること、算出方法に原単位法を用いたため現実と異なること等

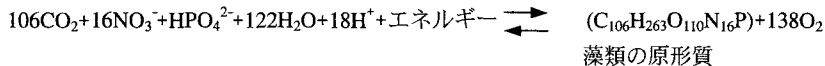
が影響しているためである。実際には浄化残率が1を超えることはないため、本モデルでは浄化残率の上限を1と設定した。

#### (2) 汚濁物質排出量の一元化

規制対象汚濁物質であるCOD、TN、TPそれぞれを独立に取引した場合、水質の組み合わせが幾通りも発生するため、本モデルでは、COD、TN、TPそれぞれの排出負荷量を統合化し一元的に評価する手法を導入した。クロロフィルaに換算した窒素及びリンはCODとの相関関係が強いことから、今回の排出権取引制度下ではTNとTPは換算係数を用いてCOD当量に換算した値で評価する。各排出源からの排出負荷量は以下のように算出される。

$$\text{排出負荷量 (kg CODeq)} = \text{COD} + \alpha \cdot \text{TN} + \beta \cdot \text{TP} \quad (\alpha, \beta : \text{換算係数})$$

換算係数の値は以下の光合成の化学量論式<sup>9)</sup>を用いて設定した。算出方法は下記の通りである。



$$\text{COD} : \text{TN} : \text{TP} = 1/(16 \times 2 \times 138) : 1/(14 \times 16) : 1/(31 \times 1)$$

$$= 1 : 19.7 : 142.5 \quad \text{よって、} \alpha = 19.7, \beta = 142.5 \text{ とした。}$$

#### (3) 実績値の適用

本研究では、下水道統計<sup>6)</sup>に記載された平成12年度における各処理場での処理施設と処理状況に基づいてモデルを組み立てている。処理状況として、年間処理水量、年間高度処理水量、処理水質(COD、TN、TP)の実績値を用いた。また年間処理水量を年間日数で割った値を日平均処理水量とし、日平均処理水量を負荷率(=70%)で割った値を日最大処理水量と設定した。

#### (4) 各処理場の系列数の設定

1種類の処理技術のみを利用している処理場に関しては、1つの処理系列で全量処理しているものと仮定した。2種類以上の処理技術を利用している処理場、又は、2系列以上で処理水質のモニタリングを行っている処理場に関しては、導入している処理技術の数、又は、モニタリングが行われている系列の数だけ処理系列が存在しているものと仮定した。2種類以上の系列が存在し、各系列の処理水量が把握できない場合は、全処理水量を等分した値を各系列の処理水量と設定した。

#### (5) 排出権取引に要する費用

排出権取引に要する費用には、排出権の購入費用(もしくは売却収入)と取引業務に関わる諸費用が考えられる。排出権の価格は本来市場で決定されるものであるが、下水処理場が公的な機関であることや、全ての取引が協議会を通じて行われることから、本モデルでは協議会が排出権の価格を設定するものとした。また、取引業務に係る諸費用は一切かからないとし、各処理場は必要な排出権の売買を必ず行えるものとした。

### 3.2 各処理場の行動

先述したように協議会との排出権の取引は各都県が一括して行う形が望ましいと考えるが、各処理場の行動に関しては、個別に最適な行動を選択するものと想定した。その結果、県全体の排出権の過不足分を各都県が取引するものとした。排出権取引制度を導入した場合と一律規制を課した場合の各処理場の行動は以下の通りである。各処理場は以下の図のように、3つの技術レベルを選択することができるものと設定した。1つ目が現状の技術レベル維持、2つ目がレベル1の高度処理技術(嫌気無酸素好気法)の導入、3つ目が更に除去率の高いレベル2の高度処理技術(凝集剤併用型循環式硝化脱窒法)の導入である。Cost Aは技術導入に係る費用であり、建設費と維持管理費が含まれる。Cost Bは過不足分の排出権の購入費用又は売却収入である。各処理場は排出権の価格に応じて、初期排出枠を遵守するために係る費用が最小となる技術レベルを選択するものと設定した。排出権取引制度を導入した場合には、Cost Aとcost Bが考慮され、一律規制を課した場合にはCost Aのみが考慮される。また、現状で一部の下水のみが高度処理されている処理場においては、現状の技術レベルを維持する場合、高度処理される水量は現状と同量であるが、レベル1もしくは

レベル2の高度処理技術を導入する場合は、下水全量が高度処理されるものとした。

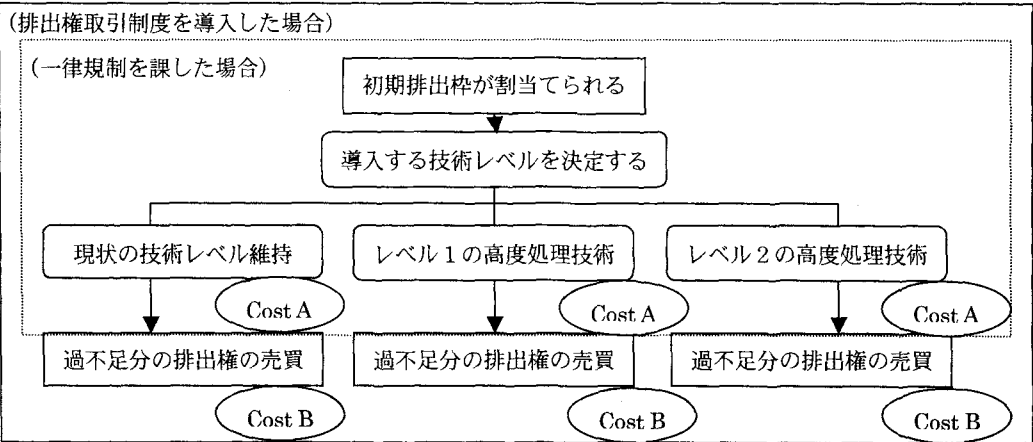


図 1 排出権取引制度を導入した場合と一律規制を課した場合における各処理場の行動

### 3.3 シミュレーション結果の出力について

モデル内において排出権価格を1円単位で変動させて各処理場が取るであろう行動を予測した。このときに対象とした全処理場における排出権の供給量が需要量よりも大きくなる排出権価格のうち、需給量の差が最も小さくなる価格を探索した。この価格を均衡価格として、排出権取引制度の導入効果について検討した。全体の供給量が需要量を上回るという条件を加えた理由は排出権取引制度の長所である全体の排出量を一定量以内に抑えることができるという点を維持するためである。余分の排出権（供給量－需要量）については全量協議会が購入することとなる。

### 3.4 パラメータの設定

#### (1) 初期排出枠の設定

初期排出枠の設定方法としては、既存の排出量に比例させて各排出源に配分する方法(*grandfathering*)と、排水量や人口などに比例させて各排出源に配分する方法などが考えられる。既存の排出量に比例させて配分する場合、既に高度処理技術を導入している処理場が不利となり、排出権取引制度が受け入れられにくくなると考えられる。このことから、排水量や人口に比例させて配分する方法を選択した。

本モデルでは、各処理場に対して一律に排水の基準水質を設定し、日平均処理水量と掛け合わせた値を初期配分枠と設定した。算出式は以下の通りである。

$$\text{初期配分枠} = \text{基準水質} \times \text{各処理場の処理水量}$$

基準水質は、東京湾流域における下水処理場からの放流水の目標水質<sup>③</sup>を参考に高度処理技術を導入したものと想定して設定した。目標水質と基準水質は以下の通りである。

表 1 目標とする水質と初期排出枠の基準水質(mg/l)

|            | COD | TN | TP  |
|------------|-----|----|-----|
| 目標値        | 12  | 8  | 0.4 |
| 長期の目標値     | 8   | 8  | 0.4 |
| 初期排出枠の基準水質 | 9   | 9  | 0.5 |

## (2) 高度処理技術の導入費用

高度処理技術導入に係る費用は費用関数  $\eta$  を用いて算出した。ここで、嫌気無酸素好気法を導入する場合の建設費については、現在嫌気好気活性汚泥法が導入されている系列は循環式硝化脱窒法が追加的に必要であるとし、既に嫌気無酸素好気法が導入されている系列に関しては追加費用が生じないものとした。現在それ以外の処理技術を導入している場合は、新たな高度処理技術の建設費が全て必要であると想定した。

年間高度処理費用は「年費用＋維持管理費」から算出した。年費用は以下の式を用いて算出した。

年費用＝建設費×資本回収係数

$$=I \times \left( r + \frac{r}{(1+r)^n - 1} \right) \quad (I: \text{建設費}, r: \text{利子率}(4\%), n: \text{高度処理施設の耐用年数}(30\text{年}))$$

## (3) 高度処理技術導入後の水質

高度処理技術導入後の水質については下表を参考に設定した。各処理方法の処理水質は一定の範囲に入ることが想定されているが、ここでは物質ごとに最良値（最も低濃度の値）を採用した。ただし、高度処理技術導入後の設定水質が現状の水質より悪くなる場合、技術導入後も現状の水質が保たれると想定した。

表 2 高度処理技術導入後の処理水質(mg/l)<sup>7)</sup>

| 処理方法           | COD   | TN   | TP      |
|----------------|-------|------|---------|
| 嫌気無酸素好気法       | 11～14 | 8～10 | 0.8～1.2 |
| 凝集剤併用型循環式硝化脱窒法 | 9～15  | 8～10 | 0.4～0.7 |

## 4. シミュレーションの結果

### 4.1 都県別の取引効果

シミュレーションの結果、排出権の均衡価格は 77 (円/kgCODeq) となった。均衡価格における都県別の取引効果を表 3 にまとめる。埼玉県と東京都、神奈川県が排出権を売却し、千葉県のみが排出権を購入する結果となった。各都県について排出権を売却する処理場と購入する処理場は同数程度存在した。費用節約効果は埼玉県と東京都、神奈川県では約 25% であるが、千葉県では約 32% にも達した。全体の費用節約効果は約 27% であった。なお、現状の水質で初期排出枠を遵守している処理場については、費用節約効果はゼロとした。

表 3 都県別の取引効果（排出権価格：77 円/kgCODeq）

|         | 総処理場数 | 合計日平均処理水量<br>(千m <sup>3</sup> /日) | 排出権取引量<br>(kgCODeq/日;+:売却量,-:購入量) |         |          | 処理場数の内訳 |    |
|---------|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------|----------|---------|----|
|         |       |                                   | 合計                                | 売却量     | 購入量      | 売却      | 購入 |
| 埼玉県     | 23    | 1714                              | 17,901                            | 37,615  | -19,714  | 9       | 14 |
| 千葉県     | 18    | 1033                              | -36,151                           | 17,406  | -53,557  | 9       | 9  |
| 東京都     | 25    | 6179                              | 19,075                            | 153,335 | -134,259 | 11      | 14 |
| 神奈川県    | 16    | 2057                              | 4,662                             | 50,979  | -46,317  | 9       | 7  |
| 東京湾流域全体 | 82    | 10982                             | 5,487                             | 259,335 | -253,847 | 38      | 44 |

|         | 汚濁物質削減費用<br>[一律規制下]<br>(百万円/年) | 汚濁物質削減費用<br>[排出権取引制度下]<br>(百万円/年) | 合計節約費用<br>(百万円/年) | 処理水量当りの節約費用 (円/m <sup>3</sup> ) | 費用節約効果 (%) |
|---------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------------------|------------|
| 埼玉県     | 8,027                          | 6,106                             | 1,921             | 3.07                            | 24         |
| 千葉県     | 5,304                          | 3,623                             | 1,681             | 4.46                            | 32         |
| 東京都     | 28,030                         | 20,683                            | 7,347             | 3.26                            | 26         |
| 神奈川県    | 10,225                         | 7,495                             | 2,730             | 3.64                            | 27         |
| 東京湾流域全体 | 51,586                         | 37,907                            | 13,679            | 3.41                            | 27         |

#### 4.2 処理場別の取引効果

以下に各処理場の規模と排出権取引量、費用節約効果の関係を示す。図2に示されるように処理水量が約250(千 $\text{m}^3$ /日)以上の処理場が全て排出権を売却する結果となったが、これはモデルに用いた費用関数の影響が大きいものと考えられる。今回使用した費用関数は規模の経済を考慮に入れたものであり、そのため大規模処理場では他の処理場に比べて相対的に安価に汚濁物質を削減することができると試算されたためである。この結果大規模な処理場が多く存在する埼玉県と東京都では大量の排出権を売却する結果となった。図3に示されるように排出権を売却する処理場における費用節約効果は約12～28%の範囲内であったが、排出権を購入する処理場における費用節約効果は約5～98%と大きな幅があると試算された。

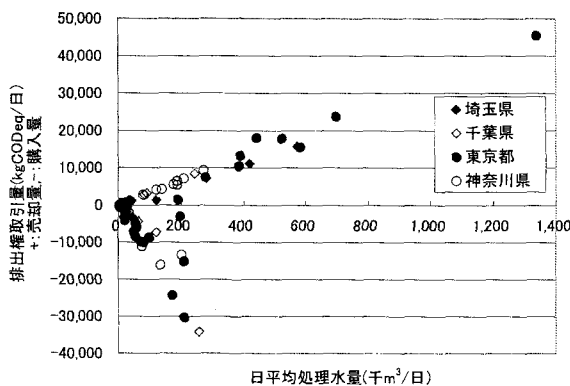


図2 処理場の規模と排出権取引量の関係

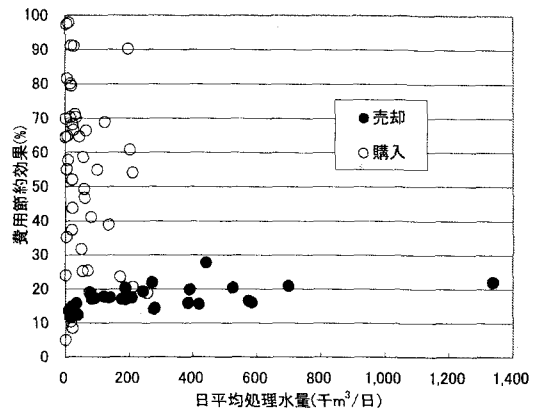


図3 処理場の規模と費用節約効果の関係

#### 5. 結論

本研究によって以下の事項が示された。

- ・ 排出権取引制度の導入により東京湾流域全体として27%程度の費用節約効果が期待できる。都県別に見ると、埼玉県と東京都、神奈川県では約25%、千葉県では最大の約32%の費用節約効果が期待できる。
- ・ 排出権の売買量を都県別に見ると、埼玉県と東京都と神奈川県で排出権を売却し、千葉県が購入する結果となった。売却する側では、特に埼玉県と東京都が大量の排出権を売却することが予測される。
- ・ 処理場毎に見ると、大規模な処理場では相対的に安価に汚濁物質排出量を削減することができるため、大量の排出権を売却する結果となった。また、全体的に排出権を購入する処理場において、費用節約効果が大きくなると試算された。

#### 【参考文献】

- 1) 環境省ホームページ <http://www.env.go.jp/>
- 2) 伊藤國男(2002) 東京湾再生推進会議について 水環境学会誌 Vol. 25 No. 10
- 3) 東京湾流域別下水道整備総合計画検討委員会(1997)「東京湾流域別下水道整備総合計画に関する基本方針策定調査報告書」
- 4) 須藤隆一(2002) 東京湾における水環境修復の課題 水環境学会誌 Vol. 25 No. 10
- 5) R.K. ダート, R.J. ストレトン(1979)「環境問題と微生物」 講談社
- 6) 日本下水道協会(2000)「下水道統計 財政編」
- 7) 日本下水道協会(1999)「流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説」