

閉鎖性水域での排出権取引における 流入河川での水質変化の影響に関する考察 —東京湾流域の下水処理場を対象として—

荒巻 俊也¹・松本 一城²・石井 暁³・花木 啓祐⁴

¹正会員 博(工) 東京大学准教授 大学院工学系研究科都市工学専攻
(〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目三番一号)

E-mail:aramaki@env.t.u-tokyo.ac.jp

²非会員 東京大学元学生 工学部都市工学科(同上)

³正会員 Ph.D 東京大学研究員 大学院工学系研究科都市工学専攻(同上)

⁴正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科都市工学専攻(同上)

東京湾流域に存在する82処理場を対象とした排出権取引モデルを構築し、流入河川での水質変化の影響を考慮して流出負荷を基準に排出枠の設定や取引を行う場合を想定して複数のシミュレーションを行い、排出負荷を基準とした場合や排出権取引を導入しない場合と比較してどの程度の節約効果があるのかを評価した。排出権取引を導入した場合の費用節約効果はどのケースにおいても全体で40~60%となり、排出権取引による費用節約効果が認められた。また、排出枠については流出負荷より排出負荷で設定した場合が、取引対象については排出負荷より流出負荷で取引した場合が、またホットスポット対策のための取引制限を導入しない場合の方が負荷削減費用の節約効果は大きくなり、削減単価は安くなった。

Key Words : tradable permit system, closed water body, water quality change in the watershed, sewage treatment plant, Tokyo bay

1. はじめに

日本の水環境保全策においては、これまで排水基準や総量規制などの直接規制的手段が主に採用されてきたが、湖沼や内湾といった閉鎖性水域においては環境基準の達成率は高くなく、更なる水質改善が望まれている。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¹⁾。

閉鎖性水域の富栄養化を防ぐための解決策として、排出権取引制度の導入が有効とされている。この制度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、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、さらに栄養塩類の総量管理が可能である。

石田ら²⁾は、東京湾流域の下水処理場を対象事業者とした排出権取引モデルを構築し、COD、全窒素(以下T-N)、全リン(以下T-P)について個別に取引した場合と換算係数を用いてCOD等量(以下、CODeq)に変換した値を用いて取引を行った場合のシミュレーションを行った。島田³⁾も東京湾流域の下水処理場を対象とした排出権取

引モデルによる解析を行っており、市町村別の負荷削減効果や費用などを算出している。これらの解析では、各処理場から放流された時点での負荷(以下、排出負荷と呼ぶ)を基準に排出枠や排出権の取引が行われると設定されていた。しかし、東京湾のような規模の大きい集水域を持つ閉鎖性水域では、流入河川での水質変化の影響により放流される地点により東京湾の水質に与える影響が異なる。具体的には上流域で排出された負荷は河川を流下していく過程で分解や沈降などの浄化作用を受けるため、臨海部から直接排出された負荷ほどの影響を与えない。よって、東京湾での水質管理を効率的に行うという意味では、東京湾に流出した時点での負荷(以下、流出負荷と呼ぶ)を基準として排出枠の設定や取引を行うという選択肢も考えられる。

本研究では、東京湾流域の82箇所の下水処理場を対象に排出権取引モデルを構築する。さらに、流入河川での水質変化の影響を考慮して流出負荷を基準に排出枠の設定や取引を行う場合を想定してシミュレーションを行い、排出負荷を基準とした場合や排出権取引を導入しない場合と比較してどの程度の節約効果があるのかを評価する。

2. 排出権取引モデルの概要

排出権取引モデルは石田ら²⁾の方法を踏襲して構築したが、処理場の技術レベルの設定などいくつか設定を変更している。以下に、詳細を記す。

(1) 対象の設定

対象地域は東京湾流域とし、対象汚濁負荷発生源は流域内の82ヶ所の下水処理場とした。また、対象汚濁物質は東京湾における総量規制の対象となっているCOD、T-N、T-Pとした。なお、排出権の取引にあたっては、これら3つの水質項目から式(1)により算出されるCODeqを用いた。

$$\begin{aligned} \text{CODeq (kg)} = & \text{COD 負荷量 (kg)} \\ & + \alpha \times \text{T-N 負荷量 (kg)} \\ & + \beta \times \text{T-P 負荷量 (kg)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、換算係数の値は石田ら²⁾の研究を参考に光合成の化学量論式を用いて $\alpha = 19.7$ 、 $\beta = 142.5$ と設定した。

(2) 発生・湾流入汚濁負荷量の試算方法

各処理場からの発生汚濁負荷量は、平成16年度の日平均処理水量($\text{m}^3/\text{日}$)に各物質の処理水中の濃度(mg/l)を掛け合わせて算出した。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。負荷率は日本下水道協会⁴⁾を参考に設定した。

また、東京湾に流入する汚濁負荷量は浄化残率を考慮に入れて算出した。石田ら²⁾の研究を参考に東京湾の流総計画⁵⁾において設定されている河川ごとの順流域と感潮域の浄化残率を参考に、1を超えているものに対しては上限を1と修正して用いた。

(3) 初期配分枠の設定

各処理場に配分される初期配分枠は、対象汚濁物質別に表-1に示す基準水質を設定し、基準水質に各処理場の日平均処理水量を掛け合わせる形で、処理場の規模に応じて分配した。基準水質は、石田ら²⁾の研究を参考に東京湾の流総計画⁵⁾において設定されている目標水質を参考にして、やや緩めに当初配分することを想定して設定した。

(4) 処理場が選択可能な行動

各処理場は現行の二次処理施設を改良し高度処理技術を導入することでのみ、汚濁負荷量の追加削減が可能であると想定した。各処理場は、現状の技術レベル維持に加えて、島田³⁾、国土交通省⁶⁾を参考に表-2に示す3つのレベルを設定した。このとき、新たに高度処理技術を導入する場合には、各処理場の処理系列ごとの処理水量は全て高度処理されるものとした。選択後の処理水質は全処理場が一律に達成可能であるとした。

(5) 費用の算出方法

ここでは、直接的な汚濁負荷削減に要する費用と、排出権の購入費用もしくは売却収入を対象に費用を算出した。これらの費用は全て、現状からの追加費用の形で算出比較を行った。各技術レベル導入時の年間高度処理費用の算出には島田³⁾の手法を用いた。具体的には式(2)を用いて算出した。

年間高度処理費用

=建設費×資本回収係数+維持管理費

$$= I \times \left(r + \frac{r}{(1+r)^n - 1} \right) + M \quad (2)$$

ここで、 I :建設費、 M :維持管理費、 r :利子率(4%)であり、 n :高度処理施設の耐用年数である。建設費及び維持管理費は表-3に示す日平均処理水量を変数とする費用関数を用いて算出した。維持管理費においては耐用年数

表-1 初期配分枠の基準水質(mg/l)

	COD	T-N	T-P
初期配分枠の基準水質	9.0	9.0	0.5

表-2 各処理場が選択可能な技術レベル

	レベル1	レベル2	レベル3
COD	8	8	5
T-N	8	5	3
T-P	0.4	0.2	0.1
CODeq	222.6	135	78.35
処理方式	嫌気・無酸素・好気法	凝集剤添加多段ステップ循環法	修正バーデンフォ法

表-3 技術レベル別高度処理費用関数³⁾ (Q は日平均処理水量($\text{千 m}^3/\text{日}$))

処理方式	建設費(百万円)	維持管理費(百万円/年)
嫌気無酸素好気法	$90.144 \times Q^{0.8373}$	$1.4001 \times (Q \times 0.8)^{1.0327}$
凝集剤添加多段ステップ法	$93.109 \times Q^{0.8284}$	$1.4001 \times (Q \times 0.8)^{1.0327} + 365 \times (Q \times 0.8) / 1000$
修正バーデンフォ法	$932.18 \times Q^{0.7229}$	$1.2808 \times 1.4001 \times (Q \times 0.8)^{1.0327} + 365 \times (Q \times 0.8) / 1000$

取引を認める場合には、余分な排出権（供給量－購入量）を生じる可能性があるが、この余分な排出権の購入費用（余分な排出権量×均衡価格）も、各都県が負担するものとし、取引を認める場合の削減費用に含めた。各都県の負担費用は下水処理量に比例させて分配した。

3. 流入河川での水質変化の影響

(1) 河川での水質変化の考慮による排出権取引への影響

図-1に本研究で対象としている東京湾集水域を示す。9つの流入河川が存在するが、荒川や多摩川などの河川においては中・上流域においても排出権取引の対象となる下水処理場が存在している。これらの処理場から排出された汚濁負荷は生物学的な分解や河床への沈降などにより浄化され、東京湾に流出するまでに水質が変化することになる。よって排出権取引導入時の排出枠の設定や取引対象について、水質変化を考慮しない排出負荷で行う、あるいは水質変化を考慮する流出負荷で行う、という2つの方法が考えられる。なお温室効果ガスなどの排出権取引においては、どの地域で排出された温室効果ガスも地球温暖化に与える影響は等しいと考えられるためこのような問題は生じない。

表-4に2つの方法についてその長所と短所をまとめた。水質変化を考慮せずに排出負荷で行った場合は各処理場に平等な削減努力を課すことができる一方で、水質変化を考慮した流出負荷で行った場合は東京湾流出負荷の総量が管理でき、より効率的となる可能性がある。

なお、河川での水質変化は対象とする汚濁負荷により異なる。ここでは2. (2) で述べた既存の研究を参考に各放流地点からの浄化残率を設定しているが、これは各河川の現況水質と流量から汚濁負荷ごとに算出された浄化残率である。

(2) 排出権取引形態のシナリオ

排出枠を河川あるいは海域に排出した時点での濃度が目標値となるように設定（排出負荷により設定）、東京湾に流出した時点での濃度が目標値となるように設定（流出負荷により設定）の2つの方法に対して、各5ケース、計10通りのシミュレーションを行った。

各5ケースについては排出権取引を導入しない場合を1ケース、導入する場合については、排出権の取引方法について排出負荷で行うか流出負荷で行うか、取引制限を有無について計4ケースのシナリオを設定した。取引制限とは、同一河川内の処理場間のみ取引ができると設定することであり、ある河川流域に汚濁負荷が集中するというホットスポットの問題が改善される。

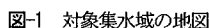


表-4 流入河川での水質変化の考慮の有無による長所・短所

水質変化	考慮しない (排出負荷)	考慮する (流出負荷)
排出枠	長所 排出した時点での水質で枠を設定するの で、全処理場に対し平等な削減への努力を 課す事が出来る。	東京湾に流出した時点での目標水質を初期排出枠 として設定できるので、東京湾の水環境改善とい う面からはより効率がよい。
	短所 地理的な要素(浄化残率の大小)を考慮しな いので、東京湾に流出した時点での水質を 排出枠として設定できない。	浄化残率の大小によって排出枠に差が出来る。沿 岸の処理場は小さく、内陸の処理場は大きくな り、不公平感がでる。
取引 対象	長所 排出した時点での汚濁負荷量で取引を行う ので、全処理場に対し平等な削減への努力 を課す事が出来る。	東京湾に流出した時点での汚濁負荷量で取引する ので、湾流出総量を管理することが出来る。
	短所 浄化残率の異なる処理場間で取引が行われ た場合、東京湾に流出する量が変化するの で湾への流出総量を管理できない。	内陸の処理場が汚濁負荷Xトンを削減した場合にX に浄化残率を掛け合わせた値しか削減したと見な されないの汚濁負荷削減へのインセンティブを 下げ、ホットスポット誘発の可能性がある。

表-5 各シナリオにおける追加費用、節約効果、汚濁負荷削減量と削減単価

排出枠の 設定	取引 制限	取引対象	追加費用 (億円/年)	節約効 果(%)	排出負荷 削減量 (t/day)	流出負荷 削減量 (t/day)	排出負荷 削減単価 (¥/kg)	流出負荷 削減単価 (¥/kg)
排出負荷		排出権取引導入せず	562		2,421	2,168	63.6	71.1
	なし	排出負荷	253	55	2,083	1,922	33.3	36.1
	なし	流出負荷	256	55	2,081	1,968	33.7	35.6
	あり	排出負荷	323	43	2,394	2,139	36.9	41.3
	あり	流出負荷	335	40	2,373	2,120	38.7	43.3
流出負荷		排出権取引導入せず	515		2,331	2,111	60.5	66.8
	なし	排出負荷	204	60	1,733	1,620	32.2	34.5
	なし	流出負荷	206	60	1,732	1,660	32.6	34.1
	あり	排出負荷	242	53	1,956	1,803	33.9	36.8
	あり	流出負荷	263	49	2,009	1,849	35.9	39.0

4. 結果と考察

(1) 費用節約効果と負荷削減単価

表-5に示すように、すべてのシミュレーションにおいて排出権取引を導入しない場合からの節約効果は40～60%程度となった。

排出枠については排出負荷よりも流出負荷で設定した方が追加費用が安くなり、節約効果は大きくなった。一方で、排出および流出負荷削減量は排出負荷で設定した方が大きいものの、排出および流出負荷削減単価で考えると流出負荷で設定した方が安価になる。これは、排出負荷で設定した場合は後述する上流部に多く存在する小規模な処理場にも一律の削減努力を求めているためであり、その場合負荷の削減は進むものの削減効率は悪くなるという結果になる。

取引対象については流出負荷での取引より排出負荷での取引の方が追加費用が安く、節約効果は大きくなる。ただし、取引制限をしない場合はその差はほとんどなく、

取引制限をする場合にその差が大きくなっている。流出負荷で取引をした場合内陸部の処理場の削減効果が小さく評価されることになるが、取引制限により排出権取引をできる処理場が同じ河川流域内の少数の処理場に限られる場合にその影響が大きくなっている。ただし、排出枠の設定ほど大きな影響は与えていないようである。

取引制限については行わない方が追加費用が安くなり節約効果が大きくなった。取引制限を行った場合、前述したように取引できる処理場が同じ河川流域内の少数の処理場に限られてしまうため、汚濁負荷削減の効率性という面からは悪影響となる。

(2) 浄化残率の考慮の仕方による相違

図-2は流出負荷を排出枠とした場合の各処理場において基準となる排水水質と処理水量との関係を示している。排出負荷基準の実線は表-1に示した初期配分での基準水質についてCOD等量に換算した値である。この実線より上にプロットされている処理場は流出負荷を排出枠とし

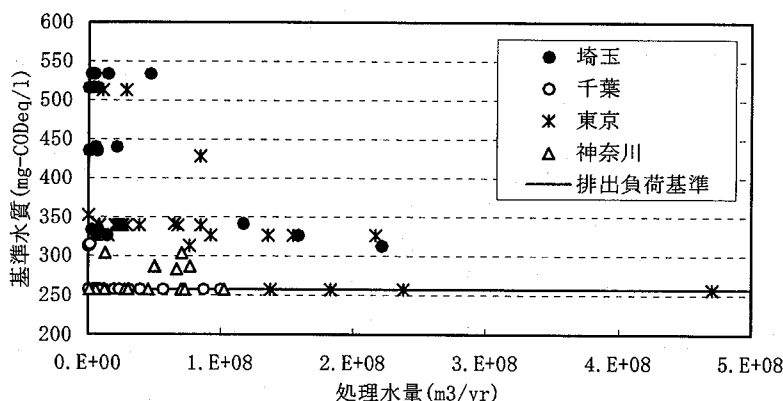


図-2 処理水量と基準水質の関係

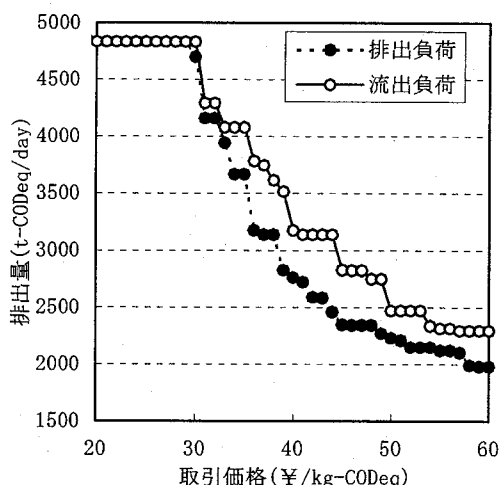


図-3 取引方法を変えた場合の排出量と取引価格

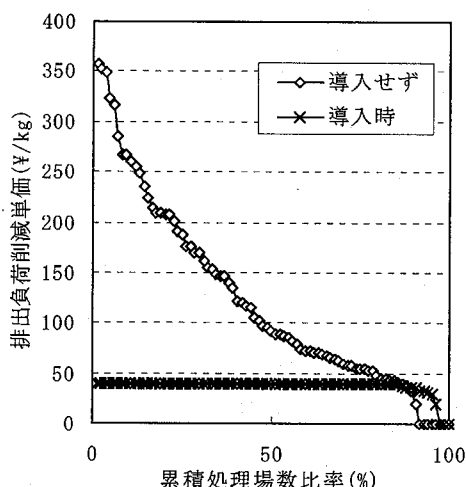


図-4 取引導入の有無による処理場の排出量削減単価の分布

た場合に河川での水質変化を考慮することにより基準水質が大きくなっており、処理場によっては2倍以上大きくなっている場合もある。この図から、処理水量が少ない処理場は内陸部に多く、排出負荷が東京湾に流出する前に浄化が起るため基準水質が高い処理場が多くなっている。一方で、処理水量が多い処理場は臨海部に多く、基準水質が厳しくなる傾向が見える。

図-3は異なる取引方法を考えた場合の総排出量を取引価格を変化させて示したものである。なお、排出負荷での取引時には排出枠を排出負荷で設定し、流出負荷で取引する場合には排出枠を流出負荷で設定した結果であり、ともに取引制限は課していない場合の結果である。排出負荷で取引した場合は流出負荷で取引した場合に比べて低価格で削減を行う。つまり流出負荷での取引は取引価格を大きく設定しないと削減へのインセンティブが働かない。その理由として、河川での浄化が考慮されるので

内陸部の処理場で処理レベルを上げた場合の削減量が見かけ上減り、削減効率が悪くなるからである。よって同じ排出量を目標とする場合でも、排出負荷で取引した場合に対して取引価格が高くなる。同一の取引価格での排出量の差を見ると、差が最大となるのは39(円/kg-CODeq)の時で690t程の差が出た。

(3) 処理場の規模と削減効率

図-4は排出権取引を導入した場合としない場合について、各処理場の排出負荷削減単価（取引を導入する場合は排出権の購入による削減も含む）の分布を示している。ともに排出枠を排出負荷で設定したケースを示しており、取引を導入した場合については、取引対象は排出負荷、取引制限は行わないケースでの結果である。この図から排出権を取引せずに直接規制で対応した場合は、削減が不要な処理場がある一方で削減効率が350円/kg

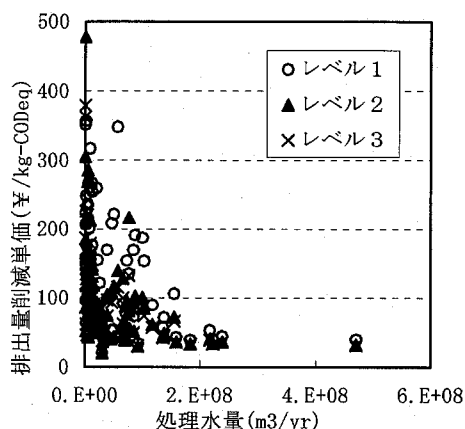


図-5 処理水量と排出負荷削減単価の関係

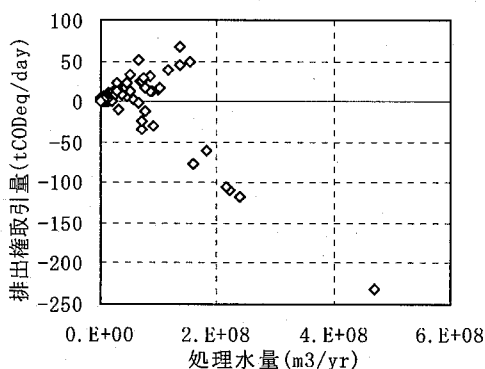


図-6 処理水量と排出権取引量の関係
(取引量は正の値が購入、負の値が売却)

を超える処理場もあり、処理場間で負担に差があることがわかる。一方で取引を仮定した場合は排出権を購入する処理場では削減単価は一律となり、それより削減単価が低いいくつかの大規模な処理場では削減を行うことになる。よって全体で見た場合のばらつきは小さくなる。つまり、直接規制（処理場排出負荷の放流濃度での規制）時には各処理場の負担に差が大きかったが、取引導入によって全体として削減効率がよくなることがわかる。

図-5は各技術レベルを選択したときの各処理場の削減単価と処理水量の関係を示しているが、処理水量が大きくなると削減効率が良くなる傾向がある。図-6には排出権および取引対象を排出負荷とし、取引制限がない場合の処理水量と排出権取引量との関係を示している。処理水量が多い大規模な処理場では削減効率がよいので、排出権取引量は負となり、多く削減して排出権を売却している。また、処理水量が少ない小規模な処理場では削減効率が悪いので、自分で削減せずに排出権を購入する傾

表-6 局所的な汚染が懸念される河川における排出枠

	中川	綾瀬川	鶴見川
排出枠 (t-CODeq/d)			
排出負荷	48	129	211
流出負荷	99	171	263
処理場数	4	2	7

表-7 取引制限におけるホットスポットの解消

	中川	綾瀬川	鶴見川
排出負荷量 (t-CODeq/d)			
取引制限無し	64	167	317
取引制限有り	22	70	197

※排出枠および取引対象を排出負荷で設定したケース

向が見られる。

このような対象地域における処理場の規模と削減効率の関係、処理場の規模と立地の関係が(1)で示した結果に影響を及ぼしている。

(4) ホットスポットの問題

表-5で示したように取引制限を課し、取引を同一河川流域内のみに限定すると、制限無しの場合と比べて追加費用が年間38～79億円必要となり、節約効果が7.4～14.4%程度低下した。

現状で河川水質が良好とは言えず、排出権取引制度の導入によりホットスポットの問題が懸念される3河川（中川、綾瀬川、鶴見川）における排出枠と処理場数を表-6に示す。排出負荷および流出負荷で排出枠を設定した場合を比較すると、流出負荷で設定した場合はそれぞれの河川での水質変化が考慮されることになるので、排出枠が大きくなる。

表-7に排出枠および取引対象を排出負荷で設定したケースにおける取引制限の有無による3河川での排出負荷量を示す。取引制限を設けない場合、3河川流域の処理場に最初に割り当てられる排出負荷で設定された排出枠に対して排出量が大きくなっている。これは、この3河川流域の処理場が全体として、排出権を購入していることによる。よって、これらの3河川では、排出権取引を行った場合に河川水質は直接規制時と比べて悪化することになる。この3河川に取引制限を導入した場合、各河川流域における下水処理場からの汚濁負荷量は表-7に示したように38～66%削減されるが、取引制限をしない場合と比較すると年間9～31億円の追加費用を要することとなる。

ここでは示していないが、排出枠及び取引対象を流出負荷で設定したケースにおいても、取引制限なしの時の3河川における排出負荷量は表-7と一致する。流出負荷で考えた場合は、河川上流部の処理場の基準水質が緩く

なるため、よりホットスポットの問題が深刻になるのではないかと考えられたが、これらの流域における処理場数、ここで検討した技術レベルの数が限られていたため、今回の解析ではそのような影響は見られなかった。表-7の取引制限なしの結果を流出負荷による排出枠と比較すると、鶴見川以外の2河川では流域の処理場全体として排出権を売却することになる。

5. まとめ

東京湾流域に存在する82処理場を排出権取引に参加する主体とした排出権取引モデルを構築した。さらに、流入河川での水質変化の影響を考慮して流出負荷を基準に排出枠の設定や取引を行う場合を想定してシミュレーションを行い、排出負荷を基準とした場合や排出権取引を導入しない場合と比較してどの程度の節約効果があるのかを評価した。

その結果、排出権取引を導入した場合の費用節約効果はどのケースにおいても全体で40～60%となり、排出権取引による費用節約効果が認められた。また、排出枠については排出負荷で設定した場合が、取引対象については流出負荷で取引した場合が、また取引制限を導入しない場合の方が負荷削減費用の節約効果は大きくなり、削減単価は安くなった。この理由の一つとして、臨海部に大規模で削減単価が低い処理場が、河川上流部に小規模で削減単価が高い処理場が多く分布しているという対象地域の特徴によることが推察された。

排出枠や取引対象を排出負荷で設定するか、流出負荷で設定するかについては、公平性の問題もあるためどちらがよいかを一概に結論づけることはできないが、本研

究で示した結果はそれぞれが効率性や各処理場の行動にどのような影響を及ぼすかを具体的な地域を対象に示しており、排出権取引の導入を検討する上で有用な知見となるであろう。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、環境省廃棄物処理等科学研究費補助金「産業拠点地区での地域循環ビジネスを中核とする都市再生施策の設計とその環境・経済評価システムの構築」（代表：藤田壮・国立環境研究所アジア自然共生研究グループ環境技術評価システム研究室室長兼東洋大学工学部教授）の支援を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 伊藤國男：東京湾再生推進会議について、水環境学会誌，Vol. 25, No. 10, 580-584, 2002.
- 2) 石田整，荒巻俊也，花木啓祐：東京湾流域の下水処理場への排出権取引制度導入効果の推定，土木学会論文集，No. 804/VII-37, 73-82, 2005.
- 3) 島田明夫：閉鎖性水域における持続可能な水質保全のための排出権取引モデルとポリシーミックス，東京大学博士論文，2005.
- 4) 日本下水道協会：下水道施設設計・計画指針と解説 前編，1994.
- 5) 東京湾流域別下水道整備総合計画検討委員会：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，1997.
- 6) 国土交通省：東京湾流域における高度処理導入による便益の調査検討に関する共同研究，東京湾流域における高度処理導入による便益の調査検討に関する委員会報告，2001.

EFFECTS OF WATER QUALITY CHANGE IN THE WATERSHED ON TRADABLE PERMIT SYSTEM FOR CLOSED WATER BODY - CASE STUDY ON SEWAGE TREATMENT PLANTS IN THE TOKYO BAY WATERSHED

Toshiya ARAMAKI, Kazuki MATSUMOTO, Satoshi ISHII and Keisuke HANAKI

Several scenarios for tradable permit system with/without considering water quality change in the watershed were examined by a simulation model of trading the permits among sewage treatment plants in the Tokyo Bay Watershed. Cost saving effect by installing tradable permit system in the whole watershed was estimated between 40 to 60 % for all scenarios. Utilization of "discharged load" from plants for assigned pollutant load was more cost-effective than utilization of "reached load" to the Bay, which includes water quality change in the watershed after its discharge. On the other hand, utilization of "reached load" for trading permits was more cost effective than utilization of "discharged load".