

閉鎖性水域における水質改善政策の経済分析*

Economic analysis of the water quality improvement policy in the closed water area*

稲垣貴政**, 武藤慎一***, 高木朗義****, 上田孝行*****

By Takamasa INAGAKI**, Shinichi MUTO***, Akiyoshi TAKAGI****, Takayuki UEDA*****

1. 背景・目的

近年、公共用水域における水質汚濁問題の1つとして、窒素やリンなどによる富栄養化問題が取り上げられている¹⁾。特に、内湾、内海、湖沼などいわゆる閉鎖性水域においては汚濁物質が拡散されにくいいため、一度汚濁物質が溜まるとその改善が非常に困難となってくる²⁾。また、上流域の主体が発生させた汚濁が下流および海岸域の主体に被害を及ぼすという上下流問題も存在する。そのため、閉鎖性水域の水質改善に関わる政策としては、汚濁物質の除去をいかに行うかという問題とともに、その流入をいかに防ぐかという問題も併せて考えていく必要があり、その場合には費用負担の問題も含めた水質改善政策の総合的な評価が必要となってくる。

これまで、閉鎖性水域の水質改善政策を扱った研究はいくつか見られる。新沢³⁾(1990)や米田・氷飽⁴⁾(1998)では、社会経済モデルを構築して水質改善政策の評価を行っているが、これらの研究では一般均衡理論の枠組みにまでなっていない、理論モデルの構築のみにとどまっているなどの問題点があった。また、高野・榊原・岡田⁵⁾(1997)は、ゲーム理論を用い、特に水質改善事業の費用配分問題に焦点を当てた分析を行った研究も見られる。

本研究では、空間経済モデルを用いた政策分析を試みる。特に本モデルは、経済主体の取水と排水行動を明示的に取り入れ、さらに蓄積された汚染物に対する政策についての分析を行うため、動学的な枠組みでの定式化を行っている。そして、定常状態に着目した水質改善政策の評価についての枠組みを示すこととする。

*キーワード：経済評価、水質改善、閉鎖性水域

**学生員 岐阜大学大学院 博士前期課程

(岐阜市柳戸1-1, TEL058-293-2447, FAX058-230-1248)

***正会員 工博 岐阜大学助手 工学部土木工学科

****正会員 工博 中日本建設コンサルタント

*****正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部開発システム工学科

2. 空間経済モデルの概要

2.1 空間経済モデルの前提条件

まず、空間経済モデルの基本的な前提条件を示す。

- 1) 本モデルは一つの流域を対象とし、上流に位置する都市(都市1)と下流に位置する閉鎖性水域沿岸都市(都市2)の2都市からなるものとする(図-1)。
- 2) 都市1には取水・排水に関わる産業として農業・工業が存在するものとし、都市2には海水質の影響を強く受ける産業として漁業、レクリエーション産業(以下R産業)が存在するものとする。また、各都市には家計および不在地主、政府が存在する。
- 3) 家計への水供給および排水処理は、政府が一括して行うものとし、都市1の取水・排水産業については、産業が直接川から取水し、使用の前後に自己浄化するものとする。

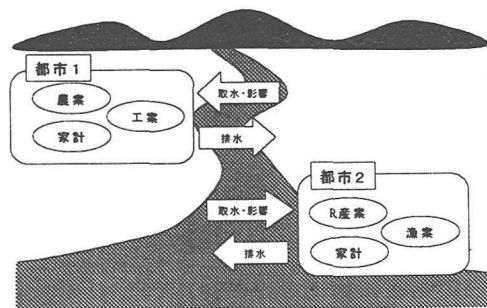


図-1 モデルの全体構成

2.2 各主体の取水・排水行動

まず、各主体の取水・排水行動について説明を行う。それらの行動を以下の図-2に示す。

まず、産業は河川から水質 Q^1 の水を取水し、 Q^1_{ij} にまで浄化して使用し、そして、 Q^1_{ij} となった水質を Q^1_{ij} まで排水処理を行って排水するものとする。なお、取水については、まず取水のみに単位費用 ω が、そして、 Q^1 から Q^1_{ij} に水質を改善するための単位費用 γ がかかるも

のとする。

また、農業部門については、特に自己浄化しないものとし、 Q^1 の水を取水して利用し、 Q^3_{ij} となった水質をそのままの状態で排水するものと考えればよい。

家計の取水・排水行動については、それを政府が行うものとするが、その行動自体は、産業のそれと全く同様に定式化できる。

以上より、閉鎖性水域の海水質 S は Q^4_{ij} ベクトルの関数として表される。

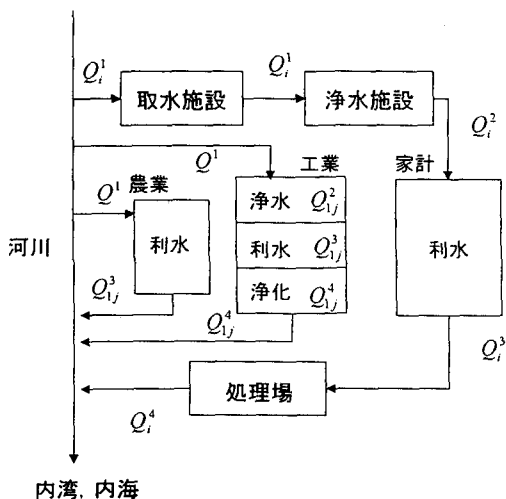


図-2 取水・排水行動

2.3 産業の行動モデル

続いて各主体の行動モデルを定式化する。

(1)都市1産業の行動モデル

都市1の各産業はある時点 t において、労働と資本、土地からなる生産要素に加え、水も投入して財の生産を行い、生産された財はより大きな経済システムで取引が行われる市場へ供給されるものとする。水の取水、排水は、2節で述べたような形で定式化を行っている。これらの行動を費用最小化問題により以下のように定式化する。

$$C_{1j}(t) = \min_{L_{1j}, K_{1j}, H_{1j}, x_{1j}^w} \left\{ w(t)Y_{1j}(t) + r(t)K_{1j}(t) + a_1(t)H_{1j}(t) + \left\{ \omega^{1j}(t) + \sum_i \gamma_i^{1j}(t) \cdot (Q^1_i(t) - Q^2_{ij}(t)) \right\} \cdot x_{1j}^{w1}(t) + \left\{ \kappa^{1j}(t) + \sum_i \delta_i^{1j}(t) \cdot (Q^3_{ij}(t) - Q^4_{ij}(t)) \right\} \cdot \alpha x_{1j}^{w2}(t) \right\} \quad (1.a)$$

$$s.t. \quad Y_{1j}(t) = f[L_{1j}(t), K_{1j}(t), H_{1j}(t), x_{1j}^w(t), Q^2_{ij}(t)] \quad (1.b)$$

ここで、添字 $1j$: 都市1の j 産業を表す、 Y : 財生産量、 x_{1j}^w : 取水量、 C_{1j} :

財 j の生産費用、 ω : 取水にかかる単位費用、 γ : 水質浄化にかかる単位費用(浄水施設の稼働)、 Q^1 : 取水時の水質、 Q^2_{ij} : 浄化後の水質、 K : 排水に必要な単位費用、 δ : 排水処理にかかる単位費用(排水施設の稼働)、 Q^3_{ij} : 排水時の水質、 Q^4_{ij} : 排水処理後の水質、 α : 排水比率ただし、 $\alpha_{1j} x_{1j}^w$ は産業の排水量を表す、 f : 生産関数、 L, K, H : 労働、資本、土地投入量、 w : 賃金率、 r : 利子率、 a : 地代、

式(1)において、水の排水量については、取水量の α 分だけ排水にまわるものとする。また、生産関数は浄化後の水質 Q^2_{ij} に依存する形としている。

式(1)を解くことにより L, K, H, x が求められる。

(2)都市2産業の行動モデル

都市2の産業は、生産活動において閉鎖性水域の海水質 S の影響を直接的に受けると想定する。また、都市2の産業は水の投入を行わないものとする、その行動モデルはある時点 t における生産要素の投入行動のみによって定式化される。これらを技術制約下での費用最小化問題として定式化を行った。

$$C_{2j}(t) = \min_{L_{2j}, K_{2j}, H_{2j}} \left\{ w(t)L_{2j}(t) + r(t)K_{2j}(t) + a_2(t)H_{2j}(t) \right\} \quad (2.a)$$

$$s.t. \quad Y_{2j}(t) = F_{2j}[L_{2j}(t), K_{2j}(t), H_{2j}(t), S(t)] \quad (2.b)$$

ここで、添字 $2j$: 都市2の j 産業を表す、 S : 閉鎖性水域の海水質

2.4 家計の行動モデル

都市1、都市2の家計は基本的には同様の行動をとるものとする。すなわち、生産要素を提供して所得を得て、予算制約と時間制約、資本の蓄積方程式による制約条件の下で通時的な効用を最大化するように財・サービス消費を行う。また、家計は生活用水、飲料水等の水を政府から供給される。なお、家計のレクリエーション消費に関しては、家計自らが、都市2に位置するR産業より供給されるR財を投入することにより、レクリエーションサービスを生産し、消費するという自家生産関数の概念を用いて定式化する⁹⁾。

【レクリエーションサービス生産行動】

まず家計は、R財と時間を投入してレクリエーションサービスを生産する。その行動モデルはレクリエーションサービスに関わる生産技術制約の下での費用最小化問題により定式化される。なお、生産技術が閉鎖性水域の海水質 S に影響されるものとしている。なお、後の政策を想定して、R財には e^R の税が負荷されるとする。

$$c_R^1(t) \cdot u(t)_R^1 = \min_{x_R^1, t_R^1} \left\{ (1 + e^R) p_R(t) x_R^1(t) + w(t) t_R^1(t) \right\} \quad (3.a)$$

$$s.t. \quad u_R^i(t) = f[x_R^i(t), t_R^i(t), S(t)] \quad (3.b)$$

ここで、添字 i : 都市を表す、 u_R : 単位トリップ当たりのレクリエーションサービス生産量、 x_R : R産業より供給されるR財の投入量、 t_R : レクリエーションに費やす時間投入量、 p_R : レクリエーション財価格、 c_R : レクリエーションサービスの単位費用

これを解くとR財投入量およびレクリエーションに関わる時間投入量が求められる。

【消費行動】

続いて、家計は上記のレクリエーションサービスを含めた財の消費量を決定する。その行動モデルは、資本の蓄積方程式と時間制約条件の下での通時的効用最大化問題として定式化される。なお、特に都市2の家計は、閉鎖性水域の環境に対し存在価値を有しているものとする。

$$V^i(w, c_R^i(p_R, w, S), a_h^i, w\Omega + y_L^i, p_h^{wi}, S^{hi}) = \max_{x_{ij}^i, s^i, H_h^i, u_R^i, x_h^{wi}, S^{hi}} \int_0^\infty U^i(x_{ij}^i, s^i, H_h^i, u_R^i, x_h^{wi}, S^{hi}) \exp(-\rho t) dt \quad (4.a)$$

$$s.t. \quad \dot{K}(t) = [w(t)\Omega + y_L^i(t) - \tau^i(t)] - \left[\sum_{j'} \sum_j (1 + e_j) p_j(t) x_{ij}^j(t) + w(t) s^j(t) + a_h^i(t) H_h^i(t) + c_R^i(t) u_R^i(t) + \{p_h^{wi}(t) + \alpha_h^{wi}(t) x_h^{wi}(t)\} x_h^{wi}(t) \right] - \delta_K K(t) \quad (4.b)$$

ここで、 x_{ij}^i : 都市 i の産業の生産財 j の消費量、 s : 余暇消費、 H_h : 居住用地消費、 Q : 環境質、 S^{2h} : 都市2の家計 h に対する海水質、 e_j : 財 j にかかる税、 ρ : 主観的割引率、 p_j : 財 j の価格、 a_h : 居住用地地、 p_h^w : 取水・浄水価格、 Ω : 総利用可能時間、 K : 物的資本ストック、 r : 物的資本の実質利率、 y_L : 土地所有者からの配当収入、 τ : 一括税、 δ_K : 物的資本ストックの減耗率、 $\dot{K}$: 時点 t における物的資本ストックの増加分

都市2の家計の効用関数は、海水質 S による影響を受けるものとした。さらに、その S は家計が都市2のどの地点に居住するかで異なると考えられるため、家計 h ことの海水質 S^h として導入した。

2.5 不在地主の行動モデル

不在地主は、所有している土地を家計、産業に対して提供して、地代収入を得る。

$$\pi_L(t) = \sum_i \sum_j a_{ij}(t) \overline{H_{ij}}(t) + \sum_i a_h^i(t) \overline{H_h^i}(t) \quad (5)$$

その地代収入は家計に配分されるものとする。

$$y_L = \frac{\pi_L}{H_T} \quad (6)$$

2.6 市場均衡条件

R産業以外の産業が供給する財の市場はオープンであ

るとする。よって、対象とする空間経済システムにおいて閉じている市場は以下のようになる。

$$\text{労働市場: } \sum_i \sum_j L_{ij}(t) = L_S(t) \quad (7)$$

$$\text{土地市場: } \sum_j H_{ij}(t) = \overline{H_{ij}}(t), H_h^i(t) = \overline{H_h^i}(t) \quad (8)$$

$$\text{資本市場: } \sum_i \sum_j K_{ij}(t) = \sum_i K_h^i(t) \quad (9)$$

$$\text{レクリエーション財市場: } \sum_i x_R^i(t) = Y_{2R}(t) \quad (10)$$

ここで、 L_S : 労働供給量であり、以下の関係式が成立する。

$$L_S^i(t) = \Omega - s^i(t) - t_R^i(t) \quad (11)$$

2.7 政府の行動モデル

政府の活動としては、①供給部門⁷⁾、②排水部門⁷⁾、③環境管理部門からなるとする。

【供給部門】

水の供給行動モデルを利潤最大化行動の枠組みにて定式化する。ただし、取水および浄水に関わる費用関数は、取水される水量と水質の改善度に依存するものとし、さらに建設費に相当する固定費用も考慮することとする。

$$\pi_C^i(t) = \max_{x_h^{wi}(t)} p_h^{wi}(t) x_h^{wi}(t) - C_w^i(t) \quad (12.a)$$

$$s.t. \quad C_w^i(t) = \left\{ \omega^i(t) + \sum_l \gamma_l^i(t) \cdot (Q_l^i(t) - Q_l^2(t)) \right\} x_h^{wi}(t) + cf^i(B^i) \quad (12.b)$$

これを解くと、水の取水価格が以下のように得られる。なお、この水価格で水を供給した場合、政府の利潤が負となるのでその分は家計からの一括税により賄われるとする。

$$p_h^{wi}(t) = \omega^i(t) + \sum_l \gamma_l^i(t) \cdot (Q_l^i(t) - Q_l^2(t)) \quad (13)$$

ここで、 i : 都市を表す、 p_h^{wi} : 取水・浄水価格、 x_h^{wi} : 家計への水供給量、 C_w : 取水・浄水費用、 ω : 取水にかかる単位費用、 γ : 水質項目 l に関し水質浄化にかかる単位費用(浄水施設技術力)、 Q_l^1 : 取水時の水質、 Q_l^2 : 浄化後の水質、 cf^i : 固定費用分、 B : 浄水施設の施設規模、 π_C : 取水・浄水活動における水供給者の利潤

【排水部門】

排水行動も、供給部門と同様に利潤最大化行動の枠組みで定式化し、排水処理費用も水量および水質に依存するものとする。

$$\pi_R^i(t) = \max_{x_h^{wi}(t)} s_h^{wi}(t) x_h^{wi}(t) - R_R^i(t) \quad (14.a)$$

$$s.t. \quad R_R^i(t) = \left\{ K^i(t) + \sum_l \delta_l^i(t) \cdot (Q_l^i(t) - Q_l^2(t)) \right\} \alpha_h^{wi}(t) + pf^i(G^i) \quad (14.b)$$

ここで、 s_h^{w1} : 排水下水価格、 $\alpha_h h_h^{w1}$: 家計からの排水量を表す、 R_w : 排水処理費用、 K : 排水に必要な単位費用、 δ : 水質項目 i に関し排水処理にかかる単位費用処理施設の技術力、 Q_i^3 : 排水時の水質、 Q_i^4 : 排水処理後の水質、 G : 処理施設の施設規模、 π_R : 排水処理活動における水供給者の利潤

【環境管理部門】

政府は、閉鎖性水域の環境管理も行うものとする。その場合に政府がコントロールできる政策変数としては、排水時の水質 Q^4 ベクトルと都市 1 の排水産業の生産する財および R 財に対する税率、そして、徴収した税をもとに行う海水質 S の浄化事業であるとする⁹⁾。

ここで、海水質の変化については以下のような式が成立するものとする。

$$\dot{S} = f^w[Q_i^4(t), Q_{ij}^4(t)] - bS(t) - f^p[e(t)] \quad (15)$$

ここで、 b : 海水質の自然浄化を表すパラメータ

この式(15)は都市 1 の産業および家計から排出される排水による海水質の悪化分から海水の浄化分を差し引いたものであることを表す。

さらに空間経済モデルに定められる条件式を含めた制約条件の下で、政府は各政策変数を CES 型で定式化される社会的厚生関数 W を最大化するように決定する⁹⁾。

$$\max_{e, e^h, e^s, Q_i^4, Q_{ij}^4} W = \left\{ \sum_i V_i^{1-\varepsilon} \right\}^{\frac{1}{1-\varepsilon}} \quad (16.a)$$

$$s.t. \dot{S} = f^w[Q_i^4(t), Q_{ij}^4(t)] - bS(t) - f^p[e(t)] \quad (16.b)$$

ここで、 $\varepsilon \geq 0$: 公平性への社会的配慮の強さを表すパラメータ

3. 定常状態における政策評価

前節で構築したモデルをもとに政策分析を行う。なお、本研究では式(16.a)の最適化問題について、ここでは内生変数の成長率がゼロ、すなわち全ての変数が一定値となるゼロ成長の定常状態に着目した評価を試みる。

ここで、海水質に着目してみる。

$$\dot{S} = f^w[Q_i^4(t), Q_{ij}^4(t)] - bS(t) - f^p[e(t)] \quad (17)$$

海水質とその変化分との関係は、式(15)より図-3 のように表される。この時、定常状態とは x 軸上にあたるため、その交点においてストック量が決定するといえ、よって y 切片を表す $f^w[Q_i^4(t), Q_{ij}^4(t)] - f^p[e(t)]$ 、すなわち、都市 1 の産業および家計から排出される排水による海水質の悪化分から海水の浄化分を差し引いた値により、定常状態におけるストック量が変化することがわかる。

これより決定される海水質 S が家計の効用水準に影響を与えるため、政策を通して間接的に S を操作することにより、政府は最善の政策を探すこととなる。

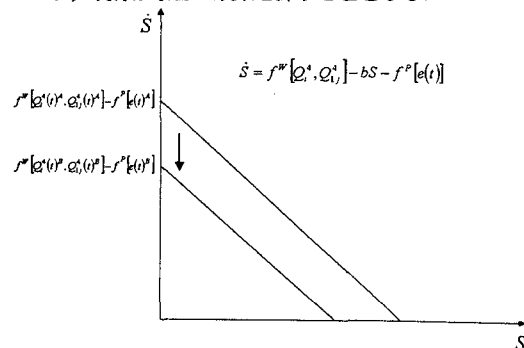


図-3 定常状態におけるストック量変化

4. まとめ

本研究では、近年重要な問題と指摘されている閉鎖性水域における水質汚染問題に対し、その改善政策の効果および影響を評価するための空間経済モデルの構築を行った。さらに、長期的な視座から見て最適な政策を明らかにするために動学的経済モデルとしてのモデル化を試みた。本研究で構築したモデルは、ここで提示した以外の産業を導入したり、家計の数を増加することも容易であり、その場合も、モデル自体の一般性は失われないものとなっているといえる。

今後の課題としては、ここで構築したモデルを用いてデータセットの作成、数値シミュレーション等の実証分析をいかに行うか検討中である。これらについては講演時に示す予定である。

【参考文献】

- 1) 中村英夫編(1992)：都市と環境、pp.236-241、ぎょうせい。
- 2) 海洋産業研究会編(1987)：東京湾 21 世紀構想、鹿島出版会。
- 3) 新沢秀則(1990)：水資源配分のシステムに関する環境経済学的研究、大阪大学学位論文。
- 4) 米田明・水飽揚四郎(1998)：霞ヶ浦における水質汚染改善のための経済政策、日本地域学会年次学術講演会。
- 5) 高野浩一・榎原弘之・岡田憲夫(1997)：流域下水道整備事業の費用配分法に関するゲーム理論的考察、土木計画学研究・講演集、No20(1)、pp.131-134。
- 6) Johansson, P-O, (1993) : Cost-Benefit Analysis of Environmental Change, Cambridge University Press, pp.32-33.
- 7) 近藤浩治・上田孝行・山田貴久(1997)：水資源政策の空間的分析の試み、土木学会第 52 回年次学術講演会、pp.120-124。
- 8) 武藤慎一・上田孝行・伊藤匠(1999)：最適成長論による自然環境保全政策の経済分析、土木学会年次講演会(発表予定)。
- 9) 上田孝行・長谷川専・森杉壽芳・吉田哲生：地域修正係数を導入した費用便益分析、土木計画学研究講演集 No21(2)、pp.195-198。