

閉鎖性水域における水質改善政策の 便益帰着分析と汚濁負荷削減量配分

高木朗義¹・武藤慎一²・上田孝行³・稲垣貴政⁴

¹正会員 博(工) 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

²正会員 博(工) 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

³正会員 博(工) 東京工業大学助教授 工学部開発システム工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

⁴修(工) 中央コンサルタンツ(株) (〒451-0042 名古屋市西区那古野 2-11-23)

閉鎖性水域における水質改善政策は、汚濁物質の除去とともに、その流入抑制も併せて考える必要がある。本稿は内陸・沿岸地域における各経済主体の水質に関わる行動と閉鎖性水域における汚濁物質の蓄積現象を捉えた応用一般均衡モデルを構築し、閉鎖性水域の水質改善政策に対する地域間、主体間の便益と費用の帰着構造を分析することにより、その経済的な評価を行う。さらに、応用一般均衡モデルを制約条件、主体毎の汚濁負荷削減量を政策変数、社会的厚生を最大化を目的関数とした均衡制約付数理最適化問題(MPEC)を定式化し、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて、目標水質水準を達成するために必要な各主体の汚濁負荷削減量を検討する。

Key Words : *benefit incidence analysis, closed water area, CGE (computable general equilibrium), MPEC (mathematical programming with equilibrium constraints), water pollutant*

1. はじめに

閉鎖性水域における富栄養化問題を背景として、1993年に海域における全窒素、全燐の環境基準の枠組みが設定されたのを受け、1995年～1997年にかけて東京湾、大阪湾、伊勢湾、瀬戸内海(一部)ではそれぞれ水域類型の指定、暫定目標の設定が行われ、対策が取られてきている。しかし、2001年12月に中央環境審議会からより厳しい暫定目標の設定または撤廃という見直しの必要性が答申され、さらには東京湾、伊勢湾、瀬戸内海に対して窒素、燐に対する水質総量規制が設定されるなど、閉鎖性水域、特に海域における水質改善政策は新たな局面を迎えている¹⁾。

閉鎖性水域においては、その地形的な特性から汚染物質が拡散されにくいいため、一度汚染物質が溜まると水質改善は難しい²⁾。さらに、上流の主体が発生させた汚濁が下流および沿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、汚染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る³⁾。現在では、下水道の整備および高度処理化の他、農家の汚濁負荷

削減対策、工場への排水規制、ノンポイント(面源)対策並びにヘドロの浚渫や覆砂等、様々な水質改善政策が検討されているが、これらを実施する場合には様々な経済主体の活動に影響を与え、それが市場経済を通じてより大きな影響を及ぼす恐れがある。したがって、主体間、地域間において様々な利害関係が発生している。このため、水質改善政策の実施にあたっては、効果と負担の両者の関係を捉えた総合的な政策評価が必要である。

このような背景の下、本稿では、まず各地域における経済主体の水質汚濁物質排出すなわち排水処理に関わる行動と閉鎖性水域の水質による各経済活動への影響を捉え、かつ閉鎖性水域の水質悪化の特性である汚濁物質の蓄積現象を捉えた応用一般均衡(Computable General Equilibrium; 以下、CGE)モデルを構築する。次に、閉鎖性水域の水質改善政策に対し、地域間、主体間における便益と費用の帰着構造を分析することにより、政策の費用負担問題も含めた経済的な評価を行う。さらに、閉鎖性水域の水質改善に必要な各主体の汚濁負荷削減量の配分を求める。これは、閉鎖性水域の目標水質水準を達成するという条件の下で、社会的厚生が最大となる汚濁負荷削減量配分を求めるものであり、

CGEモデルにより表現される政策有無のそれぞれの経済均衡を制約条件に持つ均衡制約付数理最適化問題 (Mathematical Programming with Equilibrium Constraints; 略して MPEC)⁴⁾を定式化して解くものである。本稿では、この問題、特に制約条件が複雑な問題であることを考慮し、問題を組合せ問題に書き換えることにより、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて解くこととする。

2. 既往研究と本稿の位置づけ

現在、閉鎖性水域における水質悪化は深刻であり、水質改善政策を早急に行うことが必要であるものの、一方ではその政策、特に企業に対する排水規制が市場経済に与える影響が懸念されている。したがって、水質改善政策の経済評価に対しては、社会経済モデルの適用が必要である。これまでも社会経済モデルを用いて水質改善政策の政策評価を行った研究はいくつか見られる。

岡⁵⁾は琵琶湖に流入する事業系排水の負荷について、費用関数を推定し、被害額を導出している。しかし、政策評価については、経済理論の一般的な枠組みでの議論にとどまっておらず、定量的な議論まではなされていない。また、この議論を拡張して限界的な排出削減費用曲線と税率との関係を議論し、ポーモル・オーツ税としての課徴金についても検討している⁶⁾。新沢⁷⁾は、産業連関モデルを用いて、家計や産業による水質汚染が主体の経済活動を介して、どのように広がっていくのかをモデル分析している。米田・氷飽⁸⁾は、霞ヶ浦を対象とした一般均衡理論に基づいた社会経済モデルを構築し、政策評価を試みている。しかし、そこでは理論モデルの構築のみにとどまっている。広瀬・氷飽⁹⁾は、霞ヶ浦流域の社会経済活動とそれにより生じる汚濁物質の排出をモデル化し、社会全体から見て受け入れ可能な流入規制目標値を決定する線形計画モデル最適化シミュレーションを行っている。筆者ら¹⁰⁾は、閉鎖性水域の水質改善政策を評価するための空間経済モデルを構築し、愛知県を対象として簡単な数値シミュレーションを行っている。しかし、このモデルでは汚濁フローしか捉えておらず、閉鎖性水域の特性である汚濁ストックによる水質悪化の現象を捉えきれていない。また、ゲーム理論の観点から閉鎖性水域の改善政策を取り扱ったものもある。高野・榊原・岡田¹¹⁾は、特に水質改善事業のための費用負担について、費用配分問題をゲーム理論により分析している。

以上から本稿は費用配分問題を対象とはせず、定量的な分析により社会的厚生を最大化を吟味し、配分問題については便益帰着の推定結果を示して分担にお

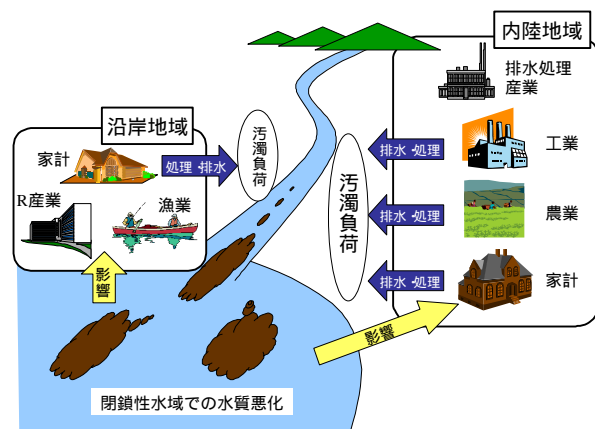


図-1 モデルの概念図

ける公正についての参照情報を提供するという立場をとる。本稿のモデルは、先行研究^{10), 11)}のモデルを基に、閉鎖性水域の水質悪化の原因である汚濁物質の蓄積を捉えられる空間経済モデルに拡張したものである。本モデルでは、この他に、閉鎖性水域流域における地域間、経済主体間の活動の連関性、排水処理(汚濁負荷削減)行動、蓄積した汚濁物質が再び経済主体活動へ及ぼす影響を捉えている。また、地域間の利害関係や費用負担問題についても便益帰着構成表を作成して検討する。さらに、目標水質水準を達成するという条件の下で、社会的厚生が最大となる主体間の汚濁負荷削減量の配分を求め、その際、定式化する MPEC が複雑であるため、その解法として遺伝的アルゴリズム(GA)を援用する。

3. 応用一般均衡モデルの構築

本稿で構築したモデルの特徴は、以下の4点である。閉鎖性水域流域における地域間、経済主体間の活動の連関性を捉えている。

排水処理(汚濁負荷削減)行動を捉えている。

閉鎖性水域の水質悪化の原因である汚濁物質の蓄積を捉えている。

蓄積した汚濁物質が再び経済主体活動へ及ぼす影響を捉えている。

図-1 にモデルの概念図を示す。

(1) モデルの前提条件

本モデルは上流に位置する内陸地域と下流に位置する閉鎖性水域沿岸地域(以下、沿岸地域)の2地域からなるものとする。

内陸地域の産業には工業、農業および排水処理産業が存在するものとする。このうち、工業・農業は排水により閉鎖性水域の水質に影響を及ぼし、排水処

理産業は排水処理に必要な財・サービスを生産する．沿岸地域の産業には漁業およびレクリエーション産業(略してR産業)が存在するものとする．このうち、漁業は閉鎖性水域の水質の影響を受ける．また、各地域には家計および政府が存在するものとする．家計の排水処理(汚濁負荷削減)は、政府が一括して行うものとする．工業・農業は排水を自己処理するものとする．各主体は立地選択を行わないものとする．

(2) 家計の行動モデル

内陸および沿岸地域の家計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、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、家計は使用水量に応じた汚濁負荷を排出する．レクリエーション消費に関しては、家計自らが、R産業より供給されるレクリエーション財(以下、R財)とレクリエーション消費に必要な時間(以下、R時間)を投入することにより、レクリエーションサービス(以下、Rサービス)を生産し、消費するという自家生産関数の概念¹³⁾を用いて定式化する．

a) Rサービス生産行動

家計はR財とR時間を投入してRサービスを生産する．行動モデルは、閉鎖性水域水質の影響を受けるRサービスに関わる生産技術制約(Cobb- Douglas 型関数により特定化)の下での費用最小化問題として定式化する．なお、後述する水質改善政策を想定して、R財には水質浄化事業を目的とした税率 e が課せられるものとする．

$$c_R^i(t) \cdot u_R^i(t) = \min_{x_R^i, t_R^i} (1+e)p_R(t)x_R^i(t) + w^i(t)t_R^i(t) \quad (1a)$$

$$s.t. \quad u_R^i(t) = h_R^i(S(t)) \cdot x_R^i(t)^{a_R^i} \cdot t_R^i(t)^{a_t^i} \quad (1b)$$

ここで、 t ：時刻、 i ：地域(内陸、沿岸)を表す添字($i=1,2$)、 c_R ：Rサービスの単位費用、 u_R ：Rサービスの生産量、 x_R ：R財の投入量、 t_R ：R時間の投入量、 p_R ：R財の価格、 w ：時間価値、 e ：水質浄化税率、 S ：閉鎖性水域水質、 h_R ：比率パラメータ、 a_R, a_t ：分配パラメータ($a_R + a_t = 1$)．

b) 財消費行動

前項で定義したRサービスを含めた財の消費量を決定する．行動モデルは、所得制約と時間制約の下、主観的割引率 r で割引、現時点から無限遠まで積分した通時的効用を最大化するものとして定式化する．

$$V^i = \max_{x_j^i, s^i, u_R^i, x_h^i} \int_0^\infty U^i(x_j^i(t), s^i(t), u_R^i(t), x_h^i(t), S(t)) \exp(-rt) dt \quad (2a)$$

$$s.t. \quad \dot{K}_h^i(t) = [w^i(t)\Omega^i - t^i(t)] + r(t)K_h^i(t) - \left[\sum_j (1+e_j)p_j(t)x_j^i(t) + w^i(t)s^i(t) + c_R^i(t)u_R^i(t) + p_h^i(t)x_h^i(t) \right] \quad (2b)$$

$$\Omega^i = l^i + s^i + t_R^i \quad (2c)$$

ここで、 x_j ： j 財の消費量($j=M, A, F$ (M ：工業、 A ：農業、 F ：漁業))、 s ：余暇時間、 x_h^W ：排水量、 K_h ：資本ストック、 \dot{K}_h ：資本ストックの増加分、 Ω ：総利用可能時間、 t ：一括税、 r ：利子率、 p_j ： j 財の価格、 p_h^W ：排水処理価格、 l ：労働時間．

式(2a)の家計の直接効用関数は以下のように CES 型関数を用いて特定化する¹⁴⁾．

$$U^i = \left[\sum_j \{a_j\}_s^{\frac{1}{s}} \{x_j^i(t)\}^{\frac{s-1}{s}} + \{a_s\}_s^{\frac{1}{s}} \{s^i(t)\}^{\frac{s-1}{s}} + \{a_{u_R}\}_s^{\frac{1}{s}} \{u_R^i(t)\}^{\frac{s-1}{s}} + \{a_{x_h^W}\}_s^{\frac{1}{s}} \{x_h^i(t)\}^{\frac{s-1}{s}} \right]^{\frac{s}{s-1}} + u_S^i(S(t)) \quad (3)$$

ここで、 s ：財間の代替弾力性、 u_S ：閉鎖性水域水質に対する存在価値、 $a_j, a_s, a_{u_R}, a_{x_h^W}$ ：分配パラメータ．

(3) 内陸地域における産業の行動モデル

a) 工業・農業の行動モデル

工業と農業は同じ行動をとるものとして定式化する．工業・農業はある時点 t において、労働と資本を投入して財の生産を行う．その際、排水処理(汚濁負荷削減)は自ら行うものとする．なお、各企業とも効率的な排水処理を行っているため、経済均衡下では財生産と同様に企業による差はないと考える．この生産行動を3段階の最適化問題として定式化する¹⁴⁾．

第1段階では、労働と資本をひとまとまりとみなした合成生産要素投入量と排水量を決定する．この行動モデルを Leontief 型生産技術制約下での生産費用最小化行動として定式化する．式(4b)に示されるように Leontief 型生産技術制約下では、産業は $Y_j(t)$ の生産に対して価格に関わらず合成生産要素投入量を $a_j^0 Y_j(t)$ だけ投入し、排水量を $a_j^{x_h^W} x_j^W(t)$ だけ排出すると仮定している．また、式(4a)の第2項は排水処理費用を示しており、各汚染物質に対する汚濁負荷削減量と排水量に依存した形となっている．

$$C_j(t) = \min_{PC_j, x_j^W} \left[c_j(t)PC_j(t) + \sum_k d_j^k(t)(q_j^k(t) - Q_j^k(t))x_j^W(t) \right] \quad (4a)$$

$$s.t. \quad Y_j(t) = \min \left[\frac{PC_j(t)}{a_j^0}, \frac{x_j^W(t)}{a_j^{x_h^W}} \right] \quad (4b)$$

ここで、 j ：産業種を表す添字($j=M, A$)、 C_j ：工業財・農業財の生産費用、 PC_j ：合成生産要素投入量、 x_j^w ：排水量、 c_j ：合成生産要素の単位費用、 q_j^k ：単位排水量当たりの発生汚濁負荷量、 Q_j^k ：単位排水量当たりの排出汚濁負荷量(排出基準値)、 \ddot{a}_j^k ：汚濁負荷削減に要する単位費用(汚濁負荷削減技術力)、 k ：汚染物質の種類、 Y_j ：工業財・農業財の生産量、 a_j^0 ：合成生産要素比率、 $a_j^{x^w}$ ：排水量比率。

式(4)を解くと以下のように合成生産要素投入量および排水量が求められる。

$$PC_j(t) = a_j^0 Y_j(t), \quad x_j^w(t) = a_j^{x^w} Y_j(t) \quad (5)$$

これらを式(4)の目的関数に代入することにより、工業・農業の生産費用関数が求められる。

$$C_j(t) = [a_j^0 c_j(t) + a_j^{x^w} p_j^w(t)] Y_j(t) \quad (6)$$

ここで、 $p_j^w(t) = \sum_k d_j^k (q_j^k(t) - Q_j^k(t))$ ：排水処理価格。

第2段階では、労働と資本の投入量を決定する。その行動モデルは、合成生産要素に関する技術制約下での生産要素費用最小化行動として定式化する。なお、合成生産要素関数はCobb-Douglas型技術を用いて特定化し、その1単位当たりの労働と資本の投入量、並びに単位費用を求めるために $PC_j=1$ と置く。

$$c_j(t) = \min_{L_j, K_j} [w^l(t) L_j(t) + r(t) K_j(t)] \quad (7a)$$

$$s.t. \quad PC_j(t) = h_j L_j(t)^{a_j^L} K_j(t)^{a_j^K} = 1 \quad (7b)$$

ここで、 L_j ：労働投入量、 K_j ：資本投入量、 w^l ：内陸地域の賃金率、 h_j ：比率パラメータ、 a_j^L, a_j^K ：分配パラメータ($a_j^L + a_j^K = 1$)。

式(7)を解くと、単位合成生産要素当たりの生産要素需要関数が求められる。また、これらを式(6)の目的関数に代入することにより、合成生産要素当たりの単位費用が求められる。

$$c_j(t) = \frac{1}{h_j} \left[w^l(t) \left[\frac{a_j^L \cdot r(t)}{a_j^K \cdot w^l(t)} \right]^{a_j^K} + r(t) \left[\frac{a_j^K \cdot w^l(t)}{a_j^L \cdot r(t)} \right]^{a_j^L} \right] \quad (8)$$

これを式(6)に代入することにより、工業・農業の生産費用が決定される。

第3段階では、式(8)の費用関数を用いて利潤最大化問題を考える。

$$p_j(t) = \max_{Y_j} p_j(t) Y_j(t) - C_j(t) \quad (9a)$$

$$s.t. \quad C_j(t) = [a_j^0 c_j(t) + a_j^{x^w} p_j^w(t)] Y_j(t) \quad (9b)$$

ここで、 p_j ：利潤、 p_j ：工業財・農業財の価格。

式(9)の一階条件より、工業財・農業財の価格が求められる。

$$p_j(t) = a_j^0 c_j(t) + a_j^{x^w} p_j^w(t) \quad (10)$$

さらに、工業・農業の排水処理は、排水処理産業が生産する排水処理財の購入し、それを投入して行うものとする。その結果、次式が成立する。

$$p_j^w(t) x_j^w(t) = p_d(t) x_d^j(t) \quad (11)$$

ここで、 p_d ：排水処理財の価格、 x_d^j ：排水処理財の消費量。

b) 排水処理産業の行動モデル

排水処理産業はある時点 t において、労働と資本を投入し、政府、工業、農業が排水処理に必要な排水処理財を生産する。すなわち、工業・農業行動モデルの定式化での合成生産要素関数を通常の生産関数に置き換え、その技術制約下での費用最小化問題として定式化する。

$$C_d(t) = \min_{L_d, K_d} [w^l(t) L_d(t) + r(t) K_d(t)] \quad (12a)$$

$$s.t. \quad Y_d(t) = h_d L_d(t)^{a_d^L} K_d(t)^{a_d^K} \quad (12b)$$

ここで、 d ：排水処理産業を表す添字、 C_d ：排水処理財の生産費用、 L_d ：労働投入量、 K_d ：資本投入量、 Y_d ：排水処理財の生産量、 h_d ：比率パラメータ、 a_d^L, a_d^K ：分配パラメータ($a_d^L + a_d^K = 1$)。

式(12)を解くと各生産要素需要関数が求められ、それらを式(12)の目的関数に代入することにより、排水処理産業の費用関数が求められる。

$$C_d(t) = \frac{1}{h_d} \left[w^l(t) \left[\frac{a_d^L \cdot r(t)}{a_d^K \cdot w^l(t)} \right]^{a_d^K} + r(t) \left[\frac{a_d^K \cdot w^l(t)}{a_d^L \cdot r(t)} \right]^{a_d^L} \right] Y_d(t) \quad (13)$$

次に、その生産費用を用いて排水処理産業の利潤最大化問題を考える。

$$p_d(t) = \max_{Y_d} p_d(t) Y_d(t) - C_d(t) \quad (14a)$$

$$s.t. \quad C_d(t) = \frac{1}{h_d} \left[w^l(t) \left[\frac{a_d^L \cdot r(t)}{a_d^K \cdot w^l(t)} \right]^{a_d^K} + r(t) \left[\frac{a_d^K \cdot w^l(t)}{a_d^L \cdot r(t)} \right]^{a_d^L} \right] Y_d(t) \quad (14b)$$

ここで、 p_d ：利潤、 p_d ：排水処理財の価格。

式(14)の一階条件より、排水処理財の価格が求められる。

$$p_d(t) = \frac{1}{h_d} \left[w^l(t) \left[\frac{a_d^L \cdot r(t)}{a_d^K \cdot w^l(t)} \right]^{a_d^K} + r(t) \left[\frac{a_d^K \cdot w^l(t)}{a_d^L \cdot r(t)} \right]^{a_d^L} \right] \quad (15)$$

(4) 沿岸地域における産業の行動モデル

a) 漁業の行動モデル

漁業は生産活動において閉鎖性水域水質 S の影響を直接受けるとする。この行動モデルは、ある時点 t に

おける労働，資本からなる生産要素のみを投入するとした費用最小化問題として定式化できる．

$$C_F(t) = \min_{L_F, K_F} [w^2(t)L_F(t) + r(t)K_F(t)] \quad (16a)$$

$$s.t. Y_F(t) = h_F(S(t))L_F(t)^{a_F^L} K_F(t)^{a_F^K} \quad (16b)$$

ここで， F ：漁業を表す添字， C_F ：漁業の生産費用， L_F ：労働投入量， K_F ：資本投入量， Y_F ：漁業財の生産量， w^2 ：沿岸地域の賃金率， h_F ：比率パラメータ， a_F^L, a_F^K ：分配パラメータ（ $a_F^L + a_F^K = 1$ ）．

式(16)を解くと各生産要素需要関数が求められ，それらを式(16)の目的関数に代入することにより，漁業の費用関数が求められる．その生産費用を用いて漁業の利潤最大化問題を定式化すると，式(17)のようになる．

$$p_F(t) = \max_{Y_F} p_F(t)Y_F(t) - C_F(t) \quad (17a)$$

$$s.t. C_F(t) = \frac{1}{h_F} \left[w^1(t) \left[\frac{a_F^L \cdot r(t)}{a_F^K \cdot w^1(t)} \right]^{a_F^K} + r(t) \left[\frac{a_F^K \cdot w^1(t)}{a_F^L \cdot r(t)} \right]^{a_F^L} \right] Y_F(t) \quad (17b)$$

ここで， p_F ：利潤， p_F ：漁業財の価格．

式(17)の一階条件より，漁業財の価格が求められる．

$$p_F(t) = \frac{1}{h_F} \left[w^1(t) \left[\frac{a_F^L \cdot r(t)}{a_F^K \cdot w^1(t)} \right]^{a_F^K} + r(t) \left[\frac{a_F^K \cdot w^1(t)}{a_F^L \cdot r(t)} \right]^{a_F^L} \right] \quad (18)$$

b) R産業の行動モデル

R産業は，生産活動において閉鎖性水域水質 S の影響を直接受けないとする．よって，R産業の行動モデルは，漁業の行動モデルにおいて比率パラメータ h を一定としたものとして定式化できる．

$$C_R(t) = \min_{L_R, K_R} [w^2(t)L_R(t) + r(t)K_R(t)] \quad (19a)$$

$$s.t. Y_R(t) = h_R L_R(t)^{a_R^L} K_R(t)^{a_R^K} \quad (19b)$$

ここで， R ：R産業を表す添字， C_R ：R産業の生産費用， L_R ：労働投入量， K_R ：資本投入量， Y_R ：R財の生産量， h_R ：比率パラメータ， a_R^L, a_R^K ：分配パラメータ（ $a_R^L + a_R^K = 1$ ）．

式(19)を解くと各生産要素需要関数が求められ，それらを式(19)の目的関数に代入することにより，R産業の費用関数が求められる．その生産費用を用いてR産業の利潤最大化問題を定式化すると，式(20)のようになる．

$$p_R(t) = \max_{Y_R} p_R(t)Y_R(t) - C_R(t) \quad (20a)$$

$$s.t. C_R(t) = \frac{1}{h_R} \left[w^1(t) \left[\frac{a_R^L \cdot r(t)}{a_R^K \cdot w^1(t)} \right]^{a_R^K} + r(t) \left[\frac{a_R^K \cdot w^1(t)}{a_R^L \cdot r(t)} \right]^{a_R^L} \right] Y_R(t) \quad (20b)$$

ここで， p_R ：利潤， p_R ：R財の価格．

式(20)の一階条件より，R財の価格が求められる．

$$p_R(t) = \frac{1}{h_R} \left[w^1(t) \left[\frac{a_R^L \cdot r(t)}{a_R^K \cdot w^1(t)} \right]^{a_R^K} + r(t) \left[\frac{a_R^K \cdot w^1(t)}{a_R^L \cdot r(t)} \right]^{a_R^L} \right] \quad (21)$$

(5) 政府の行動モデル

a) 排水処理部門

政府は，家計からの排水に対して排水処理(汚濁負荷削減)を行う．この行動を利潤最大化行動として定式化するが，排水処理費用は排水量および汚濁負荷削減量に依存するものとする¹⁵⁾．さらに，建設費に相当する固定費用も考慮する．

$$p_G^i(t) = \max_{d_h^k(t)} p_h^W(t)x_h^W(t) - C_W^i(t) \quad (22a)$$

$$s.t. C_W^i(t) = \sum_k d_h^k(t) \cdot (q_h^{ki}(t) - Q_h^{ki}(t))x_h^W(t) + pf^i(G^i) \quad (22b)$$

ここで， p_G ：排水処理部門の利潤， C_W^i ：排水処理費用， d_h^k ：家計の汚濁負荷削減単位費用(排水処理技術力)， Q_h^k ：家計からの排出汚濁負荷量(排出基準)， G ：排水処理施設規模， $pf(\cdot)$ ：固定費用．

政府は家計から徴収した排水処理費用により排水処理を行い，それには排水処理財が投入されるものとする．その結果，以下のバランス式が成り立つ．

$$p_h^W(t)x_h^W(t) = p_d(t)x_d^{Gi}(t) \quad (23)$$

ここで， x_d^{Gi} ：排水処理財の消費量．

b) 水質管理部門

政府は，閉鎖性水域の水質管理も行う．政府がコントロールできる政策変数は，排水規制値および排出基準 Q^k ，工業・農業およびR産業が生産する財に対して課す水質浄化事業を目的とした税率 e ，式(1a)，(2b)で表されているようにに基づいて徴収した税をもとに行う閉鎖性水域水質浄化事業，具体的には合流式下水道の初期雨水対策などの面源対策やヘドロの浚渫・覆砂などの事業規模である．なお，水質浄化事業に対しては排水処理財が投入されるものとする．その結果，以下のバランス式が成立する．

$$ep_M(t)x_M^i(t) + ep_A(t)x_A^i(t) + ep_R(t)x_R^i(t) = p_d(t)x_d^{Gi}(t) \quad (24)$$

(6) 閉鎖性水域の水質変化

閉鎖性水域の水質変化は，産業および政府における排水処理後の排出汚濁負荷量もたらす水質悪化分，政府の水質浄化事業による水質浄化分および自然浄化により表される．これにより閉鎖性水域の特性である汚濁ストックの蓄積現象を考慮した水質変化が表されている．本来は閉鎖性水域および発生源からの流下過程における物質収支に関する複雑なメカニズムが存在するため，それを表現すべきであるが，本稿では単純化して次式のように表されるものとする．ここでは閉鎖性水域の水質自身を汚濁ストックとして捉えており，

過去からのヘドロの蓄積についても前期の水質に含まれていると考える。

$$\dot{S}(t) = g^W [Q_M^k(t), Q_A^k(t), Q_h^{ki}(t)] - g^P [e] - bS(t-1) \quad (25)$$

ここで、 \dot{S} ：閉鎖性水域の水質変化， $g^W[\cdot]$ ：水質悪化分， $g^P[\cdot]$ ：水質浄化分， b ：自然浄化率。

(7) 市場均衡条件

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ようになる。

$$\text{労働市場： } L_M(t) + L_A(t) + L_d(t) = l^1(t) \quad (26a)$$

$$L_F(t) + L_R(t) = l^2(t) \quad (26b)$$

$$\text{資本市場： } K_M(t) + K_A(t) + K_F(t) + K_R(t) + K_d(t) = \sum_i K_h^i(t) \quad (26c)$$

$$\text{工業財市場： } \sum_i x_M^i(t) = Y_M(t) \quad (26d)$$

$$\text{農業財市場： } \sum_i x_A^i(t) = Y_A(t) \quad (26e)$$

$$\text{排水処理財市場： } \sum_i x_d^{Gi}(t) + x_d^M(t) + x_d^A(t) = Y_d(t) \quad (26f)$$

$$\text{R財市場： } \sum_i x_R^i(t) = Y_R(t) \quad (26g)$$

$$\text{漁業財市場： } \sum_i x_F^i(t) = Y_F(t) \quad (26h)$$

ここで、各時点 t において式(26)の均衡解が唯一であると仮定する。

4. 水質改善政策の便益帰着分析

(1) 定常状態

内生的経済成長理論の分野では、主に内生変数が一定率の成長をする持続的成長の定常状態と全ての変数の変化率がゼロ、すなわち全ての変数がそれぞれ一定値をとるゼロ成長の2つの定常状態を想定して議論が進められてきた。本稿では、定常状態が長期的な水質改善政策の目標となり得ることを踏まえた上で、後者のゼロ成長経済における定常状態¹⁶⁾を想定して分析する。なお、定常状態に至る到達過程の分析については今後の課題として積極的に取り組んでいきたい。

閉鎖性水域の水質変化の定常状態は、式(25)より以下のように定義される。

$$\dot{S}(t) = g^W [Q_M^k(t), Q_A^k(t), Q_h^{ki}(t)] - g^P [e] - bS(t-1) = 0 \quad (27)$$

閉鎖性水域の水質変化を図-2に示す。縦軸の切片により定常状態における水質が変化することがわかり、ゼロ成長の定常状態の場合、横軸の切片との交点により水質が決まることがわかる。よって、政府は政策変数を通して間接的に S を操作することにより、効率的な政策を探すこととなる。

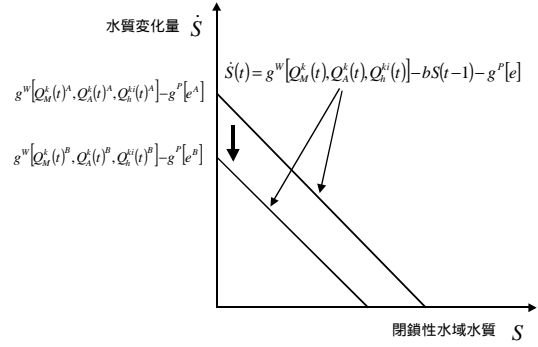


図-2 定常状態

(2) 各主体の変化

a) 家計

式(2)を解くと各消費量が求められる。これらを式(2)の目的関数に代入すると、間接効用関数が求められる。

$$V^i = I^i [\Delta]_{s-1}^{-1} + u_S^i(S) \quad (28a)$$

ただし、

$$\Delta = \mathbf{a}_M \{(1+e)p_M\}^{1-s} + \mathbf{a}_A \{(1+e)p_A\}^{1-s} + \mathbf{a}_F p_F^{1-s} + \mathbf{a}_{u_R} c_R^{i1-s} + \mathbf{a}_{x_w} p_h^w^{1-s} + \mathbf{a}_s w^{i1-s} \quad (28b)$$

$$I^i(t) = w^i(t)\Omega + r(t)K_h^i(t) - t^i(t) \quad (28c)$$

式(28)より間接効用関数は、各価格ベクトルと所得および閉鎖性水域水質 S からなることがわかる。よって、間接効用関数の全微分形は以下のように表される。

$$dV^i = \mathbf{I}^i [d^i dw - x_F^i dp_F - x_M^i d\{(1+e)p_M\} - x_A^i d\{(1+e)p_A\} - x_R^i d\{(1+e)p_R\} - x_h^{wi} dp_h^w + \frac{\partial I^i}{\partial S^i} dS^i] \quad (29)$$

ここで、 \mathbf{I} ：所得の限界効用。

b) 工業

式(9a)より工業の利潤関数の全微分形が以下のように求められる。

$$d\delta_M = Y_M dp_M - L_M dw^1 - K_M dr - x_M^W dp_M^W \quad (30)$$

式(11)より排水処理費用の全微分形が求められる。

$$p_M^W dx_M^W + x_M^W dp_M^W = p_d dx_d^M + x_d^M dp_d \quad (31)$$

式(29)を式(28)に代入すると利潤関数の全微分形は以下のように書き換えられる。

$$d\delta_M = Y_M dp_M - L_M dw^1 - K_M dr + p_M^W dx_M^W - p_d dx_d^M - x_d^M dp_d \quad (32)$$

c) 農業

農業の利潤関数の全微分形は次のように導出される。

$$d\delta_A = Y_A dp_A - L_A dw^1 - K_A dr + p_A^W dx_A^W - p_d dx_d^A - x_d^A dp_d \quad (33)$$

表-1 便益帰着構成表

	内陸地域						沿岸地域				合計	
	家計	工業		農業		排水処理 産業	政府	家計	漁業	R産業		政府
		生産部門	排水部門	生産部門	排水部門							
汚濁負荷削減費用												
産業の排水処理費用		<1>	<2>	<3>	<4>							0
産業の排水処理費用超過負担			<5>		<6>							<7>
産業の排水処理財投資超過負担			<8>		<9>							<10>
家計の排水処理費用	<11>						<12>	<13>			<14>	0
家計の排水処理費用超過負担							<15>				<16>	<17>
家計の排水処理財投資超過負担							<18>				<19>	<20>
浄化事業への税金投資額変化	<21>						<22>	<23>			<24>	0
面源の排水処理財投資超過負担							<25>				<26>	<27>
工業財価格変化	<28>	<29>						<30>				0
排水処理財価格変化			<31>		<32>	<33>	<34>				<35>	0
農業財価格変化	<36>			<37>				<38>				0
漁業財価格変化	<39>							<40>	<41>			0
R財価格変化	<42>							<43>		<44>		0
賃金率変化	<45>	<46>		<47>		<48>	<49>	<50>	<51>			0
水質変化による直接的生産増大									<52>			<53>
レクリエーション効用の増大	<54>							<55>				<56>
存在価値の増大	<57>							<58>				<59>
合計	<60>	0	0	0	0	0	0	<61>	0	0	0	SNB

$$\begin{aligned}
 <1>= \int_{A \rightarrow B} x_M^W dp_M^W, <2>= \int_{A \rightarrow B} x_M^W dp_M^W, <3>= \int_{A \rightarrow B} x_A^W dp_A^W, <4>= \int_{A \rightarrow B} x_A^W dp_A^W, <5>= \int_{A \rightarrow B} p_M^W dx_M^W, <6>= \int_{A \rightarrow B} p_A^W dx_A^W, <7>= \int_{A \rightarrow B} p_j^W dx_j^W, \\
 <8>= \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^M, <9>= \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^A, <10>= \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^j, <11>= \int_{A \rightarrow B} x_h^W dp_h^W, <12>= \int_{A \rightarrow B} x_h^W dp_h^W, <13>= \int_{A \rightarrow B} x_h^W dp_h^W, <14>= \int_{A \rightarrow B} x_h^W dp_h^W, \\
 <15>= \int_{A \rightarrow B} p_h^W dx_h^W, <16>= \int_{A \rightarrow B} p_h^W dx_h^W, <17>= \int_{A \rightarrow B} p_h^W dx_h^W, <18>= \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^{G1}, <19>= \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^{G2}, <20>= \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^{Gi}, \\
 <21>= \int_{A \rightarrow B} x_j^1 dep_j, <22>= \int_{A \rightarrow B} x_j^1 dep_j, <23>= \int_{A \rightarrow B} x_j^2 dep_j, <24>= \int_{A \rightarrow B} x_j^2 dep_j, <25>= \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^{G1}, <26>= \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^{G2}, \\
 <27>= \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^{Gi}, <28>= \int_{A \rightarrow B} x_M^1 dp_M, <29>= \int_{A \rightarrow B} Y_M dp_M, <30>= \int_{A \rightarrow B} x_M^2 dp_M, <31>= \int_{A \rightarrow B} x_d^M dp_d, <32>= \int_{A \rightarrow B} x_d^A dp_d, <33>= \int_{A \rightarrow B} Y_d dp_d, \\
 <34>= \int_{A \rightarrow B} x_d^1 dp_d, <35>= \int_{A \rightarrow B} x_d^2 dp_d, <36>= \int_{A \rightarrow B} x_A^1 dp_A, <37>= \int_{A \rightarrow B} Y_A dp_A, <38>= \int_{A \rightarrow B} x_A^2 dp_A, <39>= \int_{A \rightarrow B} x_F^1 dp_F, <40>= \int_{A \rightarrow B} x_F^2 dp_F, \\
 <41>= \int_{A \rightarrow B} Y_F dp_F, <42>= \int_{A \rightarrow B} x_R^1 dp_R, <43>= \int_{A \rightarrow B} x_R^2 dp_R, <44>= \int_{A \rightarrow B} Y_R dp_R, <45>= \int_{A \rightarrow B} l^1 dw^1, <46>= \int_{A \rightarrow B} L_M dw^1, <47>= \int_{A \rightarrow B} L_A dw^1, \\
 <48>= \int_{A \rightarrow B} L_d dw^1, <49>= \int_{A \rightarrow B} l^2 dw^2, <50>= \int_{A \rightarrow B} L_F dw^2, <51>= \int_{A \rightarrow B} L_R dw^2, <52>= \int_{A \rightarrow B} p_F \frac{\partial Y_F}{\partial S} dS, <53>= \int_{A \rightarrow B} p_F \frac{\partial Y_F}{\partial S} dS, \\
 <54>= \int_{A \rightarrow B} [u_R^1(S^B) - u_R^1(S^A)] dc_R^1, <55>= \int_{A \rightarrow B} [u_R^2(S^B) - u_R^2(S^A)] dc_R^2, <56>= \int_{A \rightarrow B} [u_R^1(S^B) - u_R^1(S^A)] dc_R^1 + \int_{A \rightarrow B} [u_R^2(S^B) - u_R^2(S^A)] dc_R^2, \\
 <57>= m[V(c_R^{1\infty}, S^B) - m[V(c_R^{1\infty}, S^A)], <58>= m[V(c_R^{2\infty}, S^B) - m[V(c_R^{2\infty}, S^A)], <59>= m[V(c_R^{1\infty}, S^B) - m[V(c_R^{1\infty}, S^A)] + m[V(c_R^{2\infty}, S^B) - m[V(c_R^{2\infty}, S^A)], \\
 <60>= \int_{A \rightarrow B} p_h^W dx_h^W + \int_{A \rightarrow B} p_j^W dx_j^W - \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^j - \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^{G1} + \int_{A \rightarrow B} [u_R^1(S^B) - u_R^1(S^A)] dc_R^1 + m[V(c_R^{1\infty}, S^B) - m[V(c_R^{1\infty}, S^A)], \\
 <61>= \int_{A \rightarrow B} p_h^W dx_h^W - \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^{G2} + \int_{A \rightarrow B} p_F \frac{\partial Y_F}{\partial S} dS + \int_{A \rightarrow B} [u_R^2(S^B) - u_R^2(S^A)] dc_R^2 + m[V(c_R^{2\infty}, S^B) - m[V(c_R^{2\infty}, S^A)], \\
 SNB= \int_{A \rightarrow B} p_h^W dx_h^W + \int_{A \rightarrow B} p_h^W dx_h^W + \int_{A \rightarrow B} p_j^W dx_j^W - \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^j - \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^{G1} - \int_{A \rightarrow B} p_d dx_d^{G2} + \int_{A \rightarrow B} p_F \frac{\partial Y_F}{\partial S} dS \\
 + \int_{A \rightarrow B} [u_R^1(S^B) - u_R^1(S^A)] dc_R^1 + \int_{A \rightarrow B} [u_R^2(S^B) - u_R^2(S^A)] dc_R^2 + m[V(c_R^{1\infty}, S^B) - m[V(c_R^{1\infty}, S^A)] + m[V(c_R^{2\infty}, S^B) - m[V(c_R^{2\infty}, S^A)], m[\cdot]: 支出関数.
 \end{aligned}$$

d) 排水処理産業

式(14a)より排水処理産業の利潤関数の全微分形が以下のように求められる。

$$d\delta_d = Y_d dp_d - L_d dw^1 - K_d dr \quad (34)$$

e) 漁業

漁業の利潤関数の全微分形は次のように導出される。

$$dp_F = Y_F dp_F - L_F dw^2 - K_F dr + p_F \frac{\partial Y_F}{\partial S} dS \quad (35)$$

f) R産業

R産業の利潤関数の全微分形は次のように導出される。

$$dp_R = Y_R dp_R - L_R dw^2 - K_R dr \quad (36)$$

g) 政府

式(23)より排水処理費用の全微分形が求められる。

$$p_h^W dx_h^W + x_h^W dp_h^W = p_d dx_d^{G1} + x_d^{G1} dp_d \quad (37)$$

式(24)より水質浄化費用の全微分形が求められる。

$$x_M^i dep_M + x_A^i dep_A + x_R^i dep_R = x_d^{Gi} dp_d + p_d dx_d^{Gi} \quad (38)$$

(3) 便益帰着構成表

便益定義として等価的偏差(Equivalent Valuation; 略してEV)を用いることを前提として、以上の行動モデルにおいて示した主体レベルの便益構成の各項を各列内に配置し、相互に関連する項目が同一の行内に入るように整理する。その結果、表-1の便益帰着構成表が完成する。なお、存在価値の増大(<57>~<59>)については、森杉¹⁷⁾に基づいて導出している。森杉はレクリエーション便益を利用便益と存在便益に分離し、前者は消費者余剰の増分、後者は費用が無限大であってもさらに存在する便益として定義されている。本稿もこれに従ってレクリエーション便益をレクリエーション効用の増大(<54>~<56>)と存在価値の増大(<57>~<59>)に分離した。

汚濁負荷削減により排水処理費用が増大(<1>,<3>)し、産業に損失が生じる。すなわち、排水処理費用の上昇に伴う排水量の減少によって排水部門で回収できなくなる費用(<5>~<7>)が発生し、損失が生じるものである。また、排水処理財の投資超過負担分(<8>~<10>)としても損失が生じる。これら2つの損失は、産業の汚濁負荷削減費用(<7>,<10>)である。家計の場合も同様に、家計の排水処理費用の超過負担分(<15>~<17>)、家計の排水処理財の投資超過分(<8>~<10>)としての損失が政府に生じる。これらが家計の排水処理費用(<11>,<13>)となる。全く同様の考えで、面源の排水処理財の超過負担分(<25>~<27>)が面源対策費となる。各産業の財価格変化(<28>~<44>)および賃金率変化(<45>~<51>)は、すべてキャンセルアウトされ、政策による社会的純便益(Social Net Benefit; 略してSNB)に影響を及ぼさない。漁業は、水質改善により財の生産性が高まり、直接的な生産増大分(<52>~<53>)としての便益を受ける。両地域の家計も水質改善によるレクリエーションサービスの向上を効用の増大分(<54>~<56>)として享受する。したがって、SNBは表-1の最下行の合計あるいは最右列の合計となり、欄外最下段の式のように表現される。

5. 汚濁負荷削減量配分

本稿では、水質環境基準を達成するという条件の下で、社会的厚生が最大となるように地域、主体毎の汚濁負荷削減量配分を求める均衡制約付数理最適化問題(MPEC)を考える。なお、ここでは社会的厚生の最大化問題を社会的純便益SNBの最大化問題に置き換え、汚濁負荷削減量配分問題を次式のように定式化する。

$$\max_{Q_M^k, Q_A^k, Q_h^{ki}, g^p[e]} SNB \quad (39)$$

表-2 伊勢湾岸域における汚濁負荷削減量(COD)

	家庭	工場	家畜	面源	合計
現況負荷量	169	115	16	105	405
目標負荷量	62	75	10	89	236
削減量	107	40	6	16	169
削減率	63	35	35	15	42

単位：負荷量(t/日)、削減率(%)

これは政府の意思決定行動を表したのもでもあり、各地域の家計、工業、農業に対する排出汚濁負荷量(排出基準： Q_h^{ki} , Q_M^k , Q_A^k)をいくつにすることが経済効率的であるかを決定するものである。また同時に、政府が行う面源対策についても水質浄化事業税として徴収した税収で行うことを前提にして、汚濁負荷削減量を決定するものである。すなわち、これは水質浄化事業税およびそれに基づく水質浄化分 $g^p[e]$ を決定することに相当する。

6. 数値シミュレーション

(1) 評価対象とする政策

本稿では伊勢湾岸流域を対象として分析を行う。伊勢湾岸では平成8年度末に「伊勢湾特定水域高度処理基本計画」が策定されており、将来の水質目標を達成するための汚濁負荷削減量が設定されている。このうちCODは表-2のように定められている¹⁸⁾。

本稿では表-2に示す総汚濁負荷削減量169t/日を前提条件として、各主体(発生源)への配分を見直し、どの地域のどの主体にそれを割り振ることが経済効率的であるかを探求し、地域、主体毎の汚濁負荷削減量の配分を決定する。なお、面源対策については政府が行うとする。4章で特定化したCGEモデルとの関係を述べると、総汚濁負荷削減量169t/日を達成すれば、式(27)が成立すると仮定し、家庭、工場、家畜については、それぞれ家計、工業、農業の政策変数 Q_h^{ki} , Q_M^k , Q_A^k を地域、主体別に決定することに相当し、面源については $g^p[e]$ を決定することに相当する。したがって、各主体が水質改善により享受する便益を固定した上で、各主体が負担すべき費用の最適配分を決定する問題を想定している。

(2) 遺伝的アルゴリズム

本稿では、環境基準を達成するという条件の下で、社会的厚生が最大となるような地域、主体毎の汚濁負荷削減量の配分を決定するためには、複雑なMPECを解く必要がある。しかし、本稿の数値シミュレーションでは比較的求める解の個数は少ないものの、制約条件が一般均衡モデルとなっているため、それを解析的

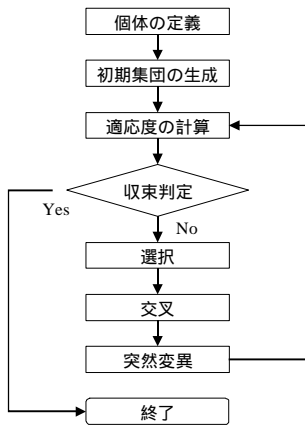


図-3 遺伝的アルゴリズム(GA)の計算フロー

パターン	遺伝子型(コード)	削減率
1	0 0 0 0	-5%
2	0 0 0 1	-10%
3	0 0 1 0	-15%
4	0 0 1 1	-20%
5	0 1 0 0	-25%
6	0 1 0 1	-30%
7	0 1 1 0	-35%
8	0 1 1 1	-40%
9	1 0 0 0	-45%
10	1 0 0 1	-50%
11	1 0 1 0	-55%
12	1 0 1 1	-60%
13	1 1 0 0	-65%
14	1 1 0 1	-70%
15	1 1 1 0	-75%
16	1 1 1 1	-80%

図-4 コード化の方法

表-3 産業のデータセット

	工業	農業	R産業	漁業	排水処理産業
労働投入額	182,500	789	5,202	133	9,007
資本投入額	124,048	2,464	2,733	111	6,122
排水量	9,335	252	0	0	0
生産額	307,929	3,267	7,935	244	15,198

単位：排水量(100万m³)，その他(億円)

表-4 産業のパラメータ

工業				
比率パラメータ	分配パラメータ		合成生産要素比率	排水量比率
h_M	a_M^L	a_M^K	a_M^0	$a_M^{x^w}$
172.16	0.595	0.405	0.997	0.0003
農業				
比率パラメータ	分配パラメータ		合成生産要素比率	排水量比率
h_A	a_A^L	a_A^K	a_A^0	$a_A^{x^w}$
10.77	0.243	0.757	0.996	0.0008
R産業				
比率パラメータ	分配パラメータ			
h_R	a_R^L	a_R^K		
213.48	0.656	0.344		
漁業				
比率パラメータ	分配パラメータ			
h_F	a_F^L	a_F^K		
100.94	0.545	0.455		
排水処理産業				
比率パラメータ	分配パラメータ			
h_d	a_d^L	a_d^K		
172.73	0.595	0.405		

に解くのは非常に困難である。ましてや、もっと詳細に経済主体や地域を区分すれば、なおさら解析的に解くのは困難であり、実際の政策に適用していくためにも簡易的な解法が必要と思われる。そこで、本稿では連続的である削減率をいくつかの区間に区切ることによって組合せ問題に置き換え、遺伝的アルゴリズム(GA)¹⁹⁾を用いて近似的に各主体の汚濁負荷削減率を計算する方法を提案する。遺伝的アルゴリズム(GA)の計算フローを図-3に示す。

a) 個体の定義

本稿では、家計、工業、農業の汚濁負荷削減率を1つの個体とする。ここで、面源の削減率が含まれていない理由は、家計、工業、農業の汚濁負荷削減率を決定することによって、自動的に決定されるためである。すなわち、面源の汚濁負荷削減率は、総汚濁負荷削減率から家計、工業、農業の汚濁負荷削減率を差し引いたものとして決定されるためである。また、それぞれの主体の削減率を4桁の2進数を用いて表現し、3主体を12桁の数字で表現する。すなわち、1つの個体の長さは12ビットになる。コード化の方法は図-4に示すとおりである。

b) 適応度

生成した個体をCGEモデル内で計算し、社会的純便益SNBを算出し、それを適応度として用いる。

(3) パラメータ設定

数値シミュレーションを行うためには、構築したモデルの生産関数および効用関数のパラメータを設定する必要がある。ここでは、応用一般均衡モデルのパラメータ設定に適用されるキャリブレーション手法によりパラメータ設定を行った¹⁴⁾。キャリブレーション手法とは、ある基準年で社会経済が一般均衡状態にあると想定し、その基準年のデータセットのみを正確に再現できるようなパラメータを求める方法である。

本稿では基準年を1993年(平成5年)とし、愛知県・岐阜県・三重県の経済データおよび排水量は、県民経済計算年報²⁰⁾、各県統計書²¹⁾より、汚濁負荷量および伊勢湾水質データは、伊勢湾浄化下水道計画連絡協議会による伊勢湾流域汚濁負荷データ¹⁸⁾よりデータセットを作成し、上記のキャリブレーション手法によりパラメータを決定した。

産業(工業・農業・R産業・漁業)のデータセットを表-3に示すとともに、パラメータを表-4に示す。また同様に、家計のデータセットを表-5に、パラメータを表-6に示す。なお、内陸地域と沿岸地域は、伊勢湾に接する12市23町(名古屋市を除く)の漁業とR産業を伊勢湾水質の影響を受ける産業と考え、その従業者を家計とし、この家計の排水処理およびこの家計が

表-5 家計のデータセット

	内陸地域	沿岸地域
工業財	301,278	7,462
農業財	3,193	79
漁業財	254	6
R財	8,399	196
Rサービス	32,961	876
排水量	680	17
余暇消費	148	5
労働時間	106	5
所得	608,165	14,498

単位：財・所得(億円), 排水量(100万 m³), 余暇・労働(億時間)

表-6 家計のパラメータ

レクリエーション生産関数(内陸地域)

比率パラメータ	分配パラメータ	
h_R^1	a_1^R	a_1^I
520.74	0.241	0.759

レクリエーション生産関数(沿岸地域)

比率パラメータ	分配パラメータ	
h_R^2	a_2^R	a_2^I
436.56	0.231	0.769

効用関数

代替弾力性 s	分配パラメータ					
	a_M	a_A	a_F	a_{u_R}	$a_{x_s^w}$	a_s
0.800	0.756	0.008	0.001	0.081	0.002	0.152

表-7 汚濁負荷削減量配分の計算結果

	家庭	工場	家畜	面源	合計
現況負荷量	169	115	16	105	405
目標負荷量	51	69	13	103	236
削減量	118	46	3	2	169
削減率	70	40	20	2	42

単位：負荷量(t/日), 削減率(%)

ら徴収した税金により水質浄化事業を行う政府という4主体を沿岸地域で活動する主体として設定した。

(4) 数値シミュレーションの結果

a) 汚濁負荷削減量の配分

遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて、水質目標水準を達成するという条件の下で、社会的純便益が最大となるような地域、主体毎の汚濁負荷削減量配分を決定した。本モデルにより求めた汚濁負荷削減量の各主体の配分量を表-7に示す。

求めた配分量(表-7)と基準となる配分量(表-2)を比べてみると、各主体とも多少の差はあるものの、ほぼ同じような配分量となった。しかし、削減率で見ると、本モデルで求めた最適配分量は面源の削減率が低い値となっている。面源は政府が家計から徴収した税によって行うものである。これは、税金を投入して面源対策を行うより、各主体が汚濁負荷量を削減した方が経済的に効率的であることを示していると考えられる。

表-8(1) 等価的偏差 EV(地域別)

	全家計 (億円)	1家計あたり (万円)
内陸地域	2,806	5.2
沿岸地域	293	14.3
合計	3,099	5.6

表-8(2) 等価的偏差 EV(県別)

	全家計 (億円)	1家計あたり (万円)
愛知県	2,058	5.5
岐阜県	503	5.2
三重県	538	6.1
合計	3,099	5.6

表-9 水質改善政策による社会経済状態の変化

価格	政策無し	政策有り	変化率
工業財	1.000	1.002	0.21%
合成財	1.000	1.000	0.02%
農業財	1.000	1.001	0.10%
R財	1.000	1.028	2.81%
漁業財	1.000	0.896	-10.4%
Rサービス(内陸地域)	1.000	1.007	0.70%
Rサービス(沿岸地域)	1.000	1.04	3.97%
賃金率(内陸地域)	1,822	1,823	0.04%
賃金率(沿岸地域)	1,185	1,236	4.32%
利子率	1.00	1.00	0.00%
排水価格(工業)	15.5	21.7	40.0%
排水価格(農業)	5.8	6.9	20.0%
排水価格(家計)	281	477	70.0%

生産量

	政策無し	政策有り	変化率
工業	30,873,990	30,752,531	-0.39%
排水処理財	1,523,800	1,608,000	5.53%
農業	327,235	326,243	-0.30%
R産業	859,406	875,100	1.83%
漁業	26,035	28,374	8.98%

(単位：100万円)

排水量

	政策無し	政策有り	変化率
工業	9,335	9,298	-0.39%
農業	252	251	-0.30%

(単位：100万 m³)

家計消費

	政策無し	政策有り	変化率	
内陸地域	工業財	30,127,774	29,986,412	-0.47%
	農業財	319,326	318,116	-0.38%
	漁業財	25,406	27,667	8.90%
	R財	839,852	854,447	1.74%
	Rサービス	3,296,141	3,423,635	3.87%
	排水量	680	443	-34.8%
	余暇消費	14,829	14,781	-0.32%
	労働時間	10,555	10,541	-0.13%
所得	60,816,547	60,835,710	0.03%	
沿岸地域	工業財	746,216	766,118	2.67%
	農業財	7,909	8,127	2.76%
	漁業財	629	707	12.3%
	R財	19,555	20,653	5.62%
	Rサービス	87,574	91,462	4.44%
	排水量	17	11	-32.7%
	余暇消費	518	515	-0.56%
	労働時間	450	451	0.19%
所得	1,449,780	1,501,896	3.59%	

単位：財(100万円), 排水量(100万 m³), 余暇(100万時間)

表-10 便益帰着構成表

	内陸地域						沿岸地域				合計	
	家計	工業		農業		排水処理 産業	政府	家計	漁業	R産業		政府
		生産部門	排水部門	生産部門	排水部門							
汚濁負荷削減費用												
産業の排水処理費用		-578	578	-3	3							0
産業の排水処理費用超過負担分				-7	0							-7
産業の排水処理財投資超過負担分			-569		-3							-572
家計の排水処理費用	-1,103						1,103	-28			28	0
家計の排水処理費用超過負担分							-896				-21	-917
家計の排水処理財投資超過負担分							-207				-7	-214
水質浄化事業への税金投資額変化	-52						52	-1			1	0
面源の排水処理財超過負担分							-52				-1	-53
工業財価格変化	-634	650						-16				0
排水処理財価格変化				-2	0	4	-2				0	0
農業財価格変化	-3			3				0				0
漁業財価格変化	26							1	-27			0
R財価格変化	-220							-5		225		0
賃金率変化	76	-71		0		-4	230	-6	-225			0
水質変化による直接的生産増大									32			32
レクリエーション効用の増大	4,090							90				4,179
存在価値の増大	490							19				509
合計	2,669	0	0	0	0	0	0	290	0	0	0	2,959

(単位：億円)

b) 汚濁負荷削減による効果

前項で示した配分を達成するための水質改善政策を実施した場合の便益を表-8に示し、社会経済状態の変化を表-9に示す。

地域別の等価的偏差EVと県別の等価的偏差EVに着目してみる。内陸地域の全家計のEVは2,806億円、沿岸地域の全家計のEVは293億円という値が求められた。これだけをみると内陸地域の家計の方が多くの便益を得ているように見えるが、これは内陸地域の家計数が沿岸地域に比べ多いためである。1家計あたりの家計の便益は、内陸地域が5.2万円、沿岸地域の家計が14.3万円となっており、沿岸地域の家計が2倍以上の便益を受けている。

愛知・岐阜・三重県のEVを見ても、伊勢湾沿岸部に隣接しない岐阜県(内陸地域)の1家計あたりの便益が3県の中で最も小さくなっている。また、岐阜県は家計数も少ないため、全家計の便益も最も小さくなっている。逆に三重県は伊勢湾沿岸部(沿岸地域)に居住している家計の割合が多いため、他県よりも1家計の受ける便益が大きいことがわかる。

社会経済状態の変化についてみると、各主体に汚濁負荷削減量を課すことにより排水処理にかかる単位費用が上昇し、各主体の排水量が減少していることが読みとれる。また、漁業の生産量が約9%増加している。これは、汚濁負荷量が削減したことに伴い伊勢湾の水質は向上するため、漁業の生産性が向上していることを示している。なお、一般的には漁業の生産性は水質がきれいになれば必ずしも上がるばかりではないが、伊勢湾ではノリやアサリの養殖業が盛んであり、現況の水質レベルから判断すれば生産性が向上するという結果は妥当と考えられる。

水質改善により、家計のRサービス需要が増加する

ため、それに伴いR産業の生産量も増加する。これら沿岸地域に位置する産業の生産量が増加すると、市場を介し、賃金率の上昇という形で沿岸地域の家計の所得も増大する。逆に内陸地域の産業については、汚濁負荷削減により財価格は上昇するものの、家計の所得増大による需要の増加に伴い生産量への影響はそれほど受けない。また、汚濁負荷削減には排水処理産業が生産する排水処理財が投入されるため、汚濁負荷削減を行う費用が増加しても、それに相当する排水処理産業の生産増大につながり、市場を介すことで沿岸地域の賃金率ほどではないが、内陸地域の賃金率も上昇している。

c) 便益帰着構成表

各主体の帰着便益を把握するために、シミュレーション結果を便益帰着構成表に整理した。それを表-10に示す。以下に、表-10の便益帰着構成表における各項目についての考察を行う。

汚濁負荷削減のための費用

汚濁負荷削減により排水処理費用が増大し、産業に7億円の損失が生じている。これは排水処理費用の上昇に伴う排水量の減少によって排水部門で回収できなくなる費用である。また、排水処理財の投資超過負担分として572億円の損失が生じている。この2つの合計である579億円が産業の汚濁負荷削減費用である。家計も同様に、家計の排水処理費用の超過負担分として917億円、家計の排水処理財の投資超過分として214億円の損失が政府に生じ、合計1,131億円が家計の排水処理費用となる。面源の排水処理財の超過負担分53億円が面源対策費となる。

よって、汚濁負荷削減費用は、それぞれ家計が1,131億円、工業が578億円、農業が3億円、面源が53億円となる。家計の汚濁負荷削減量が大きいため費用も

最大であるが、汚濁負荷削減量1単位当たりの費用は面源が最大である。そのため、経済効率性を考慮した場合、面源に税金を投入して事業を行うのは不効率であるという結果、すなわち、面源の汚濁負荷削減量が最も少ないという結果が示されている。

価格変化

各産業の財価格変化および賃金率変化は、すべてキャンセルアウトされている。すなわち、これらは政策による社会的純便益に影響を及ぼさない。

水質変化による直接的生産増大

漁業は、伊勢湾の水質が向上することにより財の生産性が高まる。そして、直接的な生産増大分として32億円の便益を受ける。

レクリエーション効用の増大と存在価値の増大

伊勢湾の水質が向上したことにより、レクリエーションサービスによる効用の増大分として、内陸地域の家計は4,090億円、沿岸地域の家計は90億円の便益を受ける。1家計当たり直すと、内陸地域の家計の方が大きな便益を受けていることとなるが、これは所得格差が起因している。つまり、所得の高い内陸地域の家計の方がより多くのレクリエーションサービスを消費しているため、伊勢湾の水質が向上してレクリエーションサービスの質も向上すれば、内陸地域の家計の方が沿岸地域の家計よりもより多くの便益を受けることとなる。

存在価値の増大は内陸地域、沿岸地域合わせて509億円の便益となっているが、これは伊勢湾がきれいになったことによって価値が生じるものである。これは本モデルでは計測が困難なため、ここではCVMにより求められた値²²⁾を用いて算出している。

これらより、産業と政府のデッドウェイトロスはいずれも1,756億円となっているものの、伊勢湾の水質改善に伴う家計のレクリエーション効用増大、存在価値の増大および漁業の水質変化による直接的生産増大による便益がそれぞれ4,179億円、509億円、32億円と損失を上回っているため、社会的純便益が正となる結果となっている。

一方、現在立案されている計画を実施した場合、すなわち汚濁負荷削減量配分(表-1)に対して、本CGEモデルを用いシミュレーションを行ったところ、社会的純便益が2,584億円となった。これは本稿で示した政策の便益よりも375億円少ない。したがって、現在の立案されている計画よりも効率的な政策を提案することができたとと言える。ただし、本稿のモデルおよびシミュレーション結果には、データなど不十分な部分も多く、実際の政策にしていくためにはさらに詳細な検討が必要であろう。

7. おわりに

本稿では、閉鎖性水域の水質改善政策を経済的に、かつ定量的に評価するために、CGEモデルを構築した。本モデルの特徴は、次の4点である。閉鎖性水域水質に大きく影響を受ける沿岸地域と水質から受ける影響は小さいが、水質に及ぼす影響は大きい内陸地域という2地域における経済主体の活動の連関を記述している、すなわち、空間性を考慮している。排水処理(汚濁負荷削減)行動を記述している。非常に単純ではあるが、汚濁物質の蓄積現象を表現している、すなわち、動学的な枠組みとなっている。蓄積した汚濁物質が再び経済主体の活動に及ぼす影響を表現している。次に、地域間、主体間での便益の帰着構造を分析することによって費用負担問題も含めた政策評価を行った。さらに、MPECを定式化し、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて解き、地域、主体毎の汚濁負荷削減量配分を求めた。伊勢湾を対象に数値シミュレーションによる分析を行った結果、効率的な配分を達成するための政策を実施した場合、2,959億円の純便益が生じることがわかった。また、現在立案されている計画の汚濁負荷削減量を課した場合に比べて、社会的純便益が375億円多いことがわかった。

以上のことから、本稿で示したモデルおよび方法が閉鎖性水域における水質改善政策を具体的に検討するツールとして有用であることを明らかにできたと思われる。ただし、分析は定常状態を仮定して行ったため、定常状態に至る到達過程が評価できていないという課題が残されている。今後は、定常状態での分析だけでなく、動学計算による長期的視座からみた政策の検討を試みていきたい。その際、技術開発などにより将来における家計や企業の行動が変化する、すなわち効用関数や生産関数が変化することを踏まえた分析を試みていきたい。また、汚濁発生源(面源も含む)から閉鎖性水域までの流下過程および閉鎖性水域内における汚濁物質収支に関する複雑なメカニズムを解析できるモデルと結合して、より詳細な分析を行いたい。

謝辞：本稿におけるCGEモデルの基本的な枠組みは参考文献12の著者の一人である伊藤匠氏(新潟県庁)の貢献が大きい。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) 環境省：報道発表資料、<http://www.env.go.jp/>。
- 2) 海洋産業研究会：東京湾21世紀構想、鹿島出版会、1987。
- 3) 西条八束編：内湾の環境科学、培風館、1984。
- 4) 例えば、Zhi-Quan Luo. : Mathematical Programs with

- Equilibrium Constraints ,Cambridge University Press ,1996 .
- 5) 岡敏弘：事業系排水負荷削減の費用調査，環境政策の経済学的分析に関する研究報告- ，pp.32-38，滋賀県琵琶湖研究所，1993 .
 - 6) 植田和弘，岡敏弘，新沢秀則：環境政策の経済学，日本評論社，1997 .
 - 7) 新沢秀則：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，1990 .
 - 8) 米田朗，水飽楊四郎：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，1998 .
 - 9) 広瀬史明，水飽楊四郎：霞ヶ浦流域における流入汚染負荷削減のためのシミュレーション分析，地域学研究，Vol.30，No.1，pp.47-64，1999 .
 - 10) 高木朗義，上田孝行，武藤慎一，稲垣貴政，橋本直也：閉鎖性水域における水質改善政策の経済分析，環境システム研究論文集，pp.9-16，1999 .
 - 11) 高野浩一，榊原弘之，岡田憲夫：流域下水道整備事業の費用配分方に関するゲーム理論的考察，土木計画学研究・講演集，No.20(1)，pp.131-134，1997 .
 - 12) 武藤慎一，上田孝行，高木朗義，伊藤匠：自然要素を導入した最適経済成長モデルの開発，岐阜大学工学部研究報告，第50号，pp.15-23，2000 .
 - 13) Johansson, P.-O. : Cost-Benefit Analysis of Environmental Change , Cambridge University Press , pp.32-33 , 1993 .
 - 14) 武藤慎一：環境政策評価への計量厚生分析の適用，岐阜大学学位論文，1999 .
 - 15) 近藤浩治，上田孝行，山田貴久：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.120-121，1997 .
 - 16) 大見明弘：内生的成長論による社会資本整備の影響分析，岐阜大学修士論文，1998 .
 - 17) 森杉壽芳：プロジェクト評価に関する最近の話題，土木計画学研究・論文集，No.7，pp.1-33，1989 .
 - 18) 伊勢湾浄化下水道計画連絡協議会：伊勢湾に関する下水道事業費用効果分析，下水道協会会誌 Vol.136，No.439,pp.40-46，1999 .
 - 19) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム，産業図書，1993 .
 - 20) 経済企画庁経済研究所編：国民経済計算年報，大蔵省印刷局，1997 .
 - 21) 愛知県，岐阜県，三重県：愛知県統計年鑑・岐阜県統計書・三重県統計書，1994 .
 - 22) 高木朗義，大野栄治：水質浄化事業による環境改善便益の計測，環境システム研究，Vol.27，pp.1-8，1999 .

(2001.2.20 受付)

BENEFIT INCIDENCE ANALYSIS OF WATER QUALITY IMPROVEMENT POLICIES AND DISTRIBUTION OF REDUCTION POLLUTANT LOAD IN CLOSED WATER AREA

Akiyoshi TAKAGI, Shinichi MUTO, Taka UEDA and Takamasa INAGAKI

The water quality improvement policies are urgently demanded in closed water areas today. There are, however, some conflicts of interests among economic agents, where application of comprehensive evaluation is required in order to check the feasibility of the policies. In this paper, we build the computable general equilibrium (CGE) model that catches the accumulation of the pollutant load, and analyze the incidence benefits induced by the water quality improvement policies in the closed water area. We formulate the mathematical programming with the equilibrium constraint that is CGE model and with the objective function that is the maximization of the social welfare. We distribute the reduction pollutant load in each regions and in each economic agents for water quality improvement by solving the MPEC with genetic algorithm (GA).