

河川水質改善のための汚濁負荷削減策の 効率的なスケジュール

高木朗義¹・武藤慎一²・上村高大³

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

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

³学生員 岐阜大学大学院工学研究科 博士前期課程 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)

本研究は、水質改善のための汚濁負荷削減策について、長期的な視野から便益と費用を計量し、地域間、主体間の利害関係について評価を行うことによって、水質改善の目標水質を達成するという条件の下で、効率的な汚濁負荷削減策のスケジュールを求めることを試みる。具体的には、社会経済活動を捉えた動的応用一般均衡(Dynamic Computable General Equilibrium: 略して DCGE)モデルを制約条件に持ち、社会的純便益を最大とするような数理最適化問題を定式化し、この問題が複雑な組合せ問題であることを考慮して、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: 略して GA)を用いて近似的に解き、効率的なスケジュールを求めるものである。

Key Word : DCGE(Dynamic Computable General Equilibrium) Model, GA(Genetic Algorithm), Pollutant Load, Water Quality Improvement

1. 背景と目的

河川は、治水、利水としての役割だけでなく、うるおいのある水辺空間や多様な生物の生息・生育環境として重要な場である。このような視点から、1997 年河川法が改正され、河川管理の目的として、「治水」、「利水」に加え、「河川環境の整備と保全」が位置づけられた。特に水質は生態系に影響を及ぼすとともに、人間生活にも影響を及ぼすなど、河川環境を構成する根源的な要素の 1 つであり、その保全あるいは改善は非常に重要である。

水質改善のための汚濁負荷削減策は、施設整備に対する財政的制約や、原因者負担の原則などから長期間を要する。また、環境変化は将来にわたって影響が及ぶため、経済成長を確保しつつ、環境改善を考えていく必要がある。企業や農家、家計の排出汚濁負荷を削減すると河川水質が改善され、魚介類の生育が良好となるため、漁業の生産活動に好影響をもたらすとともに、家計のレクリエーション行動を活発化させ効用を増大させる。一方、工場に対する排水規制は汚濁負荷削減に要する自己費用負担の増大をまねき、生産活動を通じて関連産業に影響を及ぼし、最終的には消費者である家計にその影響が波及する。このため水質改善のための汚濁負荷削減策を実施するには、施策による様々な経済活動への影響を総合的に捉える必要がある。また、上流の主体が発生させた汚濁が下流の主体に影響を及ぼす

ため、地域間、あるいは家計や企業、農家といった主体間の相互関係を配慮した長期的な視点から水質改善の効果を捉え、負担等を決定する必要がある。

近年の環境問題への関心の高まりから、最適成長モデルを用いた持続的成長の研究、議論が多数なされている。例えば Solow¹⁾は持続的成長問題への論理的アプローチを展開し、経済が自然資源の消費または環境質の低下・改良に影響を受けることを説明して、経済成長の計測は国の収入の計測に自然・環境資源を資本ストックとして考慮に入れるべきであると示している。また Xepapadeas²⁾は、伝統的外部不経済論では時間的概念を導入していないため、自然環境と経済の動向を長期的視野で評価、予測することはできないとし、効用関数に汚染ストックを導入し、制約条件では自然浄化作用を考慮した現実に近い動的最適成長モデルの構築を行っている。Hamid³⁾は環境問題に直面しているときの成長経路について、税金と補助金及び生産量規制の政策をどのように組合せたときに、社会的に最も効率的な成長経路であるかを分析している。しかし、これらの研究では、理論フレームが提示され定性的な分析がなされるに留まっている。

このような背景の下、著者らは先行研究として、地域間応用一般均衡モデルを構築し、水質改善の目標水質を達成するという条件の下で、社会的純便益(Social Net Benefit: 略して SNB)を最大とするような数理最適化問題を定式化し、

遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm:略してGA)を用いて、地域間、主体間における最適な汚濁負荷削減量の配分を算定している⁴⁾。しかし、ここでは静学モデルの構築に留まっており、時間を追った政策提案が行われていない。また、時間を追った政策検討に必要な評価指標について、時間概念を考慮した便益評価指標をいくつか示している⁵⁾。

本研究では、長期的な視野から地域別、主体別の便益と費用を計量し、地域間、主体間の利害関係について評価を行うことによって、水質改善の目標水質を達成するという条件の下で、地域間、主体間における効率的な汚濁負荷削減策のスケジュールを求めることを試みる。具体的には、社会経済活動を捉えた動学的応用一般均衡(Dynamic Computable General Equilibrium:略してDCGE)モデルを制約条件とし、社会的純便益を最大とするような数理最適化問題(これは、均衡制約付数理最適化問題(Mathematical Programming with Equilibrium Constraint:略してMPECと呼ばれている)を定式化する。この問題が複雑な組合せ問題であることを考慮して、GAを用いて近似的に解き、求めた結果について考察を行う。

2. 応用一般均衡モデルの構築

(1) モデルの前提条件

本研究において構築したモデルの概念図を図-1に示す。モデル構築における基本的な前提条件を以下に示す。

- ①社会は*i*地域から構成され、各地域に家計、企業、および政府が存在する。
- ②本モデルでは、産業として、工業、農業、商業、漁業、排水処理産業を想定する。
- ③家計は、水辺でのレクリエーション活動時に水質の影響を受け、排水により水質に影響を及ぼす。
- ④工業、農業、商業は、排水により水質に影響を及ぼす。また、漁業は水質の影響を受ける。
- ⑤家計の排水処理(汚濁負荷削減)は、政府が一括して行う。工業・農業・商業は排水を自己処理する。
- ⑥各主体は立地選択を行わないものとする。
- ⑦各地域の主体は同じ行動をとるとして、その平均的な行動をモデル化する。

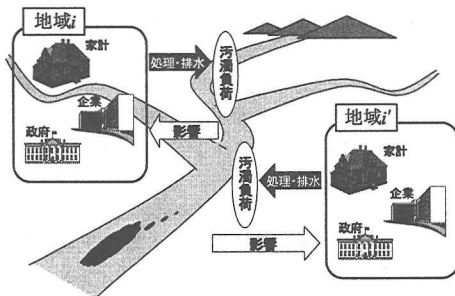


図-1 モデルの概念図

- ⑦産業の利潤は全ての家計に資本配分として均等に配分されるものとする。

(2) 動学化の概念

動学モデルの説明を行うには、まず、ストックとフローの概念を明らかにしておく必要がある。ストックとは過去から蓄積された資本・資産、フローとは一定の期間内に動く財貨の流量と定義される⁶⁾。また、ストックとフローの関係としては、ストックはフローの源泉になると考えられている。

本モデルにおける動学化の基本的な構造としては、家計の貯蓄決定行動を通して貯蓄が求められ、その貯蓄分が資本ストックの増加分になると考えられる(図-2)。そのストックの蓄積が次期に新たなフローを生み、消費者がそれ享受する。もし、新たなフローから得られる効用が低かったならば人々は次の期の貯蓄を減らすであろうし、効用が高ければ貯蓄を増やすであろう。このようにして、再び貯蓄量が決定され、それが資本ストックへとまわされる。この流れが、動学モデルの基本構造である⁹⁾。

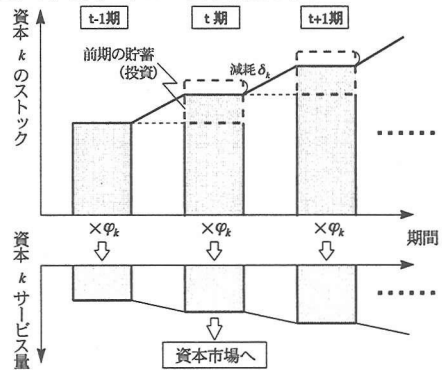


図-2 資本ストック蓄積と資本サービス供給量の変化

(3) 家計の行動モデル

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、家計は排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¹⁰⁾を用いて定式化する。

【*R* サービス生産行動】

レクリエーション消費に必要な時間を投入して *R* サービスを生産する。行動モデルは、*R* 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として定式化する。

$$c_R^i(t) \cdot u_R^i(t) = \min_{t_R^i} w^i(t) \cdot t_R^i(t) \quad (1.a)$$

$$s.t. \quad u_R^i(t) = \eta_R^i \cdot t_R^i(t) \quad (1.b)$$

ここで、 t : 時刻、 i : 地域を表す添字、 u_R : R サービス生産量、 w : 賃金率、 t_R : R に関わる時間投入量、 c_R : R サービスの単位費用、 η_R : 比率パラメータ。

【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条件の下で主観的割引率 ρ 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。

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

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

$$\Omega^i(t) = L^i(t) + s^i(t) + t_R^i(t) \quad (2.c)$$

$$s(t) = \frac{1}{X^i(t)} (1 - \varphi^i) \beta \sum_{j=1}^n x_h^j(t) \quad (2.d)$$

ここで、 x_j^i : 地域 i 産業 j の生産財の消費量 ($j = M, A, C, F$ (M:工業, A:農業, C:商業, F:漁業)), s : 余暇消費、 S : 地域 i における河川水質、 x_h^i : 排水量、 ρ : 主観的割引率、 p_j : j 財の価格、 p_h^i : 排水処理価格、 Ω : 総利用可能時間、 L : 労働時間、 K : 資本ストック、 r : 資本の実質利子率、 γ_K : 資本ストックの減耗率、 τ : 一括税、 $\dot{K}$: 時点 t における資本ストックの増加分、 X : 河川流量、 β : 排出汚濁負荷率、 φ : 浄化率。

式(2.a)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。

$$U^i = \left[\sum_j \left\{ \alpha_j^i \right\}^\sigma \left\{ x_j^i(t) \right\}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \left\{ \alpha_{u_R}^i \right\}^\sigma \left\{ u_R^i(t) \right\}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \left\{ \alpha_{x_h}^i \right\}^\sigma \left\{ x_h^i(t) \right\}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \left\{ \alpha_s^i \right\}^\sigma \left\{ s^i(t) \right\}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right] + u_s^i(s) \quad (3)$$

ここで、 σ : 各消費財の間の代替弾力性、 u_s : 河川水質に対する存在価値、 $\alpha_j, \alpha_{u_R}, \alpha_{x_h}, \alpha_s$: 分配パラメータ。

式(2.b)は資本蓄積方程式であるが、賃金所得、資本所得から、一括税を引いた実所得から、各財の消費と余暇消費を差し引いた額が貯蓄にまわされ、資本蓄積を生むことを表している。式(2.c)は時間制約式である。式(2d)は地域 i より上流に位置する地域 $i(=1 \sim i-1)$ および地域 i から排出される汚濁負荷量が各地域で行われる人工的な排水処理や河川における流下過程で自然浄化によって汚濁負荷量が減少することを示すとともに、汚濁負荷量が地域 i の地点に到達した場合において河川流量中に占める割合、すなわち水質を示している。

(4) 河川水質に影響を及ぼす産業の行動モデル

ある時点 t において、労働と資本からなる生産要素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。この生産行動を 2 段階の最適化問題として定式化する¹¹⁾。

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。

$$C_j^i(t) = \min_{PC_j^i, x_j^i} [c_j^i(t)PC_j^i(t) + \delta_j^i(t)(q_j^i(t) - Q_j^i(t))x_j^i(t)] \quad (4.a)$$

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

ここで、 j : 産業種を表す添字 ($j = M, A, C$ (M:工業, A:農業, C:商業)), C_j : 生産費用、 PC_j : 合成生産要素投入量、 x_j^i : 排水量、 c_j : 合成生産要素の単位費用、 q_j : 単位排水量当たりの発生汚濁負荷量、 Q_j : 単位排水量当たりの排出汚濁負荷量 (排出基準値)、 δ_j : 汚濁負荷削減に要する単位費用 (汚濁負荷削減技術力)、 Y_j : 生産量、 a_j^0 : 合成生産要素比率、 a_j^w : 排水量比率。

式(4.a)の第 2 項が排水処理費用を表す。このうち $x_j^i(t)$ の係数は、その単位費用を表しており、以下のように置く。

$$p_j^i(t) = \delta_j^i(t)(q_j^i(t) - Q_j^i(t)) \quad (5)$$

ここで、 p_j^i : 排水処理の単位費用。

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する。

$$c_j^i(t) = \min_{L_j^i, K_j^i} [w^i(t)L_j^i(t) + r(t)K_j^i(t)] \quad (6.a)$$

$$s.t. \quad PC_j^i(t) = \eta_j^i L_j^i(t)^{\alpha_j^L} K_j^i(t)^{\alpha_j^K} = 1 \quad (6.b)$$

ここで、 L_j : 労働投入量、 K_j : 資本投入量、 w : 内陸地域の賃金率、 η_j : 比率パラメータ、 α_j^L, α_j^K : 配分パラメータ ($\alpha_j^L + \alpha_j^K = 1$)。

排水処理は、排水処理産業が生産する排水処理財を購入し、それを投入して行うものとする。その結果、以下のバランス式が成立する。

$$p_j^i(t)x_j^i(t) = p_d^i(t)x_j^d(t) \quad (7)$$

ここで、 p_d : 排水処理財の価格、 x_j^d : 排水処理財の消費量。

(5) 河川水質の影響を受ける産業の行動モデル

生産活動において河川水質の影響を直接受ける。この行動モデルは、労働と資本からなる生産要素の投入行動のみによって財の生産を行う。これらの行動を費用最小化問題として定式化する。なお、生産関数は Cobb-Douglas 型技術を用いて特定化する。

$$C_F^i(t) = \min_{L_F^i, K_F^i} [w^i(t)L_F^i(t) + r(t)K_F^i(t)] \quad (8.a)$$

$$s.t. \quad Y_F^i(t) = \eta_F^i (S^i)^{\alpha_F^L} L_F^i(t)^{\alpha_F^L} K_F^i(t)^{\alpha_F^K} \quad (8.b)$$

ここで、 F : 漁業を表す添字、 C_F : 生産費用、 L_F : 労働投入量、 K_F : 資本投入量、 Y_F : 生産量、 η_F : 比率パラメータ、 α_F^L, α_F^K :

配分パラメータ ($\alpha_F^L + \alpha_F^K = 1$) .

(6) 排水処理産業の行動モデル

ある時点 t において、労働と資本を投入し、排水処理財を生産する。すなわち、河川水質に影響を及ぼす産業の行動モデルの定式化での合成財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。

$$C_d^i(t) = \min_{L_d^i, K_d^i} [w^i(t)L_d^i(t) + r(t)K_d^i(t)] \quad (9.a)$$

$$s.t. \quad Y_d^i(t) = \eta_d^i L_d^i(t)^{\alpha_d^L} K_d^i(t)^{\alpha_d^K} \quad (9.b)$$

ここで、 d : 排水処理産業を表す添字、 C_d : 生産費用、 L_d : 労働投入量、 K_d : 資本投入量、 Y_d : 生産量、 η_d : 比率パラメータ、 α_d^L, α_d^K : 配分パラメータ ($\alpha_d^L + \alpha_d^K = 1$) .

(7) 政府の行動モデル

家計からの排水に対して排水処理(汚濁負荷削減)を行う。家計から徴収された費用を元に排水処理を行い、それには排水処理財が投入されるものとする。その結果、以下の財政均衡式が成り立つ。

$$p_h^m(t)x_h^m(t) = p_d^i(t)x_G^d(t) \quad (10)$$

ここで、 x_G^d : 政府の排水処理財投入量

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。排水処理の単位費用は河川水質に影響を及ぼす産業と同様に以下のように表される。

$$p_h^m = \delta_i^i(t)(q_h^i(t) - Q_h^i(t)) \quad (11)$$

ここで、 δ_i^i : 家計の汚濁負荷削減単位費用(排水処理技術力)、 q_h^i : 家計からの単位水量当たりの発生汚濁賦課量、 Q_h^i : 家計からの排出汚濁負荷量(排出基準)。

(8) 均衡条件

すべての時点 t において地域ごとに労働市場、資本市場、財市場、排水処理財市場という 4 つの市場が存在し、そこでは需要と供給の均衡がとれているとする。

$$\cdot \text{労働市場: } \sum_j L_j^i(t) + L_d^i(t) = L_h^i(t) \quad (12.a)$$

$$\cdot \text{資本市場: } \sum_j K_j^i(t) + K_d^i(t) = K_h^i(t) \quad (12.b)$$

$$\cdot \text{財市場: } x_j^i(t) = Y_j^i(t) \quad (12.c)$$

$$\cdot \text{排水処理財市場: } \sum_j x_j^{id}(t) + x_G^{id}(t) = Y_d^i(t) \quad (12.d)$$

3. 効率的スケジュール決定問題の定式化

(1) 評価指標

本研究では、施策による効果がすべて家計に帰着するという先行研究¹²⁾の結果をふまえて、家計の便益を評価指標の基礎とする。その指標は、等価的偏差 EV の概念を拡張し

たものを用いる。本研究では、時間的に変化する効用水準を用いるため、図-3 に示すように施策を実施せず、水質が悪化した場合の点 A と、施策を実施して水質が改善した場合の点 B ついて with and without 分析を行うこととなる。今 EV を汚濁負荷削減策が実施された場合の各時点の効用水準 $V^w(t)$ を維持するという条件の下で汚濁負荷削減策が実施されなかった場合の各時点の効用水準 $V^u(t) \rightarrow V^w(t)$ の変化をあきらめるために家計が必要と考える最小補償額とする。この便益は、期数分だけ計測され、一般的には同じ値をとらない。各期の便益を現在価値に換算し、足し合わせたものが汚濁負荷削減策による便益となる¹³⁾。これは以下のように定式化できる。

$$V^i(p_j^{iA}(t), w^i(t), c_R^i(t), p_h^{iA}(t), S^{iA}(t), I_h^{iA}(t) + ev^i(t)) = V^w(t) \quad (13.a)$$

$$EV^i = \int_0^T ev^i(t) \exp(-\rho t) dt \quad (13.b)$$

ここで、 $I(t)$: 所得、 $ev(t)$: 各時点の最小補償額、 EV : 一世帯当りの最小補償額、 AB : 汚濁負荷削減策なし、ありを表す添字。

社会的純便益は、各地域における家計の EV^i を合計したものであり、以下のように表される。

$$SNB = \sum_i N^i \cdot EV^i \quad (14)$$

ここで、 N^i : 地域 i の世帯数

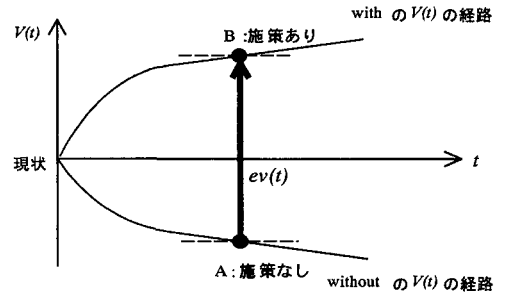


図-3 便益評価指標の概念図

(2) 数理最適化問題

本研究では、目標水質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に地域、主体、時間毎の汚濁負荷削減量配分を求める数理最適化問題を考える。このとき、効率的な汚濁負荷削減スケジュールの決定問題は次式のように表される。

$$\max_{Q_j^i(t)} SNB \quad (15)$$

4. 条件設定

(1) 評価対象とする施策

本研究では、長良川における水質改善のための汚濁負荷削減策を対象として分析を行う。長良川では 1992 年に 21 世紀における長良川流域のあるべき姿として「長良川ビジ

ョン」を策定し、その一つの柱として「日本一の清流づくり」を掲げている¹³⁾。この中では目標水質が、本川(BOD1mg/l、都市河川 BOD5mg/l)とされている。現状では下流域の本支川において、この目標水質を上まわっている(図-4 参照)。

本研究では、この目標水質を達成するための汚濁負荷削減策について、スケジュールの検討を行う。ただし、面源対策については、費用や効果など不明な点が多いことから取り扱わないこととする。

(2) 対象地域と区分

汚濁負荷削減策がもたらす効果や費用負担は、上流や下流といった地域毎に大きく異なる。長良川ビジョン¹³⁾では、流域を上流域、中流域、下流域の3地域に区分している。ここでは、さらに①主な支川における汚濁負荷削減策の影響の把握、②下水道普及率に代表される汚濁負荷削減の進捗状況の違い、③産業構造の違い、④地方自治体の行政連携(主に郡)を考慮して長良川流域を以下に示す6地域に分類した。

- ・郡上地域：高鷲村、白鳥町、明宝村、大和町、八幡町、美並村
- ・美濃地域：美濃市、板取村、洞戸村、美山町、武芸川町
- ・関地域：関市、上之保村、武儀町、美濃加茂市、富加町
- ・岐阜地域：岐阜市、伊自良村、高富町
- ・羽島地域：羽島市、各務原市、岐南町、笠松町、柳津町
- ・本巣地域：本巣町、糸貫町、真正町、北方町、巣南町、穂積町

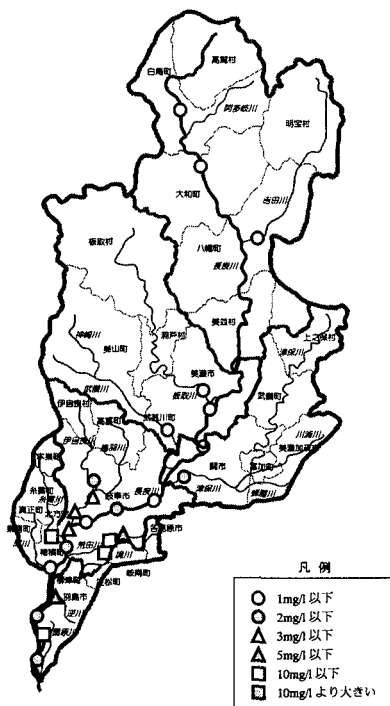


図-4 地域区分と現況水質

(3) 対象期間

1995 年を基準年とし、長良川ビジョンの目標年次である 2010 年までの数値シミュレーションを行う。なお、対象期間を限定することにより、終端時点の条件を求めることが必要となる。この点に関しては、宮田¹⁴⁾が提案している解法を参考にして計算を行う。

(4) 汚濁負荷削減量

長良川ビジョンの目標水質(本川 BOD1mg/l、都市河川 BOD5mg/l)を上まわっている基準点は、本川では長良橋、穂積大橋、南濃大橋、東海大橋の4地点、都市河川では境川、糸貫川、桑原川の3地点である。まず、これらの基準点において目標水質が達成可能な排出汚濁負荷量を求める¹⁵⁾。本研究では、まず先行研究⁴⁾にて示した手法で 2010 年における各地域、各主体における汚濁負荷削減量の最適配分量を計測する。次に、その地域、主体毎の汚濁負荷削減量を前提条件として、経済効率的な汚濁負荷削減スケジュールを決定するという手順をとる。

(5) 遺伝的アルゴリズム¹⁶⁾

目標水質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汚濁負荷削減量のスケジュールを求めるためには、複雑な数値最適化問題を解く必要がある。本研究では比較的求める解の個数は少ないものの、制約条件が CGE モデルとなっているため、解析的に解くのは非常に困難である。そこで、本研究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、式(15)における社会的純便益最大化問題に対しGA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用いる。GA の計算フローを図-5 に示す。

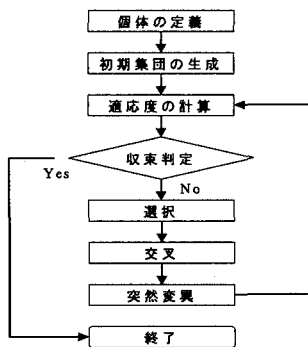


図-5 遺伝的アルゴリズム(GA)の計算フロー

本研究では、各地域の家計、工業、商業、農業の汚濁負荷削減率を1つの個体とする。ただし、総量を配分する問題であるため、未知数は1つ少なくてもよいことから 2010 年の汚濁負荷削減率を含めないこととする。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、2010 年を除く 15 年 6 地域 4 主体を 1440 桁の数字で表現する。すな

わち、1つの個体の長さは1440ビットになる。コード化の方法は図-6に示すとおりである。コード化して生成した個体をCGEモデル内で計算し、SNBを算出し、それを適応度として用いる。

パターン	遺伝子型(コード)	削減率
1	0 0 0 0	-0%
2	0 0 0 1	-1%
3	0 0 1 0	-2%
4	0 0 1 1	-3%
5	0 1 0 0	-4%
6	0 1 0 1	-5%
7	0 1 1 0	-6%
8	0 1 1 1	-7%
9	1 0 0 0	-8%
10	1 0 0 1	-9%
11	1 0 1 0	-10%
12	1 0 1 1	-11%
13	1 1 0 0	-12%
14	1 1 0 1	-13%
15	1 1 1 0	-14%
16	1 1 1 1	-15%

図-6 コード化の方法

(6) 施策による効果の捉え方

汚濁負荷削減策の直接的な効果は主に以下の3つに分類される。

- a) 汚濁負荷削減費用の増大
- b) 河川水質の影響を受ける産業の直接的生産増大
- c) 家計のレクリエーション便益の増大

また、産業に対する排水規制による汚濁負荷削減費用の増大や、河川水質の向上に伴う直接的生産増大は、生産活動を通じて関連産業に影響を及ぼし、最終的には市場価格の変化を介して消費者である家計にまでその影響が波及する。

a) 汚濁負荷削減費用の増大

汚濁負荷削減策を実施すると、各主体に汚濁負荷削減が課せられ排水処理の単位費用が上昇する。河川水質に影響を及ぼす産業では、汚濁負荷削減策により排出基準値が厳しくなると、式(5)の排出汚濁負荷量 $Q_i(t)$ が少なくなるため、排水処理の単位費用が上昇する。産業では自ら排水処理(汚濁負荷削減)を行うため、排水処理費用の増大に伴って生産に必要な労働や資本が投入できなくなるという損失として捉える。家計についても同様に、式(11)に示した排水処理の単位費用が上昇するため、必要な財やサービスが購入できなくなるとい損失として捉える。

b) 河川水質の影響を受ける産業の直接的生産増大

河川水質の影響を受ける産業は、生産活動の際に河川水質 S' の影響を受ける。本研究では、河川水質の影響を受ける産業として漁業を想定している。すなわち、汚濁負荷削減策により、河川水質 S' が向上することで、魚介類の生育が良好になるため、生産活動に好影響を与えられ考えられる。この効果は、河川水質 S' の向上に伴う生産関数(式(8.b))中の比率パラメータ $\eta'_e(S')$ が向上することで、直接的生産増大として捉えられる。

c) 家計のレクリエーション便益の増大

家計は、水辺でのレクリエーション活動の際に河川水質 S' の影響を受ける。すなわち、河川水質 S' が向上することで、レクリエーション活動が快適になり、レクリエーション施設を利用する回数や、滞在時間が増大すると考えられる。この効果は、河川水質 S' の向上に伴う効用(式(2.a))の増大分、すなわちレクリエーション便益の増大として捉えられる。

(7) パラメータ設定

数値シミュレーションを行うため、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した。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¹³⁾。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。これは、暗に企業の生産技術、家計の選好が時間的に変化しないことを想定しているものである。しかし、技術革新などをモデルに組み入れ、将来を予測することは不確定な度合いが大きすぎる。すなわち、パラメータを固定したシミュレーション結果と比較した場合、結果に対しての信頼性が低くなると思われる。また、対象期間である15年は、企業の生産技術等が一定のままで考えられる最長の期間であるとも思われる。そのため、ここでは計算の簡便化も含め上で述べたようなキャリブレーション手法を用いている。

本研究では、社会経済データおよび排水量は、岐阜県が発行している各種統計書^{17)・20)}から抽出して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設定した。

家計のデータセットを表-1に示すとともに、パラメータを表-2に示す。また同様に、産業(工業、農業、商業、漁業)のデータセットを表-3に、パラメータを表-4に示す。

表-1 家計のデータセット

	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣
工業財 [100万円]	136,392	146,795	440,235	1,031,930	660,456	241,546
農業財 [100万円]	4,512	1,444	5,914	13,107	7,783	7,795
商業財 [100万円]	39,101	22,027	123,321	885,728	280,126	69,263
漁業財 [100万円]	745	659	486	773	822	294
Rサービス [100万円]	10,831	10,163	34,688	121,356	59,174	19,399
排水量 [100万m ³]	3	4	12	33	26	8
余暇消費 [100万円]	64	57	183	643	326	101
労働時間 [100万円]	46	41	131	460	233	72
所得 [100万円]	263,459	247,178	839,081	2,889,650	1,423,032	470,861
貯蓄 [100万円]	26,557	24,916	84,580	291,280	143,443	47,463
資本減耗 [100万円]	323	303	1,029	3,544	1,746	578

表-2 家計のパラメータ

		郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣
比率パラメータ	η_p	1.864	1.952	2.089	2.076	1.997	2.118
代替弾力性	σ	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800	0.800
分配パラメータ	α_H	0.592	0.671	0.607	0.414	0.539	0.595
	α_1	0.020	0.007	0.008	0.005	0.006	0.019
	α_c	0.165	0.102	0.167	0.357	0.234	0.169
	α_F	0.004	0.002	0.001	0.000	0.001	0.001
	$\alpha_{S'}$	0.063	0.063	0.064	0.065	0.064	0.063
	$\alpha_{S''}$	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	$\alpha_{S'}$	0.154	0.153	0.152	0.156	0.155	0.151

表-3 産業のデータセット

工業	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣
労働投入量 [100万円]	60,101	66,050	207,838	484,038	312,275	114,460
資本投入量 [100万円]	37,271	39,567	140,845	301,439	201,569	66,551
排水量 [100m³]	11	10	31	110	56	17
生産額 [100万円]	101,785	108,056	350,026	788,605	525,862	181,751
農業	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣
労働投入量 [100万円]	1,058	342	1,463	3,020	1,792	1,889
資本投入量 [100万円]	2,283	748	3,071	6,802	3,936	3,929
排水量 [100m³]	49	13	75	147	100	78
生産額 [100万円]	3,442	1,111	4,636	10,026	5,731	5,820
商業	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣
労働投入量 [100万円]	19,096	11,834	60,991	408,757	151,971	35,532
資本投入量 [100万円]	9,211	4,554	29,147	251,536	62,096	15,927
排水量 [100m³]	6	4	15	76	30	9
生産額 [100万円]	28,434	16,460	90,538	663,230	215,019	51,689
漁業	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣
労働投入量 [100万円]	253	232	170	248	251	108
資本投入量 [100万円]	295	257	193	333	364	111
生産額 [100万円]	549	489	363	581	615	219

表-4 産業のパラメータ

工業	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣
比率パラメータ η_{ij}	226	232	243	242	236	245
分配パラメータ α_{ij}^1	0.617	0.625	0.596	0.616	0.608	0.632
α_{ij}^2	0.383	0.375	0.404	0.384	0.392	0.368
生産要素比率 α_{ij}^3	0.9959	0.9959	0.9959	0.9959	0.9959	0.9959
排水量比率 α_{ij}^4	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
農業	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣
比率パラメータ η_{ij}	19	19	19	19	19	20
分配パラメータ α_{ij}^1	0.317	0.314	0.323	0.307	0.313	0.325
α_{ij}^2	0.683	0.686	0.677	0.693	0.687	0.675
生産要素比率 α_{ij}^3	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996
排水量比率 α_{ij}^4	0.0041	0.0025	0.0069	0.0050	0.0071	0.0034
商業	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣
比率パラメータ η_{ij}	383	396	415	414	402	420
分配パラメータ α_{ij}^1	0.67	0.72	0.68	0.62	0.71	0.69
α_{ij}^2	0.33	0.28	0.32	0.38	0.29	0.31
生産要素比率 α_{ij}^3	0.9956	0.9956	0.9956	0.9956	0.9956	0.9956
排水量比率 α_{ij}^4	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0002
漁業	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣
比率パラメータ η_{ij}	649	389	363	581	615	219
分配パラメータ α_{ij}^1	0.462	0.474	0.468	0.426	0.407	0.492
α_{ij}^2	0.538	0.526	0.532	0.574	0.593	0.508

5. 汚濁負荷削減のスケジュール

(1) 効率的な施策スケジュール

動学モデルにて分析を行う場合、汚濁負荷削減策が実施されない場合(without)、経済成長に伴い家計、産業などからの排出汚濁負荷量が年々増大する。本研究では、排出汚濁負荷量の目標値を満足すれば目標水質が達成可能であると、施策を実施しなかった場合における2010年の排出汚濁負荷量を算出し、これから施策を実行した場合(with)における排出汚濁負荷量を差し引くことにより、総削減量を求めた。これを基に、先行研究⁴⁾の手法を用いて2010年における地域、主体毎の汚濁負荷削減量配分を求めた。各地域、各主体における汚濁負荷削減量の最適配分量を表-5に示す。

次に、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて、2010年に目標水質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汚濁負荷削減スケジュールを求めた。本モデルにより求めた各主体の汚濁負荷削減スケジュールを図-7～10に示すとともに、地域毎の削減スケジュールを図-11に、長良川流域全体での削減スケジュールと、総便益の関係を図-12に示す。

汚濁負荷削減スケジュールについては、各地域、各主体に共通した傾向が見られ、初期付近が最も高い削減率となっており、年次を追うごとに削減率が下がっていく。このことについて考えてみる。産業は汚濁負荷削減を自ら行うため、汚濁負荷削減により財価格は上昇するものの、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、排水処理産業の生産増大につながり、市場を介することで賃金率の上昇をまねく。さらに、図-13は、資本蓄積の変化を示した図であるが、withの場合の経路がwithoutの経路を下回っている。これより、家計は将来消費(貯蓄)を減らして、現在消費を選択していることがわかる。現在消費量の増大は、産業の生産量の増大をまねき、市場を介して賃金率の上昇という形で家計の所得も増大する。所得が増大することで、汚濁負荷削減費用の生産量への影響はそれほど受けにくいと考えられる。しかし、現在消費の拡大は、将来消費を犠牲にすることであり、資本蓄積の成長鈍化につながっているため、汚濁負荷削減策の早急な実施が必要であるとも考えられる。

地域毎にみた汚濁負荷削減量では、羽島地域と、本巣地域が高い削減量となっているが、このことは、下水道普及率が低い地域で汚濁負荷削減対策を行うことが経済効率的事であることを示していると考えられる。

表-5 地域、主体別の汚濁負荷量

主体\地域	郡上	美濃	関	岐阜	羽島	本巣
家計	without	2,425	2,046	1,656	6,329	6,805
	with	1,698	1,228	1,076	3,481	1,361
	削減量	728	818	580	2,848	5,444
	削減率	30%	40%	35%	45%	80%
工業	without	135	1,322	247	801	2,644
	with	101	727	173	561	1,454
	削減量	34	595	74	240	1,190
	削減率	25%	45%	30%	30%	45%
商業	without	549	400	283	1,090	1,123
	with	357	140	99	654	505
	削減量	192	260	184	436	618
	削減率	35%	65%	65%	40%	55%
農業	without	416	93	554	360	220
	with	270	42	166	72	44
	削減量	145	51	388	288	176
	削減率	35%	55%	70%	80%	80%

単位：負荷量(t/日)

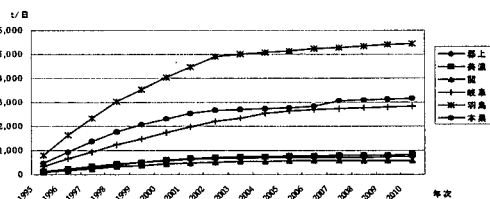


図-7 家計の汚濁負荷削減スケジュール

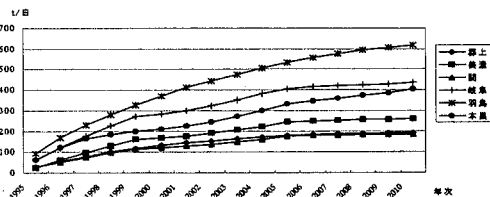


図-8 工業の汚濁負荷削減スケジュール

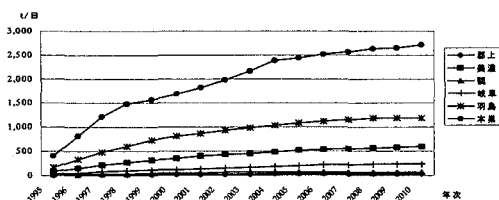


図-9 商業の汚濁負荷削減スケジュール

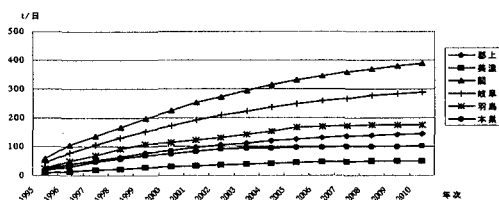


図-10 農業の汚濁負荷削減スケジュール

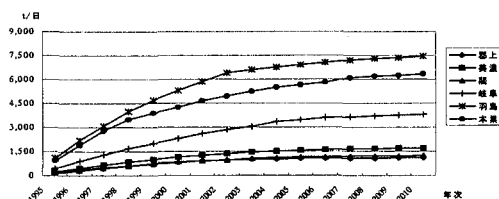


図-11 地域毎にみた汚濁負荷削減スケジュール

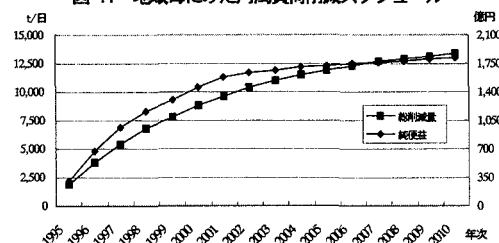


図-12 流域全体の汚濁負荷削減スケジュールと総便益

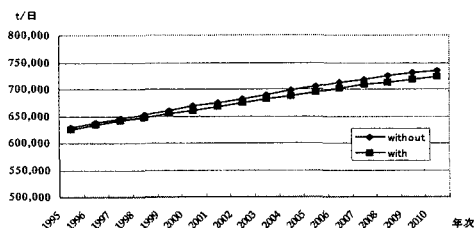


図-13 資本蓄積の変化

表-6 流域全体の便益帰着構成表

	家計	工業	農業	漁業	商業	排水処理 産業	政府	合計
汚濁負荷削減費用	-6,741	-3,596	-15		-2,080		78	-12,354
財権増強効果	-15,355	9,581	120	-199	5,807	124	-78	0
貸金増強効果	9,941	-5,985	-105	0	-3,727	-124		0
直接的生産増大				199				199
レクリエーション便益	37,189							37,189
合計	25,034	0	0	0	0	0	0	25,034

(単位: 億円)

(2) 便益帰着構成表

表-6 は、各地域において、各主体がどのような費用や便益をどれくらい負担、享受するかを整理した表で、便益帰着構成表と呼ばれている。

便益帰着構成表の各列には関係主体が列挙されている。したがって、列方向に見ることにより、主体毎に、どのような受益があり、どのような負担を行っているかを把握することができ、公平性の問題を検討する際の有益な情報となる。各行には便益の項目が列挙されている。行方向の便益の小計に着目すると、ゼロになっている項目が見られる。これらの項目の便益は主体間においてキャンセルアウト(相殺)されていることを示している。したがって、漁業の直接的な生産増大と水辺でのレクリエーションが快適になることに伴うレクリエーション便益から汚濁負荷削減費用を差し引いたものが社会的純便益となる。

便益帰着構成表に基づいて考察を行う。

① 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、産業は損失が生じている。この損失は、企業が排水処理(汚濁負荷削減)にかかる費用である。家計の場合も同様に、汚濁負荷削減により、損失が発生している。汚濁負荷削減策に要する費用は、約1.2兆円である。

② 財変化・賃金率変化

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、これらは汚濁負荷削減策の社会的純便益に影響を及ぼさない。

③ 直接的生産増大

漁業は、河川水質が向上することにより財の生産性が高まる。その直接的な生産増大分として、199億円の便益を受ける。

④ レクリエーション便益

長良川の水質が向上したことにより、レクリエーション活動が快適になり、家計は約3.7兆円の便益を享受する。以上から、施策対象期間15年間で汚濁負荷削減策による総便益は約3.7兆円、総費用は約1.2兆円であるため、社会的純便益は約2.5兆円となった。

6. おわりに

本研究では、河川水質改善のための汚濁負荷削減策を長期的な視野から検討するため、動学的応用一般均衡モデルを構築し、長良川を対象に汚濁負荷削減スケジュールを求めた。

今後の課題としては、今回の数値シミュレーションでは、地域毎に市場が閉じているため、今後は地域間での財やサービスのやり取りをモデルに組み込んでいく必要がある。

【参考文献】

- 1) Solow.R : An Almost Practical Step toward Sustainability, 1992.

- 2) A.Xepapadeas : *Advanced Principles in Environment Policy*, Edward Elgar Publishing, 1997.
- 3) Hamid Mohtadi : *Environment, growth, and optimal policy design*, *journal of public economics* , pp.119-140, 1996
- 4) 高木朗義, 武藤慎一, 上村高大 : SCGE モデルによる河川の水質改善政策評価に基づいた最適汚濁負荷削減量の算定, 河川技術に関する論文集, Vol.7, pp.435-440, 2001.
- 5) 高木朗義, 武藤慎一, 上村高大 : 時間概念を考慮した水質改善政策の便益評価, 土木計画学研究・講演集 23(1), pp.215-218, 2000.
- 6) 中込正樹 : 一步先をいく経済学入門 マクロ編, 友斐閣, 1995.
- 7) 藤田宏二 : 経済理論と経済循環, 嵯峨野書院, 1989.
- 8) 岩井克人・伊藤元重 : 現代の経済理論, 東京大学出版会, 1994.
- 9) 中島隆信, 吉岡完治 : 実証経済分析の基礎, 慶応義塾大学出版会, 1997.
- 10) Johansson.-O. : *Cost-Benefit Analysis of Environmental Change*, Cambridge University Press, pp.32-33, 1993.
- 11) 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.
- 12) 高木朗義, 上田孝行, 武藤慎一・稲垣貴政 : 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, No.27, pp.9-16, 1999.
- 13) 岐阜県 : 長良川ビジョンアクションプログラム～日本一の清流づくり～, 1999.
- 14) 宮田護 : 廃棄物対策の評価, 応用一版均衡モデルの公共投資への適用, 土木計画学ワンデーセミナーシリーズ 15, pp.98-113, 1998.
- 15) (財)日本下水道協会 : 流域別下水道整備総合計画調査 指針と解説, 1996.
- 16) 北野宏明 : 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993.
- 17) 岐阜県統計調査課 : 平成 7 年 岐阜県産業連関表, 岐阜県統計調査課ホームページ.
- 18) 岐阜県知事公室統計調査課編 : 平成 11 年 岐阜県統計書, 岐阜県・岐阜県統計協会, 2000.
- 19) 東海農政局岐阜統計情報事務諸編 : 平成 10～11 年 岐阜農林水産統計年報, 岐阜農林統計協会, 1999.
- 20) 岐阜県の市民村民所得 : 平成 5 年 岐阜県企画部統計調査課, 1996.

EFFICIENT SCHEDULE OF REDUCED POLLUTANT LOAD COUNTERMEASURES FOR WATER QUALITY IMPROVEMENT

Akiyoshi TAKAGI¹, Shinichi MUTOH² and Takahiro KAMIMURA³

The water quality improvement in a river takes long time, because of budget constrain and the conflicts of interest among economic agents. In this paper, we build the Dynamic Computable General Equilibrium (DCGE) model that can describe the behavior of economic agents, and analyze the incidence benefits induced by the reduced pollutant load countermeasures for water quality improvement. We formulate the mathematical programming that the objective function is the maximization of social net benefit and the constraint is the DCGE model. We calculated the efficient schedule of reduced pollutant load countermeasures by solving the mathematical programming with genetic algorithm (GA).