

## 時間概念を考慮した水質改善政策の便益評価\*

Dynamic Benefit Evaluation of the water quality improvement\*

上村高大\*\*, 高木朗義\*\*\*, 武藤慎一\*\*\*\*

By Takahiro KAMIMURA\*\*, Akiyoshi TAKAGI\*\*\*, Shuichi MUTO\*\*\*\*

### 1. 背景と目的

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挙げられている。湖沼水域には、富栄養化が進んだ結果、アオコ等が発生し、異臭、水道等のかび臭等の問題が生じているところがある。都市部を流れる河川には水質が悪いまま推移しているものも多い。農村部においては生活排水による河川や農業用排水路等の水質悪化が問題となっている。これらの現象の1つの共通点としては、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が存在することである<sup>1)</sup>。そのため、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り、その場合には、地域間、主体間の効果と費用負担の問題を考慮した水質改善政策の総合的な政策評価が必要となってくる。

これまでにも、水質改善の政策評価に関する研究は数多くある<sup>2)</sup>。著者らも、本研究の先行研究<sup>3)</sup>として、一般均衡モデルに依拠した動学モデルを構築しているが、その問題を解く際には定常状態を仮定しているため、時間を追った評価はできていない。

本研究では、動学的一般均衡モデルを構築することにより、時間概念を考慮した水質改善政策の便益評価を行うとともに、政策の最適スケジュール検討までも可能にすることを最終目標とし、ここではその際に必要となる動学的な便益定義をいくつかを示した。

### 2. 動学的地域間一般均衡モデルの構築

本研究で構築したモデルの特徴としては以下の4点が挙げられる。

閉鎖性水域流域における経済主体活動の連関の記述および排水処理(汚濁負荷削減)行動の記述。また、排水処理行動の後排出される汚濁物質の河川への流出から閉鎖性水域への蓄積の表現。さらに、汚濁物質の蓄積が再び経済主体活動へ及ぼす影響の記述が挙げられる。図-1にモデルの概念図を示す。

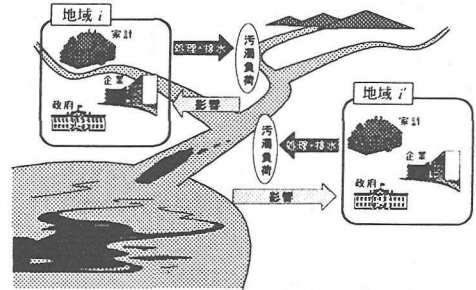


図-1 モデルの概念図

#### 2.1 モデルの前提条件

本研究において構築したモデルの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、各々の地域に家計、企業、および政府が存在する。
- ②本モデルでは、企業として、工業・農業・レクリエーション(以下Rと略す)企業・漁業・廃水処理財製造産業などを想定している。
- ③企業は取水の際、水質の影響を受ける。また、排水の際には、水質に影響を及ぼすものとする。
- ④家計の廃水処理(汚濁負荷削減)は、政府が一括して行うものとする。
- ⑤各主体の立地選択行動は考慮しないものとする。

#### 2.2 各経済主体の行動

各経済主体は、具体的には以下のような行動をと

\*キーワード：環境計画、整備効果計測法

\*\*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 博(工) 岐阜大学講師 工学部土木工学科

\*\*\*\*正会員 博(工) 岐阜大学助手 工学部土木工学科

るものとする。

- ①家計は、生産要素を提供して所得を得、予算制約と時間制約、資本蓄積方程式による制約条件下で効用を最大化するように財・サービスを消費する。
- ②企業は、生産要素に加え、水も投入して、自ら排水処理を行い、利潤を最大化するように水質に依存した生産技術下で財を生産する。
- ③政府は、河川から取水して家計に水供給を行い、家計からの排水に対して廃水処理を行う。また、水質浄化事業を行う。

以下では家計の行動モデルのみを示す。なお、企業・政府の行動モデルについては稲垣他<sup>3)</sup>から容易に想像できるため、ここでは省略する。

### 2.3 家計の行動モデル

地域*i*の家計は、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、生活用水、飲料水等の水を政府から供給され、使用後に汚濁負荷を排出する。R消費に関しては、家計自らが、R産業より供給されるR財と時間を投入することにより、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<sup>4)</sup>を用いて定式化する。

#### 【Rサービス生産行動】

R財とR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。なお、後述する政策を想定して、R財には $e^R$ の税が負荷されるものとする。

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

$$s.t. \quad u_R^i(t) = \eta_R^i \cdot x_R^i(t)^{\alpha_R^i} \cdot t_R^i(t)^{\alpha_t^i} \quad (1.b)$$

ここで、 $i$ ：地域を表す添字、 $u_R$ ：R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、 $t_R$ ：Rに関わる時間投入量、 $p_R$ ：R財価格、 $c_R$ ：Rサービスの単位費用、 $e^R$ ：財Rにかかる税、 $\eta_R$ ：比率パラメータ、 $\alpha^R, \alpha^i$ ：配分パラメータ。

#### 【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 $\rho$ で割り引き、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。

$$v^i = \max_{c_j^i, s^i, u_k^i, x_k^i, t_k^i} \int_0^T U^i(x_j^i(t), s^i(t), u_k^i(t), x_k^i(t), S^i(t)) \exp(-\rho t) dt \quad (2.a)$$

$$s.t. \quad \dot{K}(t) = [w(t)\Omega_i - \tau^i(t)] + (r - \gamma_K)K_i(t) - \left[ \sum_j (1 + e_j) p_j(t) x_j^i(t) + w^i(t) s^i(t) + c_R^i(t) u_R^i(t) + p_R^i(t) x_R^i(t) \right] \quad (2.b)$$

$$\Omega_i = L_i + s^i + t_R^i \quad (2.c)$$

ここで、 $x_j^i$ ：地域*i*産業*j*の生産財の消費量、 $s^i$ ：余暇消費、 $S^i$ ：都市*i*の家計に対する水質、 $e_j$ ：財*j*にかかる税、 $\rho$ ：主観的割引率、 $p_j$ ：財*j*の価格、 $p_R^i$ ：排水処理価格、 $\Omega$ ：総利用可能時間、 $K$ ：資本ストック、 $r$ ：資本の実質利率、 $\gamma_K$ ：資本ストックの減耗率、 $\tau$ ：一括税、 $\dot{K}$ ：時点*t*における資本ストックの増加分。

式(2.b)は資本蓄積方程式であるが、賃金所得、資本所得、一括税からなる実所得から、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が定式化されている。また、式(2.c)は時間制約式である。

### 2.4 最大値原理による動的的最適化問題の解法

式(2)の動的的最適化問題を最大値原理を用いて解く。そこで、ハミルトニアンを以下のように定義する<sup>5),6)</sup>。

$$H^i(t) = [U^i(x_j^i(t), s^i(t), u_k^i(t), x_k^i(t), S^i(t)) + \lambda(t) \{ w(t)\Omega_i - \tau^i(t) \} + (r - \gamma_K)K_i(t)] - \sum_j (1 + e_j) p_j(t) x_j^i(t) - w^i(t) s^i(t) - c_R^i(t) u_R^i(t) - p_R^i(t) x_R^i(t) \exp(-\rho t) \quad (3)$$

ただし、 $\lambda$ ：資本蓄積方程式に付随する共役変数

操作変数でハミルトニアンを偏微分することにより、最大化のための条件を得る。

$$\frac{\partial H(t)}{\partial x_j^i(t)} = \frac{\partial U^i(t)}{\partial x_j^i(t)} - \lambda(t) \cdot (1 + e) p_j(t) = 0 \quad (4.a)$$

$$\frac{\partial H(t)}{\partial s^i(t)} = \frac{\partial U^i(t)}{\partial s^i(t)} - \lambda(t) \cdot w^i(t) = 0 \quad (4.b)$$

$$\frac{\partial H(t)}{\partial u_R^i(t)} = \frac{\partial U^i(t)}{\partial u_R^i(t)} - \lambda(t) \cdot c_R^i(t) = 0 \quad (4.c)$$

$$\frac{\partial H(t)}{\partial x_R^i(t)} = \frac{\partial U^i(t)}{\partial x_R^i(t)} - \lambda(t) \cdot p_R^i(t) = 0 \quad (4.d)$$

ハミルトニアンを共役変数で偏微分する。

$$\begin{aligned} \dot{K}(t) &= \frac{\partial H^i(t)}{\partial \lambda(t)} \\ &= [w(t)\Omega_i - \tau^i(t)] + (r - \gamma_K)K_i(t) \\ &\quad - \sum_j (1 + e_j) p_j(t) x_j^i(t) - w^i(t) s^i(t) \\ &\quad - c_R^i(t) u_R^i(t) - p_R^i(t) x_R^i(t) \end{aligned} \quad (5)$$

また、ハミルトニアンを蓄積する要素で微分することで得られる Euler 方程式は、以下ようになる。

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}(t) - \rho\lambda(t) &= -\frac{\partial H^i(t)}{\partial K_i(t)} \\ &= -\lambda(t)[r - \gamma_K] \end{aligned} \quad (6)$$

無限将来における実物資本の現在価値がゼロである事を示す横断性条件は以下のように表される。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) K_i(t) \exp(-\rho t) = 0 \quad (7)$$

式(4.a)～(4.d)は、ハミルトニアン最大化の一階条件、式(5)、(6)はハミルトニアン・ダイナミクス条件、式(7)は横断性条件を表している。

まず、ハミルトニアン最大化の一階条件、式(4.a)の財消費に関しては企業の生産する財に対する税率  $e$  を考慮した形で条件が導出されている。本モデルでは、政府は企業の生産する財に  $e$  の税率を課すことにより家計から水質浄化事業費を徴収し、水質浄化事業を行う。よって、式(4.a)は、財消費の限界効用が、財価格に税率  $e$  を加えたものに共役変数を乗じたものと等しくなるという条件となっている。

続く、式(4.b)～(4.d)については、限界効用が価格に共役変数を乗じたものと等しくなるという従来と同様の条件を表している。

式(5)は、資本蓄積方程式そのものであり、資本の時間的変化を想定している。

式(6)は、資本の帰属価値の時間的変化を表す。すなわち、資本投資の帰属価値が、ハミルトニアン  $H^i(t)$  に対する資本ストック  $K^i(t)$  の限界的な貢献を埋め合わせるよう下落していくことを意味している。この意味としては、まず、投資により資本が蓄積されれば、次期の消費が増加するためハミルトン関数は高まるといえる。しかし、一方で、資本市場では資本供給量が増加するため、資本の価値自身は低下することになり、この資本価値の低下が、先の資本ストック増加によるハミルトニアンの限界的増分と一致するように変化していくことを表している。

式(7)は横断性条件と呼ばれ、無限遠の資本の帰属現在価値がゼロとなることを要請したものである。もし、無限遠においてまだ資本の価値が残っているとしたら、それは、それまでの消費が効率的になされなかったことを示しており、そのような動学的不効率を排除するための条件である。

## 2.5 間接効用関数の導出

式(4)にて示した最大化の一階条件を解くことにより、各財消費量が以下のように表される。

$$x_j^i(t) = x_j^i(p_j(t), w(t), c_R^i(t), p_h^{wi}(t), S^i(t), I_H(w(t), r(t), \tau^i(t), S^i(t), K(t))) \quad (8.a)$$

$$s^i(t) = s^i(p_j(t), w(t), c_R^i(t), p_h^{wi}(t), S^i(t), I_H(w(t), r(t), \tau^i(t), S^i(t), K(t))) \quad (8.b)$$

$$u_R^i(t) = u_R^i(p_j(t), w(t), c_R^i(t), p_h^{wi}(t), S^i(t), I_H(w(t), r(t), \tau^i(t), S^i(t), K(t))) \quad (8.c)$$

$$x_h^{wi}(t) = x_h^{wi}(p_j(t), w(t), c_R^i(t), p_h^{wi}(t), S^i(t), I_H(w(t), r(t), \tau^i(t), S^i(t), K(t))) \quad (8.d)$$

これらを式(2.a)の目的関数に代入すると間接効用関数が以下のように表される。

$$V^i(t) = V^i(p_j(t), w(t), c_R^i(t), p_h^{wi}(t), S^i(t), I_H(w(t), r(t), \tau^i(t), S^i(t), K(t))) \quad (9)$$

よって、無限期間にわたって割り引かれた効用の総和は以下のように表される。

$$v^i = \int_0^{\infty} V^i(t) \exp(-\rho t) dt \quad (10)$$

## 3. 便益の定義

### 3.1 汚濁負荷削減量の最適配分による波及的効果

ここでは、家計および企業の汚濁負荷量の直接的な削減規制、家計より徴収した税を用いて水質浄化事業を行うことにより水質が改善されると想定する。そして水質改善による経済システムの変化を前章にて構築したモデルを用いて表現することを試みる。

水質改善事業の結果、各産業と家計の行動が変化することになる。こうして各主体の行動が変化した結果、市場均衡を通じて価格調整がなされるので、価格体系が変化し、さらに、家計の所得も変化することになる。以上の結果として、家計の通時的効用水準が、 $v^{iA}$  から  $v^{iB}$  へと変化する。

$$v^{iA} = \int_0^{\infty} V^{iA}(t) \exp(-\rho t) dt \quad (11.a)$$

$$v^{iB} = \int_0^{\infty} V^{iB}(t) \exp(-\rho t) dt \quad (11.b)$$

ただし、 $A, B$  : 水質改善事業無し、有りを表す。

この効用水準の変化を、貨幣タームで計測しようとしたものが便益である。

### 3.2 便益の定義

本研究では等価的偏差 EV の概念を拡張して便益の定義を行う。時間概念を考慮した便益定義は既にいくつか提案されている<sup>7),8)</sup>。本研究における EV とは、水

質改善事業がなされた後の通時的効用水準  $v^B$  を維持するという条件の下で  $v^A \rightarrow v^B$  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をもって定義する。この場合、不確実性下の便益定義と同様に、時間の捉え方の違いによって EV はいくつものパターンが考えられる。ここでは、そのうちの主なものとして 3 種類の定義を示す。

(1) 第 1 の定義は、式(9)にて導出した各期の効用水準を用い、各期の水質改善事業無しの場合の下で、有りの効用水準を達成するために必要な追加的所得とするものである。この定義による便益は、期数分だけ計測され、一般的には同じ値をとらない。そして、各期の便益を足し合わせたものが水質改善事業による便益となる。これは以下のように定式化できる。

$$V^I(p_i^A(t), w^A(t), c_R^A(t), p_h^{WA}(t), S^A(t), I_H^A(t) + ev(t)) = V^B(t) \quad (12.a)$$

$$EV^I = \int_0^{\infty} ev(t) \exp(-\rho t) dt \quad (12.b)$$

(2) 第 2 の定義は、時間に関わらず一定の値とする便益である。すなわち、水質改善事業無しの場合のどの期においても不変の追加的所得を与え、その結果として水質改善事業有りの場合と同じ通時的効用水準が達成できる場合における追加的所得を便益とする。この便益は以下のように定式化できる。

$$\int_0^{\infty} V^I(p_i^A(t), w^A(t), c_R^A(t), p_h^{WA}(t), S^A(t), I_H^A(t) + ev^c) \exp(-\rho t) dt = v^B \quad (13.a)$$

$$EV^{II} = \int_0^{\infty} ev^c \exp(-\rho t) dt \quad (13.b)$$

(3) 第 3 の定義は、水質改善事業有りの通時的効用水準を達成するために、水質改善事業無しの場合において毎期に追加的所得を与えるのではなく、初期時点で与えるものである。この場合、初期の追加的所得により、各期の所得が変化することにより、消費行動も変化するため、市場均衡を通じて価格体系が  $A \rightarrow A'$  へ変化する点に注意が必要である。この便益は以下のように定式化できる。

$$\int_0^{\infty} V^I(p_i^{A'}(t), w^A(t), c_R^A(t), p_h^{WA}(t), S^{A'}(t), I_H^{A'}(t)) \exp(-\rho t) dt + V^I(p_i^A(0), w^A(0), c_R^A(0), p_h^{WA}(0), S^A(0), I_H^A(0) + EV^{III}) = V^B(t) \quad (14)$$

ただし、 $A'$ ：追加的所得により、消費行動が変化した状態を表す。

以上 3 種類の定義の概念を図示したものが図-2,3 である。第 1 の定義では、追加的所得を与えた場合の経路が with の経路と重なる。第 2 の定義では、各期の追加的所得が等しいため、近い将来の効用水準は with を上回り、遠い将来の効用水準は with を下回ることとなる。第 3 の定義では、初期時点でまとめて追加的所得を与えるため、効用水準は図-2 に示すような経路となる。

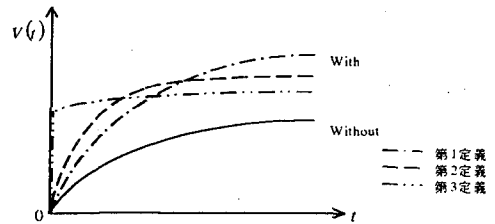


図-2 効用水準の経路イメージ

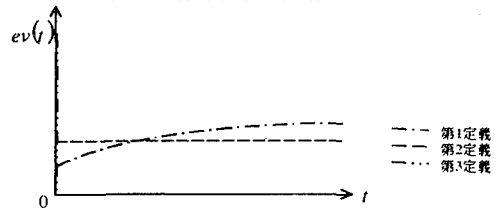


図-3 便益の経路イメージ

#### 4. まとめ

本研究では、公共用水域における水質改善政策の効果および影響を評価するために動学的モデルを構築するとともに、評価指標となる便益の定義について示した。

現在、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して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) 建設省、河川局：流域における水循環はいかにあるべきか、<http://www.moc.go.jp/river/singi/9909202d.html>, 1998.
- 2) 米田明・水飽揚四郎：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
- 3) 稲垣貴政・武藤慎一・高木朗義・上田孝行：閉鎖性水域における水質改善政策の経済分析、土木計画学研究・講演集, NO20(1), pp793-796, 1999.
- 4) Johansson, P.-O : Cost-Benefit Analysis of Environmental Change, Cambridge University Press, pp.32-33, 1993.
- 5) 西村清彦：経済学のための最適化理論入門、東京大学出版会, 1990
- 6) 吉田和男：経済学に最低限必要な数学—直感による理解—、日本評論社, 1993.
- 7) Ueda, T : An Advanced Course in Cost Benefit Analysis. Recent Topics in Benefit Definition, 1999
- 8) 横松宗太・小林潔司：防災投資による非可逆的リスクの軽減効果の経済便益評価、ARSC 全国大会発表会資料, 1999