

## 河川流域における人口減少を考慮した水環境保全計画に関する考察\*

### A Planning of Water Environmental Management in Consideration of Population Decreasing in River Basin\*

河合俊介\*\*・高木朗義\*\*\*

By Syunsuke KAWAI\*\*・Akiyoshi TAKAGI\*\*\*

#### 1. はじめに

水環境は人間社会生活や生態系にとって重要なものがあり、その保全については将来を見据えた上で検討する必要がある。わが国の総人口は2006年にはピークを迎え、以後長期の減少過程に入ると推計されている<sup>1)</sup>。社会経済システムに大きな変化がなければ、人口が減少すれば恐らく流域における消費量や生産量が減少するとともに、消費や生産過程において排出される汚濁負荷量も減少するであろう。したがって、わが国で今後必要とされる長期的な水環境保全計画を立案するためには、この人口減少による影響を見極める必要がある。

そこで本研究では、河川流域の人口減少が与える様々な影響を考慮した上で、排水処理施設の整備タイミングや規模について検討する。人口減少は家計の排水量を縮小させるとともに財の消費・生産量にも影響を与えるため、排水処理施設の整備時期を遅らせたり、あるいは施設規模を縮小させたりすることがよいとされる結論が導き出される可能性がある。本研究ではこの問題に対し数値計算を行うことによって水質の見極めを行い、最適な施設の整備時期や規模を検討することを目的とする。具体的には長良川を対象に人口減少率の変化や水処理に関する技術革新などいくつかのシナリオを想定して分析を行い、その結果から人口減少を考慮した水環境保全計画について考察するものである。

#### 2. 既往研究と本研究の位置づけ

水環境保全計画を立案するためには、流域における水環境の長期的な変化を捉えるとともに、社会経済行動との相互関係を同時に捉えて検討する必要がある。特に社会資本整備においては事業着手から供用開始まで長期間を要するため、その間に水環境が変化してしまうという

時間遅れの問題が存在する。また供用開始後においても公共用水域に堆積した汚濁負荷物質が自然浄化するまでに長期間を要するという時間遅れの問題が存在する。さらに、将来における流域人口の減少は直接的に水環境への影響を及ぼすだけでなく、社会経済活動を介し間接的にも水環境に影響を与えるであろう。また流域人口は地域間あるいは国際間の人口移動など多くの不確定要素を伴うため、減少過程は不確実である。以上のようなことを考慮するため、本研究では次の二点に焦点を当てることとする。一つは二種類の時間遅れ、すなわち、施設整備による時間遅れと自然浄化による時間遅れが水環境に及ぼす影響を捉えること、もう一つは人口減少およびそれに伴う社会経済活動の変化が水環境に及ぼす影響を捉えることである。

水環境保全と社会経済活動を捉えた研究はこれまでに数多く行われている。わが国における例としては、氷鮑ら<sup>2)</sup>、高木ら<sup>3)</sup>、篠田<sup>4)</sup>の研究がある。氷鮑らは霞ヶ浦流域の社会経済活動と環境動態を同一のモデルに包摂して、既存及び新しい水質改善技術の評価とその導入効果を考慮したより現実的な環境改善政策の提言を目的とし、最大水質汚濁負荷削減量と予算制約下での最適な予算配分、そして流域の社会経済活動への影響を新技術の導入効果とともに明らかにしている。高木らは応用一般均衡(CGE)モデルを構築し、河川水質目標を達成するという条件のもとで、社会的純便益を最大にするような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を用いて、各地域、各主体における効率的な汚濁負荷削減スケジュールを求めている。篠田は流域内全窒素収支の最適化による流域環境評価指針の提案を目指し、長良川流域を対象として土地利用状況や人口に関するGISデータベースに基づいた水環境評価モデルを構築している。そこで本研究ではこれらの研究を参考に水環境と社会経済活動の関連性を捉えたベースモデルを構築した上で、先に示した二種類の時間遅れに関するモデルを追加する形で水環境保全計画立案モデルを構築する。

一方わが国の出生率は、主として未婚化・晩婚化・晩産化の進行により低下している。また最近の出生率低下の背景には、このような従来からの要因に加え、夫婦間の出生率そのものの低下という新たな現象が加わっている。それとともに戦後の生活環境の改善、食生活・栄養

\*キーワード：計画手法論，環境計画，河川計画

\*\*学生員，岐阜大学大学院工学研究科土木工学専攻

\*\*\*正員，博(工)，International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)，岐阜大学工学部社会基盤工学科  
(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1, TEL:058-293-2445,  
FAX058-230-1248,E-mail:a\_takagi@cc.gifu-u.ac.jp)

状態の改善，医療技術の進歩等により若年層の死亡率が大幅に低下したため，高齢化が進んでいる．少子・高齢化が進む中，わが国の人口は2006年に1億2,774万人でピークに達した後，死亡数が出生数を上回り，人口が減少していくと見込まれている<sup>9)</sup>（図1）．これは少子化を理由に，単に相対的に高齢者の比率が増えるという段階を過ぎて，少子化によって人口が減る段階に入っていることを示している．人口が減少すれば産業へ提供する労働力が減少する．生産要素である労働力が減れば，生産効率が向上しない限り産業の生産力の低下につながる．また人口減少によって消費量が減れば当然生産量が減るだろう．一方人口が減れば家計から排出される汚濁負荷量が減少する．そして，生産量の減少にともない産業から排出される汚濁負荷量も減少すると考えられる．また水質の改善は技術革新の要素という側面も存在する．このことは図2の岐阜県県内総生産額<sup>6)</sup>が1990年～2000年の10年間で12%程度増加しているのにも関わらず，図3に示す長良川における全窒素濃度の推移<sup>7)</sup>が横ばいであることから言えそうである．人口減少の将来推計と社会経済への影響を分析したものとして MacKellar<sup>8)</sup>らおよび IASA<sup>9)</sup>の研究例がある．ここでは世界的な高齢化問題の解決策を社会保障システムの改良という視点から捉え，人口減少のような不確実な要素に対する分析を行うための包括的なモデルを構築し，日本の人口減少が経済活動にもたらす影響を分析している．しかし本研究では不確実性を明示的に捉えたモデルは構築せず，まずは人口減少が水環境保全計画に与える影響について，長良川流域を例にして定量的に分析するものとする．またこれらの既往研究を参考に人口減少に関わる様々な要因，具体的には利子率，生産効率，排水処理施設規模，技術革新，排水処理施設建設費用および水質に対する選好について感度分析を行い，その不確実性に関する考察を行うこととする．

### 3. 水環境保全計画立案モデルの構築

#### (1) モデルの概要

本研究では河川流域に家計，産業，政府，排水処理産業が存在するとし，それらは労働市場，資本市場，財市場，排水処理財市場において需給均衡がとれているものとする．その中で政府が家計の生涯効用の最大化を目的として水環境保全計画を立案すると考えモデル化する．

一般的な公共施設整備事業と同様に，排水処理施設整備事業は，調査・計画・設計・施工という段階をふまなければならない．近年においては住民との合意形成を踏むための調整時間が必要であり，事業着手から供用開始までに長い年月がかかる．当然のことながら排水処理施設整備の事業中に排出汚濁負荷量が削減されることはほとん

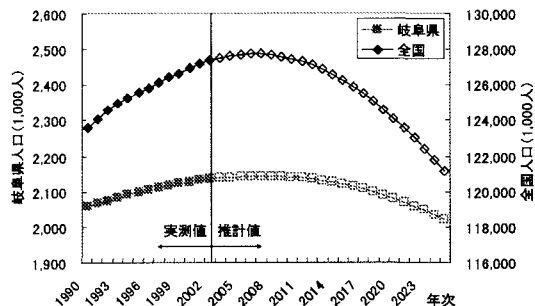


図1 総人口の推移

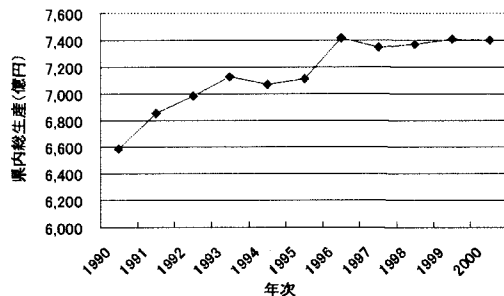


図2 岐阜県県内総生産の推移

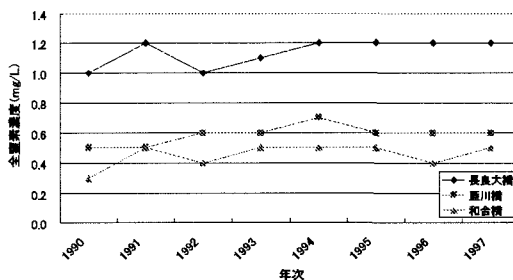


図3 長良川全窒素濃度の推移

どないであろうし，場合によっては増加することもあり，水環境が悪化する可能性がある．しかし，この期間において人口が減少すれば，消費量および生産量が減少し，逆に水環境が改善する可能性もある．一方，排水処理施設が供用開始されれば，その直後に排出汚濁負荷量は直ちに削減されるが，自然浄化による堆積汚濁負荷物質の減少にはある程度の時間を要するため，排水処理施設の供用後すぐに水環境が改善される訳ではない．本研究ではこの2つの点を時間遅れと定義してモデル化する．

#### (2) 施設整備による遅れのモデル化

産業や家計から発生した汚濁負荷物質 $\phi$ は，排水処理施設によってある割合だけ削減され，公共用水域に排出される．これを排出汚濁負荷量 $\psi$ とし，排水処理施設の供用開始前後でその排出割合 $\alpha$ が変化するものとする．また，産業から発生する汚濁負荷物質量は財生産量に依

存し、家計から発生する汚濁負荷物質量は家計の財消費量に依存するものとする。以上のことを式で表すと次のようになる。

$$\psi_j^i(t) = \lambda_j(t) \phi_j^i(t), \quad \psi_h^i(t) = \lambda_h(t) \phi_h^i(t) \quad (0 < \lambda_{j,h}(t) \leq 1) \quad (1)$$

$$\phi_j^i(t) = \gamma_j Y_j^i(t), \quad \phi_h^i(t) = \gamma_h \sum_j x_j^i(t) \quad (2)$$

$$0 \leq t < T_0 \text{ のとき } \lambda_{j,h}(t) = \lambda_{j,h_1} \quad (3.a)$$

$$T_0 \leq t \text{ のとき } \lambda_{j,h}(t) = \lambda_{j,h_2} \quad (\lambda_2 < \lambda_1) \quad (3.b)$$

ここで、 $i$ ：地域を表す添え字、 $j$ ：産業分類を表す添え字、 $h$ ：家計を表す添え字、 $\gamma_j$ ：生産量に対する発生汚濁負荷率、 $Y$ ：財生産量、 $\gamma_h$ ：消費量に対する発生汚濁負荷率、 $x$ ：財消費量、 $T_0$ ：供用開始時期。

### (3) 自然浄化による遅れのモデル化

ある期における地域 $i$ のフローとしての汚濁負荷量 $\Psi$ は、地域 $i$ に存在する家計および各産業から排出された汚濁負荷量のうち流下した量と、1期前における地域 $i$ の堆積汚濁負荷物質から溶出した量、そして地域 $i$ の1つ上流に位置する地域 $i-1$ でのフローとしての汚濁負荷量のうち流下した量との和で表される。また、ある期における地域 $i$ の堆積汚濁負荷量 $S$ は、1期前の地域 $i$ における堆積汚濁負荷物質のうち溶出せずに残留した量と、地域 $i$ に存在する家計および各産業から排出された汚濁負荷量のうち流下過程により沈降・堆積する量、および地域 $i$ の1つ上流に位置する地域 $i-1$ からのフローとしての汚濁負荷量 $\Psi$ のうち流下せずに沈降・堆積した量との和で表される<sup>10)</sup>。以上を式で表すと次のようになる。

$$\Psi^i(t) = \varepsilon S^i(t-1) + \beta \left\{ \psi_h^i(t) + \sum_j \psi_j^i(t) \right\} + \mu^{i-1} \Psi^{i-1}(t) \quad (4)$$

$$S^i(t) = (1-\varepsilon) S^i(t-1) + (1-\beta) \left\{ \psi_h^i(t) + \sum_j \psi_j^i(t) \right\} + (1-\mu^{i-1}) \Psi^{i-1}(t) \quad (5)$$

ここで、 $\varepsilon$ ：堆積汚濁負荷物質からの溶出率、 $\beta$ ：物質質量変化率、 $\mu$ ：流下過程における物質質量変化率。

### (4) 家計行動のモデル化

家計は労働と資本からなる生産要素を提供して所得 $I$ を得、予算制約と時間制約、資本 $K$ の蓄積方程式による制約条件の下で生涯効用を最大化するように財・サービスを消費するものとして定式化する。また、排水に伴って汚濁負荷物質を排出する。家計の効用関数は財消費量 $x$ 、資本蓄積量 $K$ 、河川の水質 $\Psi$ に依存するものとし、ここではこれをコブ・ダグラス型により特定化する。また、計画の最終期は状態変数である資本蓄積量と水質によって決まる残存価値として定式化する<sup>11)</sup>。減価償却率

は産業の生産量に比例するため、ここでは生産量の指標である利子率に比例パラメータを乗じた値とする。なお、排水処理施設に必要な諸費用は、供用開始前の期間には建設費 $C$ 、供用開始後には維持管理費 $M$ とする。ここでの建設費 $C$ は家計の生涯効用を最大化するように政府がその徴収時期を決めるものとするため、時間 $t$ の関数となっている。維持管理費 $M$ は施設の維持管理のため毎期政府に一括税として納めるものとする。

$$\max_{T_0} \max_{x_j} \sum_i N^i(t) \left\{ \sum_{t=0}^{T-1} \frac{u[x_j^i(t), \Psi^i(t), K_h^i(t)]}{(1+r)^t} + v[K_h^i(T), \Psi^i(T)] \right\} \quad (6)$$

$$s.t. \quad u^i = x_j^i(t)^{\alpha^x} K_h^i(t)^{\alpha^K} \Psi^i(t)^{\alpha^\Psi} \quad (7.a)$$

$$v^i = K_h^i(T)^{\alpha^K} \Psi^i(T)^{\alpha^\Psi} \quad (7.b)$$

$$\dot{K}_h(t) = \{\rho(t) - \omega(t)\} K_h(t-1) + w(t) L_h^i(t) - \sum_j p_j(t) x_j(t) - \tau(t) \quad (8)$$

$$N^i(t) = P(t) N^i(t-1) \quad (9)$$

$$0 \leq t < T_0 \text{ のとき } \tau(t) = C(t) \quad (10.a)$$

$$T_0 \leq t \text{ のとき } \tau(t) = M(t) \quad (10.b)$$

ここで、 $T_0$ ：供用開始時期、 $T$ ：最終期、 $N$ ：世帯数、 $u, v$ ：効用水準、 $x$ ：財消費量、 $K$ ：資本量、 $r$ ：社会的割引率、 $\alpha^x, \alpha^K, \alpha^\Psi$ ：パラメータ、 $\rho$ ：利子率、 $\omega$ ：減価償却率、 $p_j$ ：財価格、 $\tau$ ：一括税、 $P$ ：人口減少率、 $C$ ：排水処理施設の建設費、 $M$ ：排水処理施設の維持管理費、 $w$ ：賃金率、 $L$ ：労働時間。

### (5) 産業行動のモデル化

産業は、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、排水処理産業から排水処理財を購入し、排水処理（汚濁負荷量削減）を自ら行うものとする。この生産行動を利潤最大化行動により定式化する。また、産業から発生する汚濁負荷量（発生汚濁負荷量）は財生産量に依存する。

$$\max_{L_j, K_j^i, \phi_j^i} \{ p_j(t) Y_j^i(t) - w L_j^i(t) - \rho K_j^i(t) - \delta_j^i [\phi_j^i(t) - \psi_j^i(t)] \} \quad (11)$$

$$s.t. \quad Y_j^i(t) = \eta_j^i L_j^i(t)^{\alpha_j^L} K_j^i(t)^{\alpha_j^K} \quad (12)$$

$$\delta_j^i [\phi_j^i(t) - \psi_j^i(t)] = p_d(t) x_j^d(t) \quad (13)$$

ここで、 $Y$ ：財生産量、 $\delta$ ：汚濁負荷量削減に要する単位費用（汚濁負荷量削減技術力）、 $\eta_j$ ：比率パラメータ、 $\alpha_j^L, \alpha_j^K$ ：分配パラメータ、 $p_d$ ：排水処理財価格、 $x_j^d$ ：産業の排水処理財投入量。

### (6) 政府行動のモデル化

政府は、家計からの排水に対して排水処理（汚濁負荷量削減）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。また、家計から発生する汚濁負荷量（発生汚濁負荷量）は財消費量に依存する。

$$M(t) = \delta_G^i [\phi_h^i(t) - \psi_h^i(t)] = p_d(t) x_G^d(t) \quad (14)$$

ここで、 $x_G^d$ ：政府の排水処理財投入量

#### (7) 排水処理産業行動のモデル化

排水処理産業は、労働と資本からなる生産要素を投入し、生産技術下で利潤を最大化するとともに、政府と産業に水質改善のために必要な財・サービスを生産するとして定式化する。

$$\max_{L_d, K_d} [p_d(t) Y_d(t) - w L_d(t) - \rho K_d(t)] \quad (15)$$

$$s.t. \quad Y_d(t) = \eta_d L_d^{\alpha_d^L}(t) K_d^{\alpha_d^K}(t) \quad (16)$$

ここで、 $\eta_d$ ：比率パラメータ、 $\alpha_d^L, \alpha_d^K$ ：分配パラメータ。

#### (8) 市場均衡条件

社会には労働市場、資本市場、合成財市場、排水処理市場が存在し、そこでは需要と供給の均衡がとれているものとする。

$$\text{財:} \quad \sum_i x_j^i(t) = \sum_j Y_j^i(t) \quad (17)$$

$$\text{資本:} \quad \sum_i K_h^i(t) = \sum_j \sum_j K_j^i(t) + K_d(t) \quad (18)$$

$$\text{労働:} \quad \sum_i L_h^i(t) = \sum_j \sum_j L_j^i(t) + L_d(t) \quad (19)$$

$$\text{排水処理財:} \quad \sum_i \sum_j x_j^d(t) + \sum_i x_G^d(t) = Y_d(t) \quad (20)$$

### 4. 長良川における水環境保全計画

#### (1) 条件設定

上記のモデルを長良川流域に適用し、人口減少が水環境保全計画に与える影響について考察する。初期データセットは表1のように設定した。計画の基準年は総人口がピークになると推計される2006年としたが、2006年における各種データは存在しないため、代用として対象流域における世帯数、平均所得、初期資本量は2001年の値<sup>12)</sup>を用いた。また、排水処理施設整備に必要な諸費用と汚濁負荷物質の削減係数は既往論文<sup>13)</sup>の値を用いた。排出汚濁負荷物質の河川流出率を表す物質質量変化率は、長良川流域内の全窒素・全リン流出特性に及ぼす被覆空間配置の影響評価<sup>10)</sup>において扱われている値を用いた。消費量に対する発生汚濁負荷率は長良川ビジョンアクションプログラム<sup>7)</sup>における水質データを使って式(1)より算出した値を用いた。家計の選好パラメータに関しては不明な部分があるため、ここでは現実の社会経済に適合するような値に設定した。したがって、数値計算の条件

表1 初期データセット

| 計画基準年                                           | 2006年           |
|-------------------------------------------------|-----------------|
| 計画期間： $T$                                       | 2006～2035：30（期） |
| 世帯数： $N$                                        | 688,816（世帯）     |
| 所得： $I$                                         | 4,504（千円/年・世帯）  |
| 初期資本量： $K$                                      | 13,888（千円/世帯）   |
| 排水処理施設の総建設費： $C_1$                              | 69,092（100万円）   |
| 排水処理施設の維持管理費： $M$                               | 2,530（100万円）    |
| 物質質量変化率： $\beta$                                | 0.98            |
| 堆積汚濁負荷物質からの溶出率： $\varepsilon$                   | 0.02            |
| 消費量に対する発生汚濁負荷率： $\gamma_h$                      | 0.0065          |
| 生産量に対する発生汚濁負荷率： $\gamma_j$                      | 0.0041          |
| 産業の比率パラメータ： $\eta_{j,d}$                        | 243             |
| 汚濁負荷物質の排出係数： $\lambda_{j,h_1}, \lambda_{j,h_2}$ | 0.9, 0.225      |
| 社会的割引率： $r$                                     | 0.04            |
| 合成財消費量パラメータ： $\alpha^x$                         | 0.98            |
| 資本量パラメータ： $\alpha^K$                            | 0.01            |
| 水質パラメータ： $\alpha^\Psi$                          | 0.01            |
| 資本量（最終期）パラメータ： $\alpha^{K'}$                    | 0.9             |
| 水質（最終期）パラメータ： $\alpha^{\Psi'}$                  | 0.1             |
| 利子率： $\rho$                                     | 0.04            |
| 人口減少率： $P$                                      | 0.003           |

設定において現況再現は行われているが、パラメータに関しては仮想的な面も含まれているといえる。なお、3.で示したモデルは今後の研究遂行を考慮して流域をいくつかの地域に分けて汚濁負荷物質の空間的な分布を捉えたものであるが、ここでは第一段階の分析として流域を分割せず1地域とする。

#### (2) 人口減少が水環境保全計画に与える影響

人口減少の影響を把握するために、人口が将来にわたっても変化せず一定のままと仮定した場合と人口が減少する場合の2ケースについて、家計の生涯効用を最大にするための排水処理施設の整備タイミングを求めた。整備タイミングとは施設整備に着手する時期を表し、ここでは排水処理施設の整備に5年かかるという仮定をおいていることから、2011年供用開始とは2006年建設着手2011年施工完了を表す。結果を図4～9に示す。図4、5は水質の評価指標であるフローとしての汚濁負荷量、

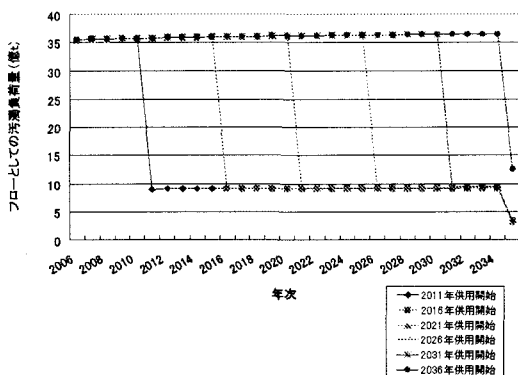


図4 フローとしての汚濁負荷量変化（人口一定）

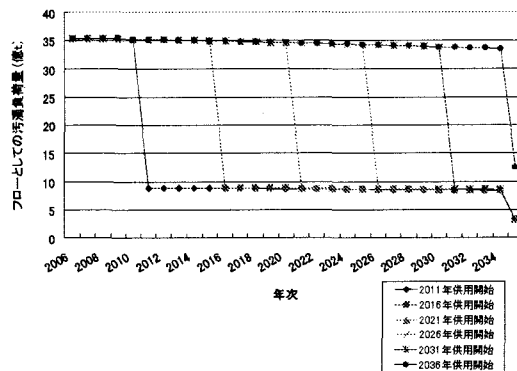


図5 フローとしての汚濁負荷量変化（人口減少）

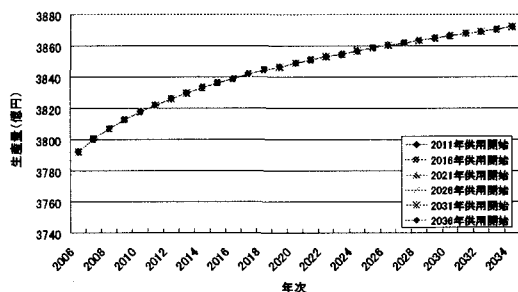


図6 生産量変化（人口一定）

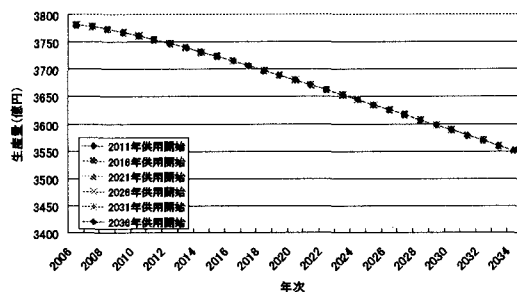


図7 生産量変化（人口減少）

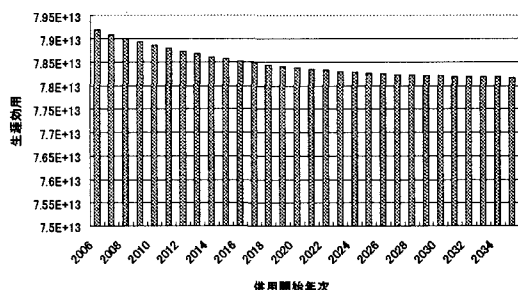


図8 生涯効用変化（人口一定）

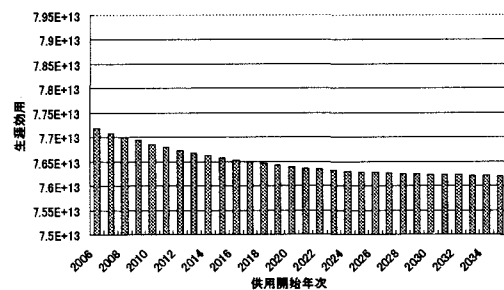


図9 生涯効用変化（人口減少）

図6、7は人口減少による影響が大きいと考えられる産業の生産量、図8、9は本研究の目的関数である生涯効用である。なお、図4～7はある供用開始時期におけるそれぞれの値の経年変化を示したものであるのに対し、図8、9は供用開始時期を変化させた場合の生涯効用の変化を表している。

図4を見ると、フローとしての汚濁負荷量は排水処理施設の供用開始直後に大幅に削減されているが、それ以外の期は供用開始前も後もほぼ一定であることがわかる。ただし、図からは読み取り難いが供用開始時期が5期遅くなるとフローとしての汚濁負荷量は約0.6%増加するという結果となっている。これは産業の生産要素の一つである資本量が増加しているために産業の生産量がそれとともに増大し、結果的に水質を悪化させてしまっていると考えられる。これに対し図5は、人口が減少する場合

におけるフローとしての汚濁負荷量の変化であり、排水処理施設整備を行わなくても汚濁負荷量が減少していることがわかる。これは人口減少によって生産・消費活動が縮小し、その結果、家計や企業から発生する汚濁負荷量が減少したためと考えられる。これらの図より、社会資本整備は事業着手から供用開始まで長時間を要するという概念を取り入れたことで、計画立案時期から供用開始時期までの間に大幅な水質改善が行われないという現象が確認できたといえる。また河川の自然浄化にはある程度の期間が必要という時間遅れを捉えたことで、早めの施設建設が堆積汚濁負荷量の増加を抑えることで河川の自然浄化を早め、結果的にフローとしての汚濁負荷量を早期に減少させるという影響が見て取れた。図6は排水処理施設供用開始時期の変化にともなう産業の生産量の推移を示したものであるが、人口が減少しない場合に

においては資本の増加によって生産量が緩やかに増加している。ただし、その増加率は年当たり平均 0.02%と非常に僅かである。一方図7に示されているように、人口が減少すると生産に必要な労働供給量が減り、生産量は縮小するという現象が起こっている。ただし、その減少率は年当たり平均 0.2%であり、人口が減少しない場合の増加率に比べて大きな値となっている。また、供用開始時期の違いによる生産量の変化はない。図8は人口一定時の供用開始時期と生涯効用の関係を示した図であるが、これより供用開始時期を遅らせるほど生涯効用が減少することがわかる。したがって、施設整備を早く行うことで得られる水質改善による効用増大分が、施設整備を遅らすことにより費用負担が先送りされ、それによって得られる資本増大による効用増大分よりも大きいと考えられる。この結果より、人口が減少しない場合には排水処理施設整備はできるだけ早く行うことが望ましいと言える。一方、図9に示すように家計の生涯効用は人口が減少すると、人口が一定の場合に比べて全体的に約 2.6%下回っている。したがって、産業の生産量の減少、すなわち家計の消費量の減少による効用低下分が、人口減少による自然的な水質改善による効用増大を上回っていると考えられる。また、人口が減少する場合も供用開始時期が遅くなるにつれ生涯効用が減少するという結果となり、排水施設の整備タイミングは早めた方がよいという結果となった。以上の結果を見るとシナリオに対するフローとしての汚濁負荷量や生涯効用の変化は微小な値であったが、増井ら<sup>14)</sup>や武藤ら<sup>15)</sup>に代表される CGE による環境政策評価に関する研究においてもシナリオに対する経済への影響は数%程度であることから、有意な値であるといえるのではないだろうか。人口減少により排出汚濁負荷量が減少し、河川水質は改善されるであろう。これだけみると、排水施設の整備タイミングは遅らせたほうがよいように思える。しかし、施設整備をしてしまえば、人口減少による自然的な水質改善をはるかに上回るレベルで水質が改善されるため、施設整備はできるだけ早く行ったほうがよいという結果となっている。すなわち、人口減少による自然の水質改善が施設整備による水質改善を上回らない限り施設整備を遅らせたほうがよいというインセンティブが働かない訳であるが、人口減少による自然の水質改善については今後も分析する必要があると考えている。

### (3) 人口減少のもつ不確実性に関する感度分析

将来の人口減少過程は不確実であるため、ここでは人口減少率、利子率、生産効率、汚濁負荷物質の排出係数、排水処理施設整備費用および水質に対する選好の変動が生涯効用に与える影響について感度分析を行う。企業の生産効率は就業人口にともない変化し、利子率は生産力

変化の影響を受けた市場の需給関係にともなって変化するため、ともに人口減少過程の不確実性による影響を受けると考え、感度分析の対象とした。また人口が減少すると排水処理施設の規模にも影響を与え、汚濁負荷物質削減能力および建設費、維持管理費などの諸費用も変化するため、これも感度分析の対象とした。水質に対する選好の変化は時代の推移による価値観の変化を考慮するため分析対象とした。なお、施設規模の変化にともない、施設建設のための費用も異なってくるため、政府が家計から徴収する一括固定税の金額も変化する。各パラメータの設定は以下のとおりとする。

- ・ 人口減少率  $P$  : 0.001~0.005
- ・ 利子率  $\rho$  : 0.01~0.05
- ・ 生産効率  $\eta$  : 219~267 (初期値 $\pm 1\sim 5\%$ )
- ・ 汚濁負荷削減係数  $\lambda$  : 0.112~0.302 (初期値 $\pm 1\sim 50\%$ )
- ・ 施設費用  $C$  : 69092~55274 (初期値 $-5\sim 20\%$ )
- ・ 水質パラメータ  $\alpha^W$  : 0.01~0.09

結果を図10~16に示す。図10より、人口減少率が 0.1%増加すると生涯効用の値は一律 0.85%程度減少することがわかった。これは人口の減少によって消費量の低下が起こり生涯効用を減少させる度合いが、人口減少率が大きくなるにしたがって大きくなるためであると考えられる。図11は利子率を変化させた場合における生涯効用の変化であるが、利子率を変化させても生涯効用には 0.022%程度しか違いが見られなかった。これは利子率の市場へ与える影響が、人口減少率に比べて小さいことを意味する。図12は生産効率の変化にともなう生涯効用の変化であるが、生産効率が低くなるにしたがって生涯効用は小さくなる。生産効率の変化が生涯効用へ与える影響は 4.5~5.3%程度であり、人口減少率が与えるものより高い値となっている。また生産効率 5%低下時には生涯効用が 10.6%減少したのに対し、5%上昇時には 9.5%の増加にとどまった。このことから、生産効率が上昇するにつれて生涯効用は増加するが、その変化率は過減すると言える。図13は汚濁負荷物質の排出係数が変化、すなわち排水処理施設の施設規模が縮小した場合における生涯効用の変化である。汚濁負荷削減係数の変化は人口減少によって排水処理施設の規模が縮小したことにより生じる。この図より供用開始時期が早い場合においては、施設規模が小さくなるほど家計の生涯効用は減少するが、供用開始が遅くなるにつれてその差は収縮していくといえる。これは供用開始時期の遅れにともない水質改善効果による家計効用への影響が小さくなるため、汚濁負荷物質削減率の生涯効用への影響も供用開始時期の遅れとともに低下していくためである。図14は汚濁負荷物質の排出係数が変化、すなわち排水処理技術の技術

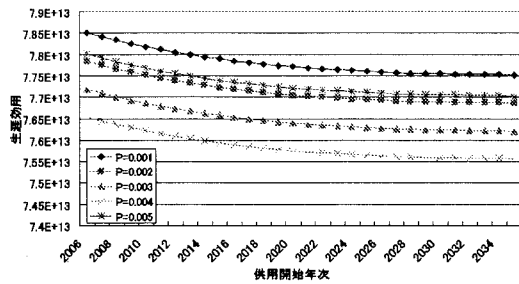


図10 人口減少率 $P$ に対する生涯効用変化

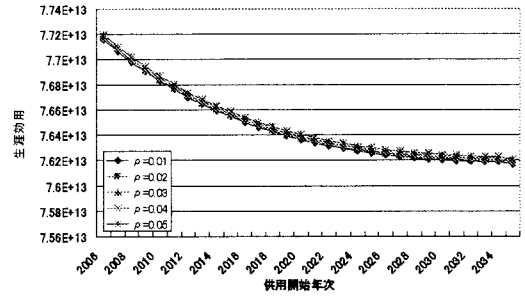


図11 利子率 $\rho$ に対する生涯効用変化

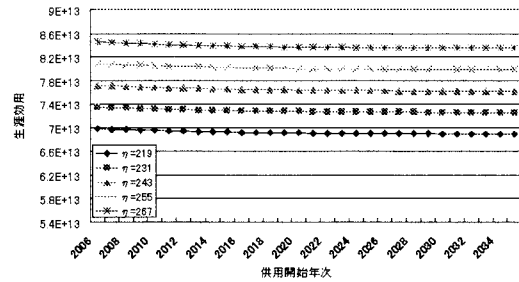


図12 生産効率 $\eta$ に対する生涯効用変化

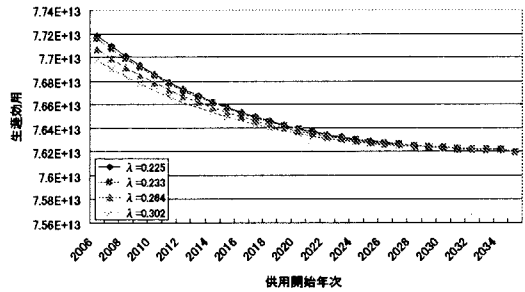


図13 排出係数 $\lambda$ に対する生涯効用変化 (規模縮小)

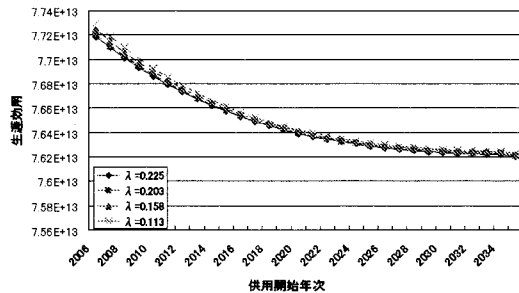


図14 排出係数 $\lambda$ に対する生涯効用変化 (技術革新)

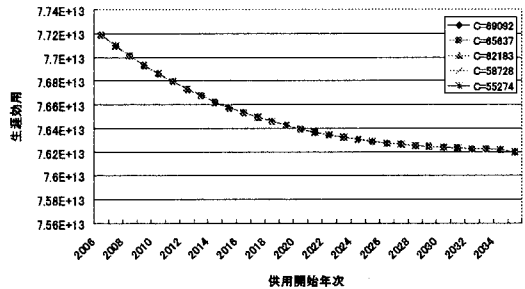


図15 排水処理施設費用 $C$ に対する生涯効用変化

革新が起こった場合における生涯効用の変化である。図13と同様に供用開始時期が早いほど排出係数が生涯効用に与える影響は大きく、供用開始が遅くなるにつれその差は縮小していく。また、ともに変化の割合が小さいのは家計の水質パラメータが小さな値であるため、排出割合変化にともなう水質改善の効果が生涯効用にあまり影響を及ぼさないためだと考えられる。図15は排水処理施設整備費用が低減した場合における生涯効用の変化であるが、施設費用は家計の所得に対して小さな値であるため、生涯効用にはほとんど影響を及ぼさないという結果が得られた。図16は水質パラメータ $\alpha^\Psi$ が変動した場合における生涯効用の変化である。この図から、同じ供用開始時期でも水質に対する選好傾向が強まるとともに生涯効用は低くなっている。これは水質が同じであっても水質に対する選好が強いほど家計効用に与える負の影響が大きいためと考えられる。またその変化の度合

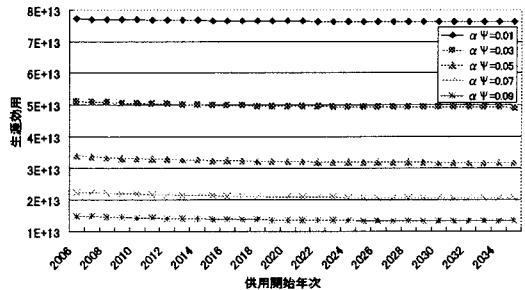


図16 水質パラメータ $\alpha^\Psi$ に対する生涯効用変化

いはパラメータの値が小さいほど顕著に表れているといえる。

## 5. おわりに

本研究による成果としては、将来の人口減少を踏まえ時間遅れを考慮したモデルを構築し、それを用いて長良

川を対象にして長期的な水環境保全計画について分析したことである。最適整備タイミングは人口が一定、減少いずれの場合もできる限り早く供用を開始した方がよいという結果が得られた。ただし、本研究の分析では将来想定される状況の一部しか扱っていないため、確定的な分析にとどまっている。また計画初期の段階で最終期までの計画を決定しているため、期間中における状況変化が生じたときの対応という概念は存在していない。人口減少については近未来確実に起こるとされており、避けては通れない問題である。したがって、今後は人口変動の不確実性を確率過程で表現し、様々な状況に対応した分析を行うとともに、リアルオプションの概念を導入し、状況に応じて柔軟な対応ができる水環境保全計画について検討していく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 丹保憲仁：人口減少下の社会資本整備，土木学会，2002。
- 2) 氷鉦陽四郎，水野谷剛，森岡理紀：霞ヶ浦流域における水質改善新技術の導入を考慮した最適環境政策に関する研究，日本地域学会，Vol.32, No.3, pp.83-106, 2001。
- 3) 高木朗義：河川水質目標達成のための効率的な汚濁負荷削減スケジュール，MPEC 研究会編，第6章，pp.133-160, 2003。
- 4) 篠田成郎：流域内物質移動の連続性確保による最適流域環境の創造，木曽三川のエコロジカル流域管理計画—流域生態系の物質循環機能を生かした流域環境管理システムの提
- 案一，科学研究補助金（地域連携）研究成果報告書，pp.150-156, 2002。
- 5) 人口問題研究所，<http://www.ipss.go.jp/>
- 6) 岐阜県統計調査課：経済活動別県内総生産データ，<http://www.pref.gifu.jp/s1111/index.htm>
- 7) 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。
- 8) MacKellar, L, Ermolieva, T, Horlacher, D, Mayhew, L : Economic Impacts of Population Aging in Japan, <http://www.iiasa.ac.at/Research/SSR/>, 2002。
- 9) IIASA : Population Aging, Pensions, and Health, OPTIONS, summer 2003, pp.2-19, 2003。
- 10) 篠田成郎：長良川流域内の全窒素・全リン流出特性に及ぼす土地被覆空間配置の影響評価，水工学論文集，Vol.44, pp.1143-1148, 2000。
- 11) 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，1994。
- 12) 岐阜県知事公室統計調査課：岐阜県統計書，2001。
- 13) 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，下水道協会誌，Vol.36, No.439, pp.40-46, 1999。
- 14) 例えば，増井利彦，松岡謙，森田恒幸：環境と経済を統合した応用一般均衡モデルによる環境政策の効果分析，環境システム研究論文集，Vol.28, pp.467-475, 2000。
- 15) 例えば，武藤真一：環境政策評価への計量厚生分析の適用，岐阜大学博士論文，1999。

### 河川流域における人口減少を考慮した水環境保全計画に関する考察\*

河合俊介\*\*・高木朗義\*\*\*

わが国の将来人口は近年における少子化の影響を受け、2006年以降減少していくと見込まれている。水環境保全計画を立案する場合には、このような人口減少の問題を考慮するとともに施設整備や自然浄化による時間遅れも勘案しなければならない。そこで本研究では、長良川を対象とし、以上の点を踏まえて排水処理施設の整備タイミングを検討するとともに、人口減少が水質や生産量、生涯効用に与える影響を分析した。また人口減少の不確実性に対する影響を見極めるため、人口減少率や利子率、生産効率等に対する生涯効用の変化について感度分析も行った。その結果、排水処理施設の早期建設の必要性や将来の不確実な要因が水環境保全計画に及ぼす影響を確認することができた。

### A Planning of Water Environmental Management in Consideration of Population Decreasing in River Basin\*

By Syunsuke KAWAI\*\*・Akiyoshi TAKAGI\*\*\*

The future population is estimated to decrease by the low birthrate in and after 2006 in Japan. We have to consider the problem of the population decreasing and the delay time of the facility development and the natural purification when planning the water environmental management (protection and improvement). In this study, we examined the timing of developing the wastewater treatment facility and analyzed the impact on the water quality, the production and the utility by the population decreasing. We made the sensitive analysis about which the utility is influenced by the population decreasing, the interest rate, the productivity and so on. As the result, we confirmed the necessity for constructing the wastewater treatment facility early and the impact on the water environmental management by the uncertain factors in the future.