

長期的な水環境保全計画の立案手法に関する研究*

A Planning Method for Long-Term Water Environment Preservation*

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であり、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。したがって、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かつ空間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。一方、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¹⁾。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。さらに、流域人口の減少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、減少過程は不確実なものであると言える。したがって、わが国でこれから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、これらの点も考慮する必要がある。

以上のような点を踏まえ、本研究では、長期的な水環境保全計画の一立案手法として最適な排水処理施設整備タイミングを決定するための手法を提案する。本手法において焦点を当てるのは次の2点である。一つは二種類の時間遅れ、すなわち、施設整備時間による

時間遅れと自然浄化時間による時間遅れを捉えること、もう一つは人口減少による影響を不確実な要素として捉えることである。なお、社会経済活動は一般均衡モデルによって捉えることとする。また、ケーススタディとして長良川を対象にして、いくつかの分析を行うこととする。

2. 時間遅れのモデル化

(1) 2つの時間遅れ

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。また近年においては住民との合意形成を諮る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は削減されることはほとんどないであろうし、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高い。一方、排水処理施設の供用開始直後に排出汚濁負荷量は急激に削減されるが、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、特に閉鎖性水域では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、以下のようにモデル化する。

(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 f は、排水処理施設によってある割合 I 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 Y とし、排水処理施設の供用開始前後でその削減割合 I 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、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。

*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

(岐阜市柳戸1丁目1番地，TEL:058-293-2447，

E-mail:i3101013@guedu.cc.gifu-u.ac.jp)

***正員，博(工)，岐阜大学工学部社会基盤工学科

$$y_j^i(t) = I_j f_j^i(t), \quad y_h^i(t) = I_h f_h^i(t) \quad (0 < I \leq 1) \quad (1)$$

$$f_j^i(t) = g_j Y_j^i(t), \quad f_h^i(t) = g_h \sum_i x_j^i(t) \quad (2)$$

$$0 \leq t < T_0 \quad \text{のとき} \quad I(t) = I_1 \quad (3.a)$$

$$T_0 \leq t \quad \text{のとき} \quad I(t) = I_2 \quad (I_2 < I_1) \quad (3.b)$$

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、 g_j ：生産量に対する発生汚濁負荷率、 Y ：財生産量、 g_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、そして地域 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 Ψ のうち流下せずに沈降・堆積した量との和で表される²⁾。以上のことを式で表すと次のようになる。

$$\Psi^i(t) = eS^i(t-1) + b \left\{ y_h^i(t) + \sum_j y_j^i(t) \right\} + m^{i-1} \Psi^{i-1}(t) \quad (4)$$

$$S^i(t) = (1-e)S^i(t-1) + (1-b) \left\{ y_h^i(t) + \sum_j y_j^i(t) \right\} + (1-m^{i-1}) \Psi^{i-1}(t) \quad (5)$$

ここで、 e ：堆積汚濁負荷物質からの溶出率、 b ：物質質量変化率、 m ：流下過程における物質質量変化率。

3. 水環境保全計画モデルの構築

河川流域には家計、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供均衡がとれているものとする。本研究は其中で政府が水環境保全計画を家計の生涯効用を最大化することを目的として立案すると考え、以下のようにモデル化する。

(1) 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 Ψ 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³⁾。なお、排水処理施設に必要な諸費用は、供用開始前の期間は建設費 C 、供用開始後は維持管理費 M を毎期政府に一括税として納めるものとする。

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

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

$$v^i = K_h^i(T)^{a^{K'}} \Psi^i(T)^{a^{\Psi'}} \quad (7.b)$$

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

$$0 \leq t < T_0 \quad \text{のとき} \quad t(t) = C(t) \quad (9.a)$$

$$T_0 \leq t \quad \text{のとき} \quad t(t) = M(t) \quad (9.b)$$

ここで、 T_0 ：供用開始時期、 T ：最終期、 k ：状態を表す添え字、 P^k ：状態 k の生起確率、 N^k ：状態 k のときの世帯数、 u, v ：効用水準、 x ：財消費量、 K ：資本量、 r ：社会的割引率、 $a^x, a^K, a^\Psi, a^{K'}, a^{\Psi'}$ ：パラメータ、 r ：利子率、 p_j ：財価格、 t ：一括税、 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。

(2) 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。

$$\max_{L_j^i, K_j^i, f_j^i} \left\{ p_j(t)Y_j^i(t) - wL_j^i(t) - rK_j^i(t) - d_j^i[f_j^i(t) - y_j^i(t)] \right\} \quad (10)$$

$$s.t. \quad Y_j^i(t) = h_j^i L_j^i(t)^{a_j^L} K_j^i(t)^{a_j^K} \quad (11)$$

$$d_j^i[f_j^i(t) - y_j^i(t)] = p_d(t)x_j^{di}(t) \quad (12)$$

ここで、 Y ：財生産量、 d ：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）、 h_j ：比率パラメータ、 a_j^L, a_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。

(3) 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（発生活濁負荷量）は財消費量に依存する。

$$M(t) = \mathbf{d}_G^i [\mathbf{f}_h^i(t) - \mathbf{y}_h^i(t)] = p_d(t) x_G^{di}(t) \quad (13)$$

ここで、 x_G^d ：政府の排水処理財投入量。

(4) 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ように、政府と産業に水質改善に必要な財・サービスを生産するとして定式化する。

$$\max_{L_d, K_d} [p_d(t) Y_d(t) - w L_d(t) - r K_d(t)] \quad (14)$$

$$s.t. \quad Y_d(t) = \mathbf{h}_d L_d^{a_d^L}(t) K_d^{a_d^K}(t) \quad (15)$$

ここで、 h_d ：比率パラメータ、 a_d^L, a_d^K ：分配パラメータ。

(5) 市場均衡条件

$$\text{財：} \quad \sum_i x_j^i(t) = \sum_i Y_j^i(t) \quad (16)$$

$$\text{資本：} \quad \sum_i K_h^i(t) = \sum_i \sum_j K_j^i(t) + K_d(t) \quad (17)$$

$$\text{労働：} \quad \sum_i L_h^i(t) = \sum_i \sum_j L_j^i(t) + L_d(t) \quad (18)$$

$$\text{排水処理財：} \quad \sum_i \sum_j x_j^{di}(t) + \sum_i x_G^{di}(t) = Y_d(t) \quad (19)$$

以上の均衡条件より、 p_j 、 r 、 w 、 p_d が得られる。

4. 長良川における水環境保全計画の検討

(1) 検討条件

上記のモデルを用い、長良川を対象として排水処理施設の供用開始時期が及ぼす影響について検討する。評価指標は、水質の評価指標であるフローとしての汚濁負荷量と堆積汚濁負荷量、本研究の目的関数である生涯効用とする。なお、本研究で示したモデルは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、ここでは流域を1地域として考えて検討する。

まず初めに計画期間中も人口が変動しない場合の検討、次に人口が変動する場合の検討を行う。ただし、先のモデルでは人口変動の不確実性を捉えているが、ここでは時間遅れの影響を捉えることに主眼を置き、確定的に人口が減少する場合について検討する。人口問題研究所の推計データ⁴⁾によると、2005年から2025年の20年間で6%程度の減少が予想されているため、毎年人口が0.3%減少するものとする。

(2) 人口が一定の場合

排水処理施設の整備には最低5年かかるとし、家計の生涯効用を最大にするための排水処理施設の最適整備時期について検討した。結果を図1～3に示す。図1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によって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。図2より堆積汚濁負荷量は施設の供用開始以降増加率が抑制されていることがわかる。図3は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ったため、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。

(3) 人口が減少する場合

検討結果を図4～6に示す。図4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を表している。この図からは分かりにくいだが、人口が一定の場合に比べてその量は3～5%程度小さくなっている。これは人口の減少によって生産・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。同様の理由で、図5の堆積汚濁負荷量の変化にも人口が一定の場合に比べて値の減少が見られた。しかし、図6のように、家計の生涯効用は

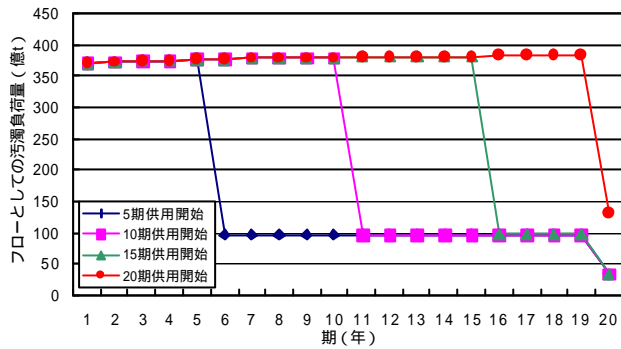


図1 フローとしての汚濁負荷量の変化(人口一定)

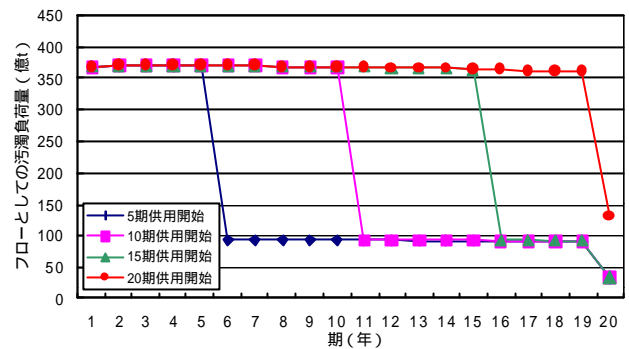


図4 フローとしての汚濁負荷量の変化(人口減少)

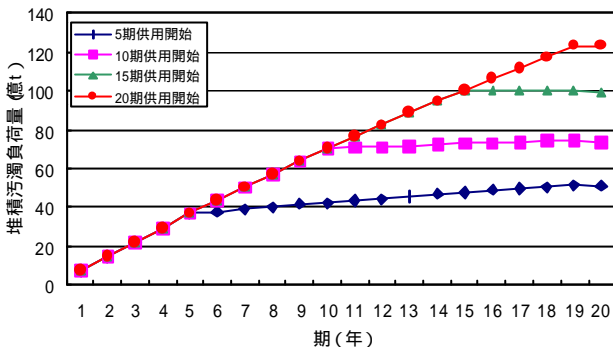


図2 堆積汚濁負荷量の変化(人口一定)

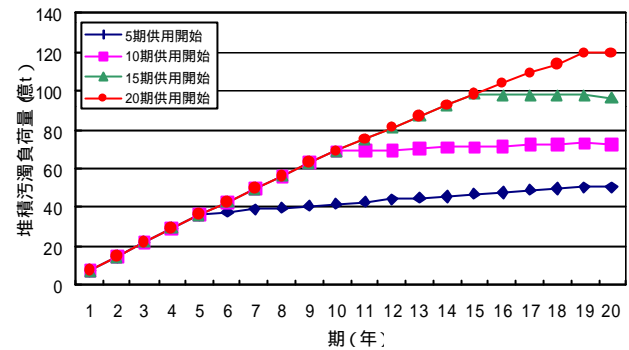


図5 堆積汚濁負荷量の変化(人口減少)

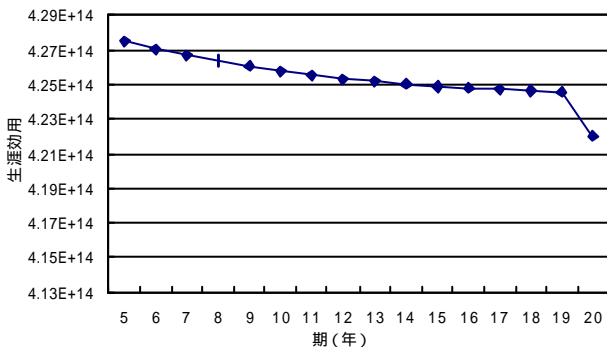


図3 生涯効用の変化(人口一定)

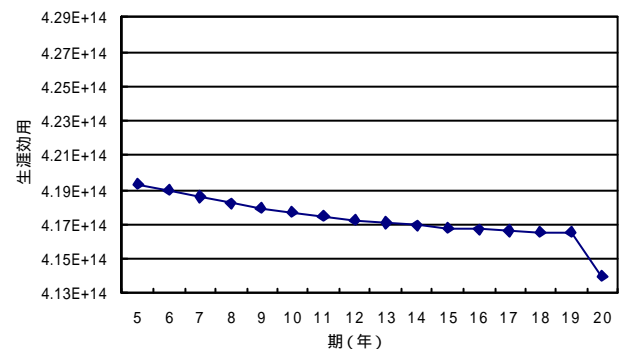


図6 生涯効用の変化(人口減少)

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3%下回っている。これは人口が減少したことにより産業に提供することのできる労働量が減り、その結果産業の生産量が落ち、最終的に家計の消費量が減少してしまったためと考えられる。

5. おわりに

本研究による成果としては、時間遅れや不確実性を考慮したモデルを構築したことにより、長期的な検討を要する水環境保全計画についての立案手法を提案できたという点が挙げられる。また最適整備タイミングは人口が一定、減少いずれの場合も早期供用開始という点は変わっていないということも確認された。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考慮し、長良川の水環境保全を目的とした計画の検討を実施していく予定である。

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) 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，pp1143-1148，2000。
- 3) 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。
- 4) 人口問題研究所：http://www.ipss.go.jp/