

(16) 河川水質の改善に対する都市排水循環利用の効果と費用配分
に関するゲーム論的研究

GAME-THEORETIC ANALYSIS OF THE EFFECTS OF WASTEWATER
REUSE ON RIVER ENVIRONMENTAL REGULATION
WITH A FOCUS ON COST ALLOCATION

渡辺 晴彦* , 岡田 憲夫**

Haruhiko WATANABE, Norio OKADA

ABSTRACTS ; Reuse of wastewater contributes to the decrease in the amounts of water withdrawal as well as its discharges back into receiving water bodies. An integrated system of environmental management with reuse of wastewater will also contribute to enhancement of environmental conservation. This paper deals with a cost allocation problem such that the environmental agency concerned intends to achieve a higher ambient standard of water quality by having water users and the sewerage manager collaborate through developments of a reuse scheme and/or by improving treatment level. The problem is formulated as a multi-agent management problem by use of cooperative three person game theory. A set of necessary conditions for instituting economically viable wastewater reuse systems are derived through mathematical model analyses.

KEYWORDS ; Wastewater reuse, Environmental regulation, Game theory

1. はじめに

都市域に係る河川の水質改善を図る方法には、大別して(1)河川で直接浄化を行う、(2)都市からの汚濁流入を減らす、(3)河川流量を増加し希釈効果を向上させる、という3種類がある。下水処理水などの排水の再利用は(2)(3)に該当するものであり、河川水質の改善に寄与することができる。国土庁水資源白書¹⁾によれば、平成2年における雑用水としての再利用実績は、生活用水全体のわずか0.6%にすぎない。再利用のコストが水道料金、下水道料金と比較して高いことがその原因の一つと言われている。これに対し、国の推進策として、水資源の有効利用と公害防止の観点から税制面と融資面での優遇措置が講じられており、間接的ながらも費用の一部を公的セクターが負担している。

しかしながら、負担の範囲については、水資源の有効利用や公害防止に該当する他の施策と同じ基準が適用されており、循環利用による効果を定量的に評価したものとはなっていない。Watanabe and Okada²⁾は、再利用の対象となる低水質の水需要が増加した場合や下水道の放流水質基準が将来的に向上した場合には、再利用システムの導入がコスト的に見合うことを明らかにしている。今後、都市の再開発などに合わせ、再利用の促進が図られることが推測される現状において、公的セクターがどの程度費用を負担すべきかを定量的に検討する方法論が求められている。

本研究では、Fig.1に示すような一部の地区(再開発地区など)のみでの循環利用を検討する仮想的な都市において、環境管理者が現行の河川の水質環境基準をさらに向上させることを計画している状況を想定する。そ

* (株) 日水コン (Nihon Suido Consultants Co.Ltd.)

** 京都大学防災研究所 (Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

の手段として下水の循環利用と高度処理を考える場合に、どのような組み合わせ方が費用最小となり、その費用はどのように負担すべきかをゲーム理論を援用して考察するのが本研究の目的である。本稿では、まず河川の水質改善ゲームを協力3人ゲームとして定義し、提携費用が循環利用規模に関する最適化問題となることを示す。次にそれらの最適化問題についてモデル分析を行った後、ゲーム理論による費用配分モデルを提示し、河川水質基準を政策パラメータとした場合の適用方法について考察する。そして、ケーススタディで河川水質基準の改善の程度が配分費用にどのような影響を及ぼすかについて具体的に考察する。

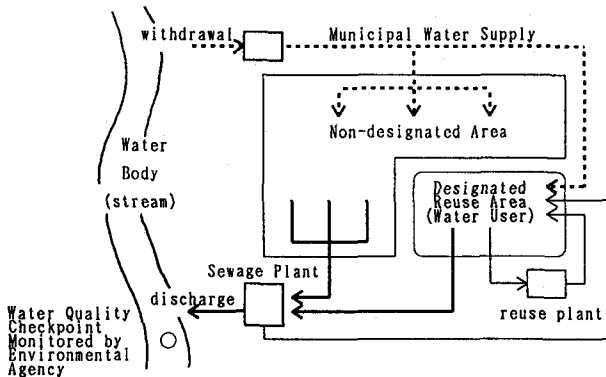


Fig.1 Hypothetical study area

2. 河川水質改善ゲーム

2.1 プレイヤーと可能な提携

仮想的な都市における水利用に係わる以下の4人のプレイヤーを想定する。

- 環境管理者 E

河川水質基準のランクを現行のそれより上げることを目的として行動する。ただし、その手段は単独では実施できず、他と提携した手段に限定され、その費用の一部を負担する。

- 排水再利用地区の水利用者 U

地区内の需要量 d が、高水質を要するもの d_H と低水質で差し支えないもの d_L で構成されるとし、それらを充足する費用を最小とするよう行動する。手段としては、需要の一部（最大 d_L ）を排水の循環利用でまかなうか、全量を高水質である水道水を使用するかである。循環化形態としては、地区単独のオンサイト型の再生施設を持つか、下水道からの広域循環を利用するかの2通りがある。

- 下水道管理者 S

河川の水質基準を満たすように都市内の排水を処理することを目的とする。手段としては、2次処理を踏襲するか、高度処理の導入し場合によっては再利用地区への循環利用を行う。

- 水道管理者 W

循環利用が行われた場合に水道供給水量の減少が生じ、施設費や料金収入の減少として、他のプレイヤーの提携の影響を受ける。しかし、ゲームの展開に直接的な主導権はなく、現状からの費用の変化は水利用者あるいは下水道管理者に費用負担してもらう。

この他に再利用地区以外の水利用者が存在し得るが、本研究では主体的な行動はとらないものと仮定し、水利用者ととは再利用地区をさすものとする。水道管理者 W が、他の3人のプレイヤーの行動に追随し、ゲームの直接的なプレイヤーではないと仮定すれば、「プレイヤーの組み合わせ」として可能な「提携」は以下に示すように7通りある。このうち、新しい河川水質基準を達成するのは提携 (E)、(SE)、(UE)、(USE) であり、提携

(S)、(U)、(US) は現行基準を踏襲する。それぞれの提携が、水質改善ゲームにおいて主体的な行動をとる場合の解釈は以下ようになる。

- 単独提携 (S) が主体となる場合

下水道管理者 S は、現在の放流基準を満たすように処理する（下水道管理者 S は環境管理者 E が求めるさらに高いランクの基準に拘束されない）。これは、循環利用等を考慮しない現在の水利用形態を踏襲することを意味し、他の提携のように最適化問題とはならないものとする。

- 単独提携 (U) が主体となる場合

水利用者 U は、再利用地区内でのオンサイト型循環利用を行う。循環利用規模 x_*^U は、水道、下水道への支払い料金と循環利用施設費の和を最小とする値として設定される。水道管理者、下水道管理者に対しては需要減となり、取水量が減少するために、河川水質は多少改善される。

- 部分提携 (US) が主体となる場合

水利用者と下水道管理者によるオフサイト型の循環利用を行う。循環利用規模 x_*^{US} は、水道への支払い料金と循環利用施設費の和を最小とする水量である。水道管理者には需要減となる。河川水質が改善される。

- 単独提携 (E) が主体となる場合

新たな河川水質基準を達成するため環境管理者は単独で行動する。直接河川浄化するなどの行動が考えられるが、本研究では他に比べ多大な費用がかかるものとする。

- 部分提携 (UE) が主体となる場合

新たな河川水質基準を満たすように、オンサイト型の循環利用を行う。循環利用規模 x_*^{UE} は、水道、下水道への支払い料金と循環利用施設費が最小となる水量である。水道管理者には需要減となる。下水道の放流水質は現行のままである。

- 部分提携 (SE) が主体となる場合

新たな河川水質基準を満たすように、高度処理の導入を行い放流水質を改善する。下水道料金収入と高度処理費の和を最小とする放流水質 y_*^{SE} を決定する。水道管理者、水利用者は、現行のままである。

- 全体提携 (USE) が主体となる場合

新たな河川水質基準を満たすよう、オフサイト型の循環利用と高度処理の導入を行う。水道料金及び循環利用施設費と高度処理費の和が最小となる循環利用規模 x_*^{USE} と放流水質 y_*^{USE} を決定する。水道管理者は需要減となる。

それぞれの提携 T においては、関連する費用（施設ごとに生ずる費用）が最小となる循環利用量 x_*^T あるいは放流水質 y_*^T を決定する最適化が行われる。その費用を $C_T^*(T)$ とする。

一方、このような「主体的」行動に対して、その補集合として「受け身的」行動をとる提携の組み方が存在する。例えば、提携 (UE) が主体的に行動する場合、提携 (S) はその補集合となり、(UE) によるオンサイト循環の影響で流入水量等が減少し、関連する費用が減少することがありうる。このため、提携 T にとって主体的に行動する場合の費用 $C_T^*(T)$ と、受け身的に行動するときのコスト $C_T(T')$ (他の提携 $T' \subseteq N - T$ が主体的に行動する) を比較し、経済的な方を提携費用として採用する。以下では、提携 T_1 が主体的な行動をとる場合の提携 T_2 に関連する費用を $C_{T_2}^*(T_1)$ と表す。

本研究の水質改善ゲームにおいては、主体的な行動での規模決定問題をもとに、受け身的行動との費用比較を行って、提携費用が定義されるものとし、これを「提携内容の選択問題」という。そして、そのような提携内容のすべての可能性が特定された上で、各プレイヤー（水利用主体）が実質的に費用をどのように負担すべ

きかという問題をとりあげ、これを「費用配分問題」という。

「提携内容の選択問題」における受け身の行動との比較が生ずるのは、提携 (U)、(S)、(E) であるが、本研究では (E) は他に比べ多大な費用 M をとるものとし、(U) と (S) に限定する。このようにして、提携 T が負担すべき費用 $v(T)$ が次のように定義される。ここで、*のついたものは規模決定に関する最適化問題を示すが、値を特定しない $v(E)$ を除く全てが最適化を必要する形となる。

$$v(S) = \min \{C_S(S), C_S(U), C_S(UE)\} \quad (1)$$

$$v(U) = \min \{C_U^*(U), C_U(S)\} \quad (C_U(SE) = C_U(S) \text{ である}) \quad (2)$$

$$v(E) = M \quad (M \text{ は他の } v \text{ と比べて十分大きな値}) \quad (3)$$

$$v(US) = C_{US}^*(US) \quad (4)$$

$$v(SE) = C_S^*(SE) \quad (5)$$

$$v(UE) = C_U^*(UE) \quad (6)$$

$$v(USE) = C_{US}^*(USE) \quad (7)$$

以上により、プレイヤー集合 $N = \{U, S, E\}$ と特性関数 v による協力 3 人ゲーム $[N, v]$ を定義することができた。次に、「費用配分問題」では各提携 T が負担すべき費用 $v(T)$ が求められた後、どの提携を都市の水利用システムとして採用するか、そしてその場合の費用配分をどうするかという、2 段階の検討を行う。これについては、3.3 で詳述する。

2.2 特性関数の定義

まず、変数と関数を Table 1 のように定義する。このとき、各提携 T によるプレイヤー集合 I の関連費用 $C_I(T)$ は Table 2 のように定義される。これをもとに式 (1)～式 (7) を整理すると次のようになる。

$$v(S) = \min \left\{ \begin{array}{l} f_s(d + d_r, \hat{q}^S, q_1) - p_s(d) \\ f_s(d - x_*^U + d_r, \hat{q}^U, q_1) - p_s(d - x_*^U) \\ f_s(d - x_*^{UE} + d_r, \hat{q}^{UE}, q_1) - p_s(d - x_*^{UE}) \end{array} \right\} - p_s(d_r) \quad (8)$$

$$v(U) = \min \left\{ \begin{array}{l} p_w(d) + p_s(d) \\ p_w(d - x_*^U) + p_s(d - x_*^U) + f_s(x_*^U, \hat{q}^U, q_L) + g_1(x_*^U) \end{array} \right\} \quad (9)$$

$$v(E) = M \quad (10)$$

$$v(US) = p_w(d - x_*^{US}) + g_1(x_*^{US}) + g_2(x_*^{US}) + f_s(d - x_*^{US} + d_r, \hat{q}^{US}, q_1) + f_s(x_*^{US}, \hat{q}^{US}, q_L) - p_s(d_r) \quad (11)$$

$$v(SE) = f_s(d + d_r, \hat{q}^{SE}, y_*^{SE}) - p_s(d) - p_s(d_r) \quad (12)$$

$$v(UE) = p_w(d - x_*^{UE}) + p_s(d - x_*^{UE}) + f_s(x_*^{UE}, \hat{q}^{UE}, q_L) + g_1(x_*^{UE}) \quad (13)$$

$$v(USE) = p_w(d - x_*^{USE}) + g_1(x_*^{USE}) + g_2(x_*^{USE}) + f_s(d - x_*^{USE} + d_r, \hat{q}^{USE}, y_*^{USE}) + f_s(x_*^{USE}, \hat{q}^{USE}, q_L) - p_s(d_r) \quad (14)$$

ここで、(E) を含む提携 T の x_*^T と y_*^T は、Table2 の制約条件から、目標とする河川水質基準 q_* により決定されることが推測される。このため、 $v(T)$ が q_* の関数として定義できる。さらに、ゲーム理論による費用配分は $v(T)$ から求められるため、 q_* が提携費用の大小関係や、配分費用にどのように影響を与えるかが分析可能となる。

3. 提携費用に関するモデル分析

3.1 費用関数の定義

Table 1 Notations and symbols

item	symbol	description
parameters	d	water demand of water user(in the designated reuse area) ($d = d_H + d_L$)
	d_H	water demand of "class H" (higher water quality level) of water user
	d_L	water demand of "class L" (lower water quality level) of water user
	d_r	water demand of the non-designated area
	Q	amount of river flow before withdrawal
	λ	proportionate share of d by d_L
	μ	proportionate share of $(d + d_r)$ by d
	ν	proportionate share of Q by $(d + d_r)$
	q_0	water quality of withdrawal
	q_1	present water quality of discharged wastewater effluents
	q_*	target water quality at downstream
	q_H	required water quality before use by "class H"
	q_L	required water quality before use by "class L"
	w_H	degree of degraded water quality after use by "class H"
	w_L	degree of degraded water quality after use by "class L"
	$\hat{q}^T$	quality of total wastewater into sewerage system when a coalition T held
	$\tilde{q}^T$	quality of wastewater to be discharged from water user to sewerage system when a coalition T held
	q_r	water quality of wastewater from the non-designated area
	x^T	amount of reused water where a coalition T held (optimum is x^T)
	y^T	future water quality of discharges from sewerage system when a coalition T held
functions	f_w	cost of water supply(function of water demand)
	p_w	cost charged by water supply system(function of water demand)
	p_s	cost charged by sewerage system(function of water demand)
	g_1	conveyance cost of reusing water to "class L" within the designated area(function of x^T)
	g_2	conveyance cost of reusing water from sewerage to the designated area(function of x^T)
	f_s	cost of treating wastewater at sewerage or on-site reuse plant(function of amount of wastewater treated, quality of wastewater before treatment, and that of wastewater after treatment)

NB:water quality is measured in concentration; costs are expressed in terms of sum of amortized capital and annual operation and maintenance costs.

Table 2 Costs accruing to player set T_2 from main coalition T_1 ; $C_{T_2}(T_1)$

Main Coalition	W (water supply manager)	U (water user in designated area)	S (sewerage manager)
(S)	$C_W(S) \equiv f_w(d+d_r)$ $-p_w(d)-p_w(d_r)$	$C_U(S) \equiv p_w(d)+p_s(d)$	$C_S(S) \equiv f_s(d+d_r, \hat{q}^S, q_1)$ $-p_s(d)-p_s(d_r)$
(U)	$C_W(U) \equiv f_w(d-x^U+d_r)$ $-p_w(d-x^U)-p_w(d_r)$	$C_U(U) \equiv \min\{p_w(d-x^U)+p_s(d-x^U)$ $+f_s(x^U, \hat{q}^U, q_L)+g_1(x^U)\}$ s.t. $x^U \leq d_L$	$C_S(U) \equiv f_s(d-x^U+d_r, \hat{q}^U, q_1)$ $-p_s(d-x^U)-p_s(d_r)$
(US)	$C_W(US) \equiv f_w(d-x^{US}+d_r)$ $-p_w(d-x^{US})-p_w(d_r)$	$C_{US}(US) \equiv \min_{x^{US}}\{p_w(d-x^{US})+g_1(x^{US})+g_2(x^{US})+f_s(d-x^{US}+d_r, \hat{q}^{US}, q_1)$ $+f_s(x^{US}, \hat{q}^{US}, q_L)-p_s(d_r)\}$ s.t. $x^{US} \leq d_L$	
(SE)	$C_W(SE) \equiv f_w(d+d_r)$ $-p_w(d)-p_w(d_r)$	$C_U(SE) \equiv p_w(d)+p_s(d)$	$C_S(SE) \equiv \min_{y^{SE}}\{f_s(d+d_r, \hat{q}^{SE}, y^{SE})$ $-p_s(d)-p_s(d_r)\}$ s.t. $\frac{(Q-d-d_r)q_0+(d+d_r)y^{SE}}{Q} \leq q_*$
(UE)	$C_W(UE) \equiv f_w(d-x^{UE}+d_r)$ $-p_w(d-x^{UE})-p_w(d_r)$	$C_U(UE) \equiv \min\{p_w(d-x^{UE})+p_s(d-x^{UE})$ $+f_s(x^{UE}, \hat{q}^{UE}, q_L)+g_1(x^{UE})\}$ s.t. $x^{UE} \leq d_L$ $\frac{(Q-d+x^{UE}-d_r)q_0+(d-x^{UE}+d_r)q_1}{Q} \leq q_*$	$C_S(UE) \equiv f_s(d-x^{UE}+d_r, \hat{q}^{UE}, q_1)$ $-p_s(d-x^{UE})-p_s(d_r)$
(USE)	$C_W(USE) \equiv f_w(d-x^{USE}+d_r)$ $-p_w(d-x^{USE})-p_w(d_r)$	$C_{US}(USE) \equiv \min_{x^{USE}, y^{USE}}\{p_w(d-x^{USE})+g_1(x^{USE})+g_2(x^{USE})$ $+f_s(d-x^{USE}+d_r, \hat{q}^{USE}, y^{USE})+f_s(x^{USE}, \hat{q}^{USE}, q_L)-p_s(d_r)\}$ s.t. $x^{USE} \leq d_L$, $\frac{(Q-d+x^{USE}-d_r)q_0+(d-x^{USE}+d_r)y^{USE}}{Q} \leq q_*$	

本研究では解析的な考察を行うため、費用関数を線形関数として定義する。これは、本研究の目的が任意の提携における最適な規模決定ではなく、提携が選好される条件を分析するためである。

(1) 水道料金 p_w 、下水道料金 p_s

水道料金と下水道料金は、水量 z に対して線形とし、それぞれの単価 c_w, c_s とする。

$$p_w(z) = c_w z, \quad p_s(z) = c_s z \quad (15)$$

(2) 下水処理施設費 f_s

循環利用のための処理施設及び下水処理場の施設費用は、処理水量 z と流入水質 q_{in} 及び放流水質 q_{out} の関数とする。処理水量と流入水質に関しては線形、放流水質に関しては反比例するものとする。

$$f_s(z, q_{in}, q_{out}) = \alpha \cdot z \cdot q_{in} \cdot \frac{1}{q_{out}} \quad (16)$$

(3) 循環送水施設費 g_1, g_2

再利用地区で循環利用を行うために、オンサイト、オフサイトとも地区内配管費が必要となる。さらに、オフサイト循環の場合には下水処理場から再利用地区までの導水施設が必要となる。これらは、処理水量 z の線形関数とする。

$$g_1(z) = \beta_1 z, \quad g_2(z) = \beta_2 z \quad (17)$$

3.2 提携内容の選択問題のモデル分析

ここでは、最適化問題の結果として得られる提携費用についてのモデル分析を行う。なお、 $C_{T_2}(T_1)$ の導出過程は岡田・渡辺⁴⁾に詳述してある。

(1) $v(U)$ の検討

式(2)の $C_U(U)$ に費用関数を代入すると次のように整理され、下に凸な2次関数となる ($q_L > q_H$)。

$$C_U(U) = (c_w + c_s)d + (\beta_1 + \alpha \frac{q(\lambda)}{q_L} - c_w - c_s)x^U + \alpha \frac{q_L - q_H}{q_L} \frac{1}{d} (x^U)^2 \quad (18)$$

ここで、 $\lambda = d_L/d$ とし、 $q(\lambda) = q_H + (1 - \lambda)w_H + \lambda w_L$ と定義する。 λ は再利用地区での低水質需要の比率であり、 $q(\lambda)$ は再利用をしない場合の下水道への排水水質を意味する。(18) 式の定数項は $C_U(S)$ に等しいことから、 $C_U(U) < C_U(S)$ となるためには、 $x_*^U > 0$ となる必要があり、この条件は x^U の係数が負となることである。整理すると次式となる。

$$\frac{c_w + c_s - \beta_1}{\alpha} > \frac{q(\lambda)}{q_L} \quad (19)$$

このとき最適値は、

$$x_*^U = \frac{\frac{c_w + c_s - \beta_1}{\alpha} - \frac{q(\lambda)}{q_L}}{2 \frac{q_L - q_H}{q_L}} \cdot d \quad (20)$$

である。 $x^U \leq d_L$ を含めて、 $v(U)$ は次のように定義される。

$$v(U) = \begin{cases} (c_w + c_s)d & \text{ただし } \frac{c_w + c_s - \beta_1}{\alpha} \leq \frac{q(\lambda)}{q_L}, \quad x_*^U = 0 \\ \left[c_w + c_s - \alpha \frac{(\frac{c_w + c_s - \beta_1}{\alpha} - \frac{q(\lambda)}{q_L})^2}{4 \frac{q_L - q_H}{q_L}} \right] d & \text{ただし } \frac{q(\lambda)}{q_L} < \frac{c_w + c_s - \beta_1}{\alpha} \leq \frac{q(\lambda) + 2(q_L - q_H)}{q_L}, \quad x_*^U \text{ は (20) 式} \\ \left[(c_w + c_s)(1 - \lambda) + \beta_1 \lambda + \frac{\alpha}{q_L} \{ q(\lambda) \lambda + (q_L - q_H) \lambda^2 \} \right] d & \text{ただし } \frac{q(\lambda) + 2(q_L - q_H)}{q_L} < \frac{c_w + c_s - \beta_1}{\alpha}, \quad x_*^U = d_L = \lambda d \end{cases} \quad (21)$$

(2) $v(US)$ の検討

式 (4) の $C_{US}(US)$ に費用関数を代入すると次のように整理される。

$$C_{US}(US) = \left\{ c_w \mu - c_s(1-\mu) + \alpha \frac{q(\lambda, \mu)}{q_1} \right\} (d + d_r) + \left\{ -c_w + \beta_1 + \beta_2 + \alpha \frac{q_L - q_H}{q_1} + \alpha q(\lambda, \mu) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right) \right\} x^{US} + \alpha (q_L - q_H) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right) \frac{(x^{US})^2}{d + d_r} \quad (22)$$

ここで、 $\mu = \frac{d}{d + d_r}$ とし、 $q(\lambda, \mu) = q(\lambda)\mu + q_r(1 - \mu)$ と定義する。 μ は、再利用地区の総需要が都市全体に占める割合であり、 $q(\lambda, \mu)$ は、再利用をしない場合の都市全体から下水道への排水水質を示す。(22) 式で示される 2 次関数が下に凸となるには、 $(x^{US})^2$ の係数が正である必要がある。すなわち、 $q_L < q_1$ となり、再利用水質が放流基準水質より良いことが必要である。さらに、 $x_*^{US} > 0$ となるためには、 x^{US} の係数が負となる必要があり、その条件を整理すると次式となる。

$$\frac{c_w - \beta_1 - \beta_2}{\alpha} > \frac{q_L - q_H}{q_1} + q(\lambda, \mu) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right) \quad (23)$$

このとき、

$$x_*^{US} = \frac{\frac{c_w - \beta_1 - \beta_2}{\alpha} - \frac{q_L - q_H}{q_1} - q(\lambda, \mu) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right)}{2(q_L - q_H) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right)} \cdot (d + d_r) \quad (24)$$

となる。 $x^{US} \leq d_L$ を含めると、 $v(US)$ は次のように定義される。

$$v(US) = \begin{cases} \left\{ c_w \mu - c_s(1-\mu) + \alpha \frac{q(\lambda, \mu)}{q_1} \right\} (d + d_r) & \text{ただし } \frac{c_w - \beta_1 - \beta_2}{\alpha} \leq \frac{q_L - q_H}{q_1} + q(\lambda, \mu) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right), \quad x_*^{US} = 0 \\ \left[\left\{ c_w \mu - c_s(1-\mu) + \alpha \frac{q(\lambda, \mu)}{q_1} \right\} - \alpha \frac{\frac{c_w - \beta_1 - \beta_2}{\alpha} - \frac{q_L - q_H}{q_1} - q(\lambda, \mu) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right)}{4(q_L - q_H) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right)} \right] (d + d_r) & \text{ただし } \frac{q_L - q_H}{q_1} + q(\lambda, \mu) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right) < \frac{c_w - \beta_1 - \beta_2}{\alpha} \leq \frac{q_L - q_H}{q_1} + \{q(\lambda, \mu) + 2\lambda\mu(q_L - q_H)\} \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right), \quad x_*^{US} \text{ は (24) 式} \\ \left[\left\{ c_w \mu - c_s(1-\mu) + \alpha \frac{q(\lambda, \mu)}{q_1} \right\} - \alpha \left\{ \left(\frac{c_w - \beta_1 - \beta_2}{\alpha} - \frac{q_L - q_H}{q_1} - q(\lambda, \mu) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right) \right) \lambda\mu - (q_L - q_H) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right) \lambda^2 \mu^2 \right\} \right] (d + d_r) & \text{ただし } \frac{q_L - q_H}{q_1} + \{q(\lambda, \mu) + 2\lambda\mu(q_L - q_H)\} \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_1} \right) < \frac{c_w - \beta_1 - \beta_2}{\alpha}, \quad x_*^{US} = d_L = \lambda\mu(d + d_r) \end{cases} \quad (25)$$

(3) $v(SE)$ の検討

式 (5) の $C_S(SE)$ に費用関数を代入して整理すると次式を得る。

$$C_S(SE) = \frac{\alpha \{q(\lambda)d + q(\lambda, \mu)(d + d_r)\}}{y^{SE}} - c_s(d + d_r) \quad (26)$$

これは、 y^{SE} に関する減少関数となっている。 y_*^{SE} は水質条件から次のように決定される。

$$y_*^{SE} = \frac{1}{\nu} (q_* - q_0) + q_0 \quad (27)$$

ここで、 $\nu = (d + d_r)/Q$ と定義し (ν は、取水点での河川流量に対する都市の需要量の比率)、(26) 式に代入すると、 $v(SE)$ は次のようになる。

$$v(SE) = \left[\alpha \cdot \frac{q(\lambda, \mu)}{q_0 \left\{ \frac{1}{\nu} \left(\frac{q_*}{q_0} - 1 \right) + 1 \right\}} - c_s \right] (d + d_r) \quad (28)$$

(4) $v(UE)$ の検討

式 (6) の $C_U(UE)$ と $C_U(U)$ は同じ関数形状 (式 (18) 参照) であるが、 x_*^{UE} は水質条件からつぎのように決定される。

$$x_*^{UE} = Q \frac{q_* - q_0}{q_0 - q_1} + d + d_r \quad (29)$$

したがって、 $v(UE)$ は次のように整理される。

$$v(UE) = \left[(c_w + c_s) - \alpha \left\{ \frac{c_w + c_s - \beta_1}{\alpha} - \frac{q(\lambda)}{q_L} \right\} \left\{ \frac{q_0 - \frac{1}{\nu} \left(\frac{q_*}{q_0} - 1 \right) + 1}{q_0 - q_1} \right\} \frac{1}{\mu} + \alpha \frac{q_L - q_H}{q_L} \left\{ \frac{q_0 - \frac{1}{\nu} \left(\frac{q_*}{q_0} - 1 \right) + 1}{q_0 - q_1} \right\}^2 \frac{1}{\mu^2} \right] d \quad (30)$$

ここで、 $x^{UE} \leq \lambda \mu (d + d_r)$ の条件により、

$$q_* \geq (1 - \lambda \mu) \nu (q_1 - q_0) + q_0 \quad (31)$$

となり、提携 (UE) で達成できる河川水質には限界があり、それ以上は提携が成立せず、提携費用が定義できないことに注意する必要がある。

(5) $v(S)$ の検討

式 (1) の $C_S(S)$ 、 $C_S(U)$ 、 $C_S(UE)$ に費用関数を代入して整理すると次のようになる。

$$C_S(S) = \left\{ \alpha \frac{q(\lambda, \mu)}{q_1} - c_s \right\} (d + d_r) \quad (32)$$

$$C_S(U) = \left\{ \alpha \frac{q(\lambda, \mu)}{q_1} - c_s \right\} (d + d_r) + \left\{ c_s - \alpha \frac{q(\lambda)}{q_1} + \alpha \frac{q_L - q_H}{q_1} \right\} x^U - \alpha \frac{q_L - q_H}{q_1} \frac{(x^U)^2}{d} \quad (33)$$

$$C_S(UE) = \left\{ \alpha \frac{q(\lambda, \mu)}{q_1} - c_s \right\} (d + d_r) + \left\{ c_s - \alpha \frac{q(\lambda)}{q_1} + \alpha \frac{q_L - q_H}{q_1} \right\} x^{UE} - \alpha \frac{q_L - q_H}{q_1} \frac{(x^{UE})^2}{d} \quad (34)$$

ここで、式 (33)(34) は、定数項を $C_S(S)$ とする上に凸な 2 次関数となっており、最大値の位置関係により $v(S)$ は次のように整理される。ここで、 $x_*^U < x_*^{UE}$ を前提としており、逆の場合は $C_S(UE)$ の代わりに $C_S(U)$ が入る。このため、受け身的な提携の検討対象としては、 x^U と x^{UE} の大きい方が該当することになる。

$$v(S) = \begin{cases} C_S(UE) & \frac{c_s}{\alpha} \leq \frac{q(\lambda) - (q_L - q_H)}{q_1} \\ \min\{C_S(S), C_S(UE)\} & \frac{q(\lambda) - (q_L - q_H)}{q_1} < \frac{c_s}{\alpha} \leq \frac{q(\lambda) + (q_L - q_H)(2\lambda - 1)}{q_1} \\ C_S(S) & \frac{q(\lambda) + (q_L - q_H)(2\lambda - 1)}{q_1} < \frac{c_s}{\alpha} \end{cases} \quad (35)$$

(6) $v(USE)$ の検討

式 (7) の $C_{US}(USE)$ に費用関数を代入して展開すると、次のようになる。

$$C_{US}(USE) = \{c_w \mu - c_s(1 - \mu)\} (d + d_r) + (-c_w + \beta_1 + \beta_2 + \alpha \frac{q(\lambda, \mu)}{q_L}) x^{USE} + \alpha \frac{q_L - q_H}{q_L} \frac{(x^{USE})^2}{d + d_r} \\ + \frac{\alpha}{y^{USE}} \left\{ q(\lambda, \mu) (d + d_r) + (q_L - q_H - q(\lambda, \mu)) x^{USE} - (q_L - q_H) \frac{(x^{USE})^2}{d + d_r} \right\} \quad (36)$$

ここで、 y^{USE} は水質条件から次のように与えられる x^{USE} の分数関数である。

$$y_*^{USE} = \frac{Q}{d + d_r - x_*^{USE}} (q_* - q_0) + q_0 \quad (37)$$

代入して整理すると次のようになる。

$$C_{US}(USE) = A(x^{USE})^2 + Bx^{USE} + C + \frac{E}{x^{USE} - D} \quad (38)$$

ただし、係数 A、B、C、D、E は次のとおり。

$$A = \alpha (q_L - q_H) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_0} \right) \frac{1}{d + d_r} \quad (39)$$

$$B = -c_w + \beta_1 + \beta_2 + \alpha q(\lambda, \mu) \left(\frac{1}{q_L} - \frac{1}{q_0} \right) + \alpha \frac{q_L - q_H}{q_0} \left\{ 1 - \frac{1}{\nu} \left(\frac{q_*}{q_0} - 1 \right) \right\} \quad (40)$$

$$C = \left[c_w \mu - c_s(1 - \mu) + \alpha \frac{q(\lambda, \mu)}{q_0} \left\{ 1 - \frac{1}{\nu} \left(\frac{q_*}{q_0} - 1 \right) \right\} - \alpha \frac{q_L - q_H}{q_0} \frac{1}{\nu^2} \left(\frac{q_*}{q_0} - 1 \right)^2 \right] (d + d_r) \quad (41)$$

$$D = \left\{ 1 + \frac{1}{\nu} \left(\frac{q_*}{q_0} - 1 \right) \right\} (d + d_r) \quad (42)$$

$$E = -\alpha \frac{1}{\nu^2} \left(\frac{q_*}{q_0} - 1 \right)^2 \left[\frac{q(\lambda, \mu)}{q_0} + \frac{q_L - q_H}{q_0} \left\{ 1 + \frac{1}{\nu} \left(\frac{q_*}{q_0} - 1 \right) \right\} \right] (d + d_r)^2 \quad (43)$$

この関数は、 $x = D$ と $C = Ax^2 + Bx + C$ に漸近する形状をとる。具体的な形状等については、ケーススタディで検討する。 x_{*}^{USE} は、式 (38) を微分して 0 とおくことにより、次の 3 次方程式の解となる。

$$(2Ax + B)(x - D)^2 - E = 0 \quad (44)$$

この一般解は Cardano の方法などにより求めることができるが、複雑な形式となるため解の挙動に関する条件整理は実質的に困難である。

3.3 費用配分問題のモデル

提携費用 $v(T)$ が求められた段階で、どの提携を都市の水利用システムとして採用するかは、次の提携構造としての総費用の大小関係から決定される。

$$\left\{ \begin{array}{ll} v(U) + v(S) + v(E) & \text{オンサイト循環+河川浄化} \\ v(US) + v(E) & \text{オフサイト循環+河川浄化} \\ v(UE) + v(S) & \text{オンサイト循環} \\ v(SE) + v(U) & \text{高度処理+オンサイト循環} \\ v(USE) & \text{オフサイト循環+高度処理} \end{array} \right.$$

ここで、 $v(USE)$ が最小とは限らず、他の組み合わせとなることも想定しうる。任意の提携構造 $T = \{T_j\}$ が採用されるとしたとき、それぞれのプレイヤー i の負担費用を θ_i とすると、全員が満足するためには、次の条件が成立する必要がある。

$$\sum_{i \in T_j \in T} \theta_i = v(T_j), \quad \sum_{i \in T'} \theta_i \leq v(T'), \quad T' \neq T_j \quad (45)$$

これは、協力ゲームの解の 1 つであるコアの概念に当たる。しかしながら、コアは必ずしも存在するとは限らない。このような場合のゲームの解としては、 $v(T)$ から解析的に求められる Shapley 値と $v(T)$ の制約による θ 空間の中で最適化を行う仁がある⁵⁾。Shapley 値は、提携に参加する順番を考慮し後から参加する場合に費用の増分を負担する原則で、可能な順番全てによる期待値を求めるものである。Shapley 値は計算が簡便であるから、解析的な取扱いも容易であるという利点がある。しかし、一部の $v(T)$ が他の $v(T')$ に比べて圧倒的に大きい場合または（そのために）特定されない場合には、計算のために ad hoc な仮定を加えないと求まらない。一方、仁は、提携 T を採用することを前提に（必要に応じ辞書式に繰り返し）、他の提携の有利性からの不満を全体に配分するものであり、最大不満の最小化として次の LP 問題を解くことに帰着する。

$$\min \varepsilon \quad \text{subject to} \quad \sum_{i \in T_j \in T} \theta_i = v(T_j), \quad \sum_{i \in T'} \theta_i - v(T') \leq \varepsilon, \quad T' \neq T_j \quad (46)$$

この LP 問題では、上述したような他に比べ多大な提携費用となる提携は、制約条件として働かないと考えることにより外して考えることができる。本研究における水質改善ゲームは、 $v(E)$ の値が多である状況を想定し、さらにこれまでの考察から $v(UE)$ も水質改善の限界があり特定できなくなることから、仁の概念が有効である。仮に $v(E)$ が特定できる場合には、Shapley 値による考察が可能となるが、仁による θ_E と比較することで、環境管理者がどのような選択を行うべきかを検討することも可能である。ケーススタディでは、コアの存在と仁による配分が河川の目標水質 q_* に対してどのように変化するかを分析する。

4. ケーススタディ

4.1 費用および水質パラメータ値の設定

設定したモデルパラメータの値は Table 3 にまとめた。費用パラメータは、建設費と維持管理費の年費用として求めた。水道料金単価 c_w については、平成 2 年度における全国上水道の供給原価の平均値から 143 円/ m^3

とする⁶⁾。都市の規模により 124~160 円/ m^3 のばらつきがある。下水道使用料単価 c_s は、平成 3 年の家庭料金の全国平均 90 円/ m^3 とする⁷⁾。循環送水に係る単価 β_1, β_2 については、上水道の給水原価における送配水費をもとに、いずれも 30 円/ m^3 とした。

下水処理に関する単価 α については、Table 4 に示す高度処理の費用試算例⁸⁾を用いて回帰式($f_s = \phi_1 \cdot z \cdot q_{in}^{\phi_2} q_{out}^{\phi_3}$)の作成を行った結果、 $\phi_2 > 0$ 、 $\phi_3 < 0$ となる傾向は、BOD、COD、SS、N、P の水質指標で確認できた。このうち、相関が最も良かった BOD 指標を説明変数にした場合の結果を Table 5 に示す。水量により違いはあるが、平均すると、

$$f_s/z(\text{円}/m^3) = 93.3BOD_{in}^{0.37}BOD_{out}^{-1.18} \quad (\bar{R} = 0.68) \tag{47}$$

となった。このため、費用関数を (16) 式のように仮定することは、 q_{in} が大きくなった場合に誤差が生ずることになるが、下水道への流入水質は循環利用による変化は 20 %程度であり大きな変化を生じないことから⁹⁾、区分的に線形化可能と考えられる。本稿では、

$$\alpha = \frac{f_s}{zq_{in}/q_{out}} = 93.3BOD_{in}^{-0.63}BOD_{out}^{0.18} \tag{48}$$

として、 $BOD_{in}=180$ 、 $BOD_{out}=12$ の場合に $\alpha = 5$ となる値に固定してとらえる。さらに、他のパラメータが人件費などを含んでおり、水道統計によればそれが費用の概ね 25 %を占めることから、最終的に $\alpha = 7$ と補正した値を採用した。

水質パラメータについては、大阪府で標準的事務所ビルの用途別 BOD 水質を計測した報告¹⁰⁾を参考とした。同報告によれば、水洗便所 325mg/ℓ、厨房 185mg/ℓ、洗車等 180mg/ℓであり、高水質である水道水を使用した後の排水水質とみなした。また、地域の水利用特性を示すパラメータとして、低水質用途の比率は水洗用水を念頭に $\lambda=0.2$ とする。再利用地区の水量比は $\mu = 0.3$ 、河川水に対する需要量の比率は $\nu=0.5$ を仮想する。河川水質基準 q_* は政策パラメータとしてその影響を考察することにした。

Table 3 Parameter values in case study

cost parameters	value yen/ m^3	water quality parameters	value mg/l
c w	143	qH	0
c s	90	qL	10
α	7	wH	180
β_1	30	wL	325
β_2	30	q r	200
		q 0	2
		q 1	15

Table 5 Results of regression analyses

amount of water	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	correlation coefficient
3000	116.9	0.37	-0.99	0.76
10000	95.7	0.35	-1.09	0.69
50000	85.1	0.38	-1.30	0.64
100000	82.2	0.38	-1.35	0.63
average	93.3	0.37	-1.18	0.68

Table 4 Water quality parameters and costs of advanced treatment processes⁸⁾

Types of Combined Process		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Original Process	Pre Treatment								CASP	CASP	CASP	CASP	CASP	CASP
	Conventional Activated Sludge Process	○												
	Rapid Filtration			○		○		○	○	○	○	○	○	
	Chemical Precipitation									○				
	Activated Carbon Adsorption									○		○	○	
	Ozonation												○	
	Phosphorus Removal with Crystallization													○
	Chemical Precipitation with Activated Sludge				○	○								
	Combined Carbon Oxidation Nitrification						○	○						
	Denitrification with Chemical Precipitation		○	○										
BOD Variation	Combined Carbon Oxidation-Nitrification Denitrification													
	Input level (q _{in}) mg/l	180	180	180	180	180	180	180	12	12	12	12	12	12
	Output level (q _{out}) mg/l	12	9	7	10	8	9	7	7	5	3	5	3	7
	q _{in} /q _{out}	15.0	20.0	25.7	18.0	22.5	20.0	25.7	1.7	2.4	4.0	2.4	4.0	1.7
Unit Cost	Ratio of Removal %	90	93	94	92	94	93	94	40	60	75	40	75	40
	Q: 3,000 m ³ /day(at maximum) yen/m ³	71	82	104	84	106	96	118	21	48	106	90	88	73
	Q: 10,000 m ³ /day(at maximum) yen/m ³	42	51	63	50	62	60	72	12	31	79	70	57	50
	Q: 50,000 m ³ /day(at maximum) yen/m ³	25	36	42	31	37	43	48	6	19	61	59	41	36
Unit cost q _{in} /q _{out}	Q: 100,000 m ³ /day(at maximum) yen/m ³	21	32	37	27	31	38	43	5	17	57	55	36	33
	Q: 3,000 m ³ /day(at maximum)	4.7	4.1	4.0	4.7	4.7	4.8	4.6	12.3	20.0	26.5	37.5	22.0	42.6
	Q: 10,000 m ³ /day(at maximum)	2.8	2.6	2.5	2.8	2.8	3.0	2.8	7.0	12.9	19.8	29.2	14.3	29.2
	Q: 50,000 m ³ /day(at maximum)	1.7	1.8	1.6	1.7	1.6	2.2	1.9	3.5	7.9	15.3	24.6	10.3	21.0
	Q: 100,000 m ³ /day(at maximum)	1.4	1.6	1.4	1.5	1.4	1.9	1.7	2.9	7.1	14.3	22.9	9.0	19.3

4.2 提携費用の分析

Table 3 の値を提携費用の式に代入し、将来の河川水質基準 q_* による変化を比較したものを Fig.2 に示す。同図では、提携費用を $v'(T) = \frac{v(T)}{d+d_r}$ と基準化して表しており、単位は円/ m^3 である (Table 6 も同様)。

提携内容の選択問題としては次の結果となった。提携 (U)、(US) における再利用規模は、いずれも低水質用途の需要量 d_L の限度まで行うことが経済的であった。提携 (S) は、提携 (U) の補集合としての受け身的な行動 (オンサイト循環を前提とした2次処理) を最適とする。以上の3提携は、 q_* の向上に費用が影響されない。

一方、提携 (UE) による河川水質の改善限界は (31) 式より $q_* = 8.1mg/l$ であり、現状の河川水質が $q_1\nu + q_0(1-\nu) = 15 \times 0.5 + 2 \times 0.5 = 8.5mg/l$ であることに比較してわずかな範囲となった。この範囲では、 q_* の向上とともに再利用量が増加し提携費用が低減するが、これは d_L で最小となるためである。それ以上の改善に対しては提携費用 $v(UE)$ が定義できない。提携 (SE) は、 q_* の向上に対して費用が増加する。提携 (USE) については、Fig.3 に (36) 式の形状を示した。同図では、提携費用と再利用量を $(d+d_r)$ で基準化しており、横軸は再利用量の比率を意味する。設定条件での再利用比率の限界は $0.06 = 0.2 \times 0.3$ であり、この値まで再利用することが費用最小となる。また、 q_* をパラメトリックに変えた曲線の間隔が徐々に増えていくことから、 q_* に関しては費用が増加する。以上のように、環境管理者が関わる提携費用 $v(UE)$ を除き、 q_* の向上に対して費用が増加する。このため、費用配分においては最も負担額が多くなることが予想される。

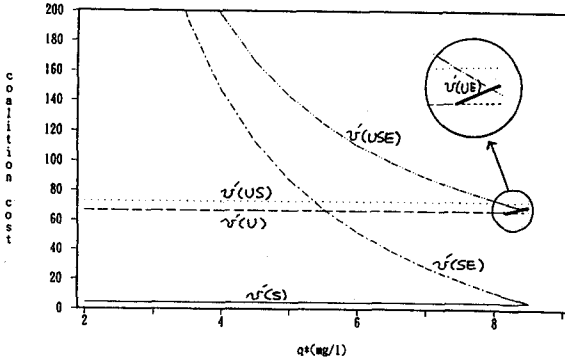


Fig.2 Variation of coalition cost with q_*

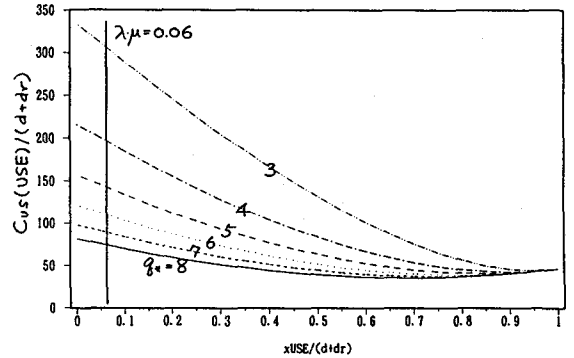


Fig.3 Variation of $C_{US}(USE)$ with x^{USE} and q_*

4.3 費用配分の分析

Table 6 には、どのような提携の組み合わせが費用最小となるかを示した。提携 (USE) が常に最小となることから、同提携にはコアが存在することがわかった。仁による $v(USE)$ の費用配分は、次のLP問題を解くことになる。 $v(UE)$ が定義できない範囲 ($q_* < 8.1$) では、(52) 式を除いて計算する。

$$\min \quad \varepsilon \quad \text{subject to} \quad \theta_U + \theta_S + \theta_E = v(USE) \quad (49)$$

$$-\varepsilon + \theta_U + \theta_S \leq v(US) \quad (50)$$

$$-\varepsilon + \theta_S + \theta_E \leq v(SE) \quad (51)$$

$$-\varepsilon + \theta_U + \theta_E \leq v(UE) \quad (52)$$

$$-\varepsilon + \theta_U \leq v(U) \quad (53)$$

$$-\varepsilon + \theta_S \leq v(S) \quad (54)$$

Fig.4 に配分結果を示した。 $v(UE)$ が定義できる区間では、 q_* の向上に対し環境管理者の負担 θ_E が減少する。これは、循環利用限度まで再利用することが経済的であるが、河川水質 q_* に応じた再利用量は限度内であることによる。また、下水道管理者の負担 θ_S は増加する。これ以外の区間では、 θ_S が一定となり、 θ_E が急増するが、水利用者の負担 θ_U は減少していく。オフサイト循環のみの提携費用 $v(US)$ が 72 (円/ m^3) であることから、現状においても環境管理者が負担すべき費用が存在し、極限までの水質改善を行う場合にはさらに増え、オフサイト循環の半分程度を負担する必要性が生ずる。これらのことから、循環利用の導入に対して、水質改善の点からその負担を軽減する措置の必要性がある。

Table 6 Sub-additivity conditions(yen/ m^3)

combinations of coalitions	Target water quality at downstream $q^*(mg/l)$							
	8.5	8	7	6	5	4	3	2
$v^*(USE)$	68.0	74.1	89.3	110.7	143.0	197.3	307.5	652.3
$v^*(UE)+v^*(S)$	74.3							
$v^*(SE)+v^*(U)$	71.2	77.9	94.8	118.5	153.9	213.1	331.3	686.0
$v^*(SE)+v^*(S)+v^*(US)$	72.9	79.6	96.5	120.2	155.6	214.8	333.0	687.7
$v^*(UE)+v^*(U)+v^*(US)$	76.0							

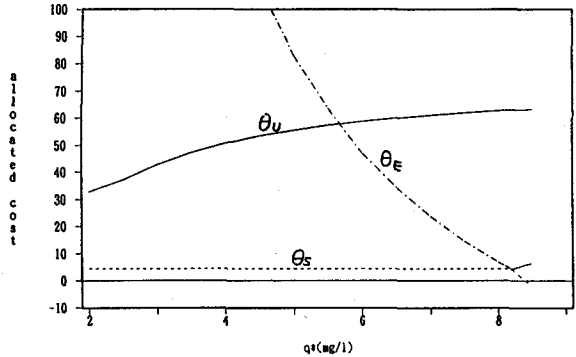


Fig.4 Variation of allocated cost with q_* .

5. おわりに

都市排水の再利用は、これまで水資源の不足を補う手段としての評価が主になされてきた。特に、造水コストが水道料金、下水道料金に対しどの程度になるかが注目されてきた。これは本稿で定義した提携費用のうちオンサイト循環の費用最小化問題として扱われてきたものと言える。しかしながら、再利用が徐々に増加する傾向にある現在では、都市全体の問題として捉えなおし、環境面からの評価も加えた計画論が必要と考えられる。

本研究は、循環利用による河川水質改善の効果を明示的に評価し、再利用の水利用者、下水道管理者、環境管理者の協力3人ゲームとしてモデル化し、提携費用の分析とケーススタディを行い次の結論を得た。

1. 水利用に関わる水質パラメータ (q_0, q_L, q_1, q_*)、水量パラメータ (λ, μ, ν)、費用パラメータ ($c_w, c_s, \beta_1, \beta_2, \alpha$) の関係から、提携費用および循環利用量を推定することが可能となった (モデル分析より)
2. 環境管理者の提携費用を特定しない場合には、「仁」の概念を適用したLPを解くことにより、その負担費用を推定することができる (モデル分析より)。
3. 環境管理者の負担費用は、河川水質基準 q_* が向上するにつれて増加し、循環利用者の負担は減少することから、河川水質改善に関して循環利用の負担を軽減する措置が必要であることを指摘した (ケーススタディより)。

今後の課題としては、政策変数として再利用地区の範囲 (μ) を変化させた場合のケーススタディを行うとともに、費用関数を非線形とした場合との比較を通したモデル分析が必要である。

参考文献

- 1) 国土庁水資源部：平成5年度水資源白書、1993
- 2) Watanabe, H. and N.Okada:Game-theoretic Analysis of Integrated Environmental Management with Reuse of Wastewater Combined, Stochastic and Statistical Methods in Hydrology and Environmental Engineering, forthcoming.
- 3) 渡辺晴彦・岡田憲夫:循環型都市水利用システムの整備形態に関する基礎的考察、第4回水資源に関するシンポジウム前刷集、pp177-182、1992.
- 4) 岡田憲夫・渡辺晴彦:都市排水再利用の水質改善効果に関するゲーム論的研究、京都大学防災研究所年報、第36号、1994 (刊行予定)。
- 5) 鈴木光男:社会システム—ゲーム論的アプローチ、共立出版、1976.
- 6) 厚生省生活衛生局水道環境部水道整備課監修:平成3年度水道統計、日本水道協会、1993.
- 7) 建設省都市局下水道部監修:平成5年日本の下水道、日本下水道協会、1993.
- 8) 建設省土木研究所:下水道高度処理計画及び高度処理導入プログラムに関する研究報告書—2次処理水質の評価、高度処理の費用、高度処理導入の考え方—、土木研究所資料No.2633、1988.
- 9) 渡辺晴彦:都市水利用システムの循環化による水質保全効果について、NSC研究年報、vol.19(1)、1994(刊行予定).
- 10) 早川登:ビル排水の個別循環利用、用水と廃水、vol.21(1)、pp.63-71、1979.