*

ゲーム理論を用いた環境負荷量配分モデルに関する研究

A Game Theory Model of the Environmental Load Allocation

○岡田 憲夫 錦 織 敦

by Norio Okada and Atushi Nishikori

The paper addresses the significance of the total environmental load control scheme which was recently introduced by the Japanese government, and points out the need for the development of scientific tools in determining how to assign the total loads to the dischargers located along a closed water system. In light of this consideration, a conflict analysis is performed to study the problem systematically, whereby a full use is made of cooperative game theory to model it. The model corresponds to the four stages of planning: total load standard setting, facility planning, cost allocation, and taxation and subsidy scheme.

Given some fundamental examples representing real world issues, a systematic assessment is made of both the theoretical and practical implications to be derived from the model. A point is made that under the particular situations some type of equity criteria, if added, may effectively reduce the possibilities of determining the environmental load assignments to the dischargers.

1. はじめに

昭和53年6月には瀬戸内海環境保全臨時措置法及び水質汚濁防止法の一部を改正する法律が施行され、瀬戸内海を始めとする閉鎖性水域の新たな水質保全対策として、水質の総量規制制度が設けられることになった。これにより指定を受けた水域や地域にあっては指定された水質項目につき、国から示された総量削減基本方針に沿って総量削減計画を策定し、さらにそれに基づいて指定地域内事業場ごとにそこから排出される排出水の一当りの汚濁負荷量について許容限度を定めることになった。

* キーワーズ：環境負荷量配分計画、ゲーム理論
費用割り振り問題

** 正 員 工 博 鳥取大学助教授 工学部海洋土木工学科

*** 学生員 鳥取大学大学院

(〒680 鳥取市湖山町南4-101)

このように総量規制を推し進める法体制の枠組みは整いつつあるものの、この種の汚濁負荷量を各排水源ごとにどのように割り当てるか等の複雑な問題を計画論的にどのように位置づけ、科学的なアプローチを提示すべきかについてはほとんど研究がなされていない。このような視点から筆者らは汚濁負荷量配分問題を取り上げるとともに、これをゲーム理論により数学的にモデル化する有効性について二、三の基礎的研究を行ってきた^{1) 2)}。本研究ではこれらの成果をふまえるが、次のような点でモデルの拡張と一般化を試みる。

- ① 2つの都市間の負荷量配分モデルがn個の都市間の配分モデルに拡張できることを理論的に示す。
- ② 計画論的には当該問題が種々のレベルの計画プロセスから構成されることに着目するとともに、この点を明示的に反映させたモデルの構築と運用の方法について言及する。

2. モデル化

1) 基本的仮定とモデルの定式化

- ①ある湖の周囲に立地した n 個の都市 ($i=1, 2, \dots, n$) からの排水に対してこの水域を広域的に管理する国は、総流入 COD 負荷量を基準値 A (t/日) 以下に規制することを考えている。なお都市 i ($i=1, \dots, n$) からの現在の排出負荷量を $\widehat{L}_i$ (t/日) とすると自明の条件として次式が成立する。

$$A \geq \sum_{i \in N} \widehat{L}_i \quad N = \{1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

- ②国は都市 i ($i=1, \dots, n$) に対して何らかの形で総 COD 排出負荷量基準 A を配分して、各都市排水の充足すべき負荷量水準 (これを割り当て負荷量水準という) を設定しなければならない。
- ③都市 i ($i=1, \dots, n$) はこれに対する一つの方策として単独で下水処理場を建設し、課せられた割り当て負荷量水準を満たすことを考える。いま、都市 i ($i=1, \dots, n$) が作る処理プラントの処理後の水質 (COD 残存負荷量) が投資額 x_i の単調減少関数で表わせるとすると②でのべたことより、

$$L_i(x_i) \leq A \rho_i \quad (i=1, \dots, n) \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} \rho_i = 1$$

が成立しなければならない。ここに $L_i(x_i)$ は都市 i のプラントから排出される残存 COD 負荷量を表わし、投資額 x_i の関数である。また ρ_i ($i=1, \dots, n$) は、流入総負荷量水準 A の都市 i への配分比率を表わす。(なお明らかに i ($i=1, \dots, n$) に対して $\widehat{L}_i = L_i(0)$ が成立するから、 $A \leq \sum L_i(0)$ でもある。)

- ④このとき都市 i は (1) の条件下で投資費用の最小化を図るとすると、この都市の関心は

$$X(\{i\}) = \min \{x_i \mid L_i(x_i) \leq A \rho_i, \sum_{i \in N} \rho_i = 1\} \quad (3)$$

を満たす $\widehat{x}_i$ と $\widehat{X}(\{i\})$ を求めることである。

- ⑤都市 i ($i=1, \dots, n$) は上述のような単独対策の代りに次のような弱提携を結ぶことを考える。全都市は全体で経済的に最も効率的な施設建設を行いたい。ただし各都市は距離的に大きく隔たった位置関係にあるため、共同処理プラントを建設するという形はとらず、それぞれが自身のプラントを建設する

方式をとる。つまり単独建設事業を各都市が想定するという意味では不完全であるが、全都市が協力して処理水準を調整し、あわせて費用の節減を図るという意味で「弱提携」と呼ぶのである。(なおここでは暗に大規模投資の経済性、 $\sum_{i \in N} L_i(x_i) \geq L_N(\sum x_i)$ が仮定されている。)

- ⑥このとき問題は

$$X^*(N) = \min \{ \sum_{i \in N} x_i \mid \sum_{i \in N} L_i(x_i) \leq A \} \quad (4)$$

となる x_i^* ($i \in N$) と $X^*(N)$ を求めることになる。ここに、 $L_i(x_i)$ は必ずしも都市 i が汚濁源の負荷量でなくてもよく、いわば都市 i が他都市から処理を請け負うことも可能であるとする。

- ⑦この他に都市のいくつかは部分提携 (弱) S を形成して、そのグループ内で総費用の最小化を図ることも可能であるとする。すなわち、

$$\begin{aligned} \widetilde{X}(S) = \min \{ \sum_{i \in S} x_i \mid \sum_{i \in S} L_i(x_i) \leq A \rho_S, \rho_S = \sum_{i \in S} \rho_i \} \end{aligned} \quad (5)$$

となる $\widetilde{x}_i$ ($i \in S$) と $\widetilde{X}(S)$ を求めればよい。

- ⑧さて一般に規模の経済性から考えて、各都市が自身に課せられた規制を単独で充足するよりは部分提携が、また部分提携よりは全提携の方が経済効率上有利となるはずである。そこで全都市は全提携を組んで協力しあうことになるが、その際、この共同事業の経費をどのように配分すべきかという、いわゆる費用割り振り問題が生じる。

- ⑨一般にこの共同事業が成立するためには、費用割り振りに当って次のような公正規範が成立しなければならない。いま、単独行動、部分提携ならびに全提携の非効用 (ここでは効用の負の概念を採用する) を規定するパラメータ (特性関数) を $v(\{i\})$, $v(S)$, $v(N)$ で表わし、次式を定義する。

$$v(\{i\}) = \widehat{X}(\{i\}) \quad (6)$$

$$v(S) = \widetilde{X}(S) \quad (7)$$

$$v(N) = X^*(N) \quad (8)$$

このとき、都市 i への費用割り振り額を ξ_i ($i=1, \dots, n$) で表わすと次式が成立する。

$$\xi_i \leq v(\{i\}) \quad (\text{個人合理性}) \quad (9)$$

$$(i=1, \dots, n)$$

$$\sum_{i \in S} \xi_i \leq v(S) \quad (\text{集団合理性}) \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} \xi_i = v(N) \quad (\text{全体合理性}) \quad (11)$$

⑩式(9)～(11)で表わされる ξ_i ($i=1, \dots, n$)の解領域はコアと呼ばれる。Young et al³⁾はこのコアに基づいた費用割り振り法として仁、弱仁および比例仁を用いた配分法を提案し、その長所・短所を比較考察している。また必ずしもコアを充足するとは限らないが、シャプレイ値を用いた配分法の有効性についても言及している。いまこれらを一括して費用割り振り法と呼び、そのうちのいずれかを適用して求めた費用割り振り値を ξ_i^* ($i=1, \dots, n$)と表記しよう。

⑪このようにして各都市が分担すべき費用が ξ_i^* ($i=1, \dots, n$)と決定されたならば、各都市はそれぞれの処理レベル(残存負荷量) $L_i(x_i^*)$ に要する経費(施設建設費) x_i^* に応じて、 ξ_i^* との差額を課徴金または奨励金としてきょ出するか賦与されることになる。すなわち $\xi_i^* - x_i^* > 0$ なら課徴金、 $\xi_i^* - x_i^* \leq 0$ なら奨励金となる。

2) 本モデルで想定している計画プロセス

以上で述べた本モデルにおいて想定されていた計画プロセスを整理すると、図-1のようになる。すなわち第1段階では本閉鎖性水域についてCODの総排出負荷量基準Aとその各都市への割り当て率 ρ_i ($i=1, \dots, n$)を決定する。この問題を総負荷量配分指針計画と呼ぶ。

ついで第2段階では各都市が単独、部分提携(弱)あるいは全提携(弱)により、それぞれの最適施設建設(実処理)費用 $\widehat{X}(\{i\}) = \widehat{x}_i$, $\widehat{X}(S)$ $= \sum_{i \in S} \widehat{x}_i$ あるいは $X^*(N) = \sum_{i \in N} x_i^*$ とそのときの処理レベル(実は残存負荷量) $L_i(\widehat{x}_i)$, $\sum_{i \in S} L_i(\widehat{x}_i)$ あるいは $\sum_{i \in N} L_i(x_i^*)$ を決定する。本問題を総負荷量配分施設計画と呼ぶ。上記の第1段階とこの第2段階目の計画を合わせて単に総負荷量配分計画と呼称する。

第3段階ではこの共同事業の総費用を各自の貢献度に応じて割り当てる問題を取り扱う。これを費用割り振り計画という。

第4段階では各都市の割り当て処理レベルでの施設建設費と上で決まった割り振り費用との差額を課徴金として他の都市にきょ出するか、逆に奨励金として他の都市から受け取るかを定める。これを調整費用割り振り計画という。また第3段階と第4段

階の計画を合せて単に費用割り振り計画という。

表-1には各段階の計画で決定すべき変数名と予め与件(または上の段階で決定している)と考えるパラメータ名を整理しておく。

3) 総負荷量配分指針計画のための公正規範

実はこれまでの議論では、第1段階の総負荷量配分指針計画においてどのように総排出負荷量基準Aや各都市への割り当て ρ_i ($i=1, \dots, n$)を決定すべきかについて明示的なモデルを示していない。本研究では後の具体的な計算事例で、問題の個別的な特殊性を考慮した場合のAや ρ_i の制約化の方法について言及する。

4. 計算のアルゴリズム

3. で述べた4段階の計画プロセスにおいて、第2段階および第3段階の計画問題を処理するためにはその数理解計画モデルとこれを解くための最適化手法が必要となる。

第2段階の最適化問題は各都市が単独行動、部分提携、ならびに全提携を形成する場合についてそれぞれ式(9)、(10)ならびに(11)で与えられている。

一般にこの種の最適

表-1 計画プロセスで用いる変数名

段階	変数名
I	A: 総目標残存負荷量(t/日) A _i : 目標残存負荷量の配分比($i=1, \dots, n$)
II	L _i [*] : 実残存負荷量(t/日) x _i [*] : 実処理費用(億円) v(i), v(S), v(N): 単独、提携における処理費用関数
III	ξ_i^* : 配分費用(億円)
IV	$\xi_i^* - x_i^*$: 課徴金(奨励金)(億円)

図-1 計画プロセス

化問題には動的計画法を用いた解法が有効であるので、本研究では以下でこの手法を用いる。なお都市が2つの場合には微分法を採用した最適化計算を用いることも可能である²⁾。第3段階の費用割り振り問題において仁や弱仁あるいは比例仁で求めるには、式(9)～(11)で定義されるコアをいくつかの付加的な公正規範を用いて一点に縮める数理計画問題を解けばよい。これは結局LPとなることが分っている³⁾。

5. 事例分析

本モデルの実用性を例示するために、2人ゲームと3人ゲームの場合についていくつかの計算を実施し、その結果の分析を行った。

(1) 負荷量関数の同定

過去の実績値を参考に負荷量関数は建設費 x の関数として

$$L(x) = L(0) \{1 - 0.667 \ln(x / q^{0.737} + 1)\} \quad (12)$$

で近似できることが分った²⁾。(表-2参照) また、この逆関数は $L(x) = L$ としてつぎのような建設費用関数となる。

$$x = q^{0.737} [\text{EXP}\{1.5(1 - L/L(0))\} - 1] \quad (13)$$

(2) 2人ゲーム

表-2 定式化に用いる記号

$L_i(0) = W_i^1 + W_i^2$	$W_i^0 = P_i \cdot \omega^0$
$W_i^1 = \sum_k S_{ik} \omega_k^1$	$W_i^2 = P_i \cdot \omega^2$
$Q_i = U_i^1 + U_i^2$	$U_i^1 = \sum_k S_{ik} q_k^1$
$U_i^2 = \sum_k S_{ik} q_k^2$	$U_i^2 = P_i \cdot q^2$
Q_i : 都市 i の汚水量(100m ³ /日)	
$L_i(0)$: 都市 i の総COD負荷量(t/日)	
W_i^1 : 都市 i の工場から出る一日当りのCOD負荷量(t/日)	
W_i^2 : 都市 i の事務所、家庭から出る一人一日当りの総COD負荷量(t/日)	
S_{ik} : 都市 i のタイプ k の業種の一日出荷額(百万円)	
ω_k^1 : タイプ k の業種の一日の単位出荷額当りのCOD負荷量(t/日/百万円)	
P_i : 都市 i の人口(万人)	
ω^0 : 一人が一日に出すCOD負荷量(t/日・人)	
U_i^1 : 都市 i の工場から出る一日当りの総汚水量(100m ³ /日)	
U_i^2 : 都市 i の事務所、家庭から出る一日当りの総汚水量(100m ³ /日)	
q_k^1 : タイプ k の業種の一日出荷額当りの汚水量(100m ³ /日/百万円)	
q^0 : 一人が一日に出す汚水量(100m ³ /日・人)	

2人ゲームにおいては以下の3つのケースについて考える。

a) ケース1

①都市排水として、いずれの都市も生活排水のみを考え、しかも処理対象汚水量とCOD負荷量は人口のみによって決まるとする。(表-2、表-3参照)

②人口は都市2が都市1の3倍と大きいので当然汚水量、負荷量ともに都市2の方が大きくなる。しかしながら予め総負荷量水準 A および負荷量配分比 ρ_1 、 ρ_2 が適正に決定されないと、各自が単独で行動した場合の事業費が $x_1 > x_2$ すなわち $v(1) \geq v(2)$ となって汚水量や負荷量が大きい都市の方が実処理費用が安いという不合理なことが生じうる。このことより $v(1) < v(2)$ なる条件が負荷量配分計画を規定する上で不可欠な公正配分条件になると考えられる。また各都市は何らかの形で費用を負担すべきであるから、当然 $v(1)$ 、 $v(2) > 0$ でなければならない。

表-3 ケース1,2,3で用いる値

ケース	都市	P_i	q^0	ω^0	Q_i	$L_i(0)$
1	1	25	0.003	26×10^{-6}	750	6.5
	2	75	0.003	26×10^{-6}	2250	19.5
ケース	都市	S_{ik}	q_k^1	ω_k^1	Q_i	$L_i(0)$
2	1	200	0.0069	692×10^{-6}	1.38	0.14
	2	306	0.0045	1400×10^{-6}	1.38	0.43
3	1	200	0.0069	692×10^{-6}	1.38	0.14
	2	275	0.0045	1400×10^{-6}	1.24	0.39

③図-2は総負荷量配分

指針計画において A と

ρ_1 を変数としたときの

$v(1) < v(2)$ かつ v

$(1) > 0$ 、 $v(2) > 0$ が

成立する領域を表わして

いる。図中 $\rho_1 = 0.25$ は

ρ_1 を総負荷量 W_1^0 と W_2^0

の比率(従って人口の比

率でもある)にとることを

意味している。本ケー

スでは $A = 26$ (t/日)

(現状維持)の場合を除

けば $\rho_1 = 0.25$ という

実績値をそのまま用いた

配分方式が妥当化され

ることが分る。このよう

な実績値比率配分法は実

際によく用いられる最も

簡便な方法であるが、本

ケースの場合には公正規

範に照らしても一応妥当

視されることが分る。

図-2 公正規範領域(ケース1)

④表-4には $A=15$ (t/日) で ρ_1 、 ρ_2 を図-2の点1、2、3、4にとったときの都市1、2の費用配分額 ξ_1 、 ξ_2 があげてある。これより $v(1) < v(2)$ の条件を満たさない点1あるいは点4では、都市1の方が都市2より負担額が多くなったり、 $v(1), v(2) > 0$ なる条件すら満足しえなかったりして結局不合理になってしまうことが分る。

⑤表-5は表-4で求められている配分費用 ξ^* (億円)と実処理費用 x^* (億円)の差すなわち課徴金(負の場合は奨励金)を表わしている。(ただし妥当な費用配分となる点についてのみ計算を行った。)これより、総負荷量配分計画において点2を選んだ場合には最終段階の費用配分調整計画では都市1に課徴金45.1(億円)が課せられ、都市2には45.1(億円)が奨励金として与えられることになる。

b) ケース2

①都市排水として、いずれの都市も産業排水のみを考える。(すなわち都市1は果実缶詰製造業、都市2は植物油脂製造業を想定している。)この場合には処理対象汚水量とCOD負荷量は出荷額(百万円)のみによって決まるとしよう。ただしCOD負荷量は都市2の方が都市1より大きい($L_1(0) < L_2(0)$)、汚水量はほぼ等しい($Q_1=Q_2$)という例を考えた。(表-2、表-3参照)

②図-3はケース1と同様に A と ρ_1 を変数としたときの $v(1) < v(2)$ が成立する領域を示している。図中 $v(1) = v(2)$ の条件で規定される公正規範の境界線(公正規範領域に含まれない)は A が小さい値の場合を除けば $\rho_1=0.244$ すなわち ρ_1 を実績値の比率($L_1(0)/L_2(0)$)にとることに相当している。この実績値比率配分法は現実によく用いられるが、本ケースでは A が0 (t/日)に近い場合を除けば $0 < A < 0.566$ の範囲のいずれに設定しても公正規範を充足しえないことになる。よって $\rho_1=0.244$ という実績値をそのまま用いた配分方式は本ケースでは妥当とはいえない。

③表-4には図-3において $A=0.4$ (t/日) で切ったときにできる断面図において点1、2、3、4に ρ_1 、 ρ_2 をとったときの都市1、2の費用配分額が掲げてある。これより点1、4はケース1と同様不合理であるが、点2すなわち実績値を用いた配分比の場合も割り振られる費用が等しくなればやは

り不合理な結果になり、②で述べたことが具体的に裏づけられることが分る。

④表-5よりこのケースの点3の場合、実処理費用表-4 ρ_i における建設費用と配分費用(ケース1,2,3)

ケース	点番号	ρ_1	ρ_2	$v(1)$ (億円)	$v(2)$ (億円)	$v(12)$ (億円)	ξ_1 (億円)	ξ_2 (億円)	A (t/日)
1	1	0.100	0.900	285.4	173.3	371.9	242.0	127.0	15.00
	2	0.250	0.750	116.5	261.9		113.3	258.6	
	3	0.400	0.600	16.1	267.2		10.4	361.5	
	4	0.800	0.200	-94.5	755.9		-	-	
2	1	0.200	0.800	1.12	1.58	1.04	0.79	0.25	0.40
	2	0.244	0.756	0.70	0.70		0.52	0.52	
	3	0.300	0.700	0.27	0.86		0.23	0.81	
	4	0.600	0.400	-0.85	1.98		-	-	
3	1	0.200	0.800	2.04	1.24	2.27	1.54	0.73	0.25
	2	0.254	0.746	1.51	1.29		1.20	1.07	
	3	0.400	0.600	0.65	1.75		0.59	1.58	
	4	0.800	0.200	-0.62	2.15		-	-	

表-5 課徴金(奨励金)の計算(ケース1,2,3)

ケース	点番号	都市	ξ_i^*	x^*	$\xi_i^* - x_i^*$
1	2	1	113.30	68.20	45.10
		2	258.60	306.70	-45.10
	3	1	10.40	68.20	-57.80
		2	361.50	303.70	57.80
2	3	1	0.23	0	0.23
		2	0.81	1.04	-0.23
3	3	1	0.59	0	0.59
		2	1.68	2.27	-0.59

ξ_i^* : 配分費用(億円)

x_i^* : 実処理費用(億円)

$\xi_i^* - x_i^*$: 課徴金(負の場合は奨励金)(億円)

図-3 公正規範領域(ケース2)

図-4 公正規範領域 (ケース3)

は、都市1が全く処理をせず都市2のみが処理する形であることが分る。よって都市1に課徴金0.23（億円）が課せられ、都市2には0.23（億円）の奨励金が与えられることが分る。

c) ケース 3

① ケース 2 と同様に、産業排水のみを考える。(業種はケース 2 と同じ) ただし、負荷量は都市 2 の方が都市 1 より大きいが ($L_1(0) < L_2(0)$)、汚水量は逆に都市 1 の方が都市 2 より大きい ($Q_1 > Q_2$) という例を考えた。(表-2, 表-3 参照)

②図-4、表-4より点1、4はもちろんのこと、点2 ($\rho_1=0.264$) すなわち実績値による配分比を用いた場合でも明らかに $v(1) < v(2)$ の領域に入っていないことが分る。ただし本ケースの場合は処理負荷量については1、2、3の順に大きくなるが汚水量では逆の関係にあり、 $v(1) < v(2)$ を公正規範にすることは保留しなければならない。ただ総負荷量規制の立場からは、汚水量の増大につれて濃度が小さくなることでメリットを得る方式には抵抗があろう。

③表－５よりケース２の点３と同様このケースの点
３の場合も都市１は実際には処理を行わず、都市１
から２へ0.59（億円）が移動していることが分る。

(3) 3人ゲーム

2人ゲームを拡張して都市1、2、3による3人ゲームについて考える。

a) ケース 4

①ケース 1 と同様、都市排水として生活排水のみを考える。また処理前の負荷量は $L_1(0) < L_2(0)$

表-6 ケース4,5,6で用いる値

ケース	都市	P_i	q^p	w^p	Q_i	$L_i(O)$
4	1	1	0.003	26×10^{-6}	30	0.26
	2	5	0.003	26×10^{-6}	150	1.30
	3	10	0.003	26×10^{-6}	300	2.60
ケース	都市	S_{ik}	q^k	w_k	Q_i	$L_i(O)$
5	1	150	0.019	577×10^{-6}	2.88	0.087
	2	270	0.011	131×10^{-6}	2.88	0.354
	3	317	0.009	245×10^{-6}	2.88	0.777
6	1	150	0.019	577×10^{-6}	2.88	0.087
	2	200	0.011	131×10^{-6}	2.13	0.262
	3	180	0.009	245×10^{-6}	1.64	0.441

＜ $L_3(0)$ で、汚水量は $Q_1 < Q_2 < Q_3$ とした。

(表-2、表-6 参照)

②図-5は総負荷量指針計画において A, ρ_1, ρ_2 を変数としたときに $v(1) < v(2) < v(3)$ でかつ $v(\{i\}) \geq 0 \ (i=1, 2, 3)$ が成立する領域を示している。また、この図の右上には $A=2.9 \ (\text{t/日})$ としたときの当該図形の断面図が示されている。

③表-7のケース4には $A=2.9$ (t/日)で ρ_1 、 ρ_2 ($\rho_3=1-\rho_1-\rho_2$)を図-5の断面図上の点1, 2, 3, 4にとったときでしかも都市1, 2, 3が単独行動の場合と提携をした場合にかかる実処理費用が示してある。また表-8には表-7に基づき4つの割り振り手法で各都市に割り振った費用が示してある。表-7の各ケースにおいて点1, 4をとる場合、条件 $v(1) < v(2) < v(3)$ あるいは $v(\{i\}) \geq 0$ ($i=1, 2, 3$)の条件が満たされていない。このため一番負荷の大きいはずの都市3が最小の処理費用となり、不合理である。点1の場合は割り振られた費用(表-8参照)を見ても $\xi_3 < 0$ となり明らかに不合理であることが分る。(点4の場合には表-7より明らかに不合理であるので負担費用の割り振りは行わなかった。)点2は実績値の配分比に相当しているが、 $v(1) < v(2) < v(3)$ (表-7参照)の条件を満たしており、割り振られた負担費用(表-8参照)も $\xi_1 < \xi_2 < \xi_3$ となっている。よって本ケースの場合は実績値による配分は妥当である。(仁のみの結果を示すが、他も傾向は同じ。)

④点3（図-5参照）の場合の配分比も点2と同様妥当である。また相対的に都市3への割り振り額 m_3 は点3より点4の方が大きくなる傾向が認められる。これより図-5の $v(1) < v(2) < v(3)$

の領域内で ρ_1, ρ_2 を大きくするにつれて ρ_3 が小さくなり、都市3の費用負担が増すことが分る。

⑤表-9は表-5と同様の課徴金(負の場合は奨励金)を示している。(ただし妥当な費用配分となる点についてのみ計算を行った。)点2の場合は都市1、2にそれぞれ5.44(億円)、5.42(億円)の課徴金が課せられ、都市3に奨励金として10.86(億円)が賦与される。点3の場合は都市1のみに課徴金が課せられるという結果になっている。

b) ケース 5

図-5 公正規範領域 (ケース 4)

表-7 ρ_i における建設費用(ケース4,5,6)

ケース	点番号	ρ_1	ρ_2	ρ_3	$v(1)$ (億円)	$v(2)$ (億円)	$v(3)$ (億円)	$v(12)$ (億円)	$v(13)$ (億円)	$v(23)$ (億円)	$v(123)$ (億円)	A (t/日)
4	1	0.010	0.200	0.790	34.23	52.01	13.06	76.62	24.47	51.40	66.12	2.90
	2	0.062	0.312	0.626	7.22	23.20	38.32	29.26	43.30	60.86		
	3	0.070	0.350	0.580	4.78	15.64	46.74	19.43	50.54	62.37		
	4	0.100	0.459	0.441	-1.95	-1.54	76.74	-	74.15	68.13		
5	1	0.050	0.200	0.750	3.03	3.08	1.22	4.34	1.57	2.89	3.40	0.73
	2	0.071	0.290	0.639	1.80	1.80	1.80	2.43	2.08	3.04		
	3	0.100	0.300	0.600	0.60	1.68	2.02	1.92	2.13	3.25		
	4	0.150	0.500	0.350	-0.70	-0.10	3.79	-	3.54	3.63		
6	1	0.100	0.300	0.600	2.17	1.75	1.03	2.65	1.39	2.25	2.74	0.47
	2	0.110	0.331	0.559	1.83	1.47	1.20	2.19	1.54	2.31		
	3	0.160	0.450	0.390	0.49	0.59	2.02	0.75	2.16	2.59		
	4	0.200	0.600	0.200	-0.25	-0.19	3.24	-	3.13	2.83		

表-8 配分費用(ケース4,5,6)

ケース	点番号	1	2	3
4	ξ_1	19.90	5.45	3.79
	ξ_2	46.83	23.01	15.62
	ξ_3	-0.61	37.66	46.72
	ξ_4	-0.61	37.66	46.72
5	ξ_1	1.13	0.60	0.32
	ξ_2	2.45	1.56	1.44
	ξ_3	-0.19	1.24	1.65
	ξ_4	-0.19	1.24	1.65
6	ξ_1	0.69	0.56	0.15
	ξ_2	1.55	1.33	0.59
	ξ_3	0.67	0.84	2.00
	ξ_4	0.67	0.84	2.00

ξ_i : 配分費用(億円)

注) 割り振り手法は仁のみを用いた。

表-9 課徴金(奨励金)の計算(ケース4,5,6)

ケース	点番号	都市	ξ_i^*	α_i^*	$\xi_i^* - \alpha_i^*$
4	2	1	5.45	0.01	5.44
		2	23.01	17.59	5.42
		3	37.66	48.52	-10.86
	3	1	3.79	0.01	3.78
		2	15.62	17.68	-1.98
		3	46.72	48.52	-1.80
5	3	1	0.32	0	0.32
		2	1.43	0.25	1.18
		3	1.65	3.15	-1.50
6	3	1	0.15	0.51	-0.36
		2	0.59	1.29	-0.70
		3	2.00	0.94	1.06

ξ_i^* : 配分費用(億円)

α_i^* : 実処理費用(億円)

$\xi_i^* - \alpha_i^*$: 課徴金(負の場合は奨励金)(億円)

注) 割り振り手法は仁のみを用いた。

図-6 公正規範領域（ケース5）

①都市排水として、いずれの都市も産業排水のみを考える。（すなわち、都市1は砂糖精製業、都市2は植物油製業、都市3は魚肉ハム・ソーセージ製造業を想定した。）ただし負荷量は $L_1(0) < L_2(0) < L_3(0)$ であるが、汚水量はほぼ等しいものとした。（表-2、表-6参照）

②図-6は A と ρ_1, ρ_2 を変数としたときに $v(1) < v(2) < v(3)$ が成立する領域と $A=0.73$ (t/day)としたときの当該図形の断面図を示している。

③表-7より明らかのように、点2（実績値を用いた配分比）の場合の単独費用はいずれも1.80（億円）と等しく公正規範を充足しない。このことは2人ゲームのケース2の結果と一致している。しかも2都市の提携費用は $v(13) < v(12) < v(23)$ である。このため配分費用が不合理な結果となっている（表-8参照）。従ってこのケースでは点3のみが妥当な配分比といえる。この結果は3人ゲームの場合、必要に応じて $v(12) < v(13) < v(23)$ 等の公正規範を付加すべきことを暗示している。

④表-9より、点3の場合、都市1、2の課徴金の合計が都市3に奨励金として移動することが分る。
c) ケース6

①このケースは処理前の負荷量が $L_1(0) < L_2(0) < L_3(0)$ であるが、汚水量は $Q_1 > Q_2 > Q_3$ とした場合である。なお、本ケースにおける4つの点の位置関係は、基本的にケース4、5の場合と同じである。（表-2、表-6参照）

②これは2人ゲームのケース3の拡張であり、ケース3の結果と基本的に同じことが言える。

5. むすび

以下本研究で得られた知見を整理する。

①環境負荷量計画問題はその性格上、多段階のコンフリクト調整問題として捉えられること、またこれを科学的に取り扱う上でゲーム理論モデルが有効であることが示された。

②すなわちこの種の問題を論じるためには、単なる水質汚濁のメカ

ニズムに関する技術論的な議論のみではなく、社会的公正規範に関する分析・評価が不可欠であることが分った。

③また現在慣用的によく用いられる実績値に基づく配分方式は必ずしも適切ではないことが明らかになった。

謝 辞

本研究を進展させるに当たり、ウォータールー大学工学部教授マーク・キルガー氏より多くのアドバイスを受けた。付して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 岡田憲夫、錦織敦：環境負荷量配分問題に関するゲーミング分析、鳥取大学工学部研究報告、第15巻第1号、昭和59年10月。
- 2) 岡田憲夫、錦織敦、マーク・キルガー：環境負荷量の配分方式に関するゲーム論的アプローチ弱提携二人ゲームモデル、第40回土木学会年次学術講演会概要集（IV部門）、昭和60年9月。
- 3) Young, H.P., N.Okada and T.Hashimoto: Cost Allocation in Water Resources Development-A case study of Sweden, Water Resources Research, Vol.18, No3., June, 1982.