

閉鎖性水域における環境負荷量配分計画問題のモデル化

— 階層性に着目して —

鳥取大学大学院 学生員○青木 智男, 京都大学防災研究所 正会員 岡田 憲夫

鳥取大学工学部 正会員 多々納裕一, 鳥取大学工学部 正会員 小林 潔司

1. はじめに

閉鎖性水域における汚濁排出源に対する環境負荷量配分の明示的な決定方式のモデル化を行う。その際、階層型負荷量配分計画を取り上げる。

2. モデル化

① グローバル・レベル：閉鎖性水域への環境負荷量基準値を総量レベルで達成しつつ、各排出源レベルで守るべき環境負荷量基準値を割り当てるグローバル・レベルの(環境全体に対する)計画モデルを定式化する。その際、各排出源レベルでの汚濁処理技術の達成度にもともなう不確実性についても明示的な考察を行う。

ある閉鎖性水域に対し汚濁物質を排出する n 個の企業 i ($i=1, 2, \dots, n$) があるとする。企業 i の排出量を以下のように表す。

$$e_i = f_i(\mathbf{x}_i) + \theta_i(z_i, \lambda_i) \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{x}_i$ ：企業 i の生産水準に関する決定ベクトル、 z_i ：企業 i の汚濁削減量、 λ_i ：確率変数、 $f_i(\mathbf{x}_i)$ ：企業 i の排出量の平均レベル、 $\theta_i(\cdot)$ ：排出量の平均レベルからの確率的な偏差である。

この水域を管理する国または行政主体が、総汚濁排出量の規制値を何らかの基準によって定めているものとする。新たに環境規制が課せられた場合、企業は汚濁排出量を削減するために生産量を減少させたり、処理量を増加させたり、あるいは処理設備を改善する必要に迫られると考えられる。これにより企業の利潤が低下することが考えられるが、企業は自らの利潤を最大化するように行動するという仮定の下では、各企業は汚濁排出量の削減に要する削減費用を最小化する形で、新しい生産水準を決定すると考えられる。削減費用の関数を以下のように表す。

$$c_i(z_i) = \min_{\mathbf{x}_i} \{ \pi_i(\tilde{\mathbf{x}}_i) - \pi_i(\mathbf{x}_i) \} \quad (2)$$

$$\text{subject to} \quad f_i(\tilde{\mathbf{x}}_i) - f_i(\mathbf{x}_i) = z_i \quad (\forall z_i)$$

ここに、 z_i ：企業 i の新規汚濁削減量、 $\pi_i(\mathbf{x}_i)$ ：企業 i の期待利潤、 $(\mathbf{x}_i)$ ：企業 i が新規の

環境規制 z_i の下で利潤を最大にするように定める生産水準の決定ベクトル、 $\tilde{\mathbf{x}}_i$ ：同様に現在の環境規制 $\tilde{W}_i$ の下での企業の生産水準の決定ベクトル(既知)である。削減費用関数 $c_i(z_i)$ は、すべての i に対して増加($c'_i > 0$)、凸($c''_i > 0$)を仮定する。行政主体は排出源である企業 i ($i=1, 2, \dots, n$) に対し、総汚濁削減費用最小化により環境全体に対して効率的(パレート効率的)に総汚濁排出量の基準値を割り当てると考える。その際、環境被害関数 $D(\sum_{i=1}^n e_i)$ を導入して効率性の評価を行う。簡単なケースとして被害関数が総排出量に対して連続、単調増加で凸の場合を仮定する。このとき、グローバル・レベルの環境負荷量制御計画問題は最適な排出量(環境負荷量)の基準値 z_i ($i=1, 2, \dots, n$) を決定する問題として表-1のように表される

・総汚濁削減費用最小化問題

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^n c_i(z_i) \\ & \text{subject to} \quad (3) \\ & E[D(\sum_{i=1}^n e_i)] \leq \overline{ED} \\ & E[D(\cdot)]: \text{期待被害量} \\ & \overline{ED}: \text{期待被害量の上限値} \end{aligned}$$

表-1

② ローカル・レベル：①のフレームの下で、各排出源に課せられた環境負荷量基準値を達成しつつ、排出源間でその達成量を取り引きすることを許すとする。共同処理施設の利用が可能である場合に企業が部分提携(全提携)を組んで汚濁処理を行う短期の操業・処理計画問題を考える。これは一種の協力ゲームの下での費用割り振り問題としてモデル化される。これをローカル・レベルの計画モデルという(表-2参照)。

・ローカル・レベルの負荷量配分問題(一例)

$$\begin{aligned}
 & N = \{1, 2, 3\} \quad \text{提携} \quad S = \{1, 2\} \text{ の場合} \\
 & \max_{x, q} p(x_1 + x_2) - A_1 x_1^{a_1} - A_2 x_2^{a_2} - B_{12} (q_1 + q_2)^{b_{12}} \\
 & \text{subject to} \quad (4) \\
 & E[a(e_1 + e_2 + e_3)^2 + b(e_1 + e_2 + e_3) + c] \leq \bar{E}D \\
 & \sum_{i=1}^2 (k_i \tilde{x}_i - \tilde{q}_i - (k_i x_i - q_i)) = z_1^* + z_2^* \\
 & x_1, x_2, q_1, q_2 \geq 0, \quad \tilde{w}_i = k_i \tilde{x}_i - \tilde{q}_i \geq 0, \quad i=1, 2 \\
 & \tilde{x}_i: \text{現在の生産量}, \quad \tilde{q}_i: \text{現在の汚濁処理量} \\
 & x_i: \text{新規の生産量}, \quad q_i: \text{新規の汚濁処理量} \\
 & z_i^*: \text{グローバル・レベルで決定された} \\
 & \tilde{w}_i: \text{現在の環境規制値} \quad \text{基準削減負荷量} \\
 & e_i: \text{提携内の企業} i \text{の排出量} \quad (i=1, 2) \\
 & e_3: \text{提携外の企業} 3 \text{の排出量} \\
 & E[\cdot]: \text{期待被害関数}, \quad \bar{E}D: \text{上限値} \\
 & p: \text{生産物価格}, \quad A_i, a_i, B_{12}, b_{12}, k_i, a, b, c: \text{定数}
 \end{aligned}$$

表-2

本研究では、以上のような考え方に基づいてモデル化を行うとともに、このローカル・レベルの計画モデルが、グローバル・レベルの計画モデルのフレームと整合するための条件やモデルフォーミュレーションの方法について理論的検討を行った。さらに本モデルの適用可能性を検討するために、パラメータや関数形を特定化して数値計算を行い、具体的な考察を行った。

3. 分析結果

企業数(排出源)の数を3つとしてモデル分析を行った。すなわち、各パラメータ値を設定するとともに、まず上位計画(グローバル・レベルの負荷量配分問題)問題として閉鎖性水域に排出される総汚濁負荷量を排出源である各企業に割り当てる問題を取り上げ、その解を求めた。その際、配分効率規範として、環境に与える被害の程度を評価する関数(被害関数)を2つにタイプ分けして考えた。すなわち、(i)この被害関数が排出量について線形の関数である場合と、(ii)そうでない場合についてである。また処理技術にともなうランダム性の程度が解に与える影響についても分析した。

ついで、上位計画で各企業に配分された基準削減負荷量を企業間で提携し共同処理施設を建設することによって、全体でより大きな利潤が得られるかどうかを吟味するため、ローカル・レベルの負荷量配分問題を取り上げた。モデル化に際し、被害関数が非線形であ

る場合には、部分提携によって共同処理を行う場合の配分ゲームの解としてナッシュ均衡解を想定した。一方、被害関数が線形の場合にはグローバル・レベルで課せられた環境基準値に関する条件を自動的に満足することを示した。以下、得られた知見を整理すれば次のとおりである。

- (1) グローバル・レベルの負荷量配分問題はパレート解であるが、これは企業の技術が同一(対称)のとき、排出量に伴うランダム性のばらつきの程度(分散)が大きければ大きいほど、より大量の処理量を達成することが要請される。また、処理費用もその分高くなる。
- (2) 同様に、企業間で排出量に伴うランダム性のばらつきに関する技術に違いがあるときは、ばらつきの大きい企業ほど大量の処理量を達成することが要請される。
- (3) ローカル・レベルの負荷量配分問題においては、必ずしも全提携が合理的であるとは限らない。しかし、総利潤レベルで部分提携が合理的であることも有り得る。

4. むすび

本研究では環境負荷量配分計画問題の重要性に着目するとともに、これを階層型の決定問題として明示的にモデル化することを試みた。同時にこの種の環境マネジメント問題において不可避である不確実性を技術リスクとしてどのように勘案すればよいかについても併せて分析した。具体例については講演時に発表する。なお、本研究の課題は次のようである。

- ① 3人ゲームをさらにn人ゲームに拡大したときのモデル分析
 - ② ナッシュ均衡解の妥当性の検討
 - ③ 企業間の提携が成立する条件の経済学的な検討
 - ④ 長期を想定した配分計画問題への拡張
- などである。今後、これらの課題を含め研究を進展させたいと考えている。

【参考文献】

- 1) Kilgour, M.M., Okada, N., Nishikiori, A. (1988): Load Control Regulation of Water Pollution: An Analysis Using Game Theory, Journal of Environmental Management, 27, pp. 179~pp. 194, 1988.
- 2) Shortle, J.S. (1990): The Allocative Efficiency Implications of Water Pollution Abatement Cost Comparisons, Water Resource Research, VOL. 26, NO. 5, pp793~pp797, May.