

国立公衆衛生院 ○田中 勝
国立公害研究所 内藤 正明
“ 乙間 末広

1. はじめに

廃棄物の広域最終処分場の環境保全対策について、総合的な立場から解析・評価することを目的に、昭和57年度に実施した調査の成果の一部をここに報告する。

廃棄物の処理は、発生源から収集・輸送、中間処理、最終処分という各段階がある。それぞれの段階において、環境保全対策の最適化とは別に、これら全体としての最適化も考えなければならない。というのは、各段階のとりうる代替案によっては、他の段階での保全対策、その費用に大きく影響するからである。

廃棄物の最終処分場の環境保全計画において、最終処分場である埋立地のみでなく、発生源から最終処分場までの全体の環境保全、すなわち各段階を統合化した環境保全が必要である。ここでは、最終処分場からの浸出液による水質汚濁に対する対策を考える。この場合にも、発生源での分別によって、水質汚濁をもたらすような廃棄物の持ち込みを抑制するとか、あるいは最終処分場に持ち込まれる前に廃棄物を中間処理して、環境汚染負荷の低減を図るとか、埋立方法において、覆土とか埋立工法を工夫して、浸出液の量・質の面で影響が少ないようにするとか、それぞれの段階で、いろいろな対応が考えられる。このように最終処分場からの浸出液対策も、各段階を統合化してみなければならないことがわかる。

総合化の意味をいくつか考えてみよう。今説明したように、(1)最終処分場からの浸出液による水質汚染の程度が、発生源、中間処理、埋立方法等の対応により異なり、総合的な解析が必要であるという意味の総合化がある。ある段階での環境影響が、他の段階での対策で変わりうるということで、その環境保全対策には各段階の保全対策を総合的にみる必要がある。(2)次に最終処分場の環境影響を考えた場合に、たとえば水質とか大気的环境項目をとってみても、発生源、収集・輸送、中間処理、最終処分の段階で段階毎に影響があり、場所的にも最終処分場だけに止まらず広域にまたがり、総合的に環境影響を考えなければならない。(3)さらに、時間的にみた場合にも、埋立前、埋立時、埋立終了後の数年間、10年後の影響を与えた場合には、長期的・総合的に環境影響を評価しなければならない。(4)また多くの環境項目間の総合化がある。最終処分場だけとって見た場合でも、浸出液による水質汚濁、発生ガスによる悪臭、そ族昆虫の発生という多くの環境項目での影響を総合化し、トータルとしての影響を評価し、環境保全計画を建てる必要がある。

ここで扱う環境保全計画は、以上に説明したような意味での総合的な評価に立った最適な、環境保全計画をたてようと試みるものである。

この問題を解決するために、この種の大規模・複雑な問題の分析に一般に使われているシステム解析手法を適用してみることにした。

今までのところ、廃棄物処理の各段階（サブシステム）で、適用可能な代替案について、最適化を行うべく、入力や評価関数、目的関数を明らかにし、定式化した上で最適化数式処理を行うべく、対象システムのフレームを検討し、システム構成、定式化の基本方針を練り、いくつかのサブシステムの最適化に共通するプロセスモデル、評価関数、制約条件の考え方を示し、一定のフォーマットによって、各サブシステムの代替案ごとに、特有のプロセスモデル、入出力、変量、プロセス方程式、制約条件、評価項目等を記述できるようにした。

ここでの検討は、特に浸出液による水質汚濁をCODに注目して、環境汚染と処理の経済コストにどのような要素が、どのように影響するかということを明らかにする目的で検討を加えてきた。

今回の報告では、廃棄物の最終処分場計画において、総合的解析の理念と、対象システムのフレームを示

すことに重点を置いた。今後具体的な検討を加えなければならない課題は多く、それらについても最後に少しふれた。

2. システム構成と定式化

ここで対象とする廃棄物最終処分場は広域的に供しうる比較的大規模なもので、その計画に当って検討する範囲は破碎・焼却等の中間処理から、最終処分場からの浸出水処理までとする。さらに、システムの構成を明確にし、解析を容易に進める目的で、図1に示すように対象とするトータルシステムを「中間処理」、「輸

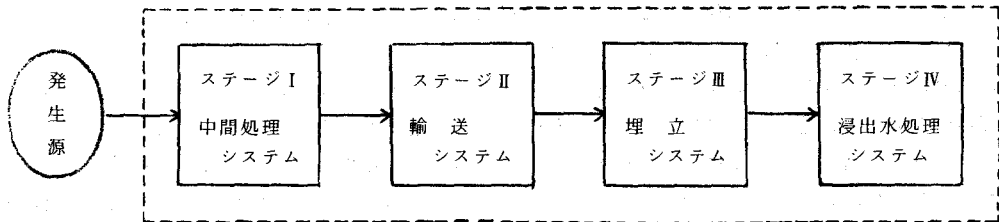


図1 廃棄物最終処分場計画におけるサブシステム

送」、「埋立」、「浸出水処理」の4つの段階（サブシステム）に分割する。ただし、必要に応じてさらに細かいサブシステムに分割することもある。

本システムの特徴は各サブシステムが直列に接続しており、物（廃棄物・廃水）の流れが一方向のみである、いわゆる、直列多段システムになっていることである。このことは各サブシステムのモデル化が比較的独立して扱えるうえ、トータルシステムを最適に構成するうえで、手法的にも都合の良い条件である。なお、ここではサブシステムをステージと呼ぶ。ステージはトータルシステムが直列多段構造を有するときにしばしば用いられる呼称である。

表1は各ステージにおける現実的な主たる方式代替案、評価項目、制約条件について要点を例示的にまとめたものである。

トータルシステムをより効果的に最適化するためにも、各ステージのモデル化を統一的な視点から

表1 廃棄物最終処分システムのシステム要因

ステージ	方式代替案	評価項目	制約条件
中間処理	・焼却 ・脱水 ・破碎 ・コンポスト	・環境影響 ・コスト ・信頼性 ・安全性 ・稼動時間 ・扱い易さ	・自然条件 ・地理的条件 ・社会条件 ・総量規制 ・大気濃度 ・必要処理量 ・地域協定
輸送	・手段（トラック、鉄道、船舶） ・ルート ・時間 ・規模 ・形態（バラ積、コンテナ） ・運営方法	・環境影響 ・コスト ・信頼性 ・機動性 ・スピード	・既存の交通量 ・ルートの制約 ・交通密度の制約
埋立方法	・埋立構造（好気性、嫌気性） ・護岸構造（アースフィル、コンクリートダム、その他）	・環境影響 ・コスト ・信頼性 ・事故対策 ・施工難易度	・埋立構造基準 ・覆土材入手源 ・土質、地質 ・地下水
浸出水処理	・循環処理 ・その他処理 ・上記の組合せ	・環境影響 ・コスト ・信頼性 ・耐用性 ・弾力性 ・維持管理性	・自然条件 ・人的放流基準 ・排水基準 ・総量規制

おこなうべきである。本研究ではまず、各ステージの入出力を次の4種類に分類する(図2参照)。

- (1) 前ステージから来る入力、 K^{i-1}
例：廃棄物の量・質、その他
- (2) 次ステージへ送られる出力、 K^i
例：廃棄物の量・質、その他
- (3) システム外部からの入力、 P_j^i
例： j 代替案の設計・制御、地理的・社会的条件、その他
- (4) システム外部への出力、 Y^i
例：環境影響、副産物、その他

具体的にはこれらの入出力ベクトルの成分に何をとりかは十分検討の要するところである。

特にステージ相互に影響しあう K^{i-1} 、 K^i については、システム全体の物や情報の流れをよく把握したうえで決定されるべきである。ここでは、物の流れに着目し、 K^{i-1} 、 K^i として廃棄物(廃水)の量と質を取り上げる。量を表わす指標としては容積と重量とし、質を表わす指標としてはCODをはじめ、水分、有害物質、重金属など特定なものとする。また、 Y^i は第 i ステージの環境インパクトなどで前後のステージに影響するものではないが、各ステージで採用される代替案方式の特性を評価するうえで重要である。

これらの記号を用いると直列多段システムの各ステージのプロセスモデルは一般に次のように書ける。

$$K^i = f_j^i(K^{i-1}, P_j^i) \quad (1)$$

$$Y^i = g_j^i(K^{i-1}, P_j^i) \quad (2)$$

ここに、 f_j^i 、 g_j^i は i ステージにおいて j 代替案を選択したときの i ステージからの出力を表わす関数ベクトルである。

プロセスモデルを用いてシステム解析するにあたり、許容不可能なシステムが選ばれることのないように、与件的な諸々の条件を制約条件としてプロセスモデルに付加する必要がある。制約条件は一般に次のような不等式で表わされる。

$$\phi^i(K^{i-1}, K^i, Y^i, P_j^i) \geq 0 \quad (3)$$

廃棄物処理システムにおいて制約条件として考えられるのは、各プロセスによって決まる操作的条件、排出基準や施設基準などによる法制的条件、予算などによる経済的条件、地形や周辺地域事情による地理的・社会的条件等々である。しかし、これらの制約条件は各ステージによって異なるのは当然である。

プロセスやシステムを評価する基準は多種多様である。特に、廃棄物処理システムのように複雑なシステムの場合、多くの評価項目が考えられ、項目抽出とその評価値を決定することは容易でない。一般に、抽出された評価項目の評価値をうるために次のように定式化される。

$$\Psi^i = \Psi^i(K^{i-1}, K^i, Y^i, P_j^i) \quad (4)$$

ここでは、この Ψ^i を評価関数ベクトルと呼ぶ。

廃棄物処理システムに対する主たる評価項目としては、①費用、②環境影響、③安全性・信頼性・操作性などが考えられるが、ここではどのステージでも①と②を評価項目として取上げ、できる限りその定式化・定量化を試みる。なお、③についてはまだ定量化は困難であるため、定性的な考察に止める。

以上が各ステージにおけるモデル化の基本方針である。取上げる各ステージの方式代替案は、トータルシステムとして余りにも複雑になることを避けるため、現実的に代表的なものに制限する。

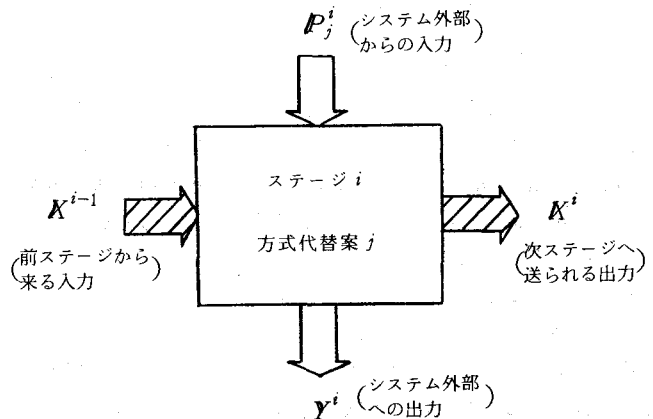


図2 各ステージの入出力分類

3. システムの最適化

一般に、大規模システムは幾つかのサブシステムに分割して計画・設計される。このとき、これらサブシステム個々の設計も重要であるが、対象としている事業や計画全体を1つのシステムとみなし最適に設計することはより重要なことである。個々のサブシステムをそれぞれ最適に設計することは従来も検討されてきたが、これを集めただけでは全体として最適にならないのが普通である。つまり、local optimum は必ずしも global optimum と一致しないのである。廃棄物の埋立事業を最適に計画・設計する問題においても、前段での方式選択が後段の特性に強く影響するという特徴を考えると、全体を1つのトータルシステムとして扱う視点が大切である。

本研究では廃棄物処理システムを図1のように4つのステージからなる多段システムと考え、トータルとしての最適化を図ることを目的としている。ところが、サブシステムである各ステージそれぞれもかなり大規模なシステムであり代替案も多々考えられ、ステージ個々の詳細な設計はそれのみで最適化問題を構成するに十分なくらいである。実際、輸送システムや水処理システムの最適化は数多くなされている。このようなことから、ここで扱っている廃棄物処理システムの最適化は図3に例示されているように最適化問題が入

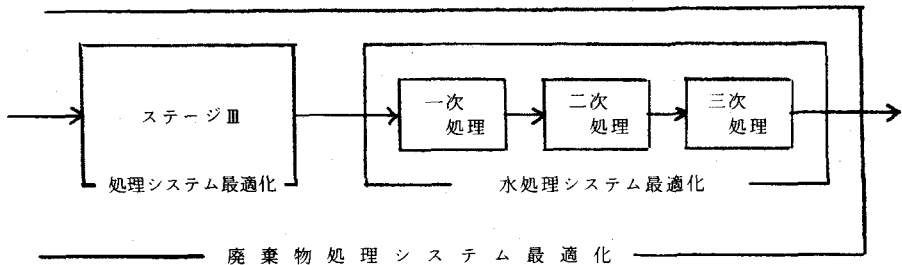


図3 廃棄物処理システムの多重構造例

れ子状の多重構造になっていることは明らかである。しかし、これら各ステージの詳細な設計をもトータルシステムの最適化に加えることは問題を必要以上に複雑にするだけであり、本研究の主目的からはずれる。そこで、サブステージの最適な組合せを探索する程度の最適化はおこなうが、それ以上の細かいプロセスの設計には立入らない。

システムの最適化問題は、「システム方程式」、「制約条件」、「目的関数」の3つの要素から構成される。システム方程式はシステムの挙動や特性を記述するモデルであり、制約条件は解や諸変数の許容範囲を示すものであり、目的関数は許容システムの選択評価関数である。ここで対象としている廃棄物処理システムに対するシステム方程式および制約条件は、形式的には各ステージのプロセスモデルと制約条件を並列に記したものとなる。すなわち、

$$X = f_i^*(K^{i-1}, P_j^i), \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

$$Y = g_i(K^{i-1}, P_j^i), \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

$$\phi = (K^{i-1}, K^i, Y^i, P_j^i) \geq 0, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

ここで注意しなければならないのはモデル精度の統一である。モデルは使用する目的によって要求される精度が異なるうえ、部分的に必要以上に精緻なモデルはその取扱いを複雑にするだけである。よって、トータルシステムの最適化に使用するモデルは必ずしも個々のステージ設計用のモデルと同一である必要はない。場合によってはより簡略化した式を採用した方が良いこともある。

システムを最適化するには、どのような意味でシステムが最適なのかという選択の基準を明確にしなければならない。すなわち、最大化または最小化を図る目的関数を決定しなければならない。この目的関数の内

容によって結果として誘導されるシステムの内容が全く異なってくる。

各ステージにおける評価項目および評価関数をもとに、システム全体を評価する評価項目を選定し、その評価関数ベクトルを

$$\psi = \psi(K^i, Y^i, P_j^i; i = 1, 2, 3, 4) \quad (8)$$

とすると、目的関数の決定はこの ψ の成分から重要と思われるものを1つまたは複数個取出すことである。この際、目的関数として選択されなかった評価項目は(7)式の制約条件の1つとして組込むことも可能である。例えば、ここで試みようとしているように、目的関数には費用を選択し環境影響をあるレベル以下に設定する場合や、また逆に、費用を一定額以下に制約し環境影響を最小にする場合などがその例である。目的関数を

$$J = J(K^i, Y^i, P_j^i; i = 1, 2, 3, 4) \quad (9)$$

とすると、廃棄物処理システムの最適化問題は、数学的には、(5)式～(7)式をみだし、かつ(9)式を最小化または最大化する K^i 、 K^i 、 P_j^i を見出すことである。

最適化の数学手法は目的関数 J がスカラー量かベクトル量かによって大きく2分される。すなわち、単目的最適化問題であるか多目的最適化問題であるかによって異なる。単目的の最適化手法としては次のものが代表的である。

- ① 線形計画法 (Linear Programming, LP)
- ② 非線形計画法 (Non-linear Programming)
- ③ 動的計画法 (Dynamic Programming, DP)
- ④ 変分法 (Variational Principle)
- ⑤ 関数極値法 (Extremum Problem)
- ⑥ 最大原理 (Maximum Principle, MP)

これら手法のうち、どれを使用するのが最も適切かはシステム方程式や目的関数の形式によって異なり、一概に言うことはできない。ところで、本研究では目的関数として、一応、費用をとることにしており、その関数形は次のように各ステージ毎の費用評価関数の和となる。

$$J = \sum_{i=1}^4 \psi^i(K^{i-1}, K^i, Y^i, P_j^i) \quad (10)$$

ここに、

$\psi^i = i$ ステージの費用評価関数

さらに、対象としている廃棄物処理システムが直列多段的構造を有していることから、計算量が大幅に節約できる動的計画法 (DP) を用いるのが最も適切と考えられる。

また、ここで扱っている最適化問題が前述のように多重構造であることを考えると、目的関数(10)式はさらに次のように二段階に分離できる。

$$J = \sum_{i=1}^4 \hat{\psi}^i(K^{i-1}, K^i) \quad (11)$$

ただし、

$$\hat{\psi}^i(K^{i-1}, K^i) = \min_{\begin{cases} Y^i \\ P_j^i \end{cases}} \psi^i(K^{i-1}, K^i, Y^i, P_j^i) \quad (12)$$

このことからわかるように、最適化を進める手順も二段階となる。まず、初めに、各ステージにおいて入出力 K^{i-1} 、 K^i が決定されたときの最適設計 Y^i 、 P_j^i を求めておく。すなわち、(12)式の $\psi^i(K^{i-1}, K^i)$ を各ステージごとに用意する。そして、それらの $\psi^i(K^{i-1}, K^i)$ を用いて(11)式が最小となるような $\{K^i; i = 1, 2, 3, 4\}$ を決定することによって、全システムの最適化を完了することになる。なお、動的計画法を用いるのが適切と思われるのは後段のトータルシステム最適化であり、前段のステージ最適化における最適化手法は

各ステージのプロセスモデルやその他の状況によって異なる。

廃棄物処理システムを最適に設計するとき、目的関数としては費用評価関数以外に環境評価関数など他にも幾つか考える。さらにこれらの評価関数を同時にとりあげ、多目的最適化とすることもできる。しかしたとえ多目的問題とするにしてもシステムの評価項目をすべて定式化し目的関数として採用することは困難である。よって切捨てられた評価項目についても何らかの方法で配慮する必要があり、その1つの方法としては方式代替案や設計変数の取捨選択を十分検討することである。

4. 今後の検討課題

各サブシステム毎にそこへの受け入れ廃棄物の量と質が与えられた場合、この入力とそのサブシステムから次の処理サブシステムへの入力としての廃棄物の量・質あるいは浸出液に与える影響との関係を示すのがプロセス方程式である。この場合システム評価には費用と共に特に最終処分場の環境保全ということで最も重要であると考えられる「水質汚濁」に視点をあわせ、埋め立て処分場からの浸出液による環境汚染を防止するという観点でまのめることが出来る。この問題はいわゆる下水処理場の流入汚水の処理において、排出基準が決められた場合の最適下水処理システムを設計するというケースに類似しており、それぞれ発生源対策、中間処理、輸送、埋め立て処分、埋め立て作業、浸出液処理という各ステージが水処理プロセスの1次、2次……処理ステージに相当し、与えられた入出力条件を満たす最も効率的な処理システムの構成を決定する問題と相似である。

しかしながら、ここでは廃棄物の発生場所と発生量が与えられ、またその廃棄物の質も定められているところからスタートし、それらの廃棄物の中間処理、輸送、受け入れた廃棄物の埋め立て作業（覆土を含む）、浸出液の処理というシステムを経て環境影響をもたらす。前述の下水道処理施設と比べて違うところは、対象物が最初固形の廃棄物で、それが最終段階では浸出液という液体の量と質に変換される点である。従ってここでは廃棄物の量を汚染物としてとらえ、汚染物が特定のステージにどれだけ移行しているか、最終的には浸出液の発生量が分っている最終処分場で、浸出液の中に含まれる廃棄物の量がどれだけかを推定することが必要となる。これを定量的に解析するためには、かなりの現象の簡略化を行なわなければならないが、先ずどういう要素が浸出液の量と質に影響を与えるかという観点から、関連する項目をリストアップしなければならない。

今後のシステム解析のために、ケース・スタディを想定して、浸出液の質と量及び処理費用に影響すると思われる各サブシステムで適用可能性の高い方式代替案を整理してみたのが図4である。

この問題を扱う場合に多くの事が整理されておかなければならない。その1つは、廃棄物を受け入れる量（処理しなければならない対象量）というのは与件（given）であるということである。発生源で受け入れ廃棄物を減量するということはここでは対象外としている。

第2点は、最適化という評価項目に便宜上費用を選択し、処理処分にかかわるトータル費用でもって処理システムが最適という考えで試みる。実際は環境影響、住民の合意、次の用地の確保、技術的な評価など多くの評価項目が考えられる。

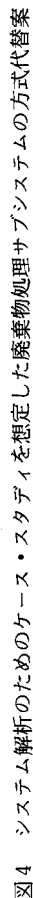
第3点は、最適の考え方には、時間的問題、確率的事象の問題等多くの事項があるが、これは今後の検討課題として残した。

その他の問題として残されているものは、最も重要な浸出液に関するデータについてであるが、下水に比べて、(1)ばらつきが大きい。(2)BODとCODの除去率が異なる。(3)水質特性が異なる。(4)経時的に変化しその予測は困難である。などであり、これをどう解析段階で克服するかも工夫を要する点である。

廃棄物処理システムを定式化・最適化するという観点から特に問題となり、今後の課題と考えられる点がいくつかある。

(1) システム方程式、プロセスモデルについて

- ・システムが大規模のため多変数となり、それら相互関係を記述するに十分な知見・情報が欠如している。



- 各ステージによりシステム規模が異なり、プロセスモデルの精度的レベルを統一するのが困難である。
 - 特に埋立地からの浸出水の水量・水質は経年的に大きく変化する。このように経年的に変化するプロセスをいかにモデル化し評価するか。
 - 幾つかの変数は確率的挙動をする。この確率変数をいかに扱うか。
- (2) 制約条件、評価関数、目的関数について
- 条件や評価項目の多くは表現や概念があいまいで定式化が困難である。
 - 目的関数に関して最適解が sensitive であるにもかかわらず、その選択・決定方法が明確でない。
 - 確率的現象であるリスクをいかに扱うか。
- (3) 最適手法について
- 多目的問題としたときの手法の選択と恣意性の排除。
- これらどれをとっても今のところ一般的解決法はなく、今後の重要な課題であろう。

最後に、本研究は、厚生省が土木学会に委託して、昭和57年度に実施した調査研究課題「広域最終処分場計画調査・環境保全計画調査」の成果の一部であり、土木学会に設置された広域処分小委員会で検討されてきたものであることを明記し、関係者に感謝の意を表したい。