

広域廃棄物埋立処分システムの最適化

OPTIMIZATION OF A REGIONAL SOLID WASTE DISPOSAL SYSTEM

乙間末広*・河村清史**・田中 勝***・内藤正明****

By Suehiro OTOMA, Kiyoshi KAWAMURA, Masaru TANAKA and Masaaki NAITO

A regional waste disposal system consisting of four subsystems, i. e., intermediate treatment (incineration), transportation, land reclamation and leachate treatment, was optimized by the dynamic programming technique. The sum of construction and running costs was employed as the objective function to be minimized under maintaining the COD concentration of effluent below a certain level.

The optimal system under the study comprised incineration of the whole waste, reclamation by the sectionally controlled filling, and biological leachate treatment followed by the adsorption by activated carbon. The cost of incineration is the largest portion as much as 86% of the total cost. The effects of parameters such as the transportation distance, the amount of waste disposed, and the efficiency of biological leachate treatment on the optimal system design were also examined.

Keywords: optimization, solid waste, regional disposal system, dynamic programming

1. はじめに

広域廃棄物埋立処分場計画を円滑に実施するうえで、環境保全に対する配慮は、最も重要視しなければならない項目の1つであり、これまでも環境影響の予測や評価に関する調査¹⁾などが行われているが、それらはシステム全体からみると部分的な評価や考察にとどまっている。広域埋立処分システムは廃棄物の収集に始まり埋立処分・浸出液処理に至るまで複数の段階があり、各段階での施設設計や環境保全対策は互いに密接な関係にあることを考えると、より効率的な設計やより実効のある環境保全対策を実施するためにはシステム全体を統一的に考える必要がある。

たとえば、環境保全上最も重要と思われる最終埋立処分場周辺の水質汚濁対策を考える場合、発生源での分別や中間処理の導入によって環境汚濁負荷の低減を図る方法、埋立時に覆土や埋立工法を工夫することによって汚

濁物質の周辺浸出を極力阻止する方法等、各段階でいくつかの選択可能代替案があり、それらの評価はシステム全体を解析することによって初めて可能となる。

本研究では、広域埋立処分システムの特徴が多段階過程であることを考え、DP (Dynamic Programming) 問題として定式化し、システム全体の最適化を試みる。従来このような検討が廃棄物の分野でなされた例は皆無であり、データや知見にはかなりの制限がある。ここでの具体的な数値計算でも、現在入手可能なデータを極力採用しているが、知見がまだ十分蓄積されていない部分も多い。したがって、計算結果も確固たる一般的なものではなく、今のところはケーススタディーの結果として位置づけられるが、複雑な廃棄物の埋立システムを統一的に整理し最適化する方法を提示し得たと考えている。

2. システムの設定

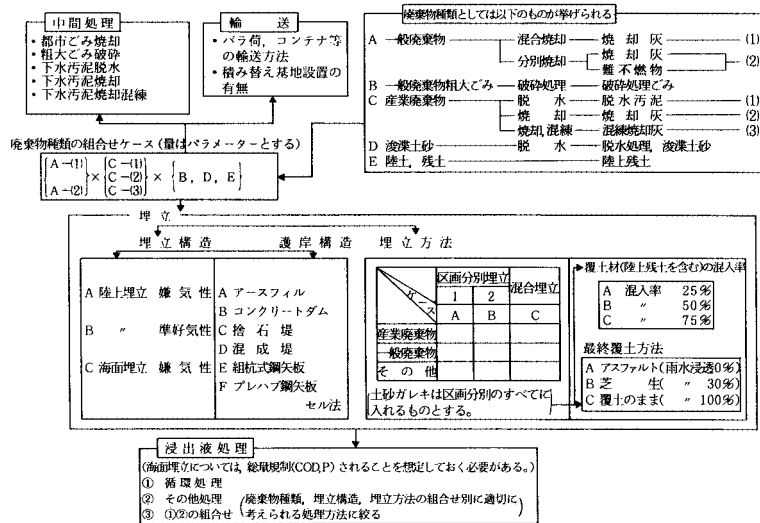
ここで扱うシステムを便宜上図-1に示されているように中間処理、輸送、埋立処分、浸出液処理の4つのステージに分割する。廃棄物発生場所から中間処理場までの収集過程は多分に地域的であり、実現可能でかつ中間処理以降のシステムに大きな影響を与えるような代替案は考えにくい。ここでは一応除外する。なお、ステージ番号が廃棄物の流れと逆になっているのは、DPとし

* 正会員 工修 国立公害研究所総合解析部研究員
(〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16-2)

** 正会員 工博 国立公衆衛生院衛生工学部水質工学室長
(〒108 港区白金台4-6-1)

*** 正会員 Ph. D. 国立公衆衛生院衛生工学部廃棄物処理室長(同上)

**** 正会員 工博 国立公害研究所総合解析部長
(〒305 茨城県筑波郡谷田部町小野川16-2)



図一 各ステージにおける適用可能性の高い代替案の種類とその組合せ

て定式化しやすくするためである。

このような大きなシステムになると、代替案の種類や組合せが数多く存在する。それらのうち、適用可能性の高いものを各ステージごとに整理したのが図一2であり、ここで取り上げるのは、さらにこのうちの一部である。その第一の理由は、定量的解析ができるほどの知見とデータが蓄積されているのは、ごく一部の代替案に限られていること。第二の理由は、システムを必要以上に複雑にすることによって、全体を見通すという本研究の主目的が十分達成されないことを懸念するためである。次節以降では、システムを下記のように簡略化するが、システム自身が非現実的にならないように配慮してある。

(i) 廃棄物の発生量：大規模な広域最終処分場を想定すると、対象圏域は5〜6県程度になると考えられる。たとえば近畿圏の場合では、6府県から出る一般廃棄物の発生量(処理前)は、8,000トン/日程度である。しかし、ここでは便宜上、一地域の一般廃棄物のみを対象とし、その発生量は京都市程度の都市のものに相当する1,500トン/日として検討する。

(ii) 中間処理：中間処理は埋立処分の前処理的位置づけにあり、一般廃棄物に対するものとしては、焼却、破碎、コンポスト、脱水などがある。ここでは、中間処理のなかでも最も一般的な焼却のみを取り上げる。焼却は減容等の効果が大きいので、後続のプロセスに対する

影響も大きい。

(iii) 輸送：廃棄物の輸送方法としてはさまざまなケースを考えることができるが、わが国の輸送の現況を考慮すると、陸上部の輸送は車両輸送とするのが妥当であろう。また、海上部の輸送は費用面から考えてバージ輸送とする。輸送のコースについては、廃棄物の発生を一地域としていることから選択はなく、輸送距離は陸上部60km、海上部30kmと固定する。

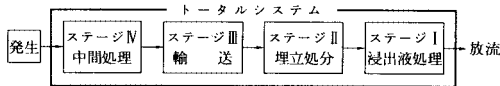
(iv) 埋立処分：埋立処分期間は10年間とする。このような大規模な広域処分場を内陸部に建設することは、現実的には難しく、ここでは海面埋立を想定する。埋立工法としては、一般的な薄層多重埋立、片押し埋立、陸上埋立の組合せとし、また、浸出液量を減少させるためブロック別に埋立てる区画埋立を行うものとする。

(v) 浸出液処理：水質の指標としては多々考え得るが、ここでは最も注視すべき指標としてCODを取り上げ、COD除去を目的としたプロセスを検討対象とする。

以上のようなシステムに対して最適化を試みるのであるが、システムを評価する指標としては、建設費の年間償却費と維持管理費の和を採用する。ただし、埋立処分場の護岸工事費は埋立後の土地売却費と相殺できるものとして考慮しない。また拘束条件として、浸出液処理施設からの放流水水質が一定値を超えないこととする。

3. ダイナミックプログラミング問題としての定式化

第*i*ステージに入る廃棄物(または浸出液)の量や質の状態をベクトル x_i で表わし、そのステージの設計または方式代替案の選択をベクトル p_i で表わすと、各ステージにおけるプロセス方程式および環境影響などの拘



図一 対象とするシステムの領域

束条件はそれぞれ次式で表現される。

$$x_{i-1} = f_i(x_i; p_i), \quad i=1, 2, \dots, n \dots\dots\dots(1)$$

$$g_i(x_i; p_i) \leq 0, \quad i=1, 2, \dots, n \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 f_i, g_i はプロセス方程式と拘束条件を表わす関数ベクトルであり、 x_0 は放流水の状態を表わすベクトルである。

システムの良否を評価する指標としてコストを採用すると、システム最適化のための目的関数 H は各ステージの目的関数 h_i の和として、

$$H = \sum_{i=1}^n h_i(x_i; p_i) \dots\dots\dots(3)$$

と書くことができる。

式 (1), (2) を満足し、かつ式 (3) を最小にする変数 p_i ($i=1, 2, \dots, n$) を求める問題は、段数 n を有する多段決定過程の問題であり、DP を適用することができる。そこで、関数列 $\{H_i(x_i)\}$ を以下のように定義する。

$$H_i(x_i) = \text{minimum}_{p_i} \sum_{j=1}^i h_j(x_j; p_j) \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 p_i は p_i のなかで式 (2) を満足するものだけを意味し、解の許容領域を示す。式 (4) の定義と最適性の原理から、関数列 $\{H_i(x_i)\}$ では次の再帰関係が成立する²⁾。

$$H_i(x_i) = \text{minimum}_{p_i} \{h_i(x_i; p_i) + H_{i-1}(x_{i-1})\} \dots\dots\dots(5)$$

また、次式も明白である。

$$H_n(x_n) = \text{minimum} H \dots\dots\dots(6)$$

このことから、DP では式 (3) を最小にする変数 p_i を、式 (5) の関数方程式を順次解くことによって求めるのである。

具体的な計算においては、これらの状態変数 x_i や決定変数 p_i に何を採用するかが重要な問題である。システム設計に対する影響度に加えて、知見やデータの蓄積度なども十分考慮する必要がある。表-1 はここで採用する諸変数の内容をまとめたもので、前節のシステム設定をふまえている。

表-1 計算に用いた状態変数, 決定変数および拘束条件の内容

ステージ	状態変数 X_i	決定変数 P_i	拘束条件 G_i	目的関数 h_i
Ⅳ. 焼却	ごみ発生量	焼却率	-----	建設費 維持管理費
Ⅲ. 輸送	ごみ輸送量 生ごみ量 焼却灰量	-----	-----	輸送費
Ⅱ. 埋立処分	ごみ埋立量 生ごみ量 焼却灰量	区画割	-----	中仕切費 処分および 維持管理費
Ⅰ. 浸出液処理システム	浸出液の量・質 最大水量 最大COD	処理レベル	-----	建設費 維持管理費
Ⅰ. 放流	放流水のCOD	-----	COD < 30 g/m ³	-----

4. プロセス方程式および費用 (目的) 関数

(1) 中間処理 (焼却)

a) プロセス方程式

一般廃棄物 (混合ごみ) の発生量を x_{a1} (トン/日)、焼却残渣率を平均的な 0.14、焼却率を p_4 とすると、生ごみがそのまま埋立処分場に輸送される量 x_{31} (トン/日) および焼却後埋立処分場に輸送される焼却灰量 x_{32} (トン/日) はそれぞれ次式で計算される。

$$x_{31} = (1 - p_4)x_{a1} \dots\dots\dots(7)$$

$$x_{32} = 0.14 p_4 \cdot x_{a1} \dots\dots\dots(8)$$

b) 費用関数

焼却にかかわる費用は焼却炉建設費と運転費 (維持管理費) である。ここでは、建設費 I_i (百万円) を必要とする炉の規模 $Q_i = p_4 \cdot x_{a1}$ トン/日の関数として次のように仮定する。

$$I_i = 35.38 Q_i^{0.9} \dots\dots\dots(9)$$

べき乗の 0.9 は文献³⁾を参考にし、係数 35.38 は炉の規模 300 トン/日の炉で 60 億円となるように定めた。すべての費用を年間費用で比較するため、建設費は減価償却費に換算する。金利を考慮した減価償却費 C_i (百万円/年) は次式で求まる。

$$C_i = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} I_i = 5.27 Q_i^{0.9} \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 r は年金利、 T は償却期間で、式 (10) の右辺はそれぞれ 8%、10 年とした場合に相当する。

運転費 R_i (百万円/年) についても建設費と同様の方法で、焼却量 300 トン/日の炉で年間 6 億円となるような次式を仮定する。

$$R_i = 3.54 Q_i^{0.9} \dots\dots\dots(11)$$

よって、焼却にかかわる年間費用 h_4 (百万円/年) は式 (10) と式 (11) の和となる。これらの式からもわかるように建設施設減価償却費と運転費の比率はほぼ 3 対 2 の割合である。

(2) 輸 送

a) プロセス方程式

輸送過程においては廃棄物の量・質が変化しない。すなわち、埋立処分場に持ち込まれる生ごみ量 x_{21} (トン/日) と焼却灰量 x_{22} (トン/日) は、それぞれ中間処理プロセス後のものと等しい。

$$x_{21} = x_{31} \dots\dots\dots(12)$$

$$x_{22} = x_{32} \dots\dots\dots(13)$$

b) 費用関数

輸送費用は重量よりむしろ容積によって決定される。以下、文献³⁾をもとに費用関数を定める。輸送時の単位体積当たりの重量を生ごみについて 0.4 (トン/m³)、焼却灰について 1.3 (トン/m³) とすると輸送時の容積

Q_t (m³/日) は次のようになる。

$$Q_t = x_{31}/0.4 + x_{32}/1.3 \dots\dots\dots(14)$$

輸送費の内訳は陸輸費、海輸費、積出港での積替費と揚陸費である。陸輸費 R_{11} (円/m³) および海輸費 R_{12} (円/m³) はともにそれぞれの輸送距離 d_1, d_2 (km) の関数で次のように決める。

$$R_{11} = 40 d_1 + 60 \dots\dots\dots(15)$$

$$R_{12} = 7.8 d_2 + 180 \dots\dots\dots(16)$$

積替費と揚陸費の合計 R_{13} (円/m³) は一律に、

$$R_{13} = 270 \dots\dots\dots(17)$$

とする。したがって、陸輸 60 km、海輸 30 km の場合の 1 年間 (365 日) の総輸送費 h_3 (百万円/年) は、

$$h_3 = 1.15 Q_t \dots\dots\dots(18)$$

となる。

(3) 埋立処分

埋立深さは水面下 10 m、水面上 10 m の計 20 m とする。処分場の規模は 10 年間分の埋立ができるものとし、さらに埋立処分地は正方形と仮定する。検討する区画割は図-3 に示すように中仕切枚数が 0 から 4 までの 5 通りとする。埋立工法は水深が水面下 3 m になるまでは薄層多重埋立とし、その後片押し埋立に移行するものとする。なお、残土は無償で入手でき、埋立時の体積比率で 25 % 混入するものと仮定する。

a) プロセス方程式

浸出液の量・質を埋存量や埋立条件の関数として予測する式はないが、文献 4) は上記の条件のもとでモデルシミュレーションを行っている。その結果では、最大水量 x_{11} (m³/日) は廃棄物埋存量 ($x_{21} + x_{22}$) に対してほぼ線形であり、次式で近似できる。

$$x_{11} = \begin{cases} 6.00(x_{21} + x_{22}) - 342 & (p_2 = 0) \\ 3.42(x_{21} + x_{22}) - 202 & (p_2 = 1) \\ 2.29(x_{21} + x_{22}) - 142 & (p_2 = 2) \\ 1.73(x_{21} + x_{22}) - 114 & (p_2 = 3) \\ 1.49(x_{21} + x_{22}) - 102 & (p_2 = 4) \end{cases} \dots\dots\dots(19)$$

ここに、 p_2 は中仕切枚数を示す。なお、これらの式は ($x_{21} + x_{22}$) が 210 トン/日以上で有効である。式中の係数からもわかるように分割数の増大とともに最大浸出液量は急激に減少する。なおここでは、一区画ごとに埋立していき、収集・処理する浸出液は埋立進行中の区画から得るもののみとし、未埋立の区画からの余水は処理対象にしない。また埋立終了後の区画は最終覆土し新たに浸

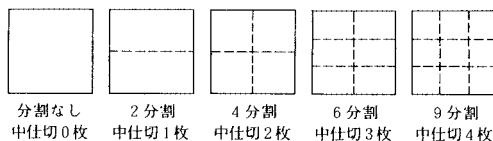


図-3 検討の対象とする埋立処分地の区画割

出液は発生しないと仮定している。

水質に関しては、水量ほどの変化はなく、ここでは同じシミュレーション結果から、薄層多重埋立時の水質を参考にして廃棄物埋存量に関係なく次のように決める。

$$x_{12} = \begin{cases} 1200 & (p_2 = 0) \\ 1400 & (p_2 = 1) \\ 1500 & (p_2 = 2) \\ 1600 & (p_2 = 3) \\ 1700 & (p_2 = 4) \end{cases} \dots\dots\dots(20)$$

ここに、 x_{12} (COD mg/l) は後段の浸出液処理施設を設計するための基礎となる水質である。これらの値は片押し埋立時の最高濃度よりも低い。片押し埋立時の浸出液量は薄層多重埋立時のものに比べてかなり少ないため、薄層多重埋立時の数値を基に設計した施設において片押し埋立時の浸出液も十分処理できるものと考えられる。

b) 費用関数

護岸工事費は埋立後の土地売却費と相殺できるものと考え、ここでは中仕切費および処分費 (維持管理費) から費用を算出する。10 年間の廃棄物を処分するのに必要となる埋立地容積 V (m³) は、生ごみと焼却灰の埋立時における単位体積重量 (トン/m³) をそれぞれ 1.0, 1.3 とすると、次式で計算される。

$$V = 3650 \times (1 + 0.25/0.75) \times (x_{21}/1.0 + x_{22}/1.3) \dots\dots\dots(21)$$

埋立地は深さ 20 m の正方形と仮定しているため、埋立地 1 辺の長さ L (m) は

$$L = (V/20)^{0.5} \dots\dots\dots(22)$$

となる。この長さは中仕切 1 枚の長さでもある。

中仕切費を 3 (百万円/m) とし、長さ L (m) のものを p_2 (枚) 設けるときの年間減価償却費 C_t (百万円/年) は

$$C_t = \frac{(1+r)^T \cdot r}{(1+r)^T - 1} \cdot 3 \cdot L \cdot p_2 \dots\dots\dots(23)$$

となる。年金利 r と償却期間 T は式 (10) で適用したものと同一 8 %, 10 年を用いた。処分費 R_t (百万円/年) は廃棄物埋存量 ($x_{21} + x_{22}$) に比例するとし、その額を 5 (千円/トン) とすると次式のようになる。

$$R_t = 0.005 \cdot 365 \cdot (x_{21} + x_{22}) \dots\dots\dots(24)$$

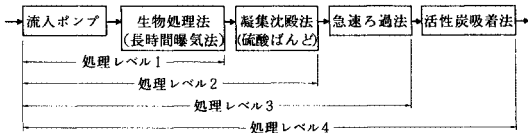
よって、埋立処分にかかわる年間費用 h_2 は、

$$h_2 = 0.45 L \cdot p_2 + 1.83 (x_{21} + x_{22}) \dots\dots\dots(25)$$

となる。

(4) 浸出液処理

付録に示すような検討の結果、浸出液処理過程では図-4 にある 4 通りの処理レベルを代替案として考慮し、各ユニットプロセスのプロセス方程式と費用関数は表-2 のように定める。なお、本節の式および表-2 中の各式の詳細については付録を参照のこと。



図—4 浸出液処理施設の構成と処理レベル

a) プロセス方程式

一般に、物理化学処理が有効に機能するためには、処理すべき水質をあるレベル以下にしておく必要がある。ここでは生物処理終了時点で浸出液 COD 濃度が 120 mg/l 以下になることを想定する。前節でみたように、埋立地からの浸出液の最高濃度はかなり高く、表—2 の生物処理効率では、凝集沈殿法流入時の濃度が 120 mg/l を大きく越えることが予測される。そこで、ここでは施設の設計計画流量に余裕をもたせることによって浸出液の高濃度に対処するものとする。すなわち、生物処理後の濃度が 120 mg/l を越えないように浸出液を希釈しても十分処理できるように施設を設計するのである。このことは、生物処理に入る前の浸出液を濃度 x_{12} から次式のように希釈調節することを意味する。

$$S_w = \min\{x_{12}, 120 / (0.125k + 0.35)\} \dots\dots\dots (26)$$

ここに、 S_w は希釈後の COD 濃度で、 k は COD 濃度と BOD 濃度の比である。

表—2 から各処理レベルのプロセス方程式は一括して次のように書ける。

$$x_{01} = \beta (0.125k + 0.35) S_w \dots\dots\dots (27)$$

ここに、 x_{01} は放流水の COD 濃度で、 β は処理レベルによって決まる係数である。処理レベル p_1 の 1 から 4 までに対応する β の値はそれぞれ、1.0, 0.6, 0.51, 0.204 である。 k を 1 とした場合、活性炭吸着法まで行うレベル 4 の施設で残留率がほぼ 10 %、処理効率でいうと約 90 % となる。

b) 費用関数

表—2 からわかるように浸出液処理施設の費用は計画水量 Q のみによって決定される。ただし、前にも記したようにこの Q は埋立地からの浸出液量そのものではなく、適当に希釈された後の流量である。すなわち、

計画流量 Q (千 m^3 /日) は

$$Q = (x_{12} / S_w) x_{11} / 1000 \dots\dots\dots (28)$$

となる。 k の値が小さくなると生物処理の処理効率がよくなるため希釈倍率も小さく、施設も小さくてすむ。浸出液処理にかかわる総費用 h_1 は、処理レベルに応じて表—2 より抜粋し、加え合わせることで求められる。なおここでは、希釈するための費用は無視し、希釈はできるだけ抑えることを前提とする。

5. システムの最適化

各ステージにおける一連のプロセス方程式を満たし、かつトータル費用が最小となるようなシステムを最適化する。3. で記しているように、最適化手法としては DP を採用するのが適切である。すなわち、式 (5) の関数方程式を順次解くことによって、最後尾のステージから最適設計を進め、最後には最適なトータルシステムに到達するのである。なお、ここでは一応、式 (26)、(27) に含まれる浸出液の水質にかかわるパラメーター k は 1 に、浸出液処理後の放流水の水質は 30 mg/l 以下に拘束する。

(1) 浸出液処理レベル (p_1) の決定

式 (27) からわかるように、浸出液の処理レベルを最高のレベル 4 にしても、処理効率は高々 90 % である。埋立地から出る浸出液の COD の最高値は埋立地の区画割に関係なく 1000 mg/l 以上であるため、放流水の拘束値 30 mg/l を維持するには処理レベル p_1 を 4 にしたうえ、さらに浸出液が高濃度時には希釈する必要がある。式 (26) に従った希釈を行った場合の放流水水質は 24.5 mg/l となり、拘束条件を満足する。すなわち、式 (5) の関数方程式の第 1 段目の解は次のようになる。

$$H_1(x_{11}, x_{12}) = h_1(x_{11}, x_{12}; p_1=4) \dots\dots\dots (29)$$

なお、参考のために記すが、処理レベル 3 の処理効率が 76 % であるから、浸出液の最高濃度が比較的低い 1000 mg/l のときでも、処理レベル 4 が不必要となるには放流基準が 240 mg/l まで緩和されなければならない。このようなことはほとんどあり得ないことである。

(2) 埋立処分場の中仕切枚数 (p_2) の決定

表—2 浸出液処理施設における各ユニットプロセスのプロセス方程式と費用関数

ユニットプロセス	プロセス方程式	費用関数		
		建設費	維持管理費	
流入ポンプ	$S_{out} = S_{in}$	$C = 58.8Q^{0.622}$	$R = 1.3Q^{0.650}$	
生物処理法 (長時間曝気法)	$S_{out} = (0.125k + 0.35)S_{in}$	水処理	$C = 17.4(\alpha Q)^{0.324} 36.5Q^{0.814}$	$R = 8.0(\alpha Q)^{0.684} 2.0Q^{0.684}$
		汚泥処理	$C = 35.3Q^{0.692}$	$R = 1.2Q^{0.687}$
		電気	$C = 177.8Q^{0.479}$	
		その他	$C = 41.5Q^{0.722}$	$R = 1.8Q^{0.745}$
凝集沈殿法 (硫酸ばんど)	$S_{out} = 0.6 S_{in}$	$C = 22.4Q^{0.946}$	$R = 11.3Q^{0.430}$	
急速ろ過法	$S_{out} = 0.83S_{in}$	$C = 107.0Q^{0.636}$	$R = 11.0Q^{0.475}$	
活性炭吸着法	$S_{out} = 0.4 S_{in}$	$C = 167.9Q^{0.648}$	$R = 7.4Q^{0.665}$	

1) k は COD 濃度と BOD 濃度の比 (COD/BOD) である。
 2) α は COD 容積負荷に原因する生物処理槽の容量補正係数でここでは 10.0 とする。
 3) 凝集沈殿法 (硫酸ばんど) は汚泥処理費 (濃縮、脱水) を含む。

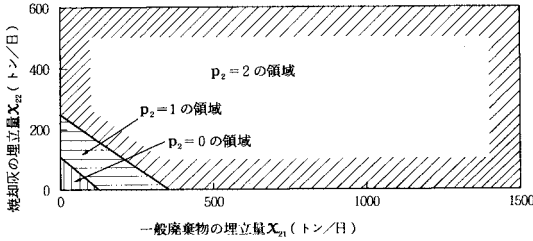


図-5 一般廃棄物、焼却灰の埋立量と最適な中仕切枚数の関係

埋立処分場の中仕切枚数 (p_2) は関数方程式

$$H_2(x_{21}, x_{22}) = \underset{0 \leq p_2 \leq 4}{\text{minimum}} \{h_2(x_{21}, x_{22}; p_2) + H_1(x_{11}, x_{12})\} \dots \dots \dots (30)$$

を満たすように決定すればよい。すなわち、埋立場に持ち込まれる生ごみ (x_{21}) と焼却灰量 (x_{22}) が与えられたとき、埋立費と浸出液処理費の和を最小にするような p_2 を求める。

結果は図-5 に示してある。大半の領域において $p_2 = 2$ (4 分割) が最適であるが、埋立量が少なくなると $p_2 = 1$ (2 分割) や $p_2 = 0$ (分割なし) が最適設計となる。

(3) 焼却率 (p_4) の決定

輸送過程に代替案はないとしているため、輸送過程以降の最適費用 H_3 は次式で求まる。

$$H_3(x_{31}, x_{32}) = h_3(x_{31}, x_{32}) + H_2(x_{21}, x_{22}) \dots \dots \dots (31)$$

さらに、トータルシステムの最適費用 H_4 は次式から決定される。

$$H_4(x_{41} = 1500) = \underset{0 \leq p_4 \leq 1}{\text{minimum}} \{h_4(x_{41}; p_4) + H_3(x_{31}, x_{32})\} \dots \dots \dots (32)$$

図-6 からわかるように、最適な焼却率 p_4 は 1 で、全量焼却を意味する。このときの埋立量は生ごみ $x_{21} = 0$ 、焼却灰 $x_{22} = 210$ トン/日で、図-5 より中仕切枚数 p_2 は 1 となる。

6. 結果の検討

(1) 最適システムと受入料金について

ここで取り上げたケースの最適なトータルシステムは廃棄物の全量を焼却したのち、焼却灰を二分割の区画埋立をし、浸出液処理では三次処理の活性炭吸着処理まで行うシステムであった。その主な設計仕様および費用は表-3 にまとめてある。ただし、末尾の数値の合計が合わないのは四捨五入による誤差である。このシステムの年間必要経費は 74 億 900 万円で、うち 56 % が建設施設減価焼却費、44 % が維持管理費である。各ステージごとの内訳では、焼却費が 86 % とかなり大きい。輸送費が 2.5 % と小さいのは廃棄物発生地から焼却場までの収集の費用が含まれていないため、これを含むとかなり大きくなると思われる。

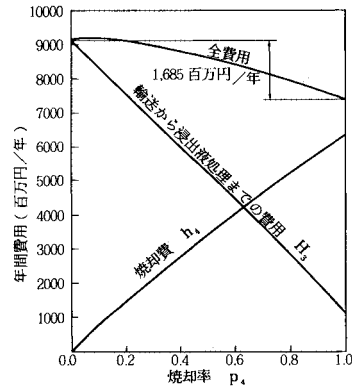


図-6 焼却率によって変化する焼却費および焼却費以外の費用

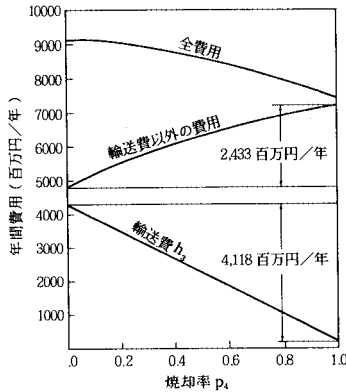
発生廃棄物 1 トン当たりにかかる処分費用 13 532 円のうち、埋立処分事業者の負担となるのは埋立処分および浸出液処理にかかわる費用で全体の 11.7 % にあたる 1 583 円である。この値は発生一般廃棄物 1 トンに対するもので、埋立処分場に持ち込まれる時点では一般廃棄物 1 トンは焼却灰 140 kg (残渣率 14 %) となっており、焼却灰 1 トン当りに換算すると 11 309 円となる。よって、もし埋立および浸出液処理にかかる費用を受入料金で全額賄うとすると、受入料金は 1 トン当たり 11 309 円以上でなければならない。

次に持込者の立場から考えてみる。全量焼却の場合の持込者の負担は焼却費、輸送費、および受入料金である。いま、受入料金を埋立処分場への持込時点で 1 トン当たり Z 円とすると、焼却費と輸送費の和 (全体の 88.4 %) が 11 962 円/トンかかっているため、持込者負担総額は発生一般廃棄物 1 トン当たり (11 962 + 0.14 Z) 円となる。一方、焼却なしの場合は輸送費と受入料のみでその額は (8 055 + Z) 円となる。これらの値から受入料金が 1 トン当たり 4 543 円を越えるとき、廃棄物を焼却した後、埋立地に持ち込むことが持込者にとって有利とな

表-3 最適システムの設計仕様と年間費用

ステージ	設計仕様	建設費	維・管費 又は処分費	合計
IV. 焼却	全量焼却 (1,500トン/日)	3,806	2,556	6,362 (85.9%)
III. 輸送	焼却灰 210トン/日 (162m ³ /日)	-	185	185 (2.5%)
II. 埋立処分	容積: 0.786 × 10 ⁶ m ³ 面積: 3.9ha 最大浸出液水量: 0.516千トン/日 最大浸出液水質: 1.400g/m ³ 区画: 2 分割	89	384	472 (6.4%)
I. 浸出液処理システム	生物処理 ~ 活性炭吸着処理 規模: 2.9千トン/日	247	146	393 (5.3%)
全システム		4,142 (55.9%)	3,271 (44.1%)	7,412 (100%)
一般廃棄物 1 トン当り (円)		7,565	5,969	13,532

(注) 最下段を除いて各数値の単位は百万円/年



図一七 焼却率によって変化する輸送費および輸送費以外の費用

る。すなわち、経済的インセンティブによって、持込者に焼却を促すには4543円以上の受入料金を設定する必要がある。

(2) 焼却費の影響について

図一六に示すように、焼却費 h_4 とそれ以後の処理に必要な費用 H_3 の間にはトレードオフの関係がある。しかし、焼却率に対する費用関数は両方もわずかながら上に凸であるため、その和である全費用も上に凸となり、最適値は端点である焼却率0または1のどちらかで生じ、その途中(部分焼却)になることはない。

焼却費の費用関数である式(10)、(11)に含まれるベキ乗係数は、通常1以下であるから上記の性質に変化はない。また、線形係数5.27と3.54についても同様である。これらの係数は、全費用に占める焼却費の割合に影響を与えるだけである。

(3) 輸送距離の影響

図一七は全費用から輸送費のみを取り出し、その他の費用と比較したものである。焼却の有無による輸送費の差は4118百万円/年で、その他の費用の差2433百万円/年を大きく上回っている。最適システムが全量焼却となったのはこの結果が反映されたものであり、輸送距離がもっと短くなるか、または1km当たりの輸送単価が安くなるなどによって、総輸送費が軽減されれば最適システムにおいても焼却不利となる。この分岐点となる輸送費用 C_T (円/ m^3) は次式で算定できる。

$$C_T = (A_1 - A_0) / 365 (Q'_0 - Q'_1) \dots \dots \dots (33)$$

ここに、 A と Q' はそれぞれ輸送費以外の費用(円/年)と輸送量(m^3 /日)を表わし、添字0と1は焼却なしの場合と全量焼却の場合を示す。ここでの例では、 $C_T = 1858$ 円/ m^3 となり、輸送費がこの額を上回る場合は焼却するのがよく、この額以下の場合は生ごみのまま埋立地に搬入するのがシステム全体として有利になる。輸送単価に変化がないとしたときの、陸輸距離と海輸距離に

よる輸送費の変化は図一八に示す。

なお、対象地域内に中間処理施設が複数箇所ある場合も、各施設における最適な焼却率と輸送費の関係は全体としての規模に変化がない限り、ここでの結果とほぼ同様になると考えられる。

(4) 処分費および中仕切費の影響

埋立処分場に関する費用として、処分費(維持管理費)および中仕切費を考えたが、両者とも埋立処分場の状況によってかなり変化するものである。そこで、これらの費用の変化に伴って、システム的设计がどのように変化するかについて試算してみた。

まず、処分費を2000~10000円/トンの範囲で変化させた。その結果、この範囲においては、中仕切数や他のステージ的设计に対する影響はなく、全費用に占める埋立処分場関係の費用の割合が3.4%~11.0%の範囲で変化するのみである。

中仕切費についても1~10百万円/mの範囲で計算した。中仕切費の変化も他のステージの最適設計に対しては影響を与えないが、最適な埋立場の分割は以下のように変化する。

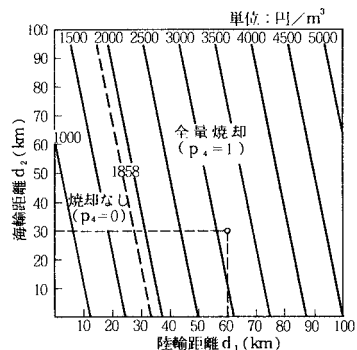
- 中仕切費が1.0~1.6百万円/mのとき、 $p_2=3$
- 中仕切費が1.6~2.8百万円/mのとき、 $p_2=2$
- 中仕切費が2.8~4.5百万円/mのとき、 $p_2=1$
- 中仕切費が4.5百万円/m以上のとき、 $p_2=0$

以上のことから、処分費より中仕切費の方がシステム設計に対する影響が大きいといえる。

(5) 生物処理プロセスの処理効率の影響

浸出液処理における生物処理プロセスは不確定要因が多く、その処理効率(または残留率)を一意的に決定するのは困難である。付録の検討においても、生物処理プロセスの残留率は、ここでの計算に用いた平均的な値を中心に、20%程度変化するレンジで与えられている。

計算結果によると、残留率が20%低くなっても(処理効率は高くなる)、システム全体の設計に影響することはないが、浸出液処理費用は約120百万円/年安くな



図一八 輸送距離による焼却の有無

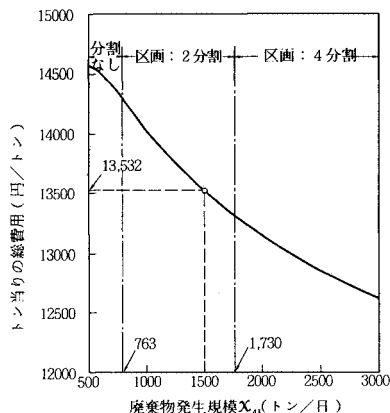


図9 廃棄物発生量と処理費用の関係

る。これは、平均的な残留率で計算したときの浸出液処理費用 393 百万円/年のほぼ 30% に相当し、かなり大きい。しかし、これを発生廃棄物量当たりには換算すると約 220 円/トンの減額となり、前記した処分のための総費用 13 532 円/トンに対する影響としては 2% 以下となり、小さいといえる。

一方、残留率が平均的な値より 20% 高くなる場合は、埋立場の仕切枚数を 1 枚（2 分割）から 2 枚（4 分割）に増やすのが経済的となる。これに伴う費用の増加は約 89 百万円で、発生廃棄物量当たりでは 163 円/トン増加することになる。

以上のことから、生物処理プロセスの処理効率が悪くなると、前段の埋立処分場の設計に影響を及ぼすが、全体の費用に対する影響はさほど大きいものではない。

（6）廃棄物発生規模の影響

ここでの計算例では廃棄物発生量を 1 500 トン/日という仮定のもとで最適システムを構成・設計し、それにかかる費用をトン当たり 13 532 円と算出した。しかし、この費用は廃棄物発生規模によって影響されるのは当然である。図-9 は発生量を 500 トン/日から 3 000 トン/日まで変化させたときの費用の変化を示している。廃棄物の発生量が増加するに従ってスケールメリットが生じ、トン当たりの処分費用は減少していくが、その量は小さく発生量が 6 倍に増加しているにもかかわらず、費用の減少は約 14% である。

最適なシステムの設計も発生規模によって変化する。図にも示されているように、発生量が 763 トン/日以下では区画埋立の必要はなく、それ以上になると、1 720 トン/日までは 2 分割区画埋立、さらにそれ以上になると 4 分割区画埋立が最適となる。焼却の有無については、廃棄物発生規模が極端に小さくなれば別であるが、500 トン/日以上では、常に全量焼却した方が有利という結果になっている。

7. おわりに

廃棄物の最終処分場における環境保全を考えるうえにおいて、埋立処分場だけでなく発生から浸出液の処理まで含めた処理システム全体をトータルとして検討することを試みた。この種の問題設定とその解析例はこれまでほとんどみられないので、その第 1 歩として、ここでは簡略化した問題を設定してシステム解析の考え方と手法の適用を示した。しかしこのために、対象とする廃棄物を一般廃棄物のみに限定するなど、問題設定が現実のものとは若干相違する部分があることを明記しておく必要がある。

ここでは埋立処分場からの環境汚染として水質汚濁だけを対象とした。廃棄物処理に伴う汚染としては当然ながらほかにも多くの項目があるが、最終処分場の環境汚染で最も問題になるのが水質汚濁であるということで、ここではとりあえず水質汚濁に注目した。さらに水質汚濁を起こす原因となる埋立処分場からの浸出液の水質評価項目としては COD が最も注視すべき対象で、かつ他項目（TOC, N, P など）の代表項目であると考えて、これを用いた。しかし現実にはこれ以外にも重金属や有機化学物質など環境影響が懸念されている種々の物質があり、今後これらも同時に加味した解析が必要となろう。

全体を通じての問題点は、データの精度が必ずしも十分高くないことに加えて、サブシステムごとにそのバランスが十分とれていないことである。したがって、問題の整理あるいは解析・評価の仕方は今後の参考に供し得るが、ここでの試算結果そのものを参考にする場合には十分な注意が必要であることを断っておきたい。感度解析はこのようなデータの不確実性を評価するための 1 つの有効な手法であり、ここでも若干の試算は行っているが、まだ十分とはいえず今後の課題であろう。

謝 辞：本研究は、昭和 57～59 年度土木学会衛生工学委員会広域処分小委員会のもとで行われた共同研究の一部である。特に、青島縮次郎（豊橋技術大学）、河上省吾（名古屋大学）、盛岡 通（大阪大学）、和田安彦（関西大学）各委員の討議と助言に負うところが多い。ここに記して深謝する。

付録 浸出液処理過程の定式化

（1）方式の設定

埋立浸出液の水質は、一般的に埋立初期には有機物濃度が高く、かつ埋立後の経過年数を経るにつれて生物分解しにくいものになる。このため、浸出液処理には生物処理だけでは困難であり、実例を参考に図-4 に示すプロセスを設定した。

生物処理方式は下・廃水処理の分野で数多く開発され実用に供用されているが、埋立処分地の浸出液を対象とした例は少ない。そこで次に示す理由から、一例として、活性汚泥法（長時間曝気法）を取り上げた。①埋立地浸出液の分野での適用件数が比較的多い。②下・廃水の分野での経験が豊富で、プロセス方程式と費用関数が得やすい。③長時間曝気法を含む数種の生物処理方式について、事業費と維持管理費を総合した処理原価をみると、一番高価な方式でも一番安価な方式に比べて20~25%高い程度である⁵⁾。このため、中間処理から浸出液処理までの全コストに対する浸出液処理コストの比率は、いずれの方式でも大差ないとみなせる。

(2) プロセス方程式

文献6)によると、都市下水、紙パルプ排水、石油化学工業排水等全部で約50種の排水に対する酸素活性汚泥法のCOD処理成績は、広い範囲の負荷に対して、負荷にかかわらず50~90%の除去率を得ているが、原水のCOD/BOD(=k)がCOD除去率を規定する重要なパラメーターになっている。そこで、文献7)にまとめられている埋立地浸出液の生物処理成績について、同様な整理を試みた。データ数が少ないため、種々の処理法を一括してまとめると図-10が得られ、流入COD濃度を S_{in} とすると、流出COD濃度 S_{out} は次式で示される。

$$S_{out} = \{0.125k + 0.35 (\pm 0.2)\} \cdot S_{in} \dots\dots\dots(34)$$

このときのCOD容積負荷は $0.003 \sim 0.1 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{日}$ であり、数値上は都市下水の長時間曝気法のBOD容積負荷の約1/3~1/50に相当し、標準活性汚泥法の約1/10~1/100に相当している。

物理化学処理法の物質除去能については、下水の3次処理について得られた除去率を用いた。凝集沈殿法、急速汙過法、活性炭吸着法のCOD除去率は、それぞれ40%、15%、60%となる⁸⁾。

(3) 費用関数

前提として、敷地は処分場にあつて費用はかからず、また、最初沈殿池の設置や、汚泥処理における焼却は考えないものとした。

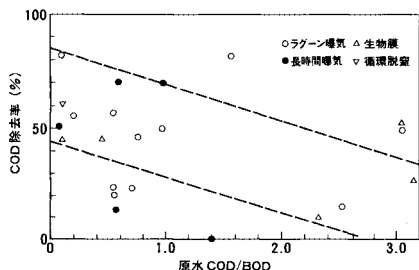


図-10 埋立浸出液の原水水質とCOD除去率

a) 生物処理プロセス

標準活性汚泥法、ステップエアレーション法を主としている下水処理場の例⁹⁾では、日最大水量 Q (千 $\text{m}^3/\text{日}$)に対して建設費用 C (百万円)が以下のように見積もられている。

$$\text{水処理} : C = 66.2 Q^{0.872} \dots\dots\dots(35)$$

$$\text{汚泥処理} : C = 35.3 Q^{0.892} \dots\dots\dots(36)$$

$$\text{電気} : C = 177.8 Q^{0.479} \dots\dots\dots(37)$$

$$\text{その他} : C = 41.5 Q^{0.722} \dots\dots\dots(38)$$

しかし、これらの費用のうち水処理については、①最初沈殿池を設けないこと、②エアレーションタンクの容積負荷を適用範囲内に入るようにするためタンク容量が増加すること、を考慮する必要がある。なお、水処理費用に含まれている塩素消毒関係の費用は最後段にくるべきものであり、分離しておくべきものであるが、生物処理と同じく常に必要な単位操作であるため、セットにして考える。

前期①、②に対処するためには、水処理関連の費用の内訳を知る必要があり、ここでは文献10)に示され、表-4に引用した昭和49年度価格の水処理施設直接工事費を用いて検討した。まず、物価補正のため、いくつかの日最大水量について、表-4に基づく積算水処理コストと式(35)の水処理コストとの比を求めると、その平均値は1.458であった。これはポンプ設備の有無等種々の状況も含まれるが、主として物価の上昇が反映したものと考え、この値と表-4の費用関数で得られるコストとの積をもとに、昭和54年度時点の新たな費用関数を得た。すなわち、エアレーションタンクの建設費用は、

$$C = 17.38 (\alpha Q)^{0.921} \dots\dots\dots(39)$$

となった。流量が α 倍になっているのは、容積負荷を $1/\alpha$ に低下させるのに必要なタンク容量の増加を確保するための補正である。なお、これに関与するものとして水処理管廊があるが、情報不足のため補正をしない。また、(最終沈殿池+塩素消毒タンク+水処理管廊)の建設費用関数については、

$$C = 36.48 Q^{0.814} \dots\dots\dots(40)$$

となった。
以上の水処理施設に加えて必要な施設として、汚水を誘導するポンプ設備がある。これについては、下水道の

表-4 水処理施設直接工事費¹⁰⁾

	土木	機械	基礎
最初沈殿池	$C = 2.81Q^{0.968}$	$C = 6.30 Q^{0.855}$	$C = 0.854Q^{0.752}$
エアレーションタンク	$C = 6.11Q^{0.961}$	$C = 5.29 Q^{0.759}$	$C = 1.43 Q^{0.992}$
最終沈殿池	$C = 4.39Q^{0.912}$	$C = 11.6 Q^{0.785}$	$C = 1.26 Q^{0.929}$
塩素消毒タンク	$C = 1.75Q^{0.718}$	$C = 0.864Q^{0.964}$	$C = 0.564Q^{0.753}$
水処理管廊	$C = 6.18Q^{0.438}$	$C = 1.14 Q^{0.737}$	$C = 3.27 Q^{0.298}$

中継ポンプ場の設備工事費を想定し、文献9)から、

$$C=58.8 Q^{0.6} \dots\dots\dots(41)$$

を得た。

維持管理費については下水処理場の例⁹⁾から次式が得られる。

$$\text{水処理} : R=10.0 Q^{0.664} \dots\dots\dots(42)$$

$$\text{汚泥処理} : R= 3.4 Q^{0.857} \dots\dots\dots(43)$$

$$\text{その他} : R= 1.8 Q^{0.745} \dots\dots\dots(44)$$

ここで、 R は百万円/年の単位である。

これらを適用するにあたっては、①水処理費では、最初沈殿池のための費用が不要となり、エアレーションタンクの容積増大に伴う費用増加があること、②汚泥処理費では、焼却のための費用を除くこと、を考慮する必要がある。これらについても適切な情報はないが、維持管理費は必要とするエネルギー量に対応するものと仮定して検討した。

アメリカ合衆国での例¹¹⁾ではあるが5 k/s (43.2万m³/日)の下水を処理する場合、水処理工程で必要とされるエネルギーのうち、最初沈殿池にかかわるものが1%にしかすぎず無視でき、活性汚泥処理にかかわるものが約80%である。このことと、容積負荷の減少化によるタンク容量増大効果を考えて、式(42)を次のように補正した。

$$R=8.0(\alpha Q)^{0.664}+2.0 Q^{0.664} \dots\dots\dots(45)$$

同じく、汚泥処理については燃料を含めた全体エネルギー量のうち、焼却にかかわるものを除いた部分が約64%であることから、式(43)を次式のように補正した。

$$R=2.2 Q^{0.857} \dots\dots\dots(46)$$

なお、流入ポンプについては、建設コストと同じく中継ポンプ場の例⁹⁾を利用して、次式を採用した。

$$R=1.3 Q^{0.690} \dots\dots\dots(47)$$

b) その他のプロセス

凝集沈殿法(硫酸ばんど)、急速滷過法、活性炭吸着

法の費用関数については、表-2にあるような関数を文献9)より得た。ただし、文献9)にはリンを除去するための(凝集沈殿法+急速滷過法)の費用関数は示されているが、凝集沈殿法だけのものは示されていない。このため凝集沈殿法の費用関数は、(凝集沈殿法+急速滷過法)の費用関数と急速滷過法の費用関数を用いて、各水量での凝集沈殿法相当分を求め、関数化して得た。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：昭和56年度広域最終処分場計画調査・環境保全計画調査報告書～輸送に係わる環境保全計画～(厚生省委託調査)，p. 91, 1982.
- 2) R. ベルマン・R. カラバ(野村弘光訳)：ダイナミック・プログラミングと現代制御理論，東京図書，p. 126, 1972.
- 3) 土木学会：昭和59年度広域最終処分場計画調査・環境保全計画調査報告書(厚生省委託調査)，p. 327, 1985.
- 4) Wada, Y. and Tanaka, M. : The study on prediction of the volume and quality of leachate, The 1st workshop on solid waste management between Japan and The Federal Republic of Germany, Tokyo, Nov. 25-26, 1985.
- 5) 中本 至ほか：視点/下水処理方式の選択(とくに規模の小型化に対する検討)，月刊下水道，Vol. 3, No. 8, 1980.
- 6) 広岡永治ほか：酸素活性汚泥法のCOD(Mn)除去率について，第16回下水道研究発表会講演集，1979.
- 7) 田中信寿ほか：ごみ埋立地浸出水の処理性に関する考察，第4回全国都市清掃研究発表会講演論文集，1983.
- 8) 田中和博ほか：琵琶湖の水質汚濁防止のための高度処理技術の開発調査(Ⅲ)，試験部報，日本下水道事業団，1980.
- 9) 建設省編：流域別下水道整備総合計画調査指針と解説，日本下水道協会，1980.
- 10) 亀田泰武ほか：下水処理場の概算コスト調査，下水道協会誌，1979.
- 11) E. B. ロバートほか(古里明瑞ほか訳)：汚水処理と再利用におけるエネルギーの経済性評価，月刊下水道，Vol. 2, No. 1, 1979.

(1986. 1. 21・受付)