

# 応用一般均衡モデルと技術選択モデルの統合による 下水汚泥処理技術の廃棄物最終処分削減への影響

増井利彦<sup>1</sup> 土田研一<sup>2</sup> 松岡譲<sup>3</sup> 森田恒幸<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 国立環境研究所社会環境システム研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

<sup>2</sup>東京工業大学大学院社会理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 京都大学大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>4</sup>工博 国立環境研究所社会環境システム研究領域 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

本研究では、ボトムアップモデルである廃棄物処理技術選択モデルとして下水汚泥処理モデルを開発し、これをこれまでに開発してきたトップダウンモデルである環境と経済を統合した応用一般均衡モデルと統合した。トップダウンモデルでは、様々な技術進歩を前提に主体間の整合的な解を導くことが可能であるが、個別技術の導入といったリアリティの再現は非常に困難である。本研究でとりあげるトップダウンモデルとボトムアップモデルの統合は、両モデルの長所を取り入れることが可能となり、個別技術の進歩がもたらす環境負荷及びマクロ経済への影響をよりリアルに定量的に評価することができるようになった。本モデルを用いた結果、二酸化炭素排出量や廃棄物最終処分量の削減による GDP ロスは、2010年に 1.8 兆円 (1995 年価格) になるが、下水汚泥処理において現在導入されていない技術の選択を可能とすることで新技術の導入が進み、2010年の GDP は約 100 億円回復し、生産プロセスにおいて再生品の需要を増加させるという政策と組み合わせることで、およそ 2000 億円の GDP を回復させることがわかった。今回は下水汚泥処理を対象とした分析であるが、こうした手法を他の分野に拡張することで、個別技術の導入可能性を考慮に入れた環境政策の効果を分析することが可能となる。

**Key Words:** *Computable General Equilibrium Model, End-use model, Sewage Sludge Treatment, Assessment of Environmental Policy*

## 1. 統合モデルの重要性

モデル分析から得られる環境と経済に関する様々な情報をもとに環境政策を議論することの重要性が、中央環境審議会等でも取り上げられるようになり<sup>1</sup>、環境問題に対するモデル分析の重要性が高まってきた。しかしながら、政策の議論に耐えうるようなモデルの開発は、地球温暖化対策など個別の分野ではいくつか見られるものの総合的な環境問題を取り扱ったモデルは皆無な状態である。モデル分析を政策議論の場において利用するためには、個々の政策をリアルに表現することが可能であり、それぞれの政策を導入した場合にみられる影響や波及効果を整合的に表現する必要がある。モデルはその構造からトップダウンモデルとボトムアップモデルに分類することができる。トップダウンモデルは、技術進歩や社会

の変化を所与として、モデルで取り上げている主体間の整合的な解を導く。これに対してボトムアップモデルでは、主体間の相互関係を所与として、技術や社会の変化を再現することができる。モデルの結果が環境政策の叩き台として用いられるためには、マクロ的な整合性とともにも個別技術のリアリティを兼ね備える必要があることから、トップダウンモデル、ボトムアップモデルの統合が必要となる。すなわち、トップダウンモデルから得られる様々な主体の活動の整合性を満たした結果をボトムアップモデルの前提となる需要や供給に関する入力条件とし、ボトムアップモデルから得られる個別技術に基づいたリアリティのある結果をトップダウンモデルの前提となる技術進歩に組み入れる必要がある。

国立環境研究所と京都大学では、アジア太平洋統合評価モデル(AIM)の一環として、環境と経済を統合した応

用一般均衡モデル（以下、AIM/Material と略）を開発してきた<sup>2</sup>。この AIM/Material はトップダウンモデルであり、将来の技術進歩や生産プロセスの変化はパラメータの変化により表されるが、そうした数値の変化は個別の技術選択などとリンクされておらず、実際に政策決定の場で用いられるにはリアリティの再現という面で課題が残る。そうした問題点を克服するために、AIM/Material をボトムアップモデルである技術選択モデルと統合する分析を行っている。本研究では、下水汚泥処理を対象にした技術選択モデルを例にトップダウンモデルとボトムアップモデルの統合を行い、下水汚泥処理技術の進歩が下水汚泥の最終処分量の削減や再生品の供給を通じてマクロ経済に及ぼす影響について評価する。

## 2. モデル構造

本研究で用いるトップダウンモデルは、逐次均衡型の応用一般均衡モデルである。AIM/Material の構造については参考文献 2 を参照のこと。この AIM/Material に表-1 に示す改良を加え、さらに今回開発したボトムアップモデルである下水汚泥処理を対象とした技術選択モデルを統合した。下水汚泥処理については、様々な分野において個別技術を対象とした研究がなされている<sup>3</sup>。今回はそうした研究を参考に技術選択モデルを構築した。これにより、下水汚泥処理という限られた対象ではあるが、下水汚泥リサイクル及び下水汚泥の最終処分に関する将来シナリオを実現するための技術導入とそうした技術進歩がマクロ経済に及ぼす影響について定量的な評価を行うことができる。今回の分析において下水汚泥を対象とした理由は以下の 3 点である。(1) 下水汚泥は、最終処分量全体に対する比率は 2% と比較的小さいが、排出量は全産業廃棄物の 17% を占め、将来の下水処理人口の増加により今後も下水汚泥発生量の増加が見込まれており<sup>4</sup>、廃棄物最終処分量の削減を考える上で重要な廃棄物である。(2) 下水汚泥を発生する下水道部門が、AIM/Material モデルにおいて既に独立した部門として存

表-1 応用一般均衡モデルの主な改良点

項目	旧モデル	今回のモデル
基準年	1990年	1995年
技術進歩	新規資本に関係なく外生（年率 % という想定）	新規導入資本のシェアにより決定（但し、新規資本の技術進歩は外生）
租税	資本所得や労働所得等を含めて評価	資本税、労働税、関税等を明示
資本ストック	各部門共通 (Putty-Putty)	各部門固有 (Putty-Clay)
物質収支	必ずしも一致していない	物質収支の整合性も確保

在しており、下水汚泥処理の個別モデルの構築とトップダウンモデルとの統合が容易である。(3) 過去の処理形態などの各種データが比較的整備されている。

### (1) 技術選択モデルの概要

下水汚泥処理に関する技術選択モデルでは、発生する下水汚泥量の制約や、建設資材、肥料等の再生利用に関するシナリオのもと、費用最小化の基準で最適な技術が選択される。定式化は以下の通りである。

$$\text{Min}TC = C\_I + C\_R + C\_D - R\_R \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \sum_i \{ \sum_{lt} X(lt, i) + XN(i) \} \geq W \quad (2)$$

$$C\_I = \sum_i \{ \sum_{lt} [ X(lt, i) * ri(i) + (XO(lt, i) - X(lt, i)) * ri(i) * r\_t(lt) ] + XN(i) * r\_i \} \quad (3)$$

$$C\_R = \sum_i \{ (\sum_{lt} X(lt, i) + XN(i)) * rr(i) \} \quad (4)$$

$$C\_D = \sum_i \{ DRX(i) + DRXN(i) \} * rd \quad (5)$$

$$R\_R = \sum_j \{ \sum_i [ RX(i, j) + RXN(i, j) ] * p(j) \} \quad (6)$$

$$\sum_{lt} \{ X(lt, i) * u(i, j) \} = DRX(i, j) + RX(i, j) \quad (7)$$

$$XN(i) * u(i, j) = DRXN(i, j) + RXN(i, j) \quad (8)$$

$$\sum_i \{ RX(i, j) + RXN(i, j) \} = R(j) \quad (9)$$

$i$  : 汚泥処理技術（現存技術、未導入技術を含む）、

$lt$  : 供用年数,  $j$  : 再生品

外生変数

$W$  : 処理すべき下水汚泥量,

$R(j)$  : 再生品  $j$  の需要量,

$XO(lt, i)$  : 供用年数  $lt$  処理技術  $i$  の設備における処理能力,

$ri(i)$  : 処理技術  $i$  の固定費用原単位,

$r\_t(lt)$  : 償却期間の残余年,

$rr(i)$  : 処理技術  $i$  の運転費用原単位,

$rd$  : 最終処分費用原単位,

$u(i, j)$  : 処理技術  $i$  の再生品  $j$  の産出原単位,

$p(j)$  : 再生品  $j$  の価格,

内生変数

$TC$  : 下水汚泥処理に要する総費用,

$C\_I$  : 下水汚泥処理に要する固定費用,

$C\_R$  : 下水汚泥処理に要する運転費用,

$C\_D$  : 下水汚泥処理に要する最終処分費用,

$R\_R$  : 下水汚泥処理から産出される再生品の売上,

$X(lt, i)$  : 処理技術  $i$  の  $lt$  年供用した設備による下水汚泥処理量,

$XN(i)$  : 処理技術  $i$  の新規設備による下水汚泥処理量,  
 $DRX(i, j)$  : 既存設備の処理技術  $i$  から発生するリサイクル可能な再生品  $j$  のうち最終処分される量,

$RX(i, j)$  : 既存設備の処理技術  $i$  から発生するリサイクル可能な再生品  $j$  のうちリサイクルされる量,

$DRXN(i, j)$  : 新規設備の処理技術  $i$  から発生するリサイ

クル可能な再生品  $j$  のうち最終処分される量,  
 $RXN(i,j)$  : 新規設備の処理技術  $i$  から発生するリサイクル可能な再生品  $j$  のうちリサイクルされる量,

(1)式は技術選択モデルの行動基準を示したものであり、以下に挙げる制約条件を満たしながら、各年における総処理費用が最小となるように処理技術が選択される。費用の内訳は、固定費用と運転費用、最終処分費用であり、再生品の販売額が費用から差し引かれる。

(2)式は処理すべき下水汚泥量の下限値を表しており、既存設備及び新規設備により処理される。

(3)式は各設備の固定費用を示している。 $X(lt,i)*ri(i)$ 、 $XN(i)*ri(i)$ はそれぞれ既存設備、新規設備で処理される廃棄物量に応じた固定費用である。これに対して、 $(XO(lt,i)-X(lt,i))*ri(i)*r_{-l}(lt)$ は既存設備のうち、使用されなくなった設備にかかる固定費用を示している。つまり、減価償却前に設備を破棄する場合は、破棄時に未償却の設備費用の負担が必要となる。通常、固定費用は処理容量により決定されるものであるが、ここでは下水汚泥処理総合計画策定マニュアル<sup>5</sup>に従って処理水規模に換算した値を用いる。なお、減価償却資産からみた下水処理関係機器の耐用年数は7年である<sup>6</sup>ことから、固定費用は設置後7年かけて支払われるものとする。また、設備更新までの期間は30年と仮定した。統計<sup>6</sup>では30年を超えて稼働している施設も数多く見られ、施設内で設備の更新が行われている可能性があるが、ここではそうした設備更新は考慮に入れず、30年を超えて稼働している設備については第1期(1995年)後にすべて廃棄されるものとみなす。これにより、1996年以降における下水汚泥処理フローは実績とは異なったものとなっている。

(4)式は各設備の使用に際して必要な運転費用を示したものであり、人件費や燃料費がこれにあたる。

(5)式は最終処分に必要な費用を示したものである。ここでは最終処分にかかる費用として20,000円/トンと仮定した。制約により廃棄物最終処分の削減に対して限界費用が発生する場合には、その費用を上乗せする。

(6)式は再生品の販売による売上を示す。現状において、再生品の取引は有償で引き取ってもらう場合も多く見られる<sup>8</sup>が、ここでは経済的な財とみなして利用可能な部門に販売されるとみなす。なお、有償で引き取ってもらう場合を想定するには、再生品  $j$  の価格  $p(j)$  はマイナスの値に設定する。

(7)式、(8)式はそれぞれ既存設備、新規設備において処理される下水汚泥から発生する最終処分品の量を示している。これらはすべてリサイクル可能であるが、再生品の需要量を上回る最終処分品は処分される。

(9)式はリサイクル製品の需要を表す。下水汚泥処理部門では、この需要を満たすように処理技術が選択される。

なお、翌年には  $XO(lt,i)$  は  $X(lt,i)$ 、 $XN(i)$  により置き換えられる。また、本来なら資本や中間財の投入は一般均衡モデルの結果と一致すべきであるが、この技術選択モデルでは下水処理部門のうちの汚泥処理だけを取り扱っているために、そこまでの一貫性は表現していない。

#### (2) 技術選択モデル構築のためのデータ構築<sup>4</sup>

汚泥処理は、ある処理場で処理された汚泥が再び別の処理場で処理されたり、処理工程が各処理場で異なるなど複雑である。本研究では、こうした複雑なフローを『濃縮 消化 前処理 脱水 最終処理』に単純化して取り扱うことにする。つまり、複数の施設で処理が行われている汚泥についても、投入から最終処分まで一貫して行われているとみなす。分析に用いたデータは『下水道統計』<sup>7</sup>である。この統計の最終処分される汚泥は、埋め立て等の最終処分、在庫、他の処理場、他の部局や民間等に委託される。このうち、他の処理場に委託される汚泥については、委託先の汚泥の最終処分を参考に先に示したフローにあてはめる。これにより、始めの処理施設と委託先の処理施設の間では運用開始年が必ずしも一致しないが、ここでは始めの処理施設の運用開始年を代表させている。他の部局や公社に委託されるものについては、委託されたときの汚泥の性状で最終処分されているとみなす。

また、施設によっては、上記のフローのうち特定の処理のみ変更する場合(例えば濃縮を重力濃縮から遠心濃縮に切り替えるなど)が考えられるが、ここではシステム全体を変更するものとしている。図-1は、本モデル分析用に下水汚泥処理のフローと各フロー別の処理量を1995年を基準に供用年数別に取りまとめたものである。図中の供用年数30年の設備が今期廃棄され、発生する下水汚泥量を処理するために新しい設備が導入されるようになる。

濃縮過程では現在、重力式が主流であるが、遠心濃縮などの機械式も一部で見られることから、機械式の濃縮処理も対象とした。機械式濃縮処理として、遠心式のほかに浮上式などいくつか見られるが、ここでは遠心式で代表させることとする。

消化については、最終処理として焼却処理される場合、汚泥発熱量が減少する消化プロセスは省略されるケースが見られることから、消化を行う処理と行わない処理を想定する。一方で、消化により発生するガスを発電に利用する設備も見られることから、従来型の設備とともに高効率消化設備を想定する。また、消化により発生したガス(メタン)は燃料として利用されるものとする。

前処理過程は、汚泥の性状を脱水に適したものにするための工程であり、洗浄、薬品注入、熱処理が行われている。これらのうち、現在では薬品注入が一般的に行わ

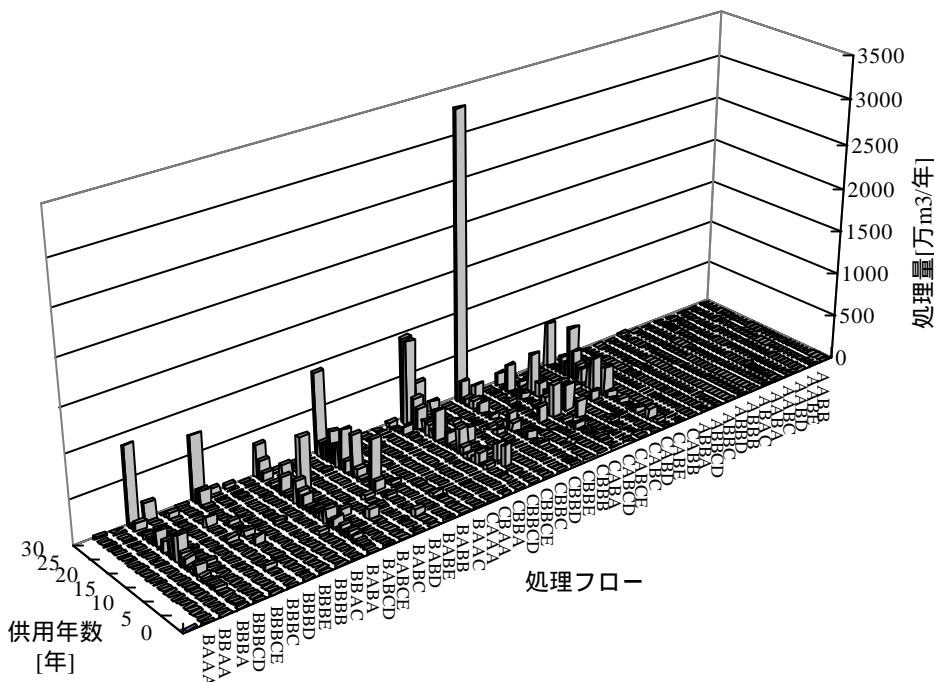


図-1 供用年数別の各処理フローにおける汚泥処理量  
 注：処理フローの記号は表-2参照。例えば、CBBBCDは「機械濃縮-従来型消化-ベルトプレス脱水-乾燥-焼却」で処理されることを表す。

表-2 汚泥処理工程と各工程における技術

処理工程	各工程における代替技術				
濃縮	A.なし	B.重力濃縮	C.機械濃縮		
消化	A.なし	B.従来型消化	C.高効率消化		
脱水	A.なし	B.ベルトプレス			
最終処理	A.直接最終処分	B.コンポスト	C.乾燥	D.焼却	E.溶融

注：各技術の前のA~Eは各図の処理フローの記号に一致する。

れていることから、前処理過程はすべて薬品注入とする。また、前処理過程は脱水処理と一体のもののみならず、設備費用は脱水処理と併せて評価する。

脱水処理は汚泥中の水分を除去し減容する工程である。現在では、ベルトプレスが設置台数の半数を占めていることから、ここでは脱水はすべてベルトプレスによるものとみなす。

最終処理として、直接最終処分、コンポスト、乾燥、焼却、溶融を対象とする。このうち、焼却と溶融については直接処理する場合と乾燥後に処理する場合の2通りを対象とする。直接最終処分を除く各工程からはそれぞれの工程に関連するリサイクル製品の供給が可能となる。なお焼却設備は流動焼却炉とする。また、需要量を超える再生品は、消費されずに最終処分されるものとする。表-2 に本モデルでの汚泥処理工程と各工程での技術を示す。

以上の下水汚泥処理工程のうち、トップダウンモデルとの統合で重要になるのは、現在普及していない技術の想定を行っている濃縮、消化、最終処理の各工程である。濃縮処理の選択によって濃縮汚泥の含水率が変化し、後

段の処理に影響を及ぼすことから、ボトムアップモデルでの技術選択の対象とする。消化も同様に、消化率により脱水に影響を及ぼすとともに、消化過程で得られる消化ガスの発生が地球温暖化問題などに影響を及ぼすことから、ボトムアップモデルで取り上げる。最終処分は、処理方法により再生品の供給量が大きく変化することから、前述の2工程と同様にボトムアップモデルで取り上げる。脱水工程も脱水ケーキの性状が最終処理工程に影響を及ぼす可能性はあるが、ここではボトムアップモデルの構造を簡略化するために脱水処理については技術選択を行わないとする。ただし、消化工程での技術により脱水工程にかかる費用は変化するように設定を行う。表-3 に各処理工程における費用の想定を示す。

(3) 応用一般均衡モデルと技術選択モデルの統合  
 トップダウンモデルとボトムアップモデルを統合した計算のフローは、以下のように表される。

AIM/Material モデルを実行し、下水処理部門が供給する下水処理サービス量（汚泥処理量）や下水部門から発生する廃棄物最終処分量や最終処分にかかる限界費用、再生品の価格を計算する。

の結果をもとに翌年の汚泥処理量、廃棄物最終処分量、再生品需要量、再生品等の価格を推定（量については1995年は実績値、それ以降は前年の結果からの変化率をもとに想定、価格については今年の価格が翌年も続くと仮定）し、それらと翌年の再生品の需要量を前提条件として技術選択モデルを実行し、下水汚泥処理技術のシェアを計算する。

下水汚泥処理技術のシェアをもとに、下水汚泥処理の効率（汚泥投入量に対する最終処分量の変化）を計算する。

で得られた技術選択モデルからの結果とその他のシナリオ（再生品需要量の変化）をもとに、翌年の均衡計算を行う。

表-3 各処理技術の費用の想定

	固定費用[100万円/年]	修繕費用	運営費用
重力濃縮	土木施設: $26.23Q^{0.485} - 9.86Q^{0.469}$ 機械設備: $9.86Q^{0.469}$	機械建設費 (年額)の 2.4%	なし
機械濃縮	土木施設: $23.86Q^{0.303}$ 機械設備: $5.85Q^{0.821}$		電力費: 179 kWh/tDS
汚泥消化	土木施設: $30.03Q^{0.590}$ 機械設備: $30.79Q^{0.536}$		人件費: 500万円/人/年 電力費: $6.5Q$ 万円/年
ベルト プレス脱水	土木施設: $23.31Q^{0.740}$ 機械設備: $83.78Q^{0.279}$		人件費: $0.7*Q^{0.723}$ 100万円/人/年 電力費: 70kWh/tDS 薬品費: 凝集剤添加率1.2%
電気設備 (濃縮・脱水)	受変電設備: $19.72Q^{0.172}$ 運転計装: $93.55Q^{0.227}$		なし
焼却	土木施設: $240.78X^{0.050}$ 機械設備: $48.89X^{0.785}$ 電気建設: $21.43X^{0.739}$		電力・燃料・薬品費: $6.42X^{0.626}$ 100万円/年 人件費: $0.77X^{0.850}$ 100万円/年
溶融	土木施設: $119.30X^{0.441}$ 機械設備: $169.43X^{0.633}$ 電気建設: $140.04X^{0.373}$		電力・燃料・薬品費: $9.73X^{0.749}$ 100万円/年 人件費: $4.25X^{0.636}$ 100万円/年
コンポスト	設備費: $211X^{0.626}$		運転経費: $3.55X^{0.901}$ 100万円/年 人件費: $0.92X+5.4$ 100万円/年
乾燥	焼却の30%		
前提条件 Q: 処理水量(100百万 <sup>3</sup> /日), X: 設備規模(脱水汚泥wet-t/日), 利子率: 6%/年, 流入SS濃度: 140 mg/l, 除去率: 90%, 発生汚泥濃度: 1%, 重力濃縮後濃度: 2%, 機械濃縮後濃度: 4%, 汚泥中有機物比: 80%, 効率消化日数: 15日, 通常消化日数20日, 通常消化率: 50%, 効率消化率60%, 脱水ケーキ含水率: 80%, 機械乾燥汚泥含水率: 10%, コンポスト含水率: 40%, 焼却灰・溶融スラグ含水率: 0%, 焼却灰残渣率: 8%, 溶融スラグ残渣率: 7%, 人件費単価: 500万円/人/年, 凝集剤単価: 150万円/ton, 電力料金: 20円/kWh, 土木耐用年数: 30年, 機械耐用年数: 7年, 電気設備耐用年数: 15年, 下水道業用設備耐用年数: 12年			

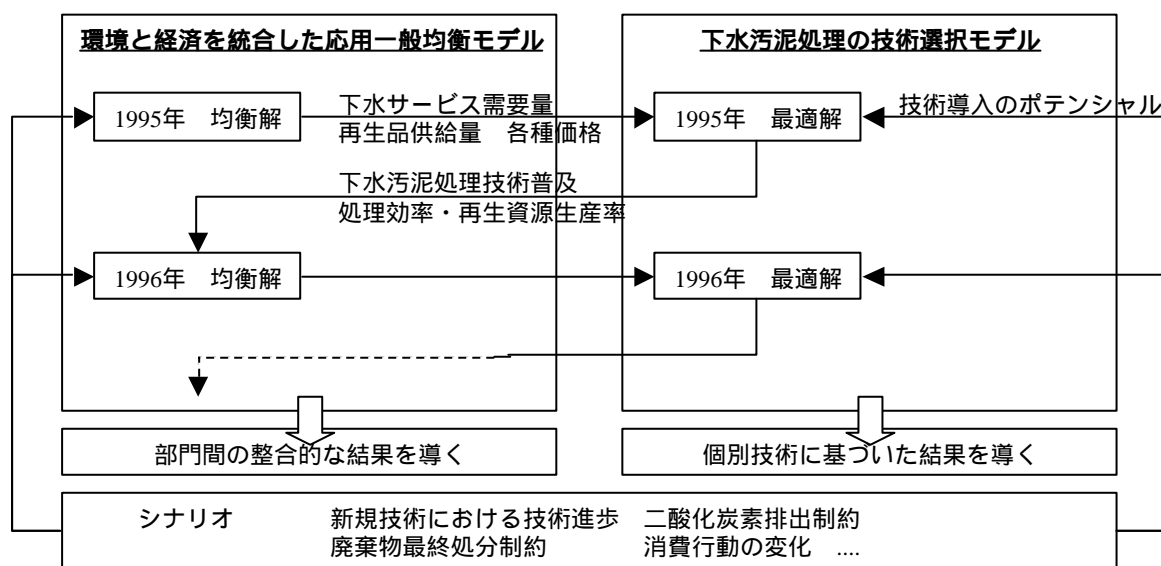


図-2 応用一般均衡モデルと技術選択モデルの関係

図-2 は以上の関係を取りまとめたものである。

(2) 二酸化炭素・廃棄物最終処分制約シナリオ

- (2)- 技術固定・再生品需要固定シナリオ
- (2)- 新技術導入・再生品需要固定シナリオ
- (2)- 技術固定・再生品需要増加シナリオ
- (2)- 新技術導入・再生品需要増加シナリオ

### 3. 計算結果

前章までに説明したモデルを用いて計算を行うにあたって、廃棄物最終処分地、新技術の導入、再生品の需要という視点から以下の5つのシナリオを想定した。

(1) 標準シナリオ

シナリオ(2)では、二酸化炭素排出制約として京都議定書の目標値(2010年の排出量を1990年比6%削減)を想定し、廃棄物最終処分制約として政府目標値(2010年の最終処分量を1996年比半減)とする。また、新技術導入

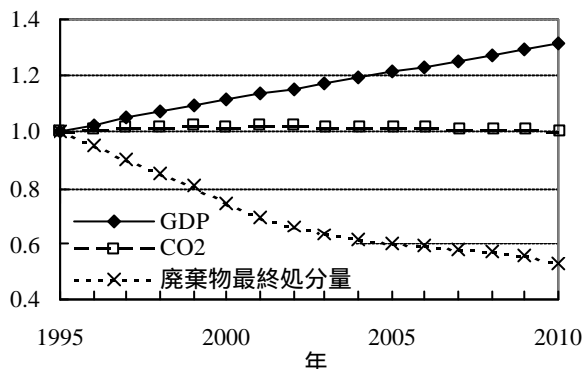


図-3 シナリオ(1) - 標準シナリオ - の結果  
(1995年=1.0)

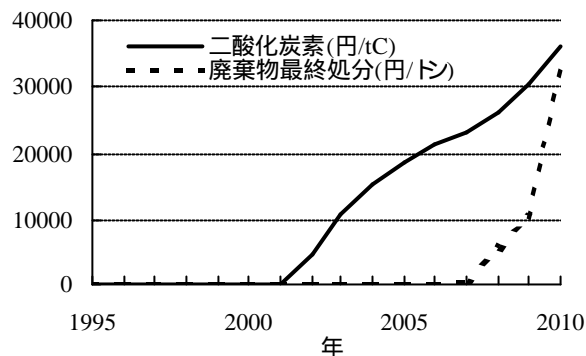


図-4 環境制約に対する限界費用の推移  
(シナリオ(2)- )

シナリオとは、2001年以降のシミュレーションにおいて1995年時点で使用されていない汚泥処理技術の工程の導入が可能なシナリオである。再生品需要増加シナリオでは、2006年以降漸増するように想定している。なお、標準シナリオにおける汚泥処理技術は現状のものだけ（技術固定）とし、将来に対する見積もり（経済成長、二酸化炭素排出量）が再現できるように、技術進歩率のキャリブレーションを実施した。

標準シナリオの結果を図-3に示す。1995年から2010年の間にGDPは486兆円(1995年価格、以下同じ)から638兆円と平均1.8%/年の成長率となった。これに対して、二酸化炭素排出量は352百万tCから354百万tCに、廃棄物最終処分量は91百万トンから48百万トンへとそれぞれ変化した。これらの環境負荷が変動しない、もしくは小さくなっているのは、あらかじめ技術進歩（価格等の影響を受けない自律的なエネルギー効率の改善、廃棄物発生量・廃棄物処理効率の改善）を盛り込んでいるためである。

これに対して、二酸化炭素排出制約および廃棄物最終処分制約を導入したシナリオ(2)のうち、シナリオ(2)-のGDPロスが最も大きく、2010年でシナリオ(1)と比較して-0.27%(1.75兆円)であった。シナリオ(2)-では、現在導入されていない技術の選択が可能となり、GDPロスは100億円軽減する。再生品の需要拡大を図るシナリオ(2)-では、シナリオ(1)と比較して0.25%(1.56兆円)のGDPロスとなり、シナリオ(2)-から約1900億円のGDPロスの回復が見られる。以上の結果から、現状の廃棄物最終処分制約下における下水汚泥処理に対して、処理技術の対策だけによる効果は、再生品の需要拡大に対して相対的に小さく、また、今回想定した再生品の需要拡大は現在普及している処理技術でも十分対応しうることがわかる。ただし、最もGDPロスの小さいシナリオはシナリオ(2)-で、シナリオ(2)-からさらに約100億円のGDPが回復するようになる。つまり、下水汚泥処理技術の導入とリサイクルの取り組みにより、約2000億円の

GDPロスを改善させることになる。

想定した環境制約に対する限界費用（二酸化炭素や廃棄物を最終処分するために必要な追加的費用）は図-4に示すように推移する。廃棄物最終処分にかかる限界費用は2004年に発生し、2008年ごろから急激に上昇し、シナリオ(2)-では2010年に3.3万円/トンとなる。この限界費用は新技術の導入によりシナリオ(2)-を基準に0.5~0.6%小さくなる。一方、二酸化炭素削減のための限界費用は2002年ごろに発生し、廃棄物最終処分の限界費用と比較すると比較的緩やかに上昇し、シナリオ(2)-では2010年に3.6万円/tCとなる。新技術の導入による二酸化炭素削減の限界費用の変化はほとんどみられないが、再生品需要拡大により二酸化炭素削減のための限界費用は1.5%小さくなる。

図-5は各シナリオにおける下水汚泥の最終処分量の推移を示したものである。生産プロセスにおいて再生品の需要を増大させるシナリオ(2)-およびにおいて再生品の需要を増加させる2006年以降において最終処分量が減少する傾向を示す。このことから、再生品の需要を増加させる政策は、廃棄物の最終処分量を減少させることが可能となる。また、最終処分量削減のための限界費用が3万円/トンを超える2010年には新規技術の導入

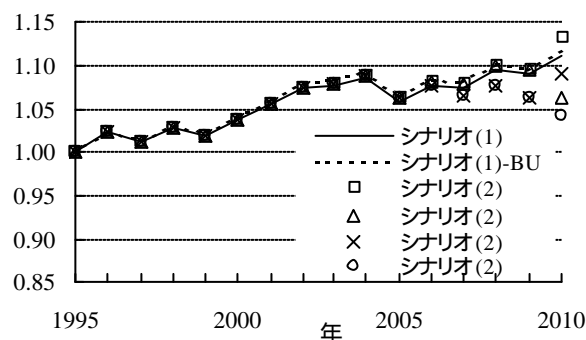


図-5 下水汚泥最終処分量の変化(1995年=1.0)  
注：BUは技術選択モデルの結果、それ以外はAIM/Materialの結果を表す。



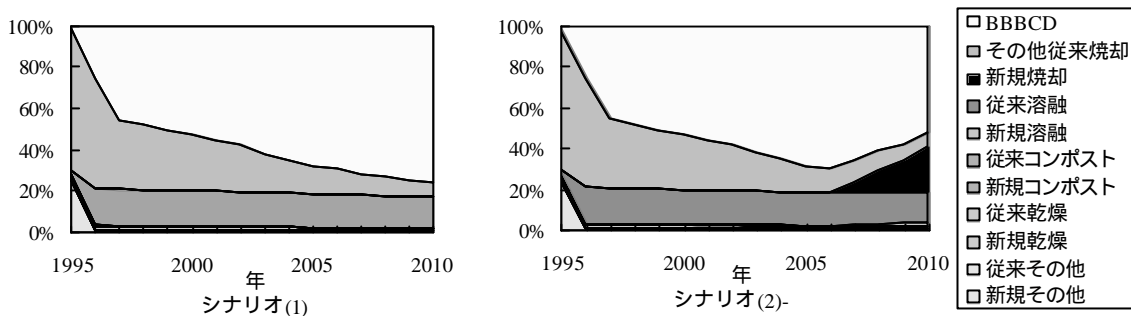


図-6 各シナリオにおける下水汚泥最終処理技術のシェアの変化  
 注：「従来」は、下水汚泥の各処理工程が1995年で導入されている技術のみで構成されている場合を、「新規」とは、各工程のいずれかにおいて1995年で未導入の技術が含まれている場合を示す。

が可能なシナリオにおいて最終処分量が大きく減少している。このことから、新規技術の導入は、最終処分制約が厳しい場合に有効であることを示している。

図-6は下水汚泥処理のための技術シェアの変化を、最終処理技術の区分と1995年時点で未導入の技術が処理工程に含まれているか否かで統合して示したものである。図-6において1995年から1996年において非常に大きな変動が見られるが、これは、1995年において廃棄される設備が非常に多い点、汚泥最終処分のうち民間委託等は処理されずに委託された汚泥の性状で処分されるとみなした点による。図-6から汚泥を脱水ケーキ等最終処理せずに処分する方法はほとんどとられず、焼却や溶融など汚泥の最終処分量をできる限り小さくするような技術が選択されていることがわかる。特に、シナリオ(1)をはじめとする技術固定シナリオでは、将来の汚泥発生量の増加に対しては、重力濃縮・通常消化・脱水・乾燥・焼却(BBBCD)という工程が主として導入される。これは、このフローが最終処分までをとらえた全体の費用が最も安価なためである。これに対して、図-6に示すように現段階では導入されていない新規技術の導入が可能となるシナリオ(2)では、新規技術を含んだ焼却が2007年以降選択されるようになる。これは効率的な消化プロセスが通常消化にとって代わるためであり、将来の廃棄物最終処分制約による最終処分費用の上昇と、効率的な消化による汚泥の減少のためである。こうした現在導入されていない技術を取り扱う技術選択モデルを一般均衡モデルと統合することで、新しい技術の普及と経済活動全体に及ぼす影響を定量的に評価することができるようになる。

#### 4. 結論と今後の課題

本研究では、日本を対象にした廃棄物処理、二酸化炭素排出を組み入れたトップダウンモデルである一般均衡モデル(AIM/Material)に下水汚泥処理技術の選択を取り上げたボトムアップモデルを組み合わせたモデルを構

築し、下水汚泥処理技術の導入可能性の変化とその経済的な影響を評価した。その結果、本モデルで想定した環境制約(二酸化炭素排出量の削減と廃棄物最終処分量の削減)を想定することで、2010年のGDPロス(1995年価格)となるが、下水汚泥処理に関する新たな技術の導入が可能となることによりGDPロスは100億円回復し、さらに再生品の需要を増大させる政策と組み合わせることでGDPロスの回復は2000億円となる。こうした分析事例を他の分野、特に技術進歩が見込まれている分野に適用することで、個別技術の導入可能性と各技術がもたらす経済的な便益を定量的に評価することが可能となり、環境保全と経済発展の両立を目指した政策の実現に寄与することが可能となる。

今後の課題としては、今回取り上げたような下水汚泥処理以外のボトムアップモデルの構築が必要となる。特に今回の分析では比較的データの整備が進んでいる下水汚泥を対象としたが、この他にも環境政策を評価する上で重要な分野は数多く存在する。また、今回対象とした下水汚泥処理に関する技術選択モデルと応用一般均衡モデルの統合においても、いくつかの課題がある。技術シェアの変化による中間投入財の変化については対象していない点、30年を超える施設の取り扱いと民間委託等される汚泥をすべて委託された汚泥の性状で最終処分されるとみなしたことでシミュレーション開始年付近の変動が大きい点、さらに、一般均衡モデルで取り上げることができる再生品のみを技術選択モデルでの再生品の対象としており、ここで取り上げた以外の再生品の利用が提案されている<sup>9</sup>にもかかわらず取り上げなかった点、再生品の供給について、異なる廃棄物からの競争がある場合に今回構築したような技術選択モデルを該当する廃棄物についても構築してあわせて評価する必要がある点の4点である。このため、より厳密な形でのモデル統合が必要となる。さらに、今回取り上げたようなエンドオブパイプ的な処理ではないクリーンプロダクションなどより広い視点からの対応策が試みられており、そうした個々の対策に対して総合的に対処できるようなデータ

の整備とモデル化が必要である。

謝辞：本分析を行うにあたり、富士総合研究所 松井重和  
研究員及び川崎重工業 澤井正和氏から様々な情報及び  
データをご提供いただきました。また、京都大学大学院  
藤原健史助教授より数々のご意見をいただきました。こ  
こに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1 中央環境審議会第 78 回企画政策部会会議録 ,<http://www.env.go.jp/council/former/yousi03/k030-078.html> .
- 2 増井利彦・松岡譲・森田恒幸(2000) 環境と経済を統合した  
応用一般均衡モデルによる環境政策の効果分析, 環境シス  
テム研究, Vol.28, pp.467-475 .
- 3 環境資源対策 Vol.34, No.2, 同 Vol.35, No.5 .  
下水道協会誌 Vol.26, No.307, 同 Vol.33, No.396 .  
環境技術 Vol.29, No.5 .  
東京ガス産業廃棄物問題研究会編(1995) 産業廃棄物処理ガ  
イドブック, 電力新報社, pp.230-237 .
- 4 森田弘昭(2000) 汚泥の処理処分・利用, 2001 年版下水道年  
鑑, pp.345-354 .  
森岡康裕・筒井誠二(1998) 下水汚泥有効利用の現状と課題  
について, 再生と利用, Vol.21, No.79, pp.27-36 .  
松田尚之(2001) 都市計画中央審議会下水道小委員会報告に  
ついて, 再生と利用, Vol.24, No.91, pp.111-119 .
- 5 日本下水道協会編(1991) 下水汚泥処理総合計画策定マニ  
ュアル .
- 6 山田一彦監修(2000) 原価償却資産の耐用年数表, 納税協会  
連合会 .
- 7 日本下水道協会(1997) 平成 7 年度版下水道統計 .
- 8 平成 7 年度下水汚泥有効利用状況調査報告(1998) 再生と利  
用, Vol.21, No.78, pp.88-111 .
- 9 澤井正和(1999) 下水汚泥の濃縮・消化・熱処理工程におけ  
る効率化技術とその評価に関する研究, 東北大学大学院学  
位論文 .

## Integration of Computable General Equilibrium Model and End-use Model for Sewage Sludge Management

Toshihiko MASUI, Kenichi TSUCHIDA, Yuzuru MATSUOKA, and Tsuneyuki MORITA

The bottom-up model is useful to represent the reality of technology and society change under the assumption of the consistent economic sectors, and the top-down model has advantage to reproduce the consistent solution among economic sectors based on the technology assumptions. In this analysis, these two types of models are integrated for the consistent environmental policy assessment considering the distribution of individual technologies. According to the bottom-up model, the sewage sludge treatment model is developed and integrated with computable general equilibrium model, which has been developed to analyze the waste management policy. In the simulation analyses, the GDP loss in 2010, which is derived from the reduction of CO2 emissions based on Kyoto Protocol and the reduction of final disposal of solid waste based on the government target, will be 1.8 trillion yen at 1995 price. By selection of new technology of sewage sludge management, the GDP loss in 2010 is mitigated by 10 billion yen. Moreover, by integration of recycling policy to increase the demand of waste in production process, the GDP loss in 2010 will be mitigated by 200 billion yen. By expanding these simulation analyses to other fields, it is possible to assess the broad environmental policies considering the introduction of the new technology.