



WASEDA UNIVERSITY

Institute for Research in Contemporary Political and Economic Affairs

1-6-1 Nishi-waseda, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8050 Japan

Working Paper Series

廃棄物産業連関分析 (WIO) と廃棄物管理最適化

近藤 康之 中村 慎一郎

No. 0308

平成 15 (2003) 年 11 月

近藤 康之

早稲田大学政治経済学部

〒 169-8050 東京都新宿区西早稲田 1-6-1

E-mail: ykondo@waseda.jp

中村 慎一郎

早稲田大学政治経済学部

〒 169-8050 東京都新宿区西早稲田 1-6-1

E-mail: nakashin@waseda.jp

廃棄物産業連関分析 (WIO) と廃棄物管理最適化

近藤 康之 中村 慎一郎

ykondo@waseda.jp nakashin@waseda.jp

早稲田大学政治経済学部

平成 15 (2003) 年 11 月

1 はじめに

廃棄物リサイクルはそれ自体が目的ではない。真の目的は我々が営む経済活動に伴う環境負荷を全体として軽減することであり、リサイクルはこのための一手段に他ならない [1]。循環型社会形成推進基本法は廃棄物管理手段について優先順位 (1 再使用, 2 再生利用, 3 熱回収, 4 最終処分) を規定しているが、但し書きには、「次に定めるところ (筆者注: 前述の優先順位) によらないことが環境への負荷の低減にとって有効であると認められるときにはこれによないこと」と明記されている。すなわち、順位はあくまで理念的な性格を持つものであり、その遵守が実際に環境負荷を全体として軽減するか否かは客観的な定量評価を行わないことには分からぬのである。ここに廃棄物管理における環境負荷の定量評価、すなわち廃棄物ライフサイクルアセスメント (LCA) の重要性がある。

本稿は、筆者達がここ数年取り組んでいる廃棄物産業連関 (waste input-output, WIO)[2, 3, 4] を用いた廃棄物 LCA を解説する。廃棄物 LCAにおいては、生産と消費に伴う廃棄物発生過程、処理・処分によるその変換過程、および再資源化過程を通じる各部門間の財と廃棄物の流れを整合的に把握することが必要である。この目的に資する勘定体系として開発された廃棄物産業連関表について、第 2 節で解説する。第 3 節では、この勘定体系を用いた LCA の方法である廃棄物産業連関分析を取り上げる。

通常の LCA では、所与の複数シナリオについてその環境効果を比較する。一方、比較対象となるシナリオそれ自体は、一般に試行錯誤に基づき、体系的な方法を用いることなく作成されている。その意味でシナリオ作成には恣意性が否定できず、これは WIO についても同様である。第 4 節では、このことから生じ得る問題である「シナリオ選択の偏り」を取り上げる。第 5 節では、この問題への対応として WIO を最適化問題として拡張し、その応用結果を第 6 節に示す。第 7 節は結語を与える。

2 廃棄物 LCA と廃棄物産業連関表

LCA の手法としては、従来、積み上げ法がもっぱら用いられていた。しかし、積み上げ法の問題点として、システム境界設定における恣意性と膨大なデータ整備費用が指摘されてきた。この解決策として最近注目されているのが、積み上げ法を産業連関分析 (IOA) と統合した混合型 (hybrid) LCA である [5, 6] (産業連関分析については文献 [7, 2] を参照されたい)。

公表されている産業連関表の部門数は世界最高規模を誇る日本や米国表でもたかだか 500 前後であり、詳細においては積み上げ法の水準に遠く及ばない。フォアグラウンド・データ (直接の評価対象である製品・用役・技術工程に関する詳細な資料) は積み上げ法に準じて収集・整備し、バックグラウンド・データ (間接効果やシステム全体に関わる部分) については産業連関分析を用いようとするのが混合型 LCA である。

バックグラウンド・データとして既存の産業連関表を用いることで、データ整備費用の大幅な削減が期待できる。国を単位とする通常の産業連関表では、システム境界は明確に国境として与えられる。国境を越えた複数国に跨るシステムを考慮するのであれば、国際産業連関表を用いれば良い [2]。

表 1: 日本の廃棄物産業連関表 (1995 年)

	財生産(動脈)部門											廃棄物処理部門			最終 需要	total
	AGR	MIN	FWP	CHE	CEM	MET	MEP	MCN	CNS	UTL	SRV	INC	LND	SHR		
財・サービス投入額表																
AGR	1671	1	8336	148	1	0	0	156	140	0	1098	0	0	0	4268	15818
MIN	0	1	5	809	166	177	1	9	180	291	1	0	0	0	25	1666
FWP	1233	14	15931	937	262	14	273	1582	4449	128	16693	26	9	1	38447	80000
CHE	926	32	3114	13076	323	383	579	5351	2238	927	11751	88	23	2	11743	50554
CEM	20	0	282	212	945	124	124	1017	5582	17	408	0	0	0	966	9695
MET	0	2	1	58	60	4534	4581	1227	684	0	11	0	0	0	850	12009
MEP	23	26	1362	454	160	4	5531	8780	9535	30	953	0	0	0	3277	30135
MCN	175	12	295	69	37	0	128	39843	1902	26	7379	79	13	19	80351	130329
CNS	50	10	268	271	136	97	245	374	224	1147	5277	0	156	0	80030	88286
UTL	122	45	1364	1418	357	443	756	1361	565	2315	6813	-69	10	16	7760	23275
SRV	2231	610	14090	9231	2229	1556	4869	22784	19468	4116	106754	76	16	3	304018	492052
廃棄物純排出量表																
grb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6000	0	0	0	10000	16000
pap	175	6	-11530	442	263	113	290	791	1235	135	5792	0	0	85	17634	15429
pls	258	4	1000	-1006	77	10	704	901	1019	39	2854	0	0	205	4330	10394
mtl	3	1	171	-84	10	-36217	-1305	5431	7591	14	566	0	0	3290	22777	2248
gls	3	1	-4369	137	-2140	198	229	211	1769	64	5409	0	0	0	3457	4970
wds	145	0	4082	90	0	0	0	0	3230	0	175	0	0	861	857	9440
ash	0	4708	1211	1592	-11614	7513	9793	1782	-9150	4783	45	3326	0	0	0	13988
sld	-5639	4283	9348	4013	-566	565	1055	660	11735	3832	395	0	0	0	0	29681
oil	6	3	1532	852	90	576	1392	1866	87	20	1148	0	0	0	0	7573
cns	0	139	56	204	341	433	434	464	14249	155	1063	0	0	0	0	17538
blk	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7167	7167
dst	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1398	0	1398
環境負荷排出量表																
CO2	5631	214	11479	29539	23765	32240	7631	3617	4529	96793	80193	4432	2831	9	41913	344817
LC	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	187212	0	0	187212

産業: AGR 農林漁業, MIN 筑葉, FWP 食料・繊維・木材・紙・パルプ, CHE 化学, CEM 窯業・セメント, MET 金属, MEP 金属製品, MCN 機械, CNS 建設・土木, UTL 電気・ガス・水道, SRV サービス。廃棄物処理: INC 焼却, LND 埋立, SHR 破碎。廃棄物: grb 紙糞, pap 紙・繊維, pls 廃プラスチック類, mtl 金属屑, gls ガラス屑, wds 木屑・動植物残渣等, ash 焼却灰, sld 汚泥, oil 廃油・廃酸・廃アルカリ, cns 建設廃材, blk 破大ごみ・廃自動車, dst 破碎ダスト。環境負荷: CO2 二酸化炭素, LC 最終処分場消費。

物質収支の考慮は LCA の必須条件である。物質収支を適切に考慮するためには、システム全体における収支を捉えることが肝要である。従って、廃棄物 LCA のために、経済全体における廃棄物フローを整合的な勘定体系の中で捉えておくことが重要である。産業連関表は財フローに関する整合的な勘定体系である。廃棄物に関する対応物として筆者の 1 人が開発したのが廃棄物産業連関表である [3]。

筆者らは、平成 7 年度産業連関表をもとに廃棄物産業連関表を推定した [8]。表 1 はそれを農林漁業からサービスまでの 11 の(動脈)産業部門、焼却、埋立、破碎からなる 3 種類の廃棄物処理部門、および厨芥からダストまでの 12 種類の廃棄物に統合した縮小版である(元表は web [9] から入手可能である)。表は大まかに 3 つの部分に分かれているが、財・サービス投入額表(産業部門を行要素として持つ最上部の行列)は通常の産業連関表に対応している。ただし、廃棄物処理部門を処理方法によって区別して、通常の産業連関表よりも詳細な部門分類を採用している。電力部門から焼却部門への負の投入は、廃棄物発電による余剰電力の販売があることをあらわす。

廃棄物純排出(排出からリサイクル投入を控除したもの)をあらわすのが、中央部の廃棄物純排出量表である。例えば、金属部門(MET)は 56.5 万トンの汚泥(sld)と 57.6 万トンの廃油・廃酸・廃アルカリ(oil)を排出する一方で、36 百万トンの金属屑(mtl)を投入している。窯業・セメント(CEM)は鉱滓・焼却灰・飛灰(ash)を実に 1160 万トンも利用しているが、これは主にセメント産業が高炉スラグや発電所からの石炭灰などを原材料として大量に用いているためである。下水処理と浄水処理は電力と共に UTL に含まれているので、これらの部門から発生する有機汚泥・無機汚泥は UTL からの汚泥(sld)383 万トンに計上されている。

焼却部門(INC)は処理した受け入れ廃棄物を 333 万トンの焼却灰(ash)に変換する。このほかに、焼却部門は二酸化炭素(バイオマス由来の二酸化炭素は含まない)を排出する。破碎部門(SHR)は廃棄物を処理して、330 万トンの金属屑、86 万トンの木屑等(wds)、および 140 万トンの破碎ダスト(dst)などに変換する。埋

立 (LND) は最終処分であり、その限りで廃棄物の変換は行わないので、廃棄物発生は計上されていない。ただし、環境負荷としての二酸化炭素（メタンガスの温暖化換算値を含む）を排出し、最終処分場を消費する。

3 廃棄物産業連関分析を用いた LCA

廃棄物産業連関表を用いた分析を行うための廃棄物産業連関モデル (WIO モデル) を解説する。いま、産業（財・サービス生産）部門数を n^I 、廃棄物処理部門数を n^{II} とし、廃棄物と環境負荷因子がそれぞれ n^W 種類、 n^E 種類あるものとする。表 1 では $n^I = 11$, $n^{II} = 3$, $n^W = 12$, $n^E = 2$ である。産業部門数は n^I であるが、 n^I 種類の財・サービスを生産するための生産方法は全部で m^I 通りあり、 $m^I \geq n^I$ であるとする。すなわち、産業部門における技術選択の可能性を考慮する。なお、通常の IOA や表 1 では技術選択の可能性を考慮していないので、 $m^I = n^I$ である。

産業における各生産方法の活動量をあらわす $m^I \times 1$ ベクトルを x_I 、各廃棄物処理部門の活動量をあらわす $n^{II} \times 1$ ベクトルを x_{II} とする。これらベクトルの要素を対角要素を持つ（対角）行列を \tilde{x}_I , \tilde{x}_{II} とすると、廃棄物産業連関表の雑形を次のように書くことができる。

	産業部門 (生産方法)	処理部門	最終 需要	
産業部門 (投入額)	$A_{I,I} \tilde{x}_I$	$A_{I,II} \tilde{x}_{II}$	$X_{I,F}$	n^I
廃棄物 純排出量	$G_{.,I} \tilde{x}_I$	$G_{.,II} \tilde{x}_{II}$	$W_{.,F}$	n^W
環境負荷 排出量	$R_{.,I} \tilde{x}_I$	$R_{.,II} \tilde{x}_{II}$	$E_{.,F}$	n^E

m^I n^{II} 1

添字 I, II, F は、それぞれ、産業部門、廃棄物処理部門、最終需要部門に対応する。投入係数行列 $A = [A_{I,I}, A_{I,II}]$ は 1 単位の生産・処理に必要な財投入額をあらわす。同様に、廃棄物純排出係数行列 $G = [G_{.,I}, G_{.,II}]$ と環境負荷排出係数行列 $R = [R_{.,I}, R_{.,II}]$ は、それぞれ、1 単位の生産・処理を行う際の廃棄物純排出量と環境負荷排出量をあらわす。

廃棄物産業連関表においては、表 1 や上の雑形において確認されるように、廃棄物は行項目としてのみ、廃棄物処理部門は列項目としてのみ現れる。したがって、投入係数行列と純排出係数行列を並べた行列、

$$\begin{bmatrix} A_{I,I} & A_{I,II} \\ G_{.,I} & G_{.,II} \end{bmatrix}$$

のサイズは $(n^I + n^W) \times (m^I + n^{II})$ であり、 $m^I = n^I$ であるとしても一般には非正方行列である。これは分析には不都合である。WIO モデルは配分行列を用いて廃棄物と廃棄物処理とを対応づけることで、この問題を解決する。いま、 $n^{II} \times n^W$ 行列 S を、廃棄物を廃棄物処理部門に対応させる配分行列とする。この (i, k) 要素 s_{ik} は、廃棄物 k が処理される場合に廃棄物処理部門 i に配分される割合をあらわす。定義から $0 \leq s_{ik} \leq 1$, $\sum_{i=1}^{n^I} s_{ik} = 1$, ($k = 1, \dots, n^W$) である。配分行列と廃棄物純排出係数行列の積 $SG_{.,I}$, $SG_{.,II}$ は各産業・処理部門が 1 単位の生産・処理を行う際に排出する廃棄物の処理に必要な各廃棄物処理部門の活動量をあらわす。

産業部門における技術選択の可能性の無い場合、すなわち、表 1 のように $m^I = n^I$ の場合を考えると、 x_I は産業部門の生産額となる。このとき WIO モデルは以下で与えられる。

$$A_{I,I}x_I + A_{I,II}x_{II} + X_{I,F} = x_I, \quad (1)$$

$$SG_{.,I}x_I + SG_{.,II}x_{II} + SW_{.,F} = x_{II}. \quad (2)$$

この連立方程式の解として、各産業・処理部門の生産・活動水準 x_1, x_{11} が与えられる。また、環境負荷排出量 e は以下で与えられる [4]。

$$\begin{aligned} e &= R_{\cdot,1} x_1 + R_{\cdot,11} x_{11} + E_{\cdot,F} \\ &= R \begin{bmatrix} I_n - A_{1,1} & -A_{1,11} \\ -SG_{\cdot,1} & I_n - SG_{\cdot,11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_{1,F} \\ SW_{\cdot,F} \end{bmatrix} + E_{\cdot,F}. \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 I_n は $n \times n$ の単位行列である。

経済活動に伴う環境負荷は、結局のところ、消費者である我々の生活形態（ライフスタイル）とそれを満たすための技術、およびそれを取り巻く制度の産物である。WIO モデルはこの関係についての定量的かつ簡潔な表現（式 (3)）を与える。消費 $X_{1,F}$ と直接の廃棄 $W_{\cdot,F}, E_{\cdot,F}$ は消費者のライフスタイルを、投入・排出係数行列 A, G, R は技術を、そして配分行列 S は廃棄物管理制度を、それぞれ定量的に表現する。最終需要は消費の他にも資本形成、政府支出、および輸出を含むが、経済活動の目的が消費者の満足充足にあるとすれば、これらも結局のところライフスタイルに起因すると言える。

消費者のライフスタイル、技術、および廃棄物管理制度の組合せ $(X_{1,F}, W_{\cdot,F}, A, G, R, S)$ をシナリオと呼ぶ。具体的な数値により様々なシナリオを作成し、式 (1), (2), または (3) に代入することで、対応する生産・活動水準 x_1, x_{11} や環境負荷排出量 e を求め、また、それらをシナリオ間で比較検討することが出来る。以上が WIO モデルを用いた LCA (WIO-LCA) の概略である。なお、本稿では LCA の構成要素である環境影響評価は取り上げていない。本稿でいう LCA はその前段階であるライフサイクルインベントリ分析 (LCI) を対象としている。

ここまででは、解説の便宜上、固定係数を前提に WIO モデルを線形モデルとして扱ったが、厳密には非線形である。WIO モデルは廃棄物処理工程についての工学モデルを構成要素としているので、廃棄物処理部門の技術を表す係数行列 $A_{1,11}, G_{\cdot,11}, R_{\cdot,11}$ は廃棄物の量と組成に依存する。従って、線形性は廃棄物の量と組成が一定の場合にのみ成立し、実際の計算では廃棄物ベクトルに初期値を与えて収束するまで繰り返し演算を行う（図 1, 図中の F はサブルーチンとして使用する工学モデルをあらわす）。

WIO-LCA の応用例としては、家電リサイクルへの応用 [10], サーマルリサイクルへの応用 [11] などがある。家電リサイクルや廃棄物処理広域化による廃棄物発電は埋立のみならず温暖化ガス排出をも軽減する、とする結果が得られている。

4 シナリオ選択の偏り

通常の LCA ではいくつかのシナリオを作成し、各シナリオの下で発生するであろう環境負荷を推定し、これを比較することで評価を行う。前節で概説した WIO-LCA についても同様である。当然のことながら、考慮したシナリオ以外の可能性は評価の対象から除外される。従って、シナリオがどのように作られるのかという点は重要である。

実際のところ、シナリオ作成は分析者の裁量に任されており、少なくとも体系化されてはいない様である [12]。その意味で、シナリオ作成に恣意的な側面があることは否めない。したがって、実際は重要で検討すべきシナリオが非意図的に検討対象候補から外れてしまう可能性がある。この問題を「シナリオ選択の偏り」と呼ぶことにしよう。

考慮すべきシナリオの範囲が狭い領域に限定される単純な対象については（例えば自動車燃料タンクの素材選択問題）、この問題は無視できよう。しかし、対象とするシステムが複雑さを増すにつれ、シナリオ設定の範囲が広範になり、シナリオを作成には多くの可能性およびシナリオ構成要素間の整合性を考慮することが必要になる。この場合、選択の偏りが生じる可能性は大きくなるであろう。

廃棄物管理は極めて複雑かつ多様なシステムである。特定の廃棄物、例えば厨芥の処理方法には多くの選択肢があり、選択肢ごとに量的質的に異なる回収物・残渣が発生する。発生した残渣の処理方法も多様である。更に、厨芥についての選択が他の廃棄物の処理における回収物・残渣に及ぼす影響も考慮する必要がある。廃

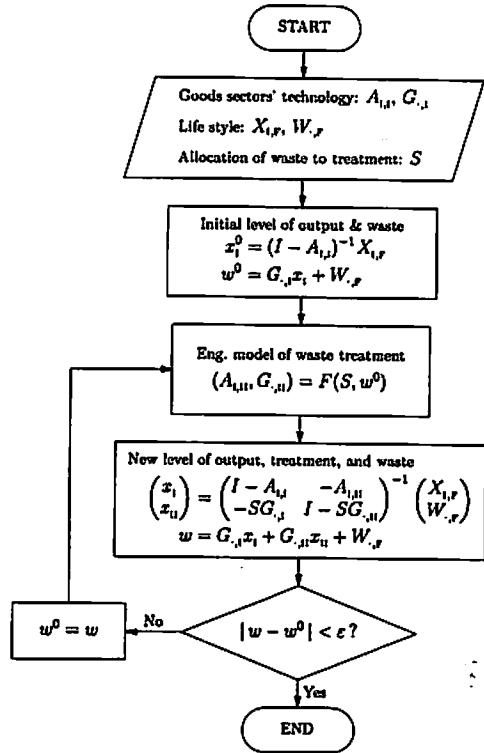


図 1: WIO モデルにおける収束演算

棄物 LCA においては、シナリオ選択の偏りの生じる可能性が大きいと言えよう。例えば、筆者らは広域化処理、分別の徹底、および下水汚泥、焼却灰、建設廃棄物リサイクルの組合せを検討した WIO-LCA を行い、平成 7 年を基準として 30% の埋立減少と 2% の温暖化ガス減少が可能との試算を得た [13]。しかし、このシナリオは試行錯誤に基づいて作成しており、考慮したシナリオの範囲も限定されている。従って、これと同水準または一層の負荷軽減をもたらすシナリオの存在を排除する物では全くない。

廃棄物 LCA におけるシナリオ設定をとくに複雑にするのが、リサイクル水準と回収物質の質・量の関係である。一般に、リサイクルのために回収物質の品質を向上するには、回収工程におけるエネルギー投入を増加させる必要がある。リサイクルはそれ自体が目的ではないから、廃棄物管理政策としては、全体の環境負荷を念頭において、何を、どの水準まで、どのようにリサイクルするのがもっとも効果的か、を判断する必要がある。しかし、複雑なシステムについて試行錯誤的な方法でこの課題に対応することは、まず不可能であろう。

この種の課題に対応するには、「あるシナリオの下で特定の環境負荷、例えば温暖化ガス排出や埋立量がどの程度軽減するか」という従来の LCA における問題設定を、「特定の環境負荷を軽減するにはどのようなシナリオがもっとも効果的か」という設定に変更する必要があると思われる。これは LCA を意思決定論の問題として拡張することによって対処できる [14]。考え得るすべての可能性を網羅した「シナリオ集合」の中から、実現可能であり、政策目的に最も合致するという意味で「最適」な組合せを選択するのである。

5 最適化問題としてのシナリオ生成

廃棄物管理における最適化分析ツールとして WIO を拡張した WIO-LP (廃棄物産業連関線形計画) モデルを解説する [15, 16]。産業部門における回収資源のリサイクルなど、さまざまな技術的選択を考慮するために、議論を $n^l = m^l$ の場合に限定せず、 $n^l \leq m^l$ とする。この結果、産業部門の投入係数行列 $A_{l,l}$ は一般に正方行列ではなく列数が行数よりも大きな非正方行列となる。廃棄物処理部門においては、元来、処理方法の種類に応じて部門が設定されている（産業部門の生産方法の数 m^l と類似の記号 m^{ll} を導入する必要はない）。

このとき、WIO モデルにおける財の需給均衡式 (1) は以下のように一般化される。

$$A_{I,I}x_I + A_{I,II}x_{II} + X_{I,F} = Jx_I. \quad (4)$$

ここで、 J はすべての要素が 0 または 1 の $n^I \times m^I$ 行列で、その (i,j) 要素 J_{ij} は次のように定義される。

$$J_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{技術 } j \text{ が財 } i \text{ の生産に用いられる場合,} \\ 0 & \text{その他の場合.} \end{cases}$$

次に、廃棄物発生・処理恒等式 (2) における選択可能性について述べる。WIO モデルでは配分行列 S は所与の定数であったが、WIO-LP モデルではこれも選択の対象となる。しかし、 S の要素を選択すべき変数とすると方程式が非線形になってしまう（式 (2) の左辺第 1 項および第 2 項が変数 S, x_I, x_{II} に関して非線形となる）。そこで、配分行列 S を選択する問題であることを念頭に置きつつ、式 (2) の線形表現を考える。そのため、 $n^H \times n^W$ の変数行列 Z を導入し、その (i,k) 要素 z_{ik} は、廃棄物処理部門 i で処理される廃棄物 k の量をあらわすものとする。変数 Z を用いると、(2) を、

$$G_{.,I}x_I + G_{.,II}x_{II} + W_{.,F} = Z' \iota_{n^H}, \quad (5)$$

$$x_{II} = Z \iota_{n^W}, \quad (6)$$

で置き換えることが出来る。ただし、 ι_n はすべての要素が 1 の $n \times 1$ ベクトルであり、 Z' は Z の転置をあらわす。以上で、式 (1), (2) が一般化され、シナリオ「集合」を表現することが可能となった。

次に、政策目標をあらわす目的関数を設定する。産業部門と廃棄物処理部門から排出される特定の環境負荷物質の削減が政策目標であるとしよう。いま、 c_I と c_{II} を $R_{.,I}, R_{.,II}$ から特定の負荷に対応する行を抜き出したベクトルとすると、目的関数は以下で与えられる。

$$c_I x_I + c_{II} x_{II}. \quad (7)$$

WIO-LP モデルは、制約式 (4), (5), (6) および変数に対する非負制約（生産額や処理量が負になることはあり得ない）やその他の追加的制約条件の下で、目的関数 (7) を最小化する線形計画問題である。その他の追加的制約条件としては、分析の対象に依存して、廃棄物処理に関する制度的条件、処理能力の上限、リサイクルにおける受け入れ能力の上限などがあげられる。

LCAにおいては、“what-if” シナリオと “cornerstone” シナリオの 2 つが、基本的なシナリオ作成・開発の方法とされている [17]。WIO モデルによるシナリオ分析においては、シナリオを具体的に設定し、それぞれの設定値に対して連立方程式の解が求められる。すなわち、WIO モデルは “what-if” シナリオを対象とした分析に適している。他方、WIO モデルを線形計画問題へと拡張した WIO-LP モデルによる分析は、極めて複雑かつ多様な廃棄物管理のシナリオ集合の中から、系統的に “cornerstone” シナリオを作成することに対応していると言えよう。

既述のように、WIO モデルは廃棄物処理工学モデルをサブルーチンとして利用しているので非線形である。WIO-LP モデルも線形計画法に基くものではあるが、当然この性質を引き継いでいる。そこで、簡便な算法として、図 1 における連立方程式を解く手順を線形計画問題を解く手順に置き換えたものを採用する。

6 WIO-LP の応用

6.1 設定

WIO-LP の廃棄物管理への最近の応用結果 [16] を紹介する。選択可能性として平成 7 年度廃棄物産業連関表にある投入・排出係数ベクトルの他に、以下を考慮した：

- 廚芥のメタンガス化発電（残渣は堆肥利用）[18]

表 2: 焼却形式の設定

タイプ、地域	I	II	III
炉能力 [ton/日]	500	180	30
施設あたり炉数	3	2	1
運転方式	全連続	全連続	バッチ
発電	あり	なし	なし
シェア	.343	.144	.513
基準輸送距離 [km]	12.0	12.0	12.0
広域輸送距離 [km]	—	24.5	84.9

- 家電リサイクル法に対応した一貫リサイクルのための高回収率破碎・分別 [19]
- 焼却の広域化 [11]
- 廃プラスチックの高炉還元利用
- 熱間圧延鋼材生産のための転炉鋼の一部を電炉鋼で代替
- 伸銅品、アルミ圧延製品、ガラス生産のための原材料(銅、アルミ、珪石)を、それぞれ銅屑、アルミ屑、ガラス屑で代替

表 2 は考慮した焼却形式を示す。広域化は、多数のタイプ II または III の施設を、処理能力の合計が等しい少數のタイプ I の施設に置き換えることで実現された。施設数の減少により、輸送距離が $\sqrt{\text{規模比}}$ に比例して増加するとした(表 2 最下行)。すなわち、選択可能な焼却形式は、地域 II から排出される廃棄物(全体の 14.4%)についてはタイプ II(輸送距離 12 km)とタイプ I(同 24.5 km)の 2 つであり、地域 III から排出される廃棄物(全体の 51.3%)についてはタイプ III(輸送距離 12 km)とタイプ I(同 84.9 km)の 2 つである。地域 I から排出される廃棄物(全体の 34.3%)は、タイプ I(輸送距離 12 km)のみで処理される。その他の各技術の原単位等は先行研究 [4, 19, 20, 21] と同様に設定した。

非現実的な最適解を排除するため、一連の制約条件を追加した。まず、処理部門ごとに処理可能な廃棄物を限定をした。とくに、メタンガス化発電の対象を厨芥に限定した。これに類似して、廃棄物ごとに可能な処理を以下のように限定した：

- 焼却のみ可：木くず、廃油、廃酸、
廃アルカリ、動物の死体
- 埋立のみ可：生き瓶、汚泥、建設廃材、
焼却灰、煤塵、破碎ダスト
- 破碎のみ可：自動車
- 焼却不可：自転車、ガスレンジ、家電
- 厨芥はガス化、埋立、焼却のいずれかで処理
- 廃プラは埋立、焼却、高炉還元のいずれかで処理。

また、不燃物が焼却される(可燃ごみへの混入)割合の上限値、および厨芥がメタンガス化される割合の上限値を制約として追加した。破碎される場合、対象となる粗大ゴミから家電、自動車に至るまでそれぞれ固有の工程で破碎されるものとした。

表 3: 主な最適化計算結果

	A	C1	L1	C2	L2	
問題設定						
1. 処理技術の選択肢						
L 埋立	○	○	○	○	○	
S 従来型破碎	○	○	○	○	○	
H 家電高回収率破碎	×	○	○	○	○	
I 広域化焼却	×	○	○	○	○	
G メタンガス化発電	×	○	○	○	○	
2. 再資源化技術の選択肢						
B 廃プラ高炉還元	×	×	×	○	○	
R その他リサイクル	×	×	×	○	○	
最小化 目的関数		CO ₂	埋立	CO ₂	埋立	

結果

選択された処理・再資源化方法 ^a					
厨芥	I	G/I	I	G/I	
廃プラスチック	L	I	B/L	B/I	
テレビ	L	H	S	H	
洗濯機	L	H	H	H	
冷蔵庫、エアコン	H	H	H	H	
鉄屑、銅屑	L	L	R	R	
ガラス屑	L	L	R/L	R/L	
環境負荷排出：現状 A に対する変化率(%)					
CO ₂	0.00	-4.97	-4.06	-5.33	-4.45
埋立容積	0.00	9.22	-26.02	5.22	-27.95

^a 最適化計算によって選択された処理・再資源化方法を、表上部「問題設定」に記した記号であらわす。ただし、複数の記号をスラッシュで区切ったもの（例えば G/I）は、許容量まで前者（メタンガス化発電）で処理・再資源化し、残りを後者（広域化焼却）で処理・再資源化することをあらわす。

6.2 結果

主な計算結果を表 3 に示す。表では選択肢の範囲と最適化目標を区別するために A, C1, L1, C2, L2 と表記している。A は 1995 年当時の現状に対応する。C1 と L1 は処理技術のみの選択を可能とし、財生産のための再資源化技術の選択は不可能とした場合である。また、C2 と L2 は処理技術と財生産のための再資源化技術のすべての選択を可能とした場合である。最小化すべき目的関数は、C1 と C2 については二酸化炭素排出量（最終処分場からのメタンガスと家電由来の未回収フロンの GWP 100 年値による二酸化炭素換算値を含む）、L1 と L2 については埋立容積（体積）である。

6.2.1 選択されたシナリオ

表 3 から、所与の廃棄物に適応されるべき「最適な」処理・再資源化方法が、選択可能性集合と目的関数の設定に依存することが分かる。埋立容積削減を優先する場合には廃棄物の減容化が重要になるため、厨芥はガス化または広域化焼却、廃プラスチックは高炉還元か広域化焼却が選択される。他方、CO₂ 排出削減を優先す

る場合には、厨芥はガス化せずに広域化焼却、廃プラスチックは焼却ではなく高炉還元か埋立が選択される。とくに、廃プラスチックについてはいずれの場合も高炉還元が選択されるが、この方法の許容能力を超えて残る分については、埋立容量削減ならば焼却が、CO₂ 排出削減ならば埋立、と異なった選択が行われる。

家電 4 品目は、埋立容積削減を目的とする場合については、再資源化技術の選択可能性に関わらず L1, L2 の両方の場合について高回収率破碎が選択された。処理の困難な破碎ダストは埋立によってのみ受入可能としているため、可能な限り破碎ダストを少なく出来る高回収率破碎が選択されている。他方、CO₂ 排出削減を目的とする場合については、品目ごとに異なった技術が選択された。冷蔵庫とエアコンは、埋立容積削減であれ、CO₂ 排出削減であれ、いずれの最小化目的についても、高回収率破碎が選択される。代替フロンの回収・破壊が CO₂ 排出削減に貢献するため、冷蔵庫とエアコンについては、高回収率破碎が選択されている。

テレビについては、CO₂ 排出削減を目的とし、再資源化技術が利用不可能な C1 の場合には、埋立が選択された。この場合の破碎は、追加的なエネルギー投入を必要とするが単なる減容方法としてしか機能しないため、選択されていない。他方、再資源化技術が利用可能な C2 の場合には、従来型破碎（鉄屑回収、ガラス屑等は回収せず）が選択された。この選択結果の主因は、鉄屑は回収すればするほど再資源化技術が追加的に稼動するのに対し、ガラス屑はすでに再資源化技術の許容量を超えて余っていることであると考えられる。洗濯機については、テレビよりも金属屑を回収できるため、再資源化技術が利用不可能な C1 の場合には埋立が、利用可能な C2 の場合には高回収率破碎が選択されている。

6.2.2 CO₂ と埋立のトレードオフ

CO₂ を最小化した場合、処理技術のみの選択 (C1) によって 5.0% の削減、すべての技術選択 (C2) によって 5.3% の削減が達成される。財生産のための再資源化技術が選択されない C1 の場合であっても、C2 の場合に削減可能な CO₂ の $5.0 \div 5.3 \approx 93\%$ 以上が削減可能である。なお、CO₂ を最小化すると、埋立容積は C1 では 9.2%, C2 では 5.2% 増加してしまう。

埋立容積を最小化した場合、処理技術のみの選択 (L1) によって 26% の削減、すべての技術選択 (L2) によって 28% の削減が達成される。また、CO₂ を最小化した場合と同様に、財生産のための再資源化技術が選択されない L1 の場合であっても、L2 の場合に削減可能な埋立容積の 93% 以上が削減可能であるとの結果が得られた。なお、埋立容積を最小化しても CO₂ は増加せず、L1 では 4.1%, L2 では 4.5% 削減される。

以上のように、CO₂ と埋立容積のあいだには、トレードオフが見出された。すなわち、一方を最小化すると他方が増加してしまう (C1, C2 の場合)、あるいは、一方を最小化すると他方はそれ自体を最小化した場合よりも少ししか削減されない (L1, L2 の場合) という関係が見出された。

6.2.3 環境負荷削減可能性フロンティア

では、埋立容積最小化 (L1, L2) と CO₂ 最小化 (C1, C2) の中間的な組合せとしては、どのようなシナリオを考えることが出来るのであろうか。この組合せの集合は、利用可能なすべての技術選択可能性と制約条件を考慮して、埋立容積と CO₂ 排出を最小にする可能性の組合せ、すなわち環境負荷削減可能性フロンティアを与える。

図 2 は、このフロンティアを後述する方法によって求めて描いたものである。図中の点 A, C1, L1, C2, L2 は、表 3 中の選択可能性と最小化目的に対応している。点 A は削減率算出の基準点であるから、その座標は (0%, 0%) である。処理技術 (配分 allocation) のみについての最適化結果である 2 点 C1, L1 を通る曲線よりも、再資源化技術も含めて最適化された結果である 2 点 C2, L2 を通る曲線の方が、より南西方向に位置している。このフロンティアの内側 (より北東方向) にある組合せは、実現可能であるが「最適」ではない。他方、フロンティアの外側 (より南西方向) にある組合せは、考慮した選択可能性と制約条件の下では実現不可能である。フロンティア上にある組合せはいずれも「最善」であるが、そのうちどれを選ぶかは政策目的によって決まる。

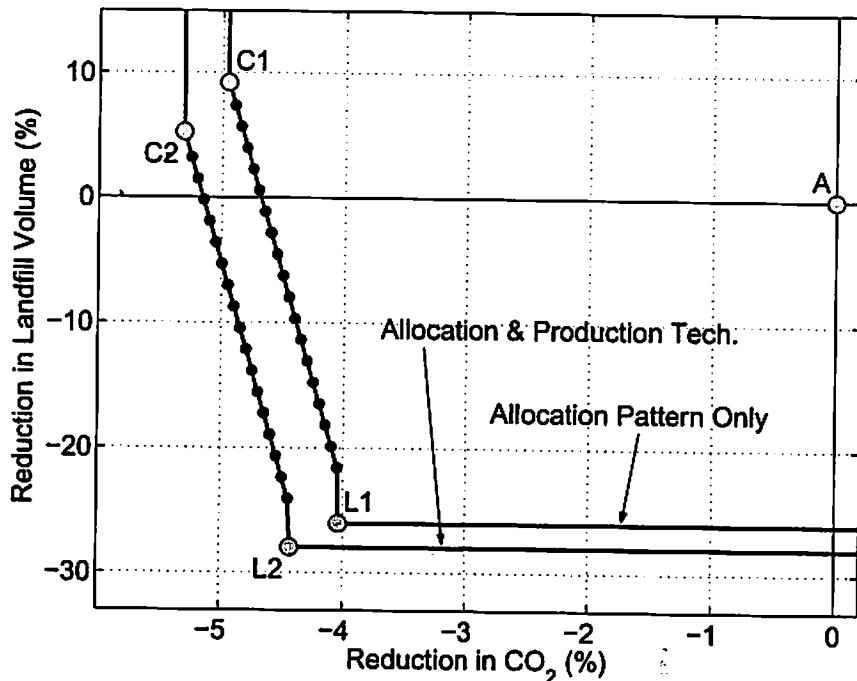


図 2: 埋立・CO₂ 削減可能性フロンティア

WIO-LP を用いて、環境負荷削減可能性フロンティアを（データに基いて定量的に）求めることが出来る。我々は 2 つの環境負荷因子を考慮しているので、どちらか一方の排出量に制約条件（上限）を設けて最適化問題を解き、この制約条件の領域を逐次的に変えていくことで曲線を求めれば良い。実際には、以下のような最適化問題を解いて環境負荷削減可能性フロンティアを求めた：

$$\begin{array}{l}
 \text{minimize} \quad \text{埋立容量} \\
 \text{subject to} \quad (\text{CO}_2 \text{ 排出量}) \leq r \times (\text{現状 CO}_2 \text{ 排出量}) \\
 \quad \quad \quad \text{その他の制約}
 \end{array}$$

ただし、表 3 から $r \in [0.9467, 0.9594]$ とした。

処理部門の技術係数に関する非線形性により、フロンティアが（とくに、点 L1, L2 の近くで）南西に凸にならないことに注意されたい。政策目標（削減したい環境負荷、負荷因子間の重み付け等）を明確にすることで、図中のフロンティア上のどの点を達成すべきかが選択されよう。その点は、単なる CO₂ 排出量と埋立容積の削減率のペアだけでなく、それを達成するための各技術の生産・活動水準が定量的に把握されたシナリオである。すなわち、単に削減目標値が提示されるだけでなく、WIO-LP モデルにより、それを達成するための具体的な廃棄物管理計画が定量的に把握される。

7 結語

WIO-LP モデルを用いれば、技術・制度の諸制約下での「最適な」廃棄物管理計画を探索することが出来る。とくに、本稿第 6 節で紹介した「最適な」シナリオ（最適化計算の結果として選択された処理・再資源化方法の組合せ）の中には、仮に試行錯誤的にシナリオを作成していたとすると検討対象候補から外れてしまっていたものが含まれていると思われる。すなわち、(i) フロンティア上にあるという意味で、また、(ii) 最適化計算を行う前には具体的に検討すること（あるいは、検討対象に含めること）が困難であったという意味で、WIO-LP モデルの最適化計算によって得られたシナリオは、“cornerstone” シナリオである。このように、WIO-LP モ

デルは、「最適な」廃棄物管理計画の探索と系統的なシナリオ作成ための枠組みを提供する。

環境負荷削減可能性フロンティアが定量的に把握されると、各種のシナリオ（政策、計画）がフロンティア上にあるか否かを評価することが可能になる。現行の廃棄物管理政策がフロンティアの内側に位置する場合、未利用の可能性が存在し、政策改善の余地がある。既存の政策をこの観点から精査することは、資源有効利用と政策の効率向上に資するところが大きいと考えられる。

また、循環型社会を実現するためには、フロンティアをより南西方向に移動すること、すなわち、より少ない環境負荷を実現する可能性を拡大することが求められる。この場合、どの制約条件を緩和すれば良いか、どのような選択可能性の拡大が費用対効果で最も有効であるか、などを検討することが重要である。WIO-LP モデルにおける制約式（対応する双対変数）からは、どの制約式を緩和するのが効果的かを検討するための知見が得られるであろう。この点を整理・検討して LCA 手法としての利用可能性をさらに高めること、および WIO-LP モデルにより多くの代替的技術を追加して分析を行うことは、今後の重要な課題である。

参考文献

- [1] 松藤敏彦：「都市廃棄物処理システムの過去・現在・未来」，田中勝・田中信寿編著『循環型社会構築への戦略』所収，中央法規，(2002)
- [2] 中村慎一郎：「廃棄物の産業連関分析」，廃棄物学会誌，11, 4, pp. 289–300, (2000)
- [3] 中村慎一郎：「廃棄物処理と再資源化の産業連関分析」，廃棄物学会論文誌，11, 2, pp. 84–93 (2000)
- [4] S. Nakamura and Y. Kondo: "Input-Output Analysis of Waste Management," *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 6, No. 1, (2002).
- [5] Udo de Haes, H.: "Broadening the Scope of Life Cycle Approaches," Proceedings of the Fifth International Conference on EcoBalance, Tsukuba, Japan, (2002-11).
- [6] 森口祐一・近藤美則・清水浩・石谷久：「自動車による CO₂ 排出のライフサイクル分析」，エネルギー経済，29, 4, pp. 36–45, (1993)
- [7] 中村 慎一郎：『Excel で学ぶ産業連関分析』，エコノミスト社，(2000)
- [8] 中村慎一郎（編著）：『廃棄物経済学をめざして』，早稲田大学出版部，(2002)
- [9] 早稲田大学政治経済学部中村慎一郎研究室：「廃棄物産業連関表 1995 年表 (WIO95)」第 3.1 版，<http://www.f.waseda.jp/nakashin/index-j.html>, (2003)
- [10] S. Nakamura and Y. Kondo: "Waste Input-Output Analysis of Disposal, Recycling, and Extended Life of Electric Home Appliances," Proceedings of EcoDesign 2001: Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, pp. 814–819, Tokyo, Japan (2001-12)
- [11] 中村 慎一郎：「循環型社会におけるサーマルリサイクル」，資源環境対策，37, 5, (2001)
- [12] R. M. Bras-Klapwijk: "Procedures and Tools for Generating and Selecting Alternatives in LCA," *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 8, No. 5, pp. 266–272, (2003)
- [13] S. Nakamura and Y. Kondo: "Recycling, Landfill Consumption, and CO₂ Emission: Analysis by Waste Input-Output Model," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 4, No. 1, pp. 2–11, (2002)
- [14] A. Azapagic and R. Clift: "Life-Cycle Assessment and Linear-Programming: Environmental Optimization of Product System," *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 19, Supplement, pp. S229–S234, (1995)

- [15] 近藤康之・中村慎一郎：「最適化問題としての廃棄物産業連関モデル：理論と応用」，第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集 I, pp. 51–53, (2002-11).
- [16] Y. Kondo and S. Nakamura, "Decision Analytic Extension of Waste Input-Output Model Based on Linear Programming," 2nd Meeting of the International Society for Industrial Ecology, Ann Arbor, Michigan, (2003-6)
- [17] H.-L. Pesonen, T. Ekvall, G. Fleischer, G. Huppes, C. Jahn, Z. S. Klos, G. Rebitzer, G. W. Sonnemann, A. Tintinelli, B. P. Weidema, H. Wenzel: "Framework for Scenario Development in LCA," *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 5, No. 1, pp. 21–30, (2000)
- [18] 食品産業センター：「平成13年度資源循環型食品産業モデル展開事業（神奈川県西部地区ゼロエミッション推進委員会）報告書」，(2002)
- [19] (財) 家電製品協会：「廃家電品一貫リサイクルシステム開発」，平成10年度成果報告書，(1999)
- [20] Yoshida T, Otsuka Y, Ueno K, Sunami A. "Life Cycle Assessment on Recycling of Electrical Home Appliances: Prediction and Results through Operation." Proceedings of the Fourth International Conference on EcoBalance, Tsukuba, Japan, pp. 551–554, (2000)
- [21] Sanou M, Fujita A, Kosan C, Yamada A, Fujisaki K. "Environmental Assessment for Treatment of Used Office Appliances." Proceedings of the Fourth International Conference on EcoBalance, Tsukuba, Japan, pp. 581–584, (2000)