

LCA手法を用いた排水処理の評価手法に関する研究

齋巻 峰夫¹・野池 達也²

¹正会員 工博 八千代エンジニアリング (〒153-8639 東京都目黒区中目黒 1-10-21)

²フェロー会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

本研究はインフラ施設の計画及び設計段階へのライフサイクルアセスメント(以下「LCA」という)の適用を考慮して、その一連の作業に必要なデータや手法の整備を行ったものである。まず、10種の環境負荷項目を選定し、ライフサイクルでの環境負荷の定量化(インベントリ一段階)に必要な原単位情報の整備を行った。次に、多数の環境カテゴリーを評価対象とする影響評価を行うために、環境負荷量について相違する環境カテゴリーを同一の次元で比較できる評価指標を導入した。この評価指標を利用可能とするためにケース・スタディとして実施した排水処理施設でのインベントリ分析結果を用いて、代表的排水処理方式での比較参考値となる値を提示するとともに、その適用事例によってその有用性を示した。

Key Words: life cycle assessment, wastewater treatment, energy resource depletion, CO₂ emission, air pollution, water pollution, solid wastes

1. はじめに

LCA手法は、工業製品の製造にともなう環境影響の検討手法として発展してきた経緯があるが、インフラ施設への適用についても、近年活発に研究が行われている¹⁾。ただし、手法的な面は現在でも技術開発が進められている状況であり、いくつかの解決されるべき課題がある。LCAの検討段階であるインベントリ分析及び影響評価についてインフラ施設へのLCA適用との関連で問題点を整理すると以下のようなことがいえる。

インベントリ分析段階においては検討対象物のライフサイクル各段階の詳細な物質収支解析が必要になるが、一般にこのような解析は各段階の当事者でなくては難しい作業である。特に、インフラ整備の計画や建設の当事者は、消費する資材や製品を購入して組立するという性格の作業を行っており、製造段階の情報を持つ立場ではないため、資材等のインベントリ分析は非常に煩雑で難しい作業とならざるを得ない。この問題に対しては産業連関表による分析を用いる方法が提案され、環境負荷原単位(以下「LCI用原単位」という(LCI: Life Cycle Inventory))を網羅的に整理した事例もあるが、対象の環境負荷項目は「エネルギー消費」、「CO₂排出」に限られている^{2), 3)}。現状では、他の環境負荷項目の原単位等についての情報が十分に整備されていない状況である。

影響評価の段階では、多数の環境カテゴリーを指標とした総合的な評価の手法が問題として挙げられる。これまでのインフラ施設へのLCAの適用事例では、1~2種程度の環境負荷項目のインベントリ分析にとどまる例が多く、この場合、影響評価の手法の議論に至って

ないのが実状である。先端的なLCA研究においても多数の環境負荷項目やカテゴリーを取り扱った場合に必要となる重みづけ係数や比較可能な指標値への変換手法等について研究が行われているが⁴⁾、汎用的手法について議論するためには、より多くの提案が必要といえる状況である。

これまで筆者らは、排水処理施設をケース・スタディとして、必要な原単位の整備⁵⁾とともに、複数の施設へのインベントリ分析と比較評価の適用を行った^{5), 6), 7), 8)}。また、排水処理施設などの環境保全施設の環境面での効率性を表現する方法の提案⁷⁾を行った。本論文は、これらの内容を体系的にまとめるとともに、環境面の効率性の評価について、既報⁷⁾での提案を発展的に検討した内容をまとめたものである。

研究の流れとしては、インフラ施設の計画や設計段階における比較検討へのLCA適用を想定して、これらの段階で得られる情報を用いてライフサイクルでの環境負荷量を定量化(インベントリ分析)するための原単位情報(LCI用原単位)を10種類の環境負荷項目について整備した。ついで、排水処理施設への適用を考慮した影響評価のための指標値を提案し、代表的排水処理方式のケース・スタディに適用し、その有用性を検証した。

2. 環境負荷量算定のための原単位(LCI用原単位)の整備

- (1) 対象とした環境カテゴリー及び環境負荷項目の種類
LCI用原単位の検討対象とした環境負荷(以下「環境負荷項目」という。)の種類を環境カテゴリー毎に以

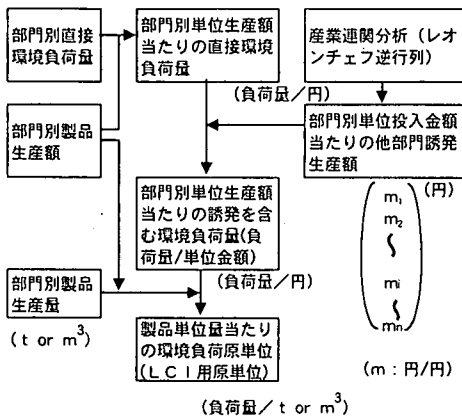


図-1 LCI用原単位の作成フロー

下にまとめる。併せて () 内に表示単位を示した。

- ・資源消費：エネルギー資源（発熱量 Mcal），水資源（水量 m^3 ）
- ・地球温暖化：CO₂（炭素換算量 t-C）
- ・酸性化：SO_x（二氧化硫換算量 kg-SO₂），NO_x（二氧化窒素換算量 kg-NO₂）
- ・富栄養化：COD（kg-COD），T-N（窒素量 kg-N），T-P（りん量 kg-P）
- ・大気圏への汚染物質の排出：SO_x，NO_x
- ・水圏への汚染物質の排出：BOD（kg-BOD），COD
- ・土壌圏への汚染物質の排出：埋立廃棄物（t）

(2) LCI用原単位の作成方法

現在、我が国で用いられているインベントリー手法としては、「産業連関法」と「積み上げ法」がある。本研究では、LCI用原単位の作成を「産業連関法」を用いて行った。その検討フローは図-1に示すとおりである。

産業連関表は「平成2年表」（基本表 527×411 部門）のうち「91部門表」⁹⁾と「建設部門分析用産業連関表（特別分類（一般部門表）」¹⁰⁾の2種類を使用した。

前者は標準的部門区分を順次統合して作成した表であり、後者は建設に関連する部門は統合をさけ、他の部門は大きく統合した62部門の表である。両表は利用目的に相違があり、本研究ではその特徴を生かして利用することとした。算定に使用した環境負荷量の基礎データは産業連関表に合わせて平成2年を基準とした。

産業連関分析に使用した逆行列は競争輸入型と呼ばれる $(I - (I - M) \cdot A)^{-1}$ 型を使用し、最終需要部門の取り込み（「資本形成」の考慮や「家計消費支出」の内生化等）の操作は行わない解析とした。

(3) 部門別直接環境負荷量の算定

部門別の直接環境負荷量の算定方法及び算定して得られた結果の妥当性については別報⁸⁾に詳述したが、その

概要は以下のとおりである。

a) エネルギー資源消費量

エネルギー資源消費は、産業連関表の付帯表中の物量表⁹⁾に記載されている部門別エネルギー種別消費量の数値を基本として、他の統計資料^{11), 12)}で補完した。エネルギー種別発熱量は統計資料¹¹⁾の採用値を使用した。

b) CO₂排出量

CO₂排出量の算定対象範囲はエネルギー消費に伴うものと、セメント焼成過程での石灰の反応に伴うものとした。エネルギー種別CO₂排出係数は既存検討事例¹³⁾での採用値を使用した。

c) SO_x, NO_x排出量

SO_x, NO_x排出量の算定対象範囲はエネルギー消費に伴うものとし、部門別エネルギー種別毎の排出係数は既存検討事例¹⁴⁾の数値を適用した。なお、部門別負荷量が把握されている場合には、当該部門の総量が検討事例¹⁵⁾と一致するよう補正を加えて使用した。

d) 水資源消費量

水資源消費量は製造業については工業統計¹⁶⁾を、その他については固定水道統計¹⁷⁾を用いて把握した。

e) BOD, COD, T-N, T-P排出量

水質汚濁物質に関わる環境負荷項目の負荷量は、排水が全て公共用水域への排出と仮定し、部門別の排水濃度を既存の調査事例¹⁸⁾を参考に設定し、水資源消費量に乗じて算定した。

f) 埋立廃棄物

埋立廃棄物は厚生省でまとめられた主要部門別廃棄物種類別データ¹⁹⁾と廃棄物種別埋立処分比率のデータ¹⁹⁾を基礎にして各部門への配分を行った。

g) 部門別環境負荷量の算定結果

以上の検討によって得られた部門別の環境負荷量を13部門に集約して表-1に示す。なお、表中の合計値が我が国における各環境負荷項目の全体負荷量である。

(4) LCI用原単位の算定

a) 資材、エネルギー等製造に関わるLCI用原単位

産業連関分析により作成した生産額当たりの原単位から製品・素材等の生産量当たりの原単位への変換は製品等の該部門の総負荷量を生産量で除して作成する下式(1)を使用した。

$$I_{PLC} = I_{ELC} \cdot M_p / V_p \quad (1)$$

I_{PLC} : 製品の生産量当たりのLCI用原単位（環境負荷量/単位製品重量または製品容量）

I_{ELC} : 製品の生産額当たりのLCI用原単位（環境負荷量/生産額）

M_p : 対象製品の生産額

V_p : 対象製品の生産重量または生産容量

なお、式(1)による計算では、同一部門に複数の製品が

表-1 部門別環境負荷総量の算定結果(13分類での表示)

平成2年での数値(埋立廃棄物のみ入手できた統計データの都合上平成4年度の数値)

	エネルギー資源 百万Mcal	CO ₂ 排出 千t-C	SO _x 排出 t-SO ₂	NO _x 排出 t-NO _x	水資源 消費 千m ³	BOD t-BOD	COD t-COD	T-N t-N	T-P t-P	埋立廃棄物 千t
農林水産業	76,254	5,855	72,672	66,679	45,070	1,298	1,393	1,803	264	791
鉱業	6,156	259	2,154	1,980	12,404	357	383	496	73	5,597
製造業	1,714,144	117,028	415,952	498,482	13,477,048	345,425	434,897	244,579	21,636	28,836
建設	70,038	3,881	26,733	58,278	318,369	9,169	9,838	12,735	1,862	39,307
電力・ガス・水道	1,192,146	96,532	235,566	253,439	82,657	2,381	2,554	3,306	484	14,032
商業	89,711	4,103	18,237	8,659	92,993	2,678	2,873	3,720	544	1,200
金融・保険	6,633	208	109	392	84,582	2,436	2,614	3,383	495	167
不動産	18,400	870	1,993	1,999	117,741	3,391	3,638	4,710	689	268
運輸	646,196	47,978	398,990	982,860	266,748	7,682	8,243	10,670	1,560	900
通信・放送	8,191	252	1,196	914	67,827	1,953	2,096	2,713	397	59
公務	30,546	1,453	7,493	3,649	31,311	902	968	1,252	183	280
サービス	261,709	12,530	39,458	29,978	2,085,148	60,052	64,431	83,406	12,198	1,374
分類不明	34,969	2,691	28,389	11,341	15,015	432	464	601	88	31
最終需要部門	597,202	34,609	6,004	252,759	9,553,381	275,137	295,199	382,135	55,887	13,442
合計	4,752,295	328,249	1,254,946	2,171,408	26,250,295	713,295	829,591	755,509	96,360	106,285

存在する場合、各製品の負荷量は製品の生産額に比例して部門内の負荷量を按分したものとなる。この方法の問題点は、同一部門内での再投入が大きくなる部門や著しく生産過程が相違する製品が同一部門に統合されている部門に適用したときに誤差が大きくなる点である。特に部門統合した産業連関表を用いた場合には、この点に留意する必要がある。本検討では、2.(2)で述べた2つの産業連関表を適宜使い分けることにより、前記の問題が生じないよう留意した。

b) 建設機械、輸送用車両等のLCI用原単位

建設機械、輸送用車両等のライフサイクルでの環境負荷量の算定は既往の研究事例²⁰⁾を参考として表-2に示した方法で算定を行った。

以上の2.(4)a), b)の方法で算定したLCI用原単位の例を表-3に示す。

表-2 建設関連機械のライフサイクルでの環境負荷量の算定方法

	参考文献での取扱い ²⁰⁾	本研究での取扱い	
生産段階	生産価格(乗用車105万円)を「自動車製造」部門の生産額当り原単位に乗じて算定している。	同左	
流通段階	流通に係わる経費を算定し「卸売」、「小売」部門の生産額当り原単位に乗じて算定している。	機械の生涯での輸送される距離を500kmとし、5km/l-軽油として燃料消費分を考慮した。	
修理	全修理費を80万円と査定し、「自動車修理部門」の生産額当り原単位に乗じて算定している。	参考文献での修理と生産価格の比(80:105)を採用して修理費を査定し、参考文献と同様に負荷を算定した。	
使用段階	燃料消費	走行距離を査定し、燃料による負荷を算定している。	本研究では使用される燃料を別途算定して利用することを想定しているため除外した。
道路	「道路関連公共事業」等による負荷を算定し、1台当たりで割り振っている。	建設機械は必ずしも道路走行するものでないため除外した。	
廃棄段階	シュレッダーによる解体分の負荷を算定している。	本研究で算定した廃棄物処理原単位を利用した(=廃棄物処理部門負荷量/全国廃棄物量)	

3. 影響評価手法の検討

(1) 影響評価指標の導入

影響評価を行う場合には、個別環境カテゴリーの評価と総合評価の2段階での検討が必要になる。

個別環境カテゴリーの評価に用いる評価指標としては、関連する環境負荷項目に対して当該環境カテゴリーへの影響度を評価した重みづけ係数を導入して代表的環境負荷項目の負荷量と等価の値として表示する方法が提案されている²¹⁾。

次に総合評価を行う場合には、環境カテゴリー毎に政策判断やアンケート等により重みづけ係数を決定して、共通指数への変換する方法が提案されている^{4), 21)}。

本研究では複数の環境負荷項目及び環境カテゴリーを用いて総合的な評価が可能となるために次の①及び②の指標を導入した。

- ①同一の環境カテゴリー内での環境負荷の表示を統一化するための指標
- ②発生する環境負荷の大きさを相違する環境カテゴ

リ間で客観的に比較するための指標

①の指標は、主にこれまでの知見の転用であり、内容を3.(2)で説明する。②の指標は、本研究での提案であり、内容を3.(3)で説明する。

(2) 同一の環境カテゴリー内での環境負荷の表示を統一化するための指標

同一の環境カテゴリー内においても複数の環境負荷項目が存在するため、各環境負荷項目について重みづけ係数を設定し、統一化した指数を作成する必要がある。この係数を用いて各環境カテゴリーの評価指標への変換は下記式(2)を用いる。

$$L_{cat_i} = \sum_j (C_{i,j} \cdot L_j) \quad (2)$$

ここで、 L_{cat_i} : i環境カテゴリーの環境負荷量

$C_{i,j}$: j環境負荷項目のi環境カテゴリー内での重みづけ係数

L_j : j環境負荷項目の環境負荷量

表-3 作成したLCI用原単位の例

主要建設資材

	生産量 単位	1材 - Mcal	水消費 ℓ	CO2 kg-C	SOx g-SO ₂	NOx g-NO ₂	埋立廃棄物 kg	COD g-COD	T-N g-N	T-P g-P	BOD g-BOD
セメント	t	803	997	199	91	583	1.2	12.3	27.1	0.8	12.6
砂利・砕石	t	22.03	24.70	1.60	7.18	17.34	3.39	0.74	0.67	0.08	0.64
生コンクリート	m ³	149	214	29	27	110	4.0	3.5	5.7	0.3	3.3
鋼材	t	4,708	12,467	426	879	1,464	63.0	143.0	141.2	14.5	246.0

エネルギー

電力	MWh	2,442	206	120	268	300	2.7	6.0	5.1	0.7	5.2
揮発油	kl	9,843	2,348	747	* 222	* 341	8.6	23.3	22.4	1.7	21.3
軽油	kl	10,021	1,336	780	* 127	* 194	4.9	13.3	12.8	1.0	12.1

* : 誘発のみの数値。最終需要段階での直接排出量を加算する必要がある。

薬品等 単位：表記単位/t-資材

硫酸		476	1,755	28	170	131	2	140	123	5	92
苛性ソーダ		2,348	8,669	137	837	649	10	690	606	26	454
塩化第二鉄		2,329	8,597	136	830	644	10	685	601	26	450
次亜塩素酸ソーダ		899	3,318	52	320	248	4	264	232	10	174
凝集助剤		27,102	73,979	803	3,216	4,863	41	2,929	2,552	110	1,925
水		3.11	1,003	0.20	0.81	0.55	0.56	0.11	0.09	0.01	0.09
活性炭(粉状)		15,495	57,199	904	5,525	4,282	67	4,555	3,996	171	2,993

建設機械等 単位：表記単位/台 (下記の数値には燃料消費による負荷量は含まれていない。)

機械種類	機械仕様	1材 - Mcal	水消費 ℓ	CO2 kg-C	SOx g-SO ₂	NOx g-NO ₂	埋立廃棄物 kg	COD g-COD	T-N g-N	T-P g-P	BOD g-BOD
ダンプトラック	10t	143,902	567,335	9,319	33,534	49,074	2,407	14,230	10,215	1,283	12,003
ライトバン	1500cc	15,383	57,217	1,007	3,956	6,530	233	1,433	1,029	129	1,209
バックホ	0.6m3	232,458	914,905	15,087	54,488	80,043	4,119	22,948	16,475	2,069	19,356
ブルドーザ	15t	228,253	902,164	14,766	52,899	76,931	3,762	22,629	16,243	2,040	19,087

i : 環境カテゴリーの区分を表す添字

j : i 環境カテゴリー内の環境負荷項目の区分を表す添字

以下に環境カテゴリー内での環境負荷項目別の重みづけ係数の設定について述べる。

a) 資源消費

資源消費の環境負荷項目としては、「エネルギー資源」、「水資源」を対象としている。

既存の研究では資源消費について同一のカテゴリーとして統一的に評価しようとする事例⁴⁾もあるが、本研究では個々に独立したカテゴリーとして取り扱うこととする。

b) 生態影響

生態影響に関する環境カテゴリーとしては下記の項目を対象としている。

- ① 地球温暖化 (CO₂)
- ② 酸性化 (SO_x, NO_x)
- ③ 富栄養化 (COD, T-N, T-P)

① 地球温暖化

地球温暖化に寄与する物質の影響度を表現する指標としては地球温暖化係数 (GWP)²²⁾ が用いられており、この係数が重みづけ係数として利用できる。

ただし、本研究での地球温暖化に対応する環境負荷項目は「CO₂排出」のみであるため、ここでは重みづけ係数の導入の必要がない。

② 酸性化

酸性化に関する指標は、質量当たりの水素イオン反応

可能量を SO₂ を 1 とした比で表示する酸性化指数 (AP)²¹⁾ を採用し、表示単位は「t-SO₂」とする。

なお、本研究では環境負荷量を SO_x, NO_x (ただし SO₂, NO₂ としての換算量で表示としている。) として算定しており、その分子形態を区分していないが SO₂, NO₂ の指数を採用した。

③ 富栄養化

富栄養化に関する指標はバイオマスの平均組成 (C₁₀₆H₂₆₃O₁₁₀N₁₆P) 中での各物質の質量構成比の逆数を富栄養化への寄与とし、PO₄³⁻ を 1 とした比で表示する富栄養化指標 (NP)²¹⁾ を採用し、表示単位は「kg-PO₄」とする。

c) 汚染物質の環境中への排出

汚染物質の環境中への排出に関する環境カテゴリーとしては下記の項目を対象としている。

- ① 大気圏への汚染物の排出 (SO_x, NO_x)
- ② 水圏への汚染物の排出 (BOD, COD)
- ③ 土壌圏への汚染物の排出 (埋立廃棄物)

このうち「土壌圏への汚染物の排出」に関しては環境負荷項目が 1 項目のため指標導入の必要がない。ただし、単位は他の環境カテゴリーの負荷量と区分するために「t-DPW」(DPW: Disposal Wastes) として表記する。

① 大気圏への汚染物の排出

大気圏への汚染物の排出に関する指標としては大気汚染に関する環境基準値をもとに提案された数値²³⁾ を採用し、表示単位は「t-SO₂」とする。

表-4 対象とする環境カテゴリーの我が国における負荷総量

	資源消費		生態影響		
	エネルギー 百万Mcal	水消費 千m ³	地球温暖化 千t-C	酸性化 t-SO ₂	富栄養化 t-PO ₄
日本全国での環境負荷量	4,752,295	26,250,295	328,249	2,774,932	630,426

	汚染物質の環境への排出		
	大気圏 t-SO ₂	水圏 t-OD	土壌圏 千t-DPW
日本全国での環境負荷量	4,273,203	829,591	106,285

② 水圏への汚染物の排出

水圏への汚染物の排出に関する対象負荷項目であるBODとCODによって表される汚染物質は、大部分が重複している可能性が高く、等価とみなすことができると考えられる。したがって、2種類の負荷量のうち大きい方を評価指標として採用するものとし、表示単位としては「kg-OD」とする。

(3) 発生する環境負荷の大きさを相違する環境カテゴリー間で客観的に比較するための指標

1種類の環境カテゴリーのみで評価を行う場合、単純比較という手法が可能であるが、多数の環境カテゴリーを総合的に評価しようとするれば、各環境カテゴリーの負荷量を適当な指標に変換して、同一の次元で負荷量を表示することが必要となる。

この観点から、次の2つの指標を提案する。

①環境負荷寄与指数

環境カテゴリー毎の環境負荷量を検討対象となる全体システムの総負荷量との比で表す。

②環境間依存指数

排水処理施設のような環境インフラを評価するための指数。排水処理の場合、処理した水質汚濁負荷量の環境負荷寄与指数と、そのために発生した環境負荷の環境負荷寄与指数の比で表す。

以下に2つの指標値の算定方法を述べる。

a) 環境負荷寄与指数

(Environmental Load Index in the Proportion to the Total Domestic Load : LIP)

環境負荷寄与指数 (以下、「LIP」で表記する。) は、検討対象施設の環境負荷量の全体システムでの総量に対する比を取ったものであり、考え方としては単純であるが、全体システムの定義が問題となる。

本研究の場合、LCI用原単位作成で採用した産業連関分析の検討範囲が日本国内であるため、全体システムとは日本国内と定義することで一連の解析が整合のとれたものとなる。その全体量は産業各部門や民間消費などの総和として算定されている。LIPは下記式(3)により算定する。

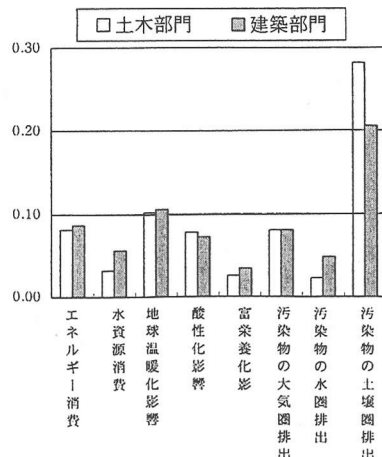


図-2 土木・建築部門の全体環境負荷量のLIPでの表示

$$LIP_i = Lcat_i / TLcat_i \quad (3)$$

ここで、Lcat_i : i環境カテゴリーの統一化した環境負荷量

TLcat_i : i環境カテゴリーの統一化した環境負荷の我が国での全体量

i : 環境カテゴリーの区分を表す添字

なお、日本全国での環境カテゴリー毎の環境負荷量 (TLcat_i) は、3.(2)で述べた環境カテゴリー内の重みづけ係数と表-1の数値から表-4のように算定される。

LIPを用いて相違する環境カテゴリーの環境負荷の状況を比較すれば、どの環境カテゴリーが問題であるかが定性的に理解できる。このため、環境カテゴリー間の重みづけを行ったことと近似的になり、総合評価に近い形の評価が可能になると考えられる。ただし、この指標では現状での各環境カテゴリーの問題状況 (深刻さ) や許容される環境負荷量といった視点が欠けており、今後の課題として検討が必要になる。

LIPでの表示例として建設関連の土木及び建築部門の数値を図-2に示す。

両部門のLIPは数値はいずれも「汚染物の土壌圏排出」が突出しており、評価の重みづけとしては、「汚染物の土壌圏排出」を重点化する必要がある。また、環境対策を立案する場合には、その環境負荷項目である埋立廃棄物の問題にどれだけ効果があるかを優先的に検討することが、有効であると考えられる。

b) 環境間依存指数

(Environmental Load Index Dependent on other Environmental Loads : LID)

環境インフラと呼ばれる施設では環境負荷量を削減す

表-5 検討対象浸出水処理施設の計画水質

項目	単位	計画流入水質		計画処理水質
		稼働当初	最終年次	
BOD	mg/ℓ	100	100	20
COD	mg/ℓ	500	300	30
SS	mg/ℓ	100	100	10
T-N	mg/ℓ	500	300	60

る機能を有しているため、環境保全対策の効率性の評価として、環境負荷を削減するために他の環境カテゴリーに対してどれだけ環境負荷を与えたかという指標の導入が可能となる。例えば、排水処理施設の場合、水質汚濁負荷（「水圏への汚染物の排出」または「富栄養化影響」）の削減に対する効率性ということになる。この指標を環境間依存指数（以下、「LID（負荷排出環境カテゴリー／負荷削減環境カテゴリー）」と表記する。）と呼ぶこととする。LIDの算出式は式(4)のとおりである。

$$LID_{(i/j)} = LIP_i / LIP_j \quad (4)$$

ここで、

LIP_i：処理によって増加するi環境カテゴリーの負荷量の環境負荷寄与指数。

LIP_j：処理によって削減されるj環境カテゴリーの削減量の環境負荷寄与指数。

i：環境カテゴリーを表す添字。処理によって環境負荷が増加する環境カテゴリーを表す。

j：環境カテゴリーを表す添字。処理によって環境負荷を削減する環境カテゴリーを表す。

LIPは環境カテゴリー間の相対比のみが意味を持つが、LIDは絶対値についても意味を持つ数値となる。すなわち、LID>1ということは処理対象の環境カテゴリーの環境負荷を軽減するために他の環境カテゴリーの環境負荷量を、削減量以上に排出していると解釈でき、全体の環境負荷としては増加傾向と考えられることもできる。

環境インフラと呼ばれる施設へLIDを用いた評価を適用しようとするれば、その比較の参考となる数値が予め提示されていることが望ましい。そこで、排水処理施設における比較参考値となる数値を、以下の検討において提示するものとする。

4. 影響評価のケース・スタディ

(1) ケース・スタディ対象施設の内容

ここではLIDを用いたLCAでの検討の内容を提示するために、次の2種類の施設のケース・スタディを紹介する。

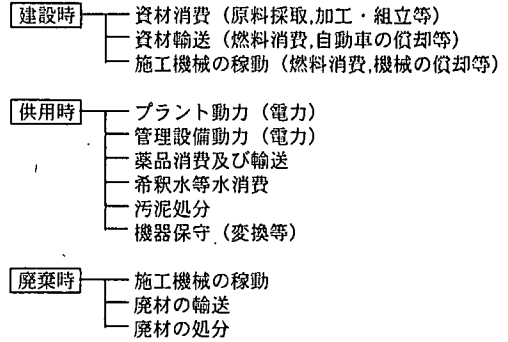


図-3 環境負荷量の算定対象範囲

a) 下水道終末処理施設

下水道終末処理施設としては水処理施設と集約汚泥処理施設の2施設について行った。

① 水処理施設

・計画処理量：86,400 m³/日

・処理方式

沈砂池～場内ポンプ～最初沈殿池～エアレーションタンク～最終沈殿池～消毒設備

・供用期間 50年

② 集約汚泥処理施設

・計画汚泥処理量：44,137 m³/日（1%汚泥換算）

・処理方式

機械濃縮～嫌気性消化～脱水～乾燥～焼却（流動床炉）→埋立処分

・供用期間 30年

b) 最終処分場浸出水処理施設

最終処分場浸出水の性状は埋立てたごみの種類及び埋立方法により大きく変化するが、検討対象施設での浸出水は、有機性ごみを嫌気性埋立てした場合の典型的な例である次の性質を持っている。

- 1)フミン質を中心とする生物難分解性COD濃度が高い。
- 2)アンモニア性窒素濃度が高い。

ケース・スタディ施設の計画諸元を以下に示す。

・計画処理量：6,400 m³/日

・計画水質：表-5に示す。

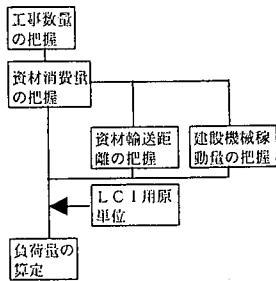
・処理方式

水処理 生物学的硝化脱窒処理～凝集沈殿処理～フェノール酸化処理～砂ろ過～活性炭吸着処理
汚泥処理 重力濃縮～脱水→埋立処分

・供用期間 15年

(2) 環境負荷量の算定方法(インベントリー分析の方法)

算定対象とした環境負荷発生要因の内容は図-3に示すとおりである。



注) 廃棄時の場合、「資材」は「廃棄物」となる。
 図-4 環境負荷量の算定フロー (建設, 廃棄時)

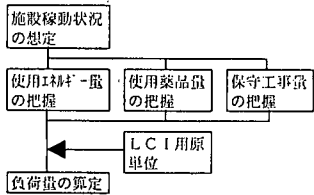


図-5 環境負荷量の算定フロー (供用時)

表-6 下水道終末処理施設のライフサイクルでの環境負荷量

(単位: 表示単位/処理量 m^3)

	資源消費		生態影響		
	エネルギー Mcal	水消費 l	地球温暖化 kg-C	酸性化 g-SO ₂	富栄養化 g-PO ₄
水処理	1.47	0.64	0.082	0.39	0.009
汚泥処理	0.49	0.26	0.028	0.23	0.010
全体	1.96	0.90	0.109	0.62	0.019

	汚染物質の環境への排出		
	大気圏 g-SO ₂	水圏 g-OD	土壌圏 kg-DPW
水処理	0.58	0.013	0.023
汚泥処理	0.38	0.006	0.066
全体	0.97	0.019	0.089

消費される資材やエネルギーの情報は、各種比較検討が行われる比較的計画熟度の浅い段階で収集可能な計画情報を使用した。この情報に基づく資材やエネルギー消費量とLCI用原単位(表-3)を用いて図-4, 5に示すフローにしたがってインベントリー分析を行った。この詳細については別報^{7), 24)}に記載した。

(3) 環境負荷量の算定結果

下水道終末処理施設の全ライフサイクルでの環境負荷量の処理量当たりの算定結果を表-6に示す。

また、最終処分場浸出水処理施設での処理量当たりの算定結果を表-7に示す。

これらの数値は各処理方式のライフサイクルでの環境負荷量の原単位的数値として表示したものである。

(4) 環境間依存指数(LID)の比較参考値の提案

LCAにおける最も単純な評価方法は、比較対象となる事例を設定し、それぞれのインベントリー結果を相对比较して、改善または妥当性を評価する方法である。

表-7 最終処分場浸出水処理施設でのライフサイクルでの環境負荷量(有機性ごみの嫌気性処分場の例)

(単位: 表示単位/t-除去COD)

	資源消費		生態影響		
	エネルギー 10 ³ Mcal	水消費 m^3	地球温暖化 t-C	酸性化 kg-SO ₂	富栄養化 kg-PO ₄
生物処理	292	283	15.50	78.4	6.81
凝集沈殿	44	127	2.96	20.4	2.08
フェント酸化	472	1.850	30.28	252.4	44.10
砂ろ過・活性炭吸着	414	1.079	24.17	186.5	40.98
全体	206	522	12.23	86.7	14.04

	汚染物質の環境への排出		
	大気圏 kg-SO ₂	水圏 kg-OD	土壌圏 t-DPW
生物処理	113.5	13.04	31.0
凝集沈殿	29.7	3.97	51.6
フェント酸化	360.3	85.58	246.2
砂ろ過・活性炭吸着	258.8	79.96	1.3
全体	123.4	27.23	66.6

(単位: 表示単位/t-除去N)

	資源消費		生態影響		
	エネルギー 10 ³ Mcal	水消費 m^3	地球温暖化 t-C	酸性化 kg-SO ₂	富栄養化 kg-PO ₄
生物処理	68.65	66.54	3.65	18.45	1.60

	汚染物質の環境への排出		
	大気圏 kg-SO ₂	水圏 kg-OD	土壌圏 t-DPW
生物処理	26.71	3.07	7.30

表-8 排水処理での環境間依存指数(LID(水圏排出))の比較参考値の提案値

処理方式	資源消費		生態影響		
	エネルギー t	水消費 l	地球温暖化 t-C	酸性化 kg-SO ₂	富栄養化 kg-PO ₄
標準活性汚泥法	0.0020	0.0002	0.0016	0.0011	0.0001
凝集沈殿法	0.0077	0.0040	0.0075	0.0061	0.0027
活性炭吸着法	0.0679	0.0324	0.0562	0.0524	0.0526

処理方式	汚染物質の環境への排出		
	大気圏	水圏	土壌圏
標準活性汚泥法	0.0012	0.0001	0.0043
凝集沈殿法	0.0058	0.0040	0.4024
活性炭吸着法	0.0468	0.0784	0.0100

LIDを用いた場合も同様で、対象施設に対して事前に比較対象となるLIDの参考値が提示されていれば作業は容易となる。

表-8はケース・スタディの結果を用いて、処理対象排水の性質が明確に相違し、かつ、汎用的に利用されている3処理方式のLIDを算定し、比較参考値として提案したものである。

このLIDは排水処理の効率性を検討するため、負荷削減効果を期待する環境カテゴリーとして「汚染物の水圏への排出」を選択している(以下、このLIDをLID(水圏排出)と記載する。)

例示した3処理方式のLIDは、適用される排水の処理の難易のために明確な差があるため、値に差が生じている。したがって、それぞれの比較参考値は、その算定条件と類似の条件における処理方式の検討に適用する必要がある。提案値は以下の様なケースに対し適用可能と考えている。

a) 標準活性汚泥法のLID

標準活性汚泥法は、下水道終末処理施設などのBOD

及び有機性のSSを主要な処理対象とした場合の標準的二次処理方式である。このLIDの値は、二次処理の代替方式や比較的処理しやすい物質の処理方式の比較参考値となる。

b) 凝集沈殿法のLID

凝集沈殿法は、CODやSSを処理対象とした高度処理として、その第1段目に採用されることが多い。このため、このLIDの値は、高度処理の第1段目の処理法、または、処理難度がやや高い汚水を対象とした処理方式の比較参考値となる。

c) 活性炭吸着法のLID

活性炭吸着処理は、COD、SSや色度などの仕上げ処理として、高度処理の最終段階に適用されている。このため、このLIDの値は、最も処理が困難な排水の処理方式の比較参考値となる。

ただし、このような値については、今後も研究を継続し、より精度の高い値へ随時補正する必要がある。本報で提示した値は、その過程における第一段階の提案と位置づけることができる。

(5) 環境間依存指数 (LID) を用いた改善技術の評価の例示

LIDを用いた影響評価の事例として次の2例を紹介し、LID及び前述した比較参考値の適用の有用性を示す。

- ・フェントン酸化処理方式の評価
- ・汚泥処理方式の改善技術の評価

a) フェントン酸化処理方式の評価

COD高度処理方式としてケース・スタディ施設の最終処分場浸出水処理施設ではフェントン酸化処理方式を適用している。この方式は難分解有機物を過酸化水素から生成されるOH⁻ラジカルの酸化力を利用して分解する方式である。

ここでは、フェントン酸化処理を凝集沈殿法及び活性炭吸着法と比較し、その代替利用の可能性について評価した事例を示す。

フェントン酸化処理の適用方法としては次の方法を考えている。

- ・一段目：高度処理の第一段目に利用する凝集沈殿法の代替利用。
- ・二段目：高度処理の第二段目以降に利用する活性炭吸着法の代替利用。

したがって、一段目の利用では、凝集沈殿法より、第二段目の利用では活性炭吸着法よりLIDが低いことが望まれることになる。

比較検討の処理方式はCODを対象とした高度処理のため、環境改善としては「汚染物の水圏への排出」を採用し、表示はLID（/水圏排出）とした。

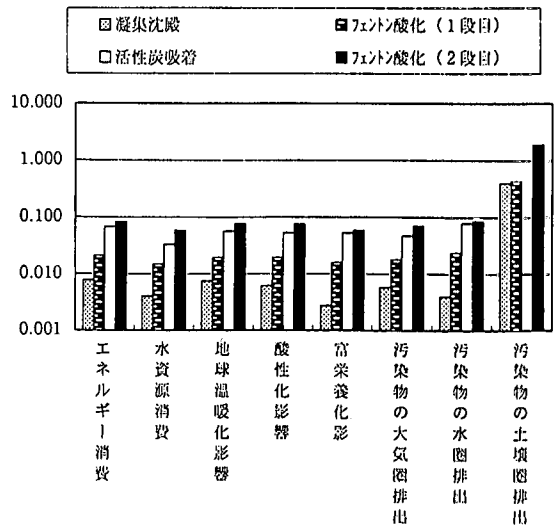


図-6 フェントン酸化処理のLID（/水圏排出）によるLCA評価の試行結果

比較結果を図-6に示す。なお、図の数値表示は環境カテゴリー毎に値の相違が大きいため対数表示とした。

フェントン酸化処理の一段目利用では、「汚染物の土壌圏排出」を除く全環境カテゴリーで、LIDが凝集沈殿法を大きく上回っており、一段目の利用では課題が多いことが伺われる。二段目利用では、「汚染物の土壌圏排出」以外の環境カテゴリーで活性炭吸着法と同程度またはやや大きい程度になっており、一般的な適用に向けた改善策の検討が実現性の高い課題であると考えられる。

また、改善策を検討する場合、重点化して評価すべき環境カテゴリーとして二段目利用でLID>1となっている「汚染物の土壌圏への排出」が挙げられる。

フェントン酸化処理では、触媒として硫酸第一鉄が大量に利用されており、その汚泥が埋立廃棄物発生の大きな要因となっている。元来、硫酸第一鉄は製鉄過程の廃材の利用が可能といった長所があるが、対策として発生汚泥を触媒として再生利用する方法も開発されている。一方、OH⁻ラジカルの酸化反応を触媒を利用せず、UVやO₃と併用することで汚泥を抑制できる酸化促進処理技術（AOP法：Advanced Oxidation Process）は一種の技術改良であり、期待される技術動向が生まれている。

LIDの比較参考値は、それらの技術開発に際し、改善目標値として利用することができる。

b) 汚泥処理方式の改善技術の評価

ケース・スタディ対象の下水道終末処理施設の汚泥処理の特徴として嫌気性消化処理と汚泥焼却廃熱を利用した汚泥乾燥処理の適用が挙げられる。また、エネルギー

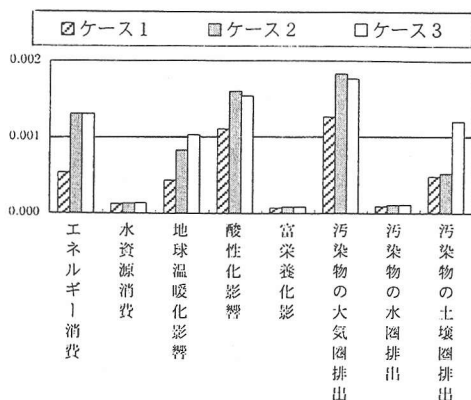


図-7 汚泥処理フローの LID (／土壌圏排出) による LCA 評価の試行結果

回収方法として消化ガスを利用したガスタービン発電が行われている。これらの技術の適用による環境負荷削減効果の評価を次の3ケースのLIDを比較することにより行った。

ケース1) 消化ガス、焼却熱利用ケース

濃縮～嫌気性消化～脱水～乾燥～焼却

エネルギー利用：

消化槽加温 (発電廃熱)，ガスタービン発電 (消化ガス)，汚泥乾燥 (焼却廃熱)

ケース2) 消化ガス利用ケース

濃縮～嫌気性消化～脱水～焼却

エネルギー利用：

消化槽加温 (発電廃熱)，ガスタービン発電 (消化ガス)

ケース3) 汚泥焼却廃熱利用ケース

濃縮～脱水～乾燥～焼却

エネルギー利用：汚泥乾燥 (焼却廃熱)

ケース1～3のフローにおいて、ケース1は消化ガス及び汚泥焼却廃熱の双方を有効利用するケースであり、ケース2は消化ガスのみ、ケース3は汚泥焼却廃熱のみ有効利用するケースである。

この汚泥処理に関する評価においてLIDは汚泥減量化に関する効率を検討するため、「汚染物の土壌圏への排出」に関する検討とした (以下、このLIDをLID (／土壌圏排出) と記載する。)

比較ケースでのLID (／土壌圏排出) を示したものが図-7である。

これまでの検討^{6), 24)}では、汚泥処理施設のライフサイクルでの環境負荷量のうち、供用時の負荷が全体の80～90%と計算されている。したがって、エネルギー回収では設備建設時の環境負荷増加より、供用時の環境負荷削減が全ライフサイクルでの環境負荷を削減するために効果があることが予想される。この検討でも、供用

時の環境負荷の削減効果が最大となるケース1のLIDが最小で環境保全上、最も効率的という評価結果となった。特に、「エネルギー消費」、「地球温暖化」、「酸性化」、「汚染物の大気圏排出」のエネルギー利用に関連するカテゴリで優位性が大きい結果となった。一方、ケース2、3の比較では、「汚染物の土壌圏への排出」でケース2が優れているが、他の環境カテゴリはほぼ同等で、消化ガス発電と廃熱利用汚泥乾燥がほぼ同程度の環境保全効果という評価となった。

既存の汚泥処理施設では、消化ガス発電や廃熱利用汚泥乾燥等を複合的に適用した事例は少なく、この検討結果は、汚泥処理分野の環境負荷面での改善の方向性を示唆しているといえる。

また、「エネルギー消費」、「地球温暖化」、「酸性化」、「汚染物の大気圏排出」の4項目のLIDを図-7の値と比較すると、明らかに「酸性化」、「汚染物の大気圏排出」の2項目が大きくなっている。この大きな要因として、焼却過程における大気中の窒素の反応によるNOx発生 (サーマルNOx) が考えられる。汚泥焼却のほかにメタンガスを燃焼させるガスタービン発電を適用しているケース1、2に上記の傾向が顕著であることもサーマルNOxの寄与を裏づけていると考えられる。この結果は、焼却をとみなわない処理 (汚泥ではコンポスト化、発電では燃料電池適用など) が環境負荷削減で有効である可能性を示唆しているといえる。

このようにLIDは、今後の技術の適用や開発の方向性を検討するための指標としても有効である。

5. まとめ

本研究はインフラ施設全般の評価へのLCAの導入を考慮しつつ、特に排水処理施設または排水処理技術の評価への適用を検討したものである。本研究での成果として以下の事項がまとめられる。

- (1) ケース・スタディの実施によって、インフラ施設のLCA手法適用の流れを示すことができた。
- (2) インフラ施設のインベントリー分析に用いる環境負荷量原単位 (LCI用原単位) を網羅的に整備することができた。
- (3) 相違する環境カテゴリの環境負荷量の大きさを客観的に比較することのできる指数として環境負荷寄与指数 (LIP) を提案した。
- (4) 排水処理の環境面での効率性を評価する指数として環境間依存指数 (LID) を提案した。また、主要な排水処理方式でのLIDを示し、比較参考値として例示することができた。

(5) 環境間依存指数 (L I D) を適用した場合の検討方法を例示し、その有用性を示すことができた。

参考文献

1) 例えば次の2例がある。

- ・土木学会地球環境委員会環境負荷評価 (LCA) 研究小委員会：土木建設業における環境負荷評価 (LCA) 研究小委員会、講演要旨集、1997年8月。
 - ・井村秀文、銭谷賢治、楠田哲也、森下兼年、池田秀昭：下水道システムのライフサイクルアセスメントに関する研究—LCE を指標としたケーススタディ—環境システム研究、Vol.23、1995年。
- 2) ㈱空調和・衛生工学会：シンポジウム地球環境時代の建築設備の課題、1995年7月。
 - 3) 環境庁国立環境研究所：産業連関表による二酸化炭素排出原単位、1997年2月。
 - 4) 永田勝也：LCA における環境指標総合化の試み 第9回環境システムシンポジウム、土木学会、環境システム委員会、1996年。
 - 5) 鶴巻峰夫、野池達也：LCA における多項目環境負荷の定量化に関する研究、環境システム研究、vol.25、1997年10月。
 - 6) 鶴巻峰夫、野池達也：排水処理施設のライフサイクル分析による環境負荷の定量化について、第51回土木学会年次学術講演会講演概要集 第7部門、1996年9月。
 - 7) 鶴巻峰夫、野池達也：ライフサイクルアセスメントを適用した排水処理の評価に関する研究、環境システム研究、vol.24、1996年10月。
 - 8) 鶴巻峰夫、野池達也：LCA を用いた排水処理過程の評価—嫌気性消化汚泥処理—、第52回土木学会年次学術講演会講演概要集 第7部門、1997年9月。
 - 9) 総務庁：平成2年 (1990年) 産業連関表、1994年3月。
 - 10) (財) 建設物価調査会：平成2年 (1990年) 建設部門分

析用産業連関表、1995年1月。

- 11) 資源エネルギー庁：1991年度総合エネルギー統計、1991。
- 12) 通商産業省：1990年度、石油等消費構造統計表 (商工業編)
- 13) 環境庁地球環境部編：地球温暖化防止対策ハンドブック5、1992。
- 14) 科学技術庁：アジアのエネルギー利用と環境、1992。
- 15) 日本国政府：「気候変動に関する国際連合枠組み条約」に基づく日本国報告書、1994。
- 16) 通商産業省：1990年、工業統計表、用地・用水編。
- 17) (社) 日本水道協会：1990年度、水道統計、1992年7月。
- 18) 環境庁：環境影響評価における原単位の整備に関する調査報告書、pp.2-83、1992年3月。
- 19) 厚生省：産業廃棄物業種別廃棄物種別発生量 (1992年度) 実績。
- 20) 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、エネルギー経済第19巻、第4号 (1993年4月)。
- 21) CML (1992) : Environmental Life cycle Assessment of Products (邦訳：戦略LCA研究フォーラム LCA製品の環境ライフサイクルアセスメント、サイエンスフォーラム 1994年2月)
- 22) 霞ヶ関地球温暖化問題研究会編訳：IPCC地球温暖化レポート、中央法規、1991年3月。
- 23) 日本エコライフセンター：環境への負荷の評価に関する予備的検討、1993年3月。
- 24) 鶴巻峰夫、藤岡荘介、内藤弘：下水道終末処理施設のライフサイクルでの環境負荷について、第4回地球環境シンポジウム講演集、1996年7月。

(1998. 10. 6 受付)

STUDY ON THE LCA EVALUATION OF WASTEWATER TREATMENT

Mineo TSURUMAKI and Tatsuya NOIKE

For the purpose of applying Life Cycle Assessment (LCA) methods to the planning and design of infrastructure, relevant data was collected and analyzed and a method developed for environmental impact assessment. Firstly, information on ten varieties of environmental loads used in the construction and maintenance of infrastructure was compiled using the input - output method to produce a life cycle inventory. Secondly, a method for environmental impact assessment of wastewater treatment facilities was developed by normalizing environmental loads to provide a common scale, thus making possible the comparison of environmental severity in different environmental impact categories. A case study of wastewater treatment facilities, including inventory analysis, was undertaken. From this study, an environmental impact assessment for a typical wastewater treatment facility was carried out and comparable values to be used in the planning and design of such a facility were proposed. Examples of the application of the developed method are also presented.