

下水道における ライフサイクルアセスメント手法 に関する研究

1. はじめに

ライフサイクルアセスメント（以下「LCA」と称す）は、製品の製造・流通・消費・廃棄の全サイクルにわたって発生する環境負荷を評価しようとするものである。特に家電、自動車、材料等の産業界において、個々の製品の製造による環境負荷を評価するものとして開発されたLCA、いわゆる「製品LCA (PLCA)」と呼ばれるものが進められてきた。近年では、このPLCAの概念が社会資本整備のためのさまざまな事業にも拡大され、各種構造物・施設を対象としたLCAに関する研究が、活発に進められている。

土木学会ではインフラを対象としたLCAの検討が行われ、原単位や主要な構造物についての共通手法などが提案されている。

2. 研究の目的

本研究では、インベントリ分析（以下「LCI分析」と称す）を主とするケーススタディを行い、下水道施設においてLCAを実施するための基本事項と、その考え方を整理することを目的とする。

図-1に本研究における調査フローを示す。

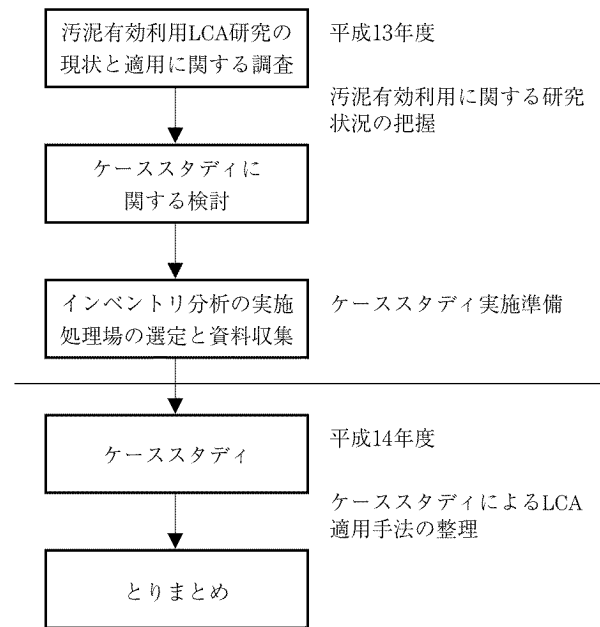


図-1 調査フロー

3. 研究結果

3.1 既往研究内容の整理

土木業界においてもLCAの研究は進められており、土木学会の解析結果では、土木構造物の建設に伴って発生する環境負荷（CO₂）は、日本国内の全産業における環境負荷の10%程度と報告されている。

その内訳を見ると、道路が最大（25.7%）で農業（10.1%）や下水（9.8%）がこれに続いている。

インフラ施設は、建設後の施設の供用期間が長いため、その間の環境負荷排出を評価する必要がある。特に下水処理場のように供用期間中のエネルギー消費量が大きいものは、供用時の環境負荷排出量の比率がライフサイクル全体（建設～廃棄）の排出量に対して大きくなることが考えられる。

靄巻、藤岡、内藤らによると、下水処理場における供用時のライフサイクルCO₂（以下「LCCO₂」と称す）は、下水処理場のライフサイクル全体（建設～廃棄）の約85%、また、ライフサイクルエネルギー（以下LCEという）が約90%を占めている。このように、下水処理場の供用時における環境負荷の比率はライフサイクル全体に対して大きくなるため、これを把握することが重要となる。

3.2 条件の設定

本研究では、下水処理場におけるLCAの一部として、汚泥の有効利用に着目し、コンポスト化施設および汚泥溶融施設を対象とした環境負荷を求めた。境界条件（範囲）を以下に示す。

① 施設の建設

対象とする施設は、土木、建築、機械、電気の各施設とする。

② 運転管理に要するエネルギーおよびその他のユーティリティ消費

施設の運転時における電気、燃料等のエネルギー消費量と各種薬品類の消費量を対象とする。コンポスト化施設の場合は、使用するモミガラやオガクズ等の副資材も対象とする。

③ 機械・電気設備の耐用年数経過後の解体と廃棄 機械・電気設備の耐用年数後の廃棄について、鉄、アルミ等一部の資材はリサイクルを考慮する。

④ 各資・機材の運搬

建設および廃棄時の各資・機材の運搬は、運搬距離を設定して計上する。

3.3 ケーススタディの対象処理場

LCAの基本的な作業の流れは、着手→インベントリ（以下「LCI」と称す）の作成→LCI分析→影響評価→改善評価である。影響評価の手法については、現在では産業環境管理協会等で検討が進められているため、本研究においてはLCI分析までの検討とした。ケーススタディの対象処理場は以下の条件を基に選定した。

① 一般的な処理方式であること。

② 施設能力相当の処理がなされていること。

③ 施設の運転が安定して行われていること。

④ 運転状況、施設諸元等の資料の入手が容易であること。

①はLCI分析の結果がコンポスト化施設および汚泥溶融施設の代表値として位置付けられることが重要であるから、一般的な処理方式である方が他との比較を行う上でも有利である。

②は1日当たりの処理量/処理能力を処理量比率として表し、この値が「1」に近い施設を対象とする。処理量比率が小さい場合は、処理能力の余裕分が過大に評価されることが考えられる。

③は①と同様に、LCI分析結果の代表値として位置付けるため、特殊な運転方法ではなく、標準的で安定した運転を行っている施設が望ましい。

④は実際の施設を対象にケーススタディを実施するため、運転状況を記録した維持管理記録に加え、施設諸元を把握するための設計図書等の入手が可能であることが必須である。

最初に、平成11年度版下水道統計を整理した結果、コンポスト化施設においては処理量比率が0.7以上である施設は13処理場のみで、処理能力相当の処理を実施している施設は少なかった。

処理方式は、横型が約半数を占め、立型と堆積型が残りを2分していた。堆積型は、古くから実施されている発酵方式であることと、施設のイニシャルコストの面で有利な点が採用の多い理由と考えられる。

堆積型は、施設が単純であること、運転面では送風機と切返し作業のためのショベルローダーの運転程度であるので、評価項目は他の方式に比べて少ないといえる。そのため、LCAを行わずとも環境負荷の排出量の把握については、ある程度の予測を立てることが可能と考えられる。

以上の結果から、本研究ではコンポスト化施設の代表的なものとして、機械式の横型と立型の施設をLCIの対象とした。

溶融施設においては、11処理場が稼働し、そのうち7処理場で旋回溶融炉方式を採用していたことから、採用例の多い旋回溶融炉を対象とした。ただし、現有施設では処理能力に対する投入汚泥量あまり高くなく、処理量比率で0.5程度以上を対象とした。

さらにヒアリングを行い、現在の運転状況および資料の有無を確認した上でケーススタディの対象処理場を決定した。対象処理場を表-1に示す。

表-1 対象処理場

施設名	処理方式	処理場名
コンポスト化施設	横型スクープ式	K市T下水処理場
	立型パドル式	O市T浄化センター
溶融施設	旋回溶融施設	S市C下水処理場

3.4 資料収集

調査に先立って、対象処理施設の資料収集を行った。資料は対象施設の設備構成、整備状況、処理能力および運転管理状況が把握できるものを収集した。

3.5 処理状況

各施設の平成13年度の処理状況を表-2と表-3に示す。

3.6 LCI分析

LCI分析においては、施設の建設に係わるものと

表-2 コンポスト化施設の処理状況

項目	K市T下水処理場	O市T浄化センター
処理方式	横型スクープ式	立型パドル式
二次発酵	有	有
副資材	無	オガクズ
副資材年間投入量 (t/年)	—	231.5m ³ /年
返送比 (%)	200	43.6
供用開始年度	処理場：昭和57年6月 コンポスト化施設：昭和58年11月	処理場：昭和41年6月 コンポスト化施設：昭和56年4月
計画処理能力 (t/日)	1	0.62
現在の処理能力 (t/日)	1	0.62
現在の投入汚泥量 (t/H)	1	1
年間総投入量 (t/年)	387.7	238
年間コンポスト総生産量 (t/年)	102	104
施設の運転方法	起動のみ手動	自動
脱臭装置の有無	有	有
脱臭装置の運転方法	連続	連続

表-3 汚泥溶融施設の処理状況

項目	S市C下水処理場
処理方式	旋回溶融
供用開始年度	処理場：昭和36年9月 汚泥溶融施設：平成7年4月
計画処理能力 (t/日)	88
計画の炉の基数 (基)	2
現在の処理能力 (t/日)	35
現在の炉の基数 (基)	1
現在の投入汚泥量 (t/日)	29
年間総投入量 (t/年)	8,860
スラグの年間総発生量 (t/年)	326
投入汚泥の性状	高分子系
前処理の方法	乾燥
調整剤の投入	無
冷却方法	急冷 (水砕)
施設の運転方法	連続

して、各設備の素材構成を設定し、素材毎の使用数量を整理した。また、施設の運転管理に係わるものとしては、各設備の運転時間と消費されるユーティリティ (電力、燃料、薬品等) を整理し、LCIとした。

(1) 使用する原単位

下水道施設で使用されている機器毎の原単位 (2次原単位) があれば、それを用いて容易に環境負荷の定量化が可能であるが、現状では、LCI分析に使用可能な機器毎の原単位については研究の域を出ていない。したがって、今回のLCI分析に用いる原単位は、既に公表されているパブリックデータを用いるものとした。建設については各機器の使用されている素材毎の原単位 (1次原単位) を用いることとし、単位物量 (重量) 当たりの環境負荷が示されているデータベースの原単位を使用した。図-2に各原単位の使用目的を、表-4には使用する原単位を示す。

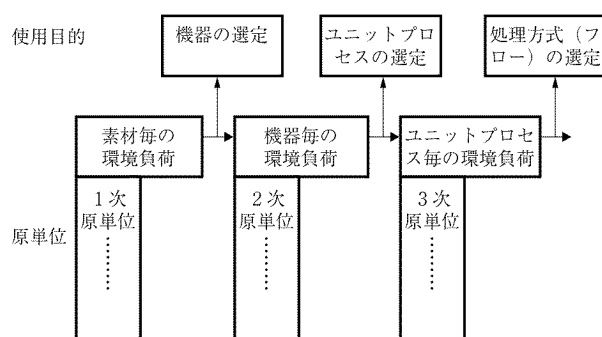


図-2 各原単位の使用目的

表-4 使用する原単位

工種	種別	原単位		根拠		
		CO ₂	エネルギー			
		単位	数値	単位	数値	
建設/素材	SS材	kg/ 素材ton	1,397	MJ/ 素材ton	21,157	日本建築学会 “建物のLCA 指針 (案)” による
	SUS材		2,522		38,214	
	鋳物		3,346		38,873	
	鋼管/SUS管		2,683		40,459	
	鋳鉄管		2,368		30,472	
	銅		3,119		48,947	
	アルミ		7,977		140,776	
	合成樹脂		5,007		80,283	
	合成ゴム	15,194	239,847			
運搬		kg/ 製品ton	37.8	MJ/ 製品ton	563	同上より、搬送距離200kmの場合
電力		kg/kWh	0.53	MJ/kWh	11.66	日本建築学会 “建物のLCA 指針 (案)” による
A重油		kg/ℓ	2,627	MJ/ℓ	38,078	
都市ガス		kg/m ³	2.65	MJ/m ³	50.79	
プロパンガス		kg/m ³	6.316	MJ/m ³	105.47	
苛性ソーダ		kg/T	1,148	MJ/T	16,950	
次亜塩素酸ソーダ		kg/T	798	MJ/T	11,779	

3.7 各設備の素材構成

LCI分析においては、環境負荷排出量の原単位が適用可能なレベルにまで各設備を分解することが必要である。本研究では、各機器を構成する材料（素材）にまで分解し、素材毎の原単位の適用が可能なようにした。材料の場合は、排出量原単位が重量当たりとなっているため、各機器に使用されている材料の重量を求めるために、各機器を構成する主な材料の比率を設定した。この比率を用いて、機器重量に占める各材料の重量を求め、これに原単位を乗じて排出負荷を定量化した。

各機器に使用される素材には、実際には多様な素材が使用されているが、ここでは、当該の機器を構成する主たる素材を代表的に選定した。

3.8 LCCO₂およびLCE試算

(1) 施設の建設における環境負荷

各施設に用いられている材料の重量から環境負荷を求める。また、建設時の素材の運搬に係る環境負荷の排出量を機器重量と運搬距離から求める。

なお、土木構造物については、鉄筋コンクリート構造物を対象としてコンクリートおよび鉄筋の数量から環境負荷を求めた。

建築構造物については、施設の仕様によって使用する部材等が大きく異なることから、同じ規模の施設でも環境負荷に差異が生じる。

(2) 施設の運転管理における環境負荷

各機器の運転に関しては、定格出力に運転時間を乗じて消費電力量を求め、電力量当たりのCO₂排出量を求めた。燃料、薬品等の使用については、各資材の使用量に原単位を乗じてCO₂排出量を求めた。

(3) 施設の廃棄における環境負荷

機械設備の廃棄については、機器の解体に伴う環境負荷を据付の25%と設定した。また、使用されている素材のうちSSおよびSUSを10%再利用するものとして、素材由来のCO₂排出量およびエネルギー消費量の10%をマイナスカウントした。また、廃棄に伴う運搬を建設と同様に計上した。

3.9 ライフサイクルの考え方

LCCO₂およびLCEの試算に当たっては、ライフサイクルをどの程度の期間見るかが重要となる。本研究の対象施設は機械設備が主であるため、機械設備の耐用年数を一つのスパンとし、この間のCO₂排出量およびエネルギー消費量を求めることとした。土木構造物についても、耐用年数（50年）を対象スパンとした。

なお、建設に係る排出については、対象スパン中に1回の排出であるため、1年当たりの排出量は、建設に係る排出量を耐用年数で除すものとした。

本研究においては、機械設備の耐用年数を17年とし、各処理場とも現有の施設が17年間稼働した場合のCO₂排出量およびエネルギー消費量を算定した。土木構造物については、建設に係る排出量を機械設備の耐用年数期間に当てはめるために、17/50倍して算定した。

3.10 LCCO₂およびLCEの算定結果

(1) K市T下水処理場の算定結果

K市T下水処理場におけるコンポスト化施設の建設および運転時におけるCO₂排出量ならびにエネルギー消費量を算定した。算定結果を以下に示す。

機械設備の建設に伴う排出量は、各機器の主要材料と重量から求めた。主要材料および重量は主に設計図書より設定したが、鋼製架台等の重量が不明なものについては、設計図面から概略の数量を拾い出して設定した。

表－5 機械設備建設時の環境負荷

設 備	CO ₂ (kg/年)	エネルギー (MJ)
汚泥投入フィーダー	994	14,577
製品投入フィーダー	995	14,396
混合破砕機	543	5,268
投入コンベアー	352	4,331
送風機	872	12,543
切返し機	9,405	349,111
水洗脱臭塔	1,182	16,596
その他	122	1,788
合 計	14,464	418,610

表－6 土木構造物建設時の環境負荷

設 備	CO ₂ (kg/年)	エネルギー (MJ)
コンクリート	80,555	576,729
鉄筋	26,627	386,823
合 計	107,182	963,552
耐用期間中の排出量	36,442	327,608

ただし、土木構造物の数量表が入手できなかったため、設計図面から概略の数量を拾い出した。

運転時については、各機器の運転時間を設定して

表-7 建築構造物建設時の環境負荷

材 料		CO ₂ (kg)	エネルギー (MJ)
材料	鋼材	31,837	481,981
	壁・屋根材	2,492	36,378
	小 計	34,329	518,359
運搬	鋼材	924	13,756
	壁・屋根材	581	8,660
	小 計	1,505	22,416
合 計		35,834	540,775
耐用期間中の排出量		20,306	306,440

表-8 運転時の環境負荷

設 備	CO ₂ (kg/年)	エネルギー (MJ/年)
汚泥投入フィーダー	196	4,313
製品投入フィーダー	196	4,313
混合破碎機	719	15,814
投入コンベアー	196	4,313
切返し機	329	7,228
送風機	4,179	91,927
水洗脱臭塔	66,856	1,470,839
その他	315	6,926
合 計	72,985	1,605,674
耐用期間中の排出量	1,240,748	27,296,464

定格能力から求めた。

耐用期間中のCO₂排出量のうち、水洗脱臭塔の運転時におけるCO₂排出量が運転時の排出量を大きくする要因となっている。エネルギーについても同様である。

また、廃棄時には素材の再利用分が解体、運搬による環境負荷を上回り、廃棄段階全体でマイナスの環境負荷となっている。

表-9 耐用期間中の環境負荷

設 備	CO ₂ (kg/年)	エネルギー (MJ)
建設 (機械)	14,464	418,610
建設 (土木)	36,442	327,608
建設 (建築)	20,306	306,440
運転	1,240,748	27,296,464
小 計	1,311,960	28,349,122
廃棄	-1,048	-15,558
合 計	1,310,912	28,333,564

(2) O市T浄化センターの算定結果

O市T浄化センターにおけるコンポスト化施設の建設および運転時におけるCO₂排出量ならびにエネルギー消費量を算定した。算定結果を以下に示す。

土木構造物の数量は、設計図面から概略の数量を設定した。

表-10 機械設備建設時の環境負荷

設 備	CO ₂ (kg/年)	エネルギー (MJ)
材料	65,071	984,853
運搬	1,493	22,244
据付	909	4,860
合 計	67,473	1,011,957

表-11 土木構造物建設時の環境負荷

設 備	CO ₂ (kg/年)	エネルギー (MJ)
コンクリート	25,307	182,295
鉄筋	8,842	128,448
合 計	34,149	310,743
耐用期間中の排出量	11,611	105,653

O市T浄化センターでは、コンベアおよびプロワの運転に伴うCO₂発生量、エネルギー消費量が大きくなった。スクリーコンベアの台数が多いことが要因と考えられるが、スクリーコンベアに脱水汚泥と副資材との混合機構を持たせているための結果とも考えられる。今回の試算では、脱水機の運転日に併せてコンベアが1回当たり2時間稼働するものとした。これは、脱水機の1日の運転時間が約4時間(H13年度実績)であることから、その半分に相当するものである。

表-12 建築構造物建設時の環境負荷

材 料		CO ₂ (kg)	エネルギー (MJ)
材料	鋼材	6,278	95,041
	壁・屋根材	1,898	27,704
	小 計	8,176	122,745
運搬	鋼材	182	2,713
	壁・屋根材	443	6,595
	小 計	625	9,308
合 計		8,801	132,053
耐用期間中の排出量		4,987	74,829

表-13 運転時の環境負荷

設 備	CO ₂ (kg/年)	エネルギー (MJ/年)
汚泥貯留槽	235	5,162
添加物貯槽	185	4,075
環流物貯槽	185	4,075
発酵槽	2,038	44,827
ブロワ, コンプレッサ	3,234	46,645
コンベア	4,310	86,665
合 計	10,187	191,449
耐用期間中の排出量	173,179	3,254,634

表-14 耐用期間中の環境負荷

設 備	CO ₂ (kg/年)	エネルギー (MJ)
建設 (機械)	67,473	1,011,957
建設 (土木)	11,611	105,653
建設 (建築)	4,987	74,829
運転	173,179	3,254,634
小 計	257,250	4,447,073
廃棄	-4,219	-78,772
合 計	253,031	4,368,301

(3) S市C下水処理場の算定結果

S市C下水処理場における汚泥溶融施設の建設および運転時におけるCO₂排出量ならびにエネルギー消費量を算定した。算定結果を以下に示す。

各設備運転時における電力消費量割合は、乾燥設備が全体の約30%を占め、次いでブロワおよびファン、溶融炉冷却塔の順に排出量が多い。これら3設備で、全体の60%以上を占めた。

溶融炉は24時間/日で運転されているが、上記3設備で特に排出量が大きくなる要因としては、処理水ポンプや乾燥ファン、燃焼ファン等の出力が大きな機器が含まれているためと考えられる。

表-15 機械設備建設時の環境負荷

設 備	CO ₂ (kg/年)	エネルギー (MJ)
材料	116,131	1,394,215
運搬	2,574	168,478
据付	1,566	8,375
合 計	120,271	1,571,068

表-16 土木構造物建設時の環境負荷

設 備	CO ₂ (kg/年)	エネルギー (MJ)
コンクリート	65,792	471,030
鉄筋	14,579	211,801
合 計	80,371	682,831
耐用期間中の排出量	27,326	232,163

ユーティリティを含む運転に伴うCO₂発生量、エネルギー消費量は、重油の消費によるものが80%以上を占め、次いで、苛性ソーダが約15%となった。

設備運転に伴う電力由来の排出量は、全体の1%にも満たず、燃料消費による排出量の大きさが明らかになった。

表-17 運転時の環境負荷

設 備	CO ₂ (kg/年)	エネルギー (MJ)
脱水汚泥供給設備	155.1	3,413
乾燥設備	665.4	14,639
ブロワおよびファン	455	10,010
脱硫設備	123.3	2,713
バーナーおよび熱風炉ファン	128.7	2,832
ユーティリティ供給設備	30.5	672
溶融炉冷却塔	366.7	8,066
脱臭設備	40.5	891
その他	88.5	1,946
設備運転小計	2,054	45,183
重油	391,423	5,673,622
苛性ソーダ	70,529	1,041,340
次亜塩素	3,575	52,770
プロパン	878	14,661
ユーティリティ小計	466,404	6,782,393
合 計	468,458	6,827,575
耐用期間中の排出量	7,963,790	116,068,779

表-18 耐用期間中の環境負荷

設 備	CO ₂ (kg/年)	エネルギー (MJ)
建設 (機械)	120,271	1,571,068
建設 (土木)	27,326	232,163
運転	7,963,790	116,068,779
小 計	8,111,387	117,872,010
廃棄	-2,282	-91,935
合 計	8,109,105	117,780,075

4. まとめと今後の課題

本研究では、3施設についてLCI分析を行ったが、今後は、その結果得られた機器毎の原単位を利用することで、各機器を素材にまで分解せずとも環境負荷量を算定することが可能となり、LCI分析の簡素化を図ることができる。

具体的には表-5～表-18に示す環境負荷量を、同等の規模および同様の機器構成であれば原単位の目安として使用することができる。ただし、処理能力および機器の構成が異なれば、設備としての原単位も異なる。

今後の課題としては、各施設の数量および機械設備毎の環境負荷を算定するために、設計図書、運転管理記録および各設備のユーティリティ使用量等の

より詳細なデータを入手すること、対象とする機器の製造段階にまで遡ったパブリックデータが提供されること等が、LCI分析を実施する前提として重要である。

さらに、標準的な処理方法で、能力に応じた処理を行っている施設のLCI分析結果と対比することが望ましいが、そのためには、今後は標準的な施設をモデル設計するなどして、環境負荷の原単位を設定することが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 靄巻, 藤岡, 内藤, 下水道終末処理施設のライフサイクルでの環境負荷の定量化について, 地球環境シンポジウム, 1999

●この研究を行ったのは

研究第一部長
研究第一部総括主任研究員
研究第一部主任研究員
研究第一部研究員

田中 修司
武 亨
二階堂悦夫
一松 雄太

●この研究に関するお問い合わせは

研究第一部長
研究第一部総括主任研究員
研究第一部主任研究員
研究第一部研究員

田中 修司
武 亨
佐野 廣一
一松 雄太