

下水道システムのライフサイクルアセスメント： LCE及びLC-CO₂による評価

井村秀文¹・銭谷賢治²・中嶋芳紀³・森下兼年⁴・池田秀昭⁵

¹正会員 工博 九州大学教授 九州大学工学部環境システム工学研究センター (〒812福岡市東区箱崎6-10-1)

²工修 山口県徳山土木建築事務所 (〒745徳山市港町1-1)

³学生員 九州大学大学院工学研究科

⁴正会員 東和科学 (〒730広島市中区舟入町6-5)

⁵正会員 工修 北九州市 (〒803北九州市城内1-1)

都市の下水道システムについて、そのライフサイクルにわたって発生する環境負荷の定量的評価（ライフサイクルアセスメント）を実行した。具体的には、福岡市の下水道システムをケーススタディ対象に選び、エネルギー消費量と二酸化炭素（CO₂）排出量を環境負荷の評価項目とした。施設としては、管渠、処理場、ポンプ場を対象範囲とし、それぞれの建設と運用から発生する環境負荷を評価した。機械設備等については産業連関分析による原単位を利用し、施設の運転については実績データを用いた。消化ガスの回収エネルギーはマイナスとして換算した。LCEは、建設による分が55.5%、運転による分が44.5%、LC-CO₂については、建設による分が56.4%、運転による分が43.6%と算定された。

Key Words : *life cycle assessment, sewerage system, energy analysis, carbon dioxide, global warming*

1. はじめに

人間活動が環境に及ぼす影響を評価するための概念、手法として、LCA（ライフサイクルアセスメント）が登場している。元々のLCAは、製品の製造、流通、使用、廃棄のトータルライフサイクルから発生する環境負荷を評価しようとするEU、ISO等の動き^{1)・2)}から発するものであったが、現在、その対象及び内容は、個々の製品のみならず、各種土木構造物も含めた極めて幅広いものに拡大しつつある。

社会資本の整備は、人間生活に利便性と快適性をもたらす一方で、各種構造物の建設・維持に多量の資材が投入され、その解体時に多量の廃棄物が出るなど、地球環境に及ぼす負荷も大きい。こうして、個々の構造物、その建設技術、あるいは構造物の総体によって成立する都市システム、社会システム等が地球環境的にどのような意味を持つかをLCA的に評価することは大きな社会的要請ともなっている。

一般に、土木構造物や建築物等を対象とするLCAは、大規模で複合的な施設を対象とすること、施設の寿命が20年、30年と長いことなど、製品のLCAとは特性を異にする面があるので、著者らはこれを

ILCA（"Infrastructure Life Cycle Assessment"）と呼んでいる³⁾。概念的に、ILCAにおける評価範囲としては、建設用資材の製造から施工、設備の据え付け、施設の維持・運用、構造物の最終廃棄に至るまでの全過程において発生する環境負荷が対象となる。また、LCA全般の環境負荷評価としては、まず、各種資源の消費とそれにとりまう環境汚染物質の発生量の評価（インベントリ分析）が必要となり、次に、それが環境にどのような影響を及ぼすかという影響評価（インパクト評価）が課題となる。

しかし、インベントリ分析からインパクト評価に至る部分は、LCA対象物の特性と言うよりは、個々の負荷項目と影響因子との間の影響メカニズムに関連する問題である。このため、LCA固有の守備範囲としては、現在のところインベントリ分析までとどめる例が多く、本論文においてもこの枠内での分析にとどめる。

ILCAの対象となる土木構造物や建築物等が一般の製品と異なる大きな特徴は、建設のために鉄、セメント等の基礎資材が大量に必要となり、それら資材の製造、運搬等にもまた大量のエネルギーが消費されることである^{4)・5)}。さらに、施設によっては、そ

表-1 社会資本整備による環境インパクト評価手法の整理

ILCAの分析手法	分析範囲	手法の説明
積み上げ法	マイクロ	資材レベルのデータを積み上げていく手法
産業連関分析	マクロ	各産業が誘発する資源消費量や環境負荷発生量を分析する手法
積み上げ法&産業連関分析	セミマクロ	積み上げ法をベースとし、データ不備を産業連関分析で補う手法

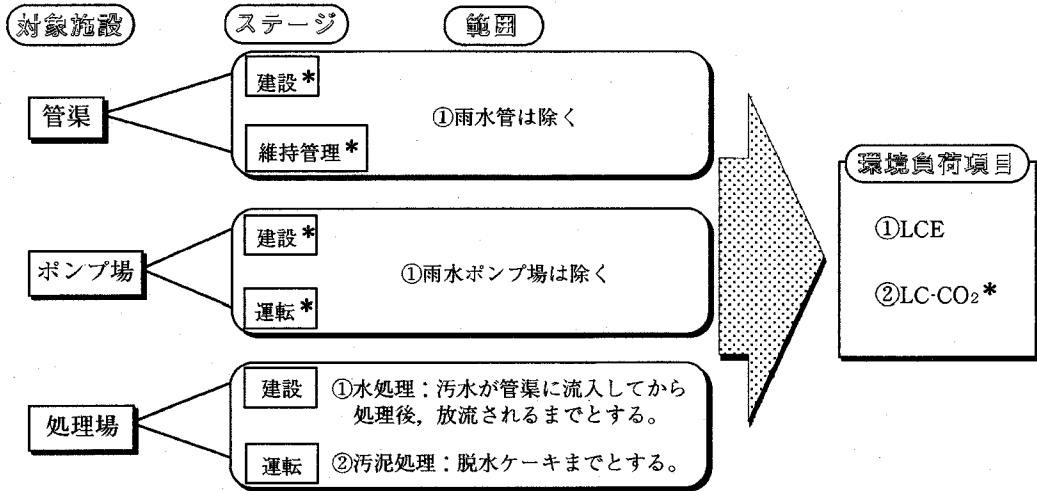


図-1 評価の枠組み（*印は、前論文³⁾に対して、改善または追加した項目である）

の維持・運用のためにも大量のエネルギーが必要である。エネルギーの消費は、大気汚染物質や地球温暖化の原因となる二酸化炭素（CO₂）の発生をもたらす。そこで著者らは、エネルギー消費量（LCE）を評価指標（インベントリ分析の項目）とし、建設のみならず運用のためにも多くのエネルギーを排出する下水道システムをケーススタディ対象に選んでILCAを実行した³⁾。しかし、この前論文³⁾においては、エネルギー消費と密接に関係するCO₂についての評価は行っていなかった。また、管渠の管径を一定として取り扱ったこと、管渠の維持・管理、消化ガスの回収を考慮していなかったことなど、不足の部分があった。本論文では、これらの点についての分析を追加し、前論文の内容をより完結したものにする。ただし、施設の最終廃棄、処理場から発生する汚泥の処分に関する部分は、まだ十分なデータ収集が行えず、今後の課題として残されている。

2. 分析手法

社会資本整備にともなう環境負荷評価に関する各種手法の相互関係を整理したのが表-1である。

国や地域に存在する社会資本の全体を見るマクロな分析レベルでは、産業連関分析による手法が有効であり、ここでは建設産業部門の分類に応じて、各部門の

最終需要によって誘発される資源消費量や環境負荷発生量の分析が多く実行されている⁶⁾。しかし、我が国で現在作成されている建設部門分析用産業連関表の産業分類は46部門と限定されている上に、産業連関表による産業分類と構造物の種別とが必ずしも対応しないという問題がある。他方、マイクロレベルでは、製品LCAの課題として、鉄、セメント、ガラスといった個々の資材の生産によって発生する環境負荷の評価が行われている。ここでは、工場における製造プロセスを細分化して、それぞれのプロセスに付随する環境負荷を積み上げる方法（「積み上げ法」）を取る例が多いが、産業連関法によるデータもかなり混合して使われているのが実情である。

下水道、橋梁といった具体的な構造物についての分析では、材料レベルでのマイクロなデータに、個々の工法、運用等に関する施設固有のデータも加えて、それら全体を積み上げることが必要となる。しかし、評価に必要な全データを材料や工法ごとに個々に得ることは実際上困難であり、ある部分については、産業連関法で得られたマクロなデータを用いる方法が取られる。具体的には、各産業の最終需要金額当たりが誘発する環境負荷（原単位）を求め、これに材料費や工事金額を乗じることによって全体の負荷を計算する。しかし、産業分類と材料等の項目が完全に一致しないため、近似的な取り扱いとならざるをえない。例えば、

表-2 利用したエネルギー原単位

エネルギー原単位利用項目	利用原単位	
砂	「砂利・砂」→2.429 (TOE/百万円)	参考文献20)
管渠	「セメント製品」→2.184 (TOE/百万円)	参考文献20)
アスファルト	「石油製品」→14.106 (TOE/百万円)	参考文献20)
管渠の維持管理に使用する機械	「特殊産業用機械」→1189 (ℓ/百万円)	参考文献20)
土木工事	「土木」→15.1 (TOE/百万円)	参考文献20)
建築工事	「建築」→7.9 (TOE/百万円)	参考文献20)
建築設備工事	「建設建築用金属製品」→12.9 (TOE/百万円)	参考文献20)
機械設備工事	「一般産業」→9.7 (TOE/百万円)	参考文献20)
重電気設備工事	「重電機器」→9.6 (TOE/百万円)	参考文献20)
電子・通信機器設備工事	「電子通信機器」→6.6 (TOE/百万円)	参考文献20)
上水使用量	「上水道」→3200 (kcalm ³)	参考文献17)
電気使用量	「電力」→2250 (kcal/kWh)	参考文献12)
A重油使用量	「A重油」→9300 (kcal/ℓ)	参考文献12)
軽油使用量	「軽油」→9200 (kcal/ℓ)	参考文献12)
ガス使用量	「都市ガス」→10000 (kcalm ³)	参考文献12)

ある施設固有の機械の製造エネルギーが不明の場合、その機械に最も近い製品を生産している産業部門について産業連関法から得られる値を代用するといった便宜法が取られる。

要するに、土木構造物のような複合的な対象物については、ミクロなデータからの積み上げと産業連関分析等によるマクロデータの利用をミックスした分析にならざるを得ないのが現状と言える。このため、本研究でもこの方法を採用する。この方法によって積み上げた結果の信頼性や精度については別途検討が必要であるが、本論文では現段階における1つの現実的かつ体系的な方法としてこれを採用するものである。

なお、産業連関分析によって原単位を求める手法にもいくつかあるが、本論文では、輸入財を考慮しない(I-A)型の計算結果を用いた。産業連関表としては、1985年の統合表183部門に建設部門分析用産業連関表46部門⁷⁾を結合したものを基本とした。さらに、利用局面に応じて、統合表83部門による値も用いた。ただし、金額当たりの値(原単位)について異なる年度のデータを用いる場合には、総合卸売物価指数⁸⁾によって1990年の値に調整した。本論文で利用したエネルギー原単位の値を表-2に示す。なお、1TOE=10⁷kcalである。

本研究では、下水道システムに対するLCAの枠組みを図-1のように設定した。上述のとおり、汚泥の最終処理段階等、分析対象となっていない部分があるが、これはデータ未入手のためである。

3. 評価方法及び結果

(1) 管渠のLCE

a) 管渠の建設

管渠について、資材の製造及び敷設工事を対象にそ

表-3 福岡市管渠敷設距離の管径別内訳

污水管(管径)	延長距離(m)
100~1000mm	2,983,941
1001~2000mm	182,621
2001~3000mm	34,520
3001~4000mm	14,591
4001~5000mm	2,786
5001~6000mm	974
6001~7000mm	1,009
7001mm~	160
合計(m)	3,220,602

の建設エネルギーを評価する。前論文³⁾では全ての管渠を開削工法管径700mmと設定し、その単位距離当たり原単位に延長距離を乗ずることで管渠建設エネルギーを求めた。しかし、今回は新たに入手できた福岡市の管渠の管径別延長距離データ⁹⁾に基づき、管径のサイズ(100mm~11000mmまで約300種類)ごとに原単位を計算した上で積み上げる方法に改善した。福岡市の管径別敷設距離内訳を表-3に示す。計算方法としては、前論文と同様に、建設省による土木工事積算マニュアルに基づいて管渠敷設工事を工程毎に分類し、建設機械の使用時間等を積み上げて管渠敷設1mあたりのエネルギー原単位を算出した¹⁰⁾・¹¹⁾。なお、管渠の耐用年数はコンクリートの寿命を考慮して50年とする。下水道管渠の敷設にはいくつかの工法があるが、本論文では開削工法を対象とする。

具体的には、以下の4項目に分けて建設エネルギー原単位を求める。

①直接投入エネルギー：現場の建設機械等に使用される軽油や電力を対象とする。なお、電力については1kWh=2,250kcal(転換時のロスを考慮する)¹²⁾として一次エネルギーに換算する。

②間接投入エネルギー(建設機械等製造)：バックホ

表-4-1 管渠敷設エネルギー原単位：
開削工法，内径700mmの場合

700 (mm)	(Mcal/m)				合計 (労働除)	合計 (労働含)
	直接投入	建設機械	建設資材	間接投入		
掘削工	24.7	4.0	0.0	1.4	28.7	30.1
掘削工	12.3	2.0	0.0	2.8	14.3	17.1
砂埋戻し工	0.0	0.0	24.7	2.7	24.7	27.4
発生土埋戻し工	21.9	3.6	0.0	7.0	25.5	32.5
残土処分工 (積込み)	63.8	8.5	0.0	3.1	72.5	75.6
矢板打込み工	118.3	36.6	0.0	17.0	54.8	71.8
矢板引抜き工	84.0	10.8	0.0	8.2	94.8	103.0
支保材取付け工	34.6	36.3	0.0	14.5	70.9	85.4
支保材取除き工	15.7	5.1	0.0	9.0	20.8	29.8
管布設工 (ヒューム管)	11.1	2.5	318.2	8.7	331.8	340.5
ぐり石基礎工	0.0	0.0	12.1	1.2	12.0	13.2
水替え工	5.4	0.2	0.0	0.2	5.7	5.9
舗装取り壊し工	9.6	1.6	0.0	0.5	11.1	11.6
路面復旧工	1.0	0.2	41.1	0.4	42.4	42.8
合計	402.4	111.5	396.0	76.8	909.9	986.7

表-4-2 管渠敷設エネルギー原単位：
開削工法，内径1000mmの場合

1000 (mm)	(Mcal/m)				合計 (労働除)	合計 (労働含)
	直接投入	建設機械	建設資材	間接投入		
掘削工	50.1	8.2	0.0	2.8	58.7	61.5
掘削工	25.1	84.1	0.0	5.6	29.3	34.9
砂埋戻し工	0.0	0.0	50.4	5.6	50.3	55.9
発生土埋戻し工	44.7	7.3	0.0	14.4	52.0	66.4
残土処分工 (積込み)	130.3	17.4	0.0	6.4	147.6	154.0
矢板打込み工	141.0	39.5	0.0	20.3	180.5	200.8
矢板引抜き工	95.8	12.4	0.0	9.3	108.2	117.5
支保材取付け工	34.6	36.3	0.0	14.5	70.9	85.4
支保材取除き工	15.7	5.1	0.0	9.0	20.8	29.8
管布設工 (ヒューム管)	12.8	2.9	649.4	10.0	665.1	675.1
ぐり石基礎工	0.0	0.0	24.4	2.4	24.6	27.0
水替え工	5.4	0.2	0.0	0.2	5.7	5.9
舗装取り壊し工	13.6	1.6	0.0	0.7	13.3	14.0
路面復旧工	1.4	0.3	58.7	0.6	60.5	61.1
合計	570.9	135.4	783.1	101.8	1489.4	1591.2

ウヤダンプトラック等の建設機械及び矢板等の建設鋼材の製造に投入されるエネルギーを対象とする。ここで、建設機械の製造エネルギーは産業連関表(183部門中の鉱山・土木建設機械部門)の値から算出した。建設機械は繰り返し使用されるものであるため、建設機械等損料算定表¹⁰⁾に基づき、損料に比例して減価償却されるものとして、次式により建設工事当り(損料当り)のエネルギー原単位とする。ただし、矢板、支保材については、耐用年数、使用回数が不明のため、製造エネルギーの値をそのまま採用した。

$$\epsilon = \frac{\text{建設機械の製造エネルギー} \times \text{運転1時間あたりの損料}}{\text{建設機械の基礎価格}}$$

③間接投入エネルギー(建設資材製造)：ヒューム管や砂利等、建設資材の製造によって誘発されるエネルギーを対象とする。ここでも、建設資材の製造エネルギー原単位は、資材の品目に応じて183部門産業連関統合表により求めた値を用いる⁴⁾。

④労働力投入による負荷：現場で投入される労働力によって間接的に投入されるエネルギーを対象とする。管渠の建設においては、人的労働力が投入されているものが多く、労働力によって投入されるエネルギーは無視できないものになると考えられる。その評価法としては、色々な算定方法が考えられるが、ここでは、国民1人1日当りの家庭用エネルギー消費量によって、1人1日当り労働のエネルギー投入原単位とした。このほか、たとえば、1人1日当りの食料摂取カロリーを基に算定する方法もあるが、それによる結果は非常に小さな値となる。このように、労働力を建設機械と同様の概念で扱うこととし、積算基準書から人数、時間を算出し、人の生活による環境負荷のうち労働時間による環境負荷を算出した。

例として内径700mm, 1000mm, 2000mmについ

表-4-3 管渠敷設エネルギー原単位：
開削工法，内径2000mmの場合

2000 (mm)	(Mcal/m)				合計 (労働除)	合計 (労働含)
	直接投入	建設機械	建設資材	間接投入		
掘削工	201.7	33.0	0.0	11.2	234.7	245.9
掘削工	100.5	16.4	0.0	22.5	116.9	139.4
砂埋戻し工	0.0	0.0	201.4	22.3	201.5	223.8
発生土埋戻し工	178.7	29.4	0.0	57.5	208.1	265.6
残土処分工 (積込み)	521.1	69.6	0.0	25.4	590.7	616.1
矢板打込み工	216.9	49.3	0.0	31.1	266.2	297.3
矢板引抜き工	135.0	17.4	0.0	13.1	152.5	165.6
支保材取付け工	34.6	36.3	0.0	14.5	70.9	85.4
支保材取除き工	15.7	5.1	0.0	9.0	20.8	29.8
管布設工 (ヒューム管)	18.3	4.1	2597.5	14.4	2620.0	2634.4
ぐり石基礎工	0.0	0.0	98.4	9.6	98.4	108.0
水替え工	5.4	0.2	0.0	0.2	5.7	5.9
舗装取り壊し工	27.2	1.9	0.0	1.5	29.1	30.6
路面復旧工	2.8	0.7	117.4	1.3	120.9	122.2
合計	1458.0	263.4	3014.8	233.7	4736.3	4970.0

表-5 管渠の建設エネルギー

総延長距離 (m)	総建設エネルギー (10 ³ Gcal)
3,220,602	2,777

て、上記によって求めた原単位を表-4に示す。なお、表中には、労働力投入によるエネルギーを含めない値も併記した。内径700mmの例について見ると、管渠の製造エネルギーが318.2Mcal/mと大きく、管渠敷設工事全体の投入エネルギーの約32%を占めている。つまり、下水道管渠敷設工事全体としてのエネルギー消費削減には、管渠製造におけるエネルギー消費削減が重要である。

管径ごとの原単位に、それぞれの延長距離を乗じ、総和することで管渠の建設エネルギーとした。その結果を表-5に示す。

b) 管渠の維持・管理

前論文³⁾では実行していなかった管渠の維持管理について、新たに入手できたデータ¹³⁾を用いて、LCEを算出した。管渠の維持管理には、高压洗浄車・揚泥車・給水車が使用されている。それぞれの運用データから管渠1mあたりの走行及び運転に必要な燃料使用量を求め、これを直接原単位とした。また、産

表-6 管渠の維持・管理原単位 (ALCE (kcal/m/年))

	直接原単位	間接原単位	合計
高圧洗浄車	315.3	397.4	712.7
揚泥車	518.5	374.9	893.5
給水車	-200.1	139.0	339.1
合計	1,033.9	911.3	1,945.2

表-7 管渠の維持・管理エネルギー (ALCE (Gcal/年))

	直接エネルギー	間接エネルギー	合計
高圧洗浄車	214.9	270.9	485.8
揚泥車	353.4	255.6	609.0
給水車	136.4	94.7	231.1
合計	704.7	621.2	1,325.9

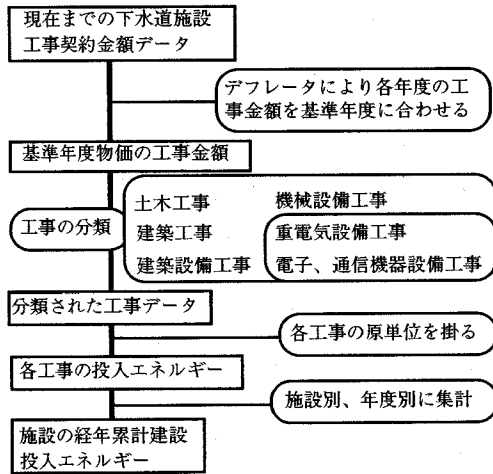


図-2 建設エネルギー計算フロー

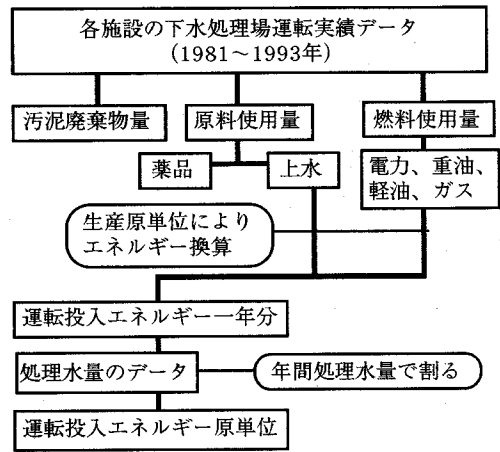


図-3 運転エネルギー計算フロー

表-8 ポンプ場工事分類別建設エネルギー (Gcal)

	土木	建築	建築設備	機械設備	電気設備	合計
処理場A (11ヶ所)	41,043	12,749	2,517	79,352	30,107	165,768
処理場B (1ヶ所)	4,063	0	295	1,837	2,216	8,409
処理場C (1ヶ所)	4,723	1,011	334	2,471	2,122	10,661
処理場E (1ヶ所)	266	85	22	639	473	1,485
合計	50,095	13,845	3,168	84,298	34,917	186,323

業連関分析によって、特殊産業機械部門のエネルギー原単位を求め、それぞれの機械の耐用年数で除すことで当該機械の製造についての年間当たり間接原単位とした。結果を表-6に示す。

また、この原単位に1993年度の年間運転距離を乗じ、ALCEを求めた。ここで、ALCEは年間当たりのライフサイクルエネルギー ("Annualized Life-Cycle Energy") を意味する。結果を表-7に示す。これを見ると、揚泥車に関するエネルギーが約半分を占めている。

(2) ポンプ場のLCE

前論文ではデータが未入手であったため、ポンプ場についてのLCEは実行していなかった。このため、新たに入手したデータによってポンプ場のLCEを算定した。

a) ポンプ場の建設

ポンプ場 (雨水ポンプ場を除く) についての契約工

事データ¹⁴⁾と、工事実績データ¹⁵⁾により建設エネルギーを推定した。調査対象としたポンプ場の工事件数は1961年度から1993年度までの間に約700件を数え、この各工事において投入された資材 (原料、燃料等) を細かく算出することは困難であった。このため、全工事を土木工事、建築工事、建設設備、機械設備、電気設備、電子通信機器設備の6つの工事 (k = 1, 2, . . . , 6) に分類し、産業連関分析によって得られる各工事や設備の原単位を利用することによって工事全体に要するエネルギーを推計した。ここでの原単位は、産業連関表として84分類の統合表を用いて、上記6部門を土木、建築、建設・建築用金属製品、一般産業、重電機器、電子通信機器の各部門に対応させることによって求めたものである。ただし、電子通信機器設備の値は他よりかなり小さいので、最終結果は電気設備と一緒にまとめ、単に「電気設備」として示した。以上、この計算手順を図-2に示す。結果を表-8に示す。

表-9 ポンプ場年間運転エネルギー (Gcal/年)

	上水	電気	A重油	軽油	ガス	合計
処理場A	85.1	9917.2	71.7	216.2	92.9	10,383
処理場B	0.3	413.6	4.0	0.0	0.0	418
処理場C	0.8	363.1	3.7	0.0	0.0	368
処理場E	0.1	86.9	0.8	0.0	0.0	88
福岡市全体	86.2	10780.8	80.2	216.2	92.9	11,256

表-10 処理場別工事分類別の全建設エネルギー (Gcal)

	土木	建築	建築設備	機械	電気	合計
処理場A	155,796	41,917	5,398	185,153	62,588	450,851
処理場B	59,419	94,153	7,533	117,022	50,612	328,738
処理場C	165,186	74,705	15,750	122,713	63,629	441,983
処理場D	34,076	41,944	22,814	45,655	23,837	168,325
処理場E	37,170	9,147	394	15,024	11,064	72,798
合計	451,647	261,867	51,888	485,565	211,729	1,462,695

b) ポンプ場の運転

ポンプ場の運転に要するエネルギーを、各処理場の運転実績データ¹⁶⁾を積み上げることによって求めた。薬品については、塩素、塩化第二鉄、消石灰、次亜鉛、苛性ソーダ、塩酸等の薬品の使用量から製造エネルギーを求めることは可能であるが、その値は小さいため無視した。また、上水については、既存の研究報告書¹⁷⁾に基づき、そのLCE原単位として3200kcal/m³の値を用い、それに年間使用水量を乗じて求めた。以上の手順を図-3に示す。なお、入手できた実績データは1989年度から1993年度までのものである。結果を表-9に示す。

(3) 処理場のLCE

a) 処理場の建設

ポンプ場と同様の手順で、契約工事データと工事実績データにより工事分類別に建設エネルギーを推定した。結果を表-10に示す。

ところで、実際の処理場においては、新設後も不断に設備の補修や更新が行われている。施設の寿命は、鉄筋コンクリートの物理的耐用年数が50年、施設の建設期間が概ね5年であることを考慮して運転開始後の寿命を45年とする。個々の設備の寿命は施設全体の寿命よりはかなり短いのが普通であり、処理場の建物の寿命を前述の理由から45年としても、内部の機械類は10年とか15年とかで新しいものに置換されていく。福岡市の場合、現在のところ一番古い処理場でも建設後30年程度の若さであるから、寿命45年とすれば、あとさらに15年間は設備の補修や更新が継続していくものとみられ、その将来推移を予測評価する必要がある。次いで、各処理場について、最終寿命までの累積投入エネルギーを求め、こ

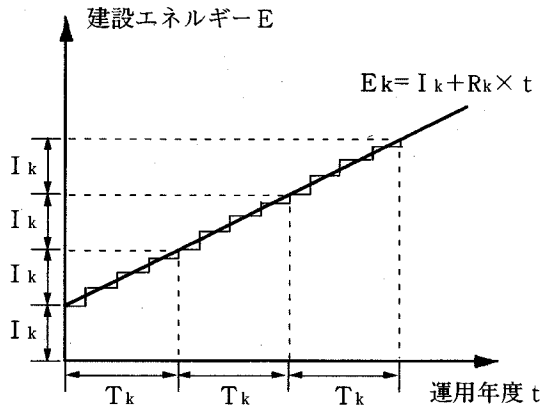


図-4 更新エネルギーモデル (構成要素が一つの場合)

れを処理能力水量で除すことによって単位処理能力あたりの建設エネルギーを求める。その算定方法を以下にまとめる。

前述の工事k (k=1, 2, …, 6) について、その運用開始からt年間に投入される総建設エネルギーは、

$$E_k(t) = I_k + R_k(t) \quad (1)$$

と書かれる。ここで、I_kは工事kの初期建設工事に投入されたエネルギーである。R_k(t)は、t年間に設備の補修・更新のために投入されたエネルギーの年平均値である。ところで、設備kは、その耐用年数T_kごとに更新され、また土木、建築構造物についても補修が行われるわけであるが、長期間の平均で見た場合、部分的な更新を繰り返す、耐用年数だけ

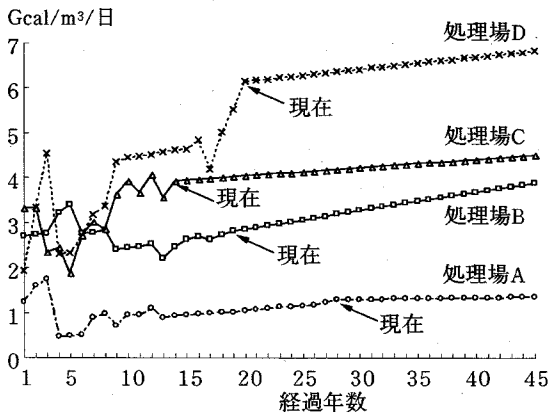


図-5 単位能力処理水量当たりの累積建設エネルギー

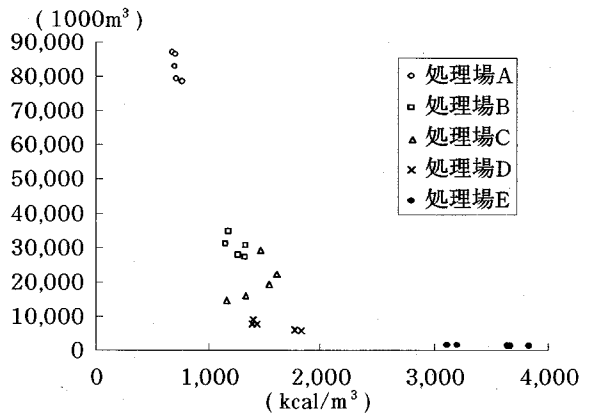


図-6 年間処理水量と運転原単位

表-11 処理場年間運転エネルギー (Gcal/年)

	電力	上水	A重油	ガス	消化ガス回収	合計
処理場A	60,796	190	192	60	-25,689	35,548
処理場B	40,087	151	578	16	-7,521	33,311
処理場C	41,284	59	1,863	16	-3,810	39,412
処理場D	12,038	28	242	4	-2,337	9,975
処理場E	3,993	6	244	3	-130	4,115
福岡市全体	158,198	434	3,118	99	-39,488	122,362

経過したときには新設設備と同等のものに生まれ変わっていると考える。その場合、耐用年数 T_k の間には当該施設の新設に投入されたと同じだけのエネルギーが更新のために必要になるものと考えられる。そこで、 R_k は初期建設工事ににより投入されたエネルギーを耐用年数で除したものととして、

$$R_k = I_k / T_k \quad (2)$$

と仮定する。こうして、下水処理場全体の t 年間の総建設エネルギー E_k は、

$$E_k = \sum_{k=1}^6 E_k(t) \quad (3)$$

によって推計される。

図-4は、上記の算定モデルを図解したものである。この図に示すように、将来時点における累積建設エネルギーは階段状に増加していくことになるが、長期的に見るとほぼ直線的な増加となる。

福岡市内の4つの処理場について、上の手法によって単位処理能力量当たりの累積建設エネルギーの経年変化を求めたのが図-5である。ここで、各施設の耐用年数は土木・建築設備が50年、電気設備が20年、機械設備が15年、個別循環設備が10年と設定した。このグラフにおいて単調増加ではなく途中で

値が減少した年があるのは、その年に処理能力の増加があったためである。将来の建設エネルギーについては、1993年度までの各処理場の実績値を用いて、式(3)によって推計した。ただし、現在以降は、処理能力水量に変化はないものと仮定している。また、将来の段階的な変化については直線に適合させて表示している。

b) 処理場の運転

ポンプ場と同様の手順で、各処理場の運転実績データを積み上げることによって、福岡市処理場の年間運転エネルギーを算出した。前論文³⁾では消化ガスの発生を全く考慮していなかったが、福岡市の事例では、消化ガスの燃料としての再利用は大きな位置を占めている。本論文では、その分も対象とする。

福岡市の場合、消化槽で発生した消化ガスは消化槽加温用・電力供給用にエネルギーとして再利用されている。そこで、消化ガス使用による回収エネルギーは、処理場内の電力消費、加温のための燃料消費を削減できるとの視点から、エネルギー回収量としてマイナス値で計上することとする。消化槽加温用の消化ガスについては、ガス使用量に消化ガスの発熱量 10000kcal/m^3 を乗じて算出した。電力供給による回収エネルギーは、発電量に 2250kcal/kwh を乗じて算出した。1993年度の結果を表-11に示す。

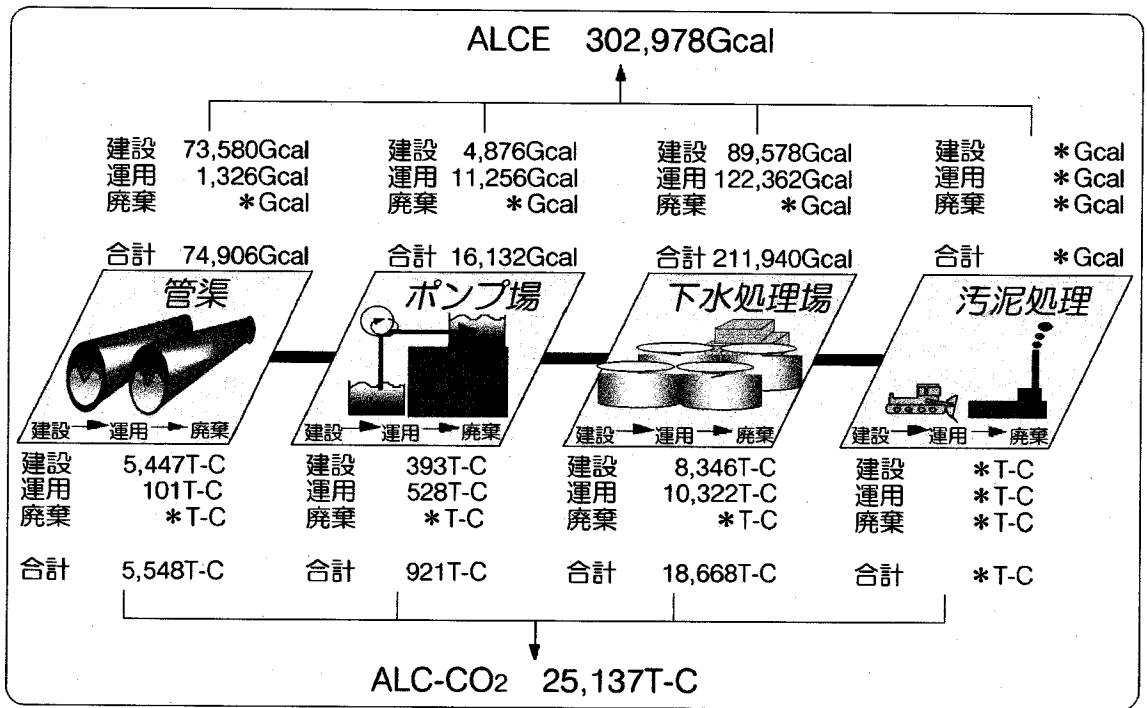


図-7 下水道システム全体としての評価 (*は本論文の分析対象外)

表-12 CO₂排出強度値

	石炭	原油	天然ガス	電力
(T-C/TOE)	0.996	0.804	0.574	0.460

表-13 利用したCO₂原単位

産業部門	該当する資材, 工事等	(T-C/百万円)	(TOE/百万円)
砂利・採石	砂	1.89	2.43
石油製品	アスファルト	11.32	14.11
セメント製品	下水管	1.72	2.18
その他の特殊産業用機械	管渠の維持・管理用機械	0.76	1.1
公共事業	土木工事	1.54	1.86
住宅新建築	建築工事	0.75	1
建築用金属製品	建築設備工事	0.98	1.37
運搬機械	機械設備工事	0.78	1.05
重電機器	重電気設備工事	0.90	1.25
通信機械	電子・通信機器工事	0.56	0.86
電力	電力	4.88	10.7
都市ガス	都市ガス	4.71	7.04
水道	上水	1.02	1.86

単位処理水量あたりの運転エネルギーは、その処理場で実際に処理された水量などによって変化している。図-6に年間処理水量と単位水量あたり運転エネルギーの関係(1989~1993年度の各年のデータ)を示す。本論文に示した各処理場の下水処理方法は、いずれも標準活性汚泥法である。ただし、この図では消化ガスの分は考慮していない。この図によれば、年間処

理水量が大きいほど運転原単位(消化ガスを除く)は小さい傾向にあり、規模のメリットが読み取れる。

(4) 汚泥処理場

現在、福岡市では年間約160tの汚泥が発生している。その処理の内訳は、約100tが焼却され、発生した灰は埋立及びセメントの原料に利用されている。ま

た、残りの約60tはコンポスト処理され、肥料として利用されている。従って、汚泥処理場をLCA的に評価するには運転データ（埋立やセメントの原料として使用される灰の重量、肥料として使用される重量等）やそれに必要な原単位を入手しなければならない。しかし、現時点では、これらの必要データが入手できないため、汚泥処理は対象外とする。

4. 下水道システムとしての全体的評価

(1) ALCEによる評価

福岡市下水道システム全体の1993年度ALCEを評価した結果が図-7である。建設ALCEは、建設LCEを施設の耐用年数で除することによって算出した。管渠のLCEについては建設の占める割合が高いが、ポンプ場や処理場のLCEについては運用の占める割合が高い。

(2) ALC-CO₂による評価

以上において、各施設・各処理段階のライフサイクルエネルギーを算出した。エネルギーと密接に関係するのが地球温暖化の原因物質として注目されている二酸化炭素である。そこで、上で求めたライフサイクルエネルギーに、表-12に示すようなエネルギー源別の既存のCO₂排出強度値（T-C/TOE）¹⁸⁾を乗じることによって、直接的に排出されるLC-CO₂（ライフサイクルCO₂）を算出した。また、間接的に排出されるLC-CO₂については、産業連関分析によって算出した表-13の原単位を利用して算出した。

施設の耐用年数を除することによって求めた1993年度二酸化炭素排出量（ALC-CO₂）の算出結果を図-7に示す。消化ガスとしてエネルギー回収しても、それを燃焼することによってCO₂が排出されるため、ALCEの場合とは違ってLC-CO₂は増える。なお、下水道システムから発生するCO₂としては、本論文で取り上げた消化ガスの燃焼からのもののほか、流入有機物が処理過程で変換されて発生するもの、汚泥の燃焼によって発生するものなどもある。これらの有機物起源のCO₂は、下水道システムが存在しなかったとしても自然界で発生したであろうと考えられるものなので、その分のCO₂は化石燃料の燃焼からの人為起源のものとは区別すべしという議論もあるが、本論文ではこの両者を同列に評価している。ここで、有機物については、処理・処分の方法によってはCO₂よりも温室効果の大きいメタンなどに変換される場合もあるので、地球温暖化への影響という視点からはこの点をも考慮した分析が必要である。

5. 結論

本論文においては、福岡市の下水道システムを事例研究対象として、管渠、ポンプ場及び処理場を対象に、その建設及び運転（維持・管理）に関するライフサイクルエネルギー（LCE）を算出した。計算においては、資材等の投入量については工事積算マニュアルのデータを用い、資材や機械の製造エネルギー原単位は産業連関分析の結果を利用した。また、運転については福岡市の実績データを主に利用した。こうして、各施設のライフステージごとのLCEを算出し、これらの総和によって下水道システム全体としてのLCEを推計した。LC-CO₂についても同様に行った。

本論文の推計結果によれば、下水処理場の処理量が大きいくほど、処理量当りのLCE原単位は小さいというスケールメリットが見られた（ただし、消化ガス回収分は含まない）。ここで、管渠の敷設を考えると、人口密度の大きな地域の処理場ほど、処理量当りの建設原単位は下がると推測されるから、この意味でのスケールメリットもある。結果として、人口集中地域で規模の大きな施設を建設するのはLCE的には効率がよいと言えよう。ただし、実際のシステムの最適化の議論には、LCE以外の因子と合わせた総合的な評価が必要である。

ALCE及びALC-CO₂で評価すると、福岡市の下水道システム全体のライフサイクルエネルギーは約30千TOE（石油換算トン）、CO₂発生量は25千トンCという結果が得られた。福岡市の調査によれば、人口124万人の同市全体のCO₂排出総量（電力による間接排出も含む、1990年度）は1688千トンCである¹⁹⁾。下水道システムによる分はその値の約1.5%である。また、1993年度のALCE、ALC-CO₂及び年間処理水量から、福岡市の下水道システム全体での処理原単位は1889kcal/m³、157kg-C/m³と算出された。

福岡市の下水道システムの場合、ALCEの内訳は、建設関連が55.5%、運転関連が44.5%となり、ALC-CO₂の内訳では、建設関連が56.4%、運転関連が43.6%となり、ともに前者の寄与が大きい。建設全体のうち、ALCEについては、管渠によるものが43.8%、処理場によるものが53.8%となる。ALC-CO₂については管渠によるものが38.4%、処理場によるものが58.8%となる。また、運転全体に占める処理場の割合は、ALCEで90.7%、ALC-CO₂で94%と大きくなっている。

本研究では、評価項目としてエネルギー及び二酸化炭素だけに着目したが、今後は大気汚染物質、水質汚濁物質をはじめとする他の評価因子についても検討する必要がある。また、耐用年数に達した施設の最終廃

棄段階での負荷の評価、汚泥の処理ステージについての負荷算定等が残された課題である。処理後の汚泥の多くは廃棄物処理場で焼却処分されており、それからのエネルギー回収があるが、汚泥による分だけを分離・特定して算定するにはデータが不足しているのが現状である。また、下水道システムの内容は都市によって異なるため、本論文で対象とした福岡市内とは異なるシステムについても検討し、結果の妥当性を比較・吟味する必要がある。

謝辞：本研究は、文部省重点領域研究（人間地球系）及び旭硝子財団の援助を受けて行ったものである。また、データ提供についてご協力いただいた福岡市下水道局の方々には厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) エコマテリアル研究会：日本におけるLCA研究の現状と将来の課題，(社)未踏科学技術協会，1995。
- 2) エコマテリアル研究会，(社)未踏科学技術協会：LCAのすべて－環境への負荷を評価する，工業調査会，1995。
- 3) 井村秀文，森下兼年，池田秀昭，銭谷賢治，楠田哲也：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，環境システム研究，Vol.23，pp.142-149，1995。
- 4) 池田秀昭，井村秀文：社会資本整備にともなう環境インパクトの定量化に関する研究，環境システム研究，Vol.21，pp.192-199，1993。
- 5) 銭谷賢治，井村秀文：建設にともなう環境負荷の定量化に関する研究，環境システム研究，Vol.22，pp.147-153，1994。
- 6) 岡本英靖，酒井寛二，漆崎昇：土木工事における炭素排出量の推定，土木学会第1回地球環境シンポジウム講演集，pp.93-98，1993。
- 7) 建設省建設経済局調査情報課：昭和60年建設部門分析用産業連関表，建設物価調査会，1989。
- 8) 通商産業省大臣官房調査統計部：通産統計ハンドブック，(社)通産統計協会，1988，1995。
- 9) 福岡市：福岡市管渠延長距離データ（内部資料）。
- 10) 建設大臣官房技術調査室：土木工事積算基準マニュアル，建設物価調査会，1994。
- 11) 下水道工事積算編集研究会：下水道工事の積算，経済調査会，1994。
- 12) 資源エネルギー庁長官官房企画調査課：総合エネルギー統計，通商産業研究社，p.16，1995。
- 13) 福岡市：福岡市管渠維持管理データ（内部資料）。
- 14) 日本下水道協会：下水道統計－財政編，pp.122-245，1994。
- 15) 福岡市下水道局：福岡市下水道工事データ。
- 16) 福岡市下水道局：福岡市下水処理場運転実績データ，1981-1993。
- 17) 水道と地球環境を考える研究会：地球環境時代の水道，技報堂，p.109，1993。
- 18) EDMC: The Energy Data and Modelling Center, *Energy Statistics*, 1994.
- 19) 福岡市環境局：福岡市地球温暖化対策地域推進計画，p.103，1994。
- 20) 総務庁：昭和60年産業連関表－計数編(2)，全国統計協会連合会，pp.771-782，1989。

(1996.3.11 受付)

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF URBAN SEWERAGE SYSTEMS: A CASE STUDY IN TERMS OF LCE AND LC-CO₂

Hidefumi IMURA, Kenji ZENITANI, Yoshinori NAKAJIMA,
Kanetoshi MORISHITA and Hideaki IKEDA

As a case study of life cycle assessment (LCA) of urban infrastructures, the life-cycle energy (LCE) and the life-cycle CO₂ (LC-CO₂) of an urban sewage system in Fukuoka City were analyzed. The estimation covers the construction and the operation of the sewerage pipeline network, waste water treatment plants, and pumping stations. The data derived by input-output analysis are used to determine energy and CO₂ intensities for the construction of the plants and the manufacturing of machinery, while those for plant operation are obtained from actual data. The energy recovered by the use of digestion gas is counted as negative. It is estimated that the construction and the operation account for 55.5% and 44.5% of the total LCE, and 56.4% and 43.6% of the total LC-CO₂, respectively.