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

LIFE-CYCLE ASSESSMENT OF URBAN SEWERAGE SYSTEMS: A CASE STUDY USING "LCE" AS AN INDICATOR

井村秀文*・森下兼年**・池田秀昭***・銭谷賢治*・楠田哲也*
Hidefumi IMURA*, Kanetoshi Morishita**, Hideaki Ikeda***, Kenji Zenitani* and Tetsuya Kusuda*

ABSTRACT; The purpose of this study is to investigate the life-cycle environmental assessment of urban sewage systems. LCE (life-cycle energy) is chosen as an indicator, and energy input to construction and maintenance of water treatment plants and drainage networks is estimated. Energy required for the production of input materials, machines and equipments, and for the construction of buildings is calculated based on a standard method of input-output analysis. Direct energy input to construction works and plant operation is estimated by using the standard construction work budget estimation manual of the Ministry of Construction and the actual plant operation data for the sewers in Fukuoka City. Although the calculation does not cover the entire life-cycle and the functions of sewage systems, it reveals that about 83% of the estimated total LCE is required for the operation of treatment plants and the remaining 17% for the construction of treatment plants and drains.

KEYWORDS; LCA of construction, LCE, sewerage system, input-output analysis

１．はじめに

最近，製品の製造，使用，廃棄のライフサイクルにわたる環境負荷を定量的に評価しようとするライフサイクルアセスメント（LCA）に対する関心が高まっている[1),2)]。元々，LCAの発想はさまざまな消費財や工業製品を念頭に生まれたものであるが，その考え方や手法は土木構造物や建築物等の施設（社会資本）あるいはそうした施設の集合体としての１つの地域や都市に対しても適用できる[3),4)]。しかし，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，本論文ではこれをILCA（"Infrastructure Life Cycle Assessment"）と呼ぶことにする。

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，一般に，LCAにおける環境負荷の評価としては，まず，各種資源の消費とそれにともな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の評価（インパクト評価）が問題となる。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ででとどめる例が多い。また，インベントリ分析の段階においても，項目の設定はもちろんのこととして，さまざまな項目を並列的に評価すべきか，それぞれに重みをつけることによって総合的に評価すべきかと言った点について現在さまざまな議論が展開されているところである。

*九州大学工学部環境システム工学研究センター　Institute of Environmental Systems, Faculty of Engineering, Kyushu University
**東和科学　Towa Kagaku Company Limited
***北九州市　Kitakyushu City

LCAの視点から見たとき，土木構造物や建築物等の際だった特徴は，それらの建設のために鉄，セメント等の資材が大量に必要となることであり，それら資材の製造，運搬等に大量のエネルギーが消費されることである。[3] また，施設によっては，その維持・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，本論文では，施設のライフサイクルにわたるエネルギー消費量（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必要とする下水道システムをケーススタディ対象に選んでILCAを実行する。

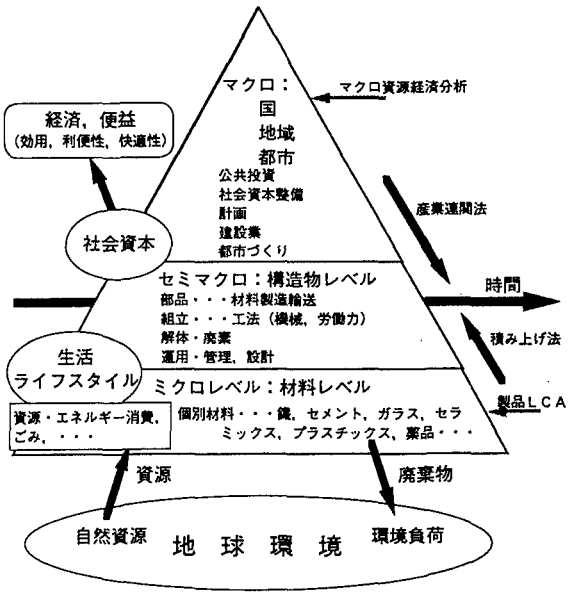

図１　社会資本整備による環境インパクト評価手法（ILCA）の相互関係

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図１である。ここでは，議論の整理として，国や地域に存在する社会資本の全体を見るマクロなレベル，個々の構造物ごとに見るセミマクロのレベル，構造物を構成する個々の材料レベル（ミクロレベル）の３段階に分析レベルを分けている。ILCAは，これら各レベルの手法を組み合わせて実行することになる。

マクロレベルでは，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[5]。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，ミクロレベルでは，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（セミマクロレベル）では，材料レベルでのミクロなデータに，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（「積み上げ法」）。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で代用する例が多い。たとえば，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もの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法が取られる。結果的に，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。

３．評価の枠組み

本研究では，下水道システムに対するLCAの枠組みを以下のように設定した。

(1)評価対象施設：一般に，下水道システムは，①管渠，②ポンプ場，③処理場（水処理，汚泥処理），④汚泥廃棄物処理より構成されるが，本分析の対象としては①及び③に限る。また，雨水処理も対象外とする。

このように対象を限定したのは，主にデータの入手制約のためである。
(2)評価対象のライフサイクルステージ：一般にLCAでは，資材の製造も含めた施設の建設から，施設の運転，施設の廃棄までの全ライフサイクルが対象となるが，本分析では，施設については建設と運転，管渠（汚水管）については建設のみを対象とする。施設の廃棄にともなう負荷については，適切なデータが収集できず，実行していない。また，管渠の維持・管理としては，老朽化した場合の管の交換，管内面の補修，清掃などが対象となるが，その現実の実施運用パターンがさまざまであり，適切な計算仮定を設定するのが困難なために対象外としている。
(3)評価項目：単位処理水量あたりのライフサイクルエネルギー消費量（LCE）とする。
(4)評価範囲：水処理については，汚水が管渠に流入してから処理の後，放流されるまでとする。また，汚泥処理については脱水ケーキまでとし，それ以降の処理は対象にしていない。
(5)計算手法：下水道の建設に必要となる各種材料や機械等については，その製造のために投入されるエネルギー消費量（全国平均値）を求める。また，処理場の建設・運転及び管渠の建設に必要なエネルギーは，福岡市の具体的な施設の実例に基づき算定する。最後に，これらの値を総和することによって，下水道システム全体としてのLCEを算定する。
(6)産業連関分析による原単位の算定
建設用の資材，機械等の製造，建物の建設のために投入されるエネルギーについては，産業連関分析の標準的な手法（$(I-A)^{-1}$型）によって原単位を算定した。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[6]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）とし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[7]によって1990年の値に調整した。

4．評価方法及び結果

（1）管渠のLCE

管渠について，資材の製造及び敷設工事を対象に，その建設エネルギーを評価する。建設省による土木工事積算マニュアルに基づき，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する[8) 9)]。なお，管渠の耐用年数はコンクリートの寿命を考えて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と推進工法（シールド）を対象とする。さらにマンホール設置工事についても計算し，以上の2つを合わせて管渠敷設についての建設エネルギーとする。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，電力は1kWh=2,250kcal（転換時のロスを考慮する）[10]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）：バックホウやダンプ，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ので，建設機械等損料算定表[8]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。

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

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[3)]。
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。

その評価としては，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。

開削工法（内径700mm）及び推進工法（内径1100mm）について，上記によって求めた原単位を表１にまとめる。推進工法の場合には，管長当たりの原単位とともに立坑工事１箇所当たりの原単位を求めた。推進工法では，一般に管径が大きいこともあり，単位長当たり原単位は大きく，さらに立坑工事の分が追加される。開削工法の場合，管渠（ヒューム管）の製造エネルギーが317.7Mcal/mと大きく，管渠敷設工事全体の投入エネルギー987.2Mcal/mの約32%を占めている。これは，推進工法についても同様である。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。

次に，推進と開削の２工法について求めたこの原単位を基に，福岡市内で実際に行われた９つの下

表１－１　下水道管渠敷設工事エネルギー原単位（開削工法、内径700mm）

(Mcal / m)

工程	規格	直接投入	間接投入			合計
			建設機械	建設資材	労働力	
掘削工	機械掘削0.6㎥バックホウ	24.7	4.1	0.0	1.4	30.1
〃	人力併用機械掘削0.6㎥バックホウ	12.3	2.0	0.0	2.7	17.1
砂埋戻し工	人力投入人力締固め購入砂	0.0	0.0	24.7	2.7	27.4
発生土埋戻し工	バックホウ投入タンパ締固め	21.9	3.6	0.0	7.2	32.7
残土処分工（積込み）	11tダンプトラック機械積み	64.0	8.6	0.0	3.1	75.7
矢板打込み工	バイブロ40kw、クローラ35～37t	118.5	36.5	0.0	17.0	172.0
矢板引抜き工	〃	84.2	10.8	0.0	8.2	103.2
支保材取付け工	鋼製2段トラック、クローラ15～16t	34.6	36.3	0.0	14.4	85.3
支保材取除き工	〃	15.7	5.0	0.0	9.0	29.8
管布設工（ヒューム管）	トラッククレーン10～11t	11.1	2.5	317.7	8.7	340.1
ぐり石基礎工		0.0	0.0	12.3	1.2	13.5
水替え工	水中ポンプ	5.4	0.3	0.0	0.3	5.9
舗装取り壊し工		9.5	1.5	0.0	0.5	11.5
路面復旧工		1.0	0.3	41.2	0.4	42.9
合計		402.9	111.5	395.9	76.9	987.2

表１－２　下水道管渠敷設工事エネルギー原単位
（推進工法、内径1100mm）

（管敷設工事）

(Mcal/m)

工程	規格	直接投入	間接投入			合計
			建設機械	建設資材	労働力	
管推進工	管内掘削工	0.0	0.0	784.6	11.8	796.4
	坑内作業工	12.4	161.6	0.0	47.6	221.6
	坑外作業工	15.6	69.9	0.0	35.5	121.1
	ずり運搬工	74.9	10.0	0.0	3.7	88.6
管目地工	管目地工	0.0	0.0	0.0	6.2	6.2
	モルタル工	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5
注入工	滑材注入工	9.4	42.3	223.0	9.0	283.8
	裏込め注入工	4.7	7.0	90.7	11.2	113.6
合計		117.1	290.8	1098.7	125.1	1631.8

（立坑工事）

(Mcal/１箇所)

工程	規格	直接投入	間接投入			合計
			建設機械	建設資材	労働力	
管布設工		27.8	6.29	794.4	6.2	834.7
仮設備工	支圧壁工	525.9	162.7	2335.7	254.2	3278.5
	クレーン設備工	1572.5	366.3	0.0	747.3	2686.1
	基礎コンクリート工	55.9	11.9	681.6	48.1	797.6
	発進坑口工	89.5	58.4	397.7	125.4	670.9
	推進設備工	18.9	406.5	0.0	334.7	760.1
	刃口撤去工	44.4	10.0	0.0	13.7	68.1
	鏡切り工	0.0	0.0	0.0	44.3	44.3
立坑工（No.1）	路面とりこわし工	108.6	18.2	0.0	5.9	132.7
	機械掘削工	494.0	81.4	0.0	27.4	602.8
	床掘り工	0.0	0.0	0.0	12.5	12.5
	砂埋戻し工	438.5	72.2	0.0	143.9	654.5
	残土運搬工	512.1	68.8	0.0	24.9	605.8
	土留め工	2562.4	389.2	1231.4	457.8	4640.9
合計		6450.3	1652.0	5440.8	2246.3	15789.3

表２　福岡市工事サンプル

工事	工法	請負金額（円）
A	推進	39,552,000
B	推進	134,315,090
C	推進	165,315,000
D	推進	60,770,000
E	開削+推進	121,334,000
F	開削+推進	182,624,150
G	開削+推進	236,591,000
H	開削	119,141,130
I	開削	39,116,120

表３　福岡市工事サンプル評価

工事	工事内容			積み上げ法（Gcal）				産業連関法	A/B
	開削(m)	推進(m)	マンホール	開削	推進	マンホール	合計(A)	(B)（Gcal）	(%)
A	0	101	3	0	150	17	167	194	85.8
B	0	369	6	0	547	34	581	659	88.2
C	0	360	3	0	533	17	550	811	67.8
D	0	62	2	0	91	11	102	298	34.3
E	307	291	16	303	430	91	824	595	138.4
F	26	243	9	26	360	51	437	896	48.7
G	616	211	42	608	312	238	1,158	1,161	99.8
H	153	0	4	151	0	23	174	585	29.7
I	103	0	1	101	0	6	107	192	55.7

水道管渠敷設工事のサンプルA～I（表2）について投入エネルギー量を求めたのが表3である。ただし，過去に敷設された管渠の大きさについての個別的なデータが得られなかったため，開削工法については内径700mm，推進工法については内径1100mmと一律に設定した。ここには，産業連関法による結果を比較のために記している。ここでの産業連関法の結果は，建設部門分析用産業連関表における土工工事の原単位と工事費金額とから求めたものである。ただし，ここでは一次の波及効果までを考慮した。より高次の波及効果を取り入れるほどこの値は更に大きくなり，積み上げ法によって求めた値との違いは大きくなる結果となった。表3の結果を見ると，2つの手法による評価はオーダー的には近い値であるものの，一致度にはかなりばらつきがある。

（2）下水処理場のLCE

建設と運転の2つのステージについて，処理場のエネルギー消費を求める。ここで，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。

①建設エネルギー

下水処理施設についての契約工事データ[11]と，福岡市の3つの処理場A,B,Cの工事実績データ[12]により推定した。調査対象とした処理場の工事件数は1961年から1993年までの間に約1500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（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。以上，この計算手順を図2に示す。

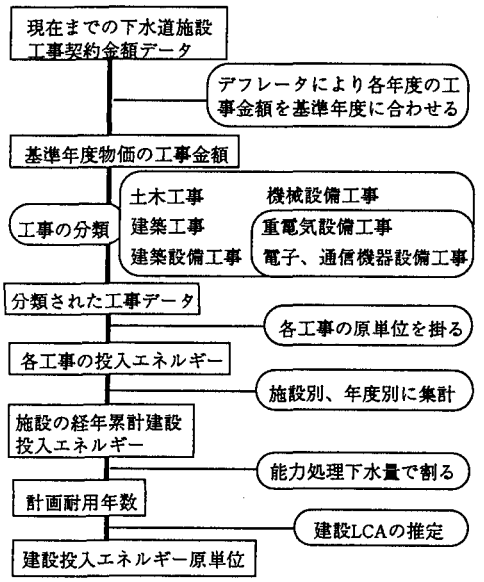

図2　建設エネルギー計算フロー

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。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。

上記の工事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，

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

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年間において設備の補修・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し，耐用年数だけ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てよかろう。そこで，

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

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，

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

によって推計される。

図3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。

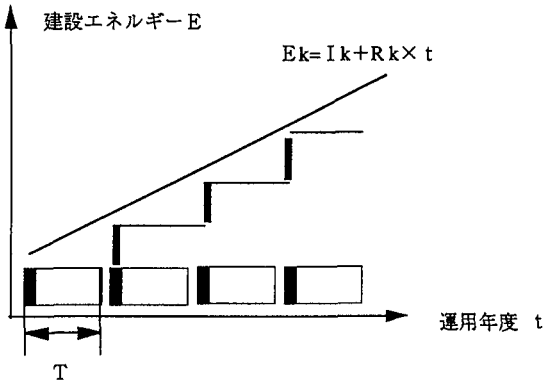

図3－1　更新エネルギーモデル1
（構成要素が一つの場合）

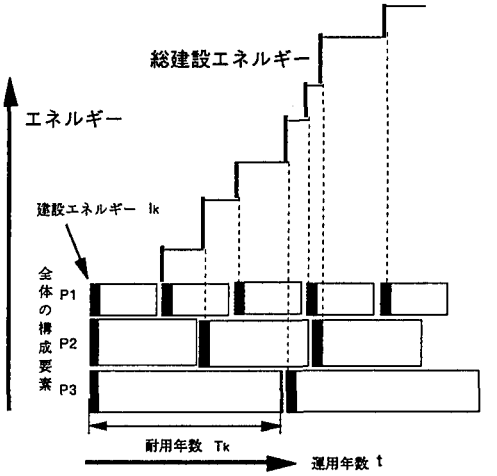

図3－2　更新エネルギーモデル2
（構成要素が複数の場合）

福岡市内の3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4である。ここで，各施設の耐用年数は土木・建築設備が50年（当初の建設期間5年を除けば45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フィットさせて表示している。

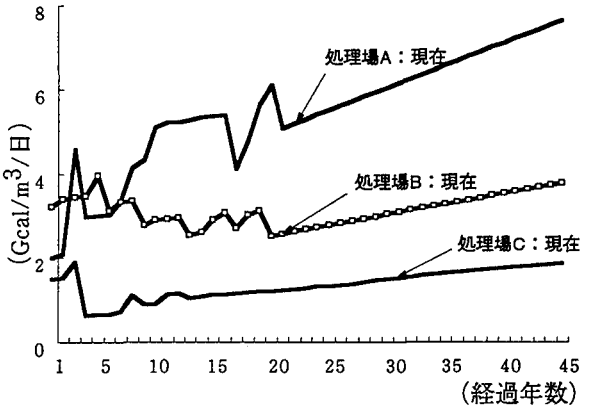

図4　各処理場の経年建設エネルギー－福岡市の例－

この計算結果の内訳を表4にまとめる。ここで，ALCEは年間当たりのLCE（"Annualized Life-Cycle Energy"）を意味する。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」として示す。

②運転投入エネルギー

処理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[13]を積み上げることによって求めた。薬品については，薬品（塩素，塩化第二鉄，消石灰，次亜鉛苛性ソーダ，塩酸等）の使用量から製造エネルギーを求めることが可能であるが，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[14]

表4　建設工事別LCE－福岡市の例－

	一年当たりの建設LCE（ALCE）						処理能力水量	処理能力当たりALCE
	土木	建築	建築設備	機械	電気	合計		
	Gcal	Gcal	Gcal	Gcal	Gcal	Gcal	m³/日	Mcal/m³
処理場A	2,373	597	110	1,112	632	4,824	27,400	176
処理場B	3,733	1,961	155	2,409	1,142	9,400	116,700	81
処理場C	5,001	812	100	3,429	1,256	10,597	350,000	30

に基づき，そのLCE原単位として3200kcal/m³の値を用い，それに年間利用水量を乗じて求めた。以上の手順を図5に示す。なお，入手できた実績データは1981年から1993年までのものである。

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の運転エネルギーの関係（1981～1993年の各年のデータ）を示す。この図によれば，年間処理水量が大きいほど運転原単位は小さい傾向にあり，規模のメリットが読み取れる。

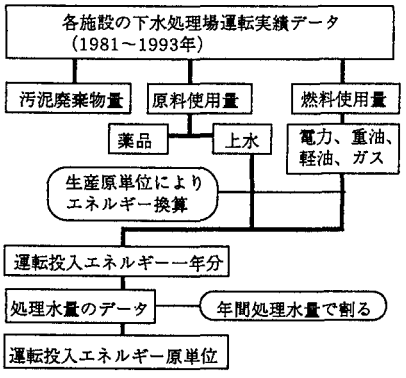

図5　運転エネルギー計算フロー

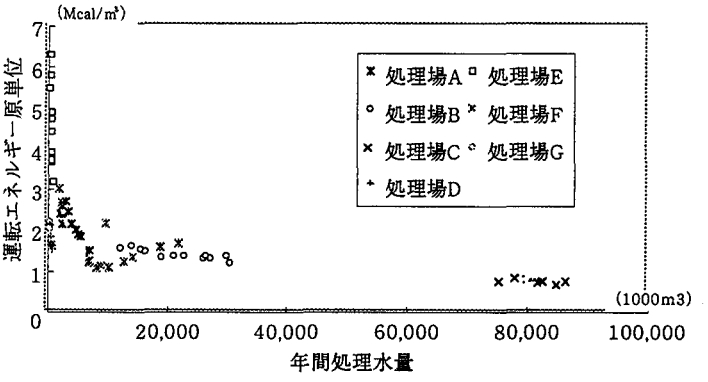

図6　年間処理水量と運転原単位－福岡市の例－

（3）下水道システムとしての全体的評価

福岡市内の処理場（A,B,C）と管渠の評価をあわせて，下水道システム全体（3処理場の総和）としてのLCEを1年当りの値に換算して評価した結果が表5である。ここで，ALCEは年間当たりのLCE（"Annualized Life-Cycle Energy"）を意味する。ただし，現存の全管渠についてその工法を特定することはできなかったため，ここでは管渠の全長が一律に開削工法（内径700mm）によって建設されたものと仮定した。実際には，推進工法によって建設されたものもあるので，この評価は過小評価になっている可能性が強い。

この結果を見ると，下水道システム全体のLCEのうち，運転エネルギーは約83%と大きい。また，建設だけに着目すれば，管渠敷設工事に投入される分が全体の約8割を占める。

次に，各処理場ごとのALCEの推計結果を表6に示す。ここで，福岡市における施設の運用実態に基づき，処理水量は処理場の能力の65%とした。また，管渠については，各処理場の処理区域内に敷設されているものをその処理場に帰属するものとした。

以上の結果として，処理水量1m³当たりのALCEとして，1100～3400kcal/m³という値を得た。ここで対象とした3つの処理場の比較によれば，下水処理場の処理水量当りのLCE原単位は，処理水量が大きなほど小さい。すなわち，規模によるスケールメリットが認められる。

表5　下水道システムのALCE（1年当たり）
－福岡市の例－
（Gcal、カッコ内は%）

	処理場	管渠
建設	3,345 (2.8)	17,163 (14.2)
運転	99,972 (83.0)	——

表6　各処理場のALCE－福岡市の例－

平成5年	処理場A	処理場B	処理場C
処理場ALCE(Gcal)	13,987	42,010	68,797
管渠ALCE(Gcal)	8,429	26,164	24,760
年間処理水量（万m³）	650	2,769	8,304
処理水量当たりのALCE原単位(Kcal/m³)	3,448	2,462	1,127

5．まとめ

（1）本研究においては，下水処理場及び管渠を対象に，その建設及び運転（維持・管理）におけるライフサイクルエネルギー（LCE）を試算した。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。

（2）本研究の推計結果によれば，下水処理場の処理量が大きいほど，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。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。

（3）下水道システム全体のライフサイクルエネルギーのうち，運転エネルギーが約83%，管渠敷設エネルギーが約14%，処理場建設エネルギーが約3%を占めるという結果が得られた。

（4）下水道システムの建設だけに着目すれば，管渠敷設に投入されるエネルギーが全体の約8割を占め，管渠敷設への投入エネルギーの約32%が管渠製造のためであった。

（5）本計算では，施設運用の実態に基づき処理水量は処理場の能力の65%としたが，もしこれが100%に近ければそれだけ建設に要するLCEは減少するはずである。施設能力に余裕をもたせるのは，維持管理上のさまざまな理由によるものであるが，その是非はLCE的には今後検討すべき課題である。

（6）本研究では，評価項目としてエネルギーだけに着目したが，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，管渠の維持・管理にともなう負荷の定量化，施設の最終廃棄段階での負荷の評価，ポンプ場や汚泥処理場についての算定などが残された課題である。汚泥の焼却や消化ガスの利用によって回収されるエネルギーについても検討が必要である。また，今回対象とした福岡市内とは異なる処理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。

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り，ここに感謝の意を表します。

参考文献

1）(社)未踏科学技術協会・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」，エコマテリアル研究会，1995

2）(社)未踏科学技術協会・エコマテリアル研究会：「LCAのすべて－環境への負荷を評価する」，(株）工業調査会，1995

3）池田秀昭，井村秀文：環境システム研究，Vol21，pp.192-199

4）銭谷賢治，井村秀文：環境システム研究，Vol22，pp.147-153

5）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

6）建設省建設経済局調査情報課監修：昭和60年建設部門分析用産業連関表，建設物価調査会，1989

7）通商産業大臣官房調査統計部：通産統計ハンドブック，社団法人 通産統計協会，1988,1995

8）建設大臣官房技術調査室監修：土木工事積算基準マニュアル，建設物価調査会，1994

9）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

10）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（平成6年度度版），通商産業研究社，p.16，1995

11）日本下水道協会：平成4年版下水道統計－財政編，pp.122-245，1994

12）福岡市下水道局：福岡市下水道工事データ

13）福岡市下水道局：福岡市下水処理場運転実績データ，1981-1993

14）水道と地球環境を考える研究会：地球環境時代の水道，技報堂出版株式会社，p.109，1993