

LCC 及び LC-CO₂ による污水収集システムの 評価に関する研究

秋永薫児¹・柏谷衛²

¹正会員 工修 株式会社日水コン東北下水道部 (〒980-0011 宮城県仙台市青葉区上杉 5 丁目 3-36)

²フェロー会員 工博 東京理科大学 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

本研究は、比較的人口密度の低い地区での污水収集面整備計画を策定する際の污水収集システムの選定と計画に当って、経済的効果のみならず環境への影響、特に地球温暖化の抑制を加えた評価方法を提案するため行ったものである。面整備では、自然流下システムのほか、圧力及び真空システムの各 2 種類を代替案として選び、地区面積 20ha の平坦地で人口密度 5, 20, 50, 70 人/ha についてケーススタディを行った。経済効果の検討はライフサイクルコスト(LCC)、環境への影響の検討はライフサイクル発生二酸化炭素(LC-CO₂)にて算出し、それぞれ評価するとともに、これらを合せ評価する統合評価指標(単位は 10³円/人・年)を提案した。

Key Words: life cycle cost (LCC), life cycle carbon dioxide (LC-CO₂), alternative sewer system, pressure sewer system, vacuum sewer system, gravity system

1. はじめに

わが国の下水道普及率は平成 10 年度末で 58% に達しているが、行政人口 5 万人未満の小都市での普及率は未だ 20%程度に留まっており、下水道普及率は都市人口によってその差が極めて大きいことが知られてきた¹⁾。現在進行中の第 8 次下水道整備 7 ヶ年計画の目標である普及率 70%を達成するためには、人口密度の余り高くない地区にも幹線管きよを整備するとともに、その進捗に合せた面整備を実施していかなければならないことになる。特に人口密度の比較的低い地区、起伏に富んだ地区での面整備では、今までの面整備手法を適用しては、非効率的、非経済的となる場合が多いことから、従来とは異なる発想でシステムを構成することが必要となる。このことから、建設段階から維持管理、設備の更新を含めて評価するライフサイクルコスト(以下、LCC という)の考え方が建設物件の最適意思決定に必要な手法として下水道面整備にも要求されてきた。

この LCC のコンセプトと評価手法は A. J. Dell'isola らによる解説書が 1970 年代にすでにアメリカで出版されており、同国の環境保護庁(USEPA)は 1990 年まで実施してきた地方自治体への下水道建設補助金の交付に際して、LCC によるコスト評価を義務付けてきた^{2), 3)}。数年前からわが国でも下水道構造物に対する LCC の考え方が

検討されるようになってきており^{4), 5)}、自然流下システム管きよのコスト縮減について検討した論文も発表されてきている^{6), 7)}。

筆者らはモデル地区での自然流下式、圧力式、真空式の污水収集システム(以下、それぞれ自然流下システム、圧力システム、真空システムという)の代替案評価において、「建設コストと維持管理コスト」による評価と LCC による評価が異なる結果となることを明らかにしており⁸⁾、面整備地区の諸条件に応じた省コストのシステム選定に LCC の適用は大きな意味を持つことを述べてきた。圧力システムと真空システムの污水収集システムはアメリカで約 30 年の歴史を持ち、USEPA は技術移転計画^{9), 10)}の中で、その普及を推奨してきた。最近筆者らが行ったアメリカでの聞き取り調査では、1990 年に下水道建設に対する補助金制度が廃止された以降、圧力システムと真空システムの污水収集システムはその建設費が自然流下システムに比べて安価であることから、同国ではその普及が一段と進んでいることが判明した。

しかしわが国の現状では、圧力システムと真空システムは未だ特別な条件下での面整備代替案としての認識が強く残っており、面整備は自然流下システムとの固定観念でシステム選定が行われている場合が多い。しかし最近では、公共事業の予算面の制約からコスト縮減が強く望まれており、圧力システムや真空システムの污水収集システム

を面整備の代替案として検討するように行政的な指導が行われるようになってきた。

また地球温暖化防止の京都会議において、CO₂をはじめとする温暖化ガスの削減が国際的な約束となった。下水道幹線管きよや面整備に使用される材料は、その大部分が工場製品であり、多量のエネルギーを消費して生産される。エネルギーの消費は、即、二酸化炭素（以下、CO₂）の発生を伴う。下水道施設のなかで、管きよの占める割合が大きく、その建設、更新、維持管理などで発生するCO₂排出量は無視できないと考えられた。これまでも下水処理施設や幹線管きよのライフサイクルエネルギー（LCE）やライフサイクルCO₂（LC-CO₂）がベースのライフサイクル評価（LCA）に関する研究は盛んに行われているが^{11)~14)}、下水道の面整備でのLCA研究^{15),16)}はまだ少ない。一般の土木建築物では窒素酸化物や硫黄酸化物のインベントリー分析も行われているが¹⁷⁾、わが国ではCO₂の約40%は土木建築活動により発生していることから¹⁸⁾、下水道の面整備についてもLC-CO₂で評価するのが適切であると考えた。炭素排出量の算定に当ってはLCAのデータベースが利用可能であるが^{19),20)}、面整備手法の代替案比較では使用する個々の製品の違いや施工条件による相違を表現することが困難であった。ここでは算定に用いた原単位（単位：kg-C）を用いて^{21),22)}、発生するCO₂負荷量を算定し、これをLC-CO₂として扱うこととした。

本研究は、このような現状を踏まえて、下水道の面整備に圧力システム、真空システムという代替システムを広く導入していくことを前提に、その評価をLCCのみならず、LC-CO₂とその処理・処分コストについても併せて行うことを提案すべく実施した。この研究では特殊条件を排除するために、平坦地をモデル地区としてケーススタディを行うこととし、このモデル地区内の面整備を行う際のそれぞれのLCC及びLC-CO₂を算出した。具体的には、平坦地面積20haのモデル地区において、代替システム6案、人口密度4案の組み合わせ24ケースである。それらのLCCとLC-CO₂をできるだけ詳細に算出して、最適システム選定のための比較検討を行うべく、人口密度別に結果を整理した。そして各システムの経済効果と環境負荷特性を示すために1人当りの年間換算値を算出した。また、LCCに発生CO₂の処理・処分コストを加えた統合評価指標による代替案の選定手法と人口密度の相違による適用性を検討した。

筆者らは、LCE評価において、人口密度（30～100人/ha）、地形（上り勾配10%と平坦地比較）及び面積（5、10、20ha）による自然流下システ

ム、圧力システム、真空システムの特性的違いと適用性もすでに提案してきた^{23),24)}。今回の研究では、これらの研究結果を踏まえて、コストと環境負荷の細部にわたる比較評価の結果とその手法について検討することに主眼を置いて、モデル地区を幹線管きよへの接続面積20haの広さにとり、平坦地という条件に絞って、人口密度による特性評価を行った。LCE評価の成果より、人口密度の違い、地形の違い、汚水面積の違いなどの特性が異なっても、同様の手法を用いることで評価が可能であることを提案してきた。また、このモデル地区での検討結果は、コスト、環境両面からの面整備方法の評価が今後の最適な面整備システムの選定に有用であることを示唆している。

2. 基礎数値算出の考え方

LCC及びLC-CO₂の算定において、使用する製品、建設工事、運転、維持管理、廃棄にかかる基礎数値を算定するに当たり、次の考え方をした。すなわち、製品価格は物価資料に基づき、記載されていないものについてはメーカー見積もり値とした。建設コストは積算要領に基づき、積み上げを行った。CO₂の算定に当っては、積み上げ法によるミクロな解析を行い、CO₂発生原単位を求めた。素材は文献などに拠ったが、材料・製品については国内の当該メーカーに協力依頼し、電力、燃料消費量データを収集し、製品別のCO₂発生原単位を算出した。また、施工については積算資料を用いて条件別に積み上げた。各製品のデータはネジ、コンデンサー、コード線と言った小さな部品を除き全て収集できており、この点から製品にかかるCO₂発生原単位の精度はほぼ満足されたと考えている。これにより、管径、土被り、ポンプ類の機種、材質による違いを表現できるようになり、詳細な特性の表現と細部の比較検討が可能となった。

また、維持管理について圧力及び真空システムの実績のあるオランダと英国の維持管理会社より資料を収集し、作業項目とその頻度及び故障率を設定した。このことで実態に近いモデルを作ることができた。自然流下システムについては調査報告書²⁵⁾より全国の実態を項目と頻度及びコストで整理した。しかし、ばらつきが大きいため中間値を用い、ライフサイクルでの維持管理作業をモデル化した。

コストとCO₂の算定では計算の流れと項目は同じであるが、コストが人件費を考慮するのに対し、CO₂の算定には人間が排出するCO₂量は考慮していない。また、各製品の耐用年数を考慮して交換、

表-1 管路製品（自然流下システム）（円/m）

管径 (mm)	CRC管 (外圧・1種B形)	推進用CRC管 (E形)	PVC・VU管 (ゴム輪継手)
150	1,845	—	1,090
200	2,110	8,750	1,790
250	2,505	9,450	2,690
300	2,970	9,140	3,780
350	3,660	11,980	5,100

注) 2000年1月建設物価²⁶⁾

表-2 管路製品（圧力及び真空システム）（円/m）

管径(mm)	PVC・VP管 ¹⁾ (ゴム輪継手)	PE管 ²⁾ (「プレザント」直管)
50	410	—
75	810	1,360
100	1,210	2,570
125	1,600	—
150	2,340	5,340
200	3,780	9,750
250	5,790	15,640

注) 1) 2000年1月建設物価²⁶⁾ 2) メーカーヒヤリング³⁾

表-3 枿（管底深さ0.8m）（円/基）

名称	分類	価格
枿	RC製	28,000
	PVC製	43,700

修理を行うように設定しているが、リサイクルはせず、廃棄とした。その際、廃棄コストは処分コストを加味しているが、廃棄の際のCO₂原単位は、積み込み、運搬作業分のみを計上した。

3. 素材・製品

(1) 価格

汚水収集システムに必要な主要製品としては管路材、人孔、枿、ポンプ類及び弁類があり、ケーススタディで用いた価格を表-1～表-5に示す。価格データは市販の物価資料^{26), 27)}と関連メーカーの見積もりを整理した。表-1は自然流下システムの管路材として遠心力鉄筋コンクリート管（以下、CRC管という）と下水道用硬質塩化ビニル管（以下、PVC・VU管という）のm当りの価格を示している。表-2は圧力システム及び真空システムで用いる水道用硬質塩化ビニル管（以下PVC・VP管）及び下水道用ポリエチレン管（以下、PE管）の価格である。PVC・VP管は物価資料よりデータを整理したが、PE管はメーカーヒヤリング結果をまとめた。表-3は自然流下システムで用いられる汚水枿[コンクリート製（以下、RC製という）]及びPVC製の価格を示している。表-4は自然流下システムの組立て人孔の各部品（斜壁、直壁、

表-4 人孔製品価格（蓋含む）（10³円/基）

深度 (m)	1号 (普通)	1号 (深形)	2号 (普通)	2号 (深形)
2.0	170	—	239	—
3.0	214	—	295	—
4.0	241	—	337	—
5.0	263	—	384	—
6.0	—	321	471	—
7.0	—	350	—	535

表-5 真空ポンプ、圧送ポンプ（10³円/基）

出力(kW)	真空ポンプ	圧送ポンプ
2.2	1,000	—
3.7	1,380	3,110
5.5	1,920	4,160
7.5	2,360	4,480
11.0	2,680	5,020

注) 価格は3社5機種平均値

表-6 GPユニット（10³円/基）

規格	1.0kW	1.2kW	1.5kW	2.2kW
平均価格	1,414	1,474	1,510	1,680
備考	FRP槽	RC槽	RC槽	RC槽

注) GPユニット：GP、着脱装置、貯水槽、制御盤含む
FRP槽：FRP製貯水槽
RC槽：鉄筋コンクリート製貯水槽

表-7 真空弁ユニット（10³円/基）

規格	宅内用・FRP製 (深さ1.1m)	1号人孔・RC製 (深さ2.0m)
平均価格	727	1,046

管取付壁、底板) 価格を人孔深さに応じて組み合わせて集計したものである。表-5は真空システムの真空ステーションに設置される真空ポンプ及び汚水ポンプの価格を整理したもので、真空ポンプは3社5機種の平均価格を示し、汚水ポンプは物価資料価格を出力別に整理した平均値を示している。表-6は圧力システムに用いるグライNDERポンプ・ユニット[破碎機付汚水ポンプ(以下、GPという)、貯水槽、着脱装置、水位計及び制御盤](以下、GPユニットという)の出力数別価格を示したもので、6社平均見積り額(据付費含む)を示している。表-7は真空システムに用いる真空弁ユニットの価格を示しており、宅内用と公道下用の2種類を示している。表-8はGPの部品価格であり、交換時期も示している。表-9は真空弁の部品価格と交換時期を示しており、表-10には真空ステーションの機器部品の価格と交換時期を示している。尚、表-8～表-10の価格と交換時期はメーカーヒヤリングの結果を整理したものである。

表-8 GP用交換部品 (円/個)

部品名	能力	1.0kW	1.2kW	1.5kW	2.2kW
上下軸受け		6,000	6,000	6,000	8,000
軸封装置		15,000	15,000	15,000	25,000
潤滑油		1,500	1,500	1,500	2,100
回転刃		20,000	20,000	20,000	33,000
固定刃		22,000	22,000	22,000	36,000
小計		64,500	64,500	64,500	104,100
保守点検年間コスト		11,650	11,650	11,650	15,200

注) 不具合発生率10%として保守点検コスト算定
メーカー見積もり値

表-9 真空弁部品, 交換頻度とコスト

部品名	価格(円/個)	交換頻度	年換算コスト(円)
コントローラー	71,400	12年	5,950
弁体シート	2,500	12年	208
軸シール	4,500	12年	375
軸受け	2,000	12年	167
弁内ダイヤフラム	7,000	12年	583
スプリング	4,600	12年	383
Oリング	800	12年	67
交換コスト	16,250円/基	12年	1,354
オーバーホール	109,050円/基	12年	9,090

注) メーカーヒヤリング

(2) 価格の評価

自然流下システムに使用する管路と圧力及び真空システムで使用する管路は管径が大きく違うため、m当りの製品価格は2倍以上の開きが生じる。また人孔が数10mおきに設置されるためm当りで数10³円が加算される。圧力システムと真空システムではそれぞれ汚水の収集用樹またはユニットが設置されるため、その個数によってm当りの製品価格が左右される。

真空弁ユニットの価格はGPユニットに比べ約50%であるが、真空ステーション工事費におよそ100×10⁶円を要するため、圧力システムと真空システムを比べると、ある程度のユニット数を有する規模でなければ真空システムが安くならない特性がある。例えば、真空弁727×10³円/基(表-7参照)、GPユニットを1,414×10³円/基(表-6参照)とし、配管コストを同じとすれば、価格差は687×10³円/基となり、真空ステーション工事費を相殺しようとする146台以上のユニットを有するシステム規模が経済性を高める条件となる。また、部品コスト(表-8、表-9及び表-10)は単純に比較できないが、年換算の平均値では真空弁ユニットがやや安く、真空ステーションの年換算コストを加えてもユニット数の増加に伴い、圧力システムの部品代と真空システムの部品代の差が広がっていくことが予測される。

表-10 真空ステーション機器部品, 交換頻度とコスト

機器名	部品名	交換頻度	価格(円)	年換算コスト(円)
真空ポンプ	軸受け グランドパッキン スリーブ カップリングゴム カスケット 平均	3年	11,000	3,667
		1年	5,000	5,000
		3年	85,800	28,600
		3年	6,000	2,000
		分解時	4,000	-
		平均		9,817
圧送ポンプ	軸受け メカニカルシール スリーブ カップリングゴム 潤滑油 平均	10年	35,000	3,500
		5年	110,000	22,000
		5年	55,000	11,000
		5年	8,000	1,600
		1年	2,000	2,000
		平均		8,020

注) 真空ポンプは口径80mm, 圧送ポンプは口径150mm, メーカーヒヤリング

(3) CO₂発生原単位

CO₂の発生原単位についてはいくつかの調査結果があり、数値には多少ばらつきがある。ここで用いた素材、製品などの主なCO₂発生原単位を表-11に整理した。製品のCO₂発生原単位は該当製品を製造している国内の工場からその全工程で消費される月間の電力、燃料及び製品の月間生産量(個数または重量)を入手し、各製品について算出した。

表-11に示す水のCO₂発生原単位は国内の上水処理における単位量当りの電力消費量より算出した。铸铁は粗鋼との成分がやや異なるだけで、製造におけるプロセスは同じであるので、ポンプ、弁、人孔蓋のCO₂発生原単位の算定においては同じとみなした。ポンプメーカーでは電炉による製造を行っており、原料として鉄屑を使用していた。この鉄屑は型抜きされた鉄板であったため、原料のCO₂発生量を考慮するために、高炉による鉄の生産工程のCO₂発生原単位を文献より求め、これに熱延鋼板製造のCO₂発生原単位を加えたものを原料のCO₂発生原単位とした。熱延鋼板製造のCO₂発生原単位は消費電力量と燃料消費量データを国内工場より入手し、それに文献値^{21), 28)}を加えた平均値とした。電炉によるCO₂発生原単位を求めるために、国内4社のデータと文献^{21), 28)}データ2件を整理したが、最大値と最小値の差が過大であったため、この両者を削除した4データの平均値を用いた。ポンプ類の铸铁製造においては、電炉であることから鋼板の製造に電気炉の値を加えた。アルミニウムの用途がポンプモーターのステーター(電磁鋼板)の固定であるため、文献²¹⁾より得た値に製造及び輸送を加えて算出した。

CRC管(B形)は3社のデータより算定した結果の平均である。製造工程において、セメント、鉄筋、水、砂・砂利が使用され、電力、重油及び軽油が消費される。各管径別に材料使用量と電力、

表-11 CO₂発生原単位

分類	名称	採用値	単位	備考	分類	名称	採用値	単位	備考
素 材	セメント	0.228	kg-C/kg	学会 LCA ²²⁾	製 品	CRC管(B形)	3.516~32.596	kg-C/m	φ150~700 算定値
	舗装用アスファルト	0.0113	kg-C/kg	学会 LCA ²²⁾		小口径推進管	5.718~39.053	kg-C/m	φ200~700 算定値
	水	0.061	kg-C/m ³	算定値		PVC-VU管	0.441~20.169	kg-C/m	φ75~600 算定値
	砂	0.00154	kg-C/kg	学会 LCA ²²⁾		PVC-VP管	0.553~11.474	kg-C/m	φ50~300 算定値
	砂利	0.00189	kg-C/kg	学会 LCA ²²⁾		PE管	0.356~8.710	kg-C/m	φ30~300 算定値
	粗鋼(高炉)	0.312	kg-C/kg	算定値		GP	55.5~99.3	kg-C/基	1.0~3.7kW 算定値
	粗鋼(電炉)	0.551	kg-C/kg	算定値		真空弁本体	8.7	kg-C/基	算定値
	熱延鋼板(高炉)	0.422	kg-C/kg	算定値		排水ポンプ	42.6~355.4	kg-C/基	0.75~11kW 算定値
	アルミニウム	2.616	kg-C/kg	算定値		RC樹	27.5	kg-C/個	算定値
	PVC	0.024	kg-C/kg	文献値 ²¹⁾		PVC樹	3.94	kg-C/個	算定値
燃 料 類	PE	0.005	kg-C/kg	文献値 ²¹⁾	仕切弁	16~172	kg-C/個	算定値, プラスチック製品 φ40~150mm	
	エポキシ樹脂	1.077	kg-C/kg	文献値 ²¹⁾	逆止弁	0.11~2.01	kg-C/個	算定値, プラスチック製品 φ15~80mm	
	重油	0.736	kg-C/L	文献値 ²¹⁾	空気弁	31.9	kg-C/個	算定値, 鋳鉄製	
	軽油	0.721	kg-C/L	文献値 ²¹⁾	人孔(1号)	180~427	kg-C/個	深さ1.5~5.0m	
他	ガソリン	0.643	kg-C/L	文献値 ²¹⁾	人孔(2号)	336~638	kg-C/個	算定値	
	電力	0.1244	kg-C/kWh	文献値 ²¹⁾	バックホウ	4,700	kg-C/台		
					輸送	0.323~0.742	kg-C/km	2~10t 車	

記) 学会 LCA : 土木学会 LCA 小委員会推奨値²²⁾

燃料消費量を求め、素材、製造の CO₂ 発生原単位を求めた。推進工法用 CRC 管は CRC 管 B 形の各管径別単位重量当り CO₂ 発生量に基づいて、各推進工法用管路材の重量から算出した。人孔、RC 樹についても製造方法は同じであるので、各組立て部品の重量より算出した。人孔蓋は粗鋼の値より 1 号人孔、2 号人孔用蓋の各メーカー製品の平均重量から各々算出した。

PVC 管及び PE 管は素材である PVC 及び PE の発生 CO₂ 値を文献²¹⁾より入手し、製造工程にて発生する CO₂ は、メーカー 2 社の工場より収集した単位重量あたりの消費電力量より算出した。文献²¹⁾によると、素材製造で発生する CO₂ は「製造工程の化学反応による発生量」と「蒸気、電力、燃料などの使用に伴う発生量」とに分類されており、両者を合計して求めた。PVC 樹の素材は管材と同じくし、樹の製造工程での消費電力量をメーカーより入手して製品の発生原単位とした。

GP の材料構成はケーシング、インペラー、グラインダーの鋳鉄による型枠構造によるもの、電磁鋼板(ステーター、ローター)と銅線(巻線コイル)から構成されるモーター部に分類した。巻線コイルは銅の素材 CO₂ として文献値²¹⁾を用い、工場ヒヤリングによるエナメル塗装作業の発生 CO₂ 及び銅線の加工として鋼材の圧延工程での発生 CO₂ を用いて巻線製品の発生原単位とした。

弁類は鋳鉄製のもの型枠製造であるため、各重量別の素材及び製造時の発生 CO₂ として、プラスチック弁類の素材は PVC 管と同じく、製造について消費電力量から算定した。工場の製造機械についてはその製品の CO₂ 発生量を考慮していない。

輸送 CO₂ はトラックの燃費より燃料消費量を算出し、輸送する製品重量別の CO₂ 発生量を算定した。

4. 工 事

(1) 工事コスト

a) 管路工事コストの基本的な考え方

工事コストの算定は国内の土木及び下水道関係の積算資料^{29)~33)}に基づき行った。開削工事における CRC 管、PVC-VU 管、PVC-VP 管及び PE 管について各々条件を設定し、管径、土被り別に単位延長当りのコストを算定した。推進工法は推進工法用積算資料³³⁾に基づき、立坑(発進及び到達)と推進工に分けて積算し、深さ、管径別に整理した。

開削工法の条件は積算要領に基づき、砂質土としての歩掛を適用し、状態は普通とした。管基礎は、CRC 管のコンクリート基礎は厚さ 200mm、砕石基礎は厚さ 200mm、PVC-VU 管及び PVC-VP 管では砂基礎(厚さは下部 400mm、上部 100mm)とした。掘削深が 2 m を超える場合には、水替えを行うとした。工事に使用する建設機械については、賃料、燃料代、損料を考慮している。積算にあたって、矢板支保工にはトラッククレーン、打ち込み・引き抜きにはパイロハンマー、掘削用にバックホウ(平積 0.35 m³)を用いた。埋め戻しは人力及び機械にて行い、締め固めはタンパ、敷均しはブルドーザを用いた。残土運搬にはダンプトラック(2t)を用い、残土処分費 4,000 円/m³を計上した。土留工については、掘削深が 1.5m を超える場合に矢板を用い、1.5m~2.0m 未満には軽量鋼

表-12 管路工事コスト (直接工事費) (単位: 10³円/m)

管種	管 径 (mm)					
	50	75	100	150	200	250
CRC管 (1.2m)					30.1	35.2
CRC管 (4.0m)					105.2	109.0
PVC・VU管 (1.2m)				25.2	26.5	28.6
PVC・VU管 (4.0m)				91.9	94.3	97.6
VP管 (1.2m)	16.8	17.1	17.5	25.2	26.5	28.6
PE管 (1.2m)	16.9	17.2	17.6	25.4	26.9	29.2

注) 地下水位 2m, 普通地盤, 人孔含まない

表-13 人孔工事コスト(直接工事費) (単位: 10³円/m)

掘削深 (m)	土工		人孔設置		合計	
	1号	2号	1号	2号	1号	2号
2.20	98.7	130.2	28.0	29.9	126.6	160.1
2.50	109.8	144.6	28.0	29.9	137.7	174.5
3.00	114.0	151.4	28.0	29.9	142.0	181.3
4.00	135.0	177.7	28.0	29.9	163.0	207.6
5.00	183.8	239.2	29.2	30.9	213.0	270.1
6.00	220.8	286.7	30.4	31.9	251.2	318.5
7.00	268.7	343.7	31.6	33.5	300.3	377.2
8.00	325.1	414.4	32.8	34.7	357.9	449.1
9.00	400.9	508.4	34.0	35.9	434.9	544.3

矢板建て込み, 2.0m~3.5m 未満に軽量鋼矢板打ち込み, 3.5~9.0m に鋼矢板 (I~IV形) 打ち込みをそれぞれ適用した。

地下水ハンドブック³⁴⁾によると, 水替えはウェルポイント工法による地下水排水をそのポンプ能力から1セット 1.5~1.75m³/分としており, これを目安にしてポンプ運転コストを算定した。算定条件は設置・撤去, 1 スパン 50m, 水替え日数を掘削, 管敷設, 埋め戻し, 人孔設置1箇所の施工日数として7日, 作業排水方式として1日8時間の運転時間と設定した。

人孔設置に伴う工事コストは, 積算条件を管路工事と同じとし, 掘削深は組立て部品の組み合わせにより算定し, それを基に土被り別のコスト関数を作成した。管路工事において, 人孔掘削延長分を管路工事延長から減じている。

自然流下システムでは土被り 4m 以上の管路に対して推進工法による工事を行うものとして, 発進立坑, 到達立坑及び推進工に分けて積算した。立坑はライナープレートを用い, 使用回数は1回とした。発進立坑は 3m×2m の小判形, 到達立坑は 2m 径の円形とした。使用機械はバックホウ (0.35m³), クラムシェル (0.60m³), トラッククレーンであり, 損料も考慮している。推進工はオーガー方式 (1 工程) で積算し, 管径は 1 ランク上のものを用いる。路面工は, 舗装切断, 破砕工, 積込工, 残土運搬工, 不陸整正, 路盤工 2 層, 締め固め及びアスファルト舗装工を積み上げた。

表-14 推進工法立坑工事コスト(直接工事費)
(10³円/箇所)

深さ(m)	発進立坑	到着立坑	合計
4.0	2,581	2,092	4,673
5.0	3,117	2,531	5,648
6.0	3,652	2,970	6,622
7.0	4,188	3,409	7,597
8.0	4,723	3,848	8,571
9.0	5,260	4,286	9,546

表-15 自然流下システム管路の単位長
当りの工事コスト (φ200 開削工法)
(10³円/箇所)

土被り	管種	管きよ	人孔	合計	m 当り
1.5m	CRC	2,895	138	3,033	60.7
	PVC・VU	1,390	138	1,528	30.6
2.0m	CRC	3,290	142	3,432	68.6
	PVC・VU	3,005	142	3,147	62.9
3.0m	CRC	3,730	163	3,893	77.9
	PVC・VU	3,320	163	3,483	69.7

条件として, 路盤の仕上がり厚さ 10cm, 作業区分として「B 区分: 作業スペースが 1 車線程度の一般的な舗装作業」とした。その他, 管路及び弁の布設工を素材別, 口径別に積算した。

b) 管路工事のコスト

表-12 に示すように自然流下システム, 圧力及び真空システムとでは使用する管径の範囲が異なるため工事コストに大きく差が生じている。また同一管種による土工事と設置のコスト及び路面工事を含めた直接工事費で管径, 土被りによるコストを比較すると, 地下水位 2m, 開削工法では, 自然流下システム CRC 管の土被り 1.2m と 4.0m で約 3 倍, PVC・VU 管では 3~4 倍の開きがある。また推進工法では推進管施工の直接工事費として 9.2×10³ 円/m (管径 250mm) と算定した。人孔の直接工事費は表-13 に示すように人孔設置費と土工費で 126.6~434.9×10³ 円/箇所 (1 号人孔, 掘削深 2.2m~9.0m) 及び 160.1~544.3×10³ 円/箇所 (2 号人孔, 掘削深 2.2m~9.0m) と算定した。

表-14 に示すように立坑の直接工事費は発進及び到達させた 1 個所当り 4,673~9,546×10³ 円/箇所 (深さ 4m~9m), 水替工は 5,980 円/m と算定した。工事費は直接工事費に間接工事費として 70%分を加算して求めた。

開削工事の範囲内で人孔間隔 50m とした場合, 管径 200mm の管きよでの単位長当りの平均建設費は表-15 に示すように CRC 管で 61~78×10³ 円/m, PVC・VU 管では 31~70×10³ 円/m と算定した。

c) 機械設備等のコスト

発生する汚水を収集し管路施設へと導入するための施設として, 汚水糞と GP/真空弁ユニットが

表-16 樹・ユニットの設置コスト (10³円/基)

樹・ユニット	分類	製品	工事	設置コスト
汚水樹	コンクリート	280	20.0	300.0
	PVC	440	13.4	453.4
GPユニット	宅内	1,216	224.0	1,440.0
	公道	1,166~ 1,283	497.0	1,663~ 1,780
真空弁ユニット	宅内	610	29.0	639.0
	公道	850	128.0	978.0

表-17 管路工事のCO₂発生原単位 (地下水位2m, 普通地盤) (kg-C/m)

管種(埋設深)	管径 (mm)					
	50	75	100	150	200	250
CRC管(1.2m)					26.8	27.9
CRC管(4.0m)					126.0	128.6
PVC・VU管(1.2m)				17.9	18.7	20.1
PVC・VU管(4.0m)				102.5	104.1	106.9
PVC・VP管(1.2m)	4.7	4.8	4.9	17.9	18.7	20.1
PE管(1.2m)	4.7	4.8	4.9	18.0	18.9	20.5

ある。宅内設置の場合、FRP製のタンクを用い、公道上に設置する場合は、1号、2号の組立人孔を用いるとして建設コストを算定した(表-16)。建設コストの比較として、自然流下システム管路と圧力及び真空システム管路のm当り単価の差を60×10³円/m(表-12より、PVC・VU管径200mm、土被り1.2mと4.0mの平均単価-PVC・VP管径100mmの単価)とすれば、GPユニット対汚水樹では初期設置コストの差が1,140×10³円/戸となり、家屋間距離19.0m/戸が建設コストの分岐点と推定できる。また、表-16より真空弁ユニット対汚水樹では設置コストの差が339×10³円となり、分岐点としては5.7m/戸の家屋間距離となる。

(2) 工事に伴って発生するCO₂

a) 管路工事による発生原単位

管路工事に伴う発生CO₂は建設費同様に積算要領^{29),30)}に基づいて算定した(表-17)。工事費算定と異なるのは、人力によって発生するCO₂は考慮していない点である。また、廃棄は運搬によって消費される燃料から発生するCO₂を算定し、製品の重量別に換算した。処分は計上していない。損料に相当する分は機械、素材のCO₂より使用回数から1回分を算定することで考慮した。建設機械はバックホウ(0.3m³級)の製造時の発生原単位を基にその重量から推定し、素材製造のCO₂を加算することで算出した。建設機械における製造CO₂は製品CO₂の3%である。製造CO₂は部品の運搬、組立てによるものであるため、部品重量が大きくなれば消費される電力、燃料も大きくなると考え、重量に比例させて算定した。水替え時に発生する

表-18 人孔設置のCO₂発生原単位(kg-C/箇所)

掘削深 (m)	土工		人孔設置		合計	
	1号	2号	1号	2号	1号	2号
2.20	115.9	166.4	0.9	1.1	116.8	167.5
2.50	128.6	181.0	0.9	1.1	129.5	182.2
3.00	149.1	206.6	0.9	1.1	150.0	207.7
4.00	187.8	255.7	0.9	1.1	188.7	256.8
5.00	269.5	358.7	0.9	1.1	270.4	359.8
6.00	337.4	443.5	0.9	1.1	338.3	444.6
7.00	474.0	580.4	1.0	1.2	475.0	581.6
8.00	566.9	694.9	1.0	1.3	567.9	696.2
9.00	764.6	935.5	1.0	1.3	765.6	936.8

表-19 推進工法立坑建設CO₂発生原単位(kg-C/箇所)

深さ (m)	施工		
	発進立坑	到着立坑	合計
4.0	3,270	3,260	6,530
5.0	3,980	3,920	7,850
6.0	4,590	4,580	9,170
7.0	5,250	5,240	10,490
8.0	5,910	5,900	11,810
9.0	6,570	6,570	13,140

注) 推進工: 613.95kg-C/m (φ250mm)

表-20 樹・ユニットの設置CO₂発生原単位(kg-C)

樹・ユニット	分類	製品CO ₂	工事+設置CO ₂	合計
汚水樹	RC 径500mm	27.5	0.001	27.5
	PVC (1.5m深)	11.84	0.014	11.85
GPユニット	宅内 (1.0kWGP)	78.4	52.3	130.7
	公道下 (1.5, 2.2kWGP)	359.8 ~416.8	95.8	455.0 ~512.7
真空弁ユニット	宅内	14.0	52.3	66.3
	公道下	205.7	95.8	301.5

CO₂は揚程を10m以下として、設置・撤去及び運転時の発生原単位を加え、単位延長当りに換算した発生原単位を算出した。人孔設置による発生CO₂は表-18に示すような算定結果となり、推進工法による発生CO₂は表-19に示す原単位となった。

b) 機械設備による発生原単位

汚水樹(RC及びPVC製)、GPユニット及び真空弁ユニット設置についてCO₂発生原単位を表-20に示す。汚水樹はPVC製がRC製の約43%のCO₂発生となる。GPユニットの宅内設置の場合、FRP製の貯水槽となることから公道下の1号人孔と比べ約30%のCO₂発生となる。真空弁も同様に宅内設置と公道下設置では1基当たり約4.5倍の差を生じている。

表-21 自然流下システムの維持管理作業頻度

作業	設備名	使用年数	
		1～30年	31～50年
巡視点検	人孔、柵	5年1回	3年1回
清掃	管きよ、取付管	5年1回	3年1回
	人孔	5年1回	1年1回
目視調査	人孔、柵	5年1回	3年1回
漏水調査	管きよ、取付管	10年1回	7年1回
補修	管きよ、取付管	10年1回	7年1回

表-22 MPの維持管理作業と所要時間

分類	作業項目	所要時間 (分/箇所)	所要人員 (人/回)	備考
定期 作業	日常点検	120	4	ポンプ引上げ
	清掃	60	5	
	現場対応	60	3	
	制御盤交換	120	3	
	潤滑油交換	60	4	
緊急 作業	水位計	60	2	
	ポンプ	120	4	
	制御盤	30	2	

5. 維持管理及び運転

(1) 基本的な考え方

維持管理作業として、点検、清掃、補修、部品交換について作業時間、頻度、内容に応じて耐用年数期間で算定した。運転はポンプの電力消費量から算定した。

管理作業については、自然流下システムでは既存の調査報告書²⁵⁾より管径700mm以下を対象にデータを整理した。定期的作業は点検と清掃および部品交換であり、その作業項目と頻度、平均作業時間を整理した。自然流下システムはその作業頻度にばらつきが大きかったが、中間値を整理した(表-21)。自然流下システムでは30年を越えるとその維持管理頻度が増加する³⁵⁾。ヒヤリング結果から自然流下システムでは管きよの閉塞が年に2回起こると仮定した。緊急対応作業として清掃作業にて閉塞を解除する。

補修は自然流下システムではTV調査後行われるものとして、下水道施設維持管理積算要領³⁶⁾にあるパッカー工法およびライニング工法としてインライナー工法による単位長あたりの平均値を用いた。マンホールポンプ(以下、MPという)では、維持管理作業は下水道用マンホールポンプ施設技術マニュアル(案)³⁷⁾より、作業項目、頻度を整理し、表-22に示す条件で見積もった。

実態調査では、国内2社に協力を依頼し、維持管理作業内容、頻度、緊急対応に関する資料及び年間コストの資料を入手した。維持管理の対象地区が広域となることから、定期点検のための移動

表-23 圧力システム維持管理作業頻度と所要時間

作業	作業項目	頻度	所要時間
点検	損傷、運転、電気系統	年1回	40分
	圧送管	5年1回	120分
清掃	ポンプおよびタンク	年1回	40分
	圧送管	10年1回	60分
	取付け管	5年1回	45分
交換	ポンプ	10年1回	90分
	メカニカル、動力線	5年1回	90分
	電気系統	3年1回	120分
	制御盤	15年1回	120分

表-24 真空システム維持管理作業頻度と作業時間

作業	作業項目	頻度	所要時間	
点検	真空弁	損傷、運転、管内真空度	年1回	22分
	真空ステーション	ポンプ運転、電気系統	週1回	100分
清掃	真空弁	ピット	年1回	5分
	真空ステーション	取付け管	5年1回	20分
		真空弁	2年1回	10分
交換	真空弁	真空ポンプ	年1回	30分
	真空ステーション	真空タンク	年1回	30分
		クーリングタンク	月1回	30分
交換	真空弁	真空弁	10年1回	15分
	真空ステーション	スターターバルブ	年10回	5分
		ベアリング	5年1回	20分
		真空ポンプ	10年1回	300分
	真空ステーション	メカニカル	年5回	30分
		モーターのベアリング	2年1回	45分
		排水ポンプ	10年1回	300分
		インペラー	4年1回	40分
		メカニカル	5年1回	300分
		シーリングオイル	年1回	20分
制御盤		25年1回	120分	
スイッチ類の交換	5年1回	240分		

時間を60分/箇所、緊急対応の移動時間を90分とし、巡視点検を年3～12回、清掃を年2～4回行うこととした。機械設備の部品交換は実態に基づく耐用年数での交換とし、緊急作業は水位計(1件/年)、ポンプ(1～4件/年:台数に応じて設定し、最大4件とした)、制御盤(1件/年)の交換作業とした。

圧力及び真空システムでは、実際に管理作業を行っている企業の資料およびヒヤリング調査(圧力システム3箇所、真空2箇所)のデータをもとに維持管理作業の分析を行なった。維持管理に関する頻度と作業時間を表-23、表-24にそれぞれ示す。頻度、作業時間にバラツキのある項目は中間値を用いて整理した。圧力及び真空システムの機械設備の部品交換は実態に基づく耐用年数での交換とし、ポンプ、真空弁はすべての部品を交換することによるリニューアルが可能と考え、部品の

表-25 圧力及び真空システムのポンプ部品交換頻度

部品名	GP (1.2-3.7 kW)	水中ポンプ (0.75-11 kW)	真空ポンプ (5.5-11 kW)
パナソニック	10年	10年	5年
パナソニック	10年	10年	5年
シーリング	2年	1年	1年
モーター	10年	15年	10年
ケーシング	10年	15年	10年
羽根車	10年	10年	15年
グライダース	10年	-	-
スイッチ類	3年	3年	3年

表-26 圧力及び真空システムの緊急対応作業

分類	作業項目	
圧力システム	a. 一般管理	ポンプ交換, 高水位, アース不備, ヒューズ不良, 水位計空気管閉塞, 事故停電, 計画停電
	b1. 機械関係	羽根車閉塞, 車等による破壊
	b2. 電気関係	制御盤故障, ケーブル不良, 警報故障, 落雷, 空気ポンプ故障, ポンプ空気混入
c. 工事関係	圧送管破損, 圧送管閉塞, 取付管閉塞, 自然流下システム閉塞	
真空システム	a. 一般管理	真空弁詰まり, 真空弁異音・振動, 真空弁交換, 弁室内スカム・グリース, 弁室内高水位, 事故停電, 計画停電, 接地不良, ヒューズ不良
	b1. 機械関係	真空ポンプ異音・振動, 真空ポンプ羽根詰まり, 真空ポンプ交換, 排水ポンプ異音・振動, 排水ポンプ羽根詰まり, 排水ポンプ交換, 排水ポンプ水位計故障
	b2. 電気関係	制御装置故障, 電力ケーブル異常, 警報装置故障
c. 工事関係	真空管破損, 真空管詰まり, 真空管抜け, 圧送管詰まり, 圧送管抜け, 接続管詰まり, 空気弁破損	

交換を繰り返す方式をとった。ポンプ部品の定期交換頻度は表-25に示す。定期点検、清掃作業はGPユニット及び真空弁ユニットでは年1回行い、真空ステーションでは週1回行う。定期的作業においては維持管理会社が地区内、もしくは近郊に常駐している条件で、移動時間1箇所当たり10分とした。また、緊急対応における移動時間を内容に応じて15分~30分とした。

圧力システムに関する作業モデルは実作業項目とそれにかかる平均的な作業時間とから作成し、定期的な作業(点検、清掃、部品交換)は年間に処理すべきポンプ台数より1日当たりの台数を算定し、人員数を算定している。作業は1日8時間、週5日の労働で1年を52週として年間の作業時間、作業人員数を算出した。点検作業はユニットと管路の2つに分類した。移動時間は雑作業を含めてユニット間を10分とした。故障対応時間は

表-27 故障率

	故障項目	故障率 (%)
圧力システム	ポンプ故障	0.01009~0.01856
	羽根車閉塞	0.01612~0.05911
	タンク内高水位	0.15392
真空システム	真空弁故障	0.00433
	真空弁閉塞	0.03557
	タンク内高水位	0.01442

4分類の各作業に含まれている作業時間の平均を用い、1日当たりの発生件数に乗じて1日の作業量を算定した。作業は1日8時間/人として365日の労働とした。年間作業量は各分類の故障率と各平均作業時間とから作業人員数を算定した。移動時間は分類により異なり、1回当たり、管理分類によって15ないし30分とし、これより1日当たりの換算平均移動時間を求めた。

作業は4分類して、それぞれが担当することとした。

- a. 管理会社にて行なう作業
- b1. 専門的な技術を要する機械関係の作業
- b2. " 電気関係の作業
- c. 工事を伴う作業(管路など)

真空システムは真空弁と真空ステーションとに大きく分け、それぞれの台数を考慮して維持管理に要する人員を算定した。故障作業担当の分類は圧力システムと同様である。各担当の作業は表-26に示す。圧力及び真空システムではオランダでの筆者自身の調査結果より算出した故障項目別の故障率を基に規模別年間件数を算定し、交換する部品数、各作業時間を考慮して緊急作業モデルを作成した。故障率は年間の発生件数を台数または管路延長および年間日数(365日)の積で除して求めた。算出した主な故障率を表-27に示す。

(2)維持管理及び運転にかかるコスト

a)維持管理作業にかかるコスト

自然流下システムの管理は目視調査、TV調査、清掃、補修について行ない、国内の調査資料³⁸⁾に基づく各作業の平均のコスト(以下、実データ)と維持管理積算要領³⁹⁾を用いてシミュレーションした結果(以下、シミュレーション値)とを比較した。管きよ内清掃作業の土砂深は10%と仮定した。また、実データの出所は都市中心部での調査と考えられるため、規模補正した。補修工法では対象管径を200~300mmとした。コスト比較に当って、実データは1986年データを用いているため、物価指数にて補正した。TV調査では実データが1,170円/mに対し、シミュレーション値は本管と取付管の合計が600円/mと差がついた。これは当時TV調査の実績がまだ少なく、コストのバラ

表-28 維持管理単価の比較

項目	実データ ⁷⁾	シミュレーション値
点検	目視調査 320 円/m (350 円/m)	目視調査 (本管人孔) 1,960 円/箇所 本管清掃 9,950 円/箇所
		→ 換算値 240 円/m
TV 調査	1,170 円/m (1,256 円/m)	本管 350 円/m 取付け管 2,470 円/箇所 → 換算値 600 円/m
清掃	950 円/m (1,020 円/m)	管路 200 円/m, 取付け管 980 円/箇所 柵 520 円/箇所 1号人孔 29,800 円/箇所 → 換算値 950 円/m
補修	57~66 円/m (62~71 円/m) (昭和58~60年)	パッカー工法: 本管 15,000 円/箇所, 取付け管 24,200 円/箇所, ライナー工法: 10,100 円/m ケーススタディ規模換算値 53~93 円/m

換算値: 1 スパン 50m, 5 軒,
()内は 1986 年値, 物価指数補正值: 0.934

ツキが大きかったためと推測する。TV 調査によって発見された管の故障は、TV 調査年にパッカー工法又はライナー工法によって補修されるとした。故障の発生率は予防管理として提案されているモデル³⁹⁾に従い、各年での補修対象延長を算定した。今回のケーススタディの規模では、総延長に対しての単価として 53~93 円/m と算定した。一方、実データによると昭和 58 年~60 年の 3 ヶ年における 66 市町村の平均単価は 57~66 円/m と算定された。この結果、TV 調査以外ではシミュレーション値と実データとほぼ近似していると考え、積算要領と調査報告書に基づいたモデルは現実と乖離しないと判断した。

MP に関しては技術マニュアル(案)³⁷⁾に基づいたシミュレーションを行い、MP (0.75~2.2kW) の維持管理コストは直接費として 222×10^3 円/基・年と算定した。これに MP 交換と制御盤の交換コスト (製品価格) を加え、年間換算総額を $1,110 \times 10^3$ 円/基と算定した。実態調査では、A 社資料は 7 基 (ポンプ数 18 台) の平均委託管理コストは 441×10^3 円/年・基 (設置ポンプ 2.2~30kW 出力)、B 社では 13 基平均委託管理コストが 262.1×10^3 円/基 (設置ポンプ 0.4~15kW, 計 26 台) であった。このシミュレーション値は直接費であること、緊急作業を含むこと、そしてポンプの出力が小さいことから、信頼できるものと判断した。

圧力システムの GP ユニットの維持管理コストはオランダでのヒヤリング調査から得た作業項目と頻度を基に算定した。実データは、8 年稼動した 388 台の GP について 112,460, 136,877 及び 127,900 ギルダ/年 (1993~1995 年) であった。

1 台当りに換算すると 324 ギルダ、日本円換算で 18,500 円/台・年 (1995 年レート) となる。これに世界統計年鑑⁴⁰⁾によるオランダと日本の労働者賃金の格差を考慮すると 22,200 円/台・年となる。維持管理作業者の賃金を 19,100 円/日とすると、直接経費として、交換部品、製品の価格を引いた作業コストが約 15,000 円/台・年となる。間接費を 50% として加算すれば、シミュレーションでの維持管理コストは 23,250 円/台・年となり、オランダの維持管理費に近いものとなった。

真空システムの維持管理コストについては英国の事例を調査した。筆者の調査したイングランド北東部に位置する Lopik 市では、過去 3 年間における 10 システム (真空ポンプ 21 台、排水ポンプ 36 台、真空弁 650 ユニット) の年間コストは日本円に換算すると 12,800 円/ユニット・年 (真空ステーション含む) となった。英国アングリア州での調査⁴¹⁾では、635~927 £/年・12 基 (日本円換算で約 10,600~15,450 円/年・基 (1994 年レート) であった。表-29 はケーススタディをおこなった条件設定 (表-32 参照) での真空システム・2 ケース (真空 1 及び真空 2) について真空弁の維持管理コストのシミュレーション結果を示している。この表-29 に示すシミュレーションでは、真空弁ユニットにかかる管理コストとして、50 年間での管理コストは 46.38 (真空 1, 50 人/ha) ~ 194.29 (真空 2, 5 人/ha) $\times 10^3$ 円/年・基となったが、部品代を除く管理コストが真空弁あたり 3.7 (真空 1, 70 人/ha) ~ 10.6 (真空 2, 5 人/ha) $\times 10^3$ 円/年・基となった。英国の事例は新設後 3 年間のものである事を考慮すると、維持管理モデルは妥当と判断した。

b) 運転コスト

自然流下システムでは機械電気機器を使用しないため、運転コストを計上しない。MP を設置する自然流下システムを用いる場合、ポンプの契約基本料金及び運転時間に応じた電力量料金を計上する。MP の基本料金は出力数 $\times 1.25$ の少数第 1 位を四捨五入した数値を契約 kW 数として計算されることから、1 日の運転時間、出力数、ポンプ効率より電力消費量を算定した。

圧力システムで用いる 1.0kWGP については、単相 200V の家庭用電力 (従量電灯) を利用できる場合には、基本料金を新たに必要としないが、2.2kWGP については低圧電力の契約となるため、MP 同様の計算より 3kW 契約を結ぶ。そのため、およそ 3,060 円/台・月の料金を支払うことになる。ところが運転時間は 1.0kWGP の場合 1 日 10 分~15 分程度、2.2kWGP では 1 戸当たり 5 分/日程度であるので、消費電力量料金は 1,100~1,400 円/戸・

表-29 真空システムの維持管理コストシミュレーション値の比較 (10³円/年)

項目	真空 1				真空 2			
	5	20	50	70	5	20	50	70
人口密度	5	20	50	70	5	20	50	70
軒数	28	116	295	410	28	116	295	410
ユニット数	28	116	295	410	7	19	46	64
真空弁維持管理費合計	2,285	6,104	13,683	19,037	1,360	1,882	3,075	3,977
真空弁1基当たり	81.60	52.62	46.38	46.43	194.29	99.05	66.85	62.14
部品代を除くコスト	160	463	1,108	1,526	74	116	231	289
真空弁1基当たり	5.7	4.0	3.8	3.7	10.6	6.1	5.0	4.5

注) 定期点検コストを真空弁とステーションでその移動時間比率按分とした。

表-30 自然流下システム維持管理作業の

CO₂発生原単位

作業項目		CO ₂ 発生量
清掃	本管(200-700mm)	0.132 kg-C/m
	取付管	0.094 kg-C/個所
	弁	0.049 kg-C/個所
	人孔	0.225 kg-C/個所
漏水調査工	本管(800mm未満)	0.192 kg-C/m
	取付管	0.520 kg-C/個所
目視調査(清掃付)		6.135 kg-C/個所
MP清掃		1.138 kg-C/個所
補修(パッカー工法) (800mm未満)	本管	21.347 kg-C/個所
	取付管	19.684 kg-C/個所
補修(ライナー工法) (800mm未満)		7.667 kg-C/m

年と非常に安価である。真空システムでは、真空弁に運転コストはかからないが、真空ステーションに電力料金がかかる。真空ポンプ及び排水ポンプが複数台あるため、汚水量によって異なるが、今回のケーススタディ規模でおよそ 1,860 円～13,538 円/戸・年の電力料金がかかる。

(3) 維持管理及び運転に伴って発生する CO₂

a) 定期的作業の CO₂ 発生原単位

自然流下システムでは、作業内容と頻度から発生原単位を積み上げた。表-30 に各作業による CO₂ 発生原単位を示す。自然流下システムの場合、管路延長当たりで換算すると 0.03kg-C/m 年の CO₂ 発生原単位となる。

MP では、維持管理作業の移動時間を 60 分/個所として発生原単位は 119 kg-C/基・年と算定した。圧力システムでの作業モデルを基に各作業の発生量を GP ユニット当たりに換算すると 3.04 kg-C/基・年となる。部品の交換においては表-31 に示す各製品の CO₂ 発生原単位を計上している。真空システムでは、真空ステーションの規模にや影響するが、真空弁1基あたりに換算すると、1.35～3.36kg-C/基・年の CO₂ 発生原単位となった。

b) 緊急対応作業の CO₂ 発生原単位

ケーススタディ規模でのシミュレーション結果

表-31 主部品の CO₂ 発生原単位 (kg-C/個)

部品名	グライカ [®] ポンプ (1.0-3.7 kW)	水中ポンプ (0.75-11 kW)	真空ポンプ (3.7-11 kW)
モーター	7.0～13.0	6.0～47.0	38.0～82.0
ケーシング	12.4～22.2	9.8～81.4	12.0～28.0
羽根車	1.0～1.8	0.8～6.6	5.3～9.0

として、自然流下システムでは 0.02kg-C/m・年程度、MP では 18 kg-C/基・年の発生原単位と算定した。圧力システムで緊急対応作業の CO₂ 発生原単位は 6.51～10.25 kg-C/基・年、真空システムでは、0.26～2.00 kg-C/基・年と算定した。

c) 運転の CO₂ 発生原単位

標準型自然流下システムでは運転時の CO₂ 発生量は計上せず、MP は設置地点上流の汚水量から1日の運転時間、出力数、ポンプ効率より電力消費量を算定し、運転時の CO₂ 発生原単位を算出した。圧力システムは多くの GP を用いるため、流量計算表に基づく各吐出し量と汚水量から各 GP について1日の運転時間を算出し、ポンプの出力数、効率を考慮して、それらの電力消費量から運転時の CO₂ 発生原単位を算出した。真空システムは真空ステーションでの真空ポンプ、送水ポンプの運転時間を総汚水量より算出し、各々電力消費量を算定し、運転時の CO₂ 発生原単位を算出した。

6. 廃棄について

廃棄では撤去と運搬にかかる作業、燃料消費量を計上し、さらに処分コストを計上した。土工事等は新しい施設の建設に含まれると見なした。

コストの算定において、ポンプ、鋳鉄弁、人孔蓋は金属くず、PVC・VU 管、PE 管などは廃プラスチック、そして CRC 管、人孔などはコンクリート塊(有筋)として分類した。中間処分のためのコストを処分量に応じて計上した。

CO₂ の発生原単位については、積み込みと廃棄物運搬についてのみ考慮し、県内処分として距離 100km を運搬するとして、製品別 CO₂ 発生原単位を各システム毎に集計した。

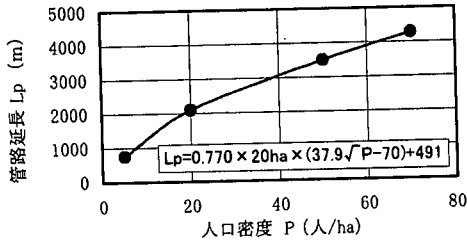


図-1 人口密度と管路延長

7. ケーススタディに採用したシステムの概要

(1) 基本条件

ケーススタディは各システムに適用可能な平坦地を対象として、下水道幹線に接続する面積 20ha の管路について実施した。ケーススタディは適用対象地区を農村地区、郊外住宅地（粗と密）及び地方都市の市街地までの範囲を想定し、人口密度を 5, 20, 50, 70 人/ha の 4 種類とし、総管路延長は人口密度と面積から算定した⁴²⁾ (図-1)。各戸の居住人員は平均 3.5 人として、1 人あたりの汚水量を 350L/人・日とした。配管系統への配分を考慮して家屋数を設定した。

ケーススタディは標準型自然流下システム（標準型）に代替案システムを加えて計 6 システムとした。面整備地区で LCC と LC-CO₂ を用いてコスト節減及び環境への影響を少なくできる代替案を選定する手法とその留意点を示す目的から、検討ケースを必要以上に増やさないよういくつかの条件を満たすシステムの適用を考慮した。この代替案は自然流下システム、圧力システム、真空システムで条件設定した。自然流下システムの代替案として、平均土被りを最小にするために地区の中間位置に MP を設置する案を MP 付自然流下システム（自然+MP）とした。モデル地区では起点土被りが 1.2m、最下流土被りが 2.84m の場合、平均土被りを最小とするには、 $(1.20+2.84)/2=2.0m$ を最大土被りにすることで達成できる。圧力システムでは使用する機器類の最大、最小規模を設定して、各戸に電力の基本料金の支払いを必要としない最小の GP (1.0kW, 85 L/分) を設置した。そして GP 台数を最大とする案を圧力 1 とした。このシステムでは必要に応じて中継ユニット (1.0kW・GP 1 台または 2 台) を設置することとした。複数戸数を集水する場合、集水管及び柵が設置され、ユニットとして 1 号人孔を使用するために、宅内用と比べ初期のコスト及び CO₂ 発生量

が大きくなる。そこで、集水戸数 1 戸あたりの初期のコスト及び CO₂ 発生量が宅内用ユニットを下回る最小接続戸数を算定したところ、ケーススタディの最大家屋間距離 25.6m において初期コストでは 12 戸以上、その CO₂ 発生量では 3 戸以上という結果が得られた。

大型の GP として出力 3.7kW と 2.2kW があるが、最大吐出量は約 300 L/分とほぼ同じであることから、出力の小さな 2.2kW の GP に最大戸数で 15 戸までを接続して、GP 設置台数を最小にする代替案を圧力 2 とした。この案では、横引き柵方式で路肩・歩道埋設にて管径 150mm の PVC・VU 管の自然流下で主道路まで集水し、主道路沿いに GP ユニートを配置する。真空システムも同様の考え方で、各戸に真空弁ユニット（宅内用：プラスチック製貯水タンク）を設置する代替案を真空 1 とした。真空 2 の設定に当たっては、圧力システムと同様の検討をした。すなわち、真空弁の吸込み能力は 120L/分 (40L/回×3 回/分) であり、この能力から集水家屋数は最大 17 戸と算出された。しかし、1 回の吸込み量 (40L) に相当する接続戸数は 5~6 戸となる。集水戸数 1 戸あたりの初期コスト及び CO₂ 発生量が宅内用ユニットを下回る最小接続戸数は、初期コストから 2 戸以上、その CO₂ 発生量では 6 戸以上と算出された。そこで 6 戸を集水する案が現実的であると考え、これを真空 2 とした。圧力及び真空システムでのユニットまでの取付け管及び柵は PVC 製とし、自然流下の取付け管のコストを参考にしてその延長、個数分を計上した。

ケーススタディに採用した標準型と代替システムの特徴と概要を表-32 にまとめた。さらに人口密度別配管ルートの基本型を図-2 に示す。

管路材の耐用年数については特定が難しいが、自然流下システムの管路については一般に 50 年といわれている。しかし、ある調査報告³⁵⁾によると、既設の管きよについては 30~35 年経過後に陥没などの障害の発生件数が最大となった。そして、この時期に耐用年数を迎えると分析している。また圧力システム、真空システムの維持管理を長年行ってきたオランダの維持管理会社の資料⁴³⁾によると、経験上、圧送管 (PVC) の耐用年数を 50~60 年と設定している。これらのことからこのケーススタディでは、自然流下システムの CRC 管の耐用年数は 30 年と設定した。圧力及び真空システムの管路の耐用年数を 50 年と設定し、機械設備は各々実耐用年数にて部品交換する条件で廃棄も含めた 50 年間の LCC を算定した。自然+MP で MP は部品交換を 30 年間にわたり各耐用年毎に行っていくとした。

表-32 標準型と代替システムの特徴と概要

システム名 (略称名)	特徴	人口密度	5人/ha	20人/ha	50人/ha	70人/ha
		人口	100	400	1,000	1,400
		戸数	28	116	284	412
		本管延長 (m)	750	2,100	3,500	4,290
		本管延長 (m) :圧力2 ^{注)}	500	760	1,000	1,000
① 標準型自然流下 (標準型)	RC柵 CRC管	本管管径(mm) 人孔数(基)	200 17	200 43	200 71	200 99
② MP付の自然流下 (自然+MP)	PVC柵 CRC管 揚水用ポンプ場	本管管径 (mm) 人孔数(基) MP基数(基)	200 16 1	200 42 1	200 70 1	200 98 1
③ 圧力 1 (圧力1)	1戸に1ユニット (宅内) 1.0kW・GP	本管管径(mm) ユニット数(基) 中継ユニット(基)	50 28 2	50~125 116 3	50~150 284 4	50~150 412 4
④ 圧力 2 (圧力2)	2.2kW・GP (公道下)	本管管径(mm) ユニット数 ユニット接続家屋数(戸)	50~75 4 14	75~125 8 14~15	75~150 20 14~15	100~200 28 14~15
⑤ 真空 1 (真空1)	1戸に1ユニット (宅内)	本管管径(mm) ユニット数(基) 真空ポンプ出力(kW) 排水ポンプ出力(kW)	75~100 28 3.7 3.7	75~150 116 5.5 3.7	100~250 284 5.5 3.7	125~250 412 5.5 3.7
⑥ 真空 2 (真空2)	6戸に1ユニット (公道下)	本管管径(mm) ユニット数(基) ユニット接続家屋数(戸) 真空ポンプ出力(kW) 排水ポンプ出力(kW)	75~100 7 4 3.7 3.7	75~150 19 6~7 3.7 3.7	100~250 46 6~7 3.7 3.7	125~250 64 6~7 5.5 3.7
備考	設計のための基本条件:地下水水位 2m, 管きよの最小土被りを1.2mとした。					

注 1) : 圧力 2 は横引き柵方式で主道路沿いの GP ユニットまで集水するため, 他システムより本管延長が短い。

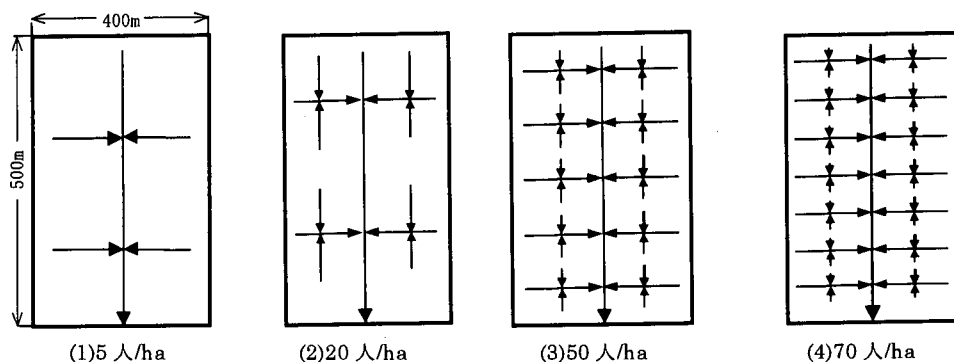


図-2 人口密度別配管ルートの基本型

8. LCCによる比較

(1) 基本データ

LCC の算定にあたり, 頻繁に用いる基礎データとして, 電力・燃料・材料単価 (表-33) および件費 (表-34) を示す。電力料金は電力会社 7 社の単価を参考にして設定した。

(2) 現在価値法への換算

現在価値法では現在と将来のすべてのコストを現在価値 (現価) に換算する。毎年同じように発生する繰返しコストと何年か後にただ 1 回しか発生しない非繰返しコストを交換する年価法は, LCC を毎年のコストとして表すのに使うことができる。LCC は建設コスト, 繰返しコストおよび非繰返しコストの合計となる³⁾。現価換算のなかで用いられる利率 (割引率) は, インフレや投資効果を考慮して決定するが, ここでは過去 46 年間のわが国におけるデフレータの平均値⁴⁾より 2.8

表-33 電力・燃料・材料単価

項目	単価	備考
電力	13 円/kWh	低圧電力使用料金
	16 円/kWh	従量電灯使用料金
	1,020 円/kWh/月	低圧電力基本料金
軽油	75 円/L	建設物価2000年1月号 ²⁶⁾
ガソリン	100 円/L	建設物価2000年1月号 ²⁶⁾
砂	3,800 円/m ³	建設物価2000年1月号 ²⁶⁾

表-34 人件費 (円/日)

項目	単価	項目	単価
世話役	22,600	助手	13,900
普通作業員	15,900	とび工	20,200
特殊作業員	19,100	ﾄﾞﾚｯﾄﾞ特殊工	32,980
運転手	18,700	ﾄﾞﾚｯﾄﾞ世話役	37,220
特殊運転手	21,500	ﾄﾞﾚｯﾄﾞ作業員	31,170
		溶接工	25,900

出典：建設物価 2000 年 1 月号²⁶⁾

%とした。割引率の設定に当って、その感度分析を行った。割引率を0%, 2.8%, 5.0%, 10.0%の4ケースで比較したところ、初期コストの大きいケースではその差が広がるという相対比率は変化したもの、評価順位に影響はなかった。このため、上記の算定根拠より2.8%を用いた。

減価償却コストを算定するために、耐用年数間の年々の配分方法を決めなければならない。ここでは一般に用いられている定額法とした。

LCCの構成は、初期投資額、運転コスト、管理コスト、部品交換・補修コスト、税金、起債償還利息及び減価償却コストである。減価償却コストは残存価値を10%とし、税金(固定資産税等)を償却コストの45%として加算した。そのほか、起債償還による利息を3%、5年据え置き、25年間元利均等償還にて算定した。起債償還利息率は割引率を参考に設定した。感度分析の結果、評価順位に影響がないことを確認した。この結果、利息は初期コストの94.2%相当と算出された。

(3) 初期(建設時)のコスト

図-3に人口密度と初期コストとの関係を示す。地区特性として人口密度をファクターとして選んでいるため、初期コストとしての比較では、人口密度の違いが管路延長によるものか、設備によるものかは明らかにできないが、より一層その違いを明確にすべく、「年間、1人あたりに換算したコスト」を用いて表すこととした。これにより、面整備における受益者の負担するコストをより明らかに表現することができる。

年間、1人当りの初期コストは人口密度によって大きく変動した。自然流下システムでは人口密

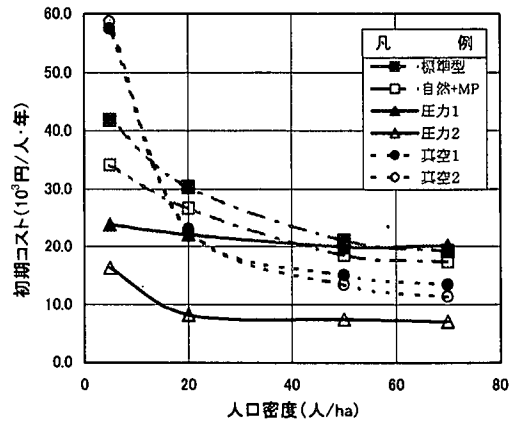


図-3 人口密度と初期コスト

度70人/haでは $17\sim 19 \times 10^3$ 円/人・年であったのに対して、人口密度5人/haでは $34\sim 42 \times 10^3$ 円/人・年に増加した。圧力システムでは圧力1と2とでその差が大きく、人口密度70人/haでは圧力1が 20×10^3 円/人・年、圧力2が 7.0×10^3 円/人・年であった。人口密度5人/haではそれぞれ、 24×10^3 円/人・年と 16×10^3 円/人・年と最小になった。圧力2の初期コストが低くなったのはGPの設置数のほか、出力の異なるGPの本体と部品の価格差の小さいためである。吐出水量当りのGP価格が同じになるとすると、圧力1の初期コストは35%低下して圧力2とほとんど変わらなくなる。真空システムでは人口密度70人/haが $11\sim 13 \times 10^3$ 円/人・年であったのに対し、人口密度5人/haが 58×10^3 円/人・年に増加した。人口密度5人/haに近づくほど初期コストの増加は著しかった。真空システムでは真空ステーションの工事費^{45), 46)}が取り扱う汚水量に比例しないため、人口密度が低いと不利になる。しかし宅内真空弁ユニットはPVC汚水樹と設置コストが余り変わらないため、管路工事コストが安くなるのと相俟って、標準型よりもコスト面で有利となった。

初期コストの平均構成比率は、標準型では工事コストが90%以上を占める。自然+MPでは人口密度が小さくなるほどMPとその周辺機器の占める割合が増加しているが、それでも20%に満たない。圧力1ではGPなど製品の占める割合が78~86%を占め、圧力2でのそれは34~50%であった。真空1では工事と製品のコストがほぼ同じであり、真空弁ユニットを減らした真空2は工事コストが73~77%を占めた。

(4) 維持管理コストと運転コスト

維持管理コストと運転管理コストは使用される機器、製品の耐用年数がシステムによって異なる

こと、人口密度の相違からくる規模の違いが生じている。

維持管理コストの1人あたり年間換算 LCC についてみると、圧力1が非常に大きく、自然流下システムの17~37倍近い。真空1でも11~15倍を示した。各戸にユニットを設置するシステムでは設置台数の増加が影響して、維持管理コストが増加することが総コスト増加の原因と考えられる。耐用年での維持管理の構成をみると、圧力1の管理コストが24~28%を占め、標準型、自然+MPが1~2%、及び真空1が8~19%を占めていた。

標準型では定期点検の占める割合が36~42%を、人件費が71~74%を占めていた。自然+MPでは、MP分の定期点検コストがやや増加する。圧力1、2では、定期点検と補修のコストが各々44%~56%を占めた。それら合わせてあわせて維持管理コストの99%以上を占めた。また、人件費の占める割合は11~14%と小さく、部品・資材コストが86~89%を占めていた。真空1、2では定期点検が92~93%を占め、部品・資材コストは93~95%と圧力1と同様な傾向が見られた。圧力及び真空システムでは部品交換や資材に多くのコストがかかっており、交換部品価格やその交換頻度が維持管理コストに大きく影響していた。また、ポンプの使用において、契約に伴う基本料金が大きく運転コストを増加させており、圧力及び真空システムの国内での使用において不利な条件となっていることが認められた。

圧力システムの維持管理コストでは部品・製品の交換コストが約86~89%を占め、そのうち23%が制御盤、48%がケーシング、羽根車、モーターの主部品である。部品・製品の交換コストのうち約44%が定期的交換、56%が故障対応となっており、部品代の占める割合が大きい。

真空システムの真空弁の部品・製品の交換コストは、真空1、2とも92~94%に達していた。真空ステーションの維持管理コストはユニット数に比例しないため、人口密度が低い場合、ユニット当りに換算すると、そのコストは大きくなってしまふという問題がある。

(5) LCC とシステム評価

人口密度別の年間、1人当りに換算した LCC を図-4に示す。自然流下システムでは、初期及び関連コストは LCC の98%を占める。自然流下システムを除く各システムの LCC に占める初期コストの割合が32~43%であり、関連する償却、税金、利息を含めて71~95%を占めた。従って初期コストの大小が LCC に影響を与える可能性が高い。

図-4に示したように、自然流下システムでは

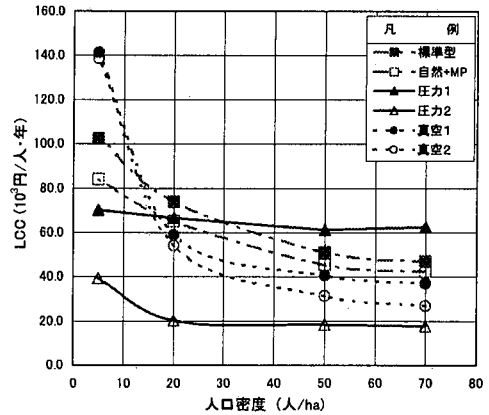


図-4 人口密度と LCC (現在価値)

人口密度の増加とともに LCC はなだらかに減少した。これに対して、圧力システムは人口密度5人/haで他のシステムに比べて極めて小さい LCC を示した。圧力システムでは人口密度20人/ha以上で LCC にほとんど変化がなかった。圧力1では、人口密度70人/haから5人/haまでで LCC は60~70×10³円/人・年の範囲にあった。LCC が最小であった圧力2も、18~40×10³円/人・年の範囲であって、人口密度の違いにより LCC に大きな差を生じなかった。人口密度20人/ha以上となっても、圧力2は LCC の優位性を維持するが、このことは圧力1に不利となった。維持管理コストは圧力1が24~28%を占め、圧力2の6~8%と大きな差を生じた。圧力1と2に差が大きいのは、GPの製品、管理、運転の価格差のためである。GPの価格を吐出し量当りで同じと設定できると、各戸にGPを設置できて、管理責任が明確になる圧力1の LCC は約20%低下し、その適用範囲は大きく広げうる。

自然流下及び真空システムは、人口密度5人/haでその LCC は急激に上昇した。自然流下システムでは、標準型102×10³円/人・年、自然+MPは84×10³円/人・年であった。真空システムの LCC は人口密度5人/haでは標準型よりも高く、139~141×10³円/人・年であった。しかし、人口密度の増加とともに急激に減少した。人口密度20人/haで自然流下システムを下回り、その優位性を発揮した。人口密度70人/haでは、真空2の LCC は27×10³円/人・年であり、圧力2(18×10³円/人・年)に接近した。真空システムでは真空ステーションのコスト負担が大きく、人口密度がある程度大きくなると LCC は低下しない。

表-35に LCC による評価順位と標準型との相対比率を示した。人口密度5人/haで真空システムは標準型を約40%、人口密度70人/haで圧力1は

表-35 LCCによる評価順位と相対比率

人口密度	70人/ha	50人/ha	20人/ha	5人/ha
標準型	5 (1.00)	5 (1.00)	6 (1.00)	4 (1.00)
自然+MP	4 (0.90)	4 (0.89)	4 (0.88)	3 (0.82)
圧力1	6 (1.34)	6 (1.20)	5 (0.90)	2 (0.69)
圧力2	1 (0.38)	1 (0.36)	1 (0.27)	1 (0.39)
真空1	3 (0.79)	3 (0.80)	3 (0.80)	6 (1.38)
真空2	2 (0.57)	2 (0.61)	2 (0.73)	5 (1.36)

注) 上段は評価順位, 下段()内は相対比率

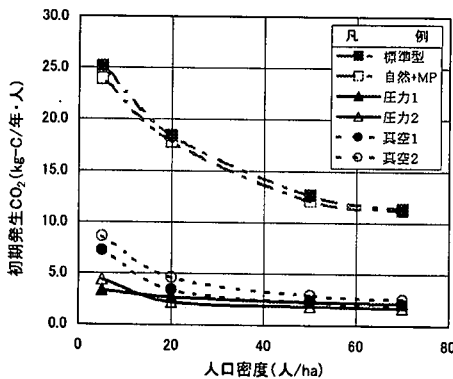


図-5 人口密度と初期発生CO₂

標準型を約 34%も上回った。自然+MP は標準型の 80~90%の LCC であった。圧力 2 はこの範囲の人口密度では標準型の 27~39%の LCC を示しており、人口密度 50 人/ha 以上では真空 1 は標準型の 80%以下、真空 2 も 57~61%の LCC であった。

9. LC-CO₂による比較

(1) 初期(建設時)の発生CO₂

図-5 に示した年間、1 人当りの初期発生 CO₂ は、自然流下システムと圧力及び真空システムとの間に大きな差異のあることを示した。この差は人口密度の増加と共に減少していくが、自然流下システムの低減率がより高いために生じた。自然流下システムと圧力及び真空システムの初期発生 CO₂ に大きな差が生じたのは、管きよの埋設深さに大きく影響している。人口密度 5 人/ha で圧力システムと真空システムに差が生じているのは、人口の少ない場合での真空ステーションの設定が発生 CO₂ にも影響しているためである。また圧力 1 と 2 で発生 CO₂ が逆転しているのは、圧力 2 で GP ユニット数とその配置の制約により台数が増加したことに原因している。

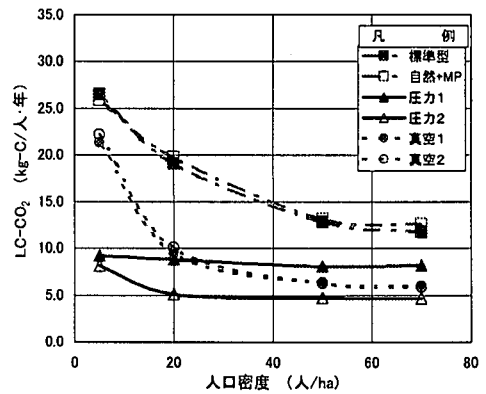


図-6 人口密度と LC-CO₂

初期発生 CO₂ は、自然流下システムでは工事そのものの占める割合が約 80%であった。真空システムでは、その割合は更に高く、80~90% (残りは製品によるもの) であった。これに対して、圧力システムの工事は 60~80%であり、製品による割合が高かった。これは GP が金属製であり、真空弁はプラスチック製であることから、CO₂ 発生原単位に差異を生じたためである。

(2) 維持管理と運転時の CO₂

維持管理と運転時の発生 CO₂ を作業別にみた場合、標準型では定期点検に 24~43%、清掃に 35~49%、補修に 21~32%とバランスが取れており、自然+MP は定期点検にややウェイトを移しているものの標準型と同様にバランスが取れたものであった。これに対して、圧力 1 では補修 (主として部品交換) に 62~70%、定期点検に 30~31%を占め、圧力 2 は補修の割合が 10~15%と減って定期点検が増加した。いずれにしても清掃からの発生はごく僅かであった。真空 1, 2 はともに定期点検と清掃で 90%以上を占めた。

これらについて更に材料別に「部品・資材」と「燃料・電力」にわけて整理すると、自然流下システムでは後者が 76~88%以上を占めたのに対して、圧力システムでは前者が 85%以上を占めた。真空システムでは人口密度によって変化しており、人口密度の低くなるほど「部品・資材」の割合が高くなる傾向 (42~55%から 70~85%) を示した。

(3) LC-CO₂とシステム評価

初期、維持管理と運転及び廃棄についての発生 CO₂ を求めて人口密度別に示したのが図-6 である。年間、1 人あたりの LC-CO₂ は自然流下及び真空システムでは人口密度の低下と共に大きく増加した。すなわち、自然流下システムでは人口密度 70 人/ha が 12~13kg-C/人・年、人口密度 20 人/ha が

表-36 LC-CO₂による評価順位と相対比率

人口密度	70人/ha	50人/ha	20人/ha	5人/ha
標準型	5 (1.00)	5 (1.00)	5 (1.00)	6 (1.00)
自然+MP	6 (1.07)	6 (1.02)	6 (1.04)	5 (0.98)
圧力1	4 (0.70)	4 (0.63)	2 (0.46)	2 (0.35)
圧力2	1 (0.40)	1 (0.37)	1 (0.27)	1 (0.31)
真空1	2 (0.51)	2 (0.49)	3 (0.50)	3 (0.80)
真空2	3 (0.50)	3 (0.49)	4 (0.53)	4 (0.84)

注) 上段は評価順位, 下段()内は相対比率

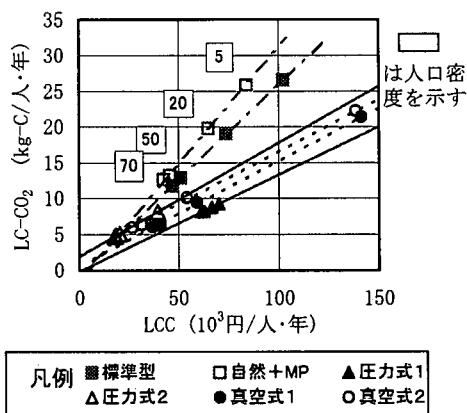


図-7 LCC と LC-CO₂

表-37 既往文献による CO₂ 処理・処分及び抑制コストと試算のための発生 LC-CO₂ 対策設定値

対策	方法	処理・処分及び抑制コスト (文献値)		設定値(円/t-C)
森林など植物への固定	植 林	・1~7.3 円/kWh ⁴⁹⁾	→810~58,680 円/t-C	58,700
		・11.35\$/t-C ⁵¹⁾	→1,350 円/t-C	
分離・回収及び 投棄, 保存	分離・回収+ 深海投棄	(分離・回収) ・7.4~13.7 円/kWh ⁴⁹⁾	(海洋投棄) ・3.7-3.9 円/kWh ⁴⁹⁾ →29,740~31,350 円/t-C	107,720+31,350 =139,070
	分離・回収+ 地中埋設	→59,490~107,720 円/t-C	(地中埋設) ・3,100~4,700 円/t-CO ₂ ⁵⁰⁾ →11,370~17,230 円/t-C	107,720+17,230 =124,950
経済的抑制	炭 素 税	・2 ~152 \$/t-C ⁴⁸⁾	→220~16,720 円/t-C	16,700
	排出許可証	・122~450 \$/t-C ⁵¹⁾	→13,420~49,500 円/t-C	49,500

19~20kg-C/人・年と変化は僅かに留まったが, 人口密度 5 人/ha では 26~27kg-C/人・年と大きく上昇した。これに対して, 圧力 1 では人口密度 70 人/ha から 5 人/ha までの間で 8kg-C/人・年から 9kg-C/人・年に留まった。圧力 2 はこれよりは変化が大きかったが, それでも 5kg-C/人・年から 8kg-C/人・年に, しかも上昇は人口密度 20 人/ha から 5 人/ha の間であった。

表-36 には LC-CO₂ による評価順位と標準型との相対比率を示した。自然流下システムでは概ね自然+MP が僅かながら標準型より高く, 真空システムでは人口密度 50 人/ha 以下で, 真空 2 が真空 1 よりも僅かながら高いという傾向を示した。しかし, 人口密度 5 人/ha で真空 1 と真空 2 は, 標準型との相対比率がそれぞれ, 0.80, 0.84 になるまで標準型に接近した。圧力システムの場合には, 人口密度が大きいくほど標準型との相対比率が高くなる傾向を示したが, 人口密度 70 人/ha で圧力 1 が 0.70, 圧力 2 が 0.40 に留まった。

10. LCC 及び LC-CO₂ によるシステム評価

図-4, 図-6 より, 圧力及び真空システムでは,

LCC は人口密度 5 人/ha の真空システムを除いて自然流下システムよりも小さく, LC-CO₂ はすべてについて小さかった。つまり, システムの 1 部 (人口密度 5 人/ha の真空システム) を除いて, 人口密度による差異は極めて小さいことが示された。

LCC と LC-CO₂ との関係を図-7 に示す。すなわち, この両者の関係は直線回帰できることが明らかとなった。しかもシステムによりその傾きと Y 切片が異なる。このことは指標値としての互いの対等性を示すものと考えた。そして人口密度の小さい程, LCC, LC-CO₂ 共に大きくなるという明確な特性を示した。標準型を含む自然流下システムは他のシステムに比べてその傾きが大きく, 自然+MP は標準型よりも傾きはやや大きい。共に人口密度に大きく影響を受ける。圧力及び真空システムでは共に圧力 2 及び真空 2 の傾きが大きかった。

地球の温暖化抑制が急務となっていることから, 汚水の収集システムについても LC-CO₂ を考慮に入れた評価を行うことが望まれるが, そのためにコスト高を招いては経済的な影響を与え, 社会全体としてマイナス影響となることが懸念される。このようなことから LCC と対比できるように, LC-CO₂ の発生抑制や処理・処分のコストを求めて, その和を汚水収集投資額とする統合評価指標を提

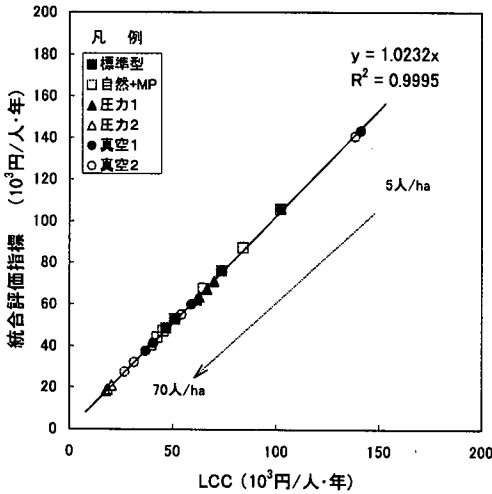


図-8 LCC と統合評価指標
(分離・回収と深海投棄の例)

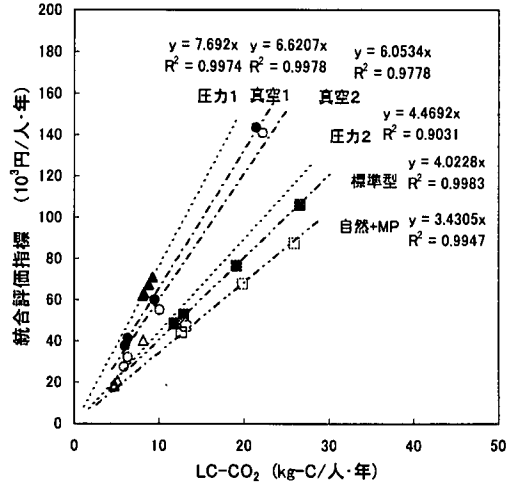


図-9 LC-CO₂ と統合評価指標
(分離・回収と深海投棄の例)

案することとした。

いままでに CO₂ の処理・処分方法として、森林など植物への固定、溶剤や膜による分離、海洋（深海）への投棄、地中への埋設などが提案されてきた^{47)~50)}。また CO₂ 抑制策として、炭素税、排出許可証の売買なども提案、あるいは検討されてきた^{49),51)}。これらの既存資料（文献値）と試算に使用した設定値を表-37 に示した。処理・処分値は設定条件によって大きく変動するが、炭素 1 トン当りに換算して、数 10⁴ 円から数 10⁵ 円のオーダーであった。

CO₂ を処理・回収したうえ最終処分する際には別にエネルギーを使用することになるから、その際の環境負荷も加える必要があるが、今のところ適切なデータがなく試算に加えることはできなかった。このため、汚水収集システムの整備、利用と廃棄までのコスト(LCC)に、その間で発生する CO₂ 量(LC-CO₂)を処理・処分するためのコストのみを加えて、これを統合評価指標（単位は 10³ 円/人・年）とした。発生した CO₂ の処理・処分に要するコストの試算に当っては、第 9 章の記述で算出した各システムの LC-CO₂ を用い、そして文献値をもとに定めた設定値（表-37 参照）により処理・処分コストを求め、現在価値に換算してある。算出された年間、1 人当たりの発生 CO₂ 処理・処分コストは LCC の数%を占めるに過ぎなかったが、統合評価指標の評価順位は LCC による評価順位を変える場合もあった。

感度分析を行ったところ、4 ケースの人口密度で評価順位が変わる発生 CO₂ 処理・処分コストは、130×10³ 円/t-C で人口密度 20 人/ha のケースの

順位に変化を生じさせ、2,500×10³ 円/t-C で 4 ケースすべてについて順位を変化させた。1 例として「分離・回収」による処理と「深海投棄」による処分の組み合わせを適用した場合について LCC と LC-CO₂ と統合評価指標との関係を示したのが図-8 及び図-9 である。

図-8 より統合評価指標と LCC とは高い相関が見られたが、これは指標に占める LCC の割合が非常に高かったためである。図-9 では全体として LC-CO₂ との直接の相関は見られなかったが、システム毎に相関をとると各々高い相関を示すことが認められた。Y 切片を 0 とした直線回帰式の傾きの違いは、統合評価指標における LC-CO₂ の影響度を示すもので、言い換えれば、環境負荷の影響度の違いを示している。傾きの大きいものは LC-CO₂ の影響度が小さく、傾きの小さいものは影響度が大きくなる。それらの傾きから、自然+MP の影響度が最も大きく、影響度の最も小さい圧力 1 の約 2.2 倍であった。環境負荷の統合評価指標に占める割合は小さかったが、システムによって特性に大きな違いのあることが確認された。

一般的に統合評価指標は人口密度の低下と共に増加する傾向を示した。そして、統合評価指標の小さいほうが経済的かつ環境負荷の小さいことを表している。システム別に統合評価指標が最小になったのは圧力 2 であり、続いて真空 1, 2（人口密度 5 人/ha を除く）であった。人口密度 5 人/ha では圧力 1 が真空 1, 2 に勝っていた。このことより、圧力システムは人口密度が極めて低い地区で優位性が高く、真空システムは真空ステーションのコスト負担の点から人口密度の増加に伴

い、その優位性が高くなっていく。自然流下システムは LC-CO₂ が常に高いほか、圧力及び真空システムの1部(圧力1の人口密度50人/ha以上と真空1,2の人口密度5人/ha)について、統合評価指標も大きくなった。

ケーススタディは汚水収集面積20haの平坦地で行ったが、統合評価指標を用いる事で経済的かつ環境影響負荷の小さいシステムを選定できる事が示された。

11. まとめ

汚水収集面整備システム計画の策定のために、これを経済的効果のみならず、環境への影響からも検討すべく、LCCとLC-CO₂を算出し、それぞれ評価した、さらにLC-CO₂から発生CO₂の処理・処分コストを試算し、これをLCCに加算した統合評価指標(単位は10³円/人・年)で評価する事を提案した。

LCCの算出では、基礎数値を算定するのに物価資料、メーカー見積もり、積算要領、実績に基づく積み上げを行った。LC-CO₂の算定では、文献などの既存資料のほか、電力、燃料消費量データの収集などにより、素材、製品、工事などのCO₂発生原単位を積み上げにより作成した。

地区面積20haの平坦地で、自然流下、圧力及び真空システムで各2ケース、人口密度4ケースについてケーススタディを行い、これを年間、1人当りのLCC、LC-CO₂及び統合評価指標でそれぞれ算出し、評価した。

ケーススタディでは発生CO₂の処理・処分コストがLCCの数%を占めるに過ぎなかったが、統合評価指標の評価順位はLCCの評価順位に変動を与える事も生じた。人口密度4ケースで評価順位が変わるのは、発生CO₂処理・処分コスト130×10³円/t-Cで人口密度20人/haのケース、2,500×10³円/t-Cでは4ケースすべてであった。

謝辞：データ及び資料収集において貴重なアドバイスを関連企業の担当者に頂きました。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) (社)日本下水道協会：日本の下水道 平成11年度, pp. 44-46, 1999.
- 2) Alphonse J. Dell'isola : *Value Engineering in the Construction Industry Third Edition*, Van Nostrand Reinhold Company, pp. 117-154, 1974.
- 3) Alphonse J. Dell'isola and Stephen J. Kirk :

Life Cycle Costing For Design Professionals, McGraw-Hill Book Company, 1981.

- 4) 仲上健一：豊かな「環境都市・大阪」を目指して：下水道事業におけるLCCとPFI, 月刊下水道, Vol. 22, No. 17, pp. 15-19, 1999.
- 5) 仲上健一：社会資本整備とライフサイクルコスト：下水道維持管理更新新時代にどう対応するか, 月刊下水道, Vol. 21, No. 31, pp. 16-19, 1998.
- 6) 酒井憲司：下水道事業におけるコスト削減の取り組みと今後の展望, 下水道協会誌, Vol. 35, No. 426, pp. 4-8, 1998.
- 7) 笹部薫, 松物良一, 吉田敏章, 大沢健治, 小林一三：管渠システムのコスト削減に関する調査, 下水道関係調査研究年次報告集, Vol. 1998, pp. 113-118, 1999.
- 8) Akinaga, K. and Kashiwaya, M. : Study on the Life Cycle Evaluation of Sewer Collection Systems by Cost, Energy and Carbon Emission, *Proceedings of WEFTEC2000 Conference*, October 2000, USA.
- 9) USEPA: *Alternative for small wastewater systems : Pressure Sewers / Vacuum Sewers*, EPA Technology Transfer Seminar Publication, EPA-625/4-77-011, 50-56 & 70-73, 1977.
- 10) USEPA : *Alternative for small wastewater systems: Cost/Effectiveness Analysis*, EPA Technology Transfer Seminar Publication, EPA-625/4-77-011, 1997.
- 11) 井村秀文, 銭谷賢治, 中嶋芳紀, 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：LCE及びLC-CO₂による評価, 土木学会論文集, No. 552/VII-1, pp. 75-84, 1996.
- 12) 轟巻峰夫, 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の定量化について, 第4回地球環境シンポジウム講演集, 土木学会地球環境委員会, pp. 57-62, 1996.
- 13) Emmerson, R. H. C., Morse, G. K., Lester, J. N. and Edge, D. R. : *The Life-Cycle Analysis of Small-Scale Sewage-Treatment Processes*, *J. CIWEM*, pp. 317-325, 1995.
- 14) 建設省都市局下水道部, 日本下水道事業団：下水処理場におけるエネルギーの効率的利用に関する調査-平成5年度調査報告書-, pp. 25-61, 1993.
- 15) 尾崎正明, 原田一郎, 久保忠雄, 石崎隆弘：下水道システムのLCAに用いる原単位に関する調査, 下水道関係調査研究年次報告書集, Vol. 1998, pp. 191-196, 1999.
- 16) 秋永薫児, 柏谷衛：ライフサイクルエネルギーに基づいた省エネルギー汚水収集システムに関する研究, 土木学会論文集, No. 622/VII-11, pp. 35-49, 1999.
- 17) 野村昇, 赤井誠, 稲葉教, 外岡豊：発電システムのライフサイクルにおける窒素酸化物・硫黄酸化物排出量, エネルギー・資源, Vol. 3, No. 6, pp. 551-557, 1998.
- 18) 盛岡通, 吉田登：持続可能な産業社会変革のための土木建設システムの環境負荷評価, 地球環境シンポジウム講演集, Vol. 6th, pp. 147-153, 1998.
- 19) 内山洋司：LCA手法, エネルギー・資源, Vol. 17,

- No. 6, pp. 19-24, 1996. 11
- 20) 稲葉敦: LCA用データとソフトウェア, エネルギー・資源, Vol. 17, No. 6, pp. 25-31, 1996.
- 21) (社) 化学経済研究所: 基礎素材エネルギー解析調査報告書, 1993. 9.
- 22) 酒井寛二: 土木建設物の二酸化炭素排出量原単位の推定, 第4回地球環境シンポジウム講演集, 土木学会地球環境委員会, pp. 43-48, 1996.
- 23) Akinaga, K. and Kashiwaya, M.: Life Cycle Energy (LCE) Analysis of Sewer Collection Systems, *Proceedings of International Conference on Urban Pollution Control Technology*, pp. 435-441, 1999.
- 24) 秋永薫児, 柏谷衛: 汚水収集システムのライフサイクルエネルギー (LCE) と規模特性評価に関する研究, 第37回下水道研究発表会講演集, pp. 124-126, 2000.
- 25) (社) 日本下水道管路維持管理業協会: 下水道管路施設の維持管理方法に関する調査報告書, 1996.
- 26) 建設物価調査会: 建設物価, 2000年1月号, 2000.
- 27) (財) 経済調査会: 積算資料, 2000年1月号, 2000.
- 28) 環境庁企画調整局地球環境部: 地球温暖化対策技術評価検討委員会報告書, 地球温暖化防止対策ハンドブック2産業編, 1992.
- 29) (社) 日本下水道協会: 下水道用設計積算要領: 管路施設 (開削工法) 編, 1992.
- 30) 下水道工事積算研究会: 建設省下水道工事積算基準, 1994.
- 31) (財) 建設物価調査会: 土木工事 積算基準マニュアル, 1995.
- 32) (財) 建設物価調査会: 建設工事標準歩掛, 1995.
- 33) (社) 日本下水道管渠推進技術協会: 推進工法用設計積算要領-小口径管推進工法編一, 1996.
- 34) (株) 建設産業調査会, 地下水ハンドブック編集委員会: 地下水ハンドブック, pp. 819, 1979.
- 35) (社) 日本下水道協会: 第5回 下水道技術セミナー (維持管理部門) テキスト-管渠の補修・更新工法一, 1995.
- 36) (社) 日本下水道協会: 下水道施設維持管理積算要領-管路施設編一, 1993.
- 37) (財) 下水道新技術推進機構: 下水道用マンホールポンプ施設技術マニュアル (案) [本編・資料編], 1997.
- 38) (株) 新都市開発社: 下水道管渠の維持管理: 新都市開発増刊号, Vol. 25 No. 3, 1987.
- 39) 北川三夫: 管路施設の高寿命化を目指して, 月刊下水道, Vol. 17, No. 2, pp. 6-10, 1994.
- 40) United Nation: *Department for Economical and Social Information and Policy Analysis Statistical Division: Statistical Yearbook Fortieth issue 1993*, pp. 266-269, New York, 1995.
- 41) ING. P. EUR J. P. Consterdine: Maintenance and Operational Costs of Vacuum Sewerage Systems in East Anglia, pp. 591-597, *J. CIWEM*, 1995. 9
- 42) 下水道計画研究会, (財) 全国建設研修セミナー: 下水道計画の手引き, 1997.
- 43) Cip-Gegevens Bureau/Koninklijke Bibliotheek, Den Haag: *Mechamische Riolerling A Anbevelingen Beheer Eindrapport Onderzoeksproject, 92-03*, 1994.
- 44) 日本銀行調査統計局: 物価指数年報, (昭和51年~平成10年)
- 45) 浜松市村郷町: 村郷処理分区 (真空式) 管渠および中継ポンプ場築造工事変更設計書, 1992.
- 46) 島根県三朝町: 山田真空ポンプ場ポンプ設備工事設計書 (見込み), 1992.
- 47) 地球環境工学ハンドブック編集委員会編: 地球環境工学ハンドブック, pp. 501-521, オーム社, 1993.
- 48) 小島紀徳: 二酸化炭素問題のウソとホント 地球環境・温暖化・エネルギー利用を考える, pp. 167, 141-142, 224, アグネ承風社, 1997.
- 49) 内山洋司: CO₂の回収・処理技術の経済性, pp. 660-665, ケミカルエンジニアリング, 1995.
- 50) 小坪宏則, 原田平, 大隈多加志: 日本におけるCO₂地中貯留システムの経済性の検討, pp. 317-322, 第17回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 2001.
- 51) 天野明弘: 地球温暖化の経済学, pp. 168, 日本経済新聞社, 1997.

(2000. 8. 30 受付)

STUDY ON AN EVALUATION PROCESS BY LIFE CYCLE COST AND LIFE CYCLE CARBON EMISSION OF WASTEWATER COLLECTION SYSTEMS

Kunji AKINAGA and Mamoru KASHIWAYA

This study proposed a new evaluation process to select a wastewater collection system with alternatives of a gravity with pumps system, each two pressure and vacuum systems as well as a standard gravity system. Case studies were carried out to evaluate from both economical and environmental points of view. A model area was flat 20ha, with population density consisting of 5, 20, 50 and 70 persons per ha. Each life cycle costings (LCC) and life cycle carbon dioxide emissions (LC-CO₂) were also applied as the evaluating factors. The total LCC and LC-CO₂ classified based on the population densities, were estimated and converted into annual present values per capita. And, an integrated factor indicating both cost and environmental effectiveness was proposed.