

琵琶湖流域における上下水道システムのライフサイクルアセスメント

Life Cycle Assessment related to Water Supply and Sewerage Systems in Lake Biwa Basin

天野 耕二*

西村 彰人**

Koji Amano

Akito Nishimura

ABSTRACT: Infrastructures have been emitting a large amount of environmental loads. In this study focusing on Lake Biwa, the largest lake in Japan, we estimated the amount of life cycle energy consumption and carbon dioxide emission generated with the construction and operation of the water supply and sewerage systems in Lake Biwa Basin. The total amount of Annualized Life Cycle Energy consumption (ALCE) is 864,712Gcal/year (water supply = 55.1%, sewerage = 44.9%). ALCE consist of water supply facilities (29.2%), sewerage plants (18.0%), and sewerage pipes (17.7%). The ratio between initial and running stages is 54.1% : 45.9%. The total amount of Annualized Life Cycle Carbon Dioxides emission (ALC-CO₂) is 157,368TC/year (water supply = 15.7%, sewerage = 84.3%), which corresponds nearly 11.5% of the total CO₂ emission from Shiga Prefecture in 1999. ALC-CO₂ consist of water sewerage pipes (76.4%), water supply facilities (8.4%), and sewerage plants (7.2%). The ratio between initial and running stages is 89.4% : 10.6%. The annual reduction ratios of COD_{Mn} · T-N · T-P loading into the lake are 1.20% · 3.28% · 2.78% by adopting “Super Advanced Treatment System”, while the ALCE and ALC-CO₂ from the entire systems become 2.14 and 1.33 times as much.

KEYWORD: Water supply and sewerage systems, Life Cycle Assessment, Energy Consumption, CO₂ Emission, Advanced Treatment

1. はじめに

現代の社会生活において、人々は社会資本から多大な恩恵を受け、快適で安全な生活を送る事が可能となっている。一方、社会資本は環境負荷という形で、人間に様々な影響を及ぼしている。社会資本構造物には、資材採取の段階から、構造物が寿命を終えて解体される段階まで、膨大なエネルギーが消費されている。その過程では、多くの資源や燃料が消費され、廃棄物が大量に排出される。例えば、社会資本整備を支える土木建設活動では、建築と土木を合わせた建設用基礎資材の使用量が年間約 11 億トンで、日本全体の物質利用総量 22.4 億トンの約半分にも上る。土木建設分野に限定しても 7.2 億トンと 32%を占めている。そして、地球温暖化の最大の要因である CO₂ 排出量は、土木工事用資材製造で日本全体の 5.6%を占め、施工や波及効果を含めると 10%弱にもなる¹⁾。また、地球温暖化への寄与以外にも、大気圏、水圏、土壌圏への汚染物の排出なども考えられる。このように、社会資本整備は、地球環境に与える負荷が非常に大きい。そして、社会資本の一つである上下水道施設においても、安全な水の確保という目的の一方で、地球環境への様々な負荷とその対策について議論されている。その代表例が、上下水道施設の省エネルギーの推進である²⁾。また、更なる安全な水を目指した上下水道施設の高度化が、全国的に拡がりを見せている。その一方で、施設の高度化による地球環境への更なる負荷が存在するのも事実である。

* 立命館大学理工学部

Department of Science and Engineering, Ritsumeikan University

** 立命館大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

社会資本から発生する環境負荷評価を対象とした既往の事例研究としては、ダムを対象としたもの³⁾、港湾施設を対象としたもの⁴⁾、更には本研究で対象範囲内になっている浄水施設、下水道終末処理施設の事例研究がある⁵⁾⁶⁾。また、水処理分野の高度化に関する LCA 研究も報告されてきているが⁷⁾、超高度処理施設の導入に関する事例研究は発展途上にあると言える。LCA 研究における環境負荷の定量化の際、不可欠と言える原単位情報に関する報告も多いが⁸⁾、本研究が上記の事例研究と異なる点は、上下水道の両システムを同時に評価する事により、水の浄化・利用を系統的に捉えている事にある。また、社会資本を対象とした LCA 事例研究数が未だ多くはないという点においても、琵琶湖流域という特定地域の環境資本を対象とした LCA 事例として、特徴的であると言う事ができる。

本研究では、日本最大規模の琵琶湖の流域における上下水道システムを対象として、システム全体のライフサイクル環境負荷を1年間当たりに換算した年間エネルギー消費量 (ALCE)、年間二酸化炭素排出量 (ALC-CO₂) を積み上げ法と産業連関表による環境負荷原単位の併用により試算した。更には、高度水処理技術を導入した場合に生ずる ALCE、ALC-CO₂ の増加と、COD_{Mn}・TN・TP 負荷の削減についての比較評価も試みた。

2. 研究の対象施設とライフサイクルステージ

上水道システムについては、琵琶湖水を原水とする様々な規模 (平成12年度の年間取水量が1,138~21,069 千 m³) における15箇所の浄水場と、それらに付属する取導水施設 (導水ポンプと送水管含む) と配水施設 (送水管含む) を対象とした。下水道システムについては、琵琶湖を放流先とする4箇所の琵琶湖流域下水処理場と、それらに付属する幹線管渠・公共下水道管渠と、中継ポンプ場を対象とした。

対象とするライフサイクルステージとしては、上水道システムで取導水施設・浄水施設・配水施設の建設と運転 (運用) ステージとした。下水道システムでは、終末処理場・中継ポンプ場においては、建設と運転ステージとした。しかし、下水道システムの幹線管渠と公共下水道管渠においては、老朽化した管の交換や管内の補修、清掃といった維持・管理段階も考慮すべきであるが、該当するデータが未入手のため、建設段階のみを対象とした。また、すべての施設においての廃棄段階は対象外とした。

3. ライフサイクルインベントリ分析 — ALCE 評価 —

インベントリ分析では、対象とする上下水道システムの各ステージにおける年間エネルギー消費量 (ALCE) と年間二酸化炭素排出量 (ALC-CO₂) の算出を行った。分析方法として、積み上げ法と産業連関表による環境負荷原単位を併用した。建設段階の ALCE と ALC-CO₂ を求める際、LCE と LC-CO₂ を耐用年数で除するが、土木建築設備、機械設備、電気設備の耐用年数を各々40年、15年、20年として算出した。

3.1 上水道システム ～ 取導水施設、浄水施設、配水施設を対象として ～

建設・運転段階の両ステージにおいて、各施設の琵琶湖からの年間取水量に施設規模別のイニシャル・ランニングエネルギー消費原単位⁹⁾を乗じ、それらの合計を求める事により ALCE を算出した。電力消費のエネルギー換算については、原単位 2250kcal/kWh¹⁰⁾を使用した。

3.2 下水道システム ～ 管渠、処理場、ポンプ場を対象として ～

(I) 管渠

流域幹線管渠では各下水道処理区の管渠データ¹¹⁾、公共下水道管渠では各自治体の管渠データ¹²⁾の管径別の管渠延長 (m) に対して、それぞれ延長別に対応させた開削工法による管渠敷設エネルギー消費量原単位 (Mcal/m)¹³⁾ を乗じて、耐用年数で除すことにより、管渠敷設における建設 ALCE を算定した。

管渠敷設エネルギー消費原単位に関しては、既に報告されている管径 700mm、1000mm、2000mm の場合の管

径 (X) と原単位 (Y) の関係を 2 次式 ($Y=1.012 \times 10^{-3} X^2 + 2.117 \times 10^{-1} X + 562.381$) で近似した上で、管径 600mm、1300mm、1500mm、3000mm、3500mm、4000mm の場合の原単位を推定した。上記の 2 次式の決定係数は 0.98 となった。

(2) 下水終末処理場

建設エネルギーに関しては、湖南中部・湖西・東北部・高島の各浄化センターの工事一覧表に示されている工事請負額¹⁴⁾に産業連関表による環境負荷原単位¹⁵⁾を乗ずることにより算出した。ただし、処理場建設で行われてきた各工事は施工年度が異なるため、各工事請負額を建設工事費デフレーターにより、基準年として設定した平成7年度に合わせ物価補正した。各工事を土木建築工事、機械工事、電気工事の3種類に分類して、産業連関分析により報告されているエネルギー消費量原単位 (TOE/百万円)¹⁵⁾を乗じ、それらを各々の耐用年数で除する事により建設 ALCE を求めた。原単位を乗じる際には、上記の3工種を建設 (32 部門)、一般産業機器 (93 部門)、重電機器 (93 部門) の各分野に対応させた。

運転エネルギーに関しては、平成12年度運転年報¹⁶⁾に基づいて、一般的な積み上げ法により運転 ALCE を算出した。分析対象としては、電力量、上水使用量、灯油使用量とした。電力量については、自家発電も含めた総電力量を適用した。上水使用量については、上水道システムの運転 LCE の時と同様に、原単位 3200 kcal/m^3 を用いた。薬品については、PAC (ポリ塩化アルミニウム)、消石灰、塩化第二鉄などが使われているが、薬品エネルギー値は電力エネルギー値などと比べ小さいと仮定して、考慮しなかった。

(3) 中継ポンプ場

終末処理場と同様の方法により、建設・運転 ALCE を算出した。

3.3 ALCE 評価の結果 (図-1)

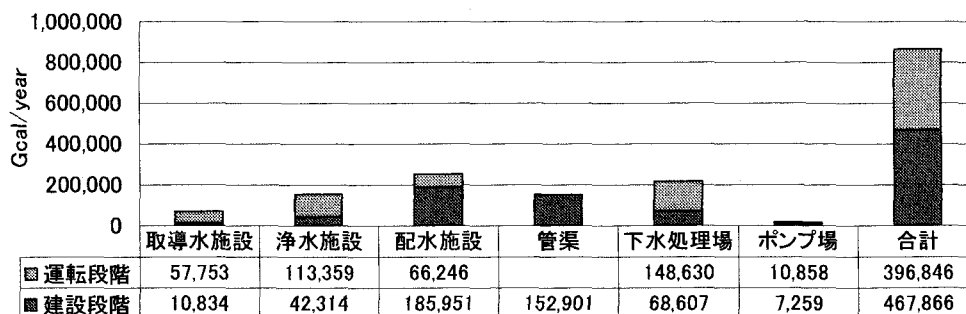


図-1 上下水道システムにおける ALCE

上下水道システムの総 ALCE は、864,712 Gcal/年となった。上下水道別 ALCE 内訳では、上水道システムが 55.1%、下水道システム 44.9% であった。施設別内訳を見ると、配水施設 (上水道) が 29.2%、処理場 (下水道) が 25.1%、浄水施設 (上水道) が 18.0% と高い値を示し、これら 3 施設で総 ALCE の 72.3% を占めた。建設・運転段階別の内訳でみると、建設段階 54.1%、運転段階 45.9% となった。

4. ライフサイクル二酸化炭素排出量 — ALC-CO₂評価 —

建設段階に関しては、処理区別年次別事業費の平成12年度の管渠本工事費¹⁵⁾を平成7年度基準に物価補正したものを、管渠敷設エネルギー原単位表（開削工法、内径700mm）¹⁵⁾の内訳に従って分配し、各々に対応する環境負荷原単位¹⁵⁾（TC/百万円）を乗じてCO₂排出量を求めた。原単位表の「直接投入」、「建設機械」、「間接投入（砂埋戻し・ぐり石基礎工）」、「間接投入（ヒューム管）」、「間接投入（路面復旧工）」に対して、「電力（93部門）」と「原油・天然ガス（186部門）」を半額ずつ、「鉱山・土木建設機械（186部門）」、「砂利・採石（93部門）」、「セメント製品（186部門）」、「石油製品（93部門）」を対応させた。「直接投入」に関しては、正確な投入された燃料が把握出来なかったため、建設機械使用に不可欠な電力と原油の原単位を、分配された工事費の半額ずつに乘じた。

運転段階に関しては、上下水道システム共に電力消費のみを対象とした（CO₂排出強度： 4.6×10^{-8} (TC/kcal)）¹⁷⁾。以下に、ALC-CO₂評価の結果を示す。（図-2）

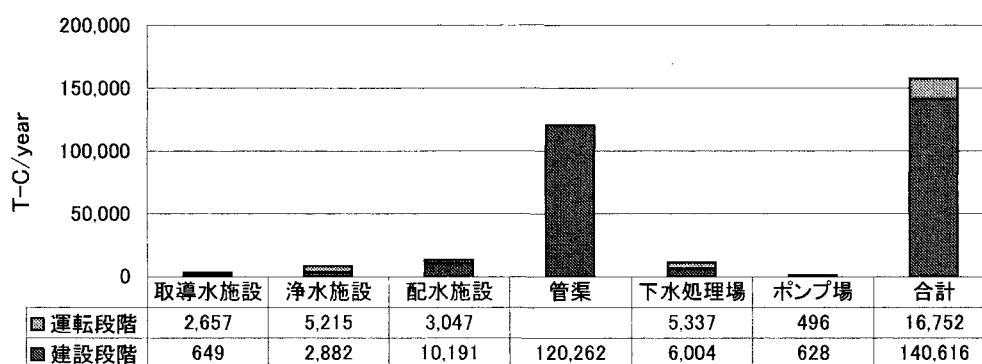


図-2 上下水道システムにおける ALC-CO₂

上下水道システムの総 ALC-CO₂は、157,368TC/年であった。これは、滋賀県の総 CO₂排出量（1999 年における）の約 11.5%に相当する。上下水道の割合で見ると、上水道システム 15.7%に対し、下水道システム 84.3%となった。施設別では、管渠（76.2%）、配水施設（8.4%）、下水処理場（7.2%）となった。段階別に見ると、建設段階 89.4%、運転段階 10.6%となった。

5. 水処理技術の高度化によるライフサイクルインベントリ

琵琶湖流域下水道では、ノンポイント負荷対策や終末処理場からの汚濁負荷の更なる削減が重要課題とされており、生物処理と物理化学処理を併用した「超高度処理」の導入が検討段階である。ここでは、琵琶湖流域下水道で現在採用されている「凝集剤添加活性汚泥循環変法」と「凝集剤添加多段硝化脱窒法」に替えて、実際に「超高度処理」が導入された場合の年間目標処理水質に基づく COD_{Mn}、TN、TP の年間負荷削減量、増加分 ALCE と ALC-CO₂について試算した。その結果、COD_{Mn}、TN、TP の年間負荷削減量は、それぞれ 1.20%、3.28%、2.78% となった一方で、対象とする上下水道システム全体で、ALCE が 2.14 倍、ALC-CO₂ が 1.33 倍となった。（図-3、図-4）

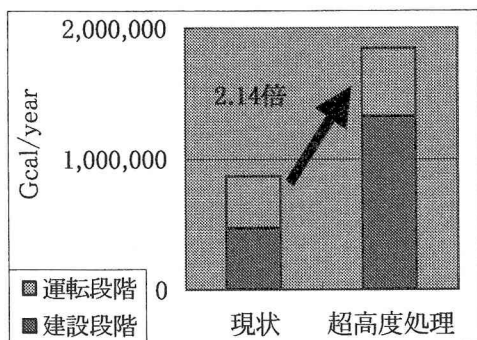


図-3 超高度処理による増加分 ALCE

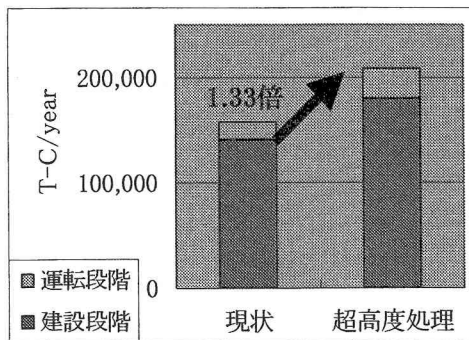


図-4 超高度処理による増加分 ALC-CO₂

6. まとめと今後の課題

- ◆ 琵琶湖流域における上下水道システムの ALCE と ALC-CO₂ を試算した結果、ALCE 評価では上水道システムの方が大きい (上水道：下水道 = 55.1 : 44.9)、ALC-CO₂ 評価では下水道システムの方が圧倒的に大きくなった (上水道：下水道 = 15.7 : 84.3)。この理由として、ALC-CO₂ における下水管渠関連の割合が大きくなっていることから、管渠に使用されるセメント生産プロセスにおける石灰石起源の CO₂ 排出が考えられる。
- ◆ 琵琶湖流域下水処理場に超高度処理を導入した場合における水質汚濁負荷削減量と CO₂ 排出量の関係については、COD_{Mn}、T-N、T-P 削減量当たりの CO₂ 排出量が、202.42T-C/T-COD_{Mn}、202.42T-C/T-T-N、12,152.26T-C/T-T-P となった。
- ◆ 今回対象外とした下水処理場の薬品使用、管渠の維持管理、下水污泥の搬出など、更なるエネルギー消費・CO₂ 排出に関わるライフサイクルステージを考慮する事が求められるが、更なる環境負荷原単位の整備が必要となる。また、上水道システムの建設・運転段階のエネルギー消費量試算の場合においても、実績運転・工事データなどに基づいて行う事が、より実質的な提言への第一歩である。
- ◆ CO₂ 排出源では、運転段階における電力によるものが高い割合を示したが、燃料や污泥焼却などから発生する CO₂ についても考慮する必要がある。また、地球温暖化への影響を更に検討していく際、CO₂ 以外の温室効果ガスについても環境負荷影響を検討する必要がある。例えば、下水の污泥処理から発生するメタンや一酸化窒素が対象となる。
- ◆ 水利用から水処理にまたがる完全な水循環を補うためには、合併処理浄水槽や農村集落排水処理施設などの他の排水施設も考慮に入れる必要がある。

参考文献

- 1) 盛岡通, 鶴巻峰夫, 斉藤修 著, 土木学会地球環境委員会(LCA 評価・環境パフォーマンス評価研究小委員会) 編; ISO14030-40 の規格化による建設業の環境パフォーマンス評価とライフサイクルアセスメント, 75, 鹿島出版会 (2000).
- 2) 花木啓祐; 上下水道における省エネルギー推進への期待, 水環境学会誌, 25, 1, (2002).
- 3) 小泉泰通, 高柳則男; ダム建設のライフサイクル評価, 第4回地球環境シンポジウム講演集, 49-56, (1996).
- 4) 中嶋芳紀, 河野幸次, 松本亨, 井村秀文; 港湾整備事業のライフサイクルアセスメントに関する研究: 福岡アイランドシティのケーススタディ, 土木学会論文集, 566(VII-3), 35-48, (1997).

- 5) 土木学会地球環境委員会・環境負荷評価 (LCA) 検討委員会；土木建設業における環境負荷評価 (LCA) 検討小委員会-平成8年度調査研究報告書, 61-70, (1998).
- 6) 土木学会地球環境委員会・環境負荷評価 (LCA) 検討委員会；土木建設業における環境負荷評価 (LCA) 検討小委員会-平成7年度調査研究報告書, 66-77, (1997).
- 7) 稲葉陸太, 花木啓祐, 荒巻俊也；下水の高度処理導入による地球及び地域への環境負荷変化量の統合的評価, 第28回環境システム研究論文発表会講演集, 55-60, (2000).
- 8) 鶴巻峰夫, 野池達也；LCA 手法を用いた排水処理の評価手法に関する研究, 土木学会論文集, 643(VII-14), 11-20, (2000).
- 9) 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, 90-92, 94, 109, (1993).
- 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7年度版, (1996).
- 11) 滋賀県, 湖南中部地域下水道推進連絡協議会, 湖西地域下水道推進連絡協議会, 東北部地域下水道推進連絡協議会, 高島地域下水道推進連絡協議会；琵琶湖流域下水道30年のあゆみ, 12-26 (資料編), 琵琶湖流域下水道30周年記念事業実行委員会 (2001).
- 12) 日本下水道協会；平成12年度版下水道統計 一行政編一, 288-292, (2002).
- 13) 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, 土木学会論文集, No552/VII-1, 78, (1996).
- 14) 滋賀県, 湖南中部地域下水道推進連絡協議会, 湖西地域下水道推進連絡協議会, 東北部地域下水道推進連絡協議会, 高島地域下水道推進連絡協議会；琵琶湖流域下水道30年のあゆみ, 27-34, 35-39 (資料編), 琵琶湖流域下水道30周年記念事業実行委員会 (2001).
- 15) 南斎規介, 森口祐一, 東野達；産業連関表による環境負荷データブック(3EID), 独立法人 国立環境研究所, (2002).
- 16) 滋賀県, (財)滋賀県下水道公社；平成12年度維持管理年報一概要版一, 12-21, 32-39, 50-55, 66-71.
- 17) 前出 13), 82.
- 18) 滋賀県琵琶湖環境部；平成14年度滋賀県の下水道事業, 62-69, (2001).
- 19) 日本下水道協会；平成12年度版下水道統計 一財政編一, 18, (2002).
- 20) 滋賀県琵琶湖環境部；滋賀県地球温暖化対策(案), (2003).
- 21) 滋賀県琵琶湖環境部, 日本下水道事業団；琵琶湖流域下水道における超高度処理に関する調査報告書, 201, 229, 263, 285, (2000).
- 22) 山田友博；汚濁物流出管理支援システムの開発とその有用性に関する研究 ～琵琶湖集水域を事例として～, 立命館大学大学院理工学研究科修士論文, (2001).