

都市・社会資本・交通を対象としたライフサイクルアセスメント研究の現状と課題*

A State of the Arts of Life Cycle Assessment Researches for City, Infrastructure and Transport Systems*

加藤 博和**・柴原 尚希***

By Hirokazu KATO**・Naoki SHIBAHARA***

1. はじめに

地球温暖化、エネルギー・資源枯渇、有害化学物質・廃棄物処理といった地球レベルでの環境問題への対応が国際的に喫緊の課題となっている現在、人間活動の環境インパクトを評価し、改善方策を検討する手法の重要性が認識されるようになってきている。その一手法として、ライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment: LCA)の研究が工業製品開発を中心に様々な分野で進められており、その結果を生産技術の見直しや環境報告書での開示データに活用する企業も増加している。

一方、土木計画学が対象とする都市・社会資本・交通へのLCA適用事例を概観すると、既にニュータウン建設や輸送機関といった多様な評価対象に適用されているものの、工業製品とは異なる特徴を有するがゆえの課題が多く残っている。そこで本稿は、土木計画分野でのLCA研究の現状を整理し、今後の研究課題を明確にすることを目的とする。

2. LCA研究の系譜と最近の動向

(1) LCA研究の萌芽

LCAの原義は、製品の環境負荷を「揺りかごから墓場まで(Cradle-to-Gate)」の全体で評価することである。つまり、製品の生産から最終廃棄物となるまでの生涯における環境負荷を、なるべく定量的かつ総合的に評価しようとするものである。LCAという言葉が使われるようになったのは、1990年に開催された欧米の化学系の研究者で組織する環境毒物化学学会(SETAC: Society of Environmental Toxicology and Chemistry)の国際ワークショップが最初である。ただし、LCAと似た概念や手法は1980年代以前から用いられていた。その後、アメリカ

およびヨーロッパで、1980年代から1990年代初頭にかけてSETACを中心に研究が進展し、さらに、1992年の地球サミットを受けて、国際標準化機構(International Organization for Standardization: ISO)が環境管理システム規格の検討に着手したことで、LCA研究が活発に行われるようになった¹⁾。1993~96年にかけてLCAがISO14040番台に規格化され、その後のLCAの標準的手続きを規定するものとなっている。

日本でも1990年代以降、各分野で本格的にLCA調査研究が行われるようになり、これらを横断する組織として1995年に「LCA日本フォーラム」が設立された。さらに、1998年からは通商産業省(現・経済産業省)が産学官共同の国家プロジェクトとして「LCAプロジェクト」を立ち上げ、LCAの方法論やデータベース構築が進んだ。2004年には日本LCA学会も設立され、LCA研究は学際的な環境研究の一分野として確立しつつある。

(2) 建設分野におけるLCA研究の動向

一方、インフラや建築物を対象としたLCAは、日本で際だって研究が行われてきた分野であり、SETACやISOにおける検討がベースとなっている工業製品分野のLCAとはやや異なった発展経過をたどってきている。これは、インフラや建築物は長い耐用年数を有するために、従来、費用や効果影響に関してライフサイクル的な分析が実施されてきていた実績があり、それらがベースとなったためである。

建築物に関しては、省エネ住宅のような建設段階と運用段階のトレードオフが問題となる場合や、長寿命住宅のような使用年数の検討といった観点からの検討においてライフサイクルコスト(LCC)分析が用いられ、これに環境の視点を加えるためにLCAが導入されるという流れであった。日本建築学会では1990年からLCAに関する検討を進め、現在ではインベントリに使用する原単位データベースが整備されるとともに、官庁施設や建築物を対象としたLCA手法が標準化されるに至っている²⁾。

土木分野においても、インフラを対象としたLCA研究が1990年代に精力的に行われた。建設プロジェクトでは一種のLCA的評価手法として、環境影響評価(環境アセスメント)が従前から実施されていたが、これは立地

*キーワード：環境計画、地球環境問題

**正会員、博(工)、名古屋大学大学院 環境学研究科 助教授(〒464-8603 名古屋市千種区不老町、

Tel:052-789-5104、E-mail:kato@genv.nagoya-u.ac.jp)

***正会員、修(環境)、三重交通(株) 総合企画室経理部 (〒514-8635 三重県津市中央1-1、Tel:059-229-5521、E-mail:Shibahara.Naoki@sanco.co.jp)

表-1 社会システムを対象としたLCAに関する既往研究の整理

著者	対象	代替案	評価指標	概要
交通システム				
松橋ら ⁷⁾ (1998)	路面電車	自動車	ELC-CO ₂ ELC-NO _x	路面電車整備における環境負荷削減効果を推計
稲村ら ⁸⁾ (2002)	東北新幹線	東北自動車道	ELC-CO ₂	走行のみならず、建設・供用段階の重要性の提言
加藤ら ⁹⁾ (2000)	都市鉄道	路面電車 路線バス	ELC-CO ₂	想定輸送需要量や運行状況の違いが環境に及ぼす影響を推計
山口ら ¹⁰⁾ (2001)	LRT	(運賃体系、 表定速度)	ELC-CO ₂	LRT 整備による長期的な環境改善の可能性を提言
相原ら ¹¹⁾ (2002)	東海道 新幹線		SyLC-CO ₂	産業連関法と積み上げ法による結果を示し、比較
工藤ら ¹²⁾ (2003)	鉄道(with and without 高架橋) 地下鉄、トラム、トロリーバス、路線バス、自動車		SyLC-CO ₂	各輸送機関の環境負荷比較
柴原ら ¹³⁾ (2003)	都市近郊鉄道	鉄道 高速道路	ELC-CO ₂	計画段階での標準的LCA手法の確立
長田ら ¹⁴⁾ (2005)	AGT、LRT、 GWB、BRT	鉄道 自動車	SyLC-CO ₂ SyLC-SO _x SyLC-NO _x	複数の輸送モードの環境負荷の需要量による感度分析
渡辺ら ¹⁵⁾ (2005)	LRT	路面電車 路線バス	ELC-CO ₂ SyLC-SO _x SyLC-NO _x	LRT、路面電車の有無によるシナリオ間の、道路交通起因の環境負荷比較
加藤ら ¹⁶⁾ (2006)	磁気浮上式 超高速鉄道	航空機 在来型 新幹線	ELC-CO ₂ SyLC-SO _x SyLC-NO _x	速度・輸送力を考慮した環境効率指標による評価の導入
都市・地域				
伊藤ら ^{17)・19)} (1995-97)	ニュータウン	(工法、 材料)	SyLC-CO ₂	ニュータウン建設・供用の環境負荷評価、概略LCA手法の提案
藤田ら ²⁰⁾ (1999)	都市再開発		SyLC-CO ₂	都市再開発事業の直接影響のみならず、それが都市圏の交通などに与えるインパクトの評価
林ら ²¹⁾ (2000)	大都市の 建物群+ 交通システム	(都市コンパクト化、建物 長寿命化)	SyLC-CO ₂ ほか計10 種類の 環境負荷	都市域マネジメントによる環境負荷削減効果の評価
松本ら ²²⁾ (2004)	都市生活排水・廃棄物処理システム	(排出技術 導入)	SyLC-CO ₂ SyLC-TOD	LCC も含めた統合評価の考え方、時間経過を考慮したライフサイクルシミュレーション
栗島ら ²³⁾ (2004)	ニュータウン		SyLC-CO ₂ SyLC-SO _x SyLC-NO _x 煤塵 固形廃棄物	施設運用による環境負荷を詳細に検討

場所の周辺環境を評価する手法であった。そこで、地球環境問題への対応を加える必要性からLCA研究が進められた。土木学会では、インベントリ分析のためのCO₂排出原単位として「学会推奨値」を整備し、さらに建設業へのLCA適用の考え方について整理を行った³⁾。

また、各種のインフラを対象としたLCA研究も進み、90年代の間に一通りの研究が出そろった⁴⁾。これらの研究は建築分野と異なり、建設段階における、材料の遡及的排出も含めたCO₂排出・エネルギー消費を推計し、それを削減するための材料・構造・工法の選択を検討することが主な目的である。これは、インフラの場合、建設段階、特に主な材料である鋼やコンクリートの分が卓越するためである。建設段階におけるインベントリ分析は、各材料の使用量にその環境負荷原単位を乗じるというものであり、建設費の積算と同様に(建設単価を内包環境

負荷原単位に置き換えればよい)ことから、原単位データベースの整備に伴ってソフトウェア開発も進んできている。

しかし、土木計画の対象である、都市開発や交通機関整備といった、多数のインフラとそれを利用して行われる活動から構成される社会システムを評価する場合には、整備の態様がその後の活動を規定し、活動に伴う環境負荷を変化させることに注意が必要である。その負荷は建設段階に比べ決して小さくないため、単に建設段階のインベントリ分析を行うだけでは不十分であると言える。また、インフラの複合システムになっていることから、その相互関係によって環境負荷が規定されることを考慮する必要もある。このような観点から行われたLCA研究について次に説明する。

3. 社会システムのLCAに関する既往研究の整理と課題の抽出

(1) 既往研究

ここでは、インフラ単体を対象とするLCA研究でなく、多数のインフラが支える社会システムを対象とするLCA研究について概観する。表-1にまとめるように、それは大きく交通システム⁵⁾と都市・地

域を対象とするものに分けられる(ほかにも上下水道システムなどが存在するが、ここでは取り扱わない)。いずれについても既に様々な研究事例が存在している。多数のインフラや活動の環境負荷を推計しとりまとめる必要があることから、各インフラ・活動に関する環境負荷のデータベースを構築し活用したり、推計のためのモデルシステムを構築したりといった工夫が行われている。

(2) 適用における問題点

以上の既往研究から、社会システムが工業製品とは異なる特徴を有しているが故のLCA適用の困難さが、以下のように列挙できる。

a) ライフタイム (耐用年数)

維持管理の仕方によっては、半永久的に存在し続けるものもあり、ライフタイムの設定が容易でない。将来

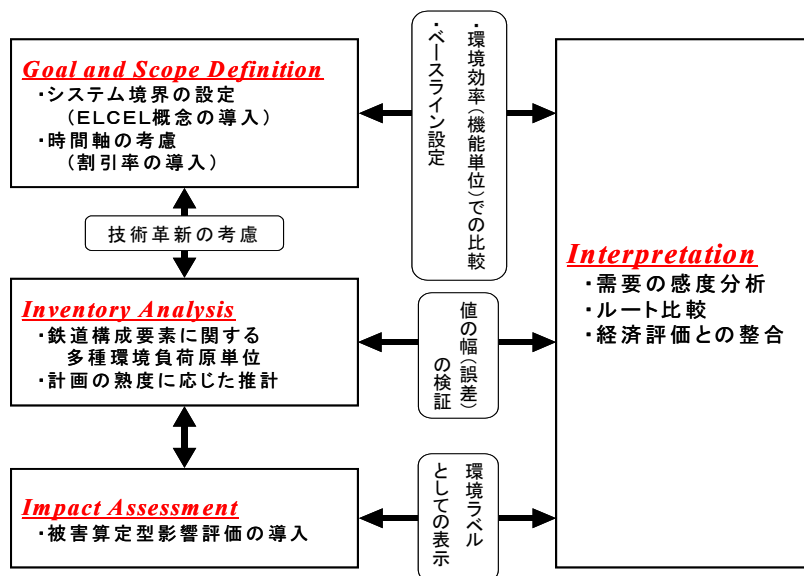


図-1 社会システムに関する LCA 研究の理論・手法面に関する課題と ISO-LCA との関係

の技術革新や老朽化による更新・淘汰(寿命)の考慮が難しい。しかも、社会システムの場合にはライフタイムの異なる多数のインフラ・製品から構成されており、その間の関係も考慮しなければならない。

b) 生産

インフラは一品生産であり、試作ということがない。正確なインベントリ分析を行うには、個々のケースに従って詳細データを入力し推計を行う必要がある一方で、計画段階(詳細設計のない段階)では、データ制約により仮定が多くなり、結果の信頼性が低下する。設計・施工段階での仕様変更によって環境負荷が大きく変化する可能性も高い。

c) 波及効果

社会システムの改変は広範囲な波及効果を及ぼすため、それらを包括した評価バウンダリとする必要がある。著者らは、評価範囲をシステム自体の環境負荷(SyLCEL: System Life Cycle Environmental Load)にとどまらず、波及効果が生じる範囲まで拡張したELCEL(Extended Life Cycle Environmental Load: 拡張ライフサイクル環境負荷)概念を提案している⁵⁾が、実際にそのバウンダリ特定は困難である。小さくとれば波及効果の捕捉は過小となる。大きくとれば膨大なデータを必要とし、推計が困難となる上、結果の信頼性も低下してしまう。

d) 社会への影響

社会システム変化によって人間の行動が変化し、例えば、輸送総量や機関分担率が経年的に変化することで環境負荷も変化する。しかし、事前評価の場合、その精度は需要予測の結果に依存してしまう。

加えて、工業製品のLCAにも共通する課題として以

下の点が挙げられる。

e) 経済的視点

LCA結果を企業活動や事業の評価としての費用対効果分析の中に取り入れるためには、経済的視点が欠かせないが、環境を貨幣価値に換算することに関して、議論の余地が残されている。

f) 時間的視点

使用段階の環境負荷が卓越している対象ほど、ライフタイムの設定によって、ライフステージ別シェアは大きく左右される。また、評価が長期間になるほど技術革新や産業構造変化の影響を受けるようになる。

(3) 理論・手法面に関する課題

前節で挙げた課題をISO-LCAの手順に沿って整理する(図-1)。

a) Goal and Scope Definitionの標準的な設定法

①システムバウンダリの設定

- 波及効果を把握でき、誤差をコントロールできる標準的なバウンダリ特定法

②ベースラインの設定

- 整備なしという仮想的な状態の設定法

③時間軸の考慮

- 技術革新、不確実性、寿命設定、インフラ廃棄の考慮など、時間的視点の考慮

b) Inventory Analysisにおけるプロジェクトの熟度と精度・データとの関連

①簡略/詳細LCAの使い分けと原単位の制約

- 事業進捗状況と取得可能データとの関係
- 計画時を想定した場合、データ制約に伴って精度にばらつきが出る
- 事業進捗によって設計が変更されることが普通

②環境負荷原単位

- 多項目環境負荷の考慮
- 積み上げ法と産業連関法による差の解釈

③需要予測への依存

- 結果の精度が需要予測精度に依存

c) Impact Assessmentのための指標

①環境負荷統合化指標

- LIMEなどの指標開発が発展途上であり、適用性検討が必要

d) Interpretationおよび情報開示のためのアウトプット

①評価指標

- 性能指標と環境効率指標の定義
- サービスレベル、経済的視点との兼ね合い

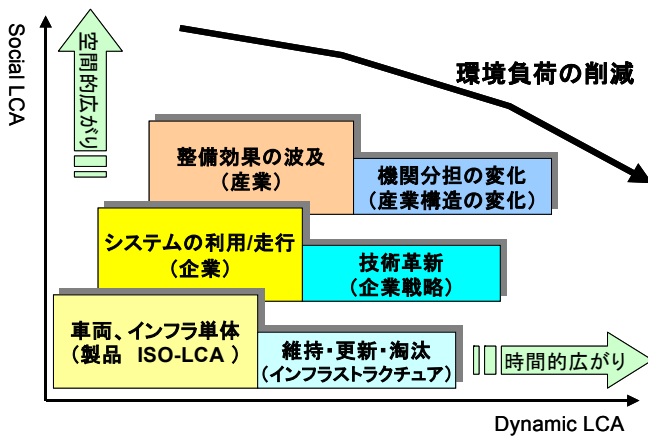


図-2 社会システムと Social/Dynamic LCA の関係 (稲葉⁶⁾の提案 () 部分) に加筆)

②環境へのやさしさを認識しやすい指標

・ Type III ラベルとしての表現法

4. 社会システムの環境負荷評価手法確立に向けた新しいフレームの必要性 -Social/Dynamic LCA-

前章で整理した諸課題は、「時間境界の設定」「空間境界の設定」(とデータ制約・影響波及範囲との関係)、および推計結果の「評価指標」に大別される。LCAにおける永遠のテーマと言っても過言ではないであろうこれらの課題は、社会システムへの適用においてとりわけ顕著であるとともに、従来は評価者が場当たりに(性悪説に立てば恣意的に)仮定を設定しているのが実状である。

以上の問題意識を解決する方向性として、稲葉⁶⁾が提唱したSocial/Dynamic LCA概念がある。これは、長期的に環境負荷が小さい社会を目指すための手法としてのLCAの提案であり、その定義は以下の通りである。

Social LCA : 評価対象を「単一製品」から「企業」「産業」に広げるとともに、「経済や市民社会との係わり」の視点を加える。

Dynamic LCA : 時間軸を考慮する。すなわち、価値観の変化や技術革新を評価に取り入れる。

この2つのアプローチが融合することで、環境負荷が少ない社会を構築する手法に昇華させることが究極の目標とされている。この構図を社会システムに当てはめると、図-2に示すように整理できる。

以上、本稿では、土木計画学に関わるLCA研究を概観し、課題を整理した結果、それがSocial/Dynamic LCA概念の具体化に集約されることを示された。今後は、各課題の詳細な検討によって、その方法論を確立していくことが必要である。

謝辞

本研究は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 東京支社との共同研究「鉄道整備のライフサイクル環境評価に関する共同研究」の一環として実施した。ここに記し、謝意を表する。

参考文献

- 1) 稲葉敦: LCAに関する国際的議論の動向、日本LCA学会誌、Vol.1、No.1、pp.4-9、2005。
- 2) 伊香賀俊治: 建築物のLCA・LCC同時評価ツールの国・自治体・企業での活用状況、第1回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、pp.6-11、2005。
- 3) 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: ISO-14030-40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、鹿島出版会、2000。
- 4) 井村秀文編著: 建設のLCA、オーム社、2001。
- 5) 加藤博和: 交通分野へのライフサイクルアセスメント適用、IATSS Review、Vol.26、No.3、pp.55-62、2001。
- 6) 稲葉敦: 「ソーシャルLCA」と「ダイナミックLCA」の検証と今後の方向性、LCA日本フォーラムニュース、第26号、pp.4-7、2002。
- 7) 松橋啓介、森口祐一、近藤美則: 都市内交通手段としての路面電車に関するライフサイクル評価、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、Vol.4、pp.67-72、1998。
- 8) 稲村肇、M.Piantanakulchai、武山泰: 高速道路と新幹線のライフサイクル炭素排出量の比較研究、運輸政策研究、No.15、pp.11-22、2002。
- 9) 加藤博和、大浦雅幸: 新規鉄道整備による CO₂ 排出量変化のライフサイクル評価手法の開発、土木計画学研究・論文集、Vol.17、pp.471-479、2000。
- 10) 山口耕平、青山吉隆、中川大、松中亮治、西尾健司: ライフサイクル環境負荷を考慮した LRT 整備の評価に関する研究、土木計画学研究・論文集、Vol.18、No.4、pp.603-610、2001。
- 11) 相原直樹、辻村太郎: 東海道新幹線の LCA 手法による環境負荷の基礎的検討、鉄道総研報告 Vol.10、No.10、pp.13-18、2002。
- 12) Kudoh Y. et al. : Life Cycle CO₂ emissions from public transportation systems, Journal of Asian Electric Vehicles、Vol.1、No.1、pp.259-266、2003。
- 13) 柴原尚希、加藤博和、狩野弘治: LCA に基づく標準化原単位を用いた鉄軌道システムの環境性能評価手法、土木学会、第31回環境システム研究論文発表会・講演集、pp.167-172、2003。
- 14) 長田基広、柴原尚希、加藤博和: 中量旅客輸送機関導入へのLCA適用、第1回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、pp.88-89、2005。
- 15) 渡辺由紀子、長田基広、加藤博和: 波及効果を考慮した LRT システム導入の環境負荷評価、第1回日本LCA学会研究発表会講演要旨集、pp.90-91、2005。
- 16) 加藤博和、柴原尚希: 公共交通整備計画評価へのLCA適用 - 超伝導磁気浮上式鉄道を例として -、日本LCA学会誌、Vol.2、No.2、pp.166-175、2006。
- 17) 伊藤武美、花木啓祐、谷口学幸、有浦幸隆: ニュータウン建設にともなう二酸化炭素排出量に関する研究、環境システム研究、Vol.23、pp.190-197、1995。
- 18) 伊藤武美、花木啓祐、本多博: 二酸化炭素排出抑制技術・システムのニュータウン建設への適用、環境システム研究、Vol.24、pp.250-271、1996。
- 19) 伊藤武美、花木啓祐、本多博: ニュータウン建設における二酸化炭素排出量の概略推計方法の検討、環境システム研究、Vol.25、pp. 379-384、1997。
- 20) 藤田壮、盛岡通、村田昭人: 都市集積地区から派生するライフサイクル二酸化炭素の評価の都市マネージメントへの展開についての考察、環境システム研究、Vol.27、pp.355-364、1999。
- 21) 林良嗣、加藤博和、北野恭央、喜代永さち子: 都市空間構造改変施策に伴う各種環境負荷のライフサイクル評価システム、土木学会環境システム研究論文集、Vol.28、pp.55-62、2000。
- 22) 松本亨、左健: 都市基盤の再構築におけるLCAの役割: 都市生活排水・廃棄物処理システムを事例として、土木学会第32回環境システム研究論文発表会講演集、pp.195-202、2004。
- 23) 栗島英明、瀬戸山春輝、玄地裕、稲葉敦: 施設誘致型の社会基盤整備に対するLCA手法の研究 - 三重県クリスタルタウンのケーススタディ、土木学会第32回環境システム研究論文発表会講演集、pp.215-221、2004。