

# 交通システムLCAにおける評価の不確実性管理と情報提示の方法論\*

A Methodology for Managing Uncertainty and Representing Information in Applying LCA to Transport Systems\*

柴原 尚希\*\*・渡辺 由紀子\*\*\*・加藤 博和\*\*\*\*

By Naoki SHIBAHARA\*\*・Yukiko WATANABE\*\*\*・Hirokazu KATO\*\*\*\*

## 1. はじめに

平成19年2月以降、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次評価報告書が順次公開され、地球温暖化への懸念がますます強くなってきている。運輸部門においても、日本でのCO<sub>2</sub>排出量は総排出量の約20%を占め、対策の重要性が認識されている。その際、輸送量(人km)あたりの走行に関わるCO<sub>2</sub>排出量で環境影響が議論されるのが通常であるが、環境負荷は走行時のみに生じるものではなく、当該交通システムを支えるインフラの建設や車両の製造時においても発生することから、対策検討においてはそれらを含めて評価するLCA(Life Cycle Assessment)の考え方を適用する必要があるとの視点に立った研究が行われてきている<sup>1)</sup>。

工業製品を中心として、既に適用されているLCAでは、各社環境報告書やホームページ上に分析結果が開示されることも多くなってきている。そのため、「環境にやさしい」かどうかを正しく識別できるような評価方法として整備されていることが、評価結果利用者(交通政策に携わる専門家や行政官など)へのディスクロズにおける大前提でなければならない。しかし、ISO14040番台で規定されているLCAの交通システムへの適用においては、データの欠損等から生じる評価範囲設定の制約、構想段階での評価の際に正確な仕様が不明であること、広範囲に生じる波及効果の計測、原単位データの誤差、などに起因する不確実性への対処という課題が存在している。

そこで本稿では、交通システムのLCAの結果がはらむ不確実性や誤差への対処方法を構築する。さらに、環境効率や環境ラベルといった考え方を取り入れながら、交通システムのLCA結果を、不確実性を考慮した形で施策者に提示する方法論を示すことを目的とする。

表-1 LRTの各構成要素の標準原単位(CO<sub>2</sub>)の推計結果例<sup>3)</sup>

構成要素	t-CO <sub>2</sub>
車両原材料[/両]	6.02×10
車両製造[/両]	9.74
軌道(含レール)[/km]	1.53×10 <sup>3</sup>
電停[1カ所]	1.49×10

## 2. 交通システムのLCIにおける不確実性リスク要因の抽出

### (1) LCIの手順と推計における諸仮定

構想段階での交通システムLCAのうち、具体的なデータ収集と計算による環境負荷の計量を行うプロセスであるLCI(LC Inventory analysis)においては、詳細なデータを活用することが不可能であるため、各構造物について標準的な原単位をあらかじめ設定して用いる手法である概略LCI<sup>2)</sup>を援用することが多い。この手法は誤差が大きく、恣意性が入り込みやすいことから、本稿では交通システムLCAの不確実性のうち、特にLCIに着目して論じる。

ケーススタディとして、LRT(Light Rail Transit)とBRT(Bus Rapid Transit)を取り上げる。これらは大量輸送に対応する鉄軌道と少量輸送に対応する路線バスのいずれでも対応しがたい中間の需要に適した中量輸送機関の一種である。環境負荷物質はCO<sub>2</sub>のみを対象とする。以下に交通システムLCIの一般的な手順を示す。

#### a) 各構成要素の標準原単位の推計

該当する交通システムと同種の既存交通システムを対象に、インフラ構成要素(標準構造物)ごとにLCI分析を行い、原単位として整備する(これを標準原単位と呼ぶ)。LRTに関する推計結果例を表-1に示す。

#### b) 交通システム構成要素の物量の設定

構想している路線を構成する各標準構造物の整備量を求め、この値に、a)項で整備した標準原単位を乗じて積み上げ、当該交通システムのライフサイクル環境負荷(SyLCEL: System Life Cycle Environmental Load)<sup>4)</sup>を推計する。さらに、必要に応じて、波及効果を含めたELCEL(Extended Life Cycle Environmental Load)<sup>4)</sup>を推計し、代替案比較に用いる。そのため、路線長や構造、需要量が不明の場合にはそれらを設定する必要がある。

\*キーワード: 地球環境問題、交通計画評価、環境計画

\*\*正会員、修(環境)、名古屋大学大学院 環境学研究所

(〒464-8603 名古屋市千種区不老町、TEL: 052-789-3828、

FAX: 052-789-1454、E-mail: shibahara@nagoya-u.jp)

\*\*\*正会員、修(環境)、東日本電信電話株式会社

\*\*\*\*正会員、博(工)、名古屋大学大学院 環境学研究所 准教授

そこで LRT について、実在の路線のデータを参考に、路線長と構造・需要量等を仮定する。表-2 に示すように、路線長を 5km、日需要量を 5,000[人/日]、インフラの構造としては路面上に複線軌道がある状態を想定し、地下構造物や高架構造物は有しないとす。電停は約 312.5m 間隔であり、上下線合わせて 34 ヶ所とする。1 日の平均混雑率(乗車人数/定員)を 20%とし、1 編成あたりの定員は 150 人とする。

以上の設定を基に、各ライフステージにおける CO<sub>2</sub> 排出量を推計する。ここで、ライフタイムはインフラ 60 年、車両 30 年とする。この結果、インフラに関する LC-CO<sub>2</sub> は 8.19 × 10<sup>3</sup>[t-CO<sub>2</sub>/60 年]、車両の LC-CO<sub>2</sub> は 4.19 × 10<sup>3</sup>[t-CO<sub>2</sub>/30 年]となる。また、LRT の走行時の電力消費原単位を 1.5[kWh/km]とするため、走行 1km あたりの CO<sub>2</sub> 排出量は 846[g-CO<sub>2</sub>]である。

また、LRT の機能単位を「1 人を 1km 輸送すること」とし、機能単位あたりの SyLC-CO<sub>2</sub>(SyLCEL を CO<sub>2</sub> で評価した値)を各ライフステージ別に算出した結果を図-1 に示す。この結果から、軌道インフラと走行に関わる排出量が大部分を占めることが分かる。

## (2) 不確実性の発生要目の整理

(1)節で示した交通システム LCI の手順に沿って不確実性を抽出(図-2)し、以下にその解説を示す。

### 1) 用いる原単位の誤差

標準原単位を作成する段階では、データの欠損や、使用する環境負荷原単位の推計方法や実際に用いる部材構造の想定との違いに起因する誤差、そして同じ部材であっても用いられる各種材料やその投入量が異なることによる誤差が生じる。

### 2) 諸元の設定に伴う誤差

交通システムのライフサイクル環境負荷をその構想段階で算出する場合、各部材の必要数が概算でしか算出できないことや、構造形式が実際と異なる可能性があること、需要予測の精度についての誤差、ライフタイムに関する不確実性、将来の価値観や技術革新に関する不確実性などが存在している。

### 3) 波及効果の計測範囲と不確実性

波及効果の計測結果においてはパウンダリの設定が重要であり、それを広く捉えようとするほど不確実性はより大きなものになる。

## 3. 不確実性の感度分析を用いた管理

### (1) 不確実性と感度分析

LCA にあたって、不確実な要素を確実にするための追求は無論怠ってはならないが、回避できない不確実性への対処策も考えておく必要がある。そこで、不確実性をもたらす諸因子の影響を感度分析によって検討する。

表-2 本研究における LRT に関する諸設定

項目	設定値
路線長[km]	5
定員[人/編成]	150
日平均混雑率[%]	20
日需要量[人/日]	5,000
電停数[カ所]	上下計 34(約 312.5m 間隔)

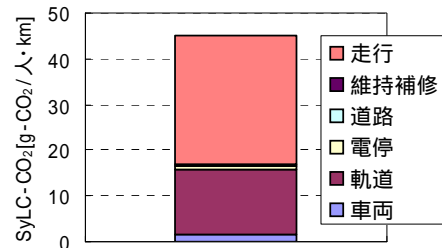


図-1 LRT の SyLC-CO<sub>2</sub> とそのライフステージ別内訳の推計例

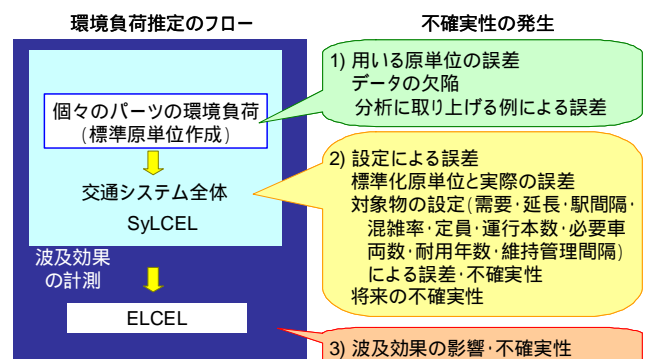


図-2 交通システム LCI における不確実性の発生要目

表-3 各変数の増減による人 km あたり SyLC-CO<sub>2</sub> の変化量

変数	-10%	+10%
ライフタイム	+3.64%	-2.98%
日需要量	+4.02%	-3.28%
日平均混雑率	+7.13%	-5.83%
電停間隔(電停数の逆数)	+6.92%	-5.62%

ケーススタディの LRT について、不確実性が大きいと考えられる 4 種類の設定値について感度分析を行った。結果のうち、各変数 ± 10% の増減による SyLCEL の変化量を表-3 に示す。

ライフタイム・需要量・混雑率は SyLCEL 算出時の分母要素であり、これら変数の値が大きくなるほど、人 km あたりの SyLCEL は小さくなる。また、電停間隔は長くなるほど同様の傾向となる。本ケーススタディの場合、基準混雑率を低め(20%)に設定しており、また走行時の加減速による燃料消費量は電停間隔の設定に大きく依存するため、混雑率・電停間隔が SyLC-CO<sub>2</sub> に大きな影響を及ぼすことがわかる。このように、感度分析を行うべき要素は、各交通システムや環境負荷の種類によって異なり、それぞれの特徴に合わせた分析が必要である。

(2) 誤差による値の幅と感度分析

a) 環境負荷原単位の値の不確実性

感度分析によって各設定変数の不確実性に対応することは可能であるが、別のアプローチとして、誤差を値の幅として含ませた形で提示することも考えられる。ここでは、各種環境負荷原単位による誤差を値の幅として表示した上で、需要量による感度分析を行う。

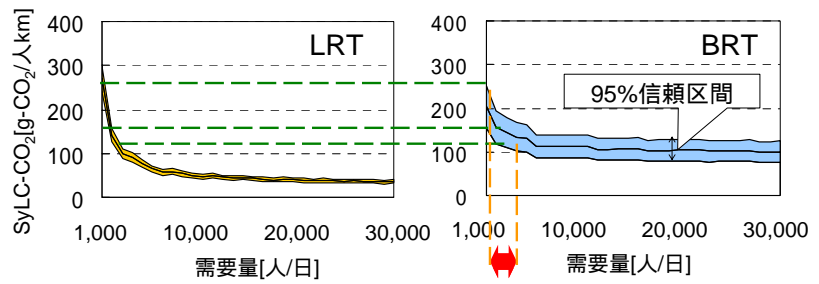


図-3 環境負荷原単位の値の不確実性と感度分析

表-4 各種環境負荷原単位(単位: [kg-CO<sub>2</sub>/ ])

原単位 ( )	電力 (kWh)	軽油 (t)	コンクリート (m <sup>3</sup> )	鋼棒 (kg)	鋼板 (kg)	砂利 (t)	砕石 (t)
建築学会(1995)	0.564	3.00	482	0.941	1.26	12.0	11.0
土木学会(1990)	0.473	2.86	311	0.469	1.51	5.65	6.93
物質材料研究機構(1995)	0.524	-	325	2.12	2.37	7	7.56
国立環境研究所(1995)	0.529	-	282	-	1.77	5.39	4.43
電力中央研究所(1995)	0.594	2.64	282	0.886	1.67	21.4	18.1
土木研究所(1990)	0.477	3.64	309	0.519	1.71	9.41	10.8
空衛建築学会(1990)	0.473	2.86	221	0.931	1.30	5.65	6.93
建築研究所(1990)	-	-	-	0.693	1.60	1.03	1.17
酒井ら(1990)	-	-	-	0.634	1.60	1.11	1.11
平均値	0.519	3.00	316	0.894	1.64	7.62	7.56
標準偏差	0.048	0.38	81	0.568	0.32	6.23	5.33
変動係数	0.0926	0.127	0.255	0.636	0.196	0.0415	0.0356

9 種の原単位(表-4)について、特に結果への寄与の大きいコンクリート、鉄筋、鋼、電力、軽油についての誤差を取り上げる。多くの原単位の算定で行われている産業連関表を用いる方法では、まず部門ごとに環境負荷量を割り振り、さらに推計において扱いやすい項目に細分化している。また、この原単位は金額あたりの単位となっており、物価を用いて物量ベースに換算している。このため、用いる物価が異なれば原単位間に差異が生じる。さらに、差異の生じる原因として、算定段階(生産・流通・最終消費など)に何を含めているかも挙げられる。なお、使用する原単位の選択においては、これら推計時の設定が、各原単位作成機関における主な用途を意識したものであることにも注意が必要である。

ある一種の原単位を用いて算定した場合、感度分析の結果は単一の線で表現され、CO<sub>2</sub> 排出量の観点からの優劣はある単一の需要量を境として示されるが、誤差を含めた表示においては、単一の値ではなく幅を持った値となり、不確実性を含んだ表示となる。実際に、LRT と BRT について、原単位の誤差が正規分布に従っていると仮定し、平均値および標準偏差を9種の原単位データから計算して、95%信頼区間をそれぞれの需要量について推定した結果を図-3 に示す。

b) 誤差のキャンセルアウト

a) 項では誤差による幅を持った値での代替案比較を行っているが、実際には同一の原単位を用いて算定していれば、比較において誤差はキャンセルアウトされる。そこで、キャンセルアウト分を除いた結果を図-4 に示す。需要量 10,000[人/日]のときのライフサイクル全体でのCO<sub>2</sub> 排出量を、LRT と BRT について、キャンセルアウト前後の値を示している。縦線の上端が95%上限値、下端が下限値であり、中央の点が平均値を示している。当然ながら、キャンセルアウト後は誤差が小さくなり、精度の向上が見込める。

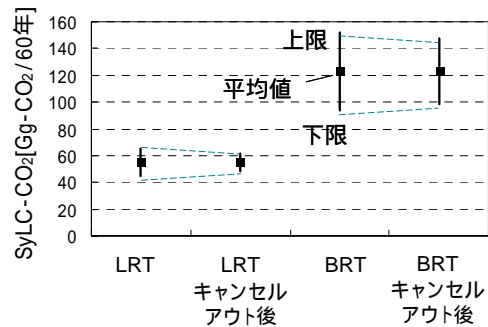


図-4 環境負荷原単位による誤差のキャンセルアウト

4 . LCA 結果の提示手法の提案

(1) タイプ 環境ラベルに則った提示

製品の分野においては、環境情報開示ツールとして様々なものが提案されている。環境効率や環境ラベルはその代表的手段である。

環境ラベルのうち、タイプ は LCA と密接に関わりを持ち、食品の成分表のようにデータの判断は購買者にゆだねられている。また、タイプ 環境ラベルは LCA の規定に従った客観的なデータの開示であり、中立的で信頼性が高い点が特徴とされているため、交通システムの環境情報を、不確実性を含めて開示する手法として適当と考えられる。なお、実際のタイプ 環境ラベルとするには第三者認定が必要である。

本稿では、交通システム LCA におけるタイプ ラベル導入のためのたたき台となりうる環境情報提示手法を構築する。その際、建築分野において LCA を取り入れ

た環境ラベリングツールとして利用が始まっている評価システムである CASBEE(建築物総合環境性能評価システム：Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency)<sup>5)</sup>を参考に、このツールは建築物のライフサイクルを通じた評価建築物の環境品質・性能(Q)と環境負荷(L)の両側面からの評価環境効率の考え方をういて新たに開発された評価指標「BEE(建築物の環境性能効率：Building Environmental Efficiency)」での評価

という3つの理念に基づいて開発されている。タイプ環境ラベルほどの詳細な入出力データが掲載されているわけではないが、LCAによる環境負荷物質排出量の結果と、その他の局所的な環境要素(室内環境等)が1つのシートにまとめられ、さらにレーダーチャートでの表示や、環境性能効率での評価が併記されている。

このように、環境負荷だけでなく他の要素も絡めて提示する評価システムは、交通システムにおいても必要である。なぜなら、交通システムの計画においても、環境は評価全体の側面ではなく、他の様々な性能やコストが重要視されるからである。さらに、交通システムは波及効果が大いことから、その単体を評価するだけでは全く異なる結論に至る可能性もある。

以上から、交通システムの LCA 結果提示においては、標準原単位とそのバックグラウンドデータの整備不確実性の表現性能と併せた環境効率による評価波及効果の考慮が必要である。

## (2) LCA 結果提示シート「交通エコレポート」

(1)節で列挙した必要要素を考慮し、交通システムの LCA 結果提示シートである「交通エコレポート」を図5のように作成した。ここでは具体的には、

「資材投入」「建設・製造」「運用」「維持補修」といったライフステージ別の標準原単位の整備(利用者がそれらの組み合わせで結果を再現できる)

仮定条件での総排出量試算結果と人 km での排出量試算結果の提示

種々の要素についての感度分析を行い、それぞれの値の変化によってどのように結果が変化するかを提示  
誤差による値の幅を持たせた感度分析の提示(代替案比較においては誤差による値の幅のキャンセルアウトの検討を行う)

仮定条件下での環境効率による評価の提示

といった点が考慮されており、評価結果の利用者が「交通システム導入が環境面で有利かどうか」の判断が可能ないように LCA 結果情報が提示されている。

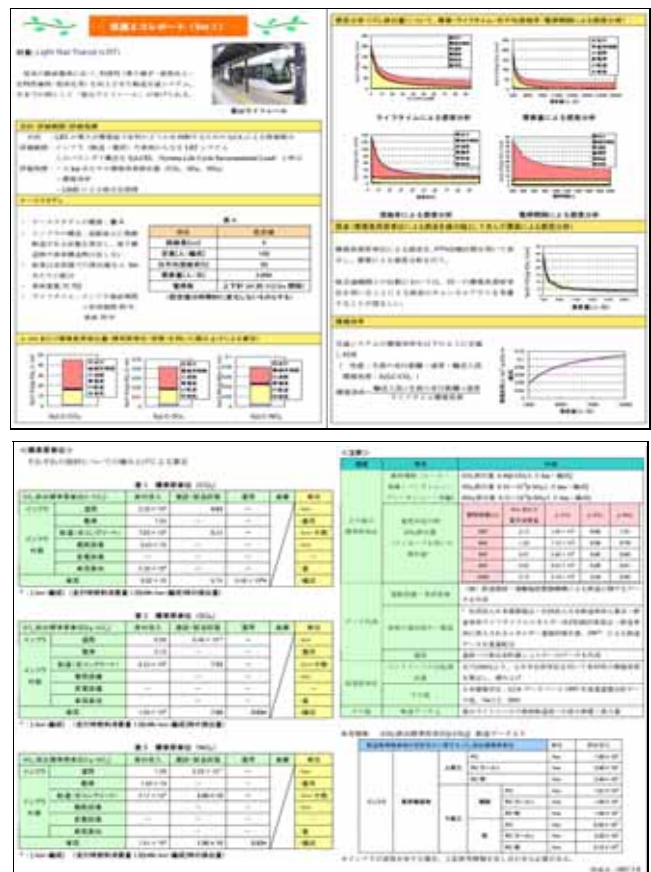


図5 LRT を対象とした交通エコレポート

## 5. 結論

本稿では、交通システムを対象とした LCI の結果の不確実性や誤差の発生要因を抽出するとともに、それらに感度分析を施した。その結果、

LRT は走行段階の排出量が多く、電停数が多いため、需要量やライフタイムと同様に日平均混雑率や電停間隔といった要素の不確実性を重視する必要がある  
誤差による値の幅は、代替案比較においてはキャンセルアウトを考慮することで小さくすることができる  
ことが分かった。また、不確実性を含めた交通システム LCA 結果の提示の際に必要な要素を整理し、提示シート「交通エコレポート」を作成した。

### 参考文献

- 1) 例えば、井村秀文：「建設のLCA」, オーム社 .
- 2) 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 .
- 3) 渡辺由紀子, 長田基広, 加藤博和：「LRT システム導入の環境影響評価 - 代替輸送手段との比較と環境効率の適用 - 」, 日本 LCA 学会誌, Vol.2(3), pp.246-254 .
- 4) 加藤博和：「交通活動に伴う環境負荷のライフサイクル評価手法」, 環境科学会誌, Vol.17(2), pp.141-145 .
- 5) 「CASBEE 建築物総合環境性能評価システム」, <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/index.htm> .