

建設資材の環境負荷原単位の不確実性が 社会基盤LCA結果に及ぼす影響の分析

益田 悠貴¹・森本 涼子²・柴原 尚希³・加藤 博和⁴

¹学生会員 名古屋大学 大学院環境学研究科 (〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町C1-2(651))

E-mail:yamasuda@urban.env.nagoya-u.ac.jp

²学生会員 名古屋大学 大学院環境学研究科

E-mail:rmori@urban.env.nagoya-u.ac.jp

³正会員 名古屋大学助教 大学院環境学研究科

E-mail:nshiba@urban.env.nagoya-u.ac.jp

⁴正会員 名古屋大学准教授 大学院環境学研究科

E-mail:kato@genv.nagoya-u.ac.jp

交通社会基盤の環境負荷を事前評価する際には、製品・サービスの場合と同様、不確実性の扱いに注意が必要である。しかし、建設段階の排出量についてはライフサイクル環境負荷に占める割合が小さいことを理由に不確実性分析の対象とされず、ライフサイクルにおける不確実性を完全に考慮するには至っていない。社会基盤の建設は多数の工程や資材から成り立っており、また、構造形式なども異なるため、多くのインベントリデータを必要とし、それぞれのデータがもつ不確実性の合計は無視できない可能性がある。本研究では、具体的な事例を挙げ、インフラ建設・車両製造に関するインベントリデータの不確実性がLCA結果に及ぼす影響について考察することを目的とする。そのために、LCAにおけるインベントリデータに確率分布を与え、LCA結果の確率分布を推計する。

Key Words : *life cycle assessment (LCA), uncertainty analysis, probability distribution, inventory analysis*

1. はじめに

交通社会基盤整備事業実施の意思決定における情報として、事業に伴う環境負荷排出量の変化を知ることが必要な時代になっている。加藤ら¹⁾は、ライフサイクルアセスメント(Life cycle assessment : LCA)の方法論を適用し、交通活動に伴う環境負荷のみならず、整備する交通社会基盤の建設・資材製造から維持管理、そして廃棄に至るまでの環境負荷を評価範囲に含めた評価枠組みを提案し、適用してきた。

一方で、LCAにおける入力データが有する不確実性によって、推計結果がどのようにバラツキを持つかを分析することは、解釈にあたって重要であり、ISO規格でも推奨されている。具体的には、パラメータが結果に与える影響の大きさを検証する感度分析や、多様なシナリオ分析を行う事で対処するが、実際にはそのような検討が必ずしも十分になされておらず、代表値(期待値)を用いた確定的な解釈や結果開示が行われることが一般的である。しかし、入力データの値のバラツキが大きい場合、

不確実性も大きくなるためその考慮は重要である。

製品のLCAにおいて、用いた入力データの不確実性が結果に及ぼす影響を分析した例は、酒井ら²⁾や菊池ら³⁾、本下ら⁴⁾などがある。交通社会基盤のLCAにおいても、これら既往研究と同様の分析が必要である。森本ら⁵⁾は、交通社会基盤を対象に、データの不確実性がLCI結果に及ぼす影響について考察している。しかし、ライフサイクル環境負荷に占める割合が小さいことを理由に建設時の排出量推計を不確実性分析の対象としておらず、ライフサイクルにおける不確実性を完全に考慮するには至っていない。社会基盤の建設は複数の項目、資材から成り立っており、多くのインベントリデータを必要とする。そのため、それぞれのデータがもつ不確実性の合計は無視できない可能性がある。また、各要素のバラツキを把握し、どの要素のバラツキに留意すべきかを明らかにすることで、LCI結果の信頼性を向上させることにつながる。

そこで本研究では、交通社会基盤における具体的な事例を挙げ、インフラ建設・車両製造に関するインベント

リデータの不確実性がLCA結果に及ぼす影響について考察することを目的とする。そのために、インベントリデータに確率分布を与え、LCA結果の確率分布を推計する。

2. ケーススタディへのLCA適用と不確実性分析の方法

(1) 評価対象の設定

本研究では、ある都市で実際に計画されていた Light Rail Transit (LRT) 導入計画をケーススタディとする。LRTのライフサイクルを、インフラ建設・車両製造による建設段階と LRT 走行による運行段階の2段階と考え、建設段階について詳細な分析を行う。図-1 に示すように、建設段階には線路建設、停留所建設、電気設備工事、道路改良・駅前広場改築、車両製造の項目を含み、それらに起因する環境負荷排出量の推計、不確実性分析を行う。各項目の設定値を表-1 に示す。ライフタイムは、インフラは60年、車両は20年とする。推計対象とする環境負荷としてCO₂を取り上げる。

(2) 使用するインベントリデータと不確実性設定

インベントリデータに関しては日本で整備されているデータベースでは不確実性に関する情報を十分に得られないため、Ecoinvent Ver. 2.2を参照する。Ecoinventは2003年に欧州で発表されたLCAデータベースであり、建設を含め、エネルギー、輸送、素材に関する豊富なデータを収録していることが特徴である。また、不確実性データを含む唯一のLCAデータベースである。分析には、Ecoinventがデータベースとして搭載されているLCAソフトウェア Simapro Ver.7.3.2を使用する。

不確実性に関しては、データベース内の1素材の製造における各プロセスの原単位データ(プロセスデータ)に明示されている標準偏差、分布形状を用いる。分布形状は対数分布を前提としており、大半のプロセスデータに対数正規分布が設定されている。例として、車両製造を構成する各プロセスデータにおける代表的な項目の平均値、標準偏差、分布形状を表-2に示す。

データベース上にデータが存在しない素材に関しては、資料⁹⁾の環境負荷排出量を用いる。不確実性に関してはEcoinventの不確実性分析における標準偏差の決定に使用されるWeidema *et al.*の系統行列⁷⁾において、最も不確実性が大きい場合の標準偏差($\sigma^2=2.564$)を使用し、分布形状は対数正規分布を設定する。

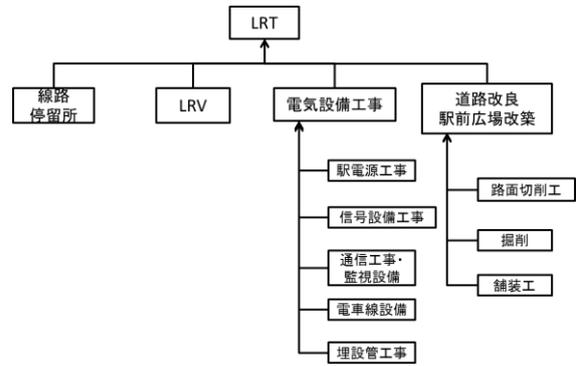


図-1 評価対象とするLRT計画

表-1 推計に用いる設定値

| | | | |
|------------|-----|------------|------|
| 路線延長[km] | 1.7 | 停留所数[箇所] | 10 |
| 車両数[編成] | 8 | 道路改良延長[km] | 1.51 |
| 車両重量[t/編成] | 25 | 駅前広場改築[箇所] | 2 |

表-2 代表的な素材の標準偏差、分布形状

| 材料 | 平均値 | 単位 | 分布形状 | 標準偏差 |
|--------|--------|------|--------|------|
| 鉄筋 | 20,173 | kg | 対数正規分布 | 1.5 |
| アルミニウム | 991 | kg | 対数正規分布 | 2.0 |
| 銅 | 856 | kg | 対数正規分布 | 2.0 |
| ポリエチレン | 1,311 | kg | 対数正規分布 | 2.0 |
| 合成ゴム | 196 | kg | 対数正規分布 | 2.0 |
| 板ガラス | 651 | kg | 対数正規分布 | 1.5 |
| 輸送 | 2,090 | t-km | 対数正規分布 | 2.08 |

(3) CO₂排出量推計方法

LRTの車両製造・インフラ建設について、次の各項目のCO₂排出量を推計する。

a) LRT 車両製造

データベース内の「トラム」のプロセスデータに、渡辺ら⁹⁾による車両メーカーへのヒアリングから得た車両のデータの重量比を乗じる。

b) 線路建設・停留所

データベース内の「トラム線路」「電停」のプロセスデータを構成する素材の投入量を、渡辺ら⁹⁾によるものに変更し計算を行う。

c) 電気設備工事

データベース内の各施工・原材料のプロセスデータにLRT導入計画積算資料に記載されている素材投入量を乗じる。

d) 道路改良・駅前広場改築

資料⁹⁾から得られた各施工・原材料の原単位に、LRT導入計画積算資料に記載されている素材投入量を乗じる。

(4) 不確実性分析方法

本研究ではLCAのうち、環境負荷量を推計するインベントリ分析の段階での不確実性を検討する。推計には

多量の資材の確率分布データを取り扱うため、解析的な計算は困難である。そこで、確率分布に従って入力データの乱数を発生させて試行を繰り返すことにより LCI 結果の確率分布を得るモンテカルロシミュレーションを行う事で、LCI 結果のバラツキを求める。試行回数を 1,000 回とする。

得られた LCI 結果の確率分布から、代表値のみならず、推計結果の信頼区間(たとえば 95%)が示される。その最大値・最小値を用いて代替案比較などの検討を行うことができる。また、用いた代表値が十分な代表性を有するかどうかを検証し、ばらつきが大きいようであればデータを再度収集し、信頼性の向上を図ることも可能である。

3. 不確実性分析結果

(1)代表値に基づいた CO₂ 排出量推計結果

LRT のインフラ建設・車両製造について、不確実性を考慮しない代表値に基づいた CO₂ 排出量推計を行った。推計結果を図-2 に示す。

内訳を見ると、線路建設による CO₂ 排出量が大きく、全体の半分以上を占めている。これは、線路建設には他項目と比較して多量の資材を投入するためと考えられる。また、既往研究⁸⁾において考慮されていなかった電気設備整備工事と道路改良、駅前広場改築に起因する CO₂ 排出量は、車両製造と同程度である。建設・製造全体の CO₂ 排出量推計において、これらの項目も重要である。

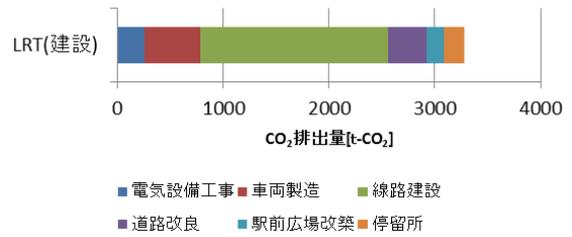


図-2 代表値に基づいたCO₂排出量推計結果

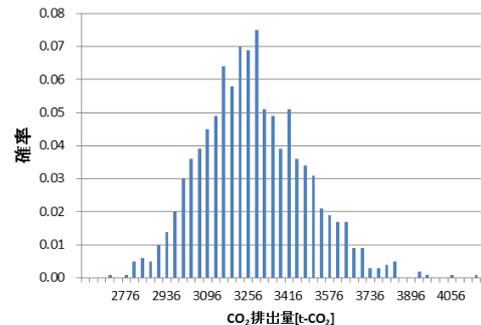


図-3 CO₂ 排出量推計結果の確率分布

表-3 モンテカルロシミュレーション結果(統計量)

| | LRT(建設) |
|----------|---------|
| 平均値 | 3.28+E3 |
| 中央値 | 3.26+E3 |
| 標準偏差 | 205 |
| 変動係数 | 6.25% |
| 95%下限 | 2.91+E3 |
| 95%上限 | 3.70+E3 |
| 平均値の標準誤差 | 0.0019 |

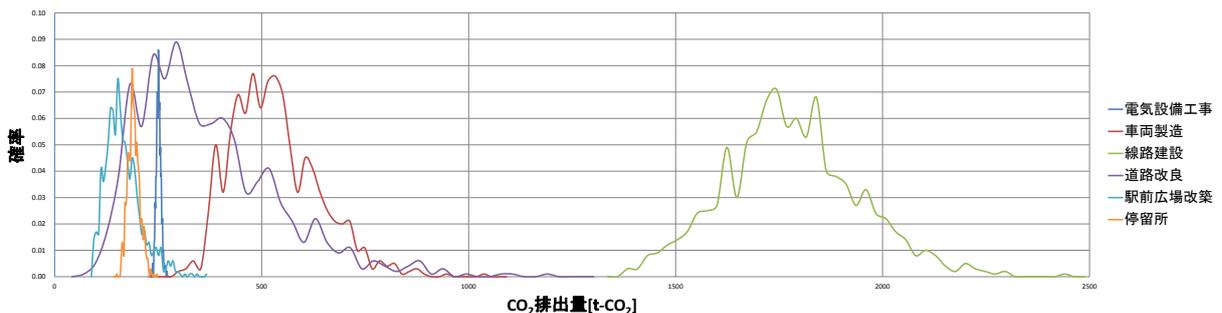


図-4 各項目のモンテカルロシミュレーション結果

表-4 各項目のモンテカルロシミュレーション結果(統計量)

| | 電気設備工事 | 車両製造 | 線路建設 | 道路改良 | 駅前広場 | 停留所 |
|----------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|
| 平均値 | 251 | 532 | 1.78E+03 | 368 | 165 | 191 |
| 中央値 | 251 | 512 | 1.77E+03 | 338 | 158 | 190 |
| 標準偏差 | 5.89 | 114 | 163 | 169 | 42.3 | 14.2 |
| 変動係数 | 2.35% | 21.5% | 9.18% | 46.0% | 25.6% | 7.45% |
| 95%下限 | 240 | 369 | 1.47E+03 | 143 | 99.7 | 165 |
| 95%上限 | 263 | 829 | 2.13E+03 | 788 | 274 | 221 |
| 平均値の標準誤差 | 0.0007 | 0.0068 | 0.0029 | 0.0146 | 0.0081 | 0.0023 |

(2)不確実性分析

CO₂排出量推計結果の確率分布を図-3、図-4に、その統計量を表-3、表-4に示す。不確実性分析結果から、CO₂排出量の平均値が3,280[t-CO₂]、中央値が約3,260[t-CO₂]であった。代表値に基づいた評価結果では3,279[t-CO₂]であり、ほぼ同程度の結果となっていることが確認された。また、2,820~3,850[t-CO₂]の範囲でほぼ95%の信頼性を担保できることが分かった。

図-4から、電気設備工事、停留所のCO₂排出量が取りうる値の幅が小さく、また表-4の変動係数も比較的小さいことがわかる。これは、他の要素と比べ、資材投入量が少ないため、全体でのCO₂排出量のバラツキも小さくなったと考えられる。

また、車両製造・道路改良・駅前広場改築は、他の要素と比べ変動係数が大きい。その理由として、車両製造に関しては、1つの車両を製造するために多くの資材が必要であるため、内包する不確実性も多くなり、結果的にばらつきが大きくなったと考えられる。道路改良・駅前広場改築に関しては、CO₂排出量の不確実性に関するデータがEcoinventデータベース上に存在しなかったため、最も不確実性が大きい場合を想定し、標準偏差を固定値で設定したためである。また、同じ理由で結果の確率分布も対数正規分布の形状を残している。LCI結果の信頼性を向上させるためには、これらのバラツキが大きい要素を構成するプロセスデータに留意することが重要である。

(3)ライフサイクルCO₂における建設段階の不確実性

前節の建設段階の推計結果に運行段階のCO₂排出量⁸⁾を加算した、LRTのライフサイクルCO₂を図-5に示す。建設段階(インフラ建設・車両製造)におけるCO₂排出量のバラツキは、ライフサイクルCO₂の約8.1%であり、無視できるほど微小とはいえないと考えられる。代替案比較を行う際には、代替案間の環境負荷排出量の差が1,000[t-CO₂]未満と小さい場合、建設段階の不確実性によって、代替案の優劣が逆転する可能性がある。

4. まとめ

本研究では、具体的な事例を対象に、インフラ建設・車両製造に関するインベントリデータの不確実性がLCA結果に及ぼす影響を分析し、各要素の不確実性の大きさを把握するとともに、どの要素のバラツキに留意すべきかを明らかにした。また、分析結果を代替案比較に適用

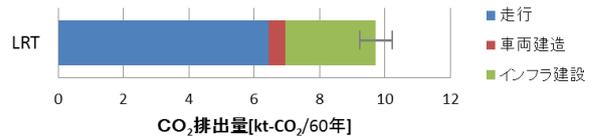


図-5 ライフサイクルCO₂における建設段階の不確実性

し、建設段階の不確実性によって、代替案の優劣が逆転する可能性があることを明らかにした。

留意すべき点として、対象とした建設時の社会基盤起源CO₂排出量が内包する不確実性がデータの測定誤差を表したものであるのに対し、供用時の車両走行起源CO₂排出量が内包する不確実性は統計的なモデル精度の限界や将来予測の不確実性により生じる予測誤差である点が挙げられる。したがって、ライフサイクルCO₂における不確実性分析を行う際には注意が必要である。

謝辞：本稿は、環境省・環境研究総合推進費(2RF-1303)の支援により実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 加藤博和, 柴原尚希: ELCEL概念によるSocial/Dynamic LCAへの挑戦, 日本LCA学会誌, Vol5 No.1, pp.12-19, 2009.
- 2) 酒井信介, 盧偉哲: マトリックス法を用いたライフサイクルアセスメント(第二報: 感度分析と不確実性解析), LCA日本フォーラムニュース, 39号, pp.14-18, 2006.
- 3) 菊池惇恵, 伊坪徳宏: プロセスの代表性を考慮した紙カップLCIの不確実性分析, 第3回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, pp.264-265, 2008.
- 4) 本下晶晴, 伊坪徳宏, 稲葉敦: 乗用車を事例としたLCA結果の不確実性分析, 日本LCA学会誌, Vol4 No.3, pp.260-269, 2008.
- 5) 森本涼子, 加藤博和, 柴原尚希: 交通社会基盤整備のLCA結果の不確実性管理に関する基礎的研究, 土木計画学研究講演集, Vol43, CD-ROM(213), 2011.
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 社会基盤のライフサイクルを通じた環境評価技術の開発に関する報告, pp.3(61)-3(77), 国土技術政策総合研究所, 2012.
- 7) Weidema, B.P. and Wesnaes, M.S.: Data quality management for life cycle inventories – an example of using data quality indicators, *Journal of Cleaner Production*, 4, 3-4, pp.167-174, 1996.
- 8) 渡辺由紀子, 長田基広, 加藤博和: LRTシステム導入の環境負荷評価—代替輸送機関との比較と環境効率の適用—, 日本LCA学会誌, Vol.2No.3, pp.246-254, 2006.