

交通社会資本整備のLCA結果の不確実性管理に関する基礎的研究

森本 涼子¹・加藤 博和²・柴原 尚希³

¹学生会員 名古屋大学研究生 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:rmori@urban.env.nagoy-u.ac.jp

²正会員 名古屋大学准教授 大学院環境学研究科

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

製品・サービスの環境負荷を事前評価する際には、使用するデータや推計・設定値に関する不確実性の扱いに注意が必要である。評価範囲が広いインフラの場合は特に、例えば道路整備を対象とする場合、整備後の交通量が不確実でバラツキが大きいと、推計結果にも大きなバラツキが生じる。そのため、環境負荷が削減できるという結果が得られても、入力データのバラツキによって結果が逆転する可能性がある、分析の信頼性が低くなってしまふ。本研究では、交通社会資本整備にLCAを適用した場合の、評価結果の信頼性と入力データのバラツキとの関係を明らかにする。それにより、不確実性の大きいデータを用いることの妥当性や、結果の信頼性を検証する方法論を提供している。

Key Words : *life cycle assessment (LCA), uncertainty analysis, decision-making, probability distribution*

1. はじめに

交通社会資本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。著者ら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、整備する交通社会資本の建設・資材製造から維持管理、そして廃棄にいたるまでの環境負荷を評価範囲に含めた評価枠組を提案し適用してきた。さらに、交通社会資本整備は一般に代替交通手段からの需要転換など、評価対象外の活動に対して波及的な効果影響もたらすことから、その波及の範囲まで拡張して評価する「拡張ライフサイクル環境負荷(Extended Life Cycle Environmental Load : ELCEL)」の概念を導入してきた。

しかし、事前評価を行う場合、評価結果には評価者が管理できない様々な不確実性が必然的に内包される。例えば、供用開始後の利用量の予測値と実際値との間には往々にして乖離が生じ、時には大幅になることもある。交通社会資本はそれを利用する活動に伴う環境負荷がライフサイクル全体の中で卓越する場合が多く、利用状況は総量に大きく影響を与えることから、利用量の値が不確実性を有すると、それが総量の不確実性にも直結する。

したがって、予測値に内包される評価結果の不確実性が評価結果に及ぼす影響について、解釈の段階で吟味される必要がある。

このような、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ことで対処するが、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。

そこで本研究では、交通社会資本を対象に、入力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、入力データがある確率分布に従っていると仮定して、LCA結果の確率分布を推計する。それにより、不確実性の大きいデータを用いることの妥当性や、結果の信頼性を検証する方法論を提供する。

2. LCIにおける不確実性分析事例と交通社会資本評価への展開

LCAのISO規格は、得られた結果に関する不確実性を十分吟味して解釈することを求めている。本藤²⁾は、「LCA結果に大きな影響を与える入力データを特定できたなら、そのデータに含まれる不確実性によって、結果がどの程度ばらつくか見積もることが望まれる」と述べている。

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(Inventory)分析の段階での不確実性を検討する。Life Cycle Inventory (LCI)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³⁾や菊池ら⁴⁾、本下ら⁵⁾など多く存在する。これらの研究では、LCIに用いた入力データやモデル予測結果のバラツキを考慮するため、確率分布を与え、モンテカルロシミュレーションを行うことで、LCI結果のバラツキを求めている。それによって代表値(期待値)のみならず、推計結果の信頼区間(例えば95%)が示される。その最大値・最小値を用いて代替案比較等の検討を行う。それにより、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、バラツキが大きいためであればデータを再度収集する等の対応が求められるとしている。

交通社会資本のLCIにおいても、これら既往研究と同様の分析が必要である。感度分析によって結果に大きな影響を与える要因を抽出し、その要因に確率分布を与えて、LCI結果のバラツキを検証する。図-1は、交通社会資本整備のLCIを実施し、整備しない場合の環境負荷量から整備した場合の環境負荷量を引いた値を ΔE として、そのバラツキを模式的に示したものである。図-1では、 ΔE の期待値はi, iiとも正であり、期待値を用いる限りは整備によって環境負荷が削減されると結論される。しかし、確率分布を考慮すると結果の解釈は異なってくる。信頼区間、最大・最小値のチェックを行った結果、i)のようにほぼ100%の確率で $\Delta E > 0$ となれば問題ない。しかし、ii)のように設定値の不確実性が大きいと、 $\Delta E < 0$ となる確率が大きくなる。整備するかどうかの意思決定において、 ΔE の正負は重要であるため、外れる可能性が大きいのであれば、それを明確にするべきである。すなわち、3(2)で述べるように、設定値での推計においては $\Delta E > 0$ であっても、「X%の確率で $\Delta E > 0$ となる」という表記を行うことが必要である。

3. 交通社会資本整備LCAにおける不確実性分析方法

(1) 推計結果のバラツキの算出

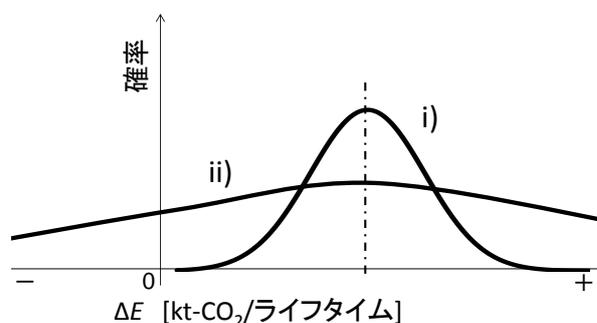


図-1 推計結果の確率分布の例(正規分布)

交通社会資本のライフサイクルを大きく、使用開始前(以下「前段階」と呼び、変数の添字を*f*とする。主に原料調達・製造段階が該当)と使用開始後(同じく「後段階」、*l*とする。主に使用段階が該当)に分ける。

LCAが有効な場面の1つとして、前段階では環境負荷を多く排出するものの、後段階では環境負荷が削減される新技术の導入(交通社会資本整備もこれに相当)に関する評価が挙げられる。もし両段階の負荷量が確定値として得られれば、単純に両者を加算した総量について、技術代替案間での比較を行えばよい。しかし、ここでは前段階は確定的である(供給者が管理できる)が後段階は不確実性を有する(供給者・消費者とも事前に管理できない)場合を想定し、不確実性がLCI結果に及ぼす影響について考察する。

2つの代替案AとBでの環境負荷の比較を考える。

$$\begin{aligned} E_A &= E_{fA} + E_{lA} \\ E_B &= E_{fB} + E_{lB} \end{aligned} \quad (1)$$

より、辺々引いて

$$E_A - E_B = (E_{fA} - E_{fB}) + (E_{lA} - E_{lB}) \quad (2)$$

が得られる。右辺の前半分(前段階の差)は確定値で、後半分(後段階の差)は確率変数となる。

a) バラツキが正規分布に従う場合

最も単純な仮定として、後段階の環境負荷量が、使用量・状況の不確実性を原因として、推計値を(最尤推定値と見なして)平均値とし、ある分散 σ^2 を持った正規分布に従うものとする。この時、総量の値の分散も σ^2 となり、総量は推計値を中心として、上下それぞれ標準偏差 σ の幅に約68%、 2σ の幅に約95%の確率で値が存在することになる。各代替案の後段階の環境負荷がそれぞれ、平均が推計値、分散が $(\sigma_{fA})^2$ 、 $(\sigma_{fB})^2$ の正規分布に従い、両者の共分散が σ_{fAB} である場合、 $E_A - E_B (= \Delta)$ は正規分布の再生性によって再び正規分布となり、その分散は $\{(\sigma_{fA})^2 - 2\sigma_{fAB} + (\sigma_{fB})^2\}^{1/2}$ となる。

ここで問題なのは共分散である。使用目的が同じ評価対象を比較するという点では、 E_{fA} と E_{fB} は従属的であり、共分散も大きくなると想定できる。この場合は不確実性がある程度キャンセルアウトされることになる。一方、

代替案によってランニングコストが変化するなどの要因から使用量・状況が大きく変化するのであれば、むしろ両者は独立であると見なすことができ、共分散がゼロに近くなると考えられる。なお、完全に独立の場合、 Δ の標準偏差は $\{(\sigma_A)^2 + (\sigma_B)^2\}^{1/2}$ となる。標準偏差の平均ではなく、分散の和の平方根であることに注意が必要である。

b) パラツキが一様分布に従う場合

将来予測モデルによる推計結果にはモデルの構造と実際の挙動とのずれが内包されるため、推計結果を最尤推定値と見なすことは不適切であり、またパラツキも正規分布になる保証はない。そこで、総環境負荷量の値が、推計値を平均値としつつ、平均値の上下にある幅をとって一様分布するものと仮定する。この時、 Δ の確率分布は、一様分布ではなく、推計値を頂点とした三角分布になる。

以上では、LCI結果自体に確率分布を与えたが、例えば交通量や燃費といった入力データが有する不確実性の確率分布がわかる場合、それらを用いて推計を行い、LCI結果の確率分布を求める必要がある。例えば、環境負荷量を投入・使用量と発生原単位の積として計算する場合、それぞれが正規分布に従うとすると、計算される環境負荷量は非心カイ二乗分布に従う。しかし、実際の推計においては、分布形が理論分布に従わないなどの理由で、解析的な取り扱いができないことも考えられる。その場合は、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ことになる。

(2) 結果の確率論的解釈

このようにして得られた確率分布を用いて、 Δ の推計値の確率分布が得られる。 Δ の標準偏差 σ_Δ が Δ に比べて大きな値をとる場合、 Δ は裾の広い分布となり、推計値の符号が逆の領域にまで広がることになる。例えば、 Δ の推計値が正(すなわち、代替案Aの方がBより環境負荷が大きい)となっても、 Δ が負の値をとる(すなわち結果が逆転する)確率が生じる。結果が逆転する可能性を把握し、結果を確定値として断定的に表示するのではなく、「この設定条件下ではX%の確率で代替案Aのほうが環境負荷が小さい」という表示を行うことができる。

(3) 不確実性管理

(2)で行っているのは、得られた標準偏差を用いた統計的有意性の確認であるといえる。LCI結果が正規分布に従う場合、 $\Delta/\sigma_\Delta = 0.25, 0.52$ とするとそれぞれ40%、20%の確率で、1.64、2.33とするとそれぞれ5%、1%の確率で、ライフサイクル環境負荷の増減(Δ の符号)を取り違える可能性がある。このように、 σ_Δ がどの程度であれ

表-1 自動車走行に関する設定値

	整備なし		整備あり
	ピーク時	通常時	ピーク時
踏切の1時間あたり平均遮断時間[分]	24	12	-
踏切の1回あたり平均遮断時間[分]	2	1	-
1踏切あたり昼間交通量[台/日]	5,000		5,000
走行速度[km/h]	行列最後尾まで：40 踏切解放後：20		40
平均行列長[m]	50	24	-
平均停止時間[分]	1.0	0.5	-
停止車の割合[%]	50	30	-

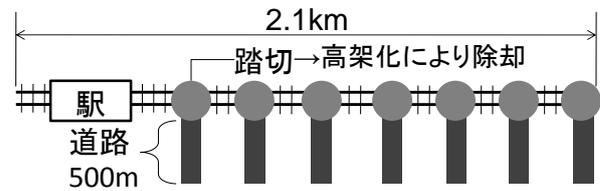


図-2 評価対象事業の概要

ば、 Δ の符号についてどの程度の有意性を確保できるかが算出できる。よって、結果が外れてもよい確率(有意水準)を設け、例えば外れる可能性を5%以内に抑えたい場合は、予測値の不確実性をどの程度に抑えればよいかを逆算できる。それをもとに不確実性を低くするための追加調査分析を行うことで、結果の信頼性水準を管理することができる。一方、それが不可能な場合は、1)「結果はどちらとも言えない」とする、2)有意な推計結果を提示し、その入力データを入れていない推計結果を、注釈つきで示す、のいずれかの対応を行うことになる。

以上をまとめると、不確実性管理のために、

- 1) 推計結果の確率分布
- 2) 推計結果の存在確率を設定したときの最大値・最小値
- 3) 予測値で得られた結果(削減できるか否か)が逆転する確率
- 4) 設定した有意水準を満たすために、各要素の分散をどのくらいに抑えればよいか

を明らかにし、結果の信頼性を検証することが必要である。

4. 代替案比較への適用

既報⁹⁾のLCI事例について、その不確実性を具体的に検証する。推計に用いる設定値を表-1に示す。扱う事例は、鉄道を高架化することで踏切を除却し、道路渋滞を解消

する事業の事前評価である。図-2に示すように、全長2.1kmの鉄道を高架化することにより、7か所の踏切が撤去される。それに伴い、踏切手前500mの道路で、停止や渋滞で燃費が悪くなっていた自動車の走行状況が改善されると想定する。評価対象範囲としてインフラ建設と、踏切を通過する自動車走行を考える。インフラのライフタイムを60年とする。推計に用いる設定値を表-1に示す。

この事業によって環境負荷が削減される可能性がある。自動車走行による環境負荷は、式(3)により推計される。

$$[1] \text{整備なし} : E_1 = (Ca + Cb + Cc) \cdot Q_1 \cdot e$$

$$[2] \text{整備あり} : E_2 = I + (Ca + Cb + Cc) \cdot Q_2 \cdot e \quad (3)$$

ただし、 E ：ライフサイクル環境負荷排出量、 I ：インフラ建設に伴う環境負荷排出量、 C ：燃料消費量(a ：走行、 b ：停止、 c ：一旦停止)、 Q ：交通量、 e ：燃料自体の製造から消費まで(Well-to-Wheel)の環境負荷排出原単位。

整備開始前に評価を行うため、交通量 Q は将来予測値であり、不確実性が含まれる。交通量は予測値から上下3割程度の誤差が見込まれているとする。その他の値についてはここでは確定的であるとする。

(1) 交通量が正規分布に従う場合

交通量 Q_1 、 Q_2 がそれぞれ平均値(=将来予測値)=5,000[台/日]、分散 $=\sigma^2=750$ の正規分布に従い、互いに独立であるとして、環境負荷推計結果に与える影響を検討する。この分散の設定は「予測値から上下3割以内の誤差にとどまる確率は95%である」場合に相当する。

環境負荷としてCO₂を取り上げた場合の E_1 、 E_2 の推計結果を図-3に示す。予測値での推計結果を棒グラフで、95%信頼区間を幅として示している。推計値の95%信頼区間は、 $E_1=10.7\pm 3.2$ [kt-CO₂]、 $E_2=9.4\pm 2.0$ [kt-CO₂]、整備による削減量 $E_1-E_2=\Delta E=1.3\pm 3.8$ [kt-CO₂]となった。図-3からわかるように、自動車走行に起因する環境負荷が大部分を占めているため、交通量の設定は結果に大きな影響を与えることがわかる。予測値での推計結果は $\Delta E > 0$ で、整備により環境負荷が削減されることを示しているが、バラツキを考えると、 $\Delta E < 0$ すなわち環境負荷増大となる可能性があることが理解できる。

そこで、 ΔE の確率分布を図-4に示す。ここでは、a)上で検討した Q_2 と Q_1 が両方バラツキを持つ場合とともに、b) Q_2 のみがバラツキを持つ場合(Q_1 は整備しない状態なので、現状のまま推移するとする)を考える。当然ながら、a)の方がバラツキが大きくなる。 ΔE の符号が逆転する可能性は、a)の25%に比べてb)では9.8%となる。a)の場合、推計結果は「75%の確率で、事業実施によりライフサイクルCO₂が削減できる」と表記すべきである。

ΔE の符号の信頼性をあらかじめ設定した有意水準を満たすようにするには、交通量予測値の標準偏差をどの

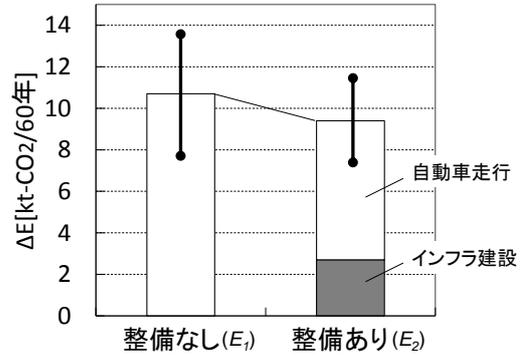


図-3 ΔE の推計結果と最大値・最小値

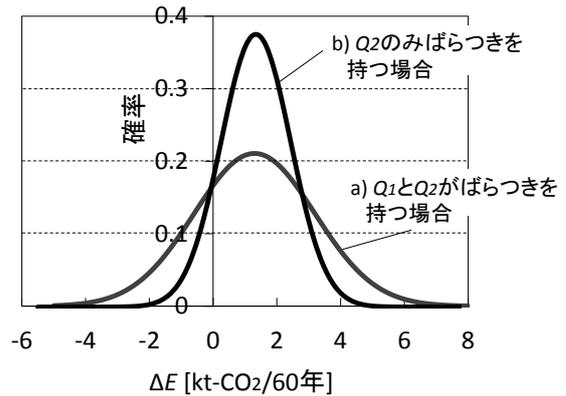


図-4 ΔE の確率分布(交通量が正規分布に従う場合)

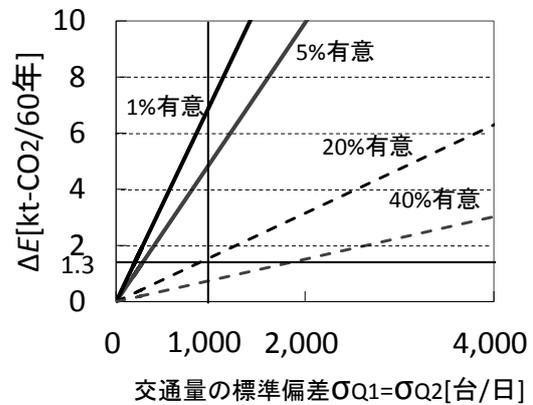


図-5 各有意水準を満たす ΔE と交通量の標準偏差の関係

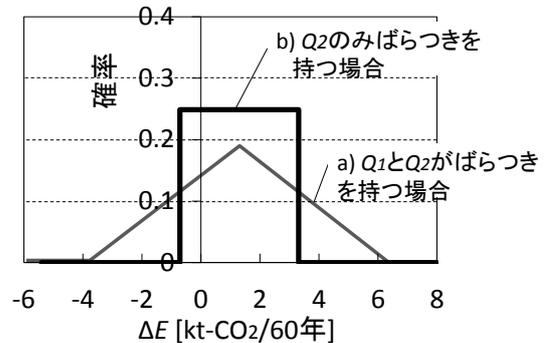


図-6 ΔE の確率分布(交通量が一様分布に従う場合)

程度に抑えるように予測精度を上げればよいかを明らかにする必要がある。図-5に、 Q_1 と Q_2 の標準偏差が等しい場合の、各有意水準を満たす ΔE と交通量の標準偏差の関係を示す。本推計の $\Delta E=1.3[\text{kt-CO}_2]$ においては、符号が逆になる可能性は、交通量の標準偏差が180[台/日]のとき1%、270[台/日]のとき5%、800[台/日]のとき20%、1,700[台/日]のとき40%である。

また、図-5は、交通量の標準偏差が大きくても、 ΔE が大きければ符号が逆になる確率が低いことを示している。すなわち、確保できる入力データの精度から、 ΔE がどの程度あれば、有意水準を満たせるかを読み取ることもできる。例えば、交通量の標準偏差が1,000[台/日]の場合、 ΔE の符号が逆になる可能性が5%未満となるのは、 ΔE の推計値が5.0[kt-CO₂]より大きい事業の場合となる。

(2) 交通量が一様分布に従う場合

交通量 Q_1 、 Q_2 が平均値(=将来予測値)=5,000[台/日]、 $3,500 < Q_1 < 6,500$ 、 $3,500 < Q_2 < 6,500$ の一様分布に従うとして、環境負荷推計結果に与える影響を検討する。このとき、 E_1 、 E_2 の推計結果、95%信頼区間の最大値・最小値は(1)、すなわち図-3と同様となる。

ΔE の確率分布を図-6に示す。a)上記設定のように Q_2 と Q_1 が両方バラツキを持つ場合と、b) Q_2 のみがバラツキを持つ場合とを比較すると、a)ではそれぞれのバラツキを足し合わせることで ΔE が広がりのある三角分布になる。 ΔE の符号が逆転する可能性は、a)の場合は29%、b)の場合は18%となる。当然であるが、交通量のバラツキに正規分布を仮定した場合よりも外れる可能性が大きくなっている。このように、どのような確率分布を与えるかで、結果の確率分布および信頼性は異なるため、適した分布形や標準偏差の選択が重要である。

5. まとめと課題

本研究では、交通社会資本整備にLCAを適用する場合に、入力するデータや予測値の不確実性がLCI結果に与える影響を検証した。まず結果自体が不確実性(バラツキ)を有する場合、そのデータに仮に確率分布を与え、推計結果の解釈の方法について整理した。次に、実例として踏切除却事業のLCIについて、交通量予測値の不確実性を考慮した場合、予測値を用いた推計結果では環境負荷が削減できるという結果が得られても、実はそのバラツキによって結果が逆転する可能性があることを、その確率も含めて明らかにした。その確率が大きければ、

結果の信頼性が低くなるため、結果が逆転する確率を表示することが必要である。さらに、結果が逆転する確率と推計に用いるデータのバラツキとの関係を明らかにした。

本研究ではLCI結果の不確実性を、予測値を平均とする正規分布および一様分布を不確実性を持つ入力データに与えて表現した。標準偏差も仮に設定したが、実際にはデータから標準偏差や確率分布を、既存事例などから算出することが考えられる。しかし、分布形や標準偏差を得ることは困難がつきまとう。例えば、類似の既存予測結果の実際値との誤差をプロットすることが考えられるが、これは過去の予測の「外れ」を明らかにしているだけであるし、十分なサンプルを得られる保証もない。実務において、分散の値そのものをどのように設定するかについては議論が必要である。また、様々な不確実性要因の間の関係の検討も必要である。共分散が大きければ、キャンセルアウトによりバラツキは減少する。今後は実際の交通社会資本整備プロジェクトにおいて様々な入力データの不確実性を考慮したLCI結果の解釈を行っていく予定である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金・若手研究B(23710055)の助成を受けたものである。

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、Vol.5 No.1, pp.12-19, 2009.
- 2) 本藤祐樹：LCA と不確実性—意思決定の材料を提供するツールに向けて—、LCA 日本フォーラムニュース、22号, pp.2-5, 2001.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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、Vol.4 No.3, pp.260-269, 2008.
- 6) 森本涼子、柴原尚希、加藤博和：自動車技術と交通需要の変化を考慮した道路事業のライフサイクルアセスメント、地球環境研究論文集、Vol.17, pp.193-201, 2009.