

交通システムのLCAにおける将来の不確実性の考慮に関する検討*

Analysis on Consideration of Uncertainty in LCA of Transport Systems *

柴原 尚希**・加藤 博和***

By Naoki SHIBAHARA**・Hirokazu KATO***

1. はじめに

「環境の世紀」における社会資本の整備は、現在よりもより将来にわたって環境への負荷を抑制し、持続可能な社会を形成する基礎となることが、その実施における最も重要な前提条件である。そのためには、整備に伴う環境へのインパクトが把握できなければならない。このとき注意すべきは、環境問題は発生した部分だけを見てもその本質に迫ることができず、原因・メカニズム、対策技術、社会経済・制度を含めたシステム全体の構造を踏まえ対処する必要があるということである¹⁾。つまり、環境へのインパクトの評価は、その影響が及ぶ範囲全体でなされる必要がある。とはいえ、評価範囲をむやみに広げると、評価の費用や時間がかさみ、結果の不確実性も高まってしまう。それゆえに、評価のシステム境界を適切に設定することが重要である。

LCA(Life Cycle Assessment)は、環境評価におけるシステム境界を空間・時間の各側面から適切に設定する方法として位置づけられる。一般的なLCAのシステム境界は、時間的には評価対象のライフタイム全体、空間的には製品の製造・使用・廃棄に加えて動脈側にある資源やその加工・運搬等への遡及を含めた分である。このシステム境界は、LCAがもともと工業製品を対象として開発された手法であり、その影響波及範囲を意識した設定である。一方、社会資本は使用年数が長く、整備に伴う影響範囲が広いという、工業製品と異なる特徴を有することから、社会資本の評価にとって適切なバウンダリが、製品のそれと一致している保証はない。したがって、社会資本整備にLCAを適用する際には、時間・空間バウンダリの再吟味を伴う。ところが、既存の適用例では、システム境界設定法に一貫性がないのが実情である²⁾。そこで、空間バウンダリ設定の考え方について、著者³⁾は波及効果も含めた設定であるELCEL(Extended Life Cycle Environmental Load; 拡張ライフサイクル環境負荷)概念を導入することを提案している。

本稿では、社会資本整備を対象とするLCAにおける

表-1 ケーススタディ(LRT新設)における諸仮定

	項目	設定値
L R T	路線長[km]	5
	定員[人編成]	150
	電停数[箇所]	上下計34(312.5m 間隔)
	需要量[人日(往復)]	6,300
	日平均混雑率[%]	25
(並行道路) 乗 用 車	交通量 [台/日(往復)]	整備前: 10,000, 整備後: 9,000 (減少分がLRTに転換したと仮定)
	平均乗車人数 [人/台]	1.3

時間バウンダリの設定法について、交通システムを例に論じる。まず、発生する環境負荷の総量をライフタイムで推計し評価する方法の問題点を整理した上で、割引率を導入した推計方法との比較を行う。その上で、将来の不確実性が考慮された実用的で簡便な方法を提案することを目的とする。

本稿では、著者らが既の実施した、LRTを対象としたLCA事例⁴⁾をケーススタディとして用いる。その主な仮定を表-1に示す。評価の空間バウンダリは、LRTシステムを構成するインフラ・車両(走行分も含む)を範囲としたSyLCEL(System Life Cycle Environmental Load; システムライフサイクル環境負荷)とともに並行道路を走行していた乗用車交通量の10%がLRTに転換すると仮定して、それによる削減分も合わせたELCELでの評価も実施している。また、評価する環境負荷はCO₂のみとする。

2. ライフタイム設定に伴う問題点

通常のLCAでは、評価対象のライフタイム(本稿では供用期間を指すものとする)をある値(例えば法定耐用年数)に設定し、その期間の環境負荷の単純合計 E_L を推計する。これは式(1)で定義される。

$$E_L = \sum_{t=0}^T e_t \quad (1)$$

ただし、 e_t : t 年における環境負荷、 T : ライフタイム
本稿ではこの方法を「Life Time法(LT法)」と呼ぶ。

ケーススタディとするLRTについて、ライフタイムを60年としてLT法によりLC-CO₂(ライフサイクルCO₂)を推計した結果、インフラ建設によって、供用前に8,057[t-CO₂]が排出されるものの、供用後はLRTの走

*キーワード: 地球環境問題, 環境計画

**正会員, 修(環境), 名古屋大学大学院環境学研究科
(名古屋市千種区不老町C1-2(651), TEL: 052-789-2773,
FAX: 052-789-1454, E-mail: shibahara@nagoya-u.jp)

***正会員, 博(工), 名古屋大学大学院環境学研究科
(TEL: 052-789-5104, E-mail: kato@genv.nagoya-u.ac.jp)

行や維持補修による排出に比べて乗用車交通の減少の方が大きい(図-1)。ライフステージ別にみると、LRTのSyLC-CO₂(CO₂で評価したSyLCEL)は軌道インフラ建設と走行にかかわる発生量が大部分を占める(図-2)。また、並行道路の乗用車交通の変化分も含むELC-CO₂(CO₂で評価したELCEL)でみると、556[t-CO₂/年]削減されると推計している。

ところが、この例のように長期にわたって供用される交通システムをLT法で評価する場合、以下のような課題がある。

(1) ライフタイム設定

社会資本のライフタイム設定は、ライフサイクル環境負荷の総量はもとより、単位期間もしくは機能単位あたりの環境負荷量も変化させる。したがって、設定にあたっては整備や維持管理に関する技術や、ニーズに関する時間的変化を十分に吟味し折り込む必要がある。

しかし、例えば交通システムの場合、道路舗装や橋梁についてはライフタイムが存在すると考えてよいが、多くは建設から廃棄までのライフサイクルを繰り返すと考えにくい。むしろ、既存のインフラを活用しながら、更新もしくは再構築を行うことが多い。このことは、そもそもインフラの「寿命(ライフタイム)」をどう設定するかの問題と関連する。都市街路のように、廃棄が行われず、維持補修によって半永久的に使用が続くと考えられる場合は、供用(走行・運用)段階の環境負荷量は無限大へと発散してしまい、LCAは無意味なものになってしまう懸念がある。このため、LT法では、ライフタイムを便宜上設定して、その時点までの環境負荷を単純に時間積分する。しかし、ライフタイムの設定次第では総発生量や図-2に示した段階別シェアは大きく変化してしまい、結論が反転する可能性もある。

なお、交通システムに関するLCA研究の多くは、廃棄段階のCO₂発生量はライフサイクル全体のうち微小であるか、計測困難であるとして考慮していない。しかし、これもあくまで使用開始時における想定であり、長期を経た後の廃棄時に何が起こるかは定かでない。

(2) 将来の不確実性

もしライフタイムを設定できても、その期間の社会資本の維持管理技術や使われ方を長期にわたって設定し推計を行うことは難しい。通常、素材やエネルギーの生産に伴う発生量原単位が一定値で推移し、使用量も変化しないという仮定の下で推計されることが多い。しかし、この仮定が現実に成立する保証はない。たとえ将来予測を行ってその結果を適用したとしても、将来に対する不確実性が結果に入り込まざるを得ない。例えば、急激な需要の変化や、排出対策技術の向上がそれにあたる。むしろ、それらのトレンドが十分に予測できるのであれば、できる限り考慮しておく必要がある。

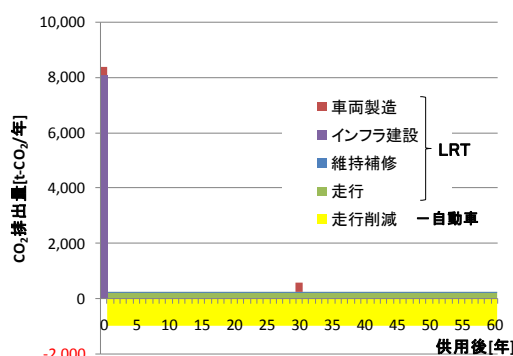


図-1 ケーススタディにおけるLC-CO₂の経年推移

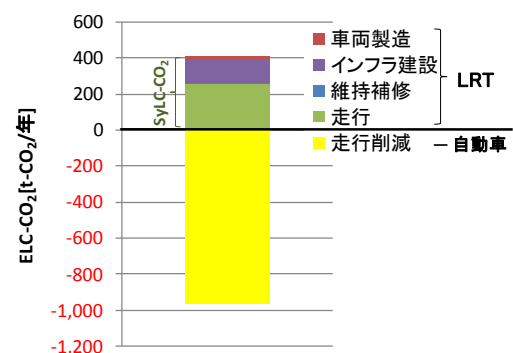


図-2 ケーススタディにおけるLT法によるELC-CO₂とそのライフステージ別内訳

一方、現在排出する環境負荷を将来排出される環境負荷と物量あたりで等価と捉えてよい(同量の排出が同等の影響を与えると認識してよい)と結論づけることもできない。将来の発生量については、運営・維持活動の推移に関する不確実性が高く、また技術革新による削減も起こりうることから、将来の環境負荷を減らすことを先に考慮するよりも、現在の環境負荷を減らす努力をする方がより確実である。LCAでは、以上のような将来の不確実性要因が考慮される必要がある。そもそも、将来の使用状況や技術向上に関する不確実性が、将来に対する価値観の重みを左右するものであることにも注意が必要である。しかし、通常は現在と将来とで排出される環境負荷のインパクトは等しいことが暗黙のうちに仮定され、それに基づいて単純に期間合計値が用いられている。

3. 割引率を用いたLCAの特徴と問題点

(1) 割引率の導入

2章で述べたLT法の問題点を解決する方法として、将来の環境負荷発生量を割り引く「Discount Rate法(DR法)」の導入が考えられる。

割引率(Discount Rate)とは、現在価値に対する将来価値の目減り分を表すパラメータであり、時間的選好率とも呼ばれる。LCAに類似した評価の時間バウンダリが用いられる費用便益分析においては、「将来における費

用・便益の現在における価値は、今すぐに得られる同額の費用・便益より低い」という価値観(や、それが「利率」として表現される金融・資本市場の存在)を前提に、将来の費用・便益を現在価値に換算するために用いられる⁵⁾。その値として、市場で決定される利率を参考にすることもできる。しかし、CO₂の場合、そもそも割引くことができるかどうかさえ定かではない。この点については後で検討する。

DR法では、インフラシステムのライフタイム(T 年)にわたる環境負荷 E_d は、割引率を i として式(2)で表される。

$$E_d = \sum_{t=0}^T \frac{e_t}{(1+i)^t} \quad (2)$$

式(2)はライフタイム T を無限大とすると収束する($i > 0$ であることが条件となる)ことから、DR法ではライフタイムが設定できなくても値が確定し、さらに、ライフタイムが長い場合には廃棄の値が無視される。このような特徴から、特に半永久的に使用される可能性がある交通システムの評価においては好都合である。

環境負荷削減を意図する社会資本整備の場合、これまでに述べたように、初期のCO₂排出が大きいものの、供用後は削減量が発生量を上回ること、長期を経て環境負荷が削減される。一方、割引率を大きい値に設定する(将来を低く見積もる)場合、早期に初期の発生量を回収できるほど各年次の削減量が大きければ、環境削減型プロジェクトとして優良であると評価される。逆に、社会資本整備による長期的削減は小さめに評価されるが、これは将来の不確実性を割引いた結果である。

(2)推計結果

ケーススタディとしたLRTについて、割引率を国土交通省⁶⁾が「公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針」の中で定める4%、ライフタイムを ∞ 年と設定したDR法で推計した結果、SyLC-CO₂は15,358[t-CO₂/(使用開始時点換算)/ ∞ 年]となり、LT法(割引率0%に相当、ライフタイム60年とする)の推計値(24,487[t-CO₂/60年])より37%小さくなる。

一方、割引率 i によって SyLC-CO₂ と LT 法のライフタイムを感度分析した結果を図-3 に示す。割引率と等価となるようにライフタイムを設定して LT 法を実施することで、割引率とライフタイムを1対1に対応させることが可能である。例えば $T=60$ 年の場合の結果は、割引率を1.71%と設定した場合の結果と等しい。また、特に割引率が小さいところでは、割引率に対する SyLC-CO₂ の弾力性が大きいことが分かる。先の LT 法による結果(図-2)を見ると、LRT および乗用車の走行に起因する分が大きく、これらは供用後長期にわたって発生することから、DR法では割引率がわずかに異なるだけで評

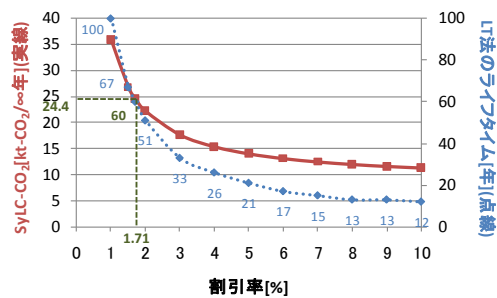


図-3 SyLC-CO₂・LT法のライフタイムと割引率との関係

価結果が大きく異なってしまふ。したがって、割引率は十分な検討のもとに設定される必要がある。

割引率を大きな値に設定することは、将来の価値や被害(額)を小さく評価することになる。そのため、持続可能性評価の立場からは、割引率の概念を認めない、あるいは限りなくゼロに近い値を用いるべきだという主張もある⁷⁾。スターン・レビュー⁸⁾では、割引率を0.1%という極めて小さい値に設定することによって、地球温暖化問題は早めの対策が必要という結論を導き出している。一方、IPCC⁹⁾では割引率設定方法について様々な議論を行っているものの、第4次報告書でも割引率としてどのような値を用いるべきかについて確定的な議論には至っておらず、費用便益分析で標準的に用いられる値(数~十数%)を適用している。

また、本稿ではCO₂のみを対象としているため、その環境インパクトを何らかの方法で貨幣換算する(実は環境負荷発生から被害までの間に時間経過があるため、換算係数の中に割引の概念が入ってくるはずである)ことは行わず、CO₂発生量をそのまま評価指標に用いている。しかし、市場で決定される利率はあくまで貨幣価値での評価値を想定したものと解釈すべきなので、CO₂発生量に直接割引率として適用することは妥当でない。こうなると、CO₂発生量に適用可能な割引率を科学的に設定することも容易でない。

結局のところ、DR法ではライフタイムを設定する必要がないものの、代わりに割引率の値を設定しなければならず、その設定方法が定められない以上、問題の解決につながっていないことになる。

4. 割引率を直接設定しない評価法

実は、社会資本整備プロジェクトを、将来環境負荷を出さないための先行投資として評価するのであれば、割引率(あるいはライフタイム)を設定しないで評価する方法がある。以下に3つの評価法を提案する。

(1)累積環境負荷チャート

図-4に、ケーススタディのLRTを導入する場合(with)と導入しない場合(without)の各代替案について、時間経

過に伴って累積する CO₂ の推移を示す。2 つの線が t=6 で交わることは、インフラ整備分の CO₂ が初期に発生するものの、乗用車走行分の削減効果が発生し相殺することを意味している。すなわち、ケーススタディの LRT 整備は CO₂ 削減型のプロジェクトであることを示している。

(2) エコロジカルペイバックタイム

ペイバックタイムは、設備投資の効果によって、投資資金が何年で回収できるかを示す指標であり、例えば発電所などのエネルギー生産設備の性能を表すために用いられる。設備の導入時に投入したエネルギーを、その設備からの生産によって回収するまでの運転期間がそれである。この考えを環境負荷に応用するものがエコロジカルペイバックタイムである。

図-5 は without に比べて with の場合に ELC-CO₂ がどの程度増えるかを示したものである。この図から、ケーススタディの CO₂ ペイバックタイムが読み取れる。LRT のインフラ建設・車両製造による CO₂ と、ペイバックタイムまでの運用による CO₂ が、乗用車走行による CO₂ 削減によって回収される期間は 12 年であることが分かる。

(3) 環境収益率

費用便益分析において便益と費用が等しくなる場合の割引率を意味する内部収益率 (IRR : Internal Rate of Return) の考え方を応用し、環境収益率 (ERR : Environmental Rate of Return) 指標を定義する。ERR はプロジェクトの実施による環境負荷の発生量と削減量が等しくなる割引率であり、式(3)を満たす i である。

$$\sum_{t=0}^T \frac{ELC - CO_2}{(1+i)^t} = 0 \quad (3)$$

ERR の高いプロジェクトほど環境削減効果が高いと判断できる。本ケーススタディでは ERR=9.10% と算出される。この値は、前述したように市場利率と単純比較できるものではないが、価値観を表す参考値として比較対象とすることは許されるであろう。

5. おわりに

本稿では、ライフタイムが長い社会資本へ LCA を適用する際の、時間的バウンダリと将来の不確実性の考慮について検討した。CO₂ 削減を意図した LRT 整備プロジェクトをケーススタディとして、ライフタイムを設定せず割引率を用いる方法の適用について検討したものの、割引率の設定自体が難しく、実用的でないことが分かった。そこで、ライフタイムも割引率も設定しない評価方法を以下のように提案した。

- 1) 各代替案の累積環境負荷チャートを描くことにより、削減効果が発現する時期を可視化できた。

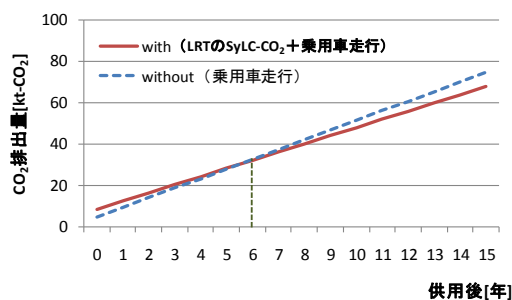


図-4 累積 CO₂ 発生量チャート

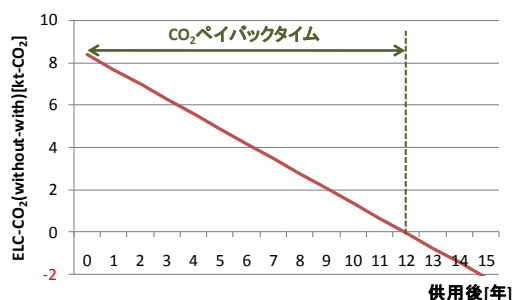


図-5 ELC-CO₂ の変化と CO₂ ペイバックタイム

- 2) エコロジカルペイバックタイムを算出することで、「環境負荷の先行投資」が回収されるまでの期間を明らかにできた。
- 3) 「環境への投資」の回収可能性を判断できる ERR 指標を提案することができた。
 今後はこれらの指標を様々な交通システムに適用し、その有効性を検討していく予定である。

謝辞

本研究は科学研究費・萌芽研究(19651016)の助成を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 井村秀文：環境問題を系統的に考える—氾濫する情報に踊らされないために、化学同人，2009。
- 2) 加藤博和，柴原尚希：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，土木計画学研究・講演集，Vol.33，CD-ROM(34)，2006。
- 3) 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。
- 4) 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.2 No.3，pp.246-254，2006。
- 5) 藤井聡：土木計画学—公共選択の社会学，学芸出版社，2008。
- 6) 国土交通省：公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針，2004。
- 7) R.K.ターナー，D.ピアス，I.ペイトマン著，大沼あゆみ訳：環境経済学入門，東洋経済新報社，2001。
- 8) NICHOLAS STERN：The Economics of Climate Change—The Stern Review，CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS，2007。
- 9) WG III to the FAR of the IPCC：Climate Change 2007—Mitigation of Climate Change，CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS，2007。