

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

An Evaluation Method of Environmental Performance on Railway Systems
applying the Standardized Life-Cycle Emission Factor

柴原 尚希^{*1}

Naoki Shibahara

加藤 博和^{*1}

Hirokazu Kato

狩野 弘治^{*2}

Koji Kano

ABSTRACT : This study constructs a universal estimation method of environmental loads by LCA (Life Cycle Assessment) in the planning phase of the new railway systems and evaluates environmental performance considering economic benefit. For advance evaluation, 1) the emission units from standard structure form in each life cycle stages are estimated; 2) the model based on ELCEL (Extended Life Cycle Environmental Load) concept are introduced.

As a case study, a suburban railway project is evaluated. The analysis results in 1) the CO₂ emission from infrastructure construction stage consist of about 50% of life cycle total one (about 0.48 [Mt-C/60years]); 2) decrease of 22 [kt-C/year] is expected by declining in car driving and other railway use; 3) this project has fully potential to reduction of CO₂ emissions in transport sectors according to sensitivity analysis; 4) adoption of arch slab rigid frame to elevated bridge is environmentally superior to RC beam; 5) even if the route is extended to the central city, environmental performance is almost the same.

KEYWORDS : Life Cycle Assessment (LCA), Railway Planning, Environmental Performance

1 はじめに

1997年の気候変動枠組条約第3回締約国会議(COP3)で採択された「京都議定書」における、先進各国に対してのGHG排出削減目標設定をきっかけとして、その対応が世界的に大きな課題となっている。また、排出削減目標達成の緩和措置として設けられた京都メカニズムのひとつであるCDM(クリーン開発メカニズム: Clean Development Mechanism)によって、途上国におけるGHG排出削減策に対する認識もしだいに高まってきている¹⁾。

運輸交通部門は、日本においてCO₂排出のうち約2割を占め、他国でも大きな割合となっている。その上、増加傾向も著しいことから、排出削減対策の立案・実施の重要性が高まりつつある。そのため、まず交通活動から排出される環境負荷総量や、事業実施による排出削減効果を推計した上で、削減対策や事業評価を行う仕組みを構築する必要がある。その際、単に交通機関の走行・運行時に限っての排出量の検討では部分的な把握に過ぎない。関連施設の建設・製造・更新等、一連のライフサイクルまで踏み込んだ環境負荷量の実態解明と排出削減対策の具体化が必須である。

このような認識の下に、近年適用が進められているのが、LCA(Life Cycle Assessment)に基づく手法である。LCAは、評価対象の環境影響を「揺りかごから墓場まで」の全体で評価するもので、各種の環境負荷が「どこから」「どれだけ」排出されるかを定量的・包括的に把握するための方法論である。LCAにはISO(国際標準化機構: International Organization for Standardization)の中で14040番台が割り当てられており、「環境への優しさ」を計測する方法としての国際規格化がなされている。しかし、ISOでの規定は、あくま

^{*1} 名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻

Division of Environmental Engineering & Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

^{*2} 日本鉄道建設公団 関東支社 計画部 調査課 Japan Railway Construction public Corporation

で手続きを示したものであって、具体的な方法が示されているものではない。また、ISOで規定されたLCAは工業製品を対象としているということもあり、交通システムを対象としたLCA適用事例はまだまだ少ない。多くは、特定の対象を設定した事後評価であり、その推計結果の紹介にとどまっている。その結果、交通システム一般に適用可能な方法論が示されているとは言えない。端的な例として、LCAで常に問題となるデータ制約への対応は、推計者の仮定という名の下で場当たりの行わざるを得ないのが実状である²⁾。

そこで本研究では、公共交通機関整備プロジェクトの代表例である鉄軌道整備を対象に、その計画段階において一般的に適用可能な方法論として、LCAの考えに基づいた環境負荷推計手法を構築することを目的とする。さらに、経済的便益との関係を考慮に入れた「環境性能」の評価を実施する。

2 本研究で構築する方法論の位置づけ ～範囲の深さ・広さの設定～

LCA実施にあたって最初に必要なとなるのは、実施の目的を設定し、そのための調査範囲を明確にすること（Goal and Scope Definition）であるが、これは最も重要でかつ難しい問題である。すべての要素の完璧な抽出と把握がBestに違いないが、それにはきりがなく、むしろ最低限どこまで考慮されていればBetterであるかを定めることの方が有意義である。そのひとつの対処法は、事業の進捗段階によって概略／詳細LCA³⁾を使い分けることである。本

研究では、詳細設計図のない段階での適用を想定していることから、概略推計法をとる必要がある。そこで、代表的な構成要素のLCI（Life Cycle Inventory）分析結果を原単位として用い、簡略的に全体の傾向を把握することとする。

一方、システム境界をどのように設定するかについても同様に難しい問題をはらんでいる。交通システム整備を扱う場合には、従来Infrastructure LCAとして行われてきた交通インフラ自体から生じるライフサイクル環境負荷に加えて、交通インフラの存在による、交通機関利用（車両走行）と効果波及に伴う他交通機関の利用変化から生じる環境負荷量を考慮する必要がある。これはELCEL（拡張ライフサイクル環境負荷：Extended Life Cycle Environmental Load）として著者が提案している²⁾概念であり、計画段階における評価に有効であるため、本研究でも採用する。ただし、どこまで「拡張」するかについては議論が分かれるところであり、推計のいたちごっこに陥る危険性は残されている。

以上を踏まえ、本研究で構築する方法論を図2.1のように位置づけることとする。なお、本来のLCAでは、各種環境負荷を網羅・算出し、統合評価を行うことが想定されているが、本研究におけるインベントリ分析は、CO₂排出量に限定してLCAの考え方を適用している。

3 標準化原単位と推計手法

3.1 対象とする路線

本研究では、推計対象とする新規鉄軌道整備プロジェクトとして、大都市部から郊外部を結ぶ延長58kmの都市近郊鉄道を想定する。

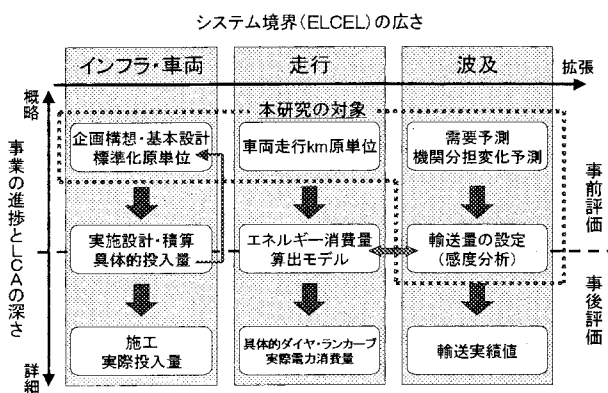


図2.1 本研究で構築する方法論の位置づけ

3.2 構成要素の標準化

本研究では詳細設計が存在しない計画段階で適用可能な手法の開発を想定しているため、一般的な LCA で行われる、評価対象についてすべての設計図と施工手順が得られるという前提は非現実的である。そこで図 3.1 のように、鉄軌道システムを鉄道模型のパーツのように分解して考え、それぞれについていくつかの「標準モデル」を設定する。そして、各標準モデルに関して LCI 分析を実施し、それらを組み合わせることにより、システム全体でのライフサイクル環境負荷を算出する概略法をとる。

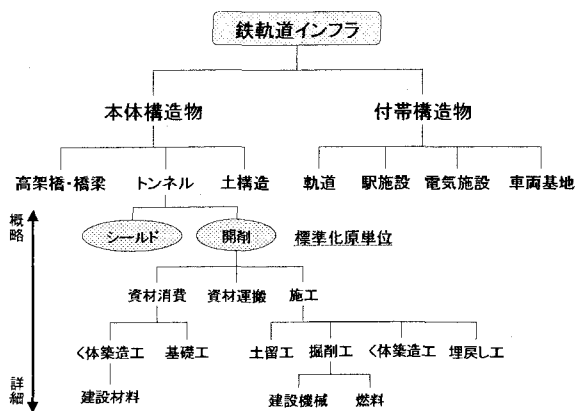


図 3.1 鉄軌道システム構成要素の分解

3.3 標準モデルの LC-CO₂原単位

鉄軌道システムの個別標準モデルに関する LCI は、日本鉄道建設公団関東支社が実施しており、その結果は単位長さあたりの CO₂ 排出量として原単位的に整備されている⁴⁾。本研究では、これらのデータをもとに「標準化原単位」を設定し、推計を行っている(表 3.1)。

表 3.1 より、本体構造物建設の CO₂ 排出量は、トンネル、橋梁が土構造物に比べて多くなっている。これは、コンクリート・鋼材の使用量が大きく関係しているものと考えられる。

表 3.1 本研究で用いた主な標準 CO₂ 排出原単位⁴⁾

●インフラ本体構造物(建設)

アーチスラブラーメン高架橋	2.04 [t-C/m]
RC桁用橋脚	35.8 [t-C/基]
PC桁用橋脚	32.2 [t-C/基]
トラス桁用橋脚	139 [t-C/基]
RC桁	0.85 [t-C/m]
PC桁	1.02 [t-C/m]
鋼製トラス桁	2.98 [t-C/m]
シールドトンネル	2.41 [t-C/m]
開削トンネル	4.48 [t-C/m]
盛土	1.77 [t-C/m]
切土	0.88 [t-C/m]

●インフラ付帯構造物(建設)

スラブ軌道	77.9 [t-C/m]
バラスト軌道	87.8 [t-C/m]
高架駅	1,040 [t-C/駅]
地下駅	8,490 [t-C/駅]
車両基地	1,670 [t-C/箇所]

●インフラ付帯構造物(維持補修)

レール	3,910 [kg-C/百万車両km]
架線	41.4 [kg-C/百万車両km]

●車両(製造)

アルミ20m車両	24.9 [t-C/両]
----------	--------------

●車両(維持補修)

パンタシュー	5.50 [kg-C/百万車両km]
ブレーキシュー	144 [kg-C/百万車両km]
車輪	1,710 [kg-C/百万車両km]

●走行

電車電力	0.31 [kg-C/車両km]
付帯施設電力	0.21 [kg-C/車両km]

4 都市近郊鉄道の LCA 結果

4.1 整備による ELC-CO₂ (ELCEL で評価した CO₂ 排出量)

3.3 節で示した標準化原単位を用いて、対象とする都市近郊鉄道の LCA を行う。具体的な路線延長、構造種別ごとの延長および駅数は、表 4.1 のとおり設定している。

また、運行段階の試算に必要な運行計画は、基本的に加藤・大浦が構築したモデル⁵⁾に沿って設定している。これは、輸送量（需要）から運行本数、必要車両数を割り出し、そこから鉄軌道システムのライフサイクルにわたる走行量を求めるモデルである。しかも、表 4.2 に示すようなデータを分析可能な政策変数としているところが、このモデルの特徴である。

以上を用いて、対象とする鉄道の ELC-CO₂ をライフサイクル 60 年、輸送需要 32.7 [万人/日]（類似事例を参考に設定）として算出したところ、図 4.1 のようになった。なお、ライフサイクルにわたり技術水準（燃費、電力、効率等）は現状のまま推移し、輸送需要も変化しないとして計算している。これは、名古屋市において運輸部門から 1 年間に生じる CO₂ 排出量の約 3 分の 1 に相当する。段階別では、インフラ建設が約 52% と最も多く、次いで走行の約 26% となっている。これより、新規鉄軌道システム整備を環境の面から議論するにあたっては、車両走行分だけでなく、インフラも含めたライフサイクル全体を考慮することが、排出量シェアからみても重要であると言える。

4.2 整備前後での ELC-CO₂ 変化

類似事例⁶⁾を参考に、対象とする鉄道の整備によって、都市圏全体で自動車交通量および鉄軌道の利用量はともに減少すると想定する。この想定値をもとに整備前後での ELC-CO₂ 変化を推計した結果が図 4.2 であり、合計で約 2.2 [万 t-C/年] の CO₂ 排出量削減が見込まれると推計される。これは、並行する高速道路を走行する自動車が 1 年間に排出する量、約 11.6 [万 t-C/年]（平成 11 年度道路交通センサスから算出）の約 19% にあたる量である。

4.3 輸送需要の変化による感度分析

新規鉄軌道整備を対象とした LCA において結果を最も左右する変数は、供用後の輸送需要である。車両走行はもとより、信号通信等の付帯施設の電力消費量や軌道・架線等のメンテナンスも走行量に応じて変化する。しかし、需要予測の結果と実績値に差が出ることは往々にして起こり得るため、ここでは単純に需要予測の結果想定された輸送需要に基づいた値だけでなく、実績値がその値から増減した場合を考え、感度分析を行う。なお、時間帯ごとに、輸送量比率を設定して需要を配分し、混雑率を与えて運行本数を決定しているため、車両 km と人 km が単純に比例しているわけではない。

表 4.1 構造種別延長と駅数

高架橋	橋梁	トンネル	土構造	駅部	合計	高架駅	地下駅
20km	3km	13km	4km	18km	58km	12駅	8駅

表 4.2 モデル⁵⁾で分析可能な政策変数の例

分類	政策変数
交通需要	区間需要、転換率
車両性能・仕様	耐用年数、定員、編成車両数
運行計画	運行頻度、混雑率

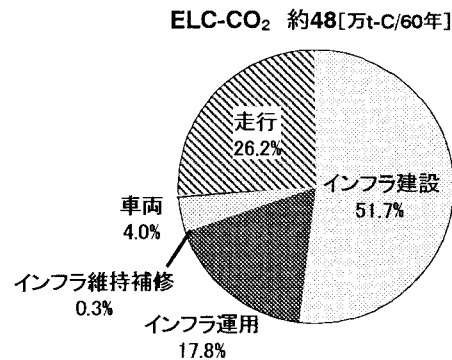


図 4.1 対象鉄道の ELC-CO₂ と各段階別の内訳
(ライフサイクル：インフラ 60 年、車両 20 年)

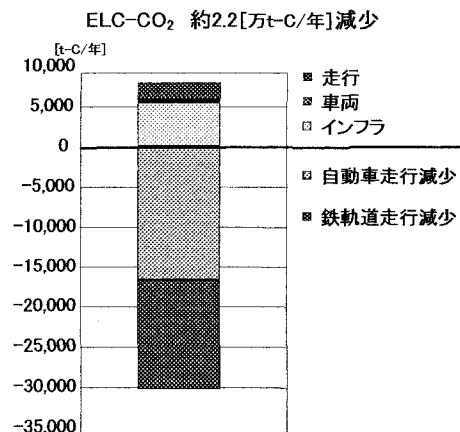


図 4.2 整備前後での ELC-CO₂ 変化

感度分析の結果を図 4.3 に示す。ここで棒グラフは、各輸送需要のときの、他交通機関の走行減少分を除いた ELC-CO₂ 増加量である。容易に予想されるように、輸送需要が減少するほど走行量が減少するため、ELC-CO₂ も減少する。しかし、単位人あたりの ELC-CO₂ で考えると増加することになるため、輸送需要が予測を下回るほど、環境面でも不利になっていくと考えられる。

一方、折れ線グラフは、対象とする鉄道の整備による ELC-CO₂ 増加を相殺するために必要な都市圏全体での自動車の走行減少量を推計した値である（鉄軌道走行減少分は考慮していない）。これによると、いずれの場合も、0.10%~0.15%（33~50 [万人 km/日]）程度減少すればよいことが分かる。類似事例での需要予測結果では 0.29%減少となっていることから、上記の値は十分達成され得ると思われる。すなわち、対象とする都市近郊鉄道の整備が、運輸部門の CO₂ 排出削減に有効であると考えられる。

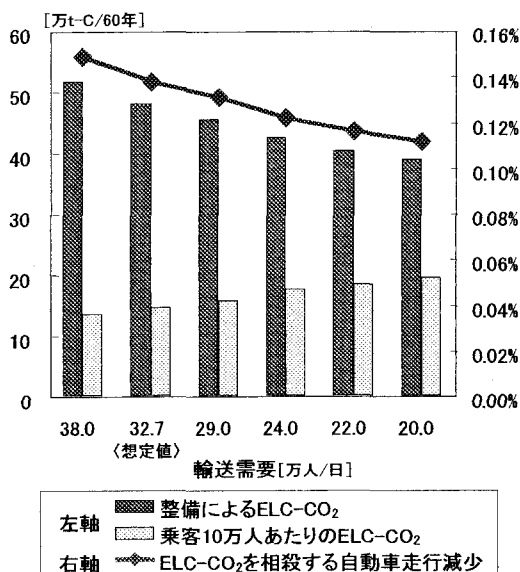


図 4.3 輸送需要の変化による感度分析結果

4.4 設計構造の検討

図 4.4 は、対象とする鉄道の構造形式別延長と CO₂ 排出量を割合で示したものである。路線延長 58km のうち、最も割合の大きい構造物は高架橋であり、全体の約 3 分の 1 を占めているが、CO₂ 排出は約 6 分の 1 に過ぎない。高架橋に関しては、景観・経済性向上のためにアーチスラブ式ラーメン高架橋が取り入れられることを想定して推計しているが、もし仮にすべて RC 形桁式高架橋で整備されたとしたら、CO₂ 排出量はインフラ部分で 5% 増加すると推計される。アーチスラブ式ラーメン高架橋は、環境面でも優位であると言える。

このように、標準的な構造形式をあらかじめ原単位として整備しておくことによって、設計構造の違いが ELC-CO₂ 全体にどの程度の差を生じさせるかを事前にチェックできることが、本研究で構築した方法論の利点のひとつである。

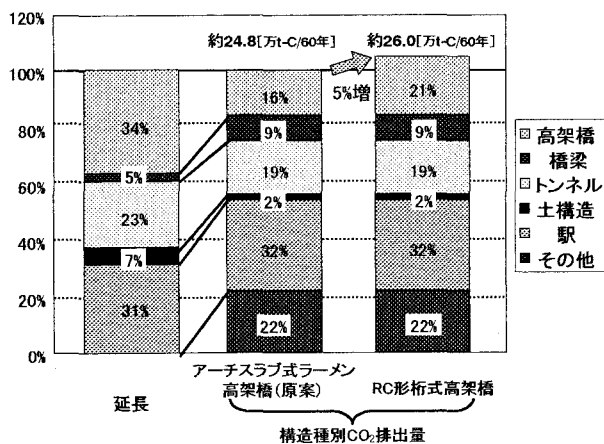


図 4.4 構造種別ごとの延長と CO₂ 排出量の関係

4.5 環境負荷 - 便益 (E-B) ベクトルによる環境性能評価

LCA において、代替案ごとの環境負荷比較・検討は機能単位 (Functional Unit) で行われる必要がある。社会資本の場合、機能単位指標として考えられる最も一般的なものは (貨幣単位の) 便益であることから、

単位便益あたりの環境負荷（環境性能：Environmental Performance）を用いての評価を試みる。具体的には、都市部での2kmの延伸計画（地下）について検討する。

「キャピタリゼーション仮説」によれば、新規鉄軌道整備による便益は、地価上昇に帰着すると考えられる。ここで、対象鉄道を原案通り整備したときの便益は、データ制約により算出が困難である。そのため本研究では、総便益を鉄軌道整備によって生じる住宅整備投資が最終的に地価上昇に帰着すると仮定し、類似事例における総投資額予想値を用いる。さらに、総便益から建設費を差し引いて純便益を算出し、これを経済波及効果の計測期間（30年）で除して、年間約2,158億円とした。これと、4.1節で求めた ELC-CO₂ (=8,003 [t-C/年]) をプロットし、ベクトルで表したものが図4.5である。これより、対象鉄道の環境性能を算出すると、3.7 [t-C/億円] である。一方、延伸計画に関しては年間約40億円の純便益増が見込めると推測されているものの、地下区間を通すことから、ELC-CO₂ も8,409 [t-C/年] へと約5%増加してしまう。その結果、環境性能は3.8 [t-C/億円] となり、若干上昇してしまう。しかし、環境面で計画を再検討すべき程の結果ではないと言える。

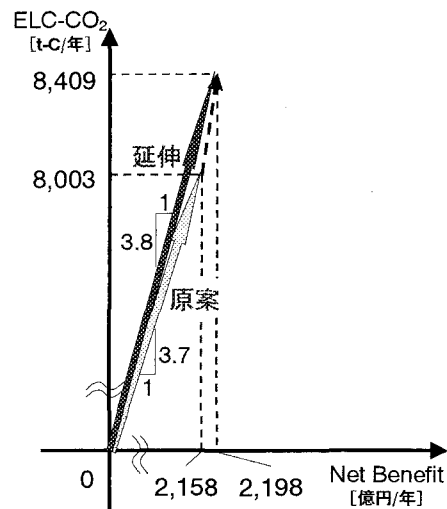


図4.5 E-Bベクトルによる環境性能の比較

5 まとめ

本研究では、標準化原単位を用いることで、新規鉄軌道整備のCO₂排出推計を計画段階においてLCA的に行う手法を確立した。さらに、都市近郊鉄道整備についてのケーススタディの中で、整備によるELC-CO₂およびその前後変化や需要による感度分析、設計構造の検討を行い、事前評価に関するこの手法の有効性を検証することができた。同時に、経済的便益との兼ね合いも含めた環境性能での評価によって、新規鉄軌道整備計画を、環境面を組み込んで簡便に比較検討できる方法論を構築した。ケーススタディの結果から、対象路線の整備は運輸交通部門におけるCO₂排出削減効果が期待できる事業であると結論づけられる。

謝辞

本研究の遂行にあたっては、日本鉄道建設公団関東支社「環境からみた鉄道整備効果に関する調査」研究会（委員長：石田東生・筑波大学社会工学系教授）の委員の皆様方に、データ提供等、多大なご協力をいただきました。この場をお借りして厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田中浩介・加藤博和・林良嗣：「運輸交通分野におけるCDMを用いたビジネスモデルの可能性に関する基礎的検討」、第11回地球環境シンポジウム講演論文集、pp225-230、2003.7
- 2) 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
- 3) 伊藤武美・花木啓祐・本多博：「ニュート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、pp379-384、1997.10
- 4) 日本鉄道建設公団関東支社・財団法人運輸政策研究機構：「平成13年度環境からみた鉄道整備効果に関する調査報告書」、2002.3
- 5) 加藤博和・大浦雅幸：「新規鉄軌道整備による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 No.17、pp471-479、2000.9
- 6) 日本鉄道建設公団関東支社・財団法人運輸政策研究機構：「平成11年度環境からみた鉄道整備効果に関する調査報告書」、2000.3