

新規交通施設整備に伴う環境負荷変化の LCA に基づいた評価モデル

An LCA-Based Evaluation Model of Change in Environmental Load Due to Improvement of Transport Systems

加藤 博和¹ 林 良嗣¹ 大浦 雅幸²
Hirokazu Kato Yoshitsugu Hayashi Masayuki Ohura

ABSTRACT: This research aims to develop a model system that estimates the change in environmental load due to the improvement of the transport systems, and compares the environmental impact among the alternative transport modes. The model system utilizes the methodology of Life Cycle Assessment, and introduces the concept of Extended Life Cycle Environmental Load (ELCEL), in which the range of assessment is extended to include the change in environmental load due to transport activities. Most of the existing LCA researches on infrastructure only evaluate energy consumption and CO₂ emission, while this model system treats other environmental loads such as air pollution, water pollution, and waste, among others. The model system introduces the concept of Environmental Friendliness Point (EFP), an evaluation index which integrates the consideration of every environmental load. The developed model also contains various parameters concerned with transportation demand, performance of vehicles, and the design of route and operation. Sensitivity analysis on the ELCEL can be conducted for each transportation measure by investigating into these different model parameters. In this paper, the extent of transport demand and the ratio of the shift to public transport are analyzed on urban subway and tram transport.

KEYWORD: Life Cycle Assessment, Environmental Impact, Transport Infrastructure

1. はじめに

Life Cycle Assessment (LCA) を社会基盤施設の環境負荷評価に適用する方法に関しては、近年多くの研究が行われ、実施例も蓄積されてきている。それらの多くは、主に工業製品を対象として確立されてきた LCA の方法論をそのまま適用するものであり、施工技術の改善や使用する構造・部材の比較といった詳細設計の検討が可能となった。しかし、社会基盤施設の特徴である、供用時における利用者の行動変化や波及効果の発生による環境負荷変化の考慮については課題として残されており、施設の計画段階での評価に適用することができないという問題点が指摘されてきた。

また、LCA は本来、あらゆる環境負荷を網羅的に評価する手法である。しかし、建設分野では二酸化炭素 (CO₂) 排出に焦点を絞った研究が大部分であるために、「LCA= CO₂ を測る方法」と見なされる場合が多い。加えて、LCA の結果を計画・設計における意思決定でいかに活用すべきかに関する方法論が未確立であるために、実務への活用ができない状態となっている。こうした問題意識に立つて、著者は LCA を交通施設整備の計画段階に適用するための考え方として、評価対象を施設の原材料・製造機械から発生する分に加えて、施設整備によって波及的に生じる環境負荷に拡張した「ELCEL (Extended Life Cycle Environmental Load : 拡張ライフサイクル環境負荷)」の考え方を提案し¹⁾、ケーススタディを行ってきている。

本研究では、交通施設整備の LCA 手法として、ELCEL 概念の適用に加え、複数の環境負荷項目を計測するとともに、項目間の統合評価を行う手法を開発することを目的とする。さらに、開発した手法の適用可能性を検討するために、公共交通機関の新規導入を対象に分析を試みる。

¹ 名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻, Dept. of Geotechnical and Environmental Eng., Nagoya Univ.

² 日本技術開発(株), Japan Engineering Consultants Co., Ltd.

2. 複数環境負荷項目を対象とした LCA の手順

2.1 各種環境負荷の推計 (Inventory)

本研究で開発する LCA 手法を、図 1 に示すような、ISO で規定される標準的な LCA の流れに沿って説明する。

まず、扱う環境影響カテゴリ (Impact Category) や比較対象となる代替案、分析対象のライフタイムといった対象範囲を設定する (Scoping)。本研究では評価対象として、自動車や鉄軌道等の交通機関を扱う。そのため、単に交通施設そのものを対象とした LCA でなく、交通施設を利用する自動車・鉄軌道車両にまで評価範囲を拡張した ELCEL による評価を行う必要がある。次に、影響カテゴリごとに関連する物質を抽出し環境影響の関連付けを行う (Classification)。本研究では、評価対象の特性を考慮して、表 1 に示す 6 カテゴリと、それに関連する 7 負荷物質を扱う。

Classification で挙げられた各負荷物質について、評価対象のライフタイムにわたる排出量を推計する (Inventory)。その方法として、交通施設や車両に関しては、建設分野の LCA で一般に用いられる「組み合わせ法」(評価対象への投入物質・活動ごとに、産業連関表から得られた各環境負荷の内包原単位を乗じて内包環境負荷を求め、それを積み上げる方法)を用いる。内包環境負荷原単位には、鶴巻ら²⁾による 10 種類の環境負荷に関する算定結果を用いることで、CO₂のみにとどまらず多種の環境負荷項目を対象とした Life Cycle Inventory を行うことができる。また、車両走行に伴う分に関しては、整備される交通機関の特性を考慮した交通活動変化の予測を行い、それを基に環境負荷を推計する必要がある。

2.2 各種環境負荷のインパクト評価 (Impact Assessment) と統合評価

Inventory は各種環境負荷発生量の個別データであるとともに、環境影響の程度を直接的に表す指標ではないことから、これをそのまま環境負荷削減策の検討に活用するのは困難である。そこでまず、同一環境影響カテゴリ内での影響強度に比例した重み付けを行い、カテゴリ内統合指標としての環境影響ポテンシャル量を得る (Characterization)。この量は Category End-Point と呼ばれるもので、各カテゴリの環境インパクトの大きさを表す量として科学的客観性が保たれる。本研究で用いる重み付け係数を表 2 に示している。

さらに環境影響カテゴリ間に何らかの価値基準を与え、各カテゴリの重要度 (重み付け) を決定する (Valuation) ことで、異なるカテゴリの環境負荷を比較、あるいは合計することが可能となる。ただし、影響カテゴリ間の重み付けは各環境問題に対する価値観の違いを必然的に内包するため、Category End-Point の段階まで保たれてきた科学的客観性は失われる。これは Valuation における共通の課題である。

国内外の LCA 研究においては、カテゴリ間の重み付け決定手法が数多く提案されている。国際的に有名なものは Eco-point (スイス、1990)、Simapro (オランダ、1991) である。ただし、これら海外での重み付け値をそのまま日本に適用するにあたっては、a)顕在化している環境被害の違い、b)環境に対する価値観の違い、という問題点がある。そこで、日本で開発された重み付け値をみると、例えば永田³⁾のアンケート

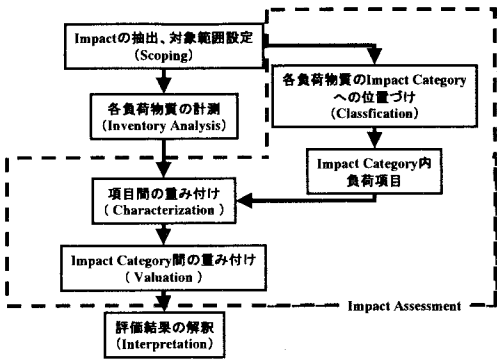


図 1 LCA の分析プロセス

表 1 本研究で扱う環境影響カテゴリと関連する環境負荷物質

環境影響カテゴリ	関連する物質
(a)エネルギー消費	エネルギー
(b)地球温暖化	CO ₂
(c)酸性雨	NO ₂ , SO ₂
(d)水質汚濁	COD, T-P
(e)大気汚染	NO ₂ , SO ₂
(f)廃棄物処理	産業廃棄物

調査による設定値がある。しかし、アンケート調査で得られる重み付けは個人の環境に対する価値付けの合計であり、その個人が環境問題に精通していない限りは客観的根拠に欠けるため、環境負荷評価への適用の範囲は限定的にならざるを得ない。一方、松野・稲葉ら⁴⁾は、環境影響発生地における各影響カテゴリの現状値を用いて重み付けを算定している。また、伊坪・山本⁵⁾は、各影響カテゴリを、a) 環境影響をもたらす物質

表 2 同一環境影響カテゴリ内での重み付け値

影響 カテゴリ	インパクト指標	負荷 物質	重み付 け係数	重み付け設定機関
(b)地球 温暖化	GWP ₁₀₀ (地球温暖化 ポテンシャル)	CO ₂	1	IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)
		N ₂ O	270	
		CH ₄	11	
(c)酸性雨	AP (酸性化ポテンシャル)	NO ₂	0.70	CML (Center of Environmental Science of the University of Leiden)
		SO ₂	1	
		NO	1.07	
(d)水質 汚濁	NP (富栄養化 ポテンシャル)	COD	0.022	
		窒素	0.42	
		リン	3.06	
(e)大気 汚染	HCA (人体に対する大気の 毒性ポテンシャル)	NO ₂	1.2	CML, TNO (Netherlands Organization for Applied Scientific Research)
		SO ₂	0.78	

(Output) の量とその物質の環境基準、b) 限りのある資源 (Input) の投入量とその資源の埋蔵量、に分け、それぞれについて環境基準や埋蔵量を用いた重み付け値算定方法を定義している。この手法はスイスの Eco-point をはじめ、海外においても多く用いられており、現在のところ最も科学的客観性の高い重み付け法であると考えられている。本研究でもこの方法を用いて、統合された環境影響ポテンシャル値 E を(1)式のように定義するとともに、重み付け値を新たに算定する。

$$E = \sum_j \left(\sum_i (E_i \times WI_{ij}) + \sum_r (E_r \times WR_{rj}) \right) \quad (1)$$

E_i : 環境影響物質 i の排出量、 E_r : 枯渇性資源 r の使用量
 WI_{ij} : 環境影響カテゴリ (環境影響物質排出) j の重み付け係数
 WR_{rj} : 環境影響カテゴリ (枯渇性資源消費) j の重み付け係数

右辺第 1 項の「環境影響物質排出」に該当するカテゴリは、(b)地球温暖化、(c)酸性化、(d)水質汚濁、(e)大気汚染、の 4 つである。これら各カテゴリの重み付け係数 WI_{ij} は(2)式で定義される。

$$WI_j = \sum_i \left(\frac{1}{AE_{ij}} \times F_{ij} \right) \quad (2)$$

AE_{ij} : 物質 i の地球全体での年間排出量
 F_{ij} : 物質 i の低減係数 (実際の環境影響と容認されうる環境影響<環境基準等>の比で算出)

右辺第 2 項の「枯渇性資源消費」に該当するカテゴリは、(a)エネルギー消費、(f)産業廃棄物、の 2 つである。これら各カテゴリの重み付け係数 WR_{rj} は(3)式で定義される。

$$WR_j = \sum_r \left(\frac{1}{AC_{rj}} \times \frac{1}{\frac{Y_{rj}}{100}} \right) \quad (3)$$

AC_{rj} : 枯渇性資源 r の年間消費量、 Y_{rj} : 枯渇性資源 r の使用可能年数

年間消費量 AC_{rj} は、1989～1990 年の排出データを基に算出する。使用可能年数 Y_{rj} は、(a)については原油の可採埋蔵年数を考慮して 50 年とする。また(f)については、産業廃棄物最終処分場の受入可能量を資源

表3 各種環境負荷の EFP 換算係数

環境影響カテゴリ	代表とする 環境負荷	EFP 換算係数	単 位	目標値と現状値
(a)エネルギー消費	エネルギー(原油)	1.00	TJ	使用可能年数 50 年
(b)地球温暖化	CO ₂	0.0360	t	目標値：1990 年レベルの 6%削減値
(c)酸性雨 (e)大気汚染	SO ₂	23.0	t	SO ₂ 目標値：0.04ppm、現状値：0.163ppm
(d)水質汚濁	COD	3.83	t	目標値：T-N=1.0mg/l、T-P=0.09mg/l 現状値（最悪）：T-N=4.9mg/l、T-P=0.34mg/l
(f)廃棄物処理	産業廃棄物	0.222	t	使用可能年数 5 年（最終処分場）

とみなし、本研究では 5 年という値を設定している。以上より算出された EFP 換算係数を表 3 に示す。このようにして新たに設定した重み付け値を用いた統合評価値を、本研究では「Environmental Friendliness Point (EFP)」と呼ぶこととする。

最後に、以上の各段階で得られた指標値 (inventory, category end point, EFP) を解釈し (Interpretation)、環境負荷削減策の検討に利用する。

3. ケーススタディ —都市内公共交通機関の整備—

以上で構築した LCA 手法を適用するケーススタディとして、本研究では都市内公共交通機関（地下鉄、路面電車）の新規整備を取り上げる。

3.1 公共交通機関に対する LCA 適用の意義

公共交通機関整備は環境負荷削減政策として半ば常識的に扱われているが、その根拠は LCA 的な分析に裏付けられたものではない。従来しばしば用いられてきた根拠として、運輸関係エネルギー要覧の人キロ・トンキロあたりエネルギー消費量・CO₂排出量原単位がある。これによると、平成 9 年度の日本国内旅客交通平均値は、鉄道が 105[kcal/人キロ]、バスが 187[kcal/人キロ]、自動車が 626[kcal/人キロ]となっている。しかし、この値の問題点として、a)運行時のエネルギー消費量のみを対象としており、新規公共交通機関整備を行う場合に考慮が必要な、車両や交通施設がライフサイクルにわたって排出する環境負荷は考慮されていないこと、b)エネルギーや CO₂に関するデータであり、他の環境負荷のデータは存在していないこと、c)運行実績に基づくデータであり、新規に整備される公共交通機関では利用状況の違いによって値が大きく変動すること、が挙げられる。本研究で構築した LCA 手法は、このうち a)と b)に対応している。

3.2 Inventory のためのモデル

さらに、上記の課題 c)に対処するための Inventory 手法として、1)ELCEL 概念を導入した評価の必要性はもとより、2)公共交通機関の利用・運行状況による違いも考慮できる手法の開発・適用が必要である。このような手法として、著者⁹⁾は新規交通施設整備に伴う ELC-CO₂ 変化の推計モデルを開発している。本稿ではこれをさらに多種環境負荷に適用可能な形に拡張する。

モデルの基本的な推計プロセスを図 2 に示す。大きく、i)公共交通機関整備に伴って新たに生じる環境負荷、ii)公共交通機関整備に伴う自動車交通削減による環境負荷変化、の 2 つの部分に分けられる。i)では、公共交通インフラ・車両のライフサイクル環境負荷、および車両走行に伴う環境負荷が推計される。ii)では、自動車走行に伴う環境負荷が推計されるが、道路や自動車のライフサイクル環境負荷については、公共交通整備によって変化しないと考え、推計は行わない。以上の推計値を合計することで、各ケースにおける自動車交通・公共交通に伴う ELCEL を把握することができる。

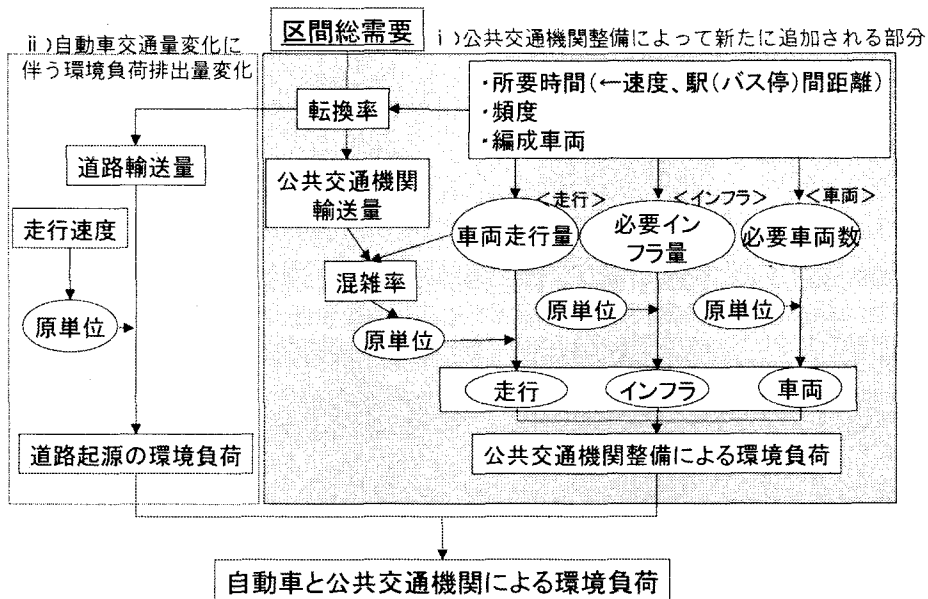


図2 新規公共交通整備の Inventory Analysis の考え方

この推計手法の中で特徴的なのは、i)の部分において、公共交通機関の混雑率を明示的に取り込んでいる点である。自動車の場合、平均乗車人数はほぼ一定であり、人の移動量（人 km）と自動車走行量（台 km）との間に比例関係が成り立つのに対し、公共交通機関では車両走行 km（運行本数・編成両数）は運行事業者が設定するため、車両あたり乗車人数や混雑率は不定であり、人 km と車両 km の間に比例関係は成立しない（むしろ、混雑率の設定はサー

ビス水準や採算性に影響するため、その変化による間接的影響はある）。先述の運輸関係エネルギー要覧の値でも、混雑率が全国平均値として扱われていることになる。本モデルでは、混雑率を説明変数とすることでその違いによる車両走行キロの変化を推計可能としており、さらに必要な車両数も推計することができる。

本モデルではほかにも、公共交通機関の環境負荷を規定する要因として重要であるにもかかわらず従来は明示的に扱われることの少なかった、加速時間の比率（駅間距離や所要時間から計算される）や需要ピーク特性といった要素も扱うことができるようになっている。本モデルで分析可能な政策変数を表4にまとめる。

なお、本モデルを多種環境負荷の推計に適用するにあたってのデータ上の大きな問題として、鶴巻ら²⁾による環境負荷原単位が金額あたりで与えられているのに対し、本モデルでは自動車や公共交通機関の走行量が台キロ・車両キロ単位で算出されるという齟齬が挙げられる。これに関しては、走行量から燃料消費量を推計し、CO₂やNO_xのように直接計算できるものは計算し、そうでないものは燃料消費量を燃料費用に換算して金額あたり原単位を適用するという方法をとっている。また、部門分類が本モデルと整合しない点も問題であるが、便宜上、それぞれに最も近いと思われる部門の原単位を適用している。

3.3 ケーススタディにおける仮定

本稿では、実際に地下鉄工事が行われている区間のデータを参考に、仮想区間（道路距離 8[km]）を考え、その区間に地下鉄あるいは路面電車を新たに建設した場合の環境負荷を推計する。モデル分析に必要な各種

表4 モデルで分析可能な変数

分類	政策変数
交通需要特性	整備区間における総交通需要、公共交通への転換率、需要の集中度
車両性能・仕様	加減速性能、耐用年数、車両定員、車両重量
公共交通整備計画	駅・停留所数、駅間距離
運行計画	所要時間、混雑率、運行頻度

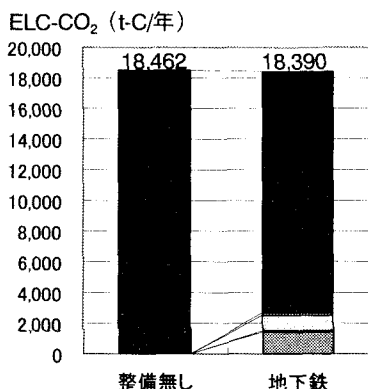


図3 地下鉄整備による ELC-CO₂ の変化

(総交通需要 10 万[人/(日・片道)]、転換率 15%)

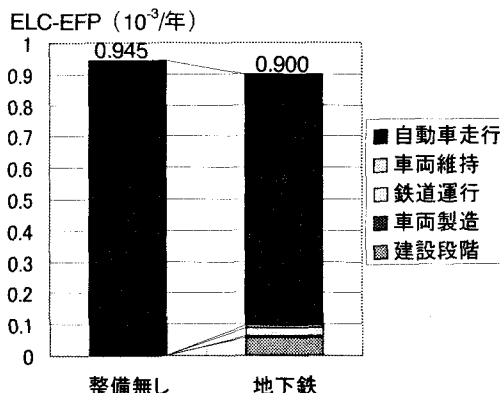


図4 地下鉄整備による ELC-EFP の変化

(総交通需要 10 万[人/(日・片道)]、転換率 15%)

設定値は既報⁹⁾と共通の値を使用しており、地下鉄に関する値は名古屋市交通局の、路面電車は札幌市交通局の運行実績を参考としている。

なお、公共交通整備に伴って、自動車走行速度（試算では 20[km/h]と設定）が向上する効果や、自動車交通需要が新たに誘発される効果も考えられるが、本モデルでは現在のところ、これらの効果を推計する手法は組み込まれていない。ただし、これらの効果は互いに相殺する方向にはたらく。

3.4 モデルを用いた分析結果

モデルを用いて、区間総交通需要量と公共交通機関への転換率をシナリオ的に与えて ELCEL を推計することにより、公共交通機関が環境負荷削減政策として成り立つために必要な需要条件を定量的に把握する。

1) 地下鉄整備

図3に、区間の総交通需要が 10 万[人/(日・片道)]あり、地下鉄整備によってそのうちの 15% (1.5 万[人/(日・片道)]) が地下鉄に転換した場合の ELC-CO₂ 変化を示す。この設定は、日本の大都市における既存地下鉄の実績に比べるとかなり低い値である。整備に伴って自動車走行分は 15%削減されることになるが、新たに発生する鉄道の ELC-CO₂ によって相殺され、結果的に総 ELC-CO₂ はほとんど削減されていない (約 0.5%減) という結果になっている。鉄道の ELC-CO₂ のほとんどは運行分と鉄道インフラ建設分であり、他の項目は無視できる。

同様に ELC-EFP を推計した結果を図4に示す。ELC-EFP は約 4.7%減と、ELC-CO₂ の削減率を上回っており、CO₂ 排出量以外のカテゴリにおいて地下鉄整備による削減効果が高いことを示している。このことを確認するために、図5に、地下鉄整備のライフサイクルにおける各段階毎の環境負荷カテゴリの内訳を示す。これを見ると、全段階において大気汚染 (SO_x、NO_x) の影響が大きくなっているほか、鉄道インフラ建設・車両製造・車両維持の段階における産業廃棄物や、鉄道運行によるエネルギー消費が ELC-EFP の大部分を占めていることが分かる。これらのうち、特に大気汚染の影響の強さが、EFP 評価において地下鉄に有利に働いた原因と考えられる。一方で、地球温暖化 (CO₂) の寄与は全体の 5%にも満たず、EFP における地球温暖化の重みが小さいことを示す結果となっている。

なお、地下鉄整備による環境負荷削減率は、区間総交通需要や転換率が大きくなるほど高くなる傾向にあることが、モデル推計によって確認されている。おおむね 1 万～1 万 5 千[人/(日・片道)]以上の乗客が見込まれる場合に ELC-EFP 削減効果が生じることが示されている。この輸送量は、実際に運行されている地下鉄の多くで達成されている。

2) 路面電車（併用軌道）

1)と同様に、区間総交通需要および路面電車への転換率を10万[人/(日・片道)]、15%に設定した場合について ELC-EFP を推計した結果を図6に示す。路面電車は、建設費が地下鉄の約10分の1で済むため、インフラに伴う分は非常に小さくなる。しかし、既存道路上に軌道を設置する場合には道路容量が低下することから、路面電車への転換が十分に生じないと自動車走行速度低下による燃費悪化が生じ、環境的には不利になる。この試算では、自動車走行速度が20[km/h]から15[km/h]へと低下すると想定している。試算結果は、路面電車整備に伴って ELC-EFP が約9.1%減となっている。

また、路面電車整備による環境負荷削減率も、地下鉄と同様、区間総交通需要や転換率が大きくなるほど高まる傾向にあり、おおむね3千～4千[人/(日・片道)]以上の乗客が見込まれる場合に ELC-EFP 削減効果が生じることが推計される。

3) 地下鉄と路面電車との比較

地下鉄・路面電車それぞれに関して、区間総交通需要と転換率を変化させた時の ELC-EFP 削減率推計結果を図7に示す。これを見ると、交通需要・転換率が低い場合は路面電車の削減率が高く、おおむね4万[人/(日・片道)]以上の乗客が見込まれる場合には地下鉄の削減率が高くなることが分かる。これは、転換需要が小さい場合にはインフラ投資が少ない路面電車が環境的に有利であり、大きい場合には地下鉄の大量輸送能力が環境面でも効果を発揮することを示す結果である。

4. 結論

本研究では、新規交通施設整備に伴う環境影響の評価手法として、ISO-LCA の枠組みを意識しつつ、評価範囲を整備に伴う波及効果把握にまで広げ（ELCEL 概念）、CO₂のみならず多項目の環境負荷を定量的に計測し、さらに環境影響カテゴリ間の重要度を加味した統合指標（EFP）を定義して、これら各段階の評価指標を用いて代替案の比較検討を行うことを可能とした。

本手法適用のケーススタディとして、都市内の区間を仮に設定し、地下鉄および路面電車の新規整備を対象に試算を行った。試算の結果得られた知見は以下のとおりである。

- 地下鉄のインフラ建設に伴って発生する環境負荷は、整備後の自動車走行に伴う負荷減少分を相殺する程度の量である。したがって、インフラ建設段階での環境負荷削減が地下鉄整備の ELCEL 削減に占め

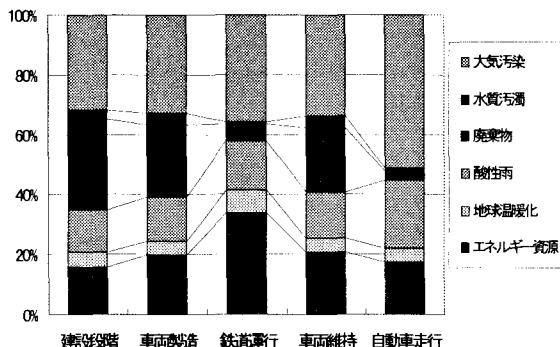


図5 地下鉄整備に伴う ELC-EFP に占める各環境影響カテゴリの内訳

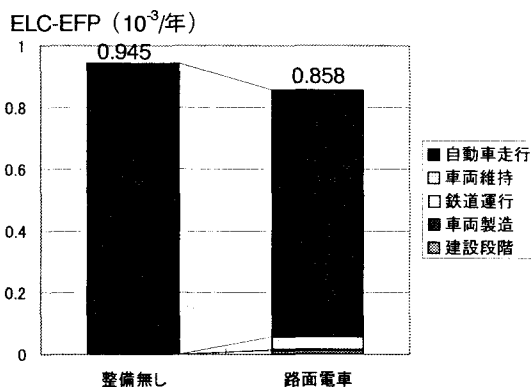


図6 路面電車整備による ELC-EFP の変化
(総交通需要 10 万[人/(日・片道)]、転換率 15%)

ELC-EFP 削減率 (%)

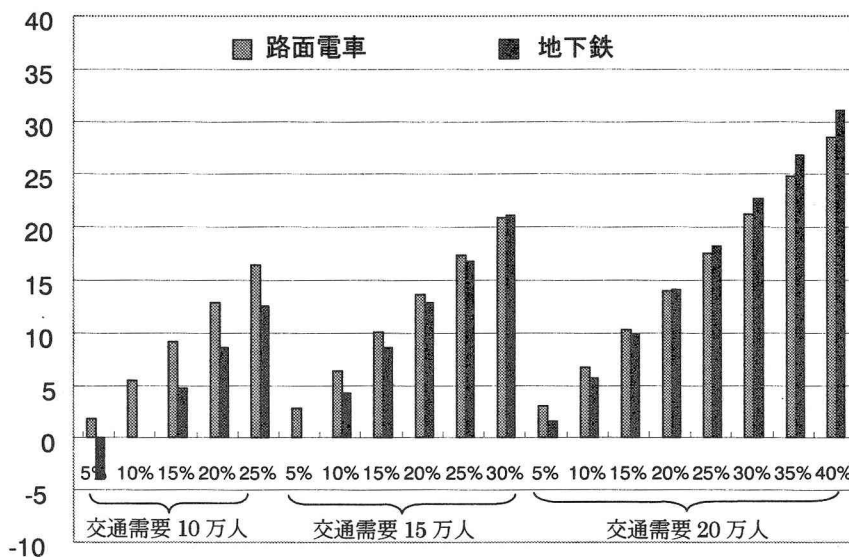


図7 区間総交通需要・公共交通機関への転換率と ELC-EFP 削減率との関係

る割合は無視できない。

- b) 本研究で定義した EFP 指標で見ると、鉄道インフラ建設や車両製造に伴う廃棄物発生量や、自動車走行に伴う SO_2 ・ NO_2 排出量の削減が、ELCEL 削減のため重要な取り組みである。一方、 CO_2 の重要度は低くなっている。
- c) 乗客数が 4 万[人/(日・片道)]程度を境界として、それより少ない路線は路面電車が、多い路線は地下鉄が、環境負荷をより多く削減できる。

今後の課題としては、本研究で行った方法を、バスや新交通システムといった他の都市内交通機関や都市間交通機関に適用することがまず考えられる。さらに、手法自体に関しては、a)環境アセスメントとの関係を念頭に置いた、classification で取り上げる環境影響カテゴリおよび環境負荷物質の検討、b)EFP の重み付け値の空間的・時間的变化の取り込み、c) ELCEL として扱うべき対象範囲の明確化、が必要である。

参考文献

- 1) 加藤博和：交通整備による環境インパクト計測手法としてのライフ・サイクル・アセスメント、交通工学 Vol.33 No.3、pp.81-86、1998.
- 2) 鶴巻峰夫・野池達也：LCA における多項目環境負荷の定量化に関する研究、環境システム研究 Vol.25、pp.1-11、1997.
- 3) 永田勝也：LCA における環境指標統合化の試み、土木学会第 9 回環境システムシンポジウム、1996.
- 4) 松野泰也・稲葉敦・水野建樹：排出地域及び排出形態を考慮した局地性インパクトカテゴリのインパクトアセスメント手法の開発、日本エネルギー学会誌 No.860、pp.1128-1138、1998.
- 5) 伊坪徳宏・山本良一：材料の環境影響の統合評価、日本エネルギー学会誌 Vol.77 No.859、pp.1080-1088、1998.
- 6) 加藤博和・大浦雅幸：新規鉄軌道整備による CO_2 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 Vol.23、2000.