

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*

Life Cycle Assessment of the Change in CO₂ Emission by Providing Railway Systems

加藤 博和** ・ 大浦 雅幸***

By Hirokazu KATO and Masayuki OHURA

1 はじめに

地球温暖化の原因となる温室効果ガスの排出削減は、運輸交通部門を含めた人間活動全般にわたる大きな課題となっている。その対策を具体的に立案・実施していくためには、まず、各活動に伴う温室効果ガス発生量と対策実施による変化量を定量的に把握しておくことが不可欠であるが、現状では必ずしも十分に実施されているとは言えない。

例えば、自動車から鉄軌道へのモーダルシフト施策は、半ば常識ともいえる温室効果ガス排出削減策である。これを理由づけるデータとして、「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排出量原単位がしばしば利用される。しかし、これは運行実績に基づくデータであり、新規鉄軌道整備によって CO₂ 排出が削減されることを必ずしも保証するものではない。まず、1) 整備された鉄軌道において輸送力のわりに利用者が少なければ、CO₂ 排出量原単位は既存鉄軌道に比べて高くなってしまう。したがって、自動車から新規鉄軌道にどれだけのトリップが転換するかや、鉄軌道事業者がどの程度の輸送力を提供するかを明らかにした上で CO₂ 排出量原単位を求めることが必要である。一方、2) 鉄軌道整備自体がインフラ建設・維持管理および車両製造等に伴って多くの環境負荷を生じる活動であることも忘れてはならない。これらの環境負荷も、鉄軌道整備の計画段階でどの程度の輸送力を想定するかによって変化するものである。すなわち、新規鉄軌道整備の評価にあたっては、1) 運行効率による CO₂ 排出量原単位の違い、2) 鉄軌道の建設や維持管理に伴って生じる CO₂ の考慮、が必要である。

そこで本研究では、新規鉄軌道整備の計画段階において、想定される利用・運行状況の違いを考慮した CO₂ 排出量評価手法を構築することを目的とす

* keywords: 地球環境問題, 環境計画, ライフ・サイクル・アセスメント

** 正会員 博(工) 名古屋大学大学院助手
工学研究科地圏環境工学専攻
〒464-8603 名古屋市千種区不老町
TEL: 052-789-2773, FAX: 052-789-3837
E-Mail: kato@genv.nagoya-u.ac.jp

*** 正会員 修(工) 日本技術開発(株)

る。手法の構築にあたっては、特に上記 2) の推計を可能とするために、環境負荷評価手法の中でも近年注目され、ISO14000 シリーズでもその適用が規定されている Life Cycle Assessment (LCA) のアプローチが有効であるため、これを応用する。さらに、地下鉄や路面電車を想定したケーススタディを実施し、これらの整備による CO₂ 削減効果について考察を試みる。

2 LCA とその交通インフラ評価への適用の考え方 -ELCEL 概念の導入-

LCA は、評価対象がその製造から維持管理を経て廃棄までのライフサイクル全体で発生する環境負荷を評価する方法である。もともと、LCA の適用対象は工業製品であったことから、標準的な LCA (ISO-LCA) では、環境負荷の計量範囲を、a) 評価対象自体と、b) その原材料および製造機械等から遡及的に発生する分、と想定することが一般的である。しかし、この想定範囲を新規鉄軌道整備にそのまま適用すると、可能な検討は原材料や施工法のみにとどまってしまう¹⁾。この問題は、交通インフラへの LCA 適用にあたって一般的に生じるものであり、インフラ LCA 研究における課題として常に位置づけられてきた²⁾。

そこで著者らは、LCA の交通インフラへの適用にあたって、評価範囲をインフラ整備によって波及的に生じる環境負荷にまで拡張した「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、道路整備の環境負荷評価への適用を試みている^{3), 4)}。本研究では、この ELCEL 概念を新規鉄軌道整備の環境負荷評価に応用し、整備による ELC-CO₂ (Extended Life Cycle CO₂) 変化を推計する手法を構築する。さらにこれを用いて、新規鉄軌道整備が CO₂ 排出削減策たりうるか否かを検討する。

なお、LCA の方法論には、単に CO₂ 排出量を求めるのみならず、あらゆる環境負荷を網羅的に算出し、それらを統合評価することまでが含まれる。しかし本論文においては、CO₂ 排出量 (ELC-CO₂) の推

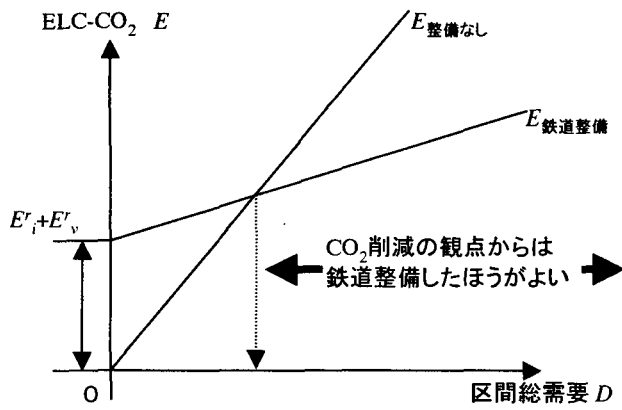


図1 区間総需要と ELC-CO₂ との関係

計に限定して LCA の考え方を適用している。

3 ELCEL 概念に基づく環境負荷評価指標の定義

本研究では、新規鉄軌道整備による ELC-CO₂ の増減として取り扱う範囲を、以下 i)、ii) のように設定する。

- i) 新規鉄軌道整備によって発生する ELC-CO₂
 - ・線路、駅等のインフラ建設・維持管理 (E_i)
 - ・鉄軌道車両製造・維持管理 (E_v)
 - ・鉄軌道運行によるエネルギー消費 (E_d)
- ii) 鉄軌道への転換による道路交通量減少に伴う ELC-CO₂ の減少 (ΔE_d^c)

以上より、新規鉄軌道整備に伴う ELC-CO₂ の変化は式(1)で表される。

$$E_{with} - E_{without} = E_i' + E_v' + E_d' - \Delta E_d^c \quad (1)$$

E_{with} (鉄軌道整備あり) と $E_{without}$ (鉄軌道整備なし) は多くの要因によって変化するが、特に整備区間の全交通機関の総輸送需要 D に大きく影響され、図1に示すように変化すると考えられる。需要がほとんどない場合には、鉄軌道整備自体による CO₂ 増加 ($E_i' + E_v'$) が相対的に大きくなるため、 E_{with} が大きい。しかし、鉄軌道が存在する場合は D が増加しても鉄軌道が一部を分担するため、 E_{with} の増加が小さくなる。そして、 D がある値を越えると両者の ELC-CO₂ は逆転する。このような D の値を求めることが、CO₂ 削減の観点から鉄軌道整備を評価するにあたって参考になる。

なお、式(1)による ELC-CO₂ の定義では、道路インフラ建設段階や自動車製造段階の CO₂ 排出は含まれていない。このことは、道路の新設・改良や、周辺地域の自動車保有台数変化が、鉄軌道整備とは無関係に生じることが仮定できる場合に成立する。また、鉄軌道供用後の道路混雑緩和や区間の利便性向上に伴う誘発交通が生じる場合には、各交通機関の輸送量変化に組み込む必要がある。

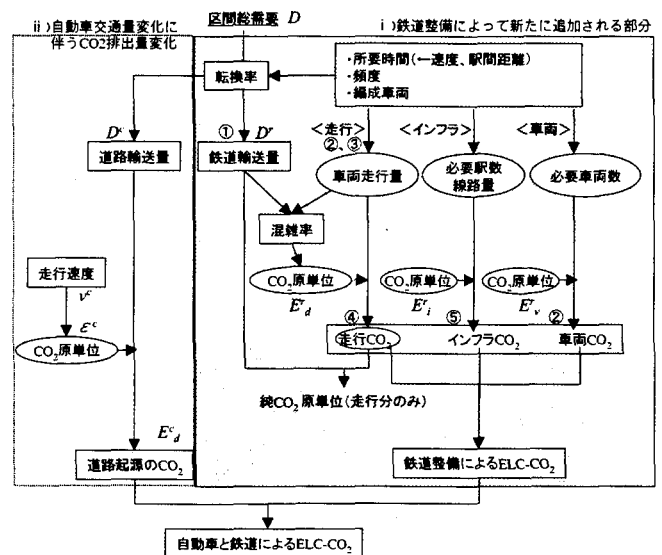


図2 ELC-CO₂ 推計のフローチャート

本研究の ELCEL 概念とほぼ同様の考え方で、松橋ら⁵⁾は路面電車整備による CO₂ の変化を試算している。しかし、この研究では幾つかの整備ケースを設定しているものの、新規路線の需要や整備状況の違いを変数として考慮可能な一般的定式化を行うには至っていない。本研究ではそれを可能とする手法を構築するものである。

4 ELC-CO₂ 推計モデルにおける想定と考え方

ELC-CO₂ の推計は、図2に示すフローチャートに従って行われる。基本的な考え方は、CO₂ 排出の原因となる各活動の量を推計し、それに CO₂ 排出量原単位を乗じて加え合わせる積み上げ法である。ただし、各 CO₂ 排出量原単位には、既往のインフラ LCA 研究でも一般的に用いられている内包原単位を利用する。内包原単位とは、単に対象とする製品の製造時のみならず、製品の原材料や製造機械等の投入物による排出も含めた原単位のことである。これは産業連関表を用いて計算することができ、CO₂ に関してはデータ整備も進んでいる。本研究でも既整備の内包原単位データ⁶⁾を利用して推計を行う。

ある2地点間について、従来は交通手段が道路のみであり、交通需要 D がすべて道路を利用していたのが、鉄軌道整備後に D' だけ転換したと仮定する。このとき、式(2)が成立する。

$$D = D' + D'' \quad (2)$$

D : 区間総需要量、 D' : 道路輸送量

D'' : 鉄軌道輸送量 (いずれも片道)

鉄軌道が整備されない場合の ELC-CO₂ 推計は図2のハッチがかかっていない部分 (ii) のみとなる。自動車の走行に伴う CO₂ 排出量は、区間総需要量

(人ベース)を自動車1台あたり平均乗車人員(1.3人を仮定)で除して台ベースに変換し、それに区間距離とCO₂排出量原単位を乗じて推計する。

一方、鉄軌道が整備されると、区間需要の一部が転換するとともに、鉄軌道のインフラや車両の建設・維持管理が発生するために、新たに図2のハッチの部分(i))を推計する必要が出てくる。鉄軌道の場合問題となるのは、事業者が輸送力(運行頻度・編成両数・車両定員等)を決定するため、輸送需要から実際の運行キロや運行効率(混雑率:自動車の場合の平均乗車人員に相当)を直接決定できない点である。そこで本モデルでは、以下に示す考え方によって、輸送力を規定する混雑率を政策変数として与えることを可能としている。

(1)鉄軌道の運行本数・必要車両数の内生的決定:

鉄軌道の必要車両数は、需要が最も多い時間帯における必要車両数から決定されることから、本研究では1日の運行時間を3区分し、鉄軌道需要の時間変動を考慮することで対応する(図2①)。必要車両数の決定により、車両製造および維持管理に伴うCO₂排出量を推計できる(図2②)。また、時間帯別の混雑率を外生的に設定することで、1日の総運行本数が決定される(図2③)。

(2)鉄軌道運行によるエネルギー消費量の推計:さらに、需要(混雑率)の時間変動によって車両重量が変動し、必要な牽引力とそのためエネルギー消費量が変動する。これを積み上げる形で1日の総エネルギー消費量が得られ、さらにエネルギー消費あたりCO₂排出量原単位を乗じることで、運行によるCO₂排出量が推計される(図2④)。

(3)鉄軌道インフラ整備量の内生的決定:インフラ建設においては、駅間距離や路線延長等から、駅数・線路量・車庫等のインフラの整備量が決定でき、そこから発生するCO₂が推計される(図2⑤)。

(4)ライフタイムの設定:LCAにおいては対象のライフタイム(使用年数)の設定が必要である。本研究では鉄軌道のライフタイム T_s として駅や線路等のインフラ施設の耐用年数(60年)を用いる。車両の耐用年数 T_v (20年)はこれより短いため、60年間に $60/20-1=2$ 回の車両更新を考慮する必要がある。

5 ELC-CO₂推計モデルの詳細

2地点間の鉄軌道整備を例とした推計モデルの具体的な定式化について示す。

なお、簡単のため、建設される鉄軌道は、複線電化で勾配はなく、駅間距離はすべて等しいと仮定する。乗客数は全断面・両方向で一定であると仮定し、誘発需要は生じないものとする。

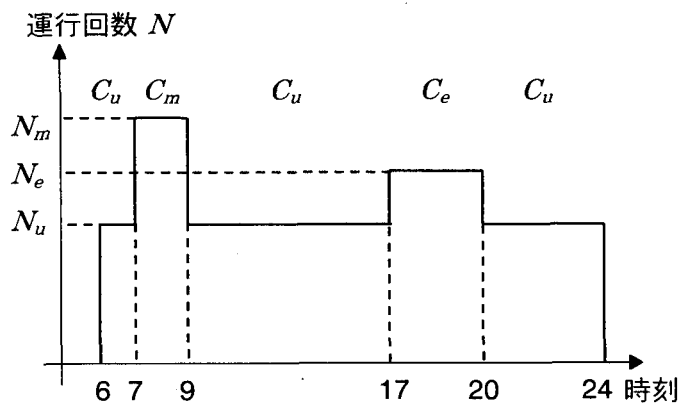


図3 運行回数および混雑率の時間変動

(1) 新規鉄軌道建設に伴う環境負荷(図2 i))

(a) 輸送量(需要)

本研究では、全交通需要は1日のうち6~24時の間に発生すると仮定し、鉄軌道もその時間帯で運行されると想定する。さらに時間帯を図3のように7~9時の朝ラッシュ時(m : morning)、17~20時のタラッシュ時(e : evening)、およびそれ以外の平常時(u : usual)、の3つの時間帯に分けて考える。

$$D'_i / D' = P_i \quad (3)$$

D'_i : 時間帯 i の1時間片道輸送量

P_i : 時間帯 i の輸送量比率

このとき、 $2P_m + 13P_u + 3P_e = 1$ が成り立つ。

(b) 輸送力(容量)と必要車両数

鉄軌道の可能輸送人員(輸送力)は、許容できる最大の混雑率 C_{max} 、及び1時間あたり片道運行本数 N_i を変数とした形で式(4)のように表される。

$$Q_i = N_i \cdot a \cdot b \cdot C_{max} \quad (4)$$

Q_i : 1時間あたり可能輸送人員(輸送力)

a : 1車両あたり乗車定員、 b : 編成車両数

輸送量は、朝のラッシュ時($i=m$)においてピークとなるため、輸送力もこれを満たすように設定するピーク時の1時間あたり片道輸送量 D'_m は、式(3)より、

$$D'_m = D' \cdot P_m \quad (5)$$

これを式(4)に代入し、 N について解くと、ピーク時1時間あたり片道運行本数 N_m は、

$$N_m = D'_m / (C_m \cdot a \cdot b) \quad (6)$$

となる(平行ダイヤを仮定)。この本数を走らせるのに必要な保有編成数 A は、回送運行がないものとする、

$$A = \frac{2(T+R)}{60/N_m} \quad (7)$$

T : 区間総所要時間、 R : 折り返し時間

なお、 $60/N_m$ はピーク時運転間隔[分]を意味する。

したがって、必要な車両数は $A \cdot b$ となり、さらにライフタイム T_s で必要な総車両数 X は、

$$X = A \cdot b \cdot T_s / T_v \quad (8)$$

T_v : 鉄軌道車両のライフタイム (耐用年数)

よって、鉄軌道車両製造に起因する CO_2 排出量 E_{vc} は、

$$E_{vc} = \varepsilon_{vc}^r \cdot X \quad (9)$$

ε_{vc}^r : 車両製造単価あたり内包 CO_2 排出原単位

x : 車両 1 両あたり製造単価

さらに、車両の維持に伴う CO_2 排出量 E_{vm} は、

$$E_{vm} = \varepsilon_{vm}^r \cdot m_v \cdot X \cdot T_s \quad (10)$$

ε_{vm}^r : 車両維持単価あたり内包 CO_2 排出原単位

m_v : 1 車両あたり年間維持費用原単位

式(9),(10)の結果を利用して、

$$E_v = E_{vc} + E_{vm} \quad (11)$$

(c) 運行本数

式(6)を用いると、ピーク時以外の時間帯 i についても、1 時間あたり片道運行本数 N_i が、混雑率 C_i を変数として同様に決定できる。その結果、1 日の片道合計本数 N は式(12)で表される。

$$N = 2 N_m + 13 N_u + 3 N_e \quad (12)$$

(d) 必要電力量 (運行エネルギー消費)

鉄軌道の運行によるエネルギー消費を推計する最も簡便な方法は、総走行人キロに人キロあたりエネルギー消費原単位を乗じることである。しかし、この方法では車両の混雑率 C_i の違いを考慮できないため、車両ベースで推計を行う必要がある。本研究ではさらに、エネルギーは鉄軌道車両の加速および定速走行時に消費されることから、加速・定速走行時間を車両の加減速性能や駅間距離から求めることで、加減速性能・駅間距離・所要時間の設定が CO_2 排出量に及ぼす影響の分析を可能とする方法を提案する。同時に、混雑率による車両の重量の違いも考慮されている。

まず、1 駅間における車両の速度 v と時間 t の関係を、図 4 のように加減速一定 (加速度: α) と仮定する。この図の台形の面積が駅間距離 l に相当することから、式(13)が導かれる。

$$\int_0^\tau v(t) dt = l \quad (13)$$

τ : 駅間所要時間 ($t_1 + t_2 + t_1$)

この左辺 (台形の面積) は $(t_1 + t_2) \cdot \alpha t_1$ である。 $t_2 = \tau - 2t_1$ を代入すると、 t_1 についての 2 次式(14)が導かれる。

$$\alpha t_1^2 - \alpha \tau t_1 + l = 0 \quad (14)$$

この式を t_1 について解くと

$$t_1 = \frac{\alpha \tau + \sqrt{(\alpha \tau)^2 - 4 \alpha l}}{2 \alpha} \quad (15)$$

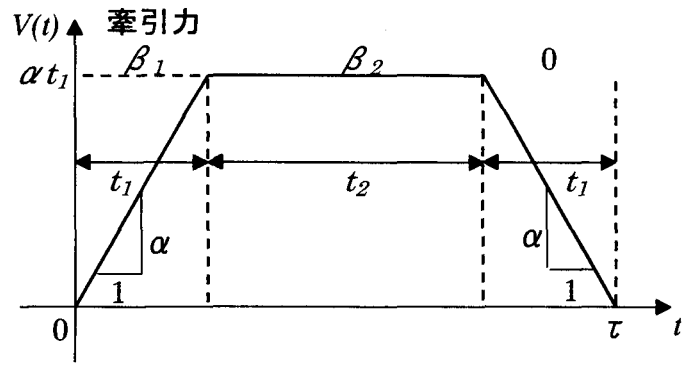


図 4 駅間の運行速度変化の想定

$$t_2 = \tau - 2t_1 \quad (16)$$

が得られ、 t_1, t_2 が α, τ, l で表される。なお、区間総所要時間 t_t は、

$$t_t = \tau (S - 1) + t_b (S - 2) \quad (17)$$

S : 駅数、 t_b : 途中駅停車時間

となる。

電車が牽引されて電力を消費するのは、列車が加速、あるいは定速走行している時である。このときの牽引力は式(18),(19)で表される。

$$\beta_1 = (W_i \cdot b) \alpha \quad \text{＜加速時＞} \quad (18)$$

$$\beta_2 = (W_i \cdot b) \mu g \quad \text{＜定速走行時＞} \quad (19)$$

W_i : 時間帯 i の 1 両あたり総重量

μ : 列車の動摩擦係数、 g : 重力加速度

なお、 W_i は 1 両あたり乗客数 $C_i \cdot a$ を用いて、

$$W_i = W_s + \gamma \cdot C_i \cdot a \quad (20)$$

W_s : 1 両あたり自重、 γ : 乗客の平均体重

1 駅間での、牽引力による消費電力は、回生がないとすると、

$$Y_i = (w \cdot \beta_1 \cdot t_1) + (w \cdot \beta_2 \cdot t_2) \quad (21)$$

Y_i : 時間帯 i における 1 編成あたり消費電力量

w : 牽引力あたり消費電力

したがって、1 日の電力消費による CO_2 排出量は、

$$e_{ed}^r = \varepsilon_{ed}^r \cdot \sum_i \{ (S - 1) \cdot (2N_i) \cdot Y_i \} \quad (22)$$

ε_{ed}^r : 電力消費あたり内包 CO_2 排出原単位

となり、さらに鉄軌道のライフタイム T_s [年] における CO_2 排出量 E_d は、

$$E_d = 365.25 \cdot T_s \cdot e_{ed}^r \quad (23)$$

となる。

(e) 必要インフラ量

路線長 F と駅間距離 l より、必要駅数 S は、

$$S = F / l + 1 \quad (24)$$

これらの鉄軌道インフラ建設に要する費用 F は、

$$F = G \cdot F + H \cdot S + J \quad (25)$$

G : 駅間部分の延長あたり建設費用

H : 駅部分の 1 駅あたり建設費用

J : その他諸費用 (車庫建設費等)

一般に駅部分は駅間部分に比べて高コストであ

り、この式(25)ではそれを表現することが可能である。しかしながら本研究では、 G, H, J に関するデータが得られなかったため、単純に

$$F = G' \cdot F \quad (25)'$$

G' : (駅間・駅部分を含めた) 延長あたり建設費用

という形で計算を行っている。

以上から、ライフタイム T_s における、インフラ建設に起因する CO_2 排出量 E_{ic} は、

$$E_{ic} = \varepsilon_{ic} \cdot F \quad (26)$$

ε_{ic} : インフラ建設単価あたり内包 CO_2 排出原単位

また、インフラの維持管理に伴う CO_2 排出量 E_{im} は、式(10)と同様に、

$$E_{im} = \varepsilon_{im} \cdot m_i \cdot F \cdot T_s \quad (27)$$

ε_{im} : インフラ維持管理単価あたり内包 CO_2 排出原単位

m_i : インフラ量あたり年間維持管理費用原単位
式(26),(27)より

$$E_i = E_{ic} + E_{im} \quad (28)$$

となる。

(2) 自動車交通量変化に伴う CO_2 排出量変化 (図 2 ii))

鉄軌道整備が行われる以前は、区間需要 D がすべて自動車によって行われていたので、

$$E_{without} = D \cdot \varepsilon^c(v_{without}) \cdot L^c \quad (29)$$

$\varepsilon^c(v)$: 平均速度 v のときの、走行による台キロあたり内包 CO_2 排出原単位

L^c : 道路延長

鉄軌道整備により、自動車交通量が D から D' に変化することから、

$$E_{with} = D' \cdot \varepsilon^c(v_{with}) \cdot L^c \quad (30)$$

式(29),(30)より、鉄軌道整備による自動車起源の CO_2 排出量の変化分は、

$$\begin{aligned} \Delta E_d &= E_{without} - E_{with} \\ &= D \cdot \varepsilon^c(v_{without}) \cdot L^c - D' \cdot \varepsilon^c(v_{with}) \cdot L^c \quad (31) \end{aligned}$$

なお、 $\varepsilon^c(v)$ の式として、参考文献 7)で示されている乗用車燃費曲線を、参考文献 6)の原単位データを用いて内包 CO_2 排出原単位に変換したものを用いている。

以上より、式(1)で定義した新規鉄軌道整備に伴う ELC- CO_2 変化は、式(11),(23),(28),(31)で推計された各項の値を代入することで求められる。本モデルにより、新規鉄軌道整備における以下の変数設定が検討可能である。

a)交通需要: 区間総需要 (D) / 鉄軌道への転換率 (D'/D) / ピーク率 (P_m)

b)車両性能・仕様: 耐用年数 (T_v) / 加減速性能 (α) / 定員 (a)・編成車両数 (b)

c)鉄軌道整備計画: 駅間距離 (l)

d)運行計画: 所要時間 (t_i) / 頻度 (N) / 混雑率 (C)

6 新規鉄軌道整備による ELC- CO_2 変化のモデル分析

(1) モデル分析の内容および仮定

本論文では、モデルによる試算例として、ある仮想区間(道路距離 8[km])を考え、これに並行する地下鉄および路面電車を新たに建設した場合の ELC- CO_2 変化を推計し、モデルの機能を示す。

この試算を大きく左右する設定変数は、当該区間の交通状況が鉄軌道整備の前後でどのように変化するかを表す、a)区間総需要、b)鉄軌道への転換率、c)自動車走行速度、である。本論文の試算対象は仮想区間であるため、a),b),c)各変数の推計に必要な分布交通量予測モデル、機関分担率モデル、交通量－速度関係式(Q-V式)のそれぞれについて、何らかの仮想的な設定を行う必要がある。本研究ではこれら各モデルの設定は困難であるため行わない代わりに、以下の想定によるモデルの感度分析を試みる。

・a)および b)の違いが鉄軌道整備に伴う ELC- CO_2 変化にどのような影響をもたらすかに関する感度分析を行う。このとき a)区間総需要の鉄軌道整備による誘発は生じず、c)自動車走行速度も整備前後で変化しないと仮定する。((2)節)

・鉄軌道整備前後で c)自動車走行速度は変化しないものの、a)区間総需要が誘発される場合を考え、どの程度の誘発需要が生じると、鉄軌道整備に伴う ELC- CO_2 削減効果が打ち消されるかに関する試算を行う。((3)節)

・鉄軌道整備前後で a)区間総需要の鉄軌道整備による誘発は生じず、b)鉄軌道に一定割合が転換し、c)自動車走行速度が向上する場合を想定し、走行速度の向上が ELC- CO_2 変化に与える影響の感度分析を行う。((4)節)

なお、自動車走行速度を外生的に与えていることから、自動車交通量変化に伴う CO_2 排出量変化の推計においては、自動車走行速度の時間帯別変化は扱わず、1日平均の速度を用いている。

鉄軌道インフラや車両の建設・維持管理費用、混雑率や運行頻度等に関しては、名古屋市交通局地下鉄線や札幌市交通局軌道線のデータを参考に、表 1 のように設定している。この値では、路面電車は地下鉄に比べ a)車両は小さく性能もやや劣る、b)電停数が多いため加減速が繰り返され、走行時の CO_2

表 1 分析で用いたデータ設定

車両

項目	変数	地下鉄	路面電車
耐用年数[年]	T_v	20	20
乗車定員[人/両]	a	103	62
編成車両数[両/編成]	b	6 (4)	2
車両単価[億円/両]	x	1.22	0.7
車両維持費[百万円/両/年]	m_v	100	10
自重[t/両]	W_s	23.8	18
乗客の平均体重[kg]	γ	60	60
最大牽引力[N/両]	β_1	29,167	9,600
モーター出力[kW/両]	$w\beta_1$	200	80
摩擦係数	μ	0.01	0.01
定速時の速度[km/h]	α_{tl}	60	30
加速度性能[km/h/s]	α	3.5	3

路線

項目	変数	地下鉄	路面電車
路線長[km]	L_r	6.2	8
駅(電停)数	S	7	17
駅(電停)間距離[km]	l	1.067	0.500
駅(電停)停車時間[s]	t_b	30	20
折り返し時間[s]	R	300	300
朝ラッシュ混雑率[%]	C_m	200 (150)	150
日中混雑率[%]	C_u	80 (60)	60
タラッシュ混雑率[%]	C_e	160 (120)	120

インフラ

項目	変数	地下鉄	路面電車
使用年数[年]	T_s	60	60
建設費用[億円/km]	G'	150	23.3
維持費用[億円/km/年]	m_i	0.94	—

道路交通

項目	変数	地下鉄	路面電車
走行速度<整備なし> [km/h] (6章(1)で使用)	$v_{without}$	20	20
走行速度<整備あり> [km/h] (6章(1)で使用)	v_{with}	20	15(併用) 20(専用)
自動車平均乗車人数 [人/台]	I_c	1.3	

※地下鉄における()内の数値は、地下鉄と路面電車の比較の際に用いた値である。これは、両者の輸送力が大きく異なり、混雑率を高くすると地下鉄の運行頻度が非常に小さくなってしまったため、別途設定したものである。

が多くなる、c)インフラ費用は圧倒的に小さく、それに伴う CO_2 も小さくなる、という設定となっている。

また、内包 CO_2 原単位に関しては、文献 6)で示されている 1990 年の値を適用している。技術革新等による将来の排出原単位改善を加味した分析を行う場合には、この原単位を変化させることが必要である。また、地下鉄・路面電車の区分が存在しないため、便宜上、いずれについても「鉄道軌道建設 (ε_{ic}^r , ε_{im}^r)」「鉄道車両 (ε_{vc}^r)」「鉄道車両修理 (ε_{vm}^r)」の原単位を適用している。

(2) 区間総需要・鉄軌道への転換率の感度分析

鉄軌道整備に伴う区間総需要の誘発や自動車走

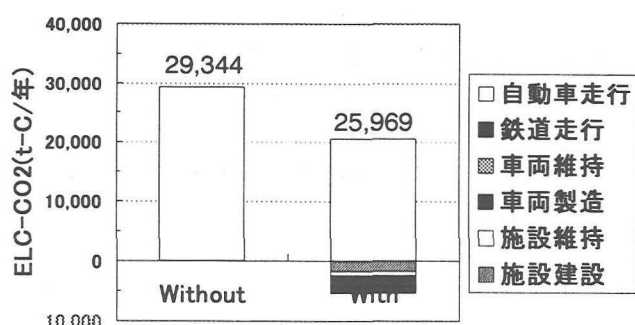


図 5 地下鉄整備前後での ELC- CO_2 変化
(区間総需要 20 万人/日、地下鉄への転換率 30%)

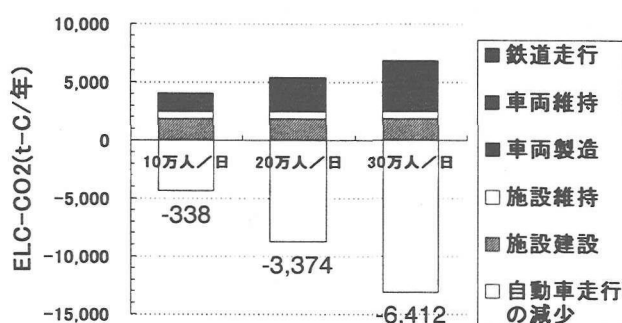


図 6 地下鉄整備前後での ELC- CO_2 増減と
その内訳 (地下鉄への転換率 30%)

行速度の変化が生じない(設定値は表 1 参照)という仮定の下で、区間総需要や鉄軌道への転換率の違いが ELC- CO_2 変化に与える影響を試算する。

(a) 地下鉄整備

図 5 は、区間の総輸送需要が(全断面を通して)20 万[人/(日・片道)]あり、地下鉄建設によってその 30% (6 万[人/(日・片道)])が転換する場合の、ELC- CO_2 変化の試算結果である。建設しない場合(without)に比べ建設する場合(with)の方が、ライフタイムで約 12%削減されていることが分かる。地下鉄インフラや車両の建設・維持管理分を除いた場合(つまり自動車走行+地下鉄走行分のみ)では削減率は約 23%となることを考えると、インフラや車両起源の部分が無視できない値であることが分かる。なお、地下鉄を整備した場合、地下鉄起源の ELC- CO_2 は全体の約 2 割を占めている。

次に図 6 は、対象区間の総輸送需要を 10 万[人/(日・片道)]、20 万[人/(日・片道)]、30 万[人/(日・片道)]と変化させ、地下鉄への転換率をいずれも 30%とした場合の ELC- CO_2 増減を試算したものである。この結果から、1)総輸送需要が大きいほど ELC- CO_2 の減少量が大きいこと、2)総輸送需要が小さい場合、地下鉄整備による自動車走行 CO_2 の減少は地下鉄起源 CO_2 の増加分と拮抗すること、3)地下鉄起源分の中で大きいのは走行とインフラ建設によ

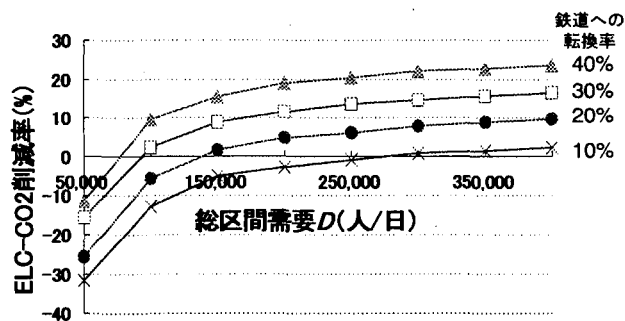


図7 区間総需要・地下鉄への転換率と ELC-CO₂ 削減率との関係

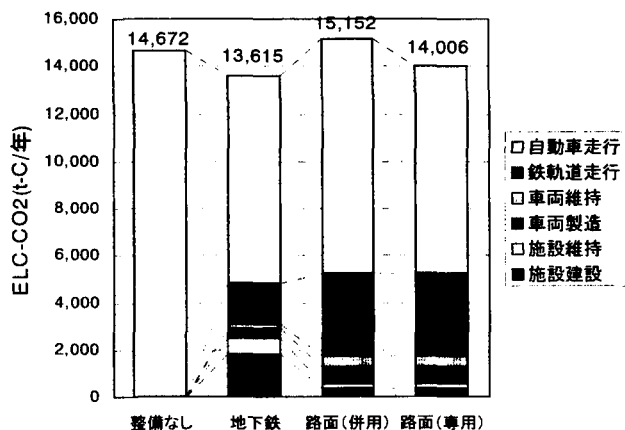


図8 地下鉄・路面電車整備による ELC-CO₂ 変化 (区間総需要 10 万人/日、鉄軌道への転換率 40%)

る分であること、が分かる。(なお、インフラ建設・維持管理分は、整備するインフラがいずれの場合も同じであるため変化しない。)

さらに図7は、区間総需要と ELC-CO₂ 削減率との関係を、地下鉄への転換率 (10%, 20%, 30%, 40%) ごとに試算したものである。これを見ると、1)区間需要が少ないと、転換率が大きくても ELC-CO₂ が削減されないことや、2)区間需要が増加するにつれ削減率は増加するものの、しだいに頭打ちになる傾向があることが分かる。なお、図7の結果から、ELC-CO₂ 削減率がゼロとなる地下鉄輸送量が、曲線と横軸との交点における区間総需要に転換率を乗じた値として推計できるが、その値は転換率によらず 25,000~30,000[人/(日・片道)]程度であることが分かる。日本の3大都市圏の地下鉄では大部分がこの値を上回っているものの、一部路線や末端区間では下回るところもある。

(b) 地下鉄と路面電車の比較

図8は、同じ区間で、総需要 10 万[人/(日・片道)]として、地下鉄・路面電車整備によって 40%が転換されると想定した場合の ELC-CO₂ 変化推計結果である。これを見ると、地下鉄整備の場合には約 7%

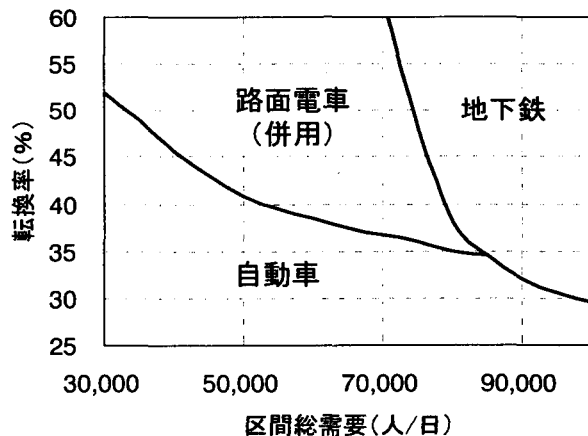


図9 区間総需要と転換率による ELC-CO₂ 最小交通機関の違い

削減される一方、路面電車を併用軌道で建設した場合には、逆に約 3%増加する結果となっている。この原因として、a)加減速回数が多いことや1本あたり輸送量が小さいことから、輸送人キロあたり電力消費が地下鉄に比べて大きいこと、b)軌道を路上に確保することによって道路の自動車走行速度が低下するという想定のため、自動車燃費が悪化し、自動車走行分の減少が抑制されること、が挙げられる。なお、総輸送需要 10 万[人/(日・片道)]の場合には約 49%が路面電車に転換しないと ELC-CO₂ は削減されないと推計される。このとき、朝ラッシュ時の運行本数は2両編成で 40[本/時]にも達する。

また、路面電車を既存道路とは別の専用軌道で整備した場合には、自動車走行速度低下は生じないため、整備なしに比べ約 5%の削減となっている。

さらに図9は、区間総需要と転換率の違いによって、地下鉄・路面電車を整備した場合としない場合とでいずれの場合が ELC-CO₂ 最小となるかを、モデル推計結果を利用して領域に示したものである。この結果から以下のことが示される。

- 区間総需要が 70,000[人/(日・片道)]以下の場合では、路面電車と自動車との選択になる。ただし、路面電車が ELC-CO₂ 最小となるためには、30,000[人/(日・片道)]では約 52%、50,000[人/(日・片道)]では約 41%という高率の転換が必要である。
- 一方、区間総需要 80,000[人/(日・片道)]以上では地下鉄と自動車の選択になる。この場合、転換率 35%以下で地下鉄が ELC-CO₂ 最小となる。

(3) 区間総需要の誘発効果の感度分析

表2は、鉄軌道整備後に区間総需要の誘発が生じて道路輸送量の減少が抑制される場合、どの程度の誘発需要が生じると ELC-CO₂ 削減効果がゼロとな

表2 鉄軌道を整備しても ELC-CO₂削減量が
ゼロとなるような需要誘発量
(転換前の総需要に対する道路需要誘発量の割合[%])

上段：地下鉄／下段：路面電車（専用軌道）

総輸送需要 [人/(日・片道)] 地下鉄 への転換率[%]	10万	20万	30万
10	—	—	1.0
20	—	1.7	2.3
30	3.5	4.9	7.8
40	7.0	9.0	14.9
	10.6	12.6	13.2

※「—」は、誘発が起こらなくても（0%）整備後の ELC-CO₂ が上回っている場合を表す。

るかを試算した結果である。表内の値は、道路輸送の減少抑制量を転換前の総需要に対する比率として表したものである。試算にあたっては(2)と同様に表1のデータを用いており、自動車走行速度は変化しないと仮定している。実際には自動車走行速度が上昇して燃費が向上することから、表2の試算値は過小推計になっている。

この結果から、a)鉄軌道への転換が生じても、誘発需要によって道路輸送量減少がその半分程度になるとときには、ELC-CO₂はむしろ増加してしまう、b)総輸送需要や転換率が小さいときほど、より少ない誘発需要でも ELC-CO₂削減効果が生じない傾向にある、ことが分かる。また、地下鉄と路面電車との比較では、総輸送需要や転換率が小さい場合、すなわち鉄道への転換量が少ない場合ほど、路面電車の方がより多くの誘発交通量でも ELC-CO₂削減効果が大きくなる傾向にある。これは、(2)(b)における比較結果からも言えることである。

(4) 鉄軌道への転換に伴う自動車走行速度上昇の
感度分析

ここまでの試算では、鉄軌道への転換によって道路輸送量が減少するにもかかわらず、自動車走行速度は変化しないことを仮定してきた。しかし実際には、自動車走行速度の上昇によって燃費が改善され、自動車走行に伴う CO₂ 排出がさらに減少する効果が生じる。この効果を試算した結果が表3である。これは図5と全く同じ条件、すなわち区間総需要20万[人/(日・片道)]、地下鉄への転換率30%の場合の試算である。太枠で囲んだ部分が図5の結果に相当する。この表から、自動車走行速度上昇に伴う ELC-CO₂削減効果は、1[km/h]の上昇あたり1~2%存在していることが分かる。なお、速度が20[km/h]から25[km/h]、30[km/h]に上昇した場合の効果を

表3 地下鉄整備前後での自動車走行速度
の変化と ELC-CO₂削減率との関係
(区間総需要20万人/日、地下鉄への転換率30%)

単位：%

整備前の速度 整備後の速度[km/h]	10	15	20	25
10	16.3			
15	26.8	13.9		
20	33.7	21.9	11.8	
25	38.8	28.0	18.6	9.8
30	43.0	32.9	24.1	15.9

転換率に換算すると、それぞれ9.3%、17.1%の追加的な上昇が必要となる。このことから、走行速度上昇の効果は無視できないことが示唆される。しかし実際には、同時に(3)で扱った輸送需要の誘発効果も同時に生じることから、この両者の影響が互いに打ち消し合い、いずれが卓越するかはその地域の状況に大きく依存するものと考えられる。以上の影響を定量的に把握するためには、誘発需要量を推計するための分布交通量予測モデルや、速度上昇量を推計するための Q-V 式の組み込みが必要であり、実際のケースについて本研究の評価手法を適用する場合には、この部分について注意深く検討する必要があると言える。

7 むすび

本研究では、新規鉄軌道整備に伴う CO₂ 排出量変化の評価を、従来の LCA における評価範囲を拡張した ELCEL（走行+車両+インフラ）で行うための考え方を整理し、さらに仮想の区間を対象とした推計モデルを構築し試算を実施した。推計モデルでは、検討可能な変数が交通需要、車両性能・仕様、鉄軌道整備計画、運行計画といったさまざまな側面に関連し、それらの大多数は計画段階で予測・想定されるものであることから、鉄軌道整備計画を CO₂ の観点から LCA 的に評価する簡便なツールとしての利用が可能となっている。

定式化されたモデルを適用して、まず、鉄軌道整備に伴って輸送需要誘発や自動車走行速度上昇が生じない場合を想定して、区間需要量や鉄軌道への転換率に関する感度分析を行った。その結果、1)鉄軌道整備による ELC-CO₂減少は鉄軌道の走行やインフラ建設によって相殺され、その量は無視できないことが分かった。また、2)地下鉄整備の場合、ELC-CO₂が減少するためにはおおむね30,000[人/(日・片道)]以上が転換することが必要であると推計された。さらに、3)地下鉄・路面電車・自動車の比較では、区間総需要が70,000[人/(日・片道)]以下

と小さい場合の ELC-CO₂ は、高率の転換が生じれば路面電車が、生じなければ自動車が最小となること、一方、区間総需要 80,000[人/日]以上と大きい場合は路面電車に代わって地下鉄が ELC-CO₂ 最小となること、が推計できた。以上のように、本モデルを用いることで、ELC-CO₂ 削減の観点からの最適な交通機関選定が可能となっている。

さらに、輸送需要誘発や自動車走行速度上昇によって生じる ELC-CO₂ 変化を試算したところ、いずれも大きな影響を与えることを明らかにし、これらの現象が卓越すると考えられる状況ではその考慮が必要不可欠であることを示した。なお、輸送需要誘発と自動車走行速度上昇の ELC-CO₂ 変化に対する影響は同時にかつ相反する効果を生じるため、各影響の把握が評価結果を大きく左右するおそれがある。併用軌道の場合、軌道が道路を占有することによる自動車走行速度の低下量についても検討が必要である。以上に関する本モデルでの取り扱いは、今後の課題とする点である。

他の検討課題としては、

- 1) バス・新交通システムといった他の都市内公共交通機関や、新幹線と高速道路の比較への本モデルの適用
- 2) 交通計画において輸送機関選定の目安として一般に用いられる、輸送能力（容量および距離）による基準や、採算性による基準と、本研究で示された ELC-CO₂ による基準との比較

3) LCA で本来扱うことが想定されている、CO₂ 以外の各種環境負荷についても推計を行い、環境負荷の統合評価を可能とする方法の開発が挙げられる。

参考文献

- 1) 岩渕省・四宮明宣・中嶋芳紀・松本亨・井村秀文：地下鉄整備のライフサイクル環境負荷に関する研究、環境システム研究 No.25、pp.209-216、1997.
- 2) 盛岡通：土木建設システムにおける LCA の考え方と事例、第 4 回地球環境シンポジウム講演集、pp.29-34 1996.
- 3) 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.
- 4) 中村英樹・加藤博和・丸田浩史・二村達：都市間高速道路の横断面構成の相違による CO₂ 排出量のライフサイクル評価、環境システム研究 No.26、pp.261-270 1998.
- 5) 松橋啓介・森口祐一・近藤美則：都市内交通手段としての路面電車に関するライフサイクル評価、第 14 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集、pp.67-72、1998.
- 6) 近藤美則・森口祐一：産業連関表による二酸化炭素排出原単位、国立環境研究所地球環境研究センターレポート、1997.
- 7) 東京都環境保全局：車種別速度別排出係数、都内自動車走行量及び自動車排出ガス量算出調査報告書、1996.

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

加藤博和・大浦雅幸

本研究は、環境負荷計測手法として近年注目されている Life Cycle Assessment を社会資本整備評価に適用するために拡張した「ELCEL(Extended Life Cycle Environmental Load)概念」を用いて、新規鉄軌道整備による CO₂ 排出量変化を定量的に評価する手法を構築し、交通需要・車両性能・運行計画の違いによって、鉄軌道整備が CO₂ 排出削減政策として成り立ち得るかどうかを示すことを目的としている。モデルを用いた試算の結果、1)鉄軌道整備による削減効果に比べ、その整備・維持管理による排出が無視できない値であること、2)誘発需要や自動車走行速度改善効果がないと仮定すると、地下鉄整備では 30,000[人/日・片道]程度の需要がないと排出削減にならないこと、3)同様に、路面電車整備では区間総交通需要が小さく転換率が大きい場合のみ排出削減となること、が明らかになった。

Life Cycle Assessment of the Change in CO₂ Emission by Providing Railway Systems

by Hirokazu KATO and Masayuki OHURA

This paper describes a methodology which evaluates the change in CO₂ emission by providing railway systems. The model is developed employing a concept of “ELCEL (Extended Life Cycle Environmental Load)”, which is an application of the Life Cycle Assessment to utilization of infrastructure. This model can consider various combinations among travel demand, train performance and operation plans. The estimated results suggest that 1) additional emission by railway construction and maintenance work is noticeably large compared with the expected emission reduction by modal shift from car to rail, 2) to reduce emission by subway provision, travel demand over 30,000 person /day is required, 3) tram provision can reduce emission only when travel demand is small and the ratio of modal shift from car to rail is high.