

177. ライフ・サイクル・アセスメントの考え方に基づく

新規鉄道整備による環境負荷変化の評価手法の開発

[土] ○加藤博和 (名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻)

大浦雅幸 (名古屋大学大学院工学研究科地圏環境工学専攻)

An Evaluation Method Based on Life Cycle Assessment
of the Change in Environmental Load due to Railway Construction

Hirokazu Kato, Masayuki Ohura (Nagoya University)

Abstract

Railways are assumed to be a transportation system with less CO₂ emission than other transportation means such as automobiles. However, it is only an assumption based upon the present situation of railway operation, and therefore, further development of railway system does not necessarily assure the decrease in the total amount of CO₂ emission. In this research, a methodology for evaluating the change in CO₂ emission due to railway construction will be developed. The methodology will be formulated by applying the concept of 'Life Cycle Assessment', with consideration of both the increment due to railway infrastructure provision and decrement due to the shift of demand from car to railway.

キーワード：環境負荷、CO₂排出、LCA、新規鉄道整備、鉄道運行計画

(Environmental load, CO₂ emission, Life Cycle Assessment, Railway construction, Train Operation Planning)

1. はじめに

自動車から鉄道へのモーダルシフト施策を環境面から理由づけるものとして、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が、これはあくまでも運行実績に基づくデータであり、新規鉄道整備によって環境負荷が削減されることを必ずしも保証するものではない。利用者が少なければ、輸送効率も悪くなり、その結果、既存の鉄道に比べ排出量原単位が悪化してしまう。さらに、鉄道整備自体も多く環境負荷を生じる活動であることも忘れてはならない。ゆえに、新規鉄道整備を環境面から包括的に評価するためには、鉄道の利用・運行状況による違いや、インフラ建設・維持管理および車両製造等に伴う環境負荷の考慮が必要である。そこで本研究では、新規鉄道整備の計画段階においてこのような評価を可能とする方法として、近年、環境負荷評価手法の中でも注目されている Life Cycle Assessment (LCA)を応用し、新規鉄道整備によるCO₂排出量変化を評価するための方法論を構築することを目的とする。

2. LCAの考え方とその交通インフラ評価への適用

LCAは、評価対象が製造から維持管理、廃棄というラ

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。しかし、LCAはもともと工業製品を対象としたものであったため、標準的なLCAでは、評価対象自体とその原材料、および製造機械から発生する分のみを評価することになっている。これだと、新規鉄道整備の評価は、その原材料や施工法の検討のみにとどまってしまう。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。¹⁾²⁾

本研究では、ELCELの概念を新規鉄道整備に応用し、整備によるELC-CO₂(Extended Life Cycle CO₂)を推計する手法を構築する。これを用いて、新規鉄道整備がCO₂排出削減策たりうるか否かを検討する。

3. 拡張LCA概念に基づいた評価指標の定義

新規鉄道整備によるELC-CO₂の増減は、i)新規鉄道整備によって新たに発生する分、ii)道路交通量の減少に伴う減少分、の2点をともに考慮すべきである。本研究では、i)、ii)で取り扱う範囲を以下のように設定する。

- i) 新規鉄道整備によって発生するCO₂排出量
- ・線路、駅等のインフラ建設によるCO₂排出 (E_i: 鉄道インフラ建設段階)

- ・鉄道車両製造による CO₂ 排出 (E_v : 鉄道車両製造段階)
- ・鉄道サービス供給による CO₂ 排出 (E_d : 鉄道運営段階)

ii) 道路交通量の減少に伴う ELC-CO₂ の減少 (ΔE_d : 道路利用段階)

以上より、新規鉄道建設による ELC-CO₂ の変化は式 (1) で表される。

$$E_{\text{鉄道整備}} - E_{\text{整備なし}} = E_v' + E_d' - \Delta E_d^c \quad (1)$$

$E_{\text{整備なし}}$ と $E_{\text{鉄道整備}}$ は多くの要因に影響を受けるが、特に整備区間の輸送需要 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。区間需要がほとんどない場合には、鉄道整備自体による CO₂ 増加 ($E_v + E_d$) が非常に大きくなる。しかし、 D が増加すると鉄道が整備された場合には、鉄道への転換が生じるため、 E の増加は整備なしに比べ小さい。そして、 D がある値を越えると、 $E_{\text{整備なし}}$ と $E_{\text{鉄道整備}}$ の値が逆転する。このような D の値を求めることが、CO₂ 削減の観点から鉄道整備を評価するにあたり、大いに参考になると考えられる。

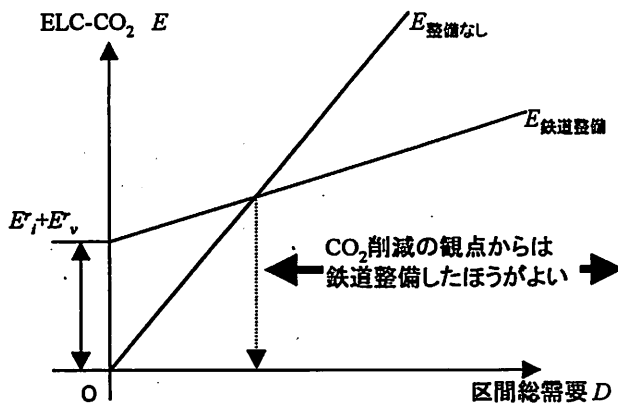


図 1 区間総需要と ELC-CO₂ との関係

式 (1) 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。これは、鉄道整備の際に道路の新設・改良を伴わないことや、周辺地域の自動車保有台数が変化しないことが仮定できる場合に成立する。また、簡単のため、本研究の定式化では、鉄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は考慮しない。これが大きく見込まれる場合には、各交通機関の輸送量変化に組み込む必要がある。

以上とほぼ同じ考え方で、松橋ら²⁾は路面電車整備による CO₂ の変化を LCA 的に評価している。しかし、この研究ではいくつかの整備ケースについて試算を行っているものの、新規鉄道需要や整備状況の違いを考慮可能な、一般的定式化を行うには至っていない。本研究では鉄道 (軌道も含む) を対象にそれを行おうとするものである。

4. 試算における想定と考え方

ある 2 地点間について、従来は交通手段が道路のみ (距離 l) であり、交通需要 D がすべて道路を利用していたのが、鉄道 (距離 l') 整備後に鉄道に D' だけ転換したと仮定する。このとき誘発需要は生じないので、式 (2) が成立している。

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

D : 区間総需要、 D' : 道路輸送量、

D'' : 鉄道輸送量 (いずれも片道)

簡単のため、鉄道は複線で勾配はなく、駅間距離はすべて等しいと仮定する。

交通需要には時間的な変動があるが (図 2、4.2 節の①)、需要が最も多い時間帯において必要となる車両数から、車両製造過程での CO₂ 排出量が決定される。一方、需要の時間変動を考慮して 1 日の運行本数 (本研究では平行ダイヤを仮定する) が決定できる (③)。

次に、需要の時間変動を受けて混雑率、そして車両重量が変動し、運行エネルギーが変動する。このエネルギーを積み上げる形で 1 日の輸送エネルギーが得られ、エネルギーあたりの CO₂ 排出量原単位を乗じることで、運行による CO₂ 排出量が求まる (④)。

また、鉄道インフラ建設においては駅間距離、路線延長などから、駅数や路線量、車庫などの施設といったインフラが決定でき、そこから発生する CO₂ 排出量が求まる (⑤)。

なお、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。本研究では鉄道のライフタイムとして駅や線路等のインフラ施設の耐用年数 (T_b) を用いる。車両の耐用年数 (T_v) はこれより短いと考えられることから、 T_b/T_v 回の車両の更新を考慮する必要がある。

一方、自動車交通は、鉄道に転換した分だけ需要が減り、かつ、速度も上昇することで、CO₂ 排出量が変化する。

5. 具体的な計算方法

i) 新規鉄道建設に伴う環境負荷

①輸送量 (需要)

輸送量は時間帯による変動があり、この需要を満たすように列車本数を決定しなくてはならない。そこで 1 日の運行時間を 6 時から 24 時までと仮定し、時間帯を図 3 のように、7 時～9 時の朝ラッシュ時 (m : morning)、17 時～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 つに分けて考える。

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

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。

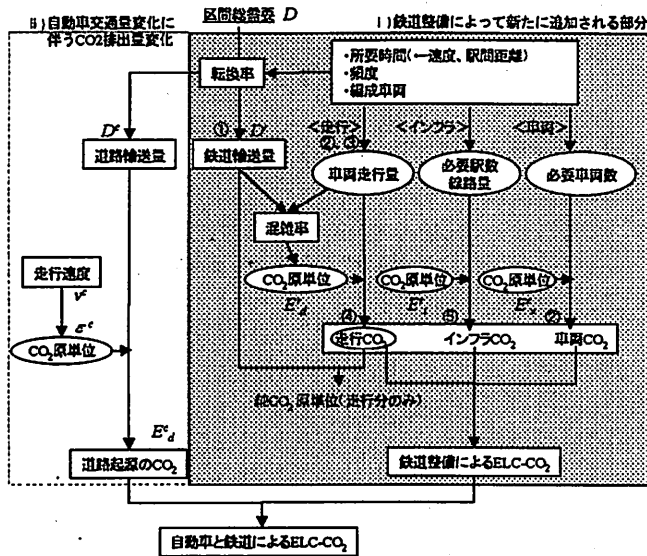


図2 試算の概略フローチャート

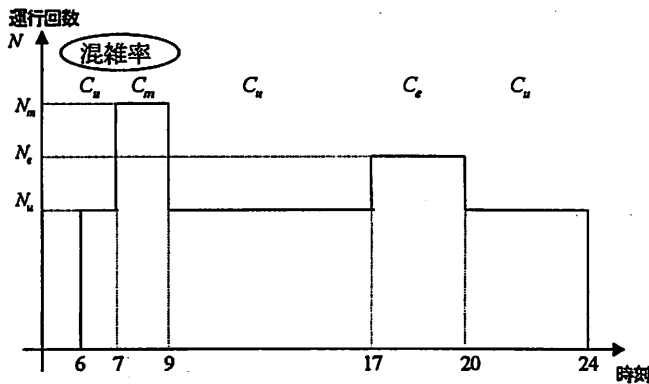


図3 運行回数および混雑率の時間変動

②輸送力と必要車両数

鉄道にはインフラや車両によって供給できる輸送容量（輸送力）があり、①で想定された輸送量を満たすことが可能なように輸送力を設定することが必要となる。鉄道の可能輸送人員（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（ morning ）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。朝のピーク時の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、

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

この列車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、

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

よって、車両の製造に起因する CO_2 排出量 E_v は、

$$E_v = \varepsilon'_v \cdot x \cdot X \quad (9)$$

ε'_v : 鉄道車両の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

なお、「内包」原単位とは、単に製造時のみならず、製品の原材料や製造機械等の投入物による CO_2 排出も含めた原単位であり、産業連関表を用いて計算することができ、既にデータが整備されている⁴⁾。

さらに車両の維持に伴う CO_2 排出量 E_{vm} は、

$$E_{vm} = \varepsilon'_{vm} \cdot m_v \cdot X \cdot T_s \quad (10)$$

m_v : 1車両あたり年間維持費用原単位

式 (9)、(10) より、

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

③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。

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

④必要電力量（運行エネルギー消費）

鉄道の運行によるエネルギー消費を推計する最も簡単な方法は、総走行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、混雑率 C による車両の重量の違いや、所要時間設定による加減速時間の違いも考慮することが可能な方法を提案する。

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。

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

τ : 駅間所要時間 ($t_1 + t_2 + t_3$)

この左辺（台形の面積）は、すなわち $(t_1 + t_2) \cdot \alpha t_1$ である。この t_2 に $\tau - 2t_1$ 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

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

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

が得られる。

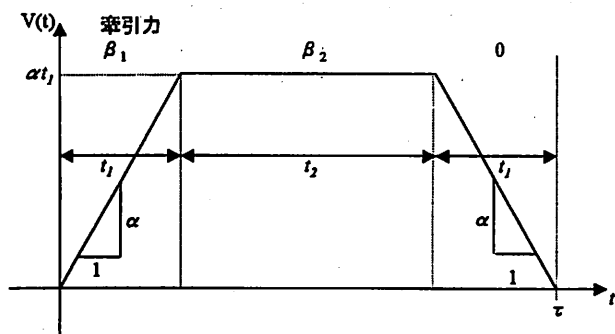


図4 駅間の運行速度変化の想定

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 (17)、(18) のように表される。

$$\beta_1 = (W_i \cdot b) \alpha < \text{加速時} > \quad (17)$$

$$\beta_2 = (W_i \cdot b) \mu < \text{定速走行時} > \quad (18)$$

W_i : 時間帯 i の時の 1 編成あたりの重量、

μ : 列車の動摩擦係数

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

$$W_i = W_s + \gamma \cdot C_i \cdot a \quad (19)$$

W_s : 1 両あたり自重、 γ : 乗客の平均体重

1 駅間で、この牽引力による消費電力は、

$$Y_i = (w_i \cdot \beta_1 \cdot t_1) + (w_i \cdot \beta_2 \cdot t_2) \quad (20)$$

Y_i : 時間帯 i における 1 編成あたり消費電力となる。したがって、1 日の電力消費による CO_2 排出量は式 (21) のようになる。

$$e_d = e_d' \cdot \sum \{ (S-1) \cdot (2N_p) \cdot Y_i \} \quad (21)$$

e_d' : 電力消費あたり内包 CO_2 排出原単位、

S : 必要駅数

よって、ライフタイム T_b における CO_2 排出量 E_d は、

$$E_d = 365.25 \cdot T_b \cdot e_d \quad (22)$$

となる。

⑤必要インフラ量

次に、必要な駅、路線について考える。路線長 F と駅間距離 l より、必要駅数 S は、

$$S = F/l + 1 \quad (23)$$

これらの鉄道インフラ建設にかかる金額 F は、

$$F = G \cdot F + H \cdot S + \text{諸費用} \quad (24)$$

G, H : 建設単価

したがって、ライフタイム T_b において、鉄道インフラ建設に起因する CO_2 排出量 E_k は、

$$E_k = e_k' \cdot F \quad (25)$$

e_k' : インフラ建設単価あたり内包 CO_2 排出原単位
また、鉄道インフラの維持管理に伴う CO_2 排出量 E_{lm}

は、式 (10) と同様に、

$$E_{lm} = e_{lm}' \cdot m_i \cdot F \cdot T_b \quad (26)$$

m_i : インフラ量あたり年間維持費用原単位

式 (25)、(26) より

$$E_i = E_k + E_{lm} \quad (27)$$

となる。

ii) 自動車交通量変化に伴う CO_2 排出量変化

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

$$E_{\text{整備なし}} = D \cdot e(v_{\text{整備なし}}) \cdot F \quad (28)$$

$e(v)$: 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

鉄道整備により、自動車交通量が D から D' に変化することから、

$$E_{\text{鉄道整備}} = D' \cdot e(v_{\text{鉄道整備}}) \cdot F \quad (29)$$

2 式より、鉄道整備による自動車起源の CO_2 排出量の変化分は、

$$\Delta E_d = D' \cdot e(v_{\text{整備なし}}) \cdot F - D \cdot e(v_{\text{鉄道整備}}) \cdot F \quad (30)$$

以上より、式 (1) で定義した新規鉄道整備に伴う ELC- CO_2 変化は、式 (11)、(22)、(27)、(30) で求められた各項の値を代入することで求められる。

6. まとめ

本研究では、既存の LCA の適用範囲を拡張することによって新規鉄道整備に伴う CO_2 排出量の変化を包括的に評価することが可能な方法論を構築した。さらに、2 地点間の鉄道整備を例に、計画段階での評価を可能とするための具体的な定式化を行った。定式化に含まれている変数の大多数は、計画段階で予測・想定されているものや、既存の統計資料等で入手可能なデータであり、試算も容易に行うことができる。具体的な試算結果と、それに基づく必要輸送需要や混雑率等の検討結果は、講演時に述べる予定である。

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) 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 CO_2 排出量のライフサイクル評価、土木学会環境システム研究 No.26, 1998.
- 3) 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.
- 4) 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.