

特集「社会基盤整備へのLCAの導入」

研究資料

鉄道整備のCO₂排出量のライフサイクル評価手法

森田 泰智・山崎 敏弘・加藤 博和・柴原 尚希

Life Cycle Assessment Method of Carbon Dioxide Emission from Railway Provision

Yasutomo MORITA, Toshihiro YAMASAKI, Hirokazu KATO and Naoki SHIBAHARA

Synopsis: As environmental consciousness has been expanding on a global scale, the railway has drawn attention as the environmentally-friendly transportation system. However, it has been generally discussed only in terms of the operating stage. It is necessary to evaluate the environmental impacts through their whole life cycle. This paper aims to construct a methodology for evaluating the total environmental load of railway systems from the construction to disposal by the application of the life cycle assessment (LCA). It also considers extended life cycle environmental load (ELCEL), which includes the effects of the environmental load reduction by decreasing alternatives to railway lines such as car traffic. This method is available for the environmental evaluation of new railway projects in the planning phase.

Keywords: CO₂; extended life cycle environmental load (ELCEL); factor of environmental load; life cycle assessment (LCA); planning phase

1. はじめに

鉄道は他の交通機関と比べて「環境にやさしい」と一般に認識されている。この根拠として一般に取りあげられるのは、例えば温室効果ガス排出量に着目した場合、交通機関が運行時に排出する量の全国平均値である¹⁾。この値は、新規の鉄道整備によって温室効果ガス排出量をいかに低減できるかを検討する際には、混雑率や運行kmあたり排出量が異なってくるため、そのまま適用することはできない。さらに、運行時の排出量だけでなく、整備時のインフラ建設や車両の製造等といった様々な関連活動に伴う排出、そして、整備に伴う競合交通機関等の排出量変化も合わせて考慮する必要がある。しかし、そのような分析を行う方法論は整備されていなかった。

そこで鉄道建設・運輸施設整備支援機構では、名古屋大学大学院環境学研究科加藤研究室の協力を得て、これらの要素を実務レベルで考慮できるような評価を整備前（計画段階）に行う方法論を検討し、その成果として「鉄道LCAマニュアル」を部内資料として作成し、活用を目指している²⁾。具体的には、鉄道システムのライフサイクル

にわたる温室効果ガス排出量を推計するとともに、鉄道整備が他の鉄道路線や自動車交通に及ぼす影響にも推計範囲を拡大し、これに伴う環境影響の評価を予測する方法も組み入れている。推計結果は、鉄道整備が社会全体へ与える効果・影響の評価項目の1つとして活用することが想定される。

本稿では、本マニュアルで整備した鉄道整備に伴う温室効果ガス排出量変化のライフサイクル評価手順の概要を紹介する。なお、温室効果ガスのうち代表的な二酸化炭素(CO₂)を推計対象とする。

2. 評価対象範囲の設定

評価対象とする製品・サービスの環境影響をそのライフサイクルを通じて評価するという通常のLCAの考え方をそのまま鉄道整備プロジェクトに適用すると、鉄道施設の建設／車両の製造から維持管理、運行、廃棄までの鉄道システムのライフサイクルにおける環境負荷の推計にとどまる。しかし、それだけでは、鉄道システム自体のCO₂削減策を検討することには有用であるものの、鉄道整備が社会

森田 泰智／(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構((財)運輸政策研究機構 運輸政策研究所へ出向中)／〒105-0001 東京都港区虎ノ門3-18-19

山崎 敏弘／(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構／〒105-0011 東京都港区芝公園2-4-1

加藤 博和・柴原 尚希／名古屋大学大学院環境学研究科／〒464-8603 愛知県名古屋市中千種区不老町C1-2(651)

Yasutomo MORITA / Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency (Working at Institution for Transport Policy Studies) / 3-18-19 Toranomon Minato-ku Tokyo 105-0001

Toshihiro YAMASAKI / Japan Railway Construction, Transport and Technology Agency / 2-4-1 Shibakoen Minato-ku Tokyo 105-0011

Hirokazu KATO, Naoki SHIBAHARA / Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University / C1-2(651) Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603

全体でCO₂排出量を削減する効果を有するかどうかを検討することはできない。

加藤ら^{3,4)}は、鉄軌道システム（インフラ・車両＜運行も含む＞）に伴う温室効果ガス排出量について、ライフサイクルにわたる推計を行うとともに、自動車から鉄軌道への利用転換や、道路内での専用軌道確保による道路混雑の悪化といった、鉄軌道システム自体にとどまらない効果影響も考慮するため、これら影響範囲にまでバウンダリを拡張して評価を行う「拡張ライフサイクル環境負荷（Extended Life Cycle Environmental Load: ELCEL）」の概念を導入し、評価を行う方法論を提案した。その後、ELCELを用いた鉄軌道整備の環境評価に関する幾つかの研究が行われてきている⁵⁻⁹⁾。ただし、それらの研究では既に存在する路線（したがって利用状況等も分かっている）の事後評価や、仮想の路線に関する評価、および特定の路線を対象とした事前評価が行われており、新規路線を整備前に検討するために一般的に適用できる方法論は示されてこなかった。

そのため、ELCELの概念を導入し、自動車交通へ与える影響にも推計範囲を拡張することで、実際の鉄道整備によってCO₂排出量をどの程度削減できるかを実務においてより包括的に評価できる手法を構築する。これを「推計範囲を鉄道から他の交通機関へ拡張したLCA（以下、拡張LCA）」と呼ぶ（図1）。

3. ライフサイクル環境負荷推計手順

鉄道システムの建設・製造から廃棄までの各段階（ライフステージ）について、CO₂排出量原単位の設定を行った

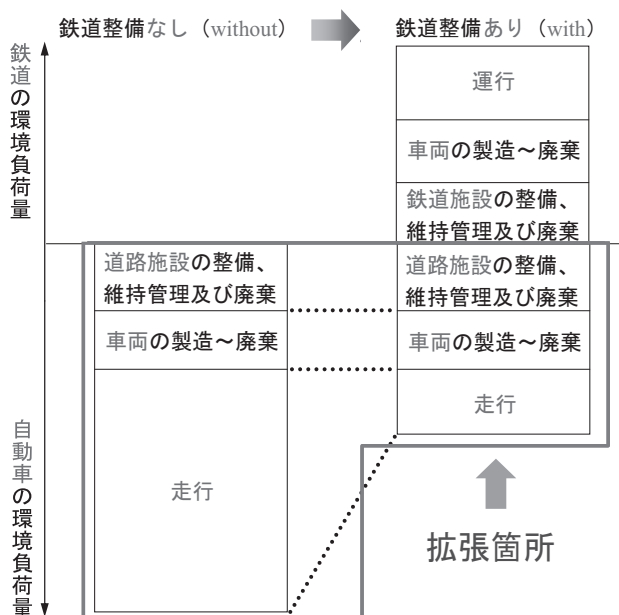


図1 拡張LCAの考え方

上で、鉄道整備に伴う環境負荷変化をELCEL概念に基づいて推計する拡張LCAの方法論を整備する。

3.1 実施目的の設定

鉄道整備プロジェクト評価の実施目的の設定例を示す。

- ・例1：これから整備する鉄道が、CO₂排出量の削減に寄与できるか。
- ・例2：交通システムを整備する場合、どの交通機関が最もCO₂排出量が少ないか。
- ・例3：どのルート（線形、構造形式等）が最もCO₂排出量が少ないか。

3.2 対象範囲の設定

3.1節で設定した目的に従い、対象範囲を設定する。

3.2.1 時間的な対象範囲：ライフタイムの設定

対象とする期間（ライフタイム）は、鉄道施設の耐用年数・事業のライフサイクル等を考慮して設定する。ここでは、財務分析および耐用年数の観点から、「鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル2005」¹⁰⁾で定義しているプロジェクト評価の“基本的な計算期間”である「建設期間に加えて開業年度から30年もしくは50年間」に合わせることをとする。

3.2.2 分析の対象範囲：対象とする鉄道および他の交通機関、構造物の評価範囲の設定

LCAの実施目的が、整備する鉄道のインフラ自体の評価である場合（整備による環境負荷量の増加分のみを推計する場合）には、当該鉄道の鉄道施設およびその運行、維持管理・補修時における環境負荷量を対象とすればよい。

一方、鉄道整備による周辺交通へ与える影響を推計する場合には、必要に応じて対象範囲を鉄道沿線や都市圏全体の他交通機関に拡張していくELCEL概念の導入が必要である。

3.2.3 空間的な対象範囲：影響を及ぼす地理的な範囲の設定

LCAの実施目的に従い、評価対象となる鉄道整備プロジェクトが影響を及ぼす地理的な範囲を設定する（図2）。

3.3 シナリオの設定

先に設定した実施目的・対象範囲において、鉄道整備の有無がCO₂排出量に与える影響を把握する場合などでは、鉄道整備がなされなかった場合、なされた場合のシナリオをそれぞれ設定する必要がある（表1）。

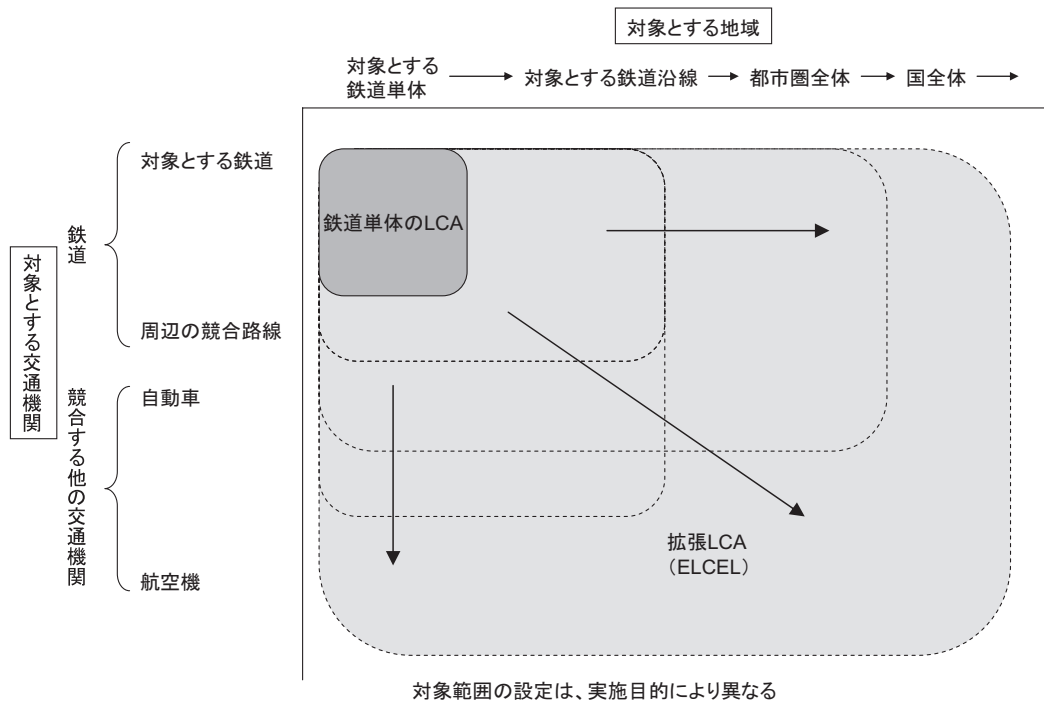


図2 空間的な対象範囲のイメージ

表1 設定した実施目的と対象範囲・シナリオの例

目的 設定 例	実施目的	対象範囲 (計測期間：30年、 50年は共通)	シナリオ例
1	これから整備する鉄道が、CO ₂ 排出量の削減に寄与できるか	<u>分析の対象範囲</u> ・拡張LCA(ELCEL) <u>空間的な対象範囲</u> ・〇〇鉄道の利用が想定される沿線地域	<u>without(整備前)</u> 〇〇鉄道が未整備であることにより、当該地域の公共交通機関はバスが中心 ・鉄道ネットワークは現況 <u>with(整備後)</u> 〇〇鉄道整備により、代表交通手段としての自動車から鉄道への転換が促進 ・鉄道ネットワークは、〇〇鉄道を加えた将来鉄道ネットワーク ・その他の交通機関は現況ネットワーク ・交通手段別利用者数・経路別利用者数は、上記前提条件のもとに交通需要予測モデルにより推計
2	交通インフラを整備する場合、どの交通機関が最もCO ₂ 排出量が少ないか	<u>分析の対象範囲</u> ・鉄道単体のLCA ・代替交通手段単体のLCA <u>空間的な対象範囲</u> ・〇〇鉄道の利用が想定される沿線地域	<u>without(整備前)</u> 〇〇鉄道が未整備であることにより、当該地域の公共交通機関はバスが中心 ・鉄道ネットワークは現況 <u>with(整備後)</u> 案1：〇〇鉄道を整備 ・鉄道ネットワークは、〇〇鉄道を加えた将来鉄道ネットワーク ・その他の交通機関は現況ネットワーク 案2：〇〇鉄道が未整備で、同ルートに高速道路が整備され、高速バスが運行 ・鉄道ネットワークは現況 ・〇〇鉄道需要がそのまま高速バス利用へと転換すると想定
3	どのルート（線形、構造形式等）が、最もCO ₂ 排出量が少ないか	<u>分析の対象範囲</u> ・鉄道単体のLCA（ルート毎に算出） <u>空間的な対象範囲</u> ・〇〇鉄道	<u>without(整備前)</u> 〇〇鉄道が未整備であることにより、当該地域の公共交通機関はバスが中心 ・鉄道ネットワークは現況 <u>with(整備後)</u> プロジェクト案毎のシナリオ ルート1：△△を経由し、□□から××区間は地下化する ルート2：△△を経由し、□□から××区間は高架化する ・プロジェクト案毎にルートが異なる際は、想定される周辺交通体系（アクセスバス路線網、道路ネットワーク等）に基づき設定 ・交通手段別利用者数・経路別利用者数は、上記前提条件のもとに交通需要予測モデルにより推計

3.4 システム構成要素の標準化

本稿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、評価対象全ての設計図や施工手順が得られるという状況は非現実的である。そこで、マニュアルでは概略法を提案している。まず、図3のように、鉄道システムを模型のパーツのように分解して考え、それぞれについて幾つかの「標準モデル」を設定する。図3では、構成要素の分解の一例として、開削トンネルのみを細分化して示している。そして、各標準モデルに関してLCI分析 (Life Cycle Inventory Analysis) を実施し、それらを組み合わせることにより、システム全体での環境負荷量を推計する。

3.5 構造物別環境負荷原単位の設定

鉄道システムの構成要素は、大きく本体構造物、付帯構造物、車両に分けられる。それぞれについて、建設・製造、維持管理・運用、廃棄の各段階別にCO₂排出量の推計を行う (表2)。

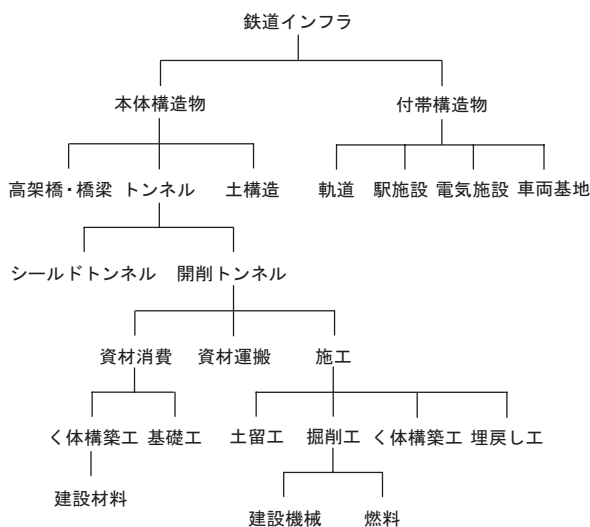


図3 鉄道システム構成要素の分解

具体的には、各標準構造物について、図4に示す構成要素毎に各資材の消費量や施工数量等を算出し、さらに各段階での必要な資材やエネルギー量等を算出する。これらにより、構造物の単位数量あたりCO₂排出量原単位を設定する。

3.5.1 資材消費

資材消費におけるCO₂排出量は、構造部材別に算出した各資材の消費量に、各資材のCO₂排出原単位を乗じて構造部材別CO₂排出量を算出し、これらを合計して求める。各資材のCO₂排出原単位は、様々な研究機関によって提供されているが、ここでは土木学会LCA小委員会推奨値¹¹⁾を用いている。

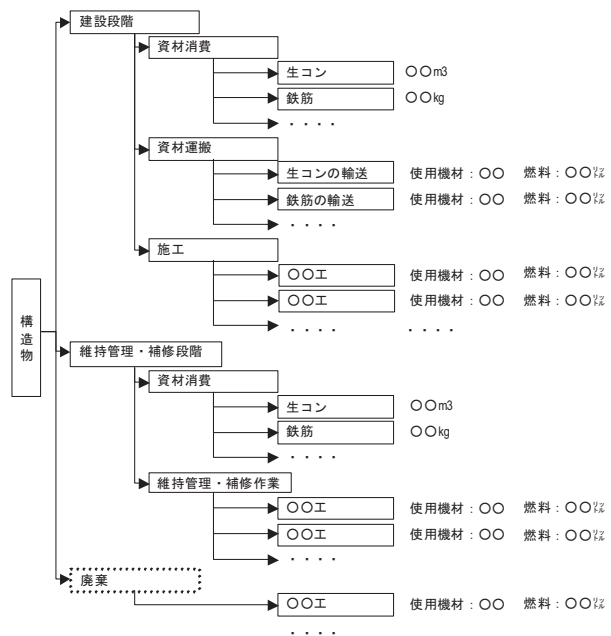


図4 構造物別環境負荷原単位算定の構成要素

表2 評価対象項目

評価対象項目		対応する区分	
本体構造物	- 土構造物：盛土、切土 - 橋りょう：高架橋、橋りょう - トンネル：NATM、シールドトンネル、開削トンネル	建設段階	資材消費
			資材運搬
			施工
付帯構造物	- 軌道：スラブ軌道、バラスト軌道 - 駅施設：土木、建築、設備 - 電気施設：電路設備、変電設備、信号設備(信号機、ポイント)、通信設備	建設段階	資材消費
			資材運搬
			施工
車両	車両本体	維持管理・補修段階	
		建設段階	資材消費
			資材運搬
			施工
		製造段階	加工組立
車両	車両本体	維持管理・補修段階	
		運行段階	
		車両廃棄段階(解体、廃棄)	

3.5.2 資材運搬

建設時の資材等の運搬にかかわるCO₂排出量は、運搬機械を用いて資材等を運搬することにより生じる排出量と、運搬機械自体が内包している排出量（運搬機械製造時等に生じる排出量）から構成される。

(1) 運搬

運搬数量および単位数量あたりの機械運転時間を算出し、各数量を乗じることで機械総運転時間を算出する。また、機械運転時の機械出力や燃料消費率等を基に、単位運転時間あたりのCO₂排出量を算出することができる。上記の機械総運転時間に単位運転時間あたりCO₂排出量を乗じることにより、機械運転によるCO₂排出量を算出する。

(2) 機械自体

運搬数量に単位数量あたりの機械運転時間を乗じること、機械運転時間を算出する。また、機械の総運転時間と機械の質量あたりライフサイクルCO₂排出量を基に、機械

の単位運転時間あたりライフサイクルCO₂排出量原単位を算出することができる。上記の機械運転時間に単位運転時間あたりライフサイクルCO₂排出量原単位を乗じることにより、運転機械自体のCO₂排出量を算出する。

3.5.3 施工

施工にかかわるCO₂排出量は、機械を用いて施工する際に生じるCO₂排出量と、施工機械自体が内包しているCO₂排出量から構成される。その算出方法は、前項と同様であるため省略する。

以上より得られたCO₂排出量原単位を表3に示す。

3.6 鉄道の運行段階における環境負荷量の推計

鉄道の運行段階におけるCO₂排出量は、新設路線がある場合とない場合の鉄道利用者を推計し、それらとCO₂排出量原単位を用いることにより推計される（図5）。

表3 構造物・車両のCO₂排出量原単位

項目			原単位	単位	
構造物 (本体構造物、 付帯構造物) の建設段階	高架橋	8m≦ H≦12m、L=57.0m+調整桁 13.0m	7.21～7.68	t-CO ₂ /m	
	駅部高架橋	H=9m、L=61.0m	11.3	t-CO ₂ /m	
	橋脚	場所打ち杭	H=9.3m、RC 桁 20m+20m	158	t-CO ₂ /基
			H=9.8m、PCU 桁 20m+20m	131	t-CO ₂ /基
			H=10.6m、RC 桁 20m+PC 桁 30m	126	t-CO ₂ /基
			H=10.2m、トラス桁 88m+ 119m	593	t-CO ₂ /基
		鋼管井筒基礎 H=17.4m、トラス桁 69m+ 69m		1,852	t-CO ₂ /基
	橋りょう	RC 桁、L=20m	3.10	t-CO ₂ /m	
		PC 桁、30≦ L≦ 47m	2.46～3.75	t-CO ₂ /m	
		PCU 桁、L=20m	2.30	t-CO ₂ /m	
		鋼製トラス桁、L=414.5m、支間 88+119+119+88	10.9	t-CO ₂ /m	
	トンネル	シールドトンネル(セグメント外径 9.8m)	8.85	t-CO ₂ /m	
		開削(躯体 W=10.6m)	16.1	t-CO ₂ /m	
		NATM(上半先進ショートベンチカット工法、 機械掘削、タイヤ方式)	14.3	t-CO ₂ /m	
	土構造	盛土(W=10.7m、H=6.0m)	6.02	t-CO ₂ /m	
		切土(W=10.3m、H=6.0m)	3.29	t-CO ₂ /m	
	軌道	スラブ軌道(軌間 1,067mm)	0.292	t-CO ₂ /m	
		バラスト軌道(軌間 1,067mm)	0.356	t-CO ₂ /m	
	駅	高架駅(土木、建築、設備)	3.81×10 ³	t-CO ₂ /駅	
		地下駅(土木、建築、設備)	3.12×10 ⁴	t-CO ₂ /駅	
	電路設備		5.44×10 ⁻²	t-CO ₂ /m	
	変電設備		51.5	t-CO ₂ /基	
信号設備	信号設備	1.52	t-CO ₂ /基		
	ポイント	8.99	t-CO ₂ /基		
通信設備		6.59×10 ⁻³	t-CO ₂ /m		
車両基地		5.88×10 ³	t-CO ₂ /箇所		
車両	地下鉄 (アルミ車両、20m10 両編成)	製造段階	93.9	t-CO ₂ /車両	
		廃棄	0.662	t-CO ₂ /車両	
	郊外型 (ステンレス車両、20m10 両編成)	製造段階	66.8	t-CO ₂ /車両	
		廃棄	0.662	t-CO ₂ /車両	
維持・ 管理段階	線路(レール)		14.4	t-CO ₂ /百万車両 km	
	電路(架線)		0.152	t-CO ₂ /百万車両 km	
	車両(パンタシュー、ブレーキシュー、車輪)		6.81	t-CO ₂ /百万車両 km	

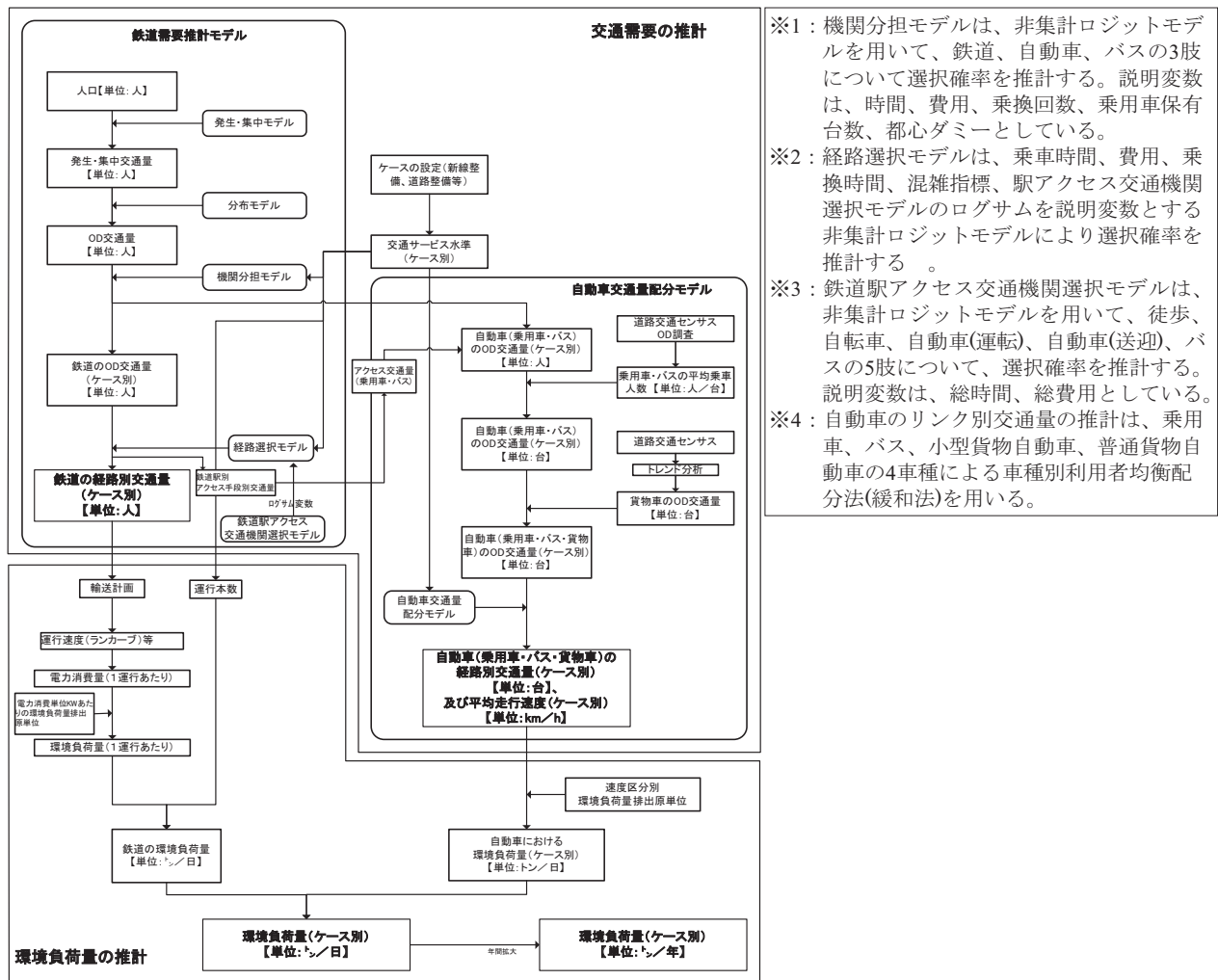


図5 拡張LCAに対応した鉄道・自動車の運行段階の環境負荷量推計ツールの全体構成

鉄道利用者数は、鉄道経路選択モデルより、路線別利用者数とゾーン別の駅利用者数（駅アクセス交通量）により推計される。また、CO₂排出量は、推計された鉄道利用者数に見合った運行本数を設定し、想定されるランカーブ（運転曲線）から、1運行あたりの消費電力量を算出し、消費電力量あたりのCO₂排出量原単位を乗じることで、鉄道の運行段階のCO₂排出量が推計される。

3.7 自動車の走行段階における環境負荷量の推計

自動車の走行段階におけるCO₂排出量は、自動車交通量配分モデルより、自動車の経路別交通量および平均走行速度を推計し、経路別交通量に速度区別のCO₂排出量原単位を乗じることで推計する（図5）。

4. ケーススタディ

4.1 構成要素別 CO₂ 排出量の試算

東京圏のある放射状路線（都心と郊外を結ぶ鉄道不便地域解消路線、路線延長約33km、平日運行本数80[本/日（片道）]、車両8[両/編成]、輸送人員約9[万人/日]程度）

を対象としてケーススタディを実施し、本体構造物、付帯構造物、車両（運行を除く）、運行、維持管理、廃棄の各段階におけるCO₂排出量を推計する。その際、図6に示すような標準的な構造物を設定している。

表4、図7に推計結果を示す。図7より、ライフタイム（建設段階＋供用後50年間）全般にわたる累積排出量をみると、供用開始後約22年以降、構造物（本体構造物＋付帯構造物）の建設段階のCO₂排出量を、車両や運行、維持管理段階のCO₂排出量が上回る結果となっている。

4.2 鉄道整備効果の ELCEL 評価

目的設定例1について検討する。そのために、構造物の建設、維持管理、車両の製造、運行におけるCO₂排出量に加え、整備によって影響を受ける他の周辺鉄道路線および自動車交通のCO₂排出量変化を考慮したELCELによる評価を行う必要がある。自動車に関しては、ケーススタディ路線における代表交通機関としてのCO₂排出量、駅アクセス交通としてのCO₂排出量、ケーススタディ路線沿線以外の地域でのCO₂排出量のそれぞれについての変化を考慮する。

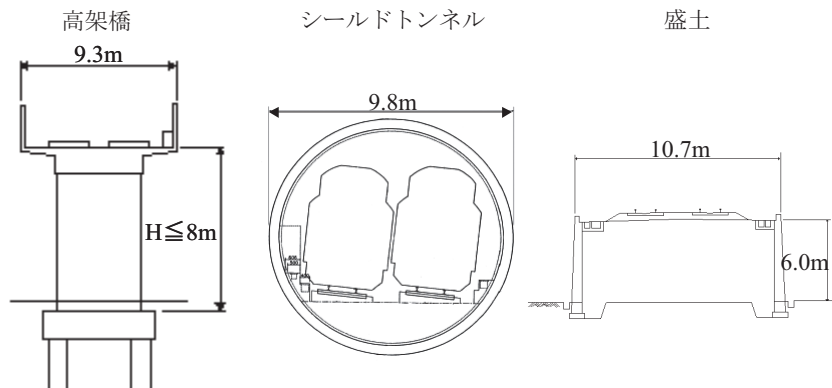
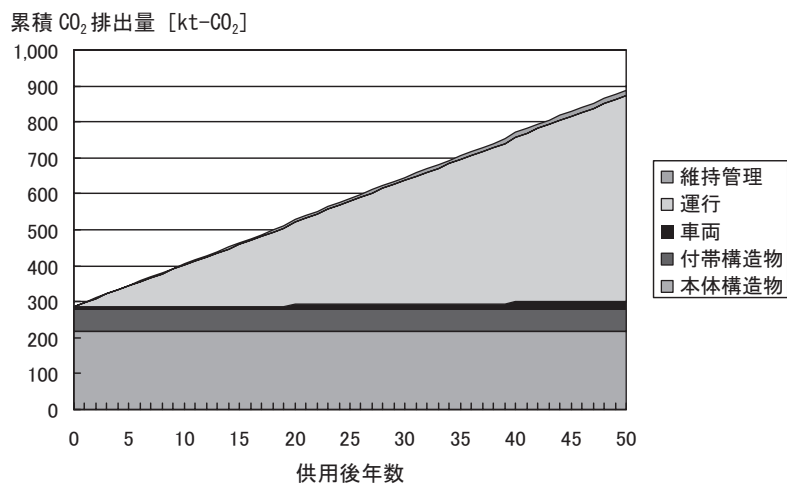


図6 ケーススタディで設定した標準的な土木構造物

表4 鉄道システムの各評価対象項目に関するライフサイクルCO₂の推計結果(ライフタイム50年、CO₂排出量)

項目	数量	排出量 [kt-CO ₂]	シェア	備考
計測期間：50年				
路線延長：32,580m				
本体 構造物	高架橋	7,580m	56.0	6.3%
	駅部高架橋	1,000m	11.3	1.3%
	橋脚	36基	36.0	4.1%
	橋りょう	1,600m	7.1	0.8%
	トンネル	3,440m	30.4	3.4%
	土構造	18,960m	77.6	8.7%
	計		218.6	24.6%
付帯 構造物	軌道	65,160m	23.0	2.6%
	駅施設	14駅	27.0	3.0%
	電路設備	65,160m	3.5	0.4%
	変電設備	6基	0.3	0.0%
	信号設備	信号器：130基 ポイント：90基	1.0	0.1%
	通信設備	32,580m	0.2	0.0%
	車両基地	1箇所	6.3	0.7%
	計		61.4	6.9%
車両	製造段階・廃棄段階		19.4	2.2%
運行			573.8	64.6%
維持管理 ・補修	線路	698.6両百万km	10.0	1.1%
	電路	698.6両百万km	0.1	0.0%
	車両	698.6両百万km	4.8	0.5%
	計		14.9	1.7%
計			887.9	100.0%

図7 供用後年数に応じた累積CO₂排出量

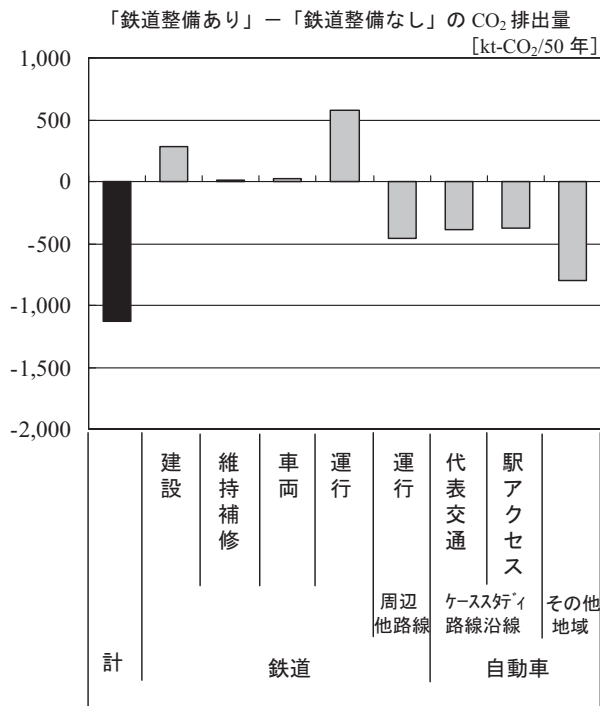


図8 ケーススタディ（鉄道不便地域解消路線）の分析結果

分析結果をまとめたのが図8である。当該路線整備が鉄道不便地域を解消することから、整備前は遠方の鉄道路線へアクセス、または自動車を利用していた利用者が、整備後は当該路線利用へ転換することが多く見込まれ、結果として鉄道建設段階を含めても大きなCO₂削減効果が確認できる。

5. おわりに

本稿では、鉄道整備に伴うライフサイクル全体にわたるCO₂を推計するとともに、ELCEL概念に基づいて、鉄道整備に伴う他鉄道路線および自動車交通への影響に範囲を拡大した分析・評価を行う拡張LCAの方法論を実務で活用できるものとして整備した。この方法論を用いることで、鉄道新線の計画段階における環境面からの客観的かつ定量的な評価が可能となる。本稿では、3.1節で設定した目的設定例1に関する分析例を示したが、目的設定例2および3についても検証することが可能である。また、都市鉄道を対象に分析を行ったが、新幹線等の都市間鉄道についても原単位を整備している。

今後は、大深度地下を利用した鉄道整備が増加することが予想されるため、地質条件に応じたCO₂排出量原単位の設定を行う等の見直しが必要である。そのほか、原単位の精査や標準構造物の検討などを進め、「鉄道LCAマニュアル」のさらなる充実を図り、CO₂をはじめ様々な環境負荷をライフサイクルで評価する手法として確立していく予定である。

(平成23年6月16日受付、平成23年9月12日採択)

参考文献

- 1) 交通エコロジー・モビリティ財団 (2009)：運輸・交通と環境2009年版, 11
- 2) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構東京支社 (2008)：環境からみた鉄道整備効果に関する調査報告書, 228pp.
- 3) 加藤博和, 大浦雅幸 (2000)：土木計画学研究 論文集, 17, 471-479
- 4) 加藤博和 (2001)：IATSS Review, 26(3), 52-62
- 5) 山口耕平, 青山吉隆, 中川大, 松中亮治, 西尾健司 (2000)：第23回土木計画学研究・講演集, 足利, 23(1), 219-222
- 6) 柴原尚希, 加藤博和, 狩野弘治 (2003)：第31回環境システム研究論文発表会講演集, 北九州, 167-172
- 7) 加藤博和, 柴原尚希 (2006)：日本LCA学会誌, 2(2), 166-175
- 8) 森田泰智, 東優, 山崎敏弘 (2008)：第15回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 東京, 591-594
- 9) 福田敦, 有村幹治, 石坂哲宏, 池下英典 (2010)：第41回土木計画学研究発表会・講演集, 名古屋, 4
- 10) 財団法人 運輸政策研究機構 (2005)：鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル2005, 166pp.
- 11) 酒井寛二 (1996)：第4回地球環境シンポジウム講演集, 東京, 43-48