環境面からみた鉄道の整備効果に関する研究

森田　泰智[1]・山崎　敏弘[2]・加藤　博和[3]・柴原　尚希[4]

[1]正会員　(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構　鉄道建設本部計画部計画課
((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)　E-mail: y-morita@jterc.or.jp

[2]正会員　(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構　鉄道建設本部東京支社計画部調査第一課
(〒105-0011　東京都港区芝公園2-11-1)　E-mail: to.yamasaki@jrtt.go.jp

[3]正会員　名古屋大学大学院准教授　環境学研究科都市環境学専攻
(〒464-8603　名古屋市千種区不老町C1-2(651))　E-mail:kato@genv.nagoya-u.ac.jp

[4]正会員　名古屋大学大学院助教　環境学研究科都市環境学専攻
(〒464-8603　名古屋市千種区不老町C1-2(651))　E-mail: nshiba@urban.env.nagoya-u.ac.jp

鉄道は他交通機関と比べて，運行時に排出する温室効果ガス排出量が少ない，環境にやさしい交通機関として一般に認識されている．しかしながら，鉄道整備によっていかに自動車交通を削減し，温室効果ガス排出量を低減できるかについて，その効果を推計したものではない．本研究では，鉄道整備の環境評価を事前に行うための方法論として，拡張ライフサイクル環境負荷(Extended Life Cycle Environmental Load : ELCEL)の概念に基づき，鉄道整備に伴う自動車交通への影響にも計測範囲を拡大した分析・評価を行う方法論を示す．また，ケーススタディによって，鉄道新線の計画段階における環境面での評価手法として有効であることを確認している．

Key Words : *life cycle assessment (LCA), extended life cycle environmental load (ELCEL), planning phase, CO_2, factor of environmental load*

1.　はじめに

地球温暖化を始めとした環境問題への積極的な取り組みが世界的な潮流となっている中にあって，鉄道は他交通機関と比べて，「環境にやさしい交通機関」として認識されている．しかしながら，この根拠として一般に取り上げられるのは，全国の交通機関が運行時に排出する温室効果ガス排出量の平均値である[1)]．したがって，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，この値をそのまま適用することはできない．また，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も合わせて考慮する必要がある．

そこで加藤ら[2), 3)]は，Life Cycle Assessment(LCA)の考え方を導入し，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，その建設から運行，そして廃棄に至るまでの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[4)-8)]．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，新規路線を事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．

そこで本研究では，ELCEL を用いた鉄道整備の環境評価を事前(計画段階)に行うための方法論を具体的に示すことを目的とする．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

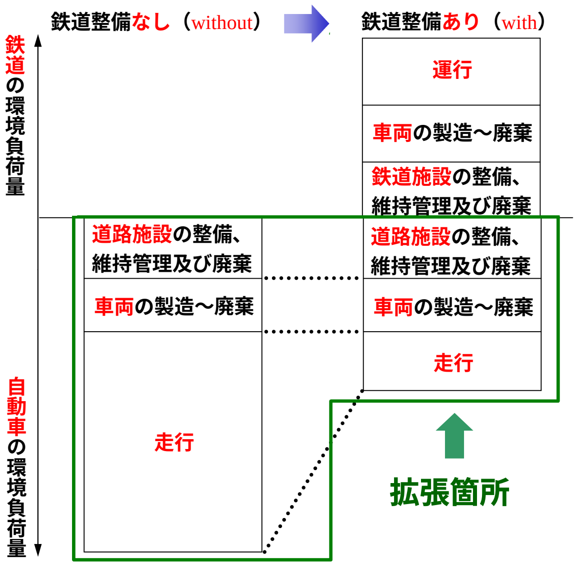


図-1　拡張 LCA の概念

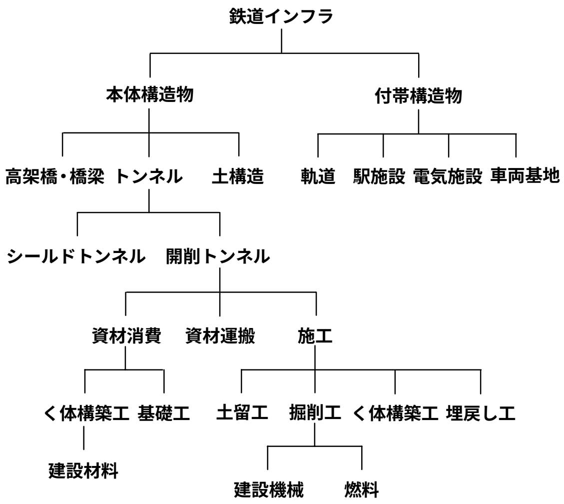


図-2　鉄道システム構成要素の分解

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．

なお，温室効果ガスとして，本研究では，CO_2排出量のみに着目して推計を行っている．

2.　LCA による鉄道整備評価の枠組

(1)　LCA

LCA は，製品などの環境影響をそのライフサイクル(いわゆる「揺りかごから墓場まで」)を通じて評価する方法論である．この考え方を鉄道整備プロジェクトに適用し，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の各段階における環境負荷量の推計を行う．

なお，本来の LCA では様々な環境負荷について排出量を推計し(inventory analysis と呼ばれる)，さらに，それらの環境へのインパクトを評価することが想定されているが，本研究では CO_2排出量のみの推計に留まっている．

(2)　拡張LCA

さらに，鉄道整備によってCO_2排出量をいかに低減できるかをより包括的に検討するために，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大して評価する手法について検討する．これを本研究では「拡張LCA」と呼ぶ(**図-1**)．

3.　推計方法

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，CO_2排出量原単位の設定を行った上で，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の方法論を構築する．

(1)　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，評価対象全ての設計図や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-2**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-2**では，構成要素の分解について，一例として，開削トンネルのみを細分化して例示している）．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概略法を適用する．

(2)　構造物別環境負荷原単位の設定

本研究で評価対象とした構成要素は，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，廃棄の各段階に分けて，環境負荷量の推計を行う(**表-1**)．

具体的には，各標準構造物について，**図-3**に示す構成要素毎に，その資材別消費量や施工数量等を算出することにより，建設，維持管理，運用の各段階での必要な資材やエネルギー量等を算出する．これらに土木学会等が算定した環境負荷原単位を乗じることにより，構造物の単位数量あたり環境負荷原単位を設定する．

a)　資材消費

資材消費におけるCO_2排出量は，構造部材別に算出した資材別消費量に，資材別CO_2排出原単位を乗じて構造部材別CO_2排出量を算出し，これらを合計して求める．なお，資材別CO_2排出原単位は，研究機関により異なる数値が提供されているが，本研究では土木学会LCA小委員会推奨値[9)]を用いている．

表-1　本研究での鉄道システムLCAに関する評価対象項目

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, 車両設備)	建設段階	資材消費
			資材運搬
			施工
		維持管理・補修段階	
	車両基地	建設段階	資材消費
			資材運搬
			施工
車両	車両本体	製造段階	資材消費
			加工組立
		維持管理・補修段階	
		運行段階	
		車両廃棄段階 (解体, 廃棄)	

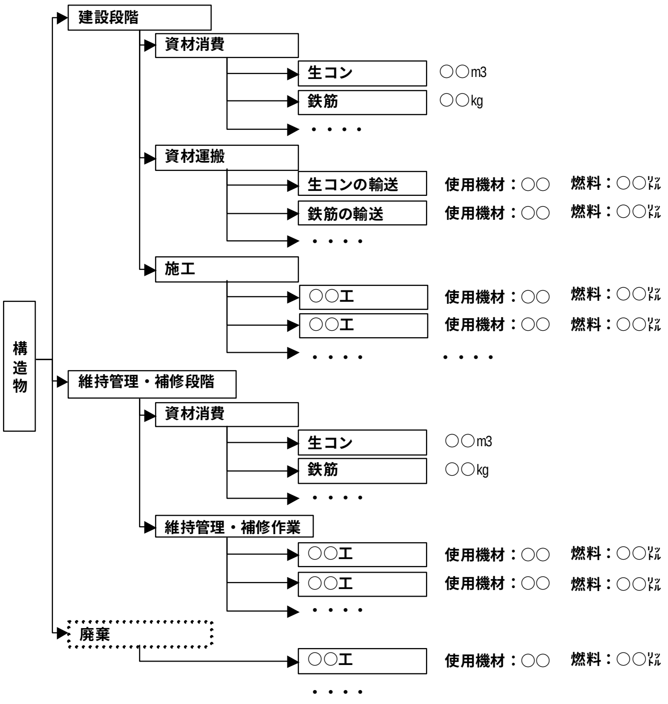


図-3　構造物別環境負荷原単位算定の構成要素

b)　**資材運搬**

建設時の資材等の運搬にかかわるCO_2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CO_2排出量と，運搬機械自体が内包しているCO_2排出量(運搬機械製造時に生じるCO_2排出量等)から構成される．

①　運搬

運搬数量及び運搬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CO_2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時間あたりのCO_2排出量を乗じることにより，機械運転によるCO_2排出量を算出している．

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で，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CO_2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CO_2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CO_2排出量原単位を乗じることにより，運転機械自体のCO_2排出量を算出している．

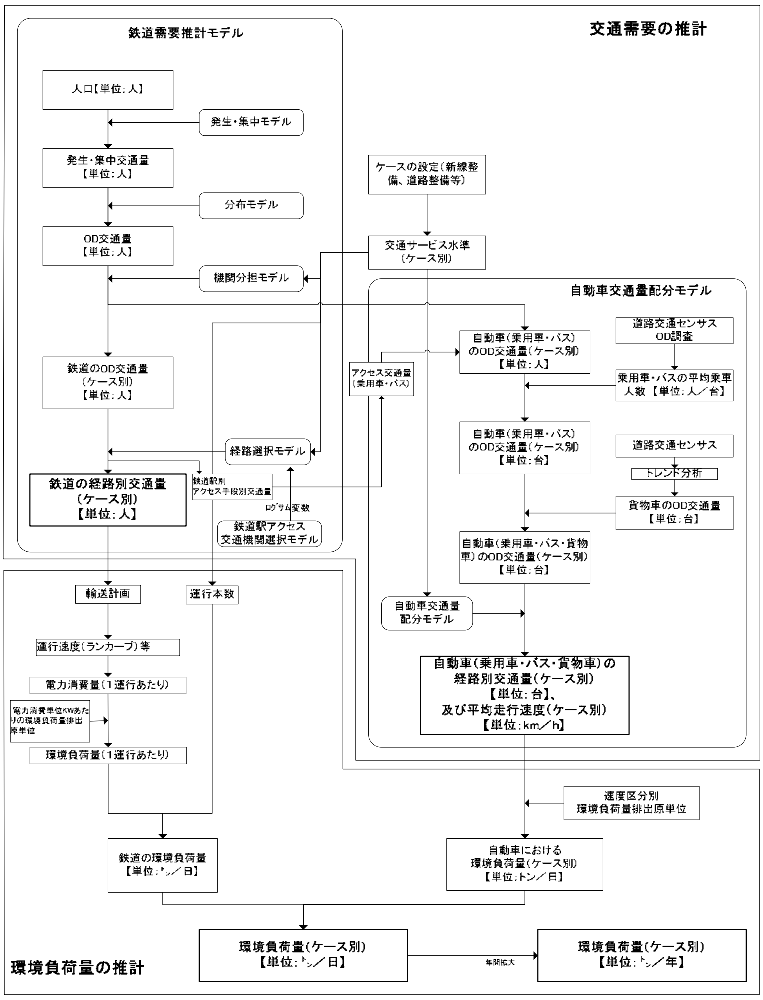
c)　**施工**

施工にかかわる CO_2排出量は，機械を用いて施工する際に生じる CO_2排出量と，施工機械自体が内包している CO_2 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CO_2排出量原単位を**表**-2に示す．

表-2　主な構造物の建設段階での CO_2排出量原単位の算定結果

項目			原単位	単位
構造物 (本体構造物, 付帯構造物)	高架橋（H=8m, L=57.0m+調整桁 13.0m）		7.21	ﾄﾝ−CO_2/m
	橋りょう（RC 桁, L=20m）		3.10	ﾄﾝ−CO_2/m
	シールドトンネル（セグメント外径 9.8m）		8.85	ﾄﾝ−CO_2/m
	盛土（W=10.7m, H=6.0m）		6.02	ﾄﾝ−CO_2/m
	切土（W=10.3m, H=6.0m）		3.29	ﾄﾝ−CO_2/m
	スラブ軌道（軌間 1,067mm）		0.292	ﾄﾝ−CO_2/m
	バラスト軌道（軌間 1,067mm）		0.356	ﾄﾝ−CO_2/m
	高架駅（土木, 建築, 設備）		3.81×10^3	ﾄﾝ−CO_2/駅
	地下駅（土木, 建築, 設備）		3.12×10^4	ﾄﾝ−CO_2/駅
	車両基地		5.88×10^3	ﾄﾝ−CO_2/箇所
維持・管理段階	レール		14.4	ﾄﾝ−CO_2/百万車両 km
	架線		0.152	ﾄﾝ−CO_2/百万車両 km
車両	地下鉄 （アルミ車両, 20m10 両編成）	製造段階	93.9	ﾄﾝ−CO_2/車両
		廃棄	0.662	ﾄﾝ−CO_2/車両
	郊外型 （ステンレス車両, 20m10 両編成）	製造段階	66.8	ﾄﾝ−CO_2/車両
		廃棄	0.662	ﾄﾝ−CO_2/車両



※1：交通機関選択モデルは，非集計ロジットモデルを用いて，鉄道，自動車，バスの3肢について選択確率を推計する．説明変数は，時間，費用，乗換回数，乗用車保有台数，都心ダミーとしている．
※2：鉄道経路選択モデルは，乗車時間，費用，乗換時間，混雑指標，駅アクセス交通機関選択モデルのログサムを説明変数とする非集計ロジットモデルにより選択確率を推計する．
※3：駅アクセスモデルは，非集計ロジットモデルを用いて，徒歩，自転車，自動車(運転)，自動車(送迎)，バスの5肢について，選択確率を推計する．説明変数は，総時間，総費用としている．
※4：自動車のリンク別交通量の推計は，乗用車，バス，小型貨物自動車，普通貨物自動車の4車種による車種別利用者均衡配分法(緩和法)を用いる．

図-4　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

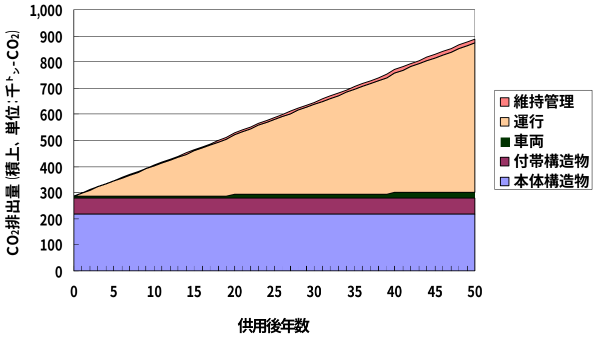


図-5　供用後年数に応じた累積CO_2排出量

(3)　鉄道の運行段階における環境負荷量の推計方法

鉄道の運行段階におけるCO_2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CO_2排出量原単位を用い推計する(**図**-4).

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)を推計する．また，CO_2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CO_2排出量原単位を乗じることで，鉄道の運行段階のCO_2排出量を推計する．

(4)　自動車の走行段階における環境負荷量の推計方法

自動車の走行段階におけるCO_2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及び平均走行速度を推計し，経路別交通量に速度区分別のCO_2排出量原単位を乗じることにより推計する(**図**-4).

4.　ケーススタディ

(1)　構成要素別CO_2排出量の試算(郊外の放射状路線)

東京圏の放射状路線の1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CO_2排出量を推計した(**図**-5，**表**-3).

図-5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22年前後より，構造物(本体構造物＋付帯構造物)の建設段階のCO_2排出量を，車両や運行，維持管理段階のCO_2排出量が上回る結果となっている．

表-3　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CO_2の推計結果(ライフタイム 50 年間，CO_2排出量)

項目		数量	排出量 (千ﾄﾝ－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%	※駅部高架橋の延長は 1 駅=200m
	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%	※盛土：5,599m，切土：13,361m
	計		218.6	24.6%	
付帯構造物	軌道	65,160m	23.0	2.6%	※路線延長×2(複線分)
	駅施設	14 駅	27.0	3.0%	※平地 6 駅，高架橋 5 駅，地下駅 3 駅
	電路設備	65,160m	3.5	0.4%	※路線延長×2(複線分)
	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%	※ポイントは駅あたり 6 箇所
	通信設備	32,580m	0.2	0.0%	※路線延長
	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%	※レール
	電路	698.6 両百万 km	0.1	0.0%	※架線
	車両	698.6 両百万 km	4.8	0.5%	※パンタシュー，ブレーキシュー，車輪
	計		14.9	1.7%	
計			887.9	100.0%	

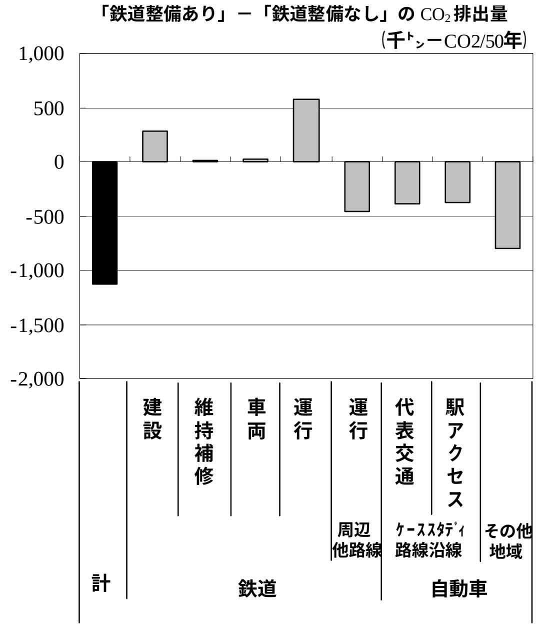


図-6　ケーススタディ 1(鉄道不便地域解消路線)の分析結果

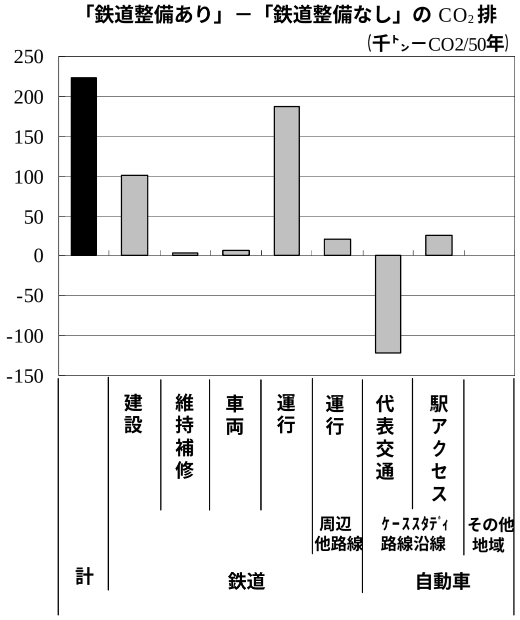


図-7　ケーススタディ 2(既設線との競合路線)の分析結果

(2)　環境面からみた鉄道の整備効果のケーススタディ

CO_2排出量からみた鉄道の整備効果について，以下の着眼点が設定できる．本稿ではそのうち着眼点 1 についてケーススタディを行った．

- 着眼点 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．
- 着眼点 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．
- 着眼点 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．

a)ケーススタディ 1(鉄道不便地域解消路線)

(1)節で検討した路線について，構造物の建設，維持管理，車両の製造，運行におけるCO_2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のCO_2排出量の変化を考慮した．さらに，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CO_2排出量，駅アクセス交通としてのCO_2排出量，ケーススタディ路線沿線以外の地域でのCO_2排出量のそれぞれについての変化を考慮した．

分析によって，当該路線が鉄道不便地域を解消して整

備されることから，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CO_2削減効果が確認された(**図**-6).

b)ケーススタディ2(既設線との競合路線)

a)と異なる路線として，既設並行路線と競合関係にある別の既設線の延伸線(都心と郊外を結ぶ放射状路線を延伸し環状路線に連絡，路線延長約7km，平日運行本数90本/日・片道，車両6両/編成，輸送人員約2万人/日程度)について同じ分析を行った．結果としては，輸送人員が周辺路線の需要量と比較して小規模な路線であり，自動車から鉄道への転換量が少なく見込まれたことから，鉄道建設段階も含めたライフサイクルでのCO_2削減には至らなかった(**図**-7).

5. おわりに

本研究では，鉄道整備に伴うライフタイム全体にわたる環境負荷をCO_2を対象に推計するとともに，ELCEL概念に基づいて，鉄道整備に伴う自動車交通への影響にも範囲を拡大した分析・評価を行う方法論を整備した．この拡張LCA手法を用いて，ケーススタディを実施した結果，路線特性によって，鉄道建設段階も含めてもCO_2削減に至るケースとそうでないケースがあることが示され，鉄道新線の計画段階における環境面での客観的かつ定量的な評価手法として有効であることが確認できた.

本研究では，4.(2)で設定した着眼点1のみを対象に分析を行ったが，着眼点2及び3についても検証すること，また，都市鉄道新線を対象に分析を行ったが，他に都市間交通も含めて検討事例を増やしていくことが必要である．それとともに，既に福田ら[8]も取り組んでいるように，今後，軌道系交通機関の整備の進展が期待される東南アジアや南米等の発展途上国にも適用が可能となるよう手法を再検討していくことを考えている.

今後は，大深度地下利用を活用した鉄道整備が増加することが予想されるため，地質条件に応じた環境負荷原単位の設定を行う等の見直しが必要である．また，CO_2以外に何が評価されることが適当かの検討も必要である.

参考文献

1) 例えば，国土交通白書
2) 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，No.17，pp.471-479，2000.
3) 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.52-62，2001.
4) 山口耕平，青山吉隆，中川大，松中亮治，西尾健司: ライフサイクル環境負荷を考慮した LRT 整備の評価に関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.23-1，pp219-222，2000.
5) 柴原尚希，加藤博和，狩野弘治：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，第 31 回環境システム研究論文発表会，pp.167-172，2003.
6) 加藤博和，柴原尚希：公共交通整備計画評価への LCA 適用ー超伝導磁気浮上式鉄道を例としてー，日本 LCA 学会誌，Vol.2，No.2，pp.166-175，2006.
7) 森田泰智，東優，山崎敏弘：鉄道整備が環境に与える影響の計測手法に関する研究，平成 20 年鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2008)，pp.591-594，2008.
8) 福田敦，有村幹治，石坂哲宏，池下英典：ELCEL による東南アジア諸都市における BRT 導入による CO_2排出削減効果の比較分析，土木計画学研究発表会・講演集，Vol.41，CD-ROM，2010.
9) 土木学会：第 4 回地球環境シンポジウム講演集，1996.