

ライフサイクルを考慮した交通パッケージ施策によるCO₂排出量削減効果に関する研究*

A Study on reduction of CO₂ emission by traffic Package Policy focused on Life Cycle*

齋藤文典**・青山吉隆***・中川大****・柄谷友香*****

By Fuminori SAITO・Yoshitaka AOYAMA・Dai NAKAGAWA・Yuka KARATANI

1. 研究の背景と目的

公共交通機関の利用促進を目的として新規LRT整備事業を考えたとき、LRT等の鉄軌道は自動車と比較してCO₂排出量が少ないといわれている。しかし、それはあくまで現在運行されているLRT等の鉄軌道によるCO₂排出量が、自動車によるCO₂排出量より少ないことを示しているに過ぎず、新規に整備を行う場合は供用段階だけでなくその整備段階を含めて、つまりライフサイクルにわたってCO₂排出量を評価する必要がある。そこで本研究は、CO₂排出量をライフサイクルにわたって評価することの出来る手法であるLCAの評価範囲を拡張することによって波及効果分まで評価することを可能にしたELCEL概念を用いて、新規LRT整備事業と、それを含む交通パッケージ施策によるCO₂排出削減効果を分析する。

2. ELCEL 概念

LCAとは、評価対象とする製品やサービスの「原材料採取→生産→流通→使用（→リサイクル）→廃棄」というライフサイクルにわたる資源やエネルギーの流れと排出する環境負荷を定量的に推定・評価し、それに伴う環境への影響を評価する手法である。インベントリ分析には産業連関分析法と積み上げ法の2つの手法があるが、実際にLCAを実行する場合積み上げ法によってすべてのデータを把握することは困難である。特に交通インフラのような多くの製品によって構成されているサービスに対してLCAを適用する場合、積み上げ法では限界があり、過小評価となってしまう恐れがあるので、本研究では、その2つを併用した組み合わせ法を適用する。ここで、通常交通インフラへのLCAの適用ではインフラそのものの評価にとどまっており、インフラ整備によ

*キーワード：ELCEL、LRT、都市内交通

**学生員、京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

(〒606-8501 京都市左京区吉田本町

TEL075-753-5139 FAX075-753-5759)

***フェロー、工博、広島工業大学環境学部地域環境学科

****正会員、工博、京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻

*****正会員、工博、名城大学 都市情報学部

る波及効果の評価にまでは至っていない。しかし、実際はインフラ整備による波及効果まで評価しなければ、それによる環境影響を評価したことにはならない。そこで本研究ではLCAのシステム境界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、加藤らのELCEL¹⁾の概念を用い、都市内交通すべてをELCELの評価範囲とする。具体的には、新規LRT整備によるCO₂排出に加えて、波及効果の評価範囲として既存鉄道、バス、自動車の需要変化によるCO₂排出の変化も考慮する。また、組み合わせ法の中の産業連関分析法については、国立環境研究所による研究²⁾で、産業連関分析法によりCO₂排出量原単位が推計されており、この値を用いることにする。

3. CO₂排出量関数の推定

a) システム境界の設定

まず、対象とする交通モードとそれぞれの評価範囲について表-1のように設定する。

表-1 各交通モードの評価項目

	車両製造	インフラ建設	車両維持	インフラ維持	車両走行
LRT	○	○	○	○	○
既存鉄道	×	×	○	○	○
バス	○	×	○	×	○
自動車	×	×	×	×	○

b) インベントリ分析

これらをふまえて、それぞれの交通モードにおいて各交通機関の需要を変数としたCO₂排出量関数を作成する。推定方法について以下に示す。

(1)建設・製造

インフラ建設及び車両製造に投じた資金に、対応するCO₂排出量原単位を乗じることでCO₂排出量を計算している。以下に式を示す。

$$CO_{2\text{manufacture}} = \sum Cap_n \cdot X_n \quad (1)$$

Cap_n : 各々の建設・製造に投入した資金

X_n : 各々のCO₂排出量原単位

(2)維持管理

i) 車両維持

車両維持費用を車両走行^{キロ}で割ったものを車両維持費用原単位とし、本研究では各鉄道事業者の車両維持費用原単位を平均化したものを使用する。この車両維持費用原単位にCO₂排出量原単位とサービス水準データである車両走行^{キロ}を乗じることでCO₂排出量を計算している。以下に式を示す。

$$CO_2 = Cost_{vm} \cdot X_{vm} \cdot D$$

$Cost_{vm}$: 車両維持費用原単位

X_{vm} : CO₂排出量原単位 D : 各交通モードの需要量

ii)線路・電路維持

線路・電路維持費用を営業^{キロ}で割ったものを線路・電路維持費用原単位とし、本研究では各鉄道事業者の線路・電路維持費用原単位を平均化したものを使用する。この線路・電路維持費用にCO₂排出量原単位と営業^{キロ}を乗じることで、CO₂排出量を計算している。以下に式を示す。

$$CO_2 = (Cost_{rm} \cdot X_{rm} + Cost_{em} \cdot X_{em}) \cdot L \quad (2)$$

$Cost_{rm}$: 線路維持費用原単位

$Cost_{em}$: 電路維持費用原単位

$X_{rm} \cdot X_{em}$: CO₂排出量原単位

L : 営業^{キロ}

i) ii)を合計したものを維持管理部門のCO₂排出量とする。以下に式を示す。

$$CO_{2maintain} = Cost_{vm} \cdot X_{vm} \cdot D + (Cost_{rm} \cdot X_{rm} + Cost_{em} \cdot X_{em}) \cdot L \quad (3)$$

(3)車両走行

車両走行によって消費した電力もしくは燃料にCO₂排出量原単位を乗じることによってCO₂排出量を計算する。各交通モードの電力消費量及び燃料消費量は、交通モードごとの需要及びサービス水準によって決定されると考えられる。そこで、電力消費量・燃料消費量データを需要関連データ及びサービス水準データによって重回帰分析してやることにより、電力消費量・燃料消費量を需要及びサービス水準によって説明する各交通モードの一般的な傾向を示したモデル式を構築する。新規LRT整備では、電力消費量を被説明変数、総輸送トン・キロと各事業者の特徴を表現したダミー変数を説明変数とした重回帰分析により電力消費量関数を構築し、それにCO₂排出量原単位を乗じることでCO₂排出量を計算する。ここで、総輸送トン・キロは、旅客人^{キロ}を車両走行^{キロ}で割った平均乗車人数に乗客の平均体重を乗じた平均旅客重量と車両重量の和である平均総重量に、車両走行^{キロ}を乗じたものとする。既存鉄道では、電力消費量を被説明変数、輸送密度と車両走行^{キロ}を説明変数とした重回帰分析により電力消費量関数を構築し、それにCO₂排出量原単位を乗じることでCO₂排出量を計算する。バスでは、燃料消費量を被説明変数、平均乗車人数(旅客人^{キロ}を車両走行^{キロ}で割ったもの)と車両走行^{キロ}を説明変数とした重回帰分析により燃料消費量関数を構築し、それにCO₂排出量

原単位を乗じることでCO₂排出量を計算する。自動車では、旧建設省道路局・三菱総合研究所による燃料消費量推計式³⁾を適用し、それにCO₂排出量原単位を乗じることでCO₂排出量を計算する。以上の説明を表した式を式(4)~(7)に、重回帰分析によって求めた電力(燃料)消費量のパラメータ推計結果を表-2に示す。

$$CO_{2Lran} = (\alpha_L \cdot D_L + \beta_{L1} \cdot R_L + \beta_{L2} \cdot L_L + \gamma_L) \cdot X_{Lran} \quad (4)$$

$$CO_{2Tran} = (\alpha_T \cdot D_T + \beta_T \cdot R_T + \gamma_T) \cdot X_{Tran} \quad (5)$$

$$CO_{2Bran} = (\alpha_B \cdot D_B + \beta_B \cdot R_B + \gamma_B) \cdot X_{Bran} \quad (6)$$

$$CO_{2Cran} = f(V) \cdot R_C \cdot X_{Cran} \quad (7)$$

$\alpha_L, \alpha_T, \alpha_B, \beta_{L1}, \beta_{L2}, \beta_T$: 係数

$\gamma_L, \gamma_T, \gamma_B$: 定数項

V : 自動車の平均速度

D_L, D_T : LRT, 既存鉄道の輸送密度 (人/日)

D_B : バスの平均乗車人数 (人)

R_L, R_T, R_B : LRT, 既存鉄道, バスの車両走行^{キロ} (千^{キロ})

R_C : 自動車の車両走行^{キロ} (km)

L_L : LRT の営業^{キロ} (km)

CO_{2Lran}, CO_{2Tran} : LRT, 既存鉄道の走行 CO₂(t - C)

CO_{2Bran}, CO_{2Cran} : バス, 自動車の走行 CO₂(t - C)

$X_{Lran}, X_{Tran}, X_{Bran}, X_{Cran}$: CO₂排出量原単位

表-2 パラメータ推計結果

説明変数	路面電車		既存鉄道		バス	
	パラメータ	t値	パラメータ	t値	パラメータ	t値
総輸送トン・キロ [t・千 ^{キロ}]	41.43	6.40				
他モード混入ダミー	4334000	3.36				
輸送密度			185.47	2.10		
車両走行 ^{キロ}			2587.1	32.1		
平均乗車人数[人]					2533.8	1.81
車両走行 ^{キロ} [千 ^{キロ}]					28.729	65.9
定数項	2702000	4.34	-2450100	-0.232	-15197	-1.3
自由度修正済み決定係数	0.911		0.972		0.995	
サンプル数	11		35		35	

以上より推定された新規LRT整備・既存鉄道・バスのCO₂排出量関数のパラメータを表-3~表-5に示す。また、自動車のCO₂排出量関数については式(8)に示す。

表-3 CO₂排出量関数のパラメータ(新規LRT整備)

	総輸送トン・キロ [千 ^{キロ} ・t]	車両走行 ^{キロ} [千 ^{キロ}]	営業 ^{キロ} [km]	車両数 [両]	電停数 [ヶ所]	定数項
LRT	車両走行	0.004598				300.0
	車両維持		0.02942			
	施設維持			4.159		
	車両製造				15.00	
	施設建設			52.53		0.4979
	計	0.004598	0.02942	56.69	15.00	0.4979

表-4 CO₂排出量関数のパラメータ(既存鉄道)

		輸送密度 [人/日]	車両走行 [*] [千 [*]]	営業 [*] [km]	定数項
既存鉄道	車両走行	0.02059	0.2872		-272.0
	車両維持		0.02582		
	施設維持			21.92	
	計	0.02059	0.3130	21.92	-272.0

表-5 CO₂排出量関数のパラメータ(バス)

		平均乗車人数 [人]	車両走行 [*] [千 [*]]	車両台数 [台]	定数項
バス	車両走行	22.84	0.2589		-137.0
	車両維持		0.007317		
	車両製造			0.8843	
	計	22.84	0.2662	0.8843	-137.0

$$CO_{2car} = \left(\frac{231.7}{V} - 1.108 \cdot V + 0.00832 \cdot V^2 + 68.29 \right) \cdot 10^{-3} \cdot D_c \quad (8)$$

これらのCO₂排出量関数を用いて京都市を対象に新規LRT整備を含むパッケージ施策のケーススタディを行い、CO₂排出削減効果があるかどうかを検証する。

4. 都市内交通シミュレーションの概要

本研究で用いる都市内交通シミュレーションモデルは、自動車交通流の中に公共交通の経路及び時刻を組み込み、自動車及び公共交通利用者の選択経路を動的に求めるものである。都市内交通を対象としたシミュレーションモデルはこれまでに多く開発されているが、その中で本シミュレーションモデルの特徴は、一つは鉄道及びバスの経路や運行状況を組み込んでいる点であり、特に自動車とバスの走行が相互に関係していることを表現することで、より現実に近い交通施策評価を可能としている。もう一つは徒歩交通を考慮に入れている点であり、それによって公共交通の経路選択がより現実に近いものとなっている。本シミュレーションモデルで対象としている道路及び鉄道ネットワークの概要を表6に、道路ネットワーク図を図1に示す。

表6 ネットワークの概要

対象地域		京都市 向日市 長岡京市の 全域
道路 ネットワーク	ノード数	計336ノード
	リンク数	計1116本
鉄道 ネットワーク	駅数	計94駅
	運行本数	計4080本
バス ネットワーク	バス停	計321ノード
	系統数	計385系統
	運行本数	計11051本

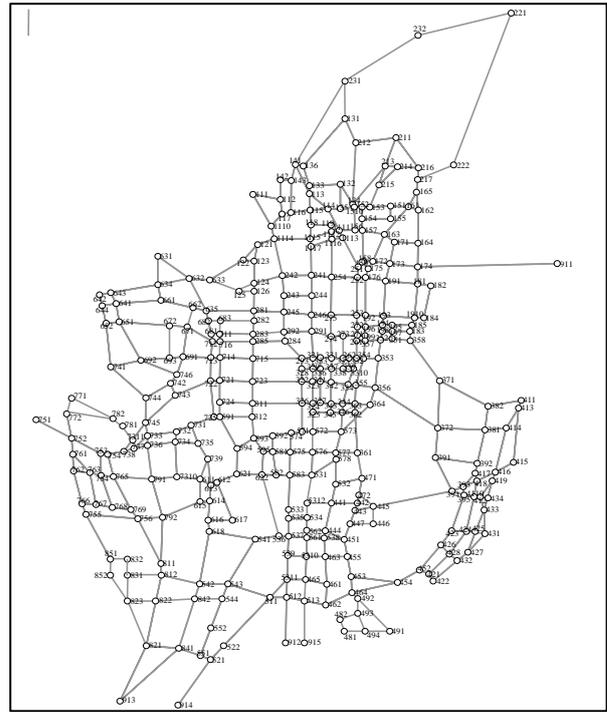


図1 対象道路ネットワーク

乗客と自動車の流動データは、平成12年の第4回京阪神都市間パーソントリップ調査を用いて作成した。車両ユニット・乗客ユニットは、発生・集中ノードと発生時刻、ユニットの大きさ、滞在時間、移動目的、免許の有無をデータとして持っている。ただ、パーソントリップ調査のデータは拡大することによってトリップの発生時刻が集中している場合があるため、原データの発生時刻の前後15分に様に分布しているものとして取り扱った。

5. 交通パッケージ施策のCO₂排出削減効果分析

種々のパッケージ施策によるCO₂削減効果を、CO₂排出量関数及び都市内交通シミュレーションを用いて計測する。本研究で考慮する交通施策は、LRT整備、P&R、トランジットモールの整備の3施策で、これらを組み合わせて以下の4シナリオを作成する。
シナリオ1: LRT整備(四条-河原町線)のみ
シナリオ2: LRT整備(四条-河原町線) + トランジットモール施策導入
シナリオ3: LRT整備(四条-河原町線) + P&R導入
シナリオ4: LRT整備(四条-河原町線) + P&R導入 + トランジットモール施策導入

本研究における仮想整備路線の駅間距離及び所要時間、運行間隔の設定を表7に示す。この設定に従い、運賃を入力データとして都市内交通シミュレーションを動かす。各交通モードの需要を計測する。尚、今回の運賃設定は200円とする。トランジットモール施策

とP&R施策のシナリオ設定については表8にまとめる。

表7 LRTの運行計画の設定

Node ID 電停名	所要時間[分] 駅間距離[m]	時間帯	運転間隔[分]
293 四条大宮	1分 300m	5:30 ~ 7:00	10
321 堀川四条	1分 300m	7:00 ~ 9:00	4
333 四条柳馬場	2分 450m	9:00 ~ 17:00	6
331 四条烏丸	1分 450m	17:00 ~ 19:00	4
335 四条高倉	1分 200m	19:00 ~ 22:30	6
262 四条守町	1分 250m	22:30 ~ 24:30	10
332 四条河原町	2分 500m		
3310 河原町松原	1分 500m		
334 河原町五条	3分 800m		
344 七条河原町	1分 300m		
346 堀小路河原町	2分 450m		
345 京都駅			

表8 パッケージ施策の設定

トランジット モータル	<ul style="list-style-type: none"> ・導入区間：四条烏丸ー四条河原町（四条通） ・導入後もLRT・バスのルート、本数に変化無し ・トランジットモータル化による来訪者の変化は考慮しない
P&R	<ul style="list-style-type: none"> ・駐車場設置場所：京福電鉄蚕ノ社駅（LRTの乗入区間） ・駐車場台数制約は考慮しない ・駐車料金：200〔円/台・日〕 ・P&R利用時の公共交通料金：通常の運賃と同額 ・車⇄公共交通の乗換所要時間は考慮しない

以上の設定に従って得られた各交通モードの需要関連データをCO₂排出量関数に適用することにより、各シナリオのELCELシステム境界内におけるCO₂排出量(ELC-CO₂)が求まる。それらをWithout CaseにおけるELC-CO₂と比較することにより、各シナリオにおけるCO₂排出削減量が求まる。このようにして計測した各シナリオのCO₂排出削減量を図2に示す。

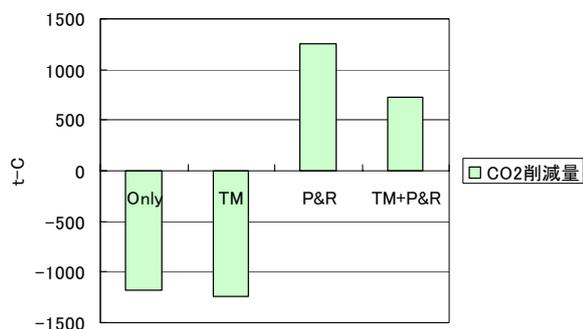


図2 各シナリオのCO₂排出削減量

[シナリオ1]

都市内交通全体によるCO₂排出量は、LRT整備のみでは増加している。これは、新規LRT整備による新たなCO₂排出量がその他のCO₂排出削減量を上回ってしま

ったためである。特に、自動車交通によるCO₂排出削減量があまり大きくなかったことが都市内交通全体によるCO₂排出量の増加に繋がったと考えられる。ただし、自動車車両製造や、道路建設によるCO₂排出を計算に含めていない点に留意する必要がある。

[シナリオ2]

トランジットモータル化による来訪者数の変化は考慮していないため、シナリオ1とほとんど変わらない結果となっている。ただ、導入区間での自動車通行を禁じているため、自動車交通量そのものは減少傾向が見られた。しかし反面、禁止区間の周囲で渋滞が起き、その結果で自動車交通によるCO₂排出が少し増え、都市内交通全体としても少し増えている。

[シナリオ3]

P&R導入によって、自動車から公共交通への機関転換が起これ、自動車交通によるCO₂排出を大きく削減できている。今回の分析においては、4シナリオの中で最もCO₂排出削減効果が高い施策となっている。

[シナリオ4]

シナリオ3に比べCO₂排出は大きく増加している。理由としては、P&R利用者がシナリオ3より増加したことが、逆にP&R駐車場周辺での渋滞原因となってしまうことが挙げられる。この問題に関しては、P&R駐車場を1つしか設定していないことと容量制約を考慮していないことの2点が影響していると考えられる。

6.まとめ

本研究では、LRT、既存鉄道、バスのそれぞれについて、ライフサイクルを考慮したCO₂排出量関数を導出した。その結果と、都市内交通シミュレーションを動かして得られた各交通モードの需要関連データを用いて、都市内交通における新規LRT整備事業を含むパッケージ施策によるCO₂排出削減効果を分析した。

<参考文献>

- 1) 加藤博和, 大浦雅幸: 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, 土木計画学研究・論文集 No.17 pp.471-479, 2000.9.
- 2) 近藤美則, 森口祐一 (編著): 産業連関表による二酸化炭素排出原単位, 環境庁 国立環境研究所 地域環境研究センター, 1997.
- 3) 建設省道路局, 三菱総合研究所: 道路整備による効果の推計に関する調査報告書, 1992.

<謝辞>

本研究は、地球環境研究総合推進費による支援を受け実施したものである。ここに記して謝意を表す。