

鉄道整備におけるLCAの原単位

「狩野 弘治¹・浅見 均²・高橋 浩一³・加藤 博和⁴

¹正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 関東支社計画部調査課課長補佐
(〒110-0014 東京都台東区北上野 1-10-14) E-mail: k.kano@jrtt.go.jp

²正会員 工修 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 関東支社計画部調査課課長補佐

³正会員 博(工) (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 関東支社計画部部長

⁴正会員 博(工) 名古屋大学大学院環境学研究科助教授

環境という観点から鉄道整備効果を評価するライフ・サイクル・アセスメント(以下LCA)において、各段階での環境負荷をより詳細に求めるためのCO₂排出量原単位の整備を行った。インフラ整備における原単位は、上乗荷重が異なる幹線鉄道と都市鉄道の両タイプ毎に、条件別・構造形式別に整理した。運行段階の原単位はランカーブ及びノッチ曲線を用いた消費電力量を求め、CO₂排出量を導く手法を確立した。これにより、平面・縦断線形に応じた消費電力量(=CO₂排出量)の評価を可能にするとともに、VVVFインバータ等の車両制御技術革新による消費電力量の低減についても適切な評価が可能になった。また、これら成果を用いて、仮想的な路線を設定してケーススタディーを行った。

Key Words : LCA, Railway system, CO₂ emission, Infrastructure, Notching curve

1. 研究の目的

ライフ・サイクル・アセスメント(以下LCA)は1997年に国際標準規格ISO14040として発行され、国内でも日本工業規格JISQ14040として制定されているが、これらには基本的な手続が記されているだけで、環境負荷量評価の具体的な手法については示されていない。

鉄道は公共交通機関として、運行段階での環境負荷が小さい点が主に着目されていた。ここで本研究では、鉄道整備効果のLCAを行うため、インフラ建設時や維持管理段階での環境負荷評価のため、鉄道整備各段階におけるCO₂排出量原単位の整備を行うことを目的とした。

2. 本研究でのシステム境界

LCA実施にあたって重要なのは、実施の目的を設定し、調査範囲を明確にすること(Goal and Scope Definition)である。

本研究では、CO₂排出量原単位を整備するという目的から、システム境界設定については図-1のように位置づけることとした。

図-1は加藤が提唱したシステム境界¹⁾であるが、本研究は同文献でいう「鉄軌道システムの個別標準モデルに関するLife Cycle Inventory」について述べ

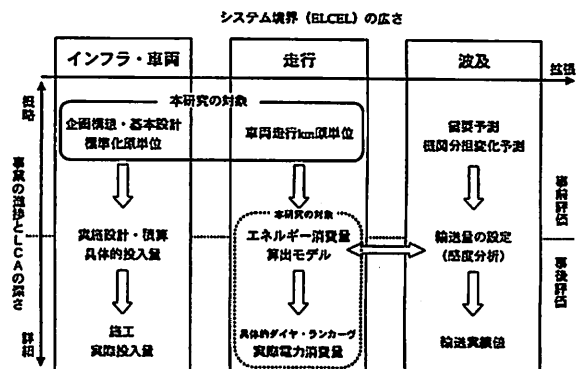


図-1 本研究でのシステム境界¹⁾

るものである。なお、研究対象として破線で囲った領域は、運行曲線(以降ランカーブ)からCO₂排出量を算出する手法について述べた部分である。

3. 原単位データの整備

鉄道整備のライフサイクルを構成する各コンポーネントにおけるCO₂排出に係る環境負荷量について、原単位データの整備を行った。

原単位データの整備を行うにあたっては、資材別の消費量や施工数量等を用いてCO₂排出量を算出する詳細な分析を行うために、構造部材や使用機器等

の単位数量あたりの原単位を整備した。ただし紙幅の都合で掲載は省略している。

また、構造別（橋梁・トンネル等）の単位数量あたり（延長あるいは基数等）CO₂排出量の原単位を確立しておくことと実務上おおいに有益であるため、これを整備した。

(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資材別消費量に、資材別 CO₂ 排出原単位を乗じて構造部材別 CO₂ 排出量を算出し、これらを合計して得ることができる。

なお、資材別 CO₂ 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、評価対象について広範囲かつ詳細な検討を加えている土木学会 LCA 小委員会推奨値²⁾を用いた。

(2) インフラ建設

インフラ建設にかかわる CO₂ 排出量は、「施工にかかわる負荷」（機械を用いて施工する際に生じる CO₂

排出量）と「機械にかかわる負荷」（施工機械じたいが内包している CO₂ 排出量）から構成される。

なお、この原単位は完成後の標準的な構造物本体から構築したものであり、現地の状況により内容が大きく変化する仮設工事等は含まれていない。

a) 機械運転による CO₂ 排出量

施工数量及び施工数量あたりの機械運転時間を算出し、これらを乗じることで機械総運転時間を導くことができる。

また、機械運転時の機械出力や燃料消費率等を基礎³⁾として、機械単位時間運転あたりの CO₂ 排出量を求めることができる。

上記の機械総運転時間に機械単位時間運転あたりの CO₂ 排出量を乗じることにより、機械運転による CO₂ 排出量を得ることができる。

b) 運転機械のライフサイクル負荷

施工数量に単位数量あたりの機械運転時間を乗じることで、機械運転時間を導くことができる。

表－１ 都市鉄道本体構造物原単位一覧

項 目				原単位	単位
本体構造物	高架橋	ラーメン高架橋	H=8m L=57.0m+調整桁13.0m	1.97	トン-C/m
			H=10m L=57.0m+調整桁13.0m	2.04	トン-C/m
			H=12m L=57.0m+調整桁13.0m	2.12	トン-C/m
			H=15m L=57.0m+調整桁13.0m	2.24	トン-C/m
	駅部高架橋	駅部高架橋	H=9m L=61.0m	3.09	トン-C/m
	橋脚	場所打ち杭	H=9.3m RC桁20m+RC桁20m	35.8	トン-C/基
			H=9.8m PCU桁20m+PCU桁20m	32.4	トン-C/基
			H=10.6m RC桁20m+PC桁30m	32.2	トン-C/基
			H=10.2m トラス桁88m+トラス桁1	139	トン-C/基
		鋼管井筒基礎	H=17.4m トラス桁69m+トラス桁6	505	トン-C/基
	橋りょう	RC桁	L=20m	0.846	トン-C/m
		PC桁	L=30m	0.671	トン-C/m
			L=47m	1.02	トン-C/m
		PCU桁	L=20m	0.63	トン-C/m
		鋼製トラス桁	L=414.5m 支間88+119+119+88	2.98	トン-C/m
	トンネル	シールド	セグメント外径9.8m	2.41	トン-C/m
		開削	躯体w=10.6m	4.48	トン-C/m
		山岳	NATM	2.95	トン-C/m
	土構造	盛土	W=10.7m、H=6.0m	1.77	トン-C/m
		切土	W=10.3m、H=6.0m	0.88	トン-C/m

表-2 都市鉄道維持管理・運用原単位一覧

項 目			原単位	単位
運用	車両		3.09×10^{-4}	トン-C/車両km
	付帯施設		2.12×10^{-4}	トン-C/車両km
維持管理	線路	レール	3.91	トン-C /百万車両km
	電路	架線	4.14×10^{-2}	トン-C /百万車両km
	車両	パンタシュー	5.50×10^{-3}	トン-C /百万車両km
		ブレーキシュー	0.144	トン-C /百万車両km
		車輪	1.71	トン-C /百万車両km

表-3 都市鉄道車両原単位一覧

項 目			原単位【トン-C/車両】		
			資材消費・加工組立	廃棄	計
車両	地下鉄	アルミ車両 (20m10両編成)	24.7	0.181	24.9
	近郊型	ステンレス車両 (20m10両編成)	16.6	0.181	16.8

また、機械の総運転時間と機械質量あたりの CO₂ 排出量を基礎として、機械のライフサイクルにおける単位運転時間あたり CO₂ 排出量原単位を求めることができる。

上記の機械運転時間に機械ライフサイクル単位運転時間運転あたりの CO₂ 排出量を乗じることにより、運転機械じたいの CO₂ 排出量を得ることができる。

(3) 建設時の資材等の運搬

建設時の資材等の運搬にかかわる CO₂ 排出量は、「運搬にかかわる負荷」(運搬機械を用いて資材等を運搬することにより生じる CO₂ 排出量)と「機械にかかわる負荷」(運搬機械が内包している CO₂ 排出量)から構成される。その算出手法は前項と同様であるため、省略する。

(4) 維持管理

維持管理に係わる CO₂ 排出量原単位として、ここでは付帯施設および車両に着目した。

算出方法は(1)とほぼ同様であり、維持管理に必要な資材ごとに算出した資材別消費量に、資材別 CO₂ 排出原単位を乗じて、維持管理部材別 CO₂ 排出量を算出し、これらを合計して得ることができる。

(5) 運用・運行

駅施設の電力消費量はある都市鉄道からのヒアリングによる、平成13年値を用いた。なお、単位電力消費量に対する CO₂ 排出原単位は 0.129 (kg-C/KWh) としている。

なお、計上した電力消費量は、列車以外の電力(信号・照明・換気・ポンプ等)である。

(6) 車両の廃棄

車両の廃棄に係る CO₂ 排出量は、車両1両あたりの CO₂ 排出原単位を用い、廃棄車両数に乗じることにより算出することができる。

なお、車両の廃棄は車体の解体のみ考慮しており、解体後の運搬、再利用にかかる環境負荷は含めていない。

以上より得られた CO₂ 排出量原単位は表-1～3に示されるとおりである。なお、幹線鉄道においても同様の原単位を整備しているが、紙幅の都合で掲載を省略している。

4. 列車運行による CO₂ 排出量

列車運行による CO₂ 排出量は、既存研究では電力総消費量を総車キロで割る手法によっていた。この手法は、実績値を用いた平均的な原単位を求めるものであり、計算が簡単という実務上の利便性が得られている。

ここで、実際の列車運行では、縦断線形や平面線形といった路線特性、VVVF インバータ等の運行する車両特性、または運行条件等による影響を受けると考えられる。そのため、複数の代替案から路線を選定する場合において詳細な CO₂ 排出量の分析を行う際には、これらの要素が把握可能な分析手法が必要になってくる。

そこで、縦断線形や平面線形の影響を考慮するため、ランカーブを作成し、そのときの消費電力の違いをノッチ曲線から算出し、消費電力から CO₂ 排出量を算出する方法を導入することとした。

列車の運行に係わる CO₂ 排出量を算出するために、まず対象ルートにおける列車運行を想定したランカーブを算出し、想定する車両のノッチ曲線を元に、一運行当たりの消費電力量を算出する。次に、消費電力量当たりの CO₂ 排出原単位を用いて、一運行当たりの CO₂ 排出量を算出する。

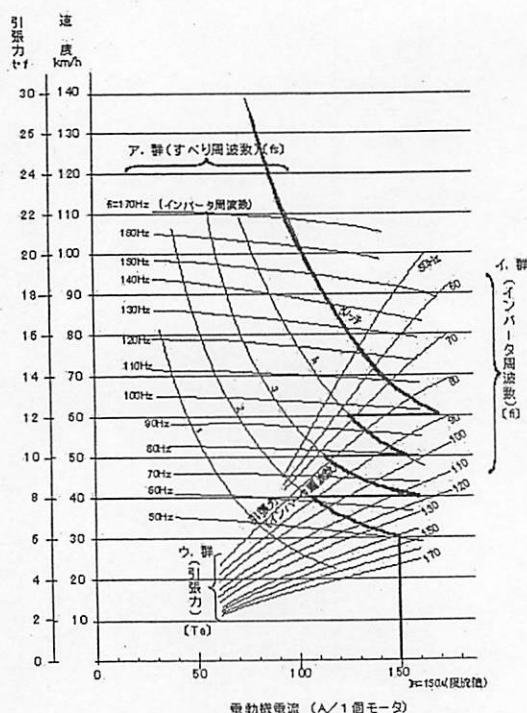


図-2 都市鉄道でのノッチ曲線例⁵⁾

その一方で、一日あたりの運行本数等より、ライフサイクルにおける運行本数を算出し、先に算出した1運行当たりの CO₂ 排出原単位を元に、列車運行に係る CO₂ 排出量を算出する。

走行時に消費する電力量は、図-2に例示したノッチ曲線を用いて算出する。算出した走行時消費電力量に、単位消費電力あたりの CO₂ 排出原単位を乗じて、CO₂ 排出量を算出する。

5. ケーススタディ

ここでは、構造物構成比率や列車走行条件の違いを比較するため、仮想的な3ルートを設定し、各段階での環境負荷量 (CO₂ 排出量) の試算を行った。ここでは、耐用年数が長いライフサイクルにおける鉄道の生涯環境負荷を構成するものとして、下記の項目別に試算を行った。

- ・インフラ整備時
- ・車両の製造時
- ・車両の運行
- ・駅施設での電力消費
- ・維持補修
- ・車両の解体及び廃棄

なお、インフラ整備のうち橋梁・高架橋・土構造といった本体構造物は、耐用年数全般にわたり更新や部材交換を行うことなく供用されるという前提を置くため、本体構造物の維持補修・廃棄は検討対象外とした。

(1) ルート設定

仮想的な3ルートは、下記のように設定した。

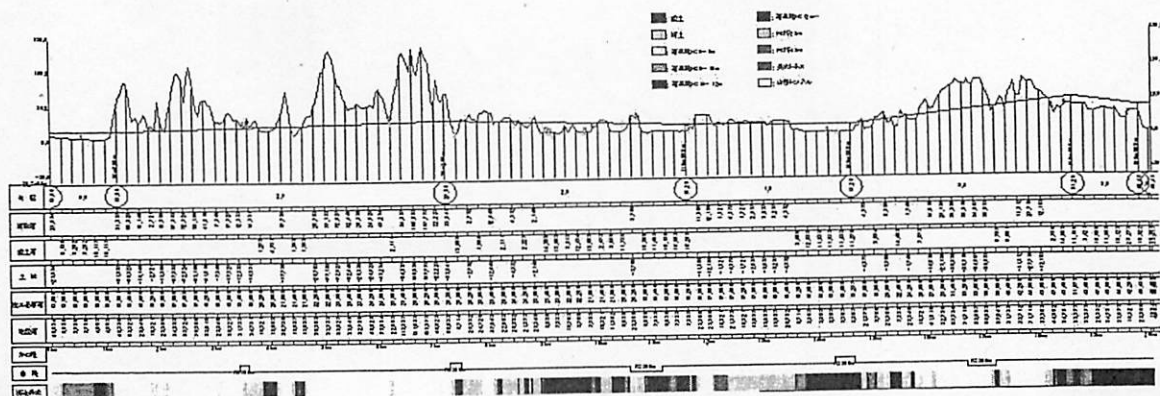


図-3 基本ルートの想定縦断図

a) 基本ルート

基本ルートは総延長が約 20km である。構造形式別の延長比では、高架橋部が約 30%、山岳トンネル部が 39%、土構造部が約 25%となっている。

なお、このルートの想定縦断面図は図-3に示されるとおりである。

b) 代替ルートⅠ

代替ルートⅠは、総延長は約 19km であり、構造形式別の延長比では、高架橋部が約 18%、山岳トンネル部が約 50%、土構造部が約 25%となっている。

なお仮想的な比較のため、路線延長を短くするかわり、山岳トンネル部の比率が高くなっている。

c) 代替ルートⅡ

代替ルートⅡは、総延長が約 21km となっている。山側を通過するルートのために山岳トンネル部の占める比率が高く、山岳トンネル部が約 70%、高架橋部が約 16%、土構造部が約 12%となっている。

なお仮想的な比較のため、あえて山間部を迂回するルート構成としており、3ルートの中で延長が最も長く、かつ山岳トンネル部の比率が最も高くなっている。

以上各ルートの設定を構造形式別延長からまとめると、図-4に示されるとおりとなる。

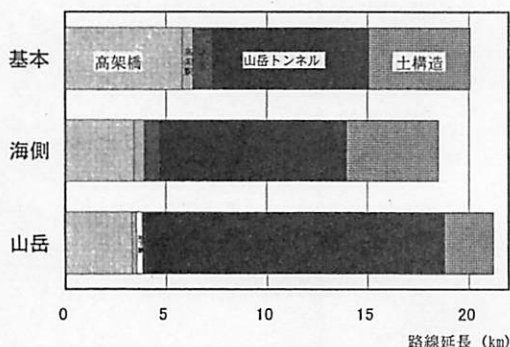


図-4 各ルート構造形式別延長内訳

(2) 試算にあたっての前提条件

試算するにあたり、以下の前提条件を置いた。

各ルートとも、複線とした。高架橋はH=8・10・12・15mの4種類を適用した。駅部の高架橋はH=10mとした。また駅の延長は、車両長 20m、1編成 6両に余裕長を見込み、1駅 130mとした。橋脚は、橋梁スパンに応じて配置した。橋梁は、PC橋 25・45mと鋼トラス橋を想定した。トンネルは山岳トンネ

ル (NATM 工法) とした。ただし代替ルートⅡにおける地下駅では開削工法を想定した。車両基地、各ルートとも 1 箇所と想定した。

車両は 6 両／編成で、6 編成を保有し、20 年毎に置換することとした。

列車運行は、一定のサービスを提供することを考慮し、運行時間は 6 時～23 時まで 10 分間隔で運行すると設定した。また列車運行時における電力消費量は、線形や駅位置による CO₂ 排出量の差を評価するため、ランカーブ及びノッチ曲線を用いた分析を行った。なお、車両性能による CO₂ 排出量の差は、感度分析として評価した。

ライフサイクルタイムは 50 年とした。

(3) 考察

試算結果から得られた各ケース毎の特徴を以下に挙げる。

ルート別のライフサイクル 50 年での CO₂ 排出量合計は、最も大きいのは基本ルートであった。ついで、代替ルートⅡ、代替ルートⅠの順となった。

CO₂ 排出シェアは運行部分が最も大きく、全体の 80% 近くに達する。その一方、本体・付帯構造物の建設、車両の製造・加工組立・廃棄、及び維持管理 (付帯構造物と車両) の部分で発生する CO₂ 排出シェアは小さい (図-4 及び 5)。

代替ルートⅠは路線延長で最も短いから、縦断面勾配が相対的に厳しい設定になっていることから、列車運行時の CO₂ 排出量は路線延長が最も長い代替ルートⅡをも上回っている。

代替ルートⅡは路線延長が最も長いから、本体構造物の CO₂ 排出量が大きくなっている。そのかわり、縦断面勾配・曲線半径とも緩やかな設定であることから、列車運行時の CO₂ 排出量は最も少ない。

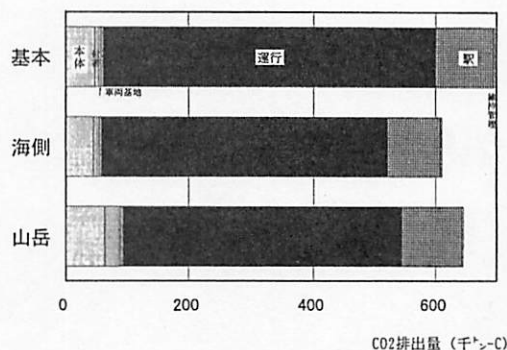


図-4 各ルートの CO₂ 排出量 (ライフサイクル計)

CO₂排出量 (千トン-C)

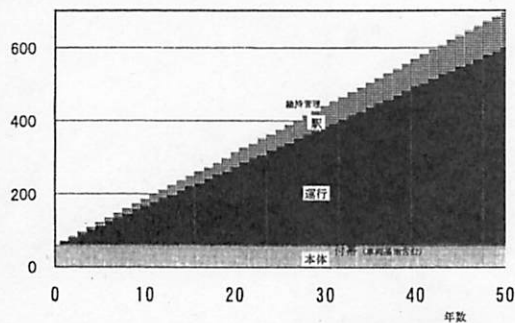


図-5 基本ルートのCO₂排出量 (経年累積)

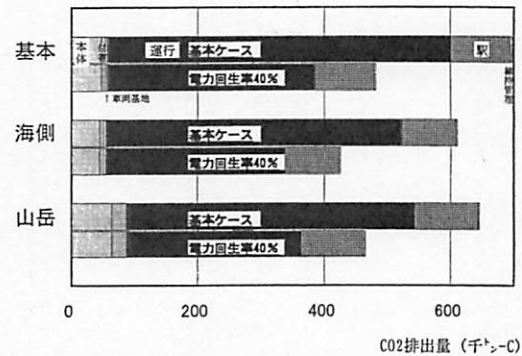


図-7 電力回生率による感度分析

(4) 感度分析

a) 運行頻度

列車の運行頻度を10%増減させ、その幅の中で運行段階でのCO₂排出量(ライフサイクルタイム50年間の総計)及び投入車両の製造・廃棄段階のCO₂排出量の感度を検討した。

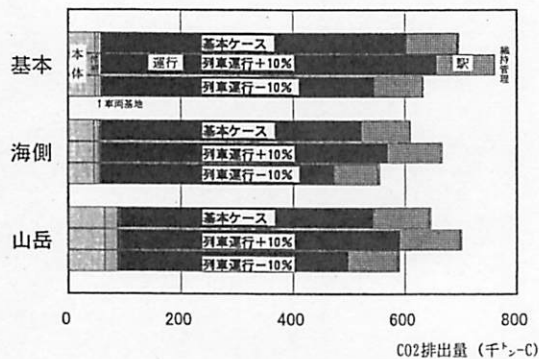


図-6 運行頻度による感度分析

運行頻度は運行車両数との相関性が強いことから、運行頻度の変化率は列車運行段階のCO₂排出量の変化率に直接影響する。試算結果をみると、基本ケースからのCO₂排出量の変化率は、ほぼ運行頻度の変化率と同じとなった(図-6)。

b) 回生率

回生率には既存関連文献より引用した40%を適用し、列車運行時のCO₂排出量を試算した。

その結果、各ルートともにCO₂排出量は約30%減少となり、いずれも大幅な削減があると試算された(図-7)。

6. まとめ

本研究においては、鉄道整備効果のLCAを行うにあたり、必要な原単位を整備することができた。ただし実際の工事では、現地の状況により工事内容に大きな違いが出てくる場合があるので、実際の適用にあたっては当機構に問い合わせされたい。

また、ランカーヴ・ノッチ曲線からCO₂排出量を算出する方法を確立し、縦断線形や平面線形などの路線特性、VVVFインバータ等の運行する車両特性、あるいは運行条件等によるCO₂排出量の違いを評価できるようになった。

さらに、ケーススタディの前提条件下では、列車運行によるCO₂排出量が大半を占め、列車運行頻度や電力回生率の設定により値が大きく変動することが確認された。

今後さらに検討を進めるなかで、本研究の手法をより有用なツールとなるよう深度化していきたい。

参考文献

- 1) 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, 土木学会第31回環境システム研究論文発表会講演集, 2003
- 2) 土木学会: 第4回地球環境シンポジウム講演集, 1996
- 3) 日本建設機械化協会: 建設機材等損耗算定表, 2001
- 4) 運輸政策研究機構: 都市交通年報, 2001
- 5) 日本資源協会: 大都市生活のライフサイクルエネルギー, 1999
- 6) 日本鉄道電気技術協会: 209系インバータ制御車
- 7) 鎌原今朝雄: 電気運転用電力設備の容量計算法, 日本鉄道電気技術協会, 1999
- 8) 日本鉄道建設公団関東支社: 環境から見た鉄道整備効果に関する調査, 1999~2003
- 9) 狩野弘治, 田中敬太郎, 櫻田陽一: 鉄道のLCAに関する研究—都市内鉄道と幹線鉄道を対象として—, LCA調査結果のインタープリテーションセミナー, 2001