

LCAを適用した中量旅客輸送機関の環境負荷評価*

Environmental Load Evaluation of Variety of Medium Capacity Passenger Transport Systems Applying LCA*

長田 基広**・渡辺 由紀子***・柴原 尚希****・加藤 博和*****

By Motohiro OSADA**・Yukiko WATANABE***・Naoki SHIBAHARA****・Hirokazu KATO*****

1. はじめに

公共旅客輸送機関を整備するうえで、大量輸送に対応する鉄軌道と、少量輸送に対応する路線バスのいずれでも対応し難い中間の需要に適した輸送機関として、モノレール、AGT(Automated Guideway Transit)、GWB(GuideWay Bus)、HSST(High Speed Surface Transport)等の中量旅客輸送機関があり、日本を含め世界中で多くの路線が営業され、新たな建設も進められている。更に近年では、路面電車を近代化した LRT(Light Rail Transit)や、路線バスが専用レーン・道路を高速走行する BRT(Bus Rapid Transit)の導入例も多い。

通常、どの旅客輸送機関を整備するかは、想定される需要量に対して十分な輸送力(容量)を有し、かつ採算性が確保されるかという観点から検討される(表-1)。しかしながら、公共輸送機関に対して「環境へのやさしさ」を期待する近年の潮流を踏まえると、中量旅客輸送機関に関しても環境負荷の面から評価を行い、輸送機関の選択における参考データとして整備する必要がある。

輸送機関の「環境へのやさしさ」は、輸送人 km 当たりの走行起源 CO₂排出量の全国平均実績値¹⁾で示されることが一般的である。しかし、輸送機関を新規に整備する場合には、その整備に伴うインフラ建設や車両製造から発生する環境負荷も無視できない²⁾。都市間高速鉄道のように輸送密度が高く運行距離の長い輸送機関では走行段階の環境負荷が卓越するが、中量旅客輸送機関の場合、輸送密度が低いことから、建設段階の環境負荷が相対的に大きくなる可能性があり、これを含めた評価の必要性はより高いと言える。そのためには、単に走行起源の環境負荷のみならず、対象とする輸送機関の関連施設の建設や車両の製造において必要な資材の調達・輸送、建

表-1 各旅客輸送機関の一般的な輸送力と表定速度³⁾

種類		輸送力(片道) [人/h]	表定速度 [km/h]
都市内鉄道・地下鉄		64,000	30
リニア地下鉄		35,000	30
中量 旅客 輸送 機関	モノレール	26,000	30
	AGT	18,000	25~30
	HSST	15,000	30
	LRT	14,000	20~25
	GWB	4,000	30
	BRT	4,000	20
路線バス		2,500	12

設・製造、運用、更新などの各ライフステージの環境負荷を定量的に把握する手法である Life Cycle Assessment(LCA)の導入が必要である。

公共交通機関を対象とした LCA 研究は既に数多く行われている⁴⁾⁵⁾。本研究では、これら既往研究で評価の対象となっていない輸送機関も含めた各種中量旅客輸送機関の環境負荷を横並びで評価し、比較を行うことを目的とする。比較にあたっては、1)需要量による感度分析を実施し、ライフサイクル環境負荷を最小とする輸送機関を明らかにする。また、交通システムを対象とした従来の LCA の多くが CO₂のみを評価してきたのに対し、本研究では 2)CO₂を含む 5 種類の環境負荷物質を扱うとともに、被害算定型影響評価手法の導入によるインパクト評価や統合化を行う。加えて、3)評価指標として、輸送人 km 当たり環境負荷に加え、表定速度も考慮した環境効率指標を導入し、代替案比較を行う。以上 1)~3)のアプローチについて、交通システムの LCA に適用することの有効性を示す。

2. 旅客輸送機関への LCA 適用の方法

LCA は、対象とする製品について、すべてのライフステージを通して投入される資源や発生する環境負荷、また、それらが人間や生態系に及ぼす影響を定量評価する手法である。本研究では、ISO14040 番台で規格化されている LCA の手順に準拠しつつ、交通システムの特

*キーワード：地球環境問題、LCA、交通計画評価

** 非会員、修(工)、大東建設㈱

*** 学生会員、学(工)、名古屋大学大学院 博士前期課程
環境学研究科 都市環境学専攻

**** 正会員、修(環境)、三重交通㈱ 総合企画室経理部

***** 正会員、博(工)、名古屋大学大学院
環境学研究科 都市環境学専攻 助教授

(〒464-8603 名古屋市千種区不老町、TEL：052-789-5104、
FAX：052-789-3837、E-mail：kato@genv.nagoya-u.ac.jp)

性に応じて評価を進める。詳細手順を以下に説明する。

(1) 目的及び調査範囲の設定 (Goal and scope definition)

(a) 比較対象とする旅客輸送機関

本研究では、①鉄道と、②モノレール、③AGT、④LRT、⑤GWB、⑥BRT の 5 種類の中量輸送機関を取り上げる。LCA 実施において各対象輸送機関のデータを得るために参考とした路線と各機関についての計算時の諸仮定を表-2 に示す。

①鉄道

鉄道は中量旅客輸送機関ではないが、比較対象として取り上げる。輸送力が大きく、高速性に優れ、長距離輸送にも適している。ここでは、高架構造で建設されることが多い中量旅客輸送機関との比較を行うことを意識して、高架式鉄道を扱う。地下鉄は高架式鉄道に比べ、インフラ建設分の環境負荷が延長 km 当たりで 1.2~2 倍大きいことが狩野らの推計によって明らかにされている⁹⁾。

②モノレール

1 本の走行路(軌道桁)の上にゴムタイヤの車両が跨座または懸垂して走行するシステムである。軌道桁の上にまたがって走る方式を跨座式、軌道桁を走る台車から車体がぶら下がる方式を懸垂式という。本研究では日本において例が多い跨座式を対象とする。

③AGT (Automated Guideway Transit)

日本では新交通システムと呼ばれることが多い。一般鉄道に比べて小型軽量のゴムタイヤ付き車両が専用軌道を走行するシステムである。鉄道と比べて厳しい線形で路線が引けるため、用地確保が困難な場所にも対応が可

能である。また、電力を動力とするため、走行において排気ガスはなく、ゴムタイヤを用いるために走行時の振動や騒音も少ない。特有の構造として、インフラには走行台とガイドレールを有している。

④LRT (Light Rail Transit)

通常の鉄道・地下鉄に比べ簡易な構造を有する鉄軌道システムで、道路上に設置された軌道を走行する場合もある。かつては路面電車の車両・設備を更新した例が多かったが、新設のものも増えてきている。日本では路面電車の車両のみを近代化する例が見られるが、これを LRT と呼ぶのは適当でない。この車両は LRV (Light Rail Vehicle) と呼ばれる。なお、本研究では LRT 新設によって自動車が行可能な道路は減少しないと仮定する。もし道路が減少する場合、それによる渋滞発生の影響を考慮する必要があるが、その検討を行った結果については別報告¹⁰⁾を参照されたい。

⑤GWB (GuideWay Bus)

案内輪を取り付けたバスが専用軌道(ガイドウェイ)に沿って走るシステムである。定時性と高速性に優れるとともに、専用軌道区間と一般道路とを直通運行できるメリットを持つ。また、ガイドレールの存在によって幅員を小さくできるため、通常の高架道路と比べてスレンダーな構造とすることが可能であり、建設費を削減できる。ガイドウェイバス特有の構造として、インフラにはガイドレール、バス車両には案内輪がある。

⑥BRT (Bus Rapid Transit)

専用のレーンや道路を設けてバスが走行するシステムである。専用の車両を必要とせず、インフラも少なく済むため、最も安価に整備できる。名古屋市で 1985 年に新設された基幹バス新出来町線は、道路中央部にバスレ

表-2 比較対象とする各輸送機関の概要

輸送機関		①鉄道	②モノレール	③AGT	④LRT	⑤GWB	⑥BRT
インフラ	構造	高架(PC)橋			道路上軌道	高架(PC)橋	道路上専用レーン
	駅間隔[m]	1,600	800	800	400	800	400
	ライフタイム[yr]	60	60	60	10	60	10
車両	車両走行原単位 (消費電力燃料消費量)	2.5 [kWh/車両 km]	1.77 [kWh/車両 km]	1.0 [kWh/車両 km]	1.5 [kWh/編成 km]	0.33 [1/台 km]	0.43 [1/台 km]
	表定速度[km/h]	40	30	30	20	30	20
	定員[人/両]	130	95	50	150	74	74
	編成車両数[両/編成]	4	4	4	1(連接)	1	1
	最大混雑率[%]	150	150	130	150	100	100
	最小運行間隔[min]	2	2	2	2	1.2	1.2
	ピーク時輸送力 (片道)[人/h]	5,850	4,275	7,200	6,750	3,700	3,700
	ライフタイム[yr]	15	15	15	15	10	10
	参考とした路線 (運行開始年)	名古屋臨海 高速鉄道 (あおなみ線) (2004)	大阪 モノレール (1990)	桃花台新交通 (ピーチライナー) (1991)	国内の 2 事業者	名古屋ガイドウェイ バス志段味線 (ゆとりーとライン) (2001)	名古屋市 基幹バス 新出来町線 (1985)

ーンや停留所を設けてる BRT の一種である。表定速度は一般路線バスの 1.5 倍程度(約 20km/h)となっている。

(b) 路線の設定

都市部で、臨海地域でなく高架下部構造が比較的大規模とならない地域を想定し、延長 10km の仮想的な路線を考える。輸送密度はどの駅間も一定と考え、方向による輸送量の偏りもないものとする。集中率 P (1 日輸送量に占めるピーク 1 時間輸送量の割合) は 25% と設定する。

(c) システム境界の設定

各輸送機関はインフラ(本体構造物、付帯構造物)と車両から構成されるシステムであり、これらシステム全体を対象としたライフサイクル環境負荷(System Life Cycle Environment Load: SyLCEL)で評価する。本研究で想定するシステム構成ツリーを図-1 に示す。図中の番号は、各輸送機関が有している要素である。

各構成要素のライフサイクルは a) 建設・製造、b) 供用、c) 廃棄の 3 つのステージに大きく分けられる。このうち c) 廃棄分は微小であるため、本研究ではインフラ建設、車両製造、および供用段階を対象とした環境負荷の合計を SyLCEL とする。

(d) 対象とする環境負荷と統合化

地球温暖化を引き起こす二酸化炭素(CO_2)、メタン(CH_4)、亜酸化窒素(N_2O)、および、大気汚染や酸性化を引き起こす代表的な環境負荷である硫黄酸化物(SO_x)、窒素酸化物(NO_x)の 5 種類を推計対象とする。また、インパクト評価でこれらの統合化を行う。

(2) インベントリ分析 (Inventory analysis)

インフラを対象とするインベントリ分析の方法には、「積み上げ法(プロセス法)」と「産業連関法」がある。積み上げ法はライフサイクルの各工程における環境負荷を積み上げていくもので、詳細な推計が可能であるが、多大な労力と詳細なデータが必要である。産業連関法は産業連関表を用いて部門ごとに環境負荷を配分したもので、遡及分まで含めた推計が容易であるが、産業連関表の部門分類が粗いため、本研究が目的とするような輸送機関代替案の比較は不可能である。

そこで本研究では、交通システムの LCA において通常用いられてきている「組み合わせ法(ハイブリッド法)」²⁾を用いる。これは交通システムの各要素に投入される資材・エネルギー量を産業連関表の原単位を適用して推

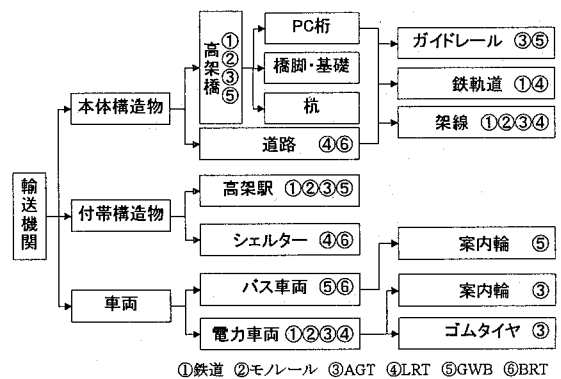


図-1 本研究で対象とする輸送機関のシステム構成ツリー

計するもので、資材等に遡及する分の推計が比較的容易で、かつ詳細な代替案比較を可能とするものである。環境負荷原単位には、日本建築学会が 1995 年産業連関表をもとに作成している LCA データベースを使用する¹¹⁾。これを使用する理由として、1) 内包環境負荷が考慮され、かつ物量ベースに換算済みであること、2) 分類が約 500 と細かい上に、運搬車両や施工機械といった建設分野にとって好都合な分類が含まれていること、が挙げられる。

1) 本体構造物

a) 建設段階

本来は実際の資材投入量やエネルギー消費量を詳細に調査し積み上げる必要があるが、本研究のように仮想路線を評価対象とする場合、これらのデータを得ることが困難なため、概略LCA手法¹²⁾を用いて推計を行う。これは、あらかじめ各要素に対して標準構造物を設定し、そのインベントリ分析を実施することによって、求められる標準構造物1単位(例えば軌道1[m]や、駅1箇所等)当たりの環境負荷を原単位とし、これに構造物の数量(例えば軌道10[km]等)を乗じて総環境負荷を推計する手法である。本研究では著者らが既に開発している鉄道の概略LCA手法¹³⁾を援用して推計を行う。

高架構造を有する輸送機関の資材投入量に関しては、各輸送機関の複数路線の平均値を用いている。特に割合の大きいコンクリート投入量に関して、各輸送機関についてデータ入手元として取り上げた路線の数、平均値、最大値、最小値、標準偏差を表-3に記載する。ただし、杭基礎の値は地盤により大きさが異なるため、臨海部の路線を省いた平均値としている。変動係数は20%以下であり、路線による差は小さい。

表-3 インフラ構造物へのコンクリート投入量[m]の路線平均とばらつき

	路線数	平均値	最大値	最小値	標準偏差	変動係数
モノレール	3	58,379	66,207	48,447	7,401	0.13
AGT/GWB	4	79,102	92,319	55,718	13,912	0.18
鉄道	3	105,753	119,917	97,907	10,035	0.09

BRT は一般道路上を走行することから、道路インフラの建設に伴う環境負荷を計上する必要がある。ただし、道路インフラは BRT 以外の交通機関にも供用されるため、その環境負荷をどの程度 BRT に配分 (allocation) するかが問題となる。本研究では、車両走行による道路へのダメージが交通量および車両重量によって異なることから、各輸送機関が、与えているダメージの割合だけ道路を使用していると考えて配分を行う。道路への損傷は車両重量の 4 乗に比例する¹⁴⁾ことから、ダメージ I を式(1)のように仮定する。これに基づいて、バスが道路に与えるダメージの割合 r_b を式(2)で表す。この r_b をバスへの配分率とする。

$$I = a \cdot m^4 \times T \quad (1)$$

$$r_b = \frac{I_b}{I_c + I_b} \quad (2)$$

a : 係数、 m : 車両重量、 T : 断面交通量、
 I_b : バスが道路に与えるダメージ、
 I_c : バス以外の車両が道路に与えるダメージ

本研究では名古屋市の基幹バス新出来町線を対象とし、式(1)、(2)を用いて r_b の推計を行う。自動車交通量は平成 11 年度大都市交通センサスの当該道路の調査値を用いる。センサスによる車種の分類は乗用車、バス、小型貨物、普通貨物の 4 種であり、それぞれの自重を 1.2t、10t、2.5t、5t と仮定する。バスの旅客重量は混雑率の実績値(約 30%)より、貨物重量は国土交通省の平成 14 年度自動車輸送統計調査より車種別平均的貨物量を推計し用いる。この結果、各車種の平均乗客・貨物重量は 0.06t、1.4t、0.4t、4.0t となる。以上より m と T を推計することができる。これを用いて 3 つの断面について、路線バスと基幹バスの運行割合についても考慮した上で基幹バスへの配分率の推計を行った結果、32、37、45% となったため、本研究ではこれらの平均値である $r_b=38\%$ を用いる。

道路補修のための資材投入量(舗装の量)は道路工事の積算書の値¹⁵⁾を用いて求める。

2) 付帯構造物

a) 建設段階

駅施設に関しては、著者ら¹³⁾によって算出された都市近郊鉄道における駅の延床面積当たり原単位を用いる。BRT のシェルター(停留所)は詳細設計図により推計を行う。駅・停留所数は、表-2 に示す駅間隔によって決まる。

b) 運用段階

駅施設や管理センターにおける消費電力および本体構造物の維持補修を対象とする。ただし、本研究で対象とする環境負荷については、後者は無視できるほど

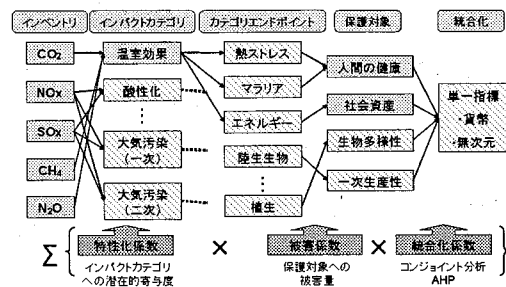


図-2 日本版被害算定型影響評価手法(LIME)¹⁷⁾
 のうち本研究へ適用する因果パス

小さい値である。

3) 車両

必要車両数は需要量や集中率によって変わる。設定方法は 4 章 (1) で詳述する。

a) 製造段階

鉄道車両の資材投入量及び組立のエネルギー消費量は、都市近郊型鉄道ステンレス車両の材料構成および車両製造にかかるエネルギーを用いて、車両の重量に比例すると仮定し推計する¹⁶⁾。AGT 車両本体についても同様に仮定し、さらに車両本体にゴムタイヤを加えた分を AGT 車両製造の環境負荷とする。

バス車両製造の環境負荷は、乗用車製造の環境負荷推計値を用いて、車両重量に比例すると仮定する。乗用車製造の環境負荷は産業環境管理協会が公開するインベントリデータ¹²⁾に記載されている資材投入量及びエネルギー消費量より求める。

b) 走行段階

AGT・鉄道は電力を、GWB・BRT は軽油をエネルギーとして走行する。表-2 に示す各輸送機関の 1 編成(又は両、台)が 1[km] 走行するときの消費電力・燃料消費量(車両走行原単位)に走行距離を乗じ、さらに消費量当たりの環境負荷原単位の全国平均値¹¹⁾を用いて推計する。なお、電力についてはこの原単位は発電方法の組成によって異なる。

以上の推計では標準的な値や全国平均値のような値を用いていることが多い。したがって、推計結果は、本研究でデータを入手した各路線の特殊性にあまり依存しないものとなる。

(3) インパクト評価 (Impact assessment)

(2) 節のようにして求めた各環境負荷発生量を基に、地球温暖化や大気汚染といった各環境影響カテゴリへの影響の大きさ、およびそれらをさらに統合化した値を求める。

本研究においては統合化指標として、日本版被害算定型影響評価手法「LIME : Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling」¹⁷⁾において示されている値を用いる。LIME では、排出量に伴う被害の大きさが a)「特性化係数」(環境負荷が各環境カテゴリに及ぼす影響を表す係数)、b)「被害係数」(各環境カテゴリが保護対象(人間健康、社会資産、一次生産、生物多様性)に及ぼす被害を表す係数)、c)「統合化係数」(すべての保護対象への影響を単一指標化するための係数)により定量化されており、これらを用いて被害の量が統合化指標として算定される(図-2 参照)。統合化係数には Version1(重み付け値特定にコンジョイント分析を利用し、評価結果が社会的費用として貨幣価値換算で表される)、Version2(Version1と同様だが、評価結果が無次元の指標として表される)、Version3(重み付け値特定に AHP を利用し、評価結果は無次元の指標として表される)がある。本研究では Version1 を用いている。

(4) 結果の解釈(Interpretation)

各輸送機関のライフサイクル環境負荷を比較するために、機能単位として輸送人 km を考え、人 km 当たりの値を指標として用いる。まず、想定輸送量を 10,000[人/day]とした時の各輸送機関における各環境負荷およびその統合値を推計し、総量やライフステージごとの割合の違いを分析する。次に需要量を変化させて感度分析を行う。なお、ここでは簡便のため、平日と休日の需要量の違いといった細かな需要の変動は考えていない。

3. ライフサイクル環境負荷推計結果

(1) インベントリ分析

各輸送機関について 1 日輸送量 10,000[人/day]の場合の SyLCEL を推計し、それを人 km 当たりに換算した結果を図-3~7 に示す。

SyLC-CO₂(CO₂を SyLCEL で評価した値)については、高架構造を有する輸送機関が大きな値となっている。本体構造物の建設はもとより付帯構造物の運用分も大きくなるためであり、SyLC-CO₂に占めるそれらの割合は 7~8 割に達する。また、走行分については、GWB、BRT の値は電力走行車両に比べて大きくなっている。これはバスの燃費に依存するものである。

LRT はすべてのライフステージにおいて SyLC-CO₂の値が小さい。これは、必要とするインフラが少ないこと、車両においても定員に対する車両重量が小さいため、製造に関わる環境負荷が小さくなるのが理由である。

BRT はインフラ建設段階の環境負荷は小さく、ほとんどを走行段階が占める。BRT と GWB を走行段階に

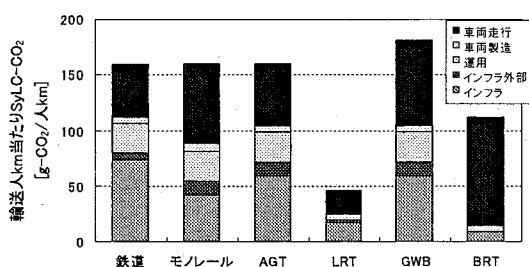


図-3 輸送人 km 当たり SyLC-CO₂(需要量 10,000[人/day])

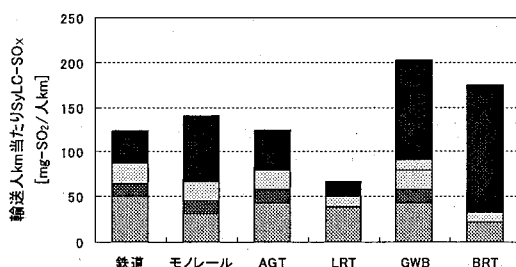


図-4 輸送人 km 当たり SyLC-SO_x(需要量 10,000[人/day])

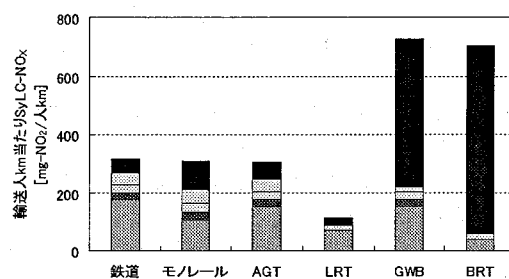


図-5 輸送人 km 当たり SyLC-NO_x(需要量 10,000[人/day])

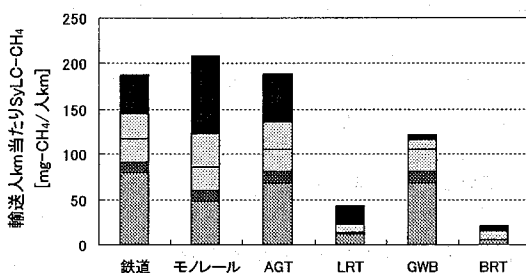


図-6 輸送人 km 当たり SyLC-CH₄(需要量 10,000[人/day])

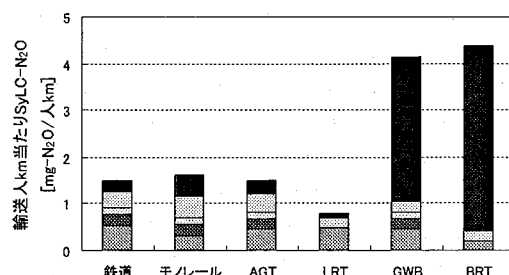


図-7 輸送人 km 当たり SyLC-N₂O(需要量 10,000[人/day])

関して比較すると、GWBの方が少ない加減速回数のため燃費が良く、走行段階での環境負荷は小さい。一方、GWBは運行規模に対して巨大なインフラを有しているため、インフラ(主にコンクリート構造物)の建設段階における環境負荷が大きい。したがって、ライフサイクル全体で見ると、燃費向上による環境負荷削減分が打ち消されてしまう。

CO₂以外の環境負荷については、NO_x、N₂OはGWB、BRTが走行段階において他の輸送機関と比べて大きくなっている。これはバス走行がこれらの排出の多い軽油を燃料としていることに起因している。また、SO_xにおいてもバス走行分が占める割合は大きい。

(2) 被害算定型影響評価手法によるインパクト評価

インベントリ分析で得られた各輸送機関のライフサイクル環境負荷を、LIMEを用いて統合化した結果を図-8に示す。被害量が最も大きいGWBは最も小さいLRTの約3.8倍となっている。いずれにおいてもCO₂、SO_x、NO_xの割合が大きく、特に排出量が圧倒的に大きいCO₂は半分以上を占めている。しかしながら、排出量が小さいSO_x、NO_xも大きな割合となっている。これは主に大気汚染によるものである。大気汚染は人の健康を直接害するものであるため、LIMEにおいて被害量を単一指標に統合するときの重みが大きくなっている。この傾向は、既往の貨幣評価型の環境負荷統合評価において一般的に見られる。

なお、ここで算出した貨幣単位の統合評価値は、運行経費(数十[円/人・km]のオーダー)に比べて数十分の一の値に相当する。LIMEでは貨幣評価においてCVMを用いているが、CVMによる環境負荷の被害額推定は、回答者の実感が伴わないために、この結果のように低く出してしまう傾向があるという著者ら¹⁸⁾の指摘と一致する結果である。

4. 需要量変化に関する感度分析

(1) 需要量と運行本数・車両数の関係

3章の結果から、SyLCELのライフステージごとの内訳によって輸送機関を大別すると、供用開始以前のインフラ建設や車両製造時に多くの環境負荷を排出するものと、車両走行や施設運用のように供用開始後の使用状態によって環境負荷発生量が大きく変わるものの2種類となることが分かる。需要量が大きい場合には、走行や運用に起因する環境負荷が大きくなる一方、インフラ建設における環境負荷は需要量との相関が低い。そこで、インフラ建設における環境負荷は需要量と無関係に一定とし、需要量の増減が運行本数の増減に反映されるという仮定で、需要量に対する感度分析を行う。

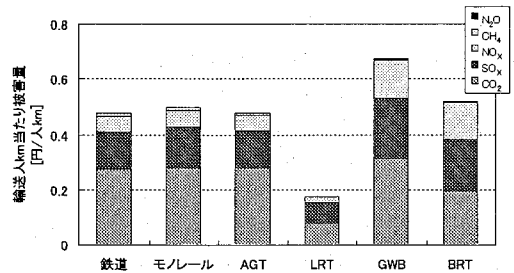


図-8 輸送人km当たりの被害量統合値
(需要量10,000[人/day])

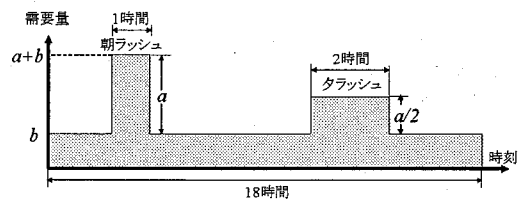


図-9 1日の需要量の変化の想定

需要量に伴って変化する環境負荷として、車両の製造、走行分がある。車両走行における環境負荷量の変化については、平均乗車人数がほぼ一定の自動車と異なり、公共旅客輸送機関では需要量と車両走行kmが必ずしも比例しないことから、混雑率もしくは車両運行本数の設定を行う必要がある。その決定方法としては、a)混雑率を外生的に与える、b)需要量と混雑率(もしくは運行本数)との関係を定式化して用いる、の2種類が考えられる。本研究では混雑率を外生変数として扱うことは行わず、b)の方法を採用する。

日本の大都市近郊部の鉄道・モノレール・AGTの55路線について、1日平均の需要量と混雑率(平成15年度都市交通年報)との関係について様々な式を仮定して単回帰分析を行った結果、式(3)が最も適合性が高く、修正済み決定係数は0.678となった。

$$D = kC^{\alpha} \quad (3)$$

$$\alpha=2.16, k=13.6,$$

$$D: \text{需要量[人/day]}, C: \text{混雑率[\%]}$$

式(3)は、混雑率が需要量の平方根(1/2乗)におおよそ比例するという関係を表している。本研究では、旅客輸送機関の最大混雑率が異なることを考慮するために、係数 k の調整を行う。混雑率・需要量の関係、輸送機関による混雑率の違いを考慮した車両運行本数の設定手順を以下に示す。

1. 著者ら⁷⁾の方法を用いて、1日の需要量が図-9のように時間変化すると仮定し、朝ラッシュ、タラッシュ、平常時の3種に需要量を割り振る。朝ラッシュを1時間、タラッシュを2時間と仮定している。

2. 日需要量 D と集中率 $P(=25\%)$ により朝ラッシュ 1 時間需要量 $a+b$ が求められる。ここで a は通勤・通学需要を指し、 b は 1 日を通した平均的な需要(平常時の需要量)を指す。朝ラッシュはこの 2 つを合わせた需要と考える。また、タラッシュは帰宅需要であり、朝ラッシュ需要を 2 時間に分散した $a/2$ と b の和とする。
3. 以上のことから式(4)の連立方程式が成立する。

$$\begin{cases} a+b=D \times P \\ 2a+18b=D \end{cases} \quad (4)$$

これを解くことにより、日需要量 D から朝ラッシュ、タラッシュ、平常時の各時間需要量が求められる。

4. 朝ラッシュの混雑率を各輸送機関の最大混雑率として、このときの需要量と混雑率より係数 k を求める。
5. タラッシュ、平常時の需要量を(3)式に代入し、各時間帯の混雑率を求める。
6. 編成定員と、各時間帯の混雑率、需要量を用いて、(5)式より各時間帯の 1 時間当たり運行本数を設定する。

$$\text{各時間帯運行本数} = \frac{\text{各時間帯需要量}}{\text{編成定員} \times \text{各時間帯混雑率}} \quad (5)$$

なお本研究では、簡便のため平日と休日の需要量の違いはないものとする。

車両製造分の環境負荷は必要車両数によって規定される。そこで、必要車両数を最混雑(朝ラッシュ)時の運行本数に対応可能な数として求める。ただし、路線長が短く、表定速度が高い場合、運行本数に対して 1 編成当たり 1 本ではなく、数本に対応することもあるため(その逆もある)、路線長と表定速度の兼ね合いも考慮する必要がある。この関係を式(6)に示す。

$$\text{必要車両(編成)数} = \frac{\text{朝ラッシュ運行本数} \times \text{路線長}}{\text{表定速度}} \quad (6)$$

さらに、本研究ではこれに予備編成数として 2 編成を加えている。

また、車両運行本数は小数点以下を切り上げて用いる。そのため、次節の結果は単調増加・減少とはならず、のこぎり状のグラフとなる。

(2) 需要量変化に伴う SyLCEL の変化

本論文では紙幅の関係で CO_2 の結果のみを取り上げる。需要量[人/day・往復]による人 km 当たり SyLC- CO_2 の感度分析の結果を図-10 に示す。いずれの輸送機関も需要量の増加によって人 km 当たり SyLC- CO_2 は減少するが、ある程度まで需要量が増加すると一定値に収束し、それ以上減少しなくなる。これは走行以外の環境負荷が人 km 当たりではほぼゼロとなるためである。このときの環境負荷は、車両走行原単位と車両の定員、混雑率によって決まる。

高架構造を有する輸送機関では、需要量が約

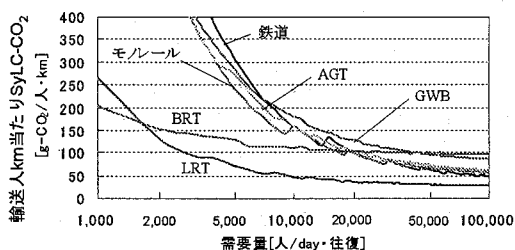


図-10 需要量変化に伴う SyLC- CO_2 推計結果

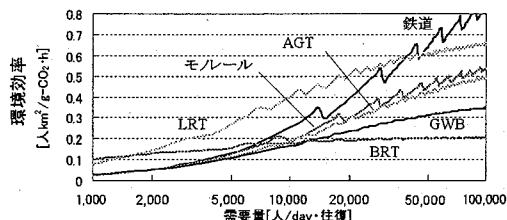


図-11 需要量変化に伴う環境効率推計結果

20,000[人/day]に達するまで、需要量の増加による人 km 当たり SyLC- CO_2 の減少傾向が顕著に見られる。図-7 の統合化結果では最も環境負荷が大きくなった GWB も、需要量増加による減少が期待できる。一方、LRT、BRT の環境負荷は車両走行にほぼ起因するため、需要量が増加しても人 km 当たり SyLC- CO_2 はほとんど減少しない。需要量 2,000[人/day]までは最もインフラ建設分が小さい BRT が、それ以上ではインフラ建設、車両走行の環境負荷が小さい LRT が、それぞれ SyLC- CO_2 最小の輸送機関となっている。ただし、LRT の最大対応輸送量は 54,000[人/day]であるため、それ以上では鉄道、モノレール、AGT が SyLC- CO_2 の小さい輸送機関となる。大量需要の場合、環境負荷の多寡は車両走行分によって決定されるため、ランカーブを用いた分析などでの詳細な推計を行うことが重要となる。また、インフラ建設分が小さい BRT は、需要量 20,000[人/day]前後で高架構造を有する電力走行の輸送機関より、40,000[人/day]以上で燃費が良い GWB より大きくなる。

(3) 環境効率による評価

ここまでは輸送人 km 当たり SyLCEL で評価を行ってきたが、この指標では輸送機関ごとのサービスレベルの違いが考慮されていない。そこでサービスレベルを考慮する指標として、表定速度を導入した「環境効率」を定義する。辻村ら¹⁹⁾による新幹線車両の環境効率指標を参考に、式(7)のように環境効率を定式化する。

$$\text{環境効率} = \frac{\text{生涯の走行距離} \times \text{定員} \times \text{混雑率}}{\text{生涯の環境負荷 (SyLCEL)}} \times \text{表定速度} \quad (7)$$

ここで、分子の「生涯の走行距離×定員×混雑率」

は輸送機関の輸送量を表す。つまり、輸送機関の性能として表定速度の他に輸送量を用いていることになる。表定速度は路線延長を所要時間で除したものであるが、本研究では路線延長は全代替案で 10[km]と等しいため、実質は所要時間の逆数を輸送機関の性能として加味していることになる。

SyLCEL 推計値を式(7)に適用して環境効率を求めた結果を図-11 に示す。この値はシステムの性能と SyLCEL の比であることから、大きいほど良いことになる。そのため図-11 は図-10 とは逆の右上がりの傾向を示している。

環境効率が最も高い輸送機関は、需要量が 40,000[人/day]以下では SyLC-CO₂ が小さい LRT、それ以上では表定速度が高い鉄道となる。モノレール、AGT はこれより小さく、さらに GWB、BRT が小さい。人 km 当たり SyLC-CO₂ で GWB と BRT の順位が入れ替わる需要量は 40,000[人/day]であったのに対して、環境効率で見ると 10,000[人/day]となり、表定速度の違いによる影響が出ていることがわかる。

(4) 自家用車からの転換による削減効果

旅客輸送機関の新規整備に伴って、並行道路を走行する自家用車や他の輸送機関の利用は減少すると想定される。したがって、新規整備を行うことで交通システム全体として環境負荷が減少するか否かを判断するためには、システム境界をこれら代替輸送機関の走行に伴う環境負荷分に広げた「拡張ライフサイクル環境負荷(Extended Life Cycle Environment Load: ELCEL)」によって評価することが必要である²⁾。本研究ではシステム境界拡張についての仮定として、当該輸送機関が整備されていなかった場合、自家用車によって同一距離の移動が行われている(つまり、誘発需要が生じない)と想定し、整備によってその走行がなくなることによる環境負荷の減少を含めて ELCEL と定義する。ここで、自家用車の製造分を含めていないのは、当該 10km 区間のみの転換では自家用車の購買を控えるには至らないと考えられるためである。また、当該区間には既に道路が存在しており、輸送機関が整備されなかった場合にも新しく道路が建設されることはない想定して、道路インフラ量は変化しないものとする。このようなシステム境界の設定は、既に道路インフラが整備され、自家用車も普及し、それらが変化しないという前提に立って、新規輸送機関が整備される際の ELCEL 変化を評価するための措置である。もし単純に輸送機関どうしの SyLCEL を比較するのならば、自家用車の場合も道路や自家用車製造分の計上が必要である。

各輸送機関整備前後の ELC-CO₂(ELCEL で評価した CO₂ 排出量)の変化を推計する。ここで、自家用車走行

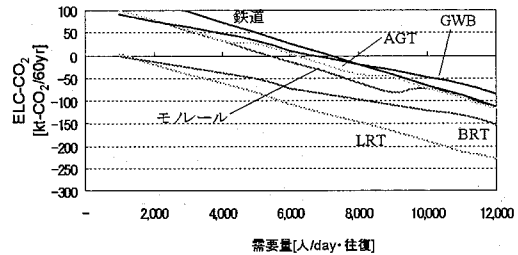


図-12 各輸送機関の ELC-CO₂

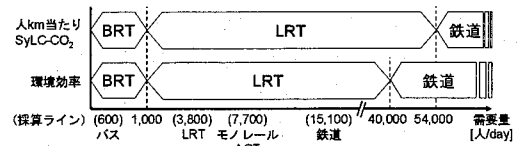


図-13 各指標における最適な輸送機関と需要量の関係

原単位は、燃費を 10[km/l]としたときの値である 288[g-CO₂/台 km]を用い、平均乗車人数を 1.3[人/台]とする。

需要量の変化に対する ELC-CO₂ の感度分析を行った結果を図-12 に示す。インフラ建設分が小さい LRT、BRT は需要量が 1,000[人/day]以上で、また高架構造を有する鉄道、モノレール、AGT、GWB はそれぞれ 6,000~7,000[人/day]以上で ELC-CO₂ がマイナスとなり、いずれの輸送機関も実現可能な需要量で ELC-CO₂ が減少することが分かる。さらに需要量が増加すれば ELC-CO₂ 減少量も大きくなり、需要量 10,000[人/day]で最も SyLC-CO₂ が大きい GWB でも、ELC-CO₂ は-48[kt-CO₂/60yr]となる。ただし輸送機関整備による誘発需要が大きいと、この効果は打ち消されることになる。

5. おわりに

本研究では、中量旅客輸送機関であるモノレール、AGT、LRT、GWB、BRT を 10km 区間に新規導入することを想定し、LCA を適用して環境負荷を推計するとともに、高架鉄道との比較を行った。その結果、SyLCEL での CO₂ 排出量が最小となる輸送機関、さらに環境効率が最大となる輸送機関と需要量との関係は図-13 のようになることが明らかとなった。かなり幅広い需要量で LRT が最適となっていることが見て取れる。速度・輸送量性能を考慮した環境効率による評価では、大量・高速輸送機関がより有利となった。なお、この図には、採算性を保てる輸送機関との関係³⁾も付記している。輸送機関の選択の際、採算性に加えて環境面をどの程度考慮していくかが今後の課題である。

さらに、各輸送機関の整備による自動車交通からの転換が生じる場合の ELC-CO₂ 減少量を推計し、いずれの輸送機関でも自家用車からの転換量を大きくすることでライフサイクルでの環境負荷削減効果が十分発揮されることが示された。被害算定型影響評価手法によるインパクト評価では、排出量が圧倒的に大きい CO₂ のみならず、SO_x、NO_x など大きな割合を示すことや、貨幣評価値は運行経費の数十分の一の値であることが分かった。

謝辞

本研究は、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 東京支社との共同研究および(財)鉄道総合技術研究所との共同研究として実施したものである。また、愛知県企画振興部交通対策課、名古屋ガイドウェイバス株式会社、名古屋臨海高速鉄道株式会社、大阪高速鉄道株式会社、沖縄都市モノレール株式会社、富山市役所都市整備部などより、データ提供などの御協力をいただいた。この場を借りて深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：交通関係エネルギー要覧，2005。
- 2) 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.55-62, 2001。
- 3) 都市交通研究会：これからの都市交通—環境を考えた魅力ある都市づくり，山海堂，2002。
- 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・論文集，Vol.18, No.4, pp.603-610, 2001。
- 5) 鈴木徹也，高橋淳，河西純一：CFRP による軽量化バスの LCA，第 48 回 FRP CON-EX 2003 講演要旨集，pp.72-73, 2003。
- 6) Y.Kudoh, Y.Moriguchi, R.Matsushashi, Y.Yoshida：Life Cycle CO₂ Emissions from Public Transportation Systems, Journal of Asian Electric Vehicles, Vol.1, No.1, pp.259-266, 2003。
- 7) 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。
- 8) 岩渕省，四宮明宣，中嶋芳紀，松本享，井村秀文：地下鉄整備のライフサイクル環境負荷に関する研究，土木学会環境システム研究，Vol.25, pp.209-216, 1997。
- 9) 狩野弘治，浅見均，高橋浩一，加藤博和：鉄道整備における LCA の原単位，第 32 回環境システム研究論文発表会講演集，pp.203-208, 2004。
- 10) 渡辺由紀子，長田基広，加藤博和：波及効果を考慮した LRT システム導入の環境負荷評価，第 1 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集，pp.90-91, 2005。
- 11) 日本建築学会：LCA データベース 1995 年産業連関分析データ版，Ver.2.2, 1995。
- 12) 伊藤武美，花木啓祐，本多博：ニュータウン建設における二酸化炭素排出量の概略推計方法の検討，第 25 回環境システム研究，pp.379-384, 1997。
- 13) 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・講演集，pp.167-172, 2003。
- 14) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，社団法人，日本道路協会，p.19, 2001。
- 15) 道路工事積算研究会：[改訂]道路工事の積算，財団法人，経済調査会，pp.149-179, 1995。
- 16) 日本資源協会，日本鉄道車輛工業会，鉄道車輛ライフサイクルエネルギーLCE 検討委員会：鉄道車両に投入されるエネルギー量検討報告書，1996。
- 17) 産業環境管理協会：LCA データベース，2005 年度 4 版。
- 18) 加藤博和，林良嗣：LCA のインフラ整備施策評価プロセスへの導入方法に関する一考察，環境科学会 1998 年会講演要旨集，pp.140-141, 1998。
- 19) 辻村太郎，宮内瞳当，永友貴史，橋本淳：新幹線電車の LCA ケーススタディと環境効率，鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.601-604, 1998。

LCAを適用した中量旅客輸送機関の環境負荷評価*

長田 基広**・渡辺 由紀子***・柴原 尚希****・加藤 博和*****

本研究では、中量旅客輸送機関(モノレール、AGT、LRT、GWB、BRT)を対象に、LCA(Life Cycle Assessment)を適用して、そのインフラ建設や車両製造段階をも含めた環境負荷(CO₂、SO_x、NO_x、CH₄、N₂O)排出量の推計を行い、鉄道との比較を行っている。さらに、CO₂については需要量による感度分析を行い、需要量ごとに排出量が最小となる輸送機関を明らかにしている。また、評価範囲を自家用車による走行の削減にまで拡張し、各輸送機関の整備による自家用車からの転換がSyLC-CO₂の削減に及ぼす影響を推計し、実現可能な転換量で削減が十分可能であることを示している。

Environmental Load Evaluation of Variety of Medium Capacity Passenger Transport Systems Applying LCA*

By Motohiro OSADA**・Yukiko WATANABE***・Naoki SHIBAHARA****・Hirokazu KATO*****

This study quantifies the environmental loads from medium capacity passenger transport systems (mono rail, AGT, LRT, GWB and BRT) by employing LCA. The estimated environmental loads are compared with those of ordinary railways. The results of the sensitivity analysis carried out by the passenger demand, are used to determine the transport modes with minimum CO₂ emissions for different levels of demand. The reductions in SyLC-CO₂ by the modal shifts from passenger car are calculated to prove the very likely ease of environmental loads from some adequate amount of modal shifts.