

技術水準と需要の長期変化を考慮できる 都市内旅客輸送手段のライフサイクルCO₂推計

金井 洸¹・加藤 博和²・柴原 尚希³・柴田 達矢⁴

¹正会員 玉野総合コンサルタント株式会社 (〒461-0005 名古屋市東区東桜二丁目17番14号)
E-mail: kanakana891013@gmail.com

²正会員 名古屋大学准教授 大学院環境学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 一般社団法人産業環境管理協会 (〒101-0044 東京都千代田区鍛冶町2-2-1)

⁴学生会員 名古屋大学 大学院環境学研究科 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
E-mail: tshibata@urban.env.nagoya-u.ac.jp

旅客輸送起源CO₂排出量削減のためには、バスや鉄道等の公共交通の利用促進が必要である。しかし、これらのCO₂排出量をそのライフサイクルで評価する場合、需要量が同じであっても、車両の運行量を左右する混雑率や運行本数・編成両数といった変数によって大きく変化する。また環境技術の進歩が著しいため、長期のライフサイクルを想定する場合にはそのトレンドを考慮することが重要である。

本研究では、都市内旅客輸送手段について、技術水準 (CO₂排出原単位) と需要量、及び運行に関する諸設定の変化による影響を考慮したライフサイクルでのCO₂排出量を推計する。さらに、ライフタイムでのCO₂排出量あたりのサービス性能によって表される環境効率指標を用いることで、総合的な評価を行う。

Key Words: Life Cycle Assessment, Intra urban transport systems, Eco-efficiency indicator

1. はじめに

運輸部門は化石燃料への依存が強く、またCO₂排出に大きく寄与している。日本では、運輸部門におけるCO₂排出量が人間活動全体の2割弱を占めていることから、国土交通省では低炭素社会実現のためにBRTやLRTといった環境に優しいといわれる旅客輸送手段の整備を始めとする様々な削減策を打ち出している。

旅客輸送手段に関する環境負荷排出量の評価方法のフレームワークの一つとして、ライフサイクルアセスメント(LCA: Life Cycle Assessment)が挙げられる。LCAはISO 14040番台に規定されており、製品やサービスの環境負荷排出量や環境影響を包括的かつ簡便に算出できる方法として整備されている。

旅客輸送手段へのLCA適用方法については加藤ら¹⁾が整備を進めてきている。通常のLCAと大きく異なる点は、対象が車両とインフラという異なるライフタイムを持つ要素によって構成される大規模なシステムであることである。需要量が同じであっても、ライフサイクルでのCO₂排出量(LC-CO₂)は、それを直接に規定する車両運行量で決まり、それを左右する混雑率あるいは運行本数・編成両数といったパラメータによって大きく変化する特徴がある。

また、環境技術の進歩は著しく、長期のライフタイムを想定する場合にはそのトレンドを考慮することも重要である。例えば、電気自動車(EV)や燃料電池自動車(FCV)といった次世代自動車における技術発展が目覚ましく、今後の技術水準向上によってはバスや鉄道に比べて輸送量あたりLC-CO₂が小さくなる可能性がある。

したがって、旅客輸送手段のLCAにおいては、その運行状況や技術水準の変化を考慮した分析を行う必要がある。

一方、旅客輸送手段を評価する際には、環境負荷のみならず、速達性や定時性、快適性などのサービス性能の評価を合わせて行わなければならない。その際、サービス性能とLC-CO₂の比(環境効率)を用いた評価が可能である。しかし、環境効率評価におけるサービス性能指標には、移動速度や輸送人員といった供給側主体の指標が多い。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

日本における旅客輸送手段を対象としたLCAは、1990年代前半にインフラ施設や車両を対象としたライフサイクルインベントリ研究に始まった。さらに1990年代後半には、輸送手段の整備事業全体の環境負荷変化を包括的に評価する方法として適用され始めた。2000年代に入ると様々な旅客輸送手段の比較が行われるようになった。例えば、長田ら²⁾は鉄道・AGT・LRT・BRT等の中量及び大量旅客輸送手段にLCAを適用し、混雑率(すなわち運行本数、編成両数)による違いを検討している。さらに、森本ら³⁾や伊藤ら⁴⁾は混雑率のみならず、技術水準向上についても考慮できるLCA手法を開発・適用している。

環境効率指標は、小さな環境影響で大きな価値を創出することを目的に、企業や製品の競争力を測る指標として広く用いられているが、その定義は厳密ではない。

辻村ら⁵⁾は新幹線車両の性能を輸送量・走行距離・

所要時間と捉え、環境効率を定義した。柴原ら⁶⁾は運輸部門における CO₂ 排出量削減策として、航空路線を削減し、新幹線輸送に転換させることの有効性を検証している。さらに、益田ら⁷⁾は移動場面毎に作成した環境効率指標を用いて鉄道・地下鉄・LRT・BRT と乗用車の比較評価を行った。

本研究では、混雑率や運行本数といった運行状況とともに、技術水準の向上による CO₂ 排出原単位の将来変化を考慮し、旅客輸送手段の LC-CO₂ を推計する。中量及び大量乗合輸送手段に乗用車を含め、需要に応じた環境効率の評価を行い、LC-CO₂ が少ない輸送手段を明らかにする。

3. 都市内旅客輸送手段の LC-CO₂ 推計手法

(1) 評価対象の設定

本研究では、都市内旅客輸送に供する輸送機関である、鉄道(高架線)、モノレール、Automated Guideway Transit (AGT)、LRT、Guide Way Bus (GWB)、BRT、HSST を評価対象とする。乗用車については、ガソリン自動車(GV)、ガソリンハイブリッド車(HV)、FCV、EV を対象とする。評価バウンダリとして、インフラ(本体構造物、付帯構造物)と車両から構成される輸送手段のシステムを取り上げる。システムのライフサイクルは建設・製造、供用、廃棄の 3 段階に分けることができる。この内、廃棄分の環境負荷は全体から見て微量であるため考慮しない。

(2) LC-CO₂ 推計手法の構築

a) 乗合輸送手段

1) インフラ建設, 2) インフラ外部建設(駅施設, 車両基地, 架線), 3) インフラ・インフラ外部建設の運用(以下運用), 4) 車両製造, 5) 車両走行のステージ毎に推計する。システムのライフタイムは 60 年とする。

1) インフラ建設

1km あたり資材投入量に CO₂ 排出原単位及び路線長を乗じることで算出する。

2) インフラ外部建設

駅施設は、狩野ら⁸⁾を参考に算出する。ただし、駅規模は対象輸送機関の車両の長さ按比例する。

3) 運用

駅施設における電力消費を対象とする。先行研究での事業者へのヒアリングに基づいて算出する。

4) 車両製造

鉄道車両の資材投入量及び組立時エネルギー消費量に CO₂ 排出原単位を乗じる。

電気鉄道はステンレス車両の値を用いて、ディーゼル鉄道、モノレール、AGT、LRT、HSST はその重量比から推計する。ただし、GWB、BRT は乗用車製造時の CO₂ 排出量推計値より車両重量に比例する。また、車両製造数は式(1)のとおり定式化する。

$$(\text{車両製造数}) = \left(\frac{D \cdot I}{P \cdot N \cdot C_{max} \cdot p} + A \right) \cdot N \quad (1)$$

ここで、 D : 需要量[人/日], I : 集中度[%], C_{max} : 最大混雑時の混雑率[%], p : 1 往復距離に対する走行割合[%], A : 予備編成数, N : 編成両数[車両/本], P : 車両定員[人/車両]

5) 車両走行

各輸送手段の走行距離あたり消費電力・燃料に、日本建築学会の消費量あたり CO₂ 排出原単位を乗ずることで算出する。電力・燃料消費量は事業者へのヒアリングを参考に算出する。運行本数は a) 混雑率内生, b) 混雑率固定に設定した場合の 2 ケースを取り上げる。

a) 混雑率内生

通常、混雑率は需要量が多い路線ほど高くなる。この両者が比例関係である場合、需要量が少ない区間での運行頻度は非常に少なくなってしまうためである。実際、大都市近郊部の鉄道・モノレールのデータを用いて規定した、日平均需要量と日平均混雑率との関係は式(2)のとおり定式化された。

$$D = 1.91 \cdot C^{2.19} \quad (2)$$

ここで、 C : 日平均混雑率[%]

輸送手段における需要量の時間変動を図-1 のように仮定し、朝ラッシュ、タラッシュ、日中の 3 種類に需要量を割り振る。本研究では、需要量最大の時間帯(1 時間)の需要総量に占める割合(集中度)を 25% と仮定する。

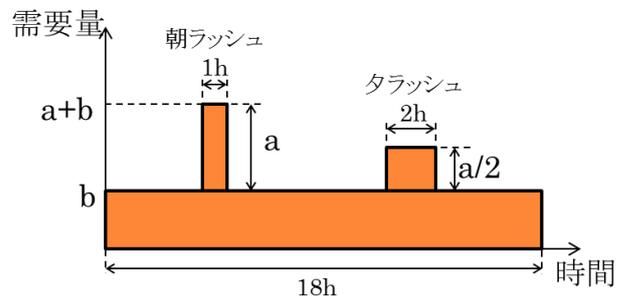


図-1 需要量の時間変動設定

1 時間あたりの運行本数は各時間の需要量によって変化するものとして式(3)のとおり定式化する。

$$(\text{1 時間あたり運行本数}) = \frac{(\text{1 時間あたり } D)}{P \cdot N \cdot C} \quad (3)$$

また、輸送力 T_{max} を式(4)のとおり定式化する。

$$T_{max} = \frac{P \cdot N \cdot C_{max}}{R_{min}} \quad (4)$$

ここで、 R_{min} : 最短運転間隔[h]

b) 混雑率固定

各時間帯の需要量によって運行本数は変化するものとして、式(5)のとおり定式化する。ただし、バスシステムと鉄道とは混雑率が示す混雑状況に大きな違いを有するため、バスシステムでは混雑率を鉄道基準に換算すると半分になるとした換算混雑率を用いる。

$$(運行本数) = \frac{D}{P \cdot N \cdot C} \quad (5)$$

この場合の輸送力 T_{max} は式(6)のとおり定式化される.

$$T_{max} = \frac{P \cdot N \cdot C}{R_{min}} \quad (6)$$

b)乗用車

乗用車については 1) 車両製造, 2) 車両走行のみを評価対象とする. これは, 道路は既に整備済みであり, 新規に旅客輸送手段を導入する場合を仮定しているためである.

1) 車両製造

山田ら⁹⁾を参考に, CO₂ 排出原単位を設定する. また, 車両更新期間は 8[年]とする.

2) 車両走行

乗用車の平均乗車人数は 1.3[人/両]とする. また, 平均旅行速度は需要量に応じて変化すると仮定し, H22 道路交通センサスを用いて, 式(7)のとおり定式化する.

$$v = 38.704 \cdot e^{-0.018k} \quad (R^2 = 0.5231) \quad (7)$$

ここで, v : 平均旅行速度[km/h]

土肥ら¹⁰⁾, 日本自動車研究所¹¹⁾, 宮崎ら¹²⁾を参考に, 各車種・各速度に応じた CO₂ 排出原単位を求める.

(3)技術水準向上の考慮

本研究では, 技術水準向上として CO₂ 排出原単位値の低減を扱う. 発電及び駅施設・車両運転, 乗用車の燃費改善におけるエネルギー削減努力, 低炭素車普及に基づいた CO₂ 排出原単位値の減少率の設定を表-1 に示す.

表-1 CO₂ 排出原単位値減少率の設定

項目	%	文献
発電	11	東京電力環境指標実績報告書 2013
公共交通	運用	JR EAST Technical Review No.40
	車両走行(電気)	JR EAST GROUP CSR Report 2014
	車両走行(ディーゼル)	第 17 回鉄道総研講演会
乗用車	GV 走行	次世代自動車普及戦略
	FCV 走行	総合効率とGHG排出の分析報告書
	EV 走行	

4. 推計結果

(1)運行状況を考慮したLC-CO₂推計結果

本研究では混雑率について, 混雑率内生と, 終日混雑率 20%、終日混雑率 100%に設定した場合の 3 ケースを取り上げる. 各ケースの LC-CO₂ 推計結果を図-2 に

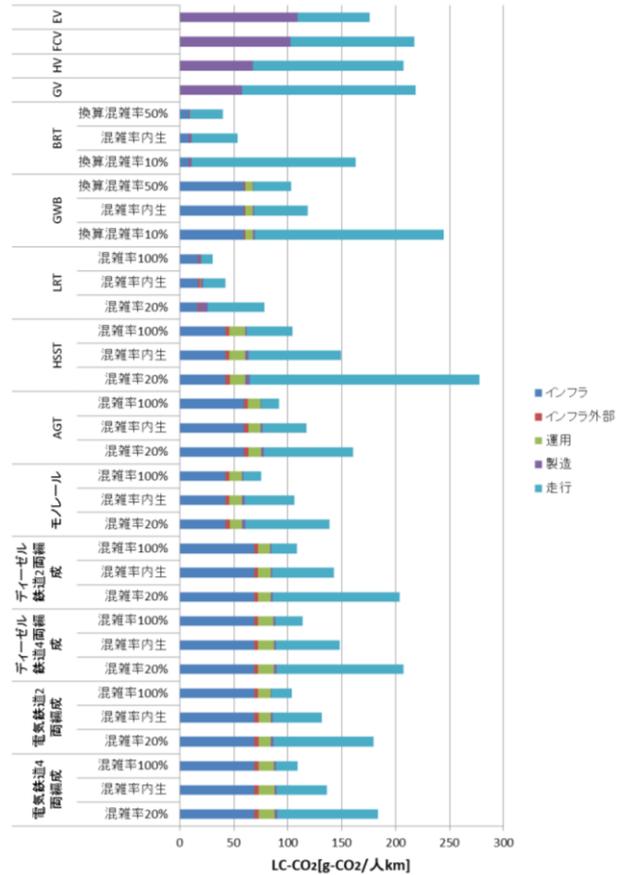


図-2 輸送手段別 LC-CO₂ 推計結果

示す. 混雑率が高く設定されると運行本数が少なくなり, 走行起源の CO₂ 排出量も小さくなるため, いずれの輸送手段においても混雑率降順に LC-CO₂ は少なくなる. 混雑率内生ケース a)では, 高架構造物を有する輸送手段の LC-CO₂ が大きい. 特に編成定員が少なく, かつ走行による CO₂ 排出原単位が最も大きい HSST が最も大きくなっている. 乗用車は 1 台あたり CO₂ 排出量が少ないが, 機能単位を人 km あたりに設定しているため, 他輸送手段に比べ LC-CO₂ は大きい. インフラ起源の CO₂ 排出量が少ない輸送手段は, 混雑率が高いと大幅な CO₂ 排出量の削減が見込まれる. LRT, BRT では混雑率が低い場合に運行本数が増加するため, 走行による CO₂ 排出原単位が大きいことと編成定員の少なさから LC-CO₂ が大幅に上昇する.

(2)需要量変化に伴う感度分析

a)混雑率内生ケース

混雑率内生ケースにおける需要量に応じた LC-CO₂ の推計結果を図-3 に示す. 需要量が約 850[人/日]よりも少ない場合には乗用車が最も有利となる. さらに, 需要量が約 850[人/日]から約 5,000[人/日]までの範囲では BRT が, それ以上では LRT が最も有利となる. しかし, LRT・BRT の最大輸送量である約 30,000[人/日]以上の需要量が生じた場合, モノレールが最も有利となる. 需要量の増加に伴って全体的に減少傾向にあるが, 混雑

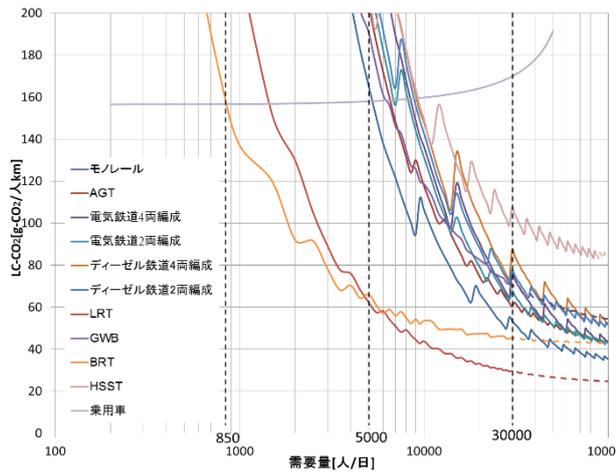


図-3 混雑率内生ケースにおける需要量に応じた LC-CO₂

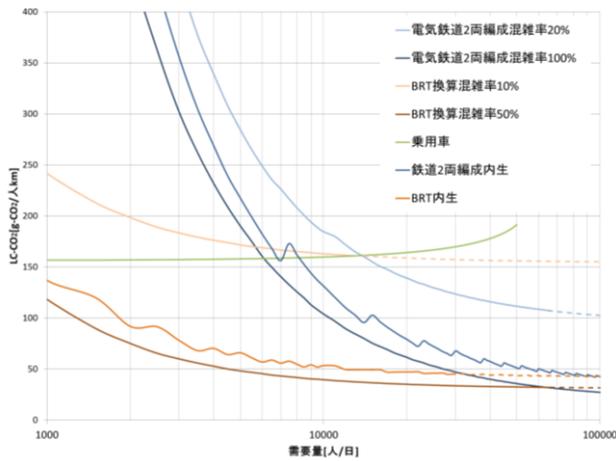


図-4 混雑率固定ケースにおける需要量に応じた LC-CO₂

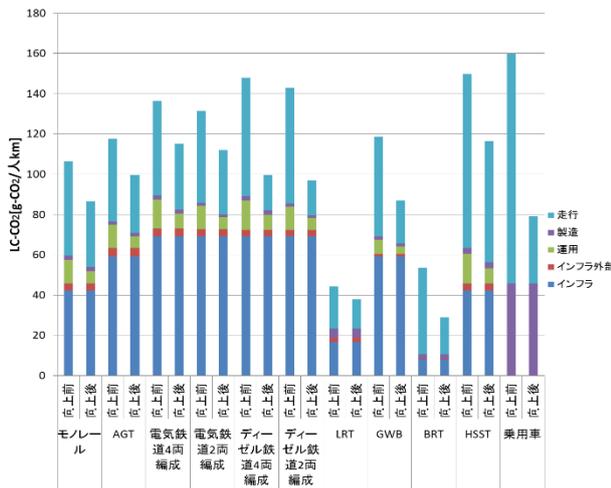


図-5 混雑率内生における技術水準向上を考慮した LC-CO₂

率内生ケースでは需要量と車両製造数・運行本数の関係式によって混雑率が決定されるため単調減少ではない。また、乗用車では単調増加になっている。この傾向は、需要量の増加に伴って平均旅客速度が減少し、燃費が低下することで走行起源の CO₂ 排出量が増加することによる。

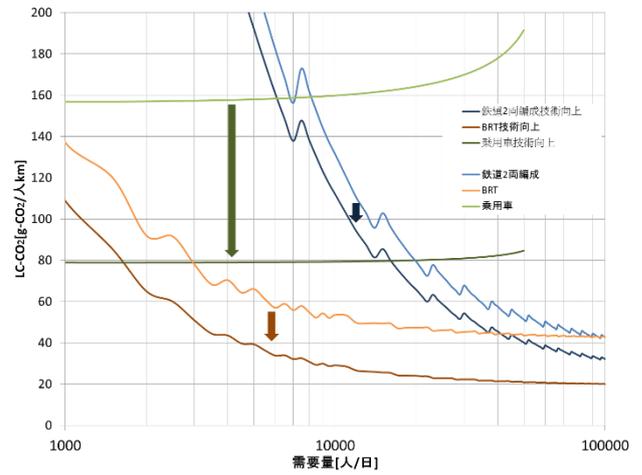


図-6 混雑率内生における需要量に応じた技術水準向上を考慮した LC-CO₂

b) 混雑率固定ケース

混雑率固定ケースの需要量に応じた電気鉄道(2両編成)とBRTの2つの輸送手段における LC-CO₂ を図-4 に示す。混雑率 20% の場合、約 13,000[人/日]までは乗用車が有利である。また、BRT は編成定員が少なく、換算混雑率 10% では約 14,000[人/日]しか輸送できないが、換算混雑率 50% で運行した場合は需要量約 67,000[人/日]以上の輸送が可能である。編成定員の増加は、鉄道では編成車両数を増加させることで対応できる。走行起源の CO₂ 排出量の少ない鉄道では編成車両数の変化による LC-CO₂ への影響はごくわずかであり、BRT においても車両定員の多い連節バスを導入することによって同様の効果を得られる。

(3) 技術水準向上を考慮した場合

表-1 で仮定した混雑率内生ケースにおける技術水準向上を考慮した場合の LC-CO₂ の推計結果を図-5 に示す。走行エネルギーを電力によって賄う輸送手段では向上前後での CO₂ 排出量の減少率は平均約 15% である。一方、走行エネルギーを石油燃料によって賄う輸送手段では減少率は平均約 35% である。また、乗用車では低炭素車普及率の変化も考慮したため、減少率は約 50% である。

混雑率内生ケースにおける技術水準向上を考慮した場合の需要量に応じた LC-CO₂ 推計結果の内、電気鉄道(2両編成)、BRT、乗用車の各モードについて図-6 に示す。鉄道と BRT では需要量によって LC-CO₂ の変化率は変化しない。一方、乗用車では次世代自動車の普及率変化によって需要量増加に伴う平均旅行速度低下の影響は小さくなる。このため、乗用車の LC-CO₂ は需要量に応じた大幅な変化は生じない。

5. ファクター値の算出

(1) 環境効率とファクター値

都市内旅客輸送手段を評価する場合、LC-CO₂ だけではなく、速達性や定時性、快適性といったサービス性能も考慮すべきである。この評価には環境効率指標を用いることができる。本研究では、環境効率の算出方法として益田ら⁷⁾を用いて、式(8)のように定義する。

$$\text{環境効率} = \frac{\text{輸送手段のサービス性能値}}{\text{人 km 当たりのライフサイクルCO}_2\text{排出量}} \quad (8)$$

また、性能値は式(9)のとおり定式化されている。

$$\text{性能値} = \sum (\text{移動場面上における性能項目の重み} \times \text{輸送手段の性能項目の水準}) \quad (9)$$

重みは、アンケート結果を用いたコンジョイント分析によって推計する。また、益田ら⁷⁾は DID 人口密度毎に評価しているため、郷ら¹³⁾を参考に交換する。

技術水準向上や運行方法見直し等に伴って環境効率は変化する。この対策実施前後での環境効率の比はファクター値と呼ばれる。

(2)性能値・環境効率の算出

各輸送手段について、混雑率内生ケースを扱うとともに、BRT と電気鉄道の技術水準向上を考慮したケースの推計結果を図-7 に示す。終日混雑率 20%固定ケースでは、運行本数増加に伴う応時性(乗車機会)の向上等によって性能値は向上する。しかし、LC-CO₂ も混雑

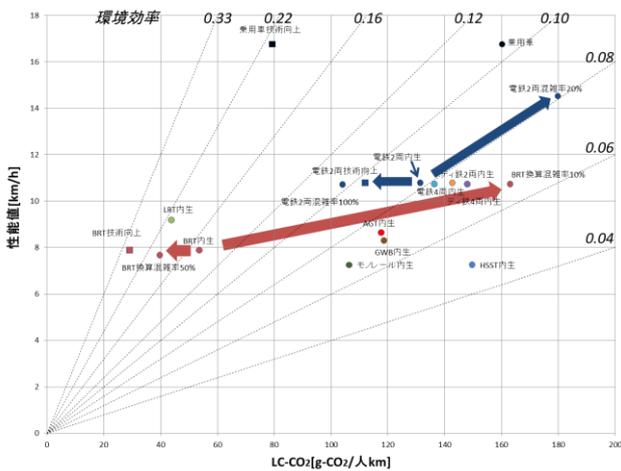


図-7 各輸送手段の性能値と LC-CO₂

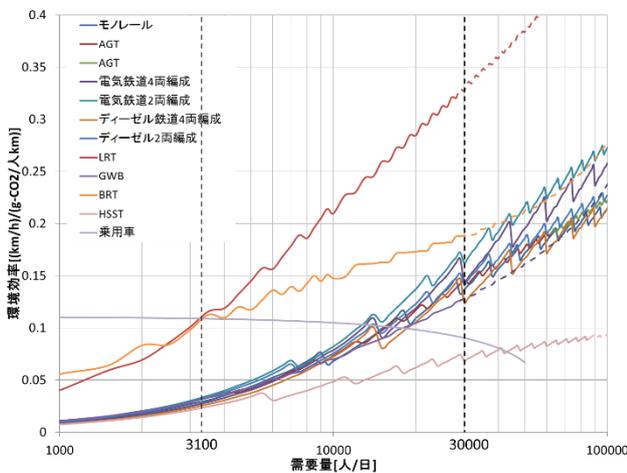


図-8 需要量に応じた各輸送手段の環境効率

率内生ケースに比べて多くなるため、環境効率は同等

かそれよりも小さい値となる。一方、終日混雑率 100%固定ケースでは、性能値は混雑率内生ケースに比べてわずかに小さくなるが、LC-CO₂ がそれ以上に少ないため、環境効率は高くなった。

混雑率内生ケースの環境効率を図-8 に示す。乗用車では、需要量の増加に伴って平均旅行速度が減少し燃費が低下するため、性能値は低下する。一方、乗用車以外の交通モードでは需要量の増加に伴って運行本数が増加するため、応時性(乗車機会)が増加し、性能値も向上する。環境効率値は需要量が約 3,100[人/日]まで乗用車が最も有利だが、それ以上では LC-CO₂ が少ない LRT が最も有利となる。一方で、LRT と BRT の最大輸送量である約 30,000[人/日]以上の需要量においては電気鉄道(2両編成)が有利となる。

(3)ファクター値の算出結果

需要量 10,000[人/日]の場合における各輸送手段の混雑率内生ケースを基準としたファクター値を図-9 に示す。終日混雑率 20%固定ケースでは、性能値の増加量に比べて LC-CO₂ の増加量が大きいため、総じてファクター値は 1 以下となる。特に LC-CO₂ の増加量が大きいモードではファクター値は 0.6 以下となる。一方、LC-CO₂ の増加量が少ない鉄道はファクター値が 0.9 以上となり、環境効率は混雑率内生ケースとほぼ等しい。終日混雑率 100%固定ケースでは、いずれの輸送手段においても LC-CO₂ の減少量が性能値の低下量より大きいため、ファクター値は 1 以上となる。

需要量に応じた BRT と電気鉄道 2両編成の 2つの輸送手段におけるファクター値を図-10 に示す。基本的に終日混雑率 20%固定ケースではファクター値は減少傾向にあり、終日混雑率 100%ケースではファクター値は増加傾向にある。BRT の終日混雑率 20%固定ケースでファクター値が急増しているのは、運行本数増加に伴って性能値も向上しているためである。

しかし、急増が生じている点線部分は BRT の最大輸送量を超えているので、この値は参考にならない。この結果から、運行状況を変化させた場合には次のことが導かれる。低い混雑率で運行本数を増やして運行する場合、性能値は向上するが、それ以上に LC-CO₂ が増

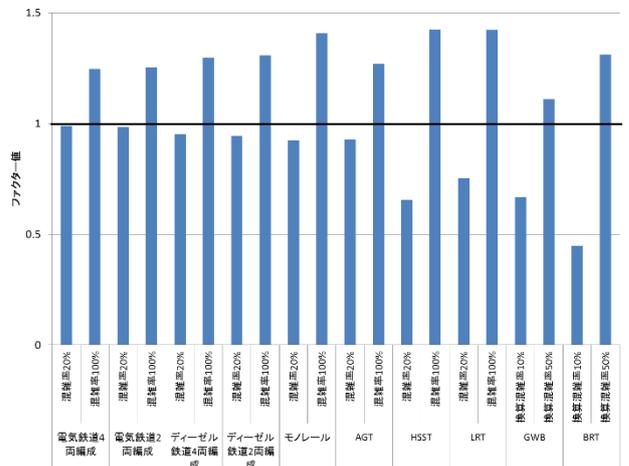


図-9 運行状況を変化させた場合のファクター値

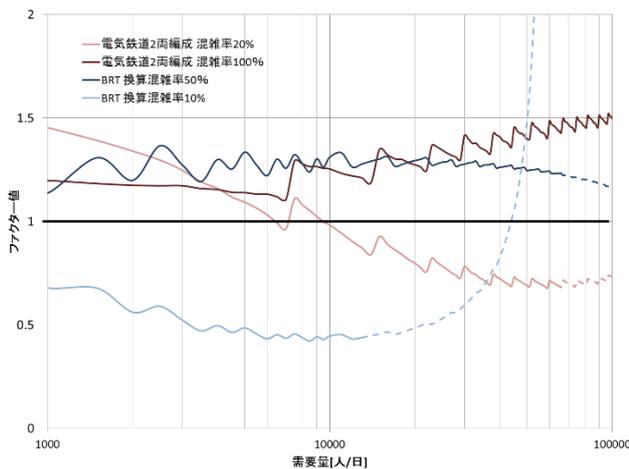


図-10 混雑率固定ケースにおける需要量に応じたファクター値

加するため、環境効率は低下してしまう。一方、高い混雑率で運行する場合、性能値は低下するものの、それ以上の LC-CO₂ 削減効果が期待でき、環境効率は向上する。また、編成定員を増加する場合、LC-CO₂ は減少するが、性能値も低下してしまうため、環境効率はあまり変化しない。終日混雑率 100% 固定ケースでは、いずれの輸送手段においても LC-CO₂ の減少量が性能値の低下より大きいいため、ファクター値は 1 以上となる。

5. おわりに

本研究では、都市内旅客輸送手段について、運行状況と技術水準を考慮できる LC-CO₂ 推計手法を構築した。また、構築した手法を実際に複数の輸送手段について適用し、加えて環境効率指標を用いた総合的な評価も行った結果、次のような知見を得られた。

- 1) 需要量に応じて混雑率が増加した場合、インフラ起源の LC-CO₂ が少なく、編成定員が多い輸送手段が有利となり得る。
- 2) 低い混雑率で編成本数を増やして運行した場合、性能値の向上は LC-CO₂ 増加量と比べて小さく、ファクター値の増加には至らない。
- 3) 技術水準向上を考慮した場合、石油を燃料としている輸送手段では LC-CO₂ 削減効果が期待できる。乗用車では低炭素車普及による効果も重複するため、約 50%

の LC-CO₂ 削減が可能である。

参考文献

- 1). 加藤博和, 柴原尚希 (2006): 公共交通整備計画評価への LCA 適用: 超電導磁気樹状式鉄道を例として, 日本 LCA 学会誌, Vol.2, pp.166-175.
- 2). 長田基広, 渡辺由紀子, 柴原尚希, 加藤博和 (2006): LCA を適用した中量旅客輸送機関の環境負荷評価, 土木計画学研究・論文集, 23, pp.355-363.
- 3). 森本涼子, 柴原尚希, 加藤博和 (2009): 自動車技術と交通需要の変化を考慮した道路事業のライフサイクルアセスメント, 地球環境研究論文集, Vol.17, pp.193-201.
- 4). 伊藤圭, 柴原尚希, 加藤博和 (2011): 輸送密度と混雑率を考慮した地域内旅客交通機関のライフサイクル CO₂ 比較, 第 6 回 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp44-45.
- 5). 辻村太郎, 宮内瞳, 永友貴史, 橋本淳 (1998): 鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 5, pp.601-604.
- 6). 柴原尚希, 加藤博和, 林良嗣 (2008): 地域間高速旅客輸送機関の二酸化炭素排出からみた優位性評価手法, 日本 LCA 学会誌, Vol.5, No.1, pp.40-46.
- 7). 益田悠貴, 加藤博和, 柴原尚希, 伊藤圭 (2012): 目的及び使い方に応じた旅客輸送手段の環境効率指標の提案, 土木学会論文集 G (環境), Vol.68, No.5, pp.I_67-I_76.
- 8). 狩野弘治, 浅見均, 高橋浩一, 加藤博和 (2004): 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, pp203-208.
- 9). 山田裕也, 有山祐介, 井野博満, 原田幸明 (2005): 燃料電池車における LCA (エネルギー消費量と CO₂ 排出量)-ガソリン車と天然ガス車との比較-, 日本金属学会誌, 第 69 巻第 2 号, pp237-240.
- 10). 土肥学, 曾根真理, 瀧本真理 (2012): 自動車走行時の CO₂ 排出係数及び燃料消費率の更新, 土木技術資料, 54-5, pp40-45.
- 11). 日本自動車研究所 (2006): 平成 18 年度燃料電池自動車に関する調査報告書, p.140.
- 12). 宮崎博之 (2012): 三菱 i-MiEV の性能評価と効果的な活用策 効率的なエネルギー利用と低炭素社会を目指して, 技術開発ニュース, No.144, pp25-26.
- 13). 郷智哉, 加藤博和, 谷田一 (2007): 脱温暖化社会を目指した地域類型別交通施策パッケージ提案手法, 土木計画学研究・講演集, Vol.36, CD-ROM.

(2015.7.31 受付)

Evaluation of life cycle CO₂ emission of intra urban transport systems
considering long term changes in technology trends and demand

Koh KANAI, Hirokazu KATO, Naoki SHIBAHARA and Tatsuya SHIBATA