

常電導吸引型磁気浮上式旅客輸送システムへのLCA適用*

An Application of Life Cycle Assessment to Normal Conducting MAGLEV System*

柴原 尚希**・後藤 直紀***・加藤 博和****

By Naoki SHIBAHARA**・Naoki GOTO***・Hirokazu KATO****

1. はじめに

運輸部門における地球温暖化対策として、公共交通利用促進へ寄せられる期待は大きい。自家用自動車から鉄軌道へのモーダルシフトはもとより、自動車抑制策との連携による道路交通の円滑化によって、エネルギー消費量や CO₂ 排出量が削減できると考えられているからである。しかし、この対策を進めるための大前提として、公共交通機関の環境面での優位性が証明されている必要がある。一般的にこの根拠としてよく用いられるのは、交通関係エネルギー要覧¹⁾が示す輸送人 km あたりの走行起源 CO₂ 排出量の全国平均値であるが、これは需要量などによって上下することから、今後新設・改良される公共交通機関がその値をとるかどうかは不明であり、「環境にやさしい」ということを無条件に保証するデータではない。また、公共交通整備においては、それに伴って発生する CO₂ も無視できない。

そのため、著者らは様々な旅客輸送機関に対して LCA (Life Cycle Assessment) を実施し、輸送機関の関連施設建設や車両の製造において必要な資材の調達、建設・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してきている²⁾。また、需要量の変化に応じて、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ための感度分析を実施している³⁾。

本稿では、著者らが既に実施した中量旅客輸送機関の LCA²⁾では未実施であった常電導吸引型磁気浮上式旅客輸送システムである HSST (High Speed Surface Transport) システムを取り上げて LCA を行い、他の中量輸送機関との比較を行う。さらに、需要量やサービスレベルの設定が LCA 結果に及ぼす影響を示すことを目的とする。

2. LCA 適用における設定・方法

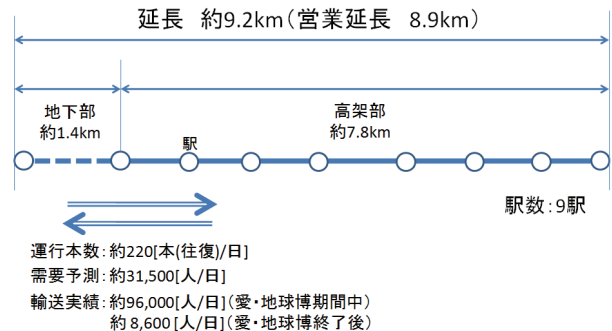


図1 ケーススタディ(東部丘陵線)の概要

磁力によって車体を浮かせてリニアモーターで推進させる「常電導吸引型磁気浮上・リニアインダクションモーター推進方式」を採用した中量軌道輸送システムである HSST システムは、2005 年 3 月から半年間開催された愛・地球博(愛知万博)に合わせて、名古屋市東部丘陵地区に営業線としては日本で初めて開業した。主な特徴として、①浮上走行するため騒音・振動が少なく、摩擦部分がないため車両やレールの保守の手間が低減する、②リニアモーターで走るため、急勾配・急カーブをスムーズに走行でき、最高速度や加減速度が高い、ことが挙げられる。

本稿では、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) ケーススタディの概要

評価対象とする HSST システム(愛知高速交通・東部丘陵線<リニモ>)の概要を図1に示す。名古屋市営地下鉄藤が丘駅を起点とし、長久手町を通過して豊田市の愛知環状鉄道八草駅を終点とする営業延長約 8.9km の路線である。地下構造と高架構造を有し、駅数は9駅である。需要予測では約 31,500[人/日]を想定していたが、愛・地球博終了後の実績は約 8,610[人/日](2005 年下半年期)にとどまっている。

(b) 比較対象とする交通機関

既報²⁾で LCA を実施済みの鉄道、モノレール、AGT(Automated Guideway Transit)、LRT(Light Rail

*キーワード：地球環境問題、交通計画評価、環境計画

**正会員、修(環境)、名古屋大学大学院環境学研究科 研究員
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町、TEL：052-789-2773、

FAX：052-789-1454、E-mail：shibahara@nagoya-u.jp)

***学生会員、学(工)、名古屋大学大学院環境学研究科

****正会員、博(工)、名古屋大学大学院環境学研究科 准教授

表 1 中量輸送機関の車両走行原単位

	HSST	鉄道	モノレール	AGT	LRT	GWB	BRT
車両走行原単位 ① (消費電力/燃料消費量)	4.0 [kWh/車両 km]	2.5 [kWh/車両 km]	1.8 [kWh/車両 km]	1.0 [kWh/車両 km]	1.5 [kWh/連接 km]	0.33 [l/台 km]	0.43 [l/台 km]
定員 ②[人/両]	81	130	95	50	150	74	74
定員あたり走行原単位 ①÷②	50 [Wh/人 km]	19 [Wh/人 km]	19 [Wh/人 km]	20 [Wh/人 km]	10 [Wh/人 km]	4.5 [ml/人 km]	5.8 [ml/人 km]

Transit)、GWB(GuideWay Bus)、BRT(Bus Rapid Transit)について、同じ機能単位(輸送人 km)で比較を行う。

(c) システム境界とライフタイム

輸送機関はインフラ(軌道等の本体構造物、駅等の付帯構造物)と車両とから構成されている。本稿では、これらの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 Environmental Load : SyLCEL)で評価する。各構成要素のライフサイクルは、①建設・製造、②供用、③廃棄の3つのステージに大きく分けられるが、③廃棄分は微小であることが既往研究で示されているため、本稿ではインフラ建設、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。また、ライフタイムはインフラ 60 年、車両 20 年と設定する。

(d) 対象とする環境負荷物質

本稿では、地球温暖化の主要因である二酸化炭素(CO₂)を中心に論を展開するが、その他にメタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)、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)の計 5 種類の環境負荷物質についても推計を行っており、結果を紹介する。ただし、インパクト評価については行わない。

(2) インベントリ分析(Inventory Analysis)

本稿では、社会基盤施設の計画時の詳細データが存在しない段階で推計する際に用いられる概略 LCI 手法⁴⁾を援用して推計を行う。これは、あらかじめ各構成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。標準構造物は東部丘陵線建設誌⁵⁾を参照して設定した。以下に具体的な推計方法を解説する。

(a) 使用する原単位

LCI における基礎データとなる環境負荷原単位は、産業連関法やプロセス法によって、様々な機関で推計が行われ、公表されている。それらのうち、本稿においては、物量ベースで整備されており、分類が約 500 と細かく、建設分野の LCA を行う上で扱いやすい日本建築学会⁶⁾作成の原単位を使用する。

表 2 HSST システムの CO₂ 原単位(車両)

	CO ₂ 排出量
車両製造 [t-CO ₂ /編成]	227.2
車両走行 [kg-CO ₂ /編成 km]	6.870

表 3 HSST システムの CO₂ 原単位(インフラ)

インフラ 構造形式	CO ₂ 排出量 [t-CO ₂ /km]	延長 [km]
PC 橋	17,018	3.736
RC 橋	14,783	3.087
ラーメン橋	6,551	0.441
シールドトンネル	1,543	1.005
開削トンネル	47,954	0.329
軌道	1.213	9.152
電車線	0.052	9.152

(b) 車両起源

①製造段階

東部丘陵線に使用されている車両は 3 両 1 編成であり、空車の重量は 51.9[t/編成]である。運行事業者である愛知高速交通株式会社へのヒアリングにより得られた概ねの重量構成比(アルミニウム 49%、鉄 21%、電子機器類 15%など)に環境負荷原単位を乗じて各種環境負荷を推計する。

②走行段階

Hibi et al.⁷⁾によると、HSST 車両の平均電力消費量は 4.046[kWh/車両 km]と推計されており、これに車両走行 km を乗じることで、環境負荷量を推計する。

なお、HSST の走行には浮上力と推進力を必要とするため、他の電力を起源とする輸送機関と比較して車両走行原単位は 1.6~4.0 倍程度、定員あたりに換算しても 2.5~5.0 倍程度大きい(表 1)。

(c) インフラ起源

①本体構造物

地下部の構造には開削工法と複心円土圧式シールド工法が用いられている。また、高架部には PC 橋、RC 橋、ラーメン橋が存在しており、文献⁵⁾により、それぞれの標準的なパーツごとにインベントリ分析を行い、環境負荷排出量を延長 1km あたりの値として表す。

なお、東部丘陵線は、阪神大震災以降に設計された初の中量軌道系システムであるため、新耐震基準が採用されており、従来のシステムと比べて堅牢に設計されている。

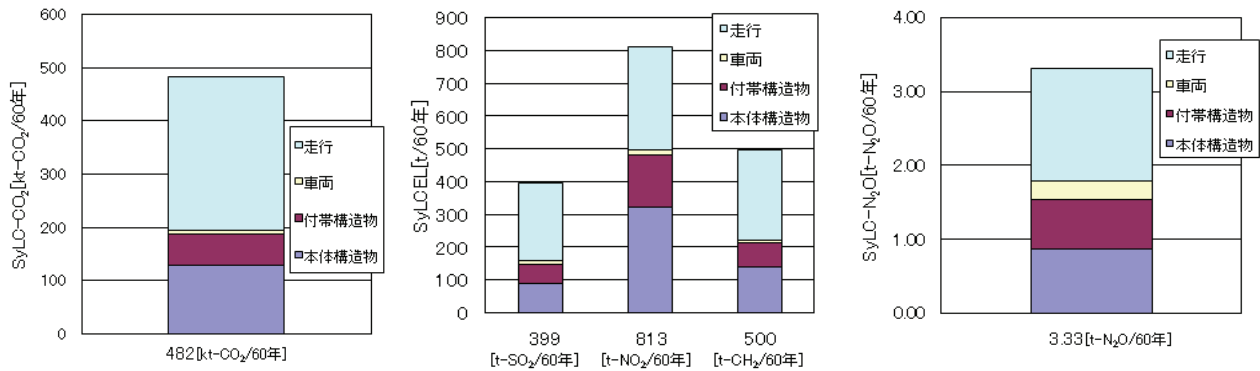


図2 SyLCEL 推計値（需要量 8,610[人/日]、混雑率約 16%）

②付帯構造物

駅は、大きく地下駅と高架駅に区分され、各駅にエレベーターや自動改札機といった付帯設備が存在する。日本鉄道建設公団関東支社（現・（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）の原単位⁸⁾を参考に、それぞれ環境負荷排出量を積み上げる。その他、軌道・電車線の投入材料組成に関しては、運行事業者へヒヤリングを行った。

なお、通常の軌道系システムではレールや枕木の交換が必要であるが、浮上走行方式においてはメンテナンスフリーという特性があることから、維持補修に係る環境負荷排出量はゼロと仮定する。

以上より求められた環境負荷原単位のうち CO₂ について表 2-3 に示す。他の 4 種類についても同様に整理している。

3. ライフサイクル環境負荷推計結果

（1）需要量実績値を用いた推計結果

東部丘陵線の需要量は、愛・地球博の開催中と終了後で大きく異なり、かつ需要予測とも乖離している。そのため、まず通常時の需要量である愛・地球博終了後の実績値を用いて SyLCEL を推計した結果を図 2 に示す。

SyLC-CO₂ (CO₂ を SyLCEL で評価した値) については、走行段階での排出が約 6 割を占める。これは、走行にかかわる電力の消費量に由来するものである。他の環境負荷に関してもほぼ同様の傾向を示しているが、NO_x については本体構造物建設の占める割合が大きい。資材投入におけるコンクリートや鉄鋼起源の原単位が寄与していると考えられる。

（2）需要量予測値・実績値による推計結果の違い

ここからは、CO₂ 排出量に絞って論述する。

（1）節で推計した走行起源の CO₂ 排出量を輸送人 km あたりに換算すると、341 [g-CO₂/人 km] となる。これは、交通関係エネルギー要覧¹⁾等で示されている鉄道の数値

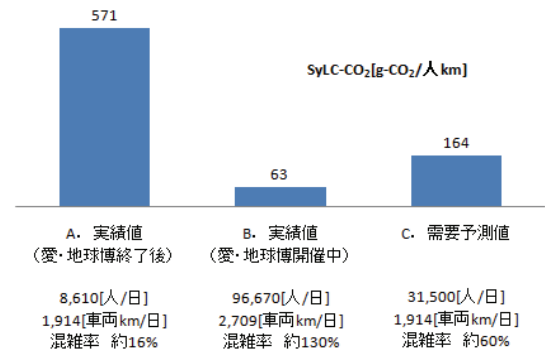


図3 ケース別の SyLC-CO₂ 推計結果

と比べると 20 倍近い値であり、CO₂ 排出量が大きいとされている航空機や自家用自動車と比べても 3 倍ほど大きい。これにより、LCA を行うまでもなく（従来通りの走行面だけでの比較においても）、環境面で不利であると言える。SyLC-CO₂ も大きく (571 [g-CO₂/人 km])、浮上走行に伴い維持補修が不要になることで、環境面で優位になるとは言えない。

ただし、単位輸送人 km での評価は需要量に大きく依存するため、車両走行 km (すなわち走行ダイヤ) が実績値と同様の条件 (1,914 [編成 km/日]) のもとで、当初予測されていた需要量 (31,500 [人/日]) を達成した場合の SyLC-CO₂ を推計する。参考までに、愛・地球博開催中の輸送実績値 (2,709 [編成 km/日]、96,670 [人/日]) での SyLC-CO₂ もあわせて示し、比較する (図 3)。

「C：需要予測値」を用いて算出した SyLC-CO₂ は 164 [g-CO₂/人 km] であり、「A：実績値 (愛・地球博終了後)」と比べて約 71% 小さい。すなわち、計画段階で LCA を実施していた場合、CO₂ 排出量を過少に見積もっていた可能性がある。このことから、結果を提示する際には、需要量のような結果に大きく影響を及ぼす要素に関して感度分析を行うことの重要性が改めて示された。

なお、「B：実績値 (愛・地球博開催中)」を用いた場合には、SyLC-CO₂ は 63 [g-CO₂/人 km] であり、約 89% 小さい。

(3) 他の中量輸送機関との比較

図4は既報²⁾で算出された各種輸送機関の需要量と SyLC-CO₂ との関係である。既報における需要量と SyLC-CO₂ との関係曲線は需要量と混雑率との関係を定式化し、最大混雑率の設定により運行本数を決定した上で得られたものであり、本稿のように実績の混雑率値から算出された結果とは異なる。この図に本稿で実施した HSST システムの LCA 結果を当てはめると A、B、C のようにプロットされる。「A：実績値(愛・地球博終了後)」の需要量では他のどの中量輸送機関よりも SyLC-CO₂ が大きく、最も小さい LRT と比べて 11 倍の差がある。「C：需要予測値」の場合にも同様に 2～5 倍程度大きい。既報のような運行本数や車両数の決定法であれば、平均混雑率約 130%というすし詰め状態での輸送であった「B：実績値(愛・地球博開催中)」の運行本数や編成車両数は実績値よりさらに多く、一方で平均混雑率が 16%程度にとどまっている「A：実績値(愛・地球博終了後)」は減便が検討される可能性がある。

(4) 同一運行ダイヤ下での比較

各種中量輸送機関を同一条件で比較するため、「A：実績値(愛・地球博終了後)」の運行ダイヤ(C も同一)のもとで SyLC-CO₂ を算出し、混雑率に関する感度分析を行ったものを図5に示す。凡例に示す順に輸送人 km あたりの SyLC-CO₂ が大きく、最も大きい HSST は最も小さい LRT の約 5 倍である。東部丘陵線の機種選定の際に代替案として挙げられていたモノレールや AGT と比較しても 2.0～2.6 倍大きい値である。

4. 結論

本稿では、HSST システムの LCA を実施し、各構成要素に関する原単位を整備した。また、実績値ベースの需要量のもと、各種環境負荷排出量を推計した。さらに、需要量の実績値(愛・地球博開催中、終了後)、予測値を用いて各種環境負荷排出量を推計した結果、輸送人 km あたりの SyLC-CO₂ に関して、実績値(愛・地球博終了後)と予測値で 2 倍以上の差があり、需要量の設定が LCA 結果に大きな影響を及ぼすことが確認できた。

また、他の中量輸送機関との比較を行った結果、需要量実績値(愛・地球博終了後)では SyLC-CO₂ が 3～10 倍ほど大きい(航空機や家用自動車と同水準)ことが分かった。

謝辞

本研究の遂行にあたり、愛知高速交通株式会社には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。

A：実績値(愛・地球博終了後)、B：実績値(愛・地球博開催中)、C：需要予測値

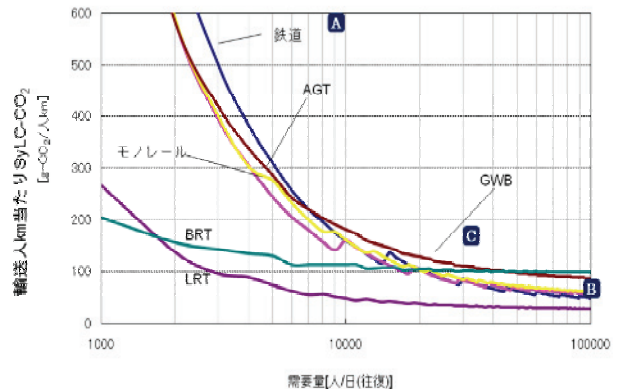


図4 需要量変化に伴う SyLC-CO₂ 推計結果²⁾ における HSST システムの位置づけ

A：実績値(愛・地球博終了後)、C：需要予測値

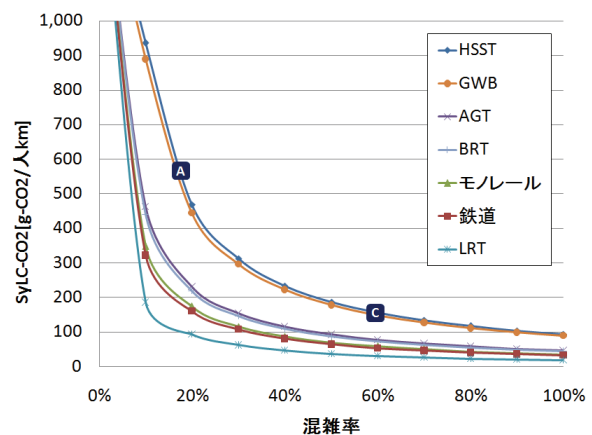


図5 輸送機関別 SyLC-CO₂ の混雑率による感度分析結果

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局情報管理部：平成 17 年版 交通関係エネルギー要覧，国立印刷局，2005。
- 2) 長田基広，渡辺由紀子，柴原尚希，加藤博和：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 No.23, no.2, pp.355-363, 2006。
- 3) 柴原尚希，渡辺由紀子，加藤博和：交通システム LCA における評価の不確実性管理と情報提示の方法論，土木計画学研究・講演集，Vol.35, CD-ROM(254)，2007。
- 4) 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。
- 5) 愛知高速鉄道株式会社：東部丘陵線建設誌，2006。
- 6) 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。
- 7) O.Hibi, K.Saito：Summary of automatic operation of Linimo and achievement in opening year，The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives，2006。
- 8) 日本鉄道建設公団関東支社，(財)運輸政策研究機構：平成 13・14 年度 環境からみた鉄道整備効果に関する調査報告書。