

# 自転車・LRT・乗用車の ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量比較

山本 充洋<sup>1</sup>・加藤 博和<sup>2</sup>・柴原 尚希<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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C1-2(651))  
E-mail:myama@urban.env.nagoya-u.ac.jp

<sup>1</sup>正会員 名古屋大学准教授 大学院環境学研究科  
E-mail:kato@genv.nagoya-u.ac.jp

<sup>1</sup>正会員 名古屋大学助教 大学院環境学研究科  
E-mail:nshiba@urban.env.nagoya-u.ac.jp

運輸部門における低炭素化を進めるための基礎情報として、各交通システムのCO<sub>2</sub>排出量を適切に評価しておく必要がある。本研究では、低炭素な交通手段と言われる自転車及びLight Rail Transit(LRT)が、乗用車に比べ実際にどの程度CO<sub>2</sub>削減効果を有するかを、Life Cycle Assessment(LCA)を用いて評価する。評価に際しては、各交通手段を車両とインフラから構成される一体的なシステムと捉え、それを導入する区間の既存交通に与える影響も加味する。分析の結果、自転車のライフサイクルCO<sub>2</sub>は、乗用車に比べ人kmベースで8~9割低くなった。しかし、既存道路上に自転車専用道やLRT軌道を整備する場合、乗用車からの転換が一定以上生じなければ、逆にCO<sub>2</sub>排出量が全体で増加することが示された。

**Key Words :** *life cycle assessment, CO<sub>2</sub> emissions, bicycle, light rail transit*

## 1. はじめに

地球温暖化問題への懸念が高まる中、低炭素な交通手段として、自転車やLight Rail Transit(LRT)への関心が高まっている。しかし、その低炭素性の根拠については、限られた側面のみからの理解に基づく場合が多い。

確かに、自転車やLRTは走行時のCO<sub>2</sub>排出が小さい交通手段である。しかし、実際に人が自転車を利用するには自転車を製造する必要があり、LRTが街中を走行するためには専用軌道の建設が必要となる。これらはCO<sub>2</sub>を排出する活動である。更に、自転車専用道やLRT軌道の新設に伴って自動車レーンが減少すれば、渋滞という形で乗用車の燃費を悪化させ、CO<sub>2</sub>増加につながる可能性がある。このような、交通手段の変化によって間接的に変化するCO<sub>2</sub>排出を考慮せず、走行時のCO<sub>2</sub>排出のみに着目して自転車やLRTの低炭素性を議論することは適切ではない。

そこで本研究では、評価対象の環境負荷をそのライフサイクル全体で評価するLife Cycle Assessment(LCA)の手法を用いて、都市内交通手段のCO<sub>2</sub>排出量を包括的に比較することを目的とする。鉄道やLRTに対するLCAの適用は、渡辺ら<sup>1)</sup>や加藤ら<sup>2)</sup>によってその手法が確立されてい

る。本研究ではその手法を自転車や電気自動車(EV)に拡大して適用し、需要量等の条件に応じた各交通手段のCO<sub>2</sub>削減効果を明らかにする。

## 2. 評価手法及び諸設定

### (1)LCA適用範囲

LCAは、評価対象となる製品・サービスの環境負荷を、原材料調達から製造、使用、廃棄までのライフサイクル全体で評価する手法である。ISOでも規格化され、工業製品から食品、輸送機械まで、その適用例は数多い。

加藤ら<sup>3)</sup>は、新規交通機関導入を評価する際に、通常のLCAでは別個に評価される車両とインフラを、一体的な交通システムとして扱うSystem Life Cycle Environmental Load(SyLCEL)による評価を実施している。更に、前述の様に、自転車専用道やLRTの専用軌道の新設が他の交通手段に与える影響も含めた環境負荷をExtended Life Cycle Environmental Load(ELCEL)と呼び、多くの事例への適用を進めてきている。

これを踏まえ本研究では、自転車・電動アシスト自転車・LRTを対象に、各交通システム単体のCO<sub>2</sub>排出量

(SyLC-CO<sub>2</sub>)に加え、専用軌道の 신설による影響まで包括したCO<sub>2</sub>排出量(ELC-CO<sub>2</sub>)を評価する。自転車については車両・インフラ起源CO<sub>2</sub>に加え、運転による人間のカロリー消費増加に伴って誘発される食品起源のCO<sub>2</sub>排出増加量を参考値として推計する。乗用車についてはガソリン車(GV)を想定するが、今後EVを始めとする次世代自動車の急速な普及が予想されることから、半数がEVに転換したケースも考え、各ケースについて自転車・電動アシスト自転車・LRTへの転換を評価する。また、全ての交通手段において、車両の維持・管理及び廃棄に伴うCO<sub>2</sub>排出量は総量からみて微小であると考え、考慮しない。

## (2)基本設定

片側3車線、5kmの乗用車のみが走行する道路区間を仮に想定し、自転車専用道もしくはLRT専用軌道によって片側1車線が占有される場合を考える。

表-1に、全ての交通手段の導入に共通する設定を示す。朝夕のラッシュ時は平常時と比べ交通需要が集中することを想定する。

電力については、電動アシスト自転車・LRT・EVに使用される電力は同一のものとし、参考文献<sup>4)</sup>から算出した電力CO<sub>2</sub>排出原単位(2009年現在、全国平均値)を用いる。

表-1 基本設定

交通発生時間帯[時]	6-24
朝ラッシュ時間帯[時]	7-9
夕ラッシュ時間帯[時]	17-20
朝ラッシュ1時間交通量/日交通量[%]	10
夕ラッシュ1時間交通量/日交通量[%]	8.0
ラッシュ以外1時間交通量/日交通量[%]	4.3
ライフタイム[年]	60
電力CO <sub>2</sub> 排出原単位 <sup>4)</sup> [t-CO <sub>2</sub> /kWh]	4.49×10 <sup>-4</sup>
乗用車乗車人数[人/台]	1.3

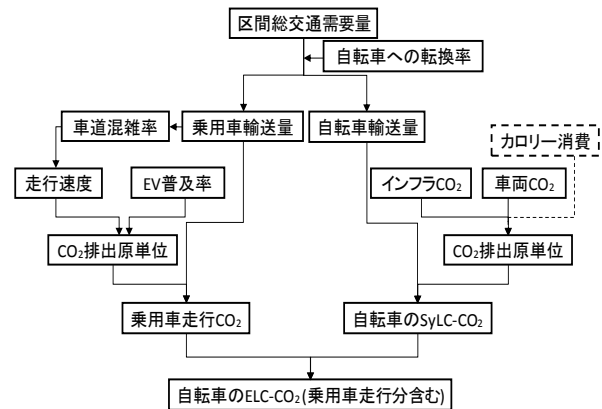


図-1 評価手順(自転車)

## (3)評価手順

図-1に自転車を例としてSyLC-CO<sub>2</sub>・ELC-CO<sub>2</sub>推計手順を示す。もともと乗用車で全て賅われていた区間総交通需要量に対して、自転車への転換率を与えることで乗用車・自転車の輸送量が定まり、それをもとにSyLC-CO<sub>2</sub>が算出される。乗用車は転換による輸送量減少と自転車専用道新設に伴う車線減少の影響をともに受ける。先行研究<sup>1)</sup>の手法を用いて推定した車線数別の交通量-旅行速度関係式を用いることで、双方の影響を考慮に入れた旅行速度を算出し、大城ら<sup>9)</sup>が提示した旅行速度を説明変数とする回帰式と組み合わせることで燃費を算出する。ただし、EVについては旅行速度が電力消費量に与える影響についてのデータが得られなかったため考慮しない。LRTの新設が乗用車に与える影響についても同様の手法を用いて評価する。

## (4)自転車に関する設定

表-2に自転車に関する諸設定を示す。自転車専用道は、歩道との境界を縁石で区切り、中央にガードパイプを設置したものを想定する(図-2)。自転車専用道の 신설にあたっては、これらの縁石とガードパイプを新設すると考え、原材料の分量から新設に伴うライフサイクルCO<sub>2</sub>を算出する。

表-2 自転車に関する設定

自転車専用道建設CO <sub>2</sub> [t-CO <sub>2</sub> /km]	18.1
自転車走行速度[km/時]	15
車両耐用年数[年]	8
日平均走行距離 <sup>9)</sup> [km/人日]	2.93
自転車製造CO <sub>2</sub> <sup>10)</sup> [t-CO <sub>2</sub> /台]	0.0465
自転車消費カロリー <sup>7)</sup> (自動車運転時との差分)[kcal/時]	337
食品起源CO <sub>2</sub> <sup>8)</sup> [t-CO <sub>2</sub> /kcal]	0.99
電動アシスト自転車製造CO <sub>2</sub> <sup>10)</sup> [t-CO <sub>2</sub> /台]	0.0747
電動アシストLi-ion電池性能 <sup>10)</sup> [V]	25.2
電動アシストLi-ion電池性能 <sup>10)</sup> [Ah]	8.1
電動アシスト航続距離 <sup>10)</sup> [km]	20
Tank to Wheel効率 <sup>11)</sup> [%]	67
電動アシスト比率[%]	28

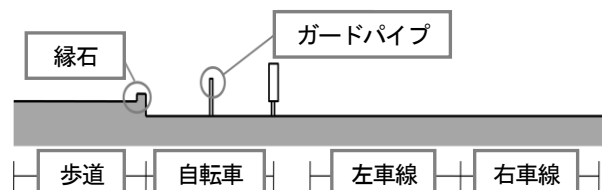


図-2 自転車レーンを導入した道路の断面図

自転車の運転によるカロリー消費については、アメリカスポーツ医学会<sup>7)</sup>によるMETS法を用い、乗用車運転時(電車による通勤も同値)との差分を算出する。『エコプロダクツ2008』<sup>8)</sup>に出展された食品群のCarbon Footprint(CFP)値の平均値を、日本全体のGHG排出割合を用いてCO<sub>2</sub>換算することでカロリーあたりのライフサイクル食品起源CO<sub>2</sub>原単位を求める。これに乗じることで、自転車を1時間運転した際のカロリー消費増加によって誘発される、食品起源CO<sub>2</sub>排出量が導出される。

電動アシスト自転車については、カロリー消費を一部電力が代替していると考え、電池性能、航続距離、Tank to Wheel効率からその比率を算定する。

### (5)LRTに関する設定

表-3にLRTに関する諸設定を示す。先行研究<sup>2)</sup>の手法を用いて、時間帯別の1時間あたり運行本数を需要量及び混雑率から決定する。更に、最も運行本数が多い朝ラッシュ時の運行車両数に予備車両数を合わせて必要車両数を算出する。これらを用いて運行・車両起源CO<sub>2</sub>排出量が導かれる。軌道及び電停の建設・維持に伴うCO<sub>2</sub>排出は、先行研究<sup>2)</sup>で延長kmもしくは電停あたりで算出されている値を原単位に用いて推計する。

### (6)乗用車に関する設定

表-4に乗用車に関する諸設定を示す。自転車やLRTへの需要量転換が生じてても、乗用車保有台数や道路インフラ量には変化がないと仮定し、車両・道路インフラ起源CO<sub>2</sub>は推計対象としない。ただし、EVへの転換を考える際には、EVはGVより車両起源CO<sub>2</sub>が大きいことから、その差分について考慮する。

また、EVのTank to Wheel効率については、先行研究<sup>1)</sup>で示した現状の技術水準値を用いる。

## 3. 推計結果

### (1)各交通手段のLC-CO<sub>2</sub>推計結果

図-3に各交通手段の車両製造と走行エネルギー消費を考慮したLC-CO<sub>2</sub>の推計結果を示す。自転車・電動アシスト自転車はともに、乗用車に比べ1桁小さい値となる。人間のカロリー消費を考慮しない場合、電動アシスト自転車は通常の自転車に比べ約2.5倍大きい値を示す。しかし、カロリー消費を考慮すると、差は小さくなり、発電方法によっては大小が逆転する可能性もある。

### (2)各交通手段のSyLC-CO<sub>2</sub>推計結果

図-4に各交通手段について、車両・インフラ起源分も含めたSyLC-CO<sub>2</sub>の推計結果を示す。この値は輸送量(人

表-3 LRTに関する設定

LRT駅数[箇所]	11
定員[人]	150
朝ラッシュ混雑率[%]	100
夕ラッシュ混雑率[%]	90
ラッシュ以外混雑率[%]	50
車両製造CO <sub>2</sub> <sup>12)</sup> [t-CO <sub>2</sub> /両]	70
車両耐用年数[年]	20
軌道建設CO <sub>2</sub> <sup>12)</sup> [t-CO <sub>2</sub> /km]	1,510
電停建設CO <sub>2</sub> <sup>12)</sup> [t-CO <sub>2</sub> /箇所]	14.9
インフラ維持補修CO <sub>2</sub> <sup>12)</sup> [t-CO <sub>2</sub> /年]	4
LRT走行時電力消費原単位 <sup>12)</sup> [kWh/編成km]	1.5

表-4 乗用車に関する設定

GV車両製造CO <sub>2</sub> <sup>11)</sup> [t-CO <sub>2</sub> /台]	4.2
EV車両製造CO <sub>2</sub> <sup>11)</sup> [t-CO <sub>2</sub> /台]	6.4
車両耐用年数[年間]	10
年間走行距離[km/台・年]	10,000
EV Tank to Wheel効率 <sup>11)</sup> [%]	67

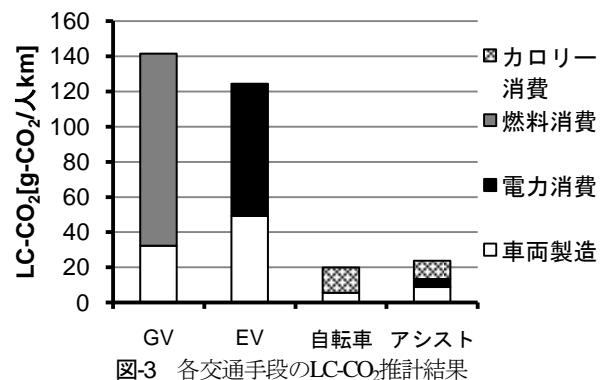


図-3 各交通手段のLC-CO<sub>2</sub>推計結果

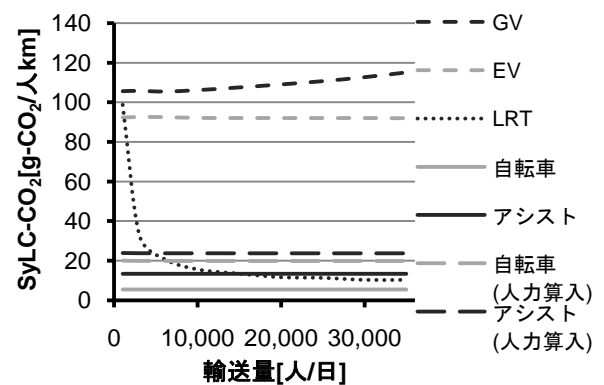


図-4 各交通手段のSyLC-CO<sub>2</sub>推計結果

km)あたりの排出量に換算しており、輸送量の大小によって値が変化する。LRTでは輸送量増加に伴い、人kmあたりに配分されるインフラ・車両起源排出量が小さくなるため、SyLC-CO<sub>2</sub>は減少していく。逆に、GVについては、輸送量増加に伴い道路混雑が進むため、SyLC-CO<sub>2</sub>は漸増する。

その結果、輸送量増加に伴って、電動アシスト自転車よりLRTのほうが $SyLC-CO_2$ が小さくなる場合があるという結果が得られた。ただし、通常の自転車の $SyLC-CO_2$ を下回ることはない(いずれも人力起源非算入)。

### (3)各交通手段の $ELC-CO_2$ 推計結果

図-5・6・7に、各交通手段について、乗用車からの転換を考慮した $ELC-CO_2$ の推計結果を示す。

図-5は、対象区間の総交通需要量を20,000[人/日]とし、そのうち30%が自転車・LRTに転換した際の $ELC-CO_2$ の変化量を示したものである。いずれの場合も新規交通手段への転換量、車線数減少が等しいため、乗用車起源排出量の減少分も等しい。LRTは、インフラ起源排出量の影響が大きいため、自転車に比べ $ELC-CO_2$ 削減量が小さいが、人力起源排出量を考慮する場合には自転車と拮抗する。

図-6は、対象区間の総交通需要量を20,000[人/日]に固定し、転換率を変化させた場合の $ELC-CO_2$ 計算結果を示したものである。いずれも、転換率30%の場合には13~17%、転換率50%の場合には36~40% $ELC-CO_2$ が削減される。また、16~21%以下の転換率では、自動車レーン減少の影響により $ELC-CO_2$ が増加する結果が得られた。自転車専用道やLRT軌道の新設による $CO_2$ 削減効果は、十分な手段がないと得られないことが分かる。

図-7は、転換率を30%に固定し、区間総交通需要量を変化させた場合の $ELC-CO_2$ 削減率を示したものである。自転車による削減量は需要量に関わらず安定しているものの、総交通需要量増加に伴って漸減傾向を示す。これは、車線減少による乗用車の燃費悪化が原因である。逆に、LRTは総交通需要量の増加によって、インフラ・車両起源排出量が全体に占める割合が小さくなり、これが乗用車の燃費悪化の影響を打ち消し、削減率が上昇している。

図-8・9に、転換率・総交通需要量毎の $ELC-CO_2$ 最小となる交通手段を示す。図-8は自転車の人力起源を算入しない場合、図-9は算入する場合である。

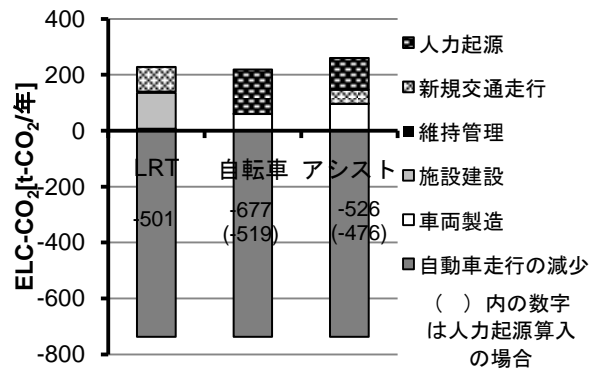


図-5 各交通手段導入による $ELC-CO_2$ 変化量 (総交通需要20,000[人/日]・転換率30[%])

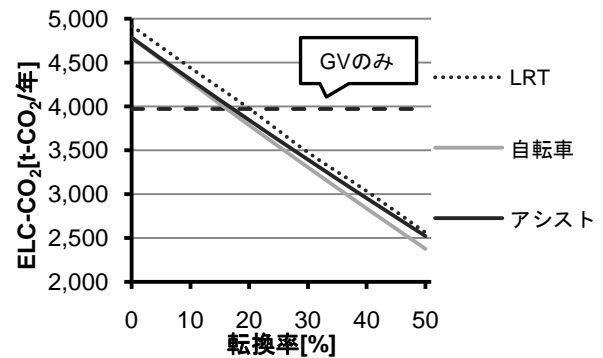


図-6 各交通手段導入時 $ELC-CO_2$ の転換率による変化 (人力起源非算入)

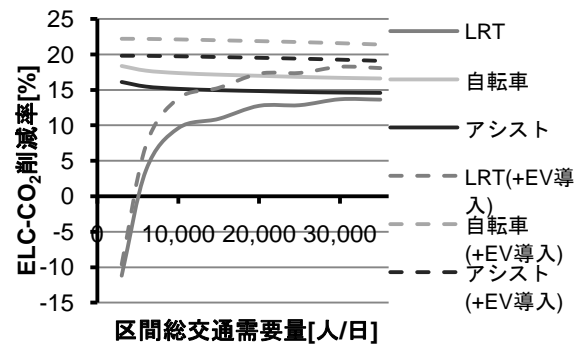


図-7 各交通手段導入時 $ELC-CO_2$ の需要量による変化 (人力起源非算入)

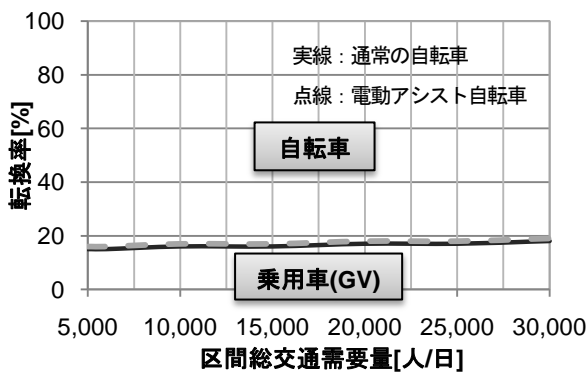


図-8  $ELC-CO_2$ 最小となる交通手段(人力起源非算入)

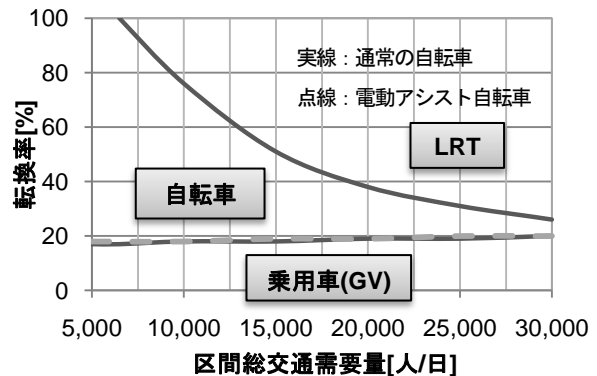


図-9  $ELC-CO_2$ 最小となる交通手段(人力起源算入)

これらの図から、転換率を約20%確保できない場合は、総交通需要量に関わらず転換をしないほうがELC-CO<sub>2</sub>が小さくなること、転換率を約20%以上確保できる場合は自転車が優位となることが分かる。更に、人力起源を算入する場合、転換率・総交通需要量が大きい領域(輸送量約5,000人以上)ではLRTが優位となることも示された。また、自転車と電動アシスト自転車とでは結果にほぼ差が見受けられなかった。

#### 4. まとめ

本研究では、自転車・電動アシスト自転車・LRTの環境負荷評価にLCAを導入することで、乗用車とのSyLC-CO<sub>2</sub>の比較、ELCELの概念を用いた乗用車からの転換によるCO<sub>2</sub>削減可能性の検討を行った。その結果、自転車の車両・走行起源CO<sub>2</sub>排出量は乗用車の1~2割程度と非常に小さく、SyLC-CO<sub>2</sub>でも乗用車・LRTに比べて優位にあることが分かった。しかし、自転車専用道やLRT軌道の新設を加味したELC-CO<sub>2</sub>を考えると、乗用車からの転換がある程度得られないと、逆にCO<sub>2</sub>排出量が増加することも同時に明らかになった。

乗用車からの転換施策の実施を検討するためには、対象区間の交通特性や、その地域の空間構造、あるいは交通手段自体が持つ特性やその使われ方も考慮する必要がある。今後は、本研究で得た知見にそれらを加味することで、より現実的な施策の実施検討に役立てるよう、調査分析を継続していく予定である。

謝辞：本研究は科学研究費補助金・若手研究B(23710055)の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- 1) 渡辺由紀子, 長田基広, 加藤博和: LRT システム導入の環境負荷評価—代替輸送機関との比較と環境効率率の適用—, 日本 LCA 学会誌, Vol.2, No.3, pp.246-254, 2006.
- 2) 加藤博和, 大浦雅幸: 新規鉄軌道整備による CO<sub>2</sub> 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.
- 3) 加藤博和, 柴原尚希: ELCEL 概念による Social/Dynamic LCA への挑戦, 日本 LCA 学会誌, Vol.5, No.1, pp.12-19, 2009.
- 4) 電力中央研究所: ライフサイクル CO<sub>2</sub> 排出量による発電技術の評価 -最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響, 1999.
- 5) 資源エネルギー庁: エネルギー白書 2010.
- 6) 大城温, 松下雅行, 並河良治, 大西博文: 自動車走行時の燃料消費率と二酸化炭素排出係数, 土木技術資料, 43(11), pp.50-55, 2001.
- 7) アメリカスポーツ医学会: Physical Activity & Public Health Guidelines, <http://www.acsm.org/>.
- 8) 経済産業省: エコプロダクツ 2008 出展 カーボンフットプリント 暫定表示 商品説明資料, <http://www.cfp-japan.jp/common/files/4presentationsiryoy.pdf>.
- 9) 内閣府: 平成 22 年度 自転車交通の総合的な安全性向上策に関する調査 報告書, <http://www8.cao.go.jp/koutu/chouken/h22/pdf/houkoku/5-1.pdf>.
- 10) 田中潤, 伊坪徳宏: 電動アシスト自転車の環境影響評価とその導入に伴う環境影響削減効果, 第 6 回日本 LCA 学会研究発表会講演要旨集, pp.174-175, 2011.
- 11) 山本充洋, 加藤博和, 伊藤圭: 将来の車両・エネルギー技術進歩が運輸部門 CO<sub>2</sub> 排出量に与える影響の評価, 第 18 回地球環境シンポジウム講演集, pp.75-80, 2010.
- 12) 柴原尚希, 加藤博和: 交通社会資本評価における環境アセットマネジメント手法の提案: LRT 整備プロジェクトへの適用, 日本 LCA 学会誌, Vol.6, No.4, pp.303-309, 2010.