

23.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

森本 涼子^{1*}・柴原 尚希¹・加藤 博和¹

¹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: rmori@urban.env.nagoya-u.ac.jp

道路事業に伴う環境負荷変化を評価するために、整備される道路インフラとそれを利用する自動車の走行を評価範囲に包括したLCAを実施することによって、インフラ建設により発生する環境負荷が、自動車の燃費改善に伴う環境負荷削減によって相殺される構造が定量的に表現される。この評価手法において、道路のライフタイムが長期であるために生じる、1)車両技術変化と2)交通需要変化の不確実性を検討する方法論を開発する。評価範囲の設定次第で結果の解釈や不確実性が変わりうることから、それを考慮した評価範囲設定の必要性を示す。その上で、不確実性を感度分析により検討し表現する手法を構築し、踏切除却事業を対象にCO₂について分析を行っている。

Key Words : road improvement project, vehicle traveling, technology innovation, sensitivity analysis, system life cycle environmental load (SyLCEL)

1. はじめに

自動車交通は地球温暖化や大気汚染、騒音といった環境問題の大きな原因であり、対策が急がれている。対策の1つとして、走行状況の改善による環境負荷発生原単位の低減が考えられる。渋滞や交差点・踏切の存在によってストップ・アンド・ゴーの回数やアイドリング時間が多くなると、燃費が悪化し環境負荷発生が増大する。そこで、このメカニズムを詳細に分析し、環境負荷削減効果を分析する調査研究は数多く行われてきている。

しかしながら、自動車の走行状況を改善するためにインフラ整備を実施する場合には、インフラ建設自体に伴う環境負荷排出が大きいことに注意が必要である。国土交通省や建設会社が、道路整備に伴う環境負荷削減効果として自主的に調査・公表しているのは、通常、自動車走行からの排出分のみであり、インフラ建設分は計上されていない。また、供用後の利便性向上による自動車交通量増加がもたらす環境負荷増加についても、評価プロセスの中でいかに考慮しているかを明確にしたものは少ない。これらの影響も含めて環境負荷を包括的かつ定量的に評価する手法が整備され適用されることで、道路改良事業が環境負荷削減施策として機能しているかどうかの議論に活用できる客観的なデータが得られる。

このような包括的・定量的評価を可能とする手法とし

て、LCA(Life Cycle Assessment)が考えられる。LCAとは、製品やインフラの製造・建設から、運用、更新、廃棄までにわたるライフサイクル全体の環境負荷を定量的に把握する手法である。もとは工業製品を対象とするものであったが、インフラへの適用も既に多くなされてきている¹⁾。実際に、国土交通省においても、道路のライフサイクルCO₂排出量算出の方針を検討する動きがある。この背景として、日本が道路整備推進の理由の1つにCO₂削減効果を挙げ、京都議定書目標達成計画においても対策として位置づけていることがある。一方で、他の先進国においては、道路整備は需要喚起につながり、環境負荷増加要因となるとする考え方が強い。そのため、道路交通からの環境負荷削減策として、燃費向上やガソリン以外の代替燃料の普及といった、自動車の技術革新に期待が寄せられており、それらに関する研究が多く行われている²⁾。しかし、道路整備に伴う需要変化や、将来の技術革新のいずれをとっても、不確定要素が大きい。自動車交通に伴うCO₂排出を長期的に削減するための施策の方向性を検討するためには、これらの要素を総合的かつ定量的に考慮するとともに、その不確実性についても検討することが必要である。

道路事業を対象としたLCA研究として、著者ら^{3,4)}は道路インフラとそれを利用する自動車の走行を評価範囲に含め、道路改良による環境負荷変化を包括的に捉えるこ

とを試みてきた。その後、道路の整備・改良のLCAを計画段階において実施するにあたり、このフレームワークを用いた研究は多数行われてきている⁹⁷⁾。しかし、既存の研究では事業の空間的波及影響や車両技術の変化といった、長いライフタイムの中で変化しうる要素については通常、固定的なシナリオを与えるにとどまっており、シナリオの違いによる検討をすることを前提とするものとはなっていない。実際には、後述するようにシナリオの変化が結果に影響を与えることが考えられる。この問題意識に立って、本研究では道路事業にLCAを適用する際、評価対象範囲の設定により推計結果がどのように変化するかを検討することを目的とする。特に、長期間のライフタイムにおける自動車技術と交通需要の変化が評価結果に与える影響を感度分析する手法を構築する。

2. インフラへのLCA適用の方法論構築

(1) LCAの一般的な方法論

LCAの一般的な実施枠組みは図-1に示すように、ISO14040において規格化されている。まず、LCA実施の目的を設定し、その目的やデータ制約に合うように、調査範囲(評価対象範囲)を設定する(A)。次に、各種の資源・エネルギー投入量や環境負荷物質排出量を推計する(B)。その結果を基に、環境へのインパクトの大きさを評価する(C)。最後に、以上の結果の全体的な整合性を確認し、分析結果を解釈する(D)。この枠組みはインフラにも適用可能である。

(2) 評価対象範囲

インフラ整備は広い空間範囲の様々な部門に対して効果影響を波及させるため、LCAの適用においては、波及効果の範囲に対応した評価対象範囲の設定の考え方を明確化することが重要である。これが適切に行われない場合、結果の解釈が妥当でなくなったり、有用性・信頼性が損なわれたりすることとなる。そこで加藤⁹⁸⁾は、インフラ整備を対象としたLCAにおける範囲設定の考

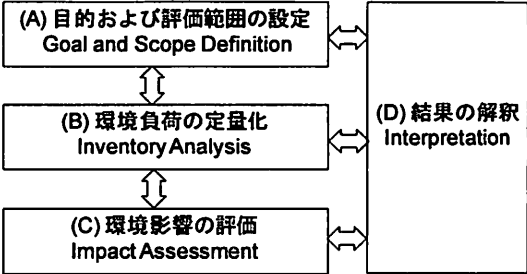


図-1 ISOで規定されたLCAの実施枠組み

え方として、SyLCEL・ELCELの概念を提案している。SyLCEL(System Life Cycle Environmental Load: システムのライフサイクル環境負荷)とは、評価対象とするシステム自体を範囲とした場合の環境負荷である。システムの中に多数の構成要素が含まれる場合には、それらをすべて評価することになる。一方、ELCEL(Extended Life Cycle Environmental Load: 拡張ライフサイクル環境負荷)はシステムの外部に波及的に生じる環境負荷変化分まで評価範囲を拡張したものである。本研究で対象とする交通システムにおいては、それを構成するインフラ・車両の環境負荷の合計がSyLCELとなる。これによって、幾何構造やルート代替案比較検討が可能となる。この範囲設定は、交通インフラ自体を評価する立場で考えれば、その外部に当たる車両の走行に影響を与えるメカニズムが内部化されることになり、ELCEL評価であると見ることができる。以上のように、SyLCELやELCELは、何を評価対象とするかによって変化するものである。

この考え方に倣い、道路インフラの整備によって交通を変化させることを目的とする道路事業において、そのSyLCEL・ELCELを、表-1のように定義する。インフラ建設によりインフラのLCEL(Life Cycle Environmental Load)が発生するが、その区間における走行状況改善や渋滞解消によって、自動車走行による環境負荷が大きく削減できることが考えられるため、道路およびその上を走行する車両を合わせて、道路システムとしてみたSyLCEL評価の対象とする。一方で、対象道路区間の交通が円滑化したことに伴い、誘発交通需要の発生や他経路からの転換が、対象道路区間の交通量増加に寄与することが一般

表-1 道路事業のLCAにおける評価範囲の考え方

環境負荷 評価指標	評価対象	
	道路改良事業一般	鉄道連続立体交差事業(高架化)による踏切除却
インフラ のLCEL	・既存インフラの除去 ・新規インフラのライフサイクル	・踏切の撤廃、道路の舗装 ・高架鉄道橋の建設・維持
SyLCEL	・自動車走行状況変化 ・自動車以外のシステム各要素の変化 ・対象区間での交通量増加(誘発/転換)	・自動車の渋滞・停止の解消 ・勾配による電車の電力消費の変化 ・対象区間での交通量増加
NeLCEL	・ネットワーク全体での交通量増加と再配分	・ネットワーク全体での交通量増加と再配分
ELCEL	・社会全体への波及効果 (車両の保有状況・沿道土地利用の変化など)	・社会全体への波及効果

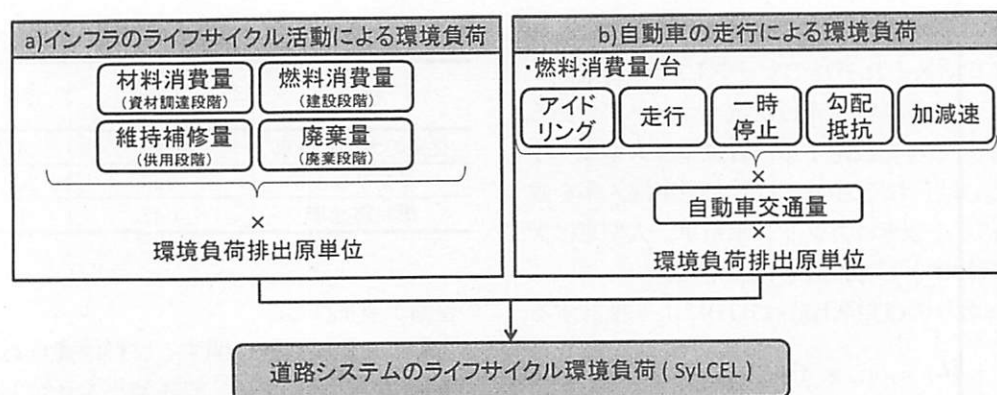


図2 道路システムの SyLCEL の構成

的であり、SyLCELにその評価も組み込む必要が生じてくる。加えて、周辺の道路ネットワークや、場合によっては公共交通等を含めて交通量が再配分され、交通状況が変化し、結果として環境負荷を増減させることも考えられる。これらはSyLCELの対象範囲である当該道路区間に含まれないことから、考慮が必要な場合は対象範囲を広げて評価すべきである。これは一種のELCEL評価にあたり、本研究では「NeLCEL(Network Life Cycle Environmental Load: ネットワークライフサイクル環境負荷)」と呼ぶこととする。さらに、他部門を含めた社会全体に波及する効果を広義のELCELと位置づける。例えば、車両の保有状況に与える影響や、沿道の土地利用の変化などがこれに含まれる。この段階になると、効果の網羅的な捕捉は積み上げ型の推計では困難であり、応用一般均衡分析などの活用が必要となる。ただし、一般にLCELからELCELに向かうほど、その影響の不確実性も高いと予想される。このような評価対象範囲の設定と結果の不確実性の扱いは、通常の道路整備効果評価においても全く共通する課題である。本研究では、評価対象範囲を表-1のように定義し、その範囲でいかなる分析や解釈が可能かを明確化することで対処するものとする。

(3) 結果の提示

LCAの実施においては様々な仮定やモデル化が必要であり、結果もそれらに起因する不確定要素によって大きく左右されることから、それらを踏まえた結果であることが受け手に伝わるような情報提供の工夫が必要である。特に、道路事業を含めたインフラLCAにおいては、事業の規模や社会への影響が大きく、また計画時に利用状況を予測するのが困難であるという特徴を持っており、情報提示における配慮が重要となる。

その具体的な留意点としてまず、どのような前提条件の下に行われた推計であるかを明示することが挙げられる。設定値が予測結果などの不確実な値である場合には、感度分析を行うことで、その設定によって結果がどう変化するか検討し示す。推計の主な目的は、事業により環

境負荷削減が達成されるかどうかを明らかにすることであるため、どのような条件で環境負荷が削減されるのか、またその状況が起こりやすいかどうかを提示する必要がある。

3. 道路事業を対象とした具体的な推計手法

(1) ライフサイクル環境負荷推計方法

2章での一般的な整理を踏まえて、本研究では表-1のうちSyLCELに基づいた評価対象範囲を扱う。すなわち、仮想の対象道路区間を設定し、その範囲内におけるa)インフラのライフサイクルでの活動、およびb)その区間の自動車走行を道路システムと定義して扱う(図-2)。なお、本研究では推計全体の方法論を示すことを目的としており、仮想道路区間を対象として推計を行っている。そのため、データ設定・ネットワーク構成を簡略に行っているが、実際の事業においてはシミュレーションや実測によって、曜日ごとの交通量の違いや時間帯に応じた速度の変化といった詳細なデータを把握し推計を行う必要がある。

本研究での評価対象負荷物質はCO₂のみとし、評価対象システムのライフサイクルを30年とする。

a) インフラ：概略LCI

本研究で目的とする計画段階での評価においては、整備が必要となるインフラの詳細な構造設計は実施されていないため、詳細なデータが得られない可能性が高い。その場合、各構造形式別に、既存の構造物の資材投入量データを参考にして構造物を構成する各パーツの資材投入量を求め、これらを合計することによって環境負荷を求める方法を適用する。これは「概略LCI (Life Cycle Inventory)」と呼ばれる。既往研究などで標準構造に対応した原単位が整備されている場合は、それを用いることができる。

b) 自動車交通

対象道路を通過する自動車から発生するCO₂排出量(走

行分、踏切遮断の間のアイドリングによる燃料消費を考慮)を、踏切除却前後それぞれのケースについて推計する。前提条件として、自動車走行状況パラメータである、交通量・平均旅行速度を設定する。自動車は大型車・小型車の2種類に分けられるものとし、大型車混入率を設定するとともに、小型車はガソリン乗用車、大型車はディーゼル普通貨物車として推計を行う。

自動車1台あたりのCO₂排出量は式(1)により推計する。

$$EL = EL_{\text{走行}} + EL_{\text{アイドリング}} + EL_{\text{一旦停止}} \quad (1)$$

走行・アイドリング・一旦停止による環境負荷は、それぞれ式(2)に基づいて推計する。

$$EL_{\text{走行}} = \sum (FC_{\text{走行}i} \times EF_i) \times L \quad (2a)$$

$$EL_{\text{アイドリング}} = \sum (FC_{\text{アイドリング}i} \times EF_i) \times T \quad (2b)$$

$$EL_{\text{一旦停止}} = \sum (FC_{\text{一旦停止}i} \times EF_i) \quad (2c)$$

EL : CO₂排出量[kg/台]

$FC_{\text{走行}}$: 走行の燃料消費率[l/km]

$FC_{\text{アイドリング}}$: アイドリングの燃料消費率[l/分]

$FC_{\text{一旦停止}}$: 一旦停止の燃料消費率[l/回]

EF : 燃料消費のCO₂排出原単位[kg/l]

L : 区間距離[km]

T : アイドリング時間[分]

i : 車種(小型車, 大型車)

走行の燃料消費率 $FC_{\text{走行}}$ の算出には、大城ら¹⁰⁾が走行試験によって得た、平均旅行速度 V [km/h]を説明変数とする式を、小型車・大型車それぞれに用いる。平均旅行速度は、走行状況が燃費やCO₂排出原単位に及ぼす影響を表す際に最もよく用いられるパラメータである。また、停止時のアイドリングによる燃料消費率 $FC_{\text{アイドリング}}$ は、環境省¹¹⁾の値を用いる。踏切進入前の一旦停止による燃料消費率 $FC_{\text{一旦停止}}$ は安井¹²⁾より、小型車・大型車ともにガソリン0.026[l/(台・回)]とする。

なお、大城らの推計式は走行試験を停止・アイドリングを含んだ走行モードを基に推計されているため、式(1)にそれを組み込んだ場合、停止・アイドリングがダブルカウントになる可能性がある。一方、停止時間を含む概念である平均旅行速度が説明変数となっているが、後で使用するのは停止時間を含まない走行速度であり、これによって過少評価になるおそれがある。しかし本研究では、停止・アイドリングを含まない走行モードに関するCO₂排出量データを利用することができなかつたため、便宜的に大城らの推計式を使用している。本研究のような、微視的な走行挙動の変化が問題になる場合、それに対応した燃料消費率データの使用が適当であり、そ

表2 各自動車のCO₂排出原単位の設定(従来のガソリン車=1)

種類	走行 (Well-to-Wheel)	停止	一旦 停止
従来のガソリン車	1	1	1
ハイブリッド車	0.47	0	0
燃料電池車	0.45	0	0

の整備が望まれる。

自動車・建設機械に関する燃料消費量あたりのCO₂排出原単位 EF については、日本建築学会¹³⁾が公表しているLCAデータベースVer.4.04を利用することで、燃料の採掘や製造に伴う分も含めて評価する。

推計した1台あたりのCO₂排出量に、各車種の交通量 Q を乗じて足し合わせることで、対象範囲全体のCO₂排出量を求めることができる。交通量 Q [台/日]は大型車混入率 β [%]を用いて、式(3)で求められる。

$$Q_{\text{小型車}} = Q \times \left(1 - \frac{\beta}{100}\right) \quad (3a)$$

$$Q_{\text{大型車}} = Q \times \frac{\beta}{100} \quad (3b)$$

以上から、自動車走行のCO₂排出量は燃料消費率と交通量により決定される。この2つの要素に影響を与える長期的な変化として、低環境負荷車普及と交通需要変化を取り上げ感度分析を行う。

(2) 低環境負荷車普及の考慮

前節で示した自動車走行に伴うCO₂排出量推計手法の中で、燃料消費率 FC や燃料消費あたりのCO₂排出原単位 EF は、現行のガソリン車やディーゼル車の性能特性に依存している。したがって、今後新たな技術に基づいた低環境負荷車が普及すると結果が大きく変わりうる。

今後普及が見込まれる低環境負荷車として、a)ハイブリッド車、b)燃料電池車の2種類を取り上げる。a)ハイブリッド車は、電気モーターや二次電池などからなるハイブリッドシステムを内燃機関に組み合わせた自動車であり、ブレーキ時のエネルギー回生が可能となるとともに、エンジン効率の低い走行条件ではモーターで走行し、高い条件では発電するなどしてエンジン効率を高められる。b)燃料電池車は、水素と酸素の化学反応によって電気を取り出す燃料電池を用い、電気モーターで走行する自動車であり、エネルギー効率が高く、走行時にCO₂を排出しない、また大気汚染の原因となる有害物質を発生しない、といった利点がある¹⁴⁾。

a), b)の普及により、渋滞によるCO₂排出量増大が抑制される可能性がある。これを表現するため、推計において各自動車のCO₂排出原単位を、従来のガソリン車を1として表2のように設定する。このうち走行に関しては燃料のWell-to-Wheelの推計結果¹⁵⁾を参考としている。

なお、このデータは小型車のものであるが、大型車についてはデータが得られなかったため、小型車と同じ率でCO₂排出原単位が改善するものとして推計を行う。

次に、普及する低環境負荷車の種類、普及開始時期、普及率のシナリオを設定する。本研究では、松本¹⁶⁾が消費者の選好や技術進展・社会要因からモデル化した普及予測(図-3)を用いる。これは、2020年ごろまでは従来のガソリン車に代わってハイブリッド車が普及、その後は燃料電池車の普及開始によりハイブリッド車を代替していき、30年後に燃料電池車が60%普及するシナリオになっている。これによると、30年間の台kmの累積車種構成率は図-4のようになる。なお、技術パラメータ(燃費や使用するエネルギー)は、現在存在する低環境負荷車のものを基に設定しており、これらの技術革新による将来にわたる変化は考慮していない。

(3) 交通需要変化の考慮

対象道路のみを評価範囲とする SyLCEL は、交通量が増加すると必ず増加する。しかし、その増加の内容には、他の交通機関からのモーダルシフトなど、これまで自動車を利用しなかった人が自動車を利用し始めるといった新規誘発交通(induced traffic)のみでなく、渋滞を避けて他の時間帯や経路を利用していた人が、当該道路を利用するようになるという転換交通(diverted traffic)も含まれている。周辺道路からの転換交通による増加であれば、対象道路の交通量は増えていても、対象ネットワーク範囲内ではトリップ数は一定であるため、周辺道路の混雑が解消し、走行条件が向上することで、全体では環境負荷削減の可能性もある。表-1 に倣うと、対象道路のみの範囲が SyLCEL、周辺道路を含めた範囲が NeLCEL である。上記の転換効果が無視できない場合、NeLCEL での評価が必要である。

そこで、事業前後の対象道路・周辺道路の交通量変化を図-5 に示すように考える。式で表すと以下の通りとなる。

$$\text{事業実施前の交通量} = Q_0 + Q'_0 \quad (4a)$$

$$\text{事業実施後の交通量} = Q + Q' \quad (4b)$$

$$= (Q_0 + D + I) + (Q'_0 - D)$$

$$= \underbrace{(Q_0 + \Delta Q)}_{\text{SyLCEL}} + \underbrace{(Q'_0 - \Delta Q \times d / 100)}_{\text{NeLCEL}}$$

ここで、 $d = 100 \times D / (D + I)$: 対象道路の需要増加量のうち周辺道路からの転換(D)が占める割合[%]、その他の記号は図-5 に示す通りである。

本研究では、対象道路の需要増加量(ΔQ)と、そのうち周辺道路からの転換が占める割合(d)を組み合わせる感度分析を行う。周辺道路に関しては、Q-V(交通量-速度)曲線を設定し、交通量変化による平均旅行速度変化

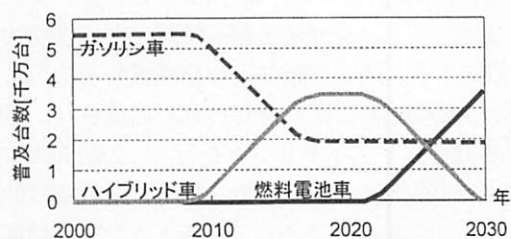


図-3 低環境負荷車の普及シナリオ

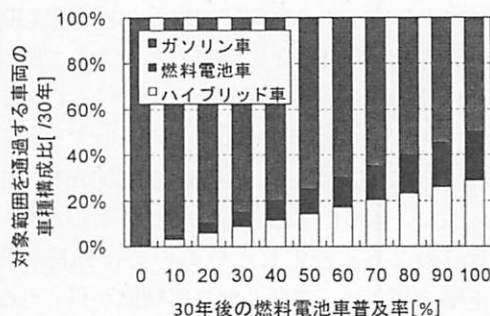


図-4 30年後の燃料電池車普及率ごとの対象範囲を通過する車両の車種構成比

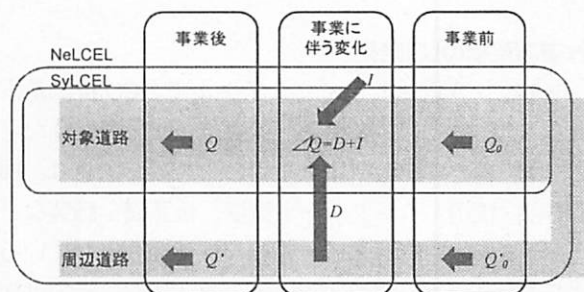


図-5 事業前後の交通量変化の考え方



図-6 鉄道高架化事業によって踏切除却事業を行う区間の想定

を反映させる。

4. 踏切除却事業への適用

(1) ケーススタディの概要

本研究では、道路改良事業の例として、鉄道連続立体交差化(高架化)による踏切除却事業を対象にLCAを適用する。対象とする事業の概要を図-6に示す。SyLCELとして、踏切除却によって走行状況が変化する道路区間における自動車走行と、鉄道高架橋(駅1箇所を含む)を考慮する。道路区間は、踏切による最大渋滞長より長い

踏切手前500mに設定する。踏切は、交通量が多い「開かずの踏切」Aと、交通量・遮断時間ともに平均的な踏切Bを設定する。踏切遮断による交通現象を次のように考える。1)踏切遮断により待ち行列が形成され、遮断の間自動車は停止しアイドリングを行う。2)踏切開放に伴い、待ち行列先頭の自動車動き出し、後続車は低速度で走行しながら踏切に進む。3)遮断されない自動車についても、踏切進入前に一時停止を行う。この1)～3)は、アイドリング、走行速度、一旦停止として考慮される。踏切遮断により停止する車(停止車)は、走行速度30[km/h]で走行し、待ち行列最後尾に到着したところで踏切遮断の間停止、踏切開放後に発進してからは走行速度20[km/h]で走行し、踏切進入前に一旦停止するものとする。通過する車(通過車)は、走行速度は30[km/h]で走行し、踏切進入前に一旦停止するものとする。そのため、車両挙動は図-7のように設定し、その中で行列長・停止時間・停止車の割合は、参考となる実測値が得られなかったため、Websterの遅れの式を応用して各パラメータを算出している。結果として設定された踏切遮断時間と自動車走行状況を表-3に示す。

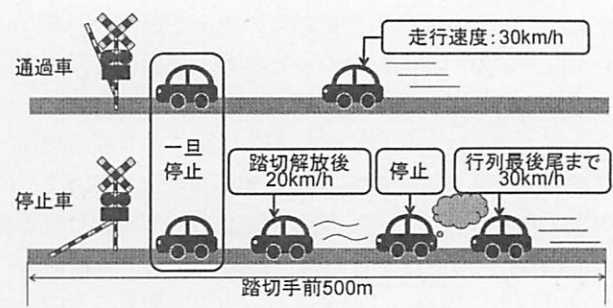


図-7 踏切付近の車両挙動の想定

表-3 踏切遮断状況・自動車走行状況の設定

	踏切 A		踏切 B	
	ピーク時	通常時	ピーク時	通常時
1時間あたり平均遮断時間[分]	42	24	24	12
1回あたり平均遮断時間[分]	3	2	2	1
1踏切あたり昼間交通量[台/12h]	7,000		5,000	
大型車混入率[%]	16		16	
平均行列長[m]	290	140	50	24
平均停止時間[分]	4.7	1.0	1.0	0.5
停止車の割合[%]	100	70	50	30

ピーク時：7～9時、通常時：9～19時

(2) 鉄道高架橋のLCI結果

鉄道インフラ自体のライフサイクルでのCO₂排出量について、本研究では、狩野ら¹⁷⁾が鉄道の駅・高架橋などに関して整備している原単位を用いる。インフラは、橋脚、橋台、橋桁、コンクリート擁壁、杭基礎、舗装などを含めた高架橋の資材調達・建設を評価範囲としている。資材調達段階では資材製造時排出分を、建設段階では施工の際に使用した機械の燃料消費による分を、運搬段階としては資材運搬を評価対象としている。資材調達・建設に要するエネルギー消費の推計においては、各資材の詳細な投入量、施工に使用した機材とその運転に使用したエネルギーなどを詳細にわたって数え上げている。維持補修に関しては、桁などに主立った交換実績がないため対象外としている。また、廃棄段階に関しては特にデータが得にくい、CO₂の場合廃棄段階は資材調達や建設に比べて排出が小さいという結果が稲村ら¹⁸⁾などによって示されていることから、推計していない。

高架橋のLCI結果を図-8に示す。資材調達段階が大きな割合を占めている。また、対象区間内には駅が1箇所あるが、駅部のCO₂排出量が大きくなっていることもわかる。

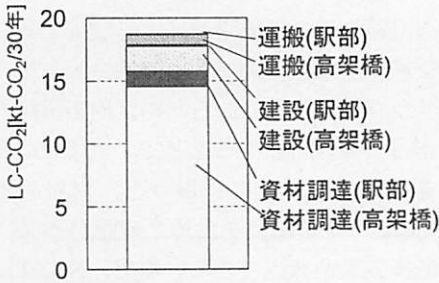


図-8 高架橋(2.1km 区間)の LCI 結果

(3) 低環境負荷車普及によるLC-CO₂の変化

3章の図-3のシナリオの通りに低環境負荷車の普及が進む場合と、現状通りの車種構成の場合について、事業実施前後のLC-CO₂を推計した結果を示す(図-9)。踏切7箇

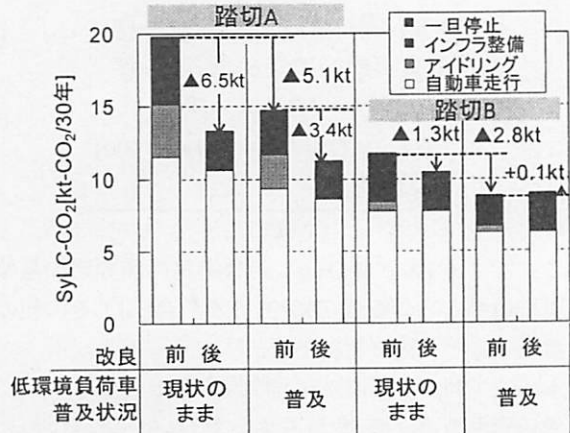


図-9 低環境負荷車普及の有無による SyLC-CO₂ の比較

所の除却を対象範囲として道路7本について推計した結果を、道路1本あたりで表示している。

自動車走行によるCO₂排出量がSyLC-CO₂ (SyLCELで評価したCO₂排出量)のうち大きな割合を占めているため、低環境負荷車の普及が推計結果に大きな影響を与えている。踏切A(交通量・遮断時間大)は、低環境負荷車普及を考慮せずに推計を行うと、事業によってSyLC-CO₂が6.5[kt-CO₂/30年]削減できるという結果が得られるが、低環境負荷車普及によって自動車走行起源CO₂の削減効果が圧縮されるため、それを考慮した推計結果では、事業によるSyLC-CO₂削減効果は5.1[kt-CO₂/30年]となった。低環境負荷車普及を考慮しない推計では、削減効果を過大評価していたことになる。さらに踏切B(平均的な踏切)では、低環境負荷車普及を考慮せずに推計を行うと、事業によってSyLC-CO₂が1.3[kt-CO₂/30年]削減できる結果となるが、考慮した推計結果では、逆にSyLC-CO₂が0.1[kt-CO₂/30年]増加している。

以上のように、自動車の低環境負荷化が進むと、事業実施によってかえってSyLC-CO₂が増大してしまう可能性があることが示される。

(4) 交通需要変化による感度分析

踏切Aを対象として、交通需要変化によりLC-CO₂がどのように変化するかを感度分析により検討する。その際、増加した需要が新規誘発であるか、周辺道路からの転換であるかについても考慮する(NeLCEL)。新規誘発である場合、その自動車の平均トリップ長は10km¹⁹⁾であると仮定し、推計に含める。周辺道路からの転換である場合、対象道路に並行する同一距離の1本の周辺道路から交通量の転換が起きているものと仮定して分析を行う。なお、転換が生じる場合、前の経路の方が距離が長いことが考えられるため、同一距離という仮定はNeLC-CO₂(NeLCELで評価したCO₂排出量削減を過小評価している可能性がある。これを防ぐためには、ネットワーク全体での交通量変化を推計する必要がある。

周辺道路では交通量減少により混雑緩和が生じ、原単位が減少することによってCO₂排出量が削減される。この変化を推計するためには、当該道路のQ-V曲線を得るべきであるが、本研究は仮定の事業であるため、実測値は存在しない。そこで、今西ら²⁰⁾の方法を参考に、道路交通センサスなどのデータを用いて、[交通量0、規制速度]と[混雑時交通量、混雑時旅行速度]の2点を通る簡易なQ-V式を設定する。規制速度を60[km/h]、混雑時旅行速度を平成17年道路交通センサス¹⁹⁾の一般都道府県道の全国平均値から19.5[km/h]、同様に混雑度を1.12とし、これらの条件での基本交通容量から、図-10に示すように周辺道路のQ-V式を設定する。その上で、周辺道路が混雑している状況を想定し、交通量・走行速度を

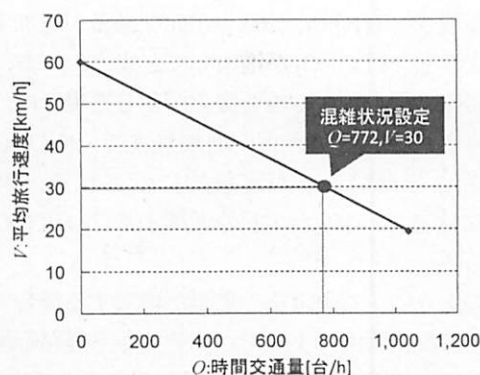


図-10 周辺道路のQ-V曲線の設定

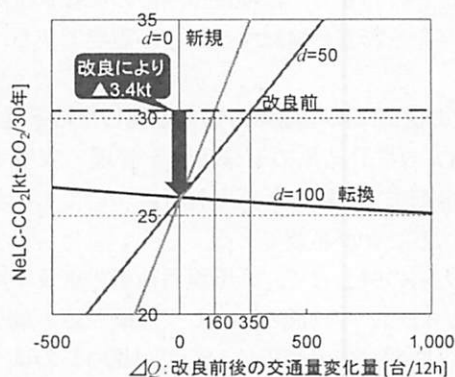


図-11 踏切Aの需要変化に伴うNeLC-CO₂の感度分析

設定する。

分析結果を図-11に示す。これは、対象道路の交通量変化量(式(4)の ΔQ)が設定と異なる場合のNeLC-CO₂の変化について、交通量変化のうち周辺道路からの転換による増加が占める割合(式(4)の d)ごとに示したものである。

まず、転換や新規誘発による需要変化の結果への感度とどのような影響があるかを分析する。新規誘発交通の発生のみによって交通量が増加する場合($d=0$ [%])、NeLC-CO₂も直線的に増え続ける。一方、対象範囲内の交通量は変化せず、周辺道路からの転換によってのみ踏切除却した対象道路の交通量が増加する場合($d=100$ [%])、周辺道路の混雑が解消されるためにNeLC-CO₂は減少する。その傾きは、速度が低い状態ほど少しの速度向上で燃費が削減されやすいという大城ら¹⁰⁾の推計結果に依存し、交通量増加量が大きくなるにつれて低減している。以上のように、転換による周辺道路の混雑解消が、交通量変化に伴うNeLC-CO₂の変化に大きく影響を与えることが定量的に示される。

次に、どの程度の交通量変化があると、NeLC-CO₂が増加してしまうかが、図-11の結果を用いて分析(switch-point analysis: 決定をくつがえすに足るほどの特定の入力変数の値の変化の分析²¹⁾)できる。対象道路の交通量増加が周辺道路からの転換のみによる場合($d=100$ [%])は、NeLC-CO₂は増加量にかかわらず減少する。新規誘発の

みによる場合($d=0$ [%])は、160[台/12h]交通量が增加すると、改良前よりも NeLC-CO₂が増大してしまう。一方、転換と新規誘発の両方による需要変化が生じる場合は、新規誘発のみの場合よりも大きい増加量まで、NeLC-CO₂の増大が起こらないことが定量的に示される。例えば $d=50$ [%]のときは、350[台/12h]の増加までは NeLC-CO₂は減少する。

以上のように、対象道路の需要が増加する場合でも、周辺道路の混雑状況によっては、そこから経路転換に伴うネットワーク全体での混雑改善が起きるため、NeLC-CO₂削減の可能性はある。したがって、新規誘発需要の発生状況と合わせて、転換量や周辺の混雑状況が CO₂排出量に与える影響を検討することが重要である。

(5) 設定の違いによる結果の幅を表現した結果提示

LC-CO₂の推計結果の不確実性を管理・表現するためには、前節までで行った感度分析についてもわかりやすく提示することが必要である。

その方法の例として、低環境負荷車の普及率による結果の違いについて、図-12 のように最大値・最小値を明記する方法や、感度分析においては図-13 のように値の幅を帯のように表示して見せる方法を提案する。これにより、不確実性を含んだ値について、その変化が推計結果に及ぼす影響を簡便に検討することができる。図-12 からは、30 年後の燃料電池車普及率によって、改良前後の変化の大きさが異なることが読み取れる。また、図-13 からは、低環境負荷車普及率が異なる場合の switch-point が読み取れる。ここでは、幅のあるグラフの上端部が普及率 0[%]の場合、下端部が 100[%]の場合を示している。例えば 0[%]の場合を検討する場合には、上端どうしの交点が switch-point となる。

5. まとめ

本研究では、道路事業(道路の整備・改良)の計画段階において LCA を用いて環境負荷を評価する手法を、以下の点を考慮して構築した。

- 1) 評価範囲を段階別に整理し、その設定次第で解釈が変わりうることを定性的に示した。
- 2) 長期のライフタイムを扱うことによって内包される、将来の低環境負荷車普及と交通需要変化に関する不確実性を、感度分析による switch-point や値の幅によって表現することにより、前提条件設定の妥当性や、結果が逆転する可能性を定量的に検討することを可能とした。

評価においては、その前提となる条件を明示して分析することで、それに合った解釈を可能とした。これは評

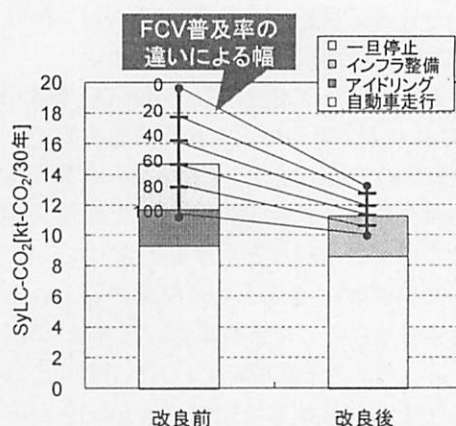


図-12 低環境負荷車の普及率の違いを幅として表示した SyLC-CO₂推計結果

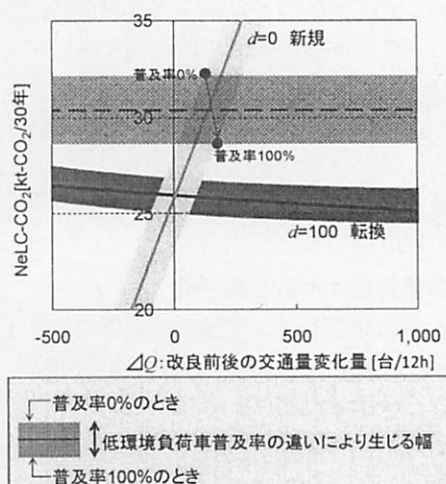


図-13 低環境負荷車の普及率の違いを幅として表示した 感度分析結果

価対象範囲の明確化とそれに合わせた解釈の必要性を述べた ISO14040 における LCA の考え方とも整合している。

構築した手法を、道路改良事業の1つである鉄道連続立体交差化(高架化)事業による踏切除却に適用して、LC-CO₂を推計することで、従来の道路 LCA では評価できなかった以下のメカニズムを定量的に表現することが可能となることを確認した。

- 1) 現行の車種構成が将来にわたり続く場合には、踏切除却に伴うインフラ建設により増大する CO₂が、自動車の走行速度改善による CO₂削減によって相殺され、SyLC-CO₂が削減される。
- 2) しかし、低環境負荷車が大幅に普及する場合、走行起源 CO₂削減効果が圧縮されるため、インフラ整備により排出された CO₂が卓越し、SyLC-CO₂が増大する可能性が生じる。
- 3) 周辺道路からの転換によって対象道路の交通量が増加する場合は、周辺道路の混雑が解消されるために NeLC-CO₂は減少する可能性がある。一方、新

規誘発交通の発生に伴って対象道路の交通量が増加する場合、NeLC-CO₂は逆に増えてしまう。

謝辞：本研究は科学研究費・萌芽研究(19651016)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 井村秀文編著：建設のLCA，株式会社オーム社，pp.2-3，2001.
- 2) Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC Fourth Assessment Report -Working Group III Report "Mitigation of Climate Change", pp.325-380, 2007.
- 3) 加藤博和，林良嗣，登秀樹：道路構造代替案の地球環境負荷に関するライフサイクル的評価手法，環境システム研究 Vol.24, pp.282-293, 1996.
- 4) 森本涼子，柴原尚希，加藤博和：道路交通流への効果を考慮した道路改良事業のLCA手法：踏切除却事業を対象として，日本LCA学会誌，Vol.5, No.1, pp.33-39, 2009.
- 5) 堺孝司，小嶋克宏，草薙悟志，入谷祥王：交通渋滞交差点における鉄筋コンクリート地下道建設による環境便益評価に関する研究，土木学会論文集G, Vol.63, No.1, pp.40-50, 2007.
- 6) 金子翔一，福田敦，石坂哲宏：アジアにおける公共交通機関導入時のCO₂排出削減効果の検討，土木計画学研究・講演集，Vol.38, CD-ROM, 2008.
- 7) 斎藤文典，青山吉隆，中川大，柄谷友香：ライフサイクルを考慮した交通パッケージ施策によるCO₂排出量削減効果に関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.38, CD-ROM, 2006.
- 8) 加藤博和：建設構造物のLCI分析，稲葉敦監修，LCAの実務，産業環境管理協会，pp.38-40, 2005.
- 9) 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.
- 10) 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，Vol.43, No.11, pp.50-55, 2001.
- 11) 環境省：アイドリング・ストップ(http://www.env.go.jp/earth/cop3/dekin/ta_03-2.html).
- 12) 安井一彦：踏切での車両挙動と制御方法に関する研究，交通工学，Vol.42, No.5, pp.29-32, 2007.
- 13) 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.4.04, 2006.
- 14) 電子産業・成長戦略フォーラム：自動車の環境対策とエレクトロニクス化，p.37, 2008.
- 15) トヨタ自動車株式会社，みずほ情報総研株式会社：輸送用燃料のWell-to-Wheel評価，p.3, 2004.
- 16) 松本光崇：産総研TODAY, 6(12), pp.16-17, 2006.
- 17) 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.
- 18) 稲村肇，M.Piantanakulchai，武山泰：高速道路と新幹線のライフサイクル炭素排出量の比較研究，運輸政策研究，Vol.15, pp.11-22, 2002.
- 19) 国土交通省道路局：平成17年道路交通センサス，2005.
- 20) 今西芳一，石田東生，寛文彦：道路整備後の交通量・CO₂排出量の短期的変化に関する実証的研究，交通工学，Vol.43 No.3, pp.53-63, 2008.
- 21) 東海明宏：不確実性を評価する，中西準子・蒲生昌志・岸本充生・宮本健一編集，環境リスクマネジメントハンドブック，朝倉書店，p.354, 2003.

(2009.3.16受付)

(2009.7.11受理)

Life Cycle Assessment of Road Projects Considering Innovations in Vehicle Technology and Changes in Traffic Demand

Ryoko MORIMOTO¹, Naoki SHIBAHARA¹ and Hirokazu KATO¹

¹ Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

A life cycle assessment (LCA) framework is applied to evaluate environmental load from road transport systems, including infrastructure and vehicle travel. The results indicate that reductions in the environmental load from improvements in vehicle fuel consumption are greater than the increases due to infrastructure construction and induced traffic, resulting in an overall reduction in the environmental load. Unlike existing LCAs, this framework provides three important results: 1) Evaluation of the uncertainty of diffusion of low-CO₂ vehicles and changes in traffic demand, 2) evaluation boundaries that are defined for each scope and definitions of boundaries change the interpretation and uncertainty of the results, and 3) sensitivity analyses test and provide a description of the uncertainty. This framework is applied to the removal of a railway crossing by constructing an elevated track and analyzes the resulting change in CO₂ emissions.

土木学会地球環境委員会地球環境研究論文集

編集：JGEE編集小委員会

役職	氏名	勤務先名称
小委員長	米田 稔	京都大学 大学院工学研究科都市環境工学専攻
委員	荒巻 俊也	東洋大学 国際地域学部 国際地域学科
委員	池野 正明	(財)電力中央研究所 環境科学研究所 物理環境領域
委員	市川 陽一	龍谷大学 理工学部環境ソリューション工学科
委員	北田 敏廣	豊橋技術科学大学 工学部 エコロジー工学系
委員	倉田 学児	京都大学 大学院 工学研究科 都市環境工学専攻
委員	島田 幸司	立命館大学 経済学部
委員	鈴木 武	国土交通省国土技術政策総合研究所 沿岸海洋部 沿岸域システム研究室
委員	都筑 良明	内閣府日本学術会議事務局
委員	那須 清吾	高知工科大学 社会システム工学科
委員	奈良 松範	諏訪東京理科大学 システム工学部機械システムデザイン工学科
委員	藤原 健史	岡山大学 廃棄物マネジメント研究センター
委員	松下 潤	芝浦工業大学 システム工学部 環境システム学科
委員	松村 寛一郎	関西学院大学 総合政策学部メディア情報学科
委員	松本 亨	北九州市立大学 国際環境工学部環境生命工学科
委員	三村 信男	茨城大学 広域水圏環境科学教育研究センター
委員	村尾 直人	北海道大学 大学院 工学研究科 環境フィールド工学専攻
委員	室町 泰徳	東京工業大学 大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻
委員	山下 隆男	広島大学 大学院国際協力研究科開発科学専攻
委員	横木 裕宗	茨城大学 広域水圏環境科学教育研究センター

ご注意 当該出版物の内容を複写したり他の出版物へ転載するような場合は、必ず土木学会の許可を得てください。

地球環境研究論文集 Vol.17

平成21年9月11日 発行

編集者 〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目（外濠公園内）土木学会地球環境委員会

委員長 太田 幸雄

発行者 〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目（外濠公園内）社団法人土木学会

発行所 社団法人 土 木 学 会

専務理事 古木 守靖

〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目（外濠公園内）

電話 03-3355-3441（代表） FAX. 03-5379-0125