研究資料(Technical Report)

自動車のライフサイクル温室効果ガスのメタ分析

八坂 慶仁^{1,*}・正畠 宏一¹・伊坪 徳宏²

Meta Analysis of Life Cycle Greenhouse Gas of Automobiles

Yoshihito YASAKA^{1,*}, Koichi SHOBATAKE¹ and Norihiro ITSUBO²

Synopsis: Meta-analysis is a method that integrates multiple existing studies through statistical processing and is typically used in academic fields such as medical care, psychology, and education surveys. Some studies exist in which they apply meta-analysis to Life Cycle Assessment (LCA) results of automobiles, but the vehicle types and target life cycle stages are limited. In this study, we applied the meta-analysis method to the life cycle of automobiles classified by vehicle type and energy sources to estimate greenhouse gas (GHG) emissions. A literature review of 27 peer-reviewed articles was conducted to extract the LCA data that were used in this study. The life cycle stages were classified into four stages: Battery, Other production, Use, and Disposal. The results showed that GHG emissions during the use stage represented approximately 80% of the entire life cycle for gasoline, diesel, and hybrid vehicles. For plugin hybrid vehicles and electric vehicles charged with electricity from electricity mix or fossil fuel generation methods the use stage accounted for approximately 50-70% of the entire life cycle. Moreover, the results showed that GHG emissions could be reduced by approximately 75-80% if gasoline and diesel vehicles are replaced by electric vehicles that are powered by electricity generated from renewable energy. However, when electric vehicles are powered by electricity generated from fossil fuels, the GHG emissions can be equivalent to gasoline and diesel vehicles. The results also showed that the amount of GHG emissions depend significantly on the travel scenarios and the source of electricity generation. Therefore, the selection of these factors are of major importance when conducting an LCA study of automobiles.

Keywords: Automobile; electric car; greenhouse gas; life cycle assessment(LCA); meta analysis

1. 緒言

複数の研究結果を統計処理する等、統合して分析結果を得る手法にメタ分析がある。Lifset (2012) によると主に医療分野や心理学、教育調査で用いられており、単一の研究では明らかにならなかった事柄が、複数の研究結果を集めることで新たな事実が判明する、全体の傾向が明らかとなることにより新たな観点を生み出す(石川)といった特徴が挙げられる。

メタ分析を行うには複数の研究結果を収集する必要があるため、過去の研究成果が豊富にあることが条件となるが、LCA研究においては、過去の評価実績が少ないことを理由に、これまでメタ分析が行われるケースが少な

かった。しかしながら、近年、国内外におけるLCAの研究論文が多く公開されるようになり、LCA研究においても様々な分野でメタ分析の実施例が見られるようになった。LCAに関する研究結果についてメタ分析を実施することで、既存の各研究結果がどの程度の分散を持つのか及びその主要な原因の推定、新技術の投入によるトレードオフの発見、ホットスポットの特定といった成果が期待されている。

Lifset (2012)によれば、Farrellら(2006)が行った「Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals」がLCA研究において行われた最初のメタ分析である。その他にも、エネルギー分野ではPriceら(2012)、Padeyら

1 TCO2 株式会社 / 〒102-0082 東京都千代田区一番町 23-2 番町ロイヤルコート 602

2 東京都立大学 / 〒224-8551 神奈川県横浜市都筑区牛久保西 3-3-1

1 TCO2 Co., Ltd. / 602 Bancho Royal Court, 23-2 Ichibancho, Chiyoda-ku, Tokyo 102-0082

2 Tokyo City University / 3-3-1 Ushikubo-nishi, Tsuzuki-ku, Yokohama, Kanagawa 224-8551

* 連絡先 (Corresponding author), yasaka@tco2.com

(2012)、Whitakerら (2012)、Warnerら (2012) が、バイオ素材の建材ではWeissら (2012)、デスクトップコンピュータではTeehanら (2012) の研究例が挙げられる。

自動車を対象製品としたLCA研究のメタ分析に着目すると、Hawkinsら (2012)、Nordelöfら (2014) の研究が挙げられる。Hawkinsら (2012) は、自動車の製造段階までに発生するGHG(温室効果ガス) 排出量を、すべての車種において共通と仮定した上で、使用段階のGHG排出量と合算し、ガソリン車、ディーゼル車、ハイブリッド車、電気自動車といった車種別に分類したGHG排出量のメタ分析を行った。Nordelöfら (2014) は、電気自動車とプラグインハイブリッド車の使用段階までのGHG排出量を収集し、バッテリーの充電に使用される外部電力の電源種類で分類し、GHG排出量のメタ分析を行った。

以上のように自動車を対象としたLCA研究のメタ分析は既に存在しているが、いずれも自動車の使用段階までを研究対象とし、廃棄・リサイクル段階を含むフルライフサイクルを対象とはしておらず、車種についても、燃料電池自動車が対象となっていないなど、包括性といった点で、不十分である。自動車のライフサイクルGHG排出量は、使用段階の寄与が大きいことが知られているが、環境負荷削減として期待される電気自動車やプラグインハイブリッド車といったクリーンエネルギー自動車は、従来のガソリン車やディーゼル車と比較して、大量のバッテリーを搭載することから、原材料調達段階、製造段階、廃棄・リサイクル段階の寄与が高まると推察され、今後は、フルライフサイクルで評価することが、望まれる。

本研究では、

- ① これまでに行われてこなかった、自動車のライフサイクルGHG排出量を対象としたメタ分析を行い、クリーンエネルギー自動車（電気自動車、プラグインハイブリッド車、燃料電池自動車等）を含む、車種別のライフサイクルGHG排出量を明らかにする。
- ② クリーンエネルギー自動車の内、外部電源を使用するプラグインハイブリッド車、および、電気自動車については、外部電源の電源種類を化石燃料由来、電力ミックス、非化石エネルギーに分けて電源種類の違いがライフサイクルGHG排出量に与える影響を考察する。
- ③ ガソリン車やディーゼル車をクリーンエネルギー自動車へ置き換えることにより期待されるGHG排出量の削減効果について、地球温暖化の緩和策としての定量的分析の実施可能性と課題について検討をおこなう。

2. 調査方法

2.1 調査方法

- ① 収集した論文から、自動車のライフサイクルのすべて、

または一部の段階に係るGHG排出量を収集する。なお、各ライフサイクル段階の内、一部の段階についてGHG排出量が得られなかった場合は、他の論文から収集した同一車種、かつ、同一段階のGHG排出量の平均値をあてはめることで、ライフサイクルGHG排出量とした。

- ② ライフサイクルGHG排出量について車種別にメタ分析を行い、車種別の中央値を求めた。
- ③ 本研究では自動車の内、乗用車を対象とし、貨物車、バスは含まない。また、対象とする乗用車の車種は、ガソリン車、ディーゼル車、ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、電気自動車、燃料電池自動車、その他、の7車種とした。なお、圧縮天然ガス自動車(CNG車)、液化天然ガス自動車(LNG車)、液化石油ガス自動車(LPG車)は取り扱われているGHG排出量が少量のためその他に含めた。
- ④ 機能単位は、乗用車の1kmの走行とした。

2.2 論文検索と整理

論文の収集にはGoogle ScholarとGoogle検索を使用し、関連すると考えられるキーワードを組み合わせて、完全一致で検索を行った。検索キーワードと収集した論文本数を表1に示す。なお表中の“0”は検索を行ったが、関連する論文が見つからなかったことを、“-”は検索を行っていないことを表している。

表やグラフの形式でGHG排出量が記載されている論文を収集対象とし、論文の基本情報として出版時期、著者名、掲載ジャーナル名、巻(号)、頁、abstractを整理した。また、GHG排出量に加え、前提条件として設定されている走行距離、使用年数、排気量、車両重量、使用国、バッテリーを使用するハイブリッド車やプラグインハイブリッド車、電気自動車の場合はそのバッテリーの種類、プラグインハイブリッド車、電気自動車の場合は使用段階の電源種類についても収集した。

収集した論文は132本となった。内訳は、キーワード検索により収集した論文が120本、これらの論文の引用文献から孫引きした論文、紙媒体で入手した論文が12本であった。これら132本の論文から、本研究では27本をメタ分析の評価対象として選択した。評価対象の選択基準は、GHG排出量の記載があること、複数の車種を評価していること、2005年から2015年の間に出版された論文であることの3点とした。研究対象にクリーンエネルギー自動車といった近年になって開発、普及が進む車種を対象に含むことから、論文の出版時期を2005年から2015年までの直近11年間とした。図1に車種別および出版時期別の論文本数を示す。

表1 検索キーワードと論文収集本数

検索キーワード	論文収集本数	
	Google scholar	Google 検索
"automobile" "LCA" "Review"	3	2
"automobile" "LCA" "Review" -"case studies"	0	1
"car" "LCA" "Review"	0	0
"automobile" "life cycle" "review"	0	-
"automobile" "comparison" "life cycle" "review"	0	-
"motor vehicle" "LCA" "review"	6	0
"vehicle" "GHG emission" "review"	1	-
"electric vehicle" "LCA" "review"	12	-
"EV" "PHEV" "LCA" "review"	7	2
"EV" "PHEV" "life cycle" "review"	0	-
"plug-in hybrid" "LCA" "review"	3	-
"Internal Combustion Engine" "EV" "LCA" "review"	3	-
"fuel engine" "EV" "LCA" "review"	0	-
"automobile" "LCA" "Review" "multi criteria"	5	-
"car" "LCA" "Review" "multi criteria"	0	-
"car" "acidification" "LCA" "Review"	5	-
"car" "energy consumption" "LCA"	2	-
"car" "acidification" "LCA"	2	-
"FCV" "GHG" "LCA"	15	-
"FCV" "energy consumption" "LCA"	5	-
"Fuel Cell Vehicle" "energy consumption" "LCA"	11	-
"Fuel Cell Vehicle" "GHG" "LCA"	3	-
"Fuel Cell Vehicle" "Particulate matter formation" "LCA"	1	-
"FCV" "Particulate matter" "LCA"	0	-
"FCV" "Life cycle"	7	-
"Fuel Cell Vehicle" "Life cycle" "GHG"	7	-
"ICEV" "acidification" "LCA"	11	-
"automobile" "air pollution" "LCA"	6	-

図1 Google scholar、Google検索を用いて収集した車種別及び出版時期別論文本数

2.3 標本抽出

国内外の自動車のLCA論文から乗用車の車種別のライフサイクルGHG排出量、またはライフサイクル段階の一部のGHG排出量を標本として抽出した。車種、電源種類別の論文本数と標本数を表2に示す。論文本数は論文中に本研究で分類した車種別の標本を1つでも含んでいる場合に1として数える。例を挙げると、ディーゼル車のGHG排出量が記載されていた論文は10本で、10本の論文から抽出できた標本は42個であった。プラグインハイブリッド車、電気自動車については前提とされる電源種類別に更に「化石燃料由来」、「電力ミックス」、「非化石エネルギー」の3種類に細分類した。「化石燃料由来」は、火力発電所等の化石燃料を用いて発電された電力を用いた場合、「電力ミックス」は自動車の使用国で用いられている公共電力を用いた場合、「非化石エネルギー」は、風力発電所や水力発電所等で発電された電力を用いた場合である。なお、発電種類を分けた理由は、LCAの視点では発電形態の違いが重要になると推測したためである。

論文内の表やグラフに記載されているGHG排出量を数値化して標本を抽出した。GHG排出量が表の形で記載されている場合は表形式で抽出し、グラフとして与えられている場合かつグラフ内に数値が記載されていない場合にはパソコン画面上でグラフの長さを定規で測り、軸の値を比較して数値化を行った。

2.4 標本の分類方法

本研究では、ライフサイクル段階として、バッテリー段階、その他製造段階、使用段階、廃棄段階の4つの段階を設定し、抽出した標本を分類した。論文の記述では、これらの段階とは異なる段階に分類されている場合もあるため、異なる段階については、本研究で設定した4つ段階のいずれかへ分類した。Li-ion battery (Nordelöfら (2014))、

Battery production (Fariaら (2013)) のようにバッテリー関係を扱ったものは、バッテリー段階へ振り分け、Vehicle production (Bickertら (2015))、Power electronics (Nordelöfら (2014)) のように、自動車の製造や電装関係を扱ったものは、その他製造段階に振り分けた。使用段階へはFuel supply (Bauerら (2015))、Electricity production (Bickertら (2015)) のように燃料の供給や電気自動車用の発電などを扱ったものを、廃棄段階へは、Vehicle disposal (Chłopekら (2015))、Battery disposal (Fariaら (2013)) のように使用後の廃棄を対象としたものを振り分けた。

2.5 データクリーニング

標本の単位は、収集した多くの論文で用いられていた、 $\text{kgCO}_2\text{-eq/km}$ とした。 $\text{kgCO}_2\text{-eq/year}$ や、自動車の寿命期間中のGHG排出量等、 $\text{kgCO}_2\text{-eq/km}$ とは異なる単位が用いられている場合は、論文内に記載されている、年間走行距離や生涯走行距離で除し、 $\text{kgCO}_2\text{-eq/km}$ に単位補正を行った。走行距離の記載がない、等の理由で、 $\text{kgCO}_2\text{-eq/km}$ に補正できない場合や、極端に大きい、小さいと判断できる外れ値については、対象外として扱った。

3. 結果

出版時期と評価対象の車種に注目すると、2010年以前は、ガソリン車とハイブリッド車またはプラグインハイブリッド車との比較を扱った論文が多い。2010年には、初めて電気自動車のLCA研究が見られ、2011年から2015年までは、電気自動車やプラグインハイブリッド車を対象とした研究が多い傾向が見られた。電気自動車のLCA研究が特に2011年から2012年に急増した背景として、2011年にトヨタ自動車やゼネラルモーターズ、フォード等の大手自動車メーカーが電気自動車を発売開始したことが一因

表2 車種、電源種類及び論文本数標本数一覧

車種	電源種類	論文本数	標本数
ガソリン車	-	27	133
ディーゼル車	-	10	42
ハイブリッド車	-	16	66
プラグインハイブリッド車	化石燃料由来	3	19
	電力ミックス	11	82
	非化石エネルギー	2	8
電気自動車	化石燃料由来	7	18
	電力ミックス	17	112
	非化石エネルギー	5	13
燃料電池自動車	-	5	37
その他	-	4	17

として考えられる。評価対象のライフサイクルについては、2010年以前は、使用段階の評価が殆どであった。2011年以降は、ライフサイクル全体での評価が増加したものの、全体を通して見た場合には、使用段階を含んだ、もしくは使用段階のみに着目した論文が多数を占めることがわかった。

車種別のライフサイクルGHG排出量の集計結果を図2に示す。本研究では箱ヒゲ図の上側を95パーセンタイル、下側を5パーセンタイルの範囲とした。

ガソリン車、ディーゼル車、ハイブリッド車といった既に普及している3車種については最大、最小値間に差がみられるものの、5パーセンタイルと95パーセンタイルの間の差は同程度となった。中央値は、3車種の間ではガソリン車のライフサイクルGHG排出量が最も高く0.23

kgCO₂-eq/km、ディーゼル車がこれに次いで、0.19 kgCO₂-eq/km、ハイブリッド車が0.18 kgCO₂-eq/kmという結果になり、ハイブリッド車はガソリン車に比べて約20%程度の削減が見込まれた。一方、プラグインハイブリッド車と電気自動車は電源種類により結果が大きく異なることがわかった。これらの車種の場合、使用段階で化石燃料由来の電力を利用した場合、プラグインハイブリッド車で0.23 kgCO₂-eq/km、電気自動車で0.20 kgCO₂-eq/kmとライフサイクルGHG排出量はガソリン車に匹敵した。使用段階で電力ミックスを利用した場合、プラグインハイブリッド車で0.18 kgCO₂-eq/km、電気自動車で0.14 kgCO₂-eq/kmとライフサイクルGHG排出量が少なくなり、ガソリン車との比較では、プラグインハイブリッド車で約20%、電気自動車で約40%削減されることが明らかとなった。

図2 ガソリン車、ディーゼル車、ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車、電気自動車、燃料電池自動車、その他のライフサイクルGHG排出量 箱ヒゲ図

非化石エネルギー由来の電力を使用した場合は、ライフサイクルGHG排出量は電力ミックスより少なくなり、プラグインハイブリッド車で0.12 kgCO₂-eq/km、電気自動車では0.05 kgCO₂-eq/kmと、ガソリン車との比較では、プラグインハイブリッド車で約50%、電気自動車では約80%削減されることが明らかとなった。プラグインハイブリッド車や電気自動車については、電源種類によって、ライフサイクルGHG排出量が大きく変わるため、LCAの実施においては、主なエネルギー源の種類を特定することが極めて重要であることがわかった。

燃料電池自動車、および、電源に化石燃料由来と電力ミックスを使用した場合の電気自動車、電源に化石燃料由来を使用した場合のプラグインハイブリッド車については、ライフサイクルGHG排出量の最大値と最小値に大きな幅が現れた。

燃料電池自動車について、ライフサイクルGHG排出量が最大となったのは、水素の製造に石炭ガス化を使用した場合で、ライフサイクルGHG排出量は0.35 kgCO₂-eq/kmで、使用段階のGHG排出量は0.33 kgCO₂-eq/km (Bauerら (2015)) であった。ライフサイクルGHG排出量が最小となったのは、原子力発電からの電気をを用いて水素を製造した場合で、ライフサイクルGHG排出量は0.07 kgCO₂-eq/kmで、使用段階のGHG排出量は0.02 kgCO₂-eq/km (Bauerら (2015)) となり、使用段階を比較すると17倍近い幅となった。水素の製造時の環境負荷がライフサイクル全体の結果に大きな影響を与えていることがわかる。

電気自動車の電源が化石燃料由来の場合、発電に用いる化石燃料が結果に大きく影響を与えることがわかった。ライフサイクルGHG排出量が最大となったのは、発電に石炭を用いた場合であり、ライフサイクルGHG排出量は0.36 kgCO₂-eq/kmで、使用段階のGHG排出量は0.31 kgCO₂-eq/km (Bauerら (2015)) であった。一方、ライフサイクルGHG排出量が最小となったのは、発電に天然ガスを用いた場合であり、ライフサイクルGHG排出量は0.12 kgCO₂-eq/kmで、使用段階のGHG排出量は0.07 kgCO₂-eq/km (Hawkinsら (2012)) であった。

電気自動車の電源が電力ミックスの場合、使用段階におけるユーザーの運転方法の設定による違いが結果に大きな影響を与えた。ライフサイクルGHG排出量が最大となったのは、走行時のエアコンを暖房状態で使用し、かつ急ブレーキ急発進等を多く行ったシナリオでライフサイクルGHG排出量が0.31 kgCO₂-eq/km (Fariaら (2013)) で、段階別には明記されておらず、使用段階のGHG排出量は不明である。一方、ライフサイクルGHG排出量が最小となったのは、急発進、急ブレーキを避けた運転で、エアコンを21℃に設定し冷房と暖房のどちらも行うシナリオで、

ライフサイクルのGHG排出量は0.05 kgCO₂-eq/kmで、使用段階のGHG排出量は、0.02 kgCO₂-eq/km (Fariaら (2013)) であった。

プラグインハイブリッド車の電源が化石燃料由来の場合、ライフサイクルのGHG排出量が最大となったのは、発電にあたって液体石炭 (coal to liquids; CTL) を古いボイラーに用いて行った場合で、ライフサイクルGHG排出量は0.33 kgCO₂-eq/km、使用段階のGHG排出量は0.28 kgCO₂-eq/km (Gainesら (2007)) であった。ライフサイクルGHG排出量が最小となったのは、圧縮天然ガス (compressed natural gas; CNG) を用いて発電を行い、高速道路を走行すると想定したシナリオの場合で、ライフサイクルGHG排出量は0.09 kgCO₂-eq/kmで、使用段階のGHG排出量は0.04 kgCO₂-eq/km (Gainesら (2007)) であった。

論文出版時期とライフサイクルGHG排出量の相関はほとんど見られなかった。車種別に出版時期とライフサイクルGHG排出量で直線回帰を行った結果、プラグインハイブリッド車の電源が化石燃料由来で減少傾向が見られ、相関係数が $R^2 = 0.56$ となりわずかに相関が見られたが、それ以外の車種では相関係数が小さく、相関はないと見做せる結果となった。

4. 課題

今回のメタ分析を実施した際の課題の一部を以下に示す。

(1) 補正の妥当性と不確実性の考慮

単位の統一、および、各ライフサイクル段階の内、一部の段階について標本が得られなかった場合に補正を行ったが、各論文で走行距離や自動車のサイズ、製造国と使用国の違い、二次データ等の前提条件が異なっており、これらの補正が妥当であるかに関しては検討が必要である。また上記の前提条件の違いにより本研究には不確実性が含まれると考えられるが不確実性分析は行っていない。

(2) 標本の分類の精度

電源種類が論文に明示されていない場合は、電力ミックスへ分類した。より正確に分類するには、全ての論文の参考文献を孫引きして調査する必要があるが、今回は一部までの調査となった。

(3) 標本の精度

GHG排出量の抽出元がグラフのみの場合、数値への変換はアナログな方法を適用したため、標本の精度には限界がある。

(4) 標本の不足

本研究では、ハイブリッド車および燃料電池自動車の廃棄段階、その他のバッテリーと廃棄段階の標本を収集することは出来なかったため、全ての車種でライフサイクルの補正を完全には行っていない。

(5) 各標本のGHG排出量の取り扱い

各標本におけるGHG排出量に含まれる温室効果ガスの種類や温暖化係数は統一されていないが、それらの補正は本研究では行っていない。

(6) その他影響領域の調査

本調査でメタ分析を行う対象の影響領域はGHG排出量のみとしたが、取得した論文の中には、大気汚染やエネルギー消費についての記載がある論文もあった。本研究の目的はガソリン車やディーゼル車をクリーンエネルギー自動車に置き換えることにより期待されるGHG排出量の削減効果について、地球温暖化の緩和策の導入効果に関する定量的な分析であり、GHG排出量以外の影響領域についても同様の分析を行う必要があると考えられる。GHGを優先したが、NO_x（窒素酸化物）やSO₂（二酸化硫黄）といった大気汚染物質を含む気候変動以外の項目について記載した論文は少なく、十分な数の標本を抽出することができなかった。大気汚染は自動車の環境影響評価において非常に重要な影響領域であるため、この影響領域をGHGと同様の水準で評価するにはさらに多くの論文を調査収集し、標本を抽出する必要がある。

(7) 電力ミックスの違い

各地域における電力ミックスを構成するエネルギー源の割合は電力をエネルギー源とする自動車のライフサイクルGHG排出量に大きく影響を与えていると推測されるが、各電力ミックスの内訳を明らかにした分析は行っていない。

(8) 標本の解像度

同じ車種であっても、メーカー別に見た時には、車両重量や投入素材の量、適用技術、空気抵抗といった側面が異なり、ライフサイクルGHG排出量に影響を与えていると推測されるが、標本の不足からこのような解像度での分析は行っていない。

5. まとめ

自動車分野で実施されたLCA結果に対してメタ分析を行い、車種や電源種類で分類した時に、ライフサイクルGHG排出量の明確な違いが明らかになった。元データとなるLCA論文においては、その前提条件や結果の表記方法、対象段階は統一されていないが、ハイブリッド車、燃料電池自動車、その他を除いて補正を通じてライフサイクル全体の評価を行うことができた。

本研究からは、ガソリン車、ディーゼル車、ハイブリッド車では使用段階で排出されるGHG排出量がライフサイクル全体の約80%を占めていることがわかった。プラグインハイブリッド車、電気自動車において、電源を化石燃料由来、電力ミックスとした場合、使用段階から排出されるGHG排出量がライフサイクルの約50%～70%を占めており、

非化石エネルギーの場合使用段階から排出されるGHG排出量がライフサイクル全体の約10%を占め、その他製造段階が約60%を占めていることが分かった。燃料電池自動車の場合は使用段階で排出されるGHG排出量がライフサイクル全体の約70%を占めた。これらのことから、ライフサイクルGHG排出量への使用段階別の寄与の大きさは車種により異なり得ることがわかった。

ライフサイクル全体の中央値で見た場合、ガソリン車、ディーゼル車と比較して、ハイブリッド車はライフサイクルGHG排出量が約6%～20%削減される傾向が見られた。プラグインハイブリッド車、電気自動車は、化石燃料由来で発電された電力を使用段階に用いると、ガソリン車、ディーゼル車と同程度のライフサイクルGHG排出量となることがわかり、発電種類を非化石エネルギーとすると、約75%～80%まで削減できることが明らかとなった。燃料電池自動車は現在開発が活発に行われており、公開されている結果には大きな幅が見られ、燃料の製造方法の改良でライフサイクルGHG排出量を抑制することが可能であることが明らかになった。

ガソリン車やディーゼル車のように使用段階で化石燃料を用いる自動車から、使用段階で電源を用いる自動車へ乗り換えることでライフサイクルGHG排出量を削減することが可能になるとの結果が得られたが、その削減量には幅があり、電源種類や走行時のシナリオによっては電気自動車であってもライフサイクルGHG排出量がガソリン車やディーゼル車と同程度になることも明らかとなった。一方で、自動車の車種及び電源の種類別に、ライフサイクルGHG排出量と出版時期をプロットしても、2変数間には有意な相関は見られず、論文の出版時期はライフサイクルGHG排出量に影響は与えないことも明らかになった。また、ガソリン車やディーゼル車をクリーンエネルギー自動車へ置き換えた時のGHG排出量の定量的な削減効果の分析を行うには、クリーンエネルギー自動車の電源の種類と、走行時のシナリオを詳細に検討することが重要であるとの結論が導かれた。

謝辞

本研究は環境省 環境研究総合推進費 戦略的研究開発プロジェクト S-14 気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略開発 (MiLAI) の助成を受けたものである。

(平成28年6月27日受付、平成29年2月27日採択)

参考文献

- Agarski B., Kljajin M., Budak I., Tadic B., Vukelic D., Bosak M., Hodolic J. (2012): Tehnički vjesnik, 19 (2), 221-226

- Bauer C., Hofer J., Althaus J. H., Duce D. A., Simons A. (2015): *Applied Energy*, 157(1), 871-883
- Bickert S., Kampker A., Greger D. (2015): *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 36, 138-151
- Bousquin J., Gambeta E., Esterman M., Rothenberg S. (2012): *Journal of Industrial Ecology*, 16 (S1), S195-S205
- Chatzikomis I. C., Spentzas N. K., Mamalis G. A. (2014): *European Transport Research Review*, 6(4), 365-376
- Chester V. M., Horvath A. (2009): *Environmental Research Letters*, 4(2)
- Chłopek Z., Lasocki J. (2013): *Combustion Engines*, 154 (3), 192-201
- Faria R., Moura P., Delgado J., Almeida T. A. (2012): *Energy Conversion and Management Journal*, 61, 19-30
- Faria R., Pedro M., Pedro M., Freire F., Delgado J., Almeida T. A. (2013): *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 271-287
- Farrell E. A., Plevin J. R., Turner T. B., Jones D. A., O'Hare M., Kammen M. D. (2006): *Science*, 311 (5760), 506-508
- Gaines L., Burnham A., Rousseau A., Santini D. (2007): *Center for Transportation Research*, 32
- Gao L., Winfield C. Z. (2012): *Energies*, 5(3), 605-620
- Girardi P., Gargiulo A., Brambilla C. P. (2015): *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20 (8), 1127-1142
- Hawkins R. T., Gausen M. O., Strømman H. A. (2012): *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), 997-1014
- Hekkert P. M., Hendriks F. J. H. F., Faaij C. P. A., Neelis L. M. (2005): *Energy Policy*, 33(5), 579-594
- Helmerts E., Marx P. (2012): *Environmental Sciences Europe*, Advance Publication, DOI: 10.1186/2190-4715-24-14, 入手先 <<https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/2190-4715-24-14>>, (参照 2016-6-10)
- 石川幹人, 2-9 メタ分析, 明治大学情報コミュニケーション学部教授 メタ超心理学研究室ホームページ, 入手先 <<http://www.kisc.meiji.ac.jp/~metapsi/psi/2-9.htm>>, (参照 2016-6-24)
- Lifset R. (2012): *Journal of Industrial Ecology*, 16 (S1), S1-S2
- Ma H., Balthasar F., Tait N., Palou R. X., Harrison A. (2012): *Energy Policy*, 44, 160-173
- Michalek J. J., Chester M., Jaramillo P., Samaras C., Shiao N. C., Lave B. L. (2011): *PNAS*, 108(40), 16554-16558
- Miotti M., Supran J. G., Kim J. E., Trancik E. J. (2016): *Environmental Science & Technology*, 50 (20), 10795-10804
- Nanaki A. E., Koroneos J. C. (2012): *Journal of Cleaner Production*, 20(1), 14-19
- Nanaki A. E., Koroneos J. C. (2013): *Journal of Cleaner Production*, 53, 261-266
- 野中航美, 中野冠 (2011): *日本機械学会論文集*, 77 (783), 4024-4033
- Nordelöf A., Messagie M., Tillman M. A., Söderman L. M., Mierlo V. J. (2014): *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(11), 1866-1890
- Onat C. N., Kucukvar M., Tatari O. (2014): *Sustainability*, 6(12), 9305-9342
- Onat C. N., Kucukvar M., Tatari O. (2015): *Applied Energy*, 150(15), 36-49
- Onat C. N., Kucukvar M., Tatari O., Zheng P. Q. (2015): *Journal of Cleaner Production*, Advance Publication, DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.021, 入手先 <https://www.researchgate.net/profile/Nuri_Onat/publication/281816183_Combined_Application_of_Multi-Criteria_Optimization_and_Life-Cycle_Sustainability_Assessment_for_Optimal_Distribution_of_Alternative_Passenger_Cars_in_U.S/links/560a0df908ae4d86bb135803.pdf>, (参照 2016-5-26)
- Padey P., Blanc I., Boulch L. D., Xiusheng Z. (2012): *Journal of Industrial Ecology*, 16(S1), S28-S38
- Price L., Kendall A. (2012): *Journal of Industrial Ecology*, 16(S1), S22-S27
- Samaras C., Meisterling K. (2008): *Environmental Science & Technology*, 42(9), 3170-3176
- Spadaro V. J., Rabl A. (2006): *Transport & Environment*, Reims
- Teehan P., Kandlikar M. (2012): *Journal of Industrial Ecology*, 16(S1), S182-S194
- Warner S. E., Heath A. G. (2012): *Journal of Industrial Ecology*, 16(S1), S73-S92
- Weiss M., Haufe J., Carus M., Brandao M., Bringezu S., Hermann B., Patel K. M. (2012): *Journal of Industrial Ecology*, 16(S1), S169-S181
- Whitaker M., Heath A. G., O'Donoghue P., Vorum M. (2012): *Journal of Industrial Ecology*, 16(S1), S53-S72
- Yan X., Crookes J. R. (2010): *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(6), 651-676