

令和元年9月9日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00668

研究課題名（和文）次世代自動車普及に伴う課題導出と対策に関する研究 - 適正処理と再資源化を中心に -

研究課題名（英文）Study on discovering issues and its countermeasures by popularization of Next-Generation Vehicles; Focus on the proper disposal and recycling

研究代表者

劉庭秀（YU, JEONGSOO）

東北大学・国際文化研究科・教授

研究者番号：70323087

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：世界的に次世代自動車が本格的に普及するには幾つかの課題が残っている。先進国（日本やEU）から発展途上国に中古次世代自動車を大量輸出しているが、輸出先では使用済み次世代自動車が適正処理されず、結果的に越境環境問題を引き起こす可能性が高い。再生と新品バッテリーの環境影響評価を行った結果、リサイクルのみならず、自動車及び定置型蓄電池としての利用も推奨すべきである。モンゴルのようなHV輸入国で使用済みHV用バッテリーの有効な利活用モデルを構築することは単なる環境問題の解決ではなく、遊牧民の生活の環境問題の質の向上、国際資源循環などに役立つものであり、持続可能な開発目標の達成に向けた優れた研究活動に繋がる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は国内外における現段階の次世代自動車の流通・適正処理・再資源化の現状を明らかにすることで、実態に即した課題が導出され、対応策の検討ができた。また、今後新たな技術やプロセス導入が迫られると予想される自動車リサイクルに対し実効性の高い政策提言を行った。そして動脈産業と静脈産業を繋いだ包括的研究成果であり、産学官連携も含めた国内外のネットワークを最大限に活用した実証的研究成果である。

研究成果の概要（英文）：There are some issues to be solved before the Next-Generation Vehicles' popularization around the world, and the need for establishing a new recycling system. Moreover, although advanced countries are exporting a vast amount of used NGV to developing countries, since part of developing countries lacks proper recycling policy and technology. This research assesses and compared the environmental impact of reconditioned NiMH and brand-new NiMH battery, and there is no significant difference when a Hybrid Vehicle uses the former one or the latter. Therefore, not only the recycling of waste NiMH battery from the HV, but also the reuse as a reconditioned NiMH battery into the HV or as a stationary battery should be recommended. In fact, an effective End-of-Life NiMH battery utilization model will not only help to solve environmental problems, but it will also improve the quality of nomad's life, international resource recycling for the achievement of the sustainable development goals.

研究分野：環境学・環境創成学・持続可能システム

キーワード：次世代自動車 中古車輸出 国際資源循環 越境環境問題 自動車リサイクル 使用済みバッテリー
環境影響評価 国際協力

1. 研究開始当初の背景

近年「次世代自動車」の普及が国内外で進んでいる。一般的に、「ハイブリッド自動車」「プラグインハイブリッド自動車」「燃料電池自動車」「天然ガス自動車」「クリーンディーゼル自動車」「電気自動車」などが「次世代自動車」として、自動車メーカー各社において凌ぎを削った開発が行われている。日本では2007年に政府が発表した「次世代燃料・自動車イニシアティブ」において次世代自動車の普及目標(2020年に新車販売台数に占める次世代自動車の割合50%)が設定され、2009年から補助金や優遇税制が開始された。こうした国の後押しを受けたこともあり、2009年度以降乗用車販売に占める次世代自動車の割合が大幅に増加している。

一方で次世代自動車の適正処理・再資源化に関する基盤整備は進んでいないのが実情である。1997年末にトヨタ自動車が初代プリウスを発売してから間もなく20年が経過し、自動車の一般的な耐用年数を越える時期を迎えるが、ハイブリッドカー(HV: Hybrid Vehicle、以下HV)をはじめとする次世代自動車のリサイクルシステムの体制整備は進んでいない。しかし近い将来次世代自動車在使用済み自動車(ELV: End of Life Vehicle)となりその適正処理と再資源化の問題に直面することは必至である。またHVをはじめとする次世代自動車のリサイクルに関する研究はほぼ着手されていない状況にある。次世代自動車に係る学術研究は目下動脈産業に特化しており、バッテリーリサイクル技術に特化した研究などに限られている。

本研究は、これまでの研究代表者の日本やアジアを中心とした自動車リサイクル研究等を踏まえた上で、学術的に未開拓分野、すなわち日本および国際的に望ましい次世代自動車のリサイクルシステムおよび法政策のあり方を実態分析や国際資源循環と環境影響のシナリオ分析を用いて考察する。

2. 研究の目的

2013年における日本の次世代自動車の保有台数は約413万台に上るが、そのうちの94.5%はHVが占めており(約390万台、PHVを含む)。その大半は中古車として海外に輸出される。本研究の目的は、こうした現状を踏まえて研究期間内に主に以下の2点を明らかにする。

- 1) 現在日本国内外で普及する次世代自動車の大半を占めるHVに焦点を当て、日本および海外における新車および中古車、使用済み自動車の流通実態を明らかにする。
- 2) 使用済み自動車の適正処理と再資源化、とりわけバッテリーのリユースやリサイクルの現状と法制度整備状況を明らかにした上で、現段階における政策課題を導出し、その対応策を探る。また、日本はすでにHVが普及しており、使用済みハイブリッドカーの再利用・適正処理・再資源化に向けた取り組みを始めているが、中古ハイブリッドカーが大量に輸出されるため、国内ではこれらのシステムが殆ど機能していない。本研究では、最大のHV輸入国であるモンゴル国を事例に、使用済み自動車バッテリーの廃棄、リユース、リサイクルの実態調査と環境影響評価を行い、その利活用方法について政策提言を行う。

3. 研究の方法

まず、次世代自動車普及政策の国際比較分析を行った。分析方法は、EU諸国やアメリカに関しては、先行研究、関連学協会のレポート、政府刊行物及び政策動向レポート、新聞記事などを文献調査・整理とその分析・考察を行った。そして日本の自動車大手メーカー(中国工場を含めて)、リサイクル関連協会、自動車リサイクル現場のヒアリング調査とフィールドワークを実施する。中国における自動車産業の政策動向、自動車メーカーの考え方の把握、現地調査を実施するためには、中国南開大学社会経済発展研究院との共同研究を推進し、モンゴル国の現地調査はモンゴル国立大学とモンゴル科学技術大学と連携して研究調査を行った。

中古(使用済み)HV用バッテリーを対象に、再生バッテリーと新品バッテリー、そしてガソリン車のライフサイクルアセスメント(環境影響評価)を行った。そして、世界1位の中古HV輸入国である、モンゴル国を対象に、中古HVの輸入実態、自動車用バッテリー(鉛・ニッケル水素)の発生・回収・廃棄・再資源化の実態調査と遊牧民を対象に、その有効利用の可能性を探った。特に、中古車輸出が越境環境汚染と国際資源循環問題に与える影響を特定し、使用済み自動車用バッテリーの有効利用方法をエネルギー格差、環境負荷低減、国際資源循環の潜在力の側面から評価した。

4. 研究成果

1) 主要国における次世代自動車普及政策の比較分析

世界的に次世代自動車が本格的に普及するには幾つかの課題が残っている。例えば、従来の自動車製造に使わなかった資源の使用量が急増したり、大量の電力消費の需要が出たり、新た

なりサイクルシステムを構築する必要がある。特に石炭火力の依存度の高い中国に低価格の次世代自動車が大量に普及すれば、CO₂の排出による地球温暖化問題、使用済み自動車の大量発生とその適正処理と再資源化の問題が顕在化すると思われる。しかし、主要自動車生産国の次世代自動車普及政策とその方針は頻繁に変化しており、一貫性が見られなかった。また、先進国（日本や EU）から発展途上国に中古次世代自動車を大量輸出しているが、輸出先には適正な自動車リサイクル政策と技術がないため、使用済み次世代自動車が適正処理されず、結果的に越境環境問題を引き起こす可能性が高い。さらに、次世代自動車の普及・特徴に対応できる自動車リサイクル技術・政策の導入も遅れていると言える。

2) HV 用バッテリーのリユース・リサイクル実態と課題分析

HV の普及をリードしているトヨタ自動車は、すでに HV に使われたニッケル水素バッテリーの独自回収スキームを構築し、解体業者から回収した使用済みニッケル水素バッテリーのリユース・リサイクルを積極的に取り組んでいる。トヨタは回収したバッテリーを3つのランクに分けている。新品同様に充電効率の良い A ランクは販売店を通し、自動車補修用バッテリーとしてもう一度販売する。経年劣化が進んでいる B ランクのバッテリーは自動車販売店の定置型蓄電池としてリユースする。リユースに適しない C ランクはバッテリーからニッケル再生材を分離し、その後湿式精錬によってニッケルを抽出した上、水酸化ニッケルに加工することよりニッケルの正極材原料として再資源化する。このように、トヨタ自動車は世界初の「バッテリー to バッテリー」リサイクル事業を行なっている。

但し、車載用バッテリーは中古車とともに輸出されたり、一部は中古部品として海外に流出したりすることが多く、せっかく自動車メーカーが構築したスキームから回収した使用済みニッケル水素バッテリーは 5,000 個程度で、リチウムイオンバッテリーも約 600 個に止まっている（2016 年基準）。各自動車メーカーは使用済みバッテリーのリユース、リサイクルに積極的に取り組んでいるが、蓄電池としてのリユース需要には限界がある。実際、このように使用済みバッテリーの収集・確保が難しく、リユース段階の品質管理や需要と供給のマッチングには課題が残っている。

3) ニッケル水素バッテリー（新品・再生品）の環境影響評価（LCA）

バッテリーの製造段階の二酸化炭素を含めば、ニッケル水素バッテリーを交換していない HV は5年間で約 4,330kg の二酸化炭素を排出する。補修用再生バッテリーに交換した HV は約 3,954kg の二酸化炭素を排出することになり、バッテリーを交換していない HV より 376kg の二酸化炭素を削減できる。よって、HV が駆動用バッテリーを交換する際に、補修用再生バッテリーを使っても、自動車走行中の排気ガスを削減できる。また、新品バッテリーに交換した自動車と再生バッテリーに交換した自動車のライフサイクルにおける二酸化炭素排出量の差は約 264kg しかなく、2 種類のバッテリーを使ったハイブリッド自動車の環境性能には大差がない。

さらに、モンゴルのような開発途上国では、自動車排気ガスによる大気汚染を改善するため、

日本から中古 HV を大量に輸入している。ここでは、輸出された HV の使用年数を 15 年に設定し、輸出された HV をさらに 5 年間使うと想定した。この場合、中古 HV に搭載しているニッケル水素バッテリーはほとんど機能しないと思われる。そのため、輸出された中古 HV の駆動用バッテリーを交換しないと開発途上国に次世代自動車が増えて環境負荷を減らすことにはならない。中古 HV の輸入を拡大している開発途上国の環境対策のためには、再生バッテリーの利用が有効な方法の一つになるだろう。一方、前述したように、現在日本にはバッテリーのリユース技術があるにもかかわらず、使用済みバッテリーが殆ど回収できないことも事実である。その原因の一つは古い HV が中古車として大量に海外へ輸出されることである。言い換えれば、これから HV 輸入国では充電効率が 50% 以下の使用済みバッテリーが大量に発生する可能性が高い。しかし、輸出先にはリユース、リサイクル技術がないため、使用済みバッテリーが最終的に捨てられたり、不適切処理されたりする可能性が高い。今後、HV 大国の日本を中心に、使用済みバッテリーを国内外から効率的に回収し、リユース、リサイクルネットワークを構築ことが期待される。

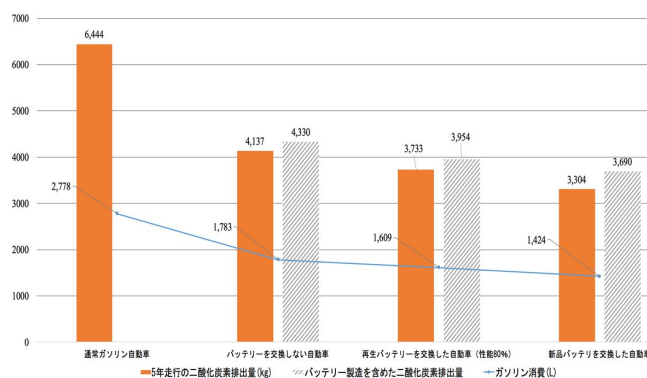


図1 再生バッテリー・新品バッテリーの環境影響

4) HV 中古車輸出が環境に与える影響（越境環境汚染と国際資源循環の問題）分析

日本自動車工業協会は、2025 年頃から日本国内で使用済み次世代自動車が本格的に発生する

と推定しており、この時点で発生する使用済み自動車の最大値を50万台と試算しているが、今までの傾向が続くのであれば、年間20~30万台の使用済み次世代自動車しか発生しないケースも排除できない。図2のように、日本の中古HV輸出は2013年以降急速に増加し、4年間で約4倍増えている。特にモンゴル国の場合、2010年以降の中古HV輸入台数が多く、この数年間に5倍以上増加しており、2014年から毎年2万台以上の中古HVが輸入されている。モンゴル国における自動車由来の廃棄物の適正処理と再資源化に関する法整備に関しては、道路・運輸省、自然環境・グリーン開発・観光省・産業省を中心に関心を示している。特に有害物質である自動車用鉛バッテリーに関しては、道路・運輸省がリーダーシップを取って実態調査や研究事業を行っている。最近、HVが急増していることもあり、今後、鉛バッテリーだけでなく、ニッケル水素バッテリーの適正処理と再資源化の重要性を認識している状況である。しかし、鉛バッテリーの法整備状況をみると、基本的な環境基準は提示されているものの、収集・運搬・保管・適正処理と再資源化に関する基本方針とガイドラインは明示されていない。このようにモンゴル国は、関連法制度と基準が明確に整備されていない状況であり、バッテリー輸入や再生鉛の輸出統計にも問題があるように見える。いずれにしても、過酷な気象条件、遊牧民のバッテリー使用状況、古い中古車の増加などを総合的に考慮すれば、自動車保有台数あたりの鉛バッテリーの需要と使用済み鉛バッテリーの排出量は、日本の数倍に当たるとと思われる。特に使用済み鉛バッテリーの回収、保管、適正処理、再資源化に関しては、早急に環境基準と制度を整備する必要がある。

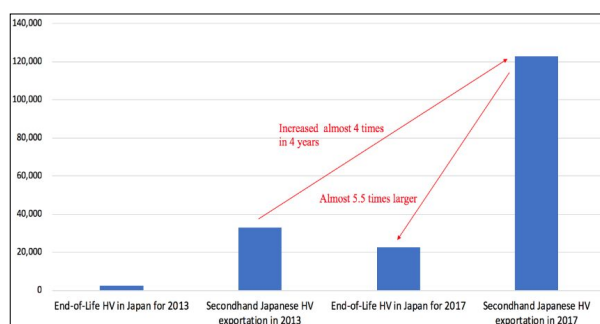


図2 中古HV輸出と使用済みHVの発生

一方、モンゴル国は、人口当たりのHV保有台数が日本を超えるほど、HVの普及率が高い。しかし、殆どが10年以上経過している古いHVであるため、ニッケル水素バッテリーの不具合が多く、修理や交換時に、使用済みニッケル水素バッテリーが発生している。今後も中古HVの輸入は増え続ける可能性が高く、使用済みニッケル水素バッテリーの適正処理と有効利用が重要な課題になっている。特に、メーカーが推奨している解体マニュアルや整備基準を守っていない場合、感電事故や故障の原因になるため、適正なりサイクルシステムの構築が望まれる。今回の研究調査で、ウランバートル市郊外の遊牧民の生活環境調査を行った結果、下記のようなことがわかった。現在、殆どの遊牧民は、太陽光パネルと鉛バッテリーのユニットを用いて電気を使用している。最低限の家電製品としては、小型液晶テレビ1台、LED電灯、電話アンテナ付きの固定電話か、携帯電話の充電)である。これらの家電製品を使うために、自動車用バッテリーを2~3個を所有しているケースが多く、容量の大きい家電製品を使う場合は、別途発電機を回している状況である。基本的に、自動車用鉛バッテリーを蓄電池として利用するケースが多い。毎年各世帯が最低1個のバッテリーを廃棄すると仮定すれば、少なくとも年間24万個が排出される計算になる。予備用バッテリーを含め、3~5個を持っている世帯も多く、実際は、年間1.5個~2個のバッテリーが廃棄され、これにオートバイ用や乗用車のバッテリーが加わると、年間2~2.5個のバッテリーが廃棄されるのではないかと推察される。今回の調査で、遊牧民のニッケル水素バッテリーの廃棄状況についても質問したが、現時点ではまだ使用済みバッテリーの発生は少ないと思われる。しかし、鉛バッテリーによる環境汚染、遊牧民のエネルギー格差問題を考慮すれば、使用済みHV用バッテリーを蓄電池(再生+2次利用)として利用することができれば、環境汚染とエネルギー貧困問題の解決に貢献できると考える。

鉛バッテリーと同様に、HV(主に中古車)の輸入、販売、廃棄、処理(リサイクルを含む)データ管理が不十分であり、HVの保有台数、修理・交換履歴の管理も必要であると考えられる。特に使用済みバッテリー、電装品の回収システムが整備されておらず、一般廃棄物として排出されたり、不法投棄されたりすることも見受けられる。修理・整備現場にはHV用バッテリーの解体、再生(リユース)使用済みバッテリーのランク付け基準と解体マニュアルがない状況である。まずは、使用済みバッテリーの有効利用方法(2次利用、リサイクル)に関する調査研究が必要である。特に、モンゴル国は、世界1位のHV保有国(人口当たり、自動車登録台数あたり)として、今後、他の開発途上国のモデルとなる、HVに特化した総合リサイクルモデルの構築も可能である。将来的には使用済みHV用バッテリーの有効な利活用モデルを構築し、開発途上国に横展開して行くことも有意義であろう。

地球環境問題の解決、持続可能な社会実現のために、使用済みバッテリーの有効利用方法を確立し、モンゴル国におけるリサイクル産業育成、環境汚染防止、資源の有効利用、雇用拡大などを推進すべきである。そのためには、民間の活力をも利用しつつ、新しいビジネスモデル、国際協力モデルを構築すべきである。モンゴル国におけるHV用バッテリーの有効利用に関しては、単なる環境問題の解決ではなく、遊牧民の生活の質の向上(エネルギー貧困の改善、鉛

バッテリー廃棄物の減少、土壌汚染改善、家畜の健康被害改善など、国際資源循環（希少金属の有効利用、資源の好循環など）などに役立つ、世界に先駆けた取り組みであり、今後、持続可能な開発目標の達成に向けた優れた研究活動に繋がると考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

- 1) Jeongsoo YU, Shouyao WANG, Erdenedalai BAATAR, Kosuke TOSHIKI, Hirotaka NAITO, "New Challenges and Trends on ELV Recycling in Japan; Focus on Popularization of New-Generation Vehicles", 9th Asian Automotive Environmental Forum Guidebook, 査読無, Vol.9, 2016, pp.11-12
- 2) Jeongsoo YU, Shouyao WANG, Kosuke TOSHIKI, Hirotaka NAITO, Kevin Roy B. Serrona, "Past, Present and Future of ELV Recycling in Japan", 10th Asian Automotive Environmental Forum Guidebook, 査読無, Vol.10, 2017, pp.51-66
- 3) Shouyao WANG, Jeongsoo YU, Kosuke TOSHIKI, Hirotaka NAITO, "The Rapid Spread of Next-Generation Vehicle and Facing Challenges", 10th Asian Automotive Environmental Forum Guidebook, 査読無, Vol.10, 2017, pp.207-210
- 4) Shouyao WANG, Jeongsoo YU, Genyao FAN, "The Trace and Features of EPR in ELV Recycling System: Comparison of International Trend", Proceedings of the 28th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management, 査読有, 2017年, https://doi.org/10.14912/jsmcwm.28.0_543, pp.543-544
- 5) Jeongsoo YU, "New Issues on Automobile Recycling in Japan", 11th Asian Automotive Environmental Forum Guidebook, 査読無, Vol.11, 2018, pp.29-33

〔学会発表〕(計15件)

- 1) Erdenedalai BAATAR, 劉庭秀, 戸敷浩介, "モンゴル国における中古車輸入の実態分析", 第15回日本地域政策学会全国研究大会, 2016年
- 2) 劉庭秀, Erdenedalai BAATAR, "中古車輸出が国際資源循環と越境環境問題に与える影響-モンゴル国を事例に-", 環境科学会2016年会企画シンポジウム, 2016年
- 3) 劉庭秀, Erdenedalai BAATAR, "モンゴル国における都市環境問題の特徴と課題-環境汚染防止と資源リサイクルのジレンマ-", 環境科学会2016年会企画シンポジウム, 2016年
- 4) Shouyao WANG, Jeongsoo YU, Erdenedalai BAATAR, "Popularization of Next-Generation Vehicle and New Challenges in ELV Recycling Business", 9th Asian Automotive Environmental Forum, 2016年
- 5) 王燦堯, パートル・エルデネダライ, 劉庭秀, "次世代自動車普及政策の変遷要因と課題分析", 第16回日本地域政策学会全国研究大会, 2017年
- 6) パートル・エルデネダライ, 王燦堯, 劉庭秀, "自動車用鉛バッテリーの国際資源循環の実態分析", 第16回日本地域政策学会全国研究大会, 2017年
- 7) Shouyao WANG, Jeongsoo YU, Genyao FAN, "The Trace and Features of EPR in ELV Recycling System: Comparison of International Trend", 第28回廃棄物資源循環学会研究発表会, 2017年
- 8) Jeongsoo YU, "Past, Present and Future of ELV Recycling in Japan", 10th Asian Automotive Environmental Forum (Seoul, Korea, 招待講演), 2017年
- 9) Shouyao WANG, Jeongsoo YU, Kosuke TOSHIKI, Hirotaka NAITO, "The Rapid Spread of Next-Generation Vehicle and Facing Challenges", 10th Asian Automotive Environmental Forum, 2017
- 10) 王燦堯, 劉庭秀, パートル・エルデネダライ, "次世代自動車普及政策の矛盾と課題", 第33回日本マクロエンジニアリング学会年次大会, 2018年
- 11) Jeongsoo YU, "New Issues on Automobile Recycling in Japan", 11th Asian Automotive Environmental Forum, 2018年
- 12) Shouyao WANG, Jeongsoo YU, "Emerging Issues of Secondhand HV Exportation from Japan; Focusing on NiMH Battery", 11th Asian Automotive Environmental Forum, 2018
- 13) Jeongsoo YU, Shouyao WANG, "Priority Issues on ELV Recycling Policy in EU, Japan and China", 1st Asian Congress, 2018
- 14) Shouyao WANG, Jeongsoo YU, "An Environmental Evaluation of Reuse and Recycling for Hybrid Vehicle Battery in Japan", 1st Asian Congress 2018
- 15) Jeongsoo YU, D. Bayasgalan, "A Potential of End-of-Life Batteries for Hybrid Vehicle", 8th Asia-Pacific Forum on Renewal Energy, 2018

〔図書〕(計1件)

- 1) Jeongsoo YU, Shouyao Wang, Kosuke Toshiki, Kevin Roy B. Serrona, Genyao Fan and Baatar Erdenedalai, "Latest Trends and New Challenges in End-of-life Vehicle Recycling (Chapter 8)", Royal Society of Chemistry, 『Environmental Impacts of Road Vehicles: Past, Present and Future』, 2017, pp.174-213

〔産業財産権〕なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：茂木 創 (MOTEGI, Hajime)

所属研究機関名：拓殖大学 政経学部

職名：准教授 研究者番号 (8桁): 10407661

(2) 研究協力者 なし