

論文内容要旨

次世代自動車の普及政策と国際環境問題に関する日中比較研究
--使用済み HEV と EV の発生予測と環境影響評価を中心に--

A Comparative Study on Next-Generation Vehicle Promotion Policies and
International Environmental Problems between Japan and China:
Focusing on Quantity Estimation and Environmental Impact Assessment of
End-of-Life HEV and EV

東北大学大学院国際文化研究科
国際文化研究専攻
王 燦堯

指導教員	劉 庭秀	教授
副指導教員	青木 俊明	教授
副指導教員	佐藤 正弘	准教授

論文内容の要旨

1. 研究背景

近年、各国は地球温暖化対策・大気汚染防止・自動車産業の競争力強化などを目的に、クリーンディーゼル自動車、ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車、電気自動車と燃料電池自動車を軸として、次世代自動車の開発と販売拡大に取り組んでいる。一方、各国政府、自動車メーカーの次世代自動車普及・販売戦略は大きく異なり、次世代自動車普及政策にも一貫性が見られない。その結果、今後各種次世代自動車の普及動向・普及台数の予測が難しいことも事実である。

次世代自動車は、化石燃料を用いてエンジンを駆動する既存の自動車と異なり、バッテリーとモーターに依存している。また、次世代自動車は燃費とバッテリー効率向上のために、急速に軽量化が進んでいる。そのため、次世代自動車の製造段階における非鉄金属（アルミ・銅など）、レアメタル（ニッケル・コバルト）とプラスチックの消費が増加している。次世代自動車の販売拡大は、今後特定金属資源の枯渇と公正な配分にも大きい影響を与える。次世代自動車製造段階における資源消費の効率を向上するためには、環境性と経済性が両立できる自動車リサイクルシステムを構築し、使用済み次世代自動車から有用資源を回収した上で、積極的に再資源化することが重要である。ただし、次世代自動車の開発・製造技術が日々目まぐるしく進歩することによって、その構成素材も大きな変化しており、既存の自動車リユース・リサイクルシステムで対応することは難しい。さらに、先進国から開発途上国、大都市から中小都市に大量の中古次世代自動車流通しているが、これらの中古次世代自動車の流通ルート、使用済み自動車の処理実態が不明確であり、廃棄物処理及びリサイクル段階における資源の浪費や環境問題の発生が懸念される。

2. 本研究の目的

本研究は上記の研究背景と必要性に基づき、下記のような研究目的を設定する。

まず、EU、アメリカ、日本と中国を対象に、各国における次世代自動車の普及政策・技術開発・学術研究の動向とその変遷について国際比較を行い、今後次世代自動車の普及動向とその実態を把握する。そして、次世代自動車の普及がもたらす新たな環境問題（クリーンエネルギーの需給・特定金属資源の消費・次世代自動車リサイクルなど）を考察する。

次に、次世代自動車の普及をリードしている日本と中国を中心に、今後両国の次世代自

自動車普及台数を推定する。そして、日本と発展途上国、中国の大都市と中小都市間の中古次世代自動車・関連部品の流通実態、流通ルート・特徴を把握した上、その流通実態を考慮した使用済み次世代自動車の発生及び回収モデルを構築する。

また、次世代自動車の駆動用バッテリーを事例に、そのリユース、リサイクルプロセスに関わる環境影響評価を行う。そして、日中における中古次世代自動車の流通状況に基づいて、自動車リサイクルシステムの環境性・経済性に関するシナリオ分析を行い、今後国内外における資源循環ネットワーク構築の在り方を提案する。

3. 本研究の研究手法と研究結果

第 1 章 序論

第 1 章では、本研究の背景と必要性、研究の目的、研究手法と研究の構成を記述した。

第 2 章 次世代自動車に関する研究動向の分析

第 2 章では、次世代自動車に関する学術研究を網羅的に収集した後、次世代自動車研究の変遷と最新動向、先行研究の特徴（学問分野、研究キーワード・歴史的な変遷など）を計量書誌学の分析アプローチで明らかにした。そして、先行研究の分析・考察結果に基づいて、本研究の研究範囲、研究対象、研究手法などを比較分析することで、本研究の独創性を明らかにした。

本研究が考察したところ、1990 年代前半では、主な次世代自動車に関する研究は電気自動車だったが、1997 年末に日本でハイブリッド自動車が発売されたことを皮切りに、ハイブリッド自動車に関する論文数は右肩上がりの傾向を示している。また、1990 年代後半からは、クリーンディーゼル自動車の発売や、アメリカを始めとする各国の燃料電池自動車の普及策の公表により、クリーンディーゼル自動車や燃料電池自動車に関する研究にも注目が集まり、全体の論文数の半分程度を占めている。一方、2009 年からは、ハイブリッド自動車・電気自動車に関する論文は再び増加し始め、2020 年までに、全体の論文数の 80% 以上を占めているが、特にこの 10 年間で約 30% も増加した。一方、電気自動車を研究対象とする論文は、12 年ぶり（2013 年以降）にハイブリッド自動車の研究論文数を超えた。この事実から、次世代自動車に関する研究は、ハイブリッド自動車（プラグインハイブリッド自動車を含む）と電気自動車が中心になっていることが分かる（図 1）。

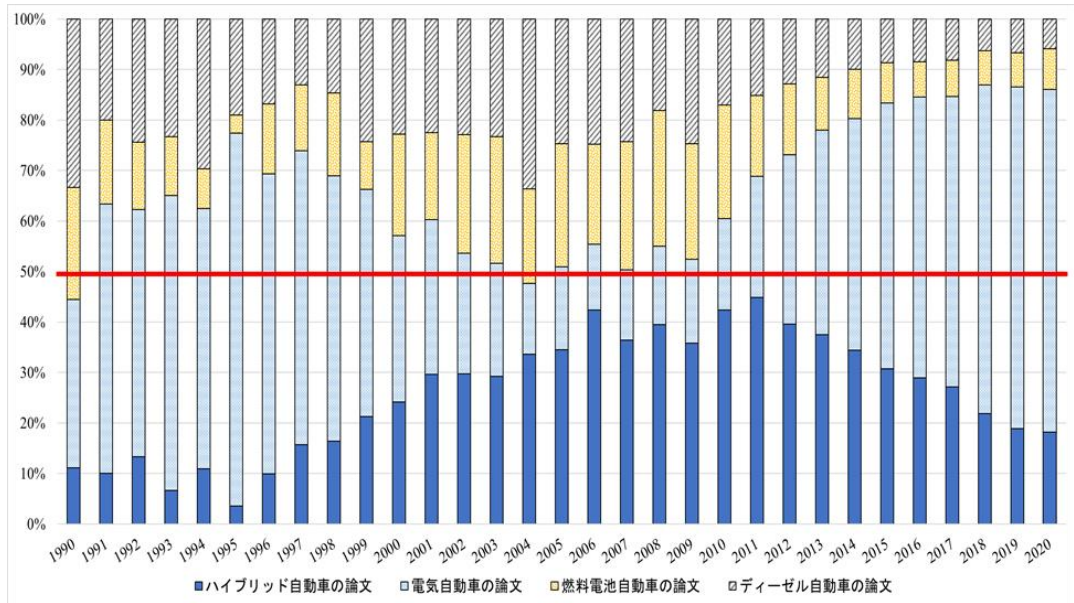


図 1：各種次世代自動車に関する論文数の変化

そして、次世代自動車に関する研究のほとんどが、電気電子工学分野に集中している。また、既存の次世代自動車に関する研究内容と研究テーマを考察すると、その駆動用バッテリー、モーター、充電インフラ設備に関する技術開発に力点を置くものが圧倒的に多い。一方、次世代自動車の普及が急速に進んでいる中、近い将来に、使用済み次世代自動車の大量発生が予想される。しかし、各先行研究は、本研究の研究課題として取り上げた「普及政策の比較分析」、「使用済み次世代自動車のリサイクル」、「環境影響評価」などに関する分析が十分ではない。なお、先行研究があるとしても、これらの研究課題を分野横断的（Cross-cutting）、かつ持続可能性（Sustainability）の視点で扱った先行研究は存在しない。

そこで、本研究の独創性として、まず、日本、中国、EU とアメリカを対象に、各国政府・自動車メーカーの次世代自動車普及政策・販売戦略の歴史的な変遷と最新動向を綿密に考察し、その変遷要因と最新動向を把握した。その後、今後の次世代自動車の普及動向を明らかにした。

そして、日本と中国における次世代自動車の普及台数を独自の方法で予測した上で、各国の中古次世代自動車・部品の国際・国内流通ルートと特徴を比較考察しながら、回収できる使用済み次世代自動車を推定した。

また、日本のハイブリッド自動車と中国の電気自動車の駆動用バッテリーに注目し、ニッケル水素バッテリーとリチウムイオンバッテリーの生産からリサイクルまでの環境影響（二酸化炭素排出量、資源およびエネルギー消費量、廃棄物発生量）を総合的かつ定量的

に評価した。なお、本研究はバッテリー開発の技術変化を考察しながら、自ら推定した日中における使用済み次世代自動車及びバッテリーの回収可能台数に基づき、各国の次世代自動車リサイクル産業の環境影響を明らかにした上で、その採算性を分析した。

第3章 各国における次世代自動車普及政策の変遷とその特徴

第3章では、各国政府の次世代自動車普及政策の歴史的な変遷と最新動向、各国における各種次世代自動車の技術開発状況、および各国の次世代自動車販売状況を考察した上で、次世代自動車の普及動向を予測した。また、これから大量に普及すると予測される次世代自動車を対象に、その特徴（動力源、構成素材）を考察した上で、次世代自動車の普及がもたらす新たな環境問題を導出した。

各国の次世代自動車の普及政策とその普及動向を比較分析したところ、日本では、次世代自動車の普及動向は自動車メーカーが主導しているが、今まで日本の自動車メーカーはハイブリッド自動車の販売拡大に重きを置いていたため、日本は世界最大のハイブリッド自動車製造・販売市場となった。一方、中国は、政府が中国の次世代自動車の開発・販売動向をリードしており、電気自動車産業の発展に主眼を置いている。そして、EU 諸国では、これまでディーゼル自動車を中心に次世代自動車の販売戦略を立てていたが、今後二酸化炭素排出規制が一層強化されることになっているため、長期的には、次世代自動車の普及戦略を電気自動車に移行させようとしている。また、アメリカは、政権交代によって次世代自動車の普及政策が頻繁に変化しているとともに、中央政府と州政府の環境規制が対立しているため、今後の次世代自動車の普及政策を予測することは難しい（表1）。

表1：各国の次世代自動車の普及政策とその特徴

	ヨーロッパ	アメリカ	日本	中国
次世代自動車への定義	クリーンディーゼル車 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	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	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	プラグインハイブリッド車 電気自動車 燃料電池自動車
主たる普及政策	"European Roadmap-Electrification of Road Transport" "A European strategy on clean and energy efficient vehicles"	"Partnership for a New Generation Vehicles" [ZEV] 規制 "Freedom CAR" "Clean new deal"	「次世代自動車戦略2010」 「EV・PHVロードマップ」 「水素・燃料電池戦略ロードマップ」	「863電気自動車計画」 「省エネと新エネルギー自動車産業発展計画（2012～2020）」 「中国製造2025」
普及目標の変遷	CDV→EV→EV/HV	HV→FCV→EV→GV	HV-EV/PHV-FCV-EV	HV/EV/FCV-EV
政策動機	環境汚染防止、二酸化炭素排出量の削減	石油自給率の向上、雇用拡大、政権交代	エネルギーセキュリティ、本国自動車産業優位性を保つ	大気汚染対策、石油消費量削減、本国自動車産業を育成
普及現状	ディーゼル自動車の販売が減速、電気自動車・ハイブリッド車の普及が並行	電気自動車の販売台数が増加 ガソリン自動車に回帰する傾向	世界最大のハイブリッド車市場	世界最大の電気自動車市場
政策の課題	(1) ディーゼル自動車市場の逆風が強まる・電気自動車の普及が遅れる中で、自動車排気ガスをクリアできない恐れ	(1) 次世代自動車普及政策は政権交代により頻繁に変化し、普及動向に不透明感が強い (2) 電気自動車の販売は特定地域に集中	(1) ハイブリッド自動車の販売が好調だが、電気自動車の販売台数が比較的に少ない	(1) 次世代自動車技術が単一 (2) コア技術開発が比較的遅い (3) 次世代自動車の普及が補助金に頼りすぎる恐れ

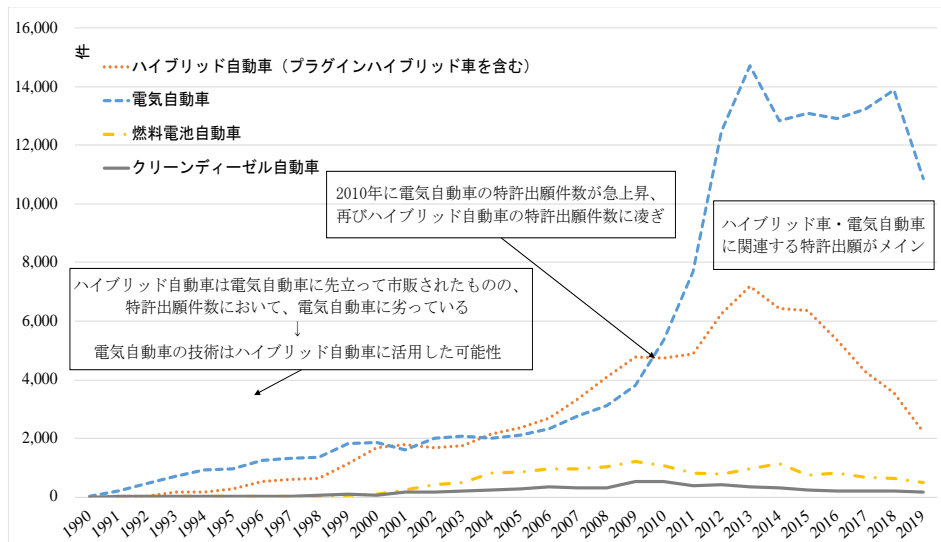


図 2：次世代自動車の特許出願件数の推移

一方、本研究は各種次世代自動車に関連する技術の特許出願件数の推移を用いて、次世代自動車技術開発の変遷と動向を分析したところ、1990年から2019年までには、電気自動車とハイブリッド自動車に係る特許が特に多いことが明らかである。特に電気自動車の特許出願数は2010年からハイブリッド自動車に凌ぎ、トップに躍り出た。ただし、2019年では、電気自動車技術円熟度の向上に伴い、その特許出願件数が減少の傾向を見せている。一方、ハイブリッド自動車の特許出願件数に関しては、1990年代から堅調に伸びているが、2013年から減る一方で、2位に位置付けられている。そのため、現段階では、次世代自動車の技術開発の軸足がハイブリッド自動車と電気自動車であると推定できる（図2）。

その後、本研究は、各先行研究・調査会社により公表した資料に基づき、次世代自動車の世界販売状況と動向を整理したところ、次世代自動車販売の軸足はハイブリッド自動車・プラグインハイブリッド自動車・電気自動車であることが分かった。さらに、当分の間には、ハイブリッド自動車の販売台数が伸びていくと考えるが、電気自動車への需要も堅調に伸びている（図3）。一方、クリーンディーゼル自動車の販売台数に関しては、その販売の主戦場であるEU各国の二酸化炭素排出規制の厳格化によって、さらに落ち込むことが予想できる。また、燃料電池自動車は殆ど普及していない状況である。

ところで、地域ごとの次世代自動車販売台数を見ると、2018年に、日本は世界ハイブリッド自動車販売台数の60%強を占めており、世界最大のハイブリッド自動車市場である。一方、第2位であるEU諸国は、世界ハイブリッド自動車販売台数の25%程度を占めている。その一方で、中国は、今までハイブリッド自動車の普及に消極的であるものの、世界

電気自動車需要の 60%以上を占有することで、世界一の電気自動車市場となっている。なお、中国は、電気自動車のみならず、プラグインハイブリッド自動車の販売においても旗を振っている。これによって、これから日本と中国は各国に率先し、次世代自動車の普及を進めていくはずであるが、両国における次世代自動車への需要はハイブリッド自動車と電気自動車を中心に伸びていくと思われる。

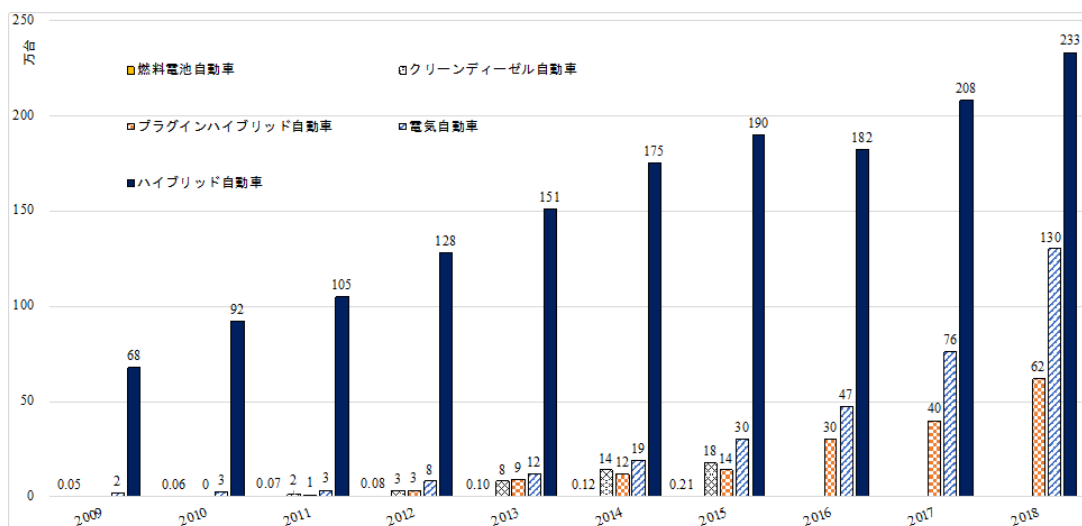


図 3：次世代自動車の販売台数の推移

しかしながら、次世代自動車は環境・走行性能を上げるために、大容量二次電池や高効率モーターを搭載している。そのため、次世代自動車に使われるレアメタル（例えば、ニッケル、コバルトやマンガンなど）や非鉄金属（例えば、銅やアルミなど）の使用量は徐々に増えている。これから各国における次世代自動車の普及に伴い、特定金属資源の枯渇問題が発生する恐れがある。これから各国政府・各自動車メーカーは次世代自動車の持続的な普及を図るためには、環境性・経済性が両立できる使用済み次世代自動車の回収・リサイクルシステムを構築し、使用済み次世代自動車から特定金属資源を効率よく回収した上で、自動車の製造段階に活用することが不可欠である。ただし、各国政府は、次世代自動車に適したリサイクル政策を導入しておらず、使用済み次世代自動車のリサイクルを民間企業のリサイクルスキームに頼っている。そこで、日本国内から発生する中古次世代自動車の大半は開発途上国に輸出されており、新たな越境環境汚染と資源流出の問題が懸念される。一方、EU 諸国、日本、中国を含めて、世界各国における中古次世代自動車・部品の大量輸出・広域移動により、フォーマルな自動車リサイクルルートで回収できる使用済み

次世代自動車・部品は極めて少ない。インフォーマルかつ不法的な自動車リサイクルルートは使用済み次世代自動車を適切に処理できない場合、天然金属資源の浪費や、リサイクル段階における環境汚染問題が発生する可能性が高い。そのため、これから各国政府は健全な次世代自動車リサイクル政策を導入し、使用済み次世代自動車に含まれる特定金属資源を効率よく回収するために、中古次世代自動車に関する国内外の流通ルート・状況を考察した上で、回収可能な使用済み次世代自動車台数を正確に把握しなければならない。

第4章 次世代自動車の流通実態の分析と使用済み自動車の発生台数の推定

-日本のハイブリッド自動車を中心に-

第4章では、ハイブリッド自動車の普及を牽引している日本を対象に、日本におけるハイブリッド自動車の販売に影響を与える要因を特定し、今後日本のハイブリッド自動車の販売台数を推定した。その後、日本の自動車抹消登録率、日本国内の使用済み次世代自動車・関連部品の回収台数、中古ハイブリッド自動車の輸出台数を用いて、これから日本国内で回収できる使用済みハイブリッド自動車台数を試算した。

そこで、本研究が分析したところ、「1人あたりの名目GDP（1,000USドル）」、「ハイブリッド自動車のモデル数」と「エコカー補助金の有無（ダミー変数、有=1、無=0）」は日本のハイブリッド自動車の販売台数と相関があることがわかった（表2）。

表2：ハイブリッド自動車の販売台数と本研究で考慮した影響要因の相関関係

	Coefficients	Standard error	T Stat	P-value
Intercept	-473324.8	223742.7	-2.1	0.06
1人あたりGDP（1,000USドル）	10241.0	5834.6	1.8	0.10
ハイブリッド自動車モデル数	18192.8	1332.5	13.7	3.055E-08
エコカー補助金の有無	148793.2	73710.1	2.0	0.07
Multiple R		0.99		
R Square		0.99		
Adjusted R Square		0.98		
Standard error		62106.3859		

*非標準化解

本研究は上記の分析結果に基づき、これから日本におけるハイブリッド自動車の販売台数を予測すると、2030年に、日本におけるハイブリッド自動車の年間販売台数が約252万台に上る（図4）。

一方、自動車は車体劣化・自動車の買い替えなどの原因により、一定時間が経過すれば抹消登録される。本研究は日本の自動車抹消登録率を用いて、これから日本における抹消登録されるハイブリッド自動車の台数を試算すると、2030年には、日本における抹消登録されるハイブリッド自動車が約134万台に上ることがわかった。ただし、「抹消登録された自動車」には、「使用済み自動車」の他、「一時抹消登録される自動車（日本国内中古車在庫増加数）」、「輸出中古自動車」と「20万円以下の輸出中古自動車」も含まれている。そこで、大量の中古ハイブリッド自動車は日本から発展途上国に輸出されているため、2030年には、日本の中古ハイブリッド自動車輸出台数が約80万台に上ることに対し、日本国内で回収できる使用済みハイブリッド自動車は約12万台に止まってしまう（図5）。

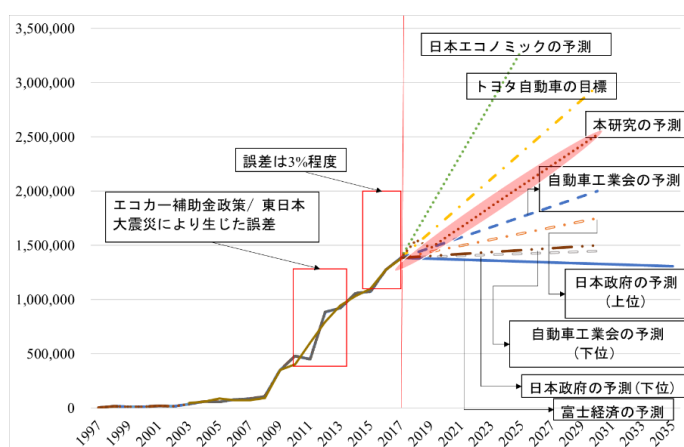


図4：日本におけるハイブリッド自動車の普及台数の予測

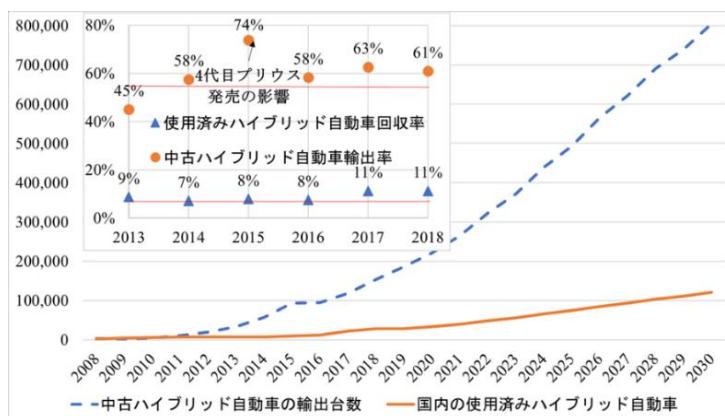


図5：使用済みハイブリッド自動車・中古ハイブリッド自動車輸出台数の推定

さらに、中古ハイブリッド自動車のみならず、日本国内で回収できる使用済みハイブリッド自動車に含まれるニッケル水素バッテリーのうち、約 70%はさらに中古部品として海外の自動車市場に流通していることが分かった。

第 5 章 中国における次世代自動車の中古車流通と使用済み自動車の発生

-電気自動車を中心に-

第 5 章では、最大の電気自動車市場である中国を対象に、中国の社会システムと政策の特徴を勘案した上で、中国政府の次世代自動車販売目標の設定、電気自動車の関連部品の技術開発状況、各種次世代自動車の販売状況を明らかにし、中国における電気自動車の販売台数を予測した。そして、電気自動車・関連部品のカレンダー寿命、関連部品の技術開発の状況を考慮しながら、これから中国における使用済み電気自動車・関連部品の発生台数・種類を推定した。

その結果、これから中国において、電気自動車の価格は安くなるが、その性能は向上できると考える。そのため、今後中国政府が電気自動車向けの補助金政策を廃止しても、電気自動車の年間販売台数は中国政府の計画通りに増加し、2030 年に約 680 万台に達することが分かった（図 6）。その後、本研究は、中国の自動車・リチウムイオンバッテリーのカレンダー寿命に基づき、これから中国の使用済み電気自動車・リチウムイオンバッテリーの発生台数を予測した。その結果、2030 年には、中国で発生する使用済み電気自動車・リチウムイオンバッテリーは、それぞれ 136 万台と 1,136 万個になると予測した。しかしながら、中国国内においては、大量の中古電気自動車・リチウムイオンバッテリーは大都市から中小都市に流れており、最終的にインフォーマルな自動車リサイクルルートで回収・処理される恐れがある。そのため、2030 年を基準に、中国でフォーマルなリサイクルルートで回収・処理できる使用済み電気自動車・リチウムイオンバッテリーの数はそれぞれ 41 万台と 341 万個に過ぎないと考える（図 7）。

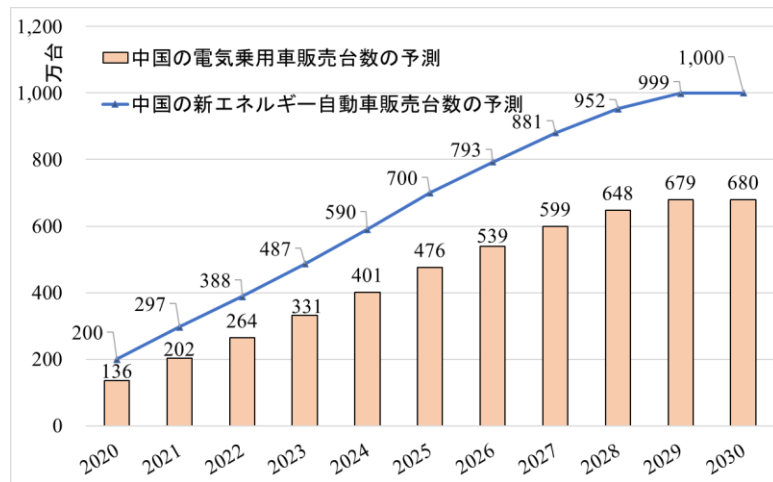


図 6：中国における電気乗用車の販売台数の予測

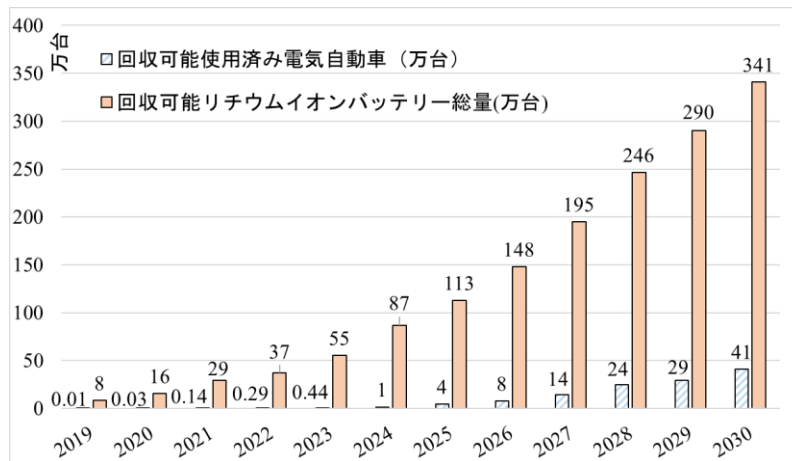


図 7：回収可能な使用済み電気自動車・バッテリー

一方、これから中国の使用済みリチウムイオンバッテリーリサイクル産業の現状と課題（環境面と経済面）を正確に把握するためには、各種リチウムイオンバッテリーの特徴、市場動向、廃棄状況を考察・分析しなければならない。本研究では、中国における種類ごとのリチウムイオンバッテリー（リン酸鉄リチウムイオンバッテリー・NCM型三元系リチウムイオンバッテリー）の市場占有率を把握した上で、これから中国における各種使用済みリチウムイオンバッテリーの発生量を試算した。その結果、2030年の使用済みNCM型三元系リチウムイオンバッテリーの発生量は約1,077万個であり、使用済みリン酸鉄リチウムイオンバッテリーの発生量は約59万個であることを明らかにした（基礎シナリオ）。言い換えれば、これから中国で発生する使用済みリチウムイオンバッテリーは主にNCM型三元系リチウムイオンバッテリーであると判断できる。さらに、NCM型三元系リチウムイオンバッテリーは、その正極材に使われるニッケル、コバルト、マンガンのそれぞれの割

合によって、NCM111、NCM523、NCM622 と NCM811 に分類できる。本研究は、種類毎の NCM 型三元系リチウムイオンバッテリーの使用状況を把握・予測した上で、これから中国で発生する使用済み NCM 型三元系リチウムイオンバッテリーは、主に NCM622 と NCM811 型三元系リチウムイオンバッテリーであることを明らかにした。

第 6 章 ハイブリッド自動車の国際流通と環境影響評価

-ニッケル水素バッテリーを中心に-

第 6 章では、日本のハイブリッド自動車に使われるニッケル水素バッテリーを対象に、ニッケル水素バッテリーの構成素材、マテリアルフローを明らかにした上で、ライフサイクルアセスメントの手法を用いて、ニッケル水素バッテリーの環境影響評価を行った。そして、第 4 章で推定した日本の中古ハイブリッド自動車・関連部品の国際流通状況・回収可能台数が、日本のバッテリーリサイクルシステムに与える環境的・経済的影響を定量的に評価した。

その結果、ニッケル水素バッテリーのライフサイクルで発生する環境負荷のみを見ると、「リサイクルなし」のシナリオに比べて、「リサイクル」及び「リユース・リサイクル」のシナリオは、ニッケル水素バッテリーのライフサイクルで発生する各種環境負荷が高い。しかしながら、使用済みニッケル水素バッテリーをリユース・リサイクルすることによって、新品のニッケル水素バッテリーの製造を回避でき、大量の金属資源も回収できる。従って、ニッケル水素バッテリーのライフサイクルで発生する環境影響を考察したところ、「リサイクルなし」のシナリオに比べて、使用済みニッケル水素バッテリーをリサイクルできれば、約 26kg の二酸化炭素の排出と 106MJ のエネルギー消費量（主に天然ガスと石炭の燃焼由来するエネルギー）が増加するが、0.66kg の資源消費（主にニッケルとコバルトを始めとする金属資源）が回避でき、0.036m³ の最終処分場の延命化が図られる。さらに、使用済みニッケル水素バッテリーをリユース・リサイクルすることができれば、「リサイクルなし」のシナリオに比べて、約 83kg の二酸化炭素の排出、1.37kg の資源の消費、0.044m³ の最終処分地の確保、そして 1,611MJ のエネルギー消費が減少する。言い換えれば、使用済みニッケル水素バッテリーを効率よく回収した上で、さらにリユースとリサイクルすることが重要である（図 8）。

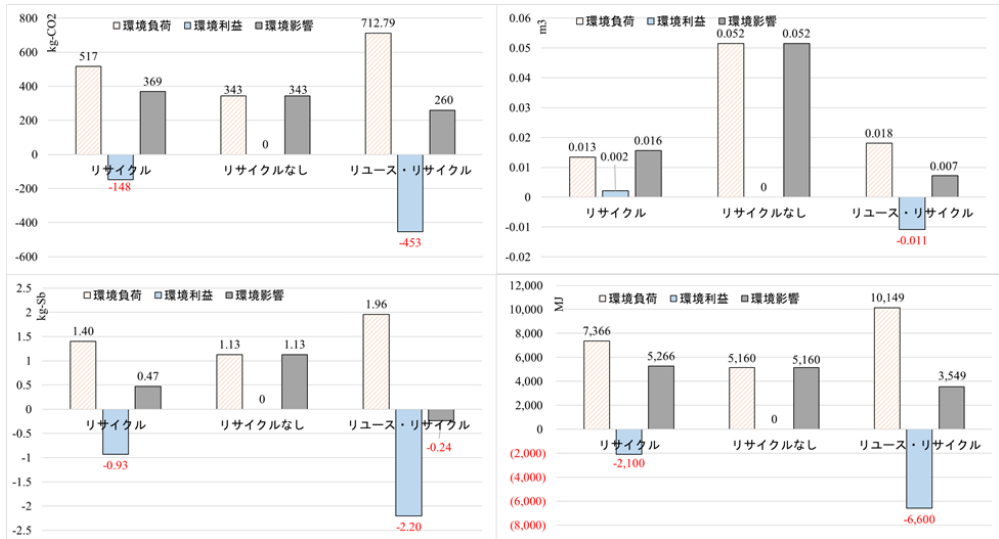


図 8：各シナリオにおけるニッケル水素バッテリーの環境影響

そして、これから日本のニッケル水素バッテリーリサイクル業者は、使用済みバッテリー回収率の向上・バッテリーリサイクル技術を改善できれば、使用済みニッケル水素バッテリーをリサイクルすることによって約 1,500 円/個の利益が得られる。

さらに、日本で回収できる使用済みハイブリッド自動車に含まれるニッケル水素バッテリーの回収率を 30%から 58%に上げ、回収されたニッケル水素バッテリーをリサイクルすれば、2030 年に、約 879t の二酸化炭素の排出（2018 年日本の二酸化炭素排出量の約 0.00008%に相当）と 3,583GJ のエネルギー消費量（2017 年日本の一次エネルギー消費量の約 0.00002%に相当）が増加するが、約 22t の資源節約と 1,214m³ の最終処分場を確保（廃棄物減少）できる。なお、回収された使用済みニッケル水素バッテリーをリサイクルだけでなく、さらにその一部（全体の 18%）をリユースできれば、約 2,585t の二酸化炭素の排出の削減、10t の資源節約、38,285GJ のエネルギー消費量の減少が見込まれ、環境負荷の削減効果がより大きいことが分かった（2030 年基準）。

第 7 章 中国における電気自動車のリチウムイオンバッテリーの環境影響評価

第 7 章では、中国の電気自動車に汎用されている NCM 型三元系リチウムイオンバッテリーを対象に、各種 NCM 型三元系リチウムイオンバッテリーの構成素材、マテリアルフロー、市場占有率の変遷を考察した上で、ライフサイクルアセスメントの手法を用いて、中国における各種 NCM 型三元系リチウムイオンバッテリーの生産からリサイクルまでの環境影響を定量的に評価した。その後、第 5 章で推定した中国における使用済み電気自動

車・関連部品の回収可能台数、各種使用済み NCM 型三元系リチウムイオンバッテリーの発生台数の変遷が、中国のバッテリーリサイクル産業に与える環境的・経済的影響を定量的に評価した。

その結果、中国において、NCM 型三元系リチウムイオンバッテリーの種類は NCM111 から NCM523、NCM622、NCM811 に切り替えており、リチウムイオンバッテリーに使われるコバルトとマンガンの使用量は減っている。このようにバッテリー種類が変化していく中、リチウムイオンバッテリーのライフサイクルで発生する環境影響は低下している。例えば、バッテリーライフサイクルの二酸化炭素の排出量は約 2,740kg から 2,460 kg に減少、資源消費量は 13 kg から 7 kg に減少、エネルギー消費量は 42,500MJ から 39,200MJ に減少した。また、各シナリオにおいて、リチウムイオンバッテリーの環境影響を比較すると、「リサイクルあり」のシナリオで発生する環境影響は「リサイクルなし」のシナリオで発生する環境影響を下回っている（図 9）。

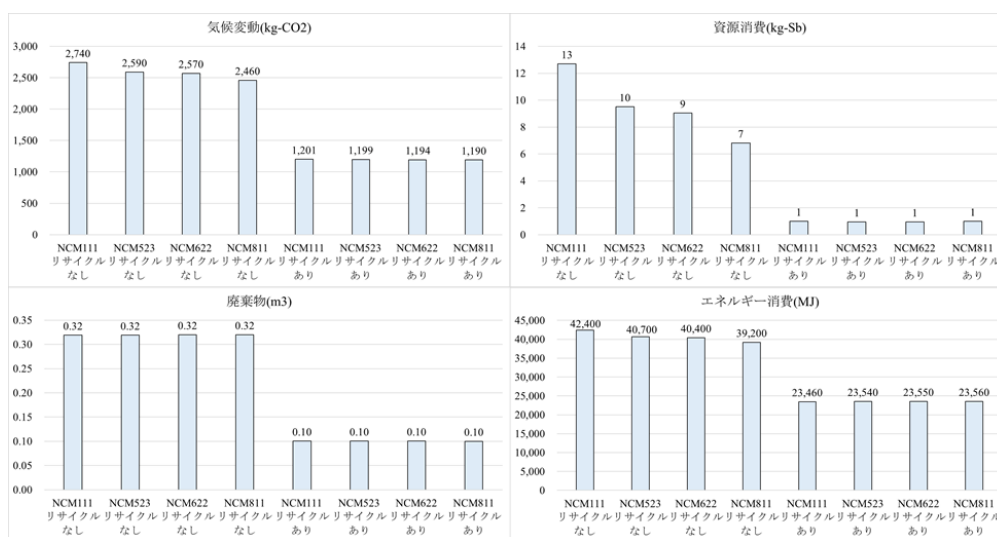


図 9：各種リチウムイオンバッテリーの環境影響の比較

さらに、各種使用済みリチウムイオンバッテリーの発生台数が変わっても、電気自動車の使用段階に交換された使用済みリチウムイオンバッテリーの回収率を 30%から 100%に改善することで、各種環境負荷（二酸化炭素の排出量、資源消費量、最終処分の廃棄物量とエネルギー消費量）がさらに三分の一以下になる（2030 年を基準）。即ち、これから中国政府とリチウムイオンバッテリーのリサイクル業者は、使用済みリチウムイオンバッテリーの回収率を向上させていくことが最も重要な課題である。

ただし、これからリチウムイオンバッテリーの種類が NCM111 から NCM811 に転換すれば、使用済みリチウムイオンバッテリーから回収できるコバルトは大幅（約 75%）に減少する。そのため、1 個の使用済みリチウムイオンバッテリーをリサイクルすることで得られる利益は、5,086 中国元から 2,955 中国元に減少する可能性が高い（約 78,000 円から 45,315 円）。従って、中国の電気自動車に使われるリチウムイオンバッテリーの種類が急速に NCM111 から NCM811 に切り替わる中で、これから中国におけるリチウムイオンバッテリーのリサイクル産業の採算性は 2023 年から悪化していく可能性がある。しかし、バッテリーの需要増が資源相場の高騰を招くことが予想されるため、この採算性が大きく改善できる可能性もある。

第 8 章 結論

第 8 章では、本研究の学術的・社会的貢献、主な研究結果を総括し、これから各国の次世代自動車普及政策、使用済み次世代自動車リサイクルシステムの改善策を提言した上で、今後の研究課題を記述した。

4. 政策提言

本研究は上記の研究成果に基づき、次のような政策提言を導出した。

①これから各国は、次世代自動車の持続的な普及を遂げるために、自国のエネルギー構成を考慮しながら、各種次世代自動車の環境性能を定量的に評価し、一貫性がある次世代自動車普及政策を提示すべきである。

②今まで各自動車メーカーは次世代自動車の技術開発・性能改善に目線を向けたが、これから次世代自動車の環境配慮設計や、使用済み次世代自動車・関連部品のリユース、リサイクルに関連する技術開発と資源循環システムの構築に注力すべきである。

③各自動車メーカー・バッテリー製造業者は、次世代自動車、特に電気自動車の走行性能・環境性能を向上させるために、頻繁に駆動用バッテリーの性能と構成素材を変更している。一方、これから電気自動車を始めとする次世代自動車の安全性の向上を図るためには、各自動車メーカー・バッテリー製造業者はリチウムイオンバッテリーのエネルギー密度のみならず、その安全性の向上にも力を注ぐべきである。

④これから次世代自動車の販売拡大に伴い、その製造段階における特定金属資源の消費量が急増していくはずである。まず、バッテリーの再生とリユースの可能性を最大化する

とともに、使用済み次世代自動車から特定金属資源を効率的に回収し、次世代自動車の製造段階に再投入できる仕組みづくりが必要である。特に日本と中国は、早急に使用済み次世代自動車のリユース・リサイクル政策を導入し、使用済み次世代自動車から回収した特定金属資源を自動車の製造段階に再利用できる資源循環システムとネットワークを構築すべきである。

⑤使用済み次世代自動車・バッテリーの回収率は、そのリサイクル段階の環境影響・採算性に大きい影響を与えるため、今後、各国政府・自動車関連業界の多様なステークホルダーは次世代自動車・バッテリー技術の最新動向を把握した上で、中古次世代自動車・駆動用バッテリーの流通ルート、国内外におけるモニタリング、使用済み自動車・関連部品の回収率向上に力を振り絞ることが重要である。特に、発展途上国には適切な自動車リサイクルシステムが存在しないため、先進国から輸入した中古次世代自動車を効率的にリサイクルすることができない。自動車製造国からの環境技術協力とともに、円滑な国際資源循環ネットワークを築き上げることも重要であろう。

5. 本研究の貢献

本研究の学術的な貢献は、次世代自動車に関する先行研究や学術動向、国際的な環境政策の比較分析・考察のみならず、幅広い分野の定量的・定性的なデータを地道に調査・収集した上、社会科学や環境科学の分析手法を駆使し、持続可能性科学の研究・分析モデルを提示したことにあり、本研究結果から導出・提示した様々な科学的な分析データは、次世代自動車に関する環境政策、国際資源循環・越境環境汚染・資源外交問題を議論する際、重要な示唆を与えられると考えており、そこに本研究の社会的意義があると考えている。

論文審査の結果の要旨

学位の種類	博士（学術）	氏名	王 燦堯
学位論文の 題名	次世代自動車の普及政策と国際環境問題に関する日中比較研究 -使用済み HEV と EV の発生予測と環境影響評価を中心に-		
論文審査担当者氏名 (主査) 劉 庭秀 , 青木 俊明 , 池田 亮 佐藤 正弘 , トレンチャー・グレゴリー (環境科学研究科)			
論文審査の結果の要旨 (1,000 字内外) <p>近年、世界的な次世代自動車の普及に伴い、自動車の電動化、軽量化が急速に進んでいる。しかし、次世代自動車の製造には貴金属類やレアメタルを投入する必要がある、これらの資源の有効利用と再資源化が急務となっている。本研究は、これらの研究背景に基づいて三つの目的を設定している。まず、次世代自動車の普及動向を把握し、次世代自動車の普及がもたらす新たな環境問題を考察することである。次に次世代自動車の普及台数を推定し、使用済み次世代自動車の発生及び回収モデルを構築することである。最後は次世代自動車の駆動用バッテリーを事例に、その生産からリユース、リサイクルまでのプロセスにおける環境影響を評価することである。</p> <p>第 1 章は、本研究の背景を紹介し、研究目的を設定した上で、研究方法と論文の構成について記述した。第 2 章では文献書誌学の手法を用いて、各種次世代自動車に関連する国際的な学術研究の動向を俯瞰的に考察し、電気自動車のような次世代自動車の学術研究は技術開発が中心となっており、環境学の議論が必要であることを明らかにした。そして、第 3 章では、日本、中国、EU とアメリカを中心に、各国における次世代自動車の普及政策、技術開発の最新動向を比較分析した上で、今後各国における次世代自動車の普及動向を分析考察し、次世代自動車の普及と技術開発は、日本 (HEV) と中国 (EV) がリーダーシップを取っていることと、次世代自動車の普及がもたらす新たな環境問題を明確にしてきた。次に、第 4 章ではハイブリッド自動車を事例に、これから日本におけるハイブリッド自動車の販売台数と使用済みハイブリッド自動車の発生台数を予測した。そして、日本と発展途上国における中古ハイブリッド自動車・関連部品の流通状況を把握した上で、今後日本における使用済みハイブリッド自動車・ニッケル水素バッテリーの回収モデルを構築した。本研究で提案した推定モデルは、先行研究の弱点を大きく改善したと言える。第 5 章では、中国の電気自動車に着目し、これから中国における電気自動車の販売台数、使用済み電気自動車・リチウムイオンバッテリーの発生量を推定した。そして、中国の中古自動車・バッテリーの流通状況を把握してから、今後中国国内で回収できる使用済み電気自動車・リチウムイオンバッテリーの台数を試算した。また、リチウムイオンバッテリーの種類毎の市場占有率の変化を予測した上で、今後中国で発生する使用済みリチウムイオンバッテリーの種類毎の発生量を明らかにした。第 6 章は日本のハイブリッド自動車に使われるニッケル水素バッテリーの生産からリサイクル及び最終処分までの環境影響を、ライフサイクルアセスメントを用いて定量的に分析し、世界的に次世代自動車の普及目標を達成するには、希少金属の確保が必要であり、使用済み自動車の適正処理と再資源化が最も重要な課題であることを指摘した。</p>			

また、第 7 章では中国の電気自動車に汎用された各種リチウムイオンバッテリーの構成素材を明らかにした上で、各種リチウムイオンバッテリーの生産からリサイクルまでの環境影響を定量的に評価し、第 6 章の政策提言のエビデンスを示した。第 8 章では、次世代自動車の普及のためには、次世代自動車の製造技術の動向を明確に把握することが必要であり、使用済み自動車及びバッテリーの発生量を正確に推定することが重要であると指摘している。また、国内外における資源循環ネットワークを構築することで、希少金属資源と確保、再生資源の有効利用が実現できると結論づけている。

本論文は、理論的な貢献が大きいとは言えないが、地道な作業によって膨大なデータと資料を収集、分析した実証的な研究である。次世代自動車の普及政策・特定金属資源の有効利用に関する基礎データを示したこと、今後使用済み次世代自動車・駆動用バッテリーのリサイクルシステム・資源循環ネットワークの構築方法を提示したことは、学術的、政策的に高く評価できる。なお、本論文の一部は、**Waste Management**、**Waste Management and Research**、**Recycling** などの著名な国際ジャーナルに投稿され、査読付論文として 7 編が掲載済みである。本審査会は、以上のような研究成果を踏まえて、本論文が修了要件を十分満たしており、氏が自立して研究活動を行うのに必要な高度の研究能力と学識を有するものと判断した。よって、本論文は、博士（学術）の学位論文として合格と認める。