

次世代自動車に関わる要素技術費用の不確実性

紀伊 雅敦・三好 博昭

Uncertainty of cost for component technologies of next generation passenger vehicles

Masanobu Kii / Hiroaki Miyoshi

ITEC Working Paper Series

14-02

March 2014

次世代自動車に関わる要素技術費用の不確実性

Uncertainty of cost for component technologies of next generation passenger vehicles

Institute for Technology, Enterprise and Competitiveness, Doshisha University
Working Paper 14-02

紀伊 雅敦

香川大学 工学部 准教授

761-0322 香川県高松市林町 2217-20

Tel: 087-864-2140

Fax: 087-864-2188

Email: kii@eng.kagawa-u.ac.jp

三好 博昭

同志社大学大学院 総合政策科学研究科 教授

同志社大学 技術・企業・国際競争力研究センター (ITEC) 兼担研究員

602-8580 京都府京都市上京区今出川通烏丸東入

Tel: 075-251-3837

Fax: 075-251-3139

Email: hmiyoshi@mail.doshisha.ac.jp

要旨：

エネルギー消費やCO₂排出を削減する手段として、電気自動車（EV）や燃料電池車（FCEV）等の次世代自動車の開発・普及が求められている。多くの自動車の生産国では、自動車メーカーの取り組みとともに、政府による技術開発投資、普及のための補助事業が行われている。これには、燃料供給インフラといった周辺技術への補助も含まれている。こうした公的投資は、学習効果あるいは量産効果によるコスト低減が見込まれる技術、および、燃料供給インフラとの間に間接的ネットワーク効果を有する技術において、普及の呼び水として正当化されている。EVやFCEVはそうした性質を有する技術と考えられており、将来的には公的投資がなくとも市場競争力を持つようになることが期待されている。

しかし、競争力を持ちうるか否かは将来のコスト低減の程度に依存する。コストが、いつ、どれほど低減するかは技術進歩に依存するため不確実性が高い。従来の技術普及推計では、多くの場合、期待値あるいはシナリオとして特定のコスト低減過程を想定し、その下での市場性を検討していた。一方、次世代技術の市場競争力は、コスト低減効果などのわずかな違いが大きく影響し、こうした想定の間隔により予想される普及率は大きく異なる可能性がある。すなわち、技術開発・普及に対する公共投資の効果には不確実性があり、投資判断においては、こうした不確実性を考慮することが必要であろう。

本稿では、次世代自動車の要素技術のうち、特に価格への影響が大きいと考えられるバッテリーと燃料電池を対象に、コスト見通しに関する文献を調査し、その不確実性の評価を試みた。その結果、現時点では両技術ともに、将来のコスト見通しに関して、技術政策を検討する上で無視し得ない不確実性が存在することを示した。

キーワード：次世代自動車技術，学習曲線，不確実性

謝辞：本研究は科研費基盤研究（B）「次世代自動車の普及政策とそのグローバル・ベネフィットに関する研究」（課題番号：25281071，研究代表者：三好 博昭）の研究成果の一部である。

次世代自動車に関わる要素技術費用の不確実性

紀伊 雅敦／三好 博昭

1. はじめに

運輸部門のエネルギー消費および CO₂ 排出の削減手段として、電気自動車 (EV : Electric Vehicle) や燃料電池車 (FCEV : Fuel Cell EV) 等の次世代自動車の開発・普及が求められている。多くの自動車生産国では、自動車メーカーによるこうした技術の開発および市場開拓の取り組みとともに、政府による技術開発投資、普及のための補助事業が行われている。これには、燃料供給インフラといった周辺技術への補助も含まれている。こうした公的投資は、学習効果あるいは量産効果によるコスト低減が見込まれる技術、および、燃料供給インフラとの間に間接的ネットワーク効果を有する技術において、普及の呼び水として正当化されている。EV や FCEV はそうした性質を有する技術と考えられており、一定の普及水準となるまで公的補助等によりコストをまかなえば、将来的にはこうした補助がなくとも市場競争力を持つようになることが期待されている。

しかし、競争力を持ちうるか否かは、これら技術の将来のコスト低減の程度に依存する。コストが、いつ、どれほど低減するかは技術進歩に依存するため不確実性が高い。従来の EV、FCEV 等の次世代自動車技術の普及推計では、多くの場合、期待値あるいはシナリオとして特定のコスト低減過程を想定し、その下での市場性を検討していた。一方、次世代技術の市場競争力は、コスト低減効果等のわずかな違いが大きく影響し、こうした想定との相違により予想される普及率は大きく異なる可能性がある。たとえば、バッテリーコストの推計に用いられる学習曲線では技術進歩率を仮定するが、その値の変動はコスト低下に影響し、将来の普及率が大きく異なる場合がある。従って、技術開発・普及に対する公共投資の効果には不確実性があり、投資判断において、こうした不確実性を考慮することが必要となる。

本稿では、次世代自動車の要素技術のうち、特に価格への影響が大きいと考えられるバッテリーと燃料電池を対象に、コスト見通しに関する文献を調査し、その不確実性の評価を試みる。以下 2 章では、次世代自動車の普及促進策についての状況を整理し、3 章では次世代自動車の要素技術のコスト推計について既往研究を整理するとともに、『機械統計』に基づき学習曲線を用いたバッテリーのコスト推計の不確実性を検討する。4 章はまとめである。

2. 次世代自動車の普及促進策

次世代自動車には、上述の EV, FCEV のみならず、ハイブリッド自動車 (HEV: Hybrid EV), プラグインハイブリッド自動車 (PHEV: Plug-in HEV), クリーンディーゼル自動車等も含まれる。こうした次世代自動車に対して、多くの国では導入のための補助金や免税等の普及促進策がとられており、加えて、一部の国では HOV (High Occupancy Vehicle) レーンの走行許可など交通政策と連動した優遇策が取られている。

次世代自動車のうち、HEV は搭載車種も増加し日本では本格的な普及が始まっている (トヨタ自動車, 2012)。クリーンディーゼルは欧州で普及が進んでおり (Hansen, 2013)、通常のガソリン車と比較した燃費の良さが評価されている。ただし、EU が提案中の次期 CO₂ 排出規制 (2020 年の新車販売平均で 95gCO₂/km 以下) を達成するためには、クリーンディーゼル車のみでの対応では困難であり、欧州メーカーは EV, HEV の市場投入を進めている (白石, 2009)。EV, PHEV は市販されているものの、現時点では、市場形成期であり普及はあまり進んでいない。また FCEV は本格的な市場投入はされていない状況である。これら技術の普及が進んでいない理由は、根本的にはそれらの技術やコストが既存の自動車と競争できる水準に達していないことが原因である。

EV, PHEV については日・米・欧で国が目標とする普及台数を定め、その達成を目指して車両購入補助や充電インフラ整備事業等の普及策を講じている (次世代自動車振興センター, 2012)。例えば日本の『次世代自動車戦略 2010』では EV, PHEV の販売比率を 2020 年に 15~20% とする目標を設定しており、こうした戦略を根拠として技術開発補助、車両購入補助が行われている。購入補助の例として、EV のリーフでは車両購入補助金が 78 万円であり、これにエコカー減税分等を加えると、約 95~99 万円が優遇される (日産自動車, 2014)。米国では 2015 年までに EV, PHEV を 100 万台導入する目標を設定しており、インセンティブとして、最大 7500 ドルの連邦税控除を提供している。また、充電設備についても商業用では最大 5 万ドル、家庭用設備については 2 千ドルの税還付が受けられる (次世代自動車振興センター, 2012)。また欧州では、例えばフランスで 2020 年の導入目標を 200 万台としており、5 千ユーロの購入補助金が与えられるなど、各国で購入補助、減税、利用料金優遇等の様々な普及措置が取られている (環境省, 2009)。

FCEV については、車両の市場投入に先立ち水素供給設備を整備することが進められている。日本では、2015 年までに 100 カ所の水素供給設備を整備する戦略を立てている。ドイツでは 2015 年までに 50 カ所を整備するため、2 千万ユーロの補助を投入する計画であり、米国カリフォルニア州では 2013 年に 10 カ所程度の整備をするため、1500 万ドル程度の補助金を投入している (総合エネル

ギー資源調査会，2012）。また，EVと同様に，燃料電池の研究開発についても国の補助がなされている。

このように，次世代自動車に対しては普及を促す様々な措置が主に自動車生産国で取られている。これは，環境，エネルギー問題への対応とともに，自動車産業の国際競争力を維持することも狙っている。現時点で未熟な技術であっても，市場での利用を通じて開発に課題をフィードバックすることは必要であり，それが競争力を向上させる原動力にもなる。ただし，想定される課題に対して有効な対策技術を提供できなければ，普及のための各種制度は極めて非効率なものとなる可能性がある。上述の各種補助制度はあくまでも本格的な普及の呼び水であり，それが本格普及に必要なとされる技術革新やコスト低下をもたらさないならば，そのような公的投資は正当化され得ないであろう。

例えば，日本政府によるバッテリーの開発目標（新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会，2008）を見ると，EVを既存自動車の代替技術とするためには，2006年の状況と比較して，バッテリーの重量エネルギー密度を7倍，コストを1/40とすることが必要とされている。一方，現在のEVの主流であるリチウムイオンバッテリーでは，エネルギー密度の理論限界は2006年の3倍程度と想定されており，上記目標値を達成するためには新たな電池開発が求められるが，そのような性能を保証する技術は現時点では知られておらず，目標を達成しうるか否かは不確実な状況である。

技術進歩は本来不確実だが，次世代技術育成のための公的投資を有効に行うには，その不確実性を定量化することが必要であろう。以下では，バッテリーと燃料電池システムについて，既往研究に基づきその不確実性を調査する。

3. 要素技術のコスト推計

将来技術のコストを推計する方法として，既往研究では，主に1) 材料，加工プロセスに要する費用を積み上げる方法と，2) 過去の出荷情報に基づき推計される学習曲線を用いる方法の2通りが用いられている。前者では，不確実性を有する性能，価格等に対して，専門家へのヒアリングに基づくレンジを与え，その下でモンテカルロ法等を用いることにより不確実性を表現している（Rempel et al.: 2013, Gallagher et al.: 2012, James and Spisak: 2012）。なお，この方法では，製造設備の稼働率に基づき生産量あたりの資本費用を算定することで量産効果を現している。後者では，累積出荷量に対する価格の関係を関数で表現している（Kamath, 2009）。燃料電池については市販されていないが，既往の技術を参考に技術進歩率を設定した分析（Tsuchiya and Kobayashi, 2004）や，サンプル段階の製造コストや複数の文献を参考に学習曲線を推計する研究

(Schoots et al., 2010) が見られる。以下では、これらの文献におけるコスト見通しと不確実性を整理する。

3.1 積み上げ型コスト推計

1) バッテリーコスト

ここでは、Rempel et al. (2013) の方法を紹介する。対象は、PHEV に搭載するリチウムイオンバッテリーであり、有効な容量を 5.5kWh (EV モードでの走行距離 20mile, SOC80%, 劣化率 30%の場合実容量 9.8kWh) と設定している。コストは、工場における製造コストであり、製造に必要とされる素材、中間財、労働、設備費、設備維持費、資本費は考慮されているが、研究開発費、販売費、一般管理費、保険、税は対象としていない。年間生産量が 25 万パックの量産時を想定しており、材料費については、製造業者等のヒアリングに基づき幅を持たせている。この幅に基づきモンテカルロ法によりシステムコストの不確実性を表現している。なお、陰極については複数の材料を検討している。

以上の仮定の下で、可能性の高いバッテリーコストは\$220/kWh から\$470/kWh の間であると推計されている。なお、当然のことながら、劣化率が低いケースの方が有効バッテリー容量に対するコストは低く推計されている。

2) 燃料電池コスト

James and Spisak (2012) は、2012 年の情報に基づき Proton Exchange Membrane 型燃料電池システムのコストを推計している。対象は FCEV に搭載するシステム出力 80kW の燃料電池であり、生産量を年間 1000 台から 50 万台まで変化させた場合を推計している。コストについては、上述のバッテリーのケースと同様、研究開発費や一般管理費等は含まない生産コストとされている。

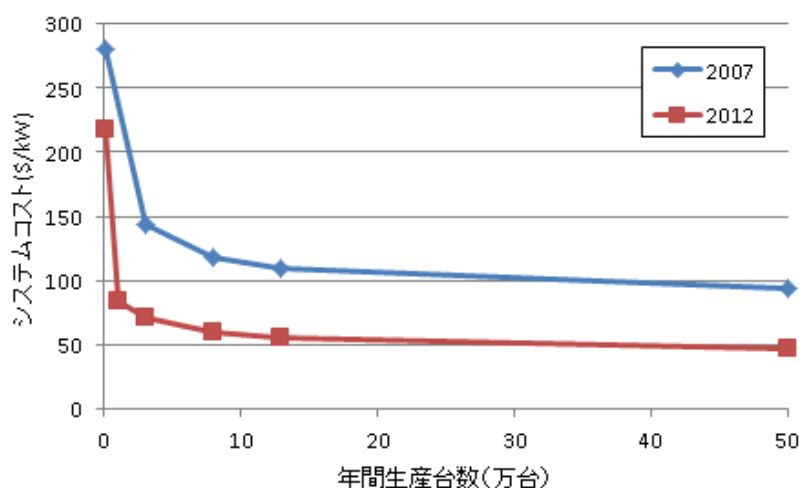
James and Spisak (2012) の主な仮定と年産 50 万台の場合の結果を表 1 に示す。ここでは、有効出力あたりの白金使用量は 0.22g となっている。これは、2008 年の日本の使用量の約半分となっている (宮田, 2008)。また、コスト削減のために白金使用量を大幅に削減すべきとの提言がされているが (経済産業省, 2011), 白金価格を\$1100/troz (\$35/g) と仮定するとシステムコストに占める割合は 16%である。スタック以外のコストが半分程度を占めていることから、白金の使用量削減のみならず、総合的なコスト削減が必要と考えられる。

表1 燃料電池コスト推計の仮定と結果

Characteristic	Units	
Stack power	kWgross	88
System power	kWnet	80
Cell power density	mWgross/cm2	984
Peak stack temperature	° C	87
PGM loading	mg/cm2	0.2
PGM total content	g/kWgross	0.2
PGM total content	g/kWnet	0.22
Pt cost	\$/troz.	1100
Stack cost	\$/kWnet	20
Balance of plant cost	\$/kWnet	26
System Assembly and Testing	\$/kWnet	1
System cost	\$/kWnet	47

出所) James and Spisak (2012) に基づき筆者作成

推計された生産台数に対するシステムコストを図1に示す. 2007年と比較して, 2012年には量産段階でのコストは約半分に低下している.



出所) James and Spisak (2012) に基づき筆者作成

図1 生産台数に対するシステムコスト

また, 材料費, 効率性に幅を持たせた場合のシステムコストの不確実性も, バッテリーコスト分析と同様にモンテカルロ法を用いて推計されている. 前提条件の想定する不確実性については, James and Spisak (2012) を参照されたい.

この前提条件に基づく分析の結果, 年産 50 万台の場合の 90%信頼区間は \$43/kW から \$52/kW と算定された. なお, MIT の想定する 2035 年の燃料電池のコスト (Bandivadekar et al, 2008) は \$50/kW であり, 量産化が進めば, おおむねその水準は達成できると推計されていることになる. また, NEDO 想定する出

力 100kW の燃料電池（NEDO 燃料電池・水素技術開発部，2010）では，システムコストは \$4300~5200 となり，本格普及時のコスト想定であるシステムコスト 50 万円に近づいていると言える。

3.2 学習曲線によるコスト推計

1) 既往研究におけるコスト推計結果

学習曲線によるコスト推計は，当該技術の累積出荷量と価格に基づき技術進歩率が推計されるが，市販されていない技術についてはこれらのデータを得ることが困難である．このため，類似する他の技術の進歩率を用い将来価格を推計する研究も見られる．

Propfe et al. (2013) はバッテリーと燃料電池について累積生産量が 10 万台までは積み上げ型推計の結果を活用し，10 万台以上では保守的な設定の既往研究（EU Coalition, 2010）を参考に学習曲線を設定している．この結果を販売台数推計に利用しているが，論文中では次世代自動車価格は明示されていない．

Mayer et al. (2012) は累積生産量と特許数を説明変数とした学習曲線を推計し，燃料電池とリチウムイオン電池のコストを推計している．ただし，燃料電池についてはデータを得られなかったことから，類似技術として太陽電池の進歩率を用いている．得られたモデルに対し，進歩率，年間生産台数，特許出願数に関する感度分析を行い，2020 年には，燃料電池で EU Coalition Study が目標とする 43 ユーロ/kW は達成可能であり，リチウムイオンバッテリーは 309 ユーロ/kWh~408 ユーロ/kWh と推計している．バッテリーについては，目標値の 300 ユーロ/kWh を達成するには特許数の増加を加速する必要があるとしている．

Yabe et al. (2012) らは費用最小化を目的関数とする線形計画問題として車種構成を推計するモデルを作成し，PHEV, EV 等のバッテリーコストに学習曲線を仮定することで，次世代自動車の普及推計を行っている．このモデルの下で，バッテリーの初期コスト，進歩率の感度分析を行っている．バッテリーコストの推移は初期価格，技術進歩率によって大きく異なり，2020 年には 8 万円/kWh~11 万円/kWh, 2045 年には 4 万円/kWh~8 万円/kWh と推計している．加えて，40 年間の長期的なコスト最適を考えた場合，初期にバッテリー導入量を増やしてコストを低下させることが総コストを最小化することになる．その場合，バッテリーコストは，2020 年に 4 万円/kWh, 2045 年には 1 万円以下と推計されている．

2) 『機械統計』に基づく学習曲線の推計と不確実性

ここでは，『機械統計』（経済産業省，1996~2012）に基づきリチウムイオンバッテリーの学習曲線とその信頼区間の推計を試みる．『機械統計』では月

別のリチウムイオンバッテリーの生産量、生産金額が与えられている。ここでは、生産金額を生産量で除することにより単価を求め、それが学習曲線に従うと仮定した。なお、リチウムイオンバッテリーは車載用とその他に分けられている。車載用は2012年から、その他は1996年から統計が存在する。また、長期的な変化を把握することが目的のため、月別の統計を年間値に集計し分析に用いる。車載用は統計期間が短いため、その他用のみを分析する。

図2は1996年から2013年までのリチウムイオンバッテリーの累積生産量と価格をプロットしたものである。ただし、ここでは1996年より前の生産量はゼロと仮定している。

これを見ると、生産当初には30万円/kWh程度だった価格が、累積生産量の増加に対して急激に減少している様子がわかる。ただし、価格が15万円/kWhより高い領域（累積生産量5700MWh以下、2001年1月まで）とそれ以下の領域では、価格低下の曲率に差が見られる。

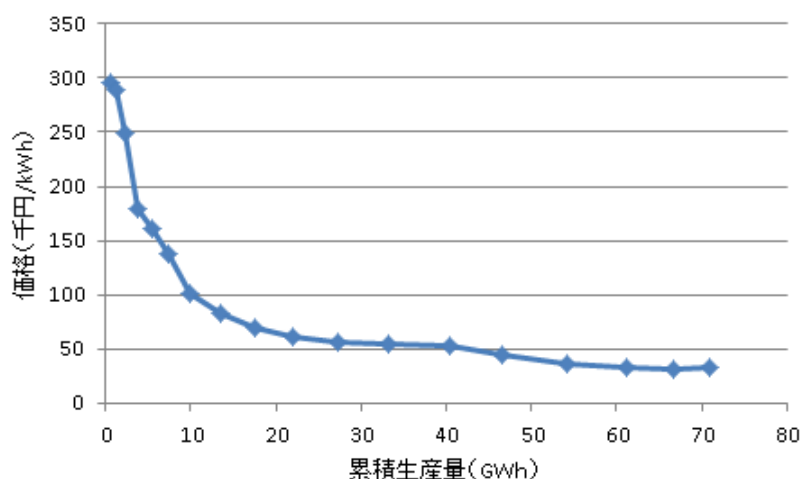


図2 リチウムイオン電池の累積生産量に対する価格

学習曲線は Mazzola and McCardle (1997) を参考に以下の式で表現する。

$$PC = \alpha x^\beta + \gamma$$

ここで、 PC は価格、 x は累積生産量、 α 、 β はパラメータである。 γ は価格の下限值を表すが、ここではパラメータと同時に推計する。全データを用いた場合と、2001年以降のデータを用いた場合の推計値を図3に示す。

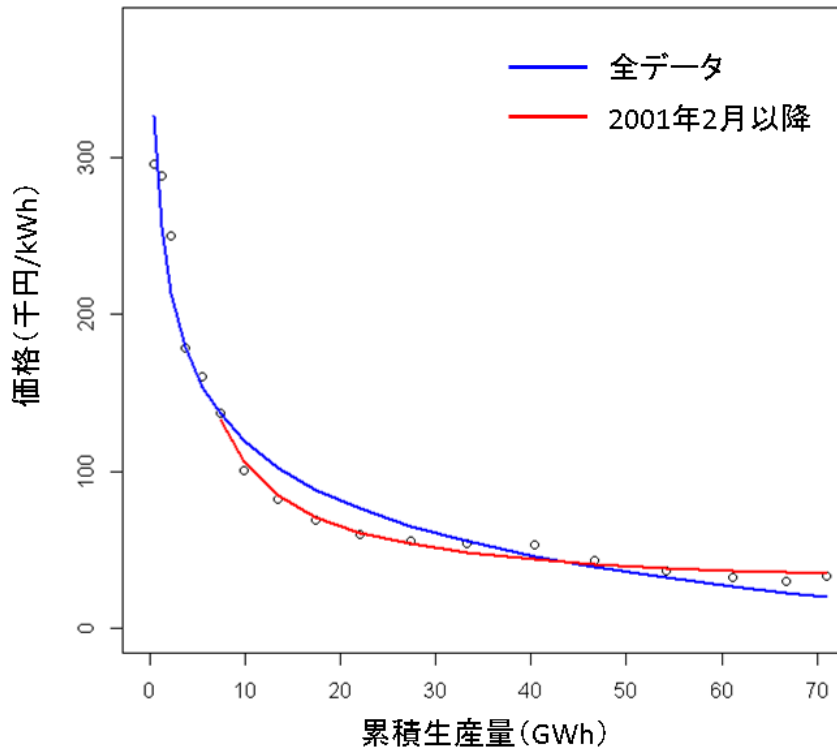


図3 学習曲線の推計結果

ここで、パラメータは、誤差分布に正規分布を仮定した最尤法により求めた。図を見ると、全データを用いた学習曲線では初期段階のデータに対するフィッティングはよいが、累積生産量が10GWh以上の領域では実績と大きくずれている。特に、直近の価格に対しては過小推計となっており、50GWh以降は乖離が大きくなる傾向が見られる。一方、2001年以降のデータを用いた場合には、対象期間のデータへのフィッティングはよく、また、足下の推計誤差も小さい。

パラメータ値を見ると、全データを用いる場合には、価格の下限値が負となっており、将来推計にそのまま用いることは適切ではないといえる。一方、2001年以降のデータを用いたところ、価格の下限値は約22,000円と推計された。この値は、過去のデータから統計的に推計されたに過ぎず、技術的な根拠を有しているわけではないが、3.1節で示したRampelらの下限に近い値となっている。将来の価格下限値について信頼できる情報が与えられれば、それを固定して、残りのパラメータを求めることも可能だが、今回推計された値に近ければ、 α 、 β についても同様の値を取るものと考えられる。以降では2001年以降のデータを用い推計された学習曲線について検討する。

表2 学習曲線の推計結果

1) 全データ

	α	β	γ (千円)
Parameters	605	-0.127	-333
s.d.	7.05	0.00189	7.09
t-value	85.9	-66.9	-47.0
R^2	0.962		

2) 2001年以降データ

	α	β	γ (千円)
Parameters	741	-0.950	22.0
s.d.	33.1	0.0251	1.10
t-value	22.4	-37.9	20.0
R^2	0.979		

モデルの不確実性には、この学習曲線の推計誤差とともに、パラメータの持つ誤差も影響する。表2に示したように、各パラメータの標準偏差も推計されている。それらの変動するならば、当然のことながら推計結果も変化する。ここでは、各パラメータが推計された期待値と標準偏差を持つ正規分布に従う確率変数と仮定し、モンテカルロシミュレーションによりパラメータの変動が推計価格に与える影響を分析する。

具体的には、パラメータ α 、 β 、 γ について、それぞれの推計値、標準偏差を持つ正規分布に従う乱数を2000組生成し、そのパラメータの組み合わせの下で累積生産量に対する価格を推計した。累積生産量は5GWhから70GWhまで1GWh刻みで設定し、各累積生産量における価格推計値の99%信頼区間を図4に示す。

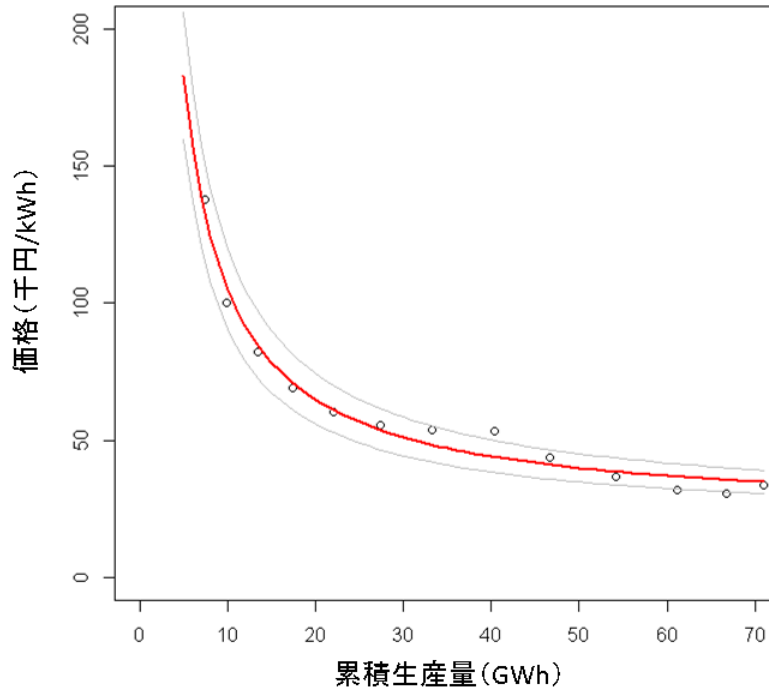


図4 パラメータの変動を考慮した学習曲線の推計結果（99%信頼区間）

信頼区間の幅は累積生産量が増加するに従って縮小し、70GWhでは、8500円ほどの幅となっている。

NEDO 二次電池技術開発ロードマップ（NEDO 燃料電池・水素技術開発部蓄電技術開発室，2010）では，2015年に3万円/kWh，2020年に2万円/kWhを目標としているが，累積生産量に対してこれらの目標が達成される確率を次式で定義する。

$$\Pr(PC \leq PC_U) = \sum_i \delta_i / N$$

$$\text{Where } \delta_i = \begin{cases} 1 & \text{if } PC(x; \theta_i) \leq PC_U \\ 0 & \text{if } PC(x; \theta_i) > PC_U \end{cases}$$

ここで， PC_U は目標価格， N はモンテカルロ法のサンプリング回数， θ_i はサンプリングされたパラメータベクトルを表す。

図5は上記の定義により算定された，3万円/kWhの目標価格を下回る確率を示している。これより，2013年の累積生産量（71GWh）では価格が3万円/kWhを下回る確率は0.1%だが，生産量が増加するに従い確率は上昇し，現在のおよそ倍となる150GWhを超えるあたりで，目標価格を達成する確率が90%となる。なお，車載用とその他のリチウムイオン電池の2013年の単年度の生産量は

7.67GWh であり、今後同じ量を生産しつづけるならば、2020 年までの累積生産量は 130GWh となる。その場合、価格が 3 万円/kWh を下回る確率は 68% である。

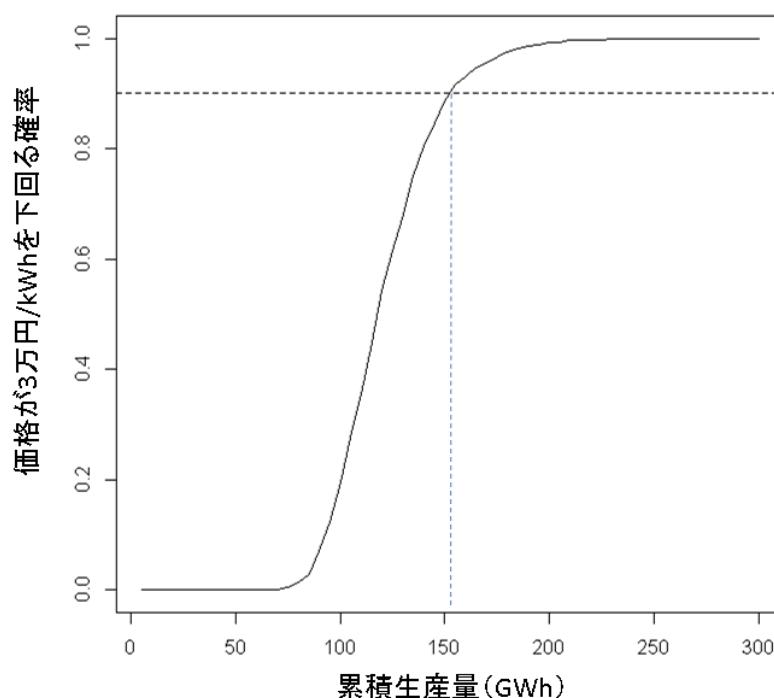


図5 累積生産量に対して価格が 3 万円/kWh を下回る確率

図6は目標価格を 2.5 万円としたときの達成確率を示している。この場合、確率が 90%を超える累積生産量は 660GWh となっている。また、図7は目標価格が 2 万円の場合の確率を表しているが、推計されたモデルでは現在の 10 倍程度の生産量となっても目標価格の達成確率は 0.1%程度である。

以上の結果から、『機械統計』から推測される学習曲線の下では、NEDO の 2015 年目標である 3 万円/kWh については、生産量の増加により達成する可能性があるといえるが、2020 年目標である 2 万円/kWh の達成については、実現可能性は非常に低いと推測される。すなわち、量産に伴う生産技術の習熟のみではロードマップに示された価格低下は困難であり、目標達成には、新材料の開発や評価技術の高度化が必要になるであろうことが示唆される。

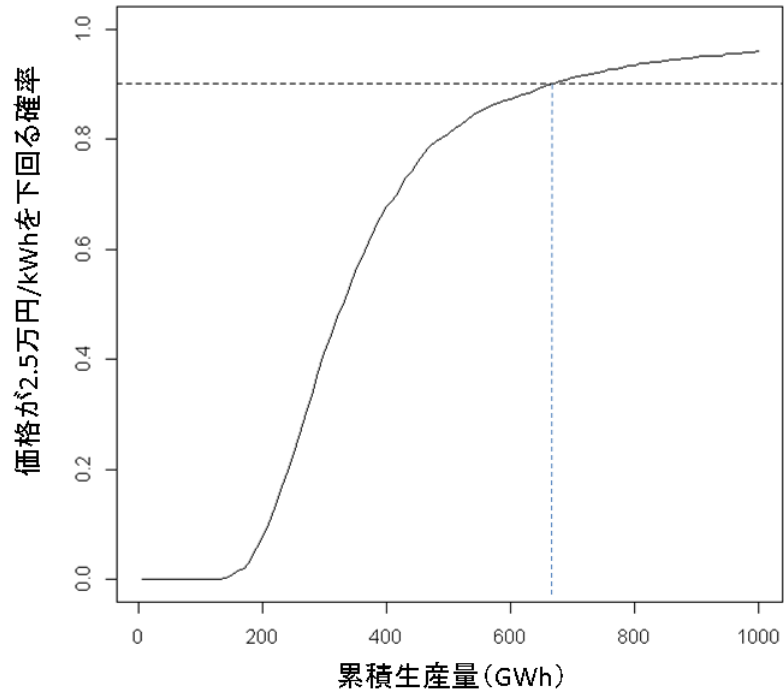


図6 累積生産量に対して価格が 2.5 万円/kWh を下回る確率

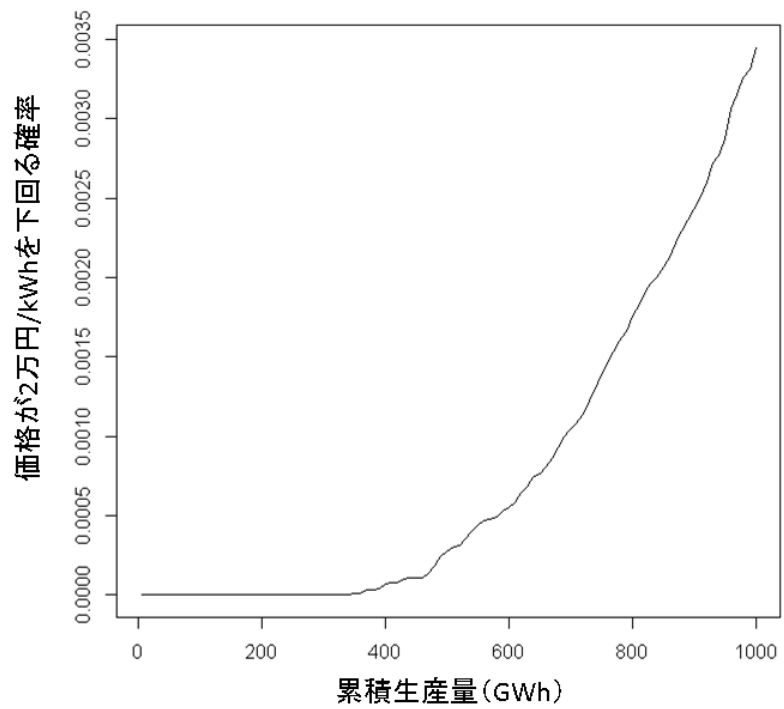


図7 累積生産量に対して価格が 2 万円/kWh を下回る確率

4. おわりに

本稿では、次世代自動車の要素技術として、バッテリーと燃料電池に関するコスト見通しをレビューし、また、リチウムイオン電池については『機械統計』に基づき価格低下とその不確実性を評価した。

文献調査の結果、燃料電池については積み上げ型の方法、学習曲線による方法ともに、量産段階ではスタックコストは NEDO の普及目標を達成しうる水準になると推計されていることがわかった。一方、リチウムイオン電池については、文献調査、および『機械統計』の分析結果ともに、NEDO の 2020 年目標を達成することは困難であると推計された。

燃料電池については、積み上げ型の方法では、生産台数により価格が大きく異なることが示されている。また、燃料電池車の普及には水素供給インフラの整備が必要不可欠となるが、車両が普及しなければ供給インフラの整備も進まないという、間接的ネットワーク効果に起因する現象が発生する。燃料供給インフラが少なければ、燃料電池の生産台数は少なく、車両コストは高いままである。また、車両台数が少なければ、燃料供給インフラの稼働率は低く、インフラ整備は進まず、供給コストも高くなる。このため、燃料電池車の普及のためには、クリティカルマスを超える水素ステーションを公的に投資することが必要と考えられるが、投資の必要額、およびその効果を事前に評価することが不可欠である。なお、水素ステーションについては、欧米と比較して日本では規制が厳しく、整備費用が 1 ステーションあたり 6 億円と高コストであると指摘されている。規制の動向によりコストが変化するため、水素供給コストについても複数シナリオの考慮が必要である。

バッテリーについては、コスト目標の達成が困難と推計されたが、高頻度に短距離走行する業務車両など、車両の使用条件によっては普及の可能性はある。ただし、普及可能性を定量的に評価するには、そのような車両需要がどの程度存在するか把握することが必要である。また、革新型電池の開発が進むとバッテリーコストは更に下がるものと考えられる。しかしながら、未確立の新技术導入についてコスト見通しに定量的な根拠を与えることは困難であり、普及推計にはシナリオを与えることが必要と考えられる。なお、充電スタンド整備については、普通充電では 90 万円～195 万円、急速充電では 300 万円～1200 万円とされており（日本ユニシス、2014）、水素ステーションと比較して安価であり、また、エネルギーの配送も比較的容易である。一方で、電力コストについては今後の発電技術、エネルギー政策によって大きく変わる可能性がある。

以上のことから、次世代自動車のエネルギー源としての水素と電気の利用については、一長一短があり、現在のコスト見通しの下ではどちらの技術が普及する可能性が高いかについては結論を得ることが困難である。今後は、利用者

にとってのコストメリットなど、需要側の条件を組み込んだ普及分析^{18, 21)}に基づき、普及のための公的投資額の比較などの経済性に関する分析が必要である。その場合、ガソリン価格の変動など、他の不確実な要因の影響も考慮することが必要となる。

参考文献

<英文>

- Bandivadekar, A. et al (2008), On the Road in 2035: Reducing Transportation's Petroleum Consumption and GHG Emissions, Report No. LFEE 2008-05, Massachusetts Institute of Technology.
- EU Coalition, McKinsey (2010) A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis,
http://ec.europa.eu/research/fch/pdf/a_portfolio_of_power_trains_for_europe_a_fact_based_analysis.pdf (accessed 6 March 2014).
- Gallagher, K. G. et al. (2012) PHEV Battery Cost Assessment, Vehicle Technologies Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting
http://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/merit_review_2012/energy_storage/es111_gallagher_2012_o.pdf (accessed 6 March 2014).
- Hansen, S. (2013) "European Experience Shows that Cars and Trucks Powered by Clean Diesel Key to Meeting CO2 Emissions Reduction Targets", Diesel Technology Forum,
<http://www.dieselforum.org/index.cfm?objectid=F055AAD8-C229-11E2-970C000C296BA163> (accessed 6 March 2014).
- James, B. D. and Spisak, A. B. (2012) Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications: 2012 Update, Strategic Analysis Inc.
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/sa_fc_system_cost_analysis_2012.pdf (accessed 6 March 2014).
- Kamath, H. (2009) Lithium Ion Batteries for Electric Transportation: Costs and Markets, Electric Power Research Institute
<http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/2009symposium/presentations/kamath.pdf> (accessed 6 March 2014).
- Mayer, T., Kreyenberg, D., Wind, J., Braun, F. (2012) Feasibility study of 2020 target costs for PEM fuel cells and lithium-ion batteries: A two-factor experience curve

- approach, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 37, Issue 19, October 2012, Pages 14463-14474
- Mazzola, J.B. and McCardle, K.F. (1997) The Stochastic Learning Curve: Optimal Production in the Presence of Learning-Curve Uncertainty, *Operations Research*. 45(3): 440-450. May-June 1997.
- Propfe, B., Kreyenberg, D., Wind, J., Schmid, S. (2013) Market penetration analysis of electric vehicles in the German passenger car market towards 2030 (Conference Paper), *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 38, Issue 13, 1 May 2013, Pages 5201-5208
- Rempel, J. et al. (2013) PHEV BATTERY COST ASSESSMENT, TIAX LLC, http://www4.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/resources/merit-review/sites/default/files/es001_barnett_2013_o.pdf (accessed 6 March 2014).
- Schoots, K., Kramer, G.J., van der Zwaan, B.C.C. (2010) Technology learning for fuel cells: An assessment of past and potential cost reductions, *Energy Policy*, Volume 38, Issue 6, June 2010, Pages 2887–2897
- Tsuchiya, H. and Kobayashi, O. (2004) Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 29, Issue 10, August 2004, Pages 985–990
- Yabe, K., Shinoda, Y., Seki, T., Tanaka, H., Akisawa, A. (2012) Market penetration speed and effects on CO2 reduction of electric vehicles and plug-in hybrid electric vehicles in Japan, *Energy Policy*, Volume 45, June 2012, Pages 529-540

<和文>

- 環境省 (2009) 「国内外の環境対応車の動向について」環境対応車普及方策検討会資料 https://www.env.go.jp/air/car/comm_erv-dm/21-01/mat05.pdf (accessed 6 March 2014).
- 経済産業省 (2011) 燃料電池分科会報告書 http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/new_energy/report01_02.pdf (accessed 6 March 2014).
- 経済産業省統計局：機械統計年報 (1996～2012)
- 次世代自動車振興センター (2012) 「平成 23 年度 電気自動車等の普及に関する調査 調査報告書」 http://www.cev-pc.or.jp/chosa/pdf/2011_1_honpen.pdf (accessed 6 March 2014).
- 白石泰基 (2009) 「欧州自動車メーカー、商品戦略の中心を HEV・EV にシフト」 <http://e2a.jp/review/091005.shtml> (accessed 6 March 2014).
- 新世代自動車の基礎となる次世代電池技術に関する研究会 (2008) 「次世代自動車用電池の将来に向けた提言」

<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/images/060828teigen.pdf> (accessed 6 March 2014).

総合エネルギー資源調査会 (2012) 第 28 回基本問題委員会 配付資料

<http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonmondai/28th/28-5.pdf>

トヨタ自動車 (2012) 「トヨタ自動車、ハイブリッド車の累計販売台数が 400 万台を突破」

http://www2.toyota.co.jp/jp/news/12/05/nt12_0514.html (accessed 6 March 2014).

日産自動車 (2014) ホームページ <http://www2.nissan.co.jp/EVENT/TAX/LEAF/> (accessed 6 March 2014).

日本ユニシス (2014) ホームページ, <http://smartoasis.unisys.co.jp/infrastructure/> (accessed 6 March 2014).

N E D O 燃料電池・水素技術開発部 (2010) N E D O 燃料電池・水素技術開発ロードマップ 2010

N E D O 燃料電池・水素技術開発部 蓄電技術開発室(2010)N E D O 二次電池技術開発ロードマップ(Battery RM2010)

<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g100519a05j.pdf> (accessed 6 March 2014).

宮田清蔵 (2008) 燃料電池用白金代替触媒の研究開発動向, N E D O 海外レポート NO.1015

<http://www.nedo.go.jp/content/100105282.pdf> (accessed 6 March 2014).