

各種自動車の総合評価と持続可能なシステム

佐野 充 (sano@info.human.nagoya-u.ac.jp)
〔名古屋大学〕

Integrated evaluation of various automobiles and a sustainable vehicle system

Mitsuru Sano

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Japan

Abstract

Various vehicles are integrally evaluated in energy efficiencies, costs, the sustainability in combination with renewable energy, and the infrastructure transferability to the future vehicle system. Energy efficiency of the electric vehicle (EV) is the most excellent at 0.89MJ/km and plug-in hybrid vehicles (plug-in HV) have also better excellent at 1.03 of gasoline and 0.95 MJ/km of diesel than 1.1 MJ/km of the fuel cell EV (FCEV). Cost performance of plug-in G-HV and EV with 16 kWh battery show much more excellent than that of FCEV. EV as well as plug-in HV shows the good sustainability and the transferability, while FCEV has serious problems such as H₂ supply infrastructure. Evaluated integrally, plug-in HV and EV with about 16 kWh battery are the most promising vehicles in the future. The sustainable vehicle system of plug-in HV in combination with the renewable energy such as solar and wind powers can be made by the following systems; one is that the part of the profit in the wind power side is transferred in the solar power side by the individual green electric power certificate and the other is that the part of the cost in solar power side is transferred in the electricity charge.

Key words

integrated evaluation of various automobiles, sustainable vehicle system, plug-in hybrid vehicle, fuel cell electric vehicle

1. はじめに

自動車の普及はBRICsに広がり、中国の自動車販売台数は2001年の236万台から2006年の721万台となり（世界自動車統計, 2007）、日本の574万台を抜いて世界第2位になった。米国の1650万台には及ばないが、車種によっては市場規模が世界最大級になったものもある。インドの自動車販売台数は2006年度に206万台であるが、年率約20%に急成長している（世界自動車統計, 2007）。世界のエネルギー消費量の約25%は交通・輸送によるものであるが、今後、途上国でもモータリゼーションが進めば、世界のエネルギー需要は益々増えることになる。日本到着の原油価格は、オイルショック以降比較的安定し、2001年くらいまで20 \$/B前後で推移していたが、2004年では38.3 \$/B、2005年では55.8 \$/B、2006年では65.6 \$/Bと急激に高くなった（貿易通関, 1999；通商白書, 2006）。世界の旺盛な石油需要を背景に、原油価格は気候変動や地域紛争のたびに今後も上昇し続けることになるだろう。さらに、自動車が環境に与える負荷を窒素酸化物の例でみると、自動車からの排出は約50%を占め、工場・事業所のほぼ1.5倍にもなり、産業に比べて自動車部門の排出量は多い（環境白書, 2000）。

環境・エネルギー資源問題を考える時に、エネルギー効率が良く、環境負荷の小さい自動車の開発は極めて重要である。また、化石資源の可採年数を考えると、我々は持続可能な交通を追求しなければならず、多大なコストを掛け

ずにそれを実現するには、どのように考えるべきだろうか。

自動車のエネルギー効率やライフサイクルアセスメントに関する報告が既にある（Granovskii et al, 2006；堀, 2006；Zamel & Li, 2006）が、算出根拠となる数値については、産業界の実情を必ずしも反映したものでなく、信頼性の点で課題がある。経済産業省が主導する「水素・燃料電池実証プロジェクト」から2006年9月に各種自動車のエネルギー効率の詳細な結果が報告された（以下、JHFC報告書と略す）（JHFC総合, 2006）。委員会の参加メンバーは学と官から、そして、産業界から各自動車会社、石油会社、ガス会社、製鉄会社等からであり、メンバー構成、陣容などの点から算出された数値そのものの信頼性は高いと思われる。このJHFC報告をもとに、燃料電池車と通常のガソリン自動車のエネルギー効率の比較が既に報告されている（石谷, 2006；荻野・丹下, 2006）。しかし、これらの自動車とディーゼル自動車、ハイブリッド自動車、電気自動車などとの比較は行われておらず、さらに、これらの自動車のコスト、化石資源に依存せず再生可能エネルギーで自動車が運用できる持続可能性、さらには、各種自動車が普及する際の社会基盤整備の容易さである普及移行性などを総合的に検討した報告は無い。また、将来性を最も期待されるPlug-inハイブリッド自動車との定量的で総合的な比較は行われていない。本論文では、自動車のエネルギー効率やコスト、持続可能性、普及移行性などを総合的に検討し、現実的な次世代自動車の形態を評価し、その持続可能なシステムについて検討する。

2. 各種自動車の総合エネルギー効率

JHFC 報告書では、乗用車として、ガソリン自動車 (G-V と以下略す)、ディーゼル自動車 (D-V)、ガソリンハイブリッド自動車 (G-HV)、ディーゼルハイブリッド自動車 (D-HV)、燃料電池自動車 (FCEV)、電気自動車 (EV) を選び、それらの使用する燃料が採掘・精製されて乗用車の燃料タンクに運ばれるまでのエネルギー効率 Well to Tank (以下、WtT と略す) と乗用車のエネルギー消費効率 Tank to Wheel (以下、TtW と略す) を算定し、各乗用車の総合エネルギー効率 Well to Wheel を算出している (JHFC 総合, 2006)。ガソリンや軽油の WtT については、そのプロセスはほぼ確立されており、エネルギーパスの効率の変動は数パーセント以内で小さい。一方、燃料電池自動車に関しては、エネルギーパスはまだ確立しておらず、燃料製造の効率の変動は大きい。また、燃料電池は開発段階であるため、将来技術の向上を見込み、幅を持った総合エネルギー効率が報告されている。その JHFC の報告書の値を表 1 に現在値として示す (JHFC 総合, 2006)。

算出された数値について、根拠や信頼性について検討する。G-V および D-V は現行のシステムに基づいて算出されており、JHFC の推定値の信頼性は高く、1km 走行当り一次エネルギー投入量 (10・15 モード) の総合エネルギー効率は、G-V が 2.7MJ/km ($= 1.21\text{MJ}/\text{MJ}$ (WtT) $\times 2.23\text{MJ}/\text{km}$ (TtW))、D-V が 2.0MJ/km ($= 1.13\text{MJ}/\text{MJ} \times 1.80\text{MJ}/\text{km}$) と報告されている。ここでは、1km 走行するのに必要なエネルギー (エネルギー単位は MJ) を示し、低い数値ほど高いエネルギー効率であることを示す。また、G-HV では市販されているハイブリッド車を参考にパラレル型ハイブリッド方式を採用し、バッテリーはニッケル水素バッテリーで算出されており、JHFC の数値の信頼性は高く、総合エネルギー効率は 1.7MJ/km ($= 1.21\text{MJ}/\text{MJ} \times 1.42\text{MJ}/\text{km}$) と報告されており、G-V を 1 とすれば 0.63 となり、2/3 の燃料消費で済むことになる。バッテリーをニッケル水素バッテリーからリチウムイオンバッテリーに変更した場合の効率は JHFC で報告されていないので、本研究で試算す

ると、バッテリーの充放電効率が 0.86 から 0.90 へ向上する (JHFC 総合, 2006) ため 1.6MJ/km ($= 1.21\text{MJ}/\text{MJ} \times 1.36\text{MJ}/\text{km}$) となる。このように近い将来の技術進歩を考慮して筆者が推定した結果を将来値として表 1 に示す。

市販されている D-HV は現在無いが、D-V 及び G-HV を参考に JHFC 報告書で総合エネルギー効率 1.3MJ/km ($= 1.13\text{MJ}/\text{MJ} \times 1.11\text{MJ}/\text{km}$) と報告されており、数値の信頼性は高い。また、バッテリーをニッケル水素バッテリーからリチウムイオンバッテリーに変更した場合、1.2MJ/km ($= 1.13\text{MJ}/\text{MJ} \times 1.06\text{MJ}/\text{km}$) と本研究で試算される。ここで、ディーゼル車の環境負荷について述べておきたい。NOx や炭素微粒子である「すす」が問題となっている。ディーゼル燃焼領域での NOx 対策に有効な技術がいくつか実施されているが、決定的な技術解となっているとはいえない。NOx や炭素微粒子対策を行うことにより、走行エネルギー効率は 10 % 程度低下する可能性あり、その場合には、総合エネルギー効率は 1.3MJ/km ($= 1.13\text{MJ}/\text{MJ} \times 1.17\text{MJ}/\text{km}$) と試算される。したがって、D-HV の将来値は本研究では 1.2 ~ 1.3 MJ/km と推定する。

電気自動車 (EV) の総合エネルギー効率は電力会社や電気自動車のデータから JHFC では 0.94MJ/km ($= 2.35\text{MJ}/\text{MJ} \times 0.40\text{MJ}/\text{km}$) と報告されており、信頼性は高い。また、バッテリーをリチウムイオンバッテリーに変更した場合、本研究で 0.89MJ/km ($= 2.35\text{MJ}/\text{MJ} \times 0.38\text{MJ}/\text{km}$) と将来値を推定する。

最後に、FCEV について検討する。燃料電池は fuel cell であり、燃料電池自動車を FCV と略すべきであるが、ブレーキ時のエネルギー回生ができない場合、総合エネルギー効率は相当低く、エネルギー回生を可能にするには、バッテリーの搭載は必須である。また、燃料電池の出力応答は鈍く、アクセルを踏み込んでも電気的な出力が上昇するまでのタイムラグは長く、出力応答の点からバッテリーを必要とする。さらに、自動車の始動時に燃料電池は瞬時に発電できないので、すべての電気をバッテリーに相当時間頼って EV 走行することになる。つまり、燃料電池を積んだ電

表 1: 各種自動車の総合エネルギー効率 (MJ/km)

Vehicle	Total energy efficiency (MJ/km)	
	present value	future value
ICEV gasoline vehicle (G-V)	2.7	
ICEV diesel vehicle (D-V)	2.0	
Gasoline hybrid vehicle (G-HV)	1.7	1.6
Diesel hybrid vehicle (D-HV)	1.3	1.2~1.3
Fuel cell electric vehicle (FCEV)	1.3~1.5	1.1(0.99)*
Electric vehicle (EV)	0.94	0.89
Plug-in hybrid gasoline vehicle	—	1.03
Plug-in hybrid diesel vehicle	—	0.97

* The value in the parenthesis is from the JHFC report as the highest future value.

気自動車であり、Fuel Cell EV となり、FCEV と略す。

水素製造プロセスには多くのエネルギーパスが存在する。JHFC で算出された最も高い WtT 効率、製鉄所におけるコークス炉ガスからと苛性ソーダ工場からの副生水素を利用する場合であり、1.27MJ/MJ と報告されており、一方、ナフサ改質の場合には、実用化段階のトップ値は 1.40MJ/MJ と報告されている。一方、TtW では JHFC 報告で FCEV 実証平均が 1.38MJ/km、また、実証最高値は 1.06MJ/km と報告されている。これらの報告から、それぞれ最も良い数値を使った結果は 1.3MJ/km となる。しかし、副生水素量は限られており、多くの自動車に供給することは難しく、水素製造の実用トップ効率 1.40MJ/MJ を使わざるを得ず、 1.40×1.06 (WtT 実証最高値) = 1.5MJ/km と現状の FCEV の総合エネルギー効率を JHFC では報告している。さて、FCEV の技術が向上した場合の総合エネルギー効率も JHFC 報告書で算出している。副生水素を燃料とし、将来の燃料電池システム効率が 60% になることを期待した場合、TtW 効率は 0.78MJ/km、総合エネルギー効率は $1.27 \times 0.78 = 0.99$ MJ/km と JHFC では報告している。しかし、先に述べたように副生水素の量は限られており、多くの自動車に供給することは難しく、WtT の値として将来も水素製造の最高効率 1.40MJ/MJ を使わざるを得ないと思われ、総合エネルギー効率は $1.40 \times 0.78 = 1.1$ MJ/km が将来値の上限と本研究で推定する。また、天然ガスを原料に DME を合成し、それを燃料とする燃料電池車も可能であるが、その総合エネルギー効率も高いものではない。JHFC 報告書の要点の一部を以下にそのまま掲載する (JHFC 総合、2006)。

「現状の FCEV においては、・・・・・・、エネルギー消費量、CO₂ 排出量ともにガソリンハイブリッド車並みである。」

「現在目標とされている FC (燃料電池) 効率水準が実現できれば、・・・・ディーゼル HV に比べて副生水素利用で若干勝る程度である。」

以上のように、乗用車の総合エネルギー効率は、EV が最も優れ、D-HV も優れた効率をもつ。究極の自動車と言われる FCEV の効率はハイブリッド車程度であり、その効率は将来も EV よりも劣る。

3. 各種自動車の総合コスト

次に各種自動車のコストについて検討する。コストは、車両価格と走行に要する燃料経費である走行コストに分けられる。車両価格は G-V の車両価格を基準とする。また、走行コストは、全国の年間平均走行距離は約 1 万 km であり (三菱総研, 2004)、走行距離の 10 年分である 10 万 km を走行する時の燃費として試算する。また、走行に際して G-V の燃料消費率を 10km/l とする。ガソリン価格によって、走行コストは変動するが、140 円/l の場合には 140 万円/10 万 km となり、車両価格と走行コストの和である総合コストは +140 万円となる。

D-V の車両価格は、市販車の VW 社の Golf などの価格 (三

菱総研, 2004) を参考にすると G-V に対して約 +20 万円程度高くなる。また、D-V には今後環境対策が確実に必要になり、そのため、将来はさらに +10 万円ほど高いコストになり、D-V の車両価格は G-V に比べて +30 万円となる。走行コストは、軽油原価をガソリン原価と同じと考え、それに軽油引取税 32.1 円を課税した後に消費税を加えて軽油価格として、それに総合エネルギー効率を乗じて試算できる。ガソリンが 140 円/l の時には、D-V の総合コストは +117 万円となる。

HV 車では、G-HV の車両価格は G-V に比べて市販車で比較すると約 +40 万円ほど高くなる (プリウス, 2007)。また、D-HV はディーゼル車で +30 万円高くなり、HV 車でさらに +40 万円高くなるため、車両価格は +70 万円高くなる。これに走行コストを加えると、ガソリンが 140 円/l の時には、G-HV の総合コストは +123 万円となり、D-HV の総合コストは +126 万円となる。

次に、EV のコスト試算をする。50kWh のバッテリーを搭載すると、バッテリーの価格は現在約 10 万円/kWh であり、G-HV の車両価格をベースにして推定車両価格は G-V より +540 万円以上高い。円筒形 18650 型の原価は約 200 円と言われており (複数の電池関係, 2007)、これから推定すると 28000 円/kWh が原価となり、各部材がコストに占める割合から推定すると将来、2 万円/kWh が目標となる。車両価格は G-V より +140 万円高くなり、走行効率は電気自動車 RAV4 を参考に算出すると 7.85km/kWh である (新エネルギー財団, 1996)。また、電気料金は種々の要素によって決まってくるが、電源構成から考えて、原油価格が倍になった場合に電気料金は 1.5 倍程度になると見積もることができる。これより、ガソリンが 140 円/l の時には、総合したコストは、+172 万円となる。なお、三菱自動車は、軽自動車相当の i (アイ) をベースに電気自動車「i MiEV」を発表しており (三菱自動車, 2007)、その緒元によれば、16kWh のリチウムイオン電池を搭載するとしており、この場合には、将来の車両価格は +72 万円となり、ガソリンが 140 円/l の時には総合したコストは、+104 万円となる。一充電走行距離 (160km と発表されている) に難があるものの、コスト的には将来、相当安価になる。

次に、FCEV の車両価格であるが、現在の燃料電池価格は 500 万円/kW であり、数億円になる。将来価格を予測するのは難しいが、G-HV 車両価格をベースに、搭載する 50kW の燃料電池の価格が NEDO (NEDO, 2005) などの目標である 0.4 万円/kW とすれば燃料電池で +20 万円となり、さらに燃料電池の始動時や応答性を考慮するとバッテリーを 5kW 程度を搭載する必要があり、バッテリー価格の将来値が 2 万円/kWh として +10 万円、FCEV の車両価格は G-V に比べ (+40 + 20 + 10) 万円となる。なお、これは最低価格であり、実用化しても初期段階では相当高価になる。走行コストでは、水素は現在高価であり将来の価格を見積もるのは難しいが、原油からナフサへ変換した後に改質プロセスで水素を取り出し、さらにそれを精製するために、水素生成プロセスは原油精製プロセスに比べて数

表2: ガソリンが140円/lの時に10万km走行した場合の各種自動車のコスト(万円)

Vehicle	vehicle cost	running cost	total cost
ICEV gasoline vehicle (G-V)	—	140	+140
ICEV diesel vehicle (D-V)	+30	87	+117
Gasoline hybrid vehicle (G-HV)	+40	83	+123
Diesel hybrid vehicle (D-HV)	+70	56	+126
Fuel cell electric vehicle (FCEV)	+70	64	+134
Electric vehicle (EV) with 50 kWh battery	+140	32	+172
Electric vehicle (EV) with 16 kWh battery	+72	32	+104
Plug-in hybrid gasoline vehicle	+60	42	+102
Plug-in hybrid diesel vehicle	+90	37	+127

倍のプロセスが必要となる。ナフサの1.5倍程度の価格が下限値と推定した。ガソリンが140円/lの時には、FCEVの総合した将来コストは+134万円以上である。これらの結果を表2にまとめて示す。

ガソリン自動車と比べると、他の自動車はコスト的に優位である。特に、D-VやG-HVは優位であり、EVも搭載バッテリー容量を16kWh程度とすれば、コスト的に優位に将来なる。一方、FCEVは将来の下限値であり、コスト的に優位性をもつのは難しい。

次に、ガソリン価格を変化させた場合の各種自動車の10万km走行時の総合コストを図1に示す。ガソリン価格が180円/l程度までD-Vが優位性を持ち、それ以上ではD-HVやG-HVが優位性をもつ。EVは搭載するバッテリー容量を16kWh程度とすれば、大きなコスト優位性をもつ。一方、

FCEVが他の自動車に対してコスト優位性をもつのは難しい。なお、本コスト推定では水素供給インフラストラクチャーの構築コストを考慮していないが、FCEVの水素供給インフラを受益者負担にした場合、さらに相当割高になる。

4. 各種自動車の持続可能性

自動車が化石資源を消費している限り、原油の高騰とともに自動車の総合コストは増え続ける。また、化石資源の可採年数から考えても、原油や天然ガスをエネルギーとする自動車が50年後も100年後も走り続けるのは難しい。自動車が化石資源に依存しないで運行できる持続可能性について、各種自動車のエネルギー源を再生可能エネルギーとした場合について評価・検討する。ここでは再生可能エ

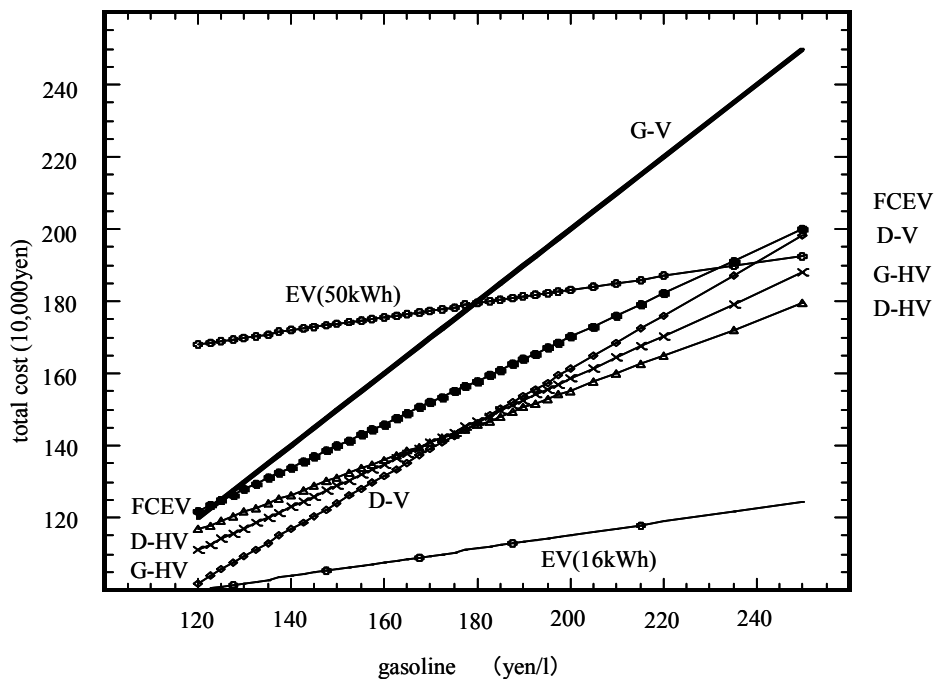


図1: ガソリン価格に対する10万km走行時の総合コスト

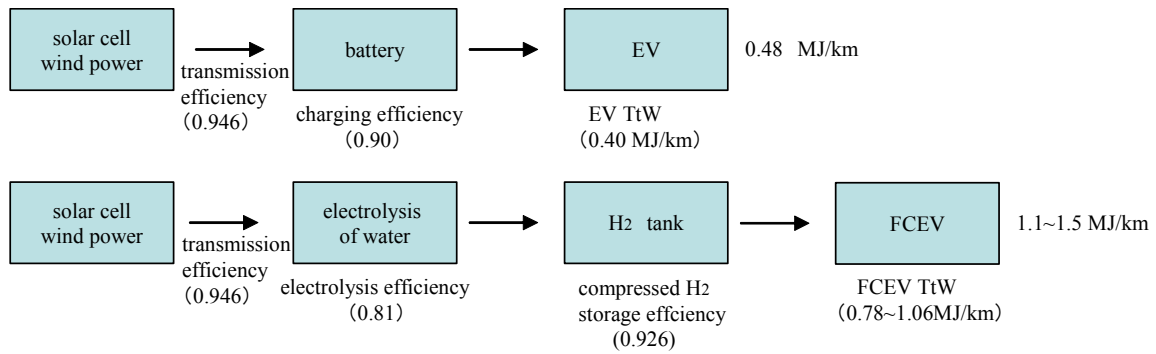


図2：再生可能エネルギーを用いた自動車の総合エネルギー効率（ ）内の数値はJHFC 報告書から引用

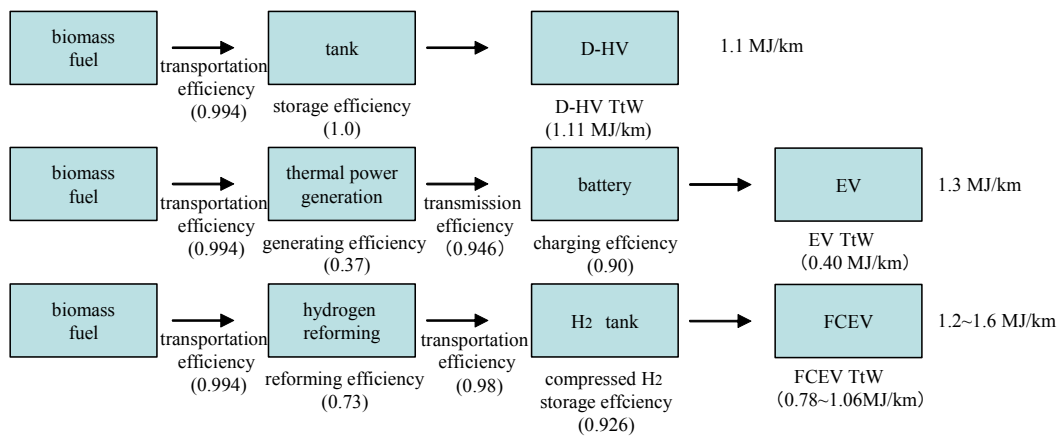


図3：バイオマス燃料を用いた自動車の総合エネルギー効率（ ）内の数値はJHFC 報告書から引用

エネルギーとして太陽光で発電した電気、風力で発電した電気、また、バイオマス燃料を基にした場合も考え、それらをエネルギー源とした場合の自動車の総合エネルギー効率について検討する。

図2に再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電を基にして推定した自動車のエネルギー効率を示す。太陽光や風力で発電した電気の場合、2つのケースが考えられる。1つは電気をバッテリーに充電する場合であり、もう1つは電気で水を分解して水素を得て燃料にする場合である。前者はEVになり、後者はFCEVになる。JHFC 報告書 (JHFC 総合, 2006) の燃料製造や走行時燃料消費エネルギーを参考に、発電以前のエネルギー消費を考慮しないで本研究で試算するとEVは0.48MJ/kmと算出され、FCEVは1.1~1.5MJ/kmとなり、エネルギー効率の点でEVがFCEVに優る。再生可能エネルギーで発電し、その電気で水を分解し、得た水素を燃料として燃料電池自動車を動かすことはエネルギー的にも、結果としてコスト的にも圧倒的に不利である。

次に、バイオマス燃料の場合のエネルギー効率を図3に示す。JHFC 報告書 (JHFC 総合, 2006) の走行時燃料消費エネルギーを参考に本研究で試算するとD-HVが1.1MJ/kmである。一方、バイオマス燃料で発電し、送電してEVを走行させた場合、1.3MJ/kmと算出される。また、バイオマス燃料から水素を取り出し、FCEVを走行させた場合には、

1.2~1.6MJ/kmになる。バイオマス燃料ではD-HVが優位性をもち、EVやFCEVはほぼ同等の総合エネルギー効率となる。

再生可能エネルギーで発電した場合、EVが圧倒的に優位性をもち、一方、バイオマス燃料の場合、D-HVがわずかに優位となるが、EVとFCEVはほぼ同等のエネルギー効率となる。

5. 各種自動車の普及移行性と社会基盤

ここでは、各種自動車が普及するための社会基盤の構築の容易さを検討する。G-V、D-V、G-HVは、運行に際して社会基盤がシステムとして既に完成されており、将来、G-HVやD-HVが普及しても、現在のシステムをそのまま継承できるために、この種の自動車の普及に支障はない。

EVでは、一充電で現行自動車並の走行距離を持たせようとする、50kWh程度のバッテリーを搭載することになる。家庭で充電しようとする、充電時間を10時間、電圧を100Vとすると、電流は50Aとなり、通常の家計用電線を使用することは難しい。また、専用充電スタンドの場合、待ち時間を10分程度として充電電圧を200Vとしても1500Aの電流が必要となり、特別な社会基盤を整備しなければならない。また、バッテリーをバッテリースタンドで積み替える場合も考えられるが、家庭で充電できず、50kWh程度のバッテリーを搭載するEVの普及には課題が

残る。一方、16kWh程度のバッテリーの場合、家庭で充電しようとするとき充電時間を10時間、電圧を100Vとすると、電流は16Aとなり、通常家庭用の電線をそのまま使用することは難しいが、家庭内のこの電線系統のみを取り替えることにより、使用可能になり、普及することが可能になる。

次に、FCEVについて検討する。水素供給のための社会基盤構築が必要であり、天然ガス自動車へ燃料供給するための基盤整備が困難なように現在のガソリンスタンドレベルまでに整備するには数兆円の社会基盤投資が必要であるとされている。これを利用者に転嫁するのは難しく、FCEVの普及にはかなりの困難が伴う。

6. Plug-in ハイブリッド自動車の可能性

既に各種自動車の総合エネルギー効率、コスト、持続可能性、普及移行性について検討した。エネルギー効率を将来値で見ると、EV < FCEV < D-HV < G-HV < D-V < G-Vである。表3にG-HVを基準に各種自動車のエネルギー効率の比較を、特に優位なものに◎、優位なものに○、劣っているものに×で示す。また、コストの将来値は(EV) < D-V、D-HV、G-HV < FCEV < G-V < EVとなる。EVは搭載バッテリーの容量と価格によって大きく変動する。表3にG-HVを基準に各種自動車のコスト比較を、◎、○、×は先の表記と同じであり、△は基準とほぼ同等であることを示す。持続可能性は化石資源を消費せず、再生可能エネルギーで走行可能なものはFCEVかEVであり、エネルギー効率はEVが優位である。○は持続可能性をもち、◎は特に優れたものとして表3に示す。普及移行性は、既に述べたようにFCEVとEVに社会基盤整備の点で困難があるが、それ以外の自動車には困難は無い。普及移行性をもつ自動車を○とし、劣っているものを×として表3に示す。

表3からわかるように、G-HVやD-HVは持続可能性に課題がある。一方、FCEVと50kWhのバッテリーを搭載したEVはコストと普及移行性に課題がある。

次に、自動車の将来の形について考える。将来の形において、重視すべきは化石資源に依存せず低コストで運用できる自動車であろう。EVは持続可能性に優れ、将来最も望ましい形である。しかし、50kWhのバッテリーを搭載した場合に普及移行性とコストに課題がある。普及移行性の課題は充電であり、50kWhのバッテリーを100Vで1時間充電することは技術的に問題ないが、500Aの電流を流す必要がある。10時間充電でも50Aであり、将来、バッテリー価格が目標値になっても、この充電時間や流す電流密度が課題となり、50kWhのバッテリーを搭載した本格的なEVの実現性を遠ざける。また、コスト高の原因は搭載するバッテリー量にある。搭載するバッテリー容量を減らせばコストを低減でき、普及移行性にも優れるが、一充電当りの走行距離が短くなる。三菱自動車の「i MiEV」はタウンカーを目指して16kWh程度のバッテリーを搭載し充電走行距離(160km)を犠牲にして総合的に高いエネルギー効率でコスト優位性を持たせようとするものであろう。使用用途によっては最も優れた形態と言えよう。

一方、FCEVはエネルギー効率、持続可能性に優れているが、コストや普及移行性に課題がある。コストの課題解決には、燃料電池のコスト減、バッテリーのコスト減、燃料水素ガスのコスト減が必要であり、EVのコスト減より難しい。また、普及移行性の課題は水素インフラの構築であり、きわめて困難な課題であり、さらに、もしFCEVが普及した場合、水素漏れも大きな課題になる可能性がある。

以上の点から、自動車の将来の形はEVをベースとして、バッテリーの搭載容量を減らし、走行距離も現在とほぼ同等レベルになるPlug-in HVを考える。

私たちは、通勤や買い物に、毎日のように自動車に乗る。日常用途の自動車の走行距離は、統計データによれば1日当たり約30km以下である(三菱総研, 2004; 陸運統計, 2006)。この走行距離を考慮してPlug-in HVに搭載するバッテリー容量を10kWh程度とする。1回充電当りで走行距離は約

表3：各種自動車の比較

Vehicle	Energy efficiency	Cost	Sustainability	Transferability
ICEV gasoline vehicle (G-V)	×	×	×	○
ICEV diesel vehicle (D-V)	×	△	×	○
Gasoline hybrid vehicle (G-HV)	—	—	×	○
Diesel hybrid vehicle (D-HV)	○	△	×	○
Fuel cell electric vehicle (FCEV)	○	×	○	×
Electric vehicle (EV) with 50 kWh battery	◎	×	◎	×
Electric vehicle (EV) with 16 kWh battery	◎	◎	◎	○
Plug-in hybrid gasoline vehicle	◎	◎	◎	○
Plug-in hybrid diesel vehicle	◎	○	◎	○

80kmとなり、我々が頻繁に利用する距離はEV走行が可能になり、最も優れたエネルギー効率になる。EVで課題となる充電条件は10kWhのバッテリー容量の場合、100Vで10時間充電時に流す電流は10Aとなり、家庭で充電することが可能になる。80km以上の走行の場合、HVモードで走行すれば良い。我々が200kmの遠出をする場合、数回の休憩を取りながら走行することが多く、サービスエリアなどの休憩の20分間で200Vで150Aの電流で充電すれば、ほぼ満充電となり、休憩後に約80kmのEV走行が可能になり、ほとんどの距離をEVモードで実質的に走行できることになる。また、150A程度の電流であれば、多大なコストを必要としないでインフラ整備が可能である。さらに、搭載バッテリー量が少なくなるために、車両価格は電気自動車の+140万円から+60万円となるために、コスト優位性は一気に高まる。

Plug-in G-HVおよびPlug-in D-HVの総合エネルギー効率は、EV走行:HV走行=8:2の場合、リチウムイオンバッテリーを搭載した総合エネルギー効率は1.03MJ/km(=0.89MJ/km×0.8+1.6MJ/km×0.2)と0.97MJ/km(=0.89MJ/km×0.8+1.3MJ/km×0.2)と算出される。先のように遠距離でも休憩時にplug-inして充電をすれば、ほとんどの距離をEVモードで走行することになり、総合エネルギー効率はEVの0.89MJ/kmに近づく。FCEVの将来形よりも高い総合エネルギー効率を実現する。つまり、Plug-in HVは高いエネルギー効率をもつ。

Plug-in HVの車両コストは、10kWh程度のバッテリーで通常のHVに対して、将来は+20万円程度高い車両価格になる。走行コストは燃料価格によって異なるが、燃料価格に対する総合コストを図4に示す。

総合したコストはPlug-in G-HVがFCEVやG-HVに対して、優位性をもつことがわかる。また、16kWh程度のバッテリーを搭載したEVもバッテリー価格が目標値になれば大きなコスト優位性をもつことがわかる。一方、FCEVは先にも述べたように図4に示したものが価格の下限値であり、G-HVやPlug-in HV、さらには16kWhバッテリー搭載EVに対して価格的に劣る。

Plug-in HVの完全な持続可能性を実現するならば、太陽電池や風力による電気を充電し、バイオマス由来のアルコールや軽油相当の燃料を用いることで達成される。この場合の総合エネルギー効率は、発電以前のエネルギー消費を考慮しないで試算すると、Plug-in G-HV 0.66MJ/km(=0.48MJ/km×0.8+1.4MJ/km×0.2)およびPlug-in D-HV 0.60MJ/km(=0.48MJ/km×0.8+1.1MJ/km×0.2)となる。再生可能エネルギーを燃料とするD-HVやFCEVに比べて高いエネルギー効率である。太陽電池や風力による発電は時間変動があり、安定性に乏しく、安定性を重視する社会基盤の電力として問題がある。しかし、Plug-in HVではバッテリーに充電するだけであり、電力が時間的に変動しても問題ない。ちなみに、風力発電では、電力変動を避けるために現在においてもバッテリーと組み合わせることが望まれている。以上のように、Plug-in HVは持続可能性にも優れる。

再生可能エネルギーとPlug-in HVのシステムの持続可能性について、エネルギー量から検討する。太陽光発電の場合、太陽電池の発電量は我が国の場合ではいずれの地域においても940~1300kWh/kW・年である(佐々木ら, 1998)。家庭用太陽電池の設置容量は約3kW以上であり(中村, 2007)、発電量は2820kWh/年・家庭以上となる。Plug-in HV

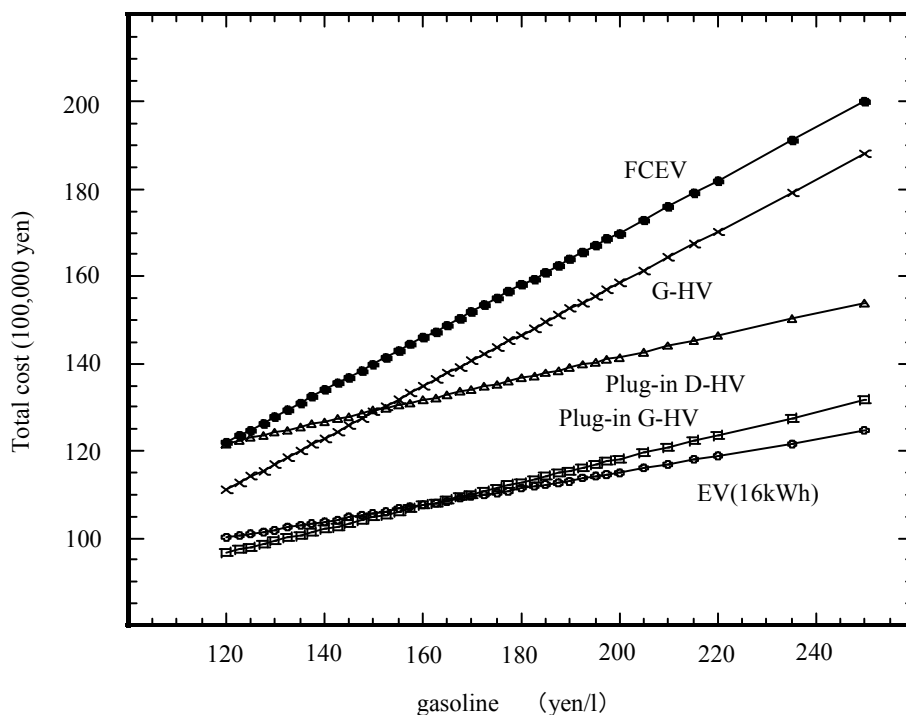


図4: ガソリン価格に対する10万km走行時の総合コスト

の年間使用電力は、自動車の年間走行距離（三菱総研，2004；陸運統計，2006）から約1300kWh/年であるので、自宅に設置した太陽光発電でその家族のPlug-in HVを運用することは十分可能な数値である。風力発電については、陸上の期待可採量は日本の総発電量の7～10％と言われており、さらに洋上（オフショア）発電まで考慮すれば20～30％程度に達するとの推定（牛山，2005）もあり、再生可能エネルギーとPlug-in HVのシステムが資源量の点においても持続可能性を持っている。また、既に述べたようにPlug-in HVは、家庭で充電できるものであり、サービスエリアなどでの短時間充電時の場合、150A程度の電流を流す新たな設備を導入する必要があるが、多大なコストを要するものではなく、普及移行性も優れている。

さて、Plug-in HVの技術的な課題を眺める。ハイブリッド車には、エンジンを単なる発電機として用いてモーターを駆動源とするシリーズ型とエンジンに発電機と駆動源の両機能を求めるパラレル型がある。パラレル型にはさらに、トヨタ社プリウスに代表されるモーターを主駆動源としてエンジンをアシスト駆動源する型とホンダ社シビックに代表されるエンジンを主駆動源としてモーターをアシスト駆動源とする型がある。Plug-in HVの場合、EV走行可能なパラレル型のモーターを主駆動源する型であり、車両は基本的にトヨタ社プリウスと同等である。プリウスはEV走行が数km可能な機能を備えている。米国では愛好家がプリウスを改造してPlug-in G-HVとして走行させている。したがって、車両そのものに大きな課題はなく、Plug-in HVの課題は、それに適したバッテリーの課題に還元される。

トヨタ社プリウスを基に、Plug-in HVに要求される駆動力の諸元は、最高出力100kW/r.p.m.、定常出力30kW/r.p.m.であろう（木村，2005）。これがバッテリーに対する要求になる。つまり、10kWhのバッテリーであれば、最高出力に対して10Cが要求され、また、定常出力として2Cが要求されることになり、ニッケル水素バッテリーもしくはリチウムイオンバッテリーを使用することになる。メモリー効果を有するニッケル水素バッテリーでは、フロート充電にならないように工夫すれば性能的に対応可能であろうが、バッテリーの価格や大きさが課題になる。一方、リチウムイオンバッテリーにも種々の課題がある。携帯電話などで使用されている用途とは異なり、出力密度、耐久性、安全性、価格などが特に重要である。先に述べたように最高出力で10Cが要求され、また、定常出力として2Cが要求されており、電極面積を大きくするなどの出力密度を高くする工夫が必要である。また、高い耐久性が要求され、耐用年数も可能な限り長い期間が望まれる。さらに高い安全性と低いコストも要求されるために、電池全体の設計や正・負極活物質や電解液などの各種材料を見直す必要がある。しかし、すでに見いだされている材料を使いこなすことによってPlug-in HVに搭載できる水準のバッテリーが可能になると思われる。

7. Plug-in ハイブリッド車による持続可能な交通を実現する制度

Plug-in HVと再生可能エネルギーを組み合わせた持続可能な交通を実現するための社会的な制度について考察する。先に述べたように太陽光発電や風力発電の電気を用いてPlug-in HVに供給する場合、高いエネルギー効率をもち、また、高い持続可能性をもつ。これらのシステムを実現するには、システムとしてのコストを検討する必要がある。

現行の電気代金や燃料費から推定されるコストはPlug-in G-HVで将来+92万円、Plug-in D-HVで将来+117万円となり、現在のG-Vに比べて安価である。安価である大きな理由は、ガソリン車の使う燃料にはガソリン税が課税されており、一方、電気にはそのような税が掛けられていないことによる。ガソリン税などと同様な税を電気やバイオマス燃料に課税すれば、Plug-in HVのコストの優位性は小さくなる。しかし、化石燃料に対する課税を環境税の一つとして捉えれば、再生可能エネルギーによる電気やバイオマス燃料に課税するのは適切でなく、むしろ課税をせずにコストの優位性を再生可能エネルギーとPlug-in HVの持続可能な交通システムの普及のインセンティブとして活用すべきである。

まず、風力発電について考える。風力発電の場合、昼夜を問わず発電可能であり、出力は変動するが、Plug-in HVでは問題にならず、Plug-in HVに適した電源である。しかし、風力発電の問題は発電に適した風速を得られる地域が限定されることであり、送電設備を新たに整備しなければならない。電力会社の送電の採算コストは10円/kWh程度と推定され、一方、風力発電所の損益分岐レベルは10円/kWhである。現行の電力料金24.5円/kWhを折半すれば、12円/kWh以上で風力発電所は電気を買って上げてもらえ、また、送電を受け持つ電力会社側もコストメリットを享受できる。また、Plug-in HV所有者にとっても、先に試算したように他の車種を利用するよりもコストメリットを享受できる。太陽光発電の場合、発電が昼に限定されるが、家庭で発電、家庭でPlug-in HVに充電、という形が考えられる。太陽電池のシステムコストは、現行で約65万円/kWhであり（中崎，2007）、耐用年数を15年で計算すると40円/kWh前後の電気価格となる。Plug-in HVに太陽光発電の電気を供給することにより、Plug-in HVのコストメリットを移転する形で減価償却時間を短縮することが可能であるが、発電コストは約30円/kWhに留まり、コスト的に優位性は見出せない。

つまり、風力発電の場合、システムとしてコスト的に実用可能であるが、太陽光発電の場合には、Plug-in HVのコストメリットを移転しても現行の電気料金より割高になる。

そこで、持続可能な交通を実現するためには、以下に述べる2つの制度の導入が考えられる。一つは、グリーン電力の個人買取制度を導入し、風力発電側のコストメリットを太陽光発電側へ移転し、太陽光発電のシステムコストが

現行の電気料金 24.5 円 /kWh 程度になるように太陽光発電の買取価格を引き上げることである。先に述べたように風力発電の損益分岐レベルの 10 円 /kWh で買い、送電側の採算コストの 10 円 /kWh で送電業者にグリーン電力の送電を委託すれば、4.5 円 /kWh を太陽光発電側へ移転できる。

さらにもう一つの方法は、再生可能エネルギーと持続可能な交通のシステムが構築できるように、ドイツと同じように発電業者と送電業者を分離し、太陽光発電のコストが 10 年程度減価償却可能なように送電業者に買い上げさせて、電気料金に上乘せすることである (大島, 2007)。持続可能な交通システムを構築するために、年間 1~2 万円程度の電気料金の上昇は十分に理解が得られるものと思われる。

なお、Plug-in HV が満充電の場合、100 V、10 A で 10 時間の電力供給が可能であり、災害時の電力インフラをある程度補うことが可能になり、防災上も優れた機能をもつ。さらに、100 万台以上に普及すれば、貯蔵される電力容量は 1000 万 kWh 以上にもなるため、電力の負荷平準機能も期待できる。

8. まとめ

各種自動車 G-V、D-V、G-HV、D-HV、FCEV、EV、Plug-in HV のエネルギー効率、コスト、持続可能性、普及移行性について検討・考察し、また、持続可能な交通システムを構築する制度について検討した。その結果について以下にまとめる。

- (1) 自動車のエネルギー効率について、JHFC 報告書をもとに検討を加え、EV が一次エネルギー投入量 0.89MJ/km で最も優れ、Plug-in G-HV や Plug-in D-HV も 1.03 MJ/km と 0.97 MJ/km であり、優れたエネルギー効率を持つ。FCEV の将来可能上限値は 1.1 MJ/km と推定される。
- (2) コストを車両価格と走行コストに分けて見積もり、Plug-in G-HV がコストに優れ、16kWh 程度のバッテリーを搭載する EV も将来高いコスト競争力をもつが、FCEV は相当割高になる。
- (3) 持続可能性は EV が最も優れるが、Plug-in HV も 10kWh 程度のバッテリーを搭載することで、ほとんどの距離を実質的に EV 走行可能になり、高い持続可能性をもつ。
- (4) 普及性移行は、G-V、D-V、G-HV、D-HV が従来の社会基盤を継承できるために優位性を持ち、FCEV は普及移行性に困難な点がある。Plug-in HV や 16kWh 程度のバッテリーを搭載する EV も普及移行性として優れている。
- (5) 総合的に評価すると、Plug-in HV や少ないバッテリーを搭載した EV が優れ、将来最も有望な自動車の形態である。
- (6) 再生可能エネルギーである風力発電や太陽光発電と Plug-in HV の組み合わせで持続可能な交通システムを実現するためには、グリーン電力証書の個人利用制度を

活用して風力発電側の低コストを太陽光発電側へ移転することが必要であり、また、電気料金に太陽光発電側のコスト増を移転することも必要である。

引用・参考文献

- 貿易通関統計 (1999) 財務省編
 電中研ニュース (2006) 電気自動車社会はどのような効果をもたらすか, 433, 1-3
 複数の電池関係者からの事情聴取による (2007)
 Granovskii, M., Dincer, I. & Rosen, M. A. (2006). Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel vehicles, *J. Power Sources*, 159, 1186-1193
 及び引用文献
 堀雅夫 (2006), まずプラグインハイブリッド自動車をして! その効果は, 月刊エネルギー, 2006 (5), 29-36
 石谷久 (2006) 水素社会における燃料電池自動車の効率について エネルギー・資源, 27 (3), 1-5
 JHFC 総合効率検討委員会・財団法人自動車研究所「JHFC 総合効率検討結果」(2006) http://www.jhfc.jp/j/data/data/h17/h17_kekka_main.pdf
 環境白書 (総説) (2000) 環境庁編, p.234
 三菱総合研究所 (2004), ディーゼル乗用車の経済分析、ガソリン車・ハイブリッド車との比較, 第 3 回クリーンディーゼル乗用車の普及・将来見通しに関する検討会, 2004 年 11 月 16 日開催 (経済産業省) www.meti.go.jp/committee/materials/downloadfiles/g41116b40j.pdf
 木村秋広 (2005) SUV 用ハイブリッドシステムの開発, TOYOTA Technical Review, 54, pp.26-31
 三菱自動車次世代電気自動車「i MiEV」(2007) <http://www.mitsubishi-motors.co.jp/corporate/technology/environment/miev.html>
 NEDO (2005) 燃料電池・水素技術開発ロードマップ委員会 燃料電池・水素技術開発目標一覧 <http://www.nedo.go.jp/iinkai/gijutsu/gijutsu/roadmap/2/mokuhyou.pdf>
 中村良和 (2007), 戸建住宅における太陽光発電の意味と実際, 資源環境対策, 43 (7), pp.102-106
 中崎尚俊 (2007), 太陽光発電の現状と経済産業省による普及促進施策, 資源環境対策, 43 (7), pp.81-88
 荻野法一・丹下昭二 (2006) 総合効率検討結果, エネルギー・資源, 27 (6), pp.396-400
 大島堅一 (2007), 再生可能エネルギー普及に関するドイツの経験—電力買い取り補償制の枠組みと実際, 立命館大学人文科学研究紀要, 88, pp.65-91
 プリウス同等車種との比較による (2007)
 陸運統計要覧 (平成 18 年版) (2006), 国土交通省総合政策局情報管理部, 日本自動車会議所
 新エネルギー財団 (1996) 通商産業大臣賞 電気自動車 RAV4 LEV, <http://www.nef.or.jp/award/kako/h08/syo1.htm>
 佐々木淑貴・赤林伸一・坂口淳 (1998), 太陽光発電の地域特性に関するシミュレーション, 学術講演梗概集, D-

- 2, 環境工学 II, 1998, pp.491-492
世界自動車統計年刊 (2007) FOURIN 社
通商白書 (2006) 経済産業省編, p.50
牛山泉 (2005), 風力エネルギーの基礎, オーム社
Zamel, N. & Li, X. (2006). Life cycle analysis of vehicles powered
by a fuel cell and by internal combustion engine for Canada, J.
Power Sources, 155, 297-310 及び引用文献

(受稿 : 2007 年 9 月 13 日 受理 : 2007 年 9 月 28 日)