

電力とガソリンの等価合成による PHEV 燃料消費率の表示*

堀 雅夫¹⁾ 金田 武司²⁾

Fuel Consumption Metrics of PHEV by the Equivalent Composite of Electricity and Gasoline

Masao Hori Takeshi Kaneda

The fuel consumption metrics of a plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) is calculated by composing the energy consumption in the charge depleting and charge sustaining modes using the utility factor, where such methods of energy consumption are used as (1) the gasoline consumption only and (2) the gasoline consumption including the gasoline equivalent to electricity consumption by its heat content. In this presentation, the utility factor and the equivalent composite of electricity and gasoline are reviewed, and a representative metrics of PHEV fuel consumption to be displayed is presented.

KEY WORDS: Energy, Fuel economy, Thermal efficiency, Metrics, Standard harmony, Regulation (D2)

1. 緒言

プラグインハイブリッド車(PHEV)は、最初の一定距離は外部電力によって充電した電気による電力走行をし、電池の充電レベル(SOC)が一定値まで減少した後はエンジン駆動のハイブリッド走行に切り替わる。エンジン自動車(ICEV)やハイブリッド車(HEV)では駆動エネルギー源はすべてガソリンなどの燃料であるのに対して、PHEVの駆動エネルギー源は外部から充電した電力とガソリンなどの燃料の二種類になる。このようなPHEVのエネルギー消費率を単一の代表的燃費値で表示する場合の、エネルギー消費率の単位・尺度(Metrics)、電力/燃料の共通単位への変換、電力/燃料の走行距離割合による加重などについて考察し、代表的燃費表示のための合理的方法を提示する。

2. 走行領域・走行モード・電池SOC・燃料消費率

PHEVでは一般に、外部充電電力による電力走行の領域をCharge Depleting(CD)レンジと呼び、エンジン駆動によるハイブリッド走行の領域をCharge Sustaining(CS)レンジと呼んでいる。この二つの領域における電池のSOCおよびエンジン用燃料の消費率を、走行距離との関係で示すとFig.1のように示される。

Fig.1の上図は、CDレンジを全部電力で走行する場合、すなわちAll Electric(AE)モードで走行する場合であり、シリーズ型(Range Extender)PHEVやパラレル型PHEVでCDレンジにおいてエンジン駆動がない条件の場合が該当する。

Fig.1の下図は、CDレンジにおいて電力駆動にエンジン駆動が加わるBlendedモードで走行する場合で、パラレル・ハイブリッド

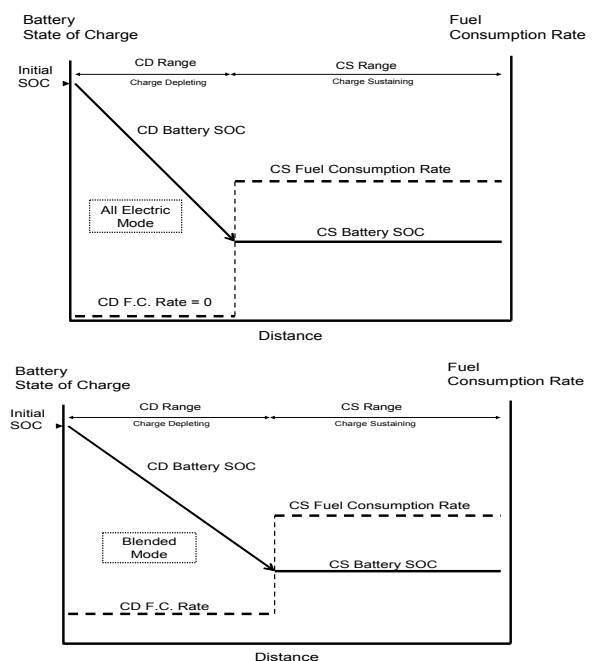


Fig.1 Battery SOC and Fuel Consumption Rate in CD and Cs Ranges for All Electric Mode and Blended Mode

ド型PHEVでCDレンジにおいてエンジン駆動がある条件の場合が該当する。

なお、実際の走行では電池SOCおよび燃料消費率とも走行条件によって変動するがこの図においては模式的に直線で示している。

3. 走行パターンとユーティリティファクター

PHEVのエネルギー消費を評価する場合、全走行距離に占める外部充電電力によって走行する距離の割合を想定する必要がある。

* 2012年5月28日受理. 2012年5月24日自動車技術会春季大会において発表.

1), 2) ユニバーサルエネルギー研究所 (105-0001 港区虎ノ門5-3-20 (Email: mhorim@mx.mesh.ne.jp))

ある。この割合は米国自動車技術会(SAE)では「ユーティリティファクター」(Utility factor, UF)と呼称している。筆者が2006年に自動車技術会に発表したPHEVに関する論文⁽¹⁾では「電力走行(距離)割合」と呼んでいた。

UFの値は自動車の走行(ドライブ)のパターンで決まってくる。一人一人のドライブパターンが異なるのでUFも各人で異なる。そのため燃費表示などに使用する時は国全体の平均的なUFを定義して使用することになり、自動車走行に関する統計調査値から国全体の平均的UFを計算することになる。

このドライブパターンからUFを算出する基本的な方法をFig.2に示す。この場合、使用したドライブパターンは、対象とする集団(個人UF⁽²⁾の場合は一人)の実働1日(車を使用した日)あたりの走行距離の頻度分布を言う。Fig.2で使用した走行距離の頻度分布は、国土交通省が全国規模で年3回調査・発表している「自動車輸送統計報告書」の2004年のデータに基づいている。この輸送統計は、無作為に抽出した自動車の一定期間内各日の走行距離、走行目的、乗車人員などを調査したものであるが、公表されている乗用自動車(登録車および軽自動車)のデータはこれらを計算処理して一走行(トリップ)距離帯別の輸送人員に整理している。そのためFig.2に示したドライブパターンの値は、公表されているデータから仮定を置いて一日あたり走行距離別の自動車台数頻度を推定したものである。もし元の調査データを入手できれば、より確かなドライブパターンとUFの算出が可能と考える。

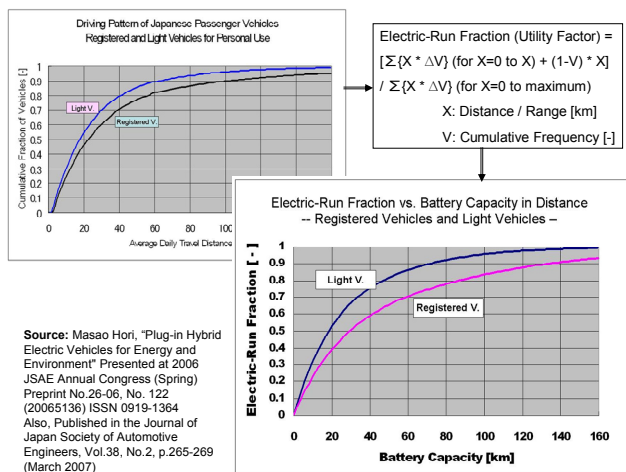
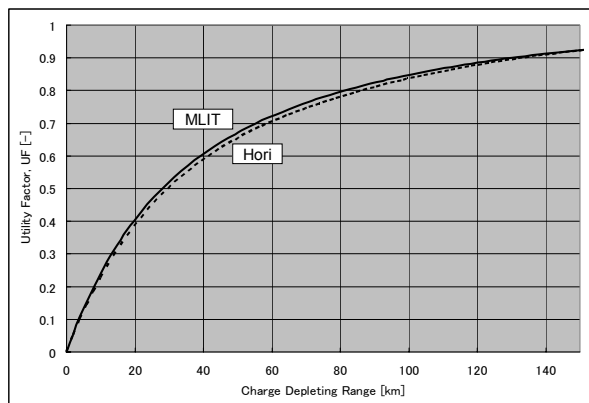


Fig.2 Derivation of Utility Factor from Driving Pattern

現在日本におけるPHEVの燃費表示に使用する公式のUFは、国土交通省が2009年に「道路運送車両の保安基準の細目を定める告示」等の一部改正に際して自動車工業会に到達した「プラグインハイブリッド自動車の燃費算定等に関する実施要領」⁽³⁾の中に、図および近似式で示されている。同通達の中ではこのUFの値は「JCAP データ自動車使用実態調査による」となっているが、対象車種・データ数・統計処理方法などは公表されていない。

この国土交通省のUFの値と筆者によるFig.2の登録車のUF

の値を比較すると、Fig.3に示すように、異なる統計データから導出された二つのUF値が良い一致を示している。

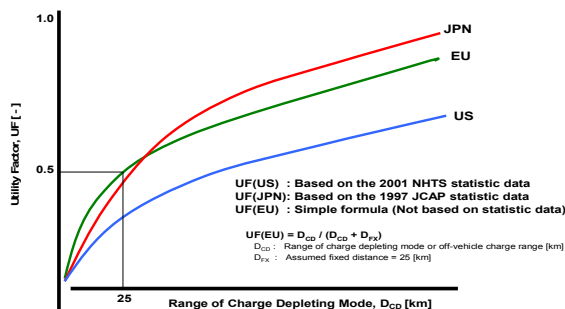


MLIT: Instruction by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism in 2009. See Ref.3
Hori: For Registered Vehicle by Masao Hori at the 2006 JSAE Annual Congress (Spring). See Ref. 1

Fig.3 Comparison of the Two UF Values for Japan

米国の環境保護庁・運輸省道路交通安全局(EPA・NHTSA)によるPHEVの燃費算定⁽⁴⁾には、SAEが2010年に改訂したPHEVのUFに関する規格SAE J2841⁽⁵⁾記載の新しく定義されたUFを使用することになっている。それまでのFleet Specific UFも新しいIndividual Specific UFも、何れも2001年の全米世帯旅行調査(NHTS)⁽⁶⁾の自動車走行統計データに基づいているが統計処理の方法が異なっており、新定義のUFは従来の値よりUF=0.5近辺で約15%程度高い値になる。このことは、UFの算出において適切な統計処理方法を用いることの重要性を示唆しており、日本の燃費算定に使用するUFについても、使用する統計データおよび統計処理方法の精査・確認が必要と考える。

なお、世界共通の自動車排出ガス・燃費などの試験法作成活動WLTP(Worldwide harmonized Light-duty Test Procedure)の場でもUFについて議論が行われており、Fig.4⁽⁷⁾のように日・米・EUのUFの比較が示されている。なお、EUのUFは簡易式によるもので統計データに基づいていない。日・米・EUのUFを同じCDレンジについて数値的に比較すると、日・EUは米より相当高い値になっており、日本・EUは平均的に短距離走行型であることを示している。



Source: WLTP-DTP, WLTP-E-Lab Sub Group Progress report WLTP-DTP-E-LabProc-034 (2011) [Edited by Masao Hori]

Fig.4 Utility Factor for Japan, EU and U.S.

4, エネルギーの等価換算と走行レンジの合成

PHEV の電力消費率とガソリン消費率は, CD レンジおよび CS レンジについて規定の燃費試験法に則って測定される. この試験結果を単一の代表的燃費値で表示する場合, Fig.5 に示すように電力とガソリンのエネルギー消費を等価換算など何らかの方法で一本化し, さらに CD レンジと CS レンジのエネルギー消費を UF を用いて合成^Aする必要がある.

PHEV の単位距離当たりのエネルギー消費は, CD レンジの電力消費率(+燃料消費率^B)および CS レンジの燃料消費率を合わせたもので, UF を用いて次式により合成する.

$$C_{PHEV} = U_F C_{CD} + (1 - U_F) C_{CS} \quad (1)$$

C_{PHEV} : PHEV の単位距離当たりのエネルギー消費率

C_{CD} : CD レンジの単位距離当たりのエネルギー消費率

C_{CS} : CS レンジの単位距離当たりのエネルギー消費率

U_F : 充電電力による走行距離の全走行距離に対する割合, UF

このように PHEV の代表燃費を CD レンジと CS レンジのエネルギー消費を UF により合成して導出する方法は, その前提として「走行は CD レンジから開始, 充電は 1 日に 1 回, 全国平均と同じドライブパターンでの走行」を想定している.

PHEV の代表的燃費の単位としては, ICEV や HEV と同様に単位ガソリン量当たりの走行距離で示するのが一般ユーザーに最も理解しやすいと考えられており, [km/L] の単位 (米国では [miles/gallon], [MPG]) で表示する方法が普通用いられている. 単位ガソリン量当たりの走行距離で示す場合は CD レンジの電力消費[km/kWh]をエネルギー的に等価のガソリン燃費[km/L]に換算するなどして, これを以下の式を用いて CS レンジのガソリン燃費[km/L]と合成する.

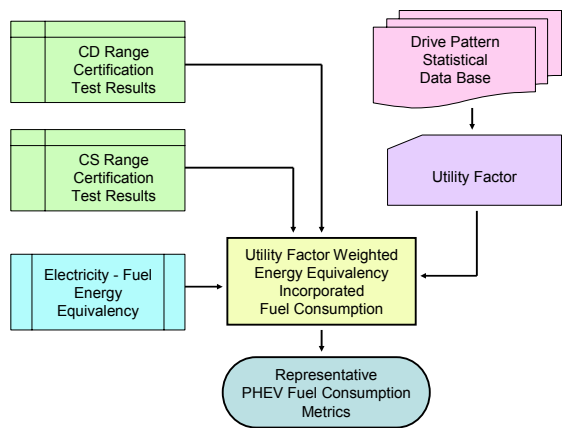


Fig.5 Defining Representative PHEV Fuel Consumption Metrics

ここで燃費 N [km/L] は単位距離あたりのガソリン消費率 C [L/km]の逆数になるので, 燃費は(2)式により計算される.

^A UF を用いて加重合算することを「合成」(Composite)と呼ぶ.

^B Blended モードの場合. なお, Blended モードについても同様に(1)式以降が導出されるが, 本報告では省略する.

$$N_{PHEV} = 1 / \{ U_F / N_{CD} + (1 - U_F) / N_{CS} \} \quad (2)$$

N_{PHEV} : PHEV の代表的燃費 [km/L]

N_{CD} : CD レンジの電力消費のガソリン等価燃費 [km/L]

N_{CS} : CS レンジの燃費 [km/L]

U_F : 充電電力走行距離の全走行距離に対する割合, UF [-]

5, PHEV の代表的燃費算出の考え方と例

ここでは, 電力とガソリンのエネルギー消費から PHEV の代表的燃費を算出する考え方のその例について考察する.

① 電力消費を無視してガソリン消費のみで評価

電力消費を無視してガソリン消費量のみを用いて代表的燃費を算出する場合, 上記の(2)式の分母の第 1 項はゼロとなるため (2)式は次のようになる.

$$N_{PHEV}[\text{km/L}] = 1 / \{ (1 - U_F) / N_{CS} \} = N_{CS} / (1 - U_F) \quad (3)$$

この評価方法は, 日本(国土交通省⁸)および EU⁹で規定され, 使用されている.

例えば, 2012 年式プリウス PHV の JC08 モードの場合, $N_{CS} = 31.6[\text{km/L}]$ および $U_F = 0.483[-]$ なので, (3)式により PHEV の代表燃費(「複合燃料消費率(プラグインハイブリッド燃料消費率)」と呼称)は $N_{PHEV} = 61.1[\text{km/L}]$ と計算される.

この評価方法は, ガソリン消費量のみで全走行距離を除すので大きな電池を搭載して UF が大きくなる場合, ガソリン消費量が小さくなるので代表燃費値が過大になる欠点がある.

② 電力消費を熱量で等価のガソリン消費に換算して評価

電力を熱量で等価のガソリンに置き換えて代表的燃費を算出する場合, 上記の(2)式で CD レンジの燃費 N_{CD} は

$$\text{AE モードの場合 } N_{CD}[\text{km/L}] = H N_{CD}[\text{km/kWh}] \quad (4)$$

なので, (2)式は次のようになる.

$$N_{PHEV}[\text{km/L}] = 1 / \{ U_F / H N_{CD}[\text{km/kWh}] + (1 - U_F) / N_{CS}[\text{km/L}] \} \quad (5)$$

ここでガソリンと電力の熱換算係数の H [kWh/L]として次の値が用いられている.

$$H = 8.89[\text{kWh/L}] \leftarrow 32.0[\text{MJ/L}] \text{ (EPA のガソリン発熱量)}$$

$$H = 9.14[\text{kWh/L}] \leftarrow 32.9[\text{MJ/L}] \text{ (日本のガソリン発熱量)}$$

この評価方法は, EPA¹⁰では既に使用されており, 日本の新燃費基準報告書¹¹では将来の PHEV などの燃費評価として示されている.

例えば, 2011 年型 Chevrolet Volt の EPA City/Highway 複合燃費の場合, $N_{CD} = 4.5[\text{km/kWh}]$, $N_{CS} = 16[\text{km/L}]$, $U_F = 0.64[-]$ なので, (5)から $N_{PHEV} = 26[\text{km/L}] = 60[\text{MPGe}]$ と計算される.

この方法では電力とガソリンを熱量で等価換算しており, 動力として使用する充電電力を熱として低く評価しているため, 大きな電池を搭載して UF が大きい場合に, 代表燃費値が大きく出る傾向がある.

③ ガソリン・電力のエネルギー変換率により換算して評価

これは, ガソリンと電力間のエネルギー変換率を用いて, 電力を等価のガソリンに置き換えて代表的燃費を算出する方法である. 数値的には, (4)式でガソリンから電力へのエネルギー変換率を

η [-]として、AE モードの場合は

$$N_{CD}[\text{km/L}] = \eta H N_{CD}[\text{km/kWh}] \quad (6)$$

を用いて計算することになる。

この考え方による燃費算出方法は、1980 年代から米国で代替燃料による燃費の表示方法として検討されてきており、2000 年には DOE が CAFE (企業別平均燃費) 基準に適用する電気自動車の燃費表示のためにこの考え方による「石油等価燃料経済計算」のルールを決めている⁽¹²⁾。この計算指針では上記のエネルギー変換率 η の値として米国の化石燃料発電の発電効率の平均値 0.328 を用いている。ただし、電力消費量をガソリン消費量に変換する式の中に、充電電力駆動への大きなインセンティブとして Fuel Content Factor (値は 6.67) なる係数を入れており、最終的なガソリンと電力の換算係数は、19.5~21.7[kWh/L]と発熱量で等価の換算(②の 8.89[kWh/L])の 2 倍以上となり、充電電力駆動に大幅に有利な燃費を算出するようになっている。

6, エネルギー変換率による PHEV の代表的燃費表示

CD レンジが AE モードの場合のエネルギー等価・UF 合成による代表的燃費の一般的計算式は

$$N_{PHEV} = 1 / \{ U_F / \eta H N_{CD} + (1 - U_F) / N_{CS} \} \quad (7)$$

N_{PHEV} : PHEV の代表的燃費 [km/L]

N_{CD} : CD レンジの電力消費 [km/kWh]

N_{CS} : CS レンジの燃費 [km/L]

U_F : 充電電力による走行距離の全走行距離に対する割合

H : 電力の熱換算係数 9.14[kWh/L]

η : ガソリンから電力へのエネルギー変換率 [-]

ここで、ガソリンから電力へのエネルギー変換率 (η) をどのようにとるかによって、PHEV の代表的燃費の値が変わる。

前節の「PHEV の代表的燃費算出の考え方と例」で示した 3 種類の評価方法を一般的な(7)式に当てはめた場合、 η の値は次のようになる。

① 電力消費を無視してガソリン消費のみで評価: $\eta = \infty$

② 電力消費を発熱量で等価のガソリン消費に換算して評価:
 $\eta = 1.0$

③ ガソリン・電力のエネルギー変換率により換算して評価 $\eta = 0 \sim 1$ の値

熱力学的に意味のあるガソリンから電力へのエネルギー変換率として、同じ化石燃料を用い発電の主流である火力発電の熱効率を参考にするのが妥当と考える。現在、日本の火力発電の平均熱効率は 42%程度であり、新設のプラントはコンバインドサイクル 48% (石炭 IGCC) ~60% (天然ガス GTCC) 程度となっており、平均熱効率は今後も向上していくものと考えられる。以上から、PHEV 代表燃費に使用するガソリンから電力へのエネルギー変換率 η の値としては、0.5 程度が妥当と考える。

ガソリンから電力へのエネルギー変換率 η の参考になる値として、「JHFC 総合効率特別検討委員会」2010 年報告書⁽¹³⁾の一次

エネルギー源から車両(燃料タンク・電池)までの Well-to-Tank 効率から、ガソリンと電力の一次エネルギー量の比を計算してみる。単位車載エネルギーあたりの一次エネルギー量は、ガソリンでは 1.2 [MJ/MJ]、電力(日本の 2009 年度電源構成、車載電力は電池における値、水力・原子力の一次エネルギーはゼロと仮定)では 2.5 [MJ/MJ]となっているので、充電効率 0.86 の補正をしてガソリン・電力の一次エネルギーの比として $1.2/2.5/0.86 = 0.56$ が得られる。

ここで、ガソリンから電力へのエネルギー変換率 η の値をパラメーターとして、JC08 モードの燃費・電費の試験値から PHEV の代表的燃費を計算した例を Table 1 に示す。この表のパラメーター η の値としては、上記①電力消費を無視してガソリン消費のみで評価 $\eta = \infty$ 、②電力消費を発熱量で等価のガソリン消費に換算して評価 $\eta = 1.0$ 、および上記の火力発電の平均熱効率の範囲の 0.4~0.6 をとっている。

(7)式による代表的燃費の算出は、 U_F が 0 から 1 までの範囲、すなわちハイブリッド車(HEV, $U_F=0$)から PHEV を経て電気自動車(BEV, $U_F=1$)に至るまでシームレスに適用可能なので、Table 1 には HEV と BEV の計算例も含めた。なお、表中の GM の Volt については JC08 モードでの試験結果はないので、[JC08 モード燃費 = EPA 複合燃費 x 1.5] と仮定して得られる燃費と U_F を用いた。

Table 1 PHEV Fuel Consumption Values for Various Gasoline-to-Electricity Energy Conversion Factors

Test Results & Parameter		Unit	PHEV Prius PHV 2012	PHEV Volt 2011	BEV Leaf ZEO	HEV Prius ZW30
JC08 Mode Test Results	CD Range Electric Consumption, N_{CD}	km/kWh	8.74	6.5*	8.06	--
	CS Range Gasoline Consumption, N_{CS}	km/L	31.6	24*	--	32.6
	Utility Factor, U_F	--	0.483	0.81*	1	0
Parameter	$\eta = \infty$ (MLIT, EU)	km/L	61.1	126.3	--	32.6
	$\eta = 1.0$ (EPA, Japan New)	km/L	44.6	46.4	73.7	32.6
	$\eta = 0.6$ (Future)	km/L	37.8	32.6	44.2	32.6
	$\eta = 0.5$ (Near Future)	km/L	35.1	28.4	36.8	32.6
	$\eta = 0.4$ (At Present)	km/L	31.8	23.8	29.5	32.6

Above 'PHEV mileages' [km/L] are calculated based on the JC08 test results by varying the fuel-to-electricity conversion factor (η). * As the JC08 test results for Volt are not available, values for Volt are estimated by the author assuming that the JC08 mileage is 1.5 times of the EPA combined mileage.

Table 1 で、エネルギー変換率 η が 0.4~0.6 の範囲の燃費値は熱力学的にも意味があるとともに、一般ユーザーにとっても実用の際の燃費との乖離などの違和感がない値となっている。(ただし、PHEV の代表的燃費算出の元になっているモード燃費の実用燃費との乖離の問題は別)

エネルギー・環境対応型自動車の導入促進のために、企業別平均燃費規制方式のように充電電力駆動の車の燃費値を高く設定して政策的インセンティブとすることも考えられるが、一般ユーザーを対象とした PHEV の表示燃費には科学的に意味のある定義・算出方法が必要と考える。

ガソリンから電力へのエネルギー変換率 η の値として、火力発電の現在から近い将来における効率値などを参考にすると、 $\eta = 0.5$ 程度を用いた PHEV 代表的燃費の定義が最も合理的なものと考ええる。

7. 結言

- ◆ 電力とガソリンの 2 種のエネルギーにより駆動される PHEV のエネルギー消費率を単一の代表的燃費値で表示する方法について考察した。
- ◆ CDレンジとCSレンジのエネルギー消費の合成に必要なユーティリティファクターの値は、代表的な統計調査データから適切な統計処理方法で算出されるべきと考ええる。
- ◆ ガソリン→電力のエネルギー変換率 η が 0.4~0.6 の範囲の燃費値は熱力学的にも意味があるとともに、ユーザーにとって違和感がない値と考えられる。
- ◆ エネルギー・環境対応型自動車の導入促進のために、充電電力駆動の車の代表的燃費値を高く設定して政策的インセンティブとすることも考えられるが、一般ユーザーを対象とした表示燃費には科学的に意味のある定義・算出方法が必要と考ええる。
- ◆ PHEV の代表的燃費の定義には、ガソリンから電力へのエネルギー変換率として $\eta = 0.5$ 程度を用いるのが最も合理的と考ええる。

参考文献

- (1) 堀 雅夫, 「プラグインハイブリッド車導入の環境・エネルギーへの効果」自動車技術会論文集, Vol.38, No.2, p.265-269, (2007)
- (2) 堀 雅夫, 金田 武司, 「HEV, PHEV 導入によるエネルギー需給変化とCO₂削減の効果」自動車技術会論文集 Vol.40, No.4, p.1101-1106, (2009)
- (3) 国土交通省「プラグインハイブリッド自動車の燃費算定等に関する実施要項について」(平成 21 年 7 月 30 日 国自環第 85 号) 自動車セミナー(交文社), 48 巻 9 号(通号 566), p. 68~71, (2009)
- (4) Federal Register; Rules and Regulations, Final Rule "Revisions and Additions to Motor Vehicle Fuel Economy Label", Vol. 76, No. 129 (EPA 40 CFR Parts 85, 86 and 600 and NHTSA 49 CFR Part 575), (2011)
- (5) Society of Automotive Engineers, "Utility Factor Definitions for Plug-In Hybrid Electric Vehicles Using Travel Survey Data" SAE Standard J2841, (2010)
- (6) U.S. DOT, Federal Highway Administration, "2001 National Household Travel Survey", <http://nhts.ornl.gov/> (2004)
- (7) WLTP-DTP, "WLTP-E-Lab Sub Group Progress report",

WLTP-DTP-E-LabProc-034 (2011)

- (8) 国土交通省「プラグインハイブリッド自動車排出ガス・燃費測定方法について」<http://www.mlit.go.jp/common/000046352.pdf> (2009)
- (9) United Nations, "Agreement: Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts. Addendum 100: Regulation No. 101, Revision 2" E/ECE/324 E/ECE/TRANS/505, (2009)
- (10) EPA & NHTSA (DOT), "Environmental Protection Agency Fuel Economy Label - Final Report" <http://www.epa.gov/fueleconomy/label/420r10909.pdf> (2010)
- (11) 国土交通省/経済産業省, 「乗用自動車の新しい燃費基準」(2011.10.20)の中の別添6「電気自動車及びプラグインハイブリッド自動車の取扱いについて」, (2011)
- (12) U.S.DOE, "Petroleum-equivalent fuel economy calculation", Federal Register 10 CFR Part 474, (2000)
- (13) 水素・燃料電池実証プロジェクト(JHFC)総合効率検討作業部会「総合効率とGHG 排出の分析」報告書, 日本自動車研究所, (2011)