ハイブリッド電気自動車のバッテリー充電状態のシミュレーション* (GPS 測定データの勾配置換手法による)

坂 本 俊 之*¹

Simulation of Battery SOC State of a Hybrid Electric Vehicle (Applying a Proposed Method of Road Inclination Convert to a Data Received by GPS)

Toshiyuki SAKAMOTO*²*² Honda Motor Co., Ltd. Suzuka Factory,
1907 Hirata-cho, Suzuka-shi, Mie, 513-8666 Japan

This report evaluates a position of SOC (State of Charge) along with a down hill drive on a real world to its simulation on an emission chassis dynamometer with a gradient road load. On a down hill drive, a vehicle kinetic energy regenerates the battery continuously and an amount of charge volume which shifts the battery SOC up. Excessive charge is a negative factor for the battery life which is designed both a long term of life and a long distance of drive. This regenerating driving mode could not be evaluated on a flat road. A gradient drive way or a system forced energy into vehicle could evaluate the mode. To evaluate, on the one hand some necessary investigation is carried out to a realization of a down hill drive simulation on an emission chassis dynamometer and problems hitting upon the investigation has been clarified. On the other hand the real world data driving down hill is measured by HEV (Hybrid Electric Vehicle). The real world data collected by GPS (Global Positioning System) has fluctuated widely. This report proposes a method of spline compensation to the data for a chassis simulation test and reviews the results of the test to the real world mode and evaluates the studies. And further more study is carried out an applied chassis simulation.

Key Words: Automobile, Motion Control, Simulation, Data Processing, Filter

1. 緒 言

地球環境問題に対して各方面で様々な取り組みが行われている。交通物流機械分野は、我が国のCO₂排出量の二割を占める。中でも自動車はその九割を占め、重点的な環境技術の構築が求められている⁽¹⁾。HEV (ハイブリッド電気自動車) は、この技術手段の一つとして 2000 年前後から実用化が進んでいる。HEV は、回生エネルギーを電池へ一時溜め込んで必要な時に出力できる機能がその最大の特徴であり、エネルギーの有効利用上から優れたシステムといえる。回生エネルギーをバッテリーが取りこぼすことなく回収するには、相当容量のバッテリーを搭載する必要がある。これは、車両重量の増加やバッテリーのコストアップに繋がるため限度がある。このため、効果的なエネルギーマネジメント制御を行うことが求められる。回生エネルギーは、走行から停止に至る運転および降り勾配での運

転が主要なエネルギー回収モードとなる。降り勾配を走行中は、バッテリーへ連続してエネルギー回収が行われ、その回収量も多くなる。このためバッテリーの充電状態を表すSOCは、充電側へシフトする。過度の充電側へのSOCシフトは、車両の廃棄にいたるまでの長期・長距離寿命が要求されるバッテリーにとってマイナス要因となる⁽²⁾。平地では、降り勾配路の状況を再現するには無理があり、勾配路を使うか、外部から車両へ運動エネルギーを加える続ける動作が必要である。

今回、エミッションシャーシダイナモに勾配機能を持たせ、勾配路のSOC推移状況が再現できるかどうかを検証した。検証にあたり、HEVを使って勾配路を実際に走行し、リアルワールドデータを収集した。一方、シャーシに勾配機能を持たせた場合の検討を行い、シャーシ置換の可能性を探った。そして、シャーシへのデータ置換に際して問題点を顕在化させ、データ置換の手法を提案した。提案手法による置換データの妥当性を推定して、最適と考えられる条件からリアルワールドモードのシャーシシミュレーションを行い結果

* 原稿受付 2008 年 3 月 13 日。

*¹ 正員, 本田技研工業(株)鈴鹿製作所(〒513-8666 鈴鹿市平田町 1907)。

E-mail: toshi-yuki_sakamoto@hm.honda.co.jp

について評価した。さらに、シャーシ置換の応用へも踏み込んだので報告する。

2. リアルワールドモードの計測

2.1 実車計測システムの概要 測定に用いた実車計測システムを図1に示す。車両は、排気量3LのHEVを用いた。エンジン出力は176kW(240Hp)、モータ出力は11.9kWである。電池はNi-MH(Nickel metal hydride)をリア席シート後部へ搭載しており、システム電圧は144V、バック容量は6.0Ahである。測定計器は、GPS(Global positioning system)で位置関係データを、PC(Personal computer)で車両制御関係のデータを測定した。

Fig.1 Measurement system on vehicle

2.2 計測結果 リアルワールドでの走行は、勾配のある北米のフリーウェイで実施した。

図2は、GPSで測定した降り勾配路での走行軌跡である。標高944mのスタート地点から一度1314mまで登り、終点の116mまでの約100kmの行程を一時間弱で走行する。本勾配路は、大都市に隣接する主要幹線路であり、時間帯により通勤車両等による交通量の増大が見込まれるが、測定は比較的交通量の少ない時間帯を選んで実施した。

Fig.2 Drive way of the field test

図3は、GPSで測定した車速と標高を示す。車速は、大きく暴れておりデータとして利用するには何らかの処理を実施する必要がある。標高は、車速に比べて安定した軌跡を示している。標高値が安定している

ので、勾配は安定した値に収まりそうであるが、データソースは同じであるため一考を要す。

Fig.3 Car speed and elevation data of the field test by GPS

3. 勾配シャーシの機能

エミッションシャーシダイナモを使い、登坂抵抗をシャーシの駆動吸収負荷に加えて、勾配路のリアルワールドモードを再現させることを検討する。

$$F_c(t) = \mu_r \cdot W_c + \mu_a \cdot A_c \cdot V_c^2 + W_c \cdot \sin \theta + \frac{W_c + \Delta W_c}{g} \cdot \frac{dV_c}{dt} \quad (1)$$

ここで、

t : 時間 [sec]

V_c : 車速 [m/s]

μ_r : 転がり抵抗係数

μ_a : 空気抵抗係数

A_c : 前影投影面積 [m²]

W_c : 車両重量 [N]

ΔW_c : エンジンプラント回転部の等価慣性重量 [N]

θ : 勾配 [rad.]

g : 重力加速度 [m/s²]

式(1)は、車両の駆動力を示す⁽³⁾。右辺第一項はタイヤの転がり抵抗、同第二項は車両が前面から受ける空気抵抗、同第三項は道路勾配による登坂抵抗、同第四項は車両を加速するための加速抵抗である。式(1)の第一項から第三項までを走行抵抗と呼ぶ。式(1)の第三項で示した登坂抵抗は、第一、二項のように係数がかからず車両重量がそのまま影響する。

図4は、坂を下る状況を示す。シャーシで再現させる場合、勾配にもよるがシャーシダイナモが吸収する負荷は平地走行時の数倍に達する。このため、シャーシダイナモの駆動吸収能力と、シャーシダイナモを冷却する設備能力をも併せて確保しておく必要がある。

降り勾配走行時の運動エネルギーは、回生エネルギーとして車両へ還流する。図5の細線は、図2で示した降り勾配ルートを実走行した場合のSOCの動きを示している。

Fig.4 Road load at a downhill drive

図3の標高値から見て、920秒から降り勾配となりエネルギー回生が顕著となる。この回生エネルギーによりバッテリーが充電されSOCが上昇する動きが図5より読取れる。図5の太線は、実走行と同じ車速度プロフィールで、勾配がない同ルートにシャーシ走行した場合のSOCの動きである。車両へは降り勾配走行時の運動エネルギーが回収されないため、降り勾配相当部に入ってからSOCは一定値に張りつき、実走行のSOCの動きと異なっている。

Fig.5 SOC characteristics on chassis test to the field test

4. リアルワールドモードのシャーシ置換

4.1 置換における問題

GPSで測定した車速と標高から勾配プロフィールを求め、車速プロフィールとともにシャーシ置換データが作成できるはずである。しかし、図3に示すように、GPSで測定した車速は暴れており車速プロフィールとしては不適である。一方、標高は安定した計測値を示しているように見えるが、標高を一階微分して距離から車速を求めるのと同次元で見ると暴れることが確認できた。標高値をそのまま用いて勾配を求めると、この影響が顕在化することになり勾配プロフィールとして不適となる。このため、GPSデータへ処理や操作を加えてシャーシ置換データを作成する必要がある。そこで処理を次のとおり進めた。図1の実車計測システムで示したとおり、リアルワールドモード計測時は、車両の制御データも併せて収録している。車速も制御データの一部である

ため、この制御車速を抜き出してGPS車速と比較したものが図6(a)である。

(a) Car speed

(b) Car acceleration

(c) Road inclination, $\tan\theta$ (GPS elevation by car control distance)

Fig.6 GPS vs. car control

図6(a)のとおり、GPS車速は制御車速に位置する実際の車速が暴れてしまったことが分かる。更に両者の動きを見るため、図6(a)のGPS車速と制御車速を微分して加速度のプロフィールを求めた。これを図6(b)に示す。制御車速は、微分値で見ても安定した加速度プロフィールを示している。制御車速は、文字どおり車両の制御に用いているため精度は高い。そこで、シャーシ置換データの作成には、GPS車速に代えて制御車速を用いることとした。図6(c)は、制御車速とGPSで測定した標高値から勾配($\tan\theta$)を求めたものである。標高値は、車両の制御データとして用いていないため、収録値はGPSデータのみとなる。図6(c)は、1250秒付近でマイナス40%を越えており、このままでは勾配プロフィールとしてシャーシ置換データに適さない。

4.2 置換の手法 図6(c)の勾配プロフィールをオリジナルデータと位置付けシャーシ置換データの作成処理を行う。暴れているデータの平滑化には、一般に移動平均を取るなどのフィルタ処理手法が取られる。

この場合、前後のデータが処理によりなくなってしまうため、車速プロファイルと勾配プロファイルとのデータ点数に相違が出てくる。標高データは、図3に示すように標高値自体にノイズが加わったり、GPS車速のように暴れたりしていないため、実測値を生かすこととした。

データ置換の手法として、データ間を補間するスプライン補間⁴⁾を採用した。スプライン補間とは、図7に示すように二点間のデータを滑らかな曲線関数で結ぶものである。曲線関数は、周辺のデータ点との接続も滑らかになるように係数を決定する。雲形定規を使ってデータ点を滑らかに結ぶ作業を連立方程式の行列を解いて求めている。

補間に使う曲線関数の次数は三次とした。測定データ点 x_i ($i:1 \sim N+1$)とし、測定データ点間をむすぶスプライン補間関数を $S_j(x)$ ($j:1 \sim N$)とすると(2)式で表すことができる。

$$S_j(x) = a_j + b_j \cdot (x - x_i) + c_j \cdot (x - x_i)^2 + d_j \cdot (x - x_i)^3 \quad (2)$$

式(2)の a_j から d_j までの四つの係数を求め、データ間を滑らかに結ぶ曲線関数を決定する。係数は次の条件から求める。

- a) 全てのデータ点上を通過すること

$$S_j(x_i) = a_j$$

- b) 一次微分係数が一致すること

$$S_j'(x_{i+1}) = S_{j+1}'(x_{i+1})$$

- c) 二次微分係数が一致すること

$$S_j''(x_{i+1}) = S_{j+1}''(x_{i+1})$$

- d) 両端の境界条件を定める

$$S_j''(x_{j=1}) = 0, \quad S_j''(x_{j=N+1}) = 0$$

ここで g_j を次式とすると、

$$g_j = 1/(x_{i+1} - x_i)$$

連立方程式は、式(3)の行列式で表すことができる。なお、両端に位置するスプライン補間関数 $S_j(x)$ ($j=1, j=N$)は境界条件を代入して求めるものとする。

Fig.7 Compensated lines by spline method

データ点が $N+1$ 個ある場合は、データ点間を補間する関数式は N 個となる。(2)式のとおり式の係数は四つなので、求める係数は $4N$ 個となる。このため $4N$ 個の式を連立して解く必要がある。表1は、上記のa)からd)の解法について図7に従い具体的に解説している。図7では、データは四点であり、補間する関数式は $N=3$ となる。求める係数は $12(=4N)$ 個で、解法に必要な方程式の数 $は12$ となる。

$$= 3 \cdot \begin{vmatrix} g_1 & 2 \cdot (g_1 + g_2) & g_2 & & \\ & \ddots & \ddots & & \\ & & g_{j-1} & 2 \cdot (g_{j-1} + g_j) & g_j \\ & & & \ddots & \ddots \\ & & & & g_{N-2} & 2 \cdot (g_{N-2} + g_{N-1}) & g_{N-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} S_1'(x_1) \\ \vdots \\ S_{j-1}'(x_{i-1}) \\ \vdots \\ S_N'(x_N) \end{vmatrix} \\ + \begin{vmatrix} S_2(x_2) - S_1(x_1) & S_3(x_3) - S_2(x_2) & & \\ & \ddots & & \\ & & S_j(x_i) - S_{j-1}(x_{i-1}) & S_{j+1}(x_{i+1}) - S_j(x_i) \\ & & & \ddots \\ & & & & S_{N-1}(x_{N-1}) - S_{N-2}(x_{N-2}) & S_N(x_N) - S_{N-1}(x_{N-1}) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} g_1^2 \\ \vdots \\ g_{j-1}^2 \\ \vdots \\ g_{N-1}^2 \end{vmatrix} \quad (3)$$

Table 1 Analytical method in the case of Fig.7

	Analytical conditions	Each x in Fig.7	Equations
a)	Equation S_j passes through both x_j and x_{j+1}	$S_1'(x_1), S_1'(x_2), S_2'(x_2), S_2'(x_3), S_3'(x_3), S_3'(x_4)$	6
b)	Both the first differentiation coefficient of equation S_j and of equation S_{j+1} are equal.	$S_1'(x_2) = S_2'(x_2)$ $S_2'(x_3) = S_3'(x_3)$	2
c)	Both the second differentiation coefficient of equation S_j and of equation S_{j+1} are equal.	$S_1''(x_2) = S_2''(x_2)$ $S_2''(x_3) = S_3''(x_3)$	2
d)	Both the end point of x_j and of x_{j+1} have their boundary conditions respectively.	$S_1'(x_1) = 0$ $S_3'(x_4) = 0$	2
		Total equations	12

4.3 置換データ

4.3.1 サンプル周期と置換データ GPS の測

定データに、4.2 のスプライン補間手法を適用する。補間は、測定データをサンプルし、サンプルしたデータ間をスプライン関数で補間する手法を取った。

(a) Car speed

(b) Car acceleration

(c) Road inclination, $\tan\theta$ (GPS elevation by car control distance)

Fig.8 GPS vs. spline compensation

図 8(a)から図 8(c)は、太線が GPS の測定データ、細線が八点毎に GPS の測定データをサンプリングしてスプライン補間した例を示す。GPS のオリジナルデータを残しつつ、サンプリングしたデータ間をスプ

ライン補間することで、データの暴れが収まる様子が確認できる。

4.3.2 置換データの妥当性の推定 スプライン補間による車速は、制御車速と比較し補間程度を判断した。

Fig.9 Car speed (GPS with spline compensation vs. car control)

図 9 は、太線で示す制御車速と、細線による 16 点毎にサンプリングした GPS 車速データをスプライン補間した結果とを比較している。GPS 車速は、車速間をプライン補間しただけでフィルタ処理をしてないが、制御車速と近い挙動になっていることが確認できる。図 10 は、サンプリング点数を変えて求めたスプライン補間車速と、制御車速との相関係数を求めたものである。図 10 で示した 16 点サンプリングの近傍に相関係数のピークがあることが確認できる。

Fig.10 Estimated adaptiveness for spline compensation speed to the car control speed

そこで、この関係を GPS で測定した標高データにも適用することとした。GPS で測定した標高データを 16 点毎にサンプリングし、データ間をスプライン補間することで、スプライン補間による標高を求めた。このスプライン補間による標高と制御車速から、シャーシ置換に用いる勾配プロファイルを設定した。

5. リアルワールドモードのシャーシ再現検証

5.1 降り勾配路における計測結果 図 11(a)は、降り勾配路における SOC 推移を示す。細線はリアルワールドを、太線はシャーシ置換である。シャーシ置

換では、車速プロファイルは制御車速とした。勾配プロファイルは 16 点毎のスプライン補間した GPS 測定標高と制御車速から求めた走行距離の両者から勾配を設定し測定した。シャーシ置換の SOC 推移は、リアルワールドの SOC 推移に近い挙動を示していることが確認できる。

(a) SOC characteristics

(b) Battery temperature

(c) Regeneration into battery

Fig.11 Chassis test vs. the field test (descent way)

図 11(a)のシャーシ置換した SOC 推移は、図 5 の勾配機能のないシャーシでの SOC 推移と比較してリアルワールドに近い。しかし、図 11(b)のバッテリー温度推移特性から、シャーシ置換ではリアルワールドより温度上昇している。ここで、バッテリー温度は、バッテリーを構成する代表ブロックに取付けたサーミスタによる平均値である。

次に、バッテリーの温度上昇の原因と考えられる回生電力量について比較した。これを図 11(c)に示す。シャーシ置換のバッテリー回生電力は、1200 秒付近 (A 点) 及び 1500 秒付近 (B 点) からリアルワールドに比べて増加していることが分かる。この付近は、図 2 の GPS 航跡から降り勾配路の方位変更点に当たり、ブレーキ回生電力の差がバッテリーへの回生電力の差となって現れていると考えられる。この回生電力量の増

加分を除くと、シャーシ置換はリアルワールドと相関ある電力量推移を示すことになる。

5.2 登り勾配路における計測結果 図 12(a)は、図 11(a)で示した降り勾配路を終点から始点に向かって登った場合の SOC 推移を示す。細線はリアルワールドを、太線はシャーシ置換である。シャーシ置換は、降り勾配路の設定手法に準じ、登り勾配路用データを設定して測定した。登り勾配路でもシャーシ置換の SOC 推移は、リアルワールドに近い推移を示している。図 12(c)バッテリーへの回生電力量は、シャーシ置換、リアルワールドとも両者に差異は見られない。バッテリーの温度も、降り勾配路のシャーシ置換のように必要以上の上昇はない。

以上から、GPS 測定標高をスプライン補間して勾配プロファイルを求める手法は、シャーシ置換の SOC 推移からリアルワールドを再現しうるものと評価できる。

(a) SOC characteristics

(b) Battery temperature

(c) Regeneration into battery

Fig.12 Chassis test vs. the field test (ascent way)

6. シャーシ置換の応用

図 12(c)のとおり、登り勾配路ではバッテリーへの回生電力量に差異が見られなかった。そこで、バッテリー回生電力を増やした場合の SOC 挙動をシャーシ上

で調べてみた。具体的には、シャーシ置換で用いた登り勾配路用データはそのままとし、エアコンディショナーを切って、この負荷分をバッテリー回生電力として加える形を取った。この結果を図13に示す。シャーシ置換ではC点からSOCが増え、バッテリー内への回生電力の増加が確認できる。

Fig.13 SOC characteristics increased regeneration on chassis test to the field test

一方、D点からは、バッテリー内への取り込み量が制限され、結果的にはリアルワールドのSOCと同じ推移となった。これは、エアコンディショナーを切っていたため、バッテリーの温度が上昇して制御機能が働いたことによる。この例のように、机上で幅広い応用が可能であると考えられる。

7. 結 語

勾配機能持たせたエミッションシャーシダイナモを使い、勾配路のSOC推移状況が再現できるかどうかを検証した。勾配路で測定したGPSデータは、そのままシャーシ置換データとするには困難があった。そこで、置換手法を提案し勾配プロファイルを求め、リアルワールドが再現しうるものかどうかシャーシダイナモで検証した。シャーシ置換したSOCの推移は、降り勾配路、登り勾配路ともリアルワールドのSOC推移に近い挙動を示すことが確認できた。更に、リアルワールドのSOCとの相違を考察し、降り勾配路での回生電力の相違箇所が、ブレーキ回生電力の差が発生する方位変更ポイントであることを確認した。このポイント部を切り分けると、降り勾配路でもGPS測定標高をスプライン補間して勾配プロファイルを求める手法は、リアルワールドを再現しうるものと評価できる。本手法により求めた勾配プロファイルを用いると、シャーシダイナモ上で勾配路のリアルワールドモードが再現できることになり、机上での幅広い応用が期待できる。今後は、シャーシダイナモの勾配機能を使った可能性を更に追求して行く所存である。

文 献

- (1) The Ministry of Land, Infrastructure and Transport, The Ministry of Land, Infrastructure and Transport white paper 2007, II.The trend of land, infrastructure and transport administration 2. Provision in the transportation section, (2007)
- (2) Sakamoto, T., Matsuda, T., Honda R&D Co., Ltd., Minami,T., Honda Motor Co., Ltd., Evaluation of Hybrid Electric Vehicle Battery Life in North American Market, The 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition, <http://www.evs22.org/>, (2006)
- (3) Nasukawa, H., Miyashita, Y., Shiokawa, M., Vehicle driving performance and test method (in Japanese), Third correction version, (1999/04), P.30-31, Sankaido
- (4) Yoshimura, K., Takayama, M., Spline function applied for PC (in Japanese), (1988/12), Publications Service of Tokyo Electrical Engineering College.