

⑪ HILS システムにおける重量 Parallel-HEV のパラメータ感度解析

環境研究領域
自動車審査部

明 光在 成澤 和幸 後藤 雄一
河合 英直

1. まえがき

内燃機関から排出される二酸化炭素(CO₂)による地球温暖化の加速,ならびに化石燃料枯渇の問題から代替燃料車⁽¹⁻³⁾,電気自動車(EV),ハイブリッド電気自動車(HEV),燃料電池自動車(FCV)など多様な車種が従来から研究・開発されている.特にHEVは内燃機関と共に電気駆動モータを搭載しているため,1充電走行距離が短いEVや燃料供給インフラを再構築しなくてはならないFCVに比べ導入が容易であり,その販売台数は年々増えている.最近では乗用車のみならず数多くの重量HEVも開発されており,今後の普及が期待されている.これら重量HEVにおける排出ガス試験法が検討され,2004年6月に電気ハイブリッド重量車排出ガス測定方法の「国自環第60号」,2006年3月には電気ハイブリッド重量車燃料消費率試験方法の「国自環第278号」が公表され,重量HEVの認証試験法として適用されてきた.これらの試験法は通常「システムベンチ法」⁽⁴⁾と呼ばれる.エンジンと電気システム系(モータ,発電機,エネルギー貯蔵装置など)を組み合わせた「システムベンチ法」は,エンジンダイナモ(ED)上で過渡試験モード(JE05)を運転し排出ガスを計測する.ED上で求めたエンジン条件(回転数,トルク等)を負側トルクの算出を加えた従来型重量車の変換プログラムを入力し燃費を算出する.しかしこの試験法は,将来普及が見込まれる4輪駆動システムやホイールインモータを搭載したHEVには適用できない.これらの問題点を解決するためにハードウェアインザループシミュレータ(Hardware In the Loop Simulator)試験法が検討され,2007年3月にHILSシステムを用いた電気ハイブリッド重量車の燃料消費率および排出ガス試験方法の「国自環第281号」が公表された(図1)HILSシステムのHEVモデルには数多くの車両パラメータを入力する必要がある,その設定値によって燃費値は大きく変動する可能性がある.そのため各パラ

メータがHILS計算結果に及ぼす影響度を把握し,パラメータ設定の際には十分注意する必要がある.そこで本研究では,パラレルHEVモデルに入力する車両パラメータの感度解析を行い,燃費に及ぼす影響度を調査した上で感度の高いパラメータと感度の低いパラメータに分類し排出ガス試験時のパラメータ設定に活用する.

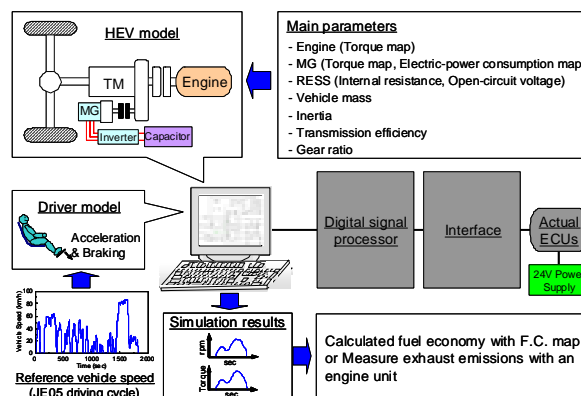


図1 重量HEVのHILS燃費・排出ガス試験法

2. HILSシステム

HILSシステムはホストPC,実機ECU,インターフェース,デジタルシグナルプロセッサ(DSP),DC電源などで構成される.それぞれの機能については表1に整理する.

3. HILSパラメータ感度解析

3.1. 対象車両及びHILSへの入力パラメータ

本研究ではキャパシターパラレルHEVをHILSパラメータ感度解析の対象車両とした.車両総重量は約8,000kgであり,6気筒ディーゼルエンジン,電子制御機械式オートマチック変速機を搭載している.電気システムとしては,永久磁石同期型モータ及びスーパーパワーキャパシターを採用している.

HILSへ入力するパラメータの内,試験対象であるエンジンやモータ,キャパシターは特性試験の計測値を入力する.これらの入力項目を表2に表す.

伝達効率, 走行抵抗係数, 回転部分慣性モーメント, ねじり鋼性及び減衰係数は「国自環第 281 号」HILS システムを用いた電気ハイブリッド重量車の燃料消費率および排出ガス試験方法に定められた値を入力する。これらの入力項目を表 3 に表す。

表 1 HILS システム各要素の機能

| | | | |
|--|---------------------|-------------------------------------|---|
| Hardware | H_ECU | HEV system control | |
| | | Clutch and shift command | |
| | | Brake torque | |
| | | Motor torque command | |
| | E_ECU | Control of injection quantity, etc. | |
| DSP | HEV Model | Driver model | Simulation of acceleration/brake opening rate |
| | | Drive model | Simulation of road load, etc. |
| | | Engine model | Simulation of engine rpm, torque and fuel consumption |
| | | Motor model | Simulation of motor rpm, torque and power |
| | | RESS model | Simulation of SOC, etc. |
| | IO Model | Input/Output analog signal | |
| | | Input /Output digital signal | |
| | | Input/Output pulse | |
| | | CAN communication | |
| | Host PC | Setup model, sampling and board | |
| Real-time monitoring of measurement data | | | |
| Save measurement data | | | |
| Analysis measurement data | | | |
| Interface | Between ECU and DSP | | |

表 2 HILS システムへの入力項目

| | | |
|------------------|---|---|
| Engine | Torque map | Torque command 11points, rpm 11p, total 121p, 2-dimensional map |
| | Max. torque map | Rpm 7p, 1-dimensional map |
| | Friction loss torque map | Rpm 7p, 1-dimensional map |
| Fuel consumption | EG rpm 10points, EG torque 11points, total 110points, 2-dimensional map | |
| Motor | Torque and power map | Rpm 10p, torque command 11p, voltage 3p, 3-dimentional map |
| Capacitor | Capacity, internal resistance, efficiency of ch/discharge | |

表 3 HILS システムへの入力項目

| | | |
|--|--|---|
| Mechanical efficiency | T/M | direct 0.98, else 0.95 |
| | Final gear | 0.95 |
| Running Resistance Coefficient * | $\mu_r = 0.00513 + 17.6/W$ | |
| | $\mu_a A = 0.00299B \times H - 0.000832$ | |
| Moment of Inertia | T/M driven gear to tire | rotating part equivalent mass is 7% of empty vehicle mass |
| | Engine to transmission driving gear | designed value |
| Torsional stiffness / Damping constant | Drive shaft | 5000Nm/rad, 300Nms/rad |
| | Propeller shaft | 60000Nm/rad, 40Nms/rad |
| | Clutch torsion spring | 2000Nm/rad, 20Nms/rad |

μ_r : 転がり抵抗係数(kg/kg), $\mu_a A$: 空気抵抗係数 × 前面投影面積 kg/(km/h)², W : 試験時車両重量(kg), B : 全幅(m), H : 全高 (m)

(* 路線バス又は一般バスの空気抵抗係数は, 上式により求めた値に 0.680 を乗じた値にする。)

これら以外のパラメータについては自動車メーカーの設計値を入力する。以上の基準パラメータのシミュレーションから得られた燃費値と基準パラメータの一つを ±1%, ±3%, ±5% ずつ変化させ計算した燃費値との比較より HILS シミュレーションに及ぼすパラメータの感度を調査した。

3.2. パラメータ感度解析の結果

3.2.1. 車速追従性, 燃費誤差及び繰返し計算時の再現誤差における検討

感度解析の前に車速における HILS の計算精度, 実走行燃費計測値との燃費誤差 HILS の計算再現性などについて調べた結果を図 2 に示す。

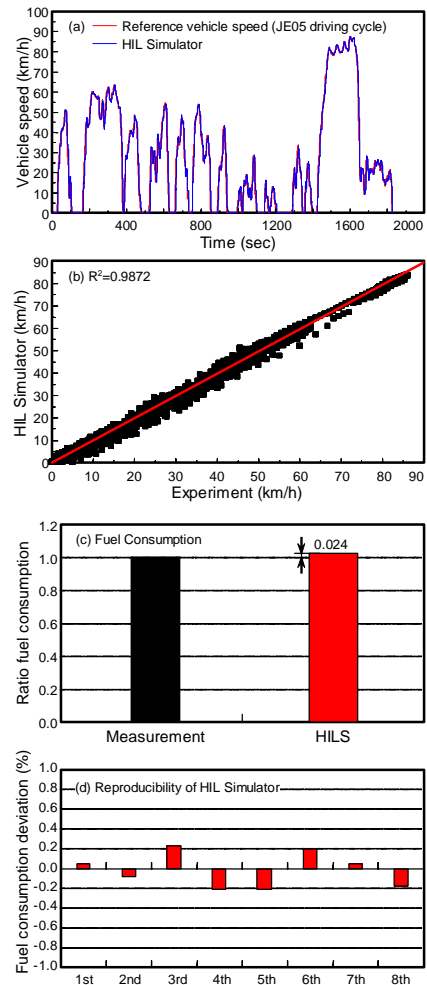


図 2 HILS の車速相関, 燃費誤差及び反復計算時の再現性

図 2(a)から分かるようにシミュレーション結果は基準車速(JE05)をよく追従し, 認証試験法に定められた速度および時間の許容誤差「走行モードのあらゆる時点において, 速度については 2km/h 以内とし, かつ, 時間においては ±1 秒以内とする。ただし, 発進時及び変速操作時は含めないこととする」を満たしてい

る . 図 2(b) の決定係数 (R^2) は 0.987 以上を示し非常に高い相関を持つ . この値は認証試験法に規定された「車速及びエンジン回転数の決定係数は 0.97 以上を許容値とし , 決定係数を算出する際 , 変速 (クラッチ断 ~ クラッチ接まで) および変速前後それぞれ 1 秒間のデータは除外することができる」をクリアする . 対象車両の JE05 モード実走行燃費値と HILS ドライブモデル走行による計算値との比較を図 2(c) に示す . HILS 計算燃費値は電気量収支エネルギー換算値の割合が下式を満たすよう蓄電装置の初期充電状態の調節を行った上で求めた .

$$|\Delta E / C| < 0.003$$

$$\Delta E = \Delta Ah \times V_{nominal} \times 3600, C = Q \times \rho \times Hu$$

ΔE : 電気量収支エネルギー換算値 (J) , C : 積算燃料消費エネルギー換算値 (J) , $V_{nominal}$: 定格電圧 (V) , Q : 積算燃料消費量 (L) , ρ : 比重 (kg/L) , Hu : 低位発熱量 (J/kg)

実車の燃費を 1 とすると HILS 燃費は 1.024 でありシミュレーション誤差は 2.5% 以下であった . この原因としては , 実車路上試験における風の影響や転がり抵抗の増加などが考えられる . 図 2(d) は繰返し計算した際の燃費における再現誤差を示し , その誤差はおよそ $\pm 0.2\%$ 以下であった . 燃費に対するパラメータの感度の判断は , 全ての条件 (パラメータ変化 : $\pm 1\% \sim \pm 5\%$) にて燃費変動率が再現誤差を超えない場合は低感度パラメータ , ある一つの条件でもその誤差を超えると高感度パラメータとする .

他 HEV システムへの適合性を調べるためにニッケル水素電池 (Ni-MH) を搭載した他社のパラレル HEV において図 2 と同様の試験を行い , 同等以上のシミュレーション結果が得られた . このことより , HILS システムの信頼性や車両モデルの精度に関する問題はないと考えられる .

3.2.2. 燃費マップ, モータ, 伝達効率, 走行抵抗係数, 回転部分慣性モーメントにおける感度解析

図 3(a) に燃費マップにおける感度解析結果を示す . 燃費マップ用のエンジントルク及び回転数マップを $\pm 5\%$ 変化させた場合 , 燃費計算値にそれぞれ約 $\pm 3\%$, $\pm 5\%$ ずつ誤差が現れる . また燃費マップデータを -5% 変化させると燃費は $+5\%$ 向上し , $+5\%$ 変化させると -5% 悪化する . 燃費マップに関連するパラメータはいずれも燃費計算値に及ぼす影響は大きくパラメータ入力時には十分な注意が必要である .

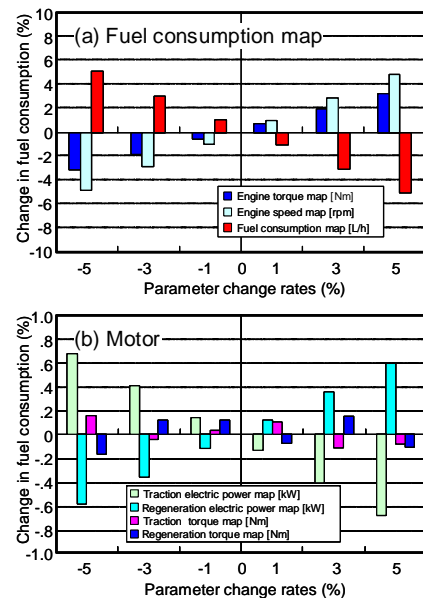


図 3 燃費マップおよび電動機における感度解析

図 3(b) にモータにおける感度解析結果を示す . モータ駆動電力を基準値より $+1 \sim +5\%$ まで変化させるとモータ消費電力の増加により燃費は悪化し , $-1\% \sim -5\%$ の変化については逆の傾向が現れる . $\pm 1\%$ の電力マップの変化に対する燃費の変動は $\pm 0.2\%$ 以下でその影響は小さいが , マップデータの変化率が $\pm 3\%$ を超えると燃費に及ぼす影響は増加し , $\pm 5\%$ においてその変動率は約 $\pm 0.7\%$ に達する . モータ回生電力においては , 駆動側とは逆の傾向を示すが燃費の最大変動は $\pm 0.6\%$ として駆動電力とほぼ同等である . 一方モータの駆動・回生トルクマップにおいては , 全てのシミュレーション条件で燃費の変動は見られない .

図 4 に伝達効率 , 走行抵抗係数 , 回転部分慣性モーメントにおける感度解析結果を示す . 図 4 (a) のディファレンシャルギア及びトランスミッションにおいて , 伝達効率の増加 (パラメータ変化 : $+1\% \sim +5\%$) は燃費の向上に繋がり , 伝達効率の減少 (パラメータ変化 : $-1\% \sim -5\%$) は燃費を悪化させる . 伝達効率 $\pm 5\%$ の変化に対して燃費はおよそ $\pm 4\%$ 変動し , これらパラメータの燃費に対する感度は高い . これに対して減速ギアの感度は低い . 図 4 (b) の走行抵抗係数の場合 , 伝達効率 (ディファレンシャルギア及び TM) に比べ感度は低いが , 走行抵抗係数 $\pm 5\%$ の変化に対して燃費の変動率はおよそ $\pm 1\%$ に至る . 図 4 (c) の慣性モーメントの場合 , タイヤを含めた車体の慣性モーメントは他パラメータに比べ質量が大きいいためその感度は比較的高く走行抵抗係数と同等のレベルである . 他慣性モーメントの燃費に対する感度は低い .

上記以外のパラメータにおいては、パラメータ変動範囲(-5%~+5%)内での燃費変化率は±2%であり、図2(d)の繰返し計算時の誤差範囲内であったため、これらが燃費に及ぼす影響は無視できる。

以上の結果を踏まえて、パラレルHEVモデルへ入力するパラメータを高感度パラメータと低感度パラメータに分類して表1に示す。

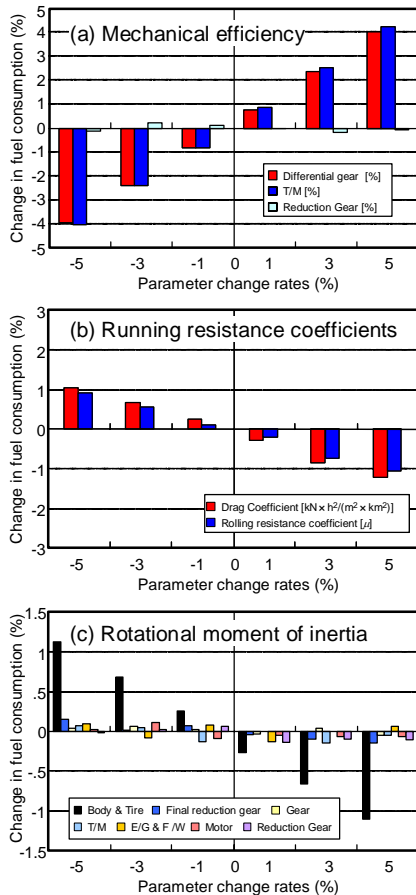


図4 伝達効率、走行抵抗係数及び回転部分慣性モーメントにおける感度解析

4. 結論

本研究ではHILSを用いた重量HEVの燃費試験におけるパラレルHEVモデルのパラメータ感度解析を行いHILS燃費計算値に及ぼす車両パラメータの影響度を定量的に分析した。その結果、燃費マップ、伝達効率(ディファレンシャルギア, TM), 走行抵抗係数, 回転部分慣性モーメント(車体+タイヤ), モータ電力マップの順に感度が高いことが分かった。これらのパラメータについてはHILSシステムの使用に当たって十分注意して値を設定しなければならない。

各パラメータは、独立変数ではないため複数の入力パラメータの相互作用、即ち低感度パラメータ(表4)

でも複数同時に変化させると燃費への影響が現れる可能性がある。今後、相互作用を含めた感度解析を進める予定である。

表4 HILS入力パラメータの燃費計算結果に及ぼす感度

| High sensitivity parameters | | Percent change in FC at ±5% parameter Changed [%] |
|------------------------------------|--------------------------------|---|
| Motor | Traction electric power map | ± 0.7 |
| | Rege. electric power map | ± 0.6 |
| Fuel Consumption map | Engine torque map | ± 3.0 |
| | Engine speed map | ± 5.0 |
| | Fuel Consumption map | ± 5.0 |
| Running Resistance Coe. | Drag Coefficient | ± 1.2 |
| | Rolling resistance coefficient | ± 1.1 |
| Mech. Efficiency | Differential gear | ± 4.0 |
| | T/M | ± 4.0 |
| Rotational Moment of Inertia | Body & Tire | ± 1.2 |
| Low sensitivity parameters | | Percent change in FC at ±5% parameter Changed [%] |
| Engine | Max. torque map | Below ± 0.2 |
| | Friction torque map | Below ± 0.2 |
| | Auxiliary brake torque map | Below ± 0.2 |
| | Acceleration map | Below ± 0.2 |
| Motor | Traction torque map | Below ± 0.2 |
| | Regeneration torque map | Below ± 0.2 |
| Capacitor | Capacity | Below ± 0.2 |
| | Internal resistance | Below ± 0.2 |
| Clutch | Efficiency | Below ± 0.2 |
| | Max. transfer torque | Below ± 0.2 |
| | Synchro max. transfer torque | Below ± 0.2 |
| Spring constant / Damping constant | Clutch coupling time | Below ± 0.2 |
| | Driveshaft | Below ± 0.2 |
| | Propellershaft | Below ± 0.2 |
| | Clutch torsion spring | Below ± 0.2 |
| Mechanical Efficiency | Reduction Gear | Below ± 0.2 |
| | Final reduction gear | Below ± 0.2 |
| Rotational Moment of Inertia | Gear | Below ± 0.2 |
| | T/M | Below ± 0.2 |
| | Engine & Flywheel | Below ± 0.2 |
| | Motor | Below ± 0.2 |
| | Reduction Gear | Below ± 0.2 |

参考文献

- (1) 川野大輔, 石井 素, 後藤雄一, 野田 明, 青柳友三, バイオディーゼル燃料適用のためのエンジンシステムの最適化, 第19回内燃機関シンポジウム(2007)
- (2) 石井 素, 鈴木央一, 川野大輔, 後藤雄一, 坂田一郎, FTD自動車の開発試作(第1報) - GTL燃料使用時のベースエンジンの排出ガス特性 -, 平成18年度交通安全環境研究所研究発表会(2006)
- (3) 佐藤由雄, 野内忠則, 及川 洋, DME自動車の実用化促進プロジェクト(第1報) - 公道走行試験の車両開発と実施計画 -, 平成18年度交通安全環境研究所研究発表会(2006)
- (4) 森田賢治, 重量HEV排出ガス試験法に関する検討 - システムベンチ法 -, 自動車技術会論文集(2005)