パラレルハイブリッド電気自動車駆動システムにおける 運転状況へのゲインスケジュール制御*

赤峰宏平^{*1}, 今村 孝^{*2}, 寺嶋一彦^{*3}

Gain-Scheduled Control for the Efficient Operation of a Power Train in a Parallel Hybrid Electric Vehicle According to Driving Environment

Kouhei AKAMINE, Takashi IMAMURA and Kazuhiko TERASHIMA^{*4}

^{*4} Department of Production Systems Engineering, Toyohashi University of Technology,
1-1 Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi-shi, Aichi, 441-8580 Japan

As environmental problems become more serious, research on the HEV (Hybrid Electric Vehicle) has become more extensively pursued by researchers in several countries. The main structure of the HEV at present is a parallel HEV. In this system, wheels of the vehicle are driven by the complex power of the motor and engine. Therefore, it is necessary to develop a complex control algorithm that appropriately distributes the torque of the combustion engine and the electric motor. In current HEVs, decomposition rate of the total torque for HEV to an engine torque and a motor torque is determined based on some simple parameters such as the state of charge or the vehicle's present speed, and so on. However, because the load pattern varies widely according to the vehicle's driving environment, the present HEV continues to show a low efficiency. Thus, the purpose of this study is development of the algorithm for power distribution to the engine and motor which is the most suitable in regard to change of load pattern for the sake of fuel economy and emission control. In this paper, first, in order to determine the optimum values in regard to fuel control, parameter analysis have been done. Secondly, an adaptive control system which will be able to adopt the power of engine and motor suitably to changes in the driving environment has been proposed. Finally, the effectiveness of the proposed control regarding the improvement of both fuel economy and emission have been confirmed through simulation analysis using Advisor-software.

Key Words: Sensitivity Analysis, Gain Scheduling, Process Control, Computer Aided Design, Automobile

1. 緒 言

近年、深刻化する環境問題への取り組みとして、ハイブリッド電気自動車 (HEV: Hybrid Electric Vehicle) の研究開発が活発になっている。HEV とは一台の車両に二種類以上の異なる動力源を搭載する自動車であり、最近ではガソリンあるいは天然ガスを燃料とした内燃機関 (ICE: Internal Combustion Engine) とモータが組み合わされたタイプが主流となっている⁽¹⁾。

HEV には大別して2種類の構造がある。一方はシリーズ HEV 方式であり、この方式では車輪はモータによってのみ駆動され、ICE は発電/充電用であるといえる。ICE を効率の高い運転点で一定負荷動作させるようエネルギーマネージメントを行い、燃費性能の向上を狙うのが一般的である。駆動力はモータのみで

発生する必要があるため、純電気自動車と同等の大容量モータが必要となり、重量、コストの点で不利である。しかし ICE の代わりに燃料電池などを使用すれば、無排出 HEV として構成することも可能でありメリットも多い。もう一方はパラレル HEV 方式である。この方式では ICE とモータの両方が車輪に直結できる構造となっており、どちらか一方あるいは両方の駆動力を効率良く用いて走行することが可能である。現在市販されている HEV はおおよそこれに近い構造を採用している。ICE / モータが、互いの動力を補って走行することが可能であり、どちらか一方のコンポーネントを大型化する必要が無く、コスト的にも有利である。先に述べたシリーズ HEV が ICE の一定負荷動作が可能なのに対し、この方式では ICE にも走行に必要な動力が要求されるため一定負荷動作は困難である。従って、ICE は低効率領域での動作を余儀なくされ、この部分をモータとのトルク配分でカバーする複雑な制御アルゴリズムが必要となる。

* 原稿受付 2002年4月2日。

^{*1} 豊橋技術科学大学大学院 (☎ 441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1)。

^{*2} 正員、豊橋技術科学大学大学院。

^{*3} 正員、豊橋技術科学大学工学部。

E-mail: terashima@procon.tutse.tut.ac.jp

近年の HEV 研究の主なターゲットは、電池、ICE、モータおよびこれらの動力を配分するための機構など、各々のコンポーネントの性能を向上させることである⁽²⁾。そのため二種類の動力源を有する HEV において、ICE / モータをどのように使い分けるかという配分条件は、電池残量、現在の车速、アクセル開度などいくつかの単純なパラメータから決定されており、これを最適化することが今後の課題となっている⁽³⁾。

また、自動車の走行に要求される負荷のパターンは、走行環境、運転者の癖などの変化によって極めて多様となることから、常に一定の条件で ICE / モータの使い分けを決定してゆくことが最適であるとは考えられない。そこで本論文では、パラレル HEV の燃費、排出性能の向上のために、変動する負荷のパターンに適応して常に最適な ICE / モータの使い分けを実現するアルゴリズムをシミュレーション解析により開発することを研究目的とする。

2. HEV 走行シミュレーションツール

本研究では HEV 走行シミュレーションツールとして米国 National Renewable Energy Lab. が開発している ADvanced VehIcle SimulatOR (ADVISOR) Ver.3.2 を用いる。このソフトウェアは MATLAB-Simulink の GUI 環境上で燃費、排出物、走行性能などをシミュレーションするためのツールであり、車両モデルやプログラムソースの編集が容易なことから、電気自動車関連のシミュレーションに幅広く利用されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

Fig. 1 Energy request flow of parallel HEV in ADVISOR

図 1 は動力源である ICE とモータをトルクカプラで動力配分するパラレル HEV を、ADVISOR によりシミュレーション解析する流れを表している。実際の車両プロセスでは燃料が入力となって ICE → ギアボックス → タイヤとエネルギーが伝達し、车速の変化が出力される。それに対して ADVISOR では走行速度パターン（车速 vs 時間）が車両プロセスへの入力となり、これに追従するために必要な燃料、電力、排出物などの逆算シミュレーションが行なわれる。サンプリングごとの车速が与えられれば、式 (1) によって車両を走行させるための推進力 F が求められる。

$$F = mgC_{rr} + \frac{1}{2}\rho C_D A v_a^2 + ma + mg \sin \theta \quad (1)$$

ただし、 m : 車両重量、 C_{rr} : 車輪の転がり摩擦、 ρ : 空気の密度、 C_D : 車体の空気抵抗係数、 A : 車体投影面積、 v_a : 空気との相対速度、 a : 加速度、 θ : 路面傾斜（登り→正）である。ここで、目標となる走行パターンに追従するために要求される ICE およびモータの速度と、式 (1) を満たす走行力を発生するために必要な ICE およびモータのトルクを、トランスミッションやトルクカプラ（動力配分機構）の伝達効率を考慮して逆算し、このときの燃料消費量、排出物、電池残量変動などをシミュレーションする。

なお、本論文における HEV 効率の評価法としては、ゼロ Δ SOC 法を適用する。これは、走行シミュレーションの開始時と終了時の電池残量 (State of Charge) 変化を繰り返し計算によりゼロに近づけることで、HEV に要するエネルギー総量を ICE の消費エネルギーに近似的に換算する方法であり、本論文では、これにより HEV の効率評価を ICE の効率評価で統一している。

3. 走行シミュレーション条件

3.1 仮想 HEV の主要諸元 ICE およびモータ等コンポーネントの大きさや、これらの動力を配分する機構などは HEV の性能に大きな影響を与えることで知られているが、現在開発されている HEV においてこれらの組み合わせは開発者の意図によって実に多様であり、一概に最良な組み合わせを提言できない。またコンポーネントの組み合わせを詳しく解析している研究⁽⁶⁾もみられるが、今回は動力配分のアルゴリズムを考案することが目的であり、詳しくは述べない。本論文で用いる仮想 HEV は、ホンダ・インサイトクラスの小型車であり、インサイトの ICE が最大 51[kW]、モータが最大 10[kW] と、ICE 主体の走行を行なう設計であるのに対し、仮想 HEV では ICE 最大 41[kW]、モータ最大 25[kW] として双方をよりバランス良く使い分けられるようにしている。主要諸元を表 1 に示す。

Table 1 Specification of virtual HEV

Total mass	940[kg]
Type	Parallel Hybrid
ICE	41[kW] Gasoline
Motor	25[kW] Synchronous
Battery	NiMH #15 115[V] 6[Ah]
Transmission	Manual 5 Speed

また本論文では、式 (1) において、 $\theta=0[\text{deg}]$ 、 $\rho=1.20[\text{kg/m}^3]$ 、 $C_D=0.25$ 、 $A=1.9[\text{m}^2]$ とした。

3.2 トルクカプラの構造 パラレル HEV は ICE とモータの 2 つの動力源を持つが、これらが共に車輪と直結する構造になっているため、ICE、モータ、車輪

の3つを連結させる機構が必要となる。図1の、<tc>ブロックのトルクカプラがこれにあたる。この動力分配機構の詳細な構造はHEVの設計指針によって実に様々なものとなるが、本論文では出来る限り特殊な機構を用いず、図2に示すトルク分配機構を用いる。

Fig. 2 Structure of torque coupler

今回用いた動力分配機構はICE, モータ, トランスミッションを直接連結する3個の固定歯車と、歯車とICEの間のクラッチから構成されている。クラッチを切断することで走行中にICEを停止したり、モータの動力のみで発進することも可能である。図2のようなトルクカプラでは、ICE, モータの一方の速度のみを変化させる速度配分は構造上不可能であり、トルクのみを任意に制御して動力配分を行なうことになる。このとき伝達損失を微小として無視すればICEトルク $T_{out,E}$, モータトルク $T_{out,M}$, トルクカプラ出力トルク $T_{out,tc}$ の間には常に式(2)の関係が成立する。

$$T_{out,tc} = T_{out,E} + T_{out,M} \quad (2)$$

ここで $T_{out,tc}$ は目標走行パターンに追従するために必要なトルクであるので既知である。従って、ここでは電池残量に伴う $T_{out,M}$ を決定するアルゴリズムを与えることによって、ICEとモータのトルク配分を決定することとなる。この詳細については後に述べる。

3.3 走行パターン 本研究で、走行環境として用いた5種類の走行パターンについて以下に示す⁽⁵⁾。

FUDS (Federal Urban Driving Schedule) FUDSは主に米国内の燃費試験等に使用されている市街地走行の典型的な走行パターンである。車速平均は31.5[km/h], 総走行距離12.0[km], 1362[s]の間に合計17回の停止がある。

FHDS (Federal Highway Driving Schedule) FHDSは高速道路の典型的な走行パターンとしてFUDSと共に用いられている。車速平均は77.6[km/h], 総走行距離16.5[km], 767[s]である。

Manhattan 重度の渋滞状態として用いたのがManhattanである。これはマンハッタン島の路線バスの走行パターンであり、大都市渋滞の典型であるといえる。車速平均は11.0[km/h], 総走行距離3.3[km], 1091[s]の間に合計20回の停止がある。

Fig. 3 Typical driving patterns

LA92モード この走行パターンはやや高速の市街地の車速パターンとして米国内で燃費評価などに一般的に用いられている。走行距離は15.8[km], 時間1437[s], 車速平均は39.6[km/h]とFUDSと比較すると速くなっており、本論文ではこれをFUDSとFHDSの中間的な走行パターンとして用いる。

Toyohashi-JAMモード この走行パターンは2001/11/19 (FRI), PM5:30から豊橋市内をホンダ・シビック(1600cc, Gasoline)で実走行したデータであり、軽度の渋滞状態の走行パターンといえる。走行距離は8.2[km], 1419[s], 車速平均は20.8[km/h]である。

4. 適応パラメータの選定

本研究の目的は、パラレルHEVが異なる走行状況に対して常に高燃費低排出となるように、走行状況に適応したパラメータ調整を行うコントローラを開発することである。そのために、まず、運転状況の変化に対してICEとモータを最適に使い分けて駆動させるために有効なソフトウェア的な調整パラメータを選定する必要がある。このパラメータ選定の条件には次のようなものが挙げられる。

- a パラメータを変動させることで、ある程度の燃費や排出物量の改善効果が認められること
- b パラメータ最適値が走行条件で変化すること

このような条件を満たすパラメータを選定するために、様々なICE / モータ使い分けパラメータについて燃費に対する感度解析を行った。

4.1 電池充電目標に関するパラメータ 式(2)において、既知の目標トルク $T_{out,tc}$ に対してモータ出力トルク $T_{out,M}$ を先に計算することによって、ICEとモータのトルク配分を決定することを述べたが、この

Table 2 Simulation condition of SOC_{lo}

Parameter	MIN	MAX	Step
SOC_{lo}	0.02	0.68	0.02

Fig. 4 Simulation results of fuel economy and SOC_{lo}

とき、電池残量に比例したモータトルクを出力するアルゴリズムとして、式 (3) を与える。

$$T_{out,M} = -\frac{\frac{SOC_{hi}+SOC_{lo}}{2} - SOC}{\frac{SOC_{hi}-SOC_{lo}}{2}} T_{charge} \quad (3)$$

ただし、 SOC (State Of Charge) は現在の電池残量を表す無次元状態量であり、Full=1, Empty=0 である。 SOC_{lo} および SOC_{hi} は電池充電目標に関係するパラメータである。式 (3) 分子の $(SOC_{hi}+SOC_{lo})/2$ は充電目標であり、分母は SOC 変動に対する $T_{out,M}$ の感度である ($0 \leq SOC_{lo} < SOC_{hi} \leq 1$)。また、 T_{charge} は SOC 変動をモータトルクに換算する係数であり、この値の増大と、式 (3) の分母の減少は同義である。

ここで、 SOC_{hi} の値を 0.7 に固定した状態で、 SOC_{lo} の値を表 2 で示すように変化させ、FUDS, FHDS, Manhattan の 3 種類で燃費シミュレーションを行い、それぞれにおける SOC_{lo} の最適値を検討した。なお、走行開始時の SOC と終了時の SOC が異なると、燃費に誤差が生じることから⁽⁵⁾、ここではゼロ ΔSOC 法にもとづき繰り返し計算し、走行開始時の SOC と終了時の SOC の差が 0.001 以内になるようにしている。

図 4 横軸は SOC_{lo} の値、縦軸は燃費である。FUDS では $SOC_{lo} = 0.02$ とした時の燃費が 22.26[km/l] と最も良く、 $SOC_{lo} = 0.68$ の時 22.00[km/l] となり今回行ったシミュレーション中最も悪い値となった。燃費の最高値と最低値の差は 1.17[%] となった。 SOC_{lo} が小さい時は全体的に高燃費であるが、 SOC_{lo} が 0.6 以上になると燃費が下降し始める。従って、FUDS 走行時には、モータの充電/放電動作トルクを大きくし過ぎない方が燃費が良くなることが予想できる。

FHDS では $SOC_{lo} = 0.58$ とした時の燃費が 29.60[km/l] と最も良く、 $SOC_{lo} = 0.66$ の時 29.56[km/l] となり最も悪い値となった。燃費の最高値と最低値の

差は 0.12[%] であり、FHDS では SOC_{lo} をいかなる値に設定しても燃費に対する影響は少ないことがわかった。 $SOC_{lo} - SOC_{hi} = 0.04$ 付近に燃費が悪くなる極値が存在し、 $SOC_{lo} - SOC_{hi} = 0.1$ 付近に燃費が良くなるピークが存在していることがわかる。

Manhattan では $SOC_{lo} = 0.66$ とした時の燃費が 10.98[km/l] と最も良く、 $SOC_{lo} = 0.34$ の時 10.85[km/l] となり最も悪い値となった。燃費の最高値と最低値の差は 1.11[%] となった。Manhattan では $SOC_{lo} - SOC_{hi} = 0.04$ 付近に燃費が良くなるピークが存在している。これは Manhattan 走行パターンでは微小な SOC 変動に対して大きなゲインでモータによる充電/放電動作を行った方が燃費が良くなることを意味する。

ここで SOC_{hi} についても同様のシミュレーションを行ったが、式 (3) の分母の関係より、 SOC_{hi} の増大と SOC_{lo} の減少による傾向は非常に似ており、図 4 に対してほぼ左右対称のシミュレーション結果が得られた。

SOC_{lo} や SOC_{hi} を操作した場合の燃費の変動は非常に小さく、制御パラメータに要求される条件 a を満たさないため、本制御系でこれらのパラメータを操作することは不適當であるといえる。

4.2 低速で ICE を停止する パラレル HEV の ICE / モータ使い分けに用いられる方法に、発進時などの低速走行時に ICE を動作させずに、モータのみで加速する方法がある。しかしこのアルゴリズムは SOC が過放電状態になる恐れがあり、量産車ではアクセル開度やエアコン ON/OFF などの状況によってはアルゴリズムを無効にし ICE とモータの両方で加速するなどの工夫がなされている。ADVISOR のシミュレーションではアクセル開度を計算しておらず、またエアコンによる負荷も不明である。そこで、以下に示す、低速運転であっても ICE を停止しないための 2 つの制約条件を設定した。

1. SOC が SOC_{lo} (0.6) を下回っていないこと
2. 走行所要トルクがモータ定格値以下であること

制約 1 は電池の過放電を防ぐためのものであり、 SOC が低下している時は充電を行うために効率が悪くても ICE で走行する。制約 2 はモータのみでは走行パターンに追従することが困難な急発進等に対処するための手段であり、ICE + モータトルクで加速する。

さらに ICE 停止しきい速度 V_{th} を設け、走行速度が V_{th} を下回り、かつ上の 2 つの条件を満たす時に ICE を停止させるアルゴリズムとした。 V_{th} が表 3 のように変化した場合に燃費に与える影響についてシミュレーションを行なった。

FUDS 走行時の最高燃費は、ICE 停止しきい

Table 3 Simulation condition of V_{th}

Parameter	MIN	MAX	Step
V_{th}	0 [km/h]	64.37 [km/h]	1.61 [km/h]

Fig. 5 Simulation results of fuel economy and V_{th}

速度 $V_{th}=22.5$ [km/h] における 22.40 [km/l] であり、FUDS での最低燃費となった $V_{th}=59.5$ [km/h] における 17.39 [km/l] と比較すると 28.78 [%] の差がある。これは、 $V_{th}=59.5$ [km/h] とした時に多用する電気エネルギーの充電を行い、ICE が燃料を余計に消費して燃費が悪化したためと考えられる。 $V_{th}=0$ [km/h]、すなわち ICE 停止をアイドリング時のみとしている場合の燃費と最高燃費を比較すると燃費改善は 0.9 [%] に留まった。

FHDS 走行時の最高燃費は、 $V_{th}=48.3$ [km/h] における 29.61 [km/l] であり、最低燃費の 29.54 [km/l] ($V_{th}=64.4$ [km/h]) と比較すると 0.26 [%] の差であり、このアルゴリズムは高速走行には殆ど効果が無いことが確認できる。

Manhattan 走行時の最高燃費は、 $V_{th}=8.0$ [km/h] における 11.25 [km/l] であり、最低燃費は $V_{th}=25.7$ [km/h] における 8.42 [km/l]、その差は 33.59 [%] であった。また $V_{th}=0$ [km/h] における燃費と比較して最高燃費には 3.4 [%] の改善が認められ、渋滞時にはある程度の燃費改善が可能であることがわかった。 $V_{th}=40$ [km/h] 付近から燃費の変化が見られないのは、Manhattan 走行パターンにこれ以上の車両速度が存在しないためである。

このパラメータは燃費に与える影響が非常に大きい。が、 $V_{th}=11$ [km/h] 付近に固定すれば全ての走行パターンでの燃費向上が見込める上、不適切な操作をすれば燃費が極端に悪化する可能性があるため、本制御系で操作するパラメータには適していないといえる。

4.3 モータトルク指令アルゴリズム 式 (3) において充電目標を 0.65 とし、 $SOC_{lo}=0.6$ および $SOC_{hi}=0.7$ に固定すると、SOC 変動に対するモータの出力は、

$$\begin{aligned} T_{out,M} &= -\frac{(0.65 - SOC)}{0.05} \times T_{charge} \\ &= -20(0.65 - SOC) \times T_{charge} \end{aligned} \quad (4)$$

Table 4 Behavior of α_1

$\alpha > 0$	$0.65 - SOC > 0$	$\alpha_1 = \alpha$
$\alpha > 0$	$0.65 - SOC < 0$	$\alpha_1 = 1$
$\alpha < 0$	$0.65 - SOC > 0$	$\alpha_1 = 1$
$\alpha < 0$	$0.65 - SOC < 0$	$\alpha_1 = -\alpha$

Fig. 6 Relationship between $T_{out,M}$ and T_{charge} , α_1

という線形関係を持つ。ここで T_{charge} を大きな値にすれば式 (4) の傾きが大きくなり、微小な SOC 変動に対して、大きな $T_{out,M}$ が発生して充放電を行なう。 $0.65 < SOC$ のときは駆動トルク（電池放電）、 $0.65 > SOC$ のときは発電トルク（電池充電）となる。

式 (4) では、充電と放電が同量の SOC 変動に対して等価に行なわれている。しかしながら、走行パターンによっては、ICE でモータを回転する充電を積極的に行なった方が良い場合や、あまり充電せずに放電を積極的に行なった方が良い場合などが考えられる。そこで、充電／放電にどちらか一方を積極的に行なうアルゴリズムとして、式 (5) を新たに提案する。

$$T_{out,M} = -20(0.65 - SOC) \times T_{charge} \times \alpha_1 \quad (5)$$

ここで α_1 は任意に設定可能な係数 α に対して表 4 のような特性を持つものとする。

$T_{out,M}$ と SOC の関係を図 6 に示す。このアルゴリズムでは α を任意に与えることによって、表 4 の条件分けにより α_1 が決定し、式 (5) のモータ出力トルクが決定する。 α を正に設定（図 6 実線）しておけば SOC に余裕があるときの放電動作は変わらないが、SOC が減少した時の充電動作トルクのみが $|\alpha|$ 倍される。逆に α を負に設定（図 6 破線）しておけば SOC に余裕があるときの放電動作のみが $|\alpha|$ 倍され、SOC が減少した時の充電動作トルクは 1 倍となる。つまり、パラメータ T_{charge} は図 6 における全体の傾きを支配し、 α は原点での折れ曲がりの度合いを支配するといえる。

ここで α および T_{charge} の組み合わせが燃費に与える影響を調査した。1 サイクルの走行パターン間を一定の α 、 T_{charge} で走行した際の燃費を、表 5 に示す組み合わせについてシミュレーションした。これに用いた走行パターンは FUDS、FHDS、Manhattan の 3 種類であり、 $SOC_{lo}=0.6$ 、 $V_{th}=0$ [km/h] である。なお表 5 よりも小さなステップや範囲外でも最適値はあまり変化

Table 5 Simulation condition of α and T_{charge}

Parameter	MIN	MAX	Step
α	-35	35	7
T_{charge}	2	72	7

 Fig. 7 Simulation results with respect to the effect of α and T_{charge} on fuel economy

しなかった。

図7は3種類の走行パターン別に、 α および T_{charge} の組み合わせに対する燃費を示したものである。図中の白い部分が高燃費、黒い部分が低燃費を表している。

図7より、FUDSでは $\alpha = -7, T_{charge} = 2$ とした時の燃費が22.28[km/l]と最も良く、 $\alpha = 35, T_{charge} = 12$ の時21.66[km/l]となり試行した中で最も悪い値となった。最高/最低燃費の差は2.90[%]である。

FHDS走行時の最高燃費は $\alpha = 35, T_{charge} = 9$ における29.61[km/l]、最低燃費は $\alpha = -21, T_{charge} = 52$ における29.28[km/l]、双方の差は1.14[%]である。 T_{charge} が小さいということは、充電/放電にあまりモータを使わず、ICEのみで走行する自動車に近くなることを意味する。また、最高燃費を示した時の α が正に大きいことから、FHDSにおいては、走行中に蓄えた電気エネルギーを少しずつ放電してゆくような制御方法が高燃費となることがわかる。

Manhattan走行時の最高燃費は $\alpha = -35, T_{charge} = 72$ における11.23[km/l]、最低燃費は $\alpha = 35, T_{charge} = 72$ における10.46[km/l]、双方の差は7.83[%]である。FUDS, Manhattan共に α が負の時に高燃費を達成している。このことより、双方共に加減速が多いため、回生ブレーキによる電力回収が多くなされ、その結果 α を正にしてICEでモータを強制的に回転させて発電するよりも、 α を負にしてモータは駆動（放電）中心に使用し、充電は回生ブレーキ中心にする制御方法にした方が、燃費が良くなることが予想できる。

これらの結果より、 α と T_{charge} を変化させることは燃費に対して大きな影響を与え、また走行パターン

の違いによって最適点も異なることがわかり、他のパラメータよりも調整パラメータとして適しているといえる。従って本論文では走行状況変化に応じて α と T_{charge} を逐次更新する制御系を構築する。

5. 車速平均への適応

5.1 制御の流れ 前節に示した α と T_{charge} の最適値導出シミュレーションは、デスクトップPC (AMD: Athlon 1.4[GHz]) を用いて45[min]程度の時間が必要であり、実車に搭載されているCPUにおいてリアルタイムでこの解析を行なうことは困難である。そこで本論文では、調整パラメータの最適値導出と走行状況の把握を以下のような流れによって行うパラメータ制御を提案する。

1. 数種類の代表的な走行パターンで α と T_{charge} の最適値導出シミュレーション
2. 走行パターンの車速平均と、最適な α, T_{charge} の関係を数式化・スケジューリング
3. 走行中に走行パターンを解析（車速平均の抽出）
4. 抽出された車速平均と、2で述べた関係式から最適な α, T_{charge} を導出

上の手順において、1および2を手元のPCでオフラインで行なうため、実車で行なう計算は、3の車速平均の導出と、4の α, T_{charge} の導出のみとなる。走行状況の把握には一般に、アクセル開度や車両装備情報が用いられることが多い。しかし、これらは運転者の志向や車両固有の機能に依存するパラメータである。本論文においては、実車のCPUで処理する上で比較的少ない計算量でリアルタイムに変化する走行状況を把握することが可能な情報として、車両速度の平均値を採用することとした。

5.2 排出物の考慮 燃費と排出物量の両方を考慮するために、式(6)のような評価関数を考える。

$$J = E_{gas}^{-W_{gas}} \times NOx^{W_{NOx}} \times CO^{W_{CO}} \times HC^{W_{HC}} \quad (6)$$

ただし、 E_{gas} : 燃費[km/l]、 NOx : NOx 排出量[g/km]、 CO : CO 排出量[g/km]、 HC : HC 排出量[g/km]、 W はそれぞれに対する重みである。排出量は少ない方がHEVの性能が優れているのに対して、燃費の数値は大きい方が良いので逆数としている。重み付けとしては、燃費に関する評価をやや重要視し $W_{gas} = 2$ 、 $W_{NOx} = W_{CO} = W_{HC} = 1$ とした。

5.3 車速平均と最適 α, T_{charge} の関係 第3.3節で述べた5つの走行パターンそれぞれについて、表5に示した条件で、式(6)の評価関数が最小となる α, T_{charge} を求めるシミュレーションを行なった。この結果を表6に示す。また図8はそれぞれの走行パターン

Table 6 Optimal value of α and T_{charge} on each driving pattern

Driving Pattern	Average Speed [km/h]	Optimal α	Optimal T_{charge}
Manhattan	11.0	-35	58
Toyohashi-JAM	20.8	-21	9
FUDS	31.5	-28	2
LA92	39.6	-7	2
FHDS	77.6	14	51

Fig. 8 Locus of optimal α and T_{charge}

の車速平均を横軸にとり、このときの最適 α および T_{charge} を縦軸にプロットしたものである。

α に関しては表 6 の関係を表現する最小 2 乗近似された 3 次関数 (図 8 中の実線) を車速平均に対する最適関係式とし、 T_{charge} に関しては、いかなる場合もゼロ以下を与えてはならないことと、 α よりもデータの傾向に規則性があるため図 8 破線で示す線形補間式を車速平均に対する最適関係式として与える。

なお、ここで導出した最適パラメータは一定のモードで長時間走行した際に現れる傾向にもとづくものである。つまり短時間の走行データには加減速や停止時間のばらつき多く、これが最適パラメータに大きく影響することが考えられ、車速平均に対する最適パラメータが特徴的に現れない。また、本論文で用いている効率評価方法 (ゼロ Δ SOC 法) の性質上、電池残量の変化を考慮するのに十分な走行データ量が必要である。よって、上記関係式の導出には、ある程度長時間の走行データが必要であるといえる。

さて、この 2 つの関係式の役割は、入力された速度に対してそれぞれ α 、 T_{charge} を出力することである。自動車が走行しながら現在の走行状況を検知するには、任意の時間内の移動平均をとる方法が簡単であるが、走行中に未来の速度を予測することは困難であるので、ここでは過去の任意時間における平均値を関係式への入力とする。平均値は毎サンプリング (1[s]) 更新される移動平均を用いることになるが、移動平均をとる長さの妥当性については調査する余地がある。

また、 α および T_{charge} における最適値の曲線は車速平均 11.0[km/h]~77.6[km/h] の範囲で構築されてい

Fig. 9 Gain-tuning of α and T_{charge} from speed average in time interval of 400s in FUDS

る。この範囲外のデータに関しては近似曲線などによる外挿を行なう方法もあるが、今回は範囲外での外挿は行わず、最大値および最小値を図 8 中の鎖線のようにホールドした関係式を用いる。

5.4 ゲインスケジュールド制御 図 8 に示す車速平均と最適 α 、 T_{charge} の関係に対し、FUDS を走行中に過去 400[s] 分の車速平均を計算しながら、逐次最適 α 、 T_{charge} を導出するシミュレーションを行なった結果を図 9 に示す。

図 9 の 1 段目は走行中の過去 400[s] の車速平均である。2 段目は図 8 に示す関係式から導出されたパラメータ α 、 T_{charge} である。3 段目は ICE およびモータの出力トルクであり、ここでは不適切なパラメータによるモータトルクの発散などの現象が無かったことが確認できている。関係式に与える車速平均の計算時間については、長すぎるとパラメータの適応性能が悪くなり、短すぎるとパラメータが極めて変動的になった。結果として燃費排出性能の低下が見られた 400[s] 程度が妥当であると判断した。

5.5 制御系適用の効果 走行中にパラメータを更新しない従来の制御系設計手法では、様々な走行環境に対して燃費排出性能がロバストに高くなるようにするのが妥当であった。 $\alpha=7$ 、 $T_{charge}=2$ と設定した時、FUDS、FHDS、Manhattan における式 (6) の評価関数値の合計積を最小にすることができるため、これを従来型の方式に基づくロバスト制御とし、設計したゲインスケジュールド制御結果との比較を図 10 に示す。

棒グラフにおいて、上に伸びているのがロバスト制御の性能と比較した時のゲインスケジュールド制御方式の改善量、下に伸びているのが悪化量を意味する。FHDS など若干悪化した結果もあるが、燃費と排出両方を考慮した評価関数の値は 3 つのパターン共にゲインスケジュールド制御のほうが小さくなっており、特に Manhattan では燃費 2.34% 向上、NOx 3.49% 削減

Fig. 10 Effects of gain-scheduled control comparing with robust control in various driving patterns

Fig. 11 Sub-optimal control in FUDS

などの効果があり、今回考案したゲインスケジュールド制御系の有効性が確認できた。

6. 準最適制御

本論文で提案したゲインスケジュールド制御系の効果を比較検討する対象として、以下の準最適制御を提案する。ここでは FUDS を 200[s] ごとに区切り、それぞれの区間について表 5 の範囲での最適 α , T_{charge} をオフラインで求め、図 11 のように走行シミュレーション中 200[sec] 毎に α と T_{charge} を更新してゆく方法を用いて、ゲインスケジュールド制御系との比較を行なった。図 12 に一定パラメータでのロバスト制御と、ゲインスケジュールド制御および準最適制御を比較した結果を示す。

図 12 で、準最適制御は今回考案したゲインスケジュールド制御よりも高燃費、低排出となることがわかる。しかし、図 11 のような 200[s] ごとの準最適パラメータを求めるためには、あらかじめ走行パターンが完全に既知であることが前提となるうえ、今回 1392[s] の準最適パラメータを算出するために約 4 時間かかったように計算時間も多く必要ことから、実車に搭載することを考慮すればゲインスケジュールド制御の方が現実的であるといえる。

7. 結 言

パラレル HEV における ICE とモータの使い分けアルゴリズムにおいて、充電領域と放電領域でモータ出力トルク特性を変えるパラメータ α , T_{charge} を提案し、

Fig. 12 Comparison between gain-scheduled and sub-optimal control in FUDS

これらの燃費に対する感度解析からゲインスケジュールド制御で操作するパラメータに適していることを示した。また、 α , T_{charge} を車速の平均値に合わせて走行中に適応させるアルゴリズムを考案した。その結果、渋滞状態で燃費 2.34% 向上、NOx 3.49% 削減などの効果をシミュレーションツール ADVISOR によって確認した。また、本論文において採用した効率計算が走行中の電気エネルギー収支を 0 に近づける手法であることから、急な加減速に応じてモータを稼働させるような一般の動力配分に比べて、状況に適した電気エネルギー配分による効率改善が期待できる。

今後の課題としては、車速平均に加えて加速度平均や速度変化周期などを考慮したゲインスケジュールド制御系への改良や、より実車に近い環境での制御実験などが望まれる。

文 献

- (1) 自動車パワーエレクトロニクスシステム・制御調査専門委員会, “自動車パワーエレクトロニクスシステム制御の動向と課題”, 電気学会技術報告, **690** 号, (1998)
- (2) 大庭秀洋, 山中章弘, 勝田浩司, 上地健介, “CVT を用いたミニバン用ハイブリッドシステムの開発”, *TOYOTA Technical Review*, **51-2**, (2001), pp.76-81
- (3) 小竹元基, 永井正夫, 鎌田崇義 “パラレル型ハイブリッド電気自動車の駆動力制御に関する研究” 日本機械学会論文集 C 編, **66-644**, (2000), pp.1116-1121
- (4) K. B. Wipke, M. R. Cuddy, S. D. Burch “ADVISOR 2.1 : A User-Friendly Advanced Powertrain Simulation Using a Combined Backward/Forward Approach”, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, **48-6**, (1999), pp.1751-1761
- (5) R. D. Senger, M. A. Merkle, D. J. Nelson, “Validation of ADVISOR as a Simulation Tool for a Series Hybrid Electric Vehicle”, *Society of Automotive Engineers*, **SP-1331**, (1998), pp.95-115
- (6) Z. Rahman, K. L. Butler, M. Ehsani, “Designing Parallel Hybrid Electric Vehicles Using V-ELPH 2.01”, *Proceedings of American Control Conference*, **1999-4**, (1999), pp.2693-2697