

CGT を用いた自動車用ハイブリッドシステムの走行性能評価

Running Performance Evaluation of CGT/Electric Hybrid System for Automotive Use

荒 木 智 彦*・吉 識 晴 夫**
Tomohiko ARAKI and Haruo YOSHIKI

1. 緒 言

地球環境問題や都市大気環境問題が深刻化する中、自動車がこれらの問題に与える影響が無視できない状況になった。特にディーゼル車は自動車保有台数の18%しかないが自動車起因の窒素酸化物の75%、粒子状物質ではほぼ全部を占めており、環境負荷の大きな車と言える。しかし、バスやトラックではディーゼルエンジンに頼らざるを得ないのが現状である。特に路線バスは発進停止が多く、低速走行により燃費及び排ガス性状が著しく悪い。そこで小型、軽量、高効率、排ガスがクリーンなCGT（セラミックガスタービン）を用いたハイブリッドシステムの路線バスへの適応を提案し、シミュレーションによりその走行性能評価を行なうことを研究目的とした。

2. ハイブリッドシステムの設計

本研究のハイブリッドシステムはシリーズ型とした。要求性能及びモータ効率の向上から3段変速機を搭載した。図1にハイブリッドシステム概念図を示す。

2.1 CGT

CGTは高熱効率化のためTIT=1350℃一定の運転線に沿って運転するとした。出力特性、排気特性は文献[1]のCGT回転数に対するCGT軸出力及び燃料流量の静特性マップ、燃焼器の単体定常実験データから算出した。動特性は発電機を含む回転系の慣性のみを考慮し、回転系に対する運動方程式をルンゲークッタ法で解いた。CGT特性を図2に示す。

2.2 モータ、発電機

モータ及び発電機には永久磁石式（PM）を用いるとした。PMは励磁に永久磁石を使うため励磁電流が不要であり、構造も簡単になると共に効率もよい。シミュレーシ

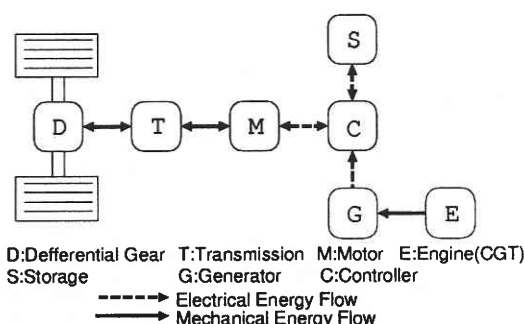


図1 ハイブリッドシステム概念図

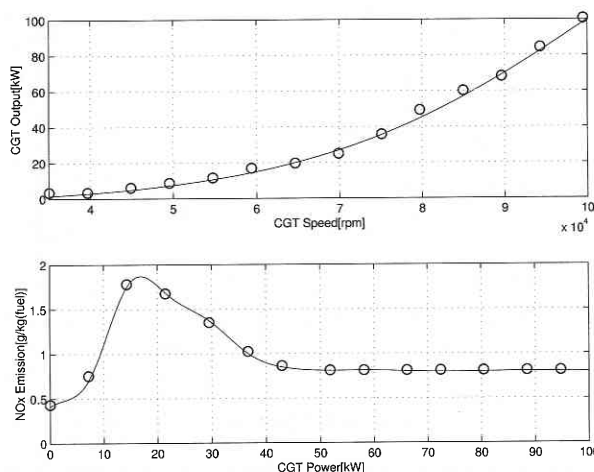


図2 CGT 特性

ンでは文献[1]の設計値を用い、各作動点ごとにインバータ損、銅損、無負荷損、漂遊負荷損を計算して効率を求めた。

2.3 蓄電池

蓄電池には比較的安価かつ高パワー密度の鉛蓄電池を採用した。文献[2]の鉛蓄電池の定常充放電特性の実験値から起電力及び内部抵抗を放電深度（DOD）の関数として

*東京電力（株）

**東京大学生産技術研究所 第2部

数式化し、内部抵抗による発熱損失から充放電時の効率を求めた。また、大電圧での充電は電池の寿命を縮める原因となるので定格電圧の1.25倍を超える場合は1部の充電電力を回避させるとした。

2.4 フライホイール蓄電装置

フライホイール蓄電装置は化学電池とは異なりエネルギーをフライホイールの回転エネルギーとして蓄える。高エネルギー密度で急速かつ大電力の充放電に適している。本研究では文献[3]の小型フライホイール蓄電装置を後述の負荷追従制御方式で鉛蓄電池と併用し、車の加速時のエネルギー放出、減速時の回生エネルギー回収に使用した。

2.5 ブレーキシステム

通常、車のブレーキシステムは前後輪が同時にロック寸前となるような理想制動力配分に近い制動力配分となっている。この理想制動力配分は安全性の上では有効である。しかし、回生ブレーキを持つハイブリッド電気自動車(HEV)にとってはせっかくの回生エネルギーを捨てることになり(4駆を除く)、そのメリットを生かしきれない。そこで本研究対象としているHEV(後輪駆動車)に適した制動力配分を検討した(図3)。ただし前輪ブレーキは油圧式ブレーキのみで、後輪ブレーキはできるだけ回生ブレーキとし、モータトルクが足りない場合、その分だけ後輪油圧式ブレーキを加える。

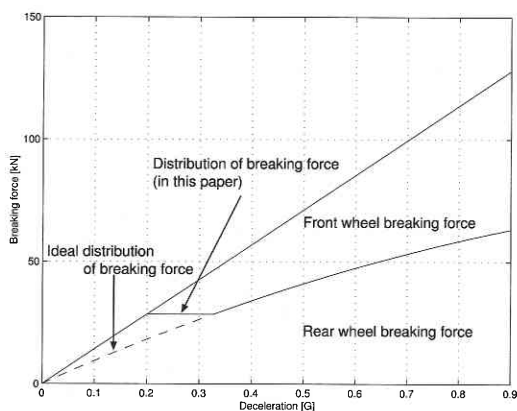


図3 制動力配分

3. CGT 運転制御方法

3.1 ON-OFF 制御

シリーズ型 HEV の基本的な発電方法である。電池残存容量 (SOC) があらかじめ定められた下限に達したらエンジンの効率の良い点で発電を行なう。また SOC があらかじめ定められた上限に達したらエンジンを停止 (アイドル) する。利点はエンジン、発電機の効率がよいこと、制御系が簡単なことであり、欠点は走行状態によっては電池の充放電効率の

影響を大きく受けること、非発電状態での走行エネルギーはすべて電池から供給するので電池搭載量が多いことである。

3.2 負荷追従制御

走行負荷及び SOC から発電機出力の目標値 (目標発電機出力: P_{Gt}) を決定し、それに応じてエンジン出力を変化させ、なるべく発電機出力のみで車両を駆動させる発電方法である。SOC の上下限を定め、SOC が適切な幅にある時はその走行を実現するのに必要な発電機出力 (P_M) を P_{Gt} とする。また上限に達したら P_M に放電係数をかけた値を P_{Gt} とし、下限に達したら P_M に電池の最大充電可能電力に充電係数をかけたものを加えた値を P_{Gt} とする。このように P_{Gt} を定めることにより SOC をある幅で保つことができる。利点は走行エネルギーの大部分を発電機出力から供給するので電池搭載量が少ないこと、電池の充放電効率の影響を受けにくいことであり、欠点は走行状態によってはエンジン、発電機の効率が悪いこと、制御系が複雑なことである。

4. シミュレーション

以下では、ON-OFF 制御-蓄電池システムを 'ON-OFF'、負荷追従制御-蓄電池システムを 'LT1'、負荷追従制御-蓄電池+フライホイール蓄電装置システムを 'LT2' とする。

4.1 走行モード

走行モードには都内路線バスの実走行モード及び市街地の多少混雑した走行を想定した10モードを使用する。ただし、路線バス用の統一された走行モードは存在しないため、文献[4]のモードを使用する。

4.2 HEV 諸元

表1にHEV諸元を示す。

4.3 性能評価方法

燃費は低公害車の重要な評価基準である。しかし、HEVのエネルギー源は燃料と電気であるため、その燃費評価が非常に難しく、統一された評価法もない。HEVでは走行状態によって電池からの持ち出し電力が多い場合は燃費がよくなり、逆の場合は悪くなる。そこで走行モードを多数回繰り返して走行燃費を算出する方が真の値に近くなると言える。そこで今回はシステムの性能評価に50サイクル終了時の値を用いることにした。

4.4 計算結果及び考察

表2に計算結果を示す。また図4に蓄電池のSOCの時間変化を示す。フライホイール蓄電装置のSOCはその下限に達することがなかったので省略する。ON-OFF制御(ON-OFF)ではCGT平均熱効率は最高熱効率に近い値を示しているが、発電機出力が直接モータを駆動させる割合

表 1 HEV 緒元

車両総重量 [kg]	14,640 (ON-FF) 14,440 (LT 1) 14,483 (LT 2)	エンジン形式 定格出力 [kW] 定格回転数 [rpm]	CGT 100 100,000
モータ形式 定格出力 [kW] 定格/最高回転数 [rpm]	PM 86.1 1,063/2,834	発電機形式 定格出力 [kW] 定格/最高回転数 [rpm]	PM 50 6,000/10,000

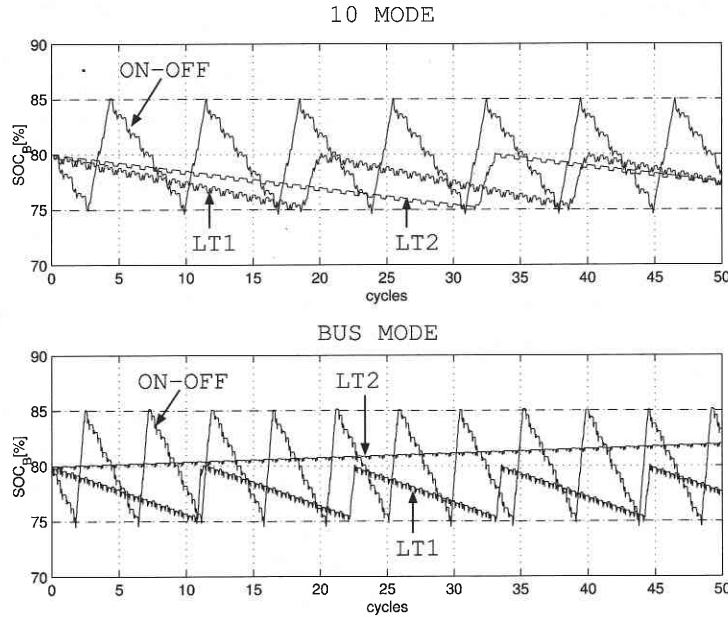


図 4 SOC の時間変化

表 2 計算結果

	ON-OFF		LT 1		LT 2		ディーゼル	
	10	バス	10	バス	10	バス	10	バス
CGT 平均熱効率 [%]	39.6	39.6	34.9	33.9	34.8	33.7		
発電機出力が直接モータを駆動させる割合 [%]	18.1	18.1	81.7	72.6	89.0	90.8		
蓄電池で回避される充電用電力 [kWh]	1.26	4.76	0.848	6.62	0.013	0.426		
燃費 [km/l]	2.92	2.00	3.39	2.33	3.55	2.64	2.3	1.8
NOx 排出量 [g/km]	0.211	0.301	0.221	0.294	0.210	0.252	14.0	19.5

は 10 % 台と非常に低い。一方、負荷追従制御 (LT 1, LT 2) では CGT 平均熱効率は 30 % 台前半と低めであるが発電機出力が直接モータを駆動させる割合は 70 % ~ 90 % と高い。これらはそれぞれの制御方法の特徴である。ところで、発電機出力が直接モータを駆動させる割合は LT 1 より LT 2 の値が大きい。LT 1 では CGT が目標とする回転

数になるまでは出力のすべてを回転数上昇用を使用するため、その間の走行は電池出力で行う。回生などで電池にも充電する機会があるが、減少分よりも少なかったために、SOC が減少し、下限に達して故意に電池に充電する機会が多かったために低くなった。また、バスモードの LT 2 では SOC が上昇している。これは 10 モードよりもバスモ

..... 研 究 速 報
 ードの方が回生エネルギーが多いためである。

制限電圧により蓄電池で回避される充電用電力を ON-OFF と LT 1 で比べると 10 モードでは LT 1 の方が少ないが、バスモードでは LT 1 が多くなっている。負荷追従制御では回生時は CGT をアイドル状態にして CGT の回転エネルギーを発電機で吸収し、減速させる。その際、電池にはモータからの回生電力と発電機からの電力が充電されようとする。もし、これらの電力の和が電池の最大充電可能電力を超えていたらその 1 部の電力が回避される。負荷追従制御では毎回の減速についてこのようなことが起こる。ON-OFF でも ON 状態（発電状態）で回生が行われていれば充電電力が回避される可能性があるが、OFF 状態（非発電状態）では回生電力のみで発電機出力はない。よって、どちらが回避される電力が多いかは走行モードや ON-OFF 幅などの制御係数にも影響されるので一概には言えない。バスモードで回避させる電力が多いのは回生電力が大きく、加減速も多いからだと考えられる。LT 2 では両方の走行モードで回避電力が飛躍的に減少している。これは LT 2 では回生エネルギー及び CGT 減速エネルギーを優先的にフライホイールで吸収したため、電池にはあまり大電力がかからず、回避される電力も大幅に減少したからである。

次に文献[5]のディーゼル車の性能データを用いて HEV とディーゼル車の性能を比較する。燃費ではすべてのハイブリッドシステムでディーゼル車を上回り LT 2, LT 1, ON-OFF の順で高い。よって燃費には CGT 平均熱効率よりも発電機出力が直接モータを駆動させる割合が大きく影響を及ぼし、ON-OFF 制御よりも負荷追従制御が優れているといえる。また、鉛蓄電池とフライホイール蓄電装置の併用は有効であることが確かめられた。NOx 排出量はすべてのハイブリッドシステムでディーゼル車より圧倒的に優れていることがわかる。ところで、NOx 排出量は LT 1 よりも LT 2 が低い。CGT の NOx 排出量はその特性 (図 2) より部分負荷で多いことがわかる。LT 1 では LT 2 より

SOC が下限を下回る回数が多いためその分 CGT 出力は高負荷となり、走行状態によっては NOx 排出量が少ない場合もある。しかし、本研究では SOC が下限を下回った場合は初期値に戻るまではたとえ停車時であっても発電を行っている。アイドル時の NOx 排出量は駆動時の排出量に比べてはるかに低いため、総合的には LT 2 がより低い値となった。LT 1 と LT 2 の NOx 排出量の差がバスモードで 10 モードよりも大きいのは停車時間の占める割合がバスモードでは全体の 51%、10 モードでは 27% とバスモードの方が多いためである。ON-OFF 制御については発電中は最大出力発電であるので排出量は低く、発電時間、発電回数に関係するので走行モードに依存すると考えられる。

5. 結 論

セラミックガスタービンを用いた自動車用ハイブリッドシステムは燃費、NOx 排出量についてディーゼル車より優れていることがわかった。また、CGT 運転制御は ON-OFF 制御よりも負荷追従制御が優れており、フライホイール蓄電装置を併用することにより更に性能が向上することがわかった。

(1999 年 7 月 19 日受理)

参 考 文 献

- 1) 石油産業活性化センター：自動車用 CGT ハイブリッドシステムに関する調査報告書，1993。
- 2) 伊藤他：小型セラミックガスタービンを用いた自動車用ハイブリッドシステムの研究，第 12 回ガスタービン秋季講演会講演論文集，pp.199-204, 1997。
- 3) 高橋勲：電気自動車用小型，大出力，長寿命フライホイールエネルギーシステムの開発，平成 10 年電気学会産業応用部門全国大会論文集，pp.33-36, 1998。
- 4) 石油産業活性化センター：CGT ハイブリッド電気自動車の調査研究報告書，1996。
- 5) 半田統敏：セラミックガスタービンの応用展開，日本ガスタービン学会誌，Vol.25 No.98, pp.57-60, 1997。