

自動車のマイクロプロセッサ制御システム

長瀬 宏, 五十嵐伊勢美

豊田中央研究所

1. はじめに

GMは、1977年型 Oldsmobile Toronado に初めてマイクロプロセッサ(μP)によるエンジン制御システムを搭載した。これを契機に、μPはエンジン制御をはじめ、多種情報システム、電子同調ラジオ、エアコン制御などに次々導入され始めた。最近の高級車には、4~8ビットのμPを数個使用しているものも出現している。この背景には、厳しい排気、燃費規制に対応するための、複雑で、きめの細かいエンジン制御の必要性と半導体技術の進歩によるLSI価格の低下を挙げることができる。

表1に米国の乗用車の排気と燃費規制の最近の推移を示す^{1),2)}。一方、国内の乗用車の現在の排気規制(1978年規制)は世界で最も厳しい規制と言われている。また燃費についても、昭和60年度には、ガソリン乗用車の燃費を昭和53年度より6.5~12.6%向上するよう義務付けられている³⁾。

このような状況のもとに、各自動車メーカーはエンジンのエレクトロニクス化を積極的に進め、初めに排気対策を主目的としたアナログ式の電子制御システムを導入した。GMのアナログ式C4システム、FordのECU-Aシステム、Chryslerのリーンバーン制御システム、トヨタのEFIシステム、日産のEGI、ECCシステム等はこの例である。しかし、排気と燃費の両立を考えると、アナログ式は、次の点で不十分であった。すなわち、運転状態に応じた複雑で多様な制御に対応できない、調整が複雑でエンジンあるいは車種の違いに対する柔軟性に欠けるなどの点である。これらを解決する方法として、次にμPによるデジタル制御方式の開発に積極的に取り組み出した。ここで注目すべきは、デジタル式はランダムロジックによる制御を飛び越えて、一挙にμPによる制御から出発した点である。

一方、半導体工業、特にLSI技術の進歩はめざましく、1チップのμP、14チップのマイクロコンピュータを生み出し、価格も十分車載可能な程度まで低下してきた。この結果、μPはエンジン制御をはじめ、自動車の各種制御システムに急速に導入され始めた。ここでは、エンジン制御を中心に自動車のμP制御システムの現状と今後の動向について概説する。

2. エンジン制御システム

表2は、これまでで実用化されたμPによるエンジン制御システムの制御機能、使用CPU、RAM/ROM容量、特徴などをまとめて一覧表にしたものである^{1),4)~24)}。この表をもとに、制御機能、各社の特徴、システム構成の順に述べる。

表1 米国の乗用車の排気燃費規制の推移

	49 STATE	CALIFORNIA	CAFE*
1978	1.5/15/2.0	.41/9.0/1.5	18
1979	1.5/15/2.0	.41/9.0/1.5	19
1980	.41/7.0/2.0	.41/9.0/1.0	20
1981	.41/3.4/1.0	.39/7.0/0.7	22
1982	.41/3.4/1.0	.39/7.0/0.7	24
1983	.41/3.4/1.0	.39/7.0/0.4	26
1984	.41/3.4/1.0	.39/7.0/0.4	27
1985	.41/3.4/1.0	.39/7.0/0.4	27.5
	HC/CO/NOx	(g/mile)	(MPG)

*CAFE(Corporate Average Fuel Economy)

$$= \frac{\text{全モデルの合計生産台数}}{\frac{\text{モデルAの生産台数}}{\text{モデルAの燃費(MPG)}} + \frac{\text{モデルBの生産台数}}{\text{モデルBの燃費(MPG)}} + \dots} \quad (\text{MPG})$$

表2 マイクロプロセッサによるエンジン制御システム

メーカー	システム名 ^(注)	形式	制御機能 ^(注)			使用CPU		メモリ容量 (x1000000)		特徴	文献				
			点火時期	空燃比	EGR	2次空気	アイドル回転数	タイプ	MOS構造			ビット数	RAM	ROM(PROM)	
GM	MISAR	'77	○				ローソワエル	カスタム	P	10	1024W		・自己診断機能 ・学習制御 (スタンバイRAM) 4)~8)		
	C4	'79		○			モトロー	6802	N	8	128B*	4KB(256B)			
		'80	○	○			モトロー	カスタム	N	8	256B	8KB(1KB)			
		'80	○	▲		○	モトロー	カスタム	N	8	256B	8KB(1KB)			
フォード	DEFI	'80	○						N	12			・Processor Assembly + Calibration Assembly 1), 9~11)		
	EEC-I	'78	○		○		東芝	カスタム	N	12					
	EEC-II	'79	○	○		○	東芝(TI)	カスタム	N	12	2.5kW				
	EEC-III	'80	○	○		○	モトロー(東芝他)	カスタム	N	8/10		2.5kW			
		'80	○	△		○						8kW			
MCU-A	'80	○	○		○	インテル(東芝他)	8048	N	8						
クライスラー	SCC	'78	○								32B	1KB(?)	・燃料線消去型のEPRM(Assembly Plant) (アセンブリ) ・CPU信号行本(周波数可変)システム 12)~14) ・制御ユニットはエンジンルーム設置		
		'79	○	○			RCA	180Z	C	8	32B	2KB(25KB)			
		'80	○	○		○									
ボッシュ(BMW)	MOTRONIC	'79	○		■		RCA	180Z	C	8			15),16)		
AMC		'80	○	○									17)		
日産	ECCS	'79	○	□		○	モトロー(日立)	6802	N	8	128B*+128B	8KB	18)~22)		
三菱	ECI	'80		△			インテル(三菱)	8048	N	8	64B*	1KB*	23),24)		
トヨタ	TCCS	'80	○	□		○	東芝	カスタム	N	12	4kW		自己診断機能		

注1) MISAR: Microprocessed Sensing & Automatic Regulation, C4: Computer Controlled Catalytic Converter, DEFI: Digital Electronic Fuel Injection, EEC: Electronic Engine Control, MCU: Microprocessor Control Unit, SCC: Spark Control Computer, ECCS: Electronic Concentrated engine Control System, ECI: Electronic Controlled Injection, TCCS: TOYOTA Computer Controlled System
 注2) ○: FBC(Feedback Carburetor Control), □: EFI(Electronic Fuel Injection), △: SPI(Single Point Injection), ●: 4点閉ループ制御を示す。

2.1 制御機能

μPによるエンジン制御の主要項目は、点火時期制御と空燃比制御である。その他にEGR制御、2次空気制御、アイドル回転数制御なども行われている。

点火時期制御は、従来デストリビュータによって全く機械的に行われていた。μP制御では、エンジン回転数と吸気管負圧により、あらかじめ定められた特性マップに従って点火時期を制御する。すなわち、閉ループのプログラム制御である。また最近では、ノックセンサによるフィードバック制御も検討されている。

空燃比制御は、従来の気化器に代わって、空気と燃料の混合比をより高精度に制御しようとするものである。これには、制御の種類と燃料供給方法の組合せにより各種の方式がある。これを表3に示す。表2ではこの方式の違いを記号で示した。開ループ制御は吸入空気量を検出し、これに基づいて燃料供給量を設定する。閉ループ制御は、O₂センサを付加して排気中のO₂濃度を検出し、これをフィードバックして空燃比を理論空燃比に近い値に制御する。この制御方式は、理論空燃比の要求される三元触媒を用いた排気浄化システムに用いられる。

表3 空燃比制御の種類

制御方式による分類	燃料供給方法による分類
・開ループ制御	・気化器制御方式 (FBC式)
・閉ループ制御 (O ₂ センサ使用)	・燃料噴射方式 ・EFI式 ・SPI式

燃料供給方法の気化器制御方式は、これまでの気化器を改良して、燃料供給量を電子制御できるようにした電子制御式気化器を用いる。この方式はほとんど閉ループ制御と組合せられる(FBC: Feedback Carburetor Control)。燃料噴射方式には2種類あって、ひとつは吸気弁の外側に各気筒ごとにインジェクタを設け、その開弁時間で燃料量を制御する方式(EFI: Electronic Fuel Injection)である。他は吸気管の途中に設けた1~2個のインジェクタから各気筒に燃料を供給する方式(SPI: Single Point Injection)である。

EGR制御は、排気の一部を吸気側にもどして燃焼温度を下げ、排気中のNO_x濃度を低減させる。2次空気制御は、排気浄化のため必要に応じて排気側に2次空気を供給する。そしてアイドル回転数制御は、アイドル時にエアコンやパワーステアリングなどによりエンジン負荷に変動を生じて、エンジン回転数をフィードバック制御して安定化させようとするものである。これによりアイドル回転数を低く設定でき、燃料消費を節約できる。

2.2 各社の特徴

GMは、1976年に世界で初めてμPによるエンジン制御システムMISARを発表した⁴⁾。機能は点火時期制御のみの単機能であった。しかしμPによるエンジン制御を初めて実用化した点は意義深い。CPUはエンジン制御用に特開発されたもので、I/O、A/D変換器内蔵の10ビットμP(Rockwell製)である。これは特性マップの一次元補間計算を一命令で実行できる特殊な命令を持っている。

GMは次にC4システムを開発し、1979年型車に搭載した⁵⁾。これは前年導入されたアナログ式のFBC式空燃比制御をデジタル化したものである。このシステムは、1980年には7~8種のエンジンに適用されると共に、点火時期制御を含む拡張システムも開発された⁶⁾。そして1981年には大半の乗用車に搭載される計画にな

っている。図1にC4のフルシステムを示す。CPUには Motorola の 6802 を取りこれを一部カスタム化した GMCM (GM Custom Microprocessor) を用いている。このシステムの特徴は、キャリブレーション・データを PROM に格納していること、CPU 内蔵のスタンバイ RAM を用いて学習制御を行っていることである。この学習制御は、エンジンやセンサ、アクチュエータなどの部品の経年変化に対応するために、空燃比制御の開ループ制御時に使用する特性マップの一部を開ループ制御時に書き換えようとするものである。

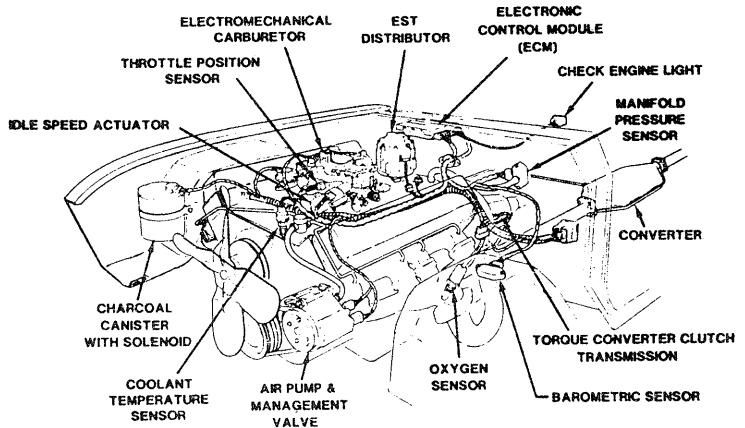


図1 GMのC4システム

GMはさらにDEFIシステムを開発し、1980年型 Cadillac に搭載した。このシステム構成を図2に示す。これは、点火時期制御、TBI (Throttle Body Fuel Injection; SPI と類似) による開ループ空燃比制御、アイドル回転数制御を行う総合制御になっている。1981年型 Cadillac では、このシステムをさらに拡張し、初めてのエンジンの可変気筒数制御も導入する。これは8気筒エンジンを軽負荷時には4〜6気筒で使用して、燃費を良くしようとするものである。

GMのMPエンジン制御に共通する特徴のひとつは、自己診断機能である。これは、制御系に何か異常を生ずると、運転席の計器板に“CHECK ENGINE”のランプを点灯する。そしてカーブ・ステーションで、制御モジュールから出ている診断用リード線を接地すれば、異常箇所を表わすコード番号を表示できるようになっている。

GMのMPエンジン制御に共通する特徴のひとつは、自己診断機能である。これは、制御系に何か異常を生ずると、運転席の計器板に“CHECK ENGINE”のランプを点灯する。そしてカーブ・ステーションで、制御モジュールから出ている診断用リード線を接地すれば、異常箇所を表わすコード番号を表示できるようになっている。

Ford も GM と並んで、早くからMPによるエンジン制御システムの開発を進めていた。そして1978年型の Lincoln Versailles に初めてEEC-Iのシステムを搭載し、その後毎年改良を加えてEEC-II, III

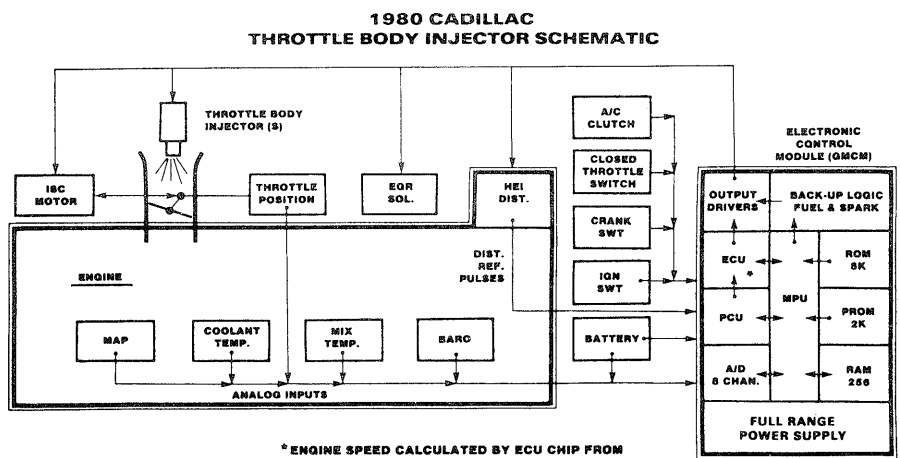


図2 GMのDEFIシステム

1980 EEC-III ELECTRONIC FUEL INJECTION

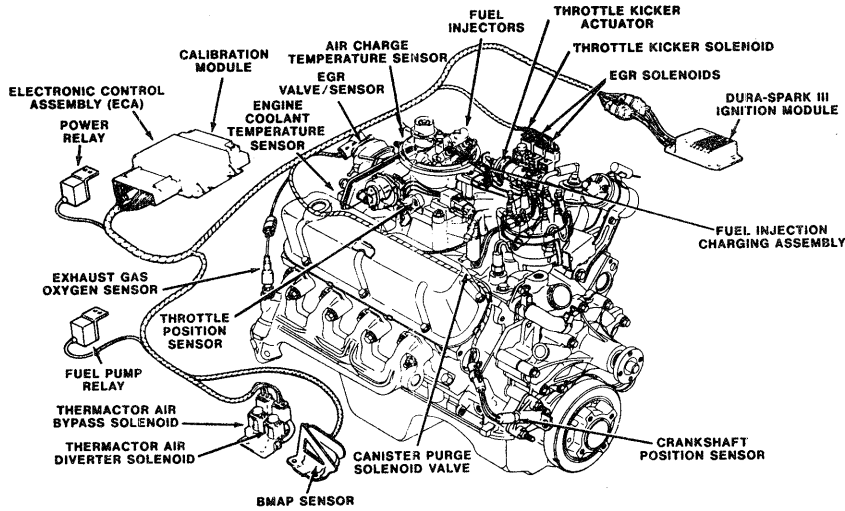


図3 FordのSPI式EEC-IIIシステム

として^{(10),(11)}EECシステムの特徴のひとつは、早くからエンジンの総合制御化を計った点である。EEC-Iでは点火時期、EGR、2次空気を制御し、EEC-II、IIIではさらに空燃比、アイドル回転数、キャニスターパーズの制御を加えた。この結果現在のところ、他社のシ

ステムと比べて最も制御項目の多いシステムになっている。図3はEEC-IIIのうちSPI式のシステムを示したものである。EECシステムの他の特徴は、本体モジュール(Processor Assembly)とROMを収納しているモジュール(Calibration Assembly)とを分離可能にしている点である。これは、各車種共通に使用できる本体の部分と、ROMを含み車種ごとに変える必要のある部分を別モジュールにし、アセンブリとサービスの便宜を計ったためである。EEC-I、IIのCPUには、東芝とFordで共同開発した12ビットのμPを用いており、使用LSIはCPUを含め7個になっている。一方、EEC-IIIのCPUは発表されていないが、使用LSIはFBC式で4種類5個、SPI式で5種類6個と少なくなっている。EEC-IIIに続いてEEC-IVの開発も進められている。最近の発表によれば、EEC-IVにはIntelの開発した16ビットのμP 8061とROMの2つのLSIを用いている。このシステムの採用は1980年代の中頃になるとのことである。

Fordは、EECシリーズとは別に、小型エンジン用にMCU-Aシステムを開発し、1980年型Pinto/Bobcat(2.3ℓエンジン)に搭載した。これはアナログ式のECU-Aシステムをデジタル化したもので、FBC式の空燃比制御と2次空気制御の単純な機能になっている。CPUにはIntelの8ビットの1チップ・マイクログコンピュータ8048を用いている。小規模なシステムではあるが、生産台数はむしろ多くなっている。

Chryslerのエンジン制御システムSCCは、アナログ式のリーンバーン点火時期制御システムをベースにしたものである^{(12),(14)}。1978年の最初のシステムは点火時期制御のみの単機能システムであった。しかし1979年には空燃比制御を加え、1980年には2次空気制御を加えたシステムへ拡張している。空燃比制御を加えたシステムの構成を図4に示す^{(14),(15)}。SCCの特徴のひとつは、CMOSのμP(RCAの1802)を用いている点である。CMOSの優れた特性和特に配慮した回路設計により、制御モジュールの動作温度を-40~125℃にし、これをエンジンルーム内に設置している。これによりコネクタ数や配線長が減少でき、システムの信頼性はかえ

て良くなったとしている。¹⁴⁾ SCC の他の特徴は、最も早くから ROM の一部に PROM を使用し、エンジン、車種ごとによって異なるデータの部分をアセンブリ段階で書き込む方法を採用している点である。またセンサとインターフェイスを工夫して、センサからの入力信号はすべて周波数、パルス中などのデジタル信号にし、A/D 変換器を不要にしているのも大きな特徴である。

その他の外国メーカーで、現在 μP のエンジン制御システムを実用化しているのは、米国の AMC (American Motors Co.)¹⁷⁾ と西独の Bosch である。^{15), 16)} Bosch のシステムは MOTRONIC と称し、BMW の 1980 年型車に搭載されている。

一方、国内の日産、三菱、トヨタはそれぞれ ECCS、ECI、TCCS の各システムを開発し、2.0 l 以上の乗用車の一部に搭載している。日産の ECCS は点火時期、空燃比、EGR、アイドル回転数の総合制御を特徴としている。^{18), 22)} 三菱の ECI は、SPI 式の空燃比制御と EGR 制御の比較的簡単な機能になっており、点火時期制御は従来のディストリビュータを用いている。^{23), 24)} トヨタの TCCS は自己診断機能を特徴にしている。なお、日本、欧州の車は米国に比べて一般に小形であり、燃費向題も今のところそれ程重大視されていないので、 μP エンジン制御システムの本格的導入は米国より数年遅れるものと思われる。

2.3 コントローラの構成

表 4 は μP エンジン制御システムのコントローラ部の現状についてまとめられたものである。ここで注目すべき点は、CPU の特性マップ (テーブル) 補間計算のための乗除算機能、スタンバイ RAM、PROM の使用、それら I/O の機能である。Ford の EEC システム用に開発された東芝のカスタム μP は乗除算命令を、GM の C4 システムの Motorola 6802 は乗除算命令をそれぞれ持っている。日産の ECCS はカスタム I/O に乗除算機能を持たせている。I/O の入出力信号については典型例として日産の ECCS の例を図 5 に示す。²⁰⁾ このよう

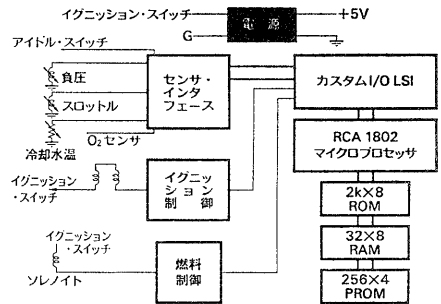


図 4 Chrysler の SCC システム

表 4 エンジン制御システムのコントローラの構成

CPU	8~12ビット 特性マップ(テーブル)補間のための乗除算機能追加
RAM	32~256バイト 学習制御のための一部RAMをバッテリーバックアップ化
ROM	マスクROM: 2k~8kバイト PROM: 125~1kバイト
A/D変換器	精度: 8~10ビット 変換時間: 数msec マルチプレクス入力数: ~8ch.
I/O	周波数入力, パルス中入力, スイッチ入力 パルス中出力, スイッチ出力

(センサ) (入力信号) (コントロールユニット) (出力信号) (アクチュエータ)

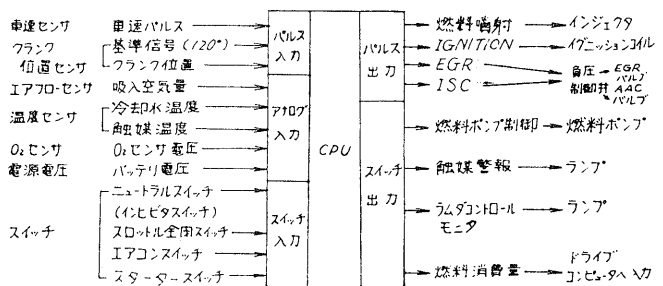


図 5 入出力信号の例 (日産 ECCS)

コントローラ部は、1チップ・マイクロコンピュータによる単機能制御を除いて、現在4~5個以上のLSIで構成されている。

ところで、エンジン制御は今後さらに多機能で高精度になり、一オ、μP自体も集積化が進んで高性能、低価格になっていくものと思われる。こうなれば高度なエンジン制御には、16ビットμPを用いることになるであろう。そこで

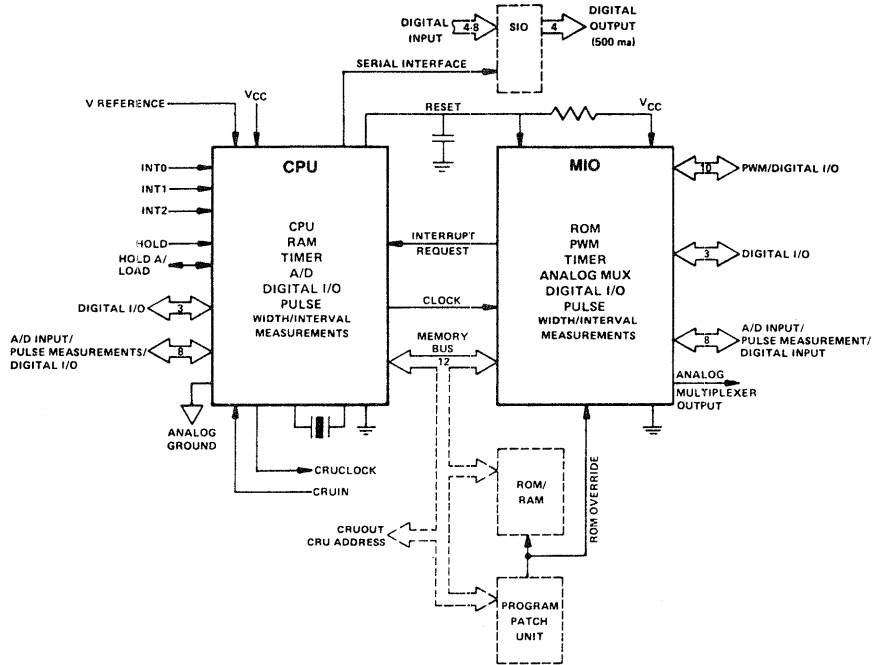


図6 16ビットμPシステム

GM, Fordでは16ビットμPシステムの検討を進めている。IntelのR. Matney等²⁴⁾、1983年以降のエンジン制御用μPシステムは、精度、処理時間、ピン数、価格等を考慮して、RAM, A/D, タイマを内蔵した16ビットCPUとROM・I/Oの2チップ構成が可能のがよいと言っている²⁴⁾。このシステム構成を図6に示す。

3. その他のμP応用システム

エンジン制御に続いて実用化された自動車のμP応用システムは、GMのトリップコンピュータに代表される多種情報システムである。これはμPの計算とメモリの機能を利用して、運転者に燃費、平均速度、走行時間、走行距離、目的地までの距離、到着予想時刻などの多種情報を提供したり、日・時時刻の記憶、時間警報(タイマ)、ラジオの番組予約などを行う。表5はGM、日産、トヨタの多種情報システムの機能とコントローラの構成を比較して示したものである。^{19), 271-281)} 他にChrysler, Ford, 三菱なども同様のシステムを発表している。

Chryslerはラジオの自動選局と時刻表示を行なうAM/FM RADIO & CLOCKのシステムを1978年型車に搭載した²⁷⁾。CPUにはRCAのCMOS 8ビットのμP 1802を使用している。μPによるラジオの自動選局は、国内の高級乗用車のカーラジオにも多く採用され始めている。

GMは1980年型Cadillac Seville, EldoradoにμPによるエアコン制御システムEEC(Electronic Climate Control)を搭載した³⁰⁾。これはデジタル式温度設定、2つのサーミスタによる室内、室外温度の検出と、吹出口の切換、吹出速度と温度の調整を行なう。μPはMostekの1チップ・マイクロコンピュータ3870を用いている。このようなμPによるエアコン制御は、今後かなり普及するものと思われる。

またトヨタは1980年秋に世界初の合成音声による警告装置スピークモニタを発

表5 GM, 日産, トヨタの多種情報システム

会社名	GM	日産	トヨタ	
システム名	Trip Computer	ドライブ・コンピュータ	クルーズ・コンピュータ	
装着年度 車種	'78 キャデラック・セビル(EFI車)	'79 シルビア・ガゼール/ビッツ・ブローア	'79 クラウン (EFI車)	
機能	MPG(平均値, 瞬時値) Trip Speed(平均)/Trip Time Range(走行可能距離) Destination/Arrive Time RPM/Temp./Volts Clock	消費燃料 トヨタ・タ(積算・減算可能) (距離計経過時計) ナビゲータ(平均車速 誤差距離 (誤差時間) 時間警報(時刻メモリ・アラム) 電子チューナ・プログラム/カリキュラ	消費燃料/平均車速 積算距離計/減算距離計 航路距離 到着予想時刻 時刻, 日メモリ 日/時計	
入力, センサ	(EFI injector pulse) 車速センサ/RPM Fuel Sender/Cool Sender Light Dimmer/Park Light SW CPU 電源電圧	← 車速センサ(スピードメータ利用) ライト SW デジタル時計	← 車速センサ	
コントローラ	CPU	モトローラ M6800 (NMOS 8ビット)	日立 HD46802 (NMOS 8ビット) HMCS45 (PMOS 4ビット)	東芝 TCP4630x2 (CMOS 4ビット)
	RAM 容量	256 バイト	128 バイト (CMOS)	
	ROM 容量	4K バイト	8K バイト (NMOS)	3K バイト
	% その他	A/D, clock, counter %	%	蛍光表示管ドライバ (CMOS) 電源レギュラ
	LSI 構成	CPU, RAM, ROM(2), %, clock, %	CPU(2), RAM, ROM(2), % ^{注)}	CPU(2), ROM, %, (レギュラ)

注) シルビア・ガゼール用のタイプは, HMCS45 x 2 のみの構成になっている。

表し, マーク II・グランデに搭載した。音声合成には μP による音素合成方式を採用しており, 半ドア警告, キー抜き忘れ警告なども項目の警告を発する。

以上の他, タイマコントローラ, 計器板表示システムへの応用も検討されている。³⁰⁾ タイマコントローラは自動車の各種タイマ機能(ターンシグナル, ハザードフラッシュ, 間欠ワイパ, 各種警報など)を集中制御するシステムである。現在実用化されているのはカスタム LSI を用いているが, μP の方式も検討されている。また計器板表示システムは, 表示装置に蛍光表示管や液晶などを用いて, 表示のデジタル化, 多機能化, 多重化を計るシステムである。 μP は表示装置の制御やデータ処理に使われる。

以上述べたエンジン制御以外の μP 応用システムでは, 主に 4~8 ビットの標準 μP を用いており, システム構成も比較的簡単である。

5. 今後の動向

μP によるエンジン制御は, 前述したように単機能制御から複数の制御機能を

有する総合制御への道を拓いてきた。総合制御システムはさらに発展して、近い将来トランスミッションなどの動力伝達系の制御も包含するであろう。そうすればμPも16ビットの高性能な機種を使用することになると考えられる。

しかしこの総合化はμPの負荷を拡大し、ハードウェア、ソフトウェア両面を複雑化し、さらに異常時のダメージを大きくする。そこで、制御対象ごとに設けた複数のμPを互に接続した、マルチプロセッサの分散制御も検討されるであろう。このシステムの利点として、共通データの利用、バックアップ・サポートによる信頼性の確保などを挙げる事ができる。

一方、小型エンジンに対しては、排気と燃費の許容範囲内でシステムの単純化、低価格化が進められる。この場合には8ビット程度の1チップ・マイクロコンピュータを用いることになるであろう。

ところで、これまでのエンジン制御は主に特性マップに従って制御するプログラム制御であった。そして、これを補正する形で一部フィードバック制御を用いてきた。しかしプログラム制御ではエンジンやセンサ、アクチュエータの特性変化に対応できない。また現在のようないフィードバック制御ではむだ時間や遅れが大きくなり、エンジンのダイナミックな状態での制御に不十分である。これらを解決する方法として、線形プログラミング、ダイナミックプログラミング、カルマンフィルタリングなどの新しい制御手法の研究も今後進められるであろう。³²⁾

参考文献

- 1) D. F. Hagen; 2nd International Conference on Automotive Electronics, IEE Conference Publication No. 181, p89 (1979)
- 2) 出井; エレクトロニクス p737 (昭55-7)
- 3) 大島, 神谷; 自動車技術 34 [6] p653 (1980)
- 4) W. P. Winstead; SAE Paper 770854
- 5) T. W. Evernham et al.; SAE Paper 780666
- 6) R. J. Schultz; SAE Paper 780843
- 7) R. A. Grimm et al.; SAE Paper 800053
- 8) L. L. Bowler; SAE Paper 800164
- 9) G. Cilibraise; SAE Paper 780119
- 10) D. F. Hagen; SAE Paper 780842
- 11) G. H. Czadzck, R. A. Reid; SAE Paper 790742
- 12) J. Lappington, L. A. Caron; SAE Paper 780117
- 13) J. L. Webster, J. Lappington; SAE Paper 780844
- 14) J. P. Lappington, L. W. Tomaczak; 2nd International Conference on Automotive Electronics, IEE Conference Publication No. 181, p95 (1979)
- 15) I. Gorille; SAE Paper 800165
- 16) J. Gosch; Electronics, p69 (August 2, 1979)
- 17) Automotive Engineering [87], p10 (Oct. 1979)
- 18) 佐々木, 天野; 日産力カカル p86 (1979. 8. 6)
- 19) 小沢; 電子技術 21 [3], p2 (1979)
- 20) 池田他; 自動車技術会昭和54年秋期学術講演会前刷 p309
- 21) " ; 日産技報 NO. 15, p65 (昭54-12)
- 22) K. Ikeura et al.; SAE Paper 800056
- 23) 三菱電子制御燃料噴射装置整備解説書(昭55-5)
- 24) 三木他; 三菱電機技報 54 (10) p1 (1980)
- 25) 高橋; エレクトロニクス p849 (昭55-8)
- 26) " ; " p961 (昭55-9)
- 27) R. Matney et al.; SAE Paper 800470
- 28) R. J. Templin; SAE Paper 780832
- 29) 八巻他; 日産技報 NO. 15, p85 (昭54-12)
- 30) K. Karstad; SAE Paper 780116
- 31) K. O. Learner, II; SAE Paper 800476
- 32) 阿川; エレクトロニクス p1073 (昭55-10)