

解説

カーエレクトロニクスと
マイクロコンピュータ†宮本 和 俊^{††} 村松 菊 男^{††}

1. カーエレクトロニクスの歴史

初期の自動車に用いられた電気系統といえば点火装置のみであったが、今や一台の車に10個以上のマイクロコンピュータを搭載する自動車もあるほどになり、半導体抜きでは自動車はあり得ないような状態になってきた。

1950年代にトランジスタが一般市場にて普及し始め、1950年後半には集積回路(IC)が発明されたが、自動車にこれら半導体製品が使われたのは1960年代後半になってからである。半導体製品が自動車用として応用されだしたのは、交流発電機(オルタネータ)の整流用シリコンダイオード、さらに電圧調整器(ボルテージレギュレータ)や点火装置(イグナイタ)用の機械式電気接点に代わるパワートランジスタからである[†]。半導体技術の進歩と共に半導体自身の品質信頼性が向上し、高機能化したことから、半導体製品は制御の品質および信頼性の飛躍的な向上に貢献することができた。

また、エンジン制御についても1960年後半に、トランジスタで構成されたアナログ回路を用いた電子点火や燃料噴射の試みも行われたが、高価であったため広く用いられることはなかった。しかし、1970年代に自動車の排ガスと燃料経済性に対する米国政府の規制が始まり、より精密なエンジンの制御が必須となり、半導体を用いた電子制御は欠かすことのできないものになった。さらに、1971年に発明されたマイクロコンピュータを用いたデジタル式エンジン統合制御が1970年代中頃から導入され、すでに用いられていたりニアIC、デジタルIC、メモリIC等と共に、図-1に示すように広く普及し現在に至っている。

† Automotive Electronics and Microcomputer by Kazutoshi MIYAMOTO and Kikuo MURAMATSU (Mitsubishi Electric Corp., Kita-Itami Works, System LSI Development Department).

†† 三菱電機(株)北伊丹製作所 システムLSI開発部

半導体製品は、劣化する部分がないことから信頼性が高く、広温度範囲で動作し、応答性がよく、低消費電力であり、小型化が可能であることから、図-2に示すように広範に使用されている。

2. マイクロコンピュータの果たす役割

2.1 メカトロニクス制御

現在の自動車の中には数多くの電子機器が搭載されており、メカをエレクトロニクスで制御するメカトロニクス機器と呼ばれるものは、ほとんどは図-3に示す構成になっている。この中で、センサは計測した物理量を電気量に変換する働きをし、入力インタフェース部はセンサからの信号を制御部で扱えるように増幅または変換する働きを持っている。また、制御部は入力インタフェース部から読みとった信号に基づき演算や判断処理を行い、アクチュエータの制御信号を出力する。さらに、ドライバ部(出力インタフェース部)は、制御部から出力された信号でアクチュエータを駆動するための電力変換部であり、アクチュエータは電気量を物理量に変換する働きをする。

マイクロコンピュータは、図-4に示すように、その中核である中央演算処理部(CPU; Central Processing Unit)とCPUの周辺回路およびプログラムが記憶されているメモリ部分から構成されている。最近のマイクロコンピュータでは図-3の構成のように、入力インタフェース部の機能や出力インタフェース機能をワンチップに取り込みコストパフォーマンスの高いシステムが構成できるようになってきた。

2.2 マイクロコンピュータを用いたエンジン制御

従来からの機器ではオープンループ制御であったが、マイクロコンピュータを用いることによって飛躍的に制御の自由度が増し、メモリにあらか

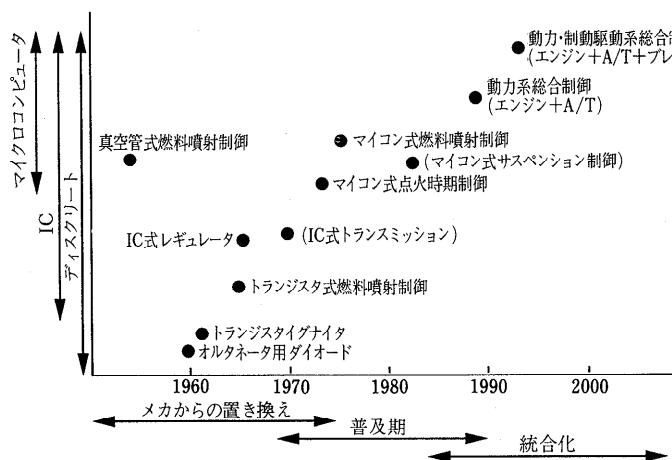


図-1 エンジン制御系の進歩

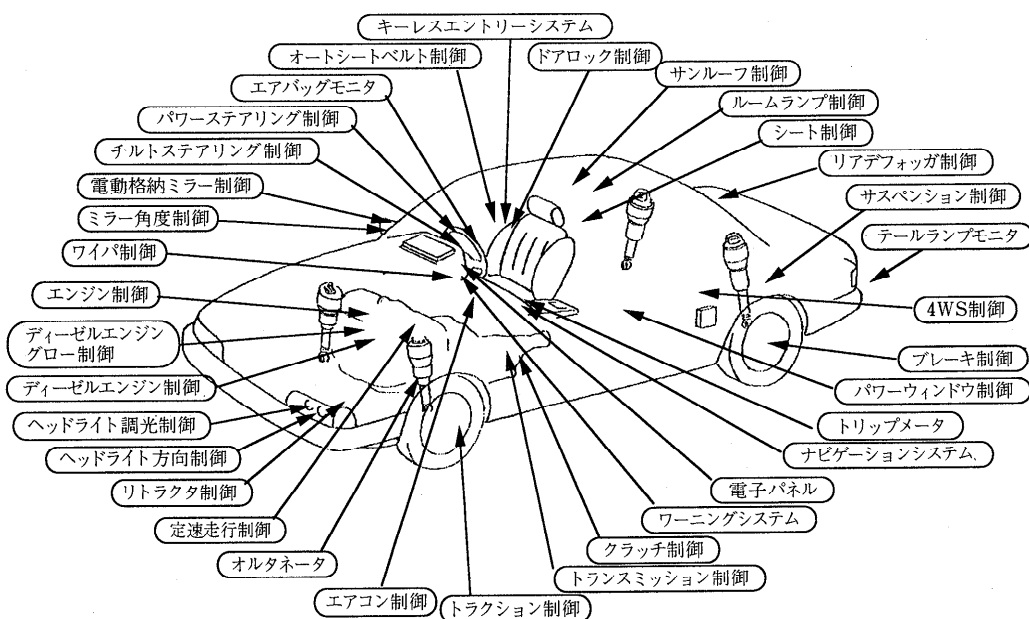


図-2 車載用半導体応用システム例

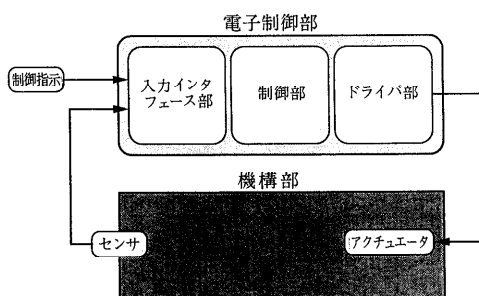


図-3 カーエレクトロニクス構成概念図

じめプログラムされた内容にしたがって、おかれた環境下での最適制御を行うクローズドループ制御を可能にすることができ、フィードバックを用いたきめ細やかな予測制御が可能になった。単に個々の機器を電子化するだけではこの制御はできない。運転状況や環境変化を監視する様々なセンサと組み合わせたマイクロコンピュータを導入することによって初めて可能になる。図-2 に示したカーエレクトロニクスの応用では、すべてマイ

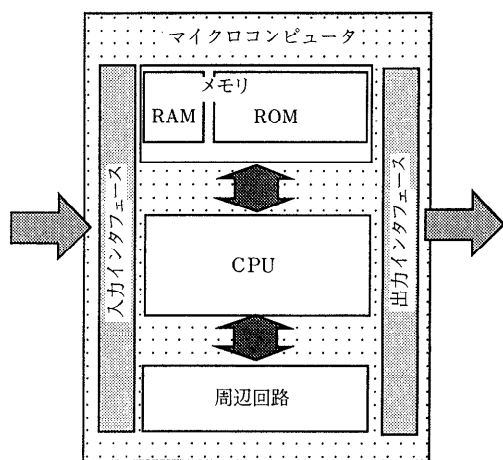


図-4 マイクロコンピュータの構成

クロコンピュータが用いられている。このきめ細やかな制御によって、マン-マシンインターフェースが格段に改善された。たとえばパワーステアリングでは、車速やエンジン回転数に合わせて、ハンドルのパワーアシスト量を最適化して快適なハンドリングを確保したり、サスペンション制御では、車輪の上下運動や加速度等を検出して路面状況や運転状況を予測し、ショックアブソーバの減衰比を変化させ、安全かつ快適な乗り心地に制御したり、またトラクションコントロール^{*}では、スピード、ハンドルの切り具合、トランスミッションのポジション等の様々な状態を監視し、無理があればエンジン回転数を下げて安全を確保する積極的な制御を行っている。このように、そのときの状況判断を行い、常にその時点での最適解を出してドライバの負担を著しく軽減できるようになり、従来の機械式で実現できなかった、快適性、安全性が確保できる。

小規模な制御機器では、アナログ回路で構成されていた時期もあったが、マイクロコンピュータの価格が低下したこと、およびソフトウェアを用いた自由度の高い制御が可能であることから、近年はほとんどマイクロコンピュータが用いられている。

2.3 フェイルセーフ機能

自動車の中では、電子機器の誤動作を防ぐために、点火系、発電系や自動車電話、無線等からの

ノイズを極力押さえ込む必要がある。特に最近の自動車ではマイクロコンピュータが、走る、曲がる、止まるの最重要制御を司っていることから、誤動作は最悪の事態を引き起こす可能性がある。これに対し、何らかの異常が発生したときの対処方法をプログラムすることによって、機器のフェイルセーフを導入している。従来ハードウェア設計でしか考慮できず、また限界があったが、ソフトウェアのプログラム設計段階で行うことにより、様々な機器の動作状態および周りの環境に合わせたフェイルセーフの組み込みが可能になり、機器の信頼性および安全性を向上させることができた。さらに、マイクロコンピュータ自体が暴走して動作しなくなったときのために、マイクロコンピュータの動作をモニタするウォッチドッグタイマーICを接続しており、異常があればリセットをかけるようになっている。さらに、ブレーキ制御等重要な機器ではマイクロコンピュータを2個使って、互いに異常がないことを確認させている場合もある。

また、プログラムすることによって必要に応じてアクチュエータ、センサ等の周辺機器やワイヤハーネス、コネクタ等の診断が可能になり、異常をすばやく知らせるシステムになっている。

3. エンジン制御とマイクロコンピュータ

3.1 エンジンの電子制御

エンジン制御装置は、カーエレクトロニクスの先駆的存在であり、カーエレクトロニクスの中でも普及率が高く、マイクロコンピュータの導入も早かった。1976年にGMがマイクロコンピュータを用いた電子式点火時期制御装置(MISAR)を採用した。このシステムではクランク角センサからエンジン回転数を取り込み、圧力センサで吸入負圧検知し、これらに対応した最適点火時期をあらかじめROM(Read Only Memory)にプログラムしたデータを参照して決定していた²⁾。

MISARはオープンループ制御ではあったが、マイクロコンピュータの特徴を活かしプログラム容易なROMテーブルを導入した点で画期的であり、メカニカルな方法でエンジン回転数から点火時期を得ていた従来制御と比べ、制御の自由度が増し、エンジンの出力および燃費が大幅に向上してきた。

^{*}トラクションコントロール：走行中のコーナリング時に、安全限界を超えないように車速を制御するシステム。

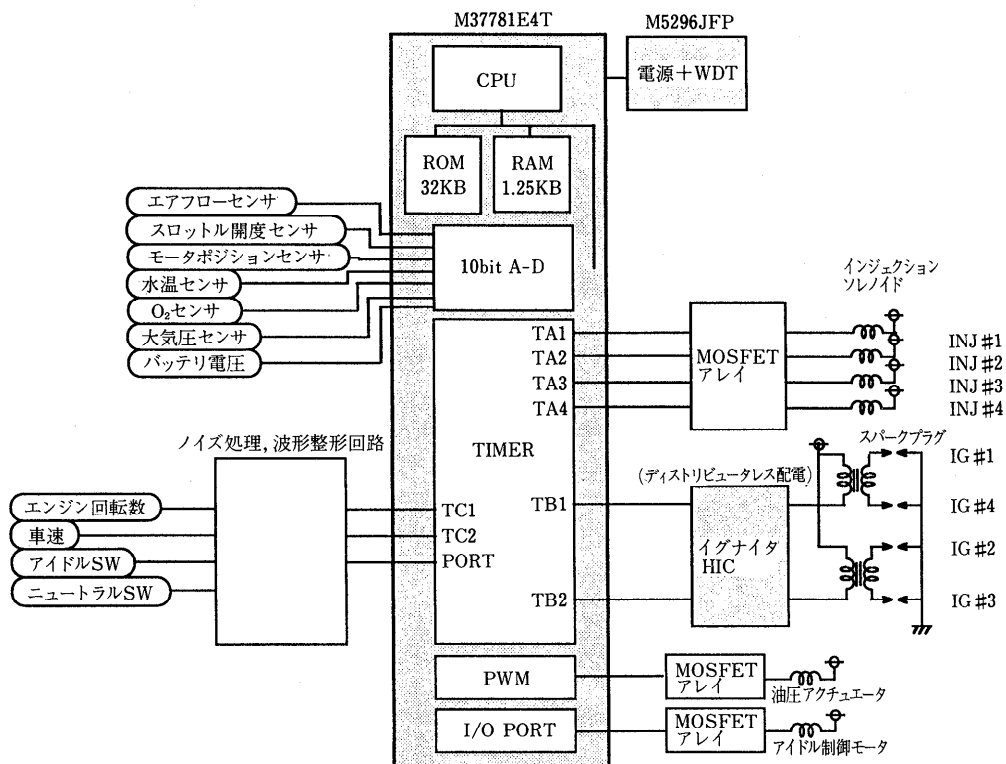


図-5 電子配電方式エンジン制御システム例

1970年代後半に出た、排ガス規制と燃費規制によって、マイクロコンピュータを用いたきめ細やかなエンジン制御の採用が一気に加速された。しかし、当初排ガスと燃費を両立させることは困難であり、排ガスを押さえるためには、燃費を我慢せざるを得なかった。同時に、エンジン出力も低下し、ユーザにとって不満なものであった。しかし、エンジン本体の改良、半導体技術の進歩、センサの精度向上等により、最適点火時期制御、最適燃料制御等エンジンの総合制御が行えるようになり、必要なドライバビリティを確保しつつ、燃費と排ガスを両立させることができた。

エンジン制御システムのブロックダイアグラムを図-5に、またエンジンの動作シーケンスを図-6に示す。マイクロコンピュータは、ピストンの基準角度（上死点付近）を示すクランク角センサからの信号を基準に、特定位相で燃料噴射信号（INJ #1～4）と点火制御信号（IGN #1/4, 2/3）を出力する。

点火時期の制御は、吸入空気量およびエンジン回転数を基本パラメータとして進角（ T_{IGN} ）を決

定している。吸入空気量やエンジン回転数は、いずれも急激な変動があるため、サンプリング間隔を極力小さくして追従性を上げる必要がある。さらに、冷却水温等による進角補正を加えている。また、ノッキング^{*}の検出を行い、ノッキングが起きている場合にはやや遅角にしてノッキングを押さえるフィードバック処理を行う。ノッキング検出および進角度設定精度が高いほど限界近くに進角を設定できることから大きなトルクを得ることができる³⁾。

排気ガス中のHC、CO、NO_xの量を減少させるために用いられる三元触媒を有効に動作させるためには、厳密な空燃比制御^{**}が必要とされる。理論空燃比付近にあるか否かを酸素濃度センサ出力信号から判断し、ずれがある場合は吸入空気量に見合った量になるように燃料噴射時間 T_{INJ} を修正している。また、急加速、減速時には噴射量

* ノッキング；ガソリンがシリンダ内で異常燃焼を起こすことによって発生する異音。

** 空燃比制御；運転状況に合わせた、シリンダ内の燃焼に都合のよい空気/燃料の重量比の制御。エンジンの出力や燃費、排気清浄性を支配する最も注目すべきエンジンパラメータである。

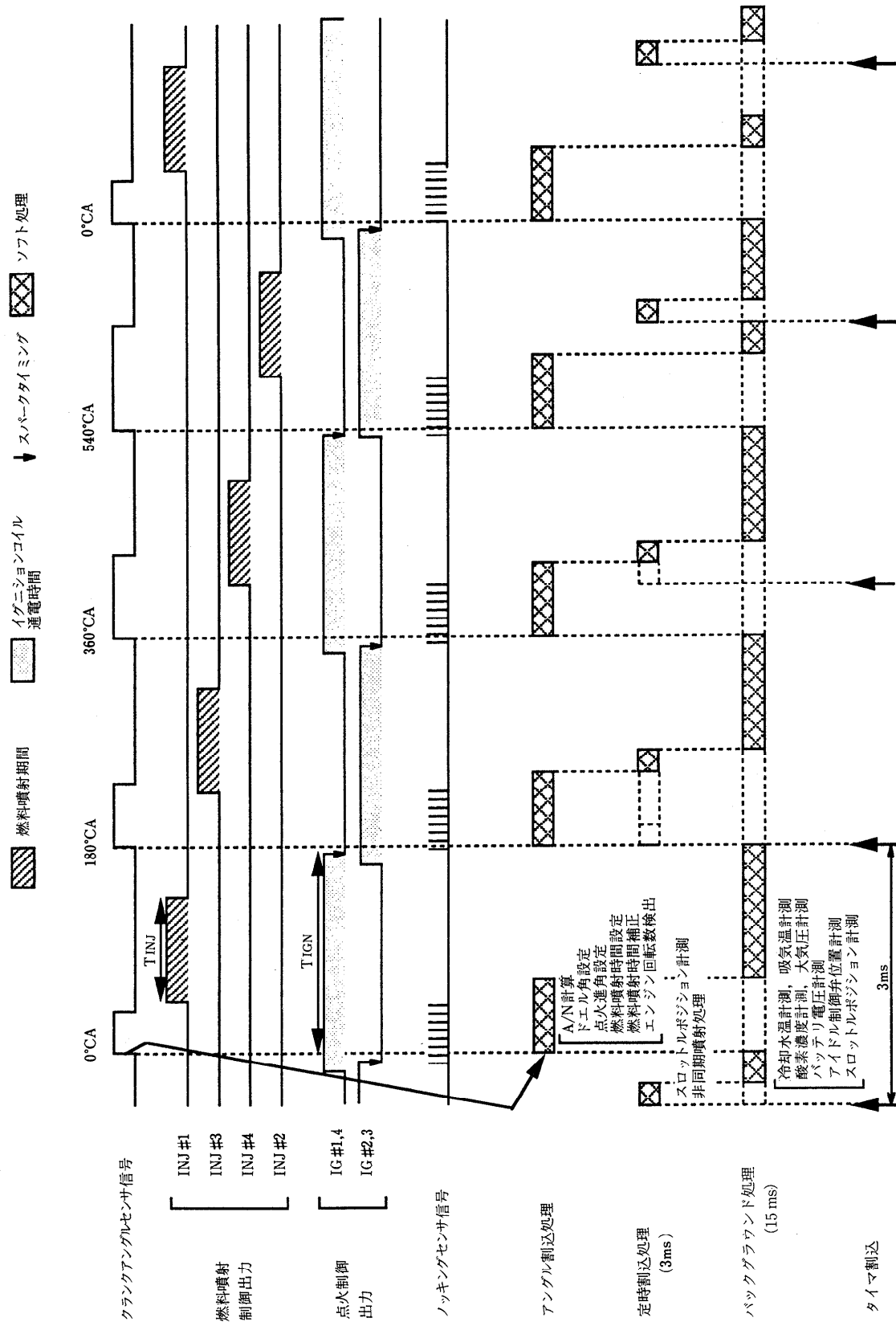


図-6 エンジン動作シーケンスモデル

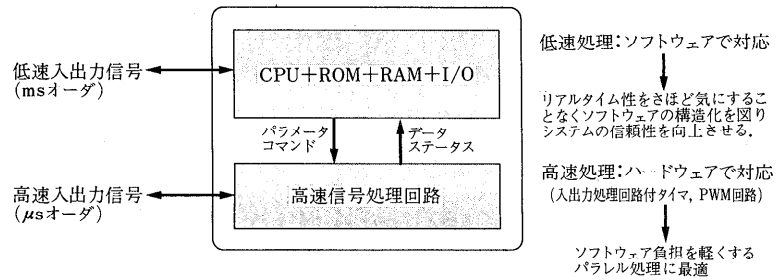


図-7 高速リアルタイム制御への対応

の増減補正を加えている。これらの制御に必要なパラメータとして酸素濃度センサ出力、吸入空気量(流速、圧力)、空気温度、スロットル開度等を読み込んでいく。

排気ガス中の NO_x を減少させるために、排気ガスを吸気側に戻して燃焼温度を下げるEGR制御^{*}も必要である。この制御では、エンジン回転数と燃料噴射量をパラメータとして帰還排気ガスを決定し、EGRバルブの開閉デューティ制御^{**}を行っている。さらに、冷却水温度とスロットル開度による補正を行っている。

3.2 エンジン制御用マイクロコンピュータ

このように、エンジンは「燃焼」という一種の化学反応を利用してトルクを得るものであるため、吸入空気量やエンジン回転数以外に反応の遅延時間(着火時間や燃焼の広がり時間)、エンジン温度、吸入空気圧や温度、バッテリー電圧等、その動作に影響のある多くのパラメータを読み取り、判断する必要がある。その制御は高速かつ複雑なものになっている。通常、燃料噴射タイミングや点火タイミングに関しては μsec オーダーの制御精度がないと上記各種制御効果が得られないとされている。さらに、エンジンの回転周期ごとに新しく取り込んだパラメータに基づいて制御出力に反映していかなければならない。

しかし、このような高速入出力信号処理および演算をマイクロコンピュータのソフトウェア処理だけで対処することはほとんど不可能に近い。そこで、ソフトウェア処理の負担を軽減するため

に、エンジン制御用マイクロコンピュータでは、図-7に示すように高速入出力処理回路(リアルタイムI/O)をハードウェアとして付加する必要がある。 m sec オーダーの低速入出力信号処理はソフトウェアで対応し、 μsec オーダーの高速入出力信号処理はハードウェアで対応させて、CPUの負担をできる限り抑える考え方である。

一例として、図-8はエンジン制御用マイクロコンピュータの高速入出力信号処理として採用されたタイマのブロック図である。ここでの例では、3種類の16ビットタイマ、TA、TB、TCを持たせてある。それぞれ、燃料噴射制御用リアルタイム出力タイマ、点火制御用リアルタイム入出力タイマ、車速およびエンジン回転数・周期の計測用の入出力計測タイマである。さらに、アイドル制御用バルブ、EGR制御用バルブ等の制御に用いられる油圧アクチュエータのドライブ用PWM^{*}も配置されている。この結果、入力信号の周期計測・時間計測・位相差計測あるいは遅延付き単発パルス・PWM・連続波出力処理に関するソフトウェア負担が小さくなり、複数の仕事を高速に処理することが可能になった。

さらに、スロットルセンサ^{**}のような高分解能を必要とされるアナログ信号を受け取るために、図-5に示すように10ビットA/Dコンバータを多チャンネル内蔵している^{4)~6)}。

^{*} EGR制御; Exhaust Gas Recirculationの略。排気ガスの一部を吸気側に環流することによって、エンジン内の NO_x 生成を抑制する手段で、排ガス対策として広く採用されている。

^{**} 開閉デューティ制御; EGRのための吸気側への排気ガス環流量を、マイクロコンピュータからの指示に基づいて、電気的にバルブ開閉時間を制御すること。

^{*} PWM; Pulse Width Modulationの略。バルブ開度を電氣的に行う場合、必要な開度を一定に保つのではなく、バルブ開閉の時間幅を変えることによって等価的に目的の制御を行う方式。

^{**} スロットルセンサ; ドライバのアクセル操作に対応してエンジンの吸気量を制御するスロットルバルブが動作する。このスロットルバルブの動きを検出するセンサ。ドライバの意志どおりにエンジンを反応させるため、細かい検出が必要である。

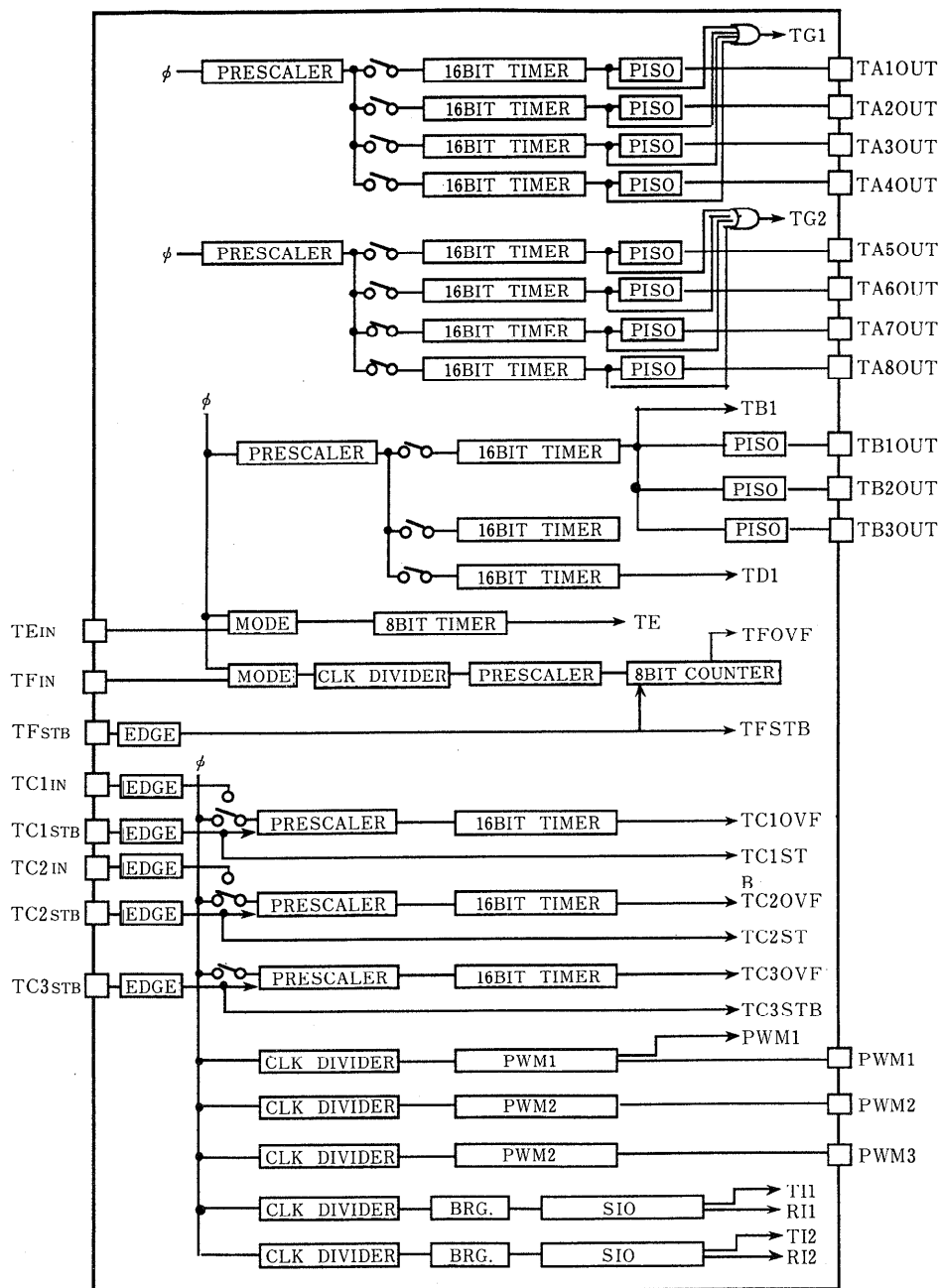


図-8 タイマ ブロック図の例
三菱電機製 M 37798 E 7 TxxxJ

4. エンジン制御用ソフトウェアの特徴とデバッグ手法

マイクロコンピュータを用いた電子機器では、制御の処理手順はマイクロコンピュータのROMにソフトウェアとして記憶させている。したがっ

て、エンジン制御のように高機能な制御が必要となるにつれて、大きなROM容量（ROMサイズ）が要求されてきた⁷⁾。最近のエンジン制御では、100 k バイトのROMサイズでも不足するほどソフトウェアの規模が非常に大きくなってきている。

従来、マイクロコンピュータのソフトウェアは機械語に近いアセンブリ言語で記述するのが通常である。アセンブリ言語は機械語に近いことから、コンパクトで高速なプログラム作成が可能であり自由度が高いが、一方マイクロコンピュータの持つ限られた命令をハードウェアと直結した表現にしなければならないことから、ハードウェアを熟知する必要がある。したがって、ソフトウェアエンジニアのスキルに頼るところがあり、リアルタイム性を重視するために迷路のようなプログラムになりバグが発生しやすい。

ROM サイズの増加にともない、構造化記述が容易な高級言語である C 言語がエンジン制御プログラムにも採用されるようになってきており、ハードウェアをそれほど意識せずに、またバグが発生し難いプログラム開発が可能になった。しかし、C 言語記述プログラムではオブジェクトレベルでの ROM 効率が悪く、ますます ROM サイズが大きくなってしまいう傾向にある、また高速入出力信号処理部のプログラムは、ハードウェアを直接ハンドリングし高速処理が必要なことからアセンブリ記述も混在可能なコンパイラが必要である。

規模が大きなプログラムになるほどバグが混入する確率が高まり、デバッグ工程は必須である。またソフトウェア制御の自由度の高さを活かした実車状態でのチューニング、および自動車の味付けも重要な工程である。これらの開発段階では、ROM として OTP (One Time PROM) を使用しているが、OTP は一度しか書き換えができないので、書き換えが必要な場合はマイクロコンピュータを取り替えているのが現状である。そこで、OTP に代わってフラッシュメモリが期待されている。フラッシュメモリはボードに実装した状態で書き換えが可能であり、飛躍的に効率を上げることができる。特に、実車試験でのチューニングのためのプログラム書き換えに対し威力を発揮すると思われる。

また、プログラムデバッグには ICE (In Circuit Emulator) を用いて、レジスタや RAM 等の内容が期待どおりになっているかを確認しているが、デバイスの高速化にともなうエミュレーションが困難になってきた。このため、今後は EWS のようなコンピュータ上でのシミュレーシ

ョンを用いたデバッグが主流になっていくだろう。

5. 今後の動向

エンジン制御用マイクロコンピュータは、数多くの高速信号を入出力しなければならないことから、高度なリアルタイム処理機能を持つことが必要である。さらに、エンジン制御だけにとどまらず、単独制御では得られない質の高い制御性、システムの小型化およびコストダウンを目指してエンジン制御とトランスミッション制御やトラクション制御を一体化し、動力系の総合制御を進める動きがある。このような統合化を進めるにあたっては、規模の大きな 1 個のマイクロコンピュータにすべて集中させる方法と、制御ユニット内に複数のマイクロコンピュータを内蔵し処理を分散させる方法がある。

集中方式を実現するためには、複数の処理を同時に遂行するだけの高速処理能力を持つマイクロコンピュータが必要になる。この場合、現在よりもはるかに多くのジョブを平行して行うため、OS による十分なソフトウェアの管理が必要となる。

一方、機能の統合化を分散処理方式によって実現するには、複数のマイクロコンピュータ間のデータ転送が容易に行えることが絶対条件になる。たとえば、LAN を用いて制御ユニット間を通信させる等、今後 LAN のインタフェース回路を内蔵したマイクロコンピュータが数多く現れるだろう⁸⁾。

近年、地球レベルでの環境問題が大きくクローズアップされるようになったが、この一環として米国では新たな排気ガス規制、燃費規制が実施されようとしている。これをクリアするには、さらなる制御精度の向上を図った上で、失火の検出、酸素濃度センサ劣化診断、診断データの通信制御等を追加する必要がある。この結果、マイクロコンピュータでは強力な数値演算能力と入出力処理のインテリジェント化が必要になる。

このような制御内容の高度化と複雑化にともない、ソフトウェア開発にかかる工数増大が問題になることが予想される。これに対し、高級言語の適用とソフトウェアのモジュール化が鍵になるだろう。

半導体技術の進歩は著しく、1990年代初頭は1.0~1.3 μm プロセスが主流であったが、後半では0.5~0.6 μm プロセスが中心になると考えられる。これは、同一チップサイズであれば4倍のトランジスタが搭載できることを意味し、1チップマルチプロセッサや大容量メモリ内蔵マイクロコンピュータ等、機能面では多くのニーズを満たすに十分な能力を持つようになると思われる。

参考文献

- 1) 志賀 弘, 水谷集治: カーエレクトロニクス, p. 3, 山海堂 (1986).
- 2) Jones, T. O.: Some Recent and Future Automotive Electronics Development, Science, p. 1156 (Mar. 1977).
- 3) 志賀 弘, 水谷集治: カーエレクトロニクス, p. 70, 山海堂 (1986).
- 4) 水垣, 村松, 田山, 増田, 遠藤, 井上: 自動車用エンジン制御オリジナル16ビットマイコン, 三菱電機技報, Vol. 63, No. 11, p. 18 (1988).
- 5) 城田, 村松, 田山, 宮田, 安達, 川崎, 井上: 自動車用16ビットマイコン, 三菱電機技報, Vol. 63, No. 11, p. 66 (1989).
- 6) 日下部, 村松: 自動車用高性能16ビットマイコン, 電子材料, p. 36, 7月号 (1990).
- 7) Jerome, G. R.: Automotive Electronics in the Year 2000, Proceedings of the International Congress on Transportation Electronics SAE, 861027 (1986).
- 8) Kiencke, U., Dais, S. and Litschel, M.:

Automotive Serial Controller Area Network, Proceedings of the International Congress on Transportation Electronics SAE, 860391 (1986).

(平成6年9月12日受付)



宮本 和俊

昭和24年生。昭和48年大阪市立大学工学部電気工学科卒業。昭和50年同大学院修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。以

来、同社北伊丹製作所にてマイクロコンピュータ、メモリ等半導体デバイスの開発・評価に従事。特に半導体の信頼性技術に興味を持つ。現在、システムLSI開発部に所属し、自動車用半導体デバイスのシステム開発を担当。電子情報通信学会会員。



村松 菊男 (正会員)

昭和28年生。昭和52年同志社大学工学部電子工学科卒業。昭和54年同大学院修士課程修了。同年三菱電機(株)入社。以

来、同社北伊丹製作所にてワンチップ・マイクロコンピュータ等半導体デバイスを用いた自動車用半導体デバイスのシステムの企画・開発に従事。現在、マイコン・ASIC事業統括部に所属。電子情報通信学会会員, Society of Automotive Engineers 会員。