

シビック用新 PGM-FI ECU の開発

Development of New PGM-FI ECU for Civic Engine

川 合 誠*

Makoto Kawai

藤 村 章**

Akira Fujimura

前 田 進*

Susumu Maeda

水 尾 直 彦*

Naohiko Mizuo

松 浦 正 典*

Masanori Matsuura

大 野 恒 夫*

Tsuneo Ohno

要 旨

'91 年 9 月に発表した New Civic には、低燃費と高出力を両立させた VTEC エンジン群が搭載され、これらのエンジン制御用として、小型・高機能で、リーンバーン制御に対応した電子制御ユニットを開発した。

本稿では、まずこれらの制御ユニットを小型化する為に採用した両面実装の信頼性向上技術について述べる。この中で、接続信頼性については、半田の耐久劣化を EPMA 法による耐久前後の Pb 粒子径で評価する手法を提案している。

次に、エンジンの A/F 値を 12 から 22 までの広範囲にわたり制御することにより、大幅な燃費向上を実現した VTEC-E エンジンに適用された Lean Air Fuel Ratio センサと、センサアンプ及び広帯域・空燃比コントロール・システムの動作原理と概要について述べる。

ABSTRACT

A compact and high-performance ECU for lean burn combustion control applied to the '92 Model New Civic has been developed.

This paper first presents the methods of ensuring the reliability of its surface mount assembly designed to reduce its size. The EPMA method was employed to evaluate the reliability of solder joints that are judged by the measurement of the growth of Pb particle during an endurance test.

It is then followed by the description of the actuation process and outlines of the 'Lean Air Fuel Ratio' sensor, the sensor amplifier and wide range air/fuel control system, all combining to help achieve a high fuel economy by controlling the VTEC-E engine.

1. ま え が き

自動車の燃費向上は、重要な課題として従来からたえず追求されてきた。近年、石油枯渇問題と、CO₂ による地球温暖化の問題から省エネルギーへの要求が強まり、一層の改善が求められている。他方、走りの性能向上を求める声も、おとろえることを知らない。1991 年 9 月に発表したシビックに搭載されたエンジン群は、こうした低燃費と高出力の両立を VTEC 機構 (Variable Valve Timing, Valve Lift Electronic Control) の応用発展によって実現したものである^{(1),(2)}。

これらのエンジンを最適に制御する為、新 VTEC エンジン用の電子制御燃料噴射ユニット PGM-FI ECU (Programmed Fuel Injection Electronic Control Unit) を新た

に開発した。

ここでは特に、日本仕様の VTEC エンジン車に搭載される小型で高機能な両面実装 ECU と、LAF (Lean Air Fuel Ratio) センサ信号を基に、A/F をフィードバック制御することによって希薄燃焼を実現した低燃費車 VTEC-E エンジンに使われる、ECU について述べる。

2. 開発の狙い

2.1. 両面実装 ECU

PGM-FI システムは、1982 年に始めて上市されて以来広く適用されるようになり、現在ではホンダ車のほとんど全ての機種で採用されている。この間、走りと燃費を高い次元で両立させる為、様々な制御仕様が追加されてきた。PGM-FI に用いられるエンジン制御仕様の年度毎

* 朝霞北研究所

** 栃木研究所

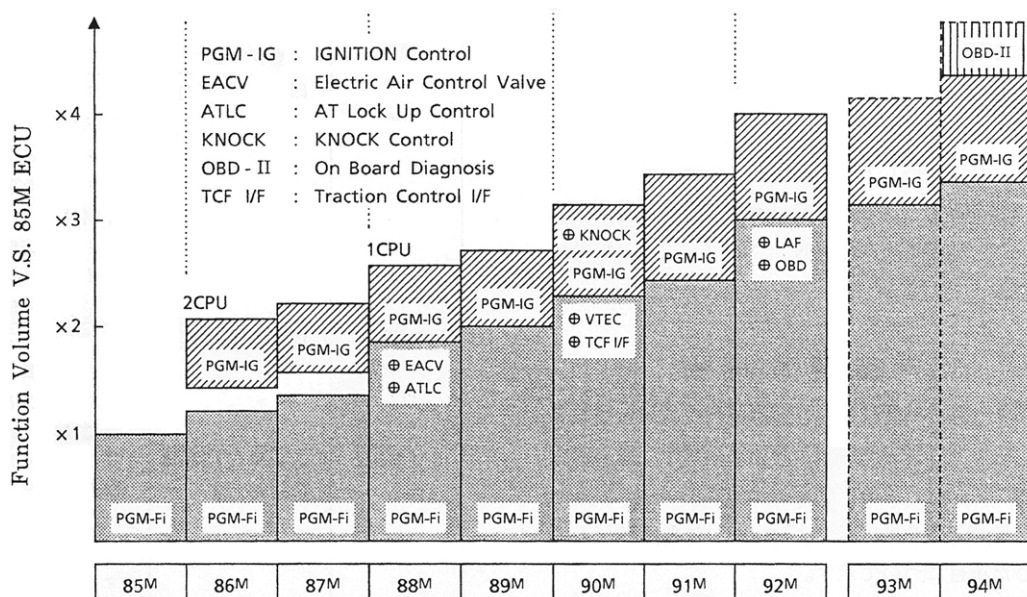


Fig. 1 Trend of increasing function of PGM-FI ECU

の増加傾向の一例を Fig. 1 に示す。

こうしたエンジン制御仕様増加に対応する為、PGM-FI ECU も飛躍的に回路規模が拡大してきた。これに対し、従来は LSI のカスタム化により小型化を進めてきたが、OBD II 対応など今後の制御仕様拡大を考慮すると、一層の小型化が必要となった。

そのため、最近著しく発展しつつある両面実装技術を '92 モデルイヤー以降の ECU に適応可能な手段として確立することにより小型 ECU の開発を行う必要が生じた。

両面実装技術とは、リード付きの電子部品を小型のチップ部品に置き換えることにより実装面積の削減を図るとともに、基板の両面にチップ部品を実装することでリードスルー実装に比べ大幅な小型化を可能とするものである。Fig. 2 は New Civic PGM-FI ECU に使われている部品実装の種類を示している。Fig. 3 に両面実装技術の適用により小型化された PGM-FI ECU を示す。

2.2. VTEC-E 用 ECU

VTEC-E エンジンとは低回転域で吸気バルブ休止を行って低負荷域で安定した希薄燃焼を実現し、高負荷域は多量の EGR ガスを与え、共に NO_x 排出量低減と燃料消費の改善を図ったものである⁽²⁾。

このため、制御用システムには LAF センサによる排気ガス中の酸素濃度の検出信号をもとに目標空燃比信号を

ENG	ECU
VTEC - E	B side Surface Mount Technology A side B side
VTEC	Lead through Mount Technology
DOHC VTEC	A & B side Surface Mount Technology

Fig. 2 Mount Technology of New Civic PGM-FI ECU

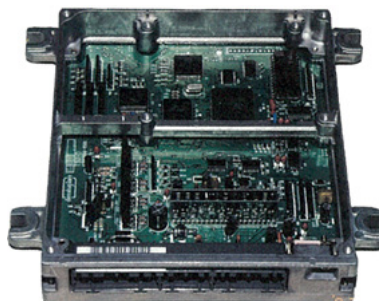


Fig. 3 '92 Model Civic ECU Using Surface Mount Technology

設定する機能を内蔵し、希薄燃焼及び多量 EGR 下の燃焼の安定化を図ることにより、低燃費、有害排出ガス低減、運転特性のそれぞれを高い次元で満たすことが要求された。

ECU もこれに対応して、内蔵した LAF センサ・アンプにより A/F を算出し、これを基に目標空燃費信号と噴射タイミング、補正点火時期信号、EGR ソレノイド駆動信号等を制御している。

3. 両面実装技術

両面実装 ECU の開発に当たり従来同様の高い信頼性を得る為、特性要因図を使用した両面実装技術の要素技術を洗い出し、設計、製造、経年劣化の観点から、テストにより、最適条件を選択した。Table 1 に要素技術と今回試験した項目について示す。

本稿では特に、ECU が長期間にわたり、高い信頼性を維持し続ける為に必要な半田劣化メカニズムの解析結果について述べる。

Table 1 両面実装の要素技術と試験項目

要素	確立すべき要素技術	試験項目
面実装基板	1. パッド寸法の決定	~1 パッド寸法と引剥し強度 ~2 パッド寸法とブリッジ ~3 パッド寸法と印刷性
面実装部品	1. 部品の信頼性確認 2. 部品の構造確認	~1 冷熱衝撃、高温、低温、放置、ソリ量 ~1 各部品の構造、材質調査
部品 ベーク	1. ベーキング温度と時間設定 2. ベーキング後リフローまでの放置時間設定	~1 吸湿量とベーク時間 ~2 吸湿量とリフロー後の部品信頼性確認 ~1 放置時間と吸湿量の関係
クリーム半田 印刷	1. クリーム半田選定 2. 放置時間の設定 3. 印刷ズレ量の許容値の決定	~1 印刷性と粘度 ~2 半田付強度 ~3 濡れ性 ~4 吸湿と半田ボール発生 ~5 洗浄性 ~1 放置時間と粘度 ~2 放置時間と半田ボール発生 ~1 印刷ズレ量と引剥し強度 ~2 印刷ズレ量と半田ボール発生

要素	確立すべき要素技術	試験項目
クリーム半田 印刷	4. 印刷条件の確立	~1 マスク厚と半田量 ~2 マスク厚と印刷性 ~3 マスク厚とダレ性 ~4 スキージ角度と印刷性 ~5 スキージ速度と印刷性 ~6 ギャップと印刷性
A 面 チップ マウント	1. 搭載精度の確認	~1 マウント・ズレ量と引剥し強度 ~2 認識マークと認識精度の確認
IC マウント	1. ズレ量の許容値の設定	~1 マウントズレ量と引剥し強度 ~2 PLCC, SOP リード浮きと半田付強度 ~3 マウントズレ量と半田ボール発生 ~4 認識精度の確認
リフロー	1. リフロー条件の確立	~1 プレヒート温度、時間と半田付強度 ~2 プレヒート温度、時間と半田濡れ性 ~3 プレヒート温度、時間と半田ボール ~4 温度プロファイルによる半田付性確認 ~5 リフローによる部品へのダメージ
洗浄	1. 洗浄条件の確立	~1 洗浄条件とフラックス残渣 ~2 洗浄条件と半田ボール除去 (X 線) ~3 洗浄後の部品信頼性
半田付 外観検査	1. 検査手法確立	~1 各方式検査能力 ~2 目視検査時の外観検査基準の設定
B 面 チップ マウント	1. 接着剤塗布条件の選定	~1 塗布径と接着強度 ~2 塗布位置ズレと強度 ~3 接着剤のパッドへのはみ出しによる半田付強度の低下 ~4 硬化条件と接着強度
ジェミニ噴流 半田付	1. ジェミニ半田槽条件の設定	~1 半田波高さ ~2 基板による影響
基板分割	1. 基板分割方法の確立	~1 分割時の部品、半田付け影響 ~2 基板ソリ限界テスト
半田付 経年劣化	1. 半田劣化メカニズム解析	~1 冷熱衝撃テスト後、引き剥し強度と EPMA 分析

3.1. EPMA (Electron Probe Microscopy Analysis) 法による半田劣化メカニズム解析

車載用の両面実装基板には、チップ抵抗、チップコンデンサ、PLCC (Plastic Lead Chip Carrier) 等が一般的によく使われている。ところが、冷熱衝撃テストを行うと、リードと基板との熱膨張差により半田接合部 (フィレット) に引張及び圧縮の繰り返し応力が加わり (Fig. 4) その結果、引き剥がしテストにて強度が低下することが知られている^{(3), (4)}。

PGM-FI ECU の半田付信頼性確認にも、従来からこの引き剥がしテストによる評価が用いられてきた。しかしながら、両面実装基板は半田材、半田接合部 (フィレット) 構造、製造法等が従来と大幅に異なることから、従来品同様の高い信頼性を得る為には、引き剥がし強度を低下させる要因について、物性の面から更に深く解析する必要がある。

両面実装基板の、冷熱サイクル数毎の引き剥がし強度を Fig. 5 に示す。ここでは冷熱サイクルの条件を $[-55^{\circ}\text{C}, 30\text{min}] \leftrightarrow [150^{\circ}\text{C}, 30\text{min}]$ 気相とし、1000 サイクル繰り返した。図中、破線は冷熱衝撃テストの前に、リードとフレームを切断し、リードフレームと基板との熱膨張差による影響を除き、半田単体の冷熱衝撃による強度劣化のみを見たものである。図から明らかな様に、半田付強度は冷熱サイクルを重ねるごとに低下するにもかかわらず、半田単体の劣化は破線に示す様に、ほとんど見られない。従って、この半田付強度の低下は IC のリードフレームと基板の熱膨張差によって起きているものと考えられる。

この劣化がなぜ発生するのかを見極める為、最大応力が発生するリードと半田の境界面付近について EPMA 法による半田の元素分析を行った結果について述べる。EPMA 法とは物質に電子線を照射したとき、物質に含まれる元素に固有の特性 X 線が放射されるので、これを周波数フィルターにかけて、元素の規定を行うものである。この手法を試みた結果、一般的に実施されている SEM 分析より、鮮明な半田劣化解析結果が得られた。

Fig. 6 に冷熱衝撃テスト前後の PLCC 半田フィレット部の EPMA 結果を示す。白く光っている部分が Pb であり、他の部分は Sn である。

図より明らかな様に、冷熱衝撃テストの回数を経たものは、Pb 粒子が大きく凝集していることが判る。

一方、応力がかかっていないものは、Fig. 7 に示す様

に冷熱衝撃テストの回数を増しても、Pb 粒子径 (Pb 粒子の長端の長さの平均値) に変化はない。Fig. 5 と Fig. 7 から、冷熱衝撃テストによる半田強度の低下は、EPMA 法で観測した Pb 粒子の大きさと強い相関関係をもつことが判る。これらは半田フィレットに繰り返し応力が加かった結果、広がった分子間の間隙を Sn が熱拡散し、Pb が凝集したものと考えられる。

こうして、できた Pb の連鎖は半田本来の引張強度に比較して、強度が 1/5 程度しかない為、引き剥がし強度が低下すると思われる。Fig. 8 に冷熱衝撃テスト前後のリー

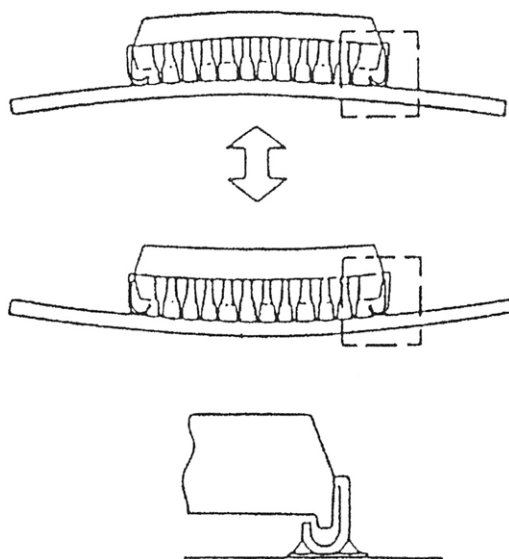


Fig. 4 Stress of solder joint by PCB deformation at Heat Shock cycles

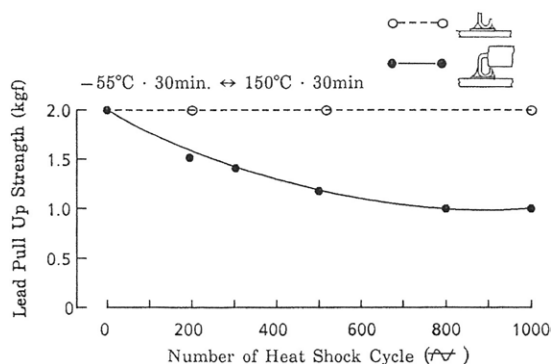


Fig. 5 Effect of Number of Heat Shock Cycles on the Lead Pull Up Strength

ドスルー半田フィレット部の EPMA 結果を示す。この Pb の凝集現象は、両面実装基板と同時にテストしたリードスルー実装基板でもほとんど同様の結果を示している。

一方、実際に市場で長期間使用された、ECU の半田フィレット部を調べたところ、半田劣化の程度は今回の解析テストの、ごく初期の段階と同等であり、Pb 粒子径と引き剥がし強度の変化はわずかである。以上のことから、今回開発した両面実装 ECU は、従来のリードスルー実装 ECU と同様、高い信頼性が確保されていることが判った。

4. VTEC-E エンジン制御 ECU

ここでは、はじめに ECU の機能ブロックの概要について述べ、次に、VTEC-E エンジン制御を特徴づける LAF センサ、センサアンプ、空燃比コントロールシステムについて述べる。

4.1. ECU 機能ブロック

Fig. 9 に ECU 機能ブロック図を示す。

以下に各ブロックに用いた新技術を要約する。

① Main CPU

空燃費コントロール、VTEC 切換などの制御仕様追加に

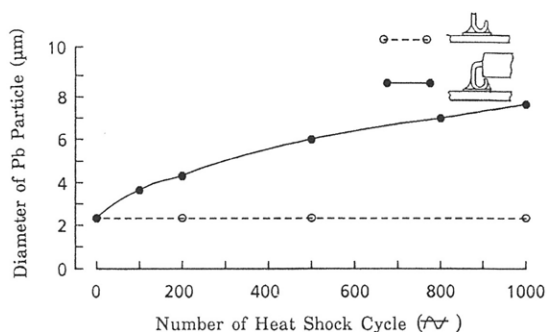


Fig. 7 Effect of Number of Heat Shock Cycles on the Diameter of Pb Particle

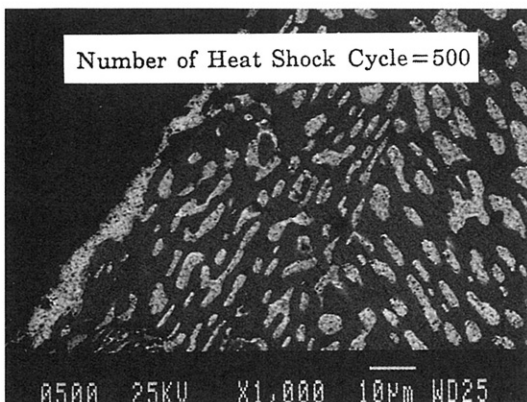
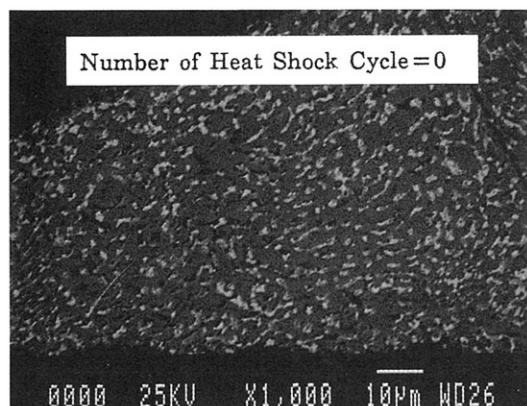


Fig. 6 Observation of The growth of Pb Particle by using EPMA (Surface Mount)

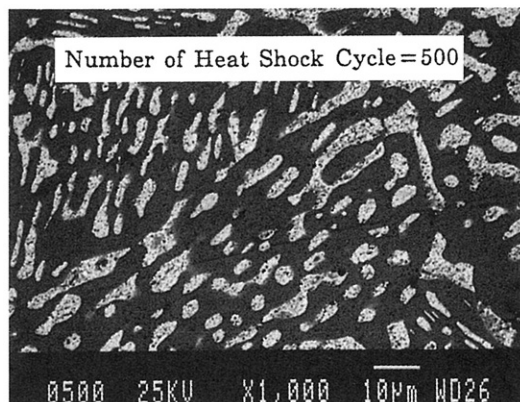
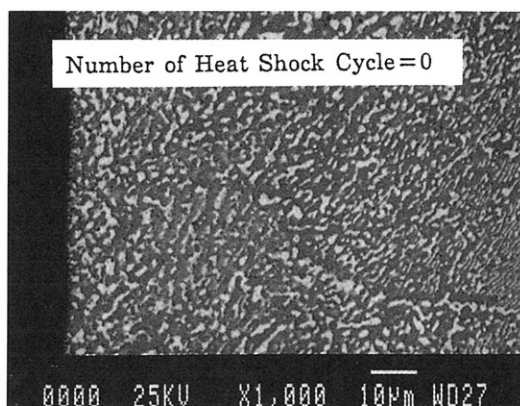


Fig. 8 Observation of The growth of Pb Particle by using EPMA (Lead through)

対応し、内蔵 ROM、内蔵 RAM を従来比 2 倍に機能アップしたワンチップ 16 ビット CPU (10 ビット A/D コンバータも内蔵) を新規適用して外付 ROM を廃止。

② Switch Custom IC

Main CPU の動作に異常が生じた場合、Back Up CPU の動作に切り換える IC としてウォッチドッグタイマ機能も一体化したカスタム IC を開発し小型、VA 化が図られた。また、この IC にはラッチアップタフネスに配慮した CMOS ゲートアレイを採用して信頼性確保を図った。

③ INJ Output

ベースアイランド構造により従来のダーリントン構造と同等の増幅率 (hfe) を確保したシングル High hfe の低飽和電圧トランジスタを採用。発熱量低減により加熱用ヒートシンクを廃止してトランジスタを自立化し組立工数を削減した。同時に ECU での組立性も向上した。

④ Power Supply

エンジン制御用学習データをイグニッション OFF 時でも保持しておく為のバッテリーバックアップ、リセット信号などの機能を 1 チップ化したカスタム IC と低飽和 5V 三端子レギュレータの構成により小型化した。

⑤ Pulse Input

クランクタイミングセンサの信号を波形整形する HIC の基板をセラミックからガラスエポキシに変更すると共に抵抗を印刷抵抗からチップ品に替え、機能を損なうことなくコストを低減した。

⑥ LAF Input (後述)

⑦ Back Up CPU

Main CPU 動作に異常が生じた場合、機能を Back Up して走行不能に陥るのを防ぐと共に、LAF センサ信号から A/F を演算して Main CPU に出力する。

⑧ Other Output (外部診断機対応)

エンジン制御に不具合が生じた時、センサ、アクチュエータ ECU のどこに異常があるのかの診断を速やかに行い、サービス性を向上する為の外部診断機対応機能を追加した。

4.2. LAF センサ動作原理

Fig. 10 に LAF センサ構成を示す。

以下に動作原理について簡単に述べる。

LAF センサは、センサ先端部が排気ガスにさらされる様なレイアウトで、排気管に取り付けられる。排気ガスはセラミック多孔質のガス拡散孔を通過して拡散室に導

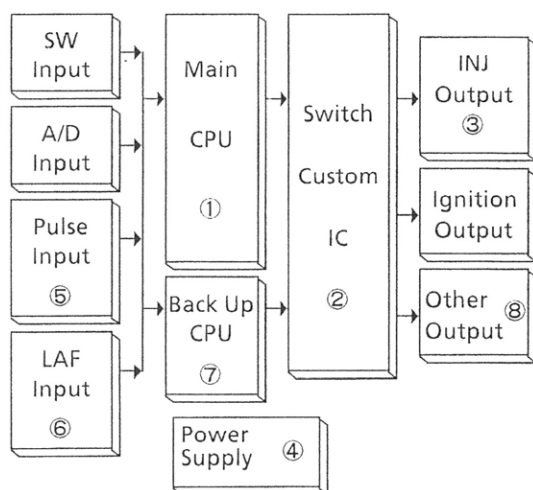


Fig. 9 Block Diagram of the ECU

入される。拡散室内の A/F が理論空燃比付近になると、 V_s セルは O_2 センサと同様に出力特性が急変する。この V_s 出力を基準電圧と比較した結果、その比較出力に応じた電流がポンプ・セルに供給される。ポンプ・セルを構成する ZrO_2 固体電解質はポンプ・セル電流に比例した O_2 分子を選択的に透過させる。今、拡散室内の A/F が常に理論空燃比になる様 ($V_s \approx 0.45V$) に制御すると、リーン状態の時、 I_p に + の電流が流れ、拡散室内部の O_2 を外部へ汲み出す。逆にリッチ状態では、 I_p に - の電流が流れ、拡散室内に O_2 を取り込む。この I_p の出力から A/F が測定できる。

$$I_p = \frac{4F}{RT} \cdot P \cdot D \cdot \frac{A}{L} \cdot X$$

ここで、各パラメータは以下の通り

F: ファラデー定数	D: 拡散係数
R: 気体定数	A: 拡散部有効断面積
T: 絶対温度	L: 有効距離
P: 排ガス圧	X: 排ガス中の成分濃度

Fig. 11 に A/F と I_p の関係を示す。

I_p が A/F 値 14.7 を境に - から + に転じ A/F 値の増大に比例して I_p が単調に増加することが判る。

4.3. LAF センサ・アンブ

LAF センサを駆動し、A/F をリッチ域からリーン域まで連続的に測定するのに必要となるのが LAF センサアンブ

プである。これはセンサを活性化させるためのヒータ駆動部、 $V_s \approx 0.45V$ を保つように I_p 電流を駆動するアナログ F/B 回路、 I_p 電流の大きさから A/F を算出する演算処理部などから構成されている。

センサアンプには、LAF 専用の CPU (以下 LAF-CPU) を用意し、本来のエンジン制御を行う CPU (Main CPU) の制御プログラムは VTEC-E 以外のエンジン制御プログラムとできるだけ互換性をもたせる様にしている。

LAF-CPU と Main CPU は、同一のプリント基板に載せ、これを組み込む ECU ケースも他の PGM-FI ECU と共用とした。LAF-CPU から Main CPU に対して、A/F 測定結果とシステム診断情報がデジタルバスにのせて伝達される。ま

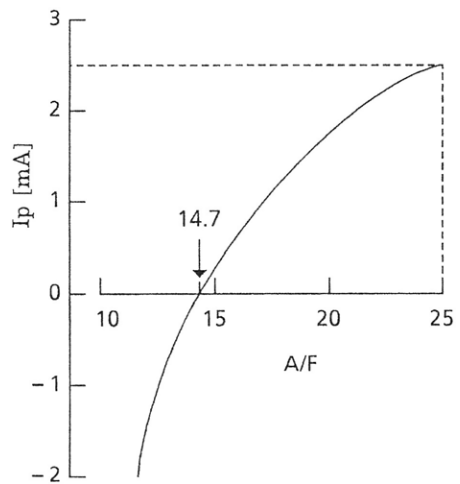
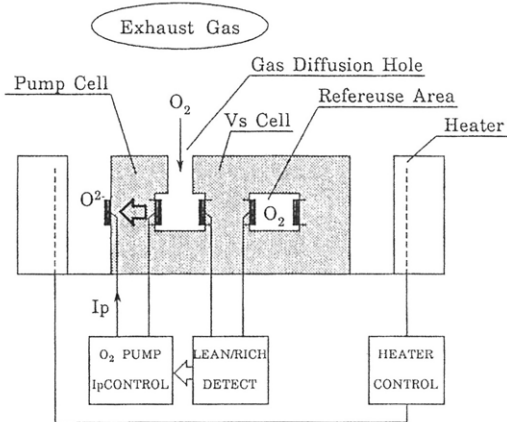


Fig. 11 Relationship between I_p and A/F

<LEAN REGION>



<RICH REGION>

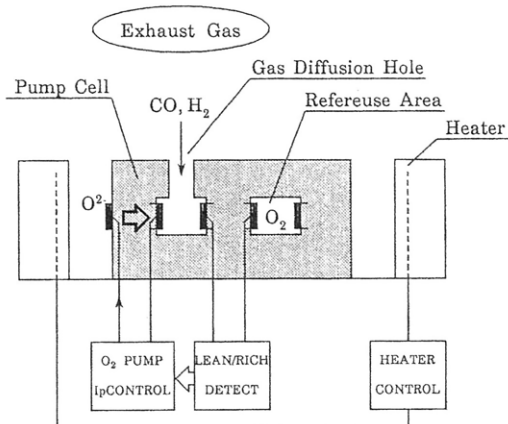


Fig. 10 Construction of LAF Sensor

た、この LAF-CPU は、万一 Main CPU 系が故障した時に、最低限の走行を確保する為のバックアップ FI 機能も兼ね備えている。

アンプ部の設計の第 1 のポイントは、 $A/F = 10.5 \sim 25$ という広い測定範囲を要求される中で、測定精度と量産性をいかに両立させるか、ということである。

- 1) I_p 電流値を高精度で、読み込むために、10 ビット A/D コンバータを採用。(LAF-CPU に内蔵)
- 2) A/D コンバータの基準電源は ECU 本来の $5.0 \pm 0.1 V$ 電源を共用。
- 3) センサの特性バラツキについては、センサを 21 のランクに分け、センサ Assy に組み込まれたラベル抵抗 (識別抵抗) を LAF-CPU で判別し、補正をかける。
- 4) オフセット等の誤差要因を最低限に押さえたアナログ部の回路設計。

などによって、リーン域で $\pm 0.5 A/F$ 、理論空燃比付近で $\pm 0.06 A/F$ という高い測定精度を得ることができた。

一例として、Fig. 12 にリーン領域での A/F 測定誤差の要因を示す。

また、第 2 のポイントとして、様々な状況においてもセンサを破壊・劣化させる事のない様、配慮が必要となる。そのために以下に示す様な電子回路とソフトウェアの対応が必要となった。

- 1) まだセンサが暖まっていない間や、システムの異常を判断した時などに、センサの I_p セルに過電圧を加えない様、クランプ回路を付加した。クランプ中は若干の $-I_p$ 電流を生じさせ、センサの拡散室内部から外部排ガス雰囲気への気相の流れを形成して拡散室内の浄化を図っている。
- 2) クランプが解除され、センサが活性化し、センサアンプが通常の動作を行っている状態でも、 I_p セルに 2V 以上の過電圧を加えない様にする為、ソフトウェアによる制限とハードウェアによる制限の二重の保護設計を行った。

以上の結果から、ブラックニングと呼ばれる素子の黒色化、素子の周波数特性劣化、素子のクラック発生等のセンサの劣化・破壊を防止することができた。

4.4. 空燃比コントロールシステム

LAF センサと LAF センサ・アンプを用いた VTEC-E エンジン制御用空燃比コントロールシステムの機能ブロック図を Fig. 13 に示す。図中破線で囲われた箇所は LAF センサ・アンプであり、従来の PGM-FI ECU に対し、新規に追加されたものである。LAF センサからの空燃比検出信号は ECU 内蔵の LAF アンプを経由して A/D に入力され、LAF CPU で LAF センサの出力に対応してポンプ電流を制御する。LAF センサの特性として、センサ周辺の圧力により、実 A/F とセンサから出力される A/F とに差が生じる為、エンジン回転数、吸入管圧力等から、排気圧力を推定し排気圧力補正を行った A/F 値を算出している。この A/F 値とエンジン回転数、吸入管圧力、スロットル開度、車速、水温、吸気温度、VTEC 制御の油圧スイッチ信号等から PGM-FI ECU は、目標空燃比信号とリーン時の

燃焼を安定させるための噴射タイミングを算出し、インジェクターを駆動し燃料制御を行っている。さらに全空燃比域で MBT 制御を行うために A/F により補正した、点火時期制御を行うことで、低燃費を実現している。

5. まとめ

1. 両面実装 ECU の要素技術を設計、製造、劣化の観点から洗い出し、これを試験することにより、従来のリードスルー実装 ECU と同様の高い信頼性をそなえた両面実装 ECU 技術を確立し、New Civic に搭載した。
2. 半田の接続信頼性の確認手法として、EPMA 法を試みた結果、明確に半田劣化が解析できた。
3. 冷熱サイクル前後の半田フィレット部を EPMA 法で解析した結果、Pb 粒子径と引き剥がし強度の間に強い相関があることがわかった。
4. LAF センサ出力検知部と LAF センサ駆動部を有する小型・高精度な LAF センサ・アンプを開発し、VTEC-E エンジン制御用 ECU に内蔵することにより、リーンバーン制御を行い、大きく燃費を向上した。

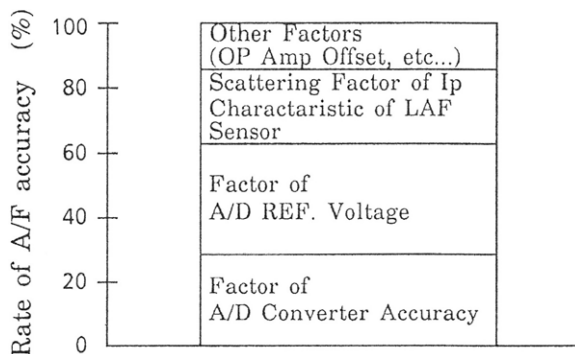


Fig. 12 Factor of A/F measurement accuracy

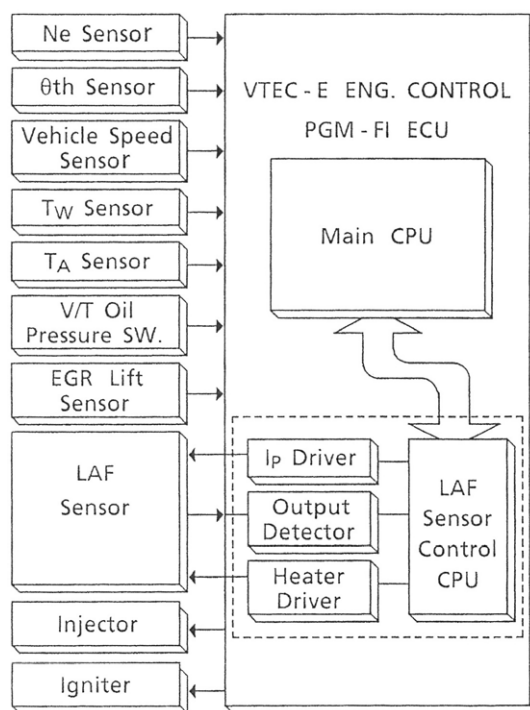


Fig. 13 VTEC-E Control PGM-FI ECU Schematic

6. あとがき

将来、ECU の制御仕様は一層拡大してゆくと思われるが、省スペースの要求のたかまりから、ECU の小型化は面実装技術と LSI の進歩により、今後ますます加速されることだろう。こうした中で高い信頼性を確保する為には、物性まで立ち入った微視的な評価手法が一層必要になる。

また、リーンバーン制御システムは、リーン NO_x 触媒の開発や、リーン運転時のトルク変動制御など⁽⁵⁾のブレークスルーによって大きく展開するものとする。それに伴い、ローコストな、高精度リーンバーン制御システムに向けて必要な部品開発が今後、重要になる⁽⁶⁾。

今回開発した小型化や、リーンバーン・エンジン制御に代表される省資源、省エネルギー技術の分野では、日本が世界の牽引車ともいえる立場を歩んでいる。今後も技術の研鑽を重ね、世界の自動車技術に貢献できる ECU の技術を育てあげていきたい。

最後に、この開発と量産化にあたり、御協力を頂いた(株)電子技研の関係者の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) K. Inoue et al. : A high power, wide torque, efficient engine with a newly developed variable valve lift and timing mechanism, SAE Paper 890675 (1989)
- (2) 三浦ほか: 可変機構を用いたガソリンエンジンの高効率化について, 自動車技術, Vol.45 No.8 (1991)
- (3) 松重ほか: 加速寿命試験の考え方と実施例, 第 21 回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集 P.243-248 (1991)
- (4) 影山ほか: マイクロソルダリング用はんだペーストの検討 その 4, 電子情報通信学会春季全国大会 (1988)
- (5) 井口: リーンバーンによる効率向上の現状と課題, 自動車技術, Vol.45 No.8 (1991)
- (6) 岡野ほか: 希薄燃焼エンジンの開発, 自動車技術会 学術講演会前刷集 911032 P.131-138 (1991)

■ 著 者 ■



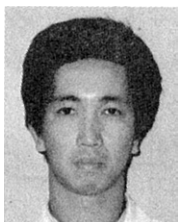
川 合 誠



藤 村 章



前 田 進



水 尾 直 彦



松 浦 正 典



大 野 恒 夫