

# インテリジェント化技術

## Intelligent Engine

中 北 智 文 航空宇宙事業本部技術開発センター制御技術部 主査 理学博士  
川 住 明 生 航空宇宙事業本部技術開発センター制御技術部  
廣 西 伸 幸 航空宇宙事業本部技術開発センター制御技術部 主査

近年、航空機用エンジンでは、定期的に点検を行って機器の状態を監視し不適合があれば整備するオン・コンディション整備方式が適用されている。本研究開発では、さらなる整備費用低減を目指し、エンジン劣化の傾向を把握するとともに故障発生時には故障した部位を識別する診断技術を開発した。また、これに伴うコスト増を低減するため、多機能電子部品を活用した低コスト ECU ( Electronic Control Unit ) 設計技術を開発した。本稿では、これらの技術について紹介する。

In recent years, on-condition maintenance has been generally applied to aircraft engines. On-condition maintenance is the methodology to repair the equipment only when the maintenance is actually necessary by observing the state of the system periodically. Aiming at the further reduction of maintenance costs, engine health monitoring technology was developed to evaluate the deterioration of the engine and to isolate the fault module if any failure is detected. The engine electronic control unit module utilizing multifunctional electronic devices was also developed to reduce the cost increase associated with this additional monitoring function. This article introduces these technologies.

## 1. 緒 言

近年、民間航空機用エンジンでは、機体に装着した状態で検査を行いながら、不良の部分が発見された時点あるいは故障にいたる可能性がでてきた時点でエンジンを機体から取り卸して整備を行うオン・コンディション整備方式が適用されている。さらなるエンジン整備費用低減のためには、運航信頼性を維持しつつ、適切な整備計画、部品補給計画を策定するための的確な情報が必要である。このためには、エンジン劣化の傾向を把握して整備の必要な部位を早期に絞り込む技術を低コストで実現することが課題となる。

本研究開発では、エンジン内部の状態量をモニタリングし、各モジュールの劣化診断、故障検出ならびに故障モジュールの識別をするモデルベースドモニタリング技術を開発した。また、インテリジェント化に伴うコスト増を低減し、低コスト化を図るため、低コスト ECU ( Electronic Control Unit ) 設計技術を開発した。

本稿では、これらの低コストインテリジェント化技術について報告する。

## 2. モデルベースドモニタリング

### 2.1 技術開発の目的

エンジンを構成する各モジュール特性の劣化診断、故障検出および故障モジュールを識別する診断技術を開発した。エンジンは、FAN, LPC ( Low Pressure Compressor ), HPC ( High Pressure Compressor ), HPT ( High Pressure Turbine ) および LPT ( Low Pressure Turbine ) の五つのモジュールから構成される。また、それぞれのモジュールは断熱効率と流量係数の二つの特性をもつ。したがって、5モジュール×2特性の計10特性について劣化診断および故障診断を行う。

### 2.2 診断方法

#### 2.2.1 診断の基本原則

本研究開発では、エンジンモデルを用いて計測値から各モジュール特性を重み付最小二乗法によって評価する方法を採用した。本方法は海外エンジンメーカーで開発され<sup>(1)</sup>、実際に運用されているが、より診断精度を向上させるための改良を行った。基本原則は参考文献(1)に詳述されているが、以下に概要を述べる。

#### (1) 基本原則

一般に、エンジンのモジュール特性  $x$  ( ファン断

熱効率  $\eta_{FAN}$ , ファン流量係数  $WC_{FAN}$ , LPT 断熱効率  $\eta_{LPT}$ , LPT 流量係数  $FF_{LPT}$ , HPT 流量係数  $FF_{HPT}$  など)のある基準状態  $x_B$  (例えば, 標準エンジンの特性)からのずれ  $\Delta x$  と, 計測値  $z$  (高圧系回転数  $Ng$ , 排気ガス温度  $EGT$  など)の基準状態  $z_B$  からのずれ  $\Delta z$  は, エンジンモデルから決定する感度行列  $S$  を用いて, (1)式によって関係づけられる.

$$\Delta z = S \cdot \Delta x + err$$

$$S \equiv \begin{pmatrix} \frac{\partial Ng}{\partial \eta_{FAN}} & \frac{\partial Ng}{\partial WC_{FAN}} & \dots & \frac{\partial Ng}{\partial FF_{HPT}} & \frac{\partial Ng}{\partial \eta_{LPT}} & \frac{\partial Ng}{\partial FF_{LPT}} \\ \frac{\partial EGT}{\partial \eta_{FAN}} & \frac{\partial EGT}{\partial WC_{FAN}} & \dots & \frac{\partial EGT}{\partial FF_{HPT}} & \frac{\partial EGT}{\partial \eta_{LPT}} & \frac{\partial EGT}{\partial FF_{LPT}} \\ \frac{\partial z_{J-2}}{\partial \eta_{FAN}} & \frac{\partial z_{J-2}}{\partial WC_{FAN}} & \dots & \frac{\partial z_{J-2}}{\partial FF_{HPT}} & \frac{\partial z_{J-2}}{\partial \eta_{LPT}} & \frac{\partial z_{J-2}}{\partial FF_{LPT}} \\ \frac{\partial z_{J-1}}{\partial \eta_{FAN}} & \frac{\partial z_{J-1}}{\partial WC_{FAN}} & \dots & \frac{\partial z_{J-1}}{\partial FF_{HPT}} & \frac{\partial z_{J-1}}{\partial \eta_{LPT}} & \frac{\partial z_{J-1}}{\partial FF_{LPT}} \\ \frac{\partial z_J}{\partial \eta_{FAN}} & \frac{\partial z_J}{\partial WC_{FAN}} & \dots & \frac{\partial z_J}{\partial FF_{HPT}} & \frac{\partial z_J}{\partial \eta_{LPT}} & \frac{\partial z_J}{\partial FF_{LPT}} \end{pmatrix}$$

$$\Delta x \equiv (\Delta \eta_{FAN} \quad \Delta WC_{FAN} \quad \dots \quad \Delta FF_{HPT} \quad \Delta \eta_{LPT} \quad \Delta FF_{LPT})^T$$

$$\Delta z \equiv (\Delta Ng \quad \Delta EGT \quad \dots \quad \Delta z_{J-2} \quad \Delta z_{J-1} \quad \Delta z_J)^T$$

..... (1)

$err$  : 計測誤差  
 $J$  : 診断に用いることのできるセンサの数

(1)式にはバイアスやノイズなどによる計測誤差  $err$  が含まれるため, 計測値  $\Delta z$  からモジュール特性  $\Delta x$  を絶対論的に求めることはできない. したがって, (2)式に示す評価関数  $RE$  を最小値にするモジュール特性  $\Delta x$  を最も確度の高い解として採用する. 重み係数は, 良好な診断結果を得ることができるよう経験的に調整する.

$$RE = \left\{ \sum_i \left( \frac{\Delta x_i}{\sigma_{x,i}} \right)^2 + \sum_j \left( \frac{err_j}{\sigma_{z,j}} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$\sigma_{x,i}$  : モジュール特性  $\Delta x_i$  の評価用重み係数  
 $\sigma_{z,j}$  : センサ誤差  $err_j$  の評価用重み係数

この重み付最小二乗法による診断では, 必ずしも診断対象であるモジュール特性と同数のセンサを必要とするわけではない. しかしすべてのモジュール特性について良い診断を行うためには同数のセンサを用いることが望ましい. 本研究開発では, 10個のモジュール特性について診断するため, 制御用センサ以外にも診断用センサを追設し合計10個の計測値を診断に使用することを前提とした.

## (2) 故障検出

モジュールやセンサの故障発生時にはそれらの診断結果がトレンド成分から急激にずれるため, そのずれ量を監視することで故障を検出する.

公表されている方法では, (3)式に示す故障診断指標<sup>しきい</sup>がある閾値を超えた時に故障と判断する<sup>(1)</sup>.

$$RE' = \left\{ \sum_i \left( \frac{\delta \Delta x_i}{\sigma_{x,i}} \right)^2 + \sum_j \left( \frac{\delta err_j}{\sigma_{z,j}} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$\delta \Delta x_i = \Delta x_i - \Delta x_i$  のトレンド成分  
 $\delta err_j = err_j - err_j$  のトレンド成分

## (3) 故障識別

故障が検出された場合, どのモジュールもしくはどのセンサが故障を起こしているのかを識別しなければならない. 完全な識別ができなくても, エンジン取り卸しが必要か否かの判断は確実にできなければならない.

故障識別は参考文献(1)に従い, 以下のように行う. 単一故障発生時には, 故障したモジュールの特性  $\Delta x_{iF}$  もしくはセンサの誤差  $err_{jF}$  のトレンド成分からのずれ  $\delta \Delta x_{iF}$ ,  $\delta err_{jF}$  のみが大きく, ほかの  $\delta \Delta x_p$ ,  $\delta err_j$  は小さい. したがって, 単一故障発生時の  $RE'$  は大きくても, (4)式に示すように故障したモジュールまたはセンサの重み係数を100倍して評価した指標  $RE'_F$  は小さくなる.

$$RE'_F = \left\{ \sum_{i \neq iF} \left( \frac{\delta \Delta x_i}{\sigma_{x,i}} \right)^2 + \left( \frac{\delta \Delta x_{iF}}{100 \times \sigma_{x,iF}} \right)^2 + \sum_{j \neq jF} \left( \frac{\delta err_j}{\sigma_{z,j}} \right)^2 + \left( \frac{\delta err_{jF}}{100 \times \sigma_{z,jF}} \right)^2 \right\} \dots\dots\dots (4)$$

そこで, ある一つのモジュールまたはセンサが故障したと仮定して評価関数  $RE'_F$  を作成し, これを最小にするように(1)式の解  $\delta \Delta x_i$  を求める. この時, 診断結果として得た  $RE'_F$  が閾値よりも小さければ仮定は間違っておらず, そのモジュールまたはセンサは故障している確度が高い. 逆に  $RE'_F$  が閾値よりも大きければ仮定は間違っており, そのモジュールまたはセンサは故障していない. このようにして, 故障箇所の候補を探索することができる. なお, 故障箇所の候補が複数ある場合, 対応する  $RE'_F$  が小さいほど確度が高い.

## 2.2.2 技術課題と対策

以上の原理によって劣化診断を行う。しかし、故障検出や故障識別においては以下に示す二つの課題がある。本研究開発では、これらの課題に対する対策を検討した。

### (1) 故障検出

計測ノイズの影響によって診断結果 ( $\Delta x$ ,  $err$ ) は乱れている。敏感に故障検出をするためには、故障によって生じたトレンド成分からのずれをこの乱れの中からいかに敏感に抽出するかが課題となる。

本研究開発では、より故障検出を鋭敏にするため、(3)式の故障診断指標に加えて、個々の  $(\delta\Delta x_i/\sigma_{x,i})^2$  と  $(\delta err_j/\sigma_{z,j})^2$  も故障診断指標として監視し、いずれか一つでも閾値を超えた際には故障と判断することとした。

### (2) 飛行条件

(1)式の感度行列  $S$  は、飛行条件（大気圧（高度）、大気温度、機速、ファン回転数）に依存する。その結果、診断誤差も飛行条件に依存する。したがって、飛行条件の変動に伴い診断結果の分散は大きくなる。故障検出や故障識別の感度を高めるためには、診断誤差の分散を小さくしなければならない。本研究開発では、診断結果の飛行条件に対する依存性を時系列重回帰分析によって求め、この依存性を除去することとした。

## 2.3 試験結果

### 2.3.1 試験目的と試験方法

2.2節に述べた方法で、飛行条件の影響を排除しながら、精度の良い劣化診断、敏感な故障検出、そして確度の高い故障識別を行うことができるか試験的に調査した。

試験はシミュレーションによって行った。エンジンモデルは、小型エコエンジンのモデルを使用した。そのモデルに組み込まれているすべてのモジュール特性を同時に変化させ現実的な劣化を模擬する。また、単一モジュール故障は、そのモジュールの特性をある時点でステップ状に変化させることで模擬した。このようにモジュール特性を設定し、与えた飛行条件のもとでエンジンモデルを解くことで、モジュール特性の劣化や故障が起こった際の計測値の理論値が算出できる。この理論値に正規分布の乱数によって模擬した計測ノイズを重畳することで、現実的なセンサ計測値を模擬した。さらに、単一センサ故障を模擬する際には、このセンサ計測値をステップ状に変化させることとした。このようにして模擬したセンサ計測値を用いて、2.2節に

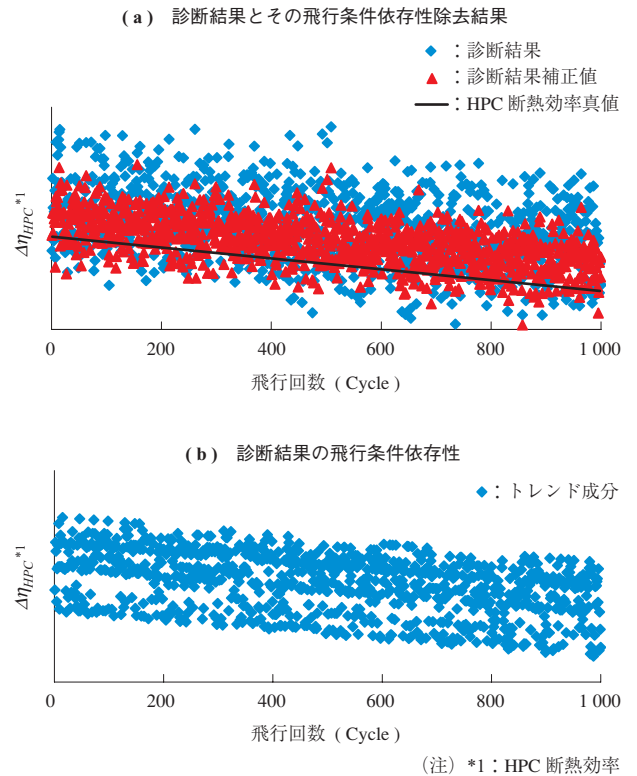
述べた方法で診断を行い、その診断性能を調査した。

### 2.3.2 試験結果

#### (1) 劣化診断

第1図に、飛行条件を変動（大気圧力3条件 × 大気温度3条件 × ファン回転数4条件 = 36条件）させて行った劣化診断結果の例を示す。本シミュレーションでは故障模擬は行っていない。第1図-(a)には、モジュール特性真値、2.2.1項(1)の方法によって得た診断結果、そして2.2.2項(3)の方法によって飛行条件依存性を除去した診断結果補正值を示す。第1図-(b)には、この診断結果に対して飛行条件を説明変数とする時系列重回帰分析を行うことによって得たトレンド成分を示す。幾つかのトレンドラインに分かれて見えるが、これが診断誤差の飛行条件依存性である。第1図-(a)に示されるように、初期のモジュール特性に対する相対的な劣化という観点では、診断結果補正值は真値と良く一致している。また、飛行条件依存性を除去することによって、診断結果の分散は小さくなっている。

このように、提案した方法で良好な劣化診断ができることを確認した。



第1図 劣化診断結果例  
Fig. 1 An Example of Deterioration Diagnosis

## (2) 故障診断

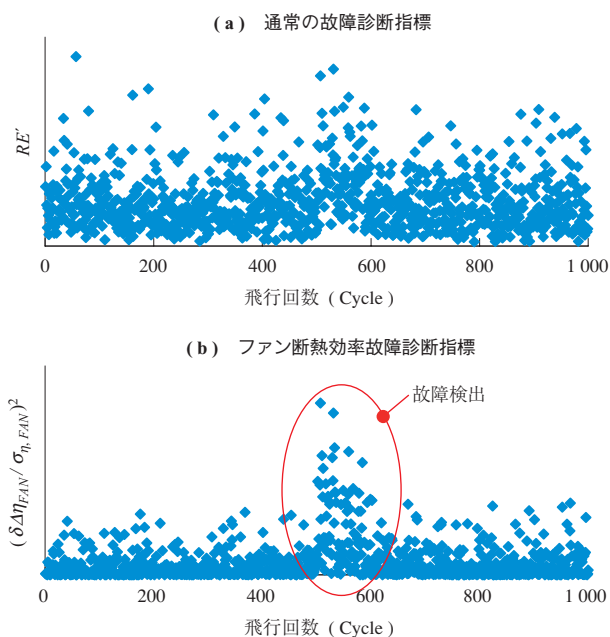
故障による計測値の変動が小さいほど、その変動が計測ノイズの中に埋もれてしまうため、故障検出や故障識別は困難となる。そこで、故障時のモジュール特性変化量を振り、故障による計測値の変動が計測ノイズ標準偏差の2倍、3.5倍、5倍となる場合について試験を実施した。

第1表に、故障診断の試験結果を示す。故障による計測値の変動が計測ノイズ標準偏差の3.5倍以上ある場合、確実な故障検出とともに、故障モジュールが高圧系か低圧系かの識別はできた。また、高圧系については故障モジュールの識別もできるが、低圧系のファン故障とLPT故障の識別は困難であった。計測値変動が計測ノイズ標準偏差の2倍にすぎない場合も、故障識別は困難でも、鋭敏に故障を検出できた。第2図に、ファン故障によって計測値が計測ノイズ標準偏

第1表 故障診断試験結果  
Table 1 Results of Fault Diagnosis

故障箇所 真値	故障箇所識別結果		
	変動量 $2\sigma$	変動量 $3.5\sigma$	変動量 $5\sigma$
FAN	FAN	LPT	LPT
LPC	LPC	LPC	LPC
HPC	HPC	HPC	HPC
HPT	LPT	HPT	HPT
LPT	LPC	FAN	FAN

(注) 変動量  $N\sigma$  は、モジュール故障による計測値変動が計測ノイズ標準偏差  $\sigma$  の  $N$  倍であることを示す。



第2図 ファン故障時の故障診断指標  
Fig. 2 Fault Index for the Case of FAN Fault

差の2倍変動した場合の故障診断指標を示す。本図に示されるように  $RE'$  だけでなく個々の  $(\delta\Delta x_i / \sigma_{x,i})^2$  と  $(\delta err_j / \sigma_{z,j})^2$  も故障診断指標として監視することによって故障検出は鋭敏になる。

## (3) 試験結果のまとめ

実際に海外エンジンメーカーで実用されている重み付最小二乗法による診断技術に対して改良を加えることで、劣化診断の精度と故障検出の鋭敏さを改善できることを確認した。今後は、センサ数の削減が課題である。

## 3. 低コスト ECU

### 3.1 技術開発の目的と課題

エンジンのインテリジェント化に伴い、ECUは制御用だけでなくモデルベースドモニタリング用の入力も必要となる。そのため、回路規模およびプリント基板やケーシングのサイズが大きくなり、コストが増大する。一方、ECUのコストの大半は、電子部品費が占めていることから、コスト低減のためには、従来のECUハードウェアよりも少ない部品点数で回路を実現するための技術開発が必要である。

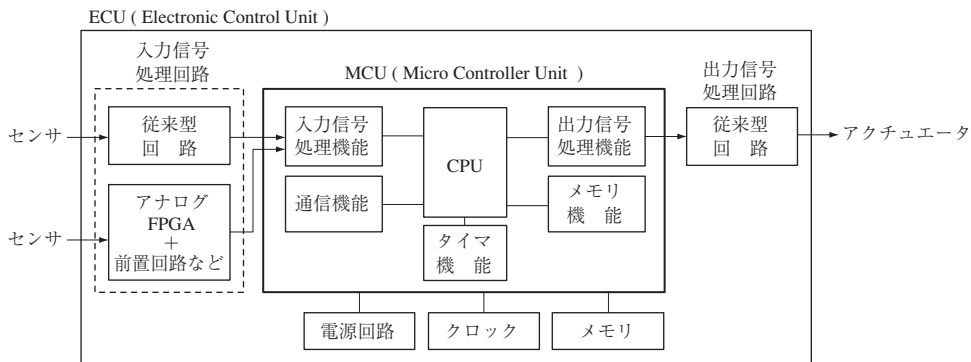
### 3.2 低コスト化技術

従来のECUハードウェアよりも少ない部品点数で回路を実現するための技術として、1チップ化技術の研究開発を実施した。1チップ化技術とは、例えば複数の電子部品で構成されていたアナログ信号処理回路を1チップ化することによって、機能を維持したまま部品点数を削減するものである。

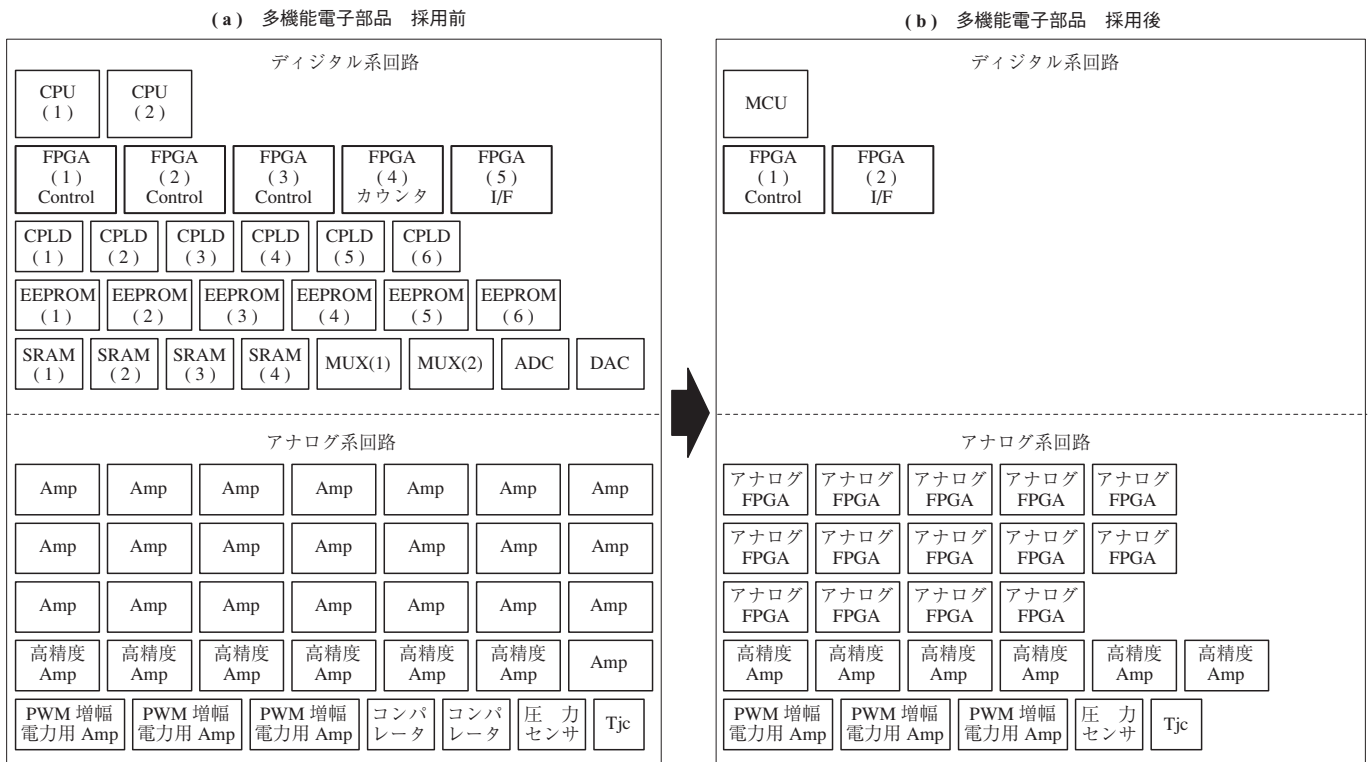
本研究開発では、プログラミングによって種々の機能をもたせることのできる多機能電子部品のうち、MCU (Micro Controller Unit) とアナログ FPGA (Field Programmable Gate Array) のECUへの適用可能性について検証した。

MCUはCPU (Central Processing Unit) とメモリ、入出力信号処理機能などを1チップに内蔵した製品である。また、アナログFPGAは、オペアンプやコンパレータを含むアナログ回路ブロックを複数搭載し、ブロック間の配線や利得を可変にした製品である。

MCUおよびアナログFPGAをECUに適用した場合の低コストECUの内部構成を第3図に、多機能電子部品による部品点数の削減効果を第4図に示す。これらの部品がECUに適用可能であれば、製造コストおよび実装面積



第 3 図 低コスト ECU 内部構成  
Fig. 3 The block diagram of the ECU utilizing multi function devices



第 4 図 多機能電子部品による部品点数の削減効果  
Fig. 4 The component reduction through the multi function devices

を約 1/2 に低減することが可能となる。

### 3.3 試験結果

#### 3.3.1 試験目的と試験方法

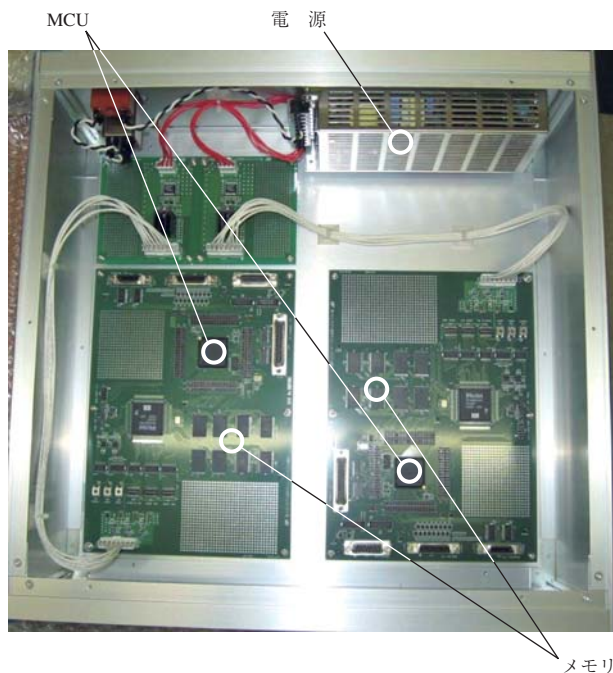
アナログ FPGA については、入出力信号の処理精度、線形性、応答性などが ECU への適用可能性の評価項目である。これらについて検証するため、アナログ FPGA を用いて ECU 内の各センサ、アクチュエータ信号処理回路を実現した ECU 多機能電子部品評価用基板 (FPGA) を設計・製作し、回路ごとに模擬入力・模擬負荷を接続した要素試験を実施した。

一方、MCU については、要素試験と複合試験の二つの

フェーズに分けて検証を実施した。これは、ECU が同時期に多数の入出力信号処理を実施した場合、処理間の切替時間を多く必要とし、処理時間自体が個別に機能させた場合と比較して延びて、必要な時間内に処理が終わらず、作動不良や計測精度の低下につながる懸念されるからである。

まず要素試験では、MCU 内の各機能が個別に ECU に適用可能かを検証した。例えば、A/D 変換機能では、A/D 変換速度およびデジタル信号への変換精度を評価項目とした。

次に複合試験では、ECU と同様に要素試験で検証する



第 5 図 低コスト ECU 試作モジュール  
Fig. 5 Tested module of ECU

タイマ割り込み機能を用いて発生させた一定間隔の割り込みごとに複数の入出力信号処理を実行させた。この計測データを通信機能で外部出力し、機能の作動不良や要素試験時と比較した。

これらの試験対象として、ECU 多機能電子部品評価用基板 (MCU) および低コスト ECU 試作モジュール (第 5 図) を設計・製作した。同時に、これらの試験装置である ECU 多機能電子部品評価試験装置も設計・製作し、両者を組み合わせた形態で要素試験および複合試験を実施した。

### 3.3.2 試験結果

アナログ FPGA の要素試験では、温度センサ信号、位置センサ信号、アクチュエータ出力信号などの入出力信号処理回路について、エンジンを制御するために十分な信号処理精度、線形性、応答性をもっていることを確認した。

MCU の要素試験では、メモリアクセス機能、演算機能、タイマ割り込み機能、A/D 変換機能に代表される入力信号処理機能、出力信号処理機能などについて検証を実施し、ECU に課せられる要求性能を満足していることを確認した。

また、複合試験では、同時に多数の信号処理を実施して

も、処理時間への影響はなく、各機能に作動不良や計測精度の低下が発生しないことを確認した。以上の結果から、本構成で ECU として期待される基本能力を満足することを検証することができた。

## 4. 結 言

本研究開発によって以下の成果を得た。今後、実機データを基にモニタリング技術の検証を行う必要があるなど残された課題も多いが、コスト増を低減しながら整備費低減に貢献するインテリジェント化技術の基盤は完成した。実機適用に向け、さらに技術の向上に努める所存である。

- (1) モデルベースドモニタリングは、実際に海外エンジンメーカーで実用されている重み付最小二乗法による診断技術に対して改良を加えることによって、劣化診断の精度と故障検出の鋭敏さを改善できることを確認した。今後は、センサ数の削減が課題である。
- (2) 低コスト ECU は、評価試験によって MCU およびアナログ FPGA による 1 チップ化技術が ECU に適用可能であることを検証したことから、これらの部品を使用したシステム設計は有効である。このため、多機能電子部品を使用しない場合に比べ、同等の機能を維持したうえで部品点数の削減が可能となり、実装面積と製造コストを約 1/2 に低減できる見通しを得ることができた。

## — 謝 辞 —

本研究は、経済産業省の民間航空機基盤技術プログラムによる「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」の一環として、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から助成を受けて実施しているものである。

また、本研究の実施に当たり、ご指導とご協力をいただいた NEDO および関係各位のご厚誼に対し、深く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) David L. Doel : Interpretation of Weighted-Least-Squares Gas Path Analysis Results ASME GT-2002-30025