

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「環境対応型先進無人飛行機(UAV)用ジェットエンジンの開発」

研究開発成果等報告書

平成23年 9月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人にいがた産業創造機構

目 次

	頁
第 1 章 研究開発の概要	
1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1－2 研究体制	2
1－3 成果概要	2
1－4 当該研究開発の連絡窓口	3
第 2 章 高精度高速切削加工技術の実現	
2－1 切削加工技術の実現	4
2－2 エンジン部品の製作	4
第 3 章 適正工具の研究	
3－1 工具研磨機改造	6
3－2 工具開発	6
第 4 章 ドライ加工の研究	
4－1 試作方法	8
4－2 試作結果	9
第 5 章 ジェットエンジンの試作	
5－1 基板設計・試作	11
5－2 エンジン組立・調整	17
5－3 試験技術の開発	19
第 6 章 全体総括	20

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

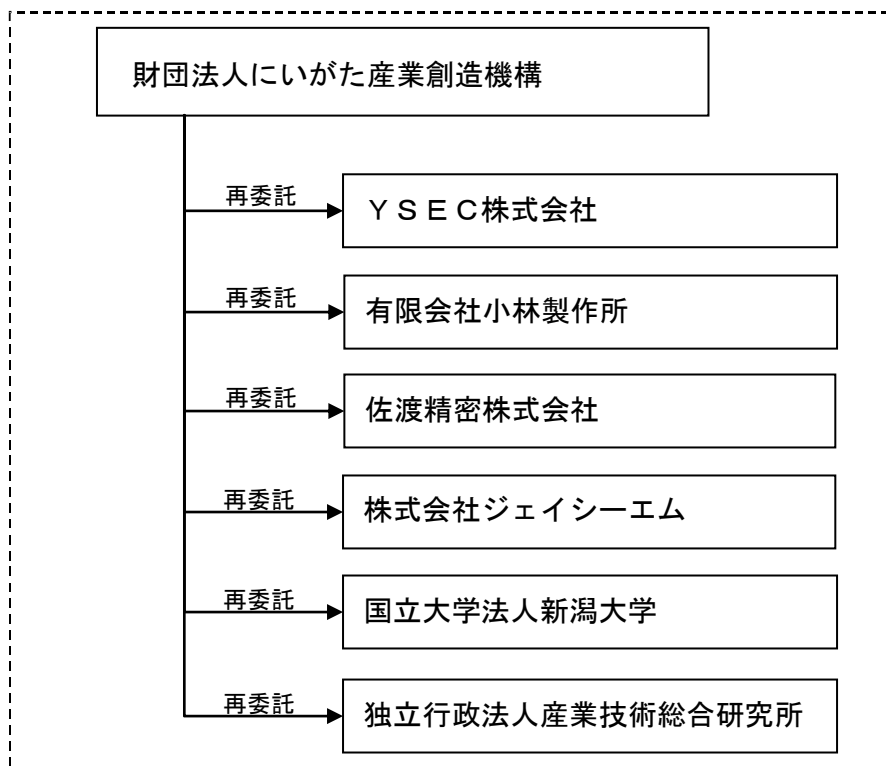
21世紀に入り10年間で2倍以上の成長を見せている無人飛行機（UAV）用の、世界トップレベルの環境対応型特性を持つジェットエンジン部品及びエンジンを開発することを目的とし、高速高精度切削加工技術を用いて加工した新素材等の部品により、燃費向上、耐熱性向上、精度向上させたエンジン部品を開発し、無人飛行機の完全国産開発に貢献するとともに、最新技術の蓄積を行い、将来のエンジン関連産業の集積に繋げる。

現在販売されているUAV用ジェットエンジンには、海外製品が大半を占めているが、これらの海外製品はスペックが低く、国内ユーザーのニーズに応えられるものはほとんど無い。例えば、軸受部品は高圧大気燃焼による耐食性の問題からSUS304が採用されているが、同部品は高い温度の掛かる部分であり、この部分の高温による劣化はジェットエンジンの耐久性に大きな影響を及ぼすことや、ジェットエンジンにおいて最も重要となるパーツであるタービンシャフトに加えて静翼および動翼が長時間の運転に耐えうる事が困難なため、トップメーカーでも400時間までの保証であり、大幅な信頼性・耐久性向上を目指すためには、部品の耐熱性向上と部品同士の組み合わせ精度が必要となる。

国内ユーザーより要求される燃費向上、耐熱性向上、信頼性向上のニーズを満たすためには、「チタン合金・マグネシウム合金等の新素材による軽量化」、「各部品の精度、組合せ精度の向上」が考えられる。小径工具を用いて、①主軸の回転数を上げる、②切り込み量を浅くする、③送り速度の高速化を図るための条件を研究し、工具に掛かる負荷、熱を低減させて工具寿命アップさせることにより、高速かつ高精度な部品の切削加工技術を実現させる。また、専用工具研磨機を開発し、それぞれの材質に適した工具の開発を行い、その技術を用いて新素材の部品製作を行う。

また、信頼性の向上のためには、部品ごとの高精度化も重要であるが、その部品がアセンブルされたときの性能や信頼性を正確に評価し、加工技術にフィードバックしなければならない。特にジェットエンジンのように部品が組み立てられて動作してはじめて信頼性が評価できる製品では、アセンブルの高精度化と評価技術の確立が重要である。静音化技術についても、振動破壊や共振を防止しエンジンの信頼性向上に大きく寄与するため、溶接技術を多用する静音構造加工技術の開発し、切削加工・溶接加工等で加工された部品の高精度アセンブル工程の開発と、エンジンを動作させるための補機類・試験装置の開発と評価工程の確立を目指す。

1-2 研究体制



1-3 成果概要

ジェットエンジンという高度な技術の集積したシステムの製造に不可欠な基盤技術として特に切削技術を中心に高度化を行い、以下の成果が得られた。

①高精度高速切削加工技術の実現

難削材であるインコネル合金や、軽量マグネシウム合金の高精度高速切削技術の高度化により排気タービン、圧縮タービンの切削技術を開発した。

②適正工具の研究

切削時に工具及びワークに掛る熱制御のための無刃部を有する工具を作る加工技術の高度化により高精度高速切削用工具を開発した。

③ドライ加工の研究

難削材であるインコネル合金のニアドライ加工やチタン合金のドライ加工、軽量マグネシウム合金のニアドライ加工の高度化による環境負荷低減化を実現した。

④ジェットエンジン試作

ジェットエンジンのシステム化技術の高度化により、推力20kgfクラス国産初のプロトタイプジェットエンジンの試作、試運転を行った。

以上の成果から、ジェットエンジン製造技術の核となる切削技術は、パリエアショー2011においても海外から高い評価が得られた反面、ジェットエンジンシステムとして電子制御を含め世界最高性能を引き出す川下技術においては、最高到達回転数などの面で課題を残している。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人にいがた産業創造機構

〒950-0078 新潟市万代島5番1号「万代島ビル」10F

産業創造グループ 産学連携チーム シニアエキスパート 天城 和哉

TEL 025-246-0068 FAX 025-246-0033

E-mail k-amaki@nico.or.jp

第2章 本論

2-1 切削加工技術の実現

当該プロジェクトで開発するエンジンについて、燃焼による高温に曝される部品（タービン、排気整流）には耐熱鋼であるインコネルを使用する。また、空気吸入口に近く、高温の掛らない部分の部品（シュラウドカバー、シュラウド、圧縮機、ガイド、フィンガイド）には金属中で最も比強度（重量当たりの強度）が高いマグネシウム合金を使用して軽量化を図った。（図 2-1-1 ジェットエンジン断面図参照）

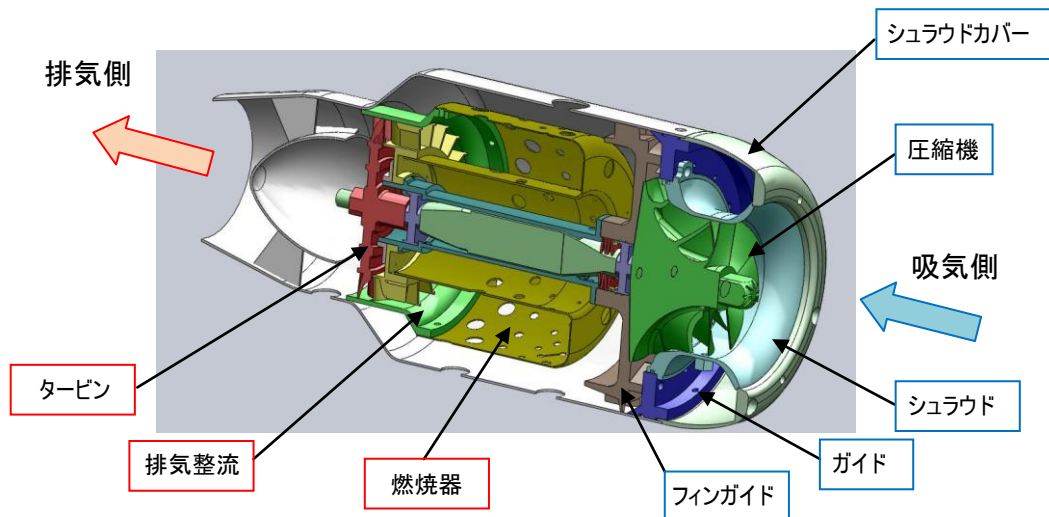


図 2-1-1 ジェットエンジン断面図

2-2 エンジン部品の製作

今回の開発では既存の海外製エンジン以上の優位性を出す為にマグネシウム、チタンを採用し軽量化を進めるが、その比較検証用に、海外製のエンジンと同材質（ステンレス、アルミ合金）の切削加工部品の製作をおこなった。尚、エンジンの耐熱部分で使用される部品は高温強度が必要な事からニッケル基耐熱合金のインコネル625を採用しているが、この部分については軽量化エンジンも同材質を使用している。エンジンの切削加工部品について下記材質を採用し加工を行った。下記に各加工の際のポイントも記載する。



【部品名、材質】シュラウド A5052（アルミ合金）

【加工のポイント】本部品はコンプレッサー動翼と組み合わせで使用され、空気吸入の重要な部品であるため、空気吸入の際に抵抗にならないように表面粗さを重要視し加工を行った。



【部品名、材質】ガイド A5052（アルミ合金）

【加工のポイント】ガイドは外筒とシュラウドが嵌合される部品であり、コンプレッサーで吸入した空気圧を排出させないように、Oリングでのシール力が重要である。そのため、Oリング溝の径と幅を重視し加工を行った。



【部品名、材質】コンプレッサー動翼 A7075 (アルミ合金)

【加工のポイント】本部品は空気吸入の要になる部品である。5軸制御マシニングセンターでの加工が必須で、空気流路の点から羽根に沿ったツールパスが必要である。また主軸嵌合部の中心穴と羽根の同軸を重視し加工を行った。



【部品名、材質】フィンガイド A5052 (アルミ合金)

【加工のポイント】本部品は主軸を固定するベアリングが入る部品であるが、海外製の参考エンジンではベアリング固定部にOリングが配されており、高回転時の主軸の振動吸収を目的としていると推測される。この部分の明確な理由が解明できていないため、ベアリングの外径と嵌合部穴径のクリアランスを重視し加工を行った。



【部品名、材質】中心管 SUS303 (ステンレス)

【加工のポイント】フィンガイドと排気整流をつなぐ部分であり同軸が必要とされる。また、嵌め合い部分のクリアランスを極力小さくすることを重視し加工を行った。



【部品名、材質】主軸 SCM435 (クロモリブデン鋼)

【加工のポイント】主軸は最大10万回転まで回る部品であり、高回転になるほど主軸全体のフレが遠心力として働き、ベアリング等に大きな負荷を与えてしまうため、高周波焼入後に全体に円筒研磨を行い、全フレで0.003mm程度に抑えるよう加工を行った。



【部品名、材質】排気整流 (ASSY) インコネル625
(ニッケル基耐熱合金)

【加工のポイント】インコネルは凝着性が高く、加工硬化が生じやすい材質である。そのため、小径ボールエンドミルを用いた高速切削加工法により、加工硬化を抑えることができた。



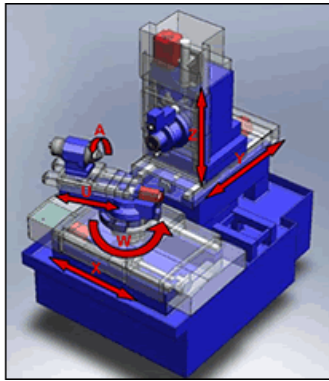
【部品名、材質】タービン インコネル625
(ニッケル基耐熱合金)

【加工のポイント】排気整流同様加工硬化を抑えた加工方法を行った。また、本部品は回転する部品であるため、主軸嵌合部との同軸度を重要視し加工を行った。

第3章 適正工具の研究

3-1 工具研磨機改造

当該プロジェクトを達成するために不可欠となる特殊工具製作にあたっては、通常の工具研削盤では製造不可能な工具（特殊形状エンドミル）製作を実現するため、工具研削盤に改造を施した。



工具研削盤の内部構造



改造により主軸に取付け可能となった高速スピンドル

3-2 工具開発

3-2-1 工具設計、特殊エンドミル試作

下図 3-2-1 「切刃により切り屑の大きさを大小に定めることが可能な切削工具」について、3Dによる形状設計を行った。

なお、下図 3-2-2 により形状はボールエンドミル、刃数は6枚刃及び4枚刃とした。

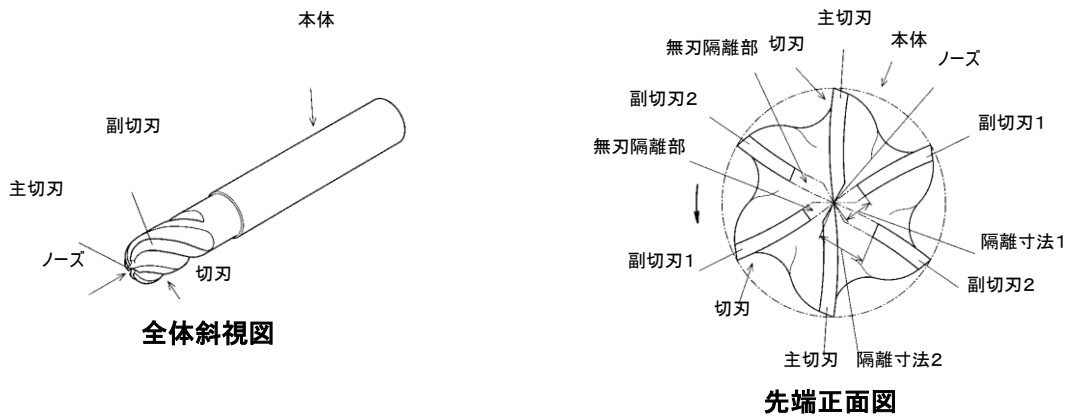


図 3-2-1 切刃により切り屑の大きさを大小に定めることが可能な切削工具
(特開 2010-207931)

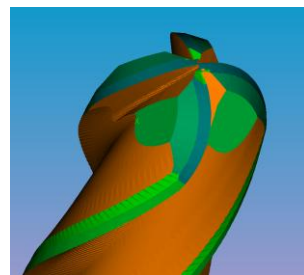
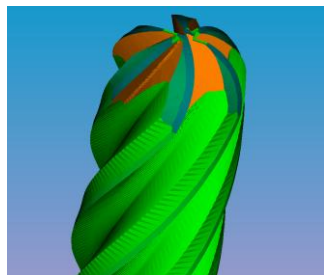


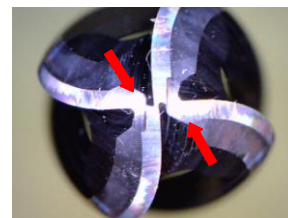
図 3-2-2 3D により設計した切削工具(左:6枚刃、右:4枚刃)

3-2-2 特殊エンドミル試作

ねじれ角度、刃先角度、刃裏側ニゲ形状等のパラメータを変更しながら工具研磨プログラム作成、超硬材料を用いて工具を試作した。



試作した特殊エンドミル



試作した特殊エンドミル先端(左:6枚刃、右:4枚刃)
※矢印部分が無刃部分

第4章 ドライ加工の研究

4-1 試作方法

インコネル及びマグネシウム合金について、下記の方法、条件によりドライ加工の研究を行った。

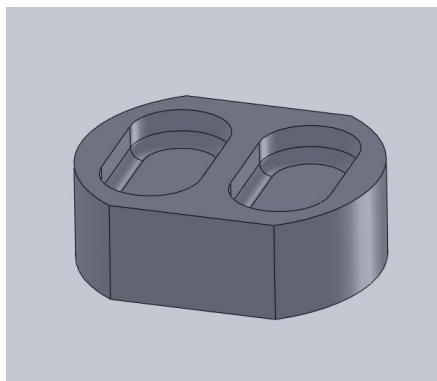
なお、本テーマについては、前述の「第3章 適正工具の研究」において開発した工具を使用した。

①インコネル

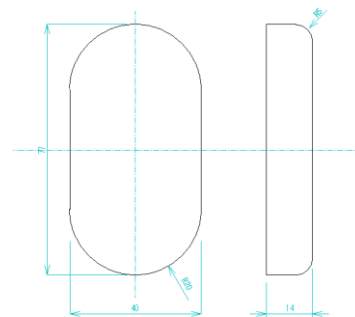
- ・使用材料：インコネル625 ϕ 120 mm (2面を100 mmにカット) \times 40 mm
- ・試作形状：ポケット形状 (幅40 mm \times 長さ70 mm \times 深さ14 mm)
- ・使用工具：A. 超硬ボールエンドミル 4枚刃 R5 \times 10 無刃部分無し
B. 超硬ボールエンドミル 4枚刃 R5 \times 10 無刃部分有り

②マグネシウム合金

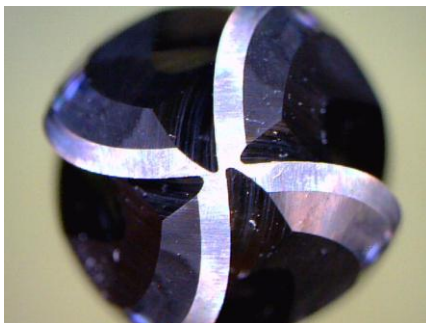
- ・使用材料：AZ31 ϕ 155 mm (2面を100 mmにカット) \times 40 mm
- ・試作形状：ポケット形状 (幅40 mm \times 長さ70 mm \times 深さ14 mm)
- ・使用工具：A. 自社製 超硬ボールエンドミル 4枚刃 R5 \times 10 無刃部分無し
B. 自社製 超硬ボールエンドミル 4枚刃 R5 \times 10 無刃部分有り



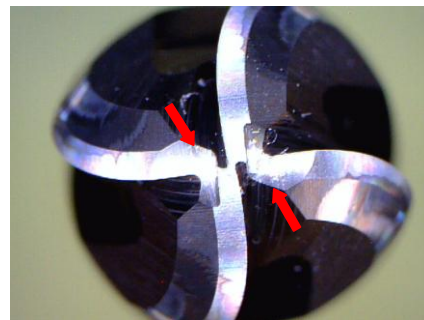
素材形状



ポケット形状



工具 A 先端



工具 B 先端

※矢印部分が無刃部分

4-2 試作結果

①インコネル ニアドライ加工

上記により、インコネル625をニアドライ加工（切削油ミスト供給）に切り替えてテストしたところ、工具A（無刃部分なし）でも切削面、工具先端共に良好な結果を得られた。

工具B（無刃部分あり）においては、主軸回転速度、送り速度共に更に40%上げた条件でも切削面、工具先端共に良好な結果であった。【写真4-2-1～写真4-2-7】

本研究によって得られた結果は小型ジェットエンジン部品加工時に活用する。



写真 4-2-1 インコネル ニアドライ加工

切削条件

	工具A	工具B
主軸回転速度(rpm)	2,290	3,820
送り速度(mm/min)	229	380
切込深さ(mm)	1.0	1.0
一回転送り速度(mm/REV)	0.09	0.09
切削油使用	あり(ミスト供給)	

インコネル ニアドライ加工条件



写真 4-2-2 工具 A 使用



写真 4-2-3 工具 B 使用

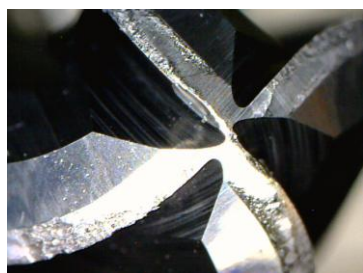


写真 4-2-4 工具 A 加工後刃先



写真 4-2-5 工具 B 加工後刃先

本研究により得た結果を活用して加工した小型ジェットエンジン部品



写真 4-2-6 タービン



写真 4-2-7 排気整流

②マグネシウム合金 ニアドライ加工

マグネシウム合金は切り子（切削屑）に発火性があることから、ニアドライ加工（切削油ミスト供給）にて試作を行った。結果、工具A（無刃部分なし）においては切削面、工具先端共に良好な結果を得られたが、工具B（無刃部分あり）では更に20%送り速度を上げた状態でも切削面、工具刃先とも非常に良好な結果が得られた。

【写真 4-2-6～写真 4-2-10】

本研究によって得られた結果は小型ジェットエンジン部品加工時に活用する。



写真 4-2-8 マグネシウム合金 ニアドライ加工

切削条件

	工具A	工具B
主軸回転速度(rpm)	18,000	18,000
送り速度(mm/min)	5,000	6,000
切込深さ(mm)	2.0	2.0
一回転送り速度(mm/REV)	0.27	0.30
切削油使用	あり(ミスト供給)	

マグネシウム合金 ニアドライ加工条件



写真 4-2-9 工具 A 使用



写真 4-2-10 工具 B 使用

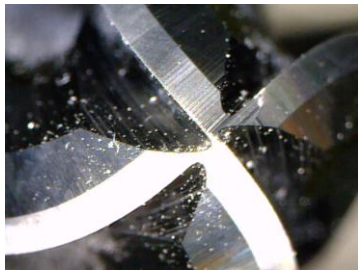


写真 4-2-11 工具 A 加工後刃先

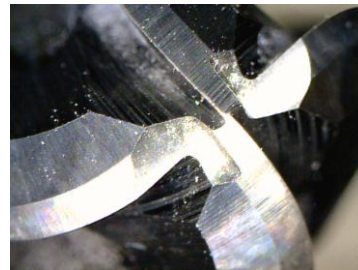


写真 4-2-12 工具 B 加工後刃先

本研究により得た結果を反映させて加工した小型ジェットエンジン部品



マグネシウム合金部品

左上: シュラウド
 右上: 圧縮機
 左下: フィンガイド
 右下: ガイド

第5章 ジェットエンジンの試作

5-1 基板設計・試作

5-1-1 要求仕様

(1) ジェットエンジン制御系基板・コントローラー

以下の3枚の基板から構成される。

① 1枚目基板：

- (ア) CPU ・ SH-7145F ・ 水晶発振器の周波数 11.0592MHz
- (イ) センサー入力 ・ 回転数、熱電対、動圧、静圧、加速度、ジャイロ、光
- (ウ) テレメトリ・プログラム書込み ・ USB または RS232C インタフェース SCI ポート
- (エ) 通信仕様 ・ シリアル通信は表示用・デバッグ用の2系統
- (オ) 状態通知 ・ ビープ音でエラー通知及び、装置状態通知
- (カ) 外部記憶 ・ RAM、フラッシュ、MicroSD 対応
- (キ) 外形寸法 ・ 120mm×120mm×40mm
- (ク) 重量 ・ 1Kg 以下

② 2枚目基板：

- (ア) 出力 ・ I/O ポート、電源回路、FET、PWM 制御、アイソレータ
- (イ) 放熱 ・ アルミ基板に実装
- (ウ) 外形寸法 ・ 120mm×120mm×40mm
- (エ) 重量 ・ 1Kg 以下

③ 3枚目基板：

- (ア) 表示装置 ・ 本体表示 LCD (20 字×4 行以上) 外部出力表示 : USB 接続
- (イ) 遠隔操作コントロール
- (ウ) 外形寸法 ・ 120mm×50mm×10mm
- (エ) 重量 ・ 2Kg 以下 金属筐体に格納のこと

④ 共通仕様

- (ア) 電源 ・ 12V, 5V, 3.3V の3系統を有する
- (イ) コネクタ仕様 ・ 各接続コネクタはロック機構及び逆刺し防止機構
- (ウ) 接続仕様 ・ 基板間の配線は極力減らす
- (エ) 動作温度範囲 ・ -40℃~75℃

(2) Engine Control Unit ファームウェア 仕様

- (ア) エンジン制御 ・ 出力：グロープラグ、ガスバルブ、スタータモータ、燃料バルブ
・ 入力：回転数、排気ガス温度

(3) Control ファームウェア 仕様

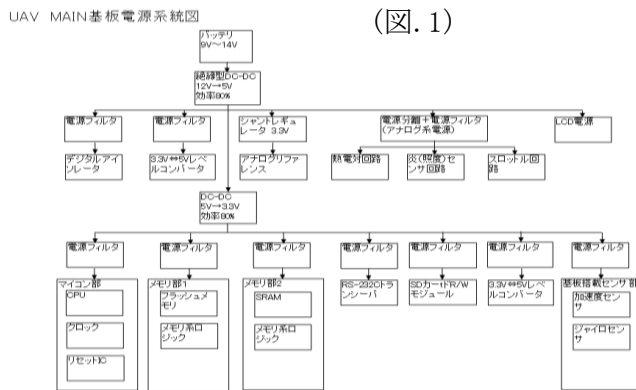
- (ア) 表示 ・ エンジン制御部から受け取った情報を LCD に表示
- (イ) 外部コントロール ・ エンジン OFF/STANBY/ON 入力：スイッチ操作
・ エンジン出力 (%) 指令値入力：スロットル操作

(4) ICE/IDE 仕様

- (ア) 開発環境 ・ GCC Developer Lite もしくは CPU 固有環境で構築
※ICE (In-Circuit Emulator: インサーキット・エミュレータ)、
IDE (Integrated Development Environment 統合開発環境)

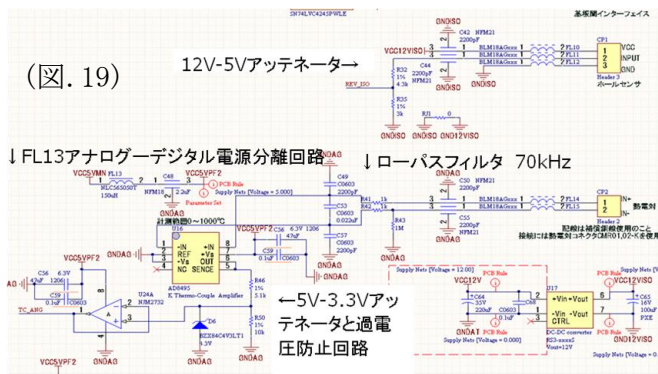
5-1-2 回路設計

仕様を元に具体的な回路設計を行った。回路設計ソフトウェアはAltium Designer10を使用した。回路全体の特徴は、1. 不要な輻射(ノイズ発生)を抑える為にロジック ICに電源フィルタを挿入し、またパラレルバスでのインピーダンス整合を確保した点、また、2. 被妨害(外来ノイズ)による誤動作防止の為に入出力部に高周波フィルタを挿入した点、さらに安全性の見地から 3. ハードウェア的なデバイス保護回路としてヒューズや過電圧防止回路を挿入し、4. 処理するアナログ信号・デジタル信号の誤りを抑制し信号の信頼性を向上する為に大電力電源の分離、デジタル/アナログ回路の電源分離、アナログリファレンスに高精度シャントレギュレータを採用し、さらに5. 低消費電力化を高効率DC-DCコンバータ、デジタルアイソレータによって実現した点にある。1枚基板(ECU基板)の電源系統図を図.1に示す。



1枚目基板(ECU)のマイコンアナログリファレンス部ではアナログリファレンス電圧調整及び過電圧入力防止対策を行った。また水晶発振子のインピーダンス整合対策を行った。フラッシュROM部、SRAM部ではノイズ防止策として直列抵抗を挿入した。バックアップ電源選択回路を挿入しスーパーキャパシタにより約2分間のバックアップ時間を確保した。

データ通信用のRS-232Cトランシーバでは信号の入出力部にEMI対策としてフィルタをLCで構成した。また、LCDとの通信はパソコンとの接続用にも兼用する為D-SUB9ピンコネクタを使用し互換性を確保した。

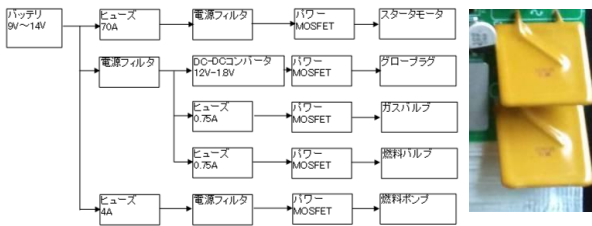


レベルコンバータ部及びアイソレータ部では3.3V系と5V系の電源が混在するため絶縁電源を内部発生しレベル変換で対応した。ホールセンサ及び熱電対入力部ではEMIフィルタを挿入した。また熱電対には70kHzのローパスフィルタを挿入した。センサー用のアナログ電源は誤動作防止の為に電源分離回路を

設けてデジタル電源部と分離した。(図. 2) 圧力センサー部では圧力センサーがアナログ系12V電源を使用するため絶縁型DC-DCコンバータで電源分離を行う。また、過電圧防止対策とEMI対策として $f_1=700\text{Hz}$ のローパスフィルタを形成した。炎センサー部及びLCDインタフェース部では $f_1=1\text{kHz}$ のローパスフィルタを形成した。

次に 2 枚目基板(電源基板)の構成を示す。(図. 3)始動モータ部、燃料ポンプ部では 各アクチュエータが PWM 駆動となるため電源フ

UAV POWERCONTROL 基板ブロック図



(図. 3) (図. 4)

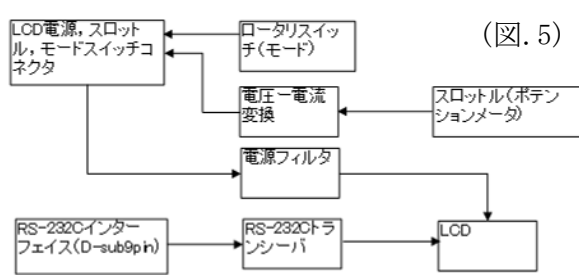
イルタを挿入し信号波形の乱れを抑制した。またノイズ対策として制御信号のアース(GND)は CPU の GND と絶縁された大電流 GND を一点アースで接続した。安全対策として

ヒューズはリセットブルタイプを使用した。(図. 4)

グロープラグ部は DC-DC コンバータの機能を利用して過電流保護を行った。また、DC-DC コンバータの SENCE 機能により大電流時の電圧降下を抑制する。燃料バルブ、ガスバルブ部は比較的低い電流駆動の為パワータイプの EMI フィルタを挿入した。

次に 3 枚目基板(LCD)の構成を示す(図. 5)。 LCD 用の RS-232C 信号線は 1 枚目基板(ECU)搭載の接続先がパソコン接続用と兼用の為電源は別コネクタで供給する。また、モード切り

UAV LCD基板ブロック図



(図. 5)

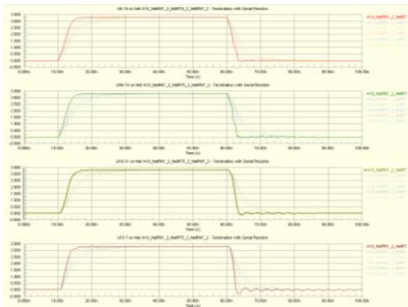
替えのロータリスイッチは LCD ユニットが未接続時の安全対策として接続されると信号が Hi レベルとなる未検出プルアップ構成とした。また、燃料制御用のスロットルは精度確保のために耐ノイズ性を考慮して電流駆動で制御する。以上の内容で回路設計レビューを実施し回路設計を確定した。

5-1-3 基板設計

次の工程では回路設計を基に基板設計を行った。基板設計ソフトウェアは、Altium Designer10 を使用した。基板設計の特徴は 1 枚目基板(ECU)では 1-1. 信頼性を重視した部品配置と配線及び、1-2. メモリ部のレイアウトに高速マイコン基板のノウハウを投入した点にある。また 2 枚目基板(電源)では 2-1. 安全性重視で配線幅を決定し、2-2. データ信号の流れを重視したアース(GND)接続点の確保、さらに 2-3. 部品の非実装領域は放熱板として利用したことが上げられる。3 枚目基板(LCD)では 3. アナログ部とデジタル部の分離によって信頼性を確保した点が特徴となっている。

1 枚目基板では信頼性重視により、電源ラインのパターンは『太く短く』を徹底して配線した。また、EMI フィルタを外部接続コネクタの接続部(根元)に配置することにより配線パターンがアンテナとして動作することを防止している。また、アナログ部品とデジタル部品を混在して配置することを排除しアナログ部とデジタル部の配線を分離することでアナログ部へデジタルノイズが混入することを防止している。さらに、アナログの弱信号部は極力配線長を短くし、また DC-DC 電源から離れた場所に配置することにより、ノイズ発生源から弱信号部を分離している。

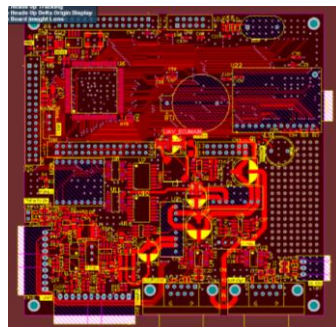
また、高速マイコン基板のノウハウでパソコンとして3端子コンデンサを配置することで2端子コンデンサと比較して挿入損失を10dB改善しノイズの除去率を向上させた。またマイコン信号の回路内での反射対策としてRAMバス端子に終端抵抗を配置し、さらにマイコンを起点として数珠つなぎにメモリを配線することで信号の反射を抑制した。またマイコン信号の波形の品質を改善するためにマイコンを基板の表面に、メモリを基板の裏面に実装しスルーホールを最小限にとどめた。これらはシミュレーションソフトを使用し信号波形シミュレーションを行い、特性を検証した。



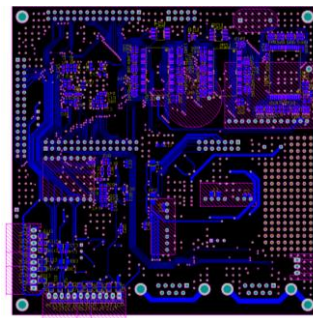
(図. 6)

マイコン信号の回路内での反射対策としてRAMバス端子に終端抵抗を配置し、さらにマイコンを起点として数珠つなぎにメモリを配線することで信号の反射を抑制した。またマイコン信号の波形の品質を改善するためにマイコンを基板の表面に、メモリを基板の裏面に実装しスルーホールを最小限にとどめた。これらはシミュレーションソフトを使用し信号波形シミュレーションを行い、特性を検証した。

(図. 6. 7. 8)

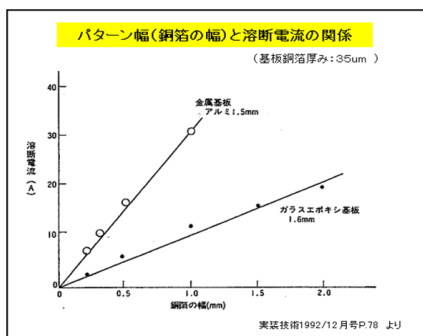


1枚目基板(ECU)表面(図. 7)



1枚目基板(ECU)裏面(図. 8)

2枚目基板では大電流を制御する為、特に安全性を重視した配線幅を確保した。グローブラグ及び始動モータは10Aの電流が流れる為、銅箔パターン幅と溶断電流の関係(図. 9)から、



(図. 9)

配線幅を4mm銅箔厚を70 μ mで破壊電流120A以上を確保した。また、0.5Aの電流が流れるバルブ類は配線幅1mm銅箔厚70 μ mで破壊電流30A以上を確保した。またアース(GND)は回路上の信号の流れを重視し、MOSFETとゲートドライバのGNDはFETのソース端子で1点接続とし、またゲートドライバのGNDとマイコン出力のレータとはゲートドライバのGND端子で1点接続し1点アースを徹底した。3枚目基板(LCD)ではアナログ制御のロットとデジタル制御のモードスイッチ及びLCDの配置を分離した。

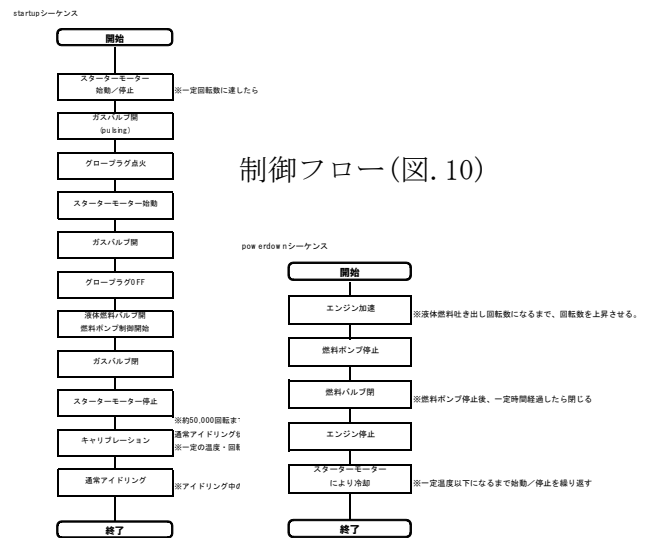
5-1-4 制御ソフトウェアの設計

要求仕様分析を基に制御ソフトウェアの設計を行った。ソフトウェアの開発工程では要求仕様の段階的詳細化によりサブシステム分割、モジュール分割を行い個々のプログラムの詳細設計を行った。

まず、要求仕様を1. エンジン始動シーケンス、2. エンジン停止シーケンス、3. LCD表示、4. 外部接続、5. 安全制御の5項目に分類しこれを大分類とした。次いでその大分類機能をさらに中分類、小分類に段階的詳細化し機能概要一覧を作成した。中分類機能はエンジン運転の状態遷移及びLCD表示と対応している。(表. 2 図. 10)

項番	大項目	中項目	小項目	要求内容
1-1	エンジン始動	standby	ソフトウェア起動	切替スイッチoff→standbyによりソフトウェア起動
1-2			LCD表示	standby状態であることをLCD表示する。
1-3			スロットル制御	スロットル位置は無視する
1-4		startup	シーケンス開始	切替スイッチstandby→runによりstartup
1-5			シーケンス中断	startup中に切替スイッチをoffにされたらpow erdownシーケンスを開始する
1-6			シーケンス完了	シーケンス完了したらrun状態へ遷移する
1-7			LCD表示	startup状態であることをLCD表示する。その他、各種入力値を表示する。
1-8		run	スロットル制御	スロットル位置は無視する
1-9			LCD表示	run状態であることをLCD表示する。その他、各種入力値を表示する。
1-10			スロットル制御	スロットル位置に応じ燃料バルブを制御しただし、燃料バルブの制御において回転数(スロットルの急激な変動に燃料制御を合回転数・温度の上限/下限値を超えないよ
1-11				
2-1	エンジン停止	powerdown	シーケンス開始	切替スイッチrun→standbyによりpowerc
2-2			シーケンス中断	powerdown中に切替スイッチをoffにされ
2-3				powerdown中に切替スイッチをstartupに

(表. 2)



制御フロー(図. 10)

次いで、エンジン運転用の各パラメータ（指示値及び閾値）の分析と洗い出しを行い、52項目の閾値一覧表を作成した。これらは各種センサーからの入力値と照合・演算することによりエンジンの運転状態を判定し制御するための値である。また異常時にはリトライ試行回数や緊急停止などの安全制御のためのパラメータとなる。これらの制御パラメータを変更することでエンジン運転条件の変更が可能となる。これらの仕様を基にさらにモジュールのレベルまで機能を分割しモジュール機能の洗い出しを行いシステム全体の構成を確定した。

今回の制御ソフトウェア開発は統合開発環境として BestTechnology 社が提供する GCC DEVELOPERS LITE を使用して行った。

5-1-5 基板製作のまとめ

(1) 評価の容易性の確保

エンジンの運転データは microSD カードに CSV 形式で記録されるためそのままパソコンのオフィスソフトウェア等で解析が可能となった。また記憶媒体も簡単に抜き差し可能なため記録媒体の可搬性も実現した。また、エンジンの動作状態はコントローラー上の LCD の他にリアルタイムで PC ツール上に表示されるため動作状態確認が視覚的に確認できるようになった。

(2) 拡張性の確保

拡張 IO ヘッダは汎用性の高い 2.54mm ピッチの MIL コネクタを 3 個搭載し基板の改修をせずに機能の拡張が可能となった。

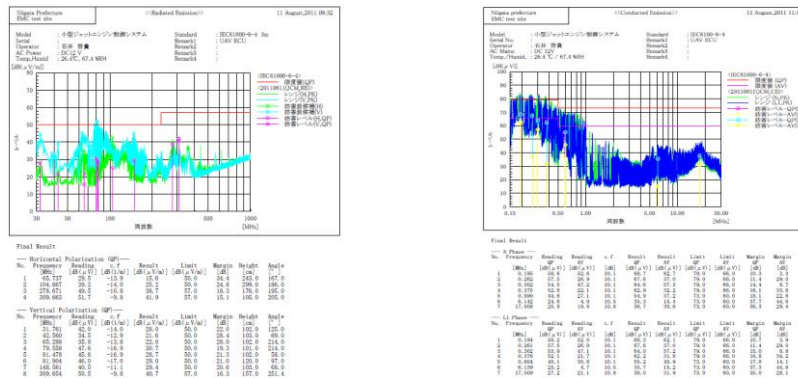
(3) 互換性の確保

部品選定では入手性を重視し特殊部品は使用せず可能な限り汎用品で構成した。また外部との接続も特殊なコネクタやケーブルは使用せず他の装置との互換性や相互接続性を確保した。また、ソフトウェア開発環境も特定ベンダの製品に依存しないようにオープンソース環境で構築したため高い互換性を確保できた。

(4) 信頼性の確保（大電流制御・ノイズ対策）

回路設計において過電流・過電圧防止機構を随所に挿入し安全制御対策を実施し、加えて、基板設計でも配線幅と放熱を重視し破壊電流 120A 以上の耐性を確保した。

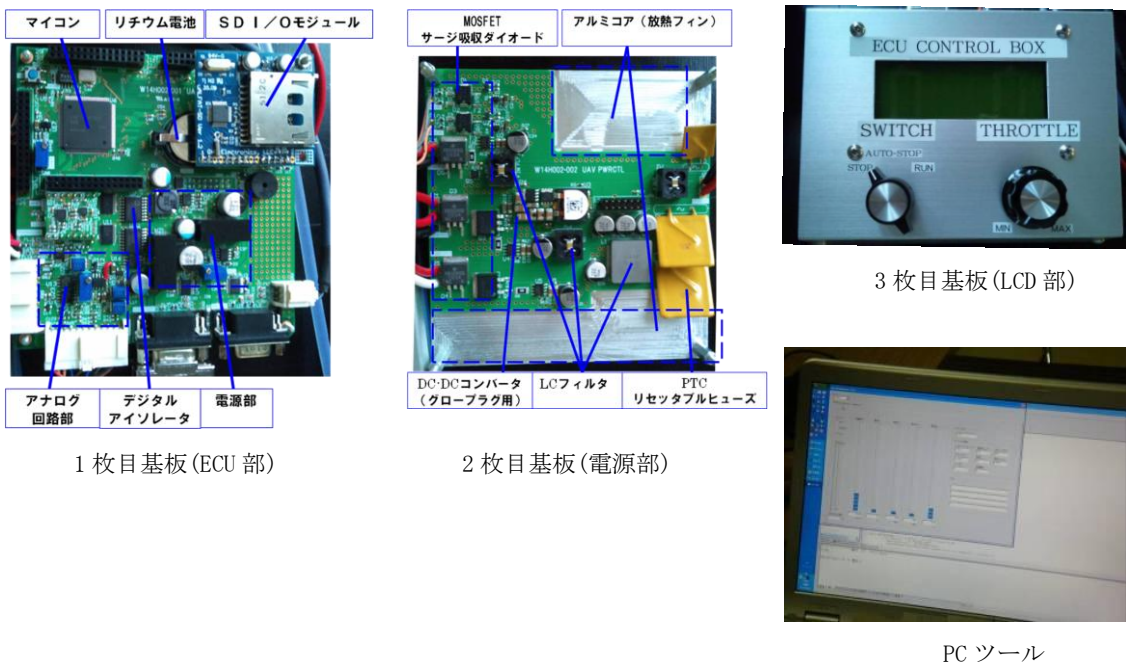
またノイズ対策の評価として新潟県工業技術総合研究所で放射電界強度及び、伝導妨害波の測定、耐ノイズ試験を実施した。



放射電界強度の計測では想定使用環境の factory 基準を達成している。但し、今後飛翔体への搭載を考慮した場合には基準が 20dB~40dB 厳しくなると想定されるため、遮蔽ケースの強化等の対策が必要となる。また、耐ノイズ試験では伝導妨害により LCD の表示が乱れる等の障害が一部で発生した。これは未使用の試験用センサーのポートを開放していた為に発生したと考えられる為未使用ポートを閉塞し更にフィルタ回路を増強することで抑制可能だと考えられる。

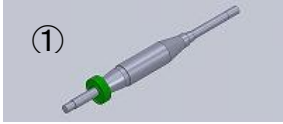

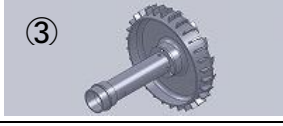
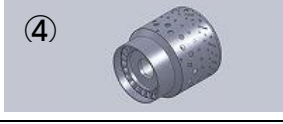
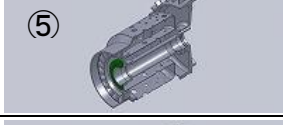
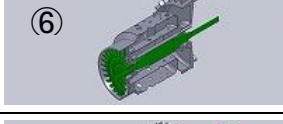
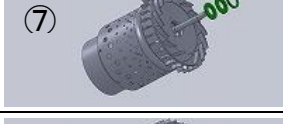
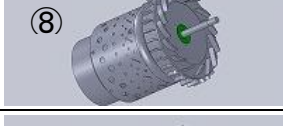
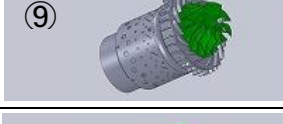
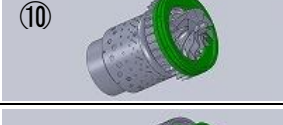
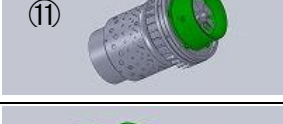
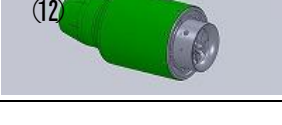
(5) 環境対応 (低消費電力化)

高効率 DC-DC コンバータ、デジタルアイソレータ等の採用により、参考エンジンでの消費電力 120mA 対し、動作可能電圧 9V~14V で standby 時の消費電流 100mA 以下を実現し約 20%の低消費電力化に成功した。



5-2 エンジン組立・調整

本研究で製作を行ったコアエンジンの各部品を、高精度に組立てる手法を確立するため、研究を行った。その結果、確立した組立フローを下部に示す。

No.	組立部品	組立手法	条件	組立番号
①	主軸+後部ベアリング	圧入	油圧プレス 1KN 以下	
②	①部品+タービン	焼き嵌め	電気炉にて加熱後、 焼き嵌め	
③	中心管+フィンガイド +潤滑配管	ネジ締結 配管差込	配管は SUS ワイヤー にて固定する	
④	排気整流+燃焼筒 +燃料配管	ネジ締結 配管差込	配管は、SUS ワイヤー にて固定する	
⑤	③ASSY+④ASSY +ロックリング	配管差込 ネジ締結	ロックリングは専用工具で 締結。	
⑥	⑤ASSY+②ASSY	挿入(押込)		
⑦	⑥ASSY+ 皿ばね・ベアリングが付	挿入 (無負荷)		
⑧	⑦ASSY+前部ベアリング	圧入	油圧プレス	
⑨	⑧ASSY+コンプレッサー	焼き嵌め 焼調整	電気炉にて加熱後、 焼き嵌め	
⑩	⑨ASSY+ガイド	ネジ締結	配管部 O リング 挿入	
⑪	⑩ASSY+シュラウド	ネジ締結	コンプレッサーとの 隙間をシムにて調整	
⑫	⑪ASSY+外殻	挿入 ネジ締結		



①ベアリング圧入



②タービン焼き嵌め



③潤滑配管組付け



④排気整流+燃焼筒



④燃料配管組付け



④燃焼筒確認



⑥タービン挿入



⑦皿ばね挿入



⑧前部ベアリング圧入



⑧圧入風景



⑪シュラウド組付け写真



⑫組立完成後のエンジン

コアエンジン組立方法

5-3 試験技術の開発

5-3-1 推力測定器

推力測定器は、リニアスライダ― エンジン支持台 ロードセルと信号変換機 解析ソフトからなり、これら装置一式を、堅強な鉄製架台（約650キロ）に設置し、推力試験機としている。

エンジンの推力を、リニアガイド上を動く荷重電圧に変換、発生電圧を、信号変換機を通し、PC上で表示するものである。



試験機全体写真



試験機拡大（リニアスライダ―部）

リニアスライダ―は、460×230×78サイズを選定、エンジン推力に十分耐える仕様となっている。鉄製のベースに、SUS製のガイドを配したタイプのもので、十分な強度を持つ。

ロードセルについては、0～100kgfまで測定可能なタイプを使用。ブリッジ回路、アンプなど信号変換機は一体型となっており、試験機上のスペースをほとんどとらずに設置が可能。ソフトを入れさえすれば、どのPCでも操作、確認が可能。



ロードセルからの情報は、PC上で確認することができ、時間経過による負荷の変化をグラフで表示、その時間の詳細荷重を表示、ログ機能で、リアルタイムに記録することが可能。

5-3-2 バランス測定器

バランス測定器は、エンジン取り付け部、バネ付支持台、重量計、フィールドバランサーからなり、これら装置一式が、堅強な鉄製架台（約450キロ）に設置されている。

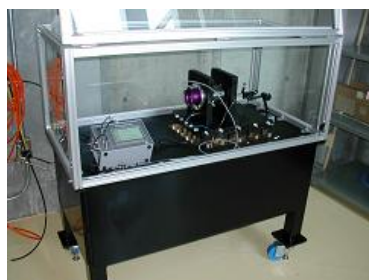
回転方法は、コンプレッサーエアを供給することにより、エンジンコンプレッサー部動翼を回転させ、軸全体を回転させる。

各センサーはエンジン取り付け部に固定、回転センサーについてもマグネットベースにより固定であるので、試験体の取り付け／取り外しは非常に容易である。

コンプレッサー部動翼、タービンの両側を同時に測定し、エンジン軸周りのアンバランスを同時修正可能である。

修正方法は、付加、削除のどちらかを選択でき、今回のような高速回転軸の修正については、削除つまり、削りを使用する。

回転数は12万回転まで測定可能。



最6章 全体総括

ジェットエンジンという高度な技術の集積したシステムの製造に不可欠な基盤技術として特に切削技術を中心に高度化を行い、「1-3 成果概要」に示す成果が得られた。

今後は、その開発したジェットエンジンの最高到達回転数など性能をより高めていくことが課題となる。具体的な性能向上のための課題は、吸気効率、圧縮効率、排気効率、タービン回転効率の向上と、動翼と静翼の配置、クリアランスの最適化、内部空気抵抗の低減、始動用モータのフリクションロスの低減、燃料ポンプのモータドライバーの改善などが挙げられる。

また、事業化のためには、製造技術、製造工程の最適化が必要となる。具体的には、ジェットエンジン部品製作工程、制作方法の見直しと設計変更、始動シーケンスの確立によるソフトウェアの変更と始動操作の自動化などである。

ジェットエンジンのようなプロダクトの場合、中小企業でもシステム化技術、川下技術の高度化は要求されることから、中小企業による川下技術の高度化まで挑戦し、我が国の弱点となっている川下技術の高度化に挑むことが課題である。既存ユーザーとのマッチングだけでなく、小型静音ジェットエンジンの新規応用、新規ユーザーを開拓する活動を行っていく。