

宇宙航空研究開発機構研究開発資料

# RJTF計測システムの現状について



2004年3月

宇宙航空研究開発機構

宇宙航空研究開発機構研究開発資料  
JAXA Research and Development Memorandum

RJTF計測システムの現状について  
Current Issues in the RJTF Measurement System

谷 香一郎、工藤 賢司、加藤 周徳  
Kouichiro TANI, Kenji KUDO, Kanenori KATO

総合技術研究本部 宇宙推進技術共同センター  
Space Propulsion Research Center  
Institute of Space Technology and Aeronautics

2004年3月  
March 2004

宇宙航空研究開発機構  
Japan Aerospace Exploration Agency



# 目 次

1 RJTF計測システムの現状と概要	1
1.1 システム導入後の経緯	1
1.2 現状の計測システム概要	1
1.3 センサ較正管理	3
1.4 計測の流れ	4
2 計測システムの導入後の更新点について	4
2.1 計測用ソフトウェアの改修	4
2.2 データ処理システムの追加	6
2.2.1 ハードウェアの追加	6
2.2.2 データ処理ソフトウェア	7
2.3 データバックアップについて	9
2.4 データ参照システムの追加	9
3 RJTF計測システムにおける問題事例とその対処について	10
3.1 推力架台	10
3.2 低圧室内圧力の誤差	10
3.3 多点圧カスキャナの異常について	11
3.4 新多点圧カスキャナ(adhoc機器)のタイムラグ	12
3.4.1 時間方向のずれ	12
3.4.2 圧力の補正	13
3.5 計測用計算機の故障	14
3.5.1 新計測用計算機について	14
参考文献	14
参考・FMS電圧/力変換マトリックスの変換について	15



# RJTF計測システムの現状について\*

谷香一郎\*<sup>1</sup> 工藤賢司\*<sup>1</sup> 加藤周徳\*<sup>1</sup>

## Current Issues in the RJTF Measurement System\*

Kouichiro TANI\*<sup>1</sup>, Kenji KUDO\*<sup>1</sup>, Kanenori KATO\*<sup>1</sup>

### ABSTRACT

A decade has passed since installation of Ramjet engine Test Facility (RJTF) and its associated measuring system at the Kakuda Space Propulsion Laboratory. During these years, numerous corrections and additions have been carried out. This report describes the current status of the RJTF measurement system, including these updates. A number of the system problems and measures taken to counter them are also presented. Finally, policy for the replacement of the core computer system currently underway is summarized.

Keywords: scarmjet engine, measurement, computer application

### 概 要

宇宙航空研究開発機構宇宙推進技術共同センターに設置されている、ラムジェット試験設備、およびその計測システムは導入後十余年を経過した。この間、いくつかの不具合修正、新たな処理系の追加を行い、現在に至っている。本報告では、これらの変更点を踏まえたシステムの現状および、計測用計算機の更新に関する検討を行った。現状については主に計測における処理上の利便性向上、および不具合事例について報告する。また、計測用計算機の更新については、更新の基本方針について報告する。

## 1 RJTF計測システムの現状と概要

### 1.1 システム導入後の経緯

ラムジェットエンジン試験設備 (Ramjet Engine Test Facility; 以下RJTF) 導入と同時に、本試験設備におけるエンジン試験に特化した計測システムを平成3年に導入した。導入当時の詳細は文献<sup>1)</sup>に詳しい。その後、平成6年12月には計測用ソフトウェアの改修を行い、主に使用面での機能向上を行った。また平成12年1月にはデータ処理用のワークステーションを導入し、特に処理上のボトルネックとなっていた工学値変換について速度向上を計った。この他、ハード/ソフトの両面で細部に変更を加えつつ、運用を続けてきたが、平成15年10月に計測システムの核となる計測用計算機が故障し、修復不可能の状態となった。平成16年2月現在、計算機を更新し、旧計測用ソフトウェアの機能を再生するための作業に着手した。新システムの運用開始は平成16年10月を目標としている。

### 1.2 現状の計測システム概要

図1に平成15年末現在のRJTF計測システム全体を示す。本システムは以下に示すエンジン試験データを取得することを目的としたものである。

1. 低圧室およびエンジン流入気流状態に係わるデータ
2. エンジン作動状況データ
3. エンジンへの燃料供給状態データ
4. エンジン推力 (推力架台) データ

圧力センサは、試験中、常時圧力を測定し続ける逐次計測センサ (以下常時モニタ) と計測点を順次スキャンして圧力を測定する多点圧カスキャナ (PSI社製SI-1600シリーズ) の二つに大別できる。温度については熱電対および測温抵抗体により取得する。推力架台は気流方向 (推力)、鉛直方向 (揚力) の二軸方向について測定可能なロードセル四基より構成し、二方向成分に加えて仮想重心回りのモーメントについても算出を行っている。

センサはエンジンと試験を行う低圧室および付随する

\* 平成16年3月8日 受付 (received 8 March, 2004)

\*<sup>1</sup> 総合技術研究本部 宇宙推進技術共同センター

(Space Propulsion Research Center, Institute of Space Technology and Aeronautics)





装置に取りつけられている。これらの出力は中継室に置いたアンプで増幅されアナログ/デジタル変換後、一旦メモリ上に蓄えられる。その後データは計測制御室に設置された計測用計算機に取り込まれ、工学値変換後、グラフ化等の後処理を行う。

本システムを動作させるために、計測用計算機上には3本のアプリケーションを導入している。主に利用するのはセンサ校正、データ取得およびデータ管理に至までの一連の作業を行うためのソフトウェアで“rjtfmeas”と称している。このアプリケーションを支援するため、“rjtfcal” および “r0limit” を利用しており、それぞれ、センサ校正時の入力支援と定数管理のため用いる。

“rjtfmeas” は以下のような機能を有する。

- ・ 試験条件、校正条件の設定を行う機能
- ・ 実際の試験に際しての前校正、データ収録、後校正を行う機能
- ・ 収録したデータのモニタ、データ変換等、データの管理に関わる機能
- ・ 収録した電圧データから工学値に変換する際の変換テーブルを管理する機能
- ・ リアルタイムにセンサ出力をモニタする機能
- ・ 計測に関わる各種設定ファイルおよびデータファイルを管理する機能

“rjtfcal” は常時モニタの実圧校正を行う際、校正を行っている現場(中継室) から、計測用計算機に実圧値を入力するための支援アプリケーションである。校正自体は“rjtfmeas”にて行う。“r0limit” は“rjtfmeas”内で用いる定数値(たとえば計測センサの最大数など)について、テキストファイルから、“rjtfmeas”が読み込める形に整形するためのアプリケーションである。これらのアプリケーションは計測用計算機(HP9000シリーズ800)上のOS(HP-UX Ver.8.0)にて開発を行い、GUIに関わる部分はX-Window System(X11)とMotif(Ver.1.2)ウィジェットセットを用いて製作されている。

“rjtfmeas”は計測に関わる機器類をGP-IB経由で一元的にコントロールするため、収録データを工学値に変換し管理する機能を除いて、二重に起動できないように設計されている。

なお、本システム導入後、故障等による機器の入れ替えを除いて、改修を行ったのは主にデータ処理に関わるアプリケーション“rjtfmeas”についてである。

### 1.3 センサ校正管理

試験に用いる常時モニタ圧力センサについては、原則として一連の試験(以下シリーズ)を行う前に一度校正を行う。また、夏期に行うRJTF全体の定期自主検査時に

も一部のセンサ(特に風洞運転状況をモニタする事に係るセンサ)について校正を行っている。校正に際しては、各センサの測定するレンジを予め設定し、そのレンジ内で5点程度を目処に実圧校正を行う。精度は導入当初より一貫して0.5%を保持している。校正結果はセンサ毎に所定の書式に沿って記入記録され、管理を行っている。

この校正結果に基づき、3次の校正曲線係数を求め、計測用計算機に入力する。(図2参照)

検査成績書(DAS圧力校正)

検査NO	検査年月日	検査区分	検査方法	検査者					
製造メーカー	2009年03月31日	<定期>臨時	単体/圧力	高橋、佐藤					
タイプ・モデル	採用した基準器	特許デジタル	1~5kgf/cm <sup>2</sup>	総合判定					
シリアルNO	目録り順番	~	0~20kgf/cm <sup>2</sup>	-					
記事 Mtsエンジン試験前校正 グループ校正コード: PE921X      総別圧: 101.3 KpaG S/N: 82487      ゲイン: 1      Ch/NO: 81      総切り圧力: -101.2 KpaG									
機種・計器名	計測値				調整	備考			
Tag	基準	1	2	3	4	5	KpaG		
PE920X	行差	0	-25	-50	-75	-101.2		零点	
	DAS入力値	0	-25	-50	-75	-101.2			スパン
	アンプ出力電圧	4.547	3.439	2.337	1.241	0.134			
S/N: 82488      ゲイン: 1      Ch/NO: 82									
機種・計器名	計測値				調整	備考			
Tag	基準	1	2	3	4	5	KpaG		
PE921X	行差	0	-25	-50	-75	-101.2		零点	
	DAS入力値	0	-25	-50	-75	-101.2			スパン
	アンプ出力電圧	4.526	3.411	2.288	1.149	-0.039			
S/N: 82489      ゲイン: 1      Ch/NO: 83									
機種・計器名	計測値				調整	備考			
Tag	基準	1	2	3	4	5	KpaG		
PE922X	行差	0	-25	-50	-75	-101.2		零点	
	DAS入力値	0	-25	-50	-75	-101.2			スパン
	アンプ出力電圧	4.515	3.390	2.271	1.151	-0.019			
S/N: 82486      ゲイン: 1      Ch/NO: 84									
機種・計器名	計測値				調整	備考			
Tag	基準	1	2	3	4	5	KpaG		
PE923X	行差	0	-25	-50	-75	-101.2		零点	
	DAS入力値	0	-25	-50	-75	-101.2			スパン
	アンプ出力電圧	4.528	3.411	2.221	1.231	0.114			

図2 校正結果の記入例

多点圧力カスケヤナは内部に校正装置を持っており、各試験前に校正を行う。校正装置自体の校正については数年に一回の割合で夏期点検時に製造元に送って行っている。校正は基準圧力発生器により作った所定の圧力をセンサユニット(16ポート/ユニット)に送り、ポート毎に校正を行う。常時モニタセンサと同じく5点校正を行い、結果を元に3次スプライン関数変換曲線を取得する。取得した校正曲線データは電子的に計測用計算機上に蓄え、特に紙面等への記録は行っていない。その他、熱電対、流量計等については夏期点検時に故障の有無のみ検査し、校正は行っていない。

エンジンの推力を直接測定する推力架台については、試験シリーズ直前に校正を行う。校正は、推力架台のある決められた位置(エンジン軸方向一カ所、エンジン鉛直方向二カ所)に所定の力を加え、四つのロードセルの電圧出力を取り、この値を元に力と電圧の変換マトリッ



クス（以後内部変換マトリックス）を求める。エンジンの有無により、出力に変化があるため、通常はエンジン搭載状態にて内部変換マトリックスを求める。最終的にはエンジンの仮想重心に働く力が必要となるので、較正時にかかる力と仮想重心回りの力を変換するための幾何変換マトリックスが必要となる。幾何変換マトリックスについては、本設備導入時に求めたものを使用しており、内部変換マトリックスとの積をとって最終的な変換マトリックスを得る。（参考参照）

#### 1.4 計測の流れ

図3にRJTF試験における標準的な計測の流れの概要を示す。概ね試験開始時間(X)の120分前から準備に入る。

まず、センサの基準圧力を発生する真空ポンプを起動する。圧力安定後、計測プログラムを立ち上げ、その日行う試験の条件等を設定後、機器類の較正に入る。較正は以下の手順で行う。

- ・ センサへの励起電圧、電流を供給する発生器の較正
- ・ 多点圧カスケヤナに繋がれたアンプのゲインとオフセットの取得
- ・ 多点圧カスケヤナの実圧力較正
- ・ 多点圧カスケヤナ以外のセンサに繋がれたアンプのゲインとオフセットの取得
- ・ 全センサのゼロ点取得

主に測定と較正のラインを切り替える較正切り替え器の動作速度の制約から、上記を全て終了した時点でX前30分程度となる。現状では較正完了から、実際の試験まで時間が長く、夏期には、アンプの温度ドリフトの影響を受けやすいという問題点がある。較正完了以後、X前10分で計測スタンバイとなるまで、センサからの出力値をモニタし、ふらつきやゼロ点移動についての監視を行う。試験中はRJTF制御装置のシステムタイマに依存して計測を行う。取り込んだデータはA/D変換器上で一度メモリに蓄えられるが、このメモリ容量の制限のため、試験中、風洞の運転状況に合わせてサンプリングレートを変更し、データ量を調節している。まず制御装置からの計測開始信号（通常は試験進行時間の0秒に発行）を受信後、機器類のチェックを行い、「プリ計測」モードで計測を開始する。プリ計測モードではサンプリングレートを100msecに押さえ、通風開始までの風洞立ち上げ準備状態における全データを取得する。通風準備が完了した時点で、制御側から「定常」との信号を受信すると、「本計測」モードへと移行する。本計測モードではサンプリングレートを5msecにまで上げて、時間的に分解能の高いデータを取得する。通風が完了すると、制御側からの「定常」信号が失われ、これを基に「ポスト計測」モー

ドへ移行する。ポスト計測では再びサンプリングレートを100msecに落とし、通風後の通風終了処理中の全データを取得する。

データはA/D変換器のメモリからGP-IBラインを通じて計測用計算機に転送される。またRS-232Cラインを使って、制御装置に蓄えられた風洞運転に係わるデータ（通風開始時間等）を取り込む。その後、較正情報等のデータと合わせて、試験に係わる全てのデータを一つのバイナリ形式のデータファイル（以下生データ）として作成し、ディスク上に記録する。工学値等、可読性の高いデータへの変換に際しては、生データ中に蓄えられた較正情報、変換係数と電圧値を基に行い、他の情報ファイルが必要としない様、「自己完結」型のファイルフォーマットを採用している。

## 2 計測システムの導入後の更新点について

本システムの導入後、データ処理速度の改善、データの確実な保全を目指して幾つかソフトウェアの導入と機器類の追加を行った。

### 2.1 計測用ソフトウェアの改修

平成6年12月に計測用ソフトウェア“rjtfmeas”の改修を実施した。主な目的は以下の通りである。

- ・ 試験後処理の柔軟性向上：
  - データ取得後であっても、センサの配置情報や、工学値変換を行う際に必要となる係数等について、変更できる機能を追加。
- ・ 試験精度の向上：
  - 圧力工学値変換にあたって必要となる、大気圧データを試験直前に入力できる機能を追加。
- ・ データファイルの汎用化：
  - 特定のデータベース形式だけではなく、より汎用的なアスキーデータとして取得データをファイル化する機能を追加。
- ・ GUI操作性の向上：
  - 無駄な入力の削減。操作やステータスの視覚情報によるフィードバック追加。
- ・ 柔軟な設定：
  - 連続したチャンネル番号に接続したセンサをグループとして、必要なグループに属するセンサのみ較正を行う機能を追加。
- ・ 警告の追加：
  - 一連のデータ収録操作中、警告を発生させる場合には視覚的に分かりやすくする（色の変更）とともに、警告音を発生させる。

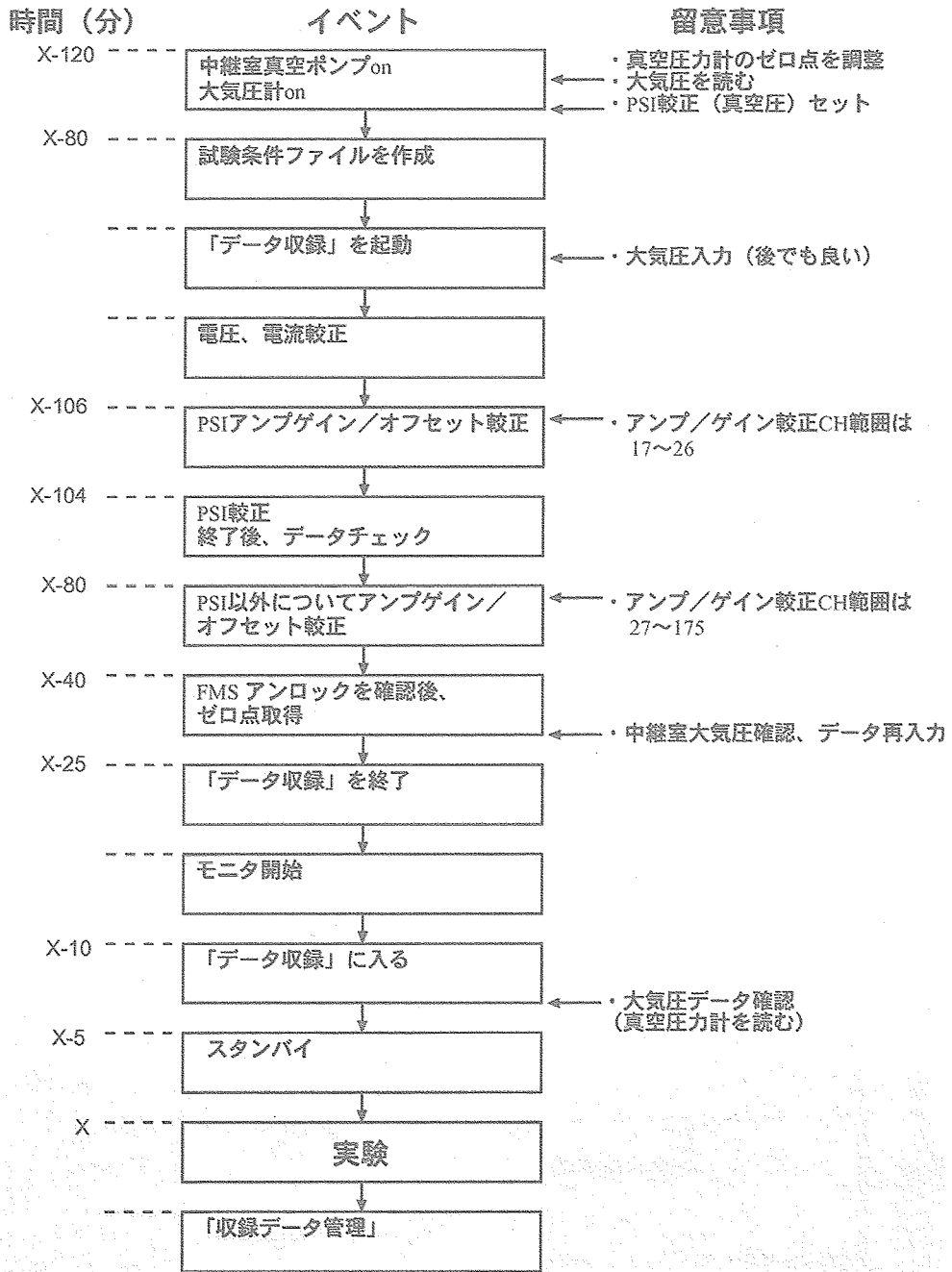


図3 計測の流れ

- ・ 較正の迅速化：  
複数個のセンサを同時に一括して較正できるようにする。また較正結果に基づき誤差情報を作成して表示する。
- ・ データ処理の迅速化：  
データ取得終了後は、複数の“rjtfmeas”の立ち上げが可能となるよう、設定を変更。

## 2.2 データ処理システムの追加

### 2.2.1 ハードウェアの追加

導入直後のシステムはデータ収録および処理のため一台のワークステーション(以下HP)と、これに接続する、X端末1台の構成であった。実験終了後、工学値変換等のデータ処理作業にあたって、“rjtfmeas”をワークステーションとX端末で同時に動かし、担当者が必要なデータの切出作業を行っていたが、処理能力の限界から、場合によっては工学値変換とディスク保存に40分程度の処

理時間を要する場合があった。このため、実験後の速やかなデータ検討を行う上で大きな時間的制約となっていた。

この状況を緩和するため、X端末を廃し、新にワークステーション(以下DELL)を平成12年に導入し、データ処理に係わる部分について受持させる事とした。また同時にデータのより安全な保存を行うために、RAID5構成の大容量外付ハードディスクユニットを導入した。新規導入したハードウェアと以下に述べるソフトウェアの組み合わせにより、データ処理時間は20秒程度にまで短縮され、迅速なデータ検討が可能となったとともに、より多くのデータを処理する余裕ができた。また、ハードディスクの大容量化、冗長化により、RJTF試験開始以来の全てのデータを安全にディスク上にて管理することが可能となり、過去のデータのすばやい検索、再処理が可能となった。以下に新規導入したハードウェアの構成を示す。

#### データ処理用ワークステーション(DELL Precision 410)

本体(筐体)	PC-AT 互換コンピュータ
CPU(SMP)	Intel Pentium III 500MHz を2台搭載したSMP構成
メインメモリ	512Mbyte
補助記憶類	内蔵Ultra2-Wide SCSI ハードディスク9GB

#### 外付ハードディスクユニット(Arena ラックマウントタイプ)

構成	13Gbyte Ultra-ATA ハードディスク6台によるRAID 5構成
インタフェイス	Ultra-Wide SCSI
冗長性	電源、ファンを二重化構成



図4 データ処理用ワークステーション



## 2.2.2 データ処理ソフトウェア

前節に述べたDELLにはOSにLinux(カーネル2.2、現在は2.4.24)<sup>2)</sup>を採用し、GUI環境としてX-Window(XFree86 4.3)システム<sup>3)</sup>とGTK+ツールキット<sup>4)</sup>を導入し、これらを用いて工学値変換のためのデータ処理アプリケーション、処理後の各種データのグラフ化、時間平均化のアプリケーションを構築した。各アプリケーションのGUIデザインにあたっては、GLADEユーザインタフェースビルダ<sup>5)</sup>を用いている。これ等は、GNU Public License<sup>6)</sup>に基づき配布されているフリーソフトウェアであり、そのソースコードが公開されていることから、半永久的に環境の再構築が可能であり、長期にわたりデータを保全する上で有利である。

X-Windowシステムのネットワーク透過型特性を生かし、アプリケーション操作者はネットワークで接続された別のコンピュータからも自由にデータ処理を行うことができる。以下にRJTFデータ処理のためにDELL向けに開発したアプリケーションについて概略を述べる。試験装置の変更や試験内容の変更に対して柔軟に対応できるよう、これ等のアプリケーションはインハウスで開発を行っている。

### 1. メニューバー(“procrjtf”)

以下に述べる“rjtfmeas”、“procave”、“procfms”、“procave”の各アプリケーションをチャイルドプロセスとして呼び出すためのメニューである。データ処理操作者は本メニューを立ち上げるだけで、データ処理からデータのグラフ化までの一連の処理を順次操作することが可能である。

### 2. 工学値変換データ処理(“rjtfmeas”)

これまでHP上の同名のアプリケーションで行っていた工学値変換処理等の機能部分のみを、新たにDELL上に構築した。操作者の混乱が少ないよう、従来のGUIデザインを踏襲しつつ、内部処理については、全て新規に作成している。本アプリケーションではHP上でデータ収録後作成される生データ(バイナリデータ)を読み込み、GUI操作により必要なセンサを選択し、主に通風時間に対応した時間区間を切り出し、可読性のあるアスキー文字列の時系列データとしてファイルに吐き出す。また、簡易グラフ表示機能により、工学値変換された時系列センサデータを表示することができる。DELLのCPU高速化と本アプリケーションの最適化により、従来のHPでの処理よりも100倍程度の高速化を達成出来た。



図5 “procrjtf”

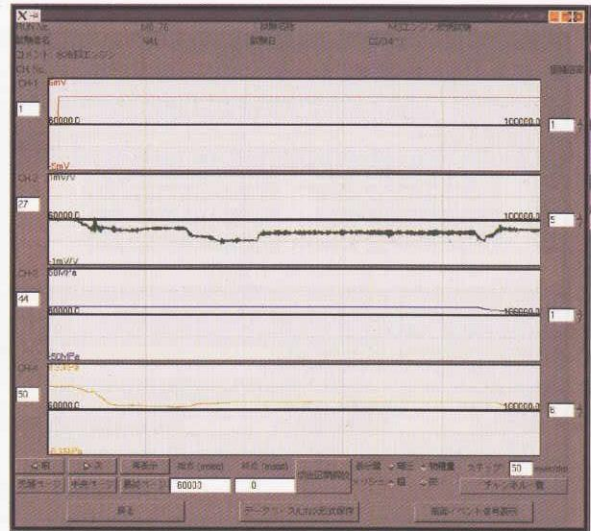


図6 “rjtfmeas” 波形モニタ画面の様子

### 3. 圧力分布データ作成処理(“procave”)

“rjtfmeas”で切り出されたデータは各センサーの時系列データの固まりであり、データ評価のためにはエンジンの壁面圧力分布等の空間分布データとして加工する必要がある。本アプリケーションは切り出された時系列データについて、指定した時間区間(例えばある一定の燃料を投入している時間)の平均処理を行い、別途定義したセンサの測定位置情報を基に、ある特定時間区間の圧力の空間分布データファイルを作成する。結果は所定のディレクトリ中にASCIIファイルとして格納される。RJTFにおけるエンジン試験では一定燃料を投入する時間区間(ステップと称する)は大凡2秒に設定されており、一度の通風中に複数のステップを設定する。本アプリケーションでは各ステップについて、最もデータの安定している0.5秒間を操作者が選び、切出処理を行う。なお、常時モニタについては、スキャンレートが5msecであることから、平均的に100点程度のデータ点を平均化することになる。一方多点圧力スキャナのスキャンレートは80msecであり、概ね6点程度のデータを含む事になる。

### 4. 推力データ時間平均化処理(“procfms”)

エンジンは推力架台に固定されており、燃料投入により発生する推力を直接計測することが可能である。このデータは推力架台に取りつけられたロードセルの電圧値として計測装置に取り込まれる。本アプリケーションで



は、事前に較正して求めた変換マトリックス（参考 参照）を用いて、ロードセル電圧データを力の値に変換し、時系列グラフ化と各燃料ステップにおける力の平均値を求める。結果はASCIIファイル形式で所定のディレクトリに格納される。

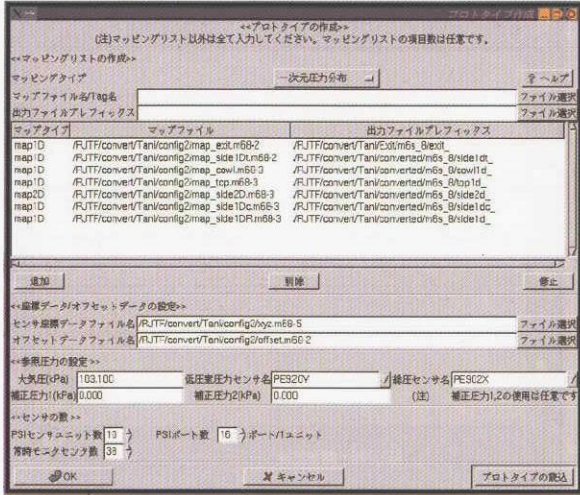


図7 “procave” 測定位置情報ファイルの設定例



図8 “procfms” 変換マトリックス選択例

5. 圧力分布グラフ化処理 (“procrgraph”)

“procave”にて処理されたデータを基に、圧力分布グラフおよび等高線画像を作成する。本アプリケーションはデータの選択部分を受持ち、画像化については、チャイルドプロセスとして以下の“krcgraph”及び“krcont”、“krcmap”を呼び出す。画像は画面上に表示する他、プリンタへの出力、画像ファイル化を行う事ができる。

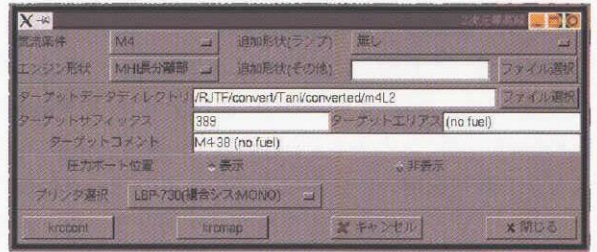


図9 “procrgraph” 表示するデータファイル選択例

6. グラフ化処理 (“krcgraph”)

汎用のグラフ作成アプリケーションであり、ハードディスク上のデータを逐次読み込み画像化するため、表示するデータサイズが実質無制限である点が特徴である。同時に16までの二次元データ(X,Y)をグラフ化することが可能で、画像はX-Windowに表示する他、以下の“libPS”および“libLBP”ライブラリを用いてそれぞれPostScript、LIPS III 対応のプリントデータを生成する。また、グラフ画像はEPS形式で出力することも可能である。

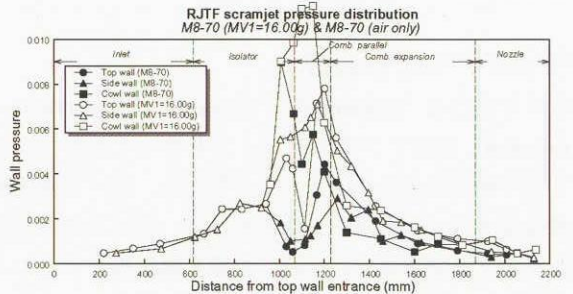


図10 “krcgraph” 出力例

7. 等高線化処理 (“krcont” と “krcmap”)

X、Y平面上に分布する圧力などの値を等高線(krcont)あるいはベタ塗り分布イメージ(krcmap)として画像化するためのアプリケーションである。X-Window上に表示された画像に対してマウス操作により自由に表示領域を変更できる点が特徴である。“krcont”は“krcgraph”同様、プリンタデータ作成ライブラリを用いてPostScriptおよびLIPS IIIプリンタへの画像出力に対応しており、EPS形式の画像ファイルを出力することも可能である。“krcmap”については、画面イメージをPPM形式でダンプし、画像ファイルを生成することができる。

8. プリンタ出力ライブラリ (“libLBP” と “libPS”)

PostScript 7.8) およびLIPS III/IVページ記述言語



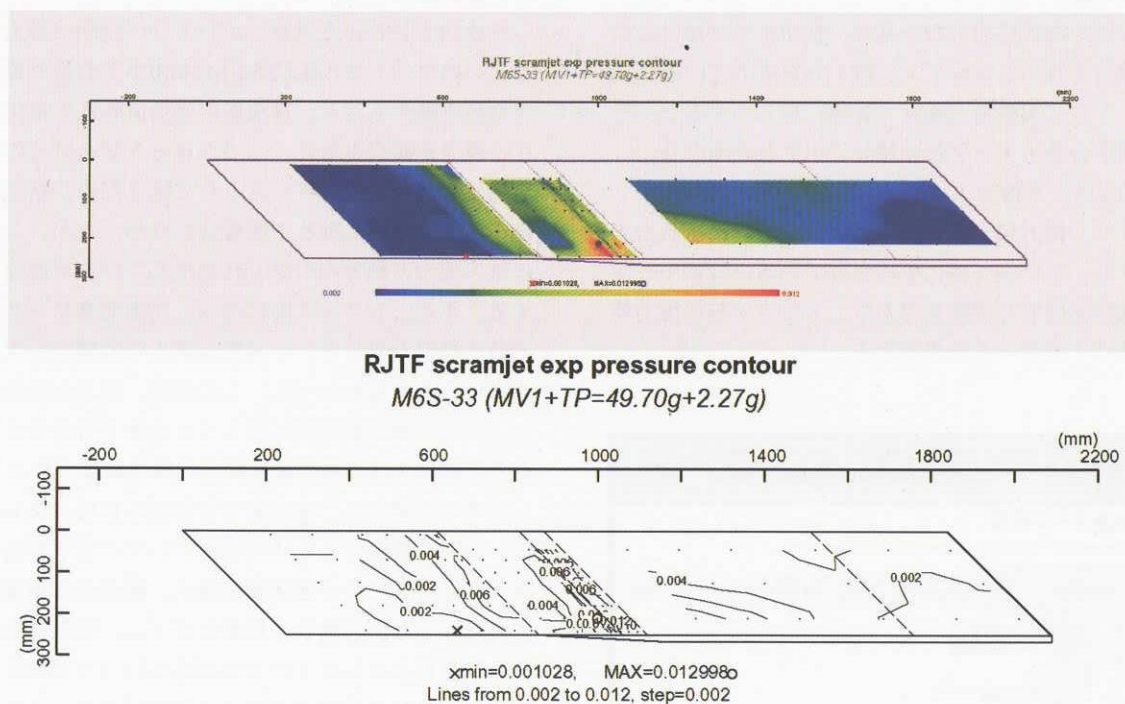


図11 “kremap” と “krcont”出力例

9-11) を用いて画像を作成するためのライブラリである。直線、矩形、楕円等のプリミティブ図形と日本語を含むベクトル文字の描画に対応している。

### 2.3 データバックアップについて

RJTF導入時の機器構成では、主にハードディスクの容量的な制約から、データはHP上のハードディスクに一時保存後、HP専用の光磁気ディスクユニットにバックアップを行う事となっていた。この光磁気ディスクは現在主流のいわゆるMOドライブとは互換性がなく、ひとたび故障した場合はデータの復旧が非常に難しい状況であった。平成12年のRAIDハードディスクの導入により、ハードディスク自体の信頼性は格段に向上した。導入後、個々のハードディスクユニットの故障により交換を行っているが、停電時を除き、常時稼働を維持し、かつデータ壊失はない。また、さらなるデータ保全を目指して、シリーズ終了毎に1.3GB MOドライブへデータのバックアップを行っている。さらに計測建屋全体への被災等に備え、別の建屋に設置したRAID5構成のNAS (Network Attached Storage: ネットワーク対応ハードディスク) に対して、シリーズ終了毎に同様にデータのバックアップを行ない、データを“三重”に管理している。

### 2.4 データ参照システムの追加

RJTF試験においては、一試験中に投入する燃料流量の切替を行う。燃料流量一定の区間をステップと称し一試験中に複数のステップを持ち、このステップを単位として圧力分布、燃料流量値、推力値を管理している。これまでの試験により、総ステップ数は1000を越えており、ある特定の試験データをすばやく選びだすために、簡易検索システムを構築した。検索システムはWEBベースであり、データ処理を行うDELL上でApache WEBサーバを立ち上げ、C言語で記述したCGIプログラムをバックエンド処理に用いて構築している。利用者は以下の項目について検索を行うことができる。なお、利用者についてはパスワードシステムによりRJTF実験従事者に限っている。

#### ・燃料流量：

エンジン模型は複数の燃料噴射装置を持っており、単独、あるいは複数の装置を組み合わせる燃料を投入する。検索キーは、個々の噴射装置毎の投入流量、あるいは総投入量であり、流量を入力すると、その値に対して大小10%の範囲に収まるデータを表示する。個々のデータにはステップ毎につけたタグ名も含まれるため、このタグを基に、圧力や推力データを選択することも可能である。



・圧力積分値：

エンジン内の圧力分布を基に、各ステップ毎に圧力の面積分を行い、エンジンに掛る力を求めている。検索キーとして実験名（番号で管理）を入力すると、その実験中の各ステップ毎の積分データを表示する。

・推力架台データ検索：

エンジン推力架台より得られたエンジンに掛る力のデータも、ステップ毎に管理されている。検索キーは圧力積分と同じく実験名であり、ステップ毎の推力架台に基づく力データを表示する。

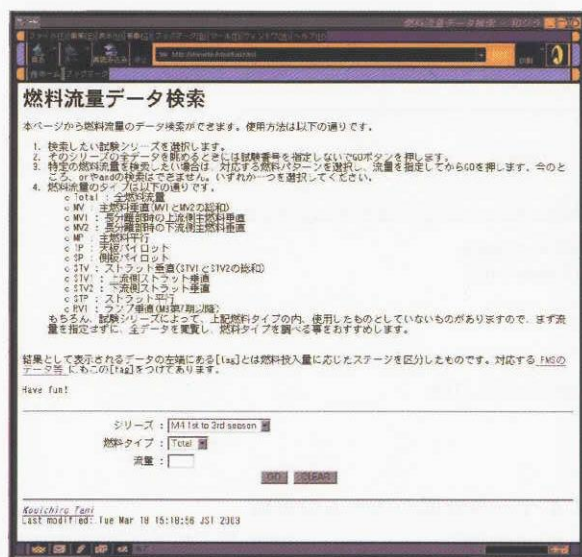


図12 燃料流量検索画面

なお、現在、さらに高度な検索が可能となるよう、平成16年3月末を目途にPostgreSQLを利用したデータ検索システムを構築中である。本システムでは燃料流量等による検索により、圧力分布データ等のグラフ表示まで含めた総合的なデータ表示、データ取得をWEBベースで行えるよう整備を行っている。

### 3 RJTF計測システムにおける問題事例とその対処について

近年、本計測システムでは幾つかの不具合が発生している。概ね機器類の単純な故障であり、定期点検時に補修を行うことで、対処してきたが、場合によっては原因不明であったり、試験時に問題が発生したため機器類の補修を行うことなく、データを取得し続けるケースもあった。このような場合、データ処理の段階で補正を行い、対応してきた。以下に主な不具合事例とその対処方法についてまとめる。

### 3.1 推力架台

平成14年に行った試験において、一時的に揚力を受持つ二つのロードセル(LC952,LC953)が正負逆の異常に大きな値を発生したり、通風後の無負荷時にも電圧を発生する現象が観察された。二つのロードセルはその出力の平均値を用いて揚力データとして扱うため、結果的に処理後の力データに現れる影響は少なかったが、この現象は推力架台の軸方向の捻じれが生じている可能性を示唆する。また、シリーズ前に行う、内部変換マトリックスの較正結果を見ると、システム納入時の値から大きくずれていることもわかった。この結果、揚力を計測するロードセルの出力が推力に対しても大きく寄与する事となり、算出された推力値に疑問が残る結果となった。

シリーズ終了後、推力架台を分解し目視点検したが、エンジンを搭載するための板については若干の捻じれがあったものの、その他異物の混入、構造的な損傷は確認されなかった。点検後、再組み立てし、架台に重石を載せる簡易較正を行って出力の確認を行ったが異常は無かった。平成15年以降の実験では問題は発生しておらず、上記シリーズにおけるエンジン組付けに問題があったものと推定されるが、詳細は不明である。

なお、変換マトリックス要素への誤差混入による推力値への影響は参考を参照されたい。問題があったケースについては、揚力を計るロードセル出力の推力方向への感度を強制的にゼロにすることで、変換マトリックスを求め直し、補正を行った。

推力架台については、導入以降幾何マトリックスの較正を実施しておらず、経年変化による構造的なずれに対応出来ない状況である。また新たなエンジンモデルを導入した場合、模型剛性や重量配分の違いから幾何マトリックスが同一になるとは限らない。今後、幾何マトリックスも含めた較正を行う方法について検討を進める。

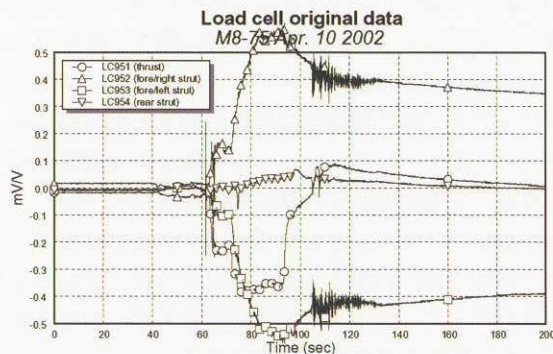


図13 推力架台出力の捻じれ

### 3.2 低圧室内圧力の誤差

エンジンを据え付け試験を行う低圧室の圧力は、試験中、数kPa にまで下がるため、より精度の高いセンサにて計測を行う必要がある。RJTF試験では精度確保の観点から、基準となるセンサに加えて複数のセンサを用いて低圧室圧力を計測している。平成14年の試験中、基準センサを除くセンサについて、圧力が2~3kPa程高くなる現象が観察された。

高い圧力を示したセンサは容量1kg/cm<sup>2</sup>(絶対圧)の可変リアクタンスタイプであり、これらは個々のセンサについて“専用アンプ”による増幅を行った後、システムの全チャンネル毎に設けられている直流増幅器(MCC、ゲインは1に設定)を通してA/D変換器へ信号を送る。この内、専用アンプの設定上の問題から、大気圧が高い場合、センサ出力がMCCの上限(5V)を越えて飽和状態に陥り、計算機側には誤った値が出力された。物理量換算にあたっては大気圧を基準にとるため、飽和が発生すると、図14に示す波線の関係で換算が行われ、実際の値よりも高い値を示すこととなる(飽和が解消されるまで同一の電圧値をとるため、実際には圧力が下がっているにも関わらず、出力は大気圧値のままとなる)。実際、問題のあったセンサは大気圧の低い状態では正常な値を示すことが確認されている。今回は、センサ専用アンプの設定を変更する措置をとり、大気圧の変動幅程度でMCCが飽和することが無いように調整した。

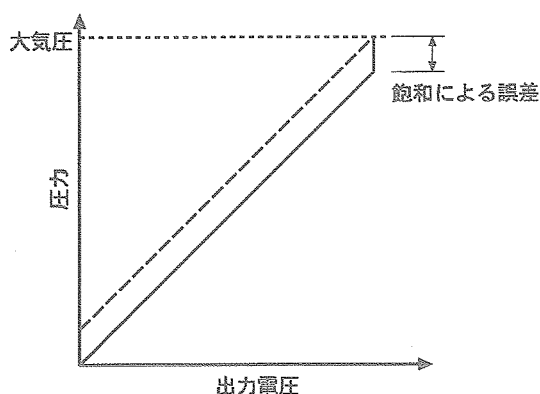


図14 可変リアクタンスセンサの誤差

### 3.3 多点圧カスキャナの異常について

平成14年の試験において、多点圧カスキャナの指示値異常が発生した。最も低圧室が低い圧力を示す状態(通風直前)で、低圧室基準センサの指示値に対して、全走査型センサが3kPa程低い結果となった。実験シリーズ終了後、点検を行った結果、センサ較正時にセンサに供給される基準圧力について、

1. 大気圧より大きい正の圧力は1kPa 未満のズレ内で供給
2. 大気圧は正確に供給
3. 大気圧以下の負の圧力は、指示値より3kPa 程高い圧力を供給

という結果を得た。このため、誤った変換係数を元に圧力が計算されることとなり、特に大気圧以下での誤差が拡大したことがわかった。よって以下に述べる方法で補正を行った。

補正の方針として、「大気圧以下の領域で正しい値を示すと思われるセンサ指示値を基準として用い、この値と一致する様、多点圧カスキャナ指示値に倍率をかける」事とした。極低圧の領域では低圧室基準センサが最も正しい値を示す。しかし同センサは最大15kPa までの容量しか持たないため、補正に必要な「大気圧から低圧室圧まで」の範囲をカバーし、かつ低圧側で低圧室基準センサの値と良く一致するセンサ(以下参照センサ)の値を用いることとした。

通風中は各センサの指示値が異なるが、通風直前に低圧室内の圧力が下がる状況では全センサは同じ値を示す。この状況での多点圧カスキャナの「ズレ」方を図15(A)に示す。大気圧以下のある点(シフト開始点; “shift starts here!”)以下で参照センサ(PE956)指示値から顕著にずれて行くのが見て取れる。最終的に、低圧室を引ききった状態で参照センサに対して“amount of shift”で示されるだけのオフセットが付加されていた。シフト開始点、シフト量は実験毎に、またセンサ毎にすべて異なる。この観察を元に以下のように補正を行う。

- ・シフト開始点( $P_{sf}$ )の特定方法  
参照センサの値に対して多点圧カスキャナが0.5%以上のずれを生じる圧力を内挿で求め、これをシフト開始点とする。
- ・シフト量( $P_{\epsilon}$ )の特定方法  
通風開始直前の1秒程度について、多点圧カスキャナ指示値と参照センサ指示値( $P_{cell}$ )の平均値の違いをシフト量とする。
- ・補正式  
多点圧カスキャナ指示値 $P_{psi}$ に対して以下の処理を行う。

$$P'_{psi} = P_{sf} + (P_{psi} - P_{sf}) \frac{P_{cell} - P_{sf}}{P_{cell} - P_{\epsilon} - P_{sf}}$$

ここで  $P_{psi} < P_{sf}$  かつ  $P_{\epsilon} > 0.0$



図15(B)に補正結果を示す。なお、本例では、 $P_{sf} = 62.53$ 、 $P_{\epsilon} = 3.43458$ であった。

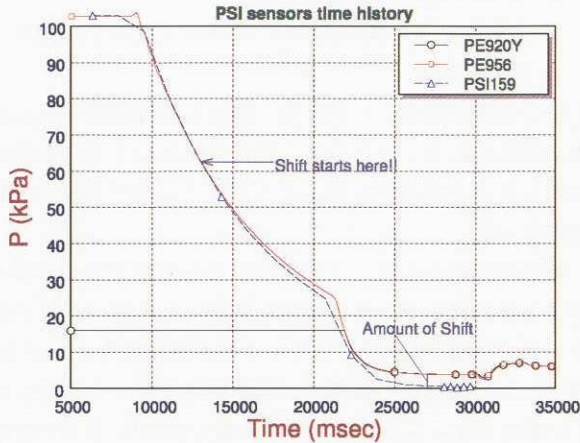


図15(A) 補正前

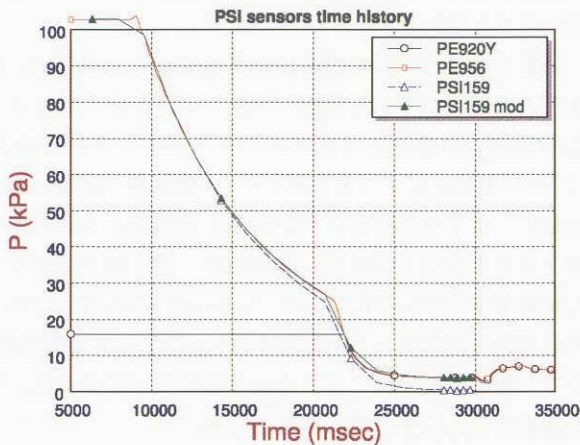


図15(B) 補正後

シリーズ終了後、この異常は多点圧カスキャナの大気圧入力ポートに誤って大気圧より僅かに高い圧力が入力されたためである事がわかった。現在は正しい圧力が供給される様、入力系を改修しており、同様の問題は発生していない。

### 3.4 新多点圧カスキャナ (ad hoc 機器) のタイムラグ

平成14年度より、新たな多点圧カスキャナ(PSI8400システム、以下新スキャナ)を導入し旧機器類と同時に圧力計測を行っている。将来的にはPSI8400で旧多点圧カスキャナ(以下旧スキャナ)を置き換える方針で運用中である。新スキャナは、制御系から直接信号を受信し、既存計測系と同時に計測を行うが、双方の時間進行にズレが生じることがわかった。これは主に以下に述べる制御系から計測開始の信号を受け取った際の既存計測設備

側内部処理の問題で時間がずれるためである。

既存計測系は制御系より信号を受けとった後、コンピュータ(HP)と計測機器側との間で通信の確立等の計測準備作業に入る。HP上では複数のプログラムが同時に走っており、計測機器との間で通信を行なう場合は、通信専用のプログラム(以下GP)に対して要求を送信する。要求は一端、バッファにため込まれ、GPはこのバッファを参照して要求を処理するが、要求が無い場合はsleep関数を使って一旦待つ。sleep関数による待ちの最小単位は1秒である。このため、一部のプログラムからの通信要求がわずかに遅れると、GPの次の処理まで系全体が停止状態になり、最大1秒の時間遅れを作ることとなる。通信要求を出す側の個々のプログラム間には従属関係があり、処理間の手順を守らないと、システム全体が機能しない可能性がある。また、GPの待ちを短くし、繰り返しバッファを参照すると、他のプログラムの実行速度に影響を与えることも考えられる。以上の様に、プログラム一つ一つの処理時間を十分に検証した上で、待ち時間の最適化を計る必要があるが、現行システムではCPUパワが限られており、これ以上の最適化は難しい状況である。平成14年の試験ではさらに、新多点圧カスキャナの較正時の問題から、計測した圧力値にも誤差が発生し、時間と圧力の双方で補正を行う必要が生じた。以下にその修正方法について述べる。

#### 3.4.1 時間方向のずれ

本来、前述の様な計測系内部の処理上の問題がある場合、新スキャナ、既存システム双方で同期した電気信号を記録し、これを元に時間の同期をとることが望ましい。しかし、新スキャナ単体では電気信号を記録できないこと、同期信号を記録する装置を新スキャナ側にもうけるだけの時間的余裕がないことなどから、新、旧両スキャナで取り込んだ同じ場所の圧力の立ち上がりを目印に時間の同期をとることとした。処理は二段回にわけて行い、新スキャナ側の時刻を既存システムに合わせるよう補正した。

##### 1. ステップ1:

同じ位置を計測している新/旧スキャナの示す圧力データを比較する。シリーズを通して一定の場所の圧力値を用いた。気流状態から燃料噴射による圧力立ち上がりの時刻について、それぞれのデータを直接読み取って調べ、その時間差をもって「ずれ」のラフな近似値とした。

##### 2. ステップ2:

新スキャナと既存システムでは計測時間刻みが異なる(スキャンレートが異なる)ため、同時刻に値を取

得しているわけではない。ラフな近似値はそれぞれのシステムの計測時刻差であり、かつ双方とも物理的に厳密な圧力立ち上がり時刻を記録しているわけではないため、真の「ずれ」量とは異なる。ステップ2では、ステップ1で求めた近似値を出発点として、5msec程度の間隔で以下の要領でスキャンを行い、ずれを特定した。

- (a) まず、ずれ量を仮定し、ずれを補正した新スキャナ計測時刻における既存システムの圧力値を時間方向に内挿して求める。
- (b) 続いて新/旧システムの示す圧力値の差を求め、これを時間履歴としてグラフ化する。ここでは(新スキャナ値-既存システム値)を用いる。
- (c) 図16 (a)~(c) に新スキャナ、既存システムの圧力差履歴と、既存システムの圧力値の履歴を例示する。図(a)は圧力立ち上がり近辺に、負の方向に大きな「くぼみ」がある。この状態は圧力立ち上がりの状態において新スキャナよりも既存システムの方が早めに立ち上がる(よって圧力差が負になる)事を意味する。この場合、新スキャナの時間フレームをやや早めてやる必要がある。
- (d) 図16(c)では圧力立ち上がりの近辺で正の方向にスパイクを生じている。これは前者とは逆に新スキャナ側が早く圧力上昇していることを示しており、よって新スキャナの時間フレームをやや遅らせる必要がある。
- (e) 新スキャナの時間フレームを調整し、最終的に(b)

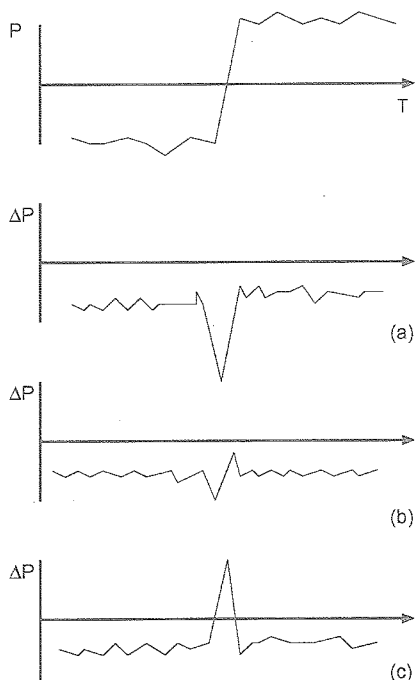


図16 新旧システム圧力差の履歴による時間ずれの特定

の様に、圧力立ち上がりの前後に圧力差の正負のスパイクが最も小さくなるようにする。

#### 3.4.2 圧力の補正

前節の方法により、時間方向のずれを解消した後、新スキャナと既存システム間の圧力の違いについて、補正を行った。今回は新システム較正時に、センサに対して正しい圧力がかかっていなかったことがズレの原因である。よって、以下の点を仮定して補正を行った。

1. 真の圧力/電圧曲線は、直線で近似可能である。
2. 誤差の乗った圧力/電圧曲線について、二点較正(よって直線近似)の場合、真の値も直線であることから、誤差も圧力に対して一次関数となる。
3. 三点較正(よって二次曲線)の場合、誤差も圧力に対して二次関数となる。

新スキャナ/既存システムで同じ位置の圧力を計っている22点について、新スキャナ/既存システム間の圧力差と新システム圧力指示値の相関としてプロットした例を図17に示す。図では二つの新スキャナそれぞれが別々の傾向を示すことがわかる。実際には個々のスキャナでもポート毎に違いがあり、特に45psiレンジのスキャナ(PSI45)については、ばらつきが大きい。

15psiレンジの新スキャナ(PSI15)については比較調査した全ポートについて、概ね同一傾向を示した。よって全ポートのデータを図に示す一次線(三点較正の場合は二次曲線)にて近似する。近似式と実際のずれについて、その差を取り、分布状況を確認すると、標準偏差は0.2~0.35であり、99.9%の確率で±1.0kPa以内の誤差範囲に収まると考えられる。

一方、PSI45については、大きく傾向の異なるポートを除いて同様に近似式と実際のデータの差を求めると、0.2~2.2(99.9%確率では±6.6kPa)となり、ばらつきが大きい。

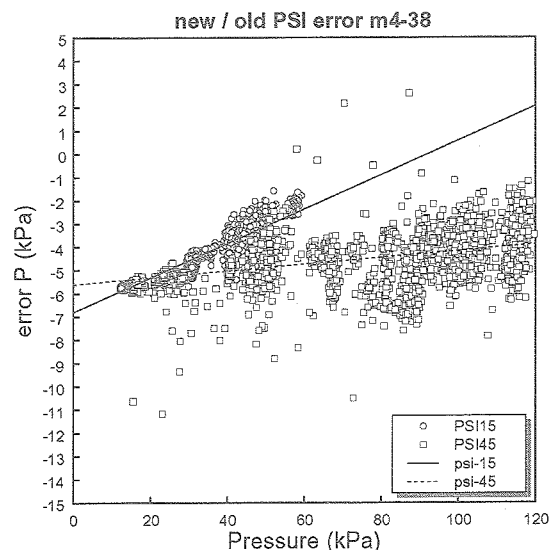


図17 新スキャナ、既存システムの圧力指示差

上記の様に、特にPSI45については、ポート毎の誤差が大きくなる可能性はあるものの、既存システムとの比較を取れないポートも存在することから、スキャナ単位でひとつの近似式を適用することとした。この近似式からスキャナの指示する圧力における、誤差量を推定し、指示値に誤差量を加えることで補正を行った。

### 3.5 計測用計算機の故障

平成15年10月の試験直前に、計測用コンピュータ(HP)へのXdmログインが不可能となった。同時にtelnetによる外部からのログインもコネクションを張ることができず不可能となった。この時点でリブートを試みたが、ブートローダ起動後、停止する状況となった。テープバックアップから起動を行ない、起動用ハードディスクの状態を調べたが、一部領域の読み込みが出来ないことが判明し、再フォーマットによる修復が出来ない状況となった。HPにはSCSI接続のハードディスクを搭載しているが、既に保守期限を過ぎており、製造元にも交換部品がないことがわかり、一部製品の置き換えによる修復も不可能であることが判明した。

平成16年2月現在、HPからパーソナルコンピュータベースの計測用計算器置き換えを行っている。

#### 3.5.1 新計測用計算機について

新計測用計算機は基本的に旧計算機上で実現していた機能をそのまま引き継ぐものである。ただし、パーソナルコンピュータベースとすることで、装置そのものの汎用性を高め、故障時の代替品の入手がより容易になることを目指す。また、

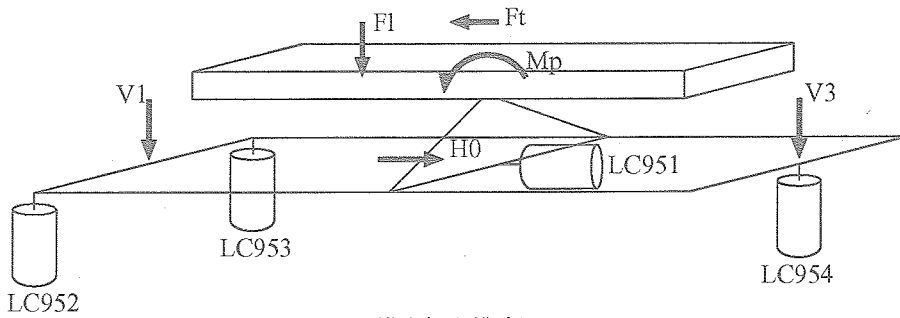
- ・汎用のプログラム言語による可読性の高いソフトウェアであること。
- ・既存システムとの親和性を考慮し、処理上のボトルネックを作らない様設計する。
- ・既存システムと新スキャナの間に見られる様な時間ズレを最小限に押さえる様、ソフトウェアアーキテクチャを最適化する。

などの要件を考慮するよう検討中である。この他のシステムについては、既存設備を使う。また、既存システムで取得したデータについては、DELLにおいて今後も管理、処理を行う。

### 参考文献

- 1) RJTF 建設グループ; ラムジェットエンジン試験設備, 航技研技術報告, TR-1347,1998年
- 2) Linux については、<http://www.kernel.org/>を参照のこと
- 3) X-Window システムについては、  
<http://www.x.org/index.html/>および  
<http://www.xfree86.org/> を参照のこと
- 4) GTK+ ツールキットについては、  
<http://www.gtk.org/>を参照のこと
- 5) Damon Chaplin, Martijn van Beers;GLADE GTK+ User Interface Builder,  
<http://glade.gnome.org/index.html/>
- 6) Free Software Foundation, Inc.;GNU General Public License (GNU 一般公衆利用許諾契約書),  
<http://www.gnu.org/licenses/gpl.ja.html>,1989, 1991
- 7) B.W.Kerningha & D.M.Ritchie (石田晴久訳); プログラミング言語 C 第2版, 共立出版
- 8) 木下凌一、林秀幸; X-Window Ver.11 プログラミング 第1版/第2版, 日刊工業新聞社
- 9) 兜木昭男、木下凌一、柴谷政己、林秀幸、安川悦子, X-Window OSF/Motif プログラミング, 日刊工業新聞社
- 10)安居院猛、永江孝規; PostScript グラフィックス, 新紀元社
- 11)Adobe Systems Incorporated; PostScript Language Reference Manual
- 12)Adobe Systems Incorporated; PostScript Language Tutorial Cookbook
- 13)R.J.Rost (秋元信彦訳); X/Motif クイックリファレンスガイド, トップラン
- 14)キャノン編; Canon LASER SHOT プログラマーズマニュアルコマンドリファレンス 4.2
- 15)キャノン編; Canon LASER SHOT プログラマーズマニュアルクックブック 4.2
- 16)キャノン編; Canon LASER SHOT プログラマーズマニュアルソフトウェア概説書 4.2

参考・FMS電圧/力変換マトリックスの変換について



推力架台模式図

1. 信号の変換

4つあるロードセル、LC951から954までの4本の信号の内、前部ストラットに相当するLC952/953を1本の信号として扱う。3本の信号をLC1,LC2,LC3とする。LC1が前方ストラット、LC2が中程の推力、LC3を後方ストラット電圧信号とすると、

$$\begin{pmatrix} LC1 \\ LC2 \\ LC3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} LC951 \\ LC952 \\ LC953 \\ LC954 \end{pmatrix}$$

により、オリジナルのLC95nからLCnへの変換を行う。上記変換マトリックスをLとする。

2. 感度係数マトリックス(内部較正マトリックス)の算出

内部較正においては、ロードセルに力を掛けて、その電圧出力を見る。ロードセルに加わる力成分を(V1,H0,V3)とし、出力電圧は1.で定義した(LC1,LC2,LC3)である。ここでV1,V3は前方(二つあるロードセルを仮想的にまとめたもの)および後方ロードセルの受ける荷重であり、H0は中程のロードセルが受ける荷重である。出力LCnと入力(V1,H0,V3)の関係を表すマトリックスは以下の通り。

$$\begin{pmatrix} LC1 \\ LC2 \\ LC3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V1 \\ H0 \\ V3 \end{pmatrix}$$

最初にH0(水平抗力)のみ与えて、 $D_{n2}$ の係数を求める。これは単純に入力したH0に対する各センサの出力を線形近似(一次回帰式<sup>1</sup>)し、その勾配を当る。

次に架台の任意の水平位置Xで垂直荷重を加え、この時の各電圧出力LCnと荷重の相関を一次近似する。ここで求まる勾配は、荷重を掛けた点Xの関数となり、勾配とXの関係を一次近似することができる。即ち、各勾配を $A_n$ で表すと、

$$A_n(X) = a_n \cdot X + b_n$$

となる。

ここで前方ロードセルを設置した $X=X1$ では、LC3の感度計数 $A_3$ が0になるので、上記式から $X1 = -b_3 / a_3$ を得る。同様に後方ロードセルのある $X=X3$ では $A_1 = 0$ から、 $X3 = -b_1 / a_1$ となる。これらの値を用いて、

<sup>1</sup>入力  $x_i$ 、出力  $y_i$  の関係が線形 ( $y = ax + b$ ) とし、その勾配  $a$  と切片  $b$  を以下の式より求める。

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2},$$

$$b = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$



$$X_c = \frac{X1 + X3}{2}$$

$$\Delta X = |X3 - X1|$$

$$\begin{aligned} D_{11} &= a_1(X_c - \frac{\Delta X}{2}) + b_1, & D_{13} &= a_1(X_c + \frac{\Delta X}{2}) + b_1 \\ D_{21} &= a_2(X_c - \frac{\Delta X}{2}) + b_2, & D_{23} &= a_2(X_c + \frac{\Delta X}{2}) + b_2 \\ D_{31} &= a_3(X_c - \frac{\Delta X}{2}) + b_3, & D_{33} &= a_3(X_c + \frac{\Delta X}{2}) + b_3 \end{aligned}$$

上記 $D_{ij}$ を各要素とするマトリックスをDとする。このマトリックスは力入力に対する電圧出力を求めるマトリックスに相当する。これを内部較正マトリックスと称する。実際のエンジン推力測定においては、推力架台上に置かれたエンジンに対して力がかかるので、ここで求めたマトリックスをそのまま適用することはできない。別途、エンジンにかかる力に対する電圧出力を較正し、同様の方法で変換マトリックスを較正したものが必要となる。後者を外部較正マトリックスと称す。外部較正マトリックスと内部較正マトリックスは荷重点が移動するだけなので、単純な幾何変換マトリックスにより関係づけることが可能である。この幾何変換マトリックスは不変であるとする。

Dを求めた後、次の処理のため、 $D^{-1}$ を求めておく。

### 3. 内部較正マトリックスから外部較正マトリックスへの変換

推力架台納入時に求めた、内部較正マトリックスDと外部較正マトリックスCの変換マトリックス（以下幾何マトリックスG）を前説で求めたDにかける。CとDの関係は以下の通り。

$$C^{-1} = G \cdot D^{-1}$$

納入時には推力方向較正と抗力方向較正でDにずれが生じたため、Gについても2方向それぞれに求めているが、ここでは2方向のマトリックス各成分を単純に平均したものをを用いた。2方向それぞれのマトリックス要素を以下に示す。

推力方向

$$\begin{pmatrix} 1.0171 & 0.5490 & -0.0030 \\ 0.0038 & 1.0028 & -0.0054 \\ -0.0020 & -0.5497 & 0.9965 \end{pmatrix}$$

抗力方向

$$\begin{pmatrix} 1.0171 & 0.5497 & -0.0030 \\ 0.0038 & 1.0027 & -0.0054 \\ -0.0020 & -0.5474 & 0.9965 \end{pmatrix}$$

$C^{-1}$ を求めた後、次の処理のため、Cを求めておく。

### 4. 成分の補正

内部較正では直接推力方向の力をロードセルに掛けるため、推力方向の力のLC1とLC3への効き具合を評価するのが難しい。そこで、Cの成分のうち、LC1, LC3に対するHの効き具合の要素、 $C_{12}$ と $C_{32}$ については、納入時の値を元に、2.で求めた $a_1$ と $a_3$ を用いて補正を行うこととし、内部較正結果を破棄する。納入時の値を $C'_{12}$ 、 $a'_1$ で表すと、補正後の $C_{12}$ は、

$$C_{12} = C'_{12} \times \frac{a_1}{a'_1}$$

$$C_{32} = C'_{32} \times \frac{a_3}{a'_3}$$

となる。なお、納入時のデータは以下の通り。

$$\begin{array}{lll} C'_{12} & 2.0159 \times 10^{-4} & \frac{mV}{V} \\ C'_{32} & -2.0026 \times 10^{-4} & \frac{mV}{V} \\ a'_1 & 2.6028 \times 10^{-7} & \frac{mV \cdot mm}{V \cdot N} \\ a'_3 & -2.5252 \times 10^{-7} & \frac{mV \cdot mm}{V \cdot N} \end{array}$$

### 5. 電圧から力への変換

補正後のCについて、再び逆行列 $C^{-1}$ を求める。

$$\begin{pmatrix} V1 \\ H0 \\ V3 \end{pmatrix} = C^{-1} \begin{pmatrix} LC1 \\ LC2 \\ LC3 \end{pmatrix}$$

### 6. 推力等への変換

(V1, H0, V3)から推力(Ft)、揚力(Fl)、モーメント(Mp)への変換は以下に従う。

$$\begin{pmatrix} Ft \\ Fl \\ Mp \end{pmatrix} = FC^{-1}L \begin{pmatrix} LC951 \\ LC952 \\ LC953 \\ LC954 \end{pmatrix}$$

X1, X3は2. で求めた前後方のロードセル位置である。  
上記変換マトリックスをFとする。

な値をとる。即ち、 $i \neq j$  について、

$$D_{i,i} \gg D_{i,j}$$

7. まとめ

上記の結果から、最終的に以下を得る。

較正上の定義からLC1はV3に対して、LC3はV1に対してそれぞれ感度を持たないので、

$$\begin{pmatrix} Ft \\ Fl \\ Mp \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ X1 & 0 & X3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V1 \\ H0 \\ V3 \end{pmatrix}$$

$$D_{13} = D_{31} = 0.0$$

問題の要素 $D_{21}$ 、 $D_{23}$  が正常値のそれぞれ $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_3$  だけ大きな値を取るとする。この時、内部較正マトリックスは、

8. 誤差による推力への影響

平成13年下期の試験シリーズでは内部較正結果を見るとV1、V3 の入力に対して、LC2(=LC951) の出力が大きくなっている。これにともない、内部較正マトリックスの $D_{21}$  および $D_{23}$  要素が大きな値を示すようになった。その結果、以下のような理由でLC3(=LC954)の出力がH0(=推力)に影響を与える事になる。基本的に内部較正マトリックスは対角成分が大きな値をとり、それ以外の要素は小さ

$$\begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ \epsilon_1 D_{21} & D_{22} & \epsilon_3 D_{23} \\ 0 & D_{32} & D_{33} \end{pmatrix}$$

と表せる。内部較正マトリックスの逆行列( $D^{-1}$ )を計算すると、

$$D^{-1} = \begin{pmatrix} D'_{11} & D'_{12} & D'_{13} \\ D'_{21} & D'_{22} & D'_{23} \\ D'_{31} & D'_{32} & D'_{33} \end{pmatrix} = \frac{1}{|D|} \begin{pmatrix} D_{22}D_{33} - \epsilon_3 D_{23}D_{33} & -D_{12}D_{33} & \epsilon_3 D_{12}D_{23} \\ -\epsilon_1 D_{21}D_{33} & D_{11}D_{33} & -\epsilon_3 D_{11}D_{23} \\ \epsilon_1 D_{21}D_{32} & -D_{11}D_{32} & D_{11}D_{22} - \epsilon_1 D_{12}D_{21} \end{pmatrix}$$

となる。ここで前述の仮定から、

$\epsilon$  が1より大きな値をとる場合、H0の算出にあたって、LC1とLC3の寄与が拡大することになる。

$$D'_{11} \cong D_{22}D_{33}$$

$$D'_{33} \cong D_{11}D_{22},$$

また、

$$D'_{13} = D'_{31} \cong 0$$

よって、誤差の影響は $D'_{21}$  および $D'_{23}$  に強く現れる。

平成13年度下期シリーズ中の内部較正では、比較的誤差の少ない初期の較正時に比べて $D_{21}$  に相当する係数が約2.6倍( $\epsilon_1 \cong 2.6$ )、 $D_{23}$  に相当する係数が約9倍( $\epsilon_3 \cong 9$ )になっており、結果的にLC3(=LC945)の寄与が9倍程度に増幅される結果となった。



宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-03-026

---

発行日 2004年3月25日  
編集・発行 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構  
〒182-8522  
東京都調布市深大寺東町七丁目4番地1  
TEL 0422-40-3000 (代表)  
印刷所 株式会社 ビー・シー・シー・  
東京都港区浜松町2-4-1

---

©2004 JAXA

※本書(誌)の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。

※本書(誌)からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。

※本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター





Japan Aerospace Exploration Agency

