

独立行政法人

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1454

航技研遷音速フラッタ試験設備の新システム設計

第 部「計測系・他編」

菊池孝男・江尻 宏・玉山雅人
森田甫之・中道二郎

2002年11月

独立行政法人 航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY OF JAPAN

目次

概要	2
第6章 計測システムについて	2
6-1 計測装置（システム）.....	2
6-1-1 概要	2
6-1-2 風洞系計測装置	3
6-1-3 圧力変換器校正装置	5
6-1-4 データ処理装置	6
6-2 模型系計測装置	7
6-3 付帯設備（その他）.....	9
第7章 おわりに	11
7-1 将来のフラッタ試験計画	11
7-2 おわりに	12
参考文献	12
付録	12
Appendix 数値風洞モデル（亜音速）.....	12
Appendix 高圧導管の圧力損失	16
Appendix フィードフォワード演算方法	21
Appendix 圧力自動校正要領	21

第部・第部 目次

第部「機能編」

第1章 はじめに	
1-1 はじめに	
1-2 フラッタ試験設備の基本機能	
第2章 既設の遷音速フラッタ試験設備の概要	
2-1 旧システムの基本仕様	
2-2 構造形態	
2-3 高圧貯気槽	
2-4 高圧配管部	
2-5 調圧弁および圧力制御装置	
2-6 集合胴および整流装置	
2-7 縮流筒	
2-8 測定部および抽気室	
2-9 模型支持装置	
2-10 拡散胴	
2-11 安全装置	

- 2-12 消音塔
- 2-13 付属設備
- 2-14 測定部

第3章 フラッタ試験設備改修概要

- 3-1 改修目的
- 3-2 主な改修項目
- 3-3 改修内容および性能・機能
 - 3-3-1 集合胴圧力制御系の改修
 - 3-3-2 抽気室の改修
 - 3-3-3 気流低乱化のための改修
 - 3-3-4 運転制御系の改修
 - 3-3-5 圧力およびマッハ数制御
 - 3-3-6 マッハ数設定用フラップの改修
 - 3-3-7 模型支持装置の改修
 - 3-3-8 既設模型支持装置の改修
 - 3-3-9 安全装置の改修
 - 3-3-10 気流可視化装置の設置
 - 3-3-11 仕切弁の新設
 - 3-3-12 風洞に関わるその他の改修
 - 3-3-13 関連法規

第4章 遷音速フラッタ試験設備改修後の機能

- 4-1 はじめに
- 4-2 改修後機能
 - 4-2-1 風洞運転範囲
 - 4-2-2 遷音速フラッタ試験設備の位置付け
 - 4-2-3 全体配置
 - 4-2-4 気流の制御パターン
 - 4-2-5 気流の低乱化
 - 4-2-6 模型支持装置
 - 4-2-7 各種運転制御系用盤の設置
 - 4-2-8 抽気室
 - 4-2-9 気流可視化装置の設置
 - 4-2-10 安全装置
 - 4-2-11 マッハ数設定用フラップ
 - 4-2-12 集合胴
 - 4-2-13 既設伸縮継手
 - 4-2-14 風洞に関わるその他の改修
 - 4-2-15 電気関連改修
- 4-3 新旧設備の外観比較

参考文献

第 部「改修設計・技術検討編」

第 5 章 改修項目設計および技術検討

- 5-1 調圧弁の設計
 - 5-1-1 調圧弁の必要開口面積
 - 5-1-2 調圧弁サイズ
 - 5-1-3 調圧弁のストロークと開度特性
 - 5-1-4 調圧弁の駆動力
 - 5-1-5 主要部の肉厚計算
- 5-2 油圧源装置基本設計
 - 5-2-1 調圧弁の駆動力
 - 5-2-2 調圧弁駆動用油圧シリンダの選定
 - 5-2-3 サーボ弁容量の選定
 - 5-2-4 アキュムレータ容量
 - 5-2-5 油圧ポンプ容量
 - 5-2-6 油圧ポンプの選定
 - 5-2-7 油圧タンクの容量
 - 5-2-8 油冷却器
 - 5-2-9 油冷却器の要否
 - 5-2-10 配管
 - 5-2-11 油圧作動油
- 5-3 高圧導管強度計算
 - 5-3-1 設計条件
 - 5-3-2 管胴の肉厚計算
- 5-4 伸縮継手強度計算
 - 5-4-1 伸縮継手の伸縮量
 - 5-4-2 繰り返し変位回数の検討
 - 5-4-3 バネ反力の計算
 - 5-4-4 風洞の温度範囲
- 5-5 抽気室の設計
 - 5-5-1 改修方針
 - 5-5-2 改修内容
 - 5-5-3 改修後の耐圧および気密試験
 - 5-5-4 扉強度計算
 - 5-5-5 大扉強度検討
- 5-6 気流の低乱化
 - 5-6-1 発生騒音量の推定
 - 5-6-2 消音スプリッタの計画及び減音効果予測
 - 5-6-3 消音スプリッタの荷重条件
 - 5-6-4 多孔板強度計算
 - 5-6-5 整流金網強度計算
 - 5-6-6 起動時のスクリーン強度のチェック
- 5-7 前部集合胴強度計算
 - 5-7-1 設計条件
 - 5-7-2 拡散胴および前部集合胴の肉厚計算

- 5-8 マッハ数設定用フラップ改修
 - 5-8-1 前部フラップ駆動装置の設計
 - 5-8-2 後部フラップ駆動装置の設計
- 5-9 模型支持装置の改修
 - 5-9-1 ステイングストラット駆動装置設計
- 5-10 運転制御系設計
 - 5-10-1 制御システム概要
 - 5-10-2 制御装置ハードウェア構成
 - 5-10-3 運転制御コンピュータでの数値換算機能
 - 5-10-4 シーケンスブロック

参考文献

航技研遷音速フラッタ試験設備の新システム設計

第 部「計測系・他 編」*

菊池孝男*¹ 江尻 宏*¹ 玉山雅人*¹
森田甫之*² 中道二郎*¹

System Design of Renewed Transonic Flutter Testing Facility at NAL *

Takao KIKUCHI *¹ Hiroshi EJIRI *¹ Toshiyuki MORITA *²
Masato TAMAYAMA *¹ Jiro NAKAMICHI *¹

ABSTRACT

This report describes renewal of the Transonic Flutter Testing Facility (Flutter Wind Tunnel) at NAL, conducted from FY1993-FY1996. The report consists of three parts-seven chapters and four appendices.

Chapters 1, 2, 3 and 4 are grouped together as PART . These chapters outline the performance of the previous as well as the new system. Chapter 2 provides an overview of the previous system constructed in 1959. The concept design of the new system was based on improvements to the basic design of the previous system. In Chapter 3, the purpose of the renewal and specifications and plans for the new system are shown. The major aims were to reduce the turbulence of flow in the tunnel and renewal of out-of-date hardware. The specifications given ensured that the previous wind tunnel structures and concept were retained where possible. The proposed specifications are summarized. Chapter 4 describes the design of the new system performance. Items involving performance and utility are viewed from the client's perspective.

PART corresponds to Chapter 5 and describes the design concept and technical investigations of various issues concerning the renewal design including the design of the pressure control valve, the highpressure tubes, the chambers, test section and prinum chamber. These components are considered not only from an aerodynamical but also from a structural dynamical perspective.

PART consists of Chapters 6, 7 and four appendices, and Chapters 6 explains the measurement systems in the present facility. The measurement system for the tunnel is beyond the scope of the renewalproject, but an overview is necessary and included in this report. Chapter 7 describes the flutter examination plan for the future as settling. The four appendices assist in understanding the design routines of the present wind tunnel. These are Appendix ' Numerical Wind Tunnel Model '; Appendix ' Pressure loss in the high pressure tubes '; Appendix ' Method of feedforward control used in the new system ', and Appendix ' Calibration of pressure '.

The results of the work meant renovation of the flutter testing facility was made possible by improvements to flow quality and renewal of hardware to the extent that the new system performs as well as any modern wind tunnel in the world. The authors hope that this report will be of assistance to users and clients of the wind tunnel in the future.

Keywords: blowdown transonic wind tunnel, Renewal Transonic Flutter Testing Facility

* 平成 10 年 11 月 29 日受付 (received 29 November 1998)

* 1 構造研究部 (Structures Division)

* 2 元構造力学部 (before Structural Mechanics Division)

概 要

平成5年度から8年度にかけて行った航空宇宙技術研究所(以下「航技研」)の遷音速フラッタ試験設備の改修における風洞システム設計に関する報告である。第 部,第 部および第 部で構成され,都合7章からなる。

第 部は第1,2,3,4章から成る。改修前の旧設備の機能を概観し,新システムの機能設計について述べる。

まず,第2章では,1959年に設計された同設備の旧システムの概要を記す。新システムの設計に際し,機能向上を考えるに当たり基本となる項目を考察する。

第3章では,改修目的,計画と新システムに関する仕様を述べる。主たる目的は気流の低乱化対策と老朽化対策である。同システムの構造および形態を最大限に活かす方針で新システムに対する仕様を定めた。これらをまとめる。

第4章では,第3章を受け新システムの機能設計についてまとめる。主に,本設備のユ-ザ-の立場から見える機能および利便性に焦点をあてる。前章の概念設計に基づき新システムについての概要は本章に集約されている。

第 部は第5章のみである。新システムの設計,および技術検討について述べる。

第5章では,仕様に従って行った各部の基本設計および技術検討を記し,調圧弁の設計,高圧導管,集合胴,測定部,抽気室の流体力学および構造力学の立場からの技術検討および設計の概要を記す。

第 部は,第6章,第7章および4つのAppendixから成る。本設備の計測システムについての概略を示した後にまとめを述べる。さらに新システム設計時の参考資料および本設備での圧力較正に関する資料を添付する。

第6章では,計測システムについて記述する。今回の改修では,計測系は対象外であったが,本設備に関する報告としては欠かすことのできない項目である。

第7章ではまとめとして将来のフラッタ試験計画について述べる。さらに,付録として,主に第5章の技術検討,設計に関わる事項の理解を助ける意味で「数値風洞モデル」,「高圧導管の圧力損失の推定」,本設備の制御系に採用した「フィードフォワード演算法」および「圧力自動較正要領」についての技術検討結果を添付する。

本研究の結果,気流の低乱化および設備の老朽化対策を目的とした改修が実施され,機能面においても最新の風洞に匹敵する程の改善が加えられた。本研究の妥当性が実風洞試験においても証明される結果となった。

本報告が,将来にわたり設備使用者にとって有益な資料になることを希望する。

第6章 計測システムについて

6-1 計測装置(システム)

航技研遷音速フラッタ試験設備の計測関連装置は,昭和62年度に大幅な改修,更新を行い現在に至っている。今回(平成7~8年度かけて)の本設備改修(風洞本体および運転制御装置の改修)に伴う計測装置関連の改修は,風洞測定部プレナム室から制御室までの計測系信号ケーブルと中継端子盤およびシュリーレン装置の改修のみとした。よって図6-1-2に示す既存の計測装置は,更新後10年余りを経ているが,本装置の主要部分については今後とも暫くの間その必要性から使用し続けることになる。以下に既存の計測関連装置の構成全体とその機能および取り扱いについて説明する。

6-1-1 概 要

図6-1-1に本設備計測装置システム全体のブロック図を,図6-1-2にシステム全体の写真を示す。本装置の主たる役割は,通風時の集合胴総圧(P_0),集合胴温度(T_0),測定胴静圧(P_s)および大気圧(P_a)を計測し,これらの風洞実データからマッハ数をはじめとする測定胴内気流の諸量(動圧,気流速度,レイノルズ数等)を計算することにある。通常通風前には圧力変換器および計測系の較正を行う必要があり,このための附属装置として圧力較正装置を備えている。また,以上の風洞系計測装置とは別に風洞測定部に取り付けられた風試模型からのデータ(歪みゲージ等の波形信号)を同時に計測する模型系計測装置を有している。図6-1-3に計測装置および圧力較正装置の外観図を示す。この他,付帯設備としてビデオカメ

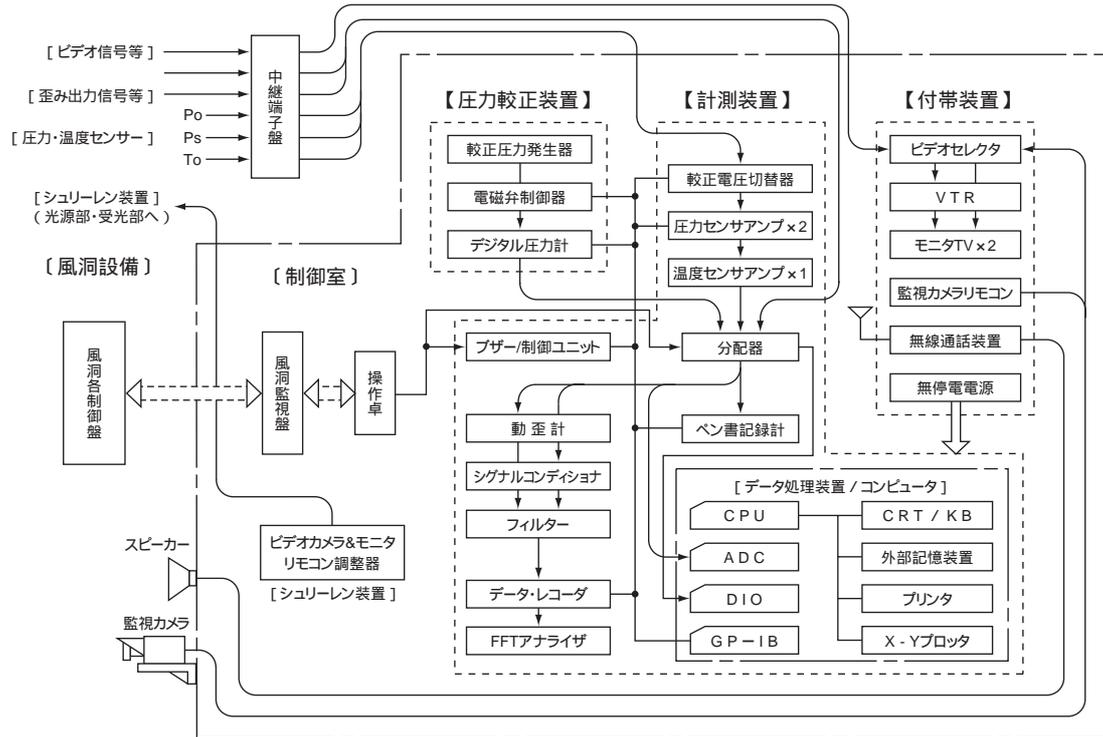


図 6-1-1 計測装置 (システム) ブロック図



図 6-1-2 計測装置 (システム) の全景写真

ラによる風洞監視装置, 風洞現場と制御室との連絡用双方向無線通話装置および無停電電源装置を装備している。また, その他の設備として模型周りの気流を観測するためのシュリーレン装置も備えている。次にこれら各装置の機能と性能 (仕様) の詳細について述べる。

6-1-2 風洞系計測装置

本装置の構成は, 風洞内気流を検出する各センサー

(圧力変換器×2, 温度変換器)と制御室内の計測装置(各センサーアンプ, 分配器等)および後述するデータ処理装置[A/D変換器, インターフェース(GPIB), 記憶装置等]からなる。このような一連(通風開始から停止まで)のデータ収集作業は, コンピュータ(GPIB制御)により自動的に進行。この間, センサーアンプからのアナログデータは分配器(分岐して他計測器へ出力可能)を通してマルチペンレコーダに記録される。図6-1-4に風洞系計

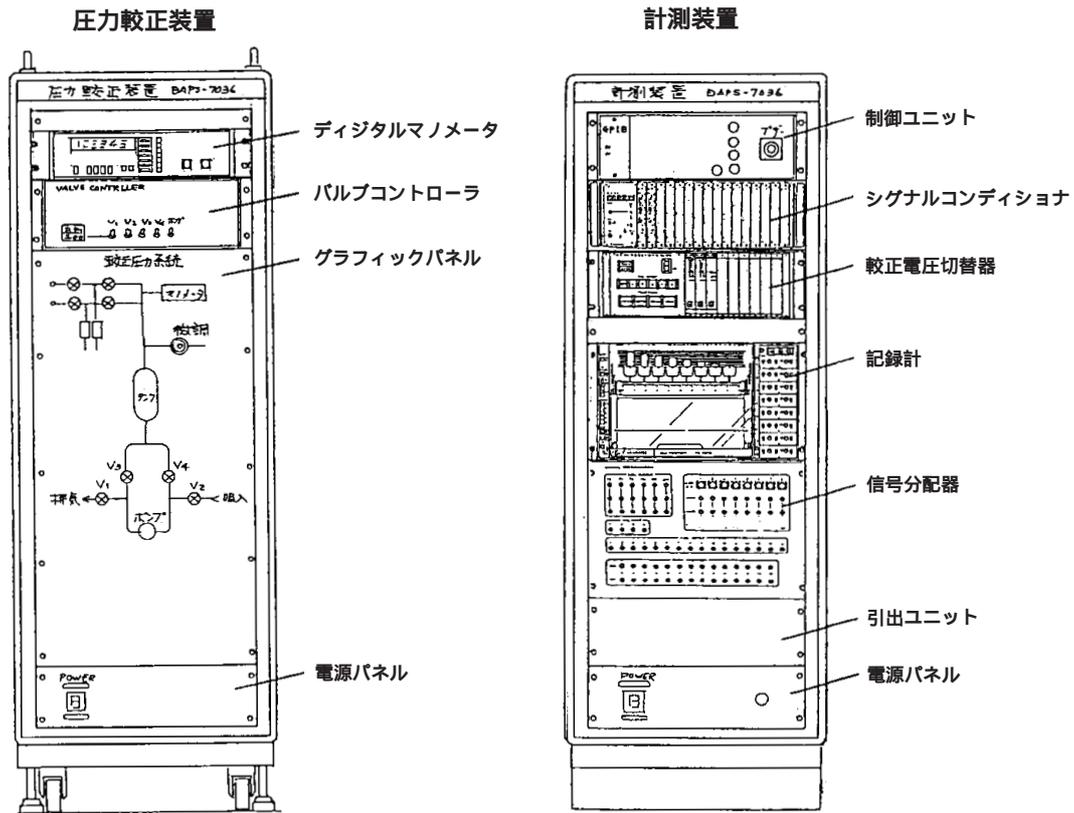


図 6-1-3 計測装置 & 圧力校正装置外観図

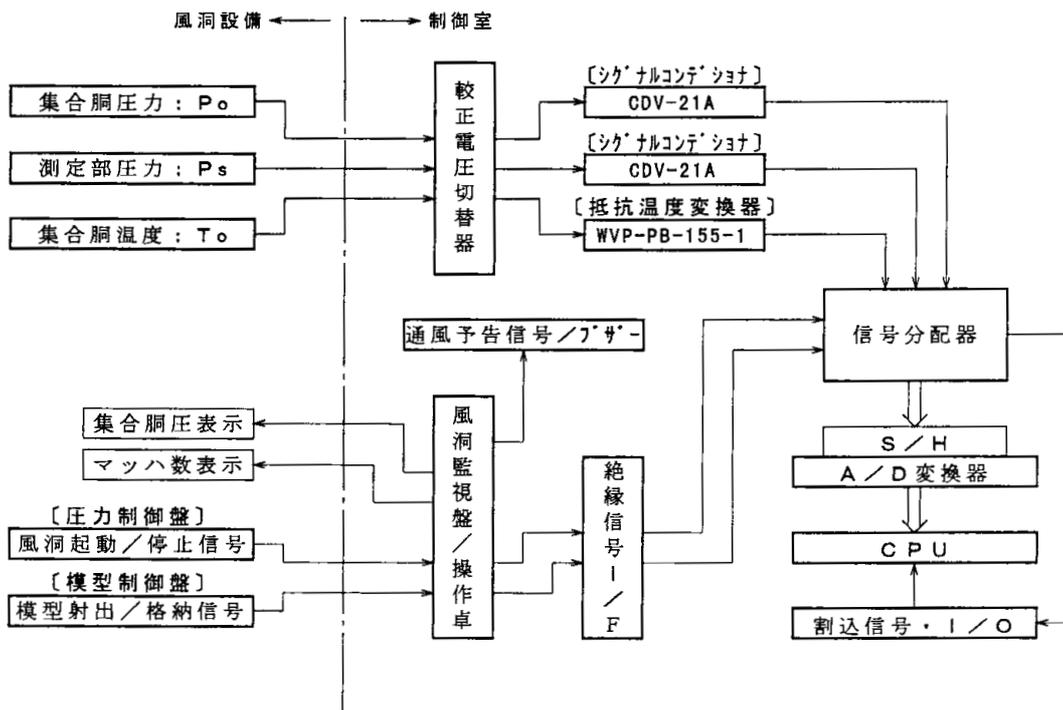


図 6-1-4 風洞系信号 (制御/圧力) 系統図

測信号の系統図を示し、以下に構成器機の仕様を示す。

(1) 圧力変換器(集合胴全圧用:1台,測定胴静圧用:1台)

型式/型名: PA-5KB (共和電業社製)

精度: 0.1% F.S.

測定範囲: 0 ~ 490 kPa abs

使用温度範囲: - 253 ~ 323 K

(2) 温度変換器(1台)

型式/型名

測温抵抗体: DAPS-7036 (共和電業社製)

精度: ± 0.3 % F.S.

測定範囲: - 223 ~ 323 K

応答速度: 313 K/sec

(3) マルチペン・レコーダー(1台)

型式/型名

位相同期型: MC-6800 (グラフテック社製)

チャンネル数: 4 (4色ファイバーペン)

記録幅: 250 mm (長さ: 15 m/ 折り畳み式)

記録紙送り速度: 7.5 ~ 1200 mm/min & hour

精度: ± 0.2 % F.S.

制 御: 自動 (GPIB リモートコントローラ

(IF-35)使用)

6-1-3 圧力変換器校正装置

本装置は、圧力校正装置盤内の校正用圧力(正負圧)発生器とデジタル圧力計および計測装置盤内の校正電圧切換器等で構成される(図 6-1-3 参照)。制御はデータ処理装置のコンピュータ(GPIB制御)により自動的(手動でも可)に行うことができる。図 6-1-5 に本装置の構成ブロック図を示す。

(1) 校正用圧力発生器

真空ポンプ,コンプレッサー,電磁切換弁等により,圧力センサーおよびデジタル圧力計に空気圧を送り込む。

使用圧力: - 49 ~ 392 kPa G

空気吐出量: 45 L/min

制 御: 自動 (GPIB) / 手動可

(2) デジタル圧力計

圧力発生器から送り込まれた空気圧を精度良く測定する。また,大気圧計として機能する。

型 名: DG-430K (東京航空計器社製)

測定範囲: 0 ~ 490 kPa abs

精 度: 0.01 % F.S.

制 御: 自動 (GPIB)

(3) 校正電圧切換器

各センサーの出力側に接続して疑似出力電圧を発生さ

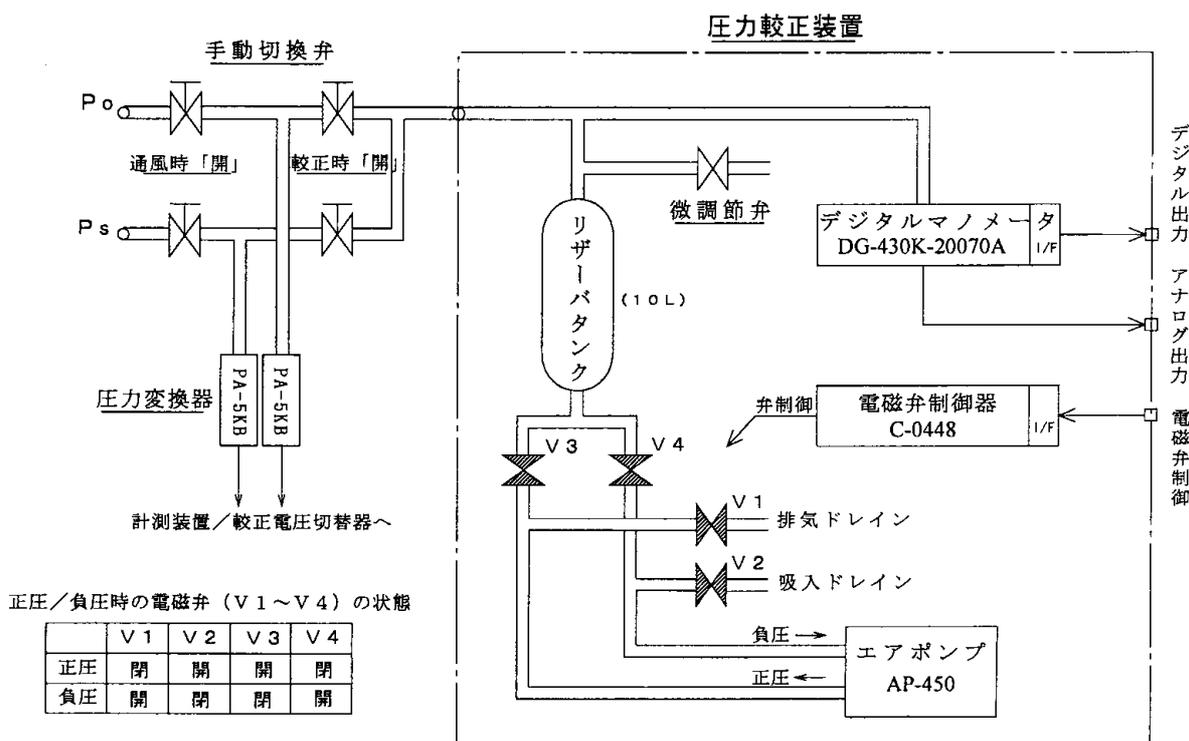


図 6-1-5 圧力校正装置構成ブロック図

せ計測系の感度を較正する。

チャンネル数 : 3 ch

機能 : + キャル , - キャル , ゼロ

キャレンジ : 6 レンジ (ゼロを含む)

精度 : 0.05 % F.S.

制御 : 自動 (GPIB) / 手動

びグラフ表示 , またはプリンタおよびプロッタに出力するシステムである。このような一連の処理作業はシステム運用プログラムにより一括して行われる。図6-1-6に本装置のシステム構成図を示す。

6-1-4 データ処理装置

本装置 (システム) は , コンピュータを使い通風開始から停止まで (60 秒間) のデータ収集作業 (A/D 変換) を GPIB 制御により自動的に行い , 通風後には , 収録されたデータの後処理としてマッハ数 , 動圧 , 気流速度等の各量を計算し , その値を CRT 画面にデジタル表示および

(1) コンピュータ (PC-9801・VX21)

(a) 本体 (CPU) :

16ビット / 80286 (80287 / 数値演算コプロセッサ搭載)

(b) 増設メモリ : 2 MB (メイン : 640 KB)

(c) ディスプレイ :

14 インチ (640 ドット × 400 ライン)

(d) 外部記憶装置 :

20 MB ハードディスク (カセットストーム付)

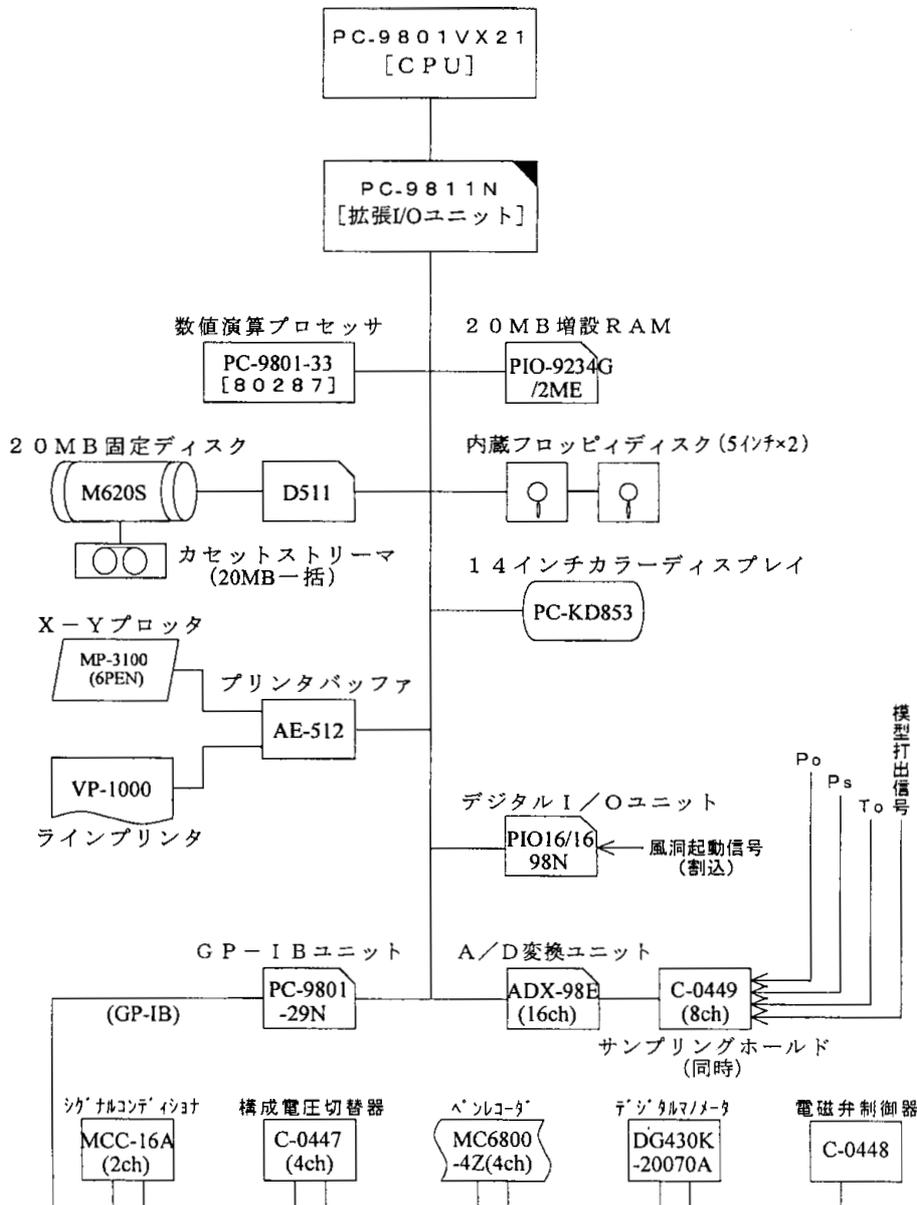


図 6-1-6 データ処理装置システム構成図

- (e) ドットプリンタ :
24 ピンドットマトリックス /136 桁
- (f) X - Y プロッタ :
6 ペン (6 色) /A3 サイズ (297 mm × 420 mm)

(2) I/O 拡張ユニット (インターフェース)

- (a) A/D 変換器 :
12 ビット /16 ch (シングルエンド)
- (b) サンプリング周波数 :
2 kHz (サンプリングホールド機能付)
- (c) GPIB :
コントロール / データ・バス制御
- (d) 入出力 (I/O) :
プザー, 風洞起動, 模型打出信号 (正極パルス)

(3) システムソフトウェア (運用プログラム)

本システムソフトは、基本ソフトにより本データ処理システム装置周辺器機の制御およびデータの高速処理等を行う。また、計測系を含めた全体をコンピュータ・システム化することにより効率的な管理運用を可能とした。図 6-1-7 に本システムのプログラム構成図を、図 6-1-8 にプログラム操作フローチャートを示す。

(a) 基本ソフト

- (i) 基本 OS :
MS-DOS & ユーティリティ
- (ii) プログラミング言語 :

BASIC コンパイラ, アセンブラ

(b) アプリケーションソフト

- (i) 運用プログラム :
圧力較正, 計測器機制御, データ収集 & 処理 (各諸量の計算・表示および出力)

(c) データ解析ソフトウェア

- (i) DADiSP (デイ・ディスプレイ / アストロデザイン社)
一般数学演算, 統計解析, スペクトル分析, フィルタリング, 行列演算等

6-2 模型系計測装置

模型系計測装置は、測定部プレナム室の翼模型等 (種々のセンサー) からの信号を中継端子盤を経由して制御室内計測装置内装の動歪計 (およびシグナルコンディショナ) の入力とし、その出力を入出力ターミナル (分配器) を通してデータレコーダ, FFT アナライザ等に分配して記録, 解析する装置である。下記にその仕様を示す。

(1) 中継端子盤

- (a) タジミコネクタ
入力端子 : 36 ch / 内 14 ch (風洞 / 抽気室より)
出力端子 : 36 ch / 内 20 ch (計測 / 制御室へ)
- (b) BNC
入力端子 : 28 ch / 内 11 ch (風洞 / 抽気室より)

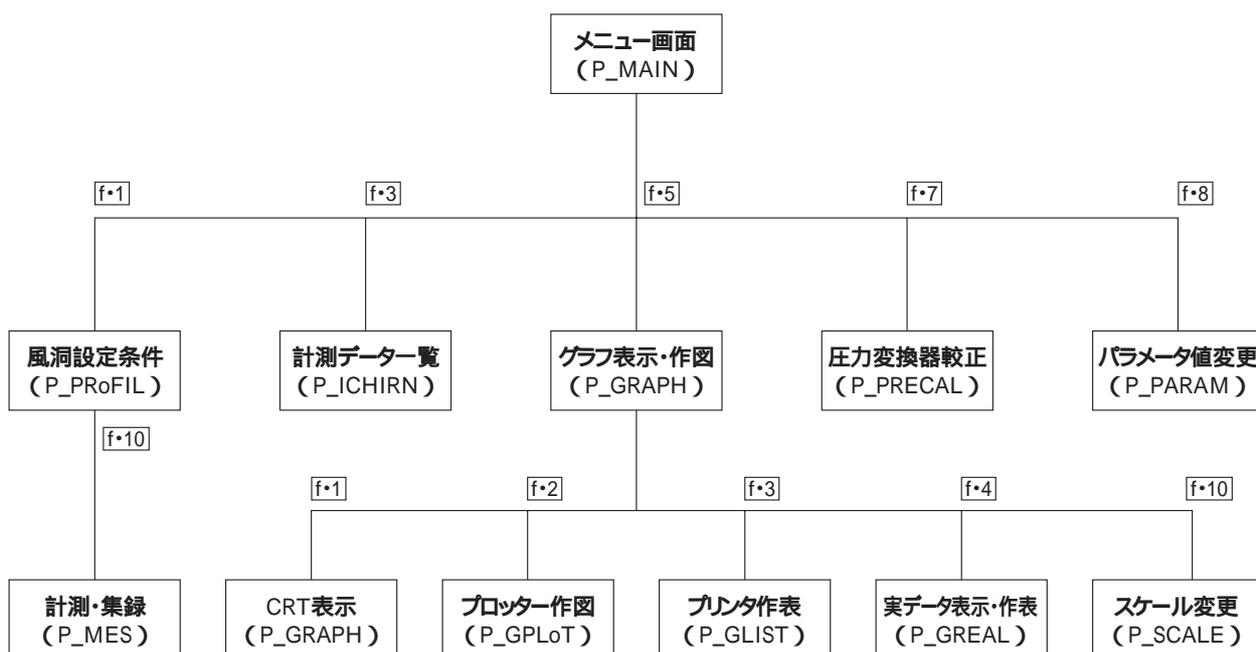


図 6-1-7 システムプログラム構成図

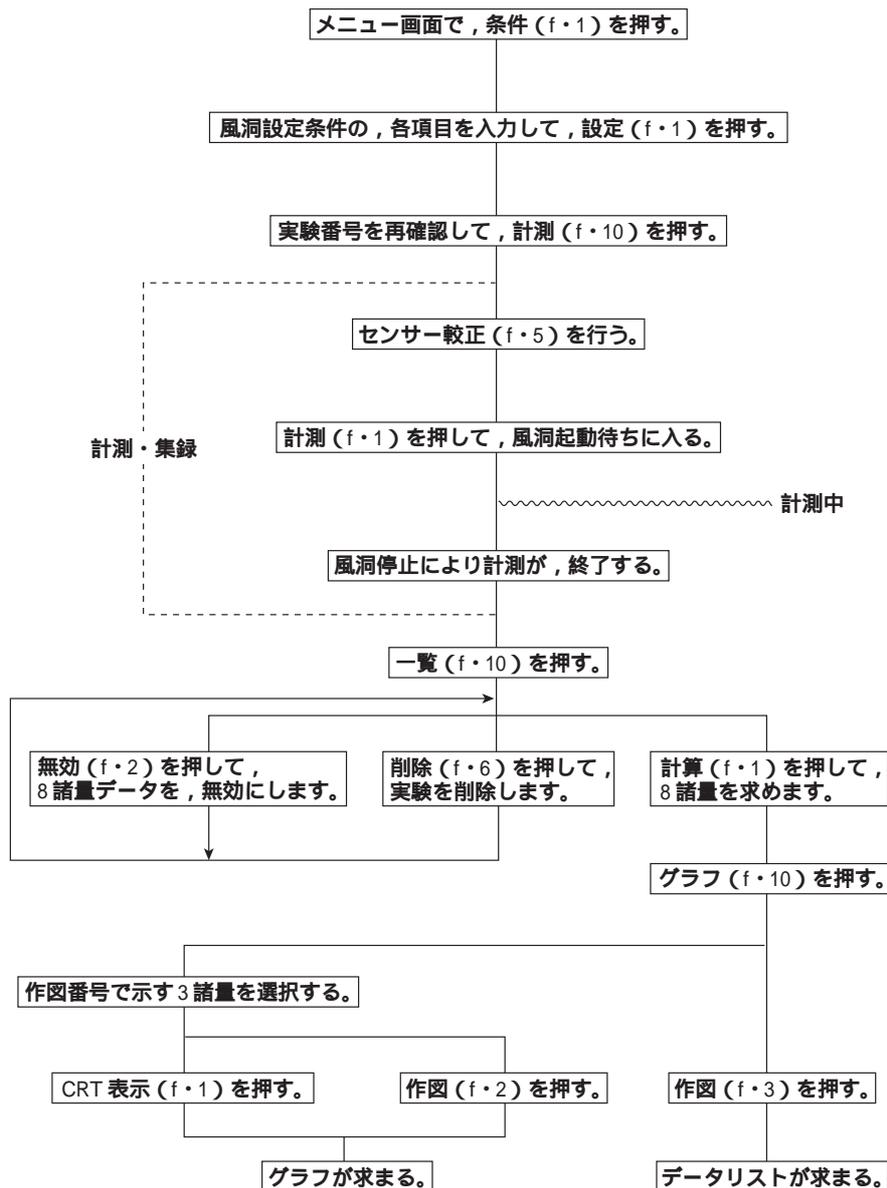


図 6-1-8 システムプログラム操作フローチャート

出力端子：28 ch / 内 20 ch (計測 / 制御室へ)

の記録 / 再生へ)

(2) 入出力ターミナル (信号分配器)

(a) 風洞信号系

信号出力：3 × 6 ch (BNC 端子：Po, Ps, To, Pa, 通風, 打出)

ADC 入力：16 ch (BNC 端子：AD 変換器へ)

記録計入力：4 ch (BNC 端子：4 ペンレコーダへ)

(b) 模型信号系

センサー出力：8 ch (タジミ端子：ブリッジボックス等より)

電圧入出力：2 × 8 ch (BNC 端子：動歪計出力 - 中継 - 他計器入力)

その他：14/14 ch (BNC 端子：データレコーダ

(3) 附属計測器機

計測装置の附属計測器として以下のものが装備されている。

(a) 動歪計 (MMC シリーズカード：4 台)

型名：DPM-21A (共和電業社製)

適用ゲージ抵抗：60 ~ 1000

ブリッジ電源：AC 2 Vrms

感度：10 × 10⁻⁶ ひずみ入力で 0.5 V 以上 (5 k 以上の負荷)

応答周波数範囲：10 ~ 5 kHz (ローパスフィルタ付)

(b) シグナルコンディショナ (MMC シリーズカード：4 台)

型名：CDV-21A (共和電業社製)

適用ブリッジ抵抗：120 ~ 1000

ブリッジ電源：DC2V および 10V (± 0.2 %) 定電圧

感 度：10 × 10⁶ ひずみ入力で 0.1 V 以上

(120 , B.V. 2 V 時)

応答周波数範囲：DC ~ 50 kHz (ローパスフィルタ付)

(c) ローパスフィルタ (MMC シリーズカード：4 台)

型 名：LFU-21A (共和電業製)

遮断周波数：1Hz ~ 16kHz の 64 段およびフラット

遮断周波数特性：fc (遮断周波数) 通過域との振幅比：

- 3 dB ± 1 dB 以内

(d) データレコーダ (2 台)

(i) 型 名：RTP-550 (共和電業社製)

チャンネル数：7 ch (ch 1 ~ ch 6：データ，

ch 7：データ / 音声切替使用)

記録方式：FM 変調

使用テープ：コンパクトカセット型計測用 (AS-C90)

テープ速度：1.19 ~ 38.1 cm/sec

(6 段可変 / 標準速：4.76 cm/sec)

周波数特性：DC ~ 10 kHz (最高速)，

DC ~ 1.25 kHz (標準速)

(ii) 型 名：DAT/RD-135T (ティアック社製)

記録方式：多重化 PCM によるアナログ入力

(出力：アナログ)

指定テープ：DAT 規格テープ (DM120(60 m)，

DM60(30 m))

量子化ビット数：16 ビット

記録データ長：量子化ビット数上位 14 ビット

テープ速度：8.15 mm/S (1 倍速)，

16.3 mm/S (2 倍速) / 切替

記録時間：1 倍速時 2 時間 (DM120)，

2 倍速時 1 時間 (DM60)

(e) FFT アナライザ (2 台)

(i) 型 名：CF-210 (小野測器社製)

入力チャンネル：2 ch

周波数分析レンジ：1 Hz ~ 40 kHz

メモリ機能：レコードメモリ：128 k バイト

(32 k ワード × 2 ch)

(ii) 型 名：CF-5220 (小野測器社製)

入力チャンネル：2 ch

周波数分析レンジ：0.01 Hz ~ 100 kHz

メモリ機能：レコードメモリ：512 k ワード × 2 ch

：ブロックメモリ：200 ブロック

(4 k バイト / ブロック)

：3.5 インチ FDD：1 基

(2 HD/MS-DOS フォーマット)

6-3 付帯設備 (その他)

この他，付帯装置として以下に示す装置が装備されている。

(1) 風洞・模型監視装置

風洞・模型監視装置は，テレビカメラにより風洞設備周辺の安全の確認，通風時の異常発見および模型の監察または記録等を行う装置である。

(a) ビデオ・カメラ (2 台 / 1 台は風洞監視用)

(b) 電動雲台 (風洞監視カメラ用)

(c) リモート操作器 (風洞監視カメラ用)

(d) ビデオ・オーディオセクタ (1 台)

(e) 録画再生器 / VTR (1 台)

(f) モニタ・テレビ (21 インチ・カラー：2 台)

(2) 無線通話装置

下記に示す親機と外部スピーカ等付属品，電源装置，および 4 台の子機からなり，制御室内の風洞運転者と制御室外現場作業者との連絡を双方向に行うことができる。

(a) 親機・基地局装置

(信和通信機製 / 型名：SC400NA：1 台)

チャンネル数：4 ch (屋外アンテナ，外部スピーカ，スタンドマイク付属)

(b) 電源装置 (信和通信機製 / 型名：SO984：1 台)

定格出力電圧 / 電流：DC 15 V / 1.7 A

(c) 子機 (ヘッドホン付属：4 台)

(3) 無停電電源

データ処理作業中に不意の停電が起きた場合，ハード (本装置) およびソフト (プログラム) の損傷を防ぐ。

形 名：YUMIC-1010

(湯浅電池社製)

電源容量：1 KVA

停電時保持時間：10 分

切り換え時間：無瞬断

(4) シュリーレン装置

シュリーレン装置は，模型周りの流れを観察する目的で下記に示す構成からなり，特徴は，光源部にキセノン・アークランプとストロボ・パルスランプの 2 種類の光源を備え，受光部にはビーム・スプリッタを用いて 2 台のカメラが同時に撮影できる。また，制御室に備えたコントローラ (& モニタ) によりカメラの微調整 (ズーム，アイリス等) の遠隔操作が可能である。(図 6-3-1 ~ 図 6-3-3 参照)

(a) 光源部架台 (1 式)

(i) キセノンアークランプ

出 力：1 kw

(ii) ストロボ・パルスランプ

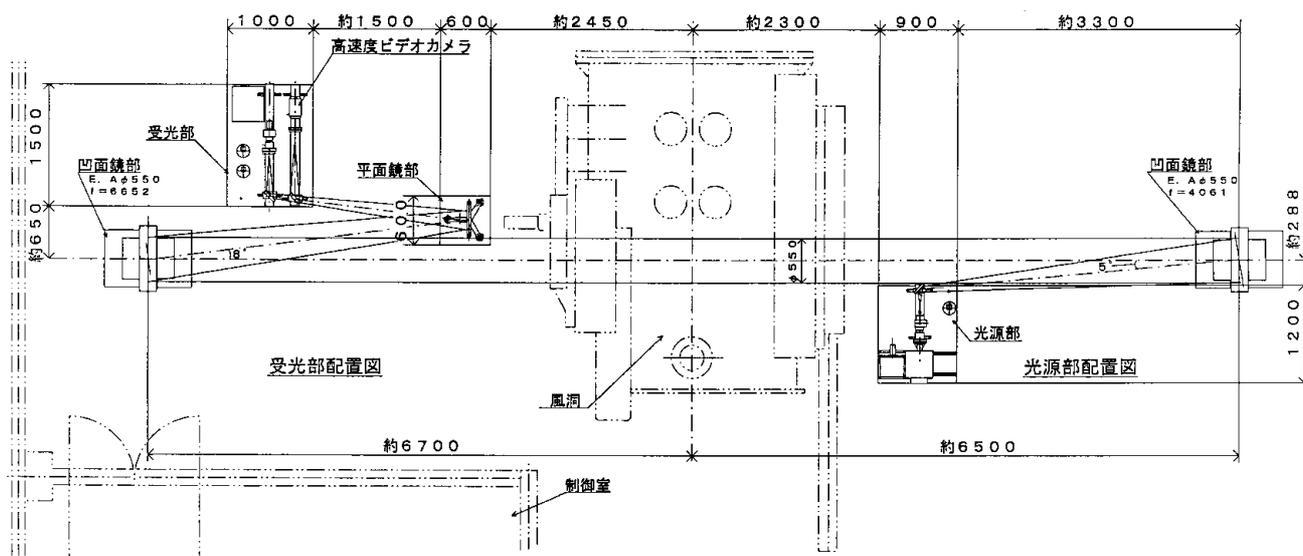


図 6-3-1 シュリーレン装置全体配置図

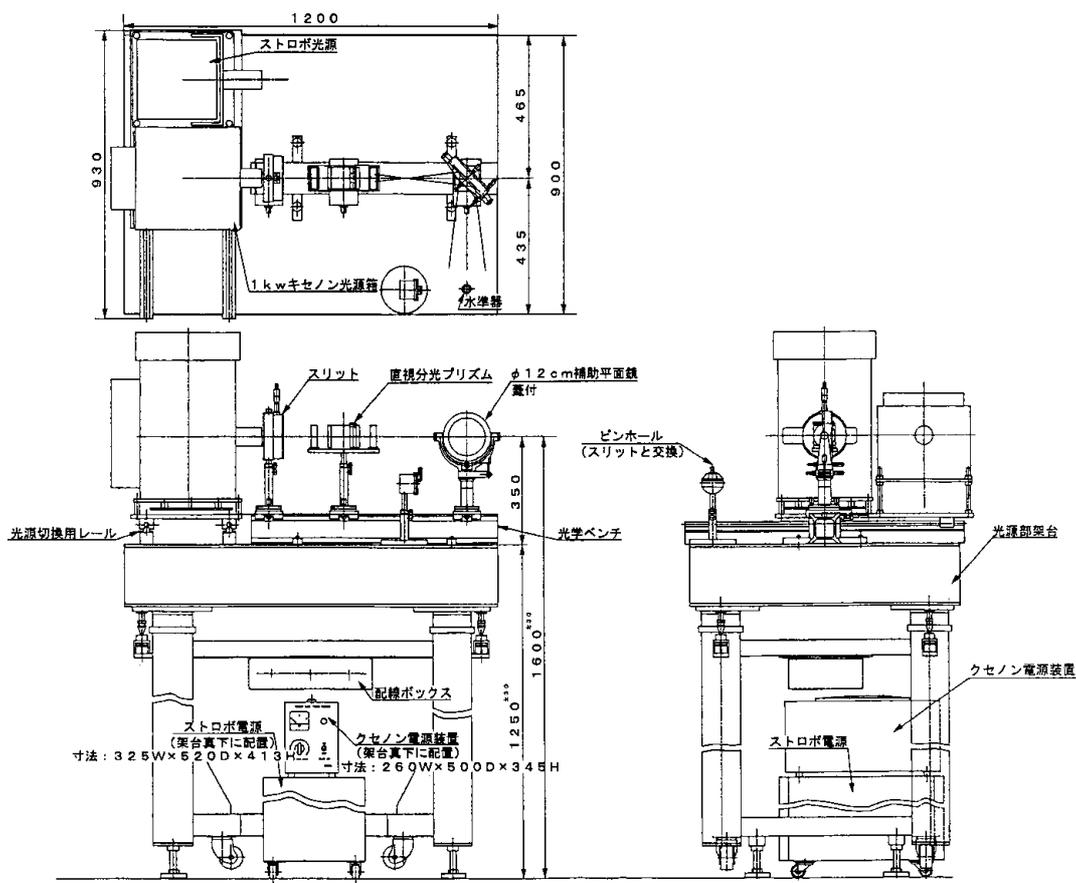


図 6-3-2 シュリーレン装置光源部

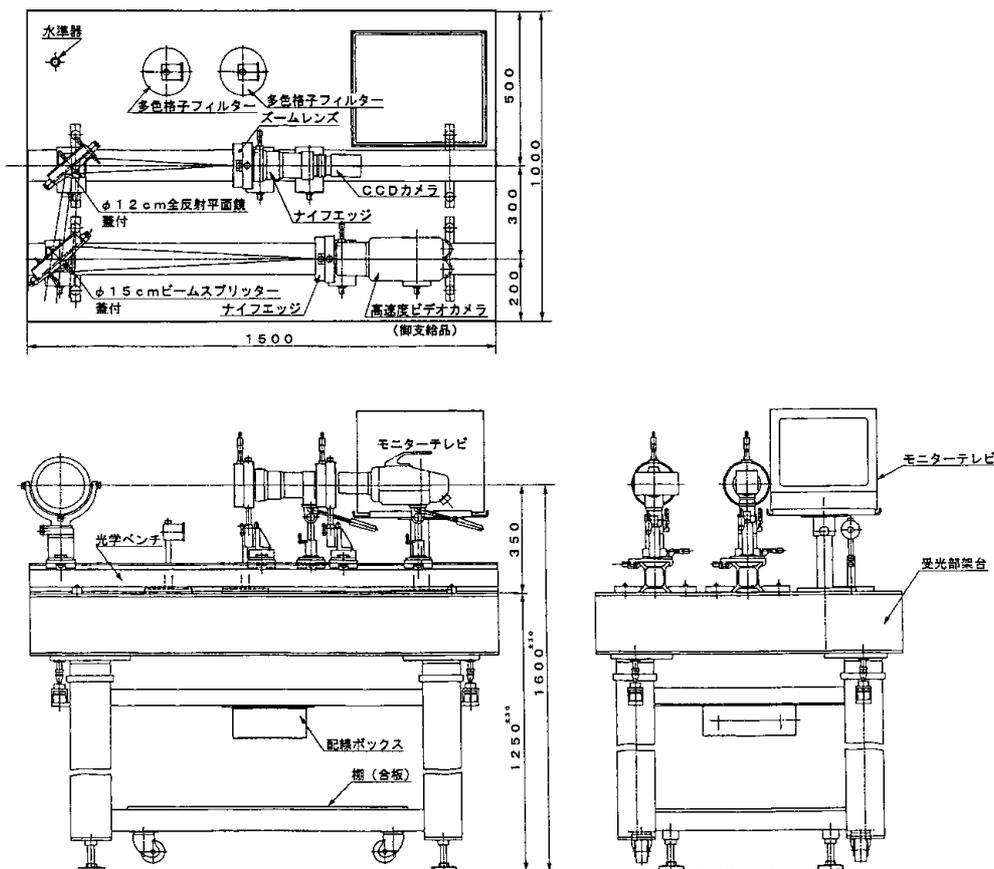


図 6-3-3 シュリーレン装置受光部

- 閃光時間 : 0.9 ~ 1.8 μ sec
- 閃光周波数 : 5 ~ 1500 Hz (5 レンジ切換え式)
- (iii) コリメータレンズ&コンデンサーレンズ
- (iv) ピンホール, スリット, 直視分光プリズム
- (v) 補助平面鏡 (有効径 : 120 mm, 1 台)
- (b) 受光部架台 (1 式)
 - (i) ビームスプリッター
 - 有効径 : 150 mm
 - 面精度 : 1/8 光波長
 - 表面処理 : アルミ半透明蒸着 (保護膜付)
 - (ii) 多色格子フィルター (2 組)
 - (iii) ナイフエッジ (2 組)
 - (iv) 全反射平面鏡 (有効径 : 120 mm, 1 台)
 - (v) ビデオカメラ (1 台)
 - 本体 : 3 CCD カラー (シャッター機能付)
 - レンズ : 50 mm ~ 286 mm ズーム (電動調整機能付)
 - (vi) コントロールユニット (カメラ調整・タイトル表示機能付 : 1 台)
 - (vii) ビデオデッキ (S-VHS 対応 : 1 台)
 - (viii) 14" カラーモニタ (2 台)

- (c) 凹面鏡 (2 面)
 - 有効径 : 550 mm
 - 表面処理 : アルミ蒸着 (保護膜付)
- (d) 平面鏡 (1 面)
 - 有効径 : 300 mm
 - 表面処理 : アルミ蒸着 (保護膜付)

第 7 章 おわりに

7-1 将来のフラッタ試験計画

航技研で、現在行われている空力弾性関連の研究の主たるものを列挙すると、

空力弾性テイラリングの研究

フラッタ抑制あるいは突風荷重軽減の能動制御の研究
サブクリティカル応答を用いたフラッタ限界値推定法の研究

HOPE のティップフィン形態のフラッタ特性の研究

2次元翼遷音速バスの研究等である。この内、従来フラッタ風洞で行われてきたのは、およびである。その他は遷音速風洞で試験が実施されている。使用風洞は試験の目的、風洞の機能、および性能から選択されるものであるが、本設備の改修後の、気流条件の制

御機能，気流の低乱度から，利用範囲は大幅に拡張されるものと考えられる。将来的には

振動翼の非定常空気の測定

3次元翼のバズの研究

振動翼まわりの可視化試験は可能である。現在，既に SSTアローウイング非定常空力測定等の空力弾性試験の本設備での試験が計画されている。本風洞の利用に関しては，測定部寸法(0.6m × 0.6m)の制約から模型の製作技術が重要な課題となり得る。

7-2 おわりに

以上，航技研における遷音速フラッタ風洞の改修の概要を示した。今後の空力弾性の分野の研究の活発化，航空宇宙機の国産機開発，同国際共同開発に向けて本設備の活用が期待される。当所の研究風洞としての使用のみならず，国内航空機メーカーからの本設備の使用を期待するところである。

最後に，本設備改修に当たっては多くの方々からご支援を頂いた。

まず，予算準備のためには，当所管理部企画室，同会計課の行政官の方々には並々ならぬご努力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

当時，構造力学部長であられた，戸田勲研究総務官，山根皓三郎（現航空機事故調査委員会委員）には，本設備改修計画に関しご指導頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

技術的には，川崎重工業（株）の岡村 徹氏，金山 孝氏，河合孝幸氏，森田 勇氏，竹内 俊氏，鹿島 宗氏には，当方の要求仕様を実現すべくご努力頂き大変お世話になった。さらに，設計・据え付け・調整では，機

械関連は川谷春海氏に，計装・制御関連は木村直人氏に特に熱心に作業遂行にご努力頂いた。また，現場の責任者として，石原 孟氏，藤本十三氏，池本土郎氏には作業期間，現場監督を遂行された。そしてまた，計装では大藤工業商事（株）の江本 弘氏に，機械の据え付けには大阪動力工業（株）の徳井 剛氏と吉村文雄氏に，制御のプログラムの製作では金陵製作所（株）の林 利文氏にお世話になった。ここに記して感謝の意を表します。川崎重工業（株）営業部，釘宮博文氏には，本改修計画終始にわたり，予算調整，技術情報提供にご努力頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

この報告執筆にあたり，元構造物材料 朝田洋雄領域長からは，原稿に関し緩急自在の叱咤督促があった。刊行の契機，動機を与えて頂いたことに関し，深く感謝するとともにその強力な指導力に畏敬する。

参考文献

- (1) 三輪等；「二次元風洞構成要素の研究（III）」集合胴圧力制御のデジタルシミュレーション，航空宇宙技術研究所報告 TR-597(1984)，PP.1-16
- (2) 日本機械学会編；技術資料「管路・ダクトの流体抵抗」(1979)，PP.53-95，日本機械学会

Appendix

数値風洞モデル（亜音速）¹⁾

1. 仮定

風洞の制御アルゴリズム検証用であることをふまえて下記の仮定の基に数値モデルを作成する。

貯気槽，高圧導管，集合胴，プレナム室内部の流れは一樣であるとして，集中定数系として作成する。

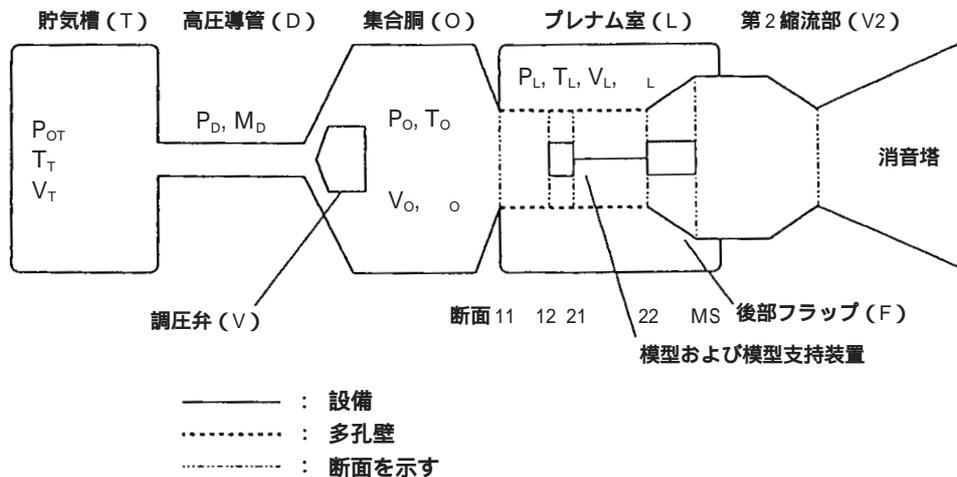


図 A1-1 風洞の構造

他の部分については、通風方向を軸とする一次元流れとして作成する。

風洞の構造を、図 A1-1 の如く簡略化する。

前部フラップは0度で固定とする。(後部フラップのみモデル化する。)

2. 記号

2-1 一般

: 空気の比熱比

R : 気体定数 [J/(kg・K)]

n : ポリトロープ指数

2-2 貯気槽関係

P_T : 圧力

T_T : 温度

V_T : 貯気槽容積

P_{Ti} : 初期圧 (全圧)

T_{Ti} : 初期温度 (全温)

2-3 高压導管

P_D : 圧力

P_{0D} : 全圧

T_D : 温度

T_{0D} : 全温度

A_D : 断面積

M_D : マッハ数

ρ_D : 空気の密度

u_D : 流速

K_D : 高压導管圧力損失係数

P_{Dl} : 圧力損失

2-4 調圧弁関係

A_V : 調圧弁開口面積

A_{Vmax} : 調圧弁最大開口面積

C_{WV} : 流量係数

G_V : 質量流量

S_V : 調圧弁シリンダーストローク

S_{Vmax} : 最大シリンダーストローク

2-5 集合胴関係

P_0 : 圧力 (全圧)

T_0 : 温度

V_0 : 容積

2-6 第1縮流部関係

A_n : 縮流部断面積

G_n : 質量流量

2-7 測定部関係

2-7-1 断面 11 関係

A_{11} : 断面積

P_{01} : 全圧

P_1 : 静圧

T_1 : 温度

M_1 : マッハ数

G_{11} : 質量流量

2-7-2 断面 12 関係

A_{12} : 断面積

G_{12} : 質量流量

2-7-3 断面 21 関係

A_{21} : 断面積

P_{02} : 全圧

P_2 : 静圧

T_2 : 温度

M_2 : マッハ数

G_{21} : 質量流量

2-7-4 断面 MS 関係

A_{MS} : 断面積

P_{0MS} : 全圧

P_{MS} : 静圧

T_{MS} : 温度

M_{MS} : マッハ数

G_{MS} : 質量流量

2-7-5 模型及び模型支持装置関係

A_{mod} : 模型断面積

A_{ST} : 模型支持装置断面積

C_{dmd} : 模型抗力係数

C_{dst} : 模型支持装置抗力係数

2-7-6 多孔壁関係

w : 壁面損失係数

A_{w1} : 測定部上流多孔壁面積 (断面 11 ~ 12)

A_{w2} : 測定部下流多孔壁面積 (断面 21 ~ 22)

R_w : 壁開口率

G_{w1} : 測定部上流側壁通過質量流量

G_{w2} : 測定部下流側壁通過質量流量

G_{w1c} : 測定部上流側壁チヨーク質量流量

G_{w2c} : 測定部下流側壁チヨーク質量流量

C_w : 流量係数

2-7-7 模型廻り関係

P_{OME} : 全圧
 P_{ME} : 静圧
 T_{ME} : 温度
 M_{ME} : マッハ数

$$M_D = \sqrt{\frac{RT_D}{A_D P_D}} \frac{G_V}{A_D P_D} \quad (3-2-5)$$

$$P_{0D} = P_T - \frac{P_D}{2} = P_T - \frac{\rho_D u_D^2}{2} \\ = P_T - \frac{1.619}{2} \frac{RT_D}{A_D^2 P_D} G_V^2 \quad (3-2-6)$$

2-7-8 第2縮流部関係

A_{V2} : 第2縮流部断面積
 S_{V2} : スロートノズル移動量
 P_E : 圧力 (大気圧)
 G_{V2} : 質量流量

3-3 調圧弁

P_{0D}/P_D 1.8929 の場合 (音速)

$$G_V = C_W A_V P_{0D} \sqrt{\frac{RT_{0D}}{RT_D} \left[\frac{2}{+1} \right]^{+1}} \quad (3-3-1)$$

$P_{0D}/P_D < 1.8929$ の場合 (亜音速)

$$G_V = C_W A_V P_{0D} \sqrt{\frac{1}{RT_{0D}} \frac{2}{-1} \left[\left[\frac{P_0}{P_{0D}} \right]^2 - \left[\frac{P_0}{P_{0D}} \right]^{+1} \right]} \quad (3-3-2)$$

2-7-9 プレナム室関係

P_L : 静圧
 T_L : 温度
 V_L : 容積
 : 温度回復係数
 M_L : プレナムマッハ数

3-4 集合胴

$$\frac{dP_0}{dt} = \frac{RT_0}{V_0} (G_V - G_n) \quad (3-4-1)$$

2-7-10 後部フラップ関係

A_F : 開口面積
 F : フラップ角度
 C_{F1} : フラップ流量係数 ($P_L > P_{MS}$)
 C_{F2} : フラップ流量係数 ($P_L < P_{MS}$)

3-5 測定部及び模型支持装置部での全圧損失

$$P_{01} = P_0 \quad (3-5-1)$$

$$P_{02} = P_{01} e^{-2 M_1^2 [C_{and} \frac{A_{mod}}{A_{12}} + w]} \quad (3-5-2)$$

$$P_{0MS} = P_{02} e^{-2 M_2^2 C_{and} \frac{A_{ST}}{A_{22}}} \quad (3-5-3)$$

3. 数式モデル

3-1 貯気槽

貯気槽内の状態変化は、ポリトロプ変化とする。

貯気槽の圧力変化

$$\frac{dP_T}{dt} = - \frac{nRT_T}{V_T} \left[\frac{P_T}{P_{Ti}} \right]^{n-1} \cdot G_V \quad (3-1-1)$$

貯気槽温度

$$T_T = T_{Ti} \left[\frac{P_T}{P_{Ti}} \right]^{n-1} \quad (3-1-2)$$

3-2 高圧導管

高圧導管内の状態は、下式にて表せるものとする。

$$T_D = T_{0D} \left[1 + \frac{k-1}{2} M_D^2 \right]^{-1} \quad (3-2-1)$$

$$P_D = P_{0D} \left[1 + \frac{k-1}{2} M_D^2 \right]^{-1} \quad (3-2-2)$$

$$\rho_D = \frac{P_D}{RT_D} \quad (3-2-3)$$

$$u_D = \frac{G_V}{A_D \rho_D} \quad (3-2-4)$$

3-6 測定部特性

$$P_1 = P_{01} \left[1 + \frac{k-1}{2} M_1^2 \right]^{-1} \quad (3-6-1)$$

$$T_1 = T_0 \left[1 + \frac{k-1}{2} M_1^2 \right]^{-1} \quad (3-6-2)$$

$$\rho_1 = \frac{P_1}{RT_1} \quad (3-6-3)$$

$$u_1 = \frac{G_{12}}{A_{12} \rho_1} \quad (3-6-4)$$

$$M_1 = \frac{u_1}{\sqrt{RT_1}} = \frac{G_{12}}{A_{12} P_1} \sqrt{RT_1} \quad (3-6-5)$$

$$P_2 = P_{02} \left[1 + \frac{k-1}{2} M_2^2 \right]^{-1} \quad (3-6-6)$$

$$T_2 = T_0 \left[1 + \frac{k-1}{2} M_2^2 \right]^{-1} \quad (3-6-7)$$

$$\rho_2 = \frac{P_2}{RT_2} \quad (3-6-8)$$

$$u_2 = \frac{G_{22}}{A_{22} \rho_2} \quad (3-6-9)$$

$$M_2 = \frac{u_2}{\sqrt{RT_2}} = \frac{G_{22}}{A_{22} P_2} \sqrt{RT_2} \quad (3-6-10)$$

3-7 測定部代表特性（模型廻りの特性）

$$P_{ME} = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (3-7-1)$$

$$T_{ME} = T_0 \left[1 + \frac{k-1}{2} M_{ME}^2 \right]^{-1} \quad (3-7-2)$$

$$M_{ME} = \sqrt{\frac{2}{-1} \left[\left[\frac{P_{ME}}{P_0} \right]^{-1} - 1 \right]} \quad (3-7-3)$$

3-8 模型支持装置部（後方区間）

$$P_{MS} = P_{OMS} \left[1 + \frac{k-1}{2} M_{MS}^2 \right]^{-1} \quad (3-8-1)$$

$$T_{MS} = T_0 \left[1 + \frac{k-1}{2} M_{MS}^2 \right]^{-1} \quad (3-8-2)$$

$$M_{MS} = \frac{P_{MS}}{RT_{MS}} \quad (3-8-3)$$

$$u_{MS} = \frac{G_{V2}}{A_{MS} M_{MS1}} \quad (3-8-4)$$

$P_{OMS}/P_E < 1.8929$ の場合（亜音速）

$$M_{MS} = \frac{u_{MS}}{\sqrt{RT_{MS}}} = \frac{G_{V2}}{A_{MS} P_{MS}} \sqrt{RT_{MS}} \quad (3-8-5)$$

$P_{OMS}/P_E > 1.8929$ の場合（音速）

$$\frac{A_{MS}}{A_{V2}} = \frac{1}{M_{MS}} \left[\frac{2}{k+1} \left[1 + \frac{k-1}{2} M_{MS}^2 \right] \right]^{2(k-1)} \quad (3-8-6)$$

3-9 第1縮流部

$P_0/P_1 > 1.8929$ の場合（音速）

$$G_n = A_n P_0 \sqrt{RT_0 \left[\frac{2}{+1} \right]^{-1}} \quad (3-9-1)$$

$P_0/P_1 < 1.8929$ の場合（亜音速）

$$G_n = A_n P_0 \sqrt{\frac{1}{RT_0} \left[\frac{2}{-1} \left[\left[\frac{P_1}{P_0} \right]^2 - \left[\frac{P_1}{P_0} \right] \right]^{-1} \right]} \quad (3-9-2)$$

3-10 測定部上流側壁流量

$P_1/P_L > 1.8929$ の場合

$$G_{W1} = w A_{W1} R_W P_1 \sqrt{RT_0 \left[\frac{2}{+1} \right]^{-1}} \quad (3-10-1)$$

$P_L/P_1 > 1.8929$ の場合

$$G_{W1} = - w A_{W1} R_W P_L \sqrt{RT_0 \left[\frac{2}{+1} \right]^{-1}} \quad (3-10-2)$$

$1 < P_1/P_L < 1.8929$ の場合

$$G_{W1} = w A_{W1} R_W \sqrt{\frac{2}{RT_L} P_1 (P_1 - P_L)} \quad (3-10-3)$$

$1 < P_L/P_1 < 1.8929$ の場合

$$G_{W1} = - w A_{W1} R_W \sqrt{\frac{2}{RT_L} P_L (P_L - P_1)} \quad (3-10-4)$$

但し、式(3-10-3)および(3-10-4)から得られる G_{W1} は、式(3-10-1)の G_{W1} を上限とし式(3-10-2)の G_{W1} を下限とする。

3-11 測定部下流側壁流量

$P_2/P_L > 1.8929$ の場合

$$G_{W2} = w A_{W2} R_W P_2 \sqrt{RT_0 \left[\frac{2}{+1} \right]^{-1}} \quad (3-11-1)$$

$P_L/P_2 > 1.8929$ の場合

$$G_{W2} = - w A_{W2} R_W P_L \sqrt{RT_0 \left[\frac{2}{+1} \right]^{-1}} \quad (3-11-2)$$

$1 < P_2/P_L < 1.8929$ の場合

$$G_{W2} = w A_{W2} R_W \sqrt{\frac{2}{RT_L} P_2 (P_2 - P_L)} \quad (3-11-3)$$

$1 < P_L/P_2 < 1.8929$ の場合

$$G_{W2} = - w A_{W2} R_W \sqrt{\frac{2}{RT_L} P_L (P_L - P_2)} \quad (3-11-4)$$

但し、式(3-11-3)および(3-11-4)から得られる G_{W2} は、式(3-11-1)の G_{W2} を上限とし式(3-11-2)の G_{W2} を下限とする。

3-12 第2縮流部

$P_{OMS}/P_E > 1.8929$ の場合

$$G_{V2} = A_{V2} P_{OMS} \sqrt{RT_0 \left[\frac{2}{+1} \right]^{-1}} \quad (3-12-1)$$

$P_{OMS}/P_E < 1.8929$ の場合

$$G_{V2} = A_{V2} P_{OMS} \sqrt{\frac{1}{RT_0} \left[\frac{2}{-1} \left[\left[\frac{P_E}{P_{OMS}} \right]^2 - \left[\frac{P_E}{P_{OMS}} \right] \right]^{-1} \right]} \quad (3-12-2)$$

3-13 プレナム室

プレナム室圧力変化

$$\frac{dP_L}{dt} = \frac{RT_L}{V_L} (G_{W1} + G_{W2} + G_F) \quad (3-13-1)$$

プレナム室温度

$$T_L = T_0 \quad (3-13-2)$$

プレナムマッハ数

$$\frac{P_0 - P_L}{P_0} = 1 - \left(1 + \frac{k-1}{2} M_L^2 \right)^{-1} \quad (3-13-3)$$

3-14 後部フラップ

$P_L > P_{MS}$ の場合

$$G_F = C_{F1} A_F \sqrt{\frac{2}{RT_L} P_L (P_L - P_{MS})} \quad (3-14-1)$$

$P_L < P_{MS}$ の場合

$$G_F = - C_{F2} A_F \sqrt{\frac{2}{RT_{MS}} P_{MS} (P_{MS} - P_L)} \quad (3-14-2)$$

3-15 主風路流量

図A1-2に示す測定部とその前後の各断面を通過する流量は、連続の式として式(3-15-1)から(3-15-6)で表される。

$$G_{MS} = G_{V2} \quad (3-15-1)$$

$$G_{22} = G_{V2} + G_F \quad (3-15-2)$$

$$G_{21} = G_{22} + G_{W2} \quad (3-15-3)$$

$$G_{12} = G_{21} \quad (3-15-4)$$

$$G_{11} = G_{21} + G_{W1} \quad (3-15-5)$$

$$G_n = G_{11} \quad (3-15-6)$$

3-16 調圧弁開度特性

調圧弁ストロークと開口面積の関係は (3-16-1)式で表される。(3-16-1)式は、調圧弁開度特性を多項近似したものである。

$$\frac{A_V}{A_{Vmax}} = a_7 X^7 + a_6 X^6 + a_5 X^5 + \dots + a_1 X \quad (3-16-1)$$

ここで

$$X = \frac{S_V}{S_{Vmax}}$$

$$a_7 = 8.147272$$

$$a_6 = - 34.63126$$

$$a_5 = 58.89026$$

$$a_4 = - 50.83916$$

$$a_3 = 23.09126$$

$$a_2 = - 4.811763$$

$$a_1 = 1.153388$$

3-17 第2縮流部開口面積

第2縮流部ストロークと開口面積の関係は (3-17-1)式で表される。

$$A_{V2} = 0.85 \times \left(0.6 - \frac{2}{100} S_{V2}\right) \times 10^4 [cm^2] \quad (3-17-1)$$

3-18 後部フラップ開口面積

フラップの角度と開口面積の関係は (3-18-1)式で表される。

$$A_F = \left(0.0583 + 0.6 \sin \frac{F}{2}\right) 10^4 [cm^2] \quad (3-18-1)$$

3-19 定数計算 (亜音速編)

シミュレーションに必要な定数を風洞の構造や通風条件より算出した結果を、表A1-1と表A1-2に示す。

Appendix

高压導管の圧力損失

1. 高压導管の圧力損失の推算

ここでは圧力損失を以下のように推算した。図A2-1に示すような配管系において、圧力条件より、

$$P_{T1} = P_{oD} + \frac{1}{2} \rho_D u_D^2 + \frac{1}{2} \rho_1 u_1^2 \quad (1-1)$$

$$P_{T2} = P_{oD} + \frac{1}{2} \rho_D u_D^2 + \frac{1}{2} \rho_2 u_2^2 \quad (1-2)$$

貯気槽圧力を2ヶある貯気槽の平均値をとると、

$$P_T = \frac{P_{T1} + P_{T2}}{2} \quad (1-3)$$

(1-1)式 + (1-2)式、及び(1-3)式より

$$P_T - P_{oD} = \frac{1}{2} \rho_D u_D^2 + \frac{1}{4} \rho_1 u_1^2 + \frac{1}{4} \rho_2 u_2^2 \quad (1-4)$$

各管路内の密度を一定とし、次式で考える等価圧力損失係数 eq を考えると

$$P_T - P_{oD} = \frac{1}{2} eq \rho_D u_D^2 \quad (1-5)$$

ここに、

$$eq = \rho_D + \frac{1}{2} \rho_1 \left[\frac{u_1}{u_D} \right]^2 + \frac{1}{2} \rho_2 \left[\frac{u_2}{u_D} \right]^2 \quad (1-6)$$

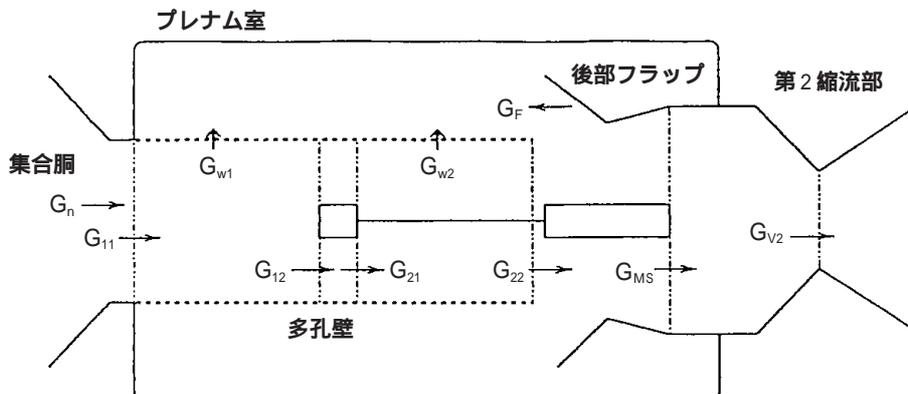


図 A1-2 プレナム室内の流れ関係図

表 A1-1 定数計算結果 (1/2)

定数名称	記号	数値	備考
気体定数	R	29.27	
ポリトロップ指数	n	1.07	
比熱比	κ	1.4	
貯気槽容量	V_T	#3 905 #4 1150	m ³
高压導管断面積	A_D	0.384845	m ² , ϕ 700
高压導管圧力損失係数	ζ_D	1.619	
集合胴容積	V_0	25.707	m ³
第 1 縮流部断面積	A_n	0.36	m ²
調圧弁流量係数	C_W	0.84	$P_{0D} / P_0 \geq 1.8929$
プレナム室容積	V_L	20.075	m ³ 測定部除く
測定部上流主風路断面積	A_{11}	0.36	m ²
模型支持装置部断面積	A_{MS}	0.51	A_{ST} 含む 0.85×0.6
模型断面積	A_{mod}	0.0072	$A_{mod} / A_{11} = 2\%$
模型支持装置断面積	A_{ST}	0.05425	m ² , 0.059×0.75+0.1×0.1
測定部上流多孔壁面積	A_{W1}	0.312	m ² , 0.6×1.3×0.2×2 (R_W 考慮)
測定部下流多孔壁面積	A_{W2}	0.118	m ² , 0.6×0.492×0.2×2 (R_W 考慮)
模型抗力係数	C_{cmd}	1.0	
模型支持装置抗力係数	C_{dst}	0.5	
壁面損失係数	ζ_W	0.02	
測定部断面の 1 辺の基準長さ	1	0.6	m

表 A1-2 定数計算結果 (2/2)

定数名称	記号	数値	備考
11 断面～12 断面間距離	L_1	1.3	m
11 断面～22 断面間距離	L_2	1.95	m
測定部側壁傾斜	θ	0～0.5	
境界層基準傾斜	λ	0.002	
12 断面換算の境界層吸収効果係数	η_1	1.0	
22 断面換算の境界層吸収効果係数	η_2	1.0	
MS 断面での流量比による面積補正係数	η_{MS}	1.0	
壁開口率	R_W	0.2	上下壁のみ
多孔壁流量係数	ε_W	0.8	
プレナム室温度回復係数	η	0.98	

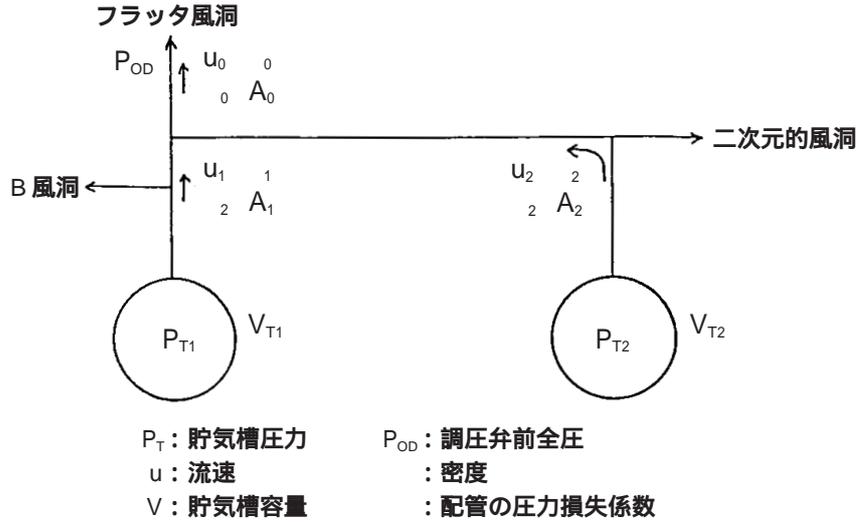


図 A2-1 高圧導管経路 (1)

で表され、各管路の圧力損失係数と流速比で e_q を求めることができる。
 流速比は次のようにして求める。

(貯気槽から流出する空気量) (貯気槽容積), 及び
 = 一定より,
 A = 管路断面積とすれば

$$\frac{A_1 u_1}{V_{T1}} = \frac{A_2 u_2}{V_{T2}} \quad (1-7)$$

又、連続の式より

$$A_1 u_1 + A_2 u_2 = A_D u_D \quad (1-8)$$

式(1-7) (1-8)より

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{A_D}{A_1} \frac{V_{T1}}{V_{T1} + V_{T2}} \\ u_D &= \frac{A_D}{A_2} \frac{V_{T2}}{V_{T1} + V_{T2}} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

数値を代入して、

$$\begin{aligned} A_D = A_1 = A_2 &= \frac{1}{4} \times 0.7^2 \\ V_{T1} &= 1,150 \text{ m}^3 (13 \text{ m}) \\ V_{T2} &= 905 \text{ m}^3 (12 \text{ m}) \end{aligned}$$

$$u_1 = \frac{1,150}{1,150 + 905} = 0.560$$

$$u_D = \frac{905}{1,150 + 905} = 0.440$$

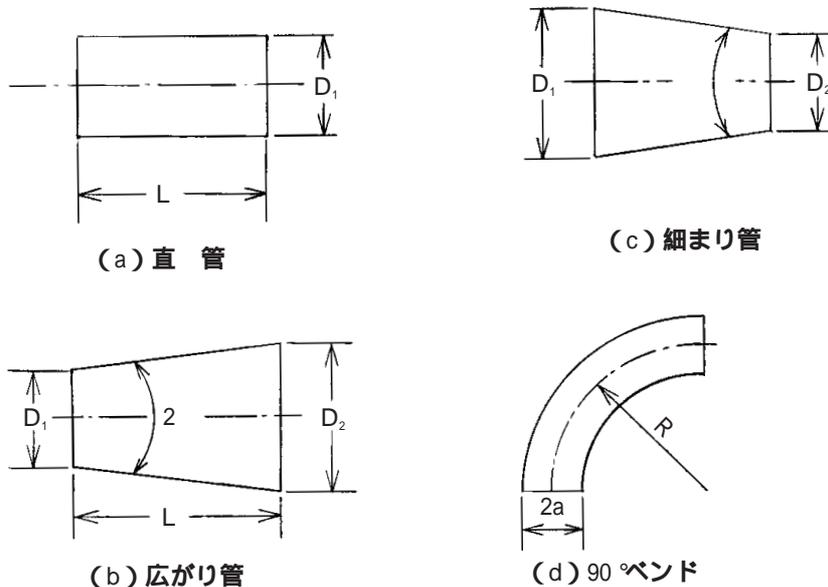


図 A2-2 管路の要素

従って (1-6) 式の等価圧力損失係数 e_q は

$$e_q = \frac{L}{D} + 0.157 \frac{D_2}{D_1} + 0.0968 \frac{D_2}{D_1} \quad (1-10)$$

となる。

2. 管路要素の圧力損失係数²⁾

管路における各要素毎の圧力損失係数を次のように求める。

(1) 直管摩擦損失 (図 A2-2(a)) $Re > 10^5$ に対して Nikuradse の式は、

$$f = 0.0032 + 0.221 Re^{-0.237} \quad (2-1)$$

ここで、 Re : レイノルズ数であるが、伸縮継手、弁等を考慮して $f = 0.02$ とする。

$$h_f = f \frac{L}{D} \quad (2-2)$$

(2) 広がり管 (図 A2-2(b))

$$K_2 = 2 \tan^{-1} \frac{D_2}{2L} \frac{D_2}{D_1} \quad (2-3)$$

$$K_1 = \left\{ 1 - \left[\frac{D_2}{D_1} \right]^2 \right\}^2 \quad (2-4)$$

数値を代入して、

$$D_1 = 700, D_2 = 1,000, L = 620$$

$$0 < 2 \theta < 10^\circ \quad f = 0.15 \quad (2-5)$$

$$10 \leq 2 \theta \leq 45^\circ \quad f = 0.024(2 \theta) - 0.0929 \quad (2-6)$$

$$2 \theta > 45^\circ \quad f = 1.0 \quad (2-7)$$

$$2 \theta = 27.2^\circ$$

$$K_2 = 0.568$$

$$K_1 = 0.148$$

となる。

(3) 細まり管 (図 A2-2(c))

$$K_2 = 0.06 \quad (\theta \leq 60^\circ) \quad (2-8)$$

(4) 90° ベンド (図 A2-2(d))

Weisbach の式より

$$K = 0.131 + 1.847 \left(\frac{a}{R} \right)^{3.5} \quad 1 < \left(\frac{R}{a} \right) < 5 \quad (2-9)$$

ただし摩擦損失は含まない。

数値を代入して、

$$\frac{R}{a} = 2 \quad K = 0.294 \text{ となる。}$$

(5) T 形管

ここで、 Q_i ($i = 1, 2, 3$) 流量

r : 管の接続部の曲率半径

d : 管の直径

(a) 合流・本流 (図 A2-3(a))

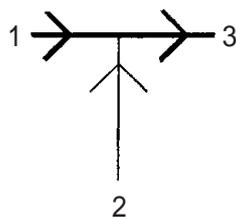
$$\frac{Q_2}{Q_3} = 0.5 \quad \frac{r}{d} = 0.5 \quad (2-10)$$

$$K_{13} = 0.16 \quad (2-11)$$

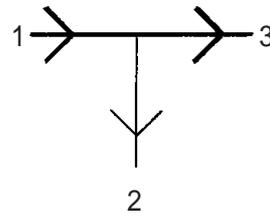
(b) 分岐・本流 (図 A2-3(b))

$$\frac{Q_2}{Q_1} = 0 \quad (2-12)$$

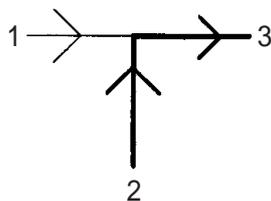
$$K_{13} = 0.047 \quad (2-13)$$



(a) 合流・本流



(b) 分岐・本流



(c) 分岐・支流

図 A2-3 T 形管の合流および分岐

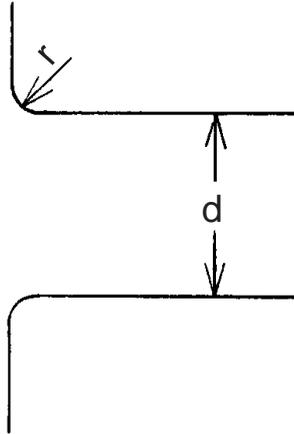


図 A2-4 貯気槽出口部

$$= 0.04 \quad (2-19)$$

(7) 定温装置

$$= 3.0 \text{ (経験値)} \quad (2-20)$$

3. 等価圧力損失係数 e_q

前記の各要素毎の圧力損失係数 を利用して、図 A2-5 に示す管路の等価圧力損失係数 e_q を求める。

(1) 13m 貯気槽ルート

$$\begin{aligned} {}_1 = & 3.0 + 0.04 + 0.02 \times \frac{2555 + 12450}{700} + 0.148 \\ & + 0.06 + 0.16 + 0.047 + 0.294 = 4.178 \end{aligned} \quad (3-1)$$

(2) 12m 貯気槽ルート

$$\begin{aligned} {}_2 = & 3.0 + 0.04 + 0.02 \times \frac{2555 + 12450 + 22000}{700} \\ & + 0.294 + 0.59 + 0.06 + 0.093 = 5.034 \end{aligned} \quad (3-2)$$

(3) 合流管

$${}_D = 0.02 \times \frac{2900}{700} + 0.02 \times \frac{1840}{600} \times \left(\frac{700}{600}\right)^4 = 0.196 \quad (3-3)$$

実際には、上記数値に20%の余裕を見込んだ下記の値を使用する。

$$\begin{aligned} {}_1 &= 5.014 \\ {}_2 &= 6.161 \\ {}_D &= 0.235 \end{aligned} \quad (3-4)$$

(c) 分岐・支流 (図 A2-3(c))

$$\frac{Q_2}{Q_3} = 0 \quad \frac{r}{d} = 0.5 \quad (2-14)$$

$${}_{13} = 0.59 \quad (2-15)$$

$$\frac{Q_2}{Q_3} = 0.5 \quad \frac{r}{d} = 0.5 \quad (2-16)$$

$${}_{13} = 0.093 \quad (2-17)$$

(6) 貯気槽出口部 (図 A2-4)

$$\frac{r}{d} = \frac{1}{7} \quad (2-18)$$

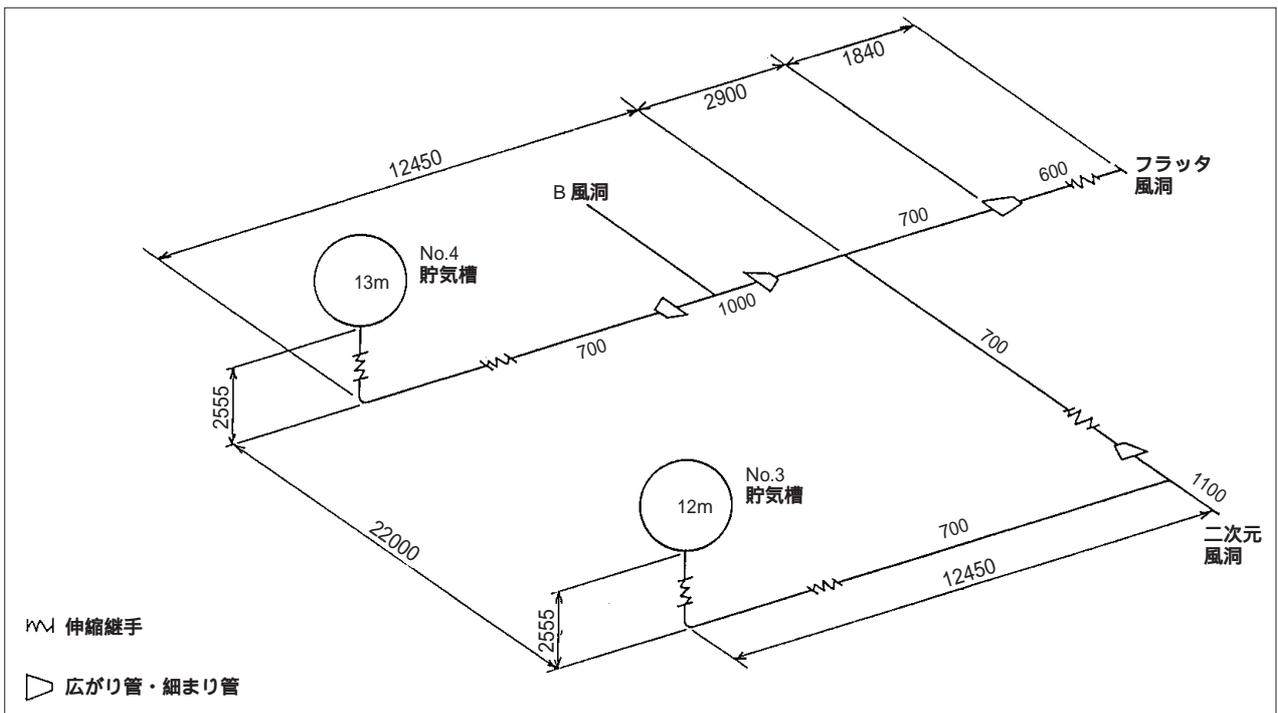


図 A2-5 高圧導管経路 (2)

従って、等価圧力損失係数 eq は、式 (1-10) より

$$eq = 0.235 + 0.157 \times 5.014 + 0.0968 \times 6.161 = 1.619 \quad (3-5)$$

また、高圧導管の圧力損失は、式 (1-5) より

$$P_T - P_{od} = \frac{1.619}{2} \rho u_D^2 \quad (3-6)$$

と表すことができる。

Appendix

フィードフォワード演算方法

この演算は、マッハ数目標値、集合胴圧力目標値、高圧導管圧力値から必要な調圧弁開度を演算するものである。考え方としては、調圧弁流量の式 (1) と縮流胴流量の式 (2) から調圧弁開度 (Av) を求める方法である。

また、今回の風洞では集合胴圧力が最大0.4Mpa、貯気槽吹き止まり圧力が1.08Mpaであるので、調圧弁は常にチョーク状態での使用となる。

記 号

Gv ; 調圧弁質量流量 (kg/s)

Gn ; 縮流胴質量流量 (kg/s)

Av' ; 調圧弁開口面積 (m^2)

Av ; 調圧弁開度

Cw ; 調圧弁流量係数

A ; 縮流胴開口面積 (m^2)

R ; 気体定数 (J/(kg・K))

; 空気の比熱比

T_0 ; 全温度 (K)

T_{od} ; 高圧導管圧力 (Mpa)

P_0 ; 集合胴全圧 (Mpa)

P_0^* ; 集合胴圧力目標値 (Mpa)

M ; マッハ数

M^* ; マッハ数目標値

調圧弁流量の式

$$Gv = Cw \times Av' \times P_{od} \times \sqrt{R \times T_0 \left[\frac{2}{+1} \right]^{-1}} \quad (1)$$

縮流胴流量の式

$$Gn = A \times P_0 \times \sqrt{R \times T_0} \times M \times \left(1 + \frac{-1}{2} \times M^{*2} \right)^{-2 \left(\frac{+1}{-1} \right)} \quad (2)$$

式 (2) を次式で近似する。

縮流胴流量の式 (近似式)

$$Gn = A \times P_0^* \times \sqrt{R \times T_0} \times M^* \times \left(1 + \frac{-1}{2} \times M^{*2} \right)^{-2 \left(\frac{+1}{-1} \right)} \quad (3)$$

$Gv = Gn$ より

$$Av' = \frac{A \times P_0^* \times M^* \times \left(1 + \frac{-1}{2} \times M^{*2} \right)^{-2 \left(\frac{+1}{-1} \right)}}{Cw \sqrt{\left(\frac{2}{+1} \right)^{-1}}} \times \frac{1}{P_{od}} \quad (4)$$

最大調圧弁開口面積で正規化を行う。

$$Av = \frac{Av'}{Av'_{max}} \quad \left(= \frac{Av'}{0.217} \times 10000 \right) \quad (5)$$

(開口率 100% で 10000bit を出力)

式 (4)(5) より

$$Av = P_0^* \times \frac{A \times M^*}{Av'_{max} \times Cw} \times \left(\frac{2}{+1} + \frac{-1}{+1} \times M^{*2} \right)^{-2 \left(\frac{+1}{-1} \right)} \times 100 \times \frac{100}{P_{od}} \quad (6)$$

よって次の式 (7) から、調圧弁開度が得られる。

$$Av = P_0^* \times f(M^*) \times \frac{100}{P_{od}} \quad (7)$$

但し

$$f(M^*) = \frac{A \times M^*}{Av'_{max} \times Cw} \times \left(\frac{2}{+1} + \frac{-1}{+1} \times M^{*2} \right)^{-2 \left(\frac{+1}{-1} \right)} \times 100 \quad (8)$$

シーケンサ内での演算は、 $f(M^*)$ を折れ線テーブルに展開して使用する。

Appendix

圧力自動較正要領

1. 自動較正タイムチャート

圧力自動較正装置の機能を使用して、自動的に圧力発信器に図A4-1のタイムチャートのように圧力の印加と圧力導管の切り替えを行って圧力計の自動較正を行う。

2. 較正係数の計算方法

各制御用圧力発信器に印加した2点の圧力とその時の圧力発信器の出力電圧から、圧力発信器の較正係数(a, b)を次の方法で計算する。これらの計算は運転制御コンピュータで行う。

$$\text{較正係数 } a = \frac{P_{ref2} - P_{ref1}}{V_2 - V_1} \quad (1)$$

$$\text{較正係数 } b = \frac{P_{ref1}(V_2 - V_1) - V_1(P_{ref2} - P_{ref1})}{V_2 - V_1} \quad (2)$$

ここで、

P_{ref1} : 低圧側の印加圧力

P_{ref2} : 高圧側の印加圧力

V_1 : 低圧側の圧力発信器の出力電圧

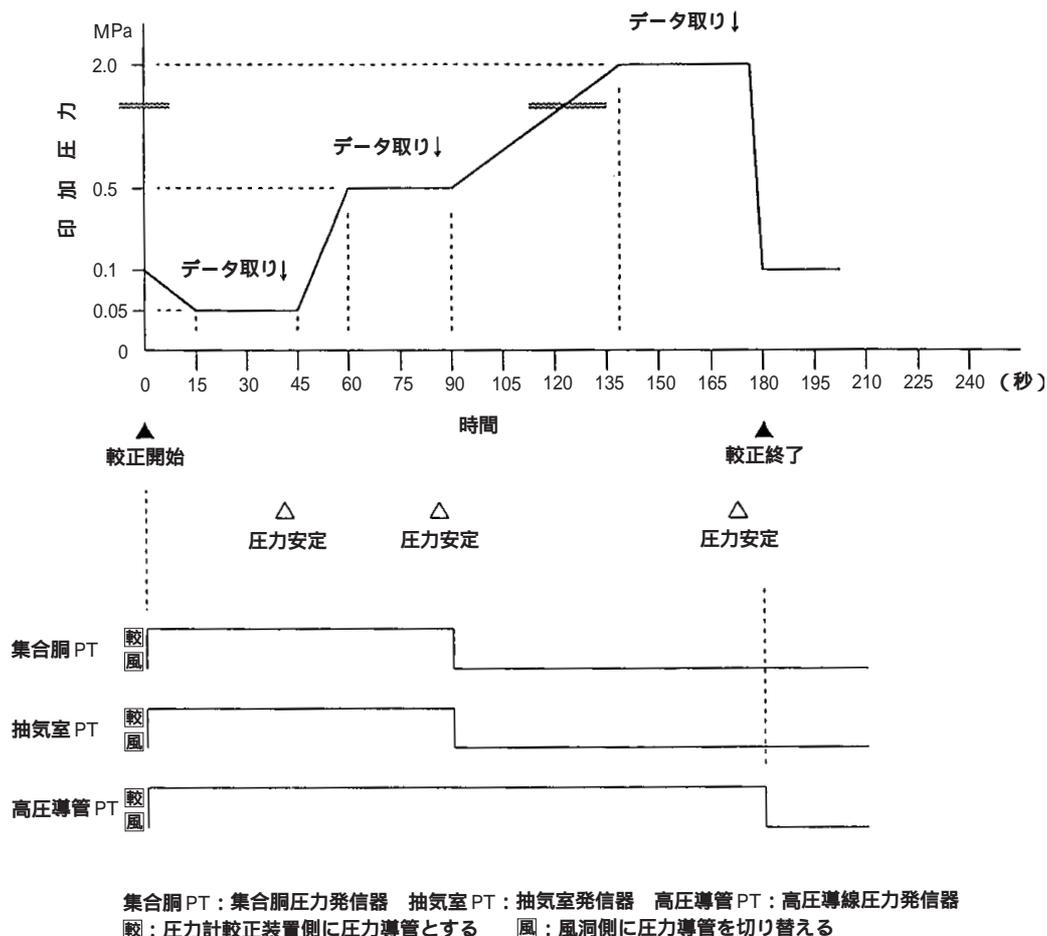


図 A4-1 圧力自動較正タイムチャート

V_2 : 高压側の圧力発信器の出力電圧

計算された較正係数は、圧力制御盤で圧力発信器の出力電圧値を圧力値に変換する次の較正式の中で用いられる。

$$\text{較正式 } y = ax + b \quad (3)$$

ここで、

y : 較正された圧力値

x : 圧力発信器の出力電圧

これらの計算は図A4-2の印加圧力と圧力発信器出力電圧のグラフにおいて、圧力計較正装置の印加圧とその時の圧力発信器出力電圧から得られる2点を通る直線の式を圧力発信器出力電圧から圧力値変換する式とすることを表している。

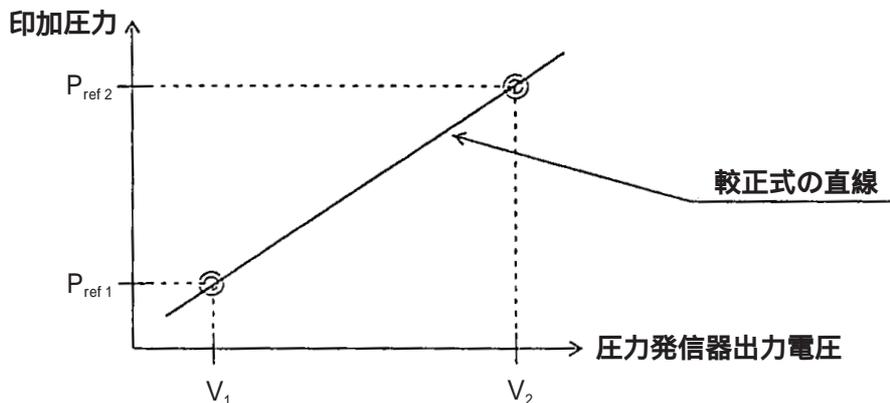


図 A4-2 印加圧力発信器出力電圧

独立行政法人航空宇宙技術研究所報告 1454 号

平成 14 年 11 月発行

発行所 独立行政法人 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町 7・44・1
電話 (0422) 40・3935 〒182・8522
印刷所 株式会社 実業公報社
東京都千代田区九段北 1・7・8

© 2002 独立行政法人 航空宇宙技術研究所

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、情報技術課資料係にご連絡下さい。
本書(誌)中、本文については再生紙を使用しております。

