

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-379

突風風洞空気源設備

廣末健一・岩崎昭人

1979年2月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

突風風洞空気源設備*

廣末健一**

岩崎昭人**

1 まえがき

突風風洞⁽¹⁾は、昭和47年3月に完成して以来、汎用性の高い風洞として航空機の突風に関する風洞実験はもとより、通常の風洞実験にも広く利用されて来ている。

特に昭和50年度から開始された特別研究“ファンジェットSTOL機の空力特性の研究”に関連して、前縁BLC(Boundary-Layer Control)とAW(Augmentor Wing)を組み合わせた高揚力機の半載模型および模型シミュレータエンジンを装着したUSB(Upper Surface Blowing)方式の高揚力機の半載模型等の普通風洞試験を実施することとなった。

これらの試験においては、BLC、AW用の給気や模型シミュレータエンジンの駆動に高圧空気を使用するため、新たに高圧空気源設備の設置が必要となった。

上記風洞試験において模型に供給する空気の圧力は1~2.5 kg/cm²^{注)}、その時の空気流量は0.1~1.0 kg/sec(重量流量)の範囲であり、給気の持続時間は最大流量の場合でも5分程度は保持できることが要求された。

この要求に対処するため、昭和50年6月から高圧空気源設備の計画を始め、昭和51年9月に据付および調整を完了した⁽²⁾。

高圧空気源設備は大気を連続的に圧縮、脱湿して圧力3.0 kg/cm²、絶対湿度 7×10^{-5} (760 mmHg 大気圧における露点-40℃)の高圧乾燥空気をつくり、一旦貯気槽に貯え、それを所要圧力に調整して模型に供給するようにしたものである。本設備は完成後直ちに前述の各試験に供されているが、それ等の試験以外にも供試模型の動力源、BLC用その他に広く利用できるので、突風風洞の機能を一段と高めることになった。

今後、本設備利用者の参考に供するため、設備を計画した経緯、各機器の構成および機能ならびに試験結果の一部等について報告する。

2 計 画

計画に当っては、据付経費が低廉で済み、運転制御や保守が容易であり且つなるべく省力化できる設備にまよめるよう心掛けた。種々検討の結果空気圧縮機、空気脱湿器、高圧貯気槽、調圧装置等を用いる方式を選んだ。一方突風風洞の建設当時、空気源設備の設置について詳細な検討まではなされていなかったため、容易に供給できる電力、水等に制約が生じた。その結果空気圧縮機の電動機容量は100KW以内とし、空気圧縮機、冷却器等の冷却水はクーリングタワーを用いて消費水量の少ない循環方式とすることにした。

2.1. 使用条件の検討

前述の模型シミュレータエンジンを搭載するUSB半載模型の風洞試験は C_J ($C_J = \frac{\text{ジェット推力}}{\text{一般流動圧} \times \text{主翼面積}}$)が1~5の範囲で実施される。 C_J の変化は試験風速を23 m/s とすれば、エンジン推力20~100%がこれに対応する。

計画時得られたシミュレータエンジンの推力、タービン空気流量およびタービン入口圧力の関係は表-1の通りである。

表-1 シミュレータエンジンの性能

推 力	回 転 数	タービン 空気流量	タービン 入口圧力
6.5	20	0.15	5.5
16.2	50	0.26	11.7
32.5	100	0.48	22.0

またAW半載模型の場合、USB模型のように高い圧力は必要でなく C_J は2以下で試験される。供試模型の大きさ(半翼幅1.2 m, 半翼面積0.4 m², 吹き出し部スリットの面積5 cm²)から推算して模型ダクト内圧力は1~6 kg/cm²、最大吹き出し空気流量は0.7 kg/cm²程度を想定しておけば十分と考えた。なお設備容量はかなりの

* 昭和53年11月10日受付

** 新型航空機研究グループ

注) 以下本文に出て来る圧力は総べてゲージ圧である。

余裕を持たせて置くことにした。

高圧空気を模型に供給する調圧装置は、幅広い要求に対応して高い制御精度を保つため調圧弁のサイジングや流量計の測定レンジを考慮して高圧系統、中圧系統の二系統とすることにした。予定した風洞試験ではUSBの場合高圧系統が、AWの場合中圧系統が主として使用されることになる。

なお圧力 1 kg/cm^2 以下の低圧系統については将来必要が起きた時容易に増設が可能ないようにしておくことにした。

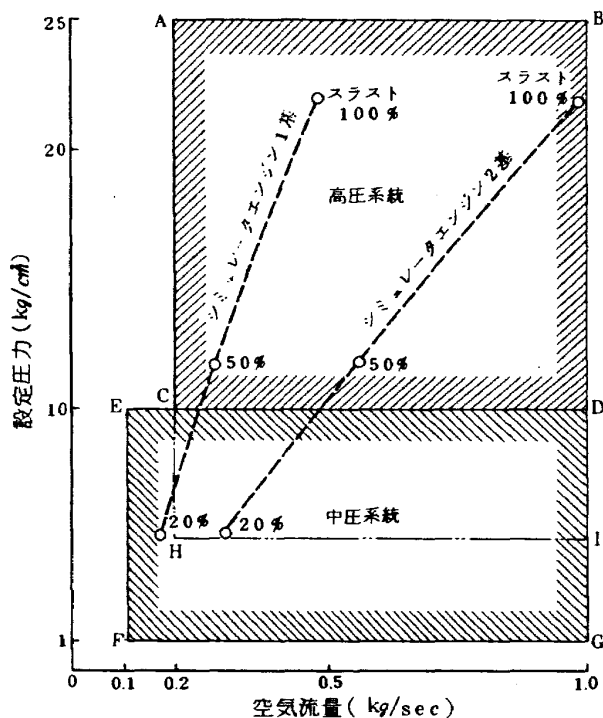


図 - 1 圧力流量範囲

高圧系統、中圧系統の設定圧力に対する空気流量の関係を図-1のように決めそれぞれ斜線で示した範囲の調圧が可能ないようにする。なお高圧系統については調圧弁の性能から仮想線で結んだCDHIの範囲も調圧可能である。

2.2. 給気および貯気能力

給気可能な時間は、模型側が必要とする圧力および吹き出し空気流量と貯気槽の容積および貯気圧力に関係する。貯気槽の容積が大きく、貯気圧力が高い程給気時間を長くできるわけであるが、それ等は必要最低限にとどめることにした。流量、圧力の関係で最も厳しい状態と考えられる模型シミュレータエンジン2基の推力100%時の給気可能な時間を5分程度とするために、貯気槽の容積は 30 m^3 、貯気圧力は 30 kg/cm^2 とすることにした。

その場合、貯気圧力 30 kg/cm^2 (P_{30}) から給気により設定圧力 (P_f) まで減圧する場合の使用可能な空気量 ($M \cdot t$) は次のように書ける。

$$M \cdot t = (\gamma_{P_{30}} - \gamma_{P_f}) \cdot W$$

ここで、 M : 空気流量 (kg/sec)、 t : 時間 (sec)、 $\gamma_{P_{30}}$ 、 γ_{P_f} : 圧力 30 kg/cm^2 および設定圧力における空気の比重量 (kg/m^3)、 W : 貯気槽の容積 (m^3) である。

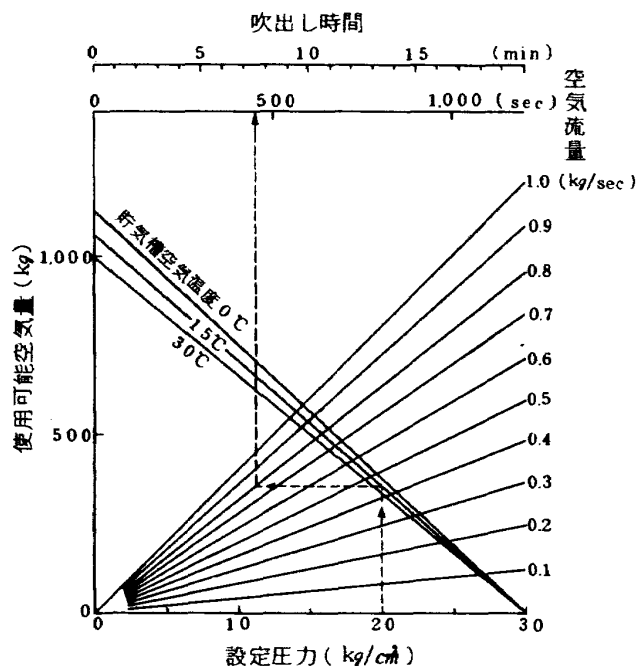


図 - 2 吹き出し可能時間

この式をもとにして貯気槽温度3種につき使用可能空気量 (kg) と空気圧力の関係、使用可能空気量と流量から給気可能な時間を求めることができ、それ等の関係をまとめたのが図-2である。図の矢印の付いた破線はこの図の使用法を示したもので、貯気圧力 30 kg/cm^2 から設定圧力の 20 kg/cm^2 まで下げる場合で、貯気槽の空気温度 15°C 、空気流量 0.8 kg/sec とした時の例である。矢印のよりにたどれば給気可能な時間 450 秒が求まることを示している。貯気槽の圧力および空気温度を同じ条件として図-1のB点の条件 (設定圧力 25 kg/cm^2 、流量 1.0 kg/sec) について考えれば直ちに 170 秒が求まる。

突風風洞においては模型の6分力、その他の計測が迎角を変えながらの瞬時計測ができるようになっているので、測定時間が限られる給気を行う試験ではその瞬時計測の方法が取られる。この迎角変化に要する時間は変角範囲を 30° とすれば天秤の変角速度が $6^\circ/\text{min}$ であるから5分程度となる。これが給気可能な最低時間を決めた根拠である。

貯気能力としては貯気槽容積 30 m^3 で、圧力 0 から 30 kg/cm^2 に昇圧が 3 時間程度でできる空気圧縮機を考へることとした。実際の試験においては設定圧力以下まで減圧しないうへ次の試験のため模型形態の変更に 30 分程度を要するのでその間に昇圧ができ、特別の場合を除いて試験能率に支障が無いものと考えた。

3 機器の構成および機能

本空気源設備の構成は高圧乾燥空気を製造する系統（空気圧縮機、後部冷却器、油水分離器、空気脱湿器）、空気配管系、高圧貯気槽、調圧装置、補助機器（クーリングタワー、計装用空気源装置）およびそれ等の機器を操作する操作盤から成っている。各機器全体の簡単な系統図を図-3に、突風風洞設備との関連を示す配置を図-4に示す。図-4において実線は空気源設備の関係を示し、破線は既存の設備、建物等を示している。

各機器の運転はシーケンス制御による全自動で、貯気槽圧による自動ON-OFF（昇圧中は圧力 29.5 kg/cm^2 でOFFとなり、以後は圧力が 27.2 kg/cm^2 まで下ると

ONになる）、安全保護機能として系統内に異状（圧力、油圧、温度、電流、冷却水流等について）が生じた場合自動的に停止するようになっている。停止状態で何処かに異状がある場合の起動はもちろんできない。

各機器の要目、機能は下記の通りである。

(1) 空気圧縮機

型式：V型4気筒二段圧縮水冷式

吐出圧力： 30 kg/cm^2

吐出容量： $270\text{ N m}^3/\text{h}$

電動機： 75 KW 、 10 P 、 3000 V 、 50 Hz 、 3ϕ

(2) 後部冷却器、油水分離器

圧縮機から出た空気は $80\text{ }^\circ\text{C}$ 程度になっているので後部冷却器により冷却を行う。また油や水滴が直接脱湿器に入らぬよう油水分離器を設ける。処理能力は $270\text{ N m}^3/\text{h}$ 以上、設計圧力は 30 kg/cm^2 であり、高圧空気は油水分離器出口に取付けたサーモスタットにより $40\text{ }^\circ\text{C}$ 以下で空気脱湿器に送られる。

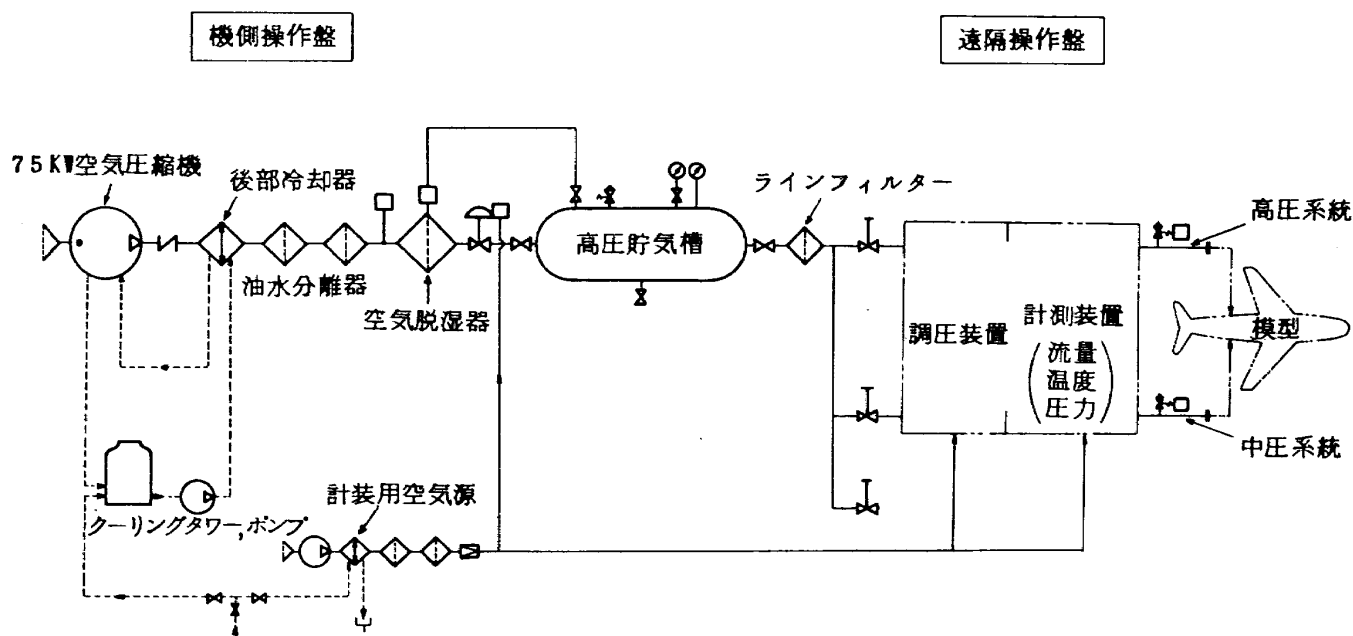


図-3 空気源設備全体の系統図

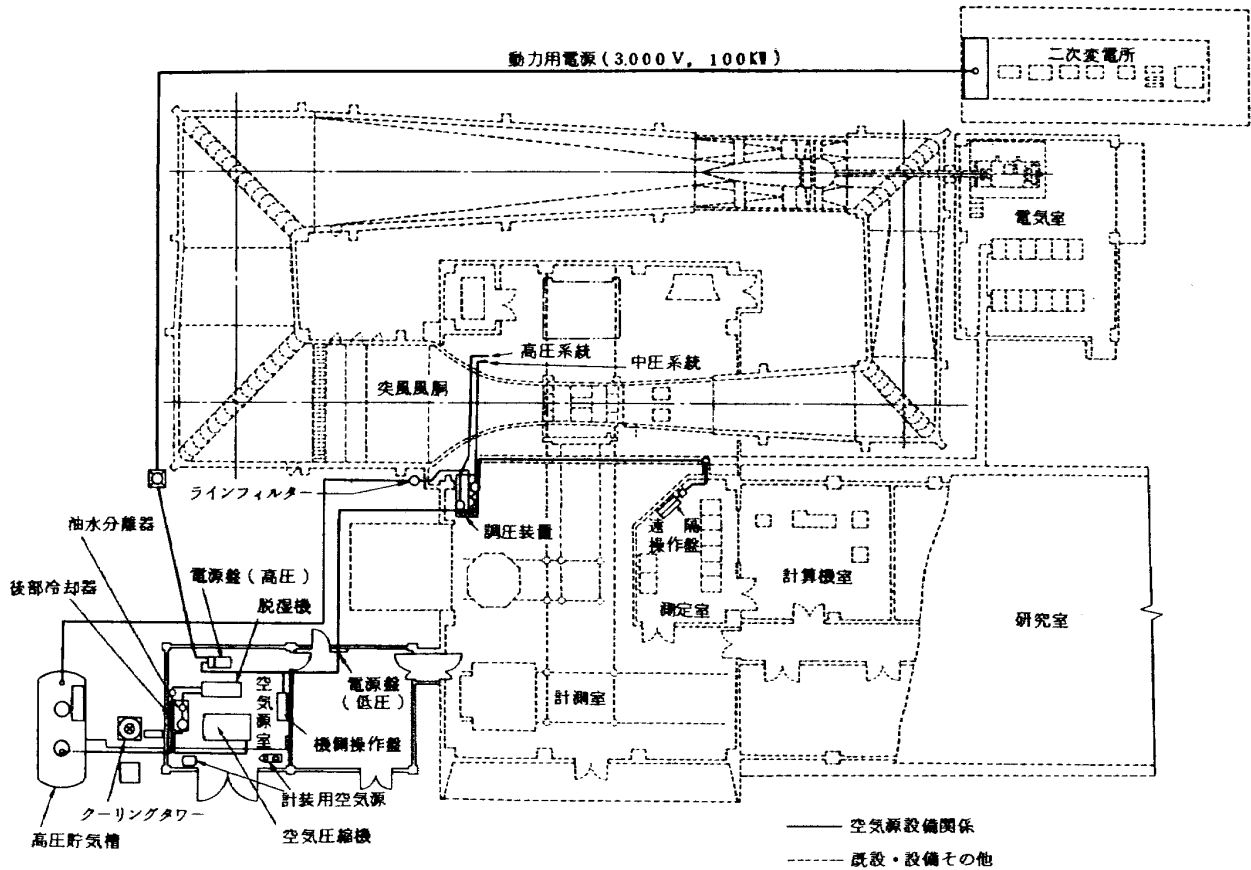


図-4 突風風洞, 空気源設備配置図 (縮尺 1/200)

(3) クーリングタワー

クーリングタワーは自吸タービンポンプを備えており空気圧縮機, 後部冷却器の冷却用として用いる。処理能力は $70,000 \text{ Kcal/h}$ で, 風量 $100 \text{ m}^3/\text{min}$, 処理水量は 230 l/min である。ポンプ (4段タービンポンプ, 3.7 kW) の吐出能力は 230 l/min の時揚程が 38 m である。

(4) 空気脱湿器

型式は単塔の乾燥剤吸着式である。乾燥剤としては活性アルミナおよび球状シリカゲル 40 kg が充てんされている。処理能力は $300 \text{ N m}^3/\text{h}$ で8時間の連続使用が可能である。8時間使用した後は乾燥剤を再生する必要がある。再生は 4.8 kW のヒータと 1.5 kW のブロワにより3時間 (吸湿状態が低い場合ヒータ, ブロワの稼働時間が短くて済む) の温風加熱で行う。その後塔内の冷却に3時間を要する。その冷却には高圧貯気槽の乾燥空気 (約 90 N m^3) を 1 kg/cm^2 に減圧して使用する。空気脱湿器は1基であり, 再生運転中空気圧縮機の運転ができないから, 昼間高圧空気を使い実験を最大限に行うとすれば, その再生運転は夜間行うことになる。

これまで述べて来た機器のうち空気源室にある空気圧

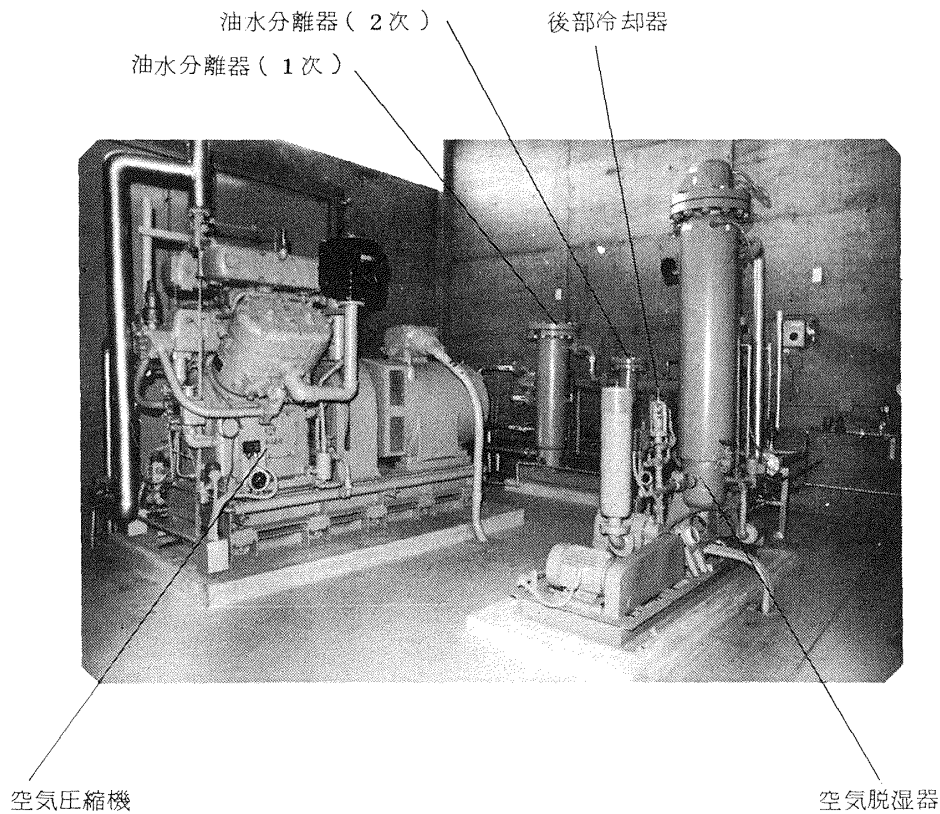
縮機, 後部冷却器, 油水分離器, 空気脱湿器等の写真を図-5に示す。それ等の機器およびクーリングタワー, 高圧貯気槽, 計装用空気源装置を含んだ詳細な系統図を図-6に示す。

(5) 高圧貯気槽

本貯気槽は内径 2.5 m , 全長 6.6 m の円筒形の横置型で内容積 30 m^3 , 常用圧力 30 kg/cm^2 である。図-7に高圧貯気槽の構造の概略を示す。高圧空気放出時に生ずる著しい温度低下を防ぐため⁽³⁾貯気槽内には外径 77 mm , 高さ 81 mm , 上下蓋に直径 21 mm の穴を明けたミルク缶5万個を封入した。その他には安全弁, 圧力計, 温度計, 遠隔指示用の温度発信器が付いており, 給送気用主管のほか空気源室にある空気脱湿器の再生用および圧力発信器用の空気配管が接続している。

(6) 計装用空気源装置

本装置は低圧, 小容量の空気圧縮機 (7 kg/cm^2 , 3.17 l/min , 空気タンク容量 85 l), 冷却器, 脱湿器, 減圧弁等から成り, 調圧弁 (電気信号-空気圧式ポジション付) 3個の作動用として用いられる。調圧弁の設置箇所は空気脱湿器と高圧貯気槽の間 (これは調圧弁上流の諸機器の能力を高め小型化に役立てるために入っている)



図－5 空気源室内の機器

るもので、この弁より上流の圧力が規定圧 29 kg/cm^2 を越えた時始めて空気を貯気槽に送るようになっている)と、高圧系、中圧系にそれぞれ1箇所である。

(7) 調圧装置

高圧貯気槽から高圧空気排出側の配管系はラインフィルタ(設計圧力 30 kg/cm^2 、濾過精度 20μ)の後に高圧系、中圧系、予備(低圧系)の3系統に分けており、その使い分けは手動弁の開閉によって行う。しかし二系統以上の調圧を行う同時使用はできないようにしてある。

調圧装置は高圧系統、中圧系統のそれぞれについて模型に供給する空気の圧力を調圧弁の開度調節によって制御し、その時の空気の圧力、流量、温度を検出し、それ等を演算処理して表示する機器類を一括して調圧装置としている。その機器類の構成は調圧弁、ON-OFF自動開閉弁(通電時開型)、圧力伝送器、流量検出器、温度検出器(熱電対)、異状圧検出器および遠隔操作盤に組込まれている圧力指示調節計、温度変換器、温度圧力補正演算器、開平演算器、流量指示計、温度指示計等である。

図-8にラインフィルタ以後の配管系に設けられている調圧装置の系統図を示す。中圧系には調圧弁の上流側に自律式の減圧弁が入っていて調圧弁に 15 kg/cm^2 以上

の圧力がかからないようになっている。異状圧検出器は安全装置として、これが作動するとON-OFF自動開閉弁が直ちに閉となり、模型へ供給している高圧空気を停止させる。

模型に供給する空気圧力の制御は、まず自動開閉弁を開き、設定圧力を圧力指示調節計にセットすると、圧力伝送器から得られた圧力が同メータに指示されると共に、その指示圧力と設定圧力との偏差が零になるよう調圧弁を動かす電気信号が出て電-空ポジションにより弁が開閉し圧力制御が自動的に行われる。圧力指示調節計のレンジは $0 \sim 30 \text{ kg/cm}^2$ と $0 \sim 10 \text{ kg/cm}^2$ の2種類があり使用する系統が、高圧系か中圧系かによって何れかに切換えて使用する。流量は図-9に示したピトー管と同じ原理のアニューバ流量検出器により得られた差圧を電気信号に変え、温度圧力補正演算器、開平演算器を通して kg/sec の形で表示される。流量計のレンジは $0 \sim 1 \text{ kg/sec}$ と $0 \sim 0.5 \text{ kg/sec}$ の2種類があり、高圧系の場合は前のレンジが、中圧系については両方のレンジが切換えて使用できる。空気温度は熱電対の出力を温度変換器により $^{\circ}\text{C}$ の形で表示される。その表示範囲は $-50^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ である。なおこれ等の圧力、流量、温度を出力端子から外部に取り出す場合はアナログ量でいづれも $1 \sim 5 \text{ V}$ である。調

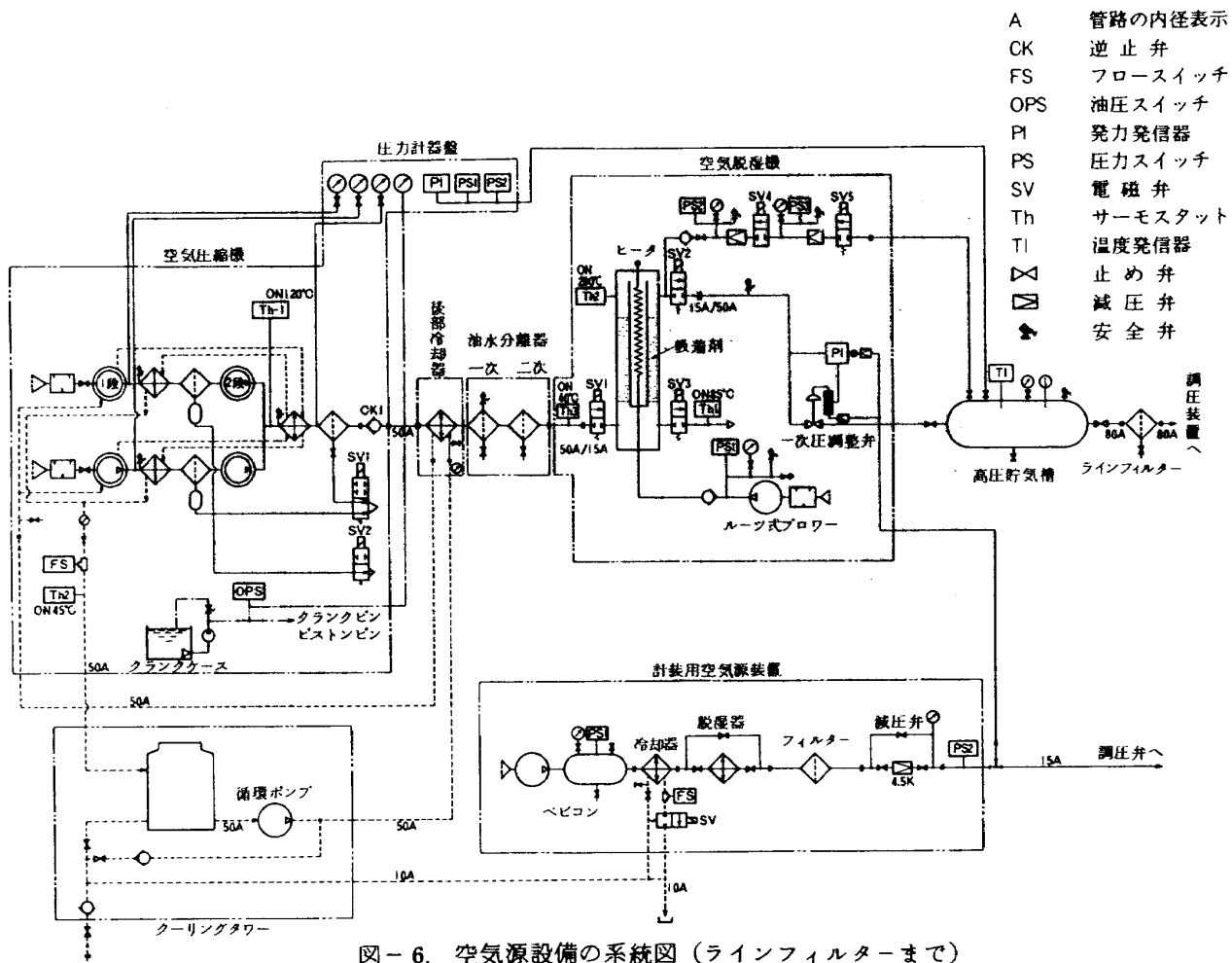


図-6. 空気源設備の系統図 (ラインフィルターまで)

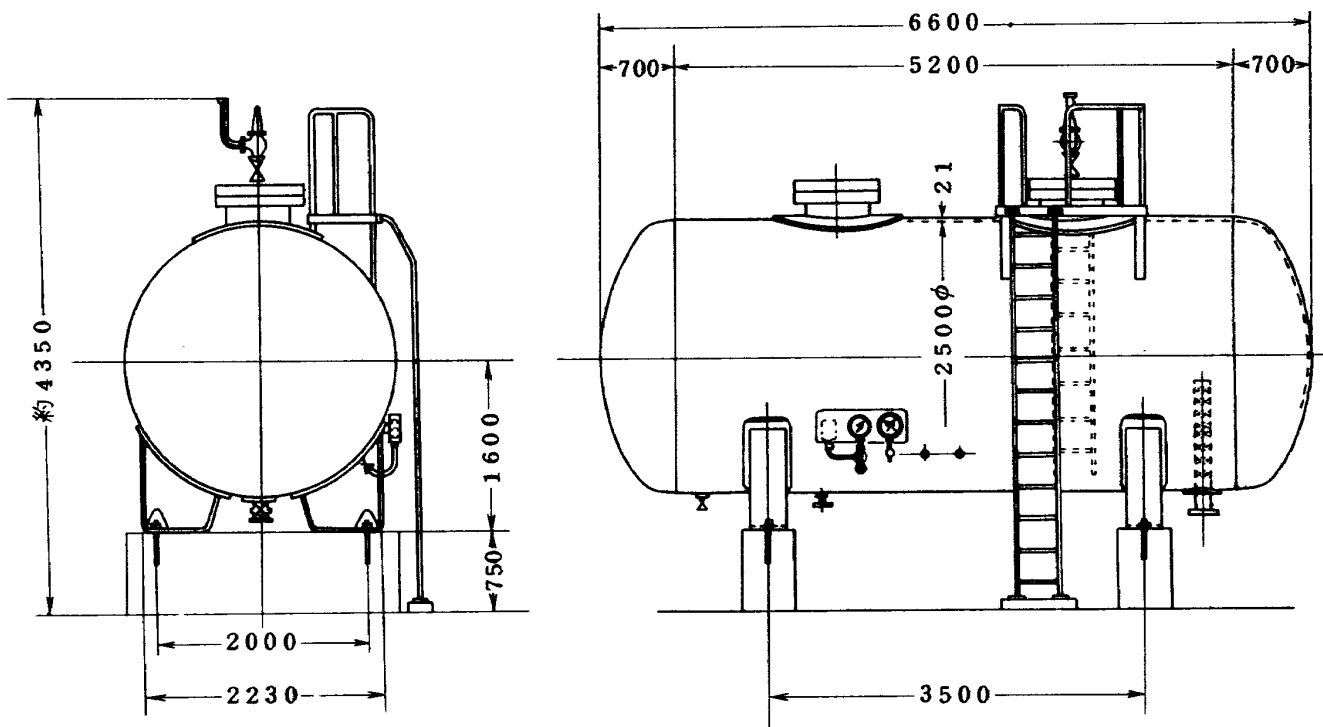


図-7 高圧貯気槽

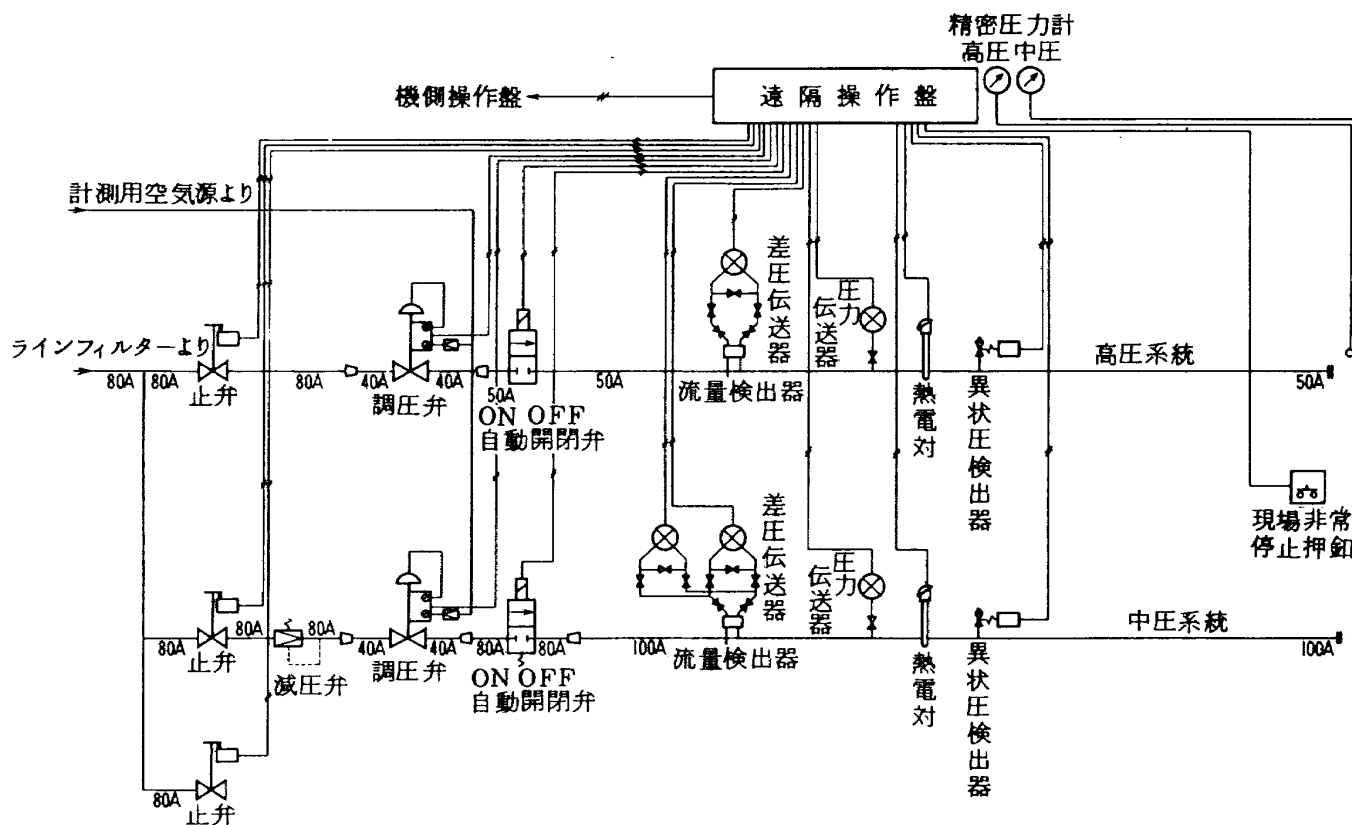


図-8 調圧装置関係の系統図

圧、温度変換、流量演算等の回路図を図-10に示す。図中の切換スイッチAは使用する系統(高圧系、中圧系)の選択用で、Bは中圧系流量のレンジ切換え用である。

(8) 操作盤

操作盤は空気源室にある機側操作盤と測定室にある遠隔操作盤の2種があり、各機器の運転操作は切換によりその何れかで行うようになっている。

機側操作盤には各機器の操作回路、電流計類、運転状態の正常異状を示すランプ類、運転状態(自動、手動、機側、遠隔等)の切換えスイッチが付いている。ここでは全自動運転の他各機器の単独運転ができるようになっている。

遠隔操作盤はグラフィック表示で、各機器の作動状況が一目でわかるようになっており、この盤では主圧縮機、計装用圧縮機の起動、停止および使用する圧力系の選択ならびに模型に供給する高圧空気の調圧操作を行う。他に貯気槽の圧力、温度を表示するメータ、前述の圧力、流量、温度の指示計およびその外部出力端子等が付いている。図-11に遠隔操作盤の写真を示す。写真の右側にある細長い盤には精密圧力計(0~20, 0~50 kg/cm²)2個が設けてあり模型内の圧力を精密に計測したい場合配管することにより直接測ることができる。

全自動運転のプログラムは図-12(a), 12(b)のようになっており、空気圧縮機が積算して8時間稼働した後は空気脱湿器の自動運転プログラム図-12(b)に移り空気脱湿器の再生運転に入る。これが終了すると再び図-12(a)に従って空気圧縮機の運転を開始するようになっている。

(9) 高圧空気の配管

高圧空気用配管路の材料、管径、結合部の形状等の概略を図-13に示す。

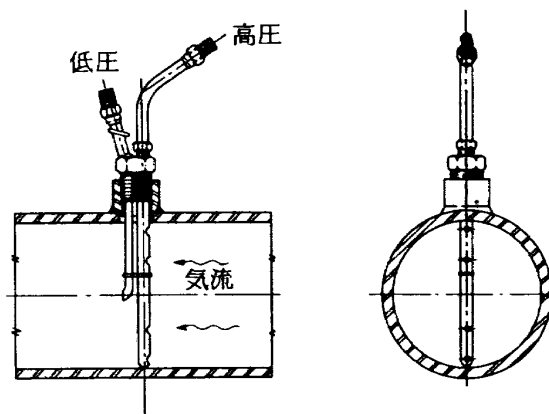


図-9 アニューバー流量検出器

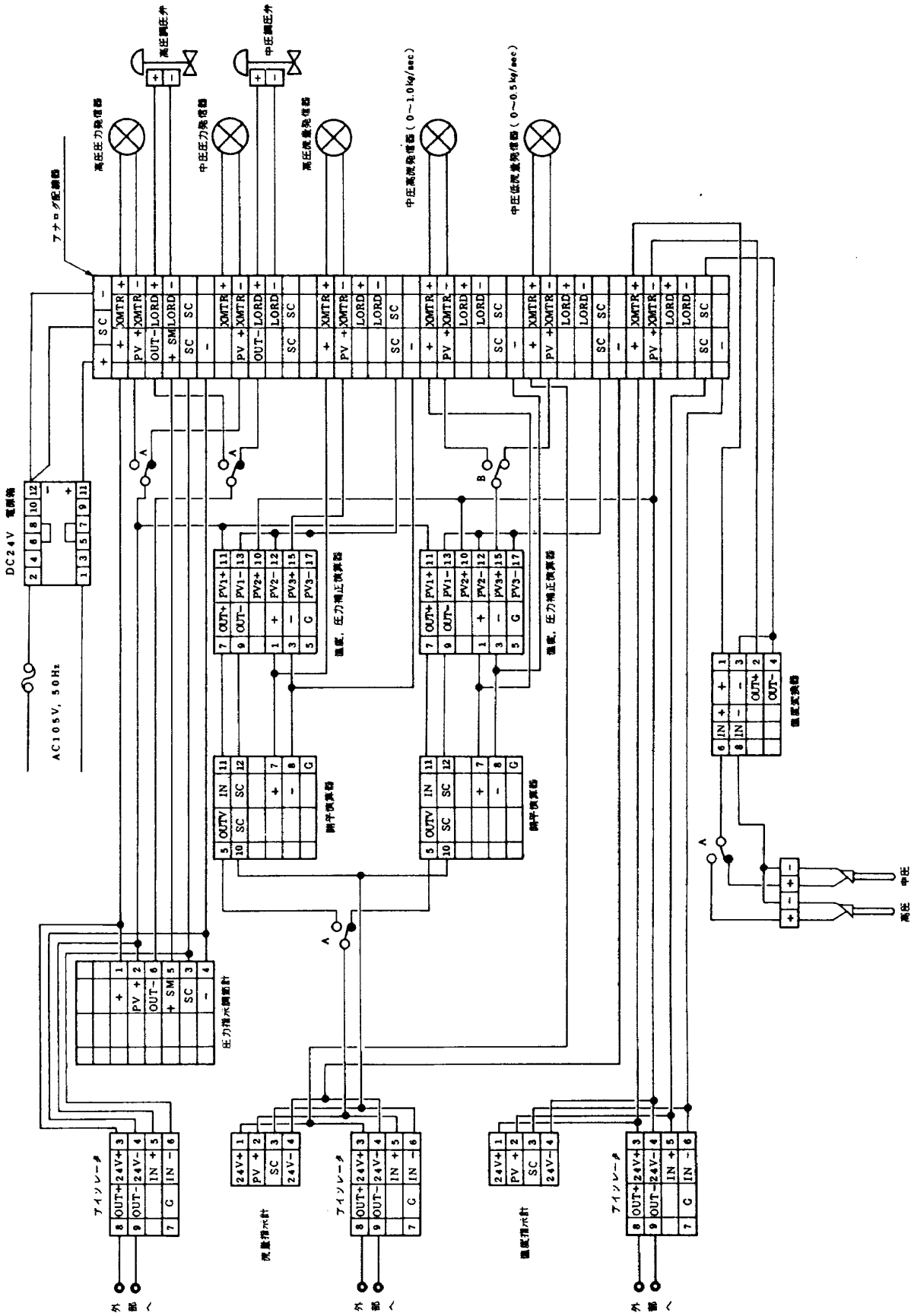


図-10. 調圧および流量演算回路

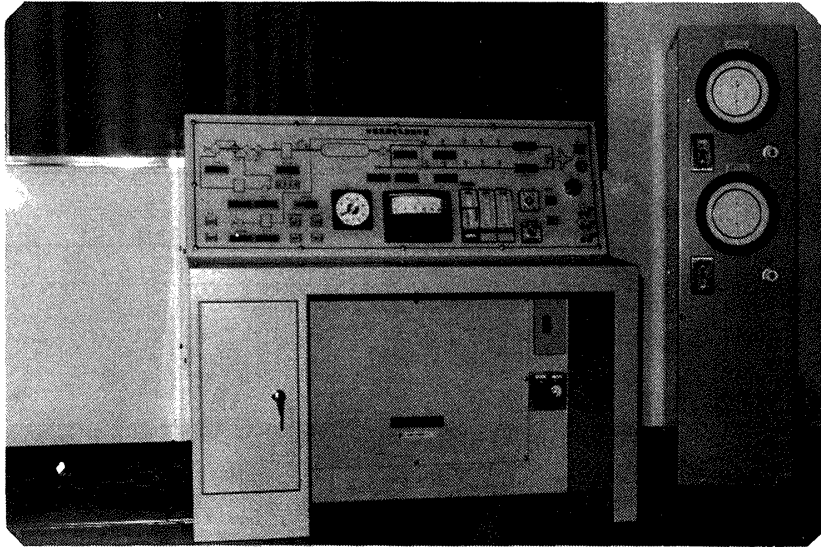


図 - 1 1 遠隔操作盤

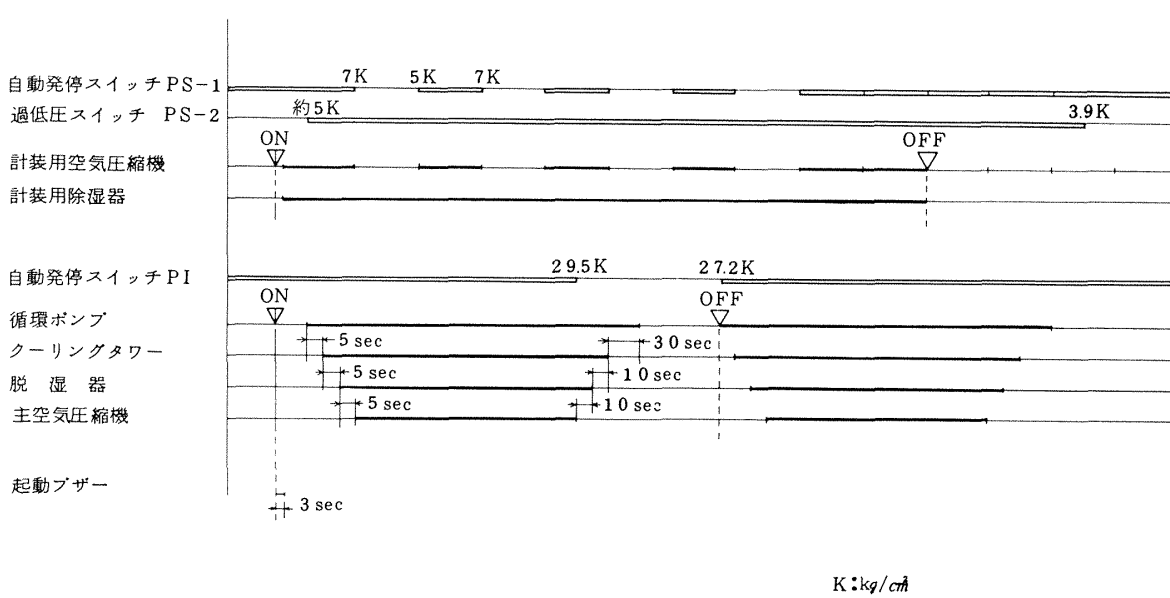


図 - 1 2 (a) 全自動運転プログラム (計装用および主圧縮機の系統)

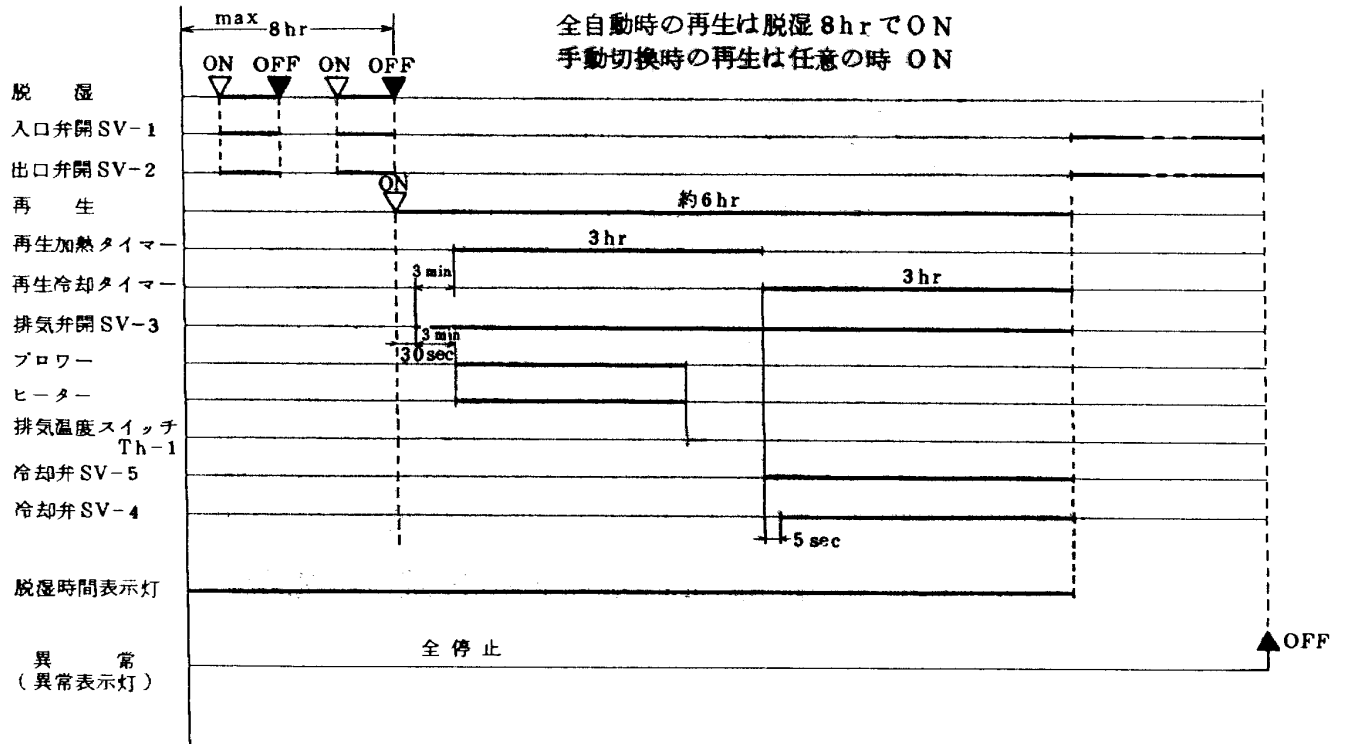


図-1 2 (b) 脱湿器自動運転プログラム

4 性能試験

各機器単体の機能試験，性能試験はそれぞれ行われているのであるが，こゝではそれ等を総合したシステムとして所期の性能（図-1）が満たされているか否かについて簡単に述べる。

貯気能力は圧力0から2.9.5 kg/cm²に昇圧するのに3時間10分を要した。

高圧系，中圧系の設定圧力に対する流量は配管系末端の吹出しノズルの面積によって決まる。この断面積決定の目安として，吹口でチョークした準1次元流を考えれば，流量Q (kg/sec)は次式⁽⁴⁾から求められる。

$$Q = \sqrt{\frac{\kappa}{RT_0}} P_0 S / \left(\frac{\kappa + 1}{2} \right)^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}}$$

こゝでκ：空気の比熱比，R：ガス定数，P₀：吹口上流淀み点の圧力，T₀：吹口上流淀み点の温度，S：吹出しノズルの面積である。

この式を使って図-1のABHI，EDFG点の圧力，流量を与えてその点の試験ができる吹出しノズルの面積

を計算すると表-2のように求まる。計算は見当をつけるのであるから簡単にダクト損失なし，空気温度0℃として求めている。

表-2 吹出しノズルの断面積

(単位 cm²)

高圧系	A	B	H	I
	0.33	1.67	1.14	6.94
中圧系	E	D	F	G
	0.39	3.94	2.06	2.06

試験は噴流排出後の噴流の始末と騒音の軽減を考えて吹出し空気を密閉型の突風風胴内に放出するようにした。

吹出しノズルの面積は先に求めた数値を参考にして鋼板に多数のねじ穴を明けたものを配管系の末端に溶接し，そのねじ穴を適宜ふさぐことによって調節できるようにした。試験した時の配管と穴明けした吹出し板の形状を図-14に示す。

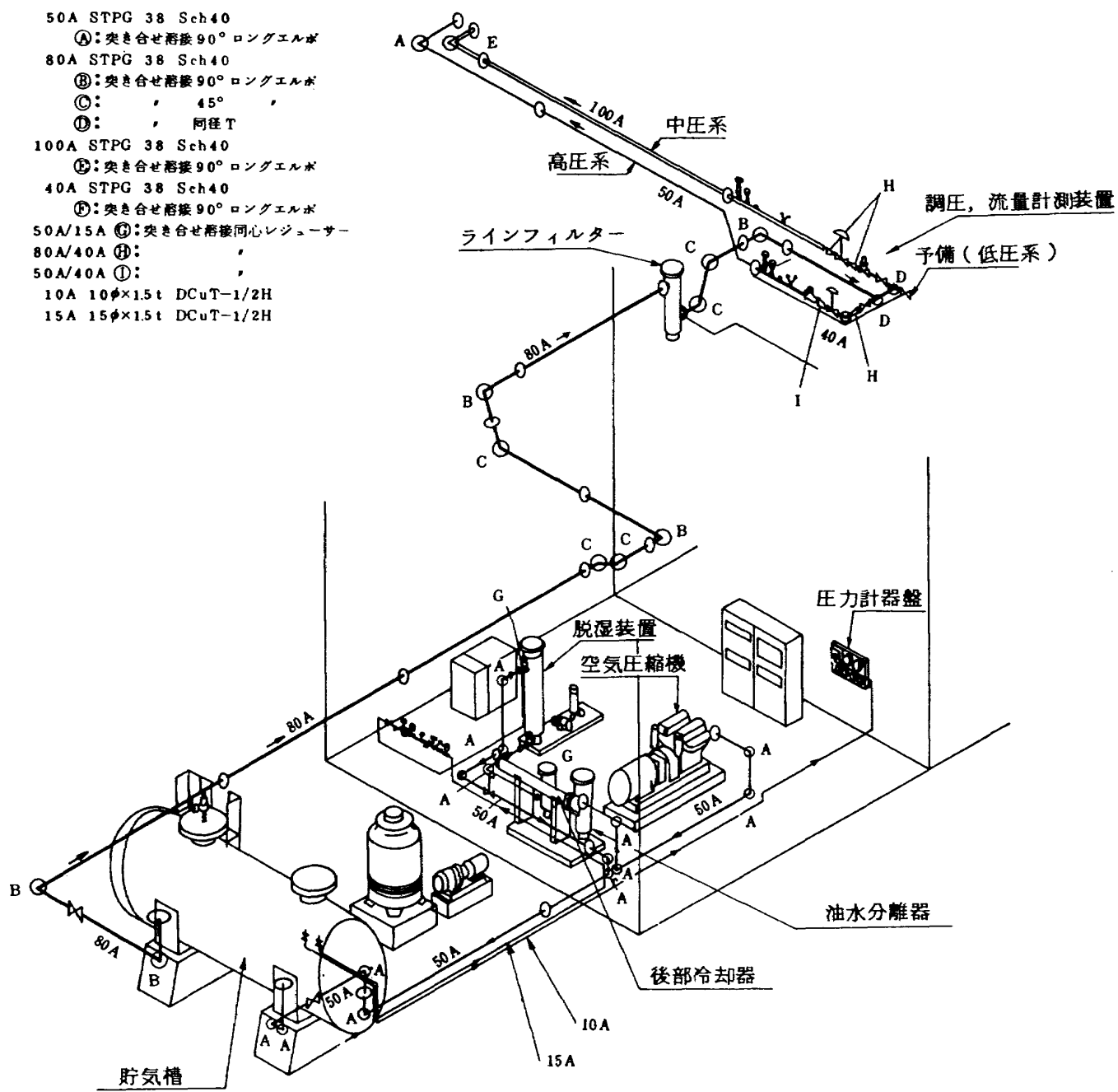


図 - 1 3 高圧空気配管路

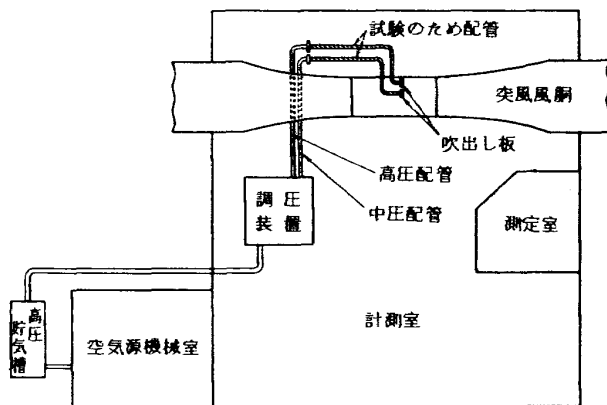
測定は遠隔操作盤の指示計器により行い適宜選んだノズル面積に対し、設定圧力を変化させてその時の指示圧力、指示流量を読み取った。その結果を図-15に示す。ノズル面積は高圧系については5種、中圧系については6種変えて行った。ノズル面積を一定とした時の圧力と流量の関係は直線の変化であることがわかる。A B C D, E D F G点の確認はしていないが、新たに穴を明けノズル面積を微調整すれば可能なことが予想できる。この試験結果により図-1の圧力、流量範囲は十分満たすものと判断した。

設定圧力に対する指示圧力の追従は過敏、鈍感でなく数秒で定常状態となりそれによって指示流量も一定となる。

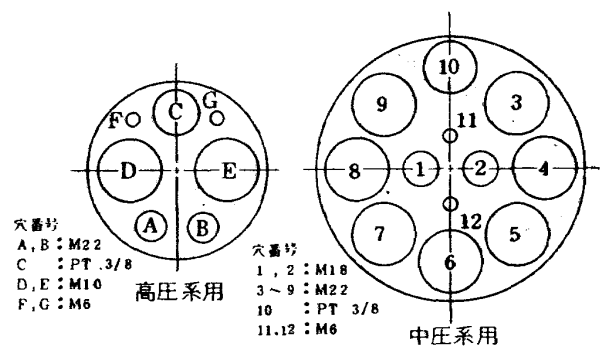
持続時間の試験は図-15の高圧系の△印(設定圧力 2.2 kg/cm^2) についてのみ行い定常状態になってから180秒の持続時間が得られた。その時の高圧貯気槽圧は開始時 2.9 kg/cm^2 、停止時 2.4 kg/cm^2 であった。この持続時間は図-2から求まる吹出し時間を大分下廻っているが、これは調圧弁操作に不慣れで大事をとり非常にゆっくりと昇圧していたこと、図-2が定常圧に達するまでの圧損が無く、貯気槽圧が定常圧まで使用できるとした理想状態を示していることも考慮に入れる必要がある。ちなみに実際に行ったAW, USBの風胴試験にお

いては $C_j = 5$ 以上の試験が無く持続時間が短かくて迎角を変化させながら計測している途中で試験を中断すると云うことは起こらなかった。

通風時における高圧貯気槽の温度降下は環境条件、空気を使用する状態(例えば通風時間)等によって大いに影響される。参考としてAW, USB模型の風胴試験の際記録した高圧貯気槽の温度降下(遠隔操作盤の指示計の読み取り)を図-16(a)に、その時の高圧系または中圧系の調圧弁下流の温度降下(遠隔操作盤の指示計の読み取り)を図-16(b)に示す。図のデータはAW, USBの試験から空気を多量に使用した推力試験の場合を選び出したもので、試験した時期(AWが1~4月, USBが5~8月)、時間、天候等がそれぞれ異っている。図から高圧貯気槽の温度降下は大きなもので無くまた環境条件が異っているため一様で無いことがわかる。 2.0 kg/cm^2 減圧した場合の温度降下は最大で 8°C の程度である。No.119について見れば、調圧弁下流の温度は調圧弁が屋内にあるため高圧貯気槽の温度より 4°C も低い状態からスタートして通風により 2°C 上昇した結果もある。これらの通風に要した時間はAWの場合7分程度(変化させた流量は最大で 1 kg/sec)、USBの場合13分程度(変化させた流量は最大で 0.48 kg/sec) である。



(a) 試験時の配管



(b) 吹出し板

図-14 試験時の配管および吹出し板

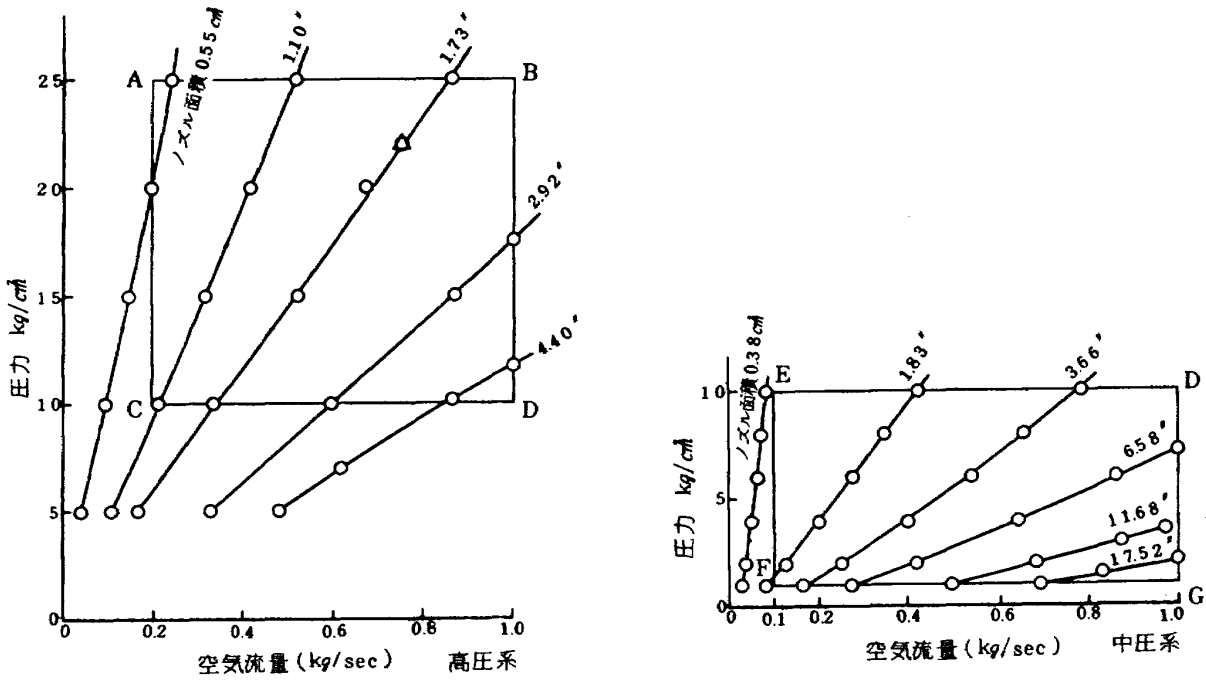


図-15 吹出しノズル面積を変えた時の調圧弁下流の圧力および空気流量

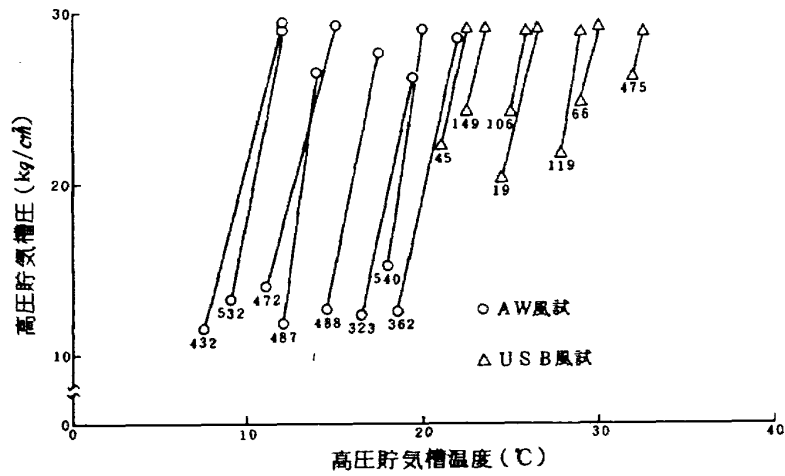


図-16(a) 通風時の高压貯気槽温度

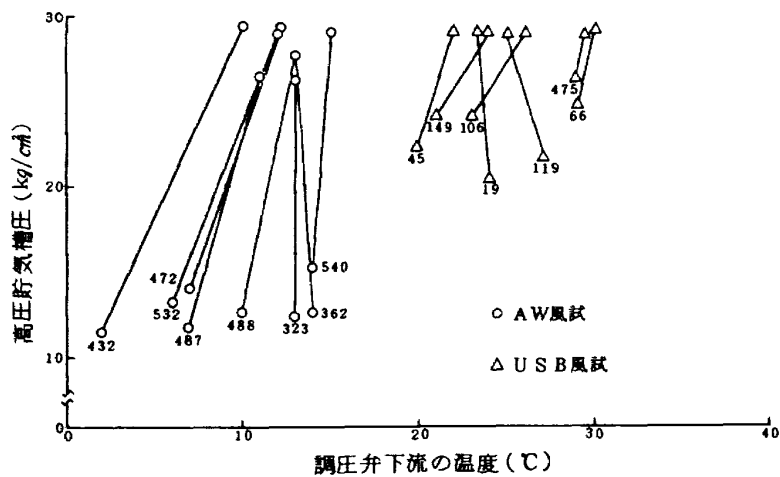


図-16(b) 通風時の調圧弁下流の温度

5 む す び

突風風洞の付属設備として新設した高圧空気源設備の計画、各機器の構成および機能ならびにシステムとしての性能試験結果の一例について述べた。

空気圧縮機の吐出圧力 30 kg/cm^2 、吐出容量 $270\text{ N m}^3/\text{h}$ 、高圧貯気槽の容積 30 m^3 、貯気圧力 30 kg/cm^2 、貯蔵する乾燥空気の露点は $-40\text{ }^\circ\text{C}$ である。

本設備の運転操作は全自動で人手を余り要しない取扱い容易な設備である。供給する高圧空気は模型によって使い分けるよう高圧系統(調圧範囲 $5\sim 25\text{ kg/cm}^2$ 、その時の流量 $0.2\sim 1.0\text{ kg/sec}$)、中圧系統(調圧範囲 $1\sim 10\text{ kg/cm}^2$ 、その時の流量 $0.1\sim 1.0\text{ kg/sec}$)の二系統とした。

空気脱湿器は1基としたことにより空気圧縮機を連続使用する場合その再生運転が途中に入り若干不便な面がある。

性能的には当初計画されたAW, USBの風洞試験に必要な空気圧力、流量が得られ通風持続時間の点についても支障が無かった。通風時起こる高圧貯気槽の温度降

下は十分に低いものとする。

本設備の設置に当っては航空宇宙技術研究所が基本計画を行いこれに基づいて川崎重工業株式会社が設計製作を担当したものであることを付記する。

終りに本設備の完成ならびに各種試験に尽力された川崎重工の宮下純一課長、日置吾郎氏をはじめ関係された各位に対し心からの謝意を表する。

文 献

1. 廣末健一, 北村清美, 村上義隆, 進藤重美: 航空宇宙技術研究所突風風洞の計画と整備試験, 航技研報告 TR №335, 1973。
2. 廣末健一, 岩崎昭人: 突風風洞空気源設備完成, 航技研ニュース №215, 1977。
3. 中井暎一, 橋爪宏, 中村泰治: 航空技術研究所(60cm×60cm)遷音速フラッタ試験設備の計画と整備試験, 航技研 TR №5, P. 3, 1960。
4. 航空宇宙学会: 航空宇宙工学便覧, P. 162, 1974。

航空宇宙技術研究所資料 379号

昭和54年2月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段南4-2-12
