

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-680

2 m×2 m遷音速風洞測定胴改修, その2  
可変ノズル装置の改修について

細江 信幸 ・ 鈴木 弘一 ・ 小池 陽  
河本 巖 ・ 海老原 正夫

1995年4月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 目 次

1. はじめに .....	2
2. 記号 .....	2
3. 可変ノズル装置の改修の動機 .....	3
4. 従来の変ノズル装置 .....	3
4.1 可変ノズル装置の本体 .....	3
4.2 可変ノズルの補機類と運転操作の手順 .....	5
5. 可変ノズル装置の改修について .....	7
5.1 可撓壁の継続使用について .....	7
5.2 ジャッキ装置の駆動源の選択 .....	8
5.3 測定胴設備の制御装置について .....	10
5.4 可撓壁の形状について .....	17
6. 動作試験結果 .....	19
7. まとめ .....	23
8. 今後の課題 .....	23
9. 謝辞 .....	23

# 2m×2m遷音速風洞測定胴改修, その2 可変ノズル装置の改修について

細江 信幸\*<sup>1</sup> 鈴木 弘一\*<sup>1</sup> 小池 陽\*<sup>1</sup>  
河本 巖\*<sup>1</sup> 海老原 正夫\*<sup>1</sup>

## Renewing of the Test Section of the NAL 2×2m Transonic Wind Tunnel Part 2. Renewal of the Variable Nozzle and Control system

Nobuyuki HOSOE\*<sup>1</sup>, Kouichi SUZUKI\*<sup>1</sup>, Akira KOIKE\*<sup>1</sup>,  
Iwao KAWAMOTO\*<sup>1</sup>, Masao EBIHARA\*<sup>1</sup>

### ABSTRACT

As part of a large-scale refurbishment of the NAL 2×2m Transonic Wind Tunnel, the flexible nozzle system has undergone the replacement of its driving and control mechanisms. This paper describes the content of the new mechanisms together with an outline of the replacement process.

The driving mechanism, which is used to set the nozzle wall contour through positioning all ten jacks attached to the wall, is changed from a hydraulic-based system to an electric-based one taking advantage of the recent development in the power range of electric servo-motors. The choice of the electric system was made based on the standpoint of the maintainability and controllability.

The control mechanism is changed from a mechanical analogue system to a computer-controlled digital system. In the former system, a set of cams, one for each of ten jacks, was employed to determine the jack positions in a coordinated manner. In the new system, each jack motion is ruled independently from the others by the instruction from the computer.

Some of the performance test results are given to illustrate the characteristics of the new flexible nozzle system.

**Key Words:** Transonic wind tunnel, Variable nozzle, variable nozzle control system.

### 概 要

航空宇宙技術研究所の2m×2m遷音速風洞の測定胴の改修により、測定胴の一部を構成している可変ノズル装置も改修された。

この報告では、始めに従来の可変ノズル装置の構造と制御手順について述べ、次に可変ノズル装置の改修にあたっての課題と改修の方法について述べる。

従来の可変ノズル装置の駆動機構は、10台の油圧モータとジャッキによりノズル形状を変化させていたが、今回の改修によって、ノズル形状の変化を電動モータとジャッキによる駆動機構へと変更した。可変ノズルの可撓壁形状の制御機構は、従来は機械的なカムによってノズル形状を決定していたが、整備と制御の簡便さを考慮して、計算機によるノズル形状の制御機構へと変更した。

新しくなった制御機構の構成、制御手順について述べるとともに、改修した可変ノズル装置の動作試験の結果についても触れる。

---

\* 平成6年12月14日受付 (received 14 December 1994)

\* 1 空力性能部 (Aircraft aerodynamics division)

## 1. はじめに

航空宇宙技術研究所の2m×2m遷音速風洞は、我国唯一の最大規模の遷音速域の試験設備であり、昭和35年に完成して以来、30数年間遷音速領域における航空機、あるいは高速飛翔体まわりの空気の流れを解明する大型試験設備として、我国の実機開発および基礎研究に多大な貢献をしてきた。

そして近年起こりつつある、風洞試験内容の緻密化による風洞試験時間の一層の増大、試験項目の高精度な測定要求にともなう模型の大型化等の理由により、今後も本風洞の大型実験設備としての使命と役割は一層増大すると思われる。

しかし、以上のような状況があるにもかかわらず、近年、本風洞設備の老朽化および陳腐化が進み、各部の大規模な改修を行う必要が生じ、特に本風洞設備の中核部である測定胴設備の故障は、風洞の運転機能の一部を失

わせるので、それらの抜本的な改善対策が求められた。

以上のような理由により遷音速風洞特別改修の計画が実行され、その中心の一つとして昭和63年度より、測定胴改修作業が改修作業計画に従って、年度ごとに順を追って進められた。

本報告では、下記に示す測定胴の改修項目(1)から(5)のうち、昭和63年度から平成元年にわたって行なわれた(2)可変ノズル装置の改修について報告する。

- (1)主制御装置
- (2)可変ノズル装置
- (3)カート(全機, 半機, 斜孔)
- (4)模型支持装置
- (5)測定胴要素

## 2. 記号

M : 測定部マッハ数

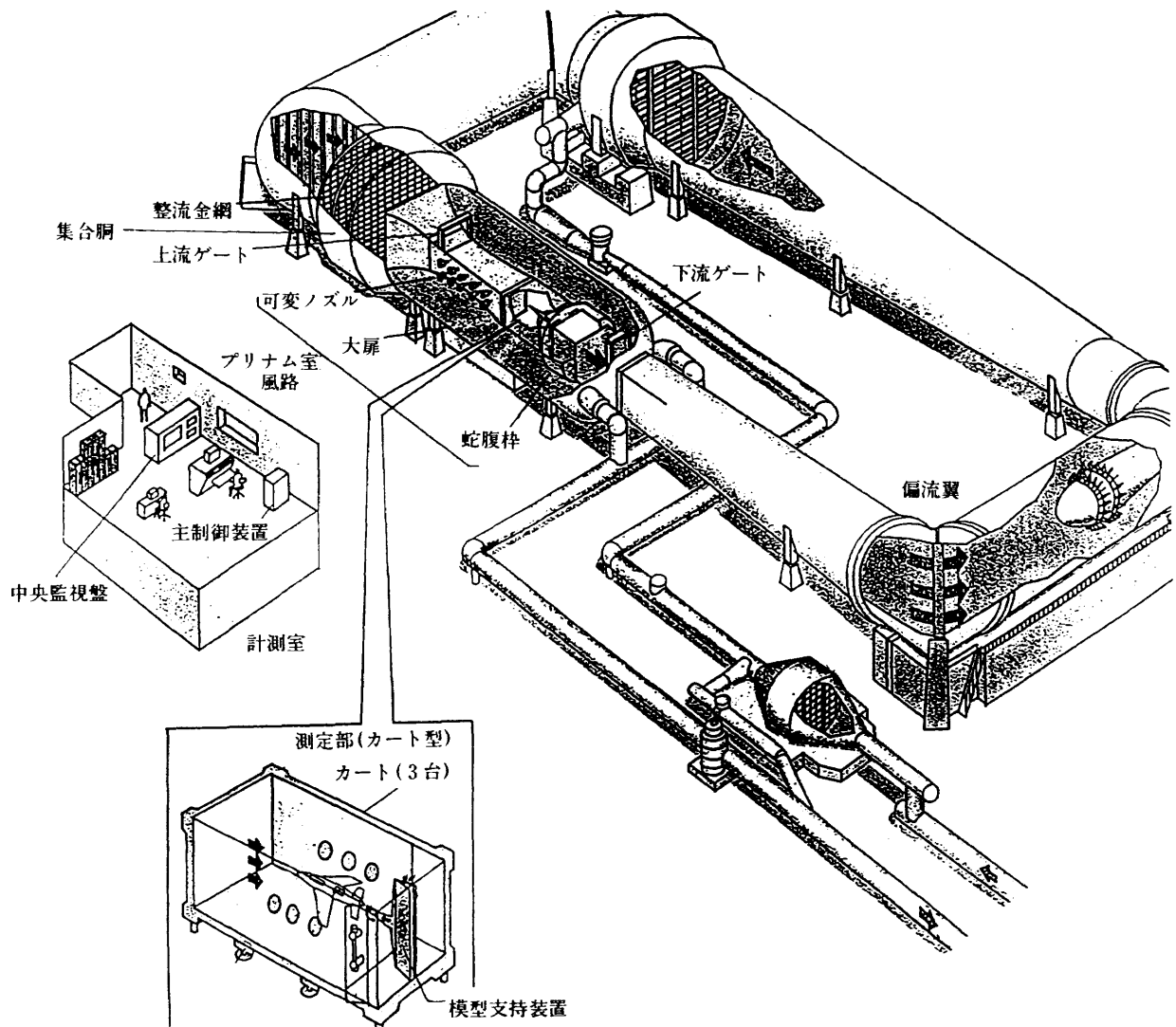


図1 遷音速風洞測定胴の概要図

- $M_C$  : カム軸マッハ数  
 $M_N$  : 可変ノズル設定マッハ数  
 $M_{N'}$  : 可変ノズルの出口のマッハ数  
 $M_T$  : 可変ノズル設定マッハ数目標値  
 $S_j$  : ジャッキ装置の移動量計画値  
 $S_{jR}$  : 検出されたジャッキ装置の移動量

### 3. 可変ノズル装置の改修の動機

図1に遷音速風洞測定胴の概要図を示す。風洞の測定胴の構成要素の一つである可変ノズル装置は、その油圧ユニット、及び可変ノズル装置の位置表示部の劣化による交換作業など、多少の改造はあったが風洞設置以来30数年間稼働し続けてきた。

しかし近年、可変ノズルを必要とする低超音速領域 ( $M=1.00\sim 1.40$ ) の風洞試験を遂行するにあたって、可変ノズル装置各部の老朽化によると思われる障害が頻繁に起り始めた。それらの障害のうち、特に可変ノズル装置の駆動部が原因と考えられる故障が大部分を占めた。

可変ノズル装置の駆動部は、設置以来、大規模な分解修理を行えなかったため、油圧駆動回路の軸封部からの油洩れが著しく、駆動部に供給する油圧の低下が起り、それによる可変ノズル装置の動作不良が発生していた。

このことは、風洞の運転機能を大きく害するものであるから、可変ノズル装置本体の機能を早急に回復するための改修を行うことにした。

### 4. 従来の可変ノズル装置

測定胴の風路の一部を構成する可変ノズル装置は、2m×2m遷音速風洞の低超音速領域での測定部気流の一様性を確保するために設置された<sup>1)</sup>。可変ノズル装置の位置は、図1に示す集合胴に続くプリナム室内風路の上流側にある(図1を参照)。可変ノズル装置の下流側に測定部カートを接続し、測定部カートの直後に配置された蛇腹棒を作動することにより、それらが順番に連結されてプリナム室内風路が形成される。

図2に、可変ノズル装置の機器配置を示す。可変ノズル装置の機器類を大別すると、次のものから構成されている。まずプリナム室内風路上にある(1)可変ノズル機構部と、その左右にとりつけられ可撓壁を变形させる(2)可変ノズル駆動部、1階補給室に設置された(3)油圧ユニットとその(4)運転盤がある。

さらに、可撓壁の上下に配置された、空気注入式のシールゴムの空気圧の出入りを制御する(5)シールエア制御盤、(6)大扉の下流側に設置された(7)可変ノズル制御装置がある。2階の計測室内には、(8)可変ノズル制御装置の操作表示部がある。風洞外の油圧ユニットとプリナム室内の駆動部は、風洞壁を貫通している油圧配管により接

続され、可変ノズル装置の油圧サーボ系を構成していた。

#### 4.1 可変ノズル装置の本体

図3に、可変ノズル装置本体の全体図を示す。この装置は、図2(1)可変ノズル機構部(図中の①から⑧まで)と(2)可変ノズル駆動部(図中の⑨から⑭まで)から成り立っている。

##### (1) 可変ノズル機構部

可変ノズルの外枠は、①a縦枠台と①b横枠受け台、②縦枠、③横枠から成り立っており、あらかじめプリナム室上流側下部に設置されている支持枠の上に、①a縦枠台と①b横枠受け台が取り付けられる。外側の2つの脚が①a縦枠台であり、内側の2つが、③横枠を支持する①b横枠受け台である。

②縦枠は、プリナム室内の下部に配置された支持枠と①a縦枠台の間で、可変ノズルの高さ方向の中心が風洞中心と一致するよう高さを調整されて、風路上に固定される。②縦枠の上部は、個々の②縦枠が気流方向に傾かないよう、⑫上部連結梁で固定している。さらに横方向は、上下に配置された③横梁の両端が、個々の②縦枠と結合している。最前部の縦枠と最後部の縦枠が、それらの気流方向と直角な方向の中心と風洞中心が一致するように位置を調整されて、プリナム室内に配置された横方向の支持枠に固定される。

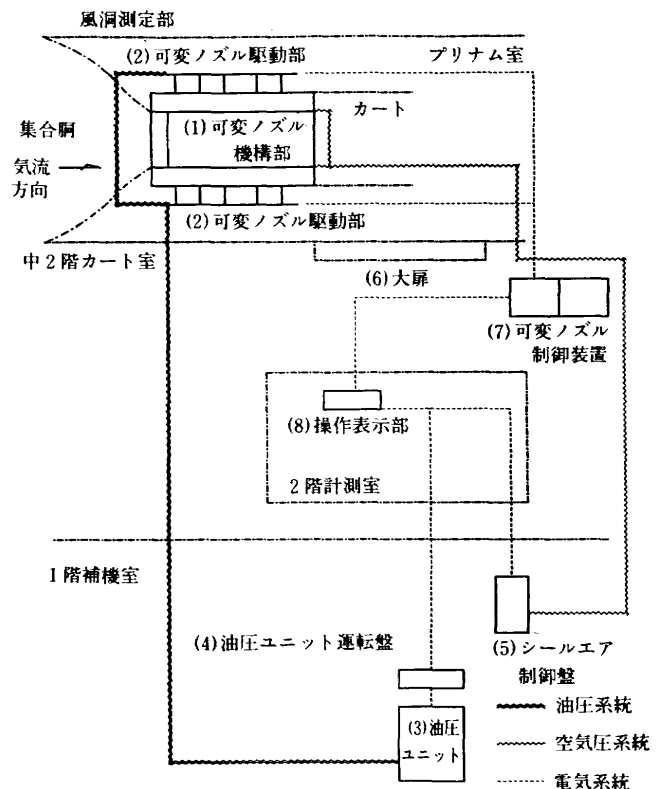


図2 可変ノズル装置の機器配置

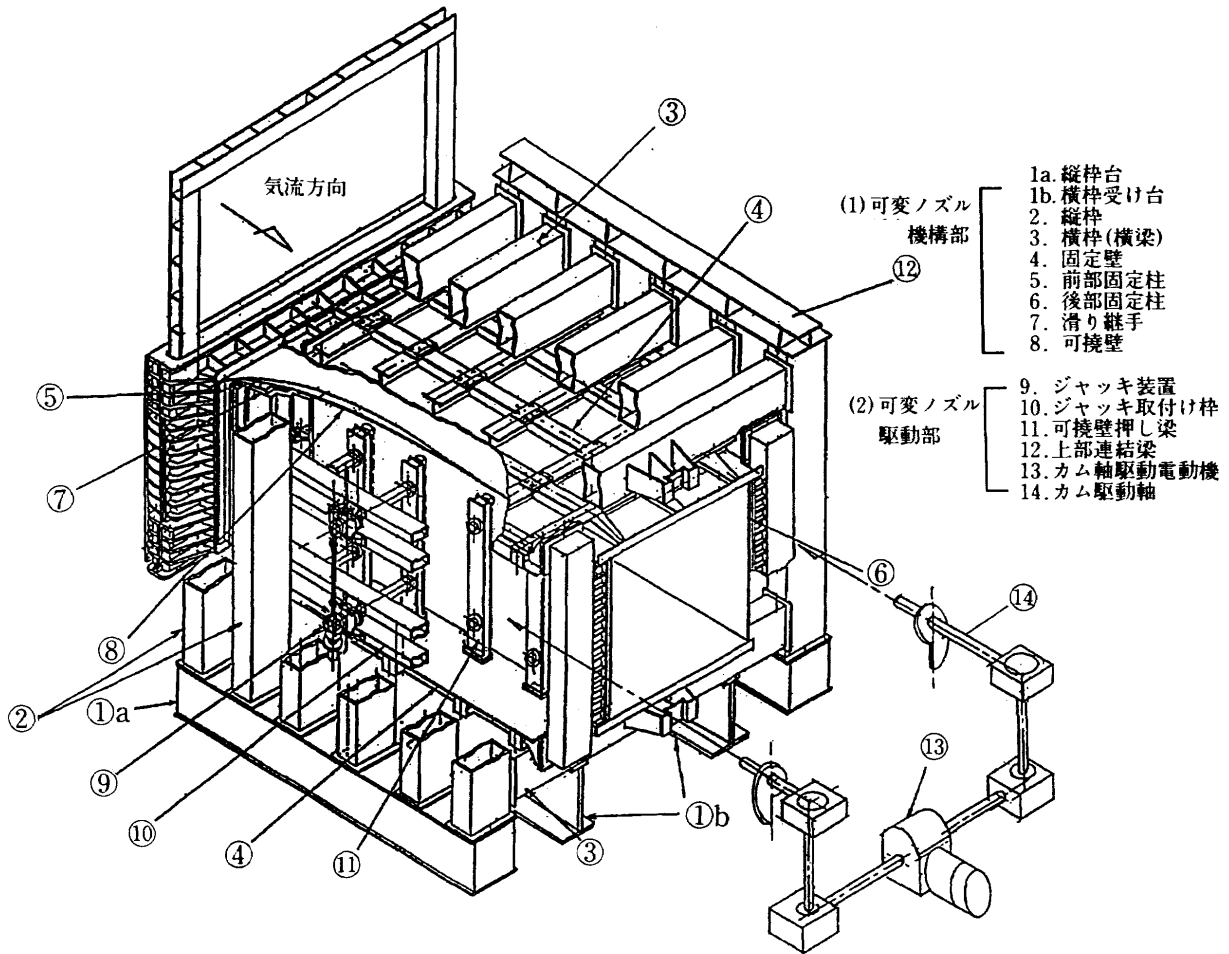


図3 可変ノズル装置本体の全体図

可変ノズル機構部の上下の④固定壁は、その内面(気流側の面)の平面度、及び上下の固定壁間の平行度を保つため、固定壁の外側は補強され、かつ③横梁と④上下の固定壁の接合面は、両側とも機械加工が施されている。

気流方向の左右に配置された⑧可撓壁は、⑤前部固定柱と、それに続く⑦滑り継手によって上流側を支持され、⑥後部固定柱により下流側を固定されている。⑤前部固定柱と⑥後部固定柱は、その機械的な位置が決まっており、⑤前部固定柱前端は、測定部の気流方向の基準位置となっている。

また、最下流にある上下の③横枠の中央と、左右の⑥後部固定柱の中央に、可変ノズルに対する測定部カートの機械的な位置決めを行うキーが4カ所設置されている。

## (2) 可変ノズル駆動部

可変ノズルの駆動部にある⑨ジャッキ装置は、個々の②縦枠の間に、⑩ジャッキ取付け枠とトラニオン軸受(図4の⑨)によって、片側5組づつ、左右10組配置されている。

②縦枠と⑧可撓壁の隙間に、可変ノズル本体の下流端から上流端に向かって⑭カム駆動軸が貫通し、その軸は

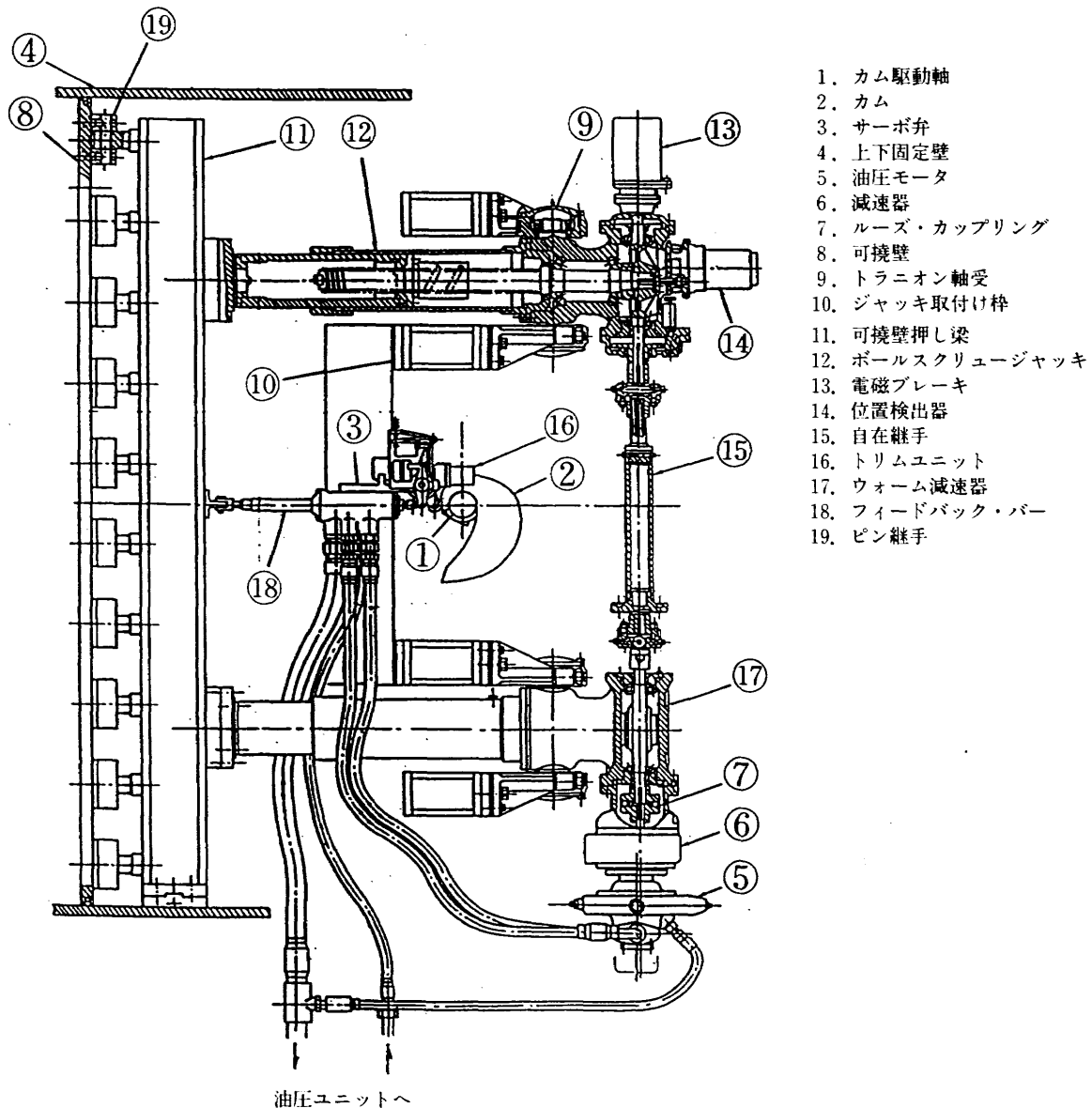
それぞれ2台のウォーム減速機と回転軸を組合わせることによって向きを変えて、プリナム室内の最下部にある⑬カム軸駆動電動機へと接続していた(図3を参照)。

図4に、可変ノズル駆動装置の断面図を示す。一組の駆動装置は、⑫ボールスクリーージャッキ(以後、ジャッキ装置という。)を、風路中心から上下に600mmの間隔で配置している。

ジャッキ装置の一方の軸端は、可撓壁に接続する⑪押し梁に固定されていて、押し梁の気流面側は、⑧可撓壁へ押し梁を接続するための⑯ピン継手が縦方向に配置されている。他方の軸端には、⑰ウォーム減速器と⑱位置検出器が取り付けられている。

上下のウォーム減速器の間は、⑲スプライン軸と自在継手で連結し、上側のウォーム減速器の軸端は、⑬ジャッキ用電磁ブレーキへと接続している。下側のウォーム減速器の軸端が⑦ルーズ・カップリングによって、⑥平歯車減速器と組み合った⑮油圧モータに結合している。

③サーボバルブは、⑯トリムユニットを介し、①カム駆動軸に固定された②カムへと繋がり、③サーボバルブへ繋がる配管は一方は油圧ユニットへ、他方は油圧モータへと配管されている。



1. カム駆動軸
2. カム
3. サーボ弁
4. 上下固定壁
5. 油圧モータ
6. 減速器
7. ルーズ・カップリング
8. 可撓壁
9. トラニオン軸受
10. ジャッキ取付け枠
11. 可撓壁押し梁
12. ボールスクリュージャッキ
13. 電磁ブレーキ
14. 位置検出器
15. 自在継手
16. トリムユニット
17. ウォーム減速器
18. フィードバック・バー
19. ピン継手

図4 可変ノズル駆動装置の断面図

②カムの形状については、片面の気流方向に配置された5台のジャッキ装置(左右で10台)ごとにカムの外形形状に違いはあるが、気流方向の左右対象位置にあるジャッキ装置のカムの外形形状は同じである。

②カムとサーボバルブスプールの間に配置された⑩トリムユニット(微調整機構)は、それらの中でローラカムフォロアを円弧運動させることによって、その間の寸法を変えられる。

ジャッキ装置の変位量は、②カムの回転によって与えられた変位量とは別に、⑩トリムユニットにより個々に調整(最大約±10mm)が可能である。その結果、測定部マッハ数(M=1.00からM=1.40)に対して決まっている可撓壁の形状(カム軸マッハ数で決まる。)を、それとは違った状態に変化させることが可能である。しかし、今まで行なわれている通常の風洞試験では、この機能は使用し

ていなかった。

#### 4.2 可変ノズルの補機類と運転操作の手順

次に、従来の運転操作の手順に従って、補機類について述べる。図5に可変ノズルの運動操作の手順を示す。この一連の操作は全て手動によって行われた。

可変ノズル装置の操作が必要な当風洞の低超音速領域(M=1.00からM=1.40)の通風については、主、補助両送風機との連携操作が必要であるが、これについてはここでは触れない。

##### (1) 油圧ユニットの起動(図5.①から③)

可変ノズル装置の油圧ユニットの動作について簡単に述べる。油圧ユニットは、③誘導電動機をその運転盤によって直入れ起動し、油圧ポンプを作動させる。一定時

間経過後、リリース弁が作動し一定圧(5.88Mpa)となり、負荷に対し油圧が供給可能となる。しかし、油圧は油圧遮断弁により止められ、油圧サーボ系には供給されない。

## (2) カム軸駆動電動機の電源(図5.④)

次の操作は、④カム軸駆動電動機の電源を操作表示部で投入することであるが、この電源は高回転用の電源と低回転用の電源の二種類がある。可変ノズルの運転にあたっては、どちらか一方の電源を選択して使用するようになっていた。通常は、カム軸駆動電動機で高回転が得られる前者の電源を使用していた。

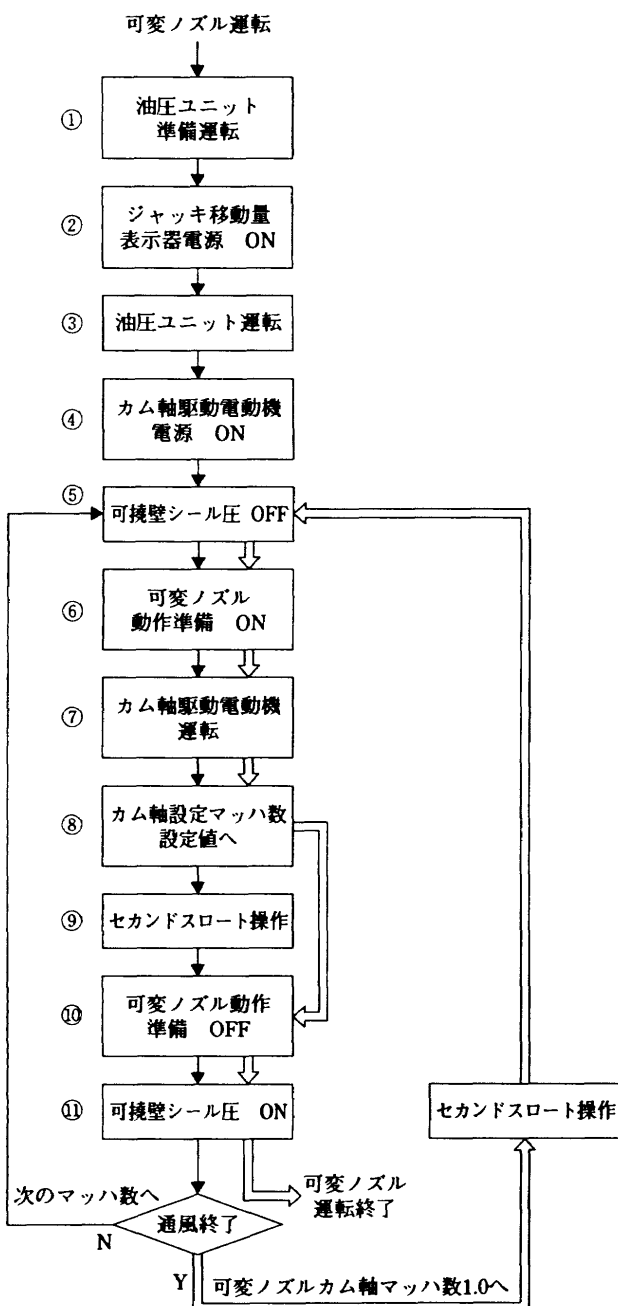


図5 可変ノズルの運転操作の手順

例えば、カム軸駆動電動機を高回転用の電源を使用し、運転した場合、カム軸マッハ数 $M_c$ が1.00から1.40に移動するのに必要な時間は、192sとなる。

以上で、可変ノズルの運転準備作業は終了し、以後はその運転作業となる。

## (3) 可変ノズルの運転(図5.⑤から⑩)

- 1) 可変ノズルの可撓壁には、上下の固定壁と可撓壁の摺動面から、気流側とその反対側の圧力差による空気洩れを防ぐために、気流方向に空気注入式のシールゴムが取付けられている。その空気注入式シールゴム内の圧力を、⑤シール空気制御盤内の電磁弁を動作させることによって下げる。
- 2) 計測室内の操作表示部で、手動によって⑥可変ノズル動作準備押釦を押すと、制御装置の働きによりジャッキ用電磁ブレーキ(図4の⑬)が励磁されて開放し、ジャッキ駆動軸が回転できるようになる。同時に、油圧遮断弁も開き、サーボバルブへ油圧が供給される。
- 3) 続いて、⑦カム軸駆動電動機の動作押釦を押すと、カム軸駆動電動機のブレーキが開放して、カム軸駆動電動機が回転する。同時に、それに接続しているカム軸とカムも回転を始める。
- 4) カムが回転することによって、サーボバルブスプールが可撓壁側へと押され、サーボバルブ本体とサーボバルブスプールの相対位置が、中立から油圧モータを回転させるポートを開く方へと状態が変化する。
- 5) ポートが開くと、油圧がサーボバルブ本体を介して油圧モータに加わり、油圧モータが回転する。その結果、停止状態であったジャッキ装置が伸び(縮み)方向へと動く。
- 6) ジャッキ装置が動いて可撓壁を押すと、可撓壁を押した量だけ、サーボバルブ本体がサーボバルブスプールと同方向に移動する。再び、サーボバルブ本体がサーボバルブスプールと相対的に中立な位置に戻ろうとする。
- 7) カム軸を回転し続けることによって、サーボバルブ本体に偏差が常に与えられ、ジャッキ装置の動作が連続的に行われる。
- 8) 操作表示部にあるカム軸マッハ数表示器により、カム軸マッハ数を確認し、所要のカム軸マッハ数 $M_c$ となる直前で押釦を開放し、⑧カム軸駆動電動機の動作を停止させる。
- 9) カム軸駆動電動機が停止してカム軸の回転が止まり、少し遅れてサーボバルブ本体が中立位置へ戻る。すると、油圧モータの回転が止り、可変ノズルの可撓壁の形状がカム軸マッハ数に対応した状態となる。



- 10) 続いて、測定部カートの後部に配置された⑨セカンドスロートの形状を、測定部マッハ数に対応する形状に変更する作業を行う。
- 11) その後、⑩可変ノズル動作準備を解除すると、先に述べたジャッキ駆動軸に接続している電磁ブレーキが作動し、同時に先の電磁弁も閉じる。その結果、サーボバルブ本体への油圧の供給も止る。
- 12) 再び、先の電磁弁を作動させることにより、⑪可撓壁と上下壁間のシールゴムに空気圧を加えて、可変ノズルの運転作業は終了となる。

尚、反対方向への可変ノズル装置の動作は、個々の要素の回転方向と移動方向が変化するだけで、上記と同様である。

可変ノズルを風洞試験の通風の都合によって、他の低超音速領域のマッハ数へ動かす場合は、上記の運転操作作業の繰り返しで行っていた。(図5.⑤から⑪)

次に、表1に可変ノズルの保護装置を示す。この保護装置は、可変ノズル装置を構成する機械部品の保護を図るため組付けられている。可変ノズルの異常な動作に対し、表1に示した項目の一つでも作動すると、可変ノズルはその動作を中止し緊急停止する。

## 5. 可変ノズル装置の改修について

可変ノズル装置の改修については、改修範囲を定めるのが大きな課題である。今回の可変ノズル装置の改修の目的を下記に示す。

- (1) 可変ノズル装置の機能の回復。
- (2) 可変ノズルの運転制御の自動化と操作性の向上。
- (3) 可変ノズル装置の整備性の向上。

今回の可変ノズル装置の改修にあたり、上記の目的から判断して、可変ノズル装置の機構部については、多少の機械的な改修は行うにしても、ほとんど以前と同様で

問題はない。従って、改修対象となるものは、老朽化による故障が頻繁に起る可変ノズル装置の駆動部と、可変ノズルの制御装置(位置検出部を含む。),及び高応力の繰返し荷重が加わると予想される可撓壁などに絞られる。

今回の可変ノズル装置の改修では、検討の結果次に示す方針で改修を行うこととした。

- (1) 可撓壁は継続して使用する。
- (2) ジャッキ駆動部は、油圧サーボ系から電気サーボ系へ変更する。
- (3) 制御装置は、シーケンサを用いた計算機リンクシステムへ切り換える。
- (4) 可撓壁(ノズル)の形状の計測を行う。

以下に、上記の項目の詳細について述べる。

### 5.1 可撓壁の継続使用について

可撓壁は、長さ4300mm、高さ1997mm、厚さ25mmの板状である。文献1)によると、可撓壁の材質はUSスチール製のT-1鋼であり、その機械的性質は引っ張り強さ882.6Mpa、疲労を考慮した場合でも、392.3Mpaまでは使用できると述べられている。

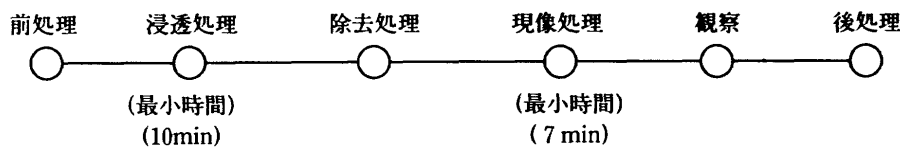
しかし、可撓壁の背面には、多数の機械加工を施してあるため、可撓壁の断面積の急変する場所は応力集中によって、上記の値より高応力になっている可能性があり、可撓壁が継続して使用できるか懸念された。

そこで、可撓壁を今後も継続して使用できるか判断するために、現時点での可撓壁表面上の欠陥の有無を調査することとした。今回は、JIS-Z2343の浸透探傷試験方法、及び欠陥指示模様等の等級分類の中に示されている、溶剤除去性染色浸透液と速乾式現像剤を用いた検査方法(浸透探傷検査)を採用した。表2に、浸透探傷検査の手順を示し、図6に左右の可撓壁の浸透探傷検査の範囲を示す。

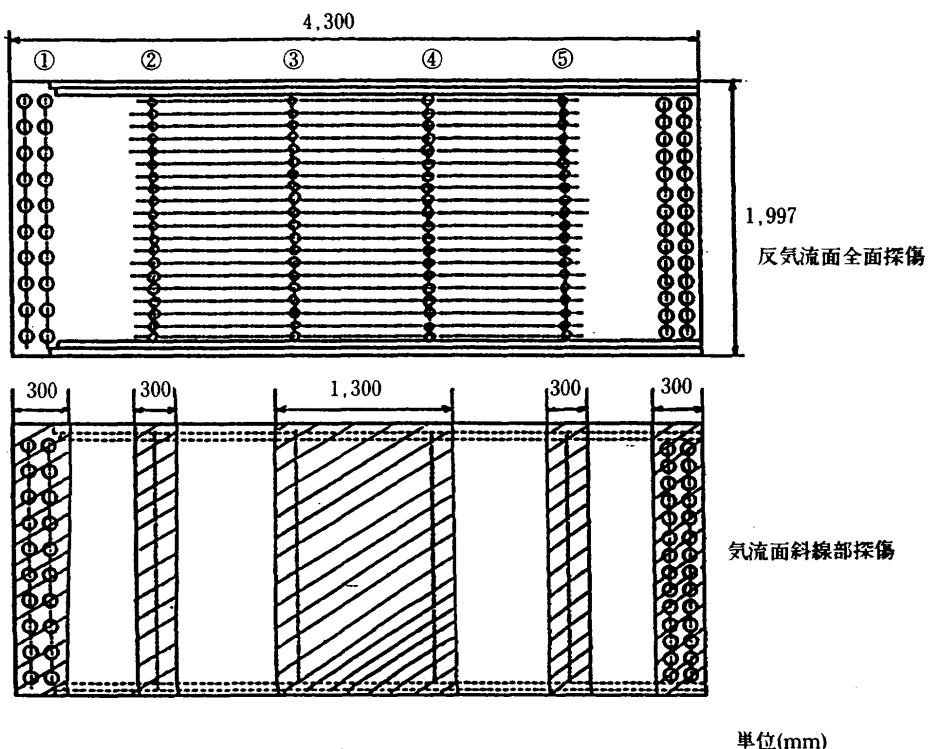
表1 保護装置

目的	限定範囲	検出機器	機器数量
ジャッキ伸縮量限定	可動量+10mm	マイクロスイッチ	1個*10組
サーボバルブ本体とスプールのズレ量	+4mm	マイクロスイッチ	2個*10組
トリム調整量限定	±10°	マイクロスイッチ	2個*10組
ジャッキ暴走防止	+1mm	マイクロスイッチ	1個*10組
カム軸回転角限定	可動量+4°	マイクロスイッチ	2個*1組
可撓壁応力監視	検出系故障により不明	歪みゲージストレインアンプ	可撓壁片側4箇所づつ

表2 浸透探傷検査の手順



浸透探傷試験範囲



浸透探傷試験規格

		表面状態	機械加工面	適用規格	JIS Z 2343
探傷方法：		溶剤除去性染色浸透探傷			
探傷剤	浸透液	SUPER CHECK (UP-NU)			
	洗浄液	" (UR-NU)			
	現像液	" (UD-NU)			
	乳化液	-			
		探傷条件	試験温度	23°C	
			前処理方法	溶剤洗浄	
			浸透時間	20分	
			現像時間	10分	
			標準試験片	-	

図6 可撓壁の浸透探傷検査の範囲

図7に、浸透探傷検査結果の一例を示す。それによると、可撓壁の製作時に入ったと思われる加工傷と、その取り付けと取り外しの時に入ったと考えられる打痕傷が少し観察されたが、全検査箇所とも疲労による欠陥は観察されなかった。この検査結果から、可撓壁は継続して使用することにした。

5.2 ジャッキ装置の駆動源の選択

ジャッキ装置の駆動源の改修にあたり、その駆動源を従来と同じ油圧系にするか、それとも電気系にするかの選択を行わなければならなかった。

表3に、駆動源の比較表を示す。その比較から、負荷容量(出力)を除いては一般的に電気系の方が油圧系より有利と考えられる。しかし、ジャッキ装置の駆動源を電気駆動とした場合、駆動源の配線経路において、電気的なノイズの発生を無くすことは非常に難しい。しかも、

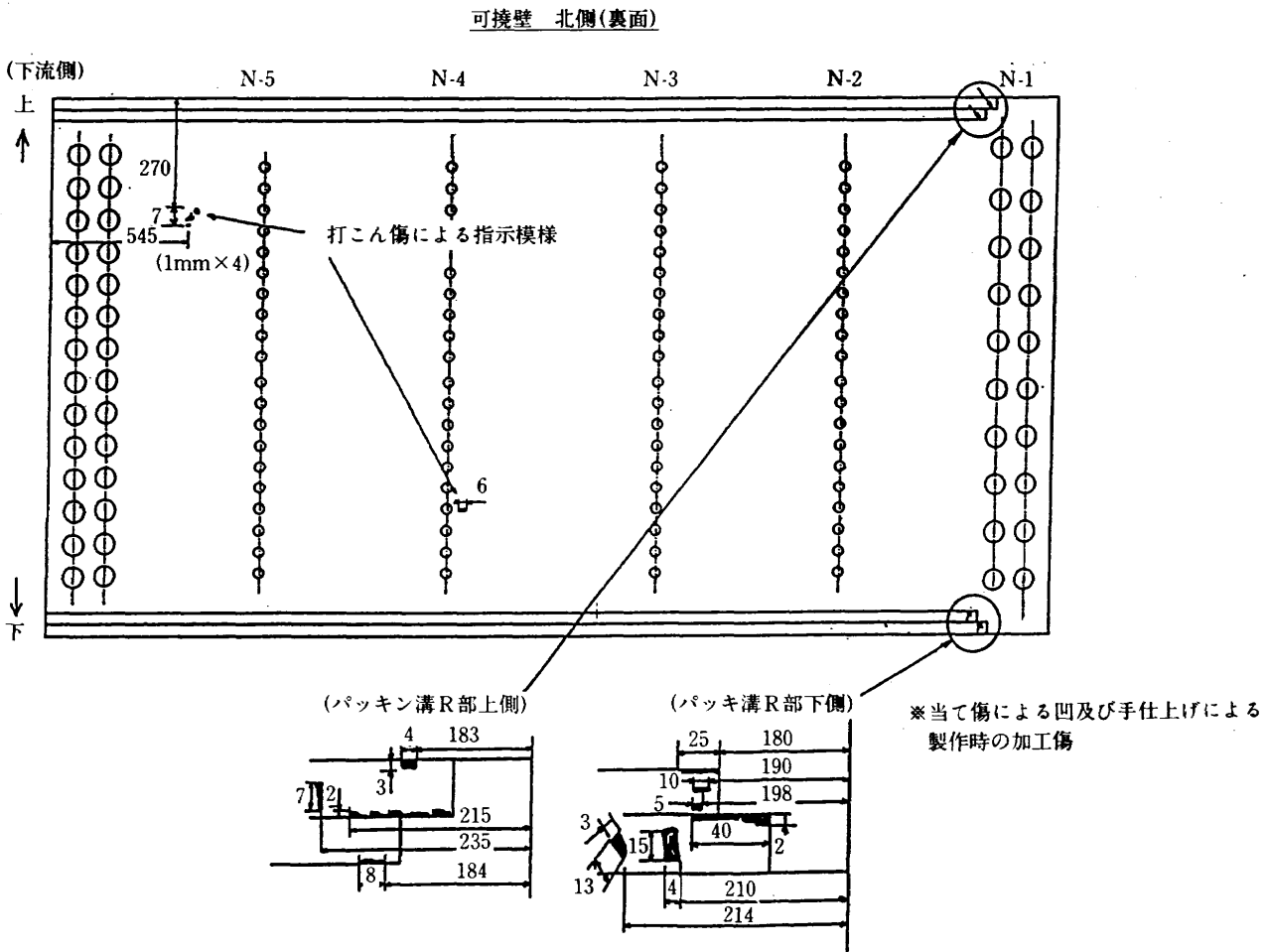


図7 浸透探傷検査結果の一例

表3 駆動源の比較表

種類/項目	構造	負荷容量	振動騒音	取扱性	保守性	周辺汚染
油圧駆動	△	○	×	△	×	×
電気駆動	○	△	○	○	○	○

ジャッキ装置の駆動系の配線経路の近くには、弱電系である風洞データの計測を行う計測機器類の配線も存在している。しかし、過去の風洞試験において可変ノズル装置の動作中に、その計測機器類を使用しながら通風データを取得することは行われなかった。従って、ジャッキ装置の駆動源からの電磁干渉の最も強い部分は、これを避けることができる。即ち、従来の手順にそって通風業務を行う限り、電気系の駆動源を採用しても支障はないと考えられるので、可変ノズル装置の駆動源として従来の油圧系を廃止し、電気系(サーボモータ)を採用することとした。

付録に、油圧モータに変るサーボモータ(以後、モータと言う。)の出力を推定する方法を示す。

一般的に市販のモータは、その電機子巻線の最高温度

が定められている。モータの機種決定にあたり、モータの使用される環境の最高温度と、モータの電機子巻線の運転による温度上昇分を考慮して、今回は付録に示す数値より大きめの枠番を持つモータを使用することにした。さらに、使用するモータ出力の詳細な検討により、機械側の安全を考慮するなどの使用上の理由によって、モータの一部の仕様値を標準値より下げることにした。表4に、同期型ACサーボモータの仕様を示す。

図8に、駆動源をモータとした場合の、可変ノズルの三面図を示す。

今回の改修作業にあたり、測定胴に関わる機械類の電源系、駆動系、制御系の配線類を分類し、既設の配線路、新設の配線ラックなどを活用して、それらの電圧レベルに応じて階層構造にして配線するために、改修作業に関

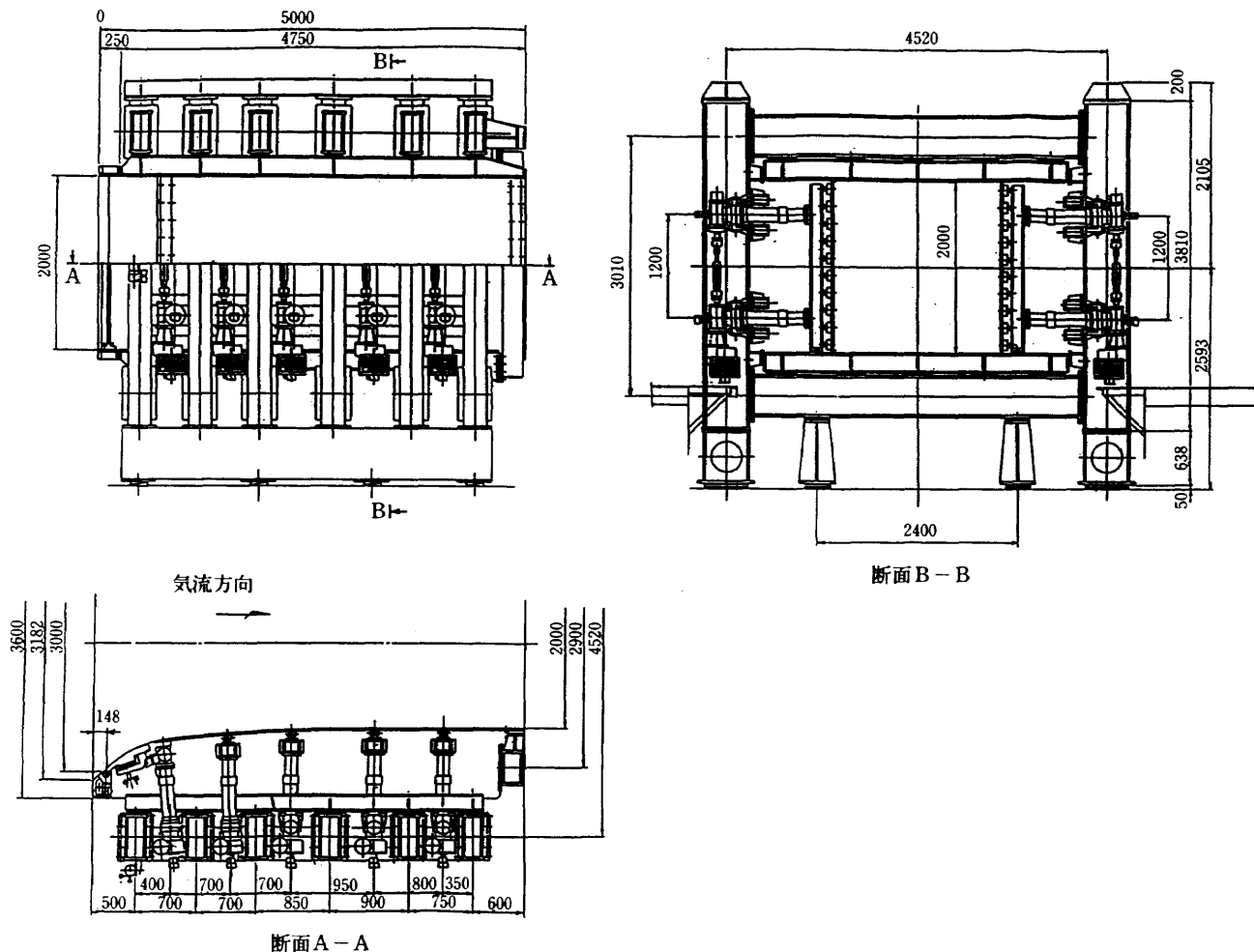


図8 可変ノズルの三面図

表4 同期型ACサーボモータ仕様

☆ 最大連続出力	4.5Kw
☆ 最大連続トルク	33.73Nm
☆ 最大ストールトルク	58.84Nm
最大回転数	1500rpm
使用周囲温度	-10~60°C
保持ブレーキトルク	44.13Nm
ロータ慣性モーメント	0.0216Kgm <sup>2</sup>

☆印は変更した仕様を示す。

る測定胴設備の制御盤類は、1階補機室にまとめて設置することとした。

5.3 測定胴設備の制御装置について

(1) 従来の測定胴設備の制御方法

従来の測定胴設備の制御方法は、測定室内に設置された監視盤、あるいは現場操作盤からの、手動によるリレー・シーケンス制御であった。従って、風洞の通風作業

中の作業者は、測定部マッハ数に応じて動作させる必要のある設備に対し、状況に応じて、それらを個別に操作して動かす必要があった。

さらに、マンマシン・インターフェース(作業者に機械側の情報を与え、また作業者が操作を行う機器類)が、表示管と表示灯の組合わせであったため、作業者が容易に風洞の状態を把握できる状態になかった。

測定胴の改修に関する問題を整理するために、個々の測定胴設備の制御方法による分類を試みた。図9に、測定胴設備の分類を示す。測定胴設備は、(1)制御を必要とするものと、(2)制御が不要なものに分類できる。制御を必要とする設備は、電気、油圧、空気圧の駆動源を持っていた。

従来の測定胴設備に関する問題点は、(老朽化に関する事柄と、空気力学的な事柄を除く)以下のように整理できる。

- 1) 測定胴設備の制御装置の風洞本体に対する配置場所の不統一。
- 2) 測定胴設備の電源部の位置の不統一と、その駆動源の違いによる取扱いの煩雑さ。
- 3) 測定胴設備の運転操作の手順が煩雑であること。

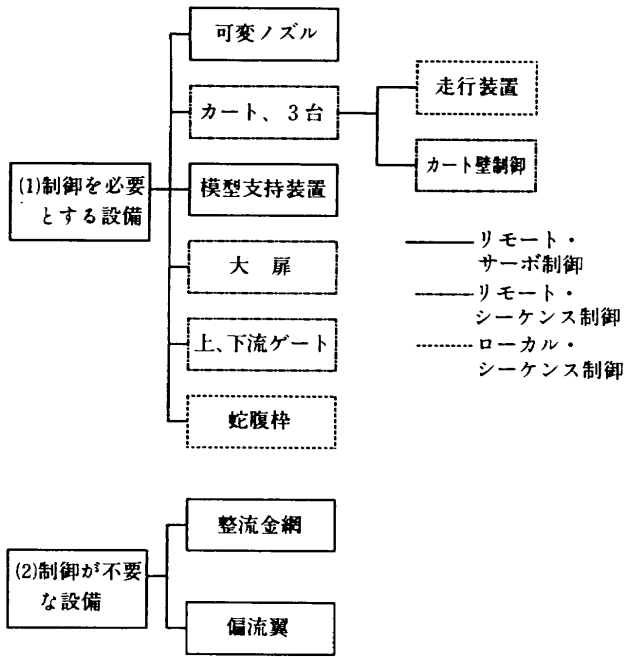


図9 測定胴設備の分類

4) 上記の要因が重複することによって発生する、風洞運転作業の効率の低下。

**(2) 測定胴設備の改修指標**

これらの点を考慮して、測定胴設備の改修については、下記に示す改修指標にそって行うこととした。

**改修指標**

- 1) 駆動源の種類の一歩化と電源系の位置の統一。
- 2) 測定胴機器の制御系情報の中央への統合。
- 3) 測定胴機器の機械系のメンテナンス・フリー化と、機械保護系の一層の充実。
- 4) 測定胴機器の自動化による、風洞作業の軽作業化。
- 5) マンマシン・インターフェースの充実による、風洞の通風作業の操作性と安全性の向上。

**(3) 新しい測定胴設備の制御方法**

測定胴設備の機械系も含めた構成要素については(特別必要であるものを除く。), 其の汎用性, 互換性, 耐久性, 品質の安定性, 価格等, 将来のメンテナンス上の理由により, 可能な限り一般市販品を使用するのが望ましい。

特に, 先に述べた図9の(1)制御を必要とする測定胴設備のうち, 可変ノズル, カート壁, 模型支持装置の三者は, それらの制御の自動化を考える時に, 通風中の連係動作の制御方法が重要と考えられる。

以上の理由により, 測定胴設備の制御系を市販のシーケンサを用いて, 計算機とシーケンサ・リンク(光リンク)を組合わせた, 計算機リンク・システム<sup>5)</sup>の三階層構造と

して構成することとした。図10に, 計算機リンク・システムの概念図を示す。

図11に, 測定胴設備のシーケンサ通信回路を示す。この通信回路網によって, 各測定胴設備の制御系がシリアル・リンク(光リンク, またはRS-232-C)を介して, 中央にある主制御装置と結合される。また主制御装置は, その配下にあるマンマシン・インターフェースを司る中央監視盤, 操作卓とも結合される。

各測定胴設備の制御に関わる情報は, 通信回路網を通して主制御装置に伝達される。その情報は主制御装置によって作業者に理解しやすいよう加工されて, 計測室にある中央操作卓上のCRTと中央監視盤に表示される。

この表示方法によって, 作業者は容易に風洞の状態が把握でき, さらに通風作業中に必要であった測定胴設備の設定の自動化も容易になる。

**(4) 可変ノズルの制御装置**

通信回路内の一つである可変ノズルの制御装置(以後制御装置と言う。)の構成は, 可変ノズル装置の駆動部を電気サーボ化したことによつて, 以前の制御装置の構成とは大きく変る。

可変ノズルの制御装置の備えなければならない機能は, 1) 可変ノズル装置の運転に関する機能と, 2) 可変ノズル装置を運転するための操作に関する機能に分けられる。それらは下記のように整理できる。

- 1) 可変ノズル装置の運転に関する機能
  1. 可変ノズル調整時のジャッキ装置個別手動運転
  2. 可変ノズルの動作確認運転

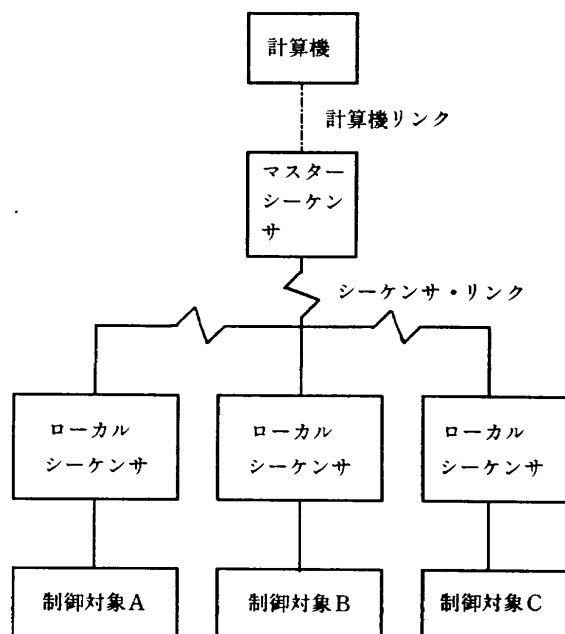


図10 計算機リンク・システムの概念図

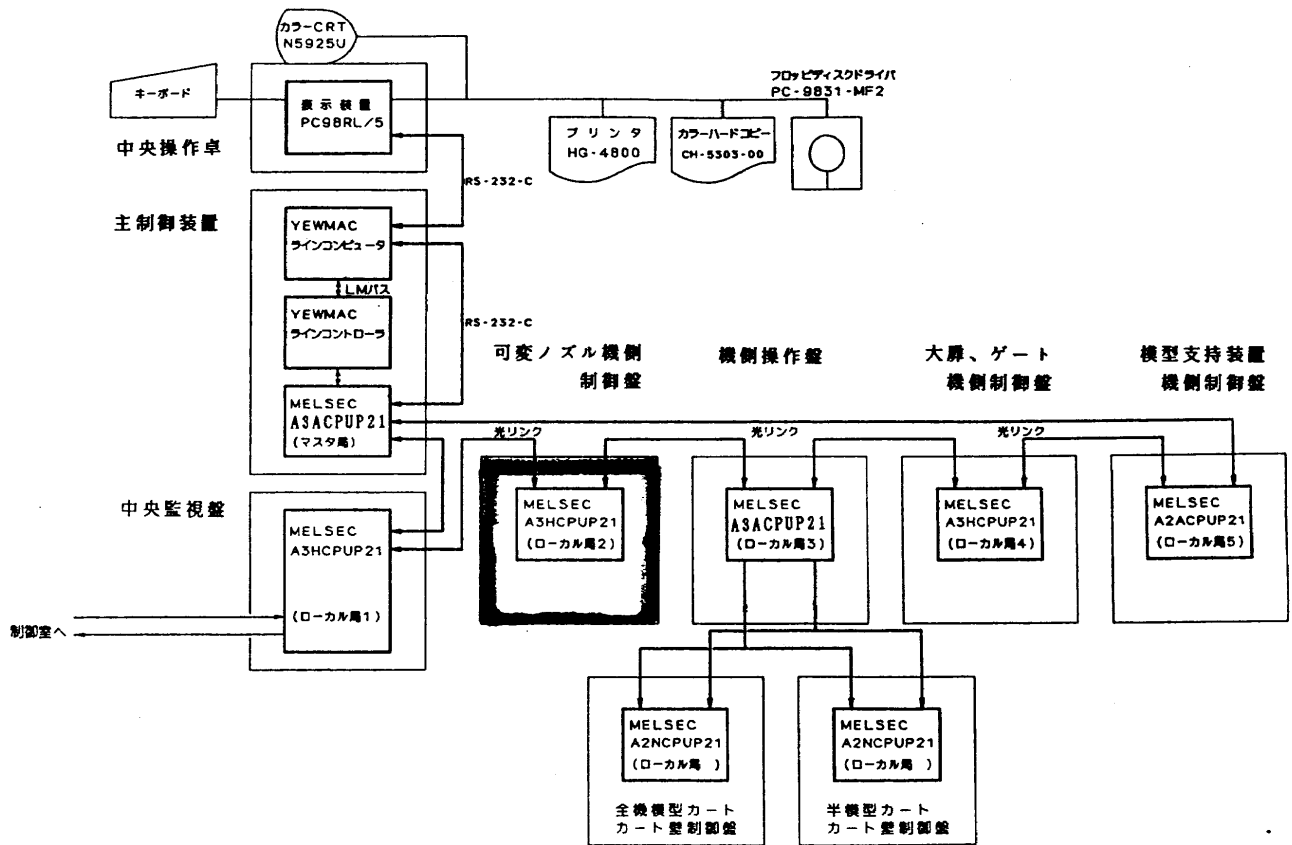


図11 測定胴設備のシーケンサ通信回路

3. 風洞通風時の通常運転

2) 可変ノズル装置を運転するための操作に関する機能

1. 可変ノズルの調整時のジャッキ装置個別手動操作
2. 現場での単独操作
3. 中央操作卓からの単独操作
4. 中央操作卓からの自動操作

その他に、中央操作卓から行なう可変ノズルの運転に必要な作業として、上に述べた2) 操作に関する機能の2項、3項、4項に必要な、a. 可変ノズルの設定マッハ数1.00~1.40までの動作時間(60s~300s)の設定、b. 対測定部マッハ数余裕の数値の設定作業がある。

場合によっては、3項、4項に関して、c. トリム量の設定作業も必要である。

(5) 可変ノズル制御装置の盤構成と操作方法

制御装置の盤構成と配置は、制御装置の構成機器の収納の都合と、その運転操作機能の振り分けを考慮して決定した。図12に、可変ノズル制御装置の配置と機能分担を示す。

表5に、操作場所と操作内容を示す。通常の変ノズル装置の操作場所は、中央操作卓と機側操作盤とした。中央操作卓からは、自動操作か単独操作のどちらか一つが選択可能であり、機側操作盤からは単独操作しか出来

ない。可変ノズル装置の操作場所の切り換えは、風洞無風時の作業上の安全保持を考慮して、機側操作盤でしかできない。(大扉、上下流ゲート、模型支持装置も同様の取り扱い方をしている。)

次に、制御装置における可変ノズルの自動操作と単独操作について述べる。

自動操作は、運転設定ファイルに示された通風を行う予定の測定部マッハ数(予定マッハ数)が1.00から1.40の間にある時に、可変ノズルが自動的に動作を行う。可変ノズルは、上記の予定マッハ数に対応したノズル形状になると自動的に動作を終了する。(運転設定ファイルに示された予定マッハ数が、主制御装置を介して可変ノズルの制御装置へ入力されると、それが可変ノズル設定マッハ数となる。)続いて、各測定部カートの後部にあるディスプレイフラップとセカンドスロットが、運転設定ファイル上の予定マッハ数の値に対する形状まで、自動的に動作して停止する。

単独操作の場合は、可変ノズル設定マッハ数(以後、ノズル設定マッハ数と言う。)を中央操作卓のキーボードか、機側操作盤の増減スイッチのどちらかで主制御装置に入力し、続いて駆動命令を出す。駆動命令によって、可変ノズルだけが、入力されたノズル設定マッハ数に対応したノズル形状になるまで動作して自動的に停止する。

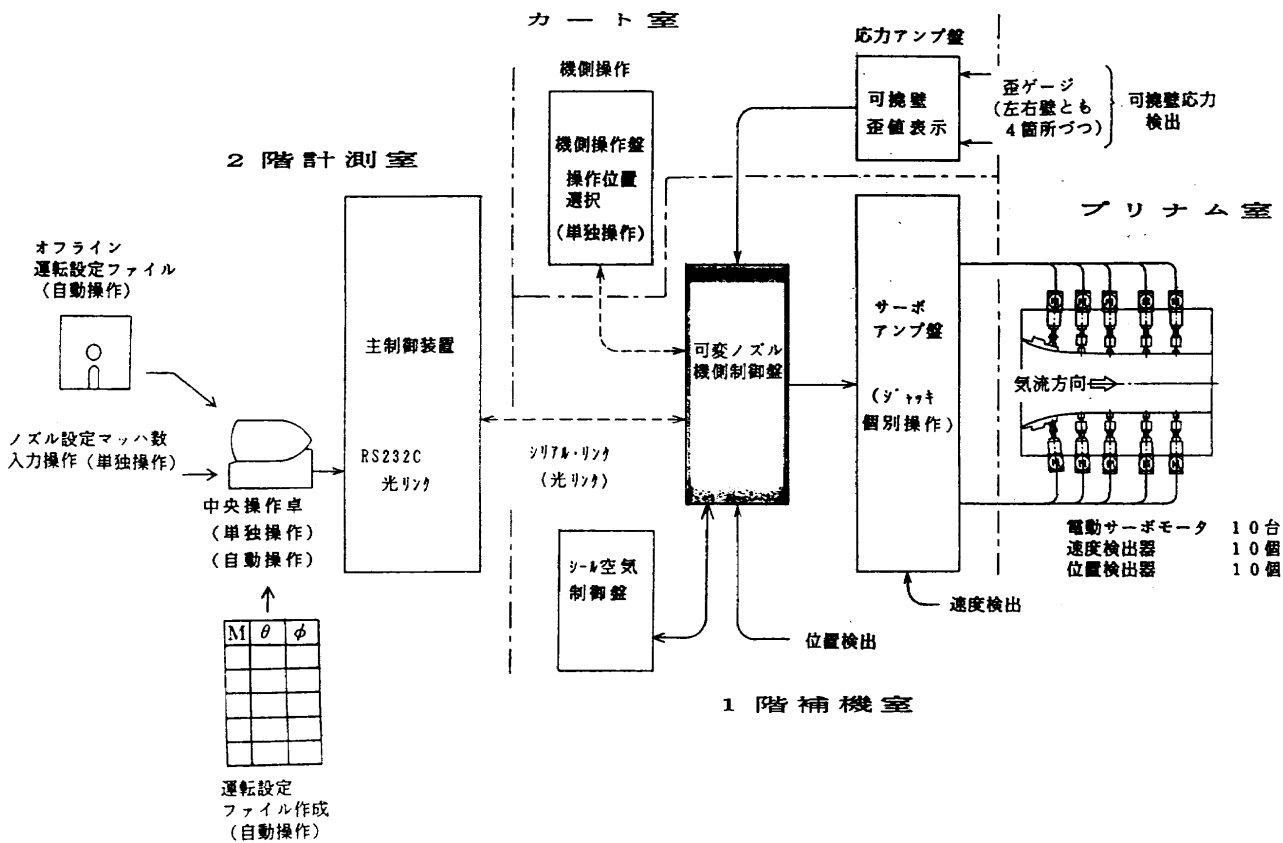


図12 可変ノズル制御装置の配置と機能分担

表5 可変ノズルの操作場所と操作内容

	単独操作	自動操作	ジャッキ個別操作	その他
機側制御盤	×	×	○	×
機側操作盤	○	×	×	×
中央操作卓	○	○	×	○

(6) 自動操作の制御手順

次に、可変ノズル装置の中央操作卓からの自動(単独)操作による制御動作について述べる。

図13に可変ノズルの制御タイムチャートを示す。

- 最初に、ノズル設定マッハ数が主制御装置に入力される。
- 制御装置に駆動命令(B008, B172)が入ると、動作シーケンスが自動的に動き出す。同時に、制御装置からシーケンサ・リンクによって、可変ノズル動作中(B0A1)の信号が中央の主制御装置へ送り返される。
- 制御装置によって、シール空気制御盤内にある電磁弁が作動し、可撓壁のシールゴムに加わっている空気圧が放出される。
- 続いてその圧力が、その盤内にある圧力スイッチの設定値以下(19.6Kpa)になり、制御装置がシール空

気放出完了状態を検出すると、T11(オンディレイ・タイマ)が働き、少し遅れてサーボアンプ盤内にある10台のサーボアンプが動作可能となる。

- 同時に、サーボモータ下部にある無励磁作動型のブレーキが励磁されて、ジャッキ装置のブレーキを解除する。
- 次に、制御装置の働きにより、サーボアンプからサーボモータに速度指令が与えられ、サーボモータが回転し、個々のジャッキ装置がノズル設定マッハ数に対応した可撓壁の形状へ向かって動く。
- 最終的に、ノズル設定マッハ数に対する各ジャッキの移動量が、あらかじめ与えられた値の規定値内(位置偏差 $\geq 0.04\text{mm}$ でジャッキ整定信号を出力、位置偏差 $\leq 0.05\text{mm}$ でジャッキ整定信号を保持)に入ったことと、ノズルマッハ数が設定値に達したことが制御装置の回路で判定されると、ノズル整定完了(以後、整定完了と言う。)を伝える信号が出力される。
- 次に、整定完了の信号が出力されるとT10(オンディレイ・タイマ)が働き、先のジャッキブレーキが作動する。
- 整定完了の信号が出力されることによって、T12(オンディレイ・タイマ)が働きサーボアンプが切れる。ノズルが整定して、ジャッキブレーキが作動していると、シールエア電磁弁が作動して、可撓壁のシー

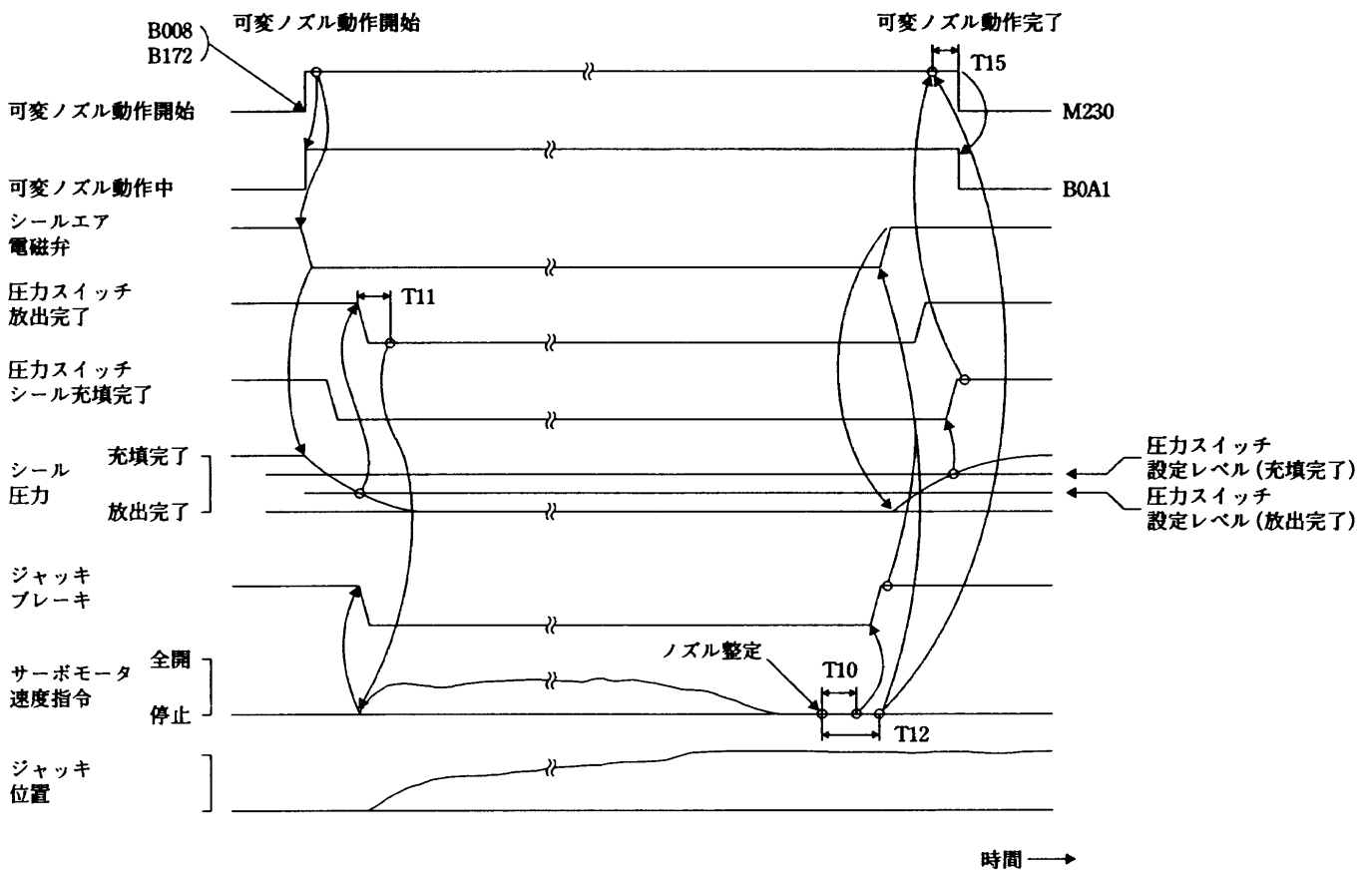


図13 可変ノズルの制御タイムチャート

ルゴムに空気が充填される。シールゴムの空気圧が圧力スイッチの設定値以上(372.6Kpa)になると、シール充填完了信号が出力される。

- 10) T12が働くことによって、サーボアンプ動作停止の信号が出力されている状態で、シール充填完了の信号が制御装置の回路によって検出されると、T15(オンデレイ・タイマ)が働いてリセット信号が出力される。
- 11) その結果、可変ノズル動作開始の信号(M230)が切れる。同時に、可変ノズル動作中の信号(B0A1)も切れる。

シリアル・リンクによって、可変ノズル動作中の信号(B0A1)が切れたことが、制御装置から主制御装置へと出力され、可変ノズル装置の一連の制御動作が終了する。

(7) 可変ノズル制御装置の要素

次に、図14に可変ノズル制御装置のブロック図を示し、ノズル設定マッハ数の信号の流れにそって、制御回路の要素について述べる。

1) ノズルマッハ数リミッタについて

このノズルマッハ数リミッタ(以後ノズルリミッタと言う。)の必要性は次のように説明される。

一般的に、可変ノズル内の流れはノズルスロートで音速に達し、そこから更に加速されてノズル出口では超音速となっている。一方で可変ノズル下流の測定部では、目標とすべき気流マッハ数(以後、測定部マッハ数Mと言う。)が設定されており、主送風機及び補助送風機の制御系は、設定された測定部マッハ数を実現するように主送風機の駆動部の回転数と、プリナム室内の抽気量の制御(補助送風機による。)を行なう。

ノズル出口のマッハ数 $M_N'$ が測定部マッハ数Mを越えない限り( $M_N' < M$ )、気流はノズル出口から測定部にわたって加速される状況にあり、流れは安定である。

逆に、ノズル出口のマッハ数 $M_N'$ が測定部マッハ数Mを上廻ると( $M_N' > M$ )、気流は自然にノズル出口から測定部に向かって減速を強いられ、超音速での減速は衝撃波を伴うのが通例であるから、測定部内に衝撃波が発生する可能性がでて来る。ひとたび衝撃波が発生すると、測定部内の壁形状の一様性から、これをつなぎ止めることは不可能で、衝撃波はノズルスロートから測定部下流の第一拡散胴入口迄の区間を前後に激しく移動し、気流を大きく乱す。同時に、送風機を始めとする各機器、及び風洞構造体に強い変動荷重を与えることとなり、最悪の場合それらの故障や破壊を引き起こすことになる。



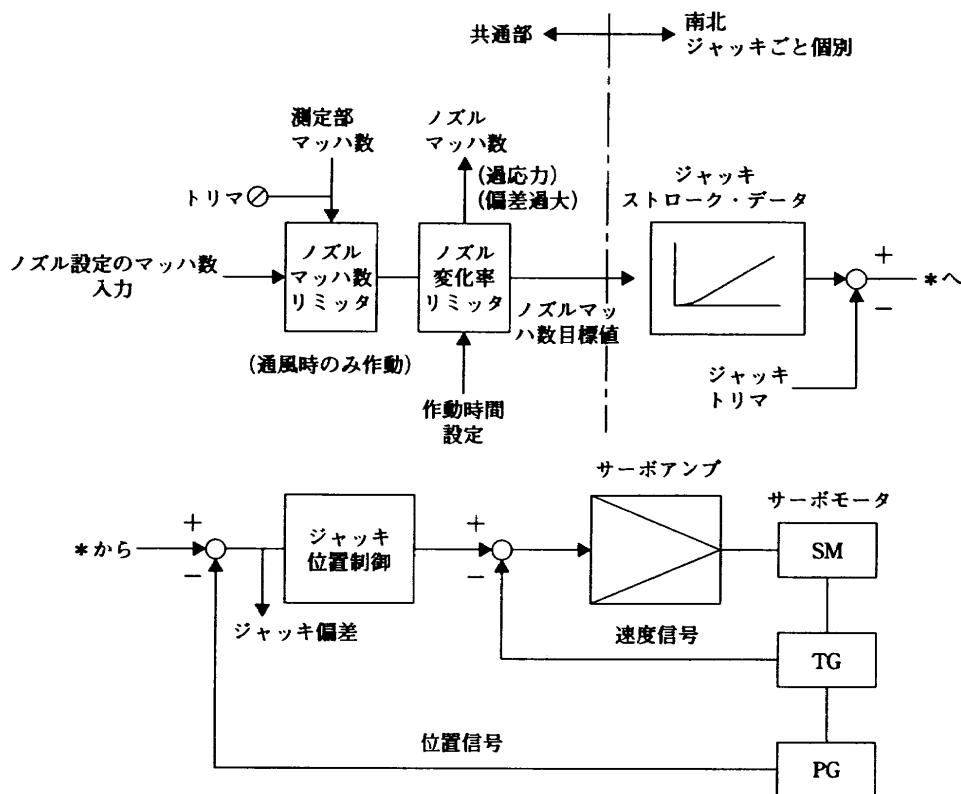


図14 可変ノズル制御装置のブロック図

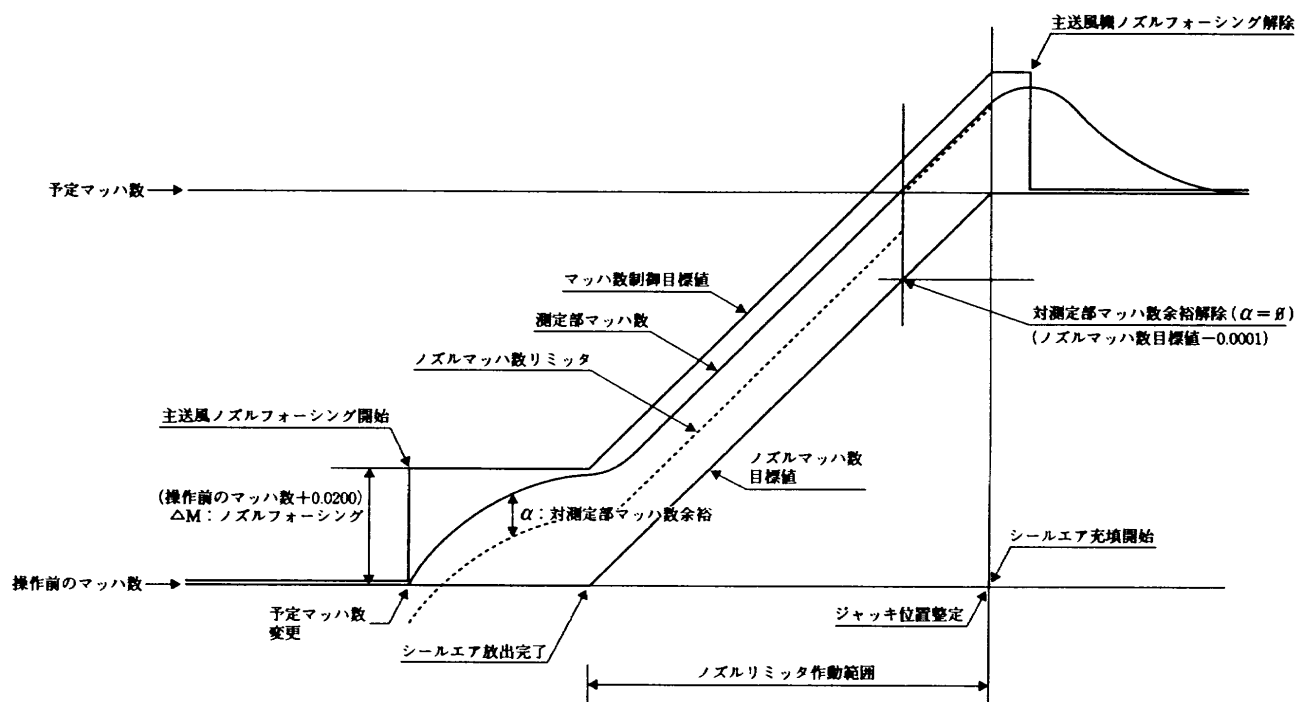


図15 ノズルリミッタの動作概念図

ノズルリミッタは、上記のような事態の発生を未然に防ぎ、風洞の通風時の作業の安全を図ることを目的として制御装置に組込まれている。ただし、風洞の無風時には、ノズルリミッタは作動しない。

ノズルリミッタの動作は、可変ノズル設定マッハ数目

標値(制御装置に入力されたノズル設定マッハ数まで、可変ノズルを動作させるために必要な連続する信号で、以後ノズルマッハ数目標値と言う。)を、常に測定部マッハ数以下に保ち( $M_T \leq M$ )、かつノズルマッハ数目標値を測定部マッハ数に追従させる。

図中のトリマ(通常、ノズルマッハ数余裕と呼んでいる。)は、風洞通風中の測定部マッハ数からノズルマッハ数目標値までの間の値を与え、この値は任意に設定可能(0.0から0.020まで)である。

図15に、ノズルリミッタの動作概念図を示す。

2) ノズル変化率リミッタについて

この他に、ノズル変化率リミッタ(以後、変化率リミッタと言う。)が取付けてある。変化率リミッタを取付けた目的を下記に示す。

1. 可変ノズルが動作する時に、個々のジャッキ装置の移動量の過渡的な不揃いを避ける。
2. 可撓壁の過大な応力の発生を未然に避ける。

変化率リミッタは、中央操作卓で与えられた可変ノズルの動作時間(60s~300s)によって、ノズルマッハ数目標値の変化率を決めている。

この変化率は、左右の可撓壁の8箇所(片側4箇所)の検出された応力の最大値と、ジャッキ装置個々に検出される位置偏差の最大値によって制限される。

応力と位置偏差の制限の敷居値は2段階設けられていて、それらの一方が1段目(0.15mm, 2750 $\mu$  strain)を越える値になると、変化率リミッタはノズルマッハ数目標値の変化率を、敷居値を越えた量に反比例するように低下させる。同様に、応力と位置偏差の一方が変化率リミッタの2段目の敷居値を越えると、可変ノズル装置は緊急停止を行う。

3) ジャッキ装置の位置制御系について

変化率リミッタから出力されたノズルマッハ数目標値

は、可撓壁左右に配置された5組の個々のジャッキ装置に対応した、ジャッキ移動量目標値の信号に逐次変換されて、ジャッキ装置の位置制御系へと入力される。

ジャッキ装置の位置制御系では、入力されたジャッキ移動量目標値の信号と、検出されたジャッキ装置の移動量の信号(図14を参照)との差を求め、求めた差(位置偏差)に応じた速度指令電圧への変換を行う。位置制御系は、位置偏差に応じた速度指令電圧( $\pm 9V$ が $\pm 1500rpm$ )をサーボアンプへと出力する。

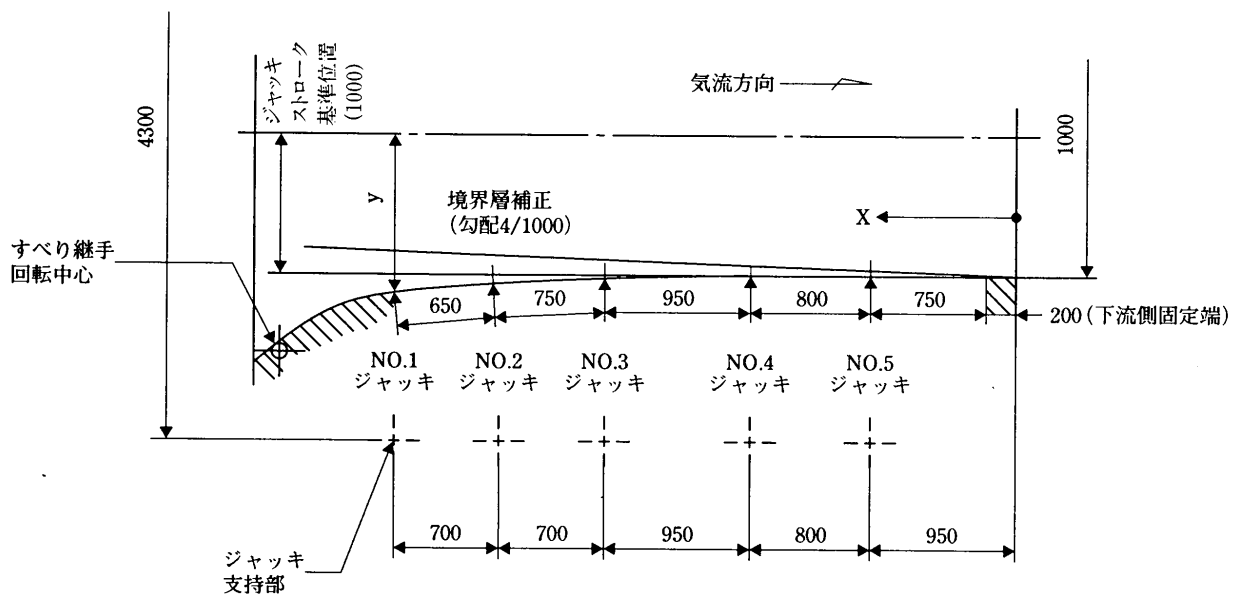
サーボアンプでは、与えられた速度指令電圧とモータの回転速度信号との比較を行って差(速度偏差)を求め、その差に応じた電流制御(PWM可逆制御)を行い、常に、モータの回転速度信号が速度指令電圧と対応するように制御している。

次に、ジャッキ装置の位置の検出精度について述べる。ジャッキ装置のボールスクリュウピッチが $P_B=12.7mm$

*** アラーム履歴 ***		84/28 11:27	
日付	時刻	アラーム内容	発生場所 復旧
84/28	11:22	可変ノズルジョールエア異常	1 F 補機室
84/28	11:21	防二ノズル下限オハトラバ	1 F 補機室
84/28	11:21	北二ノズル可変ノズル上限オーバー	1 F 補機室 11:27



図16 中央操作卓のCRT出力例



単位 mm

図17 可変ノズルの基準寸法

であって、位置検出器はその軸に直結している。位置検出器の分解能が2048パルス/一回転であるので、1パルスあたり6.2μmの機械的なジャッキ移動量が検出可能である。位置検出器の直線性誤差は、その回転角に比例した理想的な出力パルス数に対して、位置検出器の軸の回転角換算幅2°以下の範囲で動く。従って、検出されたジャッキ位置の内、約0.08mmの幅が、検出器にとっての検出最大誤差と見積られる。

4) 可変ノズル制御装置の保安機能

可変ノズル制御装置の検出する、可変ノズル装置の異常動作の項目を下記に示す。

1. 可撓壁応力過大(2段目)
2. ジャッキ偏差過大(2段目)
3. ジャッキストローク上限, 下限
4. 緊急停止要求(コンピュータ異常)
5. シールエア異常(シールエア放出と充填の渋滞も含む)
6. 位置検出器異常
7. サーボンプ異常
8. サーボンプの電流出力の制限(定格出力の60%)
9. サーボンプ電源喪失

可変ノズルの制御装置は、上記の可変ノズルの異常動作の内の一つでも検出すると、可変ノズル装置の異常が発生した時点で、サーボンプへの駆動電源供給を遮断し、同時に、モータ下部のジャッキブレーキを動作させてジャッキ装置を停止させ、可撓壁を故障発生時点の形状に固定する。ほぼ同時に、中央操作卓で警報を鳴らし、故障表示部に可変ノズルの故障点灯表示も行う。中央操作卓上のCRTに、故障の発生した日付と時刻、及びその内容と故障場所を表示する。

図16に、可変ノズル装置の故障時の中央操作卓のCRT出力例を示す。

可変ノズル装置の復旧操作は、CRT上に示された故障内容にそってその原因を探り、原因を取り除いた上で、中央操作卓上のアラームリセットスイッチを押し、装置を正常な状態とする。これによって故障表示灯が消灯し、同時に復旧時間がCRTに表示され復旧完了となる。

5.4 可撓壁の形状について

図17に、可変ノズルの基準寸法を示す。図中のXは、可変ノズル下流端を基点とする、可撓壁の内面にそった可変ノズルの反気流方向の長さを示す。図中のyは、風洞中心を基点とし、そこから可撓壁の内面の個々のジャッキ点の位置までの距離を表している。可撓壁の外面の数字は、可撓壁の内面にそった個々のジャッキ間の長さを表している。

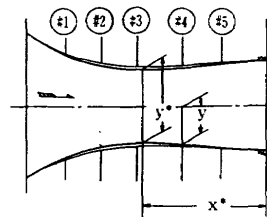
可変ノズルの可撓壁の内面に発達する境界層の補正分

として、可変ノズル下流端から上流側に向かって、可変ノズルの内側に向いて、4/1000の勾配が両側の可撓壁に与えられている。

従来の可変ノズルは、カムの外郭形状とカム軸回転角(これをカム軸マツハ数で表示していた。)で可変ノズルの可撓壁内面形状(以後、壁位置と言う。)を変更していた。今回の改修によって、従来のカム軸マツハ数がノズル設定マツハ数に変更される。従って、ノズル設定マツハ数で可変ノズルの壁位置を制御するためには、ノズル設定マツハ数に対応する壁位置を定める必要がある。

壁位置は、遷音速風洞建設時から改修直前まで、長期間に渡って、表6に示す文献<sup>2)</sup>に示された数値を目標として、調整されてきた経緯がある。従って上記の数値を、改修時の壁位置を定める基準として採用するのが妥当と考える。

表6 TR-25に示された可撓壁内面位置



各ジャッキ平衡位置(トリム零)(単位 mm)

カム軸設定マツハ数M	1.000	1.140	1.200	1.300	1.400		
y	北ジャッキ	#1	1121.7	1104.1	1094.7	1073.8	1062.8
		#2	1052.7	1026.7	1011.0	976.2	954.4
		#3	1004.8	982.4	964.0	929.2	888.6
		#4	994.6	981.4	973.2	955.6	932.3
		#5	996.8	994.0	991.8	987.9	981.1
	南ジャッキ	#1	1121.7	1104.1	1094.7	1073.8	1062.8
		#2	1052.7	1026.7	1011.0	976.2	954.4
		#3	1004.8	982.4	964.0	929.2	888.6
		#4	994.6	981.4	973.2	955.6	932.3
		#5	996.8	994.0	991.8	987.9	981.1
y*	第1最小断面	1989.2	1953.8	1922.4	1857.2	1775.2	
x*	同上位置 (ノズル出口より)	1750.0	2256.7	2441.5	2595.0	2600.0	

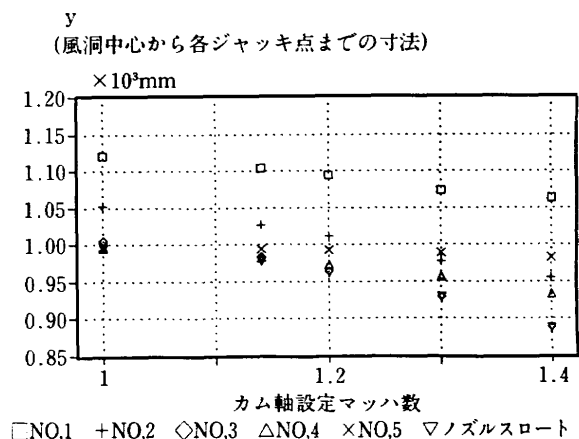


表7 可撓壁内面の基準位置

可変ノズル設定マッハ数に対する壁面位置(単位, mm)

可変ノズル設定マッハ数 $M_N$		1.00	1.14	1.20	1.30	1.40
y	北ジャッキ #1	1121.70	1104.10	1094.70	<u>1075.70</u>	1062.80
	"    #2	1052.70	<u>1025.40</u>	1011.00	<u>977.50</u>	<u>954.60</u>
	"    #3	1004.80	<u>982.11</u>	964.00	929.20	888.61
	"    #4	994.60	981.40	973.20	955.60	932.30
	"    #5	996.80	<u>993.87</u>	991.80	987.90	981.10
	南ジャッキ #1	1121.70	1104.10	1094.70	<u>1075.70</u>	1062.80
	"    #2	1052.70	<u>1025.40</u>	1011.00	<u>977.50</u>	<u>954.60</u>
	"    #3	1004.80	<u>982.11</u>	964.00	929.20	888.61
	"    #4	994.60	981.40	973.20	955.60	932.30
	"    #5	996.80	<u>993.87</u>	991.80	987.90	981.10
y*	第1最小断面	<u>1988.6</u>	1953.8	1922.4	1857.1	1775.3
x*	同上位置	<u>1962.8</u>	<u>2261.4</u>	2441.4	<u>2594.3</u>	2600.0

TR-25に示された、可変ノズルの壁位置に対する修正量

(単位, mm)

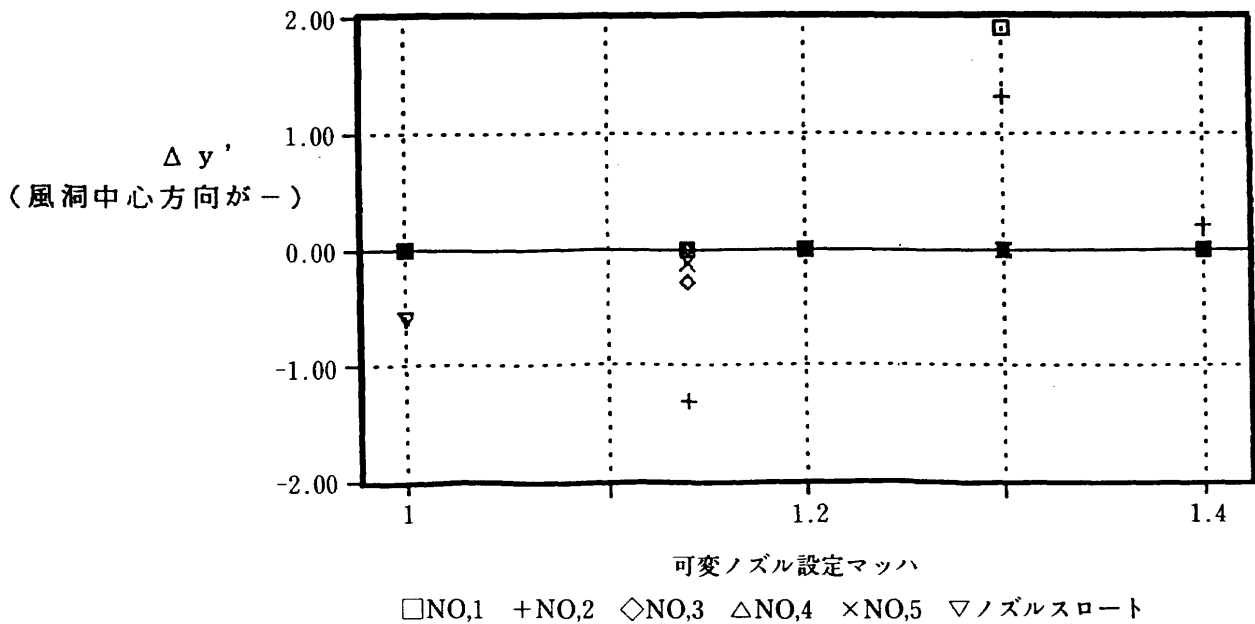
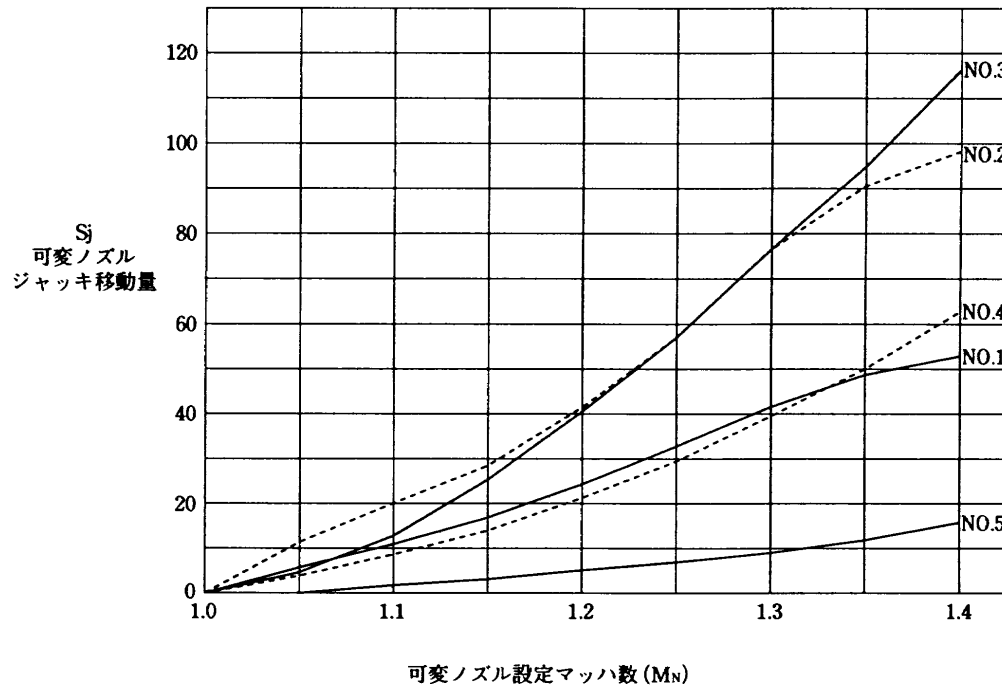


表8 ジャッキ装置移動量の計算値

可変ノズルジャッキ移動量計画値(mm)

ジャッキ マッハ数	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5
1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.05	5.89	11.92	4.54	3.82	0.37
1.10	11.09	20.21	13.05	8.62	1.70
1.15	16.95	29.34	25.43	14.46	3.26
1.20	24.16	41.71	40.78	21.42	5.01
1.25	32.50	57.58	57.67	29.59	6.83
1.30	41.24	76.50	75.57	39.06	8.92
1.35	48.81	90.68	94.76	49.97	11.68
1.40	52.87	98.10	116.17	62.45	15.76



ノズル設定マッハ数に対応する壁位置は、表6に示した数値を基本に、可変ノズル設定マッハ数1.00のジャッキ位置を基点として、5組のジャッキ装置それぞれに付き、マッハ数を代表とした多項式近似によって表わし求められた。表7にその結果を示す。アンダーラインの部分は、文献1)で与えられた数値を、新たに変更した値を示す。

ノズル設定マッハ数に対応する壁位置を制御するためには、図17に示した可変ノズルの基準寸法と表7に示した可撓壁内面の基準位置から、個々のジャッキ装置が必要とする移動量を定め、定めたジャッキ装置の移動量を制御装置へ記憶させておく必要がある。

表8に、個々のノズル設定マッハ数に対するジャッキ

移動量の計算値を示す。

## 6. 動作試験結果

ノズル設定マッハ数 $M_N=1.00$ から1.40と、 $M_N=1.40$ から1.00まで、可変ノズル装置を連続させて動作させた時の(作動時間の設定は60s)、制御偏差(位置偏差)出力の変化と、ノズルマッハ数目標値の変化を図18に示す。(図中の中央から斜下に向かって、あるいは図の下端から斜上に向かって変化しているのがノズルマッハ数目標値である。)

図18によると、各ジャッキ装置の制御偏差(位置偏差)の最大値が、ノズルリミッタの数居値の第1段を越えたため、図中のA点においてノズルマッハ数目標値の勾配

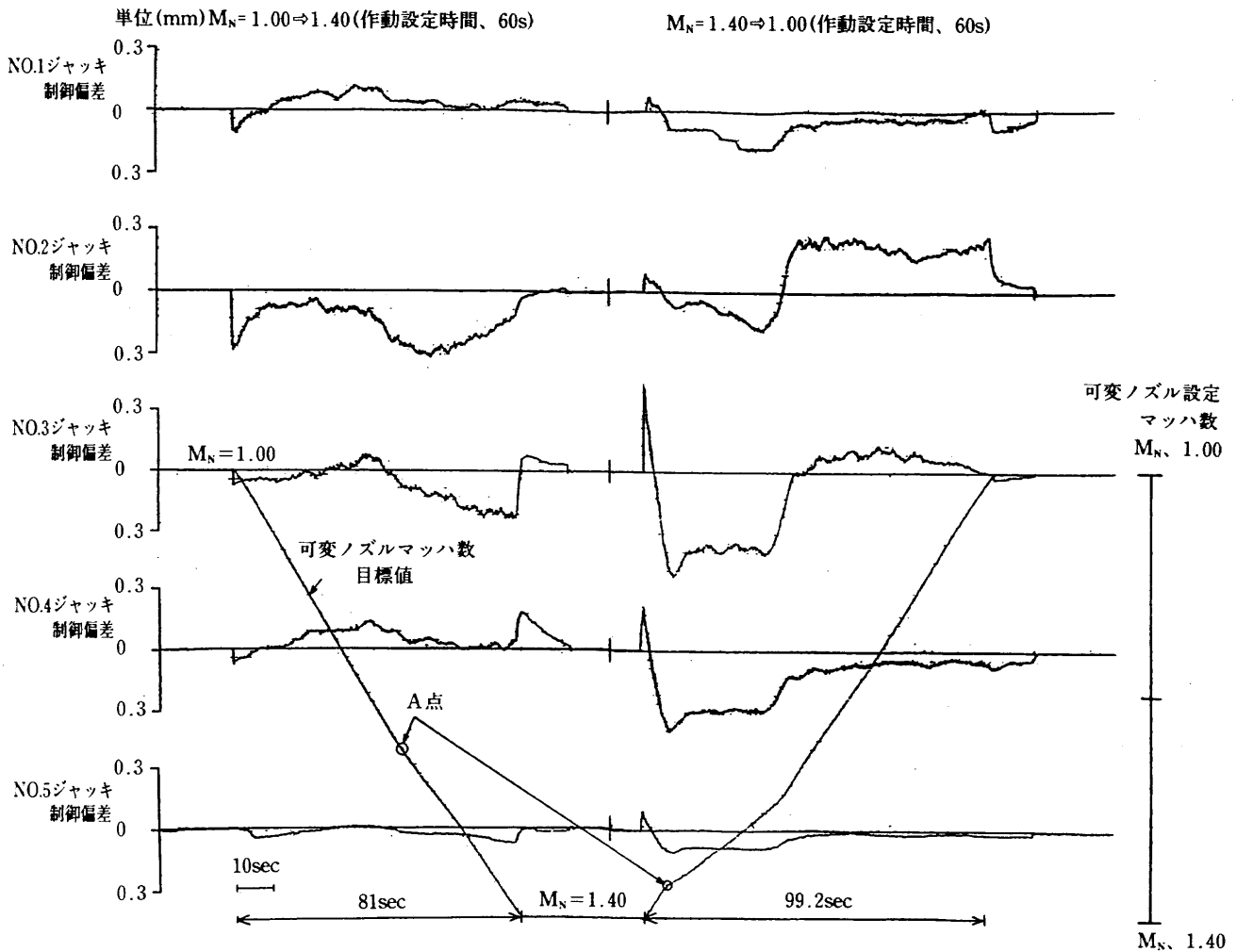


図18 ノズルマッハ数の変化と各ジャッキ装置の制御偏差の例

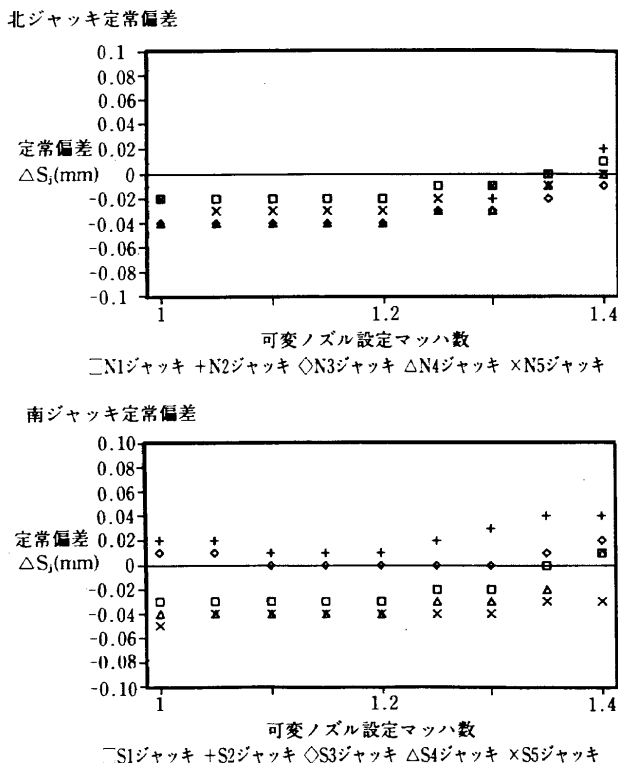


図19 各ノズル設定マッハ数におけるジャッキ装置の定常偏差

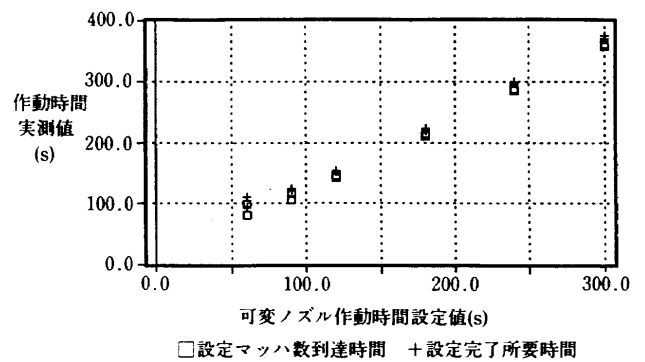


図20 作動時間設定値と作動時間実測値の対応

が緩くなっている。その結果、設定した作動時間に対して、実際の作動時間がかかなり長くなっている。このことによって、変化率リミッタが機能したことがわかる。

図19に、各ノズル設定マッハ数におけるジャッキ装置の定常偏差を示す。横軸はノズル設定マッハ数 $M_N$  ( $M_N = 1.00 \sim 1.40$ )を示し、縦軸は各ジャッキ装置の定常偏差の値を示す。図中の各点は、ノズル設定マッハ数ごとの各ジャッキ装置の実際の移動量 $S_{JR}$  (可変ノズルの作動完了後)と、表8に示したジャッキ移動量計画値 $S_j$ との差(定常偏差)を示す。( $S_{JR} - S_j = \Delta S_j$ )

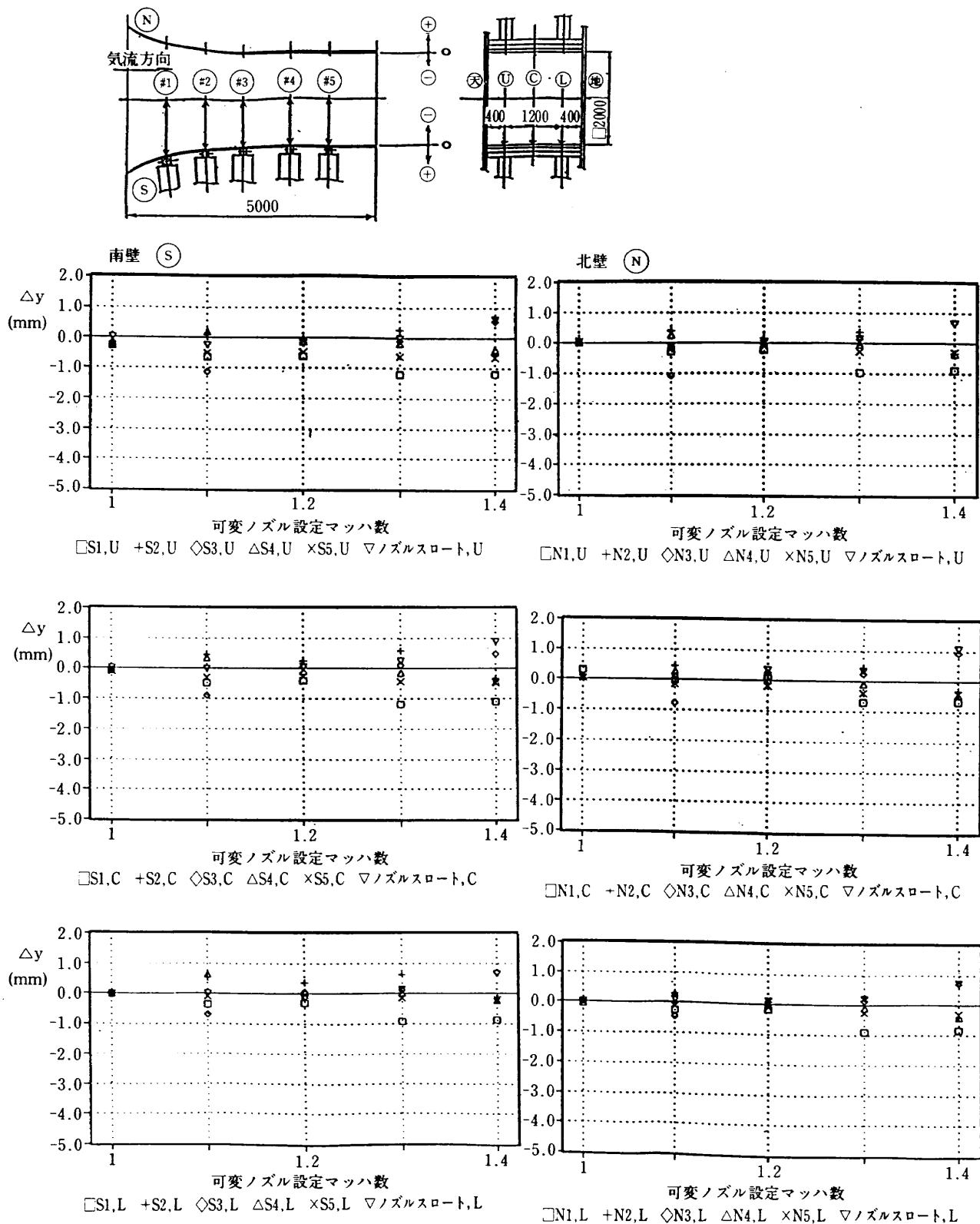


図21 改修後の可撓壁の内面位置誤差

これによると、各ジャッキ装置の定常偏差は、すべて±0.05mm以内に入っている。これは、先に述べたジャッキ位置検出限界の値とほぼ同じで、これを見る限りジャッキ装置の位置制御は、非常に良好に行なわれていると考えられる。

今回の改修では、ノズル設定マッハ数 $M_N$ の1.00から1.40までの変化に必要な時間(作動時間設定値)を、60s~300sの間で任意に設定が可能として計画した。

図20に、作動時間設定値と作動時間実測値との対応を示す。これによると、作動時間実測値は作動時間設定値

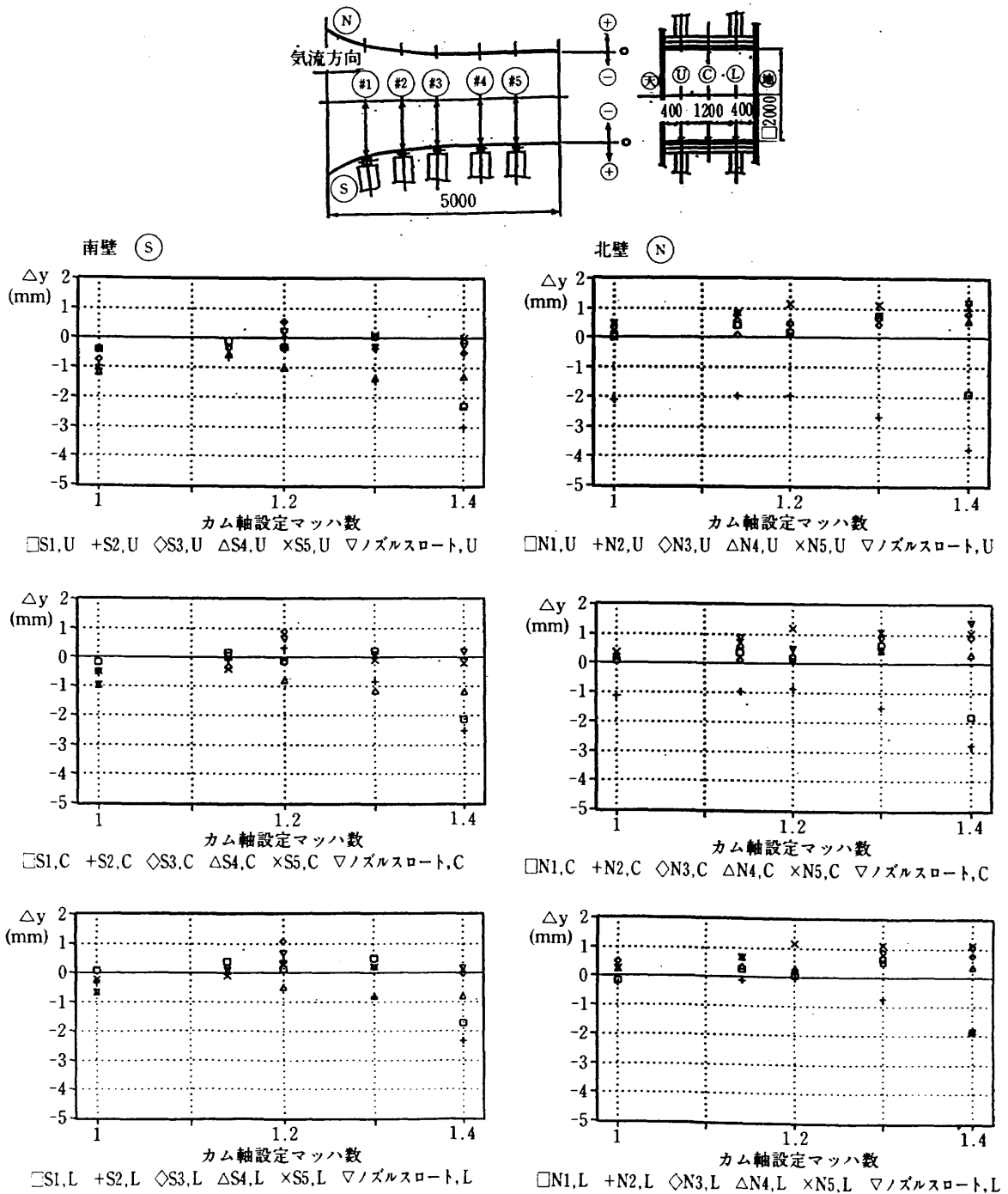


図22 改修前の可撓壁の内面位置誤差

に対し、設定時間60sの場合を除き、2割ほど多く時間がかかっている。しかし、ノズルマッハ数目標値がノズル設定マッハ数に到達し、各ジャッキ装置が個々に定位置に停止するのに必要な時間(整定完了時間)は、どの作動時間設定値についても約10sec程度でほぼ一定である。

次に、図21に改修後の可撓壁の内面位置誤差(壁位置の実測値と基準値との差)を示す。

壁位置の測定については、可変ノズルの下部固定壁を水平、垂直方向の基準面として定めた。その測定点は、個々のジャッキ点の垂直方向に、上側(記号, U)、中央(記

号, C)、下側(記号, L)の3点を代表点と定めた。図中の符号は、表7に示した数値を基準として、それより内側の気流面側を一方、その反対側を+方向として扱う。図中のジャッキ装置の番号は上流側からNo.1, No.2と続き、最下流のジャッキ装置をNo.5とした。横軸にノズル設定マッハ数を取り、縦軸は、個々のジャッキ点における、壁位置の実測値と基準値との差を示す。これによると、ノズル設定マッハ数1.00の時、壁位置の誤差は南壁、北壁とも僅かである。ノズル設定マッハ数1.20の場合も同様に見える。ノズル設定マッハ数1.30以上になると、



ほとんどのジャッキ点で、壁位置の誤差が僅かに増加する傾向がみられる。南壁、北壁とも基準位置から同じ方向(正または負)へ移動している。

今回の可変ノズル装置の改修においては、総合的な壁位置の設定精度を、表7に示した数値の $\pm 0.1\text{mm}$ 以内を目標としていた。しかし、ジャッキ装置のボール・スクリュウのバックラッシュの影響と、ジャッキ装置が高荷重で運用されるため、その取付け部を含んだ構造体の弾性変形の影響等の機械的な現象によって、残念ながらこの目標値は現在のところ達成されていない。

このことは、その詳細な原因追求を含め、いずれ解決しなければならないことと思われる。

参考のために、図22に、改修前の可撓壁の内面位置誤差を示す。これの基準値は、文献1)で示されている表6の数値である。可変ノズルの改修作業の前の状態での測定であったために、可変ノズル装置の老朽化の影響が加わって、このような数値になったと推測される。

図21と図22を比較すると、最大3mm以上あった壁位置の基準値と実測値との差が、1.1mm以下に減少している。

次に、図23に可撓壁の応力計算値と応力実測値との対応を示す。この計算値は、ノズル設定マッハ数ごとの壁位置に応じた、個々のジャッキ点での可撓壁の応力を求めたものである。一方の実測値は、可撓壁の反気流面側にある歪ゲージ(各ジャッキ点の100mm下流側に取付けられている。)により検出された値をもとに、求めた可撓壁の応力である。横軸は、ノズル出口を基準位置(0mm)

として、そこからノズル前部固定柱の前端(5000mm)迄の間のジャッキ点の位置を示す。縦軸は、ノズル設定マッハ数ごとの可撓壁の応力の値を示す。白抜き記号は、ジャッキ点、及び後部固定柱の前端の応力計算値で、黒塗り記号は、歪ゲージの出力から求めた可撓壁の応力の実測値である。応力計算値と応力実測値を比較すると、それらは良い対応を示していると言える。ただし、図中に文献1)に述べられている、可撓壁の疲労限界の値(392.3Mpa)を越える数値が見られるのが気掛かりではある。

## 7. まとめ

2m×2m遷音速風洞の可変ノズル装置の改修を行ったことにより、次に示す機能の向上が得られた。

- (1)測定胴制御装置に計算機・リンクシステムを取入れ、その一部に可変ノズル制御装置を組入れたことによって、下記の効果が得られた。
  - 1)可変ノズル制御とカート壁制御が自動化され、風洞の通風作業に、より一層の安全性と操作性の向上をもたらした。
  - 2)風洞の通風業務に必要な操作と監視作業が、マンマシン・インターフェースに計算機を使用することによって、非常に容易となった。
- (2)可変ノズル装置の駆動部を油圧系から電気サーボ式に変更し、駆動部と可変ノズル制御部を分離したため、可変ノズル装置の運転と保守が今までより、効率的に行えるようになった。

可変ノズルの改修で得られた、設備の自動化による操作性の向上と作業の安全性の向上は、その後の測定胴の改修作業にも反映された。このことが、今回の測定胴の改修作業における最大の成果の一つである。

## 8. 今後の課題

可変ノズル装置の今後の課題として、以下の点を検討する必要がある。

- (1)改修された装置に対する、機能維持のための保守の内容とその間隔を策定すること。
- (2)可撓壁内面壁位置の目標値に対する“ズレ”の解消を図ること。

## 9. 謝辞

今回の改修を進めるにあたって、遷音速風洞関係者をはじめ、多くの方々には多大なご協力を頂いた。特に、川崎重工工業株式会社の原動機事業部の方々、そして工事関係者の方々には、測定胴改修の基本計画の段階から工事終了まで、多大なる御尽力を頂いた。

ここに記して、皆様に厚く感謝の意を表します。

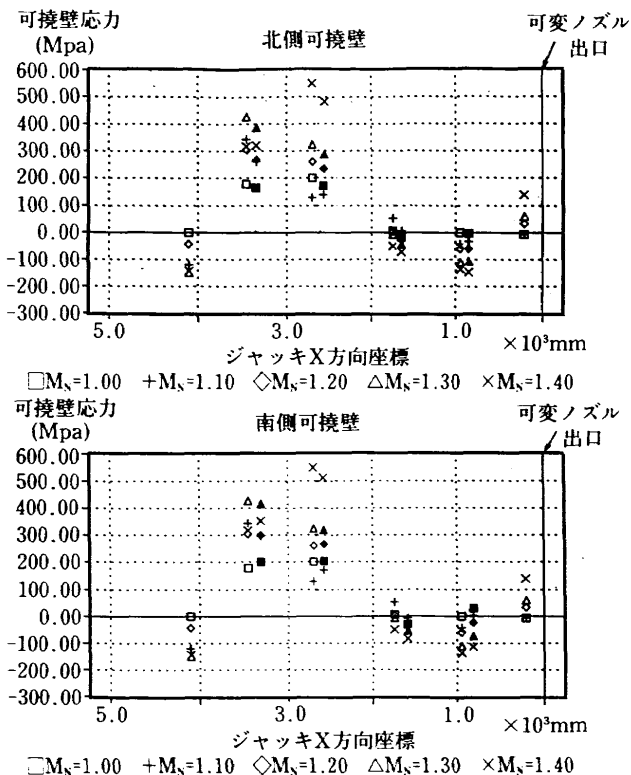


図23 可撓壁の応力計算値と実測値の対応

## 参考文献

- 1) 航空宇宙技術研究所；航空技術研究所，2m\*2m遷音速風洞の計画と構造，航技研報告TR-25(1962)
- 2) 計測自動制御学会；自動制御ハンドブック(機器応用編)(1983)，オーム社
- 3) 日経BP社；日経メカニカル別冊，メカ設計術(1993)
- 4) 機械設計便覧編集委員会編；機械設計便覧，(1983)，丸善
- 5) 三菱電気株式会社；三菱汎用シーケンサ，ユーザーズマニュアル，(1989)

## 付録．サーボモータの出力の推定方法

## 1. 記号

$F_j$	: ジャッキ反力(N)
$i_m$	: モータ出力軸減速比(1/2)
$i_w$	: ボールスクリュウ軸減速機の減速比(1/40)
$J_L$	: モータ軸換算の慣性モーメント(Kgm <sup>2</sup> )
$J_m$	: モータの回転子と保持ブレーキの慣性モーメント(Kgm <sup>2</sup> )
$N_m$	: モータ回転数(rpm)
$P_B$	: ボールスクリュウピッチ(mm)
$P_{max}$	: モータ最高動力(Kw)
$P_N$	: 可変ノズル静圧(Pa)
$P_o$	: 集合胴総圧(Pa)
$P_s$	: プリナム静圧(Pa)
$t$	: 移動時間(s)
$T_L$	: モータ負荷トルク(Nm)
$T_{max}$	: モータ最高必要トルク(Nm)
$T\alpha$	: モータ加速トルク(Nm)
$\Delta y$	: ジャッキ移動量(mm)
$\alpha$	: モータ角加速度(rad/s <sup>2</sup> )
$\eta$	: モータ軸までの減速機等効率
$\eta_o$	: その他の効率
$\eta_B$	: ボールスクリュウ効率
$\eta_m$	: モータ軸減速機の効率
$\eta_w$	: ボールスクリュウ軸減速機の効率
$\omega$	: モータ角速度(rad/s)

## 2. サーボモータの出力の推定

従来の可変ノズル装置の油圧モータの仕様は軸出力0.9Kw，回転数1200rpm(油圧5.884Mpaの時)であった。今回の可変ノズル装置の改修にあたっては，可変ノズルのノズル設定マッハ数が1.00から1.40まで変化するのに必要な時間を，60s~300sの間で任意に選択可能とした。

モータの出力を決定するためには，可変ノズル装置の駆動系が負担する負荷を決めなければならない。

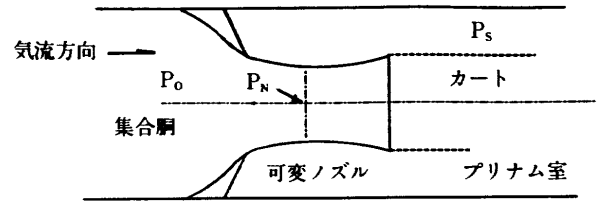


図24 測定部の略図

モータの負荷としては，摩擦等で損失するものを除いて，(1)可撓壁の変形の時に要する力と(2)可撓壁の両側の差圧による力の両者を加えたものである。(1)の最大値は，過去の資料から判断して，ノズル設定マッハ数 $M_N=1.40$ の時のNo.3ジャッキの反力である。No.3ジャッキの可撓壁の両側の差圧の推定には，以下のような風洞の通風状態を仮定した。図24に測定部の略図を示す。

風洞の澁み点圧力 $P_o$ については，文献1)の第1.5図より，測定部マッハ数1.00の時の澁み点圧力 $P_o=141.18$  Kpaを採用した。上記の状態では，可変ノズルスロート部がマッハ数 $M=1.00$ となり，その時に測定部マッハ数が $M=1.40$ になっていると仮定する。(1)式によって，それぞれの静圧は $P_N=74.58$ Kpa， $P_s=44.36$ Kpaと求まり，その結果，No.3ジャッキに加わる可撓壁の内側と外側の圧力差による力は，51.97KNとなる。

$$P_o/P_s = (1 + 0.2M^2)^{3.5} \quad (1)$$

以上より，No.3ジャッキが負担しなければならない負荷は余裕を見て，測定部マッハ数 $M=1.00$ の時は $F_j=55.9$ KNと定め，測定部マッハ数が $M=1.40$ の時の負荷は， $F_j=300.0$ KNと定めた。

可撓壁の最大移動量は，文献1)の第6.1表より，No.3ジャッキのカム軸マッハ数 $M_c=1.30\sim 1.40$ の間にある。その移動量 $\Delta y$ は $\Delta y=40.6$ mmである。

次に，従来のジャッキ装置の減速比の仕様を，以下に示す。

従来のジャッキ装置の減速比

ボールスクリュウピッチ： $P_B=12.7$ mm

ボールスクリュウ軸減速比： $i_w=1/40$

油圧モータ軸減速比： $i_m=1/6.25$

従って，従来のジャッキ装置を使用して，可変ノズルの可撓壁形状を1.00から1.40まで変化させるのに必要な時間を従来の約3倍とするためには，(1)サーボモータ(以下，モータと言う)の回転数を上げるか，または，(2)減速機の減速比を変えるかのどちらかになる。

一般的に言って，可変ノズルの制御系が位置決めサーボ系となるので，可撓壁の設定位置の誤差の減少と整定時間の短縮を図る都合から，モータの回転数を約3倍にも上げるのは好ましくない。従って，今回は(2)の減速比を変える方法を選択し，従来の油圧モータ軸減速比 $i_m=1/6.25$ を新しいモータ軸減速比 $i_m=1/2$ とすることとし

た。

モータの必要回転数は(2)式によって求められる。モータの回転数の決定には、市販のモータの中から必要な回転数を満たすものを選定することとなる。今回は、(2)式で求めたモータの必要回転数に余裕を見て、モータ回転数 $N_m$ を $N_m=1500\text{rpm}$ と定めた。(ノズル設定マッハ数が、1.00~1.40まで変化するのに必要な時間が最小60sであるので、その間のマッハ数の変化率を一定と考えると、それが0.10の変化するのに必要な時間は15sとなる。)

$$N_m = (60 \cdot \Delta y / P_B \cdot t) \times 1 / i_w \times 1 / i_m \quad (2)$$

モータの負荷トルク $T_L$ は、先に述べた数値を用いることによって、(3)式によって求められる。その負荷トルクはノズル設定マッハ数 $M_N=1.00$ の時 $T_L=3.63N_m$ 、また $M_N=1.40$ の時 $T_L=19.10N_m$ となる。

$$T_L = (F_j \cdot P_B / 2 \pi) \times i_m \times i_w \times 1 / \eta \quad (3)$$

ここで、 $\eta = \eta_B \cdot \eta_w \cdot \eta_o \cdot \eta_m$ とする。

モータの加速トルク $T\alpha$ は、モータに最大の負荷トルク $T_L$ が加わったとした状態から、0.5sでその定格回転数まで加速するとして、その加速トルクを求める。

(モータ軸換算慣性モーメント： $J_L=20.8 \times 10^{-3} \text{Kgm}^2$ 、ロータ慣性モーメント $J_m=21.6 \times 10^{-3} \text{kgm}^2$ )

$$T\alpha = J_T \cdot \alpha \quad (4)$$

ここで、 $J_T = J_L + J_m$ とする。

$$T_{\max} = T_L + T\alpha \quad (5)$$

$$P_{\max} = T_{\max} \cdot \omega \times 10^{-3} \quad (6)$$

(4)式より $T\alpha=13.3\text{Nm}$ となって、結果としてモータの最高必要トルク $T_{\max}$ は、(5)式より $T_{\max}=32.4\text{Nm}$ となる。その時のモータ最高動力 $P_{\max}$ は(6)式より、 $P_{\max}=5.1\text{Kw}$ となる。

実際のモータの機種選定にあたっては、モータの使用状況(運転頻度と負荷の程度等)によって、実効トルク等の詳細な検討が必要であるがここでは省略する。

TM-670	CAD設計によるUSB-STOL機半截模型の風洞試験(第2報) Wind Tunnel Investigation of a USB-STOL Transport Semi-Span Model (II)	1994年11月	高橋 侖, 奥山 政広 藤枝 郭俊, 藤田 敏美 岩崎 昭人
TM-671	空気封入式パラグライダー模型の風試結果について Wind Tunnel Investigation of Paraglider Models with a Closed Canopy	1994年11月	奥山 政広, 岩崎 昭人 藤田 敏美, 藤枝 郭俊 高橋 侖, 玉置 元昭 宮下 純一
TM-672	実験用航空機ドルニエDo228-200型機の地上走行及び飛行振動試験 Towing and Flight Vibration Tests of the NAL Dornier 288-200 Flight Research Airplane	1994年12月	安藤 泰勝, 峯岸 正勝 松下 洸, 齊藤 健一 外立 政隆, 藤井 謙司 中村 勝, 照井 祐之 鎌田 幸男
TM-673	精密測定技術とその航空機構造模型形状測定への応用 Precision measuring technique and its application to the profile measurement of aircraft structure model	1994年12月	染谷 昭夫, 井上 育三
TM-674	航技研遷音速風洞の測定胴設備改修の概要について Refurbishment of the NAL 2m×2m Transonic wind tunnel test section	1995年1月	鈴木 弘一, 細江 信幸 中村 正剛, 小池 陽 飯島 由美, 小国 保男 河本 巖, 海老原正夫
TM-675	極超音速飛行実験(HYFLEX)基本設計初期構想 ——予備設計結果—— Basic Concept for the Preliminary Design of the Hypersonic Flight Experiment, HYFLEX	1995年1月	NAL/NASDA HOPE 研究共同チーム HYFLEXサブグループ
TM-676	航技研におけるガスタービンおよびジェットエンジン燃焼器研究開発 Research and Development of Combustors for Gas Turbine and Jet Engines in the National Aerospace Laboratory	1995年1月	田丸 卓
TM-677	航技研0.1m×0.1m遷音速低温風洞の気流測定(その2) Measurement of Free-Stream Properties in the NAL 0.1 m×0.1m Transonic Cryogenic Wind Tunnel(Part II)	1995年1月	青木 竹夫, 澤田 秀夫
TM-678	キールチューブ付5孔ヨーメータを用いた速度ベクトルの測定におけるデータ処理 An Improved Data Reduction Method in the Measurement of Velocity Vector by a 5-hole Yaw-meter With a Kiel Tube	1995年3月	室田 勝一, 野中 修 近藤 洋史, 林 良生
TM-679	遷音速における二次元LFC翼の感温液晶による遷移点の可視化試験 Measurement of the boundary layer transition point over a 2-D LFC airfoil in transonic flow using liquid crystals	1995年3月	野口 正芳, 石田 洋治 須谷 記和, 佐藤 衛 神田 宏

## 航空宇宙技術研究所資料680号

平成7年4月発行

発行所 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 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北1-7-8