

航技研二次元風洞の改修 (制御関連について)

佐藤 衛, 神田 宏, 須谷 記和, 重見 仁, 戸田 亘洋
空力特性研究部 二次元風洞研究室, 空力特性研究室
(航空宇宙技術研究所)

Revitalization of the NAL Two-dimensional Transonic Wind Tunnel
(Renewal of the Wind Tunnel in the relation to Control System)

Mamoru Sato, Hiroshi Kanda, Norikazu Sudani,
Masashi Shigemi and Nobuhiro Toda
(NAL)

概要

航技研二次元風洞の改修工事終了に伴い風洞の特徴について報告する。測定部を大型化することによって模型付近の流れに及ぼす側壁の影響が軽減化された上、作業性(安全性)が向上し、また従来の二次元翼型試験に加えスティング、ストラット方式による三次元模型試験が可能となった。さらに可変ノズルを新設することでマッハ数領域を1.4まで拡張した。

1. はじめに

航技研二次元風洞¹⁾は1979の年建設から20年近くが経過し約9000ブローの試験を行い、貴重なデータを提供してきた。しかし、電子部品等の経年劣化による老朽化が進み、制御装置の誤動作或いは不作動が頻発する状況に陥り、さらに制御回路用モジュールの製作中止により風洞試験の実施に大きな支障をきたすようになっていた。このため風洞改修の費用を得る努力を重ね、平成7年～9年度にかけ風洞改修を行う費用を得て改修を行うことができた^{2),3)}。現在風洞改修後の制御機能と安全性を確認するための通風試験が行われている状況である。風洞本体は二次元風洞本来の特徴である高レイノルズ数流れを得る加圧方式をそのまま受け継ぐことを基本とした吹き出し式風洞である。改修には現在までの風洞試験結果から得た改良すべき点^{4),5)}等を考慮に入れ、一部は既設部分を流用した。改修

の主な箇所として次の項目を取り入れた。気流の低乱化装置として集合胴内のサウンドサプレッサ部の増設、側壁境界層吸い取り装置の改修、および調圧弁下流側に多孔板を増設した。安全対策として調圧弁の上流側に仕切弁を新設した。また測定部の大型化に伴い、三次元模型試験装置(スティング・ストラット)の新設が可能となった。さらにマッハ数範囲の拡大を図る可変ノズル、抽気フラップ、および作業性の向上を目指し、拡散胴のテレスコープ化機能を新設したのでそれぞれの機能について報告する。

2. 改修の目的

- (1) 経年劣化による老朽化が進んだ装置の活性化
- (2) 安全性および作業性の向上
- (3) 風試範囲の拡大, 取得データの高精度化以上を目的に改修を行った。

3. 改修による新たな可能試験および特徴

- (1) マッハ数範囲の拡大 ($M=0.2\sim 1.4$)
- (2) マッハ数スイープ試験
- (3) レイノルズ数制御試験
- (4) Pr スイープ試験
- (5) 二次元翼型試験設定迎角点数 (10点→20点)
- (6) 三次元模型試験による力測定
- (7) 光学ノイズの減少 (シュリーレン窓ガラスの測定部側への移動機構)

- (8) 第2スロート弁のテレスコープ化による模型へのアクセスが容易
- (9) 停止方式の改良による模型への負荷軽減
- (10) 測定部観測窓の増設による可視化試験の改善
- (11) 気流の低乱化 (サウンドサプレッサおよび多孔板の増設, ウェークトラバース装置壁一体化によるトラバース装置用溝からのエッジトーン削除)

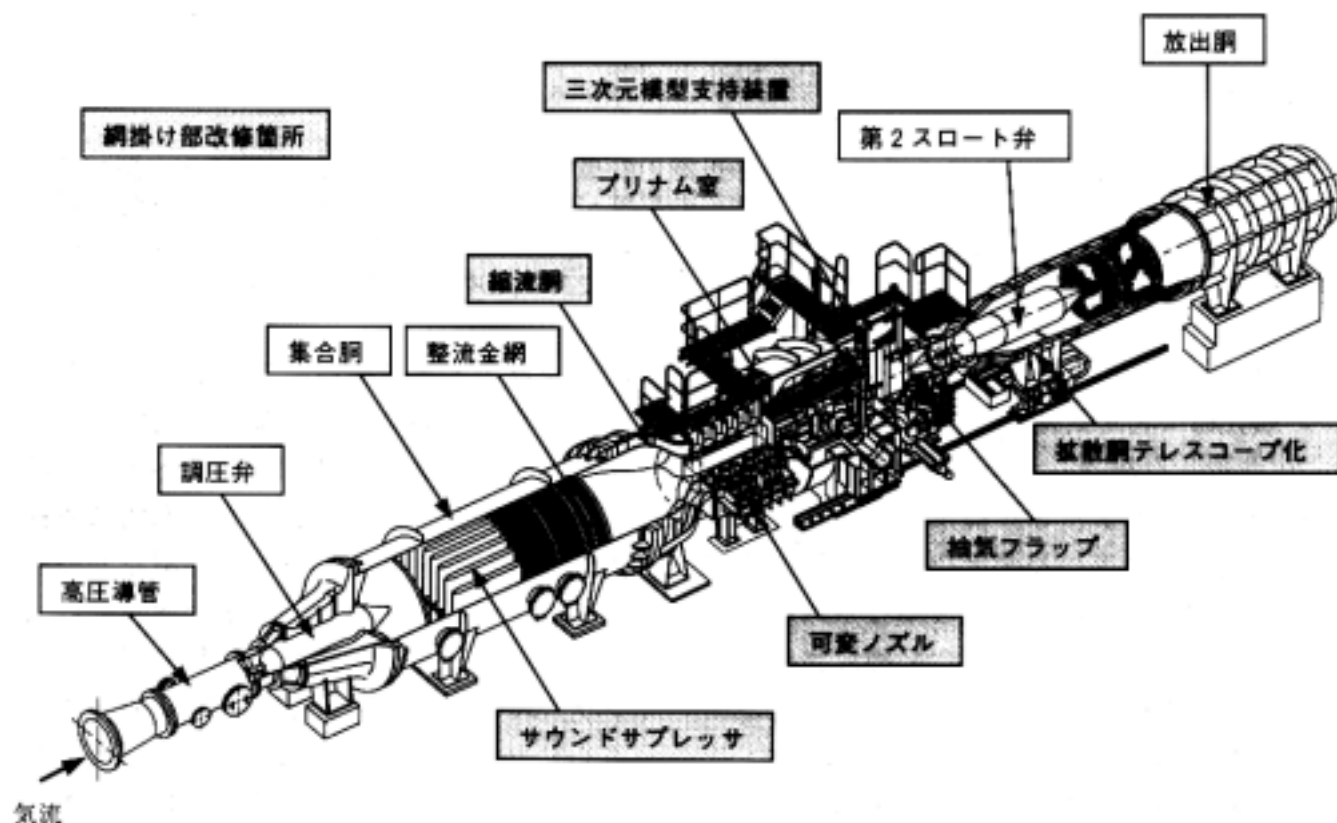


図1 二次元風洞全体図

4. 改修範囲

- ・仕切弁
- ・プリナム室
- ・測定部
- ・可変ノズル及び縮流胴
- ・気流低乱化
- ・抽気性能向上

- ・三次元模型支持装置の新設
- ・拡散胴のテレスコープ化
- ・制御装置
- ・計測装置³⁾ (データ収集装置, 処理設備含む)

図1, 図2に改修後 (網掛け部改修箇所) の二次元風洞全体図および測定部詳細図を示

す。また表1に風洞の主要な諸元を、図3に集合胴圧力に対する通風時間およびレイノルズ数の関係を示す。測定部の大型化に伴い通風流量が増加することにより通風時

間が増加（右下がりのグラフ）する。モデルコード長とレイノルズ数の関係を（右上がりのグラフ）示す。

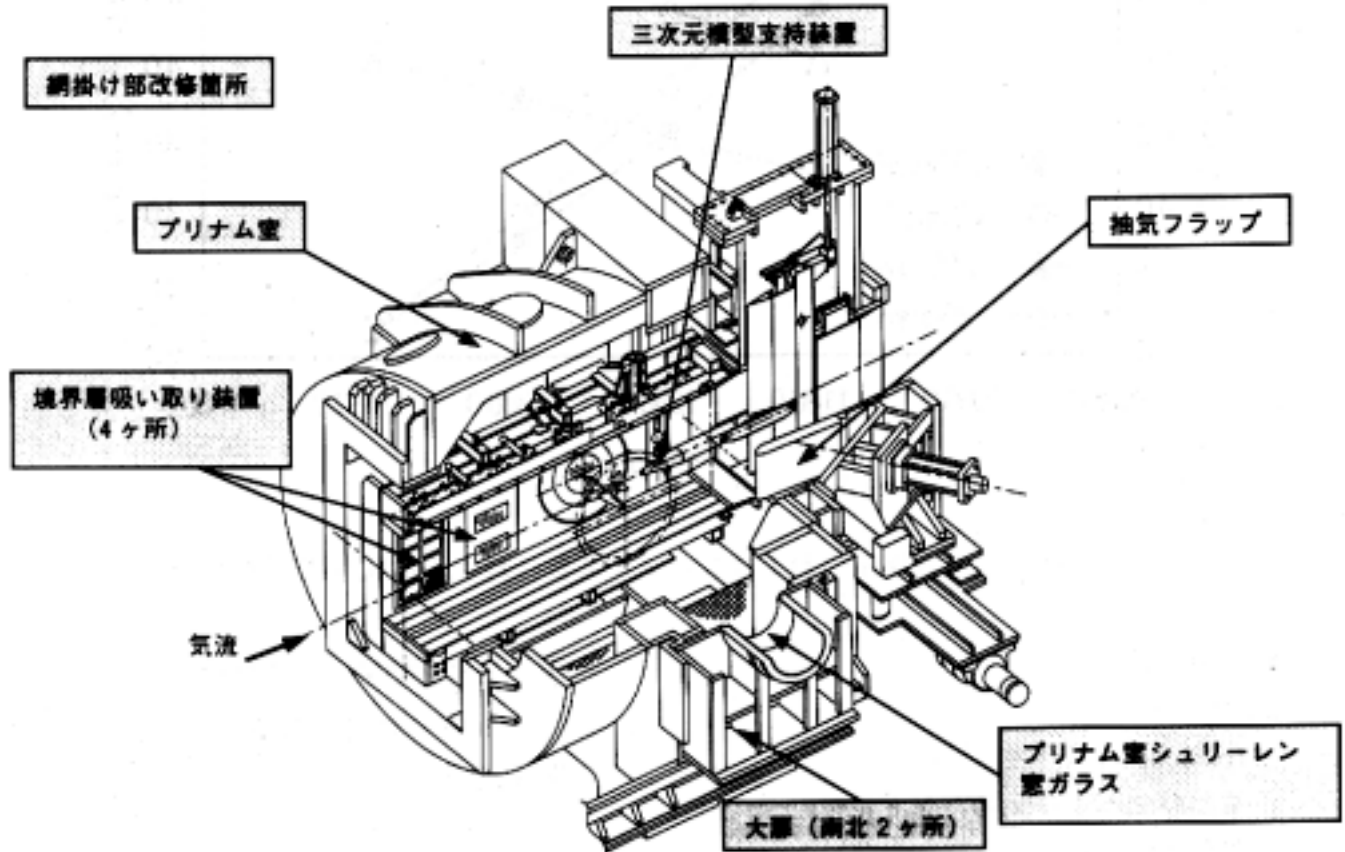


図2 測定部詳細図

表1 二次元風洞主要諸元

| | |
|----------------|--|
| 風洞形式 | 間欠吹き出し式 |
| 測定部断面積 | 0.45m (幅) × 0.8m (高さ) |
| 淀み点圧力 | 196kPa～1176kPa (abs) |
| マッハ数範囲 | 0.2～1.40 |
| レイノルズ数 | 36×10^6 (モデルコード長 $c=200\text{mm}$ 基準, $P_0=1176\text{kPa}$, $M=1.4$) |
| 二次元翼型試験 | 両端支持方式：翼上下面圧力分布測定, 後流測定, 流れの可視化 etc |
| 三次元模型試験 (全機模型) | スティング・ストラット方式：(6分力測定) [$F_x=784\text{N}$, $F_y=3920\text{N}$, $F_z=3920\text{N}$, $M_x=58.8\text{Nm}$, $M_y=196\text{Nm}$, $M_z=196\text{Nm}$] |
| (半裁模型) | 片持支持方式：(3分力測定) [$F_x=980\text{N}$, $F_z=1960\text{N}$, $M_y=147\text{Nm}$] 流れの可視化 etc |
| 通風時間 | 9～100sec |

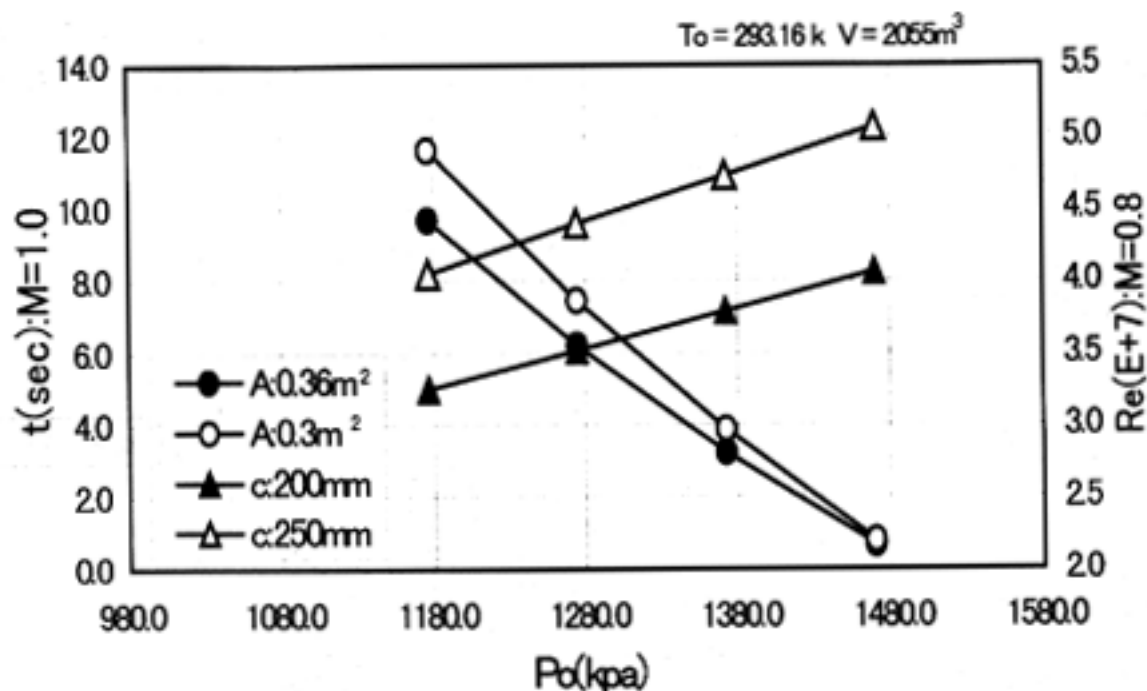


図3 集合胴圧力およびレイノルズ数に対する通風時間の関係

5. 改修項目

a: 仕切弁

1000mm^φゲート弁

電動駆動および手動ハンドル付

開閉時間 120sec (全開→全閉)

設計圧力: 1960kPa(G)

b: プリナム室

胴体寸法: 2800mm^φ × 4200mm^L → 2800mm^φ × 2450mm^L

設計圧力: 1960kPa(G)

付属品: 大扉2面, 電動駆動式, 700mm^W × 1200mm^H, シュリーレン窓ガラス移動方式。

扉シール方式: シールゴム加圧押しつけ方式, シール用空気圧力: 1666kPa(G)

c: 測定部

300mm^W × 1000mm^H × 3500mm^L →

450mm^W × 800mm^H × 2450mm^L

二次元翼模型 (コード長 250mm → 200mm,

模型スパン 300mm → 450mm)

第二スロート弁開口面積と測定部マッハ数の関係式

$$\frac{Av_2}{A} = M \left[\frac{1}{1.2} (1 + 0.2 M^2) \right]^{-3}$$

および第二スロート弁開口面積の変化と測定部マッハ数の変化の関係は次式より

$$\frac{\Delta Av_2}{Av_2} = \left(\frac{1}{M} - \frac{1.2 M}{1 + 0.2 M^2} \right) \Delta M$$

$$\frac{\Delta Av_2}{Av_2} = 0.5244 \Delta M \quad (M = 0.75)$$

$$A_{old} = 0.3m^2, \quad A_{new} = 0.36m^2$$

A: 測定部断面積

$$Av_{2,old} = 0.282m^2 \quad Av_{2,new} = 0.339m^2$$

Av₂: 第二スロート弁開度

第二スロート弁ストロークの検出器の精度は直線性で0.1%FSである。

弁開口面積→弁ストロークが比例関係にあるとすると第二スロート弁全開

$$A_{v2} = 0.5m^2 \rightarrow \Delta A_{v2} = 0.0005m^2$$

第二スロート弁開口面積の変化と測定部マッハ数変化の関係式より ΔM は

$$\frac{\Delta A_{v2}}{A_{v2_{old}}} = 0.5243\Delta M \quad \therefore \Delta M = 0.0034$$

$$\frac{\Delta A_{v2}}{A_{v2_{new}}} = 0.5243\Delta M \quad \therefore \Delta M = 0.0028$$

測定部を $0.3m^2 \sim 0.36m^2$ に広げることによってマッハ数の精度は 0.0034 から 0.0028 に向上する。

d: 上下壁

多溝壁：開口比 6%固定方式，スタビライザ 1.5H（多孔壁：開口比 6.28%と交換可能）上下壁傾角可変方式 $\pm 0.7deg$ （手動ハンドル駆動方式，側壁は固定）

e: 後流トラバース装置

形式：側壁一体型トラバース方式（エッジトーンを防ぐ方式）

駆動方式：電動サーボ駆動

移動範囲：0～600mm

移動速度：200mm/sec

位置精度： $\pm 0.1mm$

f: 境界層吸い取り装置

形式：エゼクタ方式

吸い取り量： $M=1.0$, $P_o=784kPa$ において7 kg/sec（主流量の1%以上を吸い取る）

低 P_o 制御：エゼクタを利用

高 P_o 制御：大気圧との圧力差を利用

吸い取り位置：模型取り付け位置上流側に抵抗係数12000,24000のレジメッシュを着脱可能($320mm^W \times 640mm^H$)

g: 二次元模型（あるいは半載模型）変角装置

形式：左右側壁での模型両端支持方式

駆動方式：油圧サーボ駆動→電動サーボ駆動

迎角設定範囲： $+25deg \sim -15deg$

迎角変化速度：15deg/sec

迎角精度： $\pm 0.1deg$ （目標 $\pm 0.05deg$ ）

迎角点数：10→20

h: 三次元模型変角装置

形式：スティング，ストラット支持方式

駆動方式，油圧サーボ駆動

ピッチ角設定範囲： $+20deg \sim -20deg$

ピッチ角変化速度：10deg/sec

ピッチ角精度： $\pm 0.1deg$ （目標 $\pm 0.05deg$ ）

ロール角設定範囲： $+180deg \sim -180deg$ （機械式手動設定）

i: 可変ノズル

可変ノズルは左右各5台のジャッキで1枚の可換板を変形させる。マッハ数 1.1～1.4までは0.025刻みでセットできる。各ジャッキは電動サーボモータの駆動とアブソリュートエンコーダでのジャッキ回転角の検出により位置制御が可能である。また異常応力にならないように応力を監視し位置制御に補償動作を行う。

j: 縮流胴

縮流比16.4→13.6

測定部の寸法変更に伴って縮流比は減少する。一方測定部形状（矩形）の縦横比が減少することにより縮流胴の上下方向と左右方向の縮流曲線は軸対称形に近づくことになり同一断面内圧分布の一様化への改善となり気流特性の向上が期待される。

6. 風洞制御装置

a: 全体制御系

風洞制御形式は風洞操作卓からのワンマンオペレーションによる全自動シーケンス制御方式が基本である。制御室風洞操作卓において通風準備から通風運転制御まで一括して制御する事ができる集中監視、風洞室に設置された圧力、可変ノズル、模型、マッハ数、補機のそれぞれの制御盤とはシーケンサリンクを介して信号の授受を行い各措置の制御を行う分散制御に大別される。

- (1) 集中監視：風洞操作卓、風洞監視盤（制御室）
- (2) 分散制御：各機側盤、操作盤（風洞室）

集合胴圧力制御、マッハ数制御に関しては目標値に対して外乱が制御量に影響を与えてからの訂正動作を始めてからでは動作に遅れが生じる。そのような外乱の変化を検知し、それを打ち消すような制御方式であるフィードフォワード制御を新たに取り入れ、さらに偏差を小さく押さえるためにフィードバック PID 制御方式を取り入れた。以下図 4 に二次元風洞全体制御系統図を示す。

b: 風洞停止方式

- (1) 緊急停止：緊急停止要因時には緊急シーケンスによってサーボ弁制御から電磁弁制御に切り換わる緊急停止動作を行い、風洞内の圧力を大気圧にする。
- (2) 保安停止：保安停止シーケンスによって二次元模型、三次元模型が動作可能ならば迎角をゼロにしてから、動作不可能であればその時点からサーボ制御で第二スロート弁を現在位置固定、調圧弁はサーボ制御で全閉、境界層急開弁は全閉、エゼクタ駆動空気止め弁は全閉動作を行

い、通風を止める。

(3) 通風中断：通風中断シーケンスによって二次元模型、三次元模型が動作可能ならば迎角をゼロにしてから、動作不可能であればその時点から充填停止を選択の場合は調圧弁、第二スロート弁をサーボ制御で全閉、開放停止を選択している場合はサーボ制御で調圧弁を全閉、第二スロート弁を現在位置固定、抽気弁は全閉、抽気フラップはサーボ制御で全開、境界層急開弁は全閉、エゼクタ駆動空気止め弁は全閉動作。

(4) 充填停止：第二スロート弁を全閉、圧力検出器の検出圧力過大にならないように保護機能を持たせて弁を閉める。

(5) 開放停止：第二スロート弁を現在位置に保持する。

c: 集合胴圧力制御

集合胴圧力を検出して設定集合胴圧力と一致するように調圧弁の開度制御を行う。目標値（定値）およびスワイプ制御選択の有無の設定がある。スワイプ制御を選択した場合は初期圧力目標値、最終圧力目標値、と初期圧力保持時間、スワイプ速度を設定し、これらの設定値から決まる圧力設定パターンに合わせて、圧力設定値を変化させる。

- (1) 圧力設定範囲：196kPa(a)～1176kPa(a)
- (2) 制御制度：±1%（目標±0.5%）
- (3) 圧力スワイプ設定：最大 852.6kPa(a)
- (4) スワイプ：29.4kPa(a/s)

本風洞の代表的な制御方式である集合胴圧力制御ブロック図を図 5 に示す。高圧導管圧力からの外乱を予測し、マッハ数目標値、集合胴圧力目標値からのフィードフォワード演算制御、さらにこの偏差を小さく押さえるためのフィードバック PID 制御方式を取り入れた。

(5) 圧力検出器：

集合胴圧力範囲 (P_0) = 196kPa ~ 1176kPa,
マッハ数範囲 = 0.2 ~ 1.4

集合胴圧力 (P_0) - プリナム室差圧 (P_L):

$P_0=1196\text{kPa}$, $M=1.4$, $(P_0-P_L)_{\max}=8065.5\text{kPa}$

$P_0=196\text{kPa}$, $M=0.2$, $(P_0-P_L)_{\min}=5.39\text{kPa}$, から以下の圧力変換器を準備した,

$P_0 \sim 1568\text{kPa}$, $\sim 784\text{kPa}$ の 2 レンジ

$(P_0-P_L) = \sim 980\text{kPa}$, $\sim 245\text{kPa}$, $\sim 61.25\text{kPa}$ の 3 レンジ

標値を変化させる,

(1) マッハ数設定範囲: 0.2 ~ 1.4

(2) マッハ数スweep範囲: 0.3 ~ 1.15

(3) マッハ数スweep: 0.03/s

(4) マッハ数制御精度: $\pm \Delta 0.005$

マッハ数制御では可変ノズル, 抽気フラップ, 第 2 スロート弁, 抽気弁をマッハ数目標値により組み合わせてマッハ数制御を行う. 各アクチュエータとマッハ数の関係を表 2 に, また運転方式を図 6 に示す.

d: マッハ数制御

マッハ数目標値 (定置) 及び, 初期目標値, 最終目標値, 変化率目標値, スweep開始時間の各設定値とスweep開始時間の各設定値とスweep選択の有無の設定がある.

スweep選択: 初期値と最終値と変化率とスweep開始時間より逐次マッハ数目標値

e: レイノルズ数制御

集合胴温度 T_0 をフィードバックしてレイノルズ数が一定になるように集合胴圧力 P_0 の設定値を変化させ調圧制御を行う.

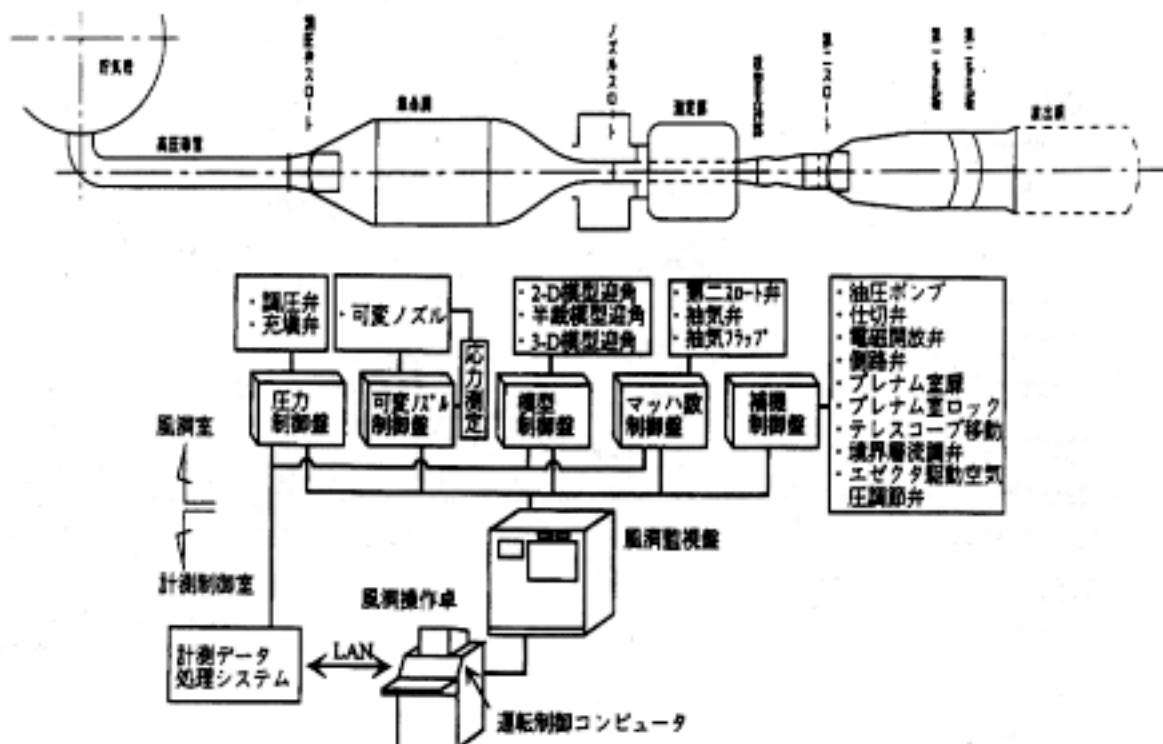


図4 二次元風洞全体制御系統図

f: 二次元模型（あるいは半裁模型）迎角制御

本迎角制御は連続制御，段階制御，遠隔制御を選択できる。

(1) 連続制御：初期迎角目標値，最終迎角目標値，迎角変化率設定値のそれぞれの設定値および計測終了信号または模型休止タイムアップ信号により連続制御目標値を生成し制御を行う。

(2) 段階制御：迎角目標値（No. 1～No. 20）と計測終了信号または模型休止タイムアップ信号により連続制御目標値を生成し制御を行う。

(3) 遠隔制御：計測装置から発信される遠隔目標値に従い制御を行う。

計測開始信号は上記の目標値に対して迎角信号が設定偏差以内となりかつ気流制定となると出力される。手動では手動設定値を迎角目標値として模型迎角制御を行う。（5：g 項を参照）

g: 三次元模型制御

ロール角は機械式手動設定，油圧サーボでピッチ角制御を行う。

連続制御，段階制御，遠隔制御を選択できる。

(1) 連続制御：初期迎角目標値，最終迎角目標値，迎角変化率設定値のそれぞれの設定値および計測終了信号または模型休止タイムアップ信号により連続制御目標値を生成し制御を行う。

(2) 段階制御：迎角目標値（No. 1～No. 20）と計測終了信号または模型休止タイムアップ信号により段階制御目標値を生成し制御を行う。

(3) 遠隔制御：計測装置から発信される遠隔目標値に従い制御を行う。

計測開始信号は上記の目標値に対して迎角信号が設定偏差以内となりかつ気流制定となると出力される。手動では手動設定値を迎角目標値として模型迎角制御を行う。（5：h 項を参照）

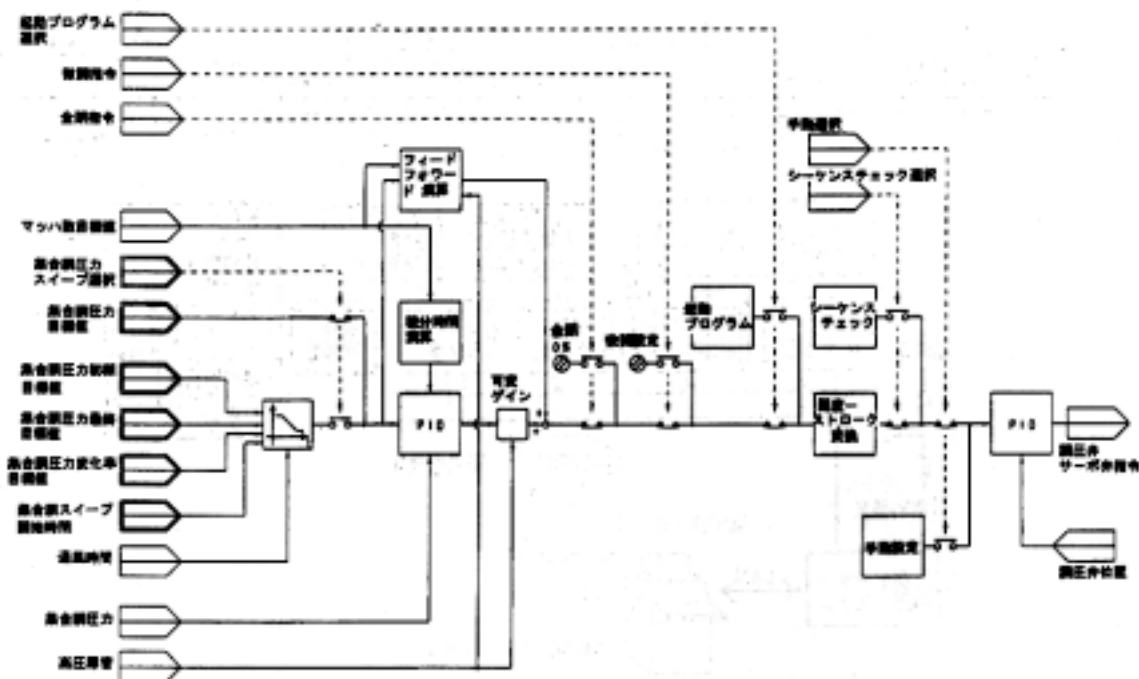


図5 集合翼圧力制御ブロック図

表2 各アクチュエータとマッハ数の関係

| アクチュエータ | 亜音速域 | 遷音速域 | 超音速域 |
|---------|---------------|-------------------------|-------------------------|
| 可変ノズル | $M = 1$ | $M = 1$ | 超音速ノズル |
| 抽気フラップ | 全閉プリセット | プリセット (マッハ数フィードバック制御) | プリセット (マッハ数フィードバック制御) |
| 抽気弁 | 全閉プリセット | マッハ数フィードバック制御 (全閉プリセット) | マッハ数フィードバック制御 (全閉プリセット) |
| 第2スロート弁 | マッハ数フィードバック制御 | 全開プリセット | 全開プリセット |

() 内はプレナム室圧力が低い場合

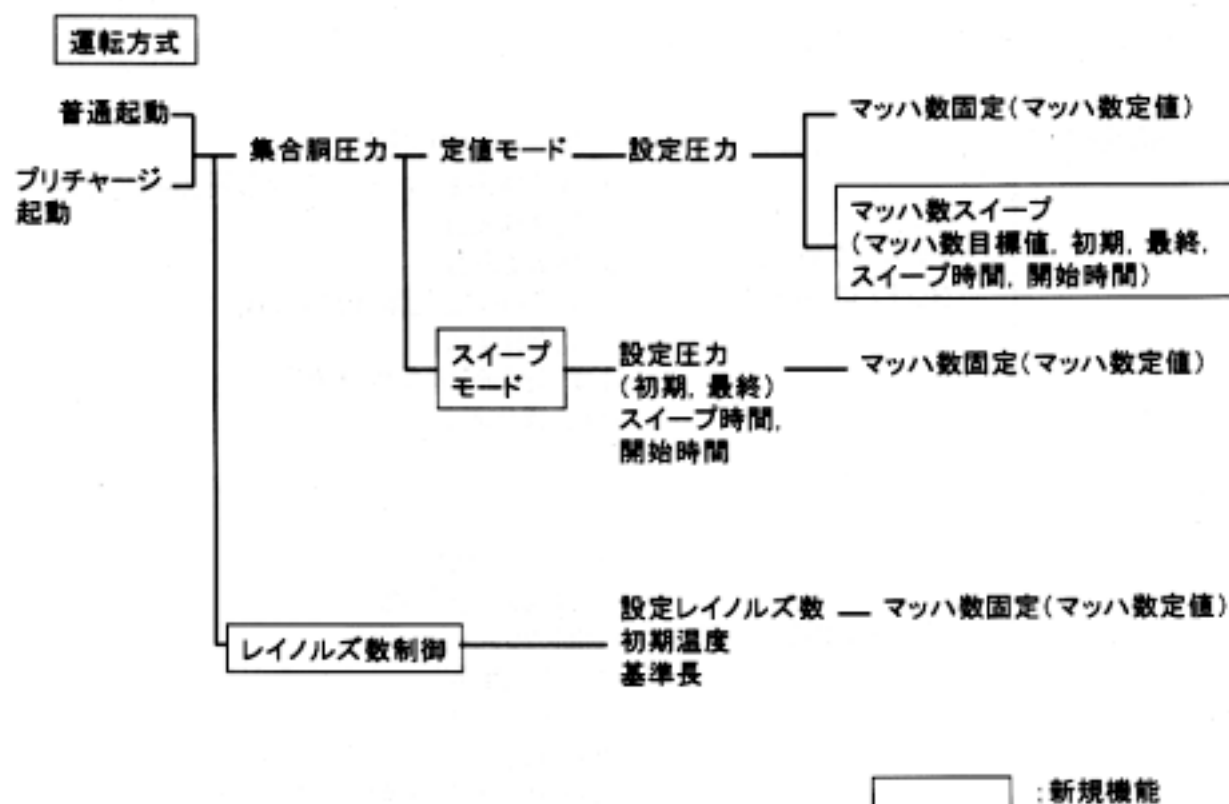


図6 二次元風洞運転方式

h: 境界層吸い取り制御

測定部上流部および下流部の二系統あり
それぞれの配管には流調弁があり個別に
流量が調整できる。エゼクタ駆動を選択
→エゼクタ空気止め弁を開きエゼクタ駆
動空気圧力調整弁でエゼクタ駆動空気圧
力を一定になるように圧力制御を行う。
このとき高圧導管圧力を用いた可変ゲイ
ン処理を用いる。

i: プリチャージ制御

充填弁を開けプリナム室圧力が設定プリ
チャージ圧力設定圧力付近になると抽気
弁を微開にし、プリナム室圧力を基に圧
力制御を行う。計測系の校正時に風洞を
圧力チャンバーとして使用する。

j: その他の制御

油圧ユニット制御

制御油圧系の監視、油圧シリンダの駆動

制御を行う。

(1) プリナム室扉制御

プリナム室扉の開閉制御を行う。扉の開
閉に関わるインターロック制御、室内に
おいても扉開閉操作ができる。

(2) 移動ブロック制御

移動ブロックの動作制御、固定の監視、
インターロック設定

(3) シール圧制御

各部接合部（可変ノズル、プリナム室扉、
移動ブロック）シール部分の圧力の監視、
制御を行う。

(4) 制御用圧力自動校正装置の制御

基準圧力を発生する圧力発生器の開閉制
御、圧力校正を行うための弁開閉制御を
行う。

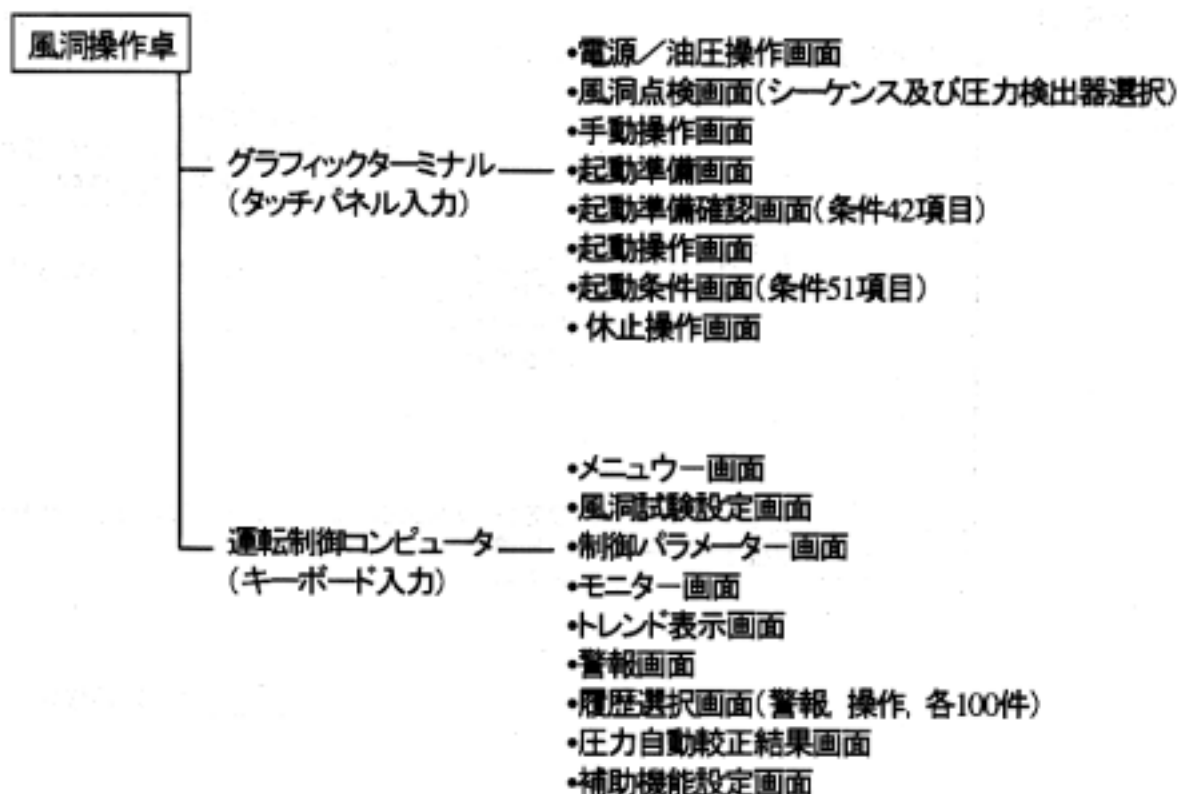


図7 二次元風洞操作卓機能

k: 風洞監視盤

風洞状態の監視（グラフィックパネル）により調圧弁、第二スロート弁、抽気弁、抽気フラップ開度表示、集合胴圧力、マッハ数、模型迎角表示、貯気槽、高压導管および風洞内の圧力指示、油圧源の動作表示、模型状態の監視、風洞起動条件、保安停止、緊急停止、計測停止、警報、プリチャージ、シーケンスチェック、通風、停止、休止の表示、元弁操作権表示、現在時刻、通風時通し時刻表示（LEDによる数値表示とバーグラフ）

l: 風洞操作卓

運転制御コンピュータとグラフィックターミナルを設け、風洞のシーケンスに関する表示や操作はグラフィックターミナル、試験条件の設定や気流状態のモニタなどは運転制御コンピュータで行う。以下図7に風洞操作卓の機能について示す。

7. 今後の予定

測定部は改修以前と比べ大型化され、風洞の気流特性を把握しておく必要がある。今後次のような試験を予定している。

- (1) 風洞制御特性
- (2) マッハ数分布（中心プローブ）
+ 壁静圧測定（模型なし）
- (3) 境界層測定：境界層吸い取り量の決定
- (4) 壁傾斜角の決定
- (5) 断面内速度分布
- (6) 標準模型による圧力、力測定試験
- (7) その他遷移測定、乱れ測定等

8. おわりに

風洞改修工事が平成9年度に終了し、新しい二次元風洞が完成した。今後風洞特性試験および新しい風洞技術の確立を目標

とし、多様化する風洞試験に答えなければならない。改修工事を担当して下さった川崎重工業株式会社、工事関係各位および航空宇宙技術研究所の皆様方にお礼を申し上げる。

9. 参考文献

- 1) 空気力学第2部：航技研二次元風洞の構造と特性、航技研報告 TR-647(1980)
- 2) 重見 仁, 神田 宏, 佐藤 衛, 須谷 記和
：航技研二次元風洞の改修、航技研特別資料 SP-38(1998)
- 3) 神田 宏, 佐藤 衛, 須谷 記和, 重見 仁
：航技研二次元風洞の改修その2、航技研特別資料 SP-38(1998)
- 4) 佐藤 衛, 神田 宏, 須谷 記和, 松野 謙一
：遷音速翼型試験における側壁干渉効果に関する流れの可視化を用いた研究、航技研報告 TR-1196(1993)
- 5) John B. McDevitt, Thomas .Polek, and Lawrence A.Hand :A New Facility and Technique for two-dimensional Aerodynamic Testing. :J. Aircraft, Vol. 20, No. 6, June. 1983

