

# 宇宙航空研究開発機構研究開発資料

## JAXA Research and Development Memorandum

---

### JAXA 2 m×2 m連続式遷音速風洞の統合自動運転

Integrated Automatic Operation of the JAXA 2 m by 2 m  
Continuous Transonic Wind Tunnel

永井 伸治, 塩原 辰郎, 唐沢 敏夫, 馬込 誠  
真城 仁, 知念 大実, 我那覇 義人

Shinji NAGAI, Tatsuro SHIOHARA, Toshio KARASAWA, Makoto MAGOME  
Jin MASHIRO, Masami CHINEN and Yoshito GANAHA

2019年1月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 目次

<b>1. はじめに</b>	<b>1</b>
<b>2. 風洞と運転制御上の特徴</b>	<b>2</b>
2.1. 風洞を構成する装置と機器	2
2.2. 風洞弁の配置と圧力制御	3
2.3. 運転制御上の特徴	4
2.4. 運転上のリスク	4
<b>3. 統合自動運転の準備検討</b>	<b>4</b>
3.1. 省力化、自動化の目標	4
3.2. 制御系統の考案	5
3.3. 設定ファイルによる自動運転	6
<b>4. 通風前後の運転自動化</b>	<b>6</b>
4.1. 各部運転シーケンスの体系化	6
4.2. 風路調圧シーケンス	8
4.3. 風路開放シーケンス	8
4.4. 休止シーケンス	8
<b>5. 通風時の運転自動化</b>	<b>11</b>
5.1. 各部の連携操作シーケンス	11
5.2. マッハ数と各部制御の関係	14
5.3. 試験条件変更時の操作シーケンス判断	14
5.4. 通風シーケンスの確認	16
5.5. 安全動作の検討	16
5.6. ワンマン運転の機会と試験体制	16
<b>6. まとめ</b>	<b>17</b>
<b>7. 謝辞</b>	<b>17</b>
<b>参考文献</b>	<b>17</b>

# JAXA 2 m × 2 m 連続式遷音速風洞の統合自動運転

永井 伸治<sup>\*1</sup>, 塩原 辰郎<sup>\*1</sup>, 唐沢 敏夫<sup>\*1</sup>, 馬込 誠<sup>\*2</sup>, 真城 仁<sup>\*2</sup>, 知念 大実<sup>\*3</sup>, 我那覇 義人<sup>\*3</sup>

## Integrated Automatic Operation of the JAXA 2 m by 2 m Continuous Transonic Wind Tunnel

Shinji NAGAI<sup>\*1</sup>, Tatsuro SHIOHARA<sup>\*1</sup>, Toshio KARASAWA<sup>\*1</sup>,  
Makoto MAGOME<sup>\*2</sup>, Jin MASHIRO<sup>\*2</sup>, Masami CHINEN<sup>\*3</sup>, Yoshito GANAHA<sup>\*3</sup>

### ABSTRACT

The JAXA 2 m by 2 m continuous closed-circuit transonic wind tunnel was operated by three operators. They communicated each other and operated each semi-automatic control system of the main blower, the test section and the suction blower. These control systems were replaced and modified as well as the old main drive motor. Previous to the replacements, the operation sequence of the whole wind tunnel was discussed to be re-constructed for one-man automatic operation at the re-test conditions if the tunnel once started.

**Keywords:** Transonic, Continuous, Wind Tunnel, Automatic Operation

### 概要

宇宙航空研究開発機構 2 m × 2 m 連続式遷音速風洞は、主送風機、補助送風機、測定胴の3社の操作卓に、3名の熟練運転員を配して運転されていた。主送風機駆動設備の更新に伴い、風洞制御装置を更新改修することになった。この更新改修に先立ち、3名の運転員の連携手動運転操作について議論した。そして、起動後に再試験条件であれば、ワンマン運転が可能となる統合自動運転シーケンスを考案した。

### 1. はじめに

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）2m×2m遷音速風洞は、旧航空技術研究所（NAL）によって1960年に建設された<sup>1)</sup>。世界で20基程度、アジアで唯一の連続回流式大型風洞となる。Re数が可変できる可変密度風洞であり、M = 1.4までの通風が可能な可変ノズルと、補助送風機を備える。建設以来、わが国で開発・使用されたほぼ全ての機体の風洞試験データを提供してきた。

この風洞の主送風機を、四半世紀駆動してきた22.5 MW主電動機を更新することになった。それに伴い、M = 0.1~1.4の気流マッハ数と、P0 = 50~150 kPaのよどみ点圧力等の制御を行う主送風機制御装置も更新する。このような老朽化機器を更新改修する機会等には、幾多もの運転制御方法の改良が、旧NALやJAXAにより試みられてきた<sup>2-8)</sup>。

しかし、風洞を構成する各機器は、複数各社によって製作されている。従って、今なお主送風機、補助送風機、測定胴の3社の半自動制御装置を、3名の運転員が声を掛け合って操作し、風洞を運転していた。特に超音速域では、可変ノズル等の風路と補助送風機との連係制御を行う。よって、関連する制御装置も併せて改修し、運転省力化を目指すことになった。なお、補助送風機による測定部抽気を行うと、主送風機のみ風洞と比較して半分程度の電力で超音速運転が可能である<sup>9,10)</sup>。それでも最大消費電力は20 MWにも及ぶ。大電力の問題を、複雑な構成

doi: 10.20637/JAXA-RM-18-004/0001

\* 平成30年10月16日受付 (Received October 16, 2018)

<sup>\*1</sup> 航空技術部門 空力技術研究ユニット (Aerodynamics Research Unit, Aeronautical Technology Directorate)

<sup>\*2</sup> 株式会社 IHI エアロスペース・エンジニアリング 技術部 (Engineering Department, IHI Aerospace Engineering, Co., Ltd.)

<sup>\*3</sup> 株式会社コスモテック 東日本事業部 (East-Japan Department, Cosmotec Co., Ltd.)

と高度な運転技術によって回避している風洞と言える。

従来、運転員の習熟には1年かかると言われていた。データ生産性の要求も高い本風洞では、適時の状況判断に基づく複雑な連係操作が必要であったからである。また、各自動制御の不足点を、熟練の手動操作で補っていたからである。さらに、近年の高Re数試験や、新しい計測技術の要求に応えるためには、従来とは異なる運転手順が必要となる。速度の低い運転員でも、安全に効率よく運転するためには、自動制御の改善や、新たな自動化も必要となる。

そこで、主/補助送風機、測定胴の3名の運転員の複雑な連係操作を整理した。次に、世界の連続式遷音速風洞を11基訪問見学した経験にも基づき、本風洞の運転制御の特徴をまとめた。さらに、試験条件を管理して各部に指令する制御系統と、運転制御を統合する自動シーケンスを考案した。以上の検討結果と、予想される効果を報告する。なお、本資料は、第53回飛行機シンポジウムで発表された内容<sup>1)</sup>を改訂すると共に、補足する内容を追加したものである。

## 2. 風洞と運転制御上の特徴

### 2.1. 風洞を構成する装置と機器

図1に、風洞を構成する各装置と、電動機更新に伴って更新される機器類を示す。主電動機や主送風機制御装置は三菱電機、主送風機は三菱重工メカトロシステムズ、排風機及び圧縮機は神戸製鋼が担当会社である。また、補助送風機と排気模擬用530 kW圧縮機はIHI回転機械、測定胴と風路胴体、冷却装置、貯気槽は川崎重工が担当会社である。

2 MPaの高圧乾燥空気を製造する高圧空気源は、圧縮機と貯気槽から構成される。高圧空気源は3つの吹出式風洞の作動空気を供給する他、密閉型高速風洞である本風洞の充填加圧や乾燥空気置換も行う。また、風洞の排気減圧には排風機を用いる。

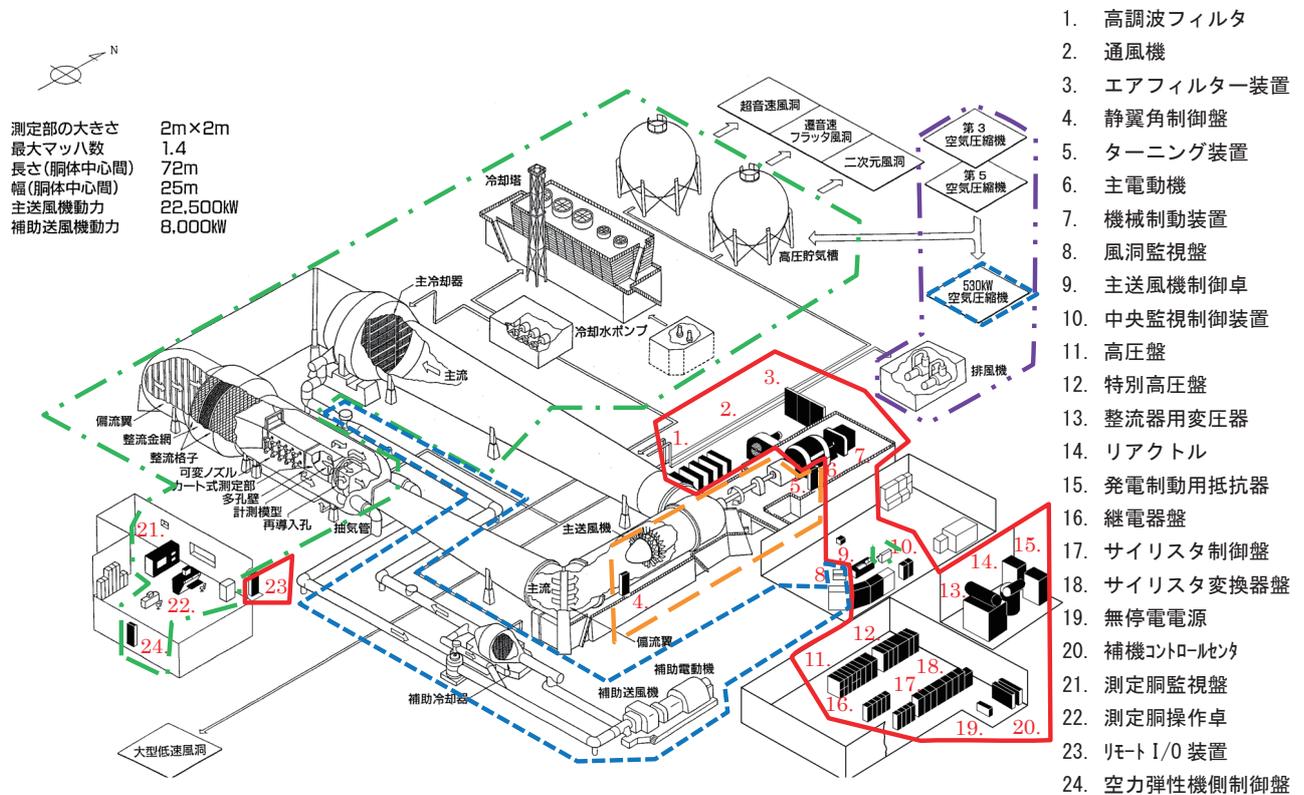


図1 風洞を構成する装置と更新範囲

補助送風機と測定胴、そして排風機には、主送風機制御装置と連係した自動シーケンスが一部組まれていた。例えば、超音速でマッハ数を変更する場合は、測定部での剥離衝撃波の発生を防ぐため、ノズルマッハ数を測定部マッハ数以上としない自動制御がなされる<sup>6)</sup>。これらの自動制御は、限られた条件では良好に動作するものではあった。しかし、気流条件を変更する場合や、模型姿勢角が大きく変化する場合さえも、複数の熟練運転員が連係する手動操作を必要とした。

### 2.2. 風洞弁の配置と圧力制御

図2に、風洞弁の種類と配置を示す。密閉型可変密度風洞のため、多数の風洞弁が存在する。建設当時からの運転制御方式の変遷により、開閉どちらかで固定されている弁もある<sup>4)</sup>。また、大気開放装置は存在していたものの、運転制御には用いられていなかった。

風路の加減圧や自動調圧には、口径や種類の異なる弁を使い分ける。口径250AのVM5C減圧弁と、65AのVM6C加圧弁による自動調圧により、試験データ取得中の安定したよどみ点圧力P0が得られる。しかし、よどみ点圧力P0やマッハ数を変更するには、大幅な加減圧が必要となる。マッハ数変更時の加減圧を先読み制御する機能はあったが、結局は手動操作に頼っていた。まず加圧補助には、50AのVM9弁開度を手動操作する。さらに、200AのVM4B弁と500AのVM4A弁の開度を手動で調整し、減圧を補助する。減圧補助の弁操作では、加圧速度と比較して減圧速度が遅い上、排風機保護のための操作も必要となる。

2台の375 kW (10000 m<sup>3</sup>/h) 排風機は、2/4極の極数切り替えによる2段変速機能を持ち、2台で4段階の排気能力調整が可能である<sup>8)</sup>。しかし、2台の排風機の起動や2極運転は、突入電流の制限のため、2台で時間差を設けて操作する必要がある。排風機入口許容圧力は、低真空～108 kPaである。従って、高Re数試験等、よどみ点圧力P0が大気圧より高い場合は、弁開度操作に細心の注意を要する。さらに、入口圧力を高真空としないために、大気混入弁VD3も操作する。

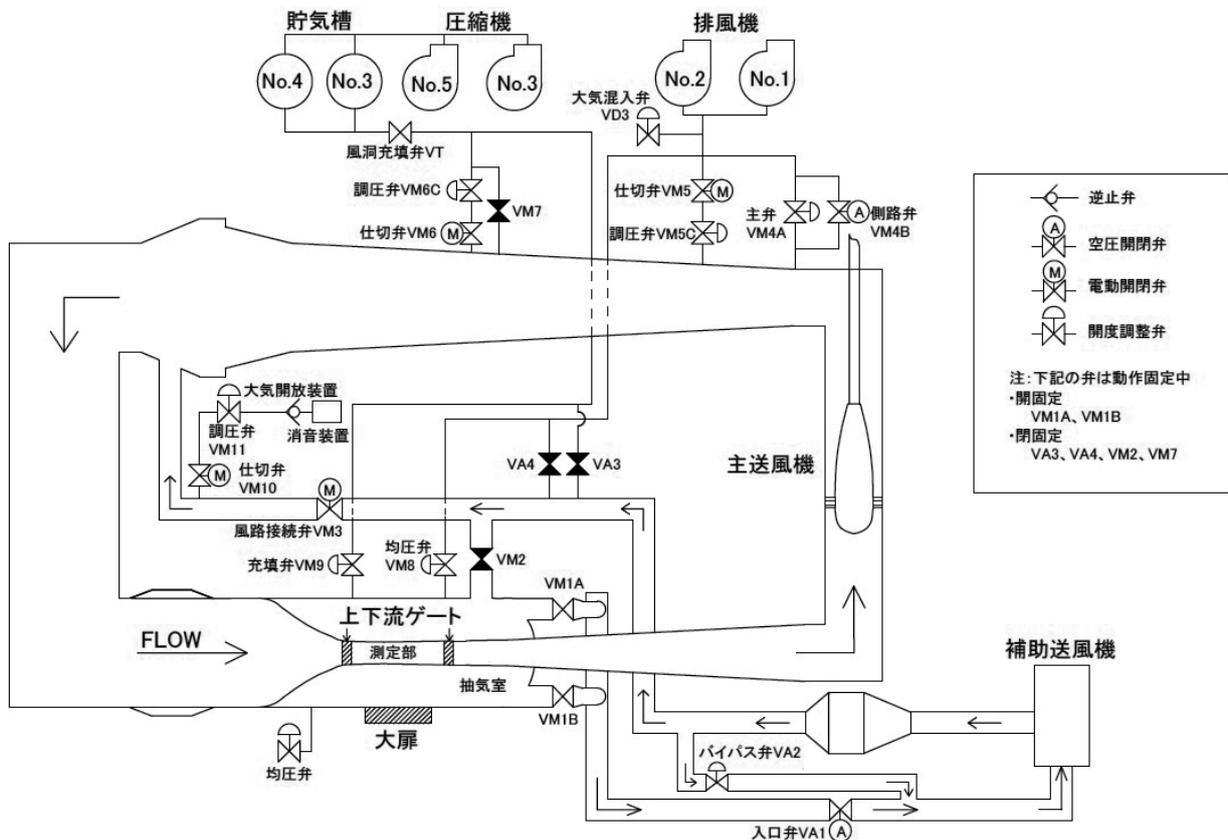


図2 風洞弁の種類と配置

起動時等、主送風機回転数が大幅に変わる場合は、マッハ数の増加に伴ってよどみ点圧力が増加するため、過加圧の恐れがある。従って、運転員が別途低めに見積もった設定値を仮入力する。そして、気流マッハ数が設定マッハ数に近くなったら、仮設定値を本設定値に変更する。素早い気流条件変更には、以上のような手動操作が必要であった。

測定部での試験準備時には、上下流ゲートを閉めて風路の乾燥度を保つと共に、大扉を開けて風洞ユーザが測定部に入る。一方、主送風機が起動準備に入ると、軸受潤滑油の圧送を開始する。同時に高圧の軸受けシール空気を供給し、潤滑油の風路への侵入を防ぐ。このシール空気は風路に漏れてしまうため、VM8弁とVM4A弁を開としてゲート前後の差圧を均圧する。また、大扉閉時には、運転員の判断で大気混入弁VD3を開とし、大扉内外を大気圧とする大扉均圧を行う。

### 2.3. 運転制御上の特徴

本風洞の運転制御上の特徴としては、以下が挙げられる。

- (1)真空槽を持たず、排風機を運転しながら圧力制御を行うこと。
- (2)圧力制御を利用した乾燥空気充填や、上下流ゲート開閉により風路内の乾燥度を保つこと。
- (3)亜音速のマッハ数制御は、主送風機回転数で行うこと。
- (4)補助送風機で測定部を抽気する高亜音速以上では、この抽気量でもマッハ数制御を行うこと。
- (5)超音速可変ノズル制御を始め、風路と補助送風機が、密接な関係制御を行うこと。

複雑な各部連携制御が必要であるが、世界の同等設備と比較して、運転員3名は少ないと言える。なお、主送風機静翼角<sup>10)</sup>やバイパス流路、第2スロート<sup>12)</sup>等により、高速マッハ数制御を行う風洞もある。しかし、今回の改修では、物理的な制御方法は変更しないこととした。もっとも、主送風機の回転加速度を1.6→3.0 rpm/sに倍増し、風路調圧を自動化して高速化する。

### 2.4. 運転上のリスク

本遷音速風洞の運転上のリスクが、3つ挙げられる。模型の振動、超音速時の不始動、そして補助送風機のサージングとチョークである。

遷音速で巡航する航空機は、アスペクト比の大きな薄翼を持つことが多い。このような薄翼は、風洞試験模型でも振動しやすく、遷音速フラッタが生じる可能性もある。振動によって模型が破損して飛散すると、送風機羽根に衝突して破損が連鎖する。遷音速風洞共通の試験リスクであるが、特に連続式の風洞では送風機の全損に至った例もある。

超音速運転時に、測定部の気流マッハ数 $Mc$ をノズルマッハ数 $Mn$ 以上に維持する必要がある。これが維持できないと、測定部静圧がノズル出口静圧以上となり、ノズル含む測定部壁面で逆圧力勾配が生じる。この逆圧力勾配によって境界層が剥離すると、剥離衝撃波を生じて亜音速に減速し、不始動状態となる<sup>13)</sup>。衝撃波前後では大きな差圧が発生するが、不始動発生時には衝撃波が前後に振動しながら移動する。この衝撃波の振動通過により、模型や測定部カート壁が振動して破損する可能性がある。

補助送風機の運転点は、運転マッハ数や、模型の大きさや姿勢角に依存する測定部閉塞比により、広範囲の設定が必要である。補助送風機の、高圧力比小流量の運転領域にはサージング領域、低圧力比大流量の運転領域にはチョーク領域が存在する。これらの領域での運転は、高速回転機械である補助送風機に、異常振動等が生じる危険があるため避ける必要がある。補助送風機の運転点を移動する際にも、これらの危険運転領域に入らないようにする<sup>14)</sup>。

## 3. 統合自動運転の準備検討

### 3.1. 省力化、自動化の目標

運転省力化にあたっては、作業者の安全と設備の保全を考える必要がある。まず、送風機等の起動停止には、各現場での点検操作が必要である。次に、気流条件の達成に必要な主送風機

の回転数や、場合によっては帶動が必要な補助送風機の抽気量は、試行錯誤する必要がある。姿勢角にも依存する模型抵抗、すなわち送風機で補償する圧力損失の予測が困難だからである。この試行錯誤中にマッハ数が変化し、模型の振動やフラッタまで生じる危険がある。従って、新たな試験条件で通風する場合は、模型の安全監視に別要員が必要となる。以上より、起動後に再試験条件であれば、ワンマン運転が出来ることを省力化の目標とした。すなわち、試験条件を入力するだけで、一切の調整操作なしで試験条件を実現することが、自動化の目標となる。

### 3.2. 制御系統の考案

部分更新/改修となるため、図1に示した既存の機器構成や担当区分を踏襲した上で、ワンマン自動運転するための制御系統を考案した。制御系統の検討案を図3に示す。

各機器の現場操作盤では、各機器の状態を確認し、操作権を現場から中央に切り替える。さらに、模型支持装置を除く各制御装置の操作卓では、各機器の単独操作と、風洞制御装置からの指令に従う連動操作を選択する。単独操作により、各機器の動作確認等を行う。機器自らを守るインターロック等は、各制御装置が分担する。その上で、各機器の連動操作を基本として通風を行う。もっとも、亜音速時には風路制御は不要、補助送風機も帶動しない場合が多い。従って、これらの単独操作状態を、条件に応じて許容する。

連動状態の各部制御装置には、風洞制御装置から必要な指令が送信される。補助送風機制御装置には、バイパス弁 VA2 開度と静翼角角度、入口弁 VA1 開閉等が適宜指令される。風路制御装置には、設定マッハ数 Ms 等が適宜指令される。風路制御の詳細な単独操作画面は、担当メーカー区分により計測卓に設ける。冷却水設備制御装置には、個別に設定されるよどみ点温度 T0 制御のための冷却水流量が適宜指令される。排風機現場操作盤や主送風機静翼角現場操作盤についても同様である。

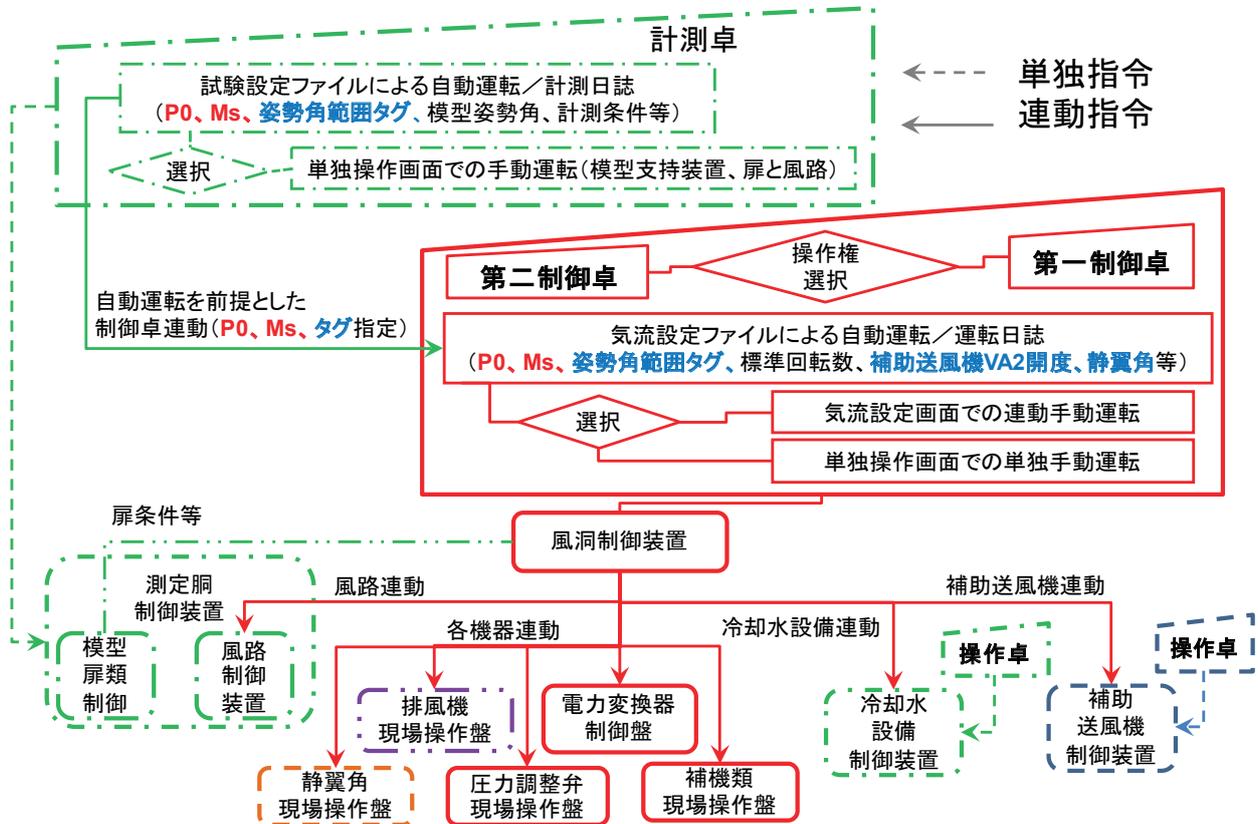


図3 制御系統の検討案

制御卓と計測卓の両方で自動運転を選択し、さらに制御卓で制御卓連動を選択すると、計測卓でのワンマン運転が可能となる。なお、制御卓単独を選択し、計測卓1名と制御卓1名のツーメン運転を行う必要もある。従来にはない風路制御の指令を出すため、主送風機制御装置は風洞制御装置と改名する。風洞制御装置を操作する制御卓は、主送風機側の制御室に第一制御卓、測定部側の計測室に第二制御卓を設け、操作権をどちらかに選択できる。

### 3.3. 設定ファイルによる自動運転

気流に関する操作を行う制御卓では、気流設定ファイルによる自動運転、気流設定画面での連動手動運転、そして各単独操作画面での手動運転が出来る。気流設定ファイルの各行には、設定マッハ数 $M_s$ とよどみ点圧力 $P_0$ 、姿勢角範囲設定タグNo.の他、主送風機標準回転数、補助送風機バイパス弁VA2開度、補助送風機静翼角等の運転条件が記載されている。同一気流条件であっても、模型姿勢角に依存する模型閉塞比が増えると、補助送風機の抽気量を増やす必要が生じる。この抽気量が増加する運転条件を、姿勢角範囲設定タグNo.を増加した別行に用意する。気流設定ファイルの行を選択して実行すると、望む気流条件が得られる。気流設定画面の各設定窓には、気流設定ファイルの選択行に記載された情報が転載されて制御される。

模型形状や姿勢角に左右される標準回転数は、制御卓に予測する機能を備える。この標準回転数は、主送風機フィードフォワード（FF）制御の目標値となる。この標準回転数に達する、または、測定部マッハ数 $M_c$ が設定マッハ数 $M_s$ に近くなると、設定マッハ数を目標値としたフィードバック（FB）制御に切り替える。なお、手動運転時には、標準回転数を目標値とした回転数制御を維持し、マッハ数制御に切り替わらない。

模型支持装置と計測装置を操作する計測卓では、試験設定ファイルによる自動運転、または各単独操作画面を用いた手動運転が出来る。試験設定ファイルの各行には、試験条件が記載されている。試験条件は、模型姿勢や計測条件等と、設定マッハ数 $M_s$ やよどみ点圧力 $P_0$ 、姿勢角範囲設定タグNo.の気流条件で構成される。試験設定ファイルの行を選択すると、望む模型姿勢角が得られ、手動または自動で試験データを計測する。

試験設定ファイルの行数は、試験ケース数と等しく、気流設定ファイルの行数は、気流条件の数と等しくなる。一つの気流条件で多数の模型姿勢角を取って試験を行うため、試験設定ファイルの行数は、気流設定ファイルの行数を模型姿勢角の数だけ倍増したものとなる。模型重量の風袋補正のための無風データ取得も、試験設定ファイルを用いて行うため、実際の行数はさらに増える。試験設定ファイルに基づいて計測日誌を作成し、試験データの管理に用いる。気流設定ファイルに基づいて運転日誌を作成し、風洞や運転条件の管理に用いる。

ワンマン運転の場合、試験設定ファイルの設定マッハ数 $M_s$ 、よどみ点圧力 $P_0$ 、姿勢角範囲設定タグNo.が一致する気流条件が、制御卓の気流設定ファイルから探し出され、その行に記載された運転条件で自動運転される。ワンマン運転で気流条件を変更する際は、安全のため計測卓操作画面にて確認操作を行う。

姿勢角範囲設定タグNo.の変更以外は、模型姿勢角と同時に気流条件を変更しないこととする。また、気流条件変更は、模型閉塞比が最少となる姿勢角で行うよう、試験設定ファイルを作成する。なお、試験／気流設定ファイルは、通風中でも書き換え、置き換え可能とする。模型姿勢角の連続変化に応じて、主送風機回転数を予測して制御するFFスイープ制御は、制御卓連動状態にて再試験条件の範囲内で行う。

## 4. 通風前後の運転自動化

### 4.1. 各部運転シーケンスの体系化

風洞各部の状態を整理し、運転シーケンスとして体系化した結果を、図4に示す。横方向に時間の関係、上下方向に、制御卓連動のワンマン運転を頂点とする条件の関係を示す。

測定部の上下流ゲートと大扉の開閉、さらに風路を調圧する操作は、試験準備作業を行う風

洞ユーザの安全に深く関わる。上流ゲート弁を開けて測定部上流の粒子画像計測法（PIV）シードレークの位置調整や、感圧塗料法（PSP）試験時の無風調圧を行う等、新たな試験技術には追加要求もある。通常の空気力測定試験でも、大気圧下で風袋データを取得し、模型重量を算出する。従来は、複数の運転員の状況把握と、各弁の手動操作により対応していた。

測定部の安全と省力化を両立するため、「風路調圧」と「風路開放」の両シーケンスを考案した。起動準備から休止まで、背反関係で選択する。風路開放シーケンスは、風路を大気に開放し、測定部作業が可能な状態とする。ここでは、主送風機の軸受けシール空気供給に伴い、複数の風洞弁操作による大扉均圧やゲート均圧が自動で行なわれる。大扉閉による測定部の無人状態、上下流ゲート「開」による測定部の風路接続、圧力設定を条件として、風路調圧シーケンスが選択実行できる。風路調圧シーケンスでは、排風機が運転され、設定されたよども点圧力 $P_0$ に調圧される。

風路調圧を条件として、計測卓からの起動許可を得て、主送風機を起動する。起動後に気流条件を整え、模型姿勢角を加えた試験条件で試験データを取得後、計測卓からの停止許可を得て、主送風機を停止する。計測卓から離れている第一制御卓もあるため、このような計測側の確認操作を起動停止の条件とする。また、起動後から停止までの間、すなわち通風中に制御卓連動とすれば、計測卓でのワンマン運転が可能となる。

補助送風機の帶動運転を選択した場合は、主送風機と同様、補助送風機の軸受けシール空気による補助送風機風路の過圧を防ぐ必要がある。このため、風路接続弁VM3を開として下流側風路を主風路に接続する。このVM3弁開閉時の均圧の必要から、補助送風機帶動運転の選択は、風路調圧開始前までとする。補助送風機接続マッハ数 $Me$ を設定し、設定マッハ数 $Ms$ に応じた補助送風機の接続と分離、抽気と待機の切り替えを自動で行う。現場点検や操作があるため、補助送風機の起動準備、起動、停止、休止の操作は補助送風機操作卓で行うが、停止操作は制御卓でも行えるものとする。

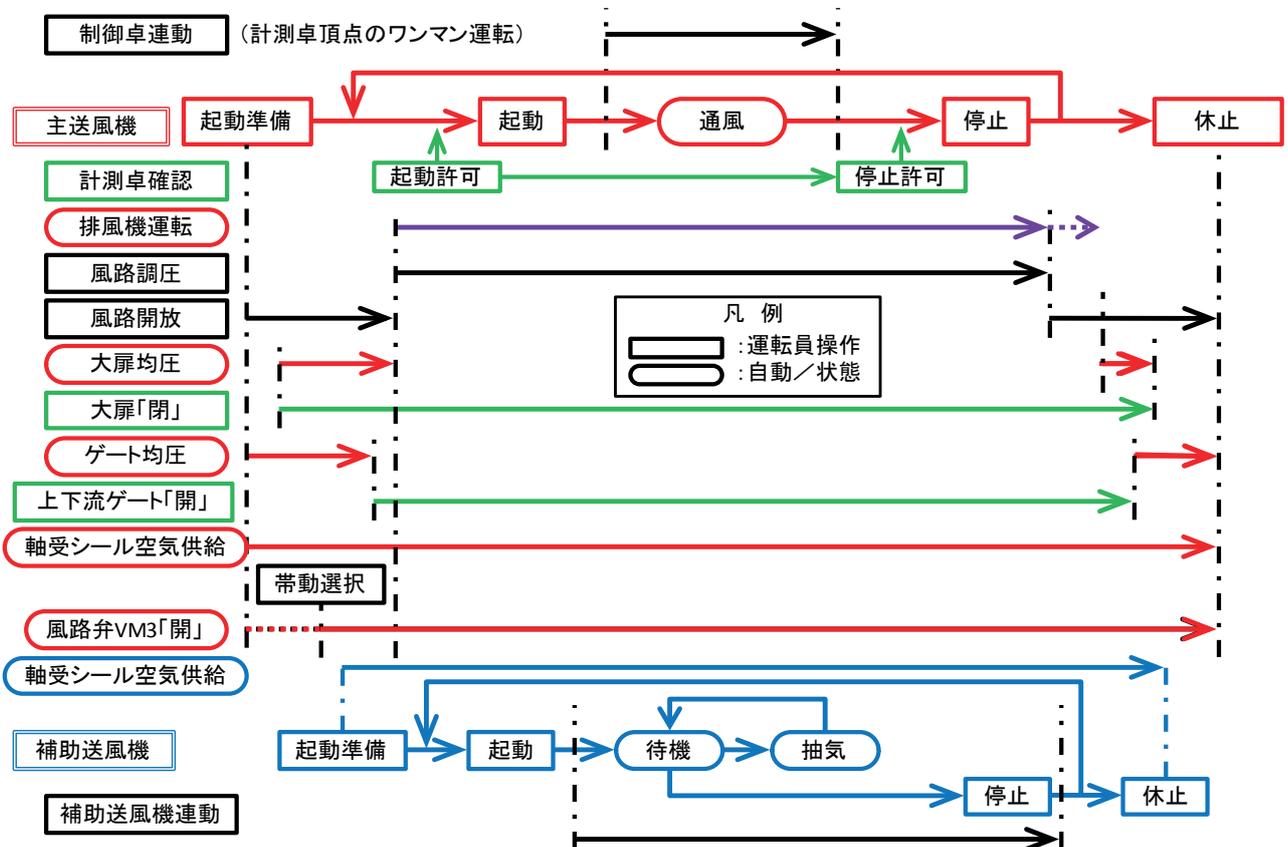


図4 各部運転シーケンスの体系化案

## 4.2. 風路調圧シーケンス

高速化と省力化のため、まず大気開放装置を更新整備し、減圧補助と大扉均圧に用いることにする。これより、入口圧力過大による排風機の故障リスクを低減する。また、排風機能力の段階調整を4極2台（1台故障時は2極1台）の50%、2極2台の100%の2段階に簡略化することにした。その他の手動操作も可能な限り簡略化し、図5と6に示す風路調圧の自動シーケンスにまとめた。

マッハ数が増加すると、よどみ点圧力 $P_0$ が増加する。例えば、圧力制御せずにマッハ数 $M=0 \rightarrow 0.9$ まで加速すると、 $P_0=100 \rightarrow 114$  kPaとなる。マッハ数の増分に応じた $P_0$ 増加分を予測し、この $P_0$ 増加分を $P_0$ 設定値から減じて $P_0$ 加速値とし、加速中の $P_0$ 目標値として過加圧を防ぐ。

$P_0$ 測定値  $\geq 103$  kPaの場合は、VM4A弁を全閉として排風機の入口圧過大を防ぐ。VM5C弁はVM4A弁より小口径のため、全開となっても排風機入口圧が過大となることは無い。また、VM4A弁の開度制御によって減圧速度を制御するが、 $P_0$ 設定値  $\leq 60$  kPa時には17%に開度固定し、排風機の入口圧過小を防ぐ。

$\Delta P_0 = P_0$ 目標値 -  $P_0$ 測定値とする。 $\Delta P_0$ に応じて充填弁VM9や、大気開放装置VM10弁とVM11弁を用いて加減圧を補助する。50AのVM9弁は、加圧補助に適当な口径であるため、従来の手動制御で常用されてきた。しかし、測定部に乾燥空気を充填するため、測定部マッハ数が影響を受ける。補助送風機帶動時には測定部マッハ数 $M_c \geq 0.8$ 、超音速運転時には測定部マッハ数 $M_c \geq$  ノズルマッハ数 $M_n$ を維持する必要があるため、VM9弁開度リミットや復帰タイマ付の全閉時間を設けて加圧を制限する。冷却器付近にあるVM7弁を小口径化してVM9弁の代わりに用いると、測定部のマッハ数に影響を与えないと思われる。

よどみ点圧力 $P_0$ を一定に保つ微調整は、最も小口径のVM5C弁、VM6C弁によって、従来も自動で行われていた。これに目標値への加減圧を加速する過程が追加されたシーケンスとなっている。

## 4.3. 風路開放シーケンス

図7に、風路開放シーケンスを示す。ここで大気圧への自動調圧を、風路開放シーケンスの一部とした。大気圧以下での通風も多いため、VM9弁による乾燥空気充填で加圧して運転を終えることも多い。停止後に冷却時間が必要である排風機は、出来るだけ早く停止する。逆に、大気圧以上で通風していた場合には、大気開放装置だけでは、大気圧付近での減圧速度が遅くなる。従って、VM5C弁を介した排風機による減圧を継続する。風路開放から風路調圧に切り替えると排風機が起動するが、風路調圧から風路開放に切り替えた場合は、必ずしも排風機は停止しない。図7右側に示すように、測定部ゲート弁や大扉の均圧操作も自動シーケンス化する。大扉均圧は、従来のVD3弁ではなく、大気開放装置のVM10弁、VM11弁を用いて行う。

## 4.4. 休止シーケンス

図8に、休止シーケンスを示す。風路内圧力増加の原因となる主送風機軸受シール空気の停止と、補助送風機シール空気を遮断するVM3弁閉を条件として各風洞弁を閉鎖する。通風直後は、風洞各部の温度が50℃以上となっていることが多いため、時間が経過すると常温に冷えて減圧し、大気圧以下となることも多い。大気圧以下となると大扉の開閉に支障を来すため、排風機入口の大気開放弁VD3から大気を導入して大気圧を保つ。各部が常温になるほど時間が経てば、大気を導入する必要もなくなるため、休止シーケンス開始15分後にVD3とVM5、VM5C各弁を閉とし、休止完了する。

以上より、個々の手動操作に頼っていた圧力制御とバルブ操作を、全て自動シーケンスで行う見込みが得られた。排風機を始めとする機器が確実に保全されると共に、測定部で作業するユーザの安全が、新たな要求に応えた上で向上することになる。

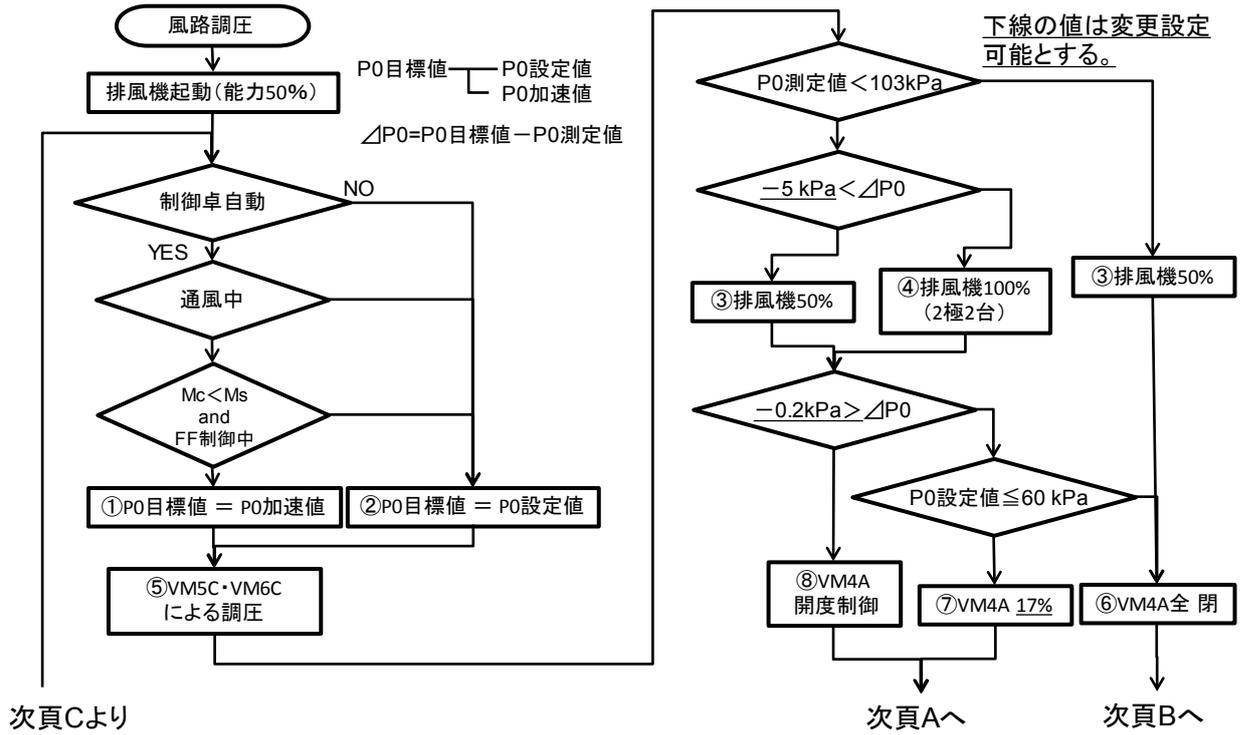


図5 風路調圧シーケンスその1

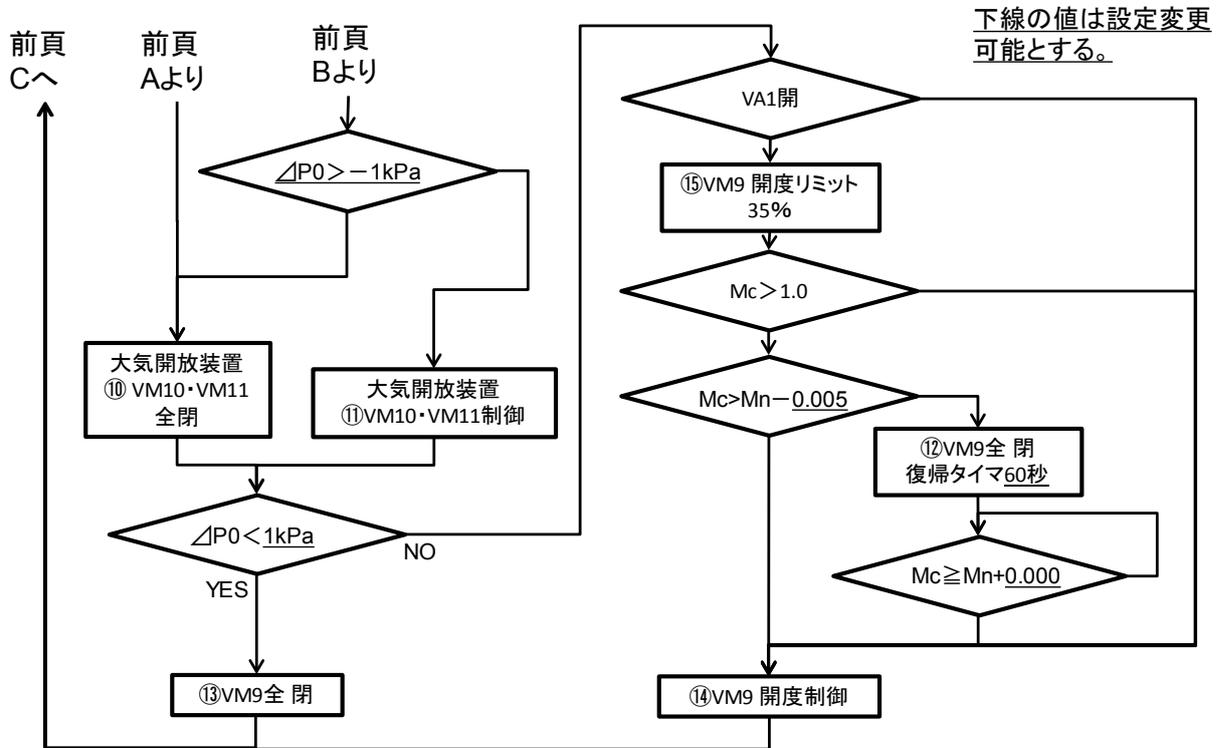


図6 風路調圧シーケンスその2

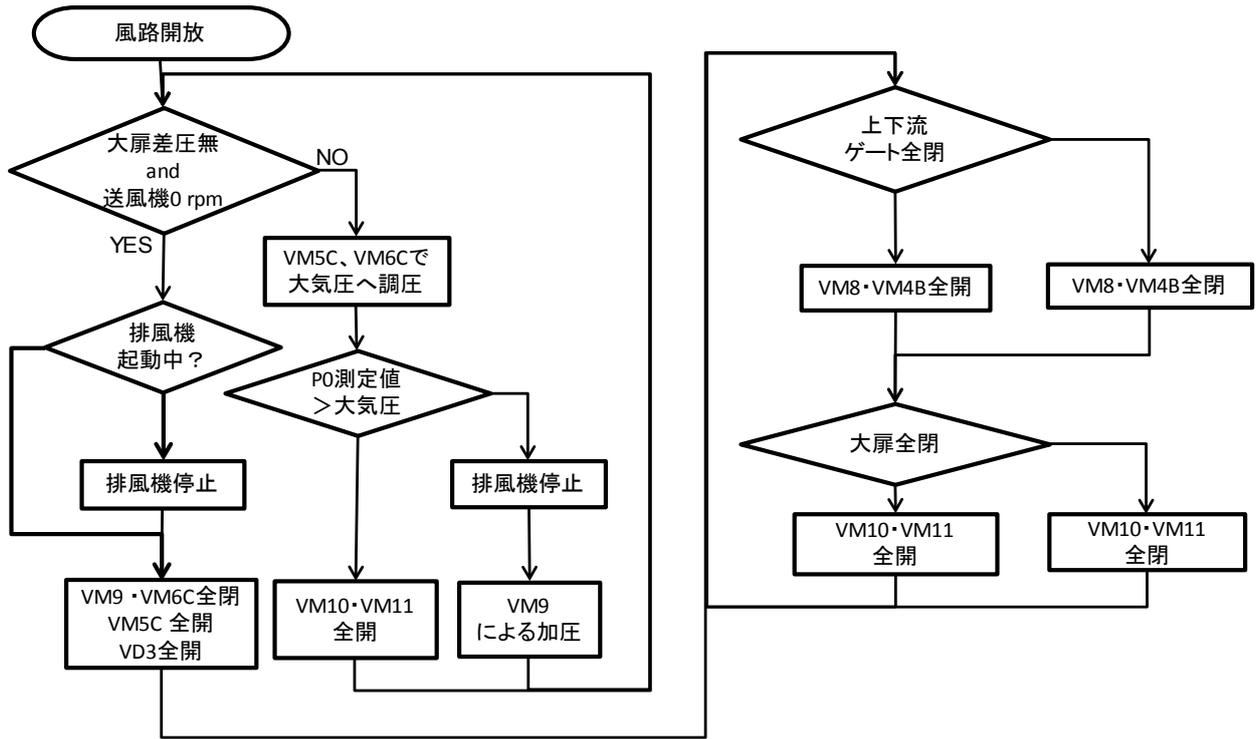


図7 風路開放シーケンス

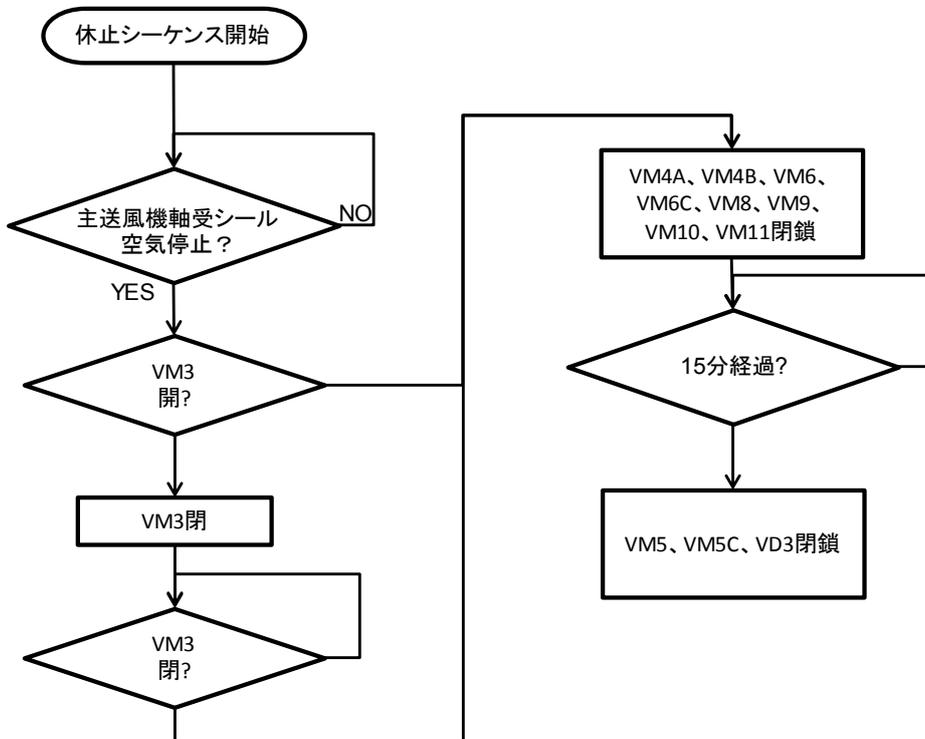


図8 休止シーケンス

### 5. 通風時の運転自動化

#### 5.1. 各部の連携操作シーケンス

試験条件のあらゆる変更パターンを列举し、表1に示す。各変更パターンにおける一連の運転操作を、図9～11の①～⑬の各操作シーケンスに整理分類し、その操作順も表1に示す。従来は、主/補助送風機、測定胴の3名の運転員が、各変更パターンの複雑な操作手順を、お互いに逐次把握していた。そして、時には時間短縮のための先行/並行操作を行っていた<sup>6,7)</sup>。

補助送風機帯動時には、マッハ数や模型の姿勢角変更等により、測定部の抽気量を変更する。この抽気量変更は、バイパス弁VA2開度と静翼角によって行うが、これより補助送風機の運転点が移動する。従来は、運転点がサージング領域に入らないよう、かつ、変更中の電力消費を抑えるよう、変更経路上のVA2開度と静翼角の多数の組み合わせを、運転員が自ら考えて設定していた。予備試験を行って検討したところ、この抽気量変更も④、⑤、⑥、⑦、⑩、⑪の各操作シーケンスに示すように、簡略自動化出来る見込みである<sup>14)</sup>。

③、④、⑤、⑧の各操作シーケンスに示すように、測定胴の第2スロート動作には、構造上ディフューザフラップを寸開して退避する必要があり、マッハ数制御にも影響する。④、⑤のノズル加減速の操作シーケンスでは、測定部内での剥離衝撃波の発生を予防する必要もあり、主/補助送風機及び測定胴風路の複雑な連系制御が必要である。⑫そして⑬では、マッハ数を一定とするように主送風機回転数をFB制御し、試験データを計測する。なお、⑬中では、模型姿勢角の連続変化に応じて、主送風機回転数を予測して制御するFFスイープ制御を行うこともあるが、さらに詳細な手順となるため、図11では割愛している。

表1 試験条件変更パターンと操作シーケンス

No.	試験条件の変化	設定マッハ数 Msの変化	操作シーケンス		
			加速	減速	
				補助送風機 静翼角変化	ハイパス弁VA2 開度のみ変化
1	亜音速⇒亜音速(主送風機単体)	0⇒0.2	①⑫	—	—
2	亜音速⇔亜音速(主送風機単体)	0.2⇔0.6	①⑫	—	—
3	亜音速⇔補助送風機帯動亜音速	0.8⇔0.98	①②⑩⑬	①⑨⑫	—
4	亜音速⇔音速	0.2⇔1.0	①②③⑩⑬	①⑧⑨⑫	—
5	亜音速⇔超音速	0.8⇔1.4	①②③④⑬	①⑤⑧⑨⑫	—
6	補助送風機帯動亜音速⇔帯動音速	0.95⇔1.0	①③⑩⑬	①⑧⑦⑬	①⑧⑩⑬
7	補助送風機帯動亜音速⇔帯動超音速	0.95⇔1.4	①③④⑬	①⑤⑧⑦⑬	①⑤⑧⑩⑬
8	補助送風機帯動亜音速⇔帯動亜音速	0.95⇔0.98	①⑩⑬	①⑦⑬	①⑩⑬
9	音速⇔超音速	1.0⇔1.2	①④⑬	①⑤⑦⑬	①⑤⑩⑬
10	超音速⇔超音速	1.2⇔1.4	①④⑬	①⑤⑥⑬	—
11	姿勢角範囲設定タグによる抽気増減	変化なし	⑩⑬	⑪⑫	—
12	よどみ点圧力P0の増減	変化なし	①⑬	①⑬	—
13	模型姿勢角の増減	変化なし	⑬	⑬	—
14	無風調圧	0⇔0	①⑬	①⑬	—

※条件:補助送風機接続マッハ数Me = 0.95とする。

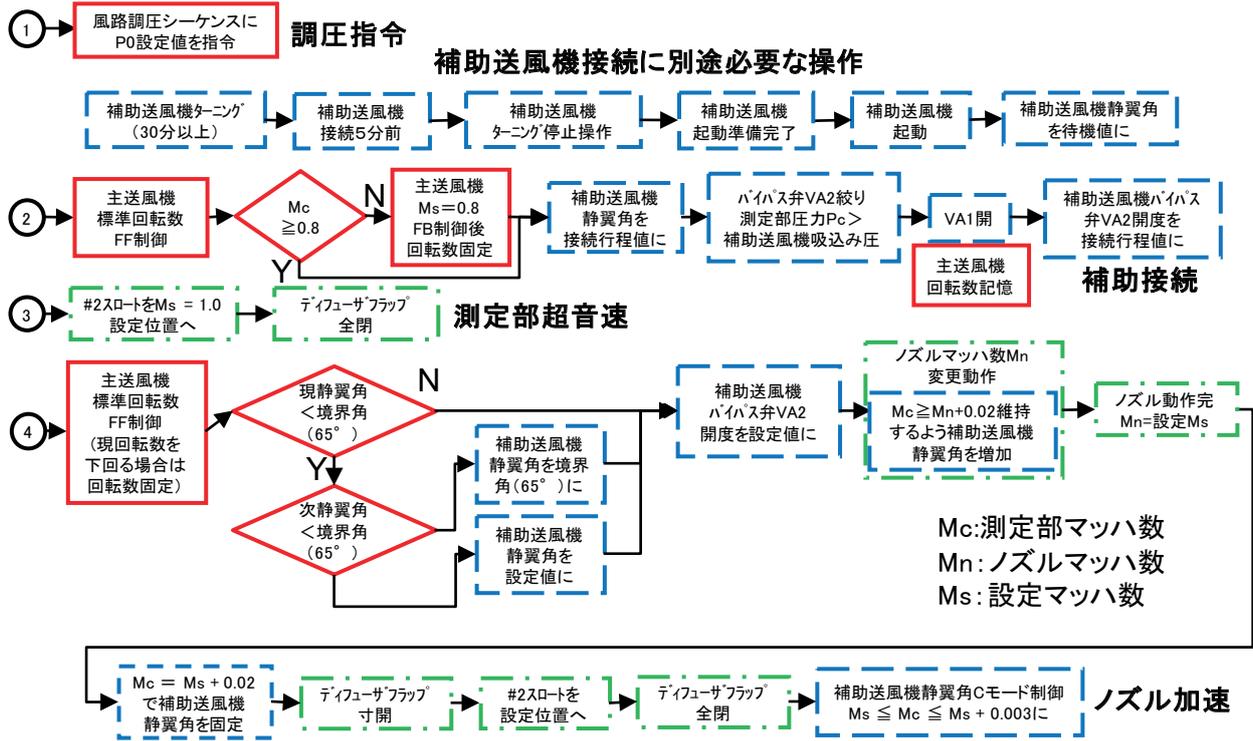


図9 操作シーケンスその1

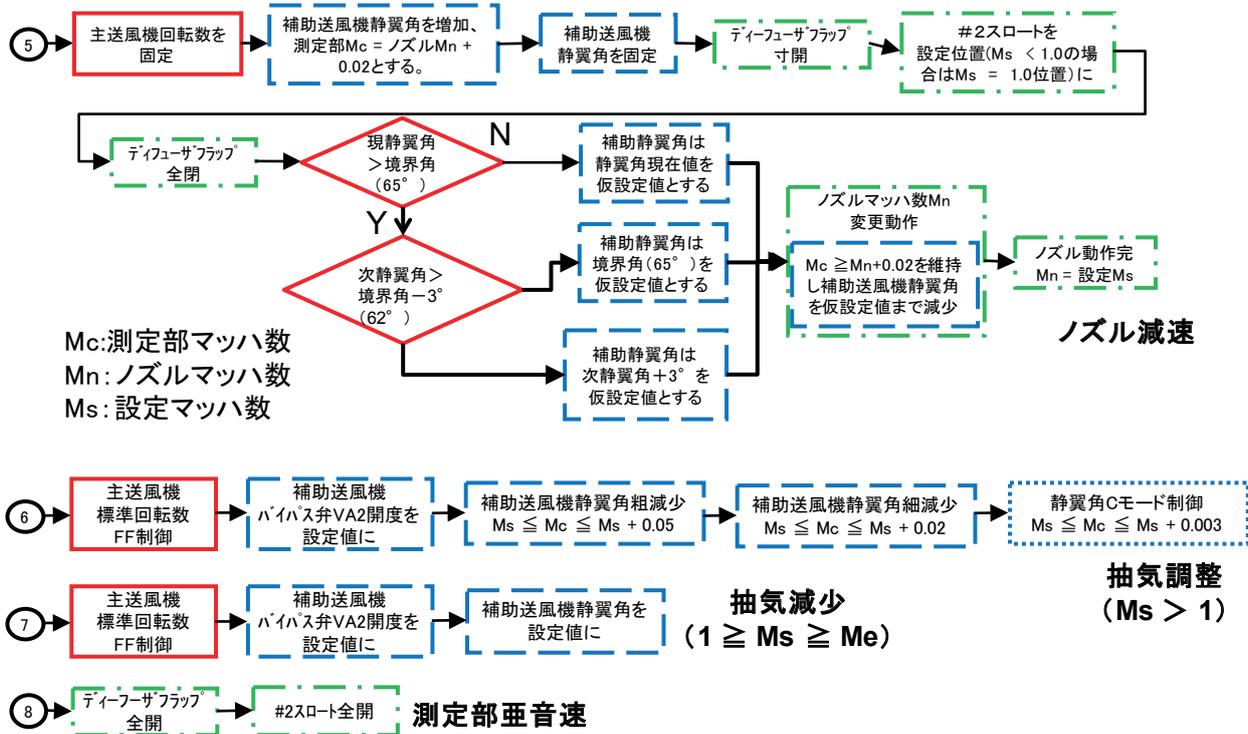


図10 操作シーケンスその2

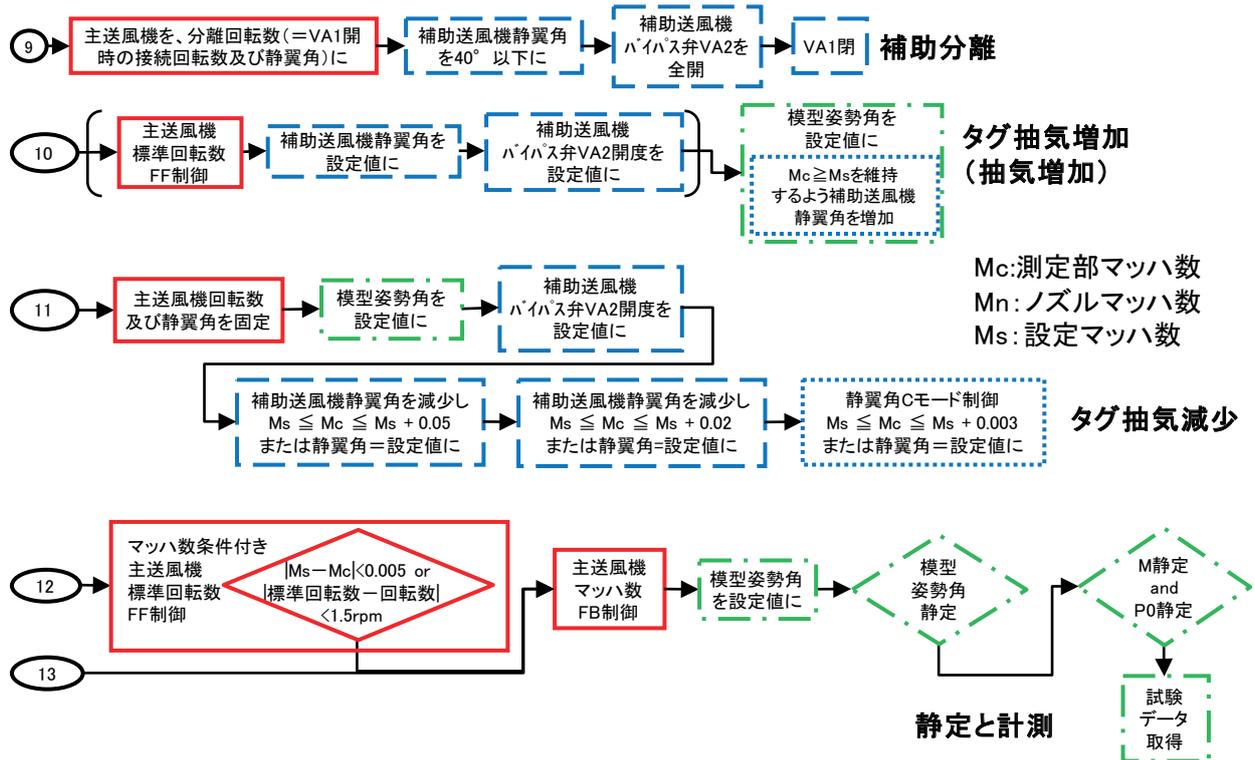


図11 操作シーケンスその3

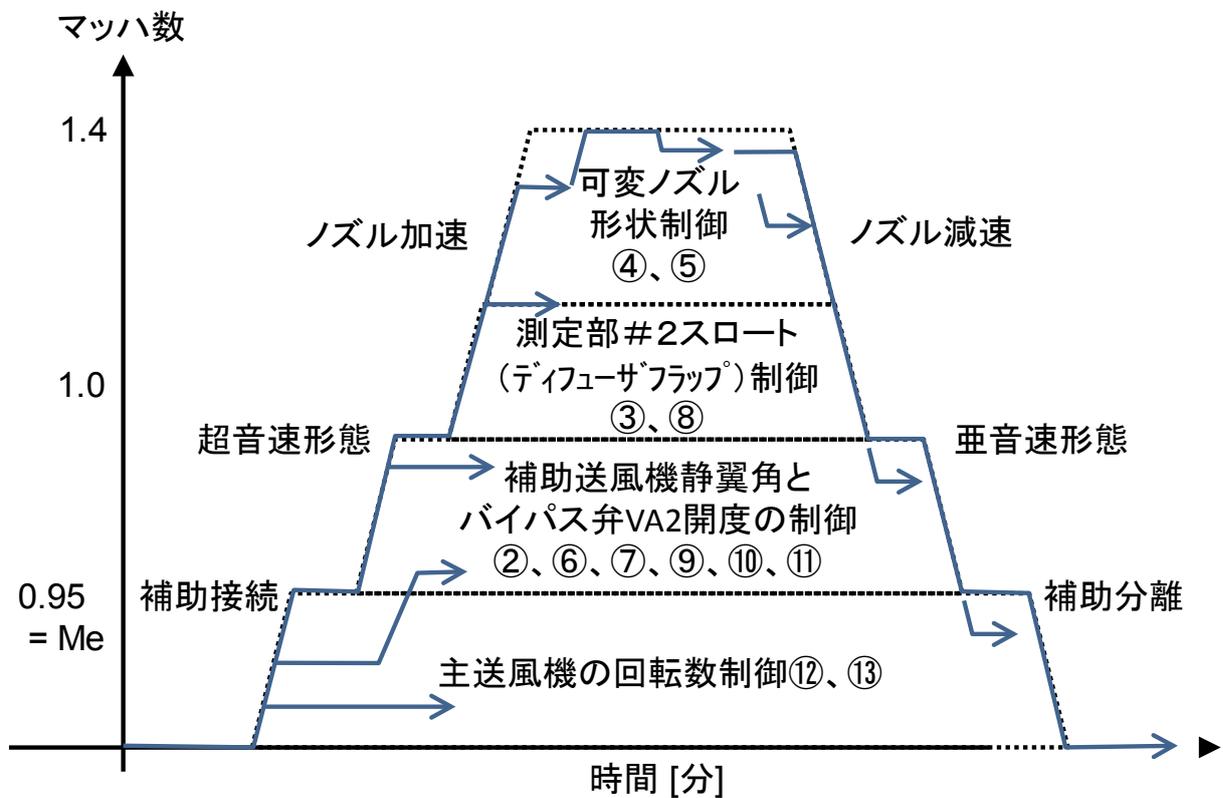


図12 マツハ数の増減と必要な各部制御の概念図

## 5.2. マッハ数と各部制御の関係

マッハ数の増減に対して必要となる各部制御の関係を図12に示す。通風中は風路調圧が常に必要であるが、図12では操作シーケンス①を省略している。

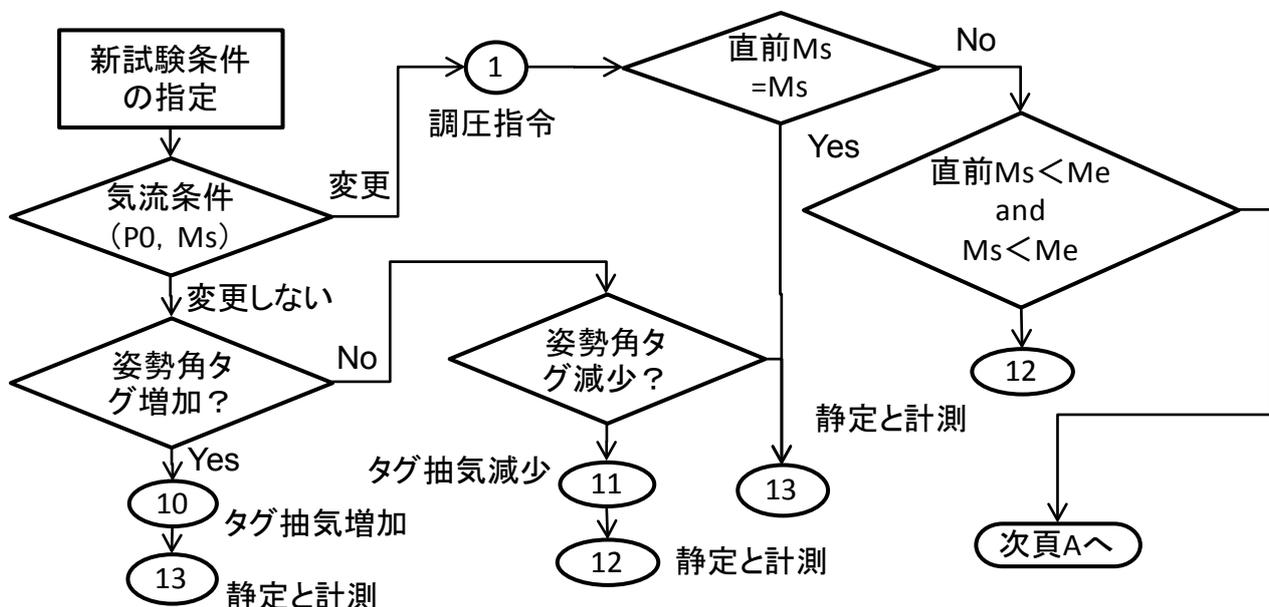
亜音速では、主送風機の回転数制御によるマッハ数制御⑫、⑬がまず必要となる。補助接続マッハ数 $Me = 0.95$ とすると、それ以上のマッハ数では、補助送風機の接続②または分離⑨の制御と、抽気調整⑦⑩⑪が必要となる。音速以上のマッハ数では、ディフューザフラップを含む第2スロート制御③、⑧が必要である。超音速マッハ数では、ノズル加減速④、⑤が必要であり、後者に伴う超音速抽気調整⑥も必要となる。

マッハ数が高いほど制御要素が増加する。マッハ数増加時には、現在のマッハ数から必要とされる各制御要素を下から積み上げる。一方、マッハ数減少時には各制御要素を上からすくい取る。マッハ数変化に応じて、必要な制御要素を順序良く追加削減する必要がある。

## 5.3. 試験条件変更時の操作シーケンス判断

試験条件のあらゆる変更パターンに対し、必要な各部の操作シーケンス①～⑬を適切な順番で実行する必要がある。試験条件変更に必要な操作判断と、その判断手順をまとめたフロー図を図13～15に示す。直前及び新たに指定した試験条件に対応する気流条件、現在のノズルマッハ数 $Mn$ 、補助送風機入り口弁 $VA1$ 開閉の状態、補助送風機静翼角の情報で必要な各部操作を判断する。

模型姿勢角の変更は、気流条件の変更より頻繁に生じる。このため、模型姿勢角の変更や、これに伴う測定部抽気量の変更を、判断フロー図の前1/3である図13で終わらせるようにした。亜音速でマッハ数を変更する場合は、超音速不始動を心配する必要がない。補助送風機による測定部の抽気量調整は、動作の粗いバイパス弁 $VA2$ 開度だけでも可能である。図15右側で、亜音速の抽気量調整を行っているが、バイパス弁 $VA2$ 開度のみでの抽気増減は、操作シーケンス⑩で両方とも可能である。



- ①～⑬は、分類整理された一連の操作シーケンスを示す。
- ②、③は直前の過程完了を待たない。
- Ms: 設定マッハ数
- Me: 補助接続マッハ数
- タグは現在値と設定値を比較

図13 試験条件変更時の判断フローその1

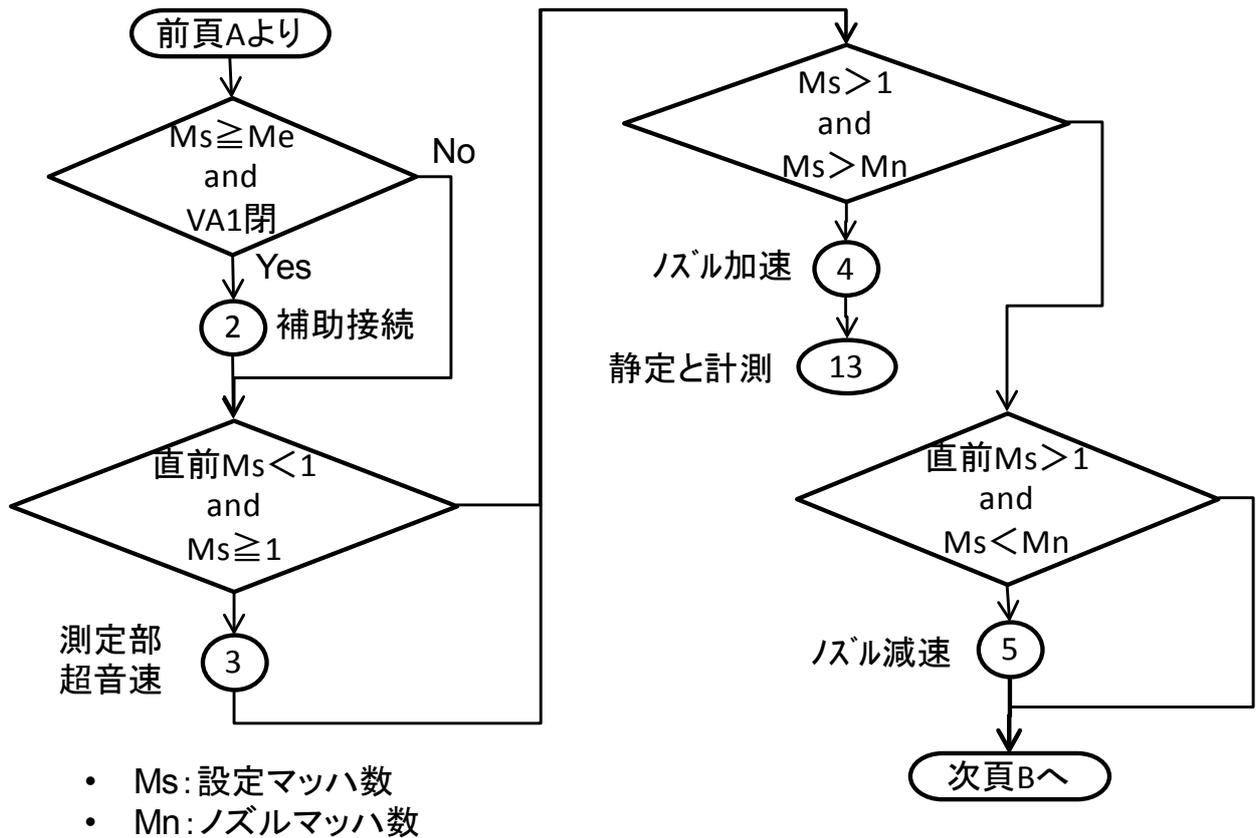


図14 試験条件変更時の判断フローその2

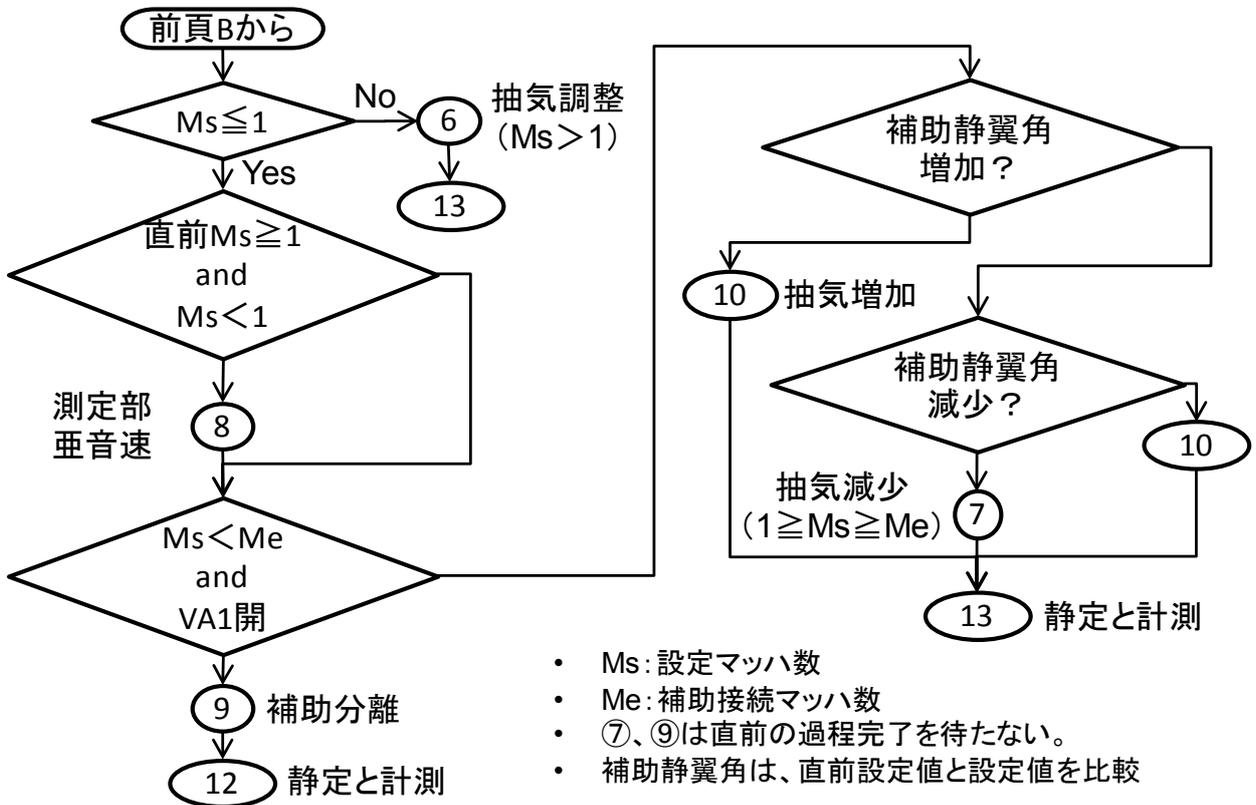


図15 試験条件変更時の判断フローその3

#### 5.4. 通風シーケンスの確認

気流設定画面を模したホワイトボードに、各部運転条件を書き出し、適宜書き換えて運転状態を机上模擬し、運転員全員で考案した自動運転シーケンスを検証した。表1に示す試験条件のあらゆる変更パターンに対しても、図13～15で示した操作シーケンス判断に基づき、図9～12で示した操作シーケンスを実行すれば、滞りなく対応できることを確かめた。

図3に示した制御系統にて各部に指令し、図9～12の操作シーケンスを自動で実行する。ツーマン運転時には、模型姿勢角の変更と計測操作を、計測員が判断して計測卓で操作する。図11に示すタグ抽気増加⑩及び減少⑪の操作シーケンスでは、姿勢角変更を伴う抽気増減操作を行うが、ワンマン運転時には操作シーケンスが自動進行する。ツーマン運転時には、計測卓での模型姿勢角変更操作を待って、操作シーケンスが自動進行する。

#### 5.5. 安全動作の検討

ワンマン運転時の安全確保のため、自動シーケンスの一時停止機能を設けることにした。このため、図9～12の操作シーケンス中の、どの段階でも安全に一時停止できることを確認した。ただ、超音速運転時は、ディフューザフラップ寸開位置より全閉位置の方が、測定部の気流マッハ数が安定する。従って、ディフューザフラップ寸開時に一時停止指令を受けた場合は、第2スロット動作を一時停止した後、ディフューザフラップは全閉位置まで動作した後一時停止する。

また、タグ抽気増減時に一時停止した場合は、現状の抽気量に相当するタグNo.が不明となる。抽気量増減の前後で抽気量が少ない方、すなわち小さい方のタグNo.を現在値とし、次の操作シーケンス判断が安全側となるようにした。タグNo.が増加するタグ抽気増加⑩では、抽気量を増加した後に模型姿勢角を変更する。一方、タグNo.が減少するタグ抽気減少⑪では、模型姿勢角を変更した後に抽気量を減少する。模型姿勢角に依存する模型閉塞比の変化に対し、常に測定部マッハ数 $M_c$ をノズルマッハ数 $M_n$ 以上に維持する必要がある。このために必要な抽気量を、常に確保する操作シーケンスとする。

さらに、自動シーケンス動作途中で、次の試験条件を指定することが無いよう、⑫、⑬の主送風機FB制御に入ることを、次の試験条件が指定できる条件とする。これより、不完全な一時停止状態でも、次の試験条件に変更操作することを防止する。一時停止後には必要に応じて制御卓単独、さらには手動に切り替えて風洞各部の状態を整えた後、ワンマン運転に復帰する。

以上より、ワンマン運転時の安全動作を実現する見込みを得た。

#### 5.6. ワンマン運転の機会と試験体制

以上より、3名の運転員の複雑な連係操作を統合し、自動シーケンス化する目途が得られた。試験2日目以降は、模型細部を変更し、同じ試験条件で試験を繰り返すことが多い。模型細部の変更程度では、新たに送風機の運転条件等を試行錯誤する必要がないことが殆どである。従って、通風日程のかなりの部分で、起動後の再試験条件を条件とするワンマン自動運転が可能な状況となる。

しかし、ユーザが望む試験条件での試験データ取得を、通風しながら管理する必要がある。通風の終了時刻が迫るに従い、優先して試験する試験条件を取捨選択する必要にも迫られる。模型が振動するような危険な試験条件は、再挑戦する可能性を考えて試験設定ファイルに残っている場合があり、また、エルロン操舵等の模型細部変更にも影響を受けることがある。これらは一人では勘違いする恐れがあり、自動運転シーケンスで予防することはできない。

従って、ワンマン運転できる風洞となっても、風洞試験は2名以上で状況を確認しながら実施する。なお、運転操作に関する負担が減れば、試験効率や安全性は高まる。残り時間で行う優先ケース等を相談したり、異常の発生に気づいたり出来る余裕が生じるからである。試験中にユーザが常駐する、計測室の第二制御卓周りの配置案を図16に示す。隣接する計測卓に1名、第二制御卓に1名の計2名の運転員を配置し、お互いに助け合うことが出来る配置となっている。

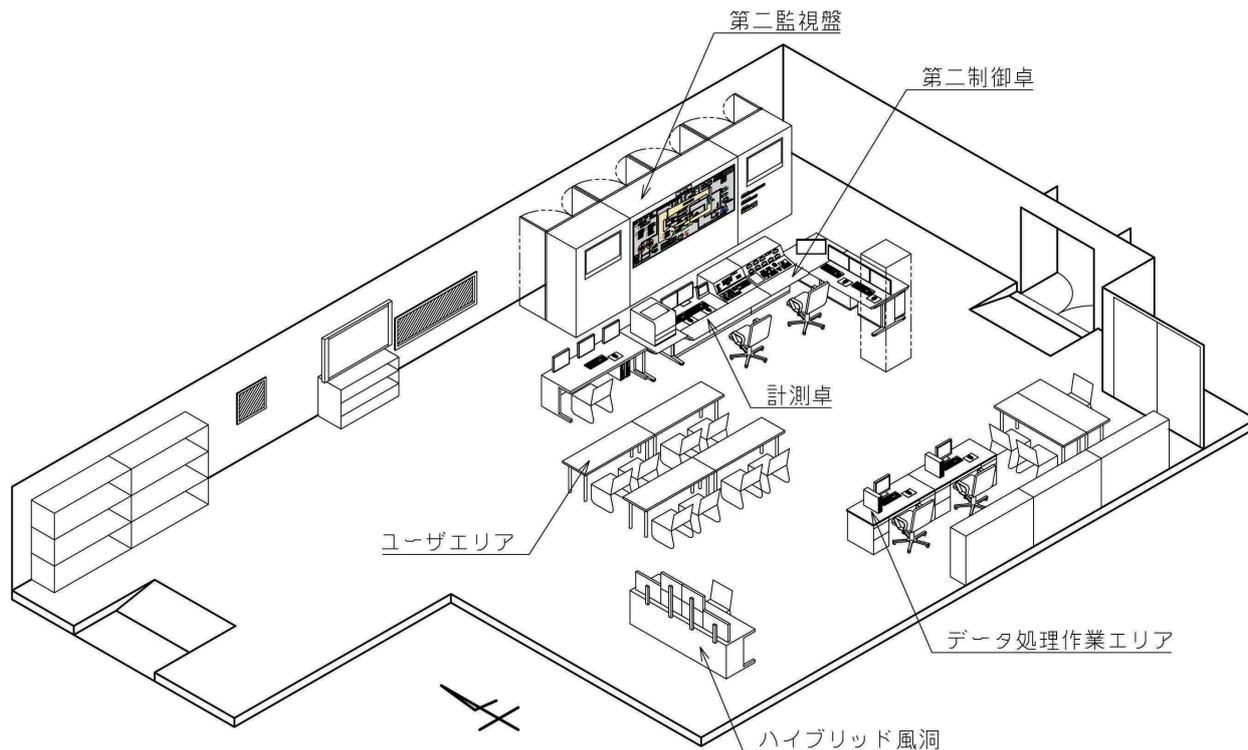


図16 計測室内の第二制御卓、計測卓他の配置案

## 6. まとめ

宇宙航空研究開発機構2 m×2 m遷音速風洞の主送風機、補助送風機、測定胴の運転制御を統合自動化する検討を行った。主電動機の再更新に伴って各制御装置を更新改修し、平成29年8月に試運転を計画している。

3名の運転員が3社の制御装置で行っていた連係操作を整理し、複雑な構成に起因する当風洞の運転上の特徴をまとめた。大気開放装置を導入することとし、試験条件を管理指令する制御システムを考案すると共に、熟練の手動操作を簡略自動化する目的を立てた。そして、各操作を整理して体系化し、試験条件を入力するだけの統合自動運転シーケンスを考案した。作業者の安全と設備保全が向上する他、起動後で再試験条件ならば、ワンマン運転も可能となる見込みである。

## 7. 謝辞

平成26年度で定年退職された小松行夫主任研究員、電動機更新タスクチームの互井梨絵研究開発員、日高亜希子研究開発員、山崎喬特任担当役、コスモテック渡邊篤史氏に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 航空技術研究所、航空技術研究所2m×2m遷音速風洞の計画と構造、航空技術研究所報告TR-25、1962年3月
- 2) 三堀進、井上政一、白井正孝、藤田敏美、ディフューザフラップによる抽気を用いた2m×2m遷音速風洞のマッハ数制御、航空宇宙技術研究所報告TR-551、1978年10月
- 3) 鈴木正光、戸田亘洋、小松行夫、唐沢敏夫、2m×2m遷音速風洞主送風機駆動設備の更新(計画と構成に

- ついて)航空宇宙技術研究所資料TM-580、1988年2月
- 4) 鈴木正光、唐沢敏夫、小松行夫、末永尚志、戸田亘洋、航技研2m×2m遷音速風洞用送風系設備の更新について、航空宇宙技術研究所資料TM-656、1993年7月
  - 5) 鈴木弘一、細江信幸、中村正剛、小池陽、飯島由美、小国保男、川本巖、海老原正夫、航技研遷音速風洞の測定洞設備改修の概要について、航空宇宙技術研究所資料TM-674、1995年1月
  - 6) 細江信幸、鈴木弘一、小池陽、川本巖、海老原正夫、2m×2m遷音速風洞測定洞改修、その2可変ノズル装置の改修について、航空宇宙技術研究所資料TM-680、1995年4月
  - 7) 唐沢敏夫、末永尚志、鈴木正光、小松行夫、戸田亘洋、2m×2m遷音速風洞用補助送風機設備の更新、航空宇宙技術研究所資料TM-698、1996年8月
  - 8) 小松行夫、鈴木正光、唐沢敏夫、末永尚志、航技研2m×2m遷音速風洞用排風機設備の更新、航空宇宙技術研究所資料TM-702、1996年10月
  - 9) Bernhard H. Goethert, Transonic Wind Tunnel Testing, Dover Publications, Inc., New York, 2007, Chaps. 14
  - 10) Frank J. Kmak, Modernization and Activation of the NASA Ames 11-by 11-foot Transonic Wind Tunnel, AIAA 2000-2680
  - 11) 永井伸治、馬込誠、真城仁、我那覇義人、塩原辰郎、唐沢敏夫、2 m×2 m連続式遷音速風洞の制御統合、第53回飛行機シンポジウム講演集、JSASS-2015-5031、平成27年11月、©日本航空宇宙学会
  - 12) X. Bouis, J. Prieur, J. A. Tizard, G. Hefer, ETW Aerodynamic Design -A Case Study-, AGARD Conference Proceedings 585, Aerodynamics of Wind Tunnel Circuits and their Components, 1996
  - 13) John D. Anderson, Jr., Fundamentals of Aerodynamics, McGraw Hill Book Company, New York, 1983, Chaps. 10.3
  - 14) 永井伸治、唐沢敏夫、馬込誠、真城仁、大野宇宙、好本彰、池田洋一、生形裕、加藤孝宏、坂本保幸、2 m×2 m連続式遷音速風洞の補助送風機の自動運転、第55回飛行機シンポジウム講演集、JSASS-2017-5007、平成29年11月

宇宙航空研究開発機構研究開発資料 JAXA-RM-18-004  
JAXA Research and Development Memorandum

**JAXA 2 m×2 m連続式遷音速風洞の統合自動運転**  
Integrated Automatic Operation of the JAXA 2 m by 2 m Continuous Transonic Wind Tunnel

---

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1  
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 平成31年1月24日  
電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。  
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

