

小型ジェットエンジン付模型風洞試験法への取り組みについて

(その1：風試システムと解析結果)

中谷輝臣、馬場滋夫、小池 陽、長井健 一 郎、生沼秀司、
武田克己、関根静雄（航空宇宙技術研究所）

The Approach to the Wind Tunnel Test Method for a Aircraft Model Powered by
Small Jet Engine - An Engine Control System and Analysis of its Test Results.

Teruomi Nakaya, Sigeo Baba, Akira Koike, Kennitirou Nagai,
Hideji Oinuma, Katumi Takeda, Sizuo Sekine (NAL)

概要

航空機（SSTジェット実験機、スペース・プレーン等）開発の空力設計に必要な小型ジェットエンジン付模型風洞試験法の確立に向けた取り組みについて述べる。内容は2種類のシミュレータエンジンとして実燃焼方式のマイクロ・ジェットエンジンと高圧空気で作動するTPSエンジンによる両エンジン単体特性風洞試験を実施したので、両風洞試験装置の概要および両エンジン単体特性の解析の一部についても報告する。

1. はじめに

本報告は、航空機（SSTジェット実験機、スペース・プレーン等）開発の空力設計に必要な小型ジェットエンジン付模型風洞試験法の確立に向けた取り組みについて述べる。特に機体とエンジンとが一体となっているSSTジェット実験機等における模型風洞試験ではエンジンの推力有無によって、飛行時の機体周りの流れ場の相似性に違いが生じると思われる。過去のSTOL実験機「飛鳥」開発で問題となった高圧空気作動方式のTPS (Turbine Powered Simulator) エンジン付模型風洞試験と飛行試験との間に明らかに空力特性に違いが生じており、高圧空気の排気ジェットの運動量で推力を得るTPSエンジンの風洞試験パラメータの見直しが求められてい

た。

そこで、実機の相似性が良いと推測できる実燃焼方式のマイクロ・ジェットエンジン（Micro TurboJet Engine：以後Mエンジンという）を導入し、風洞内運転技術を確立させ、Mエンジンに対するTPSエンジン特性を見直すために必要な両エンジン単体特性風洞試験を実施して両エンジン単体特性のデータベース化を図る。次に当該両エンジンを模型に装備して風洞試験を実施し、機体とエンジンとの空力干渉に関するデータベース化を図り、双方のデータベースからMエンジンに対するTPSのシミュレーションパラメータを確認し、適用領域を明らかにする。その作業の進め方を図1のブロック概要図に示す。

これらのエンジン付模型風洞試験技術は、例えば、①エンジンの吸気流と排気ジェット流による機体（胴体下面、尾翼、主翼）への空力干渉の推算法の確立。②双発エンジン装備におけるエンジン最適装備位置（エンジン間隔）の決定。③エンジン片側停止時における空力安定（方向舵の効き等）の確認。④地面効果の確認。⑤超音速インテークの低速機能確認。⑥排気流挙動（排気拡散等）の把握等に関する各種要素技術の確立を図ることで、CFD(Computational Fluid Dynamics)の精度向上、航空機開発に貢献できる。

なお、今回の報告内容は、図1のブロック概要図の上側に示す両エンジン単体特性のデータベース化に向けたエンジン単体風洞試験技術を中心に、一部のデータ解析についても報告する。

2. 両エンジン単体風洞試験装置

「概要」

推力発生機構の異なる2種類のシミュレータエンジン（Mエンジン・TPSエンジン）の単体特性を把握するためには、それぞれのエンジン機構に合わせた試験手法と試験装置が必要となる。特に、エンジン特性の比較にはエンジンを装備するナセル、ナセル支持機構、推力計測用天秤及び排気ジェット後流計測等の機構部を共通化し、両試験においてナセル周囲の流れ場の相似性を確保することが重要である。なお、本両エンジン単体特性試験は航空宇宙技術研究所の大型低速風洞を用いており、その試験装置も風洞に合わせたものとなっている。

2. 1 Mエンジン単体風洞試験装置

Mエンジン単体風洞試験装置は大きく分けて、エンジン単体風洞試験装置本体（機構部、計測・制御部）と排気ガス回収装置からなる。

2. 1. 1 装置本体の機構部

エンジン単体風洞試験装置本体の機構部の大きさ等を図2-1と図2-2、写真2-1に示す。その構成はMエンジンを装備するナセル（吸気流量計測レーク付き）、推力を計測する天秤、排気ジェット流を計測する後流トラバース装置（後流流量計測レーク付き）、エンジン制御ユニットと小型燃料タンクを収納するエンジン制御ボックス、圧力計測用のスキヤニバルブ等を収納する計測ボックス、これらを支える架台およびターンテーブルの下に置かれた燃料元タンク（20リットル）等のからなる。

2.1.1 (1) Mエンジン

【Mエンジン本体系】

試験に適用したMエンジンは、Advanced Micro Turbines社製の形式Olympusエンジン⁽¹⁾を使用している。エンジンの概要を図2-3に示す。このMエンジンは2機種目のエンジンである。初期のTurbine Technologies社製の型式SR-30エンジンは、耐久試験中にエンジンの静翼が破損（熔解）し、シミュレータエンジンとしては問題があることわかり、新たにECUが充実したOlympusエンジンを導入した経緯がある。

Olympusエンジンの特徴は、タービン軸受けの潤滑に、燃料(Jet-A1)に潤滑油を混合させて循環させる方式（焼玉エンジンに類似）をとっていることである。そのために、特別に軸受用の潤滑油系システムを必要としないことである。

Olympusエンジンの形状・性能仕様を下記に示す。

Diameter	1 3 0 mm
Length	2 7 0 mm
Turbine weight	2. 4 kg
Thrust(max.rpm)	1 7 0 N (1 9 0 N)
Thrust(idle.rpm)	7 N

Maximum.rpm	110,000rpm (115,000rpm)
Idle.rpm	30,000rpm
Pressure ratio(max.rpm)	4.1
Mass flow(max.rpm)	400 g/sec
Normal EGT	650°C
Max EGT	750°C
Limit EGT.	800°C
Fuel consumer(max.rpm)	400 g/sec
Fuel	Jet-A1

【制御ユニット系】

Mエンジンをナセルに装備して運転できるようにするには種々の装備品を必要とし、ECU{Electronic Control Unit(内臓ROMにエンジン運転パラメータが自動的に40分間分収納される)}, ASU(Automatic Start Unit), 回転センサ、点火プラグ、燃料ポンプ、エンジン運転用送信機(プロポ)、受信機、各種電源、各種信号線および燃料・空気供給パイプからなる。

【エネルギー供給系】

エンジン点火には、必要な高速回転数を確保するために高圧空気を供給する空気源(末端で1.3Mpa以上)、点火の種火として供給するLPG(プロパンガス)タンクおよびエンジン燃料(Jet-A1と潤滑油混合)タンク(元タンクとエンジン制御ボックス内の小型タンク)等からなる。

(2) ナセル

Mエンジンを装備するナセル機構部を図2-4と写真2-1に示す。Mエンジンは高温(燃焼器でMax800°C)となるために、エンジン本体とナセル内壁の間に隙間設けて取り付け、バイパス流路を確保し、空冷効果にてナセルが高温にならない構造にしてある。

ナセルの構成は空気を取り入れるインテーク部、中胴部、排気ノズル部よりなる。インテーク部には写真2-2に示すように吸気流

を計測するレーク{総圧管・静圧管・温度センサ(熱電対)}と周壁に静圧孔が設けてある。中胴部はMエンジンの固定と前後のインテーク部と排気ノズル部を支えている。排気ノズル部は高温排気ジェットを整流して放出する耐熱ダクトを支え、さらにバイパス流を確保するエジェクター効果を持たせている。

また、一様流が無い静止推力特性試験時にはナセル内は高温となるために、回転センサを熱から守る必要があり、そのために空冷用のパイプを設けている。

(3) 天秤

天秤は推力を計測するのに用いる。天秤は、ニッタ(株)製の6軸力覚センサ(貫通穴を大きくした特別仕様品)を使用している。6軸力覚センサはセンサ本体とエレクトロニクス部および電源部からなる。そのセンサ本体の形状・性能仕様を下記に示す。

型式	UFS-7520A150-1125M	
形状	外径	190mm
	内径(貫通穴)	80mm
	高さ	50.8mm
	重量	3kg
定格荷重	F _x , F _y	66kgf
	F _z	132kgf
	M _x , M _y	1200kgf·cm
	M _z	1200kgf·cm
許容荷重	定格荷重の500%	
分解能	定格値の1/2000	
精度	直線性	0.2%
	ヒステリシス	0.2%

また、エレクトロニクス部(ROM付き)の入出力は、

シリアル入出力	2ポート (RS232,RS422)
パラレル出力	16ビット
ディスクリット入出力	8入力, 8出力
アナログ出力	6チャンネル

($F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$)

ROM 6 軸の干渉係数マトリックス

(4) 後流トラバース装置

後流トラバース装置は図 2-2 と写真 2-1 に示すように、2 軸 (X 軸、Y 軸) 移動機後部 (リニヤガイドとボールネジ) に十字型の後流計測レークを設けて前後、左右に移動させるものである。後流計測レークには排気ジェットの色度と温度を計測するための総圧管 (12 本)、静圧管 (11 本) および温度センサ (熱電対 5 本) がランダムに設けてある。また、移動機後部は十字型レークを前後方向 (X 軸移動量 1500mm) と左右方向 (Y 軸移動量 ± 200 mm) に移動できるようになっている。2 軸の移動設定はハンドル操作で行っている

(5) エンジン制御ボックス

エンジン制御ボックスは図 2-2、写真 2-1 に示すように、M エンジン運転用の各ユニットの設置に一定の制約があり、エンジン近傍に最低限のユニット (ECU、受信機、燃料ポンプ、電池および小型燃料タンク) を収納できるエンジン制御ボックスが必要である。例えば、燃料ポンプの機能はエンジン本体と燃料タンクの高差を 30cm 以内 (試験で確認) とし、また、ECU と回転センサの信号線のノイズ問題等がある。

(6) 燃料タンク

燃料タンクは図 2-1、図 2-2 と写真 2-1 に示すように、風洞外に置かれた大型の燃料元タンク (Jet-A1: 20 リットル) とエンジン制御ボックス内の小型燃料タンク (容量 0.5 リットル) がある。燃料は元タンクから電動ポンプにて小型燃料タンクに供給され、一定の容量を超えるとドレイン機能によって元タンクに戻り、常に小型燃料タンクが空にならないようになっている。

2. 1. 2 装置本体の計測・制御部

M エンジン単体風洞試験装置に適用した計測・制御部の概要を図 2-5 のブロック図に示す。本計測・制御部は、大きく分けて M エンジン運転系と、推力計測と吸気・排気流計測系に分かれる。

(1) M エンジン運転系

M エンジン風洞内で安全に運転するのに必要な最低限の構成を図 2-5 の点線枠内に示す。その構成は、ECU (Electronic Control Unit)、ASU (Automatic Start Unit)、送信機・受信機、燃料ポンプ、各種電源、各種信号線および燃料・空気供給パイプからなる。

【ECU】

ECU (電子制御器) は、一種の高性能マイクロ・コンピュータから成り、エンジンの最適制御を行うものである。ECU には、市販の模型飛行機用のデジタル送信機 (Ultimate Radio Control System) が利用できるデジタル式 ECU ユニットと、アナログ式 ECU ユニット (NAL の要請で製品化) がある。今回のエンジン運転にはデジタル方式を用いた。なお、アナログ式 ECU ユニットでも運転確認を行っている。

ECU の機能は、エンジン回転センサと排気温度 (EGT) 信号を入力とし、ASU (スタート時のみ使用) と燃料ポンプ (エンジン燃料流量) への信号を出力とするフィードバック制御プログラム (自動点火、エンジン回転設定等) が組み込まれている。また、エンジン運転中は、運転パラメータ (回転数、EGT、スロットル量) を一定時間分 (40 分弱) 記憶できるデジタルレコーダ機能 (ROM) が備わっており、逐次、パーソナルコンピュータに取り出せるようになっていて異常燃焼等の原因究明に対応できるようになっている。

る。

【ASU】

ASUはエンジン始動時に必要なものであり、ECUからの命令のもと、エンジン（タービン）への高圧空気とLPGの供給量を調節する制御バルブユニットを構成している。特に高圧空気制御は点火に必要な一定のタービン回転数を確保するのに必要である。また、エンジン停止後、燃焼器を冷やす強制クーリングにも使用されている。LPG制御は、スタート用点火の種火の燃料として使用され、ガス点火により燃焼器内を高温保持してJet燃料噴霧による安定した自立燃焼を得るためのものである。

【送信機（プロポ）】

一般に市販されている模型飛行機用のデジタル送信機(Ultimate Radio Control System)を、Mエンジン運転用に使用している。Mエンジン運転には、送信機の一部の機能を用い、左側のスロットルスティックをエンジンの始動停止用として、右側のスロットルスティックでエンジン回転数制御として使用している。なお、送信機とECUの信号のやり取りには有線方式と無線方式があり、現場でのエンジン調整には無線方式を、本試験では有線方式を採用している。

(2) 計測・制御系

Mエンジン用の計測・制御系は、図2-5のブロック図（点線枠外）に示すように、エンジン推力は天秤のエレクトロニクス・エンクロージャのFx（X軸）の出力を、また、吸気レークと排気レークにおける多数の総圧管と静圧管の圧力情報はコンピュータからの指令でスキャニバルブを切り替えて圧力変換器の出力を、さらに各温度センサ（熱電対）出力を、各種インタフェースボードを介してコンピュータに取り込んでいる。

2. 1. 3 排気ガス回収装置

実燃焼式のMエンジンを循環型の大型低速風洞内で運転すると、風路内に排気ガスが充満し、停止後もしばらく、立ち入ることができない状態となり、チャッター開放で風洞運転（空運転1時間以上）するなどして無駄な時間を費やしていた。そこで、エンジンの下流に設けて排気ガスを外部に強制排出する排気ガス回収装置を製作したので、その概要について述べる。

排気ガス回収装置の構成は、図2-1と写真2-1、写真2-3、写真2-4、写真2-5に示すように、排気ガス吸込口、冷却用空気導入ダクト、支持枠、フレキシブルダクト、フィルターボックス、排風機（制御パネル付き）からなる。その仕様は、

吸入口形状：外径 400mm

内径 300mm

フレキシブルダクト：内径 300mm

長さ 約10m×2本

(3mのものを3本半)

排風機：風量 500m³/min

差圧 300mmAq

(口径440mm)

モータ：37kw（インバータモータ）

等である。

排気ガス回収装置の風洞試験への適用について述べる。エンジンの静止推力試験（風無し）において、Idle（30,000rpm）から最大回転数（110,000rpm：最大推力）までのエンジン回転数 sweep（10,000rpm 刻み）を40分にわたって実施した後、風洞内に入っても、風路内の環境は悪化しておらず、排気ガス放出機能の有効性が確認できた。その後、風洞運転を開始し、風速30m/sにおけるエンジン回転数 sweep（30,000rpm～110,000rpm）においても排気ガス回収装置の機能は同様に

確認できた。次に風速を40 m/sに増速してエンジン回転数が90,000rpm時に、排気ジェットによる一様流の誘導流が増大したことで、排風機の吸い込み能力をオーバーして排気ダクト内圧が急上昇し、フレキシブルダクト(約10 m/s)のジョイント部分(一箇所)が外れ、フレキシブルダクトの1本が破損した。修理後、風速40 m/s以上の試験では、排風機を外し(写真2-4)、フレキシブルダクトの出口側を直接、建物外に出し、大気に放出するように変更して試験を行ったが、排気ガス回収機能の有効性が確認できた。ここで、一様流が無しと低速時においては排風機結合による強制排気が必要であるが、排気ジェット流速と一定以上の一様流速が確保されている場合には、排風機が無くても排気ダクトのみで排気ガス放出機能の有効性があることがわかった。

2. 1. 4 Mエンジン運転手順について

Mエンジンの風洞試験には、風洞内運転の安全のために運転マニュアル⁽¹⁾が必要である。本報告書では詳細な部分(エンジン始動停止操作等)を省き、1RUN(約40分)あたりの風洞試験手順の概要について述べる。

図2-6のフローチャートに示すように、まず、1RUNの流れは、①Mエンジンの運転に必要な各種ユニットの点検(燃料漏れ、燃料補給、高圧空気・LPGの確認)と各種電池の交換等を2人以上で行う。②風洞外に退去し、排風機を起動、③計測のファイル名を書き込み計測開始、④エンジン運転を開始、IdleからMaxまで機能チェックし、Idleで待機、⑤風速の設定、⑥エンジン回転数の設定、⑦スキャニバルブ動作で圧力計測開始し、最終ポートでHomeに戻す、⑧エンジン回転数Maxまで⑥と⑦間を繰り返す、⑨エンジン停止、⑩風洞停止、⑪エンジン運転情報を

コンピュータに収納して終了する。

2. 2 TPSエンジン単体風洞試験装置

【概要】

TPSエンジン単体風洞試験は、前項のMエンジン単体特性との比較を目的としており、Mエンジンで使用した風洞内設置の主な機構部(排気ガス回収装置を除く)を共有して流れ場の相似性を確保することである。そのうえで、TPSエンジン運転に必要な高圧空気供給配管装置関係等を追設した。なお、TPSエンジン本体を含む追設装置については一部を除いて、STOL実験機「飛鳥」開発風洞試験で使用した高圧配管設備等を整備して使用したものであり、詳しくはSTOL風洞試験関係の文献(2)、(3)等を参照していただきたい。本項では、運転に必要な装置と追設した装置の整合性、特に新規に製作した配管干渉除去装置(ベローズ継手)と役割等について簡単に述べる事にする。

2. 2. 1 風洞試験装置の機構部・制御部

TPSエンジン単体風洞試験装置の機構部・制御部の概要を図2-7、写真2-6に示す。

風洞試験装置の構成は、Mエンジン単体風洞試験装置と共有する各種機構部{架台、ナセルのインテーク部、天秤、エンジン制御ボックス、計測ボックス(スキャニバルブ含む)、後流トラバース装置}と、TPSエンジン単体風洞試験用の各種追設装置{TPSエンジン本体、ナセル改修・潤滑油供給装置、配管干渉除去装置、高圧空気供給配管装置、校正試験装置}がある

ここで、Mエンジン単体風洞試験装置と共有する各種機構部・制御部等については、省略する事にする。

(1) TPSエンジン本体

TPSエンジン本体の性能と使用方法等に付いては、過去のSTOL実験機「飛鳥」に関する多くの風洞試験報告書⁽²⁾⁽³⁾等で述べているので、本報告書では省くことにする。

(2) ナセル改修と潤滑油供給装置

ナセル改修(パイロン含む)・潤滑油供給装置系は、ナセルを改修してTPSエンジンを装備して運転できるようにすることである。図2-8に示すように、ナセルの外形はMエンジン装備ナセルと同形状とし、インテーク部(レーク付き)は既設のものを利用、中胴部と排気ノズル部をTPSエンジン装備にあわせている。また、TPSエンジンのタービン軸受けの機能維持には潤滑油を供給する潤滑油供給装置(潤滑油タンク、ポンプ等、パイプ)等の装備を設けている。

(3) 配管干渉除去装置

配管干渉除去装置はTPSエンジンに高圧空気を供給する末端の配管部、天秤の貫通穴($\phi 80$)に併設する部分にフレキシブル配管機構部を設けて、高圧空気供給変化において推力計測に悪影響を与えないようにするものである。その要求は高耐圧で、変形(圧力変動による剛性変化)の再現性があり、しかも天秤の6自由度の歪みに対応できることである。そこで、今回の風洞試験装置では図2-9、図2-10と写真2-7に示すように、既設の装置(天秤、エンジン制御ボックス)に内設できる配管干渉除去装置{ダブルヒンジ方式のベローズ継手本体(4自由度)と円筒摺動機構(2自由度)の組み合わせ}を開発して実際に適用した。その形状・機能仕様は、

「形状」

ベローズ継手本体：

上部フランジ直径	180 mm
高さ	180 mm

フレキシブル機構部：

外径	75 mm
内径(高圧管路)	35 mm

円筒摺動機構部：

上部フランジ直径	75 mm
内径(高圧管路)	30 mm

「自由度」

ベローズ継手本体：

X軸・Y軸の並進2自由度

X軸・Y軸周りの回転2自由度

円筒摺動機構部：

Z軸の並進1自由度

Z軸周りの回転1自由度

「素材と耐圧」

波形ベローズ(ステンレス製)の多段接加工、耐圧 30 kg/cm^2

(4) 高圧空気供給配管装置

図2-7の概要図に示すように、高圧空気供給配管装置のほとんどは、過去のSTOL実験機開発風洞試験⁽²⁾⁽³⁾で使用したものを整備して使用している。今回のTPSエンジン単体風洞試験は使用エンジンが1発であり、装置としては簡素化してある。配管設備は既設の口径100 mm鋼管に口径50 mm鋼管を接続し、ストップバルブ、制御バルブ、流量計、フィルター、高圧ゴムホース(口径50 mm×約5 m)を介して配管干渉除去装置の空気取入口に接続している。また、計測・制御は制御バルブの設定、エンジン回転数、流量、温度および供給圧の計測である。

(5) 校正試験装置系

校正試験装置は天秤の貫通穴($\phi 80$)に設けた配管干渉除去装置の供給圧変化における天秤への影響(剛性等)を確認し、補正係数を決定するのに必要なものである。装置は図2-9、図2-10、写真2-8に示すように密封機能(リング付き)を有するフランジ付十字金具を、配管干渉除去装置(フランジ部)に設けて目蓋とし、空気が漏れない

ようにする。十字金具にはピアノ線を張って重りが加えられるように成っている。

3. 試験

両エンジン単体風洞試験装置を適用した風洞試験装置の校正と一部のデータ解析について述べる。

3. 1 Mエンジン単体風洞試験

3. 1. 1 天秤校正試験

Mエンジン単体風洞試験装置における天秤校正は、天秤の貫通穴を通した各種パイプ(空気用・LPG用・燃料用)や信号線を含めて行った。試験は推力(F_x)のみについて確認し、その後の解析に適用した。その校正試験結果を図3-1に示す。

3. 1. 2 エンジン Normal 特性

ナセルに装備せずに Normal 形態で静止推力試験を実施した。その結果を図3-2に示す。横軸にエンジン回転数(rpm)を、縦軸に推力(N)とスロットル量(%)およびEGT($^{\circ}\text{C}$)をプロットした。推力はIdleで7(N)~Maxで160Nである。また、EGTは最高で274($^{\circ}\text{C}$)まで上昇した。なお、本試験における最大推力値が、カタログ値より低いのは、エンジン入口温度(実験環境35度前後)とECU(排気温度監視)との関係によるものと思われる。

3. 1. 3 Mエンジン風洞試験

Mエンジン単体風洞試験は、前記のナセルにMエンジンを装備した装置を用いた試験である。試験は推力計測と吸気流・排気流計測(後流トラバース計測)を同時に進めた。試験の設定・計測パラメータを下記に示す。

【設定パラメータ】

風速： $V=0, 30, 40, 50, 60\text{m/s}$

エンジン回転数 Sweep：

$R=0, 30,000\text{rpm}(\text{idle})\sim 110,000\text{rpm}$
(10,000rpm 毎)

後流トラバース位置：

前後(X軸)：排気ノズルから後方630mm
位置(7D)

左右(Y軸)：エンジン軸中心上と左右
20mmの3点

【計測パラメータ】

風洞：速度 $V(\text{m/s})$ 、動圧 $q(\text{Pa})$ 、
気流温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 、大気圧(Kpa)

風速：ピトー管(総圧 P_0 、静圧 P)

エンジン：回転数 $R(\text{rpm})$ 、EGT($^{\circ}\text{C}$)、
スロットル量(%)

燃料：流量(リットル/sec)→(g/sec)

推力：天秤出力(F_x)(N)

吸気レク：総圧 $P_{0i}(\text{Pa})$ 、静圧 $P_i(\text{Pa})$ 、
温度 $T_i(^{\circ}\text{C})$

排気レク：十字レークの総圧 $P_{0j}(\text{Pa})$ 、
静圧 $P_j(\text{Pa})$ 、温度 $T_j(^{\circ}\text{C})$

等である。

3. 1. 3 (1) 推力計測

前記、試験パラメータをもとに、Mエンジン単体風洞試験を実施した。その試験結果を図3-3に示す。横軸にエンジン回転数を、縦軸に風速毎の推力(N)曲線をプロットした。なお、グラフにはエンジンの Normal 特性もプロットした。また実測値($V=0,30,40,50,60\text{m/s}$)の特性曲線から外挿した予測値($V=80,100,120,140,160\text{m/s}$)もプロットした。グラフから、風速 $V=0\text{m/s}$ と 30m/s との比較で、ナセルの影響として最大推力時で10Nである。また、風速(動圧)を上げるとナセル抗力(パイロン含む)とエンジン推力の釣合状態(天秤出力 $F_x=0$ の位置)が回転数の増速側に移行する。+ F_x 側が加速できる領域である。本結果から全機模型形態(エンジン2発装備)でも高い風速まで試験ができると推測できる。

3. 1. 3 (2) 吸気流・排気流トラバース計測

吸気流・排気流トラバース計測の結果に付

いては解析を進めており、別報告書で述べることにする。

3. 2 TPSエンジン風洞試験

TPSエンジンのNormal特性については、試験装置の関係から実施していない。

3. 2. 1 TPSエンジン単体特性

前記のSTOL実験機「飛鳥」開発風洞試験で使用した後、しばらく使用しなかったため、供給空気圧に対する回転数の関係を確認した。その結果を図3-4に示す。ファンブレード(直径105mm)の周速を考えるとエンジン回転数が60,000rpmが限度である。

3. 2. 2 配管干渉除去装置の校正試験

配管干渉除去装置の校正試験は、TPSエンジン単体風洞試験を実施する上からも重要な試験の一つである。まず、前項2.2(5)の校正試験装置で述べたように十字金具を天秤に取り付ける。試験方法は供給圧設定して保持し、荷重(重り)を変え、天秤出力(F_x)を計測した。

【試験パラメータ】

供給圧 : $P_h=0, 3, 5, 7.5, 10, 12,$
 $14, 16(\text{kg/cm}^2)$

校正荷重 : $W=0\sim 18(\text{kg})$

その試験結果を図3-5に示す。横軸に校正荷重(kg)、縦軸に供給圧変化毎の天秤出力 F_x (kg)をプロットした。

結果から、製作した配管干渉除去装置の配管干渉特性は、校正荷重に対する天秤出力値 F_x の傾きが一定で、供給圧変化に対して平行移動していることがわかった。このことから、校正荷重に対しては一定の出力を得、供給圧変化毎に原点補正することで配管干渉を取り除くことができることが確認できた。

3. 2. 3 TPSエンジン風洞試験

TPSエンジン単体風洞試験は、前記のT

PSエンジン単体風洞試験装置を用いた試験である。試験はMエンジン試験と同様に推力計測と吸気流・排気流計測(後流トラバース計測)を同時に進めた。試験の設定・計測パラメータを下記に示す。

【設定パラメータ】

風速 : $V=0, 30, 40, 50, 60\text{m/s}$

エンジン回転数 Sweep :

$R=0, 30,000\text{rpm}(\text{idle})\sim 110,000\text{rpm}$
(10,000rpm 毎)

後流トラバース位置 :

前後(X軸) : 排気ノズルから後方540mm
位置(6D)

左右(Y軸) : エンジン軸中心上と左右
20mmの3点

【計測パラメータ】

風洞 : 速度 V (m/s)、動圧 q (Pa)、
気流温度 T ($^{\circ}\text{C}$)、大気圧(Kpa)

風速 : ピトー管(総圧 P_0 、静圧 P)

エンジン : 回転数 R (rpm)、供給圧(kg/cm^2)

供給流量 : 流量計出力(リットル/sec) \rightarrow (g/sec)

推力 : 天秤出力(F_x)(N)

吸気レク : 総圧 P_{0i} (Pa)、静圧 P_i (Pa)、
温度 T_i ($^{\circ}\text{C}$)

排気レク : 十字レクの総圧 P_{0j} (Pa)、
静圧 P_j (Pa)、温度 T_j ($^{\circ}\text{C}$)

等である。

3. 2. 3(1) 推力計測

前記、試験パラメータをもとに、TPSエンジン単体風洞試験を実施し、その試験結果を図3-6に示す。横軸にエンジン回転数(rpm)を縦軸に、風速毎の推力(N)曲線をプロットした。また実測値($V=0,30,40,50,60\text{m/s}$)の特性曲線から外挿した予測値($V=80,100,120,140\text{m/s}$)もプロットした。グラフから、風速 $V=0\text{m/s}$ と 30m/s との比較で、ナセルの影響として最大推力時で23Nであった。また、風速(動圧)を上げるとナセル抗力(Pa も含む)とエンジン推力の釣合状態(天秤出力 $F_x=0$ の位置)が回転数の増速側に移行する。 $+F_x$ 側が加速できる領域である。本結果から全機模型形態(エンジン2発装備)でも高い風速まで試験ができると推測できる。

3. 2. 3 (2) 吸気流・排気流トラバース計測

Mエンジン風洞試験と同様に吸気流・排気流トラバース計測の結果に付いては解析を進めており、別報告書で述べることにする。

3. 2. 4 両エンジンの推力特性比較

両エンジン単体風洞試験結果をもとに、推力発生機構の異なるエンジン推力特性について比較検討する。今後、後流トラバース計測の質量流量、運動量、温度特性等の解析基準に同じ推力について考える必要があるためである。

そこで、両エンジンの回転数に対する推力特性を図4-1に示す。Mエンジンについては最大回転数設定(110,000rpm)を1とした量(Max=1)を横軸に、最大推力(160N)を1とした量(Max=1)を縦軸にプロットした。また、TPSエンジンについては、Mエンジンに合わせて160Nを1とした量(Max=1)を縦軸にプロットし、推力160Nを得る回転数を1とした量(Max=1)を横軸にプロットした。

両エンジン特性に違いがある。Mエンジンは50%の回転数で推力が13%であるに対して、TPSエンジンは倍近い24%である。この違いは、Mエンジンは高温排気ガスのEntropyに、TPSエンジンは圧縮空気の供給流量に依存するためと思われる。

4. まとめ

本報告書は、多くの写真、説明図等を適用して両エンジン単体風洞試験装置の概要について述べてきた。両エンジン試験では、改善すべき課題も多くあることがわかったが、多くのノウハウも蓄積された。

4. 1 装備性と取扱等について

【Mエンジン試験装置】

MエンジンはAMT社製の模型飛行機用エンジン(Olympus)を使用しており、エンジン装備品(ECU, ASU等)と取扱説明書も充実している。しかし、模型飛行

機用エンジンの仕様は自由フライト用に設計されているために、風洞内に固定して使用する場合の問題点をどのようにクリアすべきかが大きな課題であった。しかも模型飛行機用であっても、超高速回転で高温排気ジェットを有し、点火にLPGガスを使用するなど、安全の上から堅固のナセル構造になった。また、燃料ポンプについても独自に試験を実施し、能力の限界を確認した。そこで、ナセル近傍に大きめなエンジン制御ボックス(ECU、燃料ポンプ、小型燃料タンク)を設けることとなった。また、エンジン点火の種火に家庭用のLPG(日本のLPGガスはプロパンとブタン等の合成ガス)を使用しているが、しばらく使用すると分離したブタンが残り、点火がしにくいことがあった。

その他に、試験には多くの準備期間(予備試験含む)と多くの人手を必要とした。また、Mエンジン運転用のAMT社製のソフトウェアは、OSにMS-DOSが使用されており、Windows98上では重く、動作が鈍くリアルタイム性が損なわれ、コンピュータを2台使用することになった。

【TPSエンジン試験装置】

TPSエンジンは高圧空気を必要とするために、配管干渉除去装置の設置と校正試験等に余分な手間が必要であった。また、TPSエンジンの軸受には余分な潤滑油をもどすドレイン機能が無く、タービン軸受から漏れた油はエンジンノズル、ナセルを通して風洞内に拡散し、風洞内を汚し、後処理が大変である。

4. 2 両エンジンの現象

【Mエンジン】

Mエンジンの運転では、エンジン回転数がIdle状態に排ガス濃度が高い傾向がある。

また、点火に失敗した場合にはアアーを送って、ナセル内に充満したLPGガスを拡散させることが必要である。

【TPSエンジン】

TPSエンジンは、高圧空気をノズルより吹き出してタービンブレードを高速回転させる構

造になっているために、高圧空気の断熱膨張にてタービン排気ノズル部に氷環ができる現象がおき、時々計測に悪さがみられる。現象を写真4-1と写真4-2に示す。

【ナセルの影響】

両エンジンの推力特性について、同じナセル（インターク）を使用しているにも関わらず、一様流が30 m/sでMエンジンに比べてTPSエンジンでは2倍以上の推力損失が確認された。TPSエンジンでは、ファンブレードの吸込能力がおとり、逆に抵抗になっているものと思われる。このことは、データベース作成に影響するために再度確認する必要がある。

【謝辞】

マイクロ・ターボジェットエンジンの風洞試験では、航空技術研究所の遠藤征紀航空推進総合研究官、田丸卓航空エンジン研究部長、二村尚夫航空エンジン部研究室長、柳良二研究室長から貴重な御意見と御指導等を戴いた。また、実作業においては、スーパーレジン工業（株）の上原聡氏、ツクバリカセイキ（株）の鈴木勝也氏、サガミ堂の小室隆氏、（株）コスモテッ

クの平田淳氏、電気通信大学の高橋正博君、上智大学の夏期技術研修生（関谷智彦君、近藤幸弘君、関根広亮君）各位に実務を担当して頂き、深謝の意を表します。また、本年度の本研究に携わったメンバー以外の航空エンジン研究部の田口秀之氏、空力特性研究部の野中修氏には多大な御助力を戴いた。

5. 文献

- (1) Advanced Micro Turbines 社の Olympus エンジンの取扱説明書
- (2) 戸田 洋、他9名；大型低速風洞における動力付模型の風洞試験、航空宇宙技術研究所報告書 N-19(1975. 1)
- (3) 犬丸矩夫、他4名；ファンジェットSTOL機の空気特性、航空宇宙技術研究所報告書 TR-790(1983. 11)

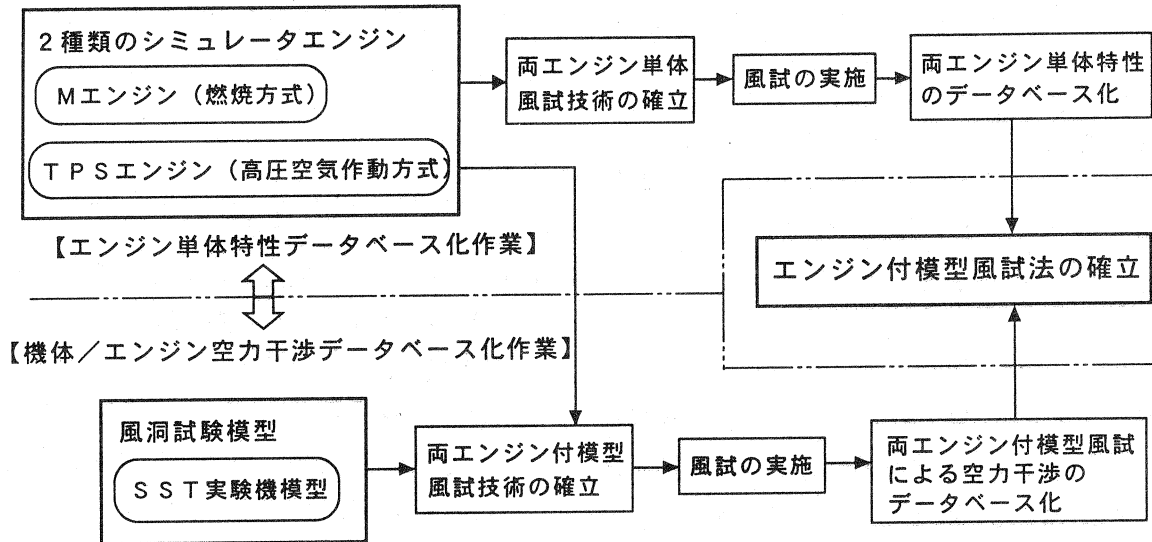


図1 エンジン付模型風試法の確立に必要な作業内容

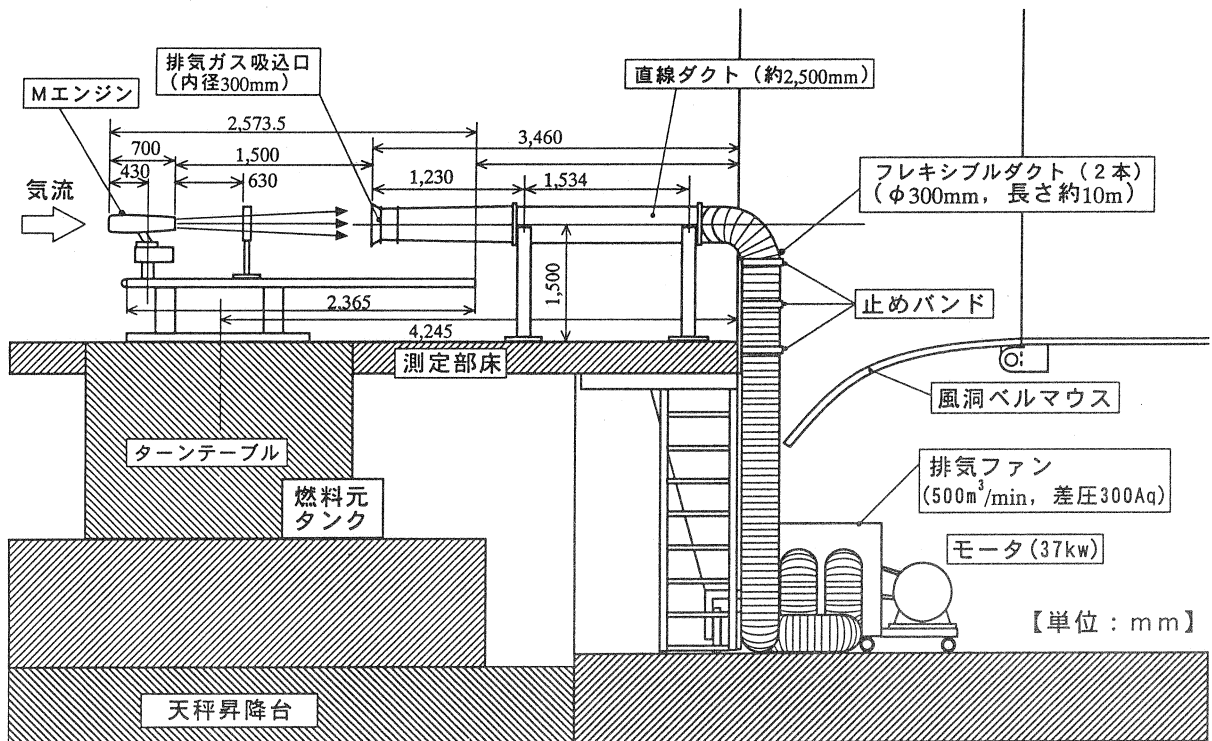


図2-1 Mエンジン単体風洞試験装置の概要図(装置本体と排気ガス回収装置)

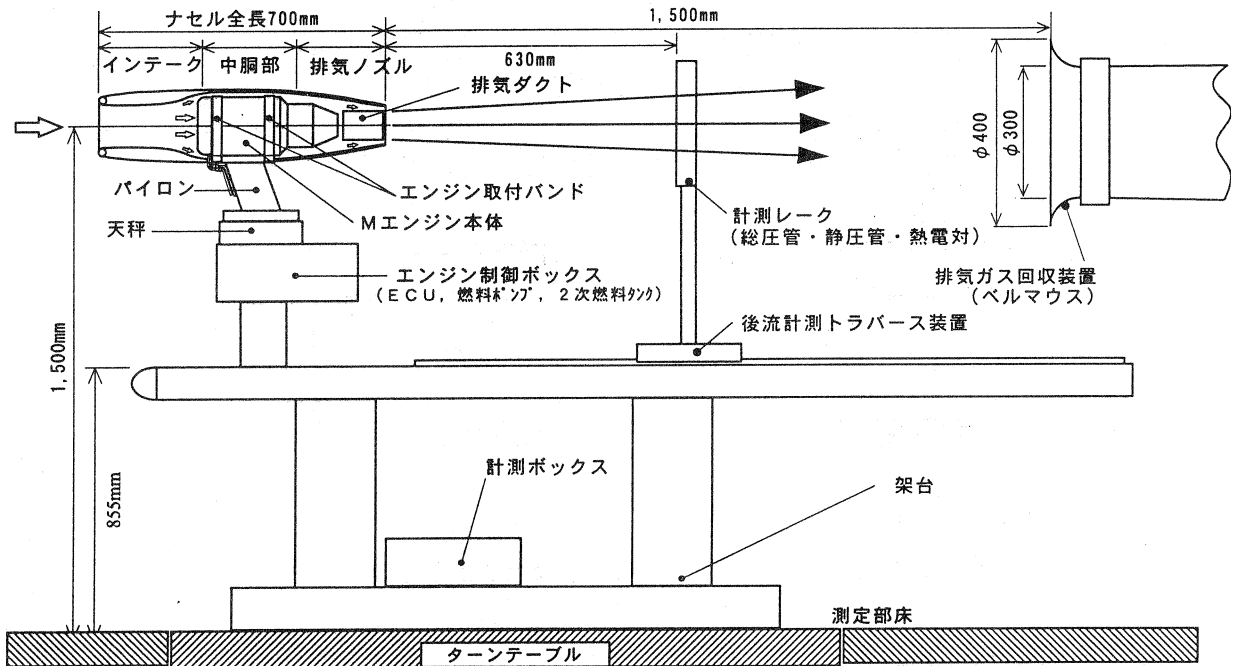


図 2 - 2 Mエンジン単体風洞試験装置の詳細概要図

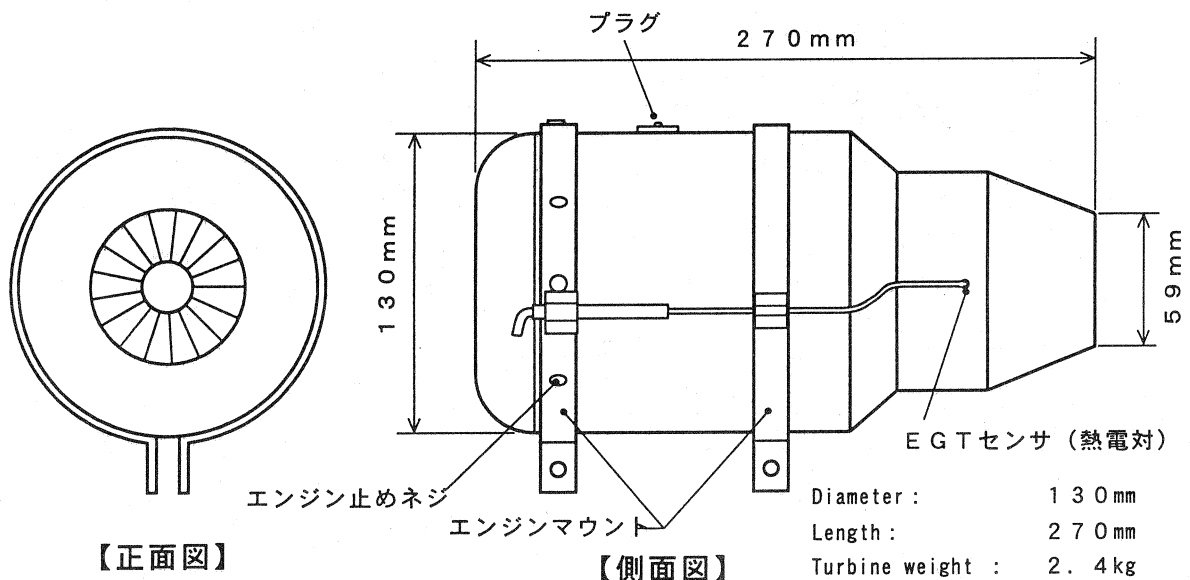


図 2 - 3 Mエンジン本体の概要図

Diameter :	130mm
Length :	270mm
Turbine weight :	2.4kg
Thrust(max. rpm) :	170N
Maximum. rpm :	110,000rpm
Idle. rpm :	30,000rpm
Pressure ratio(max. rpm) :	4.1
Max EGT :	750°C

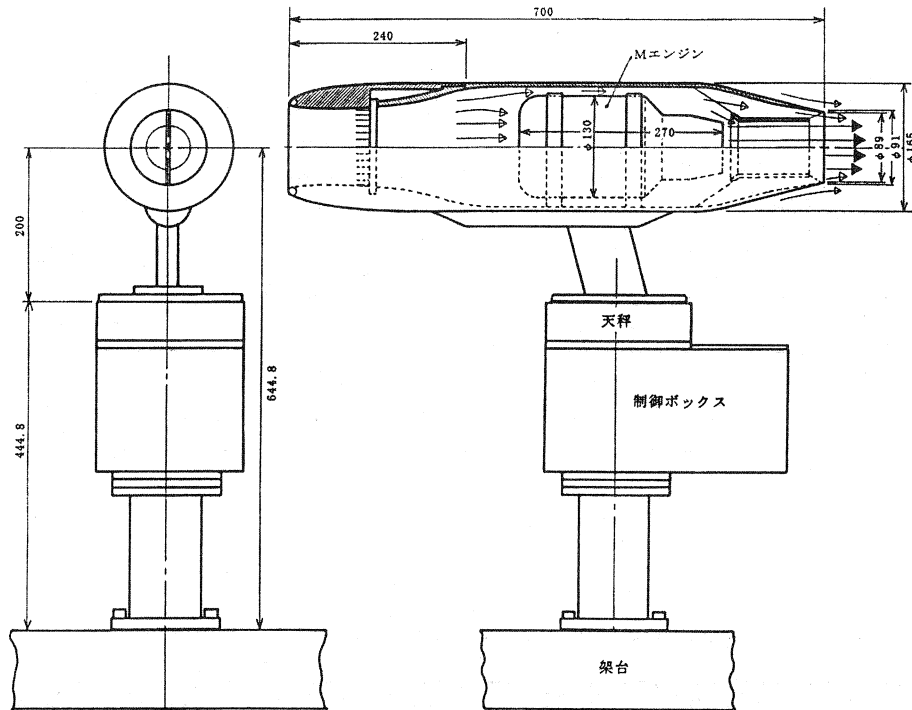


図2-4 ナセル内のMエンジン装備の概要図

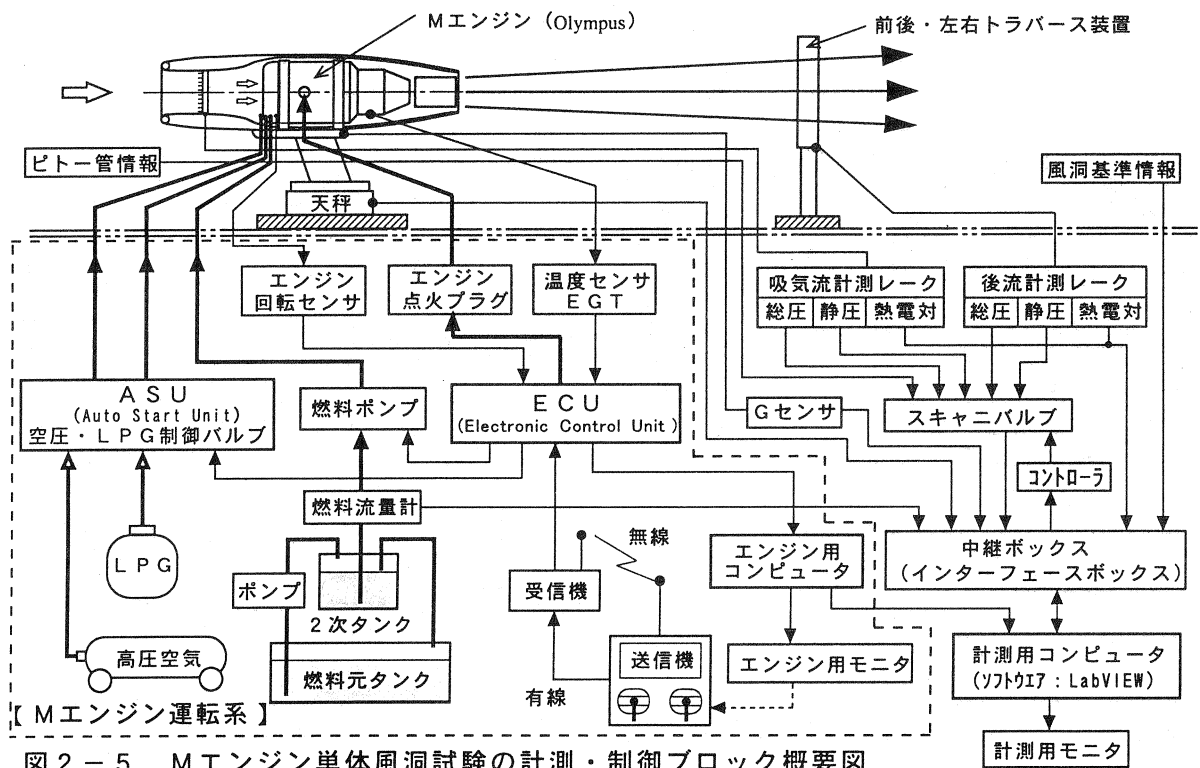


図2-5 Mエンジン単体風洞試験の計測・制御ブロック概要図

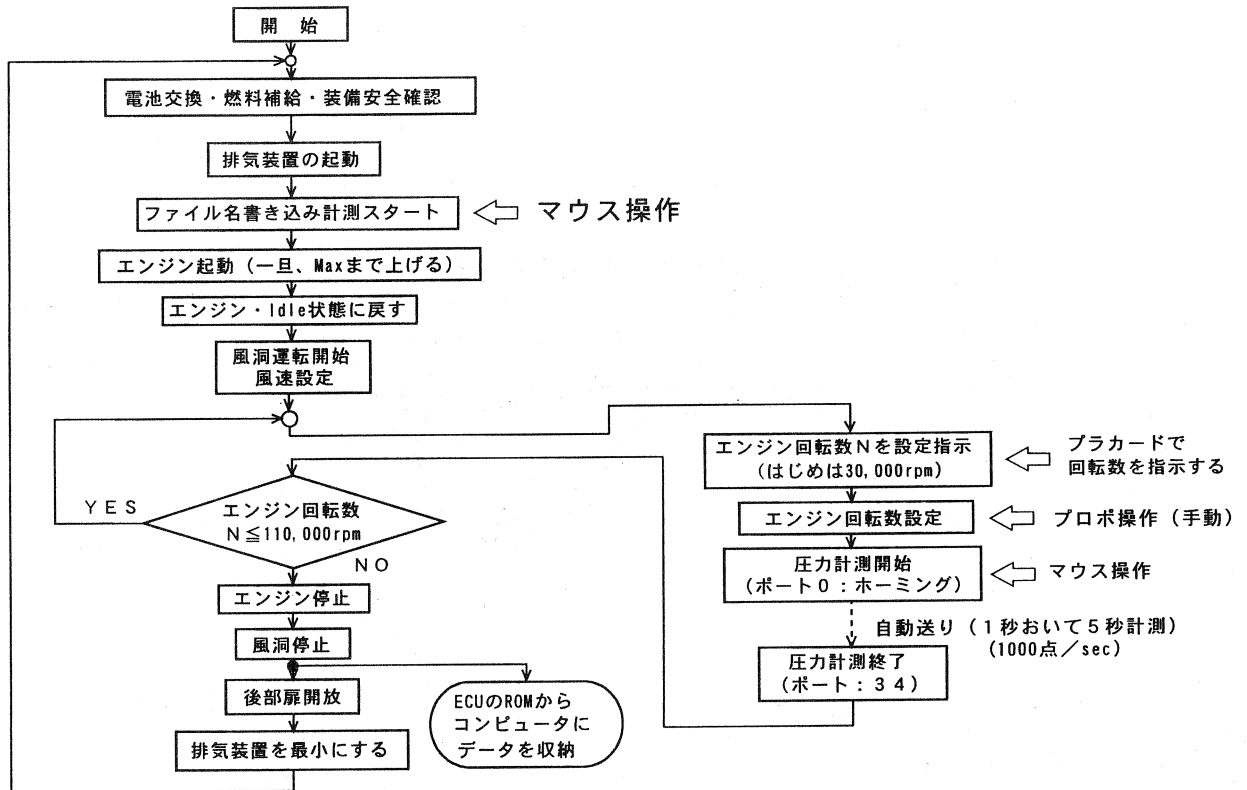


図 2 - 6 Mエンジンの運転フローチャート(1RUN)

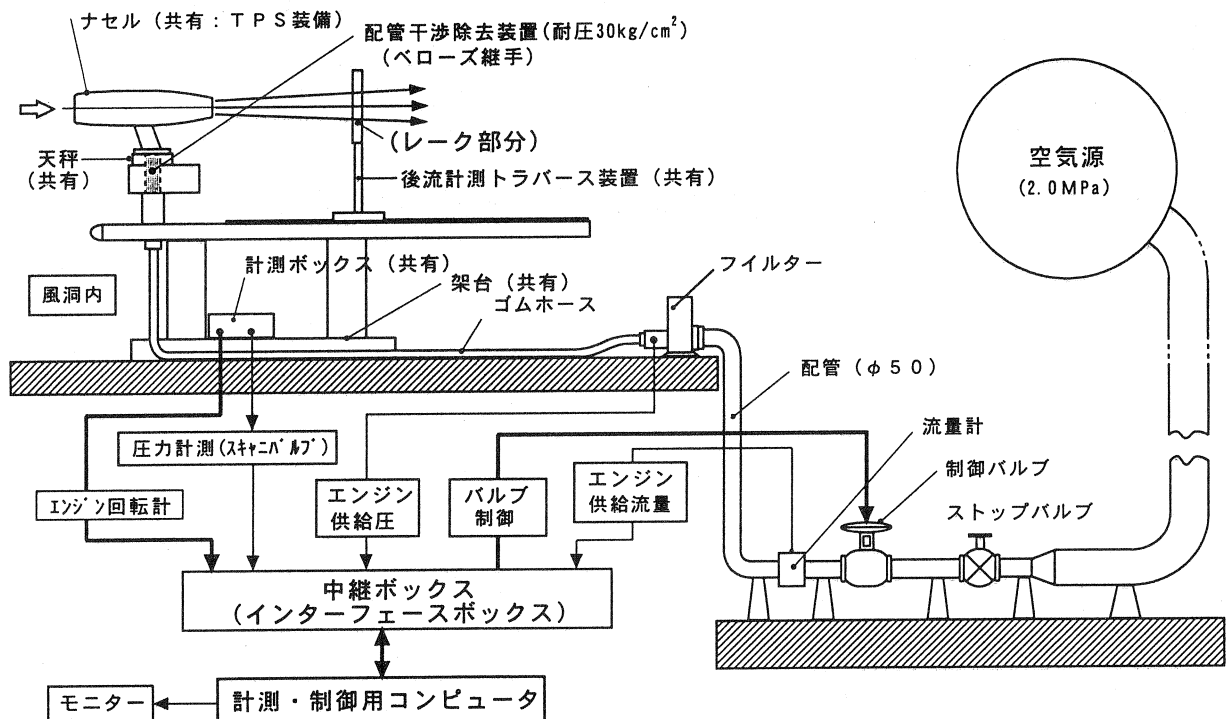


図 2 - 7 TPSエンジン単体風洞試験装置のブロック概要図

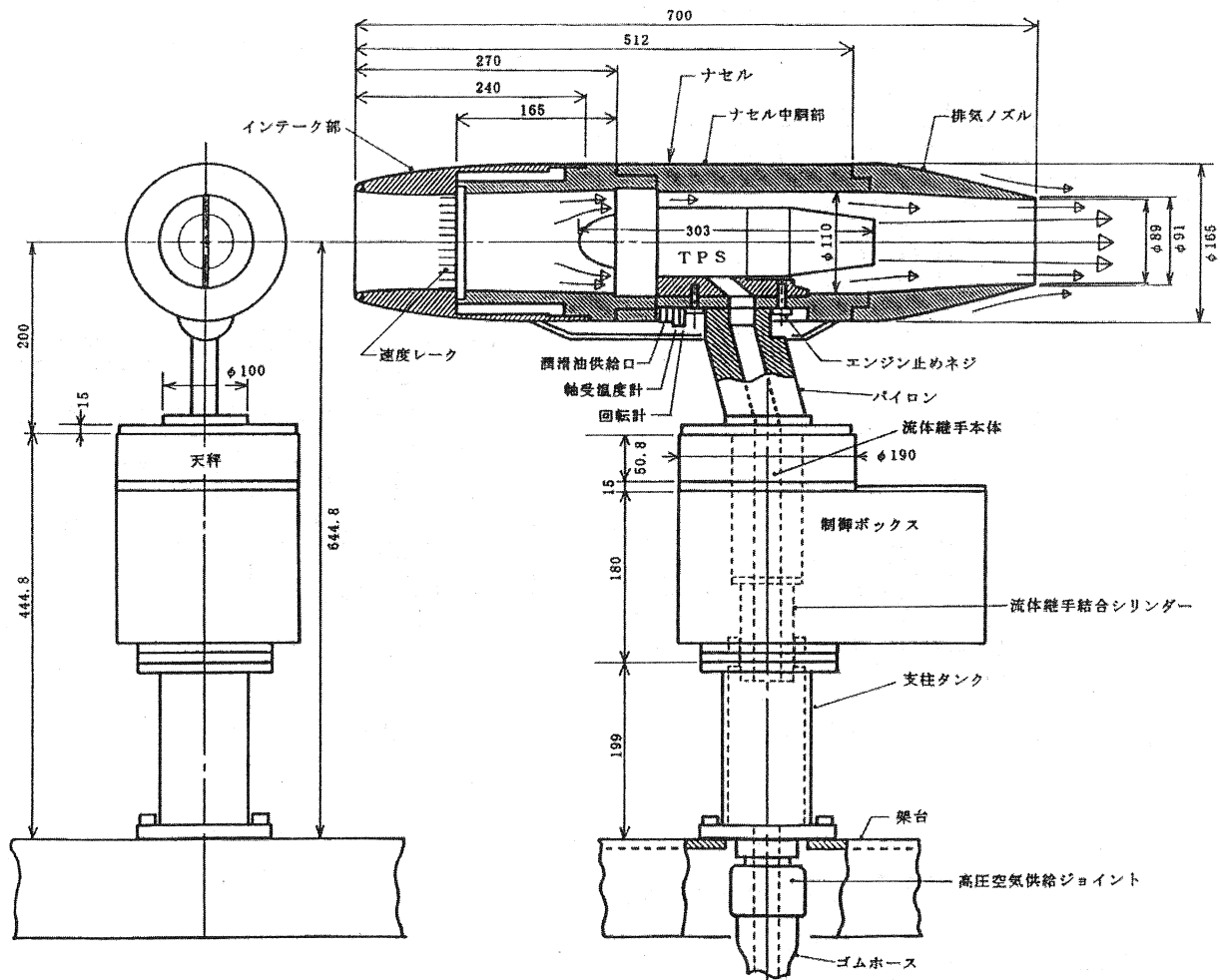


図2-8 ナセル内のTPSエンジン装備の概要図

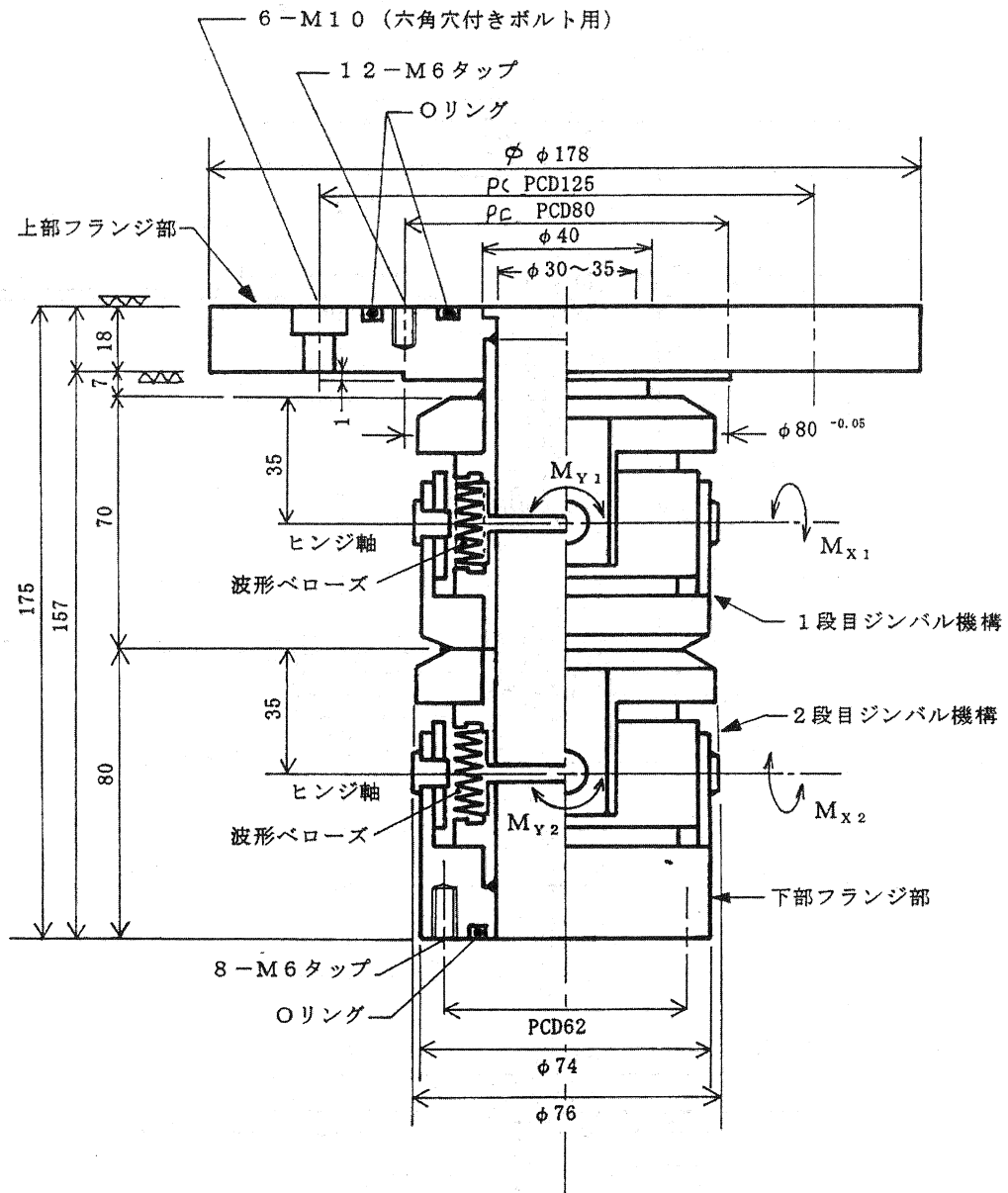


図2-9 配管干渉除去継手本体の概要図

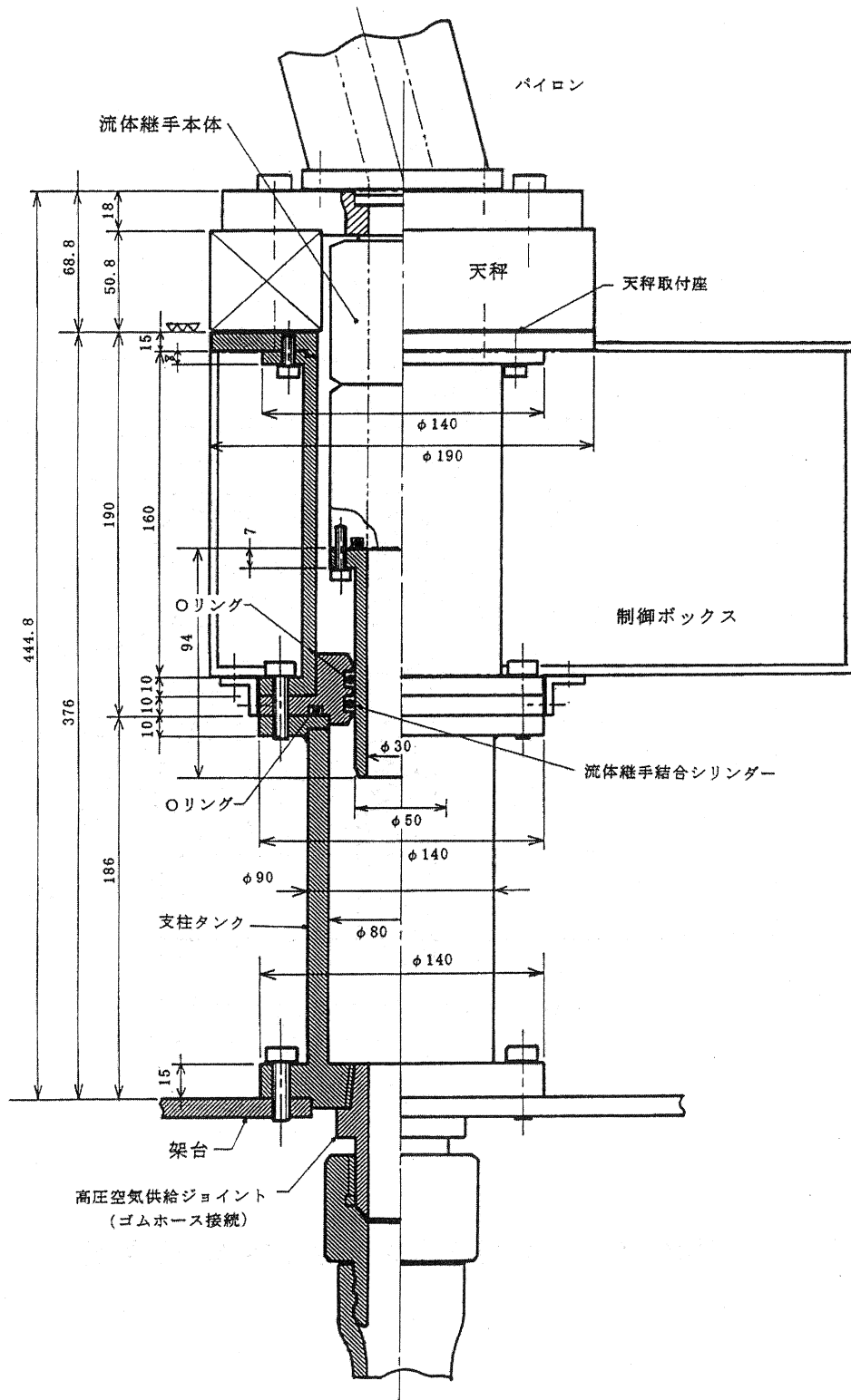


図2-10 配管干渉除去装置の適用概要図

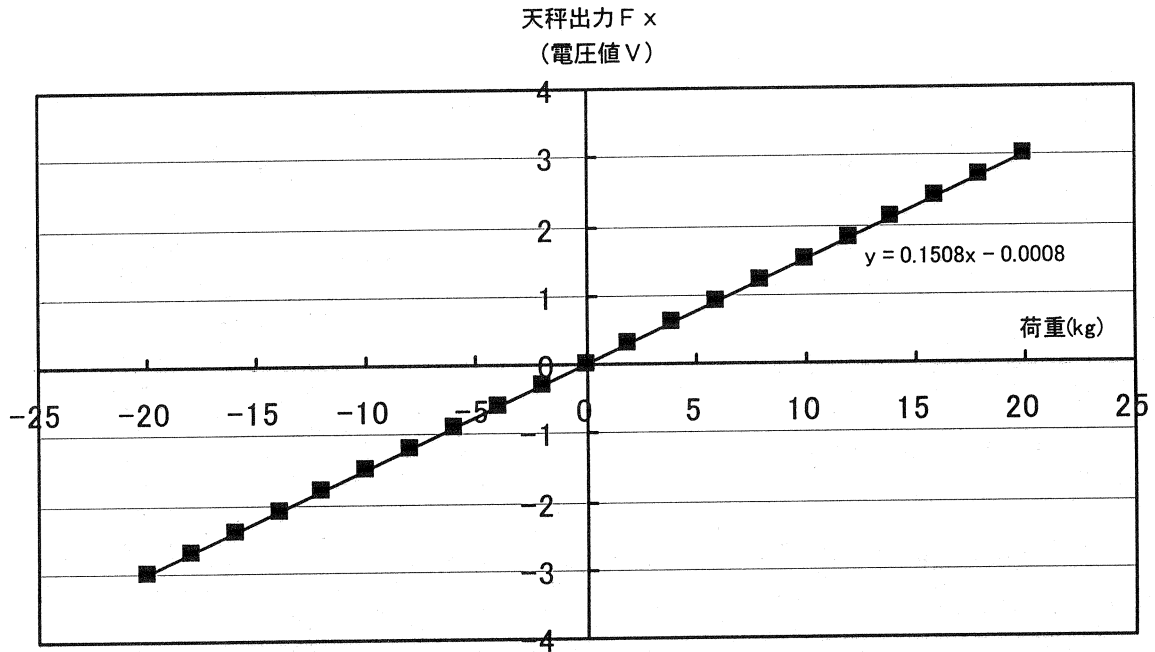


図 3 - 1 天秤校正 (Fx) グラフ

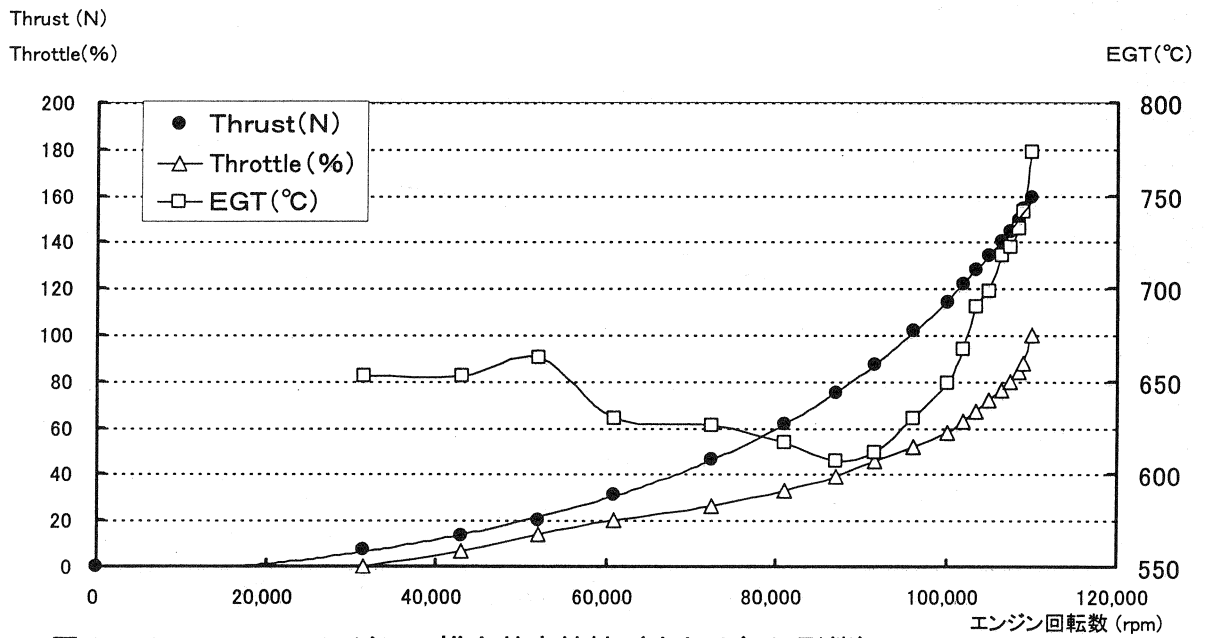


図 3 - 2 Mエンジンの推力基本特性 (ナセル無し形態)

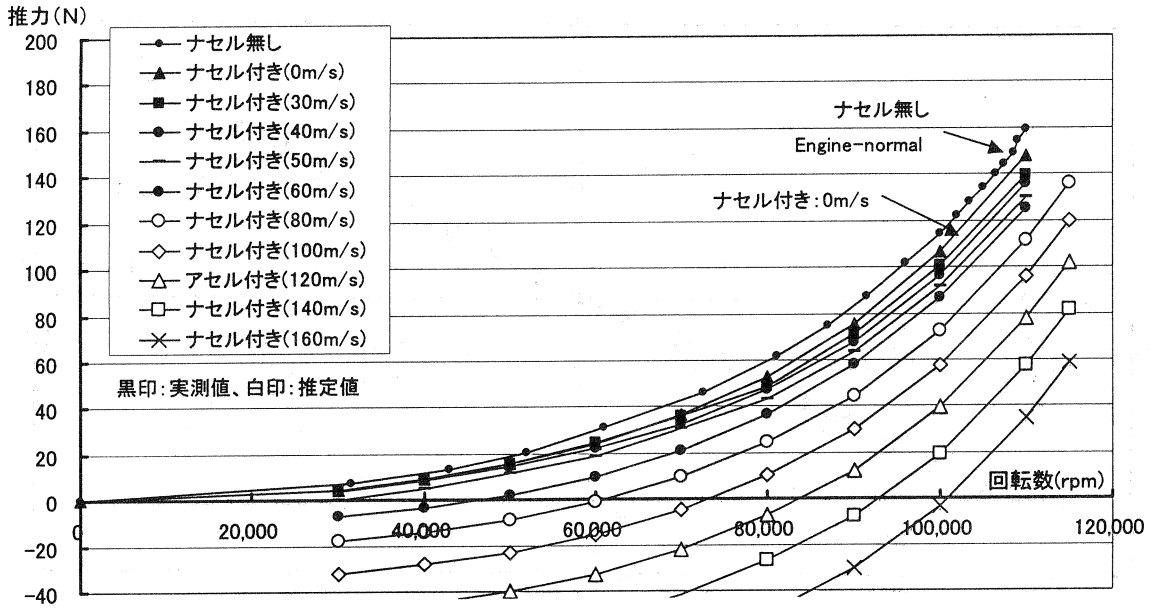


図3-3 Mエンジン単体風試の推力特性(ナセル付き)

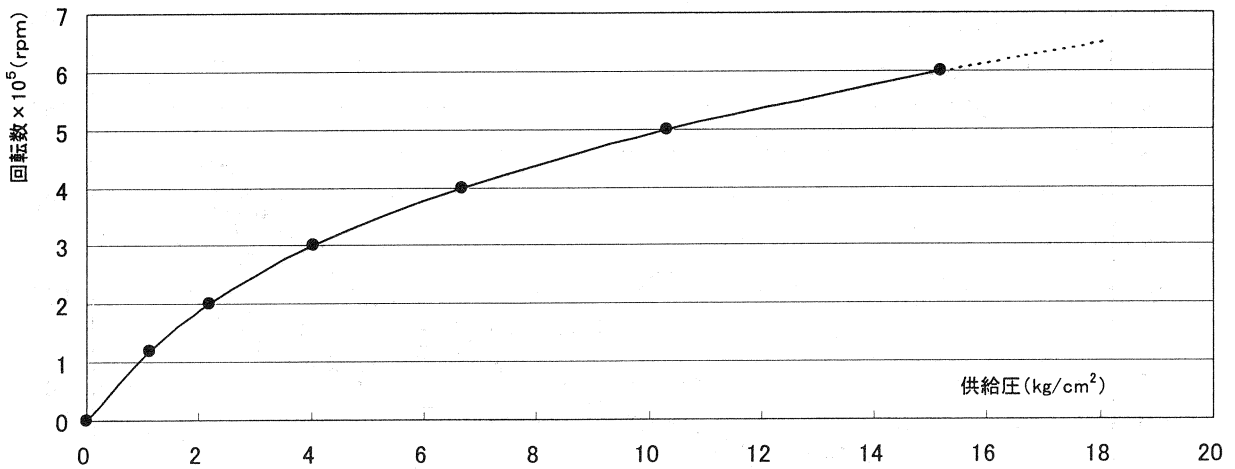


図3-4 T P Sエンジンの供給圧と回転数との関係

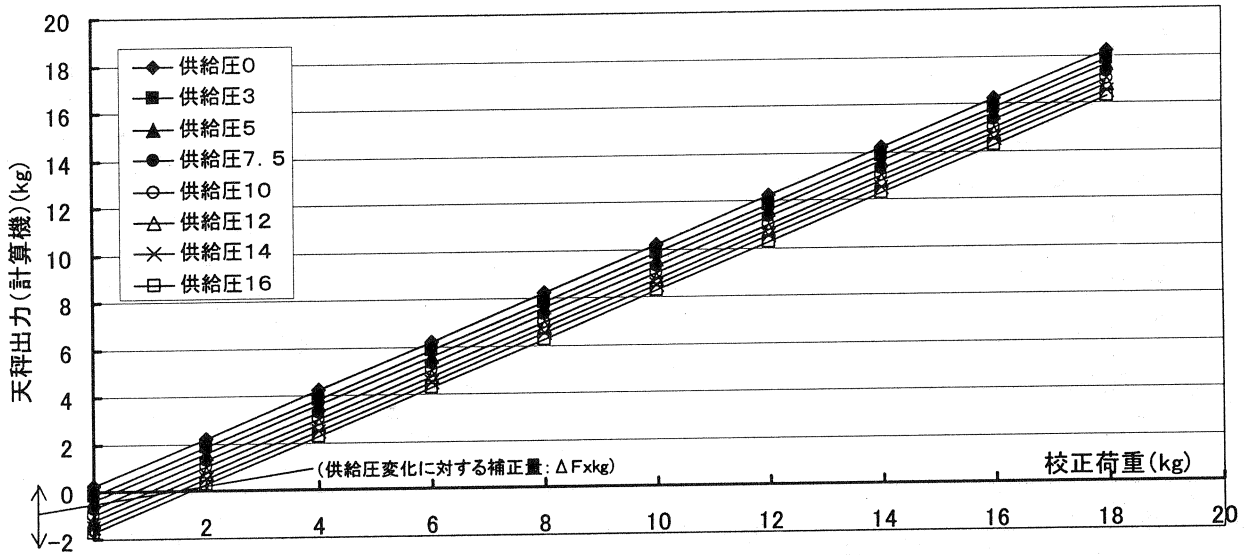


図3-5 配管干渉除去装置(ベローズ継手) Fx方向の干渉量

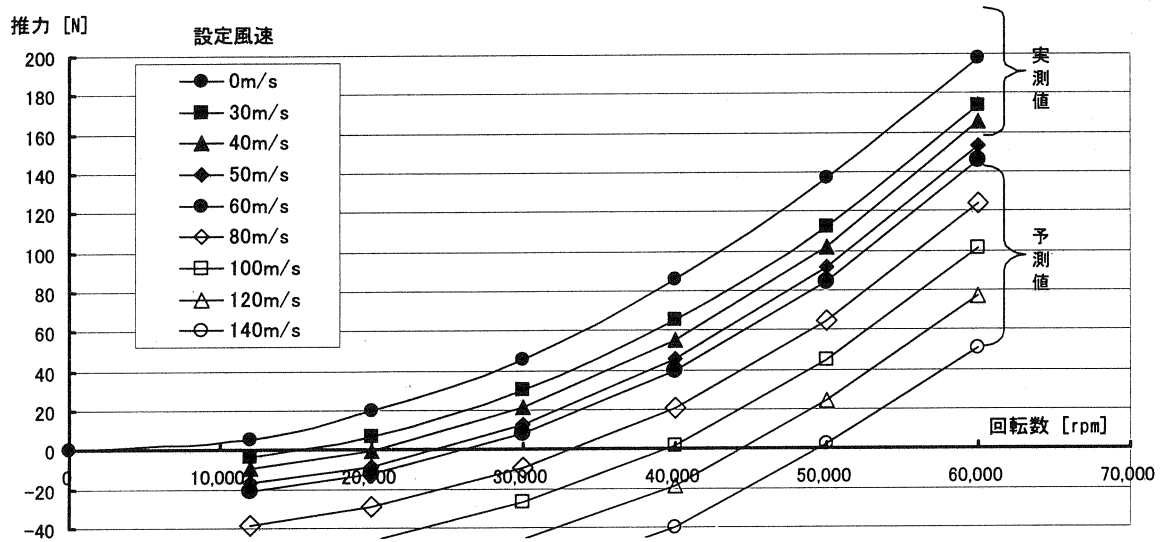


図3-6 TPSエンジン単体風試の推力特性

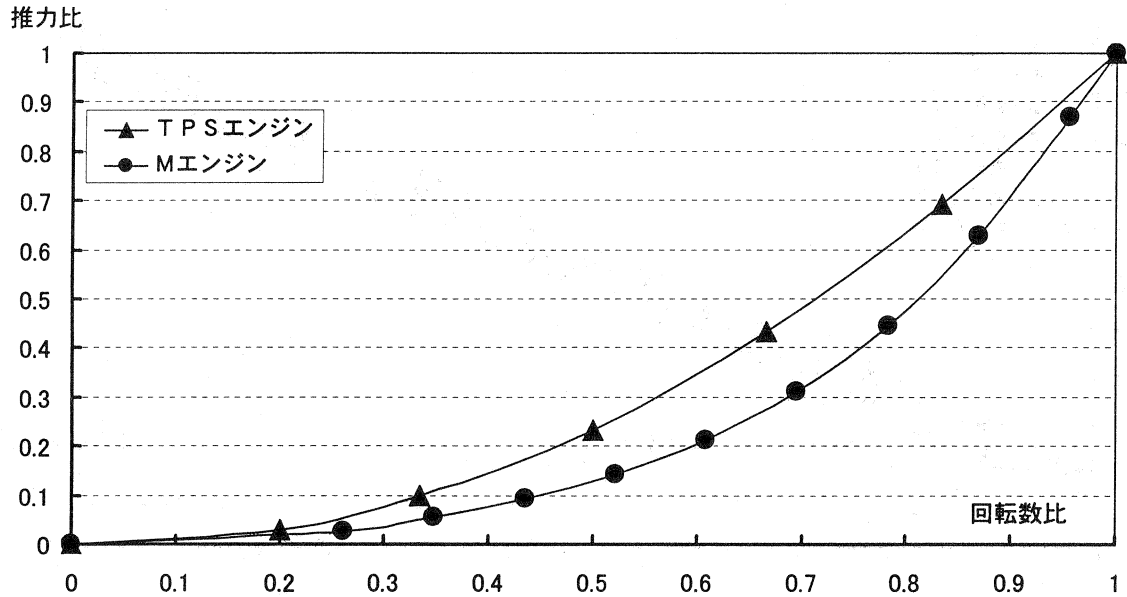


図4-1 両エンジンの回転数 (Max=1) に対する推力 (Max=1) の特性比較

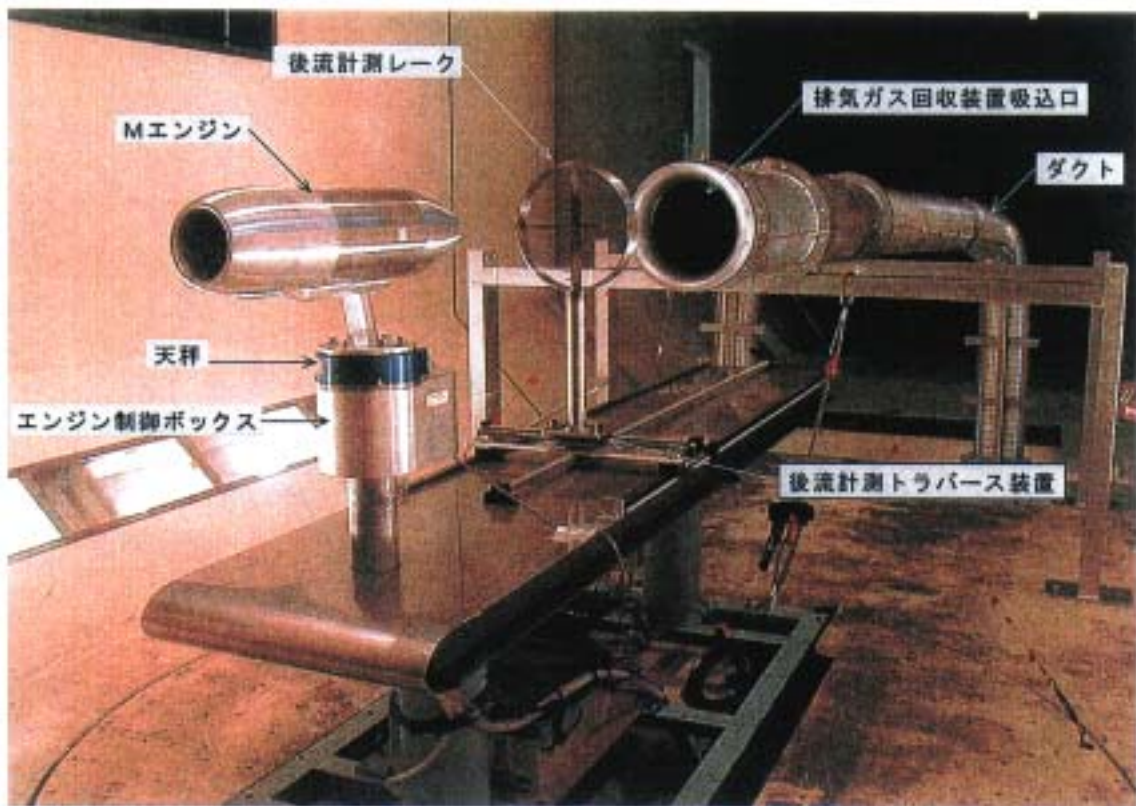


写真 2-1 Mエンジン単体風洞試験装置の全景 (上流より)



写真 2-2 インテーク部の吸気流計測レーク (正面)

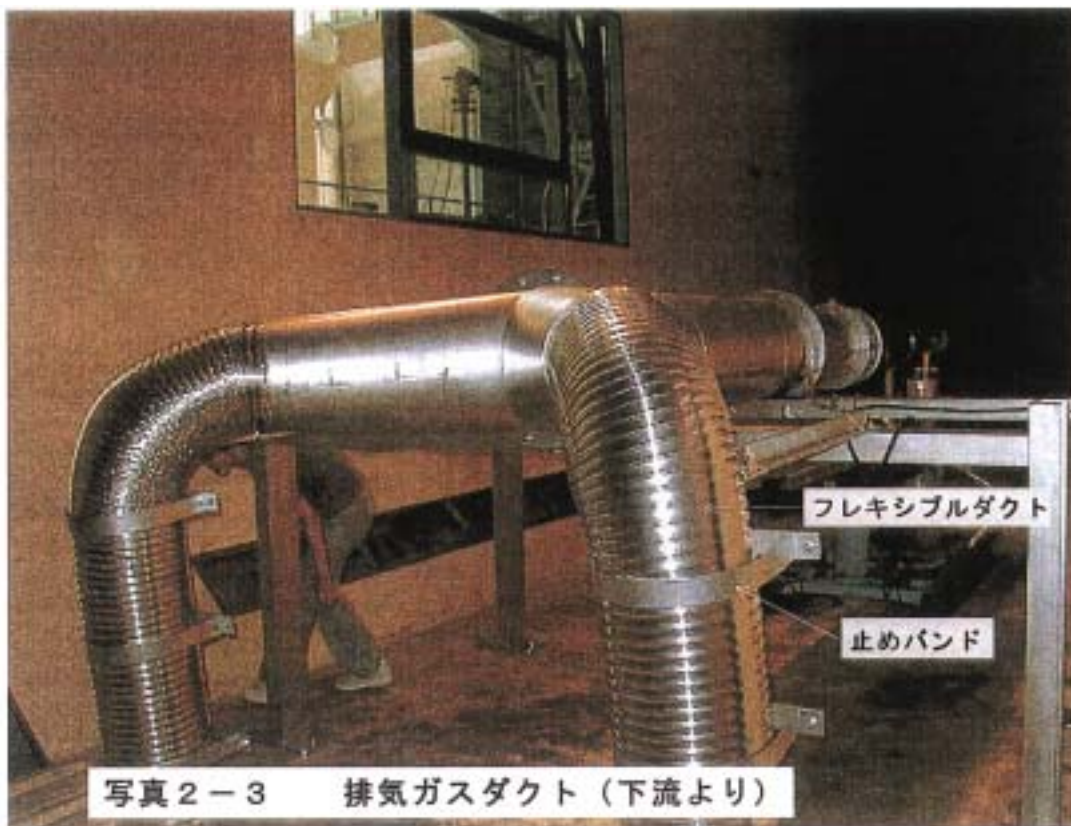




写真2-5 排気ガスの外部放出ダクト



写真2-6 TPSエンジン単体風洞試験装置の概要

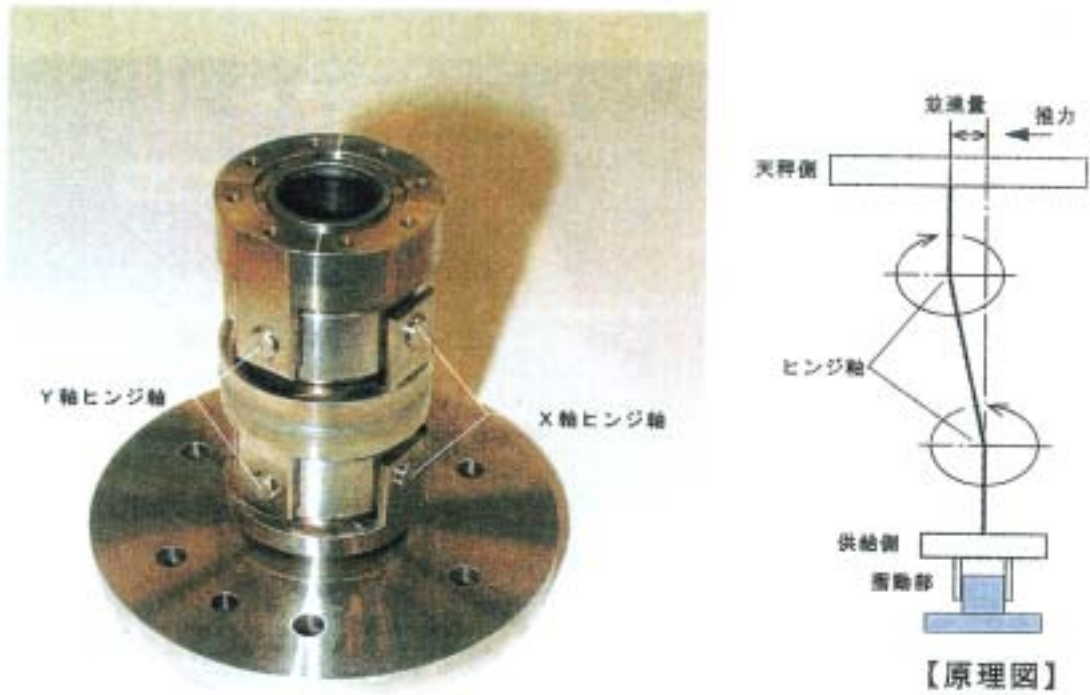


写真 2-7 配管干渉除去装置
(ダブルヒンジ方式のペローズ継手)

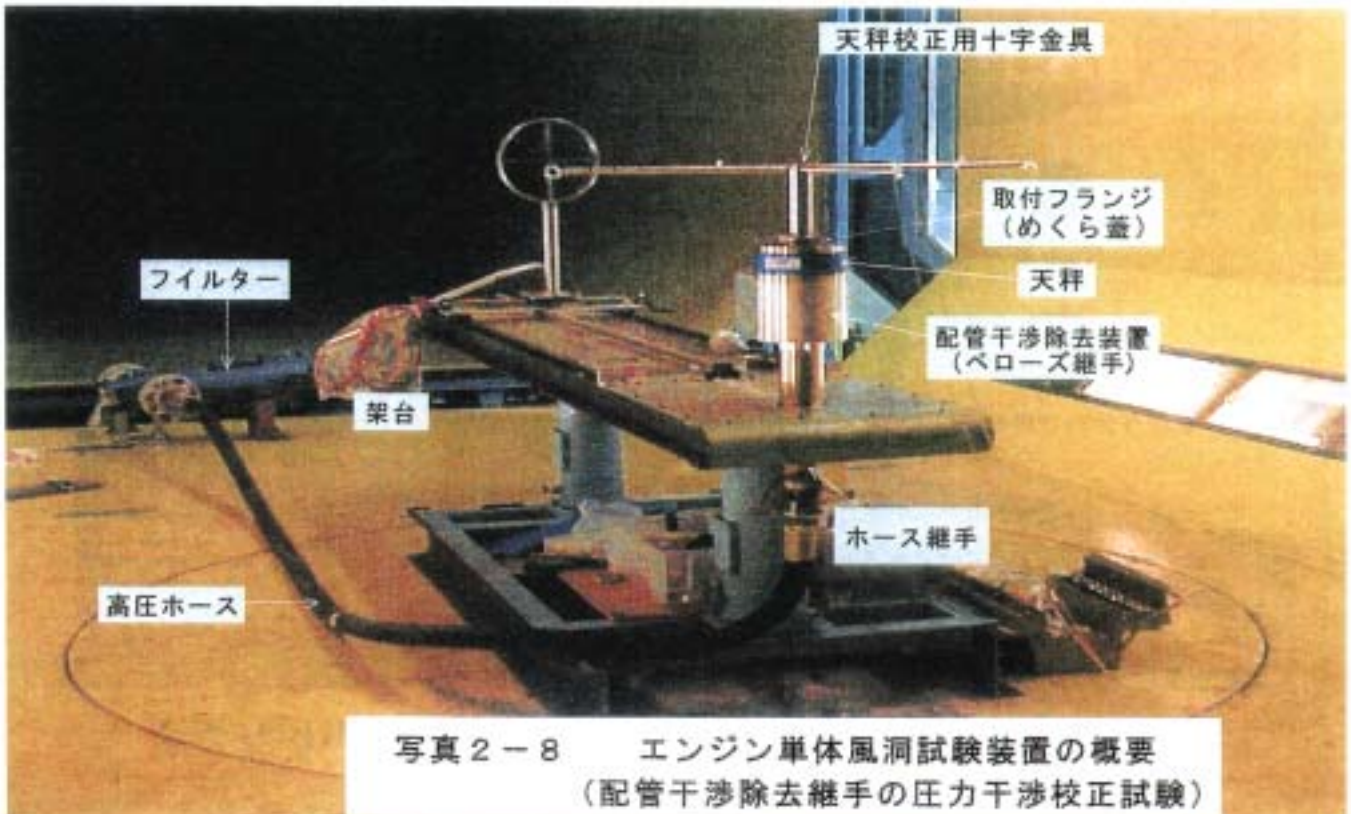


写真 2-8 エンジン単体風洞試験装置の概要
(配管干渉除去継手の圧力干渉校正試験)

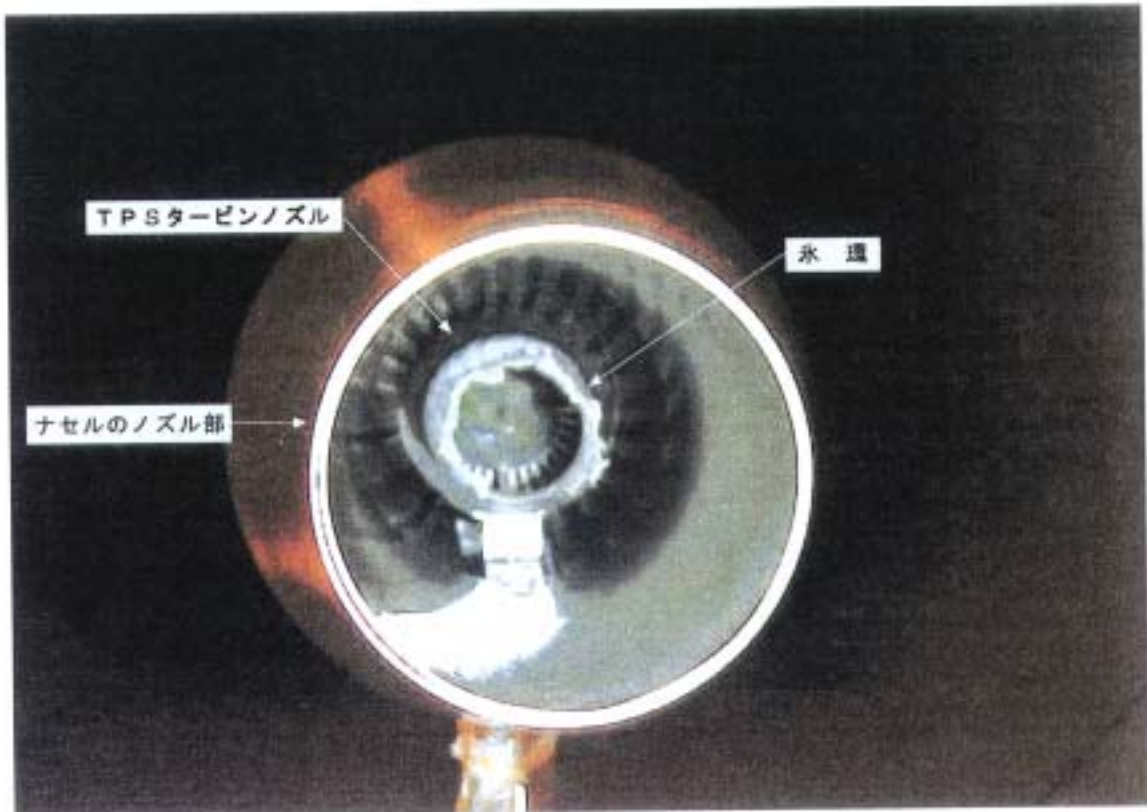


写真4-1 TPSエンジン単体風洞試験で排気ノズルに発達した氷環



写真4-2 掌に取り出した氷環の一部