

No. 13

航技研の推力検定装置について

小池 陽、唐沢敏夫、末永尚史、半沢麻雄、野中 修、中谷輝臣、馬場滋夫
(航空宇宙技術研究所)

The Thrust Calibration tank for a Turbine Powered Simulator of the Transonic Wind Tunnel
in National Aerospace Laboratory

Akira KOIKE, Toshio KARASAWA, Hisashi SUENAGA, Asao HANZAWA, Osamu NONAKA,
Teruomi NAKAYA, Sigeo BABA (NAL)

概 要

STOL 実験機「飛鳥」の開発を機会に航技研の遷音速風洞に、TPS の推力検定装置を作ることになった¹⁾。この装置の特徴は TPS の推力を天秤で測定すること、ファン流量を音速流量計で測定することである。それらの測定に際して幾つかの技術的課題を解決してきた。このたび低速模擬の推力検定が可能になったので報告する。本稿では同装置の概要と推力検定について主に述べる。

1. はじめに

風洞試験における動力模擬は、より詳細に空力特性を解明する上で重要であるが、模型に搭載する場合その模擬技術には多くの問題がある。幾つかある模擬エンジンから試験目的に適合する大きさと模擬方式を選択すること、更に発生する推力を正確に見積もることが必要である。TPS (Turbine Powered Simulator) は模擬エンジンとしては、吸排気流れを非常に良く模擬できる優れたものであり、欧米の航空機メーカーの風洞試験でも多用されている。また、同時に TPS の推力を風洞以外の設備で計測できる装置 (推力検定装置) を備えて推力の検定試験を行ってきている。

推力検定装置は、TPS の推力とエンジンナセル内を通過する流量の2つを精度良く計測するための特別な装置である。風洞試験時のマッハ数に相当する圧力比を得るために全体が気密容器になっているので、Mach Simulation Tank と欧米では呼ばれている。

2. 装置の概要

本装置の主な構成を図1に示した。推力検定装置は、TPS のファン流を供給するために高圧乾燥空気源に接続されている。2MPa を 500kPa 程度に調圧し、更にファン流量を設定するために調節弁が配置されている。

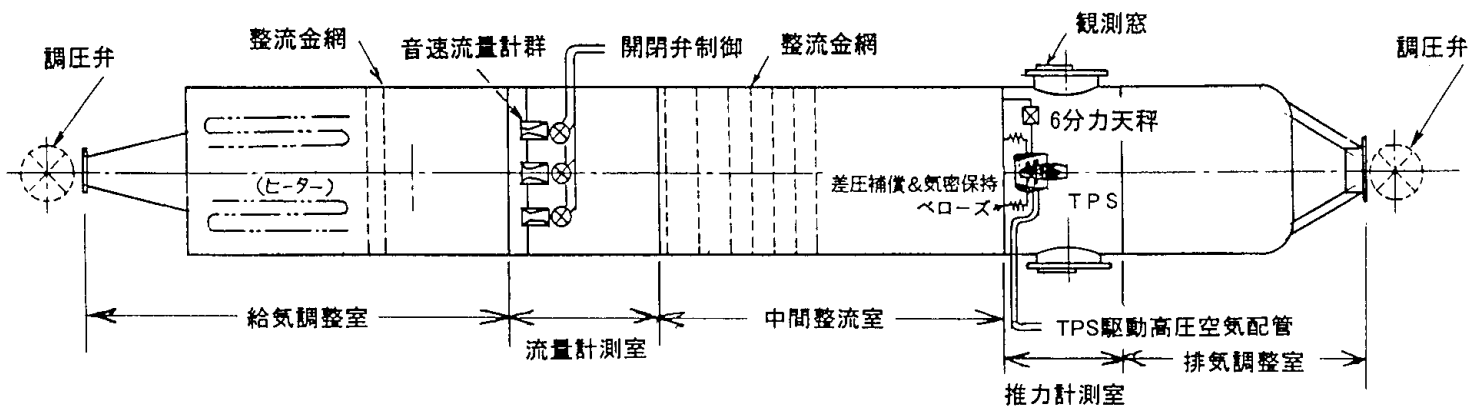


図1 推力検定装置の概要

この調節弁は、音速流量計群 (Multiple Critical Ventury meters, MCV と略称する場合もある) の上下流の圧力比を音速のそれに近づける役目も兼ねている。更に、TPS ファン圧力 (風洞試験時の風洞総圧にほぼ等しい) となる様に制御されている。

MCV の下流には乱れた流れを整流し、速度や温度分布をできるだけ一様にするための金網を配置した中間整流室を経て TPS の推力を測定する推力計測室につながっている。推力計測室の下流には TPS 排気流を調整するための排気調整室がある。ここでは排気圧力を調整する他、排気の方法の切り替えもできる切替弁が配置されている。排気圧力が大気圧程度の時には、切替弁で大気放出側に切り替えられ、排気は消音塔を通して大気放出される。低速模擬の推力検定はこのように行われるが、遷音速模擬では、排気圧力が 50kPa 程度になる場合もあり、切替弁で排風機側に切り替えられる。

図 2 に推力検定装置の制御系統図を示した。TPS の運転制御と種々の計測システムはこれとは別に構築されてきた。推力検定に用いられる TPS の機種の違いによってその運転制御方法が異なっていること及びナセルの内部流計測方法にも差があることがその理由である。従って現在は TPS 運転制御と装置全体の圧力制御を個別に手動で行うシステムで運用している。

従って P1 から P3 までの圧力の制御はコントローラを用いず手動で行っている。

このような運用方法で、ファン流量の制御も手動で行うため、ファン圧力とファン流量の 2 つの変化量を調節しなければならず効率の悪い制御・計測システムとなっている。但し、TPS の運転制御が自動的に (プログラム化されて) 行われれば全体の自動化も可能であり、効率の改善が期待できる。

その場合には TPS の安全な運転管理がさらに重要となる。

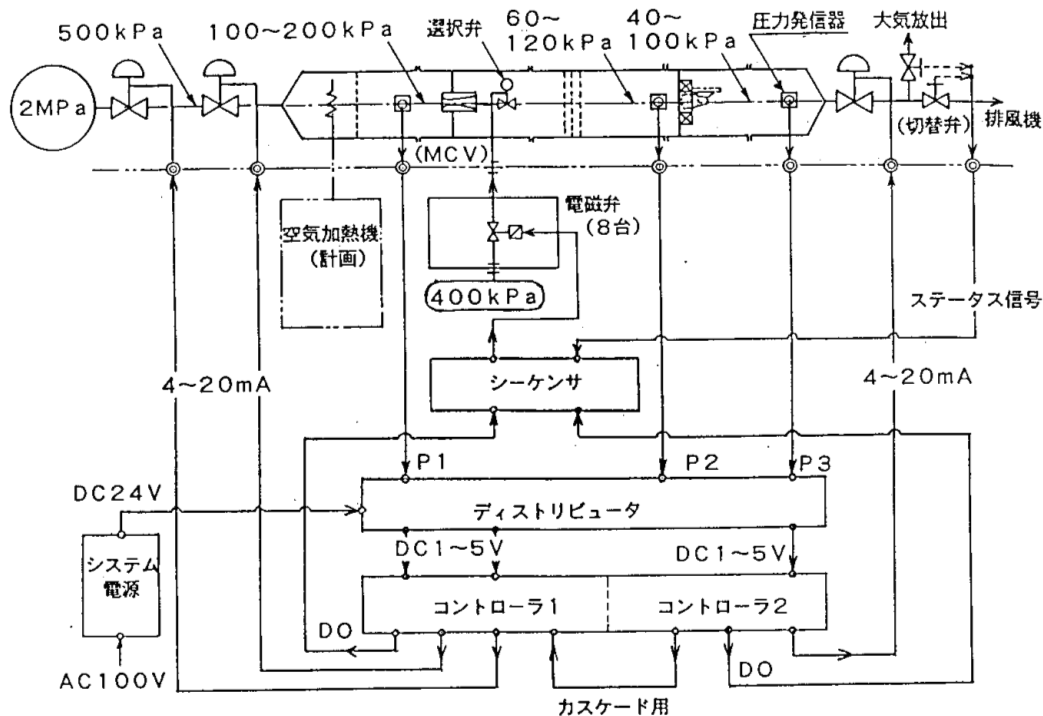


図2 圧力制御システム

3. 装置の機能と特性

3.1 各室の機能と特性について

図1に示すように本装置は5つの部屋から構成されておりそれぞれ以下に述べる機能、特性を持っている。給気調整室はTPSファン流の圧力と流量を調整する。ファン流量は流量計測室に設置されている音速流量計(Sonic Ventury meter,以下SV)で計測する。ファン圧力と関連して所定の流量値になるように複数個のSVを組み合わせる(設定する)ためにSVのスリーブ下流に取付けた開閉弁を遠隔で操作して流量を制御する。SVの特性については別の項でも述べる。

SVを通過した流れは中間整流室に設置された整流金網で整流されTPSファンに流入しウインドミル回転させる。TPSに高圧の駆動空気を流入するとTPSは更に高速回転して推力を発生する。推力計測室に設置された天秤でこの推力を計測する。この推力計測に際して次の2つの課題(文献1で提示された)がありその解決策を述べる。①「TPSの上下流に圧力差を作った時その圧力差が天秤軸力へ及ぼす力を如何に小さく抑えるか」、②「TPSの駆動空気配管が天秤に及ぼす配管干渉を如何に小さく抑えるか」の2つの課題である。

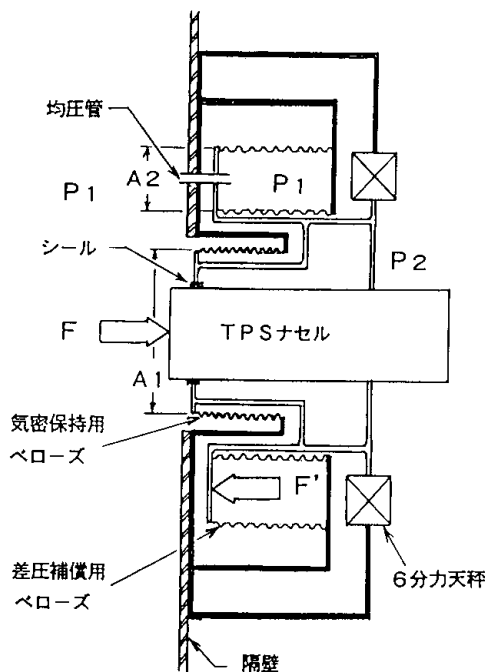


図3 差圧補償システム

①については図3に示す2重ベローズの採用で解決した。内側ベローズはTPSナセルとは力計測上絶縁(non-metric)されておりシールによって外側の流れが遮断されている。外側に配置されているベローズにはTPSの上流側の圧力をその内部に導入する。上流側圧力が下流より高い時、圧力差による力Fは下流に向かう。ベローズ内部の圧力による力F'は逆に上流に向かう。

受圧面積(A1とA2)が等しければ両者の力は相殺される。実際には受圧面積がわずかに異なる、金属ベローズの特性で力の伝達に差がある、等の理由で差圧による軸力が常に存在する。これを風袋軸力と呼ぶ。但し、この軸力の特性は線形であり、予め行う天秤較正で評価すれば天秤計測精度は維持できることが分かった。

②については図4に示す配管システムでかなり干渉を抑えることができた。わずかに残る配管干渉量を天秤較正でできるだけ正確に評価し定量値として知ることが天秤計測精度を維持する上で重要である。

排気調整室の圧力を制御するために調節弁がある。また、排気方向を切り替える切替弁を排風機側にすると、遷音速風洞の排風機につながり、遷音速模擬の推力検定が可能である。排風機の運用は風洞との調整が必要であり今後も検討を要する。

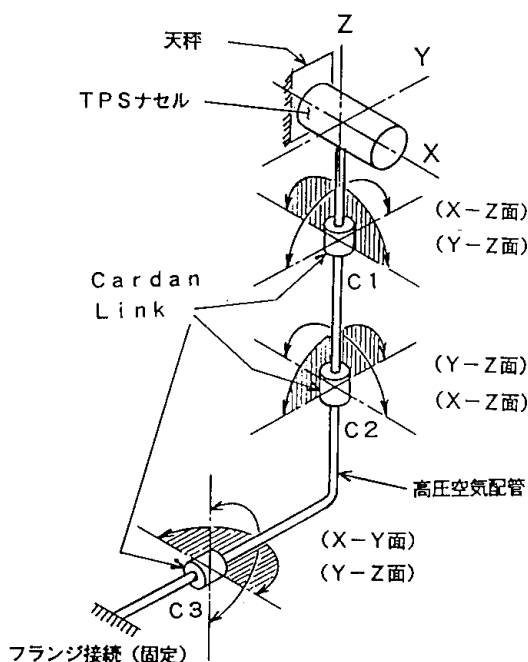


図4 6自由度配管干渉除去システム

3. 2 音速流量計について

推力検定装置において、ファン流量の測定精度については文献 1 で述べているように 0.2% を目指した。代表的な TPS の最大ファン流量は 0.8kg/s であり、複数の音速流量計を組合わせて任意の流量を設定する場合、最小流量は 0.0016kg/s となる。

以下その 2 倍、3 倍、というように 2 進化系列に揃えると 8 個目は 256 倍で約 0.4kg/s となる。

一方、商品として音速流量計を作り、流量検定まで行うメーカーは国内では限られており、しかも高々 0.1kg/s 程度である。また、流量検定を行えるレイノルズ数が、標準大気圧の下で $10^4 \sim 10^5$ 迄である。

本装置で使用する音速流量計は 0.2kg/s 以上の大流量の音速流量計が必要となり、結局それらは米国のメーカーに製作と流量検定の両方を発注した。この流量検定はレイノルズ数が 10^6 以上であり、当装置の使用条件に適合している。

音速流量計の流量係数は、レイノルズ数が 10^4 で 0.97、 10^5 で 0.98、 10^6 で 0.99 であることが図 5 に示されている。最小と最大で 0.02 の差があることになる。

次に、音速流量計が作動するための圧力比の設定が問題となる。本装置で用いる流量計は一種のベンチュリー管で、スロートの下流側が更に拡大管となっている。圧力比は、上流側の総圧とスロートでの静圧との比をとり、音速の場合 0.528 であることは良く知られている。しかし、本流量計のようにスロート下流部に拡大部がある場合、その出口圧力はスロート静圧より高く総圧と出口静圧の比が 0.528 より高い場合でも音速流量計として作動している可能性がある。実際に音速流量計として作動させるには、図 2 に示す P1 と P2 をそれぞれ総圧と出口圧力（スロート静圧より若干高い）としてその比が音速の比に近い状態を設定する。P1 は本装置の強度の制約から常用で 2 気圧程度までであり、確実に音速状態が保証されれば圧力は少しでも低い方が装置の運用効率も上がる。一方 P2 を TPS のファン圧力として所定の値に保持する時、TPS の回転数を上昇させるとファンの吸い込み流量が増えて、P2 が低下しこれを所定値に戻すのに P1 を制御（上昇）することになる。即ち、流量制御と音速の圧力制御の 2 者を同時に行う必要がある。

TPS の回転数が低下する時は逆に P2 は上昇するので所定値に戻すために P1 を下げることになり、音速の圧力比が崩れて、音速流量計として機能しなくなる。これらの事態は TPS の流量変化と音速流量計の選択（設定）が適切でないことが原因と考えられ、TPS の運転制御法と流量計の適切な設定法が確立すれば、問題は解決すると思われる。

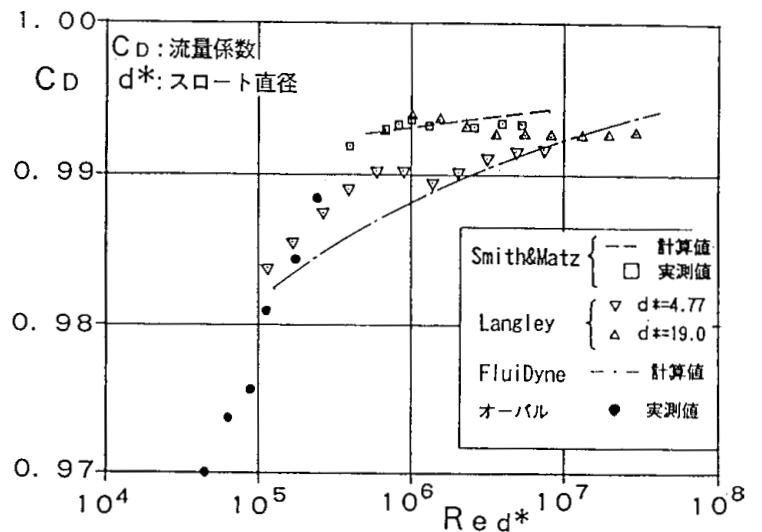


図5 流量係数のレイノルズ数依存性

3. 3 天秤較正とその装置について

TPS が発生する力は 3 軸成分で軸力に相当する推力が最大であり、それに直行する垂直力、横力は僅かである。また、それらの軸周りに発生するモーメントも僅かであるが無視はできない。そこで風洞試験に用いる天秤と同様に 6 分力天秤を推力検定装置でも採用することとした。本装置で用いる 6 分力天秤は外装型天秤と呼ばれるものである。6 分力の各素子間の干渉補正のほかはこの装置特有の条件下での補正值を得るために較正を行う。図 6 に天秤較正装置の取付け状態を示す。この装置は天秤の外側を囲むように取付けられ、所定の位置に荷重負荷ワイヤーの通過孔がある他滑車の支持台も付いている。較正装置全体の大きさは内径 60 cm の筒型で長さが 75 cm である。天秤の各素子に荷重を負荷するために、X、Y、Z の 3 軸方向に荷重作用点及びモーメント用のアームを持つ金具（通常これを天秤較正治具と呼んでいる）を天

秤に取付ける。ピッチングモーメントは X 軸を含むアーム上の 2 点に互いに反対方向の垂直力を負荷して生成し、ローリングモーメントは Y 軸を含む左右 2 本のアームに互いに反対方向の力を負荷して生成する。X 軸方向の荷重負荷方法は、電動ジャッキを用いて力を、X 軸に取付けられた金属製ロッドで天秤に直接伝える方法とした。電動荷重負荷方式で遠隔操作が可能なので様々な条件下での天秤較正(主に軸力)が可能である。

前述のように、TPS の前後に差圧を持たせると天秤に軸力が生ずる。これを打ち消す機構(装置)として 2 重ベローズを天秤の内側に内装している。また、TPS 駆動空気配管による力やモーメントが天秤に加わる(干渉する)ことは避けられない。これらの配管干渉は、図 4 に示した干渉除去システムである程度抑制することができるが更にその効果を高めるには天秤較正によって測定精度の保証が必要である。従って本装置における天秤較正では次の 2 つの条件が特徴であり、その評価が天秤測定精度に大きく関わってくる。

① 天秤上下流に圧力差のある状態での較正。

② TPS の駆動用高圧空気配管の内部に圧力のある状態での較正。

2 番目の条件は、内部圧力によって配管が伸びた時、これを当除去システムによって除去できなければ伸びによる変位が力となって天秤に及ぶので天秤には過大な負荷となる可能性があり、干渉除去システムの性能確認を兼ねて、完全に除去し切れない干渉量をこの較正で評価しようとするものであり、TPS の推力計測上必要な較正条件と言える。 図 7 は天秤の上下流に圧力差がある状態での較正例を示す。これは、下流側圧力を大気圧として、上流側 (P1) をそれより 40kPa 高くして圧力差が「抗力」の方向に作用するようにしている。TPS が取付けられる天秤部分中空になっているので圧力差を保持する際には蓋をしてある。データ処理をした結果の 6 分力の出力は図 8 に示すように負荷荷重に対して線形である。また、Fx 以外の成分の出力特性は何れも線形であり、干渉補正が容易であることが期待できる。

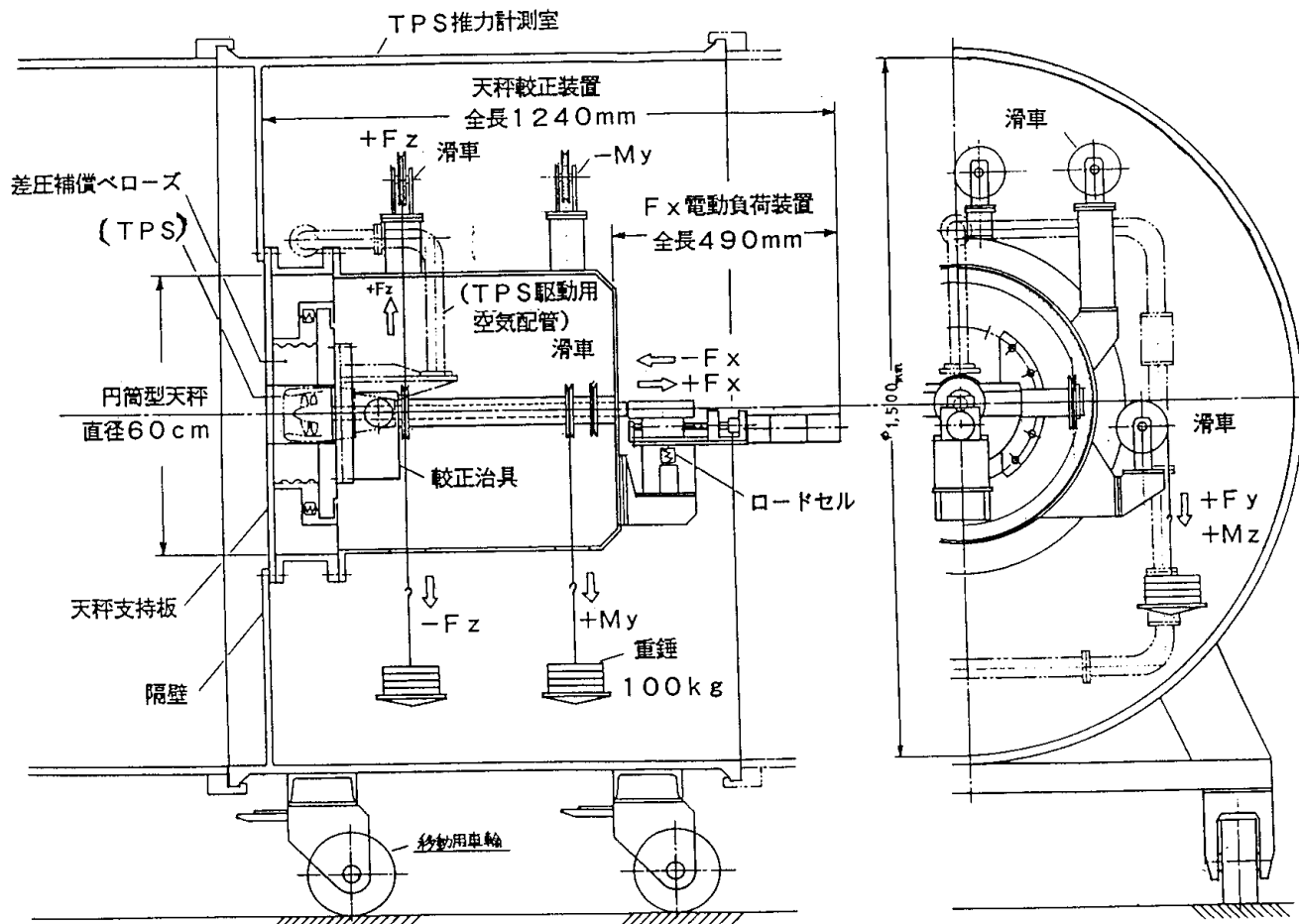


図6 天秤較正装置

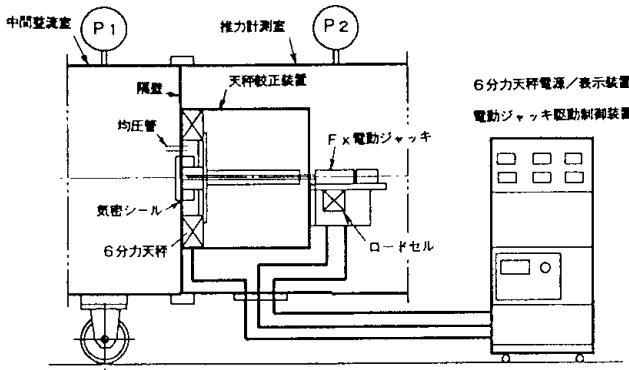


図7 較正試験概要図

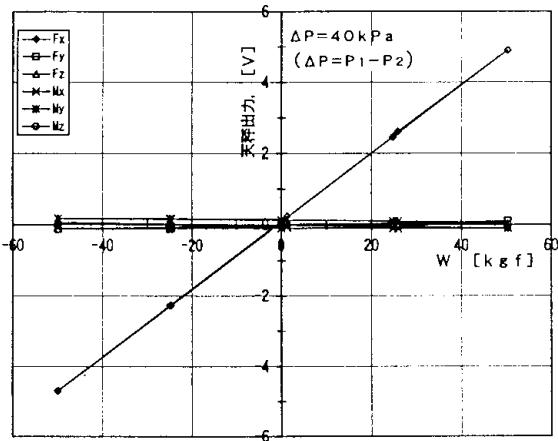


図8 天秤出力例

4. 低速模擬推力検定

TPS の排気側を大気開放の状態では離着陸時のファンエンジン作動状態を模擬した推力検定を行うことができる。風洞の一樣流速に相当する圧力差を TPS の上下流に作り、ファン圧力を一定にしながら所定の回転数毎に推力、流量を計測した。使用した TPS は国内メーカーが STOL 実験機「飛鳥」の低速風洞試験²⁾用に製作したものである。

この TPS の諸特性を以下に示す。

- ①最高回転数 (常用) 65000 rpm
- ②ファン流量 (理想) 0.95 kg/s
- ③総推力 (理想) 280 N (29 kgf)

これらの特性値は、風洞試験用のナセルを装着した性能試験で試験速度 0 (静止) の状態で得られたものである。今回の検定試験では、推力を天秤で、流量を SV でそれぞれ計測 (実測) したものである。また風洞試験速度の模擬 (TPS 前後に圧力差あり) を行っており、その面でも直接比較はできない。図 9 は天秤の軸力と TPS の駆動空気圧を、前後差圧をパラメータとし回転数に対して示した。

差圧が 1.5kPa 以上になると、TPS 回転数の低い状態ではラム抗力が上回っている。(天秤出力が負) 前述したように差圧補償ベローズが期待通り機能したか否かは計測データの処理方法にも依存する (各種の干渉補正データを加味しているか否かによる) ので現段階では精度も含めて定量的なことは言えない。今回の検定試験から分かったことは、TPS のファン流量を設定する MCV (音速流量計群) を十分に大きな値にした方が、ファン圧力を安定した値に設定できること、及び小流量 (低回転数) の場合に、SV の前後に音速の圧力比を設定できないことがあることである。後者の状態は、SV 下流の圧力 (ファン圧力) を一定にするため低回転数では SV 上流圧力も低くせざるを得なくなることである。

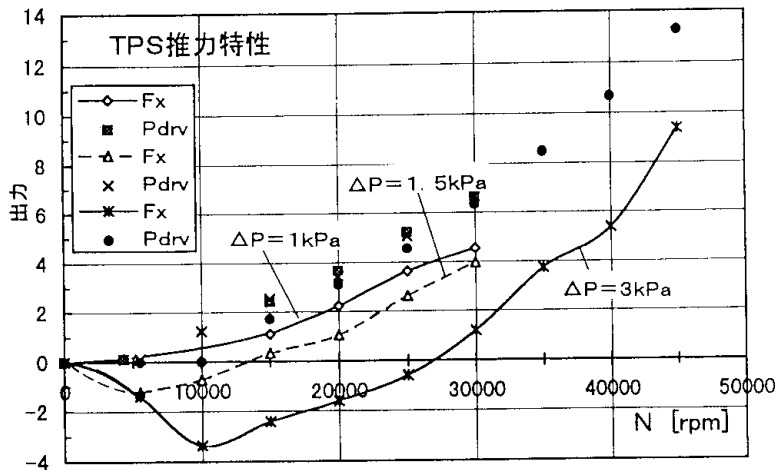


図9 低速模擬推力検定の出力例

5. まとめ

低速（離着陸）時のエンジン作動状態を模擬した推力検定を通して、効率の良い運用方法と今後の課題を記す。

(1) 推力検定試験

- ① 圧力調整弁を操作する要員
- ② TPS を運転監視する要員
- ③ 計測記録等コンピュータを操作する要員
- ④ 全体を監視あるいは補助の要員

以上 4 名からなるチームで作業を行う。各項目は自動化が可能であり、計測・制御を統合したシステムを構築すれば格段の効率化が期待できる。

(2) 航技研の推力検定装置の特徴

- ① 装置内に音速圧力比、模擬マッハ数に相当する圧力比（但し遷音速は未確認）が設定できる。
- ② 差圧補償ベローズ機構、6 自由度配管干渉除去機構等の採用により天秤への影響をかなり少なくできる。
- ③ 遷音速圧力比の設定には遷音速風洞の排風機かそれと同様の排風能力を持つ機器を使用する必要がある。

6. 引用文献

- 1) TPS 推力検定装置の計画、第 39 回風洞研究会議、海老原正夫他、1987 年
- 2) STOL 全機模型バフエット対策風洞試験、TR-1129、高橋 侔他、1991 年