

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1091

貯蔵性推進薬実液流量較正

黒田行郎・只野真・佐藤政裕
日下和夫・宮島博・長島隆一
佐藤正和

1991年1月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. まえがき	2
2. 主な使用記号	2
3. 用語の定義および説明	3
4. 実液によるインプレース校正の必要性	4
5. 流量計の校正装置	5
6. 流量計の校正方法	5
7. キャピタイティング・ベンチュリー(C・V)管の実液校正	8
8. 計測データ処理	10
9. 流量計校正系の精度	10
10. 流量計の校正結果	11
10.1 流量計の校正精度	11
10.1.1 短期精度	11
10.1.2 長期精度	14
10.2 燃焼試験データの一致度	17
11. まとめ	17
12. 謝 辞	18
引用文献	19

貯蔵性推進薬実液流量較正*

黒田行郎^{*1} 只野 真^{*1} 佐藤政裕^{*1}
日下和夫^{*1} 宮島 博^{*1} 長島隆一^{*2}
佐藤正和^{*3}

Calibration of Turbine Flowmeters for Storable Bipropellant Engines

Yukio KURODA, Makoto TADANO, Masahiro SATO, Kazuo KUSAKA
Hiroshi MIYAJIMA, Ryuichi NAGASHIMA, Masakazu SATO

Abstract

Propellant flow rate measurement is one of the most important factors in rocket engine evaluations. In the development of the apogee engine for the engineering test satellite-IV (ETS-IV), the mass flow rate measurement uncertainty requirement for the propellants is less than $\pm 0.25\%$, thus ensuring the overall uncertainty of the measured specific impulse is less than 1 second. The engine's propulsion system design adopted a complete blowdown system (blowdown ratio = 2 : 1), thus it is important to ensure the measurement accuracy for a wide range of flow rates, i.e., from about 30-120% of the minimum flow rate (corresponding to a 0.85 MPa chamber pressure and a mixture ratio of 1.0). To achieve this uncertainty level, an "IN-PLACE/END-TO-END" turbine flowmeter calibration system was developed. The calibrations were conducted with actual propellants under pressures and temperatures similar to those in firing tests, thereby reducing errors caused by variations in fluid physical properties and densities. The characteristics and accuracies of the flow calibration system are described, as well as the method and results of a flow calibration using both hydrazine (N_2H_4) and nitrogen tetroxide (NTO). The uncertainty of the calibration factors, K-factors (pulse per unit volume), was generally estimated to be within $\pm 0.25\%$ of the nominal flow rate (185cc/sec for NTO and 265cc/sec for N_2H_4).

Keywords : ETS-IV, K-factors, Flow rate Calibration,
Propellant Flow rate, Turbine Flowmeter

* 平成2年11月22日 受付 (received 22 November 1991)
*1 角田支所 (Kakuda Research Center)
*2 宇宙開発事業団 (National Space Development Agency)
*3 石川島播磨重工業株式会社 (Ishikawajima-Harima Heavy Industries, Co., Ltd.)

概 要

アポジェンジンに用いられる貯蔵性推進薬系の流量の測定精度の要求値は、ノミナル流量値に対して $\pm 0.25\%$ である。この要求値を実現するためにタービン式流量計の実液インプレースによる“END-TO-END”校正装置を開発し、校正方法及び校正精度の検討を行った。その結果、流量計の校正精度は要求値の $\pm 0.25\%$ 以内を満足することが確認された。

1. まえがき

1993年度に、H-IIロケットによって打ち上げが予定されている静止技術試験衛星VI (EST-VI) 型には、貯蔵性推進薬としてヒドラジン (N_2H_4) / 四酸化二窒素 (NTO) を用いた液体アポジェンジンが用いられる⁽¹⁾。エンジンの性能を評価するのに、一般に比推力が用いられるが、アポジェンジンの比推力測定の精度の要求値は ± 1 秒であり、これはブローダウン初期の比推力322秒の $\pm 0.3\%$ に相当する。この内、推力と低圧室圧力の測定精度が比推力に及ばず効果を差引くと、流量測定系の精度としては $\pm 0.25\%$ の高精度が要求されている。このエンジンは、ブローダウンモードで用いるため広範囲の流量測定において高精度を保持しなければならない。そのため、エンジンの開発試験上で流量計の校正をいかに行うかが重要な問題となった。

タービン式流量計の実液に対する校正係数は、水による校正からある程度推定できるが、校正係数は流量計のタービンブレード部の形状や流体の温度と粘度等により異なり、また配管の形状によって校正係数が影響されることなどから、これらの要因が流量計の測定精度にどの程度影響を与えるのか推定することは難しい⁽²⁾。そこで、アポジェンジンの要求精度を実現するためには、エンジンの燃焼試験時と同じ供給系を用いて流量計から計測系までを含めた流量測定系全体の校正 (END-TO-END 校正) を、実液を用いて行うことが必要である。

本研究の目的は、流量計の校正装置を製作し、

それを用いてタービン式流量計の実液インプレースによる END-TO-END 校正をし、校正方法及び校正精度の検討を行うことである。ここでは、流量計の短期精度を求めるために検出器と計測系を別々に校正してその両方から精度を求める分離校正と、検出器を含めた計測系全体の END-TO-END 校正を行い、それぞれの精度の比較を行った。ここで定めた校正方法 (6章参照) を用いて、長期間に数回の校正をし流量計の校正係数の推移と流量計の長期精度を求めた。次に、エンジンの燃焼試験時に推進薬流量を2チャンネルで測定して、その一致度を調べた。

ここで定めた校正方法で、推進薬 NTO と N_2H_4 を用いてエンジンの燃焼試験に供した流量計の校正を行い精度を求めた結果、校正精度は当初定めた要求値を満足していることが確認された。

2. 主な使用記号

B : かつより誤差の上限の推定値 (正確度)
 K_f : 流量計の校正係数 (パルス/cm³)
 K_{fa} : キャピテーション指数
 K_{fm} : 校正係数の平均値
 K_{fml} : K_{fm} との差が最大となる校正係数
 M : S_i の個数
 P : 平均パルス数 (パルス/sec.)
 P_{cn} : キャッチタンク圧力 (MPa)
 P_c : 推進薬の臨界圧力 (MPa)
 P_L : 流量計部の圧力 (MPa)
 P_s : 積算パルス数 (パルス)
 P_T : ランタンク圧力 (MPa)
 P_V : 推進薬の飽和蒸気圧力 (MPa)

P_{vc} : ベンチュリー収縮部圧力 (MPa)
 \dot{Q} : 平均体積流量 (cm³/sec.)
 S_1 : 流量計単体の精密度
 S_2 : 計測系の精密度
 S_3 : 密度計測の精密度
 t : 校正時間
 T_L : 流量計部の温度
 t_{95} : 自由度 (D_f) の 95%信頼度水準の学生 t 分布値
 U_d : 流量計下流側の短期精度
 U_v : 流量計上流側の短期精度
 V : 流量計の出力パルスに相当する電圧
 V_i : 計測電圧の積分値
 W : 毎秒当りの推進薬重量
 W_i : 推進薬の総重量
 X_{a1} : 校正第 1 ステップの電圧
 X_{a2} : 校正第 2 ステップの電圧
 X_i : 印加した物理量に対する計測電圧
 Y : 校正で得られた物理量
 Y_i : 校正曲線より求めた物理量
 ρ : 推進薬の密度

3. 用語の定義および説明

(1) 一致度

燃焼試験時の推進薬流量を 2 台の流量計で測定し、その流量の一致度を次式で求めた。

$$|2(\dot{Q}_1 - \dot{Q}_2) / (\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2)| (\%)$$

ここで、 \dot{Q}_1 と \dot{Q}_2 はそれぞれ上流側と下流側の流量計で測定された流量である。

(2) インプレース (“IN-PLACE”) 校正

燃焼試験時と同一の推進薬供給系及び計測系を用いて行う校正方法で、流量計校正の場合には校正時に流量計を推進薬供給系の供給配管内に取付けておくことが必要である。

(3) END-TO-END 校正

検出器からの既知の物理入力に対してデータ取得装置に収録される出力を比較して計測系全体の入出力の校正を行う校正方法。校正は必ずしもインプレースで行う必要はないが、検出器への物理入力を燃焼試験時と同一の測定系（検出信号の取

入部から計測データ処理部までを同一の測定系で計測する必要がある。この場合、校正データは校正を行った同一の測定系内のみ有効である。

(4) 偶然誤差

測定の繰返し過程で観測される誤差で、この誤差は繰返し測定で互いに完全に一致することはない。

(5) 校正係数の推移

ここでは、校正係数の推移を次式で定義した。

$$|(K_{f_{n1}} - K_{f_m}) / K_{f_m}| (\%)$$

(6) 信頼度

計算された統計量が正しい確率

(7) 正確度 (Bias, B)

測定値には、それを試験した期間を通じて変化の無い誤差がある。一定の物理量を同一の手法、環境下で繰返し測定する場合、それぞれの測定値には同一のかたより誤差（測定値の母集団の平均値と真の値との差）が含まれており、そのかたより誤差の予測される上限の値を示す。

(8) 精密度 (Precision index, S)

N 個の測定値に基づいて推定される各パラメータの標準偏差（母集団のばらつきの大きさを表す標準的な尺度）である。

(9) 相関係数

回帰式の近似の良さを示す尺度である。相関係数の二乗は決定係数と呼ばれ、x 軸に対する変数の変化に伴う y 軸の変数の変化の割合を示す尺度である。

(10) ノミナル流量値

エンジンの作動範囲により定まる値である。但し、アポジエンジンは、ブローダウンのモードで作動するため、このノミナル流量値はブローダウン始動時の値で与えられる。

(11) 不確かさ

測定値の不確かさを示し、本論文では精度と同義とする。測定値の正確度と精密度が求められ、その精密度に対する自由度の推定値が与えられた場合、不確かさは 10 章の式(12)で示される。

すなわち、与えられた包括度（あるパラメータの推定値が真の値を含んでいると期待できる確率）における測定値あるいは結果に含まれる誤差限界

の推定値（母集団に対する統計量の真の値を推定するために、ある試料から計算される値）である。

(12) ブローダウンモード

ETS-VI用の二液式アポジエンジンの採用した推進薬供給方式で、推進薬タンクに押しガスを封じ込み、そのガス圧により推進薬をエンジンに供給する。推進薬の消費に伴って封じ込んだガス圧は下がりエンジンへ供給される流量は低下する。

4. 実液によるインプレース校正の必要性

タービン式流量計は、非磁性体のハウジングとその内部に設計されたベアリングに支持された多翼のロータ及びピックアップから構成された簡単な構造のものである。そのため、常温の流体を用いてタービン式流量計の校正を行った場合は、次の影響が考えられる。

- (1) 流体の粘度による影響。
- (2) タービンブレード部の軸受部およびベアリング部の摺動抵抗（機械的抵抗）による影響。

この内、機械的抵抗の影響は特に低流量域で支配的となるためここで校正した流量域の内、ノミナル流量域については流体の粘度の影響のみを考慮すればよいことになる。この他に流量計を校正する配管の影響や、流量計2台を同一配管に直列に取付け校正した場合の流量計間の干渉の影響なども考えられる。

図1に、供試エンジンの試験に用いたタービン式流量計の推進薬 NTO と水の校正結果を示す。ここで示す校正係数の求め方については、第6章以下で述べることにする。同図に示す NTO 側の校正データは、19 カ月間に計3回校正した結果である。100 (cm³/sec.) 以上の流量域では、高流量になるにつれて緩やかな上昇となり一定の値 (K_f) に近づくが、それ以下の流量域ではその値は僅かに変化している。燃焼試験に用いる流量計は、その特性が一定であることが望ましいが（第10.2章参照）、燃焼試験に供したほとんどの流量計は図1と同じ傾向を示した。低流量域における特性の変化は流体の粘性抵抗の他に流量計のタービンブレード・ロータ部の機械的抵抗の影響が僅かに現れたためと思われる。この傾向は、図1に

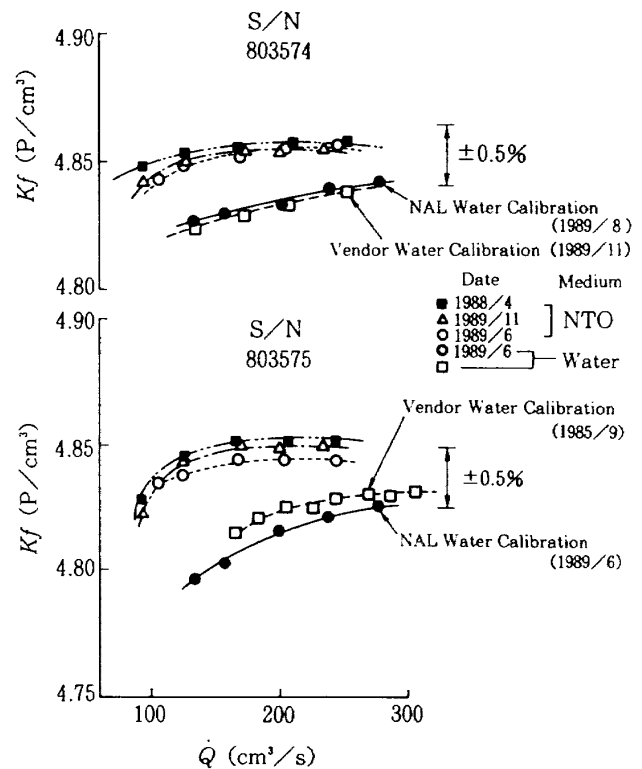


図1 推進薬 NTO と水の校正結果の比較

示す水の校正結果でも示されたが、流体の粘度による影響が低流量域で大きく表われ、低流量域における NTO と水の校正係数の差は拡大している。下流側流量計 (S/N : 803575) では、メーカーでの水校正の後に4年経過してから航研・角田（以下、NALと呼ぶ）で水校正をしたため、校正係数の差はほぼ同時期にメーカーとNALで水校正した上流側流量計 (S/N : 803574) に比べて僅かに大きい結果が示されている。しかし、校正した流量計の長期精度（第10章1.2項参照）が±0.3%であることを考慮すると、メーカーとNALの水校正結果はここでは一致しているとみなすことができる。そのため、図1に示す流量計以外についてはメーカーの水校正值を用いて実液の校正係数を比較することにした。これらの結果でも特性は図1の場合と同じ傾向が示された。すなわち、上流側と下流側の流量計を比較した場合、原因は明確でないが NTO と水の校正係数の差は下流側で大きく表れる傾向があり、ノミナル流量値で±0.5%程度それ以下の低流量域では最大で1%程度の差が認められた。

以上の結果を考慮すると、アポジエンジンの要

求値を実現するには、実液によるインプレースの校正が不可欠であると言える。

5. 流量計の校正装置

図2に流量計校正装置の構成図を示す。推進薬は、ランタンクから燃焼試験と同一の供給配管に直列に装着されたタービン式流量計2台を通じてエンジン直前の遮断弁から流量計校正装置側のキャッチタンクへ供給される。供給された推進薬の重量増分は、電子台秤で動的に計測される。電子台秤は、流量計校正の前に計量研で検定された分銅で校正した。大気圧へ逃気しながら、キャッチタンクへ推進薬を供給するとキャッチタンク内のガス相の重量変化によって推進薬の重量の計測に誤差が生じる。このため、校正の間は、キャッチタンク内を密閉した。これに伴って、キャッチタンク内の圧力が増加して流量が低下するので、これを防ぐためにキャッチタンク入口側へキャピテイティング・ベンチュリー管（以下、C・V管と略称）を取付けた。

6. 流量計の校正方法

タービン式流量計の校正要領を図2の構成図に従って説明する。まず流量計校正の直前に電子

台秤の校正をし、流量計校正の当日には電子台秤の精度が要求値以内であることを確認する。加圧弁を開いて、調圧した窒素ガスをランタンクに送り加圧した後、遮断弁を操作して一定時間キャッチタンクへ通液しデータを収録する。ここで、計測開始から終了までの間、流路内の圧力変動と温度勾配が無視できる程度に小さく、圧力と温度の値がほぼ一定となることを確認し、流量計の校正係数を求めて前回の校正結果との比較をする。以上の手順で流量計校正の準備が完了する。

次に流量計校正の操作を行う。計測データを収録する前に、ランタンク内の圧力を大気圧まで減圧し、試験前電気校正（第8章で説明する）の出力データを収録する。ランタンクとキャッチタンクを一定の圧力に加圧した後、キャッチタンクへ数回通液し流量計の校正係数を求める。流量計校正のシーケンスを図3に示す。遮断弁開から3秒後に計測開始用の押ボタンスイッチを押すと1秒後に流量計積算パルス数を読み取り、それと同時に電子台秤でキャッチタンク内の通液量を記録する。20秒間の校正後に計測収録装置が自動的に終了する。この操作を各流量について1日5回繰り返す。図4に校正した流量の校正モードを示す。校正は、ブローダウン初期の流量の30%~120%の流量範囲に対し各流量について1日5回、2日間で計

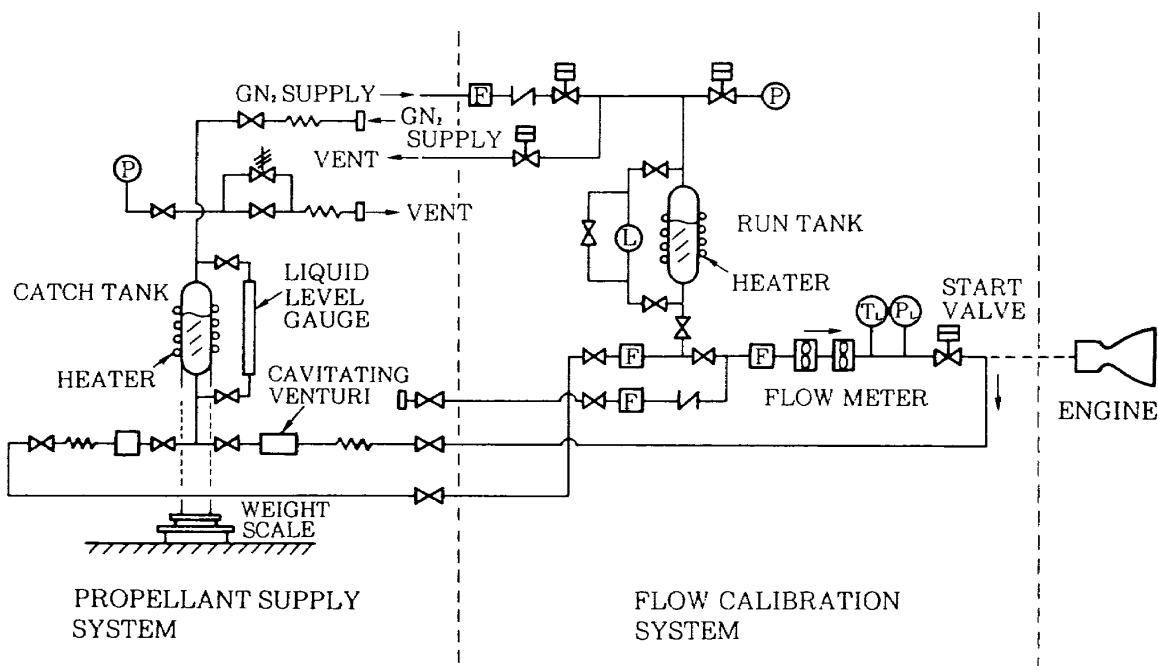


図2 流量計校正装置の校正図

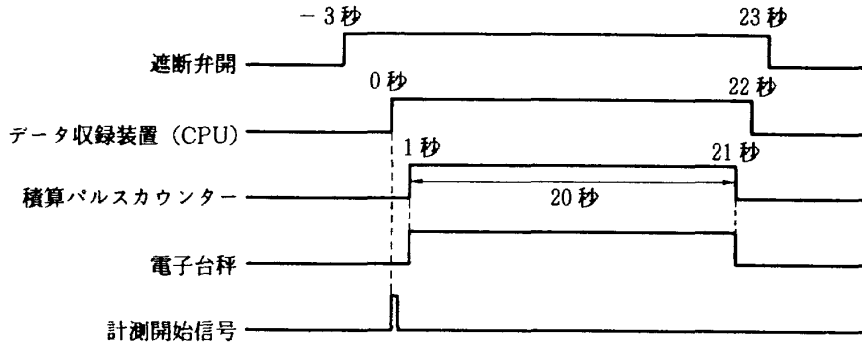


図3 流量計校正のシーケンス

ステップ	校正負荷	校正回数
①, ⑥	$1.0 \times \dot{Q} t$	各ステップ: 5回 ↓
②, ⑦	$0.8 \times \dot{Q} t$	
③, ⑧	$0.6 \times \dot{Q} t$	
④, ⑨	$0.5 \times \dot{Q} t$	
⑤, ⑩	$0.4 \times \dot{Q} t$	

$\dot{Q} t$: 校正した流量の最大値 校正回数: 合計50回
($0.8 \times \dot{Q} t$ は、ノミナル流量値)

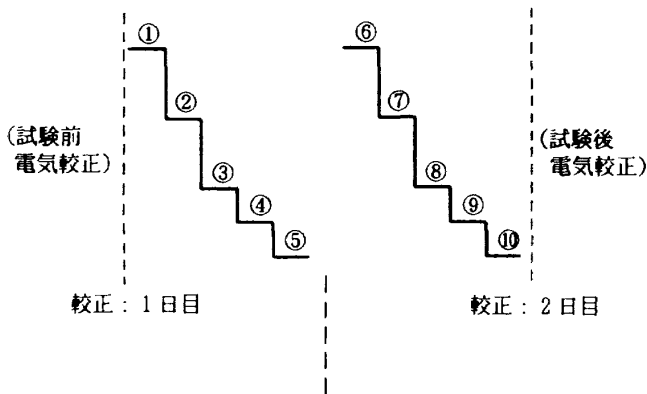


図4 校正モード

10回の校正を行った。校正の負荷は、図4に示す5種類について段階的に校正する流量の最大値から最小値まで加えた。

流量計校正の方法として、ここではEND-TO-END校正によって流量計の測定系全体を校正して校正精度を直接求める方法と、検出器と計測系を別々に校正してその両方から校正精度を間接的に求める分離校正の方法を用いてそれぞれの精度の比較をした。図5に流量計校正のブロック図を示す。END-TO-END校正の場合には、各流量に対して20秒の一定時間に流入された推進薬

の重量とタービン式流量計の積算パルス数の関係を求める。得られるデータは流量計の校正装置側では、校正時間 t (sec.) と推進薬の総重量 W_i (g) と積算パルス数 P_i (パルス) で、データ取得装置側では周波数-電圧変換器 (以下、FVCと略称) により流量計からの出力パルスに相当する電圧に変換された計測電圧の積分値 V_i (ボルト) と、流量計部の圧力 P_L と温度 T_L のデータから算出した密度 $\rho = f(P_L, T_L)$ である。求めた密度から、平均体積流量 \dot{Q} ($\text{cm}^3/\text{sec.}$) と平均パルス P (パルス/sec.) の相関が求まる。この平均パルス数と平均体積流量の比は、流量計の校正係数 K_f (パルス/ cm^3) として与えられる。以下に、これらの関係を示す。

$$\text{推進薬の総重量 } W_i \text{ (g)} = \int_0^t W dt \quad (1)$$

$$\text{計測電圧の積分値 } V_i \text{ (ボルト)} = \int_0^t V dt \quad (2)$$

$$\text{平均パルス数 } P \text{ (パルス/sec.)} = P_i / t \quad (3)$$

$$\text{平均体積流量 } \dot{Q} \text{ (cm}^3/\text{sec.)} = W_i / \rho t \quad (4)$$

$$\text{流量計の校正係数 } K_f \text{ (パルス/cm}^3\text{)} = P / \dot{Q} \quad (5)$$

タービン式流量計の平均パルス数、平均体積流量、推進薬の密度、各流量の校正負荷に対する校正係数等処理し、タービン式流量計の校正表としてタイプアウトする。

分離校正の場合は、流量計の単体校正の前後にそれぞれ1回づつ計測系の校正を行う。計測系の校正では、流量計校正で得られた出力パルスと同じ周波数を流量計の増幅器入力側 (図5の増幅器

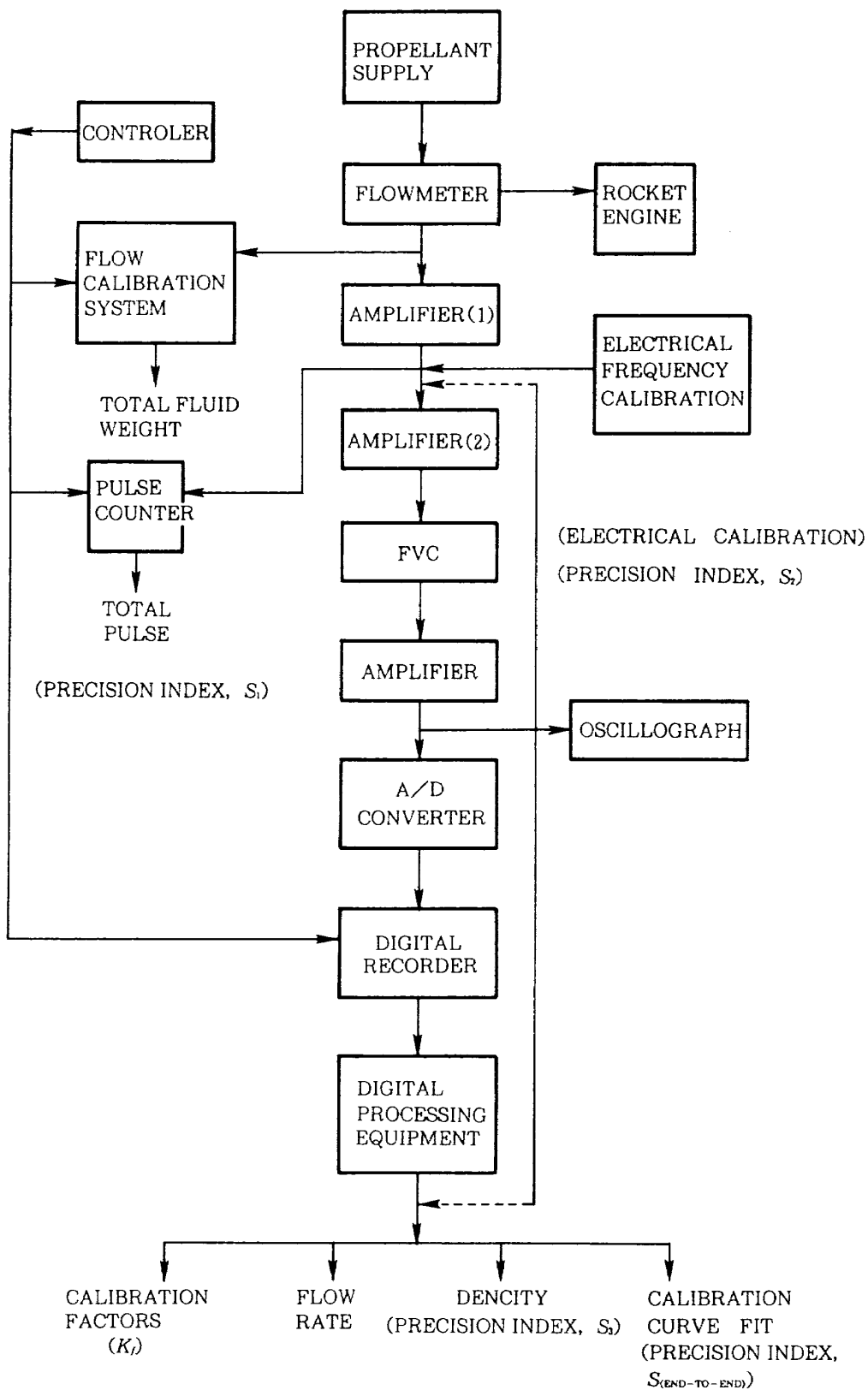


図5 流量計校正のブロック図

(2)の入力側)へ基準の周波数を入力し、流量計校正時と同一のFVCを介して得られた出力電圧と入力した基準周波数の関係から校正曲線を求め、第10章で定めた方法で流量計の増幅器(2)以降から計測データ集録装置までの校正精度を求めた。

7. キャピテイティング・ベンチュリー (C・V) 管の実液校正

実液校正に用いたC・V管の形状を図6に示す。図6のC・V管は、流量計の校正で用いたC・V管と収縮部径及び収縮/拡大部の形状が同じである。図6の P_{IN} 、 P_{OUT} は、それぞれベンチュリーの入口と出口部の圧力である。実液による作動特性を図7(a)、(b)に示す。図7(a)、(b)の ΔP はベンチュリーの入口部と出口部の圧力の差である。図7(a)、(b)に示すように、流量はキャピテーションが生じる臨界点以上では、流量の値はC・V管のベンチュリー部前後の圧力損失の大きさにかかわらず一定となることがわかる。キャピテーションが生じる臨界点のベンチュリーの差圧と、キャピテーション指数 K_{fa} の関係を図8に示す。 K_{fa} の値は、0.3~0.45の範囲にあり、従ってキャピテーションが生じて流量が一定となるためには、 K_{fa} の値が燃料(N_2H_4)側では0.3以上、酸化剤(NTO)側では0.4以上必要であることが判る。ここで、 K_{fa} は次式より求めた⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$K_{fa} = \Delta P / (P_T - P_{vc}) \tag{6}$$

ここで、 P_{vc} は次式によって算出される。

$$P_{vc} = F_f \cdot P_v \tag{7}$$

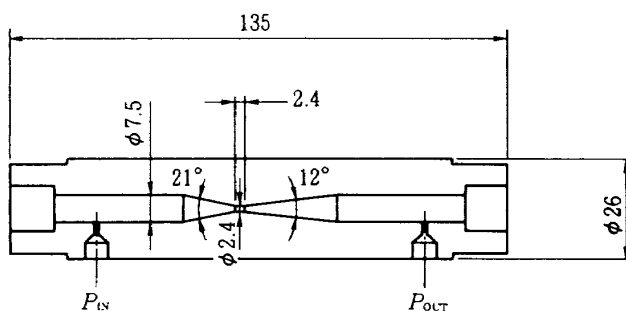


図6 キャピテイティング・ベンチュリー管 (C・V管) の形状

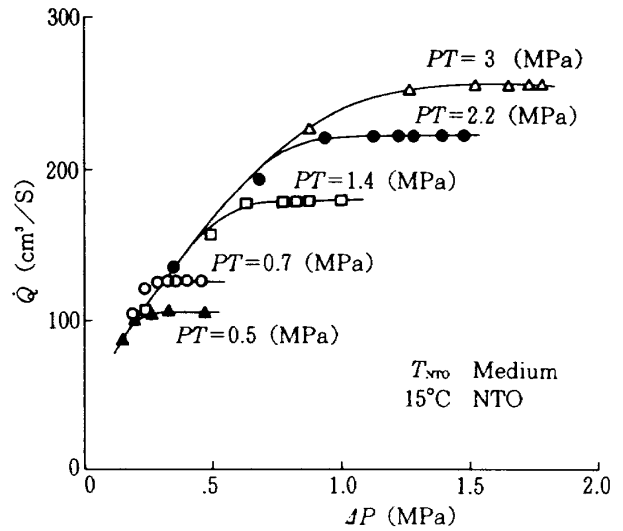


図7(a) C・V管の作動特性

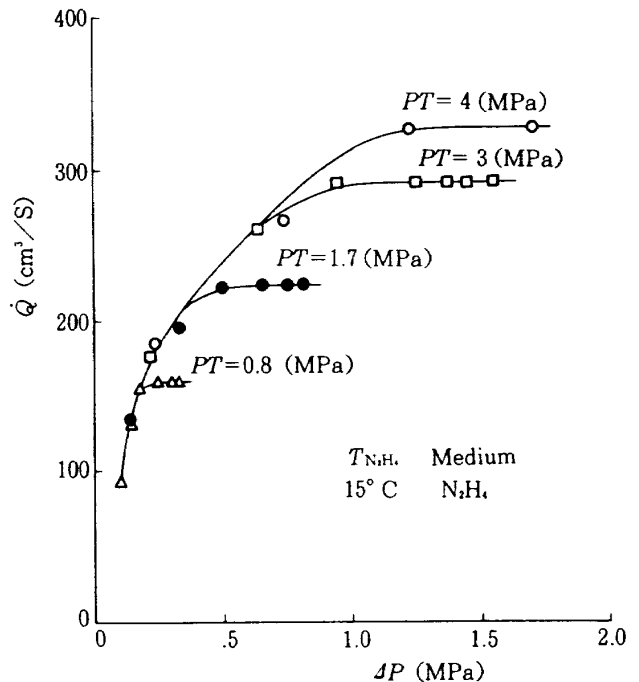


図7(b) C・V管の作動特性

$$F_f = 0.96 - 0.28 (P_v / P_{cr})^{1/2} \tag{8}$$

流量計の校正時に設定したランタンク圧力と、校正の前後のキャッチタンク圧力の関係を表1に示す。C・V管の校正では、流量計の校正と同じ条件にするため初期のキャッチタンク圧力 P_{Cr1} は、推進薬NTOと N_2H_4 の場合にそれぞれ0.13(MPa)と0.03(MPa)に定めて校正した。推進薬NTOの校正では最小流量100($cm^3/sec.$)と最大流量250($cm^3/sec.$)に対して20秒の校正

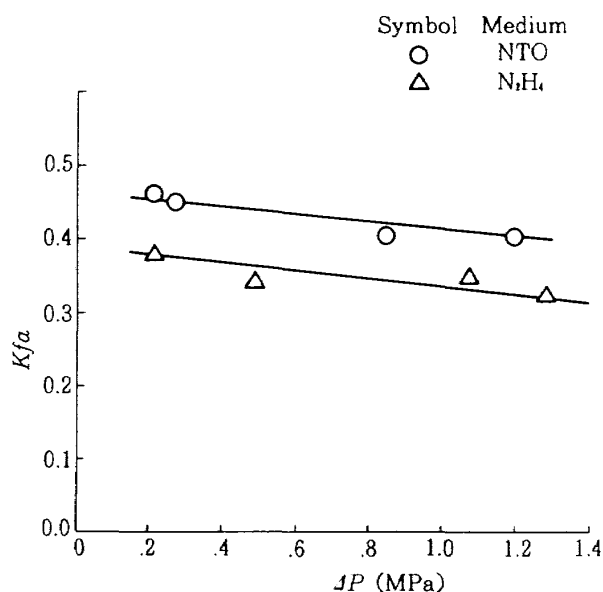


図8 ベンチュリー差圧～キャビテーション指数

後のベンチュリー差圧 ΔP はそれぞれ 0.32(MPa) と 2.56 (MPa) であり, この場合のキャビテーション指数 K_c/a は 0.4 以上となった。また, 推進薬 N_2H_4 の校正では最小流量 140 (cm³/sec.) と最大流量 360 (cm³/sec.) に対しては, 20 秒の校正後におけるベンチュリー差圧 ΔP は, それぞれ 0.61 (MPa) と 4.11 (MPa) であり, この場合のキャビテーション指数 K_c/a は 0.3 以上あることが示された。これらの結果から, 両推進薬共に校正を行った流量の範囲内ではキャビテーショ

表2 流量計校正時の推進薬重量流量

時間 (sec.)	キャッチタンク重量 (g)	推進薬重量流量 (g/sec.)
0	106467	
1	106770	303
2	107074	304
3	107373	299
4	107676	303
5	107979	303
6	108283	304
7	108587	304
8	108888	301
9	109190	302
10	109495	305
11	109796	301
12	110097	301
13	110399	302
14	110702	303
15	111001	299
16	111303	302
17	111606	303
18	111906	300
19	112208	302
20	112513	305

表1 ランタンク圧力-校正の前後のキャッチタンク圧力

推進薬	目標流量 \dot{Q} (cm ³ /S)	ランタンク圧力 P_{Lr} (MPa)	初期キャッチタンク圧力 P_{Cm} (MPa)	最終キャッチタンク圧力 P_{Cm2} (MPa)
NTO	100	0.5	0.13 ↓	0.15
	125	0.7		
	150	1.0		
	200	2.1		
	250	2.8		
N ₂ H ₄	140	0.7	0.03 ↓	0.05
	180	1.2		
	220	1.6		
	280	2.8		
	360	4.3		

ンが生じていることが確認された。

ここで校正した C・V 管を用いて、NTO 側流量計の校正結果の一例を表 2 に示す。表 2 では、ランタンクの圧力を一定にし、20 秒間の校正期間に対しての毎秒当たりの推進薬重量流量の値を示した。この結果から、1 回の校正に対する推進薬重量流量の変動の幅は最大で ±2 % 程度であることがわかる。表 2 で示した流量の変動値を校正係数の大きさに変換し、校正から求めた流量の平均値に相当する校正係数と比較すると、その影響はほとんど無視できる程度 (±0.002 % 程度) であることが示された。そのため、校正の間は流量は一定とみなすことにした。

8. 計測データ処理

流量計校正に係わる計測データ処理の項目の内、流量計単体の他に圧力と温度の測定系があるが、ここでは圧力測定系を例として計測データの処理方法を述べる。

圧力測定系の計測データのスケーリングは、校正電圧を測定の前後 (それぞれを、試験前電気校正と試験後電気校正と呼ぶ) に計測系の入力端へ印加し、出力端からの出力信号を用いて行った。この方法は、次の長所を有する。

- 1) 校正電圧の値によって、随時測定データのスケーリングが可能である。
- 2) 増幅器利得や検出器励起電圧等がある期間内 (例えば、流量計の校正時と燃焼試験時) に若干の相異があったとしても、校正時と計測時 (ここでは、流量計の校正時を“校正時”、燃焼試験時を“計測時”と呼ぶ) で相異があってもデータ処理ができる。校正時と計測時に取得された電圧の間には、式(9)の関係が成り立つ⁽⁶⁾。

$$X_i = [(X_{c,1} - X_{c,2})(X_i' - X'_{c,2}) / (X'_{c,1} - X'_{c,2})] + X_{c,2} \quad (9)$$

['] 印は計測時のデータを示す。

検出器の校正は計測データを取得する前に、図 4 に示す校正モードで行った。この場合、計測

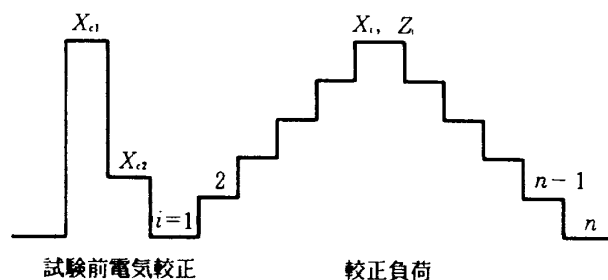


図 9 校正モード

を行う直前に試験前電気校正 (図 9 に示す) の第 1 ステップおよび第 2 ステップに相当する出力 $X_{c,1}$, $X_{c,2}$ を収録し、その後に検出器に対する校正の負荷を段階的に最大の動作レベルまで加えてその出力値 X_i と加えた負荷に相当する物理量 Z_i を記録した。図 9 にそれを説明する校正モードを示す。図 9 の校正負荷は、段階的に最大のレベルまで加え、再び初期の校正負荷まで下げる方法を用いた。図 9 に示す校正を数回繰返し、編集した校正データから最小自乗近似式 $Z_i = f(X_i)$ を与え、この関係から実際に燃焼試験で収録した電圧 X_i を校正時の校正電圧と比較して式(10)から与えた物理量を算出した。

$$Z_i' = f(X_i) \quad (10)$$

このように物理量の換算は、校正時および計測時に行われる電気校正の値を用いて計測時と校正時のデータが関係付けられており、測定系に変更がない限り校正したデータを用いて最小自乗近似式から物理量を求めることができる。

9. 流量計校正系の精度

流量計の校正系の不確かさ (精度) は、これを構成する各要素の校正精度によって推定される。この場合の不確かさ (U) は、次式で定義される。

$$U = \pm [(\sum_{i=1}^n B_i^2)^{1/2} + t_{95}(\sum_{i=1}^n S_i^2)^{1/2}] \quad (11)$$

表 3 に流量計の校正系についての各要素の精度を示す。この内、密度計測の精度は密度を求めるのに用いた温度計と圧力計の校正精度 (流量計の校正を行う直前にそれぞれの検出器を校正した結

表3 流量計校正系の精度

Source of Error	Uncertainty
Density	±0.03%
Weight Scale	±0.003%
F/V Converter	±0.025%
Amplifier	±0.01%

果, 温度計の校正精度は±0.2 K, 圧力計の校正精度は±0.2%となった) から求めた。これらの諸要因の誤差を総合すると, この流量計校正系の精度は±0.04%と見積もることができる。

10. 流量計の校正結果

10.1. 流量計の校正精度

10.1.1. 短期精度

流量計の校正方法として, ここでは分離校正とEND-TO-END校正を行って, それぞれの精度を比較した。分離校正では, 流量計単体と計測系を別々に分けて校正し, 両方の校正結果についてそれぞれに近似式(最小自乗回帰より求めた回帰曲線から定めた)を与えて精度を求めた。この場合, 分離校正の不確かさ(U_1)は, 式(12)⁶⁾で与えた。

$$U = \pm [B + t_{95} (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2}] \quad (12)$$

式(12)の精密度(S)は, 回帰曲線のまわりの校正データ点のばらつきの尺度を表すもので, 式(13)を用いて算出した。また, t_{95} は対称な学生t分布に対して面積95%を占める点に対応した統計値であり, この値は精密度(S)を計算する時に用いられる自由度(D_f)の関数となる。自由度(D_f)は, 校正過程で精密度(S)に対して定まる自由度で, 式(14)より求めた。式(12)の積 [$t_{95} (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2}$] は, 校正で得られた物理量 Y (式(13)に示す) に対する偶然誤差の推定値である。

$$S = [\sum (Y_i - Y)^2 / (N - K)]^{1/2} \quad (13)$$

$$D_f = (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2) / [(S_1^4 / d_{f1}) + (S_2^4 / d_{f2}) + (S_3^4 / d_{f3})] \quad (14)$$

ここで, K は回帰曲線に含まれる定数の数を表す。 d_{f1} , d_{f2} , d_{f3} は, 校正過程での各要素の精密度に対する自由度で, 式(15)から定める。

$$d_f = \sum (N_i - 1) \quad (15)$$

これを, 流量計単体の精密度(S_1)について当てはめると, N_i は各流量に対して校正係数 K_i を求める時に一定の流量の下で繰返した校正の回数である。そのためここでは, $N_i = 10$ とした。また, M は校正した流量の校正点数(図4の校正モードにおいて, 測定する流量の値がステップ①~⑤に相当する)でここでは $M = 5$ である。また, 流量計単体の精密度(S_1)を求める場合は, 式(13)の Y_i には校正曲線から求めた流量を, Y には流量計単体の校正結果から求めた流量を代入した。表4に, 校正結果を校正表として出力させた例を示す。表4の Y_i は校正時の流量で, Y は校正結果から定めた校正曲線により求めた流量の値である。

計測系の校正では, 計測系へ基準周波数を入力してデータ収録装置で得られた出力電圧と入力した周波数の関係から定めた。表5に校正結果の一例を示す。表5の Y_i は, 入力した基準の周波数と流量の関係から校正曲線を求め, その校正曲線を用いて定めた流量の値である。また, Y は入力した基準の周波数に相当する流量で, この値は流量計の単体校正より求めた校正曲線に基準周波数の値を当てはめて定めた。ここでは校正曲線を求めるのに用いた流量の値は, 計測系の校正の直前に流量計の単体校正を行い, その時に定めた流量計単体の校正曲線から算出した。これらの結果を, 式(13)に代入して精密度(S_2)を求めた。計測系の校正は流量計校正の前後に1回ずつ行ったが, その精密度(S_2)の値は流量計単体の精密度 S_1 に比べて僅かであり, 流量計の校正精度にはほとんど影響を与えないことが示された。

密度計測の精密度(S_3)を求める場合は, 次の方法を用いた。流量計校正の前に, 密度計測用の温度計と圧力系(図2の T_L と P_L)を校正し, その結果得られた入出力の関係からそれぞれの校正曲線を定めた。次に, 校正の各点の密度を計算

表 4 流量計単体の較正結果の一例

精 密 度 $S=0.2011597$ (cm^3/S)
 多項式係数 $a_0 : 3.256528$
 $a_1 : 0.197755$
 $a_2 : 0.476551\text{E}-05$

	積算パルス数 P_i ($\text{P}/\text{Sec.}$)	Y_i (cm^3/S)	Y (cm^3/S)	$Y_i - Y$ (cm^3/S)
1	528.700	109.228	109.142	- .860748E-01
2	529.910	109.484	109.387	- .970154E-01
3	530.857	109.620	109.580	- .401917E-01
4	532.004	109.822	109.812	- .955200E-02
5	532.054	109.752	109.822	.703430E-01
6	532.054	109.688	109.822	.134445
7	533.250	109.823	110.065	.241730
8	540.259	111.570	111.487	- .829315E-01
9	540.528	111.596	111.541	- .548401E-01
10	541.007	111.631	111.653	.216217E-01
11	608.973	125.396	125.452	.558472E-01
12	611.914	125.970	126.050	.800934E-01
13	613.958	126.516	126.467	- .496063E-01
14	615.503	126.660	126.781	.121552
15	615.852	126.788	126.852	.646973E-01
16	616.750	126.926	127.035	.108749
17	616.841	126.894	127.054	.159439
18	624.776	128.979	128.670	- .308899
19	625.611	129.075	128.840	- .235611
20	626.620	129.309	129.045	- .263748
21	832.502	171.282	171.191	- .906677E-01
22	836.540	172.163	172.022	- .140549
23	836.989	172.194	172.114	- .799255E-01
24	837.189	172.219	172.155	- .632782E-01
25	839.711	172.652	172.674	.219574E-01
26	840.827	172.839	172.904	.651398E-01
27	841.177	172.805	172.976	.170761
28	841.575	172.945	173.058	.113113
29	842.672	172.973	173.284	.310562
30	842.772	173.132	173.304	.171845
31	997.158	202.205	205.189	- .162201E-01
32	998.604	205.845	205.488	- .356262
33	998.953	205.719	205.561	- .157944
34	1003.29	206.643	206.460	- .183319
35	1004.24	206.815	206.656	- .158615
36	1004.99	206.786	206.811	.254059E-01
37	1005.43	206.611	206.904	.293091
38	1005.48	206.710	206.915	.204681
39	1005.68	206.996	206.956	- .398254E-01
40	1005.98	207.028	207.018	- .106049E-01
41	1171.05	241.440	241.374	- .657806E-01
42	1171.10	241.433	241.384	- .491638E-01
43	1171.19	241.572	241.402	- .170212
44	1171.49	241.630	241.465	- .165329
45	1171.65	242.069	241.499	- .569946
46	1174.38	242.087	242.069	- .183258E-01
47	1174.68	242.193	242.131	- .621491E-01
48	1175.08	242.144	242.214	.702667E-01
49	1177.42	242.231	242.704	.473373
50	1178.51	242.292	242.933	.640869

表5 計測系の較正結果の一例

精密度 $S=0.07474$ (cm³/S)多項式係数 a_0 ; 2.783 a_1 ; 1.9983800E 02 a_2 ; 3.9584850E 00

基準周波数 P (KHz)	Y_i (cm ³ /s)	Y (cm ³ /s)	$Y_i - Y$ (cm ³ /s)
.304	64.016	63.889	.128
.616	127.316	127.294	.022
.919	189.694	189.720	.026
1.224	253.385	253.381	.004
1.514	314.435	314.441	.006
1.738	362.109	362.162	.053
1.536	319.101	319.066	.035
1.232	254.934	254.913	.020
.922	190.334	190.471	.137
.612	126.638	126.569	.069
.308	64.639	64.615	.025
.308	64.639	64.650	.010
.612	126.460	126.552	.092
.918	189.539	189.473	.066
1.244	257.586	257.524	.062
1.525	316.648	316.726	.078
1.725	359.203	359.265	.062
1.527	317.095	317.239	.144
1.231	254.682	254.701	.018
.922	190.342	190.467	.125
.613	126.791	126.817	.026
.308	64.639	64.650	.010
.304	63.843	63.957	.114
.609	125.848	125.860	.012
.919	189.853	189.754	.099
1.201	248.610	248.576	.034
1.502	311.973	311.888	.085
1.740	362.489	362.394	.096
1.520	315.806	315.711	.095
1.208	249.912	249.860	.053
.919	189.729	189.752	.022
.609	125.934	125.860	.074
.303	63.693	63.711	.018

し、その値と較正曲線から求まる密度を比較して S_3 を求めた。

ここで、データ処理に伴う誤差として数値計算の精度に伴うものがあるが、この誤差は無視し得るほど小さいと仮定した。また近似式を求める場合の較正曲線の当てはめの誤差の内、較正曲線とデータ間の相対的な誤差は、その近似の良さの尺度を示す相関係数（第3項で説明）がほぼ1に等しかったため、ここでは無視した。また、較正曲線の絶対的な誤差（較正曲線の真の値と、求めた較正曲線との間の絶対的な誤差）は、式(12)に示す精密度（ S ）の内に含まれているものとした。式(12)により求めた分離較正の結果を、表6に示す。表6では、計測系の正確度を零と仮定し、流量計較正に用いた推進薬重量計測の正確度のみを用いて較正系の正確度（ B ）とした。推進薬の重量計測の較正精度は、最大40Kgまでの重量の測定に対して $\pm 1g$ ($\pm 0.003\%$) であった。表6の結果から、分離較正の不確かさ（ U_1 ）は、ノミナル流量値に対して、 $\pm 0.2\%$ 程度であることが認められる。

END-TO-END 較正では、電子台秤の重量増分から求めた流量と、FVC、増幅器等を含めたデータ取得システムの一方である電圧値の間の関係式を与えて、精密度を求めた。この場合の不確かさ（ U_2 ）は、式(16)で与えた。

$$U_2 = \pm [B + t_{95}(S_{(END-TO-END)}^2 + S_3^2)^{1/2}] \quad (16)$$

$S_{(END-TO-END)}$ は、END-TO-END 較正の精密度で END-TO-END の較正結果に対して式(14)より求める。

この場合、自由度（ D_f ）は次式で与えた。

$$D_f = (S_{(END-TO-END)}^2 + S_3^2)^2 / [(S_{(END-TO-END)}^4 / d_{f1}) + (S_3^4 / d_{f2})] \quad (17)$$

END-TO-END 較正の結果を表7に示す。END-TO-END 較正の不確かさ（ U_2 ）と表6の流量計単体と計測系の精密度から求めた不確かさ（ U_1 ）は、ほぼ同じ値であり表6における計測系の正確度を零とした仮定は、妥当であることが確認された。

10.1.2. 長期精度

表6 分離較正の結果

Meter S/N	Meter Location	Medium	Flow Calibration System		Electrical Calibration		Density S_3 (cm ³ /S)	Bias B (%)	Uncertainty U_1 (%) ⁽¹⁾
			Number of tests N_1	Precision index S_1 (cm ³ /S)	Number of tests N_2	Precision index S_2 (cm ³ /S)			
803574	UP	N ₂ O	50	0.15	33	0.07	0.05	± 0.003	± 0.17
803575	Down	N ₂ O	50	0.14	33	0.06	0.05	± 0.003	± 0.16
803576	UP	N ₂ H ₄	50	0.19	33	0.04	0.05	± 0.003	± 0.14
803577	Down	N ₂ H ₄	50	0.20	33	0.06	0.05	± 0.003	± 0.15

(1) Calculated for nominal flow rate

表 7 END-TO-END 較正の結果

Meter S/N	Meter Location	Medium	"END-TO-END" Calibration			
			Precision index		Bias	Uncertainty
			$S_{(END-TO-END)}$ (cm ³ /S)	S_3 (cm ³ /S)	B (%)	$U_2^{(1)}$ (%)
803574	UP	NTO	0.18	0.05	±0.003	±0.13
803575	Down	NTO	0.11	0.05	±0.003	±0.09
803576	UP	N ₂ H ₄	0.21	0.05	±0.003	±0.15
803577	Down	N ₂ H ₄	0.22	0.05	±0.003	±0.16

前節で示した較正方法で、3回以上の短期精度を取得した場合は長期精度は次の方法で求めた。この場合不確かさ (U_3) は、式(18)で求めるが、精密度 (S_1), (S_2), (S_3) は以下の式を用いた。

$$S_1 = \left[\sum_{i=1}^M (S_{1,i})^2 / M \right]^{1/2} \quad (18)$$

$$S_2 = \left[\sum_{i=1}^M (S_{2,i})^2 / M \right]^{1/2} \quad (19)$$

$$S_3 = \left[\sum_{i=1}^M (S_{3,i})^2 / M \right]^{1/2} \quad (20)$$

ここで、自由度 (D_i), (d_i) はそれぞれ式(14)と式(15)より求める。

式(18), (19), (20)により求めた長期精度の結果を表

8に示す。ここでは、長期精度を求めるために3年間に取得した7回の短期精度の結果を用いた。表8の長期精度の不確かさ (U_3) は、表6, 表7に示す短期精度に比べて僅かに大きい。図10に過去3年間に実施した流量計較正の結果をまとめて示す。図10の K_n は、ノミナル流量に対する較正係数で、これはノミナル流量に対して較正し得られた10個のデータの平均値で表わした。両推進薬共に、較正係数に対する変化の傾向は同じであるが、その大きさは推進薬N₂H₄に比べNTOの場合に僅かに大きいことが示された。燃焼試験に供したNTO側流量計を試験後に分解し流量計のタービン・ブレードのロータ部ベアリングを観察した結果、ベアリング部表面に黒色の異

表 8 流量計較正の長期精度

Meter S/N	Meter Location	Medium	Equation (18)				
			Precision index			Bias	Uncertainty
			S_1 (cm/S)	S_2 (cm/S)	S_3 (cm/S)	B (%)	U_3 (%)
803574	UP	NTO	0.14	0.08	0.05	±0.003	±0.17
803575	Down	NTO	0.20	0.06	0.05	±0.003	±0.22
803576	UP	N ₂ H ₄	0.28	0.07	0.05	±0.003	±0.21
803577	Down	N ₂ H ₄	0.27	0.06	0.05	±0.003	±0.20

(1) Calculated for nominal flow rate

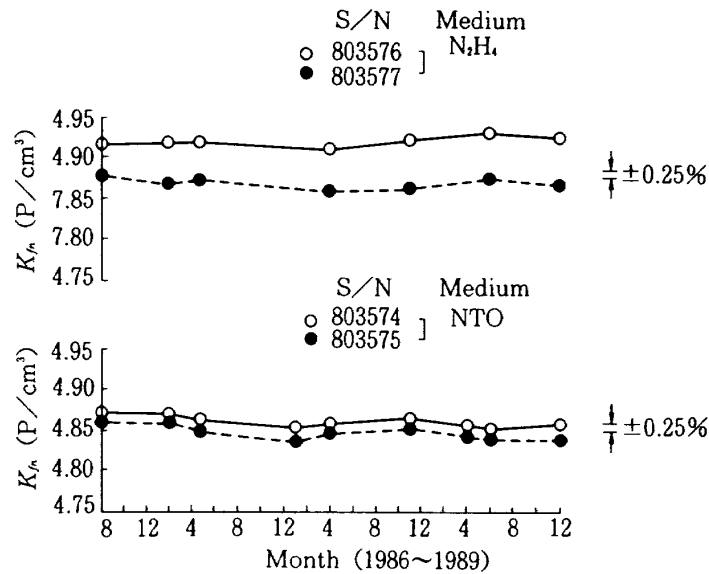


図 10 校正係数の経時変化

物が僅かに付着している例が認められた。この事と、校正時に低流量域で校正係数が小さくなる傾向とが、対応している事が後の検討で判明した。そのため、燃焼試験後は流量計を配管から取外した時に酸化剤側の流量計はフロンで、燃料側の流量計はアルコールで洗浄し、真空乾燥をした後に保管することとした。表 9 に、両推進薬に対する校正係数の推移を示す。表 9 には、図 10 の 4 台の流量計の他に別の時期に校正した流量計 (S/N : 804106) の校正結果も加えて示した。表 9 の K_{fm} は、3 年間に実施した数回の校正結果から求めた校正係数の平均値で K_{fni} は K_{fm} との差が最大となる校正係数の値である。表 9 に示すように、校正係数の推移の大きさは、 N_2H_4 に比べ NTO で大きいことが示されている。表 10 に、供試エン

ジンの燃焼試験の前後に校正したデータを基にして校正係数の推移の大きさを比較して示した。燃焼試験を 2 カ月間行い、試験後に流量計を配管に取り付けた状態にして再校正し、燃焼試験前の校正係数との比較をした結果を表 10 のコード B に示す。この場合には、試験前後の校正係数の変化は $\pm 0.1\%$ 程度であったが、燃焼試験の後に流量計を配管から取外し 3 カ月間保存し再校正したコード A の場合は、校正係数の変化はコード B の結果より大きく、校正係数の値は試験前より僅かに小さくなっていることが判明した。コード C は、燃焼試験後に配管内に流量計を取り付けて 3 カ月後に再校正した結果であるがこの場合は実液に取り付けた期間がコード A と同程度であったが校正係数の変化の大きさはコード B の場合と同程度

表 9 校正係数の推移

Meter S/N	Number of tests	Period (Months)	Medium	Maximum deviation of K_{fni} from mean. $ (K_{fni} - K_{fm}) / K_{fm} $ (%)
803574	9	41	NTO	0.22
803575	9	41	NTO	0.25
803576	7	41	N_2H_4	0.21
803577	7	41	N_2H_4	0.18
804106	4	36	NTO	0.28

表10 校正条件の異なる場合の校正係数の変化の割合

(Medium: NTO)

		SN : 3574		SN : 3575		
Code	Calibration (Date)	K_{fn} (P/cm ³)	Deviation (%)	K_{fn} (P/cm ³)	Deviation (%)	Engine Firing Tests (Date)
A	1988/11	4.861 ^{*1}	0.27	4.849	0.25	1988/11~1988/12
	1989/4	4.852 ^{*2}		4.837		
B	1989/4	4.855	0.07	4.837	0.04	1989/4~1989/5
	1989/6	4.851		4.835		
C	1989/6	4.851	0.13	4.835	0.06	1989/7~1989/11
	1989/12	4.858		4.832		

Deviation : $|(*1 - *2) / *1|$ (%)

であった。そのため、NTO側流量計は燃焼試験前の保存期間が3カ月以内の場合は流量計は配管内の実液に浸けて保存することとした。この場合、試験直前に流量計の校正をし、特に低流量域(50 cm³/sec.以下)において流量計の特性が変わった場合は、燃焼試験時において2チャンネルで計測した流量の値の一致度が悪くなる傾向が示されたので、この場合は流量計のベアリングを交換することにした。ベアリングを交換して、実液で再校正した結果では、使用した流量範囲よりも低流量域で僅かな特性の変化はあったが、燃焼試験の流量域に対しては影響のないことが確認された。表10の校正結果からは、校正係数の変化の割合は最大でも±0.3%程度であり、このためこれらの誤差要因を考慮して試験に用いた流量計の長期精度は、±0.3%と定めた。

10.2 燃焼試験データの一致度

供試エンジンの燃焼試験で、推進薬流量を2チャンネルで測定し、その一致度(用語の定義の項を参照)を調べた。図11は、一致度を各試験毎の燃焼時間30秒目のスライスタイムに対応させて示したもので、破線は流量計2台の精度の二乗和平方根より定めた一致度の限界線である。その値は、式(21)より求めた。

$$(|U_1^2| + |U_2^2|)^{1/2} \quad (21)$$

流量計の校正は図11に示す燃焼試験(試験番号: 8140,8170,8200)の直前に1回づつ行った。同図に示すように、試験前半には一致度はほぼ破線で示す限界線内であったが、試験後半にはその限界値を越える場合があった。そのためエンジン性能の評価には、流量の値として一致度が0.4%以内の場合は2チャンネルで測定された平均値を、また一致度が0.4%を越えた場合はどちらか一方の値を用いることとした。図11の後半の燃焼試験で得られた燃焼圧力と流量測定データの一致度の関係を燃焼時間30秒に対応させて図12に示した。この結果から示されるように、流量計の一致度は、低流量域(図12における低燃焼圧側の流量域に相当する)で悪くなる傾向があり、この傾向は図11の流量測定データの一致度と同じであることが認められた。

11. まとめ

アポジエンジンの要求精度を実現するために、実液インプレースによるEND-TO-ENDの流量計校正を行い、校正方法と校正精度の検討を行った。得られた主な結果は、次の通りである。

- (1) 推進薬NTOと水の校正結果を校正係数の

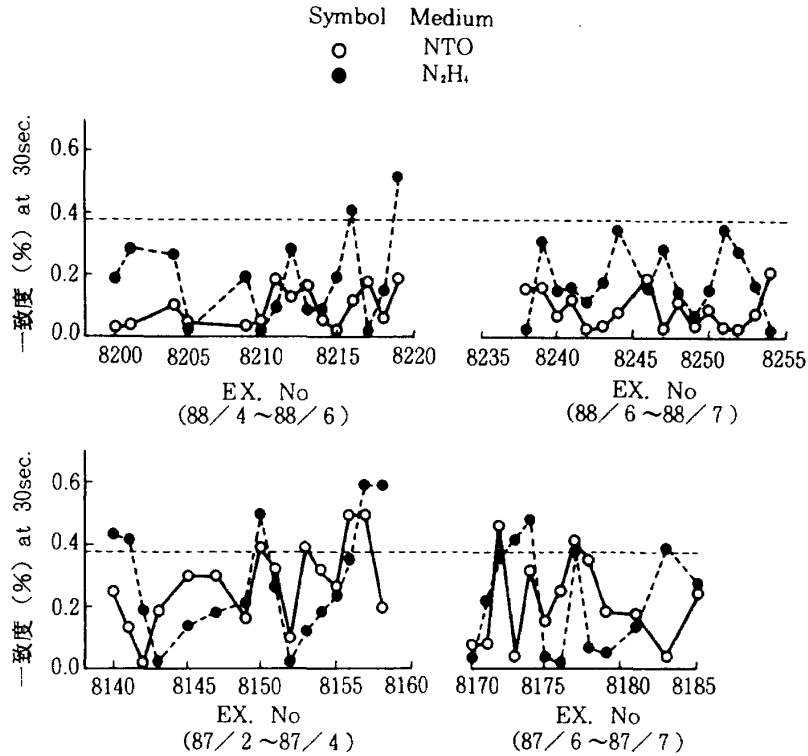


図 11 燃焼試験データの一致度

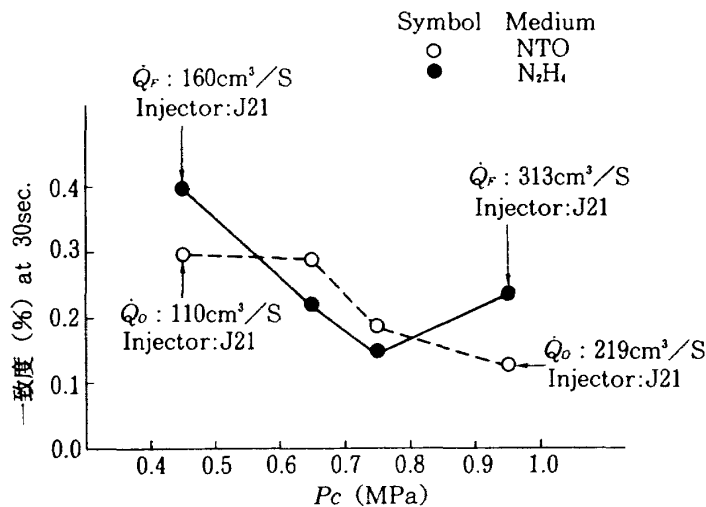


図 12 燃焼圧力-流量測定データの一致度

値で比較すると、ノミナル流量で±0.5%程度、それ以下の流量域では最大で±1%程度の差が認められた。そのため、アポジエンジンの流量測定の要求精度±0.25%を実現するには実液による校正が不可欠である。

- (2) 短期精度を分離校正と END-TO-END による校正方法で求め比較した結果、校正精度はほぼ同じ値であることが示された。
- (3) ここで定めた校正方法で燃焼試験に用いた流量計を校正した結果、校正精度は要求精度の

±0.25%以内を達成することができた。

12. 謝 辞

本研究の実施において多くの方々の御協力を得た。ここに感謝の意を表す。

流量計校正装置の製作に当たっては、石川島播磨重工業株式会社の関係者に協力いただいた。校正結果の精度管理に当たっては、航技研の木皿且人氏に、実験に当たっては航技研の桜中登氏に協力していただいた。また、流量計の水校正では流体

工業㈱の塚本剛治氏に助言いただいたことを付記する。

引用文献

- 1) H. MIYAJIMA, Development Tests of the liquid Apogee Engine for the EST-VI. 16th ISTS, Sapporo May 1988.
- 2) M. R. SHAFER, Performance Characteristics of Turbine Flowmeters. Journal of Basic Engineering, December 1962, P471~485.
- 3) 上野次郎, ベンチュリーオリフィスの検討, IHI 技術メモ。
- 4) Aerospace Fluid Component Designers' Handbook. Volume 1, Revision D, May 1964, P108~171.
- 5) 木皿且人, 二液式アポジェンジン用デジタルデータ処理システム, NAL, TM-599, 1月, 1989.
- 6) ICRPG Handbook for Estimating the Uncertainty in Measurements made with Liquid Propellant Rocket Engine Systems, CPIA No. 180, 30 April 1969.

航空宇宙技術研究所報告1091号

平成3年1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 共 進
東京都杉並区久我山5-6-17
