

液 位 計 測

倉谷健治・山下雅道・小田欣司

梁洪森・清水洋一

(1983年1月5日受理)

Measurement of Liquid Level and Related Items

By

Kenji KURATANI, Masamichi YAMASHITA, Kinji ODA,

Hong Sen Liang and Yoichi SHIMIZU

Abstract : Various types of liquid level sensors have been tested. As continuous reading sensors a capacitance gauge and a pressure head gauge were used and as point reading sensors a carbon-resistor, a small Si-diode and varieties of hot wires made of thin platinum and tungsten wires were investigated. Other indirect methods to measure the change of liquid level such as integration of flow meter reading, pulse count evolved from a turbine flow meter, and integration of flow rate calculated from the pressure difference at the injector surface were also examined, because they are sometimes useful as a supplementary method to estimate the liquid level change. The most reliable sensors which have been used by us are capacitance gauges and gaschromatographic catharometer's fillaments made of thin tungsten wire. The latter was gold-plated on its surface.

The experimental results obtained from these sensors were compared quantitatively and the excellent agreement among the results of different methods such as a capacitance gauge and hot wiress : pressure head, integration of flow rate and pulse count summation etc. were obtained. A few kinds of methods to perform smooth propellant utilization control were tried and finally a special logic programmed in a micro-computer was used to distinguish the true signals in a pile of complex indications sent from the hot wire arrays of both tanks.

In relation to the measurement of liquid level, a data handling system using a micro-computer was established. It works well to monitor and display various items in real time. Temperatures along the supply lines expressed in deg. Kelvin are the good example to

monitor in order to operate the engine system and they are indicated on a color-television, a panel meter and a printer. Another item was the mass flow rate ratio O/F during the hot runs of thrust chambers and feed systems and it was displayed on a XY-plotter.

概 要

液位計として連続測定用の静電容量, 差圧計, ポイントセンサとして炭素抵抗, Si-diode, Pt-, W-線等を試用した。また間接法として流量計積分, タービン流量計のパルスカウント, 噴射器差圧よりの流量積分等も試みた。最も信頼度の高いのは静電容量とガスクロマトグラフ用フィラメントであり, 後者は細いタングステン線に金メッキが施されている。

これら液位計の定量的比較が静電容量対ホットワイヤ; 流量積分, 差圧計, パルスカウント等で行われ良好な結果を得ている。PU制御はホットワイヤから多発される信号の中からマイコンに組んだ論理回路で真の信号を識別し円滑に動作させるのに成功した。

液位計測に関連してマイコンによるデータ処理方式を確立し, 実時間でのモニタ, 指示に有効に使用されている。例えば供給ライン各点の温度は絶対温度に換算されてカラーディスプレイ, パネルメータ, プリントに指示され, 質量流量比 O/F は XY-プロッタに画かれている。

なお, 付記としてホットワイヤについての詳細な検討, 直交多項式を用いる最小二乗法が述べられてくる。

I. 液位の各種計測法

1. 静電容量

直径 d_1, d_2 の同心円筒の長さが l , 媒質の誘電率を ϵ とすると静電容量は

$$c = 2\pi\epsilon l / \ln[d_1/d_2]$$

で与えられる。従って液柱の高さを h , 液体および気体の誘電率を ϵ_L, ϵ_G とおくと, 全系の静電容量は比例定数を α とすれば

$$c = \alpha[\epsilon_L h + \epsilon_G(l - h)] = \alpha(\epsilon_L - \epsilon_G)h + \alpha\epsilon_G l \quad (1)$$

となり, 静電容量 c から, 液体と気体の誘電率の差に応じて, 液柱の高さ h すなわちタンク内の液量が求められる。静電容量 c を求めるには発振周波数の変化を利用する方法と, 同調点からのずれによる振幅変化を用いる方法とがあるが, 前者が直線性に富んでいるの

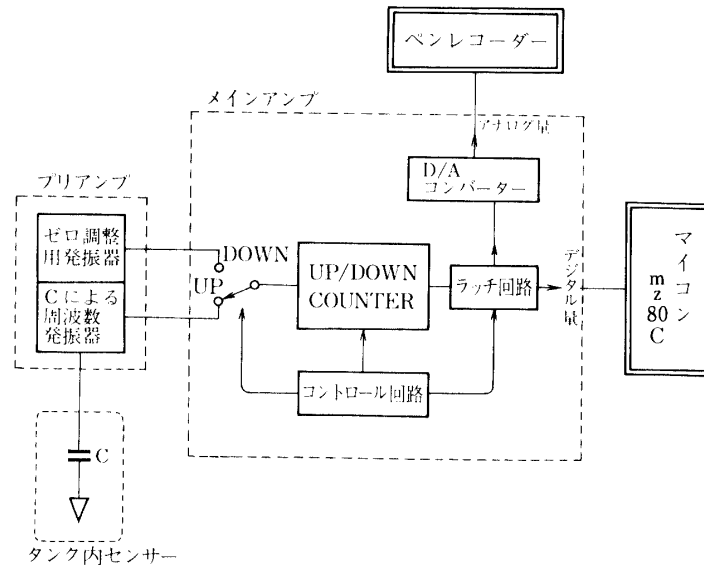


図1 静電容量レベル計

で、液水実験開始以来、発振周波数法が採用されている。図1はその系統図で、タンク外壁に2回路の発振器を持つプリアンプを設置する。このうち1回路はタンク内容量変化を周波数変換し、残る1回路は液量ゼロの静電容量 c_0 に対応する周波数をダミー容量 c_0 で発振させる。メインアンプにはUP/DOWNカウンタ用パルス (LH₂ 80 KHz, LOX 32 KHz) が用意されている。まず c_0 に相当する周期の間 (約30ms) 基準パルスをDOWNカウントし、その後直ちにタンク容量 c による発振周波数の1周期の間 (約30~60 ms) UPカウントし、両者より ΔC すなわち液位を求める。出力はDA変換してペンレコでモニタする一方、10ビットのデジタル信号はマイコンに入力され実単位表示および実験後の解析に供される。

液位の計測はタンク注液時の指標として、また排液時には空運転を防止するための残液量確認を目的とし、極めて重要な計測項目であるが、絶対値についての定量的検討は二三の場合以外行われていなかったが、PU制御その他の必要上、計測技術が進むにつれて綿密な検討が行われている。

本方法の開発途上には次にあげるような多くのトラブルが発生した。

- 毛細管効果…電極となる同心円筒に穴を開ける。[1]
- タンク外取付端子…伝熱により冷却され端子部に結露する。頸部を長くした。単なる防水処理では接触不良を起し易い。接点復活剤は有効である。
- 同心円からのずれ…スペーサを入れて偏心を避ける。
- 渦流による凹面形状…ステージ試験用タンクには排出孔付近に渦流防止板を設け、バフ板も随所に設けた。ターボポンプ試験設備系のタンクでは排液は底面よりは出ない。
- 電極の脱落…長い円筒が急激な温度変化を受けて伸縮するので保持用スペーサから脱落する事故を経験した。

しかし、現在ではいずれも解決している。静電容量法は調整不良による dead zone の発生 (GG-701-1の例) [2]等取扱いに熟練を要するが、連続的に液位を計測する方式としては差圧計法よりは格段に優れており、またポイントセンサであるホットワイヤ HW との対応もほぼ良好で信頼性に富んでいる。

2. ホットワイヤ HW

TC-701-1の実験では、始め炭素抵抗をポイントセンサに用いていたが、アンプ不良のため代りに $10\ \mu\phi$ の白金線でセンサを自作して試行した。しかし抵抗値が小さいため信頼性に乏しく、昭和52年11月の TP-701-3 では、この $10\ \mu\phi$ の白金線をセンサとする非常停止回路が正常に作動せずタービン破壊の事故を招いた。以来ポイントセンサの改良に腐心し炭素抵抗 (Allen-Bradley 社, $1/8\ W$, $51\ \Omega$), Si-ダイオード (IN-1588, 外側にニクロム線を巻いて傍熱型を試作), 各種白金線, ガスクロマトグラフ GC 用フィラメント等を検討した。

各種細線としては白金の $5\ \mu\phi$ 線 ($30\ \Omega$), $15\ \mu\phi$ 線 ($7\ \Omega$), $15\ \mu\phi$ 線 ($1\ \Omega$), タングステンの $15\ \mu\phi$ 線等も試用したが、白金の $20\ \mu\phi$ 線, $30\ \mu\phi$ 線を空間に張りめぐらし、それぞれ $7.6\ \Omega$, $6.4\ \Omega$ としたセンサは実液試験にも採用され良好な結果を得た。以上すべてのセンサは液体窒素への出入による静止試験には合格し、極めて高感度であるが、実液での正規の試験ではタンク内の圧力変化にも鋭敏に反応して「にせ」記号を多発する。その原因はホットワイヤ型センサは水素タンク内で爆発の点火源ともなり得るので、極力電流値を下げたため、伝熱効果による液面探知よりは、加圧に伴う温度変化を検知する“温度計”として作動してしまったためとみられる。実液試験では環境の乱れが大きく、センサが気・液を識別する感度は定性的に

静止試験 10, 残液処理 1~2, 実験時の排液 $1/4\sim 1/8$ 程度である事も作動不確定の原因にあげられる。その他

○遠隔計測の必要上、リード線の抵抗が無視できない。従って、抵抗値の大きいセンサが有利であるが、小型でなければならない。

○液中では大電流となっても良いから、正の抵抗温度係数をもつ純金属の方が良い。

等の条件があり、結局常温での抵抗値が大きく、抵抗温度係数正、小型で入手し易いものとして GOW-MAC 社製の GC・フィラメントを採用した。このものはタングステンの細線を細いコイル状に巻き、全長 $12\ \text{mm}$, 表面を金メッキしたもので常温抵抗 $18\ \Omega$, 液水中抵抗 $2.1\ \Omega$, 使用電流は水素中 $250\sim 500\ \text{mA}$, 空気中 $\sim 200\ \text{mA}$ が推奨値である。現在組込まれている回路図は図2のものでゲインは $40\ \text{dB}$ 以上、出力をコンパレータで ON-OFF に変える (ユニゾン電子製)。タンク内には HW が数点設けられるので、それぞれのコンパレータ出力電圧は加算され、電圧値より、HW が何本液中に残っているかを判定できる。出力はペンレコでモニタすると共に A/D を介してマイコン処理される。

この方式は単純であるが、 $150\ \text{m}$ に及ぶリード線の抵抗が直列に入ってくるので、信頼性を高めるには開発当初のようにブリッジ回路の1辺にセンサを組込む方式に戻す方が良いと思われる。

GC・フィラメントを HW とする方式は昭和53年頃確立されたと考えていたが、PU制

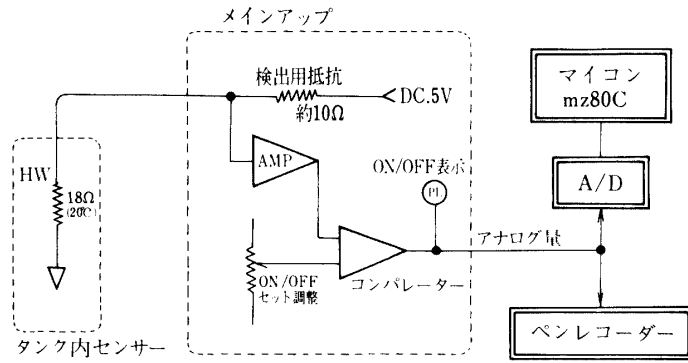


図2 HW用回路

HST-1001-1-3 (LH2) 57.4.26.

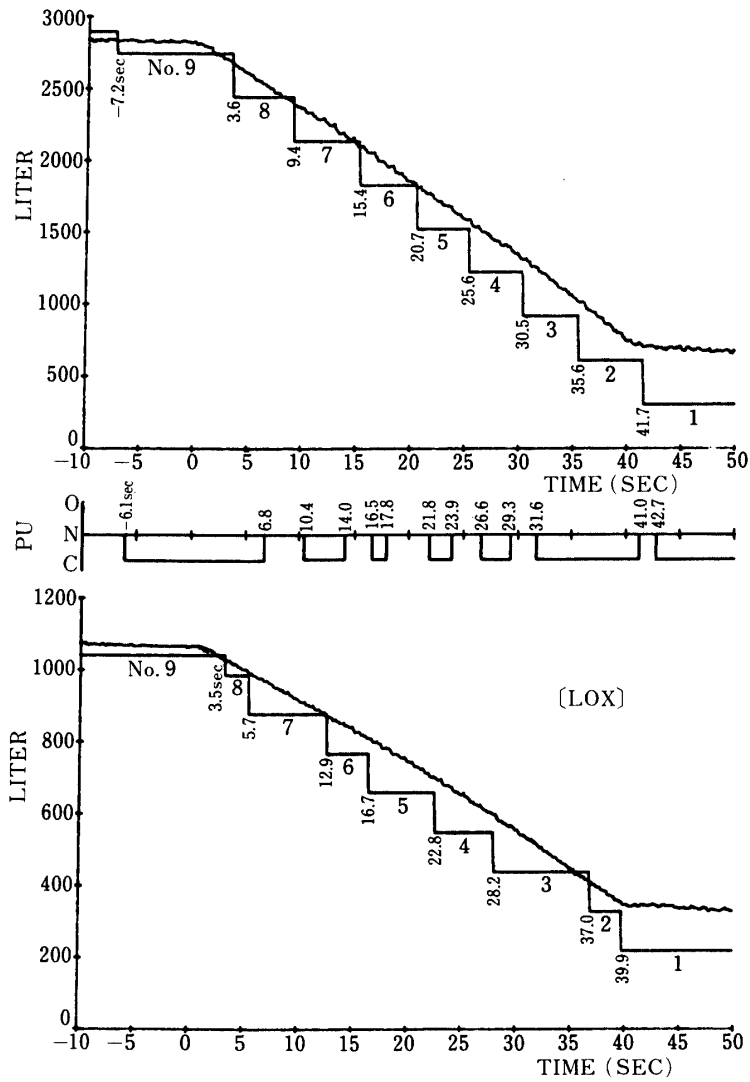


図3 HST 1001-1-3における液位測定とPU制御

御に HW を適用した所、不具合が続出した(昭和 56 年推進系シンポジウム)。その原因はやはり爆発の点火源となることを恐れて電流を絞り過ぎたため“温度計”的に作動して「にせ」信号を多発した事にある。電流値を上げる事によって、この不具合は解消したが、保安上の見地からはタンク内のガス置換が完了するまでは、計器調整のためと言えども通電しないこと、液面通過後のフィラメントには寿命を伸ばす意味でも通電しないことが必要な注意事項である。その後 HST 1001-1 では水素側の HW は満足な結果を示したが、LOX 系での静電容量との対応が良くなかった。この原因も酸素中でフィラメントが過熱、断線することを恐れて小電流としていた事にある。TC 1002-1 では電流値を 180 → 250 mA に上げ、静電容量とも良い一致を得ている。なお HW についての詳細な検討を付記に付しておく。

3. パルスカウンタ

液水実験開始当初は液位計測の信頼性が乏しかったので、タービン流量計 (Cox Instrument 社製、極低温流体用) の工業計器出力から得られるパルスを積算して排液時の全流量を確認し、少くとも非常停止のバックアップとすることを考えた。図 4 はその回路で EG-TS-2, TC 701-1 で試用した。同回路は積算値を LED display T 314 にデジタル表示すると共に、ペンレコにもアナログ表示し得る。実験例として TC 701-1-2 を図 5 に示す。図 5 ではタービン流量をデータレコーダに収録、再生しピーク毎に積分計 (タケダ理研 TR 2122) で積分したものと、実験時に各シーケンス毎にパルス数をメモしておいたものを

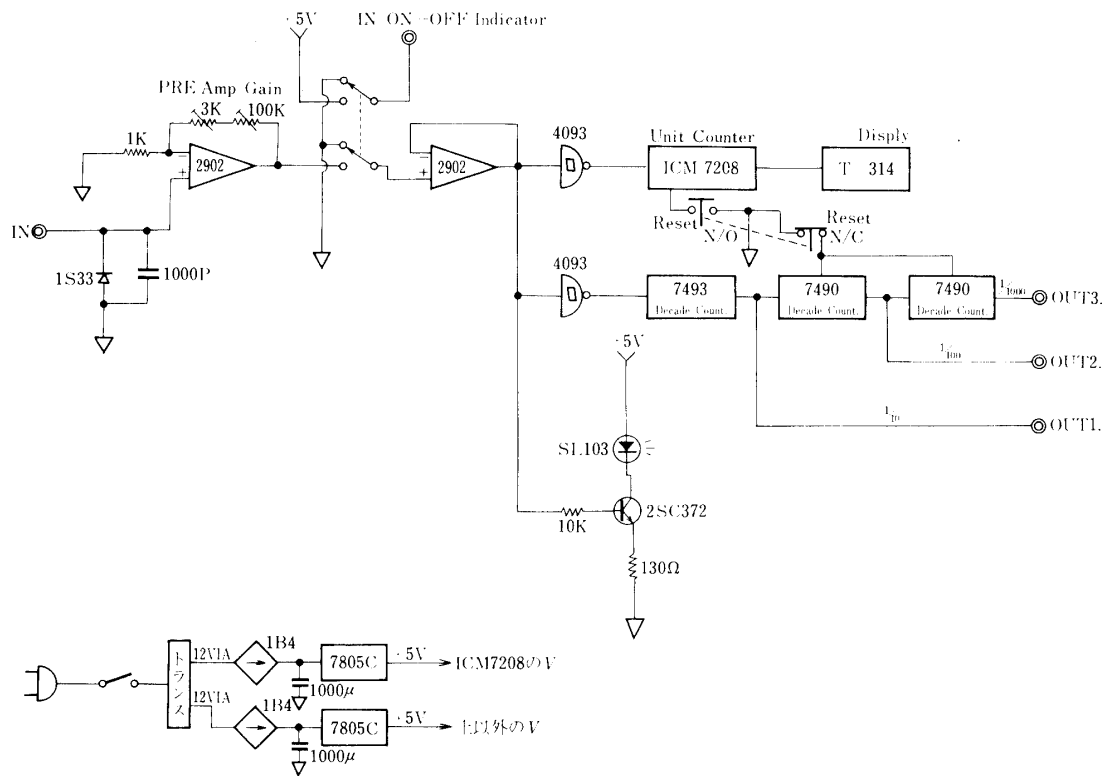


図 4 パルスカウンタ

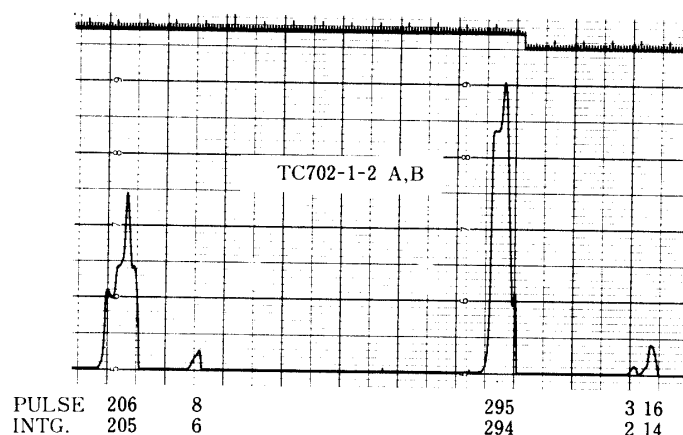


図5 流量積分とパルスカウンタ

各ピークの下欄で比較してあり、かなり良い一致が見られる。ただし現在ではこの方法は採用していない。

4. 差圧計

最も簡単な液位計である。静止時には信頼性が高いが実用してみると動的測定には全く不向きである。ターボポンプ試験設備では圧力の微小変動にも過敏で差圧計の指示は激しく変動する。その一因は差圧取出用配管内の液柱振動（沸とう現象も加わっている）にあるので、エンジン試験設備ではタンク下部より配管を外部に直ちに取出し、枝管内に液柱が残らないようにして振動を抑えた。ただ、枝管内が完全にパージされないため、水素系で窒素による試験を行なった後、水素による試験を行なうと目づまりを起す。また気柱の密度変化を補正する必要もあり、解析が面倒な上、信頼性（オーバーシュートするから）が乏しいので、静電容量、ホットワイヤ技術が進歩した現在では全くの参考値の意味しかない。

II. 定量的検討

1. 静電容量と流量積算値

a) TP 703-1 静電容量の計測値 L とタービン流量 QT の積算値との差を、初期静電容量を L_0 とし

$$\Delta L = L - (L_0 - \Sigma QT \cdot \Delta t) \quad (2)$$

をリアルタイムで AD-DA した結果が図 6 である。ターボポンプ試験設備系タンクであるから渦流はなく、排液中（ -20 s \sim $+20$ s）の間 $\Delta L \approx 10$ l 程度である。

b) TC 1002-1 静電容量の計測も良好でタービン流量計の積算値との比較が詳細に行われた。なお、この実験では液位をシャープ・マイコン、流量をソード・マイコンで計測したので、マイコン間のデータ伝送を RS-232 C インターフェイスを利用し、電話線を介して音響カプラ（EPSON の CP-20 を使用）による方法で試行した。RS-232 C 方式では 300

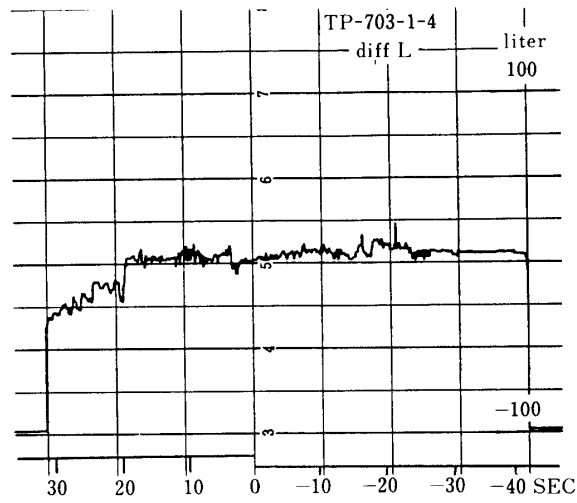


図 6 静電容量と積算タービン流量 i)

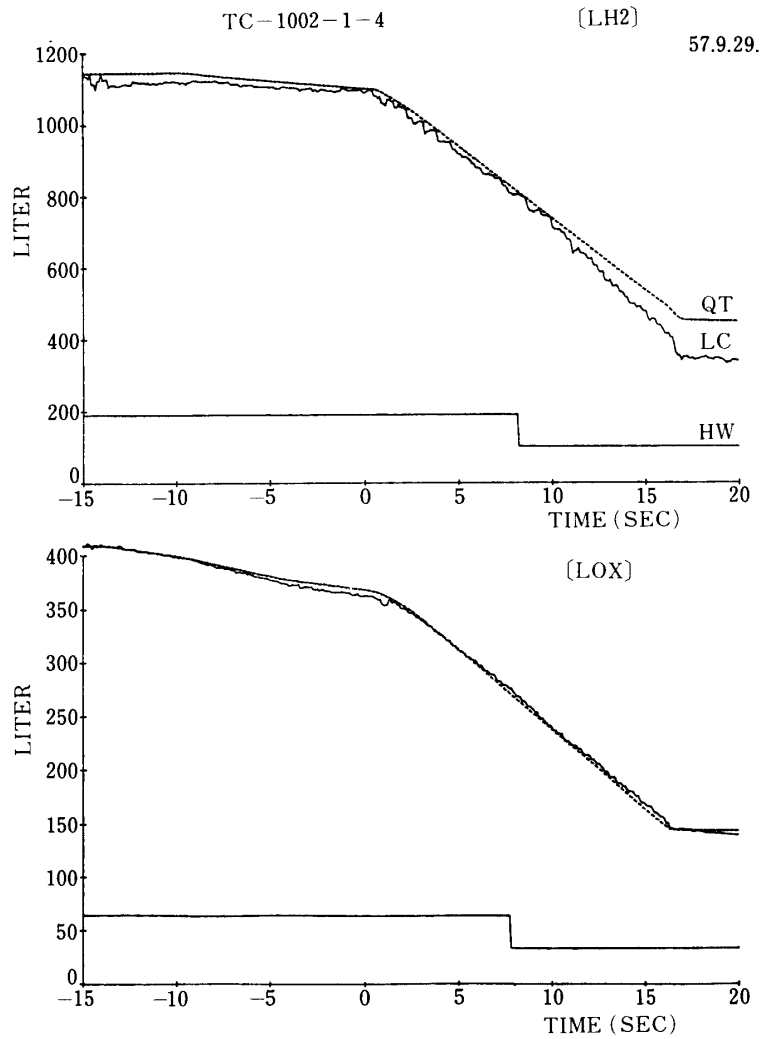


図 7 静電容量と積算タービン流量 ii)

BAUDの速度であるため、シャープ・マイコン側はアセンブラ言語でプログラム、ソード・マイコン側はTBASIC語でプログラムした。

データ伝送手順は図8に示されているが、誤伝送のないよう、SOH, STX, …, NAK等のJISで決められているコードを用いている。この伝送方式は大型計算機のTSSのインテリジェント末端としても使用できる。

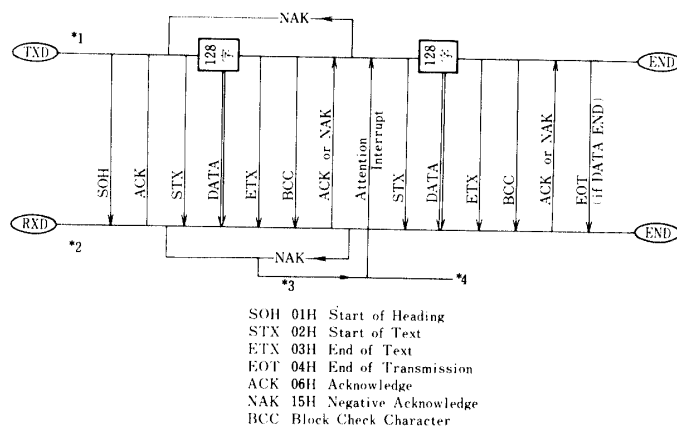


図8 データ転送

実験結果の1例が図7に示されており、液水側で約116 l 静電容量による消費量が多く表示されている。この原因の一つはTC-1002-1では加圧供給方式を採用しているため、圧送時はタンクは約55 Kg/cm²に加圧され、誘電率は較正曲線を描いた時と異なる値となる事にある。すなわち、図7の静電容量による液位は(1)式で1気圧20.4 Kの $\epsilon_L=1.227$ 、1気圧300 Kの $\epsilon_G=1.000$ を用いて画かれている。従って排液開始時(図7の左端) h_1 と排液停止時(図7の右側平坦部) h_2 との間の総流出量を考えると、みかけの容量変化は

$$\Delta C = \alpha(1.227 - 1.000)(h_1 - h_2)$$

であるが、この値は停止時の真の液位を h_2^0 とすると(排液開始時の静電容量を基準に流量積算値をセットされているので h_1 は一定と仮定する)、高圧での誘電率^[3]を用いた式

$$\alpha(\epsilon_L - \epsilon_G)(h_1 - h_2^0)$$

に等しくなければならない。～55 Kg/cm²の $\epsilon_L(20K)=1.250$ 、 $\epsilon_G(300K)=1.0128$ を用いると、静電容量による変化量は808 lより770 lに修正され、流量積算値よりの値692 lに接近する。タンクの収縮分7 l、渦流による補正42 lを差引くと、両者の差は29 lとなる。この差は図7からも明らかになように、排液開始時の静電容量の値を雑音にまどわされて低く見積り過ぎたためであり、この事実を考慮すると、両者の差はほぼ完全に消失する。

水素系静電容量に対する加圧効果は従来より知られて[4]おり、排液時の較正曲線は注液時と異なるものを用いて対処して来たが、今回の入念な流量計とのクロスチェックで、加圧効果の実体を明らかにすることができた。当然液酸素系[5]でも加圧効果が考えられるが

	$\epsilon_l(90K)$	$\epsilon_g(300K)$	$\Delta\epsilon$
校正時 1Atm	1.48699	1.00048	0.4865
排液時 50Atm	1.49261	1.02501	0.4676

であるため、排液時の方が $\Delta\epsilon$ 小で渦流効果に相殺される。液体窒素については誘電率の詳細値が不明で検討し難いが、校正曲線が注液時と排液時とで大差のないこと（図9参照）から誘電率の差も小さいと推定される（EG-TS-3では流量積算値とほぼ完全に一致している）。

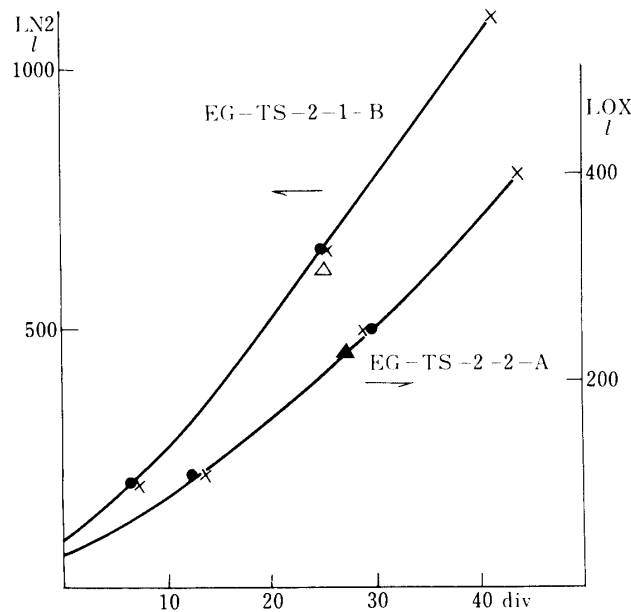


図9 静電容量とホットワイヤ（校正曲線に当る）

2. ホットワイヤと静電容量の比較

通常はホットワイヤはタンク内上中下の3点しか設置されていないため、静電容量との対応はとり難い。というのは排液開始前に液位は上のHW以下となっていることが多く、停止は下のHW通過前に実行されるから2コのHWを1回の実験で通過する例が少ないからである。スタンド機能試験のように非常停止をかけない場合等の少数例について調べてみると、図9のEG-TS-2では液体窒素を流体として用い良い一致を得ている。先にも述べたように液体窒素では静電容量に対する加圧効果が小さいからである。なお図9中の△印は静電容量の同心円筒電極を保持するため、電極の長手方向中央部に入れたテフロンスペーサによる段差で、校正点が1点増設された事に対応する。

システム試験、ステージ試験ではタービン流量計は取外し、代わりにタンク内の液位変化量より、残液量に応じて液水、液酸の一方を多く流すというPU制御を試みている。この場合、HWは固定値を与え校正の必要がないこと、信頼性も高いことから、LH₂側11点、

表1 各種計測法の比較

テスト名	タンク	流体	秒時	流量積分		差圧計	静電容量	
				秤量	パルスカウンタ			
EG-TS-2-1 A	TK2	LN ₂	0~30s	264 ℓ	—	264 ℓ (236)*	254 ℓ	
EG-TS-2-1 B	TK1	LN ₂	-60~100	842	866	760 (722)	850	
	TK1	LN ₂	0~100	764	786	—	750	
EG-TS-2-2 B	TK1	LH ₂	0~30	610	631	—	620	
EG-TS-2-2 A	TK2	LN ₂	0~30	298	—	308 (289)	290	
EG-TS-2-2 C	TK2	LN ₂	0~30	312	—	297 (278)	300	
TC-701-1-1	TK1	LN ₂	0~40	280	280	230 (200)	280	
	TK1	LN ₂	100~140	280	276	250 (230)	295	
	TK2	LN ₂	0~40	316	—	310 (300)	300	
TC-701-1-2 A	TK1	LH ₂	0~20	313	310	—	320	
	B	TK1	LH ₂	130~150	210	206	—	190
TC-701-1-3 B	TK2	LOX	0~40	327	330	320 (290)	310	
	A	TK2	LOX	0~40	329	329	326 (295)	320
	C	TK2	LOX	0~40	317	320	330 (300)	305
TC-701-1-1(3)	TK1	LN ₂	0~20	277	283	—	270	

LOX側10点のHWをタンク内に設置して、これを液位の基準とした。従って静電容量との対応もとり易くなったが、HST 1001-1-3の例では(図3)、LH₂側はかなりよい一致が見られる。これは渦流防止板に工夫が加えられていること、ターボポンプ供給方式でタンクも数気圧程度にしか加圧されないためであるが、LOX側はHWに流した電流値が小さく、この場合は信頼性に欠けている。

3. その他

各種の液位計測法を動員して相互比較を試みた例を表1に示す。このうち秤量法とはタービン流量のペンレコ記録を切取ってその面積を秤量して求めた積分値である。また差圧計の()の中の値は気柱の比重変化を補正しない時の値を示す。差圧法を除けば相互の一致はかなり良いと言えよう(昭和53年頃の古いデータで、今ではこれよりもかなり計測精度は向上している)。

III. PU制御

フライトを想定するとタンクの液水、液酸をほとんど同時に使い切る事が最も望ましい。推進薬消費量をこの目的に合わせて制御するのがPU制御で、我々の用いたシステムでは液水は定常流量で流し、液酸の方についてのみターボポンプ下流のPU弁を作動してタンクへ逆戻りする量を調節して、上記の目標を達成する方式を採っている。このPU弁を操作するための信号は両タンクの液位を比較して発せられるが、各種の方法を模索したあげく、タンク内に10数点設置されたホットワイヤHWを基準にとって、その通過時間の関係から液酸の消費量を調節するのが最も確実であるとの結論に達した。

今LH₂、LOX側のHW番号M_H、M_Oをタンク下端から順次につけておき、

$$\begin{array}{ll}
 M_H > M_0 & \text{PU 弁開} \\
 M_H = M_0 & \text{PU 弁中立} \\
 M_H < M_0 & \text{PU 弁閉}
 \end{array} \quad (3)$$

の信号を送るようあらかじめ回路を組んでおけば、マイコン等をわずらわさずに単純に HW 番号の比較により PU 弁を ON-OFF させることができる。図 10 はこの方法を用いた結果、内圧 P_c にその影響が表われた例である。この場合には、HW が図 11 に示すようにやや無称序に変動したにも拘らず、それに極めて忠実に PU 弁操作が行われている事がわかる。はじめこの HW の変動は液面のゆれによるものでスロッシング防止板を入れる事により改善されるであろうと予測していたが、HW が大きい番号の方、いいかえれば高液位の方にも変動していることから、現実の HW 取付間隔から考えて説明し難く、単なるスロッシングとして見逃す訳には行かないと判断され、その防止対策、いいかえれば図 10 の「ひげ」除去法を考える事にした。

HW 単独で液位が正しくどこにあるかを判定するため、隣り合う HW の指示する電圧値の中央値を判定基準 W_i とし、 W_i を超えていれば HW 番号 $M=i+1$ に液位はありと規定して、この液位モニタを燃焼実験開始 $x-5$ sec 前まで続け、燃焼実験スタート時の HW 番号 M_H, M_0 を確認する。次にモニタ用のプログラムから本番用のプログラムに切替えて判定電圧 W_i を切ったまま、その状態が 1sec 以上続けば液位は HW 番号 $M=i$ に落ち着いたと判定するが、それ以外はすべて「偽」信号として無視することにした。すなわち図 12 の信号①は論外であるし、②、③も 1 sec 以上経過していないので無視され④のみが正当と判定される。この判定基準を用いて実験した 1 例が図 13 の HST 701-2-1 で HW が

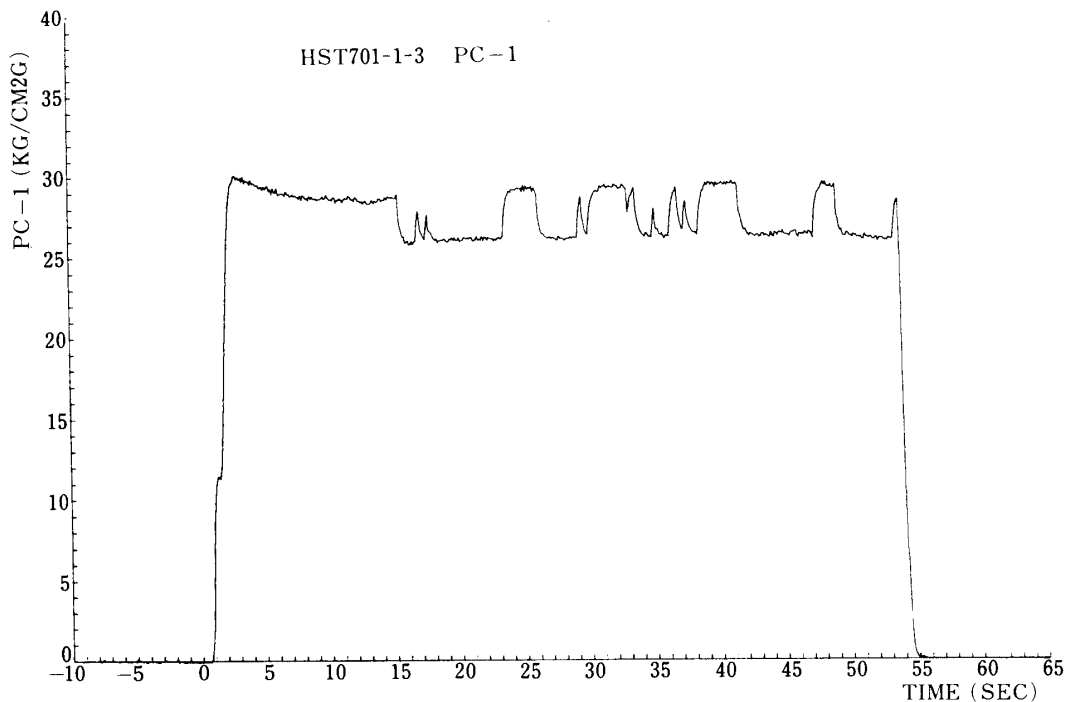


図 10 PU 制御に伴う内圧の変化

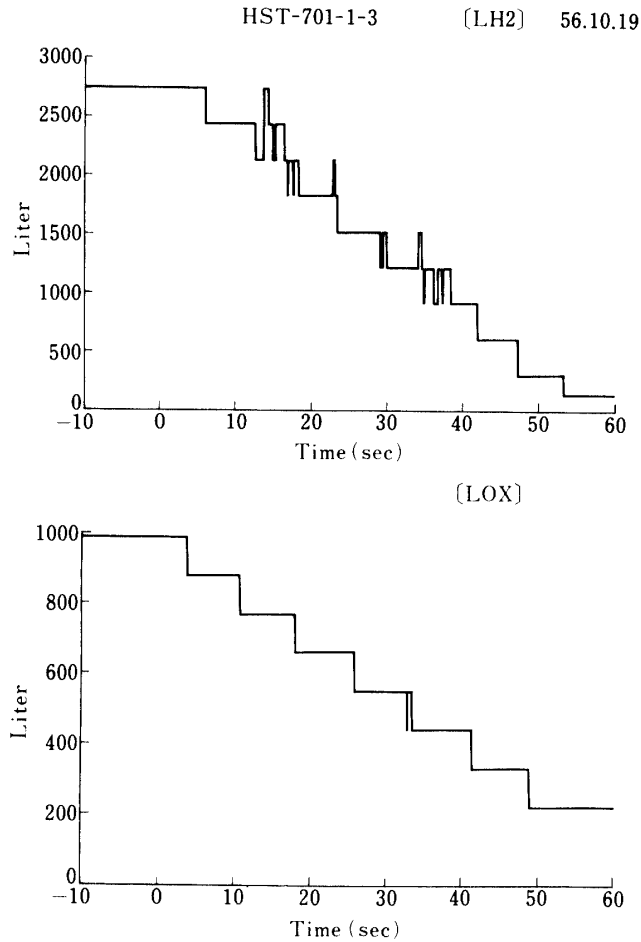


図 11 図 10 に対応する HW の指示値

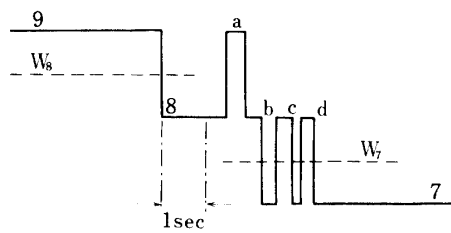


図 12 判定基準

激しく変動しているにも拘らず、「偽」の信号を無視して PU 弁操作信号が的確に送られている。尚図 13 の PUY は PU 弁中立-開を, PUX は PU 弁中立-閉の信号に当り, ステップ上下の肩付きの番号は PU 弁操作信号を出した時の HWH, HWO の番号を表わし, PU 弁操作の論理(3)と一致している。先に示した図 3 の HST 1001-1-3 においても PU 制御が行われ(図の中央 PU と記した欄)極めて良好な結果が得られた。

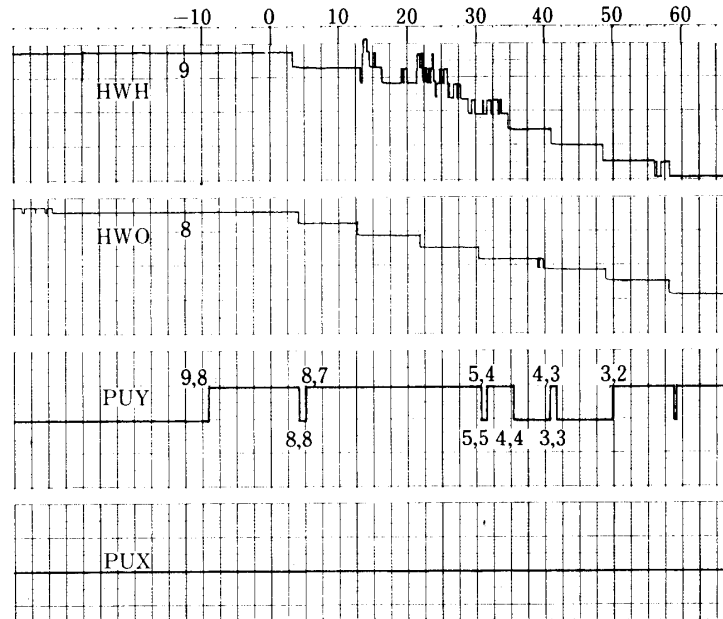


図 13 HST 701-2-1 における HW と PU 制御

IV. 液位に関連した計測

1. 流量と O/F

液位の計測の一環として流量の計測についても我々の研究室でその開発に協力した。当初はタービン流量計 (Cox Instrument 社製極低温流体用) の工業計器出力がペンレコまたは CPU に入力されているに過ぎなかった。しかし、この工業計器はノイズを抑えるために過大なフィルタが入れてあり、レスポンスは秒単位の遅いものであったので、エレクトロニクスショップで F/V 変換器 (図 14) を作成した。この変換器は 20 msec の時定数で 54 年の TC 701-3 以降使用され続け好成績を治めている。系統図は工業計器指示計と併用するため下記となっている。

タービン流量計—スケラ— $\left\{ \begin{array}{l} \text{F/V (工計)} \text{—指示工業計器} \\ \text{アイソレーター—F/V (ショップ)} \text{—計測ライン} \end{array} \right.$

一方燃焼器試験では、液酸、液水の重量流量比 O/F をモニタすることが望ましく、タービン流量のみでなく、流量計付近での密度を知るために、温度、圧力をも独自に計測し、リアルタイムでデータ処理する必要がある。密度は圧力、温度の関数であるから正統法としては、両者を計測して内挿法で密度表より密度を計算すべきであるが、演算時間が長く、リアルタイム指示には不適である。圧力は実験時はほぼ一定しているから、圧力値には計画面値を採用し、温度のみを変数として簡単な 2 次式で密度を算出した。この場合近似式の適用範囲は狭く極限されていることに注意を要する。ES 701-1, 2 の例では

$$\left. \begin{array}{l} \text{LH}_2 \text{系 } 20\text{-}28 \text{ K } 6 \text{ 気圧 } \rho = -0.03871V^2 - 0.3926V - 0.9110 \\ \text{LOX } 90\text{-}110 \text{ K } 6 \text{ 気圧 } \rho = -0.005026V^2 - 0.09908V + 0.8868 \end{array} \right\} \quad (4)$$

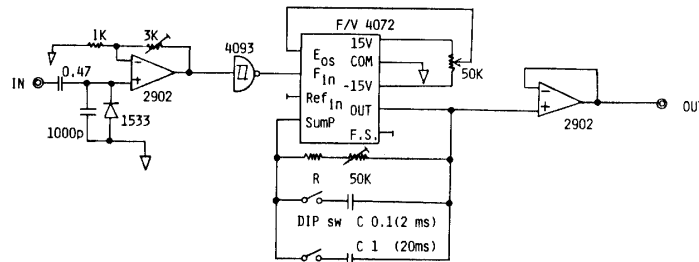


図 14 F/V 変換器

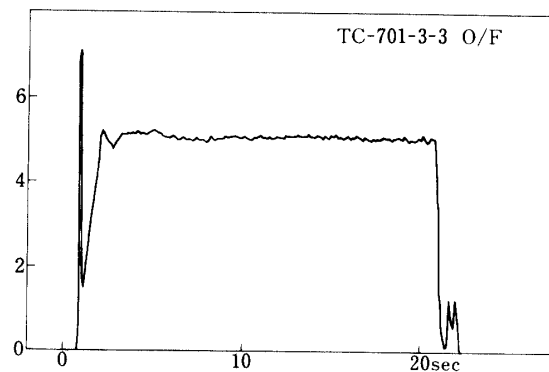


図 15 O/F リアルタイム表示

を用いる。ここに V は温度の増巾後の電圧で $-5 \sim +5$ V に変動する。O/F 算出に当っては温度の電圧値をそのまま用い、実単位 (deg K) に換算せずに上式で密度を求めているが、これも演算時間を短縮するためである (ソード・マイコンで 0.1 s 間隔で AD し、計算後アナログ出力を XY プロッタに画く)。ベンチュリ流量も O/F モニタに使用できるが、開平の演算時間が長いので不適當である。図 15 を画く場合、液水流量の小さい所では O/F が大きく変動しグラフが見づらくなるので、液水流量 1 l/s 以下では O/F = 0 を指示するようにプログラムしてある。

2. 噴射器差圧と流量

流量は元来オリフィス前後の差圧から求められる。ことにシステム試験、ステージ試験ではシステムの構成上、タービン流量計、ベンチュリ流量計は取払われるので、流量を他の方法で求める必要が生じる。噴射器圧と燃焼室圧との差圧もこの意味で流量計測に適しているが、管構造燃焼器 TC 701, TC 1001 では噴射器オリフィスの流量係数が不可解な値を示すとして、システム試験以前での検討が充分に行われなかった (システム試験以前ではタービン流量計も設置されているので、噴射器差圧との相関を求めるのに好都合である)。従ってシステム試験以降では止むを得ず流量の基準にタンク液位変化を採り、ターボポンプ回転数を流量瞬時値の代りに用いる等の対策が採られた (棚次ほか)。この経緯にかんがみ、チャンネル構造の燃焼器の単体試験ではタービン流量計も復帰しているのので、これを基準にして噴射器の流量係数を確認する事にした。

定常燃焼では、上流のタービン流量計で求めた重量流量 (流量計付近での密度の計測も

必要となる) Q は, 噴射器での差圧 Δp と密度 ρ とにより

$$Q = C_d A \sqrt{2g \cdot \Delta p \cdot \rho} \quad (5)$$

で結びつけられ, こゝに C_d は流量係数, A は流路の断面積である. 問題は断面積 A のとり方で, 実用上はとにかくその燃焼器に固有な値としておけばよい. しかし, 従来は LOX 系では噴射管中の最も細い部分の断面積を採用したため $C_d > 1$ の異常を示した. 差圧を計測している位置から考えると, 噴射管の奥の方にあるオリフィス部よりは噴射管出口の断面積を採用した方が合理的と見られるので, このように改めると $C_d < 1$ の正常値となる.

今一つ噴射器差圧より流量を求める際の難点は, 噴射器圧, 燃焼室圧を個別に求めることによる誤差の拡大で, この難点は両者間の差圧を差圧計で直接計測することによって現在では解決している. また密度 ρ の算出に当たっても, 水素側は低温になると理想気体の状態方程式が適用できなくなるので, 温度-圧力-密度の表に戻って折線近似で正確に求める必要がある.

これらの配慮のもとにチャンネル構造燃焼器 TC 1002-1-1-4 で実測された C_d 値を温度の関数として図 16 に示す. 流量係数は今までの管構造燃焼器での経験から噴射器の温度に依存する事が判っていたので, このように図示した. 参考までに採用した断面積の値は

水素例…噴射孔 11.22 cm^2 に多孔質板の次を加味して 20 cm^2 と仮定した.

酸素例…オリフィス面積 3.3 cm^2 の代りに出口面積 10.18 cm^2 を採用した.

で [これは修正し過ぎである. 正確な取扱いは別報にゆずる], 図 16 は

$$\left. \begin{aligned} C_d(\text{GH}_2) &= 0.3356 + 0.89635 \times 10^{-3} \times T(\text{Hinj}) \\ C_d(\text{LOX}) &= 0.3006 + 0.11531 \times 10^{-2} \times T(\text{Oinj}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

で表わされる. [付記 2 参照]

3. 温度の実単位表示

当初は O/F モニタの必要上タービン流量計付近の温度のみを計測していたが

○従来の CPU (TEAC DP-1500) では電圧打出しのみで, 温度班が実単位換算に多大の労力を割いていた.

○温度計測 (データ処理を含めて) の信頼性が乏しく, しかも解析に時間を要したので不具合個所の発見が遅れ, 次の実験のパラメータ決定に支障を来たす.

○ターボポンプの運転, 予冷終了の判定に多数点の温度を実単位でモニタすることが不可欠である.

ことなどが重なった. 温度のデータ処理点数が徐々に拡大し, マイコンを総動員して, その一部はカラーディスプレイに使用するまでになった. ししかし新 CPU (ファコム U 1500) に切替えられてグラフィックディスプレイで一括処理できるようになったので, 現在では全く無縁となっている.

a) パネル表示

タンク温度のみをソード・マイコンで処理し実単位換算した値を口頭通報していたが, TC 701-2-1 よりマイコンのアナログ出力を利用し

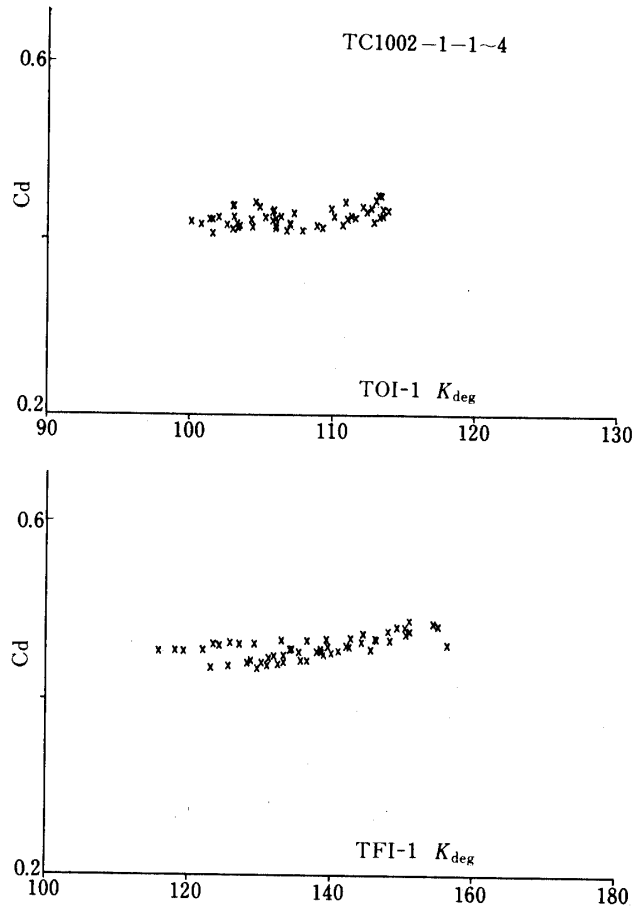


図 16 TC 1002 の流量係数

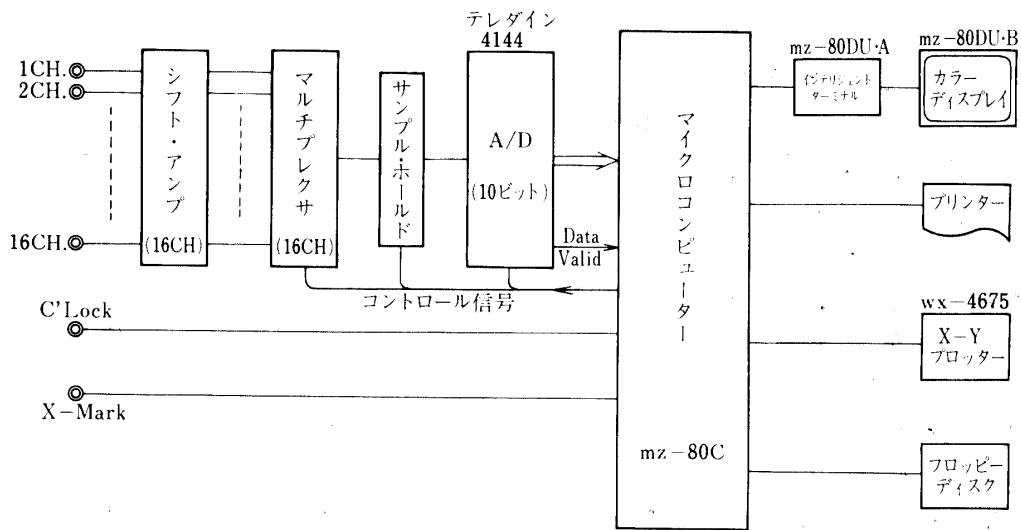


図 17 温度データ処理系統

ソードマイコン——シフトアンプ——アテネータ——	パネルメータ		
-5~+5 V	0~10 V	0~2 V	1.999 V
アナログ出力	シンキー社 SC 51		

の系統によって操作室のパネルメータに表示した（小数点を移して 20.4 等と表示）。マイコン自体は O/F モニタ用のものであるから、本番の X-15 s でパネル表示から O/F 計測に切替えられるようにプログラムが組んである。

b) シャープ・マイコンによる温度データ処理

図 17 の系統図でデータ処理している。温度増幅の出力電圧は -5~+5 V で、シャープ・マイコンの入力は 0~10 V であるのでシフトアンプで適合させる。Clock の立上りをマイコンが検出するとマルチ・プレクサに 1 CH をセレクトさせ、入力をホールドする命令をサンプル・ホールドに出す。（AD 変換の間、入力を一定にするため）。次に AD 指令が出される（所要時間 2 msec）。AD が終了すると DATA VALID 信号をマイコンが受取り、メモリに収録する。収録後マルチプレクサのチャンネル番号を+1し、同様操作を 16 CH まで反復した後、次の Clock 信号を待つ。シャープ・マイコンは 8 ビットであるので 10 ビット AD のために、1 バイトづつ 2 度データを入力する。デジタルデータはメモリに LOW-HIGH の順で収録されるが、HIGH は 2 ビットのみ使用されているに過ぎないから、その MSB を X=0s の X-MARK 識別用に使用する。

上記回路により温度データの収録、解析、表示に当って来たが

- TP-1001-1 よりカラーディスプレイを採用。全温度範囲を 10 区間に分けて折線近似している。予冷終了後、TV 画面を記録写真に撮ってから本番に移行。
- ES 702-1 より予冷 10 s、本番 1 s 間隔で表示。予冷-本番の移行を円滑に連結。
- GG1001-1、GG-703-2 では折線近似を使うと図 18 に示すように大幅な誤差が金-鉄熱電対以外で発生する事が明らかとなったので、低温域では折線区間を狭くする方式に変えた。演算時間の関係からシャープ・マイコンではアセンブラ語を用いているので、プログラムは簡単な演算式のみを用いて作ってある。
- TP 1002-1 より予冷時のデータをディスクに収録し、本番に直ちに移行できるようにした。従って TV への再生、ハードコピーの作成が容易となった。プログラムも不等間隔内挿法用の Aitken 等法⁶⁾に改めた。不等間隔内挿法としては Lagrange 式が有名であるが、同式を不注意に採用すると ES 702-1 のタンク温度で見られるように発散する。これに対し Aitken の方法では同一式を用いるが、内挿しようとする値に最も近い基準点から順次計算の項数を増して行き、収束した所で計算を打切れるので発散しない。
- 現在では温度のデータ処理は CPU に一任されているが、実験後のデータ解析は Aitken 算法を用いている。

図 19 は予冷時の温度モニタをテレビ画面にカラーディスプレイする一方、メモリに蓄え、実験終了後ハードコピーとして出力した 1 例である。

なお温度データ処理に当って、特に較正值のマイコン取込みに当って温度班の絶大な協力を得た事に感謝する。

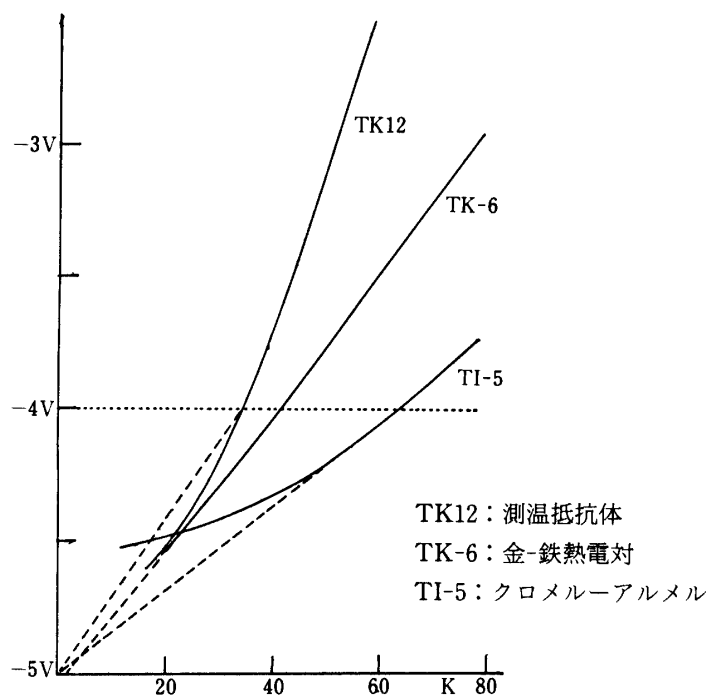


図 18 低温域における各種センサの非直線性

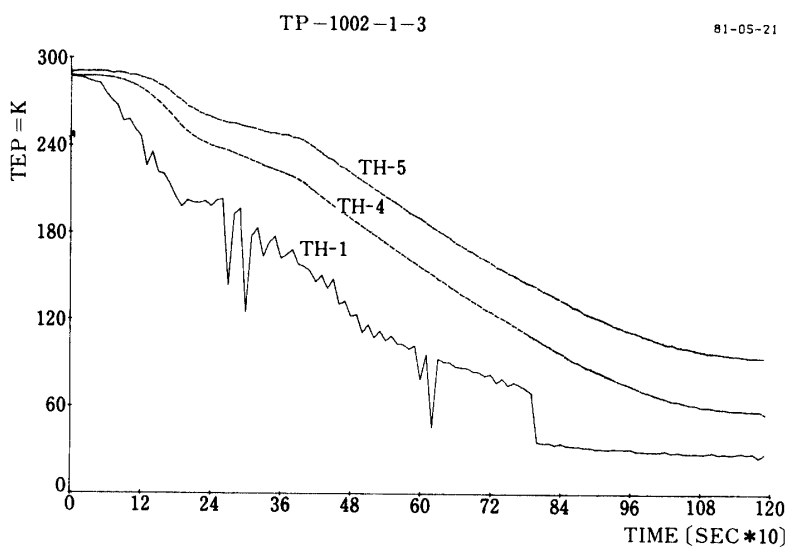


図 19

付記 1.

ホットワイヤは気液での熱伝導度係数の差を利用して液面を検出するもので、温度センサではない。細線の熱伝導度の式(7)を用いると、長さ l 、抵抗 R のホットワイヤに電流 i を流した時

$$i^2 R = 0.4\pi\lambda l(T\omega - T_0) \quad (7)$$

で与えられる温度 $T\omega$ までホットワイヤ自体が加熱される。こゝに T_0 は周囲温度、 λ は熱伝導度係数でその値は表 2 に示してあるように液体では気体よりおよそ 1 桁大きい。

今、抵抗 R も温度係数 α を用いて周囲温度 T_0 の時の抵抗値 R_0 を基準にとり

$$R = R_0[1 + \alpha(T\omega - T_0)] \quad (8)$$

と書きかえると、(1)式は

$$T\omega - T_0 = i^2 R_0 / [0.4\pi\lambda l - i^2 R_0 \alpha] \quad (9)$$

となり、熱伝導度係数 λ が大きい液体の方が $T\omega$ が小さく、従って抵抗 R も小さくなり、この事実を利用して、たとえ液体および液面に接する気体が同じ温度 T_0 でも、抵抗の変化を利用して液面を検出し得る。

細い金属線を張り渡した場合には(7)式の l には実長を用いればよいが、細線を 1 mm 程度のコイルに密に巻いたガスクロマトグラフ用フィラメント等に対しては、この l を推定する必要がある。

そこで 7 トンエンジン冷走試験において GC フィラメント(タングステン線)で液面を検知する本来の計測と併行して、注液前のタンクが予冷されている状態での気体中、注液が開始され HW が液中に没して安定した時、および排液時に HW が液面より気中に出た直後等について抵抗を 0.3 mA の低電流でマルチメータにより測定し、周囲温度とホットワイヤの抵抗値(低電流で自熱効果が無視できる時の)の関係を求めると共に、ホットワイヤが液面を通過する前後でのブリッジ非平衡電圧値を測定した。

一方冷走試験で用いたと同じブリッジ回路に同一電圧をかけ、ホットワイヤに代えて抵抗箱により、冷走試験におけると同じ非平衡電圧を再現するに必要な抵抗値を求めた。

(1)式より実行長 l を求めるには、何よりも先ずホットワイヤ抵抗値から、ホットワイヤ自体の温度 $T\omega$ を知る必要がある。常温以上のタングステンの温度係数は

$$\alpha = 0.0045 \text{ (20°C 基準)}$$

とされている^[8]から問題はないが、低温側の値は不明である。従って冷走試験で測定してお

表 2 熱伝導度係数 λ (mwatt/cm·K) の値

	液	体	気	体	気体 (常温, 1 Atm)
水素〔9〕	1.0	(20 K, 1Atm)	0.17	(20 K, 1Atm)	1.8
酸素〔9〕	1.515	(90 K, 1Atm)	0.0854	(90 K, 1Atm)	0.26
窒素*	1.3	(77 K, 1Atm)	0.075	(77 K, 1Atm)	0.25
ヘリウム**			0.26	(20 K, 1Atm)	1.5

* J. E. Jensen, R. B. Stewart, "Selected Cryogenic Data Notebook", Brookhaven Nat. Lab., (1966).

** Landolt-Bornstein, "Zahlenwerte u. Funktionen", 6 Aufl., IV-4-b-teil P. 581.

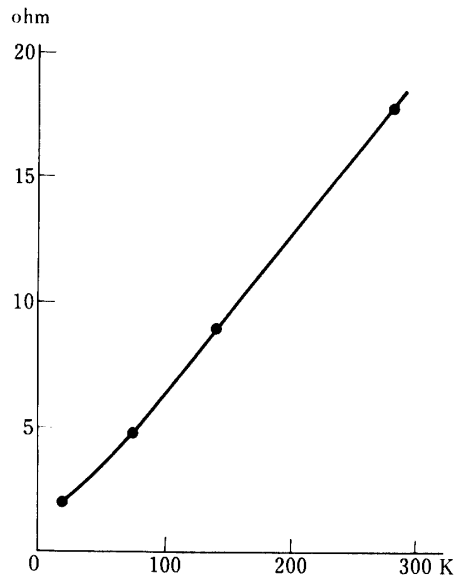


図 20 抵抗線による温度測定

表 3 ホットワイヤ測定例

テ ス ト	流体	電源電圧	非平衡電圧 E	Eを与える 抵抗箱の値*	電流 i	抵抗よりの T_{ω} 計算値	(1)式よりの 計算 T_{ω} 値
a. EG-TS-2-1-B	LN ₂	8 V	L -1.30 V	5.1 Ω	255 mA	82 K	88 K
			G 1.35	30.3	140	441	
b. TC-701-1-1	LN ₂	4.6	L -0.746	4.9	140	80	80
			G -0.09	12.5	115	200	
c. EG-TS-2-2-B	LH ₂	12	L -2.74	2.6	410	32	39
			G 0.55	17.4	270	278	
d. TC-701-1-2 B	LH ₂	8	L -1.84	2.5	275	28	29
			G -0.57	9.5	220	152	

* 冷走試験でのリード線抵抗 1Ω を差引いた値

いた低電流での抵抗値と温度との関係を基にして大電流通電時の T_{ω} を導くことにした。使用した較正曲線は図 20 に示されているが、温度の計測は工業計器指示値および、常圧での LH₂, LN₂ 沸点をそのまま採用しているため、今後更に精度を上げる必要はある。以上のようにして求めてホットワイヤの通電時の温度 T_{ω} は表 3 の右より 2 番目の欄に示した。これを用いて実効長 l を求めるに当たっては、温度差の小さい場合は誤差も大きいので、気体中での測定値のみを取出して論ずる事にする。この場合、低電流での抵抗値が液面通過によって変化しなかった事から、周囲温度 T_0 は気、液ともに LH₂ 20 K, LN₂ 77 K と仮定した。このようにして求めた実効長 l は

a.	b.	c.	d.
17.3	14.3	16.3	23.0 cm

で、かなりのばらつきを持っている。しかしこの平均値 $l=17.8$ cm を用いれば(7)式を用

いて逆に表3の液中での温度差, 更にはホットワイヤの温度 T_w を決定する事ができる.* 得られた結果は表3の最右欄に示されているが実測値にかなり近く, 実効長 l の推定が, ほぼ妥当なものと結論できる. それゆえ, 上記の計算法に従えば, ホットワイヤ使用時の実験時の条件に合わせて, ブリッジ非平衡電圧をあらかじめ計算でき, 調整その他も極めて容易なものとなる.

付記2.

一般に1次式または2次式近似に最小二乗法を適用する場合, 行列式を用いて計算される事が多く, ほとんどの数値計算に関する成書には, この方法しか紹介されていない. しかし, この方法は時によっては分母がゼロに近付き, 精度的にも不良となる. この難点は直交多項式を用いれば克服され, 多数の提案があるが, 本文では簡便さから Forsythe の多項式を用いる. 一般の成者には余り記載がなく, 原文献も入手し難いので, Fox の引用している Forsythe の多項式を再録すると, 例えば2次式では

$$\begin{aligned}\phi_0 &= 1/2 \\ \phi_1 &= x - \alpha_1/2 \\ \phi_2 &= (2x - \alpha_2)(x - \alpha_1/2) - \beta_1/2\end{aligned}$$

を用いて

$$y = b_0\phi_0 + b_1\phi_1 + b_2\phi_2$$

とおく. これらの式に表われる諸係数は点数を N として

$$\alpha_1 = 2\sum x/N$$

$$\alpha_2 = 2\sum x \cdot \phi_i^2 / \sum \phi_i^2$$

$$\beta_1 = 4\sum \phi_i^2 / N$$

$$b_i = \sum \phi_i \cdot y / \sum \phi_i^2$$

で与えられる. [L. Fox, D. F. Mayers, "Computing Method for Scientists and Engineers" (1968), P. 116~118.]

* 以上の計算では常圧の熱伝導度係数を用いている. タングステンホットワイヤ通過は残液処理時に実験されており, タンク圧は高くはなく, 系全体が平衡に達しているとも思われないうこと, 液温も大気圧下の沸点に近かった事などからこのような近似計算を行なった.

参 考 文 献

- [1] 逆の説もある. H. Cohn, W. E. Dunn, Contr. Eng., Jan. 51 (1968).
- [2] 倉谷健治ほか, 推進系シンポジウム, 昭53年 P. 203.
- [3] L. A. Weber, NASA SP 3089 (1975).
- [4] H. M. Roder, NASA SP 3083 (1974).
- [5] 誘電率は H. M. Roder, L. A. Weber, NASA SP 3071 (1972).
- [6] 吉沢正, 岩波講座, 基礎工学4, 数値解析 P.45.
- [7] 機械学会編, 伝熱工業資料 P.36 (1966).
- [8] C. D. Hodgman et al., "Handbook of Chemistry and Physics" (1961).
- [9] T. R. Strobridge, NBS Tech Note, Jan., 129 (1962).