

LH₂/LOX エンジン開発における極低温温度計測

青柳鐘一郎・霜田 正隆・加勇田清勇
齊藤 猛男・山谷 寿夫・岩間 彬

(1983年1月31日受理)

Cryogenic Temperature Measurement in the Development of LH₂/LOX Engine

By

Shoichiro AOYAGI, Masataka SHIMODA, Seiyu KAYUTA
Takeo SAITO, Toshio YAMAYA and Akira IWAMA

Abstract: In the present paper are described the processes, barrier problems and know-how on temperature measurement, particularly at low and cryogenic temperatures which have played an important role in developmental experiments of an LH₂/LOX rocket engine since 1976.

In order to make reproducible and reliable temperature measurements based on IPTS-68 firmly established down to 13.81K and acquire some correct calibration curves, using Chromel vs Au-0.07at%Fe (KP/AuFe) thermocouples, and Pt-0.5 mol%Co(PCoRT) resistance bulbs as a first transducer, we have operated 'in-place' calibration for traceable temperature measurement by a cryogenic temperature calibrator.

Various factors affording influences on the accuracy of measurement have been investigated, e. g., the suitability of inserted length for sensor, connecting method of compensating lead wires, the structure of fixed points, the stability of amplifiers, the properties of recording instruments, at every experiment. Lately we have succeeded in establishing the measurement system with the allowance less than 0.5 K.

概 要

1976年にはじまった宇宙科学研究所のLH₂/LOXエンジン開発における温度計測、とくに低温および極低温の計測についての経過、得られた知見を述べ、あわせて問題点を論じる。

13.81 K までの国際実用温度目盛を確立した IPTS-68 に準拠した測定値を得るために、最も重要な一次変換器として熱電対にはクロメル/金-0.07 at %鉄 (KP/AuFe) を、測温抵抗体には白金-0.5 mol %コバルト (PCoRT) を選び、トレーサブルな計測を目指して極低温温度校正装置を用い、できるだけ実際の計測に即した校正を行なった。

測定系の精度を左右する多くの因子、例えばセンサ差込長、補償導線の接続法や基準接点の構造が適正であるか、増幅器の安定性、定電圧・定電流発生器の精度、収録機器の性能が満足すべきものであるかどうか、などについて実験毎に検討を重ね、ようやく要求精度 0.5 K に応えられる計測システムの確立をみた。

1. はじめに

昭和 51 年にはじまった LH₂/LOX エンジンの開発に筆者らが温度計測を担当したのは、それ以前の固体モータの地上燃焼実験において温度計測に少々関わったことの延長にすぎず、したがって、低温ないし極低温の温度計測は筆者らにとって全く未経験の分野であった。爾来試行錯誤を重ね、ようやく、不十分ながら温度計測システムの確立をみたので、その経過、問題点、成果などについて報告したい。

温度という概念は、もともと感覚的なもので、熱力学の第 0 法則が第 1～第 3 法則におくられて一般的原理として認められたことは、その本質が理解されにくかったことを物語っている。温度は強度因子であって容量因子ではないため、同じ 1 度でも温度目盛の領域によりその大きさは異なっている。そのことは任意の温度差を測定できる単位温度間隔が存在しないことを意味している。

Kelvin が熱力学第 2 法則のカルノー・エンジンの概念にもとづいて熱力学温度目盛を導入し、理想気体温度計を用いることによって作動物質に無関係に定まる温度目盛を具現したのは 1848 年である。以来、常磁性を利用する熱力学温度、熱平衡放射による熱力学温度、統計熱力学的な原理による熱力学温度など幾多の熱力学温度測定方法が発表されてきた。しかしこれらは、原理的な測定法を左端にとり実用的な測定法を右端にとった、いわゆるトレーサビリティ (traceability) の概念図の最左端に位置するもので、理論的整合度は高いが、測定に手間がかかり、装置がたいへん高価で、実用的には大きな困難が伴う。

そこで熱力学温度目盛に密接に近似するような国際実用温度目盛 IPTS (International Practical Temperature Scale) の制定が国際度量衡委員会を中心に進められた。IPTS の歴史は 1927 年にさかのぼるが、幾多の変遷を経て 1968 年国際温度目盛 (IPTS-68) [1] が定められ、13.81 K の極低温域までの温度目盛が確立した。(その後 1975 年に IPTS-68 テキストの修正版がオーソライズされたが、数値上の実質的な変更はない。)

IPTS-68 で画期的なことは、従来 IPTS-48 の定義の下限が酸素の沸点 90.18 K であったのが平衡水素の三重点 13.18 K に拡張されたことである。IPTS-68 の定義定点を表 1 に示すが、ここで T_{68} は国際実用ケルビン温度、 t_{68} は国際実用セルシウス温度で、 T_{68} と t_{68}

表1 IPTS-68 の定義定点

平 衡 状 態	国際実用温度の与えられた値	
	T ₆₈ (K)	t ₆₈ (°C)
平衡水素の固相、液相および気相の間の平衡（平衡水素の三重点）	13.81	259.34
33330.6 Pa（25/76標準気圧）の圧力における平衡水素の液相と気相の間の平衡	17.042	256.108
平衡水素の液相と気相の間の平衡（平衡水素の沸点）	20.28	252.87
ネオンの液相と気相の間の平衡（ネオンの沸点）	27.102	246.048
酸素の固相、液相および気相の間の平衡（酸素の三重点）	54.361	218.789
酸素の液相と気相の間の平衡（酸素の沸点）	90.188	182.962
水の固相、液相および気相の間の平衡（水の三重点）	273.16	0.01
水の液相と気相の間の平衡（水の沸点）*	373.15	100
亜鉛の固相と液相の間の平衡（亜鉛の凝固点）	692.73	419.58
銀の固相と液相の間の平衡（銀の凝固点）	1235.08	961.93
金の固相と液相の間の平衡（金の凝固点）	1337.58	1064.43

注) すべての三重点と平衡水素の一つの定点（17.042 K）とを除き、与えられた温度値は P₀ = 1 標準気圧（101325 Pa）の圧力における平衡状態に対するものである。

* 水の沸点に代わるものとしてスズの固相と液相の間の平衡状態（スズの凝固点）を用いてもよい。それに与えられた値は t₆₈ = 231.9681 °C である。

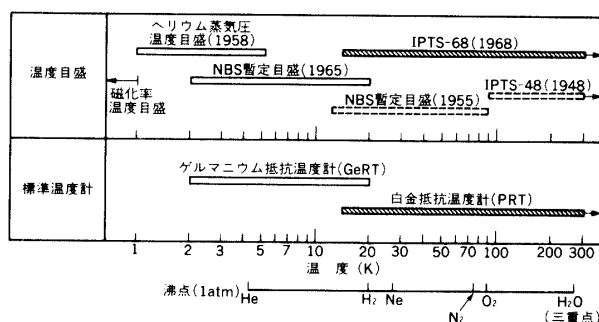


図1 温度目盛と標準温度計の領域

との関係は $t_{68}/^{\circ}\text{C} = T_{68}/\text{K} - 273.15$ である。

13.8 K 以下の温度目盛は、2 K~20 K の範囲については NBS (National Bureau of Standards) 暫定温度目盛 (NBS-65) を、1 K~5.2 K についてはヘリウム蒸気圧温度目盛 (T-58) が用いられるが、われわれの測定範囲は IPTS-68 の定める温度領域である。

これらの定義を具現するための標準温度計としては、下限 13.8 K までは白金抵抗温度計 (PRT)、2 K~20 K の範囲はゲルマニウム抵抗温度計 (Ge RT) が定められており、図 1 [2] のような関係にある。

以上のような国際標準すなわち熱力学的温度に準拠した測定値を得るための実用温度計をいかに選ぶかが、われわれのまず直面した問題であった。

温度計とは一般に、検出部（一次変換器）、伝達部（二次変換器）および指示部（出力変換器）を備えたひとつの構成システムを指すが、これらの構成要素のうち最も重要なものは一次変換器である。広く用いられている実用温度変換器としては、膨張式温度計、圧力

式温度計，熱電対温度計，抵抗温度計，放射温度計などがあり，そのほか，磁化率，音速，核磁気共鳴，相転移などの温度依存性を利用したものがある．これらの中から必要な感度（変換係数の大きさおよび分解能）があること，必要な温度範囲をカバーできること，再現性・安定性のよいこと，応答が早いこと，扱いやすいこと，入手しやすいこと，価格が適当であること——などを勘案して，熱電対温度計と抵抗温度計を選んだ経緯は先に報告[3]した．

次に当面した二次変換器については，増幅器のドリフトが測定誤差の大きな要因を占めていたが，漸次改善を重ね，ほぼ満足する結果を得ている．

指示部については CPU (FACOM U-1500) 収録をメインに，データレコーダ，マイコン，グラフィックディスプレイ，ペンオシロ，工業計器を併用している．最近ではリアルタイムに実単位でデータ取得ができるまでに漕ぎつけたが，分岐回路の干渉による偽信号の対策や，データ処理の煩雑さに悩まされた歴史がある．

以下項を追って，実例を交えながら低温計測について知り得たこと，問題点などを述べる．

2. 検 出 器

測定系の最も重要な一次変換器としてのセンサに，われわれはまず熱電対を選んだ．一連の実験の温度計測は低温領域の測定が主眼であるが，測定個所によっては高温域もあるためタイプ K (CA)，タイプ E (CRC)，タイプ J (IC)，タイプ T (CC)* も併用した．しかしこれらは JIS に定められた普遍的な熱電対であるため省略し，特に低温測定用を選んだクロメル/金-0.07 at %鉄熱電対について 2.1 で記述する．

開発が進むにつれて実機計測に近づけるため要所に測温抵抗体** を用いた．前述のように IPTS-68 で標準温度計として白金抵抗温度計が採用されたが，70 K 以下での感度がより優れている白金-コバルト測温抵抗体を主に用いたので，2.2 でこれについて述べる．

2.1 クロメル/金-0.07 at %鉄熱電対 (KP***/AuFe)

熱電対は一般に低温になるにつれて熱電能が小さくなり，従って不均質誤差，熱電導誤差が大きくなる．1962 年以来，低温領域に用いる熱電対の規格化が NBS の Powell らによって進められ[4][5][6][7]，次の3種が選定された．

タイプ E (クロメル/コンスタンタン) 旧記号 CRC

タイプ T (銅/コンスタンタン) 旧記号 CC

タイプ K (クロメル/アルメル) 旧記号 CA

これらについては JIS でも規格化され， -270°C までの熱起電力表が与えられており，3者の中ではタイプ E が熱起電力，熱電能ともに優れ，低温計測に推奨されてきた．しかし，水素液化技術の進歩とともに，低温領域から極低温領域への移行にもなって，これらの特性では適正な計測が行なえなくなり，クロメル/金-2.1 at %コバルト (KP/AuCo)，銅/

*) これらのタイプ名は JIS C 1602-82 で定められたもので，パーレン内に旧記号を付記した．

**) JIS C 1604 に定める呼称で，白金測温抵抗体については規格化されている．

***) クロメルは商標なので，規格 K (CA) のプラス脚という意味で KP と表わす．

表2 極低温用熱電対の熱起電力表

温度 (K)	KP / AuFe		C / AuCo		Type T	
	熱起電力 (mV)	感度 ($\mu\text{V}/\text{K}$)	熱起電力 (mV)	感度 ($\mu\text{V}/\text{K}$)	熱起電力 (mV)	感度 ($\mu\text{V}/\text{K}$)
0	0	0	0	0	0	0
1	0.008	8.6	0.0005	1.0	0.0002	0.3
5	0.053	13.3	0.012	5.0	0.004	1.6
10	0.127	16.0	0.049	9.4	0.016	3.1
20	0.295	17.0	0.180	16.4	0.060	5.8
30	0.462	16.6	0.373	21.9	0.130	8.2
40	0.628	16.5	0.614	26.2	0.223	10.3
50	0.793	16.7	0.894	29.6	0.336	12.2
60	0.963	17.1	1.203	32.1	0.466	13.9
70	1.136	17.6	1.534	34.1	0.613	15.4
80	1.314	18.0	1.884	35.6	0.773	16.7
90	1.496	18.4	2.247	37.0	0.947	18.0
100	1.682	18.8	2.623	38.1	1.134	19.4
110	1.872	19.2	3.009	39.0	1.334	20.6
120	2.066	19.5	3.403	39.8	1.546	21.9
130	2.263	19.8	3.804	40.4	1.772	23.2
140	2.462	20.1	4.211	41.0	2.009	24.4
150	2.664	20.4	4.623	41.4	2.260	25.7
160	2.869	20.6	5.039	41.8	2.523	26.8
170	3.076	20.8	5.458	42.1	2.797	28.0
180	3.285	21.0	5.880	42.3	3.083	29.1
190	3.496	21.2	6.305	42.5	3.380	30.2
200	3.709	21.4	6.731	42.7	3.689	31.4
210	3.924	21.5	7.158	42.8	4.008	32.4
220	4.140	21.7	7.586	42.9	4.337	33.5
230	4.358	21.8	8.016	43.0	4.677	34.5
240	4.577	21.9	8.446	43.0	5.028	35.5
250	4.797	22.0	8.876	43.0	5.388	36.5
260	5.017	22.1	9.306	43.0	5.758	37.5
270	5.239	22.2	9.736	43.0	6.137	38.4
280	5.462	22.3	10.166	43.0	6.526	39.3

金-2.1 at %コバルト (C/AuCo) の組合わせが開発された。この組合わせは高い感度を持つが、金-コバルトの合金状態が不安定で室温でアニールされるため現在では余り用いられない。

これに代わるものとして、20 K 以下でも良い熱電能をもち、1~280 K の範囲でほぼ直線の感度曲線をもつクロメル/金-0.07 at %鉄熱電対 (以下 KP/AuFe と記す) が NBS で開発され 1972 年に発表された [8]。

表2に KP/AuFe, C/AuCo およびタイプ T の熱起電力, 感度の比較を示す。この表からわかるように、20 K において KP/AuFe の感度は $17.0 \mu\text{V}/\text{K}$ と他の熱電対に比べて格段に良い。Sinclair らが他の低温用熱電対と比較した熱起電力曲線を図2に、感度曲線を図

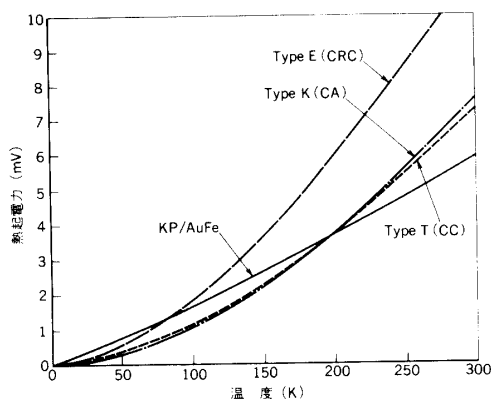


図2 低温用熱電対の熱起電力-温度曲線

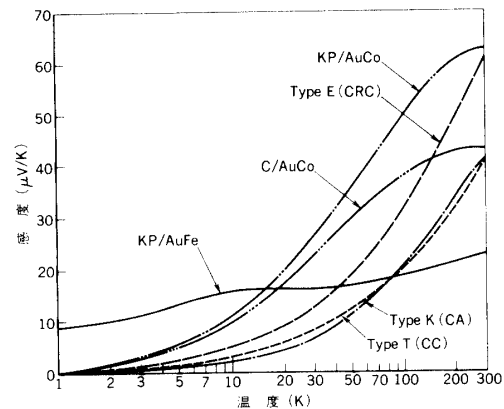


図3 低温用熱電対の感度曲線

3に示す[2]が、ともに KP/AuFe の直線性が際立っていることがわかる。

われわれは東大物性研・永野弘 助教授のすすめをうけて昭和52年6月実験より同研究室製の KP/AuFe を試用, 53年8月の GG-701-1 実験よりメーカ製のものを本格的に用いた。形状は $\phi 0.2$ mm 素線を $\phi 1.0$ mm \times 1000 mmL の SUS チューブで保護した非接地形シース熱電対を標準品とした。LN₂ 基準接点までの補償導線は、測定誤差を極力小さくするためいわゆる Extension 形とし、熱電対と同質の素線を約 5 m 延長した。延長素線は初期の頃は手作りで、 $\phi 0.2$ mm の素線をテフロンテープに挟み込む方式としたため機械的強度に欠け、しばしば破損のトラブルを経験している。その後 $\phi 0.5$ mm 素線をテフロンチューブで保護する形に改めてからは強度的不安は解消された。

基準接点は手作りで、数 ch をまとめて LN₂ 魔法瓶中に浸漬するが、LN₂ 液に直接接触れしかも互いに接触しないよう開放チューブに収められている。基準接点より下流は銅導線で、防水ボックスを経て二次変換器に導かれる。

ここで問題になるのは補償接点、基準接点の接合部で異種合金ができ起電力が生ずる懸念である。後述する校正装置で得られた LN₂ 温度 (77.37 K) は、基準点が LN₂ 実液なので理論的には 0 mV であるべきところ表3のように最大 200 μ V の熱起電力を生じているセンサもある。この値は補償接点、延長素線、基準接点、銅導線を含めた in-place に近い校正なので実用上は問題ないが、接合部に生じる異種合金が原因であれば、接合部の温度変化で誤差の生じるおそれがあることはすでに指摘した[3]。

標準形として用いたシース形熱電対は機械的に強靱で取扱いやすいが熱応答性に劣るため、インジェクタ部など熱応答性を要求する個所の測定には測温接点を露出させた露出形センサを用いた場合もある。図4に両者の熱時定数を測定したペンシログラフの一例を示すが、室温より LN₂ 液中へ瞬時に投入した場合、シース形の 5.8 sec に対し露出形の時定数は 0.45 sec と約 13 倍向上する。しかし、露出形センサは機械的強度が劣り、校正時、装着時の取扱いに注意を要し、測定個所が限られる。

2.2 白金-0.5 mol % コバルト 測温抵抗体 (PCoRT)

IPTS-68 で標準温度計として採用された白金測温抵抗体 (PRT) は、白金特有の化学的

表3 LN₂ 温度点の校正値の一例*

(単位:mV)

センサNo.	温度	70 K	80 K	77.37 K**
1		- 0.2264	- 0.0451	- 0.0936
2		- 0.3234	- 0.1401	- 0.1894
3		- 0.0760	+ 0.0945	+ 0.0488
4		- 0.2193	- 0.0352	- 0.0844
5		- 0.0555	+ 0.1128	+ 0.0677
6		- 0.2332	- 0.0451	- 0.0953
7		- 0.2386	- 0.0513	- 0.1012
8		- 0.3378	- 0.1526	- 0.2024
9		- 0.3443	- 0.1589	- 0.2087

* 57年4月校正 HST-1001-1 実験用

** 補間計算値

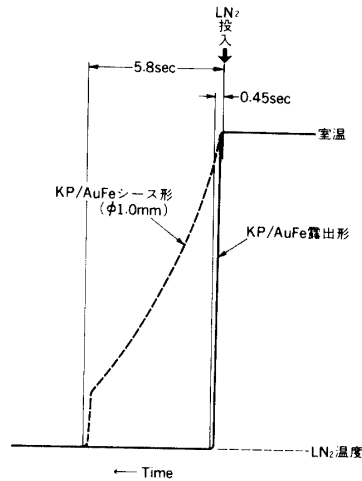


図4 KP/AuFe 熱電対の熱応答性

安定性により温度計としての安定性がたいへん優れ、13.81 K~630.74°C の広い領域で標準計器として用いられている (JIS でも JIS C 1604-81 に -200°C~640°C の R_t 値, R_t/R_0 値が与えられている)。しかし 70 K 以下の低温側では抵抗温度係数が急激に減少するため、より感度の優れた测温抵抗体の開発が進められてきた。

1972年ロジウム-鉄希薄合金(Rh-0.5 at % Fe)による抵抗温度計が発表され[9], 20 K 以下でも感度が高いことで注目されたが、均一品質の合金製造がむづかしく国産化されなかった。

工業技術院計量研究所では、この貴金属に微量の磁性元素を加えた希薄合金が極低温の計測に有用である点に注目して、白金にコバルトを微量加えた抵抗温度素子の開発を行ない[10], 数社のメーカーが国産化に成功した。この Pt-Co 抵抗素子の抵抗-温度特性, 感度-温度特性は図5, 図6に示す[11]ように白金测温抵抗体, ロジウム-0.5 at % Fe 测温抵抗体に比べすぐれた特性を示すが, 3種のコバルト含有量のうち 0.75 mol %, 1.06 mol %の

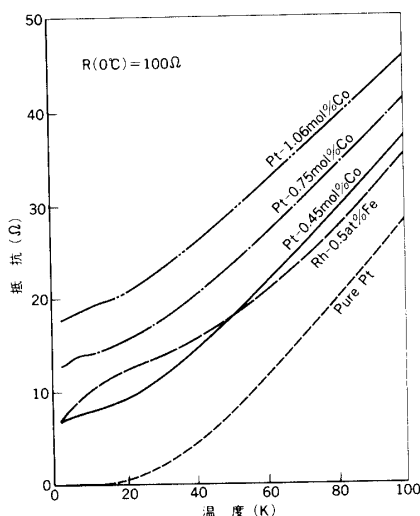


図5 Pt, Rh-Fe および Pt-Co 抵抗素子の抵抗-温度曲線

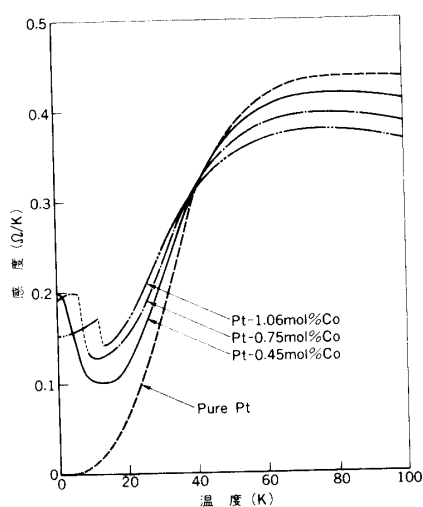


図6 Pt および Pt-Co 抵抗素子の感度-温度曲線

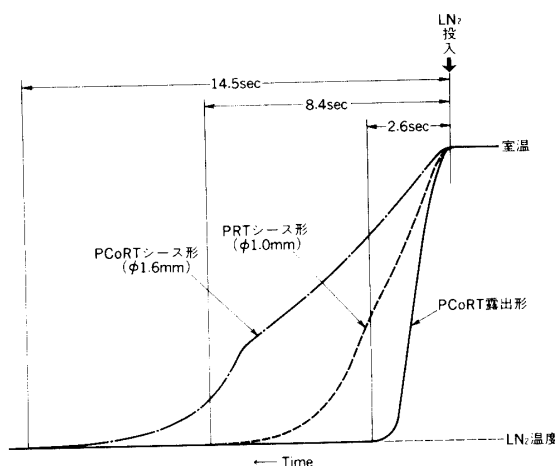


図7 測温抵抗体3種の熱応答性

素子は 6 K および 16 K で抵抗値がジャンプする特異点があり不適である。

われわれは北辰電機製の Pt-0.5 mol % Co 測温抵抗体 (以下 PCoRT と記す) を採用し、 $\phi 1.6$ mm のシース形とした。このシース径は従来の $\phi 3.2$ mm のものを企業努力により $\phi 1.6$ mm としたもので被測定物との熱接触が良く、外からの熱の流入が小さく、室温より He 液中への熱時定数は従来品の 10 sec に比べて 2.8 sec と格段に向上している。熱応答性を更に要求する個所については $\phi 1.0$ mm のものを希望しているが、現在のところ PCoRT では製作不可能なため PRT を充てており、厳しく熱応答性を問題とする個所には素子のままの露出形を用いる検討を行なっている。露出形の時定数チェックの一例を図7に示すが PCoRT ($\phi 1.6$ シース形)、PRT ($\phi 1.0$ シース形)、PRT (素子露出形) の三者の、室温より LN₂ 液中への熱時定数はそれぞれ 14.5 sec, 8.4 sec, 2.6 sec のオーダである。

PCoRT, PRT を通じて測温抵抗体の有利点は、感度が KP/AuFe 熱電対に比べて格段

に良いこと、すなわち 20 K における KP/AuFe の $17 \mu\text{V}/\text{K}$ に対し PRT は $0.08 \Omega/\text{K}$ (1 mA 印加で $80 \mu\text{V}/\text{K}$)、PCoRT では $0.13 \Omega/\text{K}$ (1 mA 印加で $130 \mu\text{V}/\text{K}$) という値であること、基準接点が不要なため定点の変動による誤差が入らず実機計装向きであること、などである。欠点としては、素子が点でなく約 10 mm の長さをもつため例えばベアリング温度などの点計測に不向きなこと、出力を電圧で取出すために精密かつ安定性の良い定電流発生器が必要なこと、曲げ、衝撃に対する機械的強度が小さく装着時の取扱いに注意を要すること、などである。

3. 温度目盛定め (校正)

極低温領域 (90 K 以下) においては、前述のように PRT が標準温度計として認められているが、測定に用いたその他の熱電対、測温抵抗体は暫定規格の段階であり、PRT にしても標準温度計として計量研の検定を受け温度-抵抗校正表をもつもの以外は個体間のバラつきを免れない。

われわれが行なった PCoRT ($\phi 1.6 \text{ mm}$, 2733 mmL) 同一ロット品 A, B 2 個体の出力値比較をみると、表 4 に示すように 20 K 点で $42 \mu\text{V}$ の差がある。これは温度に換算して約 0.3 K に相当する。更にメーカーの抵抗-温度校正表 (LHe, LOX, 永点の 3 点校正, 20 K は補間計算値) との差異は $100 \sim 150 \mu\text{V}$ に達する。

このように極低温温度測定におけるセンサの個体差は無視できないので、われわれはトレーサブルな計測を目指して、精度を要する個所に用いるセンサは原則として自家校正を行なうこととし、昭和 52 年、大阪酸素工業と協力し極低温温度校正機を試作、昭和 53 年 6 月 EG-TS-1 実験よりこれを用いた。

校正装置は図 8 に示すような系統で、冷却はクライオミニ冷凍機による方式をとり、あらかじめ計量研で検定を受けた PCoRT を基準として、設定温度における被検体の出力を日本電気計器検定所で検定を受けたデジタルポルトメータで読む。クライオスタットの主要部を図 9 に示したが、被検体の装着本数は $\phi 1.0 \text{ mm}$, $\phi 1.6 \text{ mm}$ 合わせて 36 本である。

温度調節は基準温度計、ダイヤル抵抗器、ブリッジ抵抗によって構成される直流ブリッジにおいて、ダイヤル抵抗器の設定抵抗値と測温抵抗体の抵抗値の不均衡によって生ずる偏差出力電圧を調節計に導き、サイリスタを調節点弧して、ヒータの温度制御を行なう。

本機を用いて得られた KP/AuFe 熱電対の校正値と NBS 値 [8] との比較の一例を表

表 4 20 K 点におけるセンサ出力のバラつき。

校正 \ センサ	A		B
実校正値	8.422mV	← 42 μV (0.32K相当) →	8.464mV
	↑ 144 μV (1.11K相当)		↓ 96 μV (0.74K相当)
メーカー校正値	8.566mV	← 6 μV (0.05K相当) →	8.560mV

被検センサ: PCoRT (シース径 $\phi 1.6 \text{ mm}$, 325mmL)
印加電流: 1mA

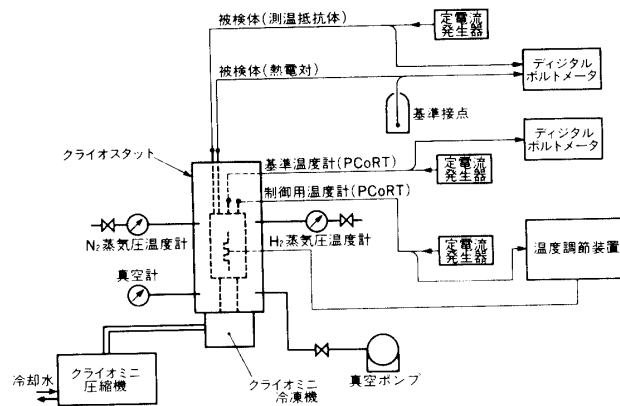


図8 極低温温度校正装置系統図

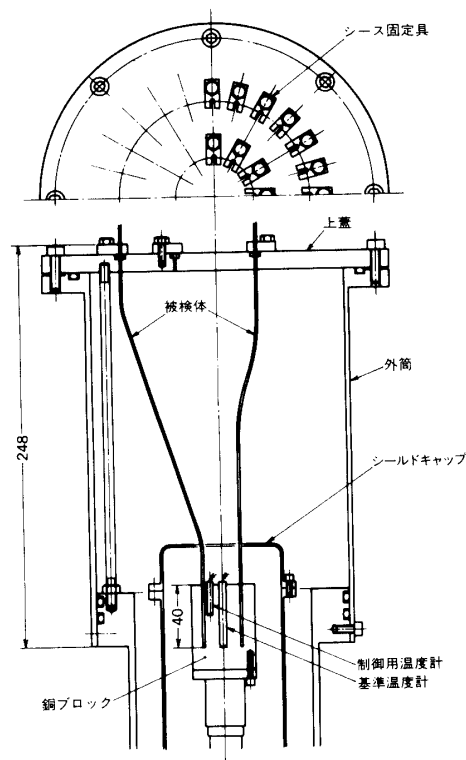


図9 クライオスタット主要部概略図

5に、それらのうち代表例を図10に掲げる。これらの図表からわかるように延長素線、基準接点を含めた熱電対の個体差は歴然としており、単体校正の必要性が痛感される。その意味でセンサ全品の校正が望まれるが、クライオスタットの構造上シース長が260 mm以下のものは装着できず、短尺ものは他の校正値を援用せざるを得ない現状である。この点を改良すべく図11のような120 mmLまで装着可能なアダプタ金具を計画中である。ただしこの場合は構造上、同時に装着できる本数は4本までであり、20 Kまでの校正は熱設計上2本に限定される。

表5 KP/AuFe熱電対の校正値表(単位:mV)

センサ 温度	露出形			シース形						NBS値*
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
20 K	-0.8281	-1.0979	-1.0730	-1.0769	-0.7310	-1.0841	-1.1274	-1.0605	-1.1324	-0.97185
30 K	-0.7021	-0.9359	-0.9023	-0.9109	-0.6128	-0.9128	-0.9765	-0.8917	-0.9820	-0.80418
40 K	-0.5673	-0.7727	-0.7326	-0.7465	-0.4820	-0.7447	-0.8242	-0.7228	-0.8252	-0.63936
50 K	-0.4267	-0.6084	-0.5647	-0.5811	-0.3457	-0.5775	-0.6703	-0.5585	-0.6637	-0.47357
60 K	-0.2768	-0.4391	-0.3923	-0.4090	-0.2002	-0.4041	-0.5046	-0.3799	-0.4948	-0.30428
70 K	-0.1206	-0.2645	-0.2159	-0.2328	-0.0484	-0.2288	-0.3355	-0.2007	-0.3219	-0.13070
77.36 K	-0.0006	-0.1325	-0.0824	-0.1005	+0.0727	-0.0952	-0.1954	-0.0781	-0.1900	0
80 K	+0.0441	-0.0843	-0.0336	-0.0526	0.1186	-0.0463	-0.1475	-0.0225	-0.1406	+0.04720
90 K	0.2139	+0.0998	+0.1527	+0.1346	0.2825	+0.1399	+0.0303	+0.1631	+0.0476	0.22930
100 K	0.3899	0.2886	0.3426	0.3262	0.4534	0.3301	0.2215	0.3530	0.2350	0.41544
110 K	0.5706	0.4814	0.5356	0.5180	0.6358	0.5227	0.4201	0.5440	0.4304	0.60541
120 K	0.7587	0.6798	0.7344	0.7169	0.8184	0.7221	0.6161	0.7380	0.6294	0.79889
130 K	0.9479	0.8792	0.9346	0.9178	1.0064	0.9209	0.8189	0.9365	0.8300	0.99556
140 K	1.1415	1.0814	1.1310	1.1219	1.1985	1.1246	1.0260	1.1451	1.0353	1.19513
150 K	1.3372	1.2846	1.3431	1.3251	1.3918	1.3293	1.2305	1.3425	1.2412	1.39737
160 K	1.5362	1.4913	1.5501	1.5536	1.5922	1.5364	1.4395	1.5581	1.4528	1.60210
170 K	1.7399	1.7021	1.7554	1.7407	1.7917	1.7475	1.6485	1.7660	1.6674	1.80915
180 K	1.9459	1.9130	1.9732	1.9580	1.9980	1.9600	1.8668	1.9658	1.8792	2.01833
190 K	2.1544	2.1257	2.1853	2.1711	2.2052	2.1751	2.0869	2.1788	2.0918	2.22947
200 K	2.3656	2.3414	2.4018	2.3878	2.4146	2.3890	2.3026	2.4014	2.3118	2.44243
210 K	2.5777	2.5590	2.6203	2.6063	2.6269	2.6084	2.5234	2.6121	2.5331	2.65710
220 K	2.7955	2.7783	2.8394	2.8266	2.8442	2.8279	2.7452	2.8303	2.7552	2.87334
230 K	3.0123	2.9991	3.0609	3.0484	3.0617	3.0501	2.9743	3.0500	2.9787	3.09099
240 K	3.2312	3.2211	3.2838	3.2724	3.2805	3.2736	3.1970	3.2723	3.2049	3.30979
250 K	3.4511	3.4432	3.5062	3.4943	3.4992	3.4954	3.4198	3.4970	3.4290	3.52956
260 K	3.6732	3.6661	3.7269	3.7176	3.7201	3.7220	3.6506	3.7249	3.6556	3.75031
270 K	3.8983	3.8934	3.9574	3.9486	3.9470	3.9507	3.8795	3.9400	3.8857	3.97217
280 K	4.1231	4.1179	4.1815	4.1749	4.1725	4.1762	4.1094	4.1653	4.1156	4.19492
290 K	4.3491	4.3451	4.3742	4.4027	4.3971	4.4053	4.3368	4.3923	4.3432	————
300 K	4.5782	4.5740	4.6368	4.6321	4.6244	4.6363	4.5699	4.6212	4.5773	————
371 K	6.2281	6.2315	6.3034	6.3051	6.3032	6.3079	6.2661	6.2969	6.2453	————
LN ₂ 実液	+0.0039	-0.1155	-0.0953	-0.0676	+0.1150	-0.0711	-0.1621	-0.0975	-0.1125	————

校正年月日：昭和57年7月29日～31日(基準接点：LN₂)

実験名：10トンチャンネル構造燃焼器燃焼試験(TC-1002-1)

*) NBS値は0K基準で与えられているため、LN₂点基準に換算した値

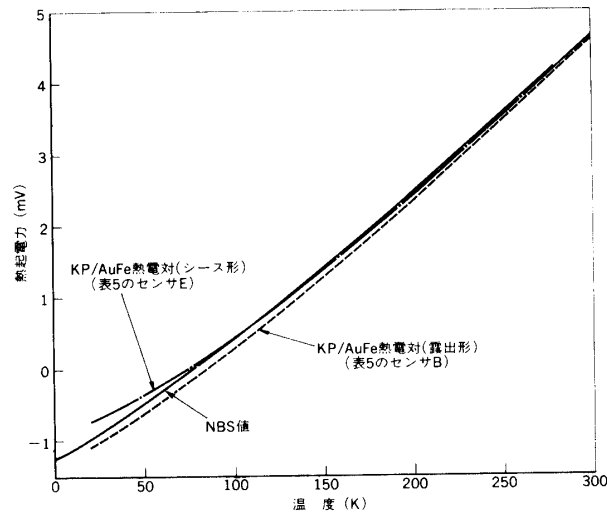


図10 KP/AuFe 熱電対の実校正値と NBS 値の比較

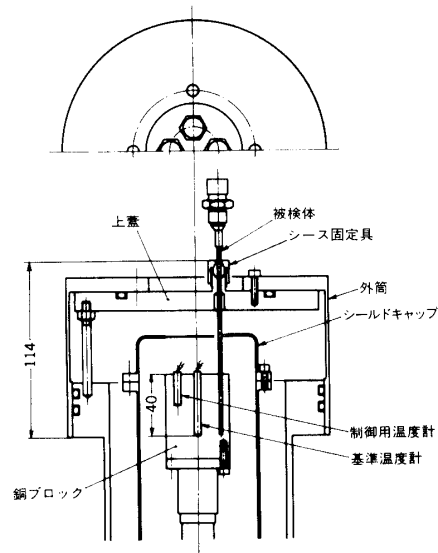


図11 短尺被検体用アダプタ

4. 温度計測の実際

4.1 測定系

温度計測の基本フロー図を図12に示す。

①部の計測点数は実験によって異なるが昭和57年4月のHST-1001-1実験を例にとると、PRT 3点、PCoRT 9点、KP/AuFe 熱電対 10点、K 熱電対 7点、計 29点を数える。センサ長さは最短 150 mmL、最長は液水タンク下部を計測する PCoRT の 2733 mmL である。計測箇所、計測温度範囲、センサ種類、寸法、収録計器などを表示した一覧表の例を表6に示す。

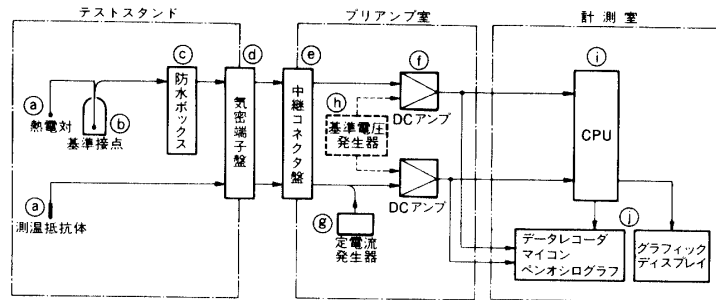


図12 温度測定系フロー図

フロー図の⑥基準接点はKP/AuFe熱電対についてはLN₂ (77.37 K) を、タイプK熱電対については氷点 (273.15 K) を用いた。①から防水ボックス③までは全長にわたって耐熱処理を施し実験時の燃焼ガスから防護する。防水ボックスからは一括ケーブルで気密端子盤④、中継コネクタ盤⑤を経てDCアンプ⑥に入る。測温抵抗体は測定点近くで一括ケーブルにまとめられ気密端子盤に入る。

熱起電力の大きいセンサを選んだとはいえ、KP/AuFe熱電対の熱起電力は20 K点で17 $\mu\text{V}/\text{K}$ にすぎないので、すぐれた増幅器が要求される。初期の頃は対数アンプも導入したが、ドリフトの制御がむづかしく適正な計測が行なえなかつたので昭和53年より現用の $\times 10^4$ DCアンプ(ハネウェル社製、ACCUDATA 28)を採用した。このアンプは増幅度および動作点が自由に設定できるようなしゃへい電圧機構をもっているため、測定範囲の上・下点を整数出力値に調整でき、ドリフト、ゲインの変動が容易に発見・調整できる。対数アンプで悩まされたドリフトは、充分な予熱、環境温度の安定に留意すれば $\pm 0.1\%$ / 24 hrの範囲で確保できる。

測温抵抗体に加えるDC 1 mAは20 ch定電流発生器⑦で与えるが、昭和55年のES-702-1実験で雰囲気温度の変動が出力に影響を及ぼすことを発見、温度補償回路の改良を行なった。図13に示した代表chのチェック例は苛酷な温度変化を瞬時に与えた場合であるが、改良前の3%変動に対し改良後は0.5%に収まっている。

⑧はCPUおよびマイコンなどのモニタ計器に校正值を読込ませる基準電圧発生器で、単体校正で得た各センサの熱起電力に相当する擬似電圧をアンプに入力し、その出力を収録計器に取得させる。アンプの直線性は $\pm 0.5\%$ が確かめられているので読込み校正手順の簡略化のため上・中・下3点の擬似信号で代表させ、他のセンサ校正点に相当する出力は図14に示す動作説明図のように求める。校正点間の任意点は直線補間で求めるが、例えば25 K点を20 Kと30 Kの値から求めた場合、図例のセンサで直線補間 -0.765 mV 、曲線補間 -0.766 mV 、その差は1 μV 、増幅出力に換算して3.8 mVにすぎず、CPUの分解能5 mVに埋没される。

計測システム全体をin-placeでチェックすることが精度、確度を論ずる場合望ましいので、擬似信号の入力箇所を単体校正の末端である③部に移すことを目下検討中である。

昭和57年4月のHST-1001-1実験よりCPUが従来のTEAC・DP-5000からFACOM U-1500に更新されたため⑥より下流は大幅に変更された。アンプ出力はエンコーダでデ

表6 温度計測一覧表 (HST-1001-1)

S57年4月

セクション	CPU ch	標識 No	計測箇所	計測範囲	センサ			基準接点	収録計器			
					種類	シース径 (ϕ mm)	長さ (mm)		CPU	G D	マイコン	ペンオシロ
エンジン	44	TPH-1F	液水ポンプ入口	20~40K	KP/AuFe	1.0	1000	LN ₂	○	○		
	73	TPH-1C		20~300					○			
	45	TPH-2	液水ポンプ出口	20~300	PCoRT	1.6	150	—	○			
	46	TPH-3	液水ポンプベアリング(ポンプ側)	20~300	PRT	1.0	200	—	○	○		
	47	TPH-4	液水ポンプベアリング(タービン側)	20~300	PRT	1.0	200	—	○	○		
	48	TPO-1F	酸素ポンプ入口	90~120	KP/AuFe	1.0	1000	LN ₂	○	○		
	74	TPO-1C		90~300					○			
	49	TPO-2	酸素ポンプ出口	90~300	PCoRT	1.6	150	—	○			
	50	TPO-3	酸素ポンプベアリング(ポンプ側)	90~300	KP/AuFe	1.0	1000	LN ₂	○	○		
	51	TPO-4	酸素ポンプベアリング(タービン側)	90~300	PRT	1.0	200	—	○	○		
	52	TT-1	ノズルマニホール(タービン)	300-1300	Type K	1.6	200	氷点	○			
	53	TT-2	排気マニホール(タービン)	300-1300	Type K	1.6	200	氷点	○			
	54	TGH-1	水素インジェクタ(ガスジェネ)	20~300	KP/AuFe	1.0	1000	LN ₂	○			
	55	TGO-1	酸素インジェクタ(ガスジェネ)	90~300	KP/AuFe	1.0	1000	LN ₂	○			
	56	TCH-1	水素インジェクタ(燃焼器)	20~300	KP/AuFe	1.0	1000	LN ₂	○			
	57	TCO-1	酸素インジェクタ(燃焼器)	90~300	KP/AuFe	1.0	1000	LN ₂	○			
	58	TGO-2	酸素供給ライン外壁(ガスジェネ)	90~300	Type K	1.6	400	氷点	○	○		
	59	TGH-2	水素供給ライン外壁(ガスジェネ)	20~300	Type K	1.6	400	氷点	○	○		
	60	TCO-2	酸素供給ライン外壁(燃焼器)	90~300	Type K	1.6	400	氷点	○	○		
61	TCH-2	水素供給ライン外壁(燃焼器)	20~300	Type K	1.6	400	氷点	○	○			
62	TCI-1	点火器燃焼室(燃焼器)	0~1200°C	Type K	3.2	300	氷点	○	○			
タンクシステム	63	TTH-1	液水タンク下部	20~300K	PCoRT	1.6	2733	—	○		○	
	64	TTH-2	液水タンク上部	20~300	PCoRT	1.6	325	—	○		○	
	65	TLH-1	加圧水素ガス流量計測部	20~300	PCoRT	1.6	150	—	○	○		
	66	TTO-1	液酸タンク下部	90~300	PCoRT	1.6	1195	—	○		○	
	67	TTO-2	液酸タンク上部	90~300	PCoRT	1.6	325	—	○		○	
	68	TLO-1	加圧酸素ガス流量計測部	90~500	PCoRT	1.6	150	—	○	○		
	69	THE-1	ヘリウムガス流量計測部	200~300	PCoRT	1.6	150	—	○	○		
スタンド	70	TLH-2	タンク帰還水素流量計測部	20~300	KP/AuFe	1.0	1000	LN ₂	○			
	71	TK-15	水素予冷出口	20~300	KP/AuFe	1.0	1000	LN ₂	○		○	
	72	TK-25	酸素予冷出口	90~300	KP/AuFe	1.0	1000	LN ₂	○		○	

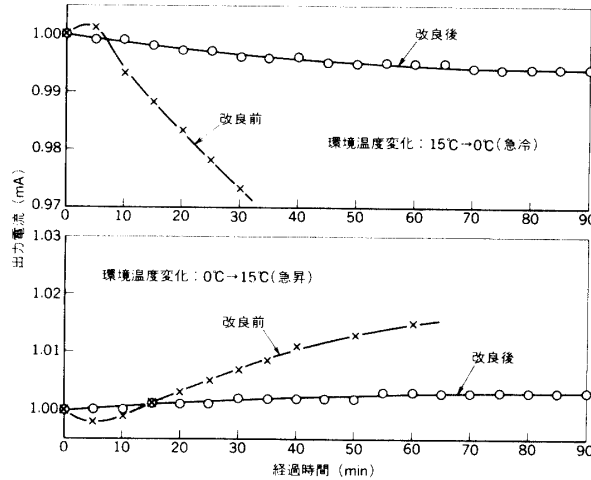


図 13 定電流発生装置の環境温度変動による影響

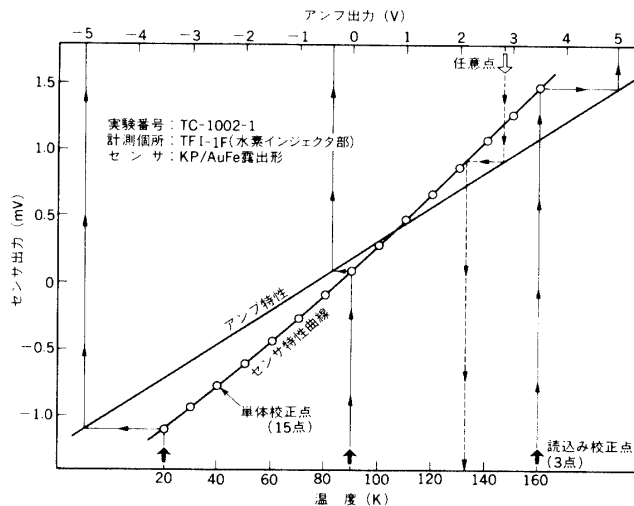


図 14 温度-センサ出力-アンプ出力説明図

デジタル化され、光ファイバケーブルで約 250 m 離れた計測室の CPU に導かれる。CPU の収録能力は 128 ch+アナログ入力 16 ch で、実験開始時刻 -300 分~-60 秒の間は 1 Hz、-60 秒~+7 分間は 200 Hz でサンプリングできる。①のモニタ類は必要に応じて収録される。

4.2 計測例

上記の手順を経て得られた測定結果は、実験毎に発行される実験報告書に詳しいので、ここでは代表例を挙げるにとどめる。

KP/AuFe 熱電対の例として図 15 にシース形、図 16 に露出形センサの温度曲線を、测温抵抗体の例として図 17 に PCoRT、図 18 に PRT の温度曲線を掲げる。

実験によってはタンク昇温の挙動観察のように長時間に亘る計測が必要な場合もある。CPU の収録能力を越える長時間計測にはマイコン (MZ-80 C) を用いた。表 7 は 42 hr に

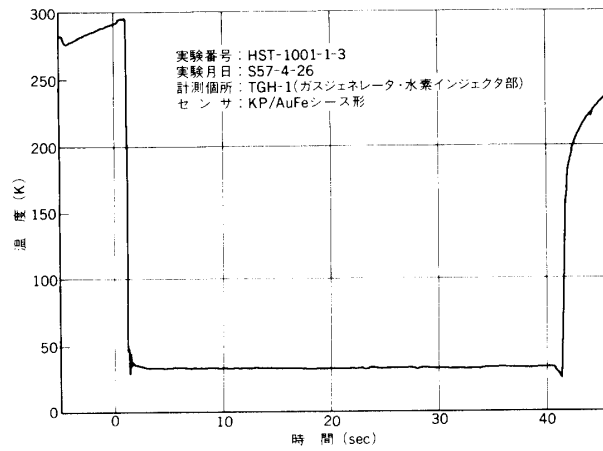


図 15 KP/AuFe シース形センサによる計測例

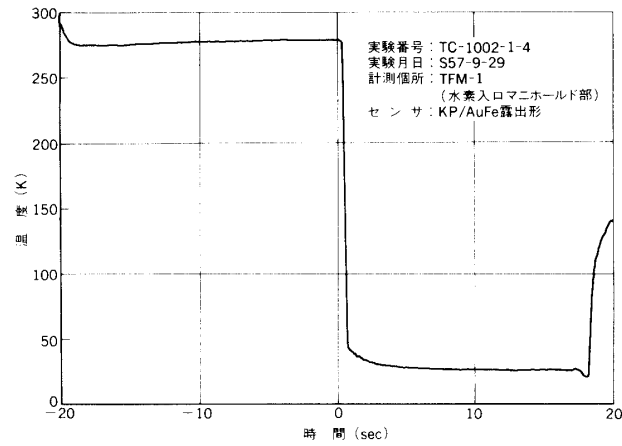


図 16 KP/AuFe 露出形センサによる計測例

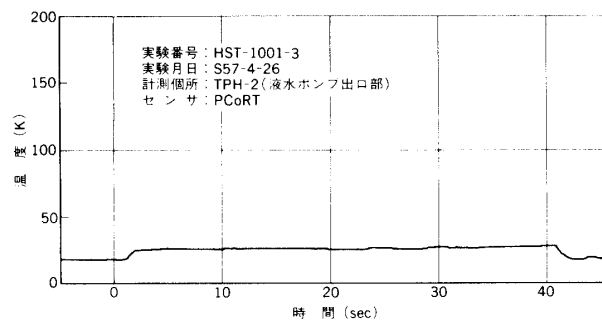


図 17 PCoRT センサによる計測例

亘って 1 min 間隔で収録した例 (HST-1001-1-2 実験) のデジタル出力の開始部分である。そのうち、TTO-1(液酸タンク下部)の全時間に亘ってのプロッタ出力図を図 19 に示す。

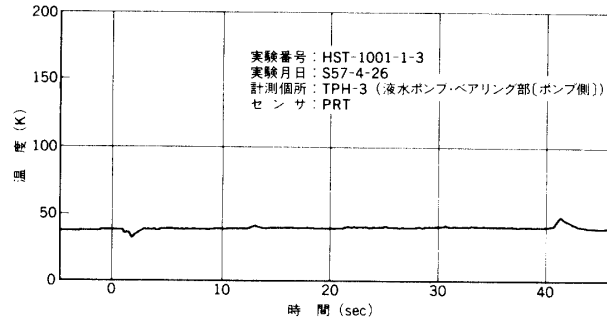


図 18 PRT センサによる計測例

表 7 マイコンによる長時間計測のデジタル出力例

PAGE 1

●●●●●● HST-1001-1-2 ●●●●●●

.... 1982.4.23--25 AOYAGI

TIME (M)	TTH-1 (K)	TTH-2 (K)	TTO-1 (K)	TTO-2 (K)
0	129.8	183.7	163.1	183.4
1	130.9	183.7	163.3	183.6
2	131.5	184.0	163.8	183.4
3	130.6	184.0	164.5	183.8
4	131.5	183.7	165.2	184.1
5	132.1	183.7	165.6	183.8
6	133.0	184.3	165.6	184.1
7	133.3	184.0	165.4	184.3
8	133.6	184.3	166.5	184.3
9	133.3	184.3	166.5	184.3
10	133.6	184.5	167.2	184.3
11	133.9	184.8	166.5	184.1
12	134.5	184.5	167.2	184.3
13	135.0	184.8	167.4	184.3
14	134.7	184.8	167.9	184.3
15	134.5	184.8	168.4	184.8
16	136.2	185.1	168.6	184.8
17	135.3	185.1	169.3	184.8
18	136.8	185.1	169.7	185.0
19	136.5	185.4	169.7	185.0
20	136.8	185.4	170.2	185.0
21	137.7	185.4	170.0	185.0
22	137.1	185.4	170.2	184.8
23	137.4	185.7	170.9	185.2
24	138.0	185.7	171.4	185.5
25	138.0	185.7	172.0	185.0
26	139.1	186.0	172.3	185.2
27	139.1	186.0	172.3	185.5
28	140.0	186.3	172.7	185.7
29	140.6	186.0	173.4	185.9
30	140.6	185.7	173.7	185.9
31	140.0	186.3	173.9	185.9
32	140.0	186.3	174.4	185.9
33	141.2	186.6	174.6	185.7
34	141.2	186.6	173.9	186.4
35	141.2	186.6	174.4	185.9
36	142.9	186.6	174.1	186.4
37	144.1	186.6	175.0	186.2
38	142.4	186.6	175.0	186.6
39	143.5	186.9	176.2	186.2
40	143.8	186.9	176.7	186.4
41	142.7	187.2	176.4	186.8
42	143.2	187.2	176.7	186.8
43	144.7	187.2	177.6	186.6
44	143.8	187.2	178.5	186.6
45	144.1	187.2	179.2	186.8
46	145.0	187.2	179.4	186.8
47	143.8	187.6	179.7	186.6

実験番号：HST-1001-1-2

測定個所：表 6 参照

センサ：KP/AuFe シース形

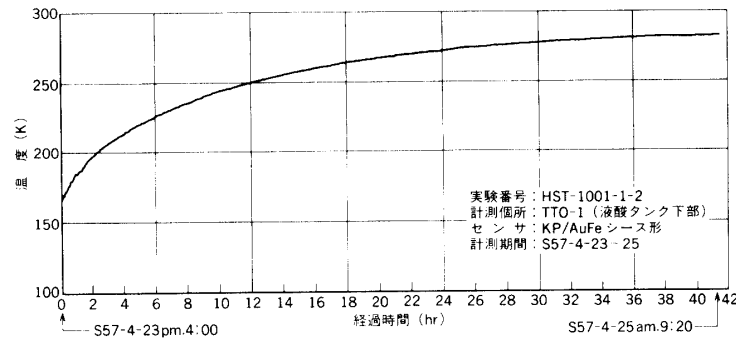


図 19 マイコンによる長時間計測のアナログ出力例

5. 温度計測の経過

昭和 52 年より現在に至る LH₂/LOX エンジンの開発実験における温度計測を実験順に追って、その問題点、改良点などを挙げてゆく。

- (第 1 次コールドフローテスト) 昭和 52 年 6 月

測定点数: 15 点

センサ: KP/AuFe (素線形), C/AuCo, Type T

この段階では LN₂ 点, 氷点の 2 点の実校正が NBS 値および JIS 値にほぼ一致する確認のみで規格表を用い計測した。KP/AuFe は素線のまま用いてみた。C/AuCo センサは良い計測結果を得られなかったので今回限りとする。アンプは×100, ×500 DC アンプ (TEAC 製) を使用。

- (1 トンエンジン第 2 次試験) 昭 52 年 7 月

測定点数: 11 点

センサ: KP/AuFe (シース形), Type T

物性研永野研究室の協力を得て KP/AuFe シース形 (φ 1.2 mm, 500 mmL) を作製, 試用した。

- TP-701-1 (7 トンターボポンプ実験) 昭 52 年 8 月

測定点数: 17 点

センサ: Type T

全点 Type T (CC) の計測である。校正法, アンプ種類は前回までと同じ。

- TP-701-2 (7 トンターボポンプ実験) 昭 52 年 10 月

測定点数: 17 点

センサ: KP/AuFe, Type T

校正は LN₂, LOX, ドライアイス+エチルアルコール (-72°C), 氷点の実校正から校正曲線を作成し用いた。2 点について対数アンプを試用したが不良であった。T センサの基準接点が接地形のため干渉トラブルを起こしている。

- TP-701-3 (7 トンターボポンプ実験) 昭 52 年 11 月

測定点数: 17 点

センサ：KP/AuFe, Type T

T センサの基準接点の絶縁を改良。2点について対数アンプを再び試みる。

- EG-TS-1 (豎形燃焼テストスタンド供給系特性試験) 昭53年6月

測定点数：6点

センサ：KP/AuFe, Type T

極低温温度校正装置(大阪酸素工業製)の完成をみたので永野研究室製のKP/AuFe 2本について18K~100K間11点の校正を行ない温度-出力曲線を作成した。KP/AuFeの補償接点, 基準接点における迷走起電力をなくすためコネクタや圧着端子による接続方法をやめ, ウッドメタルによる接続とした。改良した対数アンプを全計測項目に使用。

- GG-701-1 (7トンガスジェネレータ実験) 昭53年8月

測定点数：10点

センサ：KP/AuFe, Type K

校正装置故障のためKP/AuFe 1本のみその後校正で代表さす。Type KにはDCアンプ, KP/AuFeには対数アンプを用いたが, 対数アンプのドリフトが激しく, 他のデータより原点を推測して嵩上げ整理した。

- TP-702-1 (7トンターボポンプ実験) 昭53年10月

測定点数：18点

センサ：KP/AuFe, Type T

全センサについて20K~150K間14温度点およびLN₂実液の校正を行ない温度校正曲線を作成した。今回より×10⁴DCアンプ(ハネウェル社製)を4台試用, 結果良好。KP/AuFeセンサは実用品(岡崎製作所製)に切替えてゆく。延長素線, 基準接点は手作り。

- EG-TS-2 (豎形燃焼テストスタンド総合チェック)

TC-701-1 (7トン管構造燃焼器コールドフロー実験) 昭53年11月

測定点数：26点

センサ：KP/AuFe, Type T, K

Type Tシート形を3点用いる。×10⁴DCアンプは前回良好な結果を得たので今回より本格的に用いる。KP/AuFe 7本, Type T 2本について20K~300K間18温度点およびLN₂実液の校正を行なう。

- TC-103-1 (1トンチャンネル構造燃焼器燃焼実験) 昭54年3月

測定点数：12点

センサ：KP/AuFe, Type T

2計測点についてDCアンプと対数アンプの2系統計測による確度チェックを行なう。幸い対数アンプのドリフトは小さく良好な結果が得られた。

- TC-103-2 (1トンチャンネル構造燃焼器燃焼実験) 昭54年5月

測定点数：18点

センサ：KP/AuFe, Type T, PCoRT

対数アンプとDCアンプの両方で液温付近を測定したが対数アンプのドリフトが激しく正確な値が得られなかった。今回より試験的にPCoRT(φ1.6mmシース形)をKP/AuFe

と比較のため用い良好な結果が得られた。

○ GG-702-1 (7トンガスジェネレータ実験) 昭54年7月

測定点数：12点

センサ：KP/AuFe, Type K, PCoRT

PCoRTを試験設備系に2点使用。アンプは $\times 10^4$ DCアンプを全計測点に用い、対数アンプはモニタ用として2点のみ使用。

○ TC-701-2 (7トン管構造燃焼器燃焼実験) 昭54年8月

計測点数：18点

センサ：KP/AuFe, Type K, T (シート形), PCoRT

エンジン系に対数アンプ4点をDCアンプとパラに使いモニタとしてデータレコーダに収録。LH₂およびLOXタンク温度測定用にPCoRTをKP/AuFeと比較使用し同じくデータレコーダに収録する。比較値は良好。

○ GG-702-2 (7トンガスジェネレータ実験)

TP-702-2 (7トンターボポンプ実験) 昭54年9月

測定点数：25点

センサ：KP/AuFe, Type K, PCoRT

ガスジェネレータ系の分岐モニタ2点に対数アンプを、ターボポンプ系のモニタ計測点6点に $\times 500$ DCアンプを使用した以外は $\times 10^4$ DCアンプを充当。タンク4点は前回の比較計測が良好であったのでPCoRTを用いる。KP/AuFe 20本とPCoRT 1本を20K~300K間19温度点について校正する。

○ TP-702-3 (7トンターボポンプ総合組合わせ実験)

TP-703-1 (7トンターボポンプ実験) 昭54年11月

測定点数：21点

センサ：KP/AuFe, Type K, PCoRT

前回同様対数アンプは分岐モニタ2点のみに限る。TO-1, TH-1での不審値はセンサ突出長の不足が原因とわかり、適正なセンサ取付け寸法が問題となる。次回実験で露出形のKP/AuFeを使うためシース形との熱時定数比較チェックを行なう。

○ TC-701-3 (7トン管構造燃焼器燃焼実験) 昭54年12月

測定点数：14点

センサ：KP/AuFe (シースおよび露出形), Type K (シースおよびシート形)

エンジン系3点に初めてKP/AuFe露出形を試用、付近点のシース形との比較を行ない熱時定数、確度の優れていることを確認。今回より対数アンプを廃し $\times 10^4$ DCアンプを全計測点に用いる。

○ TP-703-2 (7トンターボポンプ実験) 昭55年3月

測定点数：22点

センサ：KP/AuFe, PRT, Type K

測温抵抗体の細径化を図るため試作した $\phi 1.0$ mmのPRT(PCoRTは現在のところ不可能)を供試体関係4点に使用。

○ ES-701-1 (7トンエンジンシステム実験) 昭55年7月

測定点数：18点

センサ：KP/AuFe, PCoRT, PRT, Type K

TC-701-3の経験からエンジン系に露出形のKP/AuFeを2点使用。実機計測に近づけるためType K 3本はねじ取付け、コネクタ接続形とした。PRTおよびPCoRTの短尺ものは校正装置にかからないため300mmLのダミーセンサでの校正值で代表させた。測温抵抗体の電源装置として20ch定電流発生器を新設し今回より使用した。アンプのリモート校正回路を新設し動作チェックを行なったが信頼性に欠ける。KP/AuFeセンサの延長素線の破断事故が続発するため $\phi 0.2\text{ mm}$ より $\phi 0.5\text{ mm}$ への切替えを順次進める。

○ GG-703-1 (7トンガスジェネレータ実験) 昭55年8月

当実験はIHI相生実験所で行なわれ、温度班としては参加しなかった。

○ ES-701-2 (7トンエンジンシステム実験) 昭55年9月

測定点数：22点

センサ：KP/AuFe, Type K, PCoRT, PRT

エンジン系に露出形KP/AuFe 2点を使用。O/F測定のため供試体関係8点、設備系2点についてマイコンによる収録を行なう。リモート校正回路の動作チェックを継続する。今回よりCPUへの読み込み校正值(上中下3点)と実校正值をもとにCPUの出力-温度関係をマイコンで算出し、データ整理に充てた。

○ TP-703-3 (7トンターボポンプ総合組合わせ実験) 昭55年10月

測定点数：16点

センサ：KP/AuFe, Type K, PCoRT, PRT

リモート校正回路の動作チェックを全期間に亘って行ないデータを集積した結果、アンプのドリフトチェッカとしての役目は果たすがcal装置としては精度に欠けるため、従前通り基準電圧発生器を用い各チャンネル毎に校正電圧を入れる。DCアンプのドリフトチェックを6時間に亘って行ない0~20mVに収まっていることを確認。

○ TP-1001-1 (10トンターボポンプ冷走実験) 昭55年11月

測定点数：17点

センサ：KP/AuFe, PCoRT, PRT

センサのインピーダンスとアンプ入力回路のインピーダンスの不整合で、基準電圧発生器で入力したときのアンプ出力とセンサ起電力によるアンプ出力の不一致が発見され、アンプのインピーダンスを変更して解決する。DCアンプのドリフトチェックを前回に引きつづき行ない5.5時間で全チャンネル0~18mVに収まっていることを確認。測温抵抗体用20ch定電流電源装置は出力変動が認められるため使用を中止し標準電圧電流発生器に置きかえる。

○ ES-702-1 (7トンエンジンシステム実験) 昭55年12月

測定点数：22点

センサ：KP/AuFe, Type K, PCoRT, PRT

露出形KP/AuFeセンサをLH₂およびLOXインジェクタ点に使用。測温抵抗体の印加

電流は従来 PCoRT は 1 mA, PRT は 5 mA であったが, 自己加熱の影響をおそれて全品 1 mA 印加に変更する。供試体関係 10 点, 設備関係 2 点はマイコンによる計測を併用。前回問題となった 20 ch 定電流電源装置のチェックを行ない雰囲気温度の変動による異常とわかり改造にかかる。温度校正装置の標準温度計の脚線が脱落し今回 2 回行なう予定の校正のうち, 第 2 回目は中止。

○ GG-1001-1 (10 トンガスジェネレータ/熱交換器実験)

GG-703-2 (7 トンガスジェネレータ/熱交換器実験) 昭 56 年 1 月

測定点数: 16 点

センサ: KP/AuFe, Type K, PCoRT

供試体関係 3 点, 設備関係 6 点にマイコン収録を併用。20 ch 定電流電源装置の温度補償を終え, 雰囲気温度の急変チェックの結果 15°C 幅で 0.5% に収まることを確認。

○ TP-1002-1 (10 トンターボポンプ総合組合わせ実験) 昭 56 年 5 月

測定点数: 26 点

センサ: KP/AuFe, Type K, T, PCoRT, PRT

×10⁴ DC アンプの台数不足で×5000 DC アンプを 4 台使用。14 計測点についてマイコン収録を併用。6 計測点についてカラーディスプレイによるモニタを行なう。

GG-1001-2-1 の特定 ch, 特定秒時 (TK-12, TK-13 の 2 sec, 9 sec 時点) を選び CPU 出力とマイコン出力の比較チェックを行ない液温付近で 0.05 K~0.48 K に収まっていることを確認。8 月実験用の長尺 PCoRT センサの校正を行なう。

○ ES-1001-1 (10 トンエンジンシステム実験) 昭 55 年 7 月

測定点数: 21 点

センサ: KP/AuFe, Type K, E (CRC), PCoRT, PRT

TT-1 を除く全点についてマイコンを併用。校正器の点弧ユニット故障があり 300 K 点の校正不能, 室温 294.7 K で代用さす。×10⁴DC アンプの全品チェックを行ない 2 台不調のため×5000 アンプで代用。

○ TK-701-1 (タンク断熱性能実験) 昭 56 年 8 月

測定点数: 4 点

センサ: PCoRT

収録はマイコンおよびペンレコで行なう。2733 mmL および 1195 mmL の長尺 RT を用いたがコネクタ部の絶縁不良がある。次回はコネクタ部をポッティングすることとする。タンク昇温挙動をみるため 52 hr に及ぶ長時間計測を行なう。

○ HST-701-1 (7 トンステージシステム実験) 昭 56 年 10 月

測定点数: 27 点

センサ: KP/AuFe, Type K, PCoRT, PRT

タンク注液, エンジン予冷, 燃焼試験, タンク昇温の全域にわたってマイコン収録を併用しデータ処理。CPU はマイコン収録のない項目についてのみデータ処理を行なった。今後センサおよびアンプの測定個所との対応を保つため, センサ履歴, アンプ履歴を明確にしてゆくこととする。

- HST-701-2 (7トンステージシステム実験) 昭56年12月

測定点数: 27点

センサ: KP/AuFe, Type K, PCoRT, PRT

測定項目, 収録方法ともに前回と同じ. マイコンによるモニタ収録に時間ずれのあることを発見, プログラム改造. $\times 10^4$ DC アンプのドリフトチェックを4日間連続作動で行ない, 1chのみ出力で20mV程度のずれがあったがその他は良好.

- HST-1001-1 (10トンステージシステム実験) 昭57年4月

測定点数: 29点

センサ: KP/AuFe, Type K, PCoRT, PRT

今回CPUがFACOM U-1500に更新され温度実単位でデータ処理されるため, マイコンは長時間計測を要するタンク内温度に限った. 従来形CPUの入力幅が ± 5 Vであったものが ± 10 Vに拡張されたのを機にアンプ出力幅の倍増を試みた. LH₂ および LOX のポンプ入口温度について広範囲(20~300 K および 90~300 K) と狭少範囲(20~40 K および 90~120 K) の2系統分岐収録を行なった.

校正器にかからない短尺ものを除き全センサの実校正を行なった. 今後はセンサの劣化等を考慮して毎回実校正を行なうこととする. アンプの直線性チェックを全品について行ない, 20V幅での偏差は0~28mVであり0.15%に収まっていることを再確認した.

短尺センサの校正が不能な点, センサの適正な差込長の確立を除いては, 温度計測システムはほぼ完成したといえる.

- TC-1002-1 (10トンチャンネル構造燃焼器燃焼実験) 昭57年9月

測定点数: 16点

センサ: KP/AuFe (シースおよび露出形), Type K (シースおよびシート形)

実験に先立って7月に実校正を行なっている. インジェクタ部など3点にKP/AuFe露出形を, 燃焼室外板など4点にType Kシート形を用いる.

収録はすべてCPUで行なった. 実校正値を多点(最高20温度点)読み込ませ, 校正点間は直線補間で計算させて温度実単位でデータを得た. モニタはGD(グラフィックディスプレイ)で行ない, 再生冷却出口部および水素インジェクタ部については狭少範囲(20~160 K)の分岐データをモニタした.

TK-12およびTK-23にセンサ差込長の不足による異常値がみられたが, 差込長の修正によって補った.

6. 結 論

温度測定の精度, 確度を支配している要因としては, (1)校正精度(校正器の性能, 標準器固有の誤差, 受験器固有の誤差), (2)熱接触の良否(センサ差込長の適否, 熱時定数), (3)電気計器(増幅器, 標準電圧発生器, 定電流電源装置, デジタルボルトメータ)の精度, 安定性およびノイズ侵入, (4)収録機器(CPU, マイコン等)の精度——など多くの因子がある.

われわれは数多くの実験でこれらの問題に当面し, 経験的に改良を重ね, ようやくにし

て総合誤差 0.5 K 程度の温度計測システムの確立を見るに至った。最終目標としている確度 0.1 K にはまだ道は遠いが、極低温温度計測の実例としてひとつの参考になれば幸いである。

謝 辞

極低温温度計測にあたって適切なお指摘ご教示をいただいた倉谷健治教授、永野弘 助教授（東大物性研）、棚次亘弘助教授、成尾芳博助手、計測に協力いただいた小田欣司技官、梁洪森研究生、神谷保羅技官、およびメーカーサイドとして協力いただいた(株)北辰電機製作所、(株)岡崎製作所、大阪酸素工業(株)、住友重工業機械(株)、石川島播磨重工業(株)、川崎重工業(株)の方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] (邦訳資料) 計量研究所訳編：“1968 年国際実用温度目盛”，コロナ社 (1971)。
- [2] D. H. Sinclair, H. G. Terbeek, and J. H. Malone：“Cryogenic Temperature Measurement”, Application of Cryogenic Technology, Vol. 3, pp. 1~38, Xyzxy Information Co., Cali., (1971)。
- [3] 加勇田他：“LH₂/LOX エンジン試験における温度の計測”，推進系シンポジウム(昭 54 年度)，東大宇宙航空研，pp. 311~322 (1979)。
- [4] L. L. Sparks, R. L. Powell：“Available Low Temperature Thermocouple Information and Services”，National Bureau of Standards Report 8750 (1965)。
- [5] L. L. Sparks, R. L. Powell, and W. J. Hall：“Cryogenic Thermocouple Tables”，National Bureau of Standards Report 9712 (1968)。
- [6] L. L. Sparks, W. J. Hall：“Cryogenic Thermocouple Tables-Part II, Reference Materials vs. Thermocouple Alloys”，National Bureau of Standards Report 9719 (1968)。
- [7] L. L. Sparks, W. J. Hall：“Cryogenic Thermocouple Tables-Part III, Miscellaneous and Comparison Material Combinations”，National Bureau of Standards Report 9721 (1969)。
- [8] L. L. Sparks, R. L. Powell：“Low Temperature Thermocouples (KP, 'normal' silver, and copper versus Au-0.02 at%Fe and Au-0.07 at%Fe)”，Journal of Research of the National Bureau of Standards, Vol. 76A, No. 3 pp. 263~283 (1972)。
- [9] R. L. Rusby：“Temperature, its Measurement and Control in Science and Industry”，Instrument Soc. Am. Vol. 4, p. 865 (1972)。
- [10] 三井, 白鳥, 三沢, 小川：“白金コバルト線による工業用極低温測温抵抗体”，第 17 回 SICE 学術講演会予稿集 No. 1507 (1978)。
- [11] 北辰電機技術文献：“極低温用温度計”，北辰ニュース, Vol. 22, No. 1 (1979)。