松下電器製カーボン抵抗体温度計の 0.4 K までの特性

後 藤 昌 彦* 栗 野 満

東京工業大学理学部応用物理学科 東京都目黒区大岡山 2-12-1

*現住所 玉川大学工学部物理教室 東京都町田市玉川学園 6-1-1

(1972年10月31日受理)

“Characteristics of Matsushita Carbon Resistors as the
Thermometer for Use between 0.4K and 4.2K”

Masahiko GOTOH* and Mitsuru AWANO

Department of Applied physics, Faculty of Science, Tokyo Institute of Technology
Ookayama 2-12-1, Meguro-ku Tokyo*Present address; Department of Physics, Faculty of Engineering, Tamagawa Univ.
Tamagawagakuen 6-1-1, Machida-shi, Tokyo

(received October 31, 1972)

Synopsis :

Matsushita radio carbon resistors (grade ERC-18GK nominal resistance 100Ω and wattage $1/8$) are found to have useful characteristics for the thermometer in a temperature range between 0.4K and 4.2K. Their characteristics are reproducible to within 1.5% in average after thermal cycling between room temperature and 1K. Temperatures calculated by the formula $T = (A \log R + B / \log R + C)^{-1}$ are within 0.01K from that of measured temperatures in the region 0.4K-4.2K. The sensitivity is about $300\Omega/\text{deg.}$ at 0.4K.

§1 はじめに

ラジオ用ソリッド抵抗体は20K以下の極低温実験に実用的な温度計としてしばしば使われている。しかしその有用性は室温と極低温の間の熱サイクルに際して再現性が良いかどうかにかかっている。米国の Allen Bradley 社製および Speer 社製の抵抗体は広く使われているものである。前者は大体 2K~20K の温度範囲で有用であり Clement 等¹⁾ がその抵抗体の特性を詳しく調べている。そして再現性は温度にして $\pm 0.1\%$ であると報告している。後者は 1K 以下で有用なものであり Black 等²⁾, Edelstein 等³⁾, Saito 等⁴⁾ がその特性を調べている。Edelstein 等によると 0.075K~1K の範囲で温度の再現性は $\pm 0.3\%$ である。ところが Allen Bradley 社製の抵抗体は約 1.2K の温度

でどの種類のものも数百 K Ω 以上の抵抗値となってそれより低い温度の測定には使えなくなる。また Speer 社製の抵抗体で市販の 1/2W 型のは形状が大きすぎて使えない場合も多い。

このようなことから本研究では 1K 以下の温度範囲で好ましい特性をもつこと、そしてなるべく小型であることという要求にこたえるために松下電器製カーボン抵抗体 (ソリッド抵抗) をとりあげその極低温用温度計としての諸特性を調べた。用いた抵抗体は Grade ERC-18GK のもので公称抵抗値 100Ω , 1/8W 型のものである。

§2 実験

極低温装置は試作した連続動作型ヘリウム-3クライオスタットを使用した。ヘリウム-3液溜およびカーボ

Table 1 List of thermometers

Resistor thermometer		Na 100-1	Na 100-2	Na 100-3	Na 100-4	Sp 220	AB 56
Manufacturer		Matsushita Electric				Speer	Allen Bradley
Size (dia. ×length)	mm	1.5φ×4	1.5φ×4	1.5φ×4	1.5φ×4	3.2φ×8	1.5φ×4
Nominal resistance	ohm	100	100	100	100	220	56
Wattage	W	1/8	1/8	1/8	1/8	1/2	1/8
Resistance at 290K	ohm	110.3	107.7	99.0	94.6	223.8	56.8
at 4.2K	ohm	176.6	156.2	161.3	137.6	420.7	432.8
at 1.2K	ohm	266.0	215.4	246.0	185.7	693.0	9171
at 0.4K	ohm	547.8	389.2	514.7	321.3	—	—
Sensitivity (dR/dT) at 1.2K	ohm/deg	42.5	27.5	40.2	22.7	136	1.23×10 ⁴
Min. detectable temperature #1	deg	4.23×10 ⁻³	6.55×10 ⁻³	4.48×10 ⁻³	7.93×10 ⁻³	1.35×10 ⁻³	1.46×10 ⁻⁵

#1 These are the figures in such a situation as this experiment that the resistance is measured with accuracy of 0.18 ohm.

ン抵抗体温度計取付部は Fig. 1 に示されている、1.5 mmφ の抵抗体は銅ブロックにあげられた 1.6mmφ の穴の中に入れられている。ヘリウム-4 の温度領域 (1.2K~4.2K) の実験では液体ヘリウム中に抵抗体が直接浸るようにしたが、ヘリウム-3 の温度領域 (0.3 K~1.0K) では Fig. 1 からわかるようにヘリウム-3 液溜の低温を銅ブロックの伝熱で導いて試料を冷やしている。そして温度分布が一樣になるように試料室にはヘリウム-4熱交換ガスを入れた。

抵抗体の抵抗値測定は直流電位差計方式でおこなった。使用した計器は横河電機製 P-7B型電位差計および VN-11 型電子式検流計である。抵抗体から四端子式でとり出されたリード線は抵抗体と同温度の所で熱的にアンカーされ、また銅端子から 0.04mmφ のマンガニン線に接続され、そして 4.2K の温度のところで再び熱的にアンカーされるとともにマンガニン線から 0.08mmφ の銅線に接続されて室温部にとり出されている。このようにすることによって寄生熱起電力は 3 μV 以下におさえることができた。これによる誤差は高温になるに従って大きくきいてくるが、1.3K で温度にして 0.15% の程度である。測定電流は 1μA でありそれによるジュール熱発生は高々 5×10⁻¹⁰W であるから問題はなかった。

温度測定は 1.2K~4.2K の範囲はヘリウム-4 蒸気圧を水銀およびオイルマノメーターで測定することによってなされた。1K 以下ではヘリウム-3 の蒸気圧をマクレオードゲージで測定することによってなされた。ヘリウム-3蒸気圧測定用導管 ((Fig. 1 参照) は

Fig. 1 He³ evaporator and sample resistor holder : C) carbon resistance thermometer, G) germanium resistance thermometer, A) thermal anchor, V) He³ vapour pressure line.

クライオスタットの熱設計上の考慮から $2\text{mm}\phi$ のものを使ったので Knudsen 効果による低温部と室温部の圧力差がかなりになった。この補正量は Thomas 等²⁾ の表により求めた。低温にゆくほど大きな影響を及ぼし 0.4K 近辺の温度では 0.03K の補正量となった。蒸気圧温度計の誤差および再現性はゲルマニウム抵抗温度計（ヘリウム-3 温度用、未校正ユニット、Type CR-50, Cryo-cal 社製）により確かめられた。その結果 0.4K 近辺で 3.2% 、 $1.2\text{K}\sim 4.2\text{K}$ の温度範囲で 1.3% 程度の偶然誤差が生じていることがわかった。

§3 結果と考察

3.1 温度対抵抗値曲線および感度曲線

測定された4個の抵抗体（Na 100-1, Na 100-2, Na 100-3, Na100-4）の抵抗値、感度などが Table 1 に示されている。比較のために Allen-Bradley 社製の抵抗体（AB 56）および Speer 社製の抵抗体（Sp

Fig. 2 Resistance vs temperature characteristics of resistor thermometers.

220) の値も併せて示した。Fig. 2 には温度と抵抗値の関係が両対数グラフで示されている。室温の抵抗値が異なっているので測定された4個の抵抗体のグラフは一致していないがほぼ相似形をしていることがわかる。実線は実験式をあらわしている。

Fig. 3 には感度 dR/dT を示した。Fig. 4 は比感度 $(dR/dT)/R$ である。これらの図から比感度の大きさは AB 56, Sp 220, Na 100 の順であることがわかる。実用上大切な量として最小検出可能温度が考えられる。これは抵抗測定の精度と dT/dR の積で与えら

Fig. 3 Temperature dependence of sensitivity (dR/dT) of resistor thermometers.

Fig. 4 Temperature dependence of sensitivity ratio $\left(\frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}\right)$ of resistor thermometers.

れる。本実験の場合は測定電流を $1\mu A$ にとると抵抗値測定の精度は 0.18Ω である。これらのことから算出した最小検出可能温度が Table 1 に与えられている。

3.2 実験式および再現性について

カーボン抵抗温度計の抵抗値と温度との関係を与える実験式には様々なものが提案されている¹⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。本研究では Clement 等¹⁾の式(1)を採用して、最小自乗法によって係数 A, B, C を決定した。

$$\frac{1}{T} = A \log_{10} R + \frac{B}{\log_{10} R} + C \quad (1)$$

実験式として(1)式を使う

ことが適当であるかどうかは次のようにして検討した。最小自乗法によって決定された係数 A, B, C および実測値 R をつかって(1)式より算出された温度を T_E とするとき、実測された温度 T_M を真の値とみなしたときの T_E の平均自乗誤差 S_{TE} と T_M に含まれている機器誤差 S_{TM} の比をとってみる (χ^2 検定)。この比の値が1に近いことは温度測定の精度と実験式の精度が同程度であることを示すからこの実験式の適用は妥当であることになる。Table 2 の“goodness”の欄にその比の値が与えられている。今の場合ほとんど1に近いので満足すべきものと思われる。

Fig. 5 は抵抗体 Na 100-4 について $(T_E - T_M)/T_E$ を描いたものである。その偏差の平均値は 1.5% である。

再現性については次のようにして検討した。ある1回の測定で得られたデータからきめた係数 A, B, C をつかった式(1)に次回の測定の R を代入して得られた温度 T_E' とそのときの実測された温度 T_M とを比べてみることである。毎回の測定点の数および分布を大体同じようにとれば、抵抗体素子の変質、損傷がない場合は $(T_E' - T_M)/T_E'$ のグラフ Fig. 6 は Fig. 5 と同じような様相を呈するはずである。見比べてみると、バラツキはやや大きい、大体中心線の上下に点が散在している。温度測定の精度などを考えあわせてみて、抵抗体素子の変質は起っていないとみて良いと

Table 2 RESULTS OF LEAST SQUARE FITTING

Date of run; '71.11.20-21		Temperature range; 0.37-4.2K			
		Na 100-1	Na 100-2	Na 100-3	Na 100-4
(1)	A	13.167	17.440	12.526	18.764
(1)'	S_A	0.086	0.188	0.077	0.240
(2)	B	54.268	68.421	49.515	69.732
(2)'	S_B	2.879	5.498	2.428	6.258
(3)	C	-53.530	-69.216	-49.851	-72.493
(3)'	S_C	1.995	4.075	1.732	4.904
(4)	Goodness	0.954	1.115	1.640	1.128
(5)	S_{TE} (deg)	0.0098	0.0119	0.0169	0.0116
(6)	S_{TM} (deg)	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103
(7)	N	20	20	20	20

A, B, C; Fitting coefficient (see equation(1))

S_A, S_B, S_C ; Standard deviation of coefficient A, B, C respectively

Goodness; Measure of the validity of least square fitting (Chi square test)

S_{TE} ; Estimated standard deviation of temperature

S_{TM} ; Weighted average of individual standard deviation of temperature

N; Number of the data points

Fig. 5 Temperature deviation of each data points from the value evaluated by the determined fitting equation Bar. A and B indicate probable errors of the standard thermometer near 0.4K and 1.2K-4.2K respectively. Resistor thermometer; Na100-4.

Fig. 6 Reproducibility of the resistor thermometer Na100-4. Each point indicates deviation from a fitting curve with coefficients determined by the data of the previous run. Bar A and B indicate probable errors of the standard thermometer near 0.4K and 1.2K-4.2K respectively.

思われる。

§4 結 論

以上述べてきたことから、松下製カーボン抵抗体

は、4.2K 以下 0.4 K までの温度範囲において、充分信頼性をもった温度計として使用可能であるといえる。すなわち、基準温度測定の精度の範囲内 (§3.1 参照) では、数回の室温と 0.4K の間の熱サイクルで変質は見出されないことが確認された。また温度と抵抗値の関係式は Clement 等の式 (1) がよくあうことがわかった。

最後に、本実験中、寒剤供給の労をとっていただいた、極低温実験室の村上氏、および伊藤氏に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) J.R.Clement and E.H.Quinnell: Rev. Sci. Instrum. 23 (1952) 213
- 2) W.C. Black, Jr., W.R. Roach, and J.C. Wheatley: Rev. Sci. Instrum. 35 (1964) 587
- 3) A.S. Edelstein and K.W. Mess: Physica 31 (1965) 1707
- 4) S.Saito, T.Shiratori, G.Terui, M.Kumano and E.Kanda: Supplement to the bulletin of the International Institute of Refrigeration (1970) 40
- 5) Thomas R.Roberts and Stephen G.Sydriak: Phys. Rev. 102(1956) 304
- 6) J.A. Rayne: Aust. J. Phys. 9 (1956) 189
- 7) G.K. White: *Experimental techniques in low temperature physics* 2nd ed. Oxford Univ. Press (1968) Chapter IV
- 8) J.Rafalowicz and B.Sujak: Acta Physica Polonica 25 (1964) 599