

1、目的

抵抗の温度による特性を測り、正しい抵抗値を示す抵抗を選出する。選出された抵抗器を CRYOSTAT 内の Evaporator、Separator に取り付けることで抵抗値を測定し、温度に換算することによって温度を測定する。また松下カーボンソリッド抵抗器はカーボン製による抵抗で、低温での抵抗値に信頼性があり、低温での抵抗値の参考資料があるため松下抵抗を測定する。

しかし抵抗値の経年変化が炭素皮膜抵抗器 (0.5%以下)、金属皮膜抵抗器 (0.3%以下) と比べ、大幅に大きいため (約 15%) 使用の際は抵抗値を確認のため測定することを奨める。

2、原理

・ AVS-45 抵抗測定器の操作原理

reference voltage として 2.5V の電圧が供給される。この電圧がデジタル電圧計 (DVM) に観測される。しかしそのまま 2.5V として観測されるわけではなく電圧の発信源 (1) から DVM までの区間で電圧が変化してしまう。そのためここでは V_r とする。

まず一定電圧 V_r は chopper へ入力され矩形波となって出力される。この chopper の役割は直流の電圧を矩形波の交流電圧にすることである。交流の電圧にする利点は変圧が可能になることである。次に、chopper から出力された電圧 (交流電圧) は attenuator (2) (減衰器) へ入力され、電圧は減衰される。これは後に出てくる参照抵抗にかける電力が大きすぎると抵抗が発熱してしまい、その温度での抵抗値が正確に測定できないため、電圧を減衰させ抵抗にかかる電力を抵抗が発熱しない程度にする。attenuator(2)から出力された電圧は減衰率 k を伴って kV_r として出力される。

減衰器から出力された電圧 kV_r は ac-amplifier(3)で参照抵抗にかかる電圧 $V_1 - V_2$ と kV_r が等しくなるように feed back が起こり、一定の excitation voltage が出力されるようにする。excitation voltage は attenuator(5)で調節することができる。feed back され ac-amplifier(3)から出力された電圧は PSD(phase sensitive detector)に入力される。PSD の役割として位相を調節する。交流電圧の位相の極性を反転させ integrator(4)で積分し一定電圧として出力する。integrator で積分する際に交流電圧の位相がずれていると電圧が少なく出力されてしまったり 90° 位相がずれてしまうと電圧が 0 になってしまう。故に電圧が最大になるように位相を調整している。以上の説明を図に示す。

図1 ロックインアンプの出力図

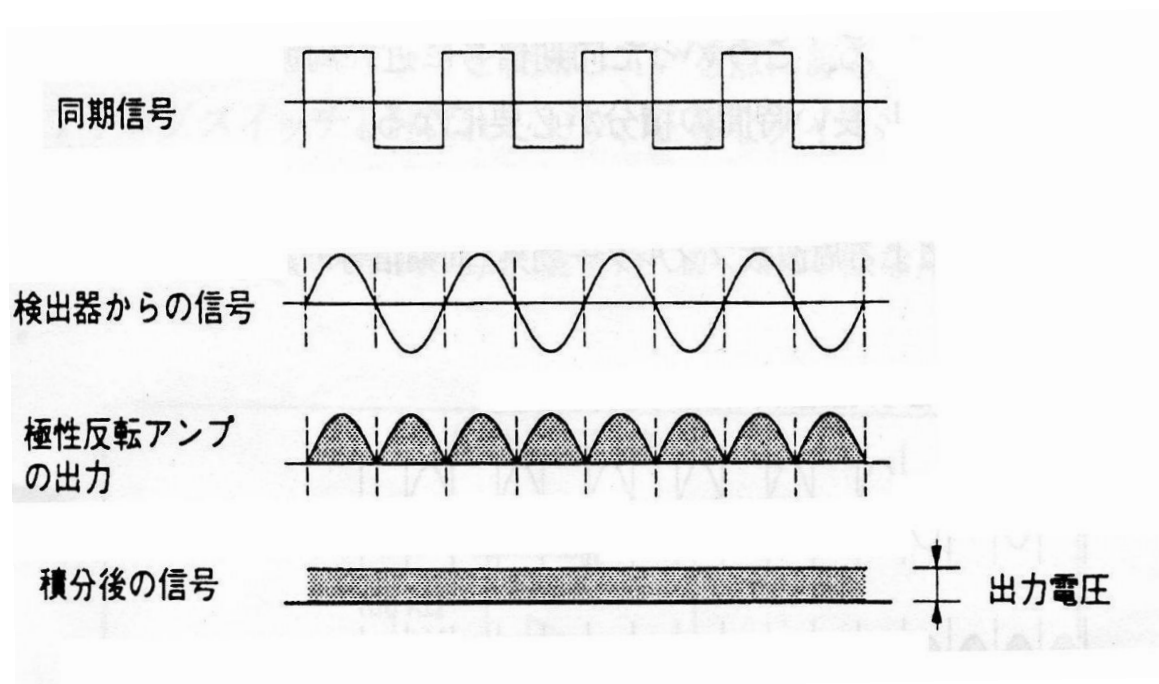
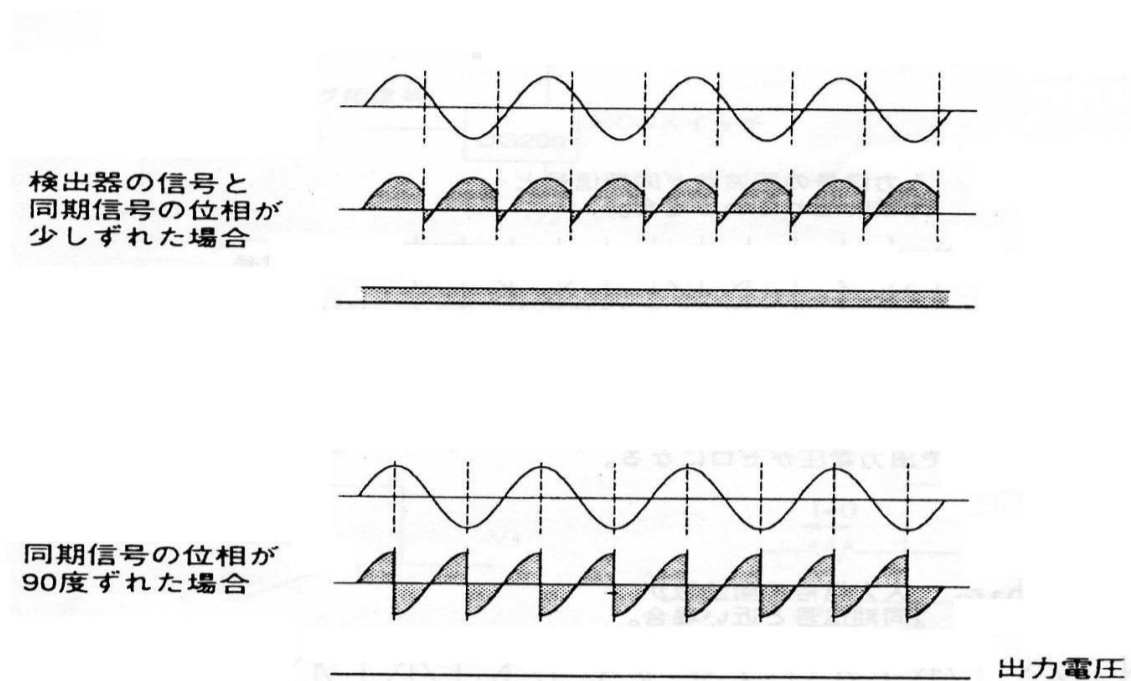


図2 ロックインアンプ出力図 (位相ずれ)



調整する際に見本になる周波数 mains synchronization から PSD へ送っている。integrater から出力された電圧を chopper でもう一度矩形波にし attenuator(5) で参照抵抗に出力する電圧を調節する。feed back されることによって抵抗に流れる電流は $I = \frac{kV_r}{R_r}$ になり、 R_r は参照抵抗であり AVS-45 の中に $10\Omega \sim 1M\Omega$ (10Ω 、 100Ω 、 $1k\Omega$ 、 $10k\Omega$ 、 $100k\Omega$ 、 $1M\Omega$) まで備え付けられている。 R_r はフロントパネルの resistance range を変えることによって自動で切り替わる。

次は $I = \frac{kV_x}{R_x}$ が R_x にかかる。 R_x は未知の抵抗で測定対象となる抵抗器である。

また r_1, r_2 は銅線抵抗でありセンサー部分の銅線が約 1 m と長いので銅線抵抗として表示されている。

ac-amplifier(3)で起きる feed back と同じように ac-amplifier(6)で $V_3 - V_4$ と kV_x

が等しくなるように feed back がおき電圧 V_x が電圧計で測定される。

ここで次の式が成立する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \bullet I = \frac{kV_r}{R_x} \\ \bullet IR_x = kV_x \\ \bullet IR_r = kV_r \\ \therefore R_x = \frac{V_x}{V_r} R_r \end{array} \right.$$

この式から測定対象 R_x が測定できる。

resistance range を AUTO mode にすることによって自動で参照抵抗が切り替わるが、この原理として $\frac{V_x}{V_r}$ が 1 になるように resistance range を選んでいる。

例として測定対象の抵抗が $1k\Omega$ としたとき、参照抵抗が 10Ω であると $\frac{V_x}{V_r}$ は 100 でなければならない。また逆に測定対象の抵抗が 10Ω としたとき、参照抵抗が $1k\Omega$ であると $\frac{V_x}{V_r}$ は 0.01 でなければいけない。 $\frac{V_x}{V_r}$ が 1 以外の数値を示すとそ

れが参照抵抗にかかり、結果として測定対象の値が導出されるのだから誤差が大きくなってしまいます。 V_x と V_r は等しくなるようにし限りなく 1 に近い値を示すようにしてある。

※ この装置では低周波数(25/30Hz)を用いている。銅線のよじれによってできてしまったコイル、銅線同士が接近することでできてしまうコンデンサーのインピーダンスを無視するために低周波を用いる。
各インピーダンスの式は次の通りである。

$$\text{コイル ; } Z = i\omega L \quad \text{コンデンサー ; } Z = \frac{1}{i\omega L}$$

※ 炭素皮膜抵抗器はセラミック（金属酸化物）基体の表面に炭素皮膜を施し、らせん状に溝を切ってトリミングしたものであり、金属皮膜抵抗器は炭素皮膜抵抗器の構造を金属皮膜にしたものである。これらの抵抗温度特性は温度を上げると、抵抗値は上がり、温度を下げると抵抗値は下がる特性がある。これは抵抗を構成している物質が温度を上げることによって熱励起し、熱運動が激しくなることで通電を妨げている。逆に温度を下げると熱運動がおさまり通電しやすくなる。金属の場合は自由電子が励起されているので自由電子のことは問題にしない。

しかしソリッド抵抗器（炭素と樹脂等の混合物を抵抗体としたもの＝非金属）の場合、温度が下がると自由電子の熱励起が弱くなり炭素と樹脂のクーロン力による束縛を受けるようになる、そのため励起した自由電子が温度を下げていくにつれて少なくなり電気を通さなくなる。ゆえに抵抗値が上昇する。また温度を高温にするにつれて逆の現象がおこり励起した自由電子が不純物の束縛から解放されるので通電しやすくなる。ゆえに抵抗値が減少する。

2、実験方法

抵抗を測る温度は液体窒素でおよそ 77.4K、液体ヘリウムでおよそ 4.2K また室温(298.00K)で行い、室温→液体窒素→室温の順で測定を行う。このとき液体窒素での抵抗値、液体ヘリウム、室温の抵抗値は参考資料から次の通りである。これからは液体窒素に入れる前の室温での抵抗値を **R.Tbefore**、液体窒素を Liq.N2、液体窒素に入れた後の室温での抵抗値を **R.Tafter** とする。

表 1 抵抗 100Ω における抵抗値と温度の関係 (参考資料)

温度(K)	298.16(K)	77.4(K)	4.2(K)
抵抗値(Ω)	101.0	114.3	175
	103.1	115.5	174
	101.3	114.8	174
	99.74	112.5	171
	99.42	111.6	185

R.Tbefore→Liq.N2→**R.Tafter** に抵抗値を測定するときは装置のパネル display に表示される数値が変化しなくなるまで (約 2～5 分)

AUTOMATIC RESISTANCE BRIDGE AVS-45



(使い方)

1) コンセントを入れる前に次の位置にピンがセットされているかを確認する。

- CAL/MEAS in CAL position
- FAST/SLOW in SLOW position
- R/ Δ R in R position
- AUTO/MAN RANGE in MAN position
- AUTO/MAN EXCITATION in MAN position

2) コンセントをいれ装置の電源を入れる。

3) 装置は電源を入れると Ohm Range \rightarrow 2kohm, excitation voltage \rightarrow 3mV を選択しているのので、display が 10000 (\pm 1) を表示するまでそのまま少なくとも 30 分はそのままにしておく。

4) フロントパネルにある SCALE をマイナスドライバーで回転させることによって微調整を行うことができる。

5) CAL から MANS へピンを変更し、抵抗値を測定する。

6) この装置の分解能は以下の通りである。

EXITATION(μ V)

RESISTANCE	10	30	100	300	1000	3000
10ohms	30m Ω	10m Ω	3m Ω	2m Ω	1 m Ω	1 m Ω
100ohms	300m Ω	100m Ω	30m Ω	20m Ω	10m Ω	10m Ω
1kohms	3 Ω	1 Ω	0.3 Ω	0.2 Ω	0.1 Ω	0.1 Ω
10kohms		15 Ω	5 Ω	2 Ω	1 Ω	1 Ω
100kohms			150 Ω	50 Ω	20 Ω	10 Ω
1Megohms				1k Ω	500 Ω	200 Ω

100 μ Ω での分解能は R \times 10 mode 、 20ohm range で測定可能。

7) Δ R mode では参照抵抗と測定対象となる抵抗値の差を見ることができる。

8) センサー部分のコネクターは衝撃に弱いのでコネクター部分の配線が接続されているか確かめておく。

3、実験結果

測定した実験データを示す。

	R.T before	Liq.N2	R.Tafter
M601	122.60	130.00	122.57
M602	115.92	126.88	116.50
M603	103.60	116.23	103.75
M604	116.86	126.58	117.07
M605	110.38	123.60	110.42
M606	106.53	120.25	106.50
M607	104.64	118.00	104.73
M608	102.53	115.62	102.52

M609	106.04	119.33	106.32
M610	124.40	136.53	126.12
M611	108.71	121.62	108.94
M612	107.34	122.16	108.68
M613	108.60	121.97	108.96
M614	105.84	119.18	105.93
M615	104.72	117.60	104.79
M616	110.25	122.08	110.83
M617	109.27	123.42	109.72
M618	117.03	127.77	117.26
M619	110.46	123.45	110.63
M620	122.77	133.70	122.93
M621	105.50	118.31	105.64
M622	111.23	124.13	112.50
M623	104.37	117.42	104.73
M624	121.97	133.02	121.97
M625			
M626	105.70	118.22	105.90
M627	111.50	124.14	111.66
M628	115.32	125.38	115.57
M629	106.88	119.29	107.04
M630	113.51	124.06	113.51
M631	116.45	126.27	116.75
M632	113.35	125.35	114.37
M633	105.38	118.64	105.55
M634	103.74	116.20	103.79
M635	108.26	121.57	108.78
M636	107.09	118.20	107.41
M637	106.88	120.84	106.97
M638	104.47	116.86	104.52
M639	106.39	119.13	106.25
M640	100.53	112.93	100.65
M641			
M642	106.07	119.08	106.25
M643	108.81	121.70	109.06

M644	101.98	114.53	102.19
M645	105.00	118.09	105.55
M646	115.37	126.14	116.04
M647	102.71	115.49	102.77
M648	102.30	114.61	102.57
M649	104.23	117.65	105.06
M650	113.73	124.62	113.76
M651	116.33	127.53	117.30
M652	119.71	129.02	119.73
M653	106.36	119.25	106.65
M654	118.51	128.63	118.94
M655	103.97	117.33	104.74
M656	109.61	123.01	109.96
M657	119.35	131.20	120.10
M658	102.84	114.76	103.08
M659	110.29	122.84	110.71
M660	105.13	118.17	105.35
M661	119.16	128.37	119.01
M662	106.06	118.70	106.36
M663	117.34	125.57	117.13
M664	116.04	131.59	118.22
M665	118.79	131.60	119.71
M666	108.52	121.40	108.77
M667	109.71	123.34	110.53
M668	110.18	122.95	110.43
M669	109.52	123.49	110.58
M670	108.79	122.40	109.23
M671	106.29	119.17	106.77
M672	107.92	121.17	108.49
M673	118.18	128.67	118.50
M674	106.08	118.57	106.20
M675	112.65	125.15	113.14
M676	104.95	118.09	105.15
M677	111.76	125.83	112.04
M678	105.49	118.64	106.09

M679	109.43	122.35	109.84
M680	105.23	118.24	105.88
M681	106.19	119.03	106.67
M682	107.54	120.18	107.60
M683	116.73	128.28	117.35
M684	111.80	125.66	112.18
M685	108.48	120.74	108.94
M686	107.50	120.67	107.79
M687	111.15	123.21	112.05
M688	102.78	115.74	103.57
M689	109.22	122.53	109.90
M690	107.03	119.83	107.43
M691	115.43	125.57	115.63
M692	118.76	130.12	119.28
M693	102.45	114.84	102.74
M694	111.10	121.03	109.40
M695	106.66	120.27	106.95
M696	119.50	130.86	120.17
M697	105.84	119.77	106.85
M698	104.68	117.72	105.27
M699	116.43	127.54	116.70
M700	104.93	117.77	105.17
M701	109.87	123.15	110.44
M702	115.34	126.37	116.66
M703	111.53	122.53	112.08
M704	113.00	125.53	114.80
M705	106.09	118.96	106.38
M706	102.85	115.06	103.08
M707	104.66	117.06	104.95
M708	120.01	131.68	121.55
M709	105.93	119.46	106.86
M710	124.05	131.86	123.46
M711	108.17	121.09	108.48
M712	106.04	119.68	106.70
M713	103.06	115.70	103.33

M714	108.23	121.64	108.65
M715	109.75	122.73	110.08
M716	109.22	123.27	110.09
M717	106.05	119.05	106.34
M718	116.12	127.11	116.82
M719	106.62	119.71	106.81
M720	121.52	132.00	122.08
M721	113.94	124.30	114.41
M722	113.92	127.04	115.42
M723	109.64	124.18	110.85
M724	118.82	128.50	118.69
M725	107.36	119.02	107.84
M726	106.25	118.79	106.55
M727	104.11	116.94	104.46
M728	104.12	116.89	104.43
M729	106.31	119.33	106.63
M730	112.35	125.74	114.17
M731	102.84	115.74	103.46
M732	103.93	118.00	104.83
M733	105.49	119.43	106.64
M734	106.46	119.38	106.93
M735	103.38	116.50	104.10
M736	103.52	117.20	103.87
M737	106.15	119.38	106.42
M738	113.42	123.78	113.67
M739	102.72	115.15	102.95
M740	115.23	125.76	116.10
M741	110.60	122.74	111.72
M742	99.80	112.33	100.10
M743	102.50	115.23	102.85
M744	106.35	120.45	107.25
M745	106.56	120.65	107.34
M746	113.48	122.30	114.40

この測定結果を表1と表2にヒストグラムで表す。

表1 室温での抵抗値ヒストグラム

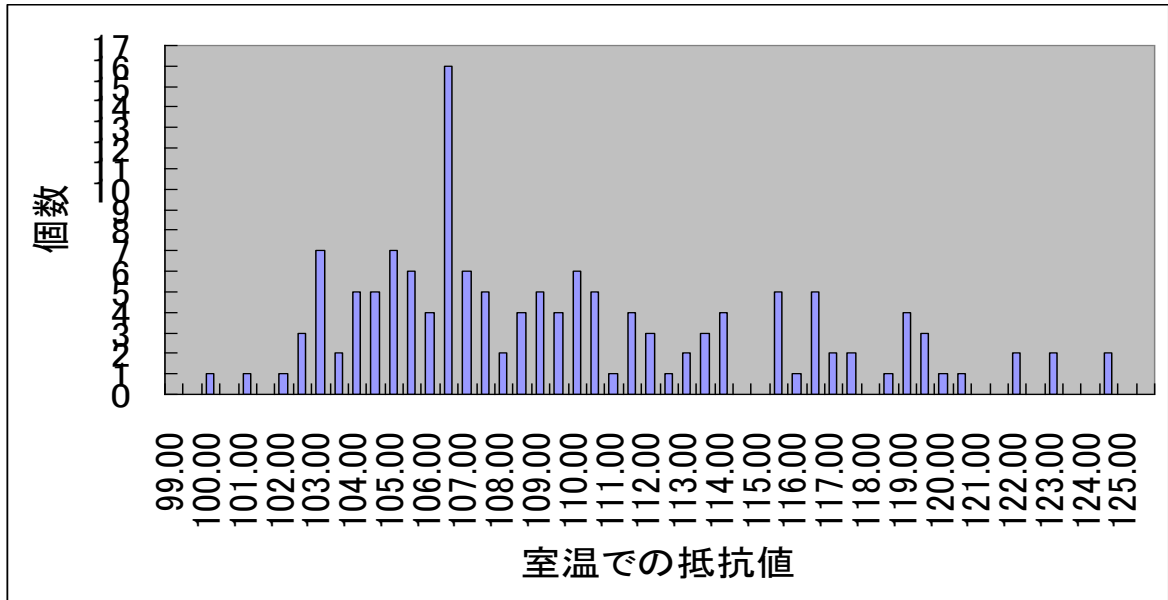
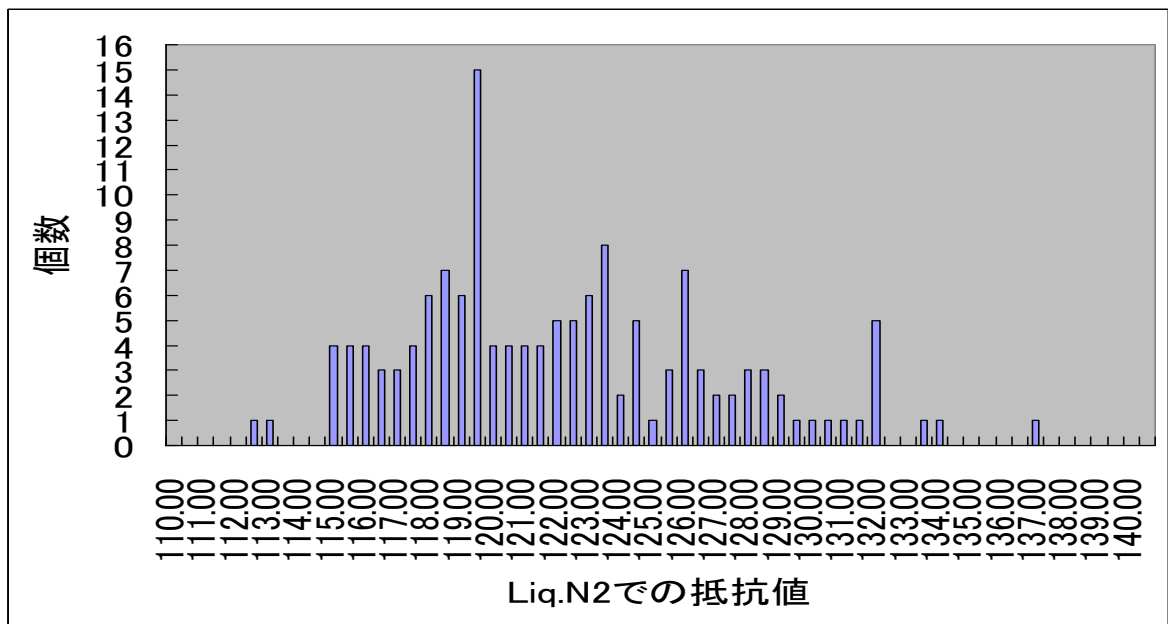


表2 液体窒素での抵抗値ヒストグラム



4、考察

松下抵抗を 100Ω の抵抗として扱える抵抗値のは $100\Omega \pm 5\%$ の範囲($95\Omega \sim 105\Omega$)である。これは抵抗器に表示してあるカラーコードからわかる。しかしデータでは $106\Omega \sim 107\Omega$ の範囲が一番多く、許容範囲内の抵抗は R.Tbefore ヒストグラムから 32本あり、その中でも参考資料の値に近い抵抗値の抵抗は 11個であった。

M603,M640,M644,M647,M648,M658,M688,M706,M713,M731,M742

後はすべて誤差が大きく、一番誤差が大きいものでは 24%もあり、これらは 100Ω の抵抗として扱えない。

この選別した 11本の抵抗を液体ヘリウムの中にいれた抵抗値を表に示す。

表 液体ヘリウムでの抵抗値

抵抗番号	液体ヘリウムでの抵抗値
M603	154.27
M640	176.51
M644	135.72
M647	157.81
M648	181.6
M658	148
M688	187.64
M706	182.3
M713	118.46
M731	117
M741	153.22

この表から参考資料とまったく異なる値を示した抵抗がある。この液体ヘリウムでの抵抗値測定はもう一度測りなおす必要がある。

液体ヘリウムでの抵抗値を再度測定しなおしてみたところ次の結果が得られた。

室温 (Ω)	液体窒素 (Ω)	液体ヘリウム (Ω)
103.76	116.23	185.74
102.04	114.53	181.86
102.7	115.49	184.56
102.7	114.76	176.34
104.02	115.74	188.07
103.62	115.7	185.62
103.52	115.74	185.01
102.95	112.33	183.32

この結果のとおり室温、液体窒素で参考資料内にある抵抗値を示す抵抗器は液体ヘリウムでも参考資料内の抵抗値を示した。

以前、液体ヘリウムで抵抗値を測定したところ参考資料とはまったく異なる抵抗値を示した。この結果の理由は、測定の際抵抗測定器のセンサー部分を液体ヘリウムのタンクに挿入し抵抗値を測定するのだが、液体ヘリウムの液面に空気の水蒸気による氷の層ができてしまい、その氷の層によって液体ヘリウム中にセンサーが入ることができなく、正確な液体ヘリウムの温度で測定できなかったためであると考えられる。

この失敗を考慮し2回目の液体ヘリウム中での抵抗値測定はヘリウムタンクを開ける際にセンサーが入るくらいギリギリの穴だけ開け、できるだけ空気がヘリウムタンクの中へ入らないように測定を行った。

R.Tbefore,Liq.N2,R.Tafter での抵抗値の信頼性を試すために次の事を行った。

①異なる抵抗測定器 (LCR メーター) を用いてこの松下抵抗を測定する。

②同じ抵抗測定器 (AUTOMATIC RESISTANCE BRIDGE AVS-45) を用いて異なる抵抗 (1kohm 1Mohm 100ohm) を測定する。

①・・・LCR メーターを用いて松下抵抗 (20 本) を測定したところ、AUTOMATIC RESISTANCE BRIDGE AVS-45 で測定した抵抗値と同じ値になった。このことにより、装置自体の不具合性はないといえる。

②・・・1kohm 1Mohm 100ohm の松下抵抗とは異なる抵抗 (20 本ずつ) を AUTOMATIC RESISTANCE BRIDGE AVS-45 で測定したところ、すべて誤差範囲内 ($\pm 5\%$) に抵抗値が収まった。この誤差範囲は抵抗の表示されているカラーコードからわかる。

①、②から抵抗測定器には問題はないと思われ、松下抵抗に不具合があると考えられる。

表 1, 2 の結果から抵抗値の経年変化は大きく一番大きいもので 25% の誤差があった。抵抗に表示されているカラーコード表示での許容誤差範囲は $\pm 5\%$ である。しかしこの松下カーボンソリッド抵抗は真空の状態で作成されていたわけではなく何十年もの月日が経過しているため測定結果は妥当だと思われる。

抵抗値の経年変化は吸湿によるものであり、ソリッド抵抗は炭素、樹脂などの混合物を抵抗体としているので、月日が経過することによって抵抗体で化学変化が起きてしまうためソリッド抵抗の成分が変化してしまう。

抵抗の温度特性中間レポート

提出日 2008/12/20(金)

05312014 岡島学