He II 温度における多点温度計測とその電気雑音低減

高橋 雅人[†], 岡村 哲至

東京工業大学大学院総合理工学研究科 創造エネルギー専攻 横浜市緑区長津田町 4259

Reduction of Electrical Noise in Multi-point Temperature Measurement at He II Temperature

Masato TAKAHASHI and Tetsuji OKAMURA

Department of Energy Sciences, Tokyo Institute of Technology

4259 Nagatsuda-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8502

1. はじめに

He II 冷却流路内の温度分布を調べようとする場合には、多数の温度計によって流路内に発生する mK オーダーの温度差を計測する必要がある。測定対象が、液体ヘリウム温度以下の場合、熱電対の出力は非常に小さくなり精度が十分ではないため、熱電対ではなく抵抗温度計を用いている。抵抗温度計として使えるものはいくつかあり、極低温用に市販されているゲルマニウム温度計もそのひとつである。抵抗温度計は温度が下がると抵抗値が大きくなる性質を持ち、微小定電流を流して、発生する電圧から抵抗を求める。このとき、熱侵入を減らすために配線の一部に用いられているマンガニンの抵抗や、クライオスタット内の長い配線による抵抗の影響を避けるため Fig. 1 のような 4 端子法を用いる。

4 端子法では、抵抗温度計の両端に 2 本ずつ、計 4 本配線し、一組を使って電流を流し、もう一組を使って電圧を測定する。電圧を測定する機器のインピーダンスが抵抗温度計に比べて十分大きければ、電圧を計測する配線での電圧降下は小さくなり、配線の本数は多くなるが、2 端子法に比べ正確に測定することができる。この測定では、商用交流、周囲にあるモーターなどの電気機器、計測機器自身などが発するノイズが

R_L : Resistnace of Lead Wire
 R_T : Resistance of Temperature Sensor

Fig. 1 4-wire ohms measurement.

静電結合や、誘導結合などの形で混入すると思われる。電気雑音の低減に関しては一般的にはいろいろ調べられているが^{1, 2)}、ここでは特に、極低温計測において計測線に影響を与える電気雑音を低減するための工夫について紹介する。

2. 直列に接続した 4 端子法

4 端子法を用いて多数の温度計を計測する場合、多数の計測線が必要になる。クライオスタット内には熱絶縁、コネクタやスペースの関係から多くの計測用配線を用意することはできない。電流源を温度計の数だけ用意してそれぞれ計測すると、配線が非常に多くなる上に、電流源を多数用意するためコストがかかる。そこで、多くの場合 Fig. 2 のようなスイッチユニットを用いる。この場合、温度計に定電流を流して電圧を計測し、終わったらスイッチユニット内で機械的に

[†]E-mail: masato@es.titech.ac.jp

2001 年 9 月 10 日受理

Fig. 2 4-wire measurements with switch unit.

Fig. 3 4-wire measurements in series.

配線をつなぎ替え次の温度計に定電流を流す。電流源の数を減らすことはもちろん、Lo 端子を共有すれば配線数を減らすことができる。

そしてさらに配線数を減らす方法として、スイッチユニットを使わず Fig. 3 のように 4 端子法を直列につなぎ 1 つの電流源で電流を供給する手法がある。温度計の数を n 個とすると、スイッチユニットを使う場合最小で配線数は $2n+2$ 個必要なのに対し、この方法では $n+3$ 個ですむ。ただし、特に電流線が切断してしまった場合、計測できない温度計が複数発生する欠点がある。

3. ノイズ低減のための配線技術

4 端子法を直列に接続した場合、1 点もグランドに接続しないほうがよい。それはグランドを接続しなかった配線は、グランドまでの配線の途中にある各温度計の抵抗分の共通インピーダンスを持つことになってしまうからである。例えば、Fig. 3 の一番左端の抵抗温度計のマイナス端子をグランドに接続した場合、左端の抵抗温度計の抵抗は、他の温度計の共通インピーダンスになってしまう。Fig. 4 の Z_c が A 点と B 点の共通インピーダンスで、回路 A からグランドに電流が流れ込むと、 Z_c の両端に電圧が発生し A の影響

Fig. 4 Common impedance.

が B に現れる。これと同様に、ある配線からグランドにノイズ電流が流れれば、他の点まで影響を受けることになる。また、温度計の抵抗が大きいことから、全体としては高インピーダンス回路となり、静電結合によるノイズの影響を非常に受けやすい。そして、静電結合によるノイズは共通インピーダンスに似た状況になるため、プラス側とマイナス側と一緒に変動するコモンモードノイズになることが多い。静電結合を防ぐにはシールドが有効で、入念にシールドをする必要がある。

クライオスタット内はツイストペアで配線し、クライオスタットが金属製の場合はそれ自体をシールドとして利用できる。この場合は、クライオスタット内にある他の配線に気をつけなければならない。これは、多くの配線が、熱侵入対策やコネクタの都合上、結果的に接近して配線されている（場合によっては束ねられている）ため静電結合しやすい状況にあり、さらに、温度計測のために用いられている定電流が他に比べ微小電流で周りからの影響を受けやすいためである。例えば、著者らは液面計も超電導線の抵抗を 4 端子法で計測するタイプのものを使用しているが、液面計の配線からのノイズがかなり大きく温度計測中に液面計を使用できなかった。これは、液面計で用いている定電流がかなり大きい上に、完全に整流されていないためと考えている。また、バス温度制御や加熱用として、He II 槽内にヒーターを取り付けてあるが、ヒーター配線に接続した定電圧電源によっては計測線にノイズが混入した。

配線がクライオスタットの外に出てから計測機器までのあいだの接続も完全にシールドする必要がある。特に、クライオスタット内に入る温度計測線以外の配線も全てシールドしなければならない。これは、ノイズの原因となる信号をクライオスタット内に侵入させないためである。これらのために普通は、三軸ケーブル

Fig. 5 Data acquisition with amplifier and filter.

ルかシールドされたツイストペアを使う。しかし、これらのケーブルはあまり普及しておらず、計測器などの接続時にも困難がある。そこで一般的な同軸ケーブル 2 本よりあわせ、2 本の外部シェルをシールドとし、芯線をそれぞれ Lo と Hi に使用することで代用できる。

4. 測定機器

通常では、計測対象 1 つにつき Fig. 5 のように絶縁アンプやフィルターを必要とするため、温度計の数が多いとこれらの機器の数も多くなる。配線が増えたり、接続する機器が増えたりすることはノイズの混入源を増やすことにもなる。そこで、AD 変換ボードのアンプ機能を使って直接データをパソコンに取り込む。高めのサンプリングレートでデータを計測し、そのデータを平均することによってフィルタの代わりとする。AD 変換ボードはディファレンシャルモードでを使用することによって、温度計を挟んだ 2 点間の電位差を計測することができ、例えば、我々がを行っている He II 温度計測では KEITHLEY 社の DAS-1800 を使っている。

AD 変換ボードで複数のチャンネルを計測する場合、ボード内部の計測器に各チャンネルを順に繋ぎ替えながら計測する。ディファレンシャルモードで直列につながった抵抗を端から順に計測していった場合、一巡して再び最初のチャンネルを計測するとき、計測する電位が大きく変化する。計測対象のインピーダンスが高く、AD 変換ボードのキャパシタンスは絶縁アンプの入力部に比べ大きい場合、急激な電位変化があった場合、信号が安定するまでの時間が絶縁アンプが間にある場合に比べ長くなる。これによって高いサンプリングレートで計測した場合、切り替わってすぐの安定する前の電圧を計測してしまう。これを避けるために

は、急激な電位変化が起こらないよう Fig. 3 のように計測する順番を工夫するか、1 つめの計測をインピーダンスの非常に小さいダミー抵抗にして電位の変化にすばやく追従させる。

また、応答の遅い計測器、積分機能を持つ測定器やサンプリングレートの低い計測器を使用している場合、ノイズの影響を受けた信号でもノイズがないように見えるので、オシロスコープで観察するなど注意が必要である。

このほかに計測系とは別系統で較正済みのゲルマニウム抵抗温度計 1 つを単独の 4 端子法で測定し、この値を使って他の複数の温度計を較正した。これは、4 端子法を直列につないだ場合、熱起電力やコモンモードノイズなどの影響を受けやすいことから、計測値が多少ずれた場合でも誤差をできる限り小さくするためである。

5. まとめ

He II 温度での抵抗温度計を用いた多点計測において、電気雑音を低減するための工夫について紹介した。主な点は以下になる。

- 4 端子法を直列に接続することによって、少ない配線で多くの点の温度を計測することができる。
- 高インピーダンス回路になっているので、静電結合によるノイズが発生しやすい。これを防ぐには完全にシールドする。
- あまり普及していない 3 軸ケーブルやシールドされたツイストペアの代わりに、同軸ケーブル 2 本をより合わせたものでもある程度代用できる。
- 絶縁アンプを使わずに AD 変換ボードに直接接続した場合、電位変化に対して信号が安定するまでの時間が長くなるので工夫が必要である。

参考文献

- 1) 岡村勉夫: 解析 ノイズ・メカニズム, CQ 出版 (1987)
- 2) ケースレーインスツルメンツ 東陽テクニカ訳: 高感度測定ハンドブック, 東陽テクニカ (1995)