Osaka University Knowledge Archive

Title	超電導連続液面計の製作とその特性
Author(s)	小山, 正邦; 岡田, 東一
Citation	大阪大学低温センターだより. 1981, 33, p. 10-13
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/6843
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

Osaka University

低温中級技術シリーズ　2

超電導連続液面計の製作とその特性

工学部　小山正邦，岡田東一（吹田 5052）

1. はじめに

超電導液面計は，超電導線材の超電導－常伝導遷移特性を利用したもので，線材の抵抗値の測定から，液面位置の変化を連続的に検知できるもので，これまでに数多く報告されている。[1-4] 現在，超電導連続液面計の製作とその使用に際して，問題とすべきことは，(1)－線材周辺の擾乱（通電電流，温度，圧力，ミスト，磁場などの変動）が生じても，線材の超電導－常伝導の境界（S－N境界）と液面位置を一致させ，精度の良い測定を行なうこと，(2)－長尺液面計において，液面位置と発生抵抗の直線性を向上させること，などであろう。最近では，液面計用線材の開発[2,3] および通電方式を改良した計測装置の開発[4] などが行なわれている。

ここでは，超電導マグネット材料の応力効果実験用の金属製クライオスタットおよびプラスチックデュワーに取付ける必要性から，超電導連続液面計を製作した経験について述べる。また，ここでは，液面計が(a)常圧の液体ヘリウム容器で，(b)強い磁界（変動磁界）のない状態で使用され，かつ(c)液面計の発熱量が容器全体の熱流入に比べて無視できるような場合を想定している。

2. 液面計測の原理

超電導液面計では，線材の液中部分は必ず超電導状態でなければならないため，液面のところで臨界温度（T_C），液中の全てのところで臨界磁場（H_C）以下，通電電流（I）はこの磁場での臨界電流（I_C）以下の条件で使用される。図1(a)は，このような条件で，かつ線材の常伝導の比抵抗（ρ_n）に温度依存性がないとした場合における液面計測の原理図を示したものである。液面の深さ（D）の時，通電電流を（I）とすると，電圧端子間に発生する電圧（V_D）は

$$V_D = (L - D)\,\rho_n\, I / S$$

で与えられる。ただし，Lは電圧端子間距離，Sは線材の断面積である。また，DとV_Dの関係は，

$$D = L - (S / \rho_n I)\, V_D = L\,(1 - V_D / V_m)$$

となる。ここで，$V_m = \rho_n I L / S$で，これは，線材がすべて常伝導に遷移した時の端子間電圧である。したがって，端子間電圧が増加することは，液面が直線的に減少することを意味している（図1(b)の実線）。

以上は，理想的な条件での議論であるが，液面がDであっても，S－N境界がガス中に存在する場合には，V_Dよりも低い電圧（図1(b)の一点鎖線）が，S－N境界が液中に侵入している場合には，V_Dには，V_Dよりも高い電圧（図1(b)の二点鎖線）が生じる。また，液面とS－N境界が一致していても，ρ_nの温度依存性が大きく寄与する場合には，端子間電圧はV_Dよりも大きく，液面の変化につれて，図1(b)の破線のように変わるだろう（非直線性）。

液面の深さと端子間電圧特性に直線性がある場合には，液面計の感度［V／cm］は，図1(b)の実線

の勾配の絶対値（$S/\rho_n I$）で示される。そこで，感度を上げるにはρ_nを大きくかつSを小さくすれば良いのであるが，ρ_nを大きくするとジュール発熱が，Sを小さくすると線材の強度が問題となってくる。ρ_nが相対的に小さく，その温度依存性も小さいならば，電圧端子間の線材の長さを長くする（ヘアピン状あるいはコイル状など）こともできるであろう。また，通電電流(I)を大きくしても測定感度は良くなるが，自ら限度はある。

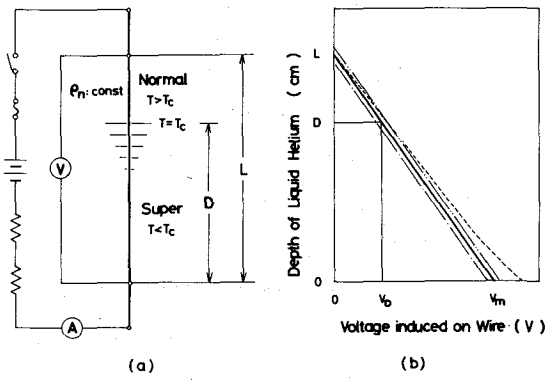

図1. (a)液面計測の条件と(b)液面の深さ－発生電圧の関係。実線は液面位置とS－N境界が一致，一点鎖線はS－N境界がガス中，二点鎖線はS－N境界が液中にある場合，破線は$\rho_n(T)$がある（即ち線材の長さ方向に温度勾配がある）場合の変化を示す。

液面計測に用いる電流値は次のようにして選定すればよい。電圧端子間電圧（V）－通電電流（I）のヒステリシス曲線を求めた場合，Iの上昇時および下降時に直線性を示す電流領域が存在することが認められる。この領域では，液面位置とS－N境界が一致しているものと考えられている[3]。直線性を示す両者の電流領域で，重なり合っているところが最適電流領域[3]と呼ばれており，Iが変動しても，線材の抵抗値が変化しない電流範囲である。通常，この領域内の電流値を用いて液面測定が行なわれる。ここでは，最適電流領域の下限から20～40mA 上の電流値を用いて液面計測を行なっている。

3. 液面計の構成

液面の深さと発生電圧特性において直線性を得るため，線材に要求される特性は，

① T_Cが4.2K 以上でかつ4.2Kに近く，遷移温度幅（ΔT_C）が狭い。

② H_Cが高い。

③ ρ_nが大きく，$\rho_n(T)$が小さい

④ 断面積および材質が均一である

こと等である。我々が使用している線材は，このような要請から製作されたNb-Ti-Mo線（NTM）線である[3]。

NTM線材を利用した液面計の構造を図2(b)，(c)に示している。線材は，外径10mmϕ のベークライト棒上に設けた電圧端子に張力を加えた状態でビス止めし，その上に細い銅線を数回巻き，ハンダ付けを行なって固定されている。図2(b)は，“単線型”（L-1）を示し，電圧端子間距離は92.0cm である。図2(c)は“ヘアピン型”（L-2）のものであり，下端ビスから電圧端子までの距離は63.0cm である。このように電圧・電流端子とも上部に設けておくと，計測用リード線が液中に浸漬することもなく，また測定感度も良くなるが，常伝導部のジュール発熱も増加するので注意を要する。

液面計（L-1）と（L-2）は，それぞれ，鋼尺とともに中央のステンレスパイプに固定し，フランジのゲージポートで支えられている。計測用リード線は，ステンレスパイプの内側を通し，パイプ上端の

ハーメチックシールに接続されている。フランジから底までの深さは約100cmであり，(L-1)の電圧端子の上端はフランジの約8cm下の位置にくる。なお，液面位置はガラスデュワービンのスリットを通し観察することができる。

液面位置の変化にともなう線材の抵抗値を測定する四端子法の結線図を図2(a)に示している。通電電流は定電流電源を用いて供給した。回路中に1Ωの標準抵抗を接続し，抵抗端子間電圧を電圧計Aで測定し，XYレコーダーに記録させた。また，電圧計(PM-18)を通した，線材の端子間電圧を電圧計BとXYレコーダーで測定，記録した。

4. 液面計の特性と使用例

図3は，液面計(L-1)における典型的な電圧(V)－電流(I)ヒステリシス曲線を示している。I増加時およびI減少時において，それぞれI_1-I_2およびI_7-I_8の領域に直線性が認められ，最適電流領域はI_1-I_7であることがわかる。I_2-I_3での非直線性は$\rho_n(T)$が大きく寄与しているためであろう。I_3からS－N境界は液中に侵入していき，I_4で線材はすべて常伝導に転移する。I_5からIを減少させていくとI_6付近で超電導の芽が生じ，I_7で線材は超電導に復帰する。液面の深さが55cmから3cmの間では，最適電流領域が160mA-300mAであることが認められた。液面計(L-2)において，液面の深さが約56cmのところでは，線材がすべて超電導に転移したため，$V-I$ヒステリシス曲線は得られなかった。液面の深さが55cm以下では，液面計(L-1)と同様な最適電流領域は180mA-290mAであることがわかった。

液面計(L-1)および(L-2)において，$D \leq 53$cm，$I=200$mAで，液面の深さ－端子間電圧曲線を求めたところ，(L-2)では直

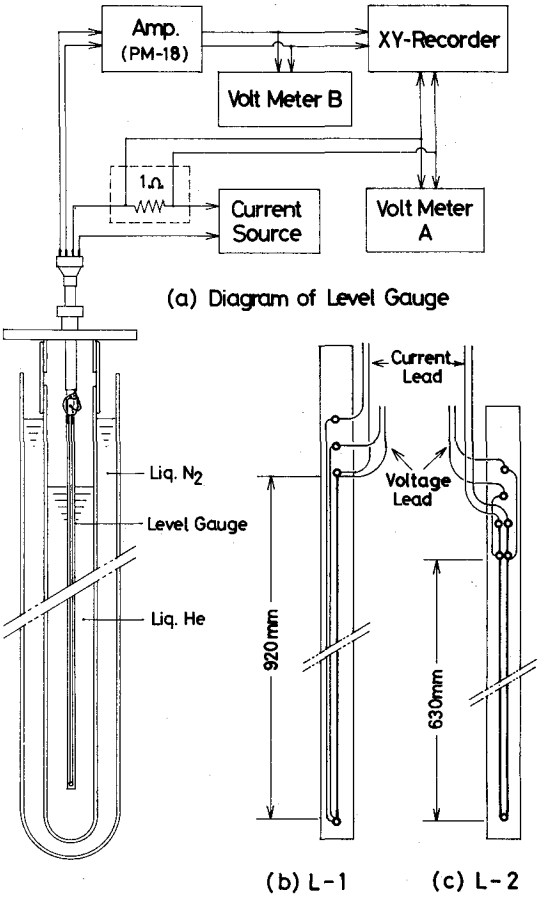

図2. 液面計測の結線図および液面計の構造

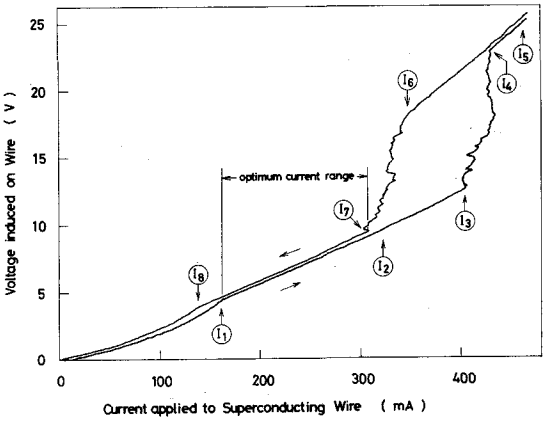

図3. 液面計(L-1)において，液面の深さが39.5cmの時に求めた電圧－電流ヒステリシス曲線

線性があり，測定感度は0.25V/cmであった。（L-1）では，電圧端子と液面までの温度勾配が大きく，$\rho_n/(T)$ が寄与するため，このような直線性は得られなかった。

我々は，$D-V$ 特性に直線性があり，相対的に感度の大きい液面計（L-2）を超電導マグネット材料の応力効果実験用クライオスタットに利用している。図4は，液体ヘリウム注入時および実験中における液面の深さの時間変化を示したものである。①，②および③は，それぞれ，注入開始時，液面計下端まで注入した時，および注入完了時を表わしている。実験時において，約40分間の電圧（液面）の細かい変動はクライオスタットを引張試験機に取付けているところである。この曲線から求めた液体ヘリウム蒸発速度は約1.4 l/hrであった。また，④は，超電導マグネット（100Aで4テスラ，蓄積エネルギー5kJ）のクエンチにより，液面が一時沸騰した後　静かになった点で，1.8 l の液体ヘリウムが蒸発したことが検出されている。

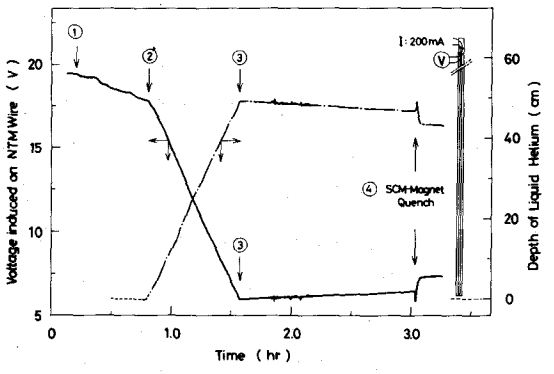

図4.　応力効果実験用クライオスタットの液体ヘリウム液面および液面計（L-2）の発生電圧の時間変化。$I=200$mAの場合。

ここでは，比較的擾乱の少ない状態で超電導連続液面計を使用した場合であるが，より条件の厳しい場合，例えば(1)加圧下あるいは超流動ヘリウム，および(2)強磁界・変動磁界の存在する容器などで使用する場合には，さらに多くの工夫改良が必要となるであろう。

参考文献

1. 石塚素蔵，安河内昂
   低温工学，3（1968）131.
2. 平田郁之
   第15回低温工学研究発表会，A－1－5（1975）.
3. 鶴谷三郎，都　正博，堀内健文
   応用物理，47（1978）547.
4. 倉岡泰郎
   低温工学，14（1979）77.