

Title	低温・強磁場下の電気容量測定
Author(s)	音, 賢一; 鷹岡, 貞夫; 邑瀬, 和生
Citation	大阪大学低温センターだより. 1997, 99, p. 6-12
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/5444
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

低温・強磁場下の電気容量測定

理学研究科 音賢一・鷹岡 貞夫・邑瀬 和生 (内線 5 3 7 5)

Email: oto@phys.sci.osaka-u.ac.jp

1. 電気容量 (Capacitance)

2枚の金属板を平行に並べたコンデンサーの電気容量 C は、金属板の面積 S 、間隔 d 、および極板間の誘電率 ϵ で決まり、 $C = \epsilon S / d$ と表される。すなわち、電気容量の測定により対象物の誘電率、面積、距離の変化を捉えることができるため、表1にあげたような様々な応用がある。原理的にはコンデンサーはジュール熱を発生しないので、低温の実験においても誘電率の温度変化を利用した温度計や、液体と気体の誘電率の違いを使った液面計（主に液体窒素用）などにも使われている。また、試料の2ヶ所に金属膜を蒸着してコンデンサーを形成し電気容量を測ることで、試料の微小な歪み（体積変化）・誘電率・電気伝導率などが調べられるなど、物性の測定手段としても広く用いられている。

表1 コンデンサーの電気容量計測の応用例

電気容量の変化の原因	応用 例
面積の変化	伝導部分の面積測定、微小変位（平行移動）計測
距離の変化	微小変位（垂直方向）計測、圧力計、歪み計
誘電率の変化	誘電率測定、伝導度測定、低温温度計(SrTiO ₃)、液体窒素液面計、半導体不純物の分布計測、金属探知器

2. 電気容量の測定法

電気容量の主な測定法とその特徴を紹介する。

(2-1) 直流で測定する準静的な方法

コンデンサーに直流電圧 V をかけたときに流れた電荷量 Q を測定して $C = Q / V$ の関係から求めるもので、以下の2通りがある。

(2-1-1) 準静的法：

適当な抵抗 R をコンデンサーと直列につなぎ、電圧 V をかける。コンデンサーが充電されるまでに流れた電荷量をエレクトロメータ（電荷を測定できる）で測り容量を求める。（電圧をステップ的に増加して測定するQuasi Static法など）または、 $C \cdot R$ 回路の充電にかかった時間から求める方法もある。

(2-1-2) ランプ法：

$Q = CV$ を時間微分した $dQ/dt = CdV/dt$ を用いる。時間的に一定の割合で増加する電圧($dV/dt = \text{一定}$)をコンデンサーに加え、そのときに流れる充電電流 $I (=dQ/dt)$ を測定して電気容量を求める。

一般に直流を用いた測定法では、測定されるコンデンサーの電気容量が小さいとき、流れる電流も小さくなるので測定が困難となる。さらに、コンデンサーに漏れ電流が流れるような場合、それが誤差の要因となる。しかし、測定法としてはシンプルで、この方法を用いた市販の計測器もある。

(2-2) 交流インピーダンスを測定する方法

角振動数 ω の交流を用いてコンデンサーのインピーダンス $Z = 1/(i\omega C)$ を測定し、電気容量を求める方法。様々な方式があるが、数十Hz~MHzまでの交流で測定する場合には以下の方法が用いられる。試料が純粋なコンデンサーだけではないとき、交流で測定した電気容量は周波数依存性を示し、直流で測定する「静電容量」とは異なることに注意が必要である。

(2-2-1) I-V法:

コンデンサーに交流定電圧 V_{ac} を加え、流れた電流 I_{ac} を測定してインピーダンス $Z = V_{ac}/I_{ac}$ を求める。交流電流を測るとき、電圧との位相差が90度、0度の両成分を求めておくことで、コンデンサーと抵抗の両方の値を求めることができる。

(2-2-2) ブリッジ法:

図1にあるように基準となるコンデンサー C_0 と抵抗 R_0 をもち、ブリッジ回路の電位差がゼロになるように C_0 と R_0 を調整する。基準となるコンデンサーにかかる電圧を V_0 、試料にかかる電圧を V_x とすると、測定端子に接続された未知の電気容量 C_x と抵抗値 R_x は、 $V_0 : V_x = C_x : C_0 = R_0 : R_x$ と表される。交流電圧源として図1のようにレシオトランス*1を用いると、 $V_0 : V_x$ はトランスの巻き数比で決まり、交流電圧や電流値を直接測定する必要がない。このため、ブリッジ法では基準コンデンサーと抵抗で精度が決まり、比較的高精度な測定が容易に行える。

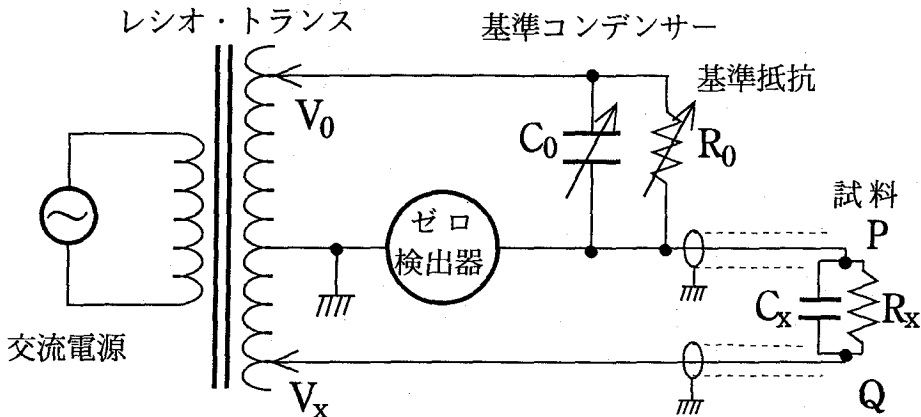


図1 交流キャパシタンス・ブリッジ。

未知のコンデンサー C_x と基準コンデンサー C_0 に交流電流を流し、ゼロ検出器の電位差がゼロとなるように基準コンデンサーの値を調節することにより電気容量を調べる装置。同様に抵抗の成分も求めることができる。グラウンドとの浮遊容量は無視できる利点を持つため、測定線P、Qは試料の直前までシールド線を使う。

(2-3) 浮遊容量について

本稿で紹介する電気容量の測定では、比較的インピーダンスの高い（Cが小さい）試料を対象にしたもので、精度良く計測するにはできる限り浮遊容量^{*)}を減らさなければならない。最も重要なのは測定端子間（図1のP-Q間）の浮遊容量を減らすことで、測定器のケーブルは試料の直前までシールド線を使い、試料ホルダーの端子等も不必要に接近しないような工夫が必要である。また、試料自身の形状や電極の数などにも注意する必要がある。また、測定端子とグラウンドとの間の浮遊容量もなるべく減らすのが良い。しかし、試料は外部から侵入する電気ノイズを避けるため金属のシールドボックス内に入れなければならない、測定用の電線もシールド線（同軸ケーブル）であるため、グラウンドとの間の電気容量はどうしても大きくなる。しかし、ブリッジ法ではグラウンドとの間の容量は原理的には測定に影響を与えないので^{*)}、小さな電気容量を正確に測定するときにはブリッジ法が不可欠である[1]。

3. 測定装置の例

(3-1) 試料ホルダー

ヘリウム3を使ったクライオスタットに試料を入れ、温度4.2 K~0.4 Kの下で14 Tまでの磁場をかけて電気容量の磁場依存性を測定する。測定のための交流電圧は小さいほど良いが、S/Nとの兼ね合いから1 mVで行っている。電気容量の値は1000 pFから0.1 pF程度まで測定する。図2は試料ホルダーの概略図である。片面に銅箔の付いたガラスエポキシ製プリント基板を円板に加工して、外周付近に穴を開け銅線を立てて端子とする。銅箔はクライオスタットの上部から下りているキューロニッケル棒に半田づけしてグラウンド電位にする。室温部分から低温用同軸ケーブル（付録参照）を端子まで直接配線する。同軸ケーブルの網線（シールド）は室温部のBNCコネクタの所でクライオスタットの金属部に接続している。また、試料側は端子の1 mmくらいまで網線がかかっており、シールドの利いていない部分なるべく少ないように配線する。試料ホルダーの端子には、9本の同軸ケーブルが接続されている。

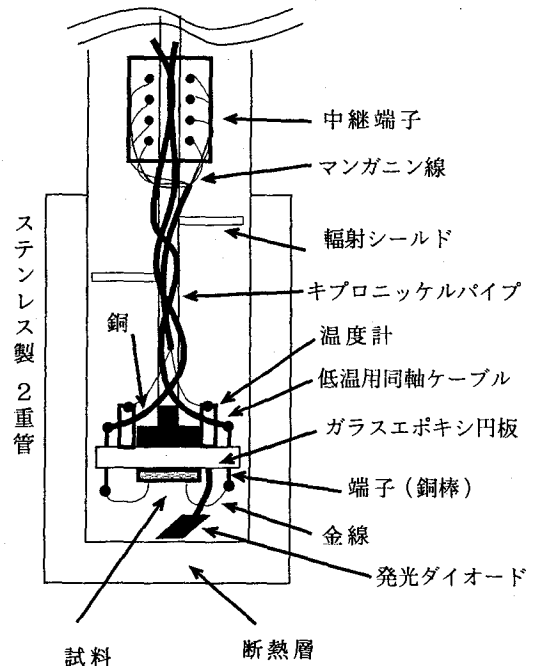


図2 試料ホルダーの概略図。

内径18mmのステンレス2重管にトップロード形式で試料ホルダーが入る。液体³Heにジャブ漬けて試料を冷却する。図で試料は下向きに真空グリスでホルダーに付けてある。50 μmの金線の一端を試料の電極に銀ペーストで付け、他端をホルダーの端子にインジウム半田で付ける。低温用同軸ケーブルは9本ある。温度計などへの配線は、試料ホルダーより20cm上までは0.1 mmのホルマル銅線で配線し、中継端子からはマンガン線で低温部まで配線している。

試料をセットしないときの浮遊容量は隣り合った端子間で0.2 pF、離れた端子間では1 fF以下

である。低温用同軸ケーブルはステンレスとテフロンでできており熱伝導が小さいため、熱アンカーに巻かずとも、特に問題はなかった。このほか温度計などのために直径 0.1 mm マンガン線 9 本も端子に接続されている。配線では、各線が振動しないように支持棒に巻き付けてセロテープなどで固定した。また、試料をセットした後、ホルダーの端子をカバーするようにセロテープを巻いて、クライオスタット内壁に端子がショートしないようにしている。これは同時に試料ホルダーがクライオスタット内で振動しないように押さえる役もしている。

この他に、極低温の実験で使えるものや便利なものを付録にまとめた。

(3-2) 電気容量の測定器

付録 3 にあるように、我々の研究室では用途に合わせて 3 種類の測定器を使っている。すべて「ブリッジ法」で測定するもので、測定交流電圧が 1 mV のときおおむね 0.1 pF 程度の分解能が得られている。電圧を大きくしても構わない試料であればさらに分解能を上げられるが、純粋なコンデンサーの成分だけでなく損失のある試料では、測定による発熱を考慮しなければならない点に注意する。

4. 測定例

図 3 は実験で用いた試料の略図である。GaAs/AlGaAs ヘテロ接合の 2 次元電子系にオーミックな電極を付け 2 次元電子系をコンデンサーの一方の極板とする。また、2 次元電子系と 100 nm 離れた試料表面に金属のゲート電極を作製する。この 2 つの電極の間の電気容量は面積、間隔、誘電率などの試料形状で決まる。図 4 はこの試料での電気容量、および同じ材料で作った試料で測ったホール抵抗である。ホール抵抗が一定値となる量子ホールプラトー [2] を示す磁場範囲では電気容量が著しく減少して、磁場 5 T 付近では 2 pF 程度まで下がっている。これは、2 次元電子系が量子ホールプラトーを示すとき電気伝導率 σ_{xx} が非常に小さくなり、コンデンサーの片側の電極に相当する 2 次元電子系の有効面積が減少するためである。

このとき、電気容量の極小値は試料の端に沿った伝導度の高いエッジ状態 [3] の面積で決まり、極小値の値からエッジ状態の拡

がり (磁場 5 T のとき試料端から 0.7 μm 拡がっていた)

を調べることができた [4]。

また、図には示さなかったが、電気容量の虚数部 (損失) から $10^{-13} \Omega^{-1}$ 程度の非常に小さな電気伝導度も同時に求まる。

このほか、電気容量の周波数依存性や温度依存性を測定して、我々は電気容量の測定で

量子ホール効果での電気伝導の研究を進めている [5]。

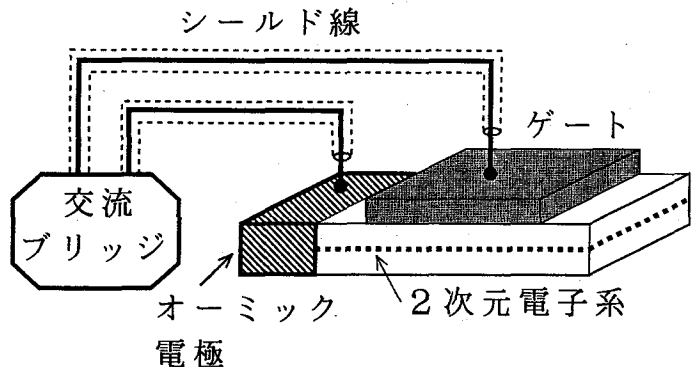


図 3 試料の略図と測定方法。

2 次元電子系と金属ゲートとの間の電気容量を測定する。両者は 100 nm 離れている。電気容量と損失 (電気容量の虚数部分) の値から 2 次元電子系の伝導部分の面積と電気伝導度が調べられる。

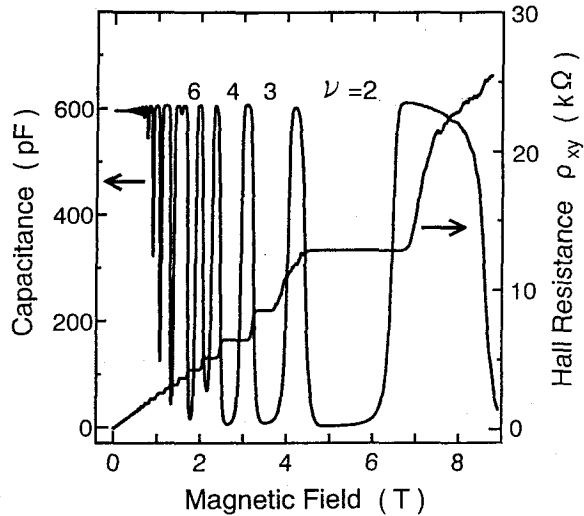


図4 同じ材料で作製した試料での電気容量とホール抵抗。

ホール抵抗にプラトー（平らな部分）が現れ、その値が h/e^2 の整数（ ν ）分の1に量子化されている。このとき電気容量は極小値（ゼロではない）をとっている。この値からエッジ状態の拡がりを実測した。

5. おわりに

ここでは実験ノートとして、日常我々の実験室で行っている電気容量測定の様子を紹介した。最後になりましたが、寒剤供給でいつもお世話になっている低温センターの皆様へ深く感謝致します。

付録： この研究で使用した低温関連の部品・装置等について

(1) 試料ホルダーに使用した極低温（1 K以下でも）で動作可能な部品

- 温度計：Scientific Instruments社（東理社）RO-600 酸化ルテニウム抵抗温度計

- 磁場センサー：松下OH-007（GaAsホール素子、超小型2mm角）

温度により、ゼロ点・感度がわずかに変化する点に注意。1.5 Kで磁場5 T程度まではホール抵抗は磁場にリニアである。強磁場では小さな振動がのる。

- 発光ダイオード：松下LN58（GaAs、波長950nm）4.2 Kで点灯するには5 V程度必要。波長がこれより短いタイプはヘリウム温度で動作しない。

- 低温用同軸ケーブル：Lakeshore SS（導体はステンレス、絶縁物はテフロン）外径1 mm、心線は1 mあたり30 Ω程度の抵抗値。

(2) ヘリウム3冷凍機

^3He ガスをクライオスタット内のヘリウム4（1.5 K）で液化後、ポンプで断熱蒸発させて冷却。

^3He ガスは回収する。到達温度0.4 K程度。 ^3He 液体が貯まる試料室には熱伝導のための工夫はして

いない。 ^3He 液体は約0.5 K以下では冷たい液体ほど軽いので液体の表面だけ冷えて試料のある下の方が冷えにくくなる。少々荒っぽいですが、十分注意をしながら、わずかにクライオスタットを揺らせて

液体 ^3He を混合すると試料のある下部まで早く冷える。

(3) 交流ブリッジ

•ANDEEN HAGERLING社 (東陽テクニカ) AH2500

周波数1kHz、高精度 (8桁)、励起電圧1mV~15V

•Hewlett Packard社 (日本ヒューレットパッカード) HP4284A

L C Rメータ、周波数可変20Hz~1MHz、励起電圧5mV~20V

•Boonton社 75C

手動式で、オリジナルは真空管式だが、内部のブリッジ部分だけを使用し、発振器とゼロ検出器をロックインアンプで行くと低ノイズで周波数可変の高感度なブリッジとなり、現役で活躍している。

(4) その他、役に立つもの

•GPIB光ケーブル オムロンZ3GA (本体2台必要)、Z3F2-4D (ケーブル)

コンピュータからの電気ノイズを容易にカットできる。1K以下での実験には特に有効。また、GPIBケーブルは太く短いため、取り扱いやコンピュータの配置に制限が多いが、光ケーブルは細くとりまわしが容易で長さも自由にできる。

• BNCコネクタ：ハーメチックシール気密型 (理研社)

簡易で良ければ通常のBNCメスコネクターを取り付け後に、隙間をエポキシ接着剤で固めたものでも可。

•超極細同軸ケーブル 潤工社DAU05B120 外径0.6mm

参考文献

- [1] Andeen-Hagerling AH2500 取り扱い説明書、
日本ヒューレットパッカード「インピーダンス測定ハンドブック」(1990)。
- [2] 量子ホール効果の参考書として、
シリーズ物性物理の新展開「量子効果と磁場」 安藤恒也編 丸善 (1995)。
- [3] 2次元電子系の非局所伝導 低温センターだより No.81, 5 (1993)。
- [4] S.Takaoka et al., Phys. Rev. Lett. Vol.72, 3080 (1994)。
- [5] 磁気電気容量でみる量子ホール効果とエッジ状態
固体物理 Vol.32, No.6, 506 (1997)。

用語説明と補足

1. レシオトランス

巻き数を非常に正確に制御できるトランス。図1では2次側巻き線のタップを制御して、 $V_0 : V_x$ の比を高精度に決めることができる。

2. 浮遊容量

電線間に自然に生じている電気容量。導体が接近したところは予期せぬコンデンサーとなっている。

3. ブリッジ回路ではグラウンドに対する浮遊容量の影響が原理的に無い (少ない)。

図1で測定線Pとグラウンドとの間の浮遊容量はゼロ検出器の両端をその浮遊容量でつないだことにな

るが、検出器の感度が十分大きければ問題ない（ゼロ検出器はゼロかどうかを検出するだけで良い）。一方、測定線Qとグラウンドの間の浮遊容量もトランスの出力に接続されているだけで、トランスの出力容量が十分大きく電圧 V_s を維持できれば問題ない。

4. エッジ状態

量子ホール状態の2次元電子系では、電場方向の電気伝導度 σ_{xx} が理想的にはゼロになる。しかし、試料の端（エッジ）に沿って伝導的な状態が生じ、量子ホール状態の電気伝導に特異な性質を与えている[2-5]。我々はエッジ状態が試料端からどの程度広がっているかを電気容量の測定で調べた。