

令和4年度 課題研究 P3
La 核を用いた T-violation 探索実験のための
冷却システムモニター開発

池水玄, 笠井優太郎, 小池諒太郎, 坂本遊野, 徳竹温也, 中川昂星, 横山怜

2023年7月28日

目次

1	Introduction	4
1.1	対称性	4
1.2	C 対称性、P 対称性、そして T 対称性	4
1.3	偏極標的による T 対称性の破れの測定	4
1.4	適切な偏極標的	5
1.5	本稿の構成と内容について	5
1.5.1	冷凍器の構造	5
1.5.2	ヘリウム回収量のデジタルデータ化 (H)	6
1.5.3	バルブの開閉の自動化 (G)	6
1.5.4	液面の把握 (B)	6
1.5.5	液面の把握 (C)	6
2	画像認識による LHe 回収量のデジタルデータ化	7
2.1	動機	7
2.2	機材の配置	7
2.3	要求される機能と性能	9
2.4	2 手法に共通のプロセス	10
2.5	手法 1: 正規化相互相関による Template Matching	11
2.5.1	手法 1: 方法	11
2.5.2	手法 1: テンプレートの収集	12
2.5.3	手法 1: 角度・閾値の微調整	12
2.5.4	手法 1: 評価	12
2.5.5	誤読の原因	14
2.6	手法 2: 輪郭解析による比較判定	14
2.6.1	手法 2: 目標	14
2.6.2	手法 2: 方法	14
2.6.3	手法の評価	17
2.7	手法 1, 手法 2 のまとめ	19
3	圧力制御の自動化	20
3.1	電動バルブの搭載	20
3.2	圧力制御プログラム	20
3.3	回収メーターに応じて調整する改良	21
3.4	LabVIEW 上のプログラムのダイアグラム	22
4	超伝導液面計	23
4.1	背景	23
4.2	原理	23
4.3	作成と回路	24
4.4	キャリブレーション実験の方法	25
4.5	結果および考察	25

4.6	今後の展望	27
5	コンデンサー型液面計	28
5.1	動機	28
5.2	原理	28
5.3	作成方法	29
5.4	検証実験	31
5.4.1	窒素による検証実験における手法	31
5.4.2	窒素による検証実験の測定データ	31
5.4.3	窒素による検証実験の考察	32
5.4.4	ヘリウムによる検証実験における手法	34
5.4.5	ヘリウムによる検証実験の測定データ	34
5.4.6	ヘリウムによる検証実験の考察	36
5.5	結論	36
6	謝辞	37

1 Introduction

1.1 対称性

物理学、特に素粒子物理学は、対称性の学問といっても過言ではないだろう。対称性は物理で最も重要な概念なのであり、その違反たる対称性の破れは現在においても絶えざる探求の対象となっている。

そのうち、時間反転対称性にはなおさら心惹かれるものがある。太古より時間は人間にとって特殊な位置を占めてきた。また、物理的な観点から、CP が破れているため時間反転対称性の破れも存在するはずだが、直接測定はなされていないという事情がある。本実験の最終目標は時間反転対称性の破れの測定である。上述した内容からも分かる通り、これは1日にして成るものではない。実際、この物理のフロンティアは準備段階のそのまた準備段階にあると言っても過言ではない。そして我々が担ったのはさらにその一角に過ぎない。しかし、石橋のどの石が欠けても人を渡し得ないように、この一角は未来の物理のために重要必須な一つである。そう信じない者の手に、誰が (any words) を授けるだろうか？

1.2 C 対称性、P 対称性、そして T 対称性

我々の宇宙における反物質の著しい希少性は、CP 対称性の破れを前提とせずには説明できない。CPT 定理により、CP が破れることと T が破れることは等価である。^[2] 従って T 対称性の破れの測定は、物質優勢宇宙の成立要件を確認する点において意義深い。

弱い相互作用における CP の破れは、 K^0 系と B^0 系で実験的に確かめられており、理論的には小林益川行列の複素位相成分の存在によって説明される。しかし、現実の物質反物質のバランスを説明するには弱い相互作用における CP の破れだけでは足りないと考えられている。

一方で強い相互作用 (と電磁相互作用) においては CP の破れは実験的には見つかっていない。強い相互作用における CP 対称性は素朴にラグランジアンを書いたときには破れているため、理論面ではアクシオンの導入などが提案されている。アクシオンを見つける努力もなされる必要があるが、CP 対称性が現実で破れている可能性を追うことも重要である。それを試みる実験として偏極標的による T 対称性の破れの測定がある。

1.3 偏極標的による T 対称性の破れの測定

複合核共鳴吸収反応において、偏極原子核の偏極中性子に対する前方散乱振幅 f は $\vec{\sigma}$ を中性子スピン、 \vec{I} を原子核スピン、 \vec{k} を中性子運動量として次のように表される。

$$f = A + B\vec{\sigma} \cdot \vec{I} + C\vec{k} \cdot \vec{\sigma} + D\vec{\sigma} \cdot (\vec{k} \times \vec{I}) \quad (1.1)$$

ここで、時間反転はそれぞれ $\vec{\sigma}$, \vec{I} , \vec{k} の符号を反転することに対応する。よって、時間反転後の系における前方散乱振幅は

$$f' = A + B\vec{\sigma} \cdot \vec{I} + C\vec{k} \cdot \vec{\sigma} - D\vec{\sigma} \cdot (\vec{k} \times \vec{I}) \quad (1.2)$$

によって与えられ、 D が非零であることを示すことによって時間反転対称性の破れを検出することができる。時間反転と等価な状況は、手動で $\vec{\sigma}$, \vec{I} , \vec{k} の符号を反転、即ち中性子と核標的の偏極方向と中性子の運動方向を反転することによって作り出すことが可能である。^[9]

Dが大きい核種を標的に据えることで、実験的にTの破れを結論出来る可能性は高くなる。そのような核種として ^{139}La が候補として挙がっており、核子核子散乱の場合に比べて複合核共鳴吸収反応ではTの破れが 10^6 倍ほど大きくなっていることが示唆されている。[5] [6]

1.4 適切な偏極標的

偏極標的を用いた散乱実験では、低温・高磁場環境で標的を偏極させたのち弱磁場環境に標的を移してビームを当てる。したがって、厚さ及び密度が大きいこと、高い偏極率(～50%)を高磁場環境で実現できること、0.1T程度の弱磁場において数時間以上偏極が持続することが標的には求められる。

これらの条件を満たし ^{139}La を含む固体結晶として、Ndを少量ドーブしたランタンアルミネート結晶 LaAlO_3 が候補に挙がっている。[4] 偏極技術開発の一環である結晶中 ^{139}La の偏極緩和時間測定が本卒業研究のメインである(はずだった)。

1.5 本稿の構成と内容について

本稿には物の理に迫る実験内容、データは含まれていない。これは本来予定していた LaAlO_3 結晶中における ^{139}La の偏極緩和時間測定が、アクシデントと短いスケジュールにより断念を余儀なくされた結果である。その結果、本稿の第2～5章はそれぞれほぼ独立した機器開発について記述している。

1.5.1 冷凍器の構造

偏極緩和時間測定では、スピンを凍結させるために0.1K以下の極低温環境が必要となる。従って液体ヘリウム冷凍器が必要となる。実験に使用する冷凍器は、大きく二つの部分から構成される：一つ目は液溜めであり、ヘリウムガスポンベから供給された液体ヘリウムはまずこの部分に入る。二つ目はインサートであり、低温状態を実現する対象(今回の場合は偏極核標的)がこの中に設置される。液溜めとインサートの底面はバルブ付きの細い管で接続されており、バルブが開の時は液体ヘリウムが両者の間を自由に移動できる。液体ヘリウムの回収はインサート上部からなされる。図は冷凍器の構造を模式的に表したものである。

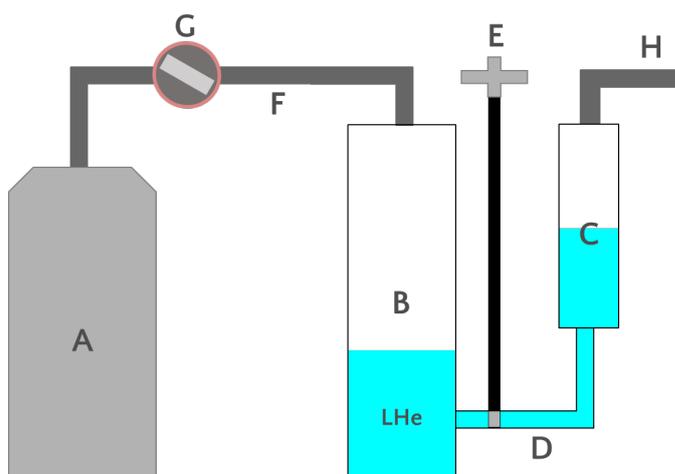


図 1.1 冷凍器の構造の模式図。A: ポンベ; B: 液溜め; C: インサート; D: 液溜め・インサート間の通路; E: ニードルバルブ; F: ポンベから液溜めへの通路; G: 電動バルブ; H: ヘリウム回収口。本稿ではB・Cを中心とする機構を「冷凍器」および「デュワー」と称する。

この冷凍機の運用は従来経験に基づいた職人的な直感によって維持されてきた。しかし今後の発展性を考慮すると、経験の如何に関わらず簡便に操作可能なインタフェースが要求される。今回は以下の4点に関して個別の開発を行った（アルファベットは上図における開発部位）：

1. ヘリウム回収量のデジタルデータ化 (H)
2. バルブの開閉の自動化 (G)
3. 液面の把握 (B)
4. 液面の把握 (C)

ここでは上記の各点について、従来の手法と今回の開発の概要を簡易に紹介する。なお各問題の概要は後章にて再び説明する。

1.5.2 ヘリウム回収量のデジタルデータ化 (H)

デュワーから排出されたガスヘリウムは再利用のため回収される。従来、回収量は回収計を直接見ることによってのみ確認できたが、デジタルデータとして得ることはできなかった。そこでメータの中継画像を画像認識することで、ヘリウム回収量をデジタルデータ化することを試みた。詳細は2章にて述べる。

1.5.3 バルブの開閉の自動化 (G)

ガスボンベから冷凍器への液体ヘリウムの供給は両者間の圧力差によってなされる。介在するバルブが開かれている場合は、より高圧なボンベから冷凍器内部の液溜めへとヘリウムが流入する。従って、このバルブの開閉を操作することによってデュワー内の圧力が調整される。従来この作業は圧力計の目視を伴うバルブの手動開閉によって行われた。それに対し我々は、電氣的に制御可能な電動バルブを導入し、デュワー内圧のデータを一定範囲内に自動制御するようなフィードバックシステムのプログラミングを試みた。詳細は3章にて述べる。

1.5.4 液面の把握 (B)

ガスボンベから供給される液体ヘリウムはまず液溜め（図 1-B）に蓄えられる。従来の方法では、実験中この部分に存在する液体ヘリウムの量を知ることはできなかった。しかし、これが把握できれば実験を進める上で有用な情報となるだろう。我々はヘリウムの液相と気相の温度の違いに注目し、液相では超電導状態に転移するが気相では常伝導状態となるような超電導線を用いた液面計を開発した。詳細は4章にて述べる。

1.5.5 液面の把握 (C)

インサート上部（図 1-H）から内部の空気を排気すると、互いに管で繋がれている液溜めとインサートの間に内圧差が生じ、液溜めに蓄えられた液体ヘリウムがインサートに移動する。インサートが完全に液体ヘリウムに満たされると排気を終了し、デュワー内部は外部と独立の系となる。この状態から、インサート内部の液面は気液平衡の状態を保ちながらデュワー内全体の力学的な平衡状態を目指して低下していく。従来の方法では、実験中この部分に存在する液体ヘリウムの高さを知ることはできなかった。我々は液相と気相の誘電率の違いに注目し、コンデンサ型の液面計を開発した。詳細は5章にて述べる。

2 画像認識による LHe 回収量のデジタルデータ化

2.1 動機

偏極を実現させるために液体ヘリウムを使用して低温環境を作るわけだが、実験中刻一刻と気化していくヘリウムは専用のパイプを通して回収され、専用の施設で液化・再利用される(図 2.1)。実験室の壁には回収されるヘリウムの量を示すメーターが設置されており、その変化を見ることでヘリウムの消費状況を確認できる。

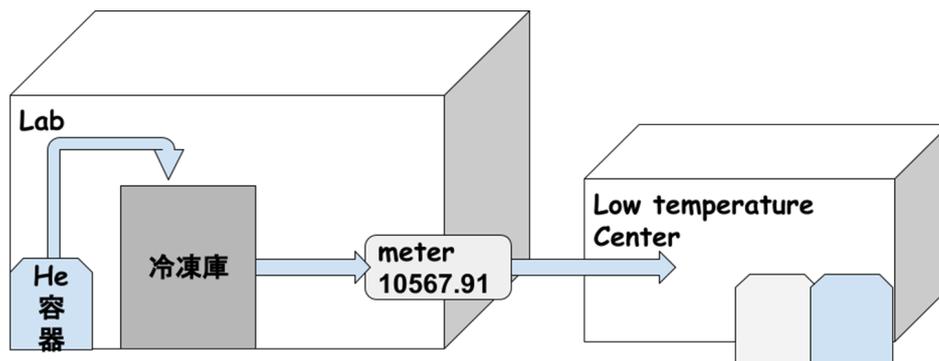


図 2.1 He 再利用の様子

これは偏極用試料周辺をモニターするための数少ない情報源であった。ヘリウムの消費状況を見ることで、冷却システムの異常を検知したり効率的な冷却が可能となる等、実験の円滑な遂行に役立てることができる。しかし、従来の実験環境では、目視でメーターの回転スピードを観察する以外に消費状況を確認する術がなかった。(なお、回収メーターを設置した RCNP 低温センターは各実験室の回収量のデジタルデータを利用可能だが、各実験室の人員はそのデジタルデータにアクセスできないという状況である。) ヘリウムをデュワーから冷凍機に送り出す圧力の制御、冷凍機内の温度の監視など、必要不可欠かつ忙しい実験プロセスの遂行に並行して上で挙げたようなモニター作業を手動で行うことは困難であった。

そこで今回我々は、実験環境の整備を目的に、回収メーターの表示を読み取り記録するプログラムの開発を行った。ヘリウム回収量の時系列データを電子的に記録することができるようになり、(第3章で詳述する)圧力制御の自動化や、(将来的には)異常検知の自動化が可能となった。

偏極緩和時間測定ではヘリウムを長時間投入し続けなければならないが、低温センターから液体ヘリウムの補充を受けられるのが平日に限られ、低温環境のセットアップには数日掛かる。そのため、セットアップの途中で異常が発生し最初から再スタートとなった場合、翌週の月曜日まで出来る事がなくなってしまう事態もあった。今回我々行ったメーター読み取りの自動化を活用することで、数日単位での実験プロセスの効率化が期待できる。

2.2 機材の配置

主な使用機材を以下に挙げる。

回収メーター	... アズビル金門社製 N25
web カメラ	... Panasonic BB-SP104W (30fps)
プログラム言語	... python3

図 2.2 に壁に設置された回収メーターの様子を示す。原理は一般的な膜式ガスメーターである。メーターの表示は、メーターの前に設置したカメラによって画像形式のデータとして扱えるようにした。web camera はブラウザを使ってアクセスでき、撮影された画像たちがブラウザ上にライブ動画として映し出される。図 2.3 に、三脚で設置したカメラの様子を示す。白い web camera を黒い三脚に取り付け、三脚の位置はブロックを使って大まかに決まるようにした。図 2.4 に回収メーターの表示が web camera を通して見える様子を示す。単位は立方メートル m^3 であり、小数点以下第 2 位まで表示される。例えば図 2.4 の表示は $15099.04m^3$ である。



図 2.2 壁に設置された He 回収メーター



図 2.3 三脚を使って設置されたカメラ



図 2.4 web camera で得られる画像

2.3 要求される機能と性能

前節で述べたように、メーターの表示は図 2.4 に示す画像データとして得られる。これを、次に示すとおりの時系列データとしてテキストファイルにリアルタイムで記録することを目指した。

カメラのフレームレートは 30fps であり、実験中メーターの目盛りが回転する速さは 1 秒に最小の桁が 1 回転強といったところである。このように読み取った数値を、第 3 章の圧力調整プログラムが 20 秒に 1 度アクセスしてきて利用する。したがって、最低性能としては、20 秒に 1 度以上の処理速度と小数点以下第 1 位までの数値を正しく認識する精度が求められる。

時刻	読み取った表示 [m ³]
2023/02/17 15:31:23	15105.5
2023/02/17 15:31:25	15105.51
2023/02/17 15:31:27	15105.52
2023/02/17 15:31:28	15105.53
2023/02/17 15:31:29	15105.54
2023/02/17 15:31:31	15105.55
2023/02/17 15:31:32	15105.55
...	...

2.4 2手法に共通のプロセス

今回、独立な2つの手法を実装／開発した。シンプルな方法を採用した手法1と、カメラの回転に対応すべく独自の方法を採用した手法2である。2.5節と2.6節でそれぞれ詳述するが、両者とも事前に用意した見本画像と現在の画像を見比べて表示されている数値を決定するという仕組みになっている。

リアルタイムで画像解析を行うプロセスのうち、2手法に共通の処理が存在する。画像を取得するまでの処理、及び数値読み取りの成否によって記録を取るか決定し画像を更新する処理などである。図2.5に全体の処理のフローチャートを示す。まず、Startの部分で各種パラメータを設定、見本画像(templates)をロード、プログラムから自動操作のブラウザを起動するなどし、準備を済ませる。その後、現在ブラウザ上に表示されている画像をスクリーンショットで取得し、クリップして必要な箇所だけ保持する。保持している画像に対し、2手法それぞれのやり方で見本画像と見比べ表示されている数値を読み取れたか、読み取った数値はいくらかを判定する。その読み取りの成否によって、画像を更新するか(失敗時)、読み取り値を記録するか(成功時)に処理は分岐する。失敗時はスクリーンショット、クリップの処理に戻るだけである。成功時はその読み取り値を、最新の数値だけを保持するテキストファイルと、今までに読み取った数値全てを時刻と共に時系列データとして記録するテキストファイルの両方に保存する。その後スクリーンショット、クリップの処理に戻る。このループをプログラムが強制終了されるまで繰り返す。

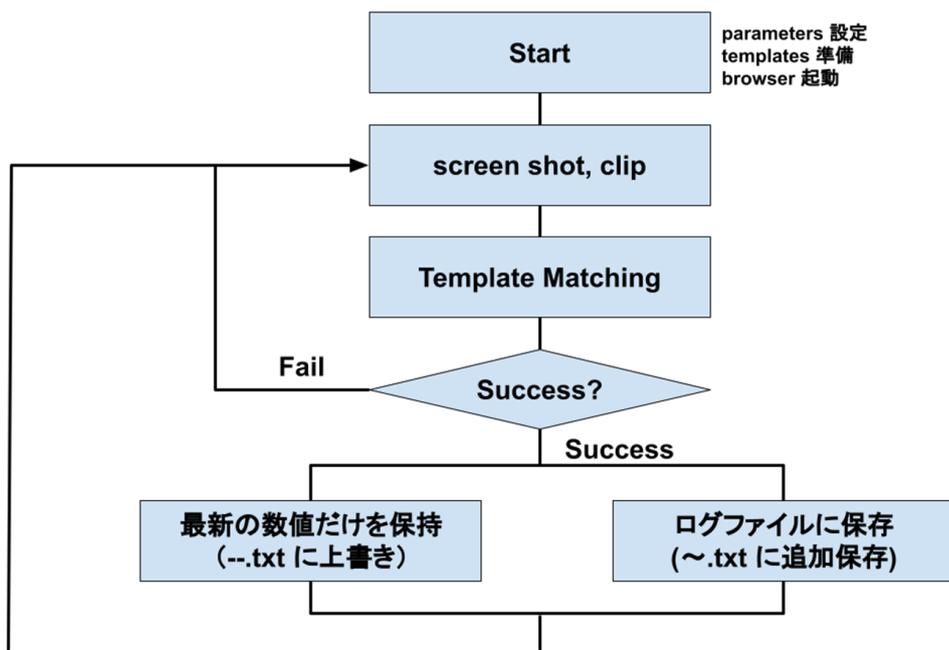


図 2.5 2手法で共通のフローチャート

2.5 手法 1：正規化相互相関による Template Matching

2.5.1 手法 1：方法

2つの画像の類似度を算出する方法として、正規化相互相関を採用した。これは以下のように類似度 R を計算するものである。

$$R = \frac{\sum_{(x,y)} (T(x,y) - \tilde{T})(I(x,y) - \tilde{I})}{\sum_{(x,y)} (T(x,y) - \tilde{T})^2 \sum_{(x,y)} (I(x,y) - \tilde{I})^2} \quad (2.1)$$

ここで $T(x,y), I(x,y)$ はそれぞれ、グレースケール化されたテンプレート及び解析対象画像のピクセル (x,y) における値（明るさ）である。 \tilde{T}, \tilde{I} は全ピクセルにわたって取った明るさの平均値である。テンプレートと対象画像の平均値からのズレの相関を、2つの画像のノルムの積で正規化したものが、式 2.1 である。なお、テンプレートと対象画像の大きさは異なるが、和 $\sum_{(x,y)}$ は2つの画像の重なった部分でとる。 R は $[-1, 1]$ に値を取り、1に近いほど類似度は高い。

対象画像に表示されている数字の決定は以下のように行う。まず、対象画像の指定された範囲を切り抜き、対象画像には一つの桁の数字のみが表示された状態にしておく。ある数字のテンプレートを対象画像の左上から右下に向けて1ピクセルごと移動させながら、すべての重なり方それぞれで類似度 R を計算する。0~9のテンプレートで結果を比較し、最大類似度が最大であったものを候補とする。さらに、その候補が記録した最大類似度が決められた閾値より大きければ、その数字が表示されているものと判断する。

この手続を各桁で行うのだが、右端の桁から始め、その桁で数字を読み取った場合一つ左の桁の読み取りを行うようにした。そして、いずれかの桁で読み取りが成功しなかった場合は全体としての読み取りは失敗とし対象画像を更新する。全ての桁で読み取りが成功した場合は、所定の記録作業を行う。

2.5.2 手法1：テンプレートの収集

冷凍機を動かしていない間もメーターはゆっくりと回転しており、定期的に画像を保存することでテンプレートを収集した。各桁の0~9の数字が枠の中央付近にあるものを選定した。実際に使用したテンプレートの一部を図2.6に示す。1の桁、0.1の桁、0.01の桁それぞれで10個テンプレートを用意した。メーターが1m³分回転するのに約16時間掛かる。そのため、(白文字で表示されている1の桁を含めて)テンプレートを全て集めるには約1週間掛かった。

2.5.3 手法1：角度・閾値の微調整

実験を始める際プログラムを一旦走らせると、図2.5で示したループ中はStartの時点で用意したテンプレートを使う。このとき用意したテンプレートが、カメラの位置のズレなどにより、対象画像に映し出された数字とあまりにもズレていると問題が生じる。2.5.1で閾値を設定して数字の判断をすると説明したが、メーターが回転していく中で最も良い位置に数字が来たのにも関わらず、最高類似度がこれを超えないという事態が起こりうるのである。これに多少なりとも対処するために、テンプレート画像を回転させたものをStart時点で準備し、閾値をそれに応じて調整することとした。

そのために、ロール方向(図2.7を参照)において-2°~2°の間を1000等分し、最も類似度が高く出る角度を探した。0~9の各テンプレートで類似度の最高値とそれを達成する角度を並べ、回収メーターに表示されている数字を目で確認しながら補正角と閾値を決定した。実際使用した補正角は $\theta = 0.99^\circ$ である。閾値に関しては、その最高値0.856から0.080低くした0.776とした。



図 2.6 1の位のテンプレート (一部)

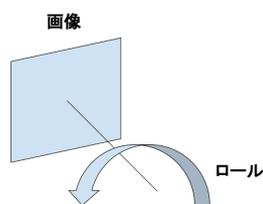


図 2.7 テンプレートを回転させる方向

2.5.4 手法1：評価

冷凍機を動かす実験中にこの手法のプログラムを走らせ、その記録を検査することで読み取りの正確性を評価した。全53870回の判定を、4243秒=1時間10分43秒の間に行った。ログには、プログラムの毎判定を記録したものと、判定が成功しかつ以前成功したときから時刻の秒が変化したときだけ記録したものの2種類がある。この2つのうち、他のプログラムに利用される可能性があるデータは後者である。前者の全判定データと照合することで、後者のデータの正確性を算出することができた。まず、後者のデータをグラフにしたものが図2.8である。

小さなデコボコが見えるが、これは小数点以下第2位を誤読した様子が見えている。小数点以下第1位までは100%正確に読み取れていた。小数点以下第2位の誤読の詳細表にまとめたものが図2.9で

ある。読み取るべき真の値 (True Value) と何の数字だと判定したか (display)、およびその判定が何回あったかを示している。1~7が表示されているときはほぼ正確に読み取れているのに対し、0,8,9が表示されているときは正確性が落ちている。したがってこの場合、読み取りの精度は表示されている真の値に対して $\pm 0.09[\text{m}^3]$ であった。

また、このプログラムの処理速度であるが、重要なのは最初に読み取りを試みる右端の桁を読み取れなかったときに、対象画像を更新して読み取りを行うまでの時間である。ヘリウムを使用しておらずメーターがほぼ回っていない状態で、プログラムが 1000 回の読み取りを試みる時間を計測することで処理速度を評価した。31.7s 掛かったので、1 回の読み取りに約 30ms 掛かったことになる。(大まかな速度が重要なので統計処理はしない。) これはカメラのフレームレートと同程度であり、これ以上は必要ない水準である。実際の使用時はコンピュータへの負荷を下げる目的で対象画像の更新の前に 10ms のスリープを取った。

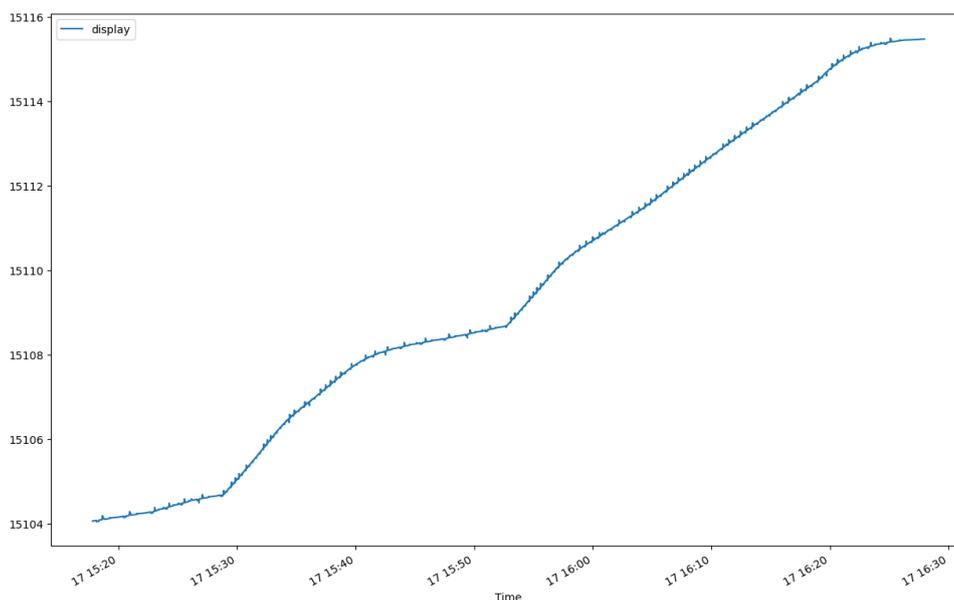


図 2.8 読み取った数値の時系列データ

True Value	display	count(%)	total count
0	0	199 (83.3%)	239
	9	40 (16.7%)	
1	1	217 (100%)	217
2	2	206 (100%)	206
3	3	239 (94.5%)	253
	5	14 (5.5%)	
4	4	141 (99.3%)	142
	5	1 (0.7%)	
5	5	328 (99.7%)	329
	4	1 (0.3%)	
6	6	277 (98.2%)	282
	9	4 (1.4%)	
	5	1 (0.4%)	
7	7	281 (99.6%)	282
	8	1 (0.4%)	
8	8	219 (70.9%)	390
	6	64 (16.4%)	
	5	26 (6.7%)	
9	6	118 (50.5%)	226
	9	104 (46%)	
	0	4 (1.8%)	

図 2.9 小数点以下第 2 位の読み取り正確性の評価

2.5.5 誤読の原因

小数点以下第2位の桁でのみ誤読が見られたが、これはコードの不備が原因であると後に判明した。ロール方向の傾きに対処しようとテンプレート画像と対象画像の両方にぼかし処理を行うことを検討していたのだが、ぼかし処理は採用しないと決定した後に、小数点以下第2位のぼかし処理のコードのみ削除し忘れていた。結果的に小数点以下第2位にのみぼかし処理が行われ、精度が下がってしまった。この部分を正しく削除すれば、 -1° ~ 1° の傾きが存在していた場合でもほぼ100%の精度が出ると思われる。

2.6 手法2：輪郭解析による比較判定

数字の輪郭を解析、テンプレートと比較することで、数字を判定する。

2.6.1 手法2：目標

最低条件は、手でカメラを調整して修正できる程度の $\pm 2^{\circ}$ 以内の傾きに対応できることとする。また、小数点第一位を読み取ることが出来れば圧力調整からの要求は満たせるため、小数点第二位の読み取りは実現していない。

2.6.2 手法2：方法

比較判定の流れは以下の通り：

1. 数字部分の切り取り
2. 輪郭抽出
3. 輪郭の解析（比較項目の抽出）
4. 比較判定

数字部分の切り取り

小数点第一位は黒い長方形を探して切り出すことができるが、現状の方法では $\pm 2^{\circ}$ 傾くと、小数点第一位の部分の切り取りができない場合がある。これ以降の段階の実際の判定において、この角度変化に対応できることが確認できた場合、 $\pm 2^{\circ}$ 以上傾いた画像に対しても適切に切り取る工夫を行うことで、対応できる傾きの角度が大きくなる可能性があると考えられる。

輪郭抽出

白黒画像の輝度平均を閾値として2値化処理を施し、その後、モルフォロジー変換を行い輪郭を抽出する。



図 2.10 2 値化画像



図 2.11 輪郭

輪郭の解析：比較項目の抽出

輪郭の解析により比較項目を抽出する。ここで、数字の傾きに依存しない形で比較項目を計算したため、輪郭を抽出するたびに、輪郭に楕円をフィッティングし、その長軸と短軸を基準軸として比較項目を抽出する。

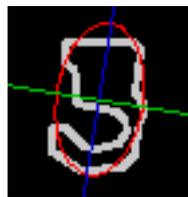


図 2.12 楕円フィット

実際の比較項目は以下の 16 項目である。これらの項目は、画素数が無限大であるとき画像が回転しても全く同じ値を返すという理由で選定した。しかし今回は 40×50 程度の画素数であるため、完全な

回転不変ではなく、たびたび外れた値をとることがある。

1. 輪郭の複雑さ (輪郭を折線で大雑把に近似したときの、点の数)
2. 輪郭の長さ
3. 楕円の中心と重心の距離/長径
4. 楕円の中心から見た重心の角度
5. 短径/長径
6. 外心と重心の距離/長径
7. 外心から見た重心の角度
8. 外接円/長径
9. 慣性モーメント/(長径)²
10. 外接長方形の短辺/長辺
11. 外接長方形の角度
12. 直線 fit の角度
13. 重心近くの輝度平均
14. 長軸と輪郭の交差数
15. 短軸と輪郭の交差数
16. Hu 変数 4 (回転不変な量の 1 つ)

回収計の数字は小数点部分と整数部分で形が微妙に異なる。また、照明環境の影響で 1 の位および小数点第 1 位は、2 値化処理後の数字が一部欠けた形になっている。このため、16 の比較項目の内比較的安定な項目と不安定な項目が桁ごとに異なって存在する。次の比較計算では、各桁ごとに、安定な比較項目を用いることとする。ここで、安定な比較項目とは同じ数字に対して近しい値を返す項目である。

比較判定

切り取った数字画像の安定な比較項目 (n 個) を $\{I_k\}(k = 1, \dots, n)$ 、数字 $i(0, \dots, 9)$ のテンプレート画像について同じ項目 $\{T_{i,k}\}$ 、と書く。なお、これらの値は以下のように標準化されている。

$$\tilde{T}_{i,k} = \frac{T_{i,k} - \text{mean}_k}{\sigma_k} \quad (2.2)$$

$$\text{ここで、} \text{mean}_k = \frac{\sum_{i=0}^9 T_{i,k}}{10} \cdot \sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^9 (\tilde{T}_{i,k} - \text{mean}_k)^2}{10}}.$$

画像と数字 i のテンプレート画像の相違を以下のように書く。

$$D_i = \sum_{k=0}^9 |I_k - T_{i,k}| \quad (2.3)$$

この時、全ての比較項目が安定なら、最小の $\{D_i\}$ を与える「 i 」が対象の数字である。しかし実際には全ての比較項目は同じ数字でも稀に大きく外れた値をとる。従って、以下のように閾値を設定す

ることで誤読を避けた。

$$m = \min_i D_i \quad (2.4)$$

$$r = \frac{m}{2 \text{ 番目に小さな } D_i} \quad (2.5)$$

m と r が十分小さいとき、最小の D_i の信頼性が比較的高いと判断できる。以下の条件を満たす時、画像を数字「 i 」として読む。

十の位～万の位: $m < 5$ かつ $r < 0.5$

一の位: $m < 2$ かつ $r < 0.4$

小数点第一位: $m < 2.5$ かつ $r < 0.4$

ただし、留意すべき点として、この閾値の設定は高々 300 程度の画像についての判定をもとにしている。対して実験は約 0.03 秒毎に数時間の判定を行うため、数十万の画像の判定を行う。従って、誤った数字だが閾値を満たす可能性が予測されるので、実用するには実験と同じ条件で正しく閾値を再評価する必要がある。

2.6.3 手法の評価

手法 2 の角度変化への対応可能性を評価した。評価には、現在と比べて約 1° 傾いている以前の画像データおよび現在の画像データを回転させて用いた。ただし、評価に用いた画像は 300 枚程度であり、実験の場合と比較して非常に少ないので暫定的な評価となる。

手法の評価基準としては、「誤読の有無」と「0-9 の数字を読み取れているか」が重要と考える。

まず、以前の画像データ (15056.3、15056.9 を計 200 枚読み込んだ) では、10 の位以降は 15050 を誤読なく読み取れた。1 の位は 6 を誤読なく読み取れた。小数点第一位は 0.9 は誤読なく読み取れたが、0.3 は 0.8 と誤読した。0.3 を 0.8 と誤読した原因は、以前と照明環境を変えたことによる 2 値化画像の形の変化があると思われる。以下に以前と現在の画像を示す。



図 2.13 以前の 2 値化画像



図 2.14 現在の 2 値化画像

また、手法2が照明環境の変化に弱いことがわかった。ただし、現状照明環境が変わることは想定されないため、改善するとしても後回しになる。

続いて現在の画像データを回転させ判定した（300枚）。各桁の結果を以下の表に示す。

角度 (°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	誤読	利用可能性
-4	○	○	○			○				○	無し	△
-2	○	○	○			○				○	無し	△
-1	○	○	○			○				○	無し	△
0	○	○	○			○				○	無し	△
1	○	○	○			○				○	無し	△
2	○	○	○			○				○	無し	△
4	○	○	○			○				○	無し	△

図 2.15 10の位

角度 (°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	誤読	利用可能性
-4	0	0	0	0	0	0	2	0	6	3	無し	×
-2	25	0	8	12	24	8	58	8	23	2	有り	×
-1	24	2	8	12	26	28	60	9	23	2	無し	△
0	26	9	8	17	29	29	47	8	23	11	無し	△
1	26	3	2	7	20	7	52	9	24	2	無し	△
2	26	0	4	0	26	6	5	9	24	8	有り	×
4	26	0	5	1	13	0	3	5	24	7	無し	△

図 2.16 1の位

角度 (°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	誤読	利用可能性
-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	無し	×
-2	7	2	1	1	0	0	0	6	3	0	無し	△
-1	22	19	14	5	6	1	4	14	3	0	無し	△
0	11	2	2	6	2	2	5	4	3	12	無し	△
1	25	22	0	4	2	0	5	14	3	9	無し	△
2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	有り	×
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	無し	×

図 2.17 小数点第一位

10の位以降の結果を見ると、少なくとも±4°までは読み取れている。このことから、理想的な画像であればこの手法は角度変化に対応できることがわかる。これに対して、1の位と小数点第一位は±1°以上の正確な読み取りはできていない。これには、以下のような原因が考えられる。①数字に

影がかかって暗くなっている部分があるため、2値化画像の形状が閾値に敏感である。②数字部分の切り取りの際に数字の一部が切れてしまっている。

対策としては、以下のようなものが考えられる。①現状、閾値は0でない輝度をもつピクセル全体の輝度平均をとっているが、2値化画像の形状が安定するような値を探す。②例えば画像からカメラの傾きを計算して、補正してから数字部分を切り取る。

また、角度変化への対応は限界があるものの現状の手法をそのまま実験に使うことを考えるなら、比較計算の項で述べたように、実験と同じ条件での閾値の再評価が必要である。

2.7 手法1, 手法2のまとめ

手法1によりカメラが特定の位置にある場合には十分な精度、処理速度で表示を読み取ることができた。一方、カメラの傾きやメーターとの距離などの変化には弱いことが判明したので、傾きに対応すべく手法2の開発に取り組んだ。手法2では対応できる角度変化の範囲が広くなるという示唆が得られた。

ただし、両手法ともテンプレートマッチングを基礎としたルールベースの判定法であり、距離変化への弱さは避けがたい。この点に関してアプローチできなかったことは大きな課題である。教師あり学習の諸手法を基礎とすることで解決できるかもしれない。また、基礎技術はテンプレートマッチングのまま、距離の異なるテンプレート群を複数用意し、使用するテンプレート群の選定および閾値の設定を強化学習を用いて自動化するなどの工夫もできたかもしれない。

3 圧力制御の自動化

ヘリウムを供給源からデュワーに送る上で、従来は圧力計を目視して確認し、必要に応じて手動で弁（以下バルブ）を開閉することによってデュワーの内圧を調整してきた。この作業は自動化が可能である。本章では、この自動化を LabVIEW のプログラムを用いて行う過程を説明する。

3.1 電動バルブの搭載

電動バルブ及び圧力計は以下の図 3.1 のようにヘリウムのガスボンベ (内圧力 140 気圧) とデュワーの間に搭載されている。バルブは DC 出力電源 (Agilent E3631A) に、圧力計はデータ収集制御ユニット (Agilent 34970A) に接続され、これらを PC に GPIB ケーブルで接続することで、遠隔的に圧力計からデュワー内の圧力を読み出し、バルブを開閉してヘリウムの圧力を 1.0-1.4bar 程度に調整、冷凍器に流入する液体ヘリウム量を制御する。

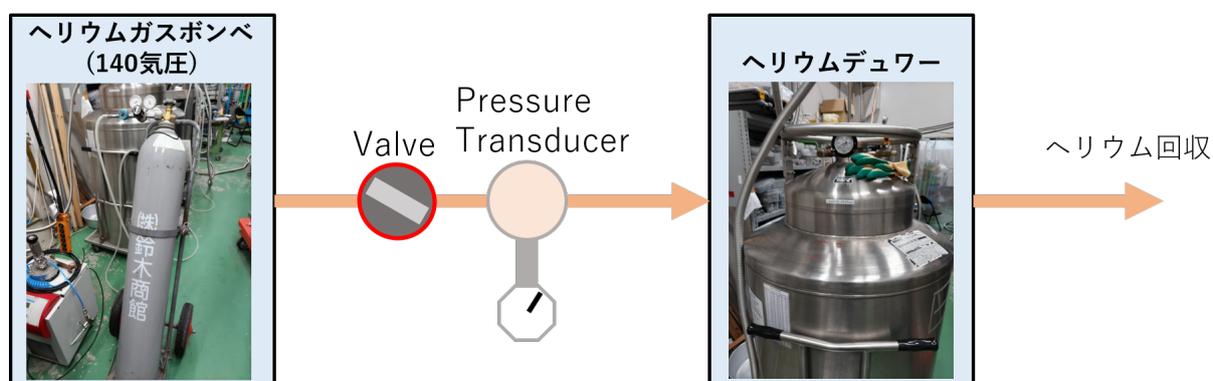


図 3.1 電動バルブと圧力計の搭載の模式図

バルブの開閉は電氣的に行われる。即ち、これに 25V の電圧が加えられている間はこれが開き、0V の間はこれは閉じている。実際は 0 - 25V の間に閾値が存在し、これを上回るかどうかが開閉を異にする。制御においては、20V でバルブが開かれることを確認したため、20V の加圧を以て実験でバルブの開閉に用いる値とした。

3.2 圧力制御プログラム

圧力を制御するプログラムは、一定時間間隔で圧力を読み出し、圧力が下限を下回るとバルブを開け、圧力が上限を上回るとバルブを閉めるという単純なものである。この機構によって、圧力が上限と下限の間の値を持つように制御されることが期待される。実際に稼働させた際の、圧力の時間変化を LabVIEW 上で見たものが図 3.2 である。このとき圧力の読み出し・応答制御間隔は 20(s)、閾値は上限 1.3(bar)、下限 1.2(bar) とし、16:00:00 頃の正のピーク付近から稼働させている。圧力はおおよそ 1.17bar - 1.37bar 間に制御されている。

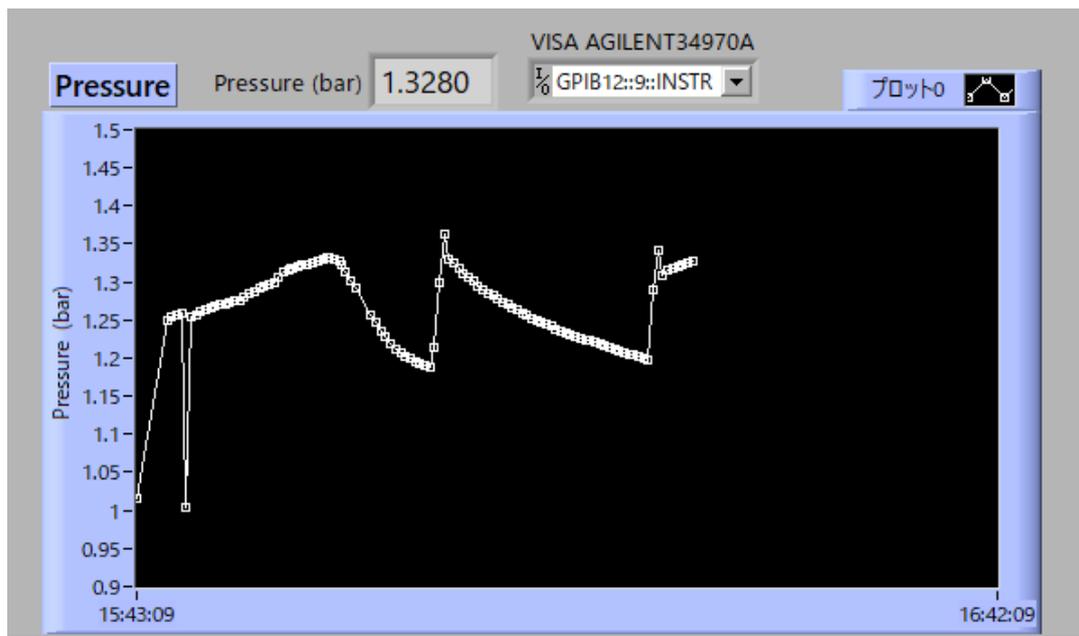


図 3.2 圧力制御プログラム稼働時の圧力の時間変化

3.3 回収メーターに応じて調整する改良

ヘリウム回収メーターの回り方に応じて圧力制御の下限値を調整できればさらによいとのことなので、メーターの値を読み出す際に数回に一度値を保存すると同時に前回保存した値との差をとって、それを設定された値と比較し大小に応じて下限値を自動で調節するような改良プログラムを搭載した。下限値更新頻度、メーター回転速度の閾値、上限値、2つの下限値を設定項目とし、下限値固定モードへ切り替えるスイッチとともに LabVIEW に実装した様子が図 3.3 である。グラフは回収メーターの読み取り値の時間変動である。

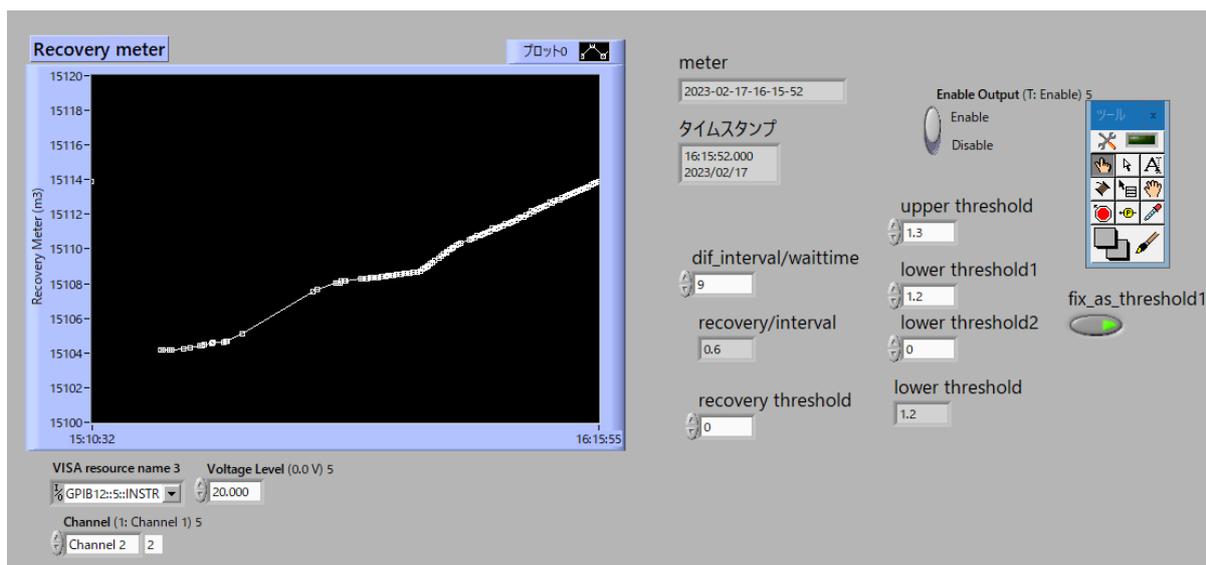


図 3.3 LabVIEW 上に実装した改良圧力制御プログラム

3.4 LabVIEW 上のプログラムのダイアグラム

参考までに、3.2、3.3 節で導入した LabVIEW 上のプログラムのダイアグラムは図 3.4 のようになっている。閾値に対する圧力の様子を 3 つの値で表現し、場合分けしてバルブを制御する。

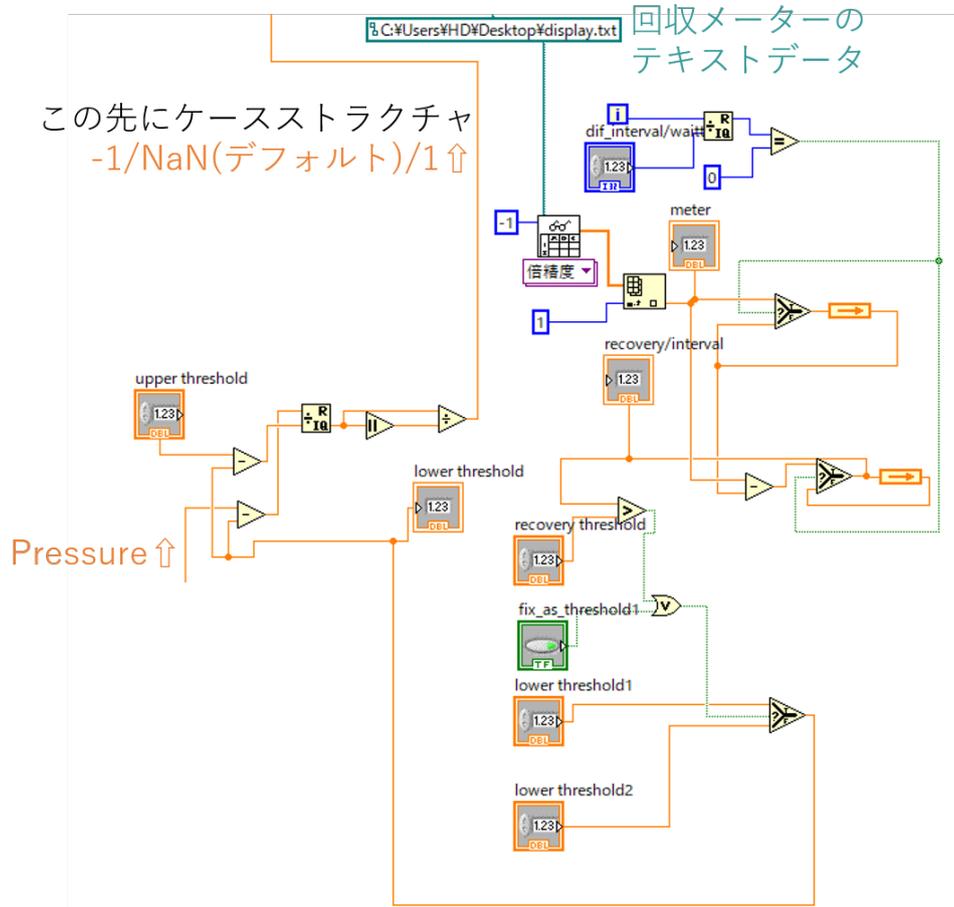


図 3.4 LabVIEW 上の圧力制御プログラムのダイアグラム

4 超伝導液面計

この章では、低温環境を作るための冷凍機内部の液体ヘリウムの量を知るための液面計の作成について述べる。具体的には、図 1.1 の B 内で液体ヘリウムの液面がどの高さにあるかを測るためのものである。(冷凍機の構造については 1.6 節参照のこと。)

4.1 背景

液体ヘリウムのベッセルとインサートとは直接接続しているわけではなく、デュワー内に液体ヘリウムを一度貯蔵する場所(通称液溜め。英名 reservoir の拙訳)からニードルバルブを通してインサートへと供給される。液溜めの液体ヘリウムを直接知る系統的な手立ては今まで存在せず、低温実験特有の実験者の職人的な手さばきで流入量を決定していたという。しかし緩和時間測定などで長時間動作することを考えると現実的ではなく、液体ヘリウムの流入を自動化する必要がある、そのために液溜めの液面の位置を知ることは重要である。このような理由から、液溜めに設置する液面計に求められる特性として以下の二つが挙げられる。

- ・液溜めの底から 20 cm の範囲まで測定できれば十分。
- ・液体が少ない時の精度が必要。

また冷凍機の構造から液面計は幅 6 インチ、長さ 40cm 以内である必要がある。本章ではこの液溜めに設置する液体ヘリウム液面計の制作から試験実験の結果までを記す。

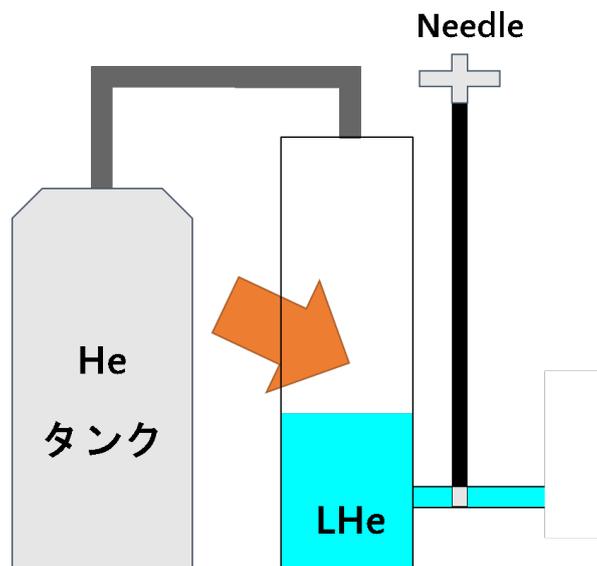


図 4.1 '液溜め'の位置の模式図。朱色の矢印で指した場所が液溜めである。図 1.1 より一部切り取り、編集。

4.2 原理

超伝導・常伝導相転移を約 9K で起こすワイヤー状の金属をプローブとして用いる。ワイヤーを液体ヘリウムに一部浸すと、液面より下の部分が超伝導状態、上が常伝導状態となり、液体につかっている長さによって抵抗が異なる。実際は液面より上の部分にも熱伝導などにより超伝導状態になってしまう部分が存在するため、ワイヤーの上半分にヒーターを設置して超伝導状態を破れるようにした。

ヒーターが理想的に機能した場合、液面に浸った部分の長さや抵抗との関係は一次関数的関係で表される。

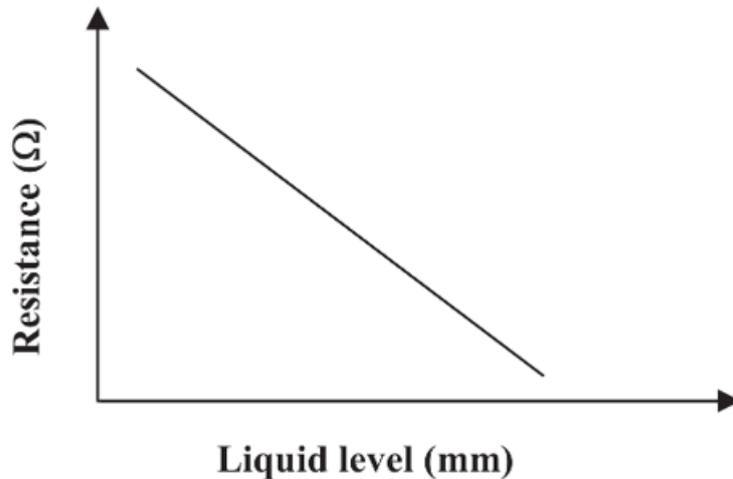


図 4.2 液面より下の長さや抵抗との関係。[8] より一部抜粋。

4.3 作成と回路

超伝導線として直径 0.062mm の Nb-Ti50wt (ニラコより購入) を 41.2(± 1.0)cm 使用した。はんだ付けのために両端 3cm を残し、直径 3mm の熱収縮チューブで絶縁保護した。その外側に直径 0.08mm のマンガン線 (長さ未測定) を NbTi 線に触れないようなるべく隙間がないように巻き付けヒーターとし、同じく上から絶縁保護した。このとき、チューブの外側にはんだづけのために数センチだけ線が出るようにした。NbTi 線とマンガン線と電流計に接続するリード線の各一端を互いにはんだづけして導通させ、マンガン線のもう片端を電流計に、NbTi 線の裸の端に残りの 2 端をリード線で接続することで NbTi の抵抗を正確に測定することが可能となった。その方法は定電流源 (7651 Programmable DC Source、YOKOGAWA 製) から流れた電流をマンガン線で発熱に用い、さらにその電流のまま NbTi 線の電圧 (電圧計は Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit、Agilent Technology 製を用いた) を四端子法で測定するというものである。電圧計は LABVIEW と接続されており電圧は 5s ないしは 2s ずつ PC に記録された。実験の記録はすべて電圧の数値が安定するのを待って採られたものである。

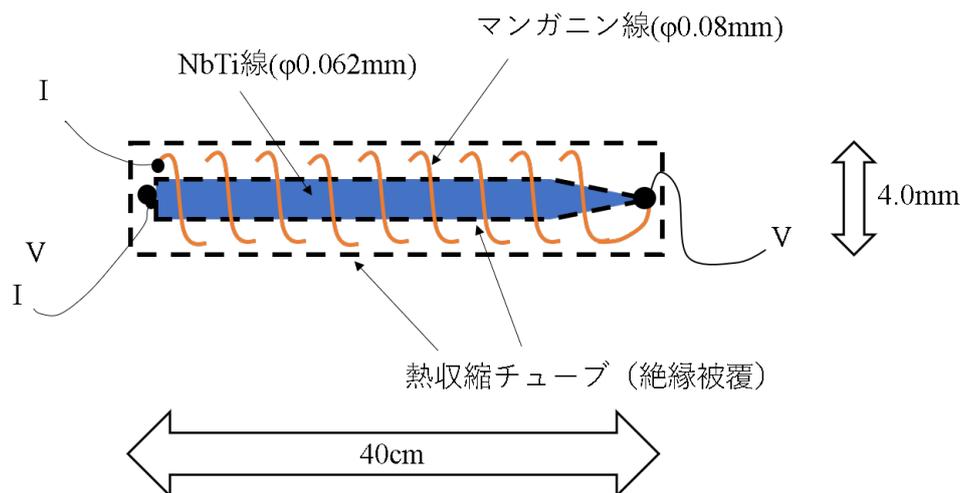


図 4.3 作成した NbTi 液面計の模式図

リード線の長さは 3 m 近くあり、電圧計の数字にはここからの寄与も含まれるが、考察の節で示すように有意な大きさではなかった。

4.4 キャリブレーション実験の方法

試作した液面計を気柱振動液面計に、二つの液面計の先端が一致するようにカプトンテープで固定した。こうしたのは液面を NbTi 液面計の先端に合わせて望み通りの長さだけ液体に NbTi 線を浸すことが可能だからである。実験としては測定したい電流に対して常温で抵抗が前記録と一致しているのを確認した後、液面計をデュワーの口天から先端が底面に触れるまでゆっくりと挿入することから始まる。次に気柱振動液面計を利用して液面計の先端を液面に合わせ、ここを 0 cm として液面計を 2 cm ないしは 5 cm ずつ下げ降ろす。段々と下げて NbTi が全て超伝導状態となり、それ以上下げても電圧の変化が見られなければ二重の意味で引き上げる。液面計はヒートガンで熱して常温まで戻せば、電流を変えて再び液体ヘリウムの寒池にその身を浸す準備が整ったことになる。

4.5 結果および考察

まずはヒーターの効果を判断するために 10 mA、30 mA、50 mA、60 mA で 5 cm ずつ測定した結果を図 4.4 に示す。各点には縦横にエラーバーが走っているが特に縦のエラーバーは点に隠れて見えなくらいには小さい。そのため、50 mA と 60 mA での近似直線は横軸のエラーバーに対して左右両端の点を除いて最小二乗法でフィッティングしたものを採用した。直線の式は $y = -3.87(\pm 0.12)x + 64.25(\pm 2.52)$ で、 $\chi^2 = 1.55$ であった。さて本題に入ると NbTi の転移温度は 9.2 K [7]、そこでの抵抗率は $5.8 \times 10^{-7} \Omega \text{ m}$ [3] くらいであるので、図 4.4 の抵抗 0Ω 付近に存在する点での状態は NbTi 全部分が超伝導状態になっているとみなしてよい。またこれらの結果からリード線の抵抗も非常に小さく無視できると考えられる。常温における液面計の抵抗は 9Ω で、[1] によると転移温度での NbTi の抵抗は常温でのその約 0.9 倍であるため、60 mA の y 切片での状態では液面より上の全部分が超伝導を破っていると考えられる。さらに底面に付けた状態で 60 mA から電流を上げていくと 70 mA 付近で抵抗が有限の値を示したため、電流の上限を 60 mA とした。これらを踏まえて、 \boxtimes より精密なデータをもって一次関数的関係を確認する、 $\textcircled{2}$ 同じ条件で測定して再現性を見る、という二つの目的を果たすために 60 mA で 2 cm ずつ測定した結果をまとめたものが図 4.5 である。右端

付近の点でそれまでの傾向から外れ急激に0に落ちるのは、液面計の浸る長さが増えてヒーターの機能が落ちたためと解釈した。これらの点を除いて先と同様にフィッティングすると一次関数的関係ははっきりと確認できた。近似直線の式は $y = 2.40(\pm 0.08) + 63.41(\pm 2.49)$ 、 $\chi^2 = 0.300$ であった。一方で②の再現性という点では左端での値しか一致していると言えるものはない。これらから言えることは、液面上部に液面計がある状態から液面計を浸したときに液面から数 cm だけ上の部分も超伝導状態となり、その長さはまちまちであるということである。

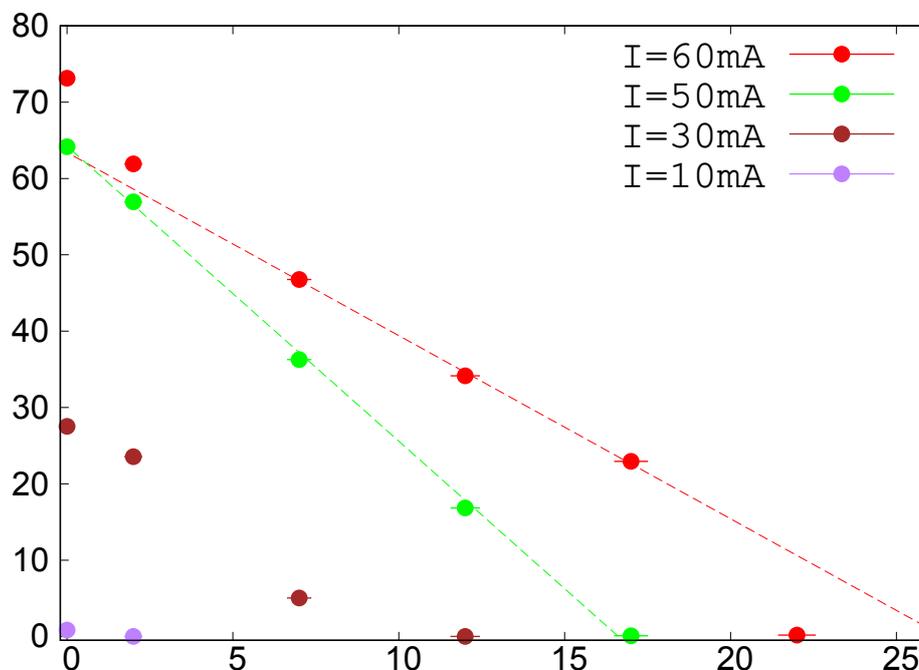


図 4.4 様々な電流に対する NbTi 線の抵抗を 5 cm ずつ測定したもの。横軸は液面より下の NbTi 線の長さ (cm)、縦軸は抵抗 (Ω)。液面計先端の不可測部のために 2 cm からになっている。

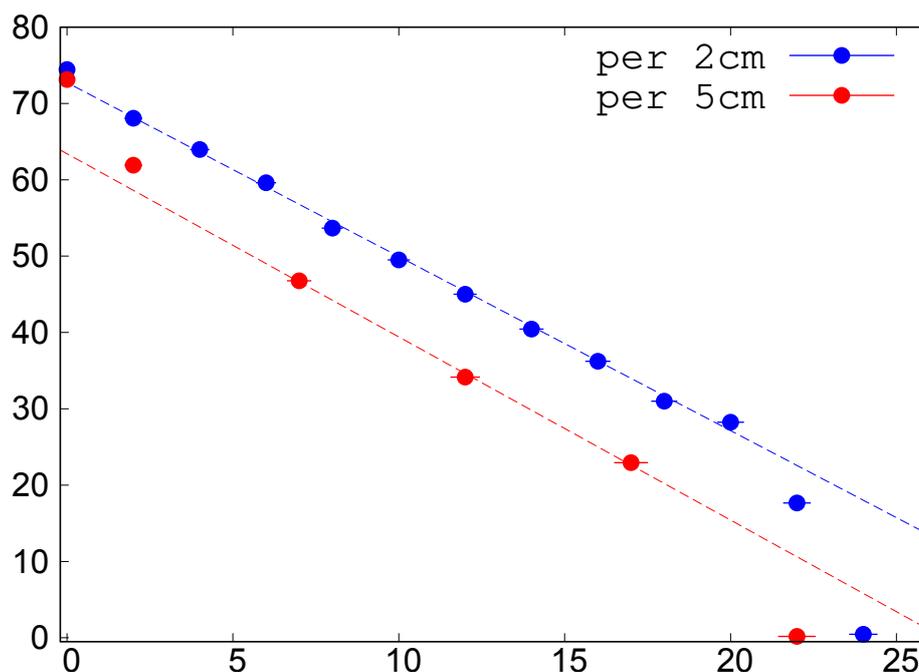


図 4.5 60 mA で 5 cm ずつと 2 cm ずつとでそれぞれ測定したもの。5 cm のデータは図 4.4 におけるものと同じ。横軸、縦軸は図 4.4 と同様。

4.6 今後の展望

今後液面計の改良に取り組むのかと問われれば沈黙せざるを得ないが、今後の課題としては次の二つが挙げられる。

☒省電力化：今回作成した液面計は電流が大きいほど液面計としての精度がよかったが、液体ヘリウムの蒸発量を減らすという経済的な目的のためには、液面計に流す電流は小さいほうが良い。今回の結果から液体に漬かっている長さが少なければ小さな電流でも十分である可能性が示唆された。小電流での振る舞いをはっきりとすることができれば、液面に漬かっている長さに従って電流を変えろという手法で様々な範囲に対応することができると思われる。

②さらなる線型関係の追求：60 m A で測定した結果ではそこそこの線型関係がみられたが、液体に深くつけるほど線型関係は崩れた。理想は 4.2 のような関係を得ることであり、今回作成した液面計は 30cm 後半くらいまでは測定することができるはずである。原因としてはヒーター不足が真っ先に挙げられるが、☒に挙げた通りヒーターをあまりに強化することは好ましくない。本タイプの作成法が書かれた [8] ではヒーターを上部にちょろりと巻いただけだから、ヒーター以外の要因もあるのではないかと考えている。液体ヘリウムの張力が 0 であることから液体が液面計をするすると登り、液面よりも上の部分を超伝導状態とした可能性を考えている。ここまで書いておいて元も子もない話だが、郡さん曰く最大 15cm 測れば十分ということなので実は②は意味のないことでもある。

5 コンデンサー型液面計

この節では静電容量の変化を用いた液面計開発について述べる。

5.1 動機

La 核偏極用の動的核偏極装置において液体ヘリウムを用い、試料の冷却が行われている。また、La 核の偏極度を測定するために NMR 装置が用いられている。概要図は図 5.1 である。真空ポンプにより気体ヘリウムの圧力を下げること、試料周辺は 1.5K 付近の値が保たれている。しかしながら、共存する液体ヘリウムの量、すなわち液面を測定する手段が無く、現在は温度のみを測定しヘリウムの流量を調整している。そこで、我々は NMR 装置用の液面計を開発し、図 5.1 下部の試料付近にマウントすることを試みた。

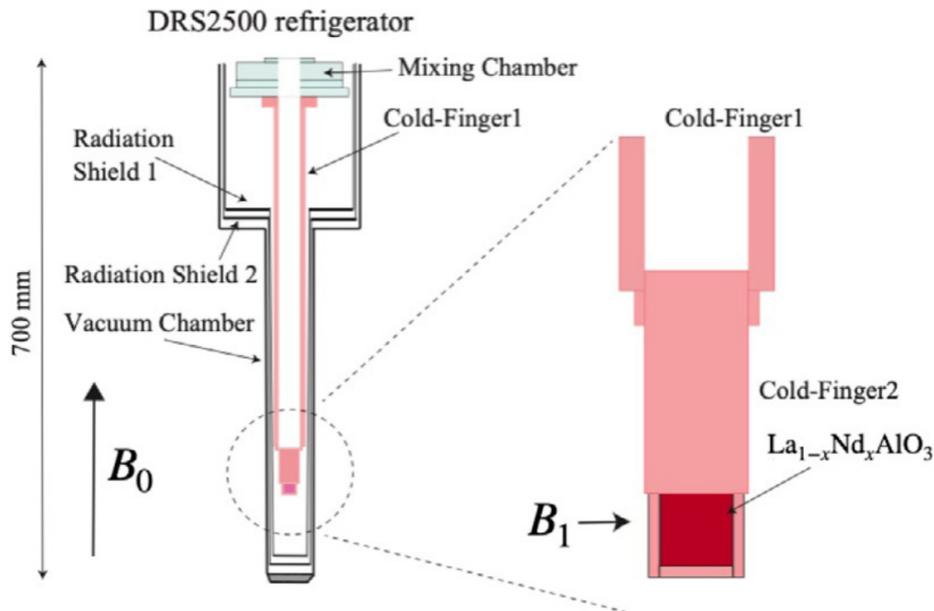


図 5.1 NMR 装置の概要図

5.2 原理

今回、我々が採用した液面計は円筒型コンデンサーの静電容量による液面の変化を用いたものである。なお、試料付近にマウントすることや液体ヘリウムと気体ヘリウムのみが共存する状態での使用であることを考慮し、コンデンサー型の液面計を開発することとした。

そこで、まず始めに円筒型コンデンサーを用いて液面を測定する方法について述べる。内径 r_i 、外径 r_o 、長さ L で真空中の円筒型コンデンサーの静電容量 C は

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (5.1)$$

である。ここで ϵ_0 は真空の誘電率である。従って、比誘電率 κ_g の気体と κ_l の液体が共存し、液面が L_l であるときの静電容量は

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0(\kappa_g(L - L_l) + \kappa_l L_l)}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (5.2)$$

となる。よって、円筒型コンデンサーの静電容量 C を測定することで、液面の高さ L_l を求めることができ、液面計としての役割を果たすことができる。

5.3 作成方法

この節ではコンデンサー型液面計の作成方法について述べる。材料として、SUS316 製の $\phi 12$ 、壁厚 1.5mm、長さ 350mm、のステンレスパイプと、 $\phi 8$ 、長さ 350mm のステンレスロッドを用いた。SUS316 は低温で磁性を持たず、NMR の運用に支障をきたさないため、この素材を採用した。ステンレスパイプは図 5.2、ロッドは図 5.3、である。



図 5.2 実験で用いたステンレスパイプ



図 5.3 実験で用いたステンレスロッド

なお、ステンレスロッドにカプトンテープを巻くことによって、ステンレスパイプと電氣的に絶縁させた。内部のロッドとパイプは接着剤 stycast を用いて液面計の上部と下部を固定することで、接触させた。また、パイプ内部に液体が流入することを担保するために、液面計下端から 25mm、75mm、125mm、225mm、275mm、325mm の位置にフライス盤を用いて直径 3mm の穴を開けた更に、読み出し用の導線を取り出すために、外部のパイプと導線をはんだ付けし、カプトンテープを巻いて固定した。また、ロッド中心部に M3 のネジ穴を作成し、ロッドと圧力端子のついた導線を電氣的に接続した。その写真が次の図 5.4 である。



図 5.4 ステンレスロッドのネジ穴部分

以上により作成されたコンデンサー型液面計が次の図 5.5 である。実際の実験ではマウント箇所から LCR メーターまでの距離が長いため、読み出し用の導線を延長するケーブルを用いた。

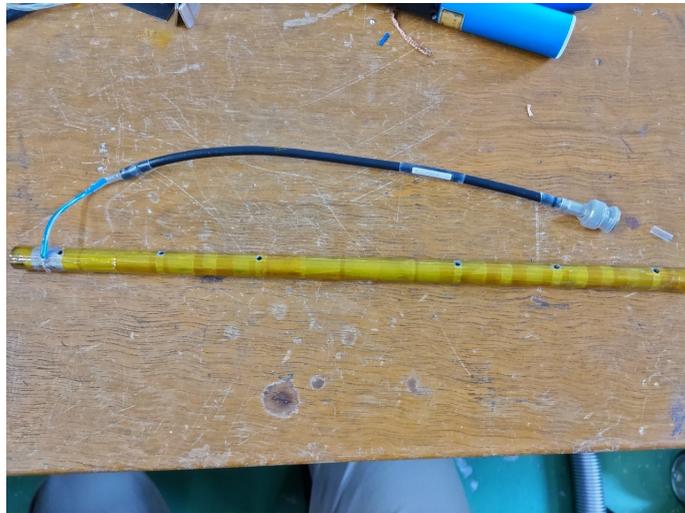


図 5.5 コンデンサー型液面計

また、液面計の静電容量測定には LCR メーターを用いた。LCR メーターは交流電圧を流すことで、四端子法によりインピーダンスを測定する装置である。今回我々が用いた LCR メーターは Keysight 社の 4263B であり、次の図 5.6 である。



図 5.6 測定用の LCR メーター

5.4 検証実験

この節では、我々が作成したコンデンサー型液面計が冷却器内での使用に耐えうるものか確認するための検証実験について述べる。これを確かめるために、我々は窒素とヘリウムのそれぞれについて静電容量を測定した、前者を 5.4.1 で、後者を 5.4.4 で述べる。

5.4.1 窒素による検証実験における手法

式 5.2 から分かるように液面計の静電容量と液面には比例関係が存在ことが分かる。そこで、我々は液体窒素をデュワーに入れ、液面の高さを変化させたときの静電容量の値の変化を確認した。その際、液面の位置の固定は手で行った。実験は二回行ったが、初回は 25mm、75mm、125mm、225mm、275mm、325mm での静電容量を測定し、二回目は 25mm、75mm、125mm、175mm、225mm、275mm、325mm での値を測定した。

5.4.2 窒素による検証実験の測定データ

初回の実験データは表 5.1 であり、二回目の測定データは表 5.2 である。両者ともに各液面に対し、静電容量を測定した。また、LCR メーターの誤差は目視で測定した。

表 5.1 液体窒素による液面と静電容量 一回目

液面 (mm)	静電容量 (pF)	誤差 (pF)
350	290	1
325	289.5	0.5
275	282	1
225	273.5	0.5
125	257.3	0.3
75	249.2	0.3
25	239.6	0.4
0	239.4	0.3

表 5.2 液体窒素による液面と静電容量 二回目

液面 (mm)	静電容量 (pF)	誤差 (pF)
350	286.8	0.3
325	294.2	0.2
275	280.7	0.3
225	272.6	0.2
175	263.5	0.4
125	254.5	0.3
75	246.4	0.2
25	239.0	0.5
0	238.3	0.1

5.4.3 窒素による検証実験の考察

式 5.2 より、液面の変化に対する静電容量の変化を ΔC とすると、

$$\Delta C \propto \varepsilon_{liquid} - \varepsilon_{gas} (\text{pF/cm}) \quad (5.3)$$

このように変化は液体とガスの誘電率の差に比例する。よって、測定値をグラフにしたときの線形性から液面計として十分に機能するかを考察する。

液体窒素における一回目、二回目の測定値と線形フィッティングを、それぞれ以下の図 5.7, 図 5.8 に示す。

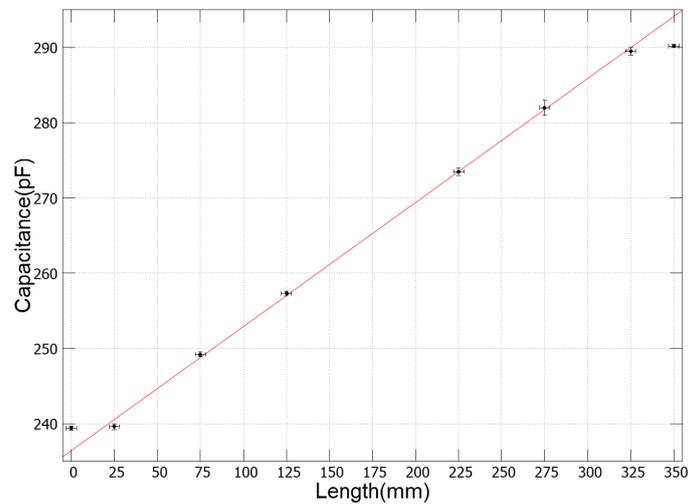


図 5.7 一回目の液体窒素における液面の高さや静電容量の変化。直線は 25-325mm で傾きの線形 fit。

フィッティングに関して、コンデンサーの構造上 0-25mm と 325-350mm の間は、他区間と同じような空間があるわけではなく接着剤等で埋まっているため、フィッティングの区間からは外しており、その区間は液面計としては利用しない。LCR メーターの表示値が沸騰による液面の揺れなどによりかなり振動するため、その振動の幅を目視で測定し縦軸の誤差とした。また、手で液面の位置を固定し

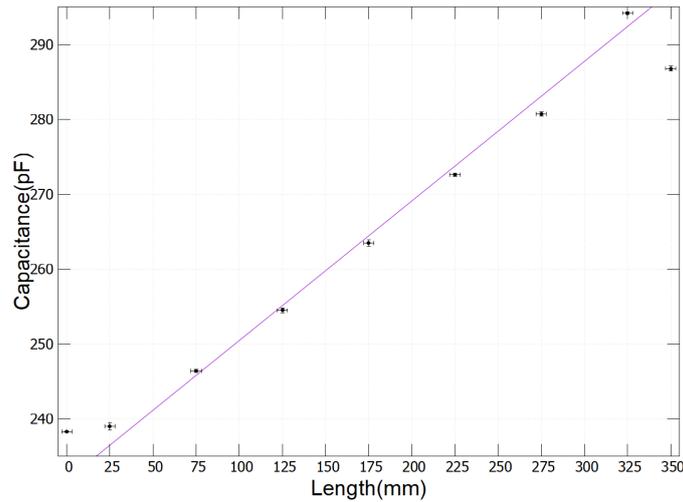


図 5.8 二回目。同上。

た際、液体窒素の液面が視認しにくかったため、液面の高さの誤差として横軸に 3mm の誤差をとっている。

一回目のグラフ (図 5.7) についてはよい線形性を示し、25-325mm での傾きは $1.648 \pm 0.03 \text{ pF/cm}$ となった。二回目のグラフ (図 5.8) についてはあまり良い線形性を見せず、25-325mm での傾きは $1.863 \pm 0.07 \text{ pF/cm}$ となった。ここで二回目の結果について、325mm での値を除いてみると、図 5.9 のようになり、傾きは $0.1721 \pm 0.03 \text{ pF/cm}$ となり、少なくとも 25-275mm ではよい線形性が見られることが分かった。

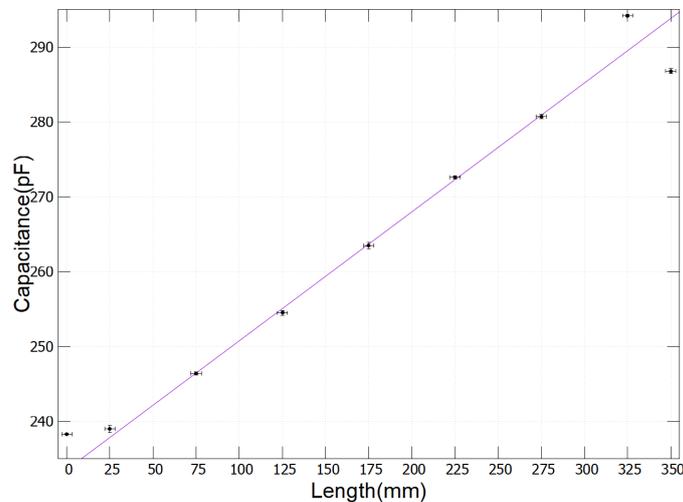


図 5.9 二回目のデータにおいて 25-275mm で fit した結果。25-325mm よりも線形性が良い。

二回の結果から求められる傾きと誤差は $1.685 \pm 0.07 \text{ pF/cm}$ 。例えば液面計を 30cm 利用するとすると、傾きの誤差は 2.1 pF 。また、ノイズによる LCR メーターの表示値の揺れが 0.5 pF 程度あるので、全体で 2.6 pF の誤差が生まれる。これは 1.6 cm の変化に対応する。30cm ほどの長さの液面計の場合、窒素の環境では最大 1.6 cm の誤差で読み取れることが分かった。

これが液体ヘリウムではどうなるかを考えると、式 5.3 から

$$\begin{aligned}\Delta C(\text{He}, 4\text{K}) &= \frac{\varepsilon_{l(\text{He})} - \varepsilon_{g(\text{He})}}{\varepsilon_{l(\text{N}_2)} - \varepsilon_{g(\text{N}_2)}} \times \Delta C(\text{N}_2, 77\text{K}) \\ &= 0.1085 \times \Delta C(\text{N}_2, 77\text{K})\end{aligned}\tag{5.4}$$

よって、このコンデンサー型液面計を液体ヘリウムで使用したときの、予想される傾きは

$$\Delta C(\text{He}, 4\text{K}) = 0.183\text{pF/cm}\tag{5.5}$$

もしも傾きの誤差と、液面の揺れなどに由来するノイズが窒素とヘリウムで同じ場合、最大で 10cm 程度の読み取り誤差が生じる可能性がある。実際にはヘリウム冷凍機内は、室温下に置かれた液体窒素よりも安定な状態にあると予想されるので、ノイズが小さくなることを期待してヘリウムでの測定を行った。

5.4.4 ヘリウムによる検証実験における手法

液体ヘリウムにコンデンサーを沈める際冷凍機に入れて測定したが、液面を図る装置が内部に無いため、状態を変化させたときの静電容量の変化の様子から液面計が機能するか判断した。

冷凍機の概要を図 5.10 に示す。

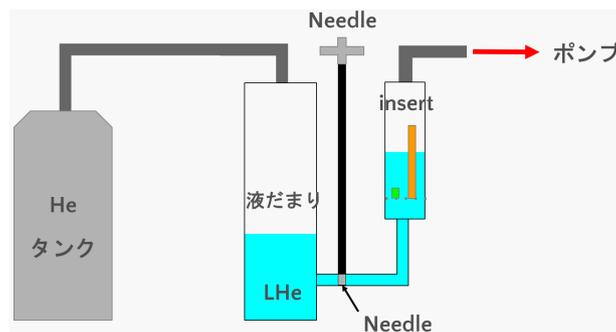


図 5.10 ヘリウム冷凍機の概要図。

コンデンサーは insert 部分に固定されている。液だまりには LHe が一定量あり、Needle によって開閉具合を調節、ポンプにより insert 内を減圧することで、insert の液面を調節する。insert 内部には温度計があり、温度のデータも同時に測定した。温度によって静電容量が変化しており、液面の変化を正確に分析するため温度が一定で液面を変化させるようにした。具体的には insert 内を減圧して液面を上昇させた後、常圧に戻し温度が $T=4.21\text{K}$ の状態で液面がゆっくりと下がるような状態を作った。Needle によってゆっくりと液体が移動するので液面の下降速度は一定であると仮定し、操作ごとに液面の降下速度は時間に比例するとした。このような状態を二回測定した。データは二回とも、 $T=4.21\text{K}$ になってから、温度が上昇し始めるまでを抽出した。温度が上がり始める点は、insert 内の LHe がなくなった点なので、0cm の時の静電容量である。一方最初に $T=4.21\text{K}$ になった時の液面は未知である。

5.4.5 ヘリウムによる検証実験の測定データ

ヘリウム冷凍機で取得した全データは図 5.11 のようになった。

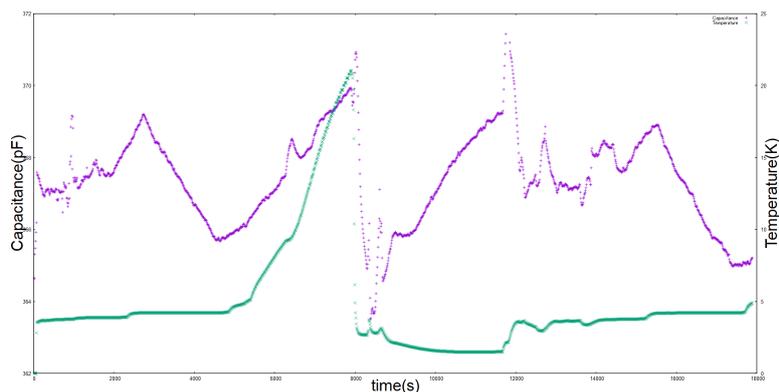


図 5.11 ヘリウム冷凍機で液面を変化させたときの静電容量 (紫) と、温度 (緑)。

二回のデータと、線形 fit した結果を図 5.12、5.13 に示す。窒素の時のような沸騰由来とみられる静電容量の揺れは見られなかった。しかし、数分周期で 0.1pF 程度上下するノイズが見られた。

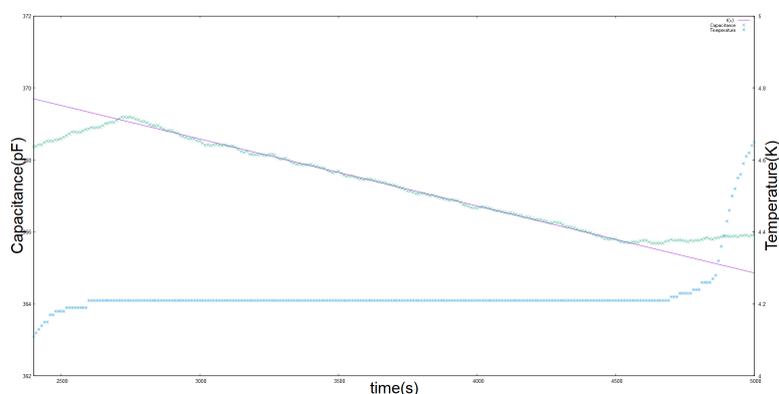


図 5.12 一回目に液面を操作したときの静電容量 (紫) と温度 (緑)。T=4.21 の間に液面が一定速度で降下し、0cm 以下になっているのが分かる。

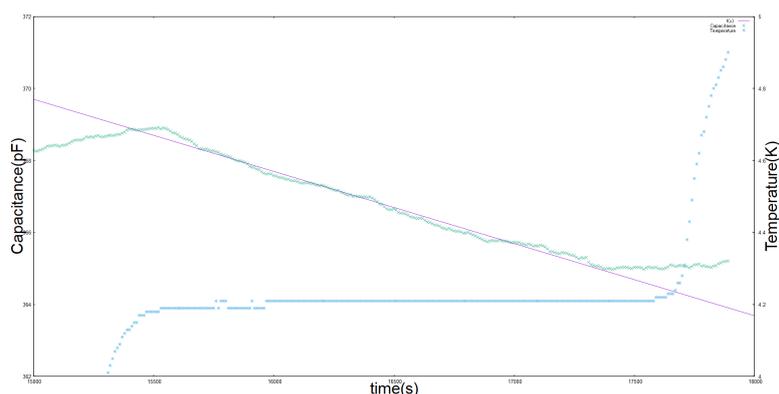


図 5.13 一回目に液面を操作したときの静電容量 (紫) と温度 (緑)。

最初に T=4.21K になったグラフ上端と 0cm であるグラフ下端の静電容量、液面が下がっている最中の傾きを表 5.3 に示す。

	一回目	二回目
上端 (pF)	369.2	368.9
下端 (pF)	365.7	365.0
傾き (pF/s)	-0.001862 (± 0.36%)	-0.002005 (± 0.75%)

表 5.3 LHe 環境で操作時のグラフの上下端の静電容量、時間に対する傾きとその誤差。

5.4.6 ヘリウムによる検証実験の考察

まずグラフ下端の値、すなわち 0cm での静電容量が異なるのは、ケーブルが insert 内で固定できていないことによる線間容量の変化によるものと考えられる。ケーブルは全長で 3m 程度あるが、地上でケーブルを変形させたときにも 1pF 程度の変化はあったため、その範囲であると思われる。次にグラフ上端と下端の差を考える。一回目、二回目それぞれ、差が 3.5pF、3.9pF となっている。仮に液面計が 30cm 全部沈んでいたとすると、5.5 式より 5.5pF 程度の静電容量の変化が見えるはずである。しかし測定では 4pF 程度であるため、液面の 0cm から何 cm までのデータが取れているか判断できない。傾きについては、一回目、二回目共に、良い線形性を示した。液面が一定の速度で下がっているという仮定のもとで、液面の 1cm の変化は十分に見える精度であることが分かった。傾きが一回目と二回目で異なるのは、液面が下がる速度が液だまりと insert の初期条件 (水位、圧力) によるためである。傾きとその精度が 30cm で保たれるとして、長周期のノイズを含めて 30cm の液面を測定したときの誤差は 0.8cm となり、1cm 以下の精度で液面を測定することができる。

5.5 結論

液体窒素では、30cm を仮定すると最大 2.6pF の誤差が見られるなど、あまり精度が出なかった。これは、LCR メーターを肉眼で観測していたことや、室内に開放された状態でおかれたデュワーやケーブルによって条件が変わってしまったことによると考えられる。液体ヘリウムという実際の環境においては、液面の変化を目標程度の良い精度で図れることが分かった。しかし問題点が 3 点ある。一点目はケーブルの変形によって線間容量が変化し、静電容量の絶対値が変化することである。これはケーブルを固定することで変化を抑えることができる。二点目は、温度によって静電容量が変化することである。実際の実験環境では温度を一定にするので問題ないが、目的の温度ごとに静電容量を測定する必要がある。また、温度によって絶対値が変わるのか、傾きも変わるのか不明であるため、明らかにする必要がある。三点目は、コンデンサー全体を沈めなければ 1cm の液面変化に対する静電容量の変化 (pF/cm) が測定できないということである。液面計として機能するためには、静電容量の絶対値が 2 点で必要である。今回の測定で液面計の線形性が確認できたが、それはあくまで (pF/s) という時間応答であるため、0cm での値とその傾きからは推測することはできない。よって、コンデンサーをすべて沈めた状態で測定する必要がある。

6 謝辞

理論ゼミでは菅沼さんから多くのことを学ばせて頂き、物理学をより深く考える時間でした。また、実際に格子 QCD のプログラムに触らせて頂き、理論研究の一端に触れたことは貴重な経験でした。また、実験ゼミやコロキでのご指摘、納期を考えない材料注文、突然の出張要請、慣れぬ薬品管理を受け止め一緒に考えてくださった成木さんに最大限の感謝を表します。それに加え理論ゼミで我々を助けて下さった TA の長谷川さん、工作室の早朝の付き添い要請にも嫌な顔せず対応して下さった TA の高橋さん、ありがとうございました。加えて、この実験は大阪大学核物理研究センター、郡英輝特任准教授の全面監修のもとに行われた。我々の実験はその協力が無くしては成り立たなかったのは間違いない。改めてお礼申し上げます。

最後に、物理データが取れなかったことは著者たちにとっても残念ではあったが、実験において避けては通れない機器開発の経験を積むことができた。実験に進む者、理論に進む者、物理以外の道に進む者、皆が物理学の進歩に向けた地道な歩みを実感した。1年間ともに歩んできた P3 の仲間たちに感謝したい。

参考文献

- [1] M. Ohkubo A. Kushino S. Kasai S. Kohjiro, S. Shiki. Development of superconducting coaxial cables for cryogenic detectors. *Journal of Low Temperature Physics*, Vol. 151, pp. 650–654, 2008.
- [2] C. ショルツ F. サッチャ 著 B. ポッフ, 柴田利明訳. 素粒子・原子核物理入門. Springer university textbooks. シュプリンガー・ジャパン, 改訂新版, 2011.
- [3] E.I. Dyachkov, R. Herzog, I.S. Khukhareva, and A. Nichitiu. Thermal conductivity and electrical resistivity of nb-ti (ht-50) as a function of temperature and magnetic field. *Cryogenics*, Vol. 21, No. 1, pp. 47–50, 1981.
- [4] K. Ishizaki, H. Hotta, I. Ide, M. Iinuma, T. Iwata, M. Kitaguchi, H. Kohri, D. Miura, Y. Miyachi, T. Ohta, H.M. Shimizu, H. Yoshikawa, and M. Yosoi. Measurement of nuclear spin relaxation time in lanthanum aluminate for development of polarized lanthanum target. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 1020, p. 165845, 2021.
- [5] J. Koga, S. Takada, S. Endo, H. Fujioka, K. Hirota, K. Ishizaki, A. Kimura, M. Kitaguchi, Y. Ninomi, T. Okudaira, K. Sakai, T. Shima, H. M. Shimizu, Y. Tani, T. Yamamoto, H. Yoshikawa, and T. Yoshioka. Angular distribution of γ rays from the p -wave resonance of ^{118}Sn . *Phys. Rev. C*, Vol. 105, p. 054615, May 2022.
- [6] T. Okudaira, S. Takada, K. Hirota, A. Kimura, M. Kitaguchi, J. Koga, K. Nagamoto, T. Nakao, A. Okada, K. Sakai, H. M. Shimizu, T. Yamamoto, and T. Yoshioka. Angular distribution of γ rays from neutron-induced compound states of ^{140}La . *Phys. Rev. C*, Vol. 97, p. 034622, Mar 2018.
- [7] Su-Hun Qiu Wenbin Maeda Minoru Matsumoto Akiyoshi Nishijima Gen Kumakura Hiroaki Choi Seyong Kim Jung Ho Patel, Dipak Kim. Niobium-titanium (nb-ti) superconducting joints for persistent-mode operation. *Scientific Reports*, Vol. 9, p. 14287, 2019.
- [8] Ramya uthirasu. Development of superconducting level sensor for liquid helium level measurements.

Procedia Engineering, Vol. 38, pp. 138–143, 2012. INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELLING OPTIMIZATION AND COMPUTING.

- [9] 奥平琢也. 複合核における時間反転対称性の破れの探索. 波紋, Vol. 29, No. 3, pp. 126–132, 2019.