

# 第2回 HAKKO 熱の実験コンテスト

## 最終報告書

山梨大学工学部応用化学科

クリスタル科学研究センターゼミ

代表 2年次八板光輝

2年次

柴田昌典 宮沢健史

清水陽向

1年次

柴崎有紀 矢ヶ崎恵斗 吉村元希 市野祥多

# 第 1 章

## 研究内容の紹介

# 磁石でコーラを冷やそう！！

## ～室温磁気冷却システムの開発～

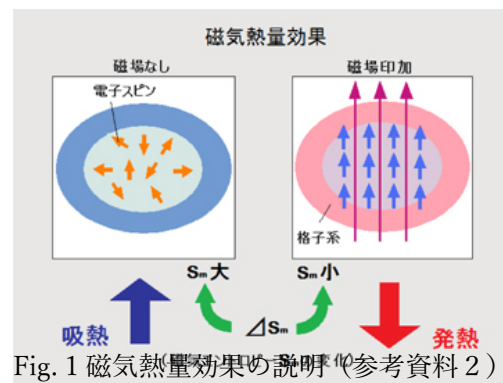
山梨大学工学部応用化学科クリスタルゼミ

### 背景と動機

現在の冷蔵庫において主流となっている冷却方法はコンプレッサーを用いた冷却方法である。1834年に発明されていて実に 200 年近く冷却方法は変わっていない（参考資料 1）。そこで次世代の冷却方法として近年研究が進んでいる磁気冷却技術に我々は着目した。この冷却方法には減磁と励磁という現象が関わっている。具体的には、磁性体を励磁した時の発熱を系（冷却システムの外）の外に排出し、減磁した時の吸熱を利用して系を冷却する。磁石の移動や回転によって減磁と励磁を繰り返すことで冷却材料（磁性体）の磁性の向きを変化させて系の温度を徐々に下げていく。そこで、このシステムを利用してフロンガスや電気を使用しない次世代の冷却システムを製作したいと考えた。

我々の提案する冷却システムには**手で回すだけで冷却 電気が不要 災害時に使用可能**という3つの優れた点をもつ魅力的な冷却システムである。

磁気冷却はこれまで研究機関で専門的に研究が行われているが、私たちがこの研究を行うことによる意義は大きいと考える。成果の有無を問うのではなく、磁気冷却というあまり知られていない技術を知ってもらい理解してもらおうという試みは社会的意義の大きい上に小型な磁気冷却装置は例を見ない。



### 目的

- ・磁気冷却の技術を使った冷却システムの製作
- ・飲み物を 10°C 以下に冷やす
- ・磁気冷却は一般に認知されていないので HAKKO 熱の実験コンテストを通して知ってもらう

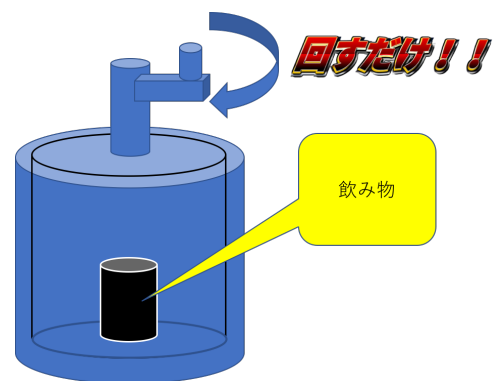


Fig.2 冷蔵庫のイメージ

### 研究内容

冷却システムの作成前に予備実験として冷却効果が高いとされるいくつかの磁性体を用いて温度変

化を測定し、コスト、冷却効果などを総合的に踏まえて最適な磁性体を検討する。その後、冷却システムの設計に合わせて予想される冷却効果について数学モデルを用いて検討する。また、これらのプロセスと並行して手回し冷却システムの設計を行い、3Dプリンターで容器を製作する。

この研究計画における最も注意すべき点は磁性体の吸熱したエネルギーをいかにして系の外へ出すかということである。この点については既存のエアコン、冷蔵庫などの冷却機器を参考にして上手く熱を出す機構を考えていきたい。

冷却システムの製作が終了したのちに実際に飲み物を用意して冷却システムとしての冷却効果の測定、冷却システムの改良を行う。

## 研究体制

本研究は本学の応用化学科のものづくりゼミの一環として行う。それに伴い、7名の指導教員の下で行う。また、大掛かりな研究になると考えられるので2班に分担することにする。

- ・冷却システム設計班
- ・磁気作業物質の検討班

## 実際に行った工程

本来であれば、当初の計画を示した通りに実験を行うべきだったがいくつも予期せぬ自体が起こり、計画に修正を入れ最終的には以下の実験を行った。

1. 熱スイッチの選定
2. 強力な磁石の製作
3. 冷却装置の作成
4. 熱電対の電磁誘導による温度変化の調査
5. 磁気作業物質の温度変化の測定
6. 液体の冷却

## 第2章

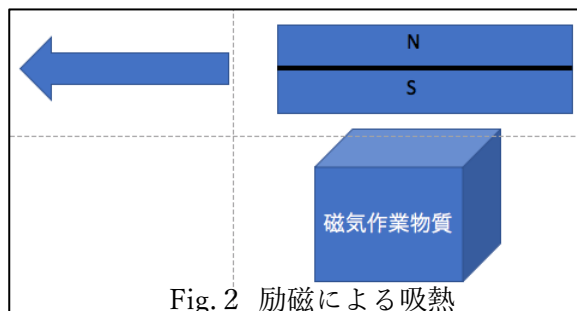
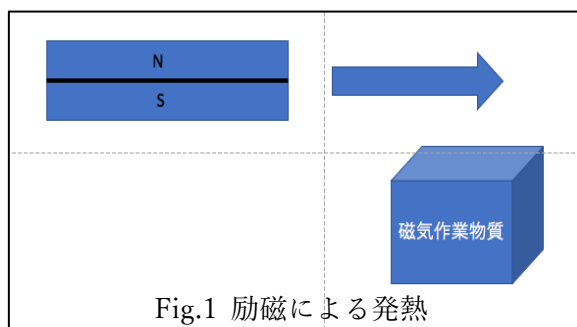
### 1部

#### 熱スイッチの検討

プロポーザルを提出した当初は冷却モデルを数学的手法を用いて検討する予定だった。指導教員のアドバイスをいただき、まずは熱スイッチと呼ばれる部品に使う材質には何が適当であるかという検討を行うことにしたい。

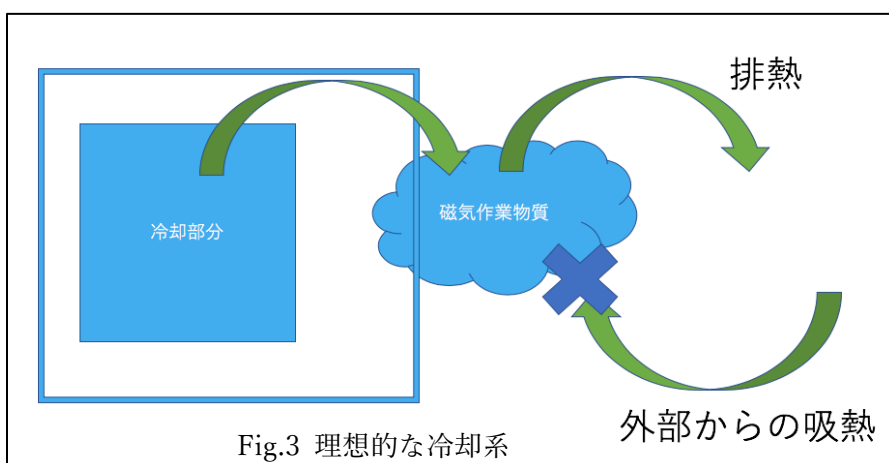
熱スイッチとは何か

磁石を磁気作業物質（磁性体）に近づけると磁気作業物質の磁気モーメントが一方向に揃う。この時、磁気作業物質はエネルギーを熱エネルギーとして外に出す（発熱）。（fig.1）次に、磁石を磁気作業物質から遠ざけると磁気物質の磁気モーメントが不揃いになり、磁気作業物質は熱エネルギーを吸収する（fig.2）。これらを一つのサイクルとみなし繰り返すことで熱の移動が可能になる。しかし、このサイクルを繰り返すだけでは我々の目指す冷却はできない。そこで、磁気作業物質が発熱し、放出した熱エネルギーのみを系の外に排出し、系の外の熱エネルギーを系に取り込まないような系を考える必要がある（fig.3）。今の技術ではそのような理想的な系は作れないので、次のような系を組むことで、理想的な系にできるだけ近いものをつくる。



・手順

1. 断熱された系内に磁気作業物質と磁石、冷却部分を用意する。
2. 熱伝導性の大きい金属の棒（熱スイッチ）を磁気作業物質に接触させながら磁石を近づける。これによって、断熱された系の外に熱を排出することができる。
3. 熱スイッチを系の外に取り出し、磁石を遠ざける。



1 から 3 のサイクルを繰り返すことである程度系の冷却が可能となる (fig.4)

#### 実験の意義

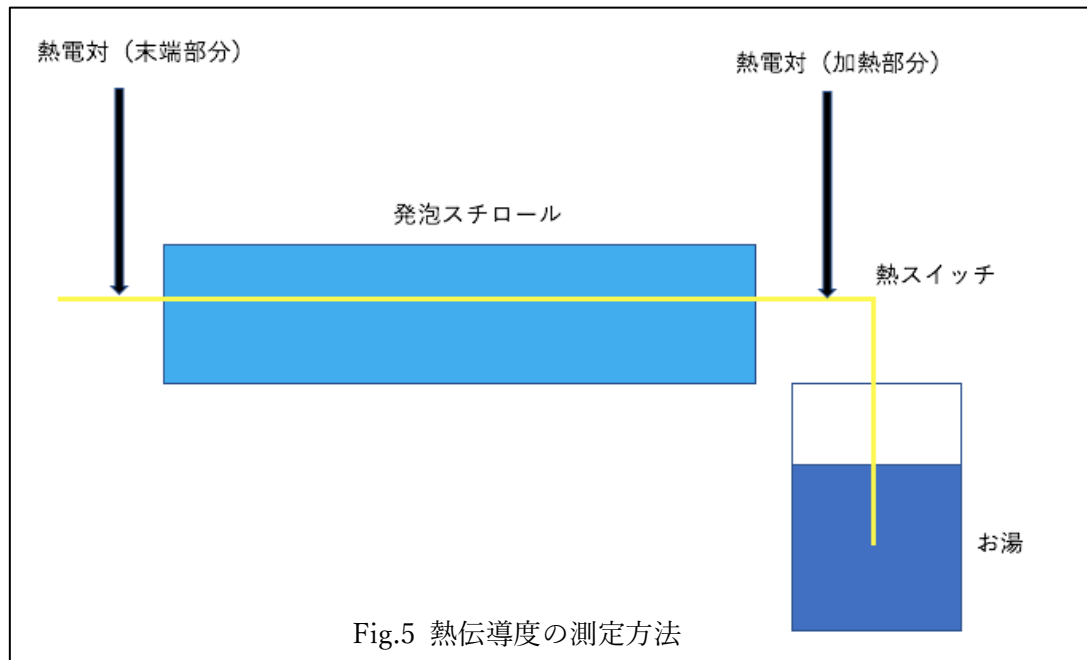
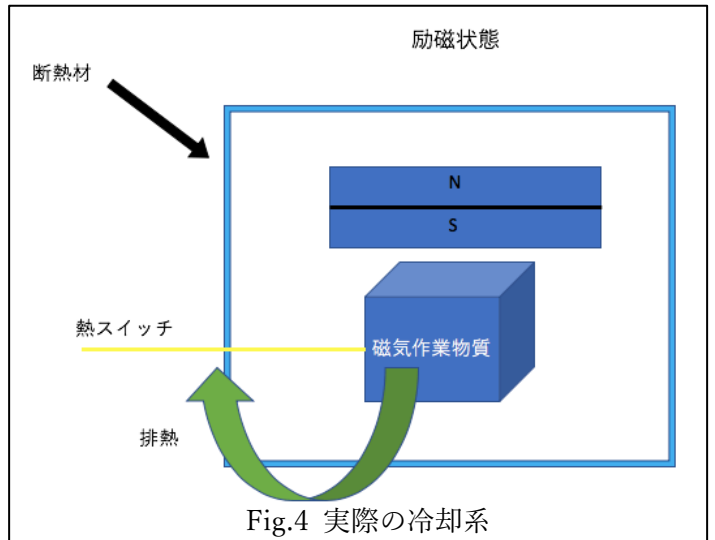
熱スイッチとして何が適切であるかを検討する上で以下の問題を提起する。

- 1 熱スイッチの太さはどの程度が適切か  
→ 細いと系の外から熱を取り込みにくい、逆に効率的に熱を系の外に出すことができない。
- 2 熱スイッチの熱伝導性はどの程度が適切か  
→ 白金や金を用いることで、大きい熱伝導性を

確保することができるが、費用としてそれは高額ではないか。また、効率的に熱を系の外に排出できるが、それは系の外から熱を取り込みやすいことを意味する。

#### 実験系の説明

次のような実験系を用意し、熱スイッチの熱伝導性を測定する (fig.5)。沸騰したお湯に熱スイッチを接触させることで一定の温度の熱を熱スイッチに与えることができる。接触させた部分から端までどれくらいの時間で、どれくらい上がるかを熱電対で測定する。



## 実験の結果

測定用の材料を発泡スチロールで挟む。発布スチロールの出入口に熱電対を装着した。ガラス管に測定用の材料である針金を通し、ビーカーに入れる。その後沸騰したお湯を100ml入れ10分間計測を開始。どれくらいの時間で熱が先端に伝わるかを見たかった。しかし、常にお湯を加熱しているわけではないので10分後には50度のお湯になった。そしてそれが原因の一つになり、うまくでデータが取れなかった。また、Fig.7より、加熱部分と末端部分での温度変化において相関は見られなかった。



Fig.5 実際の冷却系

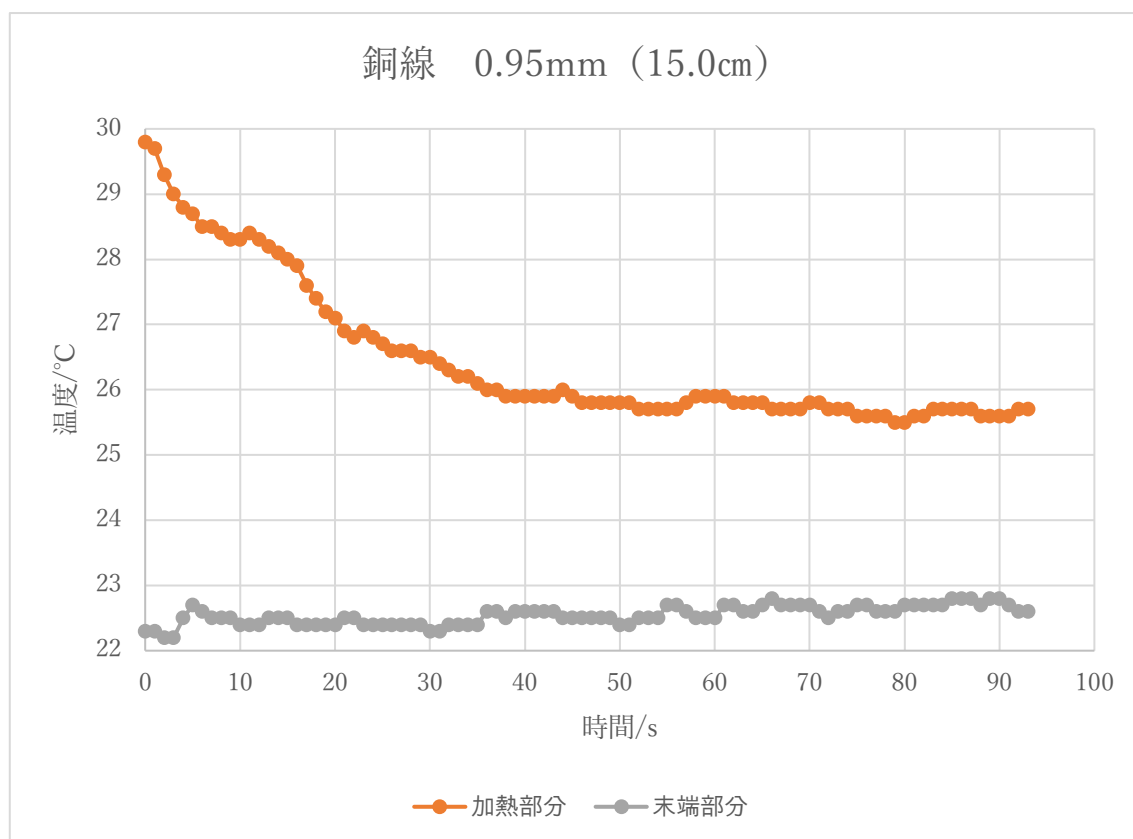


Fig.6 実験結果

## 6.本実験の総括

私達は銅線熱伝導度の測定を行うことで熱スイッチの選定を行うことを試みた。しかし、断熱性を確保できず、測定が難しいことから他の種類での測定を断念した。



## 第2章

### 2部

#### 強力な磁石の製作

ガドリニウムを励磁するためには強力な磁石を用いる必要がある。強力な磁石であるほど好ましいが超伝導磁石を用意するほど大規模に実験を行うことは不可能であるし、冷却用の液体ヘリウムを用意することはそもそも私達の地球に優しいというコンセプトにそぐわない。従って、私たちは常磁性で強力な磁石を用意することにした。

私達が用意したのはマグネットバーである。棒状のマグネットではあるが、常磁性で強磁力を得るために工夫されている。同じ極を組み合わせることにより、磁力線を排除している。この結果、磁力線はより離れた場所にも届くようになっている(fig.1)。

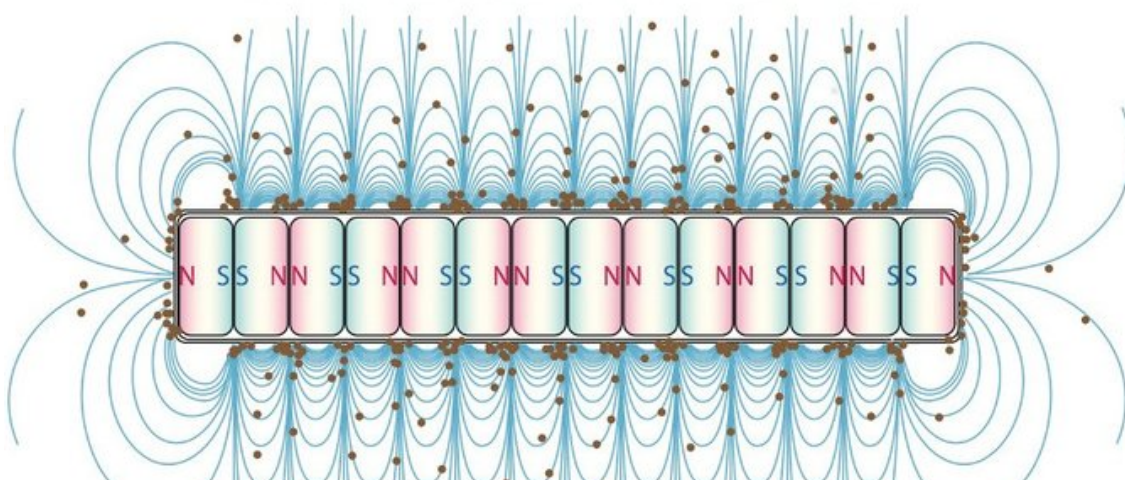


Fig.1 マグネットバーの磁力線

それだけではなく、マグネットバーを組み合わせることで格子型の磁石の作成に成功した(fig.2)。サンギョウサプライで購入したものである。



Fig.2 使用したマグネットバー



Fig.2 製作した格子型マグネットバー

磁力計で2つのマグネットバーの中央を測定した結果 0.08G を計測した。また、マグネットバーの表面磁束密度は 0.6 mT であった。

製作した磁石の中央部分にガドリニウムを通過させることでガドリニウムの励磁と減磁を行う。

## 第2章

### 3部

#### 冷却装置の作成

本計画では手回しのできる冷却装置の製作を目指していた。しかし、冷却機構の開発の遅れによって自作する時間は確保できなかった。そこで、私たちはガドリニウムの励磁と減磁を行うことのみを第一に考え、古くなり不要になったミシンを再利用することにした。ミシンの針が上下する機構を利用するために不要な部品や土台の切断を行い、専用の装置を製作した。その後、針を装着するシャフトをアクリル製パイプに変える事で、熱電対を針と同様に上下運動させる機構の開発に成功した。この上下運動機構の下に第二章第二部で製作した格子型マグネットを配置する事で、簡易的な冷却機構を再現することに成功した(Fig.1)。



Fig.1 製作した上下運動機構を持つ装置 (右) とデジタルマルチメーター (左)



Fig. 2 格子型マグネットバーと熱電対

## 第2章

### 4部

熱電対の電磁誘導による温度変化の調査

私たちは予備実験としてガドリニウムと K 熱電対を接触させた状態で磁石の相対的距離の変化によるガドリニウムの温度変化を測定することを試みた。しかしながら、ある問題が確認できた。それは磁石と熱電対の距離の相対的な変化による熱電対の電磁誘導によって正しいガドリニウムの温度が測定できないということである。この問題に対処すべく熱電対と磁石の相対的距離に変化による熱電対の測定誤差を調査した。

### 実験の意義

熱電対の磁石による温度変化の度合いをあらかじめ測定することで、ガドリニウムの温度変化の有無を裏付ける根拠となる。

### 実験の説明

第2章第2部で製作した冷却装置を利用して、熱電対を上下運動させることで磁石と熱電対の相対的距離を変化させた。この時に用いた熱電対は R 熱電対である。これによって、K 熱電対に比べて電磁誘導の影響を少なくすることができると考えた。

また、上下運動の速度を変化させるために付属の足踏み機構を取り外し、スライダックを導入した。これによって電圧を変化させることで、速度を調整することに成功した。

### 実験の結果

上下運動の速度をスライダックで電圧を変化させることで速度を変化させた。これによって、以下の4つの電圧による熱電対の温度変化を測定した。なお、電圧を大きくすることで上限運動の周期が小さくなることを確認した。

1. 45V(Fig.1) 開始時 19.3°C 終了時 17.7°C
2. 50V(Fig.2) 開始時 18.6°C 終了時 17.4°C
3. 55V(Fig.3) 開始時 18.1°C 終了時 17.7°C
4. 60V(Fig.4) 開始時 19.1°C 終了時 17.5°C
5. 室温の測定 (Fig.5) 平均 17.9°C
6. 磁石を置かない時の上下運動 (50V) (Fig.6) 開始時 17.5°C 終了時 19.5°C

次のページに温度-時間のグラフを掲載する。

温度-時間のグラフ

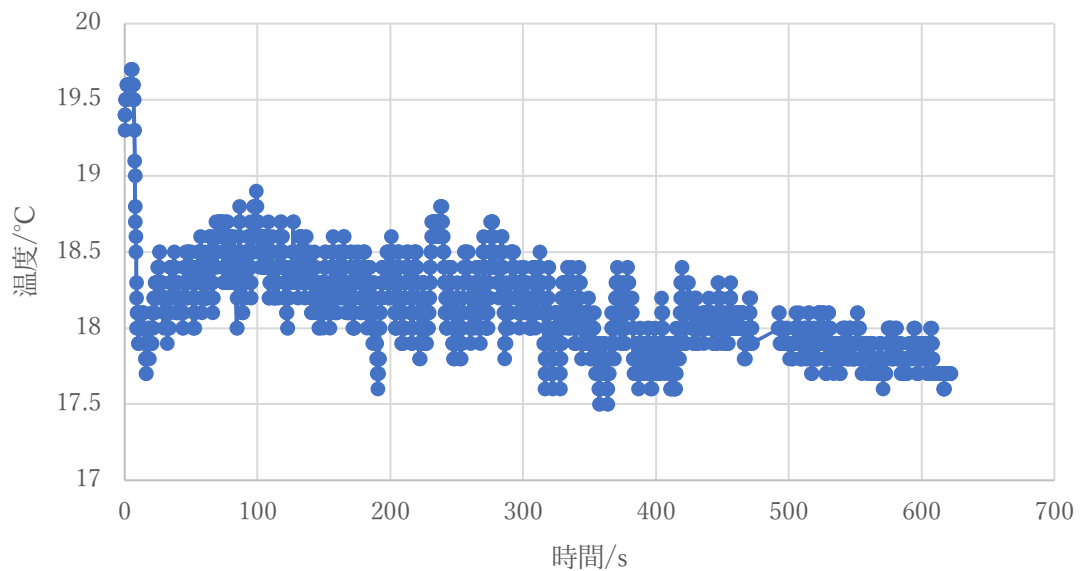


Fig.1 45.4Vにおける磁石と熱電対の相対距離操作による温度変化

温度-時間のグラフ

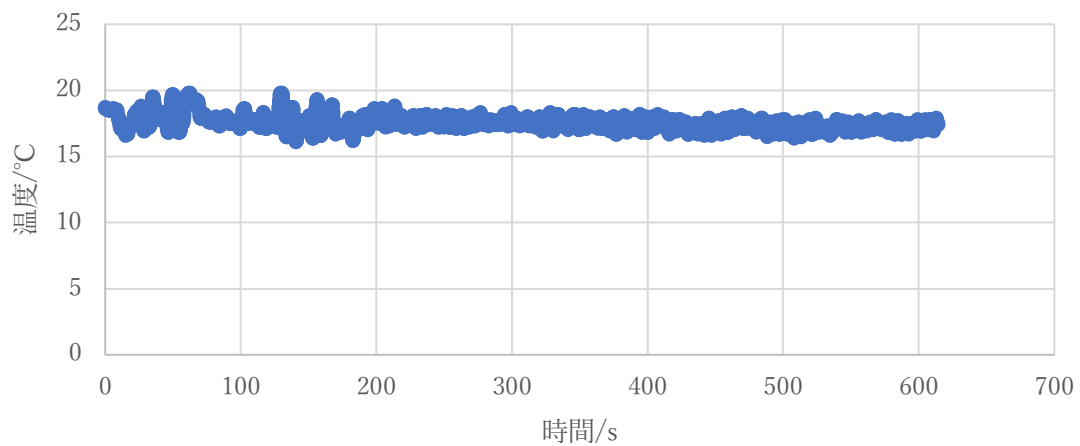


Fig.2 50.3Vにおける磁石と熱電対の相対距離の操作による温度変化



温度-時間のグラフ

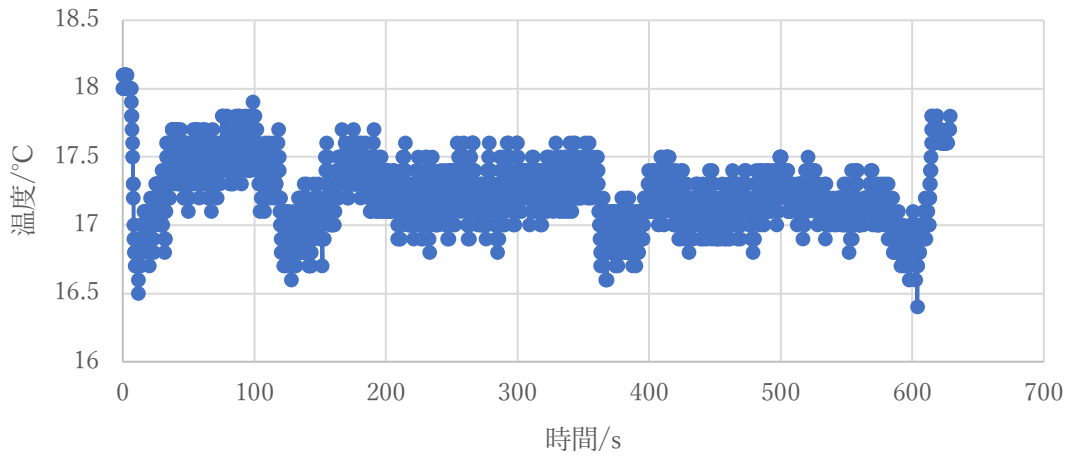


Fig.3 55.1Vにおける磁石と熱電対の相対距離の操作による温度変化

温度-時間のグラフ

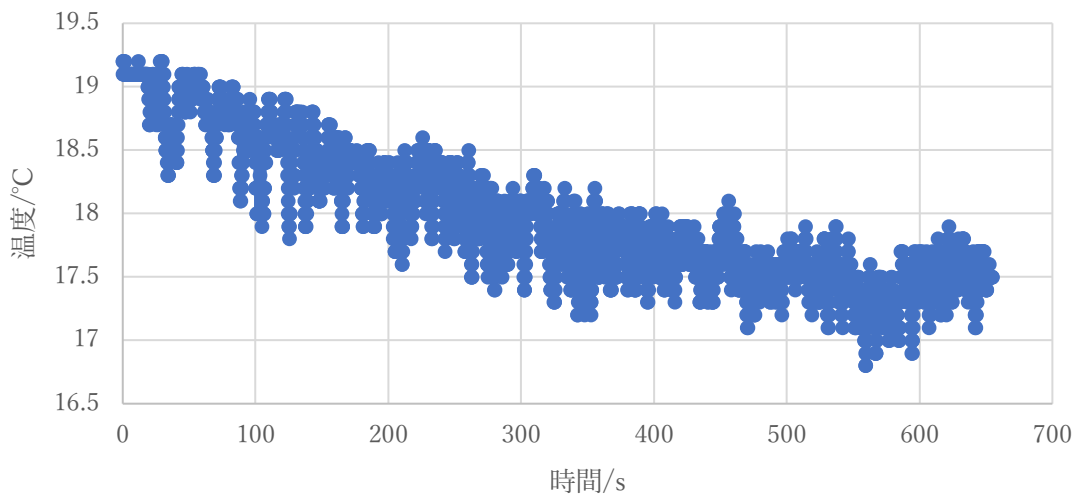


Fig.4 60.2Vにおける磁石と熱電対の相対距離の操作による温度変化

温度-時間の変化

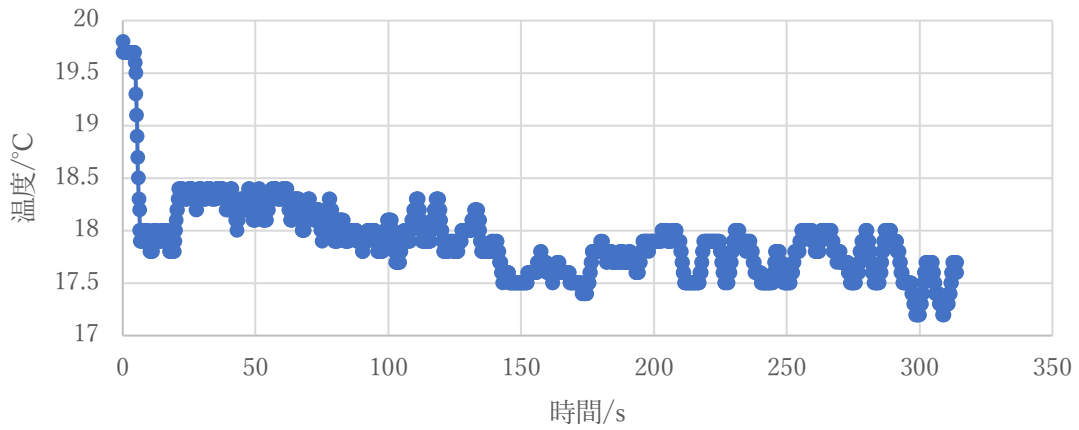


Fig.5 室温の測定

温度-時間のグラフ

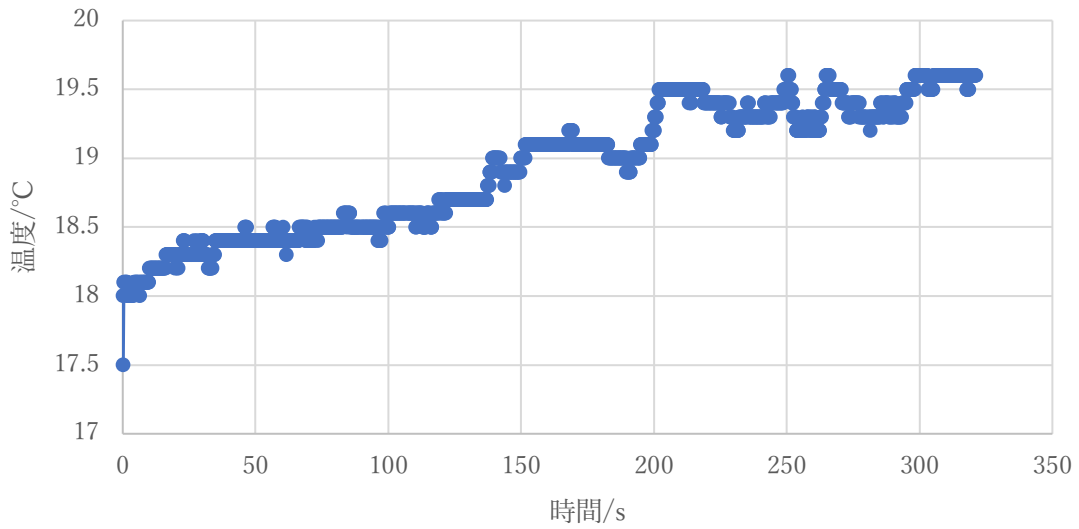


Fig.6 50.1Vにおける熱電対を上下運動させた時の温度変化 (磁石なし)

## 実験結果の考察

私達は当初、熱電対と磁石の相対距離操作による温度変化の実験では熱電対の電磁誘導による発熱を考慮して温度は時間の増加とともに大きくなっていくと予想していたが、グラフ (Fig.1~Fig.4) では変化なしか、あるいは徐々に下がっていく傾向が認められた。R 熱電対自体にも磁気作業物質としての役割がある可能性を示唆しているのではないかと考えられる。あるいは、熱電対の上下運動を行う間に空気との接触によって冷やされたという可能性もある。

しかし(Fig.6)より、熱電対自体が磁気作業物質としての役割を持っている可能性を示唆する証拠にはなり得る。

磁石なしにおける上下運動では当初の予想通り、発熱が確認された。これは摩擦による発熱ではないかと考えられる。

## 実験の総括

本実験の問題点補足を次にあげておく。

- ・ 温度の測定は 0.2 秒に一回行なっている。したがって、各電圧における速さと測定周期は一致しないのでデータに信頼性証できない。しかし、50V においては測定周期と上下運動の周期の一致を確認した。

- ・ 室温は空調によって一定を保つようにしているが、若干の変動が認められる。従って。風の影響を防ぐために(Fig.7)のような保護剤を装着することで温度変化を小さくしている。



Fig.7 熱電対の保護

## 第 2 章

### 5 部

#### 磁気作業物質の温度変化の測定

私たちは第2章第4部で熱電対と磁石の相互作用を検証した。ガドリニウムを熱電対に装着した状態による実験を行うことで、それを元にしたガドリニウムの冷却効果を検証した。

#### 実験の意義

本実験は冷却の装置のキーバイスとなる磁気作業物質の冷却効果の有無を検証するものである。

#### 実験の説明

第2章第4部と同様の方法でガドリニウムの冷却効果の有無を確認する。それと異なる点はガドリニウムを熱電対の先に装着したという点である。本来であれば、熱スイッチが必要になるが、熱電対が常時接触型の熱スイッチの代わりになると考えて、熱スイッチは搭載しなかった。

#### 実験の結果

上下運動の速度をスライダックで電圧を変化させることで速度を変化させた。これによって、以下の1つの電圧による熱電対の温度変化を測定した。これは測定周期と上下運動の周期を一致させるためである。なお、第2章第4部と別の日に実験を行った。

1. 45V(Fig.1) 開始時 21.1°C 終了時 20.8°C
2. 50V(Fig.2) 開始時 22.7°C 終了時 21.1°C
3. 55V(Fig.3) 開始時 20.9°C 終了時 20.8°C
4. 60V(Fig.4) 開始時 21.3°C 終了時 21.1°C
5. 室温の測定 (Fig.5) 平均 19.3°C

次のページに温度-時間のグラフを掲載する。

温度-時間のグラフ

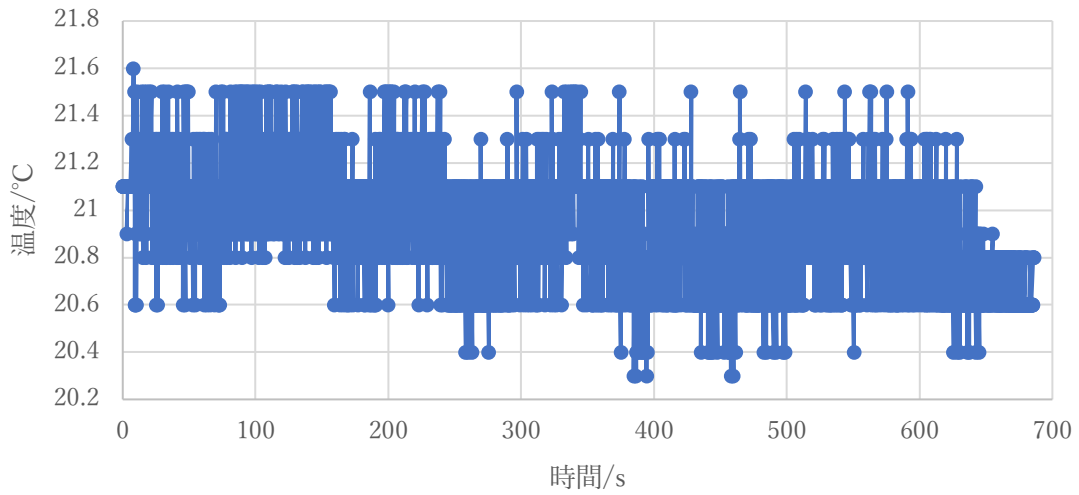


Fig.1 45.1Vにおけるガドリニウムの温度変化

温度-時間のグラフ

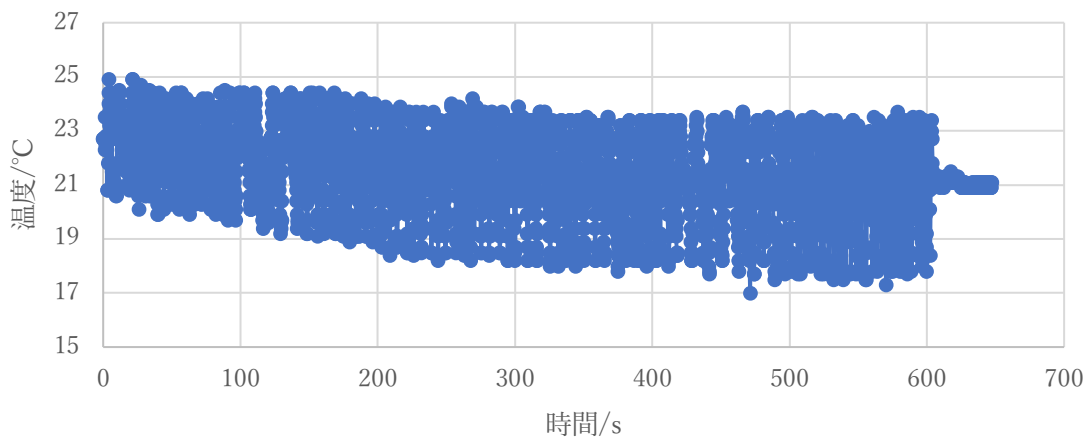


Fig.2 50.1Vにおけるガドリニウムの温度変化

温度-時間のグラフ

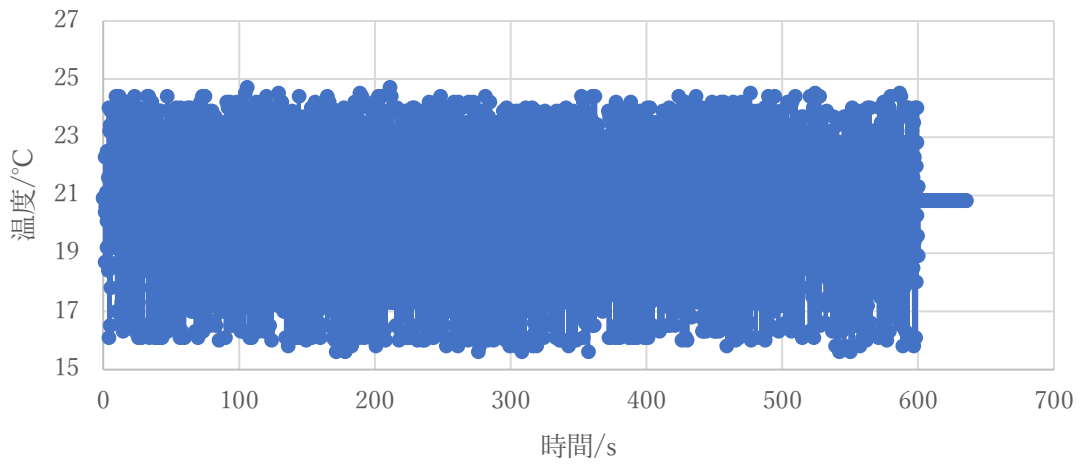


Fig.3 55.0Vにおけるガドリニウムの温度変化

温度-時間のグラフ

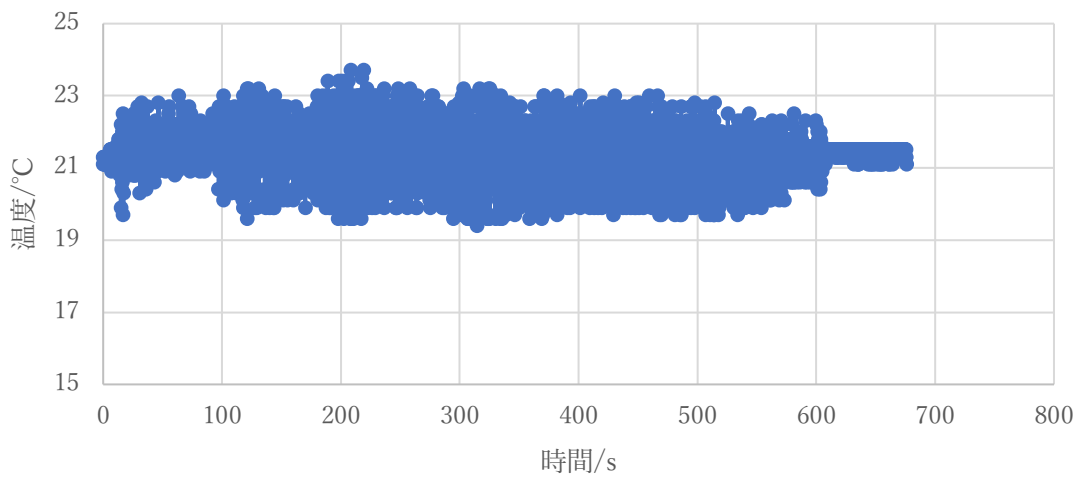
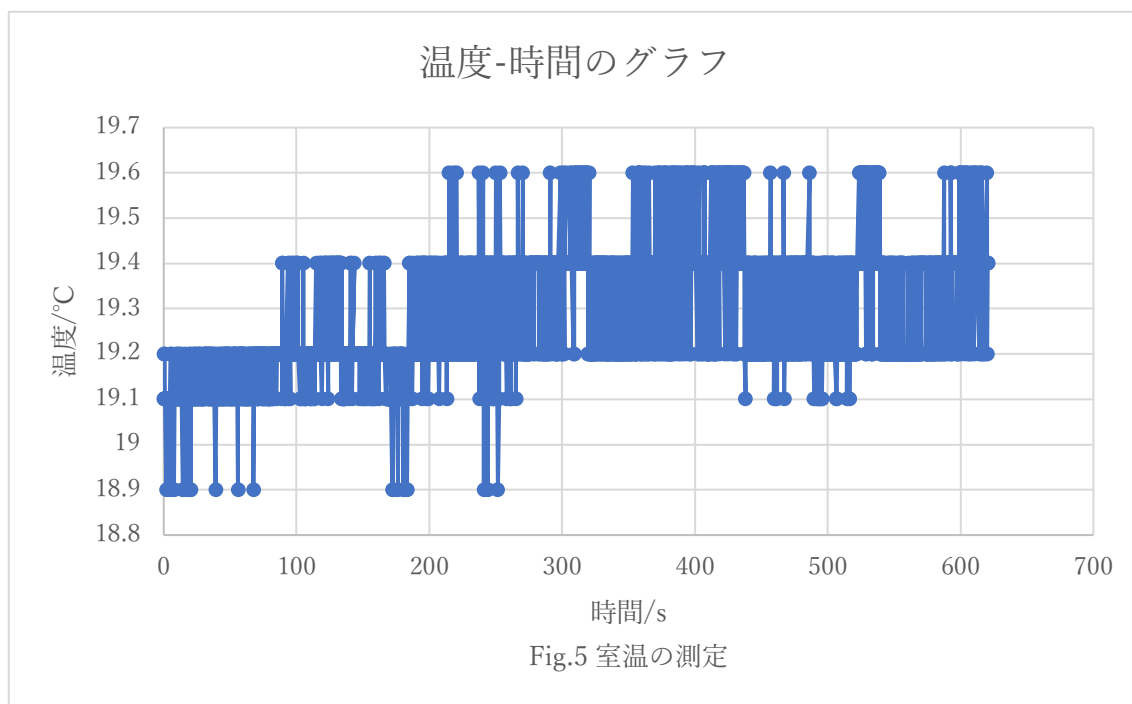


Fig.4 59.9Vにおけるガドリニウムの温度変化



#### 実験結果の考察

私達はガドリニウムを熱電対の先に装着し、励磁と減磁を行うことで顕著な温度変化が確認できると予想していたが、そのようなことにはならなかった。第2章第4部のデータを比較するとほとんど差が見られない。しかし、温度変化の振れ幅は小さくなっている様な印象は受ける。

温度変化が観察できない要因として、激しい振動に揺すられる状態の中で計測を行ったため、ガドリニウムと熱電対の接触状態が保持できなかった激しい振動で揺すられる状態の中で計測を行ったため、ガドリニウムと熱電対の接触状態を保持できなかったのではないかと推察できる。

データの不可解な点として電圧が大きくなるにつれてミシンの上下運動の速さは大きくなるので熱電対  $V=d\phi/dt$  に従い、振れ幅が大きくならなかった点である。熱起電力を測定する温度計であるからそうならなかったのはデータの測定方法に問題があるのではないかと考えられる。

#### 実験の総括

残念ながら期待していたような温度変化は確認できなかった。磁気作業物質の温度変化はほとんどできないのか、あるいは実験系に不備があるのか判断するのは現段階では困難である。



## 第2章

### 6部

#### 液体の冷却

私達は第2章第5部の実験の反省を踏まえて、温度変化の見やすい系を考えた。液体にガドリニウムを接触させることで接触面積も増え、熱交換が上手くいくのではないかと考えた。

#### 実験意義

先ほど述べたようにガドリニウムの温度変化を見やすくするために比熱の小さいエタノールでガドリニウムを浸した。これによって熱交換効率が上がり、温度変化を確認できる。

また、当初の計画にあったコーラを冷やすためには冷却効果が期待できないと今までの実験で判断し、代わりとしてエタノールで液体の冷却という目的を達する。

#### 実験の説明

熱電対の先に (Fig.1) に示すガドリニウムとエタノールの入った容器を装着することで液体の温度変化を測定する。なお、ガドリニウムを固定するためにウレタンが詰めてある。第2章4部と同様の方法で上下運動を実行した。

#### 実験の結果

私達は第2章第4部での反省を踏まえて測定周期と上下運動の周期が一致する 50V での測定を試みた。次のページに示すのがその結果である。なお、この測定は第2章第5部と同じ時間帯に行ったので、室温はそちらを参照されたい。

1. 50.4V におけるガドリニウムによる液体の冷却 (Fig.2)

開始温度 22.8°C 終了時 18.4°C

2. 50.1V におけるエタノールだけの温度変化 (Fig.3)

開始温度 19.2°C 終了時 19.7°C

次のページにそのグラフを掲載する。



Fig.1 液体とガドリニウムの入った容器

温度-時間のグラフ

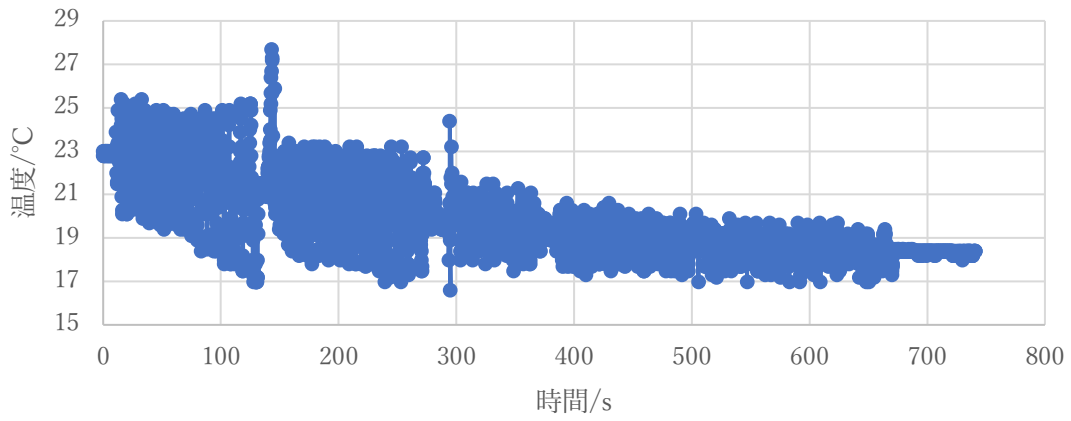


Fig.2 50.4Vにおけるエタノールのガドリニウムによる冷却

温度-時間のグラフ

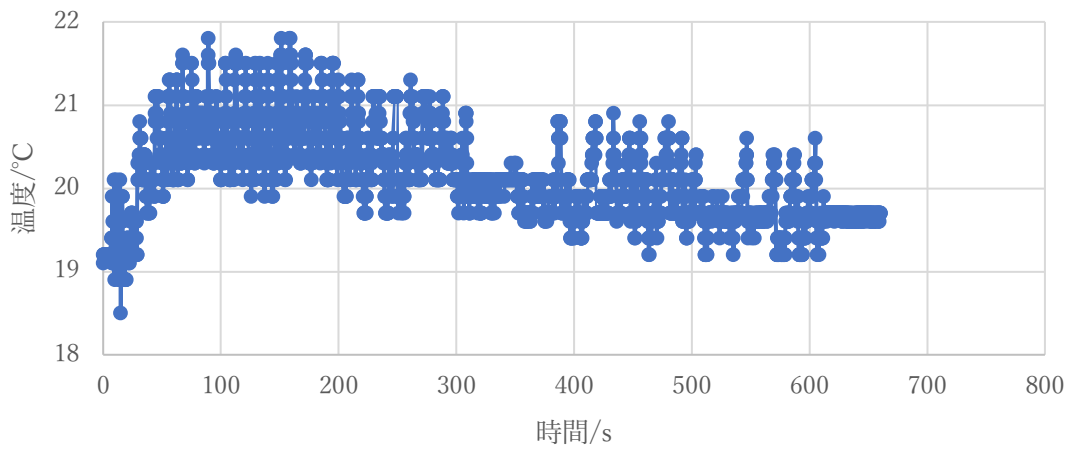


Fig.3 50.1Vにおける液体のみの上下運動

## 実験結果の考察

(Fig.2)においては $4.4^{\circ}\text{C}$ ほどの温度の低下がグラフより認められる。また、(Fig.3)による対象実験では一度、温度が上昇し低下する時間が存在した。これは摩擦による温度の上昇とそれに伴う気化熱との相互作用ではないかと推察できる。平均温度 $19.1^{\circ}\text{C}$ というデータから考察すると単に室温が低い時期があり、その時に $18.8^{\circ}\text{C}$ まで下がったのではないかという考えもできる。しかし、(fig.3)のように一度緩やかに上昇せず、ほぼ一貫して温度が低下していく様子が認められることからガドリニウムによる磁気冷却効果の裏付けを支持するデータになると考えられる。

## 実験の総括

対象実験として50Vのみを洗濯した理由は測定周期と上下運動の周期が一致するからである。測定装置の測定周期は0.2秒間隔であり、ミシンも0.2秒間隔で打点していることを確認した。グラフの600秒経過後に見られる平行線のようなものは測定終了後に一定時間放置したことに起因するものである。

## 第3章

### 本プロジェクトの総括

私達の行った実験について簡単に概要を述べる。第1部では熱スイッチの選定を行う上で熱伝導度を測定を試みた。しかし、その後の実験では熱スイッチを用いることはなかった。そして、第2部、第3部では簡易的な冷却装置を製作した。第4部では熱電対の電磁誘導による測定誤差を調査した。その結果、測定誤差は存在するが、速さや温度変化の傾向をつかむことまではできなかった。第5部ではガドリニウムの磁気冷却効果を調査した。電圧の大きさと温度変化の度合いに相関性は確認できなかった。第6部では液体を用いた磁気冷却効果を調査した。その結果、ガドリニウムなしとありでは温度変化の仕方に相違が認められ、ガドリニウムの磁気冷却を裏付ける1つの証拠を得ることができた。

私達は第2回 HAKKO 熱の実験コンテストの募集が開始される半年前からテーマを選定してきた。誰もやったことがないことをテーマにしようというのを重きにおき、本テーマを選定した。そのため、実験手法が確立されておらず、手探り状態の状態が始まった。その結果、プロジェクトの予期せぬ問題や遅れによるプロジェクトの縮小によって手回しでコーラを冷却するという当初の目的を達成できなかった。しかしながら、本実験ではガドリニウムの磁気冷却効果を簡易的な実験装置からなる系で確認できたのではないかという証拠を得ることができた。来年2月には本学の応用化学科においてもものづくりゼミの発表があるので、その発表に向けてさらなる実験系の改良、顕著な温度変化を確認できるようにしたい。

## 謝辞

研究資金の提供を行ってくださった株式会社八光電機をはじめとする研究に協力いただいた多くの方々この場を借りて御礼申し上げます。

株式会社八光電機

田中功 長尾雅則 柳田さやか 丸山裕樹 綿打敏司 米崎功記  
武井貴弘 熊田伸弘 山中淳二 上野慎太郎

## 参考文献、出典

### 第二章第二部

Fig.1：「レアマグネット」より引用

<https://store.shopping.yahoo.co.jp/raremag/>

## 参考文献

参考資料 1 : 東芝未来科学館「日本初の電気冷蔵庫」

[http://toshiba-mirai-kagakukan.jp/learn/history/ichigoki/1930refrige/index\\_j.htm](http://toshiba-mirai-kagakukan.jp/learn/history/ichigoki/1930refrige/index_j.htm)

参考資料 2 : 東芝レビュー「フロンレスを実現する冷凍技術」

[https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2007/09/62\\_09pdf/rd01.pdf](https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2007/09/62_09pdf/rd01.pdf)

「高温時期冷凍： 磁気作業物質について」

1960年 東京工業大学ら

「粒子充填構造を有する機能性媒体の熱的特性に関する研究」

2013年 神戸大学

「1kw級室温磁気ヒートポンプの開発」

2015年 鉄道総合研究所ら

「一 次元磁化過程における速度依存性」

1996年 京都大学

「室温磁気冷凍における最適冷凍サイクル探索」

2017年 千葉大学

「Ni-Fe-Nb系合金の磁気的特性について」

1971年 電気磁気材料研究所

「室温近傍における2,3の磁気冷凍作業物質について」

1983年 金属材料時術研究所

「磁気冷凍の研究動向」

1997年 科学技術庁金属材料技術研究所強磁場ステーション