

冷凍機油に対する冷媒の溶解熱の測定手法の開発

脇上, 敦史

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻機械・システム理工学メジャー

<https://hdl.handle.net/2324/7358378>

出版情報：九州大学, 2024, 修士, 修士
バージョン：
権利関係：



令和 6 年 度

修 士 論 文

冷凍機油に対する冷媒の溶解熱の測定手法の開発

九州大学大学院総合理工学府

総合理工学専攻

機械・システム理工学メジャー

熱エネルギー変換システム学研究室

脇上 敦史

指導教員 宮崎 隆彦

Kyaw Thu

提出年月日 令和 7 年月日

目次

本論文で扱う記号.....	1
本論文で扱う添字.....	1
第 1 章 序論.....	2
1.1 はじめに.....	2
1.2 冷凍機油.....	4
1.3 熱量測定について.....	5
1.3.1 さまざまな熱量測定方法.....	5
1.3.2 静的熱量測定.....	5
1.3.3 本研究で行った熱量測定方法.....	8
1.4 従来の研究.....	10
1.5 研究目的と論文構成.....	11
第 2 章 1 号機における熱量測定実験.....	12
2.1 実験装置.....	12
2.1.1 実験装置の概要.....	12
2.1.2 実験装置の詳細について.....	15
2.2 測定機器.....	18
2.2.1 圧力センサー.....	18
2.2.2 熱流センサー.....	18
2.2.3 熱電対.....	18
2.3 熱量測定実験.....	18
2.3.1 実験手順.....	18
2.3.2 実験条件.....	19
2.3.3 実験結果.....	20
2.4 実験装置の問題点.....	23
第 3 章 2 号機における実験装置および実験方法.....	25
3.1 実験装置.....	25
3.1.1 実験装置の概要.....	25

3.1.2 実験装置の各部分について	28
3.2 測定機器	31
3.2.1 圧力センサー	31
3.2.2 熱流センサー	31
3.2.3 測温抵抗体	31
3.3 1号機からの改善点	32
3.4 熱量測定実験	35
3.4.1 実験手順	35
3.4.2 実験条件	36
第4章 2号機実験結果.....	37
4.1 実験結果	37
4.2 理論熱量計算	41
4.3 考察とまとめ	43
第5章 総括.....	45
謝辞.....	46
参考文献.....	47
付録 恒温循環槽温度変化実験	48

本論文で扱う記号

記号	名称	単位
Q	熱量	J
σ	伝導型熱量測定における係数	-
T	温度	°C
S	面積	m ²
C	熱流束	W/m ²
V	電圧	V
K	溶解度	-
m	質量	g
r	潜熱	J/g
t	時間	s

本論文で扱う添字

添字	名称
sol	溶解
sen	熱流センサー
ref	冷媒
oil	冷凍機油
cond	凝縮

第1章 序論

1.1 はじめに

エアコンなどの空調機器には、冷凍サイクルが使われている。冷凍サイクルとは低温熱源から高温熱源へと熱を移動させるサイクルのことであり、圧縮機、凝縮器、蒸発器、膨張弁の4つの要素で構成されている。これら4つの要素を冷媒が流れることにより熱移動を行っている。現在、ルームエアコン、カーエアコン、業務用エアコンなどには、冷媒として主にフロン類が使われている。狭義のフロンはクロロフルオロカーボン(CFC)を指すが、フロン類というとハイドロクロロフルオロカーボン(HCFC)、ハイドロフルオロカーボン(HFC)を含めたものを指す。2015年11月30日から12月13日までの間行われた国連気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)、京都議定書第11回締約国会合(CMP11)では2020年以降の温室効果ガス削減の国際的枠組みが定められ、日本においても2030年度までに13年度比で26%削減を目標とすることを国際会議の場で表明した。先述したフロン類はこれらの会議で温室効果ガスとして削減対象の一つとなっている。特に、CFCやHCFCは温室効果とともにオゾン層を破壊する性質を持ち、日本ではCFCは1996年に全廃、HCFCも2020年までに全廃された。HFCはオゾン層破壊係数(ODP)が0であり、CFCやHCFCの代替として現在使用されているが、依然として高い地球温暖化係数(GWP)を持っているため、2016年にルワンダのキガリで開催されたCOP28で批准されたキガリ改正により具体的な削減目標が設定された(図1.1)。また、日本でのHFC削減スケジュールを図1.2に示す。表1.1に示す各種冷媒のODP、GWP値比較から分かるように、それぞれの冷媒には値に大きな差があることが分かる。近年日本で主流となっているのは従来のR410-Aに比べてGWP値が低く、エネルギー効率や経済性のバランスが取れたR32である。しかし、それもこれから段階的に削減していかなければいけないことから、さらにGWP値が低いハイドロフルオロオレフィン(HFO)系冷媒が注目されている。HFO系冷媒のR1234yfは非常に低いGWP値を持ち、カーエアコンで積極的に従来の代替冷媒として推奨されている。しかし、R32ほどではないが微燃性を持つことと冷媒が高価であること、作動圧力が低いことなどが欠点であるため、家庭用空調機器での使用が現在の課題となっている⁽¹⁾。

また、空調機器において、冷凍サイクル内では冷媒だけでなく冷凍機油と呼ばれる圧縮機の潤滑を目的とした油も流れている。この冷凍機油は冷媒が溶け込む相溶性を持つものが多く使われている。冷凍機油に冷媒が溶け込む際には溶解熱が発生することが知られており、この溶解熱は圧縮機内部の熱損失、ひいては冷凍サイクル全体の熱効率に影響するため、正確に把握することが求められている。

私の研究においては、低 GWP 冷媒の R-1234yf を用いて冷凍機油に溶解した際の溶解熱を正確に把握する測定手法を確立することを目的とした。

	途上国第1グループ※1	途上国第2グループ※2	先進国※3
基準年	2020-2022年	2024-2026年	2011-2013年
基準値 (HFC+HCFC)	各年のHFC生産・消費量の平均 + HCFCの基準値×65%	各年のHFC生産・消費量の平均 + HCFCの基準値×65%	各年のHFC生産・消費量の平均 + HCFCの基準値×15%
凍結年	2024年	2028年※4	なし
削減 スケジュール※5	2029年：▲10% 2035年：▲30% 2040年：▲50% 2045年：▲80%	2032年：▲10% 2037年：▲20% 2042年：▲30% 2047年：▲85%	2019年：▲10% 2024年：▲40% 2029年：▲70% 2034年：▲80% 2036年：▲85%

図 1.1 キガリ改正における HFC 削減スケジュール(環境省ホームページより引用)

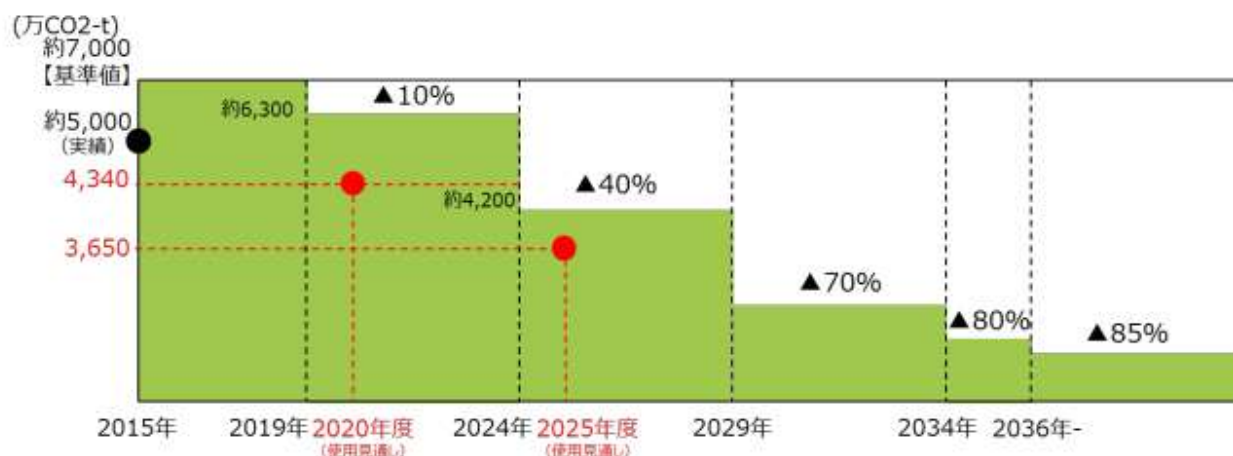


図 1.2 キガリ改正を踏まえた日本での HFC 削減スケジュール(環境省ホームページより引用)

表 1.1 各種冷媒の ODP, GWP 値比較

種類		ODP	GWP
HCFC	R-22	0.034	1760
	R-32	0	677
HFC	R-410A	0	1924
HFO	R-1234yf	0	<1

1.2 冷凍機油

空調機器の冷凍サイクル内には、冷媒以外にも冷凍機油が流れている。冷凍機油とは、主に圧縮機内部の潤滑を目的とした油のことである。冷凍機油には、冷凍サイクル内で用いるために様々な特性が必要とされている。圧縮機内部には様々な材質の部品があるため、化学的な安定性は必須であり、また冷却作用や密封作用、絶縁性も必要である。また、冷凍機油は一般的な潤滑油とは異なり、冷媒とともにサイクル全体を流れるため、冷媒との相溶性も重要な特性となる。冷凍機油にはこの相溶性を持つものと非相溶性冷凍機油の2種類があるが、非相溶性の場合は圧縮機内に油を冷媒から分離させる機構が必要となり、現在は相溶性のものが主流となっている。図 1.3 に主な冷凍機油の種類を示す。冷凍機油は使用冷媒の変遷とともに変化してきたが、HFC 系冷媒、HFO 系冷媒に対しては相溶性の問題からポリオールエステル(POE)、ポリアルキレングリコール(PAG)などの合成系冷凍機油が多く使用されている。なお、本研究では POE 系冷凍機油 RL68H を使用した。



図 1.3 冷凍機油の種類

1.3 熱量測定について

1.3.1 さまざまな熱量測定方法

熱量測定は主に動的熱量測定と静的熱量測定に分かれる。静的熱量測定は温度、圧力または体積一定の条件に対する熱量測定を行うもので、動的熱量測定は温度、体積または圧力を連続的に走査させながら熱変化を測定するものである。静的測定と動的測定の大きな違いは温度などの測定条件となる熱力学変数を一定に保つか走査するかである。これにより、動的測定は静的測定と比較して実験中の圧力変化が不明であるという点と、試料が準静的変化をしないため平衡状態に至らず、結果が走査速度に依存するという点の 2 つの熱力学的な違いがある⁽²⁾。また、動的熱量測定の代表である DSC(示差走査熱量測定)では、一定に温度を変化させて熱量測定を行うという特徴から既製の測定機器が必要となる。本研究では、冷媒が冷凍機油に溶解しているまさにその途中の熱量を測定する必要があるため、溶解させるための機構を熱量測定装置に組み込む必要があった。また溶解が終了したかどうかを判断するためには最終的に物質を平衡状態に至らせる必要があり、これらの理由から DSC をはじめとする動的熱量測定はふさわしくないと判断し、静的熱量測定を採用した。

1.3.2 静的熱量測定

静的熱量測定には熱量検出方式の異なる、断熱型、等温壁型、伝導型の 3 つの形式が用いられている。以下にそれぞれの方法の比較を行う。

1.3.1.1 断熱型熱量測定

試料周辺温度を試料温度に、あるいは逆に試料温度を周辺温度に積極的に一致させることで、試料と周辺の間を熱平衡に保つ。その結果、試料で発生した熱量を試料容器に閉じ込めることができ、その試料容器の温度変化から熱量を測定する方法を断熱型熱量測定という。この方法は熱容量、反応熱、吸着熱などの測定に使われている⁽³⁾。この測定方法では周辺温度を試料容器に追従させる必要があるが、既製品を使ったとしても完全に一致させることは不可能であり、また追従させる仕組みを自作するのは困難であると判断した。

1.3.1.2 等温壁型熱量測定

試料周辺温度を試料温度に完全に追従させることは技術的に限界があるため、周辺温度を試料容器に近いある一定の温度に保つ。それによりある一定量の熱漏れが発生するが、この周辺と試料の温度差を正確に測定することにより発生した熱を測定する方法を等温壁型熱量

測定という．この方法では断熱型より高精度な熱量測定が可能になるが，試料容器の表面温度を均一に保つ必要がある⁽³⁾．また，等温壁型と断熱型はともに温度差から熱量を測定するが，その熱量が微小な場合当然温度差も非常に微小なものになる．この微小な温度差を測定する高分解能な熱電対を用意すると当然高額になる．このような経済的な事由から等温壁型についても困難であると判断した．

1.3.1.3 伝導型熱量測定

熱容量の大きい恒温体と試料容器の間に熱伝導体を兼ねた感熱体を熱的に接触させ，この熱伝導体で直接通過した熱量を測定する方法を伝導型熱量測定という(図 1.4)．この感熱体には温度変化に応じて電圧が変化するペルチェ素子が一般的に用いられる．ペルチェ素子を用いた代表的な感熱体の一つに熱流センサーがある．熱流センサーは被測定物に貼り付けてそこからの熱流束を出力するものである(図 1.5)．熱流センサーは先述した熱電対の温度測定に比べてはるかに細かい測定範囲を持つ．また，感熱体が接触している面の熱移動のみを検知するため，等温壁型のように試料容器の表面全ての温度を均一にする必要がない．そのために容器の側面など感熱体が接していない面の熱移動を無視してしまうため，精度は落ちる．感熱体が接していない面には断熱材を巻くことなどによりなるべく影響を小さくする必要がある．この方法は熱流センサーなどの熱伝導体と金属ブロックなどの恒温体があれば比較的容易かつ安価で再現可能であるため，本研究で採用した．

また，伝導型熱量測定には単子型と双子型がある．単子型はその名の通り恒温体に対して1つの試料容器で測定を行うものである．それに対し双子型は図 1.6 に示す通り，恒温体に対して試料容器のほかに条件を完全に一致させて熱を発生させない対照容器を用意し，発生した熱以外の要素を相殺してより精度よく測定を行う方法である．精度が上がることからこの双子型が推奨されるが，容器と感熱体を2つずつ用意しなければいけないため経済的な事由から断念した．

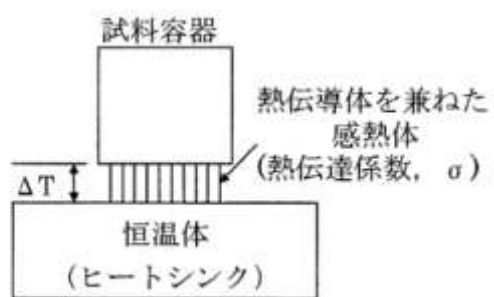


図 1.4 伝導型熱量測定の様式図⁽⁴⁾

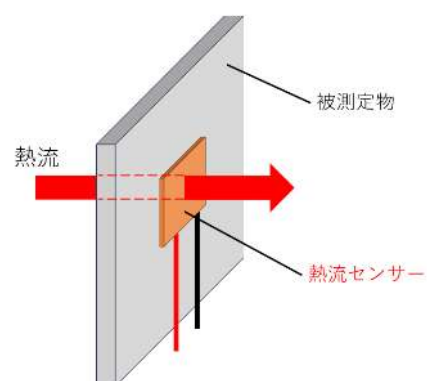


図 1.5 熱流センサーの仕組み

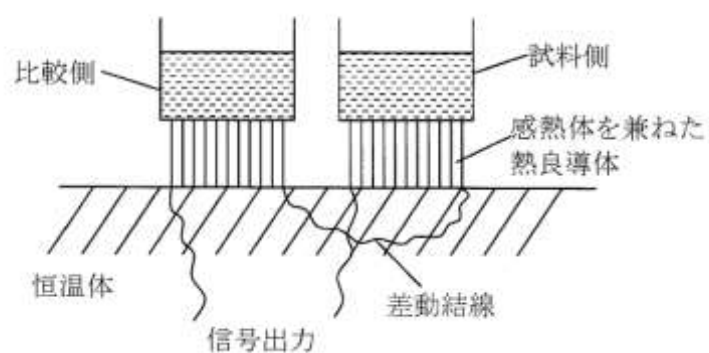


図 1.6 双子型伝導熱量計の原理⁽⁴⁾

1.3.3 本研究で行った熱量測定方法

本研究では先述した伝導型熱量測定方法を採用した。熱量測定の模式図を図 1.8 に示す。一般的な伝導型熱量測定の式は(1.1)に示される。本研究では感熱体には熱流束を測定できる熱流センサーを用いた。熱流センサーで測定できる熱量は式(1.2)によって示される。

$$Q_{sol} = \sigma \int_{-\infty}^{+\infty} \Delta T dt \quad (1.1)$$

$$Q_{sol} = S_{sen} C_{sen} V_{sent} t \quad (1.2)$$

式(1.2)において、出力電圧と校正係数の乗算で得られた熱流束に時間を掛けている理由は、熱流束を 1 秒ごとに測定しており、この熱流束を測定した時間分足し合わせることで熱量を計算するためである。

恒温体には熱容量の大きな金属ブロックが必要であるが、用意したとしてもその金属ブロック自体を長時間均一に一定温度に保っておくのは難しい。そこで、冷却性能が優れた CPU クーラーの中でもヒートパイプ式のものを用いた。ヒートパイプとは高速で熱移動を行うことができる熱伝導体のことであり、構造を図 1.9 に示す。内部は真空に近い圧力になっており、熱移動のために作動液が流れている。また、作動液が素早く流れることができるようにウィックと呼ばれる毛細管構造が内壁に施されている。以下に熱移動の流れを示す⁽⁶⁾。

- ①高温部が加熱されて作動液が蒸発(蒸発潜熱の吸収)
- ②低温部に蒸気が高速で移動
- ③蒸気が低温部で凝縮(蒸発潜熱の放出)
- ④凝縮した作動液がウィックの毛細管現象で加熱部に還流

以上の相変化が連続的に繰り返されることによって、熱が恒温部から低温部に瞬時に移動する。ヒートパイプ式 CPU クーラーはフィンとヒートパイプを組み合わせることで高い冷却能力を持っている。更に恒温槽から繋いだ水槽に付けておくことで常に一定温度まで冷却することができ、恒温体として優れた能力を発揮する。以上の理由からヒートパイプ型 CPU クーラーと恒温循環槽及びそれに繋がった水槽を用いた。

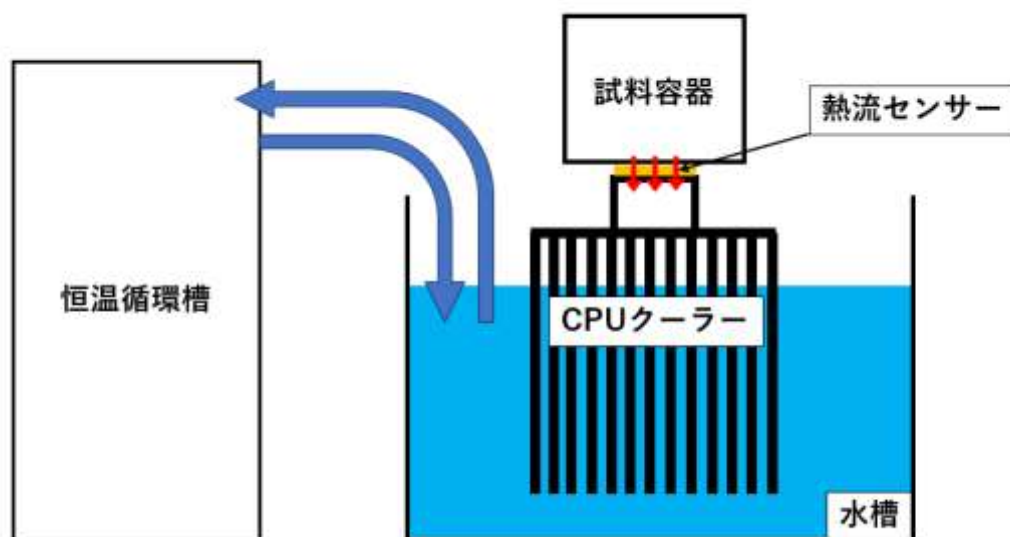


図 1.7 熱量測定装置概略図

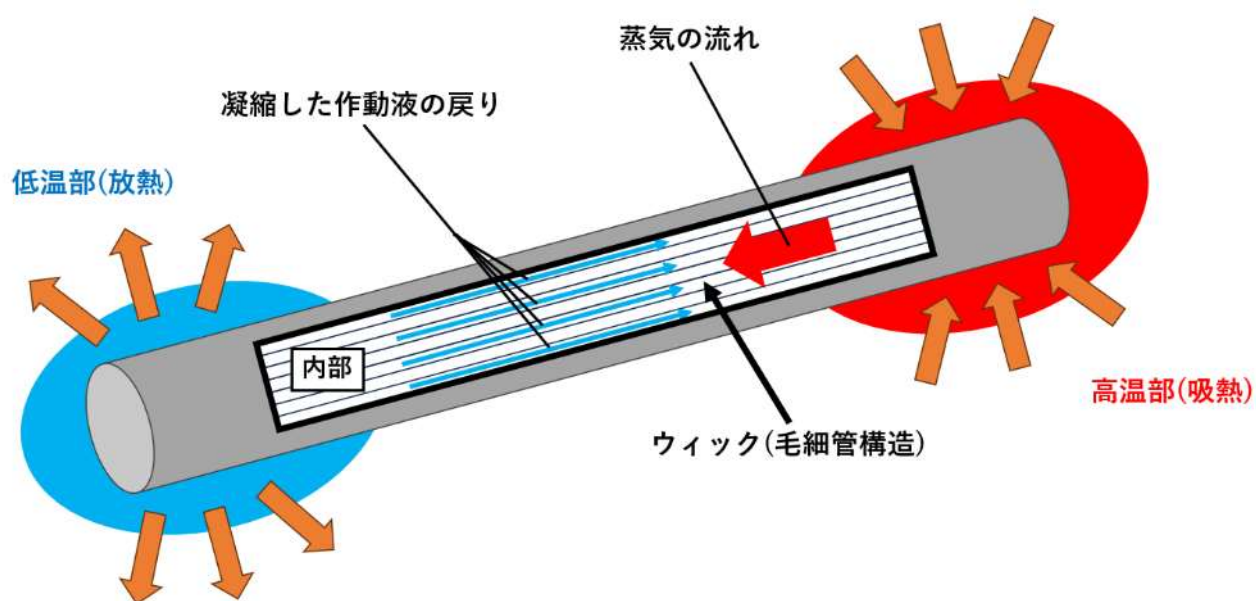
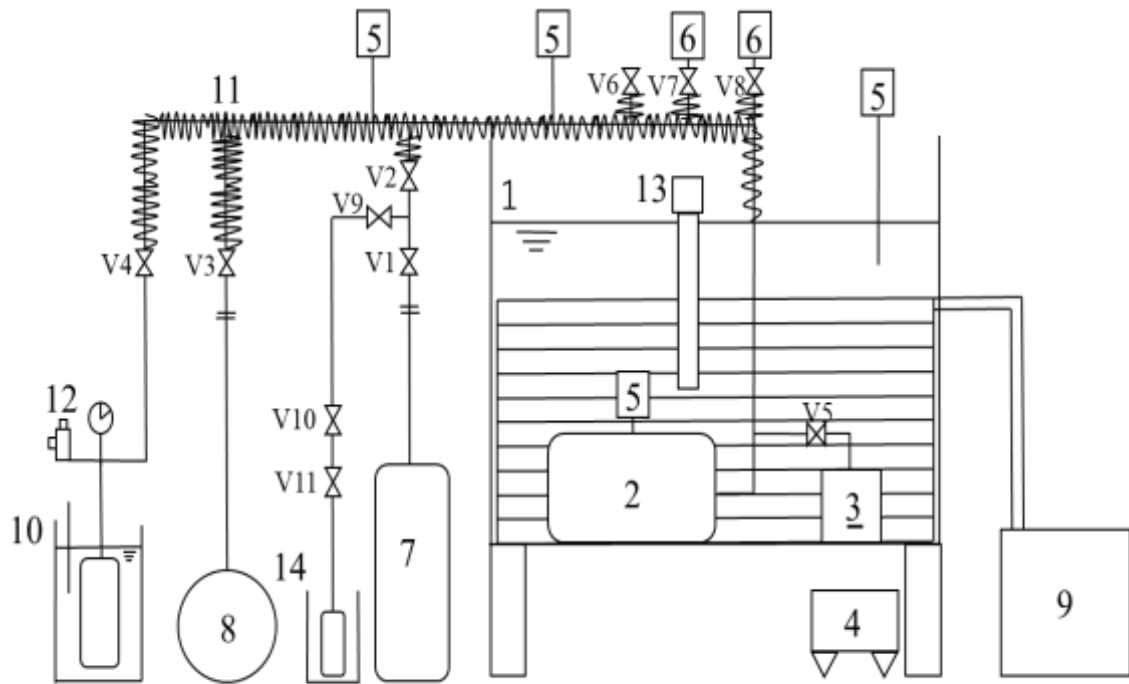


図 1.8 ヒートパイプの構造

1.4 従来の研究

圧縮機内部において溶解熱を直接測定する方法はまだ確立されていない。しかし、実験装置を製作するにあたって、先述した熱量を測定する機構以外は冷凍機油に対する冷媒の溶解度を測定した実験装置を参考にした⁽⁶⁾⁽⁷⁾。図 1.9 に参考にした実験装置の概略図を示す。ここで溶解させる容器(下図 3)の下に熱量測定装置を組み込み、新しく実験装置を製作した。



- 1.水槽 2.ガスセル 3.平衡セル 4.マグネチックスターラー 5.熱電対 6.圧力計
7.冷媒ボトル 8.真空ポンプ 9.恒温循環槽 10.ヒートコントローラー
11.テープヒーター 12.リリースバルブ 13.攪拌機 14.冷媒回収用シリンダー
⊠ バルブ ≡ コネクション

図 1.9 溶解度測定実験装置概略図⁽⁶⁾

1.5 研究目的と論文構成

本研究の目的は、ポリオールエステル系冷凍機油に対する R1234yf 冷媒が溶解した際の溶解熱を直接測定する手法を確立することである。そのため、溶解度測定実験装置をもとに実験装置を製作し、様々な条件下でデータを採集、理論熱量と比較して評価を行った。実験装置および実験結果は、最初に製作した 1 号機及び改良を加えた 2 号機についてそれぞれ述べる。本論文の構成は以下のとおりである。

第 1 章では冷媒、冷凍機油の情報やさまざまな熱量測定方法から伝導型熱量測定を行った理由について概説し、本研究の目的および構成を示した。

第 2 章では、1 号機の実験装置および実験方法、実験結果について記述した。

第 3 章では、2 号機の測定方法、計測機器、実験方法および実験条件について記述した。

第 4 章では、2 号機の実験結果および理論熱量との比較、考察を行った。

第 5 章では、本論文の総括を行った。

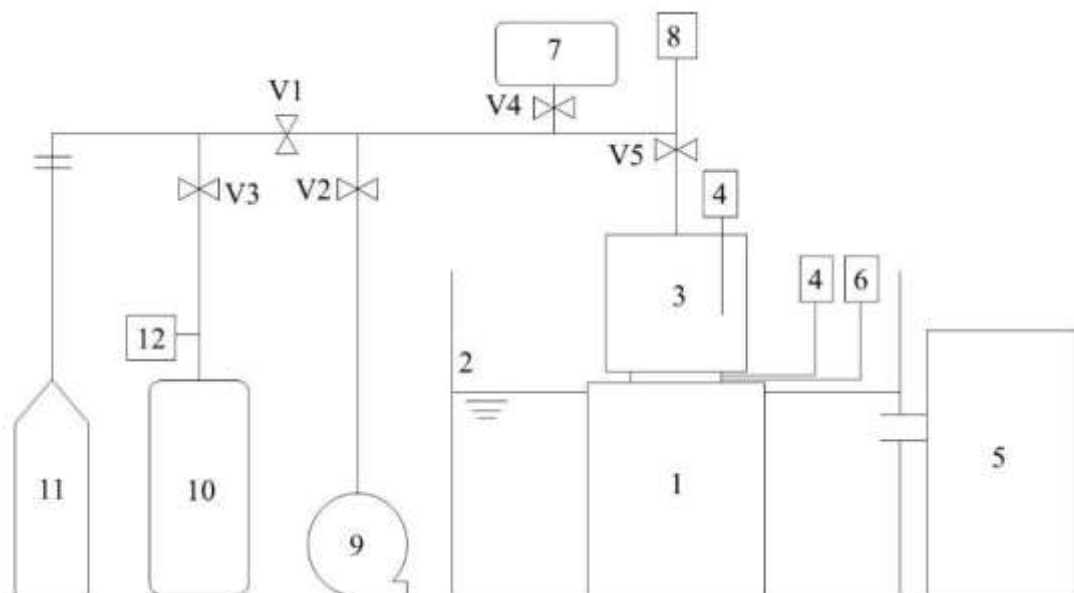
第2章 1号機における熱量測定実験

2.1 実験装置

2.1.1 実験装置の概要

本研究で製作した実験装置は、先述した溶解度測定実験装置を参考に、冷媒の攪拌装置を外して熱量測定機構を組み込んだ形になっている。また、本研究は企業との共同研究であるため、限られた予算内で実験装置を製作するため継手やセンサー類の一部は使われていない実験装置から流用した。技術職員の方や博士課程の方々の助言をもとに自分で改良を加えつつ製作した。実験装置の概略図を図 2.1 に、実際の写真を図 2.2 と図 2.3 に示す。

実験装置は主に、平衡セル(特注, 森井製作所製), ガスセル(304L-HDF4-1000, Swagelok 製), CPU クーラー(NH-P1, Noctua 製)およびそれらを繋ぐ配管(SUS316BA, 1/4 インチ)で構成されている。排気の際には、真空ポンプ(GCD-051X, アルバック機工製)を使用する。CPU クーラーは水道水で満たした水槽の中に配置し、その水は循環恒温槽(CTP-3000, 東京理化器械製)と直接ホースで繋ぎ、一定温度になるようにした。平衡セル内の温度は、熱電対によって測定される。また、平衡セル側配管には圧力センサーを設置している。CPU クーラーと平衡セルの間には熱流センサー(KM1, 京都電子工業製)を挟み、熱流束と温度を測定している。測温抵抗体および圧力センサー、熱流センサーの各電圧出力値は熱流ロガー(HIOKI 製, LR8432)により収集される。



1. CPU クーラー 2. 水槽 3. 平衡セル 4. 熱電対 5. 恒温循環槽 6. 熱流センサー
 7. 真空ゲージ 8. 圧力センサー 9. 真空ポンプ 10. ガスセル 11. 冷媒ポンペ
 12. アナログ圧力計  バルブ = コネクション

図 2.1 1号機概略図

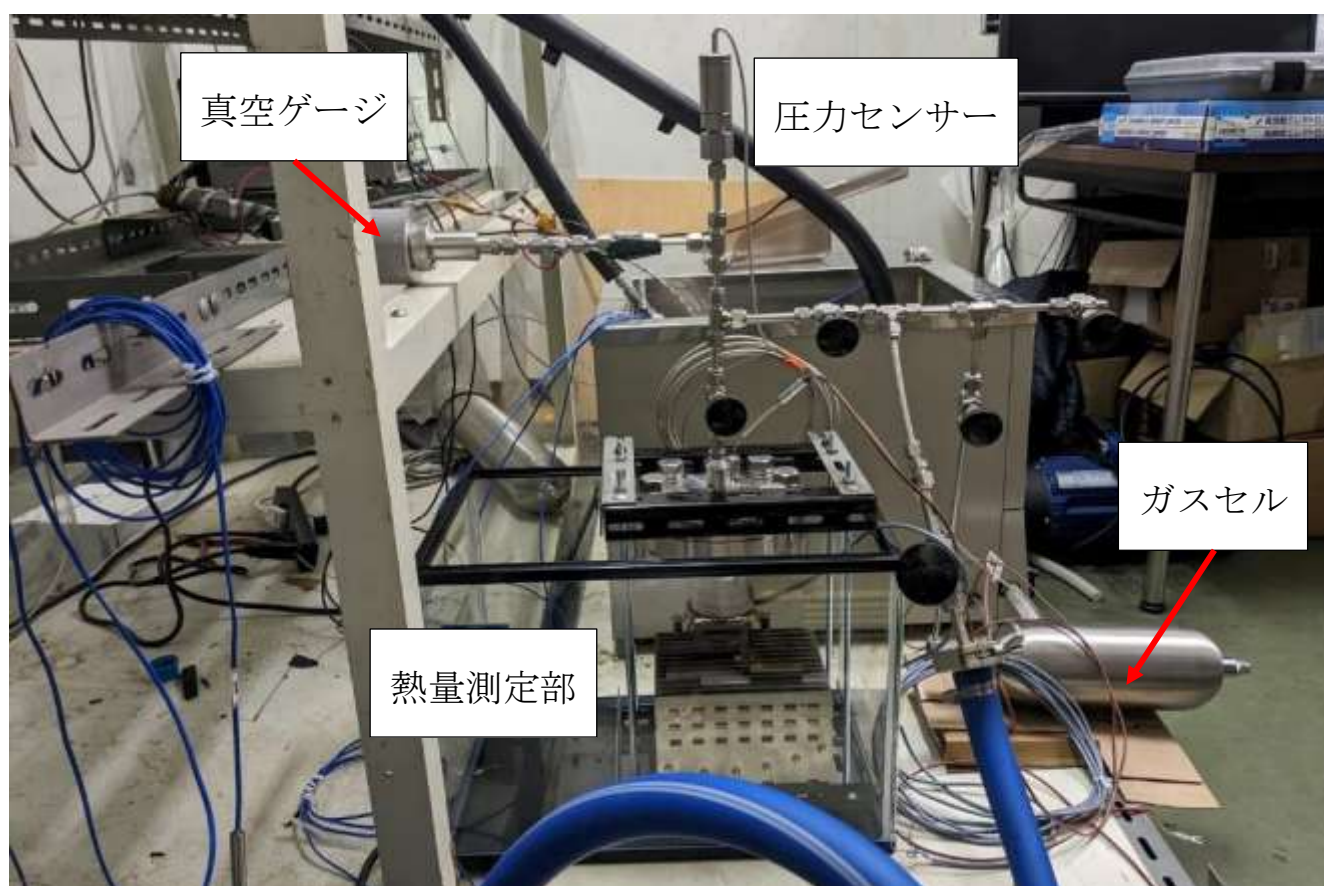


図 2.2 1号機の写真

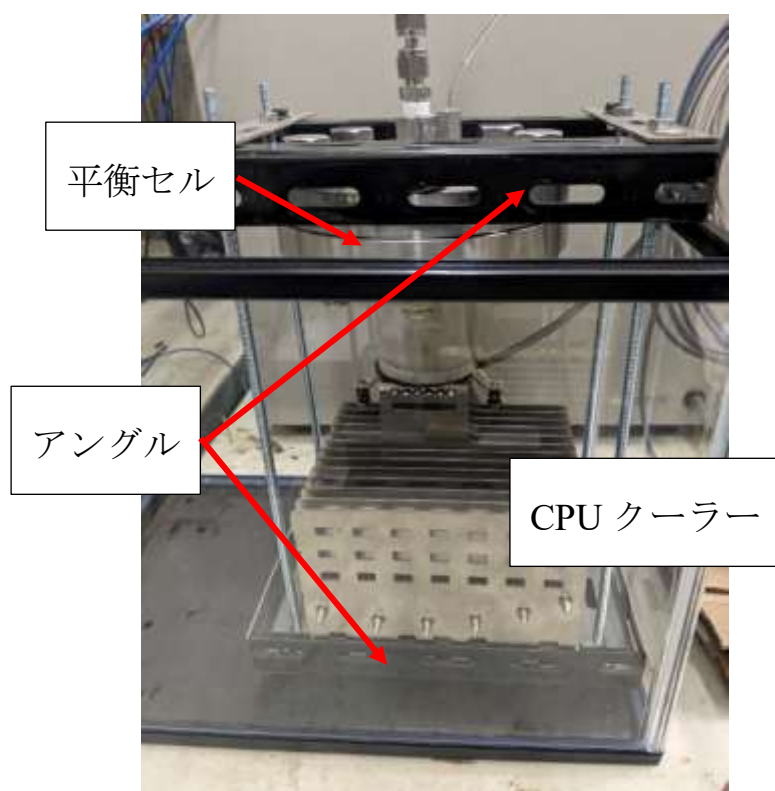


図 2.3 熱量測定部



真空ゲージ測定部



圧力センサー



CPU クーラー



真空ゲージ表示部



真空ポンプ



恒温循環槽



電源装置



アナログ圧力計



熱流センサー



ガスセル



LR8432 熱流ロガー



熱電対

図 2.4 実験装置各部分拡大写真

2.1.2 実験装置の詳細について

2.1.2.1 各部分についての詳細

(1) ガスセル

冷媒を冷媒ポンベから一時的にためておくためのセルである。ダブルエンドになっており、片方には配管を、もう片方はプラグで塞いでいる。また、封入するときには圧力を確認するためのアナログ圧力計がガスセル付近の配管部分に設置されている。

(2) 平衡セル

冷凍機油に冷媒を溶解させるためのセルである。図 2.5 に示すように、JIS2 規格で設計した。また、上部に熱電対を取り付けるためのねじが図中央とは別にもう 1 つ切ってある。最高耐圧力が 2MPa のフランジと組み合わせて密封する。

O リングは HNBR-70 G-75 を使用している。水素化ニトリル(HNBR)を原材料としたゴム用の材質でできており、一般的なニトリルゴム(NBR)と比較して耐熱性や耐油性に優れている。また、HFC をはじめとする代替フロン類への耐性がゴムの中で最も高く、冷媒用のシール材に適した性質を持つ。

(3) CPU クーラー

溶解熱を効率よく放熱させるために使用する。先述した通り一定温度の水に浸けておくことで放熱量を一定にし、溶解熱を算出できるようにした。

(4) 真空ゲージ

装置の真空がきちんととれているか確かめるために使用する。

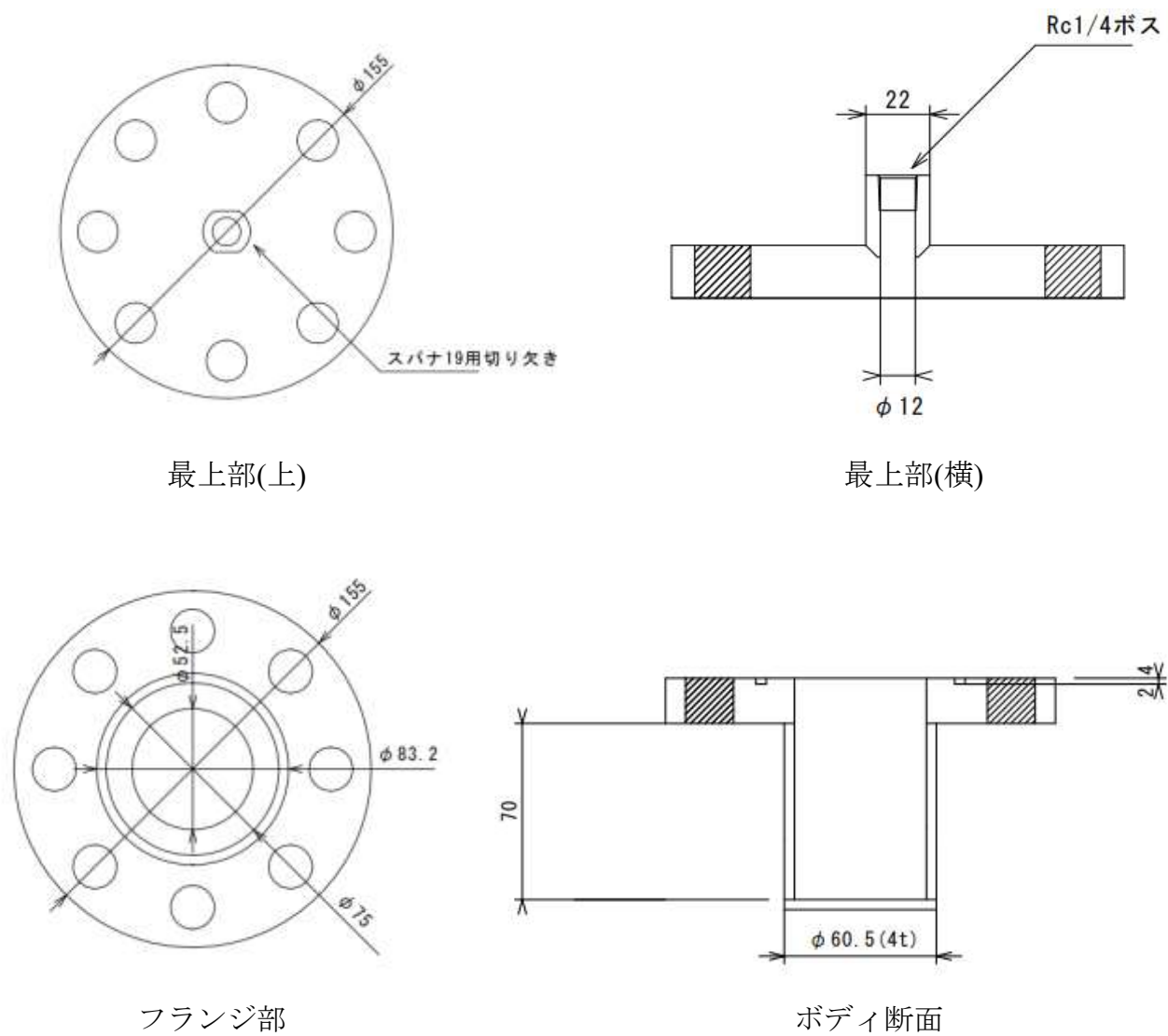


図 2.5 平衡セル

2.1.2.2 各部分の固定方法について

図 2.6 に平衡セルと CPU クーラーの固定部を示す。平衡セルと熱流センサー，CPU クーラーがきちんと接触するために，アングルと全ねじを用いて図のように挟み込んで固定した。冷凍機油の入れ替えなどで平衡セルを取り出す必要がある際には全ねじを緩めてアングルを分解して取り出した。

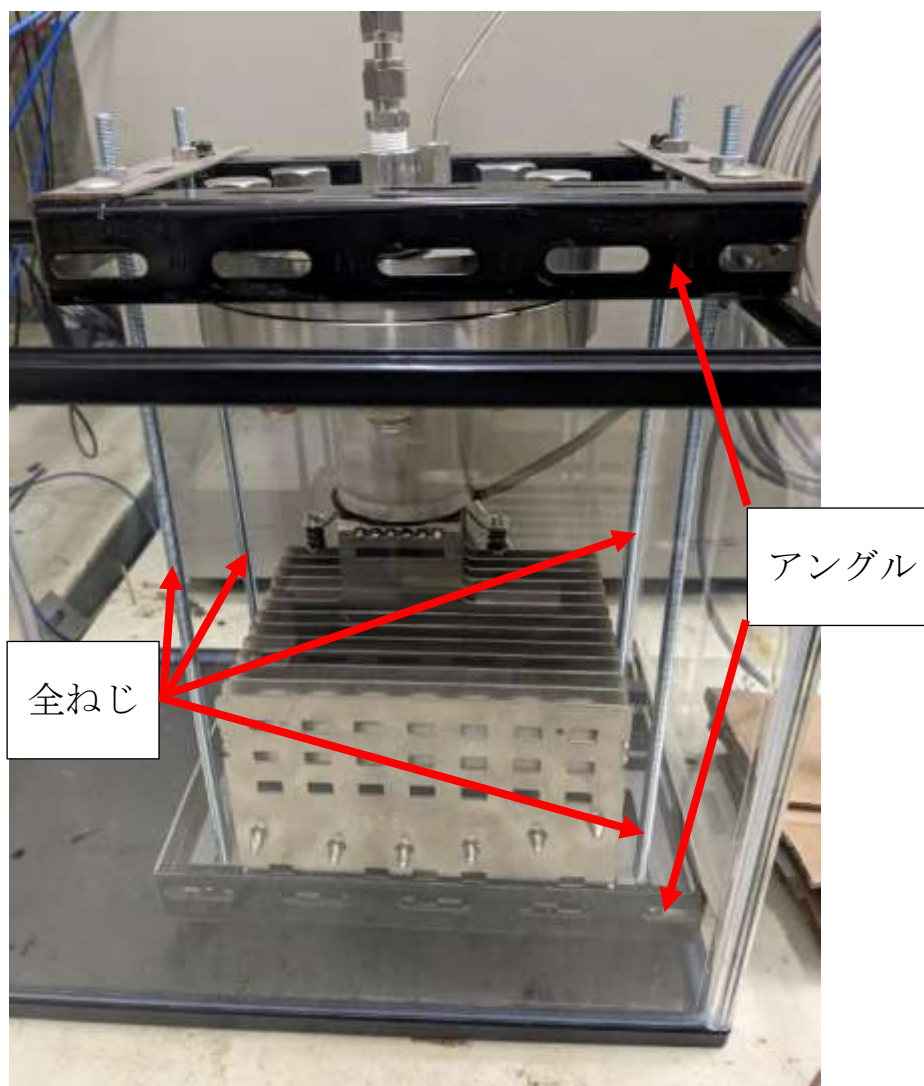


図 2.6 熱量測定装置固定部

2.2 測定機器

2.2.1 圧力センサー

圧力センサーは、フルスケール 2MPa の絶対圧変換器(PHS-B-2MP, 共和電業製)を使用した。当該センサーは購入して 2 か月程度で、また未使用であるため検定は行っていない。

2.2.2 熱流センサー

熱流センサーは京都電子工業製 KM-1 を使用した。KM-1 はサイズが平衡セルの底面および CPU クーラーの放熱面面積より小さく、温度範囲が $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ と幅広いいため採用した。また、熱電対を内蔵しているため温度も測定することができる。

2.2.3 熱電対

熱電対は、山里産業製の T 型を使用した。また、当時弊研究室は熱電対の検定に必要な装置の調子が悪く時間がかかることが予想されたため、検定は行っていない。

2.3 熱量測定実験

2.3.1 実験手順

以下に熱量測定実験の手順を述べる。また、データは圧力、温度、熱流すべて 1s ごとに記録する。

1. すべてのバルブを開けた状態で真空ポンプを使って真空引きを行う(24 時間)。
2. 真空引きと同時に恒温循環槽を 25°C に設定して起動する。
3. 真空引き終了後、V1, V2, V4 を閉じて冷媒を 0.55MPa になるように封入する。
4. 冷媒を封入した後、V1 を開けて冷媒を冷凍機油に溶解させる。それと同時に計測を開始する。溶解を開始してから 1 時間 30 分までのデータを取る。
5. 冷媒を回収し、冷凍機油を入れ替える。
6. 手順 1 から手順 4 までを繰り返し行う。

溶解熱の総量は式(1.2)によって計算される。また、測定開始時(まだ溶解していない)の熱流値を測定値から差し引くことで、CPU クーラーと平衡セルの温度差によって元から発生していた熱移動を相殺することができる。この差し引いた後の熱流値を実験結果とする。

2.3.2 実験条件

表 2.1 に実験条件を示す．冷凍機油質量については，溶解度測定実験⁽⁶⁾の条件を参考にした．また，実験装置が設置されている部屋はエアコンにより 25℃に温度制御されている．

表 2.1 実験条件

冷媒	R1234yf
冷凍機油	RL68H (ポリオールエステル系冷凍機油))
恒温循環槽温度	20℃
冷凍機油質量	約 4.2g
冷媒封入圧力	0.55MPa

2.3.3 実験結果

図 2.7, 図 2.8 に実験結果のグラフを示す.

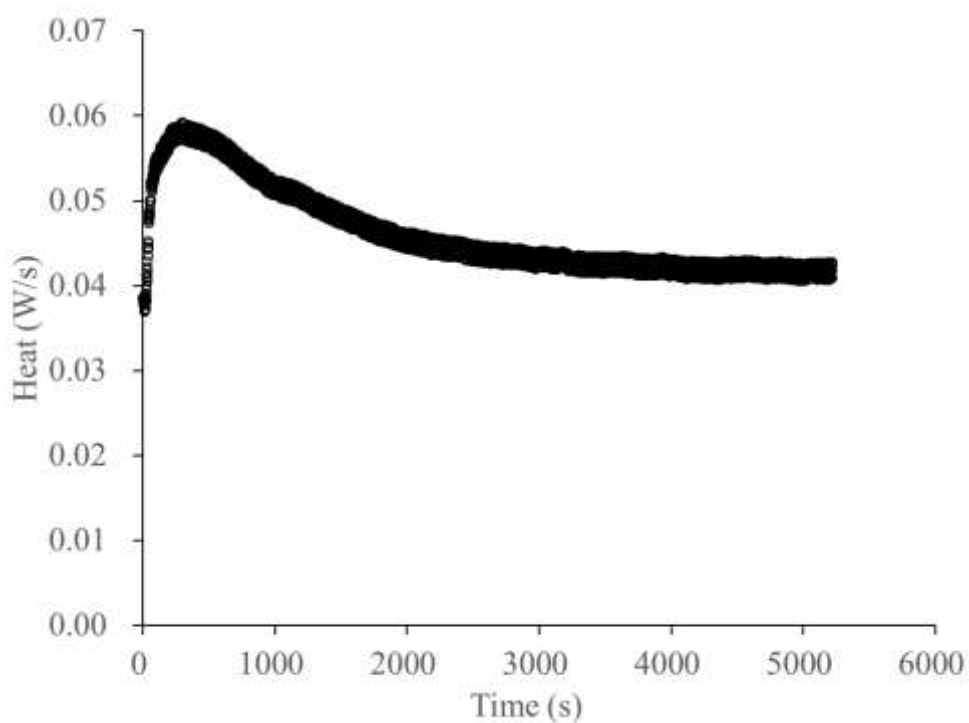


図 2.7 熱流－時間グラフ

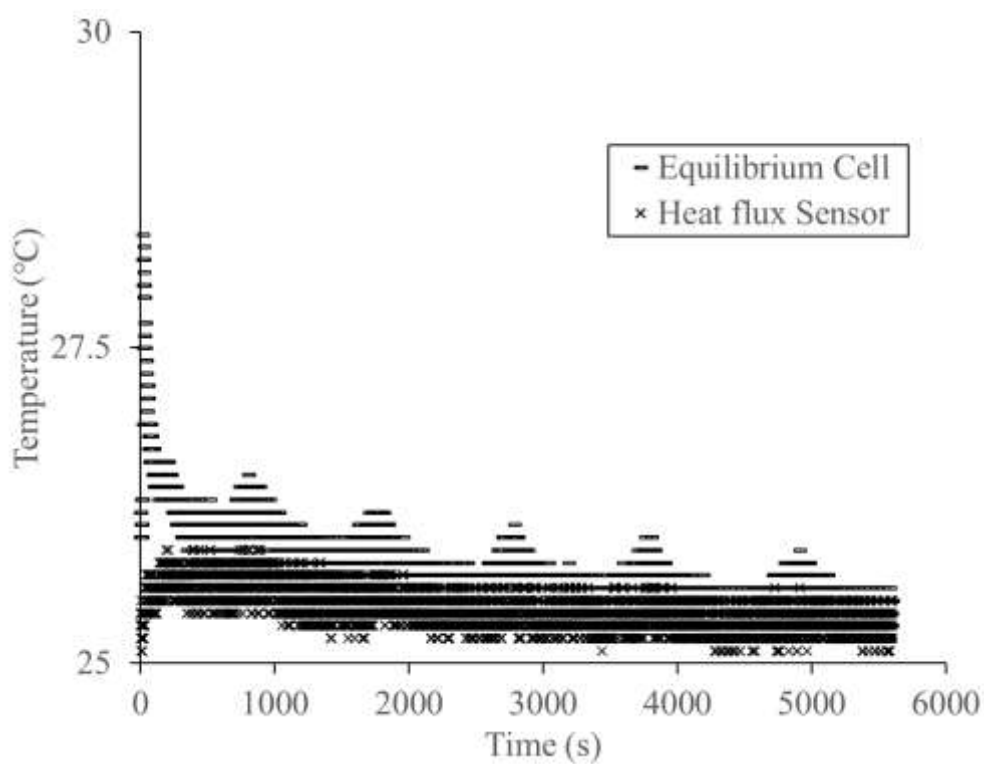


図 2.8 温度－時間グラフ

図 2.9 に、実験開始時の熱流を差し引いたグラフを示す．これは、最初に熱流センサーと平衡セルの温度差によって発生していた熱移動を打ち消すためである．

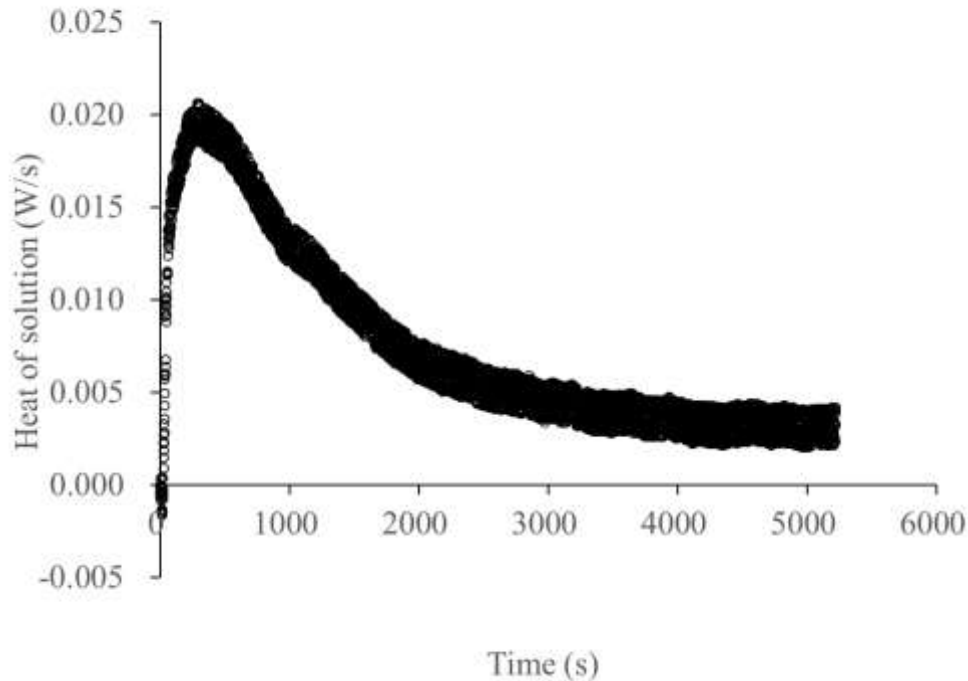


図 2.9 修正後の熱流－時間グラフ

図 2.8 で見られる約 1000s 周期の温度の波は、エアコンの温度制御によるものと考えられる．また、約 1 時間 30 分の計測を行ったが、最初の熱流値までは戻らなかった．また初期温度差による熱移動を打ち消した場合、計測終了時点での溶解熱の合計は 39.28J となった．この値を評価するために、質量当たりの溶解度を算出した．

<算出方法>

まず、溶解熱を冷媒の凝縮潜熱と同じと仮定して、溶解した冷媒の質量を算出する．質量は次の式(2.1)で求められる．

$$m_{ref} = \frac{Q_{sol}}{r_{cond}} \quad (2.1)$$

冷凍機油に対する質量当たり溶解度は次の式(2.2)で求められる．

$$K = \frac{m_{ref}}{m_{oil} + m_{ref}} \quad (2.2)$$

上記の式によって求められた質量当たり溶解度は、0.0623 となった⁽⁹⁾．また、0.55MPa, 20℃における質量当たり溶解度の理論値は提供データによれば約 0.659 である．

2.3.4 考察

実際の溶解度と比較して約 10%の値になったため、溶解熱も 10%しか測定できていないと言える。この原因については以下の 5 点の理由が考えられる。

(1) 熱の漏れ

本実験では平衡セル底面からの熱移動を計測したが、全ての溶解熱が底面に向かっておらず、側面や上面からもいくらか漏れていたことが考えられる。

(2) 空調機器

本実験では備え付けのエアコンを用いて外気温の制御を行った。このエアコンは設定温度に達すると風を弱め、また温度が少し高くなると風が強くなるタイプのものであり、溶解熱と関係のない温度変化が発生してしまっていた。また、水槽の上面を開放していたためそこにもエアコンの影響があり、平衡セル内温度に遅れて熱流センサー温度にも波が見られた。

(3) CPU クーラーの問題

実験後の CPU クーラーには白い物質が多数付着しており(図 2.9)、また水槽内の水もかなり汚れていた。この汚れが放熱機能に影響を与え、熱流センサーを通過する溶解熱が少なくなってしまうことが考えられる。

(4) 記録機器の誤差

本実験で使用したデータロガーは非常にノイズが多く、得られる値がよく振動していた。また、本実験では実験開始時の熱流束を基準として熱量を計算したが、この基準の取り方によっても大きく結果が変わってしまう。これはデータの振動が与える影響が非常に大きいということである。

(5) 初期熱流の問題

溶解熱を正確に把握するためには、初期からある平衡セルと熱流センサーの温度差による熱流の影響をなくす必要がある。しかし、本実験では図 2.9 において溶解が終了して定常状態になったとみられる 5000s 時点でも一定の熱流が発生している。この熱流は横ばいになっていることから平衡セルと熱流センサーの温度差による熱流であると推測できる。すなわち、実験を始めた段階ではまだ定常状態になっておらず、開始時の熱流を差し引いただけでは温度差による熱流の影響をなくすことができないため、溶解熱を正しく計算できていなかったと考えられる。



図 2.9 析出物が付着した CPU クーラー

2.4 実験装置の問題点

この実験装置には 6 つの問題点がある。

- (1) 冷凍機油を入れ替える際に全ねじとアングルを外し、平衡セルの下部のみを取り出す必要がある点である。これは、非常に手間がかかり、また多くのネジを実験装置に平衡セルを取り付けたまま緩めなければならず、他の関係ない締結部まで緩んでしまう可能性がある。また、平衡セル下部を取り外す際に配管が少し曲がってしまうこともあった。
- (2) 熱電対の精度が不安な点である。熱電対自体が温度センサーの中であまり高精度でないのに加えて、未検定のため精度を求めることがとても難しい。
- (3) データロガーのノイズの問題である。LR8432 熱流ロガーは熱流センサー専用のデータロガーということで購入して使っていたが、アースが取れない仕様からかとてもノイズが多かった。圧力、温度、熱流全ての値にノイズが発生しており、図 2.10 に LR8432 を用いて大気圧を測定した際の結果を示す。
- (4) 水槽内の水に析出物が浮遊していることである。これは、アングルが再利用品であり端部から錆などが析出し、また水道水と反応してさらに錆が進行したためである。この錆は CPU クーラーに多数付着した。これでは放熱に影響が出ることが考えられる。
- (5) 平衡セルの側面を断熱できていない点である。平衡セル内で発生した溶解熱がすべて底面に向かっていると仮定して熱流の値を算出したが、側面からも当然放熱すると考えられるため、影響をできるだけ減らす必要がある。
- (6) 空調機器による温度の揺らぎがある点である。これに関しては、もっと狭い範囲をより小さな温度揺らぎで制御することができる空調機器を使用する必要がある。

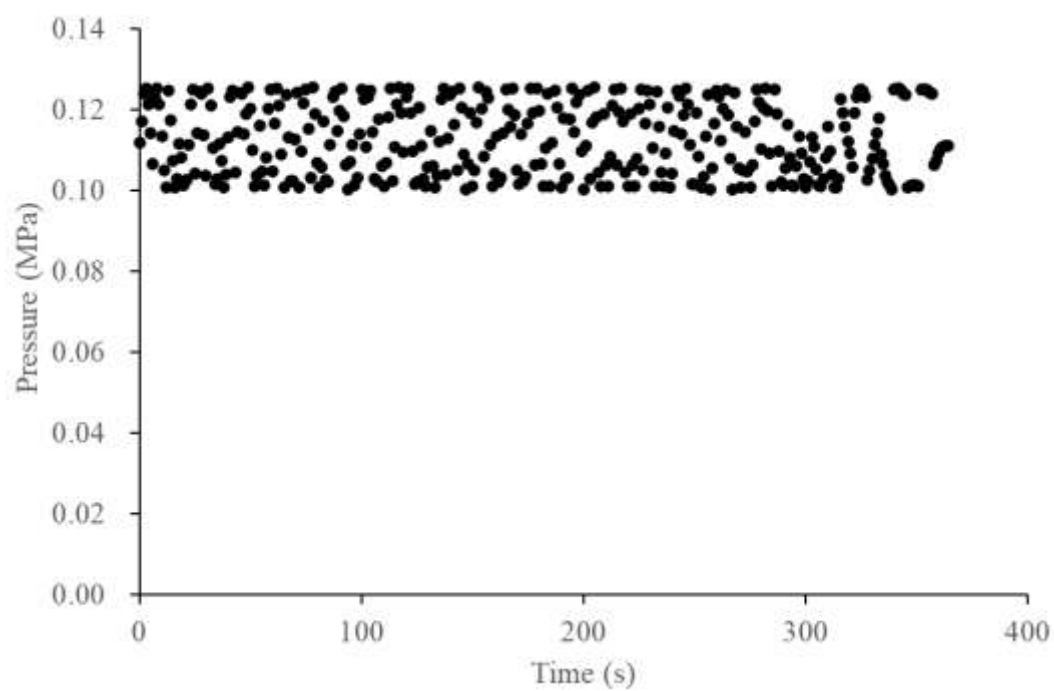


図 2.10 ノイズによる大気圧下での圧力の揺らぎ

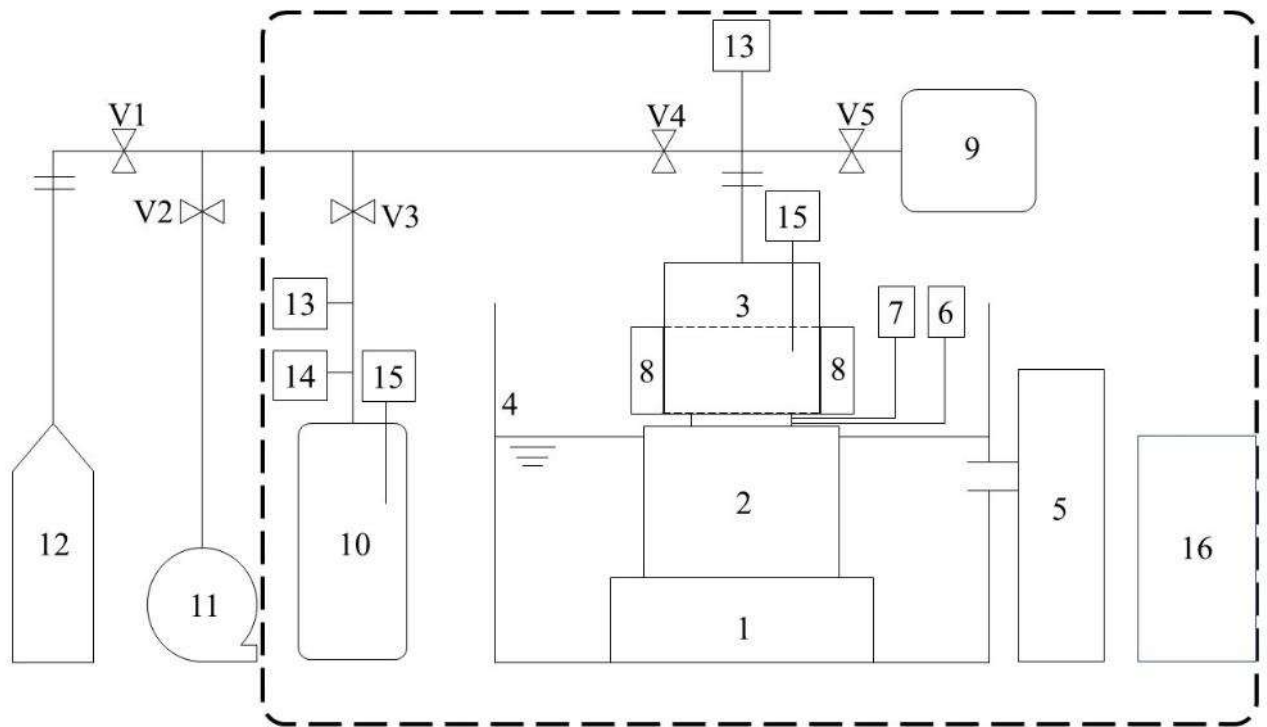
第3章 2号機における実験装置および実験方法

3.1 実験装置

3.1.1 実験装置の概要

1号機で明らかになった様々な問題点を解決した2号機を製作した。2号機において、熱量測定機構は1号機と同じで、センサー類やデータ記録装置、部品を固定するための機構などを別部品に換装した。2号機においても企業との共同研究であり、経済的事由から継手などの配管部品は多くが1号機の流用である。実験装置の概略図を図3.1に、実際の写真を図3.2と図3.3に示す。

実験装置は主に、平衡セル(特注, 森井製作所製), ガスセル(304L-HDF4-1000, Swagelok 製), CPUクーラーおよびそれらを繋ぐ配管(SUS316BA, 1/4 インチ)で構成されている。排気の際には、真空ポンプ(GCD-051X, アルバック工機製)を使用する。CPUクーラーは精製水で満たした水槽の中に配置し、その水は循環恒温槽(CTP-3000, 東京理化器械製)と直接ホースで繋ぎ、一定温度になるようにした。周囲温度は、図2.1に点線で囲んだ部分をビニールで囲い、その中にオイルヒーター(TDDS0712BL, デロンギ製)を置くことで一定になるように調節した。ガスセルおよび平衡セル内の温度は、ガスセル中心部分と平衡セル中心部分に設置している測温抵抗体により計測される。また、ガスセル付近配管と平衡セル上部配管には圧力センサーを設置している。CPUクーラーと平衡セルの間には熱流センサー(KM1, 京都電子工業製)を挟み、熱流束と温度を測定している。測温抵抗体および圧力センサー、熱流センサーの各電圧出力値はデータアキュイジションユニット(横河電機製, MX100)により収集される。収集されたデータはパソコン上で作動するソフトウェア「MX-100 スタンダード」により温度や熱流・圧力に対応した電圧の算出が行われ、画面上に表示および記録される。



1. スペーサー 2. CPU クーラー 3. 平衡セル 4. 水槽 5. 恒温循環槽 6. 熱流センサー
 7. 熱電対 8. 断熱材 9. 真空ゲージ 10. ガスセル 11. 真空ポンプ 12. 冷媒ボンベ
 13. 圧力センサー 14. アナログ圧力計 15. 測温抵抗体 16. オイルヒーター

✕ バルブ = コネクション

図 3.1 実験装置概略図

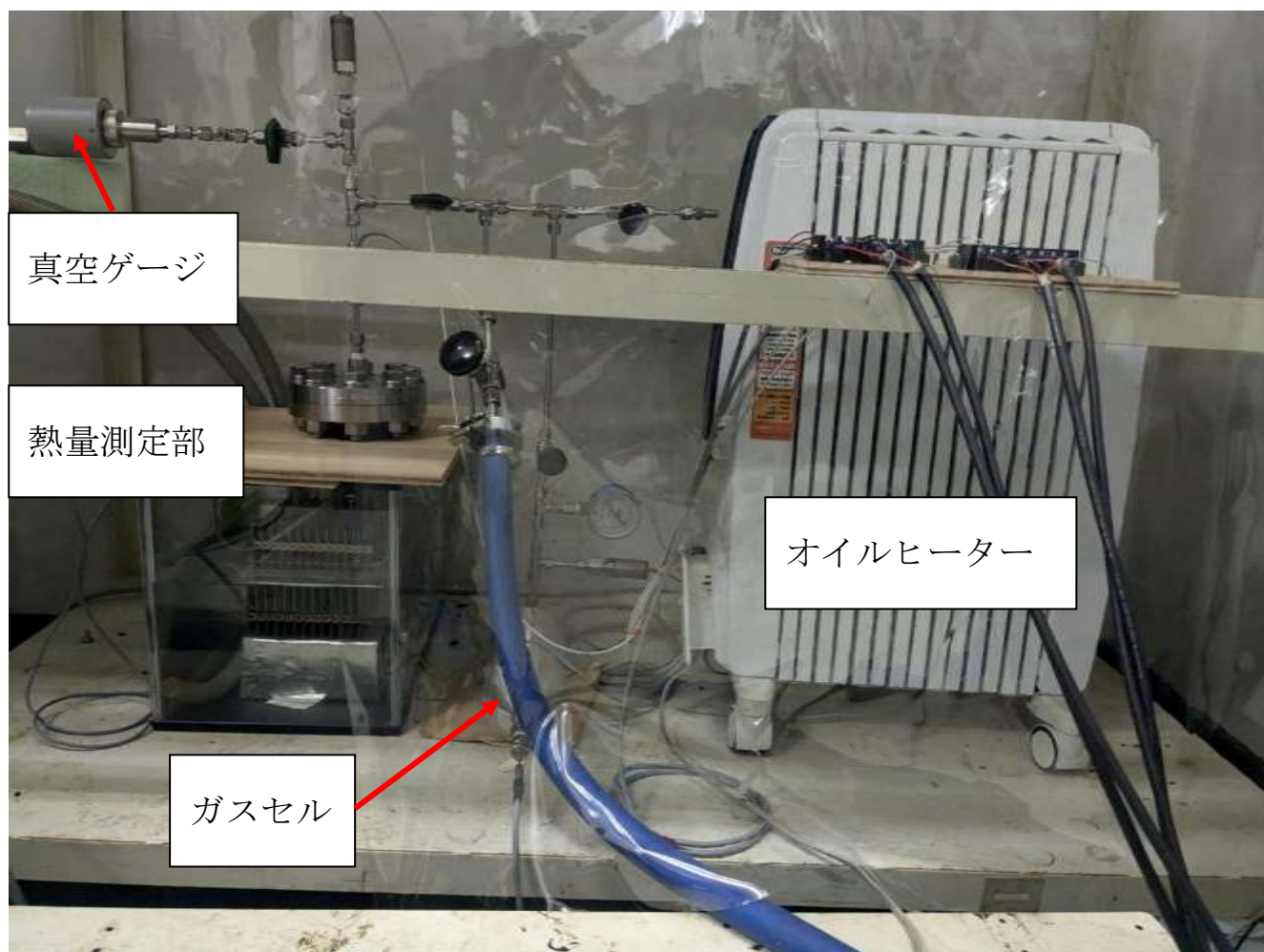


図 3.2 実験装置

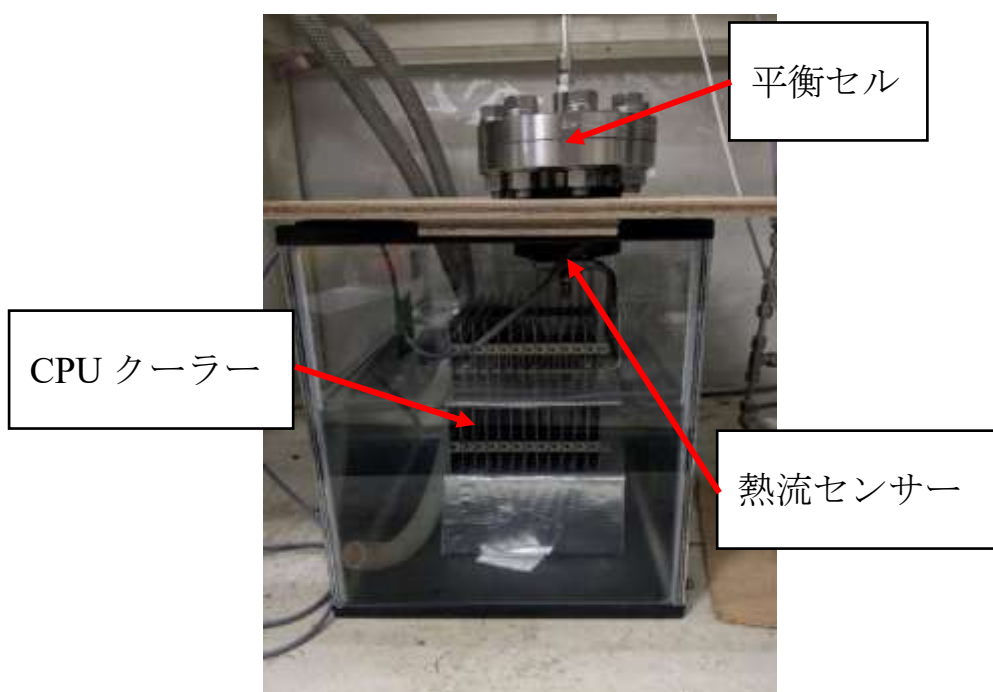


図 3.3 熱量測定部



オイルヒーター



MX100



測温抵抗体挿入部

図 3.4 実験装置各部分拡大写真(2 号機で追加された部分)

3.1.2 実験装置の各部分について

3.1.2.1 各部品についての詳細

(1) ガスセル

冷媒を冷媒ポンベから一時的にためておくためのセルである。ダブルエンドになっており、片方には配管を、もう片方には測温抵抗体を挿入している。また、封入するときには圧力を確認するためのアナログ圧力計と圧力センサーがガスセル付近の配管部分に設置されている。この圧力計と測温抵抗体により、ガスセルに一時的にためた冷媒の体積を算出することができる。

(2) 平衡セル

冷凍機油に冷媒を溶解させるためのセルである。図 2.5 に示すように、JIS2 規格で設計した。また、上部に熱電対を取り付けるためのねじが図中央とは別にもう 1 つ切ってある。最高耐圧力が 2MPa のフランジと組み合わせて密封する。

O リングは HNBR-70 G-75 を使用している。水素化ニトリル(HNBR)を原材料としたゴム用の材質でできており、一般的なニトリルゴム(NBR)と比較して耐熱性や耐油性に優れている。また、HFC をはじめとする代替フロン類への耐性がゴムの中で最も高く、冷媒用のシール材に適した性質を持つ。

(3) CPU クーラー

溶解熱を効率よく放熱させるために使用する。先述した通り一定温度の水に浸けておくことで放熱量を一定にし、溶解熱を算出できるようにした。

(4)断熱材

平衡セル底面から熱流センサーへ向かう溶解熱を最大にするため、側面に断熱材を巻いて側面からの放熱を抑えられるようにした。断熱材の厚さは 20mm である。

(5)スペーサー

CPU クーラーと底の隙間を埋めるために使用した。スタイロフォームでできており、水への物質の析出を抑えるために周りを防水テープで囲っている。

2.1.2.2 各部品の固定方法について

平衡セルと熱流センサー，CPU クーラーの固定部について図に示す。熱流センサーの両面にはセンサー固定用の両面テープ(HA2-L，京都電子工業製)を貼っている。熱流センサーのみだと平衡セルの底面に対してサイズが小さく安定しないため，図に示すように熱流センサーより 0.5mm 薄く，熱流センサーの部分を切り取ったゴムシートを挟んだ。

次に，これらの部品の固定方法について述べる。平衡セルのサイズに合わせた穴と恒温循環層のパイプが通る隙間をあけたベニヤ板に，図 3.6 のように水槽に位置合わせできるようなガイドを 3 か所取り付けた。この板に平衡セルをはめ込み，平衡セルの自重で熱流センサーを CPU クーラーに押し付けて固定することができるようにした。また，実験条件を変えるときなど，油を入れ直す際に平衡セルと熱流センサー，CPU クーラーの位置を再現性高く合わせるために，CPU クーラー下のスペーサーをクーラーが隙間なく乗るサイズにして水槽の底に固定し，ベニヤ板の穴をそれに合わせた寸法で開けることで油を入れ直して実験しても同じ位置で固定できるようにした(図 3.7)。



図 3.5 熱流センサー接着部



図 3.6 ガイド付き板

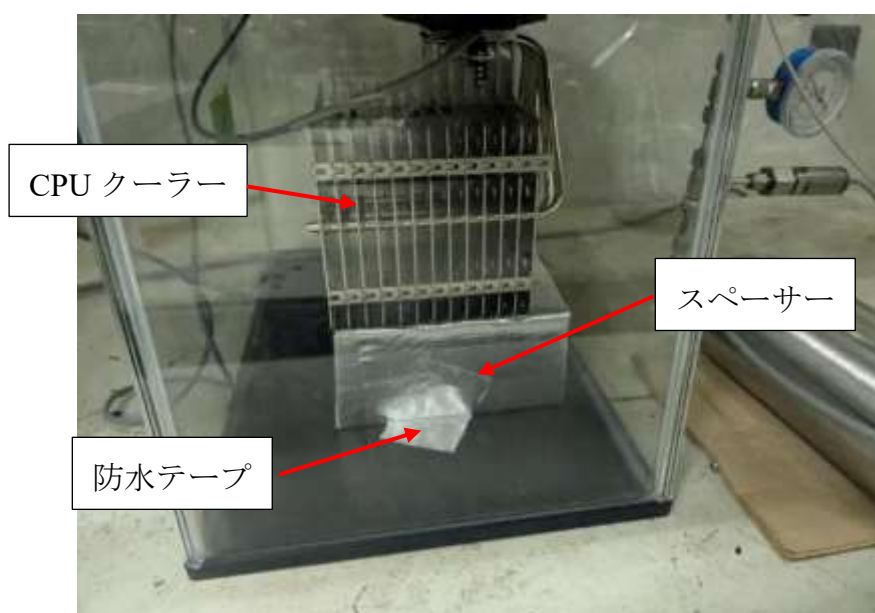


図 3.7 CPUクーラー固定部

3.2 測定機器

3.2.1 圧力センサー

圧力センサーは、1号機と同じフルスケール 2MPa の絶対圧変換器(PHS-B-2MP, 共和電業製)を2つ使用した。しかし、これらの圧力センサーは購入時から時間が経っていたため、切片の補正を行った。真空ポンプで真空状態にして出力電圧を基準値として測定し、実験の際には測定できた電圧から基準値を差し引いて、その電圧に校正係数を掛け合わせることで圧力を算出した。それぞれの値を表 3.1 に示す。

表 3.1 圧力センサーの固有パラメータ

	平衡セル側圧力センサー	ガスセル側圧力センサー
校正係数	1.090 MPa/1.0mV/V	1.091 MPa/1.0mV/V
基準値電圧	0.500 mV	0.022 mV

3.2.2 熱流センサー

熱流センサーは1号機と同じ京都電子工業製 KM-1 を使用した。

3.2.3 測温抵抗体

温度の測定には白金測温抵抗体(TSA-1.6-200K-L, アズワン製)を使用した。これは、熱電対と比較して測定精度が高く、基準接点補償が必要ないためである。測定精度が高いのは素線に使用されている白金の抵抗が温度に対して高い依存性を持つからで、基準接点補償が必要ないのは抵抗値から温度を算出するためである⁽⁸⁾。表 3.2 に熱電対と測温抵抗体の一般的によく使われるクラスもしくは型の精度を比較した表を示す。B 級の測温抵抗体でさえ、0 度付近においては T 型熱電対より高い精度を持つことが分かる。それぞれの値は JIS 規格によるものである。また、測温抵抗体は電流入力に対する抵抗出力を温度に変換するため、電源装置が別途必要であるが MX-100 に一定量の電流を入力する機能があるため、測温抵抗体用の電源装置は用意していない。測温抵抗体には温度の許容差に応じて JIS 規格で定められた C, B, A, AA のクラスがある。受信機器への接続方式には 2 線式, 3 線式, 4 線式の 3 タイプがあり線の数が多いほど導線抵抗の影響を減らすことができる。本研究では最も一般的な A 級で 3 線式のものを使用した。また、抵抗素線は白金のものを選定した。

表 3.2 測温抵抗体と熱電対の精度比較

測定温度	測温抵抗体		熱電対	
	A 級	B 級	K 型	T 型
0	$\pm 0.15^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ (クラス 1)～	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (クラス 1)～
100	$\pm 0.35^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.8^{\circ}\text{C}$	$\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ (クラス 3)	$\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ (クラス 3)

3.3 1号機からの改善点

2.4 で述べた問題点について，2号機で改善された点について述べる．

(1) 冷凍機油の入れ替えのたびに配管を分解する必要がある点

これについては，平衡セルと CPU クーラーの固定方法を変えることで対処できた．平衡セル配管にクイックコネクツ(SS-QF4-S-400, SS-QF4-B-400, Swagelok 製)を設置し，平衡セルの自重で CPU クーラーとスペーサーを押し付けて固定することによりワンタッチで配管から平衡セルを取り外すことができるように変更した．

(2) 熱電対の精度

熱電対を測温抵抗体に変更することで対処できた．先述した通り測温抵抗体は熱電対より測定誤差が少なく，また検定が必要ないためにより高い精度で計測できると言える．

(3) データロガーのノイズ

データアクイジションユニット MX100 に換装することで対処できた．図 3.6，図 3.7 に LR8432(換装前)と MX100(換装後)による大気圧の測定結果を示す．図から分かるように，MX100 に換装することでデータの振動は半分以下に抑えることができた．

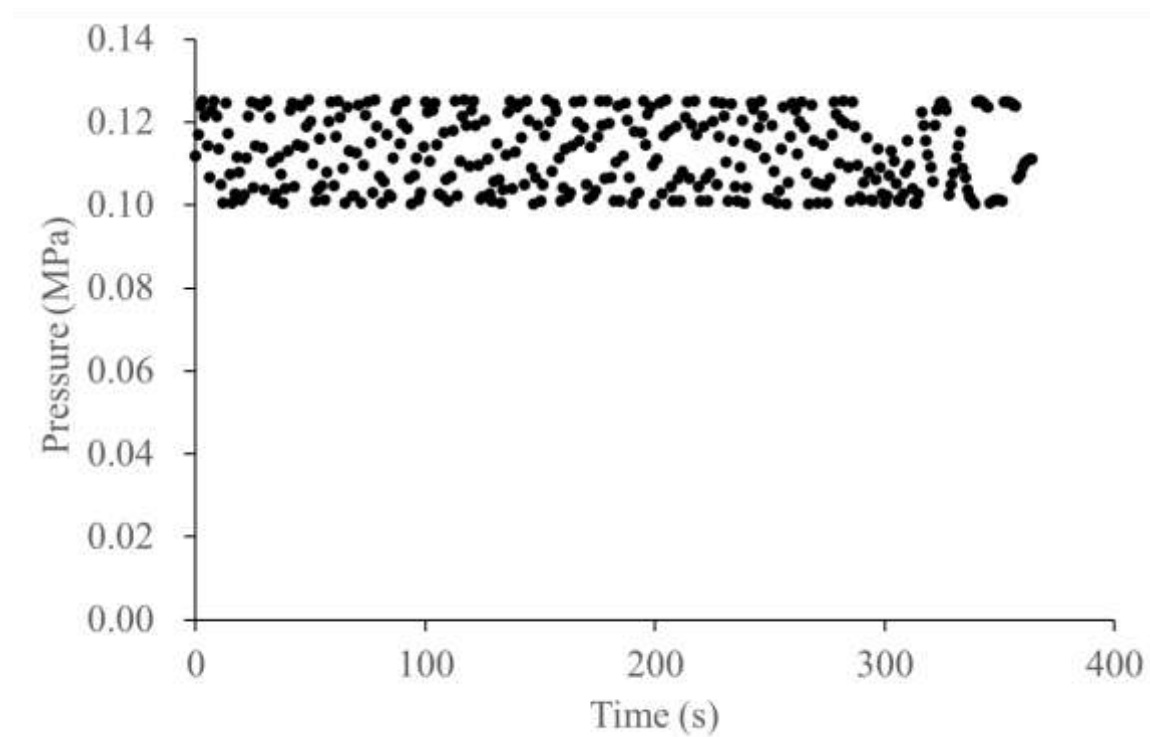


図 3.6 LR8432(換装前)による大気圧測定

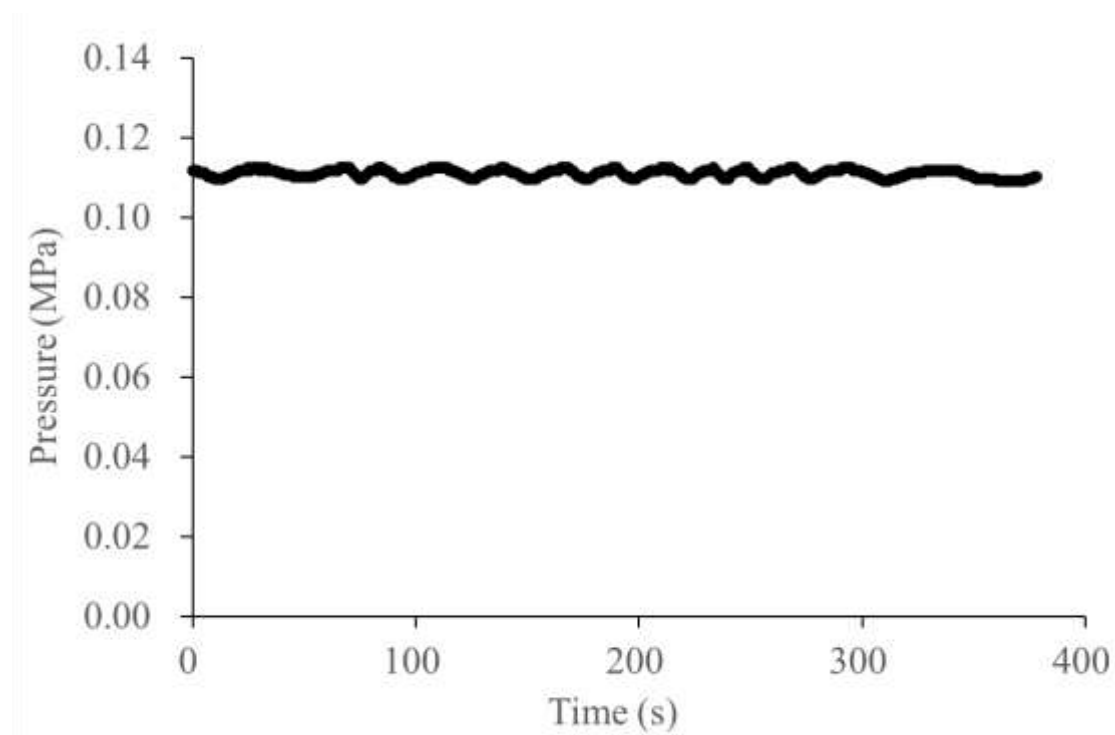


図 3.7 MX100(換装後)による大気圧測定

(4) 析出物

CPU クーラーを新しくし，平衡セルと CPU クーラーの固定部品に金属を使用しないこと，また精製水を用いることで対処できた．CPU クーラーは全く同じ新しい製品を購入し，固定には平衡セルの自重と防水テープを使用した．

(5) 側面からの熱漏れ

図 3.8 のように平衡セルの側面に断熱材を巻くことで対処できた．

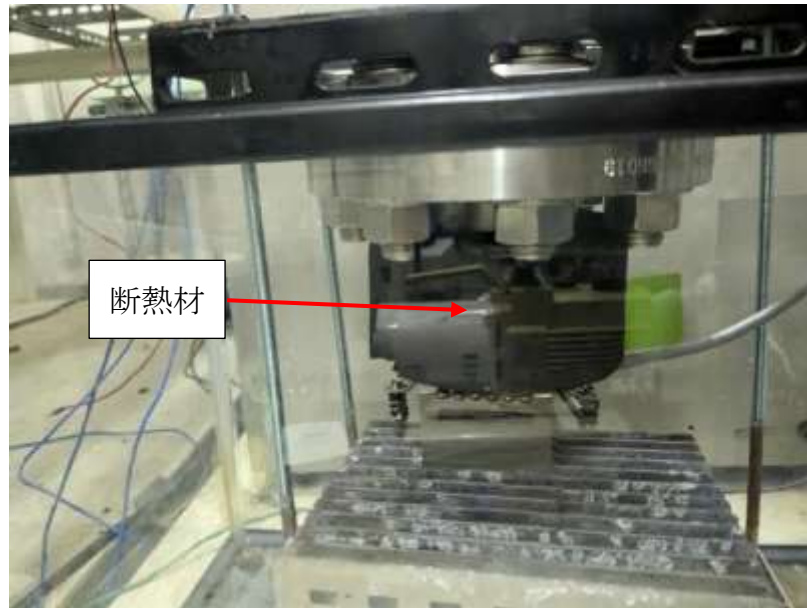


図 3.8 断熱材

(6) 空調機器の揺らぎ

これについては，エアコンより温度制御が細かい空調機器としてオイルヒーターを使用した．オイルヒーターは空気を温める速度がエアコンに比べてとても遅く，また温かい状態を維持する能力が高いためである．

3.4 熱量測定実験

3.4.1 実験手順

以下に熱量測定実験の手順を述べる．また，データは圧力，温度，熱流すべて 1s ごとに記録する．

- (1) バルブ V1 のみ閉じた状態で真空ポンプを使って真空引きを行う(1 時間)．
- (2) 真空引き終了後，恒温循環槽を実験条件の温度にし，オイルヒーターの設定温度を 25℃ にして定常状態になるまで待つ(12 時間以上)．同時に計測を開始しておく．また，それと同時に V1 を開け，V2, V4, V5 を閉じた状態で冷媒を約 0.35MPa になるように封入する．これは，この圧力では企業から与えられた溶解度のデータがあるためである．
- (3) 定常状態に至ったことを確認した後，V4 バルブ，V3 バルブの順に開けて平衡セル内で冷媒を冷凍機油に溶解させる．バルブを開けた時刻は溶解熱の計算に使用するために記録しておく．再び定常状態になった後に計測を止め，初期熱流束を下回った点までをデータとして使用する．バルブの順番については，V4 バルブがボールバルブで流量調整できないのに対してニードルバルブである V3 バルブは流量調整ができ，冷媒の流れ込む勢いを調整できるためこのように決定した．
- (4) 冷媒を回収し，冷凍機油を入れ替える．

手順 1 から手順 4 までを繰り返し行う．

溶解熱の総量は式(1.2)によって計算される．また，溶解前のデータを計測しておくことで，もともと平衡セルと CPU クーラーの温度差から発生していた熱流を把握することができる．この熱流を差し引くことで溶解熱のみを算出することができる．

3.4.2 実験条件

表 3.3 に実験条件を示す.

表 3.3 実験条件

冷媒	R1234yf
冷凍機油	RL68H (ポリオールエステル系冷凍機油))
恒温循環槽温度	20℃
オイルヒーター設定温度	25℃(実際の温度は少し高い値で安定)
冷凍機油質量	約 2.3g, 4.3g
冷媒封入圧力	0.35MPa

本研究では, 溶解度測定実験(6)と違って冷凍機油を攪拌せずに冷媒を溶解させる. そのため, 冷凍機油の表面からのみ冷媒が溶解すると考えられる. しかし, この溶け込んだ冷媒は自然対流によって質量測定は, 真空引きによる冷凍機油減少を考えて真空引き前後でそれぞれ行うべきであるが, 弊研究室には平衡セルごと冷凍機油の質量を測定できる電子天秤が無いため, 真空引き前の質量の未測定している. 測定方法は, まずビーカーに冷凍機油を適量注いだ状態でビーカーごと質量を測定する. 次に平衡セル内に冷凍機油を移して残りの冷凍機油をビーカーごと測定する. この質量の差から平衡セルに封入する冷凍機油の質量を決定する.

第4章 2号機実験結果

4.1 実験結果

図 4.1～4.4 に時間－熱流束・温度のグラフを示す.

<冷凍機油質量 2.337g>

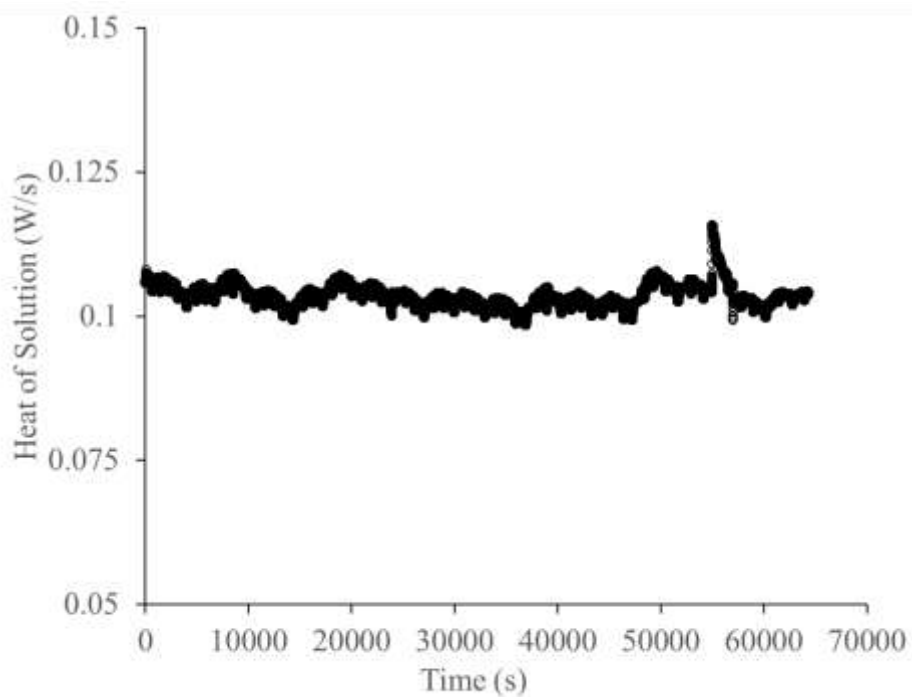


図 4.1 時間－熱流(20℃)

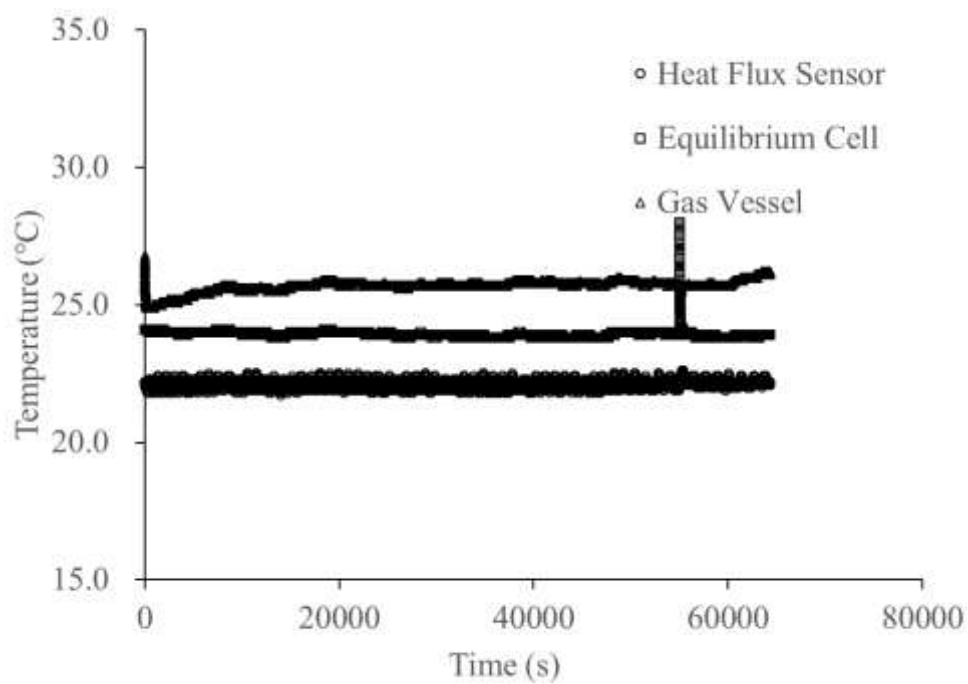


図 4.2 時間－温度(20℃)

<冷凍機油質量 4.477g>

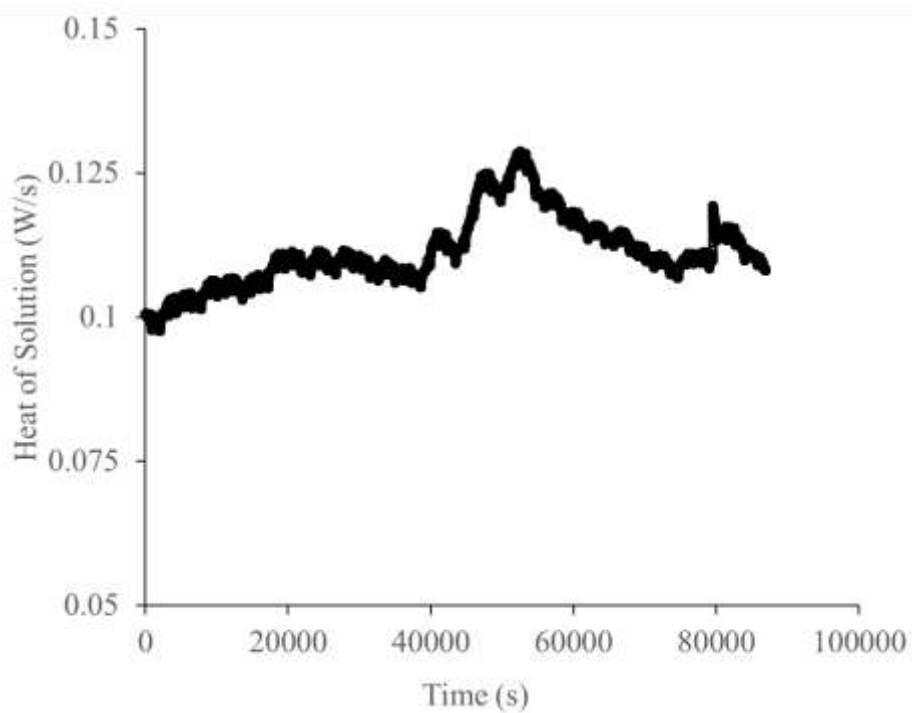


図 4.3 時間－熱流

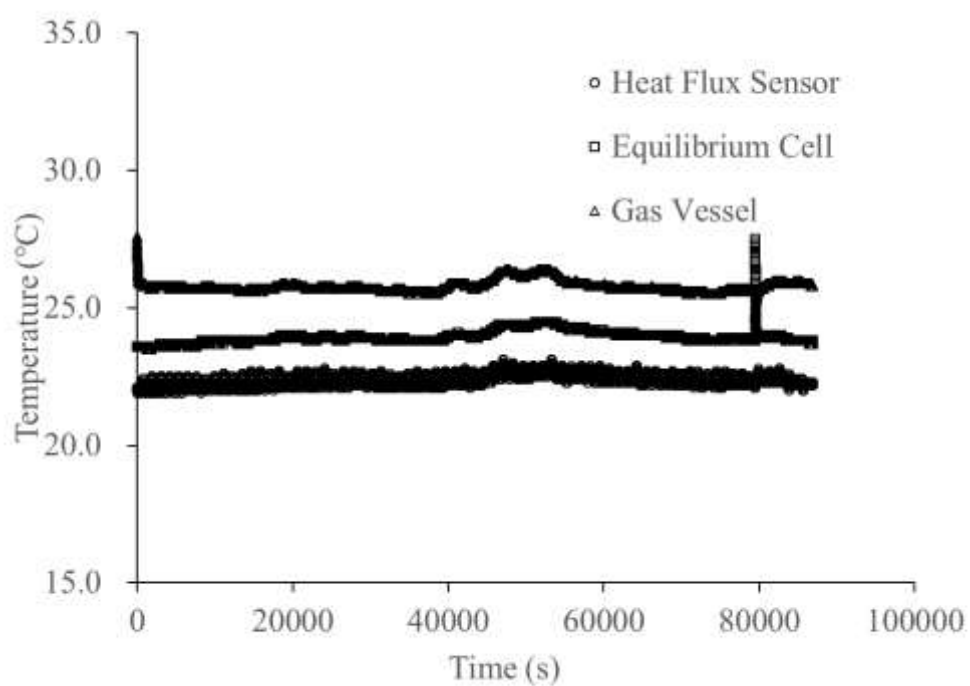


図 4.4 時間－温度

図 4.1, 4.2 より, 冷凍機油質量 2.337g の場合はバルブを開けた 55000s 以前では値が多少の波を持ちながらも定常状態になっており, また開けた後は急速に熱流が増加し約 1500s 後に元の定常状態と同じくらいの値に落ち着くことが分かる. 図 4.3, 4.4 より, 4.477g の場合は 40000s 付近から熱流が増加している箇所があるが, ここはまだバルブを開けていないため実験室内のエアコンが起動したなどの実験とは関係ない事象によるものと考えられる. 79500s のバルブを開けた時点で, その前約 5000s 間は定常状態になっており, 開けた後は約 6000s 後に元の定常状態と同じくらいの値に落ち着く. 定常状態に至るまでの時間については, 冷凍機油質量の多いほうが長い時間がかかった.

次に, 図 4.5 にバルブを開ける 1800s 前から溶解終了までの熱流を抜き出したグラフを示す. また, バルブを開ける 1800s 前から直前までの熱流の値の平均値を定常状態熱流とし, それを差し引いて溶解熱のみが正の値として分かるようにしたグラフを図 4.6 に示す.

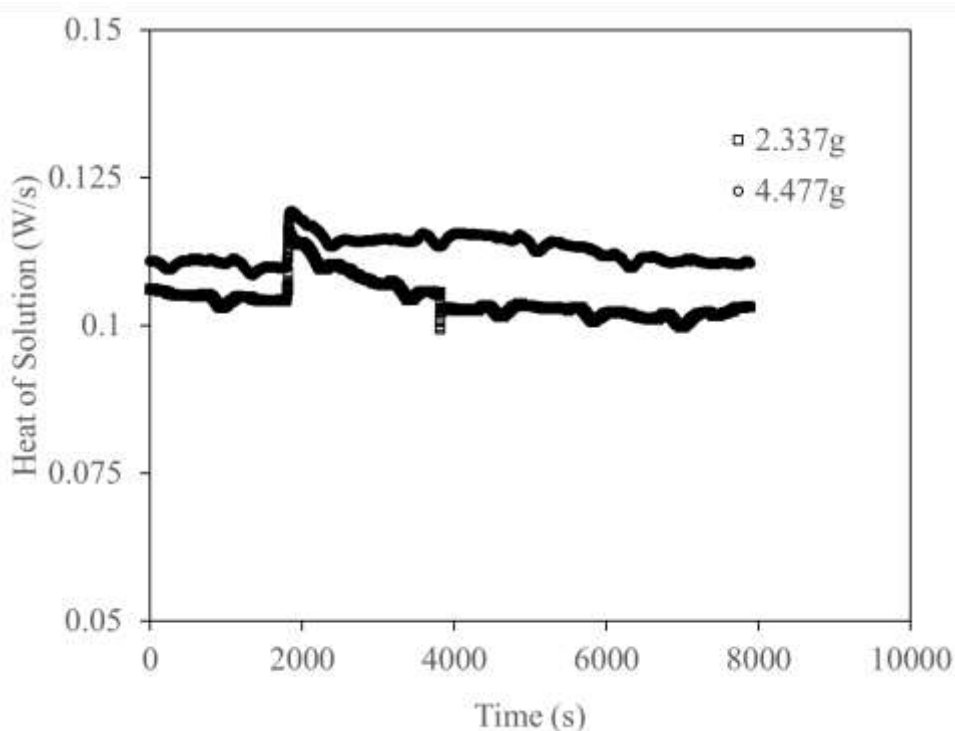


図 4.5 溶解時のみ抜き出したグラフ

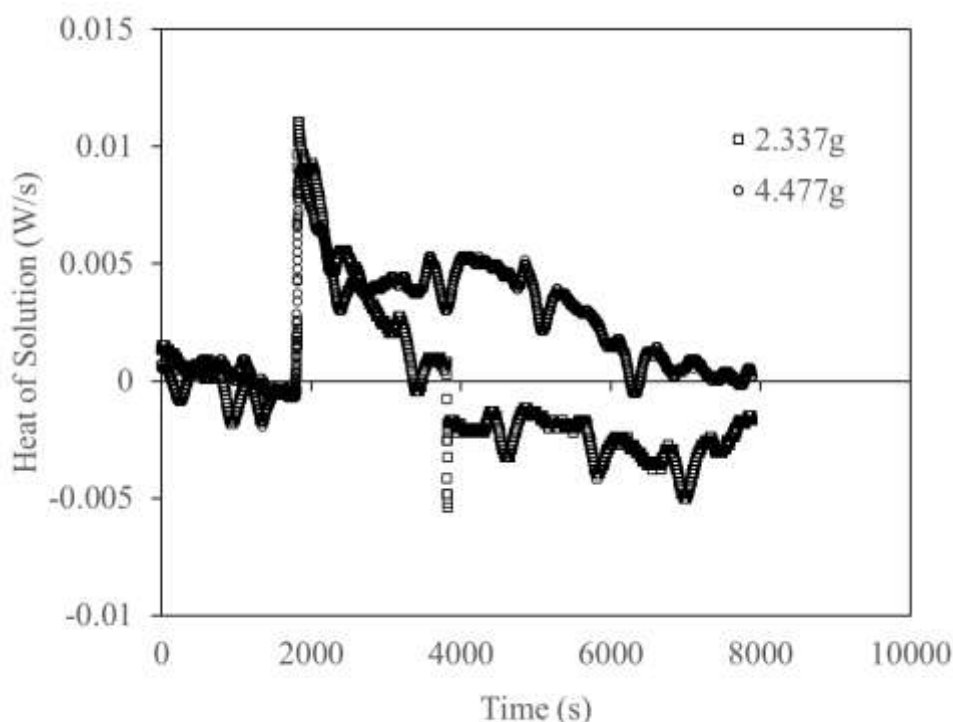


図 4.6 溶解熱のみ算出したグラフ

図 4.5, 4.6 から分かるように, 冷凍機油質量に関係なく, 発生する熱量は同じスピードで急速に増える. しかし, そこから再び定常状態へ向かうまでの時間は冷凍機油質量が多いほうが長いことが分かる. これは, 冷凍機油質量が多いため溶け込む冷媒の量も多く, 溶解熱量もそれに応じて増えるためであると考えられる.

これらの値から, 式(1.2)を用いて溶解熱の合計を計算する. それぞれの質量での溶解開始, 終了時刻, 溶解熱の算出値をまとめた図を表 4.1 に示す.

表 4.1 溶解時のデータ

冷凍機油質量 (g)	溶解開始時刻 (s)	溶解終了時刻 (s)	溶解熱 (J)
2.337	54997	56548	7.43738
4.477	79494	85580	18.93285

冷凍機油質量 4.477g は 2.337g に対して約 1.92 倍であるが, 溶解熱は約 2.55 倍となり, 冷凍機油質量に比例して溶解熱が増えるわけではないということが分かった.

4.2 理論熱量計算

実験値の評価を行うために，溶解熱の理論値を算出する．溶解熱の計算には実験と同じ温度・圧力条件下での溶解度のデータが必要であるため，共同研究先からデータを得た．それぞれの質量条件下での最終的な定常状態での温度，圧力，また REFPROP で計算した凝縮潜熱を表 4.2 に示す．

表 4.2 温度，圧力，凝縮潜熱

冷凍機油質量 (g)	温度 (°C)	圧力 (MPa)	凝縮潜熱 (kJ/kg)
2.337	23.9	0.264325	146.25
4.477	23.7	0.266771772	146.41

HFO1234yf の RL68H に対する 10°C 刻みの質量当たり溶解度データより，20°C，30°C の時の圧力，溶解度を表 4.3 に示す．

表 4.3 質量当たり溶解度データ⁽⁹⁾

温度 (°C)	圧力 (MPa)	質量当たり溶解度 (-)
20	0.264276	0.14092
	0.267199	0.143211
30	0.262621	0.099754
	0.266508	0.101749
	0.270394	0.103775

上記の値から表 4.2 内の定常状態の圧力で線形補間した溶解度の値を表 4.4 に示す．

表 4.4 定常状態圧力で線形補間した溶解度

温度 (°C)	圧力 (MPa)	質量当たり溶解度 (-)
20	0.264325	0.140958
	0.266771772	0.142876
30	0.264325	0.100629
	0.266771772	0.101887

上記の値を定常状態の温度で線形補間した質量当たり溶解度は、それぞれ冷凍機油質量 2.337g のとき 0.12523, 4.477g のとき 0.12771 となった.

溶解した冷媒質量, 溶解熱はそれぞれ次の式(4.1), 式(4.2)で求められる.

$$m_{ref} = \frac{Km_{oil}}{1-K} \quad (4.1)$$

$$Q_{sol} = r_{cond} \cdot m_{ref} \quad (4.2)$$

上記の式にて求められた冷媒質量, 溶解熱, 実験によって得られた溶解熱を表 4.4 にまとめた.

表 4.4 溶解熱のデータ

冷凍機油質量 (g)	冷媒質量 (g)	溶解熱(理論値) (J)	溶解熱(実験値) (J)
2.337	0.33456	48.9294	7.43738
4.477	0.65547	95.96736	18.93285

2.337g, 4.477g どちらの場合も理論溶解熱量に比べて実験値のほうが少なく, 約 15~20%しか測定できていないことが分かった.

4.3 考察とまとめ

実際に測定できた熱量の実験値が理論値に比べて少ないことについて、原因の考察を以下の2点について行った。

① 理論熱量計算が間違っている点

章 4.2 で計算した溶解した冷媒質量は推測値であり、実測していない。そこで冷凍機油質量 4.477g の実験後、3 日経ってから中に残っていた冷凍機油質量を測定した。測定方法は、平衡セルそのものを測定することができないため、中に残った冷凍機油を全てウェスで拭き取り、そのウェスの質量増加分を冷凍機油質量とするものである。その結果、冷凍機油質量は 4.5g となった。すると、この冷凍機油質量から初めの質量を差し引いた 0.023g が真の溶解した冷媒質量であると考えることができる。この質量から溶解熱を計算すると 3.36743J となり、実験値の 7.43738J のほうが多いということになる。実際に測定できた熱量が溶解熱量以上になるとは考えにくく、また平衡セル内の冷凍機油全てを拭き取ることはできなかったためこの 4.5g という質量の信頼性は高くないが、理論熱量が多く見積もられていることは十分に考えられる。

② 溶解熱を熱流センサーで全て把握できていない点

本実験では熱流センサーを平衡セル底面に貼付けてその通過熱量を溶解熱とした。熱流センサーの面積は 0.00045m^2 、平衡セル底面積は 0.00287475m^2 である。また、平衡セルの壁は 4mm あり、その壁の厚さ分を差し引くと 0.00216475m^2 である。熱流センサーの面積は平衡セル底面積の約 20.8% であり、4.477g の理論値に対する実験値の割合である約 19.7% と近い値となった。

しかし、この熱流センサーの面積比をそのまま使用できる場合は熱流が平衡セル底面に対して完全に一様に通過した際のみである。昨年行われた本実験装置と同じサイズの熱流センサー、平衡セル、CPU クーラーを用いた通過熱のシミュレーション⁽¹⁰⁾では、平衡セル底面において図 4.7 のような熱流の分布ができた。平衡セル底面全体のうち CPU クーラー接触部を中心に熱流が見られ、底面のうち CPU クーラーの接触面より外側の領域やセンサーと周りのゴムシート間にある空気層ではほとんど熱流が見られないことが分かる。このことから平衡セル底面のうち実際に熱が通過した領域は小さく、熱流センサー面積が占める割合は 20.8% 以上になると考えられる。また、断熱材を巻いている側面や上面からの熱漏れも完全に 0 にすることはできないため、その影響も考えられる。

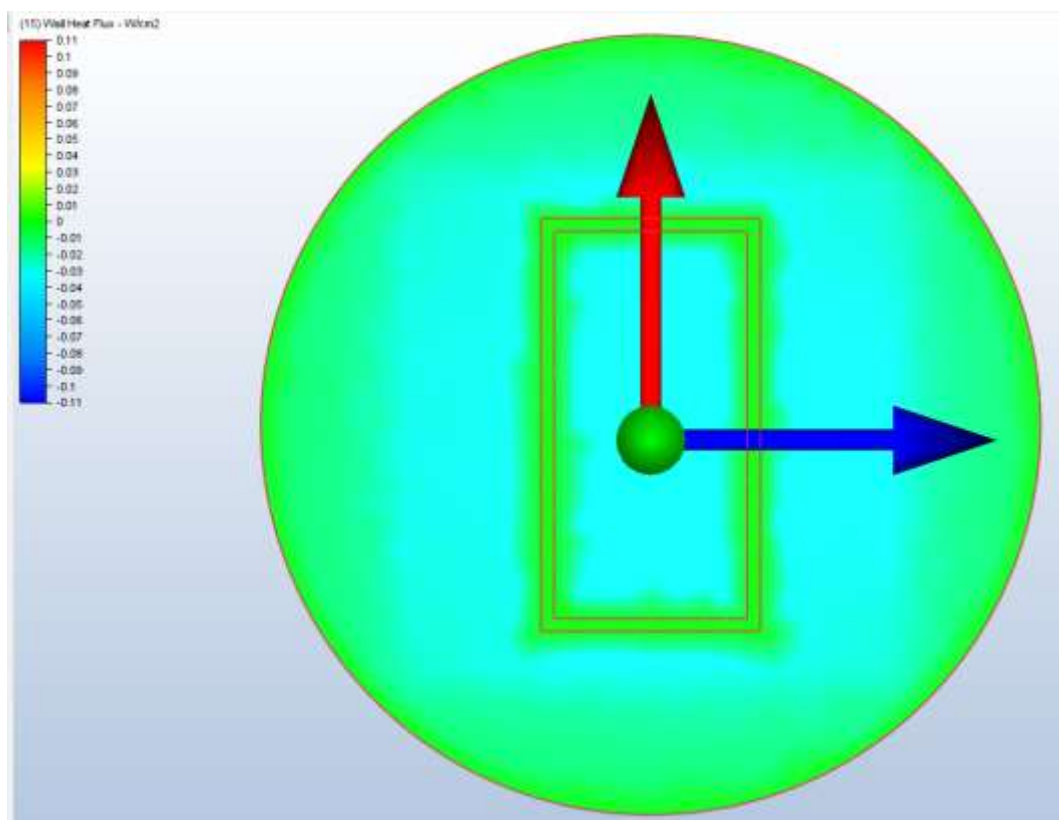


図 4.7 通過熱の分布

以上の要因により理論熱量が計算結果より少なく，また実際に発生した溶解熱のうち一部しか把握できていなかったと考えると，溶解熱が理論値に対してかなり小さかったことも説明できる．

第5章 総括

本論文は、冷凍機油 RL68H に冷媒 R1234yf が溶解する際に発生する熱量を正確に把握する手法を開発し、評価及び考察を行った結果を取りまとめたものである。以下にその内容を要約する。

- (1) 冷凍機油に対する冷媒の溶解熱を測定するには、装置製作の容易さ、溶解させるための機構の組み込みやすさ、熱量測定が静的であることを考慮した場合伝導型熱量測定が最適である。
- (2) 1号機の製作、実験により CPU クーラー、熱流センサーを使用した伝導型熱量測定実験装置において溶解熱を測定できることが判明した。しかし、実験開始から十分な時間をおいても開始前の熱流値まで値が戻らず、初期からある平衡セルと熱流センサーの温度差による熱移動の影響を取り除くことができなかったことや CPU クーラーの付着物、熱漏れ、データロガーの問題などにより溶解熱の理論値と実測値では大きな乖離があった。
- (3) 2号機の製作により 1号機にあった様々な問題点を解決し、より現実に即した溶解熱の値を得ることができた。また、得られた実験値と溶解熱の理論値のギャップは 1号機より小さくすることができたが、それでも理論値の 20%以下しか実測できなかった。溶解熱のうち平衡セル底面方向に向かうものの一部しか把握できていないこと、推算した冷媒溶解質量が実際の溶解冷媒質量と比較して大きくなっている可能性があることなどが実験値と理論値のギャップを生み出していると考察した。

本実験装置は今後も改良を続けていくことでさらに高精度に溶解熱を把握することができる。以下に 3 つの改良案を挙げる。

- ① 溶解熱が通過する平衡セル底面、熱流センサーの形状をできるだけ近くして底面を通過する熱流を全て把握する
- ② 平衡セルの高さを小さくして側面積を小さくする
- ③ 真空引き前後、実験終了後の 3 点で冷凍機油質量を測定して質量増減を厳密に把握する

謝辞

九州大学大学院総合理工学研究院 宮崎 隆彦 教授には、本研究の遂行に当たり、的確な助言に加え、丁寧なご指導、ご鞭撻を賜りました。また、本論文を執筆するにあたっても多くのご指導、ご鞭撻を賜りました。深く感謝の意を表し、心から深く御礼申し上げます。

九州大学大学院総合理工学研究院 Kyaw Thu 准教授には、多くの助言や熱心なご鞭撻を賜り、研究の遂行に大きくご貢献をして頂きました。深く感謝の意を表し、心から御礼申し上げます。

九州大学大学院総合理工学府 高田 信夫 技術専門職員の多くの助言により無事実験装置を作り上げることができました。ここに深く感謝の意を表し、心から深く御礼申し上げます。

九州大学大学院総合理工学府総合理工学専攻宮崎研究室に所属する、技術職員 高橋 史明さん、研究員 Chairunnisa さん、Marco Reyes Lao さん、Haoulomou Pepe さん、陳 昊楠 さん、Yang Cheng さん、You Cheng さん、Li Guangyao さん、柴 甲子 さん、Zhao Peng さん、Wu Yitong さん、Fujita Daido さん、Alaa Itaiwi さん、周 盈辛 さん、Isha Sameen さん、有馬 太希 さん、磯永 隆志 さん、工藤 徳人 さん、Yeh Peng さん、加門 巧次 さん、強 立 さん、永瀬 太希 さん、Goo Sangdon さん、大城 李桜さんには、多大なるご助言及びご協力をいただきました。心より御礼申し上げます。

既にご卒業されました Mojtaba Purjam さん、Seo Sang Won さんには実験装置製作に関して様々な知識を教えていただきました。心より御礼申し上げます。

令和 5 年度に九州大学大学院総合理工学府を修了されました江口 順紹 さん、中津 秀彬 さん、松尾 康介 さん、溝部 幸輝さんには多大なるご助言及びご協力をいただきました。心より御礼申し上げます。

研究室秘書大和 裕里 さんには事務手続き等で大変お世話になりました。心より御礼申し上げます。

共同研究者である 田中 佑弥 さんと 藤本 大樹 さんには実験を遂行する上で多数のご助言、実験装置製作の手伝い、実験の遂行など大変お世話になりました。深く感謝の意を表し、心より御礼申し上げます。

本研究は 2023 年より行っております三菱電機株式会社様との共同研究として実施しました。共同研究の機会をいただき、多数のご助言をいただきました三菱電機株式会社様に深く感謝の意を表します。

最後に、遠く離れた場所から著者の学生生活を温かく見守り、支えてくれた家族に心から感謝いたします。

参考文献

- (1)飛原英治, 冷凍空調用冷媒をめぐる最近の状況, SCEJ Autumn Meeting, 2010, p250-p251
- (2)小川英生, 他, 静的熱量測定の前線ー静的熱量測定の基本と研究・開発への応用ー, Netsu Sokutei, 2006, no.33(4), p148-p159
- (3)長野八久, 熱量計を完全に使い切るために, 生産と技術 第73巻 第1号, 2021, p16-21
- (4)萩原清市・浅賀喜与志, セメント・コンクリートに用いる各種熱量計, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, 2007, no.14, p451-p458
- (5) <https://www.ntec-fec.com/product/heatpipe.html>, 株式会社エヌ・テック, 製品情報ーヒートパイプとは？
- (6)益守航, 冷凍機油に対する低 GWP 冷媒の溶解度がヒートポンプサイクルに与える影響の評価, 2022
- (7) Bidyut B. Saha, Khairul Habib, Ibrahim I. El-Sharkawy, Shigeru Koyama, Adsorption characteristics and heat of adsorption measurements of R-134a on activated carbon : INTERNATIONAL JOURNAL OF REFRIGERATION, no.32, p1563-1569
- (8)宮木猛, 基礎講座 温度の測定方法は？, 応用物理 第79巻 第7号, 2010, p656-p660
- (9)三菱電機株式会社様 提供データ
- (10)藤本大樹, 冷媒に対する冷凍機油の溶解熱測定手法の開発, 2023

付録 恒温循環槽温度変化実験

2号機において、恒温循環槽温度が溶解熱に与える影響を調べた。実験条件は以下の表 6.1 の通りである。

表 6.1 実験条件

冷媒	R1234yf
冷凍機油	RL68H (ポリオールエステル系冷凍機油))
恒温循環槽温度	15℃, 20℃, 25℃
オイルヒーター設定温度	25℃(実際の温度は少し高い値で安定)
冷凍機油質量	約 4.2g
冷媒封入圧力	0.35MPa

<実験手順>

- (1) バルブ V1 のみ閉じた状態で真空ポンプを使って真空引きを行う(1 時間)。
- (2) 真空引き終了後、恒温循環槽を実験条件の温度にし、オイルヒーターの設定温度を 25℃ にして定常状態になるまで待つ(9 時間)。同時に計測を開始しておく。また、それと同時に V1 を開け、V2, V4, V5 を閉じた状態で冷媒を約 0.35MPa になるように封入する。
- (3) 定常状態に至ったことを確認した後一旦測定を止め、再び測定を開始して V4 バルブ、V3 バルブの順に開けて平衡セル内で冷媒を冷凍機油に溶解させる。初めの 9000 点までをデータとして使用する。
- (4) 冷媒を回収し、冷凍機油を入れ替える。

手順 1 から手順 4 までを繰り返し行う。

<実験結果>

図 6.1 から図 6.6 にそれぞれの温度での時間－熱流、時間－温度グラフを示す。恒温循環槽温度が 25℃の時は外気温と水槽温度の温度差がかなり小さく、初期温度差による熱移動を小さくすることができた。15℃の時はバルブを開けてすぐ熱流が下がり、その後急上昇し、他の温度とは全く違う挙動を示した。また、20℃の時と 25℃の時は熱流がピークに向かった後は下がり続けるが、15℃の時はピークに向かった後初期熱流とほぼ同じ値まで下がった後に上がるという違いがあった。

図 6.7 にそれぞれの温度の熱流から初期熱流を差し引いたグラフを示す。20℃の時と 25℃の時に熱流はほぼ同じ動きを示したが、15℃の時のピーク熱流値は半分程度で初期熱流と同じ値まで下がるのも早かった。以上のことから、平衡セルと熱流センサーの温度差が大きすぎると熱量を正しく測定することができないことが分かった。

①恒温循環槽 15°C

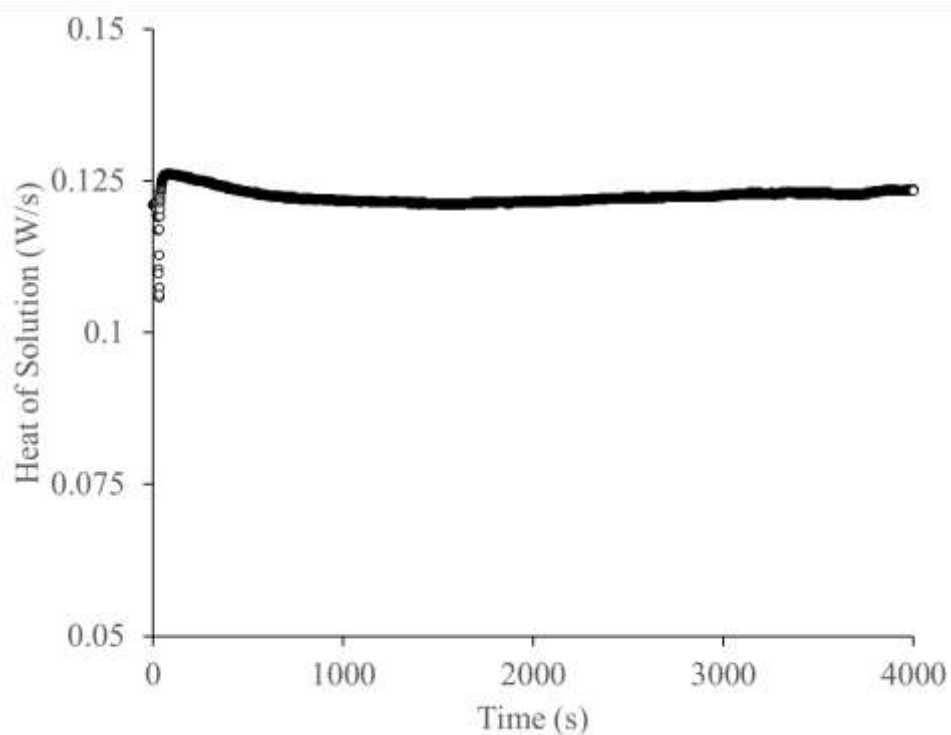


図 6.1 時間－熱流

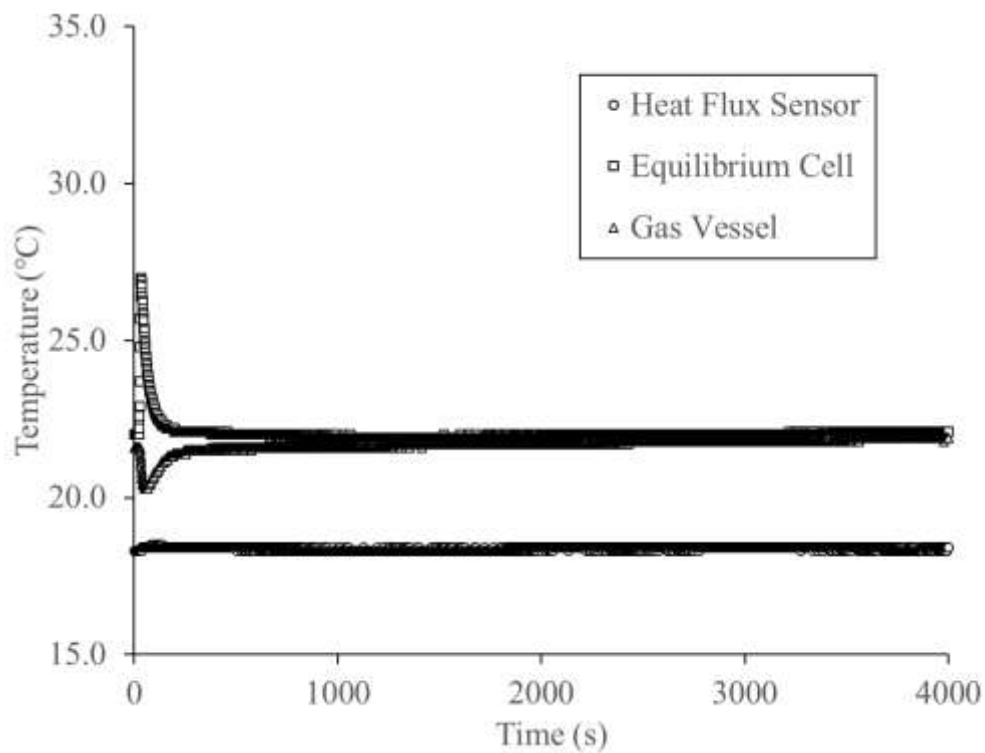


図 6.2 時間－温度

②恒温循環槽 20℃

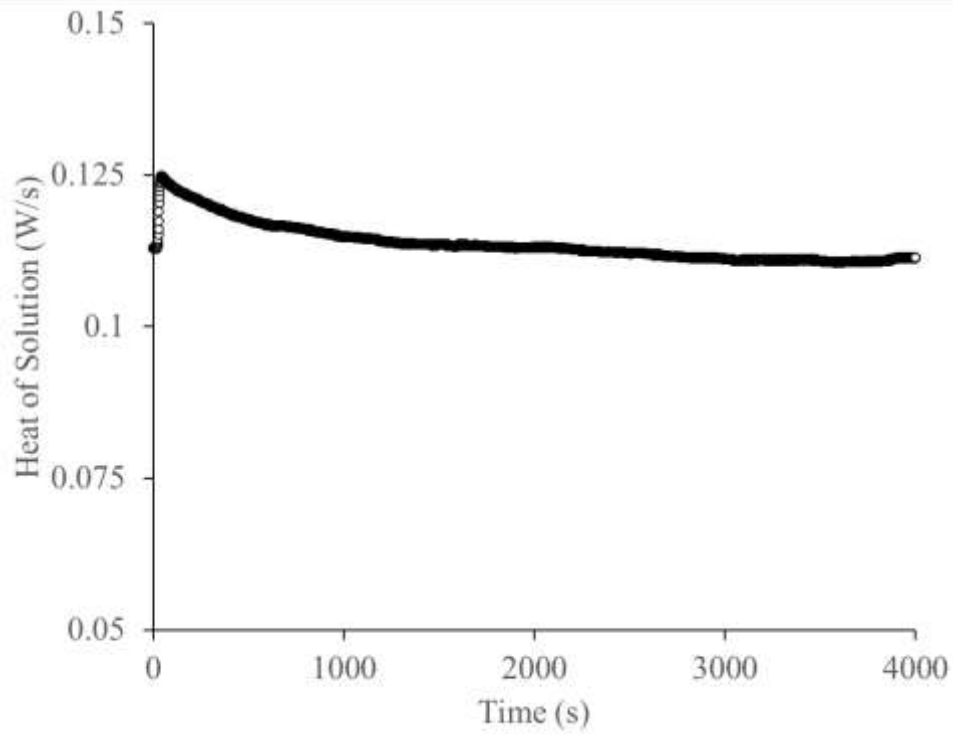


図 6.3 時間－熱流

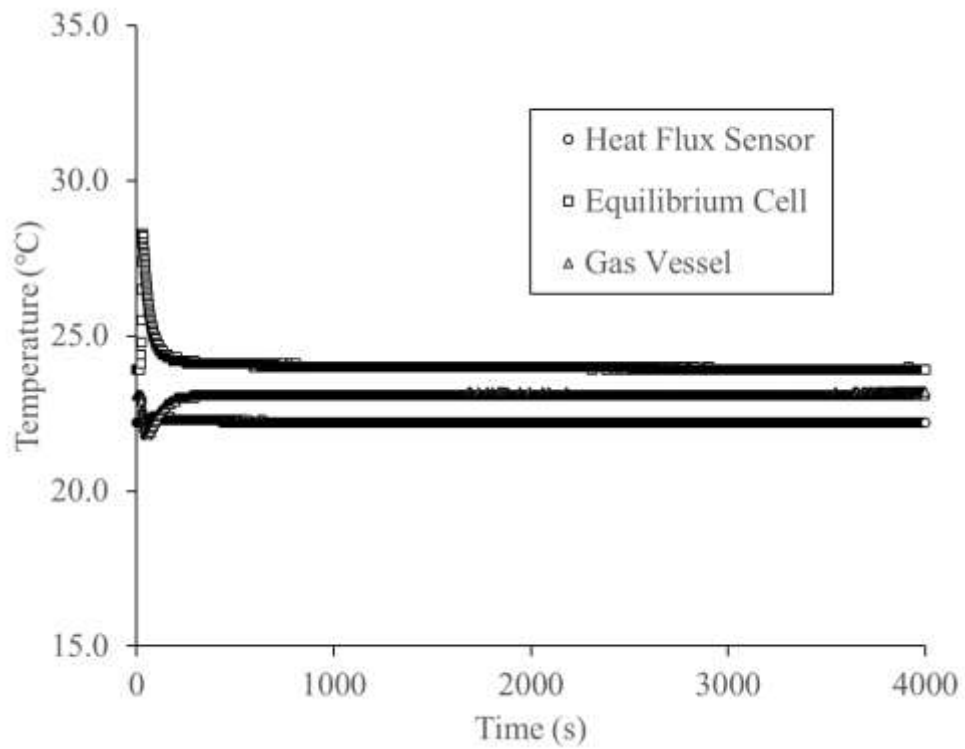


図 6.4 時間－温度

③恒温循環槽 25°C

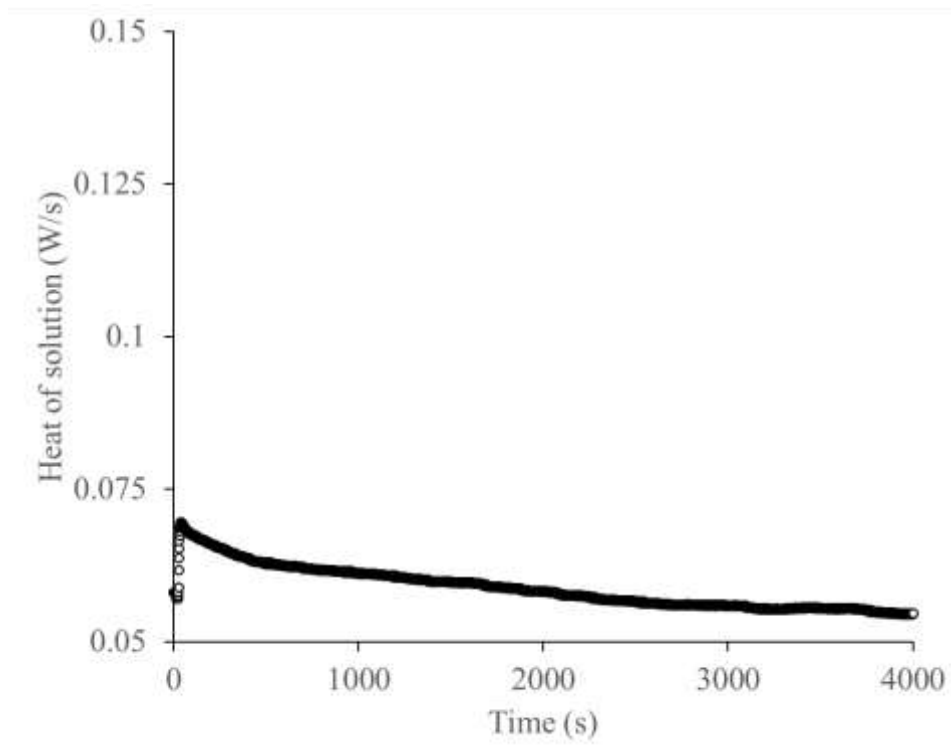


図 6.5 時間－熱流

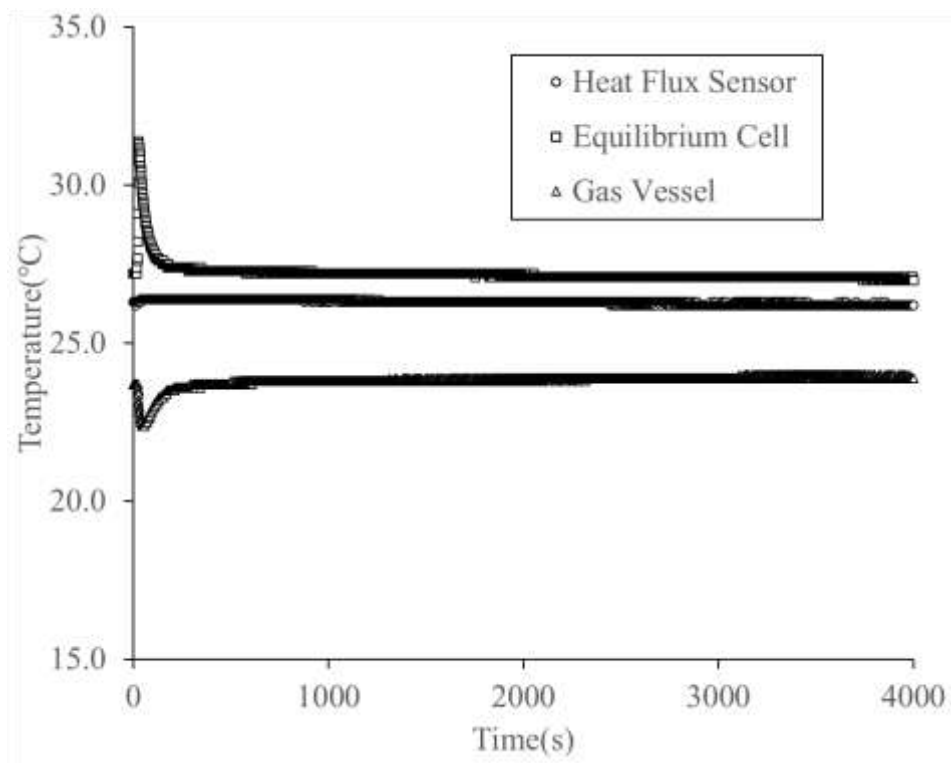


図 6.6 時間－熱流

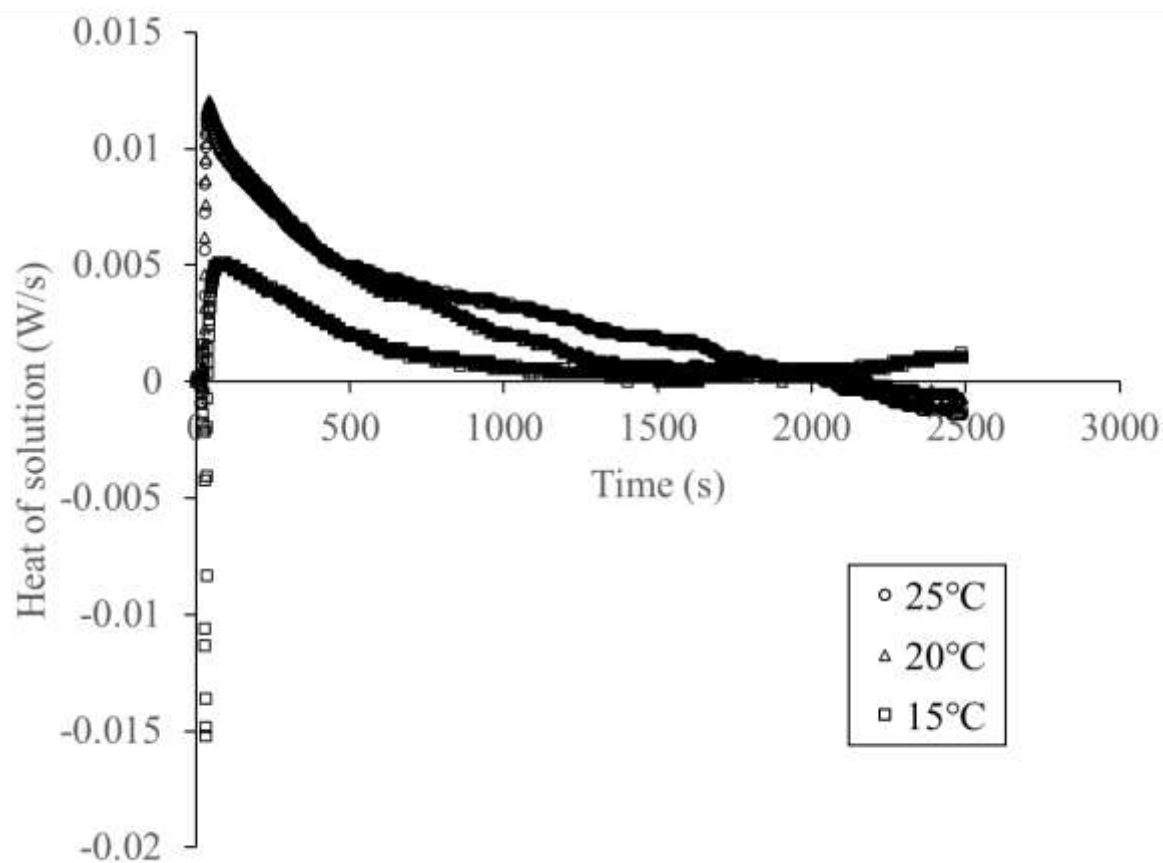


図 6.7 修正後の各温度での熱流比較