

京都大学大学院工学研究科

# 技術部報告集

(第21集)



2024年6月

# 目 次

1.	工学研究科技術部 組織	
1.1	沿革	2
1.2	組織図	3
2.	工学研究科技術部 研修	
2.1	2023 年度 工学研究科技術部 横断的研修 (2023.8.29)	5
2.2	2023 年度 工学研究科技術部 企画研修	6
	高压ガス施設見学研修 (2023.12.18)	
	量子計測技術に関する研修 (2024.1.19)	
2.3	2023 年度 工学研究科技術部 業務報告会 (2024.3.6)	7
2.4	2023 年度 工学研究科技術部 個人研修	8
3.	技術発表	
3.1	土木建築環境系技術研究会 2023 徳島大学 (2023.8.31-9.1)	10
	発表	
	モルタル圧縮試験用供試体の振動締固め方法の一提案	11
	地球建築系グループ 平野 裕一	
3.2	2023 年度機器・分析技術研究会 (2023.9.7-8)	13
	発表	
	植物繊維焼却灰試料の SEM-EDX 分析	14
	地球建築系グループ 平野 裕一	
3.3	九州地区総合技術研究会 2024 in 大分大学 (2024.2.29-3.1)	15
	発表	
	実習内容変更への取り組み	16
	機械工作系グループ 佐藤 佑樹	
	機械工作系グループ 石川 航佑	
	機械工作系グループ 玉木 良尚	
	機械工作系グループ 波多野 直也	
	技 術 室 佐藤 祐司	
	技 術 室 山路 伊和夫	
3.4	令和 5 年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会 (2024.3.7-8)	17
	発表	
	赤外線放射温度計を利用したコンクリート表面温度の測定	18
	地球建築系グループ 平野 裕一	
	京都大学桂キャンパス極低温施設での密閉式冷却塔の凍結トラブル	21
	共通支援グループ 多田 康平	
	共通支援グループ 西崎 修司	

液体ヘリウムリサイクル設備におけるヘリウム漏洩の原因と対策 .....	26
共通支援グループ	西崎 修司
共通支援グループ	多田 康平
3.5 2023 年度実験・実習技術研究会（2024.3.15） .....	32
<u>発表</u>	
ガラスビーズ破碎法を用いたパン酵母由来アルコールデヒドロゲナーゼの抽出方法の 改善.....	33
	化学電気系グループ 中池 由美
4. 技術部提供サービス	
4.1 技術部提供サービス宣伝パンフレット .....	36
4.2 桂ものづくり工房使用実績 .....	40
4.3 機械運転技術講習会 .....	41
4.4 大判プリンター使用実績 .....	42
4.5 物品貸出実績 .....	43
4.6 技術相談実績 .....	44
5. 会議記録	
5.1 会議記録 .....	46
編集後記 .....	48

1

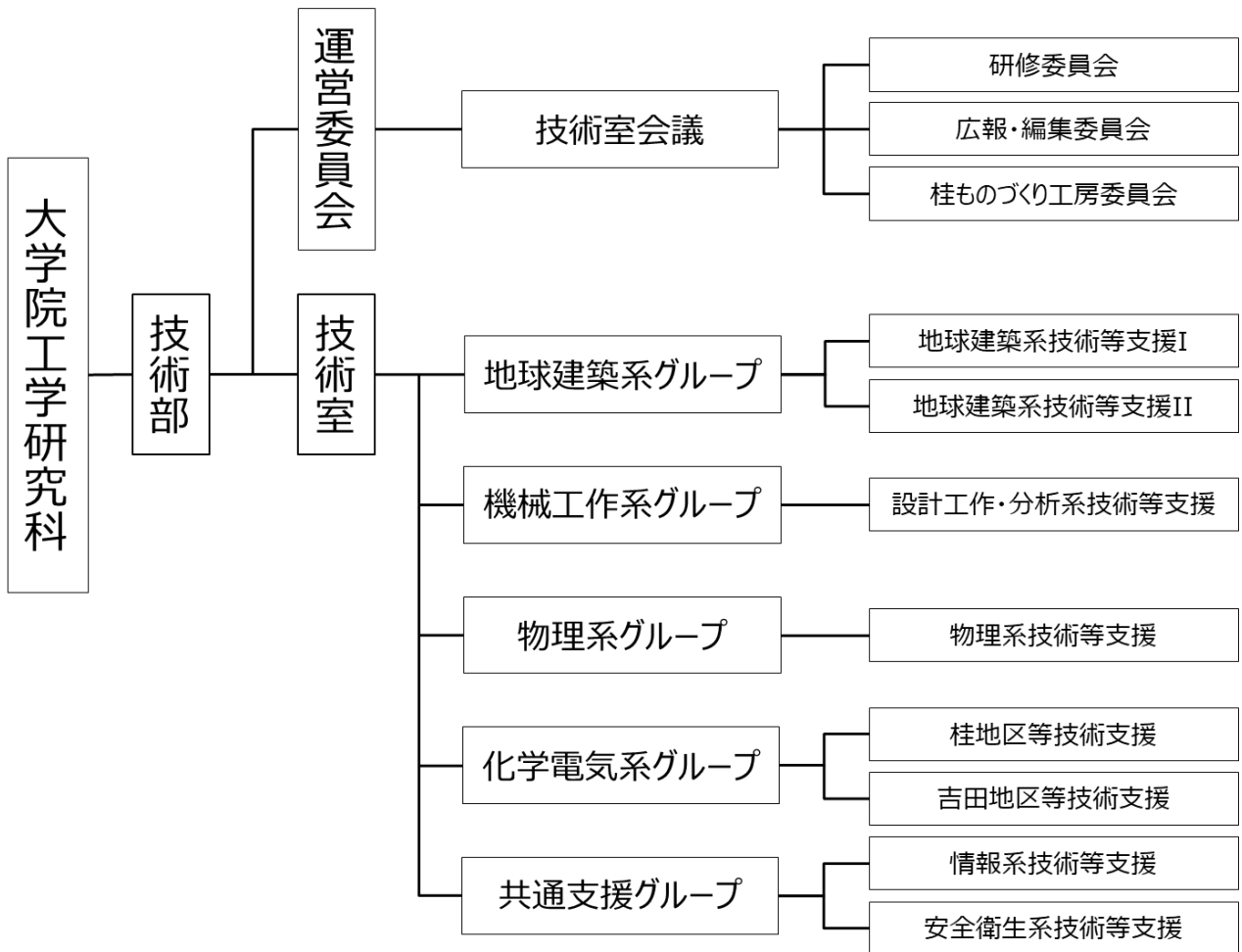
工学研究技術部  
組織

## 1.1 沿革

### 工学研究科技術部 沿革

1988年	12月	工学研究科技術研修 開始
1993年	9月	工学部・環境保全センター技術部 研修実行委員会発足
1997年	11月	工学部・環境保全センター技術部 編集委員会発足
1999年	5月	工学部・環境保全センター技術部 広報委員会発足
1999年	5月	工学部・環境保全センター技術部 技術職員連絡委員会発足
2003年	10月	桂キャンパス開学
2004年	4月	国立大学法人京都大学へ移行
2005年	11月	工学部技術職員研修実行委員会で工学部技術職員問題第1回W・G設置を検討
2006年	1月	工学部技術職員問題第1回W・G開催
2006年	8月	工学研究科技術職員シンポジウム開催
2007年	4月	工学研究科技術部発足, 5つの技術室設置 (総合建設, 設計・工作, 分析・解析, 情報, 環境・安全・衛生)
2007年	4月	工学研究科技術部第1回運営委員会開催
2008年	5月	工学研究科技術部報(現 工学研究科技術部便り) No.1 発刊
2008年	11月	桂ものづくり工房開設
2009年	4月	技術部主催新規採用技術職員研修開始 平成21年度工学研究科支出予算配当書に技術部予算が明記
2010年	2月	技術相談サービス開始
2011年	4月	分析・解析技術室を分析・物質科学技術室に名称変更
2011年	5月	物品貸出サービス開始
2015年	10月	工学研究科技術部改組, 5つのグループ設置 (地球建築系, 機械工作系, 物理系, 化学電気系, 共通支援)

## 1.2 組織図



2

工学研究技術部  
研修

## 2.1 2023年度 工学研究科技術部 横断的研修

### 掲示物・配布物作成研修

#### 開催日時

2023年8月29日（火） 9:00～16:30（16:30～17:00は任意参加）

#### 場所

桂キャンパス C クラスタ C3 棟 講義室 3 (b1S02)

#### 目的

教育研究支援を担う技術職員が学生に注意を促すなどの目的で掲示物・配布物等を作成する機会は多い。本研修でレイアウト・配色・文字の大きさなどを適切に選択するノウハウを学び、わかりやすく効果的な掲示物等を作成する技術を身につけることを目的とする。

#### 実施報告

昨年度の横断的研修は新型コロナウイルス感染拡大防止に配慮してオンラインでの実施でしたが、今年度は状況が落ち着いた事もあり、対面講義形式での実施となりました。午後から参加した1名を含めて20名が参加しました。参加者は4名1組でのグループに分かれて、講義の所々で意見交換を行いました。

講義の導入部では、自分自身で認識しているわかりやすい資料とわかりにくい資料を考えました。“わかりやすさ”とは受け取り手にとっての認識であることを理解したうえで、資料を作成する際にはいきなり作り出すのではなく、①資料作成の目的をはっきりとさせ、②情報を伝えたいターゲットを明確にし、③ターゲットによって資料の雰囲気を決め、④形にする、という手順を踏むことが大切であることを学びました。また、手元に残る配布物と一瞬しか目に入らないかもしれない掲示物では記載する内容が異なります。見出しの付け方では、掲示物では視線を集めるための「気になる一言」が重要で、配布物では「内容が一目でわかる一文」が重要になるとのことでした。

続いて効果的なレイアウトと配色について学びました。人が無意識で注目する場所や要素を上手く取り入れることで与える印象を変えることが出来ます。全体を九つのグリッドに分け、文字や図はZ字の動きとなるように配置を行うこと、図は文字とある程度連動するようなものを選択すること、情報量が多いと安っぽくなり、余白が増えると高級感が上がりやすいこと、写真の配置に関しては中央部からやや右側にずらすと安定感が増すこと、使用する文字の種類や大きさに関しては3種類に絞り、「書体、大きさ、太さ、空間」などに留意すること、罫線は使用せず空白を入れる手法もあること、文字と背景や作成する文章の意図などを考えて色相を意識して配色を考える等、多くの手法を知ることが出来ました。

これらを学んだ後、与えられたテーマに沿って受講者が実際に掲示物・配布物を作成しました。各自持参したPC上で思い思いに作成したものをグループで見比べ、お互いの改善点などを話し合った後、各グループからの代表者の作品をスクリーン投影してその主旨について説明して貰いました。同じ条件が与えられているにも関わらず様々な作品が出来てくるところに個性の豊かさを感じました。

また、追加研修時間には実際にものづくり工房で使用している掲示物を例に改善点を議論しました。講師から改善すべき箇所などのアドバイスをいただき終了となりました。



## 2.2 2023年度 工学研究科技術部 企画研修

### 1. 高圧ガス施設見学研修

#### 開催日時

2023年12月18日（月） 9:30～17:00

#### 場所

岩谷産業株式会社中央研究所、日本エア・リキード合同会社尼崎工場、エア・リキード工業ガス株式会社関西工場（兵庫県尼崎市）

#### 目的

高圧ガスの使用に際しては、高圧ガス保安法に則って、安全を確保することが重要である。圧縮ガスだけでなく、極低温寒剤（液体ヘリウム、液体窒素）などの液化ガスも高圧ガスに分類され、安全管理や利用者の安全教育が必要である。

本研修では、これら高圧ガスについての見識を深め、高圧ガスによる災害を防ぎ、高圧ガスによるトラブルに対応できるよう知識を集積させることを目的とする。

### 2. 量子計測技術に関する研修

#### 開催日時

2024年1月19日（金） 13:00～16:00

#### 場所

桂キャンパス B クラスタ 事務管理棟 桂ラウンジ、桂インテックセンター棟 竹内研究室

#### 目的

量子とは、粒子の性質と波の性質を併せ持った、極めて小さな物質やエネルギーの単位を指す。光子や電子などの量子は、複数の状態を同時にとる「量子重ね合わせ」や、2個以上の量子が互いに相関している「量子もつれ」といった、古典的粒子とは全く異なるふるまいを示す。「量子もつれ」が2022年のノーベル物理学賞を受賞したことも記憶に新しい。これらの量子の特異な性質を応用・制御することで、たとえば従来のコンピュータでは時間がかかりすぎて解けないとされてきた問題を解く「量子コンピュータ」の実現が期待されている。学生実験等を担当する技術職員に比較的身近と思われる所では、検出感度などで赤外より優位な可視領域の光学系を用いた「量子赤外分光」が実現しつつある。

本研修では、学生実験等を通して学生の育成を担う技術職員が、「量子計測技術」についての見識を深め、将来このような先端技術が実装された際にも対応できるよう知識を集積させることを目的とする。

## 2.3 2023年度 工学研究科技術部 業務報告会

### 開催日時

2024年3月6日（水） 13:30～16:15

### 場所

桂キャンパス Cクラスター C3棟 講義室1 (b1N01)

### 目的

技術職員の業務発表を通して技術職員同士の情報交換や技術交流を行い、技術力向上の一助とする。

### 実施報告

本報告会は、対面での開催となった。参加者は、横峯技術部長と工学研究科技術職員27名であった。3名の個人発表と室会議報告・各委員会報告を行った。(詳細は、下記【プログラム】参照)。

各個人発表後の質疑応答や、技術室に関わる報告を通じて、技術職員同士の情報交換や技術交流ができた。

#### 【プログラム】

13:30	開会挨拶 (個人発表)	技術部長	横峯 健彦
13:35	「3Dプリンタの現状と未来」	室長	山路 伊和夫
14:05	「工学研究科技術部のこれまで」	室長	佐藤 祐司
14:35	「環境安全衛生センターにおける業務について」 (委員会報告)	室長	日名田 良一
15:10	室会議報告	室長	山路 伊和夫
15:45	広報・編集委員会報告	委員長	塩田 憲司
15:50	研修委員会報告	委員長	波多野 直也
15:55	桂ものづくり工房委員会報告	委員長	日名田 良一
16:05	質疑応答		



写真. 技術部長からの開会挨拶

## 2.4 2023 年度 工学研究科技術部 個人研修

### 講習会・講座・技術研究会等への参加\*

- ・ 日本アイソトープ協会第 1 種オンラインセミナー (1 名)
- ・ 危険物取扱者保安講習 (1 名)
- ・ 2023 年度機器・分析技術研究会 (1 名)
- ・ 土木建築環境系技術研究会 2023 徳島大学 (3 名)
- ・ 令和 5 年度 (秋季) 放射線安全管理研修会 (1 名)
- ・ 大学 ICT 推進協議会 2023 年度年次大会 (3 名)
- ・ Bruker ユーザーズミーティング (1 名)
- ・ 第 35 回高分子学会 NMR 講座 (1 名)
- ・ 工具研削実践技術セミナー (1 名)
- ・ Internet Week 2023 (1 名)
- ・ 京都大学技術士会第 11 回大会 (1 名)
- ・ ラマン分光の基礎と応用事例セミナー (1 名)
- ・ 光化学応用講座 2023 (1 名)
- ・ 第 23 回迷惑メール対策カンファレンス (1 名)
- ・ 第 49 回技術士全国大会 (1 名)
- ・ NMR 法による高分子材料の構造・ダイナミクス解析と物性評価セミナー (1 名)
- ・ 高圧ガス施設見学研修 (3 名)
- ・ HORIBA 深さ方向元素分析装置 GD-OES セミナー 基礎から応用まで (1 名)
- ・ 令和 5 年度 (春季) 放射線安全管理研修会 (1 名)
- ・ マシニングセンタプログラミング技術講習 (1 名)
- ・ 表面分析研究会第 61 回研究会 (2 名)
- ・ 高エネルギー加速器研究機構技術研究会 (1 名)

※：工学研究科技術部予算での参加のみを記載。

### 図書購入

- ・ 「#MakeoverMonday: Improving How We Visualize and Analyze Data, One Chart at a Time '18」、著者：Andy Kriebel, Eva Murray、出版社：Wiley

3

技術発表

### 3.1 土木建築環境系技術研究会 2023 徳島大学

#### 発表

題 目：モルタル圧縮試験用供試体の振動締固め方法の一提案

所属・氏名：地球建築系グループ 平野 裕一

# モルタル圧縮試験用供試体の振動締固め方法の一提案

平野 裕一

京都大学工学研究科技術部

## 1. はじめに

主にモルタル圧縮試験用の供試体の作製において、直径 50mm、高さ 100mm の円筒状のブリキ製使い捨て型枠（図 1、以下、「円筒型枠」）を用いている。締固めの際、型枠の直径が小さいことから従来の棒突きや内部振動機による締固めはできず、欠陥のない供試体外観に仕上げるための締固めは困難であった。

そこで、セメント強さ試験（JIS R 5201：2015）用のテーブルバイブレータ（図 2）に自作のアタッチメントを取り付け、テーブルバイブレータの振動によって締固めすることを試みた。

## 2. アタッチメントの制作

図 2 に示すテーブルバイブレータはセメント強さ試験供試体用型枠（図 3）用のものであり、専用の固定用の治具が据付けられている。そこでまず、その治具を避けながら合板（ $t=12$  程度）に切り込みを入れ、円筒型枠の位置を固定できるよう直径 54.5mm 程度の穴を開けた（図 4）。これは振動中に横にずれることを防ぐものである。なお、円筒型枠の外径は 52.5mm 程度である。今回制作したものは 26 個の穴を開け、同時に 25 体の締固めが可能である（図 5）。

振動中に円筒型枠に詰めたモルタルがこぼれないようにするため合板で蓋を製作した（図 6）。ここでは、円筒型枠の上限までモルタルを詰めた状態で振動を与えることを考えている。そこで、テーブルバイブレータ付属の治具に引っ掛けて合板の蓋を固定するためのアングルを製作し（図 7）、円筒型枠の上面を密閉できるようにした。

## 3. 締固め方法の違いによる圧縮強度の比較の一例

### 3-1 試験方法

使用材料は、早強セメント、標準砂、セメント：砂=1：3、W/C=50%のモルタルとした。練混ぜは、機械練り用練混ぜ機を用い、セメントの強さ試験と同様の方法とした。



図 1 円筒型枠



図 2 テーブルバイブレータ



図 3 セメント強さ試験  
供試体用型枠



図 4 位置固定用の合板



図 5 円筒型枠を設置した様子



図 6 合板の蓋



図 7 蓋固定用アングル

従前の締固め方法として、円筒型枠の径に対し小さな径の突き棒による締固め、または、数 cm 持ち上げて強固で水平な床の上にたたくように落下させるジッキングによる締固めが考えられた。そこで、今回提案のテーブルバイブレータによる締固めとの圧縮強度の比較を検討した。これらの締固め方法に、締固めをしないで型枠に詰めるだけの方法を加え、表 1 に示す 4 種類の締固め方法により圧縮試験を実施した。

締固めなしの方法では、モルタルの自重による沈下を考慮しモルタルを円筒型枠からあふれるまで入れた。

ジッキングによる方法では、モルタルを円筒型枠の 1/2 まで入れ、床から 5cm 程度持ち上げて強固で水平な床の上に 25 回たたくように落下させ、次に次に円筒型枠からあふれるまでモルタルを入れて、同様に 25 回落下させ、最後に不足分のモルタルを加え、円筒型枠の上面にそってならした。

棒突きによる方法では、モルタルを円筒型枠の 1/2 まで入れ、φ6 の鋼棒で均等に 25 回突き、次に円筒型枠からあふれるまでモルタルを入れて、同様に 25 回突き、最後に不足分のモルタルを加え、円筒型枠の上面にそってならした。

テーブルバイブレータによる方法では、モルタルを円筒型枠からあふれるまで入れ、前記アタッチメントを取り付けたテーブルバイブレータにより 120 秒間の振動を与えた。振動後に不足分のモルタルを加え、円筒型枠の上面にそってならした。

翌日に脱型後、28 日間の水中養生を経て、供試体端面を研磨により成形し、圧縮試験を実施した。なお、それぞれの方法で 1 体ずつの試験とした。

### 3-2 試験結果

脱型後の供試体外観を図 8 に示す。締固めなし以外の方法の供試体では同等程度の外観である。テーブルバイブレータによる方法は、ジッキングおよび棒突きによる方法と比べ、表面の気泡がやや少なくなった。

圧縮強度の比較を図 9 に示す。テーブルバイブレータによる方法は、ジッキングによる方法と比べ 38% 程度、棒突きによる方法と比べ 23% 程度大きな値となった。締固めなしの方法は、テーブルバイブレータによる方法の半分程度の値であった。

この結果から、テーブルバイブレータによる方法はジッキングおよび棒突きによる方法と比べ、締固めが十分になされ供試体内部の空隙による欠陥が少なくなったことにより圧縮強度が大きくなったと考えられる。

## 4. おわりに

テーブルバイブレータによる振動締固め方法を用いることで、従前の締固め方法と比べ、内部欠陥がより少ない供試体の作製が可能になった。

また、テーブルバイブレータには 120 秒で自動的に電源が切れる機能が付いている。この機能を使用することによりモルタル圧縮試験用供試体の作製における締固めにおいて、安定的かつ定量的な振動を与えることが可能になった。

表 1 比較する締固め方法

締固めなし
ジッキング
棒突き
テーブルバイブレータ (T.V.)



図 8 脱型後の供試体外観

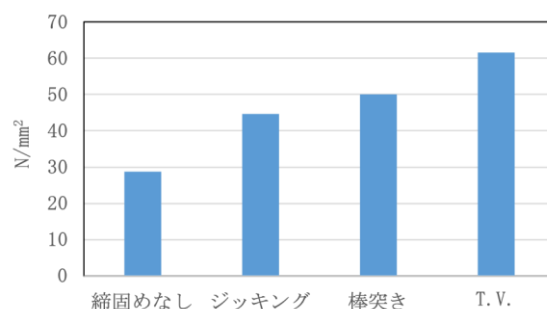


図 9 圧縮強度の比較

## 3.2 2023 年度機器・分析技術研究会

### 発表

題 目：植物繊維焼却灰試料の SEM-EDX 分析

所属・氏名：地球建築系グループ 平野 裕一



# 植物繊維焼却灰試料の SEM-EDX 分析

平野 裕一

京都大学大学院工学研究科技術部

## 1. はじめに

コンクリートの構造物や製品を製作する際に、廃棄物由来の材料を混ぜ合わせて用いることで廃棄物の削減および有効利用を目指す試みが各方面でされている。今回、精糖過程で生じるサトウキビ残渣の有効利用を目的とする研究の中で、サトウキビ残渣の焼却灰の SEM-EDX による分析を実施した。

## 2. 分析対象

今回使用した材料は、炉の中に上からサトウキビ残渣を徐々に自由落下させながら燃焼させ、炉の底面に残った焼却灰である。この方法では、焼却灰は十分な燃焼がされていない。なお、残渣の処理に関し、焼却方法は決まった方法があるわけではない。

## 3. SEM 観察

試料台にカーボンテープを貼り付け試料を上から押さえつけ、接着しない試料は叩き落とした。図 1 にサトウキビ残渣の焼却前および焼却灰の SEM 画像を示す(加速電圧 2 kV)。焼却灰試料の微細構造は不規則な形状をしている。サトウキビ残渣の焼却前の SEM 画像を見ると丸みがあった形状および角張った形状の膨らみが確認でき、焼却後に不規則な形状ができる原因のひとつになっていると考えられる。十分に燃焼されていないことから、元の形状が比較的残りやすいと考えられる。

## 4. SEM-EDX 分析

焼却灰の図 1 右の画像領域全体に SEM-EDX 分析をした。得られた原子数の割合を表 1 に示す。存在する原子のうち、炭素原子は元の植物の不完全燃焼分およびカーボンシートであると考えられ、酸素原子は元の植物の不完全燃焼分および金属原子の酸化物であると考えられる。それらの原子が何の化合物由来であるかを SEM-EDX では識別することができない。また燃焼の度合いによっても原子数比が変わると考えられる。これら金属原子は単体で存在せず、燃焼の度合いの影響を打ち消すため、構成する物資の組成を原子数比ではなく、炭素原子および酸素原子を除き原子が完全燃焼されたと仮定した上での、それぞれの酸化物分子数の割合として表すこととした。まず、それぞれの原子の酸化物を仮定し、当該 1 原子当たりの酸化物分子量と当該原子の原子量の比を算出した(表 2)。次に、表 1 から炭素原子および酸素原子を除き、それぞれの原子数比に表 2 の比を乗じた。最後に全体が 100%になるようにした(表 3)。なお、計算における原子量は文献<sup>1)</sup>を用いた。

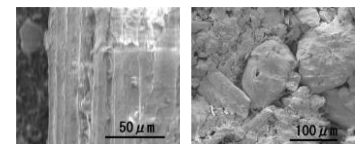


図 1 SEM 画像

(左:サトウキビ残渣の焼却前  
×1000、右:焼却灰×500)

表 1 原子数比

atom	abundance ratio
O	48.74
C	29.38
Si	13.45
Al	1.88
K	2.28
Ca	1.96
P	0.77
Mg	0.93
Fe	0.60

表 2 当該 1 原子当たりの  
分子量・原子量比

atom	molecular	molecular weight per the one atom / atom weight
Si	SiO <sub>2</sub>	2.1393
Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.8895
K	K <sub>2</sub> O	1.2046
Ca	CaO	1.3992
P	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2.2914
Mg	MgO	1.6583
Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.4297

表 3 酸化物

分子数比

molecular	abundance ratio
SiO <sub>2</sub>	68.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.46
K <sub>2</sub> O	6.54
CaO	6.53
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4.20
MgO	3.67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.04

## 5. おわりに

不完全燃焼分の焼却灰の構成する物質の組成比を表すひとつの方法を提案した。

## 参考文献

1) 日本化学会 原子量専門委員会:原子量表(2017)

### 3.3 九州地区総合技術研究会 2024 in 大分大学

#### 発表

題 目：実習内容変更への取り組み

所属・氏名：機械工作系グループ 佐藤 佑樹  
機械工作系グループ 石川 航佑  
機械工作系グループ 玉木 良尚  
機械工作系グループ 波多野 直也  
技 術 室 佐藤 祐司  
技 術 室 山路 伊和夫

# 実習内容変更への取り組み

○佐藤 佑樹, 石川 航佑, 玉木 良尚, 波多野 直也, 佐藤 祐司, 山路 伊和夫  
京都大学 工学研究科 技術部

## 1. 背景

機械システム学コースの2年生を対象とした機械製作実習では、学生が旋削・転削・穴あけ加工など、機械加工の基礎を経験し、工作機械、計測、加工精度などの知識を得るとともに、安全やものづくりに関する全般的な知識を習得することを目的としている。機械製作実習の課題製作において、以前行っていたスターリングエンジン（図1）の製作には、熱エネルギーを高効率で仕事に変換するために精密な加工が要求される点や、製作した物を動かすことで実践的な学びが得られる点、熱力学の勉強にもなるといった特徴があったが、学生の理解度の向上や機械加工・工作機械への知識・関心を広げるために、実習内容の変更に取り組んだ。本稿では、取り組んだ実習の変更内容について報告する。

## 2. 変更内容

新しい取り組みでは、機械加工の基礎を重点的に学べる実習課題スマートデバイススタンド（図2）に変更した。実習当日の理解度を向上させるために、各工作機械の使用方法和製作工程に関する動画を製作し、事前に学習できるようにした。また、課題製作とは別に、ベアリングのシャフト製作を取り入れ、精密な加工を経験できるようにし、ベアリングの仕組みを理解するために組付け作業を取り入れた。さらに、材料の機械的特性を学び実際に加工することにより、加工性の違いを経験する事や、他の最新の加工技術を学ぶため、5軸マシニングセンタ、金属3Dプリンタ、平面研削盤、ワイヤ放電加工機などの実演を行う総合学習を新たに導入した。

## 3. 結果

内容変更後のアンケート結果や実習中の学生からの意見を聞くと、事前に動画学習を行ったことで実習当日の理解度が増した、学業のモチベーションや工作機械への興味が増した、工作機械の使用方法和総合学習において実機の実演を見学することで授業内容の理解が深まった、といった高評価が得られた。今後も環境の変化に柔軟に対応しながら、より良い実習の内容を検討していくことが重要である。



図1 スターリングエンジン



図2 スマートデバイススタンド

### 3.4 令和5年度高エネルギー加速器研究機構技術研究会

#### 発表

題 目：赤外線放射温度計を利用したコンクリート表面温度の測定

所属・氏名：地球建築系グループ 平野 裕一

題 目：京都大学桂キャンパス極低温施設での密閉式冷却塔の凍結トラブル

所属・氏名：共通支援グループ 多田 康平

共通支援グループ 西崎 修司

題 目：液体ヘリウムリサイクル設備におけるヘリウム漏洩の原因と対策

所属・氏名：共通支援グループ 西崎 修司

共通支援グループ 多田 康平

# 赤外線放射温度計を利用したコンクリート表面温度の測定

平野裕一

京都大学大学院工学研究科技術部

## 概要

植物性の繊維を混ぜ合わせたコンクリートで考えられる性質のひとつとして、保水効果がある。その性質を利用し地表面温度の低減効果を狙い、歩道用コンクリートブロックとして用いることを検討したいと考えた。そこで、複数の試験体を同時に同条件で測定する方法を考えた。本稿では、その試験方法および赤外線放射温度計を用いてコンクリート表面の温度変化を計測した結果の一例を紹介する。試験結果として、歩道用コンクリートブロックの地表面温度の低減効果を一定程度確認できた。また、試験体表面温度を測定する上で、赤外線放射温度計とサーモグラフィカメラの使い分けが必要になることが把握できた。

## 1. はじめに

一般的に、コンクリートの大部分は砂や石から成り立っている。

コンクリートの構造物やコンクリート製品を製作する際に、産業上の副産物や焼却灰などの、廃棄物由来の材料または廃棄物自体を混ぜ合わせて用いることで、廃棄物の最終処分量の削減および有効利用を目指す試みが各方面でなされている。

また、コンクリート材料として廃棄物由来の材料を一部の砂や石と置き換えて混ぜ合わせることで、有限の天然資源である砂や石の使用量削減にもつながり、採掘量が減ることで生態系の維持にも貢献できると考えられる。

近年、化石燃料の代替としてバイオエタノールが注目されている[1]。その原料であるサトウキビの精糖過程で生じる残渣の有効利用を目的とする研究の中で、サトウキビ残渣自体およびその焼却灰をコンクリート材料として用いることを検討している。

サトウキビ残渣の有効利用の方法のひとつとして、歩道用コンクリートブロックの材料に用いることが考えられている。

サトウキビ残渣は植物性の繊維であり、水分を保持する性質があると考えられる。歩道用コンクリートブロックの中に植物性の繊維が含まれることで歩道用コンクリートブロック自体の保水性が高まり、水分の蒸発による気化熱により地表面温度の低減が期待できると考えられる。

加えて、歩道用コンクリートブロックに植物性繊維を多く入れることで、歩道用コンクリートブロックの表面に柔軟性が生じ、歩行時の足への衝撃を軽減できると考えられる。

今回、植物性の繊維を混ぜ合わせた歩道用コンクリートブロックで考えられる性質のひとつである、地表面温度の低減効果を検討した。

本稿では、歩道用コンクリートブロックの地表面温度の低減効果の検討のために考案した試験方法を紹介する。また、赤外線放射温度計を用いてコンクリート表面の温度変化を計測した結果の一例を紹介する。

## 2. 赤外線放射温度測定の方法

あらゆる物体は、その表面から赤外線を放射している。放射される赤外線エネルギーは温度が高くなるほど増加する。空間を伝わる赤外線エネルギーを検出することで、非接触により温度を測定することができる。

一方、放射率は物体の特性、表面状態、反射率等に影響されるため、適切な設定が必要になる。材質に対応した放射率は操作マニュアルに記載されているものもあるが、表面状態や温度により異なるため、必要に応じて、接触式温度計等で表面温度を計測し、赤外線放射温度計が同じ温度を示すように放射率を調整することが望ましい[2]。

また、測定する温度は距離に応じた円形領域の平均温度であり、測定対象との距離が離れるほど測定する面積が広くなるため、測定対象の大きさに応じた適切な測定距離の設定が必要になる[2]。

加えて、周辺温度が急激に変化した場合は、測定精度に影響があるため、数十分程度機器を同環境下に置いておく必要がある。

このように、精度の高い測定をするためには、測定対象の物体や使用する赤外線放射温度計の特性を把握して測定することが重要である。

## 3. 試験方法の検討

試験の目的である歩道用コンクリートブロックの地表面温度の低減効果の検討は、当初、実験室内で実施することを考えていた。当初の計画は、縦300×横300×高さ60mmのコンクリートブロックの試験体を製作し、室内の断熱された空間の中で複数台吊りした500Wのハロゲンライトにより熱を加え、表面温度の推移をコンクリート表面に接触させた熱電対により測定することを考えていた。

しかし、試験を進めた際に次のような問題が判明し、試験方法を再検討した。

- ハロゲンライトでは、ひとつひとつの試験体において表面を均一に照射させることが難しく、温度上昇にムラができること。
- 複数の試験体を並べて置いた際に、端に近い試験体と中央付近の試験体とではハロゲンライト

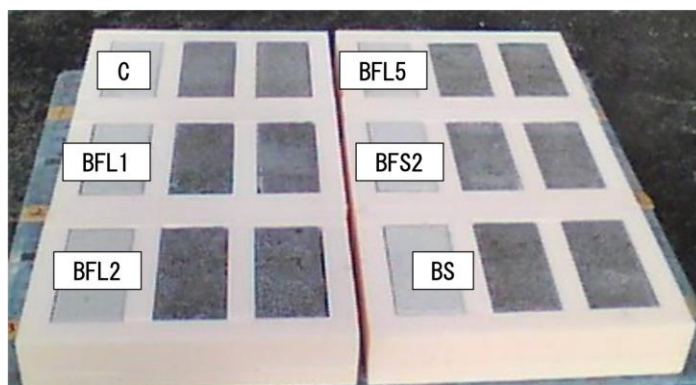


図1. 試験体の外観

から受ける熱が異なり、試験体間の照射条件をそろえることが困難であったこと。

- コンクリート表面に接触させた熱電対では、熱源から直接与えられた熱による温度上昇か、試験体の温度上昇かの判別が困難であったこと。

検討の結果、次章に示す試験体寸法に変更し、熱源は太陽光を利用することとした。また、表面温度測定は非接触の方法とした。

#### 4. 試験内容

縦 200×横 100×高さ 60 mm のコンクリートブロックの試験体を製作した。詳細な配合の紹介は本稿では割愛するが、セメントと水の量は一定として、砂と石を数種類の植物性繊維と一部を置き換え、その割合を変えた 5 種類の試験体および比較用に通常のコンクリートのみの試験体を用意した。試験条件を表 1 に示す。大きめの繊維は 10 mm ふるいを通過し 5 mm ふるいを通過しないもの、小さめの繊維は 5 mm ふるいを通過し 2.5 mm ふるいを通過しないもの、繊維灰は 1.2 mm ふるいを通過し 0.3 mm ふるいを通過しないものこという。

試験体を図 1 に示すように、試験体表面以外の面からの熱移動および試験体間の熱移動の影響を受けないようにするため、表面以外の 5 面をそれぞれ発泡ポリエチレンで覆った。試験体の外周の厚みおよび試験体間の発泡ポリエチレンの間隔は 40 mm である。図 1 の左から 1 列目と 4 列目の色が異なる試験体は、別の検討のものであり本稿では割愛する。上から 1 行目の左から 2 列目、3 列目が C、上から 2 行目の左から 2 列目、3 列目が BFL1、上から 3 行目の左から 2 列目、3 列目が BFL2、上から 1 行目の左から 5 列目、6 列目が BFL5、上から 2 行目の左から 5 列目、6 列目が BFS2、上から 3 行目の左から 5 列目、6 列目が BS である。

試験体を測定日より前から 24 時間以上、水中に浸漬させ、計測開始直前に取り出し、屋外の直射日光が当たる場所に水平に設置した。測定日の午前 9 時から午後 4 時までの 30 分毎に、ハンディタイプの赤外線放射温度計で試験体ごとに 3 回ずつ測定し、平均値を測定値とした。赤外線放射温度計と試験体と

表 1. 試験条件の概要

記号	概要
C	比較用の通常のコンクリート
BFL1	骨材の 1%を大きめの繊維で置換
BFL2	骨材の 2%を大きめの繊維で置換
BFL5	骨材の 5%を大きめの繊維で置換
BFS2	骨材の 2%を小さめの繊維で置換
BS	骨材の 5%を燃焼後の繊維灰で置換

の距離は約 1.5 m で、鉛直上から試験体に赤外線放射温度計を向けて測定した。本測定前に、温度がわかっているコンクリート片に対する同距離からの測定で、測定値に問題がないことを確認した。

また、赤外線放射温度計とは別の機器であるサーモグラフィカメラで、測定日の午前 9 時（測定開始直後）および午後 4 時（7 時間後）における試験体表面全体の温度分布を測定した。

#### 5. 測定結果の一例

測定結果の一例[3]として、コンクリート表面温度の遷移を図 2 に示す。

計測開始直後にコンクリート表面温度が周辺温度より低い理由は、試験体を屋内の水槽に浸漬させていたからである。

その後、直射日光の照射時間の経過に伴い、コンクリート表面温度が上昇した。測定開始から 3 時間経過したころにピークとなった。植物性繊維を含んだ試験体のコンクリート表面の温度はさらに 1 時間経過後から低下し始め、比較用の通常のコンクリートの表面温度に対し、最大で 5°C 程度の温度低下が確認された。繊維の混入率が高いほど、温度低下が大きい傾向が確認された。

次にサーモグラフィカメラで測定した測定日の測定開始直後および 7 時間後における試験体表面全体の温度分布をそれぞれ図 3、図 4 に示す。



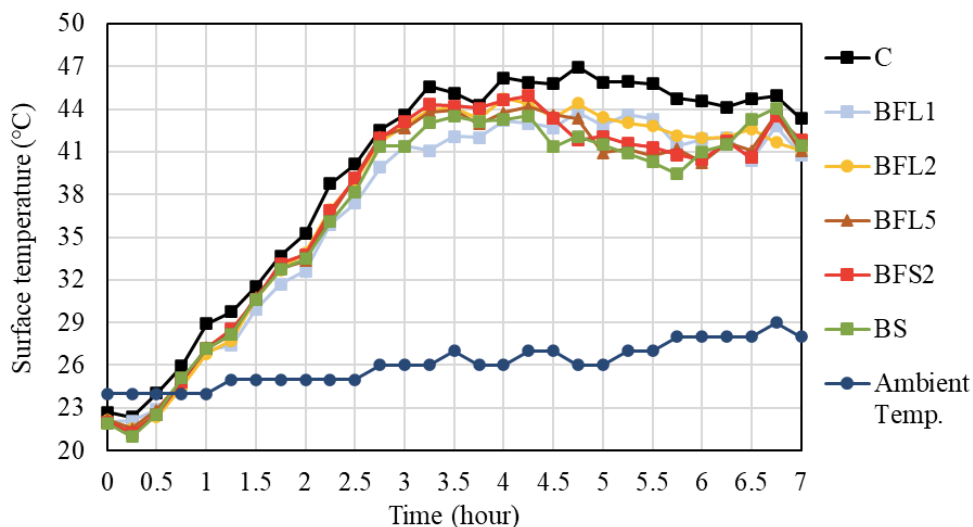


図2. コンクリート表面温度の推移[3]

試験体表面の温度上昇が確認できた一方で、断熱材である発泡ポリエチレンに接する試験体辺縁部は温度上昇が抑えられていた。発泡ポリエチレンは日射時間に関係なく温度変化がほとんどなかったことが確認された。

サーモグラフィカメラでの測定では、試験体表面全体の温度分布が把握できるものの、色毎の温度帯の幅があるために詳細な温度測定が困難であり、数°Cの温度差を確認することができなかった。サーモグラフィカメラの性能にもよるが、赤外線放射温度計との使い分けが重要であると考えられる。

## 6. おわりに

本稿では、歩道用コンクリートブロックの地表面温度の低減効果の検討のため、複数の試験体を同時に同条件で測定する試験方法を紹介した。

この試験方法により植物性の繊維を混ぜ合わせた歩道用コンクリートブロックの表面温度を測定し、その低減効果を一定程度確認できた。

また、試験体表面温度を測定する上で、赤外線放射温度計とサーモグラフィカメラの使い分けが必要になることが確認された。

## 参考文献

- [1] 例えば、輸送用エコ燃料の普及拡大について バイオ燃料, 環境省, 2006.5 (2023.11.26 閲覧)  
[https://www.env.go.jp/earth/ondanka/biofuel/materials/re\\_p\\_h1805.html](https://www.env.go.jp/earth/ondanka/biofuel/materials/re_p_h1805.html)
- [2] 例えば、放射温度センサの基礎, キーエンス (2023.11.6 閲覧)  
<https://www.keyence.co.jp/ss/products/recorder/lab/thermometry/radiation.jsp>
- [3] Ribeiro Bruno: Study of Effective Use of Sugarcane Residue as Eco-friendly Construction Materials for Disaster Prevention Structures, A doctoral thesis at Kyoto University, p.120, March 2021

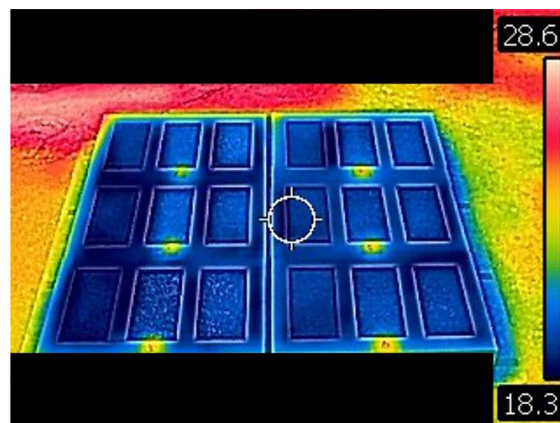


図3. 試験体表面全体の温度分布 (測定開始直後)

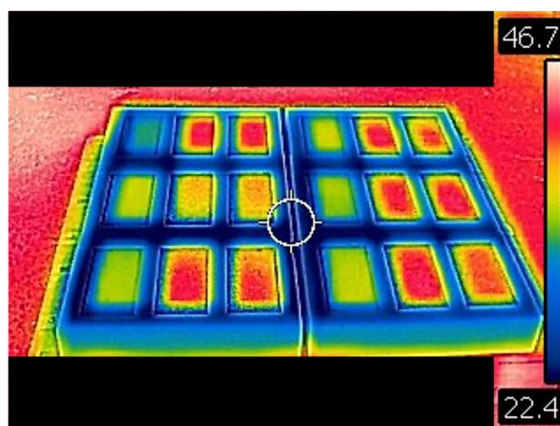


図4. 試験体表面全体の温度分布 (7時間後)

## 京都大学桂キャンパス極低温施設での密閉式冷却塔の凍結トラブル

○多田康平<sup>#, A), B)</sup>、西崎修司<sup>A), B)</sup>

<sup>A)</sup>京都大学 大学院工学研究科 附属桂インテックセンター

<sup>B)</sup>京都大学 環境安全保健機構 低温物質管理部門

### 概要

京都大学桂キャンパス極低温施設には、ヘリウム液化供給システムの複数の被冷却機器の水冷のため、密閉式冷却塔が設置されている。令和5年1月下旬の寒波の際に密閉式冷却塔の複数の部品が凍結破損した。一時的には被冷却機器を運転できない状況に陥ったが、応急措置とその後の修理対応によってヘリウム損失などの重大な問題に発展することなく復旧させることができた。本稿では、凍結破損の状況、応急措置と修理対応、今後の対策等について述べる。

### 1. はじめに

京都大学桂キャンパス極低温施設は、桂キャンパス所属の部局（おもに大学院工学研究科）に対して、液体ヘリウム、液体窒素および窒素ガスを供給している。近年の年間供給量としては、液体ヘリウムが約2万リットル、窒素（液体窒素および窒素ガス）が液体換算で約25万リットルとなっている。

桂キャンパスに設置されているヘリウム液化供給システムのうち液化用ヘリウム圧縮機（Kaeser, DSD201）、ヘリウム液化機（Linde, L140）、回収用ヘリウム圧縮機（加地テック, WH5A-15G）の稼働には水冷を要するため、ヘリウム液化供給システムには、密閉型冷却水循環設備（空研工業, KMC-40S、以下「密閉式冷却塔」と呼ぶ。）が組み込まれている。ヘリウムの液化および回収の要となる複数の機械が水冷を要するため、ひとたび密閉式冷却塔が稼働できなくなると学内のヘリウムサイクルに多大な影響を与えることになる。

### 2. 密閉式冷却塔の仕組みと構造

図1に我々の密閉式冷却塔の概略図を示す。（一部の部品や配管等は省略してある。）この図を用いて、密閉式冷却塔の仕組みと構造を概説する。

冷却塔とは、被冷却機器を冷却するための流体（我々の施設の場合は冷却水）を冷却しながら、この冷却水を被冷却機器へ循環的に送り込む設備である。密閉式冷却塔の場合は、冷却水は密閉配管の中で循環し、基本的に外気と直接触れ合わないため、冷却水や配管内が汚染されにくいという利点がある。

循環水ポンプによって被冷却機器へ送り出された冷却水は、機器を冷却した際の熱交換によって温められて密閉式冷却塔へ戻ってくる。銅管でできたコイルと呼ばれる熱交換器の中を流れるあいだに、冷却水はコイル管壁を介して外気と熱交換し、冷却される。散水ポンプを用いて散布水を散布し、送風機で強制的に誘引された外気と散布水が接触することで散布水の蒸発が促進され、その気化熱を利用して、冷却水を冷却する効率を高めている。さらに、コイルの周囲は充填材と呼ばれる構造物で覆われており、散

布水と外気が効率よく接触するよう、表面積が大きくなるように工夫されている。散布水は密閉式冷却塔の下部水槽に開放的に溜められている。日常的な蒸発などによって散布水量が少なくなると上水道から自動的に給水し、逆に降雨などによって散布水量が多すぎると自動的にオーバーフロー配管から水を排出することで、常に一定量の散布水が溜められるようになっている。

冷却水は密閉配管内を循環しながら、水温の上下を繰り返している。この温度変化に伴う冷却水の比体積や圧力の変化を吸収するため、密閉式冷却塔の最上部に膨張タンクが設置されている。冷却水の比体積の増加や圧力の上昇が起こると、それに応じて膨張タンクの水位が上昇する。上昇しすぎた水はオーバーフロー配管から自動的に排出される。一方、冷却水の比体積の減少や圧力の下降あるいは日常的な蒸発などによって膨張タンクの水位が下降すると、上水道から自動的に給水される。膨張タンクのメンテナンス等のときには、手動バルブで強制的に排水することもできる。

外気温の低い冬期に銅管コイル内で冷却水が凍結膨張すると、コイルが破損するおそれがある。この破損を予防するため、コイルの出入口にバイパスラインを設け、凍結防止ポンプを設置している。この凍結防止ポンプを稼働させることで、コイル内で冷却水を循環させ、熱負荷をかけた状態にすることで、コイル内での冷却水の凍結とそれに伴うコイルの破損を防ぐことができる。

### 3. 寒波の状況と密閉式冷却塔の被害

図2に令和5年1月下旬の京都市の気温のグラフを示す。実線は桂キャンパス（京都市西京区）のヘリウム液化供給システムのヘリウム長尺カードルの温度計の実測値、破線は気象庁のホームページ [1] から取得した京都市の気温データである。両者の間に数度程度の違いはあるものの、全体的なトレンドは一致している。1月の標準的な京都市の気温としては、最低気温が0～5℃程度、最高気温が5～10℃程度である。寒波が到来したのは令和5年1月24日（火）であった。桂キャンパス周辺ではこの日の午後3時ごろから激しく吹雪き、数時間もたないうちに雪が積もった。通勤通学者の帰宅時間帯に重なり、路線

# tada.kohei.6c@kyoto-u.ac.jp



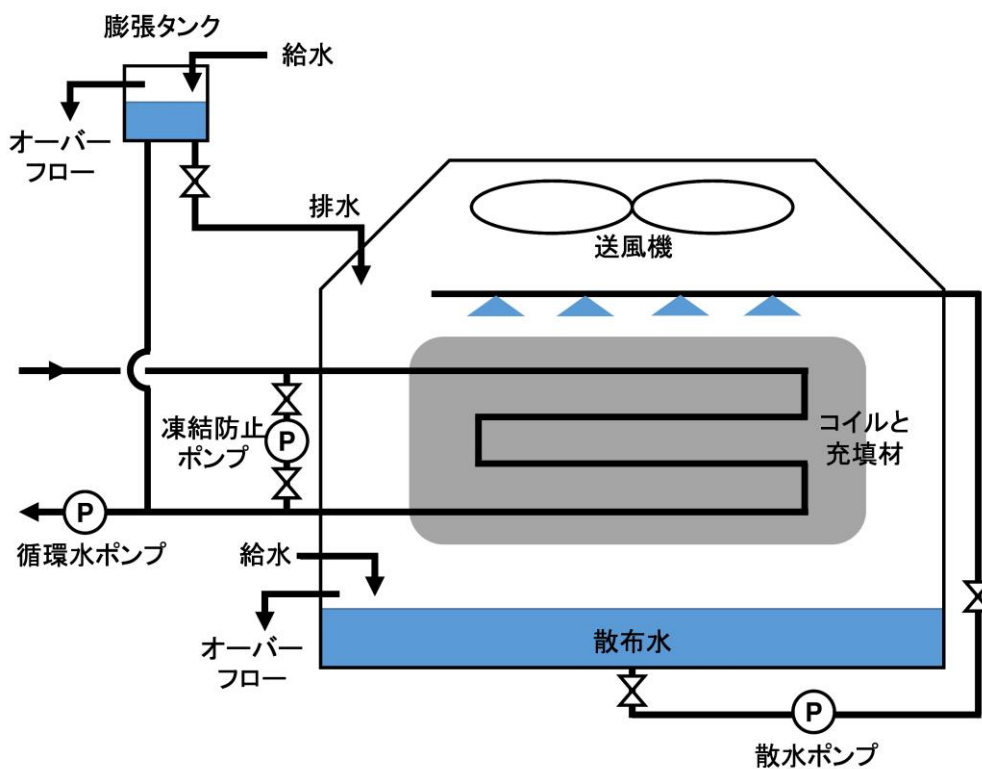


図1. 密閉式冷却塔の概略図

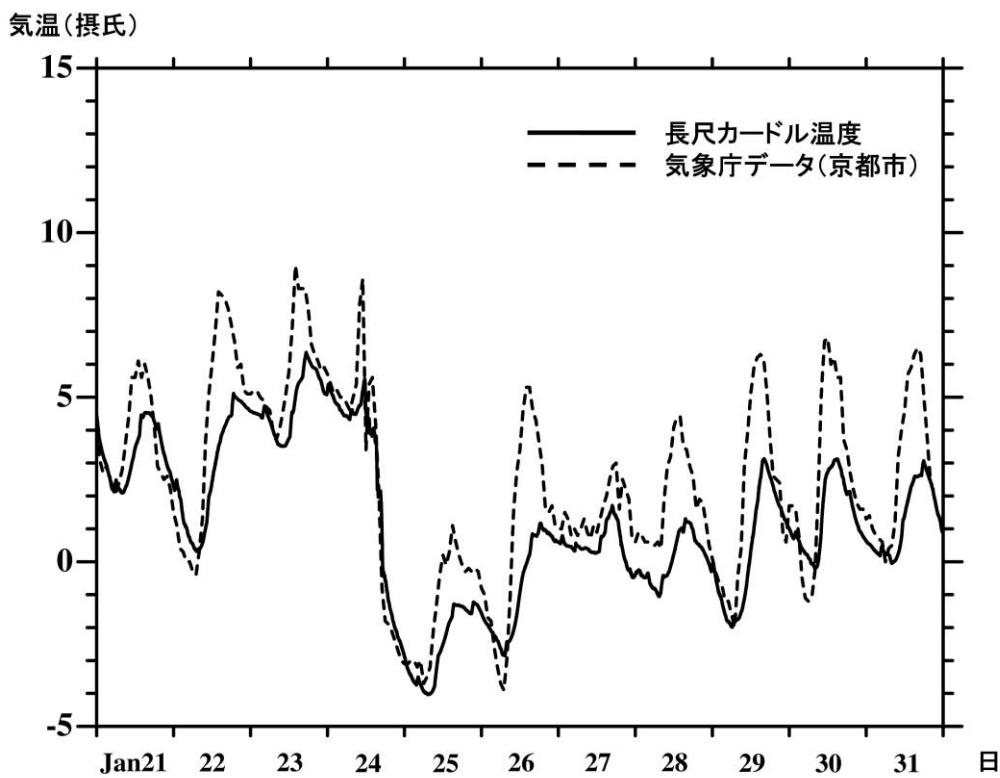


図2. 令和5年1月下旬の京都市の気温のグラフ

バスやJR西日本などの公共交通機関に大幅な遅延や運転見合せのトラブルが続出して、帰宅困難者もいたという話を聞いている。図2のグラフから、1月24日(火)の午後には5°C程度であった気温が、1月25日(水)の朝までに-4°Cまで低下したことがわかる。1月25日(水)は、ほぼ終日氷点下の気温であったが、その後数日かけて徐々に気温が標準的なものへ回復した。桂キャンパス周辺では、この寒波のときに積もった雪が全て無くなったのは2月初めであったと記憶している。

寒波到来までの密閉式冷却塔の凍結対策としては、12月下旬から循環水ポンプを手動運転モードで強制的に稼働させ、冷却水を被冷却機器と密閉式冷却塔との間で循環させ続ける措置を講じていた。散水ポンプと凍結防止ポンプについては、自動運転モードのままで特に対策は講じていなかった。

1月24日(火)までは、循環水ポンプ、散水ポンプともに問題なく稼働し、回収用ヘリウム圧縮機を運転することができた。ところが1月25日(水)には散水ポンプが過負荷のため異常停止した。液化運転時以外では、散水ポンプは、回収用ヘリウム圧縮機の運転時に既定の温度まで冷却水温が上昇したときだけ稼働するため、散水ポンプが停止している間に凍結してしまったものと考えられた。回収用ヘリウム圧縮機の1回の運転は短時間(約30分間)であるため、外気温の低い冬には、散水ポンプが稼働しなくても回収用ヘリウム圧縮機を水冷することができた。そのため、散水ポンプの状況を確認して過負荷異常をリセットすることをなおざりにしていた。

1月26日(木)の午後5時頃から液化運転を試みた。上述の散水ポンプの過負荷異常をリセットしていなかったため、散水ポンプが稼働せず、冷却水が高温(約96°C)となりタービンの温度異常でヘリウム液化機が緊急停止した。まず、散水ポンプの過負荷異常をリセットして、散水ポンプが稼働できる状態に復旧させた。加えて、密閉式冷却塔の凍結防止機能を手動運転モードで稼働させ、凍結防止ポンプも稼働させた。この状態で再度の液化運転を試みたが、今度は冷却水量不足の異常が発生したため、このままでは液化運転をおこなうことはできなかった。

1月26日(木)の午後7時頃に液化運転を中止して密閉式冷却塔を確認したところ、以下の問題が発生していることがわかった。まず、散水ポンプのケーシングに亀裂が入っており、散布水がそこから漏れていた(図3)。また、凍結防止ポンプが破損しており、冷却水がそこから漏れていた。さらに、保温とラッキングがなされていたものの、上水道から膨張タンクおよび下部水槽へ給水する水道管が凍結しており、不足した水を補えなかった。散水ポンプおよび凍結防止ポンプについては、ポンプ内に残っている水が凍結して氷になったときの体積膨張で破損したか、あるいは、凍結している状態で無理に稼働させようとしたときに破損したか、のどちらかであろうと考えられた。図1に示すように、凍結防止ポンプは冷却水配管にバイパスして設置されているので、この凍結防止ポンプが破損したことで冷却水が漏れて減少し、上水道の水道管の凍結により給水もできな



図3. 散水ポンプのケーシングの亀裂から散布水が漏れている様子



図4. 折損した膨張タンク下部配管

ったことから、液化運転の際に冷却水量が不足したと考えられた。銅管コイルの破損の有無については、この時点では分からなかった。

#### 4. 応急措置

散水ポンプは、ケーシングに亀裂が入っていたものの、手動運転モードで稼働させることができた。理由は分からないが、停止時と比べて稼働時のほうが亀裂からの散布水の漏れが明らかに少なかったため、散水ポンプについては、手動運転モードで強制的に稼働させ続けることにして散布水の減少に努めた。下部水槽に溜められている散布水が減少して不足してしまっているのではないかと危惧したが、散布水に外部から水を補給したところオーバーフロー配管からの排水が確認されたので、散布水は不足していないと判断した。

破損した凍結防止ポンプからの冷却水の漏れに関しては、凍結防止ポンプの両側に設置されているバルブ(図1参照)を閉止して、冷却水配管から凍結防止ポンプを切り離すことにより止めることができた。冷却水が不足した問題に対しては、上述の通り、膨張タンクが冷却水配管につながっているため、膨張タンクを通して冷却水を補給することを試みた。この



作業の途中、膨張タンクから手で排水する配管に力がかかり、この配管を折損してしまったため、一時的に膨張タンクに水を溜められなくなった(図4)。手持ちの安全弁に付属していたテーパネジ部を保護するキャップの直径が、偶然、膨張タンクの下部配管と一致したため、このキャップを流用することにした。配管にこのキャップをはめ、ホースバンドで固定して、膨張タンクからの排水を止め、再び膨張タンクに水を溜められるようになった(図4)。上水道から給水することができなかったので、別の凍結していない散水栓からホースを引き回し、膨張タンクを通して冷却水配管へ給水した。給水速度を高めるために、散水栓からの給水に加えて、我々の建物の給湯室から湯を汲み、バケツリレーでも給水した。日付が変わった1月27日(金)の午前1時ごろまでには安定的に循環できるだけの冷却水量を回復して、回収用圧縮機を稼働できるようになったため、ガスバッグをはじめとする回収系統からのヘリウムガス放出を免れた。

以上の応急措置により、散布水および冷却水を循環できるようになり、ヘリウムの液化運転および回収運転をおこなえるようになった。応急措置後最初の液化運転は1月27日(金)から1月28日(土)にかけて問題なくおこなうことができた。再度の冷却水量不足を避けるため散水栓からホースによる膨張タンクへの給水はそのまま続けることとした。また、循環水ポンプと散水ポンプは手動運転モードで常時稼働させ続け、これらのポンプの凍結や凍結による破損を避けるよう努めた。1月30日(月)午後までには、上水道から給水する水道管の凍結が解消し、膨張タンクおよび下部水槽へ自動的に給水できる状態に戻ったため、散水栓からのホースによる給水をやめた。

## 5. 修理対応

1月31日(火)午後に業者殿に密閉式冷却塔の状況を確認して頂いた。散水ポンプ・凍結防止ポンプ・膨張タンク下部配管は交換や修理が必要という判断であった。銅管コイルについては、一部充填材を取り外して簡易点検したところ問題は見られなかったが、全体的に充填材を取り外して点検したほうがよいということであった。

散水ポンプは、ケーシングに亀裂が入っていても稼働させることができたが、運転負荷などにより亀裂が広がった場合に稼働できなくなる可能性を考え、可及的速やかに交換することとした。ポンプの納期の都合や年度をまたいだスケジュール調整の難しさはあったものの、4月19日(水)に散水ポンプ交換工事を実施した。散水ポンプの定格電流は200Vで3.3Aであり、実際に交換後の新しいポンプでは2.8A程度の電流が流れているが、交換前の破損したポンプでは1.5A程度しか流れていなかったため、やはり異常な状態で辛うじて散布水を循環させていたのだと後で認識した。膨張タンク下部配管については、6月27日(火)に交換して頂き、復旧できた。

凍結防止ポンプについては、やはりポンプの納期



図5. 充填材を取り外して銅管コイル周辺の点検等をしている様子

等の都合でスケジュール調整が難航したが、10月25日(水)に交換工事を実施した。同日に、経年的に劣化していたエア抜き弁の交換や充填材をすべて取り外しての銅管コイルの点検作業もおこなった(図5)。寒波到来から半年以上も大きな問題なく冷却水を循環できていたのでコイルに問題はないと予想してはいたが、実際にコイルに破損や漏水等の問題がないことを業者殿に確認して頂いて安心できた。充填材は、経年的にカルキ等が付着している可能性があったため取り外した際に高圧洗浄して頂き、あまり劣化が進んでいないということで再度取り付けた。散布水を溜めている密閉式冷却塔の下部水槽には経年的にヘドロ等が堆積し、普段から数年ごとに高圧洗浄のメンテナンスを業者殿にお願いしている。この時にも堆積物が溜まっており、また、充填材の脱着の際にカルキ成分等が落下した可能性があったため、充填材を取り付けた後に下部水槽も高圧洗浄して頂いた。

寒波による被害発生から半年以上経過してしまっ

たが、ヘリウムガス損失や学内のヘリウムサイクル停止といった重大な問題に発展することなく、冬が来る前に全ての修理をおこなうことができた。なお、今回の寒波被害に関しては、国立大学法人総合損害保険（国大協保険）を利用することも検討し、報告書等を作成、提出していたが、桂キャンパスでの損害額が免責金額の範囲内であったため、結果的には保険金を受け取ることは叶わなかった。

## 6. 今後の対策

今回のトラブルを経て、密閉式冷却塔の仕組みと構造をより深く理解し、それを踏まえ凍結防止策を講じなければならない、と意識を新たにした。第2節で述べた密閉式冷却塔の仕組みと構造については、実は従前から理解していたのではなかった。そのため第4節で述べた対応も、現場で密閉式冷却塔の構造や動作状況を見ながらその場しのぎの応急措置を講じ、辛うじて危機を脱したに過ぎない。そして応急措置のあとで、取扱説明書やインターネットで調べたり、工事の際に業者殿に教えて頂いたりして、密閉式冷却塔の仕組みと構造について理解を深めることとなった。今後は、今回のトラブルを契機に理解した密閉式冷却塔の仕組みと構造を踏まえて、「どこが損傷を受けると何ができなくなり、その結果ヘリウム液化供給システムにはどのような影響が出るか」を考えながら維持管理に務めていく。

我々の密閉式冷却塔は平成18年に設置され、故障や劣化のために設置当初のように働かなくなった機能もある。配管の凍結を防止するための一部のヒーターも3年前から働かなくなっているが、修理費用の高額さのために現状ではそのままになっている。この状況で、密閉式冷却塔の凍結を防止するためにはポンプ類を常時運転し熱負荷をかけ続けることが良いと判断し、この冬は、令和5年12月下旬から、循環水ポンプ・散水ポンプ・凍結防止ポンプのすべてを手動運転モードで強制的に稼働させ続けている。本稿で報告した令和5年1月の寒波ほどの環境を経験していないため、その効果については十分に分からないところもあるが、本稿を執筆している令和6年2月時点では凍結トラブルは生じておらず、安定的に密閉式冷却塔を稼働できている。正常に働かない密閉式冷却塔の機能については、予算や優先順位を考慮しながら、可能なタイミングで修理を検討したい。

今回の寒波では、保温材による保温とラッキングがなされているにも関わらず、上水道から給水する水道管も凍結してしまった。この水道管の凍結に対しては、すでに紹介されている[2]「凍結防止ソケット」（サーモエレメントを内蔵し、周囲の温度が下がると自動で少量の水を排出して凍結を防止する器具）の使用を検討している。

トラブルが生じる前に適切に維持管理して密閉式冷却塔を稼働させ続けることが本来あるべき姿だが、万一密閉式冷却塔にトラブルが生じて稼働できなくなった場合にも学内のヘリウムサイクルを止めないことが最重要であると考えている。有り難いことに、桂キャンパスではヘリウム液化供給システムを更新

できるはこびとなり、令和6年11月の完成を目指して手続を進めている。この更新では、おもに液化系統（ヘリウム液化機・液化用ヘリウム圧縮機・液体ヘリウム貯槽など）を増設して二重化する計画で、密閉式冷却塔も1基増設する。結果、システム全体としては現有のものと合わせて密閉式冷却塔を2基保有する体制となる。京都大学吉田キャンパスではすでにヘリウム液化供給システムが二重化されているが[3, 4]、桂キャンパスでも同様にシステムを二重化することで学内のヘリウムサイクルの安定化に寄与できると考えている。

## 謝辞

本稿で報告した密閉式冷却塔の凍結トラブルでは、業者殿には比較的タイトなスケジュールで部品交換や修理の工事を実施して頂いた。環境安全保健機構低温物質管理部門および施設部環境安全保健課機構事務掛の関係者には、技術的および事務的なサポートをして頂いた。桂キャンパスのヘリウム利用者には密閉式冷却塔の修理工事の度に一時的なヘリウム利用制限にご協力を頂いた。ここに心からの感謝を申し上げる。

## 参考文献

- [1] <https://www.data.jma.go.jp/stats/etrn/index.php>
- [2] 大城 秀治、“冷却塔の凍結トラブルについて”、大阪大学大学院工学研究科技術部報告集、**9**, 34-35 (2023).
- [3] 大塚 晃弘、“新しく導入されたヘリウム液化・供給システム”、京都大学低温物質科学研究センター誌、**4**, 7-9 (2004).
- [4] 大塚 晃弘、“吉田キャンパス液体ヘリウム関連設備の更新”、京都大学物性科学センター誌、**28**, 23-27 (2016).



## 液体ヘリウムリサイクル設備におけるヘリウム漏洩の原因と対策

○西崎修司<sup>#, A), B)</sup>、多田康平<sup>A), B)</sup>

A) 京都大学 大学院工学研究科 附属桂インテックセンター

B) 京都大学 環境安全保健機構 低温物質管理部門

### 概要

世界的なヘリウム危機のために、全量を輸入に頼る日本では、ヘリウムの入手が困難な状況が続いている。にも拘らず、その特異な物性のため特に低温分野においてヘリウムの代替物質は無い。多くの研究教育機関では液体ヘリウムの安定供給のために液体ヘリウムリサイクル設備の運用や維持管理が行われている。ヘリウムの漏洩は、高圧ガスの事故に該当するのみならず、液体ヘリウムの安定供給に支障を来すため、漏洩防止に細心の注意を払うことが必要となる。ヘリウムの漏洩には振動や温度など様々な原因があり、各々の原因に応じた適切な対策が必要となる。この漏洩の問題に対して、これまで実施してきた対策や、現在検討している対策について発表する。

### 1. はじめに（ヘリウム回収率の推移）

京都大学桂キャンパス極低温施設は2008年に液体ヘリウムの供給を開始し、最近の年間供給量は約2万リットルに達している。

図1に桂キャンパスにおける半年間および年間のヘリウム回収率を示す。供給開始当初は、ガス回収メーターや回収配管が、NMRへの液体ヘリウム充填時に大量に蒸発するガスの回収に耐える設計になっていなかったため、液体ヘリウム充填の度に液体ヘリウムの大気放出が発生し、ヘリウム回収率は約80%と非常に低かった。2014年にNMRのヘリウム回収配管の改修工事を行うことで、液体ヘリウム充填時にもヘリウムを回収できるようになり、ヘリウム回収率は約90%まで上昇した。

NMRのヘリウム回収配管改修後、ヘリウム回収率は、約90%を保ち、それ以上は上昇しなかった。NMRにおける液体ヘリウムは強磁場を発生する超電導磁石を冷却することが目的であり、液体ヘリウムを溜

める部分の構造が単純なので、液体ヘリウムの充填後、充填口の締め忘れなどが無い限り、回収率はほぼ100%を保つことができる。液体ヘリウムを使用する装置が全てNMRならば、ヘリウム回収率は100%近くまで上昇していたであろう。しかし、PPMSなどのNMR以外の実験装置の場合はポンプなどにより試料の温度変化を行うため、装置内でヘリウムを溜めたり流したりする部分の構造が複雑になり、ヘリウム漏洩する可能性が高い箇所が多くなる。ヘリウム漏洩箇所に気付かなければ、ヘリウム回収率を上昇させることはできない。

近年ヘリウム回収率が95-98%と上昇している理由は、市場ヘリウム価格の急激な上昇に伴い、それを補填するため学内の損失ヘリウム単価を値上げした際、ヘリウム回収率の低い実験装置がその値上げに耐え切れず実験を終了したことや、液体ヘリウムを大量に利用するヘリウム回収率の高い実験装置が稼働して全体的なヘリウム回収率を引き上げたことによる。

このように、それぞれの機器の構造や特性を踏ま

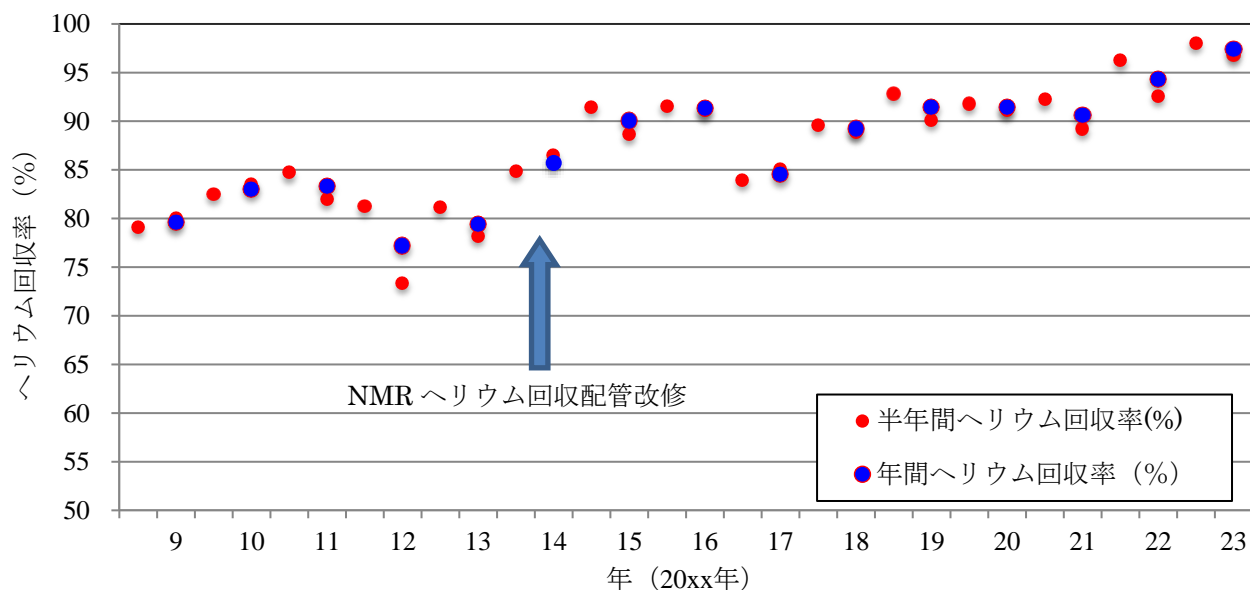


図1. 桂キャンパスのヘリウム回収率

えてヘリウム回収率が低い原因を探り、ヘリウム漏洩箇所を特定、対策することが重要である。

## 2. ヘリウム漏洩の原因

それぞれの機器に特有な構造によるもの以外にも、一般的なヘリウム漏洩の原因としては以下のものが考えられる。それらの原因に関して個別に考察する。

### 2.1 高圧

装置や配管にはそれぞれ設計圧力や常用圧力が設けられており、その圧力以下であれば問題ないのであるが、何かのトラブルによってそれを超える圧力が掛かると、破損や爆発に至り、ヘリウム漏洩を伴う重大事故が発生する可能性がある。この対策として一般には、想定外の圧力がかかっても装置や配管が破損する前に圧力を逃す安全弁が設置されている。安全弁が作動した場合には事故を免れることはできるが、安全弁が作動したことに気付かず、安全弁の吹き止まり圧力以下に内圧を下げないままにしていると、安全弁が閉じずヘリウム漏洩が続くことになるので、注意が必要である。

### 2.2 振動

装置から発生する振動により、徐々に接続箇所が緩みヘリウム漏洩が発生する場合がある。また、地震などの揺れにより、接続箇所に過度な力がかかり、その結果ヘリウム漏洩に至る場合もある。これらの対策としては、装置を床や壁に固定することによる振動防止や緩みにくいボルトやナットの使用、フレキシブルチューブを配管に挿入することによる振動吸収や振動伝搬防止を行うことで、接続箇所に過度な力が働かないようにすることが挙げられる。

### 2.3 温度

接続箇所を構成する部品がそれぞれ別の材質で作られている場合、材質ごとの熱膨張率の違いによって、温度変化に伴い歪みが発生し、ヘリウム漏洩に至る場合がある。シリコン製のパッキンでシールして金属配管を接続する場合などがよくある例である。気温だけでなく直射日光によっても、接続箇所が温められヘリウム漏洩の可能性が高まるため、直射日光を避けるために機器を室内に設置したり庇などで遮光したりする対策も有効と考えられる。運転中に高温となる装置において接続箇所に熱に弱いOリングを使用している場合、Oリングの劣化によりヘリウム漏洩が発生するおそれがある。対策としては耐熱性のあるOリングへの交換が考えられる。

### 2.4 経年劣化

長年装置を利用していると、経年劣化により、普段は想定していない箇所からヘリウム漏洩が発生する場合がある。例えば、埋設配管での配管の腐食、接続箇所の異種金属接触による電食、ガスバッグの材質の劣化などである。これらの劣化に関しては、ステンレスなどの腐食しにくい材質の配管を使用する、湿度を管理したり外面を塗装し直したりすることで錆の進行を抑える、異種金属の接続箇所には絶縁措置を講じる、といった対策が有効と考えられる。ガスバ

ッグなどの常時稼働している機器については、二重化し交互運転させることができれば、ヘリウム利用者への影響なく気密確認も行えるようになる。

### 2.5 操作ミス

作業者の操作ミスにより、ヘリウム漏洩が発生する場合もある。例えば液体ヘリウムを貯槽からベッセルに充填した後の充填口やバルブの閉め忘れ、配管の接続ミスなどである。フェールセーフやフルプルーフの機能の付いていないバルブ類の操作については、意識的な日頃の点検や指差し確認、開閉札の表示などにより、ミスを減らすことが大切である。

## 3. ヘリウム漏洩の想定、過去事例および対策（回収系）

世界的なヘリウム危機に対応するために、ヘリウム漏洩対策が重要である。そのためには、これまでに発生したヘリウム漏洩事例を調査解析することで、ヘリウム漏洩の起こりやすい箇所や原因を知ることが必須である。その結果、ヘリウム漏洩に対して効果的に対策を練ることができ、ヘリウム漏洩の確率を低下させることにつながる。

以下に、液体ヘリウムリサイクルシステムの回収系の各設備におけるヘリウム漏洩の想定、過去事例および対策を列記する。

### 3.1 建物設置ガスバッグ

各研究室から回収されたヘリウムガスは、建物ごとに設置されているガスバッグに一時的に回収し、ある程度貯められると、ロータリーポンプで回収配管に流し込まれて液化室へ送られる。建物ごとにガスバッグを設置している理由は、研究室がある建物と液化室がある建物との距離が遠いため、回収配管の背圧が高くなるので、液体ヘリウム充填の際に支障を来すからである。

この建物設置ガスバッグについては、ガスバッグに穴が開き、その穴からヘリウムガスが漏洩することが考えられる。穴が開く原因としては、ガスバッグと外枠との接触や表面に働く張力、同じ箇所での多数回の折れ曲がりなどによる損傷や、直射日光によるガスバッグ表面の硬化や多湿環境で発生するカビなどによる素材の劣化などが考えられる。ガスバッグの損傷や劣化を防ぐためには、ガスバッグに無理な力が掛からないように設計したり、ガスバッグを設置している部屋の環境を改善したりすることが重要である。

桂キャンパスでは当初、外枠の大きさに対して大きめなガスバッグが設置されていたため、常にガスバッグと外枠とが擦れ合い、ガスバッグが損傷してヘリウムが漏洩したことがある。この対策として、外枠によって傷みにくいようにガスバッグをサイズダウン（5.2 m<sup>3</sup> → 4.1 m<sup>3</sup>）するとともに、二重膜式のガスバッグへと交換した（図2）。ガスバッグ交換の際には一部の配管を外して制動試験やガス置換などを行なったが、作業後の配管復旧の際にNW25のOリングのはめ込みが甘く、ヘリウムが漏洩したことがある。ガスバッグに直結する配管の場合は、ガス圧



力が大気圧に近く漏れ検出液では確認が難しい場合があるので、別途リークディテクターでの確認も必要である。

桂キャンパスの建物設置ガスバッグにはバイパスラインがあるため、バイパスラインからガス回収しガスバッグの出入口を閉止すれば、ガスバッグの気密試験を行うことができる。キャンパスの計画停電時などバイパスラインに切り替えるタイミングで、ガスバッグの気密試験を同時に行うこともある。

### 3.2 回収配管

建物の間をつなぐ回収配管に関しては、普段操作することがなく、可動部分もないので、ヘリウムガスの漏洩の可能性は低いと考えている。しかしながら、大地震などの想定外の事態が発生した場合、接続箇所などに不具合が発生していないか確認することは必要である。桂キャンパスの回収配管は共同溝を通っているため確認しやすいが、埋設配管などの場合には経年劣化により回収配管に穴が開く事例も考えられるので、注意が必要である。

回収配管設置の際に、パイプにネジを切って使用する場合、テーパネジと並行ネジを組み合わせると、両者の間に隙間ができヘリウム漏洩の原因となるので、注意が必要である。両者の間には、テーパネジの場合はシールテープを利用し、並行ネジの場合はパッキンを使用する、という違いもある。パイプ接続はパーツ交換が容易な反面、接続箇所が多くなりヘリウム漏洩のリスクが高まる。交換を想定しない配管などの場合は、チューブ継ぎ手や溶接をうまく利用することで、ネジによる接続箇所を少なくしてヘリウム漏洩のリスクを軽減するのがよいと考えられる。

研究者や研究室の異動に伴って実験室内や建物内の回収配管が撤去される場合、回収配管を切断後、そのまま開放状態で放置されたり、バルブを閉じずに放置されたりすることで、ヘリウム漏洩につながる事例もあったため、回収配管撤去後の現地確認も重要である。

### 3.3 液化室ガスバッグ

回収配管を通して液化室に到達したヘリウムガスは、純度を確認後ガスバッグに一時的に貯められる。ある程度ヘリウムが貯まった段階で回収圧縮機により圧縮される。桂キャンパスの液化室ガスバッグでは、ガスバッグ設置の直後にタガのボルト部分がガスバッグに接触し、応力集中によりガスバッグを傷める事故が発生した。対策として、ボルトの周りにゴムを巻きつけてボルトとガスバッグとが直接接触しにくいようにするとともにガスバッグへの応力を分散させるよう工夫した(図3)。液化室ガスバッグを設置してから20年近く経ち、経年劣化によるガスバッグの気密性に疑問を感じ始めているが、液化室にガスバッグは1基しかないため、気密試験を行うことができていない。ガスバッグからのヘリウム漏洩があったとしても、程度によっては、ガスバッグが正常に動いているように見える場合もあるため[1]、現状ではヘリウム漏洩の有無、程度は不明である。今後、液化室ガスバッグの増設を行い、2基以上のガスバ

ッグを並列運用して、気密試験が行えるようにできないか検討中である。



図2. (上) 交換前の容積5.2 m<sup>3</sup>のガスバッグ。ガスバッグと外枠が擦れ合っていた。(下) 交換後の容積4.1 m<sup>3</sup>のガスバッグ。ガスバッグと外枠の接触が低減された。



図3. 液化室ガスバッグのボルト対策

### 3.4 回収圧縮機

液化室ガスバッグに貯められた大気圧程度の圧力のヘリウムガスは、回収圧縮機により段階的に加圧圧縮され、圧力は15 MPaまで上昇する。桂キャン

スの回収圧縮機は5段式で、1段目と2段目は低圧、3段目は高圧だが高圧ガス保安法施行令第2条第5項第1号により高圧ガス保安法の適用除外である。一方、4段目と5段目は高圧ガス保安法の適用範囲であるため、保安検査が必要である。回収圧縮機は気密検査ができないため、回収圧縮機を運転中にヘリウム漏洩検査を実施している。回収圧縮機本体の検査としては、送風機で発生する強風のためリークディテクターによる検査が難しいので、漏れ検出液で検査している。ただし、漏れ検出液での検査でも、運転に伴い回収圧縮機が高温になるため、漏れ検出液が沸騰蒸発してしまうので、回収圧縮機の温度が上がってしまう前に手早く検査する必要がある。

保安検査の一環として、積算運転時間により開放検査も実施している。特に高温高圧となる4段目と5段目では運転中にOリングからのヘリウム漏洩が比較的頻繁に発生しており、開放検査の際にもOリングの劣化が確認されている。当初より使用しているOリングは熱に弱いので、耐熱性のOリングに交換することを検討している。保安検査では、回収圧縮機出口の配管の肉厚検査も行い、配管の減肉による配管劣化の有無も確認している。

### 3.5 乾燥器

桂キャンパスでは、回収圧縮機で圧縮されたヘリウムガスを長尺カードルに貯蔵する前に乾燥させる高圧ガス乾燥器のみ設置しており、長尺カードルに貯蔵されたガスを内部精製器へ導入する前に乾燥させる中圧ガス乾燥器は設置していない。高圧ガス乾燥器も高圧ガス保安法の適用範囲であるため保安検査が必要である。高圧ガス乾燥器も気密検査ができないため、回収圧縮機および高圧ガス乾燥機を稼働させている間にヘリウム漏洩検査を実施する。高圧ガス乾燥器には、乾燥筒の切り替えなど配管の接続箇所が多く、作業者が普段操作することはないものの、経年的な接続箇所の緩みによりヘリウム漏洩の可能性があるので、接続箇所の漏洩確認は確実に実施する必要がある。

### 3.6 長尺カードル

回収圧縮機で圧縮されたのち高圧ガス乾燥機で乾燥されたヘリウムガスを貯蔵するのが長尺カードルである。長尺カードルも高圧ガス保安法の適用範囲であるため保安検査が必要である。桂キャンパスには12本組×2組で合計24本の長尺カードルがあり、4本、8本、12本の3系統で切り替えて運用できるようになっている。基本的には漏れ検出液でヘリウム漏洩検査を実施している。3系統の切り替えにより系統間での移充填など運用の自由度が高められている反面、配管やバルブ、圧力計などの接続箇所が増え、ヘリウム漏洩の確率も増加するので、注意が必要である。経年劣化の検査としては、長尺カードルは全体としては閉止できないものの系統ごとに切り替えて閉止することができるので、長尺カードルを構成するポンプ単体の気密検査が可能ではあるが、実際は肉厚検査を行うことで減肉していないかの確認を実施している。

## 4. ヘリウム漏洩の想定、過去事例および対策（液化系）

以下に、液化系の各設備におけるヘリウム漏洩の想定、過去事例および対策を列記する。

### 4.1 内部精製器

長尺カードルに貯蔵されていたヘリウムガスは減圧調整器で所定の圧力へ減圧されて液化系へ導入される。このヘリウムガスから大気成分などの不純物を除去して精製するのが精製器であり、液化機に付属するタイプの精製器は内部精製器と呼ばれる。内部精製器も高圧ガス保安法の適用範囲であるため保安検査が必要である。内部精製器は、気密検査が可能である。桂キャンパスでは、減圧後、内部精製器に導入される前に、ヘリウムガスの純度および露点を計測するための分析系のラインが接続されている。分析系への流量を大幅に減少させると、内部精製器への流量が増加して圧力が増加するため、内部精製器側の設定圧力と安全弁の作動圧力との差が小さいと安全弁が作動する可能性がある。そのため、分析系の流量を変化させる際は、内部精製器側の安全弁が作動しないように気を付けながらの流量調整が重要となる。また、分析系の低圧配管で安全弁の繋ぎ口からヘリウムが漏洩する初期不良も確認されたことがあるので、保安検査対象外の配管であっても自主的なヘリウム漏洩検査も重要である。

### 4.2 バッファタンク

内部精製機により大気成分などの不純物を除去して精製されたヘリウムガスを貯蔵するのがバッファタンクである。バッファタンクは、設計圧力が1MPa未満で高圧ガス保安法の適用範囲外であるため保安検査は不要である。バッファタンクは、使用時以外は閉止することができるので、気密検査が可能である。桂キャンパスでは、バッファタンクからのヘリウム漏洩の事例はないが、経年劣化によるバルブや接続箇所からのヘリウム漏洩の可能性も考えうるので、注意を怠らないことが肝要である。

### 4.3 液化用圧縮機

精製されたヘリウムガスを液化するために圧縮するのが液化用圧縮機である。液化用圧縮機は、圧力1MPa未満で運転され、高圧ガス保安法の適用範囲外であるため保安検査が不要である。液化用圧縮機も使用時以外は閉止することができるので、気密検査が可能である。現在のところ桂キャンパスでは、液化用圧縮機でのヘリウム漏洩の事例はない。毎回、液化運転後に液化用圧縮機が停止した段階で、液化用圧縮機と液化機の高圧側の配管との間のバルブを閉じることによって、液化用圧縮機内に0.7MPa程度のヘリウムガスを残すことにより、次の液化運転に必要なヘリウムガスを温存するとともに、気密試験を兼ねた運用を実施している。

### 4.4 液化機

液化用圧縮機で圧縮されたヘリウムガスを超高速で回転するタービンに通すことで寒冷を発生させ、



最終的にジュールトムソン膨張により液体ヘリウムを得るのが液化機である。液化機（内部精製器以外の部分）は、高圧ガス保安法の適用範囲外であるため保安検査が不要である。液化機は、気密検査が可能であり、液化機内部でヘリウム漏洩の確認が重要となる。桂キャンパスでは、液化機でのヘリウム漏洩の事例はないが、これまでに不純物混入によるタービン破損や、液体ヘリウムへの水素混入などのトラブルが発生した。不純物混入に対しては、液化機内のヘリウムガスを分析し、純度、露点、酸素濃度の確認などの対策を実施している。桂キャンパス独自のルールとして、露点が $-65^{\circ}\text{C}$ 以下かつ酸素濃度が1ppm未満であることを確認してから液化運転することになっている。水素混入に対しては、毎回、室温付近の温度で液化運転前に、液化機内の真空引きと、バッファタンクに溜めてある精製ヘリウムガスでの共洗いをを行うことにより、液化機系内の水素の蓄積を低減する対策を実施している。

#### 4.5 液体ヘリウム貯槽

液化機で生成された液体ヘリウムを貯蔵するのが、液体ヘリウム貯槽である。液体ヘリウム貯槽は、高圧ガス保安法の適用範囲外であるため保安検査が不要である。液体ヘリウム貯槽では、常にヘリウムが蒸発しているため、液体ヘリウム貯槽を密閉しての気密検査を実施することは不可能である。液体ヘリウムを液体ヘリウム貯槽から液体ヘリウム容器（ベッセル）に充填する際、液体ヘリウム貯槽を一時的に密閉し、バッファタンクของガスをを用いて加圧することで、差圧で液体ヘリウムを取り出している。充填後、バルブ操作を忘れて、液体ヘリウム貯槽を密閉状態で放置すると、内圧が上昇し、安全弁が作動することになる。そのため、充填後のバルブ操作の確認や、日常点検時での液体ヘリウム貯槽の内圧の確認などが重要である。また、初期不良として、液体ヘリウム貯槽上部の接続箇所からヘリウム漏洩が確認されたこともあるので、保安検査範囲外の配管や接続箇所であってもヘリウム漏洩の確認は大切である。

#### 4.6 純ガスカードル

純ガスカードルは、高純度ヘリウムガスを高圧に圧縮して業者殿に納入して頂くものである。純ガスカードルは、高圧ガス保安法の適用範囲であるため保安検査が必要である。純ガスカードルは、基本的に液化運転時にのみ使用するため、密閉しての気密検査が可能である。漏れ検出液による気密検査や、純ガスカードル圧力の日常点検によって、ヘリウム漏洩が発見されることがある。配管接続部だけでなく圧力計接続部からも漏洩することがあるので、全体的に漏洩検査するのがよい。ヘリウム漏洩を発見した場合の対応としては、作業のミスや遅延などにより漏洩を拡大させないためにまずカードル内のポンベの元栓を一旦すべて閉止したのち、漏れ箇所を既定トルクで増し締めする。パッキンが傷んでいる場合はパッキン交換も必要となる。桂キャンパスに納入頂いている純ガスカードルは、以前は配管側にスリーブ押えのない接続部品が使用され、増し締めしづらい構造であったので、業者殿に相談し、スリーブ押

え付きのものに変更して頂いた（図4）。ヘリウム漏洩の原因としては、トラック運搬中の振動や、純ガスカードル設置場所への着地時の衝撃によって接続箇所が緩むことが考えられる。この対策として、純ガス



図4. 純ガスカードルのポンベ接続部分。(上) 変更前のスリーブ押えのないもの。円筒状で切欠がないため、配管側をレンチでつかむことができない。(下) 変更後のスリーブ押えの有るもの。切欠があるため、配管側をレンチでつかむことができる。

カードル設置場所にゴムシートを敷き、着地時の衝撃を緩和する努力をしている。また、納入時に運転手によってすべての接続箇所を漏れ検出液で検査して頂いている。納入後にヘリウム漏洩の可能性をできる限り抑えるため、桂キャンパスでは、液化運転時以外の平時には、カードル内のポンベの元栓をすべて閉止する対策を自主的に講じている。

## 5. まとめ

一度大気に放出してしまうと宇宙空間まで逃げてしまうヘリウムは、回収して再利用をしないと利用できなくなる貴重な資源である。ヘリウム漏洩は、ヘリウムの安定的なリサイクルに大きな問題となるため、その対策をしっかり実施する必要がある。機器ごとの構造や特性を踏まえ、過去の漏洩事例から学び、様々な場合を想定して、日頃から対策し続けることが必要である。

## 参考文献

- [1] 大塚 晃弘、“吉田キャンパス液体ヘリウム関連設備の更新”、京都大学物性科学センター誌、28, 23-27 (2016).

### 3.5 2023 年度実験・実習技術研究会

#### 発表

題 目：ガラスビーズ破砕法を用いたパン酵母由来アルコールデヒドロゲナーゼの抽出  
方法の改善

所属・氏名：化学電気系グループ 中池 由美

# ガラスビーズ破砕法を用いたパン酵母由来アルコールデヒドロゲナーゼの抽出方法の改善

○中池 由美<sup>a)</sup>、鍵和田 聡<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup>京都大学大学院 工学研究科 技術部、<sup>b)</sup>奈良女子大学 研究院自然科学系生物科学領域

## 1. 緒言

京都大学工学部工業化学科3回生の必修科目である学生実験では、分析化学、物理化学、有機化学、無機化学、生物化学の実験を行っている。本発表では、生物化学実験で行っているアルコールデヒドロゲナーゼ（以後、ADH）の活性に関する実験を取り上げ、これまで学生実験で行う上で生じた課題とその改善方法について検討したので報告する。

ADHの実験は、学生実験でよく取り扱われるテーマである。本実験では、ADHによるエタノールの脱水素反応速度を求め、続けて種々のアルコールを用いて酵素の基質特異性の特性に関する実験を行っている。市販のADHを使用するのではなく、身近な材料であるパン酵母からタンパク質抽出液を調製して使用しており、ADH活性を評価したところ、これまで非常に低いADH活性しか示さないことが度々生じていた。この原因について我々は、2点に注目した。一つは、パン酵母の品質低下の可能性である。学生実験では、生イーストを用いている。生イーストは一般にドライイーストに比べて活性が高いと言われているが、その反面保存はきかず、冷蔵保存下で一週間程度しか持たないほど品質管理が難しい。もう一つは、タンパク質抽出液の調製方法である。これは、同じロットの酵母培養液を用いた場合でも、各学生にタンパク抽出をさせたところ、ADH活性が出たり出なかったりすることがあったことから原因の一つとして考えられる。そこで、我々は本実験により適したタンパク質抽出方法の探索と、生イーストからドライイーストへの適用を目的に検討した。

## 2. タンパク質抽出法の検討

はじめに、タンパク質抽出方法の影響について調べた。生イーストをスクロース水溶液に懸濁させ40℃で1時間振盪させた。この培養液(500μL)に精製水(500μL)を加えて懸濁したあと、遠心分離し菌体を集めた。この菌体を用いて酵母抽出液を調製した。抽出方法として4つを選択した。すなわち、これまで学生実験で実施しているThermo Fischer製のYeast Protein Extraction Reagent(以下Y-PER)を用いる「Y-PER法」と、界面活性剤TritonX-100を用いた「界面活性剤存在下での凍結融解法(以下Freeze-Thaw法)」を検討した。さらに穏和な抽出方法として、三菱商事ライフサイエンス製Zymolyaseを用いた「酵素消化法(以下Zymolyase法)」、より強力な抽出法として「ガラスビーズによる破砕法(以下、Beads法)」を選択した。各方法で菌体を処理した後、遠心分離し、上澄み液を回収することによってタンパク質抽出液を得た。得られた抽出液中のADH活性は、補酵素NAD<sup>+</sup>共存下、エタノールとADH反応によって生じるNADHの吸光度の変化を紫外可視分光器で測定し、アルコールの酸化反応速度を求めることにより評価した。その結果を図1に示す。Y-PER法で行ったところ、反応速度は $14.1 \times 10^{-7} \text{ M/s}$ であった(図1, Y-PER)。一方、Freeze-Thaw法では、ほぼ反応の進行は見られなかった(Freeze-Thaw-s)。そこで、遠心分離した際の沈澱を用いて活性を測定したところ、中程度の活性が見られた(Freeze-Thaw-p)。この結果から、Freeze-Thaw法で活性が見られなかったのは、プロテアーゼなどによってADHが失活したのではなく、十分に細胞壁や細胞膜が分解されておらず、遠心分離した際にADHが細胞膜とともに沈澱したためだと考えられる。Zymolyase法により調製した場合、Y-PER法のサンプルより反応速度が約1.5倍上昇した(Zymolyase)。一般にガラスビーズによる破砕法は簡便な方法である一方、酵素が失活したり、ビーズに吸着し活性の低下が見られることがしばしばある。しかし本実験で検討してみたところ、最も高い活性を示すことが明らかとなった(Beads)。

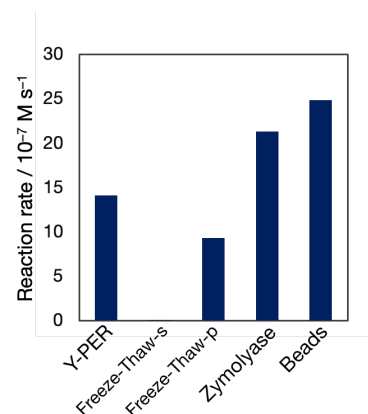


図1 各方法により調製した抽出液中のADHによるエタノール酸化反応速度の比較

Freeze-Thaw-s, -p はそれぞれ凍結融解処理後の上澄み液、沈澱を示す

### 3. イーストの検討

次に生イーストの品質管理の課題を解決するためドライイーストの本実験への適用を検討した。本学生実験は120名もの学生が受講しており、設備の制約から数カ月に渡って十数人ずつ順番に実施している。酵母のコンタミネーションや品質低下によるADH活性の低下が懸念されたため、実施期間中に何度も生イーストを購入しなおす必要があった。ドライイーストを代用できれば、よりイーストの管理が簡便になり、安定した実験運営ができると考えられる。本実験では厳密にはセミドライイースト（以下ドライイーストと記す）を用いた。一般に生イーストの水分量は70%に対してドライイーストは10%程度であることから、ドライイーストは生イーストに対して単位重量あたり3倍量の菌体が含まれていると考えられる<sup>[1,2]</sup>。ドライイースト製造時に生じる菌体の死滅も考慮し、本実験では、生イーストに対して、重量比0.5のドライイーストを用いた。タンパク質抽出液は、Y-PER法とBeads法を用いて調製した。その結果、ドライイーストを用いても同程度のADH活性が見られることが明らかになった（図2）。

### 4. 基質特異性に関する検討

生イーストとドライイーストからBeads法で調製したタンパク質抽出液を用いて、アルコールに対する基質特異性の影響を調べた<sup>[3]</sup>。アルコールとして、エタノール（EtOH）の他に1-ブタノール（*n*-BuOH）と2-プロパノール（*i*-PrOH）を選択した。その結果、EtOH、*n*-BuOH、*i*-PrOHの順に反応速度の低下が見られ、*i*-PrOHに至っては、EtOHの5分の1まで減少した。この傾向はドライイーストを用いた場合でも高い再現性が確認できた（図3）。

### 5. 結言

以上のように、アルコールデヒドロゲナーゼ（ADH）活性評価の実験において、タンパク質抽出方法とパン酵母の種類を検討した。その結果、ガラスビーズを用いた細胞破碎法が最も高いADH活性を示す抽出法であることがわかった。さらに、本実験では低コストかつ管理が容易なドライイーストの利用が可能であることを明らかにした。従来の「生イースト、Y-PER法」の組み合わせから、「ドライイースト、Beads法」に変更することにより、高いADH活性の発現に加えて、処理時間を1/10に短縮でき、さらに実験費用を1/10以下に抑えられることがわかった（図4）。本実験結果は、生物化学実験でよく用いられるADH活性評価の実験テーマにおいて、高効率かつ管理が容易な新しい実験プロトコルを提案するものであり、大学における学生実験運営において有用な知見を与えるものである。

### 参考文献

- [1] Karimi, K. et al. *Food and Bioproducts Processing*, **2012**, 90, 52–57.
- [2] 辻調グループ HP <https://www.tsuji.ac.jp/column/cat661/post-334.html>
- [3] Plapp, B. V. et al. *Biochemistry*, **2014**, 53, 5791–5803.

### 謝辞

本実験を行うにあたり、京都大学工学部工業化学科（令和6年度より理工化学科）の先端化学実験を受講してきた学生のデータを参考にさせていただきました。本実験の担当教員および関係者に感謝申し上げます。

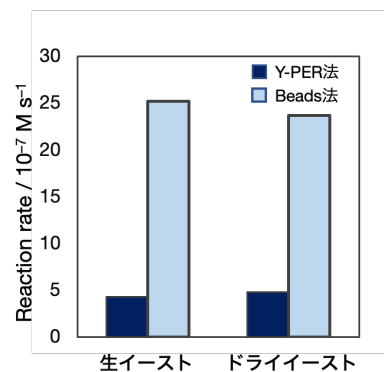


図2 生イーストとドライイーストを用いたADHによるエタノール酸化反応速度の比較

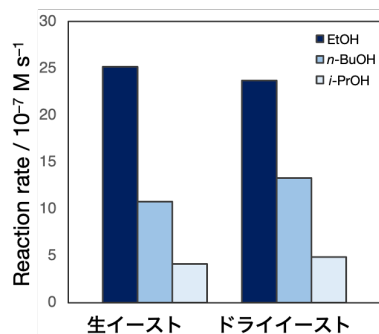


図3 生イーストとドライイーストを用いたADHの基質特異性の比較

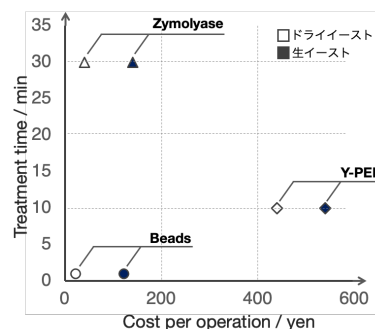


図4 各タンパク抽出方法に必要な処理時間（縦軸）と実験コスト（横軸）

4

技術部提供サービス



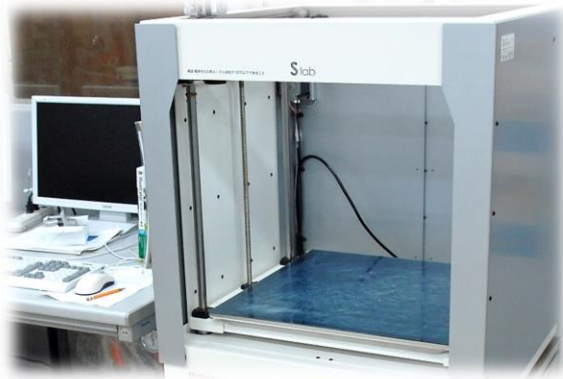
## 4.1 技術部提供サービス宣伝パンフレット

# 技術部提供サービス

工学研究科技術部では、「桂ものづくり工房」の利用、「工具類の貸出」、「大判プリンター」の利用、「技術相談」等のサービスを提供しています。

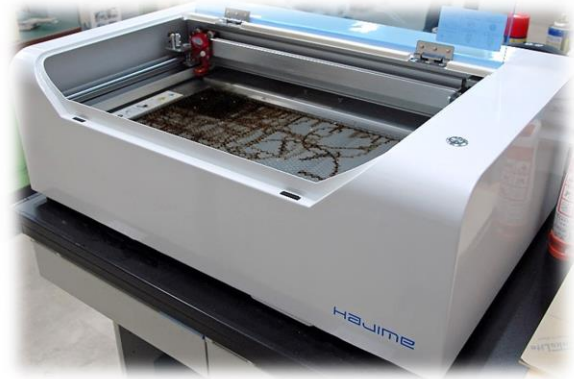
### 桂ものづくり工房で稼働中のデジタル加工機\*

エス.ラボ社製 3Dプリンター  
S3DP555



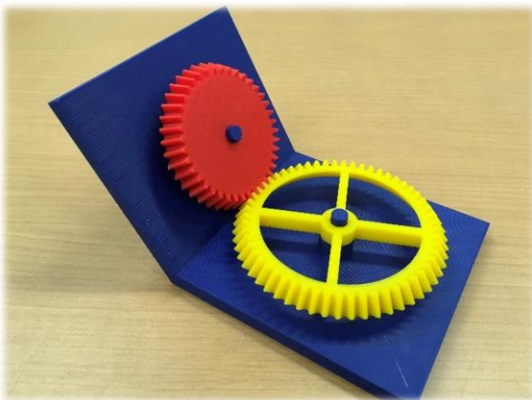
最大造形サイズ:W500×D500×H500 mm\*\*  
熱溶解積層方式 (FDM)  
材料:PLA、ABS等

オーレーザー社製 レーザー加工機  
HAJIME CL1、CL1 PLUS

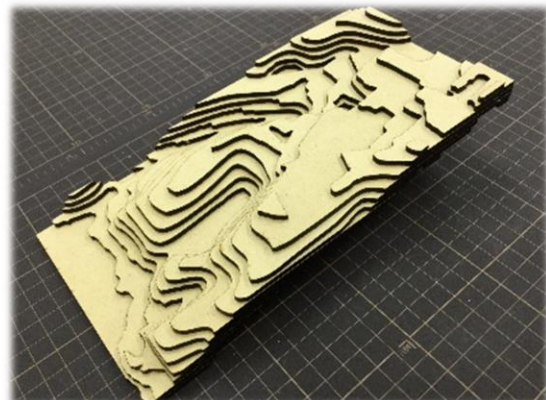


加工サイズ:W500×D300 mm\*\*  
樹脂/木材/ゴム等の切断、彫刻

製作例



加工例



\*利用には機械運転技術講習の受講が必要です。詳しくは技術部Webサイトをご覧ください。

\*\*カタログ参照値。

工学研究科技術部Webサイト『提供サービス』よりお申し込みください。

<https://www.tech.t.kyoto-u.ac.jp/ja/services>



## ○桂ものづくり工房

簡単な加工をしたいと思ったことはありませんか？  
**金属・木材・樹脂等の切削・穴あけ・切断など、  
 用途に応じた加工ができます！**

(利用には機械運転技術講習の受講が必要です。また学生の場合は学研災加入者に限ります。)

### 工作機械一例

※工作機械は他にもあります。詳しくは技術部Webサイトをご覧ください。



旋盤  
円筒形状物の加工



フライス盤  
平面・溝の加工



ボール盤  
穴あけ



両頭グラインダー  
研磨



コンターマシン  
板金の切断



ロータリーバンドソー  
棒形状物の切断



スライドソー  
木材の切断



ファインカット  
各種材料の切断

## ○工具類の貸出

工具が無く、工作や修理ができなかったことはありませんか？  
**工具類の貸し出しをしています！** (学生には担当教員の上で貸し出します。)

### 工具類一例

※貸出工具の一覧は技術部Webサイトをご覧ください。



丸鋸



ジグソー



圧着工具



ネジザウルス



ドリルドライバ



やすり類



マイクロ  
メーター



デジタルノギス



デジタル  
トルクレンチ



レーザー距離計



液晶  
プロジェクター



マイクスピー  
カーシステム  
& Webカメラ

プレゼン用機材もあります。



## ○大判プリンター

### 桂キャンパスで大判ポスター作れます！

(利用枚数・用紙の種類により課金されます。印刷はセルフサービスとなります。)



#### 用紙

- ・上質普通紙、コート紙、フォト光沢紙、防災クロスの4種
- ・A0サイズの出力可能

## ○技術相談

### 多様な専門分野に従事している職員に相談できます！

#### 相談対応例

- ・ 板に穴をあけたいが、あける方法を相談したい。
- ・ 金属を切り抜いて実験の模型に使用したい。
- ・ 実験装置を使用させてもらえる施設を教えてください。
- ・ 木材でフィールド模型を作製したい。
- ・ 実験室を新設するにあたり安全対策について相談したい。
- ・ Webカメラやサーバーを設置したいが、どのようにすればいいか相談したい。
- ・ 組成分析をしたいが、使用する装置や方法を相談したい。
- ・ 実験装置の購入に際し、目的と予算に適合したものを選定するため相談にのってほしい。
- ・ 機械加工を依頼できる業者を紹介してほしい。
- ・ 寒剤の取り扱いについて相談したい。



…等々いろいろな問題に対応いたします。

技術や方法など、わからないことがあればなんでもご相談ください。

**メール:q-a@tech.t.kyoto-u.ac.jp**

# 桂ものづくり工房



編集・発行  
 京都大学 大学院 工学研究科 技術部  
 TEL : 075-383-2882  
<https://www.tech.t.kyoto-u.ac.jp/ja/services>  
 2023年10月発行

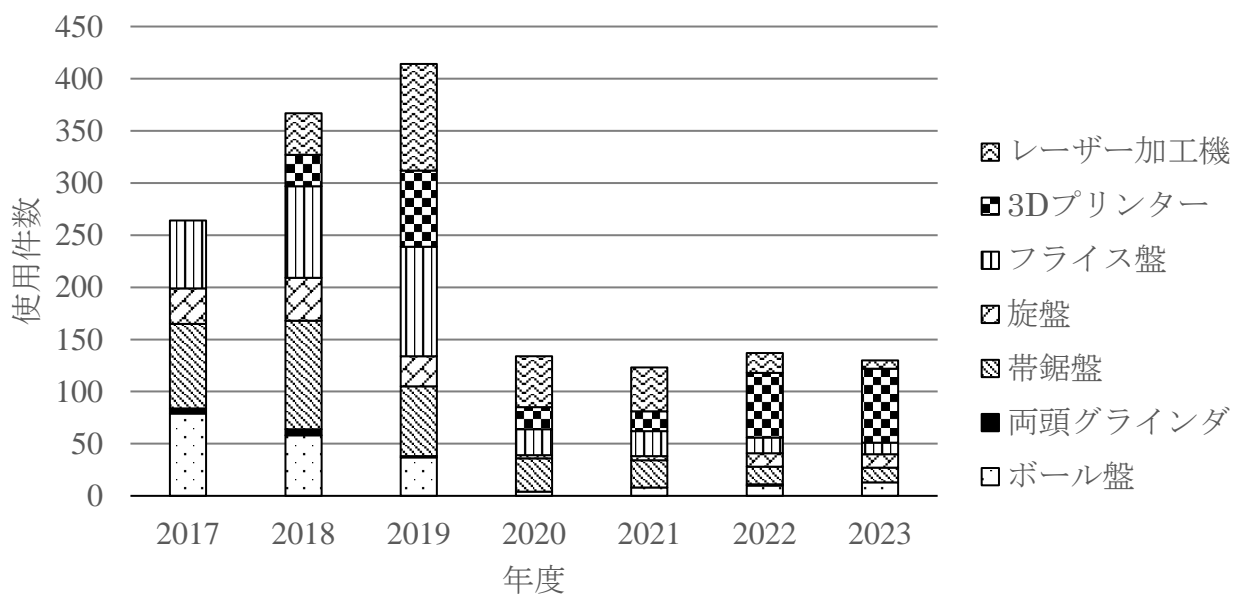
## 4.2 桂ものづくり工房使用実績

### 2023年度 桂ものづくり工房使用実績

機器名	件数
ボール盤	13
旋盤 1 (汎用旋盤)	13
旋盤 2 (卓上旋盤)	0
帯鋸盤 1 (精密コンターマシン)	8
帯鋸盤 2 (コンターマシン)	6
両頭グラインダー	0
フライス盤	11
折曲機(シャーリング)	1
ファインカット	1

機器名	件数
ベルトグラインダー	2
糸鋸盤	2
スライド丸鋸	0
ロータリーバンドソー	1
タップ / ダイス	3
工具	1
3Dプリンター	71
レーザー加工機	8

### 工作機械使用実績推移



### 4.3 機械運転技術講習会

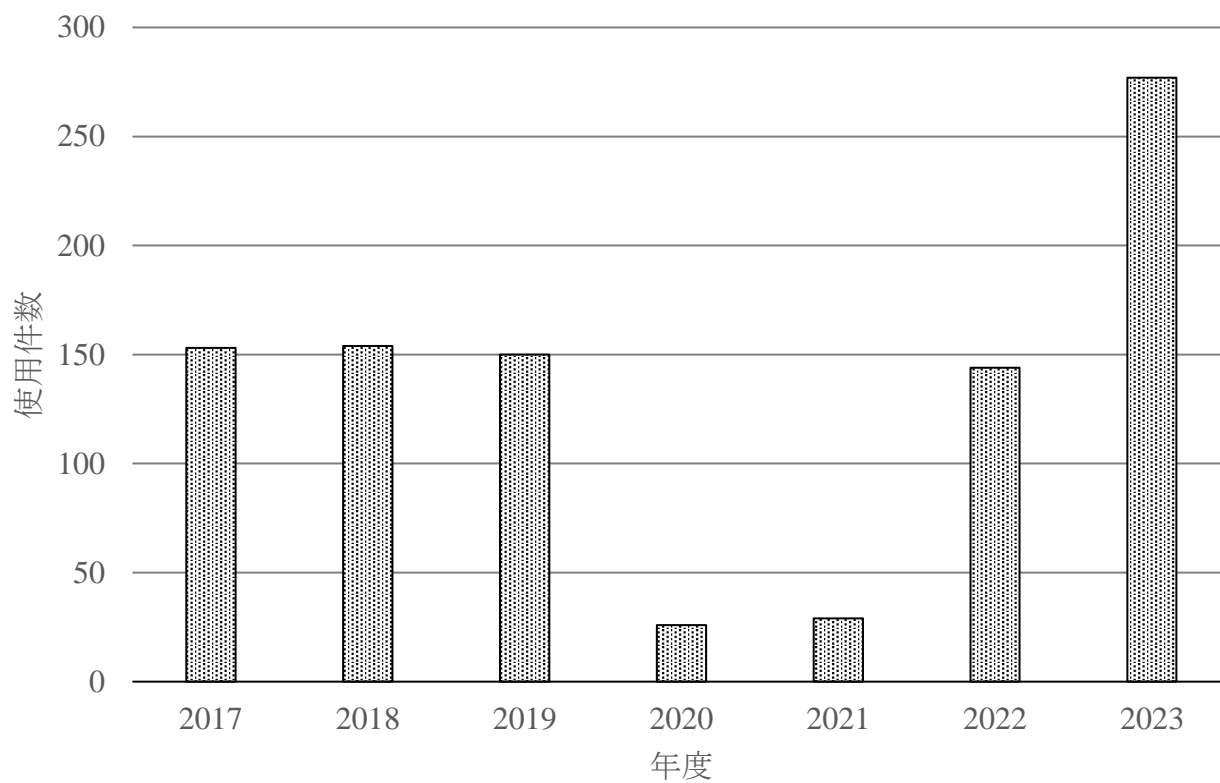
桂ものづくり工房の工作機械およびデジタル加工機（3Dプリンター・レーザー加工機）を使用するには、技術部が主催する機械運転技術講習を受講・修了する必要があります。2023年度は1回の受講者を2名までに限定した少人数制で開催し、開催回数は12回、受講者総数は19名でした。

講習日	受講人数
2023/4/10	1
2023/5/25	2
2023/6/5	2
2023/7/11	2
2023/7/27	2
2023/8/23	2
2023/9/28	2
2023/10/11	1
2023/11/9	2
2023/12/6	1
2024/1/11	1
2024/2/7	1

## 4.4 大判プリンター使用実績

2023年度の大判プリンターの使用件数は277件でした。

大判プリンター使用実績推移



## 4.5 物品貸出実績

### 2023 年度 物品貸出実績

品名	件数	日数
マイクスピーカー	5	23
Web カメラ	4	22
電気丸のこ	2	8
振動ドリル	2	6
ドリル刃	2	6
レーザー距離計	2	2
スナックリングプライヤ	1	5
爪付油圧ジャッキ	1	4
ドライバドリル (充電式)	1	4
キャッチパレットラック	1	2
手動油圧パンチャー	1	2
ネジザウルス	1	2
クランプメータ	1	1

### 貸出物品例



## 4.6 技術相談実績

技術相談は口頭、メール、WEB サイトの受付フォームで受け付けています。メールと受付フォームに限ると、2023 年度の相談件数は 11 件(メール 4 件、受付フォーム 7 件)でした。

### 【相談例】

#### <相談概要>

天然ゴムの試料に高精度で穴あけ加工をしたい。現状、回転パンチプライヤーでの加工を試みているが穴がずれてしまう。

#### <回答概要>

桂ものづくり工房に設置されているフライス盤を使用することで、容易に加工が可能。また、穴あけパンチ等を使用すると、回転パンチプライヤーよりも精度良く穴あけ加工が可能かと思われる。

5

會議記錄



## 5.1 会議記録

### 2023年4月

- 5日(水) 【研修委員会】第1回会議
- 19日(水) 【広報・編集委員会】第1回会議
- 20日(木) 【技術室会議】第1回会議

### 2023年5月

- 11日(木) 【研修委員会】第2回会議
- 15日(月) 【技術室会議】第2回会議

### 2023年6月

- 19日(月) 【技術室会議】第3回会議
- 27日(火) 【技術部運営委員会】第1回会議

### 2023年7月

- 20日(木) 【桂ものづくり工房委員会】第1回会議
- 24日(月) 【技術室会議】第4回会議

### 2023年8月

- 28日(月) 【技術室会議】臨時会議
- 30日(水) 【広報・編集委員会】第2回会議

### 2023年10月

- 19日(木) 【技術室会議】第5回会議
- 31日(火) 【桂ものづくり工房委員会】第2回会議

### 2023年11月

- 22日(水) 【技術室会議】第6回会議
- 27日(月) 【研修委員会】第3回会議

### 2023年12月

- 18日(月) 【技術室会議】第7回会議

### 2024年1月

- 22日(月) 【技術室会議】第8回会議
- 29日(月) 【桂ものづくり工房委員会】第3回会議

2024年2月

16日(金) 【技術室会議】第9回会議

2024年3月

4日(月) 【桂ものづくり工房委員会】第4回会議

15日(金) 【広報・編集委員会】第3回会議

18日(月) 【技術室会議】第10回会議

21日(木) 【研修委員会】第1回会議

## 編集後記

本報告集は京都大学大学院工学研究科技術部の 2023 年度の活動をまとめたものです。

2023 年度は 5 月 8 日に新型コロナウイルス感染症の分類が 5 類へと変更され、日常生活における制限が緩和されたことで、開催形式を対面に戻す研修や技術研究会が増える 1 年となりました。コロナ禍の期間に発達したオンライン形式による開催は、場所の拘束を受けずに情報交換できたり学習機会に触れられたりするという特徴を有していて、この特徴を生かすことで現時点でも廃れることなく、対面形式と共存・棲み分けを行って学びや交流の環境を一層充実させるものとなっています。今後もこれら両形式によって、技術職員のスキルアップや知識の共有が活発に行われるものと信じています。

最後に、京都大学大学院工学研究科「技術部報告集（第 21 集）」を発刊するに当たり、技術部の運営でご指導いただいております技術部長をはじめ、教員、事務職員、技術職員の皆様にご協力いただきましたこと、広報・編集委員会一同、厚く御礼申し上げます。本報告集をご高覧いただき、技術部へのご助言や一層のご支援を賜ることができれば幸いです。

2024 年 6 月

## 2023 年度 工学研究技術部 広報・編集委員会

委員長 塩田 憲司

副委員長 野村 昌弘

委員 青木 健朗 宇野 優衣 加藤 和成 佐藤 佑樹

## 2024 年度 工学研究技術部 広報・編集委員会

委員長 塩田 憲司

副委員長 奥中 敬浩

委員 石川 航佑 藺 林 豊 西村 果倫 平野 裕一

---

### 技術部報告集発行履歴

第1集	(1994年3月発行)	1988(S63)年度～1993(H05)年度分活動報告
第2集	(1998年3月発行)	1994(H06)年度～1997(H09)年度分活動報告
第3集	(2002年8月発行)	1998(H10)年度～2002(H14)年度分活動報告
第4集	(2007年3月発行)	2003(H15)年度～2006(H18)年度分活動報告
第5集	(2008年3月発行)	2007(H19)年度分活動報告
第6集	(2009年3月発行)	2008(H20)年度分活動報告
第7集	(2010年3月発行)	2009(H21)年度分活動報告
第8集	(2011年3月発行)	2010(H22)年度分活動報告
第9集	(2012年5月発行)	2011(H23)年度分活動報告
第10集	(2013年10月発行)	2012(H24)年度分活動報告
第11集	(2014年10月発行)	2013(H25)年度分活動報告
第12集	(2015年5月発行)	2014(H26)年度分活動報告
第13集	(2016年6月発行)	2015(H27)年度分活動報告
第14集	(2017年6月発行)	2016(H28)年度分活動報告
第15集	(2018年6月発行)	2017(H29)年度分活動報告
第16集	(2019年6月発行)	2018(H30)年度分活動報告
第17集	(2020年6月発行)	2019(R1)年度分活動報告
第18集	(2021年6月発行)	2020(R2)年度分活動報告
第19集	(2022年6月発行)	2021(R3)年度分活動報告
第20集	(2023年6月発行)	2022(R4)年度分活動報告
第21集	(2024年6月発行)	2023(R5)年度分活動報告

京都大学大学院工学研究技術部報告集（第 21 集）

2024 年 6 月

発行：工学研究技術部 広報・編集委員会

編集：工学研究技術部 広報・編集委員会

E-mail: [pr-e@tech.t.kyoto-u.ac.jp](mailto:pr-e@tech.t.kyoto-u.ac.jp)

<https://www.tech.t.kyoto-u.ac.jp/ja>

本報告集の無断転載を禁じる。