

# GUI を用いた箱詰め配置編集システムの開発とロボットシステムへの実装

神内 杜夫, 福本 靖彦, 竹中 慎, 小林 宏明

近年, 工業製品の製造工程のみならず, 食品工場や物流倉庫などでもロボットシステムの導入が進んでいる。しかし, 少量多品種の箱詰め作業では, 製品やオーダーに応じてワーク配置を変更する必要があり, 従来のロボットシステムではプログラム編集やティーチング作業に専門知識が必要であった。本研究では, 箱詰め作業を対象とした配置情報の編集手法を提案し, GUI を用いた直感的操作により誰でも簡単に編集可能なシステムとして実装した。食品の箱詰め作業を例に, GUI 操作のみで設定した配置情報に基づき, 複数形状を含む箱詰め作業を正確に実行できることを確認し, 少量多品種工程への適用可能性を示した。

## 1 緒言

近年, 少子高齢化に伴い, 様々な業種において労働力の確保が深刻な問題となっている<sup>1, 2)</sup>。特に, 単純作業や反復作業を含む業務では人手不足の影響が大きく, 生産性の維持や業務の安定的な継続が課題となっている。このような背景から, 人手作業の代替や作業効率の向上を目的として, ロボットを活用した自動化技術の導入が進められている。近年では, 食品製造業や物流倉庫など, 工業製品の製造工程以外にも幅広い分野でロボットシステムの導入が進んでいる<sup>3, 4)</sup>。

食品工場や物流倉庫では, 単純作業の代表例の一つである箱詰め作業の自動化が期待されている。これらの分野では製品の種類や注文内容が多様であり, 少量多品種生産に対応する必要がある。そのため, 箱詰め作業においても製品の種類や注文内容に応じて箱内のワーク配置を柔軟に変更する必要が生じる。従来のロボットシステムでは, あらかじめ複数の作業パターンを登録して対応する方法が用いられることが多い。しかし, 製品の組み合わせが多様化するにつれて, すべてのパターンを事前に準備することは困難となる。また, 個別に作業内容を変更する場合には, プログラム編集やティーチング作業が必要であり, 専門知識を有する作業員への依存が生じるという課題がある。

そこで本研究では, GUI (Graphical User Interface) を用いた直感的な操作により, 箱詰め作業における配置情報を編集可能なシステムを設計した。本システムは箱詰め作業を対象とし, 製品の種類や配置の違いに応じた作業内容の変更に対応することを目的とする。本システムでは, GUI 上で設定した配置情報を制御システムに送信し, それに基づいてロボットおよび周辺機器が動作する。これにより, ロボットプログラムやティーチングを変更することなく, 専門知識を有しない作業員でも配置変更を行うことが可能となる。

本研究では, 本県の特産品である和三盆糖を用いた菓子の箱詰め作業を対象としてシステムを実装し, GUI 上で設定した配置情報に基づいて箱詰め作業が正しく実行されることを確認する。

## 2 配置情報編集手法の提案

### 2. 1 箱詰め作業のモデル化

本研究では, トレイ内に配置されたワークをロボットにより取り出し, 所定位置に固定された箱内へ配置する箱詰め作業を対象とする。図1に箱詰め作業の作業環境を示す。作業環境には複数のワークトレイが配置されており, 各トレイには単一種類のワークがそれぞれ配置されている。ロボットはカメラにより取得したワークの位置座標に基づき, トレイからワークを取り出し, 箱内へ配置する。ワークには様々な形状が想定され, その大きさも異なる。

箱詰め作業では, 製品や注文内容に応じて箱内の配置内容を変更する必要がある。従来は, 製品ごとにティーチングを行う方法や, 複数の配置内容をあらかじめプログラムとして登録し切り替える方法が用いられてきた。しかし, 前者は作業内容の変更のたびにティーチング作業が必要となり手間がかかる。また, 後者については, 配置内容の種類が増加すると必要なプログラムパターン数が膨大となり, すべてに対応することは困難である。

このような課題に対し, 本研究では箱内の配置内容を整理・表現するために, 箱内部を格子状に分割し, 各区分を配置マスと定義する。ワークの配置はこの配置マス単位で表現され, ワークの形状に応じて1つまたは複数の配置マスを占有するものとする。このように配置マスをを用いることで, 箱内の配置内容を配置マス単位で表現するモデルとして整理する。

### 2. 2 配置情報の表現方法

本研究では, 箱内の配置内容を表現するために, 各配

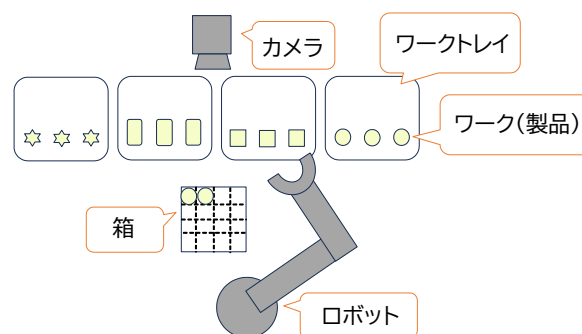


図1 対象とする箱詰め作業

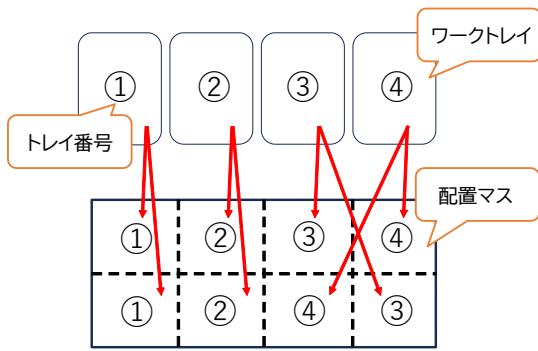


図2 配置マスとトレイ番号の割り付け例

置マスに対してトレイ番号を割り付ける方法を用いる。ここでトレイ番号とは、各トレイに対応付けられた識別番号であり、トレイ内には同一種類のワークが配置されているものとする。

図2に配置マスとトレイ番号の割り付けの例を示す。図2に示すように、各配置マスにトレイ番号を割り付けることで、どの配置マスにどのトレイからワークを取り出して配置するか、という作業内容を表現することができる。すなわち、配置マスとトレイ番号の対応関係によって、箱内の配置内容を一意に定めることが可能となる。ワークの形状によっては、1つの配置マスではなく複数の配置マスを占有する場合がある。本研究におけるワークの形状情報とは、ワークが配置マス上でどのような範囲を占有するかを示すものである。このような場合には、各配置マスに対応するトレイ番号に加えて、ワークの形状情報を付与することで、配置内容を表現する。これにより、占有する配置マスの範囲を含めた配置内容の記述が可能となる。

本手法を用いることで、作業者は各配置マスに対してトレイ番号を割り付けるのみで箱内の配置内容を決定できる。これにより、従来のような個別のティーチングや多数のパターン登録に依存することなく、配置内容の変更を容易に行うことが可能となる。

### 3 提案手法のシステム実装

#### 3.1 システム構成

本研究では、2節で提案した配置情報編集手法をGUI上に実装し、その設定情報に基づいてロボットおよび周辺機器を動作させるシステムを構築した。図3に本システムの構成を示す。本システムはGUIプログラム、カメラシステム、およびロボットから構成される。

GUIプログラムは、作業者が配置マスごとのトレイ番号およびワークの形状情報を指定するための入力インタフェースである。作業者がGUI上で設定した配置情報は、配置マスごとの情報として内部で管理され、カメラシステムに送信される。

カメラシステムは、カメラ制御プログラムとカメラ本体により構成される。カメラ制御プログラムは、GUIプログラムと同一のPC上で動作し、カメラ本体は、PCとUSBで接続される。カメラ制御プログラムは、GUIから送信された情報に基づいて撮像および画像処理を行い、ワークの位置座標を取得する。

ロボットはPCとEthernetで接続され、カメラシステムから送信されるワークの位置座標および形状情報を

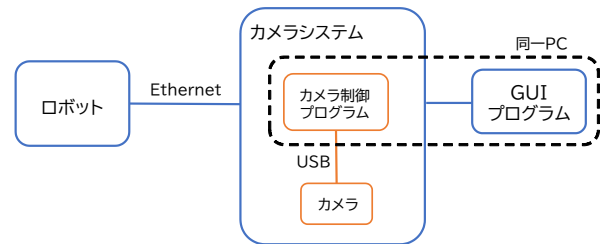


図3 システム構成図



図4 GUI画面

受信する。ロボットはこれらの情報に基づいてワークのピッキングおよび箱内の各配置マスへの配置を行う。

#### 3.2 GUIプログラムの実装

本研究では、Python (3.8.8) およびPySide6を用いてGUIプログラムを作成した。図4に本研究で作成したGUI画面を示す。画面右側に表示される4×4のマスマスが配置マスを表す。

作業者は画面左側のボタンからトレイ番号とワーク形状を選択し、右側の任意の配置マスを選択することで、トレイ番号とワーク形状を割り付けることができる。配置マスには、割り付けられたトレイ番号と、トレイ番号ごとに固有の色が表示される。

複数マスを占有する場合には、選択したマスを基点（以下、基点マスと呼ぶ）とし、ワークの形状に応じて右方向および下方向に配置マスを占有する。占有するすべてのマスに色が表示されるが、トレイ番号は基点マスのみに表示される。これにより、複数マスを占有するワークと、同一トレイ番号が隣接している場合とを視覚的に区別できる。

本システムでは、「正方形 (小)」、「縦長」、「横長」、「正方形 (大)」の4種類のワーク形状を想定し、それぞれ1×1、1×2、2×1、2×2のマスを占有するものとした。既に占有されているマスやワークがはみ出すようなマスには配置できない。

プログラム内部では、GUI上で設定された配置マスごとの情報を配列として管理している。本研究では、箱内の配置マスに対応する4×4の配列を2つ用いる。一方の配列には各配置マスに対応するトレイ番号を格納し、もう一方の配列にはワーク形状を格納する。なお、ワーク形状はあらかじめ定義した識別番号として格納する。複数マスを占有する形状の場合には、基点マスにのみトレイ番号および形状情報を格納し、占有される他のマスには識別用の値(0)を格納することで、1つのワークとして扱う。

リセットボタンにより初期状態に戻すことができる。また、送信ボタンを押すことで、これら2つの配

列に格納された情報がカメラ制御プログラムに送信される。

### 3. 3 カメラ制御プログラムの実装

本研究で用いたカメラ制御プログラムは、Python (3.8.8)を用いて作成し、画像処理にはOpenCV (4.5.3)を用いた。カメラ制御プログラムは、大きく分けて撮像処理、計算処理、通信処理の3つの機能から構成される。

本システムでは、箱詰め作業は箱内の左上の配置マスから右下に向かって順に実行されるように設計している。この処理順に対応させるため、カメラ制御プログラムはGUIプログラムから受け取った配列を先頭から順に参照することで、次に処理すべき配置マスを決定する。

撮像処理では、GUIプログラムから受け取った配列に基づき、対象となるトレイを決定し、ワークの撮像を行う。図5に撮像画像の例を示す。図5に示すように、本研究では1台のカメラで全てのトレイを撮像している。撮像は、USB接続されたカメラを用いて行い、ひずみ補正などの画像処理を行う。その後、GUIプログラムから受け取った配列を先頭から順に参照し、読み取ったトレイ番号に対応する領域をトリミングする。トレイ番号ごとのトリミング範囲は事前に設定している。撮像はロボットからの撮像依頼信号に合わせて行う。

計算処理では、トリミングされた画像からワークを検出し、その位置をロボット座標系のワーク座標に変換する。まず画像を2値化し、OpenCVのmoments関数を用いてワークの重心座標を求める。求めた重心座標に対して、事前のキャリブレーションに基づくホモグラフィ変換を行い、ロボット座標系に変換する。

通信処理では、Ethernetによるソケット通信を用いてロボットに設定値を送信する。送信するデータは、ワーク座標値、形状情報(識別番号)、スキップフラグの3つである。スキップフラグとは、縦長や横長など複数マスを占有するワークが配置された場合に、配置を行わないマスをロボット側に伝えるためのものである。データはバイナリ形式で送信する。

### 3. 4 ロボットプログラムの実装

本研究では、ロボットとカメラシステム間の通信にEthernetによるソケット通信を用いる。事前に、カメラ画像座標とロボット座標を対応付けるためのキャリブレーションを行う。また、箱内の各配置マスの位置を決定するため、左上、右上、左下の配置マスの中心座標をあらかじめティーチングしておく。

ロボットが待機位置に到達すると、カメラシステム

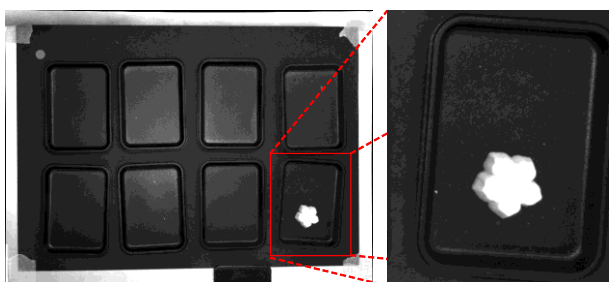


図5 カメラシステムの撮影例

を実行しているPCとソケット通信を確立する。その後、ロボットは撮像要求信号を送信する。ロボットは、カメラシステムから送信されるワーク座標および形状情報を受信し、これらの情報に基づいてワークの取り出し動作を行う。

ワークの配置は、箱内の左上の配置マスから右下に向かって順に行う。ロボットは、あらかじめティーチングされた左上、右上、左下の3点の座標値に基づき、各配置マスの中心座標を算出する。

ワークの形状によっては複数マスを占有するため、配置マスの中心座標に対して位置の補正を行う。縦長および横長のワークの場合には、下方向または右方向に0.5マス分の平行移動を行う。また、正方形(大)の場合には下方向および右方向にそれぞれ0.5マス分の平行移動を行うことで、適切な位置に配置する。

上記の処理を繰り返し、すべての配置マスへの配置が完了すると箱詰め作業を終了する。

## 4 菓子の箱詰め作業への適用

### 4. 1 実験環境

GUI上で設定した配置情報に基づき、箱詰め作業が意図した通りに実行されるかを検証するため、菓子の箱詰め作業を対象とした実験を行った。本実験では、3節で述べたGUIを用いて箱内の配置を設定し、ロボットによりワークの箱詰めを行った。図6に実験環境を示す。

本研究では、協働ロボット(Universal Robots社、UR10)に吸着ハンド(SCHMALZ社、コンポジットグリップSCG-A-MA-AR)を取り付け、ワークの取り出しを行った。ワークの撮像にはUSBカメラ(basler社、acA2500-14uc)およびリング照明(CCS社、HPR2-100SW)を用いた。また、カメラシステムにはノートPC(日本HP社、OMEN Transcend 14)を用いた。

ワークトレイには縦約7.5cm、横約5.5cmの樹脂製トレイを用いた。2値化処理を安定して行うため黒色に塗装した。トレイは黒色シートを敷いた机上に約10mmの間隔で、縦2列、横4列の計8個を配置した。各トレイには2つのワークを配置したが、縦長ワークについては1つのみ配置した。図7にトレイ番号と配置したワークの種類を示す。

箱はベルトコンベア上の所定位置に固定し、実際の製品と同様に十字の仕切り板を設置した状態で実験を

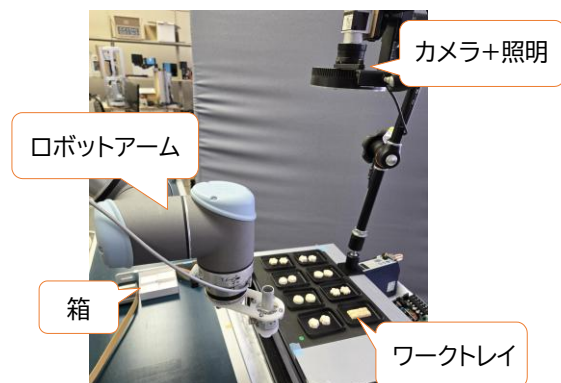


図6 実験環境



図7 トレイ番号と配置したワーク

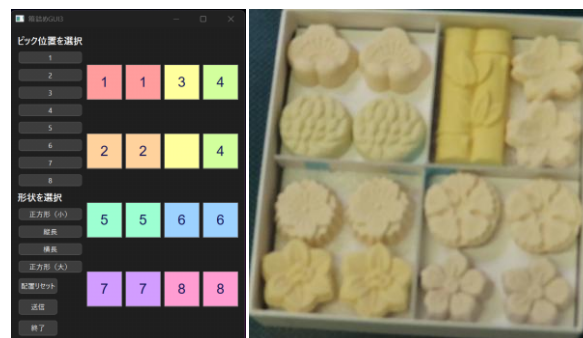


図9 GUI の設定と箱詰め作業完了後の配置

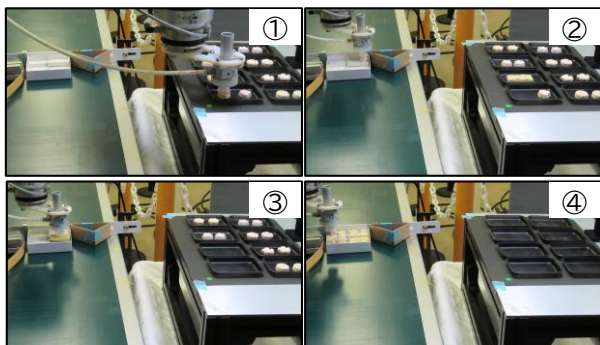


図8 箱詰め作業の様子

行った。

#### 4. 2 動作結果

図8にロボットの動作の様子を示し、図9にGUIで設定した配置情報と箱詰め作業完了後の製品配置を示す。図7に示したトレイ番号およびワーク形状の対応関係と図9を比較すると、各配置マスにおいて、GUIで指定したトレイ番号に対応するワークが正しく配置されていることが確認できる。また、縦長ワークのような複数マスを占有するワークについても、意図した配置マスに適切に配置されていることが確認された。

以上より、GUI上で設定した配置情報に基づいて、異なる形状のワークを含む箱詰め作業を正確に実行可能であることを確認した。

## 5 結言

本研究では、GUIを用いた直感的な操作により、箱詰め作業の配置情報を簡単に編集可能な、箱詰め配置編集システムを開発した。提案システムにより、GUI上で設定したトレイ番号とワーク形状情報に基づき、複数形状を含む箱詰め作業を正確に実行できることを確認した。これにより、専門知識を持たない作業者でも作業内容を容易に変更でき、食品工場や物流倉庫など、少量多品種を扱うラインへのロボット導入の障壁を低減する可能性がある。

今後の課題として、本研究ではノートPC上にGUIを構築したが、実際の工場環境では信頼性や稼働安定性の観点からPLCが用いられることが多く、HMIとPLCを組み合わせた構成が一般的である。そのため、実際の現場で想定されるHMIおよびPLC環境上で同様の編集システムを構築することを目指す。さらに、本研究で得られた成果を、県内企業のロボット導入支援へとつなげることも目指す。

## 参考文献

- 1) 香川県 政策部 政策課：「人生100年時代のフロンティア県・香川」実現計画（2023）。
- 2) 経済産業省：2025年版ものづくり白書（2025）。
- 3) 経済産業省：ロボフレ×食品 食品産業の未来を変える！（2025）。
- 4) 国土交通省 総合政策局 物流政策課：物流・配送会社のための物流DX導入事例集（2022）。

# リールを用いた8の字巻における捻じれの発生条件

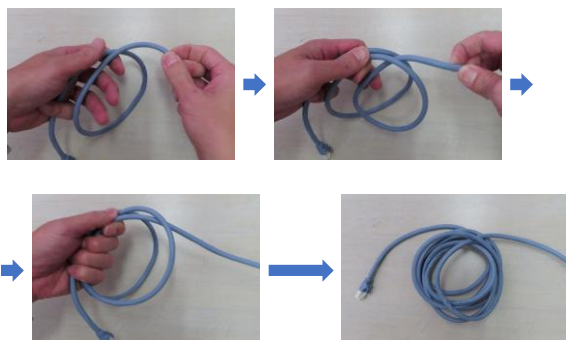
福本 靖彦, 竹中 慎, 坂東 慎之介, 森 利昭\*

8の字巻と呼ばれる紐の束ね方がある。これは束から紐を引き出した際に捻じれが生じない束ね方として知られている。8の字巻を行う方法の一つにリールを用いた方法があるが、著者らが検証したところ、条件によっては捻じれが生じることが分かった。そこで本研究では、8の字巻を構成する輪の性質を調べ、捻じれの発生条件を明らかにした。

## 1 緒言

ロープや電線などの紐状の物体(以下、単に紐と記す)を束ねる方法として、8の字巻と呼ばれる方法がある。一般に8の字巻は、束から紐を引き出した際に捻じれが生じない巻き方として知られており、図1(a)~(c)の三種類の巻き方がある。8の字巻は人の手で行われることが多いが、図1(c)に示すリール等の円柱状部材(以下、単にリールと記す)を用いた8の字巻については専用機械により実現する方法がいくつか提案されている<sup>1~7)</sup>。ただし、著者らが図1(c)のようにリールの一か所で紐が交差するように巻き取ってからリールを抜いて開いてみると、捻じれが生じてしまう場合があった。すなわち、ただリールの一か所で交差するように巻けば良いだけではないことが分かった。

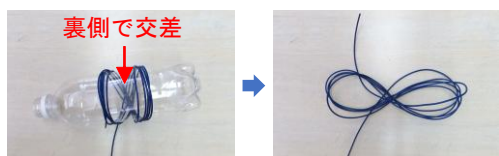
そこで本研究では、8の字巻の仕組みの解析を行った。



(a) 巻く向きを交互に変えて一つの輪に束ねたもの



(b) 平面に繰り返し8の字を書くように重ねたもの



(c) 一部交差させてリールに巻き、リールから取り出して開いたもの

図1 8の字巻

次節以降では順に、一つの輪、二つの輪、リールを用いた8の字巻の捻じれに関する性質を解析し、最終的にリールを用いた8の字巻で捻じれが発生しないための条件を示す。この条件は上掲の参考文献等<sup>1~7)</sup>では満たされていないが、明示されていないものである。

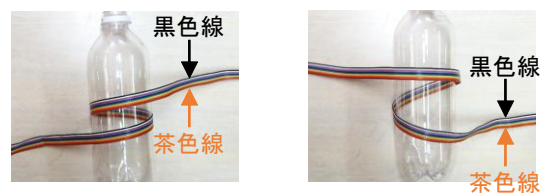
## 2 一つの輪の分類と性質

本節以降では、捻じれを視認しやすくするため、紐としてフラットケーブルを用いて図示する。

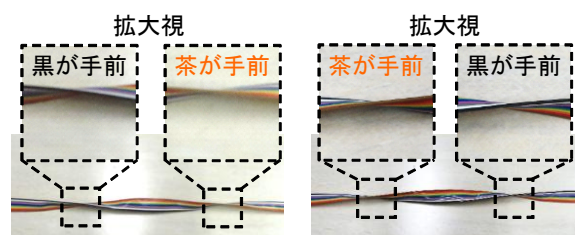
本研究では、図2(a)に示す紐の巻き方を右巻と呼び、図2(b)に示す巻き方を左巻と呼ぶ。また、図3(a)に示す紐の捻じれを右ねじの捻じれと呼び、図3(b)に示す紐の捻じれを左ねじの捻じれと呼ぶ。

図4に示すように右巻の輪の両端を引いて輪を解消すると、一周分の右ねじの捻じれが生じる。同様に、左巻の輪の両端を引いて輪を解消すると、一周分の左ねじの捻じれが生じる。図5に示すように、輪は様々な方向に作ることができるが、上記の捻じれはどの方向に輪があっても同様である。

図6に示すように、輪の中に紐の一方の端を通すと、右巻の輪は左巻の輪に遷移し、左巻の輪は右巻の輪に遷移する。

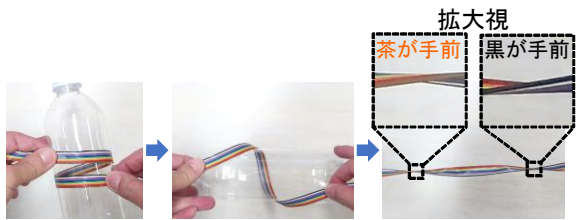


(a) 右巻 (b) 左巻  
図2 輪を巻く向きを定義

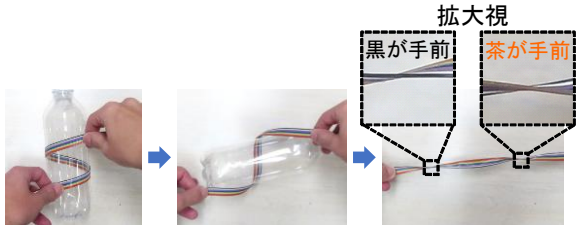


(a) 右ねじの捻じれ (b) 左ねじの捻じれ  
図3 捻じれの向きを定義

\* 高木綱業株式会社



(a) 右巻の輪を解消すると、右ねじの捻じれが生じる



(b) 左巻の輪を解消すると、左ねじの捻じれが生じる

図4 一つの輪を解消した際に生じる捻じれの差異

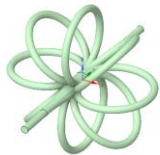
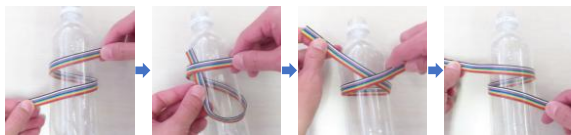
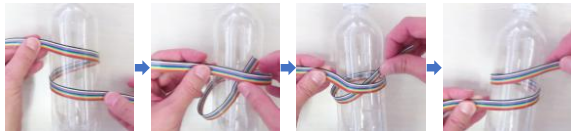


図5 45 deg ごとに輪を描画して重ねたもの



(a) 右巻の輪の中に端の一方を通すと左巻に移移



(b) 左巻の輪の中に端の一方を通すと右巻に移移

図6 一つの輪に対し、紐の一端を輪の中に通す操作

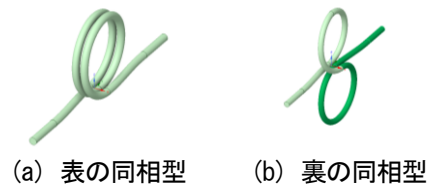
### 3 二つの輪が連続して配置されたものの分類と性質

図1の三種類の8の字巻はいずれも二つの輪を基本単位として考えることができる。そこで本節では、二つの輪を連続して配置する操作を、輪を巻く方向と輪の向きの相対位置から図7のように四つに分類し、それぞれの捻じれの有無を整理する。

本研究では、右巻のみからなる場合、あるいは左巻のみからなる場合を同相型(図7(a), (b))と呼ぶ。右巻と左巻の両方の輪を一つずつ持つ場合を逆相型(図7(c), (d))と呼ぶ。

二つの輪の方向の相対的な位置関係は360 degの自由度がある。例えば相対位置が270 degの場合は図8のようになる。ただし、紐を束ねる際には一般に同一平面に置いて束ねるので、本研究では約0 degの場合と約180 degの場合のみを扱い、それぞれ表(図7(a), (c))と裏(図7(b), (d))と呼ぶ。

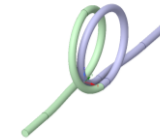
二つの輪を連続して配置した場合、一つの輪の場合と同様に紐の両端を引くと輪を解消することができる。



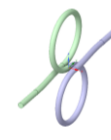
(a) 表の同相型



(b) 裏の同相型



(c) 表の逆相型



(d) 裏の逆相型

図7 二つの輪を連続して配置したものの分類

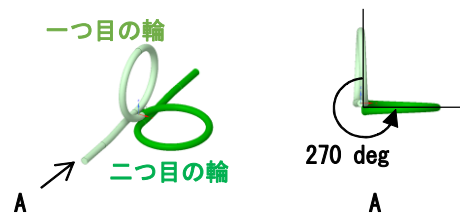


図8 二つの輪の相対角度が270 degの場合の例

表1 連続して配置された二つの輪を解消したときの捻じれの有無

	表	裏
同相型	発生する	発生する
逆相型	発生しない	発生しない

その際、同相型の場合は二周分の捻じれが生じる。逆相型の場合は左ねじの捻じれと右ねじの捻じれが生じてお互いにキャンセルされ、最終的には捻じれは残らない(以下、二つの捻じれがキャンセルされて最終的に捻じれが残らない場合も、単に捻じれが生じないと記す)。つまり表1のように整理される。

なお、表の同相型を繰り返すものは一般に順巻と呼ばれる。表の逆相型を繰り返したのものや、裏の逆相型を繰り返したものは一般に8の字巻と呼ばれる。ただしリールを用いた8の字巻では、条件によっては、裏の逆相型ではなく裏の同相型(と等価な巻き方)を繰り返したものになる場合があることを次節で示す。

### 4 リールを用いた8の字巻

図1(c)で示したように、リールの一か所で紐が交差するように巻き取り、最後にリールを抜いて輪を左右に開くことで、8の字巻を効率的に行うことができる。巻き取り過程は、リールの回転動作と、紐を巻き取るリール上の位置を制御する直動動作だけで実現できるので、機械的に実現しやすい。ただし、巻き取りと引き出しを頻繁に繰り返す場合など、用途によっては適さない場合もある。また、左右に開く際に紐の曲げが生じるので、紐に残る内部応力を減らしたい場合には注意が必要である。

前節で述べたように、リールを用いた8の字巻では、リールが二周回転することで形成される二つの輪を基本

単位として考えることができる。以下、複数の基本単位からなる束において、 $k$ 個目の基本単位を基本単位 $k$ と呼ぶ。

本節では、まず一つの基本単位からなる束の捻じれの発生条件を解析する。続いて複数の基本単位からなる一般的な束の捻じれの発生条件を解析する。

#### 4. 1 一つの基本単位からなる束の捻じれの発生条件

基本単位として、図9に示すような四種類のリールの巻き方が考えられる。これらの鏡像体となる巻き方は、捻じれの発生の有無に関してはこれらの巻き方と同様と考えられるので説明を省略する。また、以下のように用語を定義する。

- ・図9の巻き方において、先に閉じる輪を輪Aと呼び、後に閉じる輪を輪Bと呼ぶ。
- ・紐の始点から輪Aの開始点までの部位と、紐の始点から輪Bの開始点までの部位のうち、どちらか短い方の部位を導入部と呼ぶ。

巻き方1と巻き方2はリールの中央付近から巻き始めている点と同じであるが、巻き方1は導入部をリールの周方向に這わせて巻き取っているため、導入部が輪Bに巻き込まれていないのに対し、巻き方2では周方向からずれた方向に這わせているために、導入部が輪Bに巻き込まれている点が異なっている。巻き方3と巻き方4はリール端部付近から巻き始めていることは同じであるが、導入部の右側（リールの中央寄り）を通して輪Bを完成させるか、左側（リールの端寄り）を通して完成させるかが異なっている。

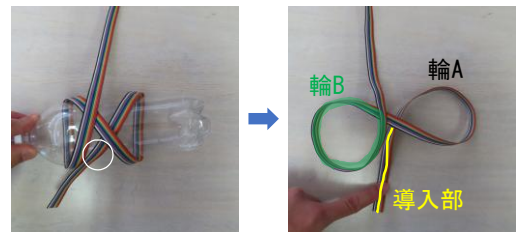
巻き方1は、図9(a)の右側の図が示すように輪Aが左巻で、輪Bが右巻であり、裏の逆相型である。したがって、紐の端を引いて輪を解消しても捻じれは生じない。

巻き方2も、図9(b)の右側の図に示すように、輪Aが左巻で、輪Bが右巻であるように見える。ただし輪Bは、その開始点から始点側へ伸びた紐が輪の中を通過している。よって図5(a)と同様に始点側の紐を引くと、輪Bは左巻に遷移する。したがって、これは捻じれの観点からは裏の同相型と等価な巻き方であると言える。(以後、同相型と等価な巻き方を単に同相型と呼ぶ。同様に逆相型と等価な巻き方も、単に逆相型と呼ぶ。)なお図10のように導入部が短い場合は、紐を引いて輪を解消したときにこの端が輪Bの中を通過するかどうか不定であるので、捻じれが生じるかどうか不定である。

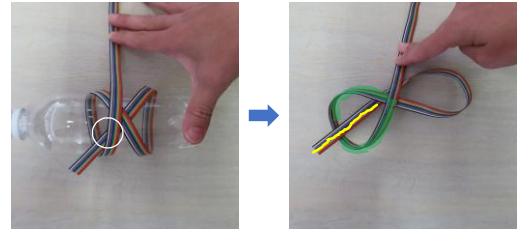
巻き方3は、図9(c)の右側の図に示すように、これまでに分類したものとは異なる形状の基本単位となっている。ただし図11に示すように、その終点側の紐を次の基本単位の最初と同様に二つの輪の間まで這わせてパターンを開始位置をずらして考えると、これは巻き方2と等価であることが分かる。すなわち、巻き方3は同相型である。

巻き方4は、巻き方3と同じ考え方で逆相型である。

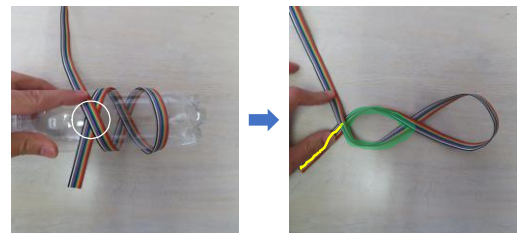
本項では、リールを用いた8の字巻の基本単位一つからなる束において、リールへの紐の巻き方と捻じれの発生有無の関係、すなわち捻じれの発生条件を表2の通り明らかにした。なお以上の発生条件はリールに巻き取る際の条件である。リールを抜いて束を左右に開く際に導入部と輪Bの関係が変わった場合(例えば、リールに巻く際には図9(b)の左図のように導入部を巻き込んでい



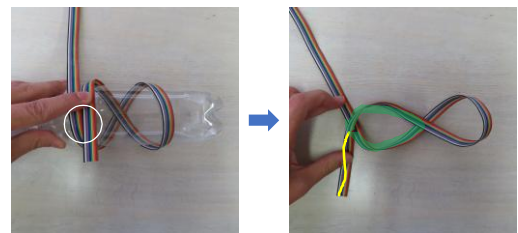
(a) 巻き方1



(b) 巻き方2



(c) 巻き方3



(d) 巻き方4

図9 リールを用いた8の字巻の基本単位の種類

紐の始点は図中下方の端点とする。左側の図中の白丸は(a)と(b)の差異、および(c)と(d)の差異を示す。右側の図中のハイライト表示は、輪B(緑色)、導入部(黄色)に対応する。

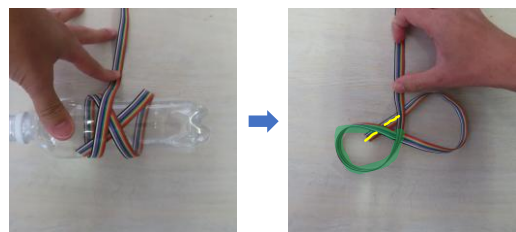


図10 巻き方2において導入部が短い場合



図11 巻き方3の終点側の紐を次の基本単位の最初と同様に二つの輪の間まで這わせると巻き方2と一致する。

表2 一つの基本単位からなるリールを用いた8の字巻における、リールへの紐の巻き方と捻じれの発生有無の関係

	巻き方1	巻き方2	巻き方3	巻き方4
巻き始め位置	リール中央付近	リール中央付近	リール端付近	リール端付近
輪Bを閉じる紐	導入部を巻き込まない	導入部を巻き込む	導入部よりリール中央寄り	導入部よりリール外側
捻じれ	あり	なし	なし	あり

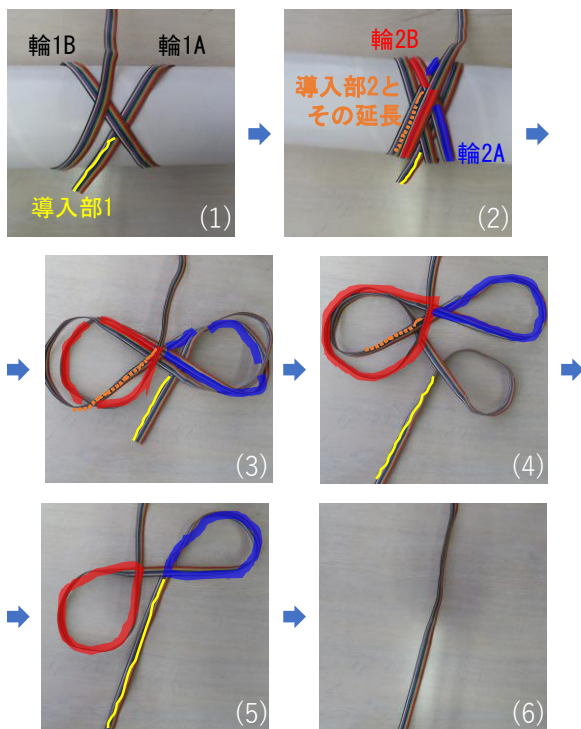


図12 二つの基本単位からなる束を作った後に、基本単位1の輪を解消し、続いて基本単位2の輪も解消する様子の例

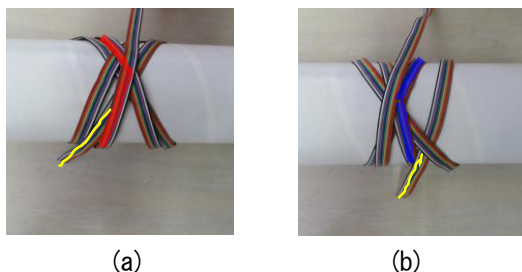


図13 二つの基本単位からなる束で、基本単位1が巻き方1かつ、基本単位2の一方の輪が導入部を巻き込むものの例

- (a) 輪2B (赤) が導入部1 (黄) を巻き込む場合
- (b) 輪2A (青) が導入部1 (黄) を巻き込む場合

るが、開く過程で導入部が輪から出て図9(a)の右図のようになった場合は捻じれの発生の有無も変わる。

#### 4. 2 複数の基本単位からなる束の捻じれの発生条件

本項では、まず二つの基本単位からなる束において、基本単位2で捻じれが生じる条件を示す。これを応用し、二つ以上の基本単位からなる束において、基本単位 $k$ で捻じれが生じる条件を示す。最後に束全体で捻じれが生じる条件を示す。

二つの基本単位からなる束の基本単位2について考える。図12に束を作る過程と、この束の基本単位1の輪を解消した後に基本単位2の輪を解消する様子の例を示す。

以下のように用語を定義する。

- 基本単位1の二つの輪のうち、先に閉じる輪を輪1Aと呼び、後に閉じる輪を輪1Bと呼ぶ
- 基本単位2の二つの輪のうち、先に閉じる輪を輪2Aと呼び、後に閉じる輪を輪2Bと呼ぶ
- 紐の始点から輪1Aの開始点までの部位と、紐の始点から輪1Bの開始点までの部位のうち、どちらか短い方の部位を導入部1と呼ぶ。
- 輪1Bが閉じた点から輪2Aの開始点までの部位と、輪1Bが閉じた点から輪2Bの開始点までの部位のうち、どちらか短い方の部位を導入部2と呼ぶ。

基本単位2が同相型であるか逆相型であるかを判定するには、導入部1と輪2Aの関係と、導入部1と輪2Bの関係の二つに着目するのが良い。

まず、なぜ導入部2ではなく導入部1に着目するのかを説明する。図12(2)、(3)では導入部2の延長先の部位(橙色点線)が輪2Bを通過しているように見えるが、図12(5)の通り、輪1Bが解消された際に当該部位は必ず輪2Bの外側を通るので、導入部2に着目する必要がない。そして、導入部2の始点側を辿ると導入部1があり、これが輪2Bの外側を通れば(図12)逆相型であるし、内側を通過すれば(図13(a))前項の巻き方2と同様に同相型である。

なお、図12と図13(a)の束はどちらも基本単位1が巻き方1(逆相型)であるので、基本単位1を解消しても捻じれは発生しない。よって上記の判定に従うならば、これらの束のすべての輪を解消すると、図12の束は捻じれが発生せず、図13(a)の束は捻じれが発生することとなる。実際に検証を行うと、図12の束は図12(6)に示すように捻じれは発生しなかった。図13(a)の束も実際にすべての輪を解消した場合には、左ねじの捻じれが発生した。したがって、上記の判定と検証結果は合致した。

次に、輪2Bだけでなく輪2Aにも着目する必要がある理由を説明する。基本単位が一つだけの場合は、リールを巻く段階で導入部が輪Aに巻き込まれることはない。しかし、着目するのが基本単位2の場合には、輪2Aが導入部1を巻き込む可能性がある(図13(b))。導入部1が輪2Aに巻き込まれたとき、輪2Aの巻く向きを逆転して考えると基本単位2が同相型になる。このとき、輪2Bに巻き込まれる場合とは、生じる捻じれが逆になることに注意が必要となる。実際、図13(b)の紐の両端を引いて輪を解消すると、右ねじの捻じれが発生した。この捻じれは図13(a)の場合と逆の捻じれである。

二つ以上の基本単位からなる束の基本単位 $k$ について考える。基本単位1から順に一つずつ、同相型であるか

逆相型であるかを判定した上で紐を引いて基本単位を解消して考えると、基本単位 2 と同様に導入部 1 に着目して判定すれば良いことが分かる。

よって、リールの中央付近から巻き始める場合には、必ず導入部 1 (紐の巻き始めの端) を二つの輪のどちらにも巻き込まずに二つの輪の間から出るように巻けば捻じれが生じることはない。なお、いずれかの基本単位の輪で導入部 1 を巻き込むと捻じれが生じるが、先に閉じる輪で巻き込みが生じた基本単位の数と、後に閉じる輪で巻き込みが生じた基本単位の数が一致する場合は、すべての紐を引き出すと最終的には捻じれがキャンセルされる。

同様の議論により、リールの端部付近から巻き始める場合には、各基本単位で後から巻かれる輪を閉じる紐が必ず導入部 1 よりもリールの端寄りを通るように這わせれば捻じれが生じない。また、いずれかの基本単位でリールの中央寄りを通れば捻じれが生じる。なお、リールの端部付近から巻き始める場合でも、先に閉じる輪で導入部 1 を巻き込む可能性があるが、導入部 1 が非常に長い場合を除き、現実には巻き込みは生じないと考えられる。

なお前項と同様に以上の条件はリールに巻き取る際の条件である。リールを抜いて束を左右に開く際に導入部 1 と輪との関係が変わった場合 (例えば、リールに巻かれていた時には輪に巻き込まれていたが、リールを抜いて束を開く際に抜けてしまった場合) は、捻じれの発生の有無も変わる。

## 5 結言

リールを用いて 8 の字巻を行う方法がある。本研究ではただリールの一か所で紐が交差するように巻くだけでは捻じれが発生しうることを最初に指摘した。この捻じれの発生条件を解析するため、まず一つの輪あるいは二つの輪を対象として、輪を巻く向きや輪ができる方向の観点から巻き方を整理した。そしてそれぞれに対し、紐の両端を引いて輪を解消したときの捻じれ発生の有無等を解析した。続いて、リールを用いた 8 の字巻を解析し、リールの中央付近から巻き始める場合には、巻き始めの

紐が二つの輪の間に位置するよう巻くことを繰り返すことで、捻じれが発生しない束ね方となることが分かった。また、リールの端部付近から巻き始める場合には二つ目の輪を閉じる紐が巻き始めの紐よりもリールの端側を通るようにすることで、捻じれが生じないことが分かった。

なお、本研究は厳密さに欠ける箇所がある。例えば、右巻や左巻は図示したのみで、厳密な定義はなされていない。また、4.2項に記した「輪 1B が解消された際に当該部位は必ず輪 2B の外側を通るので」や「基本単位 1 から順に一つずつ、同相型であるか逆相型であるかを判定した上で紐を引いて基本単位を解消して考えると」のように証明がなされていない命題もある (後者は紐を引いた際に基本単位が絡まらずに解消できることを証明していない)。より厳密な議論は今後の課題である。

## 参考文献

- 1) 日立プラント建設株式会社：ケーブル巻取装置，特許第 2720771 号，1997. 11. 21 登録 (2013. 11. 15 権利消滅)。
- 2) 今野建一：ケーブル巻取り装置，特開平 8-208115，1996. 8. 13 公開 (審査請求なし)。
- 3) スカイ工業株式会社：ケーブル 8 の字巻取り機，特開 2009-274869，2009. 11. 26 公開 (審査請求なし)。
- 4) スカイ工業株式会社：RS8-1705 手動大型 8 の字巻取機，<http://www.skykogyo.com/info/rs81705.html> (検索日：2026. 3. 6)。
- 5) 大川三基株式会社，東日京三電線株式会社：電線巻取装置，電線巻取装置の制御方法，および巻取電線，特許第 6229910 号，2017. 10. 27 登録。
- 6) 大川三基：ワイヤロールマシン：計尺巻取切断機 OSTA Model SA-522・523・524・526・527，[https://www.okawasanki.co.jp/products/wirero11/sa\\_52-series.html](https://www.okawasanki.co.jp/products/wirero11/sa_52-series.html) (検索日：2026. 3. 6)。
- 7) 有限会社ヨシモト機工：自動ワイヤー 8 字巻き装置，特許第 6684500 号，2020. 4. 1 登録 (2025. 4. 1 権利消滅)。

# オープンソース LLM を用いた RAG AI チャットボットの開発 —IRCoT による小型モデルの回答精度改善の検証—

香西 真彦, 小林 宏明, 長谷見 健太郎, 神内 杜夫

近年, ChatGPT をはじめとした大規模言語モデル (LLM: Large Language Model) を活用したシステムは多数提案されており, ソフトウェア開発支援や教育, 事務作業の効率化など幅広い分野で活用が期待されている. その適用先のひとつである”Q&A”では, LLM に必要となる知識 (データベース) を与えることで人間のような柔軟な質疑応答が可能になりつつある. しかし現状, このような応答は ChatGPT のようなクラウド上で動作する大規模モデルでなければ難しい. クラウド上のモデルの使用ではデータを外部に送信する必要があることや利用にかかるコストが導入障壁になることも少なくない. そこで, 本研究ではローカルで動作する AI チャットボットを開発し, その性能評価を行った. 大型モデルに対して推論能力に劣る小型の LLM に IRCoT 等の手法を適用することで回答精度の向上を目指した.

## 1 緒言

LLM を用いた代表的なアプリケーションとして Q&A Chatbot がある. 2023 年頃から検索拡張生成 (RAG: Retrieval-Augmented Generation) の普及により急速に広がりを見せ, 企業の受付やコールセンター, 公共施設の案内などの様々な分野への導入が進められている. RAG とは, LLM が既存モデルでは有していない知識について, 外部の知識を参照することで適切な回答を行う手法である. ただし, 検索によって参照された知識を適切に引用し回答できるかは LLM の性能によるところが大きい.

LLM は大きく 2 種類に分けられる. 一つは ChatGPT をはじめとするプロプライエタリ LLM である. プロプライエタリ LLM はクラウド上で利用され, モデルの詳細は非公開である. もう一つはモデルが完全に公開されているオープンソース LLM である. オープンソース LLM はローカル環境で動作させることができる. 前者は性能が高い一方, データを外部に送信する必要があるため導入が難しい場合がある. その場合は後者のオープンソース LLM を使う必要がある. しかし, 一般にオープンソース LLM は推論能力が低いことや, 計算リソースを用意する必要があることが課題である.

そこで, 本研究ではこうしたオープンソース LLM の課題に対して以下のような対策を行った.

- ・ IRCoT<sup>1)</sup> (Interleaving Retrieval guided by Chain-of-Thought) を参考にした手法や Rerank を用いて回答精度を改善する
- ・ 小型の LLM モデルを用いて計算リソースの負担を軽減する

実際に上記対策を講じた AI チャットボットを開発し, 性能評価を通じて IRCoT の有効性を検証する.

## 2 LLM による外部情報参照技術

Q&A Chatbot を開発するための基本的な技術である RAG とその改善手法である Rerank および IRCoT について説明する.

### 2. 1 RAG について

RAG は LLM が外部の知識を参照できるようにする技術である. 図 1 に示すように RAG の処理は次の①~⑥の流れで行われる.

- ① ユーザが質問をする.
- ② 質問を検索器にかける.
- ③ 検索器がユーザの質問をもとにデータベースを検索する.
- ④ 検索器がデータベースから質問と関連する情報を取得する.
- ⑤ もとのユーザの質問に, 検索した関連情報を付け加えたプロンプトを LLM に渡す.
- ⑥ 質問と関連情報のセットをもとに LLM が回答する.

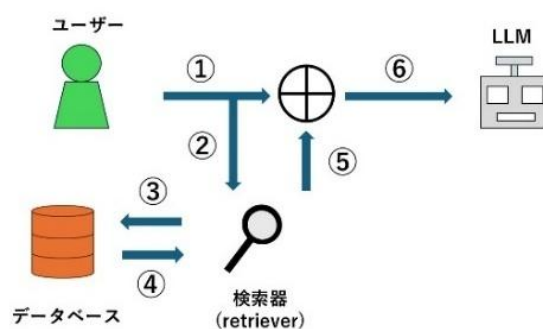


図 1 RAG の処理の流れ

RAG を用いることで以下のような利点がある.

- ・ 回答の正確性が高くなる (ハルシネーションを減らせる)
- ・ 情報の更新が容易 (追加学習が不要)
- ・ どの情報を参考にしたか把握できる (透明性の向上)

なお, ハルシネーションとは事実に基づかない情報をあたかも真実であるかのように回答することである.

### 2. 2 Rerank について

RAG の回答精度に大きく影響するのが検索器の性能である. LLM がいかに高精度であっても, 関連情報を適

切に取得できなければハルシネーションを引き起こす可能性がある。検索器を補強するしくみに Rerank という手法がある。その概要を図 2 に示す（図中の関連度はイメージである）。

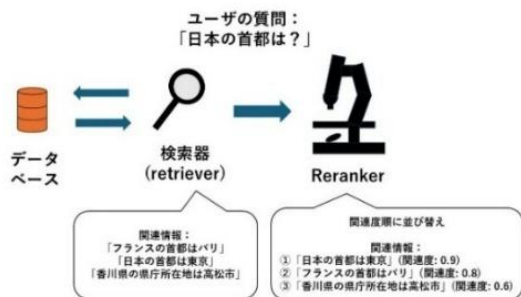


図 2 Rerank の動作イメージ

検索器が取得した関連情報を Reranker がより詳しく調べて関連度順に並び替える。このことにより、LLM に重要な情報が伝わりやすくなるため、回答精度の向上が期待できる。

### 2. 3 IRCoT について

RAG には多段階推論を必要とする質問に弱いという欠点がある。検索器で情報を取得するタイミングが一度しかないため、必要な情報をすべて取得できるとは限らないからである。例えば、「Lost Gravity (ジェットコースター) が製造された国は？」という質問<sup>1)</sup>に対しては、まず Lost Gravity を製造した企業を調べて、次にその企業がどこの国の企業なのかを調べる必要がある。通常の RAG では一度しか検索しないので、この種の問いにはうまく答えられない。このような多段階推論を要する Q&A を RAG で解決しようとする、膨大な数の Q&A ペアを事前に作成する必要がある、実現は困難である。この欠点を克服するための手法が IRCoT である。

IRCoT では検索と CoT 生成を交互に繰り返しながら質問に答えるための情報を段階的に収集する。図 3 に示すように、IRCoT は次の①～⑥の流れで行う。

- ① ユーザの質問に関連した情報を検索して集める
- ② LLM がユーザの質問と検索情報をもとに質問に回答するための次の一文を生成する。
- ③ 検索器が②で生成された文章に関連する情報をデータベースから集めてくる。
- ④ LLM がユーザの質問と③で得た情報をもとに質問に回答するための次の一文を生成する。
- ⑤ 検索器が④で生成された検索内容に関連する情報をデータベースから集めてくる
- ⑥ 回答に必要な情報が集まったら LLM が質問への回答を行う。

④、⑤は情報が集まるか、一定以上の回数になるまで繰り返す。

本研究では、上記 IRCoT の②や④における、LLM が CoT を生成する過程において、次の検索内容を明示的に生成するようにした。例えば、図 3 の②において IRCoT の論文<sup>1)</sup>の例では「Lost Gravity は Mack Rides が製造した」と回答する。一方本研究では「Lost

Gravity は Mack Rides が製造した、よって Mack Rides がどこの国の企業か調べる」のように次の検索内容を明示する。またこの変更に伴い、CoT を生成するためのプロンプトと最終的な回答を出力するプロンプトを分けて作成した。このことで次に検索する内容が具体的になり、検索精度の向上や不要な情報が減ることが期待できる。本実装の手法は本来の IRCoT とはこの点において異なる。以下、この手法のことを「検索 IRCoT」と呼ぶことにする。

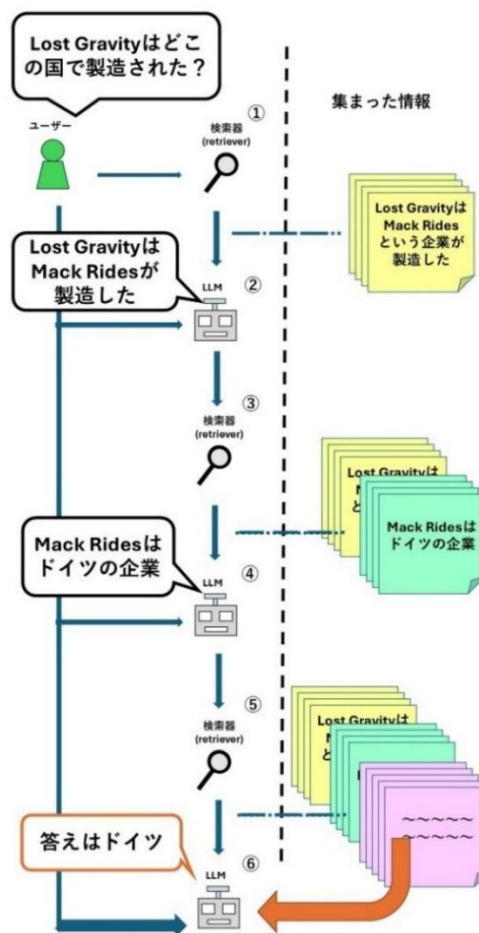


図 3 IRCoT の動作の流れ

### 3 AI チャットボットの概要

本研究では所の受付業務を代替することを想定して、検索 IRCoT を適用したチャットボットを実装した。本システムの具体的な用途としては来場者の質問内容に応じて対応する担当者を案内することなどがあげられる。図 4 に試作システムの実際の動作例を示す。

データベースに使用した情報は以下の通りである。

- ・ 香川県産業技術センターの HP のテキストデータ (約 68000 文字)
- ・ 職員の担当業務に関する自作のテキストデータ (約 5000 文字)

図 5 に示すようにシステムは、LLM サーバと Web サーバ、利用端末から構成される。LLM サーバは LLM を動かすための PC であり、GPU を搭載している。Web サーバはチャットボットアプリを動作させるためのものである。操作端末からユーザが質問すると、その内容

が Web サーバを介して LLM サーバに送られる。そして LLM の生成文を Web サーバがアプリに反映して、操作端末で回答を表示する。これら三つの構成要素は必ずしも分かれている必要はなく、一つのパソコンで完結することも可能である。



図4 試作システムの動作画面

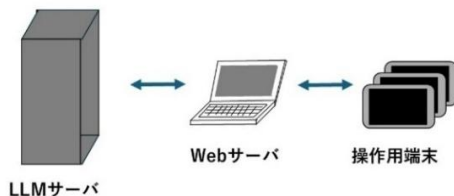


図5 AI チャットボットの動作環境

今回使用した LLM サーバの詳細は以下のとおりである。

1. 小型 LLM (8B モデル) 使用時  
GPU: NVIDIA GeForce RTX 5070 (VRAM: 12 GB)  
CPU: AMD Ryzen 7 7700 8-Core Processor  
CPU メモリ: 32 GB

前述のローカル環境で動作させる小型モデルとの性能比較のため 70B の大型モデルを動作させる環境も用意した。LLM サーバには株式会社ハイレゾの GPU サービスである「GPUSOROBAN (ジーピーユーソロバン)」<sup>2)</sup>を使用した。

2. 大型 LLM (70B モデル) 使用時  
GPU: NVIDIA A100-PCIE-40GB (VRAM: 40 GB)  
CPU: AMD EPYC 7232P 8-Core Processor  
CPU メモリ: 125 GB

#### 4 実験

上記の Q&A Chatbot に検索 IRCoT を実装し、その効果を簡易的な性能評価により検証した。実験では二つの LLM を用いた。

8B モデル: llama3:8b-instruct-q8\_0

70B モデル: llama3:70b-instruct-q3\_K\_M

前者はパラメータ数が 8B の小型の LLM であり、後者はパラメータ数が 70B のオープンソース LLM の中では比較的大きいモデルである。

性能評価には自作の評価用の Q&A データを用いた。Q&A データの質問(Q)を RAG に入力し、返ってきた回答と用意してある理想的な回答(A)とを比較して性能を評価する。二つの LLM モデルそれぞれについて下記三

つの条件で実験を行った。

条件 A: 検索 IRCoT なし, Rerank なし

条件 B: 検索 IRCoT あり, Rerank なし

条件 C: 検索 IRCoT あり, Rerank あり

評価用 Q&A データは多段階推論が必要な質問で構成されている。その内容は香川県産業技術センターの所有する試験機名からその担当課の課長を問うものである。具体的には以下のような質問と回答のセットを 22 個用意した。

```

{
  "question": "電波暗室の担当課の課長は誰ですか?",
  "ground_truth": "電波暗室はスマートシステム課の担当で、課長は鈴木です。"
}
  
```

RAG の回答用のプロンプト (検索 IRCoT の最終的な回答用のプロンプトも同じ)、および検索 IRCoT の検索内容を出力するためのプロンプトを以下に示す。

(プロンプトは Python の LLM アプリ開発用ライブラリである LangChain のテンプレートをを用いている。)

RAG 回答用のプロンプト

```

final_prompt = ChatPromptTemplate.from_messages([
  ("system",
   """
   あなたは香川県産業技術センターの情報に基づいて回答するアシスタントです。
   以下のルールを厳守してください。
   ・センターに関連する質問にのみ回答する
   ・データに無いことは回答しない
   ・職員名には敬称(さん、さま、氏など)を付けない。
   ・わからないことはわからないと答え、その場しのぎの回答はしない
   ・丁寧語は「お客様への説明」にのみ使用し、職員名には一切使用しない。
   ・日本語で回答する

   以下は、質問に関連すると推定されるデータです。

   【データ】
   {context}

   """),
  ("human", "{question}")
])
  
```

検索 IRCoT の検索内容を出力するためのプロンプト

```

step_prompt = ChatPromptTemplate.from_messages([
  ("system",
   """
   あなたは段階的に推論を行いながら次に検索する内容を考える AI です。
  
```

質問に答えるために次に検索すべき内容を1文だけ書いてください。

**【重要ルール】**

- 必ずデータに基づいて出力してください。推測して答えを書いてはいけません
- 「これまでの検索内容」と同じ内容を答えてはいけません。

出力は必ず次の JSON 形式で返してください:

```
{{"next_cot": "ここに1文", "thinking_process": "ここに思考過程を書く"}}
```

**【例1】**

質問: "大谷が所属している野球チームの日本人選手を教えてください"  
 context: [空]  
 出力例: {{  
     "next\_cot": "大谷が所属している野球チームはどこ？",  
     "thinking\_process": "大谷が所属している野球チームの日本人選手を調べるにはまずそのチームの名前を知る必要がある。" }}

**【例2】**

質問: "大谷が所属している野球チームの日本人選手を教えてください"  
 context: ["大谷が所属している野球チームはサンダーズ"]  
 出力例: {{{"next\_cot": "サンダーズに所属する日本人選手はだれ？", "thinking\_process": "大谷がサンダーズに所属していることがわかったので、サンダーズに所属する日本人選手を調べればいい"}}

---

## 質問: {question}

## 現在の情報:  
{context}

### これまでの検索内容:  
{search\_history}

日本語で回答してください。  
 英語では回答しないでください。  
 """)  
 ])

上記 {context} の中に検索器で集めた情報を入れ、{question} の中にユーザから質問を入れる。{search\_history} にはこれまでの検索内容を入れる。検索 IRCot の検索内容を出力するためのプロンプトでは、[例1]や[例2]に示すように、多段階推論が必要な質問の検索過程の例を少数与えた。

性能評価は表1に示す三つの項目について、それぞれの採点基準に従って人手で行った。評価項目の選定にはH. YuらのSurvey論文<sup>3)</sup>を参考にした。Context Recallは必要な情報をどれだけ検索により集められたかを測るものであり、LLMがそれを正しく回答に反映できているかは関係ない。Faithfulnessはハルシ

ネーションの有無を調べるものである。また、Accuracyは理想的な回答との近さを測る尺度として定義している。

また、どの条件が結果に影響を及ぼしたかを明らかにするために、各評価項目において統計的な検定を行った。条件Aと条件Bの比較、条件Aと条件Cの比較、条件Bと条件Cの比較のそれぞれについて、結果に有意な変化があったかを95%有意水準の検定により判定する。検定の詳細は付録にて説明する。

表1 評価項目と採点基準

評価項目	採点基準
Context Recall	1点: 担当課と課長名両方の情報を集められている 0.5点: 担当課の情報は集めているが、その課の課長に関する情報は得られていない 0点: 担当課の情報を集められていない
Faithfulness	1点: 検索した情報を正確に回答に反映している 0点: 検索した情報に無い虚偽の回答をしている (情報がないことについて「わかりません」と回答しているものは誤っていないので1点)
Accuracy	1点: 試験機の担当課の課長名を正しく答えられている 0.5点: 課長名を答えずに、担当課のみを正しく答えている 0点: 担当課名、課長名どちらも答えられていない、または誤った回答をしている (担当課が正確でも課長名が誤っていれば0点)

5 結果

8Bモデル、70Bモデルの各評価項目における評価用Q&Aデータ22個の平均のグラフを図6、図7、図8にそれぞれ示す。また、表2、表3に各条件の比較の検定結果(P値)を記す。なお、表中のX-Yは条件Xと条件Yの比較を表す。P値については付録に詳細を記す。

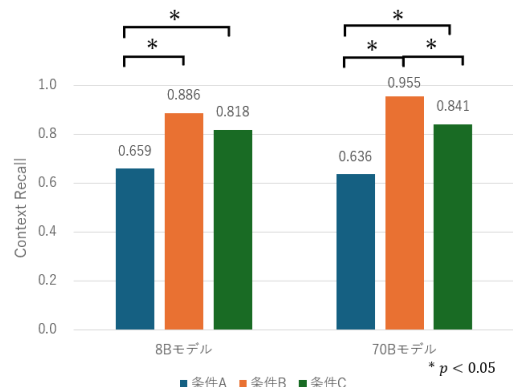


図6 モデル、条件ごとの Context Recall の平均

Context Recall は両方のモデルにおいて、条件 B と条件 C の平均が条件 A の平均よりも高くなった。実際、条件 A と条件 B、条件 A と条件 C の比較において、検定でも有意な差が確認された。

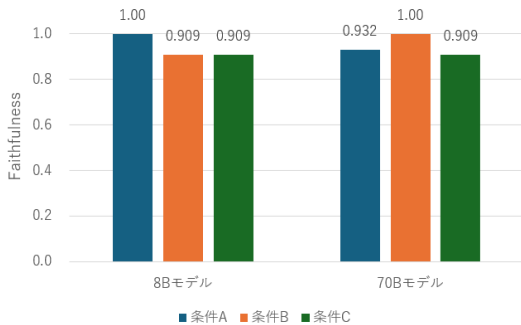


図7 モデル、条件ごとの Faithfulness の平均

Faithfulness はモデルや条件を変えても常に 9 割以上であり、大きな差はみられなかった。実際、表 2、表 3 に示すように、いずれの比較においても有意な差は確認されなかった。

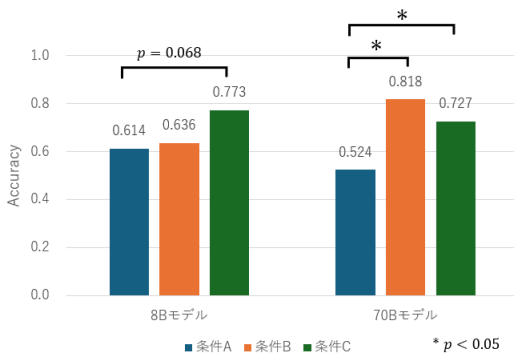


図8 モデル、条件ごとの Accuracy の平均

70B モデルでは検索 IRCoT の有無によって Accuracy に大きな差がみられた。一方、8B モデルでは検索 IRCoT ではなく、Rerank の有無によって Accuracy に大きな差がみられた。図 8 に示すように、70B モデルでは、条件 A と条件 B、条件 A と条件 C 両方の比較について、有意な差が確認された。8B モデルではいずれの比較においても有意な差は確認されなかった。しかし、表 2 の P 値を見ると A-C では約 0.068 と 95% 有意にはわずかに届かないものの、変化があった可能性を示唆している。

表2 8B モデルでの評価項目ごとの P 値

	Context Recall	Faithfulness	Accuracy
A-B	0.000200	0.0810	0.407
A-C	0.000100	0.0810	0.0684
B-C	0.288	0.500	0.0854

表3 70B モデルでの評価項目ごとの P 値

	Context Recall	Faithfulness	Accuracy
A-B	0.0000217	0.0929	0.00302
A-C	0.0126	0.164	0.0353
B-C	0.0283	0.0810	0.203

## 6 考察

### 6.1 検索の有無が性能に及ぼす影響

検索 IRCoT の有無が性能に及ぼす影響は条件 A と条件 B との比較からわかる。70B のモデルでは Context Recall と Accuracy に有意な差が出たため、検索 IRCoT の効果として、必要な情報を取得する性能と、回答の精度の向上が期待できることがわかる。多段階推論が必要な質問に対しては、条件 A のような一度の検索では必要な情報を集めきれない可能性が高い。検索 IRCoT では複数回検索を行うので、必要な情報をより高い確率で取得できることは明らかである。

一方 8B モデルの Accuracy では条件 A と条件 B の間には有意な変化が見られなかった。これは検索 IRCoT を導入しても Accuracy の向上に寄与しなかったことを示している。原因として、8B モデルでは不要な情報を大量に含む文書中から回答に必要な情報を選び出す能力が不十分であることが考えられる。特に検索 IRCoT は複数回の検索を行う手法であるため、通常の RAG よりも不要な情報が多く集まりやすい。そのため、必要な情報が埋もれてしまい、見落される可能性がある。

実験結果を基に定量的な考察を行う。本研究では、与えられた情報を活用する能力を Literacy と名付け、次のように定義する。

$$\text{Literacy} = \frac{\text{Accuracyの平均}}{\text{Context Recallの平均}}$$

Context Recall は必要な情報のうち検索器が集められたものの割合である。Accuracy は本研究では表 1 に示すように、必要な情報のうち回答できた情報の割合である。そのため、Literacy は条件付確率の考え方から、必要な情報が得られたとき、それを回答に反映できた割合と解釈できる。表 4 に Literacy の計算結果を記載する。

表4 各モデル、各条件における Literacy の値

	8B モデル	70B モデル
条件 A	0.931	0.823
条件 B	0.718	0.857
条件 C	0.917	0.865

70B モデルではどの条件についても Literacy は 0.8 以上の値となっているが、8B モデルでは条件 B の時のみ約 0.72 と低い。これは検索 IRCoT の複数回検索により不要な情報が多く集まり、必要な情報を選び出せな

くなった可能性を示唆している。また、条件 A において 8B モデルは 0.93 と高い値になっているが、Context Recall は 0.66 と低い。これは取得した情報は活用できているが、そもそも必要な情報を集められていない状態である。このように、Literacy のみでは回答精度を評価することはできず、Context Recall と Literacy 両方が高い場合に初めて回答精度に反映される。これは Literacy の定義式を変形した形

$Accuracy$  の平均 =  $Literacy \times ContextRecall$  の平均から明らかである。

もう一つの重要な論点は、条件 B における 8B モデルと 70B モデルの Context Recall の差である。検索器が同じであるにもかかわらず、8B モデルでは 0.886、70B モデルでは 0.955 と大きく値が異なっていた。この原因として 8B モデルでは必要な情報が集められず、次のステップに進めなかった可能性があると考えられる。

多段階推論を必要とする質問、例えば「電波暗室の担当課の課長はだれ？」では、まず担当課の情報を得られなければ、その課の課長を調べることができない。前述のように 8B モデルでは情報を見落としがちであり、次のステップに進めなくなる場合がある。8B モデルの検索過程を調べると、「ゼータ電位測定装置の担当課の課長の名前は？」という質問に対し、1 回目の検索時と 2 回目の検索時のいずれにおいても「スマートシステム課の課長の担当業務内容にゼータ電位測定装置が含まれるかどうかを調べる」という全く同じ検索内容を出力していた。しかしゼータ電位測定装置の担当課はスマートシステム課ではなく材料技術課である。このように検索結果中の不要な情報に影響され、最初のステップで誤った判断をしたことで、次のステップに進めなくなっていたと考えられる。

一方 70B モデルではステップ 1 で「ゼータ電位測定装置を担当している材料技術課の課長の名前は？」と、検索により得られた「材料技術課」というキーワードを正しく利用して検索できていた。このような点が Context Recall の差につながったと考えられる。

## 6. 2 検索 IRCoT に Rerank を追加することが性能に及ぼす影響

検索 IRCoT を用いるとき、検索時に Rerank を実施することの影響は条件 B と条件 C を比較することで分かる。条件 B と条件 C では概ね有意な差はみられなかったが、8B モデルにおける Accuracy では平均の値が Rerank を行った条件 C の場合のみほかの条件に比べて大きくなっていった。P 値は約 0.085 であり、有意性はないものの改善の傾向がないと完全には言い切れない結果となった。前節 6. 1 で考察したように、小型モデルは不要な情報から必要な情報を見つける能力が低い。しかし、Rerank を使用すると不要な情報をフィルタリングして関連の高い情報のみを残すことができる。そのため、必要な情報を見つけやすくなり、回答精度が改善したと考えられる。

70B モデルでは条件 B と条件 C の間に有意な差はみられず、むしろ Context Recall と Accuracy の平均は下がっていた。70B モデルでは Rerank がない場合でも必要な情報の多くを見つけられるため、Rerank の効果

は薄い。

Rerank では、関連度が指定した閾値を下回る情報を除外している。閾値を高くすると不要な情報を減らせるが、必要な情報も除いてしまう可能性が高くなる。一方、閾値を低くすると必要な情報は得やすくなるが不要な情報が増える。本研究では閾値を高め設定したため、不要な情報に弱い 8B モデルでは有効に働いたが、70B モデルに対しては逆に必要な情報が減った可能性がある。

## 7 結言

本研究ではデータを閉じた環境で扱えるオープンソース LLM を用いて、香川県産業技術センターの情報に関する質問に回答できる AI チャットボットを開発した。計算リソースの負担を少なくするため、実装は小型の LLM (8B) を用いた。その際、推論能力が低いという小型の LLM の弱点を補うため、IRCoT を参考にした手法である検索 IRCoT を実装した。さらに、開発したシステムの複雑な質問への回答精度を評価するため、多段階推論を必要とする Q&A データを用いて性能評価を行った。その結果、検索 IRCoT のみでは小型の LLM の回答精度は変化しないが、検索 IRCoT と Rerank を組み合わせることで、Context Recall や Accuracy が向上する可能性があることがわかった。一方、今回開発したシステムではデータの質・量ともに不十分なため、性能評価も部分的であった。より実用的な評価や回答の精度向上のためには実運用を通して事例を収集していくことが重要である。

## 8 謝辞

本研究では 2025 年の東京大学 松尾・岩沢研究室主催の大規模言語モデル講座<sup>4)</sup>で得た知見をもとに検討、実装を行いました。貴重な機会をいただいた講師、運営の方々に深謝いたします。

## 参考文献

- 1) H. Trivedi, N. Balasubramanian, T. Khot, A. Sabharwal: Interleaving Retrieval with Chain-of-Thought Reasoning for Knowledge-Intensive Multi-Step Questions, arXiv:2212.10509 (2023).
- 2) 株式会社ハイレゾ: GPUSOROBAN, <https://soroban.highreso.jp/> (検索日: 2026. 3. 5).
- 3) H. Yu, A. Gan, K. Zhang, S. Tong, Q. Liu, Z. Liu: Evaluation of Retrieval-Augmented Generation: A Survey, arXiv:2405.07437 (2024).
- 4) 大規模言語モデル講座 応用編, <https://weblab.t.u-tokyo.ac.jp/large-language-model-advanced-course/> (検索日: 2026. 3. 5).
- 5) 永田靖: 入門 統計解析法, 日科技連 (1992).

## 付録 t 検定による有意性の判断

本研究では 22 個の評価用 Q&A データについて Chatbot の出力を評価した。そして、条件ごとの違いが誤差の範囲内であるのか、それとも条件を変えたことによる有意

な変化なのかを判断するために t 検定を行った。以下、その内容を説明する。(統計処理の方法については「入門統計解析法」<sup>5)</sup>を参考にした。)

条件 X における 22 個それぞれのデータについての評価点の系列を

$$x_1^X, x_2^X, \dots, x_{22}^X$$

とする。この系列は母集団からのサンプリングと考えて、その母集団の平均を  $\mu^X$  とする。また、異なる条件(改良後を条件 X, 改良前を条件 Y とする)の評価点について、同じ番号  $i$  についての評価点  $x_i^X$  と  $x_i^Y$  は同じ質問に対する回答の評価点とする。このような評価点を比較する際には

$$d_i = x_i^X - x_i^Y$$

のように  $d_i$  を定義して条件間の差を考える。 $d_1, d_2, \dots, d_{22}$  の平均を  $\mu_d$ , 分散を  $V_d$  とする。このとき、

$$t_0 = \frac{\mu_d}{\sqrt{V_d/n}}$$

は自由度  $22-1=21$  の t 分布に従う。

帰無仮説, 対立仮説を立てる。

帰無仮説:  $\mu^X = \mu^Y$

対立仮説:  $\mu^X > \mu^Y$

有意水準を 95% として  $t_0$  が棄却域にあれば有意であるとして帰無仮説を棄却する。棄却域に無ければ帰無仮説を棄却できない。 $t_0$  を自由度 21 の t 分布の累積分布関数  $F$  の引数とすると、

$$p = 1 - F(t_0)$$

は帰無仮説を仮定したときに検定統計量  $t$  が  $t_0$  以上の値となる確率であり、

$$p = \Pr\{t \geq t_0\}$$

となる。 $p$  を P 値と呼ぶ。P 値は帰無仮説を仮定した場合に  $t_0$  以上に極端な値が得られる確率を表しており、これが 5% よりも小さければ、95% 有意水準の検定において、有意であるとする。

本研究では、8B モデル, 70B モデルそれぞれについて各条件の比較を行い、条件間に有意な差があるか P 値を計算して判定した。

# シングルボードコンピュータを用いた音声入力装置の検討

小林 宏明, 香西 真吉

オンプレミス環境で動作する AI チャットボットの構築を想定し、シングルボードコンピュータを用いた音声入力装置の基礎検討を行った。本報では、高性能かつ安価なシングルボードコンピュータ (Raspberry Pi 5) とオープンソースの音声認識ソフト (faster-whisper) を用いて、独自に作成した音声サンプルの処理結果を比較する簡易ベンチマークテストを実施した結果について報告する。

## 1 緒言

近年、大規模言語モデル (LLM: Large Language Model) が登場したことで、生成 AI の進歩が加速化し、様々な業務やサービスに生成 AI が活用されるようになっていく。LLM の代表的な活用事例として AI チャットボットがあるが、一般的に高性能なサービスではクラウドを利用しているため、情報漏洩などのセキュリティリスクの観点から利用が制限される場合がある。

そこで、オンプレミスと呼ばれるローカルネットワーク環境下で動作するシステムが注目されている。オンプレミスは、利用者がサーバー等の機器を準備し、システム構築から運用までを自身で行うものであり、カスタマイズ性やセキュリティ面に優れるのが特徴である。一方で、環境構築には多くの知識が必要であり、SIer などの協力を得なければ導入が難しいという側面もある。

そこで本研究では、主に中小企業向けとして、比較的安価なオンプレミス環境で動作する AI チャットボット開発を目指している。窓口業務などの自動応答を想定し、ウェブカメラを備えたシングルボードコンピュータ (SBC) で音声を取得し、音声認識モデルでテキスト情報に変換した後に、LLM が動作するローカルサーバーへ送信、回答を生成させることを目標とする。

本報では、SBC を用いて試作した音声認識システムの概要と、音声認識モデルの違いによる性能比較等の検証結果について報告する。

## 2 オンプレミス型システムの全体構想

オンプレミス型のシステムについては、いくつかの構成が考えられるが、本研究では図 1 のような小規模なハード構成を想定して開発を進める。

エッジ端末は維持費を含めたコスト面と性能面を考慮

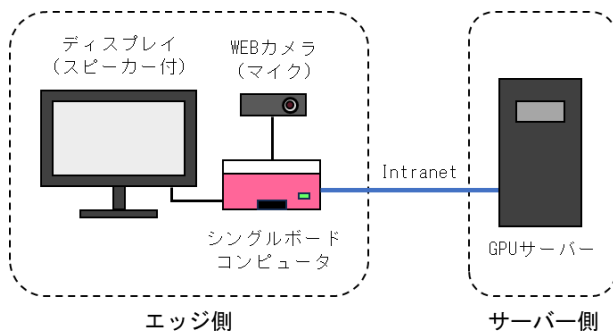


図 1 ハードウェア構成 (構想としての一例)

して SBC の利用が適切と考える。近年、SBC の性能は価格を一定水準に据え置きつつ性能の向上が図られており、様々な選択肢が考えられるが、本研究では安価かつ高い性能を有し、実装事例が豊富な Raspberry Pi を用いることとした。また、インターフェース部分については、今後の機能拡張に備え WEB カメラやディスプレイを用いることとした。

続いて、システム全体のパイプライン処理としては、図 2 のような流れを想定している。エッジ側では今回実装した音声認識のほか、サーバーからの返信テキストの読み上げ又は画像等で出力する。サーバー側では vLLM や Ollama といった推論エンジンが動作し、エッジ側と API でデータを送受信する形式をとる。

このような構成はオンプレミス環境における典型的な構成の一つである。ユーザーから与えられた情報は全てサーバー側で一元的に管理することで、データの流出や消失のリスクを低減しつつ、安価で性能の高いシステムの構築が可能となる。また、SBC のような機器を用いることで、機器更新や増設が比較的容易かつ安価に行える点も利点である。

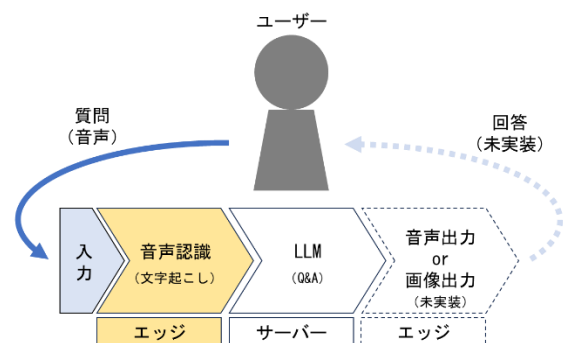


図 2 想定されるパイプライン

## 3 音声認識システムの実装

### 3.1 ハードウェア構成

今回の試作ではエッジ端末として Raspberry Pi 5 (8 GB モデル) を用いた。同機は 64 ビット対応の ARM プロセッサを搭載し、従来機と比較して CPU 性能および I/O 性能が向上している。また、8 GB のメモリ容量であれば、音声認識処理や周辺機器との通信/制御を行う上で十分な性能を有すると考えた。

次に音声入力装置として使用した WEB カメラについては、USB 接続が可能なので中価格帯の平均的な性

能のものを選定した。なお、本実装では LLM 処理以降のフローを実装しないため、ディスプレイ部は特に利用していないため割愛する。

### 3. 2 ソフトウェア構成

今回のようなシステム開発においてオープンソースソフトウェア (OSS) を活用することは、導入効果検証などにおける初期投資を引き下げ、導入障壁の低減につながると考えられる。一方で、OSS は実装に際して一定の知識が必要であり、技術者が少ない中小企業においては効果が見込みづらい。そこで、本研究ではシステム全体を OSS で実装し検証することで、得られた知見を企業へ技術供与することを目的としている。

本実装では、オープンソースの音声認識モデル「faster-whisper<sup>1)</sup>」を用いることとした。本モデルは OpenAI 社が開発した音声認識モデル「Whisper<sup>2, 3)</sup>」を基に、高速かつ低メモリでの推論を実現するよう最適化されたモデルである。CPU 環境に対応しており、GPU が無くとも高速で実用的な音声認識が可能である点の特徴である。

faster-whisper は tiny, base, small, medium, large といったモデルサイズに分かれており、モデルサイズが大きくなるにつれ音声認識精度は高く、処理速度は遅くなる傾向である。中でも最新の turbo モデルは large モデルを基に精度をわずかに犠牲にしつつ処理速度を数倍向上させたモデルとして注目されている。今回は性能比較として base, small, large, large-v3-turbo の 4 種類のモデルを用いて、前項のハードウェアで録音した音声データの分析結果を比較する簡易ベンチマークテストを実施し、それぞれのモデルの特徴や性能を評価することとした。

なお、システムの実装においては、実行環境の保護と転写を容易にするため Docker を用いた仮想環境下で構築した。

## 4 検証実験と考察

### 4. 1 実験結果

比較検証には担当者が発声して録音したデータを用いた。発声内容は所保有の開放機器のうち比較の変換難易度が高いと思われる表 1 に示す 10 種類の機器名を選定した。音声取得は Python の音声信号処理ライブラリである python-sounddevice を用い、サンプリングレート: 16 kHz, 録音時間: 5 秒の条件で各機器名を個別に録音した。

まず、取得された 10 種類の音声サンプルを各モデルでテキストデータに変換し、処理に要した時間を求めた結果を表 2 に示す。基本的には軽量モデルほど処理速度が速くなっているが、base モデルについては一部

表 1 録音データ (発声内容)

No.	発声内容 (機器名)
1	電波暗室
2	自記分光光度計
3	四分力切削動力計
4	エルメンドルフ引裂試験機
5	雑音許容度試験機
6	高周波放射イミュニティ試験装置
7	高温型示差走査熱量測定装置
8	微小薄膜対応型 X 線回折装置
9	耐蝕型超臨界反応試験装置
10	攪拌脱泡装置

表 2 処理速度の比較

No.	base	small	large	large-v3-turbo
1	13.81	5.18	25.66	19.39
2	10.06	5.26	27.76	19.44
3	20.83	6.18	27.98	19.31
4	2.93	6.18	31.46	20.01
5	2.00	5.58	28.01	19.21
6	2.10	6.56	32.88	20.10
7	15.98	6.43	32.82	20.20
8	2.30	6.59	34.09	20.08
9	2.45	6.63	32.86	20.02
10	2.01	6.03	28.59	19.42
AVE	7.45	6.06	30.21	19.72

のサンプルに対して処理時間が大きく増加しているが、このことについては次項で考察する。

続いて、各モデルによる変換結果を表 3 に示す。こちらは反対に、重量モデルになるにつれ変換精度が良くなっていることが読み取れる。軽量モデルについては、全体的に誤変換が生じており元の文章を推論することも難しい場合があるが、重量モデルについてはほぼ正確に発音された言葉を認識し変換できている。しかし、重量モデルにおいても誤認識や部分的な漢字変換の誤りがあり、全く間違いのない変換ができたものは一部のサンプルとモデルの組み合わせに留まった。

### 4. 2 考察

検証実験の結果から変換精度と処理速度がトレードオフの関係になっており、精度と処理速度の観点でいえば turbo モデルが最も優れていることが確認できた。しかし、前述のとおり軽量の base モデルでは一部のサンプルについて処理速度が著しく悪化するケースもみられた。このことについて、本実験では前処理として

表 3 faster-whisper のモデルサイズ別の文字起こし精度、速度の比較

発声内容(機器名)	base	small	large	large-v3-turbo
電波暗室	電波アンシーズ	電波暗室	電波暗室	電波暗室
自記分光光度計	じきぶんバーバードケー	時期分架行動系	磁気分光光時計	磁気分光光時計
四分力切削動力計	よんぼうりきせつさくどうやくつけ	0分裏切り切るとおりよけ	4分力切削動力計	4分力切削動力計
エルメンドルフ引裂試験機	ヘルメンドルフ 引き裂きシケン 引き裂きシケン 引き裂き	エルメンドルフ引き裂き試験機	エルメンドルフ引き裂き試験機	ヘルメンドルフ引き裂き試験機
雑音許容度試験機	ザツワン 共有の試験機	雑音共用とし元気	雑音許容度試験記	雑音許容度試験機
高周波放射イミュニティ試験装置	報酬イミュニティ試験掃除	公衆法、放射イミュニティ試験措置	高周波放射イミュニティ試験装置	高周波放射イミュニティ試験装置
高温型示差走査熱量測定装置	おもしろいパッシュサツソーサツと一緒におそく出そう	高温型視察捜査 密度測定装置	高温型視察操作熱量測定装置	高温型視察操作熱量測定装置
微小薄膜対応型 X 線回折装置	理想をはくなく対応がた X1000 脱泡掃除	微小薄膜対応型 X 線脱泡装置	微小白膜対応型 X 線脱泡装置	微小白膜対応型 X 線脱泡装置
耐蝕型超臨界反応試験装置	大食だったチヨコリンクライハナー試験掃除	対蝕型超臨海反応試験装置	体色型超臨界反応試験装置	体色型超臨界反応試験装置
攪拌脱泡装置	カフハンロツポーソウチ	カフハン・ナツポ・ソージ	カフハン脱法装置	脱泡脱法装置

ノイズ除去や正規化などの処理を加えていないため、ノイズの影響が顕著に現れたとみられる。

faster-whisper の処理フローは (1) 特徴量抽出 (2) Encoder (3) Decoder の順となっている。Encoder と Decoder はいずれも Transformer であり、本モデルも一種の LLM である。元となっている whisper はノイズが混じった膨大な音声データで学習されており高いノイズ耐性を有することで知られているが、これは Encoder がノイズ成分を無視して音声成分のみに注目するよう動作する。

ここで、入力信号の SN 比が悪い場合、前処理 (特徴量抽出) 段階のスペクトル変換において音声信号がノイズに埋もれ Encoder 側でノイズと音声の切り分けが困難になる。特に base のような軽量モデルでは、重量モデルに比べノイズ抑圧後の音声情報の復元力 (ロバスト性) が低いため、情報が欠落した不鮮明な特徴量ベクトルが Decoder へ渡されることとなる。その結果、Decoder がテキストを生成しようとする際の単語予測の確信度が低下するとともに、候補探索の試行回数や再推論 (フォールバック) が増大することで本来の計算量を上回る処理時間を要したと考えられる。

以上のことから、仮に回答速度を重視したシステム構成を考えるなら、前処理や分割処理などの工夫を加え、音声認識モデルへの入力信号の S/N 比の改善を図る必要があると考えられる。

一方で、large や turbo などの重量モデルにおいても誤認識や漢字の誤変換等の課題がある。Decoder (Transformer) の動作原理上、学習時の変換ライブラリにない専門用語や出現頻度の低い単語は、変換精度が低くなることは避けられない。特に同音異義語が複数存在する場合は、より使用頻度が高い単語に誤変換

されやすい傾向がみられた (例: 自記⇒磁気, 薄膜⇒白膜, 攪拌脱泡⇒拡販脱法など)。

このような誤変換は状況によっては後段の LLM の誤動作の原因となるため対策が必要である。音声認識モデルをファインチューニングして変換性能を向上させることも技術的には可能と思われるが、開発コストが高く現実的ではない。そこで後処理としては、LLM サーバー側の前処理として、誤った変換の結果を正す処理を追加する、もしくは誤った変換結果から質問内容を推定するよう LLM を調整することが現実的な対応と考えている。これらの対応の実装や評価については、今後の開発と並行して進めていきたいと考えている。

## 5 結言

セキュリティに配慮したオンプレミス型の AI チャットボットの開発を目的として、SBC を用いた音声認識システムを試作し性能を評価した。OSS の音声認識モデルを用いた比較実験により、モデルサイズによる精度と速度のトレードオフ関係の確認と実装上の課題の抽出ができた。今後は得られた知見に基づき、当該システムの開発を進めていく予定である。

## 参考文献

- 1) SYSTRAN: “faster-whisper”, <https://github.com/SYSTRAN/faster-whisper> (検索日: 2026. 3. 19).
- 2) A. Radford et al.: “Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision”, arXiv:2212.04356 (2022).
- 3) OpenAI: “Whisper”, <https://github.com/openai/whisper> (検索日: 2026. 3. 19).

# シート材料による帯電物の自然放電特性の変化に関する調査研究

神内 杜夫, 福本 靖彦, 香西 真壱, 小林 宏明

静電気は身近に存在する自然現象であり、工業製品の生産現場において品質不良や労働災害の要因となり得るため、その適切な管理が求められている。従来の静電気対策としてはイオナイザやコロナ放電を利用した除電手法が用いられているが、製品の構造や使用環境によっては適用が困難な場合もある。このような場合、構造や材料配置によって帯電状態や放電特性に影響を与える手法が有効と考えられるが、自然放電過程の定量的な評価は十分に整理されていない。本研究では、帯電物の自然放電特性の定量的評価を目的として、表面抵抗値の異なるシート材料を帯電物の下部に配置し、表面電位の時間変化を測定した。その結果、材料の違いにより減衰挙動が変化することを確認した。また、得られた減衰波形は指数関数により近似可能であり、等価回路モデルによってその傾向を説明できることを示した。

## 1 緒言

静電気は身近な自然現象である一方、工業製品の生産現場においては、製品の欠陥や重大な労働災害を引き起こす要因となり得るため、その適切な管理と対策が求められている<sup>1, 2)</sup>。静電気に対する対策としては、イオナイザによる能動的な除電や、突起形状を利用したコロナ放電による受動的な除電<sup>3)</sup>などが一般的に用いられている。しかし、製品の構造や使用環境によっては、これらの手法を十分に適用できない場合もある。

このような状況においては、外部装置に依存せず、構造や材料配置によって帯電状態や放電特性を調整することが有効な手法であると考えられる。帯電物に蓄積された電荷がどのように放電していくか、すなわち自然放電過程を理解することは、そのような特性変化の把握において重要である。一方で、帯電物の電荷の減衰挙動は周囲環境や条件に依存するため、放電特性を定量的に評価することは容易ではない。

帯電物の自然放電過程においては、帯電物と接地との間に形成される電荷移動経路が重要な役割を果たす。特に、その電荷移動経路に介在する材料の電気特性に着目すると、帯電物と接地との間の容量結合および漏れ抵抗に影響を与えると考えられる。このことから、材料の違いにより放電特性が変化する可能性がある。しかし、このような条件が自然放電過程に与える影響については、十分に整理されているとは言えない。

そこで本研究では、放電特性の定量的評価に関する基礎的検討として、表面抵抗値の異なる2種類のシート材料を帯電物の下部に配置した条件を構成し、帯電物の表面電位の時間変化を測定することで自然放電過程における放電特性を評価した。さらに、得られた減衰波形を指数近似式により整理し、放電過程を表す回路モデルについて考察を行った。

このような放電特性の理解は、帯電状態の評価結果の解釈や測定条件の設定における再現性の確保、さらには静電気対策における設計指針の検討に資する基礎的知見となる。

## 2 帯電物の放電特性の評価およびモデル化

### 2.1 実験方法

実験に用いた測定系の構成を図1に示す。グラウンドプレーンには、厚さ0.5 mmの樹脂板を有する金属製機を用いた。その樹脂板上に絶縁支持体として、29.9 cm角、厚さ5.1 cmの発泡ポリスチレンを設置した。帯電物として用いる導体には、10 cm角、厚さ1.2 cmの真鍮板を用い、発泡ポリスチレンの上に設置した。

帯電物の下部にシート材を設置し、その表面抵抗値の違いが帯電物の表面電位の時間変化に与える影響を評価するため、以下の3条件で実験を行った。

- (i) シート無し
- (ii) 絶縁性シート (表面抵抗値およそ  $10^{14} \sim 10^{16} \Omega/\square$ , 低密度ポリエチレンシート)
- (iii) 導電性シート (表面抵抗値およそ  $1.6 \times 10^3 \Omega/\square$ , 日本真空包装機械社, 放電くんペーパー)

表面電位の測定には静電気測定器 (シンド静電気株式会社, スタチロン DZ4) を用い、計測部を真鍮板表面から3 cm離れた位置に固定した。測定は、開始から5 ~ 30 秒の間は5 秒間隔、30 ~ 60 秒の間は10 秒間隔で行い、それ以降は120 秒および180 秒経過時点で測定した。各条件につき3 回測定を行い、その平均値を求めた。

真鍮板の帯電にはESDガン (TESEQ社, NSG435) を用い、設定電圧4 kVでの接触放電により3回電荷注入を行った。3回目の注入後を基準として表面電位の



図1 帯電物の放電特性の計測

時間変化を測定した。ただし、測定は注入5秒後に電位が安定してから開始した。なお、実験時の室内相対湿度は23%~25%であった。

## 2. 2 実験結果

図2に(i)~(iii)の各条件における表面電位の時間変化を示す。図2より、導電性シートを設置した条件では、他の条件と比較して計測開始時の帯電電圧が低いことが分かる。本実験では使用したシートの寸法が真鍮板より大きく、導電性シートを設置した場合には真鍮板と導電性シートが同電位となることで見かけ上の電極面積が増加する。その結果、グラウンドプレーンとの間の静電容量が増加し、帯電電圧が低下したものと考えられる。

一方、絶縁性シートを設置した条件とシート無しの条件を比較すると、測定開始時の帯電電圧に大きな差は見られないが、時間経過に伴う電圧の低下挙動には違いが見られる。特に、180秒経過後の残留電圧は、絶縁性シートを設置した条件の方が高く、放電速度が遅くなった。

また、いずれの条件においても、電圧の減衰は単純な指数関数による減衰とは一致せず、実験時間内において一定の残留電圧が発生した。

以上の結果より、絶縁性シートを設置した条件ではシート無しの条件と比較して放電速度が遅くなる傾向が確認された。一方、導電性シートを設置した条件では初期帯電電圧が低くなるため、一定時間経過後の帯電電圧も他の条件より低くなる傾向が見られた。ただし、本実験では導電性シートの設置により電極面積が実質的に増加し初期帯電電圧が低下していると考えられるため、放電速度そのものの比較には初期電圧を揃えた条件での検討が必要である。

## 2. 3 減衰波形の近似とモデル化

一般に、コンデンサと抵抗からなるRC回路においてコンデンサが抵抗を通じて放電する場合、コンデンサ両端の電圧の時間変化は次式で表されることが知られている。

$$V(t) = V_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

ここで、 $V_0$ は初期電圧、 $\tau$ は時定数であり、回路の抵抗 $R$ と容量 $C$ の積で与えられる。しかし、本研究で得られた減衰波形に対して最小二乗法によるフィッティングを行ったところ、式(1)では十分に近似することが出来

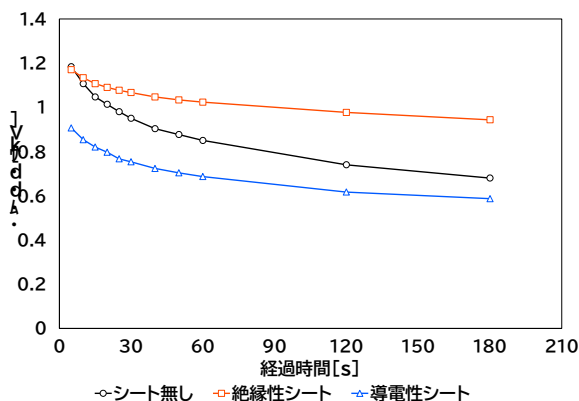


図2 帯電物の表面電位の時間変化

なかった。図2に示すように、180秒経過時点においても一定の電圧が残留していることが確認される。

そこで、本研究では実験時間内で放電しきらない残留電圧 $B$ を導入し、次式による近似を考えた。

$$V(t) \approx Ae^{-\frac{t}{\tau}} + B \quad (2)$$

実験データに対して式(2)を仮定し、最小二乗法を用いてパラメータ $A$ 、 $B$ 、 $\tau$ を推定した結果を図3に示す。図3より、本研究で得られた減衰波形は式(2)により良好に近似できることが確認された。

ただし、残留電圧 $B$ は厳密には一定ではない。実験終了後、24時間以上経過した後に再度表面電位を測定したところ、電位はほぼ0V付近まで減衰することが確認された。したがって、本来の放電挙動は次式のような2つの時定数を持つ指数関数の和で表される可能性がある。

$$V(t) \approx Ae^{-\frac{t}{\tau_1}} + Be^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3)$$

ここで、本実験の測定時間を $t_{max} = 180s$ とすると、 $t_{max} \ll \tau_2$ の関係が成立する場合、第二項は実験時間内ではほぼ一定値とみなすことができる。このため、式(3)は実験時間内では式(2)の形で近似されると考えられる。

このような電圧の減衰挙動を説明するため、本研究では図4に示す抵抗とコンデンサによる等価回路モデルを考えた。自然放電においては、帯電物とグラウンド間に複数の容量結合および漏れ抵抗が存在する。これらのうち直接グラウンドへ放電する経路を合成抵抗 $R_1$ および合成容量 $C_1$ として表す。さらに、本研究では帯電物から容量結合を介して別の導体へ電荷が移動し、その後抵抗を介してグラウンドへ放電する経路が存在する可能性を考えた。この経路を抵抗 $R_2$ および容量 $C_2$ により表した。

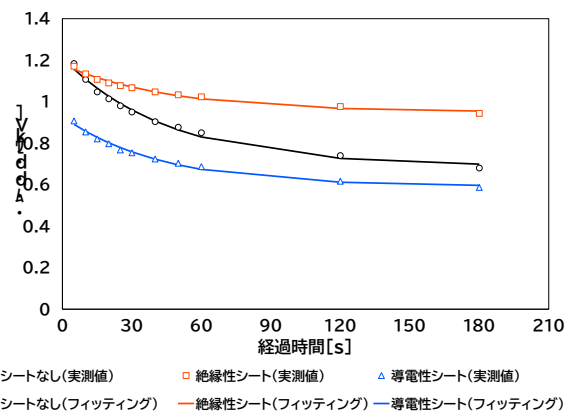


図3 実測データと理論式のフィッティング

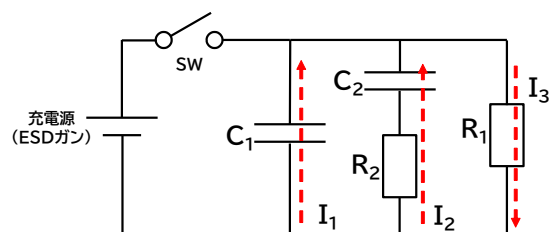


図4 検討した等価回路モデル

図4の回路に対して回路方程式を立てると次式が得られる。

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (4)$$

$$V_{C_1} = \frac{1}{C_1} \int I_1 dt = \frac{Q_1}{C_1} \quad (5)$$

$$V_{C_2} = \frac{1}{C_2} \int I_2 dt = \frac{Q_2}{C_2} \quad (6)$$

$$V_{R_1} = -R_1 I_3 = -R_1 \left( \frac{dQ_1}{dt} + \frac{dQ_2}{dt} \right) \quad (7)$$

$$V_{R_2} = R_2 I_2 = R_2 \frac{dQ_2}{dt} \quad (8)$$

$$V_{C_2} + V_{R_2} = V_{C_1} = V_{R_1} \quad (9)$$

式(5)から式(9)より、次式が得られる。

$$\frac{dQ_2}{dt} = \frac{Q_1}{R_2 C_1} - \frac{Q_2}{R_2 C_2} \quad (10)$$

$$\frac{dQ_1}{dt} = - \left( \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_2 C_1} \right) Q_1 + \frac{Q_2}{R_2 C_2} \quad (11)$$

式(10)と式(11)から得られる連立微分方程式を解くことで電荷 $Q$ の時間変化が求められる。さらに、電荷 $Q$ の時間変化が求められれば、式(5)を使って電圧 $V$ の時間変化を求めることができる。

本研究では、この解析解を Python (3.12.12) および SymPy (1.14.0) を用いて導出した。求解には SymPy の dsolve 関数を用いた。その結果、電圧の時間変化は式(3)と同様の形で表されることが確認された。なお、解析解は非常に複雑な式となるため、本稿では省略する。

以上より、本実験系における自然放電には複数の放電経路が存在し、それぞれ異なる時定数を持つ放電成分が重なり合っている可能性が示唆される。また、絶縁性シートを帯電物下部に設置した場合、遅い放電成

分の寄与が大きくなる傾向があると考えられる。

### 3 結言

本研究では、帯電物の自然放電特性の定量的評価を目的として、帯電物の下部に表面抵抗値の異なるシートを設置した条件下で、帯電物の表面電位の時間変化を測定し、放電特性の評価を行った。

実験の結果、帯電物の下部に設置するシート材料の違いにより表面電位の減衰挙動が変化し、自然放電特性に影響を与えることを明らかにした。また、得られた放電特性は指数関数により近似可能であり、簡易な等価回路モデルによってその傾向を説明できることを示した。

今後の課題として、本研究で提案した等価回路モデルの妥当性について、他の材料条件や実験環境における検証が挙げられる。また、本研究で得られた知見を基に、材料配置や構造による静電気の自然放電特性の制御手法への応用について検討していく必要がある。

### 参考文献

- 1) 大澤敦：静電気リスクアセスメント 2025, [https://www.researchgate.net/publication/320612230\\_Risk\\_assessment\\_of\\_electrostatic\\_ignitions\\_jingdianqirisukuasesumento](https://www.researchgate.net/publication/320612230_Risk_assessment_of_electrostatic_ignitions_jingdianqirisukuasesumento) (検索日：2026.3.5)。
- 2) 崔光石, 小板丈敏, 金国星, 長田裕生, 鈴木輝夫：粉体投入過程における絶縁性フレキシブルコンテナで発生する静電気放電, 静電気学会論文集' 25, pp53-56 (2025)。
- 3) トヨタ自動車株式会社：車両の除電装置, 特開 2018-176998, 平成 30 年 11 月 15 日。