令和４年度　第３学年（57 期生）

理数ゼミ　論文集

福岡県立城南高等学校

数学・情報

KH Coder と形態素解析によるヒット曲の歌詞の分析　…　2

正弦波を用いた音の合成　…　15

NPB の DH 制における有意義性をセイバーメトリクスの観点で示す

…　29

物理

Unity を用いた水害時避難についての検討　…　36

様々な方法におけるスパゲッティの折れる本数の違い　…　47

偏光板と光の関係　…　52

化学

化粧品に含まれる鉄の定量分析　…　56

バイオディーゼル燃料の作成と粘度による品質評価　…　64

高校生が考える添加物～各お茶におけるビタミン C の含有量の違い～

…　72

生物

本校における水道水の残留塩素量の変化　…　80

ヒドラに適した飼育液　～K,Ca,Mg イオンに注目して～　…　88

2021 年から 2022 年の福岡市の湿地帯環境と

そこに生息する生物種の調査　…　95

KH Coder と形態素解析によるヒット曲の歌詞の分析

理数コース３年　福島実帆　大東梨乃　迫理帆子　高山颯斗　濵田沙羅

1.要旨、概要

歌謡曲は様々な要素があり、それぞれの時代でヒットする曲は現在の新型コロナウイルス流行のような社会背景・人々の社会心理に大きく影響される。そこで、歌詞は時代ごとの状況や特徴を顕著に表していると考え、ヒット曲の歌詞について研究を行った。KH Coder というソフトウェアや形態素解析エンジンを使用して、ヒット曲過去 20 年分の歌詞を単語に分け、品詞で区別したり頻出語を導き出したり、それらのデータをもとに作成した共起ネットワークや対応分析のグラフを読み取ることで年代ごとに歌詞を比較したりプログラミングによるヒット曲の新旧判別を行った。その結果、年代ごとに歌詞に使用されている単語にかなり特徴があり、それぞれの時代を象徴することがわかった。

2.問題提起、研究目的

音楽は人々の生活の中にあふれており、音楽のメロディーや歌詞は多くの人を元気づけたり心に安らぎを与えたりしてくれる。新型コロナウイルス流行の渦中でも音楽は人々の心の支えとなった。歌謡曲にはテンポ、リズムやメロディー、音の高さ、ハーモニー、歌詞などの多様な要素が存在し、それは曲のジャンルによって異なった特徴が見られる。例えば、演歌では音階の第四音と第七音を抜いた「ヨナ抜き音階」を用いて和風なメロディーにしたり、歌詞を７音、５音を繰り返した「七五調」などを用いたりして演歌特有の雰囲気を作り出している。またヒット曲の歌詞を詳しく見ると、バブル時代には「太陽」や「幸せ」といった言葉が震災時には「未来」や「夢」など希望に満ちた言葉が歌詞に多く使われていることに気づき、時代ごとに歌詞が異なり、それが当時のヒット曲に大きく影響しているのではないかと考えた。だから、私たちは曲の「歌詞」に着目しヒット曲の共通点を見つけ、また情報の授業で学習したプログラミングを曲の分析に利用することで、曲の歌詞の特徴を掴めば「必ずヒットする J-pop」が作れるのではないかと思い研究を進めた。

3.方法

実験では歌詞を分析するために 立命館大学の樋口耕一准教授が開発した KH Coder を使用した。KH Coder とは、テキスト型データの計量的な内容分析や、テキストマイニングのための樋口耕一氏が著作権をもつフリーソフトウェアである。このソフトウェアでは歌詞を単語に分けさまざま様々な分析を行うことができることができる。【実験 1】【実験 2】【実験 3】では曲の歌詞を年代ごとにした。多く出現する単語の確認のために抽出語リストの作成をした。次に単語同士の結びつきを調べるために共起ネットワークを作成した。語と語ごとの特徴を探るために対応分析を作成した。

私たちは時代によって使用されている歌詞が異なるのではないかと予想し、1970-74 年（以下「ゾーン 1」とする）、1987-91 年（以下「ゾーン２」とする）、2008-12 年（以下「ゾーン 3」とする）、2016-20 年（以下「ゾーン４」とする）の４つのゾーンに分けて分析を行うことにした。これらのゾーンに分けた理由は、ヒット曲の歌詞に大きく影響しそうだと予想した出来事（ゾーン１はオイルショック、ゾーン２はバブル景気、ゾーン３はリーマンショック、ゾーン４は現在）の前後 5 年間ずつのグループに分け、ゾーン１～４を比較して共通する語とそのゾーンの特徴を表す語を分析しようと考えたからである。

はじめは、2000 年と 2020 年に紅白歌合戦で歌われた曲をヒット曲のデータとして KH Coder で分析して比較した。だが、曲数が少なく、紅白歌合戦では数年前のヒット曲が歌われるなどと各年のヒット曲とは限らないため（人気曲上位曲のみが歌われているわけではないため）データとして適していないと考えこの分析は中断した。

そこで、私たちは「オリコン」と「Billboard JAPAN Year End」という音楽ランキングのサイトを用いた。オリコン年間シングルランキングは CD の売上枚数などで作成された音楽ランキングであり、ゾーン１，２の年代は CD で音楽を聴くことが主流であったためこのランキングを用いて分析することにした。一方、Billboard JAPAN Year End は CD 売上やダウンロードなどのセールスとラジオ局のエアプレイ回数、さらにストリーミングなどをそれぞれポイント化し、そのポイントの合計値の高い順にランキングしたものである。最近は様々な音楽の聴き方がありオリコンよりも Billboard のランキングを用いたほうが適切だと考え、ゾーン３，４は Billboard JAPAN Year End を用いた。

【実験 1】ではこれらの曲の歌詞のデータを KH Coder を用いて抽出語リストを作成した。抽出語リストとはあるリスト内で多く出現していた単語がランキング形式で表示される頻度表である。今回の研究では私たちは４つのゾーンごとに抽出語リストを作り、それらをそれぞれ頻出度が高い順に単語を並べた。それを分析したところ未知語（英単語）が多いことがわかった。

そして総単語数に占める未知語の割合を分析したところ（図 1）特にゾーン 3 に未知語が多いことが分かった。総単語数に占める未知語の割合が一番高かったゾーン 3 に着目し品詞語数の割合を分析した結果を(図 2)に示す。我々の研究では主に J-pop を研究対象としているので「I」や「You」など、我々の研究に不必要な単語が高頻度で出現したため正しい分析ができないと予想しその後の実験では頻出未知語、助詞を除いて行った。その未知語、助詞を除いたデータを KH Coder の中の抽出語リストを用いて 4 つのゾーンをそれぞれ頻出度が高い順に単語を並べ、それを Excel ファイルに移し頻度上位 50 語を特定した。

【実験 2】では KH Coder を用いて共起ネットワークを作成した。共起ネットワークとは単語が共通に出現する関係（共起関係）を円と線で表示した図であり、単語の関連性を可視化することができるため、出現頻度の高い単語の把握や文全体の趣旨の理解などに応用することができる。４つのゾーンのそれぞれの年代で頻出語同士の結びつきを調べるため KH Coder でゾーンごとに分け KH Coder の中の共起ネットワーク分析を行った。共起ネットワ

ークの条件としては、出現数による語の取捨選択では最小値を 20 にした。これは言葉が出現した回数が 20 語以上のものを表示するということである。次に、文書数による語の取捨選択では最小値 1 にした。この研究では特に文にこだわりがなかったため、1 つの文に入ってるものもカウントした。品詞による語の取捨選択では研究に不必要な頻出未知語を抜いた。集計単位は歌詞 1 曲分を 1 つのまとまりにする「H5」、Jaccard 係数を用いた。 Jaccard 係数とはある 2 つの語同士の関連を数値で表すというもので 1 に近いほど強い関連がある。また、強い共起関係があるほど２つの語を結ぶ線を濃くし、共起ネットワークを見やすくするために最小スパニングツリーだけを描画した。

【実験 3】では KH Coder を用いて対応分析を行った。対応分析とは語と語の関係性を散布図で視覚化できる分析方法のことである。それを利用して、私たちはゾーンと語の関係性を分析した。 x 軸と y 軸のグラフで原点(0, 0)付近にはどのゾーンに対しても普遍的に存在する語が集まる。また原点から離れている語ほど特徴的な語であり、あるゾーンに位置が近い語であるほどそのゾーンと関連性が強い。よって原点(0, 0)から見て、「1」「2」「3」「4」周辺にある語、そしてその語が原点から離れているほどゾーン１、ゾーン 2、ゾーン 3、ゾーン 4 と関連性が強い語である。

【実験 4】では形態素解析を行うプログラムを構築し、対象とする曲が比較的古い曲（ゾーン１，２寄り）なのか新しい曲（ゾーン３， ４寄り）なのかを新旧判別した。形態素解析とは、特徴のない自然言語のテキストデータから、辞書と呼ばれる単語の品詞等の情報にもとづき、形態素(言語で意味を持つ最小単位である単語)の列に分割し、それぞれの品詞を判別し、単語の基本形を表示したりする作業であり、テキストの意味理解に使うことができる。今回は MeCab と Janome という辞書が搭載された形態素解析エンジンを使用した。使用するデータは研究対象である 20 年分のヒット曲上位それぞれ 30 曲（1 位～30 位）を学習データとし、その上位 30 曲に続く 20 曲（31 位～50 位）をテストデータとした。まず、私たちは学習データを 4 つのゾーン（30 曲×5 年分）に分けて、それらを KH Coder にかけて抽出語リストを作成した。その抽出語リストを設定で品詞ごとに語を分け、それを Excel に変換した。4 つのゾーンの品詞ごとの頻出上位 50 語を他の Excel にゾーン１、ゾーン２、ゾーン３、ゾーン４の 4 列に並べた。そこで、4 つのゾーンの 50 語を照らし合わせ、1 つのゾーンにしか存在しない語を抽出した。これを曲に影響を与えると予想した名詞、形容詞、形容動詞、動詞、副詞、未知語（頻出未知語を除く）で行い、ゾーン１、ゾーン２でしか存在しなかった単語を集めてまとめたリストを「old_single_list」（古い曲にだけ使われている語の集まり）、ゾーン３、ゾーン４でしか存在しなかった単語を集めてまとめたリストを「new_single_list」（新しい曲にだけ使われている語の集まり）として google drive の共有ドライブに Mecab と Janome のリスト計 4 つを保存した。テストデータでは Excel で「曲名」「歌手」「歌詞」の列に分け、1 年分の 20 曲を上から上位の順に行に並べたファイル 20 年分を csv にして google drive の共有ドライブに「（年数）.csv」として保存した。 google drive の共有ドライブにこれらのデータを入れる理由は形態素解析を行うプ

ログラミングを google colaboratory で行うので簡単にこれらのデータを利用できるようにするためだからである。　形態素解析を行ったプログラミングではまず google drive からファイルを取り出すためのコードを入力する。次に形態素解析が行えるように Mecab と Janome を colaboratory 内で使えるようにするコードを入力した。そして、ファイルを読み込めるようにする pandas というライブラリを使えるようにするコードを入力し、「old_single_list」、「new_single_list」を google drive から読み込むコードと、テストデータを 20 年ある中から年代と曲順を指定すると、その曲を google drive から読み込んでデータフレーム化し、歌詞の部分だけを抜き出しその歌詞を形態素解析するコードを入力した。そして、その形態素解析した歌詞の単語が「old_single_list」、「new_single_list」の中の語と共通する単語の個数を「old_single_list」、「new_single_list」ごとに計算するコードを入力した。そして、その共通する単語の数が「old_single_list」内の単語と共通する歌詞が多いのか、「new_single_list」内の単語と共通する歌詞が多いのかを比べ、「old_single_list」と共通する歌詞の単語の数が「new_single_list」と共通する歌詞の単語の数より多い場合は「この曲は古いです」、「new_single_list」と共通する歌詞の単語の数が「old_single_list」と共通する歌詞の単語の数より多い場合は「この曲は新しいです」、 old_single_list」と共通する歌詞の単語の数と「new_single_list」と共通する歌詞の単語の数が等しい場合は「判断できません」と表示するコードを入力した。そして、テストデータをこのプログラムに通し、新しい曲（ゾーン 1、ゾーン 2 の曲）は「この曲は新しいです」、また古い曲（ゾーン 3、ゾーン 4 の曲）は「この曲は古いです」と正しく表示される割合（正答率）を Janome、Mecab ごとに調べた。（図７）はこの正答率を 20 年分表示したものであり、「year」の列は年代、「jorm」の列は使った形態素解析エンジンが Janome か Mecab であったか、「分母」の列はその年の 20 曲の邦楽以外の曲を抜いた数である。「分子」の列は新しい曲は正しく「この曲は新しいです」、古い曲は「この曲は古いです」、と正しく表示された数である。「確率」の列は分子/分母をパーセントで表したものである。

【実験 5】ではゾーンごとに曲の BPM の箱ひげ図を作って、関係を調べた。まず Excel で年ごとのヒット曲上位 10 曲 20 年分の曲名を列に並べた。そして、インターネットから列に並べた曲の BPM を検索して、曲名の隣に BPM を全て書き込んだ。そして、その書き込んだ BPM を Excel のツールを利用して、各ゾーンごとの箱ひげ図を作成した。※BPM とは音楽では曲のテンポを表す単位である。 Beats Per Minute の略で、1 分あたりの拍数をいう。

4. 結果

【実験 1】では「恋」や「愛」という恋愛系の単語や「夢」「心」「泣く」はどの年代も多いことが分かり、古い年代（ゾーン１，２）に共通して多かった単語は「女」「男」「胸」であり、現代（ゾーン 3, 4）に共通して多かった単語は「未来」「生きる」「知る」であった。

図 3 はゾーン 1、ゾーン 2、ゾーン 3、ゾーン 4 の年代それぞれの頻出度の高い上位 10 語を示している。（図 3①～④）

【実験 2】では「恋」との結びつきが強い単語はゾーン１では「女」「泣く」、ゾーン２では「ない（否定助動詞）」「夜」「いる」、ゾーン３では見られなかった、　ゾーン４では「好き」「思う」であった。「夢」との結びつきが強い単語は、ゾーン１では「雨」「風」「ない（形容詞）」「花」、ゾーン２では「ぬ（否定助動詞）」「涙」、ゾーン３では「明日」「涙」「空」「ぬ（否定助動詞）」、ゾーン４では「今」「自分」「道」であることが分かった。（図 4①～④）

【実験 3】では（図 5）より「明日」「風」「今」「言葉」は原点（0,0）付近に表示された。また、ゾーン１は「人」「今日」、ゾーン２は「泣く」「夢」、ゾーン３は「生きる」「今」「空」「見える」、ゾーン４は「好き」「未来」「言う」「世界」が原点（０，０）から離れて表示された。　また縦軸と横軸で成分が違い、

【実験 4】では（図 6）より「2020（年）、１（上位から 1 曲目）」と指定するとその曲にある単語と「new_single_list」の単語が共通する単語の個数を表示し、（7 行目の「3」個）またその曲にある単語と「old_single_list」の単語が共通する単語の個数を表示して、（10 行目の「1」個）その二つの数を比べ、今回の実行結果ではその曲にある単語と「new_single_list」の単語が共通する単語の数のほうが多いので「この曲は新しいです」と表示された。

（図 7）より Janome を用いた形態素解析では 1973 年では 93.8%、1970 年では 92.3%と古い曲（ゾーン１、ゾーン２）が「この曲は古いです」と正しく表示された割合が大きく、また Mecab を用いた形態素解析では 2020 年では 95%、2019 年では 85%と新しい曲（ゾーン３、ゾーン４）では「この曲は新しいです」と正しく表示された割合が大きかった。

【実験 5】では（図 8）より BPM はゾーン 1 で全体的に低く、ゾーン 2 では BPM が全体的に高くどのゾーンよりも BPM の範囲が大きかった。また、ゾーン 3 はゾーン１と比べ BPM が高く、ゾーン 4 はゾーン 2、ゾーン 3 と比べ、BPM が低かった。

5. 考察

【実験 1】よりラブソングが多いのは詩歌が詠まれていた時代の名残ではないかと考えた。昔も現在もラブソングが人気であるので今後も多くの人から支持を得られるのではないかと予想する。ここ十数年「未来」「生きる」が多く使われていることから自殺が多いと社会問題になっていることの反映ではないかと考えられる。

【実験 2】よりはゾーン１は「夢」と結びつきが強い語で「雨」「風」があげられるが、ゾーン４では「今」「自分」「道」のような現実味を帯びた言葉があげられる。現代の人々は音楽で現実の共感を得ているのかもしれない。またジェンダーレスが注目されていることから、曲中に性別を限定する女や男という言葉が減少したのではないかと考えられる。

【実験 3】より「明日」「風」「今」「言葉」はどの年代にも多く使われていることからこれらの語を使うとどの年代の人にもヒットする曲が作れるのではないかと考えられる。

【実験 4】よりそのプログラミングによる新しい曲なのか古い曲なのかの判別の正答率は割合は約 7 割であり、歌詞はその年代別の特徴を示していたことが分かった。

【実験 5】より ゾーン 1 は比較的テンポの遅い曲が多い演歌や歌謡曲が多くヒット曲に選ばれていたため BPM も低くなったと考えられる。ゾーン 2 はバブル期に流行したダンスミュージックはテンポの速い曲が多く、それらの曲がヒット曲に選ばれたことによって BPM が高くなったと考えられる。ゾーン 3 は未知語が多かったことから、日本でヒットした海外の曲はテンポ速い傾向にあるのではないかと考えられる。ゾーン 4 から最近のリスナーはテンポの遅い曲を求める傾向にあるのではないかと考えられる。

6. 結論

全体を通してそれぞれの年代のヒット曲は特徴をもっていることが分かった。

【実験 1】【実験 2】【実験 3】今後の展望として、KH Coder を用いたが私たちの KH Coder に対する理解が浅く、共起ネットワークや対応分析の設定の定義が不十分であった。だから、正確な分析が行えるように KH Coder を十分に理解し、共起ネットワークや対応分析の設定を新しく定義し直したい。

【実験 4】の今後の展望として、「BERT」というものを用いたデータ処理を検討している。BERT とは自然言語処理モデルの一種で日本語では「Transformer による双方向のエンコード表現」と言われていて文章を文頭・文末の双方向から学習し、文脈を読めるようにするものである。自然言語処理とは、人間が使用している言葉（自然言語）をコンピューターによって処理する技術のことを指す。 BERT の仕組みは既に入力されたシーケンスを元に別のシーケンスを予測する事前学習モデルであり、入力されたラベル（名前）が付与されていない分散表現を Transformer が処理を行い、学習する。実際には、Transformer が Masked Language Model と Next Sentence Prediction という 2 つの手法を同時進行で進めていき、学習するという仕組みである。 Masked Language Model の仕組みは入力した文章の 15%の単語を、確率的に別の単語で置き換えていくことで、文脈から置き換える前の単語を予測するものである。選択された 15%の単語のうち、80%は[MASK]に置き換えるマスク変換となり、10%をランダムな別の単語に変換し、残りの 10%はそのままの単語となる。このような形で置換された単語を周りの文脈から当てるタスクを解くことによって、単語に対応するための文脈情報を学習していくということである。 Next Sentence Prediction の仕組みは片方の文を 50%の確率で他の文に置き換えた上で、それらの文が隣り合っているのか、それとも隣り合っていないのかを判別し、学習するというものである。 これを用いてヒット曲の歌詞のデータを機械学習させ、ジャンルや年代における特徴のある言葉を入力したら、そのジャンルや年代の特徴が組み込まれた文章を BERT が生成してくれるのではないかと考えた。

【実験 5】の今後の展望として、BPM を取った曲数が少なくゾーンごとに正しい箱ひげ図が作れていないのではないかと考えた。だから、私たちは学習データとテストデータの 50 曲分でデータを取りたい。

7. 参考文献

Billboard JAPAN　2008-12、2016-20 年

https://www.billboard-japan.com/

ORICON NEWS　1970-74、1987-91 年

https://www.oricon.co.jp/rank/js/y/2021/

Janome

https://mocobeta.github.io/janome/

MeCab

https://taku910.github.io/mecab/

bpm

https://taku910.github.io/mecab/

Colaboratory

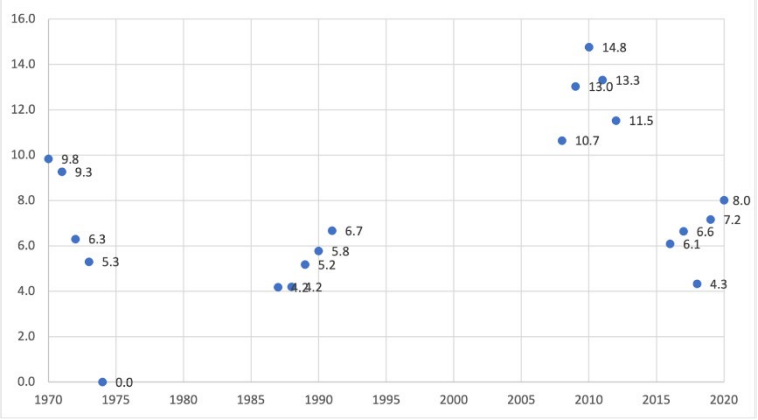
https://colab.research.google.com/drive/1B34YtOURxGObfgQgSYlXm0Kck1u9HsrJ

8. 謝辞

この研究にご協力して頂いた大学の先生方、指導してくださった学校の先生方に御礼を申し上げます。

9. 図表

（%）図 1　総単語数に占める未知語の割合



（年）

図 2　ゾーン 3 における品詞別語数

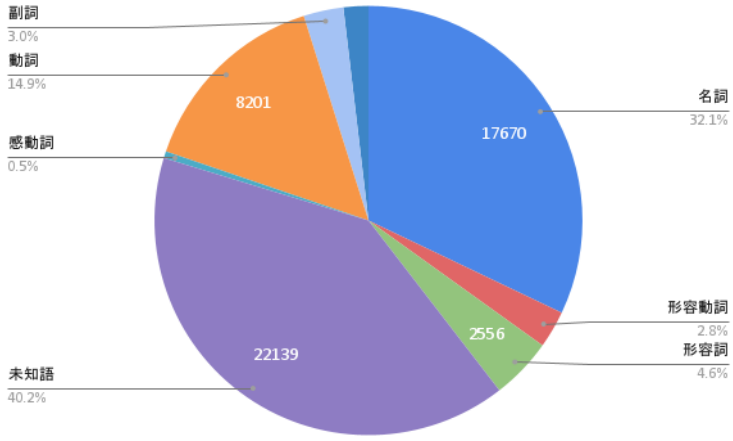


図 3①　ゾーン 1 の頻出度が高い上位 10 単語

1	愛	名詞C	119
2	人	名詞C	90
3	恋	名詞C	90
4	女	名詞C	73
5	涙	名詞C	64
6	泣く	動詞	56
7	胸	名詞C	55
8	愛す	動詞	52
9	夢	名詞C	51
10	雨	名詞C	49

②　ゾーン 2 の頻出度が高い上位 10 単語

1	夢	名詞C	122
2	愛	名詞C	114
3	心	名詞C	103
4	胸	名詞C	82
5	恋	名詞C	77
6	涙	名詞C	71
7	愛す	動詞	65
8	抱きしめる	動詞	61
9	泣く	動詞	55
10	風	名詞C	55

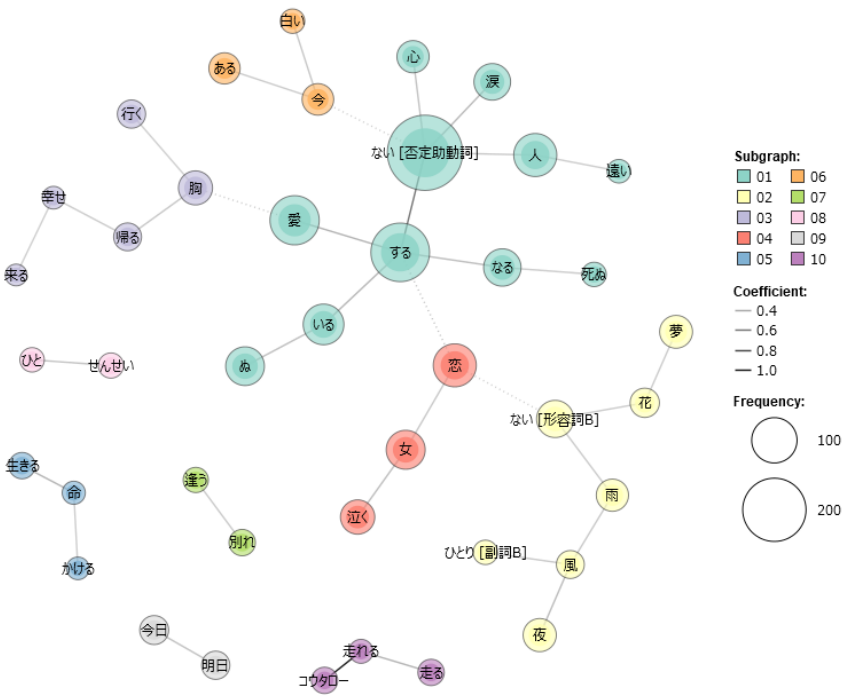
③　ゾーン 3 の頻出度が高い上位 10 単語

1	心	名詞C	164
2	夢	名詞C	147
3	愛	名詞C	139
4	生きる	動詞	119
5	手	名詞C	115
6	空	名詞C	113
7	恋	名詞C	111
8	見る	動詞	109
9	笑う	動詞	105
10	泣く	動詞	95

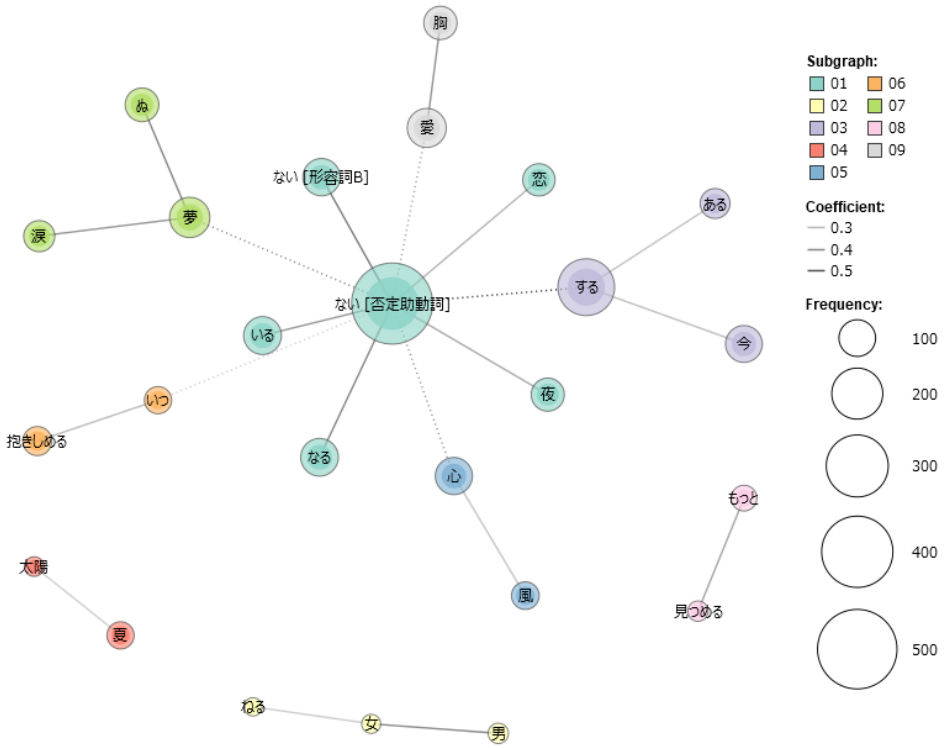
④　ゾーン 4 の頻出度が高い上位 10 単語

1	夢	名詞C	151
2	見る	動詞	142
3	言う	動詞	134
4	心	名詞C	130
5	愛	名詞C	126
6	知る	動詞	123
7	行く	動詞	119
8	思う	動詞	118
9	恋	名詞C	118
10	未来	名詞	116

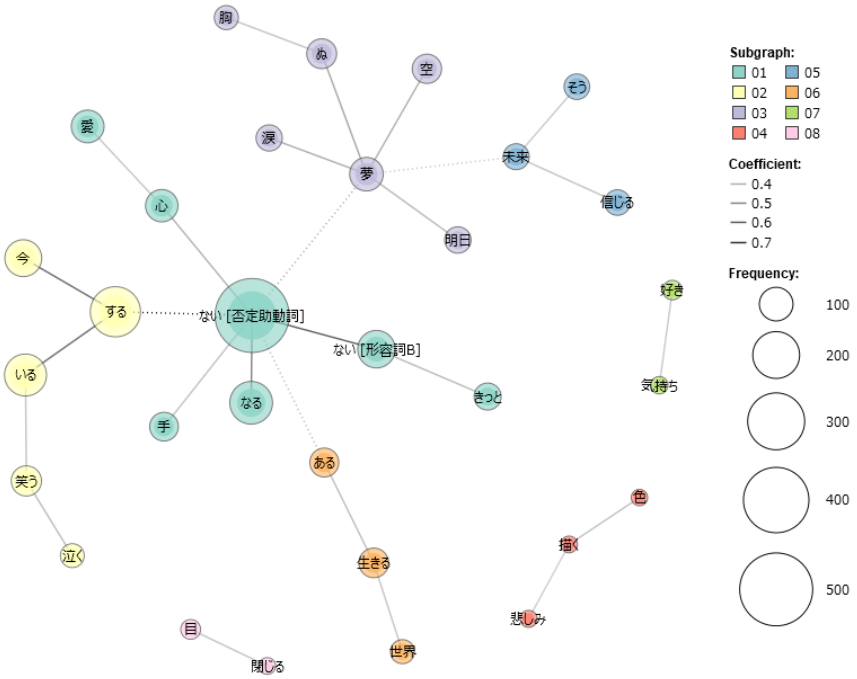
図 4①　ゾーン 1 の共起ネットワーク



② ゾーン 2 の共起ネットワーク



③ ゾーン 3 の共起ネットワーク



④　ゾーン 4 の共起ネットワーク

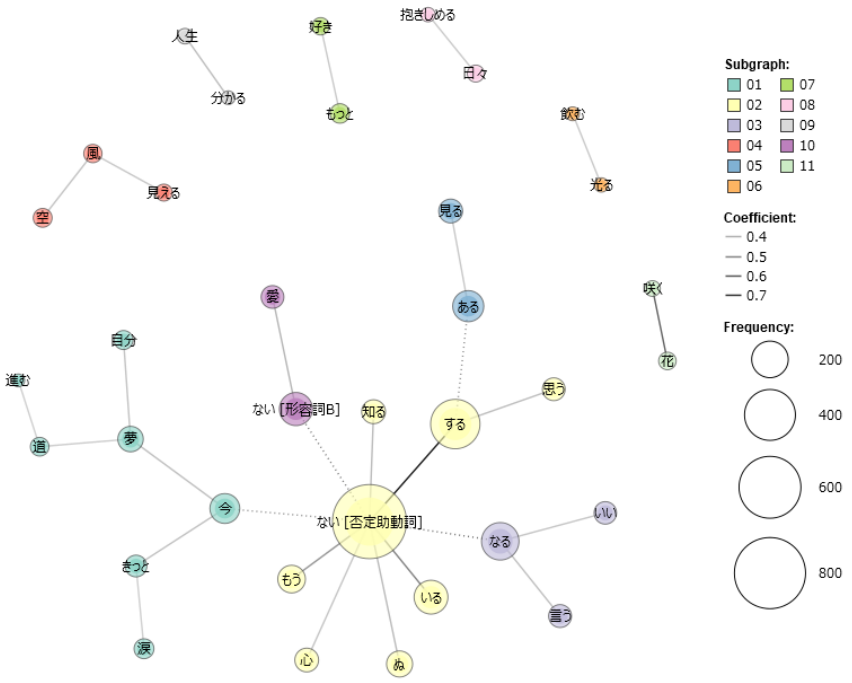


図 5　対応分析

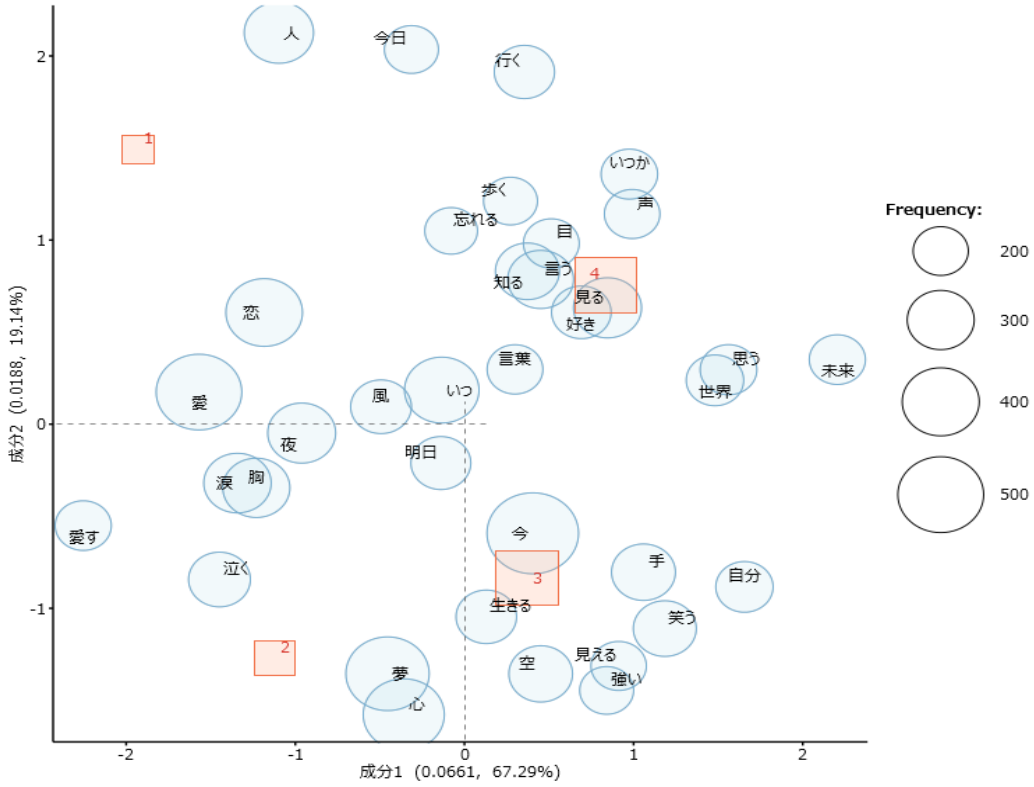


図 6　新旧判別のプログラミング

年号〔範囲 1970～1974, 1987～1991, 2008～2012, 2016～2016～2020〕2020

曲数〔1900 年代は 1～30, 2000 年代は 1～50。小さい番号が人気〕1

君とのラブストーリーそれは予想通りいざ始まればひとり芝居だずっと・・・

[’君’, ’と’, ’の’, ’ラブストーリー’, ’れ’, ’は’, ’予想’, ’通り’・・・

[’運命’, ’無責任’]

[’運命’, ’無責任’, ’運命’]

３

[’窓’]

[’窓’]

1

この曲は新しいです

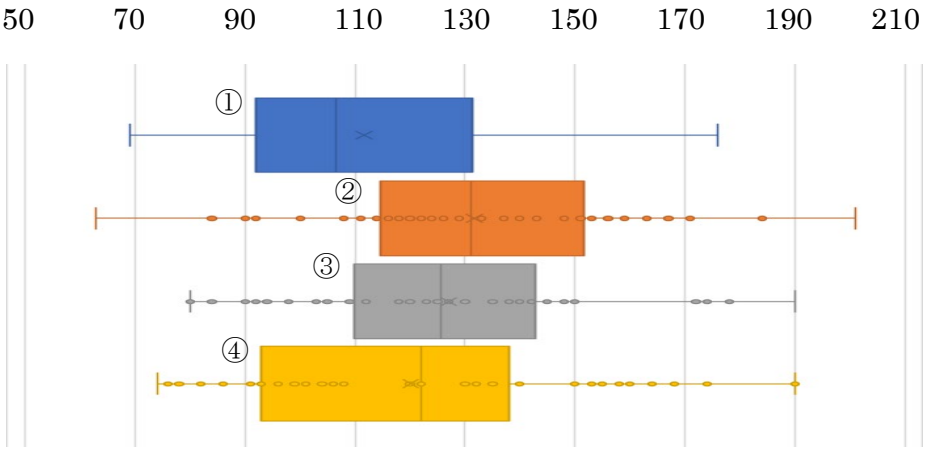
図 7　形態素解析による Janome と Mecab の正答率

Year	jorm	分母	分子	確率			year	jorm	分母	分子	確率
2020	j	17	17	100.0%			2020	m	20	19	95.0%
2019	j	19	13	68.4%			2019	m	20	17	85.0%
2018	j	19	15	78.9%			2018	m	19	15	78.9%
2017	j	16	10	62.5%			2017	m	19	16	84.2%
2016	j	19	11	57.9%			2016	m	19	13	68.4%
2015	j	16	9	56.3%			2012	m	16	10	62.5%
2012	j	17	8	47.1%			2011	m	19	10	52.6%
2011	j	20	13	65.0%			2010	m	18	13	72.2%
2010	j	19	12	63.2%			2009	m	19	12	63.2%
2009	j	19	11	57.9%			2008	m	19	12	63.2%

2008	j	17	13	76.5%			1991	m	16	7	43.8%
1991	j	17	13	76.5%			1990	m	14	7	50.0%
1990	j	16	12	75.0%			1989	m	15	11	73.3%
1989	j	20	16	80.0%			1988	m	19	15	78.9%
1988	j	20	17	85.0%			1987	m	19	14	73.7%
1974	j	18	14	77.8%			1974	m	16	7	43.8%
1973	j	16	15	93.8%			1973	m	16	11	68.8%
1972	j	17	14	82.4%			1972	m	19	14	73.7%
1971	j	19	17	89.5%			1971	m	16	12	75.0%
1970	j	13	12	92.3%			1970	m	9	7	77.8%
合計		354	262	74.0%					347	242	69.7%

図８　ヒット曲の BPM の箱ひげ図

青①：ゾーン１、赤②：ゾーン２、灰③：ゾーン３、黄④：ゾーン４



正弦波を用いた音の合成

理数コース３年　新ヶ江泰輝　藤原慧人　兼久優月　小野山慶樹　鈴木那由大

１　概要

音をフーリエ変換して数値化し、数値化したものを、分類・回帰を用い、「ピアノのドの音」や「ギターの一弦」などを指定して音のスペクトルを出すプログラムを作成した。プログラムによって出力されたデータを逆フーリエ変換することで音を作ることができると考えた。

２　研究目的

現在、音声を読み上げるアプリやソフトは広く普及しており、日常生活でも多く見られる。iPhone に搭載されている Siri やボーカロイドなどが最たる例であろう。それらの正体は、あらかじめ登録した人間の声を組み合わせたり加工したりして、テキストで入力された文字を読み上げる音声合成ソフトである。そこから、「人の声や日常生活で耳にする音を声優なしでゼロからつくることはできないのか。」という疑問を持ちアプリケーションやコンピューターのプログラミングを用いた実験を進めた。私達は声などの様々な大きさ、高さの音が重なっているようなデータを細かく分けて、再度人工音を創る実験での数々の失敗を通して、声などの音の特徴について理解を深め、中途ではあるが我々なりに音の特徴を抽出する方法を模索した。音を自由にゼロから作れるようになれば、個人にとっての理想の声や楽器音などを作ることができ、機械音特有の違和感や不快感をも解決する手立てになると考えた。また声にかかわる創作活動の幅がもっと広くなり、将来的には商業的な利用も可能になると考える。

３　研究方法

【実験１】

研究目的：人の声の特徴を解析し今後の研究の見通しを立てる

研究対象：高校２年生の男子２４人と女子９人

実験手順：

１．学校の中で比較的静かな部屋で、各被験者の「あ、い、う、え、お」という音声のデータを「デシベル X」で１人５回ずつ採取した。採取する際、被験者にできるだけ発声を長くしてもらい、発声の最初と最後をカットし、中央の音を採取した。ここで、「デシベル X」とは、スマートフォンの無料のアプリであり、採取した音を Hz（周波数）と dB（音の強さ）に分け、グラフを作成することができるアプリである。

２．デシベル X で作成したグラフを分析した。（図１参照）

【実験２】

研究目的：正弦波のみでの人の声を再現する

広島大学大学院理学研究科出典の小林亮教授の論文によるとフーリエ変換を用いれば、正弦波を合成することによって全ての音を再現することができるということ分かった。そのため、「あ」の音を 44 個の音声データに分けてその Hz と dB を出力し同時再生すれば元の音に聞こえるのでは、ないかという予想をした。（表２参照）

実験手順：

１．実験１で作成したグラフから数値を読み取り、表にまとめた。ここで、一般に人間の可聴範囲は 20Hz～20000Hz までであるが、２で用いる「周波数ジェネレーター」で再生した音では 5000Hz 以上の周波数の音が聞こえなかったため、本研究では最も影響が大きい 5000Hz までの音に絞って採取した。

２．音声データ 44 個を「周波数ジェネレーター」で出力した。ここで、「周波数ジェネレーター」とは、スマートフォンの無料アプリであり、入力した周波数(Hz)と音の強さ(dB)を 3 つまで同時再生ができるアプリである。

３．２で出力した音を「GarageBand」というアプリに録音した。ここで、「GarageBand」とは、スマートフォンの無料アプリであり、録音した様々な音源を組み合わせて出力することができる。

４．３で録音した音データを「GarageBand」で同時再生した。

【実験３】

研究目的：フーリエ変換のプログラムが正常に作動していることを確かめる

実験手順：

１．音声データの１秒間を 40000 個に分割し、それを周波数（Hz）と音の強さ（dB）に分解して数値化することができるフーリエ変換のプログラムを作成した。

２．１で得られた数値データから音のスペクトルを出力するプログラムを作成した。

３．２で出力された音のスペクトルから音の波形を作成する逆フーリエ変換のプログラムを作成した。

４．フーリエ変換する前の音の波形と３で作成した波形を比較して、正しくプログラムが実行されていることを確認した。

５．フーリエ変換で数値化されたデータの値を変換して出力させ音声がどのように変換したか調べた。

【実験４】

研究目的：音の特徴を決定する要素を調べる。

本研究の最大の目的は人の声の再現であるが、その前段階として人の声の特徴を決定する要素を調べるため、人の声より単純な楽器の音を用いて、楽器の種類によってスペクトルに違いがみられるか確認した。

使用したデータ：魔王魂（ピアノ、ビオラ、トランペット）

実験手順：

１．実験３で作成したフーリエ変換のプログラムに音声データを入力した。
２．１で得られた音のスペクトルを分析した。
３．各楽器の単音のスペクトルを重ねたグラフを作成した。
４．楽器によるスペクトルの違いを確認した。

【実験５】

研究目的：機械が音の特徴を抽出することができるか調べる

使用したデータ：ピアノ（ド～シの黒鍵を含まない一音階)、
ギター（カポをつけずに弾いた第１弦から第６弦までの音）

実験手順：

１．音データを実験３で作成したフーリエ変換のプログラミングに入力してフーリエ変換を行いデータ化した。(図４参照)
２．楽器の音や高さを示す数字（バリュー）をそれぞれに割り振る。
３．Scikit-learn を用いて機械学習を行った。ただし、フーリエ変換した音データを説明変数、バリューを目的変数（教師データ：テストデータ＝７：３）とした。機械学習では決定木、k 最近傍法、SVM の３つの手法を用いた。決定木とは、説明変数の多い各ノード（枝分かれ）に書かれた条件に従って分岐を辿っていくことにより、末端の葉（リーフノード）に書かれた結論が得られ、(次元の高い）データ、様々な尺度（質的変数か量的変数かなど）が混在しているデータでも扱いやすい手法である。また、k 最近傍法とは、分類に使われる手法の一つで、与えられた学習データをベクトル空間上にプロットしておき、未知のデータが得られたら、そこから距離が最も近い１個を取得し、そのデータが属するクラスを推定する手法である。さらに、SVM（サポートベクターマシーン）とは、2 クラス分類の直線で区分けできる線形識別関数を構築する機械学習モデルの一種である。

【実験６】

研究目的：未知データのバリュー予測

使用したデータ：魔王魂（ピアノ）

実験手順：

１．音源データをすべて教師データとして使用して、実験５で作成した３つの機械学習プログラム（決定木、k 最近傍法、SVM）を用いて、X_test（フーリエ変換した未知の音データ）を分類にかけた。(図４参照)

【実験７】

研究目的：音を機械に学習させ音を作成させる。

研究方法：実験４で使用した音のデータを使って回帰を行う。

実験の手順：(図５参照)

４　結果

【実験１】

人それぞれの声の特徴と「あ、い、う、え、お」の形が簡略化されているが、調べることができた。「あ」は全体が大きな山の形をしており、「い」は端もしくは真ん中に２つの山の形ができていた。「う」は左側に山の形ができており、「え」は全体がお椀の形をしており、「お」は全体がスリッパの形をしていた。下のデータは特徴をわかりやすくするために、外れ値を除いた。（図１参照）

【実験２】

「GarageBand」を用いて測定したものを、同時に再生したが、雑音が多く混じった全体の音が調和しないで不安定な感じを与える和音となり、元の「あ」を作り出すことはできなかった。

【実験３】

プログラムを用いて音声を数値化することができ、正常に作動できていることが確認できた。

【実験４】

ピアノの単音のスペクトルを合成したグラフはおおよそ横ばいであった。ビオラの単音のスペクトルを合成したグラフは溝の多いグラフとなり 0～7500Hz の範囲では右下がりとなった。またそれ以降ではおおよそ横ばいであった。トランペットの単音のスペクトルを合成したグラフは溝の少なく 0~7500Hz の範囲ではやや急に右に傾き、そこから 1500Hz まではおおよそ横ばいでそこから緩やかに上昇するグラフが得られた。以上のグラフを見比べると楽器の種類によって重ねたスペクトルのグラフに差異がみられた。

【実験５】

決定木を使用した機械学習での精度は 0.87、k 最近傍法を使用した機械学習での精度は 0.97、SVM(サポートベクターマシーン)を使用した機械学習での精度は 0.93 となった。したがって、k 最近傍法を用いた判定がより正確なものになった。機械学習での精度の高い音の判定ができていることから、機械が音の特徴を抽出できていることがわかる。（図６参照）

【実験６】

研究で用いた音データを正確に分類することができた。（図６参照）

【実験７】

音を作成することはできたが、雑音が多く混じった全体の音が調和しない不安定な感じを与える和音となり精度の低い結果となった。

５　考察

【実験１】

人それぞれ声に大きさ高さだけでなくスペクトルの形にも違いがあることが分かった。しかし、異なる人の声でも採取した母音それぞれの音にはグラフに類似点が多く見られた。そのため、人の声の音には別に何かしらの特徴があると考えた。人の声の採取場所を一定に

せず、様々な教室で音を録音したため、その環境で雑音が入ったこともグラフ差異に影響を与えていると考えた。したがって、一人一人違う場所ではなく、全員同じ場所で記録すれば本実験よりもより正確なグラフが得られる可能性があったと考えた。また、デシベル X の機能の精度は未知数であり、限界があるため、今回は一番大きな音の周波数と音の強さの数値しか調べることができなかった。そのため、今後の展望としてスペクトルにおいて、周波数と音の強さの正確な数値を調べ再現するために「あ」の単音にだけ注目して実験を進めようと考えた。

【実験２】

音声を「GarageBand]で、同時に出力したが、元の音に聞こえず、人の声にすら聞こえなかったことから、5000Hz よりも高い周波数にも人の声を決める要素があると考えた。また、録音した環境が、完全に雑音が遮断された空間とは言えないことから、雑音を測定した数値が混ざっていることや、こちらもアプリの性能が未知数であり限界があるのではないかと考えた。そのため、プログラムを使用することによって、アプリよりも音声をより細かく数値化し、出力できるようにすることが必要であると考えた。

【実験３】

フーリエ変換のプログラムが正常に作動していることが確認されたことより、前研究で使用したアプリケーションより正確で細かい値を用いて研究が行えると考える。また、展望として人間の声の分析は複雑であるため楽器などの単音を研究の対象として研究を進める。

【実験４】

三種類の楽器のスペクトルを比較したとき差異がみられたことから音の特徴を決定するものはスペクトルであると考えた。そして、同じ楽器の異なる単音に重なる部分が多くみられることから、楽器の音の特徴を取り出すことができると考えた。そして、音の特徴を抽出することによって任意の音声の作成が可能になるのではないかと考えた。

【実験５】

使用したデータが線型である確認を行っていなかったため、線型での分類ではなくロジスティック回帰が最も精度が良いと予測していた。しかし、今回の機械学習では 40000 次元という高次元のデータを扱ったが、高次元データではうまく機能しないはずの k 最近傍法が最も高い精度となる意外な結果となった。また SVM は高次元データでも高い精度の判定が出されることが確かめられた。しかし、過学習していないか調べる必要があった。

【実験６】

未知のデータに対しても正確な分類ができることから三つのプログラムは過学習することなく正確に作動していると考えられる。ドレミの判定では細かな分類や、楽器ではない人の声などの複雑な音の分類ができないので、もっと細かく（周波数等）バリュー付けを行うことで精度を上げることができると考えた。

【実験７】

最初は重回帰分析を行う予定だったが、うまくいかなかったため、多変量解析ではなく多

変量回帰分析を用いる必要があった。また、説明変数が量的ではなく質的なので数量化理論１類で分析する必要があった。修正した結果プログラムは完成した。ピアノ音とギター音を新しく作り、実験５で用いたプログラムで判定すると無事想定していた音と同じ判定がされたので、ある程度の精度が確認できた。しかし、違和感のある音ではあったので、分類とともに精度を上げる必要がある。無事に分類されたのに精度が低いと感じたので、実験５のプログラムも精度が疑わしくなった。両方に共通する点としてデータ量の少なさがあるので、それが問題だと考えられた。データ量の増加が今必要な改善であると感じた。

６　結論

実験６の精度が高くなかったので他の回帰を試し、データをもっと増やしてみようと思った。また、和音など複数の音が重なった音で回帰し、最終的に動物の音や、人の声など、段階的に、より複雑な音で回帰したい。研究全体を通して、参考文献などが少なく、一から模索したため実験の方向性が定まらなかったが、膨大なデータとプログラミングを用いることで音の再現が限りなく可能であることがわかった。今後より多くのデータを集めるため、ハードウェアを作成し、マイクから音データを採取し、パソコンに送信して、それらを含め回帰して作った音を出すことができるマイコンを作成中である。(図３参照)

７　今後の研究課題

今後より多くのデータを集めるためハードウェアを創ってマイクから音データを採取し、パソコンに送信してそれらを含め回帰して作った音を出すことができるマイコンを作成中だ。（図３参照）

８　参考文献

「魔王魂」https://maou.audio/category/se/se-inst/

「決定木・グラフ」https://algorithm.joho.info/machine-learning/python-scikit-learn-decision-tree/

「SVM」https://aiacademy.jp/media/?p=248

「k 近傍法」https://toukei-lab.com/%EF%BD%8B%E8%BF%91%E5%82%8D%E6%B3%95

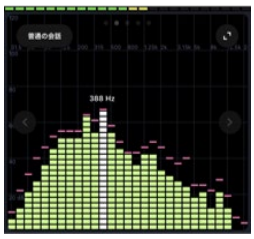
「重回帰分析」https://di-acc2.com/analytics/statistics/11786/

９　謝辞

本研究の遂行にあたり、指導教官として終始多大なご指導を賜った、藤上先生、山下先生、江河先生並びに、回帰分析についてのご指導を賜った電気通信大学の川野准教授に深謝致します。

１０　図表・画像

「あ」のグラフ　　「い」のグラフ　　「う」のグラフ　　「え」のグラフ



「お」のグラフ

図１　母音のスペクトル

表２　周波数ジェネレーターを用いて記録した数値

Hz	dB	Hz	dB
31.30	8.500	396.9	35.10
35.10	17.30	445.4	48.30
39.40	20.00	500.0	46.90
44.20	34.20	561.2	57.70
49.60	43.60	630.0	53.20
55.70	42.00	771.1	44.80
62.50	43.80	793.7	41.50
70.20	43.80	890.9	38.80
78.70	46.50	1000	34.90
88.40	47.30	1259	29.60
99.20	51.40	1114	22.10
100.4	51.40	1587	19.90
125.0	51.40	1781	9.600
140.3	51.30	2000	9.800
157.5	50.20	2244	10.40
176.8	53.90	2519	4.800
198.4	26.30	2828	12.50
222.7	53.60	3174	9.700
250.0	50.70	3563	12.80
280.6	45.80	4000	9.600
315.0	40.30	4489	2.700
353.6	37.50	5039	3.600

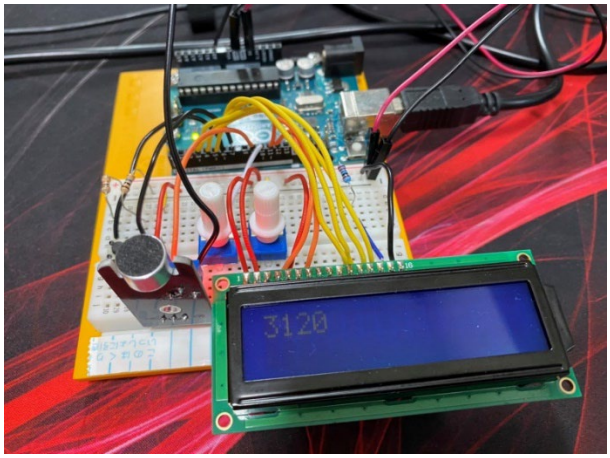


図３　現在作成中のマイコン

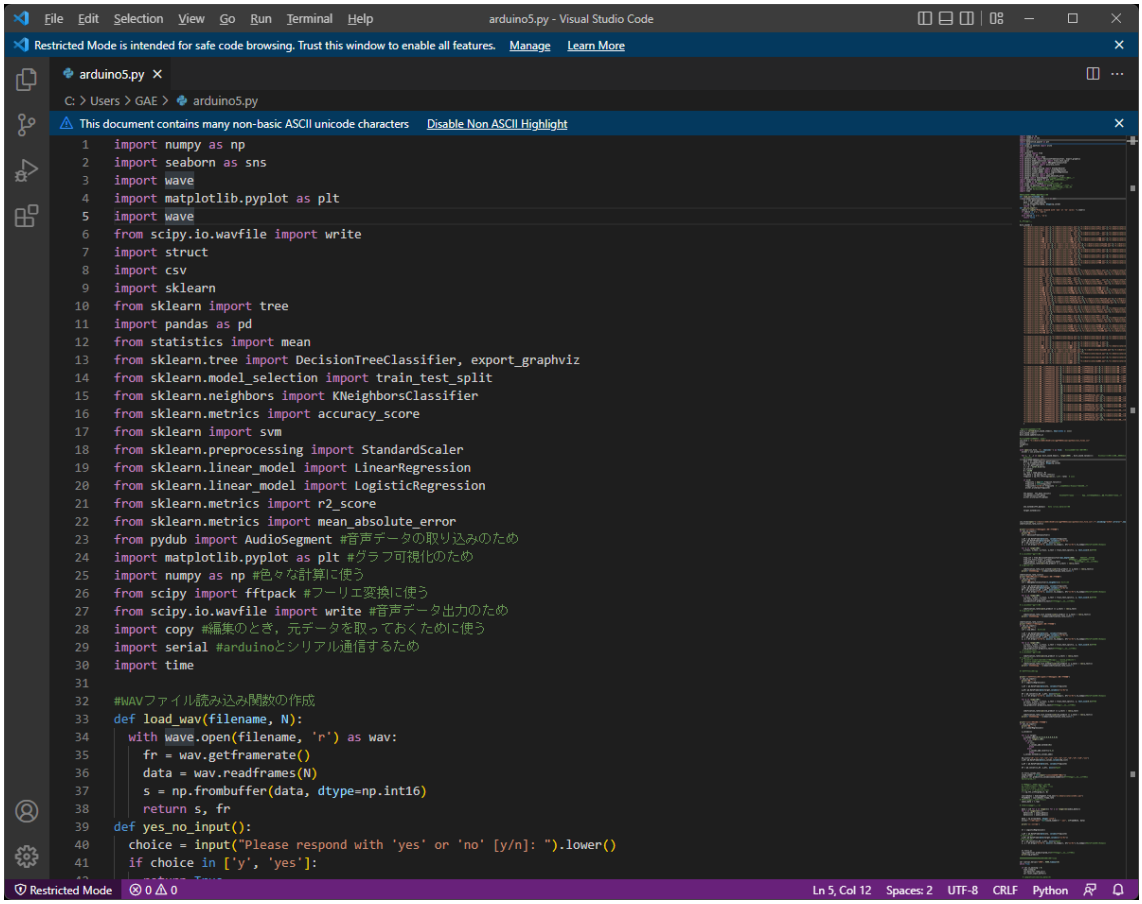
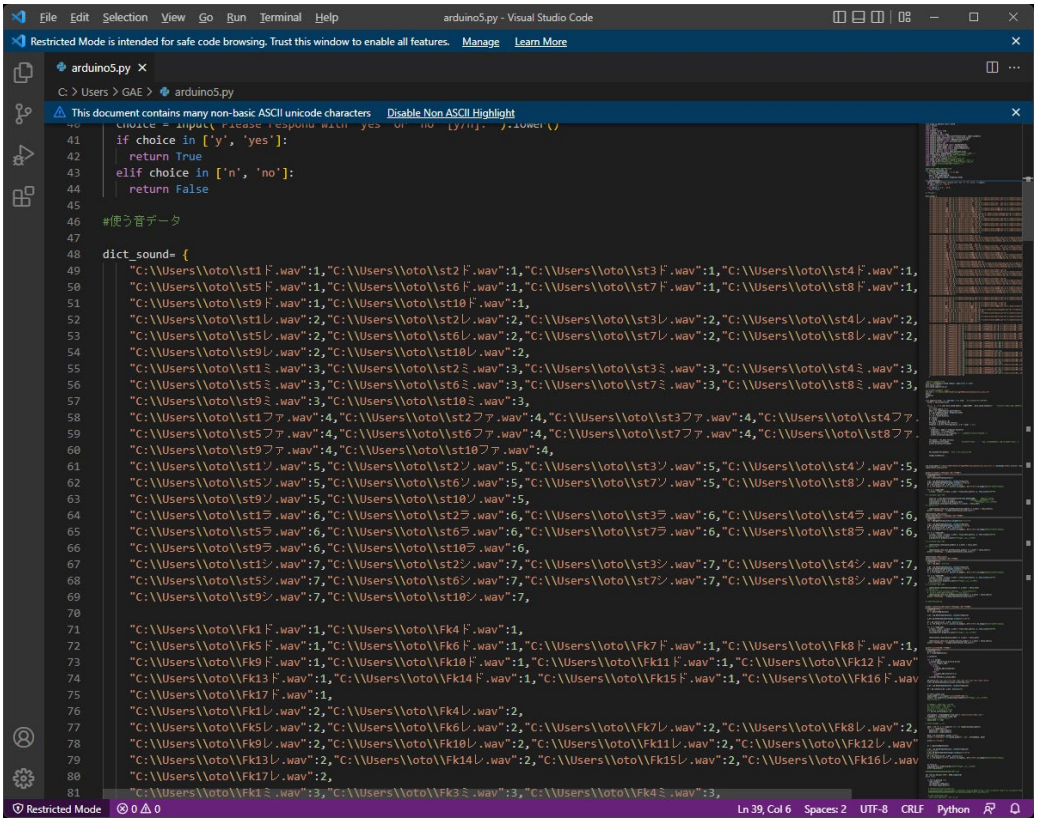
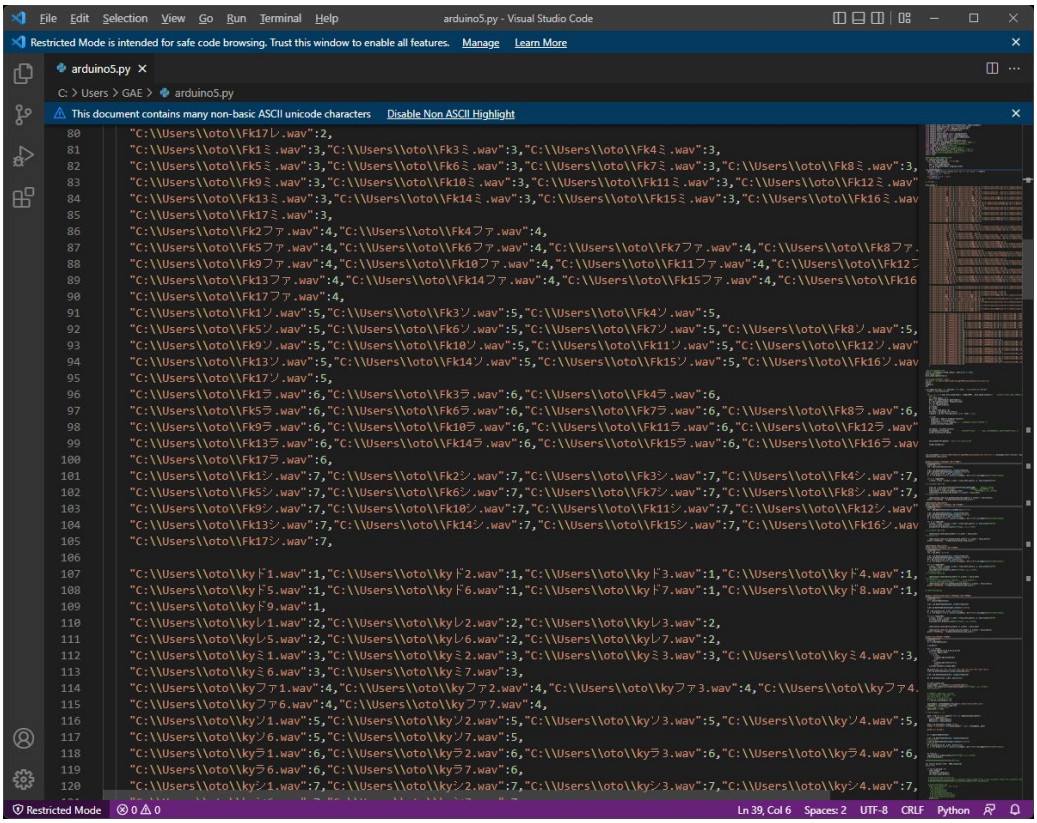


図４　分類のプログラム　その１



```
    if choice in ['y', 'yes']:
      return True
    elif choice in ['n', 'no']:
      return False

  #使う音データ

  dict_sound= {
      "C:\\Users\\oto\\st1ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\st2ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\st3ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\st4ド.wav":1,
      "C:\\Users\\oto\\st5ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\st6ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\st7ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\st8ド.wav":1,
      "C:\\Users\\oto\\st9ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\st10ド.wav":1,
      "C:\\Users\\oto\\st1レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\st2レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\st3レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\st4レ.wav":2,
      "C:\\Users\\oto\\st5レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\st6レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\st7レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\st8レ.wav":2,
      "C:\\Users\\oto\\st9レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\st10レ.wav":2,
      "C:\\Users\\oto\\st1ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\st2ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\st3ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\st4ミ.wav":3,
      "C:\\Users\\oto\\st5ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\st6ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\st7ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\st8ミ.wav":3,
      "C:\\Users\\oto\\st9ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\st10ミ.wav":3,
      "C:\\Users\\oto\\st1ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\st2ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\st3ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\st4ファ.
      "C:\\Users\\oto\\st5ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\st6ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\st7ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\st8ファ.
      "C:\\Users\\oto\\st9ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\st10ファ.wav":4,
      "C:\\Users\\oto\\st1ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\st2ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\st3ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\st4ソ.wav":5,
      "C:\\Users\\oto\\st5ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\st6ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\st7ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\st8ソ.wav":5,
      "C:\\Users\\oto\\st9ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\st10ソ.wav":5,
      "C:\\Users\\oto\\st1ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\st2ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\st3ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\st4ラ.wav":6,
      "C:\\Users\\oto\\st5ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\st6ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\st7ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\st8ラ.wav":6,
      "C:\\Users\\oto\\st9ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\st10ラ.wav":6,
      "C:\\Users\\oto\\st1シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\st2シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\st3シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\st4シ.wav":7,
      "C:\\Users\\oto\\st5シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\st6シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\st7シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\st8シ.wav":7,
      "C:\\Users\\oto\\st9シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\st10シ.wav":7,

      "C:\\Users\\oto\\Fk1ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\Fk4ド.wav":1,
      "C:\\Users\\oto\\Fk5ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\Fk6ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\Fk7ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\Fk8ド.wav":1,
      "C:\\Users\\oto\\Fk9ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\Fk10ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\Fk11ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\Fk12ド.wav"
      "C:\\Users\\oto\\Fk13ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\Fk14ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\Fk15ド.wav":1,"C:\\Users\\oto\\Fk16ド.wav
      "C:\\Users\\oto\\Fk17ド.wav":1,
      "C:\\Users\\oto\\Fk1レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\Fk4レ.wav":2,
      "C:\\Users\\oto\\Fk5レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\Fk6レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\Fk7レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\Fk8レ.wav":2,
      "C:\\Users\\oto\\Fk9レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\Fk10レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\Fk11レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\Fk12レ.wav"
      "C:\\Users\\oto\\Fk13レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\Fk14レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\Fk15レ.wav":2,"C:\\Users\\oto\\Fk16レ.wav
      "C:\\Users\\oto\\Fk17レ.wav":2,
      "C:\\Users\\oto\\Fk1ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk3ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk4ミ.wav":3,
```

図４　分類のプログラム　その２



```
      "C:\\Users\\oto\\Fk17レ.wav":2,
      "C:\\Users\\oto\\Fk1ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk3ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk4ミ.wav":3,
      "C:\\Users\\oto\\Fk5ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk6ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk7ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk8ミ.wav":3,
      "C:\\Users\\oto\\Fk9ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk10ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk11ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk12ミ.wav"
      "C:\\Users\\oto\\Fk13ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk14ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk15ミ.wav":3,"C:\\Users\\oto\\Fk16ミ.wav
      "C:\\Users\\oto\\Fk17ミ.wav":3,
      "C:\\Users\\oto\\Fk2ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\Fk4ファ.wav":4,
      "C:\\Users\\oto\\Fk5ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\Fk6ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\Fk7ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\Fk8ファ.
      "C:\\Users\\oto\\Fk9ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\Fk10ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\Fk11ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\Fk12フ
      "C:\\Users\\oto\\Fk13ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\Fk14ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\Fk15ファ.wav":4,"C:\\Users\\oto\\Fk16
      "C:\\Users\\oto\\Fk17ファ.wav":4,
      "C:\\Users\\oto\\Fk1ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\Fk3ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\Fk4ソ.wav":5,
      "C:\\Users\\oto\\Fk5ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\Fk6ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\Fk7ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\Fk8ソ.wav":5,
      "C:\\Users\\oto\\Fk9ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\Fk10ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\Fk11ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\Fk12ソ.wav"
      "C:\\Users\\oto\\Fk13ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\Fk14ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\Fk15ソ.wav":5,"C:\\Users\\oto\\Fk16ソ.wav
      "C:\\Users\\oto\\Fk17ソ.wav":5,
      "C:\\Users\\oto\\Fk1ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\Fk3ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\Fk4ラ.wav":6,
      "C:\\Users\\oto\\Fk5ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\Fk6ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\Fk7ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\Fk8ラ.wav":6,
      "C:\\Users\\oto\\Fk9ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\Fk10ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\Fk11ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\Fk12ラ.wav"
      "C:\\Users\\oto\\Fk13ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\Fk14ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\Fk15ラ.wav":6,"C:\\Users\\oto\\Fk16ラ.wav
      "C:\\Users\\oto\\Fk17ラ.wav":6,
      "C:\\Users\\oto\\Fk1シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\Fk2シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\Fk3シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\Fk4シ.wav":7,
      "C:\\Users\\oto\\Fk5シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\Fk6シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\Fk7シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\Fk8シ.wav":7,
      "C:\\Users\\oto\\Fk9シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\Fk10シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\Fk11シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\Fk12シ.wav"
      "C:\\Users\\oto\\Fk13シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\Fk14シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\Fk15シ.wav":7,"C:\\Users\\oto\\Fk16シ.wav
      "C:\\Users\\oto\\Fk17シ.wav":7,

      "C:\\Users\\oto\\kyド1.wav":1,"C:\\Users\\oto\\kyド2.wav":1,"C:\\Users\\oto\\kyド3.wav":1,"C:\\Users\\oto\\kyド4.wav":1,
      "C:\\Users\\oto\\kyド5.wav":1,"C:\\Users\\oto\\kyド6.wav":1,"C:\\Users\\oto\\kyド7.wav":1,"C:\\Users\\oto\\kyド8.wav":1,
      "C:\\Users\\oto\\kyド9.wav":1,
      "C:\\Users\\oto\\kyレ1.wav":2,"C:\\Users\\oto\\kyレ2.wav":2,"C:\\Users\\oto\\kyレ3.wav":2,
      "C:\\Users\\oto\\kyレ5.wav":2,"C:\\Users\\oto\\kyレ6.wav":2,"C:\\Users\\oto\\kyレ7.wav":2,
      "C:\\Users\\oto\\kyミ1.wav":3,"C:\\Users\\oto\\kyミ2.wav":3,"C:\\Users\\oto\\kyミ3.wav":3,"C:\\Users\\oto\\kyミ4.wav":3,
      "C:\\Users\\oto\\kyミ6.wav":3,"C:\\Users\\oto\\kyミ7.wav":3,
      "C:\\Users\\oto\\kyファ1.wav":4,"C:\\Users\\oto\\kyファ2.wav":4,"C:\\Users\\oto\\kyファ3.wav":4,"C:\\Users\\oto\\kyファ4.
      "C:\\Users\\oto\\kyファ6.wav":4,"C:\\Users\\oto\\kyファ7.wav":4,
      "C:\\Users\\oto\\kyソ1.wav":5,"C:\\Users\\oto\\kyソ2.wav":5,"C:\\Users\\oto\\kyソ3.wav":5,"C:\\Users\\oto\\kyソ4.wav":5,
      "C:\\Users\\oto\\kyソ6.wav":5,"C:\\Users\\oto\\kyソ7.wav":5,
      "C:\\Users\\oto\\kyラ1.wav":6,"C:\\Users\\oto\\kyラ2.wav":6,"C:\\Users\\oto\\kyラ3.wav":6,"C:\\Users\\oto\\kyラ4.wav":6,
      "C:\\Users\\oto\\kyラ6.wav":6,"C:\\Users\\oto\\kyラ7.wav":6,
      "C:\\Users\\oto\\kyシ1.wav":7,"C:\\Users\\oto\\kyシ2.wav":7,"C:\\Users\\oto\\kyシ3.wav":7,"C:\\Users\\oto\\kyシ4.wav":7,
```

図４　分類のプログラム　その３

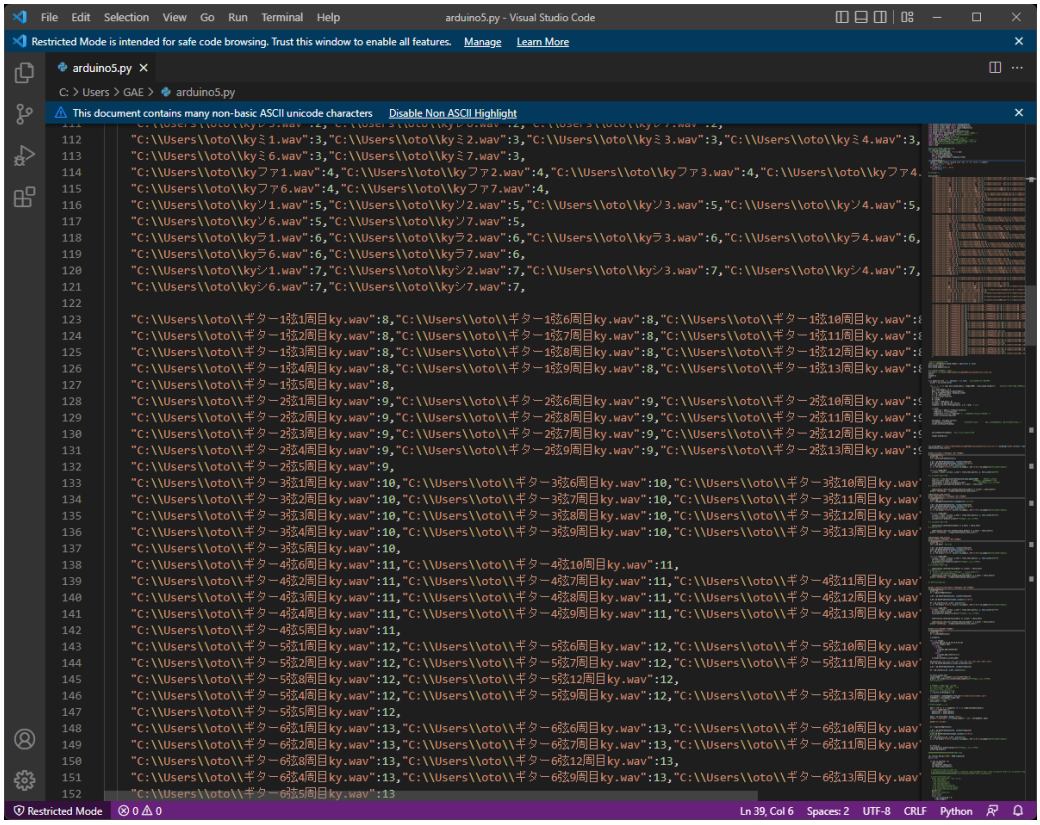


図４　分類のプログラム　その４

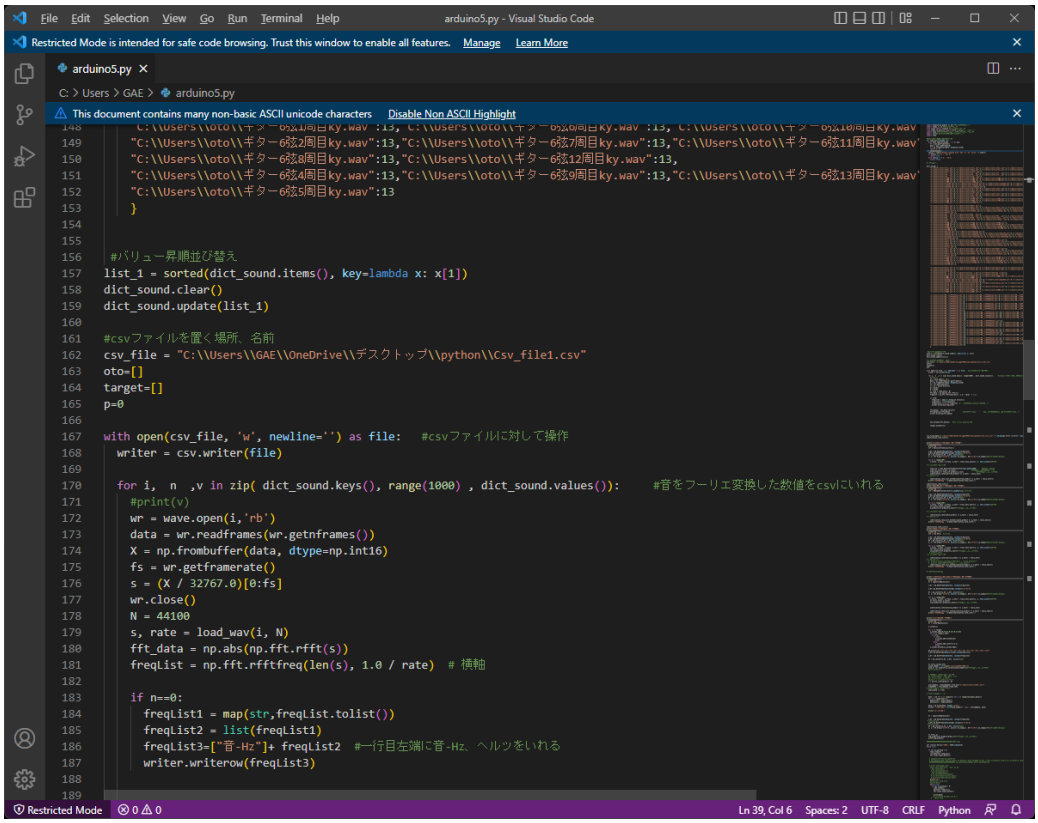


図４　分類のプログラム　その５

```python
    fft_data = np.abs(np.fft.rfft(s))
    freqList = np.fft.rfftfreq(len(s), 1.0 / rate)  # 横軸

    if n==0:
      freqList1 = map(str,freqList.tolist())
      freqList2 = list(freqList1)
      freqList3=["音-Hz"]+ freqList2  #一行目左端に音-Hz、ヘルツをいれる
      writer.writerow(freqList3)


    fft_data1=  fft_data.tolist()
    fft_data2=[v]+fft_data1                #vをhにする！！          #1行目以外左端にドレミ,スペクトルを入れる
    writer.writerow(fft_data2)




    oto.extend([fft_data1])   #oto (irisi.data)の作成

    target.extend([v])




csv_file1=open("C:\\Users\\GAE\\OneDrive\\デスクトップ\\python\\Csv_file.csv","r",encoding="ms932",errors="",newline="")
indification_rate_list=[]


print("決定木による識別率を出しますか？")
if yes_no_input():
  print("実行中")
  clf = DecisionTreeClassifier()

  x_df = pd.DataFrame(data=oto, columns=freqList2)
  y_df= pd.DataFrame(data=target,columns=["音-Hz"])
  df = pd.concat([x_df, y_df], axis=1)#結合
  x, y = df.drop(["音-Hz"], axis=1).to_numpy(), df["音-Hz"].to_numpy()#DataFrameからNumpyへ

  for w in range(100):
    x_train, x_test, y_train, y_test = train_test_split(x, y, test_size=0.3)#分割
```

図４　分類のプログラム　その６

```python
  x, y = df.drop(["音-Hz"], axis=1).to_numpy(), df["音-Hz"].to_numpy()#DataFrameからNumpyへ

  for w in range(100):
    x_train, x_test, y_train, y_test = train_test_split(x, y, test_size=0.3)#分割

# 2.決定木をモデル作成

    tree_clf = tree.DecisionTreeClassifier(max_depth=1000)      #インスタンス化
    tree_clf.fit(x_train, y_train)                  #学習データで学習してもらう
    tree_predict = tree_clf.predict(x_test)              #テストデータを使って推定
    indification_rate=sum(tree_predict == y_test) / len(y_test)
# 3.結果を出力

    indification_rate_list.extend([sum(tree_predict == y_test) / len(y_test)])
  print(f'平均識別率 : \n{mean(indification_rate_list)}')

indification_rate_list=[]
print("K最近傍法による識別率を出しますか？")
if yes_no_input():
  print("実行中")
  clf = KNeighborsClassifier(n_neighbors=1) #clf変更

  x_df = pd.DataFrame(data=oto, columns=freqList2)
  y_df= pd.DataFrame(data=target,columns=["音-Hz"])
  df = pd.concat([x_df, y_df], axis=1)#結合
  x, y = df.drop(["音-Hz"], axis=1).to_numpy(), df["音-Hz"].to_numpy()#DataFrameからNumpyへ

  for w in range(100):
    x_train, x_test, y_train, y_test = train_test_split(x, y, test_size=0.3)#分割
    clf.fit(x_train,y_train)
    k_predict=clf.predict(x_test)#テストデータを使って推定

# 2.決定木をモデル作成

    indification_rate=sum(k_predict == y_test) / len(y_test)
# 3.結果を出力

    indification_rate_list.extend([sum(k_predict == y_test) / len(y_test)])
  print(f'平均識別率 : \n{mean(indification_rate_list)}')
```

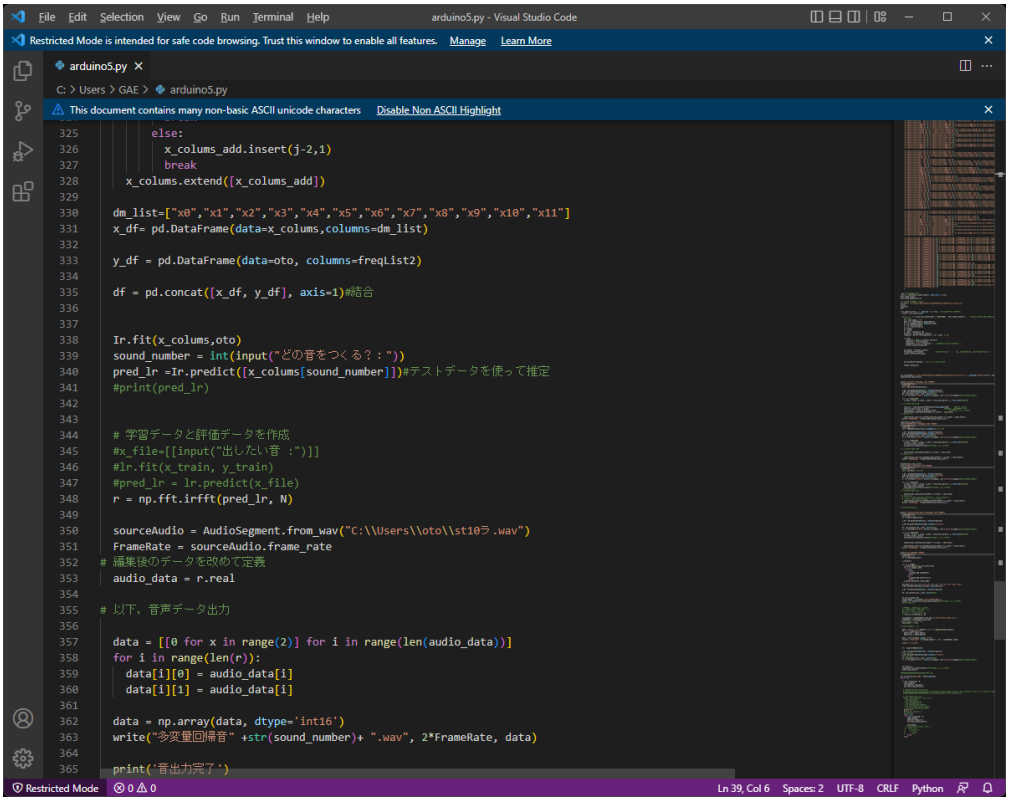
図４　分類のプログラム　その７

```python
    indification_rate_list.extend([sum(k_predict == y_test) / len(y_test)])
  print(f'平均識別率 : \n{mean(indification_rate_list)}')


indification_rate_list=[]
print("SVMによる識別率を出しますか？")
if yes_no_input():
  print("実行中")
  clf = svm.SVC()  #clf変更

  x_df = pd.DataFrame(data=oto, columns=freqList2)
  y_df= pd.DataFrame(data=target,columns=["音-Hz"])
  df = pd.concat([x_df, y_df], axis=1)#結合
  x, y = df.drop(["音-Hz"], axis=1).to_numpy(), df["音-Hz"].to_numpy()#DataFrameからNumpyへ

  for w in range(100):
    x_train, x_test, y_train, y_test = train_test_split(x, y, test_size=0.3)#分割
    clf.fit(x_train,y_train)
    svm_predict=clf.predict(x_test)#テストデータを使って推定
   # print(x_test)
# 2.決定木をモデル作成

    indification_rate=sum(svm_predict == y_test) / len(y_test)
# 3.結果を出力
  #  print(f'scikit-learnによる推定結果 : \n{svm_predict}')
  #  print(f'目的変数のテストデータ : \n{y_test}')
    indification_rate_list.extend([sum(svm_predict == y_test) / len(y_test)])
  print(f'平均識別率 : \n{mean(indification_rate_list)}')


#ロジスティック回帰


print("ロジスティック回帰による識別率を出しますか？")
if yes_no_input():
  print("実行中")
  Ir = LogisticRegression()

  x_df = pd.DataFrame(data=oto, columns=freqList2)

  y_df= pd.DataFrame(data=target,columns=["音-Hz"])
```

図４　分類のプログラム　その８

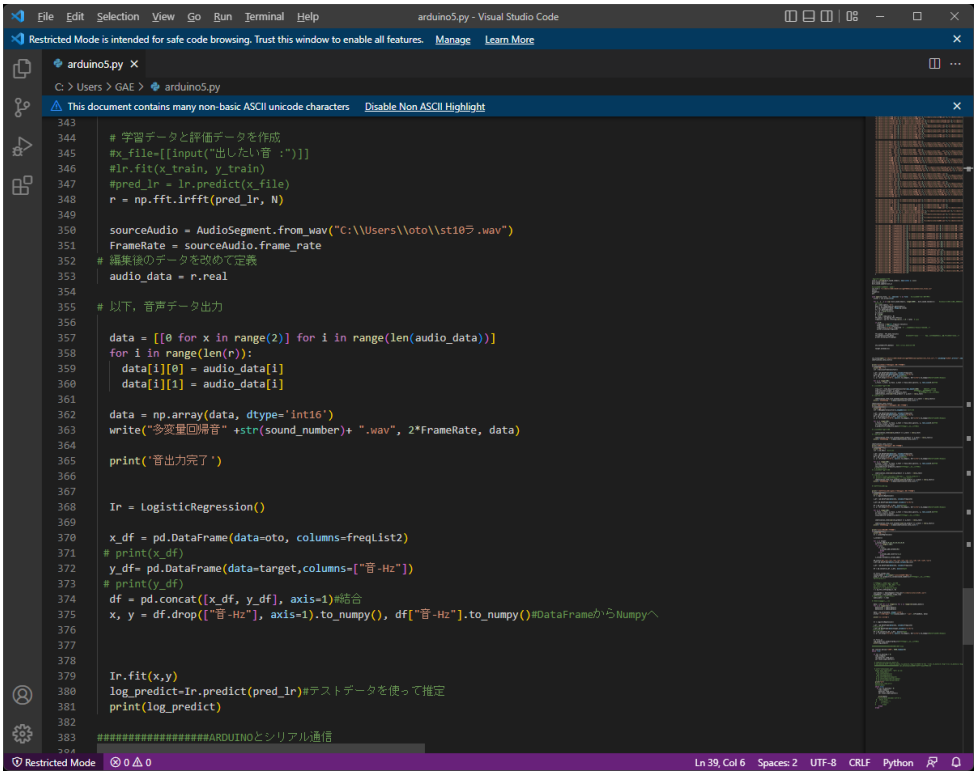
```python
  Ir = LogisticRegression()

  x_df = pd.DataFrame(data=oto, columns=freqList2)

  y_df= pd.DataFrame(data=target,columns=["音-Hz"])

  df = pd.concat([x_df, y_df], axis=1)#結合
  x, y = df.drop(["音-Hz"], axis=1).to_numpy(), df["音-Hz"].to_numpy()#DataFrameからNumpyへ

  for w in range(100):
    x_train, x_test, y_train, y_test = train_test_split(x, y, test_size=0.3)#分割
    Ir.fit(x_train,y_train)
    svm_predict=Ir.predict(x_test)#テストデータを使って推定


    indification_rate=sum(svm_predict == y_test) / len(y_test)

    indification_rate_list.extend([sum(svm_predict == y_test) / len(y_test)])
  print(f'平均識別率 : \n{mean(indification_rate_list)}')


print("音の作成をしますか？")
if yes_no_input():
  print("実行中")
  Ir = LinearRegression()

  x_colums=[]

  for i in target:
    x_colums_add=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0]
    for j in range(1,100):
      if i==j:
        if j==1:
          x_colums_add.extend([0])
          break
        else:
          x_colums_add.insert(j-2,1)
          break
    x_colums.extend([x_colums_add])

  dm_list=["x0","x1","x2","x3","x4","x5","x6","x7","x8","x9","x10","x11"]
  x_df= pd.DataFrame(data=x_colums,columns=dm_list)
```

図４　分類のプログラム　その９



```
            else:
              x_colums_add.insert(j-2,1)
              break
        x_colums.extend([x_colums_add])

    dm_list=["x0","x1","x2","x3","x4","x5","x6","x7","x8","x9","x10","x11"]
    x_df= pd.DataFrame(data=x_colums,columns=dm_list)

    y_df = pd.DataFrame(data=oto, columns=freqList2)

    df = pd.concat([x_df, y_df], axis=1)#結合


    Ir.fit(x_colums,oto)
    sound_number = int(input("どの音をつくる？："))
    pred_lr =Ir.predict([x_colums[sound_number]])#テストデータを使って推定
    #print(pred_lr)


    # 学習データと評価データを作成
    #x_file=[[input("出したい音 :")]]
    #lr.fit(x_train, y_train)
    #pred_lr = lr.predict(x_file)
    r = np.fft.irfft(pred_lr, N)

    sourceAudio = AudioSegment.from_wav("C:\\Users\\oto\\st10ラ.wav")
    FrameRate = sourceAudio.frame_rate
  # 編集後のデータを改めて定義
    audio_data = r.real

  # 以下，音声データ出力

    data = [[0 for x in range(2)] for i in range(len(audio_data))]
    for i in range(len(r)):
      data[i][0] = audio_data[i]
      data[i][1] = audio_data[i]

    data = np.array(data, dtype='int16')
    write("多変量回帰音" +str(sound_number)+ ".wav", 2*FrameRate, data)

    print('音出力完了')
```

図５　回帰のプログラム　その１



```
    # 学習データと評価データを作成
    #x_file=[[input("出したい音 :")]]
    #lr.fit(x_train, y_train)
    #pred_lr = lr.predict(x_file)
    r = np.fft.irfft(pred_lr, N)

    sourceAudio = AudioSegment.from_wav("C:\\Users\\oto\\st10ラ.wav")
    FrameRate = sourceAudio.frame_rate
  # 編集後のデータを改めて定義
    audio_data = r.real

  # 以下，音声データ出力

    data = [[0 for x in range(2)] for i in range(len(audio_data))]
    for i in range(len(r)):
      data[i][0] = audio_data[i]
      data[i][1] = audio_data[i]

    data = np.array(data, dtype='int16')
    write("多変量回帰音" +str(sound_number)+ ".wav", 2*FrameRate, data)

    print('音出力完了')


    Ir = LogisticRegression()

    x_df = pd.DataFrame(data=oto, columns=freqList2)
  # print(x_df)
    y_df= pd.DataFrame(data=target,columns=["音-Hz"])
  # print(y_df)
    df = pd.concat([x_df, y_df], axis=1)#結合
    x, y = df.drop(["音-Hz"], axis=1).to_numpy(), df["音-Hz"].to_numpy()#DataFrameからNumpyへ



    Ir.fit(x,y)
    log_predict=Ir.predict(pred_lr)#テストデータを使って推定
    print(log_predict)

  ##################ARDUINOとシリアル通信
```

図５　回帰のプログラム　その２

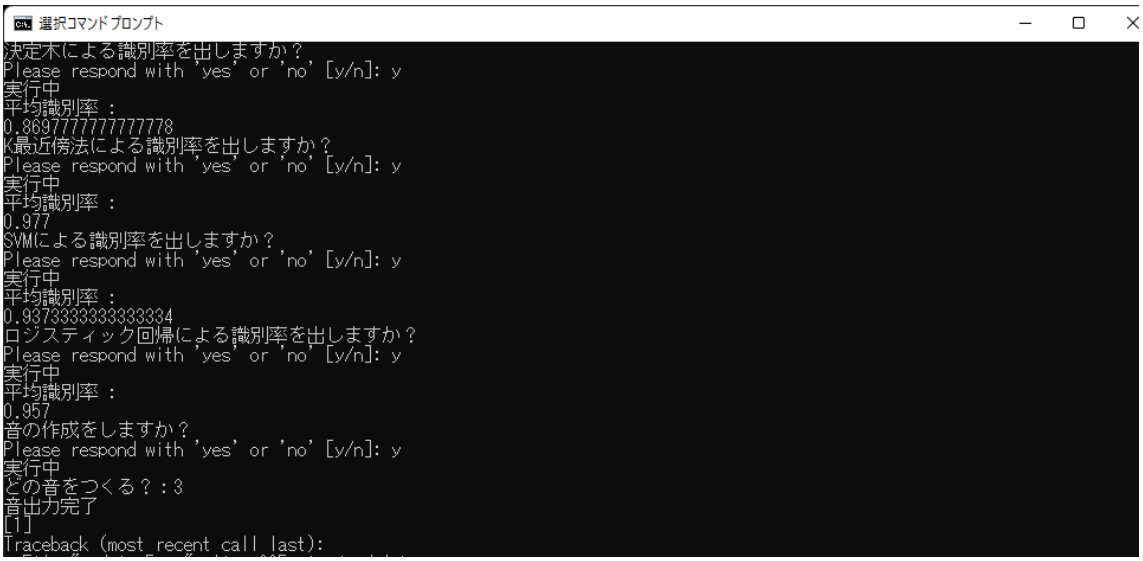


図 6　分類と回帰のプログラムの実行結果

NPB の DH 制における有意義性をセイバーメトリクスの観点で示す

理数コース３年　大歯天楓　末武祥海音　西本弘成　納富太規

1　要旨

DH 制の有無によって生じる違いを調べるために日本野球機構（以下 NPB）の公式サイトから 2016 年から 2020 年までの 5 年間分の各球団の全選手の成績データを活用し、両リーグの選手の成績をセイバーメトリクスの指標を用いて比較した。具体的には両リーグの投手と野手のアウト数の比、投手と野手の打席数の比を調査するとともに、両リーグの選手を打撃技術（OPS）や投手能力（FIP）で比較した。

2　研究目的

指名打者（Designated Hitter 以下 DH）とは投手の代わりに打席に立つ、攻撃専門の選手のことをいう。現在、NPB はセ・リーグとパ・リーグの 2 リーグ制を採用しており、DH 制はパ・リーグにのみに導入されている。また、2005 年から始まった交流戦ではパ・リーグの主催試合においてのみ DH 制が適用されている。さらに、日本シリーズではパ・リーグが本拠地の試合のみ DH 制が適用されている。

ここで、DH 制を適用することによるメリットが数点考えられる。1 点目に、投手が自身のピッチングのみに集中することができる点である。DH 制により打席に立つ必要がない投手は常に自身のピッチングに意識を傾けることができる。通常、味方の攻撃時に 2 アウトとなった場合、投手はベンチ前で次の回へ向けての投球練習を始める。DH 制があれば、毎回この準備ができるが、DH 制がない場合、投手自身が打撃に立たなければならなかったり、塁に出ていたりと準備ができない場合がある。DH 制があることで、投手は自身の投球のみに集中して良い状態でマウンドに立つことができる。2 点目に、怪我明けの選手にとっての調整の場とすることができる点がある。怪我明けの選手にとって、万全でないコンディションで、守備をにつくのは再発のリスクを高めてしまう。しかし、その選手が DH として数試合出場することができれば、試合感覚を取り戻しつつ、段階的に完全復帰に向けて調整することができる。3 点目に、DH 制を守備は苦手であるが打撃は得意であるという選手の活躍の場にすることができる点である。また、若手の選手が貴重な試合出場の機会を比較的容易に得ることができるため、若手の育成に役立てることもできる。4 点目に、試合を通じて常に、緊張感のある勝負を見ることができる点である。例えば、DH 制がなければ得点圏にランナーを背負い、打席には野手、次の打者は投手という場面においては、野手との勝負を避けて投手との勝負を選択する戦術がとられることがある。しかし、DH 制があれば次の打者も必ず野手であるので、このような戦術が使えず、常に緊張感のある勝負を楽しめる。

DH 制を適用することによるデメリットも数点考えられるがこれらは DH 制のシステム面の問題よりも「野球本来の面白さ」という点に主張があり、メリットのほうがはるかに重要であると考える。

さらに、2005 年から 2021 年の過去 16 年間の NPB の交流戦でセ・リーグは 2 回の勝ち越しに対し、パ・リーグは 14 回勝ち越していることや 2011 から 2021 年の 10 年間の日本シリーズでセ・

リーグの球団が 2 勝に対し、パ・リーグの球団は 8 勝していることから、近年では DH 制の有無によってセ・リーグとパ・リーグで実力差が生じているのではないかという議論もある。

上記のことから、私たちは DH 制の有意義性をセイバーメトリクスという手法を用いて明らかにすることで、セ・リーグの DH 制の適用に意義があることを証明したいと思い、研究を始めた。

ここで、分析の手法として我々が用いたセイバーメトリクスとは野球におけるあらゆるデータを統計学的見地から客観的に収集し、選手の評価や戦略を考える分析手法である。

3　研究方法

〈使用したデータ〉

2015 年～2020 年の 5 年間分の打撃成績（打席・打数・得点・安打・二塁打・三塁打・本塁打・塁打・打点・盗塁・盗塁刺・犠打・犠飛・四球・故意四球・死球・三振・併殺打・打率・長打率・出塁率）と投手成績（登板・勝利・敗北・セーブ・ホールド・ホールドポイント・完投・完封勝利・無四球・勝率・打者・投球回・安打・本塁打・故意四球・死球・三振・暴投・ボーク・失点・自責点・防御率）（NPB 公式サイト）

〈分析に使用したソフトウェア〉

Microsoft Excel 2020

【研究 1】

通常は打席数の割合とアウト数の割合がほぼ一致するはずであるが、得点圏にランナーを背負った際に、野手との勝負を避けて野手よりも打撃面で期待値の低い投手との勝負を選択することでアウト数の割合が投手に割合が偏るのではないかと考えて研究を行った。

まず、それぞれの年代において、総打席数に占める投手の打席の割合と野手の割合を求めて表にまとめた（表 1)。次に、それぞれの年代において、総アウト数に占める投手のアウト数の割合と野手のアウト数の割合を求めて表にまとめた（表 2)。

【研究 2】

シーズン中に DH 制があり、打席に立つ機会が少ないパ・リーグの投手よりもシーズン中に DH 制が無く、打席に立つ機会が多いセ・リーグの投手のほうが総打席数が多い。また、シーズン中の練習において、セ・リーグの投手はパ・リーグの投手と比べて多く打撃練習も行うことから打撃成績が優れるのではないかと考えて研究を行った。

ここで、本研究では打者を評価するために、セイバーメトリクスの指標の一つである OPS（On-base plus slugging）を用いた（OPS=｛(安打＋四球＋死球）÷（打数＋四球＋死球＋犠飛)｝＋（塁打÷打数))。OPS とは出塁率と長打率を足し合わせた値で得点との相関関係が非常に高く、数値が高いほど、打席あたりでチームの得点増に貢献する打撃をしている打者だと評価することができる（表 3)。本研究では、それぞれの年代において、各リーグの OPS と、その差を求めて表にまとめた（表 4)。

【研究 3】

パ・リーグの投手はDH制のおかげで、打席に立つ必要がない。そのため、自分自身の投球のみに専念することができることや次の投球回の投球練習を必ず行うことができる。また、打席に立つことがないため、デッドボールや自打球といったこともなくなることや、投手が出塁することによる疲労や肩の冷えがなくなる。他にも、シーズン中の練習において、パ・リーグの投手はセ・リーグの投手と比べて打撃練習を行う必要が少ないことから、セ・リーグの投手よりもパ・リーグの投手の方が、投手成績が良くなると考えて実験を行った。

ここで、本研究では投手を評価するために、セイバーメトリクスの指標の一つである FIP（ Fielding Independent Pitching ）を用いた。(FIP=｛被本塁打×13＋（与四球＋与死球－敬遠）×3－奪三振×2｝÷投球回＋リーグごとの補正値　ただし、リーグごとの補正値＝リーグ全体の［失点率－｛被本塁打×13＋（与四球＋与死球－敬遠）×3－奪三振×2｝÷投球回数］）である。）FIP とは投手の責任範囲を奪三振、与四死球（敬遠以外)、被本塁打の 3 つに限定することにより、より純粋な投手の能力を評価できる指標だ。評価を出す際、数値が低いほど投手の真の防投手の真の防御率を表している（表 5)。それぞれの年代において、各リーグの FIP とその差を求めて表にまとめた（表 6)。

4　結果

【研究 1】

・2016 年から 2020 年において、総打席数に占める投手の打席数の割合は 6%～9%、総打席数に占める野手の打席数の割合は 91%～94%となった（表 1)。

・2016 年から 2020 年において、総アウト数に占める投手のアウト数の割合は 3%～5%、総アウト数に占める野手のアウト数の割合は 95%～97%となった（表 2)。

【研究 2】（表４）

・2016 年から 2020 年におけるセ・リーグの投手の OPS は 0.13～0.17、パ・リーグの OPS は 0.01～0.06 となった。

・2016 年～2020 年のいずれの年代もセ・リーグの投手の OPS の方がパ・リーグの投手の OPS より大きくなり、その差は 0.08～0.16 となった。

【研究 3】（表６）

・2016 年から 2020 年において、セ・リーグの投手の FIP は 4.06～4.52、パ・リーグの投手の FIP は 4.03～4.29 となった。

・2016 年のみパ・リーグの FIP がセ・リーグの FIP を上回った。それ以外の 4 年（2017 年～2020 年）はセ・リーグの FIP の方がパ・リーグの FIP を上回った。

・セ・リーグの投手の FIP とパ・リーグの FIP の差が最も大きくなったのは 2018 年である。

5　考察

【研究 1】

・出場選手 9 人中投手は 1 人なので、本来、打席数の割合は投手約 11%、野手約 89%になる。しかし、実際は投手平均 7.24%、野手平均 92.8%となった。

・打席数の割合が野手に偏ったのは、試合終盤に投手が打席に立つタイミングで代打を送られるケースが多いことが原因ではないかと考えられる。

・本来、打席に立った際にアウトになる確率が投手と野手で等しければ、打席数の割合とアウト数の割合は同じになるはずである。しかし、実際はアウト数の割合が投手平均約 4.0%、野手平均約 96.0%となった。

・アウト数の割合が野手に偏ったのは、やはり投手へ代打を送ることが多いことが原因ではないかと考えられる。

【研究 2】

・仮説の通りパ・リーグの投手の OPS よりもセ・リーグの投手の OPS の方が僅かながらに高いことからセ・リーグの投手の方がシーズンを通して打席数が多く、パ・リーグの投手よりも打撃技術が高いことが分かった。

・しかし、両リーグの野手についても OPS を計算してみたところ、セ・リーグ投手の OPS の直近 5 年間の最高値が 0.17 であるのに対し、両リーグ野手の直近 5 年間の最低値は 0.71　であり、投手の方が野手に比べて打撃能力が著しく劣っていることが分かった。したがって、DH 制があると投手が打席に立たず、代わりに野手が打席に立つため、全ての打者が得点増に貢献する打撃をすることになる。そのため、投手は投球に集中しなければならない。このことは日本プロ野球界の投手の能力をより高めることにつながるのではないか。

【研究 3】

・両リーグの投手の FIP はほとんど差がない。DH 制の有無が投手に与える影響はほとんどないことを示している。

・DH 制があることによって投手成績が向上するわけではない。

6　結論

打席数の比較とアウト数の比較では、投手への代打や継投などの影響で投手より野手の方がアウトになる確率が低いということを検証できなかった。そこで、研究 2 において、OPS を用いて比較した結果、打撃成績が良い順に、野手、セ・リーグの投手、パ・リーグの投手となった。そのため、DH 制があれば、投手は常に緊張感のある投球を強いられ、投手能力が向上するのではないかという仮説を立てて研究 3 を行った。しかし、FIP で比較した投手成績には両リーグ間で差が見られず、DH 制の影響はないことが分かった。

今後、さらに本研究を深めていくにあたって、以下の 3 点が考えられる。1 点目に、本研究で使用したセイバーメトリクスの指標以外に、1 打席あたりにチームの得点にどれだけ貢献したか

を表す指標の wOBA（ Weighted On Base Average）や本塁打を除くインプレー打球のうち安打となった割合を表す指標の BABIP（ Batting Average on Balls In Play）といったセイバーメトリクスの観点での別の指標による調査を行うこと。本研究で使用した OPS と FIP はそれぞれに欠点が考えられる。例として、OPS では、出塁率と長打率の価値が一緒のため、長打を打っている選手の価値が高くなってしまうことや、盗塁が評価に反映されていないことがあげられる。FIP では三振を狙うよりゴロやフライボールを打たせてアウトを取るタイプの投手を正しく評価できないことや、被本塁打を投手の責任として重要視するが、ある球場では捕球される打球が、別の球場では本塁打になってしまうことがあることといった投手がコントロールできない点があげられる。これらのことから、OPS と FIP の指標以外の指標を用いることで別の結論が導ける可能性がある。2 点目に、データの資料の年代の数を増やし参考にするデータの量を増やすこと。本研究では、2016 年から 2020 年の 5 年間を調査したが、NPB の交流戦は 2005 年から開始しているため、2005 年から 2015 年の 11 年間も調査することができる。参考にするデータの量を増やすことで研究結果をより詳しく調べることができると考える。3 点目に、別の角度からの検証を行うこと。本研究ではセイバーメトリクスに基づいて DH 制について主に打撃成績や投手成績を使用したが、球場の形や天候、その日の選手のコンディション、チーム状況、どのような場面で試合に出るかなどについては言及していない。これらのことを検証することができたら、より、本研究を深く追求することができると考える。

これらのことから、本研究が、DH 制が有意義であることを示すことができるように努めていきたい。

7　参考文献

Nippon Professional Baseball Organization. 2022.”NPB.jp 日本野球機構”.
https://npb.jp（2022 年 5 月 20 日取得）

たっけーブログ. 2022.”たっけーブログ”.
https://takker04035555.com/category/saber-explanation/　（2022 年 5 月 21 日取得）

８　謝辞

本研究の遂行にあたり、指導教官として終始多大なご指導を賜った、藤上先生、山下先生に深く感謝致します。九州産業大学人間科学部スポーツ健康科学科の奥村浩正教授（健康・スポーツ科学センター所長）には、適切なご助言を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

９　図表

表１　セ・リーグの総打席数に占める投手・野手の打席数の割合

打席	投手	野手
2020	8.6%	91.4%
2019	6.1%	93.9%
2018	8.4%	91.6%
2017	6.8%	93.2%
2016	6.3%	93.7%

表２　セ・リーグの総アウト数に占める投手・野手のアウト数の割合

アウト	投手	野手
2020	4.5%	95.5%
2019	3.5%	96.5%
2018	4.5%	95.5%
2017	3.8%	96.2%
2016	3.7%	96.3%

表３　OPS の評価の仕方の目安

	OPS
非常に優秀	1.000
優秀	.875
平均	.750
問題あり	.675
かなり問題あり	.600

表 4　両リーグの OPS と OPS の差

	セ・リーグ	パ・リーグ	OPSの差
2020年	0.17	0.01	0.16
2019年	0.13	0.02	0.11
2018年	0.13	0.05	0.08
2017年	0.13	0.03	0.10
2016年	0.13	0.06	0.06

表 5　FIP の評価の仕方の目安

	FIP
非常に優秀	2.0
優秀	3.0
平均	4.0
問題あり	5.0
かなり問題あり	6.0

表 6　両リーグの FIP とその差

	セ・リーグ	パ・リーグ	FIPの差
2020年	4.07	4.05	0.02
2019年	4.06	4.03	0.02
2018年	4.52	4.24	0.28
2017年	4.30	4.29	0.01
2016年	4.23	4.24	-0.01

Unity を用いた水害時避難についての検討

理数コース３年　　鴻上　峻太朗　　北﨑　健一

研究動機

2019 年８月の九州北部での記録的豪雨やトンガでの噴火による津波被害などをみて,自分たちも水害対策について何かできることはないかと考えた。そこで地元のハザードマップによると高潮の被害予想がかなり広範囲に及んでいたので,福岡市沿岸部における高潮を対象にすることにした。また方法として，シミュレーションのためのオブジェクトの作成が容易な，ゲーム開発ツール「Unity」を使用することにした。これらを活用することで，実際に実験することが難しい津波や高潮からの避難を再現することができ，市民にとって安全な避難行動を提案ができるのではないかと考える。

研究手順

１．実験準備

（1）以下，（ア）～（カ）の手順で高潮を発生させる地形データを作る

（ア）実験では地理情報を取得するため国土地理院の基盤情報ダウンロードサービスを使用した。このサービスでは Web 上からの任意の地域メッシュにおける，様々な種類の基盤地理情報を取得することが可能である。今回は，数値標高データをダウンロードした。

（イ）ダウンロードしたデータを基盤地理情報ビューアに解凍せず，ZIP ファイルのまま読み込む。

（ウ）エクスポートは，短径領域設定で書き出す範囲を設定する（データ量を削減するため)。その後 DEM データにエクスポートする。

（エ）Cloudcompare を起動し，基盤地理情報ビューアから書き出した DEM ファイルをすべて選択し，ドラックアンドドロップで読み込む。その後，PLY 形式にエクスポートし，点群データを保存する。Meshlab というソフトを使い，PLY 形式のデータからメッシュを作成する。

（オ）その後基盤地図情報から，基本項目をダウンロードする。基盤地図情報ビューアにダウンロードした ZIP ファイルを解凍せずにドラックアンドドロップする，その後，「建物の外周線」,「道路縁」を選択し，必要な範囲だけ短径領域設定で選択し SHP 形式でエクスポートする。
Cloudcompare を起動し，基盤地理情報ビューアから書き出した SHP ファイルをすべて選択し，ドラックアンドドロップで読み込む。書き出しは DXF ファイルを選択する。

（カ）blender を起動し「ファイル」→「インポート」→「AutoCAD_DXF」でインポートする。(blender インストール時は DXF インポートのアドオン

がオフになっている）これをスクリーンショットで保存し，メッシュの下に画像として貼り付ける。この画像にもとづいて建築物（障害物オブジェクト）を配置する。配置した図は（写真1）に示すとおり。

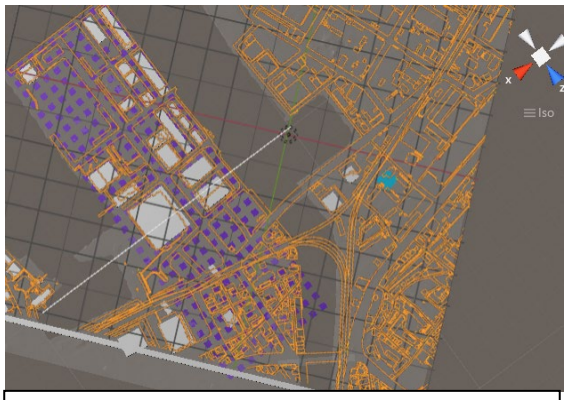


写真 1.建物と市民を配置した地図オブジェクト

(2) オブジェクト作成

[1]市民オブジェクト（写真 2）

３Ｄオブジェクトのキューブ（高さ 1m，縦 1m，横 1m）を市民に模した避難行動を行なうオブジェクトとして作成した。この市民オブジェクトは設定した目的地（この場合避難場所）に向かって直線上に動き，建物を模した障害物オブジェクト[2]にあたると，これを避けるように避難所に向かう。避難時は赤色だが避難場所に着く前に波オブジェクト[3]に当たると紫色に変化する（これを「被災」した状態とする）。避難場所に被災せずにたどりつけると，翡翠色に変化する。このオブジェクトの移動速度は適切な値に変更できる。

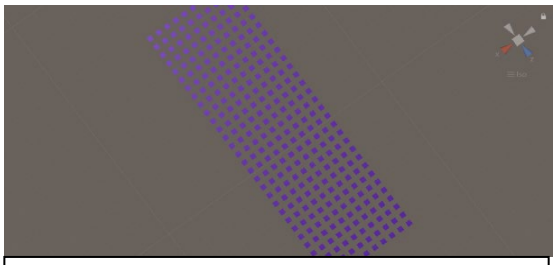


写真 2.市民オブジェクト

[2] 障害物オブジェクト（写真３）

まず建物を模した３Ｄのオブジェクトを作成し，ナビメッシュ障害物（オブジェクトが通れない透明なオブジェクト）の中に入れ，市民が建物を避けて通れるようにする。３Ｄオブジェクトを作成したのは建物を可視化するためである。

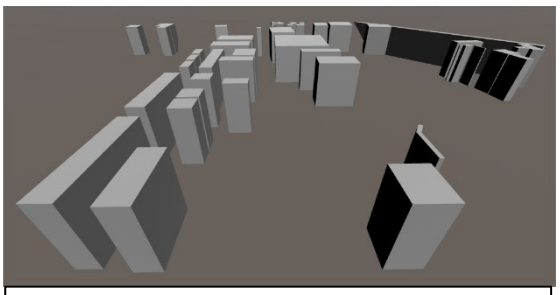


写真３.障害物オブジェクト

[3] 波オブジェクト（写真４）

内閣府，農林水産省，国土交通省によって作成された津波，高潮ハザードマップによれば浸水予測手法の考え方として，作成目的・評価対象に応じた精度が求められるとされている。今回は高度な流体シミュレーションは規模が大きいためパソコンにかかる負荷を考え，速さが変化できる空間オブジェクトを地形オブジェクトに挿入することで波（高潮）を再現する。3 次元地形モデルに挿入することで，標高に応じた時系列浸水を再現した.地形や建物による流速の変化や施設等の破壊条件は設けていないため精度は劣るが，簡易な計算で表すことができるため，軽量な高潮モデルとして採用した。

写真４.波オブジェクト

[4]避難場所オブジェクト（写真５）

市民が向かう目的地オブジェクト，福岡市のハザードマップよりインポートした地図範囲で最も海から離れた避難所の位置に設定し，被災する前にこのオブジェクトに到達すると，色が変化し避難完了した者を避難成功者（以下 escape と表記する）として判断する。

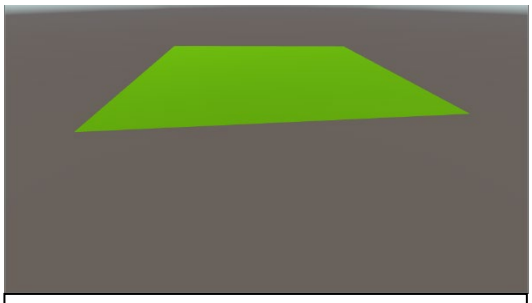


写真５.避難場所オブジェクト

（3）設定

基本的な市民の歩行速度 2.0m/s，高潮の速さ 3.0m/s として実行する。

２．実験

【実験１】シミュレーション実行時間（タイムスケール）の検討

市民の移動速度と高潮の速度を固定し高潮稼動時間（高潮発生から海岸線に到達するまでの時間）を変化させ，この時間と escape の関係を調べる。60 秒おきに escape を 3 回カウントし，平均値を取った。短時間でより多くのデータが，Unity 内の時間（タイムスケール）を加速（以下〇〇倍速と表記する）させ以下のような実験 1-1~4 の調査を行った。

実験 1-1 100 体でタイムスケールを 100 倍にして試行する

実験 1-2 100 人のとき，300 人での試行結果のバラつきを調べる

実験 1-3 100 体でタイムスケールを 10 倍にして試行する。

実験 1-4 100 体でタイムスケールを 1 倍にして試行する。

【実験２】避難場所の検討

実験１より escape 数 300 体タイムスケール１倍でのシミュレーションは安定した結果が得られるとわかったため，以下の調査はタイムスケール１倍で行った。

以下のように実験範囲内にある福岡市の避難場所のうち，100 人以上避難可能な避難所を 5 カ所選び，高潮波稼働時間と escape の個体数を実験 2-1~5 の条件で調査した。また，高齢者などを考慮した歩行速度が遅いオブジェクトを 60 個体作成し。全体で 300 個体とする。写真 6 が避難所の配置である。

実験 2-1 P.大浜公園　　市民オブジェクト 300 個体

実験 2-2 Q.大浜公民館　市民オブジェクト 300 個体

実験 2-3 R.千代北公園　市民オブジェクト 300 個体

実験 2-4 S.千代中学校グラウンド　市民オブジェクト 300 個体

実験 2-5 T.千代公園市民オブジェクト　市民オブジェクト 300 個体

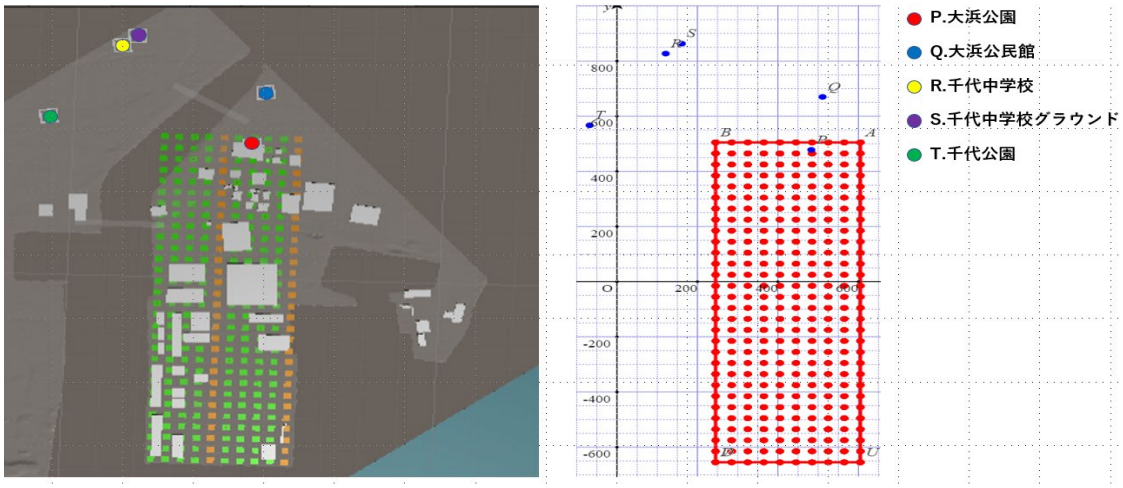


写真 6 避難所の配置

【実験３】避難経路削減による避難状況の検討

実験 2 で避難経路の安全が確保されている状態でのシミュレーションは行うことができた。しかし地震時など，避難経路が使用できない状況など，また避難経路の安全がいつも確保されているとは限らない。よってインポートした地域の面積を測定し，避難所に至るまでにある河川や橋付近の面積を段階的に削減して避難経路の削減を行った。以下の実験 3-1~5 のように条件を変化させ，　波稼働時間と escape の個体数を調査した。

実験 3-1 大浜公園（P）避難経路を 1 割または 2 割削減

実験 3-2 大浜公民館（Q）避難経路を 1 割または 2 割削減

実験 3-3 千代中学校（R）避難経路を 1 割または 2 割削減

実験 3-4 千代中学校グラウンド（S）避難経路を 1 割または 2 割削減

実験 3-5 千代北公園（T）避難経路を 1 割または 2 割削減

考察

実験 1-1 の結果より避難できる時間が多いにも関わらず escape 数が少なくなってしまっている箇所があることが図 1 から分かる。また同じ試行を三回ずつ行って平均を出したのだが同じ試行でも escape 数に差が出てしまっていた。この原因としてかんがえられるのが 300 人もの市民を配置した為，プログラム数が多すぎること，また迅速にデータが取れるように，タイムスケールを加速していることがパソコンに負荷を与え，この誤差を生んでいるのだと考える。

実験 1-1 の 100 人での試行で 1 回ごとの試行の避難成功者の人数に変化が生じることがわかった。またはデータ量が多すぎて Unity の処理が追いついていないことが考えられる。

次の実験 1-2 では 100 倍速で同じ条件における 100 体と 300 体での escape 数の差を調べた。その結果図 2 よりあまり escape 数に変化はないとわかる。全体の避難人数は escape 数に影響を与え無いとわかる。このことから自分たちはタイムスケールを加速していることがシミュレーションの結果に影響を与えていると考える。

実験 1-3（図 3）より 100 倍速のときと比べて多くの人が避難している。そして避難できる時間が増えるにつれて避難人数が多くなっている。また実験 1 と同様に，同じ試行を 3 回繰り返して平均 escape 数を得たがその際，同じ試行での誤差は小さくなったこの結果から実験 1 よりも安定なシミュレーションができていると考える。時間はかかるが正確な値を出すには 1 倍速での実験が必要だと感じた。

実験 1-4 では（図 4）避難所要時間が大幅に減った。タイムスケールが避難成功者に与える影響は大きい。

実験 1 全体の考察として，当初は効率的にデータを得るために Unity 内の時間を意図的に加速して実験していたが，100 倍速の実験で同じ試行を 3 回ずつ行って平均をとったが，あまりにも得られた escape 数に差があるときずき，タイムスケールまたは実験個体数の変化がこの差を生んでいるのだと考えた。また実験 2・3 で実験個体数よりも波稼働時間のほうが大きな影響を与えているとわかった。今回の実験で，全員が避難に必要な時間は 3 分ほどであるということがわかった。また，今回は市民オブジェクトが最短距離を自分で考えて移動するようになっているので，本来ならもっと移動に時間がかかると思われる。またオブジェクトの速さは成人男性の中で最も早い歩行速度を用いているので，高齢者等を考慮するとさらに避難時間が必要であることがわかる。この実験グループ 1 から避難人数 300 体 1 倍速でのシミュレーションは安定したシミュレーションが行えるとわかった。

次ぎに実験 2 の結果である図 5 を見ると大浜公民館の避難者は距離が近いのにも関わらず，最も多くの人数が避難できていないとわかる。図 6 から大浜公民館は避難開始地点から距離が近いが，避難経路が短くてもそこに至るまでの分岐，建物の密集具合が避難できるかどうかに多くの影響を与えるとわかる。

また，実験 5 から大浜公園が最も多くの人数が避難できているとわかる。これは避難経路が短く，避難経路に障害物が少ないからであると考えられる。

千代公園は避難時間が少ない時期は千代中学校グラウンドと同じ程度の人数が避難できていたが，途中から千代中学校グラウンドの方が escape は多くなっている。

また，最高 escape 数は 266 体であるとわかった。大浜公園を見るとわかるように，十分時間がたっても一定数は避難できていない。この理由として，シミュレーションから 300 体配置したが，格子上均等に配置したため，数体は避難区域外に配置しているためカウントされていない。さらに，シミュレーション実行画面で実際の避難状況を観察すると，建物に進行を妨げられて避難に時間がかかっていることがわかる。

実験 3 についての結果のグラフを見ると 1 割削減しただけではあまり変化が見られない。しかしすべての避難所が 2 割削減すると半数も避難できていないことがわかる。
また，大浜公民館は避難経路削減区域にほぼ囲まれていたため，2 割削減すると全く避難できていないと考える。このことから，避難経路の削減を 1 割程度までにとどめないと避難できる個体は大きく減るとわかる。

今回の結果から， 5 つの避難所の中では大浜公園が最も避難しやすいと考えられる。また，千代中学校と千代中学校グラウンドは場所が近いのに時間がたつにつれて千代中学校グラウンドが避難場所として有益だとわかる。さらに，波稼働時間の経過とどれだけ多くの市民が避難できるかどうかを調べることができるこのシステムは，災害が進行しても避難可能な避難所を特定するのに有効であると考える。

今後の展望

波のオブジェクトは，平面を用いたが流体のシミュレーション技術があればデータ量は大きくなるもののもっと正確に試行を行えると考える。

最短距離で移動してくれるオブジェクトに線画プログラムを導入すれば避難経路探索に使える，この実験を市区町村ごとに正確に作れば避難所への最短経路や避難に必要な時間など地域防災に貢献できると考える。

参考文献

[1] 大規模エージェント群を用いた津波災害時の避難行動シミュレーションの開発
http://www.interaction-ipsj.org/proceedings/2019/data/pdf/1B-17.pdf
[2] 参考：20 歳代の男性の平均速度（厚生労働省健康作りのための運動水準）
https://www.mhlw.go.jp/shingi/2006/07/dl/s0725-9f-12.pdf
[3]参考：防災科学研究所自然災害情報室
https://dil.bosai.go.jp/workshop/03kouza_yosoku/05takashio.html

謝辞

この研究を指導してくださった金先生をはじめとする諸先生方に深く感謝致します。

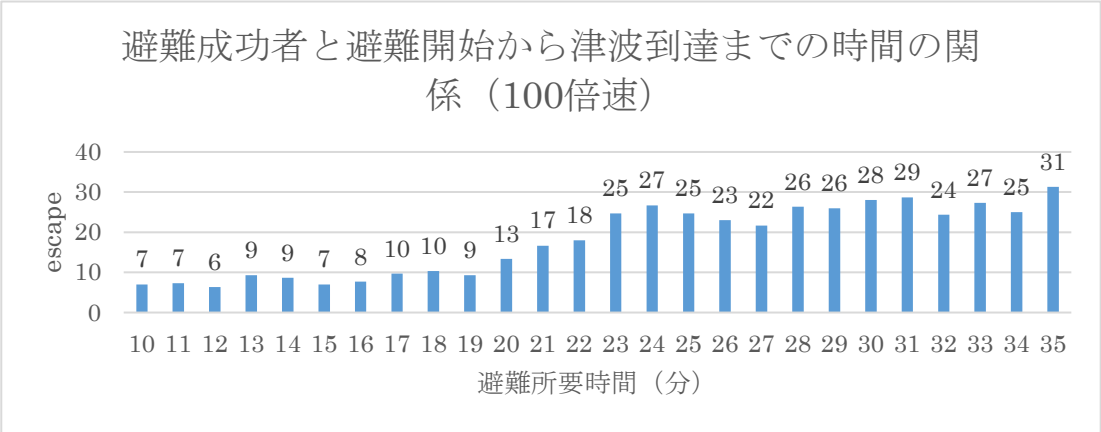


図 1.100 体 100 倍速での escape 数の変化

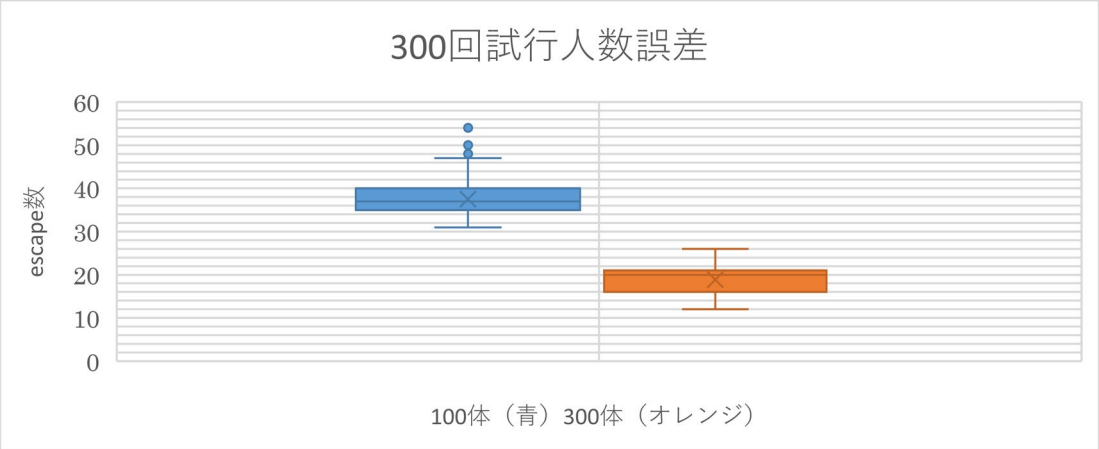


図 2.100 体と 300 体での escape 数の変化

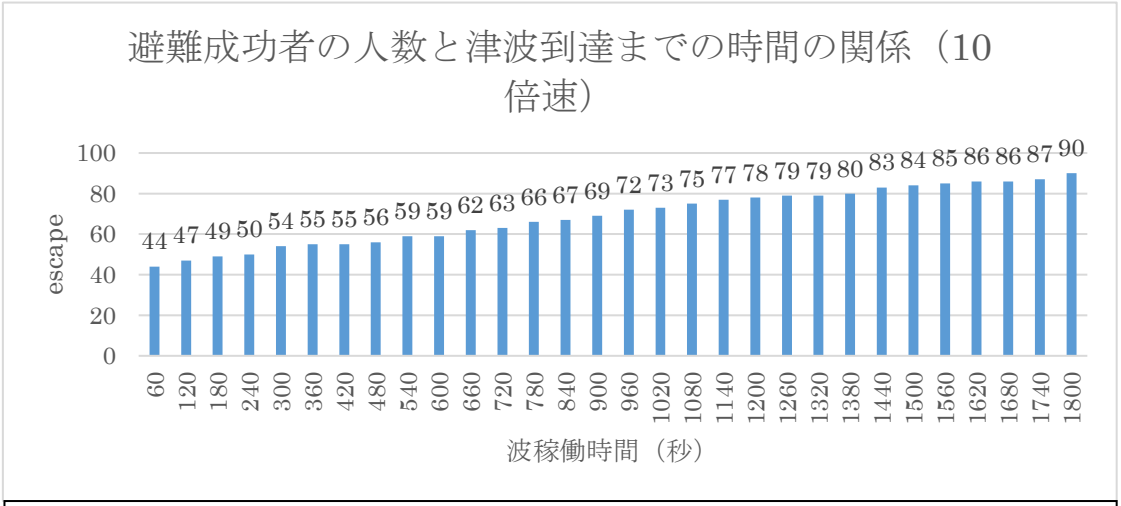


図 3.100 体 10 倍速での escape 数の変化

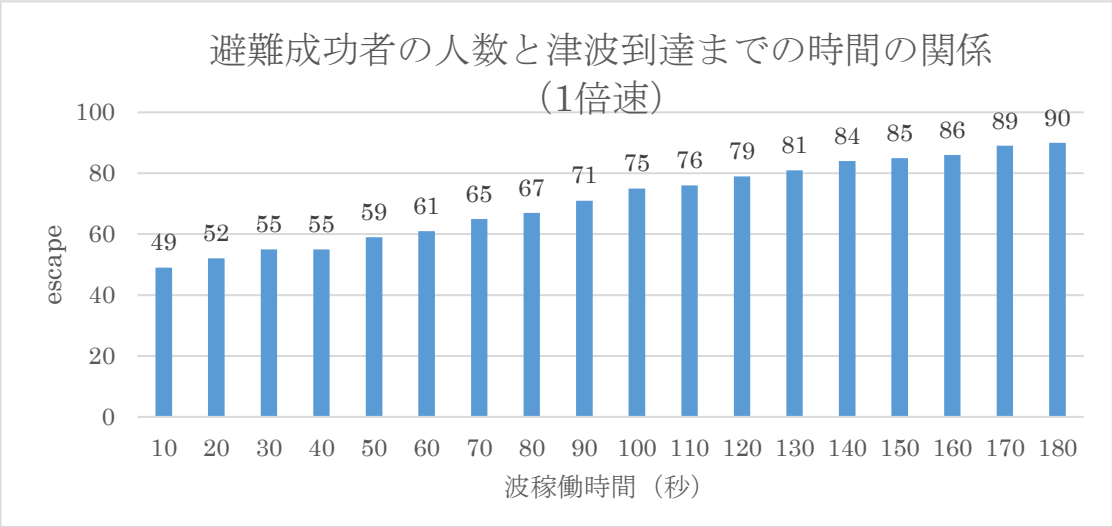


図 4.100 体 1 倍速での escape 数の変化

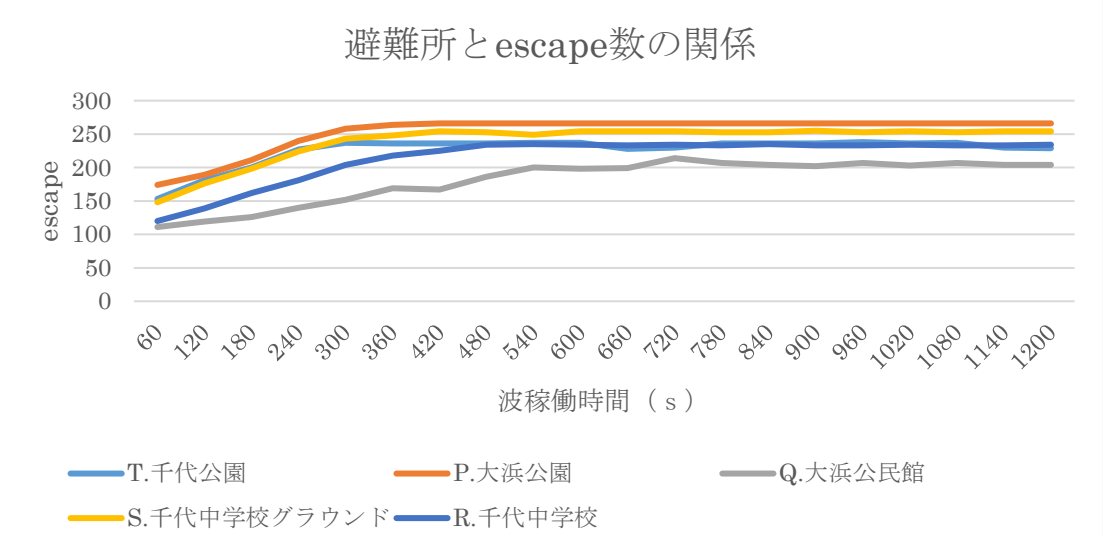
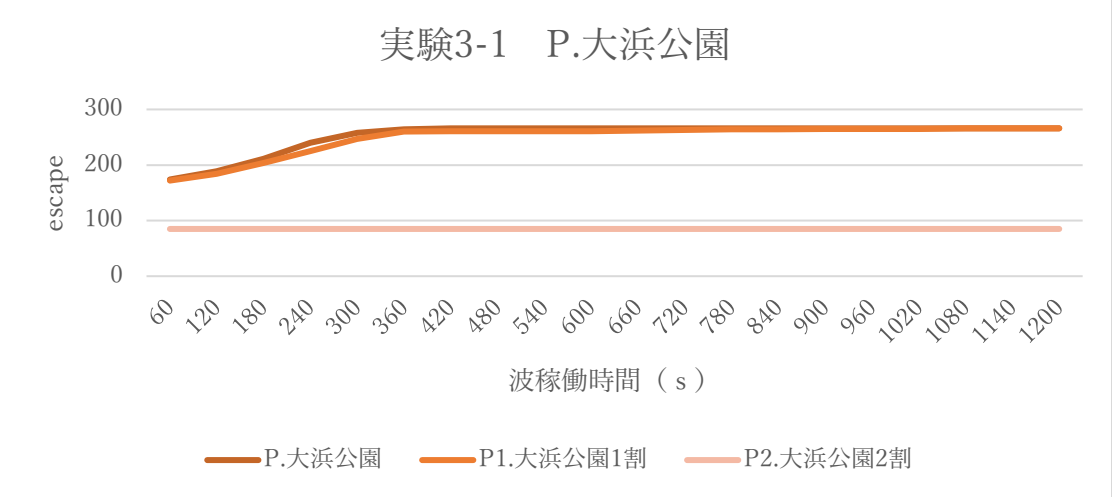
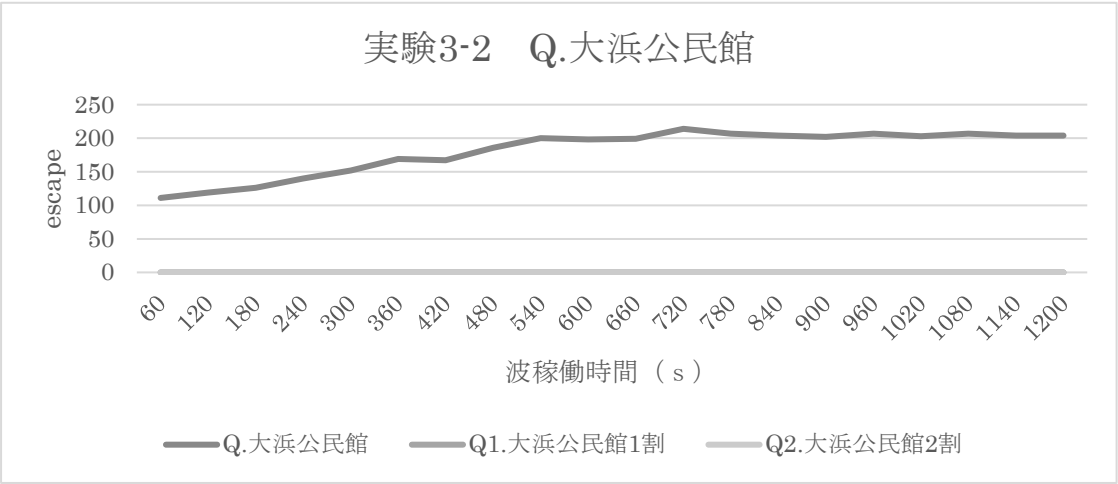
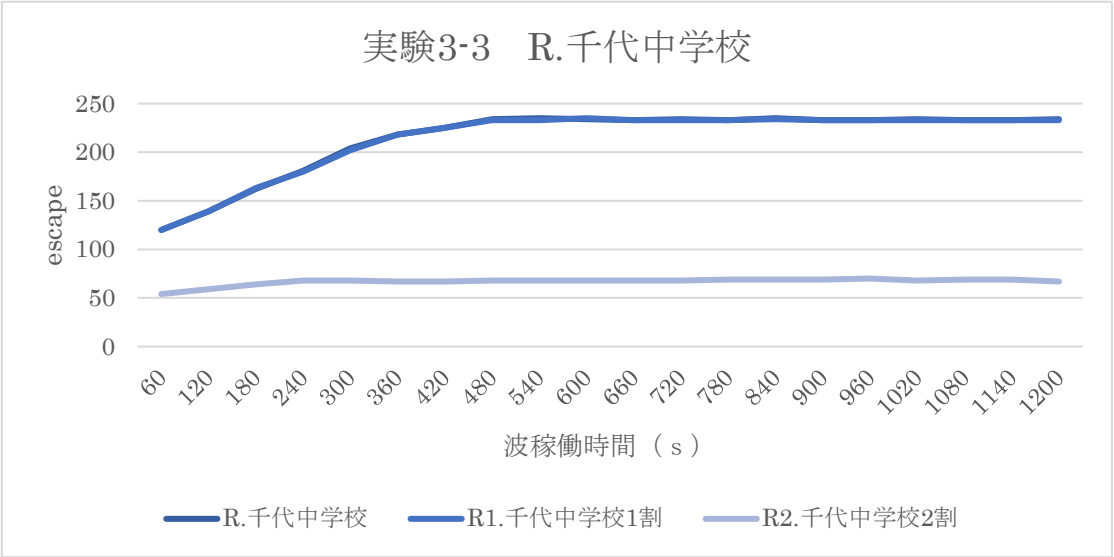
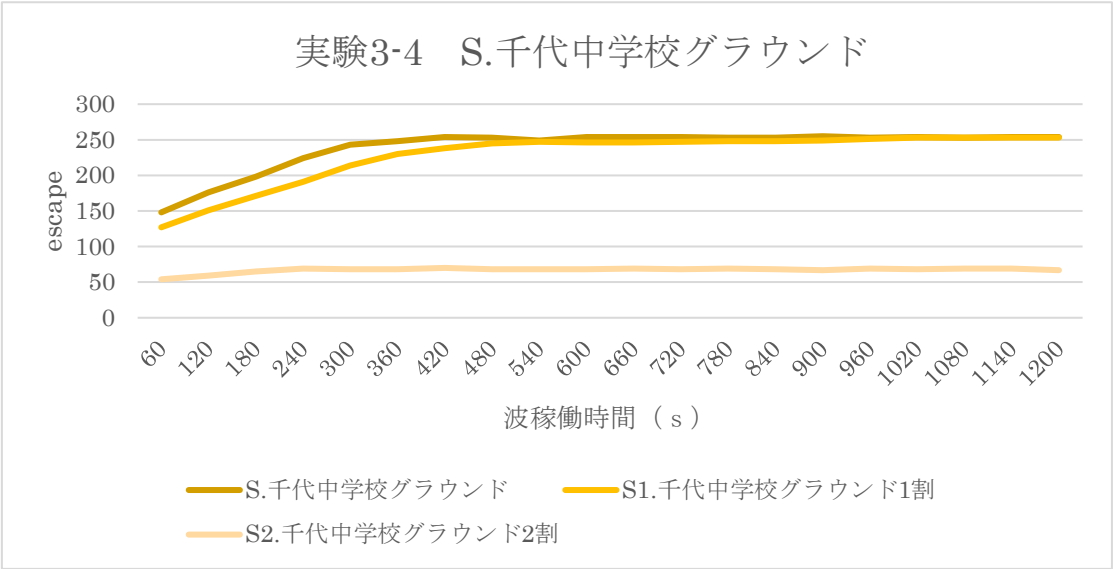


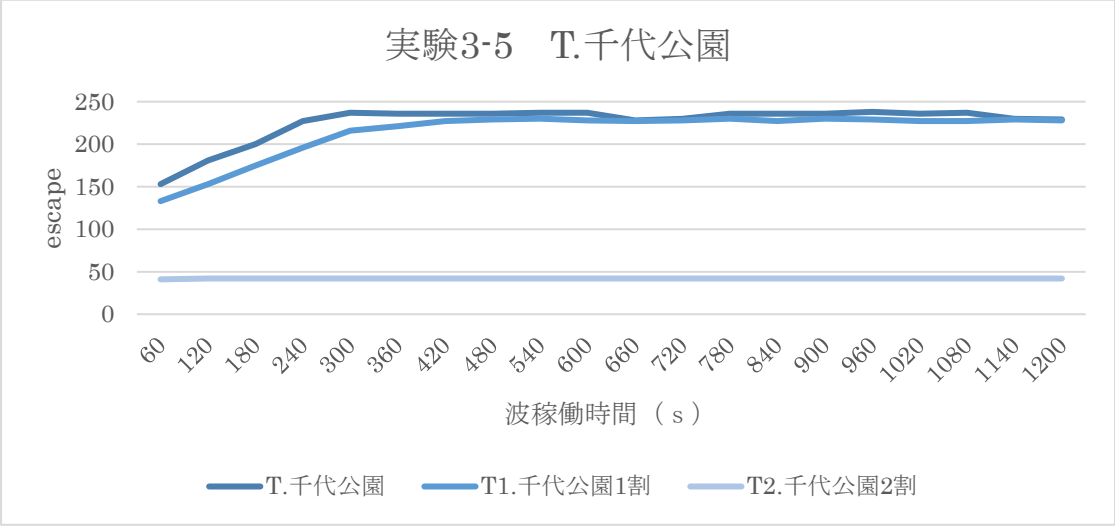
図 5.300 体 1 倍速での避難所の位置と escape 数との関係

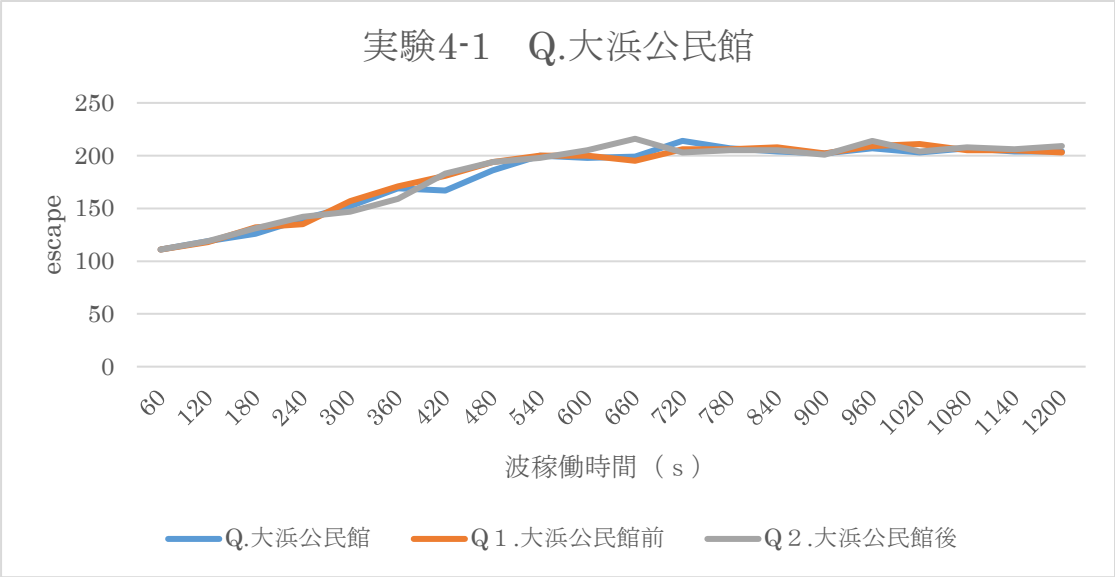


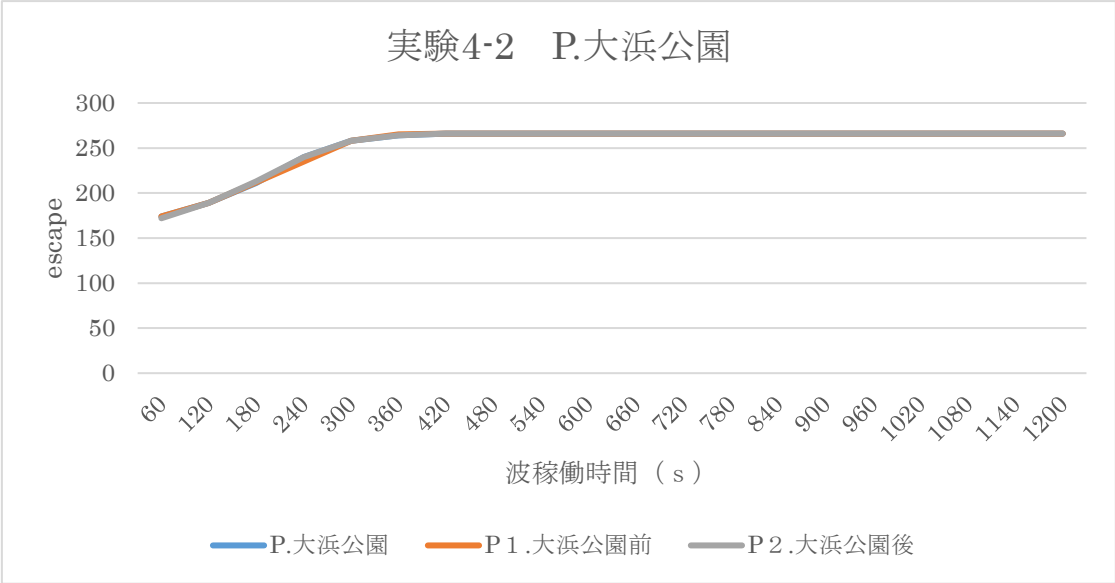

実験3-2　Q.大浜公民館
escape
250
200
150
100
50
0
60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 660 720 780 840 900 960 1020 1080 1140 1200
波稼働時間（ｓ）
Q.大浜公民館
Q1.大浜公民館1割
Q2.大浜公民館2割

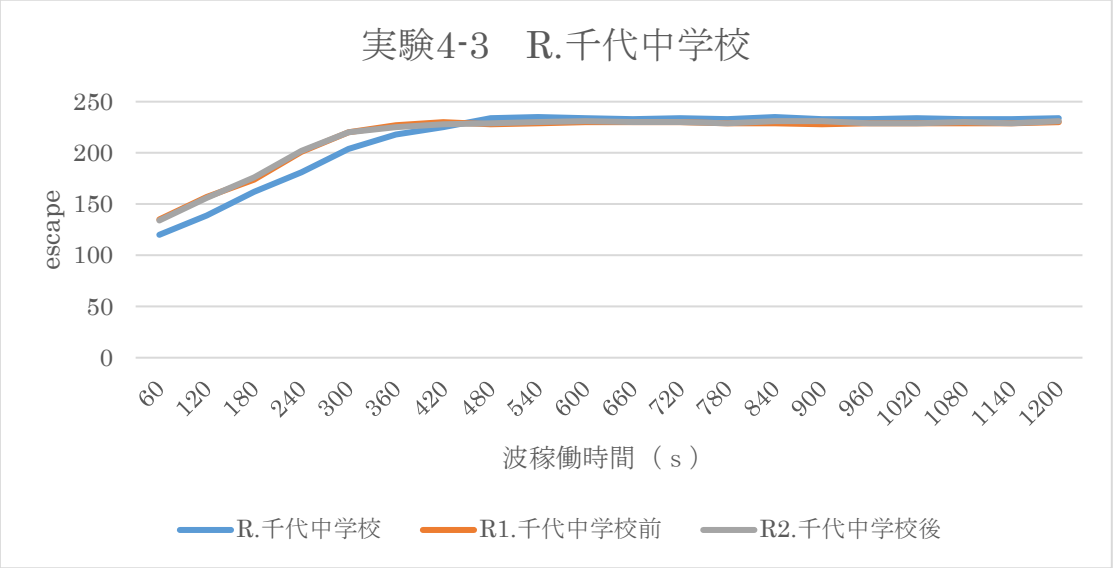

実験3-3　R.千代中学校
escape
250
200
150
100
50
0
60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 660 720 780 840 900 960 1020 1080 1140 1200
波稼働時間（ｓ）
R.千代中学校
R1.千代中学校1割
R2.千代中学校2割

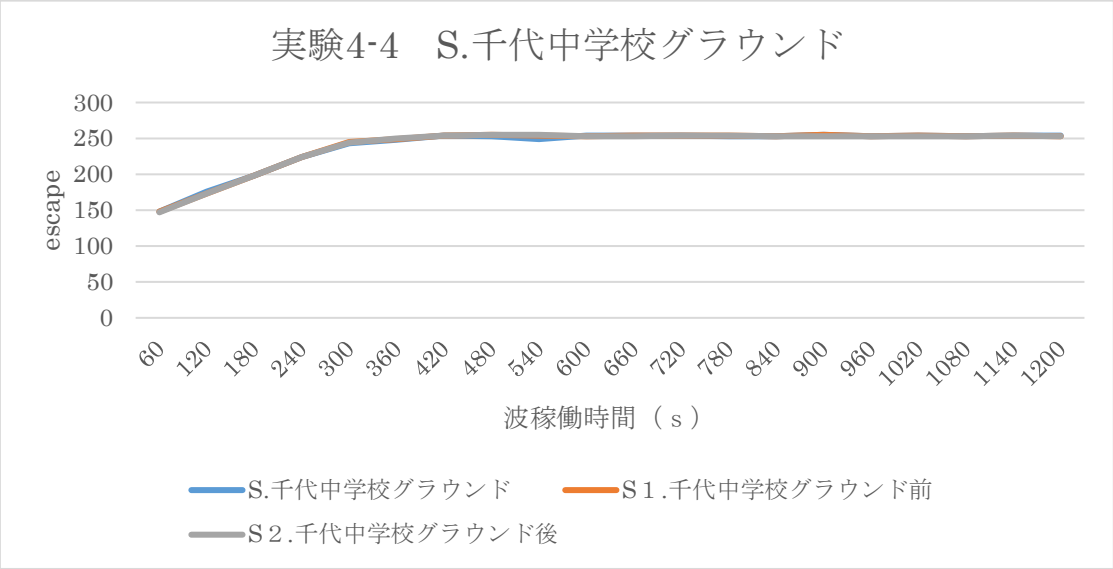

実験3-4　S.千代中学校グラウンド
escape
300
250
200
150
100
50
0
60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 660 720 780 840 900 960 1020 1080 1140 1200
波稼働時間（ｓ）
S.千代中学校グラウンド
S1.千代中学校グラウンド1割
S2.千代中学校グラウンド2割

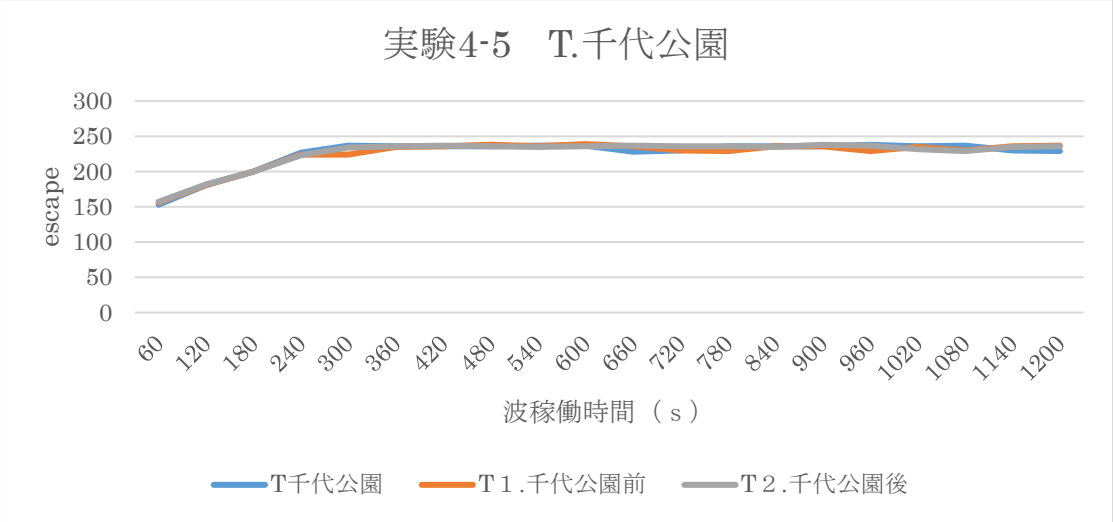

実験3-5　T.千代公園
escape
250
200
150
100
50
0
60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 660 720 780 840 900 960 1020 1080 1140 1200
波稼働時間（ｓ）
T.千代公園
T1.千代公園1割
T2.千代公園2割


実験4-1　Q.大浜公民館
escape
250
200
150
100
50
0
60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 660 720 780 840 900 960 1020 1080 1140 1200
波稼働時間（ｓ）
Q.大浜公民館
Q１.大浜公民館前
Q２.大浜公民館後


実験4-2　P.大浜公園
escape
300
250
200
150
100
50
0
60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 660 720 780 840 900 960 1020 1080 1140 1200
波稼働時間（ｓ）
P.大浜公園
P１.大浜公園前
P２.大浜公園後


実験4-3　R.千代中学校
250
200
150
100
50
0
escape
60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 660 720 780 840 900 960 1020 1080 1140 1200
波稼働時間（ｓ）
R.千代中学校
R1.千代中学校前
R2.千代中学校後


実験4-4　S.千代中学校グラウンド
300
250
200
150
100
50
0
escape
60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 660 720 780 840 900 960 1020 1080 1140 1200
波稼働時間（ｓ）
S.千代中学校グラウンド
S１.千代中学校グラウンド前
S２.千代中学校グラウンド後


実験4-5　T.千代公園
300
250
200
150
100
50
0
escape
60 120 180 240 300 360 420 480 540 600 660 720 780 840 900 960 1020 1080 1140 1200
波稼働時間（ｓ）
T千代公園
T１.千代公園前
T２.千代公園後

様々な方法におけるスパゲッティの折れる本数の違い

理数コース３年　工藤哲志　岩永尚　廣瀬栄匠　内門勇太　関遼太

1. 要旨

私たちはスパゲッティを折る速さやスパゲッティを持つ持ち方を変えることによって条件を変えてスパゲッティの折れる本数の違いを調べた。表面の凹凸は，折れる本数にほぼ関係がないことが分かった。定力装置を用いて折ることによって，折れるときにスパゲッティに生じる加速度に注目してスパゲッティを折った。その結果加速度が大きいほうが折れる本数が多いことが分かった。長さによる折れる本数の違いについても調べ，長さが長いほうが折れる本数が増えた。

2. 初めに

私たちは様々な研究を調べているときに，イグノーベル賞を受賞したある研究について知った。それは「スパゲッティを折るとき，その多くが３本以上に折れる（２本には折れない)」ことについての研究（Audoly & Neukirch,2005）であった。この現象はスナップバック効果と呼ばれており，この現象を緩和するためにスパゲッティを 270°ねじって折ることで，２本に折る方法も研究されている（Heisser & Patil,2018)。これらの研究の確認を行うため，私たちもスパゲッティを折ってみたところ，文献値以上に２本に折れるものがあった。その結果から，先行研究で確認された方法以外においても，２本に折れることがあり，折り方によって折れる本数に違いがあるのではないかと考え，本研究を行った。

3. 方法

実験器具等：パゲッティ：直径 1.6㎜ 前後，長さ 25㎝ 前後の円柱状のロングパスタ（Ａ社，Ｂ社)，やすり，台車，定力装置，

【実験１　変形する速さ，持ち方を変化させた実験】

以下①～④のように条件を変え，折れたスパゲッティの折れた本数と長さを計測した。

①スパゲッティの端をそれぞれ親指と人差し指で持ち,端が動く速さをおおよそ100㎝/s にして折った。

②スパゲッティの端をそれぞれ親指と人差し指で持ち，端が動く速さをおおよそ 5㎝/s にして折った。

③スパゲッティの端をそれぞれ人差し指で押し，端が動く速さをおおよそ 100㎝/s にして折った。

④スパゲッティの端をそれぞれ人差し指で押し，端が動く速さをおおよそ 5㎝/s で折った。

【実験２　表面の状態を変化させた実験】

紙やすり（No.2000）でＢ社のスパゲッティを表面の凹凸を削ることによって表面の凹凸をなくし，実験１の④の方法で折った。この結果を表面加工せずに実験１の④の方法で折った結果と比較した。

【実験３　加速度を一定にした実験】

定力装置と台車を用いた実験装置を考案した。定力装置を用いて台車を引き，この台車が押す引く力を一定にし，運動方程式（ma=F）により，加速度を一定にした。そうすることによって，スパゲッティが折れるときの速さが一定になり，個人差による影響を小さくし，実験に再現性を持たせた。また実験はＢ社のスパゲッティを使用した。

以下①～②のように条件を変え，折れたスパゲッティの折れた本数と長さを計測した。

①定力装置の引く力を 0.75N，台車質量 4.0kg で行う。（加速度の大きさ 0.19 m/s²）

②定力装置の引く力を 2.0N，台車質量 1.0kg で行う。（加速度の大きさ２.０m/s²）

【実験４　折る前の長さを変えた実験】

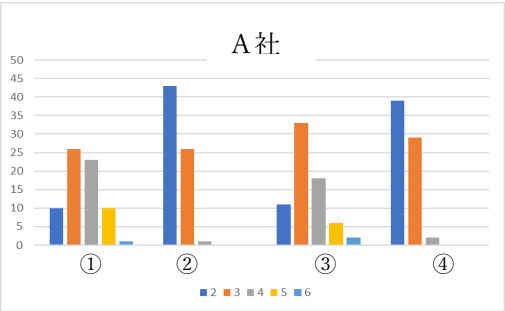
Ｂ社のスパゲッティの長さをおおよそ半分にし，実験３の①の方法で折った。この結果をもとの長さのまま実験３の①の方法で折った結果と比較した。

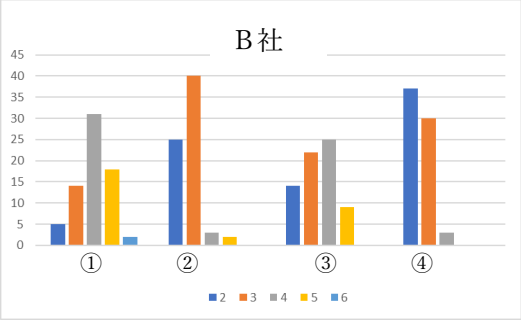
4.　結果

【実験１　変形する速さ，持ち方を変化させた実験】

Ａ社	①	②	③	④
2 本に折れた数	10	43	11	39
3 本に折れた数	26	26	33	29
4 本に折れた数	23	1	18	2
5 本に折れた数	10	0	6	0
6 本に折れた数	1	0	2	0
本数合計	70	70	70	70
折れた本数の平均値	3.51	2.40	3.35	2.47

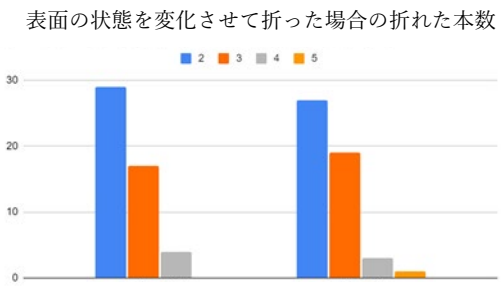
Ｂ社	①	②	③	④
2 本に折れた数	5	25	14	37
3 本に折れた数	14	40	22	30
4 本に折れた数	31	3	25	3
5 本に折れた数	18	2	9	0
6 本に折れた数	2	0	0	0
本数合計	70	70	70	70
折れた本数の平均値	3.97	2.74	3.41	2.51





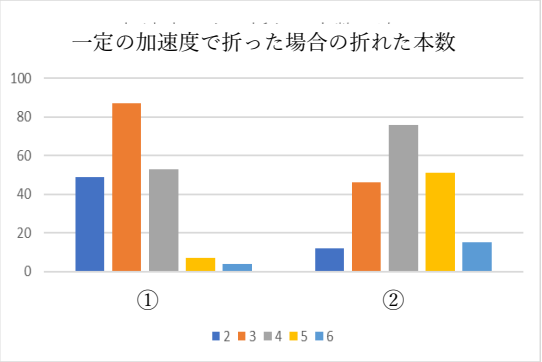
【実験２　表面の状態を変化させた実験】

B社	研磨なし	研磨あり
2 本に折れた数	29	27
3 本に折れた数	17	19
4 本に折れた数	4	3
5 本に折れた数	0	1
本数合計	50	50
折れた本数の平均値	2.50	2.56



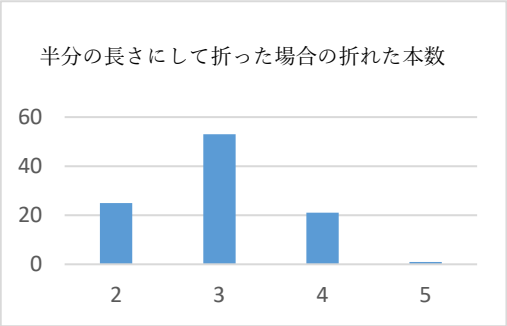
【実験３　加速度を一定にした実験】

	①	②
2 本に折れた数	49	12
3 本に折れた数	87	46
4 本に折れた数	53	76
5 本に折れた数	7	51
6 本に折れた数	4	15
本数合計	200	200
折れた本数の平均値	3.15	4.06



【実験４　折る前の長さを変えた実験】

	半分	そのまま
2 本に折れた数	25	12
3 本に折れた数	53	46
4 本に折れた数	21	76
5 本に折れた数	1	51
6 本に折れた数	0	15
折れた本数の平均値	2.98	4.06



5. 考察

【実験１】より，スパゲッティの端と端を両手の人差し指の腹で挟んで押して折ったときに比べてスパゲッティの端と端を親指と人差し指で挟んで折ったときの方が折れる本数が多かったということから持っておった方がモーメントが一定になっていて力が分散されているということが分かる。また，速く折ったとき（約秒速 100 ㎝）と遅く折ったとき（約秒速 5 ㎝）は，遅く折ったときの方が 2 本に近い本数に折れやすいことから，遅く折った方は，折れるときの振動が抑えられ，ゆがみが小さくなると考えられ，速く折ったときの方は，折れるときの振動が大きく，ゆがみがより大きくなると考えられる。また，折れた時のそれぞれの長さは，折れた本数それぞれについて，違いが大きいため，関係性がないことが考えられる。

【実験２】より，やすりで表面の凹凸を削ったスパゲッティとやすりで表面の凹凸を削っていないスパゲッティでは，折れた本数にあまり違いが見られない。このことから，スパゲッティの表面の凹凸は，折れるスパゲッティの本数には，あまり依存しないことがわかる。また，折れた時のそれぞれの長さは，折れた本数それぞれについて，違いが大きく，関係性がないことが考えられる。

【実験３】より，加速度が大きい方（加速度 2.0 ㎧）が加速度が小さい方（加速度 0.19 ㎧）よりも多くの本数に折れることから，折れるときの速さが速い方が遅い方よりも多くの本数に折れやすいと考えられる。このことから，速さが速くなると折れる本数が多くなり，速さが遅くなると折れる本数が少なくなると考えられる。また，折れた時のそれぞれの長さは，折れた本数それぞれについて，違いが大きく，関係性がないことが考えられる。

【実験４】より，おおよそ半分に折ったスパゲッティ方が元の折ってないスパゲッティよりも折れる本数が少ないことから，長さが短くなると折れる本数が少なくなり，長さが長くなると折れる本数が多くなると考えられる。また，折れた時のそれぞれの長さは，折れた本数それぞれについて，違いが大きく，関係性がないことが考えられる。

【実験１】【実験３】から分かるようにどの条件下においても速く折ったときよりも遅く折ったときの方が折れるスパゲッティの本数が少ない。折れるときのスパゲッティの形を観察してみると，遅く折ったときの折れる瞬間の形は放物線のような形になっている。しかし，速く折ったときのスパゲッティの折れる形は半円に近い形になっている。このことから分散された力の大きさが遅く折ったときと比べて速く折ったときの方が大きいと思われる。

6. 結論・展望

スパゲッティの折れるときの本数は，スパゲッティの折るときの速さに関係がある。また，スパゲッティを折るときの長さにも関係がある。また，スパゲッティの表面の凹凸は，折れる本数にあまり関係がない。

スパゲッティを速く折ったときと遅く折ったときの折れる本数の違いをより細かく条件を変えながらの明快な理由を追究する。また，短いスパゲッティを折ったときと長いスパゲッティを折ったときの折れる本数の違いについても同様に細かく条件を変えながら，折れる本数の違いの明確な理由を追究する。

スパゲッティをおおよそ半分に折って折れる本数の違いがあるか調べた実験では，スパゲッティをおおよそ半分折るとき，目分量でスパゲッティを半分に折ったので，正確に半分に折って実験をしたい。

スパゲッティの折れる仕組みや条件などをより詳しく調べることにより，日常生活の中でスパゲッティのように折れるものを探し，折れにくくする方法や折れたとしても折れる本数が少なくなるような構造のものを探す。(例えば，釣り竿や棒高跳びの棒などのような折れることがあるようなもの)

全体的に箱に入っていた時点から，スパゲッティの長さに違いがあり，私たちの実験から長さによって折れる本数に影響がみられたことから，元のスパゲッティの長さをそろえてから実験をしたい。

7. 参考文献

スパゲッティのイグノーベル賞の紹介

http://ckuma.html.xdomain.jp/class/IS2-Project/2019/3/link/Spaghetti.html

270 度のひねりを加えることによって，スパゲッティを半分に折る方法

https://nlab.itmedia.co.jp/nl/articles/1808/17/news092.html

スパゲティを折ると何故３つ以上の破片に分裂するのか？

https://dragonflare.blog.jp/archives/break_spaghetti.html

偏光板と光の関係

理数コース３年　黒木　凜　岡崎　絢人

１ 概要

偏光板を通過した光と通過前の光の強さが偏光方向の角度の違いによってどのように変化するのかを調べた。そのために，光量測定器を用意して，高原前方の偏光板の角度を 0~180 度まで 5 度ずつ変化させ，通過した光の強さを測定した。その後，前方の偏光板にクリアファイルやクリアファイルを貼り付け，同様に光の強さを測定した。得られたデータをもとに角度の違いと光の強さについてのグラフを作成し，グラフから，偏光板を通過した光がどのくらい回転して進むかを考察した。

２　研究目的

私たちは，高校物理の授業で行った実験で，偏光板の重ね方を変えると，光の明暗の変化が起こったメカニズムにとても興味を持った。この変化については「マリュスの法則」という法則がある。偏光板間に様々な材質を挟んだ時にどのようなことが起こるのかを確かめるため，調査を行った。

【マリュスの法則】

光の波は振動方向が進行方向に垂直であることから「偏光」という現象が存在する。よって偏光板を通過した後の光は，振動方向が偏光板の色素方向と同じ光のみが通過する。この光を偏光した光という。この偏光した光が二枚目の偏光板を通過するとき，通過光の強度 I は以下のような式で表すことができる。

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

この式では偏光板を通過する前の光の強度を I_0，２枚の偏光板の軸のなす角度を θ としている。この式を「マリュスの法則」という。

３．実験機器および手順

【使用機器】

D 型５００mmの光学台，D 型光学キャリア，集光レンズ付き光学実験用ハロゲンランプ，偏光フィルター，光センサー（３B　NETlog™），植物系セロファンテープ（ニチバン），クリアファイル

【実験手順】

（１）４本の光学キャリアを，光学台の２５mm，１９３mm，２６５mm，４２８mmの位置に設置して，１９３mmと，２６５mmの位置の光学キャリアにそれぞれ偏光フィルターを取り付けた。また２５mmの位置の光学キャリアに光学実験用ハロゲンランプ（以下光源とする），４２８mmの位置の光学キャリアに光センサーを取り付けた。

（２）図１のように，偏光フィルターのつまみがある面を光学実験用ハロゲンランプの方に向けて，光源から出た光が，偏光フィルターの面に対して垂直に通過するように，２つの偏光フィルターの向きを調整し，偏光フィルターを通過した光が真っ直ぐに光センサーに入射するように，光センサーの向きを調整した。

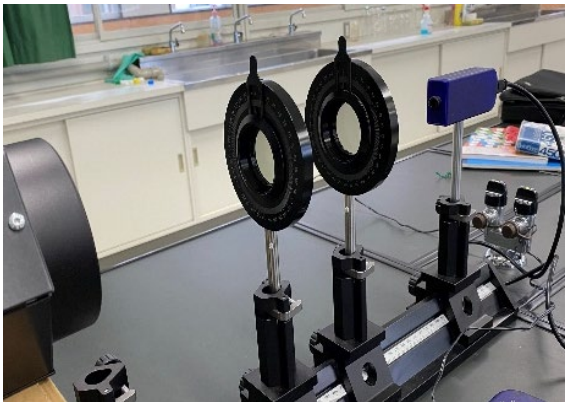


図１　実験装置写真

（３）初めに，光センサーを用いて室内の光の強さ（部屋の明るさ）の値を計測した。その後，偏光フィルターのつまみで，光源に近い方の偏光フィルターの角度を，0°～180°まで 5°毎で変えながら，通過光の強さの値を光センサーで読み取った。（これを実験①とする）

（４）前方の偏光フィルター全面にクリアファイルの一部を切り取ったクリアファイル片を貼り付け，（３）と同様に光源に近い方の偏光フィルターの角度を，0°～180°まで 5°毎で変えながら，通過光の強さの値を光センサーで読み取った。（これを実験②とする）

（５）他のクリアファイル片の上に，交差したり，一部が重なったりしないように一定方向にセロテープを１層貼り付けた。作成した「セロテープ１層＋クリアファイル片」を前方の偏光フィルター全面に貼り付け，（３）と同様に光源に近い方の偏光フィルターの角度を，0°～180°まで 5°毎で変えながら，通過光の強さの値を光センサーで読み取った。（これを実験③とする）

（６）（５）の「セロテープ１層＋クリアファイル片」の上に，更に同じ一定方向にセロテープを１層貼り付けた。作成した「セロテープ２層＋クリアファイル片」を前方の偏光フィルター全面に貼り付け，（３）と同様に光源に近い方の偏光フィルターの角度を，0°～180°まで 5°毎で変えながら，通過光の強さの値を光センサーで読み取った。（これを実験④とする）

（７）（６）の「セロテープ２層＋クリアファイル片」の上に，更に同じ一定方向にセロテープを１層貼り付けた。作成した「セロテープ３層＋クリアファイル片」を前方の偏光フィルター全面に貼り付け，（３）と同様に光源に近い方の偏光フィルターの角度を，0°～180°まで 5°毎で変えながら，通過光の強さの値を光センサーで読み取った。（これを実験⑤とする）

４．結果

実験①～⑤の結果は以下の図２～６のとおりである。

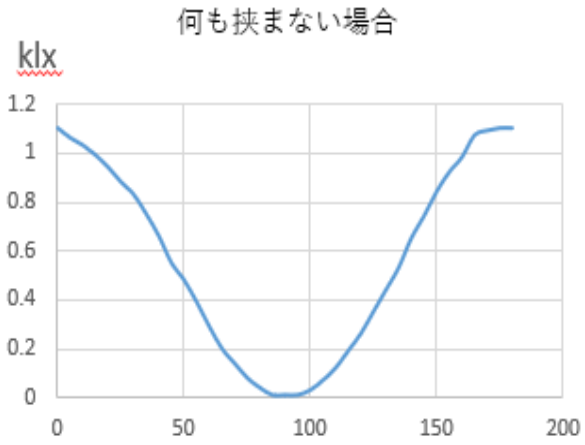


図２　実験①結果

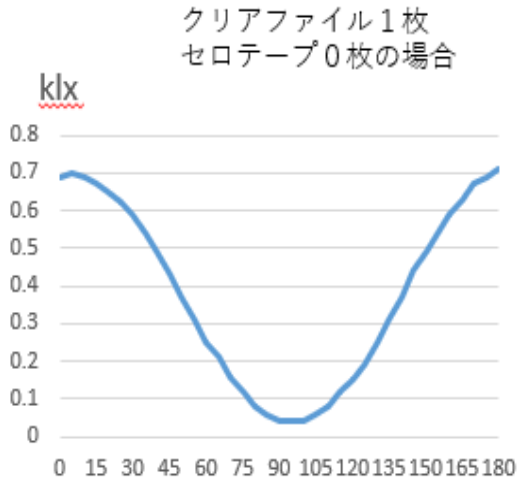


図３　実験②結果

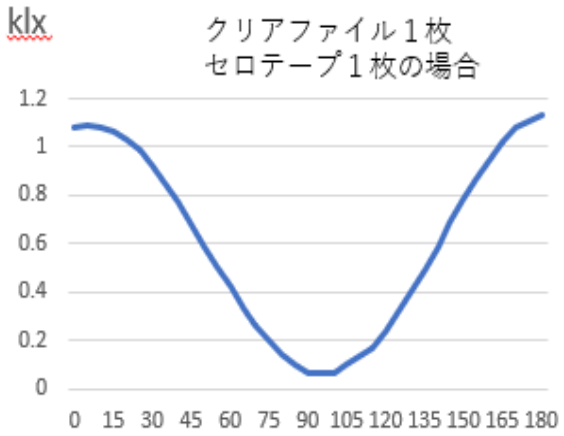


図４　実験③結果

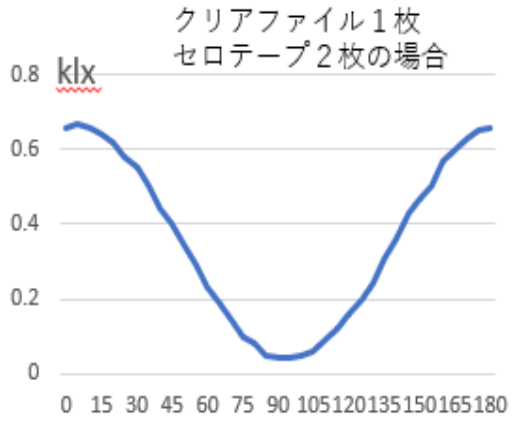


図５　実験④結果

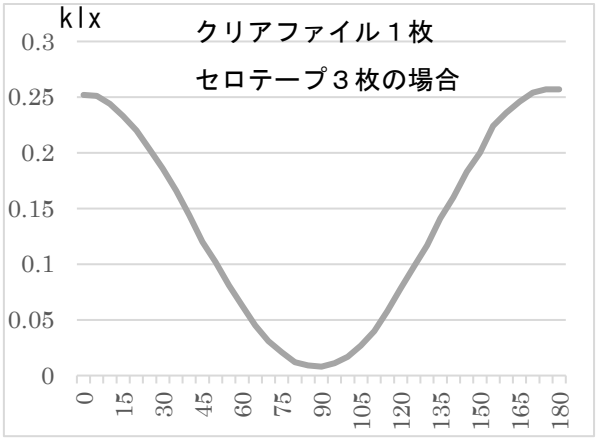


図６　実験⑤結果

実験①に示すように，偏光板の重ねる角度が 90°に近づくにつれて光の強さの値がだんだんと小さくなっていき，90°で光の強さは最小値を取った。

実験②での光の強さは 95°で最小値をとり，グラフの外形が右向きに平行移動していた。

実験③での光の強さは 94°で最小値をとり，グラフの外形が実験②のグラフと比べて左向きに平行移動していた。実験④での光の強さは 92°で最小値をとり，グラフの外形が実験③のグラフと比べて左向きに平行移動していた。実験⑤での光の強さは 87°で最小値をとり，グラフの外形が実験④のグラフと比べて左向きに平行移動していた。

５．考察

実験①の結果から，マリュスの法則が成り立っていることが確かめられた。また，実験②の光の強さの最小値の角度が 95°であったことから，クリアファイルは光の振動方向を傾ける効果があることがわかる。実験③の光の強さの最小値の角度が 94°であったことから，光がセロファンテープを通過する際に，クリアファイルで傾いた振動の向きと反対方向に振動方向が傾いたのではないかと考えられる。このことは光の強さの最小値の角度が実験④では 92°，実験⑤では 84°と徐々に小さくなっていることからもわかる。さらに実験③～⑤から，通り抜けるセロファンテープの厚さが大きいほど，光の振動方向が大きく傾くことがわかる。これは，セロファンテープを光が通るとき，光の波長によって振動面の角度（ひねられ片）がわずかに異なる偏光になるためだと考えられる。セロハンは繊維状のセルロースを一方向に引き伸ばして作っているので，偏光特性をもつのだと考えられる。

実験⑤の光の強さの最小値の角度が 87°で，実験④と比べて大幅に角度が減少した。この角度の大きさはテープの枚数（厚さ）に比例すると思われたが，実際に得られたデータとは違った。この違いが生じた原因として，セロファンテープの厚さが均一でなかったこと，使用した際の光の強さが実験毎に異なっていたことが考えられる。また，実験で光の強さの値を読み取る際に，自分や周りの人が動いたり，物を置いたりすることで，影ができてしまい光の強さの値を一定にできていなかった可能性がある。

６．今後の展望

セロファンテープの厚さを調査したり，使用する光の強度を一定したりなど，実験条件を一定にしたい。また，今回は 5°毎の調査だったが，もっと精密に測定したい。さらにクリアファイルや偏光板の枚数を増やした調査も行いたい。

７．参考文献

マリュスの法則（日本スリービー・サイエンティフィック）
https://www.3bs.jp/physics/experiment/waveopt-expt/ue4040100.htm
偏光板であそぼう　（NGK サイエンスサイト）
https://site.ngk.co.jp/lab/no123/

化粧品に含まれる鉄の定量分析

理数コース３年　　濱野瑞貴　佐藤由佳　下川真那日　藤原凜

－要旨－

私達は化粧品に含まれる着色料について研究した。その中でも鉄に着目し、化粧品によって鉄が使われているのか、また、色による鉄の含有量に違いはあるのかを調べた。鉄イオンの定量分析によって鉄の含有量を調べようとしたが、その方法を定めるためにもいくつかの対照実験を行った。その結果、キレート滴定を用いた化粧品に含まれる鉄の含有量を調べる方法を確立し、三種類の色のアイシャドウに含まれる鉄の量を調べた。

―問題提起－

世の中には様々な化粧品が存在するが、ときに化粧品が肌荒れを引き起こすことがあるというのをご存知だろうか。その主な原因は着色料であると言われている。

化粧品に着色料を使用する理由は主に以下の２つだ。

①肌に彩りを与えるため

赤やピンクなど、特定の色を出すために化粧品には色材と呼ばれる着色剤を使用している。皮膚や髪に好みの色彩を与えることで、魅力的な容姿をつくることが出来るのだ。

②商品価値を高めるため

化粧品に着色料を使うもう１つの目的は製品に色彩を加えて、見栄えを良くすることだ。 すなわち、商品に「イメージ」を付けるためである。 例えば黒糖の成分を使った石鹸があったとして、黒糖のイメージを色味で表現するためカラメル色素が添加されることがある。着色料は化粧品を彩るためには必要不可欠である。

しかし、冒頭でも述べたように着色料はアレルギーなどの副作用を引き起こす原因物質になりうるものであると言われている。基本的に国から定められた、人体に影響がない最適な量を配合しているため大きな問題になることはないが、添加物を含む化粧品を使う頻度が高いと、添加物が肌に蓄積されていき、問題が発生することがある。化粧品の製造において、添加物が肌に与える影響が無いように厳しくチェックはしているが、何度も繰り返して使うことに対する確認までは行っていない。また、肌が弱い人での試験など行っているわけでもない。

そこで私達は化粧品による肌荒れを減らす方法を探るべく、この着色料という物質に焦点を当てることにした。着色料にはいろいろな種類があるが、そのなかでも特に私達にとって身近な鉄に着目した。本当にすべての化粧品に着色料は含まれているのか。もし含まれているならばどれくらいの量が含まれているのか。これらについて詳しく調べていくことにした。

今回は着色料のなかで鉄に注目したが、鉄以外にも様々な着色料が存在する。

・無機顔料

鉄はこの無機顔料の一種に含まれ、例としてはベンガラや黄酸化鉄などがある。主に色調を調整するのに利用される。鉄以外には、酸化チタンや亜鉛華などの白色顔料があり、色の調整の他に、シミやソバカスを隠す目的でも添加される。 その他、酸化チタンや酸化亜鉛などの超微粒子は紫外線を防ぐ効果があると言われている。 また、無機顔料には着色顔料の他に、体質顔料、白色顔料、真珠光沢顔料などがある。

・有機合成色素（タール色素）

有機合成色素は有機顔料のうち、化粧品などに添加する目的で化学的に合成された色素のことで、別名タール色素とも呼ばれている。 有機顔料は、構造内に可溶性基を持たない有色粉末で、水や油などに溶解しない特徴がある。無機顔料にはやや劣ると言われているものの、鮮やかな発色が売りの顔料だ。 有機合成色素の例にはアスタキサンチン、カカオ色素、カプサイシン、カロチン、クロシン、カオリンなどがある。

・天然色素

天然由来の色素には、動植物由来のものと微生物由来のものとがある。 例えば、人参やトマト、ベニザケなどからは黄-橙赤色のカロチノイド系色素、ハイビスカス、ベニバナなどからは黄-赤紫色のフラボノイド系色素を得ることが出来る。その他、茶色のカカオ色素、緑系のクロロフィル色素などがある。 淡く渋い色味のものが多く、有機合成色素に比べると着色力や耐光性は劣るものが多いが、近年ナチュラルブームによって価値が見直されてきていると言われている。

以上の内容を踏まえて、まず、アイシャドウの着色料の中に鉄が含まれていることを知り、その後鉄(Ⅲ)イオンの定量を試みた。
そこで以下の４つの実験を行った。

―実験―

≪実験内容≫

【実験１】

アイシャドウに着色料として鉄が含まれているかどうかを調べるために、アイシャドウに硫酸をくわえた溶液にヘキサシアノ鉄（Ⅱ）酸カリウム水溶液とヘキサシアノ鉄（Ⅲ）酸カリウム水溶液をそれぞれ加えて、鉄（Ⅱ）イオンと鉄（Ⅲ）イオンの有無を調べた。ヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウムは２価の鉄イオンに反応して濃青色沈殿が生じ、ヘキサシアノ鉄(Ⅱ)酸カリウムは３価の鉄イオンに反応して濃青色沈殿が生じる。

【実験 2】

酸化された鉄は、酸化の程度によって色が変化するという特徴があり、これを利用して着色料として用いられているということを知ったため、酸化による鉄の色の変化を調べるためにガスバーナーで化粧品を焼いて鉄の酸化による色の変化を調べた。

【実験 3】

アイシャドウに含まれる鉄の定量方法を確立する。そのために以下の２点について検討した。

［ｉ］前処理の方法を決める

アイシャドウ内の鉄を定量するには、鉄(Ⅲ)イオンを取り出す必要がある。アイシャドウに含まれる鉄は酸化鉄という安定した物質で存在していたりシリコーンオイルで加工されているため鉄を溶かし出したり、反応が正確に行われるために試料の量を調整する必要がある。以下の点に注意して前処理の方法を検討した。

・ヘキサンは油成分を溶かす作用があるためアイシャドウに含まれるシリコーンオイルを溶かし出すために入れる。

・灰化処理はアイシャドウに含まれる有機物を無機物の灰にして鉄が溶け出しやすくする。

・硝酸に溶かすことによって鉄(Ⅲ)イオンを検出する

・湯煎して温度が上がることで反応速度を上げ、反応が速やかに進みやすくする。

［ⅱ］キレート滴定を行う試料の体積や pH を決める

指示薬のバリアミンブルーB の変色域は、pH1.7～2.8 であるため、ｐＨの調整が必要である。また、試料溶液中にどれだけの鉄(Ⅲ)イオンが含まれているかわからないため、実験で用いる試料の体積について検討を行った。

【実験 4】

実験３で確立した鉄の定量方法を使い実際に定量を行い、アイシャドウに含まれる鉄の量を調べる。

―準備するもの―

（実験 1～4）

・Seria の 12 色アイシャドウパレット 0.3（LOJENETOKYO）

・0.1mol/L のヘキサシアノ鉄（Ⅲ）酸カリウム水溶液 $K_3[Fe(CN)_6]$

・0.1mol/L のヘキサシアノ鉄（Ⅱ）酸カリウム水溶液 $K_4[Fe(CN)_6]$

・ヘキサン

・2.0mol/L の硝酸

・10%アンモニア水

・20%酢酸ナトリウム水溶液

・バリアミンブルーB

・こまごめピペット

・試験管 36 本
・薬さじ
・ガスバーナー
・100ml ビーカー2 個
・500ml ビーカー
・ビュレット
・ミクロスパーテル
・スクリュー管 12 本
・３ml ホールピペット３本
・ホットスターラー
・コニカルビーカー6 個

-実験方法-

【実験 1】

①試験管を３６本用意し、１２本×３列に並べる。一列ずつ A 列 B 列 C 列とする。
②アイシャドウを 1 色につき 0.50ｇずつ量り取り、A 列の試験管に 1 色ずつ入れる。
③3.0mol/L の硫酸をこまごめピペットで３.0ml ずつ A 列の試験管に入れていく。
④ホットスターラーに水を入れたビーカーを乗せビーカー内の水が 80℃になった後 A 列の試験管を 15 分入れて温めて試料液をつくる。
⑤1 色につき 1.0ml を B 列の試験管へ、1.0ml を C 列の試験管へ入れる。
⑥B 列の試験管全てにヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液をピペットで数滴入れ、C 列の試験管全てにヘキサシアノ鉄(Ⅱ)酸カリウム水溶液をピペットで数滴入れる。
⑦サンプルに濃青色沈殿が生じたか、またそれはどのくらいの濃さだったのかを観察する。

【実験 2】

①アイシャドウを 1 色ずつミクロスパーテルで少量取り出し、薬さじに乗せる。
②薬さじに乗せたアイシャドウをガスバーナーで薬さじの下から 5 分間加熱する。
③加熱が終わったアイシャドウを冷ましてスクリュー管に保管する。

【実験 3】

［ｉ］前処理の方法を決める

試料中の鉄（Ⅲ）イオンを溶かし出すための操作として、以下の 3 パターンを行った

〇パターン 1

試料中のアイシャドウをヘキサンに溶かし、屋外で 15 分程度放置しヘキサンを蒸発させる。その後るつぼに入れてガスバーナーで加熱し、灰化処理を行った後、2.0mol/L の硝酸にすべて入れて鉄（Ⅲ）イオンを溶かし出す。

〇パターン 2

試料中のアイシャドウをヘキサンに溶かし、屋外で 15 分程度放置しヘキサンを蒸発させる。その後 2.0mol/L の硝酸にすべて入れて鉄（Ⅲ）イオンを溶かし出す。

〇パターン 3

試料中のアイシャドウをヘキサンに溶かし、屋外で 15 分程度放置しヘキサンを蒸発さ

せる。その後 2.0mol/L の硝酸にすべて入れて鉄（Ⅲ）イオンを溶かし出し、８０℃のお湯で湯煎する。

［ⅱ］キレート滴定を行う試料の体積や pH を決める。

試料の体積や pH を決める操作として、以下の 3 パターンを行った

〇パターン 1

試料溶液を 3.0ml を 100ml のメスフラスコで希釈し、緩衝液を加えて pH を安定させる。

〇パターン 2

試料溶液に水を直接入れて希釈し、緩衝液を加えて pH を安定させる。

〇パターン 3

試料溶液を希釈せずに緩衝液を加えて pH を安定させる。

なお、用いた緩衝溶液は以下の手順で作成した。

①28%アンモニア水を 10ｇに 18ｇの水を入れて調製した 10%のアンモニア水を２滴入れる。

②2.0mol/L の塩酸を２滴入れる。

③酢酸ナトリウムを 2.0ｇはかりとり、ビーカーに入れ、8.0ｇの水を入れて調製した 20%酢酸ナトリウム水溶液を 2 滴入れる。

④2.0mol/L の塩酸を 2 滴入れる

【実験 4】

①１００円ショップ Seria で購入した 12 色アイシャドウパレットを２色分（今回使ったのは薄橙色と緑色）全てビーカーに削り取る。

②アイシャドウ全体に浸るようにヘキサンを入れ、屋外で 15 分程度放置し、自然蒸発させる。

③②のアイシャドウを０．３０ｇずつ試験管に量り取り、2.0mol/L の硝酸をそれぞれの試験管に入れる。

④75～８0℃に加熱したお湯の中で１５分間湯煎を行う。この際アイシャドウが 1 度表面に浮いてくるため、できる限り沈むように湯煎をしながら試験管を振る。

⑤④の試料溶液のアイシャドウの動きが止まるまで待ち、3.0ml ずつホールピペットでコニカルビーカーに量りとる。

⑧ 10%のアンモニア水を 2 滴入れる。

⑦ 2.0mol/L の塩酸を２滴入れる。

⑧ 20%の酢酸ナトリウム水溶液を 2 滴入れる。

⑨ 2.0mol/L の塩酸を 2 滴入れる。

⑩バリアミンブルーB(指示薬)を少量、紫色がはっきり分かるまで入れる。
⑪0.010mol/L の EDTA 溶液で滴定を行う。

ー結果ー

【実験 1】

全ての色のアイシャドウがヘキサシアノ鉄(Ⅲ)酸カリウム水溶液にもヘキサシアノ鉄(Ⅱ)酸カリウム水溶液にも反応し、濃青色沈殿が発生した。
よって、すべてのアイシャドウに鉄（Ⅱ）イオンも鉄（Ⅲ）イオンも入っていることがわかった。
その中でも茶色系統のアイシャドウは沈殿の色が濃く感じられた。

【実験 2】

全てのアイシャドウが元の色から少し薄くなり、灰色に近づいた色になった。

【実験 3】

［ｉ］

パターン１では、 滴定前、バリアミンブルーＢが反応しなかった。
パターン２では、滴定前、バリアミンブルーＢが反応しなかった。
パターン３ では、滴定前、バリアミンブルーＢが正しく反応した。

［ⅱ］

パターン１では、指示薬が反応しなかった。
パターン２では、滴定の際、指示薬は反応したが、終点となる色の変化が起こらなかった。
パターン３では、滴定の際、指示薬が反応し、終点となる色の変化が起こった。

【実験 4】

滴下した EDTA 溶液の量の平均値は
薄橙色：２．４８〔mL〕
緑色　：２．８５〔mL〕
なので、１００匂のアイシャドウ０．１０ｇには平均して
薄橙色：２．４８　×１０$^{-5}$mol
緑色　：２．８５　×１０$^{-5}$mol
入っていることが分かった。
また、EDTA 溶液を滴下した量が 3 回ともあまり近い値ではなかった。

ー考察ー

【実験 1】

全てのアイシャドウに反応が起こったため、鉄の有無と色に関係性を見出すことは出来なかった。しかし、色ごとに反応の度合いが違っていたので色によって鉄に含まれる量に違いがあると考える。よって定量分析を行い、鉄の量と色の関係性を調べていく。

【実験 2】

鉄が酸化したのならば黒色に近い色になるはずなのに灰色に近い色になってしまったので、鉄の酸化による色の変化が起きたのではなく、アイシャドウに含まれる有機物が灰になったのではないかと考えた。そのためこの方法は鉄の酸化による色の変化を調べるのに適した方法ではないと考える。

【実験 3】

パターン 1 では鉄（Ⅲ）イオンの濃度が低くなりすぎたために指示薬が反応しなかったのではないか。パターン 2 では水で希釈したために指示薬が正しく反応する pH ではなくなっていたのではないか。パターン 3 では終点が観察できたためこの方法で滴定を進める。

【実験 4】

2 色のアイシャドウに含まれている鉄（Ⅲ）イオンの量には差が生じているため、含まれている鉄の量の差がアイシャドウの色の違いに繋がっていると言えると考えた。
また、試料をホールピペットで量りとる際にアイシャドウを吸い取ってしまったことで EDTA 溶液の滴下量に差が出てしまったのではないかと考えた。

-今後の展望-

今までの 4 つの実験を経て、アイシャドウには着色のために鉄（Ⅱ）イオンと鉄（Ⅲ）イオンが入っており、鉄（Ⅱ）イオンと鉄（Ⅲ）イオンの有無と鉄の色との関係はないことがわかり、アイシャドウの中に含まれる鉄（Ⅲ）イオンの量を滴定する方法を確立した。そこで鉄（Ⅲ）イオンと色の関係性を見出すためにはより多くの色のアイシャドウを用いて(実験 4)データを集める必要がある。
着色料とアイシャドウの色の関係性を明確にすることでどの着色料が必要なのか、どのくらい着色料が必要なのかを突き詰めて着色料が原因の肌荒れが起こらない化粧品の成分を考えていきたい。

表 1

滴下した EDTA 溶液の量	1 回目〔mL〕	2 回目〔mL〕	３回目〔ml〕
薄橙色	1.39	2.73	3.33
緑色	2.50	2.35	5.10

ー参考文献ー

書籍
図解とフローチャートによる定量分析　［第二版］　　浅田誠一　内出茂　小林基宏共著技法堂出版株式会社
キレート滴定　九州大学名誉教授/熊本大学教授　上野景平　著　南江堂

インターネットサイト
　なるほど・ザ・化学実験室　ー実験№. 255ー　実験 B－52〈カラフル化粧品の秘密を暴く！の巻〉　日本分析化学専門学校

―謝辞―

　今回の研究に協力して下さった九州産業大学の福田昌孝先生、東京工科大学の柴田雅史先生に深く御礼申し上げます。

バイオディーゼル燃料の作成と粘度による品質評価

理数コース３年　桑野舞衣　田中彩緒里　平松快麻

研究動機

近年地球温暖化問題が深刻化しており、再生可能エネルギーの普及が叫ばれている。私たちは、石油や石炭などの化石燃料ではないエネルギー源の確保が求められているにもかかわらず、米のとぎ汁や廃油といったエネルギーに変換できる余地がある物質が排水管に下水として流され、ごみとして扱われている現状に違和感を持った。そういった当たり前に捨てられているごみからエネルギーを取り出すことができれば、石油に頼らない発電システムを構築することができ、生活廃水などのごみがもたらす環境汚染問題をも解決できるのではないかと考えた。

このことについて情報収集する中で、廃油とアルコールを用いてバイオディーゼル燃料を作成できることを知った。そこで、廃油から化学エネルギーを取り出してバイオ燃料として生まれ変わらせることができれば、環境問題解決に貢献できるのではないかと考えた。しかし、廃油とアルコールの最適な撹拌比率や撹拌時間などの条件はインターネットを用いた調査では知ることができなかったので、私たちはバイオディーゼル燃料を効率よく作成する方法を考案することにした。各薬品の比率や撹拌時間を変えながら実験を重ねることで、理想の条件である低コスト・低環境負荷・高効率を実現できる条件を見つけることができるのではないかと考えた。

実験を重ねていく中で、作成したバイオディーゼル燃料の品質評価の手段を持っていないという壁にぶつかった。そこで私たちは反応の進行度合いで値が変化する要素について模索した。原料の廃油は生成物のバイオディーゼル燃料と比べ、粘性が高い、茶褐色が強い、揮発性が低いといった差がみられる。これらについて、実現可能性や必要となる知識、学校の設備、環境負荷などの条件を踏まえて吟味した結果、粘度による品質判定が自分たちにとって再現可能で、最も正確な方法ではないかと考え、実際に取り入れることにした。

粘度を計測しようと決断してからインターネットや書籍を用いて実際に研究室や企業で用いられている粘度計について調べた。粘度計測器を開発している企業のホームページや販売サイト等を見てみたが、粘度計の販売価格はどれも高額であった。このことから実際に使われている粘度計には高度な技術が使われていると考えられる。

そこで高校生の知識で粘度計を開発してみようと思い立った。実際に使われているものを参考にして、いくつかの手法を試してみることにした。

Ⅰ　バイオディーゼル燃料の作成

予備実験

はじめに、パーマカルチャー研究所[(1)]というインターネットサイトで紹介されていた方法を参考に、バイオディーゼルを作成した。[(2)]

部員３名（平松、田中、桑野）の家庭から持ち寄った廃油をキッチンペーパーでろ過し、メタノールと水酸化ナトリウムと共に 55 ℃で 30 分攪拌し、バイオディーゼルを作成した。この時の分量は、廃油
150 mL、メタノール 30 mL、 水酸化ナトリウム 1.05 g とした。3～7 日静置し、バイオディーゼルと副生成物のグリセリンを分離した後、精製水で約 3 日おきに、計 3 回洗浄を行った。

この実験の結果として、グリセリン層が多く、得られたバイオディーゼルの量が少なかった。そこで、より多くのバイオディーゼルを回収できる方法を模索することにした。

バイオディーゼルの作成に関して、次の３つの実験を行った。

【実験Ⅰ-1　最適撹拌時間の検討】

撹拌時間を 15 分、30 分と変え、原料の分量は予備実験の条件にそろえ、対照実験を行った。

【実験Ⅰ-2　原料の比率の検討】

表１に示した分量で調整したものを 55 ℃で 30 分攪拌した。
廃油は、学校の食堂から提供していただいたものを使用した。

表１　各原料の分量

	メタノール（g）	水酸化ナトリウム（g）	廃油（サラダ油）（g）
条件１	2.56	0.30	26.0
条件２	5.12	0.30	26.0
条件３	2.56	0.20	26.0
条件４	2.56	0.40	26.0

【実験Ⅰ-3　分離方法の模索】

洗浄の過程で、バイオディーゼル層と洗浄後の精製水との間に白く濁った層が見られた。この層によって、回収できるバイオディーゼルの量が減ってしまった。私たちは、この層をセッケン層であると仮説を立て、遠心分離器を用いてこれらを分ける操作を行った。

表２　各原料の分量

	メタノール（g）	水酸化ナトリウム（g）	廃油（サラダ油）（g）
条件①	5.123	0.297	26.01
条件②	5.119	0.272	26.01
条件③	5.128	0.291	26.00
条件④	5.128	0.328	26.00

【実験Ⅰ-1 結果】

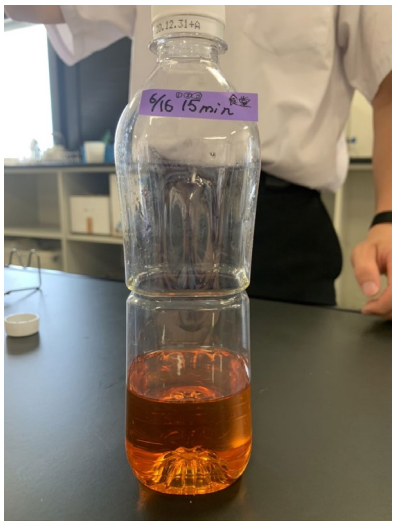


写真１　攪拌時間 15 分の生成物

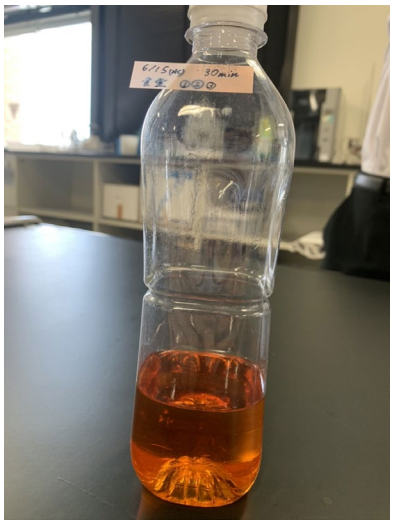


写真２　攪拌時間 30 分の生成物

写真１、２の通り、撹拌時間は得られるバイオディーゼル燃料の量にそれほど大きく影響しなかった。

【実験Ⅰ－２結果】

左から、条件①、条件②、条件③、条件④である。目的であるディーゼル層は、条件②のものにみられるような透明なものであるため、他の三つの条件では分離が難しいように見える。

実験の結果、廃油と水酸化ナトリウムの量を予備実験から変えず、メタノールの量を 2.56 mL から 2 倍にした 5.12 mL にしたものが、グリセリン層が少なく、多くのバイオディーゼルを得ることができた。また、廃油とメタノールの量を変えず、水酸化ナトリウムの量を初めの約 1.3 倍にしたところ、多

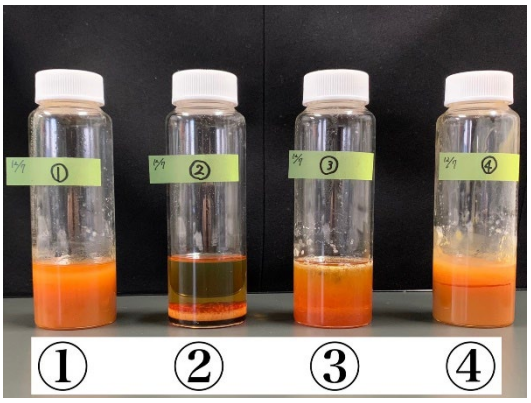


写真３　実験Ⅰ-2 における生成物

くのグリセリン層ができてしまい、ほとんどバイオディーゼルを得ることができなかった。よって、実験２の条件②の分量比が一番効率の良い分量であると考えた。

【実験Ⅰ－３結果】

精製水を加えなかった方は、写真にみられるように変化が見られなかった。また、精製水を加えた方も、静置して水とディーゼル層、石鹸と思われる層の分離の様子と比べて変化が見られなかった。

石鹸層であるという仮説の他に、白い層について、油の成分の一部が低温によって固まってしまったという仮説も立てられた。この実験は寒い時期に行ったため、精製水の水温が低く、油の成分の一部が固まったと考えられる。

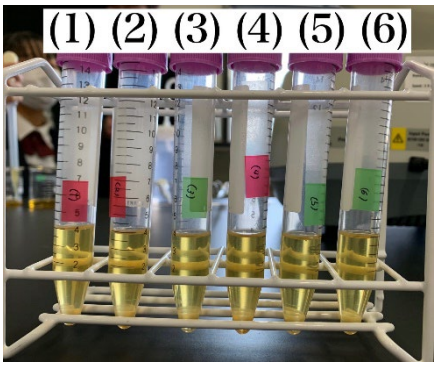


写真４　水を加えずに遠心分離を行った場合
(1)、(2)、(4)は条件１(3)、(5)、(6)は条件３

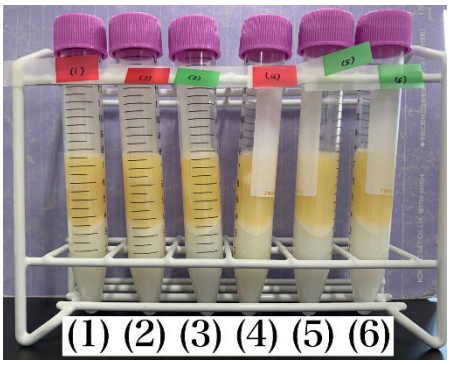


写真５　水を加えて遠心分離を行った場合
(1)、(2)、(3)は条件１(4)、(5)、(6)は条件３

Ⅱ　作成したバイオディーゼル燃料の粘度測定

【実験Ⅱ－１ペットアングルを用いた粘度の測定】

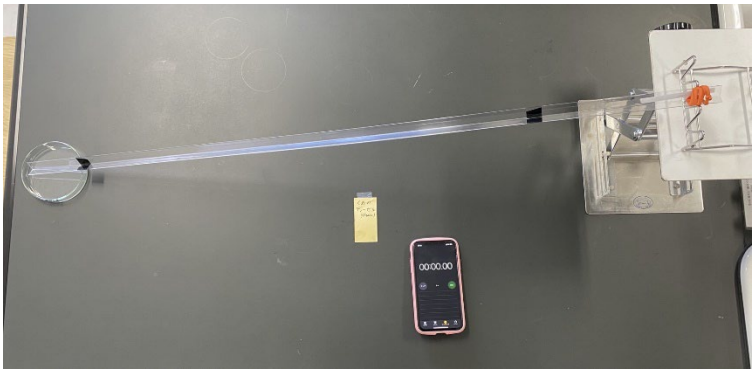


図１　計測の様子

ペットアングル（プラスチック製の板が直角に貼り合わさったもの）に試料を滴下する点、計測開始の点、計測終了の点に三つの印をつけた。それを調節台の上に乗せ、一定の角度に調節し、試料を3.0 mLずつ滴下する点に流した。流れる様子をスマートフォンのタイマー機能とともに撮影し、計測開始の点に達し

た時間から滑落時間を算出し、粘度を逆算した。（図１）また、測定回ごとの滴下速度をなるべく揃えるために、同じ人が実験を行った。

【実験Ⅱ－２“とろみ”※を用いた粘度の測定方法[3]　】

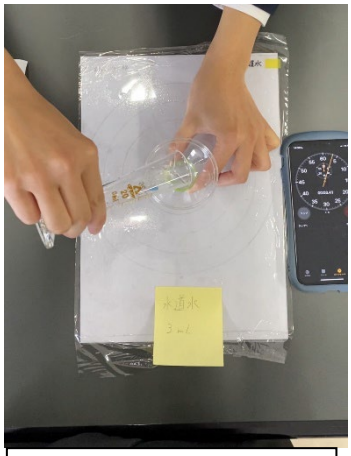


図２　測定の様子

※Line Spread Test と呼ばれる溶液のとろみの程度を測定する方法

紙に 2 cm 間隔で円を描き、紙を机に貼ってその上に透明な下敷きを敷いた。上からサランラップを気泡が入らないように貼り付け、ペットボトルの下部を切り取ったものを、円の中心に飲み口を下にし、キャップを外した状態で置いた。試料を 3.0 mL 計り、下部を切り取ったペットボトルの中に入れた。ペットボトルを垂直に上に持ち上げ、広がる様子をタイマーと一緒に録画し、測定した。（図２）試料を注いでいる様子水面の振動によって結果が変わるのを防ぐために、注いでから広げるまでに 15 秒時間を置いた。

【実験Ⅱ－３アクリルパイプを用いた粘度の測定方法[4]】

図３　測定の様子

半径 22 mm、長さ 100 cm のアクリルパイプの上から 21.5 cm、81.5 cm の位置に印をつけた（測定開始の印と測定終了の印）。アクリルパイプの先端にゴム栓をし、ゴム栓側が下になるようにアクリルパイプを固定した。ゴム栓と反対側から試料をアクリルパイプのふちまで注ぎ、鉄球を試料の液面から落とした。鉄球を落としている様子をタイマーと一緒にスローモーションで動画を取り、測定区間の落下時間を測定した。（図３）

アクリルパイプと地面が垂直であることを担保するために、ホワイトボードの柱に括り付けた。

【実験Ⅱ－１結果】

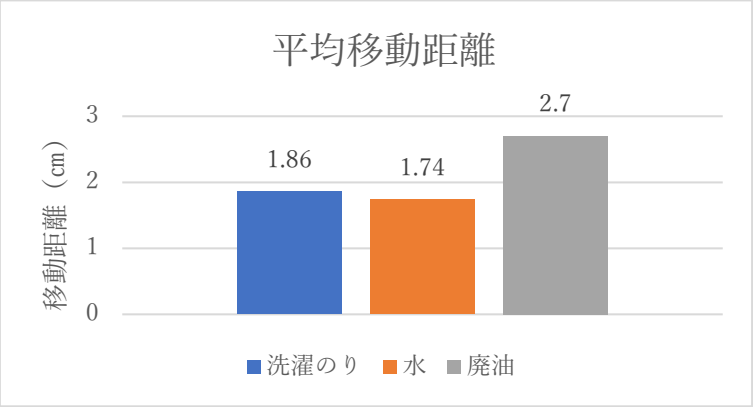
試料ごとの平均滑落時間

	洗濯のり	水	廃油
平均時間(s)	293.49	1.02	73.42

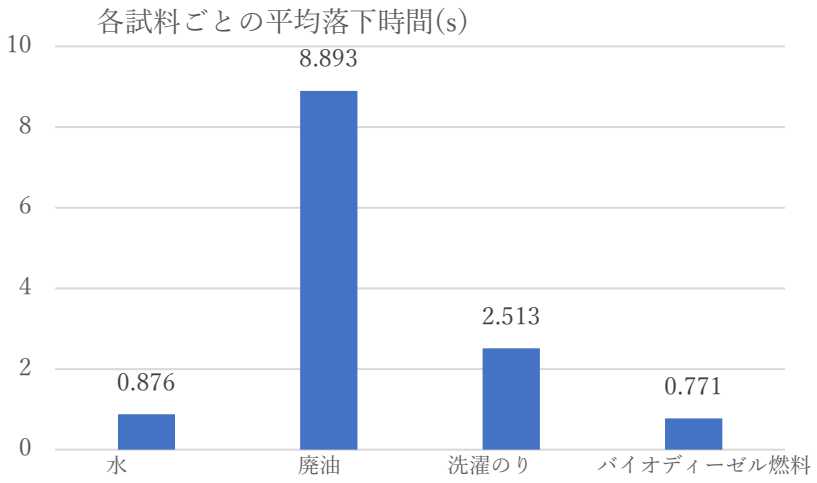
【実験Ⅱ－２結果】

試料ごとの移動距離

回数	１回目	２回目	３回目	４回目	５回目	平均
洗濯のり(cm)	1.3	1.9	2.0	2.1	2.0	1.86
水(cm)	2.0	1.9	0.8	2.0	2.0	1.74
廃油(cm)	2.3	2.8	2.5	3.0	2.9	2.70



【実験Ⅱ－３結果】



考察

実験Ⅱ－１では測定する試料が壁面に付着して残ってしまった。測定では、測定回数ごとの誤差を小さくするために、あらかじめ試料を流し、それを測定ごとに行うのと同様にキッチンペーパーでふき取りペットアングル面の状態をそろえる工夫を行った。しかし、粘度に

よって流れの先頭と最後尾の距離や広がり方に差が生まれ、測定の終点での試料の量が変わってしまった可能性が考えられる。そのため液体の粘度が滑落時間に一次関数的に影響を与えるだけでなく、粘度に依存する広がり方も滑落時間に影響を与えてしまっているので、想定していた測定値が得られないことが分かった。改善策としては、滑落時間の測定だけではなく、一定量が終点で集まる時間を同時に測定し、二つの数値を関連付けて粘度を割り出す方法が挙げられる。あるいは、斜面として用いる器具の表面の摩擦を減らし、試料の吸着を防ぎ、試料の量を極端に減らすことで分布の差という課題を解決することができると考える。

実験Ⅱ－２では、同心円状にすることで一回の測定で精度の高いデータを集めることができると考えたが、粘度の違いによる距離の差が四方に分散してしまい、値が小さくなったので、測定することができなかった。また、ペットボトルを持ち上げる際に、ペットボトルの表面に残った試料の一滴が広がっている試料の軌跡に影響を与える場面が見られたことも課題としてあげられる。しかし、斜面に資料を流す方法と違い、試料の静粘度（試料が動いていないときの粘度）を測ることができるのみならず、空気抵抗の影響が極めて小さいことや、測定装置に残る試料の影響を無視できる点で画期的な方法であると考える。

実験Ⅱ－３は、Ⅱ－１、２で課題として挙げられた試料残留問題や、人の手による誤差を小さくすることができた測定方法だといえる。試行錯誤の段階で、それまであらかじめ決めた線まで試料を満たし、鉄球を落としていたが、気泡が発生し、粘度以外の要素が数値に影響していた。そのときいただいた「パイプ上端まで試料で満たせばよいのではないか」というアドバイスをもとに、測定方法を変更し、気泡の発生をなくすことができた。ただし、落球式はほかの方法よりも圧倒的に必要な試料の量が多い。しかし誤差を減らすために複数回測定する場合、測定間の洗浄の　作業を必要としないため、時間コストを削減することができる。また、バイオディーゼル燃料のような下水道への排出が環境に与える影響が大きい試料に関しては、洗浄の操作がないことは大きなメリットであると考える。また必要な試料の量は測定スケールを変更することで改善できると考える。

今後の展望

今回はバイオディーゼル燃料の作成にメタノールを使った。アルコールを使用するにあたってコスト面で優れているメタノールは、安全性の面で、同等の役割を果たすエタノールに劣っている。

今後、反応の効率を上げていくためには反応条件の探索だけでなく、実験スケールの拡大も行っていくべきだと考える。この場合、安全の確保のための温度管理を温度計による調節から与える熱の量を一定にする方法に変えていきたい。そうすることで温度計が不要になり反応系を密閉することができるため、メタノールの揮発を防止することができる。エタノールのコストが課題になっているのは薬品として購入するからであるため、安価な自給システムを構築できれば安全で経済的にも価値のあるものになると考える。例えば、廃紙を反

応物として触媒にセルラーゼを用いることでエタノールを生成させることができたら、より持続可能な燃料生成が可能となる。

粘度測定については小スケール化を目指したい。測定ごとの再現度の点において、実験Ⅱ－３の方法が最も適していると考える。しかし、本研究で行った方法では多量の試料が必要となるので、改善が必須である。スケールを小さくするために落球距離を短くすると、必然的に落球時間が短くなると思われる。データの処理の観点から測定時間は長いほうが精度の担保に有利なので、通過させる物体の形状や筒の太さを改善してスケールダウンと測定精度を両立したい。

“とろみ”式測定法は試料の広がる方向を制限することでより精度の高い数値を得られるのではないかと考える。例えば、1 mL あたりの広がる面積が等しいと仮定したとき、広がる方向を 30° に制限すると、3.5 倍の半径になるため、粘度の差が小さくても検出することができると考える。

参考文献

バイオディーゼルの作り方｜パーマカルチャー研究所
https://permaculture-lab.com/2018/05/04/biodiesel1/
(2)バイオディーゼル燃料の製造について － 長崎県
https://www.pref.nagasaki.jp > uploads > 2013/03
(3)「サラヤ簡単とろみ測定板スタートキット」測定方法
https://www.youtube.com/watch?v=9adV61YoFjg
(4)落球式高圧粘度計の試作と性能評価
https://www.jstage.jst.go.jp/article/sicetr1965/28/9/28_9_1023/_pdf

高校生が考える添加物

～各お茶におけるビタミンＣの含有量の違い～

理数コース３年　明石友花　大西智輝　鮫島輝吉　鳴瀬茉依

研究要旨

近年、豊富な種類を持つ食品添加物に着目すると、多くの人々が聞きなじみのない物質名が並んでいる。食品添加物の危険性を主張する記事を目にすることも多くあり、消費者の不安感を強めている。その不安感を払拭するために、身近にあり心配をせずに使用することの出来る食品を添加物の代用品として使用できないかという観点から、緑茶、紅茶、烏龍茶、麦茶の４種類のお茶におけるアスコルビン酸の含有量をヨウ素滴定によって定量した。その結果、最も多くのアスコルビン酸を含んでいるお茶は紅茶であることが分かった。しかし、参考文献によると紅茶にはアスコルビン酸がほとんど含まれていないと表記されており実験結果と異なった。他にも変化が小さくデータが取ることのできないお茶もあった。これより市販の茶葉にはすでに、酸化防止剤が含まれていたり、お茶の抽出温度によって結果が変化したりする可能性があると考えた。今後はお茶の抽出温度についても加味した検討が望まれる。

問題提起

現在、厚生労働省が認めている添加物は、指定添加物(約 466 品目)・既存添加物(約 357 品目)・天然香料(約 600 品目)・一般飲食添加物(約 100 品目)・の合計約 1523 品目とされている(2020 年 6 月 18 日時点)。また、添加物は人体に有害であるといった認識の根拠としてよく槍玉に挙げられている亜硝酸ナトリウムは、指定添加物に含まれる。亜硝酸ナトリウムは成人男性を約 2g で死に至らせる猛毒ではあるが、ADI 0.06[mg/kg 体重/日]の規定内でハムやソーセージに発色剤として添加されている。以上のことから規定内で添加されているとはいえ、ハムやソーセージを食べ続けたら死に至ると考える人が一定数存在する。しかし、亜硝酸ナトリウムは岩塩にも多く含まれることから岩塩で肉を保存することと、亜硝酸ナトリウムを肉に添加することは同じではないかと考えた。そこで我々は、人為的に生成された物質を添加することに対して不安感を抱かれるのであれば、普段口にしているもののなかで添加物と同じ効果を得るものがあれば、それを代用すれば余計な心配をさせずに安心して食事ができるのではないかと考えた。本来であれば亜硝酸ナトリウムを用いて実験するべきなのだが、取り扱いの観点から断念した。そこで、同じ指定添加物に分類され、比較的安全に取り扱うことが可能なアスコルビン酸に注目した。アスコルビン酸は防酸化剤として清涼飲料水などによく添加されている。そのうち、お茶は添加前からアスコルビン酸が含まれている。よって、お茶を防酸化剤として、アスコルビン酸の代用品として活用できないかと考えた。まず、大まかなお茶に含まれるアスコルビン酸の効

力を調べるため予備実験①、②（下記）を行った。お茶に含まれるアスコルビン酸の量を定量し、効率やコストの面から考えてお茶に含まれるアスコルビン酸を防酸化剤として利用可能か否かを検証した。また効率的にアスコルビン酸を防酸化剤として利用するために最も多くのアスコルビン酸を含むお茶を調べる必要があった。お茶の種類は、発酵の度合いや、茶葉の種類によって決まる。そこで、発酵の度合いとアスコルビン酸の含有量の関係性、並びに茶葉の種類と含有量の関係性について明らかにするために、緑茶、紅茶、烏龍茶、麦茶の計４種類のお茶を茶葉から抽出し、酸化還元滴定によってアスコルビン酸の定量実験を試みた。

予備実験①

身近な食品であるブロッコリー、レモン汁、緑茶（市販）、オキシドールの還元力を比較するために実験を行った。

① 試験管に蒸留水 10ml、ヨウ素ヨウ化カリウム溶液 10 滴を入れたものを用意する。
② ブロッコリー（ビタミン C を含む野菜のため）をすりつぶして、水 10ml を入れ、コーヒーフィルターでろ過する。
③ ①で用意した試験管に②のろ過水、レモン汁、緑茶（市販）、オキシドールをそれぞれ 1ml ずついれる。
④ 同じ資料を用いて試験管に水 10ml、ヨウ素ヨウ化カリウム溶液２滴入れたもので実験する。

予備実験①結果

水 10ml ヨウ素ヨウ化カリウム溶液 10ml の場合

ブロッコリーのろ過水	変化なし
レモン汁	変化なし
緑茶（市販）	透明に変化
オキシドール	変化なし

水 10ml ヨウ素ヨウ化カリウム溶液２滴の場合

ブロッコリーのろ過水	透明に変化
レモン汁	透明に変化
緑茶（市販）	透明に変化
オキシドール	透明に変化

上記の結果から緑茶（市販）の還元力が最も大きいことが分かった。特にブロッコリー、レモン汁、緑茶（市販）にはビタミン C が含まれており、ビタミン C は酸化防止

剤としても利用されるため、還元力の強さにはビタミン C の含有量が関係しているのではないかと考えた。

予備実験②

① 2cm 角のリンゴをシャーレに入れたものを 4 個用意する。
② ビタミン C の粉末を用いて 0%、5%、10%、15%のビタミン C 水溶液を 10ml ずつ用意する。
③ ②の水溶液をリンゴに 5ml ずつかける。
④ 24 時間後に変化を確認する。

予備実験②結果

0%	茶色に変色
5%	茶色に変色
10%	変化なし
15%	変化なし

上記の結果から酸化しやすい食品にビタミン C を添加することで食品の酸化を防げることがわかった。また、ビタミン C の濃度が大きいほど酸化防止剤としての効果を発揮することがわかった。

実験方法

$C_6H_8O_6 + I_2 \rightarrow C_6H_6O_6 + 2I^- + 2H^+$

上記の化学反応式は実験で用いた反応を示す。

お茶に含まれるアスコルビン酸の定量にはアスコルビン酸を還元剤、ヨウ素を酸化剤とする酸化還元反応を用いた。アスコルビン酸は大変酸化されやすい物質であり、酸化するとデヒドロアスコルビン酸となる。一方、ヨウ素は還元するとヨウ化物イオンとなる。ヨウ素はデンプンと反応して青紫色を示すため、指示薬としてヨウ素ヨウ化カリウム水溶液にデンプン溶液を加える。全てのヨウ素がアスコルビン酸に還元され、ヨウ化物イオンになると青紫色が消える。この点を終点とする。濃度、体積が既にわかっているヨウ素ヨウ化カリウム水溶液に濃度未知のアスコルビン酸を滴下し、滴下量からお茶に含まれるアスコルビン酸の定量を行った。お茶にデンプン溶液を加えたものにヨウ素ヨウ化カリウム水溶液を滴下し、青紫色に変化した点を終点としたところ色の変化を判別しにくかったため上記の方法で実験を行った。

① ヨウ素ヨウ化カリウム溶液の調整

ビーカーとガラス棒を使い、ヨウ素 0.035 g とヨウ化カリウム 0.200 g を 5ml～10ml のエタノールと 5ml～10ml の蒸留水に溶かした。500ml のメスフラスコにこの溶液を

入れた。試薬を取り残さないために、蒸留水でビーカー内やガラス棒に付着した溶液をとり、メスフラスコに入れるという動作を 3、4 回繰り返した。これらの溶液が 500ml になるように蒸留水を入れて希釈した。

② チオ硫酸ナトリウム溶液の調整

チオ硫酸ナトリウム 0.496 g をビーカーとガラス棒を用いて蒸留水に溶かした。この溶液を 250ml のメスフラスコに入れた。蒸留水でビーカー内やガラス棒に付着した溶液をとり、メスフラスコに入れるという動作を 3、4 回繰り返した。これらの溶液が 250ml になるように蒸留水を入れて希釈した。このチオ硫酸ナトリウム水溶液の濃度は、 8.0×10^{-3}mol/L であった。

③ デンプン溶液

1%のデンプン溶液を調整するために粉末の水溶性デンプン 0.5 g を蒸留水 49.5 g に入れた。スターラーを使い、これを 70℃～80℃に加熱してデンプンを透明になるまで溶かした。

④ ヨウ素ヨウ化カリウム溶液の滴定

調整したヨウ素ヨウ化カリウム溶液をホールピペットで 10ml 量りとり、コニカルビーカーに入れた。これにデンプン溶液を 5 滴入れた。これを 10 個用意した。調整したチオ硫酸ナトリウム水溶液をビュレットに入れ、用意したヨウ素ヨウ化カリウム溶液に滴下した。終点は溶液が青紫色から無色透明に変化した点とした。終点と始点の差を読み、滴下量を求めた。表⑴参照

⑤ お茶の抽出

電子天秤にビーカーをのせ、蒸留水を 200g 量りとった。蒸留水が 80℃になるまで熱した。これに 2.0g のお茶の葉を入れ、ガラス棒で 10 回かきまぜたものに蓋をかぶせて、2 分間蒸らした。その後、網を使いお茶を抽出した溶液とお茶の葉をわけた。ビュレットの目盛りは液体の温度が 20℃の時の体積を表すので、この溶液が 20℃になるまで冷ました。

⑥ お茶の滴定

調整したヨウ素ヨウ化カリウム溶液をホールピペットで 10ml 量りとり、コニカルビーカーに入れた。これにデンプン溶液を 5 滴入れた。これと同じものを 10 個用意した。

ビュレットに試料のお茶をろ過しながら入れて、用意したヨウ化カリウム溶液に滴下した。終点はすべてのヨウ素がアスコルビン酸と反応しヨウ化物イオンとなり、ヨウ素

デンプン反応による青紫色が消えた点とした。終点と始点を読み、その差を滴下量とし記録した。

結果

溶液のモル濃度を Cmol/L とすると、

$4.32\times10^{-4}\text{mol/L}\times\frac{10}{1000}=\text{Cmol/L}\times\frac{V}{1000}$

① 緑茶

表⑵参照

V=0.73 より　　$C=5.92\times10^{-3}$ (mol/L)

② 紅茶

表⑶参照

V=0.82 より　　$C=5.26\times10^{-3}$ (mol/L)

③ 烏龍茶

表⑷参照

V＝0.66 より　　$C=6.54\times10^{-3}$(mol/L)

④ 麦茶

色の変化があまり見られず、終点の確認ができなかったためデータを得ることができなかった。

アスコルビン酸の含有量は紅茶が最も多く、烏龍茶が最も少ないことが分かった。麦茶は抽出液の色がデンプン溶液と似ており、また、お茶を滴下した時、コニカルビーカー内の溶液の色の変化が小さかったため正確なデータを得ることができなかった。茶葉に含まれている酵素が完全に発酵した後に作るお茶のことを発酵茶といい、紅茶は発酵茶に当たる。逆に収穫後に蒸したり天日で干したりして熱を加え、酵素を不活性化して発酵せずに作ったお茶は不発酵茶であり、煎茶や玉露、抹茶などがある。半発酵茶は酵素による発酵を途中で止めて作られたお茶のことを言い、代表として烏龍茶があげられる。発酵の度合いが大きいほどアスコルビン酸の含有量は減少すると考えていたためアスコルビン酸は緑茶に最も多く含まれ、紅茶にはほとんど含まれないと仮説を立てていたが、結果からはそれらに比例関係がないことがわかった。また、市販緑茶飲料のアスコルビン酸濃度が約10～40mg/100g 程度とされているのに対し、実験で抽出したお茶はおよそ3.18×10^{-5}(mol/L)という結果になり、すべてのお茶に含まれるアスコルビン酸濃度がそれを大幅に下回った。

考察

参考文献によると、アスコルビン酸は、発酵と共に失われ、発酵茶である紅茶には、アスコルビン酸は含まれていないと記載されており、実験結果と異なっていた。このように文献と実験結果が異なっていたのは、市販の茶葉には、すでに酸化防止剤が含まれている可能性があるということや、試料の中にヨウ素と反応する物質がアスコルビン酸以外にも含まれている可能性があるということなど、使用した茶葉に元々含まれる成分に関する問題が挙げられる。また、茶葉の種類によって最適温度が異なるのに加え、抽出温度によってアスコルビン酸を熱から保護する働きを持つカテキンの溶解率が変化することを考慮していなかったことや、滴定の際にお茶にすでに色がついていることから、終点を判断しにくく、曖昧になったことなどの実験操作における過誤などが、問題として挙げられるのではないかと考える。一方で、参考文献によると麦茶はほかの三つのお茶と茶葉が異なることから対照実験ではないので適切な実験方法とは言えず、データもうまく取ることができなかったのではないかと考えた。また、市販緑茶飲料のアスコルビン酸濃度が約 10～40mg/100g 程度であるのに対し、すべてのお茶に含まれるアスコルビン酸濃度がそれを大幅に下回ったことから、抽出したお茶では、防酸化剤としての効果を期待できかねると考えた。

展望として、今後より正確にお茶の種類によるアスコルビン酸の含有量の違いを明らかにするためには、まずは使用する茶葉に含まれる成分についてより詳細な情報を得る必要がある。その上で、アスコルビン酸の定量を行い、発酵度による違いを明らかにしたい。また、アスコルビン酸は体内で起こる動脈硬化や脳卒中、心筋梗塞など心臓血管系の病気のリスクを軽減する効果もあるといったデータが存在することから、酸化防止剤としての効果は期待できなくとも、身近なお茶に含まれる成分として別の分野での効果が期待できるのではないだろうか。

参考文献

厚生労働省-食品添加物
https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryou/shokuhin/syokuten/index.html
奈良県立教育研究所（2012）お茶に含まれるビタミン C の滴定
http://www.e-net.nara.jp/hs/nara/_resources/content/1501/20210204-093825.pdf
長野県教育情報ネットワーク（2007）ビタミン C の滴定
https://www.nagano-c.ed.jp/seiho/intro/risuka/kadaikenq/paper/2007/2007-07.pdf
清涼飲料水中のビタミン C についての研究
https://kozuosaka.jp/cmswpcontent/uploads/2018/03/c33fca43d037dc1df4b8dba748e7adbb.pdf

発酵茶及びその製造方法
https://patents.google.com/patent/JP2010510781A/ja
ビタミン｜お茶の成分と健康性｜お茶百科 (ocha.tv)
http://www.ocha.tv/components_and_health/benefits_greentea/vitamins/
アリエナイ理科ポータル
https://www.cl20.jp/portal/food-additive/

謝辞

本論文の作成にあたり、終始適切な助言と丁寧な指導をして下さった先生方に深く感謝します。また、研究にあたり、九州産業大学生命科学部生命科学科の金田弘挙教授、高杉美佳子准教授に多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

表

表(1)　ヨウ素ヨウ化カリウム溶液の滴定

	始点	終点	差
1	1.56	2.20	0.64
2	2.20	2.77	0.57
3	2.77	3.33	0.56
4	3.33	3.80	0.47
5	3.80	4.39	0.59
6	4.39	4.93	0.54
7	4.93	5.58	0.65
8	5.58	6.00	0.42
9	6.00	6.49	0.49
10	6.49	6.98	0.49

平均値 0.54

表(2)　緑茶の滴下量

	始点	終点	差
1	1.40	2.09	0.69
2	2.09	2.90	0.81
3	2.90	3.90	1.00
4	3.90	4.55	0.65
5	4.55	5.28	0.73
6	5.28	5.94	0.66
7	5.94	6.72	0.78
8	6.72	7.40	0.68
9	7.40	8.13	0.73
10	8.13	8.70	0.57

平均値 0.73

表(3)　紅茶の滴下量

	始点	終点	差
1	1.50	2.20	0.70
2	2.20	2.93	0.73
3	2.93	3.81	0.88
4	3.81	4.60	0.79
5	4.60	5.40	0.80
6	5.40	6.30	0.90
7	6.30	7.10	0.80
8	7.10	7.90	0.80
9	7.90	8.86	0.96
10	8.86	9.70	0.84

平均値 0.82

表(4)　烏龍茶の滴下量

	始点	終点	差
1	4.00	4.60	0.60
2	4.60	5.22	0.62
3	5.22	5.81	0.59
4	5.81	6.49	0.68
5	6.49	7.12	0.63
6	7.12	8.80	0.68
7	8.80	9.52	0.72
8	9.52	10.22	0.70
9	10.22	10.90	0.68
10	10.90	11.59	0.69

平均値 0.66

本校における水道水の残留塩素量の変化

理数コース３年　大塚悠太　滝本瞳至

1、始めに

水道水には殺菌のために塩素が入っているが、汲み置きによりその量が低下することが知られている。2020 年 9 月に行った手洗いに関する事前実験で、水のみによる手洗いをするとより多くの種や数の細菌が検出された。そこで、水道水に着目して、校内の水道水の残留塩素濃度の変化について調べた。

2、実験方法

【事前実験 1】水道水の遊離残留塩素量の測定

水道水の遊離残留塩素の経時変化を測定した。

まず、DPD 試薬を用いた遊離残留塩素の測定を行うため、吸光度から測定波長 514nm を求めた。（図 1）

測定には、ラピッド DPD 試薬Ⅱ（図 2）を用いた。試料（水）10mL に一包を溶解し、1 分後に 514nm での吸光度を測定した。なお、1 分後に測定するために、高濃度さらし粉を用いた検量線の作成を行った。（図 3-5）

次に、水道水 150mL を 10℃、15℃、20℃、25℃、30℃、35℃に静置し、ラピッド DPD 試薬Ⅱを用いてそれぞれ 24、48、72 時間後の残留塩素量をそれぞれ求めた。（図 6,7）

【事前実験 2】細菌を殺菌できる塩素濃度

黄色ブドウ球菌と納豆菌に対する殺菌に有効な塩素濃度を求めた。

細菌 1 白金耳を滅菌水 10mL に入れて 30 秒振とうした菌液と、次亜塩素酸 Na 液（商品名ブリーチ）を滅菌水で各希釈倍率に希釈した液から各 0.5mL ずつを取り、マイクロチューブに入れて 30 秒振とうした。その後、振とうした菌液 20μL を CASO ブイヨン培地に塗り広げ、25℃で 48 時間培養した後、コロニー数を計測した。

また、黄色ブドウ球菌の殺菌に用いた希釈倍率での次亜塩素酸 Na 液に関しては、514nm での吸光度を測定した。

【事前実験 3】水道水の細菌数検査

2020 年 6 月から同年 12 月において、本校の生物実験室の水道水中の細菌数を調べた。月に一度水道水の水温を計測し、水道水 20μL を LB 培地に塗り広げ、25℃で 5 日程度培養した後、コロニー数を計測した。

【実験 1】本校 8 か所の水道水の残留塩素量の測定

水道水に含まれている残留塩素濃度に影響を及ぼす要因について調べた。

2020 年 4 月から同年 11 月までの 8 か月間、1 か月に一度、午後 3 時に校内 8 か所（図 16）の水道水で水温を計測し、検体を採取した。その後、これらの採取した水道水の 514nm での吸光度を測定し、残留塩素濃度を求めた。

【実験 2】重回帰分析

ラピッド DPD 試薬Ⅱによって発色させた水道水の吸光度（Abs）を目的変数、水道水水道水の水温（℃）、貯水槽からの距離（m）、水道の使用頻度（人/日）の 3 つを説明変数として、重回帰分析を行った。

また、実際に計測した説明変数の値を回帰式に代入することで、得られた予測上の吸光度の値（予測値）と実際の吸光度の値（実測値）の関係を調べた。

3、結果

【事前実験 1】

グラフ（図 8）より、水温が 20℃を超えると 24 時間で残留塩素量が 1/5 にまで減少した。また、水温が 10℃、15℃の場合でも、24 時間ごとに塩素が元の塩素量の 3/4 へと徐々に抜け、72 時間後ではほぼ 20℃24 時間と同程度まで減少した。

【事前実験 2】

・黄色ブドウ球菌

菌液 1mL 中 20900 個（対照）に対し、次亜塩素酸 Na 液（商品名 ブリーチ）により殺菌され、菌液 1mL あたり 1/160000 希釈では 100 個（0.4%）、1/200000 希釈では 7700 個（37%）へとコロニー数が減少した。

また、吸光度は 1/160000 希釈液では 0.169、1/200000 希釈液では 0.103 であった。（図 9,11）

・納豆菌

菌液 1mL 中 7.0×10^{7} 個（対照）に対し、菌液 1mL あたり 1/10 希釈では 0 個、1/20 希釈では 6.9×10^{3} 個（0.01%）へとコロニー数が減少した。（図 10,12）

【事前実験 3】

表（図 13）より、6 月から 9 月にかけては細菌が検出されたが、10 月から 12 月にかけては検出されなかった。（図 14,15）水温は福岡市の平均気温とほぼ同じように変化した。

【実験 1】

水温は、計 8 か所でほぼ同じような変化をした。1F の水道（G）はやや水温が低く、外付けの水道（H）は外気温の影響を大きく受けていた。（図 17）

吸光度は、場所・月ごとに全く違う値を取り、吸光度の値の変化が大きい地点（A）もあれば、一貫してずっと吸光度が低い値のままの地点（F）もあった。（図 18）

【実験 2】

重回帰分析の結果は（図 22)、回帰式は（図 23）として示している。

R^2 値	0.248052
F 統計量の p 値	0.006141

	係数	標準誤差	p 値
切片	0.011088	0.014618	0.452266
頻度	5.18×10^{-5}	0.000014	0.000784
距離	-2.4×10^{-5}	0.000053	0.652933
水温	1.24×10^{-5}	0.000564	0.982521

図 22　重回帰分析の結果

吸光度（Abs）　＝　5.18×10^{-5}×水道の使用頻度（人/日）　＋
-2.4×10^{-5}×貯水槽からの距離（m）　＋
1.24×10^{-5}×水温（℃）　＋　0.011088

図 23　吸光度を予測する回帰式

残差(実測値 - 予測値)の値は、予測値が大きくなるにつれて大きくなっていった。(図 24,25)

4、考察

【事前実験 1】

水温が 20℃を超えると一日で塩素が多く抜けてしまうことから、水温が 20℃を超える 6～10 月の水道水は殺菌が十分に行われていない可能性が考えられる。また、低温でも 3 日経つと同様に塩素が抜けてしまうことから、使用頻度の低い水道場の水は、滞留することによって塩素が抜けてしまう可能性が考えられる。

また、3 月 16 日に一般家庭の塩素濃度を調べてみたところ（8:00 水道水採取 → 10:00 測定)、吸光度が約 0.08~0.10 となったため、本校の水道水は一般家庭よりも塩素濃度が低いことが問題点として挙げられる。

【事前実験 2】

黄色ブドウ球菌は、殺菌には 1/200000 希釈、滅菌には 1/40000 希釈のブリーチ液が必要であると考えられる。同様に、納豆菌は殺菌には 1/20 希釈、滅菌には 1/10 希釈のブリーチ液が必要であると考えられる。

また、ブリーチ 1/200000 希釈液の吸光度が 0.103 であったが、実験 1 の（図 8）より、本校の 4 月の水道水の吸光度は 0 日目（汲みたて）でも約 0.05 しかないことが分かっている。

よって、家庭用水道水では十分な塩素濃度が保たれているが、本校の水道水の塩素濃度で

は黄色ブドウ球菌を殺菌できないため、水道水中に細菌がいた可能性が考えられる。

【事前実験 3】

夏季に多くの細菌が検出されたことから、水道水中の細菌数は水温（気温）に影響を受けることが考えられる。また、10 月以降に菌が検出されなかった理由として、今回の実験では 15:00 の水温を計測したが、平均気温から考えて、10 月以降は夜間が冷え込んでいたために水温が下がり、菌が増殖しにくい環境にあったためであると考えられる。

【実験 1】

実験 3 より、水温と吸光度については負の相関があると考えていたが、相関係数は 0.077 となり相関は見られなかった。（図 19）

そこで、貯水槽からの距離についても考え、貯水槽から遠い箇所ほど吸光度が低くなると予想したが、相関係数は-0.108 となり相関は見られなかった。（図 20,21）

ここで、校内 8 箇所の月別吸光度変化のグラフ（図 18）について見てみると、

①5 月の A・C は吸光度が比較的高くなっているが、この時期は感染症対策のための手洗いが推奨されており使用頻度が高まっていたこと。

②7 月の H は唯一この月で高い吸光度の値を取っているが、この期間は夏休みであり、体育館の部活動生徒がここの水道をよく使っていたこと。

③7 月の A～H はどの地点でも吸光度の値が低いが、②と逆に、夏休み期間であるためにこれらの水道を使用する生徒がほとんどいなかったこと。

④E（物理実験室）、F（生物実験室）の水道は 1 年を通して吸光度が低いが、本校は新型コロナウイルスによる影響で実験授業の数が減っており、それによってこれらの水道もあまり使われていなかったこと。

これらのことが考えられる。よって、本校の水道水の吸光度は、その水道の使用頻度に影響されることが考えられる。

【実験 2】

回帰式について、R^2 値が 0.248 となっているため、回帰式の当てはまりはあまり良くないことが考えられる。しかし、F 統計量の p 値が 0.006 となっているため、頻度・距離・水温のうち、少なくとも一つの変数は吸光度に関係しているといえる。したがって、回帰式のデータへの当てはまりはよくはないが、作成した回帰式は意味がある（1%有意）。

また、説明変数について、水道の使用頻度に対する p 値が 0.01 よりも小さい値を取っているため、水道の使用頻度のみが目的変数（吸光度）に対して関係性がある（1%有意）と判断できる。

また、重回帰分析の結果より、水道の使用頻度が吸光度に影響を与える事が分かったが、この使用頻度はその水道の 1 日あたりの使用人数として換算している。この値は、校内 8 か

所において少ない箇所（5～30 人）、中程度の箇所（約 200 人）、多い箇所（約 400 人）の 3 つに分けられるため、回帰式より、図 24,25 において、使用頻度の値に最も影響を受ける吸光度の予測値は 3 つのグループに集まっているように見えたと考えられる。

5、課題

今後は、水道水中の塩素濃度に影響を与える変数の更なる検討、より精度の高い回帰式の作成などを行っていきたい。

6、参考文献

・長谷川武治（1990）『微生物の分類と同定』学会出版センター
・DATA VIZ LAB . “重回帰分析とは？概要から分析の流れまでわかりやすく解説”. https://data-viz-lab.com/multiple-regression-analysis , (参照 2022-06-20)

7、謝辞

回帰分析の研究を行うにあたり、終始懇切なご指導を頂きました、電気通信大学大学院情報理工学研究科准教授 川野秀一氏に心より感謝申し上げます。

nm	波長	490	510	512	514	516	600
%	透過率	94.0	72.9	72.0	71.6	71.8	99.0

図１　水道水で発色させた DPD 試薬の波長と透過率

図２ ラピッド DPD 試薬Ⅱ

図３　使用したさらし粉、薬品ビン

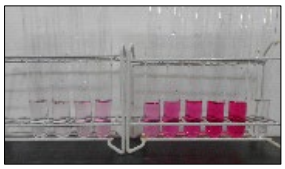


図４　DPD 発色の様子

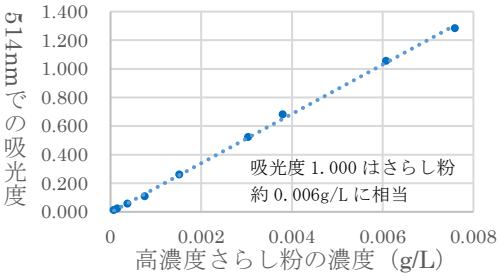


図５　検量線

図６　温度別の水道水

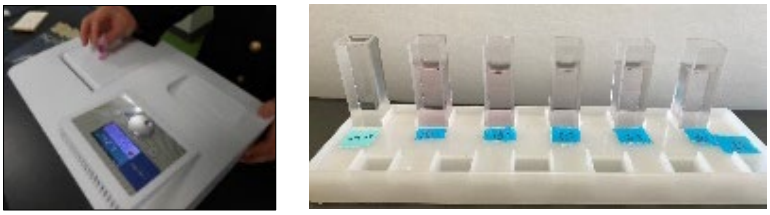


図７　吸光光度計での測定の様子

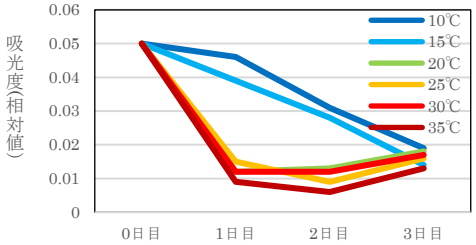


図８　１日ごとの温度別による吸光度の変化

塩素系漂白剤濃度	菌数（個/mL）
0 (control)	7.0×10^{7}
1/10 希釈	0
1/20 希釈	6.9×10^{3}

図 9　塩素濃度別の納豆菌数比較

塩素系漂白剤濃度	菌数（個/mL）	吸光度
0 (control)	20900	
1/160000 希釈	100	0.169
1/200000 希釈	7700	0.103

図 10　塩素濃度別の黄色ブドウ球菌数、吸光度比較

図 11 納豆菌　1/20 希釈

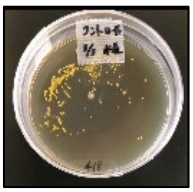


図 12 黄色ブドウ球菌 コントロール

	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
出現菌数（個）	4	2	4	11	0	0	0
水温（℃）	28.3	29.6	28.1	27.1	28.0	19.5	15.0
福岡市平均気温（℃）	24.2	28.9	27.5	25.9	21.0	13.9	9.1

図 13　月別の水道水の細菌数・水温と福岡市平均気温

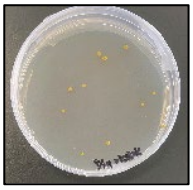
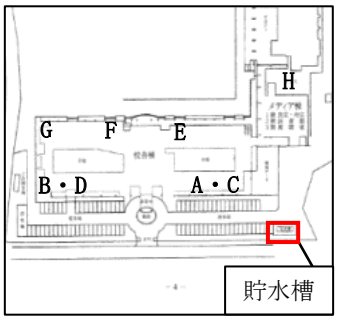


図 14　9 月

図 15　10 月



A トイレ(4F 東)
B 手洗い場(4F 西)
C トイレ(2F 東)
D 手洗い場(2F 西)
E 物理室(3F 東)
F 生物室(3F 西)
G (1F 西)
H (1F 外)
(※貯水槽は敷地東)

図 16　高校内敷地図

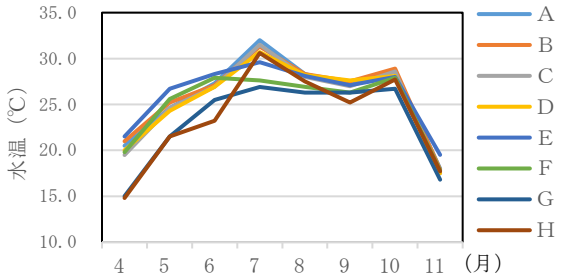


図 17 校内 8 か所の水温変化（4～11 月）

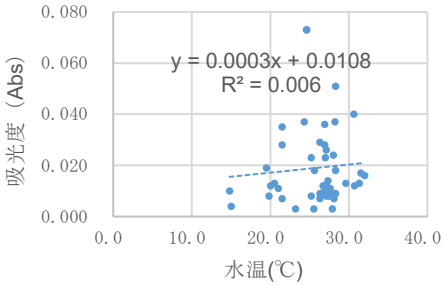


図 19 水温・吸光度の散布図

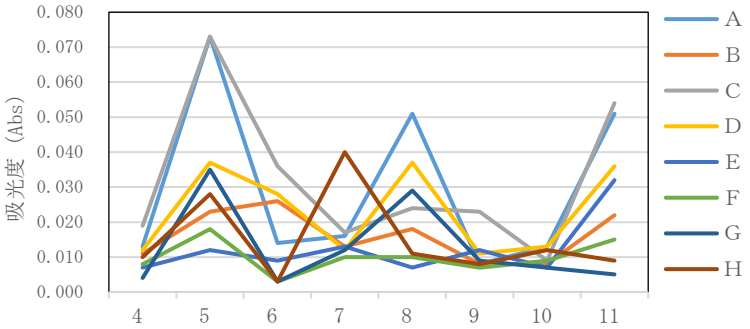


図 18　校内 8 か所の吸光度変化　（4～11 月）

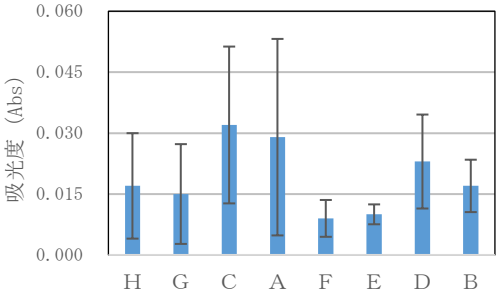


図 20 地点別の平均吸光度

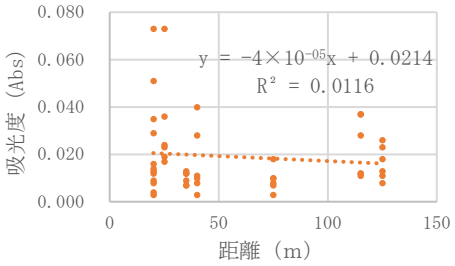


図 21 距離・吸光度の散布図

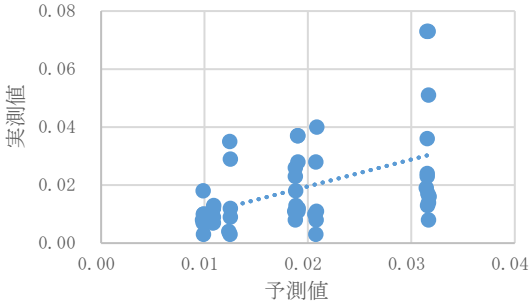


図 24 予測値に対する実測値

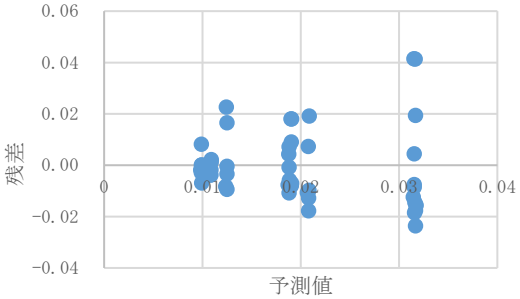


図 25 予測値に対する残差

ヒドラに適した飼育液　～K,Ca,Mg イオンに注目して～

理数コース３年　梅田義隆

1.要旨・概要

陽イオンに注目し、ヒドラ飼育に適した水溶液の種類と濃度を調査した。$MgSO_4$aq(0～1.5mM)６種、 $CaCl_2$aq(0～12.5mM)６種、KCl aq(0～0.2mM)６種の水溶液を用いてヒドラを飼育し、個体数を記録した。$CaCl_2$水溶液で飼育すると、どの濃度でも全体的に増殖した。しかし、$MgSO_4$水溶液と KCl 水溶液では減少し、餌を食べず個体が小さくなり触手の動きが見られなかった。同じく２価の陽イオンである Zn^{2+}水溶液(0～1000μM)5 種で観察したが、この場合は 24h 後に溶解または固定された状態になった。Zn^{2+}は Mg^{2+}と K^+とは異なる作用があると考えられる。

次に $CaCl_2$存在下で $MgSO_4$水溶液(0～1.5mM)６種、KCl 水溶液(0～0.2mM)６種の飼育液を用い個体数を記録した結果、$MgSO_4$や KCl 単体の水溶液で飼育した場合より増殖し、餌を食べる様子が見られた。

これらのことから Ca^{2+}はヒドラの触手の構造または運動を維持するのに必要な成分である可能性があると考えられる。

2.研究目的

刺胞動物であるヒドラは細胞レベル・組織レベルの知見が豊富であり、再生や形態形成の研究対象となっている。ヒドラは肉食で、口/肛門のまわりの触手にある刺細胞の刺胞という小器官で獲物を捕らえ、胃水管腔に押し込む。消化酵素が腔内に分泌されると獲物は栄養豊かなスープへと分解される。胃水管腔を裏打ちする細胞がこの栄養を吸収すると、消化は完了する。未消化物は口/肛門から吐き出される。本校では、6 年前に近隣の大学から普通ヒドラ(Hydra Vulgaris)を譲り受け、代々飼育して神経細胞の観察等に用いている。しかし、資料にある飼育適温では、あまり増殖が見られなかったため、温度や水質に注目して飼育条件を調べることにした。

3.実験

【事前実験】市販の６種のミネラルウォーター（コントレックス,OGEU,クールマイヨール,日田天領水,アルカリイオン水,富士バナジウム天然水）を用いてヒドラを約１か月飼育した。個体数を２日ごとに記録した。アルテミアを海水でふ化させたものを水道水で洗いそれをエサとして週５回与えた。エサを与えた後、5ｈ後水を替えた。飼育水は毎日入れ替えた。結果は、OGEU(Ca^{2+} 4.9、Mg^{2+} 1.2、K^+ 0.1(mg/100mL))で最も増殖した(図1)。

次に、12℃,15℃,18℃,21℃,24℃の５つの温度帯で約２週間飼育し２日ごとに個体数を記録した。エサの条件は前述の通りである。12～24℃においては、水温が高い(24℃)ほど

増殖した(図 2)。しかし、食べ残しの餌(アルテミア)または排泄物などにより水質が悪化するので、21℃が適していると考えられる。

また、$ZnSO_4$水溶液(0,1,10,100,1000μM)、$ZnNO_4$水溶液(0,1,10,100,1000μM)の中にヒドラを入れて様子を観察した。結果は、24h 後に溶解したり固定されたような状態になった。

【実験 1】各成分の最適濃度条件の調査

$MgSO_4$水溶液(0,0.1,0.5,1.0,1.5mM)６種、 $CaCl_2$水溶液(0,2.5,5.0,7.5,10,12.5mM)６種、KCl 水溶液(0,0.01,0.03,0.1,0.15,0.2mM)６種の水溶液を用い、約 2 週間 21℃で飼育し 2 日ごとに個体数を記録した。

【実験 2】Ca^{2+}存在下での最適条件の調査

$CaCl_2$(2.5mM)の存在下で$MgSO_4$水溶液(0,0.1,0.5,1.0,1.5mM)６種、KCl 水溶液(0,0.01,0.03,0.1,0.15,0.2mM)６種で約 2 週間飼育し 2 日ごとに個体数を記録した。

【実験 3】Zn^{2+}とCa^{2+}に対する反応の調査

ホールスライドガラスにヒドラを 1 匹入れ、ホール中の水溶液をろ紙を用いて飼育液から$ZnSO_4$水溶液(100μM)または$CaCl_2$水溶液(2.5mM)に置き換え、0 分後,5 分後,10 分後のヒドラの挙動を観察した。

【実験 4】各水溶液がアルテミア(ヒドラの餌)の挙動に与える影響の調査

$CaCl_2$水溶液(5mM),KCl 水溶液(5mM),$MgSO_4$水溶液(5mM),$ZnSO_4$水溶液(5mM)にアルテミアを入れ、アルテミアの遊泳の様子を撮影した。羽が上下するのを遊泳１回として定め(図 8)、30 秒間のアルテミアの遊泳回数を 3 個体でそれぞれ測定した。

【実験 5】各水溶液におけるヒドラの採餌行動の調査

$CaCl_2$水溶液(5mM),KCl 水溶液(5mM),$MgSO_4$水溶液(5mM),$ZnSO_4$水溶液(5mM)にヒドラを入れ、24ｈ静置し、ヒドラを水に慣れさせてからアルテミアをパスツールピペットで一滴垂らし入れ、摂食数と捕獲数を記録した。

4. 結果

【実験 1】各成分の最適濃度条件の調査

$MgSO_4$水溶液で飼育すると、ヒドラはあまり増殖傾向が見られなかった。また、餌(アルテミア)を摂食している様子が見られなかった。また KCl 水溶液では$MgSO_4$水溶液と同じようにあまり増殖傾向が見られず餌(アルテミア)を摂食している様子が見られなかった。しかし$CaCl_2$水溶液ではどの溶液でも増殖傾向が見られ、餌(アルテミア)を摂食している様子が見られた(図 3)。

【実験 2】Ca^{2+}存在下での最適条件の調査

Ca^{2+}条件下において、$MgSO_4$水溶液では増殖傾向が見られ、餌(アルテミア)を摂食している

様子も見られた(図 4)。KCl 水溶液では増殖傾向は見られなかったものの、餌を摂食している様子が見られた(図 5)。

【実験 3】Zn^{2+}と Ca^{2+}に対する反応の調査

表から、$ZnSO_4$水溶液では、5 分後、10 分後と経つうちにヒドラが縮む様子が確認された(図 6)。$CaCl_2$水溶液では、5 分後、10 分後と経つうちにヒドラが伸びる様子が確認された(図 7)。

【実験 4】各水溶液がアルテミア(ヒドラの餌)の挙動に与える影響の調査

$CaCl_2$水溶液では 106 回、KCl 水溶液では 124 回、$MgSO_4$水溶液では 119 回、$ZnSo_4$水溶液では 80 回であった(回/30 秒)(図 9)。

【実験 5】各水溶液におけるヒドラの採餌行動の調査

コントロールとした純水では 3 分の捕獲数 3.3 匹 摂食数 0 匹、５分の捕獲数 3.7 匹 摂食数０匹であった。$CaCl_2$水溶液では 3 分の捕獲数 7.7 匹 摂食数 2 匹、５分の捕獲数 8 匹 摂食数 3.3 匹であった。KCl 水溶液では 3 分の捕獲数 1.7 匹 摂食数 0 匹、５分の捕獲数 1.3 匹 摂食数０匹であった。$MgSo_4$水溶液では 3 分の捕獲数 0 匹 摂食数 0 匹、５分の捕獲数 1.7 匹 摂食数０匹であった。$ZnSo_4$水溶液では 3 分の捕獲数 0 匹 摂食数 0 匹、５分の捕獲数 0 匹 摂食数０匹であった(図 11)(図 12)。

5.考察

【実験 1】各成分の最適濃度条件の調査

Ca^{2+}はヒドラの増殖を促進する働きがある可能性がある。Mg^{+}と K^{+}はヒドラの増殖を抑制する働きがある可能性がある。

【実験 2】Ca^{2+}存在下での最適条件の調査

Ca^{2+}存在下で $MgSO_4$水溶液と KCl 水溶液はヒドラの増殖を抑制しなかったため、Ca^{2+}の働きは Mg^{+}と K^{+}の働きを抑制し、ヒドラの増殖を促進する可能性がある。また、Ca^{2+}はヒドラの摂食性を高める可能性がある。しかし、Mg^{+}と K^{+}は Ca^{2+}のヒドラの増殖を促進する働きを抑制する可能性もある。

【実験 3】Zn^{2+}と Ca^{2+}に対する反応の調査

$ZnSO_4$水溶液ではヒドラが縮んでいた様子が確認されたことから、Zn^{2+}はヒドラの運動を抑制する働きがある可能性がある。$CaCl_2$水溶液ではヒドラが伸びていた様子が確認されたことから、Ca^{2+}はヒドラの運動を促進する働きがある可能性がある。

【実験 4】各水溶液がアルテミア(ヒドラの餌)の挙動に与える影響の調査

コントロール、$MgSO_4$水溶液、KCl 水溶液、$CaCl_2$水溶液ではアルテミアの遊泳回数はあまり変わらなかったのにも関わらず、$ZnSo_4$水溶液ではアルテミアの遊泳回数は他と比べて減少していたことから、Zn^{2+}はアルテミアの遊泳運動を抑制する働きがある可能性がある。

【実験 5】各水溶液におけるヒドラの採餌行動の調査

$CaCl_2$水溶液では、ヒドラがコントロール、$MgSO_4$水溶液、KCl 水溶液、$ZnSO_4$水溶液とくらべ大いに摂食数・捕食数が伸びていることから、Ca^{2+}はヒドラの触手の遊泳運動又はヒドラの摂食作用に影響を与える可能性がある(図 10)。

6. 展望

OGEU と霧島の天然水との比較実験を行う必要がある。福岡市早良区の休耕田や、北九州市小倉南区のお糸池でヒドラの発見情報があったため、各地の水の成分を分析し、今回の実験の結果と比較する必要がある。

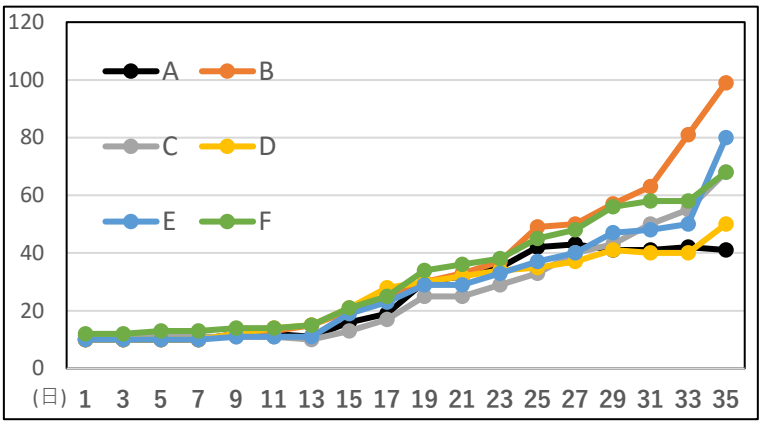
7. 参考文献

共立出版（2012）研究者が教える　動物飼育【第 1 巻】
～ゾウリムシ, ヒドラ, 貝, エビなど～

8. 謝辞

昨年、一昨年の 2 年間に亘って指導していただいた現生物部顧問の入江先生、藤谷先生に感謝申し上げます。

9. 図表



	A Cntrex	B OGEU	C COURMAY EUR	D 日田天領水	E アルカリイオン水	F 富士山のパナジウム天然水
Ca^{2+}	46.8	4.9	55.2	0.9	1.3	1
Mg^{2+}	7.45	1.2	6.4	0.2	0.64	0.35
K^{+}	0.28	0.1	0.26	0.9	0.16	0.12
Na^{+}	0.94	2.2	0.08	2.2	0.8	0.7
pH	7.4	7.8	7.4	8.3	9.1	8.4
硬度	1468	172	1640	32	59	29

図 1　水溶液別ヒドラの個体数変化と各成分表(mg/100mL)

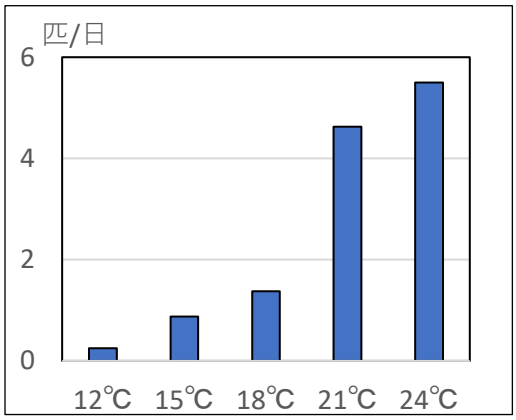


図２　7～15 日までの１日あたりの増殖数

Mg^{2+}	15日目	増殖度合い	2回目	増殖度合い
0mM	11	→	10	→
0.1mM	4	↘	4	↘
0.5mM	6	↘	10	→
1.0mM	5	↘	7	↘
1.5mM	2	↘	7	↘

Ca^{2+}	15日目	増殖度合い	2回目	増殖度合い
0mM	12	↗	9	↘
2.5mM	25	↗	12	↗
5.0mM	23	↗	18	↗
7.5mM	23	↗	11	→
10mM	18	↗	14	↗
12.5mM	18	↗	11	→

K^{+}	15日目	増殖度合い	2回目	増殖度合い
0mM	10	→	10	→
0.01mM	8	↘	0	↘
0.03mM	9	↘	3	↘
0.1mM	10	→	6	↘
0.15mM	8	↘	10	→
0.2mM	8	↘	10	→

図３各濃度別の増殖度合い

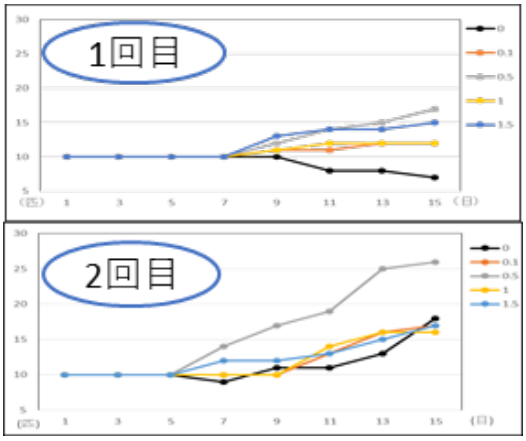


図４　Mg^{2+}＋Ca^{2+}濃度別の個体数変化

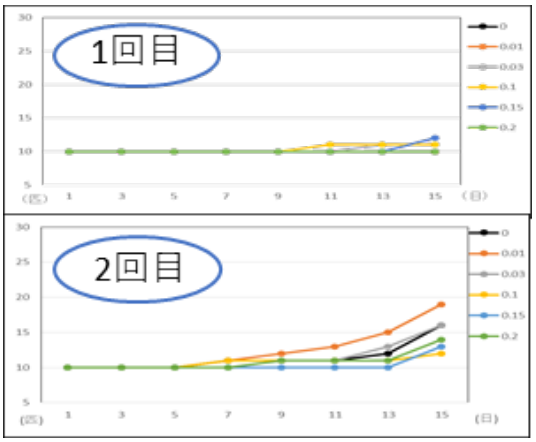


図５　K^{+}＋Ca^{2+}濃度別の個体数変化

図６　Zn^{2+}(100μM)

図７　Ca^{2+}(2.5mM)

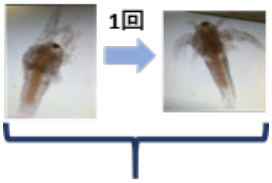


図８　アルテミアの遊泳基準

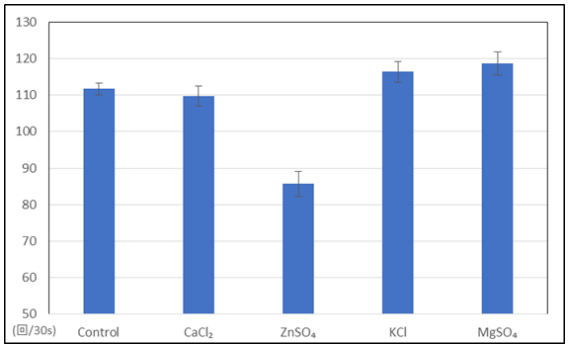


図９　アルテミア遊泳回数(回/30ｓ)

図 10 左が Control(5 分後)　右が $CaCl_2$(5 分後)

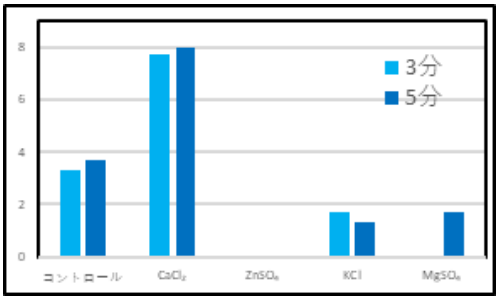


図 11 アルテミア捕獲数

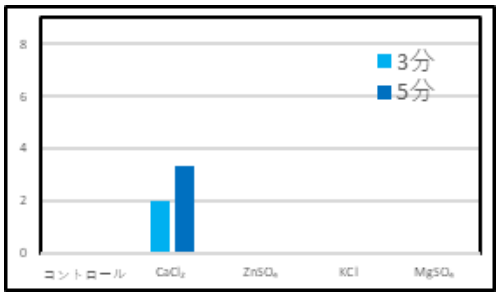


図 12 アルテミア摂食数

2021 年から 2022 年の福岡市の湿地帯環境と

そこに生息する生物種の調査

理数コース３年　亀井裕介　酒井耀

1, はじめに

福岡市は面積が 343 ㎢で 150 万人以上を有する九州最大の都市である。福岡平野に位置し、東は三郡山系、南に背振山系、北は博多湾や玄界灘に面している。2 つの干潟といくつかの島を有するなどと多様な自然環境が広がっている。昨年までの趣味としての活動を通して、福岡市に湿地帯生物がある程度生息していることを把握していたが、具体的にどんな種類の生物が生息しているか深く興味を持ったため、調査を行うことにした。

2, 調査方法

2021 年の 4 月から 2022 年 9 月にかけて福岡市内（那珂川市の那珂川流域も含む）の浅海を除く湿地帯環境を対象に調査を開始した。調査対象とした生物は、水鳥、汽水・淡水魚類、両生類、水生昆虫、淡水貝類、ベントス、水生植物である。鳥類はラムサール条約の水鳥の定義に従い、魚類は生活史の中で淡水域や汽水域を利用するものとし、水生昆虫は真正水生昆虫と半水生昆虫のみ、水生植物は沈水,浮遊,浮葉,注水植物を対象にした。調査手段は投網・たも網を用い、採集が規制されている種類や困難な種類は目視にとどめた。確認した生物は可能な限り画像として記録し、図鑑やインターネット、有識者への質問などにより種を同定した。なお、本稿で用いている希少種の定義は福岡県版レッドデータへの記載があるものとした。また、遺伝子解析を行えなかったので、ゼゼラなどの“在来分布するが、その多くは遺伝子的には外来種の可能性が高いもの”も在来種として扱った。

3, 結果

汽水,淡水魚類は 61 種、うち希少種 21 種、外来種 8 種を確認できた。
両生類は 13 種、うち希少種 8 種、外来種 1 種確認をできた。
水生昆虫は 127 種、うち希少種 17 種を確認できた。
淡水貝類は 22 種、うち希少種 11 種、外来種 5 種を確認できた。
ベントスは 51 種、うち希少種 14 種、外来種 4 種を確認できた。
水生植物は 56 種、うち希少種 18 種、外来種 16 種を確認できた。
水鳥は 28 種、うち希少種 9 種を確認できた。
合計すると福岡市の湿地帯では 358 種、うち希少種 98 種,外来種 34 種の湿地帯生物を確認できた。

4, 考察

①汽水,淡水魚類は河川や干潟において多く採集できた。源流にはサクラマス（IB 類)、上流にはアカザ（Ⅱ類)、中流にはオヤニラミ（準絶滅）やスナヤツメ南方種（IB 類)、下流にはゼゼラ（準絶滅)、河口や干潟ではマサゴハゼ（準絶滅）など、幅広い環境に多様な希少な魚類を確認できた。特筆すべき種としてはハカタスジシマドジョウである。ハカタスジシマドジョウは、和名にも学名にも“博多”という地名を冠し、分布も博多湾流入河川のみと非常に福岡市に縁のある魚であるが、氾濫原湿地の消滅などにより著しく数を減らしており、環境省,福岡県の RDB でともに絶滅危惧 IA 類に指定され、福岡県内でもトップクラスの希少な生物種である。今回の調査では博多湾流入河川下流部のワンド内の潜水調査にて 3 個体を目視することができた。

②両生類は主に水環境で多く採集できた。水田ではトノサマガエル（IB 類）やツチガエル（準絶滅)、ため池ではカスミサンショウウオ（Ⅱ類）やニホンヒキガエル（Ⅱ類）などの希少種が確認できた。特筆すべき種類としてはブチサンショウウオである。ブチサンショウウオは福岡県準絶滅危惧種のサンショウウオであり、山地の沢に生息する。他の流水性サンショウウオの例にもれず、水質がよく外来種の侵入が進んでいない良好な環境がなければ生きていけない種類である。今回の調査では脊振山系標高 850m ほどにある沢で幼体 8 匹を確認した。脊振山系には本種の生息を脅かす存在である特定外来生物アライグマが定着しているせいか、聞き取り調査で 50 年前に本種が生息していたという情報を得た 5 ヶ所の低標高の生息地では生息を確認できなかった。

③水生昆虫は純淡水域の様々な環境で採集できた。止水域ではオツネントンボ（準絶滅)、クロゲンゴロウ（IB 類)、おもに河川中流などの流水域ではキイロサナエ（Ⅱ類)、クロサナエ（準絶滅)、アオサナエ（準絶滅)、ナベブタムシ（Ⅱ類）などが確認できた。なかでも特筆すべきはアオハダトンボである。本種は福岡県で絶滅危惧Ⅱ類に指定され、環境の良い中流環境に生息する､2000 年以降福岡市と那珂川市でしか見つかっていないトンボである。今回の調査では、二つの河川の上流から中流で、時期によっては優占種となっているほど多数の個体を確認できた。アオハダトンボは福岡県内でこの 2 河川にしか生息しておらず、福岡市の河川環境の良さを再認識するとともに、そういった環境を保全する必要性も感じた。

④淡水貝類は主にため池や水田といった止水域で採集できた。流水域ではキュウシュウササノハ（Ⅱ類）やホラアナミジンニナ（準絶滅)、止水域ではヒラマキミズマイマイ（情報不足）やオオタニシ（Ⅱ類）が確認できた。特筆すべき種類としてはヒメマルマメタニシである。ヒメマルマメタニシは福岡県で絶滅危惧Ⅱ類、県内で生息地が 10 ヶ所ほどと珍しい種類であるが､今回の調査では本種の記録がなかった福岡市で 4 ヶ所生息地を見つけた。

⑤ベントスは干潟や河口で多く確認でき、イボウミニナ（IB 類)、クリイロカワザンショウ（準絶滅)、ハクセンシオマネキ（Ⅱ類）などが確認できた。特に和白干潟（福岡市東区）と今津干潟（福岡市西区）で多く確認できた。

⑥水生植物は流水域でセンニンモ（IB 類）やチャイロカワモズク（準絶滅）などを確認

でき、止水域の湿地ではヒメフラスコモ（環境省Ⅰ類）、ナンゴクデンジソウ（IA 類）などが確認できた。山あいの地域のため池や水田は特に環境が良く、ため池ではフトヒルムシロ（IB 類）、シャジクモ（Ⅱ類）、水田ではホシクサ（IA 類）、ミズマツバ（Ⅱ類）などの希少種が多く確認できた。

⑦鳥類は主にため池や干潟でクロツラヘラサギ（IB 類）、コウノトリ（環境省 IA 類）、ツクシガモ（準絶滅）、オシドリ（準絶滅）などが確認できた。また、今回の調査の対象外としたが、河川上流部ではアカショウビン（Ⅱ類）、ヤマセミ（準絶滅）などの希少種が確認できた。

これらのことをまとめると福岡市は、

源流や沢にはサクラマス、ブチサンショウウオ、ホラアナミジンニナ

上流にはアカザ、ナベブタムシ、カジカ大卵型（準絶滅）

中流にはオヤニラミ、アリアケギバチ（IB 類）、アオハダトンボ

下流にはゼゼラ、ニホンウナギ（IB 類）

汽水や干潟にはマサゴハゼ、カブトガニ、ハクセンシオマネキ、クリイロカワザンショウ

止水域の湿地にはヒメマルマメタニシ、フトヒルムシロ（IB）、コガタノゲンゴロウ（Ⅱ類）

などをはじめとする希少種が多く生息する都市であり、希少種が生育できるほどの良好な自然環境が残っているといえる。

５，まとめ

福岡市の湿地帯環境は、福岡県初発見の種を含め希少種が生育できるほどの良好な環境も残っている。しかし大都市ならではの問題ともいえる、工事による生息地の破壊が多くみられること、外来種侵入による希少種の絶滅リスクが高いことなどがあることがわかった。順次、魚類、水生昆虫、淡水巻貝、ベントス、水生植物で具体的な問題を挙げる。

魚類に関する問題としては、河川横断物の影響である。ハカタスジシマドジョウは本来後背湿地などに生息するが、それらは開発などによって失われており、現在堰やダムなどの河川横断物によって川の流速が緩やかになったため、本来は本種にとって生息しにくいはずの河川下流にのみ生息しているものと考えられる。また、シロウオは回遊魚であり、福岡県室見川でのやな漁が福岡市の春の風物詩としても有名である。しかし、堰やダムなどの河川横断物の建設によって本種の産卵に欠かせない感潮域上限のれき底が失われつつあり、やな漁という文化の消失も危惧される。一般に、河川横断物はときに回遊魚の遡上を妨げ、海への栄養の供給量を減らすなどの生態系への悪影響があることが知られている。福岡市内の河川において、ハカタスジシマドジョウを保全するためには、堰によって川の流速を遅くすることが必須である。シロウオの資源量回復にはに、川の流速の遅さを解消する必要があるというジレンマを抱えている。

淡水巻貝に関する問題は外来種に関するものである。ヒメヒラマキミズマイマイは環境省絶滅危惧 IB 類に指定されており、新鮮な水の流入がある湿地にしか生息しない 2mm ほ

どの微小な巻貝である。今回の福岡市での発見が福岡県初発見であり、県内ではかなり稀な種類である。福岡市の 1 ヶ所の休耕田から採集できた。微小なだけにわずかな環境の変化でも絶滅してしまうが、この休耕田では多く生息しており遷移が進みやすく不安定で失われやすい湿地環境が残っていることを確認できた。しかし、その一方で福岡市はほぼ全域の水田に外来種のスクミリンゴガイ（別名ジャンボタニシ）が侵入しており、在来の淡水貝類の生息地はほぼ山あいのスクミリンゴガイが侵入していない一部の地域にかぎられている。このヒメヒラマキミズマイマイの生息地のすぐそばの水田までスクミリンゴガイが侵入しており、外来種問題の重大さを感じた。

ベントスでは、干潟の生物多様性の豊かさとその保全の必要性を感じた。カブトガニウズムシはその名の通りカブトガニに寄生する環形動物であり、福岡県版レッドデータで絶滅危惧 IA 類に指定されている希少種である。カブトガニウズムシは宿主であるカブトガニ自体が西日本の環境が良好な干潟にしか生息できず、福岡県版レッドデータで絶滅危惧 IA 類に指定されている希少種であるためカブトガニウズムシも数を著しく減らしている。今回の調査では、福岡市内の干潟で捕獲したカブトガニ 2 個体の足や鰓からカブトガニウズムシ 16 個体を採集できた。この干潟にはカブトガニ、貴重な水鳥も多く生息しており、良好な干潟環境が広がっていると思われる。しかし、そういった干潟環境は、福岡市東区のアイランドシティや、ほぼ消滅した室見川河口干潟の例にもれず、埋め立てや干拓の影響を受けやすいことも事実である。

水生植物は、都市部にも多種が生息していることを感じた。ツクシオオガヤツリ（IB 類）とリュウノヒゲモ（IB 類）は福岡市中央区という都市部の中心のため池で確認でき、今回は確認できなかったが過去にはオニバス（Ⅱ類）、ミズオオバコ（IB 類）、スブタ（絶滅）などといった希少種も生育していたということも聞き取り調査で分かった。ツクシオオガヤツリは市街地のため池 7 ヶ所で確認でき、都市化が著しく進む福岡市の平野部でも辛うじて希少種が生育できる環境が残っていることを確認できた。

６, 展望

一方で福岡市の湿地帯環境は様々な危機にさらされていることも調査の中でわかった。防災工事や開発工事による生息地の壊滅や環境悪化、外来種の侵入による希少種へのリスクの増大である。福岡市は大都市であることから防災工事や開発工事の頻度が高く、調査期間中にもため池が 4 つ廃止され、浚渫や護岸工事などの河川工事が 2 ヶ所で行われていた。いずれの地点にも生息する希少種にダメージを与え、少なくとも防災のためのため池の廃止に伴って、ニホンアカガエル（Ⅱ類）、カスミサンショウウオ、クルマヒラマキ（Ⅱ類）は当該地点からは絶滅したと考えられる。浚渫工事の影響によってヤマトシマドジョウの明らかな減少が見られた。これらの工事のなかには現在進行中のものもあり、生物多様性の保全と防災の両立が求められる。

また、今回 34 種の外来種が確認出来た。なかでも止水域で多く見られたアメリカザリガ

ニ、コイ、スクミリンゴガイ、ブタジルチドメグサは特に影響が大きく、アメリカザリガニ、コイが侵入したため池では水生植物と水生昆虫がほぼ見られず、スクミリンゴガイが侵入した水田では 1 ヶ所の例外を除き、イネ以外の水生植物が一種もみられなかった。これらの外来種の影響の例として、ナンゴクデンジソウがある。ナンゴクデンジソウは環境省で絶滅危惧 IB 類、福岡県絶滅危惧 IA 類の水生植物で、福岡県内の既存産地は福岡市と筑紫野市の 2 ヶ所のみとされる希少な種である。今回の調査において福岡市の湿地で本種を発見したが、その生息状況はきわめて厳しかった。特に、生息地付近へ外来種である、スクミリンゴガイ、アメリカザリガニ、ブラジルチドメグサが侵入しており、なお、生息地から５０ｍと離れていないハス田にはこれらの外来種も多く生息し、ナンゴクデンジソウは生息していなかった。実際生息地にもスクミリンゴガイとアメリカザリガニは生息しており、ナンゴクデンジソウはこの 2 種の外来種の影響を受けない陸上の畦にしかおらず、付近の状況から鑑みてブラジルチドメグサが侵入すれば容易に絶滅するものと考えられる。福岡市の湿地帯保全には、外来種の防除が喫緊の課題だといえる。

川虫類や甲殻類などのまだ調査が完結していない分類を中心に、福岡市内に生息する湿地帯生物の種を調べ、福岡市の自然環境や地理的な特色を他の地域と比較したい。また外来種の侵入や開発がどのような種にどのような影響を与えているかを調べ、自然環境保全のために取るべき手段について考えていきたい。

7, 引用文献

福岡県の希少野生生物　福岡県レッドデータブック 2014　福岡県自然環境課
福岡県の希少野生生物　福岡県レッドデータブック 2011　福岡県自然環境課
日本の水草　(2018) 角野康郎
ヤゴハンドブック(2019) 尾園暁・川島逸郎・二橋亮
川虫図鑑 (2016) 丸山博紀・高井幹夫
日本の水生昆虫(2020) 中島淳・林成多・石田和男・北野忠・吉富博之
干潟ベントスフィールド図鑑(2014) 鈴木孝男・木村昭一・木村妙子・森敬介・多留聖典
日本の淡水魚(2015) 細谷和海・内山りゅう・藤田朝彦・武内啓明・川瀬成吾