



Tokyo Metropolitan Hibiya High School

Advanced Inquiry-Based Study of Science and Mathematics:
Academic Papers

2025

(2025.10)

東京都立日比谷高等学校

文部科学省 SSH(スーパーサイエンスハイスクール) 第IV期指定4年次

令和7年度(2025年度) 理数探究発展 論文集

	Page
1. 化学分野 天野 万葉 亜鉛錯体を用いた再生繊維の開発 第 16 回 坊っちゃん科学賞 研究論文コンテスト 入賞 2025 秋季日本金属学会秋季高校生ポスターセッション 優秀賞 第 8 回グローバルサイエンティストアワード”夢の翼”九州電力株式会社賞 第 69 回日本学生科学賞東京都大会 出品 第 20 回高校化学グランドコンテスト 出品 第 14 回 WPI(世界トップレベル研究拠点プログラム)一次審査通過作品	1
2. 化学分野 小林 穂 BR 反応の反応起点について ～実験とシミュレーションを用いた BR 反応の考察～ 第 16 回 坊っちゃん科学賞 研究論文コンテスト 佳作 第 69 回日本学生科学賞東京都大会 出品 第 20 回高校化学グランドコンテスト 出品 第 14 回 WPI(世界トップレベル研究拠点プログラム)一次審査通過作品	7
3. 化学分野 藤崎 なな子・茂木 愛依 アゾ染料の合成 ～プロモアニリンを用いたアゾ染料の合成～ 第 16 回 坊っちゃん科学賞 研究論文コンテスト 入賞 第 69 回日本学生科学賞東京都大会 出品	13
4. 生物分野 安藤 心太郎 隣接した地点間のスズメの逃避行動の違い 第 16 回 坊っちゃん科学賞 研究論文コンテスト 奨励賞 第 69 回日本学生科学賞東京都大会 出品 第 14 回 WPI(世界トップレベル研究拠点プログラム)一次審査通過作品	22
5. 生物分野 大谷 真奈美 セミの抜け殻の剛毛の滑り止め効果 令和 7 年度 SSF(スーパーサイエンスハイスクール生徒発表会) 校内代表 第 69 回 日本学生科学賞東京都大会・高校化学グランドコンテスト 出品	28
6. 生物分野 貫井 優希 リュウキュウナミウズムシの行動 ～有性個体と無性個体における行動の違い～ 第 14 回 WPI(世界トップレベル研究拠点プログラム) 優秀ポスター発表賞(Best 3) 第 69 回日本学生科学賞東京都大会 出品	36
7. 地学分野 尾原 秀澄 散開星団の色等級図の作成 ～デジタルカメラを用いて行う天体の等級測定～ 第 69 回日本学生科学賞東京都大会 努力賞 第 14 回 WPI(世界トップレベル研究拠点プログラム)一次審査通過作品	51

亜鉛錯体を用いた再生繊維の開発

東京都立日比谷高等学校 天野 万葉

1 要旨

身近な再生繊維の一種である銅アンモニアレーヨンに銅(Ⅱ)錯体が用いられることに興味を持ち、類似する手法で、他の金属錯体に代替した新しい再生繊維を開発することを目指した。銅アンモニアレーヨンの生成手順は、テトラアンミン銅(Ⅱ)イオンを含む試薬に、セルロースを溶解したのちに硫酸を加えることで、イオンの配位子をアンモニア分子からセルロース分子に変えることで再生するというものである。この方法を参照し、セルロースを錯体溶液で溶解させたのちに再生させる、という手法を検討した。まず、いくつかの代替する金属錯体の候補を用いて、セルロースを溶解するかどうか試みたが、実験ではセルロースと金属錯体が直接的な溶解反応を示さなかった。そこで、直接の反応ではなく、塩化亜鉛水溶液を用いてセルロースを粘性のある状態に溶解¹⁾させる前処理を行ってから錯体と反応させる方針を取った。その結果、前処理をしたセルロースはテトラアンミン亜鉛錯体の溶液(以下、テトラアンミン亜鉛錯体溶液とする)と反応することが確認できた。最後に、シュウ酸を用いてセルロースの再生を試みると白色の固体が生成した。この物質の分子量の測定はできなかったが、生成された繊維から亜鉛を検出することができたため、内部に亜鉛を含んだ固体であることが確認された。また、水に溶解しない、フェーリング反応を示さないといった性質からセルロースである可能性が示唆された。

2 研究目的

環境負荷の低減が求められる中で、天然由来のセルロースを原料とする再生繊維が注目されている。既存の再生繊維の一種である銅アンモニアレーヨンと類似する繊維を生成することで、再生繊維の開発に貢献できると考えた。一方、銅アンモニアレーヨンが生成時に銅(Ⅱ)錯体と反応することで、特有の滑らかさなどの機能的特性を生み出していることも興味深い。そのため、本研究では、銅錯体以外の金属錯体を用いるという方法で、新しい再生繊維を生成することを目指した。他の金属錯体を含むことで、新たな特性を持つ繊維となる可能性があると考えている。

3 研究方法

3-Ⅰ セルロースの錯体との反応性の検証

代替する金属錯体を選定するために、候補となる金属錯体とセルロースの反応性を検証する実験を行った。銅アンモニアレーヨンの生成ではアンモニアを配位子とするテトラアンミン銅(Ⅱ)錯体を用いている。これは、テトラアンミン銅(Ⅱ)錯体が、非常に安定であり、セルロース

と架橋構造を作ることで、セルロースの溶解に寄与するためである。そのため、代替の候補は、同様に比較的安定なアンモニアを配位子とする錯体を形成する、ニッケル(Ⅱ)、亜鉛(Ⅱ)、コバルト(Ⅱ)、クロム(Ⅱ)とした。

3-I-A 使用する実験器具・薬品

- ・100mL ビーカー ・脱脂綿状のセルロース 約 1g
- ・ $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$ aq, $[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ aq, $[\text{Co}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ aq, $[\text{Cr}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ aq 全て 0.1mol/L, 20mL

3-I-B 実験方法

脱脂綿状のセルロースを錯イオン溶液に入れて溶解の有無を確認する。錯体は、それぞれ、ヘキサアンミンニッケル(Ⅱ)水酸化物、テトラアンミン亜鉛(Ⅱ)塩化物、ヘキサアンミンコバルト(Ⅱ)塩化物、テトラアンミンクロム(Ⅱ)水酸化物として用いた。

3-I-C 結果

いずれの錯体においても銅錯体とセルロースの反応のように、セルロースが錯体溶液に溶解していき、粘性の高い溶液に変化する様子は確認できなかった(表1)。コバルト(Ⅱ)錯体においては、セルロースが着色する様子が確認できたが、溶解する程の反応ではなかった。クロム(Ⅱ)の錯体の実験結果を検証不可能としたのは、空気酸化が起り、実験での安定性に欠けたためである。

表1 3-I における金属ごとの様子

	$[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$	$[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$	$[\text{Zn}(\text{NH}_3)_2]^{2+}$	$[\text{Co}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$	$[\text{Cr}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$
特徴	従来のも				
溶解の有無	溶解する	溶解しない	溶解しない	溶解しない	検証不可能
Iのセルロースの様子	深青色 	薄紫色 	無色 	淡赤色 	深緑色 

3-I-D 考察

脱脂綿状のセルロースと各金属のアンミン錯体は、反応しにくい、もしくは無反応であったことが推測される。繊維状になっているために、反応しにくかったという可能性も考えられるが、セルロースが多量に錯体と反応することは、セルロースを収率の高い状態で再生させるために不可欠である。この考察から、直接セルロースと錯体を反応させることは断念した。先行研究²⁾によると、セルロースはテトラアンミン亜鉛錯体溶液と反応し溶解するそうだが、実験方法が不明であり、再現することはできなかった。

3-II セルロースの前処理

3-I においてセルロースと錯体の直接的な反応が確認できなかったため、セルロースを一度反応しやすい状態に前処理を行ってから、錯体と反応させることを考案した。松本¹⁾らの研究を参照し、セルロースを、フルフラール誘導体等のセルロース分子同士の水素結合が弱められた物質に変える目的で実験を行った。

3-II-A 使用する実験器具・薬品

- ・三角フラスコ ・温度計 ・スタンド ・ホットスターラー
- ・脱脂綿状のセルロース 約1g
- ・6mol/L塩化亜鉛水溶液 50ml

3-II-B 実験方法

図1のように、ホットスターラーに塩化亜鉛水溶液を入れた三角フラスコを載せた装置を用い、100℃で数分間加熱した塩化亜鉛水溶液に、脱脂綿状のセルロースを少しずつ加え、粘度の高い状態になった時点で加熱を止める。



図1. 実験IIの装置
ホットスターラーの上に三角フラスコを置き加熱攪拌した

3-II-C 結果

溶液が沸点に達すると、セルロースが溶解し始めた。溶解していくにつれ、溶液に粘性が生じ、色に変化し、図のような粘性のある茶色の物質(図2)になった。本実験では、完全に炭化することを避けるため、この段階で加熱を止めたが、このまま加熱を継続すると黒色の固体となった。これらの反応は先行研究におけるものと同様であった。



図2. 実験IIにおいて生成した、茶色の粘性のある物質

3-II-D 考察

茶色となったのは一部がカラメル化したためと考えられる。セルロースが溶解反応を起こしたことから、先行研究の考察で書かれているように、セルロース分子同士の水素結合が弱まったと考えられる。この生成物については、先行研究においても様々な方法で同定が試みられていたが、明確な決定はされていない。そこで、本研究においては、フェーリング反応を用いて、低分子化していないことを確認したので、このまま続けても目的である再生繊維の生成は可能と判断し、この段階の生成物は不明のまま、実験を進めることにした。

3-III テトラアンミン亜鉛錯体溶液との反応

II において前処理をしたセルロースをテトラアンミン亜鉛(II)錯体と反応させた。II において塩化亜鉛水溶液を用いているため、同一の金属を用いて金属間での反応を防ぐ目的で、こ

ここからは銅(Ⅱ)錯体を亜鉛錯体で代替することを目標に実験を行った。

3-Ⅲ-A 使用する実験器具・薬品

- ・ビーカー ・5ml駒込ピペット
- ・0.1mol/L テトラアンミン亜鉛(Ⅱ)錯体溶液 20ml ・Ⅱの生成物

3-Ⅲ-B 実験方法

Ⅱの生成物にテトラアンミン亜鉛(Ⅱ)錯体溶液をピペットで少量ずつ加えた。

3-Ⅲ-C 結果

生成物はテトラアンミン亜鉛錯体溶液と反応し、白色に変化しながら、大部分が溶液中に溶解(図3)した。黄色の溶液と白色の残渣が生じたため、ろ過を行い、完全に反応している溶液部分のみをⅣの実験以降では使用した。また、この際に反応した錯体に含まれる亜鉛の物質量は、Ⅱの実験においてセルロースを溶解するのに用いた亜鉛の物質量の5倍以上となった。このことから、主生成物に含まれる亜鉛は錯体由来のものであり、銅アンモニアレーヨンにおけるテトラアンミン銅錯体と同様にセルロースを溶解する役割を果たしている可能性が高いと考えられる。



図3.実験Ⅲにおいて、前処理後のセルロースが亜鉛錯体と反応して白く変化しながら溶解し、赤褐色の溶液となる様子

3-Ⅲ-D 考察

Ⅱの前処理をした結果、これまで見られなかった溶解反応が見られたことから、前処理によってセルロースは錯体と反応しやすくなったと考えられる。また図中に見られる白色の残渣は、溶液中に過剰に存在する塩化物イオンと亜鉛イオンによって生成された塩化亜鉛だと考えられる。

3-Ⅳセルロースの再生・分離

Ⅲの生成物を、シュウ酸と反応させることによりセルロースを再生した後に、乾燥させて生成物を分離することを試みた。シュウ酸を用いたのは、揮発性で生成物を取り出しやすいためである。銅アンモニアレーヨン同様、硫酸を用いることでも再生が可能であるが、粉末状の生成物を取り出すことが難しいという課題があった。

3-Ⅳ-A 使用する実験器具・薬品

- ・3-Ⅲの生成物をろ過したろ液 ・シャーレ
- ・1.0mol/L シュウ酸 ・5ml 駒込ピペット

3-IV-B 実験方法

シャーレに入れたろ液に、ピペットでシュウ酸を滴下した。

3-IV-C 結果

滴下するごとに白色の固体が膜状に生成した(図4)、アンモニアの特異臭がした。生成物は、洗浄しても溶解しなかった。シュウ酸水溶液を揮発させると、粉末状の白色固体(図5)として分離することができた。



図4.IVにおいて生成された白色固体



図5.IVで分離した粉末状固体

3-IV-D 考察

シュウ酸と反応させたことで、セルロースと結合していたテトラアンミン亜鉛(II)錯体のアンモニア分子の一部の結合が切れ、それに伴いアンモニアが発生し、結合の切れた部分にセルロース分子が結合して、目的の繊維となった可能性がある。生成物が、繊維状ではなく粉末状であるのは、テトラアンミン亜鉛錯体溶液にセルロースを溶解したⅢの溶液の粘度がかなり低かったためだと考えられる。銅アンモニアレーヨンの生成時は粘度が高く、注射器等で繊維状に成型して再生することができるが、その操作が不可能だった。粘度が低かったのは、Ⅲにおいてテトラアンミン亜鉛錯体溶液と反応した時に過剰に分解していた可能性がある。また、生じた白色固体に見られる無色透明の結晶(図5中に偏在)は、Ⅲの段階で未反応であったテトラアンミン亜鉛(II)塩化物の結晶とみられる。

3-V 生成物の同定

IVで溶媒と分離した生成物が、目標とした亜鉛を含むセルロースであるかの同定を試みた。まず、フェーリング反応により、生成物に還元性がないことが示されたため、単糖までには分解していないということの確認ができた。その上で、浸透圧を用いた平均分子量の測定が困難であったため、生成物から亜鉛を分離することができるか実験を行った。

3-V-A 使用する実験器具・薬品

- ・5mol 駒込ピペット
- ・20ml 試験管
- ・6mol/L 水酸化ナトリウム水溶液
- ・硫化水素(硫化鉄と濃塩酸を用いて生成)

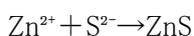
3-V-B 実験方法

セルロース、亜鉛のいずれも水酸化ナトリウム水溶液に溶解することを利用して、IVの生成物を溶解させた後に、硫化鉄と濃塩酸を用いて生成した硫化水素を吹きかける。

3-V-C 結果 白色の沈殿(図6)が生成した。

3-V-D 考察

以下の反応が起き、硫化亜鉛の沈殿が生じたと考えられる。



水酸化ナトリウム水溶液に溶解したのは、繊維部分のみであるから、ここで沈殿となった亜鉛イオンは繊維中に結合しているものだと考えられる。また、この生成物に含まれている亜鉛の由来については、Ⅲの前処理後のセルロースを溶解させたテトラアンミン亜鉛錯体溶液に含まれる亜鉛と、Ⅱにおいてセルロースを溶解するのに用いた亜鉛の二種類が考えられる。しかし、前者に含まれる亜鉛の物質量は、後者に含まれる亜鉛の物質量の 5 倍以上であることから、主生成物に含まれる亜鉛は錯体由来のものであり、銅アンモニアレーヨンにおけるテトラアンミン銅錯体と同様の役割を果たしている可能性が高いと考えられる。



図 6.Vにおいて生成物中から取り出された亜鉛による硫化亜鉛の沈殿

4 結論

目的としていた亜鉛を含むセルロースである可能性のある物質が生成した。特に亜鉛が固体の内部に含まれていることはその有力な根拠である。その生成過程で、セルロースは塩化亜鉛水溶液と反応させることにより、錯体と反応しやすくなることが明らかになった。今後、さらに生成物を同定するために、平均分子量の測定や構造解析などを進めていく必要がある。また、この粉末状で再生しているため、繊維として活用するためには、新たな加工を行う必要があるが、生成された固体の加工ができれば、不織布等の繊維製品として活用できる可能性がある。また、亜鉛錯体によって銅アンモニアレーヨンのような特性が生み出される可能性もあり、より安価な生成や、新たな特性を持つ繊維の生成といった応用が考えられる。

5 参考文献

- 1) 塩化亜鉛水溶液中でのセルロースの溶解 東京都立小石川中等教育学校 杉本洗樹
- 2) Carbohydrate-based Polymer Building Blocks and Biopolymers I Celluloses and Polyoses/Hemicelluloses, T.Heinze T.Libert, Polymer Science: A Comprehensive Reference, 2012

6 謝辞

本研究を行うにあたり、以下の方々にご助言をいただきました。心より御礼申し上げます。
 東京科学大学 教授 石曾根隆先生 北越コーポレーション株式会社 根本純司様
 また、二年間にわたり、行き詰まるたびに根気強くご指導くださいました、
 東京都立日比谷高等学校 藤原將起先生、岩淵寛先生に深く感謝申し上げます。

BR 反応の反応起点について

実験とシミュレーションを用いた BR 反応の考察

東京都立日比谷高等学校 小林穂

1. 概要

周期的な色の変化を示す BR 反応は通常、攪拌しながら行うが、攪拌せずに行ったところ、通常とは異なり、色の変化が水面付近から起こることに気が付いた。そこで、色の変化が水面付近から起こる要因を探ることを目的として本研究を行った。実験では、混合する水溶液を加える位置、一部分の温度、混合する水溶液の濃度を変化させたり、反応容器内を真空にしたり、反応液の表面に流動パラフィンを加えたりして、様々な条件下で反応させ、反応の様子を観察した。混合する水溶液を加える位置、一部分の温度、混合する水溶液の濃度を変化させたときに反応の様子が変化した。また、BR 反応の化学反応と物質の拡散による濃度変化のシミュレーションプログラムを作成し、実験結果との比較を試みた。

2. 研究の背景と目的

BR 反応 (Briggs-Rauscher 反応) は、酸化還元反応によって I⁻ と I₂ が繰り返し現れ、無色→黄色→青紫色→無色……という周期的な色の変化が見られる反応である。(図 1) BR 反応の反応式は確定しておらず、いくつかの種類があるが、本研究では以下の反応式を用いた (参考文献 5)。

- ① $\text{HOI} + \text{I}^- + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{I}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- ② $\text{H}^+ + \text{HOIO} + \text{I}^- \rightarrow 2\text{HOI}$
- ③ $2\text{H}^+ + \text{IO}_3^- + \text{I}^- \rightarrow \text{HOIO} + \text{HOI}$
- ④ $2\text{HOIO} \rightarrow \text{H}^+ + \text{IO}_3^- + \text{HOI}$
- ⑤ $\text{H}^+ + \text{IO}_3^- + \text{HOIO} \rightarrow 2\text{HOIO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$
- ⑥ $\text{CH}_2(\text{COOH})_2 + \text{I}_2 \rightarrow \text{CHI}(\text{COOH})_2 + \text{I}^- + \text{H}^+$
- ⑦ $\text{HOI} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{I}^- + \text{O}_2 + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$

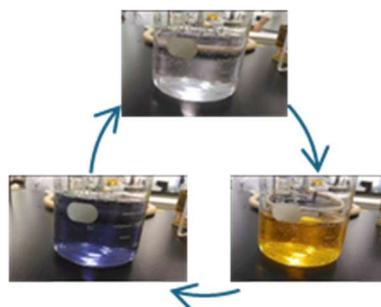


図 1

この BR 反応は通常、攪拌しながら行われ、溶液全体がほとんど同じタイミングで、素早く色が変わる。しかし、BR 反応を攪拌せずに行ったところ、水面付近から徐々に色が変わることに気が付いた。そこで、色の変化が水面付近から起こる要因を探り、色の変化が始まる部分 (以降反応起点と呼ぶ) の制御を可能にすることを目的として本研究を行った。

3.研究方法

1) 以下の手順で BR 反応を行った

使用薬品

A 液：30%過酸化水素水 150mL に純水 350mL を加えた

B 液：ヨウ素酸カリウム 21.5g、濃硫酸 5mL に純水を加え、全量を 500mL とした

C 液：可溶性でんぷん 0.2g、マロン酸 7.8g、硫酸マンガン(II)4 - 5 水和物 2.5g に純水を加え、全量を 500mL とした

実験手順

A、B、C 液を等量ばかり、この順に反応容器に加えて静置した。反応容器には、ビーカー、試験管、丸底フラスコを用いた。

以降の実験では、変化させる条件に関わらない部分はこの手順で行った。

2) BR 反応を、以下の条件を変化させて行った。

- I 混合する水溶液を加える位置
- II 反応容器内を真空にした
- III 反応液の表面に流動パラフィンを加えた
- IV 一部分の温度
- V 混合する水溶液の濃度

I 混合する水溶液を加える位置

試験管に A 液と B 液を加え、手で軽く振った後、図 2 のように、駒込ピペットを用いて試験管の底付近から C 液を加えた。



図 2

II 反応容器内を真空にした

丸底フラスコに A 液、B 液を加え、図 3 のような装置を用いてフラスコ内の空気を抜いた。その後、シリンジを用いてフラスコ内に C 液を加えた。C 液を加え終わるまで色の変化が起こらないよう、フラスコは氷水につけて冷やした。(氷水につけると反応速度が遅くなり、色の変化は水面付近から起こることは事前に確認している。)



図 3

III 反応液の表面に流動パラフィンを加えた

試験管に A 液、B 液を加え、2 mL の流動パラフィンを加えて、混合溶液の表面を覆った。試験管を傾け、壁を伝わらせて静かに C 液を加え、試験管立てに立てて静置した。

IV 一部の温度

- ① 反応溶液中に温度差があるか調べるため、ビーカーで反応させたときの底付近と水面付近の温度を測定した。
- ② 試験管に A 液、B 液を加え、冷蔵庫で冷やした流動パラフィン 2 mL を加えて、混合溶液の表面を覆った。流動パラフィン付近の溶液が冷えるよう、少し時間をおいた。試験管を傾け、壁を伝わらせて静かに C 液を加え、試験管立てに立てて静置した。

V 混合する水溶液の濃度

- ① 使用している A、B、C 液の密度を測定した。
- ② C 液を調製する際に加える純水を変えた C₁ 液、C₂ 液を作り、密度を測定した。密度に応じて加える C 液の量を減らして反応を行った。
- ③ C₁ 液、C₂ 液を用いて I と同様の実験を行った。

3) BR 反応の化学反応と物質の拡散による濃度変化のシミュレーションプログラムを作成する

- ① BR 反応の化学反応による濃度変化のシミュレーションプログラムを作成した
A+B→C+D という反応において、時刻 t~t+Δt での濃度変化 Δ[C]_t について、k を反応速度定数として

$$\frac{\Delta[C]_t}{\Delta t} \approx \frac{d[C]_t}{dt} = k[A]_t[B]_t$$

と表すことができ、この微分方程式を解くことで、各物質の初期濃度から t 秒後の各物質の濃度を求めることができる。

これを用いて BR 反応に関わる全物質の濃度変化を計算するプログラムを Python で書いた。

- ② 物質の拡散による濃度変化のシミュレーションプログラムを作成する（試行中）
ここでは、簡単のため 2 次元で考える。反応場を 1 辺の長さが Δx の正方グリッドに分割し、横軸を i、縦軸を j とする。各セルの濃度は、隣り合うセルとの間で移動する物質の量によって変化する。セル q(i,j) の濃度変化は、D を拡散係数として、

$$\begin{aligned} \Delta q_{i,j} &= D \nabla^2 q_{i,j} \cdot \Delta t \\ &\approx D \{ (q_{i+1,j} + q_{i-1,j} - 2q_{i,j}) + (q_{i,j+1} + q_{i,j-1} - 2q_{i,j}) \} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \end{aligned}$$

と表すことができる。ただし、端のセルは内側のセルと同じ濃度にしておく。
これを用いて、セル $q(i,j)$ に濃度 ϕ の物質を置いたときの各セルの濃度を計算するプログラムを Python で書いた。

- ③ ②のプログラムに①のプログラムを組み込み、BR 反応における場の濃度変化をシミュレーションするプログラムを作成する（未試行）

4.結果

1) どの反応容器を用いた場合も、水面付近から色が変化した。

2) I はじめは水面付近と底付近から中央へ色の変化が見られた（図4）が、次第に底付近から変化することはなくなり、水面付近からのみ色が変わるようになった。

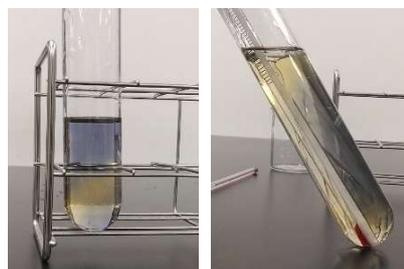


図4

図5

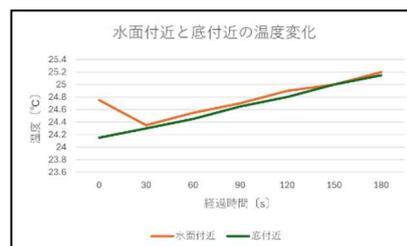
II 水面付近から色が変化した。

III 水面付近から色が変化した。

IV ①の結果はグラフ1のようになった。

②流動パラフィンが $10^{\circ}\text{C} \sim 13^{\circ}\text{C}$ 、A、B、C 液は $20^{\circ}\text{C} \sim 23^{\circ}\text{C}$ であった。

水面から少し離れた部分から色が変化した（写真5）。水面付近と底付近では色の変化が遅く、中央付近では色の変化が速かった。



グラフ1

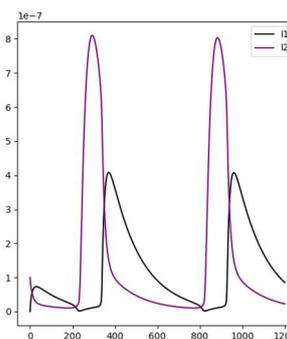
V ①の結果は表1のようになった。

② C_1 液は、はじめは水面付近から変化し、次第に均一に変化した。 C_2 液は水面付近から変化した。

③ C_1 液、 C_2 液ともに、はじめは水面付近から変化し、次第に全体が同じタイミングで色の変化を示すようになった。

	密度 (g/cm^3)
A液	1.048
B液	1.043
C液	1.006
C_1 液	1.008
C_2 液	1.020

表1



グラフ2

横軸は時間 [s]、縦軸は濃度 [mol/L]、I1、I2 はそれぞれ I、 I_2 を示す

3) ①のシミュレーション結果はグラフ2のようになった。現在②のプログラムを作成している。

5 考察

- 1) 反応起点は反応容器の形状によらないと考えられる。
- 2) I 反応起点は、特に反応の初期段階において、混合する水溶液を加える位置の影響を受けると考えられる。
 - II 水面付近が反応起点になるのは空気中の物質の影響ではないと考えられる。
 - III 水面付近が反応起点になるのは空気中の物質や蒸発の影響ではないと考えられる。
 - IV ①反応中の溶液に温度の大きな偏りはないと考えられる。反応開始0秒後のみ温度差が大きいのは、直前まで水面付近の温度を測定する温度計が空気に触れていたためだと考えられる。
 - ②流動パラフィンによって冷やされたことで、水面付近の反応速度が遅くなった結果、反応起点が中央付近になったと考えられる。反応起点は温度の偏りの影響を受けると考えられる。また、全体で色が同時に変化しないのは、温度の偏りなどから生じる、各部分の反応速度の違いによるもので、反応速度が速い部分が反応起点になると考えられる。
 - V ②③反応起点は、特に反応の途中から、混合する水溶液の濃度の影響を受けると考えられる。また、C液の密度が大きい、または、A、B、C液の密度の差が小さいほど、反応起点C液を加える位置の影響を受けると考えられる。

以上より、反応起点は、混合する水溶液を加える位置、一部分の温度、混合する水溶液の濃度の影響を受けると考えられる。これは、各部分の濃度の偏りや分子などの熱運動の激しさの違いによって、反応速度や物質の移動の様子が変わったためだと考えた。

- 3) グラフ2から、色の変化の原因となる、 I_2 とIの濃度変化が確認できた。

6 結論と今後の展望

BR反応の反応起点を変化させる要因として、混合する水溶液を加える位置、部分的な温度の偏り、混合する水溶液の濃度が考えられる。

今後は、現在制作中のシミュレーションプログラムを用いて、どの要因がどの程度、反応起点に影響を与えるのか考察するとともに、予定だ。また、現段階では、シミュレーションと実験結果が十分一致しており、今後のシミュレーション結果と実験結果を比較することにより、シミュレーションによって実験結果を予測できることを示せる可能性があると考えている。

7 参考文献

- 2) 高校化学への化学振動反応の導入と工夫 <https://obirin.repo.nii.ac.jp/records/2071>
- 3) PVA で迫る BR 反応の謎～指示薬デンプンの本当の役割～<https://gakusyu.shizuoka-c.ed.jp/science/sonota/ronnbunshu/R4/223008.pdf>
- 4) BR 反応における Mn^{2+} による反応挙動への影響 <http://www.hikonehg-h.shiga-ec.ed.jp/blog/wp-content/uploads/2020/08/0765daf40c7ddb7dbe631260fa600100.pdf>
- 5) Peter Sevcik, Katarina Kissimonova, L'ubica Adamcikova, "Oxygen Production and Numerical Simulation of the Interphase Transport in the Modified Oscillating Briggs-Rauscher Reaction"(The Journal of Physical Chemistry A, 2003)

8 謝辞

東京都立大学理学部 中谷直輝先生、東京都立日比谷高等学校藤原將起先生、岩淵寛先生、打田孝一先生をはじめ、本研究にあたってお世話になったすべての方に感謝申し上げます。

アゾ染料の合成

～ブromoアニリンを用いたアゾ染料の合成～

東京都立日比谷高等学校 藤崎なな子
茂木 愛依

1. 概要

アゾ染料は、ジアゾ化したアニリンと芳香族の化合物を用いて合成するが、合成する際に、構造異性体を用いると、色や吸光スペクトルが異なった。そこで、特に差が大きく表れたブromoアニリンを用いてアゾ染料を合成したところ、2-ブromoアニリンと4-ブromoアニリンで吸光度だけでなく、色や性質により大きな違いが見られた。しかし、分光光度計で吸光スペクトルを測定したところ、複数のピークが確認できたため、ブromoアニリンから合成したアゾ染料だけでなく、何らかの不純物が混ざっていることが分かった。不純物の除去のため、モル量の調節を行い再度実験したが、塩化ベンゼンジアゾニウムを合成する段階で半固体状になり、合成できなかった。亜硝酸ナトリウムが過剰であることが原因だと考えられるため、今後適切な比率を検討していきたい。

2. 研究目的

アゾ染料は、主に芳香族の化合物から合成される合成染料の一つであり、簡単に合成できることから、広く使用されている。私たちは新しい色のアゾ染料を作るというテーマで研究を進めており、今までに使われていない物質を使って染料を作るということを目的とした。色はその色を出す物質の構造に大きく起因している。今回は構造異性体での性質の違いを比較するため、構造異性体でアゾ染料を作成し、性質を調べ比較した。

3.0 予備実験

予備実験として、構造異性体で性質が異なることを確認するため、スクエア最新図説化学の255ページに記載されている1-フェニルアゾ-2-ナフトールの合成方法に基づき、oクレゾール、mクレゾール、pクレゾール(図1,図2,図3)を用いてアゾ染料を作成した。(合成経路参照、詳しい説明は実験1)用いたクレゾールの物質量は資料集に載せられている2-ナフトールの物質量と同じである。

図1

o-クレゾール

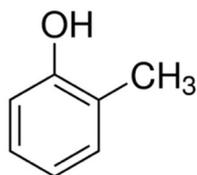


図2

m-クレゾール

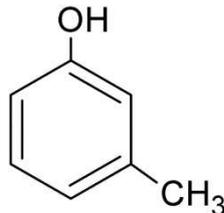


図3

p-クレゾール



3.0 結果

生成物はどれも赤色であったが、濃さが異なった。o-クレゾールと p-クレゾールの色は似ていて暗赤色だったが、m-クレゾールは少し明るめの赤色であった。吸光スペクトルのピークは、o-クレゾールが約 400nm、m-クレゾールが約 350nm、p-クレゾールが約 430 nm であった。(o-クレゾール:図 4、 m-クレゾール:図 5、 p-クレゾール:図 6)

図 4 o-クレゾール



図 5 m-クレゾール



図 6 p-クレゾール



3.0 考察

クレゾールはベンゼン環にヒドロキシ基とメチル基がついた物質であり、ヒドロキシ基とメチル基のどちらもオルト・パラ配向性を持つ。オルト・パラ配向性とは、ベンゼン環につく置換基の種類によってその後の置換反応でベンゼン環のどの位置に置換物質がつくかが変わるとい性質である。このとき、ヒドロキシ基の方がメチル基よりオルト・パラ配向性が強いのでヒドロキシ基から見てオルト位、またはメタ位にジアゾニウムが結合し、メチル基が結合している位置によってその結合位置及び構造が変わると考えられる。構造異性体同士から生成されるアゾ染料がクレゾール以外でも同様の結果が見られるのかを確かめるために、実験 1 以降を行うという結論に至った。

3.1 実験 1

実験 1 では、予備実験と同様スクエア最新図説化学に記載されている 1-フェニルアゾ-2-ナフトールの合成方法に基づき、2-ナフトールの物質と等しい量のブロモアニリンでアゾ染料を合成した。(表 1)

1.0 mL のアニリンに 2 mol/L の塩酸 10 mL を加えアニリン塩酸塩溶液と、亜硝酸ナトリウム 0.5 g を 10 mL の水に溶かした亜硝酸ナトリウム水溶液を作成した。次に、0~5°C に冷やした状態で二種の液体をゆっくりと混ぜ合わせ、塩化ベンゼンジアゾニウムを合成した。2 mol/L の塩酸 10 mL にブロモアニリン 5 mL を加え塩酸塩溶液を作成し、駒込ピペットで塩化ベンゼンジアゾニウム溶液に変色を確認されるまで 1~2 mL ほど加え、アゾ染料を合成した。(図 1 合成経路)

図1 合成経路

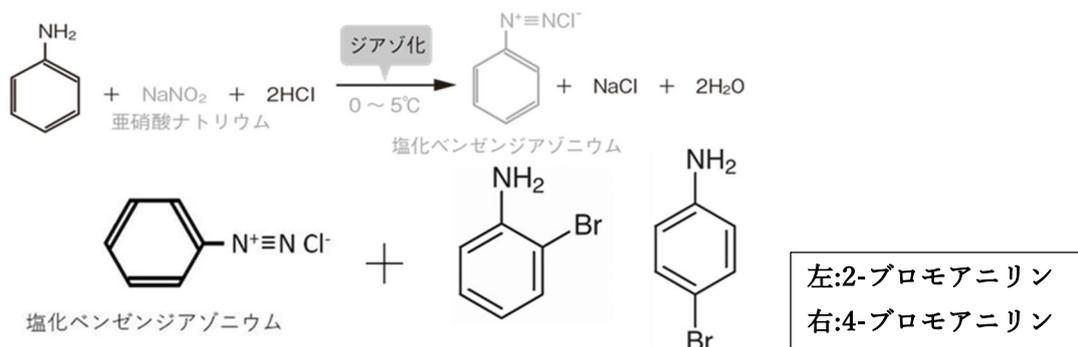


表 1

	アニリン	塩酸	亜硝酸ナトリウム	ブロモアニリン	塩酸
実験1	5.5mmol	20mmol	7.2mmol	3.5mmol	20mmol
実験2	10mmol	20mmol	10mmol	10mmol	10mmol
実験3	10mmol	20mmol	10mmol	10mmol	10mmol
実験4	5mmol	10mmol	5mmol	5mmol	5mmol

3.1 仮説

ブロモアニリンのブロモ基とアミノ基はどちらもオルト・パラ配向性を持つが、アミノ基のオルト・パラ配向性のほうが強いため、塩化ベンゼンジアゾニウムはアミノ基のパラ位あるいはオルト位に置換されると思われる。また、4-ブロモアニリンの場合では水に溶かした場合5員環ができると予想されるため、水に溶けた状態と溶けていない状態では色に違いがみられると予想できる (図2, 3)。

2-ブロモアニリンと 4-ブロモアニリンのアゾ染料の構造(点線は水素結合)

図2 2-ブロモアニリン

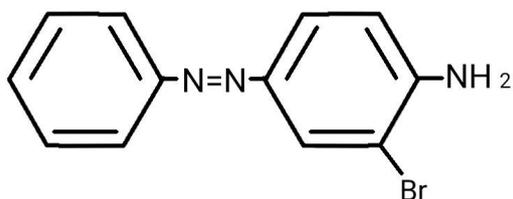
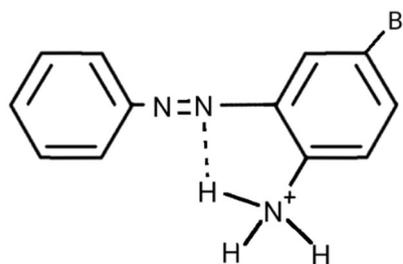


図3 4-ブロモアニリン



3.1 結果

2-ブロモアニリンでは赤色の、4-ブロモアニリンでは黄色のアゾ染料が合成できた (図7, 8)。2-ブロモアニリンは塩酸に完全に溶けず、白色の塩が沈殿していたが、わずかに溶けていた液層に赤色が確認できたため、2-ブロモアニリンから合成できるアゾ染料は赤色

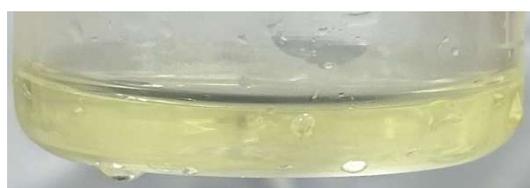
であると断定した。4-ブロモアニリンは塩の沈殿は確認されず、問題なく合成できたが、時間経過とともに図のような緑色から黄色へと変わっていき、黄色からそれ以上の変色が確認されなかったため、4-ブロモアニリンから合成できるアゾ染料は黄色と断定した。

2-ブロモアニリンと 4-ブロモアニリンのアゾ染料

図 7 2-ブロモアニリン



図 8 4-ブロモアニリン



3.1 比較実験

2-ブロモアニリンと 4-ブロモアニリンのアゾ染料にどのような性質の違いが表れたかをさまざまな条件で比較した。

3.1.1 乾固した状態の比較

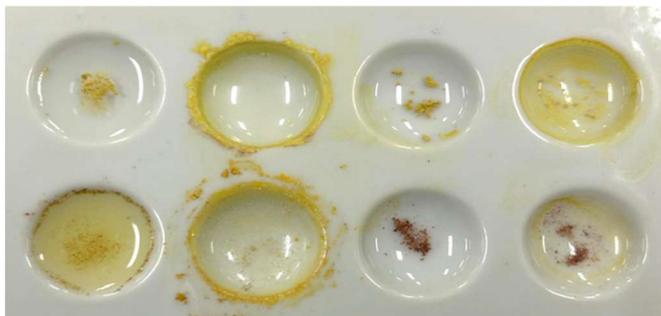
アゾ染料を固体として取り出すため、合成したアゾ染料をほこりが入らないように蓋し、乾固させた。2-ブロモアニリンでは褐色の針状結晶と 4-ブロモアニリンでは黄色の粉末状の固体が得られた。

3.1.2 溶媒への可溶性

窒素同士の二重結合であるアゾ基を一つ持つモノアゾ染料は水に溶けず、二つ以上持つジスアゾ染料などは水に溶けるが、今回の方法で合成したアゾ染料のアゾ基は一つだけであるため、乾固物のうち水に溶けないものが合成されたアゾ染料であると考えられる。そのため、水、エタノール、ヘキサンに溶かした場合の状態を観察し、水に溶けた成分と溶けていない成分の色を確認した。(図 9)

その結果、2-ブロモアニリンでは赤色の物質が水に溶けずに浮かび、黄色の物質が水に溶けていた。黄色の成分は乾固中あるいは合成中に酸化などにより生じた不純物ではないかと考えている。4-ブロモアニリンでは水に溶ける成分がなかったため、不純物がない、あるいは少ない状態で乾固できたと思われる。

図 9



上が 2-ブロモアニリン、下が 4-ブロモアニリンの乾固物の列であり、それぞれ溶媒は左から、水、エタノール、(未実験)、ヘキサン。

3.1.3 スペクトルの測定

肉眼で観察した色の差だけでは、性質に違いが表れていると断言できないと考えたため、吸光度計でスペクトルの測定を行ったが、濃度の調節に失敗したためか、測定がうまくできなかった。

3.2 実験 2

実験 1 にて 2-ブロモアニリンと 4-ブロモアニリンのアゾ染料に大きな差が見られたが、この差が不純物や収量の差によるものではないことを示すため、できる限り不純物ができないように合成する方法を考えたところ、参考にしていたスクエア最新図説化学記載の合成方法では、アニリンに対し塩酸と亜硝酸ナトリウムが過剰であったため、化学反応式に則り等量で実験を行った。また、2-ブロモアニリンは常温で液体、4-ブロモアニリンは常温で固体であるため、計量の問題上 4-ブロモアニリンのみ使用している。

3.2 結果

本来ジアゾ化の段階では透明な黄色の溶液になるはずだったが、等量で実験を行ったところ、ジアゾ化の段階で黄色のペースト状の物質が発生した(図 10)。そのペースト状の物質ごとカップリング反応をしてアゾ染料を作成した場合、アゾ染料にも黄色のペースト状の物質が確認できたが、ろ過によりできるだけペースト状の物質を取り除いてカップリング反応をした場合は、オレンジ色のアゾ染料が合成できた。

しかし、複数回実験を行ったところ、アゾ染料の色や性質が実験を行うごとに変わっていたため、再現性が求められると考え、実験 3、4 を行うことにした。

図 10 ジアゾ化した際の黄色のペースト状の物質



3.3 実験3

再現性を確かめるため、2人同時に同条件下での実験を行った。手順及び反応物の物質量は実験2と同じである。実験は2回行った。

3.3 結果

1回目 2人とも透明なオレンジ色であったが、濃淡に差が生じた。(図 11)

2回目 2人とも1回目と同じで色が似ていたが、不透明で混濁したオレンジ色となった。また、アセトンで溶かすと黄色を呈した。

図 11 同条件下で合成した4-ブロモアニリンのアゾ染料



3.4 実験4

実験2、実験3より、ジアゾ化の段階で不純物が発生していたが、亜硝酸ナトリウムを全量加えたときにそれが発生していたと考えられるため、秤量時に誤差が生じていたのではないかと気になり、 1.0×10^{-2} まで量ることができる電子天秤で秤量していたところを、ガラス風防のついた 1.0×10^{-4} まで量ることができる電子天秤で秤量し、アゾ染料を合成した。また、以前の実験では50mLのビーカーを使用していたが、今回の実験に限り試験管を使用した。

3.4 結果

今回も実験2、3と同様に黄色のペースト状の物体が発生し、手早く実験を行うため、

ペーストを除去せずにそのまま使用した。合成直後は透明な橙色だったが、時間経過とともに黄色の固体が得られ、液体部分は透明になった。(図 12,13)

図 12 少量で合成したアゾ染料



図 13 時間経過により沈殿した黄色の物



4.考察

実験 1 については、今回作ったアゾ染料はモノアゾ染料であり、モノアゾ染料は有機溶媒に溶けやすいという特徴を持つ。よって、ヘキサンに溶けた 4-ブロモアニリンの生成物はアゾ染料が合成されたと考える。また、2-ブロモアニリンの生成物には水に溶け出した黄色い成分と周りに溶けずに残った赤い成分とがあり、黄色い成分は水に溶けたことから生成過程で生じた不純物であると考えられる。構造異性体から生成された物質が異なる色を呈していたのは、オルト・パラ配向性による生じる物質の構造の違いによるものだと考えられる。オルト・パラ配向性とは、ベンゼン環につく置換基の種類によってその後の置換反応でベンゼン環のどの位置に置換物質がつくかが変わるという性質である。ブロモアニリンについているアミノ基とブロモ基はどちらもオルト・パラ配向性を持つが、アミノ基の方がより強いオルト・パラ配向性を持つのでアミノ基からみてオルト位もしくはパラ位に置換物質(今回は塩化ベンゼンジアゾニウム)がつくと考えられる。また、オルト基とパラ位がどちらも空いている場合、より安定性の強いオルト位に置換すると考えられる。

実験 2 では、実験回ごとに溶液の色が違うのは気温、湿度などの環境のわずかな違いによって少しずつ違ってくるという考察を立てた。ジアゾ化の際、温度を 0~5°C に保っていないと塩化ベンゼンジアゾニウムが水と反応してフェノールになってしまう。亜硝酸ナトリウム水溶液を滴下した時、最後の 1,2 滴で急にペースト状となった。亜硝酸ナトリウムにはナトリウムイオンも含まれているため、フェノールができていたとしたら反応してナトリウムフェノキシドができていている可能性がある。ナトリウムフェノキシドは黄色の物質

であるため、このペーストはそれが原因である可能性が高いと思われる。また、塩化ベンゼンジアゾニウムとナトリウムフェノキシドは反応して p-ヒドロキシアゾベンゼンもできる。ただし、p-ヒドロキシアゾベンゼンはどちらかというところでは橙赤色でジアゾ化の時点では純粋に黄色だったのでそれができている可能性は低い、もしくはできていても少量だと思われる。また、ペースト状のジアゾ化の生成物をこまごめピペットでとった時、一部が液状だったため、ジアゾニウムイオンが残っておりそれらが反応してアゾ染料ができたと考えられる。乾固するために、できた沈殿を濾紙に取り出したとき、赤い液体が染み込んだことから何らかの不純物も生成されていると考えられる。これが p-ヒドロキシアゾベンゼンの可能性はある。

実験 3 からは、2 人で同時に作るとほぼ同じ色のものができたことから人数的な面での再現性は保たれていると考えられる。つまり、同条件下で作れば同じものができることが証明された。ただ最終生成物の濃さが微妙に違っていたのは収率の違いだと考えられる。このことから、やはり実験 2 で上げたその日その日で最終生成物の色が違うというのは、ジアゾ化の途中の冷やす時の温度など、条件のわずかな違いによるものだと考えられる。また、2 回目の実験で強力な有機溶媒であるアセトンで溶かした時に黄色を呈したことと、実験 2 の赤い液体のことから、生成された染料は過程通り黄色であり、そこに何らかの不純物の赤色が混ざってオレンジ色となったのではないかと考察できる。よって、純度の高い場合は黄色、純度が低く不純物が多い場合はオレンジよりの色が出るのではないかと考える。

実験 4 について、誤差をできる限り小さくした状態で合成しても、黄色のペースト状の物質ができているため、化学反応式に則り、すべての物質が定量で反応しても、塩化ベンゼンジアゾニウム塩ができたか、あるいは別の反応が起こったのではないかと考えられる。

また、今回は確認できなかったが、もし予測通り五員環ができていたとしたら、炭素同士の結合が 1 つ、炭素と窒素の結合が 2 つ、窒素と水素の結合が 1 つという五員環ができている。しかし結合の 1 つは水素結合であり他の結合より弱いため、壊れやすいと考えられる。五員環ができた場合は比較的電気陰性度の大きい窒素イオンにひかれて極性が現れるため水に溶けやすくなるのではないかとと思われる。しかし、五員環が壊れてしまえば水に溶けにくくなり沈殿として出てくる、ということも考えられる。また、五員環になると構造が変化するため現れる色も変化する可能性がある。よって、実験 4 のように沈殿として出てきたものが何かはまだ特定できていないが、生成されたアゾ染料が沈殿した可能性も考えられる。

5 課題

これからの課題としては、的確な生成条件を見つけ、時間をまたいでも再現性を得られるようにすることと、そして不純物をできるだけ少なくし、純粋なアゾ染料を生成することである。今は不純物が何なのかも仮説でしかなく、特定ができていないためまずはその特定をする必要がある。もともとの実験の目的は予備実験の考察にも書いた通り構造異性体から生成されたアゾ染料はオルト・パラ配向性による構造の違いから色や性質が異なるのかを調べるためであり、ブロモアニリンからのアゾ染料の合成を安定して行えるようになった暁には、最初生成物の構造決定をしたい。そして今までの性質の比較とこれからブロモアニリンでとるデータをクレゾールのものと比較し、配向性とアゾ染料の発色との関係性を見出したいと考えている。

6 参考文献

- 第一学習社 新課程二訂版 スクエア最新図説化学
アゾカップリング反応について | J-STAGE
https://www.jstage.jst.go.jp/article/yukigoseikyokaishi1943/27/1/27_1_23/_pdf/-char/en
- ・芳香族化合物の配向性と反応性：オルト・メタ・パラの配向性 | Hatsudy 総合学習サイト
<https://hatsudy.com/jp/orientation.html>
- ・誘起効果（I効果）と共鳴効果（R効果）の教科書：オルト-パラ配向性，メタ配向性の理由を説明する | 化学のススメ
<https://chemblogno1.blogspot.com/2019/12/ir.html>

7 謝辞

研究を進めるにあたり、アドバイスをくださった東京科学大学 物質理工学院 石曾根隆先生、東京都立日比谷高等学校 理数探究および理数探究発展化学分野担当の藤原 將起先生、岩淵寛先生、藤原礼子先生にこの場を借りて心より感謝申し上げます。

隣接した地点間のスズメの逃避行動の違い

東京都立日比谷高等学校 安藤心太郎

1. 要旨

隣接した地点間でスズメが近づいてくる人に対して逃避行動をとる距離が異なっていることを検証した。逃避距離を測定したところ、隣り合う地点でも逃避行動は優位に異なることが分かった。さらに別の地点でも異なる逃避行動が観察されたことから、各地点の人為的・自然的環境と、スズメの逃避行動との関係を考察した。その結果、類似した環境下では、スズメの逃避距離は似通った傾向を示すことが分かった。

2. 研究目的

筆者の通学する都立日比谷高校内およびその周辺には、スズメが生息している。日頃よりスズメの観察をしていたところ、高校内で見られる個体と、校舎のすぐ裏に隣接するプルデンシャルタワー周辺の個体とではスズメに対して逃げられることなく近づける距離が異なっていると感じた。スズメの逃避行動についての記述がある、浅野（1996）では、離れた地点間での逃避行動の比較は行われているが、このような互いに隣接した地点間での研究はなかった。また、日比谷高校周辺での逃避距離も前述の先行研究に示されている10mから20mというデータよりも短いものであることが予想されたうえに、近年ではスズメの逃避行動に関する研究は行われていない。

以上のことにより、日比谷高校周辺の隣接した地点に生息するスズメについて継続的な観察を行い、スズメの逃避行動の場所による違いについて検証する。

3. 研究手法

一般的に、鳥類の逃避行動の評価には逃避距離という指標が使われる。逃避行動の定義に関しては、例えば、Weston et al. (2012) や、浅野ら (1996) などにおいては、「人間との距離を拡大するために、その場から長距離を移動する場合」を逃避行動とし、「短距離の移動」である回避行動や、明らかな警戒行動とは区別されている。前述の研究においては、計測される逃避距離の範囲は10mから50mと幅があるのに対して、本研究においては、対象とする個体の逃避距離がおおよそ1mから10mであることが予測されたため、逃避行動とみなす行動の範囲を拡大し、単に「近づいてきた人からスズメが飛翔して離れる行動」を逃避行動と定義した(図1)。また、行動の記録については、上述の研究等に基づき、「逃避行動が始まる瞬間における人とスズメとの距離」を逃避距

離と定義した(図2)。距離の計測は、レーザー距離計(BOSCH GLM50型)を用い、スズメに刺激を与えないためスズメが飛び去った直後に計測した。計測の際の服装は白いシャツと黒のズボンに統一し、およそ秒速0.7mの一定の歩行速度で、直線的にスズメに接近した。また、前述の先行研究では計測は複数人あるいは自動車から行われているものもあるが、本研究では観察の開始から終了まで筆者がすべて1人で行った。なお、実験中にスズメに対して意図的に接近した者は、筆者の他にいない状況で実験を行った。

また、逃避距離の計測に加えて、各調査地点におけるスズメを取り巻く環境が行動に与える影響を考察するため、その地点の特徴、観察当日の状況等を記録した。地点の特徴について記録した内容は、周囲の植生や空間の広さ、人の通行量やその場所の利用状況である。観察されたスズメの行動についても個別に記録した。

以上の計測を以下に示す実験1、2において行い、観察地点および時期はそれぞれの実験ごとに定めた。

I. 実験 I

2024年4月から11月、2025年4月から7月にかけて、上記の調査を日比谷高校校舎付近、日比谷高校校庭、プルデンシャルタワーの3地点において行った(調査地点は以下、校舎、校庭、タワーとする)(図3)。

II. 実験 II

実験Iの結果と考察を踏まえ、2025年4月から7月にかけて調査を行った。新たな観察地点として、皇居の千鳥ヶ淵沿いに整備されている千鳥ヶ淵緑道、および自宅周辺の小学校を調査地に設定して実験Iと同様の調査を行った(以下、千鳥ヶ淵、自宅周辺とする)。

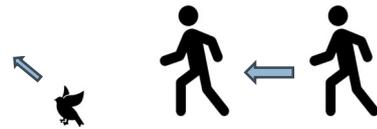


図1 逃避行動の定義

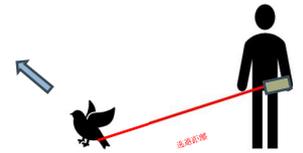


図2 逃避距離の定義



図3 調査地点

4. 結果

I. 実験1の結果

2024年度の観察では、3地点で延べ25個体の観察を行った。各地点におけるデータ数は、校舎10個体、校庭7個体、タワー8個体である。各地点の逃避距離の平均は、校庭では7.67m、校舎では3.99m、タワーでは2.51mとなった(表1、図4に示す)。有意水準 $\alpha=0.05$ でt検定をした結果、すべての地点間で逃避距離が有意に異なっていることが分かった(校舎-校庭間： $p=0.17$ 、校舎-タワー間： $p=0.013$ 、校庭-タワー間： $p=0.001$)。

2025年度の観察では、前年に引き続き、校舎、タワーに関して新たなデータを得た。校庭に関しては観察が実施できなかったため、新たにデータは得られなかった。観察した個体の延べ数はタワーで3個体、校舎で10個体であり、平均の逃避距離は、タワーで3.86m、校舎では4.43mとなり、2024年度と比べて2地点間のデータの差異が小さくなり、検定の結果も有意性を示さなかった($p=0.052$) (図6)。

	日比谷高校		タワー周辺
	校庭	校舎	
データ数	10	7	8
平均値(m)	7.67	3.99	2.51

表1 実験1における平均逃避距離とデータ数

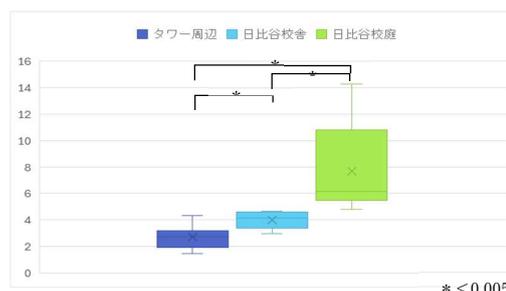


図4 実験2における逃避距離の分布

II. 実験IIの結果

実験IIにおいては、千鳥ヶ淵と自宅周辺において延べ14のデータを得ることができた。観察されたのべ個体数は千鳥ヶ淵において6個体、自宅周辺において8個体であった。逃避距離の平均は、千鳥ヶ淵で2.75m、自宅周辺では5.49mとなった(表2、図5)。実験Iと同様に有意水準 $\alpha=0.05$ でt検定を行うと、p

	タワー	校舎	校庭	千鳥ヶ淵	自宅
データ数	11	17	10	6	8
平均(m)	3.02	4.17	7.67	2.75	5.49

表2 実験2における平均逃避距離とデータ数

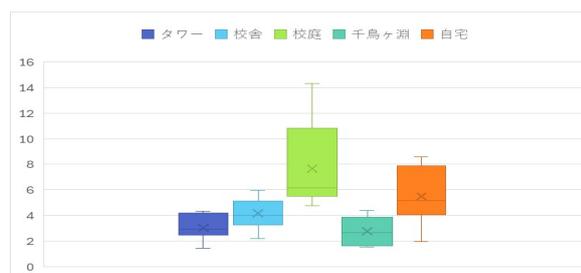


図5 実験1における逃避距離の分布

=0.020 となり行動は有意に異なっていた。また、実験 I の調査地点との間の関係も調べたところ、千鳥ヶ淵-タワー間、および校舎-自宅周辺間で、 $p > 0.05$ となり、行動に類似性がみられた。

III. 各地点の環境に対する観察結果

実験 I, II のそれぞれの観察地点で、場所ごとの環境をまとめた。

校舎は、建物に囲まれて低木と草本の混在する草地の部分と、舗装された部分があり、周囲にはキンモクセイ、イチヨウなどの樹木が植えられている。午前 8 時前後には、およそ 1000 人の生徒・学校関係者が通行する。スズメは主に草地の部分とキンモクセイ上にいることが多く、砂浴びをしている様子などが観察された。

校庭は、砂地で周囲を網で囲われている。スズメは主に網の周辺で採餌しており、校庭内にはあまり見られなかった。午後には部活動が行われる。スズメは数十羽の単位で群れている。校庭の裏にある議員会館の植え込みとの間で移動している。

タワーは近隣に勤務する人の主に休息の場として使われるようベンチなどが配置されており、昼食を食べるなどの利用がある。木が植えられており、上部には空間が開いていない。周囲にレストランなどもあり、ベンチで食事をする人も多いことから、人による給餌が行われている可能性が高い。スズメはエサを探索していることが多い。また、スズメが自発的に筆者から 1 m 以内までの距離に近づく行動が観察された。

千鳥ヶ淵は、樹木が道に沿って数列植えられている。遊歩道となっているため常に人通りがある。エサを探して地面をあさっていることが多い。千鳥ヶ淵においても、タワー同様に自発的に筆者に近づく行動がみられた。

自宅周辺は、小学校の通学路となっており、毎朝 500 人ほどが通行する。スズメは主に道路において採餌していた。

5. 考察

I. 実験 I の考察

実験 I から、校舎、校庭、タワーの 3 つの地点でスズメの逃避行動が異なっていることが示された。この考察をするにあたり、前提として、スズメの生態について次に示す 2 つの可能性が考えられる。①地点間で個体の移動はなく、地点ごとに別の個体が異なる行動をしている②地点間で個体が移動しており、同じ個体が、場所によって異なる行動を示している。この 2 つの生態のうち、どちらをとるかにより、実験 I の考察が異なるものとなる。そのため、個

体の移動がない千鳥ヶ淵、自宅周辺を追加した実験2を行った。個体の移動を踏まえた考察について、実験IIと合わせて考察を行う。

校舎とタワー間の2024年と2025年との比較により、タワーでの逃避距離が長くなっている点については、タワーにおけるデータ数が少ないため判断が難しい。今後、データを増やしていく。



図6 年度別 タワーおよび校舎における逃避距離の分布

II. 実験IIの考察

実験Iを踏まえ、逃避距離と環境の相関関係を考察していく。

逃避距離に関して、校舎と自宅周辺の間、そしてタワーと千鳥ヶ淵の間、では有意な差はないことが示されている。以上の点をもとにして各地点を分類すると、①タワー・千鳥ヶ淵 ②校舎・自宅周辺 ③校庭 の3つの地点に大きく分けることができる。

①の地点では、共通して、逃避距離が短く自発的に人に近づいていく行動が確認された。これは、周囲に人が滞在する時間が長くえさも得やすいため、人への慣れ具合が比較的高くなっており、それに伴って人に近づくとエサが得やすいことや、危害を与えられることはないことを学習しているためと推測される。

②の地点では、①と比較して逃避距離がより長くなる傾向がみられた。これは、毎日数百人から千人の人通りがあり、警戒心が強くなっていることや、人との利害関係がないということが理由として推測される。

③の地点では逃避距離が長くなっている傾向がみられる。一つの地点しか対象となっていないので一般化することはできないが、人通りが少なく、また空間が開けていて群れている個体数が多いため人を早く発見できることによって、逃避距離が長くなることが考えられる。

以上を踏まえると、すべての個体がそうであるとは断言できないが、傾向として、環境によって逃避距離が変わっている可能性がある。

6. 今後の展望

現段階のデータは、調査期間が約 10 ヶ月であったこと、学校活動により観察が制限されたことなどによりデータ数が不足しており、同様の調査を継続しデータの精度を高めることが必要である。また、今回の調査からは、隣接した地点間でスズメの逃避行動が異なっている理由を明確に結論付けるには不十分である。より正確な結論を出すためには、個体識別を行うことが求められている。個体の識別を可能とする方法として、AI による画像認識技術や排泄物に含まれる DNA の識別などの手法を活用することが考えられる。しかし、技術的・設備的な面で、現状実施することが難しいため、簡易的な手法で個体識別を行える方法を検討する。

7. 参考文献

- [1]浅野文・島谷幸宏・渡辺裕二・渡辺昭彦, ヒトとトリの距離ーヒトとトリの共存関係を求めてー (1996) 土木計画学研究・論文集 13: 303-312.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/journalip1984/13/0/13_0_303/_article/-char/ja/
- [2]佐野昌男,スズメの個体群の行動圏構造 (1973)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jyio1952/7/1/7_1_73/_pdf/-char/ja
- [3]岡久 雄二, 自然観光資源活用が野生下のトキの保全へもたらす正と負の影響. 保全生態学研究 (2023)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/hozen/advpub/0/advpub_2034/_pdf/-char/ja
- [4]環境省 III.調査の準備と方法 (調査編
https://www.env.go.jp/nature/dobutsu/bird_flu/manual/pref_0809/5_chpt3.pdf
- [5]Daniel T. Blumstein, “Flight-Initiation Distance in Birds is Dependent on Intruder Starting Distance”(2003)
[https://blumsteinlab.eeb.ucla.edu/wpcontent/uploads/sites/104/2017/05/Blumstein\]WM2003.pdf?utm_source=chatgpt.com](https://blumsteinlab.eeb.ucla.edu/wpcontent/uploads/sites/104/2017/05/Blumstein]WM2003.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- [6]M. A. Weston, E. M. McLeod, D. T. Blumstein, P. -J. Guay, “A Review of Flight-initiation Distances and Their Application to Managing Disturbance to Australian Birds”(2012)
https://blumsteinlab.eeb.ucla.edu/wpcontent/uploads/sites/104/2017/05/Weston_etal_2012_Emu.pdf?utm_source=chatgpt.com

セミの抜け殻の剛毛の滑り止め効果

東京都立日比谷高等学校 大谷真奈美

1. 概要

セミの抜け殻の観察時に脚を触ると、その表面に抵抗を感じた。どのような構造が抵抗を生むのか興味を抱いたため、セミの抜け殻の脚の表面にある剛毛を、光学顕微鏡と電子顕微鏡を用いて観察した。観察結果をもとに、剛毛の構造が滑り止め効果を有するか測定するモデル実験を実施して検証した結果、3種類の長さを持つ剛毛の構造によって、凹凸のある面での滑り止め効果があることが示唆された。

2. 研究目的

私は手掌多汗症を患っており、汗の影響で、ものが滑ってつかみにくいという悩みがあった。セミの抜け殻を触りながら観察していた際、指に抵抗を感じたため、私の手でも滑りにくいと感じたセミの抜け殻の中脚の剛毛の構造を明らかにし、滑り止めとして応用するために研究を始めた。昆虫の脚や触角には接着するための剛毛が存在することが参考文献よりわかっていたが、セミの幼虫の剛毛については先行研究がほとんど存在していなかった。そのため、粘液で接着している可能性、剛毛そのもので接着している可能性、剛毛の持つファンデルワールス力で接着している可能性など、複数の可能性が考えられた。

以上を踏まえて、本研究では、まずセミの抜け殻の中脚の剛毛の構造を明らかにし、その後その滑り止め効果を検証する。

3. 観察 I 光学顕微鏡を用いたセミの剛毛の構造の観察

◎試料

2023年に採取したセミの抜け殻（アブラゼミ、ミンミンゼミそれぞれのオス、メス）

◎手法

光学顕微鏡を用いて脚部を観察し、全体像を把握してどのような特徴を持っているのか調べる。

◎観察 I の結果

セミの脚部（腿節・脛節）には剛毛が存在することが確認された（図1）。2023年の夏に採取したものを2024年の春に観察したため、主に折れた剛毛と毛穴が見られた。また、抜け殻の剛毛の内部には、空洞が確認された（図2）ために、成虫にも剛毛が備わっていることが示唆された。

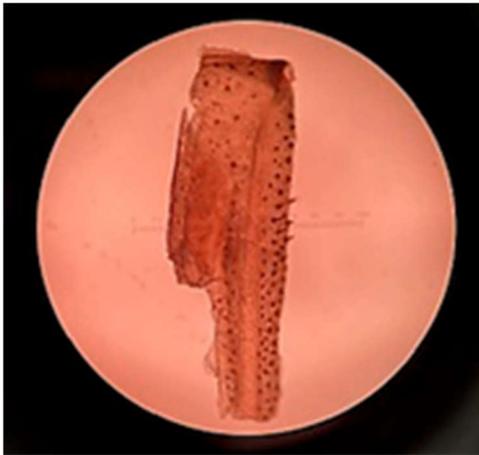


図 1

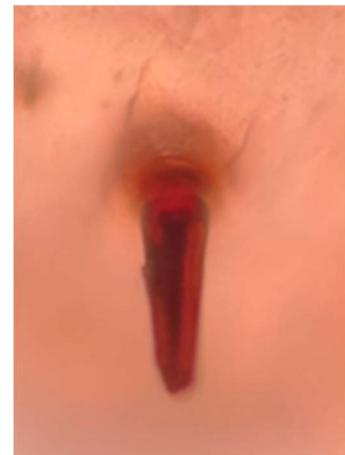


図 2

4. 観察Ⅱ 電子顕微鏡を用いたセミの剛毛の構造の観察

◎試料

2024年に採取したセミの抜け殻（アブラゼミ、ミンミンゼミそれぞれのオス、メス）の中脚脛節

◎手法

電子顕微鏡で観察し、倍率を変えながら剛毛の画像を撮影する。その画像を計測アプリ「ImageJ」を用いて剛毛の長さや密度を計測する。セミが地面を歩く際に、地面に平行な向きで中脚を2面に分けるとき、地面を向く面を下側、空を向く面を上側と定義する。この時それぞれの種類・性別のセミの中脚を、上側・下側と定義する。また、中脚を地面に垂直な向きに立てて2つの円柱を作るように地面と平行な向きで半分に分けると、その上半分を爪側、下半分を腿節側として定義する。これらの4つの分類の組み合わせごとに画像を撮影する。特に、密度については上側・下側（図7）で分けて計測する。結果を表1に示す。

◎観察Ⅱの結果

アブラゼミ、ミンミンゼミの雌雄どちらにも $500\ \mu\text{m}$ ～ $1\ \text{mm}$ の剛毛（図3）、 $100\ \mu\text{m}$ 前後の剛毛（図4）、 $3.8\ \mu\text{m}$ の剛毛（図4、図5）の、長さが異なる剛毛が3種類みられた。イモリの手のひらに見られるようなファンデルワールス力を発生させるような大きさの剛毛はみられず、いずれの剛毛にも凹凸はほとんど無かった。粘液を出すような構造も有していなかった。また、 $100\ \mu\text{m}$ と $500\ \mu\text{m}$ ～ $1\ \text{mm}$ の剛毛は必ずしも脚に対して垂直に生えているわけではなく、多くは爪のある方向に向かって斜めに突き出していた。その角度はそろっているわけではなく、ほぼ中脚の表面に平行な毛があれば、垂直に近いものも散見された（図3、図4）。表面には土の粒子や細長い傷等も見られ、中には折れているものも散見された。 $3.8\ \mu\text{m}$ の剛毛については爪のある方向に毛先を向けて、脚の表面に対してほぼ水平に生えていた。この剛毛と脚の表面の間に土の粒子が挟まっているものも見られた（図6）。

100 μm 以上の剛毛の密度を計算した結果（表1）、アブラゼミ、ミンミンゼミの雌雄ともに下側のほうが、上側よりも密度が大きくなることが示唆された。

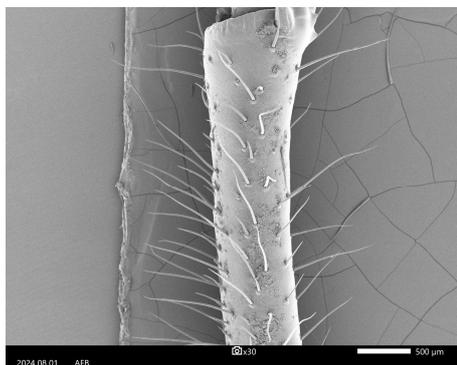


図3 アブラゼミオス 30倍

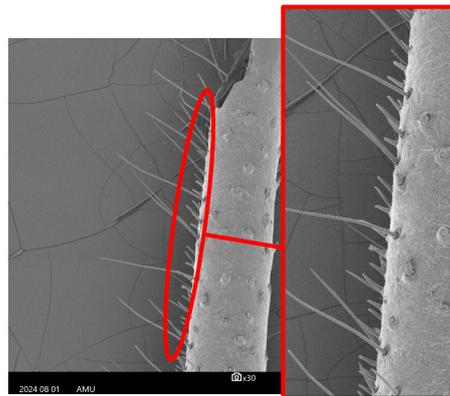


図4 アブラゼミメス 30倍

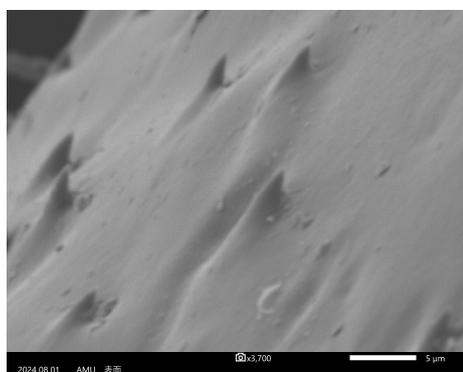


図5 アブラゼミメス 3700倍

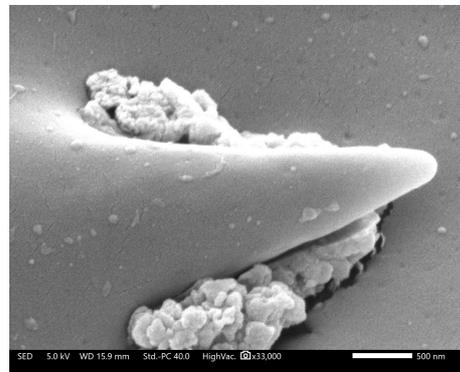


図6 ミンミンゼミメス 33000倍

表1 種類・性別ごとの部位による 100 μm 以上の長さの剛毛の密度

[本/ mm^2]	アブラゼミ	ミンミンゼミ
オス/上側	23.8/ mm^2	8.49/ mm^2
オス/下側	34.8/ mm^2	21.4/ mm^2
メス/上側	15.5/ mm^2	15.6/ mm^2
メス/下側	26.3/ mm^2	26.6/ mm^2



図7

5. 観察I・観察IIの考察

セミの抜け殻の中脚脛節の剛毛は、①500 μm ~1 mmの剛毛、②100 μm 前後の剛毛、③3.8 μm の剛毛 の異なる3種類の長さで分類できることが考えられる。これらはおおよそその長さでゆるやかなまとまりを形成している。ただし、本観察は、抜け殻を用いた観察であるため、例えば、③のような短い剛毛は、①や②のような長いものの成長途中の剛毛である可能性も考えられる。また、③に示す3.8 μm の長さの剛毛は、①や②の剛毛と比較すると明らかに短いので、滑り止めとは異なる役割を持つことも考えられる。そもそも昆虫の剛毛

には感覚器官としての役割を担っていることが多いので、本研究で言及した剛毛にもその役割が当てはまる可能性もあるが、まだ明らかになっていない。

6. 実験Ⅰ 滑りにくさを相対的に検証する実験

◎実験方法

- ① アブラゼミのオスの抜け殻（2024年採取）の中脚の脛節のみのプレート(a)、セミの脚部を模して作った爪楊枝プレート(b)を用意する((a), (b)はともに2cm×2cm) (A)。プレート(a)については使用した脛節における剛毛の密度の違いによる誤差を避けるため、2枚用意する。プレートのそれぞれに重りとして500円玉を載せる(すべてのプレートの重さは11gに統一)。
- ② トレー(B)として、プラスチック板・土(日比谷高校敷地内のアブラゼミが多く羽化する緑地の土を採取し、十分に乾燥させたのち、土の粒子が直径1mm以下になるようにふるいにかけた状態のもの)・豚の皮の3種類のトレーを用意する(すべて横5cm×縦15cm。プラスチック・土のトレーは接地面の凹凸の有無という条件を示し、豚の皮膚は人間の皮膚を想定して水分や毛を除去した状態のものを準備した)。
- ③ 土台にプレートを置き、土台を傾ける。それぞれの土台に対して、プレートが滑り始めた角度を滑りにくさの指標として測定した。プレートとトレーの組み合わせにつき10回ずつ計測を行い、その平均値を計算した。

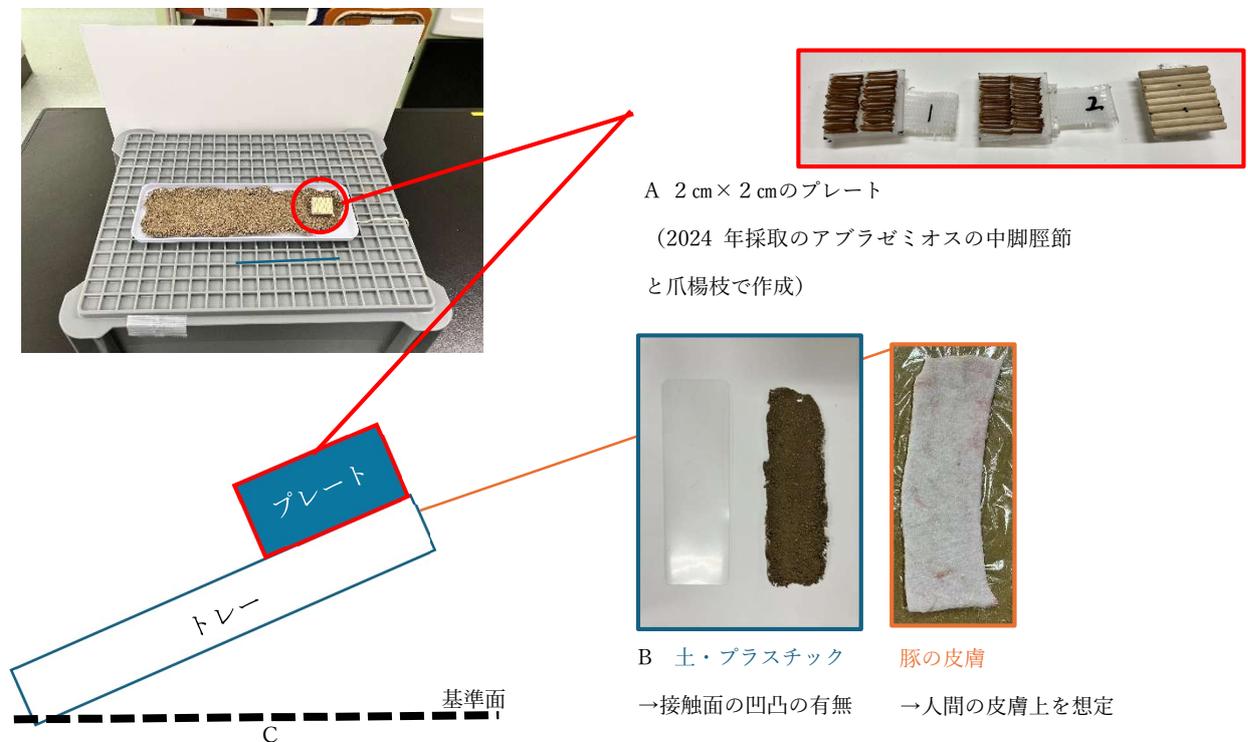


図 8

◎実験Ⅰの結果（図9）

プラスチックのトレー上を滑らせた際は、セミプレートと爪楊枝プレートの間で有意差は見られず、滑り始めた角度は、ともに 30° 未満であった。土のトレー上を滑らせた際は、セミプレートと爪楊枝プレートの間で有意差が見られ、セミプレートのほうが大きい角度で滑った。豚の皮膚のトレー上を滑らせた際は、セミプレートと爪楊枝プレートの間では有意差は見られず、いずれも 50° 前後で滑り始めた。

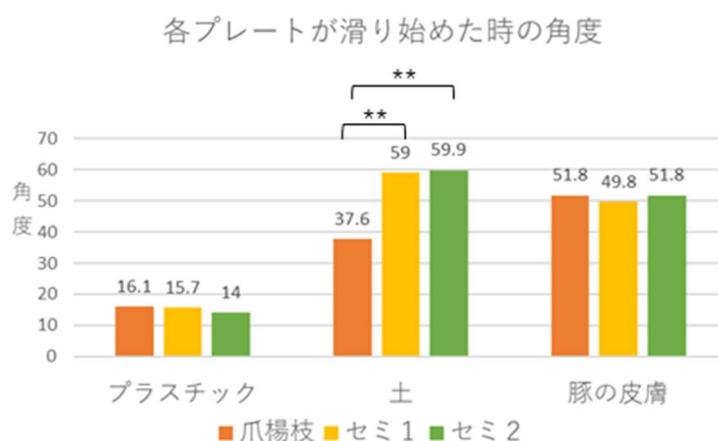


図9

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

7. 実験Ⅱ 接地面の凹凸の程度を検討する実験

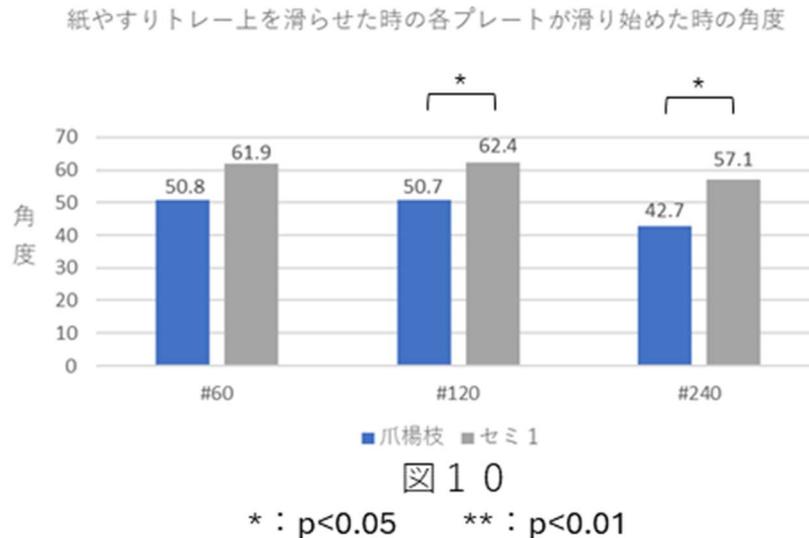
◎実験内容

セミの抜け殻（2025年採取）の中脚の脛節のみのプレート（c）、セミの脚部を模して作った爪楊枝プレート（d）を用意する（c, d）はともに $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 。土台として、粗さの異なる3種類の紙やすり（#60・#120・#240）を用意する。その後、実験Ⅰと同じ条件で実験を行う。なお、紙やすりを構成する粒子の直径は#60で $250\ \mu\text{m}$ 、#120で $106\ \mu\text{m}$ 、#240で $60\ \mu\text{m}$ である。

※本実験では、紙やすりの粒子の直径を、紙やすりの凹凸の深さに近似させて考える。

◎実験Ⅱの結果（図10）

#60のトレー上を滑らせた際、爪楊枝プレートとセミプレートの間で滑り始めた角度に有意差は見られなかった。#120と#240のトレー上を滑らせた際には爪楊枝プレートとセミプレートの間で有意差が見られ、セミプレートのほうがより小さい角度で滑り始めた。



8. 実験Ⅰ・実験Ⅱの考察

実験Ⅰより、土トレーの上を滑らせた結果(図9)に着目すると、爪楊枝プレートよりもセミプレートのほうが、滑り始めた角度が大きい。このことから、セミプレートのほうが、爪楊枝プレートよりも、滑りにくいことが考えられる。すなわち、セミの抜け殻の中脚脛節の剛毛は、土のような凹凸のある接地面で滑り止めとしての効果を発揮する可能性が示唆された。

滑り止め効果をセミの剛毛が持つ理由として、セミの幼虫は、中脚脛節の剛毛を、羽化するために土の中を掘って地上を目指す際に使っている可能性が考えられる。セミは、地中を移動する際に、掘り返した土の粒子を乗り越えて進んでいく必要がある。このとき、不安定な土の粒子の隙間に剛毛が入り込むことができれば、足場がより安定させることができると考えられる。なお、セミの幼虫は地上に出てから羽化の場所を探して木の幹や枝に登ったり、そこにつかまったりしているときは、ほとんどの場合爪の先にある2~3本の突起を利用している。そのため、滑り止めとしての使い道は限定的であるので、昆虫の剛毛の一般的な役割である感覚器官としても利用している可能性は十分にある。

プラスチックの表面には剛毛が入り込めるような凹凸が存在しないため、プラスチックのトレー上では爪楊枝とセミのプレートが同じくらいの角度で滑り出したと考えられる。また、実験Ⅰ(図9)より、豚の皮膚トレー上では、爪楊枝プレートとセミプレートは同程度の滑りにくさを示した。豚の皮膚は人間の指先の皮膚の代用と設定したが、毛穴・しわなどの突起、水分、油分などの取り除くことができない条件による影響を受けたため、爪楊枝プレート・セミプレートともに滑りにくくなったと考えられる。

参考文献(*)より人間の指紋の深さは100 μm 、幅は460 μm に近似できるので、人間の指紋はセミの剛毛が入りやすい構造であると予想される。このことと、実験Ⅱ(図10)より、#120・#240の粗さのトレー上を滑らせた際は効果のある滑りにくさを得られることから、凹凸の深さという観点に着目すれば、セミの抜け殻の脚の剛毛は100 μm 前後の深さの凹凸であれば滑り止めとして利用できると考えられる。

9. 結論・課題

セミの中脚には 500 μm ~ 1 mm、100 μm 前後、3.8 μm の 3 種類の長さの異なる剛毛があり、それが凹凸のある接地面において滑り止めとしての効果を持つことが示唆された。

今後の課題として、剛毛の担う役割の明確化が最優先されると考えられる。本研究では、そもそもの剛毛の構造を観察したうえでセミの中脚脛節の剛毛が持つ滑り止め効果という側面にフォーカスして研究を行ったが、この結果はあくまでも滑り止め機能を持っているという可能性を示唆するに過ぎない。先述の通り、感覚器官として、外部の環境に接する面積を大きくするために様々な長さのある剛毛の形状をとった結果、偶然滑り止めにもなったという考察も可能であり、詳細は本研究では断定することができなかった。また、滑りにくさに対する考察においても深さという観点のみに着目して進めたため、凹凸の幅や接触面の凹凸の種類（波状、格子状など）までは考察することができなかった。指紋に対する滑り止めの効果についても十分な裏付けが得られなかった。滑り止めとしての効果を追求しながら、より多角的な視点で剛毛を観察することで、本来の剛毛の意味をより深く考察できるのではないかと考えている。また、今後は滑りにくさをより客観的な数値として提示することが求められるほか、立体的な模型製作なども検討しているため、工学分野との連携など、生物分野の枠にとどまらない研究を目指していきたい。これらの反省を踏まえ、行いたい実験の概要を以下に示した。

◎セミの剛毛が持つ役割の明確化

・セミの幼虫の剛毛の役割や、成虫の剛毛との役割の違いを調べる観察

まず剛毛が感覚器官として使われているか否かを確かめる。その後、毛の長さや成長段階での違いを考察する。

・セミの中脚脛節の上側と下側の剛毛の密度の違いを確かめる実験

セミの剛毛が上側と下側で密度の違いがある理由が曖昧であるため、剛毛の密度の違いによる滑りにくさの比較を行いたい。

◎滑り止めとしての評価

・ヒトが滑りにくいと感じるかを確かめる実験の実施

セミの抜け殻の脚の表面を触ったときに抵抗を感じるか否かを確かめるための実験を実施し、人間がその滑りにくさを利用したいと感じられるか調べる必要がある。そのために、3D プリンターを用いてより高精度に再現された剛毛のモデルを作成したり、「滑りにくい」という感覚の指標を作ったりする必要がある。

・人間の指紋とセミの剛毛の接触の仕方を確かめる実験の実施

実験Ⅰ・実験Ⅱで使用したようなトレイを新たに作成する際に、指紋が持つしわや幅・溝の深さの違いに着目した材料を考案し採用する必要がある。

10. 参考文献

化学と教育 69 巻 細田奈麻絵 生物から学ぶ接着のサイエンス—バイオミメティクス—
生物接着学会誌 Vol.51 細田奈麻絵 生物から学ぶ環境にやさしい接着技術

[接着学会誌 Vol.51 No.11.pwd](#)

日本機械学会論文集 (C 編) 71 巻 701 号 前野隆司 人の指紋形状の力学的意味 . . .
(*)

[<4D6963726F736F667420576F7264202D208DB293A18E5293638E7796E48B40985F8EE98F9182AB8F4390B394C582CC8EE982F08D952E646F63>](#)

11. 謝辞

電子顕微鏡を利用させていただいた日本電子株式会社の谷口様、模型作成についての助言をいただいた東京都立六郷工科高等学校の深澤先生、並びに指導してくださった中野先生、岡本先生に心から御礼申し上げます。

リュウキュウナミウズムシの行動

～有性個体と無性個体における行動の違い～

東京都立日比谷高等学校 貫井優希

1. 概要

リュウキュウナミウズムシの有性個体と無性個体の間には、両者の生殖様式の違いから生じる行動の違いがあると仮説を立てた。実験より、有性個体は無性個体に比べ、有意に長い距離を移動することが分かった。また、その違いが、有性個体が体外に分泌する化学物質によるものであることが示唆された。

2. 序論

自然界のリュウキュウナミウズムシ (*Dugesia ryukyuensis*) は、以下のタイプのうちのいずれかの生殖様式を有する。①一年中有性生殖をする個体・②一年中無性生殖をする個体・③有性と無性の2つの生殖方法を季節や環境によって使い分ける季節転換型の個体、の3タイプである。^{*1)}リュウキュウナミウズムシにおける無性生殖では一般的には縦分裂により生殖が行われている。一方、雌雄同体であるリュウキュウナミウズムシの有性個体における有性生殖では、互いの生殖器を相手に挿しあう交尾によって生殖が行われる。^{*2)}生殖に関わる個体数に着目すると、無性個体においては生殖が1個体で完結する一方、有性個体においては自分以外の生殖相手を探す必要性が生まれる。以上より、有性個体には生殖相手を探すための行動が必要であると考えた。これを検証するため、「有性個体と無性個体では行動に違いがあり、その行動の違いは有性個体において生殖効率を上げることに寄与している」という仮説を立てて本研究を行った。

3. 使用した個体について

本研究では、リュウキュウナミウズムシ (*Dugesia ryukyuensis*) のOH株を使用した。OH株とは、沖縄県において1984年に採取された1個体のリュウキュウナミウズムシを人工的に株化したクローン集団である。一般に、プラナリア類は温度や水質などの環境要因等により性が変化しやすく不安定である。一方、OH株は有性個体、無性個体ともに性を安定的に維持できるという特徴をもっている。本研究で使用したOH株は、慶應義塾大学商学部の関井清乃先生からお分けいただいた。気温が20°Cに設定された人工気象機内で飼育した。週に約2回、鶏レバーの給餌を行い、餌の回収とともに水替えをした。ただし実験の際には、条件をそろえるために後述の通り、給餌のタイミングを調整した。

4. 実験1 一定時間における有性個体と無性個体の移動距離を測定する

4-I 仮説

有性個体は無性個体よりも、一定時間により長い距離を移動する。

4-II 材料

●研究試料

- ・リュウキュウナミウズムシ(*Dugesia ryukyuensis*) 有性個体・無性個体 各 14 個体

●実験装置等

- ・100 mm滅菌シャーレ (BD Falcon 社) 必要量
- ・500ml ビーカー 2 個
- ・15cm 定規 1 本
- ・30cm 定規 1 本
- ・白バット 1 個
- ・iPhone11Pro (Apple 社)
- ・ケント紙
- ・ボールペン
- ・水道水
- ・カルキ抜き (ハイポ) GX-30 (GEX 社) (チオ硫酸ナトリウム) 適量



図1 リュウキュウナミウズムシ

●その他

- ・ぺんてる平筆 6号 (ぺんてる社) 2 本
- ・駒込ピペット 2 本

(※上記の2項目は個体を扱うために用いる。有性個体と無性個体で使い分ける。)

- ・鳥レバー (餌、市販のもの)
- ・金属メス (鶏レバー切断用)

4-III 実験手法

リュウキュウナミウズムシの有性個体 14 個体と無性個体 14 個体を用意する。その中から同性の 2 個体を無作為に選ぶ。市販のカルキ抜き (チオ硫酸ナトリウム) を用いてカルキを抜いた水道水を用意する。その水を、100 mmシャーレ (BD Falcon 社) に深さ 5mm 程度に入れる。シャーレの中心に、選んだ 2 個体を配置し、5 分間シャーレの中で自由に行動させて、その様子を記録する。この実験をすべての個体について行った。(有性個体、無性個体、7 ペアずつ) また、実験で用いた個体については、実験の 2 日前に給餌を行い、その後実験当日までは給餌を行わなかった。

4-IV 記録手法

行動の様子はスマートフォン（iPhone11Pro Apple社）を用いて動画に記録した。その際、リュウキュウナミウズムシの負の走光性が実験結果に影響を与えないよう、実験装置上部に白バットを配置して、シャーレ内の明るさが一様になるように調整した。（図2・3・4）

4-V 解析手法

動画の解析にあたっては、動画解析アプリ「Tracker」を用いた。個体を追跡する点は、個体の活動をより顕著に結果に反映させるため、頭部に設定した。解析においては、エラーが出たり、個体を追跡する点が個体自体と離れてしまったりすることがあるが、その都度操作者の手で追跡点を設定しなおして解析を再開し、個体の本来の軌跡を解析した。（図5）

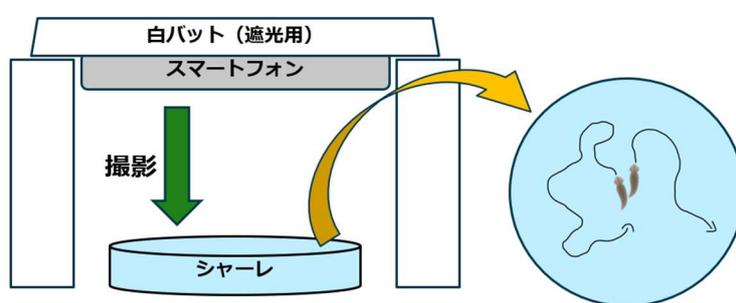


図2 実験装置の模式図



図3 実験風景（下から）



図4 実験風景（上から）

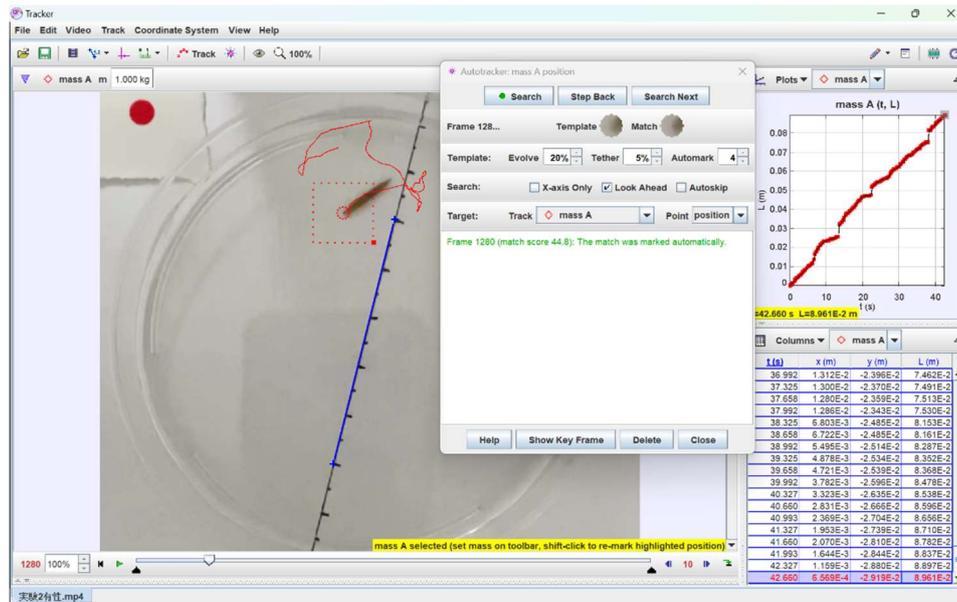


図5 Trackerによる解析画面

4-VI 結果

5分間の有性個体・無性個体の移動距離は、表1の通り、有性個体は約0.64m、無性個体は約0.52mと、有性個体は無性個体に比べ、一定時間に約1.25倍の距離を移動することが分かった。また、有性個体は、無性個体よりも、有意に長い距離を移動することが示された。(表1・図6)

表1 リュウキュウナミウズムシの有性個体と無性個体が5分間に進む距離の平均値(m)
(小数点以下第3位を四捨五入した)

有性個体 (14 個体平均)	無性個体 (14 個体平均)
0.64	0.52

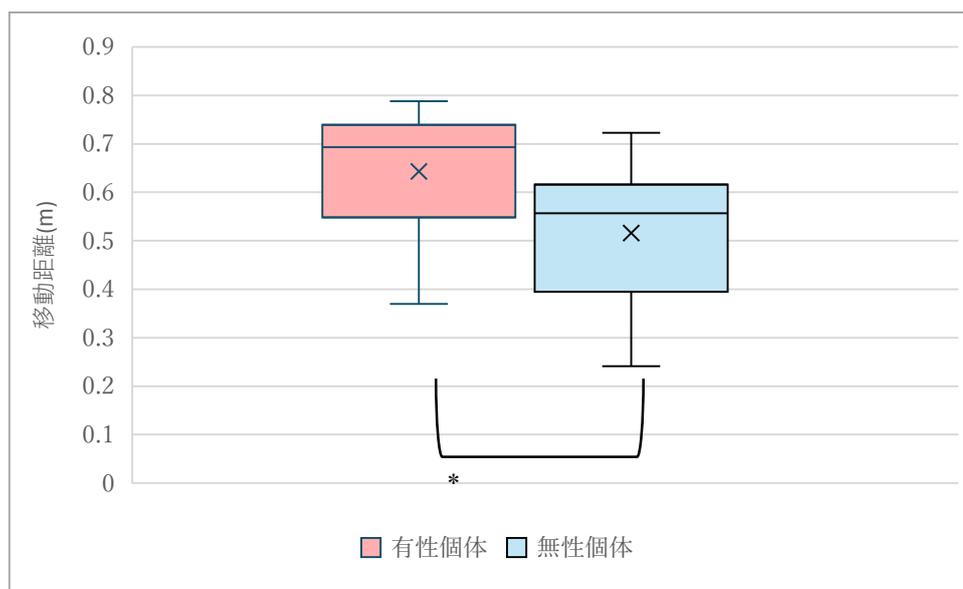


図6 リュウキュウナミウズムシの無性個体と有性個体が5分間に進む距離 (m)

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

5.考察1

以上より、有性個体は無性個体よりも長い距離を進んでいるという結果が得られた。この要因については、いくつかの可能性が考えられる。本考察では、どのような要因が個体の移動距離に影響している可能性があるのかについて検討する。

まず、プラナリアの運動器官である繊毛構造自体が、有性個体と無性個体で異なる可能性が考えられる。プラナリアの体表には繊毛が密集しており、それらが運動をすることで体が滑るように前進している。^{*3)} 有性個体と無性個体の間で、繊毛の密度や太さなど、繊毛構造に違いがあれば、個体の移動距離にも差が生まれる可能性がある。

次に、化学物質が個体に作用している可能性がある。プラナリアの体には頭部の左右のふちに耳葉という感覚器官が存在し、この器官が他の個体から発せられた化学物質を受容して、個体間の情報伝達が行われている。^{*3)} そのため、生殖時に有性個体が化学物質を外分泌して、他の有性個体の移動速度を高めることで、生殖を誘導している可能性が考えられる。また、生殖時に個体の体内で、自身の移動速度を上げる役割を持つ化学物質が内分泌されている可能性も考えられる。

さらに、個体の大きさや成熟度、実験の季節などの他の要因が関係している可能性がある。また、今回の実験では使用した個体数が少なかったため、再現性が低い可能性も考えられる。追実験を通してサンプル数を増やし、結果の再現性を高める必要がある。

6. 観察 2・実験 3 以下の 2 つの実験では前述の考察 1 に挙げた、様々な要因を検証する

A. 観察 2 個体表面を電子顕微鏡で観察し、有性個体と無性個体の繊毛構造の違いを調べる

6-A-I 仮説

有性個体の方が無性個体に比べて、体表に存在する繊毛の本数密度が高い。

6-A-II 材料

●研究試料

- ・リュウキュウナミウズムシの有性個体と無性個体 1 個体ずつ

●観察器具

- ・JSM-IT500HR In TouchScope™ 走査電子顕微鏡（日本電子社） 1 台

●その他（すべて必要量）

- ・Pt（白金） ・ Os（オスミニウム） ・ 25% グルタルアルデヒド ・ 蒸留水
- ・ カコジル緩衝液（3% ショ糖を含む） ・ 4% オスミニウム酸 ・ エタノール
- ・ 酸化プロピレン ・ エポキシ樹脂 ・

6-A-III 手法

リュウキュウナミウズムシの有性個体と無性個体をそれぞれ 1 個体ずつ用意する。用意した個体に対し固定や脱水、表面の金属コーティング（白金とオスミニウムを使用した）などの必要な処理^{*3)}を施したのち、金属製の土台に接着し、サンプルを作成する。走査型電子顕微鏡（SEM）（日本電子社）を用いて作成したサンプル表面を観察し、画像を撮影し記録した。（図 7・8）



図 7 走査型電子顕微鏡



図 8 作成したサンプル
(試料は丸で囲まれた部分)

B. 実験 3

有性個体が外分泌する化学物質がその行動にどのような影響をもたらすかを調べる

6-B-I 仮説

外部に分泌される化学物質によって、有性個体の移動距離が増加する

6-B-II 材料

●研究試料

- ・リュウキュウナミウズムシ(*Dugesia ryukyuensis*) 有性個体
4 個体 (測定用) / 5 個体 (飼育水用)

●実験装置等

- ・100 mm滅菌シャーレ (BD Falcon 社) 必要量
- ・500ml ビーカー 2 個
- ・15cm 定規 1 本
- ・30cm 定規 1 本
- ・白バット 1 個
- ・iPhone11Pro (Apple 社)
- ・ケント紙
- ・ボールペン
- ・滅菌水 (121°Cで20 分間オートクレーブしたもの)

●その他

- ・ぺんてる平筆 6 号 (ぺんてる社) 2 本
- ・駒込ピペット 2 本

(※上記の 2 項目は個体を扱うために用いる。有性個体と無性個体で使い分ける。)

- ・鳥レバー (餌、市販のもの)
- ・金属メス (鶏レバー切断用)

6-B-III 実験手法

オートクレーバーを用いて 20 分間 121°Cで滅菌した水 (以下、滅菌水と呼ぶ) を用意する。その水を深さ 5 mm ほど入れた 100mm シャーレ (BD Falcon 社) の中心に有性個体 1 個体を配置し、5 分間自由に行動させてその様子を記録する。また、その 2 日後に、飼育水*を用いて 1 回目と同様の実験を行った。この実験を有性個体 4 個体について実験を行った。ただし、本実験では個体を識別したため、同一個体での 2 回の記録のデータを比較することが可能である。また、両記録共に実験の 2 日前に給餌を行い、その後実験当日までは給餌を行わなかった。

- * …100mm シャーレ (BD Falcon 社) に水を 9 割ほど入れて、その中に有性個体 5 個体を入れて 2 日間飼育した後の水。

6-B-IV 記録方法

4-IV（実験1）と同様である。

6-B-V 解析方法

4-V（実験1）と同様である。

7. 結果 2・3

A. 結果 2

以下、観察結果の詳細をまとめる。以降、扁平な体の2つの面のうち、接地面側を裏面、その反対側を表面と呼ぶ。ただし、どの個体においても著しく繊毛が密集していたため、予定をしていた、繊毛の密度の測定は行うことができなかった。有性個体と無性個体の運動能力の違いを比較するため、繊毛の密度の代わりに、画像解析アプリ「image J」を用いて繊毛の直径を測定したため、その結果もあわせてまとめる。

7-A-I サンプルの全体像

無性個体のサンプルは、固定の際に体が裂けて、咽頭が露出している。(図9・10)

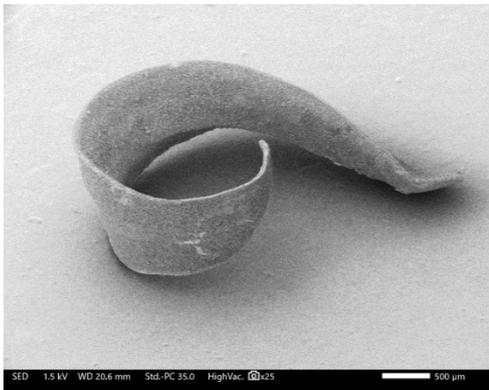


図9 有性個体（スケールは500 μm ）
画面右側の突端が頭部



図10 無性個体（スケールは500 μm ）
画面中央上部の突端が頭部

7-A-II 有性個体 裏面

無数の繊毛が密集しているのが確認できる。また、繊毛同士が絡み合っている。さらに、多数の顆粒のようなものが埋もれている。顆粒はつぶれているものが多い。(図 11・12)

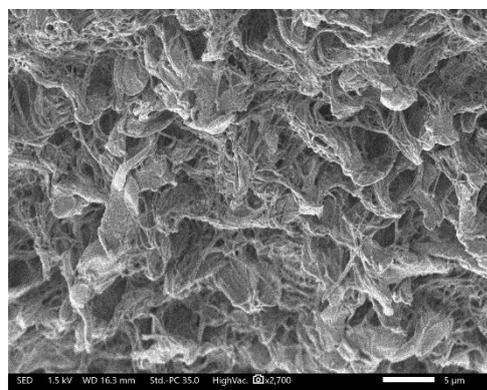
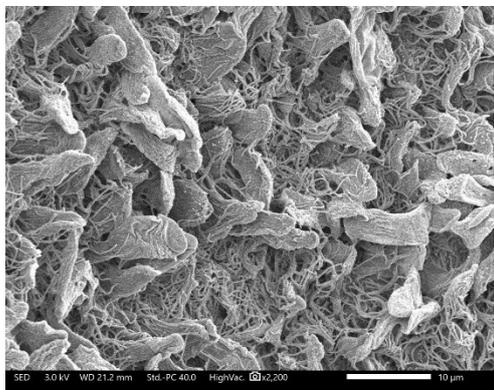


図 11 有性個体裏面 (スケールは 10 μm) 図 12 有性個体裏面 (スケールは 5 μm)

7-A-III 有性個体 表面

無数の繊毛が密集しているのが確認できる。また、繊毛同士が絡み合っている。さらに、多数の顆粒のようなものが埋もれている。顆粒はつぶれているものが多い。(図 13・14)

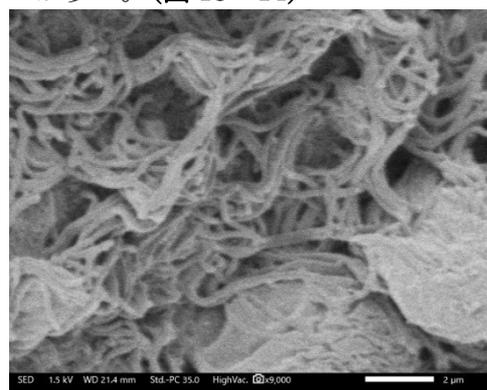
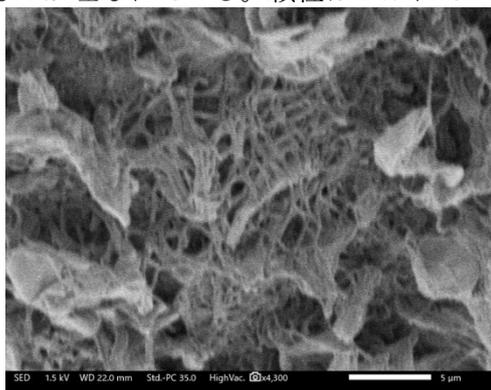


図 13 有性個体表面 (スケールは 5 μm) 図 14 有性個体表面 (スケールは 2 μm)

7-A-IV 無性個体 裏面

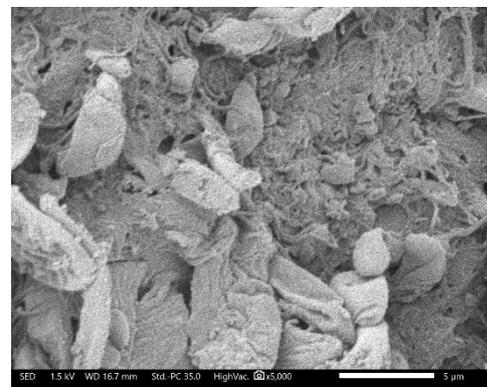
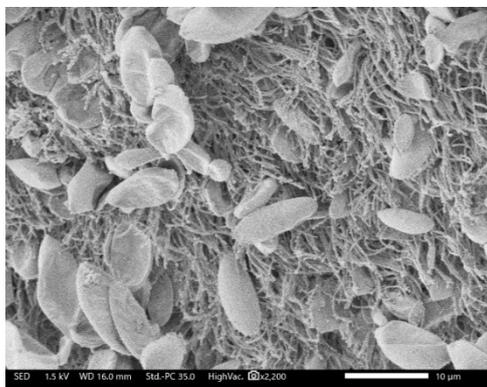


図 15 無性個体裏面 (スケールは 10 μm) 図 16 無性個体裏面 (スケールは 5 μm)

無数の繊毛が密集しているのが確認できる。また、繊毛同士が絡み合っている。さらに、多数の顆粒のようなものがあるが、つぶれているものは少ない。(図 15・16)

7-A-V 無性個体 表面

無数の繊毛が密集しているのが確認できる。また、繊毛同士が絡み合っているが、他の面と比べると程度は軽い。さらに、顆粒のようなものが確認できるが、その数は他の面と比べて著しく少ない。顆粒はつぶれているものが多い。(図 17・18)

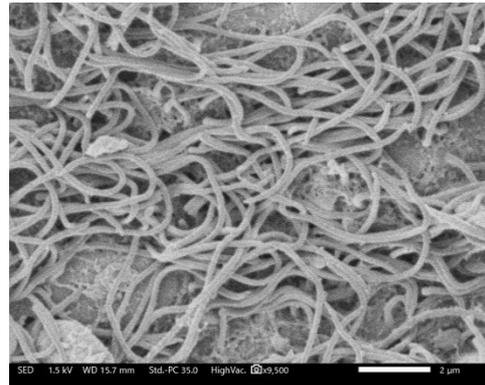
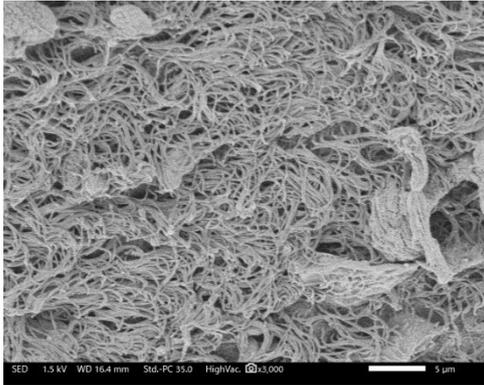


図 17 無性個体表面 (スケールは 5 μm)

図 18 無性個体表面 (スケールは 2 μm)

7-A-VI 繊毛の直径

撮影した画像の中から、測定が可能である明瞭な画像を選び、それぞれの画像の中から 5 本ずつ繊毛を選び、画像内の繊毛の太さをその直径とみなして測定した。結果より、有性個体の方が無性個体に比べて繊毛の直径が長い傾向にあることが示された。(表 2・図 19)

表 2 リュウキュウナミウズムシの有性個体と無性個体の繊毛の直径の平均値 (μm)

(小数点以下第 3 位を四捨五入した)

有性個体 (35 本平均)	無性個体 (65 本平均)
0.28	0.24

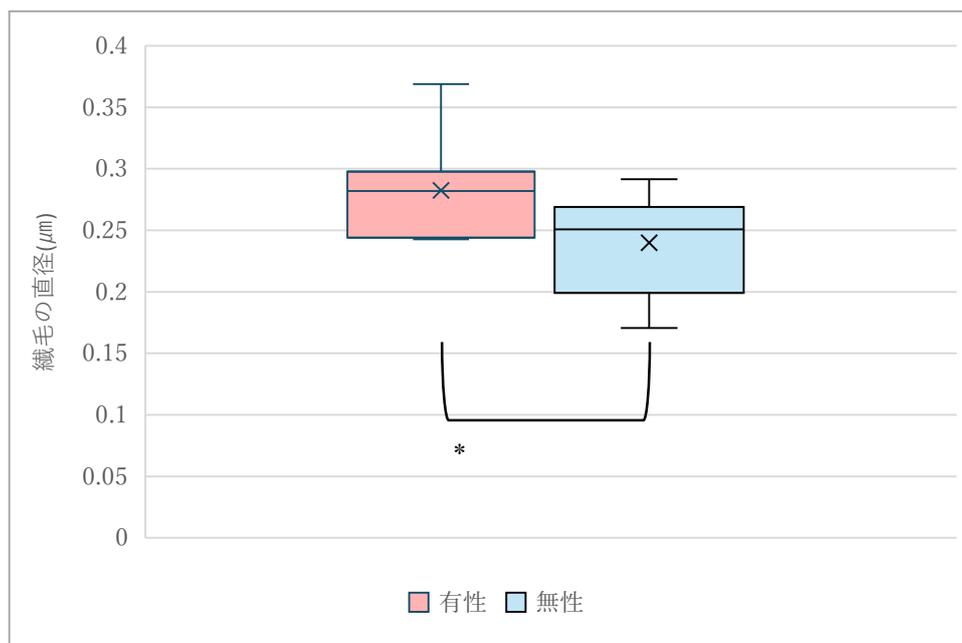


図 19 リュウキュウナミウズムシの有性個体と無性個体の繊毛の直径 (μm)

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

B. 結果 3

5 分間の有性個体の移動距離は、表 3 の通り、飼育水中では約 0.56m、無性個体は約 0.43m と、飼育水中では滅菌水中に比べ、一定時間に約 1.30 倍の距離を移動することが分かった。また、飼育水中の移動距離と、滅菌水中の移動距離との間に有意差が認められた。(表 3・図 20)

表 3 リュウキュウナミウズムシの有性個体の飼育水と滅菌水中での一定時間の移動距離 (m)

(小数点以下第 3 位を四捨五入した)

飼育水 (4 個体平均)	滅菌水 (4 個体平均)
0.56	0.43

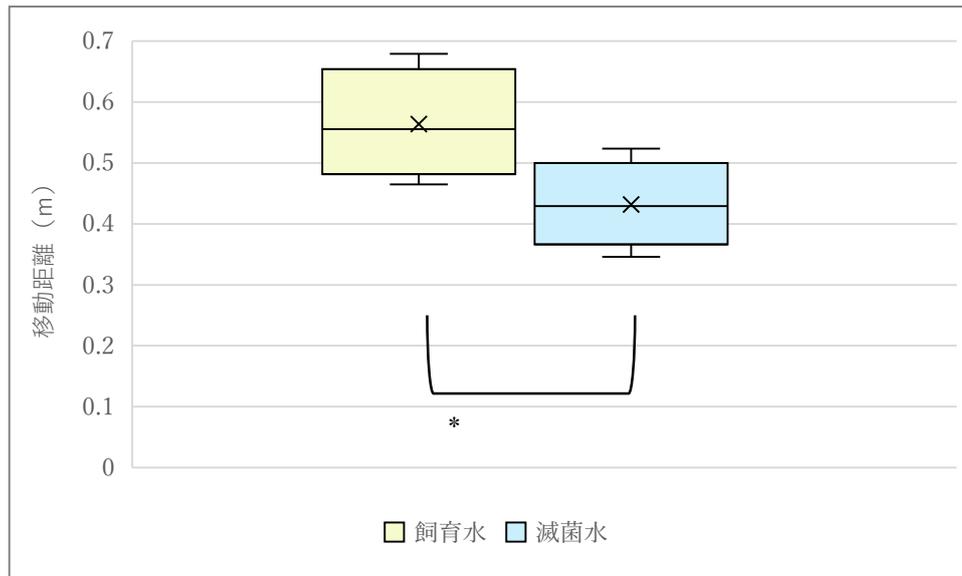


図 20 リュウキュウナミウズムシの有性個体の飼育水と滅菌水中での一定時間の移動距離 (m)

* : $p < 0.05$ ** : $p < 0.01$

8. 考察 2・3

A. 考察 2

8-A-I 繊毛について

繊毛は非常に密集しており、ほとんど表皮が見えない状態であった。現時点で繊毛の本数を測定するのは技術的に難しい。

8-A-II 表面の顆粒について

有性個体においても無性個体においても、裏面、表面ともに顆粒が確認できた。この顆粒は、リュウキュウナミウズムシの体表を覆う粘膜に含まれている可能性が高い。また、つぶれている顆粒と膨らんでいる顆粒の表面を比較すると、つぶれている顆粒は、表面の膜がしおれたような状態になっていることがわかる。(図 21・22・23) また、つぶれた顆粒の表面には細かく物質が付着しているのも確認できる。(図 24) さらに、つぶれている顆粒の周囲では繊毛がより絡み合っている。(図 21・23) 以上のことから、顆粒がつぶれることによって内部に入っていた物質が放出されている可能性がある。現状、リュウキュウナミウズムシにおけるこの顆粒の役割を記している文献は存在しない。しかし、有性個体においてはほとんどの顆粒がつぶれていたのに対し、無性個体ではつぶれていない顆粒も散見されている。このことから、考察 1 にて述べたような、他の個体と相互作用を引き起こす物質を顆粒が放出している可能性が考えられる。

また、リュウキュウナミウズムシの属する扁形動物門に固有の顆粒構造である、Rhabdite*⁴⁾ という

類似した構造が存在する。これは、外部刺激を受けた際などに表皮に押し出され、粘液を分泌することで、個体の動きを滑らかにしたり、他の物体との粘着性を高めたりする役割がある。しかし、今回観察された顆粒構造とは形態が異なる。

さらに、他の生物を含めてみても、顆粒が体外に存在している例がほとんど見られない。追観察を通して、観察された顆粒の役割の解明が求められる。

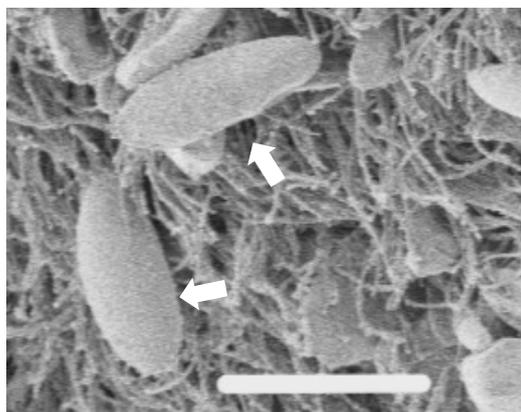


図 21 膨らんだ顆粒 (スケールは 10 μm)

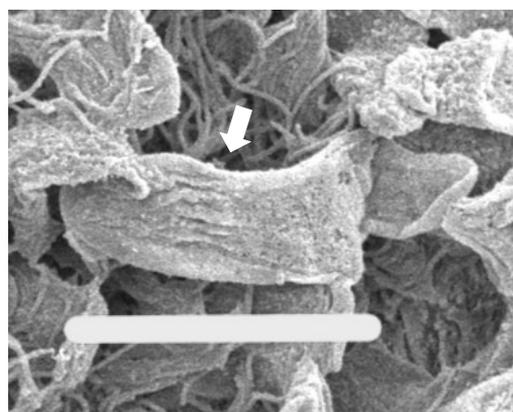


図 22 つぶれた顆粒 (スケールは 10 μm)

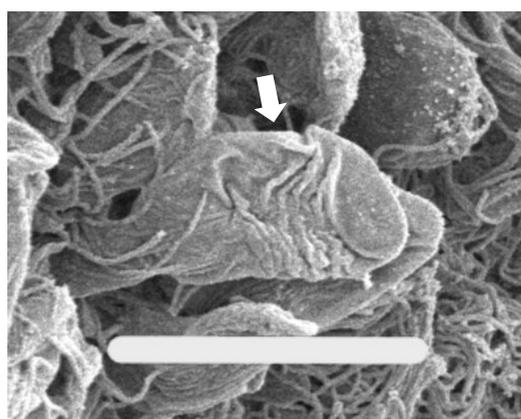


図 23 つぶれた顆粒 (スケールは 10 μm)

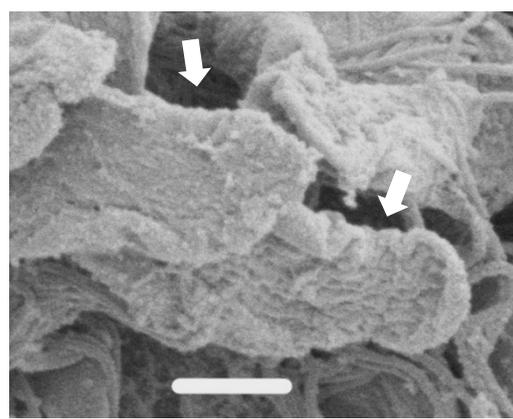


図 24 つぶれた顆粒 (スケールは 2 μm)

8-A-III 繊毛の直径について

有性個体の方が無性個体に比べて繊毛の直径が長いことが示された。これは使用したサンプルにおいて有性個体の方が無性個体に比べて体の大きさがより大きい、ということに起因している可能性が高い。

真核生物の表皮細胞の繊毛には、その太さに関係なく、2本の中心微小管と9本の周辺微小管という決まった本数の細胞骨格が存在する。そして、周辺微小管には一定周期でモータータンパク質であるダイニンが存在する。ダイニンはATPを加水分解してエネルギーを取り出す役割を持つ。^{*5)} これらの

ことから、繊毛の太さによらず、繊毛のエネルギー供給体であるダイニンの数はほぼ一定であるということが推測される。そのため、繊毛の太さに違いがあったとしても、繊毛の太さが個体の移動速度に大きな影響を与えていない可能性も考えられる。

8-A-IV 総論

繊毛の本数や密度を測定することはできなかった。また、測定可能であった繊毛の直径は有性個体の方が有意に大きかった。ただ繊毛の直径が、個体の移動速度に対して大きく影響してはいない可能性も考えられる。個体表面にて観察された顆粒は、中に物質を含み、それを体外に放出している可能性がある。顆粒の含む物質は、他の個体に作用するものが含まれる可能性がある一方、分泌顆粒として粘液を分泌している役割のみを担っている可能性も大いに考えられるため、顆粒の役割については推測の域を出ない。観察された顆粒の正体とその役割の解明が求められる。

今回の観察ではサンプル数が少ないため、より多くの個体を観察することで、考察をより確かなものにする事が求められる。

B. 考察 3

飼育水と滅菌水という二つの条件の間で、有性個体の一定時間の移動距離に有意な差が認められた。このことは、有性個体が体外に分泌した化学物質が他の個体に作用することによって、有性個体は一定時間により長い距離を移動している可能性を示唆している。しかし今回の実験ではサンプル数が少ないので、今後は追実験を通してサンプル数を増やしていき、結果をより確実にすることが求められる。また、無性個体を用いた対照実験によって、この結果が有性個体に特有のものかを確認する必要もある。

9. 結論

リュウキュウナミウズムシの有性個体が無性個体に比べて、一定時間により長い距離を移動することが認められた。また、有性個体において体外に分泌された物質が他の個体に作用することによって、有性個体と無性個体の行動の違いが生じている可能性が示唆された。

今後の課題としては、実験 1 や実験 3 において、追実験を通してサンプル数を増やすとともに、実験 3 において無性個体を用いた対照実験を行うことである。また、観察 2 において、有性個体と無性個体の繊毛構造を、定量的に、かつ効果的に評価する手法の模索も求められる。

リュウキュウナミウズムシ OH 株の生殖行動の特徴を明らかにすることは、主要な研究試料の一つであるリュウキュウナミウズムシそのものへの理解を深めるとともに、プラナリア類と比較的近似種であるヒルなど、人間にとって有害な生物の繁殖抑制に寄与することが期待される。

10. 参考文献

- * 1) Hanae Nodono, Midori Matsumoto “Annual rhythmicity in the switching of reproductive mode in planarians” (2022)

[Annual rhythmicity in the switching of reproductive mode in planarians - ScienceDirect](#)

- * 2) 小林一也・関井清乃「プラナリアたちの巧みな生殖戦略」(裳華房)

- * 3) 手代木渉・渡辺憲二「プラナリアの形態分化 -基礎から遺伝子まで- 」(共立出版)

- * 4) [Matthew J Hayes](#) “Sulphated glycosaminoglycans support an assortment of planarian rhabdite structures” (2017)

[Sulphated glycosaminoglycans support an assortment of planarian rhabdite structures | Biology Open | The Company of Biologists](#)

- * 5) 上村慎治「解説 微生物のべん毛・繊毛の運動メカニズム」

https://www.jstage.jst.go.jp/article/sobim/34/3/34_176/_pdf

- 6) Takeshi Inoue, Kiyokazu Agata “Quantification of planarian behaviors”(2021)

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/dgd.12765>

11. 謝辞

指導教員であられる岡本優太先生には、研究計画から実験、考察、論文執筆に至るまで、お忙しい中、丁寧なご指導を賜りました。また、思うように結果が得られず落ち込んでいる際には、温かい励ましのお言葉を頂くなど、精神的にも大いに支えていただきました。約1年半という長きにわたり、ありがとうございました。

さらに、本研究では、研究個体の提供ならびに研究への助言をいただいた、慶應義塾大学商学部の関井清乃先生や、走査型電子顕微鏡をお貸しいただいた、日本電子株式会社の谷口様、共同研究者の新津保万莉子さんなど、多くの方にお力添えをいただきました。この場を借りて深く御礼申し上げます。

散開星団の色等級図の作成

～デジタルカメラを用いて行う天体の等級測定～

東京都立日比谷高等学校 尾原 秀澄

1. 概要

本研究では、一般のデジタルカメラを用いて撮影した画像から色等級図を作成し、既知のデータをもとに作成した色等級図と比較する。これら2つの差異を調べたところ相関関係がみられたことから、デジタルカメラを用いた色等級図が作成できる可能性が示唆された。

2. 研究目的

天体の色等級図とは、恒星の色と等級の関係を図示したグラフであり、横軸に恒星の色指数、縦軸に恒星の明るさを示す等級をとる。色指数とは、異なる2つの波長帯による等級の差であり、この値が大きいほど赤色が強く、小さいほど青色が強くなる。また、等級に関しては、本来、色等級図を作成するには恒星の絶対等級(恒星から10パーセクの距離から見たときの等級)を用いるが、散開星団の場合、星団を構成する恒星は地球から見てほぼ同じ距離にあるため、見かけの等級(地球から見たときの等級)を用いても恒星のデータをグラフにプロットしたときの分布の形は変化しないので、見かけの等級を用いて作成することが可能である。

色等級図は、星団の年齢および距離の推定や星の性質を調べる際に用いられる重要なものである。測光作業(天体を撮影した画像から天体の明るさを求める作業)においては、通常、冷却 CCD カメラとジョンソンフィルターが使用されている。冷却 CCD カメラとは、撮像素子である CCD センサーを冷却することで高感度および低ノイズの画像を撮影できる、デジタルカメラの一種である。また、ジョンソンフィルターとは、U(近紫外光、Ultraviolet)、B(青色光、Blue)、V(可視光、Visual)、R(赤色光、Red)、I(近赤外光、Infrared)の各波長帯(バンド)の光を透過するフィルターであり、高校生にとっては高価な機材である。そこで、本研究では一般的なデジタルカメラを用いて、より簡単な手法で色等級図を可能な限り正確に作成すること、そしてそののち、自身で作成した色等級図と、冷却 CCD カメラとジョンソンフィルターによって得られた既知のデータをもとに作成した色等級図とを比較し、相関をみつけることを目的とする。

3. 研究方法

本研究では、対象の散開星団としてペルセウス座二重星団 $h-\chi$ (NGC869 及び NGC884)を用いた。

(1) 既知のデータによる色等級図の作成

・使用するソフトウェア：ステラナビゲータ(アストローツ)、Excel(Microsoft)

ステラナビゲータ(天体のさまざまなデータを搭載した天体シミュレーションソフトウェア)に内蔵されている Tycho-2 データ(欧州宇宙機関のヒッパルコス衛星による観測データに基づいて作成された、

250 万個以上の恒星の明るさや色、位置などに関するデータ)から、二重星団を構成していると判断した恒星の、B バンドによる見かけの等級(以下、B 等級)と V バンドによる見かけの等級(以下、V 等級)を得る。

そのうち、Excel で色指数を横軸に、見かけの等級を縦軸にとり、散布図を作成する。色指数としては、B 等級から V 等級を引いた値(以下、B-V 等級)を用い、見かけの等級としては V 等級を用いる。

恒星の見かけの等級として V 等級を用いるのは、V バンドによる明るさが人間の肉眼による明るさによく対応しており、天体の明るさを示す場合によく用いられるためである。また、色指数として B-V 等級を用いるのは、通常の主系列星は B バンドから V バンドにかけての範囲付近でスペクトル(各波長ごとの光の強さ)の強度が最大となり、B 等級-V 等級が最も有効となっているためである。この色指数が小さい値であるほど高温で青く、大きい値であるほど低温で赤い天体となる。高温の天体ほど青く、低温の天体ほど赤いため、より高温の天体では U バンド、より低温の天体では R バンドや I バンドを用いた色指数が有効となる。

NGC869 と NGC884 という 2 つの星団は異なるものであるため別々に色等級図を作成することも検討したが、R M D Guido、P B Tucio、J B. Kalaw、L E Geraldo (2023) ¹によると、これら 2 つの星団は地球からほぼ同じ距離及び位置にあることがわかっているため、本研究では NGC869 を構成する恒星と NGC884 を構成する恒星をまとめて色等級図上にデータをプロットしている。

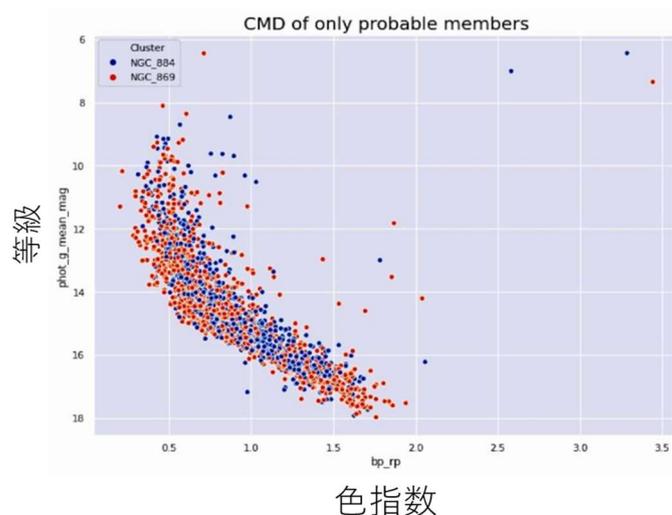


図 1 NGC869 と NGC884 の色等級図

R M D Guido、P B Tucio、J B. Kalaw、L E Geraldo (2023) ¹より

(図 1)において、赤い点は NGC869 に属する恒星、青い点は NGC884 に属する恒星のデータを色等級図上にプロットしたものである。これら 2 つは異なる星団であるが、主系列は同じ位置にあることが示されている。

(2) 撮影画像を用いた色等級図の作成

a. 天体の撮影

二重星団 $h-\gamma$ を、2 枚撮影した。

使用機材

- ・デジタルカメラ：Canon Eos kiss X7i
- ・望遠鏡：タカハシ FC-76 (焦点距離 624mm、F 値 8.2)
フラットナーレンズ(視野の隅々まで歪みやぼけが無い鮮明な画像を得ることができるレンズ)使用
- ・赤道儀：タカハシ EM-11

撮影条件

- ・日時：2025/01/04 22:00
- ・場所：埼玉県秩父市大滝げんきプラザ
- ・露出時間：236 秒
- ・ISO：1600

b. 撮影画像の処理

- ・使用ソフトウェア：raw2fits(星空公団)、Makall`i(国立天文台、アストロアーツ)

(a) B 画像および G 画像の取得

raw2fits とは、RAW 画像を FITS 画像に変換するソフトウェアである。RAW 画像とは、JPEG 画像とは異なり、デジタルカメラのイメージセンサーが捉えた光の情報をカメラ内部の画像処理や圧縮をせずに生のまま記録したデータ形式である。また、FITS 画像とは、天体に関するさまざまな科学データから構成される、天体の画像処理に用いられるデータ形式である。

この raw2fits を用いて二枚の撮影画像をそれぞれ青色の光の要素を抽出した B 画像、緑色の光の要素を抽出した G 画像に分解する。

(b) フラット処理

Makall`i (天体画像を解析するためのソフトウェア) で、フラット画像(白い背景のみを天体画像と同一機材、同一条件で撮影した、一様に光が当たった状態の画像)を用いてフラット処理を行う。この処理により視野全体の背景の明るさが整い、天体の明るさを正しく再現できる。

(c) コンポジット処理

Makall`i で 2 枚の天体の画像の加算平均を行う。B 画像、G 画像それぞれについてコンポジット(加算合成平均)を行い、ランダムノイズ(デジタルカメラの電子回路における抵抗の熱雑音や、画像センサーに当たる光子の変動などによる、時間的に予測不可能で不規則に生じるノイズ)の影響を低減する。

なお、デジタルカメラで天体撮影をする際に発生する、熱によって生じる暗電流ノイズ(ダークノイズ)は、撮影時に、レンズキャップをした状態で同じ露出時間で撮影したダークフレーム画像を用いて除去されている。

c. 等級測定

- ・使用ソフト：Makall`i(国立天文台、アストロアーツ)

(a) 測光

測光により、二重星団を構成するそれぞれの恒星の明るさを調べる。この明るさは、恒星のある部分の明るさから周囲の空の明るさを引くことで求めているため、周囲の明かりの影響を受けない。

(b) 等級の決定

求めた明るさ(カウント値)を用いて星々の等級を決定する。この際、基準星という、既知の等級の星を定め、等級を求めるための指標とする。基準星を用いて等級を決定するため、観測条件による影響を

減少させることができる。

次の式により等級を求める。

$$\text{式： (求める星の等級)} = (\text{基準星の等級}) - \frac{5}{2} \log_{10} \frac{\text{求める星のカウント値}}{\text{基準星のカウント値}}$$

d. 色等級図の作成

・使用ソフト：Excel(Microsoft)

B 画像を用いて決定した等級(以下、B'等級)と G 画像を用いて決定した等級(以下、G 等級)から色等級図を作成する。

Excel で、色指数となる B'等級から G 等級を引いた値(以下、B'-G 等級)を横軸に、見かけの等級 G 等級を縦軸にとり、散布図を作成する。ジョンソンフィルターにおける UBVR I の B、V に対してデジタルカメラの内蔵 RGB フィルターにおける RGB の B、G は異なるものであるが、これらはそれぞれほぼ同様の分光透過特性(どの波長の光がどの程度フィルターを透過するかを示す特性)をもっているため、代替することが可能である。

(3) 2つの色等級図の差異の比較

・使用ソフト：Excel(Microsoft)、JASP(アムステルダム大学)

等級決定の式では基準星を使用しているため、基準星との等級の差が大きい恒星ほどずれが大きくなると予想できる。それぞれの恒星において、Tycho-2 データによる V 等級、B-V 等級と、撮影画像をもとに決定した G 等級、B'-G 等級との差をとり、また、基準星の V 等級(以下、V₀等級)と V 等級の差をとる。これら 2つの間に相関があるか調べる。

4. 結果

(1) 既知のデータによる色等級図の作成

ステラナビゲータ上で二重星団の範囲内(中心から 15'程度)にある 190 個の星の等級を調べ、次の色等級図を得た(図 2)。

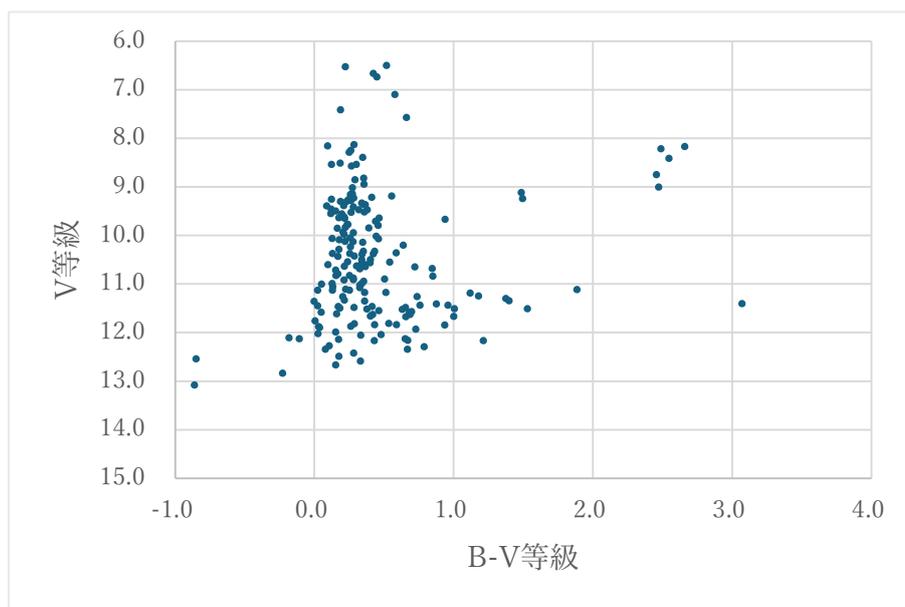


図 2 既知のデータによる色等級図

散開星団は形成直後の恒星から構成される若い天体であるため、散開星団である二重星団は、絶対等級を用いた色等級図上では左上から右下に伸びるように星が位置する主系列がみられる。

二重星団に属する恒星は地球からほぼ同じ距離にあるため、見かけの等級を用いた色等級図でも主系列がみられることが予想されるが、Tycho-2 データをもとに色等級図を作成すると明瞭な主系列はみられず、横軸にたいして垂直な分布がみられた。

(2) 撮影画像を用いた色等級図の作成

撮影画像より (1) で測光した星のうち 117 個の星を測光し、次の色等級図を得た (図 3)。

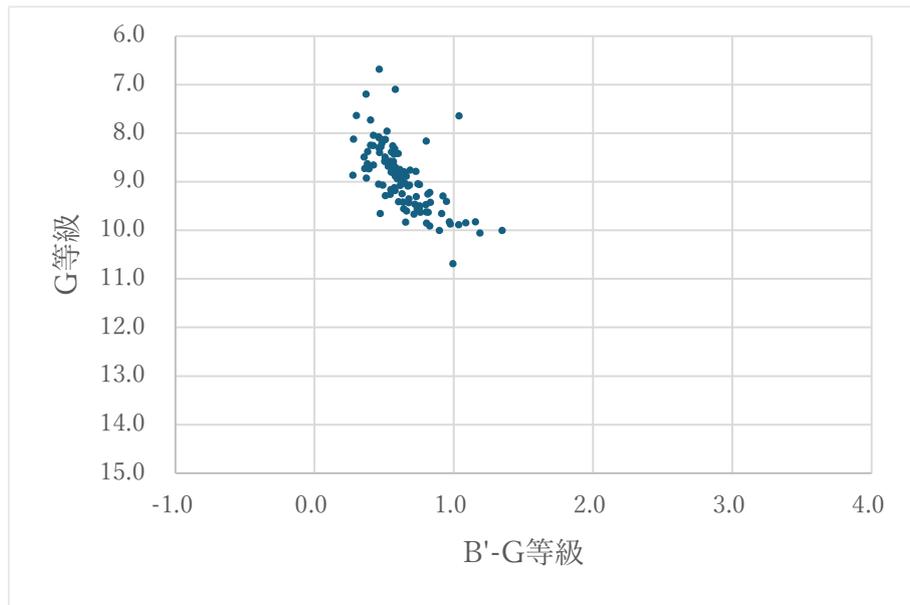


図 3 撮影画像を用いた色等級図

明瞭に左上から右下にかけて伸びる分布がみられた。

(3) 2つの色等級図の差異の比較

V 等級から V_0 等級を引いた値である V 等級- V_0 等級と G 等級、V 等級- V_0 等級と V 等級から G 等級を引いた値である V 等級-G 等級に関する散布図を得た (図 4、図 5)。

また、相関の強さおよび有意性に関する表を得た (表 1、表 2)。

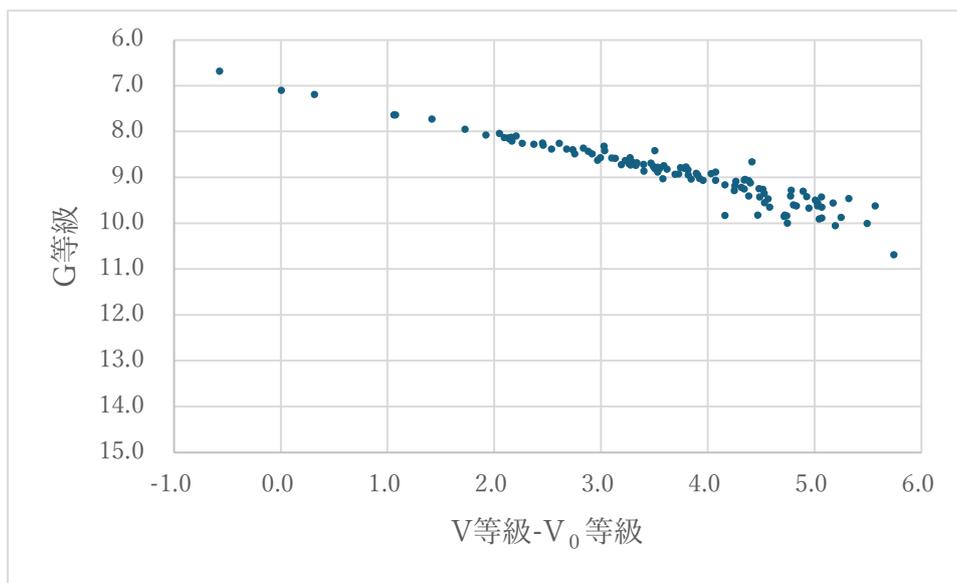
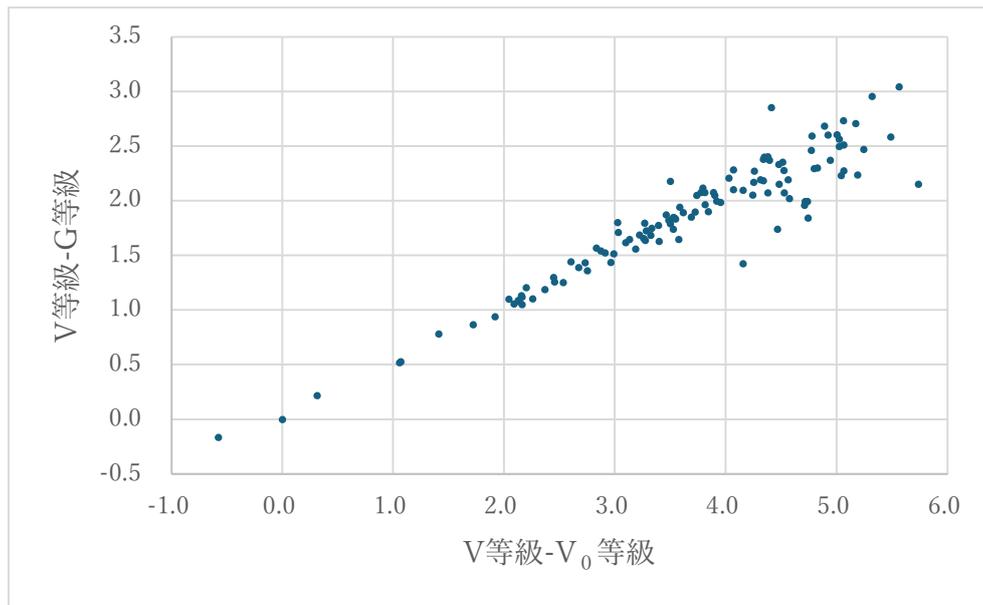


図4 V 等級-V₀等級と G 等級の相関

表1 V 等級-V₀等級と G 等級の相関の強さおよび有意性

相関表

変数		基準星とのV等級の差	G等級
1. 基準星とのV等級の差	ピアソンのr	—	
	p値	—	
	スピアマンのロウ	—	
	p値	—	
2. G等級	ピアソンのr	0.959	—
	p値	< .001	—
	スピアマンのロウ	0.964	—
	p値	< .001	—

図5 V等級-V₀等級とV等級-G等級の相関表2 V等級-V₀等級とV等級-G等級の相関の強さおよび有意性

相関表

変数		基準星とのV等級の差	V等級-G等級
1. 基準星とのV等級の差	ピアソンのr	—	
	p値	—	
	スピアマンのロウ	—	
	p値	—	
2. V等級-G等級	ピアソンのr	0.948	—
	p値	< .001	—
	スピアマンのロウ	0.923	—
	p値	< .001	—

V等級-V₀等級とV等級-G等級の間に強い相関がみられた。また、p値が0.001を下回った。Tycho-2データと比較すると、等級の値は暗い星ほど小さくなる傾向があった。

加えて、シャピロ・ウィルク検定を実施すると(表3)、G等級のデータは正規分布であり、V等級-V₀等級およびV等級-G等級のデータは正規分布ではないと示された。

表3 シャピロ・ウィルク検定

記述統計

	基準星とのV等級の差	G等級	V等級-G等級
妥当	117	117	117
シャピロ-ウィルク	0.953	0.984	0.961
シャピロ-ウィルクのP値	< .001	0.164	0.002

(図5)より、暗い星ほどばらついているが、V等級-V₀等級とV等級-G等級の相関は直線的であることがみてわかる。Excelを用いて、V等級-V₀等級とV等級-G等級のグラフの傾きを求めると、およそ0.5027であった。この傾きを0.5と近似すると、測光の際のずれは次の式のようにあらわせる。

$$(V \text{ 等級}-G \text{ 等級})=0.5*(V \text{ 等級}-V_0 \text{ 等級})$$

この式を変形すると次の式が得られた。

$$(V \text{ 等級})=2*(G \text{ 等級}-V_0 \text{ 等級})$$

次に、V等級-V₀等級とB-V等級、V等級-V₀等級とB'-G等級、V等級-V₀等級とB-V等級からB'-G等級を引いた値である(B-V等級)-(B'-G等級)に関する散布図を得た(図6、図7、図8)。

また、相関の強さおよび有意性に関する表を得た(表4、表5、表6)。

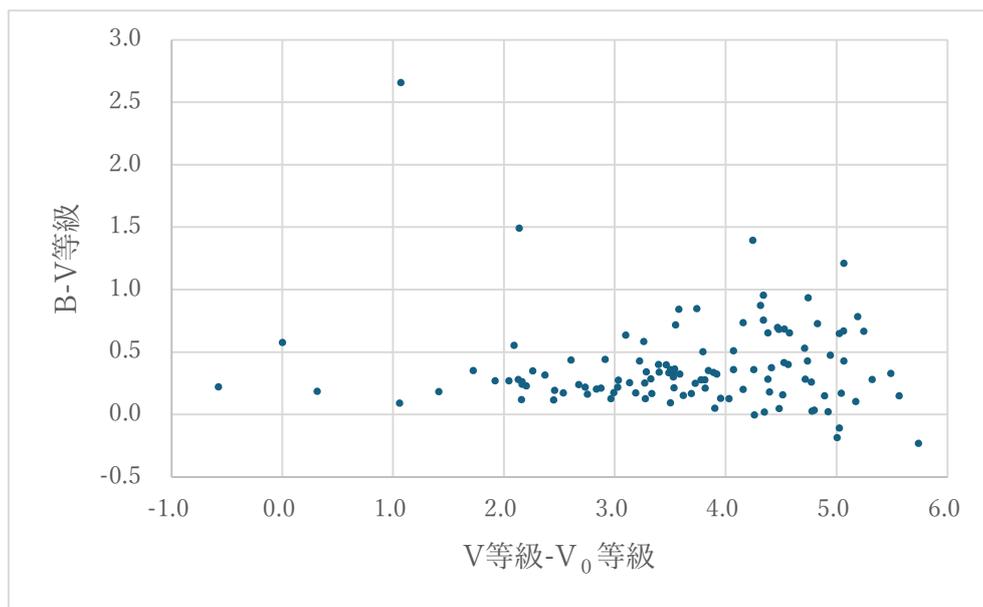
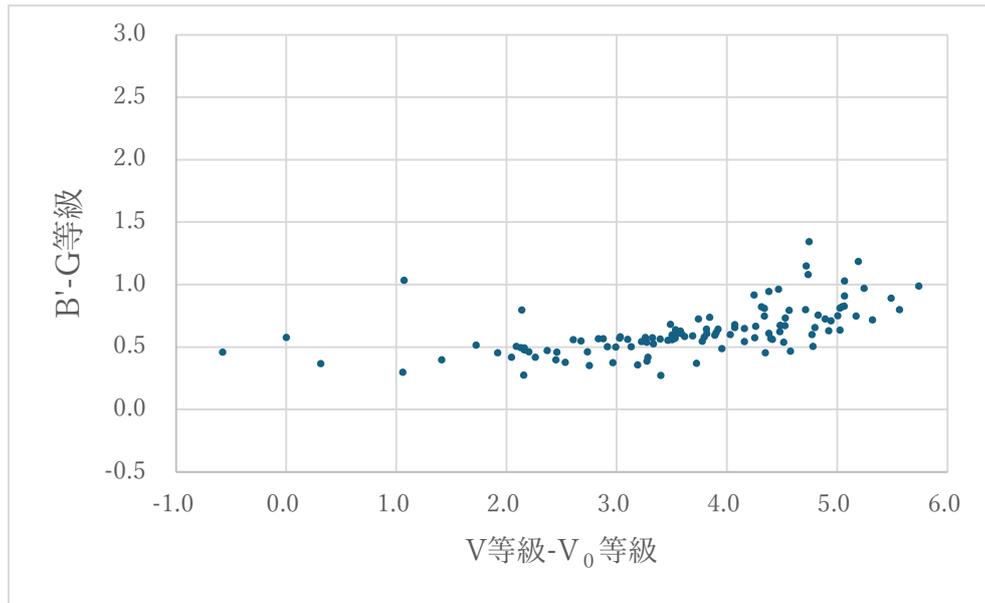


図6 V等級-V₀等級とB-V等級の相関

表4 V等級-V₀等級とB-V等級の相関の強さおよび有意性

相関表

変数		基準星とのV等級の差	B-V等級
1. 基準星とのV等級の差	ピアソンのr	—	—
	p値	—	—
	スピアマンのロウ	—	—
	p値	—	—
2. B-V等級	ピアソンのr	-0.044	—
	p値	0.635	—
	スピアマンのロウ	0.085	—
	p値	0.360	—

図7 V等級-V₀等級とB'-G等級の相関表5 V等級-V₀等級とB'-G等級の相関の強さおよび有意性

相関表

変数		基準星とのV等級の差	B'-G等級
1. 基準星とのV等級の差	ピアソンのr	—	—
	p値	—	—
	スピアマンのロウ	—	—
	p値	—	—
2. B'-G等級	ピアソンのr	0.583	—
	p値	< .001	—
	スピアマンのロウ	0.720	—
	p値	< .001	—

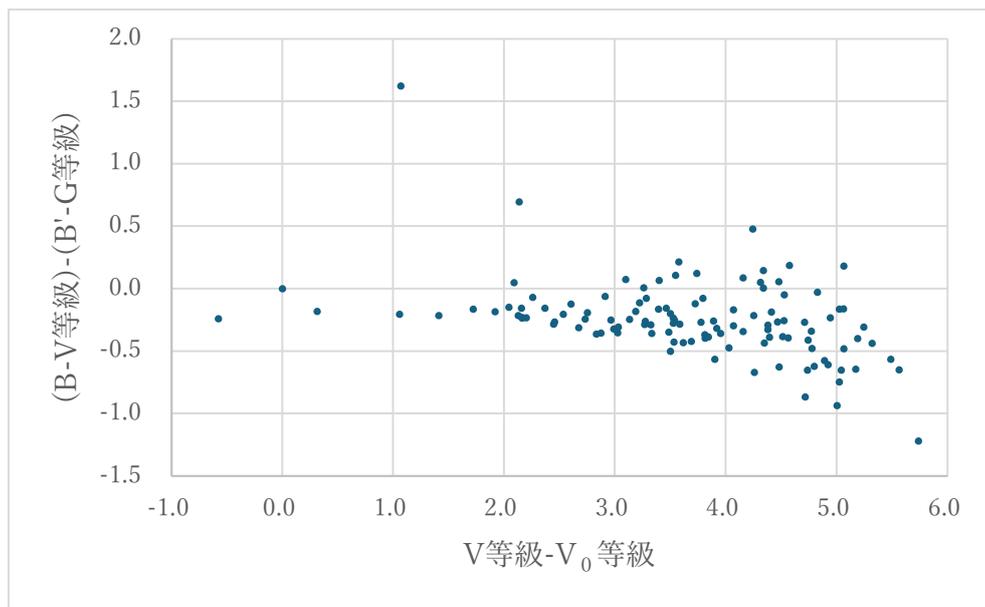


図8 V等級-V₀等級と(B-V等級)-(B'-G等級)の相関

表6 V等級-V₀等級と(B-V等級)-(B'-G等級)の相関の強さおよび有意性

相関表

変数		基準星とのV等級の差	(B-V等級)-(B'-G等級)
1. 基準星とのV等級の差	ピアソンのr	—	
	p値	—	
	スピアマンのロウ	—	
	p値	—	
2. (B-V等級)-(B'-G等級)	ピアソンのr	-0.411	—
	p値	< .001	—
	スピアマンのロウ	-0.437	—
	p値	< .001	—

基準星との色指数の差と(B-V等級)-(B'-G等級)の間に有意な相関がみられた。Tycho-2 データと比較すると、色指数の値は暗い星ほど大きくなりやすい傾向にあった。

加えて、シャピロ・ウィルク検定を実施すると (表7)、これら全てのデータは正規分布ではないと示された。

表7 シャピロ・ウィルク検定

記述統計

	基準星とのV等級の差	B-V等級	B'-G等級	(B-V等級)-(B'-G等級)
妥当	117	117	117	117
シャピロ-ウィルク	0.953	0.777	0.938	0.855
シャピロ-ウィルクのP値	< .001	< .001	< .001	< .001

(図8、表6)より、強くはないものの、V等級-V₀等級と(B-V等級)-(B'-G等級)の間に相関があることがわかる。直線的な相関があるとみなし、Excelを用いて、このグラフ上のデータの傾きを求めると、V等級-V₀等級と(B-V等級)-(B'-G等級)の傾きはおよそ-0.1077であった。この傾きを-0.1と近似すると、測光の際のずれは次の式のようにあらわせる。

$$(B-V \text{ 等級})-(B'-G \text{ 等級})=-0.1*(V \text{ 等級}-V_0 \text{ 等級})$$

この式を変形すると次の式が得られた。

$$(B-V \text{ 等級})= (B'-G \text{ 等級}) -0.1*(V \text{ 等級}-V_0 \text{ 等級})$$

これらの補正式を用いて撮像画像によるG等級、B'-G等級を補正し、補正後に残るずれとV等級-V₀等級の相関について調べると、次の散布図が得られた(図9、図10)。

なお、色指数の補正には、Tycho-2 データによるV等級を使用した。

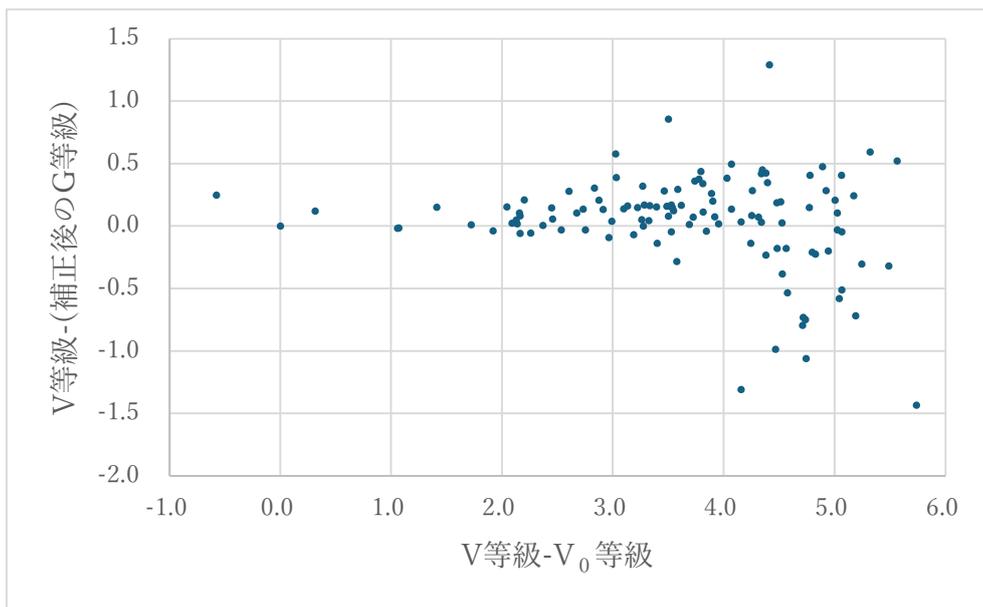


図9 V等級-V₀等級とV等級-(補正後のG等級)の相関

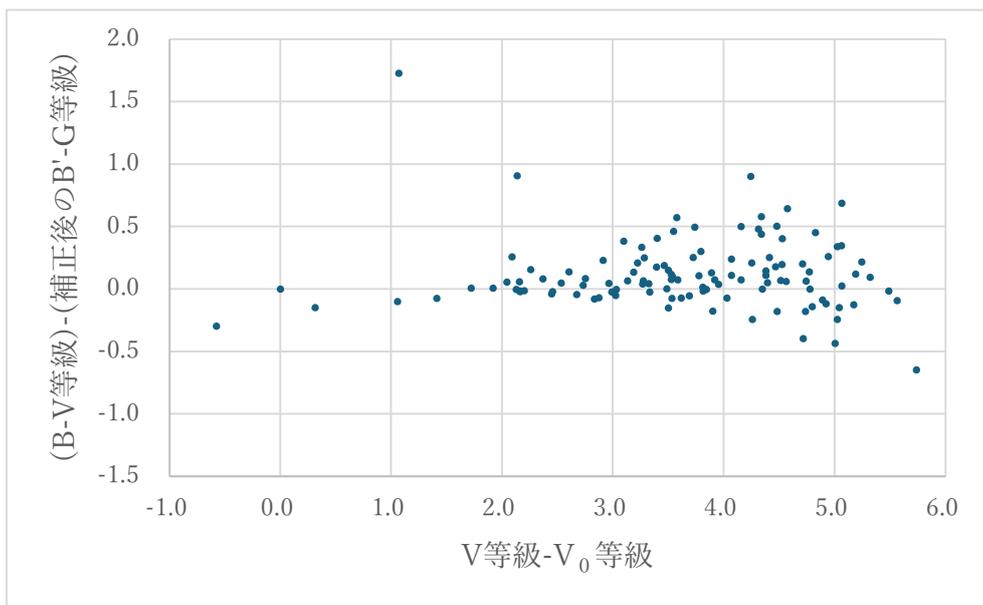


図10 V等級-V₀等級と(B-V等級)-(補正後のB'-G等級)の相関

Tycho-2 データと比べると、補正後の G 等級、B'-G 等級はともに小さくなる傾向がみられたが、大半の恒星は明るさ、色指数ともに 0.5 等級以内のずれに収まった。

補正後の G 等級、B'-G 等級を用いた色等級図を以下に示す (図 1 1)。

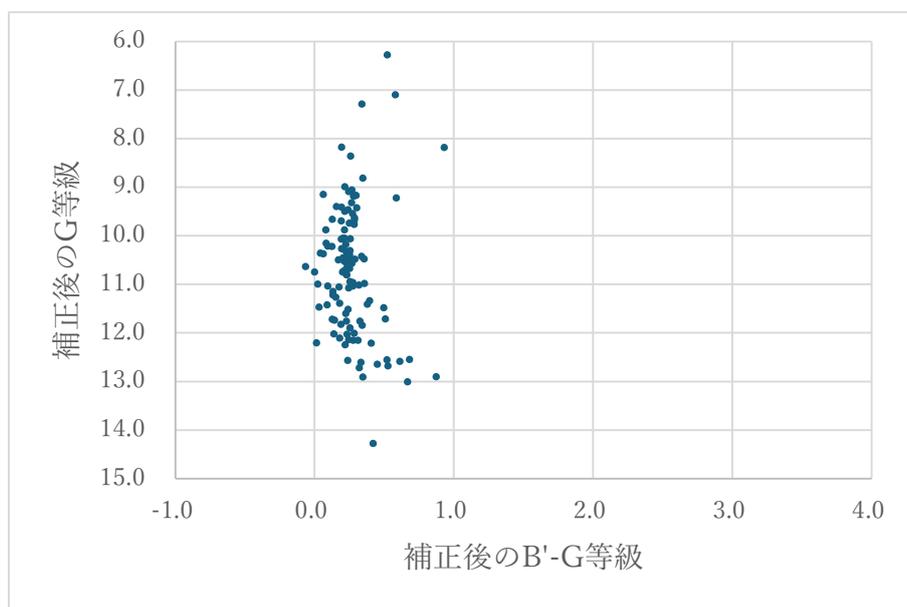


図 1 1 補正後の G 等級、B'-G 等級を用いた色等級図

補正後に残るずれを示したグラフや色等級図からみてとれるように、補正前と比べると、明るさおよび色指数は Tycho-2 データのものに格段に近づいたことがわかる。

また、Tycho-2 データによる V 等級の代わりに補正後の G 等級を用いて色指数を補正した(以下、補正後の B'-G 等級₂)。同じく補正後の色指数のずれと V 等級-V₀等級の相関を示す散布図を得た(図 1 2)。

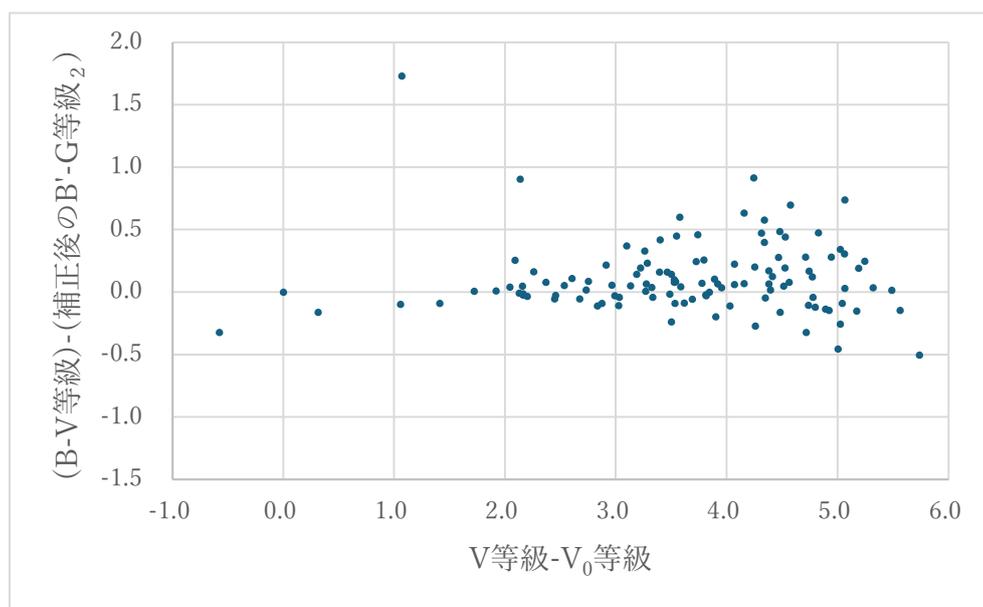


図 1 2 V 等級-V₀等級と(B-V 等級)-(補正後の B'-G 等級₂)の相関

補正後の G 等級、B'-G 等級₂を用いた色等級図を以下に示す (図 1 3)。

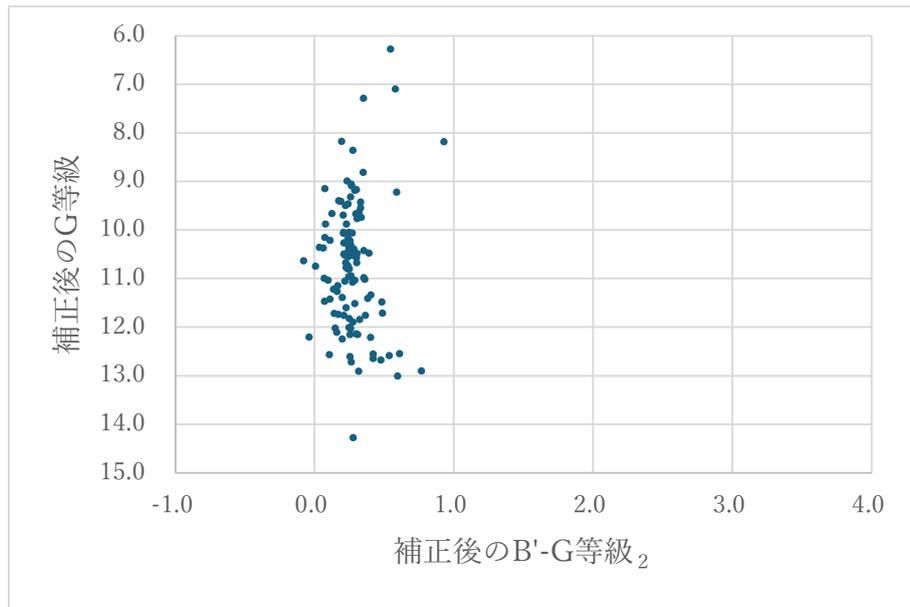


図 1 3 補正後の G 等級、B'-G 等級を用いた色等級図

補正後のずれ、色等級図ともに Tycho-2 データによる V 等級を用いた補正とほぼ同じ結果となった。

5. 考察

(1) 既知のデータによる色等級図の作成

二重星団の色等級図において明瞭な主系列はみられなかったが、(図 1)によると、今回測光した、14 等級よりも明るい恒星が分布する部分は二重星団の主系列の左端であり、横軸に対して垂直になっている部分であるため、これらの恒星分布は主系列であるといえる。

14 等級よりも暗い星は Tycho-2 データに記載されていないため、本研究では比較することはできなかった。

(2) 撮影画像を用いた色等級図の作成

見かけ上他の恒星と近接している恒星は、恒星の明るさを求める際、他の恒星の明るさの影響を受けてしまうため、正確な測光が難しい。そのため、これらの星を除いた 117 個の恒星のデータから色等級図を作成したところ、左上から右下にかけて伸びる分布がみられたが、(1) より主系列ではなく、測光の過程でずれが生じた結果だと考えられる。

大金要次郎²より、デジタルカメラを用いて正確に明るさを求めることができるのは 8 等級が限界だということも述べられており、Tycho-2 データによると二重星団の恒星は 8 等級を下回っているものが多く、暗い星においては実際の等級とのずれがあると考えられる。

(3) 2つの色等級図の差異の比較

ピアソンの相関はデータが正規分布であることを前提にして使用されるため、シャピロ・ウィルク検定の結果より、ここでは不适当である可能性が考えられるが、正規分布でない場合の影響は p 値にのみ現れ、相関の強さに影響はない。加えて、データの標本数が多い場合には p 値も信頼できるものになる

という性質もあるため、ピアソンの相関を使用することは可能である。また、非正規分布の場合も使用できるスピアマンの ρ 検定でも強い相関が見られ、 p 値は0.001を下回っていたため、V等級-V₀等級とV等級-G等級、V等級-V₀等級と(B-V等級)-(B'-G等級)のそれぞれの間には相関があると判断した。

補正後の結果としては、色等級図上でデータが横軸にたいして垂直に分布しており、等級、色指数ともによく補正できていると考えられる。

今回は Tycho-2 データに記載されている星のみで行ったが、色指数の補正を補正後の G 等級を用いて行えたことから、Tycho-2 データにない星の等級も求めることができる可能性がある。

6. 結論

本研究では二重星団を用い、既知のデータによる色等級図と、撮影画像から得られたデータをもとにした色等級図を作成し、比較した。その結果、撮影画像による等級、色指数は、既知の等級と比較して大きな差が存在したが、その差と基準星との等級の差の間に相関関係がみられた。その相関をもとに測光等級を補正すると、既知のデータに近づけることができた。

課題として、二重星団以外の星団、あるいは異なる撮影条件でも同じような相関が見られるかは不明である。また、撮影枚数は2枚よりも多くするべきであるが、今回は2枚しか撮影していないのは、もともとは二重星団ではなく散開星団 M36 を用いる予定であり、二重星団は研究用として撮影していなかったからである。比較対象として M36 でも同じように撮影画像から等級を求め、既知のデータとの比較を行ったが、二重星団のように明確な相関はみられなかった。これは M36 において正確に測光できたと考えられる恒星の数が少なく、また暗い星がほとんどであったことなどが原因として考えられる。

今後は明るい光学系を使用して撮影を行い、より暗い星の測光を行うようにしたい。

7. 参考文献

[1] ¹ R M D Guido, P B Tucio, J B. Kalaw, L E Geraldo. "Identifying cluster members of NGC 869 and NGC 884 using a combined machine learning method". 2023

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1167/1/012010/pdf>

[2] ² 大金要次郎. "ひかり天体観測所"

<http://hikariao.la.coocan.jp/ひかり天体観測所>

[3] Zeljko Ivezic, J. Allyn Smith, Gajus Miknaitis, Huan Lin, Douglas Tucker, Robert H. Lupton, James E. Gunn, Gillian R. Knapp, Michael A. Strauss, Branimir Sesar, Mamoru Doi, Masayuki Tanaka, Masataka Fukugita, Jon Holtzman, Steve Kent, Brian Yanny, David Schlegel, Douglas Finkbeiner, Nikhil Padmanabhan, Constance M. Rockosi, Mario Juric, Nicholas Bond, Brian Lee, Chris Stoughton, Sebastian Jester, Hugh Harris, Paul Harding, Heather Morrison, Jon Brinkmann, Donald P. Schneider, Donald York. "SLOAN DIGITAL SKY SURVEY STANDARD STAR CATALOG FOR STRIPE 82: THE DAWN OF INDUSTRIAL 1% OPTICAL PHOTOMETRY". 2007

https://faculty.washington.edu/ivezic/Publications/Ivezic07.pdf?utm_source=chatgpt.com

[4] 小野間史樹. "デジカメ星空診断ハンドブック", 2017

<https://www.env.go.jp/content/900400130.pdf>

[5] Brian K. Kloppenborg, Roger Pieri, Heinz-Bernd Eggenstein, Grigoris Maravelias, Tom Pearson. “A Demonstration of Accurate Wide-field V-band Photometry Using a Consumer-grade DSLR Camera”. 2012

<https://www.aavso.org/sites/default/files/jaavso/v40n2/815.pdf>

[6] John E. Hoot. “Photometry With DSLR Cameras”. 2007

[https://www.researchgate.net/publication/234376858_Photometry with DSLR Cameras](https://www.researchgate.net/publication/234376858_Photometry_with_DSLR_Cameras)

[7] 磯崎行雄、川勝均、佐藤薫. 高等学校 地学. 啓林館, 2023

[8] 浜島書店編集部. ニューステージ地学図表. 浜島書店, 2023

[9] 鈴木文二、洞口俊博. あなたもできるデジカメ天文学. 恒星社厚生閣, 2015

[1 0] 日本天文学会. “天文学辞典”

<https://astro-dic.jp/天文学辞典>

8. 謝辞

研究を進めるにあたり、担当の永田智先生をはじめとするご指導、ご協力して下さった方々に心より御礼申し上げます。

加えて、精神的な支えとなってく下さった大切な仲間たちを含む、関わらせていただいたすべての隣人に深く感謝いたしますとともに、ここまで読んで下さった皆様にも言葉を絶するほどの敬意を表させていただきます。