

令和2年度 科学部の活動の記録



巻 頭 言

科学部顧問 川勝 和哉

科学部の研究活動は、昨年（令和元年度）新たに始まりました。以前にも研究活動をしていた時期はあったということですが、長い間遠ざかっていたようです。赴任当初、彼らに「研究をしてみないか」と持ちかけたときには、2つの反応がありました。「そういうことがしたかった」という積極的な部員と、「自分たちに研究なんてできるはずがない」と躊躇する部員です。最初は、どこからどう手をつければよいのかわからず、手探りの状態でしたが、研究の指針を示すと、すぐに、ゆるやかに研究活動がスタートしました。頻繁に生徒どうしが議論する機会を設けるようにして、私が気付いたことをその場で部員に助言するスタイルをとりました。顧問が「こうすればいいのではないか」などと指示してしまうと、次にまた指示を待つようになります。そうなってしまうと、生徒の研究ではなくなってしまいますので、時間がかかっても、場合によっては、生徒がどうすればよいか悩んでいても、とにかく助言をしたら待つという姿勢を貫くことにしました。すぐに全国上位入賞を果たすようになりました。神奈川県科学部・科学論文大賞で全国2位の優秀賞に選ばれたときには「嘘だろ？」という反応でした。そして、自分たちの能力に初めて気づいた瞬間でもありました。

令和2年度に入り、新入部員を迎えてさらなる発展をしよう、と考えていた矢先に、コロナ禍による自宅学習が始まりました。1年次生の勧誘もできず、それどころか、6月まで研究活動はできませんでした。その間、顧問が具体的な指示をすることはありませんでしたが、部員たちは実験を開始できるのを待ちながら、さまざまな準備をしていました。このような状況でしたが、1年次生も多く入部してくれ、急ピッチで研究を行った結果、応募したコンテストや専門学会の多くで全国上位入賞を果たしました。賞を得るために研究しているわけではありませんが、受賞という結果は、活動に対する熱意と彼らの活動のレベルの高さを示しています。本年度の後半には、顧問の助言をほとんど必要とせず、部員だけで自走できるまでになっています。

高校生というのは、教員が考えている以上の力を持っているようです。教員が「これは高校生には難しい」などと考えることは、生徒の能力の伸長を邪魔することになります。生徒の能力は突然開花するもので、私は「なるほど」と驚かされる場面に何度も出くわしました。そのたびに研究は新たなステージに入り、それらが層のように重なりあって大きな成果になりました。本冊子に、本校科学部の活動方針や方法と、それによってもたらされた成果を、実際に投稿して受賞を果たした研究論文とともにまとめました。自然科学に深い興味・関心をもつ仲間の活動の参考になれば幸いです。

目 次

1	はじめに—科学部の探究活動の目的	1
2	科学部の活動方針	1
3	科学部の指導体制と教員の役割	2
4	科学部の探究の進め方	2
5	活動の成果と検証	2
6	研究成果（専門学会と論文コンテスト等）	4
7	小中学生を対象にした活動	13
8	発展的な探究活動	13
9	校外研修	15
10	生徒アンケートの結果	16
11	報道資料	18

研究論文

クロゴキブリのキチンの単離に挑む	20
クモは目的に応じて発する糸の構造を変える	26
播磨花崗閃緑岩固結過程でのマグマ残液循環	36
工夫して自作した高分解能の簡易分光器で電子レンジプラズマの正体を探る	45
反応染料で染色した綿糸のマゼンタの割合を紫外線の影響の程度を示す指標とする提案	54
河川に堆積した砂粒の形や鉱物の体積比から源岩からの距離を推定する方法の提案	62

1 はじめにー科学部の探究活動の目的

本校は、本年度に文部科学省からスーパーサイエンスハイスクール（SSH）の指定を受けた。生徒の主体的な活動として、答えのない問いに対して仮説を立て、それが正しいかどうかを検証したり、課題を自ら発見して解決の方法を探る「探究」の力を育成したりする目的で、1年次全員が火曜日の6限目に学校設定科目「理数探究基礎」において課題研究を実施している。

この課題研究を先導し、手本となるべく高い意識をもって活動しているのが科学部である。自然科学に興味をもつ生徒たちが集まり、日々研究に精力的に取り組んでいる。また、科学部の活動は、生徒自身が主体的にテーマを設定する方法、仮説を立てる方法と注意点、目的にあった実験や観察の企画を立案したり実施したりする際の注意点、ポスターやパワーポイントを用いた効果的なプレゼンテーションの方法、正しい様式に基づいた論文のまとめ方、等において、他の生徒の見本にもなっている。科学部の作成した論文やポスター等は、他の生徒に公開し、広報誌「SSH通信」でも紹介することによって、1年次生徒が、「面白そうだ」と身の回りの自然科学に対して興味や関心をもったり、「自分にもできるはずだ」と意欲をもったりすることに大きく貢献している。

2 科学部の活動方針

科学部は、次の4点を活動方針として掲げている。

(1) グループ研究を柱とする。

結果的に一人でおこなうことになる場合もあるが、グループ研究を基本とする。生徒はまだ自然科学についての知識や経験が乏しいため、複数の生徒からなるグループで研究することによって、互いに刺激があったり、議論によって新しい発想を引き出したりすることができる。ただし、リーダーに実施主体が偏ることがあるため、グループ内での役割分担を明確にしている。さらに、メンバー全員が研究者であるという視点から、全員が研究内容のすべてを理解できているように配慮した運営をする。

(2) 身近な自然現象をテーマとして扱う。特別な分析機器を用いることなく、高校生らしい柔軟で新しい発想と工夫で研究をおこなう。

近年の生徒発表会などをみていると、分析機器の仕組みをよく理解できていないが、得られた数字によって議論を展開しているという場面に出くわすことが少なくない。高価な分析機器は大学で活用するとして、高校生のうちは、思考の訓練を十分におこなうことを主眼とする。

研究をおこなう中で、データの数学的処理やグラフや図表を用いて表現する情報処理の力、国語表現の力、英文要旨を作成したり英語で発表したりするための英語の力、科学倫理の理解など、総合的な力が必要であることを、生徒は自覚する。

(3) 研究成果は学会や論文コンテストで評価を得る。

研究成果は、社会に公開して評価を仰がなければ科学とはいえない。論文の査読をはじめとして、専門学会での発表で研究者と議論することによって、成果の評価を得る。専門学会やコンテストにおける受賞は、生徒の進路に大きな影響を与えるばかりでなく、発表会を経験することで、科学の意味と科学者としての社会的立場や科学倫理を理解し、その結果、生徒の科学的能力は飛躍的に向上する。

(4) 研究成果を地域に還元する。

小中学生を中心とした地域住民に研究結果を公開することで、成果を還元するほか、小中学生に自然科学への興味や関心を高めてもらう契機にもなる。生徒は、小中学生にわかりやすく伝える方法の研鑽によって、自らの研究に対するより深い理解を得ることができるとともに、わかりやすく伝える技術の獲得にもつながる。

3 科学部の指導体制と教員の役割

科学部は、自然を幅広く研究対象とする。物理、化学、生物、地学、数学、工学、農学等の各分野のテーマばかりでなく、それらの横断的あるいは統合的なテーマについても扱う。そのため、科学部は、物理系研究部、化学系研究部、生物系研究部、地学系研究部、数学系研究部、の5つの部から構成されており、多くの顧問による集団指導体制をとっている。これらは互いに独立しており、生徒会や兵庫県高等学校文化連盟にも別々に登録している。

顧問教員は、事故防止と研究環境の整備、スケジュールリングや研究の論理性の確認をおこなう。具体的な研究内容に対して「こうすればよい」などと指導はせず、生徒といっしょに議論に参加することによって、生徒の新しい発想や工夫を引き出す助言をする。教員には、このような助言力が求められる。必要に応じて、大学や企業研究所の研究者を招いたり、現地へ出かけて行ったりして、研究のヒントを得ることも必要であり、そのためのネットワークを整備しておく。顧問間で頻繁に情報交換や意見交換をおこない、研究の進み具合や問題点を修正する。

令和2年度の顧問団は、川勝和哉（主顧問）、藤田真央、鈴木健仁、上田康嗣、菅生智文、内海尊覚、岡崎由紀、古河真紀子の8名である。

4 科学部の探究の進め方

年間を通じて活動する。年度の前半は研究活動を、後半は成果の発表と普及活動を中心におこなう。

- (1) 9月～12月：学会発表等が集中している時期であるが、その合間を縫って、部員一人一人が、今後取り組みたいテーマ案を持ち寄る。この際には、先行研究論文なども示し、興味深さや研究の現状、高校生が取り組むテーマであるか、等について互いに議論し、テーマ案を絞り込む。
- (2) 1月～3月：部員各自の希望によって、テーマ案に沿ったグループ分けをおこない、さらに詳細な研究テーマを設定する。またスケジュールリングも検討し、必要な物品を挙げて要求する。可能であれば予備実験を始める。
- (3) 4月～8月：新入生の獲得活動とともに本格的な研究をおこなう。成果をまとめて論文を作成する。そこからプレゼンテーションに必要な、パワーポイント（口頭発表）、ポスター（ポスター発表）、発表原稿、質疑応答集を作成する。
- (4) 9月～12月：学会に積極的に参加して、研究者との議論の中から、研究の問題点や補足すべき点などについて得た指摘に基づいて、追加の研究をおこない、最終論文としてまとめる。

5 活動の成果と検証

(1) 活動の概要

令和2年度は、新型コロナウイルスの影響によって、昨年度3月から5月まで登校できなくなり、科学部の活動は6月1日から徐々に再開していった。その段階では、本年度取り上げるテーマ設定も確定していな

かったが、ZOOMによる専門学会や論文コンテストの締切は例年どおりに設定されており、余裕のない状況での活動再開となった。それでも多くの新入生を迎え、3年次生2名、2年次生6名、1年次生10名の合計18名（男子11名、女子7名）でスタートすることができた。

精力的な研究活動はすぐに大きな成果となってあらわれ、多くの全国上位入賞を果たした。理系の生徒は、全員が大学の理数系に進学したいという希望をより強くもつようになった。また、文系の生徒の論理的思考力の獲得は目覚ましい。これからの、文理を問わないグローバルスタンダードの時代を生き抜くための力の獲得に、科学部における活動は大きく貢献している。1年次生の中には、探究活動の面白さを感じて科学部に入部したり、県の事業である「サイエンスフェア in 兵庫」でポスター発表を希望する生徒が出てきたりするなど、探究活動に対する前向きな影響を与えている。

（2）研究者と生徒との関わり

本年度、非常に高く評価された研究のひとつに、砂粒の解析から源岩から流された距離を推定する指標を作る、という研究がある。この研究は、筑波大学の久田健一郎博士（本校の運営指導委員長でもある）の助言によるところが大きい。生徒は久田先生の話真剣に聞き、得たインスピレーションをもとにして思考し、黙々と実験・観察を続けた結果、全国上位入賞につながった。高大接続という観点からも、このような研究者と生徒との関係は有効であることが明らかになった。

（3）生徒の変容

発表会ごとに生徒の論理的思考力や質疑応答に見られる言語能力をはじめとするプレゼンテーション能力の目覚ましい向上がみられた。はじめは、質問の意味が正確に理解できず、求められた答えを返すこともできなかったが、すぐに、問われている内容を正確に理解し、それを正しくわかりやすい表現で返答することができるようになった。長い沈黙が続く場面もあったが、相槌を打ちながら必要な資料を提示して説明することができるようになった。この変化は、たとえば、高校生・高専生科学技術チャレンジ（JSEC）の2日間の中でもみられた。探究の基礎的な能力ばかりではなく、文理を問わず幅広い分野の学びの必要性についても体験によって学んだ。

（4）次年度への課題と解決策

次年度に向けての課題も明らかになった。まず、科学部顧問団の集団指導体制をより強化することがあげられる。研究ごとに教員を配置し、研究に対する助言から専門学会やコンテストへの募集、引率までを担当する体制を整える必要がある。そのためには、先にも書いたように、教員の助言力が必要である。適時、研修等を実施することで対応したい。また、コロナ禍のために、本年度はほとんどすべての現地発表会や表彰式が中止になってしまったが、生徒にはぜひ現地に出向いて行く経験をさせたい。ZOOM等を用いた遠隔での学会発表は、時間と場所、費用を超越して実施することができるため、経験を積んだ専門研究者などにとっては便利なツールであろう。しかし、経験の乏しい生徒に必要なのは、実体験である。学会の現場を経験することなく卒業させることは避けたい。さまざまなチャンネルを通して、実体験の可能性を探っていききたい。

6 研究成果（専門学会と論文コンテスト等）

コロナ禍のため、例年と日程と方法が大幅に変更になった。東京理科大学第11回坊っちゃん科学賞研究論文コンテストなど、昨年度応募していた大会で中止になったものもあったが、データサイエンスコンテストやキャタピラーSTEM賞など、新たに挑戦した大会もあった。

なお、類似の表題の研究発表や論文があるが、研究を継続的におこなっているため、提出する大会ごとに内容は異なっている。また、多くの生徒が複数の研究班に属して研究をおこなっている。

(1) 第15回日本環境化学会高校環境化学賞「松居記念賞」で優秀賞を受賞（生物系研究部ゴキブリ班）

主催 一般社団法人日本環境化学会
応募 令和元年3月11日（月）申込および論文締切
日時 令和2年6月25日（木）
場所 大阪府千里ライフサイエンスセンター
テーマ クロゴキブリを無色化してキチンを単離する試み
（ゴキブリ班）



チュウガタシロカネグモは目的に応じて発する糸を変えて機能的な巣を形成する（クモ班）
研究者 榎本寛太、赤瀬彩香、高瀬健斗（ゴキブリ班）
赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、安原倭（クモ班）
結果 昨年度後半から研究を続けていたゴキブリやクモに関する論文を応募した。論文が日本環境化学会理事によって審査された。

(2) データサイエンスコンテストに参加

主催 兵庫「咲いテク」推進委員会、兵庫県立姫路西高等学校
共催 (株)大和工業、兵庫県立大学
応募 令和2年6月26日（金）申込締切
日時 令和2年7月5日（日）第1回キックオフイベント（オンライン開催）
令和2年10月25日（日）決勝（オンライン開催）
場所 兵庫県立大学社会情報科学部キャンパス
参加者 岩本滯治、内藤麻結
結果 台湾の高校生とチームを組んで、旅行ビジネスプランの立案と英語によるプレゼンテーションに挑戦したが予選で敗退した。
審査員は、野村和宏（神戸市外国語大学教授）、笹嶋宗彦（兵庫県立大学社会情報科学部准教授）、中矢憲護（大和工業取締役）、西川貴美子（JTB 姫路支店）、マイケル・スミス（ALT）

(3) 日本地球惑星科学連合（JpGU）高校生セッションで佳作（地学系研究部マグマ班）と努力賞を受賞（物理系研究部プラズマ班、紫外線班）

主催 公益社団法人日本地球惑星科学連合
応募 令和2年4月10日（金）申込締切 令和2年4月17日（金）予稿および iPoster 締切

日時 令和2年7月12日(日)(オンライン開催)

テーマ 播磨花崗閃緑岩マグマの固結過程におけるマグマ残液の循環(マグマ班)
 自作の高い分解能をもつ簡易分光器による電子レンジプラズマの分光(プラズマ班)
 紫外線の強度を反応染料で染色した綿糸の退色で指標する(紫外線班/兵庫県立西脇高等学校地学部との共同研究)

研究者 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史(マグマ班)
 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希(プラズマ班)
 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希(紫外線班/兵庫県立西脇高等学校地学部との共同研究)

結果 応募67件中、マグマ班が佳作を、プラズマ班と共同研究の紫外線班が努力賞を受賞した。
 iPosterを用いて説明し、日本地球惑星連合の理事によって審査された。



(4) スーパーサイエンスハイスクール(SSH)生徒研究発表会で発表

主催 文部科学省、(独)科学技術振興機構

応募 令和2年7月3日(金)申込締切 7月21日(火)要旨締切

日時 令和2年8月11日(火)1次審査会

テーマ 自作の高い分解能をもつ簡易分光器による電子レンジプラズマの分光(3年次生部員)

発表者 赤瀬彩香、高瀬健斗(3年次生部員)

結果 発表218校。要旨と発表動画による1次審査を受けたが、2次審査会に進出することはできなかった。

(5) 日本地質学会第127年学術大会(名古屋大会)ジュニアセッションで優秀賞を受賞(地学系研究部砂粒班)

主催 一般社団法人日本地質学会

応募 令和2年9月30日(水)申込およびポスター締切

日時 ジュニアセッションは電子データによるデジタル審査で実施された。

テーマ 石英と長石の砂粒の凹凸係数や体積比は源岩からの距離を推定する指標となる(砂粒班)



- 研究者 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希、児玉尚子、佐々木彬人、菅野和奏、多田明良、中農拓人、前田智彦、三井彩夏、三宅歩音、室本勇也、森山琉晟（砂粒班）
- 結果 日本地質学会の全理事によって、デジタルポスター審査がおこなわれ、応募18件中、第2位の優秀賞を受賞した。

(6) 第64回日本学生科学賞兵庫県コンクールに応募し、佳作を受賞（物理系研究部プラズマ班）

- 主催 読売新聞社・兵庫県教育委員会・神戸市教育委員会・兵庫県中学校教育研究会理科部会
文部科学省認定大会
- 応募 令和2年10月8日（木）申込および研究概要締切
- 場所 バンドー神戸青少年科学館
- テーマ 工夫して自作した高分解能の簡易分光器で電子レンジプラズマの正体を探る（プラズマ班）
反応染料で染色した綿糸のマゼンタの割合を紫外線の影響の程度を示す指標とする提案（紫外線班）

- 研究者 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希（プラズマ班）
赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希（紫外線班／兵庫県立西脇高等学校地学部との共同研究）
- 結果 応募総数は25件であった。論文およびポスターによって審査され、兵庫県大会審査会で佳作を受賞した。神戸大学の伊藤真之教授が委員長で、その他は教育関係者が中心の審査委員会が審査をおこなった。



(7) 第3回キャタピラーSTEM賞に応募し高校生部門の最優秀賞を受賞（2年次生 山本夏希）

- 主催 キャタピラー明石
- 応募 令和2年9月30日（水）申込および論文締切
- 日時 令和2年10月21日（水）オンラインによる面接審査
- テーマ 未来の都市について
- 応募者 内藤麻結、山本夏希、児玉尚子、菅野和奏、三井彩夏、三宅歩音
- 結果 応募11件中、第1位の最優秀賞を受賞した。本コンテストの対象は女子生徒である。



(8) 第44回兵庫県高等学校総合文化祭自然科学部門発表会で口頭およびポスター発表し、全部門総合最優秀賞（物理系研究部プラズマ班）と地学部門最優秀賞（地学系研究部砂粒班）を受賞、令和3年度全国大会に推薦された

主催 兵庫県高等学校文化連盟自然科学部会
 応募 令和2年9月28日(月) 申込締切
 令和2年10月7日(水) 論文締切
 令和2年11月2日(月) ポスターデータ提出締切
 日時 令和2年11月7日(土) 口頭発表
 令和2年11月8日(日) ポスター発表
 場所 兵庫県立神戸高等学校(口頭発表)
 バンドー神戸青少年科学館(ポスター発表)
 引率 川勝和哉、藤田真央
 テーマ 自作分光器による電子レンジプラズマの分光(物理部門)
 砂粒の形や鉱物比から源岩からの距離を推定(地学分野)
 研究者 岩本漣治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、
 山本夏希(物理部門)(口頭発表生徒は、岩本漣治と安原倭の2名)



岩本漣治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希、児玉尚子、佐々木彬人、菅野和奏、多田明良、中農拓人、前田智彦、三井彩夏、三宅歩音、室本勇也、森山琉晟(地学部門)(口頭発表生徒は、奥見啓史、内藤麻結、山本夏希の3名)
 結果 発表27件(物理分野7件、化学分野4件、生物分野10件、地学分野4件、環境特別分野2件)。論文審査と当日の口頭発表審査の合計点で、全国大会に進出する研究を選考する。各分野の神戸大学の教員、高等学校の校長と2名の教員によって審査がおこなわれ、2件とも令和3年度の和歌山全国総合文化祭に推薦された。

(9) 第3回グローバルサイエンティストアワード“夢の翼”に応募し、優秀賞(物理系研究部プラズマ班)と大学新聞社賞(地学系研究部砂粒班)を受賞

主催 グローバルサイエンティストアワード“夢の翼”実行委員会
 文部科学省認定大会
 応募 令和2年10月24日(土) 申込締切
 令和2年11月1日(日) 要旨締切
 日時 令和2年11月8日(日)(オンライン開催)
 テーマ 自作分光器による電子レンジプラズマの分光(プラズマ班)
 砂粒の形や鉱物比から源岩からの距離を推定(砂粒班)
 研究者 岩本漣治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希(プラズマ班)



岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希、児玉尚子、佐々木彬人、菅野和奏、多田明良、中農拓人、前田智彦、三井彩夏、三宅歩音、室本勇也、森山琉晟(砂粒班)

結果 発表 66 件。ZOOM による口頭発表審査で、全国 2 位の優秀賞と大学新聞社賞を受賞した。最優秀賞には文部科学大臣賞が贈られる。

(10) 神戸大学高校生・私の科学研究発表会 2020 で発表し優秀賞を受賞 (物理系研究部プラズマ班)

主催 兵庫県生物学会・神戸大学サイエンスショップ

応募 令和2年10月26日(月)申込締切

令和2年11月16日(月)要旨締切

日時 令和2年11月23日(月・祝)(オンライン開催)

テーマ 自作の高い分解能をもつ簡易分光器による電子レンジプラズマの分光(プラズマ班)

石英と長石の砂粒の凹凸係数や体積比は源岩からの距離を推定する指標となる(砂粒班)

研究者 岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希(プラズマ班)

岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希、児玉尚子、佐々木彬人、菅野和奏、多田明良、中農拓人、前田智彦、三井彩夏、三宅歩音、室本勇也、森山琉晟(砂粒班)

結果 23 件の発表があった。1 年次生徒が初めて口頭発表をおこなった。神戸大学の教員によって審査がおこなわれ、プラズマ班が 2 位の優秀賞を受賞した。



(11) 第 43 回日本分子生物学会高校生発表会で発表 (生物系研究部)

主催 日本分子生物学会

応募 令和2年10月26日(月)申込および要旨締切

日時 令和2年12月4日(金)(オンライン開催)

テーマ クモは目的に応じて発する糸を変えて機能的な巣を作る(クモ班)

研究者 岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希(クモ班)

結果 11 件の口頭発表と 18 件のポスター発表があった。ZOOM による口頭発表(オンライン開催)であったが、ZOOM の接続が不安定で、十分な発表をおこなうことができなかった。

(12) 第 18 回高校生科学技術チャレンジ 2020 (JSEC) のファイナリストとして最終審査会に進出し、審査委員奨励賞を受賞 (地学系研究部砂粒班)

主催 朝日新聞社、テレビ朝日 文部科学省認定大会

応募 令和2年10月13日(火)申込および論文締切

日時 令和2年12月12日(土)~13日(日)



(オンライン開催)

- テーマ 河川に堆積した砂粒の形や鉱物の体積比から源岩からの距離を推定する方法の提案 (砂粒班)
- 研究者 岩本滯治、奥見啓史、山本夏希 (JSEC 研究者として3名以内しか認めていない)
- 結果 応募217件であった。本研究は論文によって審査される。10月中旬の予備審査で75研究に、11月上旬の1次審査で32研究に絞られ、最終審査会に進出するファイナリストとなった。ZOOMによるオンライン審査の結果、審査委員奨励賞を受賞することができた。日本学生科学賞が教育関係者によって地方大会から選定されるのに対して、JSECは予備審査から日本を代表する研究者らが専門性を中心に審査する大会である。

(13) 第15回筑波大学「科学の芽賞」に応募し、奨励賞を受賞 (物理系研究部紫外線班)

- 主催 筑波大学「科学の芽賞」実行委員会
- 応募 令和2年9月19日(土) 申込および論文締切
- 日時 令和2年12月19日(土) (オンライン開催)
- テーマ 反応染料で染色した綿糸の紫外線照射による退色—紫外線の影響の程度を示す指標としての提案— (紫外線班)
- 高分解能の簡易分光器を自作して電子レンジプラズマの正体を探る (プラズマ班)
- 源岩からの距離を砂粒の凹凸や石英/長石の体積比から推定する指標の提案 (砂粒班)
- 研究者 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希 (紫外線班/兵庫県立西脇高等学校地学部との共同研究)
- 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希 (プラズマ班)
- 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希、児玉尚子、佐々木彬人、菅野和奏、多田明良、中農拓人、前田智彦、三井彩夏、三宅歩音、室本勇也、森山琉晟 (砂粒班)
- 結果 285件の応募のうち、科学の芽賞に次ぐ奨励賞を紫外線班が受賞した。



(14) 第19回神奈川大学全国高校生理科・科学論文大賞で、優秀賞 (全国2位) を2年連続して受賞 (物理系研究部プラズマ班)、努力賞 (地学系研究部砂粒班)、および団体奨励賞もあわせて受賞

- 主催 神奈川大学 文部科学省認定大会
- 応募 令和2年9月4日(水) 申込および論文締切
- 日時 令和2年12月23日(水) (オンライン開催)
- テーマ 自作の高い分解能をもつ簡易分光器による電子レンジプラズマの分光 (プラズマ班)
- 石英や長石の砂粒の凹凸や体積比から源岩からの距離を推定す



る指標の提案（砂粒班）
 反応染料で染色した綿糸の紫外線照射による退色—紫外線の影響の程度を示す指標としての提案—（紫外線班）

研究者 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希（プラズマ班）

赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希

赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希、児玉尚子、佐々木彬人、菅野和奏、多田明良、中農拓人、前田智彦、三井彩夏、三宅歩音、室本勇也、森山琉晟（砂粒班）

赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希（紫外線班／兵庫県立西脇高等学校地学部との共同研究）

結果 12月7日（月）の審査会の結果、応募過去最多の222件中、昨年度のクモ班に続いて、2年連続でプラズマ班が全国第2位優秀賞を受賞した。また砂粒班が努力賞を、科学部全体としても優れた研究をおこなったとして団体奨励賞を受賞した。研究論文は2021年5月に「未来の科学者との対話19」として日刊工業新聞社から全国で出版される。



(15) (財) 中谷医工計測技術振興財団成果発表会に参加（物理系研究部）

主催 (財) 中谷医工計測技術振興財団

応募 令和2年11月30日（月）申込締切

日時 令和3年1月15日（金）（オンライン開催）

テーマ 電子レンジ内で発生するプラズマの分析—シャープペンシルの芯からなぜナトリウムの強い輝線が現れるのか—

研究者 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希、児玉尚子、佐々木彬人、菅野和奏、多田明良、中農拓人、前田智彦、三井彩夏、三宅歩音、室本勇也、森山琉晟



結果 例年であれば、助成を受けたすべての学校が一堂に会して発表会を開催するところだが、本年度は新型コロナの影響により、オンライン発表会となった。その代替として、すべての学校が研究成果の動画を作成して公開することになった。

(16) 第13回サイエンスフェア in 兵庫で発表（物理系研究部プラズマ班、地学系研究部砂粒班）

主催 兵庫「咲いテク」運営指導委員会

応募 令和2年12月25日（金）申込締切 令和3年1月23日（土）アップデート締切

日時 令和3年1月24日（日）（オンライン開催）

テーマ 高分解能の簡易分光器を自作して電子レンジプラズマの正体を探る（プラズマ班）

源岩からの距離を砂粒の凹凸や石英／長石の体積比から推定する指標の提案（砂粒班）

研究者 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希（プラズマ班）

赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希、児玉尚子、佐々木彬人、菅野和奏、多田明良、中農拓人、前田智彦、三井彩夏、三宅歩音、室本勇也、森山琉晟（砂粒班）

結果 県内 SSH 指定校 11 校合同で取り組んでいる兵庫「咲いテク」事業である。新型コロナ禍の影響で、講演はライブ配信で、高校生の研究発表は MP4 のビデオで発表した。ライブではなく、コメントに対しても後日返信をするというスタイルでの実施であったためか、実感がわきにくい大会となったが、他校の生徒の研究を知ることができる貴重な機会となり、開催できたこと自体が収穫であった。

(17) 第 5 回東京女子医大「はばたけ未来の吉岡彌生賞」に応募し、奨励賞を受賞（物理系研究部プラズマ班）

主催 静岡県掛川市教育委員会、東京女子医科大学

応募 令和2年10月18日（日）申込および論文、要旨締切

日時 令和3年2月14日（日）審査発表

テーマ 工夫して自作した高分解能の簡易分光器で電子レンジプラズマの正体を探る（プラズマ班）
河川に堆積した砂粒の形や鉱物の体積比から源岩からの距離を推定する方法の提案（砂粒班）
反応染料で染色した綿糸のマゼンタの割合を紫外線の影響の程度を示す指標とする提案（紫外線班）



研究者 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希（プラズマ班）

赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希、児玉尚子、佐々木彬人、菅野和奏、多田明良、中農拓人、前田智彦、三井彩夏、三宅歩音、室本勇也、森山琉晟（砂粒班）

赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希（紫外線班／兵庫県立西脇高等学校地学部との共同研究）

結果 昨年に続き入賞を果たした。本研究は論文によって審査される。

(18) 第 17 回日本物理学会 Jr. セッション（2021）で本発表研究に採択（物理系研究部プラズマ班）

主催 一般社団法人日本物理学会、高等学校文化連盟全国自然科学専門部

応募 令和2年12月13日（日）申込および要旨、論文締切

日時 令和3年3月13日（土）（オンライン開催／予定）

テーマ 電子レンジプラズマの発生源は何か（プラズマ班）

- 研究者 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希（プラズマ班）
- 結果 98件の応募があり、物理学の各専門領域の代表・副代表、理事、Jr.セッション委員会委員、男女共同参画推進委員会委員、物理教育委員会委員、物理教育編集委員会委員、前回審査員等による書類審査がおこなわれた。その結果、本校科学部の研究が本発表研究に口頭発表として採択された。ZOOMによる発表をおこない、書類審査と当日のプレゼンテーション審査の合計点で優秀賞や奨励賞が決定される。

(19)日本農芸化学会 2021 年度大会ジュニア農芸化学会で本発表研究に採択(生物系研究部ゴキブリ班)

- 主催 公益社団法人日本農芸化学会
- 応募 令和2年12月18日(金) 申込および要旨締切
- 日時 令和3年3月19日(金) (オンライン開催/予定)
- テーマ クロゴキブリからキチンを単離する方法の開発 (ゴキブリ班)
- 研究者 赤瀬彩香、高瀬健斗、岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希 (ゴキブリ班)
- 結果 84件の応募があった。事前に提出した要旨を大会実行委員会が審査し、本発表研究が採択された。なお、本発表に当日の審査はない。

(20) 第68回日本生態学会 (2021年岡山) 高校生ポスター発表会で本発表研究に採択 (生物系研究部ゴキブリ班)

- 主催 一般社団法人日本生態学会
- 応募 令和2年11月2日(月) 申込締切 令和3年2月15日(月) 要旨締切
令和3年2月25日(木) 論文締切
- 日時 令和3年3月20日(土) (オンライン開催/予定)
- テーマ クロゴキブリのキチンの単離に挑む (ゴキブリ班)
- 研究者 岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、藤本大夢、安原倭、山本夏希 (ゴキブリ班)
- 結果 応募98件と昨年度の60件から大幅に増えた。ポスターの情報伝達能力(タイトル、要旨、工夫、情報過多でないなど)、研究の質(新規性、独創性、データの質と量、解析方法の妥当性、議論や結論の妥当性)に基づいて選考委員会によって審査され、最優秀賞と優秀賞が決定する。

7 小中学生を対象にした活動

コロナ禍のため、例年と日程と方法が大幅に変更になった。青少年のための科学の祭典など、応募していた行事で中止になったものもあった。

(1) わくわく実験教室を開催予定

- 主催 兵庫県立姫路東高等学校科学部、生活創造部
募集 令和3年2月予定
近隣の小学校に案内し、小学4・5・6年生を対象に募集する。
日時 令和3年3月27日(土) 予定
場所 兵庫県立姫路東高等学校 生物教室・調理室
テーマ 虹の結晶を作ろう！(ビスマス結晶作り)
参加者 兵庫県立姫路東高等学校科学部、生活創造部の生徒及び教員
内容 新型コロナの影響で実施が危ぶまれたが、科学部が研究によって解明した自然現象をテーマにして実施する。

8 発展的な探究活動

(1) 根源を問い革新を生む国際的科学技术人材育成挑戦プログラム ROOT に2年次生3名が合格

- 主催 GSC ひょうご神戸コンソーシアム(神戸大学・兵庫県立大学・関西学院大学・甲南大学・理化学研究所・県立人と自然の博物館・高輝度光科学研究センター・兵庫工業会・関西各教育委員会等)
応募 令和2年6月30日(火) 申込および書類締切
日時 令和2年6月27日(土) 面接審査(オンライン審査)
場所 神戸大学をはじめとする兵庫県内の国公立大学
参加者 4名が挑戦。
結果 岩本滯治、奥見啓史、山本夏希の3名が合格した。提出書類と面接によって選抜された40名が基礎ステージを受講する。ここでは研究に必要なさまざまな基礎を学ぶ。その中から、優れた生徒8名が2年目の実践ステージに進み、実際に研究をおこなったり英語の集中研修を積んだりして、ワシントン大学で開催される大学生の研究発表会での発表を目指す。講師は各大学の研究者が務める。近年は希望者が多く、レベルが高くなっており、SSH指定校等の生徒で占められる傾向にある。選抜されるためには、既にある程度の研究実績が求められるようである。

(2) 数学・理科甲子園2020に科学部の生徒が参加

- 主催 兵庫県教育委員会
応募 令和2年9月11日(金) 申込締切
日時 令和2年11月21日(土)
場所 甲南大学講堂兼体育館
参加者 岩本滯治、奥見啓史、内藤麻結、安原倭、山



本夏希（以上2年次生）、森山琉晟（1年次生）

結果 予選敗退。チーム対抗戦で、数学、理科、科学技術等に関する問題を解く。個人戦と団体戦の総合計により、上位16チームが本選に進出する。新型コロナの影響で、十分な準備や大会運営ができなかった。

（3）科学倫理教育研修会で模擬授業に参加

主催 兵庫県立姫路東高等学校
日時 令和2年11月22日（日）
場所 兵庫県立姫路東高等学校 百周年記念館
発表者 丸山マサ美氏（九州大学大学院医学研究院保健学部間講師）
川勝和哉（主幹教諭、本校SSH推進部長）
テーマ 道徳と科学倫理、研究倫理
内容 本校のSSH事業として、午前に丸山マサ美氏の講演会「バイオエシックス教育における知性教育と感性教育の統合—高校教育への期待—」を実施し、午後に科学部生徒をモデルクラスにして、川勝和哉主幹教諭の模擬授業と、丸山マサ美講師の「いのちは誰のもの」と題する模擬授業を実施した。

（4）第13回日本地学オリンピック（第15回国際地学オリンピック日本代表選抜）を16名が受験

主催 NPO法人地学オリンピック日本委員会
応募 令和2年11月15日（日）申込締切
日時 令和2年12月20日（日）（オンライン開催）
場所 生徒各自の自宅で受験
受験者 2年次生5、1年次生7名
結果 国際大会予選として実施される科学オリンピックの一種。この成績は多くの国立大学の、A0入試や推薦入試に用いることができる。マークシート方式の筆記試験で、原則として高等学校地学基礎の教科書の内容から出題されるが、思考的な発展問題も含まれる。全国の受験者数は1383名、50点満点で全国平均は24.06点、本校平均点は17.8点、本校最高点は28点であった。

（5）JST RISTEX 倫理的法的社会的課題の研究課題 ELSI「遺伝子差別に対する法整備に向けての法政策の現状分析と考察」の研究会で科学倫理のワークショップに参加

主催 JST RISTEX 倫理的法的社会的課題の研究課題 ELSI
（代表：瀬戸山晃一京都府立医科大学大学院医学研究科主任教授）
日時 令和3年3月31日（水）（予定）
場所 本校教室
内容 科学部員を対象として、京都府立医科大学と同志社大学商学部の大学生および大学院生らとオンラインで結び、科学倫理のテーマについてのワークショップを行う。

9 校外研修

経験の浅い生徒にとって、日本各地の自然や科学博物館の展示に触れることは、自然科学観を育成するために重要である。コロナ禍のために、ほとんどの専門学会や研究発表会が中止、またはオンライン開催となったため、専門研究者や科学研究をおこなっている高校生と直接対話する。

(1) 科学倫理研修

目的 地球科学の現場を見ることによって、今後の科学研究の指針を得る。また、科学や技術が社会に与えた影響について学び、科学倫理観を育成する。

期日 令和3年3月5日(金)～3月7日(日)(予定)

場所 長崎原爆資料館、雲仙岳資料館、佐賀県立宇宙科学館、九州大学病院キャンパス

宿泊 長崎バスターミナルホテル(予定)

参加者 科学部員13名

内容 地球科学を基礎にした研究をおこなうにあたり、科学倫理関係の施設を直接訪問し、歴史的な資料に触れることにより、今後の研究活動に資する。

→コロナ禍による緊急事態宣言の発出により、中止となった(2月5日)

10 生徒アンケートの結果

(2月1日実施／対象生徒：3年次生2名、2年次生6名／1年次生10名)

問1. 研究を始める前は、研究についてどのように思っていましたか？

期待していた	よくわからないので不安だった	興味がなかった
5名 (28%)	13名 (72%)	0 (0%)

問2-1. 問1で「期待していた」と答えた人に聞きます。活動をおこなってきて、どうでしたか？

期待通りだった	期待通りではなかった
5名 (100%)	0名 (0%)

問2-2. 問1で「不安だった」や「興味がなかった」と答えた人に聞きます。活動をおこなってきて、どうでしたか？

思っていた以上に面白かった	やはり面白くなかった
13名 (100%)	0名 (0%)

問3. 大学の先生の指導や助言はどうでしたか？

刺激を受けた、面白かった	期待通りではなかった
18名 (100%)	0名 (0%)

問4. 科学部の活動は自分にとって役立ったと思いますか？あてはまるものをすべて選んでください。

自然科学に対する 興味が増した	進路選択の役に立った	勉強の意欲が増した	役に立たなかった
15名 (39%)	13名 (34%)	10名 (26%)	0名 (0%)

問5. 科学部の活動についての自由記述。

- ・新型コロナウイルスの影響で活動の開始が遅れたものの、皆で協力してさまざまな賞を得ることができてよかった。多くの発表会がリモート開催になり、実際に現地に行き発表できなかったことが残念だ。
- ・集中して作業を長時間続けていたため、かけた時間が成果に反映してよかった。
- ・研究発表会などで、発表の仕方を学ぶことができ、良い経験になった。
- ・地味な活動の時間が長く続いて不安になったが、いろいろな発表会で高く評価してもらえて充実している。
- ・発表会がリモート実施になったりしてとまどったが、それを逆手にとって発表することができたので、良い経験になった。
- ・自分の強みを見つけることができた。
- ・コロナの影響で、いろいろな場所に赴く機会がなくなってしまって残念だ。
- ・分散登校などがあったため、研究が進むのか不安だった。時間がもう少しあれば、もっと研究を詰め

ることができた。

- ・少し自信がついた。楽しかった。
- ・今までは地学分野はあまり面白くないなと思っていたけれど、地道に実験してみて、終わってみると達成感があって面白いと思うようになった。
- ・科学部で自分の知る世界が広がり、さまざまな考え方に触れることができたので、今後も視野を広げていきたい。
- ・自分が今まで知らなかったことを知り、また今後も普通に生活していたのでは知ることはなかったであろう知識まで入ってくるので、やっているととても面白い。
- ・勉強のライバルとして一緒に頑張った。文武両道で頑張れた。先輩の活躍が素晴らしくて、安心して取り組めた。
- ・個人の事情で部活を休んだ場合でも、他の部員が進捗について教えてくれるので、良い部活だなと思う。先輩や同級生の成績が良いので、自分にとって良い刺激になった。
- ・研究を進める中で、友情も深まった。
- ・普段の生活の中でも、なぜだろうと考えることが多くなった。研究の方法について知り、技術を身に付けることができた。
- ・与えられた課題を教えられた方法でするのではなくて、自分で課題を探して自分で方法を考える力が付いたと思う。
- ・自分は、何をすればよいのかわからずに、じっとしている時間が長くて、先輩に頼りきりだったので、これからが不安。来年度は自分で考えて行動したい。
- ・役割分担をもっときちんと決めて、もっと計画的に活動すれば、みんなの負担も減らせるし、活動時間も集中した濃いものにできると思う。しかし、負担が減ると成果が出ないのかもしれない。
- ・話の意図をすぐに読み取り、対応できるようになりたいと思う。

【振り返りと分析】

科学研究に興味をもって入部してきたが、初めての研究活動へのとまどいと不安をもっていた生徒が多くいたことが分かる。新型コロナウイルスの影響で、研究活動の開始が大幅に遅れたり、中断されたりしたことも、今後の学校生活に対する不安感を助長させたに違いない。しかし、上級生の助言を得て研究活動がすすんでいくにつれ、さまざまな行事に全員で意欲的に取り組み、期待通りであったと満足している。自由記述では、現在でも十分に内容の濃い活動をおこなっているが、ひとりひとりがさらなる高みを目指して、どのようにしていくべきかを考えていることが分かる。

一方教員の指導・助言体制について、複数の顧問による分担指導体制を確立させることができなかった。一部の顧問が複数の研究の指導・助言がおこなっていると、個々の生徒に対して十分な指導・助言をする時間を確保することができない。次年度に向け、体制作りを急がなければならない。

11 報道資料

(1) 日本科学技術チャレンジ (JSEC2020) 審査委員奨励賞

2020年(令和2年)12月24日(木) 13歳 18

第18回高校生・高専生科学技術チャレンジ

花王特別奨励賞

植物の吸水リズムを生み出す原因とは



石原優希さん(右) 関心希子さん(左)
 兵庫県立千手堂高専 1年

審査委員奨励賞

マイクロプラスチック等の海洋環境リモートセンシングにおけるロボティクスの活用



(右から) 木村光海さん、宮口さくらさん、津田誠秀さん
 一宮高等学校 3年

花王特別奨励賞

植物の吸水リズムを生み出す原因とは



石原優希さん(右) 関心希子さん(左)
 兵庫県立千手堂高専 1年

審査委員奨励賞

マイクロプラスチック等の海洋環境リモートセンシングにおけるロボティクスの活用



(右から) 木村光海さん、宮口さくらさん、津田誠秀さん
 一宮高等学校 3年

花王特別奨励賞

植物の吸水リズムを生み出す原因とは



石原優希さん(右) 関心希子さん(左)
 兵庫県立千手堂高専 1年

審査委員奨励賞

マイクロプラスチック等の海洋環境リモートセンシングにおけるロボティクスの活用



(右から) 木村光海さん、宮口さくらさん、津田誠秀さん
 一宮高等学校 3年

花王特別奨励賞

植物の吸水リズムを生み出す原因とは



石原優希さん(右) 関心希子さん(左)
 兵庫県立千手堂高専 1年

審査委員奨励賞

マイクロプラスチック等の海洋環境リモートセンシングにおけるロボティクスの活用



(右から) 木村光海さん、宮口さくらさん、津田誠秀さん
 一宮高等学校 3年

科学教育を通してつくる 未来を
51

兵庫県立姫路東高等学校

電子レンジ内で発生するプラズマの分析—シャープペンシルからなぜナトリウムの強い輝線が現れるのか—

謎のプラズマ現象を解明!

誰が解明したのか、謎のプラズマ現象

2020年11月の兵庫県高等学校総合文化祭(総文祭)自然科学部門発表会で、兵庫県立姫路東高等学校の科学部は総合最優秀賞と地学部門最優秀賞を獲得して共に全国総文祭出場を決めた。

総合最優秀賞になった「プラズマ班」の研究は、シャープペンシルの芯を電子レンジで加熱した際に発生するプラズマの解明だ。京都大学での科学イベントで知った現象だが、炭素が主成分の芯からなぜナトリウムを特徴づける黄色いプラズマが発生するのかはわかっていなかった。そこで京大の先生が言った「誰か解明してくれないかな」という言葉を受けて研究を始めたのだ。科学部部長の岩本浩治さんは「誰も解明していないからこそ挑戦しようと思いました」と話す。



総文祭自然科学部門発表会での様子。左側の3名が、この研究のメンバー。右側の2名が、発表会の司会を務めた。



研究のきっかけになった京都大学「U5」の発表の様子(2019年8月)



●**実施担当**
川勝和哉 主幹教諭

●**活動のモットー**
議論から新しい発想を引き出せるようグループ研究を基本とする。また、身近なテーマを、特別な機器などを用いずに扱うことで思考の訓練を促す。



学校概要

「自主 創造 友愛」を校訓とする伝統校。令和2年度からは「スーパーサイエンスハイスクール」に指定されている。

設立:1909年
生徒数:830人
兵庫県姫路市本町68番地70



DVD-Rの表面などを用いた分光分析装置の自作から高分辨率を実現した



電子レンジ内で発生させたプラズマ



科学部は、全国レベルのコンクールでも優秀賞や奨励賞など、数多くの賞を受賞している

自分では気づいていない成長に驚き

以後、研究者の助言を得ながら自作分光器などを用いて研究を重ねた結果、芯が導体となり、その支持台としていた陶製装置の成分がプラズマを発生させていたことを突き止める。顧問の川勝和哉主幹教諭は「私がやるのは論理性的の確認や新しい発想・工夫を引き出す助言で、研究はテーマ決めから部員の自主性に任せています」と話し、自ら結論を導いた部員たちを評価していた。

ただし、本人たちは外部の評価に驚いているようで、総文祭の総合最優秀賞にも岩本さんや副部長の奥見啓史さんは「うまく発表できなかったのに何で?」と思いましたと話す。プラズマ班の山本夏希さんも「川勝先生から質問の意図を正確に把握できるようになったと言われましたが、自分ではよくわかりません」と戸惑う。これに対し、川勝主幹教諭は「自分では気づかないものですが、傍にいと成長がわかります」と目を細めていた。(令和2年度個別助成)

この活動は、中谷医工計測技術振興財団の「科学教育振興助成」により行われています。

公益財団法人 中谷医工計測技術振興財団 〒141-0032 東京都葛飾区大崎1丁目2番2号 アートヴィレッジ大崎 センtralタワー8階

シスメックス株式会社創立者の故・中谷太郎氏が私財を投じて設立。医工計測技術分野の発展を願い、「中谷賞」をはじめ各種研究助成、若手研究者支援や国際交流事業を展開。さらに、すも野拡大のための、科学教育振興活動などに対し、幅広い助成事業を行っています。

中谷財団 検索

研究論文

クロゴキブリのキチンの単離に挑む

兵庫県立姫路東高等学校 科学部

梶本貫太 奥見啓史 岩本滯治 安原俊 藤本大夢 内藤麻結 山本夏希

要 旨

すでに、カニ殻からキチンを単離して、高弾性・低熱膨張の透明材料であるキチンナノファイバーやキチンスラリーを合成することに成功している。世間では忌み嫌われる存在であるクロゴキブリにも50%程度のキチンが含まれており、これは他の昆虫に比べて圧倒的に高い含有率である。昆虫キチンは甲殻類のキチンに比べて加水分解されやすく、脱アセチル化されやすいため、穏和な条件で分子量の低下を抑えた化学修飾ができることが知られているが、単離が困難で研究は進んでいない。そこで、身近な昆虫であるクロゴキブリを脱色透明化してキチンを単離することができれば、人間に有益な機能性素材として活用することができるのではないかと考えた。クロゴキブリを用いた研究は本研究が初めてである。

カニの殻の脱色透明化の方法を参考にして、独自に脱色透明化の方法を模索した。クロゴキブリの内臓を取り出して乾燥させ、アセトンに1日浸して脱脂した後、水酸化ナトリウムに浸して加熱した。その結果、クロゴキブリをほぼ脱色透明化することに成功した。

キーワード

クロゴキブリ (*Periplaneta fuliginosa*) : 体長 25~30mm 程度で、黒褐色の光沢をもち雑食性で、日本全国に広く生息している。孵化後 300~350 日で成虫になり、その後 200 日前後生存する。国内に生息する屋内性のゴキブリでは、唯一越冬可能な種である。

キチン (図1) : エビやカニなどの甲殻類から昆虫類などに広く含まれている天然素材であるため枯渇の心配がない。安全性も高く、生物分解性であることから注目されている。直鎖型の含窒素多糖高分子の、ポリ-β-1-4-N-アセチルグルコサミン。化学式は $(C_8H_{13}NO_5)_n$ で、構造はセルロースと類似しているが、2位炭素の水酸基がアセトアミド基である。分子間や分子内に強固な水素結合をもち、加熱によって分解する。この水素結合は、低い溶解性の原因ともなっており、ほとんどの溶剤に溶解しない。濃塩酸や濃アルカリに浸すと、加水分解によって分子鎖が切断されて分子量が低下する結果、溶解する。

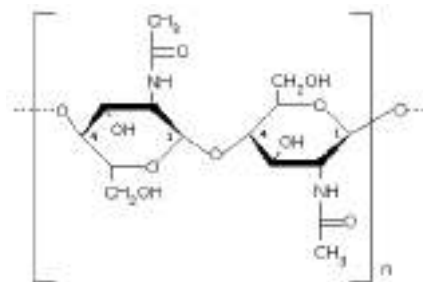


図1 キチンの分子構造

チロシン : 4-ヒドロキシフェニルアラニンとも呼ばれるアミノ酸の一種で、化学式は $C_9H_{11}NO_3$ 。

1. はじめに

キチンは生物によって、年間 1000 億トンも生産されているとされている、枯渇することのない豊富な生物資源である。生体に対する親和性が高く、おもに廃棄される部分に含まれているため、さまざまな形で再利用することができる。甲殻類から得たキチンは、すでに縫合糸など医療分野において実用化さ

れている（木船, 1994）ほか、腸管の炎症の抑制、皮膚の健康の増進効果、食品の食感の改良効果、ダイエット効果、植物の免疫機能の活性化効果、などさまざまな活用法が考えられている（伊福, 2015）。Shams ほか（2012）は、カニの殻のキチンの構造を明らかにし、伊福（2015）はカニ殻のキチンをキチンナノファイバーの形で単離することに成功している（図2）。

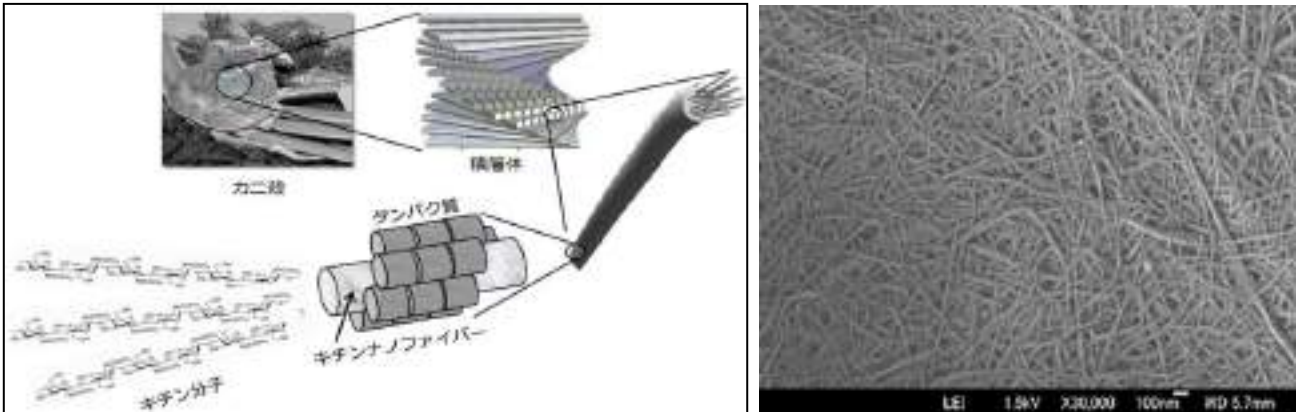


図2 カニ殻の階層構造と抽出されたキチンナノファイバー（伊福, 2015）

一方、昆虫のキチンをバイオマテリアルとして利用しようとする研究は 1996 年に旧科学技術庁のプロジェクトとして始まった（羽賀, 2011）。昆虫にもキチンが多く含まれていることは知られているが、昆虫キチンは普通の溶媒には溶解しないために、比較的容易な甲殻類のキチンの活用比べて遅れており、これまでに、カイコ蛹脱皮殻やカブトムシ幼虫からのキチン単離が報告されているのみである（羽賀・張, 1998, 1999）。これは、昆虫クチクラに含まれるフェノール化合物をはじめとするさまざまな物質を溶解する安定した方法が見つからないからである。昆虫キチンは甲殻類のキチンに比べて加水分解されやすく、脱アセチル化されやすいため、穏和な条件で分子量の低下を抑えた化学修飾ができることが知られている（羽賀, 2011）。日常生活で身近な存在であり、世間では一般に忌み嫌われるクロゴキブリにも、昆虫類で最大の 50% 程度のキチンが含まれているともいわれている（詳細は不明）。カニ殻のキチン含有率が 20~30% 程度である（伊福, 2015）ことから、その豊富さが理解できる。

困難とされている昆虫の一種であるクロゴキブリでキチンの単離（脱色透明化）が可能になれば、クロゴキブリのキチンから生体への親和性の高い新しい素材を作成するヒントが得られるのではないかと考えた。そこで、甲殻類のキチンの脱色透明化の方法を参考にして、クロゴキブリのキチンの単離を試みることにした。クロゴキブリを脱色透明化することは、キチン以外の成分を溶解してキチンを単離することを意味する。クロゴキブリを用いた研究は、本研究が初めてのものである。

2. 実験方法と結果

(1) 予備実験：ズワイガニの殻の透明化実験（図3）

キチン、キトサン研究会（1991）に基づいて、ズワイガニの殻の脱色透明化実験をおこなった。カニ殻のキチンは、充填剤（カルシウム）で支持されたキチンナノファイバーとタンパク質が複合体を形成して階層をなし、その間に炭酸カルシウムが充填されている。したがって、カルシウムやタンパク質を溶解によって除去することで、キチンを単離することができる。なお、手順⑤は、より完全な脱色透明

化を目的に筆者が独自に追加したものである。

- ① ズワイガニの殻を十分に乾燥させ、粗く粉碎する。
- ② 1.0mol/Lの水酸化ナトリウムに2日間浸し、タンパク質を取り除く。
- ③ イオン交換水を用いて中性になるまで十分に洗浄して乾燥させた後、1.0mol/Lの塩酸に3日間浸して炭酸カルシウムを溶解除去する。
- ④ イオン交換水を用いて中性になるまで十分に洗浄して乾燥させた後、エタノールに浸して色素を脱色透明化させる。
- ⑤十分にタンパク質を溶解させるために、再び1.0mol/Lの水酸化ナトリウムに浸して、蒸発した量と等量のイオン交換水を加えて攪拌しながら3時間加熱する。

以上の方法によって、ズワイガニの殻を脱色透明化することができた。

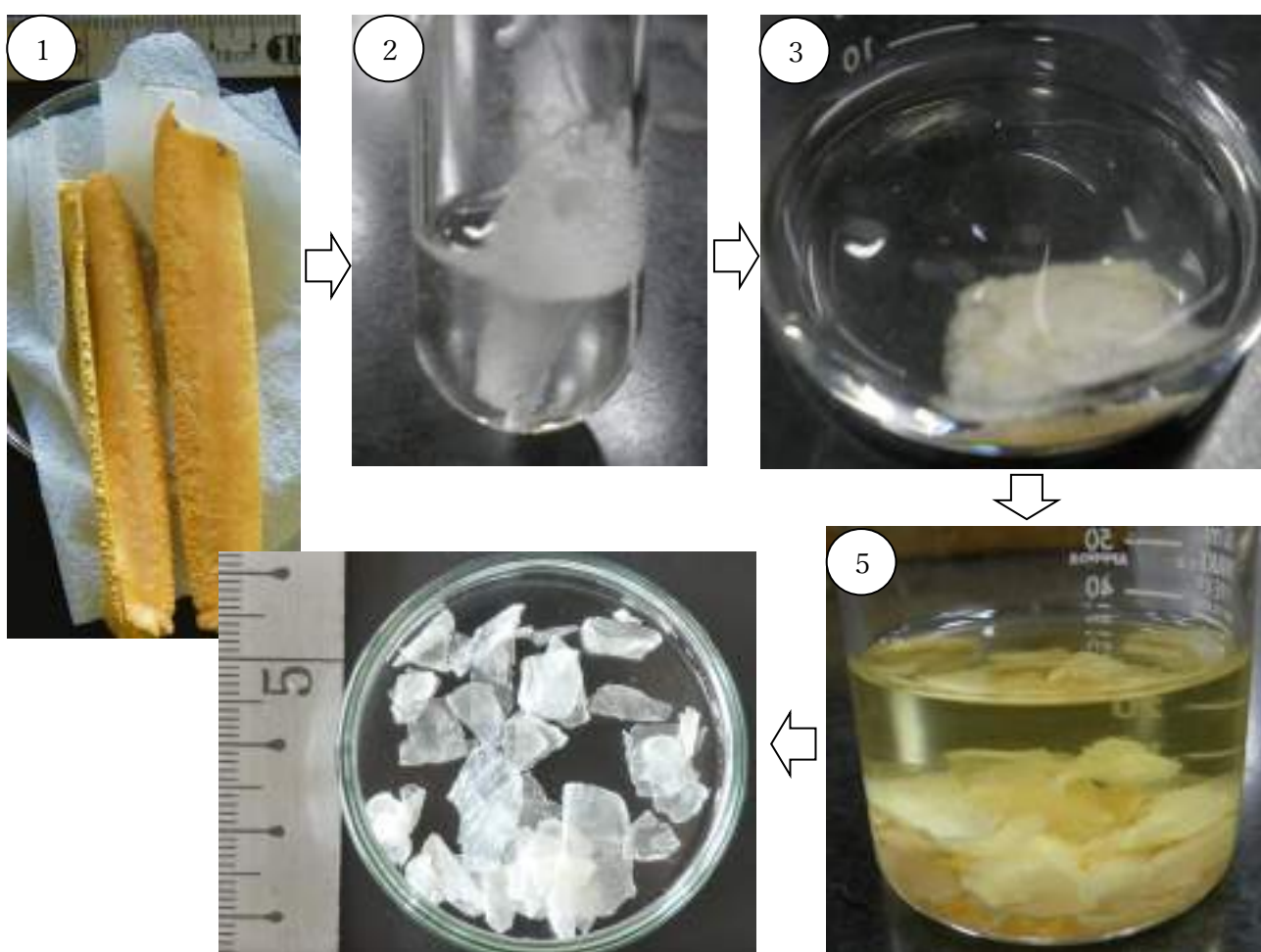


図3 ズワイガニの殻の脱色透明化実験（番号は本文中の手順に相当している）

(2) クロゴキブリの脱色透明化実験 (図4・図5)

クロゴキブリには多くのキチンが含まれているが、カニの殻とクロゴキブリでは、その成分に違いがある。甲殻類由来のキチンは主にカルシウムとタンパク質が階層構造をなしているのに対して、クロゴキブリにはカルシウムが存在せず、ジフェノール化合物が15~25%程度含まれている(羽賀, 2011)。キチナーゼに対する感受性も高く、甲殻類に比べてキチンの単離はきわめて難しいとされている。筆者は、

カニの殻の透明化の方法をヒントにして、試行錯誤の末、独自に①～⑤の脱色透明化の方法を考えた。クロゴキブリの体表には炭酸カルシウムがないため、塩酸で溶解する必要がない。一方、油分を多く含んでいるため、脱脂する必要がある。実験に用いたクロゴキブリは、アース製薬株式会社研究部から提供を受けた20個体で、そのすべてをほぼ脱色透明化することができた。

- ① クロゴキブリの死骸から内臓を取り出す。
- ② 乾燥させた後、アセトンに1日浸して脱脂する。
- ③ イオン交換水を用いて中性になるまで十分に洗浄して乾燥させた後、色素タンパク質を溶解するために、1.0mol/Lの水酸化ナトリウムに浸して加熱する。
- ④十分にタンパク質を溶解させるために、一定時間ごとに蒸発した量のイオン交換水を加えて搅拌しながら、3時間加熱を続ける。
- ⑤ イオン交換水を用いて中性になるまで十分に洗浄して乾燥させた後、色素を溶解するために過酸化水素水に3日間浸す。

以上の方法によって、クロゴキブリをほぼ脱色透明化することができた。しかし、わずかに色素が残存してしまい、完全なキチンの単離には至らなかった。

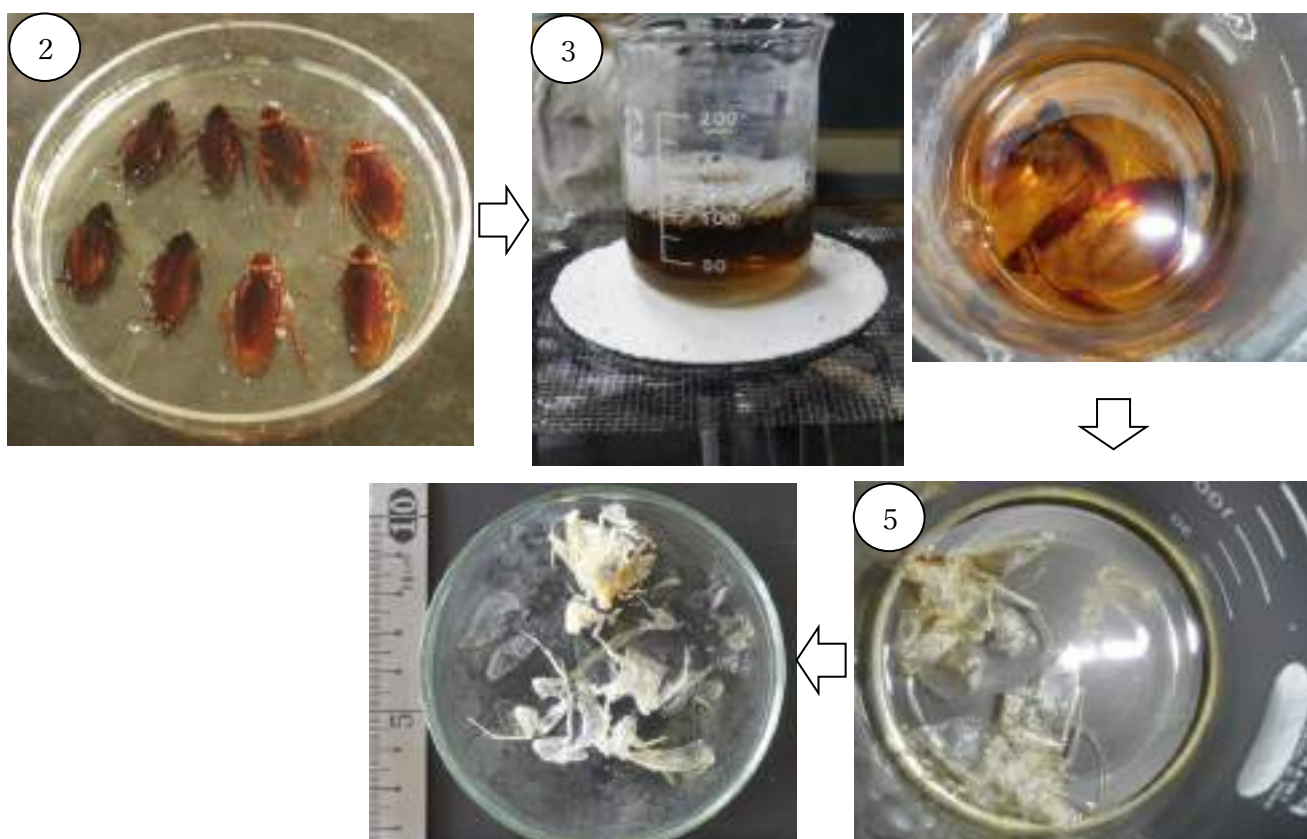


図4 クロゴキブリの脱色透明化実験（番号は本文中の手順に相当している）

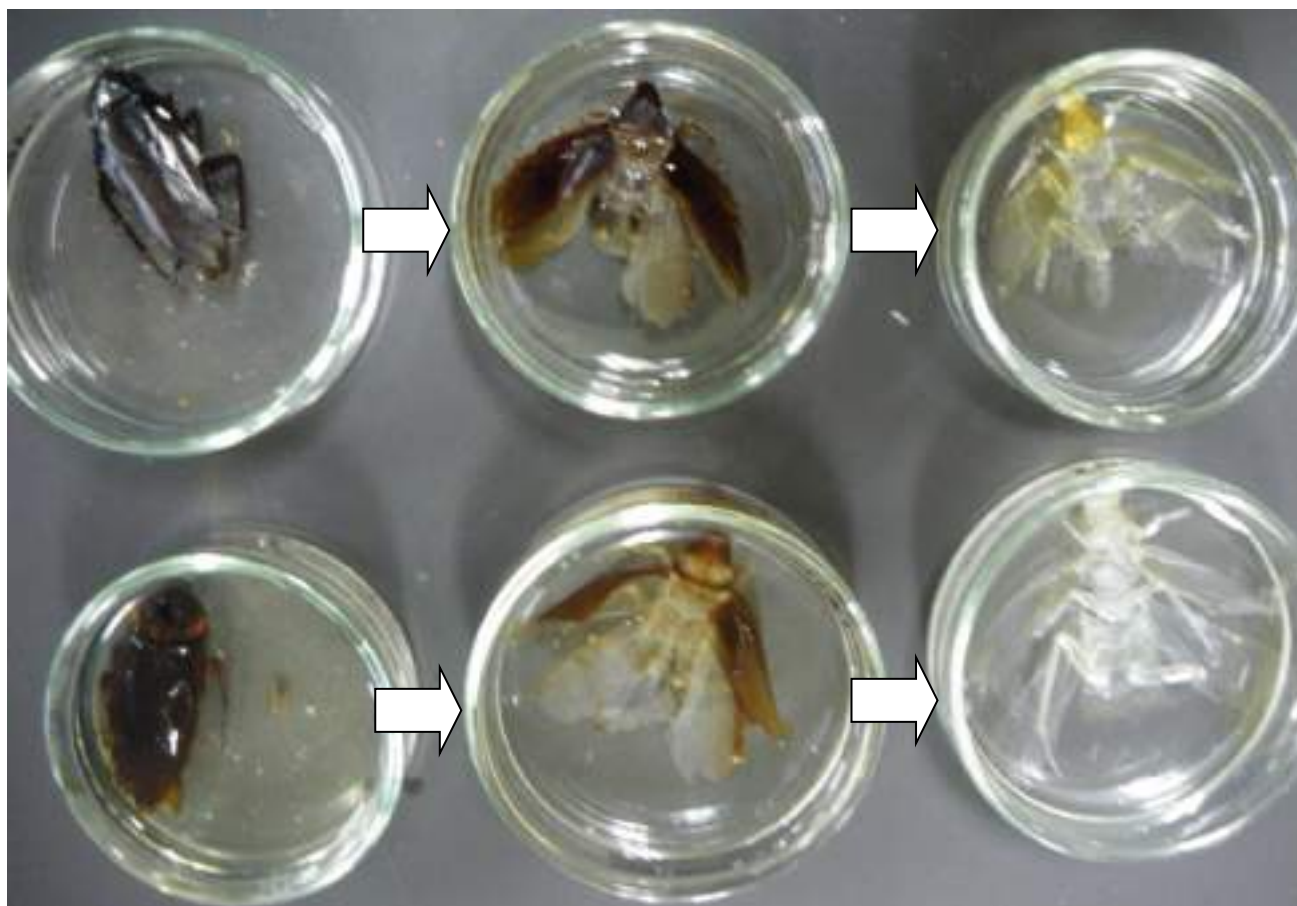


図5 クロゴキブリの脱色透明化実験の2個体の結果例

3. 考察

昆虫キチンは甲殻類のキチンよりも、穏和な条件での利用価値が高いとされている。本研究では、困難とされている昆虫の一種であるクロゴキブリのキチンの脱色透明化に挑戦し、試行錯誤の結果、クロゴキブリをほぼ脱色透明化することができた。クロゴキブリのキチンを単離する方法の確立に向けた一定の成果が得られたが、クロゴキブリには、キチンと色素タンパク質を結合させるチロシンなどが含まれているため、クロゴキブリを完全に脱色透明化してキチンを単離することはできなかった。

4. 今後の課題

現在、クロゴキブリの完全な脱色透明化ができなかった原因の可能性として考えられるチロシンなどの含有物の成分を特定し、科学的根拠を明らかにするとともに、完全脱色透明化のための方法を検討しているところである。現在、完全な透明化の方法をさらに追及している。

引用文献

- キチン、キトサン研究会 (1988) 最後のバイオマス：キチンキトサン (技報堂出版)
- キチン、キトサン研究会 (1990) キチン、キトサンの応用 (技報堂出版)
- キチン、キトサン研究会 (1991) キチン、キトサン実験マニュアル (技報堂出版)
- キチン、キトサン研究会 (1995) キチン、キトサンハンドブック (技報堂出版)

- 羽賀篤信 (2011) 昆虫キチンの利用技術の開発と応用 (蚕糸・昆虫バイオテック 80, 3, 193-210)
- 羽賀篤信・張敏 (1998) 蚕とカブト虫クテクラ由来キチンの精製 (日本蚕糸学雑誌, 67, 1, 17-21)
- 羽賀篤信・張敏 (1999) 昆虫由来キチンの化学構造特性 (平成 10 年度蚕糸・昆虫農業技術研究所研究成果情報, 28-29)
- 伊福伸介 (2015) カニ殻由来の新素材「キチンナノファイバー」の製造とその利用開発 (化学と生物, 53, 7, 473-477)
- 木船紘爾 (1994) キチン、キトサンのメディカルへの応用 (技報堂出版)
- Shams, I., Nogi, M., Berglund, L., and Yano, H. (2012) The transparent crab : preparation and nanostructural implications for bioinspired optically transparent nanocomposites (Soft Matter, Issue 5)
- The 8th International Conference on Chitin and Chitosan and 4th Asia Pacific Chitin and Chitosan Symposium, Yamaguchi, Japan (2000) CHITIN AND CHITOSAN – IN LIFE SCIENCE (Kodansha Scientific Ltd.)
- 矢吹稔 (1992) キチン、キトサンのはなし (技報堂出版)

謝辞

アース製薬株式会社研究部生物研究課の有吉立氏には、実験用のクロゴキブリ試料を提供していただいた。また本校科学部顧問の川勝和哉先生、藤田真央先生、鈴木健仁先生には、有意義な助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

クモは目的に応じて発する糸の構造を変える

兵庫県立姫路東高等学校 科学部

赤瀬彩香 池田伊織 大隅皓平 高瀬健斗 中崎恭佑
岩本滯治 奥見啓史 内藤麻結 藤本大夢 安原俊 山本夏希

要 旨

クモの糸を光学顕微鏡レベルで観察して糸の構造を明らかにする基礎的研究は少ない。筆者らは、チュウガタシロカネグモ 30 個体の発する糸を 3 か月間かけて顕微鏡観察を行った結果、多くの点で先行研究と異なる結果を得た。

チュウガタシロカネグモは最初に、枝から枝へと粘球を付着させない縦糸を張る。粘球を付着させた糸を発しながらこの縦糸の上を往復して、複数本の糸からなる縦糸を完成させる。次に縦糸が中央で交差する付近から外側に向かって、粘球が付着しない横糸を螺旋状に張っていく。縦糸の途中まで横糸を張ったら、次に縦糸に沿って外側まで移動し、こんどは逆に外側から内側に向かって、粘球を付着させた横糸を張りながら移動する。すでに中心から外側に向かって張っていた横糸部分にたどりつくと、この糸を切断しながらさらに中心部へ横糸を張っていく。

専門書には縦糸には粘球がないとされている。また、粘球を付着させながら複数の糸からなるケーブルを発するという先行研究もあるが、これらは誤りである。発した直後の縦糸には粘球は付着していないが、その後、この糸の上を、粘球を付着させた糸を発しながら往復することによって、粘球の付着したケーブル状の縦糸が完成する。腹部の大きさと粘球の分泌量に相関関係はない。また、螺旋状の糸を巻き付けて強度を増した縦糸のケーブルを発するという先行研究があるが、縦糸が破損した際に、一度脚で巻き取ったために螺旋状になった糸で補修することによって縦糸に螺旋状の糸が巻き付くのであって、縦糸の補強のために螺旋状の糸を新たに作って巻き付けているわけではない。発する糸 1 本の繊維は、縦糸は平均半径 $0.17\mu\text{m}$ と太く、一方横糸は平均半径 $0.11\mu\text{m}$ と細い。チュウガタシロカネグモは目的に応じて発する糸の太さや粘球の有無を変えることで、機能的に円網を形成する。

キーワード

チュウガタシロカネグモ (*Leucauge blanda*): アシナガグモ科シロカネグモ属のクモで水平円網を張る。

円網: 中央部から放射状に張られた糸に、同心円状に細かく糸が張られた構造をもつクモの巣網

縦糸: 円網の中央部から放射状に張る糸として発した糸 (完成した円網の糸のことではない)

横糸: 円網に同心円状に張る糸として発した糸 (完成した円網の糸のことではない)

粘球: クモの糸に付着する粘着物質が球状になったもの

A. はじめに～動機と目的

クモの糸に関する先行研究は多くあるが、それらはいずれも微視的レベルで糸の構造に注目した研究で、人間生活を豊かにする目的で活用しようとするものである。たとえば、電子顕微鏡などを用いて糸の分子構造を明らかにしたり (大崎,1996)、糸のフィブリン分子の高次構造を解明したりする研究 (朝倉・中澤, 2006、朝倉, 2007) がある。また、糸の化学成分が光や水の影響を受けてどのように変化する

のかを明らかにしたり（北川ほか, 1998）、糸のタンパク質合成機能を活用する研究（馬越ほか, 1997）、その成果をもとにして、クモの糸のタンパク質アミノ酸配列に類似したポリペプチド鎖を人工合成する研究（Tsuchiya and Numata, 2017）などもある。これらは、クモの糸の軽量でしなやかな性質を利用して、衣類の繊維や生物包帯、自動車の構造体など、糸の工業的活用につなげようとするものである。

一方で、クモの糸を光学顕微鏡レベルで観察して構造を明らかにしようとした研究は少ない。それらの先行研究では、縦糸には粘球がないとされており、それが通説となっている（福島・中島, 1996・馬越ほか, 1997・新海, 1998・中垣, 2003・新海, 2006・大崎, 2006）。また、兵庫県立西脇高等学校生物部（2018）は、以下の3点を示している。① クモの種類によって縦糸を構成する糸の本数は異なり、数本の糸からなる中心ケーブルのまわりに数本の糸が螺旋状に規則正しい振幅と波長で巻き付いている。② 横糸は螺旋構造を示さず、まっすぐな1本の繊維からなっており、強度は弱い。③ 縦糸、横糸を問わず、規則正しい間隔で粘球を付着させながら糸を発する。このように、先行研究において異なる見解が示されている。

筆者らは、昨年度からクモの糸の構造に興味をもち、チュウガタシロカネグモの円網の研究をおこなってきた。特に、完成された巣糸とともに、チュウガタシロカネグモが発した直後の糸にも着目して、観察を繰り返した。その結果は、糸の構造に関しても、粘球の有無に関しても、先行研究の見解とは異なるものであった。クモ類の糸の性質やその多様性に関する基礎研究は、クモ類の生態や進化の研究において注目されている（梶元, 1998）。筆者らの詳細な観察の結果から考察したチュウガタシロカネグモの糸の特徴についてまとめる。

B. 観察方法

本校内に生息するクモのほとんどは、チュウガタシロカネグモ（図1）であり、他にはごくわずかにコガネグモがみられるのみである。2019年5月中旬から8月中旬まで3か月間をかけて校内を詳しく調査したが、これ以外のクモを発見することができなかった。さらに、隣接する世界遺産の姫路城公園などにも出かけて行って調査したが、やはり発見することができたのは、チュウガタシロカネグモであった。そこで、チュウガタシロカネグモについて、30個体の巣の縦糸と横



図1 チュウガタシロカネグモ（左：背面／右：腹面）

糸を採取し、さらにチュウガタシロカネグモ個体も採取した。室内の飼育ケースでチュウガタシロカネグモを飼い、発する糸を採取して光学顕微鏡で観察した。なお、大崎（1985）は、季節によって糸の反射色は変化するが、成分や太さは規則的に変化することはないとしている。

C. 観察結果

(1) チュウガタシロカネグモの糸の構造

チュウガタシロカネグモは多くの場合糸を発生しながら歩行しているが、場面によって発生する糸の構造が異なっている。枝の上を歩行する際に発生する糸には粘球は付着していない(図2)。また、巣を張る際に、巣の縦糸になる糸にも粘球は付着していない(図3)。一方、横糸になる糸には粘球が一定の間隔で付着している(図4)。



図2 チュウガタシロカネグモの歩行中に発生した直後の糸の顕微鏡写真(40倍)



図3 チュウガタシロカネグモが発生した巣の縦糸になる糸の顕微鏡写真(40倍)

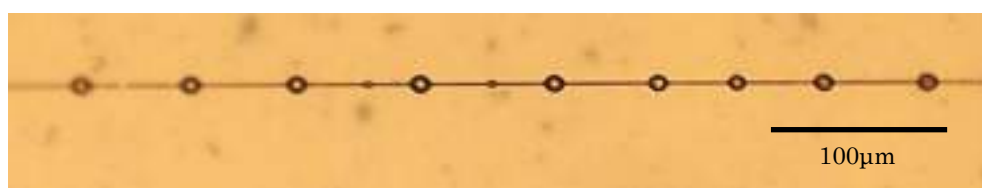


図4 チュウガタシロカネグモが発生した巣の横糸になる糸の顕微鏡写真(40倍)

チュウガタシロカネグモが発生する糸の繊維の太さは、巣の縦糸になる糸と巣の横糸になる糸では異なっている。観察した30個体のクモのうち、22個体について、縦糸の半径(μm)、横糸の半径(μm)、粘球の半径(μm)、粘球間の距離(μm)、腹部の長さ(mm)、を測定した結果を表1にまとめて示す。同一の個体では、縦糸と横糸の太さは一定であった。また、粘球は部分によって紡錘体のような形状を

しているが、ここでは球状のものを 20 個選択して測定して平均をとったものを、その個体の粘球の半径とした。粘球間の距離は、粘球の中心から隣接する粘球の中心までの距離を測定した。腹部の長さは、平常時の腹部の長さを測定した。粘着物質の体積は、横糸 1mm の間に付着している粘球の数と半径、糸の太さから、1mm 間に分泌された粘着物質の体積を求めた (図 5 / μm^3)。

個体	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
縦糸の半径(μm)	0.08	0.13	0.16	0.29	0.13	0.13	0.13	0.13	0.11	0.21	0.16
横糸の半径(μm)	0.11	0.13	0.13	0.11	0.08	0.11	0.12	0.13	0.11	0.11	0.13
粘球の半径(μm)	0.26	0.46	0.66	0.58	0.26	0.58	0.45	0.53	0.26	0.42	0.43
粘球間の距離(μm)	2.63	2.26	5.84	2.79	1.79	4.53	3.79	2.18	1.68	2.35	2.11
粘着物質の体積(μm^3)	2.20	15.86	19.18	27.68	3.69	17.06	8.85	25.33	3.08	12.04	13.76
腹部の長さ(mm)	3.0	5.0	6.0	6.0	3.0	5.0	5.0	5.0	4.0	7.0	5.0

個体	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	平均
縦糸の半径(μm)	0.18	0.16	0.21	0.26	0.24	0.16	0.16	0.13	0.18	0.18	0.18	0.17
横糸の半径(μm)	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.13	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11
粘球の半径(μm)	0.78	0.41	0.65	0.44	0.40	0.41	0.33	0.38	0.24	0.25	0.40	0.44
粘球間の距離(μm)	3.89	1.93	4.95	1.66	2.02	1.74	1.69	1.17	1.66	1.57	4.47	2.67
粘着物質の体積(μm^3)	49.93	13.52	22.61	19.16	11.91	13.81	7.85	16.36	2.46	3.18	5.25	14.31
腹部の長さ(mm)	5.0	5.0	6.0	5.0	5.0	5.0	5.0	4.0	5.0	5.0	5.0	5.0

表 1 チュウガタシロカネグモの糸の半径と粘球の半径、粘球間の距離と粘着物質の体積

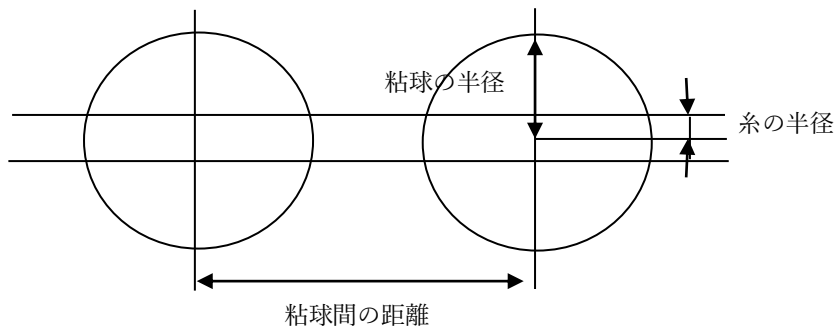
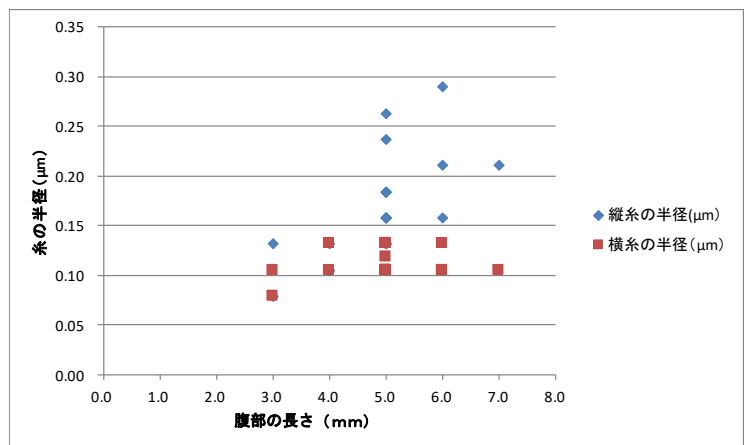


図 5 粘着物質の体積の求め方

$$\frac{10^3}{\text{粘球間の距離}} \times (4/3\pi \times \text{粘球の半径}^3 - 2\pi \times \text{粘球の半径} \times \text{糸の半径}^2)$$

発する糸の太さは環境によってさまざまに異なるが、概ね縦糸になる糸は太く (平均半径 $0.17 \mu m$)、横糸になる糸は細い (平均半径 $0.11 \mu m$) (図 6)。なお、巣糸ではない糸の半径は平均 $0.11 \mu m$ である。縦糸は体長が大きい程太くなる傾向にあるが、横糸は体長に関わらずほぼ一定の太さである。

図 6 腹部の長さと言糸と横糸の半径



(2) 縦糸と横糸の張り方

チュウガタシロカネグモの円網の縦糸と横糸で構造が異なる原因を明らかにするために、チュウガタシロカネグモが巣を張るようすを観察した(図7)。チュウガタシロカネグモは、最初に枝から枝へと粘球の付着していない1本の縦糸(図3)を放射状に張る。この縦糸の上を、粘球が付着している糸を発しながら何度か往復して、複数本数からなり粘球が付着した繊維の束にする(図8・図9)。次に、縦糸が中央で交差する付近から周辺部に向かって螺旋状に横糸を張っていく。この横糸は1本の繊維からできており、粘球はみられない(図10)。このようにして縦糸の途中まで横糸を張ったら、次に縦糸に沿って周辺部まで移動し、こんどは逆に周辺部から内側に向かって横糸を張りながら螺旋状に移動する。横糸は同心円状とされているが、実際には螺旋状に張られている。この横糸には、糸を発したときから一定間隔で粘球が付着している(図4)。前に張っていた横糸の部分にたどりつくると、顎で横糸を切断して第1脚と第2脚で巻き取り、その断片を塊にして縦糸に付着させながら中央部まで新たに横糸を張っていく。チュウガタシロカネグモは、縦糸、横糸を問わず自由に歩き回るが、強度に優れた縦糸の上を歩くことが多く、その際に脚の毛で粘球をからめ取ってしまう。



図7 チュウガタシロカネグモの円網(体長10mm)

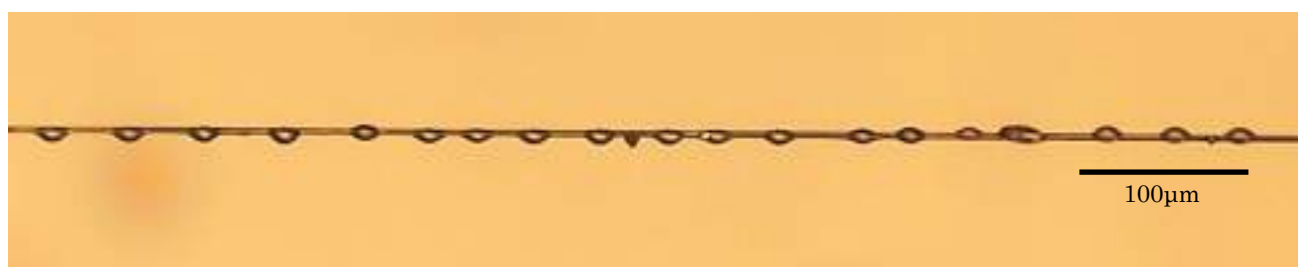


図8 チュウガタシロカネグモの縦糸の顕微鏡写真(100倍)

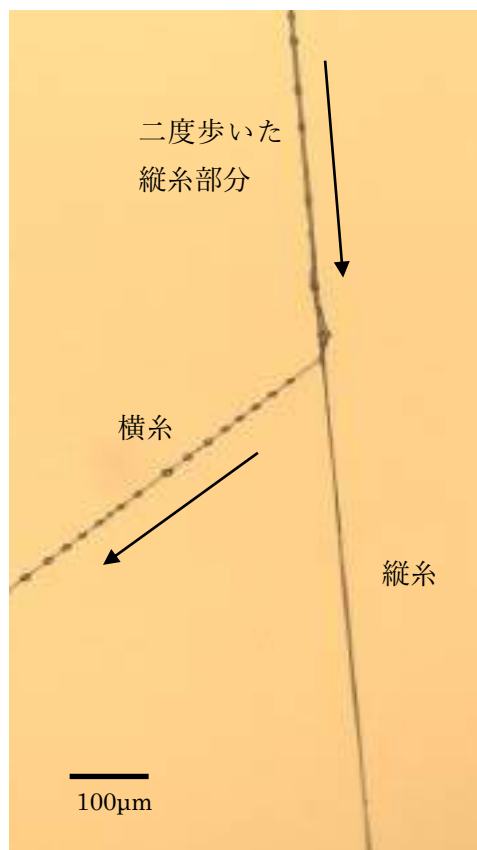
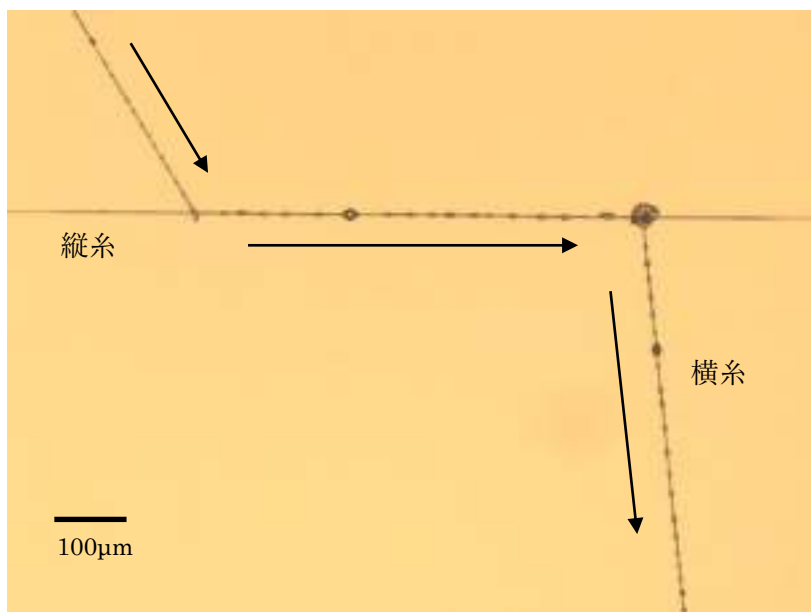


図9 チュウガタシロカネグモが往復した部分のみ、縦糸は粘球が付着した複数本の糸からなる（クモが歩いた方向を矢印で示した／40倍）

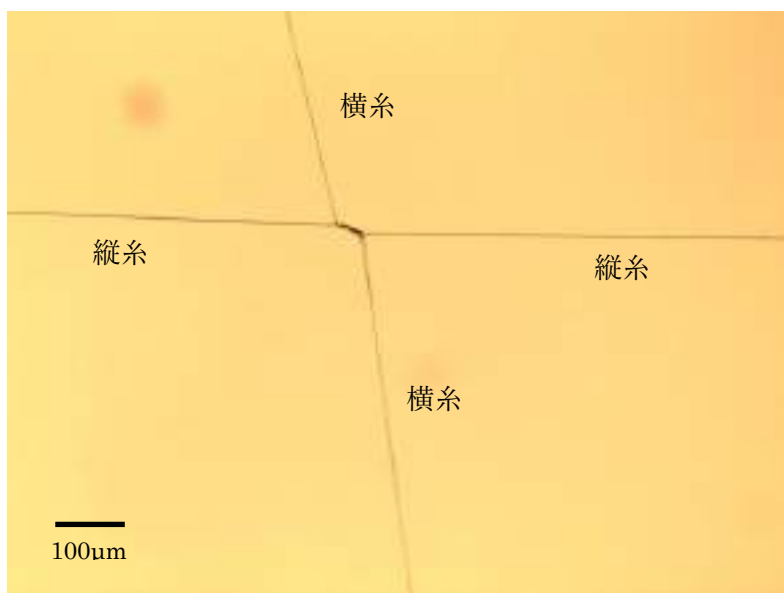


図10 チュウガタシロカネグモの巣の中央部から周辺部に向けて張る横糸の顕微鏡写真（40倍）

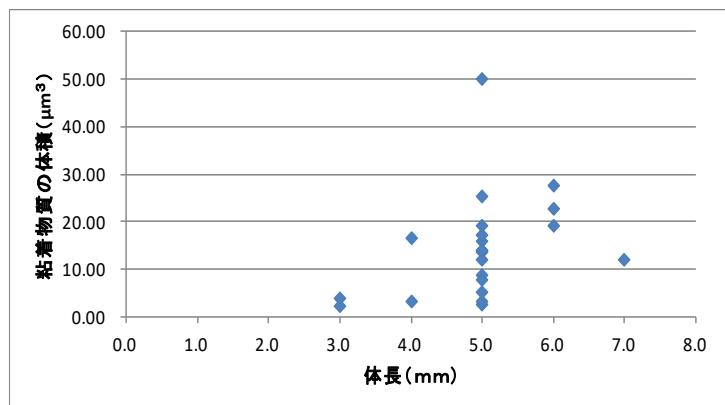


表1をもとにして、粘着物質の分泌量と体長との関係を図11に示した。腹部の長さとは粘着物質の体積に相関関係はみられない。

図11 チュウガタシロカネグモの腹部の長さと粘着物質の分泌量の関係

(3) 円網の縦糸に巻きつくらせん状の糸

円網の縦糸のケーブルには、しばしば螺旋状の糸が巻きついている。その理由を明らかにするために、さまざまな環境下で発した糸を観察した。チュウガタシロカネグモは、ヒトなどの外敵から逃れたり、新たな場所に移動したりする際には、枝に糸の端を付着させて枝から垂れ下がり、地上に降りたり枝を伝わったりして移動する。この際に発する糸は、すでに示したように粘球が付着していない1本の糸である。地上に降りる前に、強風などの影響で危険を感じると、発した糸を第1脚と第2脚で巻き取り、再び枝まで上がっていく (図 12・図 13)。この巻き取られた糸を顕微鏡で観察すると、螺旋状になっている (図 14)。チュウガタシロカネグモは、巣に獲物がかかったり強風などで巣の補修が必要になったりしたとき、しばしばこの巻き取った糸をそれにあてる。こうして、縦糸のケーブルに螺旋状の糸が巻き付く構造が作られる (図 15)。

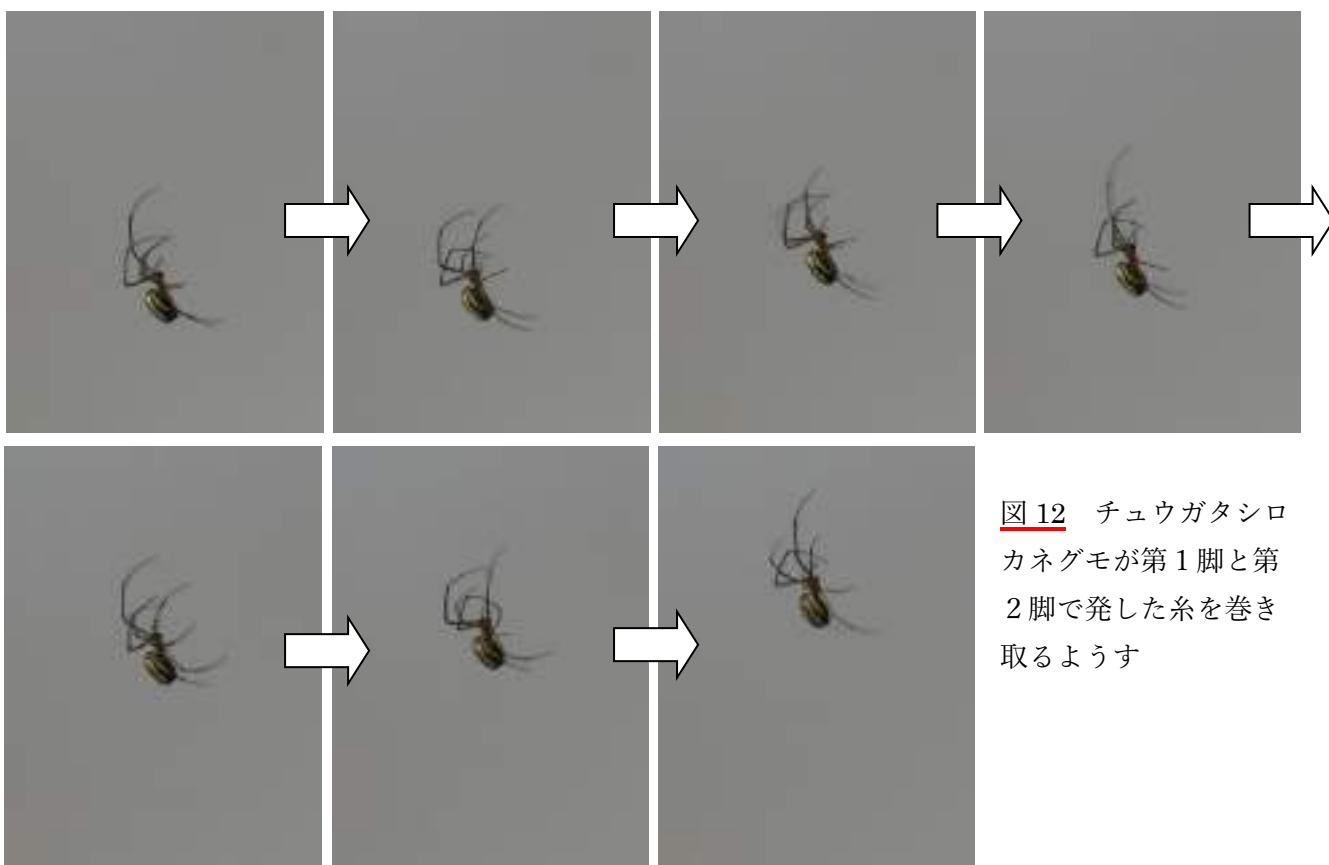


図 12 チュウガタシロカネグモが第1脚と第2脚で発した糸を巻き取るようす

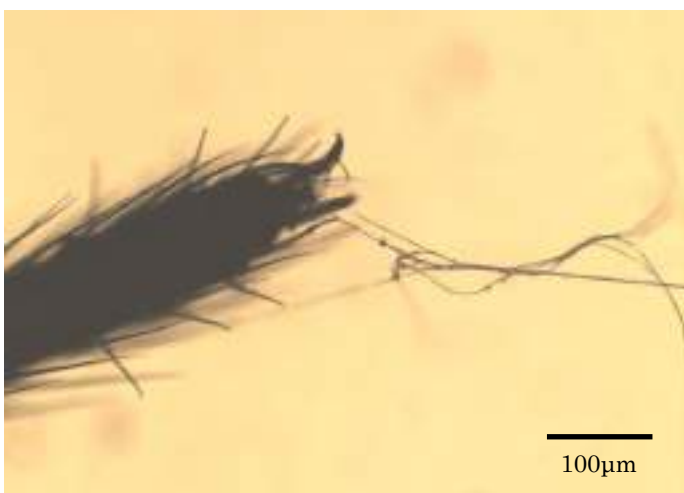


図 13 チュウガタシロカネグモの第1脚の先端部が糸を巻き取る (100倍)

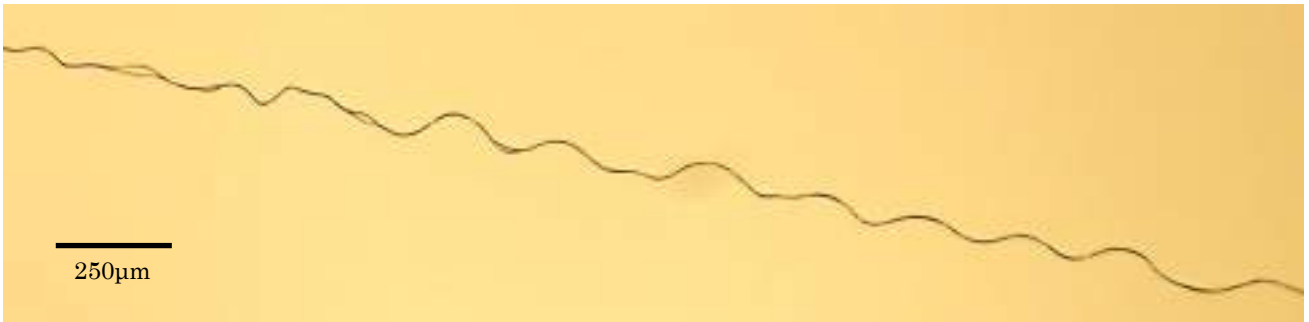


図 14 チュウガタシロカネグモが巻き取った糸の顕微鏡写真 (40 倍)

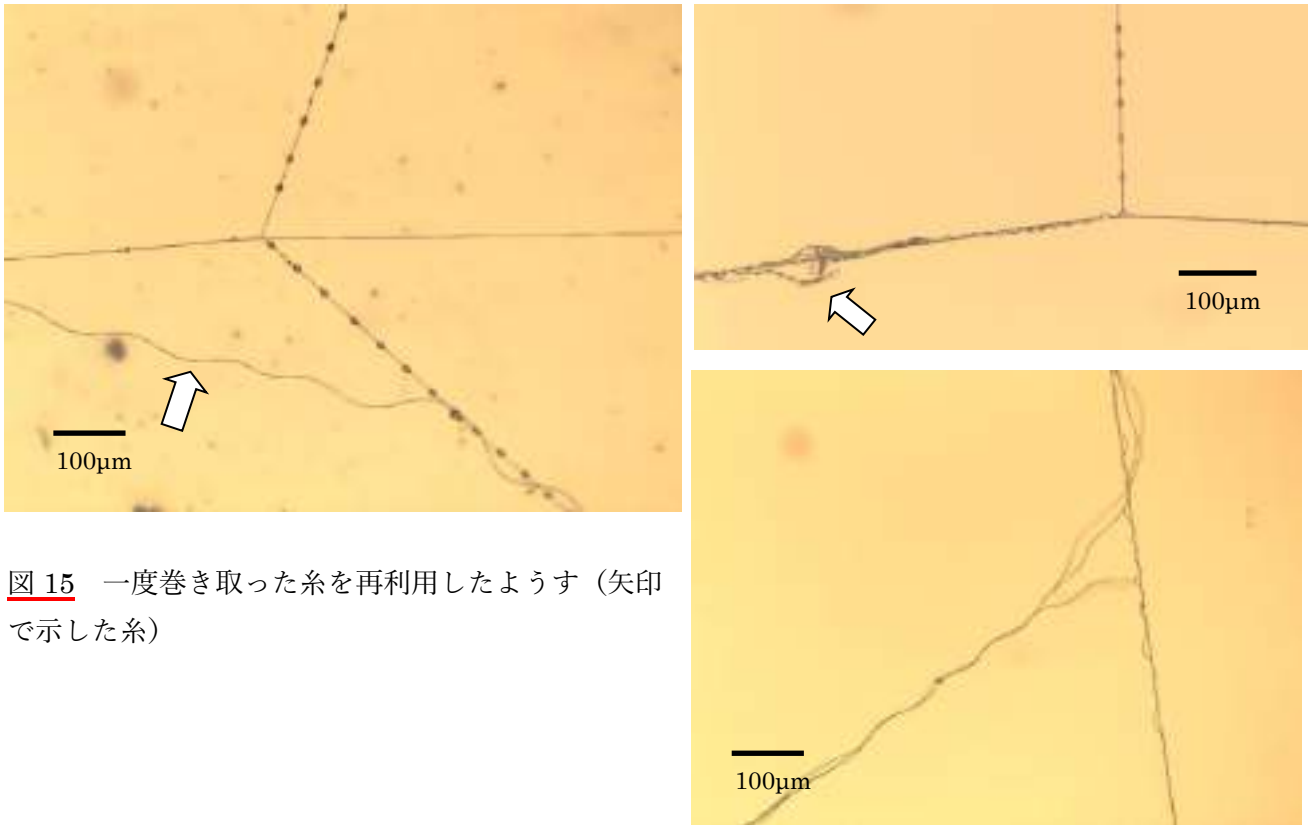


図 15 一度巻き取った糸を再利用したようす (矢印で示した糸)

D. 考察

クモの糸の性質に関する研究は、クモ類の生態や進化の理解のために重要な基礎研究である。チュウガタシロカネグモは、粘球を付着させない縦糸を張った後、Uターンして、粘球を付着させた糸を発しながら先ほどの縦糸の上を歩くことによって、縦糸を複数本数の糸からなるケーブルにして、雨や風、あるいはかかった獲物が暴れることで生じる振動に対する巣の強度を高めていると考えられる。したがって、円網を張りはじめたときの縦糸は1本の糸からなっており、粘球も付着していないが、完成後の縦糸は複数本数の粘球が付着した糸になる。この縦糸の半径は $0.17\mu\text{m}$ 程度で太く、腹部の長さが大きい程、縦糸は太くなる。その後、巣を完成させるまでの一時的な補強を目的として、縦糸が交差する中心部から外側に向かって、ひとまず粘球を付着させない横糸を張り、その後、粘球を付着させながら本来の横糸を巣の外側から張っていく。この横糸は半径 $0.11\mu\text{m}$ 程度で細く、腹部の長さとは関係なくほぼ一定である。粘球を付着させながら発した糸が、チュウガタシロカネグモの意図にはよらず、結果として横糸になったり、太い糸が結果として偶然巣の縦糸になったりする、などとは考えにくい。粘球を付

着させながら発した糸が、結果として枝から枝へと張る縦糸になる可能性もあるはずだからである。

先行研究では縦糸には粘球がないとされているが、これはクモが発した直後の糸を観察した結果に基づくものではないかと考えられる。一方、兵庫県立西脇高等学校生物部（2018）が、複数の円網を作るクモの巣を観察した結果、縦糸にも一般的に粘球が付着しているとしているのは、円網が完成した後、さまざまな環境下で縦糸を補強した後の縦糸を観察した結果ではないかと考えられる。実際には、発した直後の縦糸には粘球は付着していないが、その後、この糸の上を、粘球を付着させた糸を発しながら往復することによって、粘球の付着したケーブル状の縦糸が完成する。太い縦糸は、円網を支えるハンモックの釣りひもの役割があり、風雨や獲物がかかった時の揺れに対する強度を高めることに貢献している。一方、細い横糸は、粘球を付着させることで獲物を捕獲する目的の糸として有効である。チュウガタシロカネグモは縦糸、横糸の区別なく歩くが、特に強度に優れた縦糸の上を歩くことが多い。よく歩く縦糸の粘球を脚の毛がからめ取ってしまうことで、縦糸の粘球が失われ、縦糸には粘球がみられないと誤解されることが多いのではないかと考えられる。

円網の縦糸のケーブルにしばしば巻き付いている螺旋状の糸について、兵庫県立西脇高等学校生物部（2018）は、縦糸のケーブルを補強するために、意図的に巻き付けながら縦糸を張ったものであると考えている。チュウガタシロカネグモは、環境の変化によって、いったん発した糸を巻き取って回収することがある。回収された糸は螺旋状のばねのような形状になり、塊になって縦糸に付着させる。縦糸のケーブルに螺旋状の糸が巻き付いていることがあるのは、獲物がかかるなどして巣糸が破損した際に、第1脚と第2脚で一度巻き取った糸を用いて補修することによって、螺旋状の糸が縦糸のケーブルに巻き付いたものである。兵庫県立西脇高等学校生物部（2018）が示すように、意図的に螺旋状にした糸を縦糸に巻き付けるわけではない。

チュウガタシロカネグモの糸に付着する粘球は、糸が発せられた際に糸に均質に付着していた粘着物質が、一定の間隔と大きさと球状になったものである。腹部にある絹糸腺から粘着物質が分泌されているが（大崎, 2006）、腹部の大きさと粘着物質の分泌量の間には一定の相関関係は認められない。粘球は、獲物を捕らえる目的だけではなく、縦糸と横糸を接着したり、横糸がすべって隣接する横糸と接着したりすることを避ける、横糸をまっすぐに張るためのたるみを取る役割、などを担っていると考えられており（梶元, 1998・北川ほか, 2000）、糸の形状に一定の影響を与えているが、まだ詳細はわかっていない。

E. 結論と今後の展望

チュウガタシロカネグモの糸を観察した結果、次のことが明らかになった。

- ① 歩行する際に発する糸は半径 $0.11\mu\text{m}$ で粘球は付着していない。
- ② 縦糸になる糸は半径 $0.17\mu\text{m}$ で腹部の長さが大きい程太く、粘球は付着していない。
- ③ 横糸になる糸は半径 $0.11\mu\text{m}$ で腹部の長さに関係なく一定で、目的に応じて、粘球が一定の間隔で付着する場合としない場合がある。
- ④ 縦糸になる糸を張ったあと、Uターンして粘球を付着させた糸を発しながらこの糸の上を歩き、糸を束にしてケーブルを作る。次に、中心部から粘球が付着しない横糸を張り、その後粘球が付着した横糸を外側から張っていく。
- ⑤ 糸を脚で巻き取って螺旋状になった糸で巣を補修するため、縦糸のケーブルに螺旋状の糸が巻き付く。

⑥ 強度に優れた縦糸の上を歩くことが多く、その際に縦糸ケーブルの粘球を脚の毛でからめ取る。

⑦ 腹部の大きさと粘着物質の分泌量の間に関係は認められない。

チュウガタシロカネグモは発する糸の目的に応じて、糸の太さや粘球の有無などを変えており、その結果、機能的な巣を形成している。

チュウガタシロカネグモは、偶然による結果ではなく、その目的を理解したうえで発する糸の種類を変えていると考え、すべての行動と糸の特徴が説明できる。今後は、この説明が本当に妥当なのかどうかを、さらに多くの個体や他の種のクモで観察して検証したい。また、研究が進んでいない粘球についても、その役割についての詳細を明らかにしていきたい。

F. 謝辞

本研究をおこなうにあたり、日本蜘蛛学会前会長の鶴崎展巨鳥取大学教授には、日本動物学会において有益な助言をいただいた。また、姫路市役所環境政策室計画啓発担当の津田英治氏には、クモの一般的な生態についてご教示いただいた。本校科学部顧問の川勝和哉教諭には、研究の方針について終始有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

G. 参考文献

- 朝倉哲郎 (2007) フィブロインの高次構造 (蚕糸・昆虫バイオテック 76, 9-14)
- 朝倉哲郎・中澤靖元 (2006) 蚕ならびにクモが生産する絹の構造の解明-主に固体 NMR 構造解析法を用いて (高分子論文集, 63, 11, 707-719)
- 福島康正・中島宏 (1996) スパイダーシルク-遺伝子組換え法による高分子の合成- (繊維と工業, 52, 11, 441-445)
- 兵庫県立西脇高等学校生物部 (2018) クモの糸の構造と引っ張りの力に対する強度の関係 (化学と生物, 56, 9, 640-643)
- 北川正義・勝見誠二・若生豊 (1998) クモ糸の変形挙動に及ぼす光および水環境の影響 (材料. 47, 1, 55-59)
- 北川正義・新濃隆志・若生豊 (2000) クモ横糸の変形挙動に及ぼす粘着球の役割 (材料. 49, 9, 970-975)
- 榎元敏也 (1998) クモ糸の多様性 (Acta arachnol., 47, 2, 177-180)
- 中垣雅雄 (2003) スパイダーシルク (高分子, 52, 838)
- 大崎茂芳 (1985) クモの糸の化学 (有機合成化学, 43, 9, 828-835)
- 大崎茂芳 (1996) 蜘蛛の糸-その蛋白質科学 (蛋白質・核酸・酵素, 41, 14, 50-58)
- 大崎茂芳 (2006) クモの糸の秘密 (繊維と工業, 62, 2, 42-47)
- 新海明 (1998) クモの糸と生態 (日本蜘蛛学会誌, 47, 2, 191-195)
- 新海栄一 (2006) 日本のクモ (文一総合出版)
- Tschiya K. and Numata K. (2017) Chemical synthesis of multiblock copolypeptides inspired by spider dragline silk proteins (ACS Macro Letters, 6, 2, 103-106)
- 馬越淳・馬越芳子・秦珠子 (1997) 生物紡糸-低エネルギー・スーパー紡糸 (クモ) (繊維と工業, 53, 7, 202-211)

播磨花崗閃緑岩固結過程でのマグマ残液循環

兵庫県立姫路東高等学校 科学部

高瀬健斗 赤瀬彩香 岩本滯治 奥見啓史

要 旨

変成岩の角閃石の波状累帯構造研究の歴史は古く、マグマから角閃石が結晶化した後の変成環境を克明に記録していることが知られている。一方、火成岩の角閃石の波状累帯構造研究の歴史は浅く、マグマ分化末期の環境についてはまだよくわかっていない。筆者らは、角閃石の微細構造を発見することができれば、火成作用と変成作用を繋ぐ、マグマ分化過程末期の環境を推定することができると考えた。

兵庫県南西部姫路市ー加古川市に点々と分布する播磨花崗岩類や、兵庫県南東部神戸市に広く分布する六甲花崗岩類の露頭調査を行った。両岩体は、ともに白亜紀後期に流紋岩質凝灰岩に貫入したものである。採取した花崗閃緑岩の薄片を作成して偏光顕微鏡で詳細に観察した結果、姫路市ー加古川市に点々と分布する半径4 km程度の島状の花崗閃緑岩体の角閃石から、微弱な波状累帯構造を発見した。本地域から初めての報告である。これにより、マグマ活動末期の環境を推定する端緒が得られた。この微細構造は幅数 μm 程度の細い縞模様をなすものである。一方、神戸市に広く分布する花崗岩類の岩体からはひとつも発見することができなかった。

姫路市ー加古川市の小岩体は、周囲の凝灰岩に熱変成の影響を与えていることから、地下に広がりをもつ岩体の周縁部であると考えられる。姫路市ー加古川市の角閃石の波状累帯構造は、角閃石が結晶化した後マグマ残液の循環によって二次的にイオン置換が行われた結果形成されたことを示している。クロスラミナに似た形状は、マグマ残液が方向を変えて複数回循環したことを示している。山陰帯花崗閃緑岩のようなおびただしい発達ではないことから、その循環は強いものではなかった。一方、神戸市の花崗閃緑岩は、巨大な岩体の、少なくとも周縁部ではないと考えられ、マグマ残液の循環がおこなわれず、波状累帯構造を形成することができなかったと考えられる。

キーワード

角閃石：火成岩を構成する主要ケイ酸塩造岩鉱物。単斜晶系または斜方晶系の有色鉱物で、自形結晶は長柱状。鏡下では、120度で交わるへき開で輝石（90度）と区別できる。

波状累帯構造：多くの場合鉱物のへき開面に沿って組成が交互に繰り返す、幅数 μm 程度の細い縞模様の構造。二次的に形成されたものと結晶の成長過程で形成される場合がある。

マグマ残液：本源マグマが次第に冷却していく過程で、その凝固点に応じて数々の鉱物を結晶化させ、マグマの残液の成分が徐々に変化していく。最後に残るのは、おもに H_2O からなる熱水。

変成作用：既に形成された岩石あるいは鉱物が、二次的に温度や圧力が変化したり流体による化学反応に伴って、鉱物が再結晶化したり岩石の組織が変化すること。

火成作用：マグマが発生してから、上昇して次第に冷却され、鉱物を結晶化させながら岩石が固結するまでにおこる現象のこと。マグマが地表または地表近くで引き起こされる現象（火山作用）と、地下深くのマグマが地殻中に貫入して引き起こされる現象（深成作用）がある。

1. はじめに

一口に深成岩といっても、岩石が完全に固化する前に、部分的に既に結晶化した鉱物が再平衡して他の鉱物に変わったり、鉱物の一部が再平衡したりすることが知られている（寅丸,2019）。また、マグマの成分そのものも、異なるマグマと合流したり、周囲の岩石を溶かし込んだりして（混染）変化していく。教科書にあるように、外界から遮断されたマグマだまりのマグマが、一定の環境の下で徐々に冷却していき、カンラン石、輝石、角閃石、黒雲母の順に、一方的で不可逆的に結晶化するわけではない。このようにさまざまな経験を経て、現在われわれが目にする岩石が形成されている。筆者らは、現在目にする鉱物がどのような経験を経て形成されたのかを明らかにしたいと考えた。これは変成作用とは異なる。変成作用は、既に形成された岩石あるいは鉱物が、二次的に温度や圧力が変化したり流体による化学反応に伴って、鉱物が再結晶化したり岩石の組織そのものが変化することをいう。

変成岩を構成する角閃石の組成累帯構造は、古くから多くの地域で報告されている（小野, 1976・桑谷, 2003）。それらは、マグマから角閃石が結晶化し岩石が形成された後、変成作用の影響で二次的に形成されたものと考えられており、その発達程度は、その地域の変成作用の環境を示している。一方、これまで、深成岩の結晶過程についてさまざまな研究がおこなわれてきたが、火成作用と変成作用の間をつなぐ、マグマ残液に関する研究は少ない。筆者らが、深成岩に与えたマグマ残液の影響を知るための手段として波状累帯構造を発見した意義は大きい（図1）。

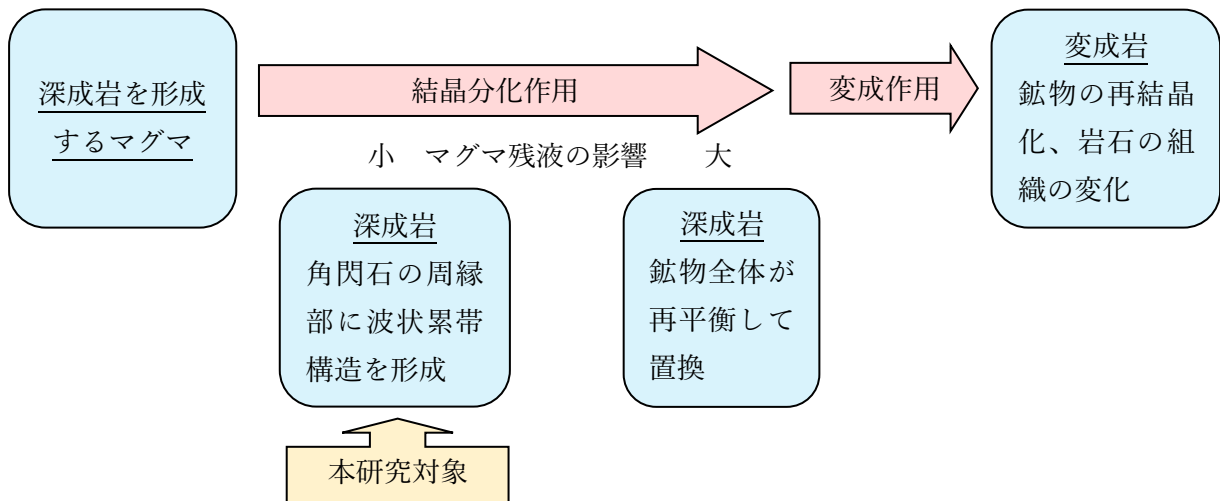


図1 本研究の位置づけ

近年では、いったん角閃石が結晶化した後に再び溶融したり再平衡したりして、離溶組織を形成したり、輝石や黒雲母に変化したりする条件が報告されている（富田, 1976・沢田, 1978・山口, 1985）。山口（1982）はカンラン岩の輝石に微細構造があることを示し、これを再平衡によって形成されたものであることを示した。さらに山口（1984）は、深成岩の角閃石の累帯構造を発見し、同様のメカニズムで形成されたことを示した。その後、Yamaguchi and Tomita（1985）は、輝石が二次的な離溶によって微細構造を形成することを示した。Kawakatsu and Yamaguchi（1987a）は、山陰帯の大東－横田地域の角閃石から波状累帯構造を発見し、Kawakatsu and Yamaguchi（1987b）、川勝・山口（1987）、川勝・山口（1990）によって、既に結晶化した角閃石を、周囲からマグマ残液が循環し、複数の陽イオンが同時に組み合わせ置換を起こすことによって波状累帯構造が形成されることを明らかにした。このように、

既に結晶化した鉱物にマグマ残液が反応することで、晶出した角閃石がイオン置換を起こして累帯構造を形成したり、他の鉱物と共存関係になったりすること、それはマグマ残液の量や循環した回数、残液の温度や組成を反映することが次第に明らかになってきた。

筆者らは、兵庫県南西部の姫路市ー加古川市と兵庫県南東部の神戸市に分布する花崗岩類の露頭調査をおこない、採取したすべての試料から薄片を作成し、偏光顕微鏡を用いて角閃石を詳細に観察したところ、姫路市ー加古川市の花崗閃緑岩の角閃石に波状累帯構造を発見することができた。本地域の花崗岩類からは初めての発見である。神戸市の花崗岩類からは発見できなかった。筆者らは、この微細構造からマグマ分化過程末期の環境の推定を試みた。

2. 岩石・鉱物記載

兵庫県南西部の姫路市および加古川市に点々と分布する播磨花崗岩類の小岩体と兵庫県南東部神戸市に広く分布する六甲花崗岩類の露頭調査を行い、試料を採取して(図2)薄片を作成し、偏光顕微鏡で観察した。播磨花崗岩類と六甲花崗岩類は、いずれも白亜紀後期に凝灰岩類に貫入したものとされている(田結庄, 1987)。

(1) 播磨花崗岩類 (姫路市)

姫路市飾西を中心にした南北5km×東西5kmの地域を露頭調査した。姫路市南西部の飾西付近の南北4km×東西3kmの中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の小岩体から試料を採取した(図3)。同様の岩体は、兵庫県南部の加古川市ー姫路市に島状に点々と分布している(山元ほか, 2000)。白亜紀後期に、火砕流堆積物に貫入したと考えられている(岸田・弘原海, 1967)。花崗閃緑岩は等粒状で、斜長石、石英、カリ長石、角閃石、黒雲母からなり、風化変質をほとんど受けていない(図4)。部分的に、有色鉱物が集合している。本岩体の詳しい研究はまだおこなわれていない(兵庫県都市住宅部土地政策局企画室, 1992)。

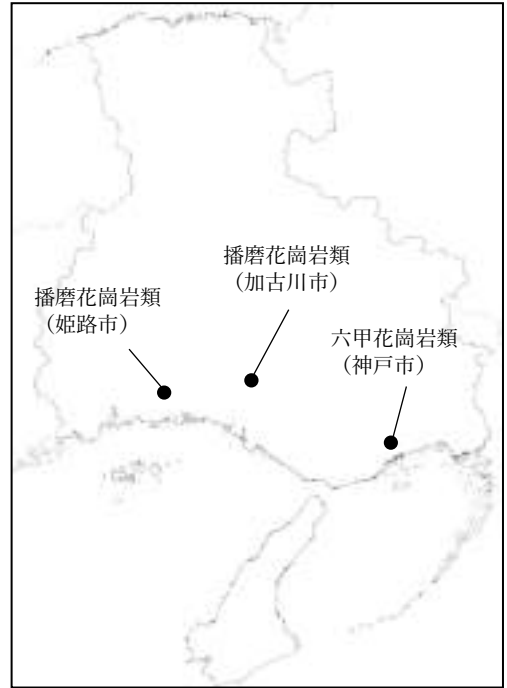
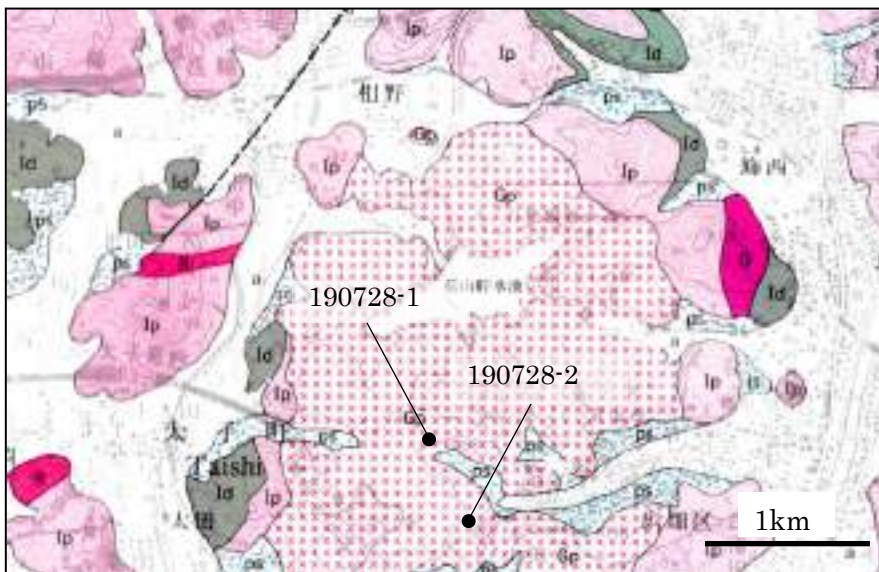


図2 試料を採取した地点



Ps : 礫・砂
 Gp : 角閃石黒雲母花崗閃緑岩
 R : 花崗閃緑斑岩ー花崗斑岩
 Ip : 流紋岩火山礫凝灰岩
 Id : 角礫岩
 (Ps は第四紀、Gp~Id は白亜紀後期)

図3 中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の試料採取地点(山元ほか, 2000 に加筆)

火砕流堆積物は、石英の斑晶に富む黒雲母流紋岩質火山礫凝灰岩で、30mm程度と同質岩片を含み、貫入の際の熱によって強溶結している。これは、地下に岩体が大きく広がっていることを示している。

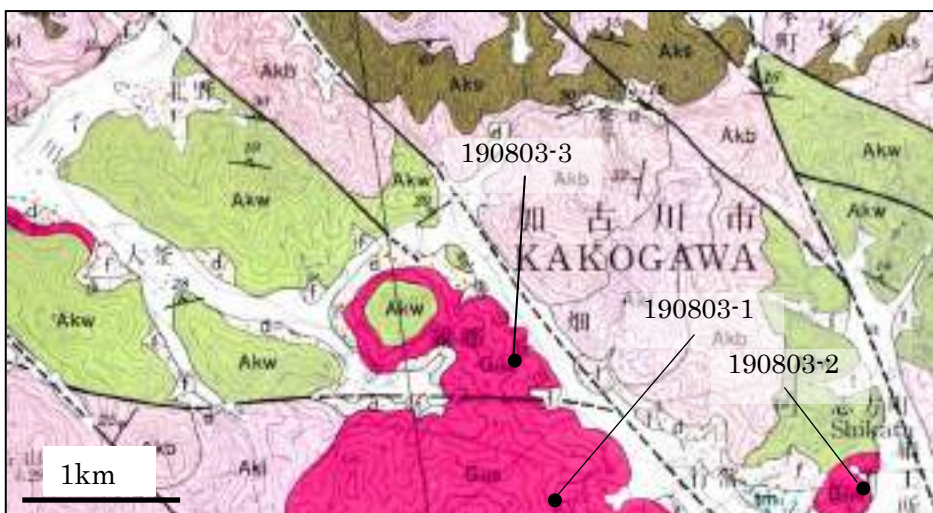


図4 姫路市の中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩
(試料 190728-2)

(2) 播磨花崗岩類 (加古川市)

加古川市志方町を中心にした南北5km×東西6kmの地域を露頭調査した。姫路市の東側に隣接する加古川市志方町の南北4km×東西4kmの中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の小岩体から試料を採取した(図5)。これは姫路市の花崗閃緑岩と一連のものである(尾崎ほか, 1995)。花崗閃緑岩は等粒状で、斜長石、石英、カリ長石、角閃石、黒雲母からなり、一部に鱗灰石もみられる。部分的に、10mm程度に有色鉱物が集合している(図6)。風化変質の程度は低い。本岩体の詳しい研究はまだおこなわれていない(尾崎ほか, 1995)。

流紋岩質凝灰岩は、数10mの規模で貫入による熱によって溶結している。



GHS：角閃石黒雲母花崗岩・花崗閃緑岩
Akw：流紋岩強溶結ガラス質凝灰岩
Akl：流紋岩溶岩
Akb：流紋岩火山礫凝灰岩
Aks：成層凝灰岩・礫岩
(GHSは白亜紀後期、Akw～Aksは白亜紀中期)

図5 中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の試料採取地点(尾崎ほか, 1995に加筆)

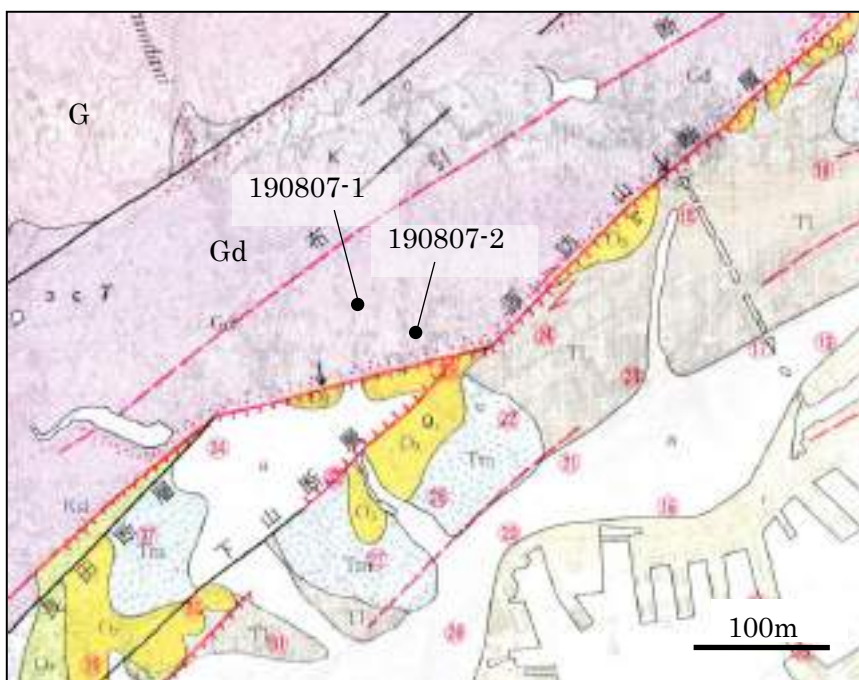


図6 加古川市の中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩（試料 190803-1/190803-3）

(3) 六甲花崗岩類（神戸市）

神戸市中央区加納町の JR 新神戸駅を中心にした南北 2 km×東西 3 km の地域を露頭調査した。JR 新神戸駅北側には、広く中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の露頭が東西方向に広がっている。この岩体から試料を採取した（図7）。花崗閃緑岩は、斜長石、ピンク色化したカリ長石、石英、角閃石、黒雲母からなり、一部に鱗灰石、スフェーン、ジルコンを含む。まれに、有色鉱物の集合体が見られる。多くは風化変質によってマサ化が進んでいる（図8）。

周囲の流紋岩質凝灰岩は、斜長石、カリ長石、黒雲母の斑晶からなり、貫入の熱によって溶結してガラス質になっている。一部はホルンフェルス化している（兵庫県都市住宅部土地政策局企画室, 1997）。



Tl・Tm：礫・砂
 O2・O3：流紋岩質火山灰
 Gd：角閃石黒雲母花崗閃緑岩
 G：黒雲母花崗岩
 (Tl～O3 は第四紀、Gd と G は白亜紀後期)

図7 中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩の試料採取地点（兵庫県都市住宅部土地政策局企画室, 1997 に加筆）



図8 神戸市の中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩（試料 190807-1/190807-2）

3. 角閃石の微細構造

採取したすべての花崗閃緑岩の薄片（厚さ 0.03mm）を作成して、偏光顕微鏡で詳細に観察したところ、島状に点々と分布する小岩体をなす姫路市と加古川市の花崗閃緑岩の角閃石の波状累帯構造を発見した。一方、神戸市に広く分布する花崗閃緑岩からはひとつも発見することができなかった。この微細構造は幅数 μm 程度の細い縞模様をなすもので、高倍率でなければ観察することができず、また肉眼で確認できても写真に撮影することは困難である。

（1）播磨花崗岩類（姫路市）

角閃石は自形～半自形で、偏光顕微鏡下では淡緑色～淡褐色である。へき開に沿って、一部に緑泥石が晶出している。自形結晶のへき開に沿って、鉱物の輪郭に平行に、幅 $1\mu\text{m}$ 程度の帯からなる微弱な波状累帯構造がみられる（図9）。波状累帯構造は、角閃石と共存する鉱物が斜長石であろうと黒雲母であろうと関係なく形成されている。山陰帯の磁鉄鉱系列花崗岩類から報告されている角閃石の波状累帯構造は、角閃石全体に発達している（Kawakatsu and Yamaguchi, 1987a）が、これに比べて発達の程度はきわめて微弱である。

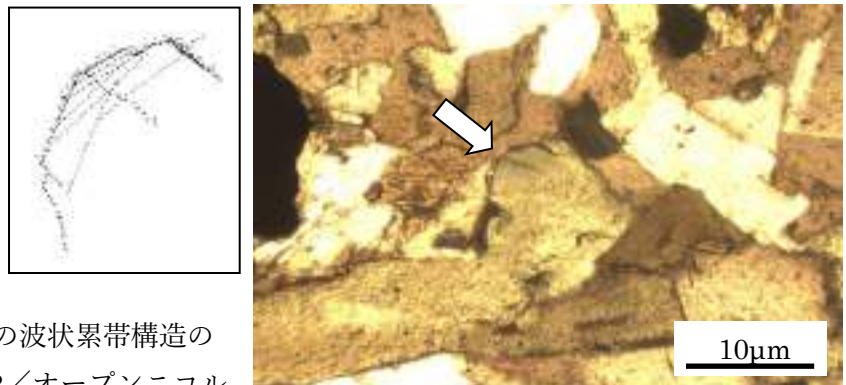


図9 姫路市の花崗閃緑岩の角閃石の波状累帯構造の偏光顕微鏡写真（試料試料 190728-2/オープンニコル $\times 100$ ）

(2) 播磨花崗岩類 (加古川市)

偏光顕微鏡下では、角閃石は自形～半自形で、淡緑色～淡褐色である。へき開に沿って一部に緑泥石が晶出している。角閃石のへき開は 60 度に交わる 2 方向に発達しているが、波状累帯構造は一方のへき開に平行な方向に形成されている累帯構造を、他方のへき開に平行な方向の累帯構造がクロスラミナのような形状で切っているようすが多く観察できる (図 10・図 11)。波状累帯構造は、角閃石と共存する鉱物に関わらず形成されている。

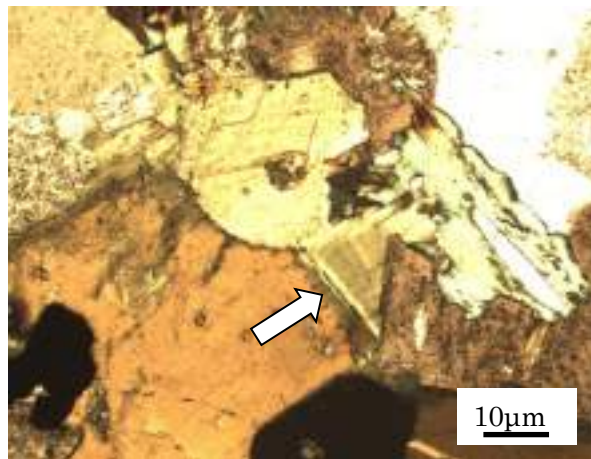
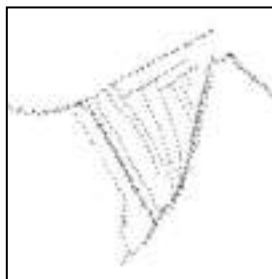


図 10 加古川市の花崗閃緑岩の角閃石の波状累帯構造の偏光顕微鏡写真 (試料試料 190803-2/オープンニコル×100)

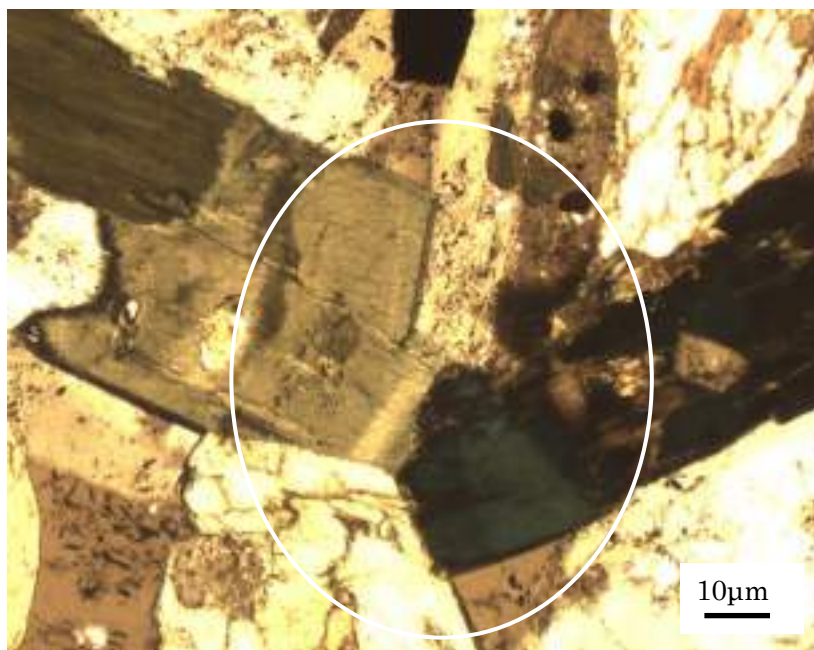
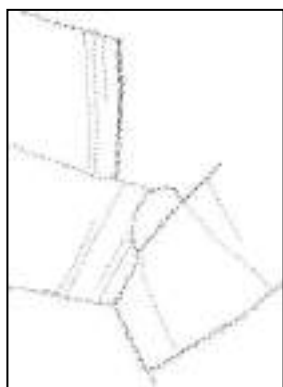


図 11 加古川市の花崗閃緑岩の角閃石の波状累帯構造の偏光顕微鏡写真 (試料試料 190803-3/オープンニコル×100)

4. 考察

姫路市や加古川市の播磨花崗岩類 (花崗閃緑岩) の角閃石には波状累帯構造がみられる。この構造は、角閃石が自形で結晶化しており、周囲に共存している鉱物に関係なく形成されていることから、角閃石の結晶化後に、マグマ残液によって二次的にイオン置換が行われた結果形成されたものであると考えられる。また、すでに形成された累帯構造を、後から別の角度で切断するように新たな累帯構造が形成されている。このクロスラミナに似た形状は、クロスラミナの形成過程と同様に、マグマ残液の循環が方向を変えて何度も繰り返し起こっていたことを示している。

波状累帯構造の発達程度は、熱水残液の循環の程度を反映しており、その形状は、熱水残液が循環した回数や置換を受けた方向を記録している。熱水残液の度重なる循環の影響を受けてもなお深成岩の組織を残していることは、これが変成作用ではなく火成作用の一環であることを示している。波状累帯構造の形成には累進的な酸化環境が必要であり、もともと酸化的環境か還元的環境かは関係ないことが知られている(和田ほか, 2004)。山陰帯の花崗岩類の角閃石の波状累帯構造が著しく発達しているのは、マグマ残液が激しく循環したことを示している (Kawakatsu and Yamaguchi, 1987a)。これに比べて、播磨花崗岩類の角閃石の波状累帯構造が微弱であることは、岩体の周縁部であっても残液の循環が激しいものではなかったことを、また六甲花崗岩類では波状累帯構造がみられないことは、岩体の中央部では残液の循環がほとんどなかった可能性を示している (図 12)。

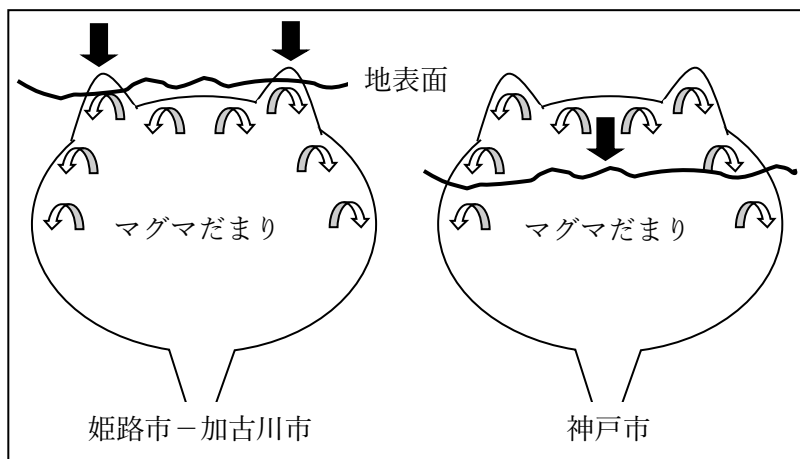


図 12 マグマ残液の循環の仮想モデル図
(矢印は熱水の循環を表わす)

5. 今後の課題

今回の研究では、花崗閃緑岩体と周囲の凝灰岩の関係を露頭で確認し、さらに先行研究からその形成時期や特徴が類似していることを確認した。採取した岩石試料から作成した薄片を丁寧に観察し、神戸市の花崗閃緑岩から波状累帯構造を発見することはできなかったが、本当に神戸市の六甲花崗岩類にはないという確証を得たわけではない。今後、六甲花崗岩類の観察を続ける中で波状累帯構造が発見されれば、本研究の考察を修正する必要性が生じることになる。

マグマ分化末期の環境についてはまだよくわかっていない。EPMA を用いて角閃石の波状累帯構造部分の成分を分析することで、マグマ分化末期にどのようなイオン置換が起こっているのかを明らかにしていきたい。なお、姫路市-加古川市の花崗閃緑岩にも神戸市の花崗閃緑岩にも輝石は含まれていない。

引用文献

兵庫県都市住宅部土地政策局企画室 (1992) 土地分類基本調査-播州赤穂・姫路・坊勢島・寒霞溪 (兵庫県)

兵庫県都市住宅部土地政策局企画室 (1997) 土地分類基本調査-神戸 (兵庫県)

岸田孝蔵・弘原海清 (1967) 姫路深成岩類の火山層序-近畿の後期中生代火成岩類の研究 (I) (柴田秀賢教授退官記念論文集, 241-255)

Kawakatsu, K. and Yamaguchi, Y. (1987a) Successive zoning of amphiboles during progressive oxidation in the Daito-Yokota granitic complex, San-in belt, southwest Japan (Geochimica et Cosmochimica Acta, 51, 3, 535-540)

Kawakatsu, K. and Yamaguchi, Y. (1987b) Microprobe analyses of zoned amphiboles from quartz diorites in the Daito-Yokota granitic complex, San-in belt, southwest Japan (島根大学地質学研究報

告, 6, 175-183)

川勝和哉・山口佳昭 (1987) 大東－横田地域の石英閃緑岩の Fe-Ti 酸化鉱物および珪酸塩鉱物の再平衡 (日本地質学会学術大会講演要旨, 457)

川勝和哉・山口佳昭 (1990) 大東－横田地域の石英閃緑岩中の累帯構造を示す角閃石の F および Cl 組成変化 (島根大学地質学研究報告, 9, 5-8)

桑谷立 (2003) 丹沢変成岩中の角閃石の組成累帯構造 (日本地質学会第 110 年学術大会講演要旨集, 292)

小野晟 (1976) 中部地方北部の中央構造線付近の変成岩について (地質学雑誌, 83, 4, 207-212)

尾崎正紀・栗本史雄・原山智 (1995) 地域地質研究報告－北条地域の地質 (地質調査所)

沢田順弘 (1978) 島根県掛合陥没体に伴われる貫入複合岩体－非アルカリ岩のマグマ型と岩石系列に関する 2, 3 の問題－ (地質学雑誌, 84, 4, 177-200)

田結庄良昭 (1987) 日本の地質 6－近畿地方 (共立出版株式会社, p58)

富田克敏 (1976) 輝石・角閃石の離溶組織 (岩石鉱物鉱床学会誌特別号, 1, 93-104)

寅丸敦志 (2019) マグマの発泡と結晶化－火山噴火過程の基礎 (東京大学出版会)

和田肇・山口佳昭・原山智・木村純一 (2004) 黒部川花崗岩体の希土類元素分布と副成分鉱物－珪長質マグマ溜まりにおける結晶分化作用 (日本岩石鉱物鉱床学会学術講演会講演要旨集, 39)

山口佳昭 (1982) カンラン岩における単斜輝石の再平衡と微細組織 (地球科学, 36, 2, 62-68)

山口佳昭 (1984) 浅所貫入深成岩の Ca 角閃石の累帯構造 (地球科学, 38, 5, 346-351)

山口佳昭 (1985) 深成岩中のアクチノ閃石－ホルンブレンド連晶とその再平衡 (島根大学地質学研究報告, 4, 27-31)

Yamaguchi, Y. and Tomita, K. (1985) On the structure of Clinohypersthene Derived as a Host Phase from Parental Pigeonite by Exsolution (島根大学理学部紀要, 19, 151-157)

山元孝広・栗本史雄・吉岡敏和 (2000) 地域地質研究報告－龍野地域の地質 (地質調査所)

謝辞

本研究をおこなうにあたって、本校科学部顧問の川勝和哉先生には、始終有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

工夫して自作した高分解能の簡易分光器で電子レンジプラズマの正体を探る

兵庫県立姫路東高等学校 科学部 プラズマ班

赤瀬彩香 高瀬健斗 岩本滯治 奥見啓史 内藤麻結 藤本大夢 安原倭 山本夏希

要 旨

電子レンジ内で、陶器の箸置きの上に置いたシャープペンシルの芯を 500W で加熱すると、プラズマが発生する。プラズマの正体と発生の原因を解明するには高分解能の分光器が必要だが、高価で入手できない。そこで、DVD-R の記録面をメタノールで洗浄して回折格子とし、表面反射型の塩ビ製鏡を反射鏡に用いて、ナトリウムの D1-D2 線を分離できる高分解能をもつ簡易分光器を開発した。

陶器の箸置きの上に、長さや太さ、濃さを様々に変えたシャープペンシルの芯や縫い針、銅線を置き、電子レンジ内で加熱した。電子レンジの波長 (0.122m) のほぼ半分の長さ 60mm の導体であれば、シャープペンシルの芯や縫い針、銅線など、その成分にかかわらず、それがアンテナになってプラズマが発生する。発生したプラズマを、開発した簡易分光器で観察し、分析ソフト Image J を用いて分析すると、いずれもナトリウムの強い輝線であることがわかった。支持台を陶器からガラスに変えると、プラズマは発生しない。電子レンジプラズマは、アンテナの支持台として用いていた陶器の成分のうち、第 1 イオン化エネルギーが最も小さいナトリウムがプラズマになった可能性が高い。H.Khattak ら (2019) は、プラズマの発生に水が必要だと指摘しているが、プラズマの発生に水は必要ない。

キーワード：電子レンジプラズマ 分光器 D 線 アンテナ 第 1 イオン化エネルギー

1. 序論 (はじめに)

筆者らは、2019 年 8 月に京都大学で開催された「ひらめきときめきサイエンス」に参加した。電子レンジ内で 500W で加熱したシャープペンシルの芯が発光し、プラズマが生じる実験に参加した。このプラズマを簡易型の分光器で分光すると、ナトリウムの D 線付近に強い輝線がみられ、他に目立った輝線はみられなかった¹⁾。この簡易型分光器は D 線を 2 本に分離することができない分解能のものであった。なぜシャープペンシルの芯から強いナトリウムの輝線があらわれるのか、この輝線は本当にナトリウムの D 線なのか疑問に思った。

筆者らはこれらの疑問を明らかにしたいと考えたが、D 線を 2 本に分離できるような市販の分光器は、数万円と高額なために入手することができない。そこで、D1 線と D2 線を分離することができる高い分解能をもつ簡易分光器を工夫して自作し、これを用いて電子レンジプラズマを観察して、そのプラズマ発光の原理に迫ろうと考えた。

H.Khattak らは、米国科学アカデミー紀要 (PNAS) に、ブドウの実を 2 つ並べて電子レンジ内で加熱すると、交点に共振が集中して、そこからカリウムとナトリウムのプラズマが発生す

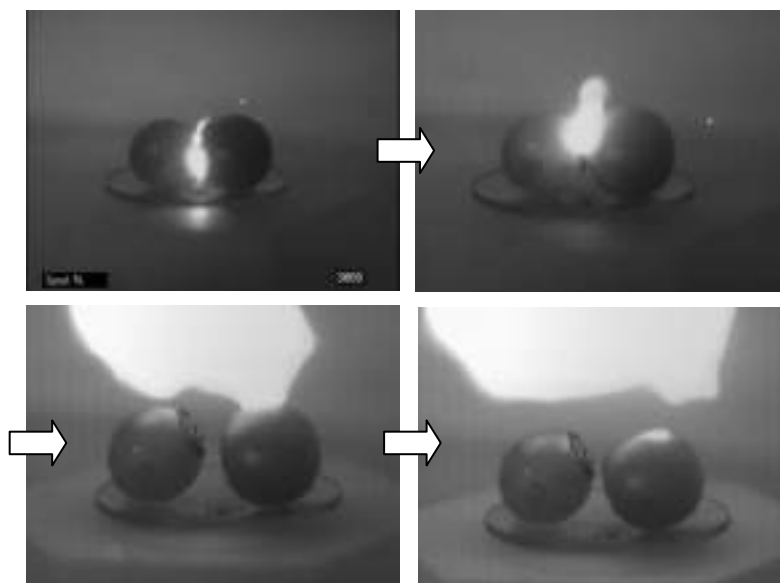


図 1 ブドウのプラズマ²⁾

ることを示した²⁾ (図1)。ブドウからプラズマが発生するメカニズムを、中が液状の球状のものを2つ接触させて電磁場に置くと、交点に共振が集中し、そこからプラズマが放出されると説明している。このように、プラズマの発生には水の存在が重要だと結論づけ、ついに電子レンジプラズマのメカニズムを解明したとしているが、シャープペンシルの芯に水は含まれておらず、彼らの説明ではシャープペンシルの芯を入れた電子レンジ内でプラズマが生じるメカニズムを説明することはできない。また、ブドウの成分のうちカリウムは7.8%と最も多いが、ナトリウムは0.04%程度を占めるにすぎないにもかかわらず、強いナトリウムの輝線が観察される原因についても明らかにしていない。自然界には、雷や恒星の発光、地球大気上層部の電離圏、オーロラなど、プラズマが普遍的にみられるが、それを電子レンジ内で再現し考察するような指向性エネルギーの研究は先行研究がほとんど見られない。このような研究は、高密度レーザーパルスなどのエネルギーシステムや、試料をプラズマ化して薄膜を作ったり微細加工したりするなど、工業的視点においても基礎研究として高い価値があるとされている。

2. 高分解能をもつ分光器の作成とD線の観察

筆者らは、教科書をはじめとする様々な資料^{3) 4) 5)}を参考にして、簡単に自作できる簡易分光器を作成してみたが、D1線とD2線を分離できる分解能がないとか、観察する角度の設定が難しいなどの理由で、電子レンジ内で発生するプラズマを分光することはできなかった。そこで、改良型の簡易分光器を自作することにした。分光の性能を確認する方法として、低圧ナトリウムランプ光の分光を行った。用いたナトリウムランプは、島津製作所製のスペクトロランプ(100V/60Hz)である。筆者らが作成した簡易分光器の写真(図2)と型紙(図3)を示す。

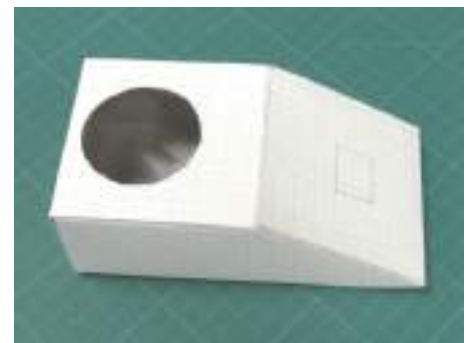


図2 製作した簡易分光器

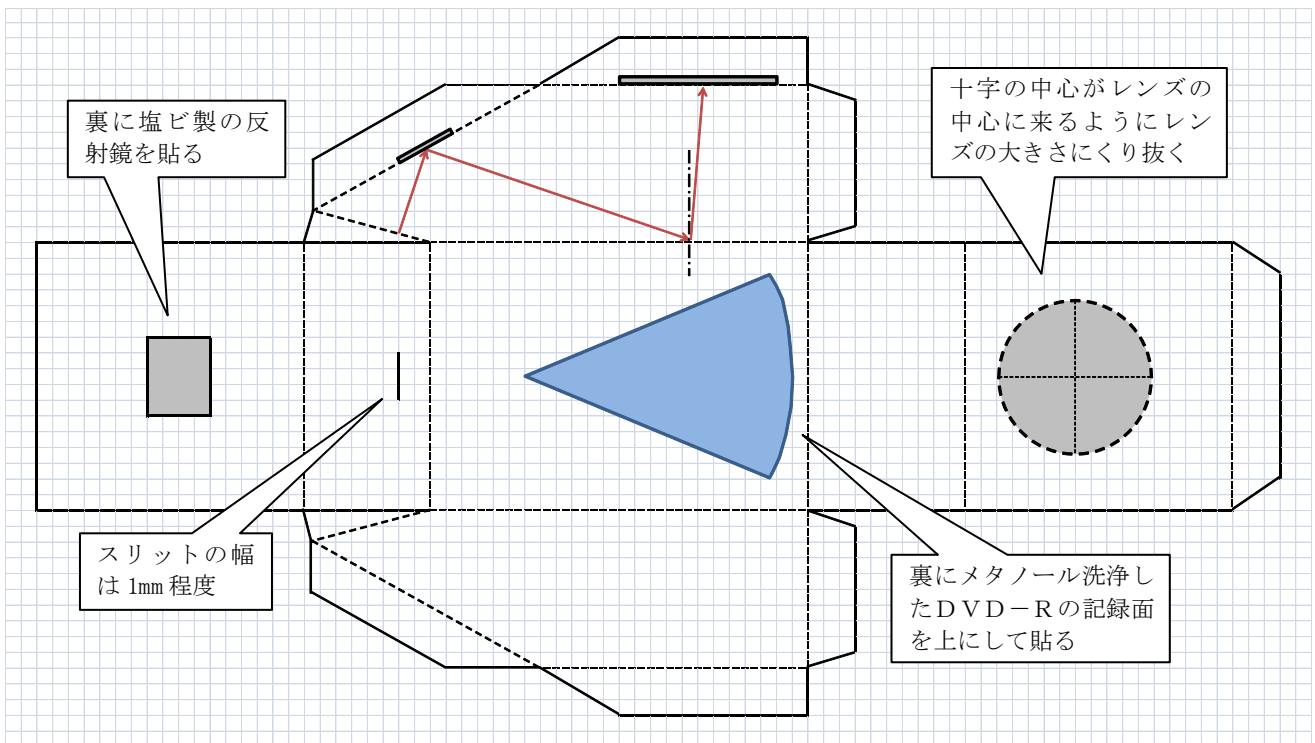


図3 簡易分光器の設計図(1目盛りは5mm)(破線はすべて山折り)

簡易分光器の開発では、回折格子、反射鏡、スリット幅をさまざまに試した。その結果、カメラ撮影が困難であった従来型のものよりも安定した撮影ができ、ナトリウムランプの2本のD線もクリアに分光・撮影が可能になった。この分光器で得られた輝線(図4)がD1線とD2線であることを確認するために、アメリカ国立衛生研究所がインターネット上で無料公開している画像解析ソフト「Image J⁶⁾」を用いて、スペクトルの波長を求めた。デジタルカメラで撮影した写真をJPEG形式で保存し、Ctrl+kを押すと、横軸が画像横方向のピクセル、縦軸がそれぞれのピクセルの輝度の相対値を示すスペクトルチャートが表示される。この数値データをExcel上にコピーし、白色蛍光灯のスペクトルで観測される水銀の輝度を用いて校正すると、これは2本に分光されたナトリウムのD線であることが実証された。



図4 分光器で得られた輝線

(1) 回折格子

回折格子として、身近にあるCD-RやDVD-R、BR(ブルーレイ)ディスクの、いずれも単層のものを用いて分光器を作成し、比較観察した(図5)。溝の間隔が狭いほど分散度が大きくなり、分解能は向上するはずである。透過型のもので、これだけの性能をもつ材料は入手困難であった。

CD-RはD線を2本に分光することができなかった。DVD-Rは、観察する角度を細かく調整すると複数の輝線に分離することができた。BRは、暗くて2本の輝線に分離できているのかどうかを確認することができなかった。BRは、観察に用いたナトリウムランプでは暗すぎて実用的・汎用的ではない。そこで、DVD-Rの盤面を用いることにした。



図5 CD-R(左)、単層DVD-R(中央)、単層BR(右)を使った分光実験の結果

DVD-Rで繰り返し観察すると、観測のたびにD1線とD2線の太さが異なって観察された。また、2本の輝線がぼやけて見えた(図6)。

DVD-Rは記録層と保護層からなっている(図7)。保護層に分光の能力はないので、記録層のみにして、表面の塗料をメチルアルコールで洗浄して(図8)アルミの蒸着面を露出させて分光器に使用すると、分離する前よりも明瞭な2本の輝線が得られた(図9)。



図6 保護面で輝線がぼやけたり(左)余計な輝線が見える(右)



図7 (左) DVD-R は記録面と保護面からなる



図8 (右) DVD-R の記録面をメタノールで洗浄する

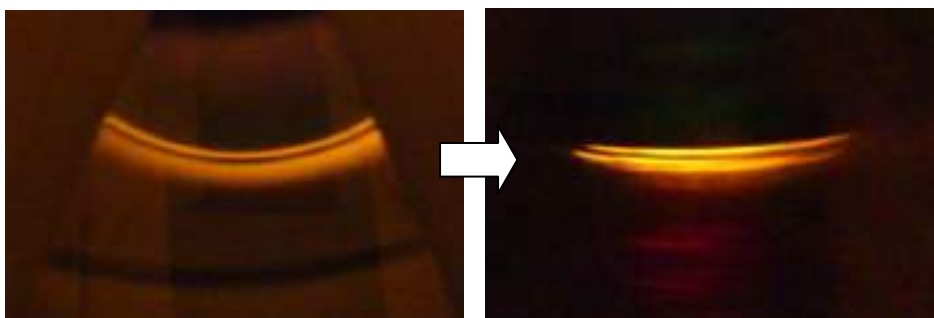


図9 記録面をメタノールで洗浄すると、洗浄前(左)よりも輝線が見える可能性が高まる(右)

(2) 反射鏡

通常のガラス製の鏡を用いても D 線を分離することはできるが、スリットからの入射光がうまく DVD-R 面に反射できない。ガラス製の鏡には、表面に保護膜が貼ってあることが原因だと考えた。保護膜が貼られていない表面反射型の塩ビ製の鏡を用いると、観察が容易になった(図10)。

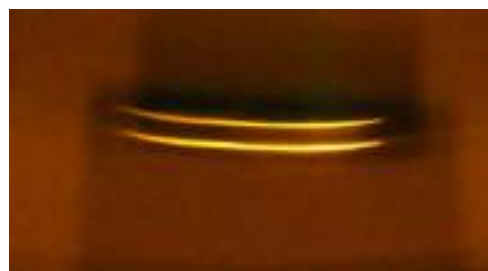


図10 塩ビ製の鏡を用いて分光する

(3) その他の条件

箱の中の色は、観察しやすいかどうかには影響するだけで、D 線の分離に影響しない。実際に箱の中を白くしても黒くしても影響はなかった。

分解能は、(回折格子までの距離) / (スリット幅) に比例するとされているので、製作した分光器のように回折格子までの距離が一定であれば、スリット幅は狭いほど分解能があがることになる。しかし、スリット幅を小さくしていくと、分解能は回折格子の溝の数に依存するようになるため、スリットの幅はあまり意味をなさない。細すぎると入光量が少なく分光が弱くなり、観察には適さない。

(4) デジタルカメラを用いた撮影方法

分光の可能性がもっとも高い回折格子である DVD-R の記録面をメタノール処理し、塩ビの鏡で反射させた改良型の分光器の D 線の分光を、デジタルカメラで撮影する方法を考えた。回折格子や反射鏡の工夫以上に難題なのが、デジタルカメラの装着方法である。分離された D 線の輝線は、観察する角度がわずかに変わるだけで見えなくなる。2本の D 線の輝線を安定的にデジタルカメラで撮影するためには、分光器とカメラをどのような位置関係で固定するかを確定させなければ



図11 撮影方法

ばならない。さらに、デジタルカメラの種類によって焦点距離が異なるため、回折格子とレンズの距離を調節しなければならない。

そこで、2本のD線が分離してもっとも明瞭に観察できるように、観察窓の高さを調節した。次に、



図12 改良型簡易分光器で分光したD線

(A) 観察の角度が少しでも変わると2本のD線の分離が難しくなる。

(B・C) 角度が固定できると、安定して2本のD線の撮影が可能になる。

観察窓の中心が光軸になるようにして、観察窓をデジタルカメラのレンズの先端がはまるように円形にくりぬいて、分光器とデジタルカメラを固定し、これを三脚でナトリウムランプの前に固定する(図11)と、安定的に輝線の画像を撮影することができる(図12)。デジタルカメラの種類が異なれば、この光軸を中心とした円形の観察窓の大きさを変えればよい。筆者らは、パナソニック社製のLUMIX(DMC-FZ300)と、カシオ社製EXILIM(EX-FC150)を使って撮影をおこなった。いずれの

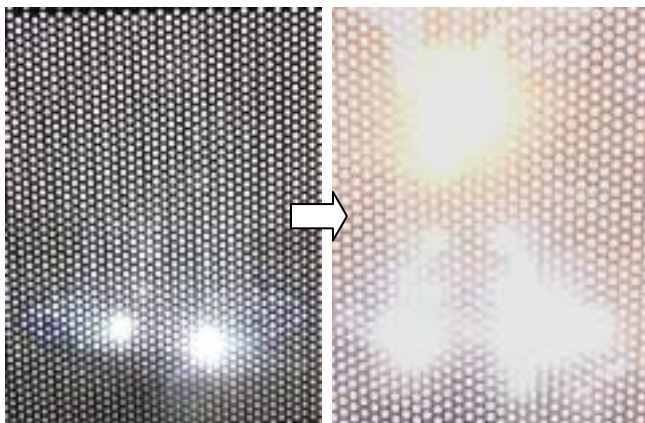
場合も、撮影はオート機能を解除してマニュアルフォーカス撮影に切り替えるだけである。測光モードやISO感度、回折補正などを操作しても撮影に影響はない。デジタルカメラのレンズの表面には反射光を減らして透過光をふやすために薄膜がコーティングされているが撮影に影響はない。

3. 電子レンジプラズマの実験と結果

(1) シャープペンシルの芯を用いた加熱実験



陶器の皿の上に陶器の箸置きを置き、その上にシャープペンシルの高分子焼成芯を置く。耐熱ガラスのコップをかぶせて電子レンジ(100V/定格消費電力1100W/定格高周波出力700W)内に入れ、500Wで加熱を始めると、数秒で芯からプラズマが発生する(図13)。



電磁波が漏れることを防ぐため、電子レンジの扉のメッシュを残したまま撮影した。発生後の芯の両端は尖り、細く短くなり(図14)、芯の表面は、白い粉末が付着している。

図13 電子レンジ内でシャープペンシルの芯の両端から周期的にプラズマが発生し、ガラスのコップ内上方で一体となるようす

発生したプラズマを製作した分光器で分光し、画像解析ソフト「Image J」を用いて、得られた輝線のスペクトルの波長を求めた。その結果、これは2本に分光されたナトリウムのD線であることを確認することができた (図15)。

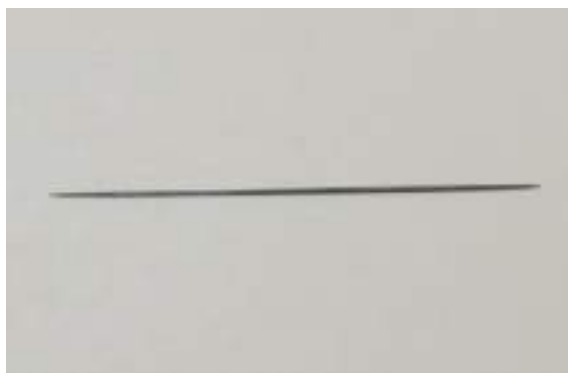


図14 プラズマを発生させた後の芯の両端は尖っている

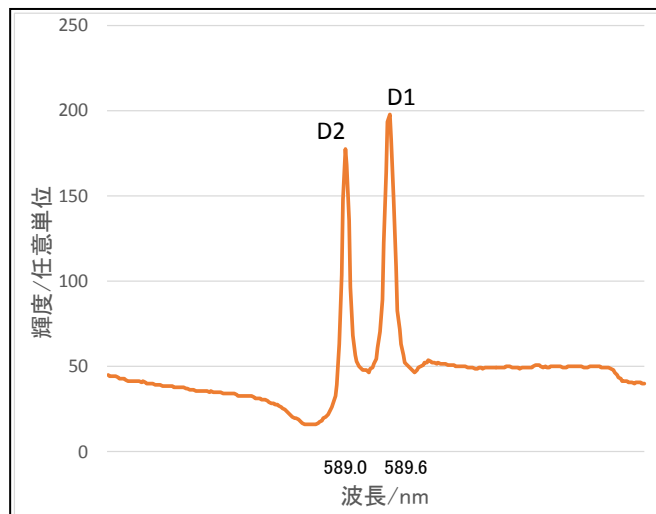


図15 分光器で得られた輝線の波長分析

(2) プラズマが生じる芯の長さ、太さ、濃さ

長さ 80mm のシャープペンシルの高分子焼成芯を 5mm ずつ短くして電子レンジ内で加熱 (500W/700W) し、プラズマが生じるかどうかを調べた (表1)。また、シャープペンシルの芯の太さや濃さ (硬さ) によっても、プラズマの発生が異なるのかどうかを調べた。

条件を変えて実験をそれぞれ5回ずつ繰り返した。プラズマは芯の長さが 60mm の際にのみ発生し、芯の濃さや太さには関係しない。

表1 出力、シャープペンシルの芯の長さや太さ、濃さとプラズマの発生の有無の関係

芯の長さ (mm)		80		75		70		65		60		55	
芯の太さ (mm)		0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3
芯の濃さ		HB	2B	HB	2B	HB	2B	HB	2B	HB	2B	HB	2B
出力 (W)	500	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×
	700	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×

芯の長さ (mm)		50		45		40		35		30		25	
芯の太さ (mm)		0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3	0.5	0.3
芯の濃さ		HB	2B	HB	2B	HB	2B	HB	2B	HB	2B	HB	2B
出力 (W)	500	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	700	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

(3) シャープペンシルの芯以外の物質を用いた実験

シャープペンシルの芯以外にも同様のプラズマが発生するのかどうかを確かめるため、縫い針や銅線でも同様の実験をおこなった。その結果、長さが 60mm であれば、縫い針でも銅線でも、シャープペンシルの芯と同様にナトリウムの輝線をもつプラズマが発生した (図16)。

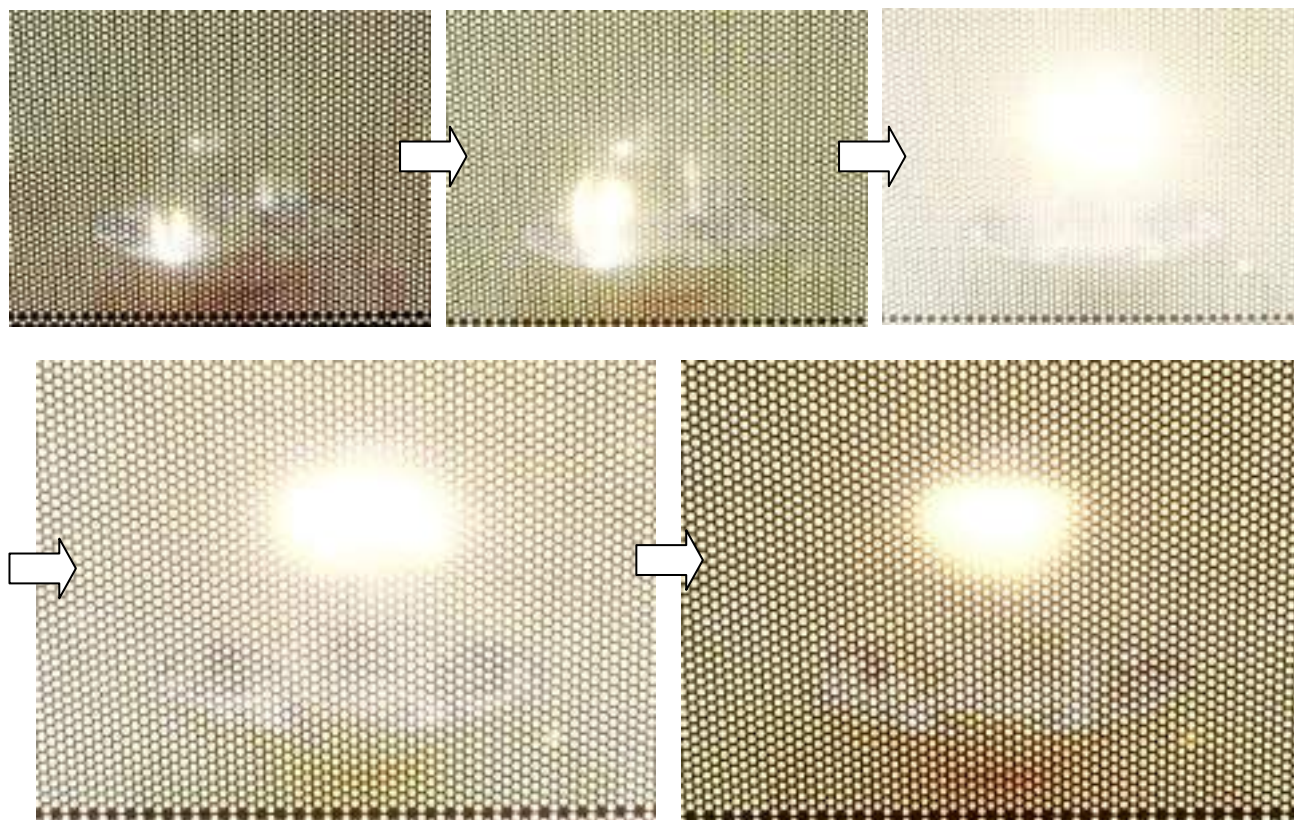


図 16 素焼きの板の上に置いた縫い針からプラズマが発生するようす

(4) 芯や縫い針、銅線を支持する台を変えてみる

プラズマを発生させた後の箸置きを観察すると、芯や縫い針、銅線に沿って白濁し、一部は欠けるなど破損していた (図 17)。芯や縫い針、銅線など、成分によらずプラズマが発生することから、箸置きの成分がプラズマ発生の原因になっているのではないかと考えた。そこで、支持台を素焼きの箸置きから耐熱ガラスに置き換えて実験をおこなった。その結果、シャープペンシルの芯でも縫い針でも銅線でも、プラズマは発生しなかった (図 18)。



図 17 素焼きの箸置きの白濁

図 18 耐熱ガラスを用いたプラズマ発生実験(左)とその結果(右)

4. 考察

(1) 高分解能をもつ分光器の作成方法

D1線の波長 λ は589.6nm、D2線は589.0nmであるため、分光するためには589.3nmの分解能があればよい。分解能は $\lambda/\Delta\lambda=589.3/0.6\approx 1000$ となる。回折格子の本数(線密度)が1mmあたり1000

本あればよいことになる。記録用単層 DVD-R の規格は 1350 本/mm とされているため、市販されている多くの分光器 (600~1000 本/mm) よりも、単層 DVD-R ディスクが有効であると考えられる。CD-R が分光できなかったのは、線密度が 625 本/mm で、D1 線と D2 線を分離することができなかったと考えられる。ブルーレイディスクは、線密度が DVD-R の約 3 倍で、通常のナトリウム管の明るさでは暗すぎるので、簡易分光器としては汎用性に欠けると結論付けた。簡易型分光器には単層の DVD-R が適している。スリット幅を 1mm にし、塩ビ製の鏡で反射させた入射光を、メタノール処理して皮膜を落とした DVD-R の記録面で回折させると、明瞭な 2 本の D 線に分離することができる。デジタルカメラのレンズを簡易分光器にはめこみ、三脚で固定して撮影する。このように、身近にあるディスクを用いて、性能のよい分光器を自作することができた。

(2) 電子レンジプラズマの実験

電子レンジの波長は 0.122m と決められている。どのような濃さのシャープペンシルの芯であっても、縫い針や銅線であっても、長さが電子レンジのほぼ半波長の長さ 60mm の導体であれば、プラズマが発生する。分光によって得られた輝線は、ナトリウムのプラズマであることを示している。シャープペンシルの高分子焼成芯は、1000℃前後で焼成する過程でほぼ完全に炭素となる。また、成分が全く異なる縫い針や銅線でもプラズマが発生している。箸置きの上に置いた針状の物体がナトリウムのプラズマを発生しているとは考えられない。

ナトリウムは、支持台として用いた箸置きに含まれる成分のうち、第 1 イオン化エネルギーが 495.8kJ/mol⁷⁾ と最も小さい元素である。60mm の針状の物質の成分によらず、これらがアンテナとなって箸置きのナトリウムが励起され、プラズマとなって発光したのではないかと考えられる。

H.Khattak らのブドウの実を 2 つ並べて電子レンジ内で加熱し、プラズマを発生させる実験²⁾ では、プラズマの発生に周波数が重要であることを示している。ブドウの実の内部の屈折率は 1.33 程度で、ブドウの中を伝わる周波数は、空気中のほぼ 10 分の 1 となるため、ブドウの内部を通過するときの波長は電子レンジの 10 分の 1 の 12mm となる。これがちょうどブドウの大きさと一致するため、電子レンジ内ではマイクロ波がトラップされ、電磁場が電子レンジの 100 倍以上増幅されて (500W の場合 50000W) 集中し、内部から熱されていく。これを 2 つ接触させると、接点に電磁場の中心が集中して周囲の空気がイオン化されてプラズマが放出される、と結論付けている。ブドウの場合には、カリウムとナトリウムのプラズマが発生するとされている。彼らはプラズマの発生には水の存在が必要であると結論付けているが、筆者らが示したように、水が存在しなくても電子レンジ内でプラズマは発生する。

5. 今後の課題

本研究は、京都大学で体験したプラズマの観察から得た疑問について、筆者ら自身が仮説を設定し、専門研究者の助言を得ながら、独自の視点で教科書の内容を発展的に扱ったものである。電子レンジ内で発生したプラズマが本当にナトリウムによるものなのかどうかについて、さまざまな意見があると思うが、筆者らは観察結果に基づいて考察をおこなった。電子レンジのエネルギーがどのようにして箸置きのナトリウムを励起したのかについて、今後さらに検討が必要である。

謝辞

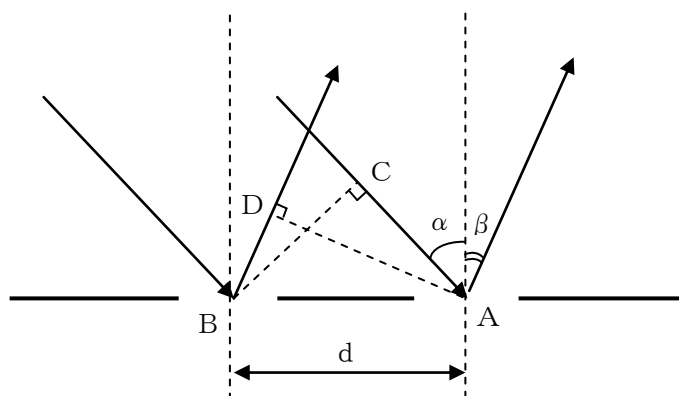
本研究をおこなうにあたって、京都大学情報学研究科の宮崎修次先生には、電子レンジプラズマについての詳細な検討をしていただいた。LLP 京都虹工房の小林仁美氏や本校科学部顧問の川勝和哉先生と藤田真央先生からは、多くの助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Y.Ueno, R.Yasufuku and S.Miyazaki, Spectroscopy of plasma induced by a kitchen microwave, ELCAS Journal, 2018, 3, 102-102.
- 2) H.Khattak, P.Bianucci and A.Slepkov, Linking plasma formation in grapes to microwave resonances of aqueous dimmers, PNAS, 2019, 116, 10, p4000-4005.
- 3) 植松恒夫, 酒井啓司, 下田正編, 高等学校物理改定版, 啓林館, 2017, p210.
- 4) 若林文高, DVD 分光器の回折条件, 国立科学博物館理工学研究部紀要, 2005, 28, p21-30.
- 5) 若林文高, 光を分ける—簡易分光器とそれを使った実験—スペクトルの科学的意義と DVD 分光器による観察・解析法—, 化学と教育, 第 65 巻, 2 号, 2017, 65,2,p76-79.
- 6) <https://imagej.nih.gov/ij/>
- 7) D.F.シュライバー, P.W.アトキンス, 無機化学 (上), 東京化学同人, 2001.

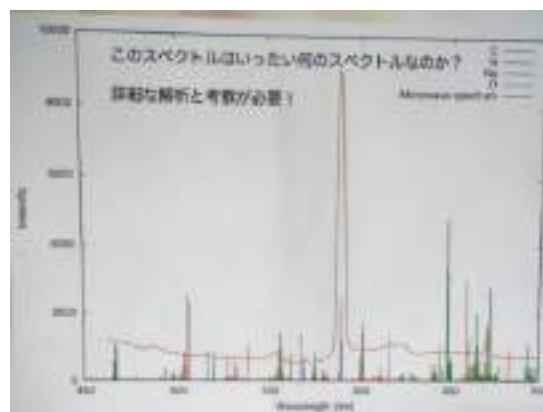
Appendix

1. 筆者らが製作した分光器の回折格子方程式を考える。光路差=AC-BDである。入射角を α 、回折光と回折格子法線とのなす角(回折角)を β とすると、このような反射型では、 $\sin\alpha - \sin\beta = Nm\lambda$ となる(N:1mmあたりの溝の本数、m:回折次数、 λ :波長 nm)。この分光器の場合、Nは DVD の規格 1350 本/mm、ナトリウムランプの波長は約 589nm であるから、 $m = 1$ のとき $\sin\beta = \sin70^\circ - 1350 \times 589 \times 10^{-6} = 0.1446$ で、 $\beta = 8^\circ \sim 9^\circ$ の回折光が得られることを示している。



2. 光の波長を λ 、光の伝播速度を v 、振動数を f とすると、 $\lambda = v/f$ で示される。光の伝播速度は、大気中でも真空中と同様に 299792458m/s で近似できる。日本の電子レンジの振動数の規格は 2.45GHz であるため、 $\lambda = 299792458 / (2.45 \times 10^9) \approx 0.122\text{m}$ となり、シャープペンシルの芯の長さ 60mm はこれのほぼ半波長の長さになる。

3. 電子レンジ内のナトリウムの輝線については、LLP 京都虹工房の小林仁美氏の協力を得て、恒星の光を分光することができるような高性能の分光器を用いて分光したところ、ナトリウムの波長の強い輝線であることが示された。



反応染料で染色した綿糸のマゼンタの割合を紫外線の影響の程度を示す指標とする提案

兵庫県立姫路東高等学校 科学部 紫外線班

山本夏希 赤瀬彩香 高瀬健斗 岩本滯治 奥見啓史 内藤麻結 藤本大夢 安原倭

共同研究：兵庫県立西脇高等学校 地学部

岸本ななみ 藤井咲幸 横山渚 小畑颯矢 小林日菜向 村上春輝 山田怜央 吉田翔

要 旨

繊維製品を洗濯後干すと、陽にあたった場所だけが変色してしまう経験がある。筆者らは、繊維製品の紫外線による退色について、反応染料で染色されている播州織の綿糸を用いて研究した。

青、黄、赤の3色の綿糸に紫外線を照射した結果、以下の3点を明らかにした。(1) 紫外線を赤糸に連続照射すると、6日目まで照射日数 x に対してシアンに対するマゼンタの染料の割合 y が、 $y = -6.42x + 42.3$ の関係で減少して退色する。これは、マゼンタが紫外線によって壊されたことを示す。(2) 青糸や黄糸には明瞭な傾向が見られず、赤糸に比べて退色しにくい性質をもつ。(3) 紫外線の影響の程度を、マゼンタの染料が残存する割合で指標することができる可能性がある。

キーワード：退色（色素そのものの性質が変化して色が変わる現象） 染料 紫外線 色の3原色

1. 序論（はじめに）

繊維製品を洗濯後干すと、長時間干していたわけではないにもかかわらず、陽にあたった場所だけが変色してしまう経験がある。糸の染色方法には、染料を用いる方法と顔料を用いる方法がある。染料は、糸の繊維に染料を科学的に結合させて染色するもので、繊維の内部まで染色することができる。酸と塩基の作用（イオン性の官能基や水酸基）など、ひとつひとつの分子が分子構造に基づく作用で繊維と結合するため、変色しにくい。一方、顔料は、色素を微細な樹脂の粒子で接着する方法で繊維の表面を染めるため、変色しやすく、また表面で乱反射して色がくすんで見えやすい。西脇市は、古くから反応染料で糸を染色して織り上げる播州織で栄えた都市である。兵庫県立姫路東高等学校科学部は、播州織の糸の染色方法に興味を持ち、播州織の地元である兵庫県立西脇高等学校と共同研究をおこなった。

退色の原因として、化学的変色と物理的変色の先行研究がある。物理的変色についての先行研究は少ないが、綿やシルク、ナイロンなどは、紫外線の影響で繊維素材そのものが分解されて変色が起こるとされている^{1) 2)}。退色に関する先行研究の多くは、化学的に変色のメカニズムを解明するものである。一般的な反応染料は、繊維と反応して共有結合できる反応基を有する染料である。反応基は中性～弱酸性で比較的安定だが、塩基性で不安定になり、繊維や水と反応して加水分解する。^{2) 3) 4)}

染色した糸に対する紫外線の影響について、同じ条件で実験しても異なる結果が得られるなど、そのメカニズムは科学的に解明されていないとされている。本研究では、反応染料によって染めた綿糸に紫外線を照射し、紫外線によって綿糸の色がどのように変化するかを明らかにすることを目的とした。播州織は、特別な糸を用いているわけではないため、播州織の糸の退色のメカニズムを明らかにすれば、

広く一般的な退色のメカニズム解明の端緒を得ることができる。さらに、一定の割合で色素の割合が変化すれば、紫外線の影響の程度を示す指標とすることができる。

2. 試料の準備

西脇市の東播染工株式会社では、綿糸だけではなく、ポリエステル糸、フィラメント糸、ナイロン加工糸等の染色もおこなっているが、本研究では古くから播州織に用いられている、反応染料で染色された綿糸を試料とした。この糸を暗室内に静置し、紫外線ライト（TECKEPIC社製 APD014PU-J0/36W36LED）

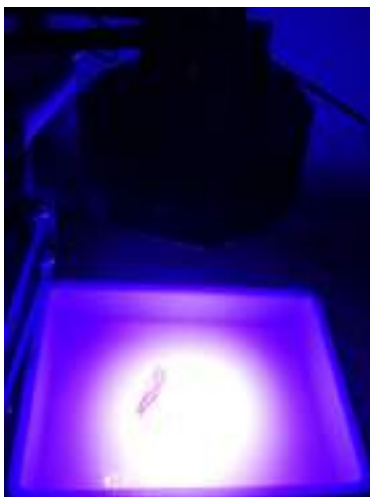


図1 赤、黄、青の糸に紫外線を照射

で、50cmの距離から紫外線を1日～10日間連続照射した（図1）。

3. 紫外線照射による染料の定着変化


(1) 実験の方法




紫外線を照射した糸の一部を細い針を用いて毛羽立たせ、顕微鏡で糸の色素のようすを観察した。




(2) 実験の結果




糸は自ら光を発しないため、糸の色は色の3原色（空色＝シアン、赤紫＝マゼンタ、黄＝イエロー）の組み合わせによって決定される。顕微鏡で観察すると、青糸、黄糸、赤糸に見える糸は、色素が数 μm のドット状に繊維を染めており、色の3原色の割合が異なることによって、視覚的に異なる色に見えることがわかった。観察に用いた糸の顕微鏡写真を表1に示す。

表1 紫外線照射日数と糸の顕微鏡写真（顕微鏡写真の横幅は20 μm ）


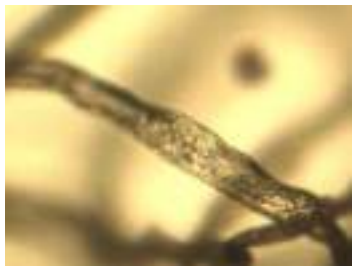

照射日数	染色前
糸の色	—
顕微鏡写真 (40倍)	

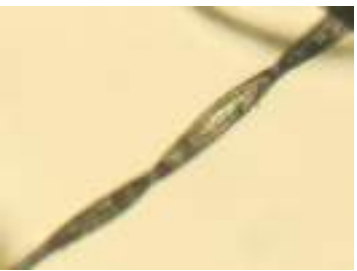

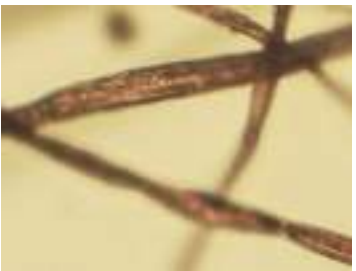
照射日数	照射前 (染色直後)		
糸の色	青	黄	赤
顕微鏡写真 (40倍)			




照射日数	1日		
糸の色	青	黄	赤
顕微鏡写真 (40倍)			

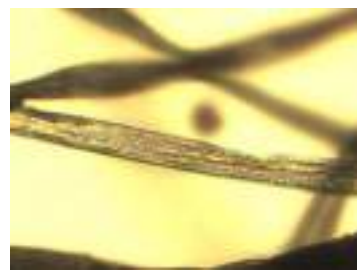


照射日数	2日		
糸の色	青	黄	赤
顕微鏡写真 (40倍)			




照射日数	3日		
糸の色	青	黄	赤
顕微鏡写真 (40倍)			

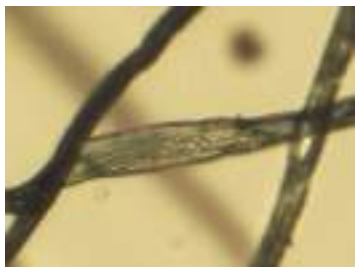


照射日数	4日		
糸の色	青	黄	赤
顕微鏡写真 (40倍)			

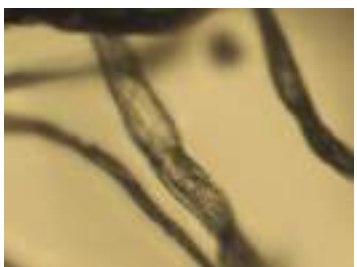
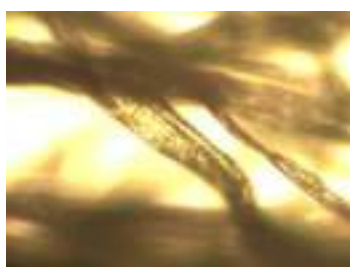
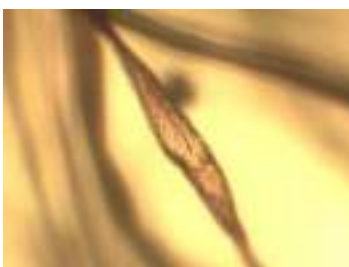
照射日数	5日		
糸の色	青	黄	赤
顕微鏡写真 (40倍)			

照射日数	6日		
糸の色	青	黄	赤
顕微鏡写真 (40倍)			

照射日数	7日		
糸の色	青	黄	赤
顕微鏡写真 (40倍)			

照射日数	8日		
糸の色	青	黄	赤
顕微鏡写真 (40倍)			

照射日数	9日		
糸の色	青	黄	赤
顕微鏡写真 (40倍)			

照射日数	10日		
糸の色	青	黄	赤
顕微鏡写真 (40倍)			

紫外線の照射日数ごとに、青、黄、赤の糸を5か所ずつ40倍の顕微鏡で撮影し、拡大した写真に1mm方眼紙を貼りつけて、1mm²にどのような色の色素が定着しているかを調べた。色は、日本色研事業株式会社の新配色カード199a(カラーチャート)を用いて、赤紫(マゼンタ)、赤、黄(イエロー)、青、緑、空色(シアン)を判断し、その面積比をもとにして、シアン、マゼンタ、イエローの色素の割合を求めた(図2)。方眼紙の1mm²枠の一部であっても、ある一色の色素が見られれば、その色素としてカウントした。また、1mm²枠内に複数の色素が見られれば、その面積の大きい方の色素としてカウントした(図3)。紫外線の照射日数と色素の面積比を求めたものを表2および図4にまとめる。

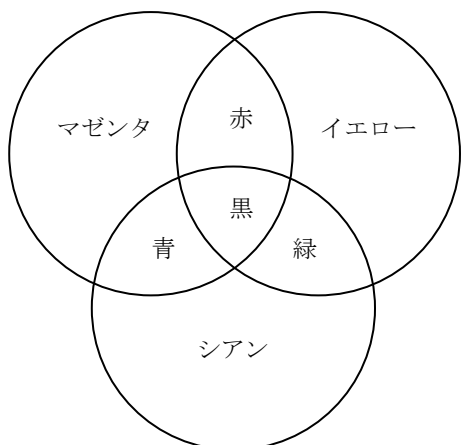


図2 色の3原色の割合を求める

シアン=空色+青+緑、マゼンタ=赤紫+赤+青
 イエロー=黄+赤+緑

図2に基づいて求めた、シアン、マゼンタ、イエローの割合を比較すると、シアンとマゼンタが占める割合が、紫外線照射によって変化しているように思われた。黄の色素に相関関係は認められなかったため、シアンに対するマゼンタの割合を青糸、黄糸、赤糸それぞれの退色の程度の指標として用いて、この割合が紫外線照射日数と相関関係があるかどうかを調べた。

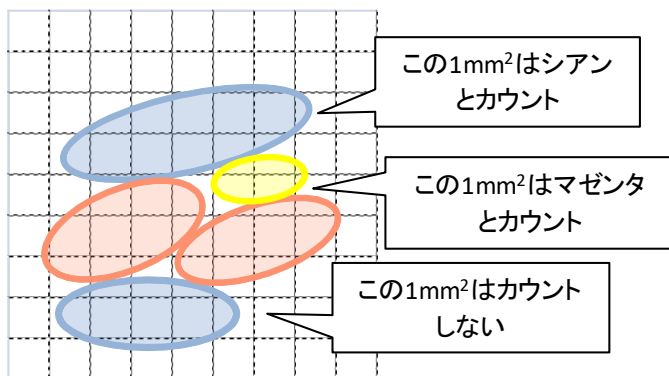


図3 色素のカウント方法

照射日数 (日)	シアンに対するマゼンタの割合		
	青糸	黄糸	赤糸
0	0.64	2.77	46.17
1	1.25	3.54	26.93
2	1.54	2.66	32.74
3	1.32	2.39	25.73
4	0.59	2.07	15.57
5	0.54	0.34	13.26
6	0.35	0.86	1.10
7	0.61	0.57	1.85
8	1.37	0.25	2.97
9	0.89	0.88	0.88
10	1.09	0.65	1.01

表2 紫外線照射日数とシアンに対するマゼンタの割合

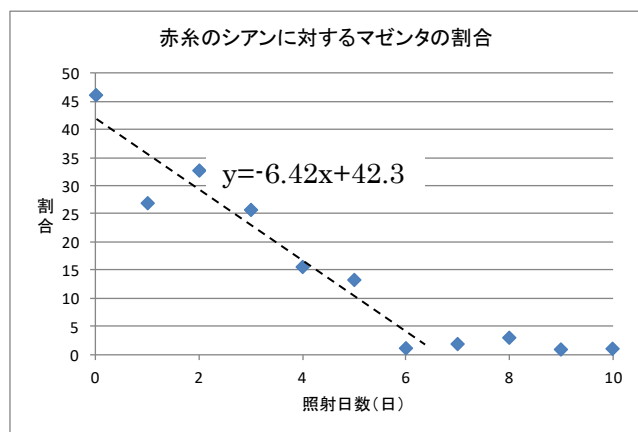
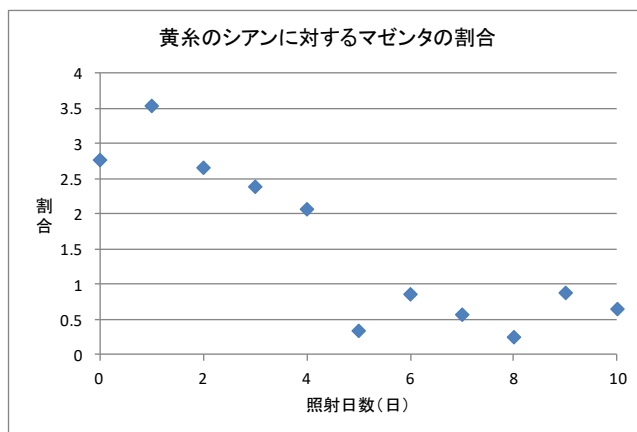
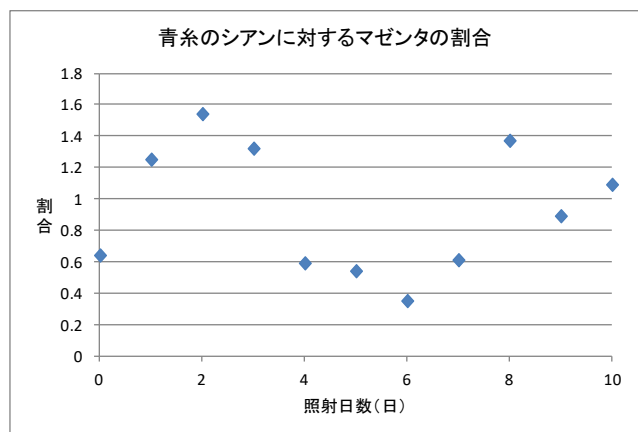


図4 青糸、黄糸、赤糸の紫外線照射日数とシアンに対するマゼンタの割合の変化 (赤糸のグラフの点線は近似直線)

青系のシアンに対するマゼンタの割合に相関関係はみられない。黄系の相関関係も不明瞭である。一方、照射日数 x に対して赤系のシアンに対するマゼンタの割合 y には、 $y = -6.42x + 42.3$ の強い相関関係がみられる。紫外線照射6日目まで割合が低下していき、それ以降は割合に変化はみられない。

4. 考察

染料そのものは変色しにくい性質をもっているが、紫外線は繊維そのものにダメージを与える。播州織に用いられている綿糸は、異なる色が混ざり合って発色しているのではなく、シアン、マゼンタ、イエローのそれぞれが、数 μm のドット状に異なる割合で繊維と結合することによって、視覚的に青糸、黄糸、赤糸として認識されている。

赤系のシアンに対するマゼンタの割合には強い相関関係がみられる。照射日数 x に対して赤系のシアンに対するマゼンタの割合 y は、 $y = -6.42x + 42.3$ の関係を保ちながら、紫外線照射6日目まで低下していく。紫外線を長期間照射するほど、繊維の強度が落ちるとともに、特にマゼンタの割合が低下して、糸の色が視覚的に退色して見えると推定される。染料は、紫外線によって励起状態となり、元の状態に戻る途中で分子内の化学結合が切れて壊れてしまうことがある。特にマゼンタのような赤系の色素は、その補色である青系の光をよく吸収する性質をもっている^{5) 6) 7) 8) 9)} ため、紫外線も吸収しやすく壊れやすい。黄糸に関しては、相関関係が不明瞭であり、青糸では相関関係が見られない。黄糸や青糸が赤糸に比べて退色しにくい性質を示しているのかもしれない。播州織で用いられる染色液や染色法は、播州織特有のものではなく、一般的な方法によるものである。今回の実験で得られた成果は、一般的な糸の変色のメカニズムの解明に通じるものである。本研究の結果をもとにすると、紫外線の影響の程度をマゼンタの染料が残存する割合で指標することができる可能性がある。

5. 今後の課題

今後は、染色液の成分を分析し、分光光度計を用いて染色液そのものの紫外線に対する吸光度を測定する予定である。現在も実験を継続しており、長期間の紫外線照射による影響について考察したい。さらに、今回扱わなかった顔料との比較研究もおこないたい。

謝辞

本研究をおこなうにあたって、西脇市の東播染工株式会社の片山宗俊氏と上田恭彦氏には、播州織に用いられている糸や染料をご提供いただいた。兵庫県立姫路東高等学校（前県立西脇高等学校）科学部顧問の川勝和哉先生には、研究の進め方について多くの助言を得た。ここに記して謝意を表す。

引用文献

- 1) 浦畑俊博, 繊維製品の黄変および変色について, 織消誌, 1992, p10-16.
- 2) 株式会社仁多産業, 繊維の脱色方法および退色方法, 2007, 日本特許情報.
- 3) 染色物の染色部属判定方法原案作成委員会, 染色物の染色部属判定方法, 日本工業規格, 1999.
- 4) 杉本太・磯野禎三, 繊維染色系排水の脱色処理技術とその動向, 環境技術, 2000, 29, 9, p731-741.
- 5) 美馬朋子・佐藤昌子, 染色布の紫外線遮蔽性能に関する研究 (第1報) -Direct Red 綿染色布について-, 織消誌, 1999, p36-46.

- 6) 美馬朋子・佐藤昌子, 染色布の紫外線遮蔽性能に関する研究 (第2報) —直接染料の可視部吸収特性の影響—, 織消誌, 2001, p46-60.
- 7) 美馬朋子・佐藤昌子, 染色布の紫外線遮蔽性能に関する研究 (第3報) —ポリエステル染色布について—, 織消誌, 2004, p58-68.
- 8) 美馬朋子・佐藤昌子, 染色布の紫外線遮蔽性能に関する研究 (第4報) —染色布の退色が紫外線遮蔽性能に及ぼす影響—, 織消誌, 2004, p61-70.
- 9) 美馬朋子, 繊維製品の染色による紫外線遮蔽効果, 織消誌, 2006, p44-49.

河川に堆積した砂粒の形や鉱物の体積比から源岩からの距離を推定する方法の提案

兵庫県立姫路東高等学校 科学部

岩本滯治 奥見啓史 山本夏希 安原倭 藤本大夢 内藤麻結

児玉尚子 佐々木彬人 多田明良 中農拓人 前田智彦 三井彩夏 室本勇也 森山琉晟

要 旨：河川における砂粒の運搬と堆積に関する研究は驚くほど進んでいない。砂粒の多くは石英と長石である。石英は水にほとんど溶解しないが長石は溶解しやすい。そこで、砂粒鉱物の外形や、石英／長石の体積比から、砂のもとになった源岩からの距離を推定できると仮説を立てた。

研究方法は以下のとおりである。(1) 兵庫県南西部の揖保川の上流から下流まで地質調査を行い、源岩とされる花崗閃緑岩と、揖保川の中流から下流までの6か所の砂粒を採取する。(2) 6か所の砂粒から石英と長石を選別し、石英 10285 粒、長石 9568 粒の粒径を測定する。(3) 6か所の石英と長石各 10 粒ずつ合計 120 粒の断面積と外周の長さを計測して、凹凸係数を求める。(4) (2) で選別した 6か所の砂粒の石英／長石の体積比を求める。

その結果以下を明らかにした。(1) 石英と長石の砂粒の平均粒径は、中流でも下流でも大きな違いはない。(2) 石英の凹凸係数は 0.73~0.75 とほとんど変化しないが、長石は下流側に向かって 0.75 から 0.85 へと大きくなり球形に近づく。(3) 石英／長石の体積比 y は、源岩からの距離 x と $y=0.024x+0.58$ の関係で下流側に向かって大きくなる。このように、凹凸係数や石英／長石の体積比をもとにして、源岩からの距離を推定することができる。河川の傾斜の大小や曲がり具合が砂粒の堆積環境に大きな影響を与えると考えられるが、このような先行研究はないので、現在取り組んでいる。

キーワード：溶解 石英／長石（体積比） 凹凸係数 FU 源岩

A. 動機と目的

筆者らは昨年度、筑波大学の久田健一郎教授（当時）の砂粒に関する講義を聞く機会に恵まれた。偏光顕微鏡で観察した時の花崗岩や変成岩の美しさに比べて、堆積岩は地味である。しかし、砂粒の大半は地球上に最も多く存在する石英であり、地球上の砂粒の 70%はこの石英からできていること、毎秒 10 億個の砂粒が生まれていること（ウェランド,2011）など、多くの情報をもつ砂粒から、まだ十分な情報を引き出せていないことに強い興味をもった。Lasaga et.al.(1994) は、石英に比べて長石がきわめて早く溶解することを示している（表1）。河川水が酸性であれば、この溶解速度はさらに大きくなるという（シーバー,1995）。角閃石は数千年で消失してしまう。そこで筆者らは、鉱物の外形や石英／長石（体積比）の値から、砂のもとになった源岩からの距離を推定できると仮説を立てて研究をおこなった。

表1 石英と長石の溶解速度の比較（Lasaga, et.al,1994 をもとにまとめたもの／25℃, pH 5 の条件で

石 英		34,000,000年
アルカリ長石	KAISi3O8(マイクロクリン)	921,000年
	NaAlSi3O8(曹長石)	575,000年
斜長石	CaAl2Si28 (灰長石)	112年

1mm の結晶が溶解してしまうまでにかかる時間)

B・C. 研究方法と結果

(1) 揖保川の露頭調査（6月1日～8月10日）

兵庫県南部の河川のほとんどは、さまざまな小河川が合流して瀬戸内海に流れ込む。源岩がどのように砂粒となって運搬、堆積し、その過程でどのように溶解したのかを明らかにするためには、砂粒の源

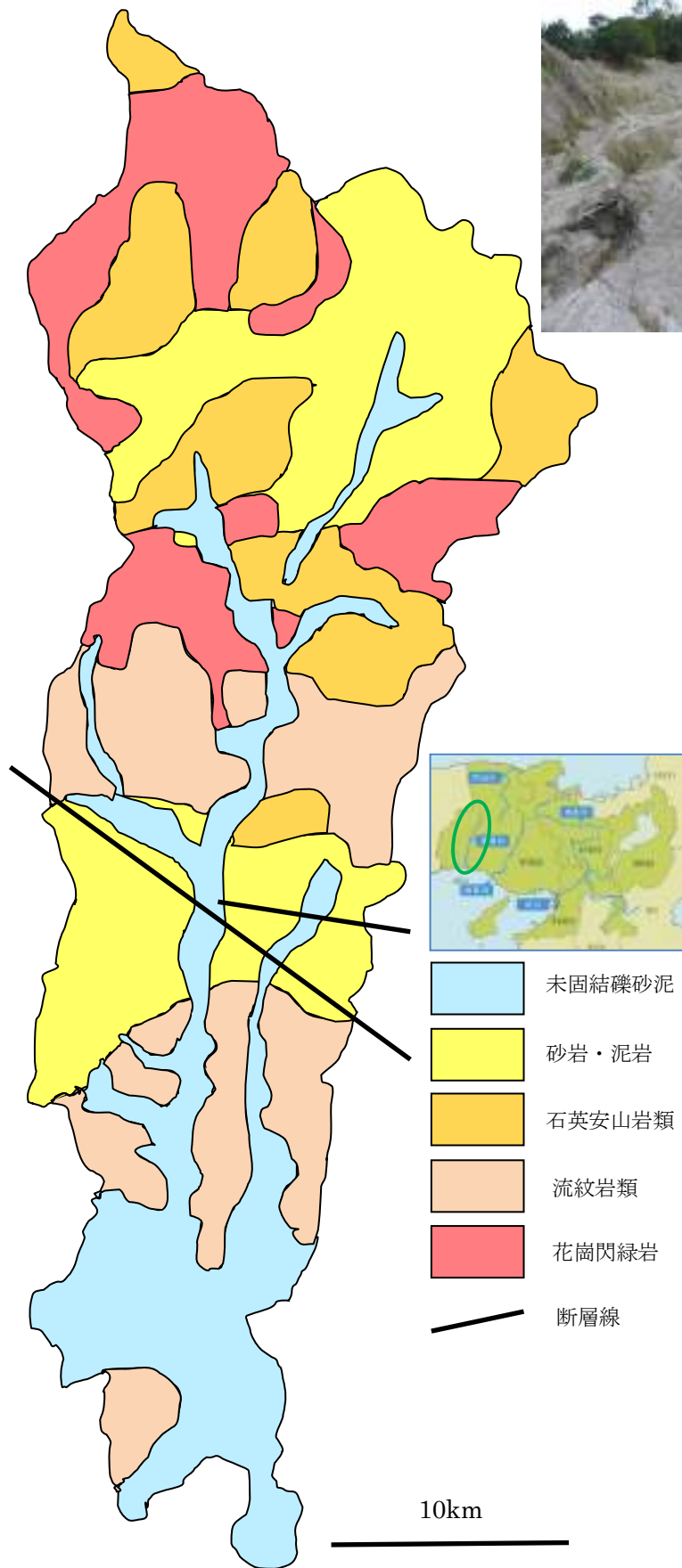


図1 揖保川水系の表層地質図

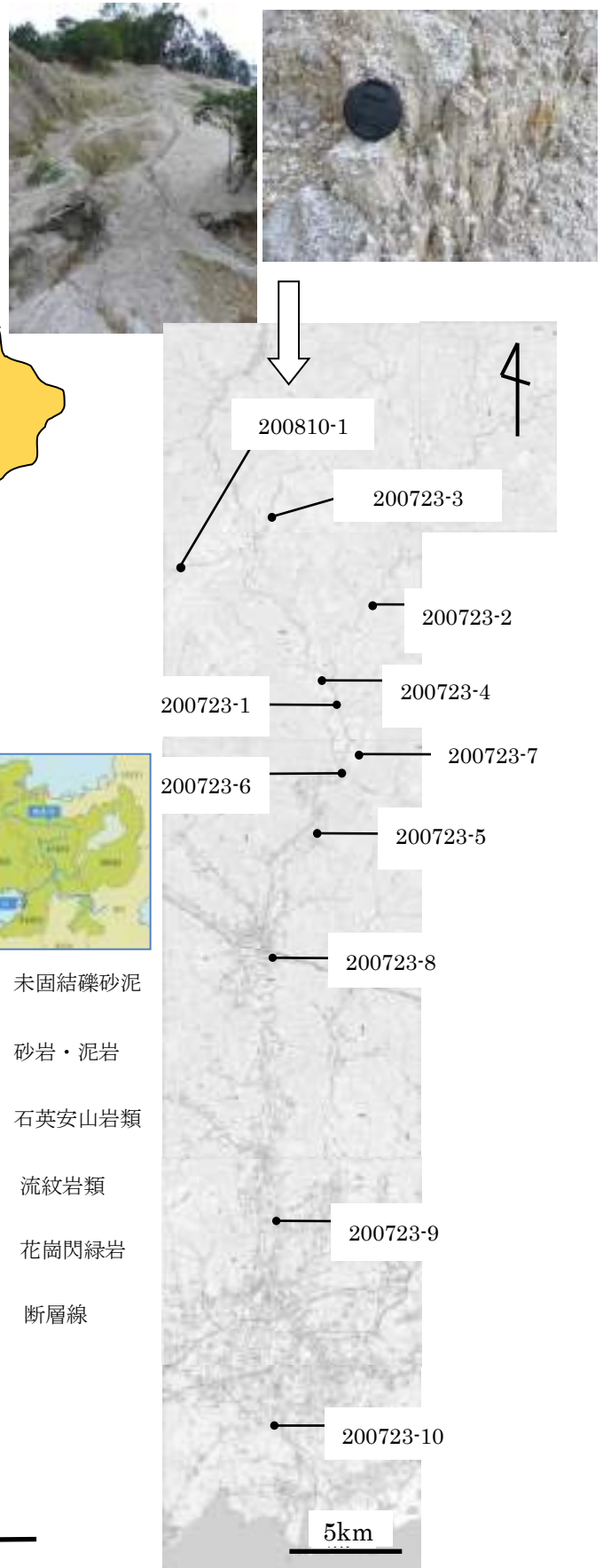


図2 試料採取地点（国土地理院,2014 に加筆）
写真 は 200810-1 地点の真砂土の崩壊地

岩が推定できること、合流する小河川ができる限り少なくして規模が小さく、複数の種類の砂粒ができる限り混じりあわない環境であること、河川が蛇行せず可能な限り直線的に流れていること、河川の傾斜の変化が大きくないこと、などの条件を備えている必要がある。兵庫県南部の河川周辺の露頭調査を広くおこなった結果、条件をほぼ備えている河川として、兵庫県南西部の揖保川を調査地域に選んだ。

揖保川は、兵庫県宍粟市の藤無山（標高 1139m）を源とし、たつの市、太子町と播州平野を流下して姫路市網干区で瀬戸内海の播磨灘に注ぐ、全長 70km の 1 級河川である。上流～中流部には山地が広がっており、一方下流域は平野部である。揖保川に合流する河川は少なく、しかも規模が小さい。筆者らは、揖保川に沿って露頭調査をおこなった。図 1 に表層地質図を、図 2 に試料採取地点を示す。伊保川の上流部や下流部には、流紋岩類～石英安山岩類が広く分布している。これらは、白亜紀～古第三紀の相生層群に区分されているものである（岸田・弘原海,1967、田中・後藤,1984、田中・後藤,1989）。一方、揖保川中流部には花崗閃緑岩が分布しており、露頭近くの鳥ヶ岬トンネル周辺には、花崗閃緑岩の真砂土の崩壊地が広がっている（図 1）。揖保川に堆積している砂粒は沖積層堆積物である（兵庫県,1990）。揖保川を東西方向に山崎断層が横切っている。筆者らは、中流～下流の 5 か所で砂粒を採取したほか、中流部の花崗閃緑岩とその真砂土、中流部～下流部の流紋岩および石英安山岩を採取した。図 3 に伊保川の河床勾配と砂粒の採取地点を示した。河床勾配は、上流部で約 1/100、中流部で約 1/200～1/300、下流部で約 1/350～1/500 である（国土交通省河川局,2007）。

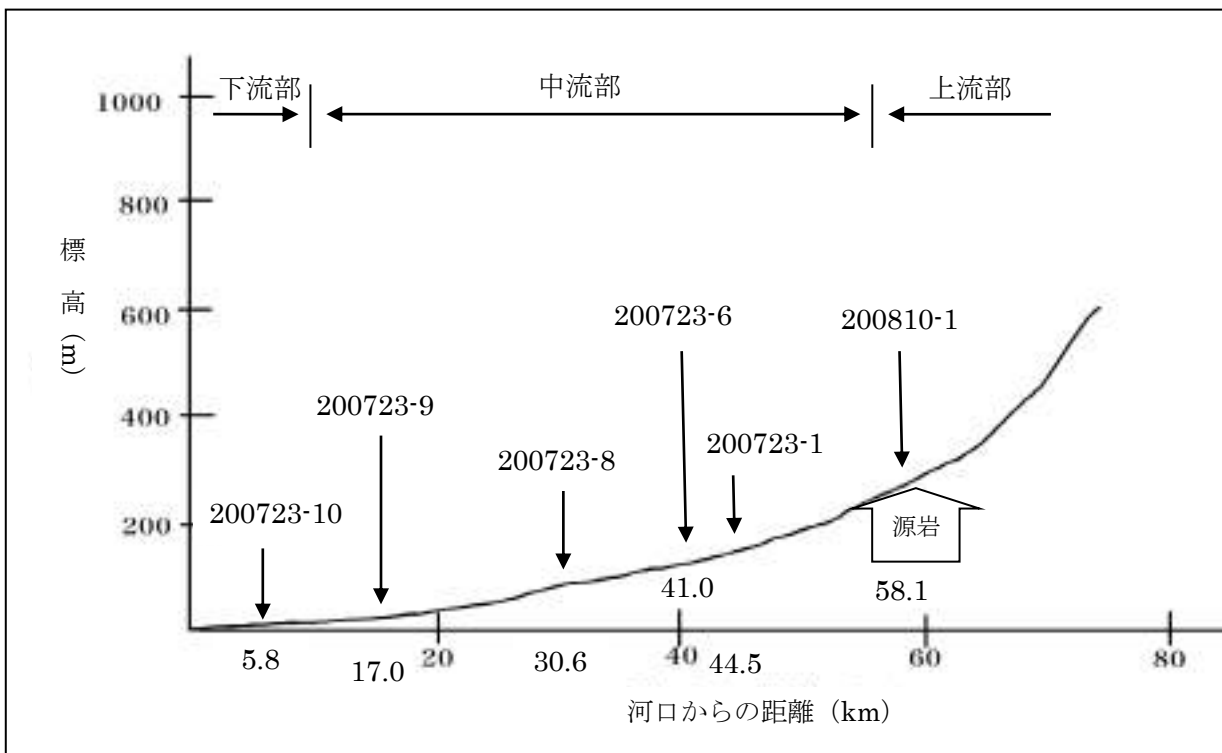


図 3 揖保川の河床勾配と砂粒試料の採取地点（国土交通省河川局,2007 を編集し加筆）

（2）砂粒試料の構成鉱物（7月23日～8月10日）

採取した砂粒を簡単に水道水で洗浄し、少量の水に浸して、実体顕微鏡やルーペを用いて石英と長石を識別して、ピンセットで選別する。細粒砂の場合には、先が細く腰が強い筆を用いて、掃くように同じ鉱物を集め、特徴を記載する。また、源岩の推定のために有色鉱物も同定する。集めた鉱物は、目の粗さの異なるふるいにかけて大きさごとに分け、それぞれの粒数を数える。砂粒は球形をしているわけではないが、吉村・小川（1993）およびシーバー（1995）に基づいて、ふるいの目の上に残った砂粒は球形であると仮定し、それぞれの大きさの石英／長石（体積比）を計算した。石英や長石の多くは単独

の鉱物からなる。平均粒径は、(その粒径 mm) × (その粒径の砂粒の個数) の合計を、その粒径すべての個数で割って求めた。観察結果を図4～図9、表2、表3に示す。石英の砂粒は河口付近まで大きく角張っているが、長石は下流のものほど丸みを帯び、石英/長石の体積比も大きくなる。



図4 試料 200810-1 (左から、採取した真砂の砂粒、集めた石英、集めた長石、含まれる有色鉱物)



図5 試料 200723-1 (左から、採取した砂粒、集めた石英、集めた長石、含まれる有色鉱物)



図6 試料 200723-6 (左から、採取した砂粒、集めた石英、集めた長石、含まれる有色鉱物)



図7 試料 200723-8 (左から、採取した砂粒、集めた石英、集めた長石、含まれる有色鉱物)



図8 試料 200723-9 (左から、採取した砂粒、集めた石英、含まれる長石、含まれる有色鉱物)



図9 試料 200723-10 (左から、採取した砂粒、含まれる石英、集めた長石、含まれる有色鉱物)

表2 砂粒試料の構成鉱物の特徴

試料番号	分類	構成鉱物の特徴
200810-1 (図4)	極粗粒砂	花崗閃緑岩の真砂土。石英や長石は最大 3mm 前後で角張る。有色鉱物は 1~2mm 程度の自形~半自形の角閃石が主でわずかに黒雲母も含まれる。
200723-1 (図5)	極粗粒砂 ~粗粒砂	0.5~1.5mm 前後の砂粒で、角張った石英や長石が目立つ。1mm 以上の長柱状~塊状の有色鉱物 (角閃石) の鉱物片が含まれている。
200723-6 (図6)	極粗粒砂 ~粗粒砂	0.5~1.5mm 前後の砂粒で、角張った石英や長石が目立つ。ときどき 2mm 長の有色鉱物 (角閃石) の破片が見られる。
200723-8 (図7)	中粒砂	0.5mm 以下の砂粒で、1.0~1.5mm の角張った石英や有色鉱物 (角閃石) 片が目立つ。一方長石は 0.5mm 以下の粒状で少ない。
200723-9 (図8)	中粒砂	0.5mm 以下の砂粒で、1.0~1.5mm の角張った石英や有色鉱物 (角閃石) 片が目立つ。一方長石は 0.5mm 以下の粒状で非常に少ない。
200723-10 (図9)	細粒砂	多くは 0.25mm 以下の砂粒で、角張った石英、粒状の長石、有色鉱物 (角閃石) は大きいものでも 0.5mm 以下である。長石はほとんど見られない。石英以外の砂粒は全体として丸みを帯びている。

表3 石英と長石の粒の粒径ごとの個数と合計体積、平均粒径、石英/長石 (体積比)

試料番号 (石英)	ふるいの目の粗さ (粒径) ごとの粒の個数					合計体積 (mm ³)	平均粒径 (mm)	石英/長石 (体積比)
	2.0mm	1.0mm	0.5mm	0.25mm	0.20mm			
200810-1	1	37	60	185	48	29.19	0.38	0.54
200723-1	0	45	401	2887	462	75.32	0.28	0.94
200723-6	0	38	436	1609	709	64.53	0.29	0.99
200723-8	0	4	296	789	218	28.82	0.30	1.26
200723-9	0	3	308	899	218	29.98	0.30	1.61
200723-10	0	0	57	331	244	7.46	0.25	1.78
試料番号 (長石)	ふるいの目の粗さごとの粒の個数					合計体積 (mm ³)	平均粒径 (mm)	
	2.0mm	1.0mm	0.5mm	0.25mm	0.20mm			
200810-1	2	60	159	386	214	54.23	0.34	
200723-1	6	28	387	1409	830	80.09	0.28	
200723-6	4	9	421	1470	976	65.10	0.27	
200723-8	0	8	213	248	636	22.81	0.27	
200723-9	0	2	155	575	662	18.66	0.26	
200723-10	0	0	12	125	571	4.20	0.21	

(3) 砂粒の形状の定量化 (7月23日~8月10日)

砂粒がどの程度角張っていたり丸みを帯びたりしているのかを、客観的に示す必要がある。吉村・小川 (1993) は、砂粒のような粒状体の形状を簡単に定量化する方法として、凹凸係数 FU (coefficient of form unevenness) を示しており、これに基づいて粒子形状を定量化した ([図10](#))。石英および長石の砂粒を顕微鏡下で観察して撮影し、写真に糸を添わせて外周長 ℓ を測定する。さらに、1mm 方眼用紙を用いて断面積 a を求め、 $FU = (4\pi a) / \ell^2$ の計算式で求めた。それぞれの採取地点における砂粒をそれ



[図10](#) 砂粒の FU を求める

ぞれ 10 粒ずつ測定した (表4)。吉村・小川 (1993) は、地点ごとに 10 粒ずつ測定をすれば、誤差 10% 以内でほぼ正確な数値を求めることができるとしている。

表4 砂粒試料の FU

試料番号	状態	鉱物	FU				FU 平均
200810-1	粗粒砂	石英	0.78	0.81	0.74	0.77	0.75
			0.69	0.75	0.78	0.73	
			0.74	0.75			
		長石	0.77	0.74	0.79	0.72	0.75
			0.73	0.76	0.71	0.79	
			0.77	0.74			
200723-1	粗粒砂	石英	0.74	0.78	0.73	0.84	0.75
			0.70	0.71	0.73	0.80	
			0.71	0.72			
		長石	0.79	0.66	0.84	0.83	0.77
			0.77	0.80	0.74	0.78	
			0.75	0.76			
200723-6	粗粒砂	石英	0.81	0.82	0.83	0.76	0.75
			0.70	0.73	0.74	0.70	
			0.72	0.71			
		長石	0.76	0.78	0.88	0.74	0.78
			0.77	0.79	0.76	0.72	
			0.77	0.81			
200723-8	中粒砂	石英	0.68	0.79	0.73	0.77	0.75
			0.76	0.74	0.71	0.76	
			0.75	0.79			
		長石	0.81	0.71	0.84	0.82	0.80
			0.83	0.83	0.78	0.80	
			0.76	0.85			
200723-9	中粒砂	石英	0.60	0.68	0.81	0.73	0.73
			0.78	0.73	0.70	0.81	
			0.69	0.75			
		長石	0.83	0.80	0.83	0.70	0.82
			0.92	0.84	0.80	0.79	
			0.85	0.84			
200723-10	細粒砂	石英	0.68	0.78	0.75	0.76	0.74
			0.63	0.68	0.77	0.79	
			0.74	0.79			
		長石	0.86	0.79	0.75	0.83	0.85
			0.82	0.88	0.89	0.87	
			0.97	0.87			

(4) 岩石試料の構成鉱物 (7月23日～8月10日)

揖保川中流部に分布する花崗閃緑岩と中流～下流域に広く分布する流紋岩と石英安山岩を採取し、薄片を作成して偏光顕微鏡で観察し、構成鉱物を同定した。結果を図11～図15および表5に示す。花崗閃緑岩は最大 10～15mm の長石、石英、角閃石などからなり、岩体南部では真砂化が進んでいる。

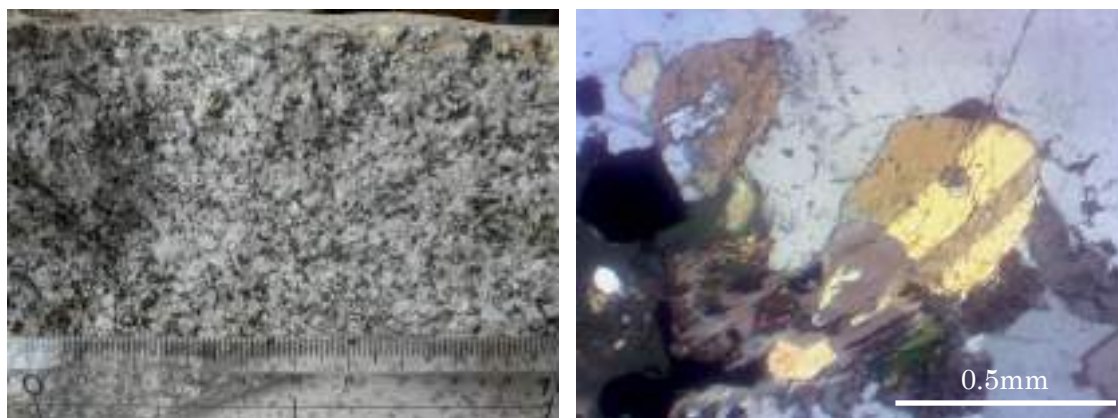


図11 試料 200723-2 (花崗閃緑岩/左:岩石写真/右:クロスニコルによる偏光顕微鏡写真)

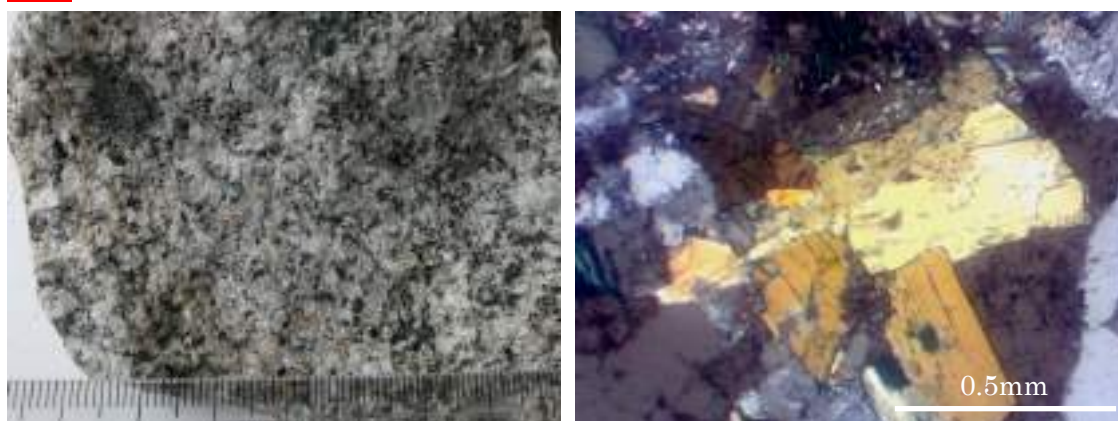


図12 試料 200723-3 (花崗閃緑岩/左:岩石写真/右:クロスニコルによる偏光顕微鏡写真)

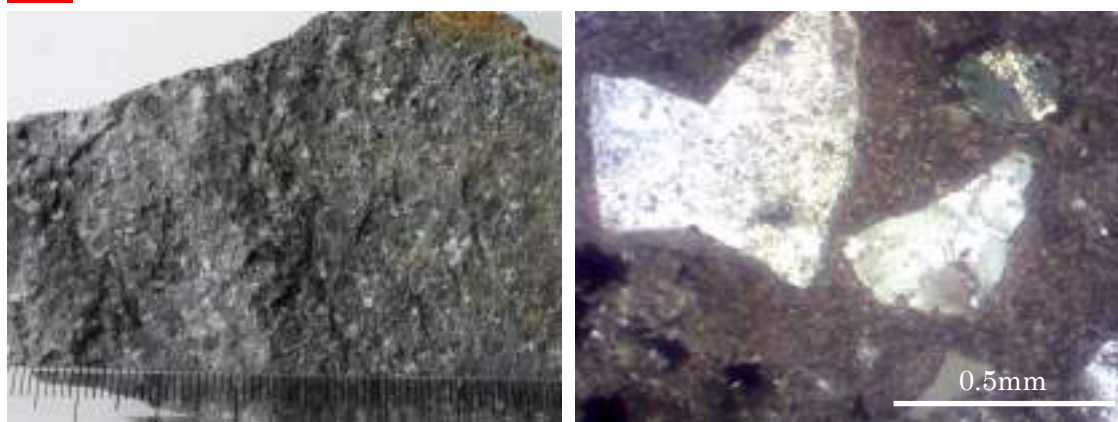


図13 試料 200723-4 (石英安山岩/左:岩石写真/右:クロスニコルによる偏光顕微鏡写真)

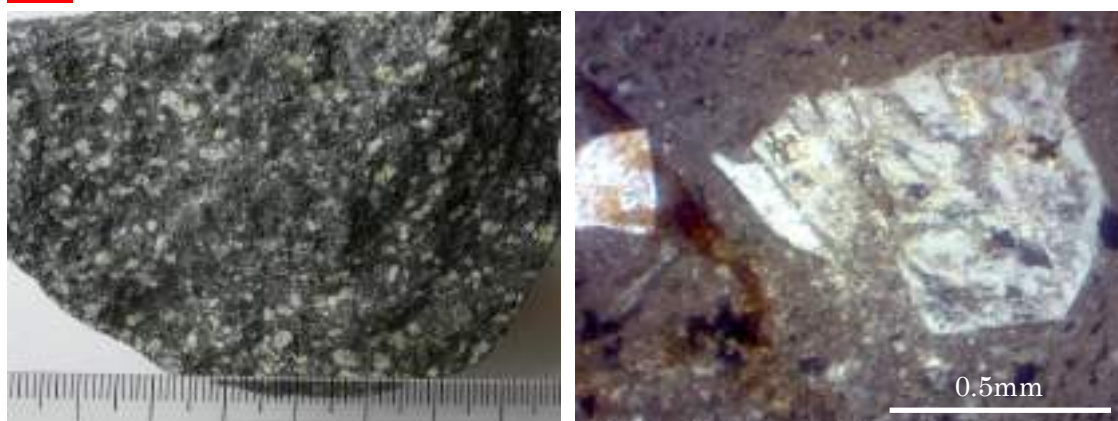


図14 試料 200723-5 (石英安山岩/左:岩石写真/右:クロスニコルによる偏光顕微鏡写真)

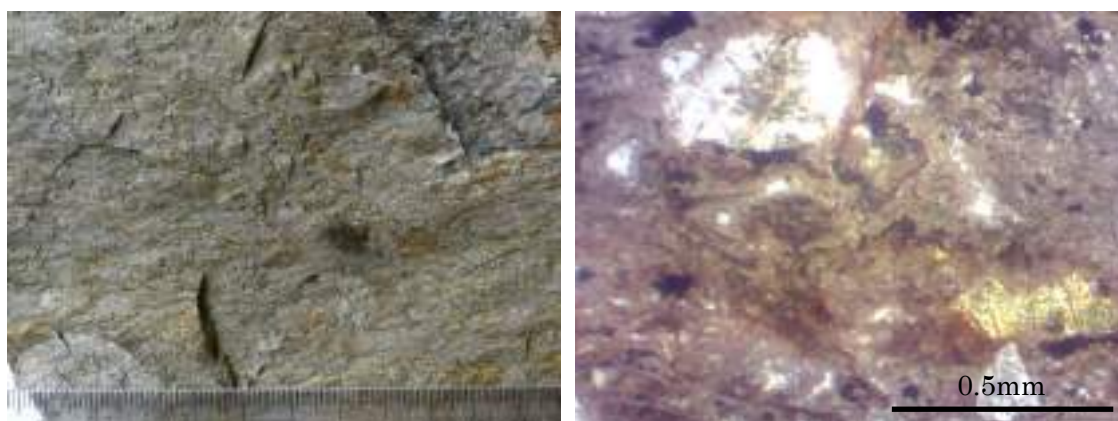


図 15 試料 200723-7 (流紋岩/左：岩石写真/右：クロスニコルによる偏光顕微鏡写真)

表 5 岩石試料の構成鉱物と石英/長石の体積比

試料番号	岩石名	岩石の組織および構成鉱物
200723-2 (図 11)	粗粒～中粒 花崗閃緑岩	風化変質の影響はほとんど見られない。長石や石英は最大 10mm である。カリ長石はややピンク色がかっており、肉眼でも容易に判別がつく。斜長石：カリ長石：石英=5：2：3 である。有色鉱物として長柱状半自形で最大 10mm 長の角閃石が 10%程度含まれる。そのほか、わずかに黒雲母や磁鉄鉱、燐灰石が見られる。
200723-3 (図 12)	粗粒～中粒 花崗閃緑岩	最大 15mm 長の長石や石英が多く見られる。カリ長石はピンク色がかっており、肉眼でも容易に判別がつく。鏡下では変質が進んでおり、汚れているように見える。斜長石：カリ長石：石英=5：2：3 である。有色鉱物として自形の角閃石が 10%程度含まれる。角閃石は最大 15mm 長で、あちこちでプール状に濃集している。そのほか、わずかに黒雲母、磁鉄鉱、燐灰石が見られる。
200723-4 (図 13)	石英安山岩	風化変質の影響はほとんど見られない。弱い流理構造が見られる。灰緑色の基質に、最大 3mm 程度の石英や斜長石の斑晶が見られる。ところどころに 5mm×3mm 程度 (最大 10mm×5mm) の角張った同質岩片を含む。有色鉱物の斑晶は見られない。
200723-5 (図 14)	石英安山岩	弱い風化変質の影響を受け、部分的に褐鉄鉱脈が生じている。灰緑色の基質に 2mm～3mm 程度の自形～半自形の石英や斜長石の斑晶が多くみられる。有色鉱物の斑晶は見られない。
200723-7 (図 15)	流紋岩	やや風化が進んでおり、あちこちに褐鉄鉱脈が見られる。灰紫色で流理構造が顕著である。1mm～2mm の石英や斜長石の斑晶が見られる。有色鉱物 (角閃石) の斑晶もときおり見られる。15mm 程度 (最大 30mm) で不定形やほぼ球状の同質岩片があちこちに含まれている。

D. 考察

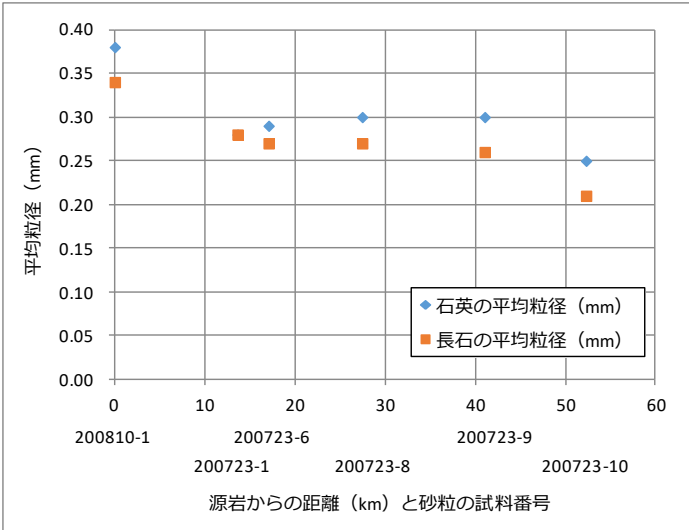
砂粒の運搬と堆積に関する研究は、驚くほど進んでいない。たとえば、ユールストロームの図に基づけば、源岩からの水平距離が同じであっても、河川の傾斜の大小は、砂粒の形成に大きな影響を与えることが予想される。傾斜は石英/長石 (体積比) の値を左右する重要な要素と考えられるが、河川の傾斜と砂粒を作る鉱物の浸食との関係を調べた先行研究はない。さらに、河川の流路が直線的なのか蛇行しているのか、より細かく見れば、河川の流路の曲線の内側なのか外側なのかによっても、堆積する砂粒の性質は異なると考えられるが、そのような先行研究もない。

長石には、斜長石とカリ長石があり、その種類によって溶解の進み具合が異なる。しかし、斜長石は

溶解速度がきわめて速く、染色などをして斜長石とカリ長石を区分してもあまり有意差が見られないとされているため、今回は長石を区分することはしなかった。本研究では、石英／長石（体積比）の値の変化が水平方向の距離を反映する指標になるという仮説を立てて研究を行った。

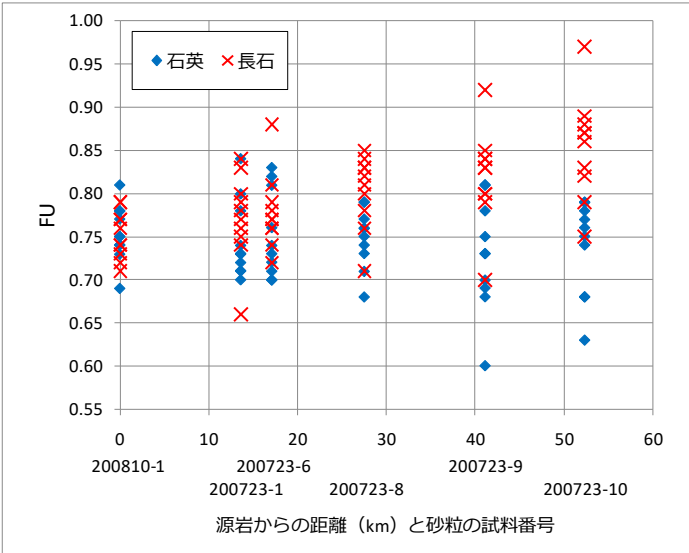
揖保川で観察される砂粒は、沖積層堆積物である（兵庫県,1990）。砂粒を構成する鉱物の多くはケイ酸塩鉱物である。とくに石英と長石は普遍的に含まれている。さらに、採取したすべての砂粒試料には、2.0~0.5mm 程度の有色鉱物（角閃石）が含まれており、砂粒の源岩は等粒状組織を呈する深成岩であると考えられる。砂粒の特徴は、花崗閃緑岩体付近の崩落地に堆積している真砂土の特徴とよく似ていることから、河川に堆積している砂粒は、揖保川中流域に分布している花崗閃緑岩が風化によって真砂土となり、揖保川を流れ下ったものと考えられる。

砂粒の構成鉱物を揖保川下流側に向かってみていくと、石英と長石は、砂粒の平均粒径の変化傾向に大きな違いはみられない（図16）。凹凸係数FUの平均値は、石英が0.73~0.75でほとんど変化しないのに対して、長石は下流に向けて0.75から0.85へと大きくなり、球形に近づくことがわかる（図17）。源岩からの距離xに対して石英／長石の体積比yは、 $y=0.024x+0.58$ の近似直線で示される関係で、下流側に向かって大きくなっていく（図18）。石英は溶解に対して耐性をもっているが、長石は石英に比べて溶解しやすい（Lasaga, et.al,1994）ためであると考えられる。これらは、源岩からの直線距離を、凹凸係数FUや石英／長石の体積比を用いて推定することが可能であることを示している。



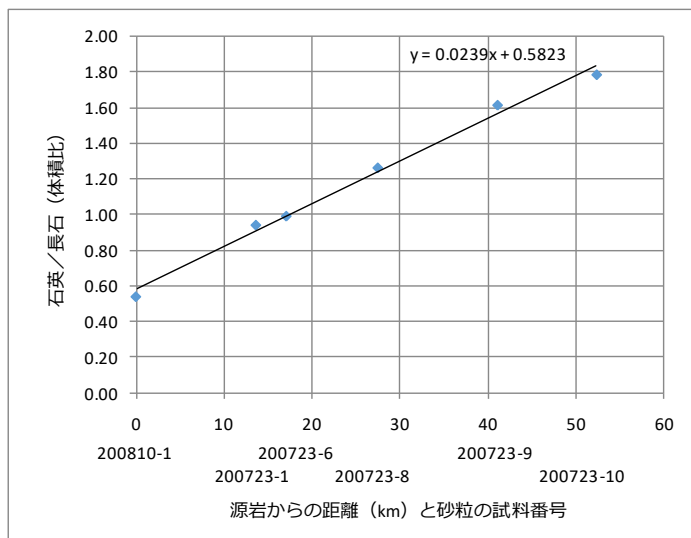
試料番号	石英の平均粒径 (mm)	長石の平均粒径 (mm)
200810-1	0.38	0.34
200723-1	0.28	0.28
200723-6	0.29	0.27
200723-8	0.30	0.27
200723-9	0.30	0.26
200723-10	0.25	0.21

図16 源岩からの距離と砂粒の平均粒径 (石英 10285 粒、長石 9568 粒)



試料番号	石英のFU平均	長石のFU平均
200810-1	0.75	0.75
200723-1	0.75	0.77
200723-6	0.75	0.78
200723-8	0.75	0.80
200723-9	0.73	0.82
200723-10	0.74	0.85

図17 源岩からの距離と石英と長石のFU (各試料 10 粒ずつ合計 120 粒)



試料番号	石英/長石 (体積比)
200810-1	0.54
200723-1	0.94
200723-6	0.99
200723-8	1.26
200723-9	1.61
200723-10	1.78

図 18 源岩からの距離と石英/長石 (体積比) (直線は近似直線)
(石英 10285 粒、長石 9568 粒をもとに計算)

E. 結論

石英の凹凸係数は 0.73~0.75 とほとんど変化しないが、長石は下流側に向かって 0.75 から 0.85 へと大きくなり球形に近づく。また、石英/長石の体積比 y は、源岩からの距離 x と $y=0.024x+0.58$ の関係で下流側に向かって大きくなる。ある程度源岩が推定できる河川であれば、凹凸係数や石英/長石の体積比をもとにして、源岩からの距離を推定することができる。

今後は、揖保川よりも長い河川でも研究をおこなう。また、今回の研究では河川の勾配を考慮しなかったが、揖保川は源岩が分布する中流部から下流に向かって、傾斜が大きく変化しないため、FU や石英/長石 (体積比) に与える影響は大きくなかったと推定される。今後は、河床勾配との関係についても、他の河川と比較して明らかにする必要がある。

F. 謝辞：筑波大学前教授の久田健一郎博士には砂粒研究の基礎をご教示頂いた。また、本校科学部顧問の川勝和哉先生には、データ処理等について有意義な助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

G. 参考文献

兵庫県 (1990) 土地分類基本調査—播州赤穂・姫路・坊勢島・寒霞溪— 5 万分の 1 国土調査 (兵庫県都市住宅部土地政策局企画室)

岸田孝蔵・弘原海清 (1967) 姫路酸性岩類の火山層序—近畿の後期中生代火成岩類の研究—(1) (柴田秀賢教授退官記念論文集, 241-255.)

国土地理院 (2014) 電子地形図 25000 兵庫 (DVD 版)

国土交通省河川局 (2007) 揖保川水系工事実施基本計画と揖保川水系河川整備基本方針 (案) 対比表
(https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouinkai/kihonhouhin/070119/pdf/s4-2.pdf)

Lasaga, A.C., Soler, J.M., Ganor, J., Burch, T.E. and Nagy, K.L. (1994) Chemical weathering rate laws and global geochemical cycles. (Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.58, No.10, 2361-2386.)

シーバー, R. 著/立石雅昭訳 (1995) 砂粒の化学—Scientific American Library 15 (東京化学同人)

田中眞吾・後藤博彌 (1984) 龍野市とその周辺の地質図の説明 (龍野市史, 第 4 巻, 13-116.)

田中眞吾・後藤博彌 (1989) 太子町の地形・地質図の説明 (太子町史第 3 巻, 11-36.)

ウェランド.M. 著/林裕美子訳 (2011) 砂粒—文明と自然 (築地書館)

吉村優治・小川正二 (1993) 砂粒のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法 (土木学会論文集, No.463, III -22, 95-103.)

兵庫県立姫路東高等学校 令和2年度 科学部の活動の記録

兵庫県立姫路東高等学校 科学部

〒670-0012 兵庫県姫路市本町 68 番地の 70

電話 079-285-1166 (代) FAX 079-285-1167

2021 年 3 月 30 日