

研究レポート集 2023

Report

第24号



THE YAKUMO FOUNDATION FOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

公益財団法人 八雲環境科学振興財団

設立の趣旨



今日の環境問題は、従来の公害問題とは異なり、日常的な事業活動や生活活動に起因する部分が非常に多く、また、地球環境問題が示すように空間的・時間的広がりをもつ深刻な問題であります。岡山県は、豊かな自然と温暖な気候に恵まれた風土を背景に、古代吉備文化に代表される古い歴史と多彩な文化を持つ住みよい地域であります。しかし、より便利で快適な暮らしへと進展していく中で、現状の自然環境、社会環境、生活環境などは必ずしもバランスのとれた状態とは言い難く、多くの問題を抱えているものと思われれます。

株式会社エイト日本技術開発（旧株式会社エイトコンサルタント）は、昭和30年に八雲測量社として創業し、今日まで「自然との共生」を基本理念に、地域の社会資本整備の要請に応じて参りました。これまでの足跡を振り返りますと、今日の成果を成し遂げることができたのも、社会全般のご指導とご支援によるものと深く感謝するとともに、これまで以上の社会貢献ができないかと日頃配意しておりました。

このような中で、21世紀に向けた「環境」に関するテーマについて、産官学がより一体となった学術研究面での充実および地球環境保全を視野に入れた国際的な意識の醸成を奨励することが必要であると考えました。そして、環境科学に関する調査研究の推進や創造性豊かな研究者の養成を支援することにより、岡山県における学術および技術開発の進展並びに国際研究交流の増進に貢献していくことを目的として、平成10年7月29日、「財団法人 八雲環境科学振興財団」が設立され、おかげさまで25年目を迎えました。

今後とも当財団の育成につきまして、御協力、御支援を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

公益財団法人 八雲環境科学振興財団
代表理事 小谷 裕 司

目次

1. 巻頭言	1
2. 財団の概要	2
3. 役員等名簿	3
4. 定款	4
5. 令和4年度事業実施状況	17
6. 年度別助成事業実施状況	20
7. 研究発表会実施状況	31
8. 令和3年度環境研究助成報告	36
9. 令和4年度環境研究助成報告	41
10. 令和4年度国際研究交流助成報告	128
11. 令和3年度研究集会助成報告	131
12. 令和4年度研究集会助成報告	133
13. 令和4年度その他の助成報告	136
14. 助成実施要項	146
15. ご寄附のお願い	152

1. 巻頭言

私は、硫黄細菌、鉄細菌と親しくお付き合いできる機会を持てた事を大変感謝している。硫黄細菌は還元型の硫黄化合物を唯一のエネルギー源にして増殖する。一方、鉄細菌は還元型の硫黄化合物と還元型の鉄化合物の両方を利用して増殖できる点で前者と異なっている。今最も研究、利用されている硫黄及び鉄細菌は、系統樹上同じプロテオバクテリア門、アシドチオバシラス属に属す *Acidithiobacillus thiooxidans* と *Acidithiobacillus ferrooxidans* である。両細菌は共に炭酸ガスを固定して増殖するので化学合成独立栄養細菌のグループに分類される。ここでは両細菌のユニークな酵素、硫黄酸化酵素及び鉄酸化酵素の鉱工業への利用について紹介したい。低品位鉱石から銅やニッケル、金などの有用金属を省エネルギー的に溶出させる技術をバイオマイニングと呼んでいる。20 世紀の中頃鉱山廃水から鉄細菌 *A.ferrooxidans* が単離され、黄銅鉱 (CuFeS_2) からの銅の溶出が鉄細菌の存在で飛躍的に増大することが示された。この鉄細菌の微生物機能を銅鉱山の現場に直接応用したのがバイオマイニングである。現在、チリ共和国、南アフリカを含め多数の国でバイオマイニングの大規模プラントが稼働している。チリのアンデス山脈、標高 4,400 m の地点で稼働している世界最大規模のバイオマイニングの現場 Quebrada Blanca 銅鉱山とアタカマ砂漠のなか、標高 2,000 m で操業しているチリ国営銅公社のチュキカマタ銅鉱山を見学する機会を得た。更に、南アフリカの Fairview 金鉱山、オーストラリアの Girilambone 銅鉱山、米国ユタ州の Bingham 銅鉱山を見学する事もできた。Quebrada Blanca 銅鉱山へは、太平洋に面した美しい海岸都市イキケからバスで約 4 時間の行程であった。バイオマイニングにはいくつかのプロセスがある。1) 採掘後破碎した銅鉱石を銅抽出サイトに積み重ねる (サイトは縦 500 m、横 500 m、高さ 10~20 m で鉱山は多数のサイトを持つ)、2) 鉄細菌を含む希硫酸溶液を散布する。鉱石間を流れ落ちる間に Cu^{2+} が溶け出る、3) 全サイトからの Cu^{2+} 抽出液を側溝に導き最後一つにまとめる (Cu^{2+} 集積池)、4) 鉄細菌、 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} を含む Cu^{2+} 集積池の溶液を再度銅抽出サイトに導き、時間をかけて循環再抽出を何回も繰り返す、5) 最終 Cu^{2+} 集積池に多数の巨大電極を挿入し、通電、生成してくる銅板を回収する。鉄細菌の菌株の違いによって銅溶出活性が異なる原因の解明、硫黄酸化酵素や鉄酸化酵素の発現制御の更なる解明など興味あるテーマが残されている。

岡山県の先生方が環境科学に関わる多岐に渡る分野で活発に研究を展開されているのを長年拝見し心より敬意を表します。また、公益財団法人八雲環境科学振興財団の長年に渡る研究者への助成事業は本当にありがたく、素晴らしい事と感謝しております。

評議員 杉尾 剛

(岡山大学名誉教授・杉尾化学合成独立栄養細菌研究所所長)

2. 財団の概要

名 称	公益財団法人 八雲環境科学振興財団
所 在 地	岡山県岡山市北区津島京町三丁目1番21号 (株式会社エイト日本技術開発内)
主務官庁	岡山県教育委員会
設立許可	平成10年7月29日 (平成14年8月26日 特定公益増進法人に認定) (平成24年10月1日 公益財団法人に移行)
出 捐 者	株式会社エイト日本技術開発 他
基本財産	2億7,108万円(令和5年3月末現在)
事業概要	(1) 環境研究助成事業 環境科学に関する研究費用の助成(年間12件程度) ① 特定研究(テーマ指定) 一件当たり150万円以内 ② 一般研究(テーマ自由) 一件当たり 80万円以内 (2) 国際研究交流助成事業 環境科学に関わる海外渡航費用の助成及び海外研究者招聘費用の 助成(年間4件程度) 一件当たり 20万円以内 (3) 研究集会助成事業 環境科学に関する研究集会等の開催費用の助成(年間2件程度) 一件当たり 30万円以内
助成対象	岡山県内の大学等の研究機関に所属する研究者又は研究グループ

3. 役員等名簿

役職名	氏 名	現 職 等
代表理事	小谷 裕司	E・Jホールディングス(株) 代表取締役社長
理 事	河野伊一郎	岡山大学名誉教授
	沖 陽子	岡山県立大学学長
	辻 英明	前岡山県立大学学長
	佐藤 豊信	岡山商科大学大学院経済学研究科教授
	波田 善夫	岡山理科大学名誉教授
	阿部 宏史	環太平洋大学副学長
	伊丹 文雄	元E・Jホールディングス(株) 顧問
監 事	西田 秀史	弁護士
	松原 治郎	税理士
	小谷 浩治	(株)エイト日本技術開発理事
評 議 員	本水 昌二	岡山大学名誉教授
	杉尾 剛	岡山大学名誉教授・杉尾化学合成独立栄養細菌研究所所長
	西垣 誠	岡山大学名誉教授
	鳥越 良光	岡山商科大学名誉教授
	星野 卓二	岡山理科大学名誉教授
	神崎 浩	岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域教授
	岩田 正晴	ロック地域計画事務所 代表
	谷本 俊夫	元E・Jホールディングス(株)取締役
	藤井 勉	(株)エイト日本技術開発顧問
選考委員	稲井 寛	岡山県立大学情報工学部教授
	田村 隆	岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域教授
	佐藤 丈晴	岡山理科大学生物地球学部教授
	藤原 健史	岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域教授
	後藤丹十郎	岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域教授
	永井 泉治	(株)エイト日本技術開発監査役

4. 定款

公益財団法人 八雲環境科学振興財団 定款

第1章 総則

(名称)

第1条 この法人は、公益財団法人八雲環境科学振興財団(英文名:Yakumo Foundation for Environmental Science)と称する。

(事業所)

第2条 この法人は、主たる事務所を岡山県岡山市に置く。

第2章 目的及び事業

(目的)

第3条 この法人は、環境科学に関する調査研究の推進や創造性豊かな研究者の養成を援助・支援することによって、環境科学の振興を図り、もって学術及び技術開発の進展に寄与することを目的とする。

(事業)

第4条 この法人は、前条の目的を達成するため、次の事業を行う。

- (1) 環境科学に関する調査研究の助成及び研究者の養成援助
 - (2) 環境科学に関する国際研究集会等への派遣並びに国際研究交流の助成
 - (3) 環境科学に関する学術講演会、フォーラム、シンポジウム、研究集会等の助成
 - (4) 環境教育活動への支援等による環境科学の啓発
 - (5) 環境科学に関するフォーラム、シンポジウム、セミナー、研究発表会等の開催
 - (6) 出版物の編集および刊行
 - (7) 環境科学に関する技術開発・実用化に向けた研究開発等の企画、資料・情報の収集及び提供、調査・研究及び支援
 - (8) 優秀な環境科学に関する研究者に対する表彰事業
 - (9) その他前条の目的を達成するために必要な事業
- 2 前項の事業については、岡山県において行うものとする。

(事業年度)

第5条 この法人の事業年度は、毎年4月1日に始まり、翌年3月31日に終わる。

第3章 財産及び会計

(財産の種別)

第 6条 この法人の財産は、基本財産及びその他の財産の2種とする。

- 2 基本財産は、この法人の目的である事業を行うために不可欠なものとして理事会及び評議員会で定めた財産とする。
- 3 その他の財産は、基本財産以外の財産とする。

(基本財産の維持及び処分)

第 7条 基本財産については、適正な維持及び管理に努めるものとする。

- 2 この法人の公益目的事業遂行上やむを得ない理由があるときは、理事会の議決に加わることのできる理事の3分の2以上の議決を経て、評議員会において、議決に加わることのできる評議員の3分の2以上の議決により承認を得た後、基本財産の全部若しくは一部を処分又は担保に提供することができる。

(財産の管理・運用)

第 8条 この法人の財産の管理及び運用は、理事長が行うものとし、その方法は理事会で定める。

- 2 財産は、安全確実な方法で運用しなければならない。

(事業計画及び収支予算)

第 9条 この法人の事業計画書、収支予算書、資金調達及び設備投資の見込みを記載した書類については、毎事業年度の開始日の前日までに、理事長が作成し、理事会の決議を経て、評議員会の承認を受けなければならない。これらを変更する場合も同様とする。

- 2 前項の書類については、毎事業年度の開始日の前日までに行政庁に提出し、主たる事務所に、当該事業年度が終了するまでの間備え置き、一般の閲覧に供するものとする。

(事業報告及び決算)

第10条 この法人の事業報告及び決算については、毎事業年度終了後、理事長が次の書類を作成し、監事の監査を受けた上で、理事会の承認を経て、定時評議員会に提出し、第1号及び第2号の書類についてはその内容を報告し、第3号から第6号までの書類については承認を受けなければならない。

- (1) 事業報告書
- (2) 事業報告の附属明細書
- (3) 貸借対照表
- (4) 正味財産増減計算書
- (5) 貸借対照表及び正味財産増減計算書の附属明細書
- (6) 財産目録

- 2 前項の計算書類等については、毎事業年度の終了後3ヶ月以内に行政庁に提出するものとする。

- 3 第1項の書類のほか、次の書類を主たる事務所に5年間備え置き、一般の閲覧に供するとともに、定款を主たる事務所に備え置き、一般の閲覧に供するものとする。

- (1) 監査報告
- (2) 理事及び監事並びに評議員の名簿
- (3) 理事及び監事並びに評議員の報酬等の支給の基準を記載した書類

- (4) 運営組織及び事業活動の状況の概要及びこれらに関する数値のうち重要なものを記載した書類

(公益目的取得財産残額の算定)

第11条 理事長は、公益社団法人及び公益財団法人の認定等に関する法律施行規則第48条の規定に基づき、毎事業年度、当該事業年度の末日における公益目的取得財産残額を算定し、前条第3項第4号の書類に記載するものとする。

(長期借入金及び重要な財産の処分又は譲受け)

第12条 この法人が資金の借入をしようとするときは、その事業年度の収入をもって償還する短期借入金を除き、評議員会においては評議員の総数及び理事会においては理事の総数の3分の2以上の議決を経なければならない。

- 2 この法人が重要な財産の処分又は譲受けを行おうとするときも、前項と同じ議決を経なければならない。

(会計原則)

第13条 この法人の会計は、一般に公正妥当と認められる公益法人の会計の慣行に従うものとする。

第4章 評議員

(定数)

第14条 この法人に、評議員7名以上10名以内を置く。

(評議員の選任及び解任)

第15条 評議員の選任及び解任は、一般社団法人及び一般財団法人に関する法律第179条から第195条の規定に従い、評議員会において行う。

- 2 評議員を選任する場合には、次の各号の要件をいずれも満たさなければならない。

- (1) 各評議員について、次のイからへに該当する評議員の合計数が評議員の総数の3分の1を超えないものであること。
- イ 当該評議員及びその配偶者又はその親族
 - ロ 当該評議員と婚姻の届出をしていないが事実上婚姻関係と同様の事情にある者
 - ハ 当該評議員の使用人
 - ニ ロ又はハに掲げる者以外の者であつて、当該評議員から受ける金銭その他の財産によつて生計を維持しているもの
 - ホ ハ又はニに掲げる者の配偶者
 - ヘ ロからニまでに掲げる者の親族であつて、これらの者と生計を一にするもの
- (2) 他の同一の団体(公益法人を除く。)の次のイからニに該当する評議員の合計数が評議員の総数の3分の1を超えないものであること。
- イ 理事
 - ロ 使用人

ハ 当該他の同一の団体の理事以外の役員(法人でない団体で代表者又は管理人の定めのあるものにあつては、その代表者又は管理人)又は業務を執行する社員である者

ニ 次に掲げる団体においてその職員(国会議員及び地方公共団体の議会の議員を除く。)である者

- ① 国の機関
- ② 地方公共団体
- ③ 独立行政法人通則法第2条第1項に規定する独立行政法人
- ④ 国立大学法人法第2条第1項に規定する国立大学法人又は同条第3項に規定する大学共同利用機関法人
- ⑤ 地方独立行政法人法第2条第1項に規定する地方独立行政法人
- ⑥ 特殊法人(特別の法律により特別の設立行為をもって設立された法人であつて、総務省設置法第4条第15号の規定の適用を受けるものをいう。)又は認可法人(特別の法律により設立され、かつ、その設立に関し行政官庁の認可を要する法人をいう。)

3 評議員は、この法人の理事又は監事若しくは使用人を兼ねることができない。

4 この法人の評議員のうちには、評議員のいずれか1名及びその親族その他特殊の関係がある者の合計数が評議員総数(現在数)の3分の1を超えて含まれることになってはならない。

5 評議員に異動があつたときは、2週間以内に登記し、登記事項証明書等を添え、遅滞なくその旨を行政庁に届け出なければならない。

(権 限)

第16条 評議員は、評議員会を構成し、第20条に規定する事項を決議する。

(任 期)

第17条 評議員の任期は、選任後4年以内に終了する事業年度のうち最終のものに関する定時評議員会の終結の時までとする。ただし、再任を妨げない。

2 任期満了前に退任した評議員の補欠として選任された評議員の任期は、退任した評議員の任期の満了する時までとする。

3 評議員は、第14条に定める定数に足りなくなるときは、任期の満了又は辞任により退任した後も、新たに選任された者が就任するまで、なお評議員としての権利義務を有する。

(報酬等)

第18条 評議員は無報酬とする。

2 評議員には、その職務を行うために要する費用の支払いをすることができる。

第5章 評議員会

(構 成)

第19条 評議員会は、すべての評議員をもって構成する。

(権 限)

第20条 評議員会は、次の事項について決議する。

- (1) 理事及び監事の選任及び解任
 - (2) 理事及び監事の報酬等の額
 - (3) 役員及び評議員に対する報酬等の支給の基準
 - (4) 定款の変更
 - (5) 事業計画及び収支予算の承認
 - (6) 貸借対照表及び正味財産増減計算書類の承認並びにこれらの付属明細書の承認
 - (7) 残余財産の処分
 - (8) 基本財産の処分又は除外の承認
 - (9) その他評議員会で決議するものとして法令又はこの定款で定められた事項
- 2 前項の規定にかかわらず、個々の評議員会においては、第23条第1項の書面に記載した評議員会の目的である事項以外の事項は、決議することができない。

(種類及び開催)

第21条 評議員会は、定時評議員会として毎事業年度終了後3ヶ月以内に1回開催するほか、必要がある場合に開催する。

(招集)

- 第22条 評議員会は、法令に別段の定めがある場合を除き、理事会の決議に基づき理事長が招集する。
- 2 評議員は、理事に対し、評議員会の目的である事項及び招集の理由を示して、評議員会の招集を請求することができる。
 - 3 前項による請求があったときは、理事長は遅滞なく評議員会を招集しなければならない。

(招集の通知)

- 第23条 理事長は、評議員会の開催日の5日前までに、評議員に対して、会議の日時、場所、目的である事項を記載した書面をもって招集の通知を発しなければならない。
- 2 前項にかかわらず、評議員全員の同意があるときは、招集の手続きを経ることなく、評議員会を開催することができる。

(議長)

第24条 評議員会の議長は、その評議員会において、出席した評議員の中から選出する。

(定足数)

第25条 評議員会は、評議員の過半数の出席がなければ開催することができない。

(決議)

- 第26条 評議員会の決議は、法令又はこの定款に別段の定めがある場合を除き、決議について特別の利害関係を有する評議員を除く評議員の過半数が出席し、その過半数をもって行なう。
- 2 前項の規定にかかわらず、次の決議は、決議について特別の利害関係を有する評議員を除く評議員の3分の2以上に当る多数をもって行なわなければならない。
 - (1) 監事の解任
 - (2) 評議員に対する報酬等の支給の基準

- (3) 定款の変更
- (4) 基本財産の処分又は除外の承認
- (5) その他法令で定められた事項

3 理事又は監事を選任する議案を決議するに際しては、各候補者ごとに第1項の決議を行なわなければならない。理事又は監事の候補者の合計数が第30条に定める定数を上回る場合には、過半数の賛成を得た候補者の中から得票数の多い順に定数の枠に達するまでの者を選任することとする。

(決議の省略)

第27条 理事が評議員会の目的である事項について提案した場合において、その提案について、議決に加わることのできる評議員の全員が書面又は電磁的記録により同意の意思表示をしたときは、その提案を可決する旨の評議員会の決議があったものとみなす。

(報告の省略)

第28条 理事が評議員の全員に対し、評議員会に報告すべき事項を通知した場合において、その事項を評議員会に報告することを要しないことについて、評議員の全員が書面又は電磁的記録により同意の意思表示をしたときは、その事項の評議員会への報告があったものとみなす。

(議事録)

第29条 評議員会の議事録については、法令で定めるところにより、議事録を作成する。

- 2 議長とその会議に出席した評議員2人は、前項の議事録に記名押印する。

第6章 役員等

(役員を設置)

第30条 この法人に、次の役員を置く。

- (1) 理事 6名以上9名以内
 - (2) 監事 3名
- 2 理事のうち1名を理事長とし、この者をもって、一般社団法人及び一般財団法人に関する法律上の代表理事とする。

(役員を選任)

第31条 理事及び監事は、評議員会の決議によって選任する。

- 2 理事長は、理事会の決議によって理事の中から選定する。
- 3 監事は、この法人の理事又は使用人を兼ねることができない。
- 4 理事のうち、理事のいずれか1名とその配偶者又はその親族その他法令で定める特別の関係にある者の合計数は、理事総数の3分の1を超えてはならない。監事についても、同様とする。
- 5 他の同一の団体(公益法人を除く)の理事又は使用人である者その他これに準ずる相互に密接な関係にある者として法令で定める者である理事の合計数は、理事の総数の3分の1を超えてはならない。監事についても、同様とする。
- 6 この法人の理事のうちには、理事のいずれか1名及びその親族その他特殊の関係がある者の合

計数が、理事総数(現在数)の3分の1を超えて含まれることとなってはならない。

- 7 この法人の監事には、この法人の理事及び評議員並びにこの法人の使用人が含まれてはならない。また、監事は、相互に親族その他特殊の関係があってはならない。
- 8 理事又は監事に異動があったときは、2週間以内に登記し、登記事項証明書等を添え、遅滞なくその旨を行政庁に届け出るものとする。

(理事の職務及び権限)

第32条 理事は、理事会を構成し、法令及びこの定款で定めるところにより、職務を執行する。

- 2 理事長は、法令及びこの定款で定めるところにより、この法人を代表し、その業務を執行する。
- 3 理事長は、毎事業年度に4ヶ月を超える間隔で2回以上、自己の職務の執行の状況を理事会に報告しなければならない。

(監事の職務及び権限)

第33条 監事は、次に掲げる職務を行う。

- (1) 理事の職務執行を監査し、法令で定めるところにより、監査報告を作成する。
- (2) 監事は、いつでも、理事及び使用人に対して事業の報告を求め、この法人の業務及び財産の状況の調査をすること、並びに各事業年度に係る計算書類及び事業報告書を監査すること。
- (3) 評議員会及び理事会に出席し、必要あると認めるときは意見を述べること。
- (4) 理事が不正の行為をし、若しくはその行為をするおそれがあると認めるとき、又は法令若しくは定款に違反する事実若しくは著しく不当な事実があると認めるときは、これを理事会に報告すること。
- (5) 前号の報告をするために必要があるときは、理事長に理事会の招集を請求すること。但し、その請求があった日から5日以内に、2週間以内の日を理事会とする招集通知が発せられない場合は、直接理事会を招集すること。
- (6) 理事が評議員会に提出しようとする議案、書類その他法令で定めるものを調査し、法令若しくは定款に違反し、又は著しく不当な事項があると認めるときは、その調査の結果を評議員会に報告すること。
- (7) 理事がこの法人の目的の範囲外の行為その他法令若しくは定款に違反する行為をし、又はその行為をするおそれがある場合において、その行為によってこの法人に著しい損害が生ずるおそれがあるときは、その理事に対し、その行為をやめることを請求すること。
- (8) その他監事に認められた法令上の権限を行使すること。

(役員任期)

第34条 理事及び監事の任期は、選任後2年以内に終了する事業年度のうち最終のものに関する定時評議員会の終結の時までとする。ただし、再任を妨げない。

- 2 補欠として選任された理事又は監事の任期は、前任者の任期の満了する時までとする。
- 3 理事又は監事は、第30条に定める定数に足りなくなるときは、辞任又は任期終了後においても、新たに選任された者が就任するまで、なお理事又は監事としての権利義務を有する。

(役員解任)

第35条 理事又は監事が、次のいずれかに該当するときは、評議員会の決議によって解任することができる。ただし、監事を解任する場合は、議決に加わることのできる評議員の3分の2以上の議決に基づいて行わなければならない。

- (1) 職務上の義務に違反し、又は職務を怠ったとき
- (2) 心身の故障のため、職務の執行に支障があり、又はこれに堪えないと認められるとき。

(報酬等)

第36条 役員は無報酬とする。

- 2 役員には、その職務を執行するために要する費用の支払いをすることができる。

(取引の制限)

第37条 理事が次に掲げる取引をしようとする場合は、その取引について重要な事実を開示し、理事会の承認を得なければならない。

- (1) 自己又は第三者のためにする、この法人の事業の部類に属する取引
- (2) 自己又は第三者のためにする、この法人との取引
- (3) この法人がその理事の債務を保証することその他理事以外の者との間におけるこの法人とその理事との利益が相反する取引

- 2 前項の取引をした理事は、その取引の重要な事実を遅滞なく、理事会に報告しなければならない。

(責任の免除)

第38条 この法人は、役員一般の一般社団法人及び一般財団法人に関する法律第198条において準用される第111条第1項の賠償責任について、法令に定める要件に該当する場合には、理事会の決議によって、賠償責任額から法令に定める最低責任限度額を控除して得た額を限度として、免除することができる。

(顧問)

第39条 この法人に、顧問を若干名おくことができる。

- 2 顧問は、学識経験者又はこの法人に功労のあった者のうちから、理事会において選任する。
- 3 顧問の任期は、2年とする。ただし、再任を妨げない。
- 4 顧問は、無報酬とする。ただし、その職務を行うために要する費用の支払いをすることができる。

(顧問の職務)

第40条 顧問は、理事長の諮問に応え、理事長に対し、意見を述べることができる。

第7章 理事会

(構成)

第41条 理事会は、すべての理事をもって構成する。

(権限)

第42条 理事会は、次の職務を行なう。

- (1) 評議員会の日時及び場所並びに目的である事項の決定
 - (2) 規則の制定、変更及び廃止に関する事項
 - (3) 前各号に定めるもののほか、この法人の業務執行の決定
 - (4) 理事の職務の執行の監督
 - (5) 理事長の選任及び解職
- 2 理事会は次に掲げる事項その他の重要な業務執行の決定を、理事に委任することができない。
- (1) 重要な財産の処分及び譲受け
 - (2) 多額の借財
 - (3) 重要な使用人の選任及び解任
 - (4) 第38条の責任の免除

(種類及び開催)

第43条 理事会は、通常理事会及び臨時理事会の2種とする。

- 2 通常理事会は、毎事業年度に4ヶ月を超える間隔で2回以上開催する。
- 3 臨時理事会は、次の各号の一に該当する場合に開催する。
 - (1) 理事長が必要と認めたとき
 - (2) 理事長以外の理事から会議の目的である事項を記載した書面をもって理事長に招集の請求があったとき
 - (3) 前号の請求があった日から5日以内に、その日から2週間以内の日を理事会とする理事会の招集通知が発せられない場合に、その請求をした理事が招集したとき
 - (4) 第33条第5号の規定により、監事から理事長に招集の請求があったとき、又は監事が招集したとき

(招 集)

第44条 理事会は、理事長が招集する。ただし、前条第3項第3号により理事が招集する場合及び前条第3項第4号後段により監事が招集する場合を除く。

- 2 理事長は、前条第3項第2号又は第4号前段に該当する場合は、その請求の日から2週間以内の日を臨時理事会の開催日として招集しなければならない。
- 3 理事会を招集するときは、会議の日時、場所、目的である事項を記載した書面をもって、開催日の5日前までに、役員に通知しなければならない。
- 4 前項の規定にかかわらず、役員の中全員の同意があるときは、招集の手続きを経ることなく理事会を開催することができる。
- 5 理事長に事故があるとき又は理事長が欠けたときは、各理事が理事会を招集する。

(議 長)

第45条 理事会の議長は、理事長がこれに当たる。

(定足数)

第46条 理事会は、理事の過半数以上の出席がなければ会議を開くことができない。

(決議)

第47条 理事会の決議は、決議について特別の利害関係を有する理事を除く理事の過半数が出席し、その過半数をもって行なう。

(決議の省略)

第48条 理事が理事会の決議の目的である事項について提案した場合において、その提案について、議決に加わることのできる理事の全員が書面又は電磁的記録により同意の意思表示をしたときは、その提案を可決する旨の理事会の決議があったものとみなすものとする。ただし、監事が異議を述べたときは、その限りではない。

(報告の省略)

第49条 理事又は監事が理事及び監事の全員に対し、理事会に報告すべき事項を通知したときは、その事項を理事会に報告することを要しない。

2 前項の規定は、第32条第3項の規定による報告には適用しない。

(議事録)

第50条 理事会の議事については、法令で定めるところにより、議事録を作成する。

2 出席した理事長及び監事は、前項の議事録に記名押印する。

第8章 委員会

(委員会)

第51条 この法人の事業を推進するために、理事会はその決議により、委員会を設置することができる。

2 委員会の任務、構成及び運営に関し必要な事項は、理事会の決議により別に定める。

(選考委員会及び委員構成等)

第52条 この法人は、第4条第1項第1号から第3号に定める助成および第8号に定める表彰の対象者を選考するために、選考委員会を置く。

2 選考委員会は、6名以上9名以内の委員をもって組織する。

3 選考委員会の委員は、その3分の2以上が学識経験者でなければならない。

4 前項の委員は、この法人の理事及び評議員以外の者から、理事会で選出し、理事長が委嘱する。

5 選考委員会の議事の運営の細則等は、理事会が決定する。

(選考委員の任期)

第53条 選考委員の任期は、2年とする。ただし、再任を妨げない。

2 補欠又は増員により選任された選考委員の任期は、前任者又は現任者の残任期間とする。

3 選考委員は、その任期満了後でも、後任者が就任するまでは、なおその職務を行う。

(選考委員の解任)

第54条 選考委員が、次のいずれかに該当するときは、理事現在数及び評議員現在数の各々の3分の2

以上の議決により、理事長がこれを解任することができる。

- (1) 職務上の義務違反その他選考委員たるにふさわしくない行為があると認められるとき
 - (2) 心身の故障のため、職務の執行に支障があり、又はこれに堪えないと認められるとき
- 2 前項の場合、当該選考委員にあらかじめ通知するとともに、理事会及び評議員会で議決する前に、当該選考委員に弁明の機会を与えなければならない。
- 3 前項の場合において、やむを得ない理由があるときは、当該選考委員から提出された弁明書をもってこれにかえることができる。なお、弁明書が一定の期限までに提出がなされないときは、第1項に規定する議決のみにて解任することができる。

第9章 定款の変更、合併及び解散等

(定款の変更)

第55条 この定款は、評議員会において、議決に加わることのできる評議員の3分2以上の議決を経て変更することができる。

- 2 前項の規定は、この定款の第3条「目的」、第4条「事業」及び第15条「評議員の選任及び解任」についても適用する。
- 3 公益社団法人及び公益財団法人の認定等に関する法律第11条第1項各号に掲げる事項に係る定款の変更(軽微なものを除く)をしようとするときは、その事項の変更につき、行政庁の認定を受けなければならない。
- 4 前項以外の変更を行った場合は、遅滞なくその旨を行政庁に届け出なければならない。

(解散)

第56条 この法人は、基本財産の滅失によるこの法人の目的である事業の成功の不能その他法令で定められた事由によって解散する。

(公益認定の取消し等に伴う贈与)

第57条 この法人が公益認定の取消しの処分を受けた場合又は合併により法人が消滅する場合(その権利義務を承継する法人が公益法人であるときを除く。)には、評議員会の決議を経て、公益目的取得財産残額に相当する額の財産を、当該公益認定の取消しの日又は当該合併の日から1ヶ月以内に、公益社団法人及び公益財団法人の認定等に関する法律第5条第17号に掲げる法人又は国若しくは地方公共団体に贈与するものとする。

(残余財産の帰属)

第58条 この法人が清算をする場合において有する残余財産は、評議員会の決議を経て、国若しくは地方公共団体又は公益社団法人及び公益財団法人の認定等に関する法律第5条第17号に掲げる法人であって租税特別措置法第40条第1項に規定する公益法人等に該当する法人に贈与するものとする。

第10章 事務局

(事務局及び職員)

第59条 この法人の事務を処理するため、事務局を設置する。

- 2 事務局には、必要の職員を置く。
- 3 重要な職員は、理事長が理事会の承認を得て任免する。
- 4 職員は有給とすることができる。
- 5 事務局の組織及び運営に関し必要な事項は、理事長が理事会の議決を経て、別に定める。

(備え付け帳簿及び書類等)

第60条 この法人の事務所には、常に次に掲げる帳簿及び書類を備えておかななければならない。ただし、他の法令によりこれらに代わる書類及び帳簿を備えたときは、この限りではない。

- (1) 定款
 - (2) 役員、評議員及びその他の職員の名簿、役員の就任承諾書並びに履歴書
 - (3) 認定、許可、許可等及び登記に関する書類
 - (4) 定款に定める機関(理事会及び評議員会)の議事に関する書類
 - (5) 財産目録
 - (6) 役員等の報酬等に関する規定
 - (7) 事業計画書及び収支予算書
 - (8) 事業報告書及び計算書類等
 - (9) 監査報告書
 - (10) 行政庁からの示達文書
 - (11) その他法令で定める帳簿及び書類
- 2 前項各号の帳簿及び書類の閲覧については、法令の定めによる。

第11章 情報公開及び個人情報の保護

(情報公開)

第61条 この法人は、公正で開かれた活動を推進するため、その活動状況、運営内容、財務資料等を積極的に公開するものとする。

(個人情報の保護)

第62条 この法人は、業務上知り得た個人情報の保護に万全を期すものとする。

(公告の方法)

第63条 この法人の公告は、電子公告により行なう。

- 2 事故その他やむを得ない事由により、電子公告をすることができない場合は、官報に掲載する方法による。

第12章 補 則

(株式の権利行使の制限)

第64条 この法人が保有する株式について、その株式の発行会社に対して株主としての権利を行使する場合には、下記の事項を除き、あらかじめ理事会において理事の総数(理事現在数)の3分の2

以上の承認を得なければならない。

- (1) 配当の受領
- (2) 無償新株式の受領
- (3) 株主割当増資への応募
- (4) 株主宛配付書類の受領

(実施細則)

第65条 法令及びこの定款に定めるもののほか、この法人の運営に必要な事項は、理事会の決議により理事長が別に定める。

附 則

- 1 この定款は、一般社団法人及び一般財団法人に関する法律及び公益社団法人及び公益財団法人の認定等に関する法律の施行に伴う関係法律の整備等に関する法律第106条第1項に定める公益法人の設立の登記の日から施行する。
- 2 一般社団法人及び一般財団法人に関する法律及び公益社団法人及び公益財団法人の認定等に関する法律の施行に伴う関係法律の整備等に関する法律第106条第1項に定める特例民法法人の解散の登記と、公益法人の設立の登記を行なったときは、第5条の規定にかかわらず、解散の登記の日の前日を事業年度の末日とし、設立の登記の日を事業年度の開始日とする。
- 3 この法人の最初の理事長は、次に掲げる者とする。
理事長 小谷裕司 とする。
- 4 この法人の最初の評議員は、次に掲げる者とする。
本水 昌二 杉尾 剛 波田 善夫 西垣 誠 阿部 宏史
鳥越 良光 岩田 正晴 谷本 俊夫 藤井 勉
- 5 この定款は、平成29年3月 1日一部改正。
- 6 この定款は、令和 元年6月 5日一部改正。

事業実施状況

5. 令和4年度事業実施状況

令和4年度の助成事業は、環境研究助成、国際研究交流助成、研究集会助成の公募を行い、総額17,318千円の助成を実施した。

当年度における公募の概要は次のとおりである。

募集の目的

当法人は、環境科学に関する調査研究の推進や創造性豊かな研究者の養成を支援することによって、岡山県における学術及び技術開発の進展に寄与することを目的とし、次に掲げる助成事業を行います。

1. 環境研究助成

	一般研究	特定研究
1. 助成対象研究	テーマは設定しません。 自然科学と社会科学の両分野の研究で自然環境の改善（環境科学）に寄与するものとしします。	令和4年度募集テーマ A. 低炭素社会に関する研究 B. 生物多様性に関する研究 C. 防災・減災に関する研究
2. 助成金額と件数	総 額 ・ ・ ・ ・ ・ 400万円程度 1件あたり助成額 ・ ・ 80万円以内 助成件数 ・ ・ ・ ・ ・ 5件程度	総 額 ・ ・ ・ ・ ・ 1200万円程度 1件あたり助成額 ・ ・ 150万円以内 助成件数 ・ ・ ・ ・ ・ 8件程度
3. 助成対象となる期間	令和5年3月31日まで	令和5年3月31日まで

4. 助成対象となる費用

研究に直接必要な経費を助成します。汎用性のある機器（パソコン、ファクシミリ、コピー機、携帯電話、カメラ等）の購入費は助成対象外とします。

5. 助成対象者の義務等

下記の事項について財団所定の「合意書」を締結し、以下の内容を履行していただきます。

- 助成期間終了後3ヶ月以内に研究レポート（1頁2,000字、A4で6頁程度）の提出ただし、特定研究部門助成対象者は指定様式にて提出。
- 令和5年11月頃に開催予定の財団主催の研究報告会（Web開催の可能性有）にて研究成果の発表。
- 財団所定の「報告書（経費使用明細書含む）」の提出。
- 対外的に研究成果を発表する場合には、当財団の援助を受けたことを明示。
- 研究を中止又は延期した場合はその理由書と経費使用明細書の提出及び助成金の精算。

6. 選考基準

- 当財団が助成するにふさわしい研究
- 学術的・社会的要請が高く将来性豊かな研究
- 独創性・先駆性に優れた研究

7. その他

- 特定研究部門助成対象者の中から、最も優れた研究に対し、「八雲賞」を授与します。

II. 国際研究交流助成

1. 助成対象

令和4年6月1日から令和5年5月31日までに出発帰着する下記の派遣又は招聘。

○国内外で開催される環境科学に関する国際研究集会での発表、又は共同研究を目的とした、海外研究者の招聘。

2. 助成金額と件数

○総 額 ・ ・ ・ ・ ・ 40万円程度

○1件当たり助成金 ・ ・ 20万円以内

○助成件数 ・ ・ ・ ・ ・ 2件程度

3. 助成対象となる費用

派遣又は招聘に必要な渡航費及び滞在費並びに研究集会参加費。

4. 助成対象者の義務等

○公開講演会又は研究発表会にて発表をお願いする場合があります。この場合謝金はお支払できません。

○派遣又は招聘完了後1ヶ月以内に財団所定「報告書」の提出。

○渡航又は招聘を中止若しくは延期した場合、その理由書の提出と助成金の精算。

○研究集会等での発表を目的とする場合、研究発表後1ヶ月以内に発表論文と応募者が発表者であることが証明できるものを提出すること。

○参加、開催を証明することのできる開催模様の写真等の提出。

III. 研究集会助成

1. 助成対象

○第1回募集（今回募集）：2件程度

令和4年10月1日から令和6年3月31日までに岡山県内で開催される、環境科学に関する研究集会、学術講演会、シンポジウム等（Web開催可）。

○第2回募集（予定）：1件程度

令和5年2月1日から令和6年3月31日までに岡山県内で開催される、環境科学に関する研究集会、学術講演会、シンポジウム等（Web開催可）。

2. 助成金額と件数

○総 額 ・ ・ ・ ・ ・ 90万円程度

○1件当たり助成金 ・ ・ 30万円以内

○助成件数 ・ ・ ・ ・ ・ 3件程度

3. 助成対象となる費用

研究集会等の開催に要する会場費、印刷費、通信運搬費等の費用。

4. 助成対象者の義務等

○研究集会等の開催が、当財団の助成を受けている旨の明示。

○研究集会等終了後1ヶ月以内に財団所定「報告書」および財団から助成を受けたことを示すもの（ポスター、HP、チラシ等）の提出。

○開催を中止又は延期した場合、その理由書の提出と助成金の精算。

○開催を証明することのできる開催模様の写真等の提出。

応 募 手 続 き

1. 応募資格

- 環境科学との関連性がないものについての助成は認めません。申請書所定欄に環境科学との関連性について記述して下さい。
- 岡山県内の大学等の研究機関に所属する研究者（博士課程(後期)の大学院生を含む）。
- 研究機関の長又は学長若しくは学部長等の推薦を受け、申請書所定欄に記入して下さい。大学院生はそれに加えて、指導教官からの推薦状（様式自由）を添付して下さい。
- 環境研究助成、国際研究交流助成、研究集会助成に重複して応募はできますが、それぞれ1件までとします。また重複して応募された場合でも、助成対象となるのは1人又は1グループにつき最大1件とします。
- 令和3年度に助成対象者となった研究者（共同研究者を含む）は、令和4年度は同一の助成部門（「環境研究助成の特定研究部門」、「環境研究助成の一般研究部門」、「国際研究交流助成部門」、「研究集会助成部門」）に再応募することはできません。
- 国際研究交流助成において、研究集会等での発表を目的とする場合、応募者が発表者であることを要件とします。また、論文採択が予定の段階でも応募できますが、選定された場合の助成金の振込は、採択後とします。申請時において決定している場合は、「論文採択通知」等の写しを申請書に添付して下さい。
- 申請書について、白黒コピーの申請書によって審査いたします。

2. 募集期間と選考手続

	応募締切	最終決定	結果通知
I. 環境研究助成	令和4年 4月22日(金)(必着)	令和4年 6月上旬	申請者及び推薦者に採否、助成金額及び交付期日と方法を通知いたします。
II. 国際研究交流助成			
III. 研究集会助成			

※ 書類に不備があった場合、選定されない場合があります。

3. 申請書類

応募申請書様式は、各大学等の事務室等に配布しています。
 または、当財団のホームページからダウンロードして下さい。
 申請書の様式は変更しないでください。

<http://www.ej-hds.co.jp/zaidan/>

応募申請書類は、下記の財団事務局にご送付下さい。

応募申請書類送付先・問い合わせ先
 〒700-8617 岡山市北区津島京町3丁目1番21号
 (株)エイト日本技術開発内
 公益財団法人 八雲環境科学振興財団 事務局
 TEL:086-252-7670
 FAX:086-252-8918
 Eメール: yakumo@ej-hds.co.jp

6. 年度別助成事業実施状況

平成 10 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
国際研究交流助成事業	7 件	7 件	1,357 千円
合 計	7 件	7 件	1,357 千円

平成 10 年度は、環境研究助成事業は実施いたしませんでした。

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
国際研究交流助成事業	岡山大学	5 件
	岡山県立大学	1 件
	岡山商科大学	1 件

平成 11 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	24 件	11 件	5,886.3 千円
国際研究交流助成事業	13 件	10 件	1,938.2 千円
合 計	37 件	21 件	7,824.5 千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	7 件
	岡山理科大学	2 件
	岡山商科大学	1 件
	津山工業高等専門学校	1 件
国際研究交流助成事業	岡山県工業技術センター	1 件
	岡山大学	5 件
	岡山県立大学	3 件
	岡山理科大学	1 件

平成 12 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	20 件	13 件	6,620 千円
国際研究交流助成事業	9 件	8 件	1,517 千円
合 計	29 件	21 件	8,137 千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	5 件
	岡山理科大学	4 件
	岡山商科大学	1 件
	川崎医科大学	1 件
	津山工業高等専門学校	2 件
国際研究交流助成事業	岡山県工業技術センター	1 件
	岡山大学	7 件

平成 13 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	14件	12件	6,370千円
国際研究交流助成事業	16件	12件	2,350千円
合計	30件	24件	8,720千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	7件
	岡山県立大学	1件
	川崎医科大学	1件
	倉敷芸術科学大学	2件
	津山工業高等専門学校	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	7件
	岡山県立大学	2件
	岡山理科大学	1件
	津山工業高等専門学校	1件
	財団法人淳風会	1件

平成 14 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	27件	12件	7,200千円
国際研究交流助成事業	10件	7件	1,400千円
研究集会助成事業	2件	1件	300千円
合計	39件	20件	8,900千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	7件
	岡山理科大学	3件
	岡山商科大学	1件
	川崎医科大学	1件
国際研究交流助成事業	岡山県工業技術センター	1件
	岡山大学	4件
	岡山理科大学	1件
	津山工業高等専門学校	1件
研究集会助成事業	岡山大学	1件

平成 15 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	28件	13件	6,900千円
国際研究交流助成事業	9件	3件	600千円
研究集会助成事業	2件	2件	600千円
合計	39件	18件	8,100千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	5件
	岡山理科大学	3件
	岡山県立大学	1件
	倉敷技術科学大学	2件
	吉備国際大学	1件
	津山工業高等専門学校	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	3件
研究集会助成事業	岡山大学	2件

平成 16 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	42件	12件	6,800千円
国際研究交流助成事業	12件	4件	800千円
研究集会助成事業	4件	4件	1,200千円
合計	58件	20件	8,800千円

※ 研究集会助成事業は平成 17 年度開催 採択 2 件を含む。

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	7件
	岡山理科大学	2件
	岡山商科大学	1件
	美作大学	1件
	就実大学	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	2件
	岡山県立大学	1件
	岡山県工業技術センター	1件
研究集会助成事業	岡山大学	3件
	岡山理科大学	1件

平成 17 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	34件	13件	6,860千円
国際研究交流助成事業	10件	5件	1,000千円
研究集会助成事業	1件	1件	300千円
合計	45件	19件	8,160千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	8件
	岡山理科大学	3件
	岡山商科大学	1件
	美作大学	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	1件
	岡山理科大学	1件
	岡山県立大学	1件
	岡山県工業技術センター	1件
	津山工業高等専門学校	1件
研究集会助成事業	川崎医科大学	1件

平成18年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	37件	14件	8,250千円
国際研究交流助成事業	8件	4件	760千円
研究集会助成事業	1件	1件	300千円
合計	46件	19件	9,310千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	9件
	岡山理科大学	2件
	岡山県立大学	1件
	吉備国際大学	1件
	津山工業高等専門学校	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	3件
	岡山商科大学	1件
研究集会助成事業	岡山大学	1件

平成19年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	25件	14件	7,250千円
国際研究交流助成事業	3件	2件	400千円
研究集会助成事業	1件	1件	300千円
合計	29件	17件	7,950千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	9件
	岡山理科大学	3件
	吉備国際大学	2件
国際研究交流助成事業	岡山大学	2件
研究集会助成事業	岡山大学	1件

平成 20 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	34件	13件	7,290千円
国際研究交流助成事業	9件	4件	800千円
研究集会助成事業	1件	1件	300千円
合計	44件	18件	8,390千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	7件
	岡山理科大学	3件
	岡山県立大学	1件
	吉備国際大学	1件
	倉敷芸術科学大学	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	3件
	岡山理科大学	1件
研究集会助成事業	川崎医科大学	1件

平成 21 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	26件	13件	7,090千円
国際研究交流助成事業	6件	2件	400千円
研究集会助成事業	1件	1件	150千円
合計	33件	16件	7,640千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	5件
	岡山理科大学	2件
	岡山県立大学	1件
	吉備国際大学	2件
	津山工業高等専門学校	2件
	くらしき作陽大学	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	1件
	岡山県工業技術センター	1件
研究集会助成事業	岡山理科大学	1件

平成 22 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	39件	12件	7,360千円
国際研究交流助成事業	3件	3件	600千円
研究集会助成事業	3件	2件	530千円
合計	45件	17件	8,490千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	9件
	岡山商科大学	1件
	津山工業高等専門学校	1件
	川崎医療福祉大学	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	3件
研究集会助成事業	岡山大学	1件
	岡山理科大学	1件

平成 23 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	29件	11件	6,890千円
国際研究交流助成事業	7件	5件	1,400千円
研究集会助成事業	2件	2件	600千円
合計	38件	18件	8,890千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	5件
	岡山理科大学	1件
	岡山県立大学	1件
	津山工業高等専門学校	2件
	就実大学	1件
	岡山農林水産総合センター 生物科学研究所	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	3件
	岡山理科大学	2件
研究集会助成事業	岡山大学	1件
	川崎医科大学	1件

平成 24 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	28件	12件	6,917千円
国際研究交流助成事業	5件	4件	744千円
研究集会助成事業	2件	2件	600千円
合計	35件	18件	8,261千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	5件
	岡山理科大学	2件
	岡山県立大学	1件
	津山工業高等専門学校	2件
	倉敷芸術科学大学	1件
	岡山農林水産総合センター 生物科学研究所	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	3件
	岡山県工業技術センター	1件
研究集会助成事業	岡山理科大学	2件

平成 25 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	19件	10件	4,738千円
国際研究交流助成事業	2件	2件	400千円
研究集会助成事業	2件	3件	800千円
合計	23件	15件	5,938千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	4件
	岡山理科大学	4件
	山陽学園大学	1件
	倉敷芸術科学大学	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	2件
研究集会助成事業	岡山大学	1件
	就実大学	1件
	岡山理科大学	1件

平成 26 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	20件	10件	5,446千円
国際研究交流助成事業	5件	4件	775千円
研究集会助成事業	4件	3件	900千円
合計	29件	17件	7,121千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	6件
	岡山理科大学	2件
	津山工業高等専門学校	1件
	就実大学	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	2件
	岡山理科大学	1件
	岡山県立大学	1件
研究集会助成事業	岡山大学	3件

平成 27 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	28件	14件	8,323千円
国際研究交流助成事業	2件	2件	400千円
研究集会助成事業	1件	1件	300千円
合計	31件	17件	9,023千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	11件
	岡山理科大学	1件
	岡山県農林水産総合センター	1件
	就実大学	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	2件
研究集会助成事業	岡山大学	1件

平成 28 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	33件	14件	9,689千円
研究集会助成事業	6件	5件	1,500千円
合計	39件	19件	11,189千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	10件
	岡山理科大学	2件
	岡山県農林水産総合センター	1件
	倉敷芸術大学	1件
研究集会助成事業	岡山大学	4件
	岡山理科大学	1件

平成 29 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	35件	12件	8,924千円
国際研究交流助成事業	6件	5件	986千円
研究集会助成事業	4件	3件	900千円
合計	45件	20件	10,810千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	8件
	岡山理科大学	1件
	岡山県農林水産総合センター	1件
	岡山県立大学	1件
	津山工業高等専門学校	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	4件
	岡山理科大学	1件
研究集会助成事業	岡山大学	1件
	岡山理科大学	1件
	岡山県立医大学	1件

平成 30 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	42件	9件	6,474千円
国際研究交流助成事業	2件	2件	400千円
研究集会助成事業	2件	2件	600千円
合計	46件	13件	7,474千円

○所属機関別助成実績

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	8件
	岡山理科大学	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	2件
研究集会助成事業	岡山大学	1件
	就実大学	1件

令和元年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	28件	15件	10,297千円
国際研究交流助成事業	4件	3件	566千円
研究集会助成事業	1件	1件	300千円
合計	33件	19件	11,164千円

○所属機関別助成実

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	8件
	岡山理科大学	3件
	倉敷市立短期大学	1件
	岡山県農林水産総合センター	1件
	就実大学	1件
	川崎医療福祉大学	1件
国際研究交流助成事業	岡山大学	3件
研究集会助成事業	岡山大学	1件

令和2年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	21件	14件	10,377千円
国際研究交流助成事業	1件	0件	0千円
研究集会助成事業	5件	5件	1,300千円
合計	27件	19件	11,677千円

○所属機関別助成実

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	13件
	岡山県立大学	1件
研究集会助成事業	岡山大学	3件
	川崎医科大学	1件
	岡山理科大学	1件

令和3年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	33件	18件	13,336千円
国際研究交流助成事業	0件	0件	0千円
研究集会助成事業	3件	3件	900千円
合計	36件	21件	14,236千円

○所属機関別助成実

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	13件
	岡山理科大学	4件
	倉敷芸術科学大学	1件
研究集会助成事業	岡山大学	2件
	統合物性モデル技術研究組合	1件

令和 4 年度

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	38 件	15 件	16,018 千円
国際研究交流助成事業	3 件	2 件	400 千円
研究集会助成事業	3 件	3 件	900 千円
合 計	45 件	20 件	17,318 千円

○所属機関別助成実

	所属機関	助成件数
環境研究助成事業	岡山大学	10 件
	岡山理科大学	3 件
	統合物性モデル技術研究組合	1 件
国際研究交流助成事業	岡山大学	2 件
研究集会助成事業	岡山大学	3 件

累計 (平成 10 年度～令和 4 年度)

	応募件数	助成件数	助成金額
環境研究助成事業	671 件	306 件	191,308 千円
国際研究交流助成事業	151 件	100 件	19,993 千円
研究集会助成事業	42 件	47 件	13,580 千円
合 計	864 件	453 件	224,881 千円

7. 研究発表会実施状況

平成12年度

開催日時	平成12年9月29日(金) 13時～
場 所	岡山口イダルホテル
発表者数	8名
協 賛	株式会社エイトコンサルタント
出席者	約50名

平成13年度

開催日時	平成13年11月6日(火) 13時～
場 所	岡山口イダルホテル
発表者数	10名
協 賛	岡山県教育委員会 株式会社エイトコンサルタント
出席者	約60名

平成14年度

開催日時	平成14年11月8日(金) 13時～
場 所	リーセントカルチャーホテル
発表者数	12名
協 賛	岡山県教育委員会 株式会社エイトコンサルタント 岡山グリーンライオンズクラブ
出席者	約60名

平成15年度

開催日時	平成15年11月6日(木) 13時～
場 所	リーセントカルチャーホテル
発表者数	12名
協 賛	岡山県教育委員会 株式会社エイトコンサルタント 岡山グリーンライオンズクラブ
出席者	約60名

平成16年度

開催日時	平成16年11月4日(木) 13時～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	13名
協 賛	岡山県教育委員会 株式会社エイトコンサルタント 岡山グリーンライオンズクラブ
出席者	約50名

平成 17 年度

開催日時	平成17年10月26日(水) 13時～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	12名
協 賛	岡山県教育委員会 株式会社エイトコンサルタント 岡山グリーンライオンズクラブ
出席者	約80名

平成 18 年度

開催日時	平成18年11月1日(水) 12時30分～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	14名
協 賛	岡山県教育委員会 株式会社エイトコンサルタント 岡山グリーンライオンズクラブ 岡山旭ライオンズクラブ 岡山吉備ライオンズクラブ 岡山ブルーライオンズクラブ
出席者	約100名

平成 19 年度

開催日時	平成19年11月12日(月) 12時30分～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	14名
協 賛	岡山県教育委員会 株式会社エイトコンサルタント 岡山グリーンライオンズクラブ
出席者	約80名

平成 20 年度

開催日時	平成20年11月4日(火) 13時～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	12名
協 賛	岡山県教育委員会 株式会社エイトコンサルタント 岡山グリーンライオンズクラブ
出席者	約50名

平成 21 年度

開催日時	平成21年10月30日(金) 12時50分～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	13名
協 賛	岡山県教育委員会 株式会社エイト日本技術開発 岡山グリーンライオンズクラブ
出席者	約50名

平成 22 年度

開催日時	平成22年11月1日(月) 12時50分～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	13名
協 賛	岡山県教育委員会 株式会社エイト日本技術開発 岡山グリーンライオンズクラブ
出席者	約50名

平成 23 年度

開催日時	平成23年10月25日(火) 13時～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	12名
協 賛	岡山県教育委員会 株式会社エイト日本技術開発 岡山グリーンライオンズクラブ
出席者	約50名

平成 24 年度

開催日時	平成24年10月5日(金) 13時～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	12名
協 賛	株式会社エイト日本技術開発 岡山グリーンライオンズクラブ
出席者	約60名

平成 25 年度

開催日時	平成25年11月14日(木) 13時～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	12名
協 賛	株式会社エイト日本技術開発 岡山グリーンライオンズクラブ
出席者	約60名

平成 26 年度

開催日時	平成 26 年 10 月 28 日 (火) 13 時～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	11 名
協 賛	株式会社エイト日本技術開発 岡山グリーンライオンズクラブ
出席者	約 60 名

平成 27 年度

開催日時	平成 27 年 11 月 2 日 (月) 13 時～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	10 名
協 賛	株式会社エイト日本技術開発 岡山グリーンライオンズクラブ

平成 28 年度

開催日時	平成 28 年 10 月 31 日 (月) 10 時 30 分～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	15 名
協 賛	株式会社エイト日本技術開発 岡山グリーンライオンズクラブ

平成 29 年度

開催日時	平成 29 年 11 月 1 日 (水) 10 時 30 分～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	14 名
協 賛	株式会社エイト日本技術開発 岡山グリーンライオンズクラブ

平成 30 年度

開催日時	平成 30 年 11 月 1 日 (木) 12 時 30 分～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	13 名
協 賛	株式会社エイト日本技術開発

令和元年度

開催日時	令和元年 11 月 5 日 (火) 13 時～
場 所	岡山大学創立五十周年記念館
発表者数	10 名
協 賛	株式会社エイト日本技術開発

令和3年度

開催日時	令和3年11月5日(金) 13時～
場 所	リーセントカルチャーホテル
発表者数	14名
協 賛	E・Jホールディングス株式会社他

令和4年度

開催日時	令和4年11月2日(水) 12時50分～
場 所	リーセントカルチャーホテル
発表者数	17名
協 賛	E・Jホールディングス株式会社他

令和5年度(予定)

開催日時	令和5年11月7日(火) 12時50分～
場 所	リーセントカルチャーホテル
発表者数	16名
協 賛	E・Jホールディングス株式会社他

令和 3 年度 環境研究助成報告

8. 令和3年度 環境研究助成報告

① 特定研究

助成対象者	所 属	研究テーマ	ページ
御輿真穂	岡山大学学術研究院 自然科学学域	川と海のつながりを環境 DNA によって評価する：ニホンウナギをシンボル種として	37

※所属は採択時

川と海のつながりを環境 DNA によって評価する：

ニホンウナギをシンボル種として

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域
東京大学大気海洋研究所

御輿 真穂
脇谷 量子郎

1. はじめに

生物多様性の保全は世界的に喫緊の課題であるが、淡水における生態系は、森林や海洋に比べて生物多様性が乏しいことが知られている。岡山県の河川は全国でも有数の淡水魚種数を誇っており、アユ、アマゴ、ハゼ科魚類、モクズガニ、テナガエビといった、海と川を行き来して一生を過ごす「通し回遊魚」が数多く生息していた。しかし、児島湾の干拓と水田開発に伴って用水路が設置されたことや、ダムや堰などの河川横断工作物が設置されたことにより、これらの回遊魚の生息域が縮小している。そこで本研究では、(1)河川～農業用水路および沿岸域における生態系を評価すること、および(2)川と海のつながりが残されている水域を今後も保全することを目的とした。

近年、その個体数が激減し、環境省や IUCN (国際自然保護連合) より絶滅危惧種の指定を受けたニホンウナギもまた、海と川を行き来する通し回遊魚である。本種は沿岸域から河川、農業用水路に至るまで、幅広い環境を生息域として利用するため、川と海のつながりを評価するための指標種として適していることに加え、河川生態系の上位捕食者であることから、その水域の生態系の健全性を評価する指標となる。また、ニホンウナギは食材として全国的に人気があるだけでなく、岡山県で採用されている小学 4 年生の国語の教科書にも登場するなど、市民からも強い注目を集めている。このため本研究では、河川と沿岸域とのつながりを保全・回復させていくためのシンボル種としてニホンウナギを取り上げた。

1.1 本研究の目的

(1) 河川～農業用水路および沿岸域における生態系の評価

岡山県には吉井川、旭川、高梁川と 3 本の一級河川が流れ、瀬戸内海に面した平野部には全国でも有数の密度で用水路が存在している。我々はこれまでに、河川における横断工作物の設置が回遊魚の多様性に与える影響を調査してきたが、本研

究ではより複雑な河川本流との接続性を示す用水路や野池において、ニホンウナギの生息実態を調べることにより、これらの水域環境の生態学的な意義を把握することを目的とした。指標種としてニホンウナギを用い、環境 DNA 解析によって評価することで、実際に個体を採捕する調査方法では困難であった、複雑な構造の用水路や水深の深い野池といったエリアでの調査が可能となった。これにより人工の水路や野池と川とのつながりの現状を把握する。

(2) 川と海のつながりが確保されている水域を保全する人材の育成

川と海のつながりは、沿岸域から上流域まで、水系全体を俯瞰する必要がある。このため、ある水域の川と海のつながりを保全するには、その水系全体の環境保全に関心を持つ地域住民を育成することが重要である。申請者らは、2012 年より行ってきた市民参加型調査「旭川うなぎ探検隊」を基礎に、将来の地域の環境保全を担う次世代の市民を育成するシステムを開発してきた。本研究ではこのシステムをさらに発展させ、未来の環境学習リーダーとなる大学生を育成することを目指す。

2. 材料と方法



図 1 本研究での調査エリア

(1) 河川～農業用水路および沿岸域における生態系の評価

複数の地点で採集した環境水から環境 DNA を抽出し、ニホンウナギ DNA が検出されるかどうかを調べた。採水地点は、吉井川支流の千町川水系（図 1A）の 17 地点、野池（図 1B）3 地点、および瀬戸内海に接続する牛窓周辺（図 1C）の 15 地点である。採水は 20 年 2 月、3 月、5 月の計 3 回行った。環境 DNA 学会の公開しているマニュアル（文献 1）に沿って各サンプルから DNA を抽出し、リアルタイム PCR 法または RT-PCR 法によって検出を試みた。検出に用いたプライマーは Itakura ら（文献 2）と同じ配列のものを使用した。

(2) 川と海のつながりが確保されている水域を保全する人材の育成

2012 年度より実施している「旭川うなぎ探検隊」は、百間川との分岐部分に位置する旭川の明星堰において行っている、ニホンウナギに代表される回遊魚に着目した定点魚類相モニタリングである。岡山大学を中心とした大学生ボランティアが、子どもたちと少人数のチームを組むことで、魚取りや川遊び、回遊魚の解説を通じて、地域の河川環境、特に川と海のつながりに興味を持つ次世代として育成されることを目標としてきた。大学生ボランティアの参加は、細やかな安全対策と環境学習指導を可能にするだけでなく、活動を通じてボランティア自身が成長できるところに大きな意味がある。2020 年度、2021 年度は新型コロナウイルス感染拡大防止のために実施を見送ったが、2022 年度は岡山大学理学部の夏期集中講義として、大学生ボランティアの学びに着目し、彼らを未来の環境学習リーダーと位置づけ、旭川うなぎ探検隊を材料に、市民参加型調査の意義と方法、水生生物のフィールド調査、グループ学習のファシリテーションについて学習を行った。このイベントは、旭川南部漁業協同組合連合会、岡山県環境保全事業団環境学習センターアスエコ、岡山県自然保護センター、岡山県内水面漁業協同組合連合会、岡山大学理学部附属臨海実験所、岡山の自然を守る会、岡山理科大学理学部齋藤研究室、中央大学研究開発機構ウナギ保全研究ユニットから組織する、旭川うなぎ探検隊実行委員会によって運営された。また、国土交通省中国地方整備局岡山河川事務所の後援により、テントや調査機材の貸与を受けた。

3. 結果と考察

(1) 河川～農業用水路および沿岸域における生態



図 2 エリア A（千町川水系）での調査地点
ニホンウナギ DNA が検出された地点を●、▲で示す。○は 3 月、△は 5 月の調査を表す。

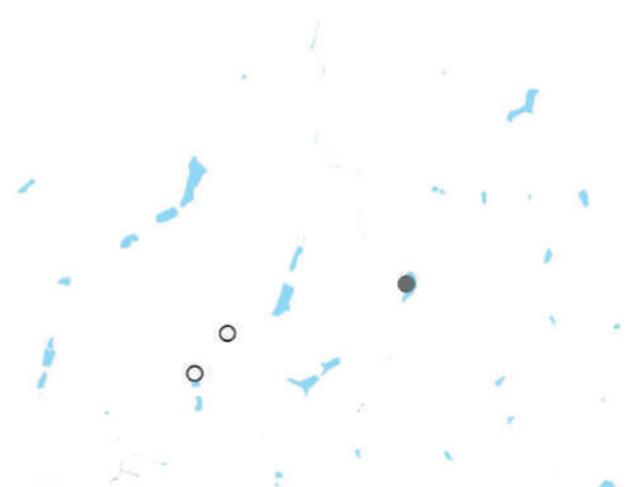


図 3 エリア B（野池）での調査地点
ニホンウナギ DNA が検出された地点を●で示す。



図 4 エリア C（牛窓）での調査地点
ニホンウナギ DNA が検出された地点を●、▲、■で示す。□は 2 月、○は 3 月、△は 5 月の調査を表す。

系の評価

調査の結果、千町川本流ではニホンウナギ DNA が検出されなかったが、千町川に注ぐ用水路の分流部、および野池から千町川に注ぐ沢の一部において DNA が検出された (図 2)。また、野池では選定した 3 地点のうち 1 地点で DNA が検出された (図 3)。牛窓エリア (図 4) では、海辺の住宅地を流れる用水路のうち、年間を通じて常に一定の水量が確保された地点で DNA が検出され、季節によって水量が大幅に減少する水路では検出されなかった。また、海に隣接する農地の用水路では、最下流の地点でのみ DNA が検出された。

これらのことから、ニホンウナギは源流に近い上流に生息している一方、より海に近い本流の下流域では生息していないか、もしくは個体数密度ないしバイオマス密度が低いことが明らかとなった。図 2 で検出された沢の地点は、調査時には水量が少なく、下流とは堰によって表流水はほぼ遮断されている状態であったが、ニホンウナギは調査以前の増水時に遡上してきたものと考えられる。千町川本流でニホンウナギ DNA が検出されなかった理由は、河川流量に対する個体数密度ないしバイオマス密度が低いことによると考えられるが、調査地点は釣り人によってニホンウナギが目撃されている地域であるため、実際には生息している可能性が高い。また、本調査では 2、3 月の低水温期のサンプリングが多かったことから、変温動物である魚類の代謝が低下していたため、代謝産物の濃度が検出限界を下回った可能性も考えられ、水温の異なる時期を含む、年間を通じた調査の重要性が示唆された。今後も定期的に調査を続けていく予定である。調査した野池のうち 2 地点は川との接続が不明であったが、1 地点の池は千町川と接続しており、実際にその 1 地点でのみニホンウナギ DNA が検出された。この事実もまた、ニホンウナギの上流への遡上を示すものである。同時に、ニホンウナギをはじめとした水生生物の生息環境保全の観点において、野池のような閉鎖性の高い水域であっても、水域間の接続性の確保が重要であることが示唆された。

これに対し、牛窓エリア (図 4) での調査から、河川を介さずに溜池と海をつなぐ比較的近距離の水路にもニホンウナギが流入していることが明らかになった。児島湾のいわゆる「青うなぎ」と同様に、牛窓の汽水域にも一定数のニホンウナギが生息しており、汽水域～上流域にわたる広範囲な水域を本種が利用している実態が示された。

(2) 川と海のつながりが確保されている水域を保全する人材の育成

人材育成と定点魚類相モニタリングとを兼ねて実施している第 8 回旭川うなぎ探検隊は、2022 年 8 月 20 (土) に、旭川と百間川の分流部付近にある明星堰周辺で開催した。2019 年の開催時には調査水域が改修工事中であり、2020 年、2021 年はコロナ禍で開催しなかったため、河川改修工事後初めての魚類相調査となった。採集された魚類の種数は 23 種で、ボラとコイが新たに記録され、8 回で記録された魚類の種数は計 37 種となった (表 1)。河川の工事による周囲の環境への影響が懸念されていたが、調査で採集された魚類の種数に大きな変化はなかったため、現時点では工事による影響は少ないと考えられる。また、採集された魚種には複数の回遊種が含まれ、明星堰周辺については、工事後も変わらず川と海とのつながりがよく保たれていることが確認できた。

8 月 18 日から 20 日の 3 日間にわたり、岡山大学理学部の夏期集中講義として、旭川うなぎ探検隊の事前・事後学習を行った。講義は中央大学の海部健三教授が、申請者とともに担当した。8 月 18 日は岡山大学で講義を行い、ニホンウナギを含めた絶滅危惧種の保全や生物多様性を維持することの重要性、専門家社会と非専門家社会との間に生じやすい乖離を埋めるためには協働が効果を持つことなどを講義し、市民参加型調査の意義について学生とともに議論した。8 月 19 日は実際に旭川で魚類採集を行った。ほとんどの学生にとって川での魚採集は初めての経験であるため、この事前学習は翌日のうなぎ探検隊の準備として重要である。8 月 20 日の午前には第 8 回旭川うなぎ探検隊にボランティアスタッフとして参加し、その後、岡山大学にて事後学習 (振り返り) を行った。参加学生からは「今後も同様の取り組みに継続して参加したい」との声が多く寄せられ、事前・事後学習を通じた丁寧な学習環境の整備が、将来の地域の環境保全を担う次世代、および未来の環境学習リーダーを育成することに貢献することが示唆された。

4. 参考文献

1. Minamoto, Miya, Sado, Seino, Doi, Kondoh, Nakamura, Takahara, Yamamoto, Yamanaka, Araki, Iwasaki, Kasai, Masuda & Uchii (2021) An illustrated manual for environmental DNA research: water sampling guidelines and experimental protocols. Environmental DNA 3:

2. Itakura, Wakiya, Sakata, Hsu, Chen, Yang, Huang, Han, Yamamoto & Minamoto (2020) Estimations of Riverine Distribution, Abundance,

表1 採集魚類一覧。回遊種は網かけで示す。

	種名	RDB	外来生物	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2019	2022	
魚類	ニホンウナギ	絶滅危惧 IB 類		○		○	○		○	○	○	
	アユ					○	○	○	○	○	○	
	フナ類			○	○	○	○			○	○	
	ヤリタナゴ	準絶滅危惧		○	○	○	○	○		○		
	アブラボテ	準絶滅危惧		○	○	○	○	○	○	○	○	
	カネヒラ			○	○	○	○	○	○	○	○	
	シロヒレタビラ	絶滅危惧 IB 類			○	○	○					
	イチモンジタナゴ	絶滅危惧 IA 類	国内移入			○	○	○				○
	オイカワ			○	○	○	○	○	○	○	○	○
	カワムツ			○		○	○	○		○	○	
	ヌマムツ									○		
	カワヒガイ			○								○
	ムギツク			○	○	○	○	○	○	○	○	○
	カマツカ			○		○	○	○	○	○	○	○
	ニゴイ類			○	○	○				○	○	○
	イトモロコ			○	○	○	○	○				○
	コウライモロコ			○	○	○				○	○	○
	タモロコ										○	
	シマドジョウ								○	○		
	スジシマドジョウ類	絶滅危惧 II 類		○		○	○	○	○	○	○	○
	ナマズ			○		○	○			○	○	
	ギギ					○			○	○	○	○
	アカザ	準絶滅危惧				○	○					○
	ウツセミカジカ			○		○	○	○	○	○	○	○
	オヤニラミ	絶滅危惧 II 類		○	○	○	○	○	○	○		
	オオクチバス		特定						○			
	カムルチー		外来						○			○
	ドンコ			○	○	○	○	○	○	○		
	カワヨシノボリ			○	○	○	○	○			○	○
	ヌマチチブ			○		○	○	○	○	○	○	○
	シマヨシノボリ								○		○	
	ウキゴリ				○				○	○	○	
ゴクラクハゼ									○	○	○	
マハゼ										○		
カワアナゴ							○		○	○		
新	ボラ			/	/	/	/	/	/	/	○	
新	コイ			/	/	/	/	/	/	/	○	
魚類種数(年ごと)				20	14	24	22	22	20	25	23	
魚類種数(累計)				20	22	26	27	31	32	35	37	

令和4年度 環境研究助成報告

9. 令和4年度 環境研究助成報告

① 特定研究

助成対象者	所 属	研究テーマ	ページ
前田千尋	岡山大学学術研究院 自然科学学域	カーボンニュートラルを目指した光駆動型二酸化炭素固定化反応の開発	42
木村隆行	統合物性モデル技術 研究組合	衛星 SAR や地形データを活用した不安定斜面分布図（新ハザードマップ）	46
山方 啓	岡山大学学術研究院 自然科学学域	反応機構に立脚した高活性可視光応答型光触媒の開発	53
仲 章伸	倉敷芸術科学大学	低炭素社会実現に向けたシリコン（ケイ素）の利用に関する研究	59
松多信尚	岡山大学学術研究院 教育学域	土石流危険渓流の安全度評価手法の確立ー重力探査による谷中に堆積する土砂の見積もりと土石流発生ポテンシャル評価ー	65
小田哲也	岡山理科大学工学部	水上-空中変形機構を備えるドローンと簡易な河川内三次元測量技術の開発	71
近森秀高	岡山大学学術研究院 環境生命科学学域	防災・減災に向けた水域地形の変化に関する計測方法の実用化研究	77
満身 稔	岡山理科大学理学部	アクセプター内包亜鉛ポルフィリンダイマーに基づく可視光レドックス触媒の創製	80
鳴海大典	岡山大学学術研究院 環境生命科学学域	シュタットベルケ型ビジネスモデルの導入による脱炭素ならびに地域付加価値創出効果	84

② 一般研究

助成対象者	所 属	研究テーマ	ページ
田中健太	岡山大学異分野基礎 科学研究所	赤色光をエネルギー源として利用可能にする有機光触媒の開発	90
森 泉	岡山大学資源植物科 学研究所	低バイパスフローイネ作出によるイネ地上部へのナトリウムおよびカドミウム取込みの低減	95
藤岡春菜	岡山大学学術研究院 環境生命科学学域	スズメバチにおける栄養交換の機能解明と環境に及ぼす影響の解析	101
大久保貴広	岡山大学学術研究院 自然科学学域	金属イオンの吸着分離を指向した酸化グラフェン由来の新規細孔材料の開発	108
山口一裕	岡山理科大学教育推 進機構教育開発セン ター	ICT を活用した環境教育プログラムの構築～岡山理科大学で学ぶ自然教室での実践から～	114
安場健一郎	岡山大学学術研究院 環境生命科学学域	AI を利用したキャベツ栽培における除草ポジション判別方法の開発	122

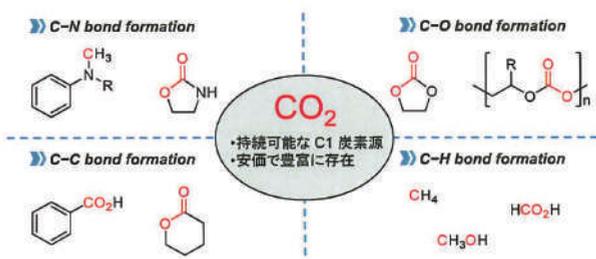
※所属は採択時

カーボンニュートラルを目指した光駆動型二酸化炭素固定化反応の開発

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域 前田 千尋

1. はじめに

脱炭素社会の構築を目指し二酸化炭素(CO₂)の排出実質ゼロを目指す取り組みが求められている。CO₂は温室効果ガスである一方で、自然界に豊富に存在する安価で低毒性のC1炭素源であることから、CO₂を有用な化合物に変換する技術の開発が注目されている。例えば図1に示すように、C-H、C-N、C-O、C-C結合を形成する反応開発が盛んに行われている。特に有機化学においてC-C結合形成反応の開発は重要な課題であり、例えばCO₂を用いたカルボン酸合成が盛んに行われている。このようなカルボキシル化反応は農薬や医薬品などの生物活性分子合成にも広く適用できる。CO₂は熱力学的に安定で反応性が低いため、従来はグリニャール試薬や有機リチウムといった非常に求核性の高い有機金属試薬を使用する必要があったが、近年は触媒的カルボキシル化反応が注目されている。しかし一般的に高温、高圧条件を必要とすることが多く、結果として消費するCO₂よりも発生するCO₂の方が遥かに多くなってしまいうことが課題である。2050年カーボンニュートラルの実現を目指す近年では、単にCO₂を用いるだけでなく、常温・常圧条件など環境低負荷なCO₂固定化反応の開発が求められる。



以上のような背景から本研究では光駆動型CO₂固定化反応の開発を行うこととした。光駆動型では光励起により生じた活性種を用いることで常温・常圧条件での反応が可能である。例えばMartin, Iwasawaらによって報告されたPd触媒を用いたア

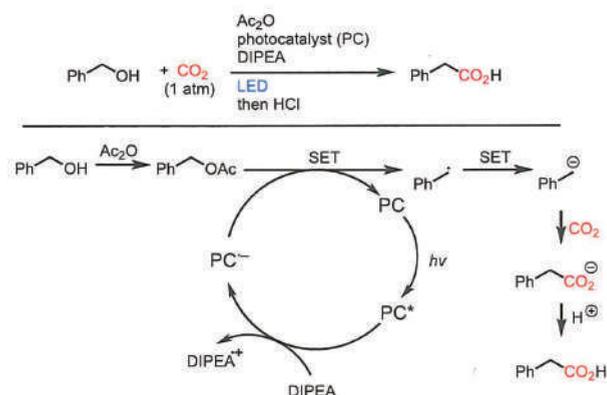
リールブロミドのカルボキシル化反応では、従来等量以上必要としていた亜鉛やマンガンの代わりに、光照射とアミン条件下とすることで金属還元剤を使用することなく常温・常圧で反応が進行する。しかし高価なPd触媒と光触媒が必要であることと、基質由来のハロゲン化合物の廃棄物が生じることが課題として残る。

2. 結果と考察

本研究ではレアメタル・ハロゲンフリーなCO₂固定化反応を開発することを目的にした。まずアルコールを基質としたカルボン酸合成を検討した。アルコールを活性化させるためのLewis酸触媒としてアルミニウムポルフィリンを用い、Lewis酸触媒が光触媒も兼ねることで、高価な光触媒を必要としない条件も探索することとした。またオキシランとCO₂からβ-ヒドロキシ酸の合成を試みた。

2.1 ベンジルアルコール類のカルボキシル化

まず反応性の高いベンジル位でのカルボキシル化を考え、ベンジルアルコール類とCO₂の反応を行うこととした(スキーム1)。

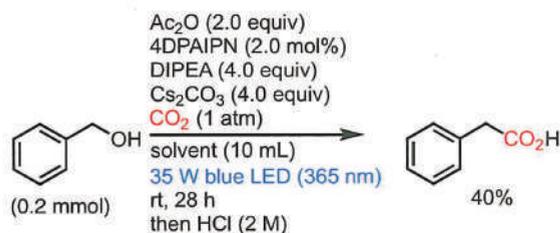


スキーム-1 アルコールとCO₂の反応機構

光触媒(PC)がLEDによって励起されPC*となり、アミン還元剤(DIPEA)から電子を受け取ることによってラジカルアニオンPC*⁻が生成する。次にラジ

カルアニオンから無水酢酸(Ac₂O)との反応によりアセチル化したアルコール(PhCH₂OAc)に電子移動(SET)が起こることでラジカル種が生成する。さらに SET が起こることでアニオン中間体となり、CO₂ への求核攻撃およびプロトン化を経て目的とするカルボン酸が生じると予想される。

Yuらにより報告されている光反応²⁾を参考にし、光触媒として2,4,5,6-tetrakis(diphenylamino)-1,3-benzenedicarbonyl (4DPAIPN)、アミン還元剤としてdiisopropylethylamine (DIPEA)、無水酢酸 Ac₂O と炭酸セシウムを添加し、溶媒としてDMFを加え、LED (λ = 365 nm)照射下、室温 28 時間で反応を行ったところフェニル酢酸が 40%収率で得られた(スキーム 2)。次に Ac₂O の代わりに触媒量の金属ポルフィリンを加えて反応を試みたが収率の向上は見られなかった。



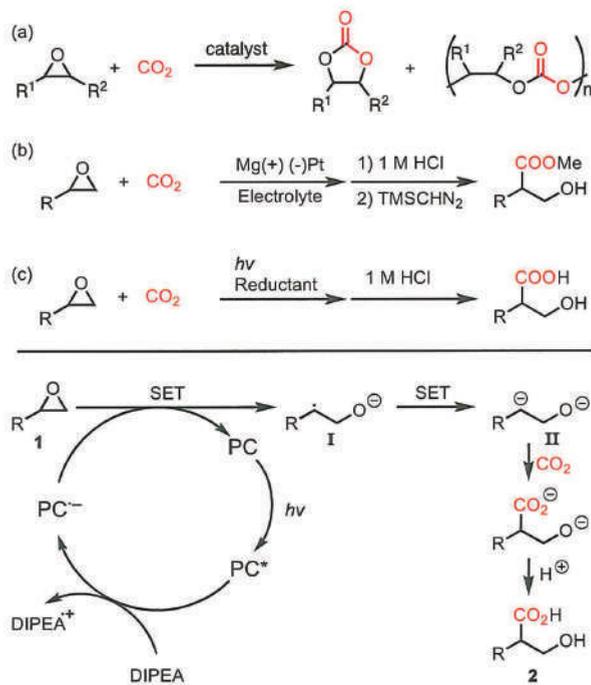
スキーム 2 ベンジルアルコールと CO₂ の反応

その後ベンジルアルコールのフェニル基上に置換基を導入した基質を用いたり反応条件を検討したが中程度以上の収率の向上は見られなかった。次項のようにベンジルアルコールの代わりにオキシランを反応基質として用いたところ、対応するβ-ヒドロキシ酸が得られることがわかったので、光照射によるオキシランと CO₂ の反応を中心に検討することにした。

2.2 オキシラン類のカルボキシル化

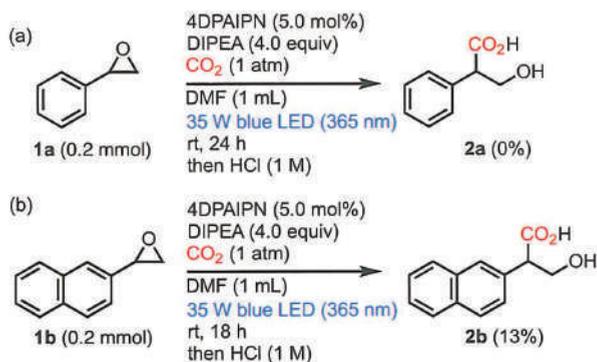
オキシランと CO₂ から環状炭酸エステルやポリカーボネートを合成する触媒反応が数多く報告されている(スキーム 3a)。一方で極性転換を利用することでβ-ヒドロキシ酸の合成が期待される。最近電解装置を利用することでオキシランと CO₂ からβ-ヒドロキシ酸を合成する例が Zhang 及び Qiu によって報告された(スキーム 3b)。^{3,4)}我々はこの反応を光還元により行うことで電解装置を利用せずにβ-ヒドロキシ酸を合成することを考えた(スキーム 3c)。PC の触媒サイクルによってオキシランに SET が起こることでオキシランが開環したラジカル中間体 I が生成するとともに基底

状態の PC が再生する。ラジカル中間体 I にさらに SET が起こることでアニオン中間体 II となり、CO₂ への求核攻撃およびプロトン化を経て目的物 2 が生じると予想される。



スキーム 3 オキシランと CO₂ の反応

まず、phenyloxirane (1a)を基質として光反応を試みた。Yuらにより報告されている光反応⁴⁾を参考にし、光触媒として4DPAIPN、アミン還元剤としてDIPEA、溶媒をDMFとし、LED (λ = 365 nm)照射下、室温 24 時間で反応を行ったが、加水分解により1-phenylethane-1,2-diolが51%生成したのみで、目的物である2-phenyl-3-hydroxypropanoic acid (2a)は得られなかった(スキーム 4a)。オキシランの開環を促進させるルイス酸として金属ポルフィリンを加えたり、溶媒およびルイス酸を変えて反応を行ったが、目的物 2a は得られなかった。

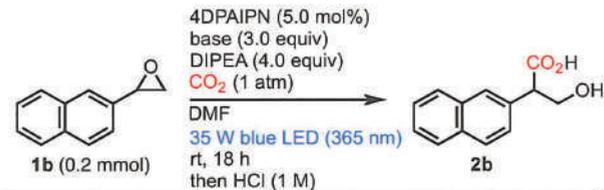


スキーム 4 オキシランと CO₂ の反応

次に、電子求引性の強い基質にすることで開環が促進されるのではないかと考え、基質を 2-naphthylloxirane (**1b**)に変更して光反応を試みた。光触媒として 4DPAIPN、還元剤として DIPEA、溶媒として DMF を用い、LED ($\lambda = 365 \text{ nm}$)照射下、室温 18 時間で反応を行ったところ目的物である β -ヒドロキシ酸 α -(hydroxymethyl)-2-naphthaleneacetic acid (**2b**)が 13%得られた (スキーム 4b)。またプロトン化したアルコールも 8%得られた。原料は残っており、ほかの大きなピークも見られなかった。全体の内標収率が低く、生成物が複雑化している可能性があった。

実験を進めていく中で、無機塩基を添加することで収率が向上することがわかった (表 1)。 K_2CO_3 及び Cs_2CO_3 を加えた際、収率はそれぞれ 22%及び 34%となった (entries 1-4)。ここまでの反応混合物の $^1\text{H NMR}$ においてブロードなピークがしばしば見られ、オリゴマーあるいはポリマーの生成が示唆された。そこで低濃度での反応を試みたところ、DMF 10 mL (20 mM)の条件で収率 61%まで向上した (entries 4-7)。恐らく競合する分子間反応が抑制されたため、目的のカルボキシル化反応が主として進んだものと考えている。

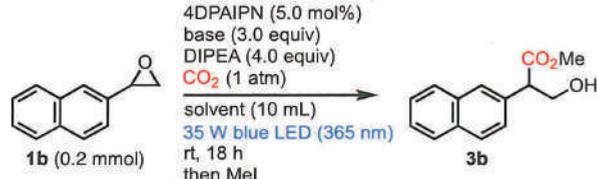
表 1 塩基及び溶媒量の検討



entry	base	DMF (mL)	yield (%)
1	—	1	13
2	Na_2CO_3	1	10
3	K_2CO_3	1	22
4	Cs_2CO_3	1	34
5	Cs_2CO_3	5	48
6	Cs_2CO_3	10	61
7	Cs_2CO_3	20	58

上記の反応条件 (表 1, entry 6) をもとにメチルエステル化し、シリカゲルカラム精製することで **3b** を 68%収率で単離できることがわかった (表 2, entry 1)。溶媒量 10 mL (20 mM)の濃度条件のもとで塩基や溶媒を変更して反応条件のさらなるチューニングを試みたが、現時点では炭酸セシウムを塩基として用い、DMF 溶媒下で行う条件 (entry 1) が最も良い結果となっている。

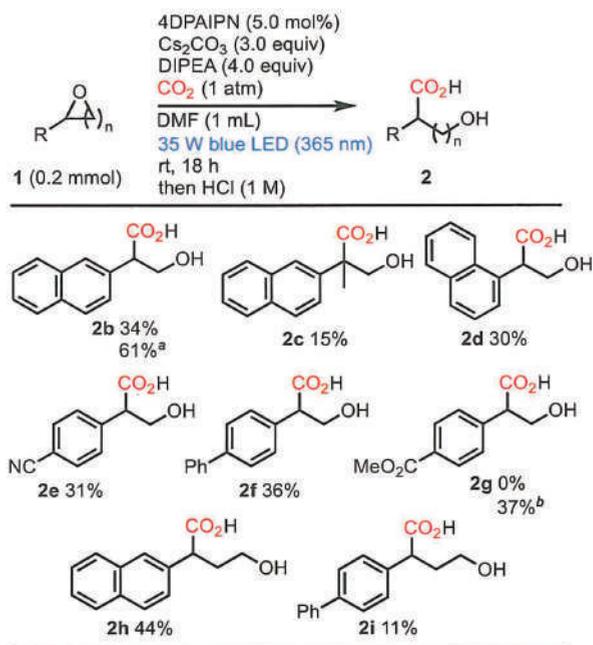
表 2 塩基及び溶媒の検討



entry	base	solvent	yield (%)
1	Cs_2CO_3	DMF	65(68)
2	K_2CO_3	DMF	42
3	CaCO_3	DMF	14
4	BaCO_3	DMF	8
5	Cs_2CO_3	DMA	33
6 ^a	Cs_2CO_3	DMF	61
7 ^{a,b}	Cs_2CO_3	DMF	41

^a Photo irradiation at 420 nm, ^b $[\text{Ir}(\text{dtbpy})(\text{ppy})_2]\text{PF}_6$ was used.

基質の検討をした結果、これまでに 2-ナフチルオキシラン **1b** の他に、置換位置の異なる **1c** やメチル基を持つ **1d** も反応が進行し **2c** 及び **2d** を与えた (スキーム 5)。また phenyloxirane のパラ位に電子求引性基を導入することで **2e** や **2f** が得られた。エステル基をもつ **1g** ではテトラブチルアンモニウムヨード (TBAI) を添加することで **2g** が生成した。これは TBAI がオキシランの開環を助けることで反応が進行することを示しており、基質展開の拡大を期待している。さらにオキシタン **1h** や **1i** からは対応する γ -ヒドロキシ酸 **2h** 及び **2i** を与えた。基質適用範囲の調査は反応条件の最適化を完了したのち改めて行い、収率を向上させる。



^a 10 mL of DMF was used. ^b 1 equiv of TBAI was used.

スキーム 5 基質適用範囲の検討

3. 結論

我々はレアメタル・ハロゲンフリーな CO₂ 固定化反応としてアルコールおよびオキシランと CO₂ の反応を常温・常圧条件で行った。ベンジルアルコール類からフェニル酢酸類を与える反応は中程度の収率で進行することがわかった。またオキシランと CO₂ の反応から対応するβ-ヒドロキシ酸を与える反応を新規に開発した。この反応はオキセタン類にも適用でき、対応するγ-ヒドロキシ酸を与えた。今後、反応条件検討と基質適用範囲を完成させ論文発表する。

4. 謝辞

本研究を遂行するにあたって岡山大学工学部合成有機化学研究室の依馬正教授、高石和人准教授からの貴重な助言、及び久米本蓮氏(M2)、田中梨央氏(M1)の尽力に感謝します。最後に本研究に助成いただいた公益財団法人八雲環境科学振興財団に深謝いたします。

5. 参考文献

- 1) K. Shimomaki, K. Murata, R. Martin, N. Iwasawa, *J. Am. Chem. Soc.* **2017**, *139*, 9467.
- 2) C.-K. Ran, Y.-N. Niu, L. Song, M.-K. Wei, Y.-F. Cao, S.-P. Luo, Y.-M. Yu, L.-L. Liao, D.-G. Yu, *ACS Catal.* **2022**, *12*, 18.
- 3) K. Zhang, B.-H. Ren, X.-F. Liu, L.-L. Wang, M. Zhang, W.-M. Ren, X.-B. Lu, W.-Z. Zhang, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202207660.
- 4) Y. Wang, S. Tang, G. Yang, S. Wang, D. Ma, Y. Qiu, *Angew. Chem. Int. Ed.* **2022**, *61*, e202207746.

衛星 SAR や地形データを活用した不安定斜面分布図(新ハザードマップ)

統合物性モデル技術研究組合(エイト日本技術開発) ○木村隆行, 工藤健雄
統合物性モデル技術研究組合(基礎地盤コンサルタンツ) 八野祐二, 吉川猛
統合物性モデル技術研究組合(ウエスコ) 井上真, 今西将文, 伊達 裕樹
統合物性モデル技術研究組合(中電技術コンサルタント) 笹井友司, 松井章弘

1. はじめに

現在, 全国の各自治体では急傾斜や土石流のハザードマップや地すべり指定地を公開しているが, 2018年7月豪雨では対象外の斜面も多く崩壊している。岡山でも岡山大学裏山の半田山で, 指定外の斜面で崩壊が生じた。つまり現在の急傾斜や土石流や地すべり指定地の範囲外でも, 多くの不安定斜面が分布し, その適正な把握手法や評価手法は, まだ確立されてはいない。そのため, 急傾斜や土石流や地すべりなどの位置付けから漏れる「不安定斜面」を把握し, 安定度を評価し表示する手法が, 大きな課題と考えている。

ここでは, それらの研究では漏れてしまう表層崩壊より深い中間層崩壊～地すべり性不安定斜面を対象として, 「不安定斜面」を把握し, 評価することを目的とした。

研究手順としては, (1)国土地理院 GSIMaps 傾斜量図による不安定斜面の設定, (2)地質技術者14人による AHP 法による評価, (3)衛星 SAR 干渉解析による変位速度評価, (4)AW3D 高精度地形傾斜量図による評価, (5)不安定斜面の地形要素解析, (6)不安定斜面分布図の危険度表示という手順とした。

これらの結果, AHP 法は SAR 干渉解析データともある程度相関があり, 不安定斜面の順位付けや安定度評価に有効であることが判明したので報告する。

2. 開析斜面における「不安定斜面」

中国地方の地形は, 吉備高原面に代表される小起伏面と, それらを開析したV字谷の傾斜面に大別できる。その傾斜面には, 地すべりに準じる不安定斜面が多く分布するが, 必ずしも典型的な地すべり地形は少なく, 多くが地すべりに準じるような凸型斜面か凹型斜面などからなる。それらは地形図のみからは判読が困難ではあるが, 地質技術者の多くが傾斜量図を併用することで推定可能な準地すべり地形である。

研究区域は岡山県南西部で, 東西4km南北5km

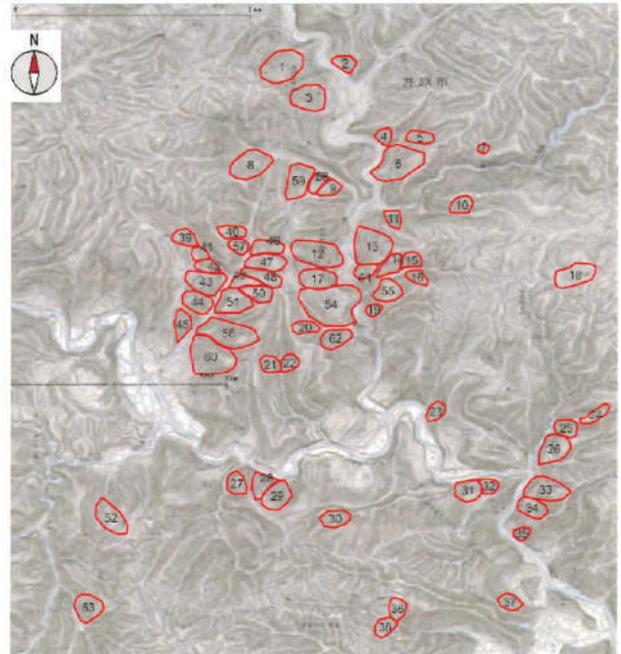


図-1 「不安定斜面」の分布
(国土地理院 GSIMaps 傾斜量図による)

の区域である。地質は, 脆弱で破砕質な古生層(泥岩, 変輝緑岩など)の夜久野オフィオライトが分布している。山頂は標高300~400mの吉備高原面で, 河川が150~250m程度下刻し, 開析斜面を形成し, その斜面に多くの「不安定斜面」が分布している。図-1は国土地理院地図 GSIMaps で傾斜量図を作成し, 不安定斜面62箇所を抽出した分布図で, 防災科学技術研究所の地すべり地形の24箇所(J-SHISMapによる)を含んでいる。

3. AHP 法による評価

3.1 AHP の階層構造について

階層分析法 AHP (Analytic Hierarchy Process) は, 意思決定の分析法で, 主観的判断とシステムアプローチとの両面から決定する意思決定手法である。AHPは1970年代にトーマス・L・サーティによって創始され, 数学と心理学がベースになっている。階層分析法の主な工程は, 「(1)階層構造の構築」, 「(2)一対比較」, 「(3)ウェイトの計算」,

表-1 不安定斜面の評価階層区分

大分類 階層1	中分類 階層2	小分類 階層3	AHP点数
地すべりの発達段階	地すべり地形明瞭度	地すべり形状初期	4.33
		地すべり形状ややあり	8.06
		地すべり形状明確	13.96
		地すべり形状解体	4.32
地すべり活動の新しさ	不動域/滑溜座	背後段差あり	21.11
		滑溜座のみ	12.16
		集水地形勾配化	5.33
		地表従順化	4.47
	移動体内微地形群度	明瞭段差地形多数	21.11
		段差地形点在	11.34
		小凹凸微地形点在	6.55
		小凹凸微地形不明瞭	3.52
	移動体舌端部	前面崩壊急斜面あり	10.56
		凹凸面あり	5.13
		移動体のみ	3.27
		地表の従順化	1.95
地すべりのポテンシャル	リニアメント遭遇数	2か所以上遭遇	3.10
		1か所遭遇	1.84
		近接遭遇	1.06
		遭遇なし	0.63
	地すべり全体開放度	側部および下部開放(沢など)	7.06
		側部一部および下部開放(沢など)	4.19
		下部のみ開放	2.42
		下部閉塞(ボトルネック)	1.44
	移動体下部の勾配	移動体平均勾配より著しく急	6.51
		移動体平均勾配よりやや急	3.87
		移動体平均勾配と同じ	2.23
		移動体平均勾配よりゆるい	1.33
末端の浸食状況	河川攻撃斜面	16.59	
	河川または海岸線	7.65	
	沢に面する	4.22	
	沢に面していない	2.30	

「(4)総合評価値の計算」であり、多数の要素をふたつづつ比較していくことで、どちらに重きがあるかを感覚的に判断し、その感覚的判断を数値化し、重みづけを行い、総合評価点で表現する手法である。

中国地方では河野ら(2020)¹⁾が地形や地質などの項目による AHP を適用し、防災科学技術研究所の地すべり地形を評価し、妥当性を検証している。今回は不安定斜面(災害予備群の動いていない地すべり)の評価を想定し、北海道立総合研究機構地質研究所ら(2012)²⁾による「地すべり活動度評価手法マニュアル(案)」の項目に準じたが、現地にあわせ修正した。その中分類 10 項目・小分類 40 項目の評価項目で、14 人の熟練地質技術者で「1 対比較」を行った。集計した中間値を採用し現地 62 箇所の不安定斜面の評価点を求め、相関解析を行った。相関が得られない中分類 2 項目・小分類 8 項目を削除し、再度、配点表を構築したのが表-1 になる。この表-1 の最大合計が 100 点になり、最も不安定ということになる。

3.2 AHP 法の評価点と安定度評価

現地 62 箇所の不安定斜面の評価点の頻度分布は、図-2 のように中間 50 点を中心に正規分布状に分布した。現地は現状で著しく移動している地すべりはないため、不安定斜面とはいえ基本的に「今は動いていない地すべり相当」と考えられる。その場合ひとつの目安として、中間点の AHP=50 を現状安全率 $F_s=1.10$ とする表-2 のような安定度区分や F_s の目安が考えられる。

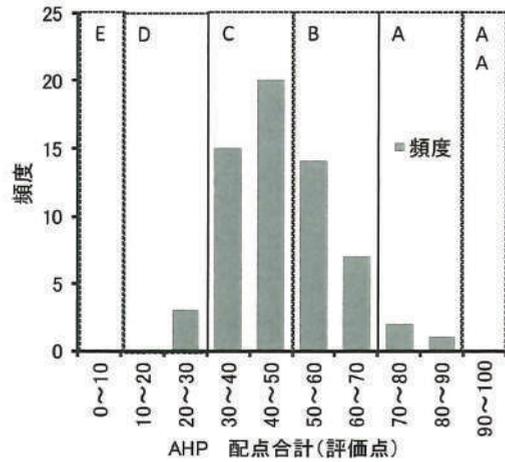


図-2 現地の AHP 評価点分布

表-2 AHP 評価点区分と安全率 F_s

AHP 評価点	記号	安定度	目安としての F_s
~10	E	かなり安定	
10~30	D	多少安定	----10 $F_s=1.20$
30~50	C	僅かに安定	----30 $F_s=1.15$
50~70	B	僅かに不安定	----50 $F_s=1.10$
70~90	A	多少不安定	----70 $F_s=1.05$
90~	AA	かなり不安定	----90 $F_s=1.00$

表-2 のように、AHP 評価点 90 で $F_s=1.0$ 、10 点で $F_s=1.20$ すると、式(1)になる。式(2)は稲垣・長谷川ら(2005)³⁾による開析度による F_s で、式(3)は日本道路公団(1985)⁴⁾による式を地形要素のみで再構成した F_s の修正式になる。

AHP 評価点による安全率

$$F_s = (90 - \text{AHP}) / 400 + 1 \quad (1)$$

稲垣・長谷川らの開析度 $D(\%)$ による安全率³⁾

$$F_s = 1 + 0.007 \times D \quad (2)$$

日本道路公団(1985)の地すべり地形安定度評価の地形項目限定の修正式⁴⁾

$$F_s = 1.148 + \begin{matrix} \text{定数項} & \text{地質年代} & \text{断面斜面形} \\ \left(\begin{matrix} -0.035 \text{ (四新三)} \\ +0.089 \text{ (古三中)} \\ -0.038 \text{ (古生層)} \end{matrix} \right) & + & \left(\begin{matrix} -0.029 \text{ (凸)} & +0.047 \text{ (凹)} \\ +0.119 \text{ (直)} & -0.061 \text{ (複)} \end{matrix} \right) \end{matrix} \\ + \begin{matrix} \text{遷急線} & \text{誤差} \\ \left(\begin{matrix} +0.033 \text{ (有)} \\ -0.106 \text{ (無)} \end{matrix} \right) & + & \pm 0.05 \end{matrix} \quad (3)$$

図-3 は日本道路公団の地形による F_s の分布だが、ほぼ中央に式(1)が分布しており、図-4 は稲垣・長谷川らの開析度による F_s 分布の下位に、式(1)が位置し、安全側評価となっている。現在明

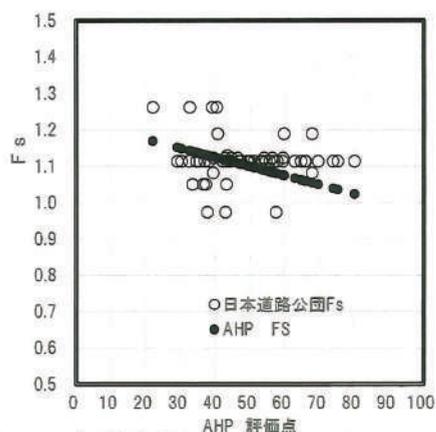


図-3 日本道路公団地形のFsとAHPのFs

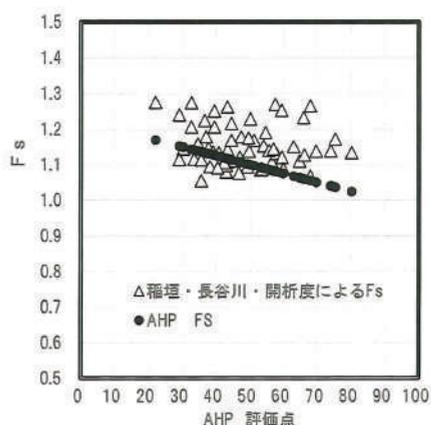


図-4 地形開析度のFsとAHPのFs

確に動いていない「不安定斜面」に対し、AHP評価点と式(1)の安全率Fsは、目安として概ね妥当な設定になると考えられる。

4. 衛星 SAR 干渉解析による変位速度評価

衛星 SAR による地すべり変位については、佐藤ら(2012)⁹⁾石塚ら(2017)¹⁰⁾清澤ら(2020)¹¹⁾などの事例において、適用が検証されている。ゆるく平坦で広い地すべりについては入射角の条件が良く、効果的な予測ツールとして期待されている。しかし、条件が不利な谷部の不安定斜面においても適用が可能であれば、広く展開が可能になると考えられる。今回、吉備高原面を150～250m下刻して形成されている開析斜面の不安定斜面に対し適用し検討した。

衛星データはALOS-2/PALSAR-2の2015/9/2～2022/5/18までの7年間の15データとし、解析範囲は前述の岡山県南西部(緯度34度36分、経度133度21分～緯度34度42分、経度133度27分を交点とした四角)とした。

解析方法は、SarScape(sarmap社)を使用し、SBAS(Small Baseline InSar)時系列解析を行った。補正は精密軌道補正、大気補正、高さ補正

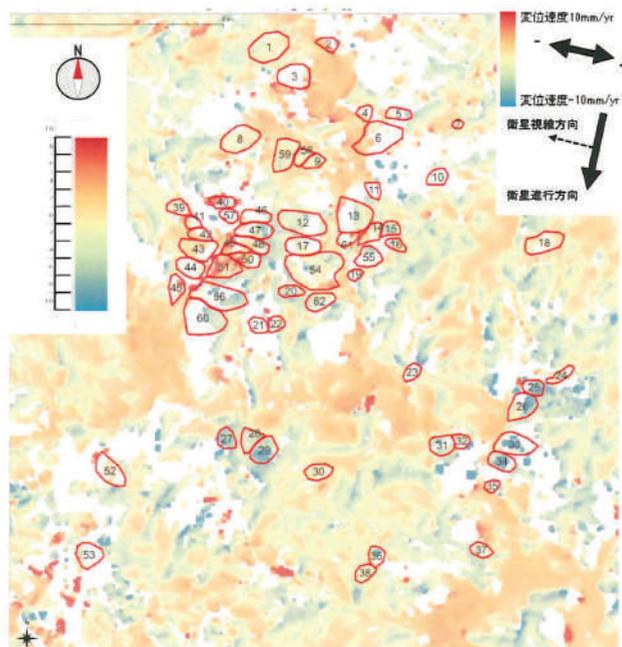


図-5 変位速度分布と不安定斜面

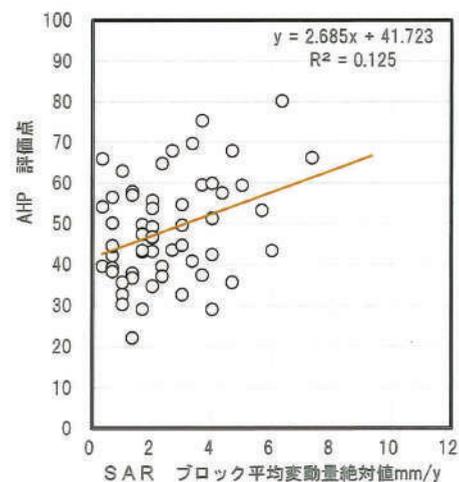


図-6 全体平均 $|\Delta v| \cdot AHP$

(PS地点自動補正)とし、干渉処理の解析グリッドは10m×10mとした。またSarScapeによる自動取得でGCP(Ground Control Points)を求め、7年間の平均変位速度 Δv (mm/y)を表示した。その分布図を図-5に示す。

図-5では、衛星軌道がおよそ北から南に移動しながら西方向に照射している関係から、東向き斜面が+側、西向き斜面が-側に分布する傾向がみられ、全体の変位速度分布と不安定斜面の変位速度に有意な差は認められない。この分布図では不安定斜面を区分することはできないものの、色の濃い変位速度部分も認められ、現在動いていないと判断される微細な斜面変動を捉えている可能性も考えられた。

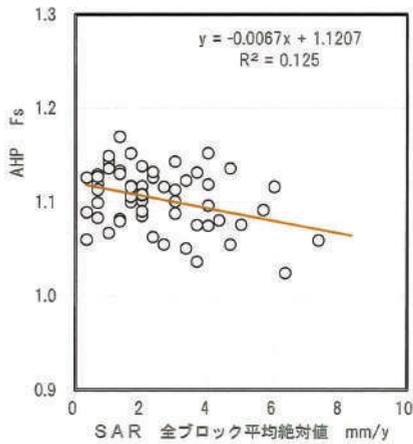


図-7 全体平均 $|\Delta v|$ ・AHPFs

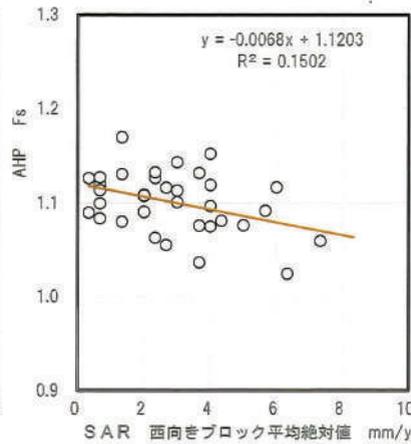


図-8 西向き平均 $|\Delta v|$ ・AHPFs

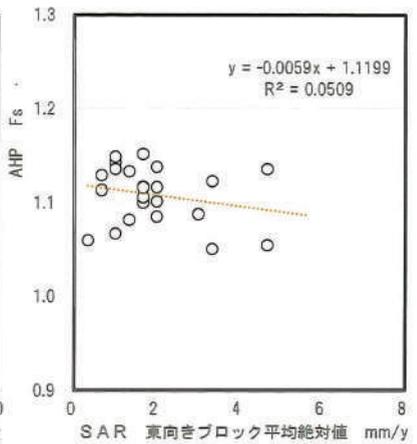


図-9 東向き $|\Delta v|$ と AHPFs

地すべり方向は衛星入射方向に対しバラバラであるので、この観測変位は地すべりの「うごめき量」と考え、方向性を除外した絶対値で整理する方法を考案した。

不安定斜面の上中下の3地点の変位移動速度の絶対値を合計平均した全体平均 $|\Delta v|$ と AHP 評価点との相関を図-6 に示したが、ある程度相関があることが判明した。

この全体平均 $|\Delta v|$ を、AHPFs と比較したのが図-7 であり、同様の整理を西向き斜面に対し行ったのが図-8 であり、東向き斜面に対し行ったのが図-9 である。衛星から離れる方向の西向き斜面の方が、東向き斜面より相関性が高い傾向が認められた。このように入射方向の影響は受けていることは判明したが、全体平均 $|\Delta v|$ で不安定斜面の微細な変位速度を把握できる可能性が考えられた。

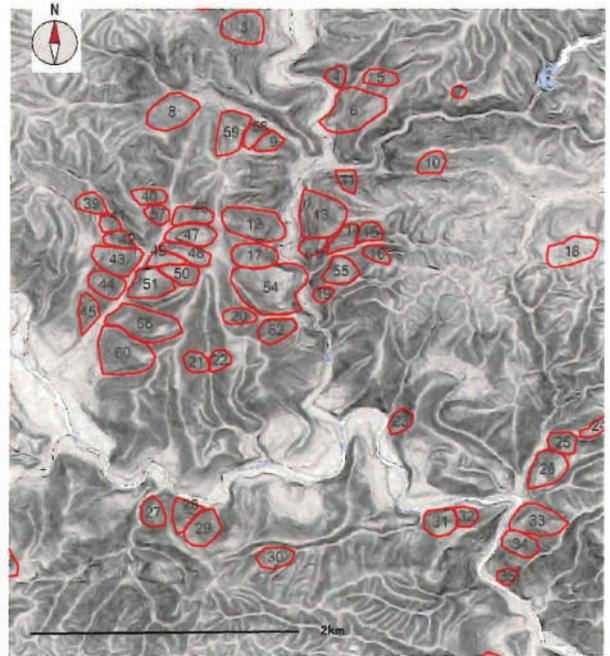


図-10 高精度地形データによる傾斜量図

5. AW3D 高精度地形傾斜量図による評価

AW3D 全世界デジタル 3D 地図は衛星画像処理解析により地形や地面の起伏を再現した 3次元データである。その 3D (3次元) の「DTM (Digital Terrain Model 数値地形モデル、解像度 0.5m)」を使用し、1mメッシュで傾斜量図を作成した。傾斜量図は、傾斜が緩やかな部分を白、急な部分を黒としたグレースケールを用いて出力し図-10 に示した。

全体図では明瞭ではないが、個々の不安定ブロックについて微細な凹凸が確認でき、ブロック毎の詳細な小ブロック区分化や詳細な形成過程解析が可能になった。ただ、今回の中間層地すべり以外の浅層地すべりも判別され、個別の固有地形解析が必要となり、今回は個別解析は対象外とした。共通の地形として、(1)2次ブロック(2)小起伏(3)前面・側部崩壊の3点について表-3 に示すランクに区分し検討し、図-11~13 に示した。

表-3 ブロック内の微地形ランク

ランク	2次ブロック	小起伏	前面・側部崩壊
1	なし	なし	なし
2	不明確	不明確	不明確
3	少数	少数	少数
4	多数	多数	多数
5	顕著	顕著	顕著

図-11 は 2次ブロックの派生と AHP 評価点の相関だが、2次ブロックが派生していない方が最も不安定なものから安定なものまでバラつき、2次ブロックが多いほど中間的安定度に収束していく特徴的な傾向となった。

図-12 は小起伏と AHP 評価点の相関だが、全体としては小起伏が多いほど不安定化するが、少数分布程度が最も不安定になることもあるという傾向を示した。

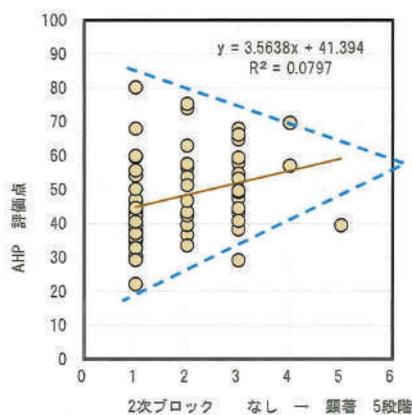


図-11 2次ブロックとAHP

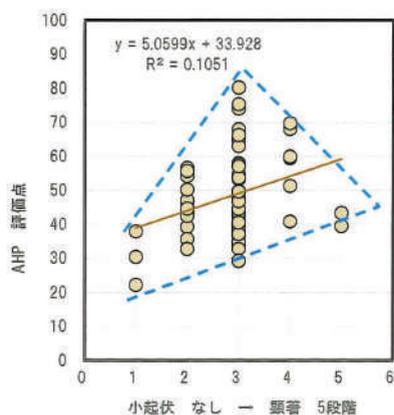


図-12 小起伏とAHP

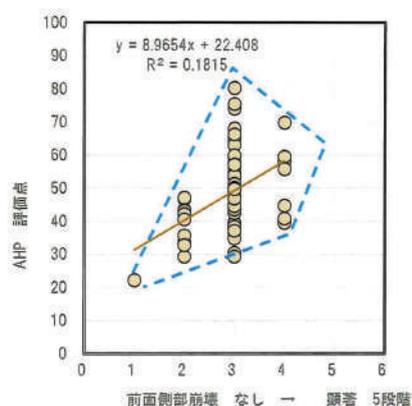


図-13 前面・側部崩壊とAHP

図-13は前面・側部崩壊とAHP評価点の相関だが、全体としては前面・側部崩壊が多いほど不安定化するが、少数分布程度が最も不安定になることもあるという傾向を示した。

いずれも特徴的な傾向であり、個別ブロック内の詳細な形成過程を追跡することで、より明確化できる可能性があると考えられた。

6. 不安定斜面の地形要素解析

不安定斜面は吉備高原面を開析している斜面であり、地すべり地形に準じる不安定斜面を形成していると考えられる。そのため図-14のような断面を形成していると仮定し、それぞれの地形要素を数値化した。国土地理院GSIMapsの断面図機能を利用した。

図-15は移動体の現況斜面部分の水平距離H2と鉛直距離V2の相関で、正の相関があるが水平距離が大きいほど鉛直距離の比率が対数的に小さくなる傾向を示している。

図-16は移動体の現況斜面部分の水平距離H2と傾斜角度 θ_2 の相関で、負の相関があるが水平距離が大きいほど傾斜角度 θ_2 の比率が対数的に小さくなる傾向を示している。

図-17は移動体の現況斜面の斜距離VH2とAHP評価点の相関で、斜面の規模が大きくなるほどAHP評価点が増加する傾向が認められる。

図-18は移動体の上部斜面の斜距離VH4とAHP評価点の相関で、上部斜面が大きくなるほどAHP評価点が増加する傾向が認められる。これはVH4の移動直後の斜面を反映していると考えられるので、下部斜面(舌端部)からの開析が進行し斜面が不安定化していくが、ある程度開析が進む場合、逆に斜面勾配がゆるくなり安定化すると判断しているためと考えられる。

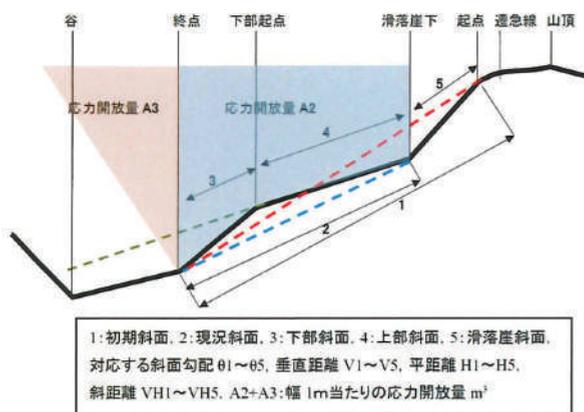


図-14 不安定斜面地形要素モデル図

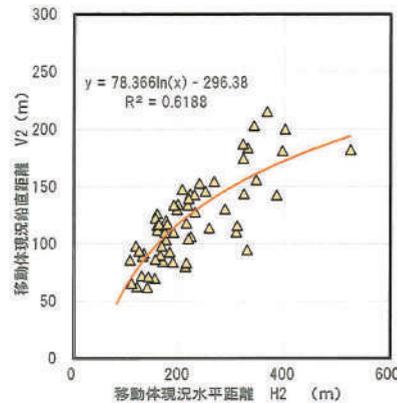


図-15 現況斜面 H2-V2 相関図

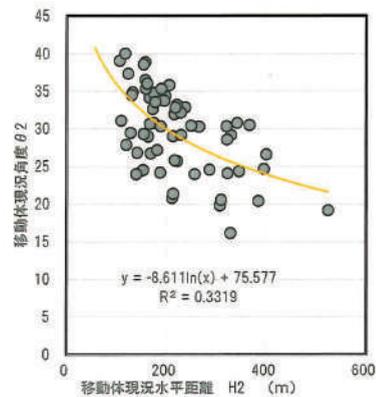


図-16 現況斜面 H2- θ_2 相関図

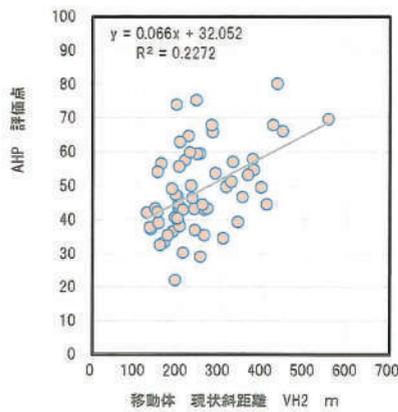


図-17 現況斜面 VH2 と AHP

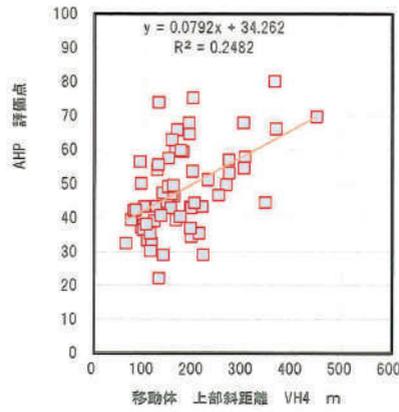


図-18 上部斜面 VH4 と AHP

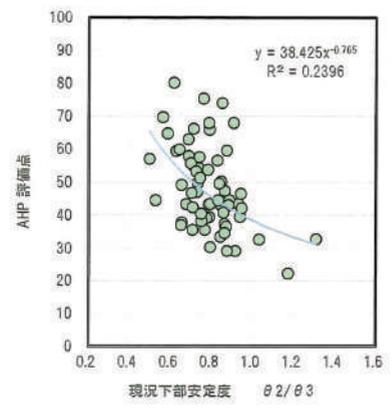


図-19 $\theta 2/\theta 3$ と AHP

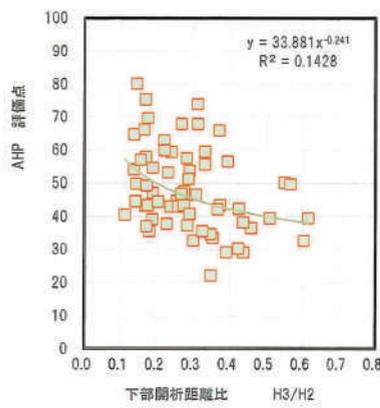


図-20 H3/H2 と AHP

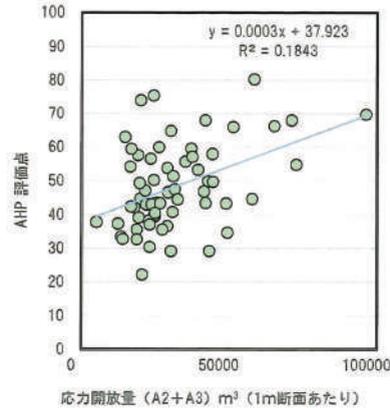


図-21 応力開放量と AHP

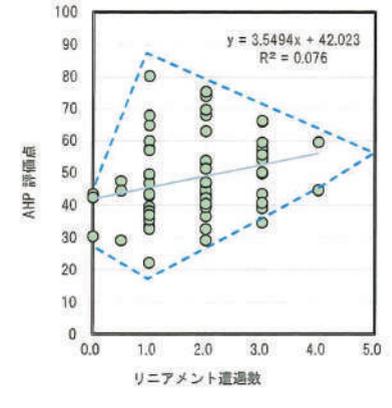


図-22 リニアメント遭遇数と AHP

図-19 は移動体全体の勾配 $\theta 2$ と下部斜面（舌端部） $\theta 3$ の比と AHP 評価点の相関で、舌端部が急勾配であるほど AHP 評価点が高い傾向が認められる。

図-20 は下部斜面水平距離 H3 と現況斜面水平距離 H2 の比と AHP 評価点の相関で、舌端部からの開析進行が少ないほど不安定という評価になっていると考えられる。

図-21 は応力開放量と AHP 評価点の相関で、応力開放が大きいほど不安定という評価になっていると考えられる。

図-22 はリニアメントとの遭遇数と AHP 評価点の相関で、全体としては遭遇数が多いほど AHP 評価点は高い傾向にはあるが、1 か所の遭遇が評価点の最大値と最小値にバラツキ、遭遇数がふえるほど中間評価点に収束していく傾向が認められた。

以上より、今回の AHP 評価の地形要素としては、舌端部が急勾配で大きく斜面侵食がされており、移動初期上部斜面が残留しており、応力開放量の多い規模が大きな斜面が、より不安定と判断されていると考えられた。

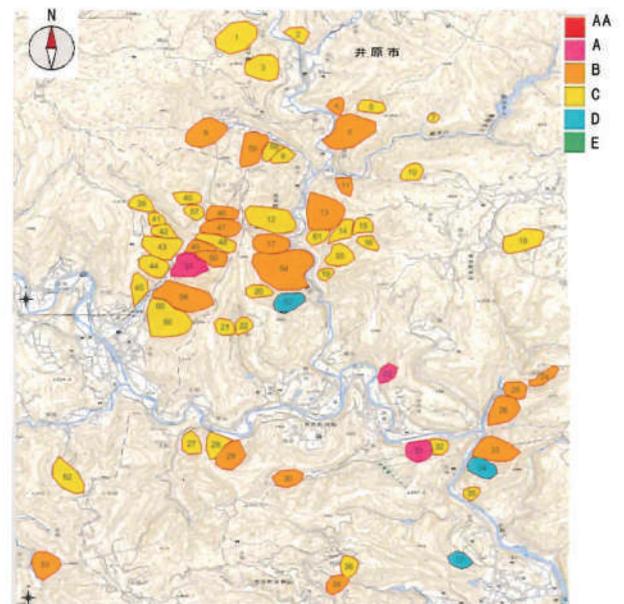


図-23 不安定斜面安定度分布図

7. 不安定斜面分布図の危険度表示

表-2 で区分した 62 箇所の斜面の区分を図-23 に示した。この区分では AA と E はなく A が 3 か所であった。その 3 か所の地形図（傾斜量図併用、国土地理院 GSIMaps）を図-24 に示した。

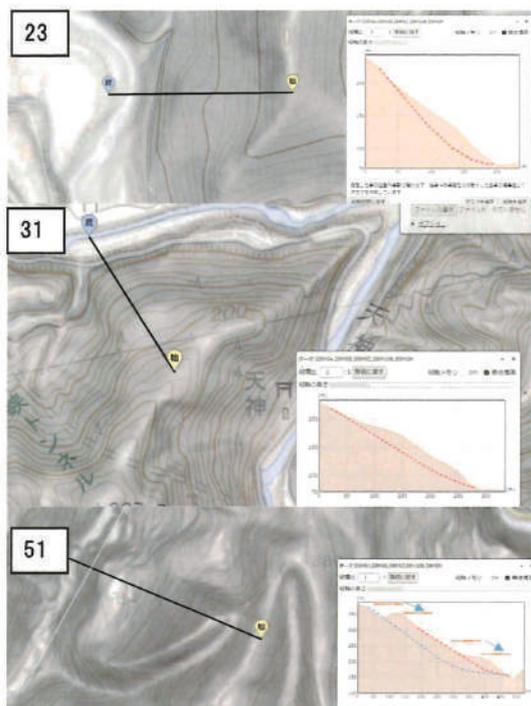


図-24 不安定斜面ランク A (多少不安定)
傾斜量図と断面図 (国土地理院 GSIMaps 使用)

図-23 で示すように、緊急度の高い AA ランクの不安定斜面はないものの、注目すべき斜面の選別ができ、不安定斜面の調査順位などを選定するうえで、かなり有効な手法になることが考えられる。また A ランクの 3 カ所は、図-24 に示すように、傾斜も形状も異なるが AHP では A (多少不安定) と判断され、単一的ではない評価であることが示された。

8. おわりに

今回の研究成果として下記の事項を確認できた。

- (1) 考案した不安定斜面の AHP 法の評価点は不安定斜面の順位付けに有効である。
- (2) AHP 法の F_s は、旧日本道路公団の地形による F_s と調和的であり、比較的妥当と考えられる。
- (3) AHP 評価点は衛星 SAR による変位速度の絶対値とも相関傾向が認められた。
- (4) AHP 法評価と SAR 変位速度絶対値とも、動いていない地すべりの微細な変動をとらえ、不安定斜面を評価できる手法になる可能性を示唆した。
- (5) その地形要素として、下部斜面の勾配比や上部斜面の残留程度、不安定斜面の規模や応力開放量などが、評価の着目点となっていることが判明した。
- (6) 高精度傾斜量図では、必ずしも 2 次ブロック

や小起伏や前面・側部崩壊などが多いほど不安定という訳でなく、少数の場合に不安定化が顕著になる場合もあることが判明した。

これら不安定斜面は現在も微細に動き、通常では把握できないレベルだが、将来の地形改変や地震や豪雨などの不安化要因の増加により顕在化する可能性が考えられる。その事前評価として有効な手法といえる。また、今後の課題として、以下の点が考えられ、検討を進める予定である。

- (1) 他の地域や地形への AHP 法の適用。
- (2) AHP 法の項目の再検討や修正。
- (3) 高精度傾斜量図による地すべり地形過程解析による区分。
- (4) 推定スベリ層厚との検討解析。
- (5) 他の事例を含めた変位速度と F_s の検討解析。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、助成を賜りました八雲環境科学振興財団に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 河野勝宣ら: 熱水変質岩の点載荷強さを考慮した AHP 法に基づくランドスライドハザードマップの試み-北海道黄壁澤-シケレベンゲツ川地すべり地域の例-, 日本地すべり学会, 地すべり学会誌, Vol.50, No3, pp.121-129, 2013.
- 2) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構・地質研究所他: 地すべり活動度評価手法マニュアル(案), pp.1-7, 2012.
- 3) 稲垣秀輝ら: 古期地すべりの安定性, 地盤工学会, 土と基礎, 7月号, pp.17-19, 2005.
- 4) (財)高速道路調査会: 地すべり地形の安定度評価に関する研究報告書(日本道路公団委託), pp.75-199, 1985.
- 5) 佐藤浩ら: SAR 干渉画像を用いた地すべり地表変動の検出について-山形月山周辺を事例にして-, 日本地すべり学会, 地すべり, Vol.49, No2, pp.61-67, 2012.
- 6) 石塚師也ら: 干渉 SAR 解析によって推定した地表変動と地すべりブロックとの関連-白山甚之助谷周辺の地すべりを例に-, 日本応用地質学会, 応用地質, 第 57 巻, 第 6 号, pp.289-294, 2017.
- 7) 清澤友弥ら: 長野県小谷村における PALSAR-2 干渉解析による地すべり性地殻変動の検出, 日本地すべり学会, Vol57, No1, pp.24-29, 2020.

反応機構に立脚した高活性可視光応答型光触媒の開発

岡山大学学術研究院環境生命自然科学学域(理) 山方 啓

1. はじめに

エネルギー問題や環境問題を解決するために、太陽光を用いて水から水素を製造できる光触媒が注目されている。しかし、工業的に利用するためには、活性をさらに向上させることが不可欠である。太陽電池をはじめとする半導体デバイスのほとんどは、表面欠陥が効率を低下させるため、いかにして欠陥が少ない大きな単結晶を安く製造するかが、重要なテーマであった。光触媒の場合にも、表面欠陥は光励起キャリアの再結合を促進する場になると考えられており、いかにして欠陥を少なくするかが重要な研究課題であった。しかし、つい最近、申請者は時間分解分光測定によりTiO₂やSrTiO₃の場合には、欠陥の少ない単結晶よりも欠陥が多い粉末の方が光励起キャリアの寿命が著しく長いことを実証した。光励起電子が欠陥に捕捉されると、電子のエネルギーは低下するので反応活性は低下する。しかし、電子の動きは遅くなるので、正孔と衝突する確率は低下し、正孔の寿命は長くなる。そのため、酸化活性は逆に向上する。つまり、電子トラップ準位を制御できれば、光励起電子の反応活性と正孔の寿命を制御できるので、光触媒活性を向上させることができることを示した。これらの結果は、太陽電池の場合とは異なり、光触媒の場合には適切な表面欠陥を導入することで光触媒活性を劇的に向上できることを示唆している。

そこで、本研究では、光触媒粉末の表面に存在する欠陥の化学組成と構造を制御することで光励起キャリアの動きを制御し、光触媒活性を向上させることを目的とする。そのためには、まず、表面欠陥における光励起電子や正孔の動きを良く理解することが不可欠である。一般に光触媒としてよく用いられる金属酸化物や金属酸窒化物の粉末の表面には、酸素欠損が生じやすい。そして、この酸素欠損の近傍にある金属カチオンが光励起電子を深くトラップすると考えられている。電子トラップ準位の深さは、化学組成だけではなく、欠陥の構造に依存する。そしてトラップ電子の反応活性は、トラップ準位の深さに支配されるので、光触媒活性を向上させるためには、どのような欠

陥がどのような深さの電子トラップ準位を形成するのか、そして、トラップキャリアの寿命と反応活性はどのように変化するのか、その一つ一つを理解する必要がある。そこで、本研究では申請者が独自に開発した可視中赤外時間分解分光測定を用いて、様々な粉末光触媒に形成された欠陥における電子トラップ準位の深さとそこにトラップされたキャリアの挙動を明らかにした。そして、ここで得られた知見を新しい機能を有する“欠陥”として設計し、光励起キャリアのエネルギー状態や動きを制御する。このように、従来、“害”と考えられてきた欠陥をうまく利用し、高活性光触媒を実現することを目的としている。

2. 時間分解分光計測による光励起キャリアの挙動解析

(1) 時間分解可視近赤外中赤外分光装置の概要

可視から中赤外域の時間分解分光計測をサブピコ秒から秒の時間領域で行うために、Fig. 1 に示す装置を製作した。マイクロ秒領域の時間分解測定は、Fig. 1A に示すように、cw 光源をプローブ光に用い、ポンプ光照射に伴うプローブ光の強度変化をオシロスコープで記録する³⁻⁵。赤外域の測定は粉末が高い赤外透過率を与えることを利用して、透過配置で実験を行う。ここでは、MoS₂などのセラミックス光源から放射される赤外光をサンプルに集光し、透過した光を分光器で単色化する。そして、この光強度の変化を MCT で検出した。可視域と近赤外域の測定は、粉末によるプローブ光の拡散が大きいため、拡散反射配置で行う。ここでは、光源にハロゲンランプを用い、サンプルに集光させた後に、散乱した光を分光器で単色化する。光強度の検出にはシリコンフォトダイオードと InGaAs を用いた。

実験に用いる光触媒粉末は水に懸濁した後に、CaF₂ 基板上に滴下しこれを自然乾燥させることで基板上に薄く固定する。そして、このサンプル基板を BaF₂ の窓板で構成され、雰囲気を制御できる赤外用真空セルの中に設置し、Nd:YAG レーザーの三倍波 (Continuum 社, Surelite-II, 355 nm, パルス幅 6 ns, 繰り返し周波数 0.01~10 Hz) や光パ

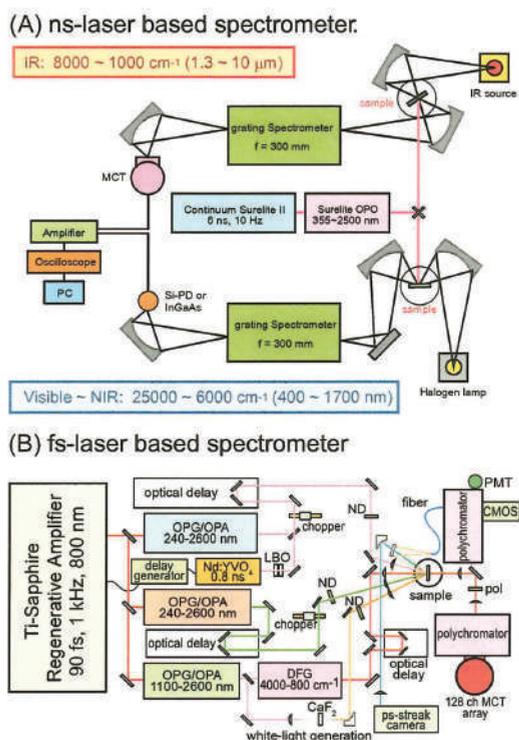


Fig. 1. Home-built time-resolved visible, NIR and IR absorption spectrometers.

ラメトリック増幅器で波長変換された可視光や近赤外光 (Continuum 社, Surelite-OPO, 410~2000 nm) を照射し, その光応答を計測した.

フェムト秒時間分解赤外分光測定には Fig. 1B に示すポンププローブ法を用いた. ここでは, チタンサファイヤ再生増幅器 (Spectra Physics 社, Solstice, パルス幅 90 fs, 繰り返し周波数 1 kHz) から出力された 800 nm の光を光パラメトリック発振や差周波発生 (Spectra Physics 社, TOPAS Prime, TOPAS NDFG, パルス幅 90 fs, 繰り返し周波数 1 kHz) により波長変換した光をポンプ光 (240~2000 nm) とプローブ光 (25000 ~ 1000 cm⁻¹) として用いた. この測定でも赤外領域は透過配置で実験を行い, 可視から近赤外域は拡散反射配置で測定を行った. 可視域, 近赤外域, 中赤外域のプローブ光の検出には光電子増倍管と InGaAs, MCT アレイを用いた. そして, プローブ光パルスの揺らぎによる S/N 比の低下を低減するために, チョッパーを用いてポンプ光の繰り返し周波数を 500 Hz に落とし, ポンプ光の照射 ON/OFF のプローブ光強度の比から吸光度変化を計算した. また, 時間分解測定は, 光学遅延回路を用い, ポンプ光とプローブ光が照射される時間差をずらしながら測定を行った. 一方, ナノ秒領域の過渡吸収測定には, ポンプ光に Nd:YVO₄ レーザーの 3 倍波

(Innolas 社, Piccolo, 355 nm, パルス幅 800 ps, 繰り返し周波数 1 kHz) を用い, プローブ光 (25000 ~ 1000 cm⁻¹) には上述したフェムト秒レーザーパルスを用いた. ここでは, ポンプ光とプローブ光がサンプルに照射される時間差をデジタル遅延パルス発生器 (SRS 社, DG645) を用いて変えながら時間分解過渡吸収測定を行った.

(2) 光励起キャリアによる過渡吸収スペクトル

光触媒のバンドギャップを光で励起して, 可視から中赤外域の過渡吸収スペクトルを測定すると, 一般的に Fig. 2A に示すような形状のスペクトルが出現する. 光励起キャリアによる光吸収過程を Fig. 2B に示すが, 伝導帯に励起された電子は, 主に中赤外域に吸収を与える. この吸収はバンド内遷移に帰属され, 右肩上がりで構造がないという特徴を有している. 一方, 欠陥にトラップされた電子は, トラップ準位から伝導帯への遷移に帰属される吸収を主に可視から近赤外域に与える. そして, この吸収端のエネルギーから, 伝導帯の下からトラップ準位の上端までの深さを大まかに見積もることができる. 一方, トラップ正孔は多くの触媒においてバンドギャップよりも若干長波長側の可視域に吸収を与えることが報告されている²⁾. したがって, 可視から中赤外域の時間分解吸収分光測定をサブピコ秒から秒の時間領域で行うことで, 伝導帯電子とトラップ電子, トラップ正孔のエネルギー状態や減衰過程を区別しながら光励起キャリアの挙動を詳しく調べることが可能になる.

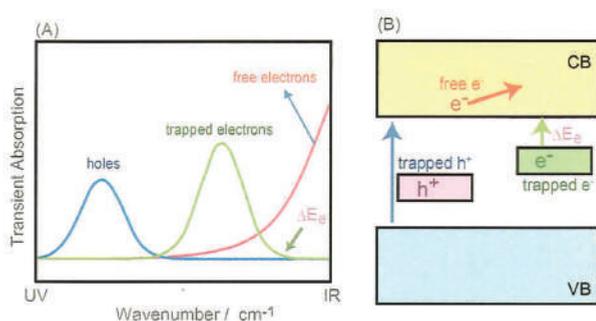


Fig. 2. Typical transient absorption of free electrons, trapped electrons and holes in photocatalysts.

3. 光触媒粉末欠陥における光励起キャリアの特異的な動きと光触媒活性への影響の解明

欠陥における光励起キャリアの挙動を調べるため, まず SrTiO₃ の単結晶に 355 nm のレーザーパルスを照射して過渡吸収スペクトルを測定した.

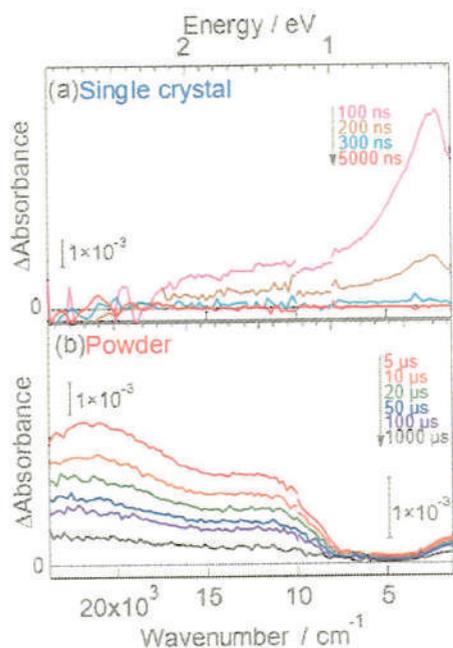


Fig. 3. Transient absorption spectra of SrTiO₃ irradiated by UV laser pulses (355 nm, 6 ns duration, 0.5 mJ/pulse, and 5 Hz): (a) single crystal (110) and (b) powder.

Fig. 3A に示すように、紫外光を照射すると、25000 から 10000 cm^{-1} にかけてブロードな吸収が観測された。この右肩上がりの吸収は、伝導帯中に励起された自由電子のバンド内遷移に帰属される^{3,4)}。また、2400 cm^{-1} 付近に小さいピークが現れるが、これは浅いポーラロン状態に束縛された電子による吸収に帰属される⁴⁾。これらの結果は、欠陥が少ない単結晶の場合、ほとんどの光励起電子は伝導帯中で自由電子、あるいは、浅いポーラロン状態として残存することを意味している。しかし、大部分の光励起キャリアは寿命が短く、再結合により 300 ns 以内に消失してしまうことが分かった。

次に、SrTiO₃ の粉末を用いて同様な実験を行った。しかし、Fig. 3B を見て分かるように、過渡吸収スペクトルの形状は単結晶とは全く異なる。伝導帯電子あるいは浅いトラップ準位に束縛された電子による吸収が 4000 cm^{-1} 以下に現れる。しかし、これよりさらに強い吸収が 22000 cm^{-1} と 11000 cm^{-1} 付近に出現した。これらの吸収は酸素ガスやメタノール蒸気との反応性から、それぞれトラップ正孔とトラップ電子に帰属された^{3,4)}。これらの結果より、粉末の場合、大部分の光励起キャリアは欠陥に捕捉されていることが分かる。しかし、光照射から 1 ms 経っても強い吸収が観測されることから、単結晶に比べて光励起キャリアの寿命は著しく長いことが分かった。

次に、欠陥が再結合速度に及ぼす影響をさらに

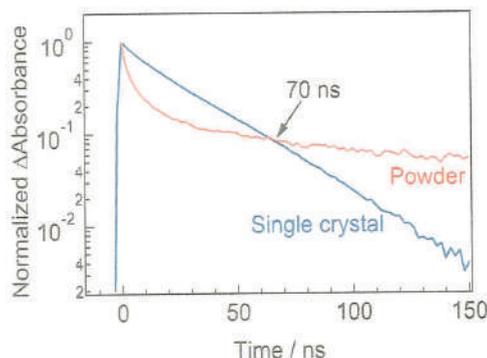


Fig. 4. Decay curves of transient absorption measured at 2000 cm^{-1} for single-crystal and powder SrTiO₃. The sample was excited by 355 nm laser pulse (800 ps duration, 6 $\mu\text{J pulse}^{-1}$).

詳しく調べるために、Fig. 4 に示すように単結晶と粉末における電子の減衰過程を比較した。その結果、単結晶の場合、2000 cm^{-1} で観測した自由電子は単一成分の指数関数で単調に減衰する。しかし、粉末の場合、減衰はいくつかの異なる寿命を有する成分で構成され、時間がたつにつれて徐々に減衰速度が遅くなることが分かる。その結果、自由電子の寿命は光照射直後は単結晶の方が長いですが、約 70 ns 後に逆転し、それ以降は粉末の方が寿命が長くなる。同様な結果は、トラップ電子とトラップ正孔の減衰でも観測されるが、逆転する時間は約 12 ns とトラップキャリアの方が速い。この結果は、粉末中で生成した光励起キャリアは、光照射から数ナノ秒間は単結晶よりも寿命が短いですが、その後、単結晶よりも長くなることを意味している。これらの結果は、粉末欠陥は光照射直後の再結合を促進するが、遅い時間領域では、逆に再結合を抑制する、という相反する二つの効果を有していることを意味している。

この一見矛盾して見える二つの効果は、Fig. 5 のようなモデルで説明できる。光照射直後、生成したキャリアは光吸収によって得た余剰エネルギーを有しており、このエネルギーを用いてバルクや表面へ拡散が進行する。しかし、粉末には数多くの欠陥があるため、一部のキャリアはこれらの欠陥に捕捉され、拡散が妨げられる。このとき、まだ十分に拡散していない間にキャリアが捕捉されると、電子と正孔は互いに近い場所に束縛されることになる。このような状況では、電子と正孔は互いにホッピングして接近することが可能であるため、すぐに再結合してしまう。このような理由で、粉末欠陥は特に光照射直後における再結合を促進する効果がある。

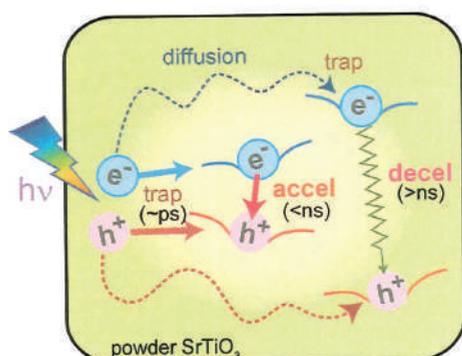


Fig. 5. Schematic representation of the acceleration and deceleration of photocarrier recombination by the defects on powder SrTiO₃.

しかし、光照射直後の再結合を逃れることができれば、これらは拡散することが可能であり、電子と正孔は空間的にさらに離れていく。その結果、電子と正孔は互いに離れた場所で欠陥に捕捉されることになる。この場合、電子と正孔が再び互いに接近するためには、ホッピングとトンネリングを繰り返して長い距離を移動しなくてはならない。トラップキャリアにとっては、このような移動は容易ではない。したがって、トラップキャリアの再結合は伝導帯電子に比べて遅くなる。よって、特にナノ秒以降の遅い時間領域では、粉末の方が単結晶よりもキャリアの寿命が長くなる、と説明できる。

つまり、粉末は単結晶よりも多数の欠陥を有するが、これらの欠陥は光励起キャリアの長寿命化に役立ち、光触媒の活性向上に役立つ場合があることが分かった³⁾。

4. Na をドーピングした SrTiO₃ 光触媒の活性向上のメカニズム解明

欠陥や不純物が光触媒活性に及ぼす影響を詳しく調べるために、SrTiO₃ に Na をドーピングして、光触媒活性と光励起キャリアの挙動を調べた。SrTiO₃ に Na をドーピングすると、Sr²⁺ が Na⁺ に置換され、電荷を補償するために酸素欠陥量が増加することが期待される。そこで、時間分解過渡吸収測定を行い、光励起キャリアの挙動を調べた⁵⁾。

まず、何もドーピングしていない SrTiO₃ に紫外光レーザーパルス照射して測定した過渡吸収スペクトルを Fig. 6A に示す。その結果、ブロードな吸収バンドが >14,000 cm⁻¹, 14,000–5,000 cm⁻¹, 5,000–1,000 cm⁻¹ に観測された。これらはそれぞれ欠陥にトラップされた正孔、欠陥にトラップされた電子、伝導帯電子に帰属される⁵⁾。一方、Na

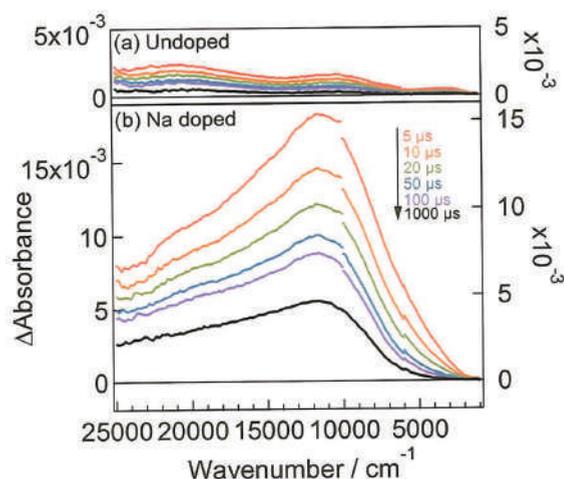


Fig. 6. Transient absorption spectra of (A) undoped SrTiO₃ and (B) 4 mol% Na-doped SrTiO₃ measured in vacuum.

を 4 mol% ドープすると、可視から近赤外域の広い範囲で吸収強度が著しく増加した (Fig. 6B)。これは欠陥に捕らえられた電子の残存量が Na ドープで増えたことを意味している。このトラップ電子の減衰過程をさらに詳しく比較したところ、トラップ電子の減衰速度は Na をドーピングすることで著しく遅くなることが分かった。

これらの光触媒の水分解活性を実際に調べたところ、Na を 4 mol% ドープすると、水分解による水素生成活性が 0.15 mmol/h から 28.4 mmol/h と約 200 倍近く向上し、反応の量子効率も 30% 近くまで達した⁵⁾。これらの結果は、SrTiO₃ に不純物をドーピングするとこれらの不純物・欠陥準位が光励起電子を捕捉することで再結合を著しく抑制し、その結果光触媒活性を向上させたと考えられる。

5. ドーパントの空間分布を制御することによる Ga₂O₃ 光触媒の活性向上メカニズムの解明

上で述べた SrTiO₃ の他に、Ga₂O₃ でも不純物をドーピングすると光触媒活性が向上することが報告されている⁶⁾。例えば、Ga₂O₃ 粒子の表面に Zn を 3.5 mol% ドープすると水分解の量子効率は 24% から 57% まで向上する。一方、Ga₂O₃ 粒子の内部に Ca を 0.9 mol% ドープすると量子効率は 32% まで向上する。さらに、Ca のバルクドーピングと Zn の表面ドーピングを組み合わせると、その量子効率は 71% まで向上する。しかし、Zn と Ca をドーピングすると、なぜ活性が向上するのかそのメカニズムが分かっていなかった。そこで、本研究では Ca や Zn をドーピングすると光励起キャリアの再結合速度や電子のエネルギー状態がどのように変化するかを調べた。

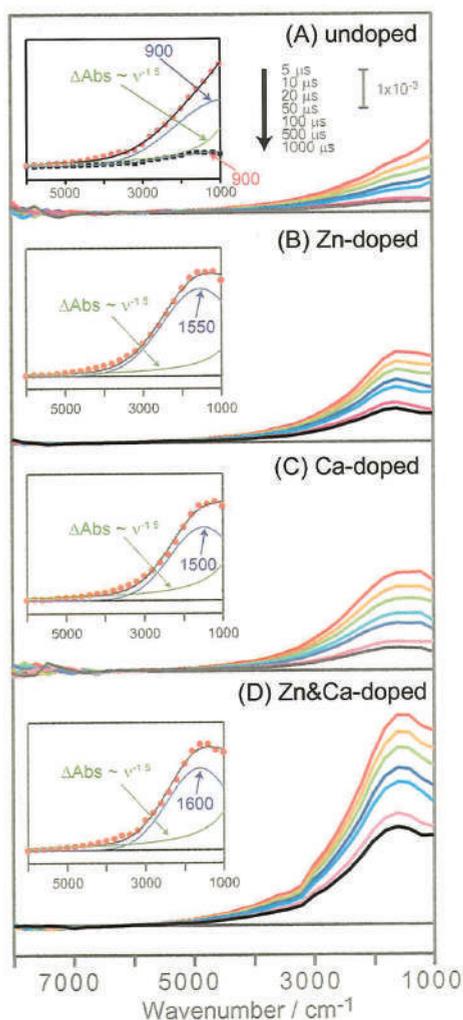


Fig. 7. Transient IR absorption spectra of undoped Ga₂O₃ (A), Zn-doped Ga₂O₃ (B), Ca-doped Ga₂O₃ (C), and (Ca, Zn)-doped Ga₂O₃ (D) upon band gap excitation using 266 nm laser pulses. The insets show the curve fitted transient absorption spectra measured at 5 μs. Blue and green curves are fitted by gaussian and power law functions, respectively.

まず、何もドーピングしない Ga₂O₃ に 266 nm のレーザーパルス照射して測定した過渡吸収スペクトルを Fig. 7A に示す。バンドギャップを励起すると、5000~1000 cm⁻¹ に右肩上がりの構造のないブロードな吸収が観測された。この吸収は伝導帯電子による赤外吸収 ($\Delta\text{Abs} \sim \nu^{-1.5}$) と 900 cm⁻¹ (~0.1 eV) にピークを持つ浅い欠陥準位に捕捉された電子による赤外吸収で構成され、大部分の電子は自由電子あるいは浅くトラップされた電子として残存することが分かった。

次に、Zn をドーピングした Ga₂O₃ の過渡吸収スペクトルを測定したところ、伝導帯電子による赤外吸収に加えて、1550 cm⁻¹ (~0.2 eV) 付近に新しいピークを持つ強い吸収が出現した (Fig. 7B)。この結果は、Ga₂O₃ に Zn をドーピングすると浅い欠陥準位

が形成され、大部分の電子はこの欠陥に捕捉されることを意味している。浅い欠陥準位の形成は Ca ドープ (Fig. 7C) や Ca と Zn の共ドープ (Fig. 13D) でも観察され、そのピーク位置は Ca でも Zn でもほとんど変わらない。この結果は、ドーピングされた Zn と Ca はいずれも同様な深さの電子トラップ準位を形成すること意味しており、これは理論計算でもサポートされている⁶⁾。この浅い欠陥準位の生成は光励起電子を捕捉し、SrTiO₃ の場合と同様に再結合の抑制に役立っている。その結果、ドーピングにより再結合が抑制され、Zn&Ca > Ca > Zn > undope の順番に残存電子数が多くなっている。

問題はこれらのトラップ電子が水との反応性を有しているかどうかである。これを調べるために Ga₂O₃ に水素生成助触媒である Rh を担持して電子の減衰過程を窒素中と水蒸気中で比較した。その結果、水蒸気を導入すると、マイクロ秒領域における電子の減衰が加速され、電子が水分子へ移動することが確認できた。そして、Zn と Ca を共ドーピングするとトラップ電子の反応活性がさらに向上することが分かった。これは、バルクから表面にかけてドーパントの濃度勾配ができているためであると考えている。光励起電子の拡散はトラップ準位の電子占有率を一致させる方向に進行する。したがって、このようなトラップ準位の濃度勾配ができている場合には、バルクの内部でトラップされた電子は表面に拡散しやすいことが期待される。つまり、ドーパントの空間分布を制御することでトラップ電子の表面への拡散を制御できることが分かった。粉末欠陥は再結合を抑制する効果があるが、この欠陥準位の深さと分布をうまく制御することで活性を飛躍的に向上できることを明らかにした⁷⁾。

6. 欠陥導入により活性が向上する触媒と活性が低下する光触媒の違いの解明

光触媒粉末の表面には欠陥が多数存在し、これらは光励起キャリアの再結合を促進するという説や逆に再結合を抑制するという説が提唱されてきた。しかし、どのような場合に再結合が促進され、どのような場合に抑制されるのか、意見は分かれており統一的な見解が得られていなかったのが実情である。そこで、本研究では、この矛盾を理解するために、TiO₂ や SrTiO₃、WO₃ などの光触媒粉末に水素還元処理を施して酸素欠陥を導入し、可視から中赤外域の過渡吸収をフェムト秒から秒の時間領域で測定できる独自の分光システムを使って再結合速度への影響を調べた⁸⁾。その結果、

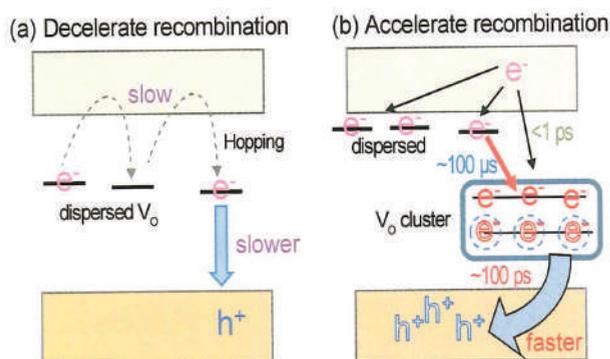


Fig. 8. Schematic representation of the effects of the defects on the recombination kinetics of photocarriers. (a) Dispersed oxygen vacancies (V_o) decelerate the recombination, but (b) aggregated V_o accelerate the recombination. Reduced WO_3 corresponds to (b), and V_o accelerates the recombination.

700°Cで水素還元したルチル型 TiO_2 と 800°Cで水素還元した $SrTiO_3$ は、いずれも水素還元によって再結合が抑制され、光触媒活性が向上することを見いだした⁹⁾。しかし、300°Cで水素還元した WO_3 の場合には、光触媒活性が低下し、再結合が促進されることが分かった。同じ酸素欠陥でも材料によって影響が異なるのは、Fig. 8 に示すように酸素欠陥の分布に違いで説明できる。 WO_3 の場合、酸素欠陥ができやすく、 $WO_{2.9}$ や $WO_{2.83}$ 、 $WO_{2.72}$ といった多くの酸素欠損型が安定に存在する。このような材料では、酸素欠陥の近傍に新たな酸素欠陥が形成しやすく、複数の酸素欠陥がつながった複合体になりやすい。この酸素欠陥に捕捉された電子は、連結した欠陥の間を自由に動くことができる。したがって、再結合が加速されることになる。一方、 TiO_2 や $SrTiO_3$ は、 WO_3 ほど還元されやすくはない。このような場合には、酸素欠陥はまばらに存在し、欠陥に捕捉されたトラップ電子は、再結合相手である正孔と衝突するまでにホッピングやトンネリングを何度も繰り返さなくてはならない¹⁰⁾。つまり、欠陥は再結合を抑制するものと、促進するものがあるが、それらの分布を上手く制御することで光触媒活性を向上できることを見いだした。

7. まとめと今後の展望

本研究では、可視から中赤外域の過渡吸収分光計測をフェムト秒から秒の時間領域で行うことで光触媒反応の活性を支配する光励起キャリアの挙動を調べた。光触媒反応は、光を照射して生成した電子と正孔によって引き起こされる。したがって、メカニズムを理解するためには、これらの光

励起キャリアの動きを理解する必要がある。特に、粉末光触媒の場合、表面欠陥や不純物準位に束縛されたキャリアの動きが反応を支配する。光触媒に不純物をドーピングしたり、異種材料を接合すれば活性が変化する。しかし、活性が変化する原因が分かっていない。多くの研究者が長年の経験と深い洞察に基づいて光触媒開発を進める中で、このような反応メカニズムを解明できれば、原理に基づいた触媒設計が可能である。可視から中赤外域の過渡吸収分光計測を用いれば、粉末光触媒材料に特有の光励起キャリアの動きを詳しく調べることができる。複雑な光触媒粉末における光励起キャリアの挙動を一つずつ検証できれば、これまで見過ごされてきた新しい原理を発見できる可能性がある。欠陥ばかりの半導体ナノ粒子の場合、理想的なバルクの結晶では起きえない不思議な現象がまだまだ起きる可能性がある。ブレークスルーをもたらす研究は、反応素過程を一つずつ検証し、これまでの常識を見直す研究の中から生まれてくると考えている。

References

- 1) J. I. Pankove: *Optical Processes in Semiconductors*. (Dover, New York, 1975).
- 2) A. Yamakata, M. Kawaguchi, N. Nishimura, T. Minegishi, J. Kubota, and K. Domen: *J. Phys. Chem. C* **118**, 23897 (2014).
- 3) A. Yamakata, J. J. M. Vequizo, and M. Kawaguchi: *J. Phys. Chem. C* **119**, 1880 (2015).
- 4) K. Kato and A. Yamakata: *J. Phys. Chem. C* **124**, 11057 (2020).
- 5) K. Kato, J. Z. Jiang, Y. Sakata, and A. Yamakata: *ChemCatChem* **11**, 6349 (2019).
- 6) Y. Sakata, T. Hayashi, R. Yasunaga, N. Yanaga, and H. Imamura: *Chem. Commun.* **51**, 12935 (2015).
- 7) A. Yamakata, J. J. M. Vequizo, T. Ogawa, K. Kato, S. Tsuboi, N. Furutani, M. Ohtsuka, S. Muto, A. Kuwabara, and Y. Sakata: *ACS Catal.* **11**, 1911 (2021).
- 8) K. Kato, Y. Uemura, K. Asakura, and A. Yamakata: *J. Phys. Chem. C* **126**, 9257 (2022).
- 9) J. Jhon M Vequizo, K. Kato, F. Amano, and A. Yamakata: *J. Phys. Chem. C* **in press** (2023).
- 10) S. Naniwa, K. Kato, A. Yamamoto, H. Yoshida, and A. Yamakata: *J. Phys. Chem. C* (2023).

低炭素社会実現に向けたシリコン(ケイ素)の利用に関する研究

倉敷芸術科学大学生命科学部生命科学科 仲章伸

1. はじめに

地球の表面に存在する元素の重量百分比を示したものはクラーク数と呼ばれている。このクラーク数では酸素が49.5%で第一位、ケイ素が25.8%で第二位を占めている。これほど多く存在するケイ素であるが、これまでのところ完全に有効利用されているとは言えない。筆者らは、地球上に無尽蔵に存在する元素であるケイ素の有効利用を目指して、基礎から応用まで様々な研究を行ってきた。ケイ素の性質はまだ未知の部分が多く、今後も幅広い基礎研究が必要であると考えている。現在では、グリーンケミストリーの観点からも、副生成物を出さない含ケイ素化合物の新規合成法の確立が求められている。本研究の基礎的な側面においては、ケイ素置換基を一度に2個導入することが出来るビスシリル化反応に着目し、研究を進めたところ、これまでに例のない世界で初めての反応を見出すことが出来たので報告する。

また、ケイ素化合物の応用的な側面としてケイ素-酸素結合を有するシリコン利用に関する研究も行った。シリコンは、耐熱性、耐候性、耐光性、耐寒性など、様々な特性を有しており、極めて広範な分野において利用されてきている。しかし、炭素を中心とする有機材料が年産2億トンを超えるのに対し、シリコンの生産量は、その1%にも満たないのが現状である。

これまで、シリコンの温室効果ガス排出量とその利用による温室効果ガス削減効果の調査が行われてきている。ヨーロッパ、北アメリカ、日本の3地域で、シリコンの製造、使用、使用済み段階からなるライフサイクルで排出される温室効果ガスを対象としたものである。その結果、シリコンを使用することにより、シリコンの製造と廃棄処理から排出される温室効果ガスの9倍もの排出削減の効果が生み出されることが分かっている。つまりシリコンを製造するのに1トンの二酸化炭素が排出されたとしても、シリコンを使用することにより9トンの二酸化炭素の削減ができるということである。そこで、シリコンに関する研究として、ピリミジンを経由し、トリエトキシシランを有するアームが伸張した含ケイ素化合物の合成を行い、それらを利用したガス分離膜の開発を検討したので合わせて報告する。

2. パラジウム錯体触媒存在下、分子内ビスシリル化によるピリジンが縮環したシロールの合成

2.1 緒言

含ケイ素化合物は、機能性材料や製薬など様々な分野で使用されている。それにともなって、含ケイ素化合物の新規合成法の開発も行われてきている¹⁾。その中で、遷移金属錯体触媒を用いたピ

スシリル化反応も報告されている²⁾。内部アルキンとジシランのビスシリル化反応の例を図-1に示した³⁾⁻⁵⁾。

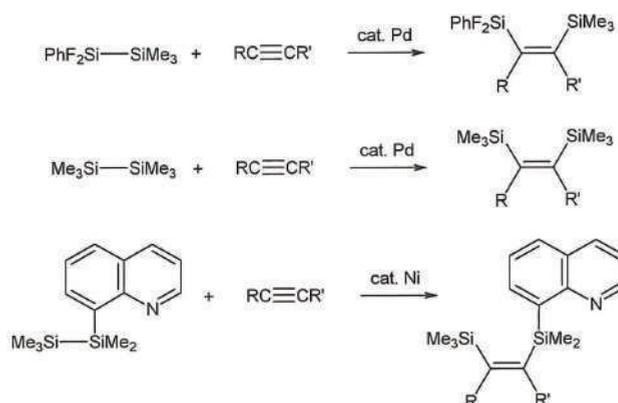


図-1 内部アルキンのビスシリル化

上記に示すように、これまで報告されているパラジウム錯体およびニッケル錯体触媒存在下でのビスシリル化反応は、すべてシス付加である。

トランス型ビスシリル化反応については、ロジウム錯体触媒存在下での反応が図-2に示すように報告されている⁶⁾。

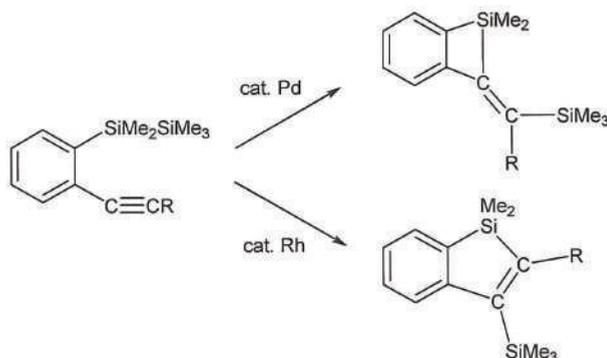


図-2 アリールジシランとアルキンの分子内ビスシリル化反応

また、ケイ素を含む五員環化合物であるシロールは、それらの低い最低空軌道(LUMO)を有することにより、電子受容性に優れていることが知られている。様々なシロールを含む化合物が合成されてきており、それらの特異な電子的および光物性により、有機LED、光起電力デバイス、半導体材料などへの応用研究がなされてきている⁷⁾。

そこで、本研究の基礎的側面では、機能性材料を指向してピリジンが縮環したシロール誘導体の合成を計画した。

2.2 実験結果と考察

2,3-ジブロモピリジンをイソプロピルマグネシ

ウムクロライドと室温で反応させ、続いてクロロペンタメチルジシランでクエンチしたところ、2-ブロモ-3-(ペンタメチルジシラニル)ピリジン(1)が70%の収率で得られた。2-フェニルエチニル-3-(ペンタメチルジシラニル)ピリジンを得るために、化合物1とエチニルベンゼンを菌頭カップリングの条件下で反応させた。具体的には、ジクロロビス(トリフェニルホスフィン)パラジウム-ヨウ化銅触媒存在下、化合物1とエチニルベンゼンの混合物をトリエチルアミン溶媒中で加熱還流させた。その結果、驚いたことに予期せぬ化合物である1,1-ジメチル-2-フェニル-3-(トリメチルシリル)-1*H*-シロロ(3,2-*b*)ピリジン(2a)が15%の単離収率で得られた。その他の化合物としては、分子間ビスシリル化生成物である3aが8%の収率で得られた。

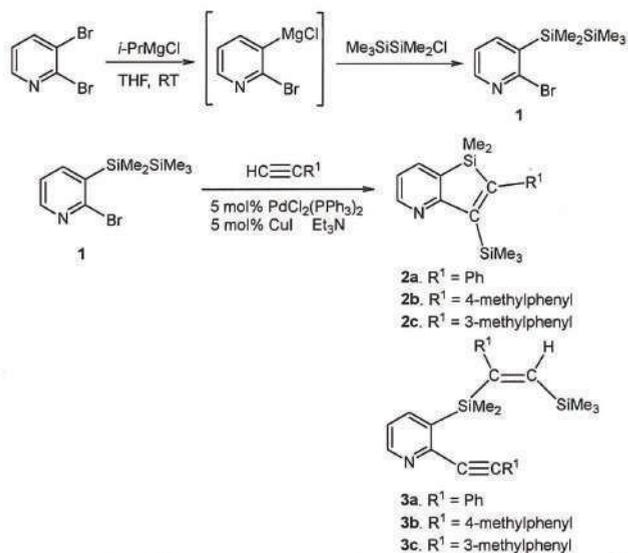


図-3 化合物1とエチニルベンゼン誘導体のパラジウム錯体触媒反応

化合物2aは、トランス型分子内ビスシリル化反応を経由して生成したものと考えられた。また、反応混合物のガスクロマトグラフィー(GLC)およびゲルパーミエーションクロマトグラフィー(GPC)分析により、多くの同定できない生成物が存在していることが明らかとなった。化合物2aおよび3aの構造は、高分解能質量分析(HiMS)および各種核磁気共鳴スペクトル(NMR)により決定した。

反応機構を明らかにする目的で、化合物1とエチニルベンゼンの反応をヨウ化銅触媒不在下、パラジウム錯体触媒のみで行ったところ、化合物2aは全く検出されず、複雑な混合物が得られた。現在のところ、ヨウ化銅触媒は、カップリング反応のみに必要であると考えている。

化合物1と4-エチニルトルエンを同条件下で反応させたところ、1,1-ジメチル-2-(*p*-トリル)-3-(トリメチルシリル)-1*H*-シロロ(3,2-*b*)ピリジン(2b)が21%および化合物3bが7%の単離収率で得られた。この反応においても、GLCおよびGPC分析で多くの同定できない化合物が検出された。化合物1と3-エチニルトルエンをジクロロビス(トリフェニルホスフィン)パラジウム-ヨウ化銅

触媒存在下、反応させたところ、1,1-ジメチル-2-(*m*-トリル)-3-(トリメチルシリル)-1*H*-シロロ(3,2-*b*)ピリジン(2c)が16%および化合物3cが3%の単離収率で得られた。

化合物1と1-クロロ-4-エチニルベンゼンを同様の条件下で反応を行ったが、化合物2a-2cや化合物3a-3cと類似の化合物は全く検出できなかった。これは、塩素置換基の電子求引性の効果が影響しているものと考えている。化合物1と2-エチニル-1,3,5-トリメチルベンゼンとの同様の反応でも、ビスシリル化生成物は全く得られてこなかった。おそらく、2-エチニル-1,3,5-トリメチルベンゼンの立体的な嵩高さが原因であると思われる。

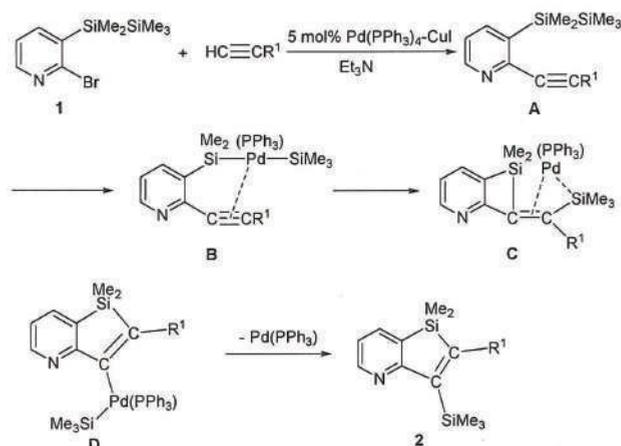


図-4 化合物2生成メカニズム

化合物2の生成メカニズムを図-4に示す。最初に、化合物1とエチニルベンゼン誘導体が菌頭カップリング反応を行うことにより、化合物Aが生成する。続いて、ケイ素-ケイ素結合のパラジウム錯体への酸化的付加が起こり、中間体Bが生成する。中間体Bは、ケイ素-炭素結合の形成をともなっており、中間体Cとなる。中間体Cは、四員環から五員環への環拡大を起こし、中間体Dとなる。その後、還元的脱離により、ビスシリル化生成物2が得られるとともにパラジウム触媒が再生するものと考えている。

次に、化合物1とエチニルトリメチルシランの反応をジクロロビス(トリフェニルホスフィン)パラジウム-ヨウ化銅触媒存在下で行った。化合物1とエチニルトリメチルシランの混合物をトリエチルアミン溶媒中で加熱還流させたところ、3-(1,1,2,2-ペンタメチルジシラニル)-2-(トリメチルシリルエチニル)ピリジン(4)が17%の単離収率で得られた。シロール誘導体2a-2cと類似の化合物である1,1-ジメチル-2,3-ビス(トリメチルシリル)-1*H*-シロロ(3,2-*b*)ピリジン(2d)は反応混合物中に全く検出されなかった。化合物1と3,3-ジメチル-1-ブチンとの同様の反応においても、2-(3,3-ジメチルブト-1-イン-1-イル)-3-(1,1,2,2-ペンタメチルジシラニル)-ピリジン(5)が5%の単離収率で得られ、シロール誘導体は全く確認出来なかった。これらの反応においても、GLCおよびGPC分析で多くの同定できない化合物が検出された。

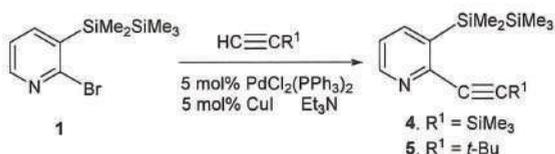


図-5 化合物 1 とエチニルトリメチルシランおよび 3,3-ジメチル-1-ブテンの反応

2.3 計算化学的研究

3-(1,1,2,2,2-ペンタメチルジシラニル)-2-(フェニルエチニル)ピリジン(6)から、中間体 7 を経由してビスシリル化生成物 2a への合成ルートにおけるエネルギーおよび構造変化を明らかにする目的で DFT 計算を行った。

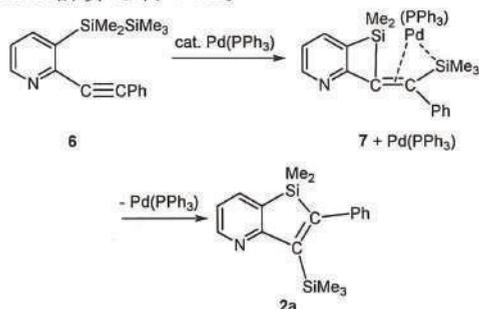


図-6 化合物 6 から中間体 7 を経由した化合物 2a 生成ルート

パラジウム錯体は、パラジウムにトリフェニルホスフィン配位子が 1 個付いた Pd(PPh₃)を用いて計算を行った。化合物 6 から化合物 2a 生成のメカニズムとしては、2 つの反応経路が考えられる。1 つ目は、化合物 6 からシス型ビスシリル付加体 7 とトランス型ビスシリル付加体 2a が別々に生成するルートであり、2 つ目は化合物 6 から最初にシス型ビスシリル付加体 7 が生成し、その後トランス型ビスシリル付加体 2a へ構造変化を起こすルートである。双方のルート計算を行ったが、2 つ目のルートすなわち、化合物 6 から最初に 7 が生成し、その後 2a に変換するほうがエネルギー的に低いという結果となった。図-7 では、7 個の遷移状態(TSs)と 8 個のローカルミニマム(LMs)を示している。LM0 は化合物 6 であり、LM4 はシス型ビスシリル付加体 7、LM7 はトランス型ビスシリル付加体 2a である。

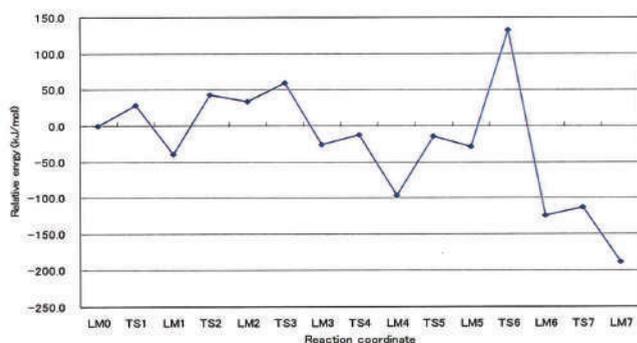


図-7 化合物 6 から中間体 7 を経由した化合物 2a 生成のエネルギー変化

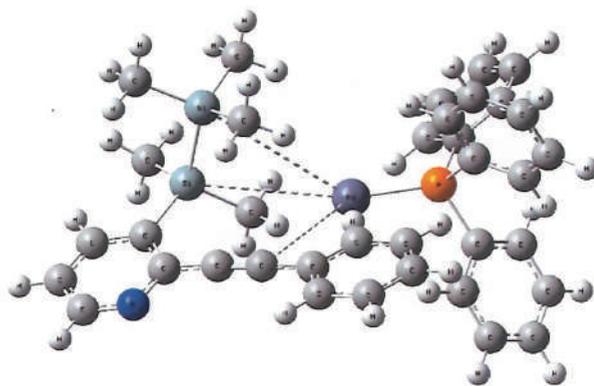
DFT 計算による LM0 から LM7 の各々の構造

は、図-8 から図-11 に示した。

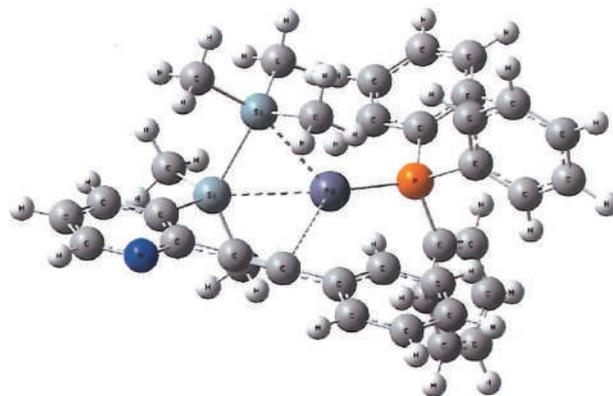
TS6 の形成は、161.0 kJ/mol の活性化エネルギーを持っており、シス付加体 7 からトランス付加体 2a への変換の活性化エネルギーが最も高いということが明らかになった。しかし、トランス付加体 2a は、シス付加体 7 よりも 91.4 kJ/mol も熱力学的に安定である。化合物 2a の生成は、四員環化合物である化合物 7 の歪みの解消がドライビングフォースであると考えられる。

さらに、パラジウム錯体上にトリフェニルホスフィン配位子を持たない系でのトランス付加体 2a 生成の DFT 計算を行った。その結果、その一番大きな活性化エネルギーは 215.3 kJ/mol となり、図-6 に示すルートよりも大きなエネルギーを要することが分かった。

LM0(化合物 6)



TS1



LM1

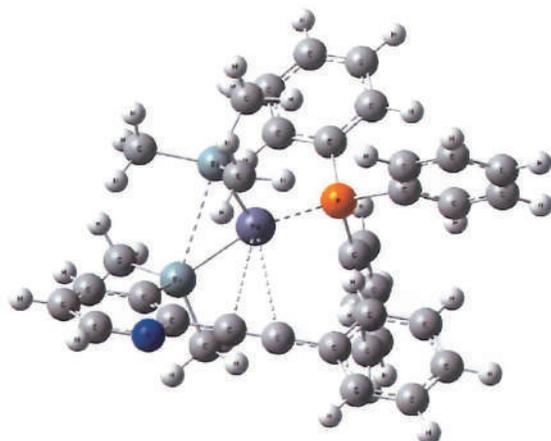
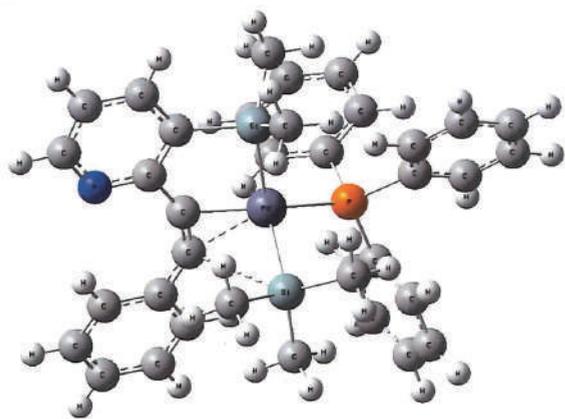
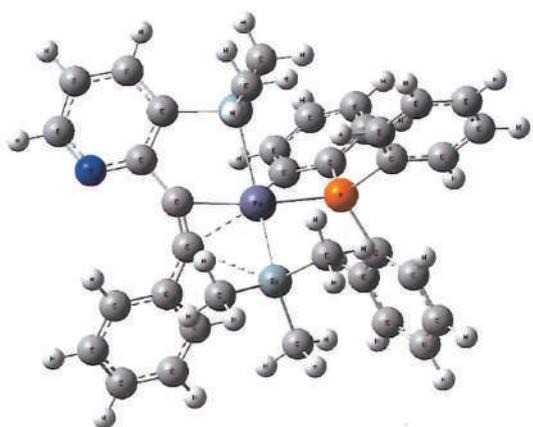


図-8 DFT 計算による LM0、TS1、LM1 の構造

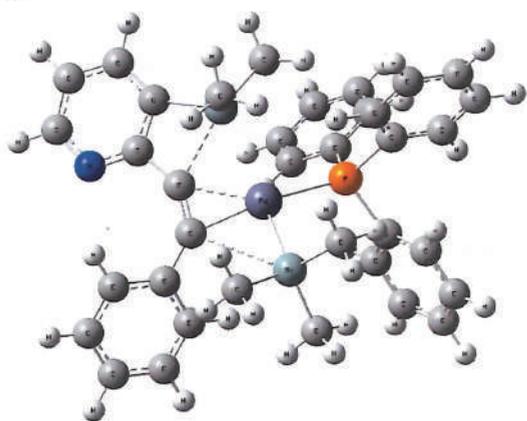
TS2



LM2



TS3



LM3

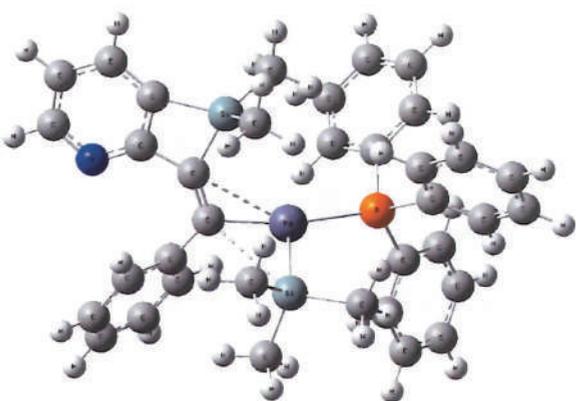
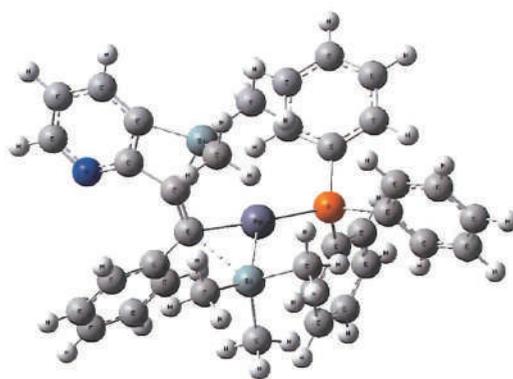
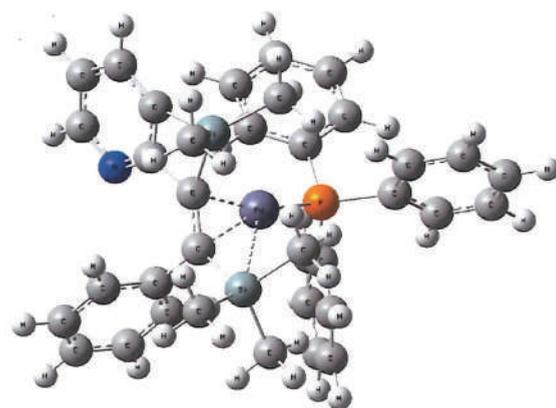


図-9 DFT 計算による TS2、LM2、TS3、LM3 の構造

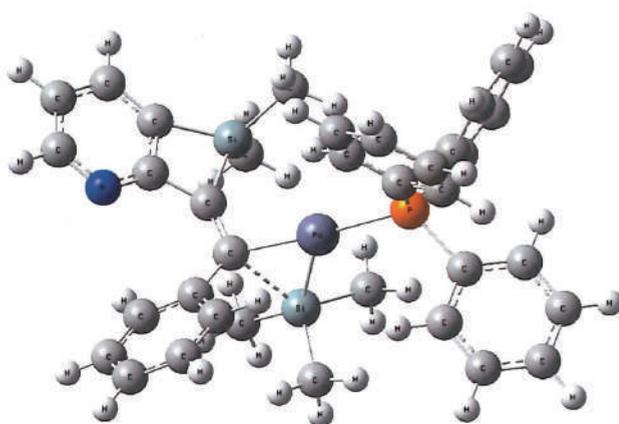
TS4



LM4(化合物 7)



TS5



LM5

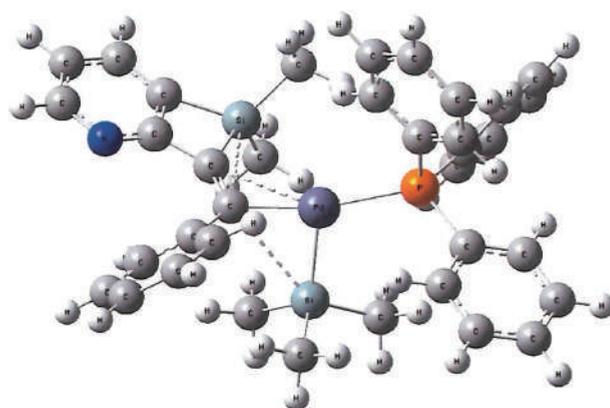
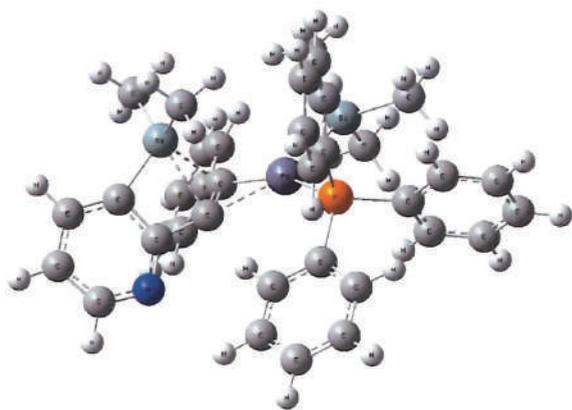
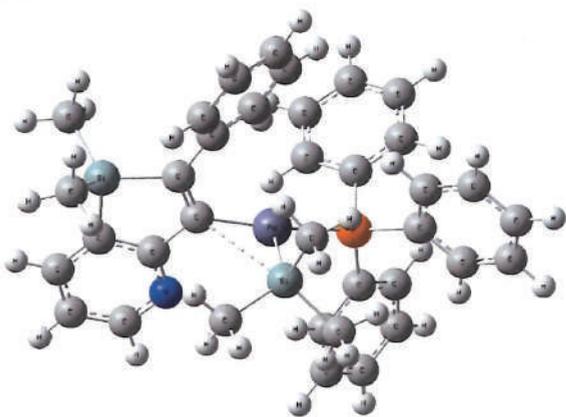


図-10 DFT 計算による TS4、LM4、TS5、LM5 の構造

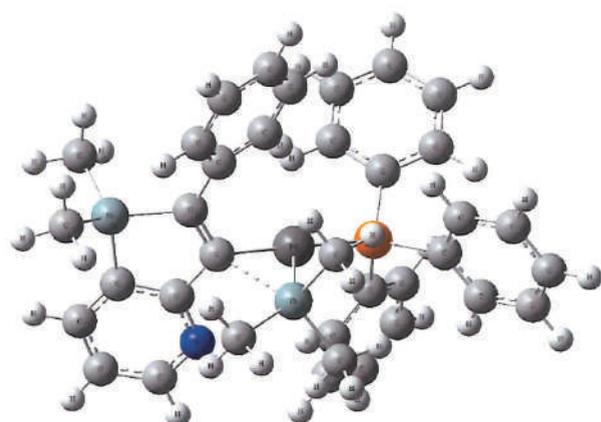
TS6



LM6



TS7



LM7(化合物 2a)

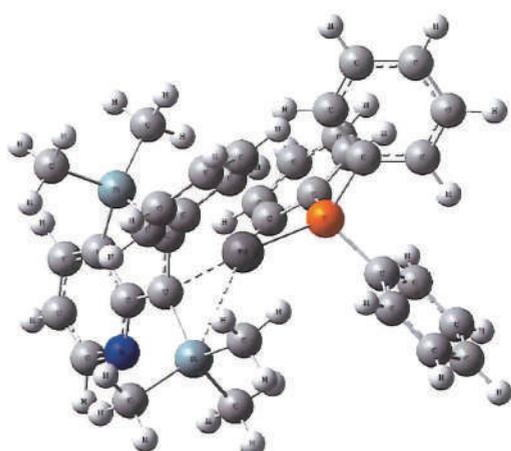


図-11 DFT 計算による TS6、LM6、TS7、LM7 の構造

2.4 まとめ

本研究では、2-プロモ-3-(ペンタメチルジシラニル)ピリジン(1)をジクロロビス(トリフェニルホスフィン)パラジウム-ヨウ化銅触媒存在下、エチルベンゼン誘導体との反応を行った。その結果、菌頭カップリング反応後、分子内トランス型ビスシリル化反応が起こり、シロール誘導体 2a-2c が得られることが明らかとなった。また、DFT 計算を用いて、その反応機構を詳細に検討し、シス付加体を経由して、最終生成物であるトランス付加体を与えていることを見出した。パラジウム錯体触媒による内部アルキンのトランス型ビスシリル化反応は、これまで例がなく、世界で初めての報告となった。今後は、今回開発した合成法をブラッシュアップし、発光材料やセンサーなどへの応用研究を行いたいと考えている。

3. ピリミジンをコアとしトリエトキシシランを有するアームが伸張した含ケイ素化合物の合成とガス分離膜への応用

3.1 緒言

近年、化石燃料の燃焼による二酸化炭素排出量増加により、地球規模の気候変動への懸念が高まっている。この課題解決のために二酸化炭素を効率的に捕捉する技術が求められている。その中で二酸化炭素の膜分離技術がその高エネルギー効率および使いやすさの点から注目を集めている⁸⁾。特に、有機アルコキシシランを利用した分離膜の合成は大きな可能性を秘めている⁹⁾。分離膜の性能を決定する重要な鍵となるのは、シリカネットワークの細孔サイズの調整、および二酸化炭素に対する膜の親和性である。二酸化炭素とアミンが強い相互作用を有することは知られているが、二酸化炭素の高い透過性と二酸化炭素と他のガスの高い透過選択性を持ち合わせた分離膜は、これまで報告されていない。そこでシリコンの応用面としての本研究では、ピリミジンをコアとし、トリエトキシシランを有するアームが伸張した含ケイ素化合物の合成を行い、それらを利用したガス分離膜の開発の検討を行った。

3.2 実験結果と考察

ガス分離膜の原料である 4,6-ビス(3-エトキシシリル-1-プロポキシ)-1,3-ピリミジン(10)は、図-12 に示す方法で合成した。

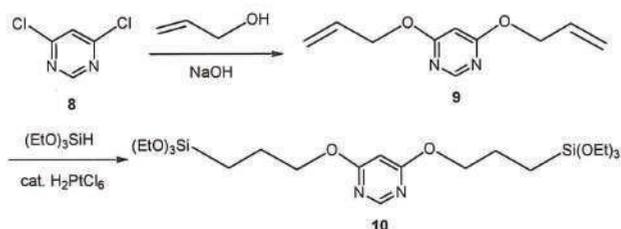


図-12 化合物 10 の合成

まず、4,6-ジクロロピリミジン(8)を 10%水酸化ナトリウム水溶液中、アリルアルコールと反応させたところ、4,6-ジアリロキシ-1,3-ピリミジン(9)が 49%の単離収率で得られた。化合物 9 を塩化白

金酸触媒存在下、トリエトキシシランとヒドロシラン化反応させ、4,6-ジアリロキシ-1,3-ピリミジン(10)を定量的に得た。

次にエタノール中、化合物 10：水：塩化水素 = 1：240：0.3 のモル比で加水分解し、重縮合を行い、ゾル(11)を得た。

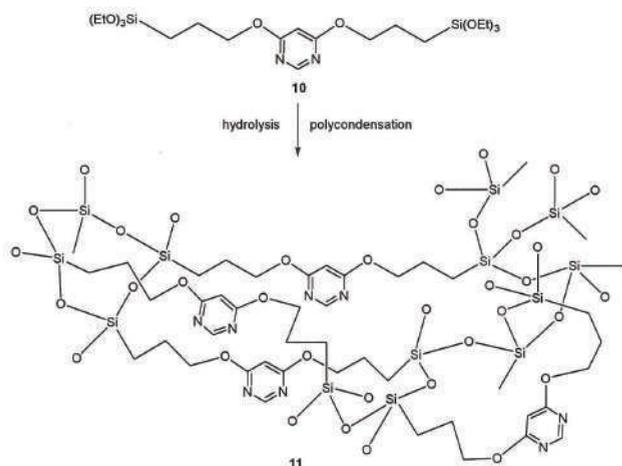


図-13 重縮合によるシリカネットワークの形成

分離膜は、多孔質アルミナ管をシリカ-ジルコニアコロイド溶液でコーティングし、最後に化合物 10 由来のゾル 11 をコーティングすることで作成した。ガス透過特性の測定は、異なった動力学径をもつガスであるヘリウム (2.6 Å)、水素(2.89 Å)、二酸化炭素 (3.3 Å)、窒素 (3.64 Å)、メタン (3.8 Å)、六フッ化硫黄 (5.5 Å)で行った。

ガス透過度 P [$\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$]は、 $P = F/(\Delta p \cdot A)$ の式で求めた。Fは透過流量 [mol/s]、Aは膜面積 [m^2]、 Δp は圧力差 [Pa]である。

今回作成した分離膜でのガス透過性は、以下の順で減少した。



これまで報告されている化合物 12 (図-14 参照)を前駆体としたアミノ基を有するガス分離膜性能と比較すると、今回作成したゾル 11 を使用した分離膜は、二酸化炭素の透過度をそれほど減少させることなく、他のガスとの透過選択性を増大させることができた。いくつかのガス透過選択性のデータを図-15 に示した。ガス選択性は、浸透温度を上昇させると減少した。これは、温度上昇により、ガスの分離膜への溶解度が小さくなるのが原因であると考えられる。

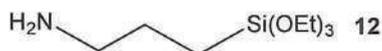


図-14 アミノ基を有するゾル前駆体 12

温度	ゾル11			12を用いたゾル		
	He/N ₂	CO ₂ /N ₂	CO ₂ /CH ₄	He/N ₂	CO ₂ /N ₂	CO ₂ /CH ₄
35°C	45	25	25	21	8	4
100°C	29	13	11	20	6	5
150°C	26	8	6	20	5	4
200°C	20	6	4	26	4	3

図-15 ガス分離膜の透過選択性

3.3 まとめ

本研究では、二酸化炭素に対して穏やかな親和性を持つ新しいピリミジンをコアとしたトリアルコキシシラン膜の設計および合成を行った。その結果、ピリミジン部分の立体障害を反映し、ピリミジン部分と二酸化炭素のそれほど大きくない相互作用により、これまでのアミン基を有するガス分離膜と比べて、二酸化炭素の輸送効率が向上し、二酸化炭素の透過選択性も上昇した。今後は、シリカネットワークのゲル作成条件の検討やアーム部のアルキル基の長さのチューニングを行っている。と考えている。

参考文献

- 1) Hiyama, T.; Oestreich, M. Organosilicon Chemistry: Novel Approaches and Reactions, Wiley-VCH Press: Weinheim, 2019.
- 2) Suginome, M.; Matsuda, T.; Ohmura, T.; Seki, A.; Murakami, M. In Comprehensive Organometallic Chemistry, 10th ed., Crabtree, R. H., Mingos, D. M. P., Eds., Elsevier: Oxford, 2007, Vol. III, pp 725–787.
- 3) Ozawa, F.; Sugawara, M.; Hayashi, T. A New Reactive System for Catalytic Bis-Silylation of Acetylenes and Olefins. Organometallics 1994, 13, 3237–3243.
- 4) Ansell, M. B.; Roberts, D. E.; Cloke, F. G. N.; Navarro, O.; Spencer, J. Synthesis of an [(NHC)₂Pd(SiMe₃)₂] Complex and Catalytic cis-Bis(Silyl)ations of Alkynes with Unactivated Disilanes. Angew. Chem. Int. Ed. 2015, 54, 5578–5582.
- 5) Zhang, Y.; Wang, X. C.; Ju, C. W.; Zhao, D. Bis-Silylation of Internal Alkynes Enabled by Ni(0) Catalysis. Nat. Commun. 2021, 12, 68.
- 6) Matsuda, T.; Ichioka, Y. Rhodium-Catalysed Intramolecular Trans-Bis-Silylation of Alkynes to Synthesize 3-Silyl-1-Benzosiloles. Org. Biomol. Chem. 2012, 10, 3175–3177.
- 7) Santra, S. Synthesis and Application of Siloles: From the Past to Present. ChemistrySelect 2020, 5, 9034–9058.
- 8) Gin, D.L.; Noble, R.D. Designing the next generation of chemical separation membranes. Science 2011, 332, 674–676.
- 9) Kim, H.-J.; Chaikittisilp, W.; Jang, K.-S.; Didas, S.A.; Johnson, J.R.; Koros, W.J.; Nair, S.; Jones, C.W. Aziridine-functionalized mesoporous silica membranes on polymeric hollow fibers: synthesis and single-component CO₂ and N₂ permeation properties. Ind. Eng. Chem. Res. 2014, 54, 4407–4413.

謝辞

本研究を遂行するにあたり、助成を賜りました八雲環境科学振興財団に深く感謝いたします。また、倉敷芸術科学大学生命科学部生命科学科当研究室所属の学生には実験遂行の面で協力いただきました。ここに謝意を示します。

2. 地域概要

高松山は太田川左岸に位置している国有林である。高松山周辺は、5万分の1地質図幅広島（高橋，1991）によると、広島花崗岩類が分布する。広島花崗岩類は高松山の近隣地域の阿武山周辺では、標高 200 m より上部に細粒黒雲母花崗岩が、下部に中-粗粒黒雲母花崗岩が分布すると報告されている。斎藤ほか（2015）によると、高松山の上部では、細-中粒斑状花崗岩が分布しているのが確認でき、下部は不明である。ただ、調査地点の約 1 km 南南東では、上部の細粒な花崗岩の下部に粗粒花崗岩の分布を報告しており、その境界は調査地近くでは、標高 150 m 付近である。

平成 26 年 8 月豪雨では半数以上の谷で土石流が発生しており、本調査では高松山東斜面のケー 8 と名付けられた谷を対象とする（図-2）。本溪流は、現在の地形で標高 150~180 m の範囲において、土石流により 3~6 m 程度掘り込まれている。標高 190~200 m には明瞭な傾斜の変化があり、変化域を境に上流域から下流域に向かって勾配（標高差/水平距離）が約 0.5 から 0.3 以下へと変化する。この標高が低く傾斜の緩やかな地形は、現在より営力の弱い気候環境（おそらく氷期）下で山麓部にもたらされた堆積物が基盤岩を覆うことで形成されたと考えられる。

3. 稠密重力測定とその結果

3.1 重力探査の概要

重力探査では、土石流に巻き込まれる可能性がある谷の中に堆積物または風化した密度の低い層（想定密度 $2.0 - 2.3 \text{ g/cm}^3$ ）と、花崗岩の基盤岩



図-2 調査地域。赤色範囲は平成 26 年 8 月豪雨の土石流発生場所（地理院地図）

（想定密度 $2.6 - 2.7 \text{ g/cm}^3$ ）の二層構造で近似することで、谷底の土砂量を見積もることを試みた。

調査期間は、令和 4 年 12 月 17 日~20 日、令和 5 年 2 月 18 日~23 日の 2 回に分けて行った。使用した重力計は、産業技術研究所所有のラコスト重力計（D-68）である。重力測定点の分布は図-3~5 の白および赤の点である。これらの測点は、谷底に沿う 1 測線、それに並行する崩壊の縁の両側の 2 測線、および道路沿いの 1 測線の 4 測線が組み合わせられて構成され、さらに追加点も含まれる。

重力測定点は、標尺台や木杭を利用して場所を定め、あらかじめトータルステーション機能および地上型レーザースキャナー機能を有する Trimble SX12 を用いて測量したのち、重力測定を行った。その重力測定では、コンパスを用いて磁北に向けて重力計を設置し、調査域内で 94 地点について 101 回（重複 7 か所）の重力測定となった^{注 1)}。

3.2 重力解析方法

重力解析は、東京測地系準拠の SPEC1988（地質調査所重力探査グループ，1989）を用いて行った。正規重力値の計算については、世界測地系の値を利用し、陸域の地形補正については、国土地理院の数値地図 50m メッシュ（標高）を用いた方法（村田ほか，1996）に加えて、重力測定点周辺の 81（ 9×9 ）メッシュ分については、5m メッシュ DEM を用いた方法（直四角柱式：Nagy, 1966）を採用した。5m メッシュ DEM は、2014 年土砂災害発生前（H21 年度）と発生直後（H26 年度）の航空レーザ測量データ（1m メッシュ）および今回の調査で取得した地形の点群データを用いて、災害前、災害直後、現況の 3 種類を用意し、利用した。

3.3 解析結果とその解釈

まず、調査地の表層密度を F-H 相関法（牧野・遠藤，1999）より推定した。本手法内では、重力異常の長周期成分を緯・経度座標値の双一次曲面で表現した。得られた F-H 相関プロット（図-3）内でデータの直線性は非常に高く、表層密度として $2.22(2) \text{ g/cm}^3$ （カッコ内は最終桁の誤差）が得られた。一般的な花崗岩の密度の代表値は 2.67 g/cm^3 であり、この谷は地質図上で花崗岩のみが分布することから、得られた表層密度 2.22 g/cm^3 は、花崗岩礫およびその風化物を主体とする土石が空隙をもって緩く堆積しているものと考えられ

る。

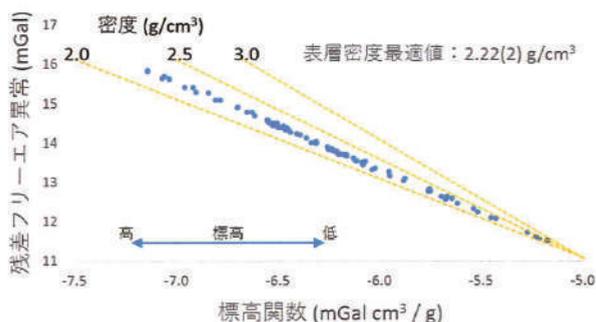


図-3 F-H 相関図 直線の傾きが密度を表す。

次に、得られた表層密度と花崗岩の一般的密度を用いたブーゲー重力異常図を作成した(図-4, 5)。

表層密度 (2.22 g/cm³) による重力異常図(図-4)は、表層の低密度層を見えなくした新鮮な花崗岩上面の高度分布に対応する。

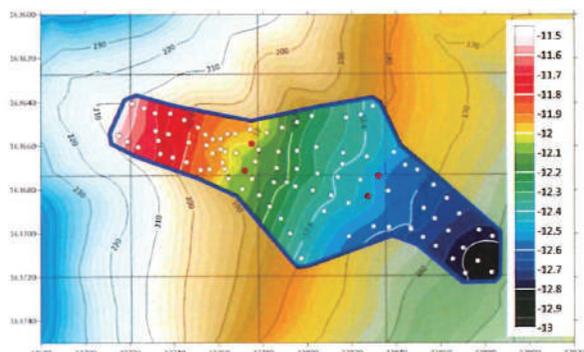


図-4 表層密度 (仮定密度 2.22 g/cm³) でのブーゲー重力異常図(青枠内)。白丸と赤丸は、重力測点を示し、赤丸は測量基準点としても用いた堰堤上の測点。重力コンターの単位は、mGal。

この図の等重力線は、谷地形を表さず、谷線(溪流)に直交し、重力異常値は上流に向かって様に上昇している。このことは、上流ほど新鮮な花崗岩の厚みが増すこと、基盤上面には顕著な谷がないことを反映している。また、等重力線の間隔は、標高 180~190 m を境に、上流側で密、下流側で粗となっている。この特徴は、調査地域の大局的な斜面形状と調和的であり、新鮮な花崗岩が上流側では急勾配であり侵食環境が支配しており、下流側で緩勾配をなす形状の上に堆積物が乗っている堆積環境であることを示す。

花崗岩の一般的密度を用いた重力異常図(図-5)では谷の底部に沿った測線に着目すると、上流側(-14.8~-14.7 mGal)と下流側(-15.2~-15.1

mGal)とで、おおよそ2分されている。一方、崩壊の縁部の二つの測線についても上記と同様に上流側と下流側で2分され、さらに谷底の測線よりも0.15 mGal程度の低重力異常を示している。

この重力異常図では、表層の低密度層の分布を示す重力異常に対応しており、谷底では、低密度層の厚みが薄く、崩壊の縁部では、低密度層の厚みが厚いことに対応している。また、全体的に下流域よりも上流域の方が、低密度層の厚みが薄いことを示している。また、等重力線が溪流方向とほぼ平行であることは、地表面と平行にマサ化深度面が分布していると推定される。

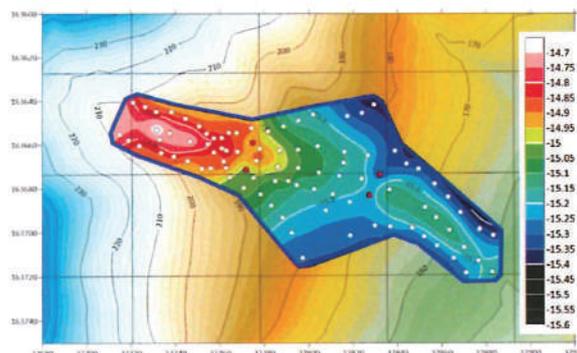


図-5 一般的な花崗岩密度(仮定密度 2.67 g/cm³)でのブーゲー重力異常図(青枠内)

3.4 重力解析結果の考察

今回の結果(図-5)では、赤点である堰堤上部の基準点付近と東側の下流部で重力異常値の閉曲線が見られる。これは、高密度な堰堤のコンクリートの影響によって、堰堤上部や堰堤周辺に影響が出ている可能性がある。また下流部は、土石流によって大きく下刻したため、現段階での地形補正で用いられたDEMが粗すぎる可能性がある。これらはともに、今後のより詳細なDEMによる地形補正によって除去されると思われる。

仮定密度 2.22 g/cm³ および 2.67 g/cm³ の二つのブーゲー重力異常図から、表層密度(低密度)の厚さが標高 180~190 m 地点周辺で急変していると推定された。この原因として二つの要因が考えられる。ひとつは、地形学的に堆積地形と侵食地形の境界部にあたり、常に剝削によって新鮮な基盤岩が露出しやすい上流側と堆積によって堆積物に厚く覆われがちな下流側の堆積物の厚さの影響である。もうひとつは、高橋(1991)が高松山に近い阿武山周辺において、標高 200m 付近に上部の細粒花崗岩と下部の中-粗粒花崗岩の境界があることを示しているが、今回の調査地の標

高 190 m 付近にこの境界があることによる、粒度の異なる花崗岩の風化耐性の違いによる影響である²⁾。これらは相反するわけではないので、この両方の要因が影響している可能性もある。

一方、今回の調査地では、比較的新鮮な花崗岩は、標高 190 m 以上での溪流の、主に谷底部に分布し、それほど土石流によって削られていないため、土石流発生前の標高まで、表層密度 2.22 g/cm^3 の物質でかさ上げすることで、崩壊前の重力値を推測することが可能である。表層密度 2.22 g/cm^3 のブーゲー異常図を基準とすれば、表層の地形改変の影響は考えなくて済む。さらに、重力異常源である新鮮な花崗岩の分布は、傾いた平面で近似できる可能性が高いため、簡単なモデル計算で、重力異常源からの重力鉛直勾配を計算できる。具体的には、調査現場の地形の平均傾斜 0.329 度の斜面を有する東西および南北 400 m の範囲で、密度 0.45 g/cm^3 のプリズム状の密度異常について、その中央上部での重力鉛直勾配を計算する。その結果、プリズム直上から 20 m 上方の範囲で、 $-0.03884 \sim -0.03868 \text{ mGal/m}$ となり、 -0.03876 mGal/m をつかって、標高のかさ上げ分による重力異常の低下を計算した。これらにより、崩壊前の地形上での重力測定値を予測することができ、各仮定密度での重力異常値を計算できる。

仮定密度 2.67 g/cm^3 での崩壊前の推定ブーゲー異常図を図-6 に示す。図-4 および 5 の現況のブーゲー異常図と図-6 崩壊前の推定ブーゲー異常図とを比べてみると、後者では、谷底の観測点での重力異常が、崩壊の縁部の重力異常と同程度もしくは、それより低い値になっており、前者が明確な高重力異常であったことと対照的である。このことは、崩壊のポテンシャル指標として重力探査が利用できる可能性を示している。

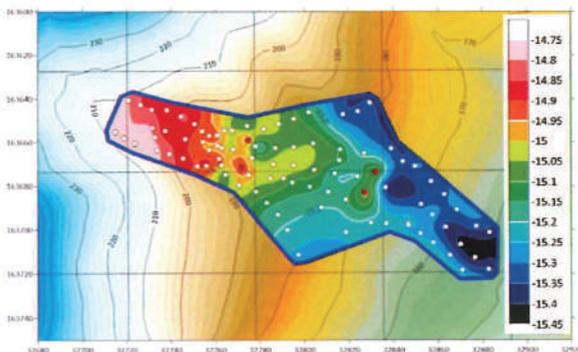


図-6 2014 年災害の崩壊前を想定した推定ブーゲー重力異常図(仮定密度 2.22 g/cm^3)

4. 地形計測方法の検討

今回、重力測定値の地形補正として、5mDEM を用いた解析を行ったが、表層密度推定(図-3) およびブーゲー異常図(図-4, 5)の作成において、特段の支障がなかった。しかしながら、崩壊前の推定ブーゲー異常図(図-6)において、明らかに堰堤上の点が高重力異常でその周囲が低重力異常となるバイアスが見られた。これらは、より精細な DEM を用いた地形補正と、周囲の地質より明らかに高密度である堰堤分の重力補正を施すことで、解消されると期待される。

この精細な DEM 取得に関して、高精度であるが非常に高価な地上レーザースキャナーの代替に、ハンディータイプのレーザースキャナーが活用可能か取得したデータの比較に基づいて検討した。

4.1 使用した機器

高精度な計測機器としてトータルステーション機能および地上型レーザースキャナー機能を有する Trimble SX12 を用いた。SX12 は $1,550 \text{ nm}$ の波長のレーザーで、水平方向 360° 、鉛直方向 300° 走査することができ、角度精度は $1''$ ($1/3600^\circ$)、測定距離は 600 m (有効な計測範囲は 300 m 程度) である。1 秒間に $26,600$ 点のデータを取得し、本体重量は 7.5 kg である(この他に三脚も加わると総重量は約 12 kg)。SX12 の測量にあたっては、測量基準点(計 4 点)を当溪流にある 2 つの砂防堰堤上に 2 つずつ設け、それら測量基準点の座標(緯度、経度、標高)を Trimble R10 のネットワーク RTK (VRS) を用いて測量することで SX12 のスキャンで得られるすべての点群は、現場において緯度、経度、標高として記録される。そのため、パターンマッチングによるスキャンごとの点群データの合成処理の必要がない。ハンディーレーザースキャナーとしては、Livox 社製の Avia を用いた。Avia は 905 nm の波長のレーザーで、水平・垂直方向に約 70° 走査することができ、角度精度は 0.05° 、測定距離は 460 m (有効な計測範囲は $200 \sim 300 \text{ m}$ 程度) である。1 秒間に $240,000$ 点のデータを取得し、範囲精度は約 2 cm である。SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) 技術により、Avia を持って照射しながら歩くだけで 3 次元の点群の XYZ 座標が取得可能となる。本体重量は 498 g であり、この他にコンパクト三脚、SLAM 処理を行う PC 等が必要であり、今回の機器一式による総重量は約 3 kg である。なお、Avia は測量用に開発された機器で

はないため、絶対位置への変換やパターンマッチング等による点群の合成が、後処理として必要である。

4.2 点群データ処理と取得結果

SX12 の点群は Trimble 専用ソフトウェアで合成とフィルタリングを行うだけで、地理座標を持った地表点群データを作成することができるが、固定地点から照射する方式であるため、堰堤や林間など障害物が多い現場においては、ステーション移動が多く、そのたびに測量基準点を用いた機械位置の計測が必要で、やや煩雑さがあった。

一方の Avia は、計測開始地点を原点とする座標で点群の XYZ が記述され、その他の情報としては反射強度が取得できる。概ね、ゆっくり歩くスピードで計測を行うことができたが、地理座標への変換に手間を要した。Avia で取得できる点群については、地理座標系に合わせる際に GCP の情報が必要となる。今回は2種類の質感の異なる素材で格子柄からなるマーカーを設置し、反射強度から判別可能な GCP マーカーを設置したが、結果的には上手く GCP として利用することができなかった。そのため、ノイズ・植生除去のフィルタリング等、一連の点群処理を行った後に、既存の地図情報(縮尺 1/2500)を基に地理座標を与え、ジオリファレンスした(XY 座標と標高の補正)。また、計測データの一部において、堰堤の縁の部分など、特徴的な箇所の点群がずれて2重に捉えられていた。この現象は、SLAM 処理が適切に行っていないことを示し、点群の処理上、大きな誤差を生む原因となった。Avia の点群処理にはフリーの点群処理ソフトウェア CloudCompare を用

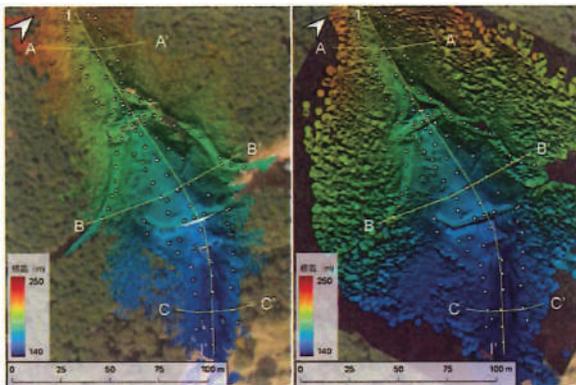


図-7 取得データの比較

左: Trimble SX12, 右: Avia. いずれも標高段彩図と陰影起伏図を、基図(地理院タイルの写真)に重ねている。白丸は、重力測定地点を示す。黄色線は、図6の断面位置。

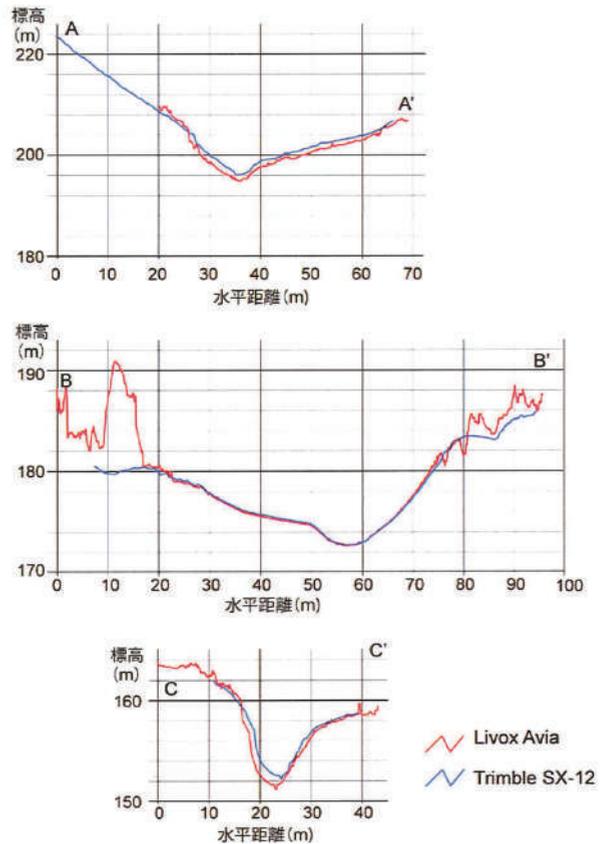


図-8 溪床横断面図による取得データ比較

いた。

フィルタリング後の点群に関しては、両データとも CloudCompare で読み込み、同じパラメータでラスタ化したのち、点群密度が粗で no data となったメッシュの値を内挿する処理を QGIS で施し、0.1mメッシュの DEM を作成した。図-7 に作成した DEM, 図-8 に任意の線分で作成した断面図を示す。

SX12 と Avia の標高値を比較すると、図-8 の B-B' の谷底部などの起伏が小さい領域では、数 cm 程度の差に収まっているものの、起伏が大きい領域や樹林地における差は大きくなっている。樹林地については、植生除去フィルタリングの向上とそれを促すための点群取得を工夫しなければ解決しないものと考えられる。また C-C' では谷底の概形および谷中心部のわずかな凹みも捉えているものの、その水平・鉛直位置がメートルオーダーでずれており、点群をマージする際の全体的な傾きの補正が十分ではなかったことが考えられる。また、この点に関しては上記の2重に特徴点(線)が捉えられたこととあわせると SLAM 処理で生じた誤差である可能性も高く、そうした誤差を抑えるアルゴリズムを適用する必要があるであろう。

以上のように、ハンディーレーザースキャナーを用いた点群取得は、簡易かつ安価で、技術的に可能であるものの、地理座標系に投影して稠密重力探査の地形補正に利用しようとする場合には、1) 適切な GCP マーカーの設置、2) SLAM の不良処理の回避、3) 植生フィルタリングの精度向上に対する改善を行っていく必要がある。

5. まとめ

本研究では、土石流の母体となる谷の中に堆積する土砂量を、地表で観測できる重力異常値から見積もることを試みた。試みでは、谷およびその付近で山地を構成する岩盤（花崗岩）がどのような形状で存在し、その上に堆積土砂がどの程度堆積しているかを明らかにする必要があり、その中では、詳細な地形計測を用いた地形補正を重力探査に採用することで浅部の地下構造が推定できるか否かの検証と、実装のために安価で容易な地形計測手法の確立が必要と考えた。そのため、発災前後の溪流の状況があきらかな広島市北部・高松山東部の谷（林野庁管轄地域）と今後の発生が予想される可部9丁目付近（国交省管轄地域）を対象地域とした。本報告では重力測定と地形計測の2つを行うことができた高松山東部の谷の事例を報告する。

調査の結果、重力探査による重力異常は、谷の中の堆積物や風化度合いの異なる岩盤に対比される岩石密度の違いを反映しており、稠密重力測定によって新鮮な基盤岩とそれ以外のルーズな層（強風化したマサ土や斜面あるいは溪床の堆積物）の境界面を捉えられる可能性を示すことができた。しかし、今回の重力測定で用いた国土地理院の5 m DEM や林野庁が取得した1 m DEM では、堰堤などの人工物の影響を十分に取除けず、より詳細な地形データが必要なことが分かった。

詳細な地形データの取得に関しては、高精度な地上レーザースキャナーの代替として、ハンディータイプのスキャナーでのデータ取得も試みたが、絶対座標（地理座標）への位置合わせや、植生下の地表を捉えにくい点、反射強度で判別可能なマーカーを作る必要がある点などの課題があり、現時点での代替は難しいことが分かった。

参考文献

Ackermann, R.J. and C.A. Sorrell (1974) Thermal Expansion and the High-Low Transformation in Quartz. I. High-Temperature X-ray Studies. *J. Appl. Cryst.*,

7, 461

地質調査所重力探査グループ (1989) 地質調査所重力補正標準手順 SPECG 1988 について、地質調査所月報, 40, 601.

国土交通省中国地方整備局広島西部山系砂防事務所 (2019) 林野庁

工藤洋三 (1989) 花崗岩内の微小欠陥の配向と力学的異方性, 名古屋大学博士論文。

牧野雅彦・遠藤秀典 (1999) 鹿児島県出水市針原川土石流地域の重力探査, 物理探査, 52, 153.

村田泰章・牧野雅彦・遠藤秀典・渡辺和明・渡辺史郎・ト部厚志 (1996) 神戸市・芦屋市・西宮市における精密重力探査 (1) 一重力異常と伏在断層一, 地質調査所月報, 47, 109.

Nagy, D. (1966) The gravitational attraction of right rectangular prism. *Geophysics*, 31, 362.

中嶋 悟 (1995) 花崗岩の割れ目, 粒界, 間隙構造のフラクタル解析と物質移動・流動, 鉱物学雑誌, 24, 125.

斎藤眞・川畑大作・佐藤大介・土志田正二・新井場公德 (2015) 2014年8月20日広島豪雨による土石流発生地域の地質, 地質学雑誌, 121, 339.

高橋裕平 (1991) 広島地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の1 地質図幅), 地質調査所, 41p.

注

1) 重複測定地点での重力値の日時を変えての再現性は、5 地点において通常の典型値である 0.020 mGal 以内であったが、2 か所において、0.024 mGal および 0.033 mGal と、通常よりやや大きな差であった。これらは、2月18~19日の合計 30 mm の降雨があり、普段は水無川である本溪流において2月20日に地表水の流下が認められたことから、地表及び地下水分布の変化の影響であると解釈される。

2) 花崗岩形成時の温度低下により、花崗岩に多く含まれる石英の結晶は、574°Cで高温型から低温型へと相転移し、550°Cまでに石英の体積は、1.3%程度も縮む (Ackermann and Sorrell, 1974)。そのため、花崗岩中の石英は、潜在的に亀裂が多く存在し (工藤, 1989; 中嶋, 1995)、他の深成岩に比して透水性が高く深層風化しやすい原因と思われる。今回の調査地では、より細粒のものが風化されにくいと推察されるが、砂粒のもののほど、潜在亀裂の幅が小さくなると考えられるので、透水性が小さくなり、風化しにくくなると考えれば矛盾がない。

水上-空中変形機構を備えるドローンと

簡易な河川内三次元測量技術の開発

岡山理科大学 工学部 情報工学科 講師 小田 哲也

1. はじめに

平成 30 年 7 月豪雨以降、真備町の浸水被害の経験を踏まえて河道内の土砂浚渫工事が全国で実施されている。この工事実施の際、出来高を算定する上で浚渫前後の三次元測量を実施しなければならないが、水面上および水面下で同時に測量できる方法は少ない。また、この工事を担当するのは地場の建設業者であり、業者が実施できる工事の方法が求められている。現在は、河川内に船を浮かべて水中の測量を実施しているが、この測量の実施には、河川管理者への申請、船のレンタル等、時間・コスト・労力、等の負担がかかることから、これらの負担を軽減できる方法が求められる。また、通常のレーザ測量は水面下を計測できず、グリーンレーザ測量は、高コストであることから容易に測量できないとともに、河川水の濁度が高くなると川底の測量ができない。マルチビームソナー搭載の深淺測量用のラジコンボートは水深 0.5[m]から数 10[m]の測量が可能だが、2[m]程度のボートを運搬する必要があり、土砂堆積部分と水面が入り組んでいる場所では、ボートの通航が困難となり、土砂浚渫工事現場の測量は難しい。加えて、船を用いた測量であるため、地上部は別途の測量が必要となる。さらに、土砂浚渫工事現場の測量は、河道内に土砂が堆積しており、陸上部と水中部の両方の場所が測量対象となる点がキーとなる。そのため、(1) 陸上部と水中部を同時に同じシステムで測量可能であり、データ出力後の結合作業などが不必要、(2) ドローンの使用には、河川管理者への申請が不必要、(3) 普通自動車で運搬可能であり、少人数・短時間で測量可能、以上の条件を満たすシステムが求められる。

一方、大雨や津波、発生が想定される南海トラフ大地震など、近年増加傾向にある大規模災害の防災・減災を実現するため、急斜面などの危険箇所の事前調査や発災時の被災状況の迅速な把握において、空撮及び上空からの三次元測量が可能な小型無人航空機(ドローン)の利活用が期待されている。ドローンの制御技術の発展によって、飛

行性能は向上しているが、土砂浚渫工事現場における測量、水中での点検など、地上だけでなく、水域での運用も求められている。また、ドローンの自律行動制御技術は、人が目的を設定するのみでドローンの自律的な運用が可能となるため、運用現場において省人化や効率化に極めて有効である。自律行動制御は、周辺状況に応じた意思決定などを行うガイダンス、機体姿勢の計測や周辺状況を認知するナビゲーション、機体を制御するコントロールの三要素から構成される。発災時などの複雑かつ未知の環境下で、知的システムに基づく即応の制御が可能な自律行動制御は、ドローンの広範な利活用領域に多大な影響を与える革新的な技術として開発への期待が高まっている。大規模災害の防災・減災を実現するためには、ドローンの運用領域の拡張が求められることに加え、災害現場ではドローンの操縦などの技能を備えた人員の不足が予見されるため、運用に専門知識が不要な完全自律行動制御技術の開発が重要である。

そのため、本研究の目的は、土砂浚渫工事現場の対象となる河道内に土砂が堆積している場所において、簡易に測量ができる水上-空中変形機構を備えるドローンを開発することにある。本研究では、土砂浚渫工事現場の測量の課題となる、前述した(1)から(3)の課題と、大規模災害への対応を目的として、ドローンの地上及び水域での自律的な運用を実現するため、水上-空中可変機構を備えるドローン(水空ドローン)を開発するとともに、土砂浚渫工事現場での測量を目的とした、簡易な河川内三次元測量技術を開発する。

2. 提案システム

2.1 水上-空中変形機構を備えるドローン

水上-空中可変機構を備えるドローン(水空ドローン)について述べる。開発した機体を図-1に示す。提案する水空ドローンは、空中での飛行形態(図-1(a))、水上での定点保持形態(図-1(b))及び水上航行形態(図-1(c))を、周囲の環境に対して適応的に変化させることで、空中及び

水域での運用を可能とする。また、水空ドローンは、複数の回転翼を備えることで、空中で停止行動が可能なクワドロータ型マルチコプタとして開発する。加えて、推力偏向が可能な水上-空中可変機構を備えることで、水上での航行及び定点保持が可能となる。水空ドローンの各形態における機体の大きさを表-1に示す。制御装置を格納する部分には、吸水性が低く、比重の軽いポリプロピレン製の容器を用いた。また、プロペラの保護やモータを固定するための部品及びフレーム部分は、CAD/CAMを利用してモデリングし、熱溶解積層方式の3Dプリンタを用いて作成した。



図-1(a) 飛行形態



図-1(b)

水上定点保持形



図-1(c)

水上航行形態

図-1 水上-空中可変機構を備えるドローン
表-1 水空ドローンの各形態の機体サイズ

水空ドローンの形態	縦[cm]	横[cm]	奥行[cm]
飛行形態	28	57	57
水上定点保持形態	48	57	57
水上航行形態	48	62	45

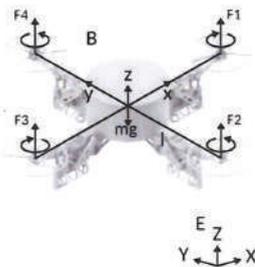


図-2(a)
飛行形態の座標系

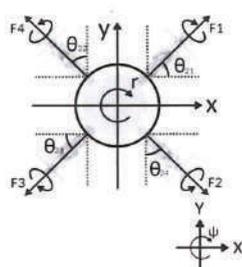


図-2(b)
水上形態の座標系

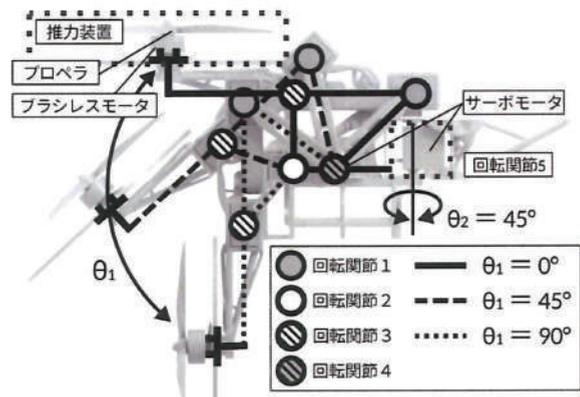


図-2(c) 水上-空中可変機構

図-2 水空ドローンの3Dモデル

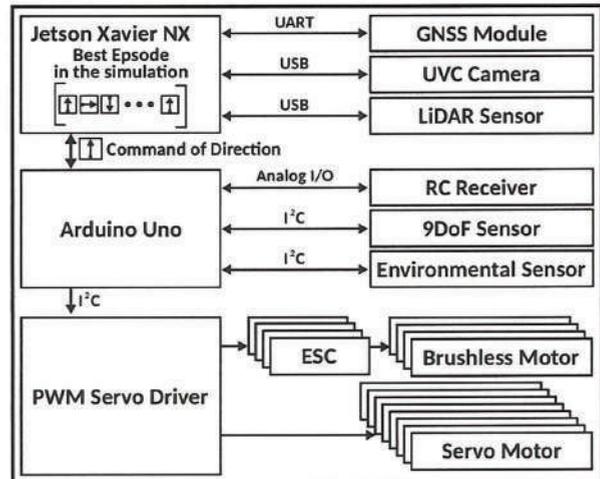


図-3 水空ドローンのハードウェア構成

2.2 簡易な河川内三次元測量技術

本節では、陸上部と水中部を同時に三次元測量する河川内三次元測量システムを提案する。また、提案システムを用いて、位置情報の取得が困難な環境下で、簡易 3D-LiDAR を用いて取得した遮蔽物の状況から相対的な位置情報を導出することで、水空ドローンの制御性能の向上が期待できる。

(1) 簡易 3D-LiDAR

Light Detection And Ranging (LiDAR) は光を用いたリモートセンシング技術の一つであり、周囲の遮蔽物までの距離測定が可能である。そのため、周辺環境の取得を目的として車両や移動ロボットに搭載され、周囲の遮蔽物の検知や自動走行などに応用されている。LiDAR には距離測定光をモータで回転させ、光を水平に走査させることで平面での距離情報の取得が可能な 2D-LiDAR と、光源を鉛直方向に複数個の設置もしくは鏡などで鉛直方向の走査を追加するなどにより三次元での距離情報の取得が可能な 3D-LiDAR がある。

工場、倉庫、建築物内の通路等の平面的な環境では、3D-LiDAR と比較して計算負荷が小さく安価な 2D-LiDAR が採用されている。一方、ドローンのような三次元空間を移動する場合は、周囲の環境を立体的に取得することが求められる。しかし、3D-LiDAR は構造的に使用する部品数が多く、処理も複雑であるため、2D-LiDAR と比較して高価である。そこで、従来高価な 3D-LiDAR を 2D-LiDAR とモータを複合し、安価に開発する。また、3D-LiDAR モータの振動を抑制するために、ファジィ制御を適用する。2D-LiDAR とファジィ制御を複合した簡易 3D-LiDAR を図-4 に示す。フレーム部分は 3D プリンタを用いて作成した。

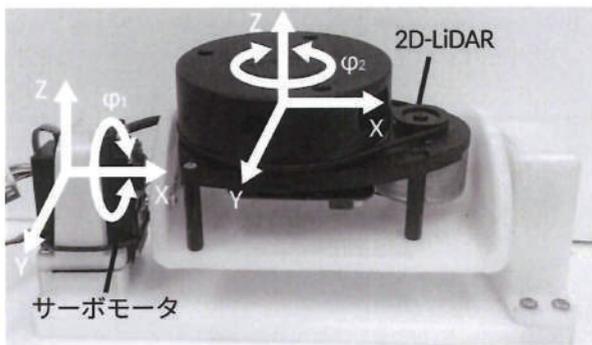


図-4 安価な 3D-LiDAR

(2) 簡易 3D 水中ソナー

水中ソナーは音波を用いたリモートセンシング技術の一つであり、水中の遮蔽物までの距離測定が可能である。水中ソナーは指向性があり、センシング方向のデータを取得する。簡易 3D-LiDAR と同様に、2D 水中ソナーとモータを複合し、簡易 3D 水中ソナーを安価に実装するが、3D 水中ソナーはフレーム部分にモータを 2 つ搭載することで水中での三次元測量を可能とする。

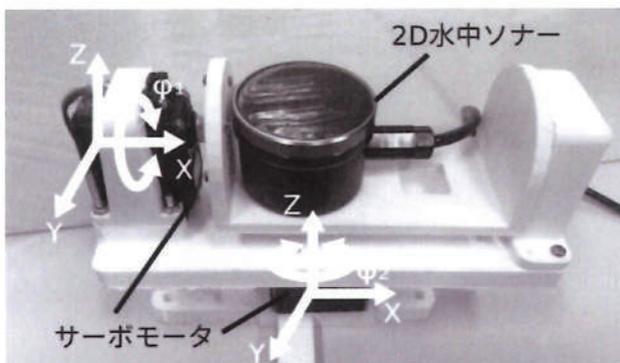


図-5 安価な 3D 水中ソナー

(3) SfM のための撮像位置決定手法

Structure from Motion (SfM) は、複数の画像から三次元形状の復元を行う手法であり、三次元地図の作成や構造物の点検等、様々な用途に応用されている。また、災害前と災害後に取得した三次元地図の差分から、被災状況を算出することが可能である。一方で、SfM には縮尺情報が保持されない、画像枚数が少ない場合に三次元再構成の精度が低い等の課題がある。SfM を用いた三次元復元の精度は、Global Navigation Satellite System (GNSS) 等の画像のメタデータを利用することで精度向上が可能である。しかし、GNSS は電波伝搬の悪い環境では位置情報を取得することが困難である。そこで、前述した問題を解決もしくは低減を目的として、SfM のための撮像位置決定手法を提案する。SfM のための撮像位置決定手法は、LiDAR Simultaneous Localization and Mapping (LiDAR SLAM) に基づく撮像位置決定するとともに、撮像位置に基づき画像のメタデータである Exchangeable Image-file Format (EXIF) へ、周囲の遮蔽物からの相対的な位置情報を追加する。

SfM のための撮像位置決定手法を図-6 に示す。提案手法に適用する LiDAR SLAM は、LiDAR で検出した周囲の遮蔽物を、角度と距離からなる二次元の点群データとして計測し、点群データから周辺環境のマッピングと自己位置の推定を同時に行う。提案手法では SLAM のアルゴリズムとして、Breezy SLAM を使用し、取得された点群データに基づいて、占有格子地図形式で周辺環境を可視化する。

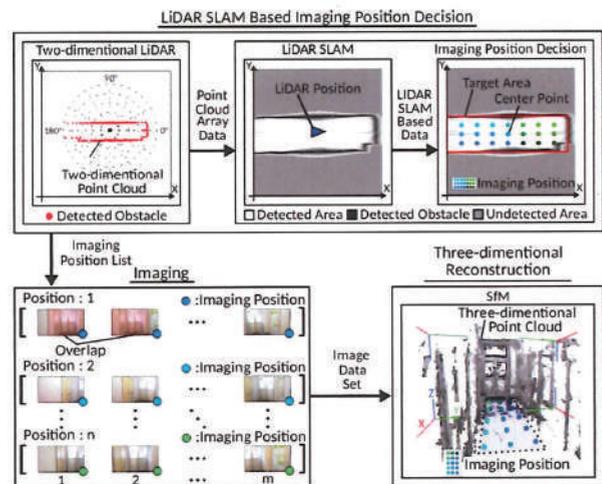


図-6 SfM のための撮像位置決定手法

2.3 自律行動制御手法

測量技術を知的アルゴリズムと複合して、水空ドローンの自律行動制御に応用する。水空ドローンの飛行形態における自律移動制御手法について述べる。図-7に、水空ドローンの飛行形態における自律移動制御手法のイメージを示す。自律移動制御手法は、LiDARに基づく目的地の決定手法、高速に移動経路を導出するタブーリスト戦略に基づくDQN (TLS-DQN) 及び TLS-DQN を用いた移動時における水空ドローンの座標変動の低減を目的とした移動経路補正手法で構成している。また、移動可能な領域は、水空ドローンから任意の距離以内に遮蔽物が存在しない領域としている。

提案システムの動作について述べる。まず、LiDAR で取得した点群データは極座標形式であり、角度と周囲の遮蔽物までの距離から構成されているため、直行座標形式へ変換する。次に、LiDAR で取得した点群データを直行座標形式へ変更後、LiDAR で取得した点群から水空ドローン前方に分布する点かつ任意の距離以上離れた点を抽出する。その後、抽出した点群の X-Y 軸の最大値と最小値から点群の中央値を導出し、目標通過地点とする。そして、水空ドローンから目標通過地点までを結ぶ直線間に遮蔽物が存在しない場合、目標通過地点に到着後、再度目的地の決定を行う。遮蔽物が存在する場合は、水空ドローンが移動可能かつ現在位置から最も遠い座標を目的地とする。

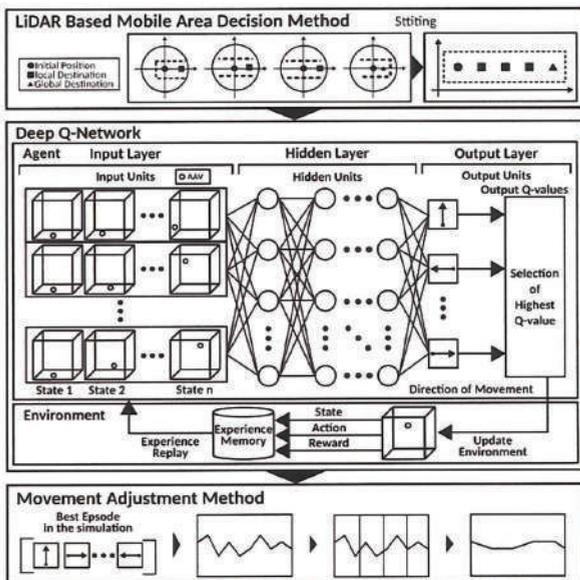


図-7 自律行動制御手法

3. 実験結果

図-8に、階段空間を含む屋内単一経路環境を対象とした、簡易 3D-LiDAR を用いた水空ドローンの目的地の決定手法の可視化結果を示す。また、図-9は図-8を重ね合わせた可視化結果である。図 3.15 において Y = 100 周辺に遮蔽物を示す点群が散在していることが確認できる。これは、実験環境にガラス面があり、LiDAR が透明度が高い物体を測距する場合に誤差が大きくなるためである。また、初期位置[290, 155, 0] に対して、目標通過地点は[290, 380, 100]、[290, 740, 100]、[120, 630, 100]、[130, 420, 200]、[130, 110, 200]、[130, 310, 250]、[130, 205, 300]、目的地は[200, 100, 300]に決定された。

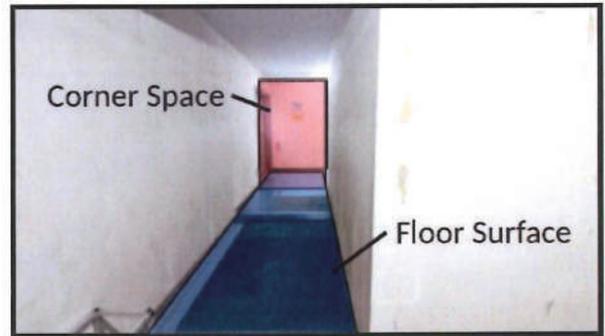


図-8 (a) 初期位置-曲がり角

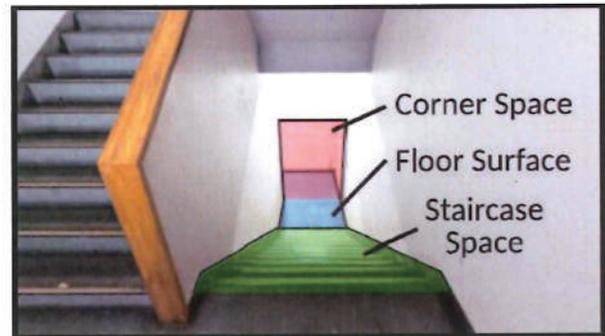


図-8 (b) 曲がり角-目的地

図-8 階段空間を含む屋内環境の写真

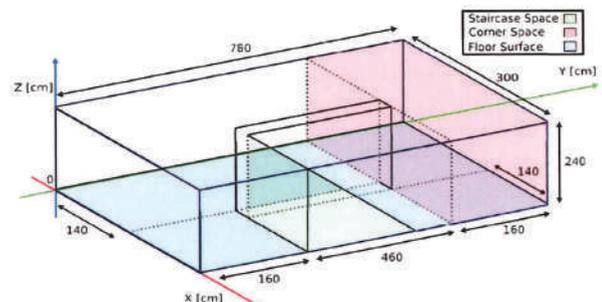


図-9 階段空間を含む
屋内環境の投影図

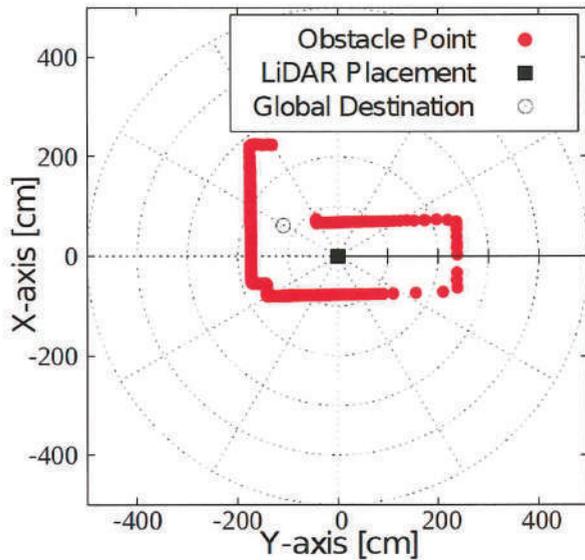


図-10 (g) 目標通過地点 6

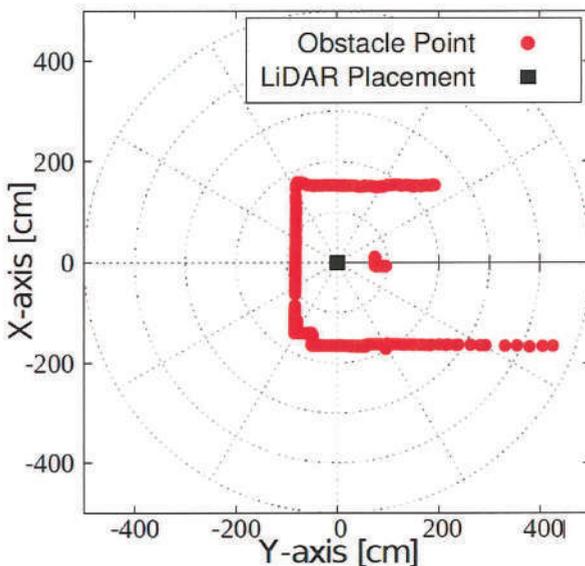


図-10 (h) 目的地

図-10 LiDAR を用いた目的地の決定手法の可視化結果

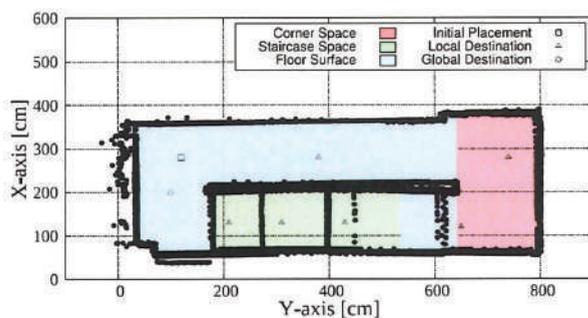


図-11 LiDAR で取得した周囲の遮蔽物を重ね合わせた可視化結果

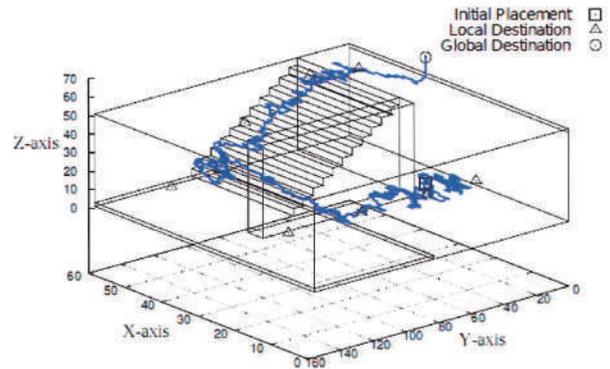


図-12 TLS-DQNを用いた水空ドローンの移動経路の可視化

図-11で得られた周囲の情報から、水空ドローンが自律行動した結果を図-12に示す。

4. まとめ

本研究では、ドローンの水域及び地上での自律的な運用を実現するために、水空ドローンを開発した。河川内三次元測量及び水空ドローンの自律移動のための周辺環境の情報取得を目的として、2D-LiDAR とファジィ制御を複合した3D-LiDAR と、SfM のための撮像位置決定手法を開発した。また、飛行形態における自律移動制御手法として、移動経路を導出する TLS-DQN、LiDAR を用いた目的地の決定手法を開発した。

実環境を想定し、階段空間を含む屋内環境を対象として、ドローンの自律移動のための周辺環境の取得手法及び自律移動制御手法の性能評価を行った。性能評価の結果から、以下の項目について本研究の成果を確認できた。

- 水空ドローンの自律移動制御のための周辺環境の取得手法において、SfM のための撮像位置決定手法を用いて、相対的な位置情報を画像に付加することで、三次元復元の精度を向上することが可能である。
- 水空ドローンの飛行形態における自律移動制御手法は、対象環境内で任意の初期位置から LiDAR に基づいて経路終端部に目的地を決定するとともに、TLS-DQN は目的地に到達することを確認できた。
- 水空ドローンの飛行形態における自律移動制御手法は、曲がり角や階段空間等を含む屋内環境において、自律移動制御において有効な手法であると考えられる。

令和4年度環境研究助成対象研究

防災・減災に向けた水域地形の変化に関する計測方法の実用化研究

研究レポート

近森秀高¹，渡辺雅二²

¹岡山大学学術研究院環境生命科学学域教授

²岡山大学名誉教授，岡山大学特命教授（研究）

研究の概要

気候変動の進行にともない今後益々活発となることが想定される水循環に対し防災の観点からは陸水域および沿岸水域に関する的確な情報が必要となる。本研究では、GPS受信機と音響測深機を中心とするハードウェアシステムに慣性計測センサー等の機器を導入した高精度の計測・解析手法の実用化と応用に取り組んだ。

研究の社会的背景

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は世界平均気温の上昇、南極の氷床の質量減少と世界中の氷河の縮小、二酸化炭素濃度の増加等の観測事実に基づき地球温暖化に疑う余地はないことを指摘した。また、その要因として人間の影響が支配的であった可能性が極めて高いことが報告された。近年頻発する豪雨災害は気候変動の進行を反映するものと考えられる。平成30年6月28日から7月8日にかけて発生した平成30年7月豪雨、令和元年10月12日に伊豆半島に上陸した台風第19号による大雨とその後の一連の大雨、令和2年7月豪雨と呼ばれる一連の大雨、静岡県熱海市伊豆山に発生した土砂崩れをもたらした令和3年7月1日からの大雨は甚大な人的被害および物的被害をもたらした。前述の例を始めとする近年の豪雨災害は温暖化の影響が顕在化してきたことを示し、今後の気候変動の進行に伴い頻度が増し、また規模も大きくなることが懸念される。したがって防災・減災の観点から河川や湖沼あるいは貯水池に関する的確な情報が不可欠となる。

平成30年7月豪雨災害によって甚大な被害を被った岡山県真備町に関しては、7月7日午前2時前後に3箇所小田川の越水が把握されていたことが報告された。このような堤防の決壊が発生した河川に対しては、復旧に際して流水の作用から堤防等を保護するため、護岸強化を行う必要があると報告された（平成30年7月豪雨災害検証報告書，岡山県「平成30年7月豪雨」災害検証委員会，2019年（平成31年）3月）。この報告は、水底地形の状況を適格に把握することが防災の観点から重要であることを示している。

研究内容

気候変動の進行にともない今後益々活発となることが想定される水循環に対しては、防災の観点から陸水域および沿岸水域に関する情報の最新化が要求される。一方、河川、湖沼、沿岸水域等の狭小水域で

は小型船舶による測位・測深が有用なものとなる。本研究では、小型船舶による測位・測深に慣性計測センサーを導入した高精度の計測・解析手法の実用化と応用に取り組むことを目標とした。計測に用いた岡山大学所有の小型船舶 OKAYAMA 1 を写真 1 に示す。

本研究では、RTK-GPS (リアルタイムキネマティック GPS) と音響測深機を中心とするハードウェアシステムを用いたデータ収録を実施した。GPS 受信機から得られた測位データの緯度-経度成分は平面直交座標系に変換され、GPS アンテナ高と音響測深機から得られた測深データを含む鉛直成分と結合されることにより 3 次元水底地形データが作成された。

水域の地形は三角形メッシュ上の区分線形関数で近似的に表されるとし、初期メッシュ M_0 から要素分割によりデータアダプティブ三角形メッシュ列 M_1, M_2, \dots を生成する方法が提案された。すなわち三角形メッシュ M_{i-1} の E のデータ密度 (単位面積あたりの水底地形データの xy 成分) と E と辺を共有する要素のデータ密度をある閾値と比較した結果に応じて要素 E を四分割, 三分割, 二分分割あるいは分割しないという方法が提案された。水底地形を表す曲面は平面上の三角形メッシュに定義された区分一次関数で近似されるものとし、各要素に定義された一次関数を特定するパラメータは 3 次元水底地形データを導入した最小二乗近似により求める手法が提案されている[1]。前述の一連の手法は令和 4 年 9 月 12 日に実施された計測結果に適用され、またその結果は、令和 3 年 11 月 22 日の計測結果に基づく解析結果と比較され令和 3 年 11 月から令和 4 年 9 月にかけての水底地形の変化が考察された[2]。

本研究では計測結果の精度を向上させるため慣性計測センサー (AHRS-IMU センサー) の導入も試行した。GPS アンテナと音響測深機が船体に固定されたときにピッチ (縦揺れ), ロール (横揺れ), ヨー (船首揺れ) などの船体の動揺にともなう誤差が計測結果に表れる。この誤差を補正するため慣性計測センサーの利用を試行した。しかし慣性計測センサーのみではヨー角を直接特定することが難しいので、磁気方位センサーの導入も試行した。今後これらの機器を用いた精度の高い計測手法の確立を目標とする。



写真 1. OKAYAMA 1.

[1] 岩上 聡, 爲賀 雅彦, 真田 将英, 毛利 道明, 岩上 義隆, 岡本 尚己, 光井 英視, 神保 秀司, 渡辺 雅二, 水面下の地形の形状推定に伴う問題点と計測結果の解析手法の提案, インダストリアルマテリアルズ, 応用数理, 第33巻・第1号, 32-39, 2023年3月 (依頼執筆)

[2] Satoshi Iwakami, Masahiko Tamega, Masahide Sanada, Michiaki Mohri, Yoshitaka Iwakami, Naoki Okamoto, Eishi Mitsui, Hidetaka Chikamori, Ryosuke Akoh, Shuji Jimbo, Masaji Watanabe, Measurement and Computational Study of Underwater Topography, Journal of Geoscience and Environmental Protection, Vol. 11 No. 4, April 2023.

DOI: 10.4236/gep.2023.114012

<https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=124959>

アクセプター内包亜鉛ポルフィリンダイマーに基づく

可視光レドックス触媒の創製

岡山理科大学 理学部 満身 稔

1. はじめに

金属-有機構造体 (MOF) や多孔性配位高分子 (PCP) とよばれる多孔性金属錯体ポリマーは、細孔を有する結晶性物質であり、光捕集を担う色素が高秩序で配列することで高効率の光捕集が期待できる。この多孔性金属錯体を電子ドナーに用いて、その細孔内に電子アクセプターとなるフラーレンを導入すれば、光エネルギー変換に必要な光捕集と電荷分離がフラーレン内包多孔性金属錯体単独で実現できると考えられる (図1)。光励起状態にある電荷分離状態から、化学エネルギーを取り出せば様々な光レドックス触媒となり、電気エネルギーを取り出せば光電変換システムとなる。したがって、多孔性金属錯体に基づく電荷分離システムは様々な用途で利用可能な光エネルギー変換材料を創製でき、エネルギー問題の解決に貢献できると期待される。

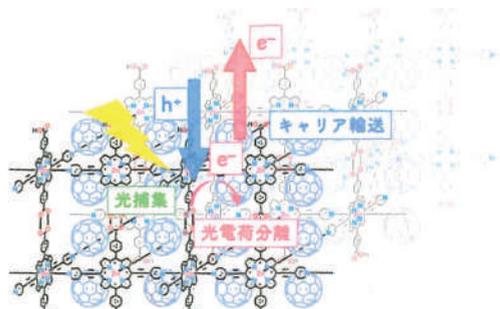


図1. アクセプター内包多孔性亜鉛ポルフィリン錯体

そこで我々は、優れた光レドックス触媒の開発を目指して、アクセプターとしてC₆₀を細孔内に内包し、長寿命の電荷分離状態を示すアクセプター内包多孔性亜鉛ポルフィリン錯体の開発を行なっている。本研究では、亜鉛ポルフィリンのダイマー化により電荷分離により生じる電荷を拡張π共役系に非局在化させて逆電子移動を抑え、電荷分離状態を長寿命化することを期待して、図2に示す自己集合により二次元四角格子を形成することが可能な亜鉛ポルフィリンダイマー-ZnPD₁₂₁を新規に合成した。この錯体では、配位サイトが四つ存在するのに対し配位部位であるピリジル基が二つであるため、自己集合によって向い合った不飽和な配位サイトが形成され、

πスタックによるフラーレンの内包が期待される。そこで、この錯体とC₆₀との共結晶化を行ったとこ

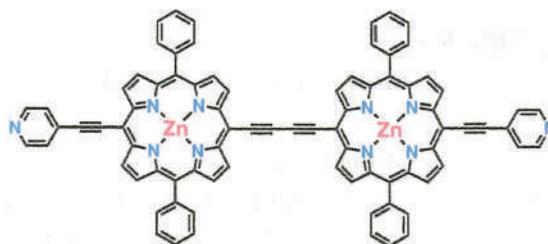


図2. 亜鉛ポルフィリンダイマー ZnPD₁₂₁

ろ、C₆₀内包多孔性亜鉛ポルフィリンダイマー ZnPD₁₂₁·C₆₀の結晶化に成功した。この錯体の結晶構造、光物性、可視光レドックス触媒としての性能評価を ZnPD₁₂₁の結果とともに報告する。

2. 結果と考察

2.1 合成

亜鉛ポルフィリンダイマー-ZnPD₁₂₁の合成経路を図3に示す。ピロールとベンズアルデヒドを出発物質として、4-フェニルジピロメタンを合成し、3-(トリイソプロピルシリル)-2-プロピナルとのMacDonald型縮合反応によってポルフィリン環を形成した。還流下、ジクロロメタン/メタノールの

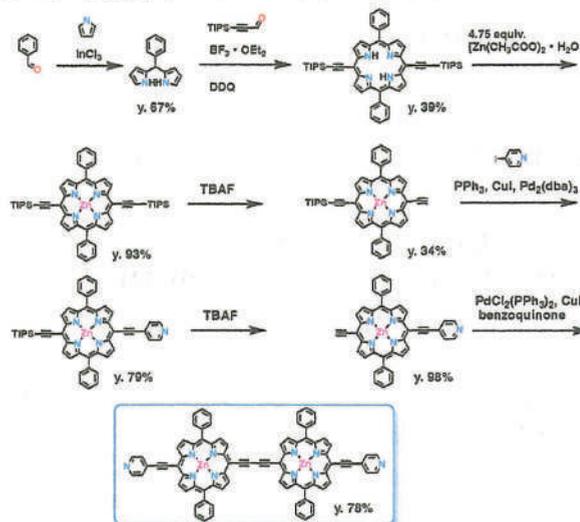


図3. 亜鉛ポルフィリンダイマー-ZnPD₁₂₁の合成

混合溶液中で亜鉛原子の導入を行い、TBAFにより片方のTIPS基のみ脱保護を行った。この化合物と4-ヨードピリジンとのクロスカップリングを行い、得られた化合物の脱保護およびホモカップリングにより、ZnPD_121を得た。多孔性亜鉛ポルフィリンダイマーZnPD_121·(PhCN)₇の結晶は、ZnPD_121をDMSOに溶かし、ベンゾニトリルを加え結晶化を行なった。一方、C₆₀内包多孔性亜鉛ポルフィリンダイマーZnPD_121·C₆₀の結晶は、ZnPD_121とC₆₀をDMSO、*o*-ジクロロベンゼン、ピリジンに溶かし、貧溶媒にアセトニトリルを加え共結晶化を行なった。

2.2 結晶構造解析

C₆₀を導入前のZnPD_121·(PhCN)₇の結晶構造を図4に示す。晶系は*monoclinic*、空間群は*P2₁/c*である。非対称単位内にはZnPD_121 0.5分子とベンゾニトリル3.5分子が含まれる。ZnPD_121·(PhCN)₇の結晶構造では、分子設計どおり亜鉛原子の片方の軸上に隣接分子のピリジル基が互いに逆側から配位することによって自己集合したヘリンボーンタイプのシート構造を形成しており、その細孔内にはベンゾニトリルが含まれていることがわかった。

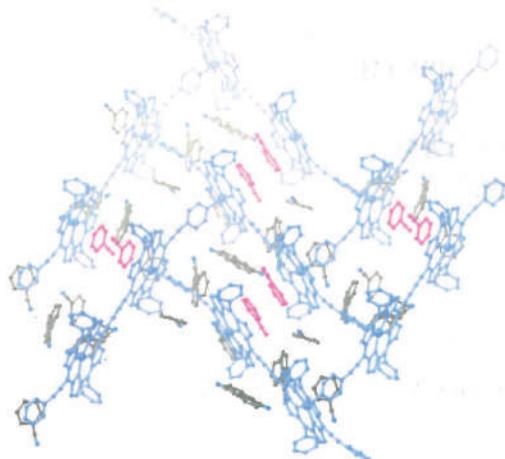


図4. ZnPD_121·(PhCN)₇の結晶構造

C₆₀内包多孔性亜鉛ポルフィリンダイマーZnPD_121·C₆₀の結晶構造を図5に示す。晶系は*orthorhombic*、空間群は*I222*である。単位格子内にはZnPD_121 4分子とC₆₀ 2分子が存在する。ZnPD_121·(PhCN)₇と同様に、ZnPD_121は亜鉛原子の軸上に隣接分子のピリジル基が互いに逆側から配位することによって自己集合したヘリンボーンタイプのシート構造を形成しているが、二次元四角格子の短辺が小さいことから、C₆₀は四角格子内だけに収まらず、上下のシートのポルフィリンユニット2つずつ、計4つとのπ-π相互作用によって取り込まれていることが分かった。

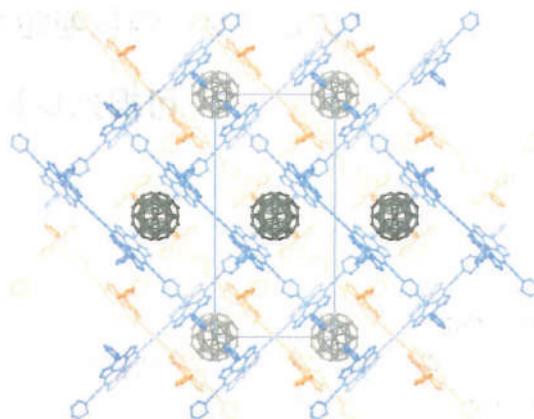


図5. ZnPD_121·C₆₀の結晶構造

2.3 紫外-可視吸収スペクトル・発光スペクトル

DMF中で測定したZnPD_121の紫外可視吸収スペクトルを図6に示す。ポルフィリン錯体に特有のSolet帯およびQ帯はダイマー化により分裂しており、Solet帯のピークが458 nmと494 nmに、Q帯のピークが681 nmと744 nmに観測された。これは、D_{4h}対称であるポルフィリン骨格の対称性がブタジイン架橋によって崩れることで、二つの遷移双極子モーメントB_xとB_yが生じるためである¹。したが、ブタジイン架橋によるダイマー化によって幅広い可視光領域の光吸収が可能であることを確認できた。

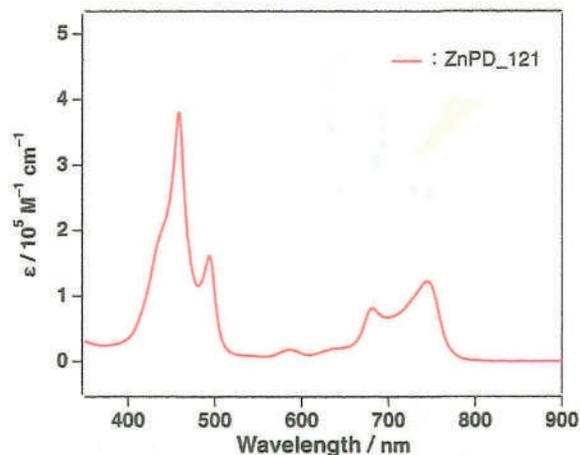


図6. ZnPD_121の紫外・可視吸収スペクトル

ZnPD_121の発光・励起スペクトルを図7に示す。分裂したSolet帯の短波長側(458 nm)を励起すると680 nm付近と740 nm付近に二種類の発光が現れた(青色)。一方、分裂したSolet帯の長波長側(495 nm)を励起すると、740 nm付近のみ発光が見られた(赤色)。また、検出器の波長を678 nmと740 nmにそれぞれ固定し、励起スペクトル測定を行うと、678 nm付近で検出された励起スペクトルはSolet帯の短波長側である460 nm付近にのみピーク(青色)を示し、

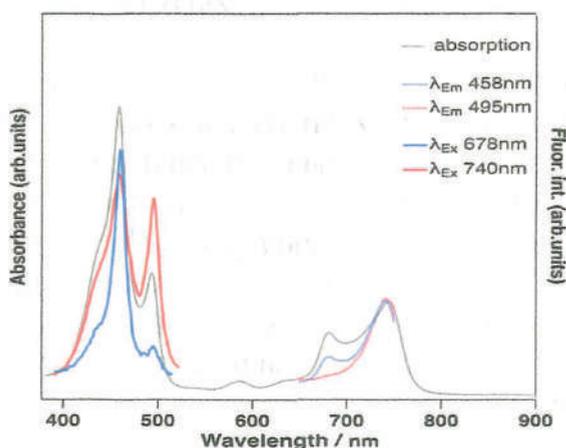


図7. ZnPD_121 の発光・励起励起スペクトル

740 nm で検出された励起スペクトルは 460 nm のピークに加え、長波長側である 500 nm 付近のピークも示した (赤色). これらブタジイン架橋ポルフィリンダイマーにおける特徴的な発光は, Anderson らによって次のように説明されている^{2,3}. ブタジイン架橋ポルフィリンダイマーは軸周りの回転により異なる立体配座を取ることができる. しかしながら, ブタジイン架橋部位は励起状態においてクムレン性が強く, 光励起によって平面化が起これり, 740 nm 付近からの発光が強く現れる. さらに, これらの異なる立体配座において, その励起スペクトルは一部重なり合っていないことから, 選択的に平面のみを励起することも可能である (図8). 本研究で合成したポルフィリンダイマーも同様に, 異なる立体配座からの発光が見られていることから, 励起状態において一部, 振れ型から共平面型へのコンフォメーションの変化が起これている可能性が示唆される.

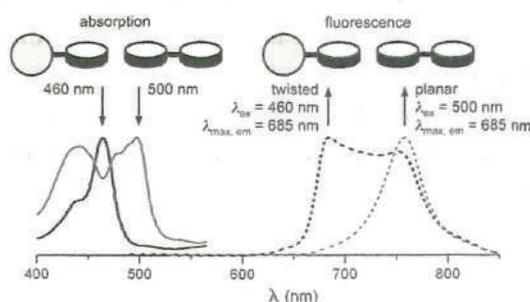


図8. ブタジインダイマーにおける異なる立体配座の選択的励起³

ZnPD_121·C₆₀ の紫外可視吸収スペクトルを ZnPD_121, C₆₀, のデータとともに図9に示す. ZnPD_121·C₆₀ のポルフィリンの Solet 帯由来のピークは ZnPD_121 と比べて 6 nm ほど red-shift してお

り, また, フラーレン由来のピークは 13 nm ほど blue-shift している. これにより, ZnPD_121 と C₆₀ の間の相互作用の存在が示唆される. また, 800 nm 付近に出現が期待される ZnPD_121 と C₆₀ の CT 相互作用による吸収は Q 帯の吸収が強く観測できず, CT 相互作用の存在の有無を判断できなかった.

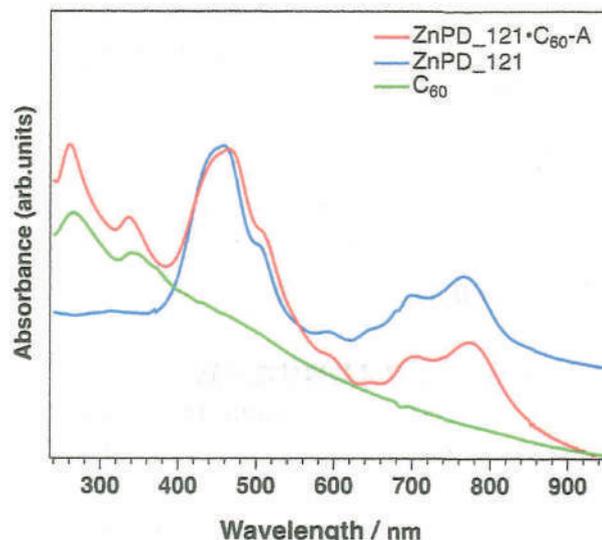


図9. ZnPD_121·C₆₀ の紫外可視吸収スペクトル

2.4 過渡吸収スペクトル

励起波長 470 nm で測定を行った ZnPD_121, ZnPD_121·C₆₀ の固体状態における過渡吸収スペクトルを図10, 11示す. ZnPD_121, ZnPD_121·C₆₀ ともに一重項励起状態のピークが約 1200~1230 nm 付近に観測された. さらに, ZnPD_121·C₆₀ では, 約 3ns の寿命を持つ電荷分離によって生成した C₆₀⁻ラジカル種と思われる約 1080nm のピークが観測された. 現在, スペクトルの詳細について検討中である.

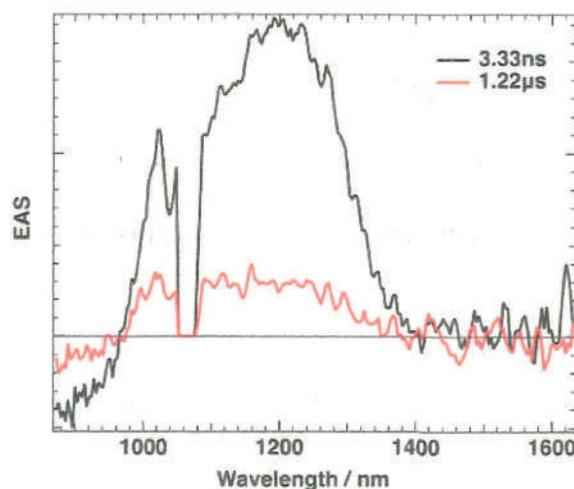


図10. ZnPD_121 の過渡吸収スペクトル.

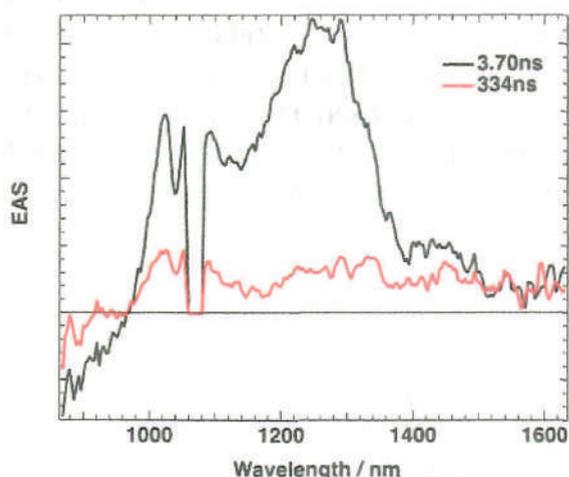


図 1 1. $\text{ZnPD}_{121}\cdot\text{C}_{60}$ の過渡吸収スペクトル.

2.5 フォトレドックス触媒性能評価

$\text{ZnPD}_{121}\cdot 7\text{PhCN}$ および $\text{ZnPD}_{121}\cdot\text{C}_{60}$ 結晶のフォトレドックス触媒としての性能評価を水素生成触媒に白金コロイド、犠牲剤にアスコルビン酸を用いて行なった (図 1 2). $\text{ZnPD}_{121}\cdot\text{C}_{60}$ 結晶では、光照射開始から 24 時間まで水素の生成を確認した。また、 C_{60} を含まない多孔性亜鉛ポルフィリンダイマー $\text{ZnPD}_{121}\cdot 7\text{PhCN}$ 結晶のみでも光水素生成が起ることを確認した。今後、光水素生成の最適化条件の検討を行いながら水素生成評価を行なっていく予定である。

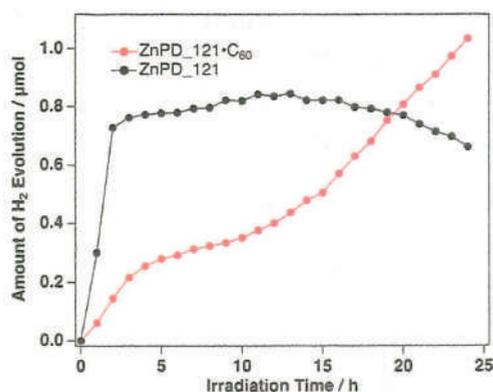


図 1 2. $\text{ZnPD}_{121}\cdot 7\text{PhCN}$ および $\text{ZnPD}_{121}\cdot\text{C}_{60}$ 結晶の光水素生成

3. まとめ

本研究では、光電荷分離後の安定化を期待して亜鉛ポルフィリンダイマー ZnPD_{121} を新規に合成し、 C_{60} 内包多孔性亜鉛ポルフィリンダイマー $\text{ZnPD}_{121}\cdot\text{C}_{60}$ の合成・結晶化を行った。X線結晶構造解析から、これらの錯体は ZnPD_{121} がヘリンボーンタイプのシート構造を形成しており、その細孔内にベンズニトリル、あるいは C_{60} がそれぞれ含ま

れていることを明らかにした。 ZnPD_{121} の吸収スペクトルでは、分子軸方向とそれに垂直な方向で遷移双極子モーメントが異なるので、Soret 帯、Q 帯の分裂が観測された。 ZnPD_{121} , $\text{ZnPD}_{121}\cdot\text{C}_{60}$ の過渡吸収スペクトルでは、 ZnPD_{121} , $\text{ZnPD}_{121}\cdot\text{C}_{60}$ ともに一重項励起状態のピークが約 1200~1230 nm 付近に観測された。さらに、 $\text{ZnPD}_{121}\cdot\text{C}_{60}$ では、約 1080 nm に約 3 ns の寿命を持つ電荷分離によって生成した C_{60}^- アニオンラジカル種に帰属されるピークが観測された。さらに、 $\text{ZnPD}_{121}\cdot 7\text{PhCN}$ および $\text{ZnPD}_{121}\cdot\text{C}_{60}$ 結晶をフォトレドックス触媒、水素生成触媒に白金コロイド、犠牲剤にアスコルビン酸を用いて、光水素生成を検討したところ、いずれの錯体においても光水素生成を確認した。本研究により、多孔性亜鉛ポルフィリンダイマーのみでもフォトレドックス触媒として機能しうることを確認できたので、現在、多孔性亜鉛ポルフィリンダイマーのみで光捕集と水素生成が可能な光水素生成触媒開発を展開している。

4. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人八雲環境科学振興財団、環境研究助成資金を賜りましたことを深く感謝申し上げます。また、本研究における過渡吸収分光測定は関西学院大学大学院理工学研究科 橋本秀樹教授、浦上千藍紗博士、光水素生成評価は島根大学大学院学術研究院環境システム科学系片岡祐介准教授にお世話になりました。御礼申し上げます。

5. 文献

1. H. L. Anderson, *Inorg. Chem.*, **1994**, *33*, 972–981.
2. M. Drobizhev, Y. Stepanenko, Y. Dzenis, A. Karotki, A. Rebane, P. N. Taylor, H. L. Anderson, *J. Phys. Chem. B*, **2005**, *109*, 7223–7236.
3. M. U. Winters, J. Karnbratt, M. Eng, C. J. Wilson, H. L. Anderson, B. Albinsson, *J. Phys. Chem. C*, **2007**, *111*, 7192–7199.

シュタットベルケ型ビジネスモデルの導入による脱炭素ならびに 地域付加価値創出効果

岡山大学学術研究院 環境生命自然科学学域 鳴海 大典

1. はじめに

地球温暖化対策推進法の改正案が2021年5月に国会で可決され、日本政府が宣言した「2050年カーボンニュートラル」が基本理念として法の下に位置づけられた。これにより、地域の再生可能エネルギー活用や地域活性化を目的とした「地域脱炭素化促進事業」の実施が地方公共団体に求められることとなり、地方公共団体が主導する「地産地消型地域エネルギーシステム」の実用化とその水平展開が喫緊の課題となっている。この点に関して、ドイツでは地域課題解決に資する地域電力主体として“シュタットベルケ”が定着している。一方で、日本では電力自由化から日が浅いこと、インフラ権限を一般電気事業者が独占してきたことなど、ドイツとは前提条件が異なることから、シュタットベルケを参考にした事業はいくつか存在するものの、その理念の実現はほど遠い状況にある。そこで本研究では、シュタットベルケ型ビジネスモデル（以降はシュタットベルケと記す）に対する住民や地方公共団体の意向調査を実施するとともに、シュタットベルケを事業展開した場合に期待される脱炭素や地域付加価値を定量的に評価することを試みる。

2. シュタットベルケに対する住民の意向調査

シュタットベルケのように地方公共団体が主体的に運営する取り組みには市民の積極的な参画—市民がエネルギー地産地消の意義を理解し、地域電力会社への切り替えにより地域電力を支えること—が欠かせない。本節ではシュタットベルケに対する受容度やその特徴を明らかにすべく、岡

山県真庭市を対象として住民意向調査（紙面アンケート形式）を行なった。配布回収はいずれも郵送とし、配布数は2470部で642の有効回答（26%）が得られた。調査全体の設問内容を表-1に示す。

得られた結果の一部として、電力会社の変更検討状況を図-2に示す。「変更した」が14%、「検討したが変更しなかった」が13%と、筆者らの過去の全国調査¹⁾と比較して割合が少なかった。変更理由については「節約」と「安定供給」への期

表-1 住民意向調査の設問内容

番号	項目	内容
問1	個人属性	居住地域、性別、年代、職業
問2	世帯	同居人数、世帯構成、世帯年収、オール電化、太陽光発電
問3	電気自動車	購入意向の有無や検討理由、購入の障壁
問4	省エネ	実施している省エネ行動
問5	電力会社	電力会社検討有無、変更なし理由、検討変更先電力会社
問6	変更重視理由	検討変更の際に重視する内容（2つ選択）
問7	地域サービス	必要な地域サービスを（3つ選択）
問8	サービスと電気料金	電気料金の上げ下げで地域電力会社に変更するか
問9	脱炭素宣言	脱炭素宣言の認知度
問10	脱炭素化政策	脱炭素化で重視する政策
問11	真庭市政策	真庭市のエネルギー政策で重視すること
問12	バイオマス発電所	真庭市のバイオマス発電所の認知度
問13	シュタットベルケ	シュタットベルケが設立された場合に出資するか
問14	真庭市取組	真庭市の脱炭素社会への取り組みへの関心度、その理由
問15	満足度	居住地域の満足度
問16	居住意向	真庭市に今後も住み続けたいか
問17	居住意向理由	問16の理由
問18	地元産食材	地元産の食材を選ぶか
問19	精神的に豊か	精神的に豊かな生活をしているか
問20	精神的に豊か理由	問19の理由
問21	地域情報	地域の情報収集手段
問22	自由記述	真庭市の脱炭素化について意見や感想



図-1 シュタットベルケの概念

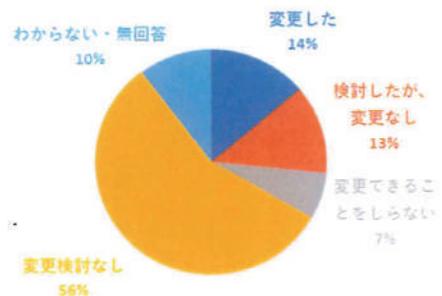


図-2 電力会社の変更検討状況

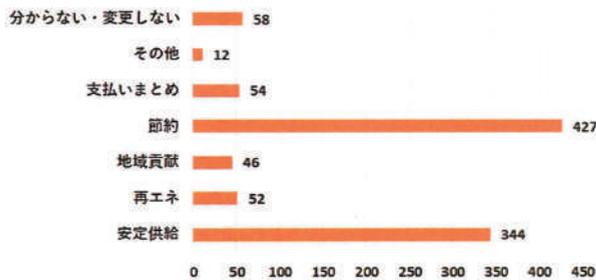


図-3 検討重視理由

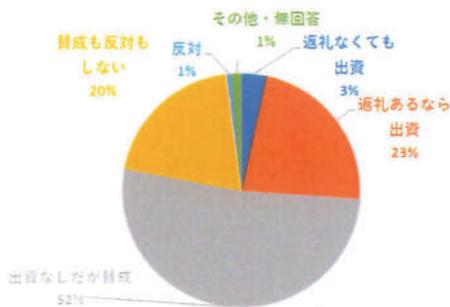


図-4 出資意向と賛否

待が突出し、「地域貢献」や「再エネ（地産地消）」はわずかだった（図-3）。将来的に真庭市においてシュタットベルケが展開された場合に期待する地域サービスを表-2に示す。最も期待が大きいサービスは「買い物支援」であり、次いで「若者の定住や移住」、「電気・水道・ガスを強化した災害避難所整備」、「保育のサポート」が続いた。シュタットベルケへの出資意向や賛否については、4分の3以上が賛成し、そのうちの3分の1は出資も検討していた（図-4）。反対については1%とごくわずかであった。

シュタットベルケによる地域電力会社への切り替えと電気料金の関係について、各設問回答との関係からその特徴を数量化2類により分析した（表-3）。その結果、「シュタットベルケへの出資意向があり」、「真庭市の脱炭素政策に関心が高く」、「地域愛着（居住地域の満足度が高い、地元産を選ぶ、将来も住み続けたい）が高い」場合に、シュタットベルケに対してより受容度が高くなる

結果となった。脱炭素に対する認知度も影響していた。その一方で、詳細は割愛するが、利便性や「高齢者や子どもの居住環境」について満足度が低く、若者ほど居住意向が低いなど、環境問題より高齢化や若者の定住を優先課題に位置づけるべきという意見も多く見られた。そのため、真庭市でシュタットベルケを展開する際には、魅力あるまちづくりによる地域満足度の向上から、シュタットベルケへの切り替えや受容度の向上につなげ、地域循環額の増加から地域満足度をさらに向上させるといった“正のスパイラル”が必要であり、脱炭素政策と地域の魅力向上を包括的に捉える取り組みが重要と考えられる。

3. 地域新電力事業（シュタットベルケ）に対する地方公共団体の意向調査

第1節で述べたように、地域資源を活用した地域エネルギー事業は地域課題解決の可能性を秘める一方で、実際に現在進行形で事業に取り組む地方公共団体はごく一部に限られている。本節では、地方公共団体が地域新電力事業を実現するプロセスにおいて、どのような背景や問題意識を有していたか、どのような障壁が存在したか、さらには今後の展開をどのように考えているかを明らかにすべく、「地域新電力事業への参画状況と将来展望に関する調査」と題してアンケートならびにヒアリング調査を行なった。調査対象は調査時点で地

表-2 期待する地域サービス

順位	内容	◎人数	○人数
1	買い物支援	96	163
2	若者の定住や移住に向けた取り組み	63	148
3	電気・水道・ガスを強化した災害避難所の整備	56	124
4	学童や放課後保育による保育のサポート	40	151
5	電気自動車による公共交通サービス	31	96
6	害獣や害虫の駆除や対策	20	101
7	高齢者の見守り巡回	26	94
8	地元農産物を利用したレストランや販売所を作る	12	56
9	森林整備のための積立金	17	45
10	ご家庭・お店の掃除、また農作業のお手伝いサービス	11	43
11	森林更新のための苗の販売	6	37
12	健康づくりの教室開催や情報共有	0	23

表-3 シュタットベルケの受容度を与える影響要因

項目	値上げ・同じでも乗り換える（-）	スコア	値下げもあれば・値下げに特化で乗り換える（+）
シュタットベルケ	出資したい	0.554	出資なし賛成・どちらでもない・反対する
真庭市取り組みへの関心	関心がある・やや関心がある	0.497	どちらでもない・あまり関心がない・全く関心がない
満足度平均	~2.875（満足度高）	0.452	2.876~（満足度低）
地元産	とても多い・やや多い	0.441	あまり多くない・全く多くない
住み続けたいか	住み続けたい	0.347	引っ越す理由なければ住み続けたい・あまり住み続けたくない・全く住み続けたくない
脱炭素宣言	理解している	0.341	聞いたことがある・知らない
精神的に豊か	している・ややしている	0.314	あまりしていない・全くしていない

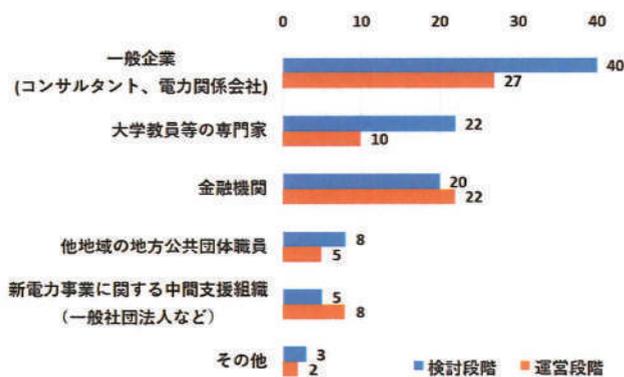


図-5 支援・協力を得た外部組織

域新電力との関わりを持つ地方公共団体とし、全79団体のうち65団体(82%)から回答を得た。調査概要を表-4に示す。

得られた結果の一部として、地域新電力の設立や運営に地方公共団体が関与した理由について、表-5に結果を示す。地域への利益還元など地域全体の繁栄に繋がる目的の達成のために、地域新電力事業に地方公共団体が関与している。また、事業の発案主体は地域によって様々である。ヒアリングを通して、必ずしも地方公共団体の関与が強いほど地域還元意識が高い訳ではなく、ケーブルテレビやガス会社のような地域インフラに関わる事業者や再エネ設備会社、地域課題解決団体などの、エネルギー事業と親和性が高い推進母体が存在する場合は、地方公共団体の関与が弱くても地域還元が念頭に置かれることが把握できた。

地域新電力の設立を検討するにあたり、また、現在運用(の支援)を行うにあたり、支援や協力を得た外部組織や人物について質問した結果を図-5に示す。事業検討段階と運用段階の変化に着目すると、検討段階では「コンサルタントや専門家、他の地方公共団体の協力を得て実施可能調査や知識収集を行い」、運用段階では「地方公共団体や関連事業者に次ぐ出資者として金融機関と関係を持つようになる」といった流れが見られる。事業立ち上げや運営の支援を行うコンサルタント会社や中間支援組織、既存地域新電力事業者などは、アンケート回答の中でも重複するものが存在し、新電力事業の支援に実績を持つ組織や新電力同士のネットワークが構築され始めている。

運用段階において、地域外部のコンサルタント等の民間企業による経営支援や委託は資金の大きな地域外流出となり得るため、新電力の設立後一定の期間を経て、事業運営を地域内の人材が担った事例も見受けられた。

本調査を通して、地域エネルギー事業に関わる

表-4 地方公共団体調査の概要

調査目的	地域新電力事業への参画状況と将来展望を明らかにする
調査期間	2022年10~12月
調査対象	自治体新電力がある地方公共団体79か所(既存調査と経済産業省のリストから抽出)
設問内容 (抜粋)	① 関与の理由 ② 設立経緯、発足のきっかけとなる人物 ③ 役所内での担当部署 ④ 地方公共団体と地域新電力の関係性(金銭面、組織面、その他) ⑤ 地方公共団体特有の難点、解決の工夫 ⑥ 支援や協力を得た外部の人物や組織 ⑦ 活用した国・都道府県の補助・支援制度
調査方法	調査票を電子メールで送付した上で、事業担当者が回答を記入、メールにより返信する。回答者の中から、担当部署や協力を得た外部機関等が異なる9団体を選定し、オンラインでヒアリングを実施する。
回答数	65/79 (回答率約82%)

表-5 地域新電力への関与理由

公共性・公益性を打ち出し、住民(顧客)の信頼や理解を得やすい	18
地方公共団体の需要・電力供給源を確保できることで、事業性が担保された状態で事業を開始できる	24
電気に地域課題解決のための付加価値サービスをつけることで、販売の際に顧客への差別性を発揮できる	14
高齢者見守りサービスなど電力供給と合わせた行政サービスの実施に繋げやすい	13
地域への利益還元が行いやすくなる	38
地域のPRやイメージアップに繋がる	17
地方公共団体間の連携の構築に繋がる	5
関係するステイクホルダーとの調整が円滑になる	3
各種法制度・条例遵守の為の助言・調整を行いやすい	1
地方公共団体として非常時のエネルギー確保ができ災害リスク対応の強化に繋がる	10
首長またはある地方公共団体職員が積極的なリーダーシップをとって新電力事業が進んだ	22
民間事業者や市民からの提案があった	21
わからない	1

多様なステークホルダーの存在を確認した。また、脱炭素や経済的な成果が現時点では顕れなくとも、「人々の繋がりや創出といった成果が得られている」との声が各地域で聞かれ、副次的・多面的な効果も含めて、地方公共団体が地域エネルギー事業に関与する意義があると考えられる。

4. 調査対象地域におけるエネルギー需給バランスデータベースの構築

本稿の第2節から、真庭市民の4分の3がシェットアウトベルケの設立に賛成し、市民ニーズが非常

に高いことが示された。また第3節から、地域新電力事業に関わりを持つ地方公共団体は多様なステークホルダーとの関わりの中で、副次的・多面的な効果も含めて地域エネルギー事業に関する意義が示された。これらを受けて本稿の以降では、真庭市内の久世地域（世帯構成比 25%）にシュタットベルケ型の地域新電力会社を設立した場合に期待される、環境性や地域経済効果を把握すべく、電力需給予測結果に基づいたフィジビリティスタディーを試みる。本節ではエネルギー需給バランスデータベースの構築について示す。

再生可能エネルギー資源による電力供給は時々刻々の気象資源に応じて変化するため、再エネ資源のみで需要量と供給量を時々刻々一致させることは困難である。そのため、地域新電力会社の設立による種々の効果を評価するためには、可能な限り時間間隔の細かな電力需給データを整備し、不足時には JEPX を介した買電を、余剰時には同様に売電を考慮した上で、年間需給バランスを評価する必要がある。本研究では久世地域の電力需要量を求めるにあたって、1 時間間隔の世帯類型別電力消費量を汎用建築シミュレーションソフトである DesignBuilder を用いて評価した。

表-6 に久世地域の世帯類型別世帯数を示す。表中の①から⑩までの世帯類型について年間時刻別の電力消費量を予測し、これに世帯数を乗じることで久世地域全体の年間時刻別の電力消費量を求めた。なお、7 人以上の世帯については世帯人数に応じて補正した。住宅の断熱水準や保有家電機器、使用時間などは一般的な条件とした。図-6 に代表日における電力需要量の予測結果を示す。冬季は暖房需要の増加に伴い、特に夜間の電力需要が増加している。

再生可能エネルギーによる電力供給については、本研究では発電源として、「木質バイオマス発電」、「太陽光発電（住宅）」、「太陽光発電（事業系）」の3種類を想定する。風力および水力発電については久世地域においては十分な資源量が得られないことから対象外とした。「木質バイオマス発電」については、市内の既存発電所から年間時刻別の発電データを入手し、ここから設置容量 1kW あたりの年間時刻別発電量原単位を求めた。「太陽光発電（住宅）」については、先述の DesignBuilder を使用し、真庭市における標準的な家庭用太陽光発電の年間時刻別発電量を推計し、ここから設置容量 1kW あたりの年間時刻別発電量原単位を求めた。「太陽光発電（事業系）」については、真庭市から公共施設（2 施設）の年間時刻別発電データを入手

表-6 久世地域の世帯類型別世帯数

世帯累計	世帯数	世帯累計	世帯数	6人以上	111
① 1人：男	438	⑦ 3人：夫婦と子（1人）	722	7人	45
② 1人：女	239	⑧ 3人：女親と子（2人）	-	8人	10
③ 1人：高齢男	229	⑨ 4人：夫婦と子（2人）	531	9人	4
④ 1人：高齢女	562	⑩ 5人：夫婦と子（3人）	228	10人	1
⑤ 2人：夫婦	613	⑪ 6人：夫婦、高齢夫婦と子（2人）	172	11人	0
⑥ 2人：高齢夫婦	520	合計	4254	12人	1
				計	172

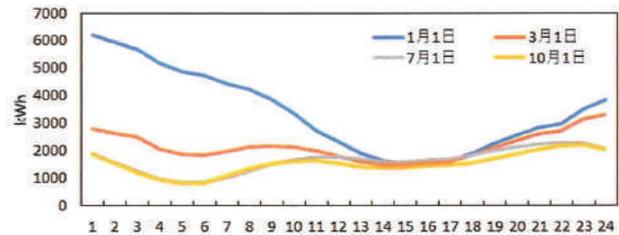


図-6 久世地域の電力需要（代表日）

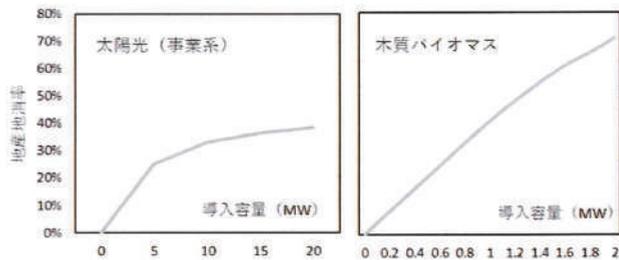


図-7 導入容量と地産地消率の関係

し、ここから設置容量 1kW あたりの年間時刻別発電量原単位を求めた。

上述のプロセスで得られた電力需給データに基づき、対象地域内（久世地域）の再生可能エネルギー発電導入容量と電力地産地消率の関係を評価した結果を、木質バイオマス発電と太陽光発電（事業系）について図-7 に示す。市内の賦存資源量から想定される導入容量上限を木質バイオマスで 2MW、太陽光発電（事業系）で 20MW とすると、木質バイオマス発電は導入容量と地産地消率が概ね線形関係となる一方で、太陽光発電（事業系）は導入容量が大きくなるに連れて地産地消率は頭打ちとなり 40%程度に収束した。これは木質バイオマスは昼夜を通して安定的に発電する一方で、太陽光は昼間のみに発電するため、発電容量が増加しても余剰電力が大きくなることから地産地消率は増加しない結果となった。

5. シュタットベルケの導入による脱炭素化・地域付加価値創出効果に関する分析

本節では前節で構築したエネルギー需給バランスデータベースに基づいて、真庭市久世地域にシュタットベルケを設立し、地域に賦存する再生可能エネルギー資源により発電し、地域内の全住宅を対象として電力を供給した場合の種々の効果を

評価する。

ここで、シュタットベルケはエネルギー事業によって得られた収益を基に地域サービス事業や電力料金の値下げを提供するが(図-1)、ここでは第2節のアンケート結果から「買い物支援」に対する市民ニーズが高かったことを受けて、買物弱者を支援する移動販売を地域サービス事業として想定する。また、評価年によって気象条件やJEPXスポット価格などが変化することで、得られる結果が大きく変わることも予想されることから、本研究ではデータが揃う最新のタイミングとして2020年を評価対象基準年として設定した。

5.1 経済性評価の前提条件

本節で地域付加価値創出効果(経済性)を評価する上で、発電コストや事業運営コストなどの前提条件を設定する必要がある。以下に経済性評価の前提条件を記す。

(1) 発電コスト

木質バイオマス発電は市内既存の発電所から2年間の収支表を入手し、ここからkWhあたりの発電コストを算出した。太陽光発電は資源エネルギー庁の発電コスト検証ワーキンググループが算出した値²⁾から政策費用を除いた額を用いた。いずれも施設設置に係る初期コストや運転維持費、人件費、燃料費(木質バイオマス)などを考慮した額である。ここで、これらの発電コストのうち、燃料費や運転維持費は地域内に支払われることから、地域付加価値を評価する上では市外流出分のみをコストとして計上する考えもある³⁾。そこで本研究では市内循環・市外流出を問わず掛かる全体の費用を「発電コスト」、市外流出分のみを計上する費用を「市外流出発電コスト」と区別して評価する。各発電源の発電コストを表-7に示す。太陽光発電は初期投資に多額の費用が掛かるため、発電コストと市外流出発電コストの差が小さい一方で、木質バイオマス発電は全体に占める燃料費の割合が大きく、燃料となる木材は市内産を中心に購入していることから、発電コストと市外流出コストの差が非常に大きくなる結果となった。

(2) 卸電力の購入価格

前述のように、自前の発電源による供給電力量が需要量と一致しない限り、JEPXを介して電力を売買する必要がある。この際の売買単価にはJEPXのスポット市場取引価格の実績値を用いた。

(3) 需要家への電力販売価格

需要家(一般家庭)への電力販売単価は一般電気事業者(中国電力)からの購入価格と同レベルを想定し、27円/kWhを基準価格として設定した。

表-7 発電源別の発電コスト

発電源	発電コスト (円/kWh)	市外流出発電コスト (円/kWh)
木質バイオマス	27.3	3.0
太陽光(家庭)	17.1	14.6
太陽光(事業系)	12.0	8.8

(4) その他事業運営に係る費用

上述の発電コスト、JEPXの売買費用に加えて、事業運営に係る費用として、「託送料金」、「管理費」、「地域サービス実施額」を考慮する。託送料金については、一般送配電事業者の託送料金平均単価から中国地方の平均価格として9.11円/kWhを用いた。管理費については、事業規模の近い既存の地域エネルギー事業の収支表に基づき年間610万円とした。地域サービス実施額については、第2節のアンケート結果から「買い物支援」に対するニーズが高かったことを受け、EV軽貨物車による移動販売事業費として、既存事業の収支表に基づき年間600万円とした。

5.2 最適電源構成に関する検討

第4節で示した3種類の再生可能エネルギー利用による発電源を久世地域に設置し、下記の前提条件を満たす最適電源構成を探索的に決定した。

- ・事業収益を600万円以上確保する(地域サービスの実施可能額)。
- ・再生可能エネルギーで賄う割合は最大限とする。
- ・太陽光(事業系)の導入上限は2MWとする(メガソーラーに対する懸念がアンケート調査から多く聞かれたため)。
- ・太陽光(住宅)の導入世帯率は22%より多く設定する(アンケート調査から現状22%であったため)。

なお、シュタットベルケの設立は再生可能エネルギーの地産地消、地域の電力インフラ強化を目指すものであるため、600万円以上の収益が得られる場合は事業収益よりも再生可能エネルギー導入率(地産地消率)を優先した。

以上のプロセスから、久世地域におけるシュタットベルケの発電源として、木質バイオマス発電は1.2MW、太陽光発電(住宅)の導入世帯率は25%(約5.8MW)、太陽光発電(事業系)は1MWが最適な組み合わせとして選定された。図-8にベストミックス電源構成による代表日の電力需給を示す。この条件でのエネルギー地産地消率は68.3%であった。

5.3 地域付加価値創出効果に関する検討

上述のベストミックス電源構成によるシュタットベルケ設立に伴う事業収益と域内循環額の評価

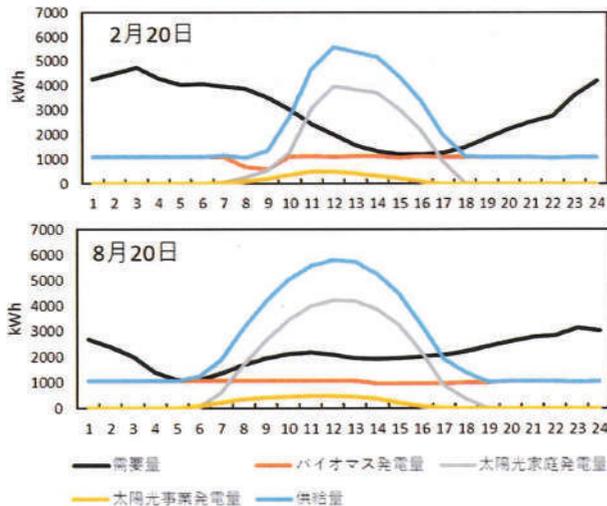


図-8 ベストミックス時の電力需給（代表日）

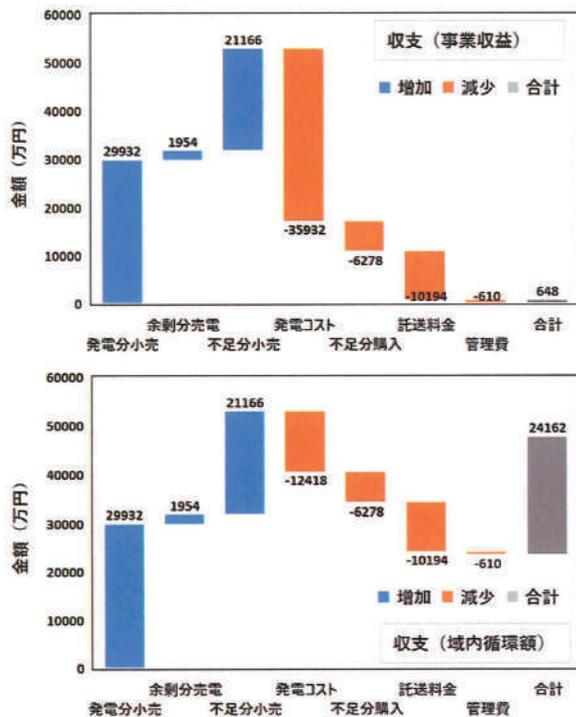


図-9 年間経済収支（上：事業収益，下：域内循環額）

結果を図-9に示す。企業としての事業収益と域内循環額との違いは発電コストのみであり、事業収益は発電コストが高いために合計が減少している。表-7に示すように、木質バイオマス発電は発電コストが高いために、導入容量を大きくすることは事業性の悪化に直結するが、その多くは木質未利用資源の燃料購入費用として域内循環するため、域内循環の観点からはむしろ導入容量の増加は好ましいことがわかる。今回の設定条件下での評価結果によると、企業としての事業収益は648万円であるのに対して、域内循環額は約2.4

億円となった。図-9から収支バランスを分析すると、託送料金や発電コストに多くの費用が掛かることが分かる。託送料金は自営線を設置することで回避可能であるが、敷設のみならず管理運営も含めて自営線の設置コストは大きく、いずれの方式を選択するかはより詳細な分析が必要となる。なお、この条件下でのCO₂削減効果は、全てを一般電気事業者からの電力供給に依存した場合と比較して年間7174t、およそ70%の削減となった。

なお、COVID-19による経済ダメージからの回復やウクライナ情勢に伴い、電気料金の高騰が社会問題となっている。このような電気料金の変化が事業収益に与える影響を評価することを想定し、JEPX スポット市場取引価格を2021年の実績値に変更した結果から、2020年の648万円の利益に対して、2021年は5716万円の赤字となった。この場合、電力販売単価を31円/kWhに設定することで赤字を回避できる結果となった。

6. まとめ

本研究ではシュタットベルケに対する意向調査を実施するとともに、シュタットベルケを真庭市内で事業展開した場合に期待される脱炭素や地域付加価値効果を定量化した。

住民に対する意向調査からニーズは非常に高いことが示された。地方公共団体に対する調査から地域エネルギー事業に関与する意義が示された。また、久世地域にシュタットベルケを設立した場合、地域サービスとして移動販売事業の運営が可能になること、特に木質バイオマス資源の購入により大きな地域付加価値が得られること、約70%のCO₂削減効果が得られることが示された。将来的には電気ヒートポンプ式給湯器や電気自動車の普及拡大によって、より大きな脱炭素や地域付加価値効果が得られると考えられる。また、今後は市民会議や市民ワークショップのような対話・協働の場で市民理解を深めることで社会実装につなげていくことが課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 深澤菜, 大塚彩美, 土屋依子, 鳴海大典: 日本版シュタットベルケの在り方に関する研究 その3: 新電力会社への切替意向に対する影響要因の分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道) D, 2022年9月
- 2) 資源エネルギー庁 発電コスト検証ワーキンググループ: 発電コスト検証に関する取りまとめ, 2021年8月
- 3) 諸富徹: 入門 地域付加価値創造分析 再生可能エネルギーが促す地域経済循環, 日本評論社, 2019年4月
- 4) 大塚彩美, 鳴海大典: 脱炭素にむけた未来創造の担い手としての市民参画手法の試み その1 岡山県真庭市における脱炭素市民会議の事例報告, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関西) D, 2023年9月

研究レポート

赤色光をエネルギー源として利用可能にする有機光触媒の開発

岡山大学 異分野基礎科学研究所

田中 健太

1. はじめに

近年の地球環境問題への世界的な取り組みとして「持続可能な開発目標 (SDGs)」を目指した活動が活発に展開されており、有機合成化学の分野においても環境に対する負荷を軽減しうる新たな合成プロセスの開発が試みられている。可視光を光源とすることのできる光触媒反応はクリーンで持続可能な化学プロセスに応じる新戦略の1つであり注目を集めている。その一方で、現在報告されている光触媒反応は紫外領域に近くエネルギーの大きい短波長側の可視光である紫～青色光(波長 380-490nm)を光源として使用しており、低いエネルギー効率が課題となっている。太陽から地球に降り注ぐ光は長波長側の可視光が高い強度を有する波長域であることから、長波長側の波長領域の可視光を吸収することのできる光触媒を開発することは、効率的な太陽光エネルギーの活用に基づく持続可能な社会の実現のために欠かすことのできない研究課題である。このような背景から、本研究では長波長側の可視光である赤色光(波長 620-780nm)を光源として利用することのできる新規有機光触媒 (TXTH) の開発を目標として研究を行った(図 1)。

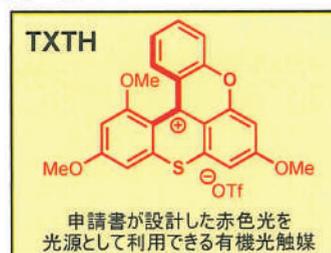


図1

2. 新規有機光触媒 (TXTH) の合成

申請者はこれまでに申請者は可視光の中でも長波長側の光である緑色光を光源とする新しい有機光触媒 (TXT) の開発に成功している¹⁾(図 2)。この触媒はチオエーテルと安息香酸誘導体の Friedel-Crafts 反応により TXT 触媒の合成に成功している²⁾。

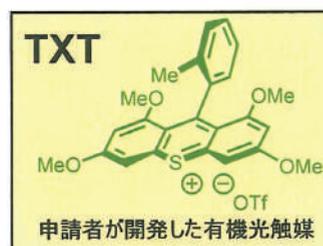


図2

この合成法を基盤とし、本研究ではチオエーテルの反応相手としてサリチル酸のようなカルボン酸のオルト位に水酸基を有する基質を用いることにより、新規有機光触媒 (TXTH) が合成できるものと考えた。即ち、まず Friedel-Crafts 反応によりチオキサンチリウム塩が生成した後にメトキシ基の脱離を伴う S_NAr 反応により螺旋構造を特徴とする含硫黄ヘリセニウムイオン有機光触媒 (TXTH) が得られると考えた(図 3)。

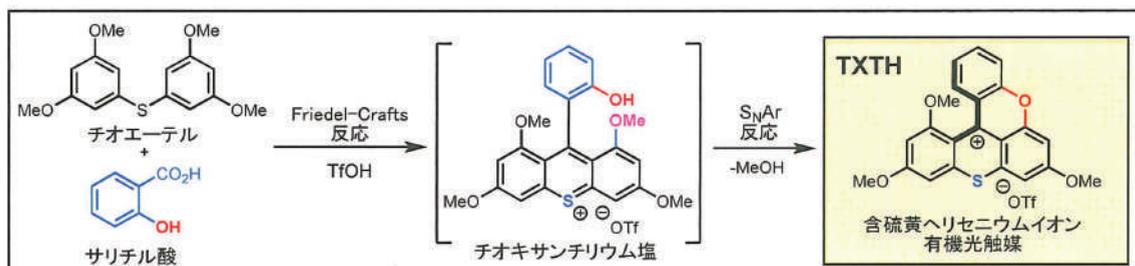


図3

そこで実際に含硫黄ヘリセニウムイオン有機光触媒 (TXTH) の合成を行った。実験条件として、基質にチオエーテル 1 (0.2 mmol) およびサリチル酸 2 (0.6 mmol) を使い、酸触媒として TfOH (3.0 equiv.)、溶媒として chlorobenzene (5.0 mL) を用いて 120 °C、24 時間の条件で検討を行ったところ、42%の収率で目的とする TXTH 触媒を得た (図 4)。この結果から、Friedel-Crafts 反応と S_NAr 反応の連続反応が円滑に進行することが分かった。一般的なヘリセニウムイオンの合成はトリアリールメチルカチオンを予め合成した後に分子内 S_NAr 反応により合成する手法が取られており³⁾、チオエーテルとサリチル酸のような入手容易な化合物を基質とし、Friedel-Crafts 反応と S_NAr 反応の連続反応により一段階でヘリセニウムイオンを合成する手法はこれまで報告例が無いことから、新たなヘリセニウムイオンの合成手法を確立することができた。

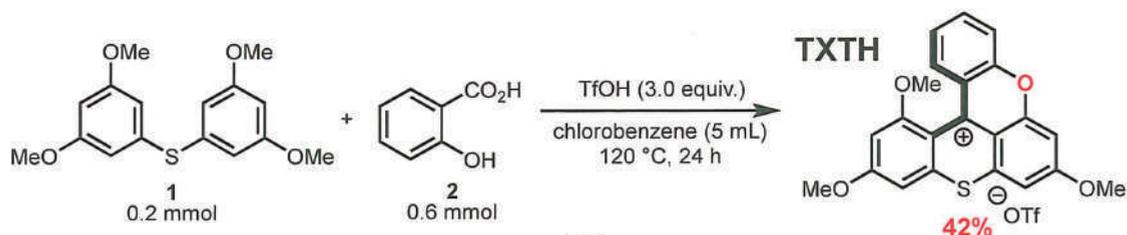


図4

3. 新規有機光触媒 (TXTH) の光触媒特性の評価

合成した含硫黄ヘリセニウムイオン (TXTH) の紫外可視吸収スペクトルの測定を行った。その結果、TXTH 触媒は可視光領域に幅広い吸収を有することが分かった (図 5)。特に波長 620 nm 以上の赤色光領域にも吸収帯が確認できることから、長波長側の可視光である赤色光を光源とした合成反応に展開できる光触媒であることが分かった。

次に、光触媒の吸収特性の比較を行うために申請者が以前開発した TXT 触媒の合成を行った。その結果、TfOH 触媒存在下、チオエーテル 1 と酸クロリド 3 の Friedel-Crafts 反応により、目的とする TXT 触媒を 50% で得ることに成功した (図 6)。

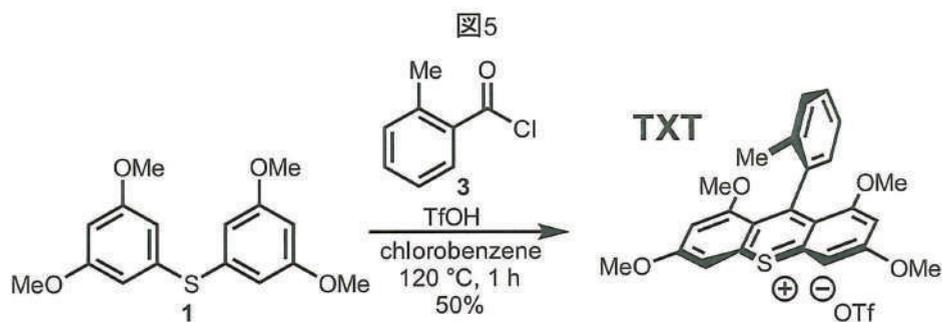
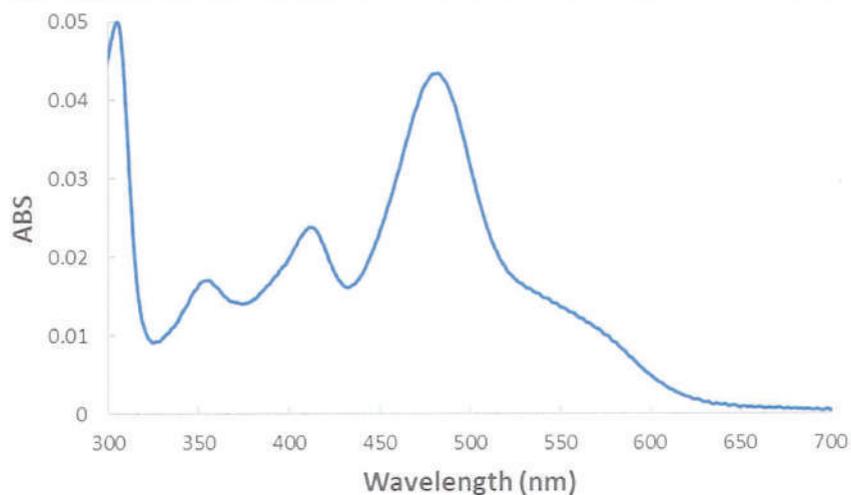


図6

合成した TXTH 触媒と TXT 触媒の吸収特性の比較を行った。その結果、TXT 触媒と比較し TXTH 触媒はより長波長側の可視光領域を吸収する分子であることが分かる (図 7)。これは、TXT 触媒よりも π 共役が拡張したため、HOMO-LUMO のバンドギャップが小さくなり吸収波長が長波長側にシフトしたためと考えられる。

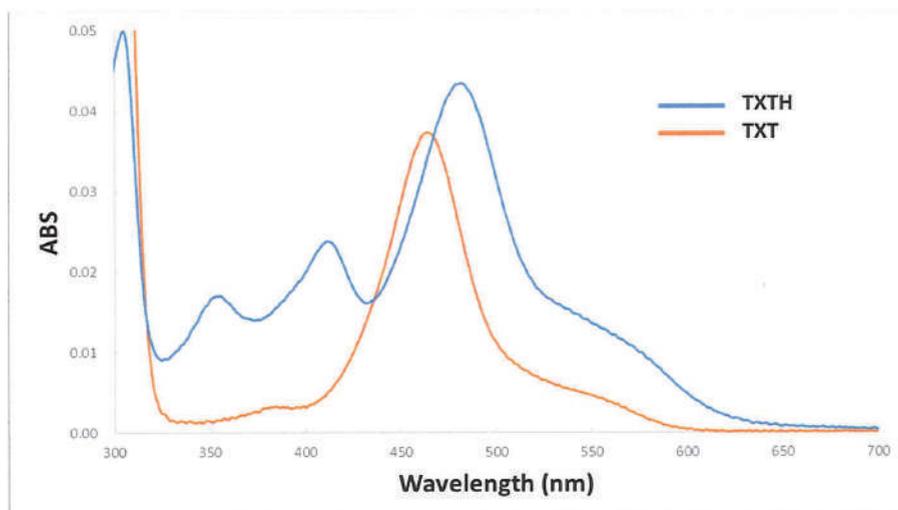
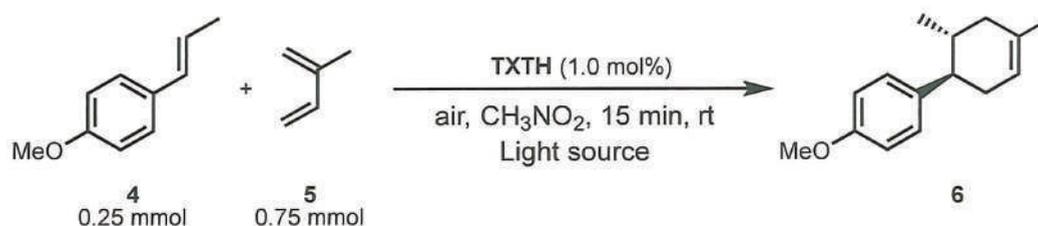


図7

4. 新規有機光触媒 (TXTH) の光触媒反応への応用

合成した含硫黄ヘリセニウムイオン (TXTH) の光触媒としての機能を創出するため、申請者が以前に開発した環化付加反応に応用することとした。実験条件として、基質に *trans*-anethole 4 (0.25 mmol) および isoprene 5 (0.75 mmol) を用い、光触媒 TXTH (1.0 mol%)、溶媒として CH₃NO₂ (4.0 mL) を用いて空気雰囲気下、室温 15 分の条件で種々光源の検討を行った (図 8)。その結果、いずれの光を光源とした場合においても円滑に反応が進行し高収率で目的とする環化付加体 6 を得ることに成功した。特に長波長側の可視光である Red LED (赤色光波長 640 nm) を光源として用いた場合に最もよい結果を示し、>99%の収率で目的物を得ることに成功した。一方、Entry 5, 6 において光触媒を加えない条件や Red LED を照射しない条件では反応が進行しなかったことから、TXTH 触媒と Red LED が本反応を促進していることが分かった。この結果から、TXTH 触媒は光触媒としての機能を有していることが分かった。



entry	light source	yield
1	UV	98%
2	Blue LED	>99%
3	Green LED	96%
4	Red LED	>99%
5 ^a	Red LED	N.R.
6	/	N.R.

^a No catalyst



図8

5. 結言

まとめとして、本研究では Friedel-Crafts 反応と S_NAr 反応の連続反応により一段階で新規含硫黄ヘリセニウムイオン (TXTH) 光触媒を合成することに成功した。この光触媒は幅広い可視光を吸収することができる分子であり、特に長波長側の可視光である赤色光を光源として利用できる光触媒であることが分かった。実際に光触媒反応に応用したところ、紫外光や可視光照射により反応が円滑に進行し、良い収率で目的物を得ることに成功した。特に、赤色光 (波長 640 nm) を光源としたところ最もよい結果を示し、>99%の収率で目的物を得ることに成功した。今後の展望として、TXTH 触媒と赤色光を用いた有機 EL 材料の効率的合成法の開発や、太陽光をエネルギー源とした合成反応を検討することにより、エネルギー分野や地球環境分野へ貢献したいと考えている。

6. 謝辞

本研究を遂行するにあたり、公益財団法人八雲環境科学振興財団による研究助成を賜りましたことを深く感謝申し上げます。

7. 引用文献

- 1) (a) K. Tanaka, M. Kishimoto, Y. Tanaka, Y. Kamiyama, Y. Asada, M. Sukekawa, N. Ohtsuka, N.; T Suzuki, N. Momiyama, K. Honda, Y. Hoshino *J. Org. Chem.* **2022**, *87*, 3319-3328. (b) K. Tanaka, Y. Asada, Y. Hoshino *Chem. Commun.* **2022**, *58*, 2476-2479. (c) K. Tanaka, Y. Iwama, K. Mami, N. Ohtsuka, Y. Hoshino, Y. K. Honda *Org. Lett.* **2020**, *22*, 5207-5211. (d) K. Tanaka, Y. Asada, Y. Hoshino *Org. Biomol. Chem.* **2020**, *18*, 8074-8078.
- 2) K. Tanaka, Y. Tanaka, M. Kishimoto, Y. Hoshino, K. Honda, K. Beilistein *J. Org. Chem.* **2019**, *15*, 2105-2112.
- 3) J. Bosson, J. Gouin, J. Lacour *Chem. Soc. Rev.* **2014**, *43*, 2824-2840.

1. 研究背景と目的

ナトリウムおよびカドミウムによるイネ栽培の問題点 ナトリウムやカドミウムはイネにとって単に不必要なミネラルであるというだけでなく、栽培上の問題を生じる。イネは塩分に非常に敏感で、根から地上部への Na^+ の過剰な取り込みは生育阻害を引き起こす。地球温暖化による高潮の頻発や大型台風により日本をはじめ世界の沿岸域で塩害による被害が増大している。イネはカドミウムに対して比較的高い耐性を持っている。しかし、イネの可食部に到達したカドミウムは、米を食べることを介して、深刻な健康被害を引き起こす (Sobahan et al., 2009; Mori et al., 2021)。

Na^+ の植物体内への取り込み経路は、必須ミネラルの取り込み輸送体を介した非選択的な輸送経路と専ら細胞外を通過して根の最外層から道管へ至る水輸送経路であるアポプラスチック経路が重要であると考えられている。Yeo ら (1987) の研究により、イネにおける根から地上部への Na^+ の取り込みの主要な経路がアポプラスチック経路を介した水の流れ (アポプラスチックフロー) であることが指摘され、現在中心的な考え方となっている。アポプラスチックフローは、理想的な栽培条件では非常に小さいことが知られている。一方、これは塩ストレスにより活性化される。結果的に、塩ストレスによりアポプラスチックフローが促進されることにより、アポプラスチックフローに伴って運ばれる Na^+ がより取り込まれることになる。

Cd^{2+} は、これまで鉄やマンガンを取り込む輸送体により、非選択的に誤って取り込まれるとされてきた。これは、理想的な栽培条件ではほぼ正しいことが証明されている。しかし、塩ストレス条件下や Cd^{2+} のストレスにより、アポプラスチックフローが促進されると、 Na^+ と同様に結果的に Cd^{2+} の取り込みが促進されることが近年報告された (Mori et al., 2021)。これらの結果は、 Na^+ および Cd^{2+} の取り込みにアポプラスチックフローが関わることを示唆している。

アポプラスチック経路による水取り込み (アポプラスチックフロー) の低いイネ品種の育種的開発 理想的なイネの栽培条件においては、 Na^+ や Cd^{2+} の土壌への蓄積は顕著ではない。これらのミネラルが蓄積している土壌はストレス土壌であり、そのような土壌ではアポプラスチックフローが亢進している蓋然性が高い。すなわち、アポプラスチック経路による Na^+ や Cd^{2+} の取り込みが盛んになると予想される。このことから、アポプラスチックフローが少ない品種を作出することにより、塩害により強く、また Cd^{2+} 蓄積がより少なくすることができると考えられる。

申請者は、ジャポニカ品種である‘日本晴’および‘コシヒカリ’とインディカ品種である‘カサラス’のアポプラスチックフローを比較した。その結果、塩ストレス下において、‘カサラス’は‘日本晴’よりもアポプラスチックフローがおよそ 1/5 であることが明らかとなった。このことから、‘日本晴’と‘カサラス’を交配することにより、アポプラスチックフローが小さく、このために Na^+ や Cd^{2+} の取り込みが小さいジャポニカ品種を育種的に作出することができると考えられる。しかし、‘カサラス’の染色体上において、低いアポプラスチックフローの原因となる遺伝子座がどこに座乗し、またどれくらいの遺伝子がこれに関わっているのかなどは不明である。

天然植物アクチベーターを利用したアポプラスチック経路による水取り込み活性の抑制技術の開発 キチンはカニの甲羅を粉砕することで作られる。キチンおよびキチンからアセチル基を除去したキトサンと呼ばれる物質は、植物の病害抵抗性を高める植物アクチベーターとして利用されている。一方、いくつかの論文が、キチンやキトサンが塩ストレスなど非生物学的なストレスに対する抵抗性を高めることができることを報告している。しかし、その作用機序はわかっていな

い。キチンおよびキトサンがアポプラスチックフローの抑制に関わっているかどうかは、推測の域を脱しないが、アポプラスチックフローはイネにおいて地上部への Na^+ の供給に重要であるとみなされていることから、その作用点として検討する必要がある。

本研究では、日本晴の遺伝的背景にカサラスの染色体断片を有する遺伝解析集団を用いて、アポプラスチックフローを抑制できる染色体領域を明らかにすること、またキチン/キトサン混合物が塩ストレスにより活性化されるアポプラスチックフロー抑制効果を持つかどうかを明らかにすることを目的とした。

2. 材料と方法

2.1. 遺伝解析集団 日本晴/カサラスの戻し交雑によって作出された 54 系統の染色体断片置換系統群 (CSSL 集団, <https://www.rgrc.dna.affrc.go.jp/jp/ineNKCSSL54.html>), および単粒系統法によって日本晴/カサラスの戻し交雑自殖により作出された 98 系統の戻し交雑系統群 (BIL 集団, <https://www.rgrc.dna.affrc.go.jp/jp/ineNKBIL98.html>) を用いた (Lin et al., 1998).

2.2. イネ実生の水耕栽培およびアポプラスチックバイパスフローの測定 イネ実生は水耕により栽培し、アポプラスチックバイパスフローは、Mori et al. (2021) の方法により 8-hydroxyl-1,3,6-pyrenetrisulphonic acid (PTS) を用いて測定した (図 1)。大量の試料のアポプラスチックバイパスフローを測定する場合には、総蒸散量の測定を省略し、PTS の地上部への取り込み量を相対的なアポプラスチックバイパスフローの活性とした。

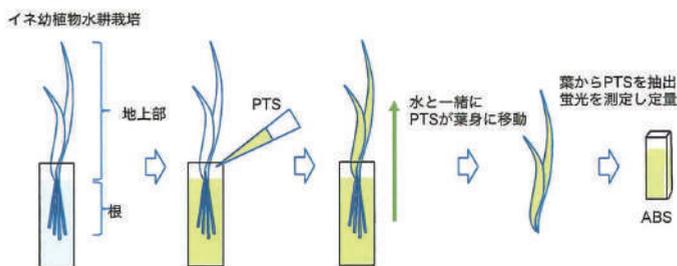


図1. PTSを用いたイネのアポプラスチックバイパスフローの測定方法の概要

2.3. ナトリウムおよびカドミウム含量の測定 イネ地上部のナトリウムおよびカドミウム含量は常法に従い、I原子吸光法により測定した。

2.4. 植物ホルモン含量の測定 イネ地上部の植物ホルモン (インドール酢酸, トランスゼアチン, アブシシン酸, ジャスモン酸, サリチル酸) の含量は液体クロマトグラフィー-質量分析 (LC-MS) により測定した。

3. 結果と考察

3.1. 低アポプラスチックフローに関与する染色体領域の特定

イネ 3 品種の幼植物の成長への塩化ナトリウムの影響の評価 2 種のジャポニカ品種, ‘日本晴’ および ‘コシヒカリ’, 1 種のインディカ品種, ‘カサラス’ の地上部および根の成長への塩化ナトリウムの影響を調べた。日本晴においては地上部および根の伸長におよぼす食塩の影響は軽微であった。カサラスは 20 mM 以上の食塩により地上部および根の伸長が著しく阻害された。コシヒカリにおいては地上部への食塩の影響は顕著であったが、根の伸長への影響は軽微であった (図 2)。伸長成長のみならず、地上部および根の新鮮重についても同様の食塩の影響の傾向が

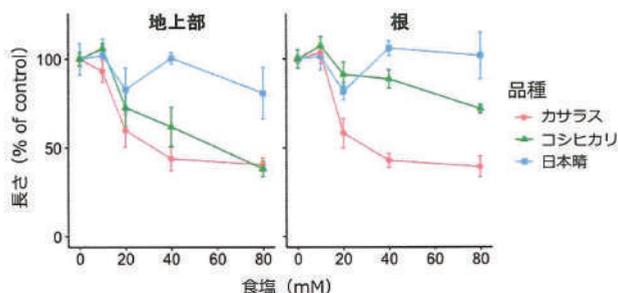


図2. イネ幼植物の成長への食塩の影響

みられた (結果は省略)。

ナトリウムによる地上部の成長阻害が小さいことから、当初日本晴のアポプラスチックバイパスフローが小さく、コシヒカリとカサラスのアポプラスチックフローが大きいと当初予想した。

イネ幼植物のアポプラスチックフローの割合の違い 地上部の成長に最も大きな差が見られた日本晴とカサラスを対象として、PTS の地上部への移行を指標に、イネ幼植物の全水吸収に対するアポプラスチックバイパスフローの割合を測定した。図3に示されるように、食塩非存在下 (0 mM) でのアポプラスチックバイパスフローの割合は日本晴では 2.0%、カサラスでは 1.6%であった。25 mM の食塩ストレスで 24 時間処理すると、アポプラスチックフローの割合は、日本晴では 17.0% (8.4 倍)、カサラスでは 3.2% (2.0 倍) に上昇した (図3)。

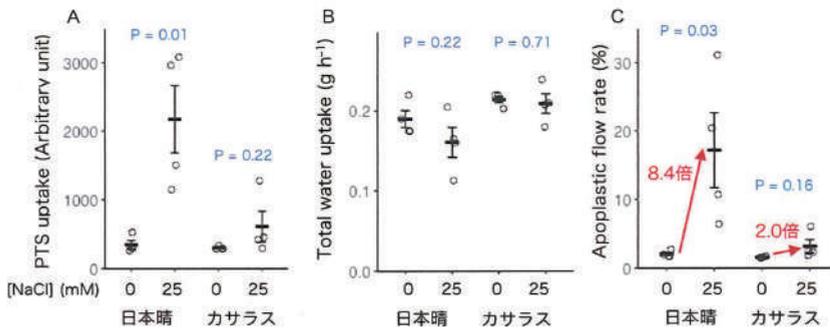


図3. 食塩処理によるアポプラスチックフローの活性化 A, 地上部へのPTSの取込み量. B, 植物体の総水取込み量. C, AとBから計算により求めた総水取込み量に対するアポプラスチックフローの割合

食塩添加による植物成長阻害の影響から予想された結果とは反対に、ジャポニカ品種である日本晴のアポプラスチックフロー速度は高く、カサラスのアポプラスチックフロー速度は低いことが明らかとなった。このことか

らカサラスの食塩ストレスに対する感受性は、地上部へのナトリウムイオンの輸送に伴う障害ではなく、別の機構があることが示唆された。

カサラスのアポプラスチックフローが、日本晴とくらべて顕著に小さかったことから、日本晴の遺伝背景にカサラスの遺伝子を後輩により導入することで、アポプラスチックフローが低い、より塩に強く、また、Cd 取り込みが低いイネ品種を作出することができると考えられた。

日本晴/カサラス遺伝分離集団におけるアポプラスチックフロー活性の評価 カサラスが持つ低アポプラスチックフロー活性の形質を日本晴に導入するために、日本晴のゲノムの一部がカサラスのゲノムに置き換えられている N/K 染色体部分置換系統 (54 系統) のアポプラスチックフローを PTS の取り込みにより調べた (図4)。日本晴に比べ、カサラスの PTS 取り込み量はおよそ 1/5 であり、図3の実験と同様の結果が得られた。もし、アポプラスチックフローに関わる遺伝子座がひとつであったと仮定すると、分離集団において、日本晴型の 1 とカサラス型の 1/5 に不連続的に分離することが期待される。しかし、この分離集団では PTS 取り込みが、連続的に分散し、

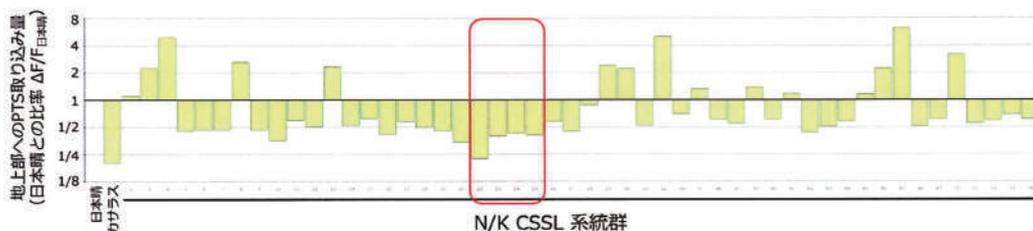


図4. 日本晴/カサラス CSSL集団におけるアポプラスチックフロー活性 系統番号SL22, SL23, SL24およびSL25を赤い枠で囲い明示した。

なかには日本晴よりも高くなる結果もあった。このことは、アポプラスチックフローの量に関わる遺伝子座が複数存在することを示唆している。また、系統番号 SL22 から SL25 にかけて PTS 取り込みが低い系統が見られた（図 4 中赤枠）。この領域はイネの第 5 染色体の一部がカサラスの染色体に置き換わっている系統群であることから、第 5 染色体にアポプラスチックフロー活性に関与する遺伝子が存在すると予想された。図 5 に SL22, SL23, SL24, SL25 の染色体の構造を示した。

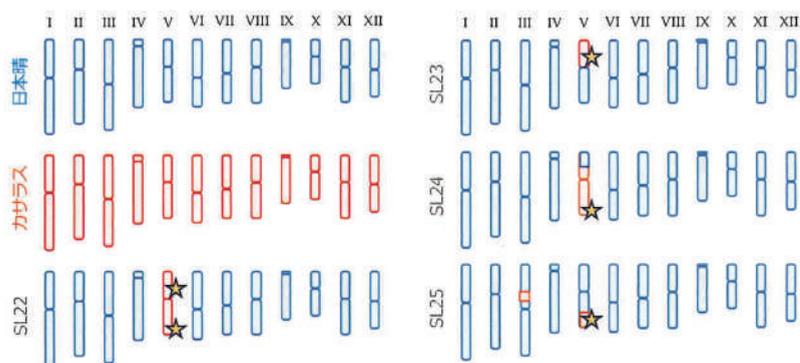


図5. 日本晴/カサラス CSSL集団 SL22, SL23, SL24およびSL25のゲノム構造の模式図と低アポプラスチックフローに関連する遺伝子が座乗している可能性の高い領域。青：日本晴染色体，赤：カサラス染色体，星：低アポプラスチックフロー関連遺伝子の存在が有力視される染色体領域。

第 5 染色体上の短腕領域と長腕の末端領域にアポプラスチックフロー活性に関与する遺伝子が座乗していると予想された。さらに予想領域を狭めるため、これらの系統を日本晴に戻し交雑した。2023 年夏に F₂ 世代を展開し、秋の収穫を待ってさらに解析を進める計画を進めている。

第 2 染色体および第 7 染色体にも関連する遺伝子座があることが示唆されたが、本研究では現在までの PTS 取り込み実験から、第 5 染色体の寄与率が高いと考えられるため、今後この領域に焦点を当てて解析を進めることを想定している。

3.2. キチン/キトサン混合物によるアポプラスチックフロー活性抑制効果の検証

キチン/キトサン混合物処理が、イネの塩耐性に効果があるという報告に基づき、キチン/キトサン混合物には Na⁺取り込みの主要経路であるアポプラスチックフローを抑制する効果があるとの仮説を立てた。

キチン/キトサン混合物によるアポプラスチックフローの抑制 10 ppm キチン/キトサン混合物を水耕栽培液に添加したところ、食塩によるアポプラスチックフローの割合の上昇が、顕著に抑制された（図 6A）。この効果はこれまでに知られている 1 mM プロリンの効果とほぼ同程度だった。50 ppm キチン/キトサン混合物では、その抑制効果が 10 ppm に比べると小さいものの、食塩によるアポプラスチックフローの促進を顕著に抑制した。

キチン/キトサン混合物による地上部へのナトリウム輸送の低減 次に、イネ地上部への Na の蓄積に対するキチン/キトサンの影響を調べた。10 ppm および 50 ppm のキチン/キトサン混合物処理により、イネの地上部への Na の蓄積は 60%未満まで減少した（図 6B）。一方、K の蓄積はキチン・キトサン混合物によりほぼ影響を受けなかった（図 6C）この結果は、キチン・キトサン混合物の添加により、イネのアポプラスチックフローが抑制され、結果的にイネ幼植物の地上部へのナトリウムの輸送が阻害されたことを示唆する。

キチン/キトサン混合物処理による植物ホルモン含量の変化 植物の塩ストレスへの応答は比較的遅いため、12 時間処理では成長に有意な影響は見られなかった（未発表）。また、キチン・キトサン混合物処理においても、12 時間処理では成長に有意な影響は見られなかった（未発表）。形態的には影響が見られないとしても、植物ホルモン含量のようなストレス応答に比較的敏感な

生化学的形質が現れることを期待して、LC-MS 解析を行った。

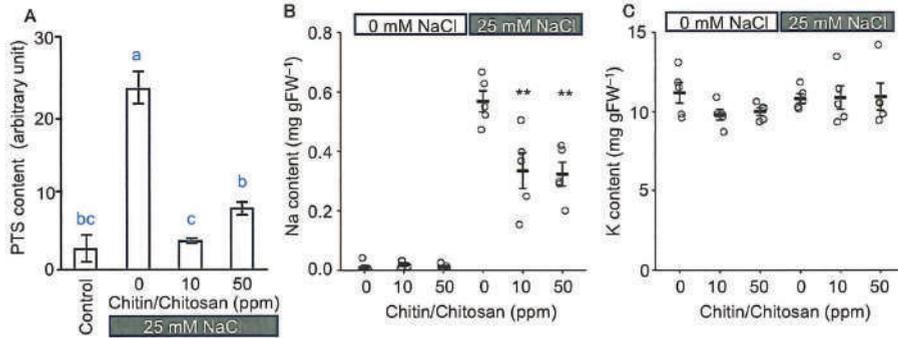


図6. イネ幼植物の地上部へのPTS, ナトリウムおよびカリウムの取り込み量へのキチン/キトサン混合物の影響 A, PTSの取り込み. B, ナトリウムの取り込み. C, カリウムの取り込み **はダネットテストでP値が0.01未満を意味する. Tukey-HSDテストで $\alpha=0.05$ で有意なものは小文字のアルファベットで示した. 塩処理, キチン/キトサン混合物処理は明期に12時間実施した.

食塩ストレスのない条件で、キチン/キトサン混合物処理により、オーキシンおよびサイトカイニンの含量が低下した(図7). オーキシンおよびサイトカイニンは細胞の伸

長や分裂に関わり、植物の成長に関わるホルモンであり、含量が低下すると成長が鈍ることが知られていることより、キチン/キトサン混合物は、長期的に処理すると、少なくとも実験室内の条件では成長を抑制すると予想された。圃場実験では作物は常にさまざまなストレスにさらされていることから、単純にキチン/キトサン混合物がイネの成長や収量に負の影響を示すとは限らない。同じ条件で、塩ストレス・低温ストレス・乾燥ストレス抵抗を付与することで知られるアブシシン酸およびウイルスをはじめとする宿主を生かしながら感染する病原体(バイオトロフ)への抵抗性を付与することで知られるサリチル酸の含量は、キチン/キトサン混合物処理の影響を受けなかった(図7)。塩応答に関連することが知られているアブシシン酸の含量が変化しなかったことは意外であったが、食塩処理の影響が地上部に現れるまでには、ラグ時間があるため、12時間ではアブシシン酸の含量に影響していないことは必ずしも不思議ではない。

一方、植物細胞を破壊し、場合によっては枯死に至らしめる病原体(ネクロトロフ)への抵抗性を付与することで知られているジャスモン酸の含量が、食塩ストレスのない条件で、キチン/キトサン混合物処理により、顕著に増加することが明らかとなった(図7)。これは、キチンやキトサンが病原性菌類の細胞壁の構成因子であることを考えると矛盾がない。イネがキチン/キトサン混合物処理により、ネクロトロフ病原菌の感染応答をしたと理解できる。これらの結果で非常に興味深いことは、キチン/キトサン混合物処理による、オーキシン・サイトカイニン・ジャスモン酸への影響が、食塩ストレス条件では見られないもしくは、顕著に弱くなっていたことである(図7)。

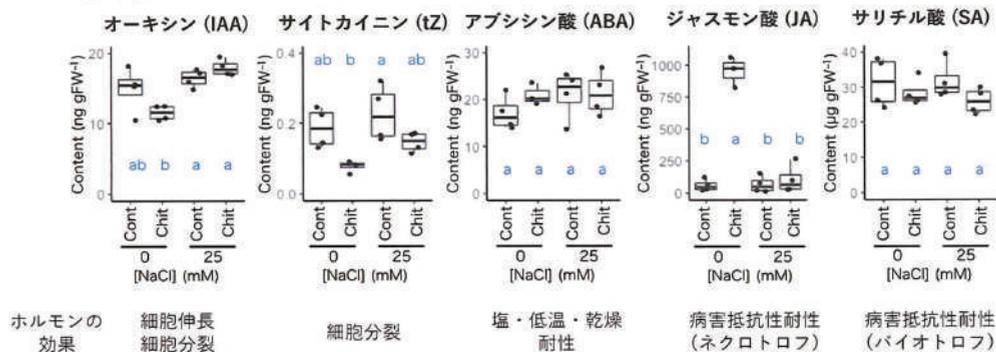


図7. イネ幼植物の地上部の植物ホルモン含量への食塩ストレスおよびキチン/キトサン混合物処理の影響

アブシシン酸応答に代表されるような非生物学的ストレスとジャスモン酸やサリチル酸に代表されるような生物学的ストレスが同時に負荷された場合に、非生物学的ストレス応答とも生物学的ストレス応答とも異なる、詳細がわかっていない異なるストレス応答状態になることが、申請者らと岡山大学およびインド国立ゲノム研究所の共同研究グループが指摘している (Gupta et al., 2017). このような応答に関する研究は少ないが、アブシシン酸およびジャスモン酸が協調して、気孔運動の制御をしていることを双子葉植物であるシロイヌナズナを用いた研究により、申請者の研究グループが明らかにしている (Yin et al., 2016). このような応答はイネではまだ知られていないが、食塩による非生物学的ストレスおよびキチン/キトサン混合物による人工的な生物学的ストレスの惹起により、イネの蒸散作用が抑制されることで、アポプラスチックフローを介した、根からの水吸収が抑制された可能性が考えられる。

4. まとめ

- ・イネのインディカ亜種の一品種である'カサラス'は、ジャポニカ亜種の一品種である'日本晴'と比べ、有意に低いアポプラスチックフロー活性を有していた。
- ・カサラスと日本晴の染色体置換系統を用いた解析により、アポプラスチックフローの大小に関わる遺伝子は、複数あり、そのなかでも第 5 染色体に少なくとも 2 つの重要な遺伝子が座乗していることが示唆された。
- ・キチン/キトサン混合物処理により、アポプラスチックフローおよび地上部へのナトリウムの輸送が抑制された。
- ・キチン/キトサン混合物処理により、イネ地上部のジャスモン酸含量が上昇した。食塩処理とキチン/キトサン混合物処理を同時に作用させた場合、ジャスモン酸含量の上昇は起こらず、非生物学的ストレス応答と生物学ストレス応答との間で相互作用が生じることが示唆された。

5. 謝辞

本研究を実施するにあたりご支援をいただきました公益財団法人八雲環境科学振興財団に心より感謝申し上げます。

6. 参考文献

- Gupta A, Hisano H, Hojo Y, Matsuura T, Ikeda Y, Mori IC, Senthil-Kumar M. Global profiling of phytohormone dynamics during combined drought and pathogen stress in *Arabidopsis thaliana* reveals ABA and JA as major regulators. *Sc Rep.* 7: 4017 (2017)
- Sobahan MA, Arias CR, Okuma E, Shimoishi Y, Nakamura Y, Hirai Y, Mori IC, Murata Y. Exogenous proline and glycinebetaine suppress apoplastic flow to reduce Na^+ uptake in rice seedlings. *Biosci Biotechnol Biochem.* 73: 2037-42 (2009)
- Mori IC, Arias-Barreiro CR, Ooi L, Lee NH, Sobahan MA, Nakamura Y, Hirai Y, Murata Y. Cadmium uptake via apoplastic bypass flow in *Oryza sativa*. *J Plant Res.* 134: 1139-1148 (2021)
- Yeo AR, Yeo ME, Flowers TJ. The contribution of an apoplastic pathway to sodium uptake by rice roots in saline conditions. *J Exp Bot.* 192: 1141-1153 (1987)
- Yin Y, Adachi Y, Nakamura Y, Munemasa S, Mori IC, Murata Y. Involvement of OST1 protein kinase and PYR/PYL/RCAR receptors in methyl jasmonate-induced stomatal closure in *Arabidopsis* guard cells. *Plant Cell Physiol.* 57: 1779-1790 (2016)

スズメバチにおける栄養交換の機能解明と環境に及ぼす影響の解析

岡山大学学術研究院
環境生命自然科学学域（農）
助教 藤岡春菜

アリ、ハチ、シロアリなどの社会性昆虫は、繁殖（女王）と非繁殖個体（ワーカー）が分化した社会形態を持ち、これは真社会性と呼ばれている。膜翅目で真社会性を持つのは、ミツバチ類、アリ類、スズメバチ類で、これらの分類群は社会性昆虫とよばれる。系統内では複数回（少なくとも8回）真社会性を進化させており、膜翅目は単独性から真社会性まで、多様な社会構造を持つ種が複雑に入り混じって構成されている。

社会性昆虫では、女王とワーカー（働きアリ、働き蜂）間の繁殖分業だけでなく、ワーカー間で育児や巣の建設・防御、採餌など様々な仕事の分担を行う。統率のとれた集団行動に、コミュニケーションは欠かすことができない。昆虫の社会では、物理接触、化学物質、視覚、音などを利用し、さまざまな情報を共有する。本研究で注目したのは、社会性昆虫で頻繁に観察される、物質を交換を介する“栄養交換”と呼ばれる一連の行動である(図1)。社会性昆虫では、巣内の一部の個体だけが巣外に採餌に行き、見つけた餌を巣仲間のために持ち帰る。液体の餌(蜜など)の場合は、その餌を飲み、胃の中に貯め巣に持ち帰り、巣内に戻ったあとにその胃に貯めた餌を吐き出し、巣仲間へ受け渡す。アリやハチの消化器官は、この栄養交換のために特殊化されており、社会胃とその後続く腸の間に弁があり、餌を社会胃に溜め、吐き戻すことができるようになっている。栄養交換は、成虫間だけでなく、幼虫と成虫間でも行われ、摂食や育児に直接関わるため、コロニーの存続・生存に極めて重要である。近年、アリ類の研究において、この栄養交換は、単なる餌の共有だけではなく、吐き出し液にフェロモンや巣仲間認識物質、小分子RNA、さまざまなタンパク質などが含まれ、コミュニケーションや他個体を操作する機能を持ちうるということが明らかになった(LeBoeuf et al. 2016; LeBoeuf et al. 2018; Hakala et al. 2021)。しかし、この吐き戻しの成分が、種・系統間でどれほど保存されているかや、社会性獲得の上でどのような機能が付随されたのかは、ほとんど分かっていない。

そこで、本研究では、単系統内で単独から真社会性までの社会段階を持つスズメバチ科を対象とし、社会性の度合いに応じて吐き戻し液に含まれる成分が異なるかの解明を試みた。

<方法>

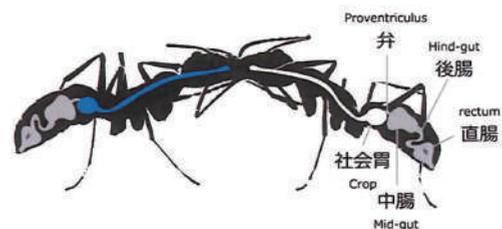


図1 餌を吐き戻して、巣仲間へ受け渡しをする様子
(左の個体から右の個体へ)

単独性または真社会性の社会性の度合いが異なる3種から、吐き戻し液を採取し、含まれるタンパク質の網羅的解析を行った。プロテオミクス解析には、ゲノム配列が必要である。そのため、ゲノム情報が入手でき、かつ現実的に採集ができることを基準に、単独性種としてエゾスジドロバチ(*Ancistrocerus nigricornis*)、真社会性種としてシダクロスズメバチ(*Vesupula shidai*)、オオスズメバチ(*Vespa mandarina*)を選定した。エゾスジドロバチは、越冬後の春と初夏に、成虫のみ採取した。社会性種は、初秋(9月~10月)に成虫と幼虫から吐き戻し液を採取した。

エゾスジドロバチは、栄養交換を行わないが、営巣のため液体を吐き戻しすることが知られている。二酸化炭素麻酔をかける刺激や、腹部を軽く圧迫することで、エゾスジドロバチの吐き戻し液の採取に成功した。社会性種シダクロスズメバチとオオスズメバチは、各4巣ずつから成虫と幼虫の吐き出した液を採取することができた。幼虫は、頭部をやさしくタップすることで、個体によっては大量(100 μ L以上)の吐き戻しをした。成虫は、冷却麻酔下で、腹部を軽く圧迫することで、吐き戻し液の採取が可能であった。シダクロスズメバチは、個体によって吐き戻す液量が大きく異なったため、3から20個体の吐き戻し液を1サンプルとし、オオスズメバチは、4個体を1サンプルとして採取した。1つの巣の中で個体数が確保できた場合は、複数の個体から採取をし、巣内での反復サンプルとした。また、麻酔下で人工的に吐き戻させた体液と、自発的に吐き戻しをした際の体液に含まれる物質に大きな違いがないことが、先行研究で確かめられている(LeBoeuf et al. 2016)。

その後、NanoLC-MS/MSでタンパク質の同定を行った。プロテオーム解析で得られた結果から、データベースから各タンパク質の機能を調べた。幼虫と成虫間で得られたプロファイルに差があるかを調べるため、タンパク質量が多かった約60個を用いて、階層クラスタリング解析を行い、ヒートマップとして結果を示した。

<結果と考察>

単独種エゾスジドロバチでは、5つタンパク質が検出されたが、その全てが特徴づけられたタンパク質ではなかった。採取できた吐き戻し液は、10 μ L程度であったため、サンプルの量が少ないためタンパク質が検出できなかった可能性は低いと考えている。一方、社会性種オオスズメバチでは240個、社会性種シダクロスズメバチでは221個という多数のタンパク質が検出された。一部のタンパク質はアノテーションがなされていなかったが、データベースから各タンパク質の機能を調べ、表1にまとめた。消化に関わる酵素やエネルギー生産、糖・脂質の代謝・合成、栄養貯蔵、酸化還元反応、物質輸送、さらにストレス反応や免疫に関連する機能を持つタンパク質が含まれていた。少数であったが、この表外にシダクロスズメバチでは、Glycogen biosynthesis(1), Growth regulation(1), Iron storage(1)やオオスズメバチでは、Behavior(1), Endocytosis(1), GTPase activation(1), Helicase(1), Motor protein(1) Receptor(1), Transducer(1), Virulence(1)の機能をもつタンパク質が検出された(カッコ内はタンパク質の個数)。この結果から、スズ

メバチの吐き戻し液に含まれる物質は機能的にも多岐に渡ることがわかった。さらに、シダクロスズメバチとオオスズメバチで含まれるタンパク質の機能は、重複がみられた。

表 1. スズメバチの吐き戻し液に含まれる物質の機能ごとのタンパク質数

Function	<i>Vespula shidai</i> シダクロ	<i>Vespa mandarina</i> オオスズメ
Uncharacterized/Characterized	26/195	35/205
Aminopeptidase/ Aminotransferase	3/0	3/1
Angiogenesis	1	1
Apoptosis	2	4
ATP synthesis	1	1
Carbohydrate metabolism	6	11
Carboxypeptidase	3	5
Cell adhesion/ Cell cycle	6/0	7/2
Chaperone	6	5
Digestion	0	4
Developmental protein	4	1
DNA-binding	1	1
Glycolysis	7	4
Glycosidase	15	2
Host-virus interaction/ Immunity	0/4	3/7
Hydrogen peroxide/ Hydrolase	1/19	1/14
Hydrolase, Protease	5	10
Isomerase	5	1
Lipid metabolism	13	10
Nucleotide metabolism	1	1
Oxidoreductase	21	20
Protease inhibitor	5	4
Protein biosynthesis	2	1
Ribonucleoprotein	1	1
Storage protein	4	2
Stress response	2	1
Transcription	1	1
Transport/Transferase	25/6	24/7
unknown	18	26

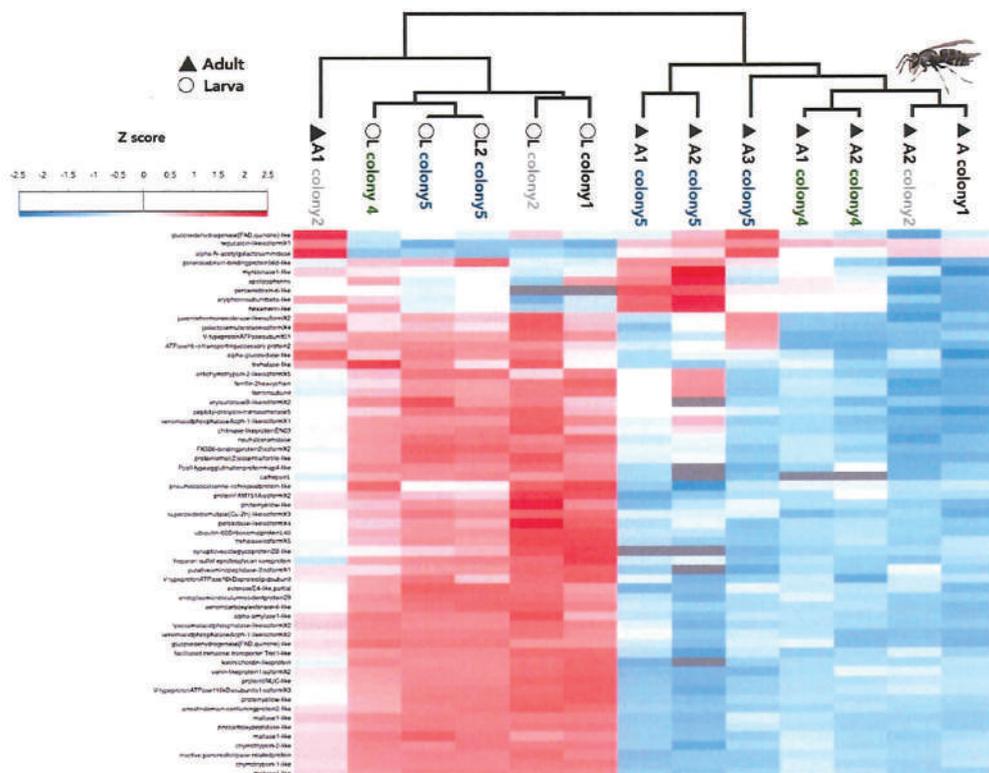


図2 シダクロスズメバチの吐き戻し液に含まれるタンパク質における幼虫と成虫間の違い

次に、幼虫と成虫間で吐き戻しに含まれるタンパク質のプロファイルが異なるかを調べるため、多く含まれていた約60個のタンパク質を対象に、種ごとに階層クラスタリング解析を行った。シダクロスズメバチでは、巣2(colony 2)の成虫サンプルを除いて、幼虫(○)と成虫(▲)でグループが分かれていた(図2)。含まれるタンパク質の数については、成虫と幼虫間で明瞭な差は見られず、巣間によって在不在のパターンが異なる結果であった。ヒートマップの色は、検出されたタンパク質の量の指標となる値(iBAQ)である。成虫より幼虫でタンパク質量が多いタンパク質が8割もあることがわかった。先行研究で、スズメバチの幼虫の吐き戻し液には多くのアミノ酸含まれていることが報告されており(Takashi et al. 1991)、これと関連する結果である。同じ巣の別個体から採取した、巣の繰り返しサンプルは、比較的似たパターンを示していた。しかし、同じ巣2から採取した反復の成虫サンプルでは全く異なるプロファイルを持っていることもあり、同じ巣内の個体であっても吐き戻し液の中に含まれるタンパク質は、個体間でばらつきがあると示唆される。

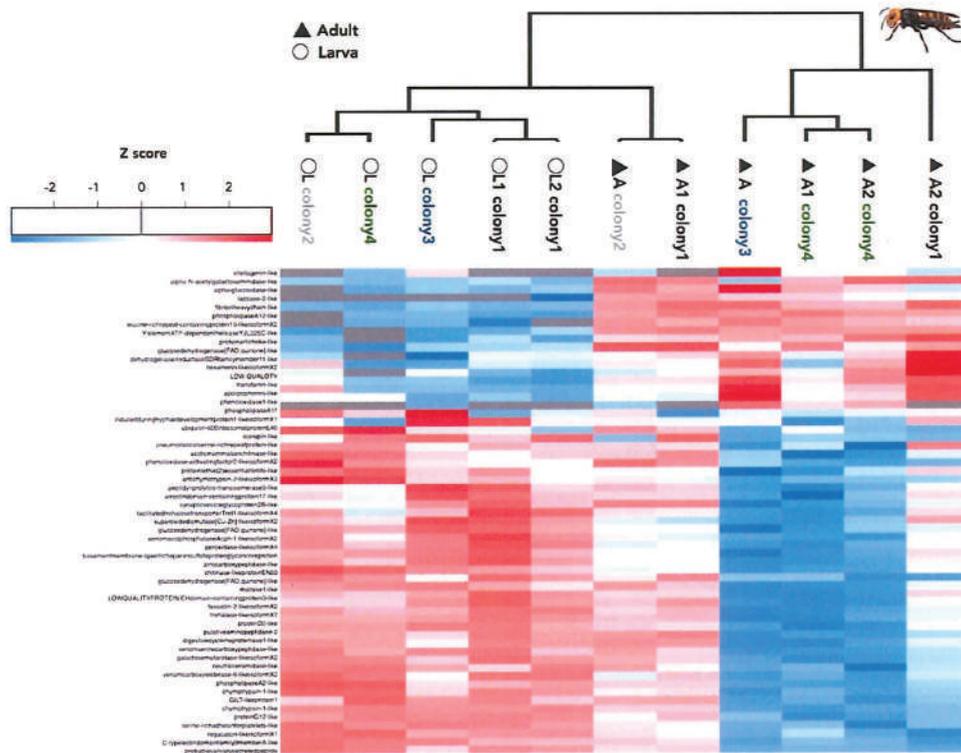


図3 オオスズメバチの吐き戻し液に含まれるタンパク質における幼虫と成虫間の違い

オオスズメバチの成虫と幼虫間の違いについての大きなパターンは、シダクロスズメバチと似ていた。6つの成虫サンプルのうち、4つの成虫サンプルが1つのまとまったグループであったが、残りの2つは、幼虫サンプルが含まれるグループに含まれていた。4つの成虫サンプルでは、成虫で多く含まれる2割のタンパク質と幼虫で多く含まれるタンパク質(青色)に分かれていたが、他の成虫サンプル(巣1と巣2)は、どのタンパク質も量が多く検出されており、幼虫とも他の成虫サンプルとも異なるパターンを持っていた。巣4の成虫サンプルと巣1の幼虫サンプルでは、反復サンプル間でプロファイルが似ていたが、巣1の成虫の反復サンプルでは違いがみられ、オオスズメバチでも巣内の個体間でのばらつきがあることが示された。

興味深かったのは、ミツバチとアリ類(ヒアリとオオアリ)の吐き戻し液に含まれていた7つの成長関連因子(JH, JHE, JH-binding protein, vitellogenin, hexamerin, apolipoporphin, and yellow protein/MRJP, LeBoeuf et al. 2016)の内5つが、2種の社会性スズメバチの吐き戻し液にも含まれていたことである。オオスズメバチではビテロジェニン(卵黄タンパク、vitellogenin)、アポリポホリン(脂質輸送タンパク質、apolipoporphin)、ヘキサメリン(貯蔵タンパク質、hexamerin)が、シダクロスズメバチでは幼若ホルモンエステラーゼ(JHE)と apolipoporphin(脂質輸送タンパク質)、hexamerin(貯蔵タンパク質)、yellow proteinが検出された。成長期である幼虫でこれらのタンパク質が多いようにも考えられるが、実際は成虫で多く含まれていた。この吐き戻し液は、成虫間や成虫と幼虫間で

交換されるものであり、成虫で作られたタンパク質が幼虫の体の中で働く、またはその逆の現象が起こっているという可能性もある。これらのタンパク質が、どの個体で作られ、どこで働くのかを調べるのが今後、必要である。さらに、ビテロジェニン(vitellogenin)や幼若ホルモン(JH)は、昆虫のさまざまな生理機能に関わるホルモンであり、卵巣発達や形態発達に関与する。オオアリ類では、JHが大型ワーカーを誘導するのに機能することが明らかとなっている。生殖やカースト分化に関連する因子が吐き戻し液に含まれていたことにより、スズメバチにおいても栄養交換が社会的な調整機能を持つ可能性が示唆された。また、ミツバチ、アリ、スズメバチは、それぞれが独立に社会性を獲得した分類群である。消化酵素以外に社会性種で共通したタンパク質が検出されたことは、栄養交換という特殊なコミュニケーションの機能が収斂的な進化を遂げた可能性があると考えられる。ミツバチやアリ類での幼虫の吐き戻し液に含まれている物質は全く分かっておらず、今後の調査が期待される。

スズメバチの幼虫は「消化」の機能をもつ「カースト」であると考えられている。スズメバチの多くは肉食性で、昆虫などを働きバチが狩り、巣に持ち帰る。大きな獲物の場合は、唾液を混ぜながら肉団子を作り巣に持ち帰ることもある。その肉団子は、幼虫に給餌され、幼虫が餌を消化する。一般的には成虫は固形物の餌をうまく食べることができないと考えられており(諸説あり)、幼虫が吐き戻す透明な体液が、成虫の主な餌源となる。幼虫は成虫からの給餌なしには餌をもらえず、成虫もまた幼虫の吐き戻し液なしには、十分な栄養を取れないという共生関係が成り立っている。これらの関係性から、幼虫は単に働き蜂からの養育を受けるのではなく、巣の中で「消化」という機能を担っていると考えられる。消化に関するタンパク質については、成虫では、糖分解に関わるグルコシダーゼ、幼虫では、タンパク質分解に関わるアミラーゼとキモトリプシン、リン脂質に関わるホスホリパーゼ A1、糖分解に関わるマルターゼが多く含まれていた。幼虫の吐き戻し液に複数の消化酵素が多く含まれていることは、理にかなった結果である。

本研究では、単独性種に比べ、真社会性種の吐き戻し液には顕著に多様なタンパク質が含まれていることが明らかとなった。今後は進化の過程を明らかにするために、アシナガバチ類のような順位制で繁殖個体が決定するといった、比較的祖先的な性質を残す真社会性種の吐き戻し液を調べていきたいと考えている。

<参考文献>

LeBoeuf, Adria C., et al. "Oral transfer of chemical cues, growth proteins and hormones in social insects." *elife* 5 (2016): e20375.

LeBoeuf, Adria C., et al. "Molecular evolution of juvenile hormone esterase-like proteins in a socially exchanged fluid." *Scientific reports* 8.1 (2018): 17830.

Hakala, Sanja M., et al. "Biomarkers in a socially exchanged fluid reflect colony maturity, behavior, and distributed metabolism." *Elife* 10 (2021): e74005.

Takashi, Abe, Tanaka Yoshiya, and Miyazaki Hiromitsu. "Comparative study of the composition of hornet larval saliva, its effect on behaviour and role of trophallaxis." *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology* 99.1-2 (1991): 79-84.

金属イオンの吸着分離を指向した 酸化グラフェン由来の新規細孔材料の開発

岡山大学学術研究院自然科学学域（理） 大久保貴広

1. はじめに

持続可能な開発目標（SDGs）で掲げられている17の目標のうち、「安全な水とトイレを世界中に」「海の豊かさを守ろう」の2つに関しては水が直接的に関係している上、その他の多くの目標の中でも水は重要な位置を占めている。生命の根源を育む水資源を維持・確保することは最重要項目の一つであることは言うまでもない。家庭で用いる小規模な浄水器から汚染水を浄化する大規模なプラントに至るまで、様々な方法で水資源が確保されている。例えば、蒸留はクリーンな水を得る最も簡便な方法であるが、水を加熱、冷却する過程で大量のエネルギー消費を伴うため、カーボンニュートラルが叫ばれている昨今の状況からも他のプロセスに置き換える必要がある。一方、吸着分離材料を用いる方法は、除去対象物質の自発的な吸着現象を利用するため、除去の工程でエネルギー消費がない簡便なシステムを構築できる利点がある。総合的に見て、吸着分離材料は水の浄化目的で大きなアドバンテージを有しており、今後も発展的な開発が進むと思われる。

筆者らはこれまでの研究で、高比表面積材料の一つである炭素材料に関して、水中から吸着させたイオン種の吸着状態や吸着機構の解明を目指した研究を展開すると共に、一部の金属錯体が炭素材料に吸着するとこれまでは見られない光化学反応を示すことを見出してきた[1-6]。炭素材料が水中からイオンを吸着する過程は当初考えていたよりも複雑で、水由来のプロトンがイオンの吸着過程で深く関わっていることが最近の研究でわかってきた[7, 8]。例えば、Fig. 1 に示すとおり、単層カーボンナノチューブの2 nm以下の細孔内に電解質水溶液が吸着する際、炭素細孔壁が水の電離を促す形で H^+ と OH^- を生成し、 π 電子で構成される表面と H^+ とが相互作用することで強酸性の吸着層が形成される。それと共に、 OH^- と細孔外のアニオンとが交換されることで細孔内にはアニオン種（この場合、硝酸イオン）が吸着されると共に、細孔外の水溶液が塩基性を示すことになり、金属イオンと対イオンであるアニオン種の吸着モル量の間には不均衡が生じる。このように、炭素材料に電解質水溶液が吸着するという単純な系でも複雑なプロセスが交錯することで思いもよらない現象が起きる。一方、申請者は新しい

吸着分離材料の開発にも取り組み、酸化グラフェン（GO）を出発原料とする新たな材料を見出した。この材料は一般的な炭素材料と大きく異なり、メソ孔と呼ばれるサイズが2～数nm程度の細孔の割合がこれまでに知られている炭素材料と比べて著しく高いことがわかっている。メソ孔は分子やイオンの吸着能に優れているだけでなく、吸着や脱離のプロセスが速いという特徴を備えており、水中からの金属イオン除去という目的では最適な細孔サイズである。本研究では、水中からの金属イオン除去能に優れたGOを出発原料とする新規細孔性炭素材料の開発を目指し、基本的な材料の性質

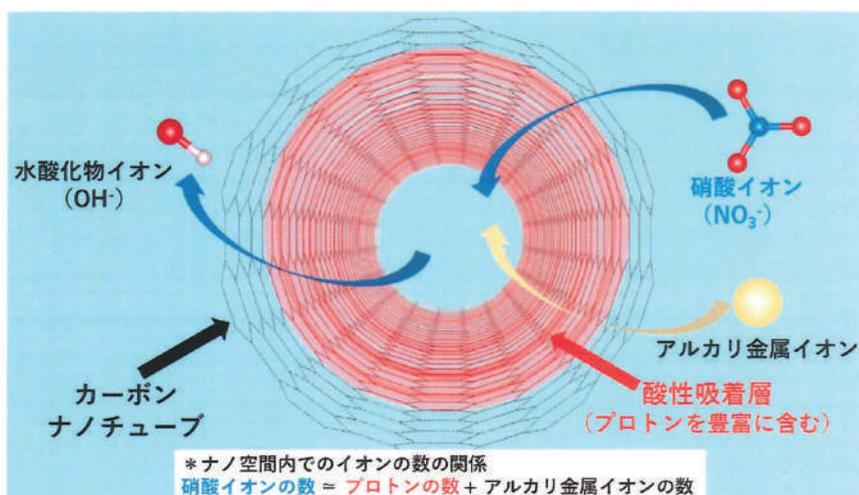


Fig. 1 カーボンナノチューブのナノ空間内で形成される酸性吸着層のイメージ

ナノ空間内での硝酸イオンの数はアルカリ金属イオンの数と等しくはならない。また、硝酸イオンが吸着する時にナノ空間から水酸化物イオンが脱離するため、ナノ空間外の水溶液は塩基性を示す。

をすることで、金属イオンの吸着能に優れた材料の開発に繋げるための研究を実施した。

2. 実験

GO は既報[9]を参考に合成した。出発原料となるグラファイトとして Alfa Aesar 社製の天然グラファイト (~200 mesh) を用いた。また、グラファイトの酸化処理には濃硫酸、過マンガン酸カリウム、および 30%過酸化水素水 (全て和光純薬工業社製) を用いた。

氷冷した濃硫酸 25 mL にグラファイト 1 g を加えて 10 分間攪拌し、その後、過マンガン酸カリウム 3 g をゆっくりと加えた。十分に氷冷されていることを確かめた後、混合溶液の温度を 35°C に保ちながら 2 時間攪拌した。酸化反応が十分に進んだところで蒸留水 25 mL を氷冷した混合溶液に少しずつ加え、混合溶液から泡が出なくなるまで過酸化水素水を加えた。

得られた GO には不純物が多く含まれるため、以下の手順で精製した。まず、混合溶液を 6000 rpm で 10 分間遠心分離し、上澄みの溶液を蒸留水に交換して沈殿物を再分散させた。これを改めて遠心分離するという工程を 10 回繰り返し行った。得られた沈殿物を 200 mL の蒸留水に分散させ、1 日攪拌し、遠心分離後に精製した GO を得た。

得られた GO を用い、金属塩を担持した状態で不活性気流下にて焼成することで目的とする細孔性材料を得た。まず、GO を 2 g 秤量し、蒸留水 50 mL 中に分散させた後に超音波ホモジナイザーで均一に分散させた。僅かに残っているマンガン種の影響を取り除く目的で透析膜を用いて 3 週間、透析を行い、溶液の導電率が蒸留水と同じ値となったことを確認して透析膜から取り出した。この GO 分散溶液に濃度既知の硝酸塩を 50 mL 加え、室温で 24 時間以上攪拌した。

硝酸塩が担持された GO を吸引ろ過で分離し、得られた薄膜状の混合物を横型電気炉で焼成した。焼成条件はアルゴン雰囲気、昇温速度 8°C/min、最高温度 800°C で 1 時間とした。

各サンプルのキャラクタリゼーションは以下に示す実験により行った。

- (1) 窒素吸着脱離等温線 (@-196°C)
- (2) 粉末 X 線回折 (XRD)
- (3) 液相吸着等温線 (@30°C)
- (4) X 線光電子分光 (XPS) スペクトル

3. 結果・考察

3.1 細孔および細孔壁の構造に関する検討

Fig. 2 に異なる金属硝酸塩を用いて焼成後に得られた細孔性 GO の窒素吸着脱離等温線測定の結果を示す。同じ硝酸塩を用いた場合でも細孔の形状が大きく異なっていることがわかる。このうち、硝酸カリウム (KNO_3) を用いた場合に窒素の最大吸着量が大きくなると共に、吸脱着ヒステリシスの大きさも大きくなることから、主に数 nm 以上のメソ孔の発達が進んでいることが示唆される。実際、 KNO_3 から得られた細孔性 GO の細孔構造を α_s プロット法 [10, 11] で評価すると、細孔サイズ 2 nm 以下のマイクロ孔の細孔容量と比表面積がそれぞれ 0.004 mL/g と 34 m^2/g であったのに対し、2 nm 以上のメソ孔はそれぞれ 0.902 mL/g と 426 m^2/g であった。特に、メソ孔の容量はマイクロ孔の 200 倍以上と著しく大きいことから、分子やイオンの大容量吸着材料として機能を発揮することが伺える。以後、 KNO_3 を活

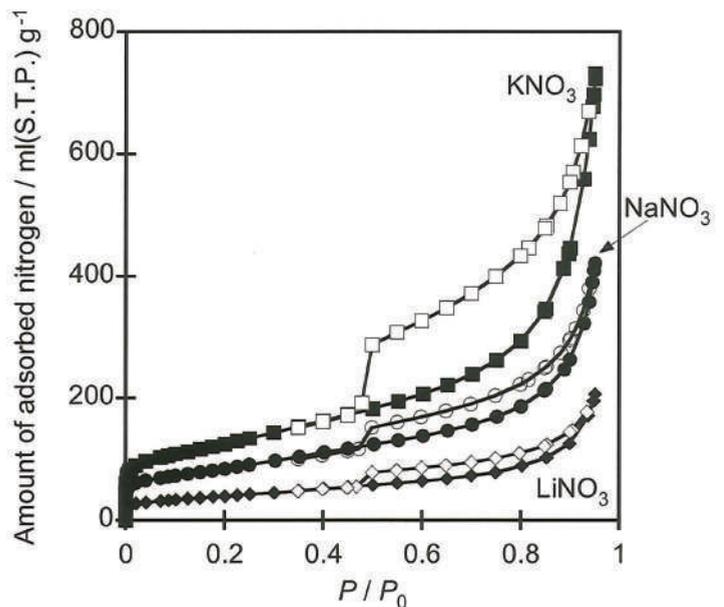


Fig. 2 異なる金属硝酸塩を用いて得られた細孔性 GO の窒素吸着脱離等温線

性化剤として用いて得られた細孔性 GO についてのみ議論を進める。

次に、細孔性 GO の結晶構造を評価するために測定した粉末 XRD の結果を Fig. 3 に示す。GO には $2\theta = 10^\circ$ 付近に鋭いプロファイルを示すことが知られており、本研究で得られた GO にも 12° 付近に同様の傾向が見られた。このプロファイルは酸化されたグラフェン薄層間に閉じ込められた水が 1 nm 程度の空間に閉じ込められていることに起因して生じるものである。一方、細孔性 GO については、GO に特徴的に見られたプロファイルが消失し、非晶質に特徴的なプロファイルを示している。ただし、細孔性 GO のプロファイルは活性炭のような市販の炭素材料とも大きく異なる。即ち、活性炭ではグラファイト結晶子の積層構造に由来するブロードな 002 反射が $2\theta = 20^\circ$ 付近に観測されるが、細孔性 GO には確認できない。このことから、細孔性 GO の細孔は微細なグラファイト結晶子から構成されるのではなく、GO に特徴的な酸化グラフェン薄層がランダムに寄り集まった集合体の隙間に構成されていると考えられ、市販の活性炭等とは大きく異なる吸着特性を示す可能性が示唆される。

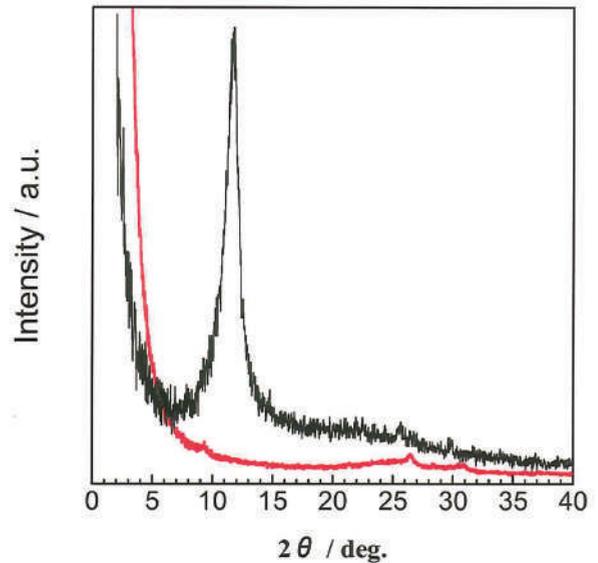


Fig. 3 GO (黒) および細孔性 GO (赤) の XRD プロファイル (Cu K α)

3.2 細孔性 GO の銅イオン吸着能評価

Fig. 4 に酢酸銅水溶液を用いた場合の細孔性 GO に対する銅イオンの平衡吸着量を示す。比較のために文献[5, 12]、および筆者らが別の研究で得た炭素材料に対する吸着量もプロットした。この図から、広範にわたる濃度領域で一般的な炭素材料の 2~3 倍程度のイオン吸着量を細孔性 GO が示していることがわかる。この差が生じる原因として、細孔性 GO の細孔サイズや細孔容量といった吸着材料の構造要因と、表面官能基によるイオン交換量の違いといった表面化学種に起因する要因の 2 つが考えられる。特に後者は銅イオンと強く相互作用する要素を含むことから、細孔性 GO が一般的な炭素材料よりも多くの銅イオンを吸着した原因になっていると考え、酸素含有表面官能基が銅イオンの吸着量に与える影響について検討した。

細孔性 GO を水素:アルゴン=1:5 の雰囲気下、 800°C で 3 時間焼成することにより表面官能基量を減らした材料を細孔性 r-GO と表記することにする。まず、細孔性 GO と細孔性 r-GO との間の酸素含有量の違いを元素分析から検討した。その結果、細孔性 GO が 27.5% であったのに対し、還元処理後の細孔性 r-GO は 6.06% にまで減少していた。このことから、不活性気流下での焼成処理により酸素表面官能基量が著しく減少したと考えられる。ちなみに、一般的な活性炭の酸素表面官能基量は 10% 前後であることを考えると、活性炭との比較において還元処理前の細孔性 GO の官能基量は著しく多く、細孔性 r-GO のそれは活性炭の還元処理後の状

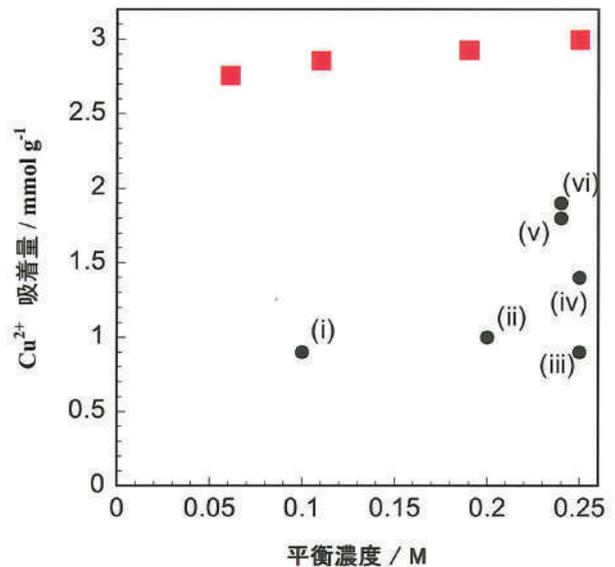


Fig. 4 細孔性 GO (赤) および他の数種類の炭素材料 (黒) に対する酢酸銅水溶液からの銅イオン吸着量の比較

(i)文献[12] (ii)文献[5] (iii)活性炭 ($w=0.7\text{ nm}$)
(iv)単層カーボンナノチューブ (v)文献[5]
(vi)活性炭 ($w=1.0\text{ nm}$)

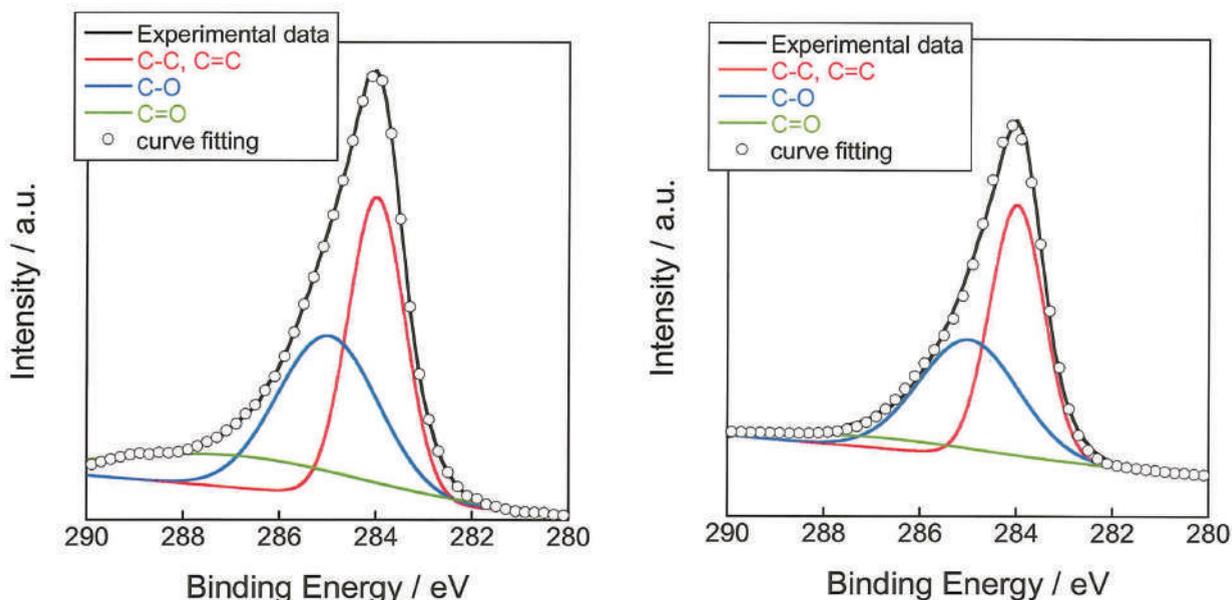


Fig. 5 細孔性 GO (左) および細孔性 r-GO (右) の C1s XPS スペクトル

態と類似した官能基量であると考えられる。一方、初期濃度 0.1 M の酢酸銅水溶液 50 mL に 50 mg の吸着材料を分散させて単位質量当たりの銅イオン吸着量を比較したところ、細孔性 GO が 2.64 mmol/g であったのに対し、細孔性 r-GO では 2.48 mmol/g であった。酸素表面官能基量の減少幅が著しかった一方で、銅イオンの吸着量は還元処理後の試料でわずか 6% 程度の減少幅であった点は当初の想定に反していた。つまり、表面官能基によるイオン交換をはじめとする比較的強い相互作用に基づく吸着量の割合が少ないと言える。

細孔性 r-GO での銅イオン吸着量の減少幅が小さい点について考察するために、還元処理前後の細孔性試料の XPS スペクトルを比較した。Fig. 5 に細孔性 GO および細孔性 r-GO の C1s XPS スペクトルを示す。まず、C=O に帰属できるバンド強度が還元処理後に著しく減少していることから、イオン交換サイトとして機能し得るカルボキシ基が還元処理により減少したと考えられる。一方、C-O に帰属できるバンド強度は還元処理前後で大きく減少することがなかったことから、細孔性 r-GO にも相当量の極性基が残っていると考えられ、このような種が銅イオンの吸着サイトとして機能していると考えられる。また、極性基は対イオンである酢酸イオンとも相互作用する可能性がある。この場合、銅イオンの錯形成など複雑な過程を経ている可能性もあると考え、銅イオンの吸着状態に関する検討を更に進めるために硝酸銅を用いて検討を進めることにした。

3.3 細孔性 GO に対する銅イオンの吸着に与える酸素含有表面官能基の影響

まず、初期濃度 0.1 M の硝酸銅水溶液を用いて、酢酸銅の場合と同様に細孔性 GO に対するそれぞれのイオンの吸着量を求めたところ、銅イオンの吸着量が 1.15 mmol/g に対して、硝酸イオンが 0.582 mmol/g であった。水溶液中における銅イオンは 2 価のカチオンであり、硝酸イオンは 1 価のアニオンであることから、銅イオンの吸着モル量は硝酸イオンのその半分のべきである。しかし、銅イオンの吸着量は硝酸イオンの約 2 倍となっており、硝酸イオンの吸着量を基準に考えると、電荷バランスの観点で銅イオンは約 4 倍の吸着量を示していることになる。このことから、銅イオンは細孔性 GO の酸素含有表面官能基とイオン交換、または強く相互作用して吸着している種が多く存在していると言わざるを得ない。

このことを検討するために Boehm 法による表面官能基量評価を行った。Boehm 法は滴定操作により金属イオンとイオン交換する可能性があるカルボキシ基や水酸基の量を求めることができ、銅イオンがイオン交換され得る酸素含有表面官能基量を定量的に求めることができる。実験の結果、細孔性 GO に含まれるカルボキシ基と水酸基の量はそれぞれ 0.0701 mmol/g と 0.294 mmol/g と求めた。これらの官能基は共に 1 価のアニオンになるため、もし銅イオンがイオン交換されるとした場合の

最大のイオン交換量は 0.182 mmol/g となる。これを先に得られた銅イオンの吸着量である 1.15 mmol/g と比較すると、イオン交換され得る銅イオンの吸着量は全吸着量の最大約 16%と見積もることができる。この値を考慮しても細孔性 GO に対する銅イオンの吸着量は既存の炭素材料よりも多い。つまり、細孔性 GO の高い銅イオン吸着能は通常のイオン交換や物理吸着以外の要因も考慮する必要があるという結論になる。

市販の活性炭等よりも細孔性 GO が高いイオン吸着能を示す要因として、材料中に存在するエッジの割合が高いことが挙げられる。例えば、Fig. 3 に示したとおり、細孔性 GO ではグラファイトの積層方向に起因する 002 面や面内方向の成長を示す回折プロファイル共に見られない。非晶質の活性炭であってもこれらに帰属できるプロファイルは観測される一方で、細孔性 GO では全く観測されないということは、構造が活性炭以上にランダムで、それ故、エッジ構造が多いのではないかとの結論に至る。エッジ原子の量を定量化することは困難であるが、エッジが増えることで、銅イオンと強く相互作用できる極性を有する表面官能基が増加することで、吸着量の増加につながった可能性が高い。実際、Fig. 5 で議論したとおり、C-O の割合の減少幅が小さいことから、金属イオンの吸着に有効な極性基が多く含まれていると言える。もう 1 つの要因としては、エッジが形成する新たな細孔の存在も考えられる。Fig. 2 で示したとおり、マイクロ孔の割合は高いとは言えないが、銅イオンを強力に吸着できる吸着サイトが通常の活性炭よりも多いのではないかと考えられる。窒素吸着脱離等温線測定ではカウント不可能な隠れた細孔の存在も考えられるため、引き続き細孔性 GO が示す高いイオン吸着能に関する基礎知見の蓄積、並びにそれらの知見を活かした材料開発を継続して実施したい。

4. まとめ

本研究では、水中からの金属イオン除去能に優れた GO を出発原料とする新規細孔性炭素材料の開発を目指し、基本的な材料の性質を探ることで、金属イオンの吸着能に優れた材料の開発に繋げるための研究を実施した。細孔性 GO がイオンを吸着する際、活性炭等と同様に細孔内への物理吸着と表面官能基でのイオン交換により水溶液からの濃縮が図られるが、それらに加えて、細孔性 GO にエッジ構造が多いため、それらのエッジと強く相互作用することで吸着するイオンも存在する可能性を見出した。細孔容量が市販の活性炭よりも多い点も吸着材として優れている点ではあるが、金属イオンを強力に補足するためには材料中のエッジ構造の割合を更に高める必要がある。出発原料である GO を更に乱れた構造にするための施策も含め、本研究で得られた知見を今後の吸着材の開発へと繋げていきたい。

5. 謝辞

本研究の実施にあたり、多大なご支援を頂きました公益財団法人 八雲環境科学振興財団にこの場を借りて深謝申し上げます。また、XPS スペクトルの測定に関しては岡山大学研究推進機構サイテック・コーディネーター中野知佑博士に全面的な協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

6. 参考文献

- 1) T. Ohkubo, T. Konishi, Y. Hattori, H. Kanoh, T. Fujikawa, and K. Kaneko, *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 11860 (2002).
- 2) T. Ohkubo, Y. Hattori, H. Kanoh, T. Konishi, T. Fujikawa, and K. Kaneko, *J. Phys. Chem. B*, **107**, 13616 (2003).
- 3) T. Ohkubo, Y. Hattori, H. Kanoh, T. Konishi, H. Sakai, M. Abe, D. Kasuya, M. Yudasaka, S. Iijima, T. Fujikawa, and K. Kaneko, *Physica Scr.*, **T115**, 685 (2005).
- 4) T. Ohkubo, M. Nishi, and Y. Kuroda, *J. Phys. Chem. C*, **115**, 14954 (2011).
- 5) T. Ohkubo, Y. Takehara, and Y. Kuroda, *Micropor. Mesopor. Mater.*, **154**, 82 (2012).
- 6) T. Ohkubo, M. Ushio, K. Urita, I. Moriguchi, B. Ahmmad, A. Itadani, and Y. Kuroda, *J. Colloid Interface Sci.* **421**, 165 (2014).
- 7) T. Ohkubo, Y. Hirano, H. Nakayasu, and Y. Kuroda, *Chem. Lett.* **51**, 971 (2022).
- 8) T. Ohkubo, H. Nakayasu, Y. Takeuchi, N. Takeyasu, and Y. Kuroda, *J. Colloid Interface Sci.* **629**, 238 (2023).
- 9) N. Morimoto, T. Kubo, and Y. Nishina, *Sci. Rep.* **6**, 21715 (2016).

- 10) K. Kaneko and C. Ishii, *Colloids Surf.*, **67**, 203 (1992).
- 11) N. Setoyama, T. Suzuki, and K. Kaneko, *Carbon*, **36**, 1459 (1998).
- 12) A. Farooq, P. Westreich, N. Irfan, and J. Dahnand, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **48**, 9804 (2009).
- 13) H. P. Boehm, *Adv. Catal.*, **16**, 179 (1966).

7. 研究業績

豊田萌人, 黒田泰重, 大久保貴広, 酸化グラフェン由来の新規メソ孔性炭素材料の創製と金属イオン吸着能評価, 第35回日本吸着学会研究発表会(長野), 2022年11月10-11日.

ICT を活用した環境教育プログラムの構築 ～岡山理科大学で学ぶ自然教室での実践 岡山理科大学 山口一裕、春日二郎

1 はじめに

岡山理科大学科学ボランティアセンターの環境教育プログラムとして、地域の親子を対象に「岡山理科大学で学ぶ自然教室」を15年続けている。学習内容は、岡山理科大学の授業科目「現代人の科学C(実験・観察で知る身近な科学)」とリンクしており、「自然教室」の講師は教員と学生が担当している。

本研究は、地域の親子を対象とした岡山理科大学で実施する全7回の自然教室において、ICTを活用した自然教室の実践とSDGsの推進に繋がる環境教育プログラムの構築を試みるとともにその有効性について検討するものである。この報告では、大学での授業実践、岡山市の中学校での実践についても報告する。

2 活動の特徴

この環境教育プログラムは、年間7回の自然教室を通して、身の回りの自然環境を調べ、自然・生物の不思議に触れ、ヒトが身に付けた知恵や技を教室で再現することで自然のつながりの中で人間も生きていくことを再認識し、ヒトとして持続的にどのように自然環境と関わっていくのかを考え、実生活の中で行動してもらうことを目的としている。これは国連のSDGsの基本的理念とも一致し、この自然教室の実践はSDGsの推進に繋がるものである。そこで、15年間の自然教室の実践経験を基盤とし、ICTを活用した環境教育プログラムの構築を実現し、その有効性を検討する

自然環境を学習する場面において、ルーペ・顕微鏡を使った極小世界の観察は欠かせない。しかし、顕微鏡での観察では、児童生徒が初めて目にする微小世界の感動を他者と共有することは難しいことが多い。そこで、ICT機器であるデジタルスコープ型顕微鏡やWiFi環境を活用して自分の感動を他者と共有できる環境を整備した。

本研究では、上記の学習場面で使う頻度の多いルーペや顕微鏡が、小中高の学習場面でも実際の観察場面では教員側の指導の手が入りにくいことに着目した。

例えば顕微鏡観察では、①機器の操作 ②観察 ③記録の手順で行われる

① 一斉指導で機器操作の手順を確認するが、わざわざパフォーマンステストとして時間をとらなければ個々の技量を正しく把握できない。児童生徒にとっては、少々間違っても注意されることはない。

② レンズを覗く本人以外何を見ているかは確認できず、児童生徒は教師の提示した物や資料の写真と同じものをさがすことになる

③ 顕微鏡操作の技量の差はあまりに大きく、そもそも器具の視野に見えるものの何を書けばいいかに悩む児童生徒は多い。結局、教師は教科書・資料集にあるイラストをそのまま写すよう指示することとなる。

この学習場面で達成感を味わえる児童生徒は少なく、顕微鏡を通してさらに何かを見つけ出そうという探究意欲を持つ児童生徒も少ない。

そこで、Wi-Fi デジタル顕微鏡を使って、この学習場面を見直したい。

① 顕微鏡1台を3～4名の班に置き、児童生徒は各自のタブレットを用意する。顕微鏡の操作は

簡単で、多様性もあるが、通常の顕微鏡とほぼ同じ操作もでき、正しく操作できているかは班内で確認でき、全員が正しく操作できるようになる。

② 顕微鏡にはモニタも付いており、観察者が正しい観察物を視野に入れているか班全員が確認できる。顕微鏡からの画像は各自のタブレットに転送でき、班内での情報共有が簡単にできる。

③ タブレットに記録した画像に必要な事項を書き込めば発表資料が出来上がる。各班ごとの発表はWi-Fi接続のプロジェクタやモニタを使えば、観察後の発表会にすぐ移行できる。

観察結果としての画像は、発表はもとより、各自のレポート作成等にも活用され、この観察での達成感は持続すると考えられる。また班活動で目的を達成したことで、さらに探究していこうとする意欲も相乗的に高まると考えられる

本研究は、自然教室に参加する児童が家族とともに自然に向き合うための素養を養うとともに、実生活で行動することの大切さを学べるICTを活用した環境教育プログラムの構築を目指すものである。このプログラムの有効性を検証するために参加者へのアンケートや聞き取りを実施し、その結果を解析することでSDGsの推進に繋がる自然教室のあり方について検討した。また、講師として参加する学生への研修会開催や自然教室での実践を通して、環境教育の担い手の養成と教職希望学生においては将来的に小中高の現場での環境教育に関する学習活動の改善につながればと考える。

3 実践活動

3.1 岡山理科大学で学ぶ自然教室

図1は令和5年度の自然教室の開催案内チラシである。令和4年度は、参加者にメールでWi-Fi顕微鏡用のアプリ導入のためのURLを知らせていたが、令和5年度からはQRコードをチラシに載せ、Wi-Fi顕微鏡利用を前面に出した。

自然教室の実施概要は以下の通りである。

第1回：6月19日（日）

- ・岡山理科大学構内の草花
- ・葉脈標本作り

11種類の4月・5月に理大構内で見られる小さな花をシリカゲルでドライフラワーにし、小型の総菜用プラスチック容器に接着させ

「小さな花図鑑」を完成させた。

葉脈標本は、理大構内に多いアベマキ・コナラを利用し、ドングリの写真・説明文のラベルと共に青葉を押し葉にしたものと並べてラミネートし、完成させた。

講義として、花の名前の由来や葉脈のはたらき等について行った。

第2回：7月10日（日）

- ・里山の生活
- ・布作り、紙作り

岡山理科大学で学ぶ自然教室
参加希望者募集中

親子を含めた合計で20人程度
親子で参加できます

募集期間：第1回は、6月12日までにweb上で申し込んでください。
「岡山理科大学科学ボランティアセンター」に検索してください

対象学年：小学校の中学年くらいから中学生まで
開催予定：毎月1回（日曜日）全7回（第2回以降受付随時）
開催場所：岡山理科大学 84号館2階講義室
参加費用：保険料として、毎回一人100円徴収します

◆◆◆ 実施予定日と実施内容 ◆◆◆ 毎回 10:00～12:00 です

第1回：6月18日（日）	小さな花の押し花図鑑 葉脈標本 植物は光るか？
第2回：7月16日（日）	里山の生活 乾紙作り 布作り（糸紡ぎ）
第3回：8月6日（日）	蟲の生き物 貝殻標本作り 海ホタル実験 魚の卵石探し
第4回：9月3日（日）	セミのゆけから標本作り クモの巣採集と標本作り
第5回：10月8日（日）	秋の葉や草木と染色 トングリの染めとアイ染め
第6回：11月5日（日）	ひつつき虫 トングリの種類分けと標本作り
第7回：12月3日（日）	地層と岩石 化石発掘とレプリカづくり

※コロナ感染防止のため、消毒済みの材料・道具を使います。手洗いや消毒液を使用します。マスクは各自で着用してください。（あくまでも目安です。新型コロナの感染状況等による変更もあります。）

Wi-Fi接続をお願いします！
講師：科学ボランティアセンター コーディネータ 春日二郎
科学ボランティアセンター 学生

生物とつながり、化学・物理・数学の知識にも触れます。一緒に、学習しましょう！

自然教室の目的
岡山理科大学に見られる自然を観察したり、身近な自然のしくみを探ったりすることで、自然の不思議や不思議を学びます。自然から学び、感動し、科学を楽しみながら、より深く考えたいと思います。

※QRコードからアプリを導入し、顕微鏡がインターネットで使えます。アプリによる不具合はあります。

図1 自然教室のチラシ

里山の意味や、利用されてきた植物について、布や紙の歴史について等の講義を行った。

自家栽培した綿を教材に、種子を取り出したり、綿から糸を取り出すための道具としてスピンドルを紹介し、糸を紡ぐ実習をさせた。葛などで作った布を見て、触ってもらった。

ミツマタの木を紹介し、表皮の乾燥させたものを配布、すでに細かい繊維が網目状になっていることを確認させた。繊維を煮て拵したものを用意し、小型の粉振り用の網とホットプレートを利用し、短時間で自然の風合いを残した和紙作りを体験させた。

第 3 回：8月7日（日） 初めて Wi-Fi デジタル顕微鏡を取り入れた。

- ・磯の生き物の生活
- ・魚の耳骨探し
- ・プランクトン 海ホタルの発光実験 星の砂観察
- ・貝殻標本作り

里海・海辺の動物について講義をした。

魚の頭骨の標本を紹介し、耳石の存在を説明。アジの頭部を煮たものを用意し、耳石をとらせた。

タイとアジで耳骨に違いのあること、耳骨に年輪様のものがあることを顕微鏡で確認させた。

ウミホタルの発光や採集方法をまとめた動画を見せ、乾燥させたウミホタルに水を加えて潰すと発光することを確認させた。

沖縄の星の砂・太陽の砂を配布し、顕微鏡で観察させた。沖永良部島の砂も配布し、角は取れているが星の砂があることを確認させた。

高知県の海岸で採集した貝類を 14 種類コップ状の容器に入れて配布し、観察させた。

第 4 回：9月4日（日）

- ・里山の生活
- ・昆虫の目
- ・クモの目とクモの巣
- ・セミの仲間と抜け殻

里山の生活とさまざまな虫との関わりについて講義した。

昆虫の複眼・単眼のはたらきについて紹介し、レンズによる演示実験を行い、偏光板を使って大気の偏光性を確認する等の実験をさせた。

クモの目とクモの巣の関係を話し、ラッカー塗料と色画用紙を使ったクモの巣標本作りを野外で体



図 2 小さな花図鑑



図 3 葛から作成した布織



図 4 貝殻の標本



図 5 セミの抜け殻図鑑

験させた。

セミの生態、種類について話をし、岡山に多く見られる6種類のセミと合わせ、ほとんど見られないエゾゼミの抜け殻を木片に接着させ「セミの抜け殻図鑑」を完成させた。顕微鏡観察もさせた。

第5回：10月16日(日)

- ・秋の実 虫こぶ
- ・ドングリによるタンニン染め
- ・藍染め

さまざまな秋の実を紹介し、食べられるもの以外に食べられないものがどのように種子を運ばせているか考えさせた。ヒマラヤスギの種子を配布し、回転して落ちていくことを確認させた。

木の実以外にも、さまざまな木に特徴的な虫こぶのあることを知らせ、イスノキの虫こぶを配布し、笛のようになることを体験させた。

自家栽培した藍の葉をちぎらせ、布へのたたき染めを体験させた。またビニール袋で出来る簡単な染め方も体験させ、藍の色の特徴的な染まり方に気づかせた。

第6回：11月6日(日)

- ・ひつつき虫
- ・ドングリの種類分けと標本作り

前回の続きとして、種子の運ばれ方で「空を舞うもの」「ひつつくもの」に注目させ、顕微鏡を見ながら、その形状の面白さに気づかせる講義を行った。

「ひつつき虫」といわれるものの中で、オナモミは場所により絶滅危惧種となっており、外来種のオオオナモミも最近見かけなくなったことを知らせ、採取してきたものを配布し、遊ばせた。

日本のドングリ22種類を紹介し、用意した19種類のドングリをそれぞれ小袋に入れ、弁当箱様の容器に入れて「ドングリ宝箱」を完成させた。

第7回：12月12日(日)

- ・地層と岩石
- ・化石発掘と化石レプリカ作り

里山・里海を形作る地学的な内容を講義した。

磨いた岩石を観察させ、地学的な現象と結びつけた話をし、フズリナやサンゴ・ウミユリの入った石灰岩をクエン酸水溶液で処理する実験をさせた。処理前後で顕微鏡観察をさせた。

光りや化石で有名な奈義町の頁岩を配布し、小型のマインスドライバーとハンマーで貝類の化石を取り出させた。取り出した貝を顕微鏡で観察させた。



図6 たたき染め



図7 ドングリ宝箱



図8 化石のレプリカ

アンモナイトなどの化石を用意し、「石粉粘土」を使って、化石レプリカの雌型を作らせた。用意した化石の雌型に粘土を詰め込ませ、やや乾燥した状態で雌型からはずしレプリカを完成させた。

[参加者の感想と評価]

それぞれの実施内容について筆記形式でアンケートをとったところ、実施した生物が「気持ち悪い」、実施した工作等の内容が「難しい」との意見もあったが、それ以外はほぼ実施内容に対して新鮮な驚き、知る喜びを記したものになっていた。整理すると次の通りである。

- ・実施形式について 「学生の講義が良かった」「話しが面白かった」
- ・実施内容について 「他でやってない」「普段手にできない」「知らなかった」「もっと知りたい」「新しい知識」「初めて知った」「初めての体験」「良い経験」「貴重な体験」「少しの工夫に驚き」「いろいろな角度から見られた」「触れて作れた」「きれいに出来た」「植物はすごい」「昔の人に驚き」「種類の多さにびっくり」
- ・気持ちについて 「こどもが食いついた」「こどもが興奮」「こどもが大喜び」「感動した」「熱中した」「夢中になった」「びっくりした」
- ・興味や関心 「家でしたい」「家に帰って楽しむ」「家でも挑戦したい」「自分でもしてみたい」「別のもので挑戦したい」「産地を訪れたい」

短時間で、ほぼ教室内で行う自然教室として、印象深いものを提供し、なるべく多くの実物を見て触れさせていくという姿勢に対して、素直に反応してくれた意見が多かった。

[Wi-Fi デジタル顕微鏡の評価]

Wi-Fi デジタル顕微鏡の利点は、モニターによる観察物の共有、Wi-Fi による接続デバイスへの画像記録である。自然教室では、その評価とともに、もっと観察したいという意欲の向上があったか評価した。8月から使用を始めたが、評価アンケートは9月から実施した。

2人～4人の家族に1台の顕微鏡を使ってもらった。7回の自然教室に継続して参加する家族もあり、途中からの参加家族もあった。評価は総じて高く、Wi-Fi デジタル顕微鏡の利点が効果的に活かされたようすが分かる。保護者がフォローしながら年長の子どもがリードして観察が行われることが多く、モニターに映る観察物を家族で覗き込み、スマホに送られた画像を保護者が記録し保存していた。

画像記録は、子どもたちには当たり前の日常となっており、自然教室ではあまり発表の機会を持たなかったの、記録する意味は感じてもらえないこともあった。また、

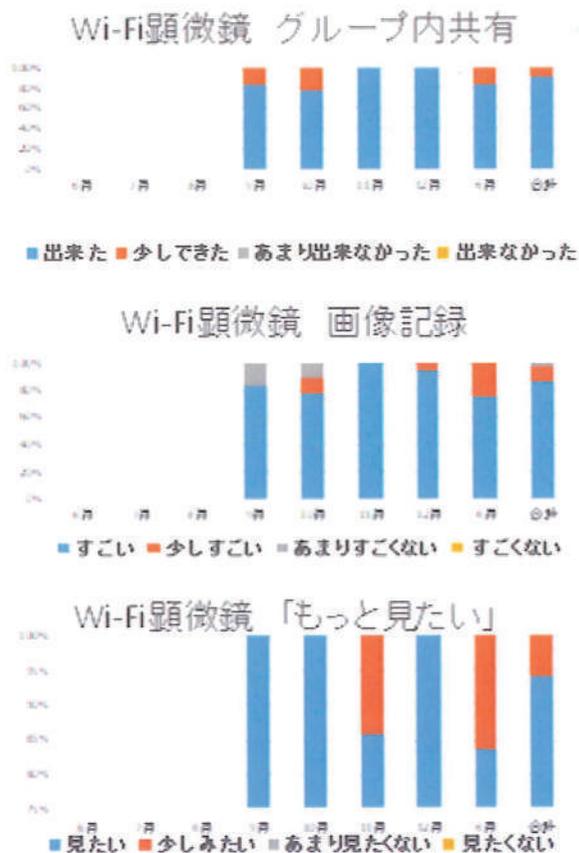


図9 アンケート結果

顕微鏡とつながるアプリがスマホによっては相性が悪く、接続しにくい、画像が保存されないなどの不具合があった。しかし、記録画像を後で見返す場面もあり、自然教室での記録を家に持ち帰ることができることには価値を感じてもらえた。

Wi-Fi 顕微鏡の画像の画質には問題があったが、参加者は工夫し、焦点の合わせ方や光量の調整によってよりきれいな画像で観察できるようになり、満足感を得られていた。

3.2 大学での講義での実践

ICT を活用した環境教育プログラムの構築のために、将来環境教育の担い手となる大学生に対しての実践を行った。授業科目としては「現代人の科学 (9~12 月期)」で実践した。毎回 Wi-Fi 顕微鏡を一人1台と観察物を用意した。

第1回 イントロダクション 自然観察の方法 害獣となったシカの生態

第2回 里山と忘れられる植物文化 身近な植物に関する知識と技術 紙すきの実習

第3回 地面から学ぶ 地球の歴史と人間の位置づけ 石灰岩実験 化石レプリカ作り

第4回 発光生物はなぜ光る ホタルやウミホタルの発光現象 ウミホタルの発光実験

第5回 身近な毒や危険 身近な毒物や放射線 ユーカリとオーストラリアの大火災

第6回 自然を感じる仕組みの進化 視覚・聴覚・嗅覚の進化 アジの干物から耳骨を取る

第7回 ドングリの科学 理大構内の3種のドングリ ドングリ染めと藍染めの実習

第8回 ヒトとして自然と向き合うことについて考える

自然教室と重なるテーマで行われてきた。履修学生の一部は自然教室の講師となり、自然教室参加者向けに授業での学習内容をさらに深めてきた。さらに履修学生の希望者には、自然教室の講師として活動するための研修を行なった。Wi-Fi デジタル顕微鏡の活用方法など ICT 技法とともに環境教育の理念についても習得し、将来の環境教育の担い手として活躍できる人材となることもめざしてきた。

Wi-Fi 顕微鏡についての可能性と課題について筆記式で回答させた。

・従来の顕微鏡では一人しか見れず、スケッチもしにくいという問題があったが、Wi-Fi 顕微鏡によってその問題が解決し、その画像を保存することで、いつでも正確なものを確認することが出来るようになる。Wi-Fi を利用するので、顕微鏡だけでなく、端末に異常があれば使うことが出来なくなってしまう。

・持ち運びが便利である。観察がしやすい。

・Wi-Fi 顕微鏡で記録した画像は、スマホでも見やすく共有しやすい。最初の接続がうまくいかないことはあるが、慣れれば問題がない。

・手軽さはやはり利点と言える。充電に関しては事前に 100% にしておけば解決する。Wi-Fi がフリー Wi-Fi なのでセキュリティの強い端末では接続はおろか検出されない場合がある。

・全員で同じものが観察でき、観察物が見やすいので学習効果が上がる。Wi-Fi がつながらないといった問題が起こる。

・一人が設定すると、その画面をグループで共有できる。顕微鏡といっても、そこまでははっきりとは見えない。

先端機器に慣れた学生たちにも Wi-Fi デジタル顕微鏡は新鮮で、集中して観察できていた。身近な高品質の機器と比べると、使ううちに上記の通り課題も感じてきていた。これから教育現場でのリーダーとして活躍する人材として、批判的な目を持ちながら機器の改善につなげ、後進への指導力の向上につなげてほしい。

3.3 中学校での授業実践

岡山市立中学校 1～3 年生のクラスで Wi-Fi デジタル顕微鏡の活用した授業を実施した。

1 月～3 月、岡山市立中学校で、各学年の 1 クラス（情緒障害児学級）の理科を週 3 時間ずつ担当した。1 年生の学習単元は「力」と地学分野の全単元、2 年生は「電流と磁界」の全単元、3 年生は「天体」の全単元と「自然界のつながり」の単元であった。1 年生の化石の単元、3 年生の自然界のつながりでは、大学での自然教室、現代人の科学での教材がそのまま使え、中学生も大きな関心を示した。

Wi-Fi デジタル顕微鏡は、1 年生の岩石・化石、3 年生の微生物の観察で利用した。

5～6 人のクラスだったので 3 台の顕微鏡を用意した。2 人（1 人）で同じものを観察させた。

顕微鏡操作にはすぐ慣れ、2 人で自分たちの観察物をモニターで確認すると、となりのグループのモニターを確認しに席を移動し、一番よく見えている顕微鏡に集まり、ひとしきり感想を言い合うと、自分たちの顕微鏡に戻り、よりよく見えるように操作し、再び見せ合うことを続けていた。

一人 1 台のタブレットは持っているが、顕微鏡用のアプリを導入することには制約があり、観察した画像をタブレットで受信することは出来なかったが、互いの観察物を見せ合い、感想を言い、議論をし、改善をめざすアクティブラーニングの姿が見られた。今までの中学校では見られなかった顕微鏡観察での学習風景であった。

中学校での学習内容に、顕微鏡・拡大鏡の使える分野・単元は思いのほか多くあるにも関わらず、「顕微鏡の使い方」に縛られ、気楽に使われてはいない。タブレットが他の文具と並んで机の上に置かれるようになった今、いつもそこにある Wi-Fi デジタル顕微鏡であってほしい。中学生の「もっと、いろいろな勉強で使いたかった」という言葉にその価値が集約されている。

4 まとめ

全国 98% の自治体で、小中学生に 1 人 1 台のタブレットなどの端末が整備されたと報じられて 2 年目である。その本格的な利用については進んでいないのが現状である。

岡山理科大学は毎年多くの卒業生を小中高の学校現場に送り出している。大学での授業等での ICT 機器の利用は、多くの学生にその技能を身に付けさせ、赴任先の学校にも少なからぬ影響を与えているものと考え

岡山理科大学科学ボランティアセンターは、教員志望の学生を中心に、地域の科学イベントをリードできる人材を育てる目的で活動している。おもしろ実験・科学工作は物理・化学分野の内容が多く、生物・地学分野には少ない。生物・地学分野で欠かせない野外実習は、科学イベントの行われる会場・日程の範囲を超えるものであることが多いからである。

「自然教室」の多くは野外での「自然観察会」として行われ、専門分野でのスペシャリストを講師に昼をはさんで一日がかりで行われることが多い。「岡山理科大学で学ぶ自然教室」では、「科学イベント」として、さまざまな自然物を教室に持ち込み、2 時間の枠の中で、自然についての講話とその内容を体験できる実習とで構成されている。講師・補助スタッフとして関わる学生にとっては、将来教員として理科室で自然を扱う学習指導に役立つ内容となっている。

「岡山理科大学で学ぶ自然教室」では、以前、会場となる大学の講義室を出て、大学構内の限られた範囲を観察・採集の場面として設定した際、参加した保護者のスマホで撮影した画像を会場に持ち帰り、スクリーンに投影することで参加者全員が情報を共有する場面があり、屋外での活動が意味のあるものとなった。このことから、Wi-Fi デジタル顕微鏡を家族ごとに持たせて屋外観察等をさせることで自然教室が意義深いものになるのではないかと考え、本研究での取り組みに至っている

グループ単位で使う Wi-Fi デジタル顕微鏡は、単価 1 万円程度のもので、1000 倍まで拡大できるとあるがはっきり観察できるのは数百倍までである。屋内、屋外での観察で、手軽に数名の端末に画像を残すことが出来る。指導者用の Wi-Fi デジタル顕微鏡からは参加者に画像を送ることができ、Wi-Fi 付きのプロジェクターには、指導者・参加者の画像を送信でき、全員で情報共有できる。自然観察の情報を瞬時に共有できるシステムの構築は、未知の自然に触れた感動と、自ら発見できた達成感を同時に味わうことができ、画像を残すことで、持続的な学習を促すことができた。中学校現場で実践できその効果を確認できたことは大きな成果であった。まだ、端末機器によっては Wi-Fi 接続の不具合があり改善の余地はある。最近スマホに直接取りつける顕微鏡レンズも改良されてきている。義務教育機関、高等教育機関での Wi-Fi 顕微鏡等の導入による顕微鏡観察は、自然科学教育全体に影響を与える。

今後も、自然教室を通し、限られた空間・時間の中での効果的な自然学習のあり方を考えていきたい。今後も、自然教室での学習からつながる SDG s の目標達成（豊かな陸・海の保全、気候変動対策、住みよい地域づくり）に向けたヒトとしての生き方を、より多く考えさせるような取組にしたいと考えている。

本研究を実施するに当たり八雲環境科学振興財団から環境研究助成を頂きましたことをここに改めて深甚なる感謝の意を表させていただきます。

AI を利用したキャベツ栽培における除草ポジション判別方法の開発

岡山大学大学院 環境生命自然科学研究学域 安場健一郎

1. はじめに

近年、農業生産現場ではスマート農業が注目されている（安場，2023）。これから、労働者人口の大幅な減少が確実視されている中で、人の手が介在する部分が多い農業生産の将来に関する危機感は強く、行政的にも ICT やロボットなど利用した農業に変化させていく必要があるという意識が強くなってきている。実際、ドローンを使って薬剤散布をすると実際に人間が体を動かして作業をする必要がないため大幅な軽労化が可能になる。また、GNSS 搭載のトラクターで耕運する場合も作業時に人間はトラクターにのっているのみで良く、操作する必要はほとんどないばかりか、耕運部分の重なりが少なくなりトラクターの走行距離が短くて済む。スマート化にはこのようなメリットがありこれからも普及や技術開発を進めていく必要がある。

その点、除草作業は特に高温期には大きな作業負担となっている。特に畑作物も栽培も大規模化が進んできており機械化が急務であるが、作物間を自動で除草するようなシステムは市販されていない。カルチベータ等で畝間を除草することも行われているが熟練の技が必要となる。一方、AI を利用した画像認識が一般的になり、高精度で雑草を認識したり（Picon ら，2022）、自動除草システムの研究も行われているが（Sapkota ら，2022；Zhu ら，2022）、今回、ロボットアームを利用した除草システムの基礎研究を行った。ロボットアームを利用する理由は、まず除草するためのシステムを構築しておけば、他の作業（例えば、播種や間引き）などもあまりアルゴリズムを変更せずに色々な農作業を実施できるシステムを構築できると考えたからである。

また近年、機械学習を使用したシステム開発が容易となっている。画像情報を利用したキャベツの選果システムの開発を行った。カードサイズのコンピュータである Raspberry Pi を利用し、市販の WEB カメラとロードセルを使用したシステムで 2 万円程度の材料費で実用レベルの選果システム構築した（内村ら，2021）。このように AI を活用したシステム開発の有用性を検証できたことから、将来機械による自動除草を目的として、作物と雑草とを明確に区別するシステムを構築することを本研究の主目的とする。将来的には GNSS を搭載した自動走行台車に除草システムをのせて大幅な省力化を図ることを目的としてシステム開発を行った。

2. 実験

2-1 キャベツ認識 AI の開発

キャベツ種子をセルトレイ(220 穴)に播種し、キャベツ苗が本葉 2 枚展開するまで生育させた。本葉 2 枚展開後、岡山大学農学部の野菜園芸学研究室の実験圃場に定植した。この時、定植するキャベツ苗の株間は 35 cm とした。定植後本葉の展開が 2 枚,3 枚,4 枚,5 枚,6 枚,7 枚と展開していく度に、キャベツ苗をデジタルカメラで測定し JPEG 形式のデジタル画像を取得した。取得した画像を正方形(2592×2592, 1.9MB, 72 dpi 24bit)に成型し、アノテーション用ソフトウェアである labeling を使用し、画像にアノテーションを付け画像中のキャベツの位置を手動で認識さ

せた、アノテーションを付けた画像を AI の学習用と検証用に分割した。学習用の画像は 1500 枚、検証用は 500 枚とした。これらの画像は、オープンソースのニューラルネットワークフレームワークである DARKNET を活用し、物体認識アルゴリズムの YOLO ver. 4 を用いて、人間がつけたアノテーションを基に機械学習させた。学習後に得られた、キャベツの位置を学習させたファイル (Weights ファイル) を得た。システム構築は AI 用のエッジコンピューティングのために開発されたマイコンボードである Jetson Nano (NVIDIA CO.製, RAM 4MB) を用いた。Jetson Nano にデジタル画像からキャベツの位置を認識するプログラムを構築した。プログラム言語は Python を使用した。

その結果、本葉 2 枚以上であればある程度正確にキャベツの位置を判断できる AI が構築できたと考えられた (表 1)。

表 1 作成したAIの認識精度

葉数	精度 (正答数/調査数)
2	10/10
3	9/10
4	9/10
5	10/10
6	10/10

2-2 キャベツ認識 AI を利用したロボットアーム除草システムの試作

2-1 で作成した AI を利用してロボットアームを動作させるシステムを試作した。今回、画像認識を行うマイコンとロボットアームを操作するマイコンは別のものを使用し、通信で情報通信する方法とした。図 1 にそれぞれのマイコンに搭載されているプログラムのフローチャートを示す。

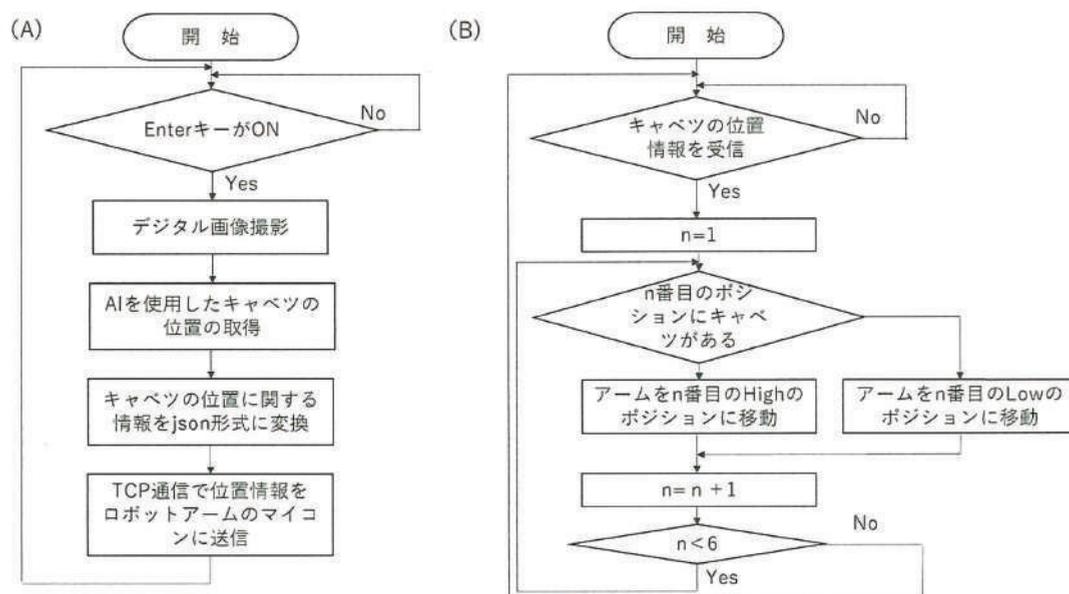


図 1 Jetson Nano(A)およびRaspberry Pi (B) 内のプログラムフローチャート

AI用のマイコンボードである Jetson Nano に USB カメラ (C270; ロジクール製) を接続し、Enter キーが押されたらキャベツ圃場の写真を撮影する。撮影後、2-1 で作成した AI で画像中のキャベツの位置を判別する。位置情報はバウンディングボックスといわれるボックスの中にキャベツが存在するという情報として AI から情報提供される。位置情報は x, y, w, h の4つの数値で表わされ、x および y は画像から見たバウンディングボックスの左上端の X 座標および Y 座標を表しており、w はボックスの横幅、h はボックスの縦幅を示す。横幅、縦幅はそれぞれ画像の縦の長さ、横の長さに対するボックス相対的な幅を示している。Jetson Nano は AI によって判断されたバウンディングボックスの座標の情報を json 形式にデータを整形して、ロボットアームにイーサネット経由で TCP プロトコルを利用してロボットアームを操作する Raspberry Pi に送信する。Jetson Nano の方では画像を撮影して AI で画像のどの位置にキャベツがあるかを判断して、その位置情報を json に成型して Raspberry Pi に送信するというタスクを行うようにした。

ロボットアームを操作する Raspberry Pi (Raspberry Pi 4) は Jetson Nano からの情報提供を待機し、受信すればアームに動作する指示を出すようにした。今回使用したアームは水平面上の稼働域が狭く、A4 用紙程度の範囲しか動作させられないため、稼働範囲を 6 ブロックにわけ、各ブロックに、Jetson Nano から情報提供があったキャベツの位置と重なりがあれば、アームをその位置では高く上げるようにし、ない場合には低く下げるようにして、全 6 ブロックを循環して動作するようにプログラム作成した。システム概要を図 2 に示した。

実際にキャベツを植え付けた苗箱を室内に持ち込んで動作を確認したところ、AI の判断が正しい場合には正常に動作することが確認できた (図 3)。

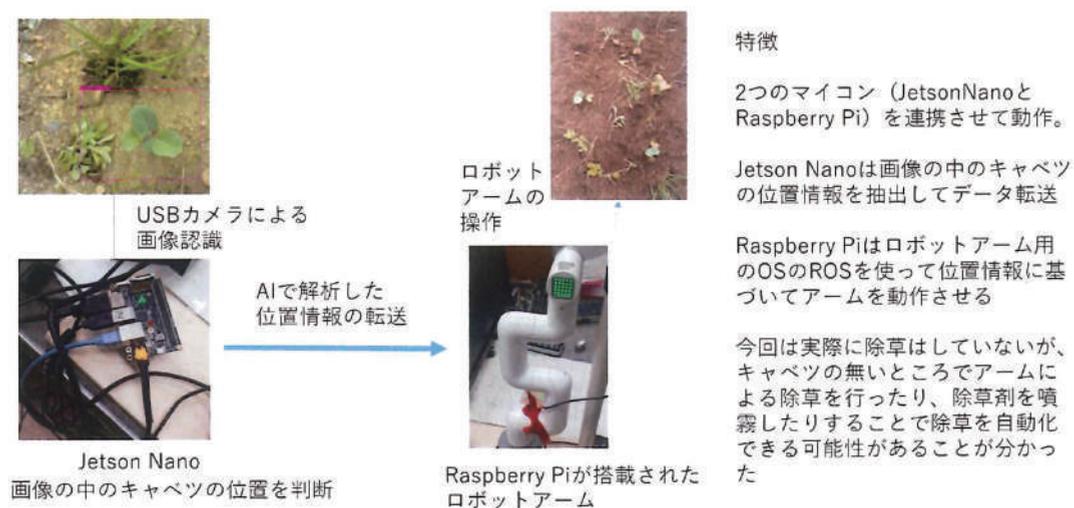


図 2 試作した除草システム概要図

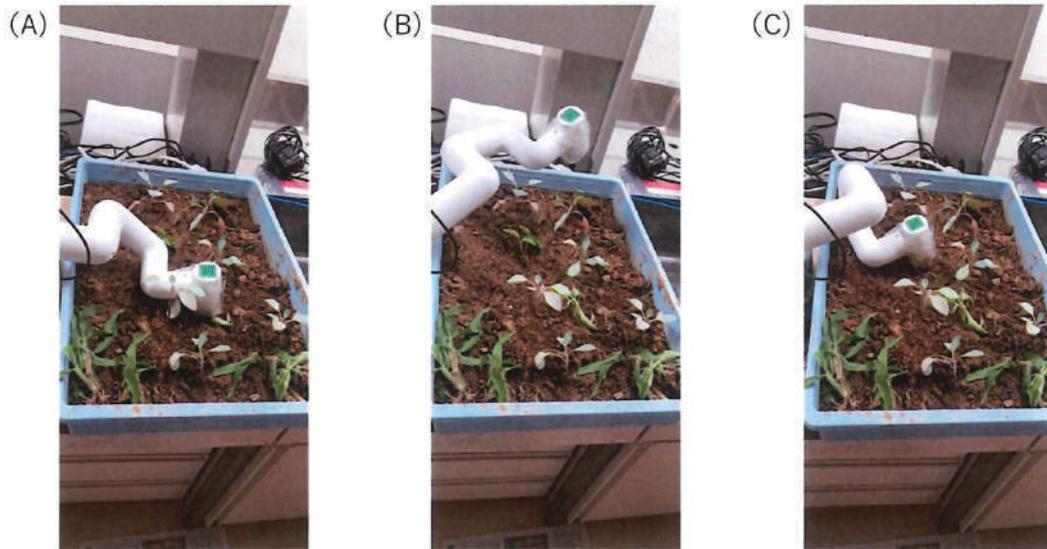


図3 ロボットアームの動作状況

- (A) キャベツが無く雑草があるところではアームは下の方におりる
- (B) キャベツがあるところではアームは上に上がる
- (C) キャベツも雑草もないところではアームは下の方におりる

3. 考察

今回、画像データと AI を用いてキャベツを避けてロボットアームを動作することを試みた。前提条件はあるがシステムとしては正常に動作することが明らかとなった。前提条件の一つとして AI が正しくキャベツの位置を認識するかどうかであるが、今回作成した AI は展開葉が 2 枚程度以上であればキャベツをある程度正確に認識できることが分かった。ただ、除草を行うことを考えるとより高精度が求められる。10 株のうち 1 株でも認識できなければ、その位置で除草をしてしまうことになるため、10%の減収につながる。今回、画像認識に YOLOv4 を利用したが他の AI でも同様の検証して精度向上を図ることが必要であるかもしれないと考えられた。また、AI 作成用には一眼レフカメラ (Nikon 製 D5200) を使用したが、システムには usb カメラを使用した。usb カメラはレンズがプラスチックで対候性が低く、WEB 会議用に開発されたものであるため屋内で人間を撮影するように調整されていると推察されるが屋外で撮影すると色合いが自然と異なり、屋外で使用するのは難しいと考えられた。屋外で使用するためのカメラの選定をさらに進める必要があると考えられた。AI についても 2000 枚程度の画像で試作を行ったが、さらに画像を増やして学習させて精度を高めていく必要性が考えられた。

本研究ではロボットアームはシステムの試作用であるため稼働域が狭く高負荷をかけるのが難しい機種を使用した。そのため重量のあるエンドエフェクタや高強度の作業をアームで実施

させるのは難しいと判断した。今後除草を実際にする場合はエンドエフェクタでカルチベータが行うような作業を行ったり、あるいはピンポイントで除草材を散布したりすることが必要になり、より強度の高いロボットアームが必要になると思われる。

4. 今後の展望

本研究において、画像認識 AI とロボットアームを組み合わせることで除草を自動化することできる可能性があることを明らかにした。今後の展望としては、まず産業用のロボットアームを用いてこのアルゴリズムで実際の除草作業を試行し最適な除草処理方法を検討することが必要であろう。除草剤散布が一番簡便ではないかと思われるが、国の施策として有機農業の推進が挙げられており、機械除草が可能であれば有機農業の推進につながるのではないかとと思われる。圃場で動作できるデジタルカメラの選定も重要であり、対候性のあり認識精度の高い画像を入手できるシステムの構築も必要であると考えられる。

除草システムが完成した場合には、近年急速に普及している GNSS を搭載した農機に搭載することが有益ではないかと思われる。最近では、一人の作業員で 2 台のトラクタを動作させるロボットトラクタも普及が進んでいる。このようなシステムに搭載すれば、作業員が農作業をしながら GNSS で自動走行する除草機は非常に農業生産にとって有益ではないかと考えられる。より理想を言えば、トラクターではなくて太陽電池を取り付けた電動の作業機に GNSS を取り付ければ、化石燃料を使用しないで除草が可能な理想的なシステムになるのではないかと考えられる。実現のハードルを高いが本研究成果を基に研究を進めていくことが重要ではないかと思われた。

謝辞

本研究は岡山大学大学院環境生命自然科学研究科の熊谷和樹氏の修士論文研究の一部として実施した。本研究を行うにあたり、多大なるご支援を頂きました八雲環境科学振興財団に深く感謝申し上げます。

引用文献

- Picon A., M. G. San-Emeterio, A. Bereciartua-Perez, C. Klukas, T. Eggers and R. Navarra-Mestre. 2022. Deep learning-based segmentation of multiple species of weeds and corn crop using synthetic and real image datasets. *Computers and Electronics in Agriculture*. 194: 106719.
- Sapkota B. B., C. Hu and M. V. Bagavathiannan. 2022. Evaluating cross-applicability of weed detection models across different crops in similar production environments. *Frontiers in Plant Science*. DOI 10.3389/fpls.2022.837726.
- Zhu H., Y. Zhang, D. Mu, L. Bai, H. Zhuang and H. Lui. 2022. YOLOX-based blue laser weeding robot in corn field. *Frontiers in Plant Science*. DOI 10.3389/fpls.2022.1017803.

内村優希, 吉田裕一, 後藤丹十郎, 安場健一郎. 2021. 機械学習を利用したキャベツ選果システムの開発. 園芸学研究 20: 469-475.

安場健一郎. 2023. 第7章 スマート農業. p. 199-217 園芸学 第2版. 金山善則 編. 文栄堂. 東京.

令和4年度 国際研究交流助成報告

10. 令和4年度 国際研究交流助成報告

助成対象者	所属	参加会議	ページ
鄭 詩穎	岡山大学学術研究院 環境生命科学学域	8th International Symposium for Geotechnical Safety & Risk	129
任 宇翔	岡山大学学術研究院 環境生命科学学域	International Symposium on Reliability Engineering and Risk Management2022	130

※所属は採択時

鄭 詩穎

岡山大学学術研究院環境生命科学学域

参加会議名 第8回地盤の安全・リスクに関する国際シンポジウム (ISGSR)
主催団体名 Geotechnical Safety Network (GEOSNet)
開催期間 2022年12月13日～2022年12月15日
開催地 ニューカルス、オーストラリア

表 題

Risk Evaluation for Earth-Fill Dams by Response Surface Method
応答曲面法によるため池のリスク評価

<内容>

この度は、地盤安全およびリスクに関する国際シンポジウム (ISGSR) の8回目が、地盤安全ネットワーク (GEOSNet) ISSMGE 技術委員会 TC304、TC205、TC309、ASCE Geo Institute のリスク評価・管理技術委員会のご支援により開催され、大変成功を収めたことを、厚くお礼申し上げます。本シンポジウムは、2年ごとに開催される国際会議シリーズであり、直近では台北 (2019年)、デンバー (2017年) で開催されております。今回初めて、オーストラリアにて開催されたことも、大変嬉しく存じます。本年度の ISGSR2022 は、テーマを「Geotechnical Risk: Big-data, Machine Learning and Climate Change」とし、地盤工学における確率論的手法とリスク手法の活用を中心に、最新の研究の進歩と工学的実践の革新が取り上げられました。本会議では、技術セッション、ショートコース、ワークショップ、ソフトウェアのデモンストレーション等、幅広い内容が充実しており、より深く学識を深めることができました。

任 宇翔

岡山大学学術研究院環境生命科学学域

参加会議名	第 8 回信頼性工学とリスクマネジメントに関する国際シンポジウム (ISRERM2022)
主催団体名	ハノーバー大学・リスクと信頼性研究所
開催期間	2022 年 9 月 4 日～2022 年 9 月 7 日
開催地	ドイツ・ハノーバー

表 題

アンサンブルデータ同化によるため池堤体の剛性評価

<内容>

本研究はデータ同化（アンサンブルカルマンフィルター）を使用して、広い地域内の地盤剛性の空間分布を推定する方法を提案しました。従来の地質調査、例えば標準貫入試験や表面波法を使用して地盤の不確実性を評価することは困難です。アンサンブルデータ同化は、数値モデルの観測値を同化し、モンテカルロ法を通じて物理システムのパラメータを推定し、アンサンブルの分散によって推定値の不確実性を定量的に評価することができます。本研究では、弾性波の速度を同化に取り入れ、パラメータ（土のヤング率）を推定し、不確実性を評価することを試みました。数値実験では、表面波速度の観測値の再現により同化方法の有効性が検証され、推定に大きな影響を与える合理的な相関距離を持つ初期アンサンブルを作成することにより数値モデルが改善された。

本研究の方法は、3つの部分から構成されています。1つ目は、数値モデルです。データ同化において、実世界のシステムの数値モデルは、状態の進化を予測するために使用されました。本研究で使用された数値モデルは、浅い地盤を伝搬する弾性波の初動を計算するために構築されていました。2つ目は、EnKF をベースとした逆解析です。逆解析とは、表面波のデータによって定量化された不確実性を伴うヤング率の空間分布を推定することです。3つ目は、推定結果を大きく左右する初期モデルです。初期アンサンブルは、逐次ガウスシミュレーションにより合理的な相関距離で作成されました。

本研究の数値実験は、表面波の速度を同化に取り入れて、パラメータを推定し、不確実性を評価することができることが示されています。数値実験では、同化の効果が波速度の観測値の再現によって確認されました。パラメータの相関距離により合理的な初期アンサンブルを作成することで逆解析の効果が改善されました。

（添付した講演資料は会議の公式サイト <https://isrerm.org/>でも確認できます）

令和3年度 研究集会助成報告

11. 令和3年度 研究集会助成報告

助成対象者	所 属	集会名	ページ
木村隆行	統合物性モデル技術 研究組合	統合物性モデル技術研究組合研究発 表会	132

木村 隆行

統合物性モデル技術研究組合

研究集会名称 統合物性モデル技術研究組合研究発表会

主催機関名 統合物性モデル技術研究組合

開催期間 2022年8月26日

開催地 岡山県岡山国際交流センター

<内容>

【特別講演】

土砂災害と地下水○西垣誠（岡山大学名誉教授、統合物性モデル技術研究組合理事長

【研究発表会】

1. 空気圧連通試験と高密度電気探査の組合せによる不飽和の高透水域の抽出方法に関する一考察○新村卓也（パシフィックコンサルタンツ）
2. 河川堤防内の長期水位計測実績に基づいた原位置における不飽和土中の水分計測の意義○片山輝彦（アサノ大成基礎エンジニアリング）
3. ジョイント・インバージョン法を使った岡山県南部の三次元 S 波速度構造モデルの作成に関する研究○杉本芳博（ダイヤコンサルタント）
4. 2022年3月福島県沖地震等の近年の地震における地震動分布推定 ○末富岩雄（エイト日本技術開発）
5. 小型震動センサーの開発と計測事例○橋本和佳（中央開発）
6. DEM と AI を活用した表層崩壊危険斜面の抽出（長野県辰野町を事例として）○斉藤泰久（パシフィックコンサルタンツ）
7. 斜面崩壊規模を予測するための崩壊土砂層厚の分布調査手法に関する研究○井上真（ウエスコ）
8. 傾斜 30 度未満の斜面崩壊に関する一考察○笹井友司（中電技術コンサルタント）
9. 衛星 SAR データによる地盤の変位解析方法と結果例○八野祐二（基礎地盤コンサルタンツ）
10. 岡山県の風化残積率と地すべり地形分類の相関について ○木村隆行（エイト日本技術開発）

【総合討論】 12 人の話題提供と討論

「2022 年研究発表会講演集」として追加論文を含めて 2023 年 2 月 15 日に印刷

令和4年度 研究集会助成報告

12. 令和4年度 研究集会助成報告

助成対象者	所 属	集会名	ページ
岸本 昭	岡山大学学術研究院 自然科学学域	第61回セラミックス基礎科学討論会	134
前田 恵	岡山大学学術研究院 環境生命科学学域	第25回比較グライコーム研究会	135

※所属は採択時

岸 本 昭

岡山大学学術研究院自然科学学域

研究集会名称 第 61 回セラミックス基礎科学討論会
主催機関名 公益社団法人 日本セラミックス協会 基礎科学部会
開催期間 2023 年 1 月 7 日～1 月 8 日
開催地 岡山大学

<内容>

本研究集会（セラミックス基礎科学討論会）は公益社団法人日本セラミックス協会基礎科学部会の主催行事で、毎年 1 月に開催される全国規模の討論会である。本年度は第 61 回の開催回数を迎え、岡山大学津島キャンパスにて対面開催された。182 件の口頭発表があり、セラミックス科学を網羅するほぼ全てのテーマを取り扱った。具体的には、環境材料をはじめ、誘電性・磁性材料からガラス、光学材料、ナノ材料まで多岐分野に渡るセッションを開催し、いずれのセッションにおいても大変活況であった。また、国際セッションでは、主として海外の若手研究者や国内に在籍中の留学生が登壇し、日本人研究者や学生と議論を深める貴重な機会となった。さらに、各セッション 2 件程度の招待講演と基礎科学部会特別講演を開催し、多くの聴講者が参加した。結果として、全体として 278 名もの参加者登録があった。

詳細のプログラムやタイムテーブルを参考資料として添付する。

前 田 恵

岡山大学学術研究院 環境生命科学学域

研究集会名称 第25回 比較グライコーム研究会
植物グライコバイオロジーの多彩な広がり

主催機関名 比較グライコーム研究会

開催期間 2023年3月4日

開催地 岡山大学

<内容>

本研究会では、主に植物が作り出す多様な糖鎖構造とそれらの生物機能に関わる研究発表（5名のシンポジスト）とディスカッションを行う。岡山大学の感染症防止対策を遵守して対面実施を行う。収容人数得制限（75%）、問診票、アルコール消毒セット、検温機器等を使用する。

【プログラム】

第25回 比較グライコーム研究会 植物グライコバイオロジーの多彩な広がり

開催日：2023年3月4日（土） 13:00～17:00

場所：岡山大学 農学部3号館 多目的室（オンサイトのみ）

・13:00 - 13:40

「物質生産からみた *N*-結合型糖鎖の不均一性とその意義」

梶浦 裕之（大阪大学 生物工学国際交流センター）

・13:40 - 14:20

「デンドロビウムの可溶性グルコマンナンの合成メカニズム」

小竹 敬久（埼玉大学 理工学研究科）

・14:20-14:30 休憩

・14:30 -15:10

「遺伝子制御による植物細胞壁糖鎖合成の人為的改変の可能性」

出村 拓（奈良先端科学技術大学院大学 デジタルグリーンイノベーションセンター）

・15:10 -15:50

「逆生化学的手法によるペクチンおよびフラボノイド配糖体生合成糖転移酵素の同定」

石水 毅（立命館大学 生命科学部）

・15:50-16:30

「植物に遍在する遊離 *N*-グリカンの構造特性、生成機構、そしてその潜在的機能」

木村 吉伸（岡山大学学術研究院 環境生命科学学域）

・16:30 - 16:40 休憩

・16:40 - 17:00 総合討論

*18:00-20:00 意見交換会 Ryotei 奉還町店（岡山駅から徒歩5分）

令和4年度 その他の助成報告

13 令和4年度 その他の助成報告

助成対象名称	内容	ページ
岡山市少年少女発明クラブ 上田 達伸	センサーを利用した発明くふう作品の製作	137
岡山理科大学教育推進機構 基盤教育センター 高原 周一	小学生とその保護者を対象にした科学実験と 科学ショーの実施	140
中国学園大学 子ども学部 佐々木 弘記	SDGS (Sustainable Development Goals) の達成 を目指した「子ども科学体験大学」	142

センサーを利用した発明くふう作品の製作

岡山市少年少女発明クラブ

1 はじめに

本クラブの目的である発明工夫の活動の中で、昨年度はセンサーを利用した機械制御のプログラミングの方法を学ばせた。今年度はその応用として自分の発明くふう品に組み込むことを計画したが、昨年からの継続のクラブ員が少なく、新規のクラブ員、しかも学年が低い児童が多かったため、ロボットの組み立てやプログラムの学習に時間がかかり、結果として自分の作品に組み込むことができなかった。

当初はグループでアイデアを練り、取り組む予定であったが、コロナ禍が終わっておらず、グループ活動ができなかった。しかし、新規に追加購入したサーボモーターや超音波センサー、カラーセンサーを活用するロボットを各自工夫することができた。

それぞれのレベルに合わせた課題を提示し、自分で工夫してロボットを組み立て、プログラムした活動を紹介する。

【使用した機材】

- ① iPad に Studuino:bit をインストールし、Bluetooth で接続
- ② アーテックロボ Ver2.0 (CPU ユニット)
【内蔵】光センサー、温度センサー、加速度センサー、ジャイロセンサー、3軸コンパス
LED5X5 マトリックス
- 【外付】サーボモーター 2 DC モーター 2
赤外線フォトリフレクタ 2
超音波センサー 1 カラーセンサー 1
下線をひいたものが今年度追加した物

2 プログラミング練習 (11/12)

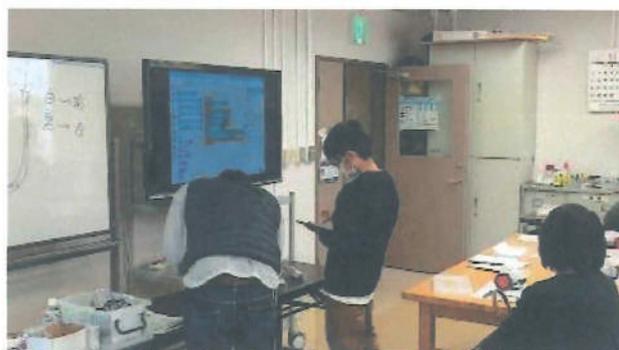
まず、踏切の信号機のように、LED を「赤→青→黄」を繰り返すプログラムを作らせた。次にサーボモーターの使い方を教えて、信号に合わせて、遮断機の腕木をあげたり下げたりするプログラムを作らせた。初めてプログラムするクラブ員も飲み込みが

早く、どのくらいの角度にすると腕木が水平になったり垂直になったりするかを試行錯誤していた。プログラムするとすぐに腕木が動くので分かりやすいようである。



3 センサーとサーボモーターの利用 (11/26)

まず「赤外線フォトリフレクタ」の動き、明るさで数値が変わることを知らせ、サンプルのプログラムを提示して確かめさせた。



次に、DC モーターの動きを知らせ、ライントレーサーとして組み上げさせた。ブロックで組み立てできるので見本を見て組み立てをして、プログラムの工夫に取りかかっていた。



4 ぶつからないで走り続ける車 (12/10)

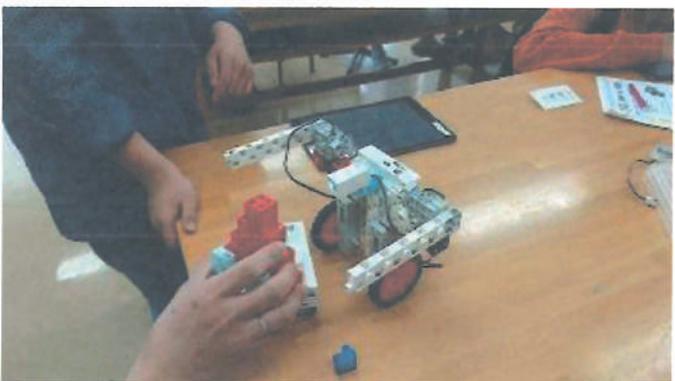
カラーセンサーを追加し、「赤、黄、青」を識別する方法を知らせ、「赤信号で止まる自動車」を考えさせた。余っていたユニットで信号機をプログラムしたものを用意していたが、まず赤色の色紙を配って練習させた。



このプログラムは比較的簡単だったので、余っているユニットを渡すと、信号機が点滅しながら逃げる1台と、「赤」を見つけて追いかける1台と2つのプログラムを作り出したクラブ員がいました。基本が分かるとどんどん工夫できるようです。



また、前に使用したサーボモーターを2つ組み込んで腕のように動かし、カラーセンサーで赤ブロックを見つけては、サーボモーターの両手で倒すプログラムを作っていた。



5 無線接続の車 (1/14)

余っているユニットを送信機にして、「Aボタンを押す」「Bボタンを押す」などのメッセージを送信するようにした。各クラブ員はこの送信機からの電波を受信して前回作っているロボットを動かすプログラムを作るようにした。



中には、こちらも気づかなかった仕組みを作ったクラブ員がいました。送信機ユニットを使わなくても、プログラムしているタブレットの画面をタッチすると、それに合わせてロボットが動くことを見つけました。最後には2人でバトルするロボットに仕上げていました。



6 色々組み合わせて独自のロボット (1/28)

超音波センサーを配布して、説明をしたが、今まで作っていたロボットを改良するクラブ員が多くいたので自由に作らせたが、指導する側は、一人ひとりやっていることが異なるので大変だった。

次の写真は、DCモーター2組、タッチセンサー、超音波センサー、カラーセンサー、赤外線と全部のセンサーを組み込んで、リモコン機能を生かしてプログラムしていたクラブ員のロボットである。プログラムが複雑になり、20行以上になっており、そ

それぞれのタイミングを取るために時間待ちの時間設定に苦労していた。



7 ほぼ自由製作 (2/25)

「信号機に合わせて走る自動車」を作るように説明したが、前回の続きをしていたクラブ員が多かった。次の写真は、障害物を見つけると腕を振り回して除外してから前進する車である。



8 ジャイロセンサーを利用 (3/11)

最後の時間になり、残っていた「ジャイロセンサー」を説明し、リフト車のサンプルプログラムに挑戦させてみた。



2つのサーボモーターで品物をつかんで持ち上げ運ぶロボットである。どのくらいの強さでつかむのが課題であり、試行錯誤で取り組んでいた。

9 まとめ

課題を与えては、後は自由に考えるように指導してみた。基本的な動作、つまり、センサーの特長を生かして、サーボモーターなどをどのように動かすかを考えさせ、組み立ててから、プログラムを考えさせてみた。

その結果、クラブ員たちは、指導者が予想していなかった動作をさせたり、色々なセンサーやモーターを組み合わせたたりして、自分が考えた動きをするロボットを作っていた。

自分の発明品に組み込むことを期待したが時間も足らず、そこまではできなかったが、次年度の発明くふう品に使用するクラブ員が出てくることを期待している。

その場合は、このようなブロックではなく、通常の模型用モーターやサーボモーター、センサーを使用することになり、接続のケーブルを用意して接続することになり、ハンダ付けの技術も必要になってくると思われる。

小学生とその保護者を対象にした科学実験と科学ショーの実施

岡山理科大学 科学ボランティアセンター

1. はじめに

岡山理科大学科学ボランティアセンターは、科学・工学教育の振興につながるようなボランティア活動を牽引するような人材の養成・認定を行っています。具体的には、科学イベントの主催、地域の方が主催する科学イベントへの学生・教職員の派遣、学生のトレーニング等を行っています。これまで、本学および地域の学校・科学館・公民館などにおいて、年間で延べ 1000 名程度（実人数 200 名程度）の学生やセンターの教職員が 100 件以上の科学イベントを実施しています。

今回は助成を受けた物品を使用して、小学生でもわかりやすく見て楽しめる実験を通して環境科学の啓発に直接的に寄与することとしました。

2. 活動の特徴

環境に関わる現象や状況について実験を行ったり視覚的に見せたりする 30～40 分の科学ショーと、60 分の科学教室を実施しました。体験型・参加型の内容と進行方法により、参加者が実験を十分に楽しむことができ、同時に単に派手な実験を見せるだけでなく、実験をする前にどうなるか予想を聞いたり、原理説明をしたり、一連の実験結果を考察してもらいながら、科学の真の楽しさを実感できるように内容を工夫しています。このことにより、発達段階に応じた科学リテラシーや科学的なものの見方を身につけることを目指しました。

《使用したおもな物品》

- ・雲の出来方実験器
- ・前線モデル実験器
- ・小型液状化実験装置
- ・ジャイアントバルーン



《小型液状化実験装置》



《ジャイアントバルーン》

3. 実施事業

8月11日	サイエンスショー「天気をさぐる」	人と科学の未来館サイピア	参加者 76名
8月11日	サイエンスショー「地球と月」	人と科学の未来館サイピア	参加者 51名
8月18日	夏休み子ども科学実験教室「お天気を探ろう」	倉敷市児島民主会館	参加者 13名
8月27日	サイエンスショー「地球と月」2回実施	人と科学の未来館サイピア	参加者 49名
1月09日	サイピア理大の日スペシャル・サイエンスショー「環境のカガク」		
	「天気のふしぎ」		参加者 38名
	「地球と月」		参加者 43名
	「液状化はなぜ起こるの？」		参加者 32名
	「君も発電所になろう」		参加者 57名
1月22日	サイピア理大の日 液状化の科学ショーと液状化の実験ブース		参加者 110名
	合計	9イベント	のべ参加者 469名

4. 実施者の感想

○前線のでき方や、雲のでき方については中学2年生で学習する内容であったため説明が難しかったですが、子どもたちの既存の知識を引き出す工夫や、実験の結果をクイズ形式にすることで子どもたちも積極的にショーに参加してくれました。気候変動や異常気象についても、最近の日本の天気や、地球温暖化により変化する世界の環境を例に出し、地球で起こっている環境の変化に目を向けてみるよう促しました。子どもたちに、身近な天気のことを知ってもらい、さらに気候変動や異常気象に目を向けてもらえるような科学教室を開くことが出来たととてもよい機会になりました。
(理学部応用物理学科3年生)



《雲の出来方実験》



《前線モデル実験器》

○「雲の出来方モデル」も「前線モデル実験器」も、どちらも使いやすく、参加された方々に好評でした。今までは既存の器具を組み合わせて、実験装置を作っていましたが、キットになったものを購入させていただき、わかりやすく、見やすい実験を行うことができました。

今回は前線モデルで使用させていただきましたが、説明書を読むと、他にも使用用途があると記述がありましたので、今後、他の使用方法で実験等を行ってみたいと思います。2つのキットは天気の実験を行う際に使用しましたが、どちらも危険を伴わずに準備でき、使用方法がわかりやすく、スムーズな実験を行うことができました。雲の作成や前線モデルを通して、温暖前線や寒冷前線などの子どもたちにとって難しい言葉や、天気的环境変化をうまく伝えることができました。(生物地球学科3年生)

○液状化についてのショーをしてみて一番心配だったことは、子どもたちが地震によって起きる津波、土砂崩れなどの被害の写真を見て怖がってしまうのではと思いました。いざやってみると「すごいな」、「なぜ起きるんだろう？」などの発言を聞き、怖いというより知りたい、驚きなどの気持ちが勝ってしまうということがわかりました。ですので、子どもたちにショーを見るついでに地震が起きた時にどのようなことをしたらいいのか、どのような対策を取れば被害を少なくできるのかなどを知ってもらえると嬉しいと思います。(生物化学科2年生)



《液状化はなぜ起こるの?》

5. まとめ

今年度特に年度前半は、対面での実験ブースや工作がまだコロナ禍で難しく、科学教室と科学ショーが中心となってしまいました。

今後は見るだけではなく、体験型・参加型の内容と進行方法により、参加者が実験・工作を十分に楽しむことができるプログラムの設定が重要だと感じました。環境に関する学習の後、実際に子どもたちが環境に関する工作等も実施できるプログラムを設定できると、なお環境科学の啓発につながると思います。このような機会をいただき、八雲環境科学振興財団に感謝を申し上げます。

SDGs (Sustainable Development Goals) の達成を目指した「子ども科学体験大学」

1 はじめに

本活動では、「子ども科学体験大学」のテーマを「SDGs (Sustainable Development Goals)」とした。SDGs とは、国連が制定した「2030 年までに持続可能でより良い世界を目指すための 17 の目標」であることは言うまでもない。地球上の豊かな資源を未来に残し、今ある問題を解決して、みんなが幸せに暮らせる世界をつくるために、国や企業だけではなく、世界各国の人たちが国境を越え協力して取り組むことが求められている。

地球規模での問題に関して考える機会が多い昨今、子どもが世界の問題に対して関心を持つきっかけづくりを提供することは重要であると考えられる。「SDGs のための解決方法を考えたり、行動を起こしたりするのは小学生には難しいのでは？」と思うかもしれないが、小学生のうちから SDGs について学び、関われるような機会を提供することで、子どもは社会全体の仕組みを考え、持続可能な世界をつくるために自分ができることを探すようになっていく。また、SDGs の目標には、「子ども」に関連する課題も含まれている。自分と同世代の子どもが直面している世界の問題に目を向け、普段の生活では知ることのできない世界を学ぶことで、子どもの新たな学びや、グローバルマインドを育てることにも繋がると考える。

SDGs には 17 のゴールがあるが、本活動において網羅的に扱う時間はない。17 の目標の中から、小学生にも馴染みがあり、身近なテーマを取り上げて、活動の中で実施する。

取り上げる目標は、環境と関連があるゴール 6 「安全な水とトイレを世界中に」、ゴール 12 「つくる責任使う責任」、ゴール 7 「エネルギーをみんなにそしてクリーンに」の 3 つである。講座の中でこれらのゴールの内容について分かりやすく講義するとともに、実験・観察を通して、参加した小学生が自分なりの解決方法を考えることができるようにする。

したがって、本活動の目的は、参加者である小学生に、SDGs の目標について理解し、解決方法を考え、自分たちが身近なことから行動を起こして

いこうとする動機づけを行うことである。

なお、本活動を行う中国学園大学教志会とは、将来小学校教員を目指す学生と教員から成るグループで、7 年前から大学近隣の小学生を対象に毎年「子ども科学体験大学」を開いてきた。観察や実験を通して小学生の科学への興味・関心を喚起するとともに、学生は観察・実験の講師役を務め、教師としての実践的な指導力を身に付ける良い機会となっている。本活動においても、学生が主体となって講座を計画し、講義や実験を指導する。

2 ゴール 6 「安全な水とトイレを世界中に」

(1) 目標

・世界では安全な水を確保できている人々は少数であること、安全な水を確保できないことは、病気や死亡のリスクが高いことを理解する。

・「ろ過」の実験を通して安全な水を確保するための方策を考えるとともに、安全な水を得るためには手間暇がかかることを体験する。

(2) 講座の様子

・日時：2022 年 8 月 27 日（土）10:00～11:30

講座の前半の講義では、日本ユニセフ協会の「SDGs クラブ」¹⁾というウェブサイトを活用し、世界での安全な水やトイレの状況について説明した。その中で、世界の水やトイレの問題についてクイズ形式で出題したり、水を確保することが困難なアフリカのある国の少女の動画を見せたりした。



写真 1 学生による講義

後半では、参加した小学生は、1人で1つのろ過実験を行った。はじめに、500mlのペットボトルを半分にカッターで切り、2つに分けた。次にペットボトルの注ぎ口に綿を輪ゴムで縛り、逆さにして、もう一方の底部のペットボトルの中にはめ込んだ。その上から小石、活性炭、砂を順に詰めていった。

一方で、ビーカーに泥を少量入れ、ろ過装置に注ぐための汚水を作った。この時、汚水とろ過を行った最終の水の透明度の差を比較するため、少量を残しておいた。汚水が準備できたところで、全員で一斉にろ過装置に汚水を注いだ（写真2）。



写真2 ろ過実験

汚水が順に浸透していき、注ぎ口の真下に置いたビーカーの中に徐々に水が出てきた。出てきた水は、はじめの汚水と比較すると濁りが少なくなっていたので、子どもたちからは「色がきれいになった。」「濁りが薄くなった。」などの声があった。その一方で「まだまだ汚い」「飲めたものじゃない」などの声もあった。そこで、注ぎ口の下にたまった水を再びろ過装置に注ぐように指示した。2回目のろ過をした後もまだまだ濁りがあるので更に繰り返してろ過を行ったがなかなかきれいにならなかった。そこでろ過を中断し、水道水を上から注ぎ、ろ過装置内に溜まった汚れを洗い流すことにした。その後、ろ過を再開するとかなりきれいな水を得られるようになったが、濁りをなくすことはできなかった。

ろ過の終了後、「見かけはきれいになったように見えても、中にいる微生物などが除去し切れないのでこの水は飲めない」ことを説明した。更に、水道の浄水施設ではろ過の仕組みを何度も繰り返して飲用できる水にしていることを伝えた。子どもたちは、安全な水を得るためには多くの手

間と時間がかかることを実感したようであった（写真3）。



写真3 講座のまとめ

3 ゴール12「つくる責任使う責任」

(1) 目標

・大量生産・大量消費の社会を続けると、生活に必要な資源を未来の人々に残すことができないことを理解する。

・コンポストを用いた生ゴミの処理の実験を通して、ゴミを減らすためにできることや循環型社会の在り方について考える。

(2) 講座の様子

・日時：2022年9月10日（土）10:00～11:30

講座の前半の講義では、世界や日本における大量生産・大量消費の状況をプレゼンテーションを用いて説明した。その中で、フードロスがどれくらい大量なのかを3択問題を使って小学生に印象づけたり、それに該当する食料支援によって世界の飢餓をどれくらい救えるかなどについて講義をした。講座の後半では、バグ型コンポストの作成を行った（写真4）。



写真4 バグ型コンポストの作成

はじめに、コンポストの中に入れた生ゴミがどのような経過をたどって肥料になるのかを説明した。そして、事前に準備しておいたコンポストを講義室の前に展示し、ゴミが変化している様子を示した。小学生は土壌の中をよく見ると水アブの幼虫がいるのを発見したり、腐敗臭がしたりすることに気付いている様子であった。その後、実際にバッグ型のコンポストの作成に入った。

腐葉土、ピートモス、バーミキュライト、油かすをトート型保冷バッグの中に入れ混ぜた。そして、家庭に持ち帰り、コンポストの中に、米のとぎ汁と水、生ゴミを入れて混ぜるように伝えた。更に図1に示すような温度記録カードを配付し、毎日定時に土の温度を測り、生ゴミの様子を記録するよう指示した。

このバッグ型コンポストを次回の講座まで約4週間家庭で生ゴミを入れ、外気温、土の温度、ゴミの様子などを記録することとした。

図1 温度記録カード

【コンポスト 温度記録カード】		学年	年	名前		
※毎日決まった時間（同じ時間）に、コンポストの様子を観察しよう！						
この温度記録カードに、コンポストの「土の温度」と「ゴミの様子」を毎日記録してね。						
★ 観察する時間を決めよう（ : : ）に観察します！						
	9/1(土)	9/2(日)	9/3(火)	9/4(水)	9/5(木)	9/6(金)
外の気温	℃	℃	℃	℃	℃	℃
土の温度	℃	℃	℃	℃	℃	℃
ゴミの様子						
【土の温度】はゴミを入れた直後、土の温度を測ってあげてね！			【ゴミの様子】何もないでかみはなくなるかな？			
	9/7(土)	9/8(日)	9/9(月)	9/21(火)	9/21(水)	9/22(木)
外の気温	℃	℃	℃	℃	℃	℃
土の温度	℃	℃	℃	℃	℃	℃
ゴミの様子						
【わかったことや感想】						



写真5 設置型コンポストの見学

講座の終了後、大学内に設置されたコンポストを見学に行った。参加者はコンポストの中をのぞき込んで生ゴミが分解されている様子を観察した（写真5）。

4 ゴール7「エネルギーをみんなにそしてクリーンに」

(1) 目標

- ・火力発電所や工場、日常の生活などから二酸化炭素を排出することにより、地球規模での温暖化につながることを理解する。
- ・身近なものから二酸化炭素を排出することなく電気を発生させる実験を行うことを通して、再生可能エネルギーについて興味を持ち、地球温暖化を防ぐ方策を考える。
- ・言語としての英語を英語科の授業だけで使うのではなく、科学においても英語を活用する機会とし、受講者に一層英語に慣れ親しませる。講義や観察・実験は英語を用いて行う。



写真6 英語による講義

(2) 講座の様子

・日時：2022年9月23日（金）10:00～11:30
講座の前半では、日本や世界における二酸化炭素排出量やそれに伴う地球温暖化の現状をプレゼンテーションを用いて英語による講義を行った（写真6）。時折、日本語での説明も加えながら説明をした。

後半では、再生可能エネルギーについての2つの実験を英語で方法を説明しながら行った。1つ目は燃料電池の実験で、薄い水酸化ナトリウム水溶液をピーカーに入れ、その中に鉛筆の芯を電極として水溶液に浸し、手回し発電機をつないで電気分解を行った。水酸化ナトリウム水溶液を使うので、参加者は安全のためゴーグルを使用して実験を行った。発電機を回すと、鉛筆の芯から激しく気体（酸素と水素）が発生した。しばらくして電流を流すのをやめ、衝撃を与えて気体の泡が鉛筆の芯から離れないように注意しながら電子オ

ルゴールをつなぐと音が流れた(写真7)。これは、水溶液中の酸素と水素が反応して水が生じる際に電流が流れるのだが、小学生は、水溶液が音を鳴らすために燃料の役割をしていることに驚いている様子だった。



写真7 燃料電池の実験

2つ目は土壌の微生物による発電の実験を行った²⁾。マッドワットという実験キットの容器の中に土を入れ、その中に網目状の電極を入れる。土壌の中の微生物が有機物を分解する際に発電をするという仕組みである。観察する小学生は、実験容器に取り付けたLEDが点滅するのを不思議そうに見つめながら、土の中の微生物が発電しているイメージを描いている様子であった(写真8)。

5 おわりに

3回の講座では、開始時と終了時にアンケート調査を実施した。その中からSDGsのゴールの内容についての知識と、講座で行った観察・実験に関する理解に関する設問を抽出して表1に示した。設問については、1から5の5段階尺度で回答を求めた(1:そう思わない, 2:あまりそう思わない, 3:どちらともいえない, 4:ややそ



写真8 土中の微生物による発電

う思う, 5:そう思う)。全ての設問について、回答の平均値が増えており、有意差も見られた。このことから、各ゴールに関する知識や実験の理解が高まったことから、小学生が自ら解決方法を考え、自分たちが身近なことから行動を起こしていこうとする動機づけにつなげることができたと考えられる。

今回の講座では、SDGsのゴール6, 7, 12を取り上げた。SDGsには17のゴールがあるので、それ以外のゴールについても、身近な課題を取り上げながら、未来を担う子どもたちが問題解決の方法について考えることができるように講座を工夫していきたい。

謝辞: 本活動は、公益財団法人八雲科学振興財団による環境科学啓発事業助成を受けて実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本ユニセフ協会. “SDGs クラブ”. <https://www.unicef.or.jp/kodomo/sdgs/>
- 2) 橋本和仁. 田んぼが電池になる!. 株式会社ウェッジ, 2014.

表1 アンケート調査の回答

番号	質問項目	授業前		授業後		T値	有意判定	人数
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差			
1	SDGsゴール6「安全な水とトイレを世界中に」について知っている。	3.33	0.75	5.00	0.00	3.07	*	n=6
2	きれいな水を作るにはどうすればよいか説明することができる。	2.33	1.60	5.00	0.00	3.73	*	
3	SDGsゴール12「つくる責任つかう責任」について知っている。	3.00	1.31	4.50	0.53	2.81	*	n=8
4	コンポストとは何か説明することができる。	1.25	0.46	4.00	0.76	8.77	**	
5	SDGsゴール12「つくる責任つかう責任」について知っている。	2.83	1.17	4.67	0.52	3.84	*	n=6
6	様々な発電方法について説明することができる。	2.50	1.22	4.33	0.52	3.16	*	

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

助成実施要項

14. 助成実施要項

公益財団法人八雲環境科学振興財団 研究助成制度実施要項

(趣旨)

- 第1 この要項は、公益財団法人八雲環境科学振興財団定款（以下「定款」という。）第4条第1号に基づき、公益財団法人八雲環境科学振興財団（以下「財団」という。）が行う、環境科学に関する研究助成の実施について定めるものとする。

(研究助成の対象)

- 第2 財団が行う研究助成は、次に掲げる学術研究に助成するものとする。
- 一 自然科学又は社会科学若しくは人文科学の分野における環境問題に係わる基礎並びに応用研究で、研究者が1人で行うもの、又は研究者が2人以上のグループで同一の研究課題について共同で行うもの。
 - 二 国の内外で、環境科学の学術的調査研究活動を行うもの。

(研究助成対象機関)

- 第3 財団が行う研究助成の対象者が所属する研究機関（以下「研究機関」という。）は、次に掲げるものをいう。
- 一 大学及び高等専門学校
 - 二 県及び県の附属研究機関
 - 三 民法第34条の規定により設立された学術的研究を行う法人
 - 四 前号に掲げるもののほか、学術的研究を行う機関で、財団において相当と認めるもの。

(推薦者)

- 第4 研究助成金の交付の申請には次の各号による研究機関代表者の推薦を受けなければならない。
- 一 研究機関に所属する研究者が1人で研究を行う場合は、当該研究機関の代表者又は学部長
 - 二 同一の大学で異なる学部の研究者2人以上が、同一の研究課題について共同して研究を行う場合は学長
 - 三 前号に掲げる場合を除くほか、異なる研究機関に所属する研究者2人以上が同一の研究課題について共同して研究を行う場合は、各研究機関の代表者

(研究助成の種別)

- 第5 研究助成は、その助成対象により、次のとおり区分する。
- 一 一般研究
財団が例示する先駆的又は独創的で将来性のある研究課題を対象とする。

二 特定研究

財団が毎年提示する基本テーマに関する研究課題を対象とする。

三 学術調査研究

国の内外で行われる環境科学に関する学術調査研究で、当財団において適当と認めたものを対象とする。

(研究助成の期間)

第6 前項に規定する研究助成の期間は、原則として1年とする。

(助成研究の募集)

第7 研究助成金の交付を申請しようとする者は、別に定める様式の研究助成申請書を、財団に提出するものとする。

(助成研究の選考)

第8 研究助成金の交付は、定款第52条に定める選考委員会において選考し、理事会の議を経て決定する。

(選考基準)

第9 助成の対象となる研究は、次の基準により審査する。

- 一 研究目的に対する学術的・社会的要請が大きいこと
- 二 研究計画が十分に検討され研究目的の達成可能性が高いこと
- 三 独創性に優れ、新たな研究分野として広がる可能性が高いこと
- 四 政府及び企業等の補助、助成が得難い等、当財団が助成する必要性が高いこと

(助成経費)

第10 助成研究者には、別に定める助成経費を支給する。なお、研究助成金は、申請課題の研究以外の目的に使用することはできない。

(報告書の提出)

第11 研究助成金の交付を受けた者は、助成期間終了後6ヶ月以内に、別に定める様式の研究成果報告書を、財団に提出しなければならない。

(雑則)

第12 研究助成金の交付を受けた者が、国立学校設置法第2条第1項に規定する国立学校に勤務するときは、助成金の受入れは、奨学寄附金委任経理事務取扱規則（文部省令第14号、昭和39年4月23日）に基づき、処理するものとする。

附 則

この要項は、平成24年10月1日から施行する。

公益財団法人八雲環境科学振興財団 国際研究交流助成制度実施要項

(趣旨)

第1 この要項は、公益財団法人八雲環境科学振興財団定款（以下「定款」という。）第4条第2号に基づき、公益財団法人八雲環境科学振興財団（以下「財団」という。）が選出する国内外の研究者等を、国内外で開催される国際研究集会等に派遣又は招聘することを助成すること並びに国内外の研究者（又はグループ）が共同で研究を行うことを助成することの実施について定めるものとする。

(国際研究交流助成の対象)

第2 この要項で対象とする国際研究交流助成は、次の条件を満たすものとする。

- 一 下記に示す国際研究集会への国内研究者の派遣
 - イ 外国で開催される研究集会であること。
 - ロ 国際的に権威のある学会、学術団体又は学術研究機関等が主催するものであること。
- 二 下記に示す国内研究集会への海外研究者の招聘
 - イ 国内で開催される国際研究集会であること。
 - ロ 国際的に権威のある学会、学術団体又は学術研究機関等が主催するものであること。
- 三 下記に示す国際共同研究のための派遣及び招聘
 - イ 協定等に基づき、国内外の研究機関で一定期間組織的に研究（研究機関の代表者が認めたもの）することを目的とした、国内研究者の派遣又は国外研究者の招聘であること。
 - ロ 国際的な共同研究を目的とした、研究者の交流や情報資料交換のための、一時的な国内研究者の派遣又は国外研究者の招聘であり、財団において適当と認めるもの。

(研究助成対象機関)

第3 財団の行う助成の対象者が所属する研究機関（以下「研究機関」という。）は、次に掲げるものをいう。

- 一 大学及び高等専門学校
- 二 県及び県の附属研究機関
- 三 民法第34条の規定により設立された学術的研究を行う法人
- 四 前号に掲げるもののほか、学術的研究を行う機関で、財団において適当と認めるもの。

(推薦者)

第4 助成金の交付の申請には所属する研究機関代表者又は学部長の推薦を受けなければならない。

(助成対象研究者の募集)

第5 派遣又は招聘研究者の助成を希望する者は、別に定める助成申請書を所属機関の長を経て財団に提出するものとする。

(助成対象研究者の選考)

第6 派遣又は招聘研究者の助成選考は、定款第52条に定める選考委員会の議を経て理事会で決定する。

(選考基準)

第7 派遣又は招聘の助成は、対象研究者の以下の基準の充足状況により選考する。

- 一 優れた研究活動の実績があること。
- 二 国際研究集会においては、講演若しくは研究発表を行うこと又は座長になること等重要な役割を果たすこと。
- 三 国際研究交流における活動に必要な語学力を有すること。
- 四 国際研究集会への参加あるいは国際共同研究により、研究の著しい向上が期待されること。

(助成経費)

第8 派遣又は招聘研究者には、別に定める助成経費を支給する。

(報告書の提出)

第9 派遣研究者は又は招聘助成を受けた研究者は研究集会等終了後1ヶ月以内に、別に定める報告書を財団に提出しなければならない。

(雑則)

第10 助成金の交付を受けた者が、国立学校設置法第2条第1項に規定する国立学校に勤務するときは、助成金の受入れは、奨学寄附金委任経理事務取扱規則（文部省令第14号、昭和39年4月23日）に基づき、処理するものとする。

附 則

この要項は、平成24年10月1日から施行する。

公益財団法人八雲環境科学振興財団 研究集会助成制度実施要項

(趣旨)

- 第1 この要項は、公益財団法人八雲環境科学振興財団定款（以下「定款」という。）第4条第1号に基づき、岡山県内で開催される環境科学に関する研究集会、学術講演会、シンポジウム等（以下「研究集会」という。）に対し、公益財団法人八雲環境科学振興財団（以下「財団」という。）が行う助成の実施について定めるものとする。

(助成対象研究集会)

- 第2 財団が助成する研究集会は次のとおりとする。
- 一 学協会及びその支部が主催するもの
 - 二 公知された懇話会、研究会等が主催するもの
 - 三 財団が認める組織が主催するもの

(助成条件)

- 第3 研究集会への助成は、岡山県下の研究機関に常勤する研究者が世話人として申請するものでなければならない。
- 2 前項の研究機関は、次に掲げるものをいう。
- 一 大学及び高等専門学校
 - 二 県及び県の附属研究機関
 - 三 民法第34条の規定により設立された学術的研究を行う法人
 - 四 前号に掲げるもののほか、学術的研究を行う機関で、財団において適当と認めるもの。

(推薦者)

- 第4 助成金の交付の申請には、所属する研究機関の代表者又は学部長等の推薦を受けなければならない。

(助成研究集会の募集)

- 第5 助成金の交付を申請しようとする者は、別に定める様式の研究集会助成申請書を財団に提出するものとする。

(助成の選考)

- 第6 研究集会助成の決定は、定款第52条に定める選考委員会において選考のうえ、理事会の議を経て決定する。

(選考基準)

第7 助成の対象となる研究集会は、次の基準により審査する。

- 一 明確に限定された研究主題であり、新しい知識又は概念の展開の可能性が大きいこと
- 二 研究法などの点で学術的価値が高いこと
- 三 岡山県において開催する意義が明らかであること
- 四 研究集会を開催するための組織と運営が明確であること

(財団名表示の義務)

第8 採択された研究集会は、刊行する印刷物等に共催、協賛、賛助等の冠を付し、財団名を記載しなければならない。

(助成額の基準)

第9 研究集会への助成額の交付基準は別に定める。

(報告書の提出)

第10 助成金の交付を受けた者は、研究集会が終了した後、1ヶ月以内に別に定める様式の報告書を財団に提出しなければならない。

(雑則)

第11 助成金の交付を受けた者が、国立学校設置法第2条第1項に規定する国立学校に勤務するときは、助成金の受入れは、奨学寄附金委任経理事務取扱規則（文部省令第14号、昭和39年4月23日）に基づき、処理するものとする。

(実施細則)

第12 この要項に定めるもののほか、必要な事項は別に定める。

附 則

この要項は、平成24年10月1日から施行する。

15. ご寄附のお願い

公益財団法人八雲環境科学振興財団は、平成10年に設立され、これまでに、省資源・リサイクル、環境計測、生態系保全をはじめ環境科学に関する多くの助成事業を行ってまいりました。今後、当財団の事業をより実りあるものにするため、広い分野の多くの方々に財団設立の主旨をご理解いただくとともに、ご指導・ご支援をいただくことが必要と考えております。

この寄附金は、事業目的の達成のために運用財産として使用させていただきます。

なお、当財団は、平成24年10月に公益財団法人として認定されており、このご寄附については、税制上の優遇措置を受けることができます。

また、岡山県下で開催される研究集会等につきまして、企業等から寄附を受ける場合、あるいは研究者個人またはグループを指定し、企業から寄附を受ける場合において、当財団が同意する場合は上記と同様に税制上の優遇措置を受けることができます。

上記の主旨をご理解いただき、ご寄附にご協力をお願い致します。

1. 募集の内容及び特典

募集期間	随時
対象	個人・法人
寄付金	個人1口 5,000円、法人1口 10,000円 特定指定寄付金(事務局までお問い合わせ下さい)
特典	・財団が発行する研究レポート集、財団ニュースの配付 ・財団が主催する研究発表会、その他事業企画等のご案内 ・その他理事長が必要と認める資料の配付

2. 税制上の優遇措置について

当財団は、公益財団法人の認定を受けております。当財団に対する寄付金には、税制上の優遇措置が適用されます。詳細は所轄の税務署又は税理士にお尋ねください。

個人寄付の場合	「所得控除」が受けられます。 (寄付金額-2,000円)の金額が所得金額から控除されます。 控除額は所得金額の40%が限度となります。
法人寄付の場合	通常的一般寄付金の損金算入限度額と別枠で、損金算入が認められます。

3. 寄附金申込み手続き

寄附申込書をダウンロードのうえ、郵送にて当財団事務局宛に送付後、ご送金手続きをお願いいたします。 当財団ホームページ → <http://www.ej-hds.co.jp/zaidan/>

4. お振込先

銀行名	三井住友銀行岡山支店
預金種類	普通預金
口座番号	6497055
口座名義	公益財団法人八雲環境科学振興財団 (フリガナ) コウエキザイダンホウジンヤクモカンキョウカガクシンコウザイダン

☆ご不明な点は事務局までお問い合わせ下さい。

公益財団法人 八雲環境科学振興財団

〒700-8617 岡山市北区津島京町 3-1-21 (株式会社エイト日本技術開発内)

TEL : 086-252-7670

FAX : 086-252-8918

e-mail : yakumo@ej-hds.co.jp

あとがき

今年7月、日本では、観測史上最も暑い月となった。世界全体でも、各地で数週間にわたる異常気象が続いた結果、過去12万年の中で史上最も暑い月となった。

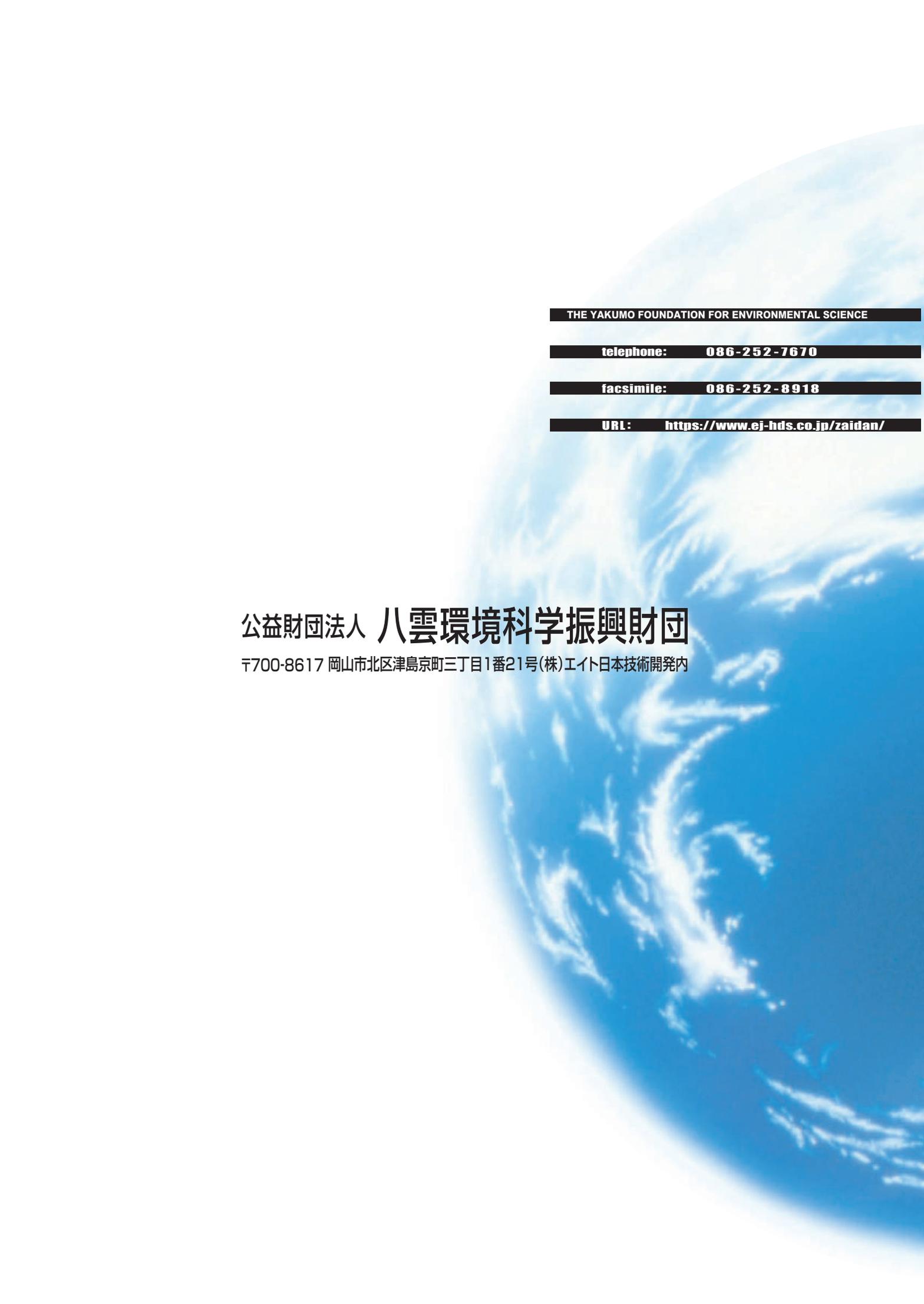
国連のグテレス事務総長は「地球温暖化の時代は終わり、地球沸騰化の時代が到来した」と警告した。我々は、今後更に、気候変動対策を強化しなければならない。

公益財団法人 八雲環境科学振興財団
研究レポート集 第24号

令和5年10月発行

発行 公益財団法人八雲環境科学振興財団
岡山市北区津島京町3丁目1-21
(株)エイト日本技術開発内)
TEL (086) 252-7670

印刷 吉備サプライ株式会社
岡山市北区野田4丁目2-20
TEL (086) 805-2111



THE YAKUMO FOUNDATION FOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

telephone: 086-252-7670

facsimile: 086-252-8918

URL: <https://www.ej-hds.co.jp/zaidan/>

公益財団法人 八雲環境科学振興財団

〒700-8617 岡山市北区津島京町三丁目1番21号(株)エイト日本技術開発内