

公益財団法人富山第一銀行奨学財団

理事長 横田 格 殿

## 助成研究成果概要報告書

|                        |                  |          |
|------------------------|------------------|----------|
| 教育機関名 : 富山県立大学         | 助成金額 :           | 500 千円   |
| 研究代表者 : 石田裕之           | 所属 : 工学部教養教育センター | 職位 : 准教授 |
| 研究題目 : ニュートリノのマヨラナ性の探索 |                  |          |

## 研究概要

本研究の研究概要は以下のとおりである。

## ① 研究課題の学術的重要性（国内外の関連する研究の中で当該研究の位置づけ等）

2015年に梶田隆章氏がノーベル賞を受賞したことからも有名になったニュートリノの質量は、現在までのほとんどすべての実験事実を説明することができる素粒子標準理論をもってしても説明ができない。これを最も単純な方法で説明するためには、右巻きニュートリノと呼ばれる新しい素粒子の導入が有力である。ところがその存在・性質は今のところ実験的にはまったく未確定である。しかしながら、素粒子標準理論の最小拡張であるこの新素粒子の存在を確定的にするものとして、『マヨラナ性の発見』がある。本研究は、このマヨラナ性を如何に探索するかということに焦点を当てている。もしニュートリノがマヨラナかそうでないかが確定すると、ニュートリノがなぜ質量をもっているのか、そしてなぜその質量が他の素粒子と比べても非常に小さいのか（例えばニュートリノ以外で最も軽い電子と比較をしても6桁程度軽い）ということにも議論を拡げることができる。

## ② 研究課題の独創性

新素粒子である右巻きニュートリノの質量は実験的には直接的な制限を受けていないが、素朴にはこの新素粒子は発見済みの素粒子よりもずっと重たいものとして導入される。一方、本研究課題では、この新素粒子を現在見つかった素粒子同様、素粒子標準理論の典型的なスケール（陽子の約250倍）よりも軽いものとして導入する。軽いものとしての導入は世界的にも独創的な取り組みで、これまでも私たちが世界をリードして研究している。この新素粒子の証拠となるマヨラナ性の発見は、素粒子標準理論が答えることのできない最大の謎の1つである宇宙の物質と反物質の不均衡（宇宙バリオン数非対称性）の起源解明にも繋がる。これは広く議論されているマヨラナ性探索に関する研究の中でも特徴的であり、独創的である。

## ③ 研究課題の波及効果

本研究課題が遂行されると、素粒子理論におけるニュートリノの質量の起源や小ささの謎のみならず、宇宙バリオン数非対称性といった宇宙物理学的謎の解明にも貢献することができる。また、新素粒子は現在の素粒子実験で到達することができるエネルギー以下の質量であるため、現行や将来計画されている新素粒子の観測が期待される実験に対して、新素粒子を探るべき具体的な質量領域や相互作用の大きさを提示することができる。これにより、素粒子や宇宙の最大の謎を、実験的に解明することができるため、理論コミュニティのみならず実験コミュニティの発展に貢献することができる。

④ 研究課題の地域性（富山県の活性化等への貢献を含む。）

富山県はこれまでも、神岡鉱山跡で行われている、ニュートリノ質量階層性や CP 対称性破れを探る実験として世界をリードし続けている T2K 実験や、ニュートリノの性質だけではなく宇宙暗黒物質などの検証も期待されるカムランド実験に馴染みが深い。また、『ぶり・ノーベル出世街道』と呼ばれる通りがあるほど、基礎研究への関心も高いと思われる。そのような土地で、ニュートリノの理論的な謎であるマヨラナ性に端を発した研究を進めることは非常に意義があると考え。特に本研究により、将来のノーベル賞級の発見が期待されるカムランド実験に対しての理論的サポートを与えることができる。マヨラナ性は T2K 実験だけでは確定することが難しい性質であることから、ニュートリノに対する相補的な研究となり得ると考える。

### 成果要約

ニュートリノのマヨラナ性の検証方法として、右巻きニュートリノの直接探索がある。本研究題目における右巻きニュートリノは、現在の素粒子実験で到達することができるエネルギー以下の質量を仮定している。右巻きニュートリノの直接探索ができた場合、これまでに多くの研究者が行ってきた、既知の素粒子よりもずっと重たい右巻きニュートリノの可能性を棄却し、素粒子標準模型の拡張に決定的な一石を投じることができる。特に、日本で行われている Belle II 実験での検証が可能な質量領域であるため、日本の実験でマヨラナ性の検証をすることが期待される。現在、Belle II 実験で測定することができる物理量を理論的に予測するため、理論家だけでなく Belle II 実験に参加をしている実験家と共に議論を重ねている。まだ確定的な理論予想の結果は得られていないが、近い将来研究結果をまとめ、学術雑誌に投稿する予定である。

具体的には、B 中間子や $\tau$ レプトンの崩壊によって生成された右巻きニュートリノが、検出器中で崩壊する場合と崩壊しない場合に分けて検証可能性を議論する。崩壊しない場合は、その崩壊確率から、シグナルが得られる数を理論的に予言し、右巻きニュートリノ以外の生成物の違いを予言する。崩壊する場合は、崩壊しない場合と比べ崩壊確率も大きくなり、シグナルを得られる可能性も増える。その中で、右巻きニュートリノの崩壊で生成される生成物の角度分布の違いを予言する。これらの予言を、実際の実験結果と比較することによって、右巻きニュートリノが生成されたかどうかを検証する。

上記の研究を遂行するため、学会や研究会に積極的に参加をし、参加者と議論を重ねた。また共同研究者と研究打ち合わせをするための出張をした。さらに、研究題目関連図書を購入した。

|          |   |         |     |
|----------|---|---------|-----|
| 研究成果発表状況 | 雑誌論文、学会発表、図書、新聞掲載、作成 Web ページ、特許権等の出願・取得状況 |         |     |
|          | 学術論文 2 本、学会発表 1 件                         |         |     |
| 経費の執行状況  | 区 分                                       | 執行額(円)  | 備 考 |
|          | 出張旅費                                      | 430,260 |     |
|          | 書籍購入                                      | 19,740  |     |
|          | 光熱費                                       | 50,000  |     |

公益財団法人富山第一銀行奨学財団  
理事長 横田 格 殿

## 助成研究成果概要報告書

|                                     |                   |         |
|-------------------------------------|-------------------|---------|
| 教育機関名 : 富山県立大学                      | 助成金額 :            | 400 千円  |
| 研究代表者 : 小柳健一                        | 所属 : 工学部知能ロボット工学科 | 職位 : 教授 |
| 研究題目 : 柔らかい外装をしたロボットによる柔らかいものの自律的把持 |                   |         |

## 研究概要

本研究では、ドンマス教授ロボットの手に触覚センサをつけ、接触検知と把持動作制御を行い、自律的に来客と握手する機能に着目して開発する。ドンマス教授ロボットは周囲への印象と安全性のために着ぐるみで用いられる柔らかい外装をしており、手も当然柔らかい。本研究では、柔軟な材料を介して、多点での荷重計測をし、フィードバック制御による把持力の補償を行う。自律的な把持動作の実装と確認のため、1に述べた握手に必要な他の機能も実装する。最終的に、ドンマス教授ロボットによる自律的な屋内移動と来客との自然な握手を、実験的に検証する。

## 成果要約

手のひらに当たる部分に4つの3軸力センサを取り付けたドンマスハンドを開発した。3軸力センサを用いるようにしたのは、将来的にせん断方向の分力を用いることで、より繊細な把持制御を行うためである。

屋内の自律的な移動をするため、壁など周辺の障害物を認識する必要があった。ドンマス教授ロボットはダ・ヴィンチ祭など小さい子供が周辺にいる状況での使用も考えているため、レーザー光による物体・距離検知は安全上の不安があった。そのため、12個の超音波センサを胴体下部周囲に配置し、周辺の物体検知および誘導対象者とロボットとの相対速度の検出、および誘導対象者の絶対速度の推定を行った。誘導模擬実験にて、誘導対象者が追従してきているか離れていくかといった移動状態を推定することに成功した。

|          |   |         |                   |
|----------|---|---------|-------------------|
| 研究成果発表状況 | 雑誌論文、学会発表、図書、新聞掲載、作成 Web ページ、特許権等の出願・取得状況   |         |                   |
|          | 「ロボットの外装としたぬいぐるみの生地に滅菌処理を多数回施した影響の定量評価」, 日本機械学会論文集, Vol. 89, No. 927, Paper ID 23-00128 (15 pages), DOI: 10.1299/transjsme.23-00128 (2023).<br>「Development of integrated control system for life-size mascot robot」, Proceedings of the SICE Annual Conference 2023, pp.856-858 (2023).<br>「等身大マスコットロボットにおける道案内システムの開発」, 日本機械学会北陸信越支部 2024 年度合同講演会講演論文集, S1109 (2024). |         |                   |
| 経費の執行状況  | 区分  | 執行額(円)  | 備考                |
|          | 需要費   | 270,280 | センサ, 機械部品費        |
|          |   | 88,000  | 論文掲載費             |
|          | 負担金   | 1,720   | 学会参加費             |
|          | 間接経費  | 40,000  | 大学規程により総事業費の10%徴収 |

公益財団法人富山第一銀行奨学財団

理事長 横田 格 殿

## 助成研究成果概要報告書

|   |                     |                 |
|---|---------------------|-----------------|
| 教育機関名 : 富山県立大学                                | 助成金額 : 400千円        |                 |
| 研究代表者 : 呉 修一                                  | 所属 : 工学部 環境・社会基盤工学科 | 職位 : 准教授 (現 教授) |
| 研究題目 : 富山県中小河川を対象とした洪水予測とデジタルツインでの可視化・避難誘導の試み |                     |                 |

## 研究概要

本研究は、富山の中小河川を対象に洪水の事前予測に取り組むとともに、洪水予測結果の様々な可視化方法を検討する。これにより、地域住民の事前避難の促進や、企業事業所の水害版 BCP の策定の推進に資する情報提供を行うことが本研究の目的となる。

近年、気象庁や国土交通省が精力的に洪水予測に取り組んでいる。しかしながら、一つの大きな課題は、県や市町村レベルの中小河川では、これら予測が殆ど対象とされていない事である。これは、中小河川のデータが不十分かつ、小さい河川での予測が科学的に難しいためである。よって、本研究では富山県の中小河川を対象とした洪水予測に、純然たる物理モデル（分布型水文モデル）での予測に加えて AI を用いた予測を組み合わせることで取り組んだ。また、洪水予測結果（水位予測）を洪水氾濫解析（氾濫の広がり）の事前計算結果と関連づけることで、水位のみならず状況が悪化した場合の想定として氾濫状態までも予測した。これらの様々な可視化方法を検討し、確率表示や家屋位置とのリンクなどを考慮したハザードマップを提案した。

## 成果要約

成果は、1) 物理モデル、AI モデルを用いた水位予測モデルの構築と精度検証、2) 中小河川を対象とした LP データの検証とその利用方法の提案、3) 洪水氾濫解析結果の可視化方法の検討、の3つに要約可能である。

## 1) 物理モデル、AI モデルを用いた水位予測モデルの構築と精度検証

氷見市の上庄川を対象として、水位の短時間予測に取り組んだ。モデルは申請者が開発した物理水文モデルおよび AI モデルの二つを利用し、1~6 時間先の予測に取り組んでいる。実測雨量を用いた 1 時間の予測は高精度で実施することに成功している（図-1）。予測雨量へのチャレンジでは、予測雨量の不確実性を考慮するために、アンサンブル（複数シナリオ）で 21 の予測結果が利用できる MEPS データを用いた。予測結果の一例を図-2 に示す。予測雨量の精度が低いため、物理モデルの 2 アンサンブルのみが洪水の立ち上がり予測できる結果となった。総じて、1 時間や 2 時間などの短時間の予測では AI モデルの精度が高く、6 時間先などの予測では物理モデルの精度が高い結果となった。これは AI モデルでは水位の観測値も

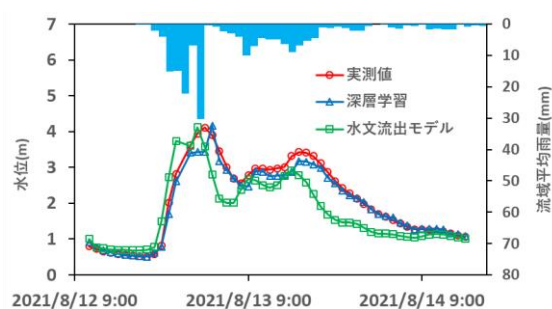


図-1 実測雨量による 1 時間先の水位予測

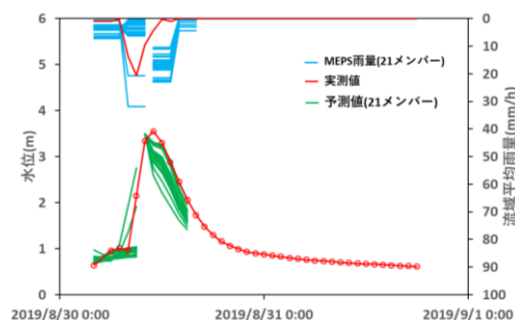


図-2 水文流出モデルによる 1~6 時間先の水位予測

利用されるが、この水位の上昇などが6時間先などでは中小河川では追いつかないためである。以上、今後の中小河川の水位予測では、物理水文モデルを用いるとともに、MEPSのアンサンブル予測結果を用いて複数予測シナリオで検討することが重要であるという結論を得ることができた。

## 2) 中小河川を対象としたLPデータの検証とその利用方法の提案

中小河川のデータ（河道横断面など）が不足している状況を克服するため、富山県が収集・整備した1mメッシュ解像度のLPデータを検証し、これらを洪水氾濫解析で使用することを提案した。図-3に示すよう、LPデータの使用の有無(Case2:LPデータ使用)では精度に大きな違いが生じており、LPデータを利用することで精度の高い洪水氾濫解析が実施できることが明らかとなった。またLPデータの検証では、実測の河川横断面データと大きな相違はなく、LPデータが高い精度を有すること、また破堤地点の事前予測に利用可能なことを示すことが出来た。

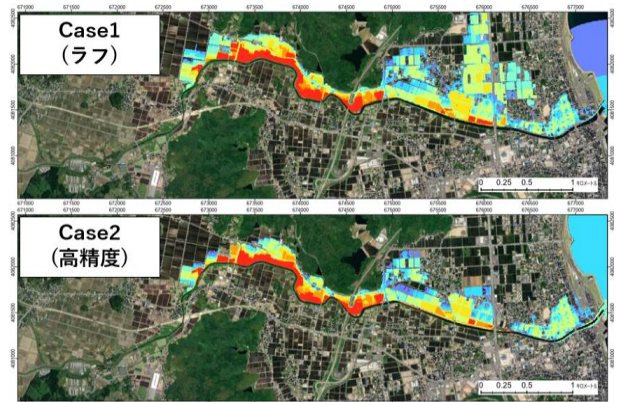


図-3 LPデータの有無が氾濫解析結果に与える影響

## 3) 洪水氾濫解析結果の可視化方法の検討

洪水氾濫解析結果の様々な可視化方法を検討した。VRを用いた3Dでの表現、CGを用いた表現などに加えて、破堤確率を考慮したハザード情報の提示、家屋の位置を強調したハザード情報の提示などを、本研究で新たに提案することが出来た。一例として家屋の位置を強調したハザード情報の提示結果を図-4に示す。このようにハザード情報（浸水深）と家屋の位置を重ねることで、各家屋の事前避難促進につなげていきたい。

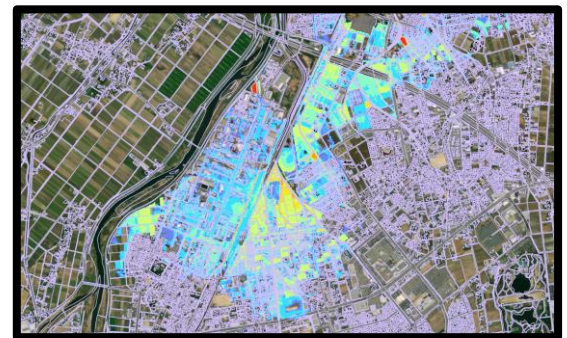


図-4 家屋の分布を背景とした氾濫解析結果

現在は、水位予測結果と堤防破堤を組み合わせることで、リアルタイム洪水氾濫解析への展開と、それらの逐次可視化に取り組んでいる。これにより、住民の事前避難促進や企業のBCP作成支援に資する情報の提供、更にはリアルタイム洪水氾濫予測システムの構築に貢献したいと考えている。

|            |   |            |               |
|------------|---|------------|---------------|
| 研究成果発表状況   | 雑誌論文、学会発表、図書、新聞掲載、作成 Web ページ、特許権等の出願・取得状況                               |            |               |
| 国内学会（査読なし） | 中小河川を対象とした深層学習および水文流出モデルを用いた水位予測、令和5年度土木学会中部支部研究発表会、2024年3月1日（名古屋工業大学）。 |            |               |
| 経費の執行状況    | 区分  | 執行額(円)     | 備考            |
| 執行済み       | 旅費  | 42,580     | 東京出張          |
| 執行済み       | 謝金  | 131,055    | 学生アルバイト謝金     |
| 執行済み       | 消耗品   | 1,408      | 文具など一式        |
| 執行済み       | 機材レンタル費   | 184,957    | GNSS-RTK, 流速計 |
| 執行済み       | 間接経費  | 40,000     | 総事業費の10%      |
|            |   | 合計：400,000 |               |

公益財団法人富山第一銀行奨学財団

理事長 横田 格 殿

## 助成研究成果概要報告書

|                                    |                    |                 |
|------------------------------------|--------------------|-----------------|
| 教育機関名 : 富山県立大学                     | 助成金額 :             | 400 千円          |
| 研究代表者 : 黒田啓介                       | 所属 : 工学部環境・社会基盤工学科 | 職位 : 准教授 (現 教授) |
| 研究題目 : 富山県の地下水・水道水中 PFAS の分布と汚染源解析 |                    |                 |

## 研究概要

有機フッ素化合物であるパーフルオロアルキルおよびポリフルオロアルキル物質 (perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances; PFAS) は一部が発がん物質であり、環境中で極めて分解しにくいいため、「永遠の化学物質」と呼ばれている。近年、飲料水の PFAS 汚染が世界的に大きな問題となっている中、我が国の知見は限られている。特に地下水については、東京都多摩地区のような広範囲な地下水汚染も想定される中、測定データが限られている。富山県においても PFAS 濃度データは極めて少なく、環境省による県内の調査地点は地下水・河川水それぞれ 2 地点ずつであり、対象物質は PFOS、PFOA、PFHxS の 3 物質のみであった。また、水質保全のためには、PFAS の分布だけでなく、その起源や汚染経路を明らかにする必要がある。

これらの背景から、本研究では地下水利用が盛んな富山県内の地下水・湧水における PFAS の存在状況をより広く詳細に把握することを目的に、県内 25 地点の地下水・湧水等を対象に採水し、PFOS、PFOA、PFHxS に加えて PFBA と PFPeA を加えた 5 種類の PFAS の濃度を測定した。また、現場の状況や、下水マーカーとなる医薬品・人工甘味料の測定結果と組み合わせることで、PFASs の汚染源 (下水、道路排水、工場、消火剤など) や汚染経路 (廃水の直接地下浸透、下水の漏洩など) を推定した。

## 成果要約

## 研究方法

2023 年に富山県内で地下水 6 地点、湧水 15 地点、水道水 1 地点、下水流入水 2 試料、下水処理水 2 試料を採取した。PFAS の測定方法は Kobayashi et al (2022) を参考にし、水試料をろ過し、固相抽出後に LC-MS/MS で分析した。固相抽出のカートリッジには Waters の OASIS WAX (弱陰イオン交換性ポリマー) を使用した。

## 地下水・湧水・水道水中の PFAS 濃度

地下水と水道水ではすべてのサンプルで、湧水では 15 地点のうち 9 地点で PFAS が検出された。5 種 PFAS の合計濃度は 2 地点を除き 10 ng/L を下回っていた (図 1)。国内基準値 (PFOS 及び PFOA の合算濃度が 50 ng/L 未満) に関しては、すべてのサンプルがこれを満たしていた。一方、湧水 1 地点 (SP3) では米国の飲料水基準値 (PFOS と PFOA がそれぞれ 4 ng/L 未満、PFHxS は XX 未満) を超えていた。本研究で得られた濃度の中央値は、環境省が行った、全国の地下水及び湧水中の PFOS と PFOA 濃度の中央値を下回っており、全国的と比べると富山県の検出濃度は低いと言える。

最も濃度が高かった SP3 では、PPCPs (医薬品類) 及び ASs (人工甘味料) の濃度も他の測定地点よりも高かった。PPCPs・ASs 濃度は生活排水の混入を示すため、SP3 の PFAS 濃度が高くなった要因の一つには、生活排水が考えられた。SP3 は非飲用水であるため、住民がこれを摂取している可能性は低いと考えられた。PFAS が検出された地点は市街地に多く存在した一方、LOQ (検出限界濃度) 未満の地点は郊外 (山や海側) に集中していた。この理由としては、市街地は生活排水等の人為的汚染があったためと考えられた。

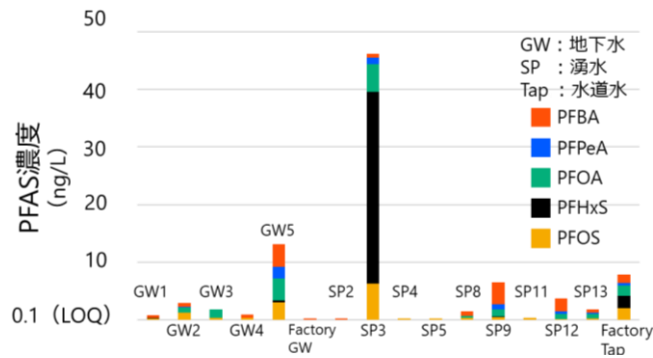


図 2. 地下水・湧水・水道水中の PFAS 濃度分布

### 下水中の PFAS 濃度

下水流入水よりも下水放流水の方が濃度が低い傾向にあった。Coggan et al (2019) によると、世界では、下水放流水の方が流入水よりも高い傾向にあり、本研究とは異なる傾向にある。そのため、引き続き下水中の PFAS 濃度を調査していく必要がある。

### 地下水・湧水と下水の PFAS 構成比率

PFHxS、PFBS、PFHxA を短鎖 PFAS と定義すると、5 種 PFAS の合計濃度に占める短鎖 PFAS の割合は地下水・湧水で 48%、下水は 98% と大きな差があった。地下水は滞留時間が長いため過去に受けた汚染を反映するため、PFOS や PFOA が多かった過去の PFAS 使用状況を反映しているのに対し、下水においては PFOS 及び PFOA の代替物質として短鎖 PFAS の使用が増加している近年の使用状況を反映していたと考えられた。

### まとめ

富山県の地下水・湧水・水道水は、日本の他地方と比較して PFAS 濃度が低い傾向にあった。PFAS が検出された地下水・湧水は主に市街地に多く、不検出地点は郊外に位置する傾向にあった。PFAS が比較的高い濃度の地点では PPCPs・ASs も検出され、PFAS が生活排水の混入に由来する可能性が示唆された。今後も調査を継続することで、富山県の地下水・湧水・水道水における PFAS の存在状況について解明したい。

### 成果発表

研究成果は今後、学会発表などで公表する。また、本研究に関連して 2 件の論文発表があった。

|             |  |           |              |
|-------------|--|-----------|--------------|
| 研究成果発表状況    | 雑誌論文、学会発表、図書、新聞掲載、作成 Web ページ、特許権等の出願・取得状況  |           |              |
| 論文 1 (査読あり) | Keisuke Kuroda et al (2023) Recent progress in photocatalysts for oxidation of As(III) and photocatalyst-impregnated adsorbents for removing aqueous arsenic, Current Opinion in Environmental Science & Health 100498-100498.                                   |           |              |
| 論文 2 (査読あり) | Manish Kumar et al (2023) Prevalence of PPCPs, microplastics and co-infecting microbes in the post-COVID-19 era and its implications on antimicrobial resistance and potential endocrine disruptive effects, The Science of the total environment 166419-166419. |           |              |
| 経費の執行状況     | 区分   | 執行額(円)    | 備考           |
| PFAS 標準試薬   | 物品費  | 360,000 円 |              |
| 間接経費一式      | その他  | 40,000 円  | 光熱水費、総額の 10% |

公益財団法人富山第一銀行奨学財団

理事長 横田 格 殿

## 助成研究成果概要報告書

|                                    |                 |
|------------------------------------|-----------------|
| 教育機関名 : 富山県立大学                     | 助成金額 : 400 千円   |
| 研究代表者 : 久加朋子                       | 所属 : 環境・社会基盤工学科 |
| 研究題目 : 富山県における河川浮遊ゴミの年間流出量把握と河川間比較 | 職位 : 准教授        |

## 研究概要

近年、世界各地の海域で海ゴミ、とくにプラスチックゴミの問題が深刻化しており、富山県においても平成22年度より海岸漂着物実態調査が実施されている。令和元年度の調査結果（富山県提供）によると、富山県内の20箇所の海岸における100 m<sup>3</sup>あたりの漂着物量は、都市化率の高い神通川河口の岩瀬浜（0.289 m<sup>3</sup>/100 m<sup>2</sup>）よりも小矢部川・庄川河口の六渡寺海岸（2.385 m<sup>3</sup>/100 m<sup>2</sup>）の方が多いたことが確認されている。これは、本調査結果のみで判断すると、富山県では農地率の高い小矢部川・庄川流域のほうが都市化率の大きい神通川流域よりもごみが多く河道へと排出されているように見え、幾つかの既往報告（都市化率が大きいほどゴミも多い）と異なる状況のようである。しかし、本当にそうなのか。本研究ではR4年度調査を発展させ、主要河川である神通川、庄川、小矢部川を対象とし、(1) 各流域の土地利用比較、(2) MPs調査と定点カメラを用いた現地調査より河川を流れる浮遊ゴミ（プラスチックごみを含む浮遊ごみ）の年間流出量の把握と河川間比較を行った。

## 成果要約

3 河川の土地利用状況（国土地理院の土地利用データ）を図-1 に示す。図を整理した結果、都市化率は神通川が8.9%（68.1 km<sup>2</sup>）、庄川が2.4%（10.8 km<sup>2</sup>）、小矢部川が7.7%（52.1 km<sup>2</sup>）であった。農地率は神通川が18.5%（141.5 km<sup>2</sup>）、庄川が10.5%（47.4 km<sup>2</sup>）、小矢部川が39.3%（266 km<sup>2</sup>）と最も割合が高くなった。流域人口は、神通川で約38万人、庄川で約2.8万人、小矢部川で約30万人である。これより、都市化率は神通川流域にて僅かに小矢部川流域より大きい程度であるが、農地率は圧倒的に小矢部川流域で大きいことが確認された。また、図-2 に3 河川の河川網と水路網を示す。図より、小矢部川と神通川には支流が多いが、庄川には殆ど存在しないと分かる。また、用排水路網については小矢部川が特に多く、庄川流域から取水された用水は排水路を通じて小矢部川へと流れ込む形となっている。

図-2 に、調査地点を黒点で示す。本調査では、目視ができる大きい浮遊ごみの河道内輸送数を把握するため、タイムラプスカメラとしてHYKE SP 3（HYKE社）を用いた。カメラは5台設置し、神通川では富山北大橋に1台（図-3）、庄川では高新大橋に1台、小矢部川では二上橋に2台と千保川合流部に1台に設置した。いずれも道路管理者より設置許可を受けた上でカメラの取り付けを行い、設置期間は2023年6月中旬ごろ（カメラにより異なる）から2024年3月末までの約10ヶ月間とした（一部カメラは設置延長申請中）。カメラ撮影は動画とし、タイムラプス間隔を5分、動画撮影時間を10秒、撮影時刻を4時から20時までとした。カメラの電源にはリチウム電池（6本/1台）を用い、1ヶ月ごとに電池交換とメモリーカードを回収によるデータ取得を行った。なお、R4年度は定点写真撮影を行ったが、R5年度は定点動画撮影を行っている。これは、10秒間の実際の浮遊ごみ通過量を数えることで、流量規模の

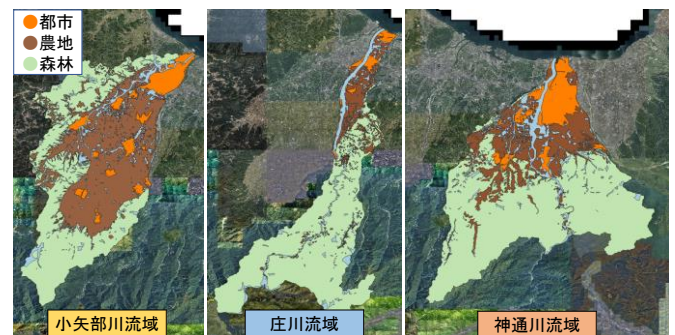


図-1 神通川、庄川、小矢部川の土地利用比較

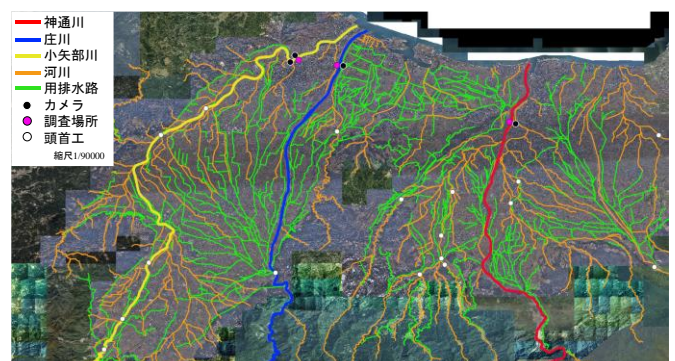


図-2 河川の河川網と用排水路網、調査地点（黒点の場所）



異なる調査日や河川間でのごみ通過数の比較を行うことを可能とするためである。

画像分析結果の一部として、平水時は晴天が続いた8月9日、出水時は撮影時間内（4時～20時）の間に雨が降った8月23日の結果を示す。浮遊ごみの判別は学習による自動判別を行う予定であったが、河道内に頻繁に白い泡が輸送される状況があり、ごみと泡の自動判別が難しいことから目視にて動画のごみ判別を行うこととした。この他、水位・流量データは水文水質データベース（国土交通省）より水位を取得し、富山河川国道事務所より提供頂いた暫定 H-Q 式を用いて時間流量を求めた。

図-4 に、平水時と出水時における1時間ごとの断面浮遊ごみ（人工物）通過数と時間流量を示す。図-4によると、平水時の神通川と庄川はごみが比較的少なく、1時間間隔で見たときにごみが確認できない時間帯も存在した。一方、小矢部川は平水時も常に幾つかごみが確認され、浮遊ごみが確認されない時間がほぼ存在しなかった。1時間換算ごみ数は、神通川・庄川では最大で約2000個、小矢部川では約3200個であった。次に、図-4より出水時を比較する。出水時は3河川ともごみが平水時と比べて増加する傾向が確認された。出水時の1時間換算ごみ数は、神通川、庄川、小矢部川にて最大約3400個、約4800個、約6800個であった。浮遊ごみ数は平水時と出水時のどちらも小矢部川が最も大きな値を示したと分かる。今回対象とした降雨は継続時間2時間、最大時間雨量9.5mmであった。出水時の小矢部川を詳しく見ると14時頃から流量が増加し（水位は約20cm上昇）、16時にピークに達した。浮遊ごみの輸送特性は、降雨開始直後から個数が増加し始め、出水前半に多くなるファーストフラッシュ型であった。

表-1 に、図-4 の値を合算して16時間通過断面数を求めた結果を示す。3河川の16時間浮遊ごみ通過数を比較すると、平水時であっても小矢部川のごみ数は多く、16時間で小矢部川は約1.7万個、庄川は約4千個、神通川は5千個の結果となった。仮にごみ数の昼夜変動と季節変動がなく、平水が365日継続したと仮定した場合、年間で河川から富山湾へと供給される浮遊ごみ数は、小矢部川で約930万個、庄川で219万個、神通川で273万個と推定されることとなる。本調査結果より、小矢部川にて圧倒的に浮遊ごみ数が多い結果は、神通川や庄川と異なり、小矢部川には規模が小さく河岸までアクセスしやすい支川が多いこと、庄川から取得した用水の排水経路がすべて小矢部川へ流れ込むことなど、小規模な開水路が流域内に広く分布しているためと考えられる。つまり、比較的サイズの大きい浮遊ごみは、都市化率よりも水域へのアクセスしやすさや地域住民の民度の問題などに由来するものと考えられ、川へ直接捨てられた、あるいは道路へポイ捨てされたような街中ごみが水路網を通じて小矢部川へたどり着き、六渡寺海岸位置する富山湾へと流れ込んでいるものと考えられる。

表-1 に、図-4 の値を合算して16時間通過断面数を求めた結果を示す。3河川の16時間浮遊ごみ通過数を比較すると、平水時であっても小矢部川のごみ数は多く、16時間で小矢部川は約1.7万個、庄川は約4千個、神通川は5千個の結果となった。仮にごみ数の昼夜変動と季節変動がなく、平水が365日継続したと仮定した場合、年間で河川から富山湾へと供給される浮遊ごみ数は、小矢部川で約930万個、庄川で219万個、神通川で273万個と推定されることとなる。本調査結果より、小矢部川にて圧倒的に浮遊ごみ数が多い結果は、神通川や庄川と異なり、小矢部川には規模が小さく河岸までアクセスしやすい支川が多いこと、庄川から取得した用水の排水経路がすべて小矢部川へ流れ込むことなど、小規模な開水路が流域内に広く分布しているためと考えられる。つまり、比較的サイズの大きい浮遊ごみは、都市化率よりも水域へのアクセスしやすさや地域住民の民度の問題などに由来するものと考えられ、川へ直接捨てられた、あるいは道路へポイ捨てされたような街中ごみが水路網を通じて小矢部川へたどり着き、六渡寺海岸位置する富山湾へと流れ込んでいるものと考えられる。

表-1 3河川における16時間浮遊ごみ通過数

|          | 小矢部川   | 庄川     | 神通川    |
|----------|--------|--------|--------|
| 平水時 8/9  | 17,640 | 3,960  | 5,040  |
| 出水時 8/23 | 19,260 | 11,520 | 13,140 |



図-3 河川に設置したタイムラプスカメラ(神通川の様子)

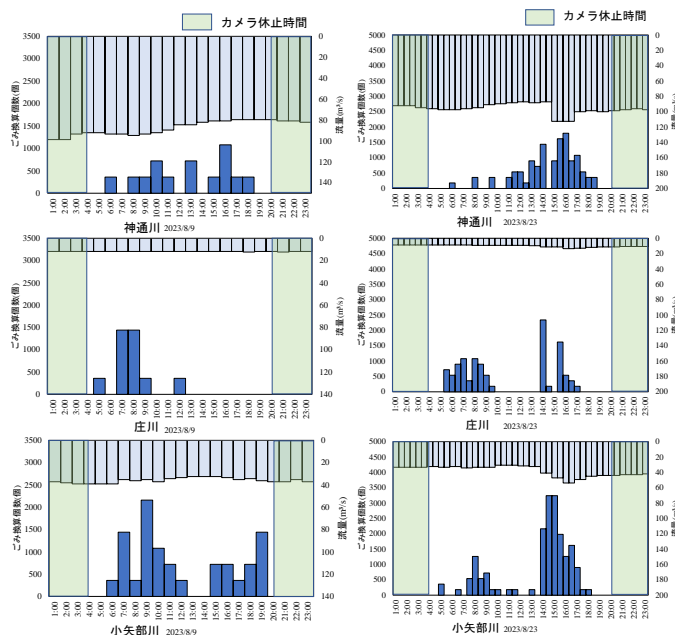


図-4 浮遊ごみ通過数と時間流量との比較

|          |  |         |   |
|----------|--|---------|---|
| 研究成果発表状況 | 雑誌論文、学会発表、図書、新聞掲載、作成 Web ページ、特許権等の出願・取得状況                          |         |   |
| 学会発表     | 磯谷健・久加朋子：富山県一級河川における浮遊ごみ輸送特性—神通川、庄川、小矢部川の比較—、土木学会中部支部大会 (2024/3/1) |         |   |
| 経費の執行状況  | 区分   | 執行額(円)  | 備考  |
|          | 物品費・作業補助謝金   | 304,000 | HYKE SP3 カメラ, マイクロ SD カード, リチウム電池多数, 作業補助謝金, 学会参加費等 |
|          | 学会参加費(土木学会中部支部)  | 8,000   |   |
|          | 旅費(土木学会中部支部)   | 48,000  |   |
|          | 間接経費   | 40,000  |   |

公益財団法人富山第一銀行奨学財団

理事長 横田 格 殿

## 助成研究成果概要報告書

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 教育機関名 : 富山県立大学                             | 助成金額 : 500 千円               |
| 研究代表者 : 中澤 暦                               | 所属 : 工学部 環境・社会基盤工学科 職位 : 講師 |
| 研究題目 : 水銀パッシブサンプラーを用いた富山県内の大気中水銀濃度の水平分布の把握 |                             |

## 研究概要

水銀はごく微量であっても生物へ影響を与える。ヒト健康に関する観点では、水銀を含む食品等を口から摂取する経口暴露と、水銀蒸気を吸入する吸入暴露が問題となる。そのため、サプライチェーンを通じた水銀の管理と環境中での動態の解明は喫緊の課題となっている。

水銀は火力発電や人力小規模金採掘活動 (ASGM) などによる人為的な排出や、火山活動やバイオマス燃焼などによる自然的な排出により大気に放出される。水銀が廉価であることから、発展途上国の ASGM 活動では金と水銀が合金を作りやすい (アマルガム) 性質を利用した金の精錬が行われており、精錬の過程で多量の水銀が使用されている。ASGM 活動場での大気中水銀濃度は WHO の大気中水銀のヒトへの吸入暴露の基準である  $1000 \text{ ng/m}^3$  を大きく超過することが分かっており、大気中水銀の観測とその知見の蓄積、ヒト健康リスクの評価手法に関する研究は重要である。

しかし、大気中水銀を観測する手法は限られている。一定量の大气を吸引することで大気中水銀濃度を観測するアクティブサンプリング法を用いた観測は、わが国でも公的機関が定期的の実施しているが、回数、地点ともに限られる。富山県内の場合、観測頻度は 1~2 か月に 1 回であり、観測地点は 6 地点である (一般環境区分として 2 地点、固定発生源周辺区分では 4 地点)。さらに、連続的な大気中水銀の観測を行う場合はアクティブサンプリング法のうち、商用電源が必要な水銀モニターを設置することが多い。これらの手法は多くの場合、商用電源供給が必須であることに加えコスト面で課題がある。そのため、代表地点で観測はできても、複数地点の同時観測は難しく、大気中水銀濃度の水平分布に関する知見は少ない。この課題を解決する一つの方法としてパッシブサンプリング法がある。パッシブサンプリング法は電源供給が不要であり、環境大気中にサンプラーを設置して大気を暴露させることで大気中水銀の観測が可能である。アクティブサンプリング法と比較して時間分解能は劣る場合もあるが、同時に複数箇所の大気中水銀濃度を観測できる利点がある。

本研究では、これまでに申請者らが開発してきた、大気中水銀のパッシブサンプラー (図 1) について実環境での実装を中心に進めた。すなわち、富山県内を中心として、付近に水銀の発生源がある地域を中心に大気中水銀のパッシブサンプラーを設置した。加えて、極域 (北極域・南極) や小規模金採掘が盛んな地域で、パッシブサンプラーを用いて観測した大気中水銀濃度の解析を行った。

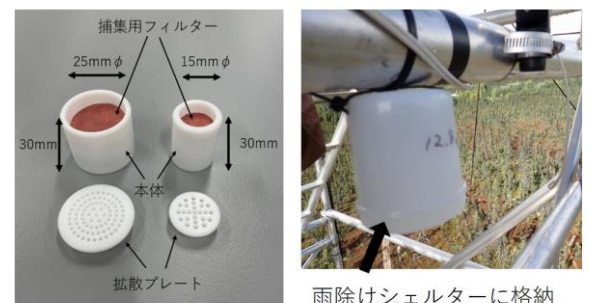


図 1 パッシブサンプラー (左) とその設置の様子 (右)

## 成果要約

＜富山県内における大気中水銀濃度の水平分布＞  
 富山県射水市内 30 地点に大気中の水銀を観測するための水銀パッシブサンプラーとアクティブサンプラーを設置し、大気中水銀の水平分布を明らかにした。調査地は人為的な攪乱の影響を受けにくい地点として神社や公園を中心に選定し、調査は 2023 年 5 月、7 月、10 月に実施し、暴露期間は 2 週間とした。2023 年 5 月に観測した大気中水銀濃度の結果を図 2 に示す。平均±標準偏差は、 $1.24 \pm 0.28 \text{ ng/m}^3$  であり、北半球のバックグラウンドレベル（おおむね  $1.5 \text{ ng/m}^3$ ）と同様のレベルであった。射水市内には大気中水銀の発生源となる可能性のある、石炭火力発電所とごみ焼却場が存在している。2023 年 5 月に観測した大気中の水平分布では地図上西部地域

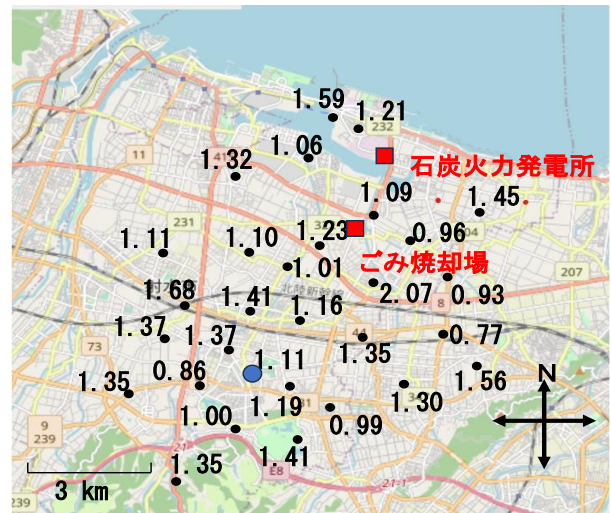


図 2 2023 年 5 月に観測した大気中水銀濃度 ( $\text{ng/m}^3$ ) の水平分布

で大気中水銀濃度が高濃度となる傾向がみられたが詳細は不明であり、今後解析を進めていく予定である。

＜極域および小規模金採掘地域における大気中水銀濃度の水平分布＞

極域のうち、南極昭和基地で 2021 年 1 月に昭和基地内にパッシブサンプラーを設置して観測した結果から、電力を供給する発電機棟、大型レーダー (PANSY) 用発電小屋、焼却施設付近で大気中水銀濃度が上昇する傾向を見出した。曝露期間における風向・風速（気象庁による観測データの提供を受けた）の解析を行うと、北北東風が卓越していた。大気中水銀濃度が高濃度となった地点について、風上側と風下側でパッシブサンプラーを設置したが、風上側では比較的濃度が低く、風下側で高くなる傾向がみられた。低濃度域であってもパッシブサンプラーが現場の大気中水銀濃度を反映していることが確認できた (Nakazawa and Nagafuchi, under review)。北極圏では 2023 年 8 月に University of Araska, Fairbanks 内の調査試験地で 18 m までの鉛直方向の大気中水銀の分布を観測し、2022 年の観測結果と合わせて解析を行う。さらに、小規模金採掘地域として、インドネシア・中央スラウェシ州パル市域で大気中水銀濃度の平面分布を観測したところ、金製錬が行われている地区からの距離に従って大気中水銀濃度が減衰する傾向がみられた。今後 2010 年の結果との比較評価を行っていく予定である。

|          |  |         |   |
|----------|--|---------|---|
| 研究成果発表状況 | 雑誌論文、学会発表、図書、新聞掲載、作成 Web ページ、特許権等の出願・取得状況  |         |   |
| 学会発表     | <ul style="list-style-type: none"> <li>・中澤 暦、永淵 修、Distribution of Atmospheric Mercury Concentration Observed at Artisanal Small-scale Gold Mining Area 第 15 回持続可能なアジア太平洋に関する国際フォーラム (ISAP2023) .</li> <li>・中澤 暦、永淵 修、末吉 哲雄、岩花 剛、大浦 一貴、アラスカデナリハイウェイ沿いのパルサ永久凍土中水銀濃度の鉛直分布とその水銀放出量について ArCSII 陸域課題研究報告会、2023.</li> <li>・中澤 暦、永淵 修、川上智規、大浦一貴、Isrun Nur, Basir-Cyio, Mery Napitupulu、水銀パッシブサンプラーの沈着速度の推定とその ASGM 地域での検証、地球化学会年会、2023 .</li> <li>・中澤 暦、水銀の環境中での動態- フィールドワークから見えてくること-、石油学会招待講演、2023.</li> </ul> |         |   |
| 経費の執行状況  | 区分   | 執行額(円)  | 備考  |
|          | 物品費  | 373,550 | 顕微鏡用デジタルカメラ<br>用コントローラ<br>実験用消耗品、野外調査<br>用具 |
|          | 旅費   | 76,450  | フィールド調査旅費                                   |
|          | 間接経費   | 50,000  |   |

公益財団法人富山第一銀行奨学財団

理事長 横田 格 殿

## 助成研究成果概要報告書

|  |               |         |
|--|---------------|---------|
| 教育機関名 : 富山県立大学                             | 助成金額 : 400 千円 |         |
| 研究代表者 : 野村 泰治                              | 所属 : 工学部生物工学科 | 職位 : 教授 |
| 研究題目 : 植物培養細胞における「休眠」二次代謝の覚醒による有用物質生産技術の開発 |               |         |

## 研究概要

植物が生合成する多種多様な二次代謝産物は、その生物活性／薬理活性や機能性に基づいて、医薬、化粧品、香料、食品などの様々な産業分野で利用されている。技術的およびコスト的制約のため化学合成による供給が困難なものは、今でも植物体からの抽出・精製によって供給されている。しかし、日本では原料植物の多くを輸入に依存しているため、国内での安定供給維持のために植物体に依存しない物質生産法の確立が強く求められている。また、現在は環境負荷の高い化学合成によって供給されているものについても、SDGs に準ずる環境にやさしい代替法での製造が強く求められるようになっている。

これらの課題の解決策の1つが植物培養細胞での物質生産である。しかし、植物を培養細胞化すると多くの場合、植物体でみられていた二次代謝の著しい減衰・消失が起こるため、植物培養細胞を利用した物質生産はほとんど実用化に至っていないのが現状である。したがって、植物培養細胞において休眠した二次代謝を覚醒させる簡便かつ汎用性の高い方法を確認することができれば、植物培養細胞を用いた有用物質生産の実用化は飛躍的に進むことが期待される。

培養細胞化に伴う二次代謝の減衰・消失の根本的な原因は、生合成酵素遺伝子(群)の転写サイレンシングであると考えられる。そこで本研究では、転写調節の根幹をなす「DNA 修飾」と「ヒストン修飾」に直接作用する「転写調節剤 (=エピジェネティック修飾剤)」を植物培養細胞に投与し、生合成遺伝子の転写を活性化することで、休眠している二次代謝を覚醒させる新たな技術を開発することを目的とした(図)。具体的には、種々の植物培養細胞を用いた「エピジェネティック修飾剤投与条件のスクリーニング」、「誘導物質の同定」、「生合成遺伝子の同定と転写調節剤による発現変動解析」を順次行い、エピジェネティック修飾剤投与による休眠二次代謝の覚醒の実証とそのメカニズム解明を行う。

これまでの研究で、本手法が単子葉植物であるホウライチク(タケの一種) Bm 培養細胞において有効であることを世界で初めて発見している。本研究においては、本手法の汎用性検証の一環として、双子葉植物であるタバコ BY-2 培養細胞をモデルとして実証実験を行い、双子葉植物においても本手法が有効であることを示すと同時に、エピジェネティック修飾剤の投与によって覚醒誘導された化合物の単離および構造解析を行った。

## 成果要約

ヒストン脱アセチル化酵素および DNA メチル化酵素の阻害剤を BY-2 懸濁培養細胞に投与し、二次代謝の覚醒誘導の有無を調べた。その結果、ヒストン脱アセチル化酵素阻害剤の一種である suberoyl bis-hydroxamic acid (SBHA) を投与した細胞において、4種の二次代謝産物の顕著な覚醒誘導が確認された。こ



図 本研究の作業仮説：ヒストンおよびDNAの化学修飾と遺伝子の転写および二次代謝の関係

核内において、DNAはヒストンタンパク質に巻き付いたヌクレオソーム構造をとっており、ヒストンおよびDNAの化学修飾は遺伝子の転写制御に重要な役割を果たしている。本研究では、「ヒストン脱アセチル化酵素阻害剤」および「DNAメチル化酵素阻害剤」を転写調節剤として投与し、人為的にヒストンのアセチル化レベルとDNAの脱メチル化レベルを上げることで、培養細胞において休眠した二次代謝を強制的に覚醒させることによる新たな物質生産技術を開発する。

のことから、エピジェネティック修飾剤の投与による休眠二次代謝覚醒法は、単子葉植物だけでなく双子葉植物も含めた植物種全般に広く適用可能な技術となる可能性が示唆された。

SBHA の投与による誘導物質の単離、構造解析の結果、それらはいずれもヒドロキシ桂皮酸誘導体であることが明らかとなった。これらの化合物の蓄積を指標として、さまざまなエピジェネティック修飾剤による二次代謝誘導能の比較解析を行った。その結果、ヒストン脱アセチル化酵素阻害剤については、suberoylanilide hydroxamic acid (SAHA) や trichostatin A (TSA) の投与によっても、SBHA 投与でみられた二次代謝の覚醒誘導が再現された。このことから、当初 SBHA の投与によってみられた二次代謝の覚醒誘導は、SBHA の副次的な作用によるものではなく、ヒストン脱アセチル化酵素の阻害作用によって、生合成遺伝子の転写が活性化したことによるものであることが強く示唆された。一方、DNA メチル化酵素阻害剤である zebularine の投与では二次代謝の顕著な覚醒誘導はみられなかった。このことから、少なくとも BY-2 細胞においては、二次代謝生合成遺伝子の休眠には DNA のメチル化レベルよりもヒストンタンパク質のアセチル化レベルが強く影響を及ぼしていることが示唆された。

今後は、SBHA 投与によって覚醒誘導された二次代謝産物の生合成遺伝子を同定した上で、SBHA 投与がそれらの転写レベルの上昇をもたらしていることを実証するとともに、複数の単子葉植物および双子葉植物の培養細胞を用いたエピジェネティック修飾剤の投与実験を引き続き進め、本技術の汎用性の検証を進めていく予定である。

|          |   |         |       |
|----------|---|---------|-------|
| 研究成果発表状況 | 雑誌論文、学会発表、図書、新聞掲載、作成 Web ページ、特許権等の出願・取得状況   |         |       |
|          | <p>【雑誌論文発表】</p> <p>1) 野村泰治、加藤康夫 (2023) ヒストンデアセチラーゼ (HDAC) 阻害剤による植物培養細胞の休眠二次代謝の覚醒. <i>バイオサイエンスとインダストリー</i>, 81 (4): 308-309.</p> <p>2) 野村泰治、加藤康夫 (2023) 植物培養細胞における二次代謝の休眠打破：新手法の発見と意義. <i>生物工学会誌</i>, 101 (11): 587-590.</p> <p>3) 野村泰治、加藤康夫 (2024) 植物培養細胞における休眠二次代謝の新たな覚醒法の発見 ～エピゲノムの改変による物質生産～. <i>化学と生物</i>, 62 (2): 67-75.</p> <p>【学会発表】</p> <p>1) 野村泰治、加藤康夫 (2023) 植物培養細胞における新たな休眠二次代謝覚醒技術による新規生合成酵素の発見. 第40回日本植物バイオテクノロジー学会.</p> <p>2) 野村泰治、加藤康夫 (2024) 植物培養細胞におけるエピゲノム改変を介した新たな休眠二次代謝覚醒法と新規クロゲン酸類生合成酵素の発見. 日本農芸化学会 2024 年度大会.</p> |         |       |
| 経費の執行状況  | 区分  | 執行額(円)  | 備考    |
|          | 消耗品費  | 360,000 | 一般試薬類 |
|          | 間接経費  | 40,000  | 光熱水費  |