

研究題目	ニュートリノのマヨラナ性の探索
機関名	富山県立大学
研究代表者	工学部 教養教育センター・准教授・石田裕之
分野	素粒子物理学理論
キーワード	ニュートリノ, マヨラナ, Belle II

1. 研究の背景と目的

この研究は、ニュートリノという素粒子にマヨラナ性と呼ばれる性質があるかどうかを明らかにするために行われる理論研究である。ニュートリノは電磁気の電荷をもたない素粒子であるため、地球の反対側の大気中で生成されたとしても地球を貫通してしまうほど反応をしづらいため、その性質は未だに謎に満ちていることが多い。

近年の実験精度向上により、ニュートリノの性質は少しずつ明らかになっている。その中でも、2015年に梶田隆章氏がノーベル賞を受賞したことから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。この受賞のきっかけになったのは、岐阜県飛騨市神岡町にある、スーパーカミオカンデという実験で、富山でもなじみが深いと思われる。

ニュートリノを除く、質量をもった素粒子は、2012年に発見されたヒッグス粒子を用いたヒッグス機構と呼ばれる機構で説明が可能となる。これは、もともとゲージ粒子と呼ばれる力を媒介する素粒子の質量を説明するために導入された機構であるが、ヒッグス粒子という素粒子と左手系（左巻きと呼称）と右手系（右巻きと呼称）の素粒子が結合をすることで、原子核のもととなっている物質粒子の質量も説明が可能であることが指摘されたことにより、すべての質量をもった素粒子の質量の統一的起源として最有力のものであり、今日までの実験結果は、素粒子のヒッグス粒子が予言するものと無矛盾である。

ところが、素粒子標準理論が構築されてからずっと、ニュートリノには右手系のもの（以後、右巻きニュートリノと呼称）は導入されてこなかった。最も大きな理由は、近年になるまでニュートリノに有限の質量があることがわかっていなかったため、右巻きニュートリノは必要なく、実験的に存在が確定していた左巻きニュートリノのみが重要であったことにある。よって、ニュートリノの質量を説明するための、素粒子標準理論を拡張する方法は、右巻きニュートリノの導入である。しかし、このような単純な拡張だけではすべてを解決するに至らなかった。

先述の通り、質量をもった素粒子はヒッグス機構によって質量を獲得する。ヒッグス機構は、非常に高温高压のビッグバンと呼ばれる状態から宇宙が始まったときを時刻ゼロとすると、おおよそ 10^{-14} 秒（1秒の100兆分の1、ちなみに現在の宇宙の年齢は約138億年）まで冷えたときに起こったとされている。つまり、ビッグバンからこの時刻まで、すべての質量には質量がなかった。この質量を禁止する原理をゲージ対称性と呼ぶ。ゲージ対称性は素粒子標準理論を構築する上での、非常によい指導原理となっており、この対称性から予言される物理現象は、

これまでの数多くの実験と無矛盾となっている。ヒッグス機構はゲージ対称性を自発的に破ることができるために、質量を生成することができる。

一方、右巻きニュートリノは、ゲージ対称性とはまったく無関係に導入することが可能である。そのため、唯一常に質量が許された物質粒子になってしまう。この問題点は、ゲージ対称性という指導原理を失ってしまっているために、右巻きニュートリノの質量を決める術がないことにある。それにより、原理的にはどのような質量を考えてもよい。実験的にも、右巻きニュートリノの質量を制限できるものは存在していない。このように、右巻きニュートリノを素粒子標準理論に導入すること自体に不定性が大きく、それによって予言も大きく異なってくるため、ニュートリノの質量獲得機構を決定するためにも、多角的なニュートリノの性質の決定というものが必要となっている。

本研究は、ゲージ対称性に縛られない素粒子が備えている特筆すべき性質である、マヨラナ性という性質を探ることにある。ニュートリノがこのマヨラナ性を有しているかどうかを決定することができれば、右巻きニュートリノの質量の決定に一役買うことができるためである。

2. 研究方法

研究を実施するために、neutrino Minimal Standard Model (以後、 ν MSM と呼称) と呼ばれる模型[1,2]を採用する。この模型は素粒子標準理論の右巻きニュートリノによる最小拡張模型となっているが、ニュートリノの質量だけではなく、宇宙暗黒物質候補となる素粒子が含まれていること、宇宙物質反物質非対称性の起源を説明できることが指摘されており、非常に魅力的である。素粒子標準理論の物質粒子には世代と呼ばれる繰り返しがあり、これまでの実験によって3世代があるということがわかっている。 ν MSM に導入されている右巻きニュートリノも3世代で、他の物質粒子と同様になっている。

さらに、 ν MSM には特筆すべき特徴がある。それが、右巻きニュートリノの質量である。この模型は、右巻きニュートリノの質量を約 100 GeV (ギガ電子ボルト)、陽子の約 100 倍の質量、よりも軽いところに仮定している。世界的にもこのような試みの元行われている研究は少なく、非常に独創的なものとなっている。この仮定により、近い将来における右巻きニュートリノの直接検出も期待できる。

これまでに、 ν MSM の枠組みにおけるマヨラナ性の検証として、ニュートリノの放出を伴わない二重ベータ崩壊 (以後、 $0\nu\beta\beta$ と呼称) に対する予言の研究 [3,5-7] や、レプトン数 (マヨラナ性をもった素粒子が媒介すると保存しなくなる物理量) と呼ばれる量に変化するような物理過程の観測可能性の研究[4]を行ってきた。いずれも観測に成功すれば、マヨラナ性をもった素粒子の存在証明となる。

後者は将来実験による検証可能性について言及しているため、今後の観測が期待される。前者も、現在世界の数か所で実験が行われているが、今のところ発見には至っていない。しかも、右巻きニュートリノの影響によって、 $0\nu\beta\beta$ がこれまで思っていたよりも頻繁に起こる可能性があるため近い将来検出できる場合[3]と、もしかしたら $0\nu\beta\beta$ はまったく起こらず、今後まったく

観測できない可能性がある場合[5-7]という相反する可能性が、パラメータ空間の違いによって実現されうるということがわかった。起こる頻度が上がるのであればいずれ実験が発見をするのが、起こらないということを証明することは困難で、右巻きニュートリノの影響によるものかどうかの判断ができなくなってしまう。そこで、 ν MSM の特徴を生かし、右巻きニュートリノを直接生成し、レプトン数の変化がある過程の詳細を調べるという[4]の可能性を、さらに広げることとした。

3. 研究成果

これまでに、近隣の研究者と共に、右巻きニュートリノの実験における生成確率、またはこれまでに議論されたことのない検証過程が存在しないかどうか、ということ調べた。特に、日本のつくば市にある高エネルギー加速器研究機構で行われている Belle II 実験において、右巻きニュートリノを検出することができないかということターゲットにすることとした。Belle II 実験では、電子とその反粒子である陽電子を世界最高の衝突頻度で衝突させ、そこから生成される粒子を世界最高精度の検出器によって調べている。そこで生成される粒子の中で、最も数が多いものは B 中間子と呼ばれる複合粒子である。この B 中間子は、陽子の約 5 倍の質量をもっており、その崩壊によって様々な素粒子が生成されることも知られている。

議論を重ね、Belle II 実験で生成される B 中間子という複合粒子の崩壊から、D 中間子と荷電レプトンと左巻きニュートリノが生成される過程に、右巻きニュートリノが紛れ込む可能性に期待ができるということが判明した。そのため、着目した過程において、右巻きニュートリノがどのような影響を及ぼすのか、ということ、数値計算により予言するための準備をしている。また、右巻きニュートリノが実験の検出器内で信号を出さない可能性も考えられるので、レプトン数が増える信号を出す場合と出さない場合に分けて解析を進める必要があることが判明した。

4. 今後の展望

今後は、ターゲットにしている過程が、Belle II 実験がデータをためていく中でどれくらい期待できるのかという予言を、右巻きニュートリノが検出器内で信号を出す場合と出さない場合それぞれで数値計算を行い、検出により決定できる右巻きニュートリノの性質をまとめ、論文として発表をすることを目標とする。

それだけではなく、今回考えた過程以外の過程においても、特徴的なものがないかを調べ、より多角的に右巻きニュートリノの存在を調べることにより、日本でニュートリノのマヨラナ性を検証することができるための足がかりにしたい。

ニュートリノという、富山ともなじみの深い素粒子に関する最大の謎である、質量生成機構の起源の解明をするためにも必須であるマヨラナ性の探索を、持続的な研究により明らかにしていきたい。



5. 参考文献

1. T. Asaka, S. Blanchet and M. Shaposhnikov, “The ν MSM, dark matter and neutrino masses” , Physics Letters B **631**, 151-156 (2005)
2. T. Asaka and M. Shaposhnikov, “The ν MSM, dark matter and baryon asymmetry of the universe” , Physics Letters B **620**, 17-26 (2005)
3. T. Asaka, S. Eijima and H. Ishida, “On neutrinoless double beta decay in the ν MSM” , Physics Letters B **762**, 371-375 (2016)
4. T. Asaka and H. Ishida, “Lepton number violation by heavy Majorana neutrino in B decays” , Physics Letters B **763**, 393-396 (2016)
5. T. Asaka, H. Ishida and K. Tanaka, “Hiding neutrinoless double beta decay in the minimal seesaw mechanism” , Physical Review D **103** no.1, 015014 (2021)
6. T. Asaka, H. Ishida and K. Tanaka, “What if a specific neutrinoless double beta decay is absent?” , Progress of Theoretical and Experimental Physics **2021** no.6, 063B01 (2021)
7. T. Asaka, H. Ishida and K. Tanaka, “Neutrinoless double beta decays tell nature of right-handed neutrinos” , Journal of High Energy Physics **07**, 062 (2023)

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
機関名	富山県立大学
研究代表者	工学部知能ロボット工学科・教授・小柳健一
分野	理工系
キーワード	ロボット, ソフトハンド, 制御

1. 研究の背景と目的

研究代表者らの所属学科では、機械・電子・情報工学の広範な知識と幅広い視野を備えた人材を育成している。ロボットがそれらの工学を統合した代表ということもあり、本学部のイメージキャラクターであるドンマス教授をモチーフとしたロボットを開発した[1]。図1に示すドンマス教授ロボットは、体高が140cmを超える比較的大きなロボットで、車輪による移動機構と腕および開閉できる手を備えており、外見は富山県の特産であるサクラマスが立ってスーツを着ているように見える。

これまでに前進や旋回などの移動、指定したセリフの発話、腕の上げ下げなどの動作を実装しており、周囲とのインタラクション性を高めるために握手動作を加えることとした。これらは1つのGUIを介して1人で操作ができるが[2]、機能が増えたために1人では滑らかに操作しきれない恐れがある。例えば図2に示すように、廊下にいるロボットが、室内ではなく廊下にいる他者に呼び掛けて近づき握手する行動を考える。これは人間には平易な行動であるが、実際には、自己位置推定→周囲のものの把握→呼びかけ等のコミュニケーション→移動→腕の動作→把持（握手）という機能を連綿と滑らかに実行しており、1人で操縦するのは容易ではないが、一方でロボットに自律的に行わせるのはかなり難易度が高い。



図1 ドンマス教授ロボット

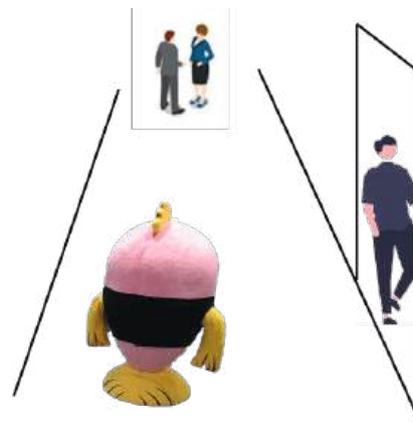


図2 廊下で人に近づいて握手する状況

そこで本研究では、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[3]、手も当然柔らかい。また、把持対象である人間の手も柔らかい。すなわち、ソフトロボットによる柔らかいものの自律的把持であるが、ただの物体把持と異なり、相手の手を「よい感じに握る」ことが要求されるため、さらに難易度が高い。いわゆる産業用ロボットのハンドや、人を模してシリコーンゴム等で被覆した手指を持つロボットハンドで行う把持制御は、以前からされている。本研究では、スポンジやボア生地のような、より柔軟な材料で覆われた場合を取り扱う。この場合の把持力は、材料の変形に伴って変化し伝達され、力フィードバックによる動作制御を困難にしている。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手法の開発を目指す。その他、図2のような行動に必要な、周辺の物体検知など他の技術要素も開発する。

2. 研究方法

ドンマス教授ロボットの腕は図3に示す構造をしており、腕の先についた2つの白い板状部品が手を構成する。上側の板が手の開閉をするモータのロータにつながり動く。そのため、図4のような握手を想定すると、この板と外装の間に力センサを内蔵することになる。このような構造の場合、手に受けた力は外装を変形させ、力センサ以外の方向に力を逃がしてしまい、力の大きさを正確に計測できない恐れがある。これに対し、複数の力センサを離して配置することで、その大きさを補償する手法が考えられる。しかし、この場合にも外装の変形により、法線方向とせん断方向の力を分離できない場合が考えられる。ここで、図5のように計測箇所の四隅に力センサを配置すると[4]、外装の変形を介して計測された力は、定常状態のせん断方向成分は内力により打ち消されると見込まれる。一方、法線方向成分は各センサの法線方向成分の総和だけでは誤差が生じるが、それを人間が認識できるかが問題となる。そこで、法線方向成分の総和と同じになるように握る力を制御し、実際に人が握って確かめた。



図3 ドンマス教授ロボットの腕の内骨格



図4 ドンマス教授ロボットとの握手

自律的な把持動作の実装と確認のため、握手に必要な他の機能も実装する。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図6のように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[2, 5]。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した。

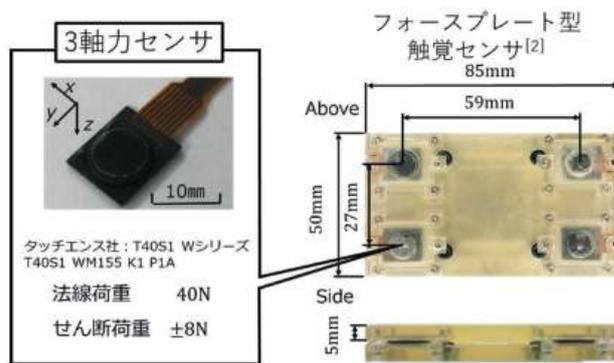


図5 手部における力センサと配置

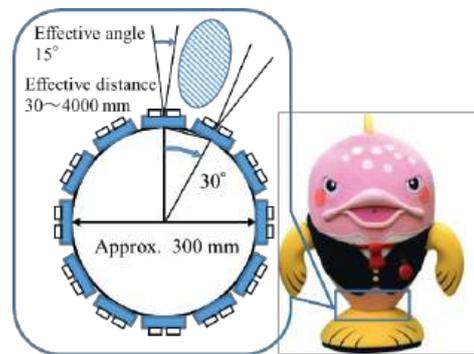


図6 超音波センサとその配置

3. 研究成果

手のひらに当たる部分に図5のような4つの3軸力センサを取り付けたドンマスの手を開発した。把持制御に先立ち、外装の硬さを計測した。一般的なデュロメータで外装内部の構造材にあたるポリウレタンの硬さを10回計測したところ、平均値は84であった。クッション材となるウレタンフォームは、平均値は55であった。すなわち、外装そのものにおいても、層に応じて硬さが異なることが確認できた。

ドンマス手を外界に固定し、力センサの逆側からフォースゲージで引くことで力を掛け、力センサの計測値とフォースゲージの値を比較した。力センサの値はフォースゲージの値に比べて2割前後小さく現れるが、再現性が低いことが分かった。

12個の超音波センサを図7のように胴体下部周囲に配置し、周辺の物体検知を行った。図8には、誘導対象者を模擬し物体との距離を検出した結果を示す。これよりロボットとの相対速度を算出し、さらにロボットの移動速度を加味して、図8のように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。ロボットの移動方向を速度の正の向きとすると、図8は誘導対象者の移動速度が正であるため、誘導対象者は誘導についてきていると言える。一方、誘導対象者の移動速度が負の場合には誘導についてこず、離れていってしまっていると言える。実験では、一定以上の距離が離れた時に誘導対象者の移動速度が負であれば、誘導対象者は離れていっていると検出するアルゴリズムとして、確かに離れていくことを検出できた。

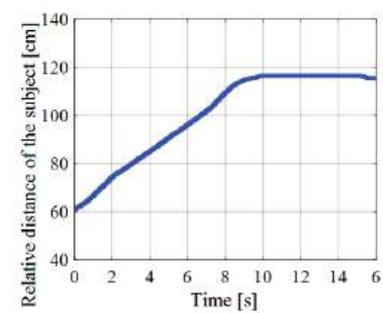


図7 誘導対象者との距離の検出

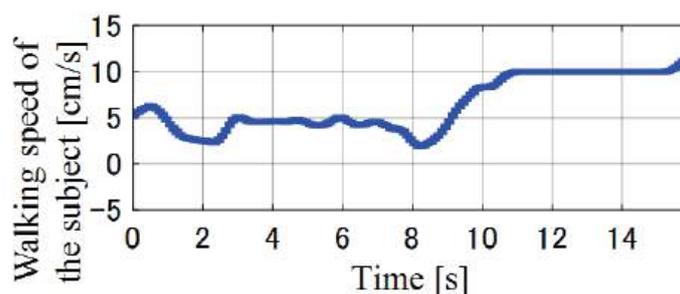


図8 対象者の歩行速度の推定

4. 今後の展望

今後、まずは各個に開発した要素技術を統合し、ドンマス教授ロボットを完成させる。特に対象者に近づき、握手をして、目的地に誘導する行動アルゴリズムを完成させ、実験により確認する。

本研究は、柔軟な素材の内部にある力センサの値を用いて安定な力制御をしようというものであるから、ドンマス教授ロボットのような対人ロボットだけではなく、果物など食品を含む柔軟物体のハンドリングを行う業種で一般的に応用できる技術である。県内の農業の自動化や効率化は火急の課題であるが、ロボットの導入は遅れている。富山県の果樹研究センターを訪れた際にも聞いたことであるが、価格の問題だけではなく、性能が不十分という問題もあり、例えば柔らかい果物の収穫作業はいまだロボットには難しい。本研究の成果は、そのような農業分野への応用も期待でき、富山県の活性化にもつながる可能性を持つ。

5. 参考文献

- [1] 小柳健一，増田寛之，村林知明，大島徹，本吉達郎，澤井圭，玉本拓巳，「大学での教育や広報を目的とした「ドンマス教授ロボット」の開発」，第29回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集，A083 (2019)。
- [2] Tatsuya Takahashi, K. Koyanagi, Hiroyuki Masuta, Fengyu Li, Kentaro Noda, Takuya Tsukagoshi and Toru Oshima, “Development of integrated control system for life-size mascot robot,” Proceedings of the SICE Annual Conference 2023, pp.856-858 (2023).
- [3] 小柳健一，野田堅太郎，大島徹，増田寛之，塚越拓哉，子嘉美，木谷尚美，「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)。
- [4] 竹田陽平，野田堅太郎，塚越拓哉，玉本拓巳，小柳健一，大島徹，「ソフトカバー付きロボットハンドのための把持力計測」，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020講演論文集，2A1-J09 (2020)。
- [5] 「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)。

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
機関名	富山県立大学
研究代表者	工学部 環境・社会基盤工学科・准教授（現教授）・呉 修一
分野	水工学
キーワード	洪水予測, 中小河川, 富山, デジタルツイン

1. 研究の背景と目的

この研究は、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。

上記の課題に加えて、上流域や中小河川は測量が困難であることもあり、基礎的調査データの不足から、洪水氾濫解析に制約があることが課題となっている。よって、本研究では、富山県の中小河川を対象として、洪水氾濫解析を行い富山県中小河川の洪水氾濫解析に必要なデータの確認や解析手法の検討を行う。特に近年整備されつつある1m高解像度のLPデータを用いる。これにより、中小河川における洪水氾濫解析の精度向上に向けて必要なデータを明らかにすることも目的とする。

2. 研究方法

本研究では富山県の二級河川である上庄川（図-1）を対象とする。上庄川は、流域面積 70.6 km²、県管理区間幹川流路延長 15.3 km の氷見市最大の二級河川である。また流域の大部分は山地で集落が点在しており、河口付近は氷見市の中心地として栄える中山間地河川に属する。

本研究は、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つがメインとなっている。以下、それぞれの概要を記す。



図-1 対象流域の概要および観測所の位置

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

本研究の使用データとして国土交通省観測所水位および雨量データ，雨量データより算出した流域平均雨量，予測雨量である気象庁メソアンサンブル予報システム(MEPS)を使用した。流域平均雨量は，流域内の雨量データを用いてティーセン法より算出した。MEPS のデータは上庄川流域内から格子点データを抽出し，それらの単純平均とし流域平均雨量として用いた。MEPS のデータは，アンサンブル数が 21 メンバーである¹⁾。また，MEPS は 3 時間間隔で予測されるため 1 時間間隔となるよう時系列補正を行った。このデータを用い，数値予測データが水位予測に与える影響評価を行う。

深層学習は入力層，中間層，出力層といった複数の層を持つ学習手法である。本研究では，時系列データを考慮した深層学習のモデルを用いた。入力データとして，ピーク水位が最も大きい洪水イベントにおける水位データ 1 地点および雨量データ 3 地点を用いた。洪水イベント期間は，水位データおよび雨量データより算出した流域平均雨量より決定した。

水文流出モデルには，呉ら²⁾の降雨流出モデルを用いた。河道部の洪水追跡計算には，1次元不定流計算を使用した。土地利用データや流域データを用いて降雨流出計算を行い，その結果から算出される流量を，洪水追跡計算への横流入として入力した。また，洪水追跡計算には，泉大橋水位観測所付近の横断面データを導入した。

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

データ検証では，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，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検証する。降雨

は「中小河川洪水浸水想定区域作成の手引き(第2版)」に基づき、想定最大規模降雨を使用する。想定最大規模降雨量は、継続時間24時間の各河川流域面積に合わせて算定した。降雨強度式を用いて中央集中型降雨波形を作成し、総降雨量が想定最大規模降雨量となるよう等倍率での引き延ばしを行った。

降雨流出モデルには、呉ら²⁾の土壌・地形特性に基づく降雨流出計算手法を用い、想定最大流量を算定した。河道部の洪水追跡計算には一次元不定流計算を用いる。また、堤内地の洪水氾濫解析には二次元不定流計算を用いる。河道の粗度係数は0.033で一律に与えた。河道横断面や破堤箇所は以下の方法により設定した。

利用可能なデータとしてLPデータを検討する。また、河道横断面は、既存データ、LPデータ(1m)、現地測量成果データを使用し、Case 1, 2, 3の3ケースに分けて設定する。Case 1は、LPデータ(5m)やGoogle Earthを基に目視で作成したラフな河道横断面を設定する。Case 2は、LPデータ(1m)を基に作成した高精度な河道横断面を設定する。Case 3は、LPデータ(1m)に加え、現地測量成果データを用いて河道横断面を作成したもので、現状ベストであると考え。堤内地の地形標高には、国土地理院LPデータ(5m)を使用する。

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可視化方法の検討では、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様々な可視化方法を検討した。

3. 研究成果

それぞれの研究成果を以下に記述する。

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

実績雨量による水位予測として、対象期間を2021年8月12日11:00~2021年8月14日15:00の出水とし、実測値と予測値を比較した。深層学習および水文流出モデルにおける水位予測の結果と実測水位との比較を図-2に示す。深層学習では、水位波形の上昇部、低減部ともに良好に再現できていることがわかる。また、予測結果の水位波形は、実測値の波形とおおむね等しい結果となった。しかし、ピーク時に実測値と予測値で差異が生じている。水文流出モデルでは、ピーク時の水位がおおむね等しいことがわかる。また、実測値より水位波形にずれが生じており、実際より早く水位予測ができることがわかる。しかし、ピーク後の水位が実測値よりも低い結果となった。両手法を比較すると、深層学習の方が水文流出モデルより比較的高い精度で予測できている。深層学習では水位データを使用しているため、精度の良い結果が得られたと考える。水文流出モデルでは河道横断面の不足が、結果に影響したものだと考える。

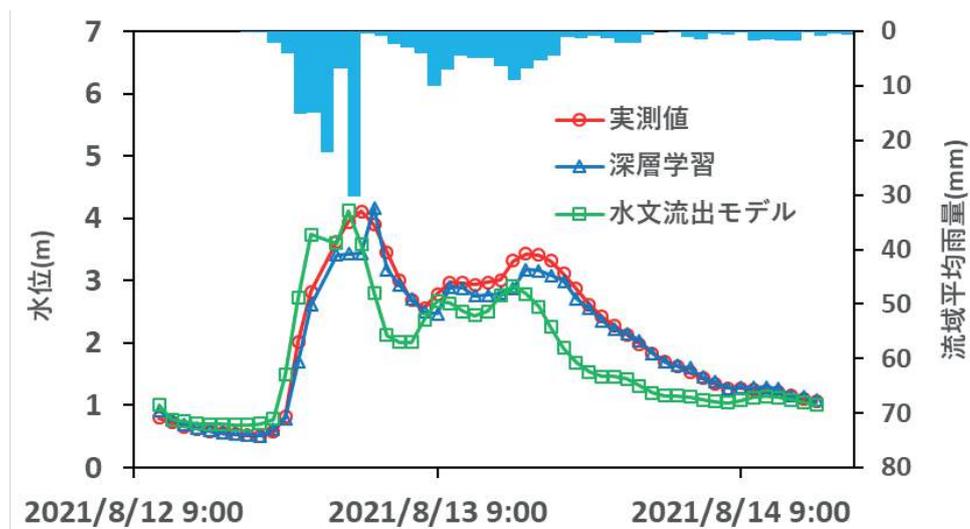


図-2 実測雨量による1時間先の水位予測結果

予測雨量による水位予測として、対象期間を2019年8月30日4:00～2019年8月31日18:00の出水とし、実測値と予測値を比較した。深層学習における水位予測の結果を図-3に示す。ピーク時にばらつきが大きくなったが、少ないメンバーで1時間先のピーク水位をとらえられた。しかしながら、水位の立ち上がりをとらえられていない。これは水位データがおいついていないためと考える。水文流出モデルにおける水位予測の結果を図-4示す。全体的なばらつきが大きいが、2つのメンバーで水位上昇をとらえることが出来た。

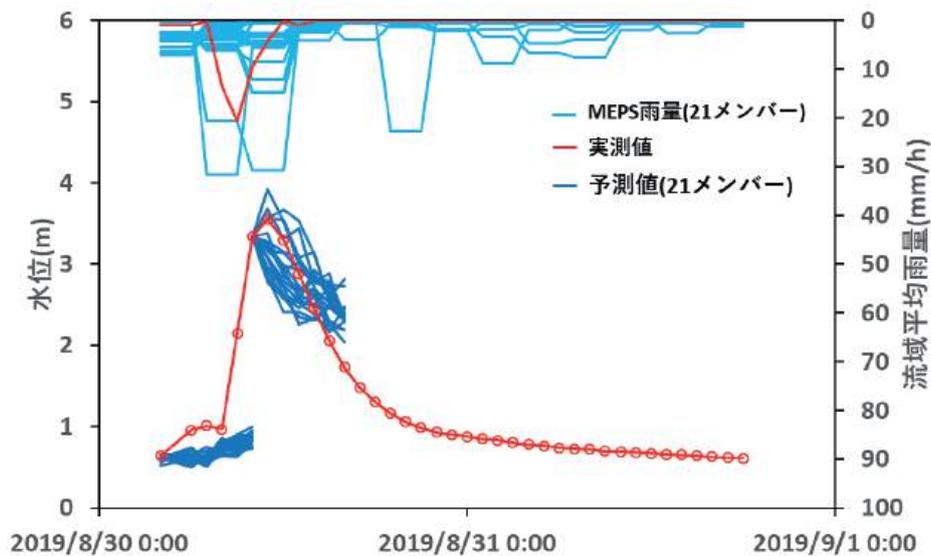


図-3 深層による1～6時間先の水位予測

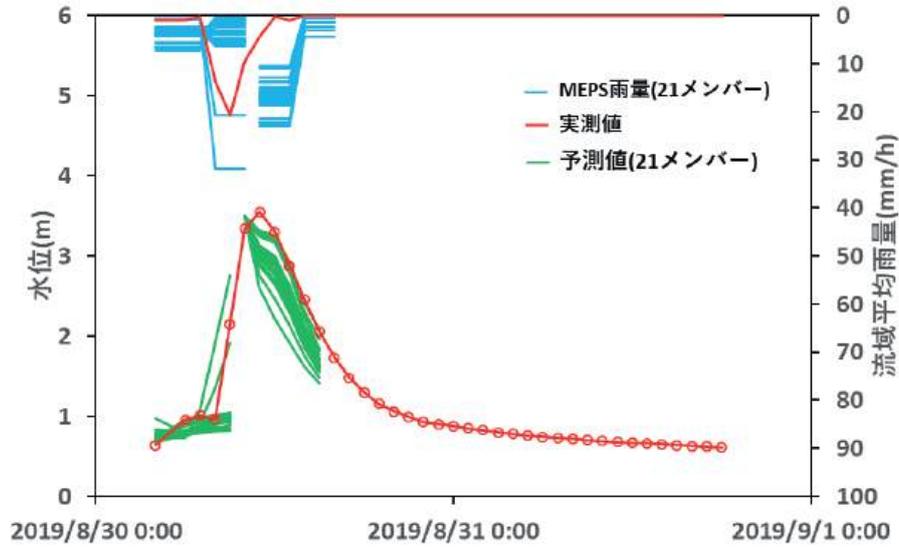


図-4 水文流出モデルによる1～6時間先の水位予測

まとめとして両手法を比較すると、深層学習の予測は、短時間先の予測では水位データのおかげで高精度な予測が可能だが、長時間先の予測では水位データが追いつかず精度が低下する。水文流出モデルの予測は、予測雨量データに依存するため、短時間予測では深層学習より精度が低い。予測雨量の精度があがれば長時間先の予測は深層学習より精度が高くなる。アンサンブル予測を行うことで、少ないメンバーは洪水を事前に予測可能となる。しかしながら、降雨予測の精度が中小河川では現状低いため、現状洪水予測が難しい状況である。

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 case を用いて洪水氾濫計算を行った。計算結果の一例を図-5 に示す。Case2, 3 と比較して Case1 の浸水範囲が最も大きい結果となった。Case1 のようにラフな河道横断面を設定した場合、過大な結果となることが考えられる。また、Case2, 3 において概ね一致する結果が得られたため、LPデータによる河道横断面で十分な洪水氾濫解析を行うことが可能であると考えられる。このように、河道横断面図は、洪水氾濫解析の結果から Case1 のような目視等による仮設では不十分であることがわかった。LPデータの精度検証結果や解析結果から、LPデータにより河道横断面図の再現が可能であり、十分な精度を有する洪水氾濫解析を行うことが可能である。

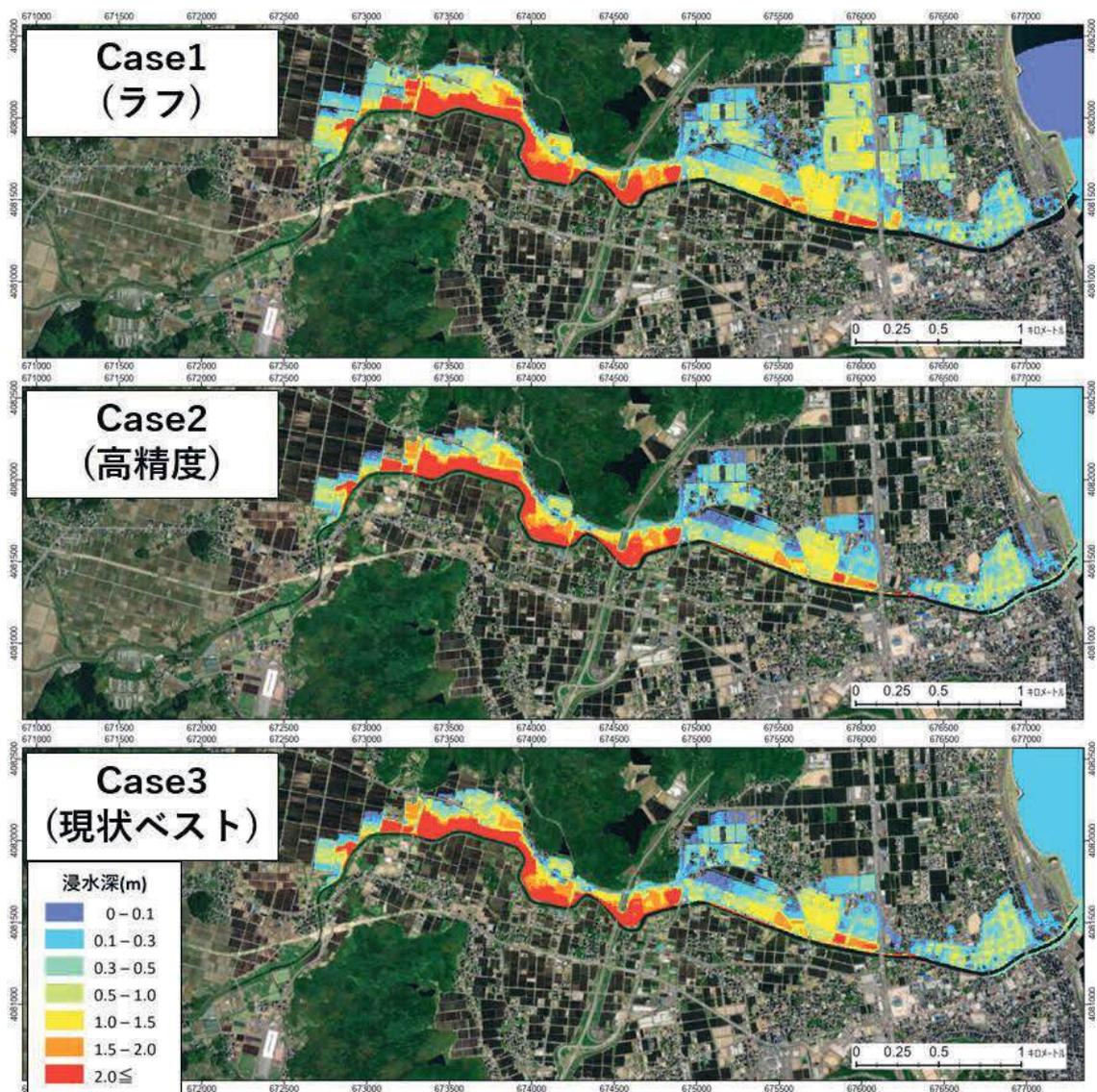


図-5 上庄川下流における洪水氾濫解析結果

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-6 に示す。また，3D での洪水氾濫解析結果の可視化結果を図-7 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-6 家屋の分布を背景とした氾濫解析結果

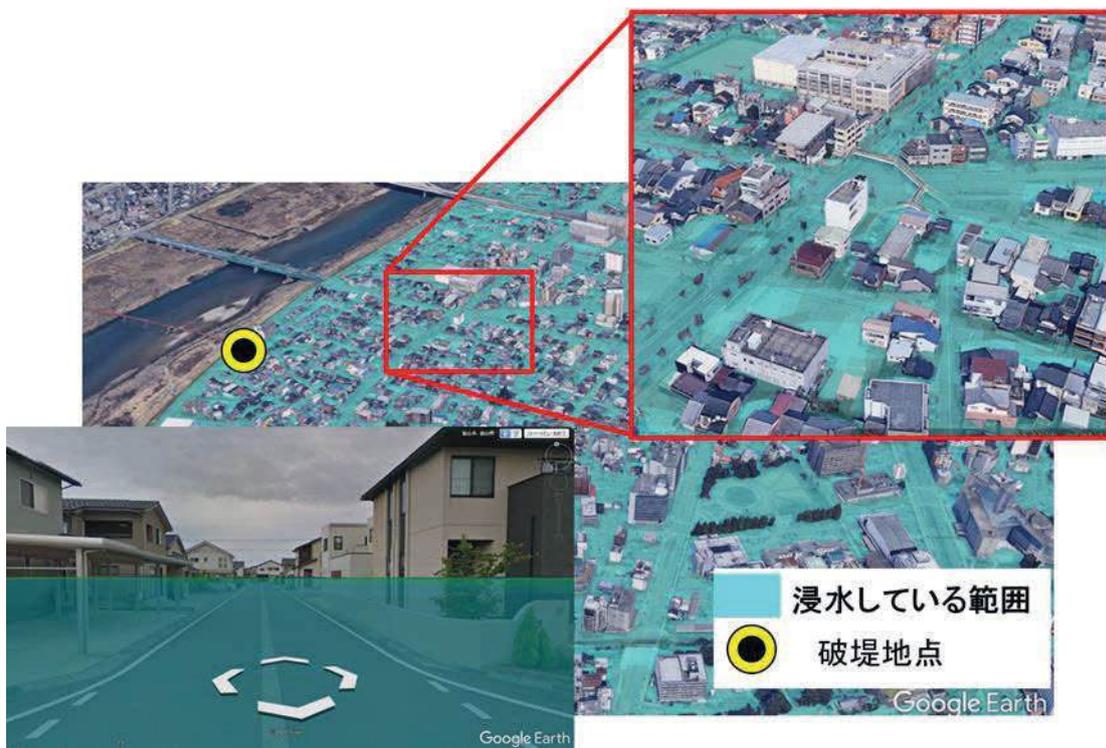


図-7 氾濫解析結果の3D表示とGoogle Earth上での表示

4. 今後の展望

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。そのために、降雨予測の精度向上が必要となる。これは気象庁などの技術改良に期待したい。また、急流河川での破堤箇所をリアルタイムで予測・監視するシステムの開発に取り組むことで洪水予測から破堤箇所の抽出につなげたい。このために、河道の滯筋をドローンで撮影・監視し、2次元の河床変動計算を実施することで、破堤を予測する。これより、富山でのリアルタイム洪水氾濫解析が可能となる。これら予測結果の可視化を3次元で VR や CG で表示することで、デジタルツインでの洪水予測が現実のものとなってくる。

5. 参考文献

1. 一般財団法人 気象業務支援センター, メソアンサンブル数値予報モデル GPV (MEPS), <http://www.jmbc.or.jp/jp/online/file/f-online10250.html> (2024年6月21日閲覧)
2. 呉修一, 山田正, 吉川秀夫: 表面流の発生機構を考慮した斜面多層降雨流出計算手法に関する研究, 土木学会水工論文集, Vol.49, B-2, pp.169-174, 2005.

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
機関名	富山県立大学
研究代表者	工学部 環境・社会基盤工学科・准教授（現 教授）・黒田啓介
分野	環境工学
キーワード	有機フッ素化合物、地下水、湧水、水道水、下水マーカ

1. 研究の背景と目的

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、結合力が非常に強い炭素-フッ素結合を持つ人工化合物の総称である^{1,2)}。撥水・撥油性、耐薬品性、耐熱性など優れた性質があるため、撥水加工・防汚加工製品や、泡消泡剤などに幅広く用いられてきた²⁾。一方、PFAS は別名で永遠の化学物質（フォーエバー・ケミカル）とも呼ばれ、環境中で拡散しやすく、かつ極めて分解しにくい性質がある¹⁾。PFAS の中でも、特にパーフルオロオクタンスルホン酸（PFOS）やパーフルオロオクタン酸（PFOA）が主に使われていた。しかし、難分解性、生物蓄積性、生態毒性が懸念され、PFOS は 2009 年に、PFOA は 2019 年に残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約（POPs 条約）に追加され、規制対象となった¹⁾。そのため、現在は PFOS や PFOA の代替として炭素鎖が短いパーフルオロヘキサンスルホン酸（PFHxS）、パーフルオロブタン酸（PFBA）、パーフルオロペンタン酸（PFPeA）などの使用が増加している²⁾³⁾。

近年は環境水からの PFAS の検出が報告されているが、Sims et al. (2022) の総説によると世界の地下水中の濃度中央値は表流水の濃度中央値の 4 倍以上高く¹⁾、地下水の PFAS 汚染は世界的に懸念されている。一方、地下水利用が盛んな富山県では PFAS 濃度データが極めて少ない。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 地点ずつしかなく、対象物質も PFOS、PFOA、PFHxS の 3 物質のみであった^{4,5)}。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。

2. 研究方法

2023 年において富山県内で湧水 15 箇所、地下水 6 箇所、水道水 1 箇所の計 22 か所の環境水

を採取した。PFAS の測定方法は Kobayashi et al. (2022) の論文を参考に決定した⁶⁾。PFAS の前処理に関しては、ろ過、固相抽出、カラム洗浄、カラム乾燥、溶出、濃縮、再構成の順で行った。具体的には、ろ過は Whatman 製の粒子担持率 1.0 μm のガラス繊維ろ紙 GF/B を使用してろ過済み水試料 1L を作成した。固相抽出では、Waters 社の WAX Plus Short カートリッジ (225 mg) を使用した。カートリッジのコンディショニングのため、0.1%アンモニア水/メタノール溶液 4 mL、メタノール 4 mL、精製水 4 mL を流した。その後、ろ過済み試料水 1 L を流速 5 mL/min でカートリッジに通水した。通水後、純水 5 mL を用いて試料容器を洗浄し、カートリッジに通水した。その後、固相抽出カートリッジを 30 分間乾燥させた。その後、0.1% アンモニア水/メタノール溶液 5 mL をカートリッジに流し、溶液を 10 mL 褐色バイアルで受けた。褐色バイアルを 40°C のヒーターに移し、窒素ガスを用いて、残っている液を 0.45 mL まで揮発させた。残量に応じてメタノールを加え、全量を 0.5 mL に再構成した。固相抽出と LC-MS/MS 分析における回収率をそれぞれ調べるために、固相抽出前と再構成前に 100 $\mu\text{g/L}$ の内部標準 ES と IS をそれぞれ 50 μL 添加した (添加量 5 ng)。

人工甘味料及び医薬品類の前処理に関しては、ろ過、pH 調整、固相抽出、溶出、濃縮、再構成の順で行った⁷⁾。ろ過は、PFAS と同様に行った。pH 調整では、塩酸を用いて pH を 1.5 ± 0.1 に調整した。固相抽出カラムには Waters 社の OASIS HLB を使用した。カートリッジのコンディショニングには、メタノール・蒸留水を 6 mL 使用した。その後、試料 500 mL を量り取り同位体を添加後、試料を 10 mL/min の流速でカートリッジに通水し、メタノール 10 mL を用いて溶出し、ほぼ乾固まで窒素気流下で揮発させ、95:5 の水/メタノール溶液 1 mL で再構成した。

これらの試料を液体クロマトグラフィー・タンデム質量分析 (LC-MS/MS) を行い定量・分析した。

3. 研究成果

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 地点のみで PFAS が検出された。表 1 に、濃度中央値 (ng/L) と検出数、検出率を示す。図 1 に、検出された地下水・湧水・水道水中の PFAS 濃度の内訳を示す。なお、SP1、SP6、SP7、SP10、SP14、SP15 は PFAS が検出されなかったため、省略した。

地下水・湧水全体として、検出率は PFBA が最も高く、次いで PFOA、PFOS、PFPeA、PFHxS の順であった。炭素鎖が短い PFBA が検出率が高いのは、短鎖 PFAS が地下水中で吸着しにくいことと整合的であった。一方で PFOA と PFOS という、POPs 条約により使用が著しく制限されている物質が地下水・湧水から多く検出されたことは、これらの物質が過去に地下水・湧水に混入し、地中で長期間にわたり流下したのちに地下水・湧水として地表に現れていることを示唆している。他の研究でも示されている^{1,8)}とおり、地下水中の PFAS は過去に受けた汚染を反映しており、今後もしばらくは PFOA と PFOS を中心としてレガシーとなった PFAS が地下水・湧水から低濃度ながら検出される懸念がある。

PFAS が検出された試料の約 9 割が 10 ng/L 以下であった。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、すべての試料がこれを満たしていた。一方、1 地点 (SP3) では米国の基準値 (PFOS と PFOA がそれぞれ 4 ng/L 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^{4,5)}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いた (図 2)。

図 2 には、PFAS が検出された地点における PPCPs・ASs 濃度分布を示した。他の地点と比べて高い PFAS 濃度が検出された GW5、SP3 では、医薬品類・人工甘味料の濃度も高かった。一般的に、医薬品類・人工甘味料は生活排水の影響を受けると濃度が上昇する。そのため、これら試料の PFAS 濃度が高い要因の一つに生活排水の影響が考えられた。

表 1. PFAS の濃度中央値 (ng/L)、検出数、検出率

サンプルの種類		PFBA	PFPeA	PFOA	PFHxS	PFOS	ΣPFAS
中央値 (ng/L)	GW	0.45	<0.1	0.41	<0.1	0.34	1.31
	SP	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.12	0.12
	Tap	1.43	0.44	1.83	2.11	1.99	7.8
検出試料 数/総試 料数	GW	5/6	2/6	3/6	2/6	1/6	6/6
	SP	6/15	4/15	5/15	2/15	8/15	9/15
	Tap	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1	1/1
検出率	GW	83%	33%	50%	33%	17%	100%
	SP	40%	27%	33%	13%	53%	60%
	Tap	100%	100%	100%	100%	100%	100%

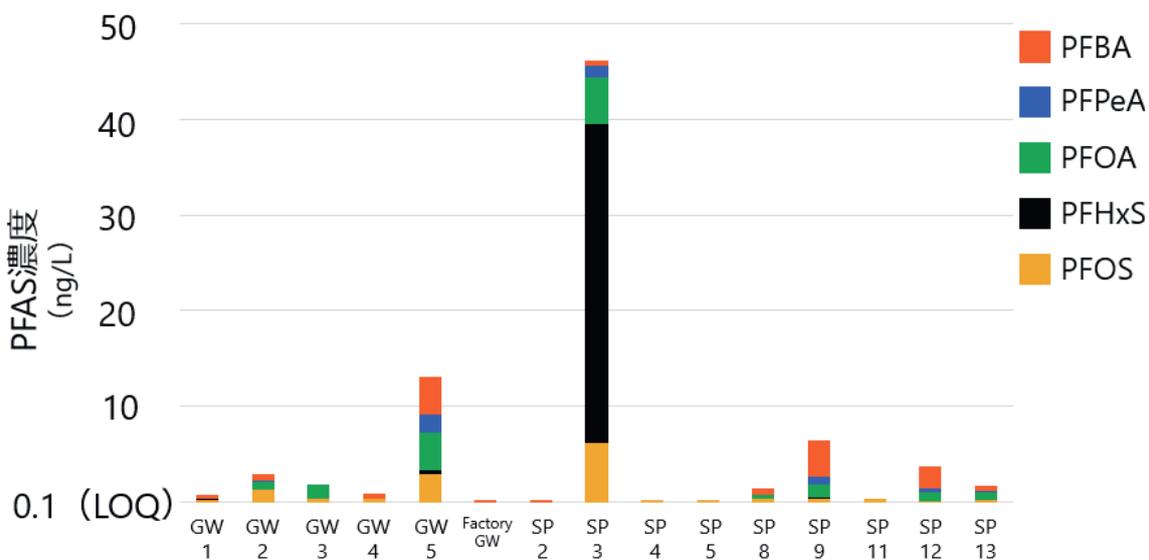


図 1. 地下水・湧水から検出された PFAS の濃度内訳

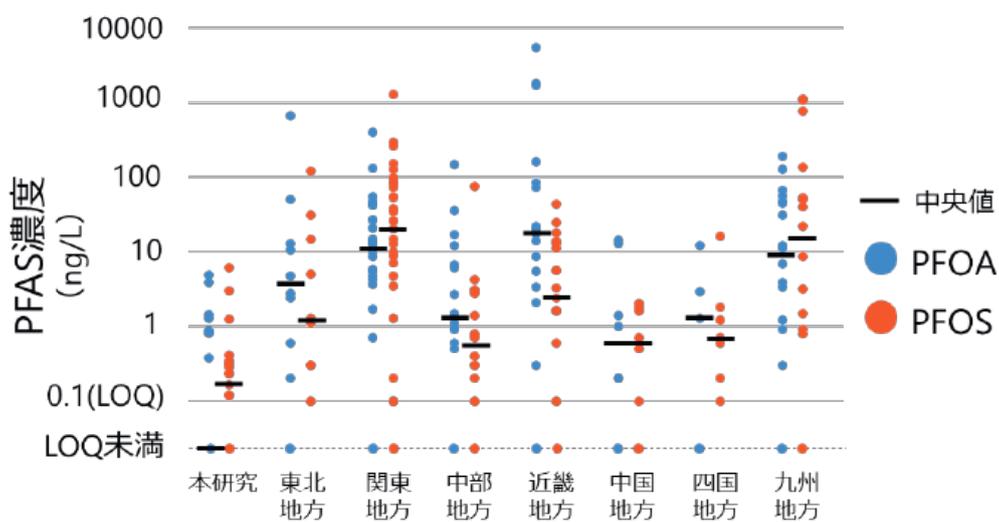


図 2. PFOA と PFOS 濃度に関する本研究結果と他地方^{4,5)}の比較

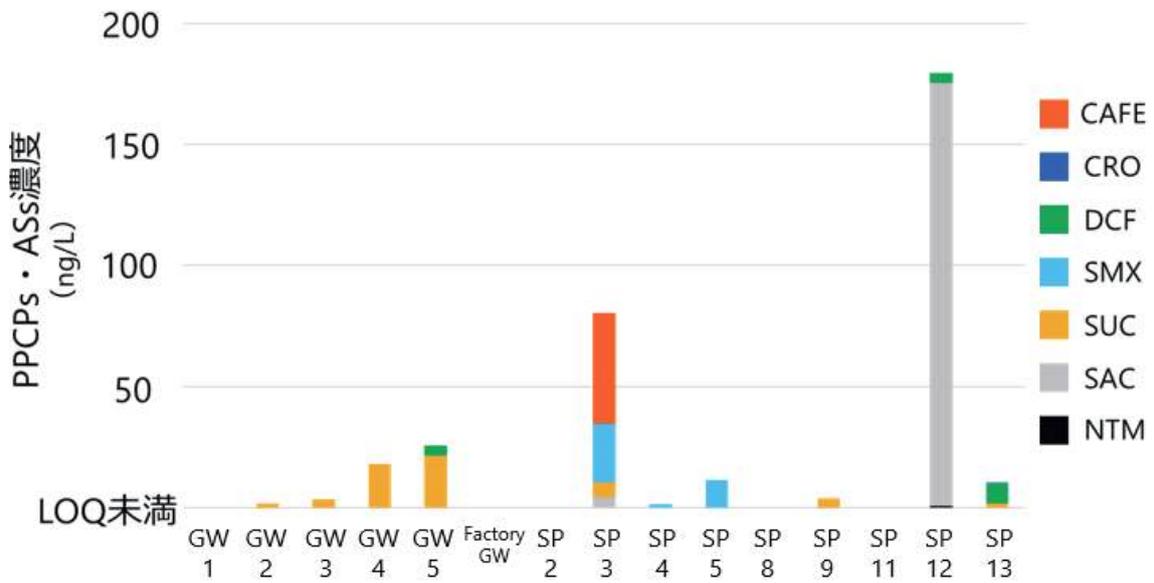


図 3. PFAS が検出された地点における PPCPs 及び ASs の濃度内訳。CAFÉ: Caffeine, CRO: Crotamiton, DCF: Diclofenac, SMX: Sulfamethoxazole, SUC: Sucralose, SAC: Saccharin, NTM: Neotame.

次に、地下水・湧水中で最も高い PFAS 濃度が観測された SP3 について汚染源や汚染経路を考える。SP3 は行田の沢清水で、滑川市の行田公園内から採水した。図 4 に示すとおり、SP3 周辺は住宅街であった。周辺 1 km には工場は存在せず、工場排水の影響は見られないと考えられた (図 5)。



図 4. SP3 の周辺の地形



図 5. SP3 付近の工場

SP3 は湧水が地表でせせらぎを形成している場所であり、試料水は地表から採取している。また PFOS・PFOA に比べて PFHxS の割合が高かったことや、Caffeine が検出されていたことから、比較的最近の汚染と考えられる^{8,9)}。これらのことから、汚染源として最も考えるのは生活排水であるが、湧水が地下で汚染されたのではなく、地表に出てから汚染を受けた可能性がある。

SP12 では、SAC が他に比べて高い濃度（175 ng/L）で検出された。SAC は畜産飼料にも使用されるため、SP12 は畜産排水の影響が考えられた⁷⁾。SP12 の源流は倶利伽羅山中の鳩清水の滝である。しかし、周辺を調査したが、汚染源の可能性のある畜産施設は見つからなかった。

水道水は 1 試料のみの分析であったが、PFAS の濃度は最大で PFHxS の 2.11 ng/L と低濃度であり、日本や米国の飲料水ガイドラインを超過することはなかった。

4. 今後の展望

調査した富山県内の合計 21 地点の地下水・湧水は、日本の他地方と比較して測定値の PFAS 濃度は低い傾向にあり、日本の環境基準はすべて満たしており、米国の飲料水ガイドラインは 1 地点を除いて適合していた。PFAS が検出された地点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。比較的高い濃度が見られた地点の PFAS の起源は生活排水と考えられた。水中の PFAS については、今後も引き続き様々な種類の環境水や飲料水中の分布調査や汚染

源の調査が必要と考えられた。

5. 参考文献

1. Sims et al (2022) Global occurrence and probabilistic environmental health hazard assessment of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in groundwater and surface waters, *Science of the Total Environment* 816, 151535.
2. Singh et al (2023) Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) as a health hazard: Current state of knowledge and strategies in environmental settings across Asia and future perspectives, *Chemical Engineering Journal* 475, 145064.
3. Wang et al (2023) Microbial plankton responses to perfluoroalkyl acids and their alternatives in the aquatic environment, *Journal of Hazardous Materials* 441 (5) 129980.
4. 環境省 (2020) 令和元年度 PFOS 及び PFOA 全国存在状況把握調査の結果について
<https://www.env.go.jp/press/108091.html>
5. 環境省 (2021) 令和2年度有機フッ素化合物全国存在状況把握調査の結果について
<https://www.env.go.jp/press/109708.html>
6. Kobayashi et al (2022) Development and Validation of an Analytical Method for Simultaneous Determination of Perfluoroalkyl Acids in Drinking Water by Liquid Chromatography/Tandem Mass Spectrometry, *Journal of Water and Environment Technology* 20 (6) 219–237.
7. 岩原 (2023) 生活排水・畜産排水が混在する河川における人工甘味料の存在実態、富山県立大学卒業論文
8. Kuroda et al (2014) Investigating sources and pathways of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in aquifers in Tokyo using multiple tracers, *Science of the Total Environment* 488–489 (1) 51–60.
9. Kuroda et al (2012) Assessment of Groundwater Pollution in Tokyo Using PPCPs as Sewage Markers, *Environmental Science & Technology* 46 (3) 1455–1464.

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
機関名	富山県立大学
研究代表者	工学部 環境・社会基盤工学科・准教授・久加朋子
分野	河川工学
キーワード	流れ, 河床・流路変動, 土砂災害, 河川環境

1. 研究の背景と目的

近年、日本では海岸に漂着する大量の海洋ゴミが問題となっており、砂浜の景観だけでなく、周辺の生態系や水質汚染など環境面からでも大きな影響を及ぼしている。浮遊する海ゴミの中には人工系であるプラスチックゴミが多く含まれており、5 mm 以下の微細なプラスチックの破片であるマイクロプラスチック（以下、MPs）の問題も深刻化している。海ゴミの問題は日本だけでなく国際的にも問題となっており、2015 年の G7・エルマウサミットで議題に挙げたことで、世界的な問題であることが認識されはじめ、国際間での早急な海洋ゴミの対策が考えられるようになってきている。その後の 2019 年の G20 大阪サミットの大阪ブルー・オーシャン・ビジョンでは、2050 年までに海洋プラスチックによる追加的な汚染をゼロにまで削減することを目指すとしており、プラスチックゴミの削減を 86 の国と地域で共有を呼びかけている。さらに日本では、この G20 に向けて海洋プラスチックゴミ対策アクションを策定し、プラスチックゴミの海への流出を抑えるために廃棄物の回収やポイ捨て・流出防止等の対策・取組が決められ、具体的な解決に向けて動きださなければならない状況下にあると言える。

海洋プラスチック汚染の問題解決にあたって、ゴミの発生源対策は必要不可欠である。既往研究¹⁾などによると、海岸に漂着する海洋プラスチックの主な発生源は陸域であり、大量に消費された使い捨てプラスチック製品やその破片である MPs が河道を通じて海域へと流出していると指摘されている。日本では、海洋ゴミの 8 割が陸域から河川を経由して海洋へと流出したものと推察されている。近年では、河道を通じたプラスチックゴミの輸送に関する研究が増えつつあり、流域内の人口が多く、都市化が進んでいる地域ほど河道内を通じたプラスチックゴミ輸送量も多くなる傾向が報告されている²⁾³⁾。

こうした背景のもと、富山県においても、海洋プラスチックゴミの漂着および河川回収などを目的とした様々な調査が行われている。具体例を挙げると、富山河川国道事務所では令和 5 年に富山 4 河川（常願寺川・神通川・庄川・小矢部川）ゴミマップを作成し、河川敷などに不法投棄されているゴミの現状の把握を行っている。富山県では海岸への漂着ゴミ対策のため、富山県内の複数海岸において浮遊プラスチックゴミおよび MPs の漂着量把握調査を行っている。富山市では、市内複数河川において網場を設置し、河川を通じたゴミ流出抑制のための調査・取組を実施している。富山県環境科学センターでは、県内複数河川を対象とし、MPs の輸送量把握のための現地調査を行っている。このように、富山県内においても海洋プラスチックゴミ発生を抑制するための数多くの調査が実施されていると分かる。しかしながら、これらはいずれも調

査時における点データ、あるいは面データであり、富山県陸域から河川、河川から海洋へ流出するプラスチックごみの時空間的な輸送特性の把握までに結び付けづらい点に課題が残ると考えられる。河川から海域へと流出するプラスチックごみの対策を検討するには、既往の調査データを踏まえたうえで、それらを補完する形でのプラスチックごみの輸送特性の把握が必要だと考えられる。

そこで、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、河道内から河口へと流出する浮遊プラスチックごみの年間流出量の把握と河川間比較を目的とし、現地調査を実施した。具体的には、はじめに各河川の流域内での土地利用の整理と比較を行った後、定点カメラを用いた現地調査より河川を流れる浮遊プラスチックごみの年間流出量の把握と河川間比較を実施した。

2. 各流域の土地利用の整理と比較

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 および表-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 km²) であり、庄川が 2.4% (10.8 km²)、小矢部川が 7.7% (52.1 km²) であった。農地率は小矢部川が 39.3% (266 km²) と最も割合が高く、神通川が 18.5% (141.5 km²)、庄川が 10.5% (47.4 km²) であった。流域人口は神通川で約 38 万人と最も多く、庄川で約 2.8 万人、小矢部川で約 30 万人であった。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。

3. 海岸近傍漂着ゴミ量の比較（既往調査報告を整理）

対象海岸には、都市化率の高い神通川の河口付近の岩瀬浜と、小矢部川および庄川河口付近の

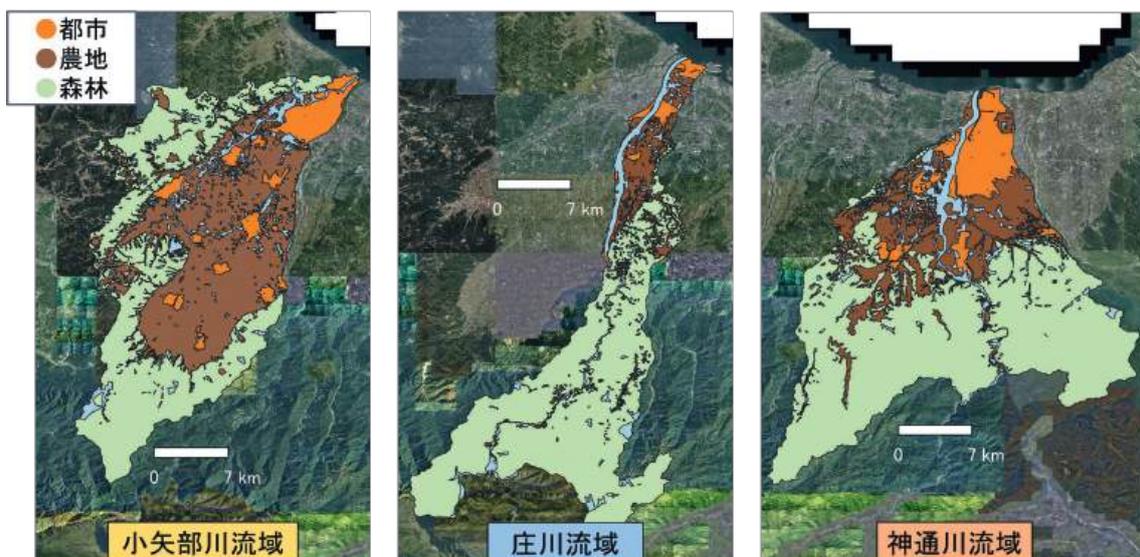


図-1 3 河川流域内の土地利用区分の整理（背景 国土地理院）

表-1 対象河川の流域圏における土地利用の比較（富山県内のみ）

流域		小矢部川	庄川	神通川
流域面積 (km ²)		677	451	765
流域人口		300,000	28,000	380,000
人口密度 (人/km ²)		443	62	497
土地利用	都市化率 (%)	7.7	2.4	8.9
	農地率 (%)	39.3	10.5	18.5
	森林率 (%)	44.7	77.8	66.0

表-2 六渡海岸と岩瀬浜における漂着物ゴミ数の比較（平水時と出水後）

砂浜	六渡寺海岸		岩瀬浜	
	平水時	出水後	平水時	出水後
漂着物密度 (m ³ /100m ²)	2.385	8.340	0.289	0.230
海岸面積 (m ²)	2.45×10 ³		126.0×10 ³	
総推定漂着物量 (m ³)	58.4	204	364	290



図-2 対象河川河口付近の砂浜，左) 六渡寺海岸，右) 岩瀬浜

六渡寺海岸を対象とした（図-2）。海岸における推定漂着物量 V (m³/100m²) は、富山県による令和元年度海岸漂着物概況調査結果を使用した。岩瀬浜と六渡寺海岸の砂浜面積 A (m²) は、砂浜面積に長期的な変化がないと仮定し、国土地理院の全国最新写真（2016 供用開始）を使用して面積を求めた。

表-2 に、岩瀬浜および六渡寺海岸における漂着物量の比較を示す。表-2 によると、平水時の推定漂着物量は六渡寺海岸にて約 58.4 m³であり、岩瀬浜にて約 364 m³であった。一方、出水時の推定漂着物量は六渡寺海岸にて約 204 m³であり、岩瀬浜にて約 209 m³であった。砂浜全域における推定漂着物量の総量を比較すると、平水時は岩瀬浜の方が 6 倍ほど大きく、出水後は砂浜面積に関わらず同程度になることが分かる。このような漂着ゴミ特性になる要因には、幾つかの仮説が考えられる。まず、平水時については六渡寺海岸での定期的なゴミ回収である。これ

より、平水時の六渡海岸調査結果は、本来のゴミ数に比べて非常に小さな値に収まっていると考えられる。また、砂浜サイズの違いによる影響も考えられる。岩瀬浜は六渡寺海岸に比べて海岸面積が約50倍と大きい。このため、漂着物が砂浜へ到達する機会は岩瀬浜の方が何度もあると考えられる。また、岩瀬浜の方が砂浜の奥行きが広いため、一度漂着したゴミは再流出しにくい傾向にあることが推察される。このため、平水時のゴミ数は岩瀬浜にて多く見える可能性も考えられる。一方、増水時が両海岸にて似たような総ゴミ数となっている要因については、海域から砂浜へと浮遊プラスチックごみが戻ってくるまでの時間が異なる可能性が推察される。出水時の流量規模は小矢部川よりも神通川の方が大きいいため、浮遊プラスチックごみは寄りと多くの沖まで流され、その後ゆっくり戻ってくるのかも知れない。さらに、本研究の主な着目点となるが、出水時、小矢部川を通じて輸送される浮遊プラスチックごみ数は、神通川を通じて輸送される浮遊プラスチックごみ数に比べて圧倒的に多い可能性も考えられる。以上の仮設より、海岸漂着物に関する既往データを考察するには各々の河川からどの程度の浮遊プラスチックごみが、どのようなタイミングで流出しているかを把握することは欠かせない基礎データであることが分かる。しかしながら、現時点ではこのような調査データは存在しない。そこで、本研究では、次に河川を通じて河口へと流出する浮遊プラスチックゴミ数を把握するための現地調査を行う。

4. 現地調査

(1) 調査河川緒言と調査地点概要

図-3 に、対象河川と調査地点を示す。神通川は岐阜県高山市の川上岳を源流とする河川である。庄川は岐阜県高山市の烏帽子岳と山中山の山中峠を源流とし、小矢部川は富山・石川県境に位置する大門山を源流とする河川である。3河川とも上流域は急勾配河川であり、河道内には砂州が発達している。図から分かるように、富山県内における小矢部川と神通川には支流が多いが、庄川は少ないことが分かる。また、用排水路網については小矢部川と神通川の両方にて多いことに加えて、小矢部川においては庄川流域から取水された用水が排水路を通じて小矢部川へと流れ込む形となっている。

調査地点の選定には、河川低水路内における砂州形成が無くなることと、水表面においてある程度流れがあること、カメラを設置するための橋が存在すること、の3つを条件として検討した。その結果、小矢部川では二上橋（河口から6.0k）を、庄川では高新大橋（河口から4.0k）を、神通川では富山北大橋（河口から6.0k）を調査地点と選定した。

(2) 調査方法

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 SP3（HYKE社）を用いた。カメラは計5台設置し、小矢部川では二上橋に2台と追加で千保川合流部に1台に設置した。庄川では高新大橋に1台、神通川では富山北大橋に1台の設置を行った。図-4 に、各々の設置状況を示す。カメラはいずれも道路管理者より設置許可を受けた上で取り付けを行い、設置期間を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して継続中）。カメラの撮影は動画とし、タイムラプス間隔を5分、動画撮影継続時間を10秒、撮影時刻を4時から20時まで、画質を2k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、本年度の検討（R5年度）で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。

(3) 結果の整理

撮影した動画は、図-5のように左岸、中央、右岸と3区間に分け、5時～19時の間のデータについて、各々の動画下半分を通過するゴミ数をカウントした。ただし、動画には白い泡が含まれる日も多く、加えて時間帯によっては水面に反射する太陽光が映り込み、簡易な機会学習（車や人に適用できる）による判別が難しいことが判明した。このため、本年度は動画を目視し、浮

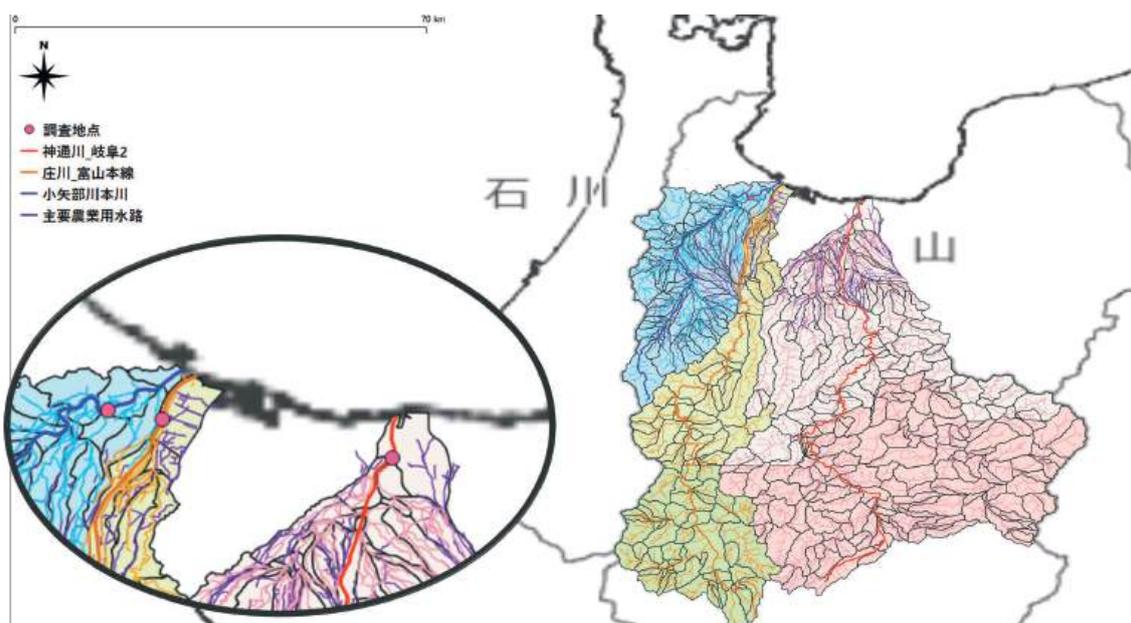


図-3 調査地点，赤点は調査地点を示す（用水路網は富山県水土里情報センター提供）



図-4 カメラの設置状況（小矢部川，庄川，神通川）



図-5 撮影画像の一例（小矢部川二上橋），3区間に分けて通過ゴミ数をカウント

遊ゴミ判別を行うこととした。目視での動画判別にあたっては、白い泡とゴミを区別するための共通ルールとして、1) 小さく色の薄いものは泡と判別してカウントしない、2) 小さく色の薄い白点が続く場合は泡と判別することとしてカウントしない、3) 白以外の浮遊プラスチックごみはカウントしない、という条件を設定した。10秒ごとのゴミ通過数をカウントした後は、6動画（30分間）ごとに平均10秒通過数を求め、その値を用いて推定30分通過数を求めた。これより、カメラ撮影時間内に通過する浮遊プラスチックごみの総数の推定値を求めた。推定値を求める方法は次の通りである。

$$\bar{n}_i = \frac{\sum_{k=1}^6 n_k}{6}$$

$$N_i = \frac{\bar{n}_i}{10} \times (30 \times 60)$$

ここに、 n_k はある時刻において撮影された10秒動画からカウントした浮遊プラスチック通過数、 \bar{n}_i はある30分間の間の浮遊プラスチックの10秒間平均通過数、 N_i はある30分間における浮遊プラスチックごみの推定通過数である。

この他、流量データと浮遊ごみ数とを比較するため、流量データの整理を行った。3河川の平水時、出水時の流量は、国土交通省の水文水質データベースより近傍水位観測所より水位を取得し、富山河川国道事務所より提供された暫定H-Q式より流量を求めた。近傍の水位観測所には、小矢部川では長江水位観測所、庄川では大門水位観測所、神通川では神通大橋水位観測所が該当する。

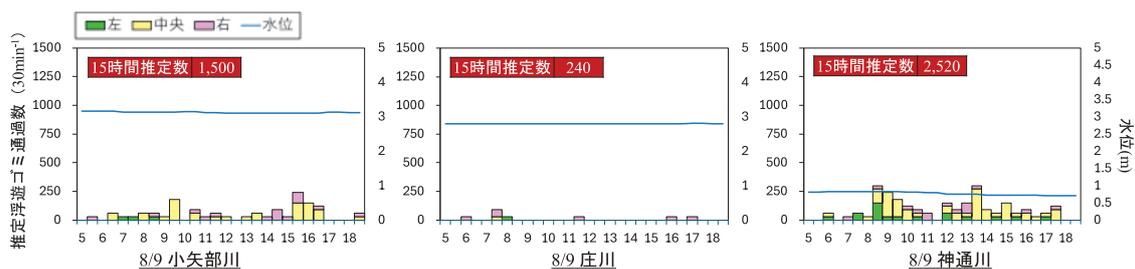


図-6 平水時（8/9）における30分推定通過ゴミ数（5時～19時）と近傍水位

5. 現地調査の結果

図-6に、平水時の各河川における30分ごとの推定浮遊プラスチックゴミ通過数を一例として示す。平水時の例には、出水日が前後日程にてしばらく確認されない2023年8月9日を選んでおり、近傍の水位観測所における水位データも併記している。図-6によると、降雨に伴う水位上昇がなくても河川を通じて河口・海域へと浮遊プラスチックゴミが絶えず流出している状況が分かる。3河川を比較すると、平水時の庄川はゴミが比較的少なく、30分間隔で見たとときにゴミが確認できない時間帯も存在した。一方、小矢部川や神通川では平水時も常に幾つかゴミが確認され、浮遊ゴミが確認されない時間がほぼ存在しなかった。5時から19時までの15時間での推定通過浮遊プラスチックゴミ数は、小矢部川では1500個（内訳は左岸90個、中央960個、右岸450個）、庄川では240個（内訳は左岸30個、中央30個、右岸180個）、神通川では2520個（内訳は左岸510個、中央1590個、右岸420個）であった。小矢部川は左岸側を通過するゴミ数が、右岸～中央にかけてと比べて少なくなる傾向になることが分かる。

図-7に、結果の一部として、2023年7月における推定通過浮遊プラスチックゴミ数と水位を示す。夜間は撮影画像がないため欠損値である。図より、7月における降雨の大半は夜間にピークを迎えるため、降雨開始から終了時点までの通過ゴミ数をカウントできた出水は7月内にて存在しなかった。図-7より、31日間（庄川のみ25日間）における15時間推定浮遊プラスチックゴミ数の総数を比較すると、小矢部川にて41,537個、庄川にて6,966個、神通川にて78,285個であった。ただし、これらは夜間を除いた個数であり、夜間のゴミ数をどのように推定するかが次の課題となる。これについては、現在、2023年6月から2024年5月までの画像データを分析中であり、それらが揃い次第、水位と30分間平均浮遊プラスチックゴミ数との相関図を作成することで、動画データの存在しない夜間についてもゴミ流出数の推定値を得ることができるようにする予定である。

6. 今後の展望

現在、2023年度に取得した3河川の10秒動画の画像分析を継続して行っている。これらが揃い次第、水位データと30分間平均浮遊プラスチックゴミ数との相関図を作成する。これより、動画データの存在しない夜間についてもゴミ流出数の推定値を得ることで、1年間に各河川から流出するゴミ数の推定値を示す予定である。さらに、小矢部川のように浮遊ゴミは河川中央では

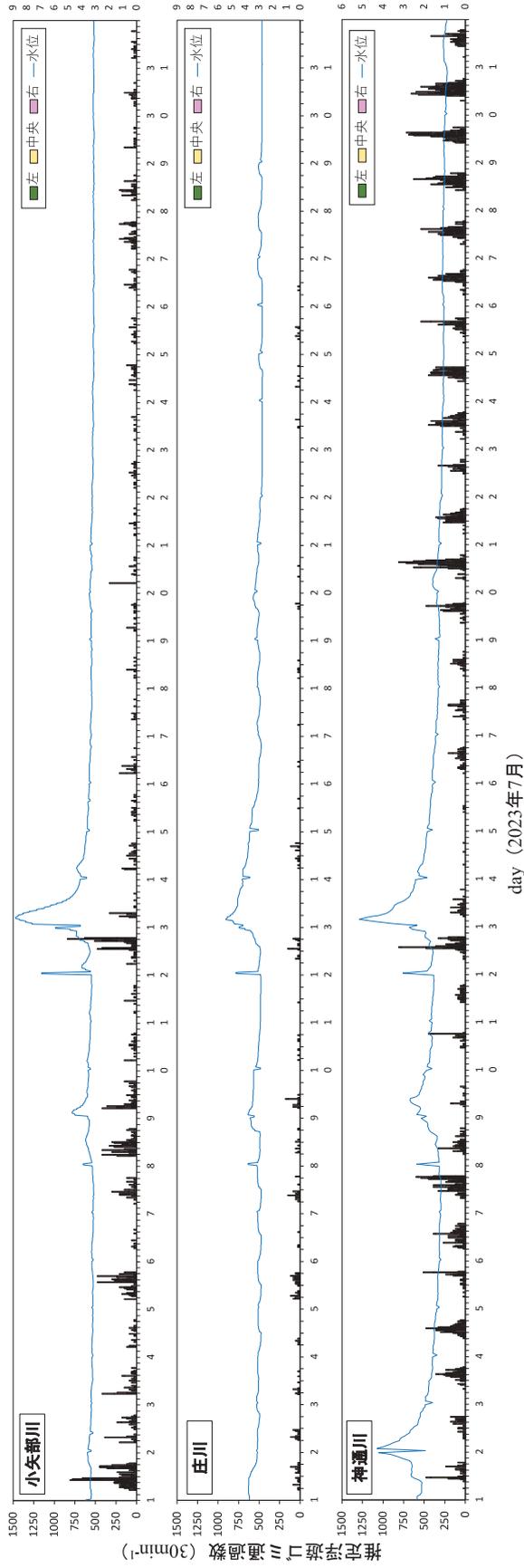


図-7 2023年7月における推定通過浮遊プラスチックゴミ数 (5時～19時以外は欠損)

なく、左右岸どちらかに偏って流れる場所も存在する。これらの要因について数値解析を用いて評価し、輸送特性の把握について検討する予定である。

7. 参考文献

1. 高田秀重：マイクロプラスチック汚染の現状，国際動向および対策，廃棄物資源循環学会誌，29(4)，pp.261-269，2018. doi: 10.3985/mcwmr.29.261.
2. 工藤功貴・片岡智哉・二瓶泰雄・北浦郁弥：平常時・出水時河川のマイクロプラスチック濃度の時間変動特性と年間輸送量評価，土木学会論文集 B1（水工学），74(4)，pp. I_529-I_534，2018. doi: 10.2208/jscejhe.74.I_529.
3. 二瓶泰雄・片岡智哉：河川から考える海洋プラスチックごみ・マイクロプラスチック対策，廃棄物資源循環学会誌，29(4)，pp.309-316，2018. doi: 10.3985/mcwmr.29.309.

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
機関名	富山県立大学
研究代表者	工学部 環境・社会基盤工学科・講師 中澤 暦
分野	環境科学
キーワード	大気中水銀、パッシブサンプラー、平面分布、モニタリング

1. 研究の背景と目的

常温で唯一液体の金属である水銀は古来より、他の金属と合金を作りやすいという性質から様々な用途に利用されてきた。752年に開眼供養された東大寺のご本尊・廬舎那仏の金色は、水銀に金を混ぜた合金を塗り、水銀を蒸発させる方法により実現した¹⁾。水銀の毒性は昔から知られており、古くは「日本書紀」や「風土記」には、水かね（水銀）の神は言語障害であると記されており、さらに江戸時代の書物にはすでに鍍金（金メッキ）師の中毒症状に関する記述が残されている²⁾。

水銀はごく微量であっても生物へ影響を与える。ヒト健康に関する視点からは①水銀を含む食品等を口から摂取する経口暴露と、②水銀蒸気を吸入する吸入暴露が問題となる。製品の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であり、水銀規制への世界的な関心の高まりから 2017年には水銀に関する水俣条約が発効した。

水銀の大気への排出源としては、化石燃料燃焼（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、森林火災、火山活動などによる自然的な排出がある。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。発展途上国ではASGM活動が盛んであり、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 $1,000 \text{ ng/m}^3$ を大きく超過することが分かっている³⁻⁵⁾。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の課題がある。そのため、発生源からの拡散状況など、大気中水銀濃度の水平分布の把握には向かない。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。

著者らはこれまでに開発してきた大気中水銀のパッシブサンプラー⁶⁻⁷⁾について、室内暴露試験を行い、沈着速度 (Sampling Rate, SR) を完成させることに取り組んできた⁸⁾。本研究では、大気中水銀のパッシブサンプラーを実環境中に適用させ、その平面分布を把握することを目的とした。調査は富山県射水市内を中心に実施した。合わせて ASGM 活動の盛んなインドネシアと周囲に汚染源のない南極昭和基地内で実施した結果と比較した。

2. 研究方法

<調査地点>

富山県射水市の観測では、市内 30 地点 (2023 年 7 月のみ 40 地点) を調査地とした。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、2022 年 6 月、11 月、2023 年 5 月、7 月、10 月に実施した。なお、暴露期間は 2 週間とした。射水市には水銀の固定発生源とされる施設として、火力発電所、焼却場が存在する。

インドネシア中央スラウェシ州パル市では、市内全域 24 地点 (ASGM 地域を含む) を調査地とした。この 24 地点は、2010~2012 年に著者らが実施した場所³⁾と同地点である。調査は 2023 年 3 月、4 日、5 日に行い、暴露期間は各 1 日毎とした。

南極昭和基地の観測では、基地のある東オングル島、25 地点を調査地とした。調査は 2022 年 1 月の 1 か月間行った。水銀の固定発生源とされる施設として発電棟 (2 棟)、焼却棟 (1 棟) が存在する。

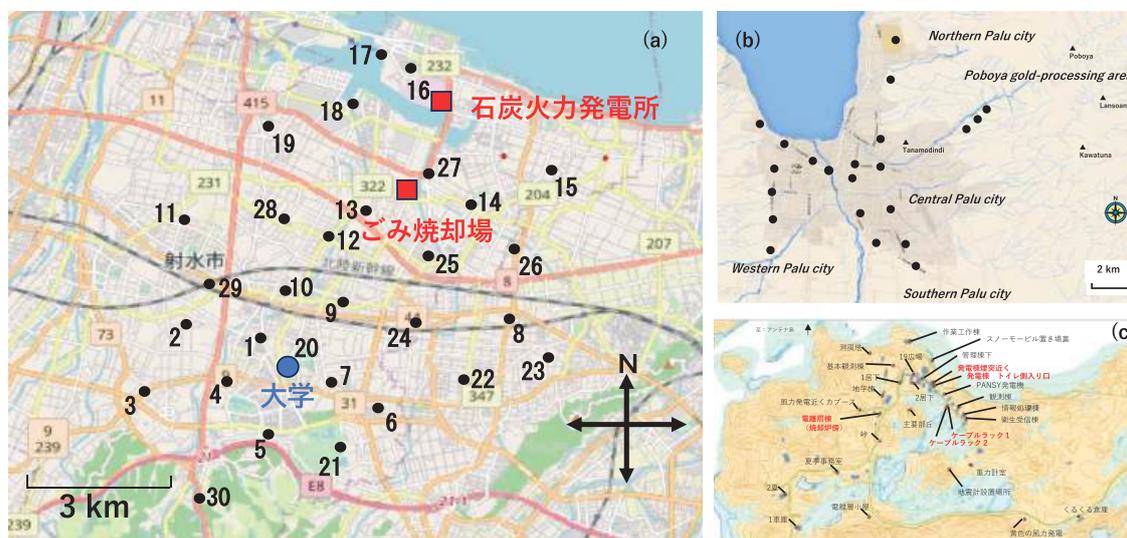


図1 調査地点 (a) 射水市、(b) インドネシア パル市、(c) 南極 昭和基地

<方法>

調査には、著者らのグループが開発を進めてきたパッシブサンプラー (図 2) を用いた。パッシブサンプラーは、φ 15 mm 石英繊維ろ紙に 30 nm 厚の金を蒸着させたもの (水銀パッシブろ紙) をテフロン製の容器に格納し、環境大気中に一定期間曝露させる仕組みである。これまで

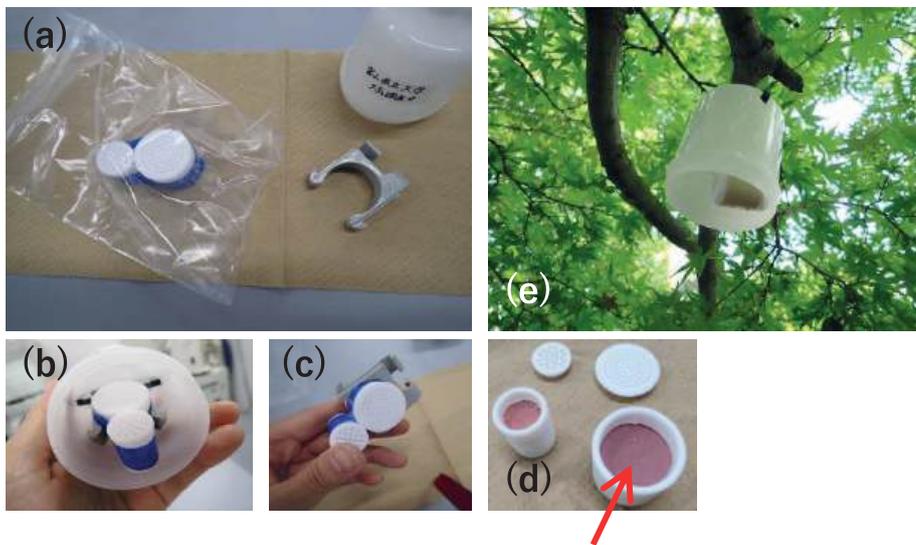
開発した方法でも、曝露期間における水銀パッシブろ紙への水銀の吸着量を観測可能であるが、吸着量から大気中濃度に換算することが不可能であった。そこで、これまでは、一定量の大气を吸引することで大気中水銀濃度を観測するアクティブサンプラー法を併用し、アクティブサンプラー法から得た大気中水銀濃度から水銀パッシブろ紙で得た吸着量を外挿し大気中水銀濃度を求めていた。また、φ15 mm の水銀パッシブろ紙は、ASGM 地域のような、高濃度の大気中水銀環境下では短期間でも十分な吸着量を得られるが、水銀パッシブろ紙の面積の制約から、低濃度域では十分な吸着量を得られず、観測が不得手であった。そこで、本研究ではφ25 mm 水銀パッシブろ紙と本体を新たに作成して比較検討した。SR の推定には McLagan et al.⁹⁾を参考にした。すなわち、

$$SR = \frac{m}{Ct} \quad (1)$$

を用いて 式(1)を

$$C = \frac{m}{SR \times t} \quad (2)$$

式 (2) に変形した。SR 値は別途暴露試験をして求めた⁸⁾。



φ15 φ25 の石英繊維ろ紙に 30nm金被膜を蒸着
 風の影響がないように拡散プレートを装着
 1つのサンプラーに両側各1枚(合計2枚)のろ紙を格納可能

図2 パッシブサンプラーと設置の様子

- (a) パッシブサンプラーキット、(b) 雨除けシェルターに取り付け、
 (c) 手に持ったところ、(d) パッシブろ紙、(e) 設置の様子

3. 研究成果¹⁰⁻¹³⁾

< 富山県内における大気中水銀濃度の平面分布 >

2022年8月から2023年1月まで、断続的に射水市で観測した大気中水銀濃度を表1に示した。大気中水銀濃度は1.24~2.10 ng/m³で推移した。北半球のバックグラウンドレベル（おおむね1.5 ng/m³）と同様のレベルであった。2023年7月に観測した平面分布の結果を図3に示した。濃度は、0.97~2.35 ng/m³の間であった。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7月に観測した大気中の水平分布をみると南部地域で濃度が高い傾向がみられたが、発電所およびごみ焼却施設付近で高濃度となることはなかった。

一般に煙突から排出される大気汚染物質は次第に拡散し濃度が低下する。煙突から排出大気汚染物質の最大着地濃度を推定する方法として、プルーム式を用いた方法がある。推定では火力発電所から1 km 地点で最大着地濃度となったが、明確な傾向はみられなかった。

< 小規模金採掘地域と南極昭和基地の大気中水銀濃度の平面分布 >

南極昭和基地の大気中水銀濃度の平均値は1.38 ng/m³ (n=30) であった。平面分布をみると、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。低濃度域であり、かつ周囲に人や車の往来のない場所では、ごく小規模の固定発生源からの水銀の排出も評価できることが分かった。

表1 大気中水銀濃度の分布

地点 調査月	n	暴露日数(日)	濃度 (ng/m ³)
射水市			
2022年8月	30	14	1.59
2022年11月	30	14	1.49
2023年5月	30	14	1.24
2023年7月	30	14	1.50
2023年10月	30	14	2.10
インドネシア			
2023年3月	23	1	46.2
昭和基地			
2022年1月	30	25	1.38

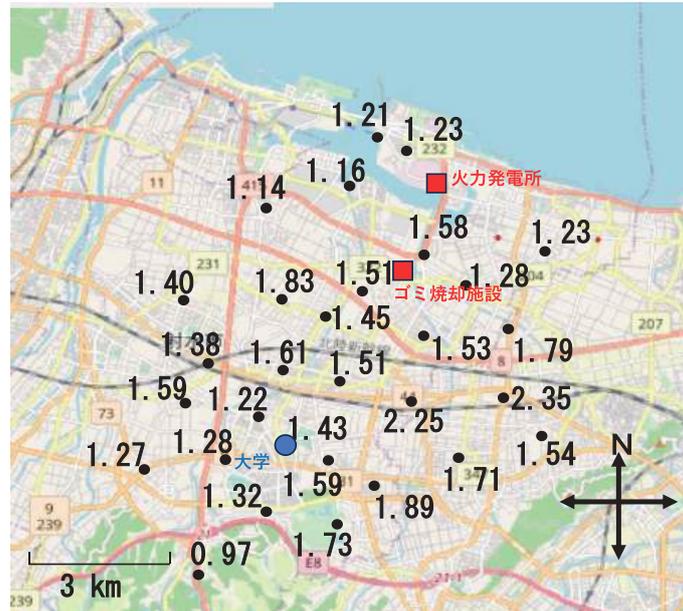


図3 射水市内大気中水銀濃度の平面分布（2023年7月）

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全域で大気中水銀濃度の平面分布を観測したところ、平均濃度は 46.2 ng/m^3 ($n=23$) であった。金製錬が行われている地区では、WHO のヒト健康のガイドラインとされる 1000 ng/m^3 程度の濃度が観測された。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。2023年に観測した結果は2010年代と比較して低濃度であった。今後、現地の社会情勢の変化等と比較検討を行う。パル市のように ASGM 活動が行われ高濃度の大気中水銀濃度が観測される地点での大気中水銀濃度の平面分布もその活動状況におおむね一致した。

4. 今後の展望

本研究では、著者らが開発したパッシブサンプラーを用いて、射水市内で大気中水銀の平面分布を観測した。さらに、ASGM 地域、南極昭和基地での結果と比較した。射水市内での平面分布の結果からは明確な濃度の分布をみることはできなかった。今後、地点数や観測回数の検討を重ねて、濃度分布を明らかにしていく予定である。

5. 参考文献

1. 左巻健男, 世界史は化学でできている, 2021, ダイヤモンド社, 東京.
2. 小長谷正明, 医学探偵の歴史事件簿 ファイル 2, 2015, 岩波新書, 東京.
3. Nakazawa, K., Nagafuchi, O., Kawakami, T., Inoue, T., Yokota, K., Serikawa, Y., Basir Cyio-M, Elvince, R., Human health risk assessment of mercury vapor around artisanal small-scale gold mining area, Palu city, central Sulawesi, Indonesia, Ecotoxicology and

environmental safety 124 155-162, 2016.

4. K. Nakazawa, O. Nagafuchi, T. Kawakami, T. Inoue, R. Elvince, K. Kanefuji, I. Nur, M. Napitupulu, M. Basir-Cyio, H. Kinoshita, K. Shinozuka (2021), DOI: 10.1039/d0ea00019a, Environmental Science: Atmospheres.

5. 永淵 修, 中澤 暦, 井上隆信, Elvince Rosana, 川上智規, 尾坂兼一, 金藤浩司 インドネシアスマトラ島ブンクル州における極小規模金採掘・精錬地区の環境媒体中水銀濃度とそのヒト健康リスク評価 環境科学会誌, 31 (2) : 43-58, 2018.

6. 國木里加, 川上智規, 加賀谷重浩, 井上隆信, Elvince Rosana, 永淵 修. 大気中の水銀濃度の測定～パッシブサンプラーの開発～, 環境工学研究論文集 46 355-359.

7. 木下 弾, 永淵 修, 中澤 暦, 横田久里子. 自由対流圏における大気中水銀の起源と輸送経路の関係 -富士山体における観測-, 環境科学会誌 29 (6) : 275-282, 2016.

8. 中澤 暦 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書 5RF-2003, 小規模金採掘による水銀汚染評価とその包括的リスク評価手法の構築 (JPMEERF 20205R03), 2023.

9. McLagan D.S, Mitchell C.P.J., Huang, H., Lei Y.D., Cole A.S., Steffen, A., Hung, H., Wania, F. A high-precision passive air sampler for gaseous mercury, Environmental Science & Technology letters, 2016, 3, 24-29.

10. 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, 2023.

11. 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, 2023.

12. 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) , 2023.

13. Koyomi Nakazawa, Osamu Nagafuchi, Satoshi Imura, Tomoaki Watanabe, Akihiro Mitsui, Fluctuation of atmospheric mercury concentration observed at Syowa station, Antarctica during January 2022, Japan Geoscience Union, 2024.

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
機関名	富山県立大学
研究代表者	工学部生物工学科・教授・野村泰治
分野	植物細胞工学、生物有機化学
キーワード	植物培養細胞、休眠二次代謝、生合成、エピゲノム

1. 研究の背景と目的

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、グリーンケミストリーやSDGsの概念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(=休眠)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手法を確立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と期待される。

培養細胞化に伴う二次代謝の休眠の根本的な原因は、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「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1)。

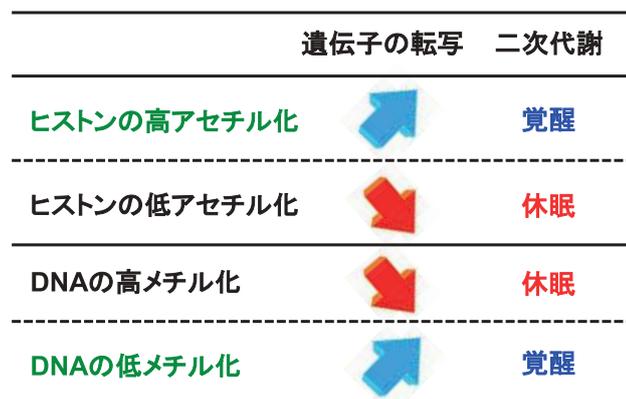


図1 本研究の作業仮説：ヒストンおよびDNAの化学修飾と遺伝子の転写および二次代謝の関係

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」をエピジェネティック修飾剤として投与し、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、植物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。

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の投与条件検討」、「覚醒誘導化合物の同定」、「生合成遺伝子の同定とエピジェネティック修飾剤投与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覚醒の実証とそのメカニズム解明を行う。

これまでに、単子葉植物であるホウライチク（タケの一種）Bm 培養細胞をモデルとした実験によって、本手法の有効性を世界で初めて発見・実証している（参考文献 1-5）。本研究では、この新たな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、双子葉植物における本手法の有効性を検証することを目的とした。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、構造解析を行うとともに、エピジェネティック修飾剤の投与条件の違いが当該化合物の覚醒誘導に及ぼす影響について、単子葉植物（Bm 培養細胞）との比較を行った。

2. 研究方法

① ヒストン脱アセチル化酵素阻害剤の投与

300 mL 容三角フラスコ中、ヒストン脱アセチル化酵素阻害剤として 1 mM suberoyl bis-hydroxamic acid (SBHA) を含む 100 mL の改変 LS 培地に初期細胞量が 5% SCV となるように BY-2 懸濁細胞を移植し、暗黒下、25°C で 12 日間、100 rpm にて振盪培養した。培養後の細胞を吸引ろ過により回収し、酸性含水メタノールによる抽出物を逆相系 HPLC にて分析した。

② 覚醒誘導化合物の単離および構造解析

①の SBHA 投与細胞約 170 g (フラスコ 34 本分) の酸性含水メタノールによる抽出物を濃縮、脱脂後、ODS カラムクロマトグラフィーおよび逆相系分取 HPLC に供することで、SBHA による覚醒誘導化合物 4 種を単離した。単離した化合物を質量分析および NMR (1D および 2D)、UV の各種分光学的解析に供し、化学構造を決定した。

③ エピジェネティック修飾剤の投与条件が二次代謝の覚醒誘導に及ぼす影響の検討

①の基本培養条件下、SBHA の投与濃度、投与開始時の細胞量、培養期間の各パラメーターが、②で同定した 4 種の化合物の覚醒誘導に及ぼす影響を調べた。また、SBHA 以外のヒストン脱アセチル化酵素阻害剤や DNA メチル化酵素阻害剤の投与が二次代謝の覚醒誘導に及ぼす影響についても併せて調査した。

3. 研究成果

BY-2 細胞に投与するエピジェネティック修飾剤として、筆者らが以前 Bm 培養細胞において休眠二次代謝の覚醒に成功しているヒストン脱アセチル化酵素阻害剤の一種 SBHA を使用し、二次代謝の覚醒誘導の有無を調べた。その結果、SBHA を投与した細胞において、非投与コントロールと比べて顕著に誘導されている 4 種の未知化合物が見いだされた (図 2)。このことから、

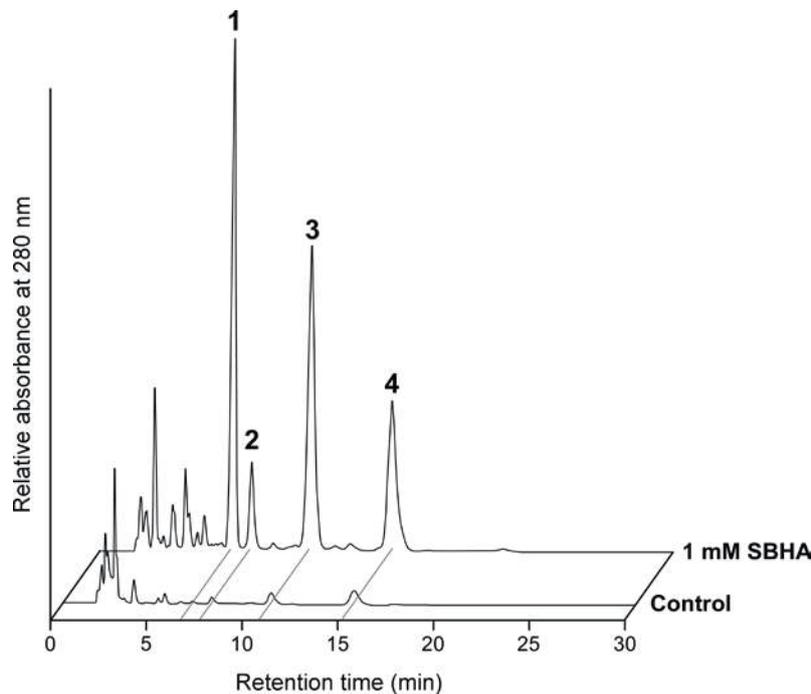


図2 ヒストン脱アセチル化酵素阻害剤（SBHA）の投与による休眠二次代謝の覚醒

SBHA 投与（1 mM）および非投与 BY-2 懸濁細胞の抽出物の HPLC クロマトグラムを示す。SBHA 非投与コントロールでは痕跡レベルの化合物 1-4 の生合成レベルが、SBHA の投与によって大幅に増大した。

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強く示唆された。

SBHA 投与細胞から覚醒誘導化合物 4 種の単離・精製を行った結果、化合物 1 が 77 mg、化合物 2 が 7 mg、化合物 3 が 61 mg、化合物 4 が 21 mg 得られた。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（論文未発表のため現時点では非公開）。このことから、BY-2 細胞においては SBHA の投与によって特にフェニルプロパノイド系二次代謝の生合成遺伝子の発現が活性化されていることが示唆された。

BY-2 細胞に 0.1~2 mM の異なる濃度の SBHA を投与し、化合物 1-4 の覚醒誘導レベルに及ぼす影響を調べた結果、細胞新鮮重量当たりの蓄積量は、化合物 1-3 は 2 mM、化合物 4 は 0.5 mM の SBHA 投与時に培養開始 1 週間前後で最大となった。以前我々が行った Bm 細胞への SBHA 投与においては、数十 μ M 程度の投与で二次代謝の覚醒誘導レベルが最大となり、それ以上の投与濃度では、覚醒誘導レベルならびに細胞の増殖レベルの大幅な減衰がみられた。これは、SBHA の細胞毒性によるものであると考えられるが、今回の実験結果から、少なくとも BY-2 細胞は Bm 細胞よりも SBHA に対する感受性が低い（細胞毒性耐性が高い）ことが示された。このことは、対象とする培養細胞ごとに休眠二次代謝覚醒のための最適なエピジェネティック修飾剤投与濃度が異なることを意味している。おそらく、投与化合物の一部が細胞内生の酵素によ

って解毒代謝されており、その解毒代謝能の違いが、投与化合物に対する感受性の差異の要因であると考えられる。

次に、SBHA の投与濃度を 1 mM に固定し、投与開始時の細胞量を 2.5~20% SCV として、化合物 1-4 の覚醒誘導レベルの違いを調べた。その結果、細胞新鮮重量当たりの蓄積量は初期細胞量が少ない方が高く、初期細胞量が高くなるにつれて減少する傾向がみられた。この結果も、投与化合物の一部が細胞によって解毒代謝されているという上記の予想を支持するものである。

続いて、SBHA 以外のヒストン脱アセチル化酵素阻害剤の投与による休眠二次代謝の覚醒誘導の有無を調べた。その結果、*suberoylanilide hydroxamic acid* や *trichostatin A* の投与によっても、化合物 1-4 の覚醒誘導が再現された。また、その際の覚醒誘導レベルは、SBHA の投与時とほぼ同等であった。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。

4. 今後の展望

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。

5. 参考文献

1. Nomura T, Yoneda A, Ogita S, Kato Y (2021) Activation of cryptic secondary metabolite biosynthesis in bamboo suspension cells by a histone deacetylase inhibitor. *Appl. Biochem. Biotechnol* 193: 3496–3511.
2. Nomura T, Yoneda A, Kato Y (2022) BAHD acyltransferase induced by histone deacetylase inhibitor catalyzes 3-O-hydroxycinnamoylquinic acid formation in bamboo suspension cells. *Plant J.* 112: 1266–1280.
3. 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. *バイオサイエンスとインダストリー*, 81: 308–309.
4. 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. *生物工学会誌*, 101: 587-590.
5. 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～. *化学と生物*, 62: 67–75.