

第41回全国環境研究所
交流シンポジウム 予稿集

令和8年2月19・20日

第41回全国環境研究所交流シンポジウム

2026（令和8）年2月19日（木）～2月20日（金）
於 国立環境研究所及びオンライン

司会：菅田 誠治（国立環境研究所 企画部）

2月19日（木）

13:30～13:35 開会挨拶

国立環境研究所 理事長 木本 昌秀

13:35～13:40 来賓挨拶

環境省大臣官房総合政策課 環境研究技術室長 中村 真紀

13:40～13:45 事務連絡

特別講演

- (1) 13:45～14:30 「廃棄物処理からの有機フッ素化合物（PFAS）排出量把握に関する研究」 …… 1
○松神 秀徳（国立環境研究所）

研究発表 < PFAS・廃棄物処理 >

座長：松神 秀徳（国立環境研究所）

- (2) 14:30～14:55 「最終処分場浸出水中PFASの活性炭処理による除去特性に関する実証的研究」
…………… 4
○渡邊 育弥（大阪府立環境農林水産総合研究所）
- (3) 14:55～15:20 「北海道PCB廃棄物処理事業における環境モニタリングの成果と将来への示唆」
…………… 6
○姉崎 克典（北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所）

15:20～15:30 （休 憩）

<気候変動適応>

座長：真砂 佳史（国立環境研究所）

- (4) 15:30～15:55 「群馬県における暑さ指数と熱中症救急搬送者数の解析」 …… 9
○熊谷 貴美代（群馬県衛生環境研究所）
- (5) 15:55～16:20 「北海道の熱中症搬送者と対策、および暑さの将来変化について」 …… 12
○大屋 祐太（北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所）
- (6) 16:20～16:45 「WBGT 機器の比較観測結果」 …… 14
○大和 広明（埼玉県環境科学国際センター）
- (7) 16:45～17:10 「猪苗代湖におけるカビ臭物質の発生予測」 …… 16
○落合 孝浩、木村 和貴（郡山市環境部環境保全センター）
- (8) 17:10～17:35 「日本全国の暑熱環境予測に基づく学校の屋外活動への影響評価」 …… 19
○大山 剛弘（国立環境研究所）

2月20日(金)

9:30~9:35 事務連絡

研究発表 <大気汚染・化学物質>

座長：菅田 誠治 (国立環境研究所)

- (9) 9:35~10:00 「化学輸送モデルに AI 技術を取り入れた新たな大気汚染予測システムの開発と実用化」22
○山村 由貴 (福岡県保健環境研究所)
- (10) 10:00~10:25 「自動同定定量システム (AIQS-GC) を用いた北九州市内公共用水域の平常時のスクリーニング分析について」25
○陣矢 大助 (北九州市保健環境研究所)

10:25~10:35 (休憩)

<環境 DNA・水環境・生態系>

座長：熊谷 直喜 (国立環境研究所)

- (11) 10:35~11:00 「脊椎動物ユニバーサルプライマーの選定と課題－国Ⅱ型研究成果報告－」28
○長谷部 勇太 (神奈川県環境科学センター)
- (12) 11:00~11:25 「赤土流入量の異なる生育環境に移植したサンゴの成長・生残について」30
○比嘉 彩也香 (沖縄県衛生環境研究所)
- (13) 11:25~11:50 「web 市民参加調査によるサンゴ白化の可視化とモデリング解析」32
○熊谷 直喜 (国立環境研究所)

11:50~11:55 閉会挨拶

国立環境研究所 理事 三枝 信子

廃棄物処理からの有機フッ素化合物（PFAS）排出量把握に関する研究

○松神秀徳¹・倉持秀敏¹・鈴木剛¹・小林拓朗¹・三宅祐一²・平井康宏³・小柴絢一郎³・
 矢吹芳教⁴・和田匡司⁴・小野純子⁴・中村昌文⁵
 （¹ 国立環境研究所・² 横浜国立大学・³ 京都大学・
⁴ 大阪府立環境農林水産総合研究所・⁵ 株式会社日吉）

1. はじめに

近年、有機フッ素化合物（PFAS）による環境汚染と健康影響が世界的な課題となっている。有機フッ素化合物は、耐熱性、耐薬品性、撥水性などの優れた特性を持つため、工業製品から日用品まで幅広く利用されてきた。しかし、有害性に関する評価や見直しが進む中で、ペルフルオロオクタンスルホン酸（PFOS）やペルフルオロオクタノ酸（PFOA）など有害性が明らかな PFAS については、国際条約や国内法規に基づく対策が強化され、含有品の管理や曝露防止の徹底等が求められている。さらに、PFOS や PFOA 以外の PFAS についても、欧米を中心に有害性に関する議論が進展しており、PFAS の存在状況や排出量に関する知見の収集、評価手法の開発、排出削減策や管理方策の検討が急務となっている。

我々はこれまで、PFAS 含有品・廃製品の適正管理に向けた調査研究を進めてきた。その中で、モニタリング・分析法の検討、実測調査の実施、廃棄物処理に伴う PFAS の存在状況と排出量の把握、廃棄物処理からの排出削減策の検討を行ってきた^{1,2)}。その結果、PFAS のモニタリング技術とモデル推計手法の最適化を同時並行で進め、PFAS 管理に実効性のある評価手法を開発すること、さらに排ガス処理や廃水処理等による PFAS の排出削減策を必要に応じて検討することが、PFAS 管理と調和する資源循環・廃棄物処理を進める上で重要な留意事項であると考えられた。しかし、PFAS は 10,000 物質以上が存在し、極性や揮発性など多様な物性を有するため、どのような PFAS に着目し、どのように把握するか、また工業製品から日用品まで幅広い用途の中で、どの含有品・廃製品を対象に、どのように管理するか、といった課題が挙げられた。評価手法の開発や排出削減策の検討において、PFAS 特有の困難性が認められた。

以上を踏まえ、現在我々は、PFAS 含有品・廃製品の管理方策を開発するため、モニタリングとモデル推計の二つのサブテーマで相互に連携しながら研究開発を進めている。PFAS 管理に実効性のある評価手法の開発と排出削減策の検討を行い、廃棄物処理に伴う PFAS の存在状況、環境排出量、環境中濃度に関する知見の収集と評価を進めている（図 1）。

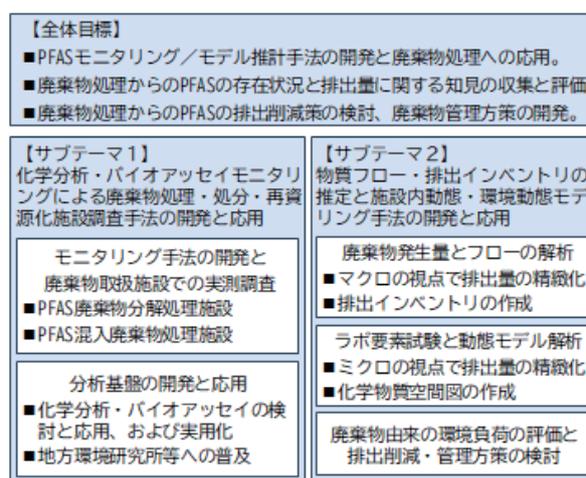


図 1 研究の全体概要図

2. 調査方法と結果

2. 1. モニタリングに係る研究開発（サブテーマ 1）

モニタリングに係る研究開発では、ロータリーキルン式焼却炉による高濃度 PFAS 含有品の分解処理施設を対象に実測調査を行い、実排ガス採取における高温・高湿度の影響、共存物質の影響、吸着剤のブランク汚染など、モニタリング・分析上の課題を抽出し、対策を整理した。PFAS 含有模擬排ガス発生装置を構築し、実排ガスを想定した条件下での PFAS の採取挙動や損失要因を詳細に検証するための実験体制を整備した。技術的留意事項³⁾の排ガス採取装置に接続する XAD-2、

PUF、GAIAC 吸着剤について、34 種類のイオン性 PFAS の回収実験を行った結果、吸着剤ごとの化学的親和性や抽出性能の違いが回収率に影響を与える可能性が示された。XAD-2/CBA 吸着剤について、121 種類の PFAS の回収実験を行い、111 種類で安定かつ高い回収性能を確認した。実廃製品の混合物を対象に化学分析による実測調査を行った結果、PFAS の多くは紙ごみと繊維ごみに由来すると判断された。このことから、フッ素加工された紙製品や繊維製品の混入回避策の検討、ならびに製品の設計・製造段階でのフッ素フリー化は、廃棄物処理に伴う PFAS 排出削減とリスク低減にも寄与すると考えられる。さらに、市中の耐油紙・紙ごみおよび防水繊維・繊維ごみについて化学分析を行い、PFAS の存在状況に関する知見を収集・評価し、発生源となる PFAS 含有製品・廃棄物を特定した。PFAS CALUX バイオアッセイ⁴⁾の維持管理体制を整備し、77 種類の PFAS 標準物質について活性スクリーニングを実施した結果、13 種類の PFAS において甲状腺ホルモン運搬タンパク質 (TTR) に対するサイロキシシ (T4) の競合阻害活性を確認した。



図2 排ガス採取装置構成 (上) と分析の全体概要図 (下)

2. 2. モデル推計に係る研究開発 (サブテーマ2)

モデル推計に係る研究開発では、PFAS 含有品である耐油紙およびカーペットを対象に、4 種類の PFAS (PFOA、PFHxA、8:2 FTOH、6:2 FTOH) の廃棄物処理施設への流入量と、処理過程における環境中への排出量を推定した。廃棄物処理施設への PFAS 流入量において、耐油紙とカーペットは同程度の寄与を示した。また、1 年間に廃棄物処理施設から耐油紙・カーペット由来の PFAS が 0.3~6 kg 排出されると推定されたが、不確実性が大きく、今後の精緻化が必要である。さらに、廃棄物固形燃料製造施設における PFAS の排出量とフローを実測に基づき推計・解析した。排出量予測法の開発に向け、ラボ実験により施設内の主要発生源からの PFAS 放散量 (最大値: $640 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{min}$) を把握し、温度変化に対応した放散量の予測手法も提示した。また、同施設の化学物質空間図を作成し、PFAS のガス態と粒子態の割合を明示した。メタン発酵におけるフッ素系撥水剤からの PFAS 放出量を評価した結果、撥水剤 1 mL あたり $5.5\sim 8 \mu\text{g}$ の PFAS が放出され、主要成分は製造年によって異なるものの、8:2 FTOH および 6:2 FTCA であった。さらに、発酵液の固液分配係数を評価した結果、特に 6:2 FTCA や 5:3 FTCA の値は、PFOA より低く、0.2 L/kg-SS 未満であり、排水処理等への流出が懸念された。

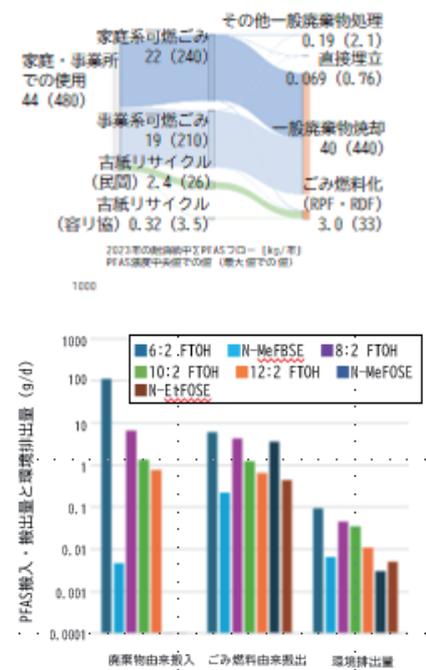


図3 耐油紙 PFAS フロー (上) と廃棄物固形燃料の製造施設からの PFAS の排出量とフロー (下)

3. 結論

モニタリングに係る研究開発では、PFAS 廃棄物取扱施設からの PFAS 排出量を把握するため、廃棄物、燃え殻、排ガス、廃水、汚泥などに含まれる PFAS のモニタリング・分析方法を開発し、実機での検討を行うとともに、廃棄物由来 PFAS の存在状況に関する知見の収集と評価を進めた。これまで、廃棄物処理に伴う PFAS 排出量の実測調査は十分に行われておらず、特に排ガスや周辺

環境大気の採取・分析方法は十分に検討されていなかったため、本研究結果は新たな知見を提供するものである。本研究では、規制・懸念 PFAS のターゲット分析に加え、全酸化性前駆体分析、全加水分解性前駆体分析、抽出可能有機フッ素分析、総フッ素分析、さらにバイオアッセイまで、多角的な分析方法を検討した。このような包括的な調査・研究例は極めて少なく、PFAS の実在濃度と潜在濃度、フッ素のマスバランス、さらに TTR に対する T4 競合阻害活性まで評価することで、廃棄物由来 PFAS の存在状況に関する理解を深め、発生源となる含有品・廃製品の特特定が可能となった。また、国内で初めて PFAS CALUX バイオアッセイを導入し、試験系を実施できる体制と維持管理可能な施設を整備した。さらに、PFAS 標準物質を対象に PFAS CALUX による活性スクリーニングを行い、13 種類の PFAS において TTR に対する T4 競合阻害活性を確認した点は重要な知見である。

モデル推計に係る研究開発では、PFAS 廃棄物の処理量とフローを把握した。これまで、廃棄物の排出から処理・処分・再資源化に至る PFAS 廃棄物の処理フローは整備されておらず、本研究は新たな知見を提供するものである。これにより、廃棄物の処理・処分・再資源化に伴う排出量と排出インベントリを推定が可能となり、先導的な解析が期待される。さらに、PFAS 廃棄物取扱施設における施設内動態の把握も進めている。具体的には、廃棄物固形燃料製造施設における PFAS 排出量やフローの解析結果は新たな知見であり、同施設からの排出量を現場で実測せずに推計する方法を開発した。この方法は排出量の把握に有用であり、多くの機関での活用が期待される。同様に、メタン発酵施設における PFAS 動態予測に必要なパラメータ、すなわち発生源であるフッ素系撥水剤からの PFAS 放出量および発酵液中の PFAS 固液分配係数を明らかにした。これらの実験結果はいずれも未報告であり、新たな知見を提供するものである。

4. 今後の課題

モニタリングとモデル推計の結果は、廃棄物処理に伴う PFAS 排出量の把握に寄与する。また、廃棄物処理施設におけるフローと排出量の推定は、PFAS 排出削減策の検討や管理の強化に資する。さらに、環境負荷低減を意識した製品や再生品など、PFAS 対応技術の開発への貢献も期待される。したがってモニタリングとモデル推計の手法は、廃棄物や環境中の PFAS の存在状況や排出量に関する知見の充実、ならびに排出削減策の検討と管理強化に重要な役割を果たすと考えられる。以上を踏まえ、今後の課題は、モニタリングおよびモデル推計手法の精緻化と普及を図るとともに、PFAS 含有品・廃製品の管理方策を開発し、管理に向けた環境整備を推進することである。

参考文献

- 1) Matsukami, H., Saito, J., Miyake, Y. (2024). Impact of tightening environmental regulations against long-chain perfluoroalkyl acids on composition of durable water repellents containing side-chain fluorinated polymers. *Science of the Total Environment* 940: 173708.
- 2) Kuribara I., Motoki T., Matsukami H., Takahashi Y., Kuramochi H., 2024. Atmospheric concentrations of per- and polyfluoroalkyl substances and their emissions at a waste recycling facility producing refuse-derived paper and plastics densified fuel. *Science of the Total Environment* 954, 176456.
- 3) 環境省. (2022). PFOS 及び PFOA 含有廃棄物の処理に関する技術的留意事項.
- 4) Behnisch, P. A., Besselink, H., Weber, R., Willand, W., Huang, J., & Brouwer, A. (2021). Developing potency factors for thyroid hormone disruption by PFASs using TTR-TR β CALUX[®] bioassay and assessment of PFASs mixtures in technical products. *Environment International* 157: 106791.

謝辞

本研究は環境研究総合推進費（3-2403: JPMEERF20243003）の助成を受け実施した。

最終処分場浸出水中 PFAS の活性炭処理による除去特性に関する実証的研究

○渡邊育弥・小野純子・伊藤耕二・矢吹芳教
(地方独立行政法人 大阪府立環境農林水産総合研究所)

1. はじめに

有機フッ素化合物(PFAS)は少なくとも1つの完全にフッ素化されたメチル又はメチレン基(フッ素が結合している炭素原子に H、Cl、Br、I 原子が結合していないもの)を含むフッ素化合物と定義されており¹⁾、撥水性、撥油性等の物性を示すことから、コーティング剤、消火剤、調理器具など様々な用途で利用されてきた。一方で、化学的安定性が高いため環境中や体内で分解されにくく、また、一部の PFAS については有害性が指摘されていることから、ストックホルム条約において残留性有機汚染物質(POPs)に指定され廃絶等の対象となっている。

国内では PFOA、PFOS および PFHxS の製造・使用・輸入が禁止あるいは制限されている。過去に使用された PFAS は廃棄された後、焼却・脱水などの中間処理後に廃棄物最終処分場に埋め立てられている。現在は規制対象とはなっていないが、最終処分場からの浸出水中に含まれる PFAS の除去技術の確立は重要な課題である。

PFAS の除去に有効な処理技術としては活性炭処理やイオン交換処理があげられる²⁾。しかしながら、これらの報告は実験室や小規模施設における実験・実証に基づくものが多く、実処理施設において連続的に実施された研究例は限られている。特に最終処分場内の浸出水処理施設における活性炭処理工程での PFAS 除去率の実態は明らかになっていない。

そこで本研究では浸出水処理工程での PFAS の消長を明らかにするために、最終処分場内の浸出水処理施設における活性炭吸着処理に着目し、PFAS 除去率と通水量との関係を解析した。

2. 調査方法と結果

調査は、浸出水処理として活性炭処理施設を備えた管理型産業廃棄物処分場で実施した。活性炭処理前後の浸出水を活性炭交換直前に採水し、交換後は処理流量に応じて定期的に採取した。採水した試料は、弱陰イオン交換の Oasis WAX カートリッジ(Waters 製)を用いた前処理を行った後、LC-MS/MS(TQ4500、SCIEX 製)により PFAS を定量した。測定対象とした PFAS は、ISO 21675-NSS(WELLINGTON 製)に含まれている 30 成分に浸出水中で検出頻度が高いとされている 4 成分を加えた 34 成分とした。また、全有機体炭素(TOC)の濃度を測定し、PFAS 濃度との関係を調べた。今回の報告では PFAS のうち POPs 条約で指定されている PFOA、PFOS、PFHxS 及び PFOA の代替物質である HFPO-DA(GenX)を中心に述べる。

活性炭処理前の浸出水中の PFAS 4 成分の濃度は、PFOA、PFOS、PFHxS 及び GenX で、それぞれ 5500、56、16 及び 1100 ng/L であり、カルボン酸を含有する成分の濃度が高かった。活性炭交換前後の PFAS 4 成分及び TOC の経時変化を図 1 に示す。横軸は通水量を活性炭容量で除した値であるベットボリューム(BV)、縦軸は除去率とした。PFOS 及び PFHxS については一定期間定量下限値以下まで除去できていた。PFOS、PFHxS 及び PFOA は BV=200 を超えても除去率 90%程度以上を維持していたが、BV=350 付近で除去率が低下した。GenX は交換直後から通水量の増加とともに除去率が低下しており、BV=200 を超えたあたりで除去率が 20%を下回った。TOC 除去率も通水量の増加とともに減少し、TOC 除去率と PFOS、PFHxS、PFOA 及び GenX 除去率との線形近似の相関係数は、それぞれ $r=0.49$ 、 $r=0.56$ 、 $r=0.78$ 及び $r=0.96$ であり、PFOA と GenX で有意な正の相関がみられた($p<0.05$)。PFAS と TOC では濃度のオーダーが 1.0×10^4 程度は異なるため PFAS 除去と TOC 除去の直接的な因果関係は明確ではないものの、両者の除去率に一定の関係性が見られたことは、PFAS 除去を推測するための運転管理上の指標として

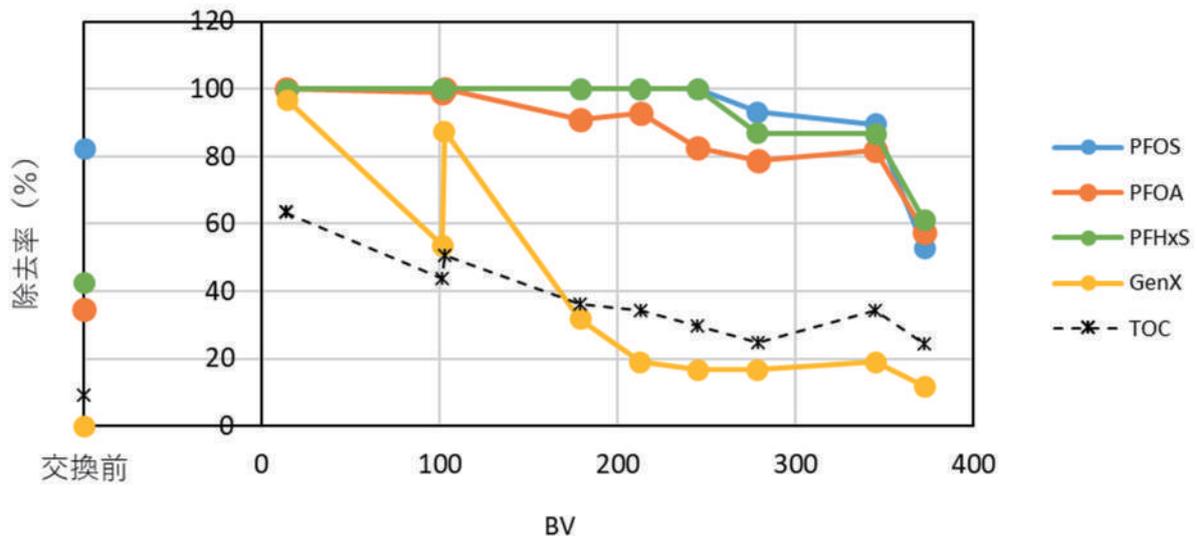


図1 活性炭処理によるPFAS 4成分及びTOCの除去率の経時変化

TOCなどの項目が活用できる可能性を示唆している。

3. 結論

調査地点とした最終処分場の浸出水処理施設内の活性炭処理工程における、PFAS 4成分の除去率は、活性炭交換直後はいずれも高い値を示したが、時間の経過とともに減少が認められた。特にGenXでは他成分よりも早期に除去率が低下した。TOC除去率も時間の経過とともに低下し、PFOAやGenX除去率との間に有意な正の相関がみられたことから、PFASよりも容易に測定が可能なTOCをモニターすることにより、PFASの除去率をおおよそ判断することができる可能性があるかと推察される。

4. 今後の課題

活性炭交換後半年分のPFASデータを解析したが、GenX以外の成分は50%以上の除去率を維持しており、活性炭処理の有効性を示した。PFOSの除去率はBV=345までは他の成分よりも高い値を維持したが、BV=372でPFOAおよびPFHxSよりも低くなった。この現象が一時的なものであるか否か、他のPFAS成分を含めたさらに長期的な除去率の変動を解析するために、引き続き観察していく必要がある。

参考文献

- 1) Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): Reconciling Terminology of the Universe of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (2021)
- 2) Lu, Jingzhao et al: A review of the occurrence, monitoring, and removal technologies for the remediation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from landfill leachate. Chemosphere, 332, 138824 (2023)

北海道 PCB 廃棄物処理事業における環境モニタリングの成果と将来への示唆

○姉崎克典¹・永洞真一郎¹・大塚英幸¹・仮屋遼¹
(¹(地独)北海道立総合研究機構 産業技術環境研究本部
エネルギー・環境・地質研究所)

1. はじめに

国内の高濃度 PCB 廃棄物の処理は、環境省が所管する特殊会社である中間貯蔵・環境安全事業株式会社 (JESCO) が、2004 年から全国 5 カ所に処理事業所を設置して実施してきた。すでに処理を終了した事業所もあり、北海道事業 (室蘭市設置) についても、2025 年度をもって処理が完了する見込みである。処理事業の適切な運営を担保するための行政対応の一環として、施設からの PCB 排出源モニタリングに加えて、周辺環境モニタリングが行われている。本機構は、その実施機関として 2008 年より調査を実施してきた。本報告では、これまでのモニタリングの概要を示すとともに、本機構が果たしてきた役割について紹介する。

2. PCB 処理施設に係るモニタリング

JESCO 室蘭事業では、高圧コンデンサやトランスを金属ナトリウムによる脱塩素化分解処理する当初施設と、安定器やその他汚染物をプラズマ炉による熱分解により処理する増設施設がある。行政と JESCO の協定に基づいて実施するモニタリングでは、それぞれの施設に係る排気ガス及び施設全体の排水における調査を行い、PCB のほかダイオキシン類やベンゼン、ばいじん、SO_x、NO_x、HCl、Hg の調査を行っている (発生源モニタリング)。また、周辺環境への影響を把握するため、室蘭市 5ヶ所における大気、室蘭港内の海水や底質の調査を行っている (周辺環境モニタリング)。PCB の分析にあたっては、高分解能 GC/MS による、209 種の全コンジェナー分析を適用した。

3. モニタリングにおける道総研の関わり

PCB 処理施設の発生源・周辺環境モニタリングを実施するにあたり重要な点は、各種マニュアルに従い高精度の分析を行うことはもちろん、限られたリソースの中でいかに効果的・効率的にデータを取得し、それらを行政や市民にとって納得性のある情報として発信できるか (アカウントビリティ) である。この原則のもと、我々は本モニタリングに際し、以下の取り組みを行ってきた。

1) モニタリング方針の決定への関与

モニタリング計画の策定にあたって、事前に先行調査と文献調査を実施し、効率や費用面から妥当なモニタリング方法を提案した。

- ・環境大気についてはダイオキシン類の方法に準拠し、四半期ごとにハイボリュームサンプラーにより一週間サンプリングを施設を取り囲むように市内 5 か所 (輪西、御前水、東、祝津、白鳥台 (対照地点)) で実施。
- ・海域への影響を把握するため、室蘭港内の環境基準点 (ST4) と施設排水の流入地点での水質と底質のモニタリングを実施。
- ・生物モニタリングについては、必要性・効率性の観点から実施しない方針とした。

2) モニタリング技術の開発と改良

PCB は置換する塩素数により性状 (特に揮発性) が大きく異なり、特に 2008 年当時は環境大

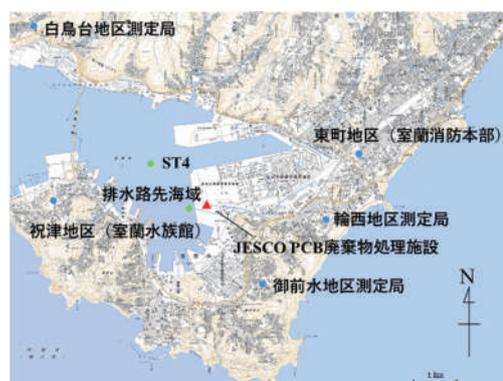


図1 環境モニタリングポイント

気や排ガスについては低塩素化体を定量的に採取・分析する技術が求められていた。このため、一部で使用されていた活性炭フェルトを使用して採取を行う方法についてその妥当性評価試験を実施し、各モニタリングへの適用を行った。また、環境大気については四半期毎の一週間採取では年間を通した連続性に欠けることから、低流量（20～30 L/min）で一ヶ月間連続採取が可能な方法を確立し、実運用に導入した（御前水でモニタリングを実施）。

3) 汚染源推定方法の開発

国内で使用された PCB のほとんどは鐘淵化学工業製のカネクロール（KC）であり、環境中で検出される PCB もその組成の影響を大きく受けている。一方、PCB は燃焼過程でも生成することが知られ、DL-PCB の割合が高いなど、KC とは異なる特徴をもつ。この点に着目し、環境中で検出される PCB の汚染由来を推定し、長期的なモニタリングによって由来別のトレンドを把握するとともに、アクシデント発生時には濃度だけでなく組成情報に基づき影響評価を行う手法を開発した。汚染由来としては KC 製品 4 種（KC300、KC400、KC500、KC600） および燃焼起源を対象とし、ケミカルマスバランス法による寄与率解析手法を確立した。また、モニタリング開始後、顔料などの非意図的生成 PCB の寄与も無視できないことがわかり、黄色顔料や緑顔料を汚染由来として加えた解析手法も開発した（後述）。

4. モニタリング結果

<環境大気>室蘭市内 5ヶ所での大気環境中の PCB 濃度の変動を図 2 に示す。PCB 濃度は、各測定ポイントで数十～数百 pg/m³ であり、祝津地区が高く、白鳥台が低い傾向が認められた。この濃度は環境省が実施している化学物質実態調査（以下、黒本調査という。）における全国各地の結果と比較しても同等レベルの濃度範囲であった。基本的に冬期に濃度が著しく低下し、逆に夏期はその 10 倍以上となる傾向が例年認められており、土壌や海域と大気間で揮発と凝縮・沈降を繰り返している（季節循環）ことが観察された。一方、御前水地区で実施した一ヶ月採取の結果（図 3）では、一週間採取と同様に夏期に濃度が高くなる傾向が認められたが、その上昇の度合いは緩やかであり、長期の連続採取により、気象要件等が平均化されていることが窺えた。

<水質・底質>室蘭海域 2ヶ所での海水の PCB 濃度は調査開始から 54～530 pg/L の範囲であり、ここ数年は 100 pg/L 程度で推移していた。この濃度は黒本調査の結果と比較すると、全国の海域における PCB 濃度の平均とほぼ同等であった。底質の PCB 濃度は調査開始から 19～44 ng/g の範囲であり経年的な変化は認められなかった。黒本調査の結果と比較すると、全国の海域における PCB 濃度の平均よりやや高い濃度であった。

<発生源>当初施設及び増設施設における排気ガスは、概ね 0.1～10 ng/m³ であり、全て排出管理目標濃度（0.01 mg/m³）を大幅に下回る濃度で管理されていた。

5. モニタリングを通して見えてきた問題

<非意図的生成 PCB>

PCB をコンジェナー別に分析した結果、ほとんどはあらかじめ想定した KC 由来また

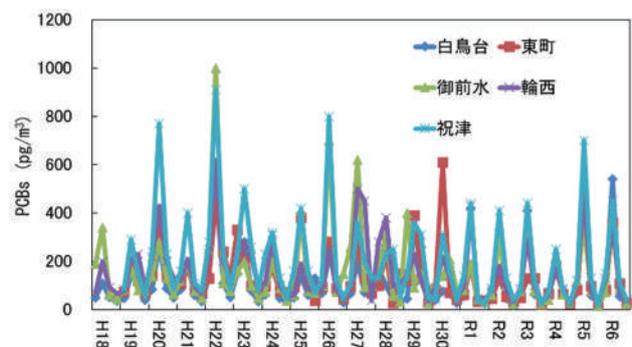


図 2 環境大気モニタリング結果（一週間採取）

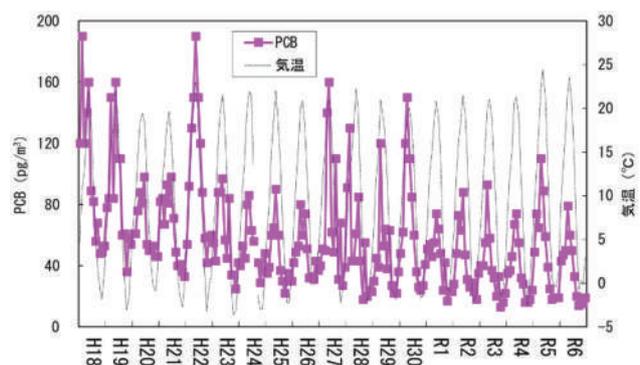


図 3 環境大気モニタリング結果（一ヶ月採取）

は燃焼由来のパターンを示したが、いずれにも分類できないものも一部確認された。中でも最も顕著であったのが、顔料由来とされる PCB-11 である。特に環境大気ではその寄与が大きく、全体として PCB 濃度が低下傾向にある中で、PCB-11 については横ばい、あるいは増加傾向を示唆する結果も得られた。PCB-11 は主として黄色のアゾ顔料に含まれ、その原料である 3,3'-ジクロロベンジジンの製造過程で生じる副生成物が起源と考えられている。業界の取り組みにより、顔料に含まれる PCB 濃度は一定以下に抑えられているものの、顔料は開放系で使用されるため、非意図的生成 PCB として今後も環境中へ一定の寄与を示し続ける可能性が高い。その他、緑色フタロシアニン顔料やフェニルシラン（シリコン）など、他の副生成 PCB の存在も明らかとなった。これらの知見は、モニタリング結果の解釈にあたっての基礎データとして活用した。また、バイズ型半因子組成モデルを用いて顔料由来の PCB の寄与も確認できる汚染由来解析方法を新たに作成した。これを一ヶ月採取の大気試料に適用したところ、概ね KC300 の寄与が最も強く、次いで KC500 であった。黄色顔料（アゾ顔料）の寄与は 10%弱程度で推移していた（図 4）。

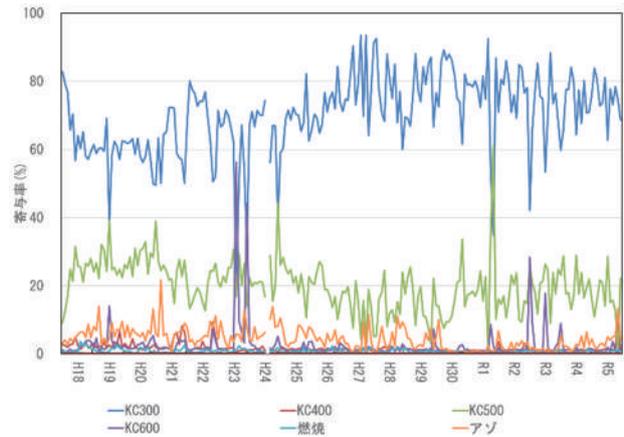


図 4 環境大気 PCB の汚染由来推定結果

<気温影響の顕在化>

比較的長期的な傾向を把握できる低流量（一ヶ月採取）の大気調査結果では、高濃度 PCB 処理の進捗に伴い、PCB 濃度が年々低下する傾向が確認され、環境が清浄化へ向かっていることがうかがわれた。一方、一週間採取による調査では、特に夏期に突発的な濃度上昇が観測された。特に採取期間中に 30℃を超える（室蘭では）高温日が含まれる年では、他の時期と比べて著しく高濃度となる傾向が見られた。すなわち、近年の気候変動により室蘭でも高温化が進めば、PCB 処理事業終了後であっても、従前より高い濃度で観測される可能性があることが示唆された。

環境中に放出された PCB が元の組成を維持し続けることはなく、分解や各コンジェナーの揮発性の差異などにより複雑な挙動を示すことが想定される。そのため、得られたデータについては、気温上昇に伴う他地域からの大気移動の影響なのか、あるいは PCB 処理施設の解体に起因するものなのかを組成解析により慎重に検討することが求められる。

6. モニタリングの意義と今後の展開

室蘭による PCB 廃棄物処理はまもなく終了し、令和 8 年度からは施設の解体撤去が進められる。これまで続けられてきたモニタリングは今後も継続され、その作業の適切な履行状況を確認していくこととなる。このため、原則的にモニタリングは変更せず、これまで蓄積していたデータとの照合や、前述の課題を総合的に考慮したデータの提供が求められることとなる。

本モニタリングで得られたこれまでのデータは、長期にわたる連続性を有し、気象条件や気候変動、社会的活動量の変化など、単年では判別できない時間変動を把握できることから、施設解体や事後環境管理で今後異常値が出た際の究明において過去にさかのぼって判断する基準となるであろう。すなわち、長期モニタリングデータは、過去の影響を評価するだけのものではなく、施設廃止・解体後の安全性確認、将来の未知の環境リスクへの備え、また行政・研究・社会の各領域で永続的に活用できる“環境資産”であることから、今後もこれらの知見を適切に整理・共有し、地域の環境保全や関連施策の検討に資する基盤情報として位置付けていくことが重要である。また、得られた経験と成果を広く活用することで、その価値をより確かなものとする必要がある。

群馬県における暑さ指数と熱中症救急搬送者数の解析

○熊谷貴美代
(群馬県衛生環境研究所)

1. はじめに

2025年8月、群馬県伊勢崎市で国内観測史上最高となる気温41.8℃を記録した(気象庁)。2022年にも県内の複数地点で40℃を超える気温が観測されており、近年の過酷な暑さは、熱中症のリスクを高める。群馬県は関東平野の内陸に位置しており、夏季は高温多湿となりやすく、熱中症対策は喫緊の問題である。本研究では、熱中症予防対策に資する科学的知見の取得を目的に、暑さ指数(WBGT)の提供データを利用して群馬県における暑熱環境の把握と熱中症救急搬送者数の関係や地域特性について解析した^{1,2)}。

2. 方法

解析期間は2022~2024年(一部2025年含む)とした。暑さ指数は、WBGT実況推定値の時間値データを用いた(環境省熱中症予防情報サイト)。群馬県内でWBGTデータが提供されている地点は、図1に示す13地点であり、本研究では県内を4つの地域に分けて解析を行った¹⁾。県中部、東部、西部は関東平野、県北部は山間地である。



図1 WBGT実況推定値提供地点と本研究における地域区分

熱中症救急搬送者数は、消防本部管轄地域単位(11地域)の搬送者数データを用いた。これらも図1の地域区分に分けて解析した。解析には県内の年齢別人口データも利用した。

3. 結果と考察

(1) 暑さ指数の状況

群馬県では、桐生、館林など関東平野の地点で猛暑日日数は経年的に増加傾向であり、2025年には桐生ほか4地点で年間50日を超えた。沼田や中之条など山間地の地点でも近年猛暑日が増加している。

暑さの程度を把握するため、WBGT日最高値について、各月のランク別頻度を集計した。データ区分は、警戒:25~28℃、嚴重警戒:28~31℃、危険:31℃以上とした³⁾。図2に例として2024年7~9月の結果を示す。

全体的には県中部、東部、西部の平野部地点でWBGTが高く、それらの地点では、7~9月はほとんどの日が嚴重警戒レベル以上となっており、7、8月を中心に危険レベルの頻度もかなり多かった。沼田、中之条、みなかみなど山間地の地点でも、WBGTは嚴重警戒、危険レベルの日数が比較的多く、2022年に比べて2023、24年はそれらの頻度は増えていた。標高1000m以上の高地にある草津や田代(嬬恋)では、警戒レベル(WBGT \geq 25℃)の日が月に10~20日ほどであった。

6月に関しては草津・田代を除きWBGTが25℃以上

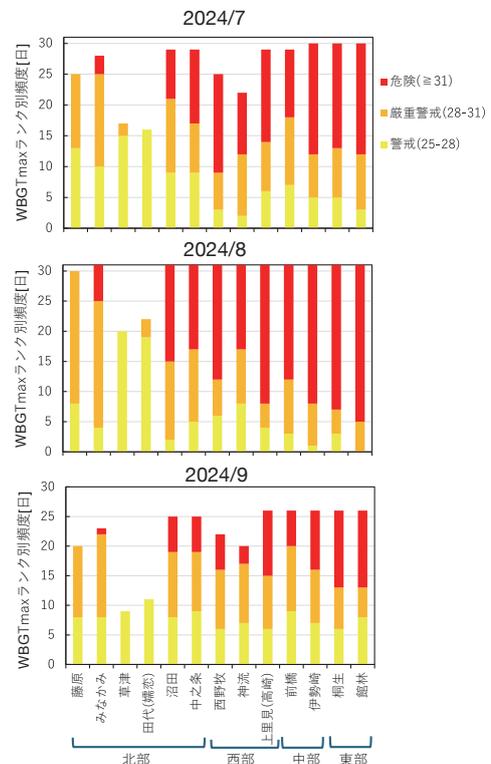


図2 月別WBGT日最高値のランク別頻度(2024年7~9月)

になる日が半月ほどあり、2022年では6月末に気温が複数地点で40℃を超え、WBGTが危険レベルに到達していた。

(2) 熱中症救急搬送者の状況

年齢別の熱中症救急搬送者数(図3)は、高齢者が最も多く、全体の半数以上を占めていた。次いで多いのは成人であった。県内で国内最高気温を記録した2025年はこの4年間で最も多かった。

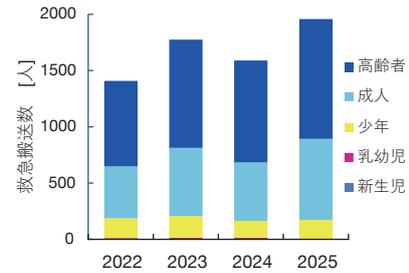


図3 年齢別熱中症救急搬送者数

図4に2024年の地域別、年齢区分別の熱中症発症率を示す。地域や年齢区分によっては人口が1万人に満たないため、ここでは1000人あたりの搬送者数とした。熱中症救急搬送者数では高齢者に次いで多いのは成人であったが、熱中症発症率で見ると、いずれの地域も高齢者が最も高く、次いで少年であった。また発症率を地域間で比較すると、2022年は県北部が他地域に比べて若干低いという差がみられたが、2023、24年では県北部も県東部や中部と同程度になっており、明確な地域差は見られなかった。これらの年は前述のとおり県北部地点でもWBGTが高かったことが影響していると考えられた。WBGTが高い平野部の県東部や中部が注目されがちであるが、北部においても熱中症対策は重要である。

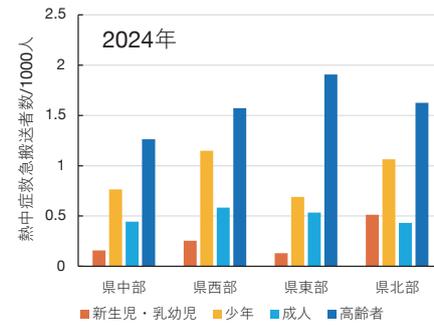
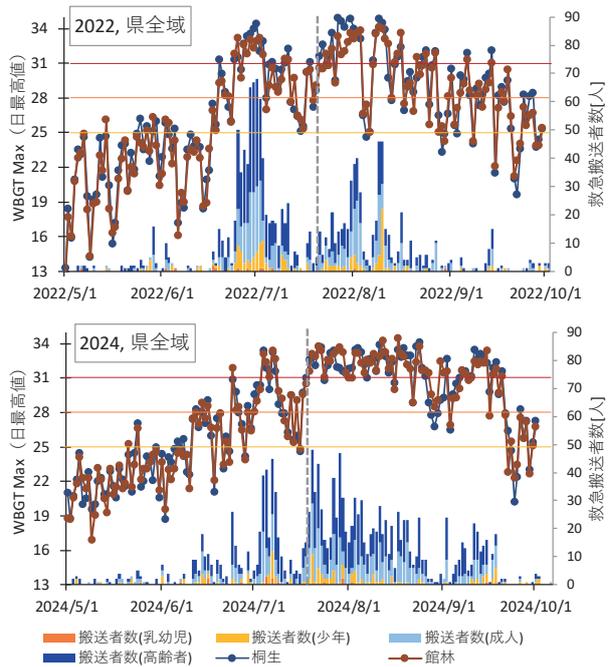


図4 地域別・年齢区分別の熱中症発症率(2024年)

(3) 熱中症救急搬送数と暑さ指数の関係

図5に2022、2024年におけるWBGT日最高値と熱中症救急搬送者数の推移を示す。WBGTは最も数値の高い桐生と館林のデータを示した。



WBGTが上昇すると熱中症救急搬送者数が多くなる傾向が見られた。例えば2022年は、気温が40℃を超えた6月下旬から7月初旬にかけてWBGTは31℃を超える状況が数日間続き、その間における搬送者数の増加が顕著であった。7月中旬にはWBGTの減少とともに搬送者数も減少したが、梅雨明け後にはWBGTは再び上昇して31℃以上となり、搬送者数も増加ピークが見られた。2024年も梅雨明け前のWBGTが上昇した時期に搬送者数の増加ピークが見られている。梅雨明け直後には、WBGTの増加とともに再び搬送者数の増加が見られたが、梅雨明け後から8月末までWBGTが31℃を超える状況が長く継続しているのに対し、搬送者数はやや減少した。暑熱順化が進んだことや各個人が熱中症対策を講じるようになったことで搬送者数が抑えられたのではないかと推察される。また、この年は9月にもWBGT増加に伴う搬送者数の第3の増加ピークが見られた。

図5 2022、2024年のWBGT日最高値と熱中症救急搬送者数の推移(図中の縦破線は梅雨明け日)

梅雨明け前後の熱中症発症リスクを調べるため、梅雨明け前後に期間を分けて、WBGTと年齢別の平均搬送者数の関係を解析した²⁾。その結果、梅雨明け前と梅雨明け後では、高齢者では

WBGT 27℃以上から差が見られ、梅雨明け前の方が WBGT の値に対して搬送者数は大きく増加することが分かった。WBGT 33℃で比較すると、搬送者数は梅雨明け前と梅雨明け後ではおよそ3倍となっており、梅雨明け前はそれだけ熱中症発症リスクが大きいことが示唆された。成人でも梅雨明け前の方が発症率は高かったが、発症率が増える WBGT 値は高齢者よりも高い側にシフトしていた。

梅雨明け前は、体の暑熱順化の程度が低いいため熱中症発症リスクが高いと考えられる。また高齢者は若年層に比べて熱中症リスクが高く、十分な注意が必要と言える。

4. まとめ

群馬県内の暑さは2022～2025年の4年間連続して記録的な暑さとなり、WBGTは平野部の地点を中心に、7～9月の大部分は嚴重警戒レベル以上(WBGT \geq 28℃)で、危険レベル(WBGT \geq 31℃)となる日も相当に多かった。熱中症救急搬送者数および発症率ともに、高齢者が最も多かった。また熱中症発症率は、地域差はあまり見られなかったことから、山間地の県北部においても熱中症の対応が必要と考えられた。WBGTの変動と熱中症救急搬送者数の変動パターンから、①梅雨明け前のWBGT上昇時、②梅雨明け直後、③9月のWBGT上昇時に、搬送者数の増加ピークが見られ、また梅雨明け前は梅雨明け後よりも熱中症発症率が高いことが示された。これらのことから、暑熱順化していない梅雨明け前の早い時期から熱中症への注意喚起が重要と考えられた。本研究で得られた解析結果を今後の熱中症予防対策に活用していきたい。

参考文献

- 1) 熊谷, 群馬県衛生環境研究所年報, 55, 34-38 (2023)
- 2) 熊谷, 群馬県衛生環境研究所年報, 57, 20-25 (2025)
- 3) 日本生気象学会. 日常生活における熱中症予防指針 Ver.4 (2022)

【謝辞】 本研究で用いた熱中症救急搬送者数データは、群馬県消防保安課から提供を受けました。

北海道の熱中症搬送者と対策、および暑さの将来変化について

○大屋祐太¹・鈴木啓明¹・野口泉¹・三村慧¹

(¹ 北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所)

1. はじめに

近年、気候変動や都市化の進行に伴い、日本各地で熱中症による被害が増加している。寒冷地である北海道においても例外ではなく、都市部や内陸部を中心に気温の上昇傾向は強く、近年（特に2021年、2023年、2025年）は記録的な高温に見舞われ、熱中症による救急搬送者数（以下、搬送者数）が増加した。本発表では、北海道における過去の搬送者数データの解析と確率モデルの構築、大規模アンサンブル気候予測データを用いた将来の暑さ予測と普及啓発動画の作成、および地域社会への適応策としての小学校における教育実践活動について報告する。

2. 北海道における熱中症の特徴と確立モデルの作成

北海道における搬送者数は例年1000人程度（人口比率で全国平均の半分以下）であるが、近年の高温年には2000人を超えている。特に北海道全域および札幌市の搬送データを分析した結果、本州の都市（東京、名古屋、大阪、福岡など）と比較して、より低い暑さ指数で搬送者数が増加し始める傾向（低いTipping point¹⁾がある。さらに北海道内においても主要都市間のデータを比較した結果、札幌、函館、釧路の順により低い暑さ指数で搬送者数が増加し始める傾向が確認された。これは、寒冷地特有の暑熱順化の遅れや、家庭・職場・学校等におけるエアコン設置率の低さなど、インフラが暑さを想定していないこと等が要因として示唆される。また、札幌市内において気象観測データを用いて地域内の温度差を分析した結果、海風の影響を受ける沿岸部と内陸部で同日同時刻に5℃以上の気温差が生じる事例が確認されており、局所的な気象条件の違いが住民に影響を与える。

搬送者数は、同じ気温や暑さ指数であっても、日によって0人の日もあれば数十人に達する日もあるなど、極めて大きなばらつきを持つ。本研究では、このばらつきを単なる誤差として扱わず、システムが不安定化している兆候（シグナル）として捉える確率評価モデルを構築した。具体的には、水文学にも応用されているブラウン運動などの不規則な現象を記述する確率微分方程式²⁾を用いて数理モデル化した（図1）。構築したモデルは、「発生の有無」と「発生強度」の二段階の確率評価を行い、単に平均値を予測するのではなく、極端事象（イベント等で大量の搬送者が発生する可能性）を評価できることを目指した。これにより任意の暑さに対する平均搬送者数に加え、救急体制が逼迫する規模になる確率が議論できるほか、パラメータの調整により適応策のシミュレーションが可能となる。

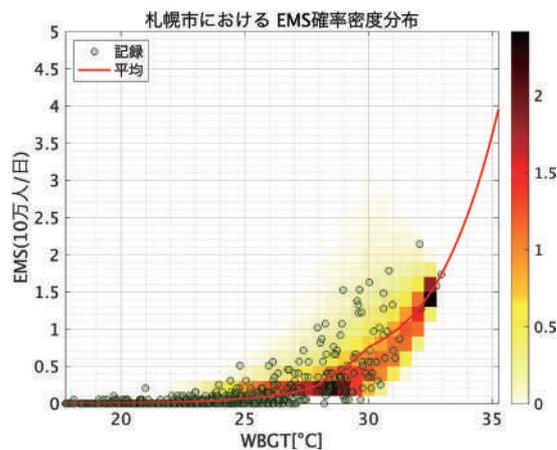


図1 作成した熱中症モデルによる確立分布

3. 北海道における暑さの将来予測

将来の気候変動が北海道の暑さに与える影響を評価するため、d4PDF（地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース）の5kmダウンスケーリングデータを用いて解析を行った。過去気候、2度上昇シナリオ、4度上昇シナリオにおける暑さ指数の日最高値の頻度分布を比較した結果、温暖化の進行に伴い分布全体が高温側にシフトしたことに加えて、Tipping point を超え

る頻度が急増することが示された（図2）。また、d4PDFの予測データに基づき、21世紀末の北海道の天気予報を模した啓発動画を作成し、公開した³⁾。

4. 教育現場における実践協力

研究成果を地域社会の適応策へと還元するため、札幌市立発寒東小学校（尾形朝良教諭 協力）において、総合的な学習の時間を利用した熱中症対策のプロジェクト型学習に協力した⁴⁾。熱中症リスクには地域差や不確実性が大きなこと、現在の子ども世代が将来気候において大きなハザードに直面することから、児童に対し、単に知識を教えるだけでなく、インプット、体験、企画、調査、アウトプットというプロセスを経て、自らが主体的に対策を考えるカリキュラムを設計し熱中症をテーマとして実践するプロジェクトに参画した。

授業前後および全体のプロジェクト終了後にアンケート調査を実施した結果、プロジェクト前は「暑い」という感覚的な理解に留まっていた児童が、終了後には「熱中症の具体的な症状（重症度）」や「数値に基づく判断」に関する知識を定着させたことが確認された。これは、研究知見を教育現場向けに翻訳・パッケージ化することで、効果的な適応策となり得ることを示している。

5. 今後に向けて

今後は、地域ごとに確立モデルを調整し、d4PDFを入力値とした熱中症リスク評価を行い、自治体や医療機関との連携を図る。教育実践については、今回の熱中症対策プログラムを汎用的なパッケージとして展開し、寒冷地における適応策の身近な例題として提案したい。

謝辞 本研究は公益財団法人北海道科学技術総合振興センター「2024年度 若手研究人材・ネットワーク育成補助金」の助成を受けたものである。データ提供を頂いた北海道および札幌市（消防局、危機対策課）、実践に協力頂いた札幌市立発寒東小学校に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Oka K. et al. “Random forest analysis of the relative importance of meteorological indicators for heatstroke cases in Japan based on the degree of severity and place of occurrence.” *Environmental Research* 263, 120066 (2024).
- 2) 吉見ら：確率微分方程式の導入による降雨流出過程における降雨の不確実性の評価. 土木学会論文集 B1 (水工学), 71(4), I_259-I_264 (2015).
- 3) 北海道立総合研究機構 エネルギー・環境・地質研究所 特集ページ 気候変動で北海道はどうなる？ どうする?, https://www.hro.or.jp/industrial/research/eeg/development/publications/climate_change/index.html (2025年12月20日確認)
- 4) 尾形：総合的な学習の時間における熱中症予防教育プログラムの開発. ??, (2025).

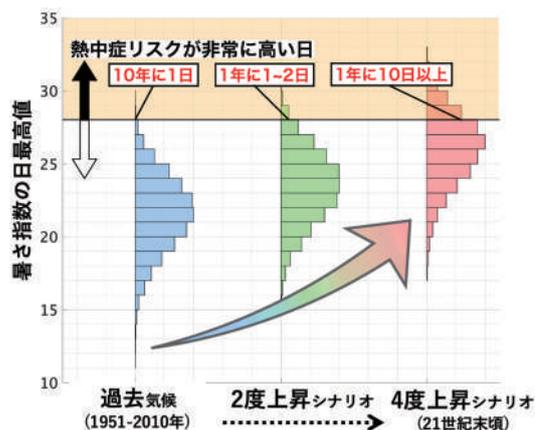


図2 暑さの将来予測



図3 授業の様子

WBGT 機器の比較観測結果

○大和広明¹・大野卓夫²・浜田崇²・岡和孝³
(¹ 埼玉県環境科学国際センター・² 愛知県環境調査センター・
³ 長野県環境保全研究所・⁴ 国立環境研究所)

1. はじめに

地球温暖化の進行に伴い、近年の夏は一層厳しい暑さとなっている。それに伴い全国的に熱中症による救急搬送数も増加している。こうした状況を受け、学校や労働現場では、暑さ指数 (WBGT) 計で測定した値を根拠に、活動や作業の可否判断、休憩・給水、作業強度の調整などの対策が進められている。特に、令和 7 年 6 月 1 日に改正施行された労働安全衛生規則¹⁾では、暑さ指数が 28℃以上の環境で作業を行う場合、熱中症が生じる可能性があることから、必要な熱中症対策を講じることが求められている。一方で、現場で測定される暑さ指数の精度自体が対策の実効性を左右する。電子式湿度計を用いた暑さ指数計の JIS 規格が制定される前に市販機の精度を検証した結果、晴天時に基準器との差が 1~2℃程度生じることが示されている²⁾。JIS B 7922 制定後も測定誤差に関する基準は設けられているが、学校や現場で使用する市販機器の誤差を把握しておくことは重要である。

そこで本報告では、夏季の屋外環境でいくつかの市販の暑さ指数計の比較観測を行い、測定精度と誤差を定量化するとともに、誤差要因を検討することを目的とした。

2. 調査方法

2. 1 市販の暑さ指数計の比較観測

市販の暑さ指数計による並行観測は、気温の極めて高い埼玉県北部と、日射量が高い標高約 1000m の長野県北部の 2 ヶ所において実施した。埼玉県北部では、埼玉県環境科学国際センターの屋上 (地面はリノリウム塗装) で、2025 年 7 月 23 日と 24 日に、長野県では、長野県環境保全研究所飯綱庁舎の駐車場 (地面はコンクリート) で、8 月 21 日と 22 日に比較観測を実施した。測定は雨が降らない 9 時から 16 時の範囲で実施した。

2. 2 市販の暑さ指数計の比較観測

JIS B 7922:2023 規格の CLASS1.5 に準拠し、15cm 黒球を備えた、鶴賀電気製の暑さ指数計 (小形 WBGT トランスミッタ) を基準の測器として、各種市販の暑さ指数計の暑さ指数、気温、相対湿度、黒球温度の比較を行う。



図1 比較観測の様子 (左：埼玉県北部、右：長野県北部)

比較観測の様子は図1の通りで、基準の測器を中央において、それを取り囲むように各種暑さ指数計を設置し、毎正時に、各種市販の暑さ指数計の表示部から値を読んで記録した。1回の観測に10分程度を要した。各種市販の暑さ指数計の黒球温度計の中心部が地上高1.5mになるように設置した。また、黒球温度計がついていない測器については、測器の中央部が地上高1.5mになるように設置した。

3. 結果

比較観測の結果を表1に示す。埼玉県で観測した、7月23、24日は大変暑い日で、両日共に観測された暑さ指数の平均は33℃であった。正午付近では34℃以上を観測した。それに伴い、気温も高く35℃前後、相対湿度の平均も約54%であった。一方で、長野県の観測では、8月21日が曇がちであったことから、暑さ指数が平均で約26℃であった一方で、27日は晴れたため、約28℃であった。

暑さ指数の差は概ね1.5℃以内であった。先行研究²⁾では、黒球温度計がついていない暑さ指数計は誤差が大きくなると指摘されているが、今回の結果では、測器ID13のように黒球温度計がついていない測器でも差が小さかった。一方で、測器ID2や3では差が大きく、日によっては2℃近い差となった。基準測器の暑さ指数の値が、埼玉県と長野県で、かなり異なるにもかかわらず、暑さ指数の差はなかった。気温と相対湿度は、基準測器との差が小さい測器(ID1,2,11,12)とそれ以外にわかれた。しかし、両者のグループの間の暑さ指数の基準測器との差はそれほど小さくなく、気温や相対湿度が大きく異なるのに、暑さ指数の差が小さいという結果となった。

表1 比較観測の結果

測器IDの基準が、基準測器で観測した、観測日ごとの平均の値、ID1~13が基準測器からの観測値の差を二乗して平均した値を観測日ごとに平均した値である

測器ID	黒球直径(mm)	暑さ指数、その差(℃)				気温、その差(℃)				相対湿度、その差(%)			
		7月23日	7月24日	8月21日	8月22日	7月23日	7月24日	8月21日	8月22日	7月23日	7月24日	8月21日	8月22日
基準	150	33.2	33.0	25.8	27.5	35.7	34.9	25.2	27.2	53.7	54.3	75.1	65.8
1	75	0.5	0.7	0.9	0.9	0.5	0.9	1.1	1.6	5.3	8.1	10.3	14.5
2	75	1.6	1.4	1.5	1.6	0.9	2.1	2.1	2.7	8.8	13.3	14.3	16.0
3	75	1.8	1.4	0.4	1.0	10.0	8.4	4.8	4.2	22.9	21.5	17.9	14.2
4	60	0.7	1.6	0.9	2.8	0.8	2.2	3.1	4.5	7.9	8.3	12.5	15.4
5	40	0.7	0.6	0.5	0.8	2.7	3.5	3.5	5.1	7.4	9.9	12.0	14.3
6	40	0.6	0.3	0.6	1.2	3.4	3.7	2.9	5.3	9.4	10.2	10.8	14.6
7	40	0.5	0.5	0.5	1.4	2.7	4.2	3.8	5.1	5.0	8.5	11.8	12.9
8	40	0.5	0.5	0.5	1.1	2.7	4.3	4.1	5.6	5.0	8.3	12.5	14.1
9	40	1.0	0.8	0.6	0.8	1.6	2.9	4.1	3.7	14.5	17.2	24.0	28.5
10	35	0.5	0.6	0.8	2.0	5.0	4.8	4.1	6.9	8.2	9.9	9.9	16.4
11	30	0.6	0.7	1.0	0.8	0.4	0.8	0.6	1.6	4.7	5.5	8.9	9.5
12	30	1.0	0.9	0.6	1.5	0.8	1.3	1.0	1.6	2.9	5.0	6.3	6.9
13	なし	0.9	0.9	1.2	1.1	4.5	5.5	3.9	4.5	11.0	13.3	14.6	12.7

参考文献

- 1) 厚生労働省労働基準局長：労働安全衛生規則の一部を改正する省令の施行等について。(2025)
<https://www.mhlw.go.jp/content/001490909.pdf> (2025年12月19日確認)
- 2) 齊藤 宏之・澤田 晋一：夏季屋外環境における簡易型を含む市販 WBGT 測定器等の測定精度に関する検討. 労働安全衛生研究, 8(1), 41-48(2014).

猪苗代湖におけるカビ臭物質の発生予測

○落合孝浩¹・○木村和貴²
 (¹ 郡山市・² 郡山市上下水道局)

1. はじめに

猪苗代湖は福島県の中央部に位置する湖沼であり、南東部には郡山市の基幹浄水場の取水施設が設置され、地域における重要な水道水源としての役割を担っている。近年、猪苗代湖では水温の上昇と pH の中性化などの顕著な環境変化が観測されている。これらの変化は特に夏季における植物プランクトンの増殖を誘発する主要な要因の一つであると推察される。植物プランクトンの中には水道事業の運営において問題となる種類が存在する。特に藍藻類は、一部の種がカビ臭の原因となる臭気成分を生産し、水道水の品質低下を招く異臭味障害を引き起こすことが知られている¹⁾。

本研究では、上下水道局と連携し季節自己回帰和分移動平均モデル：Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average Model（以下「SARIMA モデル」）を用いて猪苗代湖の翌年度の月別水温を予測し、その結果をもとにカビ臭物質の発生時期を推定することを目的とした。

2. 猪苗代湖

(1) 猪苗代湖の水環境

猪苗代湖の環境特性として、北東から酸性河川水が流入し、年間を通して卓越する西風により右回りの循環流によって湖沼全体に混合が生じている²⁾。図 1 に郡山市が調査を開始した 1996 年から現在までの取水施設における pH と藍藻類細胞数の年次変化を示す。調査開始時は pH5 程度の酸性湖沼で生物生産が限定的な湖沼環境（非調和型湖沼）を形成していた。しかし、流入する酸性河川水からの硫酸負荷量の減少により徐々に中性化が進行し³⁾、2008 年以降は pH7 付近で安定している。それに伴い、生物生産が活発化し、藍藻類の発生頻度も増加している。

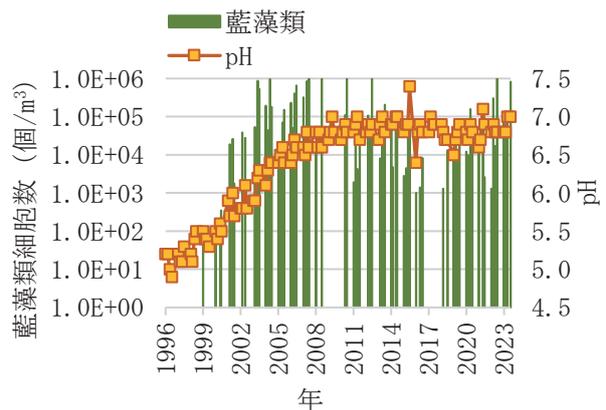


図 1 取水施設近傍の pH と藍藻類細胞数の変遷

(2) 観測される藍藻類の種類とカビ臭

取水施設近傍で観測されている藍藻類は年間を通して *Oscillatoria* sp. がそのほとんどを占め、稀に *Microcystis* sp. が観測されている。どちらも水道水にカビ臭による異臭味障害を引き起こす原因藻類である。このカビ臭の原因は、*Oscillatoria* sp. など一部の藍藻類が生産するジェオスミン及び 2-メチルイソボルネオール（表 1）と呼ばれる臭気成分にある。これらの臭気成分は藻体内で蓄積され、浄水工程で死滅・分解され細胞が崩壊する際に水中に放出され、水道水に異臭味を与える⁴⁾。

これらのカビ臭物質は、人間が知覚可能な閾値が 10 ng/L 程度と低く、水源の水面が藍藻類に覆われるような状態ではな

表 1 カビ臭物質概要

	ジェオスミン	2-メチルイソボルネオール
臭気	土臭	墨汁臭
臭気閾値	10 ng/L	5 ng/L
パネル試験	12.9～685 ng/L	0.1～115 ng/L

くとも容易にこの閾値を超える可能性がある⁵⁾。そのため、目視で異常を確認してからの対応では遅れる可能性があり、カビ臭の発生時期の予測は水道事業の重要な課題である。

郡山市では、ジェオスミン及び2-メチルイソボルネオールを水質基準に関する省令の規定に基づき環境大臣が定める方法（平成15年厚生労働省告示第261号）別表第25ページ・トラップ-ガスクロマトグラフ-質量分析法に基づき原因藻類発生時期に月1回以上の頻度で測定を実施している。この定量下限値は1 ng/Lである。

その結果、猪苗代湖では2-メチルイソボルネオールは発生していないことが確認されたため、図2に水温に対するジェオスミンの濃度をプロットした。なお、本図ではジェオスミンが定量下限未満の検体は0 ng/Lとして扱った。

ジェオスミンは水温18.6℃から検出され始め、20℃を超えると検出頻度が急増した。特に26.9℃以上では全検体から4 ng/L以上が検出され、水温とジェオスミン濃度との間に明瞭な相関が認められた。これらの結果から、水温20℃を発生閾値、25℃を警戒閾値として設定し、それぞれに対応する予測発生期間および予測警戒期間を算出した。

3. 水温予測と結果

(1) SARIMA モデル

水温の短期予測には、季節性成分を組み込んだ自己回帰和分移動平均モデル：Auto Regressive Integrated Moving Average ModelであるSARIMAモデルを用いた。SARIMAモデルは、過去の観測値に対する自己回帰 (p)、差分 (d)、移動平均 (q) に加えて、季節成分 (P, D, Q, s) を考慮することで、周期的な変動を伴う時系列データの予測に適している⁶⁾。

モデル構築では、直近12か月をテストデータ、残余を学習データとして分割し、学習データ上でパラメータ候補をグリッド探索し、小標本補正つきAkaike情報量規準(AICc)を指標に最良モデルを選定した。

解析には、1990年度から2023年度の取水施設における定期採水時の水温データを用い、2024年4月から2025年3月までの月別水温を予測した。予測は点推定値(平均値)に加えて95%予測区間を算出し、運用上のリスク評価を考慮して区間上限を予測水温として採用した。

なお、作成したモデルのテストデータに対する二乗平均平方根誤差(RMSE)は0.73℃、決定係数(R^2)は0.913であり、高い予測精度を示した。

(2) 結果

図3は、SARIMAモデルによる予測値と95%予測区間及び2024年度の水温とジェオスミン濃度の実測値を比較したものである。横軸は採水月、縦軸は水温とジェオスミン濃度である。なお、3月の実測値は欠測である。

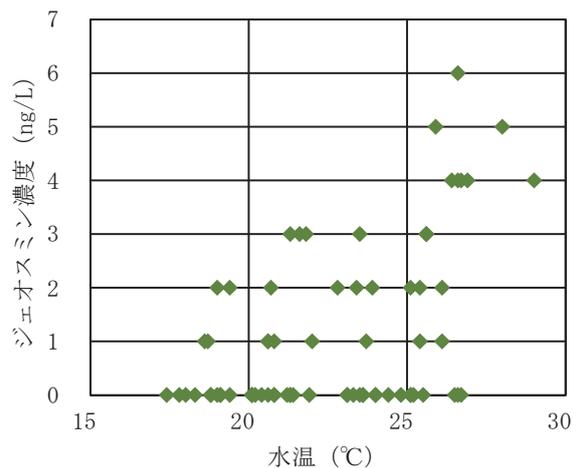


図2 水温とジェオスミン濃度の関係

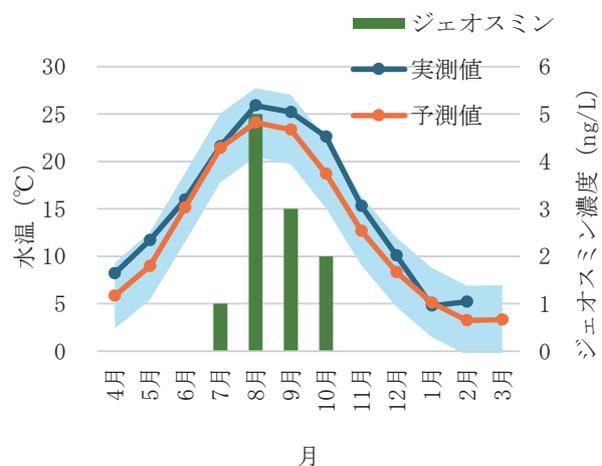


図3 水温の予測値と実測値の比較とジェオスミン濃度

水温について、予測平均値と比較して実測値はやや高めに推移したものの、すべての期間において95%予測区間内に収まっていた。この予想された水温から予測発生期間は7月から10月となった。

実際にジェオスミンの発生時期についても予測発生期間と一致しており、予測警戒期間では実際にジェオスミン濃度も5 ng/Lと一層の高値を示し、現実に応じた予測を行うことができた。実際の水道事業の運営においても、この予測結果に基づき粉末活性炭による応急的な臭気対策を効率的に実施する指針となった。

4. まとめ

近年では気候変動の影響が国内でも散見され、水道水の異臭味被害も併せて長期化・広域化の傾向にあり、その予測は喫緊の課題とされていた。これらの対応にSARIMAモデルによる発生時期の予測は有用であると考察する。猪苗代湖は年間を通じて透明度が高く、カビ臭発生時期においても取水塔付近は澄んでおり、視認により植物プランクトンの増加を確認することは困難である。そのため、水温から発生予測期間及び警戒予測期間を予測することで、現在カビ臭の原因となっている藍藻類、特に*Oscillatoria* sp.の発生リスクを事前に把握し、検査計画や水質管理に反映することで実務への活用を実現できた意義は大きい。

今後も地球温暖化により一層の水温上昇が危惧されており、取水施設近傍の調査地点で確認されている藍藻類の中でも特に高温を好む*Microcystis* sp.の一種である*Microcystis aeruginosa*など、人体に有害なマイクロキスチン-LRを生産する種の発生リスクを同様の手法で監視が可能である。

一方で、SARIMAモデルでは集中豪雨や水質事故等による瞬間的な多量変動の予測は得意としておらず、反映させることが難しいことから、これらの課題については別のアプローチが必要である。

5. おわりに

本研究は2024年4月の水道行政の事務移管を契機に、環境部局と上下水道局が連携し互いの知見を集約しながら進めてきたものであり、このような連携体制のもとで水道事業の効率的な運営に寄与する結果を得られたことは大きな成果と考えている。今後は、他の湖沼や水道水源への適用を通じてモデルの汎用性を検証し、気候変動適応策の一環として活用範囲を広げていきたい。また、この連携体制を維持し、新たな課題に柔軟かつ迅速に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 日本水道協会：維持管理指針（2016年版），pp.866-871，2016.
- 2) 中村玄正・藤田豊・佐藤洋一・橋本純：猪苗代湖の水質変化に及ぼす二面的特性の影響に関する研究，水理科学，Vol.59，pp.82-99，2015.
(https://www.jstage.jst.go.jp/article/suirikagaku/59/1/59_82/_pdf/-char/ja)
- 3) 長林久夫・平山和雄・山田泰正：猪苗代湖におけるpHの長期的推移に関する検討，水工学論文集，第53巻，pp.1327-1332，2009.
(<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00028/2009/53-0222.pdf>)
- 4) 日本水道協会東北地方支部技術研究部会：水道水の臭気対策について，浄水研究委員会報告書，2024.
(<https://jwwa-tohoku.org/archives/4236>)
- 5) 日本水道新聞社：水道水質辞典，pp.495-496，2002.
- 6) Box, G. E. P.・Jenkins, G. M.・Reinsel, G. C.・Ljung, G. M. : Time Series Analysis: Forecasting and Control (5th Edition), John Wiley & Sons, Hoboken, 2015.

日本全国の暑熱環境予測に基づく学校の屋外活動への影響評価

○大山剛弘¹・細川由梨²・高倉潤也¹・真砂佳史¹

(¹ 国立環境研究所・² 早稲田大学)

1. はじめに

日本では、世界平均を上回る 1.40℃ /100 年の気温上昇、猛暑日の頻発化が観測されており、熱中症をはじめとする暑熱による健康影響のリスクが高まっている。健常な大人に比べて体温調節能力が低い子どもは熱中症リスクが高い主体の一つであり、急速な少子化にもかかわらず、学校活動における熱中症の報告件数は年間 3,000 件程度で推移している¹⁾。今後の気候変動の進行に伴い、危険な暑さが長期間続く地域が増加し、体育や部活動など学校の屋外活動の健康リスクが増加する、あるいは屋外活動の機会が損なわれる可能性がある。しかし、現状では、時間帯まで考慮した学校活動への影響評価の例はほとんど見られない。上記の背景を踏まえて、本研究では、高解像度の湿球黒球温度 (WBGT) 予測データを用いて学校の屋外活動への影響評価を行うこととした。

2. 方法と結果

(1) 日本全国の WBGT データ

本研究では、筆者らが開発した、時間単位の将来予測を行う機械学習モデルで出力した WBGT データ (2030~2100 年、1km・時間単位) を用いた。当該モデルは、日本国内における日単位の気象データ (気温、相対湿度、日射量、風速) と時間単位の湿球黒球温度 (WBGT) の関係を学習させて構築されている。過去データによる検証では、決定係数 R^2 :0.96、平均絶対誤差 MAE:0.96℃ と高い精度が確認された。このデータの詳細については、先行して公開した論文²⁾を参照されたい。

(2) 学校における屋外活動への影響評価

ここでは、一般的に「運動は原則禁止」とされる WBGT 31℃を閾値として、(1) で説明した WBGT データに基づいて、閾値を下回る時間 (活動可能時間) の割合と、学齢期人口 1 人あたりの活動可能時間を指標として、屋外活動への暑熱による影響を評価した。具体的には、1km 解像度の将来人口予測データ³⁾から特定した 7~17 歳の人口分布域における、一般的に学校活動が行われる時間帯 (9~15 時台。以下、「学校活動時間帯」と言う。) を対象とした。以下、断りが無い場合は、中庸な SSP2-4.5 シナリオにおける 2030~2059 年の結果を示す。

活動可能時間の割合について、都道府県別の予測値を図 1 に示す。ほとんどの都道府県で 8 月 (沖縄県のみ 7 月) に割合が最低となった。平均的には沖縄県 (62%)・大阪府 (68%)・愛知県 (70%)・埼玉県 (75%)・熊本県 (77%) で特に低いが、都道府県内の差も都道府県間の差と比較可能なほど大きい。例えば、九州地方の各県の中にも、8 月の活動可能時間の割合が 95% を超え、東北地方の各県の平均に匹敵する場所が存在する。また、過去 (1980~2014 年) には最も割合が低い沖縄県でも 90% を上回ったことを考慮すると、将来気候下での活動可能時間の減少は顕著である。全国分布 (図 2) からは、関東以南の大都市圏 (東京、名古屋、大阪)、九州・沖縄地方で割合の低い地域が散見され、県境を横断する場合も多い。

1 人あたりの活動可能時間について、ほとんどが学校の夏季休業期間にあたる 8 月を除き、最も活動可能時間の割合が低い 7 月における複数期間・シナリオの組合せごとの平均値を示す (図 3)。月内の学校活動時間帯の合計 217 時間のうち、過去は 202.6 時間が活動可能時間であったが、2030~2059 年には 170.3~180.0 時間、2060~2089 年には 123.0~183.3 時間となった。2060~2089 年に活動可能時間が若干回復する SSP1-1.9 シナリオを除けば、将来にかけて単調な減少が予測され、また、温室効果ガスの排出が多いシナリオほど後の期間での現象が顕著であった。

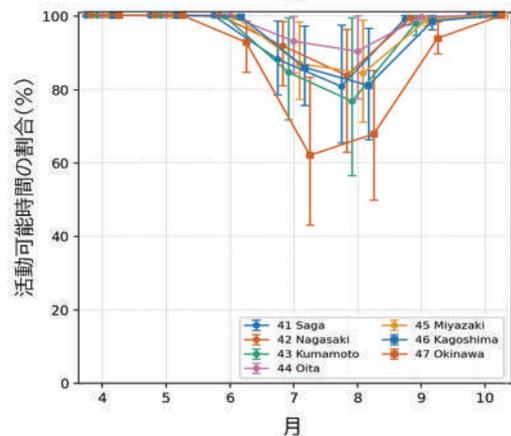
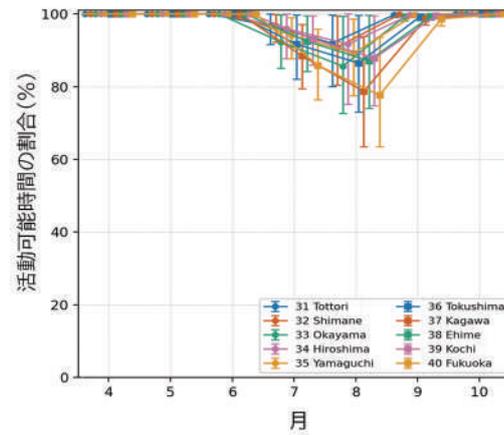
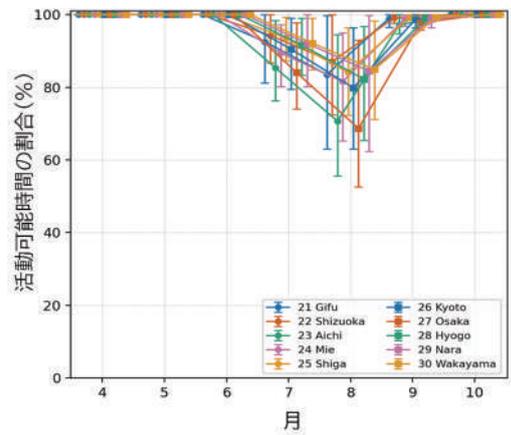
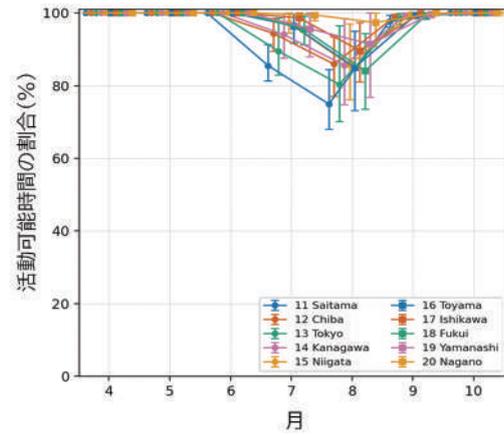
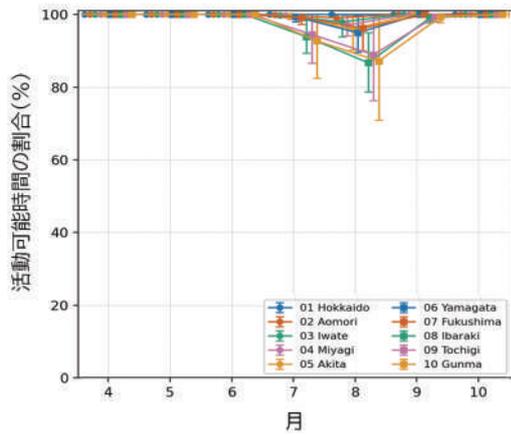


図1 学校活動時間帯のうち屋外での活動可能時間が占める割合（都道府県・月別、点は都道府県内の平均値、エラーバーは都道府県内の上位10%~90%の幅を示す。2030~2059年、4~10月、SSP2-4.5、5GCM平均）

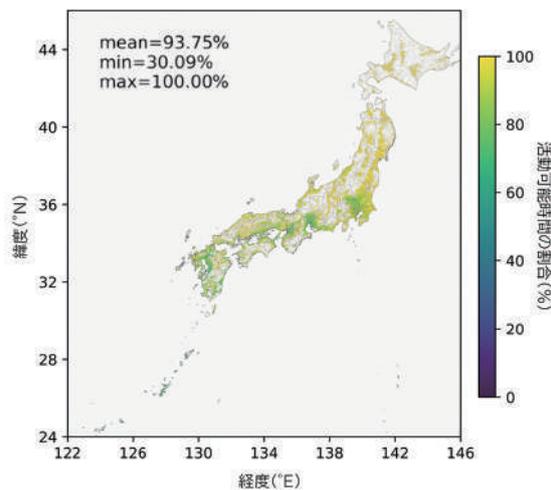


図2 学校活動時間帯のうち屋外での活動可能時間が占める割合の分布（2030~2059年、7月、SSP2-4.5、5GCM平均）

3. 考察

本研究では、年間数千件の熱中症が報告され、教育の重要な基盤である学校活動を対象に、屋外での活動可能時間を指標として評価を実施した。推計の結果より、全体的な傾向として、東京・名古屋・大阪といった大都市圏、九州・沖縄地方において暑熱影響が顕著である一方、都道府県の境界内での局所的な差も大きいことが分かった(図1、図2)。そのため、学校活動を対象とした暑熱影響の評価は、高い解像度で、理想的には各学校の所在地単位で実施することが望ましい。また、気候変動の進行に伴って、盛夏(7月)には1人あたりの活動可能時間が過去より1~4割減少するという予測(図3)を踏まえれば、将来にわたって安全な学校活動を実現するため、夏季をはじめとする学校活動スケジュールを、制度の変更に要するリードタイムも考慮した上で、再検討していく必要があると考えられる。

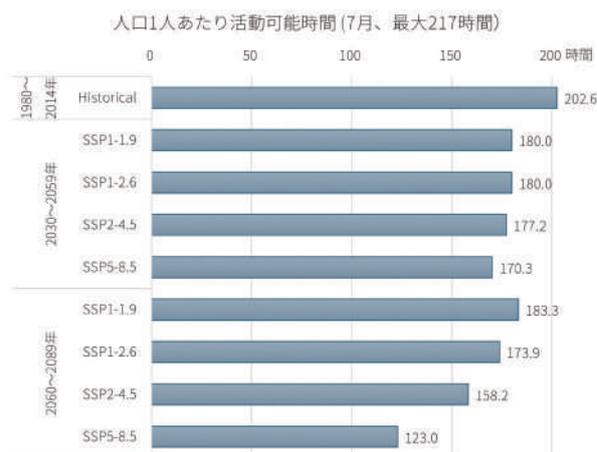


図3 学齢期人口1人あたりの屋外での活動可能時間(全国・5GCM平均、7月)

4. 今後の展開

発展的な研究として、将来の暑熱条件に加えて、地域や活動ごとの暑熱基準の設定、各学校の所在地、教育現場における実現可能性といった要素も考慮した、学校活動スケジュールの設計に取り組む予定である。また、農作業・建設業といった屋外労働への暑熱影響や対策、関連する社会経済的な影響も有望な研究テーマと考えられる。

今回活用した WBGT データは、既に国環研レポジトリで公開されており⁴⁾、今後は、国立環境研究所で運営する気候変動適応情報プラットフォーム(A-PLAT。URL: <https://adaptation-platform.nies.go.jp/>)での配信や関係機関への紹介を通じて、可用性と認知を向上させて、幅広い活用を推進したい。

参考文献

- 1) 吉田慶太. 2025. 学校における熱中症対策. 保健医療科学, 74-2, 148-156.
- 2) Oyama, T., Takakura, J., Ishizaki, N. et al., 2025. Nationwide high-resolution heat risk projections and intervention cost analysis for the elderly in Japan under climate and demographic changes. Environmental Research, 286, 122949.
- 3) 国立環境研究所. 日本版 SSP (shared socio-economic pathways) 別人口シナリオ 第2版 (2021年7月8日版). <https://adaptation-platform.nies.go.jp/data/socioeconomic/>.
- 4) 大山剛弘. 2025. 日本における時別の湿球黒球温度(WBGT)、人口の暑熱曝露、および適応策コストの高解像度予測データ. <https://www.nies.go.jp/doi/10.17595/20250718.001.html>.

謝辞

本研究は、環境省・(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF25S12431)の支援を受けて実施した。

化学輸送モデルに AI 技術を取り入れた新たな大気汚染予測システムの開発と実用化

○山村由貴¹・廣瀬智陽子¹
(¹ 福岡県保健環境研究所)

1. はじめに

福岡県において、微小粒子状物質（以下、PM2.5）は越境汚染の影響を受けやすい春季と冬季に濃度が上昇する傾向がある。一方、光化学オキシダント（以下、Ox）は越境汚染の影響が強い春季に加え、地域汚染の影響が強い夏季にも高濃度で観測されることがある。また、気象状況によっては火山の影響を受けて二酸化硫黄（以下、SO₂）濃度が上昇することもある。これらの大気汚染物質の濃度情報を事前に発信することができれば、県民は外出予定の変更や予防措置が可能になる。

福岡県保健環境研究所では平成 29 年度からワークステーションを導入し、気象モデル及び化学輸送モデルを用いたシミュレーションによる発生源推定や濃度上昇機構の解明を行ってきた¹⁾。令和 6 年度にはこれらのモデルと AI による誤差補正機構²⁾を組み合わせた大気汚染予測システム（Fukuoka Air Pollution Forecast System、以下 Fcast）を開発するとともに、ホームページ等による予測結果の配信を開始し、実用化したので紹介する。

2. Fcast の開発

2. 1 計算過程

Fcast の計算過程及び予測結果の概略図を図 1 に示す。Fcast の計算過程は①気象モデルによる気象予測データの計算、②大気汚染物質排出量データの作成、③化学輸送モデルによる大気汚染物質濃度の計算、④ AI による誤差補正の 4 段階で構成されており、この過程で予測結果が得られる。

化学輸送モデルの計算領域及び県内地域区分を図 2 に示す。計算領域の解像度は、1 格子 45km で東アジア域、15km で西日本域、5km で北部九州域と段階的に上げている。なお、AI による誤差補正には 1 格子 5km の北部九州域の計算結果を使用している。各段階の内容は以下のとおりである。

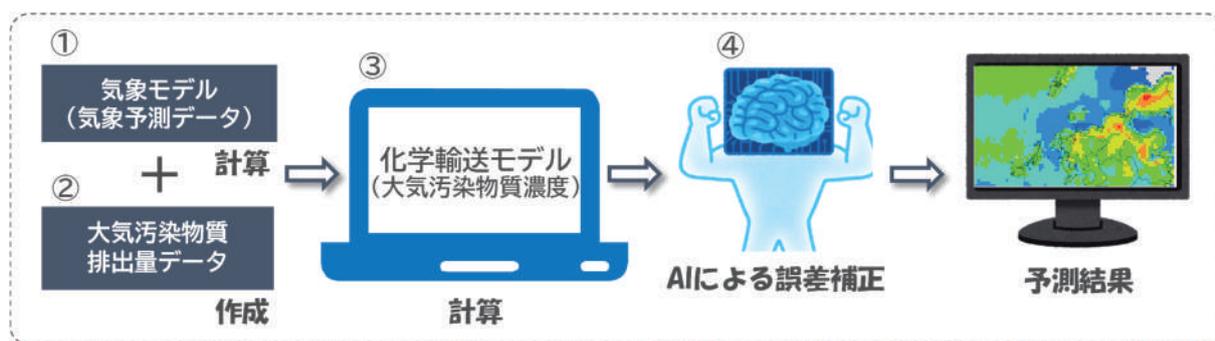


図 1 Fcast の計算過程及び予測結果の概略図

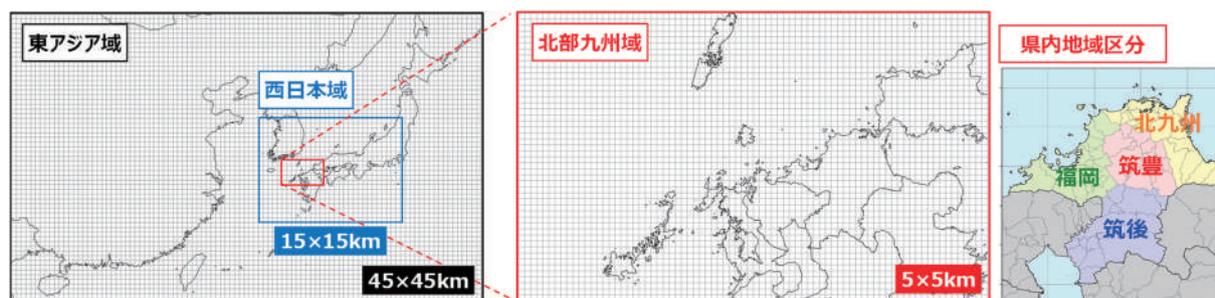


図 2 化学輸送モデルの計算領域及び県内地域区分

① 気象モデルによる気象予測データの計算

気象データを気象モデルに入力し、3日先までの気温等の気象予測データを計算する。

② 大気汚染物質排出量データの作成

国内外の人為起源（工場、自動車等）及び自然起源（火山、植物等）排出量の調査結果が、環境省等により報告されている。排出量は一律ではなく、排出源によって平日と休日で異なるものや気候によって変化するもの等があるため、予測対象日に合わせた排出量データ^{3), 4), 5)}を毎日作成する。

③ 化学輸送モデルによる大気汚染物質濃度の計算

①と②のデータを化学輸送モデルに入力し、大気汚染物質の3日先までの濃度予測を格子毎に計算する。加えて、排出量を調整することによって、越境汚染の寄与割合の算出や排出量削減効果の検証も同時に行っている。なお、計算は数百種類の化学物質に対して行われており、その中から予測対象となる物質の濃度を抽出して使用している。

④ AIによる誤差補正

③の計算結果に対し、AIで誤差の補正を行う。AIの学習には、過去3年分の福岡県内の常時監視局の1時間値（以下、観測値）と常時監視局の位置に対応する格子の計算値（以下、計算値）を用いた。図3に示すように、気象条件や時間、生成に関係する物質の濃度等を説明変数（予測対象を説明する要素）、大気汚染物質濃度の誤差（観測値と計算値の差）を目的変数（予測対象となる要素）として学習した。

これにより、図1に示すように、③の計算結果を学習済のAIに入力すると、目的変数である誤差を推測することができる。このAIによって誤差補正した結果を、最終的なFcastの予測結果として公開している。

OxとPM2.5を対象として、2022年の観測値と計算値の関係を誤差補正前後で比較した結果を図4に示す。図4から、Ox、PM2.5ともに、誤差補正により、観測値と計算値が1:1（図中赤線）に近づいており、精度が向上していることがわかる。

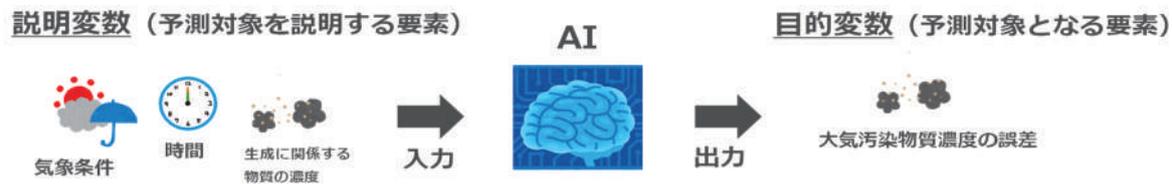


図3 AIの学習過程

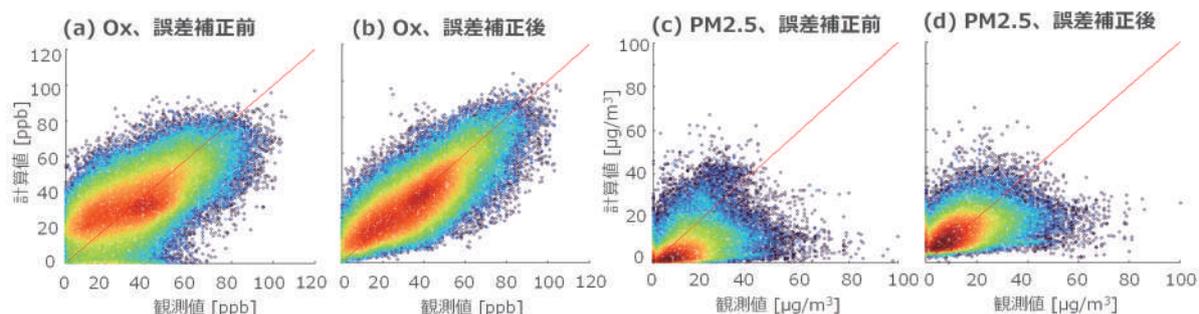


図4 誤差補正前後の比較（OxとPM2.5の観測値と計算値の関係）

2. 2 予測精度の確認

予報を開始した2025年1月29日から2025年10月末までの期間における、FcastによるOxとPM2.5の予測精度を表1に示す。表中の%は、表1行目に示す各濃度階級における、観測値と計算値の誤差が±20%以下であった件数の割合を示している。表中の括弧内は、全地域における割合の内訳（計算値数/観測値数）である。Oxの精度は30ppb以下で低いものの、30ppbより高い濃度では筑後を除いて全ての地域で60%を超え、一定の精度が確保できている。一方PM2.5の精度は、

15 $\mu\text{g}/\text{m}^3 < \text{PM}_{2.5} \leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と $35 \mu\text{g}/\text{m}^3 < \text{PM}_{2.5} \leq 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ では平均で 40% 超となっているが、地域によって偏りがあり、 O_x に比べて低い。PM_{2.5} は多成分の混合物であるため発生源や生成過程が多岐にわたること、さらに野焼きや火事等の大気モデルの計算に反映できない突発的な高濃度事象が発生することから、 O_x よりも予測が困難であると考えられる。なお、この期間では高濃度の件数が非常に少なかったことから、今後も継続して精度検証を実施する。

表 1 O_x 、PM_{2.5} の予測精度 (上: O_x 、下: PM_{2.5})

観測値 [ppb]	$\text{O}_x \leq 30$	$30 < \text{O}_x \leq 60$	$60 < \text{O}_x \leq 90$	$90 < \text{O}_x \leq 120$	$120 < \text{O}_x$	正答率
北九州	16%	70%	79%	67%	-	64%
福岡	11%	76%	80%	71%	-	67%
筑後	13%	68%	66%	50%	-	57%
筑豊	9%	65%	79%	100%	-	53%
全地域	12% (93/788)	70% (1973/2836)	76% (581/764)	64% (18/28)	-	60%

観測値 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$\text{PM} \leq 15$	$15 < \text{PM} \leq 35$	$35 < \text{PM} \leq 50$	$50 < \text{PM} \leq 70$	$70 < \text{PM}$	正答率
北九州	47%	52%	23%	-	-	48%
福岡	23%	48%	33%	-	-	29%
筑後	38%	39%	56%	20%	0%	38%
筑豊	15%	34%	50%	-	-	18%
全地域	29% (963/3275)	45% (487/1094)	41% (17/41)	20% (1/5)	0% (0/1)	33%

3. Fcast の実用化

図 2 に示すように福岡県内を 4 つの地域 (北九州、福岡、筑豊、筑後) に区分し、予測結果から各地域における各予測項目の 6 時間ごとの最高濃度を抽出する。この抽出した結果と濃度分布情報を、県民向けに毎日 7 時と 12 時にホームページと X で配信し、高濃度が予測された場合には、県の公式 LINE から情報配信している (図 5)。また、県内の関係行政職員向けに、地域・時間ごとの最高濃度の情報を LINE とメールで配信している。



図 5 予測結果の配信

参考文献

- 1) 山村由貴, 廣瀬智陽子: 福岡県での大気シミュレーション活用事例と今後の展望, 全環研会誌, 48(4), 148-153 (2023).
- 2) 山村由貴, 廣瀬智陽子, 山本重一, 菅田誠治: 光化学オキシダントを対象とした化学輸送モデルバイアス補正のための機械学習モデルの構築, 大気環境学会誌, 60(2), 11-19 (2025).
- 3) Chatani S., Shimadera H., Itahashi S., and Yamaji K.: Comprehensive analyses of source sensitivities and apportionments of PM_{2.5} and ozone over Japan via multiple numerical techniques. Atmospheric Chemistry and Physics, 20, 10311-10329 (2020).
- 4) Chatani S., Yamaji K., Sakurai T., Itahashi S., Shimadera H., Kitayama K., and Hayami H.: Overview of Model Inter-Comparison in Japan's Study for Reference Air Quality Modeling (J-STREAM), Atmosphere, 9(1), 19-19 (2018).
- 5) Sakurai T., Ito M., and Hanayama S.: Development of air pollutants emission inventories for ships around Japan on a high geographical resolution, Asian J. Atmos. Environ., 15, 2020096 (2021).

自動同定定量システム (AIQS-GC) を用いた北九州市内公共用水域の 平常時のスクリーニング分析について

○陣矢大助¹・高橋宏志朗¹・三苫洋介¹・岡本裕子²
(¹北九州市保健環境研究所、²北九州市環境局環境監視課)

1. はじめに

近年、地震や大雨等の大規模な自然災害に伴って、様々な化学物質が公共用水域等に流出する事案が発生している¹⁾。事案発生時に適切な対策を講じるためには、有害物質を取扱う事業場の立地状況や、災害発生危険度、平常時の水質性状を把握しておくことが重要である。そこで当研究所では、事故や災害時に環境汚染を生じるおそれのある地域の河川及び海域の平常時の化学物質濃度を、自動同定定量システム (AIQS-GC) を用いて調査したので報告する。

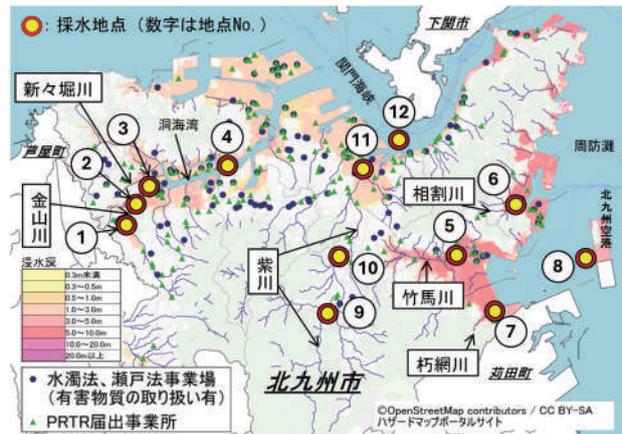


図1 高潮ハザードマップと事業場情報を重ね合わせた地図

2. 調査方法

(1) 調査地点及び調査期間

災害種類毎のハザードマップ、水質汚濁防止法 (水濁法)、瀬戸内海環境保全特別措置法 (瀬戸法) の対象事業場のうち、有害物質の取扱いがある事業場及びPRTR対象事業場の情報を重ね合わせた地図 (黄～赤の着色域は浸水想定区域) を作成した。この図を基に、金山川等2河川の地点①～③とその流出先としての洞海湾④、竹馬川等3河川の地点⑤～⑦と周防灘⑧、バックグラウンドとして紫川の地点⑨～⑪と関門海峡⑫を、それぞれ調査地点として選定した (図1)。調査地点の詳細と調査期間を表1に示す。

表1 調査地点及び調査期間

No.	地点名	詳細	調査期間※
①	金山川	則松井堰	R5.8～R6.5 3ヵ月毎に 4回採水
②	金山川	新々堀川合流前	
③	新々堀川	本陣橋	
④	洞海湾		R6.5～R7.2 3ヵ月毎に 4回採水
⑤	竹馬川	新開橋	
⑥	相割川	恒見橋	
⑦	朽網川	新貝橋	R7.5～R7.11 3ヵ月毎に 3回採水
⑧	周防灘		
⑨	紫川	八ヶ瀬橋	
⑩	紫川	志井川下流点	R7.5～R7.11 3ヵ月毎に 3回採水
⑪	紫川	勝山橋	
⑫	関門海峡		

(2) 測定方法

水試料は、図2に示す方法で前処理を行ったものを試料液とし、Agilent 7890B/5977A GC/MSにて測定した。なお試料の測定前には、性能評価用標準を用いて装置条件がデータベース構築時の状態と同等レベルであることを確認した。解析は、解析ソフトウェア AXEL (西川計測 (株)) を用いて行い、データベース登録化合物 (920物質) の同定・半定量を行った。定量下限値は全て 0.02 μg/L とした。

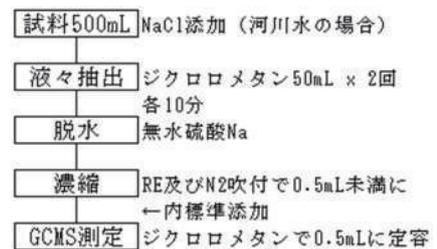


図2 前処理フロー

3. 結果と考察

(1) 検出概況

調査を通じて 118 種類 (AIQS 登録物質の約 13%) の化

表2 登録物質の分類

分類	内訳
農薬類	除草剤、殺虫剤、殺菌剤
工業原料等	有機合成原料、染料、顔料、溶剤、可塑剤、難燃剤等
PPCPs	医薬、化粧品、香料等
PAHs	多環芳香族類
アルカン類	n-アルカン類
その他	加硫促進剤、ステロール類、その他

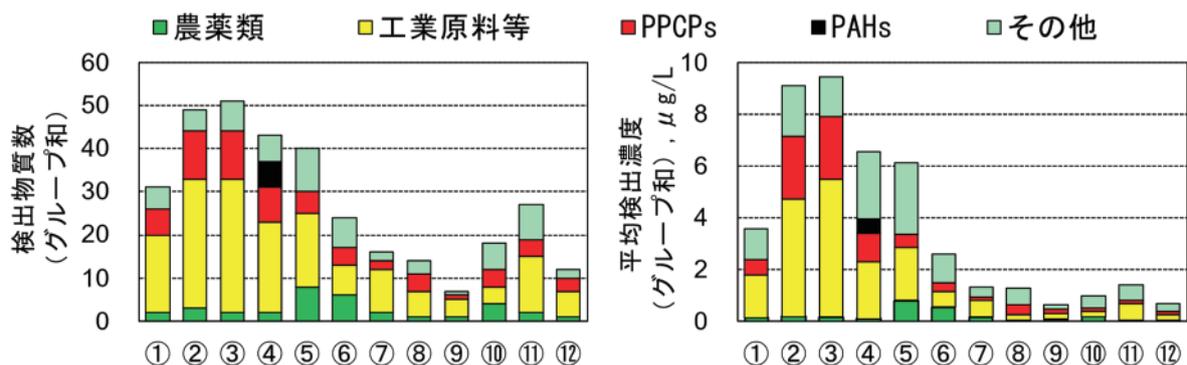


図3 各地点の検出物質数と平均検出濃度 (n-アルカンを除く)

学物質が検出された。本報では AIQS-GC 登録物質を便宜的に表 2 に示す 6 つの物質グループに分け、グループ毎の平均検出物質数と平均検出濃度を図 3 に示した (なお比較的自然的起源の割合が多い n-アルカン類は図 3 では省いた)。

【金山川①及び②、新々堀川③】

金山川の地点①・②及び新々堀川③は、検出物質数及び検出濃度とも他の地点を上回っており、また、工業原料等及び PPCPs の割合が他の地点と比べて高かった。3 地点間で比較すると、検出物質数・濃度ともに①<②<③であり、河川水の流下に伴って検出物質数及び検出濃度が増加する傾向がみられた。

【竹馬川⑤、相割川⑥、朽網川⑦】

地点⑤~⑦の検出物質数・検出濃度は、各河川の流域面積 (竹馬川 37.7km²、相割川 9.87km²、朽網川 8.4km²) の広い順に、⑤>⑥>⑦であった。また地点⑤~⑦は、他の地点より農薬類の検出が顕著にみられた。全調査地点での農薬類の検出数は 52 件だったが、このうち 32 件を地点⑤~⑦が占めた。これら 3 地点で最も高い頻度で検出された農薬類は、殺虫剤のフェノブカルブ (ND~0.09µg/L) と殺菌剤のチフルザミド (ND~0.87µg/L) であった。

【紫川⑨~⑪】

バックグラウンド地点として選定した紫川の地点⑨~⑪は、他のいずれの河川の地点よりも検出濃度が低かった。また地点⑨→⑪はこの順で上流→下流であるが、金山川の場合と同様に、河川水の流下に伴う検出物質数及び検出濃度の増加傾向 (⑨<⑩<⑪) が確認された。

【洞海湾④、周防灘⑧、関門海峡⑫】

海域の調査地点では、閉鎖性で周辺に工業地帯を抱える洞海湾④が、周防灘⑧及び関門海峡⑫と比べ、検出物質数・濃度ともに高かった。洞海湾④では、他の地点では不検出であった PAHs が検出 (PAHs 合計: 0.05~0.72µg/L) された。その一方で、検出濃度に占める工業原料等や PPCPs グループの割合が高い傾向は、地点②及び③の特徴と類似していた。同湾は比較的細長い形状 (湾の長さ約 13km、湾中央部の幅約 300m、水深 10m 弱) を持ち、表層水に関しては、湾奥から湾口に向かう流れを観測した事例²⁾があることから、洞海湾④の検出物質・濃度が、地点②及び③に類似したものとなることは十分に考えられる。

(2) 水濁法要監視項目等規定物質の検出状況

AIQS-GC に登録されている水濁法の要監視項目等の規定物質うち、1,4-ジクロロベンゼン、イソプロチオラン、フェノブカルブ、プロピザミド、フェノール及びアニリンが洞海湾④や竹馬川⑤等で検出されたが、検出濃度はいずれも指針値を大幅に下回った。

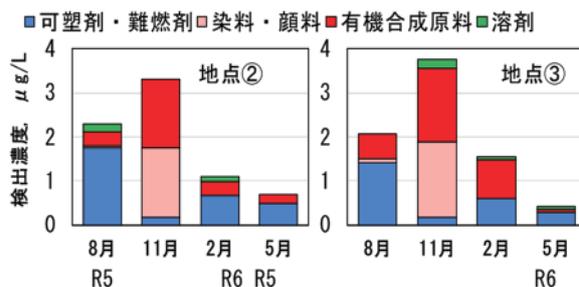


図4 地点②及び③「工業原料等」の内訳

(3) 降雨による検出濃度への影響

前項(図3)で示したように、地点②及び③では、検出濃度全体に占める工業原料等グループの割合が高かった。ここではさらに考察するため、図4に調査日ごとの内訳を示す。同図から、8月、2月及び5月の調査では、両地点とも検出濃度における「可塑剤・難燃剤」の割合が高いためで、R5年11月の調査のみ、「染料・顔料」及び「有機合成原料」が大半を占めるなど、R5年11月の調査は明らかに検出状況が異なっていた。表3に各物質の検出濃度の内訳を示すが、リン酸エステル類、ニトロ化合物等の検出濃度が、R5年11月と他の調査とで明瞭に差異があることが分かる。

ここで調査日直前の降水量を表4に示す。R5年11月の調査日は雨天であったが、採水日の4日前から降りつづいており、1日当たりの降水量は多くないものの、計17.5mmのまとまった降雨となっていた。このため前述したR5年11月の調査結果は、この降雨の影響を受けた可能性が示唆された。すなわち、他の調査日には検出頻度が低かったニトロベンゼン等の染料・顔料用途の物質が、雨水により運ばれて検出されるに至ったものと推察された。通常、降雨の影響としては、希釈による検出濃度の低下が想定されるが、事故や災害時に環境汚染を生じるおそれのある地域においては、大雨ではない通常の降雨であっても、本件のような汚染物質の濃度上昇、言い換えると、新たな汚染につながる場合があることが確認された。

4. まとめ

事案発生時に適切な対策を講じるには、有害物質を取扱う事業場の立地状況や、立地場所の災害発生危険度、また平常時の水質性状を把握しておくことが重要である。このため、事故や災害時に環境汚染を生じるおそれのある地域を選定し、AIQS-GCを用いて河川及び海域の平常時の化学物質濃度を3年にわたって調査した。その結果、AIQS-GC登録物質の約13%にあたる118物質が検出され、河川・海水中の半揮発性化学物質の平常時の検出物質及び検出濃度を、地域差も含めて把握することができた。また、有害物質取扱いのある事業場が立地する地域では、大雨ではない日常的な降雨が要因となって汚染物質の濃度上昇につながる場合があることが示唆された。

5. 謝辞

本調査研究の遂行にあたり、多大なご助言を頂きました北九州市立大学の宮脇崇准教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) 中島大介・中山崇・大曲遼・宮脇崇・門上希和夫：事故・災害時における化学物質漏洩を想定した環境モニタリングの開発と地方環境研究所への実装を目指して. 全国環境研会誌, 45, 4, 2-7(2020).
- 2) 陣矢大助・門上希和夫・岩村幸美・濱田建一郎・山田真知子・柳 哲雄：閉鎖性内湾における化学物質の分布と挙動. 水環境学会誌, 24, 7, 441-446(2001).

表3 地点②及び③における工業原料等グループの主要検出物質

主な用途	物質名	地点② (μg/L)				地点③ (μg/L)			
		R5		R6		R5		R6	
		8月	11月	2月	5月	8月	11月	2月	5月
可塑剤・ 難燃剤	リン酸トリス(1-クロロ-2-プロピル)	0.57		0.26		0.55		0.23	
	リン酸トリス(1,3-ジクロロ-2-プロピル)	0.39		0.21	0.25	0.34		0.17	
	リン酸トリス(2-クロロエチル)	0.45	0.12	0.14	0.2	0.44	0.08	0.17	0.19
染料・ 顔料	2-ニトロトルエン		0.26				0.31		
	4-ニトロトルエン	0.02	0.22				0.23		
	ニトロベンゼン	0.03	0.97			0.04	0.99		
有機合成 原料	1,2-ジクロロベンゼン		0.68				0.68		
	2,4-ジニトロトルエン		0.54				0.71		

※空欄は検出下限値未満

表4 河川調査日直前の降水量

調査日	R5		R6	
	8月	11月	2月	5月
4日前	0.0	0.0	0.0	0.0
3日前	0.0	6.0	0.0	0.0
2日前	0.0	1.0	0.0	9.0
1日前	0.0	4.5	0.0	1.0
当日	0.0	6.0	0.0	0.5

気象庁Webサイト(北九州・八幡)単位:mm

脊椎動物ユニバーサルプライマーの選定と課題

－国Ⅱ型研究成果報告－

○長谷部勇太¹

(¹ 神奈川県環境科学センター)

1. はじめに

近年新たな生物調査手法として環境中に存在する生物由来の DNA を利用する「環境 DNA 調査」が注目を集めている。捕獲調査に比べて効率的かつ高精度な調査が可能であり、魚類をはじめとした様々な分類群で手法開発が行われている。一方で特定の分類群（例えば魚類）を標的として調査するものであるため、特定の環境に生息する様々な分類群の生物を調査したい場合（例えば魚類と両生類）にはそれぞれの分類群を対象とした分析を実施する必要がある、必ずしも費用や効率の面で優位とは言えない面もある。

そこで全国環境研協議会からの提言を受けて国立環境研究所と複数の地環研等の研究者が参加して共同研究を実施する仕組みである「Ⅱ型実施共同研究」を活用し、特定の環境に生息する幅広い分類群を網羅的に検出可能な環境 DNA 調査手法を開発することを目的とした研究を令和 7 年度から開始した。淡水の流水環境の生物群集を対象として、脊椎動物および無脊椎動物を精度よく調査可能な手法開発を進めている。無脊椎動物のうち、昆虫類については一定程度手法が確立されていることから現在のところ脊椎動物全般を増幅可能なプライマーの選定を進めており、今回は選定までの流れと選定結果、現時点での課題を報告する。

2. 方法

2. 1 DNA 配列の取得

Genbank から真核生物のミトコンドリア全長配列が登録されているデータをすべてダウンロードし、同時にダウンロードした TAXID から系統情報を整理した。これらのうちから種まで同定されているもののみを抽出し、1 種につき 1 つの配列を選定し、合計で 23,170 の DNA 配列を取得した。

2. 2 脊椎動物用プライマーの選定

過去の研究論文から脊椎動物を広く対象としているユニバーサルプライマーを探索した結果、16SrRNA 領域が有力であると考えられたことから、表 1 のとおり計 7 つの 16SrRNA 領域プライマーを候補として選定した。

表 1 16SrRNA 領域プライマー候補

プライマー名	原著論文	eDNA 利用可能性の検証
16S-AmTu	Rodgers et al. (2025)	△ (魚類、両生類、爬虫類のみ)
16S-Fd-RC1	Jafar et al. (2024)	×
V16S-U	Wang et al. (2023)	○
Amphi16S	Sakata et al. (2022)	△ (両生類のみ)
MarVer3	Valsecchi et al. (2020)	△ (海洋脊椎動物のみ)
No name	Sarri et al. (2014)	×
L2513-H2714	Kitano et al. (2007)	×

2. 3 各プライマーの増幅配列の抽出

Usearch v11.0.667 の Search_PCR コマンドにより In-Silico PCR を実施し、プライマーとのミスマッチ数の確認を行った。ミスマッチ数は各プライマーで4、両プライマーで8まで許容し、これ以上のミスマッチを持った配列については便宜的に9として扱い、目ごとに平均値を算出した。各プライマーについて対象とする分類群（哺乳綱、鳥綱、爬虫綱、両生綱、硬骨魚綱、ヤツメウナギ目）とそれ以外を非対象の分類群として、箱ひげ図を作成した。

3. 結果

箱ひげ図は図1の通り。対象分類群のミスマッチ数については16S-Fd-RC1及びAmphi16Sが最も少なく、次いでMarVer3となった。非対象分類群のミスマッチ数についてはAmphi16Sが最も少なく、次いでMarVer3、16S-AmTuと続いた。

4. 考察

優れたプライマーの条件は対象分類に対してプライマー配列のミスマッチが少なく、非対象分類群に対してはミスマッチが多いことである。その点から評価すると最も優れたプライマーは16S-Fd-RC1であり、次いでAmphi16Sとなる。Amphi16Sプライマーについてはすでに当センターで脊椎動物用プライマーとして利用しており、魚類についてはMiFishプライマーと同程度の検出精度が得られることを確認している。さらに両生類等の脊椎動物も検出できている点から、同等のコストでより多くの生物の調査が可能な手法であるといえる。

5. 課題

流水環境においては、Amphi16Sは非常に良い結果を示すが、半止水環境である田んぼや止水環境の池ではミジンコなどの非特異増幅を発生させることがわかっており、様々な環境で利用可能な手法の確立が必要とされている。また、16S-Fd-RC1については環境DNA用プライマーとしての性能の評価も行われていないことから、その点を今後は検討していく必要がある。16S-Fd-RC1については非対象分類群のミスマッチが多い点はAmphi16Sよりも優れていることから、半止水や止水環境においてより良い結果が得られるかも含めて検討を進めていく必要がある。

謝辞

本研究はII型実施共同研究「環境DNAを用いた淡水生物群集の網羅的調査手法開発」の助成を受けたものです。

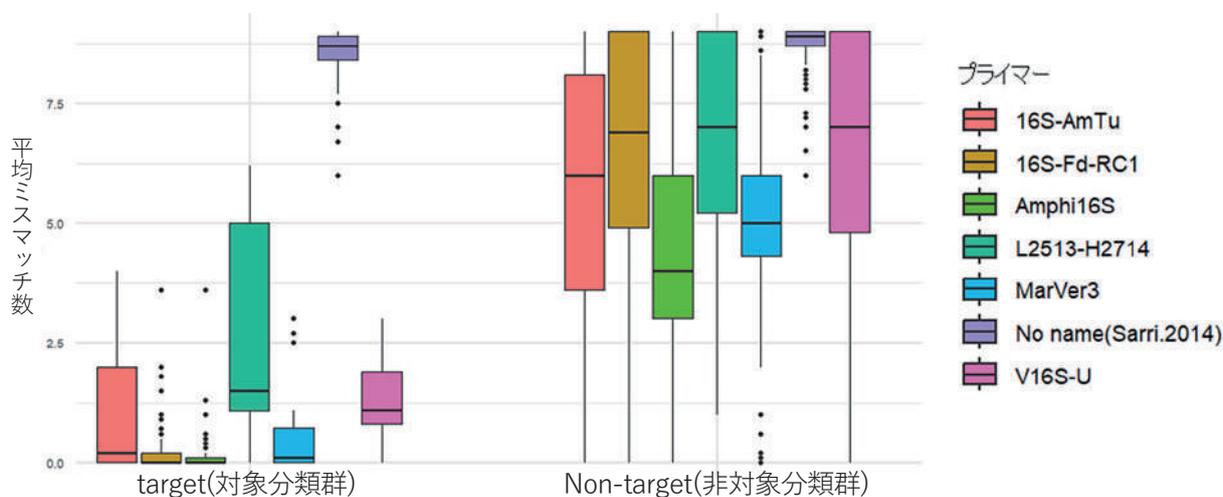


図1 各プライマーのミスマッチ数の分布

赤土流入量の異なる生育環境に移植したサンゴの成長・生残について

○比嘉彩也香¹・久保弘文^{1*}・座間味佳孝^{1**}・糸洲昌子¹・南雲春馬¹・久高友誠¹
熊谷直喜²・中田聡史²・篠原隆一郎²・山野博哉^{2***}

(¹ 沖縄県衛生環境研究所・² 国立環境研究所・

*現所属 琉球大学博物館・**現所属 沖縄県環境保全課・***現所属 東京大学)

1. はじめに

サンゴ群集は、気候変動による海水温上昇等の地球規模のストレスと、陸域からの土壌流入等の地域的なストレスの複合作用によって衰退が進んでいる。このため地域的なストレスの軽減はより現実的な気候変動適応策として着目されている。沖縄県では、陸域からの土壌微粒子(赤土等)の流入による、赤土汚染が長年の課題とされており、赤土等流入がサンゴの成長に及ぼす影響を把握することは重要である。本研究では、サンゴ成体への負荷影響および生殖履歴による影響の受け方の違いを実験的に明らかにすることを目的とし、野外実験を実施した。

2. 調査方法

沖縄島の西海岸に位置する恩納村の万座海域において、水温環境は同等だが、陸域負荷影響が異なる2地点を野外実験サイトとして選定した(図1)。両地点にサンゴ(ウスエダミドリイシ)を50群体ずつ植え付け、1年半の追跡観察を行った。50群体中半分は有性生殖によって成長したサンゴで、残り半分は無性生殖で成長したサンゴを使用した。調査は2022年5月から2023年10月にかけて計4回実施し、生存・部分死亡・全体死亡の確認及び群体の大きさを記録した。成長率は、群体を楕円錐と仮定して計算し、植え付け時に対する相対値で表した。統計解析では環境条件と生殖履歴を要因とし、生存状態の解析については、連続観察における同一群体の識別をランダム効果として組み込んだ順序ロジットモデルを適用し、成長率は二元配置分散分析によって解析した。



図1 調査地点

3. 結果・考察

赤土流入の影響が少ない低負荷区に比べ、影響の大きい高負荷区において、また無性生殖よりも有性生殖において、サンゴの死亡率が高く、特に全体死亡は高負荷区に限られていた(図2)。成長率は、低負荷区よりも高負荷区で小さかった(図3)が、生殖履歴による差はみられなかった。

本研究結果やこれまでの成果から、陸域負荷はサンゴ幼生の着底を阻害するだけでなく、サンゴ成体の生存や成長へも負の影響を及ぼすことが示唆された。また高負荷環境には生残率の高い無性生殖群体の割合が多いと予想され、被度の割に遺伝的多様性維持への貢献が小さい集団が形成されやすいことに注意が必要である。陸域からの環境負荷の軽減は、地域的な対策による実現性が期待でき、かつサンゴを保全するための気候変動適応策として有効であるため、今後も同対策を継続していくことが重要であるといえる。

生残率

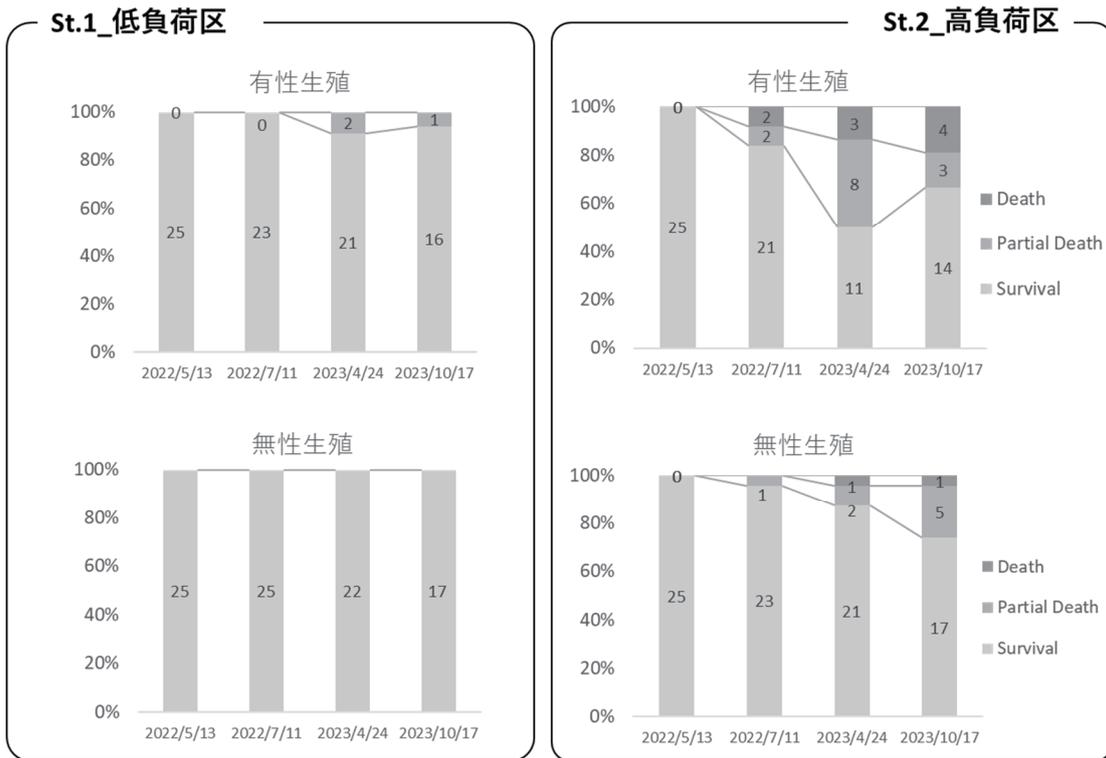


図2 各地点に植え付けたサンゴの生残率

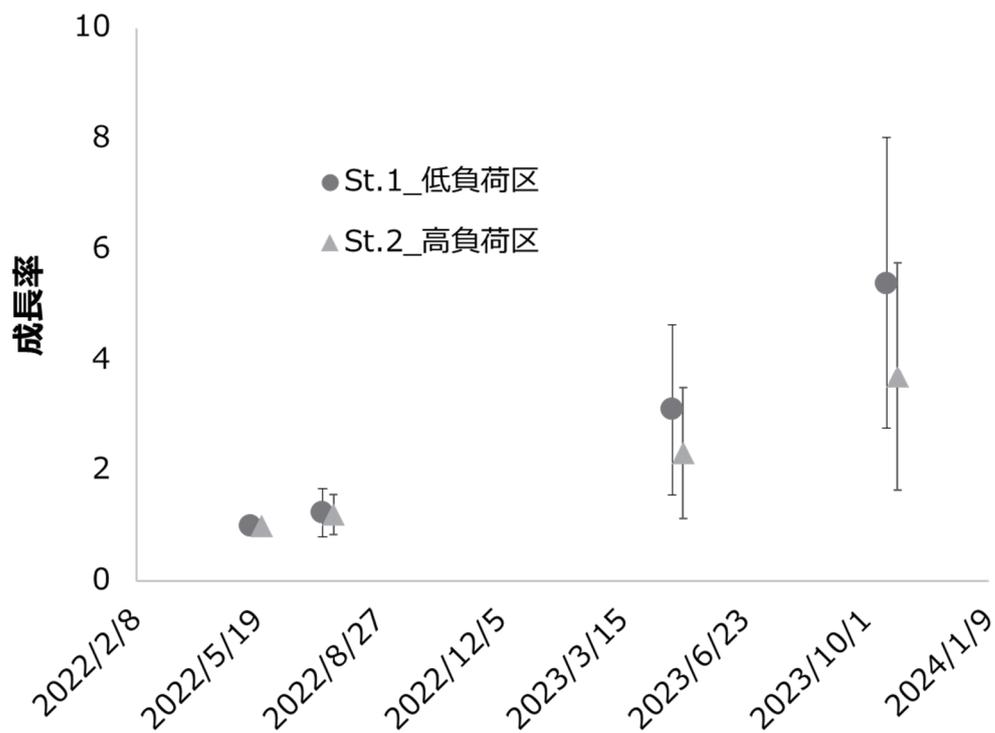


図3 各地点に植え付けたサンゴの成長率

web 市民参加調査によるサンゴ白化の可視化とモデリング解析

○熊谷直喜

(国立環境研究所気候変動適応センター)

野外の生物を観察・記録する調査は種の判別や調査手法に専門性があることから、専ら研究者が行うものだった。しかし現在では、生物調査への参加を通じて生物への関心の裾野を広げたい等の背景から、非専門家である一般市民の方々が参加する市民調査も盛んに行われるようになってきた。また、現在の生態学分野では多様なデータセットを用いた大規模なデータ解析が進んでおり、市民調査のような調査精度は高くなくとも広範で多数の観察記録が活用されている。さらに近年ではwebサイトへの観察情報の投稿・共有による野外生物の市民調査も行われるようになった。これらの調査では、観察記録のデジタル化、データの規格化、種同定など、市民調査にまつわる労力の大幅な軽減が可能になる場合がある¹⁾。これに加え、観察記録がごく短期間のうちにプラットフォーム上の地図などに反映されるなど、観察結果の貢献が速やかに共有されるようになるメリットもある。ここでは、海洋生物のうちでも認知度や社会的重要性の大きいサンゴの“白化”現象を取り上げる。サンゴの白化とは、過剰な高温ストレスを受けたときに体内の共生藻類が減少する現象であり、白化状態が持続するとサンゴの死亡に繋がる。白化現象は1998年の世界的大発生以降、大規模な発生が繰り返されるようになり、サンゴ礁生態系の持続性に関わる問題としての社会的認知度も高く、市民調査に適した現象である。ウェブサイト投稿する方式の市民参加型のサンゴ調査である「日本全国みんなでつくるサンゴマップ」(<http://www.sangomap.jp>)はサンゴの分布・白化・産卵の観察日時・位置情報を収集し公表している。本講演では、衛星観測の海表面水温データ(空間解像度:0.01°)から算出した温度ストレス指標を用いた評価を行い、白化の空間的分布の推定や気候変動適応策の実施効果の推定例を紹介する(図1)。

参考文献

- 1) 小出 大, 辻本 翔平, 熊谷 直喜, 池上 真木彦, 西廣 淳 (2023) リアルとデジタルの好循環を通じた市民科学による生物の時空間分布プラットフォーム. *保全生態学研究* 28: 109-123; DOI 10.18960/hozen.2217
- 2) Kumagai NH, Yamano H, Sango-Map-Project C (2018) High-resolution modeling of thermal thresholds and environmental influences on coral bleaching for local and regional reef management. *PeerJ* 6: e4382; DOI 10.7717/peerj.4382

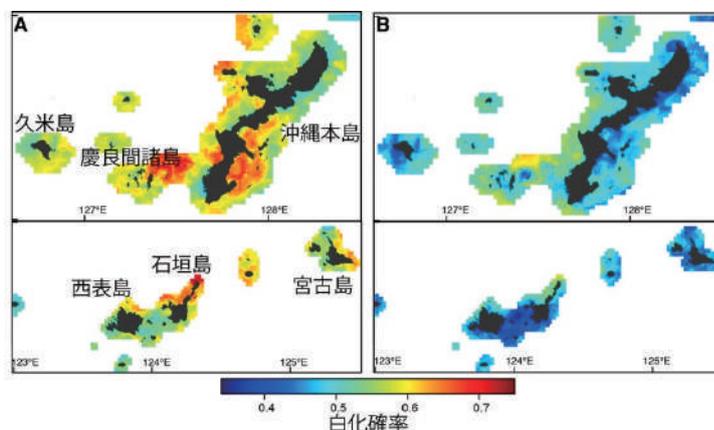


図1 沖縄海域における(A)推定白化確率、(B)40%紫外線遮蔽の気候変動適応策を想定したシナリオの元での推定白化確率。2008-2010, 2013, 2016年の最暖月の平均。²⁾の図を抜粋・改変。