

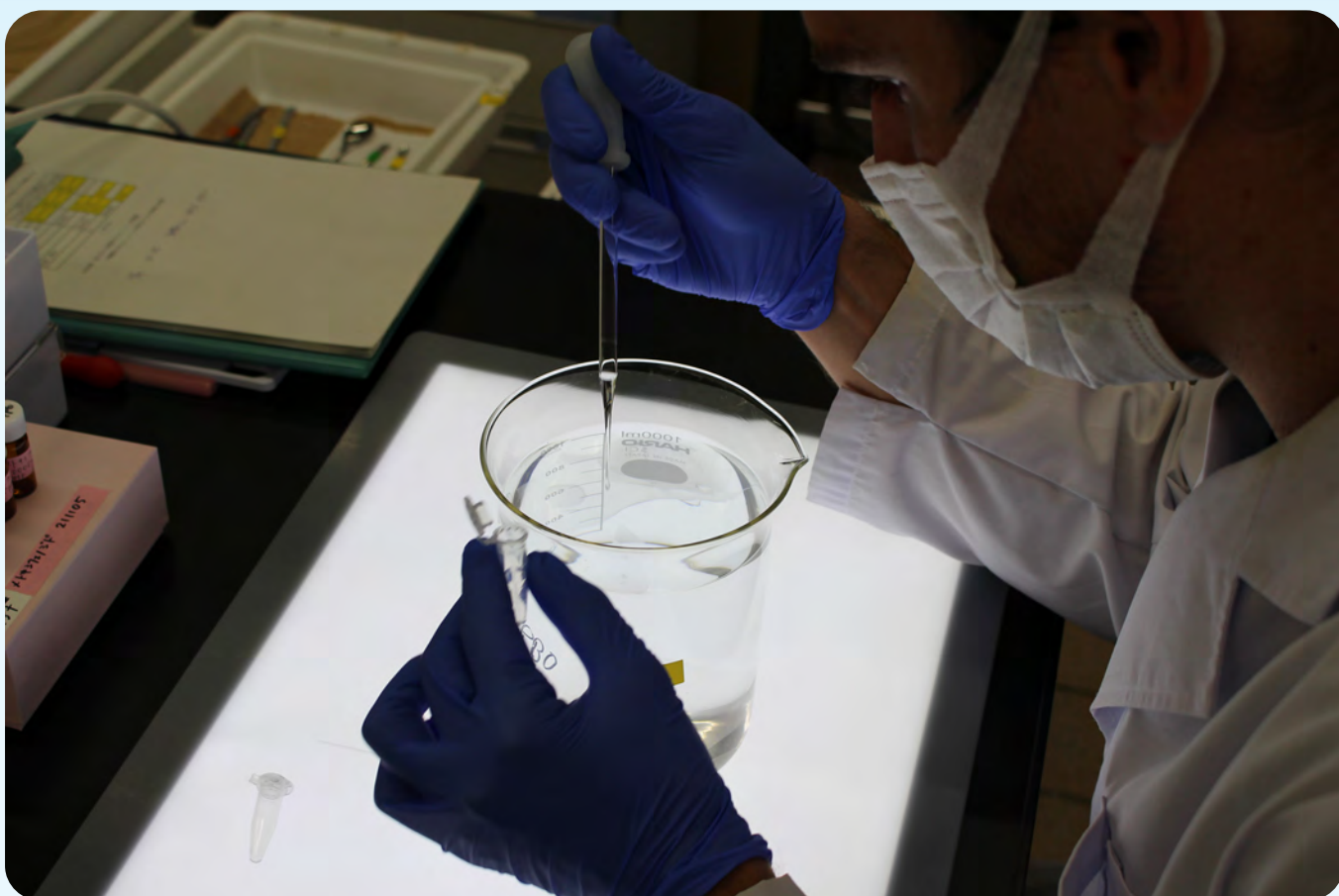
国立環境研究所 ニュース

National Institute for Environmental Studies

Vol.40

No.6

令和4年(2022)2月



水生生物を用いた化学物質曝露・動態試験に全集中

特集 | 数理モデル的手法を用いた 化学物質の環境動態把握

- 健康や生態系への影響が懸念される化学物質すべての評価を目指して | 2
- 多様な化学物質のリスク評価・曝露評価の実現に向けた用途情報の活用 | 4
- フリー溶存濃度による化学物質汚染と曝露の評価 | 7
- 地球規模の水銀循環と動態予測 | 9

「絶滅の危機に瀕する野生生物の遺伝資源保全」および「全国の調査員を募集して行う生物季節モニタリング」に係わる寄附金募集を開始しました | 12

令和4年度政府予算案等における国立環境研究所関係予算の概要 | 13

健康や生態系への影響が懸念される化学物質すべての評価を目指して

山本 裕史

当研究所の前身である国立公害研究所が設立された1974年当時、深刻であった重金属や大気汚染化学物質、農薬、洗剤などに伴う汚染によるヒト健康や生態系への影響、公害問題は地域的な問題で地球規模では考えられていませんでした。その後、各種の環境基準や排出規制、有害な化学物質の製造・使用の制限によって、近年は大きく改善されてきました。しかしながら、1990年代後半から問題となった内分泌かく乱化学物質（環境ホルモン）のようなごく低濃度で体内を調整する伝達化学物質や、非意図的に排出されるダイオキシン類、そしてその後も臭素系難燃剤やフッ素系の撥水剤、各種ナノ粒子、ネオニコチノイド系などの浸透性の農薬、海洋に排出されたマイクロプラスチックなど、次々に新たな化学物質などによる健康や生態系への影響が懸念されてい

ます。これらの物質に共通する特徴は、十分に作用・影響がわかっておらず、既存の化学物質の評価、管理から漏れてしまっている点です。

人間生活から環境中に排出される化学物質等の汚染要因については、図に示すように、Zone 1~3の3つに分けることができます¹⁾。Zone 1の既知の汚染要因（大気汚染化学物質や重金属等）は目に見える氷山の一角であり、Zone 2の定量化できない未知・未解明影響（中枢神経系の障害や免疫や内分泌かく乱、継世代等の影響）、Zone 3の未知・未規制の物質（神経毒性や内分泌かく乱作用を有する化学物質の多くやネオニコチノイド系殺虫剤等）、があつて、まだまだわからない点が多く残っています。そこで、2021年4月から始まった第5期中長期計画の包括環境リスク研究プログラム（化学物質等に起因する健康・

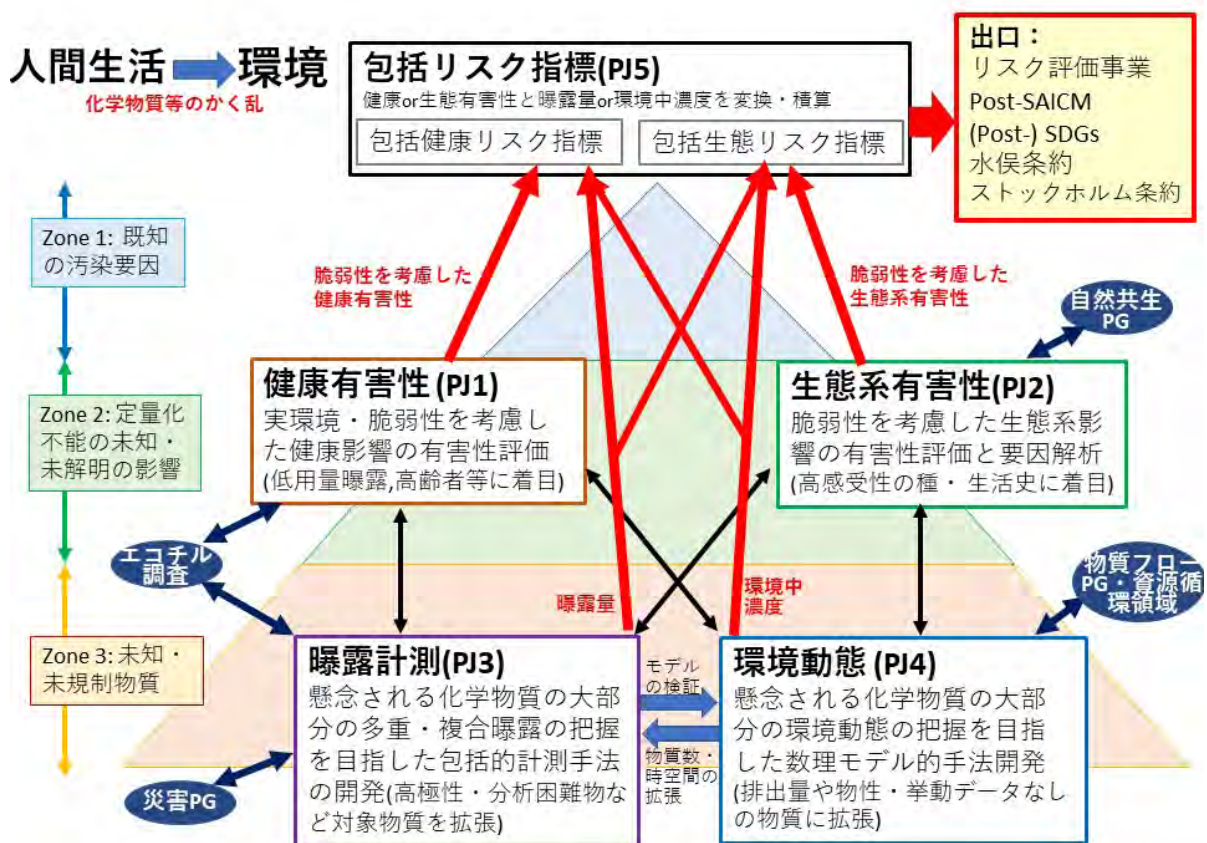


図 包括環境研究プログラムの概要

生態リスクの包括的評価・管理研究プログラム)では、図に示すように特に Zone 2 と Zone 3 に着目する5プロジェクト体制で実施することとしました。PJ1では、ヒト健康の有害性について、免疫系や脳神経系、生殖影響などのこれまでに評価が十分でない影響に加え、実環境レベルの低濃度で高齢者やアレルギー疾患などの脆弱な集団への影響の評価を、PJ2では、生態系への有害性について、生態系において脆弱な集団となっている高い感受性を持つ生物種や、高い感受性を持つふ化間もない仔虫(あるいは仔魚)などのステージ生活史に着目した野外調査、室内実験、数理・統計モデルの開発を行います。また、化学物質のヒトや生態系への曝露について、物質の対象を広げ、PJ3では高極性(水溶性が高い)などの分析困難な化学物質にも対象を広げた計測手法の開発を、PJ4では人間生活から環境への排出や移動、消長(分解や生成)に関するデータの多い多くの物質について環境動態を把握するためのモデル手法の開発を目指します。さらに、PJ5では、これらの4つのプロジェクトから得られた健康有害性や生態系有害性、曝露量や環境中濃度を統合して包括健康リスク指標および包括生態リスク指標を提案し、環境省が実施するリスク評価事業や、化学物質管理の国際的取組に対して貢献することを目指します。

今号では、本プログラムの中でも懸念される化学物質すべての環境動態のモデル開発を目指すPJ4に着目して、その研究の進捗状況や今後の研究の目標を紹介します。研究プログラム紹介では、「多様な化学物質のリスク評価・曝露評価の実現に向けた用途

情報の活用」と題して、主要なテーマである、1. 化学物質の環境リスク評価の現状とプロジェクトの狙い、2. 化学物質の用途情報と排出量推定に向けた検討、3. 不確実な情報を元にしたリスク評価について、の3つについて紹介します。また、研究ノートでは、「フリー溶存濃度による化学物質汚染と曝露の評価」と題して、主に環境中の動態の把握が難しいイオン性や難水溶性の化学物質について、生物に利用される可能性のある遊離(フリー)態に着目した研究の進捗状況について紹介します。さらに、環境問題基礎知識としては、「地球規模の水銀循環と動態予測」と題して、様々な性質を持つ化学形態があり、その長距離移動性や健康影響への懸念から2017年に水俣条約が発効するなど見直されている水銀研究の課題について解説します。

参考文献

- 1) Landrigan ほか, The Lancet Commission on pollution and health, *Lancet*, 391: 462-512, 2018.
(やまもと ひろし、環境リスク・健康領域 副領域長
包括環境リスク研究プログラム総括)

執筆者プロフィール:

私たちの日常生活を便利にしている化学物質は、ヒトの健康や生態系に悪影響を及ぼすものがあるものの、種類が多く、薄く広がって見えにくくなっています。環境への影響が小さい化学物質(群)が選ばれ、適切に使われるように、皆さんの意識が少しでも変わるといいですね。



特集 数理モデル的手法を用いた化学物質の環境動態把握

【研究プログラムの紹介：「包括環境リスク研究プログラム」から】

多様な化学物質のリスク評価・曝露評価の実現に向けた用途情報の活用

今 泉 圭 隆

包括環境リスク研究プログラムでは、人間活動に起因する化学物質の大部分を評価・管理することを最終的な目標に掲げ、それに資するための5つの研究課題（プロジェクト）に取り組んでいます。本稿では、その中の「全懸念化学物質のヒト・生態系への曝露量の把握を目指した数理モデル的手法による排出及び環境動態の推定手法の開発」というプロジェクトの中で新たに開始した環境リスク評価のための化学物質の用途情報の収集と解析についてご紹介いたします。

1. 化学物質の環境リスク評価の現状とプロジェクトの狙い

新たな化学物質が日々開発・製造されています。化学物質は多品種化が進んでいるだけでなく総量としても増加しており、今後も増加すると考えられています。化学物質による環境汚染は古くは高度経済成長期から顕在化・問題化しており、その後さまざまな法律等が制定され、それらの改定を含めて、時代とともに複雑な政策を組み合わせ、ヒトや生態系への悪影響が出ないように化学物質を総合的に管理しています（参考：環境省ケミココ関連法令のページ、<http://www.chemicoco.env.go.jp/laws.html>）。国際的にもさまざまな枠組みがあるものの、1. それらの管理対象（化学物質や事象）は限定的であり、全てをカバーしている訳ではないこと¹⁾、2. 国や地域によって管理対象物質が必ずしも共通している訳ではなく、国際的な意味での包括的なリスク評価が難しいこと²⁾を Wang らが指摘しています。化学物質管理はイタチごっこのような側面があり、既存の規制等で管理しきれない物質の存在が明らかになると、それを踏まえて新たな規制の導入や既存規制の改訂が行われてきました。

化学物質を管理する際には、その化学物質がどの程度悪影響を及ぼす可能性があるのかということの評価します。特に環境中に排出される化学物質（環

境中で生成する物質も含む）のリスクを評価することを環境リスク評価と呼びます。リスク評価は曝露評価と有害性評価（毒性評価）からなり、曝露評価で管理対象がどの程度、当該物質に曝露されるか・当該物質を摂取するかを、有害性評価でどの程度の濃度・量で有害性が発現するか（あるいは発現しない上限）をそれぞれ評価します（図）。

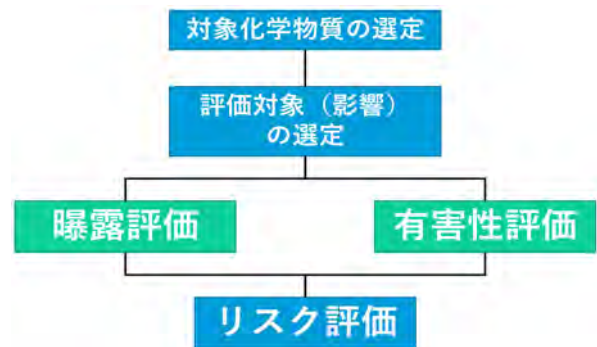


図 リスク評価の概要

我が国の環境リスクに関連する化学物質管理規制法の代表的なものは「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」（化審法）です。化審法は「人の健康を損なうおそれ又は動植物の生息・生育に支障を及ぼすおそれがある化学物質による環境の汚染を防止する」ことを目的とする法律です。化審法では、スクリーニング評価で“リスクがないとはいえない化学物質”を選定して「優先評価化学物質」と位置づけて、優先評価化学物質についてリスク評価を実施します。ただし、スクリーニング評価を実施する物質は製造輸入数量が一定以上などの条件に該当したものに限定されており、限定的な物質の評価に留まっているとも言えます。また、それぞれの物質を単独で評価するということは、物質の複合影響（複数の物質による相互作用で、加算的な影響も含まれます。）を想定していないということにもなります。より多くの物質を対象にリスク評価するためには、従来の規制対象物質以外にも含めて評価する必要があります。

しかし、一般にそういった物質についてはそもそもリスク評価のための情報を入手することが困難な場合がほとんどです。そこで曝露評価では、環境実態調査（実測データ）で対象物質の実環境での状況を把握したり、環境排出量と環境動態モデルを活用してヒトや生物への曝露量・曝露濃度を把握したりしています。本稿で紹介するプロジェクトでは後者のモデルを活用する手法を中心に研究を進めています。モデルを活用する場合、化学物質の環境排出量の推定と環境中での挙動の把握の両方が重要ですが、前者の環境排出量の推定に関する状況や研究の方針についてご紹介します。

2. 化学物質の用途情報と排出量推定に向けた検討

環境排出量の推定と関連した制度として、我が国では「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律」（化管法）において化学物質排出移動量届出制度（PRTR：Pollutant Release and Transfer Register）が運用されており、事業所から対象物質の排出・移動量が毎年届出されています。さらに、届出された排出量以外の環境への排出量を国が推計して毎年公表しています。現在届出の対象になっているのは462物質（PRTR番号ベース）です。一つのPRTR番号に複数の物質が該当する場合もあるため、厳密に何種類の物質という整理は難しいですが、おおよそ数百物質については推計排出量が存在していることとなります。そういった推計情報が存在しない場合は、物質ごとの用途別使用量（製造・輸入量等）と用途別の排出係数から当該物質の排出量を推計します。化審法における評価でも基本的には用途別排出係数から算出する手法を利用しています。ただし、化学物質の用途情報は時に企業秘密に該当することもあり、研究として用途情報を入手・収集することが難しいため、その壁をどのように突破するかを今模索しています。

収集が困難なことに加えて、用途情報の収集・整理における別の課題・問題点を、可塑剤としての用途が有名なフタル酸エステル類を例として説明します。なお、用途の情報源としては、NITE-CHRIP（以下、CHRIP）（https://www.nite.go.jp/chem/chrip/chrip_search/systemTop）、PRTRデータを読み解くための市民ガイドブック（以下、市民ガイドブック）（<https://>

www.env.go.jp/chemi/prtr/archive/guidebook.html）、北欧諸国のSubstances in Preparations In the Nordic countries（以下、SPIN）データベース（用途62分類）、米国のChemical Data Reporting（以下、CDR）データベース（うち、工業使用の用途36分類）を対象とします。国内の用途情報であるCHRIPと市民ガイドブックは自由記載で掲載されています。国内の情報源では用途が分からない物質についても検討対象にするため、またより多くの情報源を対象にした方が解析結果の信頼性が高くなると考え、国外の情報源も対象としています。フタル酸エステル類としてはPRTR対象になっている5物質を取り上げました。将来的には用途情報が少ない物質についても解析を広げる予定ですが、ここでは例として情報が豊富に存在する物質としました。各物質の用途情報一覧（一部、筆者による省略含む）を表に示します。様々な用途のうち、可塑剤、塗料、接着剤（シーリング剤含む）に着目し、それぞれ背景色で区別しました。SPIN以外では全て可塑剤（Plasticizers）が記載されていました。これはSPINでは可塑剤に該当する区分が存在しないことが原因でした。接着剤については、SPINでは“Adhesive, binding agents”、CDRでは“Adhesives and sealant chemicals”と微妙に表現が異なる上に、当該用途が記載されているかどうか物質によって異なり、国内の情報源とも明らかに差異がありました。塗料においても同様の傾向がみられました。収集した情報の国・地域が異なるため、実際に各物質の用途に相違があったのかもしれませんが、情報収集・整理方法や分類方法などに起因する情報源の特徴の違いによって相違があるのかもしれませんが、国内のCHRIPと市民ガイドブック間でも相違がありました。前者は出典元の用途情報を広く記載するという側面、後者は市民向け資料という側面があり、それらが両者の違いの原因だと考えています。このように“不整合”を含む用途情報をどのように利用して排出推定に結び付けるかが今後の課題となっています。

3. 不確実な情報を元にしたリスク評価について

現在の化審法のスクリーニング評価・リスク評価では正確な用途情報を入手可能という前提で手法が構築されています。当該物質を利用しようとしてい

特集 数理モデル的手法を用いた化学物質の環境動態把握

表 フタル酸エステル類の用途情報一覧

物質名	CASRN®	CHRIIP	市民 ハンドブック	SPIN	CDR
フタル酸ビス (2-エチルヘキシル)	117-81-7	可塑剤、塗料・ 顔料・接着剤溶 剤	可塑剤	Adhesives, binding agents / Paints, lacquers and varnishes/ 他 4 区分	Plasticizers
フタル酸ジアリル	131-17-9	架橋剤、可塑剤、 他原料	架橋剤、可塑剤、 他原料	Paints, lacquers and varnishes / 他 4 区分	Adhesives and sealant chemicals / Plasticizers / Paint additives and coating additives / 他 2 区分
フタル酸ジエチル	84-66-2	可塑剤	可塑剤	Adhesives, binding agents / Paints, lacquers and varnishes / 他 16 区分	Adhesives and sealant chemicals / Plasticizers / 他 1 区分
フタル酸ジ-n-ブチル	84-74-2	塗料、顔料、接 着剤、可塑剤、 香料、他 4 用途	可塑剤	Adhesives, binding agents / Paints, lacquers and varnishes / 他 11 区分	Adhesives and sealant chemicals / Plasticizers / 他 3 区分
フタル酸ブチルベンジル	85-68-7	可塑剤、建築 シーリング剤、 塗料	可塑剤	Adhesives, binding agents / Paints, lacquers and varnishes / 他 6 区分	Plasticizers / 他 1 区分

注：SPIN、CDR については、スラッシュ (/) で用途区分を分割しています

る事業者が用途情報を含めて申請することを前提に制度設計されているからです。一方、我々はより多くの物質を対象に包括的なリスク評価を実施することを目指しています。そのため、正確な用途情報が入手できない状況でも実施可能な手法を構築する必要があります。ここで、生態系への有害性評価に目を向けると、試験生物への毒性試験結果から環境中で守られるべきレベルを導出する際に、種間外挿（毒性試験対象の生物種から守るべき生態系の生物種のうち最も影響を受けやすい種への換算）や急性影響から慢性影響への換算に伴う不確実性を考慮しています。例えば、急性影響よりも低い曝露量・曝露濃度でも慢性影響が生じる可能性があるため、急性影響を評価した試験結果から、守るべき慢性影響が生じないレベルを導出する際に、より低い濃度（厳しいレベル）に換算するために不確実係数で除します。このように“不確実な値”を有害性評価に利用してきた経緯を踏まえて、曝露評価においても不確実係数のような概念・考え方を導入することでより多くの対象物質に対するリスク評価を実施する手法を構築できるのではと考えています。まだ始まったばかりのプロジェクトですが、これらの解析等を通じて、

より包括的かつ効率的なスクリーニング評価・リスク評価の実現につながればと考えています。

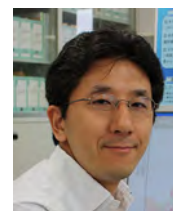
(いまいずみ よしたか、環境リスク・健康領域
リスク管理戦略研究室 主幹研究員)

参考文献

- 1) Wang, Z., et al. (2021). We need a global science-policy body on chemicals and waste. *Science*, 371(6531), 774-776. <https://doi.org/10.1126/science.abe9090>
- 2) Wang, Z., et al. (2020). Toward a Global Understanding of Chemical Pollution: A First Comprehensive Analysis of National and Regional Chemical Inventories. *Environ Sci Technol*, 54(5), 2575-2584. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06379>

執筆者プロフィール：

B.LEAGUE（国内のプロバスケットリーグ）に所属する茨城ロボッツのファンです。今期より B1 に昇格し、苦しみながらも日々成長しているチーム・選手を応援するのは“この上ない楽しみ”です。GO! GO! ROBOTS!!



【研究ノート】

フリー溶存濃度による化学物質汚染と曝露の評価

遠藤 智 司

・フリー溶存濃度

ある物質が水中で何とも結合せず、完全に水分子に囲まれている（水和している）状態のとき、その物質はフリー溶存態であると言います。そしてフリー溶存態の物質の濃度を、フリー溶存濃度（freely dissolved concentration）と言います。単に「溶存態」や「溶存濃度」と言わず、わざわざ「フリー」とつけているのは、「フリーではない溶存の状態」というものもあるからです。有機化学物質の場合、フリーではない溶存態とは「水に溶けている別の何か」に結合している状態です。別の何かとは、河川水・海水なら天然の溶存有機物（DOM）です。DOMが水中にあれば、物質はフリー溶存態のものとDOM結合態のもの両方が存在します。そしてフリー溶存濃度と結合溶存濃度の和が（総）溶存濃度になります。疎水性の高い物質はDOMに取り込まれやすいので、DOM結合態の割合が高くなり、フリー溶存態の割合が低くなります。例えばある河川水のDOMの濃度が炭素量で5 mg/Lだとしましょう。このとき疎水性の高いベンゾ[a]ピレンでは総溶存濃度の80%程度がDOMに結合しており、残りの20%程度がフリー態として存在していると推定されます（実際には幅があります）。物質の疎水性が高くなればなるほどフリー溶存態の割合は減りますが、有機汚染化学物質の毒性影響や生物蓄積を評価する際にはこのフリー溶存態の濃度を知ることが重要であると言われてい

・フリー溶存濃度が毒性や生物蓄積の鍵

フリー溶存濃度が特に重要なのは、水環境の底質汚染を評価する場合です。底質汚染の調査と聞けば、ボートなどで現地に赴き、泥を水底からすくい上げ、実験室に持ち帰って汚染物質の分析をすることを思い浮かべるでしょう。実際にまずはそうします。そして分析の結果、例えば汚染物質Aが泥1 kgあたり〇〇 mg（つまり〇〇 mg/kg）ありました、という

報告をします。しかしこの「泥1 kgあたり〇〇 mg」という濃度（全底質濃度とよびましょう）は毒性影響の有無（あるいは深刻さ）の判断にはあまり役に立ちません。底質汚染の毒性影響を考える場合、汚染物質の存在量だけでなく、底質粒子からの離れやすさ、生物移行のしやすさも考慮する必要があります。もし物質が底質粒子に強烈に吸着し、まったく粒子から離れないのであれば、生物に移行して毒性を発現することはありません。反対に量は比較的少なくともスルスルと粒子から出てくるなら、注意が必要です。このような物質の様態を底質における物質の生物利用能（bioavailability）とよんでいます。つまり底質汚染の評価は「存在量×生物利用能」で考える必要があります。これまでの研究から、粒子と粒子の隙間、つまり間隙水中のフリー溶存濃度がこの「存在量×生物利用能」を表す優れた指標であると考えられています（図参照）。

毒性影響がどの濃度で決まるかということは、底質汚染対策を考えるうえで非常に重要です。例えば底質汚染の基準値を決めようとするなら、底生生物に毒性影響が出ないように設定したいところです。もし間隙水のフリー溶存濃度が毒性影響の鍵となるなら、全底質濃度ではなく、間隙水フリー溶存濃度で基準値を設けるべきでしょう。実際に米国環境保護庁はこの考え方にに基づき、底質汚染サイトではフリー溶存濃度を評価に使うことを提案しています⁽¹⁾。また深刻な底質汚染が起きてしまったとき、浄化の目標を全底質濃度で設定するか、間隙水フリー溶存濃度で設定するかにより、浄化方法の選択の幅が変わってきます。全底質濃度を下げるためには、汚染を除去するしか方法はありません。一方、間隙水フリー溶存濃度を下げることが目標なら、汚染物質がフリー溶存態として出てこないよう、封じ込める、というのも一つの方法となります。汚染底質の除去というのはコストが高い方法ですので、ここ15年ほど米国やノルウェーでは封じ込めに関する研究が活

特集 数理モデル的手法を用いた化学物質の環境動態把握

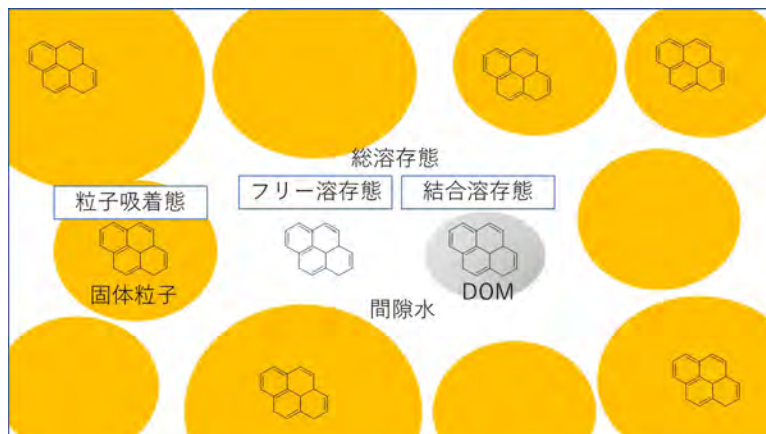


図 底質粒子と間隙水の拡大模式図

発におこなわれてきました⁽²⁾。

・パッシブサンプリングでフリー溶存濃度を測る

化学物質による底質汚染において間隙水中のフリー溶存濃度が重要であるという考え方は90年代から提唱されてきました。近年、改めてフリー溶存濃度に注目が集まる理由の1つは、フリー溶存濃度を測定する良い方法が発展してきたからです。パッシブサンプリングと呼ばれる方法で、シリコン被膜マイクロファイバーやポリエチレンフィルム小片などのパッシブサンプラーを底質試料と混合し、パッシブサンプラー中の平衡濃度を測ることにより、比較的容易に疎水性物質のフリー溶存濃度が測定できます。以前は底質をろ過したり、遠心分離したりして間隙水を集めて測定をしていましたが、大量の泥から少量の間隙水しか取れないため非常に困難な作業でした。また間隙水を集めてもフリー溶存態と結合溶存態を分離することができず、疎水性の特に高い物質については正確な測定が不可能でした。パッシブサンプリングが用いられるようになり、底質汚染の研究は大きく前進したと言えるでしょう。

私も以前、湾の多環芳香族炭化水素類 (PAH) による底質汚染の評価を共同研究としておこないました⁽³⁾。工場からの排水により底質のPAH濃度が高いことが知られている湾であり、私たちの調査でも周辺海域より100倍ほど高い濃度が検出された地点がありました(これは全底質濃度の話です)。一方、パッシブサンプリングにより間隙水フリー溶存濃度を測

定したところ、周辺との差は大きくても10倍程度で、米国などで毒性影響が懸念されるレベルの概ね50分の1以下であることがわかりました。このように底質中の存在量だけを見ていたのではわからなかったことが、間隙水フリー溶存濃度を測ることによって明らかとなりました。

・本当にフリー溶存濃度だけで毒性が決まるのか？

環境リスク・健康領域の曝露影響計測研究室及び生態毒性影響研究室の共同研究チームでは、底質毒性試験においてさまざまな化学物質の間隙水フリー溶存濃度を測定する方法を開発し、実施しています⁽⁴⁾。実験室での毒性試験と実環境でのモニタリングの両方で間隙水フリー溶存濃度を測ることにより、汚染状況と毒性影響をよりダイレクトに関連づけられるようになるかと考えています。またパッシブサンプリング手法が確立されていない界面活性剤などの物質にも手法を拡げようと研究を進めています。

研究チームでは議論をさらに一歩進めるべく、さまざまな底生生物のさまざまな底質における化学物質の毒性が本当に間隙水フリー溶存濃度のみで決まるのか、批判的な思考のもと研究をしています。ヨコエビ (*Hyalella azteca*) を用いておこなった私たちの実験では、フリー溶存濃度が同じでもDOMの濃度が高くなると殺虫剤の毒性影響が出やすくなるという結果が得られており、関心をもって見えています。また生物種の行動や呼吸・食餌の様式によっては間隙水以外の濃度がより重要になるかもしれません。

例えばオランダの研究者は同じ底生の端脚類でも別の種 (*Corophium volutator*) では間隙水よりも底質の直上水中の化学物質濃度が効くと報告しています⁽⁵⁾。間隙水フリー溶存濃度が化学物質による底質汚染の評価の土台であることは異論のないところですが、それだけでは考慮しきれない点がないか、今後も研究を進めていきます。

参考文献

- (1) USEPA, EPA-600-R-02-012, Office of Research and Development, Washington, DC 20460; 2012.
- (2) Zimmerman, J. R. et al. Environ Sci Technol 2004, 38, (20), 5458-5464.

- (3) Endo, S. et al. Environ Pollut 2020, 256, 113448.
- (4) Hiki, K. et al. Environ Toxicol Chem 2021, 40, (11), 3148-3158.
- (5) Droge, S. T. J. et al. Environ Sci Technol 2008, 42, (11), 4215-4221.

(えんどう さとし、環境リスク・健康領域

曝露影響計測研究室 主任研究員)

執筆者プロフィール：

勇んで研究ブログをはじめましたが、あまり更新できておりません。もっとがんばります。



【環境問題基礎知識】

地球規模の水銀循環と動態予測

河 合 徹

私達の身のまわりにはたくさんの化学物質が存在していますが、国境を越えて広域に輸送され、生物に蓄積し、また微量で高い毒性を持つ物質については、国際的な管理と排出削減に向けた対策が求められます。本稿で取り上げる水銀はこのような物質の一つです。水銀汚染といえば、地域的な公害問題の印象があるかもしれませんが、環境中での水銀の滞留時間は地球規模で広く拡散するには十分に長いのです。例えば、滞留時間は大気中では半年から1年程度、海洋ではさらに長く、300~3000年程度と推定されています。また、水銀は常温で液体の唯一の金属であり揮発性があります。このため、海から大気への輸送量はかなり多く、この量は現在の人為的な排出量を上回ると推定されています。長期的に、地球規模で、複数の媒体に亘る動きを考える必要があるのです。

2017年に、地球規模の水銀および水銀化合物による汚染、また、それによって引き起こされる健康被害を防ぐことを目的として、水銀に関する水俣条約(水銀条約)が発効されました。これに伴い、人為

的な排出量の削減に向けたさまざまな取り組みが実施されています。化学物質の越境汚染を防止するための国際条約は、これまでにもバーゼル条約、ロッテルダム条約、ストックホルム条約などがありますが、水銀条約は水銀に特化した初めての国際条約であり、産出から、使用、廃棄に至る水銀のライフサイクル全般を管理、規制するものです。日本は過去に水銀汚染に関する重大な公害を経験しました。この教訓を踏まえ、条約の履行と、また対策の効果の評価における中心的な役割を担うことが期待されています。本稿では、水銀の環境中への排出、その後の地球規模での循環、また水銀条約の有効性評価に向けた私たちのモデル研究の概要を紹介します。

環境中への水銀の排出には地質由来の排出と人為的な排出があります。水銀はもともと地球に偏在する元素であり、水銀含有岩の風化、火山活動など自然プロセスにより環境中に排出されてきました。このような地質由来の排出は、多く見積もっても現在の人為的な排出の半分程度です。人為的な排出の要因はさまざま、排出地域、排出要因ともに歴史的

特集 数理モデル的手法を用いた化学物質の環境動態把握

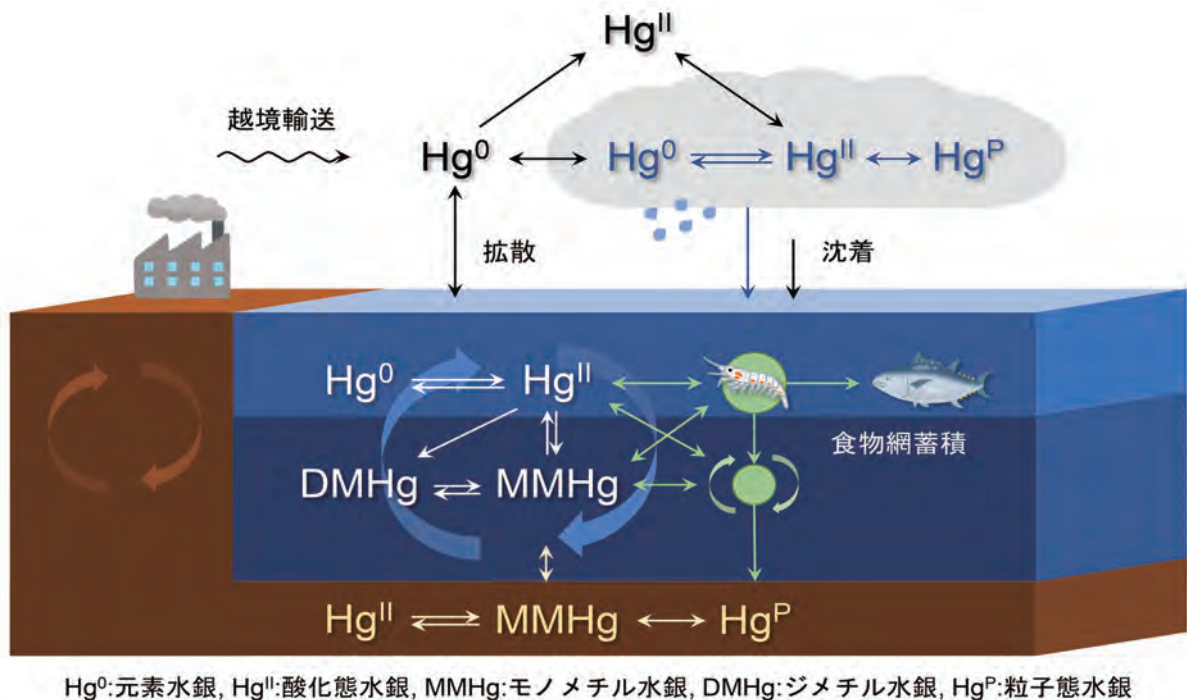


図1 形態変化を伴う地球規模の水銀循環と海洋生物への移行

に変化してきました。人為的な水銀排出が始まったのはかなり古く、貴金属が使われ始めた BC3000 年頃といわれています。明確に増加したのは産業革命後の 1850 年頃からで、19 世紀後半にかけての主要な排出源は銀と水銀の生産でした。ゴールドラッシュが終了し、20 世紀になると排出源は大幅に多様化しました。高度経済成長期には化学物質の製造や廃棄物の焼却などによって排出量が増加し、1970 年以降は、欧米など多くの先進国で規制が実施されました。これにより、これらの地域からの排出は減少しました。現在では小規模金採掘や石炭燃焼などによる、東アジアと東南アジアからの排出が多く、これらの地域からの排出が全世界の 4 割程度を占めています。

環境中に排出された水銀は、その後、元素（金属）水銀 (Hg^0)、酸化態（2 価）水銀 (Hg^{II})、有機態（モノメチル： $MMHg$ 、ジメチル： $DMHg$ ）水銀の形態をとりながら、大気—海洋—陸域—生物圏に亘って地球規模で循環します（図 1）。私たちが開発している全球モデルは、このような形態変化を伴う水銀の多媒体に亘る循環をコンピューターで計算し、水銀の存在量や輸送量を予測します。大気中の水銀形態は大半が Hg^0 、海洋では Hg^{II} です。しかし、量的には少ない水銀形態が媒体間の輸送や生物への移行に

において重要な役割を担っています。例えば、大気から海や陸への輸送を担う降雨中の主要な水銀形態は比較的溶解度の高い Hg^{II} で、魚類など海洋生物中の主要な水銀形態は生物蓄積性のある $MMHg$ です。このため、水銀のモデル研究では、形態変化を取り扱うのが不可欠です。

全ての形態の水銀には毒性がありますが、この中で私たちの主な関心は、無機水銀 (Hg^0 、 Hg^{II}) に比べてはるかに毒性が高いメチル水銀 ($MMHg$ 、 $DMHg$) です。 $MMHg$ は水環境中で嫌気性の微生物によって生成され、その後プランクトンなど低次の生物に分配され、食物連鎖によって魚類などの高次の捕食者に蓄積されます。水環境中での生成場所として、沿岸の堆積物は以前から知られていますが、近年、同位体を用いた研究により遠洋海中での生成が確認され、これがマグロなどの遠洋魚に蓄積されているという知見が得られてきています。海水とプランクトンの $MMHg$ の濃度比（生物濃縮係数）は平均で 2×10^5 程度であり、 $MMHg$ の生物への移行の大半がこの過程で起こります。プランクトンに分配された $MMHg$ の、その後の食物連鎖による濃度の増加率（食物網蓄積係数）は平均で 5 倍程度です。つまり、植物プランクトンの栄養段階を 1 とすると、

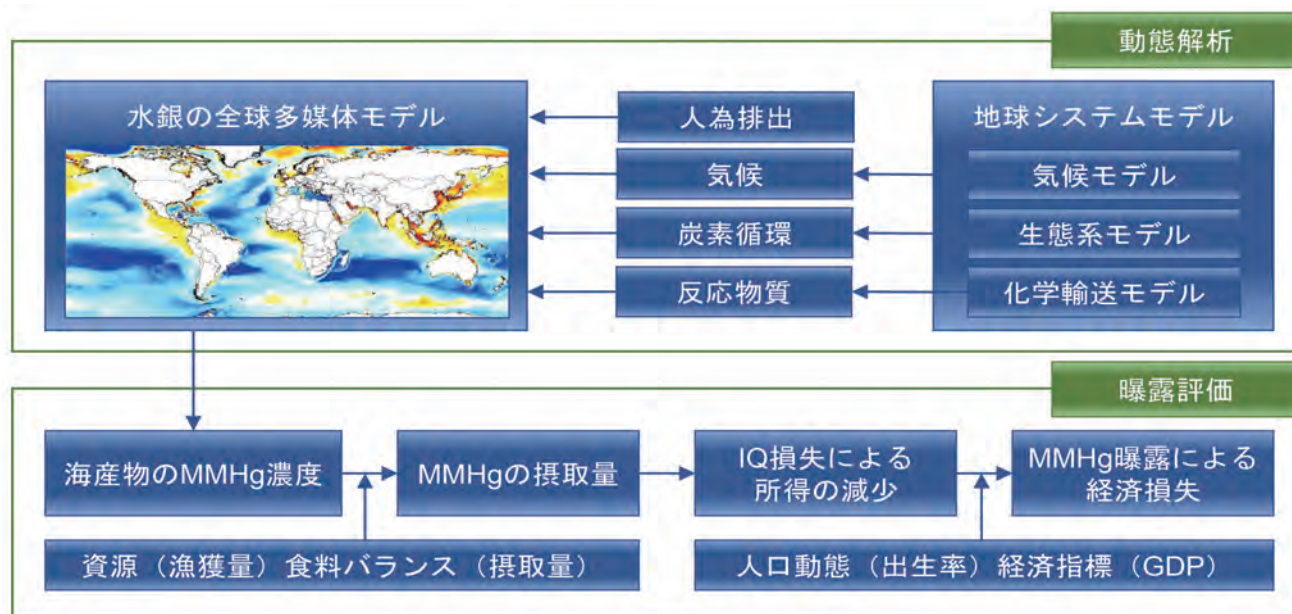


図2 水銀条約の有効性評価に向けたモデル開発の概要

例えば栄養段階4の大型の捕食魚中のMMHg濃度は、海水の $2 \times 10^5 \times 5^3 = 2.5 \times 10^7$ 倍程度になると概算されるわけです。MMHgのヒトへの曝露は、主に水産物の摂取によるため、MMHgの生成プロセスと水産物への移行動態を正確にモデル化し、遠洋海水中でのMMHgの生成速度や分解速度、生物濃縮係数、食物網蓄積係数といったモデルパラメーターを精緻化することが重要です。しかし、残念ながら、遠洋での観測には多大なコストと労力を要することから、これらの実験的なモデルパラメーターに関するデータは非常に少なく、不確実性が大きいです。

このようにパラメーター推定に関する課題は多く、モデル改良に向けた検討がまだまだ必要です。一方、水銀条約の有効性を評価するためには、全球モデルより予測される生物中の水銀濃度から、これらの摂取によるヒトへの曝露、また、その結果として生じる健康影響や経済損失を推定する必要があります。私たちはこのための統合的なモデル開発を進め、さまざまな排出シナリオを考慮した過去から将来を含む長期的なシミュレーションを実施しています。有効性の指標については議論の余地がありますが、図2は経済損失をこの指標とした場合のモデル概要を示しています。水銀の場合はMMHgの摂取により新生児のIQが低下することが知られています。これによる生涯所得の減少と、出生率やGDPといった人

口動態や経済指標から、MMHg曝露による総経済損失を地球規模で概算することができます。また、将来予測を実施するためには、将来の気候、炭素循環、反応物質濃度など、全球モデルに入力するためのデータが必要です。これらのデータを、気候変動予測などに用いられる地球システムモデルより取得し、人間活動と、その結果生じる気候変動の影響を加味した予測を行っています。

本稿では重点的に検討を進めている水銀を取り上げましたが、第5期中長期計画の包括環境リスク研究プログラムでは、残留性有機汚染物質など、他の地球規模物質への対応も進めています。

(かわい とおる、環境リスク・健康領域

リスク管理戦略研究室 主任研究員)

執筆者プロフィール：

昨年は引越しと出産で慌ただしい一年でした。パパになって育児に奮闘しています。釣りが趣味で、生命感のある水辺が好きです。



「絶滅の危機に瀕する野生生物の遺伝資源保全」および「全国の調査員を募集して行う生物季節モニタリング」に係わる寄附金募集を開始しました

連携推進部 研究連携・支援室

国立環境研究所では、2021年11月から「絶滅の危機に瀕する野生生物の遺伝子資源保存」、「全国の調査員を募集して行う生物季節モニタリング」の2プロジェクトについて、寄附金募集を開始しました。

「絶滅の危機に瀕する野生生物の遺伝子資源保存」プロジェクトは、国内の絶滅危惧野生生物の皮膚などから培養した体細胞、生殖細胞（精子、卵子、受精卵など）および組織を長期保存用タンクの中で凍結（冷凍）保存することで、絶滅危惧種の遺伝的多様性を将来に残し、絶滅の危機に備えるものです。今回の寄附金募集によって、より多くの生物種の保存を目指しています。「全国の調査員を募集して行う生物季節モニタリング」プロジェクトは、2020年をもって気象庁による生物の季節現象の観測が大幅縮小されたことに伴い、2021年、新たに、国立環境研究所、気象庁、環境省が協力して始めたものです。全国各地で長期的にご観測頂ける市民の皆様と協力

することで、長期観測モニタリングネットワークを構築し、長く広く市民に根差した生物季節モニタリングの体制構築を目指しています。今回の寄附金募集によって、多くの調査員に参加していただけるような体制作り（調査道具や旅費など）や自動観測技術の開発に役立てたいと考えています。

今回の募集特定寄附金の募集開始に伴い、寄附金サイトのリニューアルを行い^{※1}、また、クレジットカード決済代行サービス「F-REGI 寄付支払い」^{※2}の導入も行いました。今後も国民のみなさまのご期待に添うべく、研究成果の発信に努力してまいりますので、何卒ご支援を賜りますようお願い申し上げます。

※1 国立環境研究所寄附金サイト

<https://www.nies.go.jp/kenkyu/kifu.html>

※2 株式会社 F-REGI 寄付支払い

<https://www.f-regi.com/kifu/>



図1 リニューアルした寄附金サイト

令和4年度政府予算案等における 国立環境研究所関係予算の概要

企画部企画室

令和4年度政府予算案（12月24日閣議決定）においては、運営費交付金163億8千万円、施設整備費補助金7億2千万円が計上されました。令和4年度の運営費交付金は対前年度比99.2%となっています。

研究所の運営費交付金の業務費は、算定ルールにより引き続き毎年度一定の割合で削減が求められており、また、コロナ禍での厳しい財政状況の中ですが、ほぼ前年並みの予算が確保されました。また、人件費についても、衛星観測、エコチル調査への対応として若干名の人員増が認められています。

施設整備費補助金については、施設の老朽化が進む中で更新対応が課題となっていました。今回新たに特別高圧受変電施設等老朽化緊急対策工事（国庫債務負担行為）などが認められ、対前年比228.8%という大幅な増額となりました。

なお、12月20日に成立した令和3年度政府補正予算においては、衛星観測経費、エコチル調査経費および施設整備費補助金（特別高圧受変電施設）が計上されており、令和4年度予算と一体的に執行していくこととなります。

令和4年度は、第5期中長期計画の2年度にあたります。国立環境研究所では、運営費交付金とともに競争的研究資金をはじめとした外部資金も活用しつつ、初年度の活動を踏まえて国内外の環境政策への貢献を担う環境研究の中核的研究機関として、中長期計画に基づきさらなる研究展開を図っていきます。

表彰

「受賞のひとこと」など、詳しくはホームページもご覧ください。 <https://www.nies.go.jp/index.html#tab5>

地球大気化学国際協同研究計画 (IGAC) IGAC Co-Chair 感謝状

受賞者：谷本 浩志 (地球システム領域)

受賞対象：SSC メンバー及び Co-Chair として9年間にわたる IGAC への献身的なコミュニティサービスに対して

日本陸水学会 2021年度日本陸水学会論文賞 (Limnology Excellent Paper Award 2021)

受賞者：土屋 健司、富岡 典子、高津 文人 (地域環境保全領域)、佐野 友春 (環境リスク・健康領域)、今井 章雄 (企画部)

受賞対象：Decrease in bacterial production over the past three decades in the north basin of Lake Biwa, Japan, *Limnology*, 2020

環境放射能とその除染・中間貯蔵および環境再生のための学会 学術賞

受賞者：倉持 秀敏 (資源循環領域)

受賞対象：学術研究において顕著な貢献

日本鳥学会 日本鳥学会中村司奨励賞

受賞者：澤田 明 (生物多様性領域)

受賞対象：Sawada A, Ando H, & Takagi M 2020. Evaluating the existence and benefit of major histocompatibility complex-based mate choice in an isolated owl population. *J. Evol. Biol.* 33: 762–772.

International Global Atmospheric Chemistry (IGAC) project

Early Career Poster Presentation Award (優秀賞)

受賞者：MUELLER Astrid (地球システム領域)

受賞対象：How well can satellite derived XCO₂ determine seasonal and interannual changes of CO₂ over oceans? Evaluation by integrated ship and aircraft observations, presented at the 16th IGAC Scientific Conference, online, 2021

※所属は受賞当時のものとなります。

..... **編集後記**

誰もが自分の子の将来のために財産を残したいと考えるのと同様に、我々は美しい星、地球の環境を維持し、未来に継承しなければなりません。現在、地球環境は様々な問題に直面していますが、その内の一つに化学物質の問題があります。我々は、特殊な方法でしか見ない化学物質に様々な恩恵を受けるとともに、逆に健康影響の観点から脅威を感じることもあります。今回の特集号では、今年度から開始された包括環境リスク研究プログラムの全体像と、それを構成する

5つのプロジェクトの一つ、環境動態に関する研究についての紹介記事となっています。本プログラムでは主に未知や未規制の物質について焦点を当てています。こうした無数に存在する物質をどう管理して制御していけば良いのか、我々人類や地球上の生物が化学物質とともに未来を歩むためには未だ多くの課題があり、今後の一層の研究の進展が望まれると思います。(TL)

国立環境研究所ニュース Vol. 40 No. 6 (令和4年2月発行)

編集 国立環境研究所 編集分科会
ニュース編集小委員会

発行 国立研究開発法人 国立環境研究所
〒305-8506 茨城県つくば市小野川16番2

問合せ先 国立環境研究所情報企画室 pub@nies.go.jp

●バックナンバーは、ホームページからご覧になれます。

<https://www.nies.go.jp/kanko/news/>

無断転載を禁じます



この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。