

# 国立環境研究所 ニュース

National Institute for Environmental Studies

Vol.39

No.2

令和2年(2020)6月



東日本大震災の津波で損傷を受けた仙台新港と製油所(2011年5月1日)

## 特集 | 災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略に関する研究

災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略に関する研究 | 2

災害時における有害化学物質の流出事故を想定した分析法の開発 | 3

化学物質放出事故における排出シナリオの類型化 | 6

「震災による内湾底質の重油・炭化水素汚染」 | 10

掘って、ふるって、数えて、歩くー被災地の干潟での研究 | 14

## 災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略に関する研究

鈴木 規之

災害に伴う環境・健康のリスク管理を考えると、災害の直接的な被害や影響から、防災、医療、危機管理などの幅広い分野が含まれる可能性があります。これら諸課題に対し、複数の法や制度、部局によって災害対応、災害医療、コンビナート防災など危機管理、消防などとして活動が実施されてきました。このような災害に伴う環境・健康のリスク管理の課題の中で、有害物質が流出した場合のリスク管理のあり方は現在もなお十分に検討されていません。

東日本大震災の発生直後、震災や津波に起因する有害物質の流出が懸念される事案が複数発生しました。私たちは震災直後、震災後の環境と健康のリスク懸念についていくつかの試行的な取り組みを開始しました。津波被災地における健康調査などに始まり、以降でも紹介する津波後の環境調査などを進めてきて、それらの課題を統合する形で、これら一連の研究が一つの研究プロジェクトとして現在は構成されるに至っています。本特集では、災害に伴って特に有害物質の流出や発生により健康や環境に影響が及ぶ事態に対応すべく進めてきた研究について紹介します。

災害に伴って流出や発生があり得る有害物質には、さまざまな種類があると考えられます。平時における環境規制や排出規制での監視項目は災害時にももちろん考慮されるとしても、災害によって施設の破壊や未制御の反応などが起これば、平時には考えられないような物質の監視ニーズが発生し、分析が求められる可能性があると考えられます。通常ならば装置内で密閉系として管理されて外部への流出など考えられない物質が流出するとか、あるいは、反応の暴走により何らかの異常な物質の発生や流出が起こるようなケースが考えられます。また災害時には、緊急的な対応が限定された資源や時間の範囲で求められることになり、しかし状況は未知であるため、難しい課題であることが多かった経験があります。これらの状況に対応するため、漏洩や流出事故ではより網羅的、包括的な分析法が有効と考えて研究を進めてきました。

また、災害に伴って考えられる流出や漏洩にはさまざまな形態や時間、空間の異なるスケールがあります。流出、火災、爆発など異なる要因、成分の流出から副生物など異なる物質、さらには消火剤や中和剤などさまざまに異なる原因により、大気、水、土壌またほかの媒体などを通じて人や環境に作用する可能性が想定できます。このようなさまざまな状況を考えるには、適切なシナリオをあらかじめ設定しておき、これを現実の状況に対応させて修正しながら対応していくようなアプローチが有効と考えられます。また、関連して、どのような物質が対象となり得るかも事前に考えおくことが有効とも思われます。これらの課題に関して、災害・事故時の放出シナリオに関する研究を進めてきました。

東日本大震災では、沿岸域で石油成分の流出や火災などが発生しました。多環芳香族炭化水素等の汚染は現在もなお底質等に残っており、継続的な監視が行われています。また、津波によって起きた生態系への影響はなお回復過程であるため、環境、生物の継続的な観測、監視の研究も進めてきました。

本特集では、これらの一連のリスク管理上の課題、観測・分析の課題、環境監視に関する研究を紹介します。化学物質漏洩を想定した分析法、試料採取法の研究の一端を「研究プログラムの紹介」で、化学物質放出事故におけるシナリオの類型化に関する研究を「研究ノート」で紹介するとともに、東日本大震災後の環境汚染の調査研究の事例を「環境問題基礎知識」および「調査研究日誌」で解説します。  
(すずき のりゆき、環境リスク・健康研究センターセンター長)

執筆者プロフィール：

大学での最初の研究は水道水の分析化学と変異原性の研究でしたが、それから30年あまり、さまざまな研究の機会をいただき、分析からシミュレーションまで経験することが出来ました。災害に伴うリスク管理は加えて新たな課題として取り組んでいます。



【研究プログラムの紹介：「災害環境マネジメント研究プログラム」から】

## 災害時における有害化学物質の流出事故を想定した分析法の開発

中島 大介、高澤 嘉一

環境中の化学物質を測定する際には、ガスクロマトグラフィー質量分析計(GCMS)がよく使われます。GCMSは化学物質を高感度に分離分析する装置で、物質の同定能力に優れ、定量性も良いため、環境中の農薬分析や食品中の添加物など、様々な定量分析に使用されています。しかし、それは「何を測るか」がはっきり決まっている場合です(ターゲット分析と呼ばれます)。大規模な災害時には、流失した化学物質、あるいはそれらが反応して生成した物質、さらには爆発や火災などによって生じた物質など、環境中に放出された物質が何であるか想定できない事態も考えられます。

この研究プロジェクトでは、そんな状況でも活用できる2つのGCMS分析法を開発しています。

ひとつは、多種類の化学物質のうち、わずかな構造の違いでも識別でき、またそれが何であるかを精度よく判別できるノンターゲット分析法です。もうひとつは、どんな物質がどのくらい存在するのかを大まかに測定できる全自動同定定量システムです。今回はこれらの研究について紹介します。

### 二次元ガスクロマトグラフィー高分解質量分析計によるノンターゲット分析

化学物質の漏洩事故では、漏洩した化学物質に関する物理化学的な情報の有無により使用する分析法が選択されます。ここでは、漏洩した化学物質に関する情報が無い場合や極めて限定的な場合に特に効果を発揮するノンターゲット分析と呼ばれる未知物質の同定手法を紹介します。私たちが検討している方法は、二次元ガスクロマトグラフと高分解能飛行時間型質量分析計を分離検出器として用いる分析手法であり、特に揮発性化合物や中揮発性化合物に対して高感度で広い質量範囲における精密質量スペクトルの高速測定が可能という特長を有しています。わかりやすくいうと、大気中に漂うような性質を持った化学物質の構造をより正確に推定できる分析手法でしょうか。分析対象とする環境媒体は、大気、

水質、土壌など幅広く対応しています。化学物質の一般的な分析手法では、試料精製や前処理と呼ばれる作業により分析対象物質の測定を妨害する成分を事前に除去することが必要ですが、私たちの分析手法では、熱脱着装置を組み合わせることで試料に含まれる化学物質を二次元ガスクロマトグラフィーに直接導入するシステムとなっています。つまり、試料精製を行わないことで災害非常時に求められる同定分析の迅速性と分析対象成分の網羅性を高めています。通常用いられる一次元ガスクロマトグラフィーでは、多数の化学物質を含む試料を分析するとクロマトグラフィーの分離能不足によってクロマトグラム上には重なった成分ピークが観測されます。一方、私たちの分析手法では極性の異なるカラムを2本直列に接続し、その途中で各成分の冷却捕捉と熱放出を数秒間隔で連続的に繰り返すことで、各ピークの特性に関する情報量と分離能を増やす仕組みとなっています。これによりピーク幅がシャープになり分離能の向上に伴う見かけのS/N比(Signal to Noise ratio)が大幅に改善するため、より高感度な分析を行うことが可能となります。高感度な分析方法であれば分析に必要な試料量を減らすことができるので、人的負担も軽減し試料運搬も素早く行えるといった利点があります。つぎに、2016年の熊本地震の際に採取した水質試料に対して私たちの分析手法を適用した結果を紹介します。この時には、採水から化合物の同定までできる限り短時間で実施すること、試料に含まれるすべての化合物を一回の測定で同定することを目標にしました。分析を実施するには、まず水中に含まれる化学物質を集める必要があります。そこで、私たちは化学物質を吸着させる膜が塗られた小さな攪拌子(磁石を内包した棒)を水質試料(50 mL)に投げ込み、攪拌子を回転させることで化学物質を集めました(図1)。また、この小さな攪拌子は加熱脱着装置に直接導入できるため、採水から測定データを得るまでわずか1日で未知物質の同定分析を実施できました。分析の結果、3,000

特集 災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略に関する研究

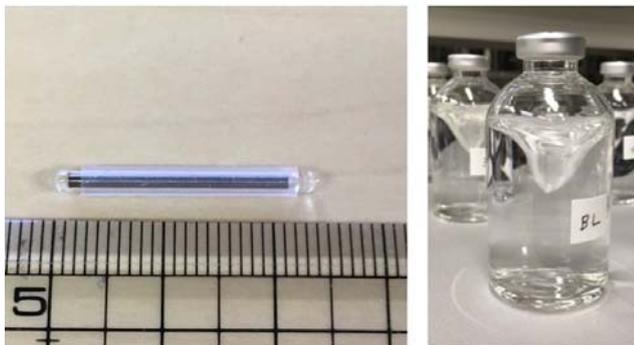


図1 水質試料に含まれる化学物質を集める様子  
(左：小さな撈拌子、右：回転時)

種以上の成分ピークが得られ、その中でも質量誤差が少なくクロマトグラム間の一致因子も良好な同定確度の高い化合物数は、トリクロサンや環状硫黄など150種以上に及びました(図2)。二次元ガスクロマトグラフィーも万能ではありませんので、例えば汚れた試料など検出ピークが非常に多岐にわたる場合には分析対象成分を十分に分離できない場合も起ります。そのような場合には、デコンボリューション

と呼ばれる数学的手法を利用して、重なりあった質量スペクトルを切り離して、個々の成分のきれいなスペクトルを切り出す作業を行います。一般的に、デコンボリューションはスペクトルを複数の構成要素に強制的に分割するため、試料によっては必ずしも良い結果を生むとは限りませんが、環境試料のように、たくさんの妨害物質が存在する中から微量な分析対象成分を探し出すには、非常に有効なツールであると言えます。

災害対応用全自動同定定量システム (AIQS) –GCの開発

一般に GCMS 分析では、装置各部位の汚れや劣化、真空度の違いなどによって感度やピーク形状が日々微妙に変化するため、測定の際に、ピークが検出されるまでの時間(保持時間)や質量スペクトルを確認し、濃度と応答値の関係式(検量線)を作成して同定・定量しなければなりません。これには多くの標準物質を保有している必要があることと、毎回

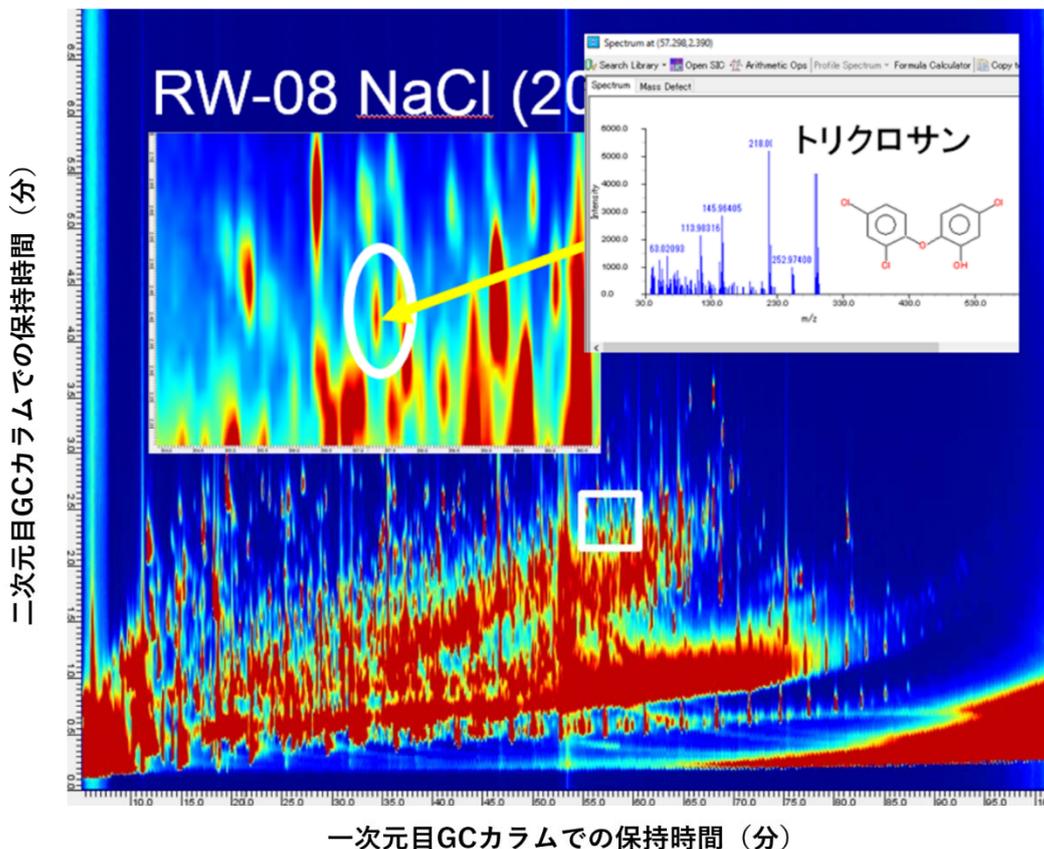


図2 熊本市内河川水のノンターゲット分析におけるトリクロサンの同定

多くの手間と時間をかけて検量線を作成する作業がついてまわります。これを回避するため、装置の性能を常に一定に保つことによって、同じ状態で測定された質量スペクトル、保持指標及び検量線情報を使い回すことを可能にする、というのが全自動同定定量システム (Automated Identification and Quantification System, AIQS) の考え方です。もし災害によって何らかの化学物質が漏洩している可能性があり、それが何なのかわからない状態であれば、多くの物質を短時間に測定できる AIQS が活躍すると考えられます。実際に阪神・淡路大震災の後に環境庁 (当時) が取り纏めた「緊急時における化学物質調査マニュアル (平成 10 年 3 月)」にも掲載されています。当時は 285 物質の相対保持時間、相対感度係数及び質量スペクトルが収録されていましたが、その後 1,000 物質程度まで拡充され、市販されるまでになっています。

この AIQS を災害時に利用するには未だ改良の余地があります。ひとつは、収録物質が平時の環境モニタリングを想定していることです。災害時には、工業原料や中間体など普段は排出が想定されない物

質もターゲットに含める必要があります。そこで災害時を想定し、更に数百物質をデータベースに追加する作業を行っています。ふたつめは、市販されている AIQS ソフトウェアが 2 社の GCMS 装置にしか対応していないこと、さらにメーカーによって測定条件もソフトウェアも、データベースも異なることです。したがって非対応の装置を保有している機関では AIQS を利用することができません。そこで、できるだけ多くのメーカーの装置で共通に使える AIQS ソフトウェアを開発中です。このために、測定条件を統一し、各社の測定データを共通フォーマットに変換して読み込めるようなプラットフォームを作成しています (図 3)。最終的には AIQS ソフトウェアをウェブ上で作動させ、ソフトウェアそのものを保有していなくても、一定の条件で測定したクロマトグラムをアップロードすれば解析結果が得られるシステムを提供する予定です。

大規模な災害時に、実際の環境モニタリングを担当するのは地方公共団体ごとに設置されている地方環境研究所 (地環研) だと想定されます。そこでこのプロジェクトでは地環研に広く協力を仰ぎ、国立

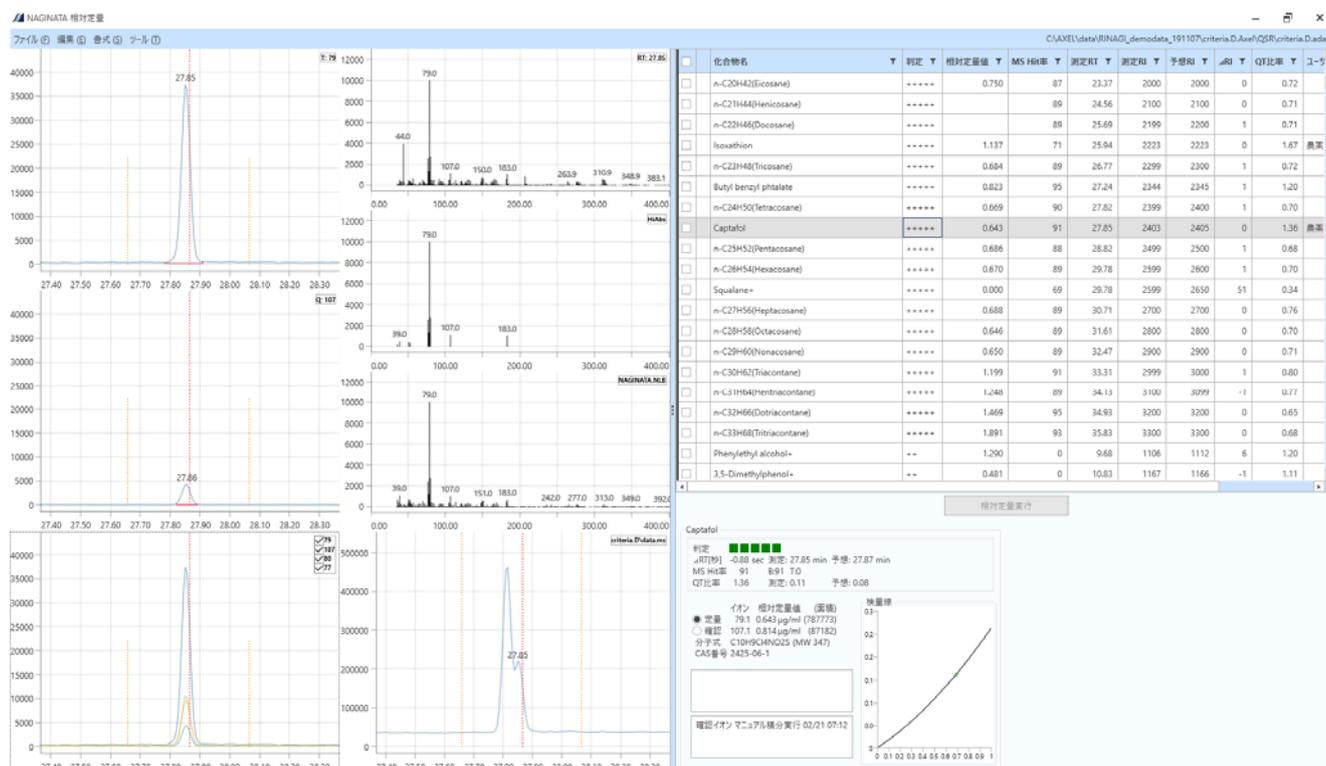


図 3 開発中の機種非依存型 AIQS の解析画面

特集 災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略に関する研究

環境研究所との共同研究として展開し、現在 40 近い地環研に参加いただいています。なお誤解されがちですが、AIQS は「GCMS の操作に不慣れでも手軽に結果が出せる魔法の測定法」ではありません。むしろ、GCMS を毎回一定の状態に整えられるだけの知識と技術が要求される上級者向けの手法です。現在、各参加機関に約 100 物質を混合したチェックスタンダード溶液を配布して測定していただき、装置の条件を整えられているかどうかの合否判定を行っています。地環研の共同研究者の皆さんは、通常業務で GCMS を利用している研究者・技術者集団であるものの、最初は合格することができないこともあります。そんな場合でも、測定結果を観ながら注入口回りの洗浄やカラムの入口側・出口側のカット、イオン源の洗浄などの対策を講じ、順次合格できるようになってきています。国環研では各機関の担当者を集めた研修会を継続的に開催し、技術の向上を図りながら、新しい AIQS ソフトウェアの開発を共に進めています。

この原稿を書いている間に、震災から 9 度目の 3 月 11 日を迎えました。今でも、石巻の日和山から見

下ろした津波被災地の光景を忘れられずにいます。環境化学が災害時にできることは何か。人々の健康と安全を守るために何が必要か。自問自答しながら研究に取り組んでいます。

(了)  
(なかじま だいすけ、環境リスク・健康研究センター 曝露影響計測研究室 室長)

執筆者プロフィール：

AIQS の改良を始めた頃には気づかなかった、GCMS 測定 of 奥深さに感嘆しています。また多くの地環研に仲間ができたことが、私にとっての宝物です。



(たかざわ よしかつ、環境計測研究センター 応用計測化学研究室 主任研究員)

執筆者プロフィール：

最近、日帰りで眺めの良い稜線歩きを楽しんでいます。見晴らしの良い景色を目にしたときは疲れが吹き飛び爽快な気分になります。これからも無理をしない程度に続ける予定です。



【研究ノート】

化学物質放出事故における排出シナリオの類型化

小山陽介

1. 背景

火災や爆発、流出など、有害物質の放出を伴う事故が、例年多数報告されています。消防庁が公表している消防白書においても危険物施設における事故件数は 1994 年 (287 件) から増加傾向にあり、2000 年以降は年間 500 件を超える高い水準で推移しています。このように多くの事故が発生する中で、事故時に放出された化学物質について、周囲の一般環境における環境リスクの観点から現象を詳細に解析した事例は限られています。近年多発する自然災害等を含む緊急時の迅速な対応を考えた場合、健康・環境への影響を把握するため、放出された化学物質が

曝露に至るまでに環境中でどのような挙動を示すのか(排出シナリオ)を想定しておく必要があります。そのためには様々な種類の事故を類型化し、その後起こり得る事象を想定し、一般化しておくことが重要と考えています。

本研究では、近年発生した事故の中から化学物質が放出された可能性のある事例を選定し、当該事業者へのアンケートやヒアリング調査により、物質の放出や事故対応に係る各種情報を収集し、その特性を解析しました。また、これらの解析結果に基づき、排出シナリオの一般化を試みています。

## 2. 近年の事故に関するアンケート調査

工場等において発生した事故事例について、化学物質関連の事故の類型化の基礎とする情報集約を目的として、環境中への化学物質の排出や事故時及び事故後の対応に関するアンケート調査を実施しました。調査実施にあたり、特定非営利活動法人災害情報センターが収集している「災害情報データベース」に集載された事例から、近年発生した化学物質の放出の可能性のある事故事例(100件)を選定しました。これらの事故当事者に対し、事故発生時の事業所における取扱物質やそれらの環境中への排出状況等に関してアンケート調査(表1)を行い、さらに一部の事業者に対して、追加的なヒアリング調査を実施しました。

アンケートの回答が得られた事例(29件/100件)は、化学工業(7件)に関する事故が最も多く、続く石油製品・石炭製品製造業(4件)、廃棄物処理業(4件)及び輸送用機械器具製造業(4件)で全体の約7割(19件/29件)を占めていました。回答があっ

た事故の種類としては、火災(爆発を含む)が27件と大半を占めており、火災以外の2件は、いずれも工場敷地内での化学物質の漏洩でした。

一般環境への化学物質の排出有無については、把握できていないとの回答(「不明」又は無回答)が3割程度(10件)で、「不明」の場合を除くと半数弱(7件/19件)が「環境中への排出あり」との回答でした。しかし、排出物質を詳細に把握できていたケースは少なく、推定等に基づく何らかの回答は得られても、「取扱物質」としては、化学分析等の分野での「化学物質」としては通常扱われない物質(例えば「樹脂」、「シンナー」など)が多く見られました。排出継続時間については、爆発等による瞬間的な排出であった場合以外の多くは、火災の発生から鎮火までの時間が回答されており、数時間程度という回答が多くを占めていました。

事業所で取り扱っている化学物質と異なる物質が生成した可能性(事故に伴い燃焼や意図せぬ化学反応によるもの)については、「不明」である場合を除

表1 アンケート調査票における質問事項(概要)

No.	質問事項
Q1	事故発生時における行政機関(消防本部等)による調査や指導の有無
Q2	関連行政機関の担当者の所属及び連絡先
Q3	当該事故に関する、事業者又は行政機関等によるレポート作成の有無
Q4	Q3のレポートの提供の可否
Q5	事故発生原因の概要(選択式)
Q6	事故発生原因の詳細(記述式)
Q7	事業所で取り扱っていた化学物質(以下、「取扱物質」)のうち、事故に関係するもの(複数回答可:最大4物質まで)
Q8	事故発生時における取扱物質の貯蔵量
Q9	取扱物質の用途や位置づけ(例:副生成物、廃棄物)
Q10	事故の発生に伴って別の化学物質(以下、「生成物質」)が生成された可能性
Q11	生成物質の名称及び、生成されたと判断(又は推定)した理由(複数回答可:最大2物質まで)
Q12	事故の発生に伴う取扱物質の放出継続時間
Q13	事故の発生に伴う取扱物質や生成物質の環境中への排出の有無
Q14	Q13に関する排出量
Q15	事故発生後における環境中での濃度測定の有無
Q16	Q15の結果
Q17	事故の発生から収束までの時系列的な事象の推移
Q18	当該事故に関するヒアリング調査への協力の可否

特集 災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略に関する研究

くと3分の1(7件/21件)が「その可能性がある」との回答でした。事故後に何らかの形で環境中の濃度測定を行ったケースは、29件中7件(24%)であり、環境中濃度の推定(シミュレーション等)を行ったという回答はありませんでした。アンケート調査の結果から、全体として一般環境における環境調査等の対応事例は少ないことが明らかになりました。ヒアリング調査においても、当事者としては「発災時には緊急の対応に追われ、環境調査を行う余力は無かった」との意見が聞かれました。

3. 事故時の調査対象物質の把握手法

今回のアンケート調査結果で、事故時及び事故直後に排出される化学物質の情報については十分に把握できていない事例が数多く存在することが明らかになりました。したがって、環境中での化学物質の状況を推定する手法を構築することは重要な課題といえます。現状、発災時に適用可能な排出物質の推定に係る基礎情報の収集方法及びそれらの長所・短所を表2に整理しました。

情報把握の方法としては、今回実施したようなアンケートやヒアリングによる当事者への確認のほか、関連する平時の排出量・取扱量等のデータを利用す

ることが考えられます。事故の当事者への確認(表2の①)については、精度が高い情報を把握できる可能性があるものの、事故の発生直後には当事者が対応不可な場合や、確認に相当程度時間を要する可能性もあり、緊急対応の面では必ずしも現実的ではないかもしれません。PRTR届出データ(表2の②)は、利用が容易で、環境リスクが比較的高い物質及び事業者の両面について大枠はカバーできていると考えられます。しかし、今回の調査では、環境中への排出があったと回答した事業者のうち、半数程度はPRTR届出事業者ではなく、PRTR届出事業者においても、回答物質とPRTR届出物質が合致する(あるいは関連性が予測できる)事例はほとんどなく、事故時の放出物質との関連性は必ずしも高くありませんでした。

比較したいずれの方法も短所があり、単独の方法で事故発生時に必要となる情報を迅速に把握することは容易ではありません。これらの情報を適宜、参照・収集しつつ排出された可能性のある物質に対して、環境調査を実施していくことが現時点では最善の方法と考えられ、事故時に関連情報を迅速に入手することが可能になるよう情報収集と整備を進めていくことが重要となります。

表2 事故に伴う化学物質の排出に関する基礎情報の収集方法

方法		メリット	デメリット
①	事故の当事者への確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>事故の状況や事故時の保管量を踏まえた比較的精度が高い情報を把握できる場合がある。</li> <li>化学物質の範囲が限定されず、直接関係する物質についての情報が得られる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>事故の発生の都度確認する必要があり、情報把握に相当の時間(・手間)を要する(特に事故発生直後には確認不可能な場合が多い)。</li> <li>大半の情報が「不明」であることも少なくない。</li> <li>情報を提供する根拠がなく、特に詳細については機密事項として提供不可である場合も少なくない。</li> </ul>
②	化管法 PRTR 届出データの利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>容易に利用可能である。</li> <li>届出要件はあるものの、基本的には全国の事業者を対象としたデータである。</li> <li>環境リスクが高い物質は概ねカバーできると考えられる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>届出対象外である場合は、情報が得られない。</li> <li>定常時に想定される年間排出量は把握可能だが、事故時の排出状況(または保管量)とは整合が取れない可能性が高い。</li> </ul>
③	化学物質の取扱量等に係る調査結果 <sup>注)</sup> の利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>基本的には全国の事業者を対象としたデータである。</li> <li>事業所における取扱量や在庫量(保管量)が把握可能である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>法令に基づいて定期的に更新されるデータではない。</li> <li>既存のデータを利用する場合は、対象物質やデータの種類が限定される。</li> </ul>

注：例えば、化管法 PRTR に係るパイロット事業における調査結果<sup>3)</sup>(<http://www.env.go.jp/chemi/prtr/archive/keii/H13/h13ref4.pdf>)や、(独)製品評価技術基盤機構による取扱量調査。

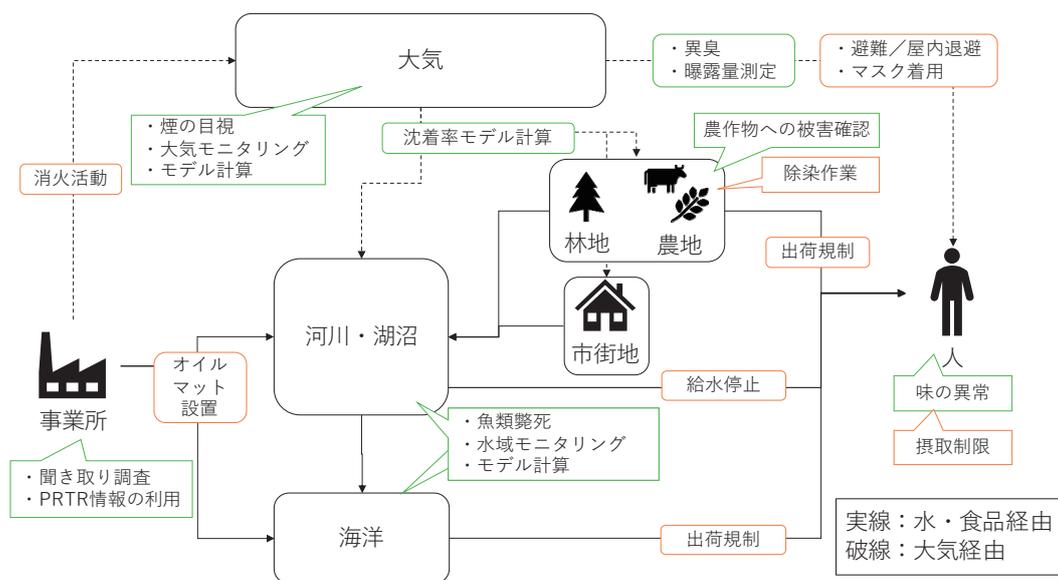


図1 一般環境への放出後の排出シナリオ及びアクションの整理（緑：把握、橙：低減）

#### 4. 排出シナリオの一般化の検討

事故に伴う事業所等からの化学物質の排出による一般環境のリスクを考えるためには、化学物質の排出後、曝露に至るまでの環境中の物質挙動を整理しておくことが有用と考えられます。起こりうる様々なケースを網羅することを念頭に、環境中の物質挙動と想定される対応（ここではアクションとする）を整理しました（図1）。

また、排出時には、起こり得る状況に応じて様々なアクションが想定されます。ここでは、これらのアクションを「把握」と「低減」の2つに大別し、さらに、それぞれのアクションについて、「媒体」に対して行うものと「媒体間移動」に対して行うものに別けて整理しています。媒体に対する把握アクションとしては、「目視（煙、農作物被害等）」、「大気モニタリング」、「モデル計算」などがあり、低減アクションとしては、「除染作業」などが挙げられます。媒体間移動に関する把握アクションとしては、「異臭（味の異常）の感知」や「曝露量測定」、低減アクションとしては、「消火活動」、「オイルマット設置」、「マスク着用」、「屋内退避」、「給水停止」などが挙げられます。

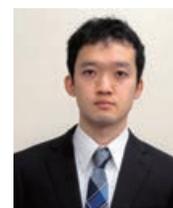
低減アクションの中には、例えば、消火活動のように大気への移動量を軽減する一方で、河川等への移動量を増加させ、あるいは別の物質の排出を伴う可能性を持ったアクションも存在します。このよう

な点も含めて、環境中での現象を整理するとともに、時間経過やアクションによる現象の変化を整理しておくことが重要になります。また、曝露に至るまでの排出シナリオは、排出形態や事業所の立地状況により異なり、アクションも排出形態や対象物質により変わってくることに注意が必要です。しかしながら、このように排出後に起こり得るシナリオと、把握と低減に関するアクションを網羅的に整理することで、過去事例において実施された（されなかった）措置やその理由を検討することが可能となります。対応に人を割けない、測定の義務が無い、物資が無いなど様々な理由が考えられますが、事故の規模や状況に応じた環境測定等の対応主体を整理しておくことで、今後の発災時における適切な対応に繋げることができると考えています。

（こやま ようすけ、環境リスク・健康研究センター  
リスク管理戦略研究室 研究員）

執筆者プロフィール：

事業者の方々に実際に会って話を聞いてみると、事故に備えた様々な企業努力がされていることを実感します。事故時の環境リスクの評価は難しい問題ですが、適切なリスク管理の在り方を考えつつ、研究を進めてまいります。



【環境問題基礎知識】

「震災による内湾底質の重油・炭化水素汚染」

牧 秀 明

1. 震災により三陸沿岸内湾で何が起きたか？

2011年3月11日に発生した東日本大震災でもたらされた大津波により、東北地方太平洋沿岸（三陸沿岸部）は甚大な被害を受けました。大津波により、三陸沿岸部の港周辺に設置されていた燃料油のタンクが流出・破壊され、内湾に油流出をもたらしました。気仙沼湾では周辺部に設置された船舶燃料用のA重油が津波で流されて破壊され、1万3千キロリットル近い重油が湾内に流出しました。また、一部の沿岸部の市街地では津波により火災が発生し、気仙沼湾では海面に流出した重油が燃え、後述するように重油成分そのものと火災により副次的に生成された様々な炭化水素による海域環境の汚染が懸念されました。大震災による被害が特に大きかった宮城県では、震災直後に公共用水域での水質測定が通常通り行うことが出来ませんでした。そのために、東北大学大学院工学研究科や宮城県保健環境センターが、震災が発生してから3か月後に気仙沼湾等で独自に緊急調査を行い、湾内の海底土砂を採取したところ非常に強い油臭が放たれ、また燃えかすのような真っ黒いススが混じっていることが分かりました。

2. 三陸沿岸海域での底質の重油・炭化水素汚染

震災から3か月後に東北大学大学院工学研究科や宮城県保健環境センターにより採取された気仙沼湾の底質が当研究所に送られ、重油に含まれる様々な炭化水素を分析しました。その結果、A重油の主成分である直鎖アルカン類が実に680,000 ng/g 乾泥もの高濃度で検出されました。図1上に底質に含まれるアルカンを分析した際のガスクロマトグラムを示しますが、通常、大都市に近い港湾域等、比較的汚染されていると考えられる底質試料を分析してもこのような明確なアルカンのクロマトグラムは得られることはまずありません。言うまでもなく、水よりも比重の軽い油は通常、海面に浮遊しますが、気仙沼湾の場合、津波により巻き上げられた湾内の海底土砂の細かい粒子がタンクから流出した大量のA重油と津波のエネルギーで混合され、油成分を抱えたまま海底に沈降・堆積したと思われます。

また同じ底質試料からアルカン以外の代表的な炭化水素である多環芳香族炭化水素（PAH）の分析も行ったところ、米国環境保護庁による指定16種物質（USEPA 16 PAH）の合計値で26,000 ng/g 乾泥、A

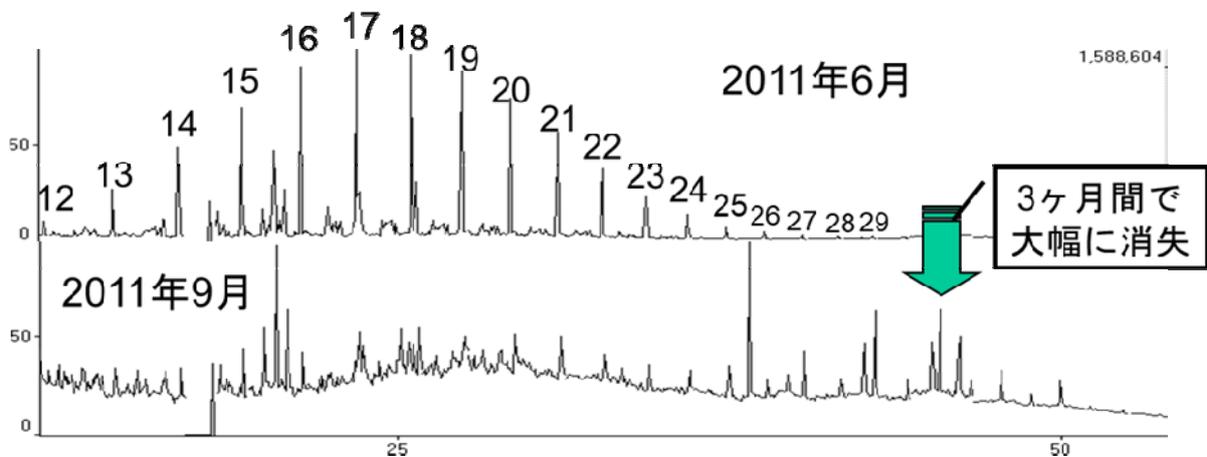


図1 気仙沼湾の大島北部で採取された底質中のアルカン類のガスクロマトグラム(上は震災から3か月後の2011年6月に採取したもの[各ピーク上の数字は各アルカンの炭素数を示す]。下は2011年9月に採取したもの)

重油由来のナフタレン、フルオレン、ジベンゾチオフェン、フェナントレンとそれらにメチル基等のアルキル基が結合したものの合計値で 275,000 ng/g 乾泥という非常に高い濃度で検出されました（図2の2011年の棒グラフ参照）。PAHの主な起源として、重油を含む石油由来のものと燃焼由来のものがあり、上記のように気仙沼湾の底質からは両方の起源を有するものが高い濃度で検出されたこととなります。また環境省でも震災の発生した2011年から「東日本大震災の被災地における環境モニタリング調査」を実施し、津波に襲われた東北地方太平洋沿岸部の広域の海域を対象にして、水深が数百メートルに及ぶ、やや沖合の地点を対象にして調査を行っています。この環境省の調査範囲は、北は青森県の八戸沖から南は福島県のいわき沖までに及び、底質中のPAHも測定していますが、前述のように津波により火災が発生した地区、あるいは気仙沼湾のように臨海部のタンクから油流出が起こった地区それぞれの海岸寄りの地点から、比較的高い濃度のPAHが気仙沼湾以外の海域からも検出されました。このように東日本大震災の津波により前例を見ない内湾底質の重油とPAH汚染がもたらされたと考えられます。

### 3. 湾内での重油・炭化水素の時間的変化と分布

前述の東北大学と宮城県保健環境センターによる気仙沼湾での調査は震災の年の9月にも行われ、再

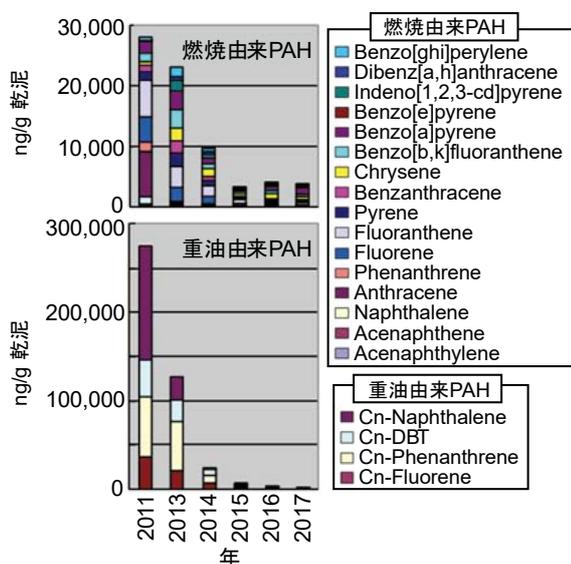


図2 気仙沼湾の大島北部における底質中の燃焼由来と重油由来の各PAHの経年変化

度採取された底質試料が当研究所に送られ分析を行ったところ、6月に非常に高い高濃度で検出されたアルカン類の大部分が消失していました（図1の下）。アルカン類は微生物により比較的容易・早期に分解されることが知られており、気仙沼湾の底質環境でもアルカン類は微生物により浄化されたことが示されました。一方、PAHはアルカン類より難分解性のものが多く、特に燃焼由来の高分子のものほど分解され難く、環境中の残留性が高いことが知られています。そのために震災から半年経って採取された泥でも依然高濃度のPAHが残留していることが示されました。同じPAHでも、上記のA重油由来のアルキル基を持つナフタレン、フルオレン、ジベンゾチオフェン、フェナントレン等の比較的low分子のPAHは燃焼由来の高分子のものより消失が速いことが示されました（図2）。

以上のように、東日本大震災による気仙沼湾の底質における重油とPAH汚染の実態が明らかになったことから、国立環境研究所では気仙沼湾と、やはり津波で流された燃料タンクからの重油による底質の汚染が起こった大船渡湾においてモニタリング調査を震災から1年後の2012年から現在まで行っており、この中で、湾内でのPAHの水平分布と底質中での鉛直分布や経時的な減衰について把握してきました。

気仙沼湾では、タンクが流出した港に近い大島北

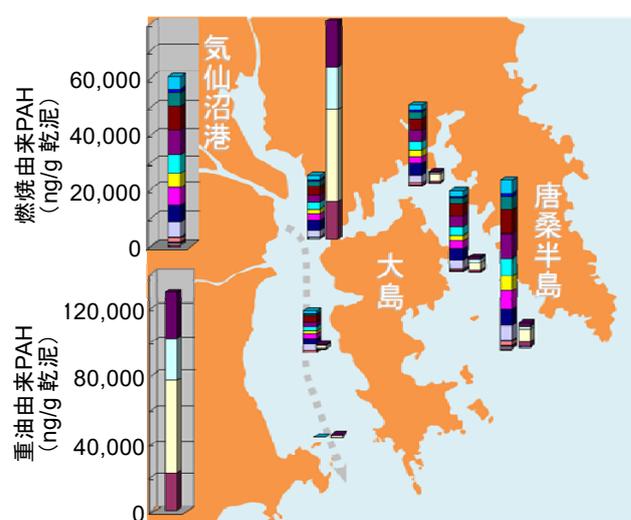


図3 気仙沼湾全域における底質中の燃焼由来と重油由来の各PAHの水平分布（2012年9月時点、棒グラフの凡例は図2と同じ）

特集 災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略に関する研究

部では重油由来の PAH が高い濃度で検出され、湾東部から湾口部にかけては燃焼由来の PAH が高い濃度で検出されました (図 3)。津波で流されタンクから流出したA重油には、高分子の PAH がほとんど含まれない代わりに、上記のアルキル基を有する比較的 low 分子の PAH が多く含まれています。一方、燃焼により出来た PAH にはアルキル基を有するものは含まれていません。前述のように気仙沼湾では津波が襲った後に湾内の海面に流出した重油に引火して大規模な火災が発生すると共に、湾周辺の陸域でも火災が発生しました。この一連の火災により、燃焼由来とされる高分子の PAH が大量に生成され、それが燃焼灰やススと共に湾内の特に大島北部から東部、湾口部にかけて海底に沈降したと考えられます。流出した重油自体は湾東部から湾口部にかけて余り広がらなかったと推測されます。

気仙沼湾で高い PAH が検出された地点で柱状採泥を行い、円柱状に採取した底質を深さ方向に切断して、その中の PAH の濃度を調べたところ泥深 10~14cm の層で最高となることが分かりました (図 4)。興味深いことに同じ地点でも、A 重油由来の PAH のピークは燃焼由来のものより浅いところに在り、それぞれの PAH の海底に沈降・堆積したタイミングが同じではなく、重油由来のものの方が燃焼由来のもの

のより遅く海底に沈降したと推測されました。これは上記の海面や湾周辺部の火災で生成した灰やススが比較的早く沈降したのに対し、津波で流された重油が津波で巻き上げられた底質粒子と混合したものは遅めに沈降したことを反映していると考えられました。

4. 現在の状況

経時的な変化では、難分解性の PAH も震災から時間が経つにつれて確実に減少しており、直近 (2017 年時点) では最高濃度時の 2~6% まで減少していることが示されています (図 2)。底質中の PAH の環境基準値は存在しませんが、PAH の中にはベンゾ (a) ピレンのように発がん性を有するものがあり、環境中に普遍的に存在する有害物質として注視されているために、米国海洋大気庁 (NOAA) により「生物学的に 10%、あるいは 50% の確率で悪影響を及ぼしうる濃度範囲をそれぞれ “Effect Range Law (ERL)”、あるいは “Effect Range Median (ERM)” として定められています。この ERL と ERM と直近の気仙沼湾と大船渡湾における底質中の各 PAH の濃度との関係は表 1 のようになっています。かつては大部分の調査地点で表に指定されているほとんどの PAH の濃度が ERL、あるいは ERM を超過していました

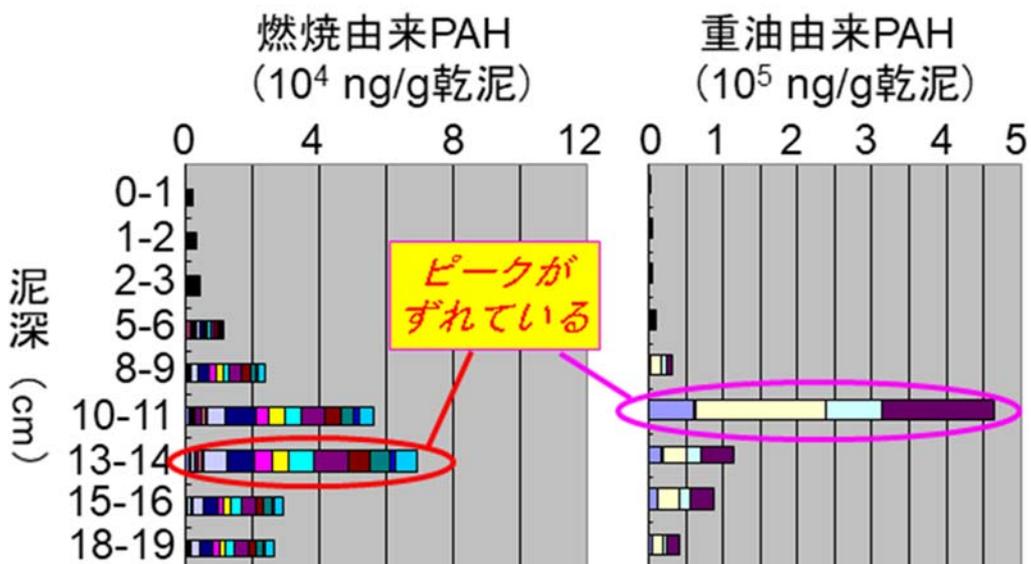


図 4 気仙沼湾の大島北部で採取された柱状採泥試料中の燃焼由来と重油由来の各 PAH の鉛直分布 (2012 年 9 月時点、棒グラフの凡例は図 2 と同じ)

表1 底質中の PAH の ERL と ERM (単位はいずれも ng/g 乾重) と 2017 年時点での気仙沼湾と大船渡湾それぞれでの全調査地点数に対する底質中の PAH 濃度の ERL と ERM 超過地点数

	ERL	ERM	気仙沼湾	大船渡湾
アセナフチレン	44	640	ERL 超 3/4	ERL 超 1/6
アセナフテン	16	500	ERL 超 1/4	ERL 超 3/6
ナフタレン	160	2100	—	—
2-メチルナフタレン	70	670	ERL 超 3/4	—
アントラセン	85.3	1100	ERL 超 1/4	—
フェナントレン	240	1500	ERL 超 1/4	—
フルオレン	19	540	ERL 超 1/4	ERL 超 2/6
フルオランテン	600	5100	ERL 超 1/4	—
ピレン	665	2600	ERL 超 2/4	ERL 超 1/6
ベンツ[a]アントラセン	261	1600	ERL 超 2/4	ERL 超 1/6
クリセン	384	2800	ERL 超 1/4	ERL 超 1/6
ベンゾ[a]ピレン	430	1600	ERL 超 3/4 ERM 超 1/4	—
ジベンツ[a,h]アントラセン	63.4	260	ERL 超 1/4 ERM 超 1/4	ERL 超 2/6
全 PAH	4022	44792	ERL 超 3/4	ERL 超 2/6

が、2017 年時点で大船渡湾では ERL を超過する地点が 6 箇所中 1~3 箇所、ERM 超過地点は無く、気仙沼湾では ERL を超過する地点が 4 箇所中 1~3 箇所、ERM 超過地点が 4 箇所中 1 箇所となっています。震災後の着実な環境回復が進んでいることが示されたと考えられました。

当研究所では津波によるタンク倒壊で重油が流出した志津川湾でも 2014 年から同様の調査を実施しており、気仙沼湾と大船渡湾と同様に底泥中の PAH の確実な減少を確認しています。東日本大震災により三陸沿岸部の内湾の底質にもたらされた特異な石油・炭化水素汚染からの回復を見届けるために、

今後もモニタリング調査を継続するつもりです。

(まき ひであき、地域環境研究センター

海洋環境研究室 主任研究員)

執筆者プロフィール：

22 年前、当研究所に入所する前は岩手県釜石市に住んでいました。東日本大震災発生 50 日後に現地を訪れ、かつて慣れ親しんでいた街の惨状に呆然とさせられました。仕事で三陸沿岸に赴くことになるとは思っていませんでしたが、毎年調査で被災地を訪れ、かつてお世話になった方々から復興の状況を伺っております。



特集 災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略に関する研究

【調査研究日誌】

掘って、ふるって、数えて、歩くー被災地の干潟での研究

金谷 弦

はじめに

高度経済成長期の日本では、東京湾を始めとして各地で多くの干潟が埋め立てられました。しかし、今でも日本の沿岸には多くの干潟が残されており、貝やゴカイのような底生動物（砂の上を這ったり穴を掘ったりして暮らす生き物）や、シギやチドリ類のような水鳥、カレイやハゼの仲間のような魚類の

生息場として重要な役割を担っています。海と陸の境目に位置する干潟には多くの希少な底生動物が暮らし（図1）、沿岸域における水質浄化の場として機能するほか、水産有用種であるアサリやヒトエグサの漁場となるなど、人間にとって多くの恵みー生態系サービスーをもたらしてくれる場となっています。

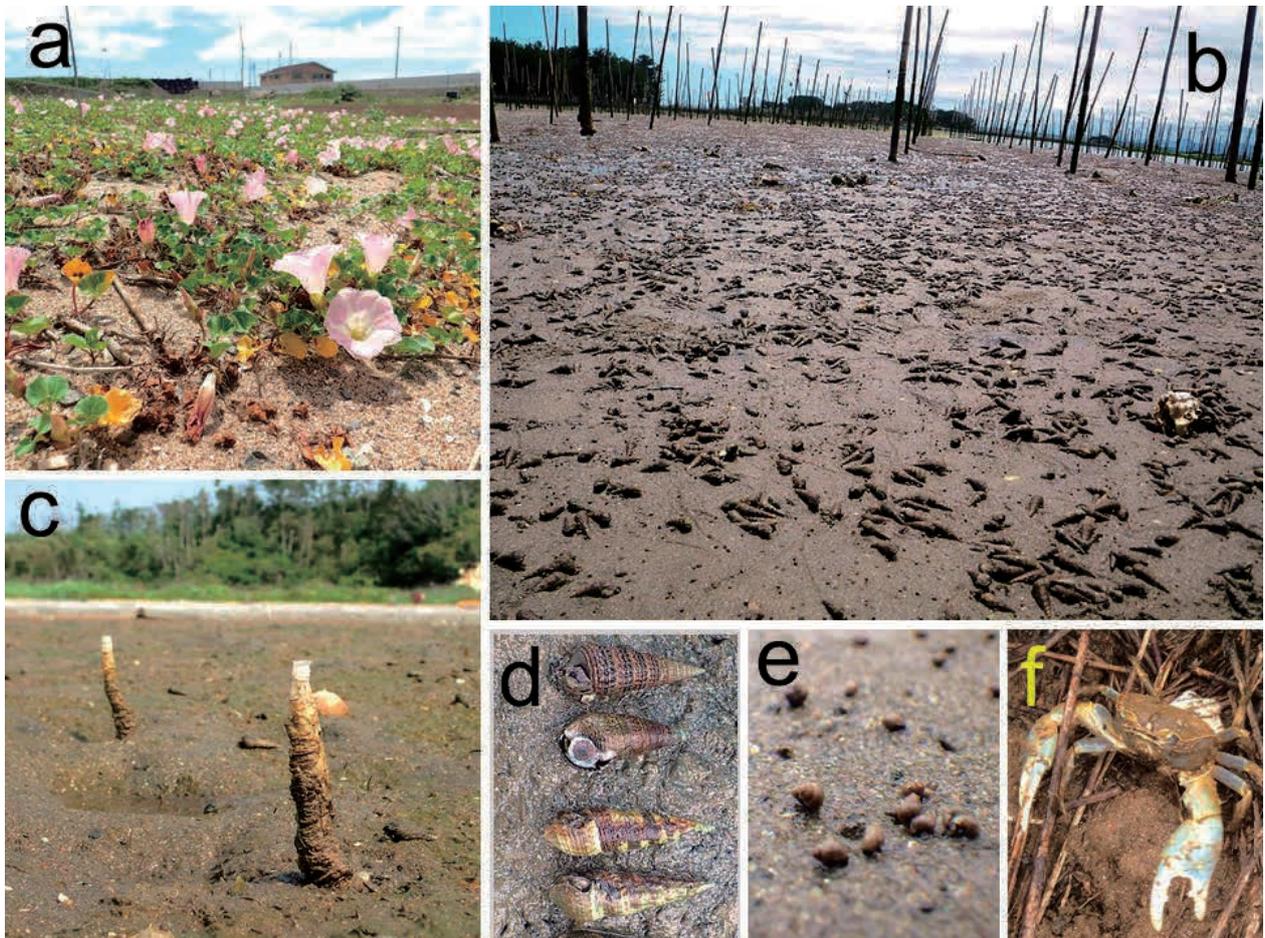


図1 干潟とその周辺部に暮らす生き物たち。(a) ハマヒルガオが咲く海浜植物群落、(b) 震災前の干潟で多産したホソウミナ（2010年5月）、(c) 震災後に増加した希少種ツバサゴカイの棲管、(d) 希少なウミナ類3種：上からカワイ、ウミナ、イボウミナ、(e) 殻の高さ2mmほどの小さな希少巻き貝マツシマカワザンショウ、(f) 復旧工事を生き延びた希少種ハマガニ。



図2 巨大津波による干潟の攪乱。宮城県仙台市蒲生干潟。(a) うっそうとしたヨシ原が広がっていた震災前の2004年6月、(b) ヨシ原が流され、防潮堤が崩れ、大木が打ち上げられていた震災直後の2011年5月、(c) ヨシ原が徐々に回復してきた2014年6月、(d) 東日本大震災時の引き波で破断した防潮堤(2011年6月)。(a)～(c)はほぼ同アングル。(b): 鈴木孝男氏撮影。

### 東日本大震災と干潟

仙台市内から車で30分ほどのところにある蒲生干潟で、私は大学4年生から博士課程を卒業するまでの期間、博士論文を書くための研究を長いこと続けていました。震災が起こった2011年は、私がつくばに就職してから2回目の春。震災から1ヶ月ほどがたち、だんだんと現地の情報が伝わってくるようになると、私は蒲生干潟がどうなっているのかが気になってきました。震災前と同じやり方で調査を行えば、巨大津波が生態系に及ぼした影響を評価することができるかもしれない……。震災のショックで呆然とした日々を過ごしていた私は、やっと回りはじめた頭で調査の計画を立て始めました。

蒲生潟は、南北1 kmほどの袋状の浅い汽水湖(淡水と海水が混じり合う環境)で、震災前はうっそうとしたヨシ原に囲まれていました(図2)。震災から3ヶ月が過ぎた頃、やっと現地を訪れることができた私の目に映ったのは、大きく変わってしまった蒲生潟の姿です。津波はヨシ原を押し流し、干潟の地形を変え、震災前に完成した防潮堤もあちこちで壊されていました。「生き物が戻ってくるまでに、何年かかるんだろう……」と、私はその時とても悲観的な気持ちであったことを思い出します。しかし、その1ヶ月後に行った調査で、ゴカイの仲間が震災前よりもはるかに高い密度で生息していることを確認できました。これは、津波でできた新しい干潟に底生動物の幼生がたくさん定着し、3ヶ月間に大きく成長したためと考えられました。1年が経つ頃には、アサリをはじめとする二枚貝の稚貝がたくさんみつきり、3年が経つ頃にはヨシ原や海浜植生にも徐々に回復の兆しが見えてきました。当時の私は、

干潟に暮らす生き物たちのしたたかさや強さに、驚かされてばかりいたように思います。

### 掘って、ふるって、数える

干潟の生きものは増えたのか、減ったのか?この問いに答えるためには、ある一定の広さに何匹の生き物がいるかを知る必要があります。このような調査を「定量調査」と呼びます。干潟での定量調査には大きく分けて2つのやり方があります。方形枠の中の動物を数える方法と、筒(コア・サンプラー)を干潟に差し込んで土を抜き取る方法です(図3)。後者の場合、抜き取った土をふるいで濾して、ふるい上の残渣から動物だけを拾い集めます。集めた動物は、実体顕微鏡の下で種同定を行い、個体数を記



図3 定量調査の方法。(a) 方形枠(25 cm 四方)中のウミナ類を全て数える。(b) 直径15 cmの塩ビ管(コアサンプラー)を使って土を掘り出し、(c) 1 mm 目のふるいで土を濾し、(d) 残渣をバットにあけて生き物を拾い集める。(b)と(d): 青木美鈴氏撮影。

特集 災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略に関する研究

録します。糸くずのようなゴカイの仲間や、すいすいと泳ぎ回る小さなヨコエビが数百匹も出てくることがあります。とてもとても根気がいる作業ですが、様々な干潟で同じやり方の調査を行うことで、データを互いに比べることができます。震災後、「記録しておくこと」の大切さを再認識した私たちは、日本のあちこちの干潟に出向いて、同一の調査手法に従って底生動物を調べる仕事を続けています。

「足で稼ぐ」調査

約6時間の周期で海の水は満ち引きを繰り返しています。GPSを持って、潮が引いた時・満ちたときの水際（低潮線/高潮線）をトレースすれば、干潟の地図を作ることができますし、ヨシ原や海浜植物群落の縁をくまなく歩き回れば、植生分布図を作れます。幸か不幸か、蒲生潟は南北800mと手頃な大きさ。私は、地形と植生の変化を調べようと、毎年夏にGPSを持って一日中干潟を歩き回ると、「力任せの調査」を始めました。

結論から述べると、やはりこの試みは無謀でした。震災直後で植生帯が失われた状況では、高潮線と低潮線をトレースすれば調査はほぼ終了でした。しかし、5年も経つとヨシ原がどんどん復活し、こちらの予想外の速さで海浜植生帯も広がっていきましました。トレースする道のりは毎年加速的に長くなり（図4a）、もはや1日では調査が終らない状況に。そこで、2019年の調査では、文明の利器・ドローンの力を借りて詳細な空撮地図を作成しました。その結果と、

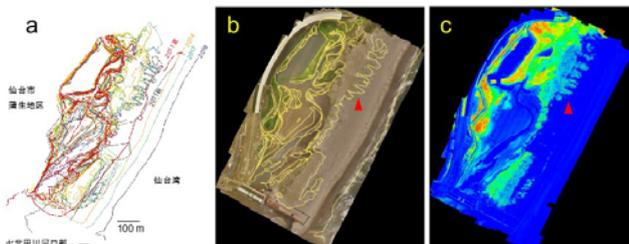


図4 蒲生干潟の地形・植生帯の経年変化。(a)：震災後2019年まで毎年1回GPSで高潮線・低潮線と植生帯をトレースした地図。(b)と(c)：2019年7月の空撮写真から作成したオルソモザイク画像。(c)は近赤外カメラ画像から計算した正規化植生指数(NDVI)の分布。緑～赤ほど植物が多く、生育もよい。(b)の黄線はGPSトレース結果。海浜植生帯は、「GPSトレース」と「NDVI」でよく一致した(赤三角)。

私が「足で稼ぐ」地図を改めて比べてみると、思っていた以上の精度で植生分布をトレースできていて、場所によっては空撮よりもきれいな結果が得られていることがわかりました(図4bc)。「ドローンを使えば、もう歩かなくていいや」と思った瞬間もありましたが、そこまで来ている体力の限界をひしひしと感じながらも、「もう少しだけ、足で稼ぐ調査を続けてみようかなあ・・・」と思った2019年の夏でした。

おわりに

干潟の良いところは、船を雇ったり、ダイビング器材を使ったりしなくとも、胴長さえあればいつでも気軽に調査を行えるところです。干潟は長期モニタリングに向いていて、震災影響を追跡するのに適したフィールドであると思います。震災から9年が過ぎましたが、被災地の海岸生態系はいまだに安定していません。東北地方の干潟には、解き明かすべき謎や不思議が、まだまだたくさん待ち受けています。被災地では、復旧工事のように震災に起因する二次的攪乱も進行しており、今後も「長い目で・きめ細かな」モニタリングが必要だと考えています。(かなや げん、地域環境研究センター

海洋環境研究室 主任研究員)

執筆者プロフィール：

震災の日、私は札幌の学会会場で、TVから流れる津波の映像を呆然と眺めていました。その後、仙台湾での干潟研究を再開し、9年間あちこちを歩き回ったり、掘ったり、ふるったり、数えたり(体力の限界を感じたり・・・)しました。しかし、沿岸域の生態系が「元に戻った」「安定した」という感覚はまだありません。これからも東北の海に腰を据えて、変わっていく干潟の状況を記録し、伝えていきたいと考えています。



**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。 <http://www.nies.go.jp/index.html#tab5>

**KeAi communications Co., Ltd Best Paper Award 賞**

受賞者：染矢雅之、鈴木 剛、松神秀徳、滝上英孝（資源循環・廃棄物研究センター）

受賞対象：Occurrence of emerging flame retardants from e-waste recycling activities in the northern part of Vietnam, Emerging Contaminants, 2, 58-65, 2016

受賞者：鈴木 剛、松神秀徳、滝上英孝（資源循環・廃棄物研究センター）

受賞対象：Comprehensive evaluation of dioxins and dioxin-like compounds in surface soils and river sediments from e-waste-processing sites in a village in northern Vietnam: Heading towards the environmentally sound management of e-waste, Emerging Contaminants, 2, 98-108, 2016

**公益財団法人河川財団 河川基金優秀成果賞**

受賞者：吉田誠（生物・生態系環境研究センター）

受賞対象：平成30年度河川基金助成事業「コイ目線の琵琶湖ドキュメンタリー：動物搭載型ビデオを用いた琵琶湖流入河川の河口域における在来魚類の生態観察」

**日本土壌肥料学会奨励賞**

受賞者：仁科一哉（地域環境研究センター）

受賞対象：マルチスケールにおける土壌の炭素・窒素循環の空間変動要因の解明および定量評価に関する研究

**日本鳥学会 黒田賞**

受賞者：吉川徹朗（生物・生態系環境研究センター）

受賞対象：鳥類と植物の生物間相互作用に関する研究

**日本エアロゾル学会エアロゾル計測賞**

受賞者：伏見暁洋（環境計測研究センター）

受賞対象：微小粒子・ナノ粒子の起源・動態解明のための高感度有機分析法の開発と適用

**大気環境学会ベストポスター賞**

受賞者：佐藤圭、梶井克純（地域環境研究センター）

受賞対象：2018年夏季京都市内における有機硝酸の大気観測，第60回 大気環境学会年会，2019

**環境経済・政策学会 学術賞**

受賞者：亀山康子（社会環境システム研究センター）

受賞対象：過去10年間の誌上発表

**環境経済・政策学会 奨励賞（SEEPS Young Achievement Award）**

受賞者：久保雄広（生物・生態系環境研究センター）

受賞対象：Voluntary Contributions to Hiking Trail Maintenance: Evidence From a Field Experiment in a National Park, Japan, Ecological Economics, 144, 124-128, 2018

**環境省自然環境局 奨励賞**

受賞者：小熊宏之（生物・生態系環境研究センター）

受賞対象：活動業績

一般社団法人廃棄物資源循環学会 優秀ポスター賞

受賞者：北村洋樹（資源循環・廃棄物研究センター）

受賞対象：最終処分場における生物学的鉱物化に關与する尿素加水分解細菌の評価,第 30 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 451-452, 2019

※所属は受賞当時のものとなります。

新刊紹介

環境儀 No.77「エアロゾルのエイジングを研究する-大気中のエアロゾル粒子はどのように変質していくのか？」

空气中に浮遊する微粒子はエアロゾルと呼ばれ、地球の気候変動に重大な影響を与えています。また、大気汚染物質として、ヒトの健康に有害な影響を及ぼすことが懸念されています。エアロゾルは空気-エアロゾルの境界で空气中に存在している酸化剤と反応を起こして、変化します。このような変化はエアロゾルの「エイジング」と呼ばれています。本号では、エアロゾルの変質のメカニズムや、それを調べるための実験法について解説します。また、最近の取り組みとして、エアロゾルが変質する際にできる「老廃物」の正体を明らかにした結果を紹介します。

○<http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/77/02-03.html>



人事異動

(令和2年5月1日付)

亀山 康子 配置換 社会環境システム研究センター長  
(社会システム研究センター副センター長)

編集後記

新型コロナウイルス感染症が世界中で猛威を振るっています。感染がどのような経路で拡大しうなのか、現状どの程度の感染者がいるのか、感染による健康影響はどの程度か、感染防止と経済活動のバランスを取りながらどのように管理するのか。こうした事柄への理解を深めつつ、発生している目の前の問題に対応するために、不確実・不確定な状況下で対策が立案・実施されてきたように思います。本号のテ

マである災害時における化学物質の管理も、同じような構造を持つ問題かもしれません。そのような視点で本号を読みなおしてみると、分析技術やシナリオ検討を平時から進め、事後的には中長期的にフォローアップを行うことの重要性を改めて実感できると思います。同時に、社会経済的観点からの検討とどのように統合して意思決定に結び付けるか、大きな課題が残されているようにも感じられました。(R.T.)

国立環境研究所ニュース Vol. 39 No. 2 (令和2年6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。  
<http://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。