

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

課題番号S-17-4
課題名「災害・事故への対応力強化に関する研究」
(JPMEERF18S11713)

平成30年度～令和4年度

Study on strengthening the ability to respond to disasters and accidents

〈研究代表機関〉

地方独立行政法人 大阪府立環境農林水産総合研究所

〈研究分担機関〉

国立研究開発法人 国立環境研究所
国立大学法人 大阪大学
静岡県公立大学法人 静岡県立大学

〈研究協力機関〉

公立大学法人大阪 大阪公立大学
神奈川県環境科学センター

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和5年5月

目次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・	1
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究目標		
4. 研究開発内容		
5. 研究成果		
5-1. 成果の概要		
5-2. 環境政策等への貢献		
5-3. 研究目標の達成状況		
6. 研究成果の発表状況		
6-1. 査読付き論文		
6-2. 知的財産権		
6-3. その他発表件数		
7. 国際共同研究等の状況		
8. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II-1 災害・事故時に活用可能な情報基盤の整備	・・・・・・・・・・	12
（大阪府立環境農林水産総合研究所、静岡県立大学、大阪公立大学、神奈川県環境科学センター）		
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-2 災害・事故発生時に環境中に残留する化学物質への対策実施と継続監視のためのモニタリング手法		
開発	・・・・・・・・・・	28
（国立環境研究所）		
要旨		
1. 研究開発目的		
2. 研究目標		
3. 研究開発内容		
4. 結果及び考察		
5. 研究目標の達成状況		
6. 引用文献		
II-3 残留化学物質の除去対策技術の開発	・・・・・・・・・・	50
（大阪大学）		

要旨

1. 研究開発目的
2. 研究目標
3. 研究開発内容
4. 結果及び考察
5. 研究目標の達成状況
6. 引用文献

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細	65
-----------------	-------	----

Ⅳ. 英文Abstract	74
---------------	-------	----

I. 成果の概要

課題名 災害・事故への対応力強化に関する研究
課題代表者名 中村 智 （地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所環境研究部参事）

研究実施期間 平成30年度～令和4年度

研究経費

259,588千円（合計額）

（平成30年度：48,806千円、令和元年度：53,092千円、令和2年度：52,962千円、令和3年度：52,962千円、令和4年度：51,766千円）

研究体制

（サブテーマ1）災害・事故時に活用可能な情報基盤の整備（地方独立行政法人 大阪府立環境農林水産総合研究所、静岡県公立大学法人 静岡県立大学）（JPMEERF18S11713）

（サブテーマ2）災害・事故発生時に環境中に残留する化学物質への対策実施と継続監視のためのモニタリング手法開発（国立研究開発法人 国立環境研究所）（JPMEERF18S11714）

（サブテーマ3）残留化学物質の除去対策技術の開発（国立大学法人 大阪大学）（JPMEERF18S11715）

研究協力機関

公立大学法人大阪 大阪公立大学、神奈川県環境科学センター

本研究のキーワード 化学物質存在量、機関間情報共有、セミアクティブサンプラー、水相パッシブサンプラー、網羅分析、化学物質除去対策技術、VCW システム

1. はじめに（研究背景等）

我が国では、災害からの回避や事故の防止を目指す安全工学的な研究が広く進められ、工場・事業場等における化学物質による事故発生の抑止と作業従事者の物理化学的な安全確保がなされてきた。しかしながら、環境への化学物質の流出・漏洩から、一般市民の安全を確保する体系的な研究はなされていない。

例えば、環境省の報告では、東日本大震災の際に、蓄電器や変圧器などのPCB廃棄物が津波後には保管場所から消失したことが指摘されている。また、車、船舶、石油備蓄基地からの重油流出に伴う一部の火災の発生が原因と考えられる環境中のPAH濃度の増加や、被災地域の化学物質取扱事業所からの高濃度のフッ化水素や六価クロムの流出やトリクロロエチレンの漏洩が報告されている。このように、東日本大震災では、火災・事故等に伴う有害物の流出、市民の健康へのリスク懸念が生じており、有害化学物質への対応が適切に行われたとは言えない。

これらの要因の一つとして、工場・事業場等で保管されていた化学物質の情報が体系的に把握されておらず、事故時の対応で主力となる自治体の機能が十分果たせなかったことが挙げられる。なお、災害・事故等への緊急対応には、自治体などのリスク管理対応能力の強化が必要であり、現在、我が国では、東日本大震災の経験や南海トラフ巨大地震等の懸念から地域の強靱化計画の策定が進められているところである。しかし、計画の中での化学物質リスクに関する扱いはごく限定的である。

化学物質への対応として、現状では、各自治体でPRTR制度に基づいて届出のあった事業場の化学物質の排出量は把握されているものの、実際に火災・事故等が発生した場合に市民の健康へのリス

クポテンシャルとして考慮すべき取扱量を把握できている自治体は、大阪府、愛知県、神奈川県などのいくつかに限られている。一方で、本研究に先立ってのヒアリング結果から、環境部局以外の消防防災部局からも化学物質取扱量についての情報共有や連携について要望があることがわかった。

以上のことから、南海トラフ巨大地震等の大規模災害に対する国土防災の確立が緊急に求められる中で、化学物質等の流出等への対応の体系的知見が未確立であること、また、施設劣化等に起因する流出事故が今後増大する可能性があることなどを考慮すれば、災害・事故等に伴う化学物質リスクへの対応力強化（災害・事故等への「備え」、災害・事故後の環境の「監視」と汚染物質の「除去」）を早急に確立することが必須である。

2. 研究開発目的

本戦略研究課題S-17は、4つのテーマ（テーマ1「災害・事故に対する化学物質リスク管理基盤の構築」、テーマ2「災害・事故における異常検知と影響予測手法の開発」、テーマ3「速やかかつ網羅的な化学物質把握のための分析手法の開発」及びテーマ4「災害・事故への対応力強化に関する研究」）で構成されている。テーマ4では、テーマ1で集約する情報基盤の一部を整備するとともに、テーマ2やテーマ3の研究を進める上で基礎となるデータの提供を担う必要がある。

本テーマでは、いつ被災地となるかもしれない全国自治体の行政を支援するため、PRTRデータ等の既存情報に基づき、日本全国における化学物質の所在や潜在的排出可能性を事前及び迅速に提供できる情報基盤の整備を行うとともに、自治体における環境部局と消防防災部局等との連携体制の在り方の検討を行うこと、また、災害・事故発生後に自治体が担うことが求められる、長期間にわたる環境中への残留化学物質のモニタリング手法及び除去技術を開発することを研究目的とする。

3. 研究目標

全体目標	全国自治体の行政を支援するために、災害・事故に対処する情報基盤の整備ならびに事後に環境中に残留する化学物質のモニタリング手法・除去技術を開発する。
サブテーマ1	災害・事故時に活用可能な情報基盤の整備
サブテマリーダー/所属機関	中村 智/地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所
目標	化学物質の取扱量をPRTR等の既存データに基づき推計する手法を開発し、全国の市町村レベルで推計を行うとともに、得られた情報をサブテーマ2及び3に提供する。また、サブテーマ2の補完として、水相パッシブサンプラーを用いた化学物質（LAS等数物質）のモニタリング手法を開発する。
サブテーマ2	災害・事故発生時に環境中に残留する化学物質への対策実施と継続監視のためのモニタリング手法開発
サブテマリーダー/所属機関	橋本 俊次/国立研究開発法人国立環境研究所
目標	災害・事故後の残留物質の中長期的な監視や対策範囲の特定を効率的・網羅的・低コストで面的な展開も可能とするサンプリング・調査手法を開発する。 不純物や反応生成物など事故等から直接に想定される以外の物質も捕捉可能な新たな網羅分析法とデータ解析手法を開発する。

サブテーマ3	残留化学物質の除去対策技術の開発
サブテーマリーダー /所属機関	井上 大介 / 国立大学法人大阪大学
目標	<p>残留化学物質を物性等に基づいて分類するとともに、既存の物理的・化学的・生物学的な化学物質除去技術を網羅的に検索して多元的観点から体系的に整理し、残留化学物質の分類ごとに有望技術を選定したデータベースを構築する。</p> <p>また、他のテーマ・サブテーマの成果を踏まえ、上記分類群からそれぞれ優先的に取り組む化学物質（数物質）を選定し、VCWシステムを用いた処理方法を開発する。</p>

4. 研究開発内容

本研究では、既存のPRTR届出データ等を活用して、災害・事故時発生場所での化学物質の存在量を予め把握するための手法の開発、環境と消防防災の担当部局間での情報共有体制に関する検討、及び、災害・事故発生後、長期間にわたり環境中に残留する化学物質のモニタリング手法及び除去技術の開発を行う。そのために3つのサブテーマを設定し、サブテーマ1では災害・事故への「備え」、サブテーマ2では災害・事故発生後の環境の「監視」、サブテーマ3では環境への残留物質の「除去」・「修復」を担う。

各サブテーマの研究内容の概要を以下に示した。

(1) サブテーマ1「災害・事故時に活用可能な情報基盤の整備」：「備え」

情報基盤

①化学物質の存在量の推計

災害・事故への対応において基礎となる化学物質の存在量を PRTR データ等の公表データに基づき推計する手法を開発する。

②存在量データの GIS 化

化学物質の所在や性状等に関する情報基盤データベースを構築し、地理情報システム (GIS) による地図表示機能を整備する。

初期対応

③関係機関の連携構築に関する検討

上記の情報基盤を災害発生直後に地域内外の環境部局だけでなく消防防災部局などの各機関でどのように共有し協力体制を構築するかについて検討する。

初期対応後

④水相パッシブサンプラーを用いたモニタリング手法の確立

災害・事故後に環境水中に残留する化学物質について、水相パッシブサンプラー (APS) を用いたモニタリング手法を確立する。

⑤長期間モニタリング手法の開発 → サブテーマ2で対応 (大気環境モニタリング)

⑥除去対策技術の開発 → サブテーマ3で対応

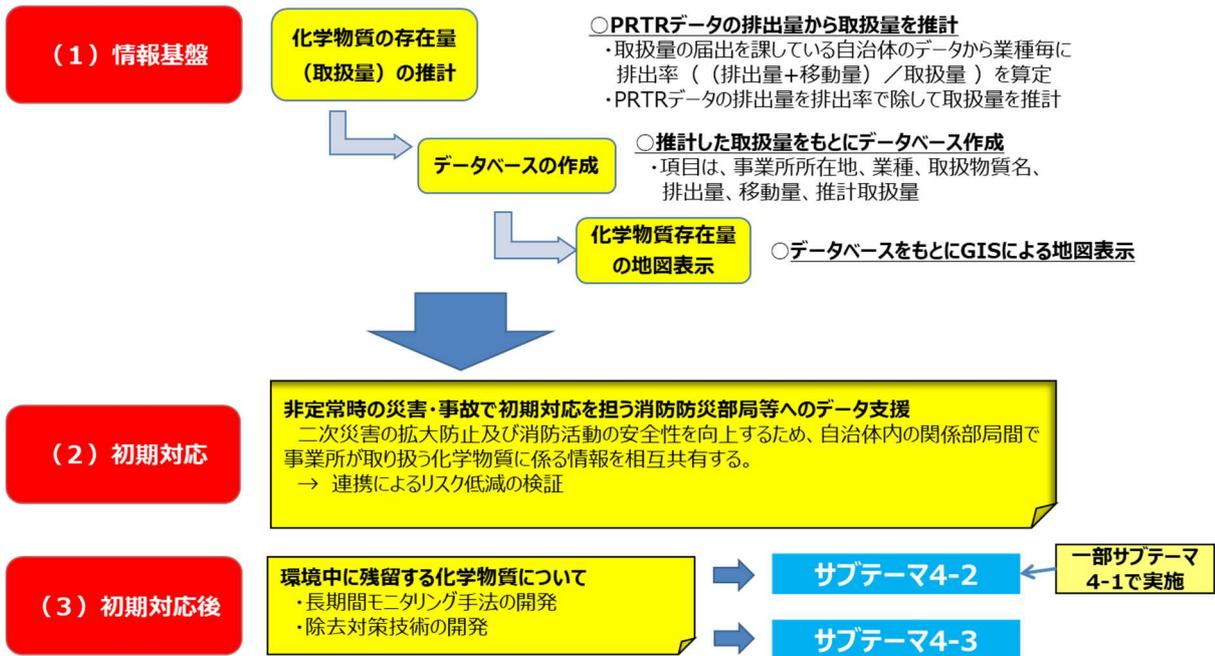


図 0.1 災害・事故時に活用可能な情報基盤の整備の検討フロー図

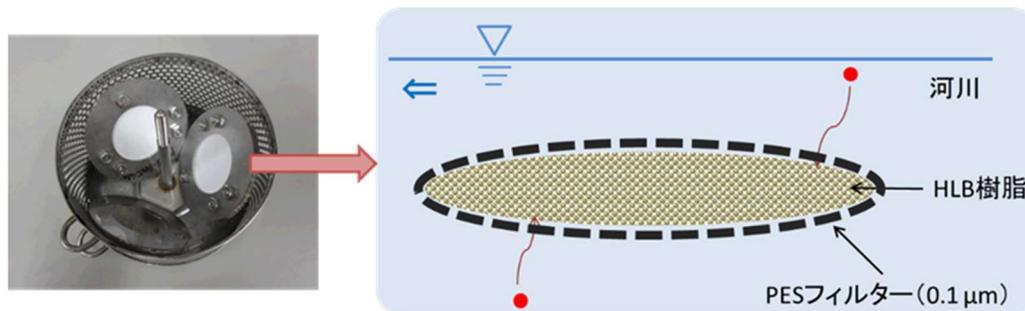


図 0.2 水相パッシブサンプラーの概要図

(2) サブテーマ 2「災害・事故発生時に環境中に残留する化学物質への対策実施と継続監視のためのモニタリング手法開発」：「監視」

①サンプリング・調査手法の開発

図 0.3 の左のイメージ図のような、簡易かつ面展開可能な主に大気試料のサンプリング法の開発を行う。

(a) 小型セミアクティブサンプリング

災害・事故後の残留物質の中長期的な監視や大気経路で曝露を考慮した効率的・網羅的・低コストで面的な展開も可能とする大気試料のサンプリング法を開発する。簡易なファンにより通気する構造の大気中化学物質の捕集機器（セミアクティブサンプラー）によるサンプリングを検討する。開発した手法とハイボリュームエアサンプリング法との比較試験により、特性を検証しつつ汎用性の高い（一般的な）条件と想定災害に最適化した条件を複数準備する。

(b) 網羅分析のための溶出・抽出法の開発

災害・事故後の汚染範囲の確定と汚染化学物質の追跡監視のための土壌、底質試料の採取を行う（通常の方法）。水質の場合は、1 地点当たり 1L 程度の採水を実施する。土壌、底質の網羅分析の必要性が見込まれる場合には、水系への溶出を想定し、残留物質の網羅測定のための簡易溶出抽出試験法を検討する。例えば、水浸-固相分配抽出-加熱脱着試料導入法の有効性と限界、適用範囲の検証を行う。

②網羅分析手法の開発

図 0.3 の右に示したような GC/MS を中心とした網羅分析による事故後の未知物質を含めた包括的な化学物質の増減を監視する手法を開発する。

(a) 多次元ガスクロマトグラフィ/質量分析による網羅分析

多次元ガスクロマトグラフィ/質量分析 (GCxGC/MS) 手法を環境化学分析に応用し、主汚染成分や二次生成物、不純物を含む多種類の化学物質を網羅的、且つ、個々の成分を同定可能な分析手法の開発を行う。

調査コストの最適化や網羅分析手法の普及と現場活用を想定し、地方自治体や分析機関に広く普及している四重極型や磁場型の汎用ガスクロマトグラフィ/質量分析手法による網羅分析を検討し、開発する GCxGC/MS 手法との比較検証により、有効性と適用範囲を評価する。

(b) データ差異解析と未知物質の同定

残留汚染物質の消長を追うために、時間経過に伴う物質の増減を科学的根拠に基づいて判定する必要がある。そのため、統計学的手法を用いて、試料間の差を判定する方法、時系列的な増減傾向を評価する手順をつくる。可能であれば、データ解析ワークフローの自動化を目指す。

膨大な GCxGC/MS データからの効率的な物質同定を可能にするため、網羅分析によって検出された顕著な成分や差異解析によって減少が認められない、あるいは増加傾向にある成分について、集中的に物質の検索と同定を行う。

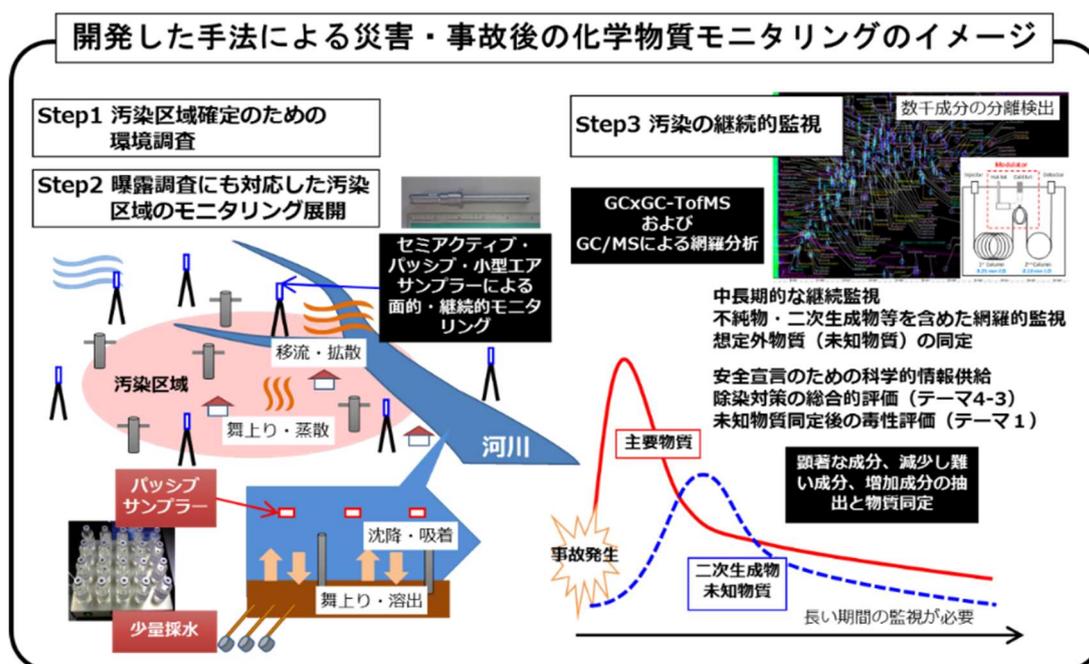


図 0.3 開発した手法による災害・事故後の化学物質モニタリングのイメージ

(3) サブテーマ3「残留化学物質の除去対策技術の開発」：「除去・修復」

①残留化学物質の分類

化管法第一種指定化学物質 462 種を調査対象物質とし、物性（融点、沸点、比重、蒸気圧、 $\log K_{ow}$ 、水溶性、解離定数等）、分解性（好氣的分解性、嫌氣的分解性、非生物的分解性、加水分解性）、環境中における分配（水/大気/土壌/底質）、有害性（急性毒性、慢性毒性、発がん性等）、存在量の各項目について情報収集を行う。また、整理した情報に基づき、462 種の対象物質をグループ分類する。

②既存除去対策技術の体系化

文献等の情報を基にして、これまでに開発されている物理的、化学的、生物学的な化学物質除去技術について調査する。

③多機能型人工湿地（VCW）システムの開発

本研究開発では、多様な物性の残留化学物質に対応し得る除去対策技術として、VCW システムに着目している。VCW システムは、図 0.4 の左側に示しているように、カラム容器に基材（砂利など）を入れて水生植物を植え付けたものが基本構成であり、残留化学物質を含む水をこのカラムの上部から流して、残留化学物質の除去を行う。カラム内では、基材、植物、ならびに基材や植物根の表面に付着する微生物による様々な化学物質除去機能が総合的に作用することにより、多種多様な化学物質を除去することができる。また、VCW システムは、①大がかりなインフラ整備を必要としない、②太陽光のみをエネルギー源として運転できる、③浄化現場に存在する容器、基材、植物を活用することもできる、といった特徴を有し、経済性と環境適合性に非常に優れており、災害・事故等において想定される経済的・エネルギー的・資源的（物的・人的資源）に不利な状況下においても適用可能であり、かつ、一定の除去効果が得られるものと期待される。

そこで、VCW システム確立の基礎として、まず、使用可能な植物種の調査を行う。また、有望な植物を用いて VCW システムのプロトタイプを構築し、モデル汚染物質を用いた試行運転を行う。ここでは特に水循環の有無と、植物種の有無及び相違が除去効果に及ぼす影響を調査する。また、(1)のグループごとに抽出した代表物質を対象として、VCW システムによる除去効果の検証を行う。

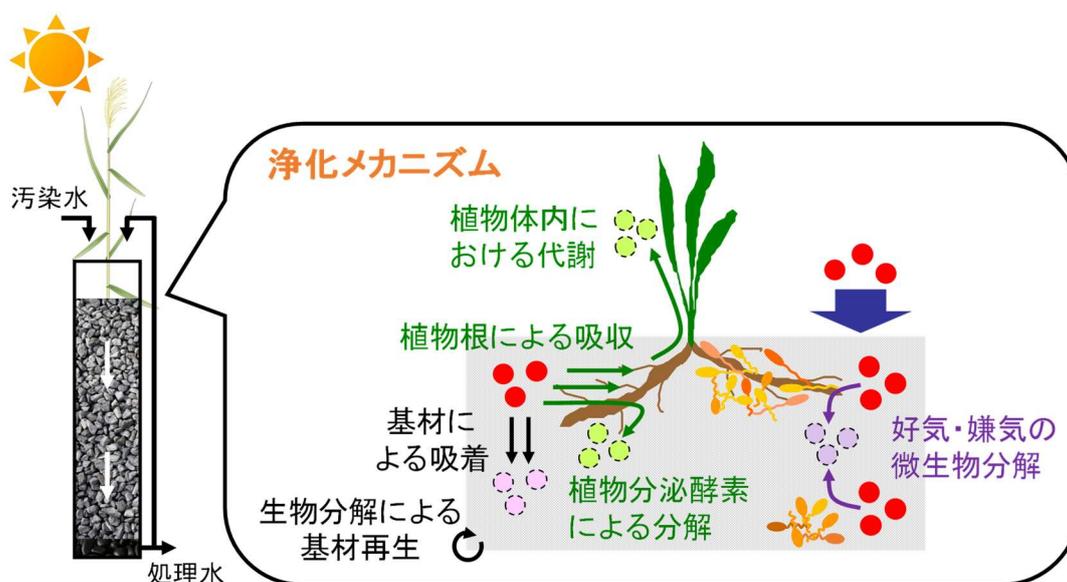


図 0.4 VCW システムの基本構成と浄化メカニズムの概念図

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

本テーマでは、全国自治体の行政を支援するために、災害・事故に対処する情報基盤の整備ならびに事後に環境中に残留する化学物質のモニタリング手法・除去技術の開発を行った。

公表されているPRTR届出データである排出量・移動量から化学物質の取扱量及び在庫量を推計する手法を確立した。検証の結果、化学物質の取扱量及び在庫量の推計が 1 桁オーダー程度の精度で行えることが分った。

災害時あるいは災害後に環境水中に残留する化学物質を中長期的に効率的・低コストでモニタリングする手法として、APSによる試料のサンプリング手法を検討した。サンプラーを構成する樹脂及

び吸着剤の組み合わせを変えることにより、疎水性から親水性を有する幅広い化学物質のサンプリングに適用できることが判明した。

同様に、環境大気中に残留する化学物質を中長期的に効率的・低コストでモニタリングする手法として、セミアクティブサンプラー（SAAS）による試料のサンプリング手法を検討した。柴田科学製のDAS-100型サンプラーを改良したDAS-300Aを開発し、吸着材として市販品（ゲステル社Twister（ポリジメチルシロキサン））を採用し、国内3地点の実大気中のPOPsの試料採取をハイボリウムエアサンプラー（HV）と並行して行った。その結果、1週間程度の捕集期間で、SAASでもHVと同様に地域差が観測でき、周辺大気に含まれる化学物質の調査には有効と考えられた。

災害時の火災や化学反応により生じる想定外の二次生成物や不純物による新たな汚染も捕捉可能な網羅分析法として、サンプリング後のチューブをクリーンアップせずに加熱脱着装置にセットし、そのまま多次元ガスクロマトグラフィ/高分解能飛行時間型質量分析（GCxGC/HRTofMS）装置に導入する手法を検討した。本法を実際の火災現場の大気試料分析に適用したところ、定性及び半定量分析手法としての有用性が確認された。

災害後に環境中に残留する化学物質について、物性に基づき分類した5つのグループ（①無機物、②有機物－低揮発性－親水性、③有機物－低揮発性－親油性、④有機物－揮発性－親水性、⑤有機物－揮発性－親油性）ごとに既存の物理的・化学的・生物学的な浄化技術を体系的に整理し、データベース化を行った。

また、多様な物性の残留化学物質に対応し得る除去対策技術として、VCWシステムに着目し検討を行った。処理に用いる植物種、基材、運転方式（水循環、回分・連続通水）を最適化することにより、上記のグループ①～④の化学物質について適用可能であることが判明した。

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

環境省の令和2年度及び3年度災害事故時化学物質漏洩流出対応検討会において、検討委員として参画し、「化学物質管理指針の改正」や「自治体環境部局における化学物質に係る災害・事故対応マニュアル策定の手引きの作成」にあたり、本研究成果である「災害対応時の地方公共団体における既存のPRTR情報の活用」の成果・知見を活用した。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

本研究で構築する化学物質の所在と排出可能性に係る情報データベースは、災害・事故に備え、広く行政で活用されることが期待できる。また、パッシブサンプラーやセミアクティブサンプラーは、運搬と設置が非常に容易で、低コストであるため、自治体による災害・事故発生後の中長期の環境モニタリングに大いに活用できる。さらに、今回開発するVCWシステムは、災害・事故発生後に残留する化学物質汚染を、その復旧・復興を妨げることなく、かつ、経済的・資源的に限られた制約条件下で確実に浄化・修復できることから、活用が見込まれる。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
全国自治体の行政を支援するために、災害・事故に対処する情報基盤の整備ならびに事後に環境中に残留する化学物質のモニタリング手法・除去技術を開発する。	目標どおりの成果をあげた。 公表されているPRTRデータから化学物質の取扱量及び在庫量を推計する手法を確立でき、全国自治体の行政を支援するための情報基盤が整備できたことから、目標を達成できたと評価できる。

	<p>また、災害後に環境中に残留する化学物質を中長期的に効率的・低コストで網羅的にモニタリングする手法が開発でき、目標を達成できたと評価できる。</p> <p>さらに、災害後に環境中に残留する化学物質の既存浄化技術のデータベース化とVCMシステムによる環境修復技術の開発でき、目標を達成できたと評価できる。</p>
--	---

サブテーマ1 目標	目標の達成状況
<p>化学物質の取扱量をPRTR等の既存データに基づき推計する手法を開発し、全国の市町村レベルで推計を行うとともに、得られた情報をサブテーマ2及び3に提供する。また、サブテーマ2の補完として、水相パッシブサンプラーを用いた化学物質（LAS等数物質）のモニタリング手法を開発する。</p>	<p><u>目標どおりの成果をあげた。</u></p> <p>サブテーマ1では、公表されているPRTRデータから、個々の事業所だけではなく、PRTR届出外の事業所も含めた、全国の市町村レベルでの化学物質の取扱量及び在庫量を推計する手法を確立した。なお、得られた情報については、サブテーマ2及び3のみならず、他のテーマにも提供した。</p> <p>また、災害時あるいは災害後に環境水中に残留する化学物質を中長期的に効率的・低コストでモニタリングする手法として、水相パッシブサンプラーによる試料のサンプリング手法を検討ところ、サンプラーを構成する樹脂及び吸着剤の組み合わせを変えることにより、疎水性から親水性を有する幅広い化学物質のサンプリングに適用できることが判明した。</p>
サブテーマ2 目標	目標の達成状況
<p>災害・事故後の残留物質の中長期的な監視や対策範囲の特定を効率的・網羅的・低コストで面的な展開も可能とするサンプリング・調査手法を開発する。</p> <p>不純物や反応生成物など事故等から直接に想定される以外の物質も捕捉可能な新たな網羅分析法とデータ解析手法を開発する。</p>	<p><u>目標どおりの成果をあげた。</u></p> <p>サブテーマ2では、環境大気中に残留する化学物質を中長期的に効率的・低コストでモニタリングする手法として、セミアクティブサンプラー（SAAS）による試料のサンプリング手法を実大気について検討したところ、ハイボリウムエアサンプラーによるサンプリングと同様の結果（地域差）が得られることが判明した。</p> <p>また、災害時の火災や化学反応により生じる想定外の二次生成物や不純物による新たな汚染も捕捉可能な網羅分析法として、多次元ガスクロマトグラフィ/高分解能飛行時間型質量分析法を検討したところ、実際の火災現場の大気試料分析において、定性及び半定量分析手法としての有用性が確認された。</p>

サブテーマ3目標	目標の達成状況
<p>残留化学物質を物性等に基づいて分類するとともに、既存の物理的・化学的・生物学的な化学物質除去技術を網羅的に検索して多元的観点から体系的に整理し、残留化学物質の分類ごとに有望技術を選定したデータベースを構築する。</p> <p>また、他のテーマ・サブテーマの成果を踏まえ、上記分類群からそれぞれ優先的に取り組む化学物質（数物質）を選定し、VCWシステムを用いた処理方法を開発する。</p>	<p><u>目標どおりの成果をあげた。</u></p> <p>サブテーマ3では、災害後に環境中に残留する化学物質（PRTR第1種指定化学物質）について、物性、分解性等に基づき5つのグループに分類した。さらに同グループごとに既存の物理的・化学的・生物学的な浄化技術を体系的に整理し、データベース化を行った。</p> <p>また、災害時において想定される経済的・エネルギー的・資源的（物的・人的資源）に不利な状況下においても多様な物性の残留化学物質に対応し得る除去対策技術として、VCWシステムに着目し検討を行った。同システムは、処理に用いる植物種、基材、運転方式（水循環、回分・連続通水）を最適化することにより、上記のグループのほとんどの化学物質について適用可能であることが判明した。</p>

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

<件数>

25件

<主な査読付き論文>

- 1) Kazushi Noro, Yabuki Yoshinori, Banno Arisa, Yusuke Tawa, Satoshi Nakamura: Journal of Water and Environment Technology, **17**(6), 432-447 (2019) (h-index:2)
Validation of the application of a polar organic chemical integrative sampler (POCIS) in non-steady-state conditions in aquatic environment. doi:10.2965/jwet.19-057
- 2) 田和佑脩、矢吹芳教、野呂和嗣、田澤慧、水谷聡、杉浦隆介、中村智：リスク学研究、**30**(3)、177-185 (2021)
PRTRデータを活用した化学物質取扱量の推計 doi:10.11447/jjra.SRA-0340
- 3) 中村智、田和佑脩、野呂和嗣、矢吹芳教：環境化学、**31**、98-105 (2021)
災害・事故に備えた化学物質の在庫量の推計 doi:10.5985/jec.31.98
- 4) 水谷聡、杉浦隆介、山崎耕平、田和佑脩、中村智、矢吹芳敬、野呂和嗣：環境技術、**50**(6)、325-332 (2021)
PRTRを活用した少人数事業所からの化学物質排出量分布の推定 doi:10.5956/jriet.50.6_325
- 5) Ryo Omagari, Takashi Nakayama, Takashi Miyawaki, Mayuko Yagishita, Shunji Hashimoto, Kiwao Kadokami, Daisuke Nakajima: Chemosphere, **285**, 131041 (2021)
Evaluation of identification accuracy using AIQS for GC-MS for measuring heavily contaminated samples. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131401
- 6) 家田曜世、高澤嘉一、橋本俊次：分析化学、**70**(6)、397-402 (2021)
セミアクティブエアサンプリング/熱脱着分析を用いた環境残留性有機汚染物質の網羅的モニタリング手法の開発 doi:10.2116/bunsekikagaku.70.397
- 7) Shunji Hashimoto, Yoshikatsu Takazawa, Teruyo Ieda, Ryo Omagari, Daisuke Nakajima,

- Satoshi Nakamura, Noriyuki Suzuki : Chemosphere, **303**(1), 135021 (2022)
 Application of rapid air sampling and non-targeted analysis using thermal desorption comprehensive two-dimensional gas chromatography/time-of-flight mass spectrometry to accidental fire. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.135021
- 8) Rajani Ghaju Shrestha, Miki Nakai, Daisuke Inoue, Michihiko Ike: Journal of Water and Environment Technology, **19**(1), 13-23 (2021)
 Potential for enhanced degradation and removal of various bisphenols by interaction between common reed (*Phragmites australis*) and microorganisms. doi:10.2965/jwet.20-117
- 9) Rajani Ghaju Shrestha, Daisuke Inoue, Michihiko Ike : Water Science and Technology, **84**, 1428-1437 (2021)
 Effects of Selection and Compiling Strategy of Substrates in Column-Type Vertical-Flow Constructed Wetlands on the Treatment of Synthetic Landfill Leachate Containing Bisphenol A. doi:10.2166/wst.2021.349
- 10) Rajani Ghaju Shrestha, Daisuke Inoue, Michihiko Ike : Japanese Journal of Water Treatment Biology, **58**(4), 137-148 (2022)
 Effectiveness of column-type two-stage constructed wetlands for simultaneous removal of organic compounds and heavy metals focusing on the impact of feeding modes and hydraulic retention time. doi:10.2521/jswtb.58.137

6-2. 知的財産権

該当なし。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	2件
その他誌上発表（査読なし）	5件
口頭発表（学会等）	60件
「国民との科学・技術対話」の実施	14件
マスコミ等への公表・報道等	0件
本研究費の研究成果による受賞	4件
その他の成果発表	3件

7. 国際共同研究等の状況

国際共同計画名

Passive sampler channel experiments by Kazushi Noro - Understanding responses of POCIS to peak concentrations of neonicotinoids, BPA and LAS

協力案件名

ネオニコチノイド系農薬、BPA、LASの濃度ピークに対するPOCISの応答についての水路試験

カウンターパート氏名・所属・国名

Dr. Etienne Vermeirssen, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag), Switzerland

参加・連携状況

Eawagと連携し、野呂任期付研究員がEawagにて実験を実施

国際的な位置づけ

スイス国内だけではなく多くの国の研究者が活用する国際的な共同実験施設である。また、パートナーのDr. Etienne Vermeirssenは水環境モニタリングの専門家として広く知られている。

8. 研究者略歴

研究代表者：

中村 智

大阪府立大学工学部卒業、大阪府環境農林水産部環境管理室課長補佐、技術士（環境部門）、現在、地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所参事

サブテーマ1

サブテーマリーダー：

1) 中村 智（上述）

サブテーマ2

サブテーマリーダー：

2) 橋本 俊次

愛媛大学大学院農学研究科修了、博士（学術）、
現在、国立研究開発法人国立環境研究所室長

サブテーマ3

サブテーマリーダー：

3) 井上 大介

大阪大学大学院工学研究科修了、博士（工学）、
現在、国立大学法人大阪大学大学院工学研究科准教授

II. 成果の詳細

II-1 災害・事故時に活用可能な情報基盤の整備

(研究代表者)

地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所 環境研究部 参事 中村 智

(研究分担者)

地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所 環境研究部 主任研究員 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 環境研究部 副主査 田和 佑脩 (平成30～令和2年度)

静岡県公立大学法人静岡県立大学 食品栄養科学部 環境生命科学科 助教 野呂 和嗣 (令和4年度)

(研究協力者)

地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所 環境研究部 任期付研究員 野呂 和嗣 (平成30～令和3年度)

公立大学法人大阪 大阪公立大学 大学院工学研究科 准教授 水谷 聡

神奈川県環境科学センター 技師 田澤 慧

[要旨]

本サブテーマでは、公表されているPRTR届出データ等を活用して、災害・事故時発生場所での化学物質の存在量を予め把握するための手法の開発、環境と消防防災の担当部局間での情報共有体制に関する検討、及び、災害・事故発生後、長期間にわたり環境中に残留する水環境中の化学物質のモニタリング手法の開発を行った。

公表されているPRTR届出データである排出量・移動量と、13の自治体が独自に届出を課している取扱量との比率を「排出率」と定義し、物質別、業種別及び従業員数区分別に排出率を算定した。検証の結果、この排出率を用いれば、化学物質の取扱量の推計が±1桁オーダー程度の精度で行えることが分かった。さらに、環境省が実施したPRTRパイロット事業で得られた在庫量と取扱量との比率を「在庫率」と定義し、推計取扱量から在庫率を用いて、在庫量を推計する手法を確立した。この結果、公表されているPRTR届出データである排出量・移動量から、「排出率」及び「在庫率」を用いることにより、存在量に近い概念値である化学物質の在庫量を推計することが可能となった。

大規模災害時における自治体内の環境と消防防災の担当部局間での連携状況について、各自治体の地域防災計画等から考察した。化学物質に係る災害時での環境部局の役割として、「環境モニタリングを行う」との記載は多くの自治体計画で見られるが、「化学物質に関する情報共有」について言及されている自治体計画はほとんどない。例えば、事業所からの取扱量の届出情報（一部の自治体で公表しないことを前提で情報を収集）を災害時等に提供・共有するためには、条例等での規定が必要というハードルがあると考えられた。なお、本研究で得られた手法で算出した推計取扱量・推計在庫量を環境部局で算出し提供する方法は有用になると考えられる。

災害時あるいは災害後に環境水中に残留する化学物質を中長期的に効率的・低コストでモニタリングする手法として、APSによる試料のサンプリング手法を検討した。サンプラーを構成する樹脂及び吸着剤の組み合わせを変えることにより、疎水性から親水性を有する幅広い化学物質のサンプリングに適用できることが判明した。また、サンプラーでの捕捉化学物質量を濃度に変換するための校正試験手法について、簡易法を構築した。簡易法では（3日間）、従来法（約1ヶ月間）と比べ短期間で校正試験を終えることができることが判明した。

1. 研究開発目的

本テーマでは、いつ被災地となるかもしれない全国自治体の行政を支援するため、PRTRデータ等の既存情報に基づき、日本全国における化学物質の所在や潜在的排出可能性を事前及び迅速に提供できる情報基盤の整備を行うとともに、自治体における環境部局と消防防災部局等との連携体制の在り方の検討を行うこと、また、災害・事故発生後に自治体が担うことが求められる、長期間にわたる環境中への残留化学物質のモニタリング手法及び除去技術を開発することを研究目的とする。

2. 研究目標

化学物質の取扱量を PRTR 等の既存データに基づき推計する手法を開発し、全国の市町村レベルで推計を行うとともに、得られた情報をサブテーマ2及び3に提供する。また、サブテーマ2の補完として、水相パッシブサンプラーを用いた化学物質（LAS等数物質）のモニタリング手法を開発する。

3. 研究開発内容

情報基盤の整備

(1) 化学物質の存在量の推計

災害・事故への対応において基礎となる化学物質の存在量を PRTR 等の公表データに基づき推計する手法を開発する。

- ①PRTR での量の届出においては、排出量及び移動量の届出が求められているが、一部の自治体（東京都、神奈川県、埼玉県、愛知県、大阪府、徳島県等）では条例等で取扱量（使用量・製造量）の届出を上乘せで課している。本研究では、事業所の個別データを公表しないという前提で、それらの自治体から取扱量データの提供を受けることとする。
- ②PRTR での公表データである排出量と移動量との和（以下「PRTR データ」と記す。）と取扱量との比率を「排出率」と定義し、上記自治体のデータから排出率を算出する。
- ③公表されている PRTR データを上記の排出率で除すことにより、取扱量を推計する。
- ④取扱量よりも存在量により近い概念の量である在庫量を推計するために、環境省より平成 13 年度 PRTR パイロット事業でのデータ（取扱量と在庫量のデータが揃っている）を入手し、在庫量と取扱量との比率から「在庫率」を算出する。
- ⑤ ③で得られた推計取扱量に在庫率を乗じることにより、在庫量を推計する。
- ⑧PRTR 届出のすそ切り以下事業所について、全国市区町村別に取扱量及び在庫量を推計する手法を確立する。

(2) 存在量データの GIS 化

化学物質の所在や性状等に関する情報基盤データベースを構築し、地理情報システム (GIS) による地図表示機能を整備する。

- ①事業所単位で所在地、緯度経度、業種、従業員数、物質、排出量、移動量、推計取扱量及び推計在庫量を入力したデータベースを作成する。また、業種、従業員数、物質、排出量、移動量から取扱量および在庫量を推計できるシステムもあわせて構築する。
- ②全国の推計取扱量および在庫量データを GIS で表示できるようにする。成果は、秘密保持の観点から一般に周知するのではなく、各自治体の環境部局に配布することを想定する。

初期対応

(3) 関係機関の連携構築に関する検討

上記の情報基盤を災害発生直後に地域内外の環境部局だけでなく消防防災部局などの各機関でどのように共有し協力体制を構築するかについて検討する。

- ①全国自治体の地域防災計画や地域強靱化計画における、各自治体内での環境部局の役割について考察を行う。
- ②大阪府の協力を得て、南海トラフ巨大地震発生時の災害対応活動中に、石油コンビナート災害、危険物等災害など、経験したことがない災害が発生することを想定し、本部と地元とで連携した活動を図上訓練する。本訓練は、防災部局と環境部局とが協力して実施する。
- ③各自治体が主催する消防防災関係の会合や化学物質対策セミナー等で大阪府での取り組み事例を PR する。

初期対応後

(4) APS を用いたモニタリング手法の確立

災害・事故後に環境水中に残留する化学物質について、水相パッシブサンプラー (APS) を用いたモニタリング手法を確立する。

- ①APS を適用する化学物質を選定し、APS に充填する吸着資材（受容相）と対象化学物質の吸着特性を評価する。また、受容相を包む膜の素材の違いによる吸着特性を評価し、化学物質に応じた APS を選定・調製する。
- ②定量的評価を可能とするため、APS のサンプリングレート (Rs) を実験により求める。事故・災害時を想定して濃度を変動させた実験系で APS によるモニタリング実験を行い、濃度変動に対する吸着特性を評価する。

4. 結果及び考察

4. 1. 化学物質の存在量の推計

4. 1. 1. 排出量・移動量と取扱量との関係

PRTRでの公表データである排出量・移動量と、取扱量との関係を調査した。排出量・移動量は「PRTR けんさくくん」¹⁾より2016年度のデータを入手した。また、取扱量は、神奈川県（横浜市、川崎市及び相模原市（以上、政令指定都市）を除く）、愛知県（名古屋市（政令指定都市）、豊橋市、岡崎市及び豊

田市（以上、中核市）を除く）及び大阪府より提供を受けたデータを利用した。

トルエンについて、横軸を排出量と移動量との合計、縦軸を取扱量とし、データをプロットした（図1.1）。データの分布は、縦軸方向に集まったものと1対1の関係を示すものとに分かれた。これはトルエンを取り扱う業種によって使用の用途等が異なるためと考えられる。このことから、各化学物質の排出率は、一律の値ではなく、業種を配慮して算出する必要があることが分った。

次に、金属製品製造業について、横軸を排出量と移動量との合計、縦軸を取扱量とし、データをプロットした（図1.2）。データの分布は、前項と同様に、縦軸方向に集まったものと1対1の関係を示すものとに分かれた。これは、金属製品製造業で取り扱われる化学物質が、製品として出荷されるものと、表面処理等で使用し、環境中に排出されやすいものとに分かれるためと考えられる。このことから、各業種の排出率は一律の値ではなく、取り扱われる化学物質を配慮して算出する必要があることが分った。

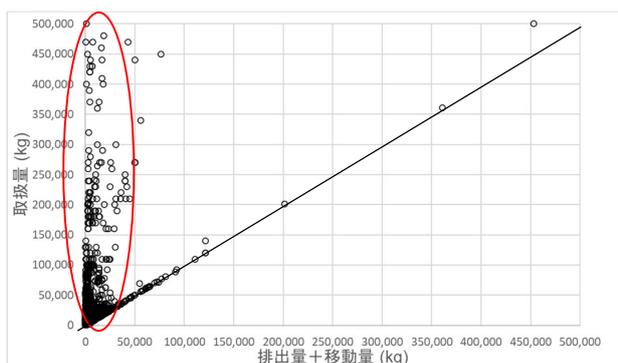


図1.1 トルエンの排出量・移動量合計及び取扱量の分布図

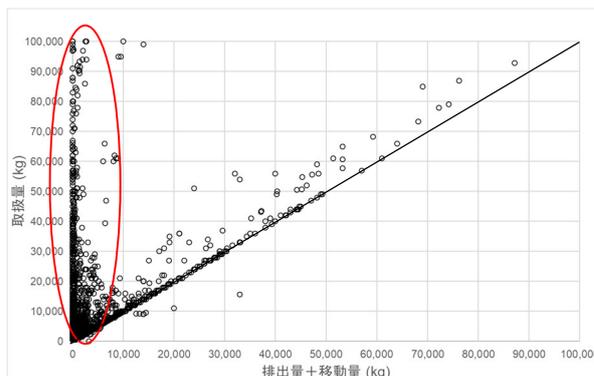


図1.2 金属製品製造業の排出量・移動量合計及び取扱量の分布図

また、出版・印刷・同関連産業等の5業種について、従業員数規模別に4つ（①20人以下、②21人以上49人以下、③50人以上299人以下、④300人以上）に区分し、取扱量に対する排出量・移動量合計との比率を算出した結果を表1.1に示した。比率は、同じ業種であっても従業員数規模により異なり、特に300人以上の場合に低い値を示す傾向がみられた。

以上の結果から、排出量・移動量と取扱量との関係を数式化するためには、化学物質、業種及び従業員数規模の3つのパラメータを考慮する必要があることが分った。

表1.1 従業員数規模区分別での取扱量に対する排出量・移動量合計との比率

従業員数(X)	出版・印刷・同関連産業	化学工業	プラスチック製品製造業	金属製品製造業	電気機械器具製造業
$X < 21$	3.8×10^{-1}	1.0×10^{-2}	3.3×10^{-2}	4.0×10^{-2}	6.2×10^{-1}
$21 \leq X < 50$	7.8×10^{-1}	1.5×10^{-2}	2.3×10^{-2}	1.6×10^{-1}	6.9×10^{-1}
$50 \leq X < 300$	2.6×10^{-1}	2.4×10^{-3}	8.0×10^{-2}	1.2×10^{-1}	4.3×10^{-2}
$X \geq 300$	6.5×10^{-2}	8.0×10^{-4}	3.2×10^{-2}	5.5×10^{-2}	4.7×10^{-3}

さらに、大阪府の2011～2016年度の届出データを用いて、化学物質別（ジクロロメタン等4物質）及び業種別（出版・印刷・同関連産業等5業種）の取扱量に対する排出量・移動量合計との比率の経年変化を調べ、それぞれの結果を図1.3及び図1.4に示した。概ね比率の大幅な変化はないが、一部の化学物質や業種では、排出規制等に伴うと推察される比率の低下がみられた。このことから、これらの算定を行う場合は、できる限り最新のデータで行うことが適切であることが分った。

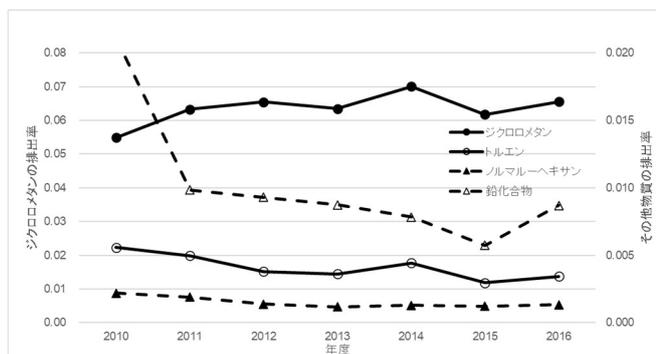


図1.3 4物質における取扱量に対する排出量・移動量合計との比率の経年変化

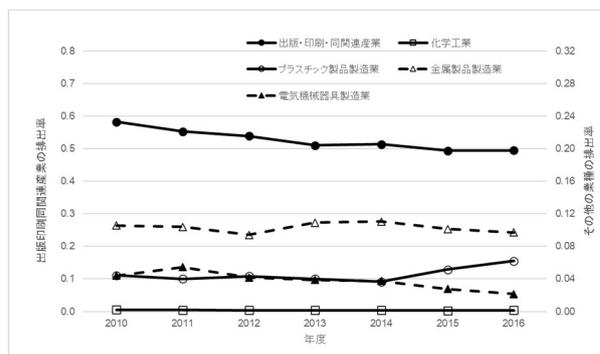


図1.4 5業種における取扱量に対する排出量・移動量合計との比率の経年変化

4. 1. 2. 排出率の算定

取扱量に対する排出量・移動量合計との比率を「排出率」と定義し、以下の式で算出した。

$$E_{a,b,c} = RT_{a,b,c} / H_{a,b,c} \dots \text{式(1)}$$

ここで、 E は排出率、 RT は排出量と移動量との合計 (kg)、 H は取扱量(kg)、 a 、 b 及び c はそれぞれ、化学物質、業種及び従業員数規模区分 (①20人以下、②21人以上49人以下、③50人以上299人以下、④300人以上) を表す。

なお、データは2018及び2019年度の届出データを用いた。PRTR届出データ (排出量・移動量等) は「PRTRけんさくくん」より入手した。また、取扱量は、札幌市、福島県、埼玉県、さいたま市、神奈川県、相模原市、愛知県、名古屋市、豊橋市、岡崎市、豊田市、大阪府及び徳島県の計13自治体より提供を受けたデータを利用した。

2018及び2019年度の13自治体の全事業所の排出量・移動量・取扱量データを、上述の4つの従業員数規模別に区分後、さらに化学物質別 (284物質) かつ業種別 (50業種) に分類した上で集計した。上記により集計した排出量・移動量の合計と取扱量との比から、排出率 $E_{a,b,c}$ を算出した。なお、13自治体でデータのない業種は E_a (化学物質別のみで算出した排出率)、該当する従業員数規模区分のデータがない場合は $E_{a,b}$ (化学物質別かつ業種別で算出した排出率) を排出率として用いることとした。また、 $E_{a,b,c}$ が0 である場合は、代わりに $E_{a,b}$ を用いた。算出結果として、トルエン、ジクロロメタン、ノルマルヘキサン及び鉛化合物の排出率の一部を表1.2に示した。

表1.2 トルエン、ジクロロメタン、ノルマルヘキサン及び鉛化合物の排出率

業種	従業員数 規模区分*	トルエン	ジクロロメタン	ノルマルヘキサン	鉛化合物
化学工業	1	$E_{a,b,c}$ 4.4×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 1.2×10^{-3}	$E_{a,b,c}$ 1.1×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 1.3×10^{-2}
	2	$E_{a,b,c}$ 3.9×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 4.4×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 1.9×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 5.5×10^{-3}
	3	$E_{a,b,c}$ 3.7×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 9.2×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 3.9×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 1.2×10^{-2}
	4	$E_{a,b,c}$ 6.4×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 6.0×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 5.0×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 7.6×10^{-3}
石油製品・石炭製品 製造業	1	$E_{a,b}$ 1.7×10^{-4}	$E_{a,b}$ 5.4×10^{-3}	$E_{a,b}$ 7.2×10^{-4}	$E_{a,b}$ 3.5×10^{-3}
	2	$E_{a,b,c}$ 7.3×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 4.3×10^{-3}	$E_{a,b}$ 7.2×10^{-4}	$E_{a,b,c}$ 3.5×10^{-3}
	3	$E_{a,b,c}$ 6.5×10^{-4}	$E_{a,b,c}$ 6.1×10^{-3}	$E_{a,b,c}$ 2.9×10^{-3}	$E_{a,b}$ 3.5×10^{-3}
	4	$E_{a,b,c}$ 2.0×10^{-5}	$E_{a,b}$ 5.4×10^{-3}	$E_{a,b,c}$ 1.4×10^{-4}	$E_{a,b}$ 3.5×10^{-3}
プラスチック製品 製造業	1	$E_{a,b,c}$ 9.7×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 1.0×10^0	$E_{a,b}$ 1.2×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 5.9×10^{-2}
	2	$E_{a,b,c}$ 4.4×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 9.8×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 7.7×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 1.9×10^{-3}
	3	$E_{a,b,c}$ 5.1×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 1.0×10^0	$E_{a,b,c}$ 1.8×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 1.2×10^{-3}
	4	$E_{a,b,c}$ 2.2×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 1.0×10^0	$E_{a,b,c}$ 1.8×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 2.3×10^{-3}
金属製品製造業	1	$E_{a,b,c}$ 6.6×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 7.8×10^{-1}	$E_{a,b}$ 2.6×10^{-1}	$E_{a,b}$ 2.8×10^{-2}
	2	$E_{a,b,c}$ 6.2×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 8.2×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 1.0×10^0	$E_{a,b,c}$ 2.8×10^{-2}
	3	$E_{a,b,c}$ 4.9×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 8.8×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 1.2×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 2.7×10^{-2}
	4	$E_{a,b,c}$ 7.9×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 1.0×10^0	$E_{a,b,c}$ 4.3×10^{-1}	$E_{a,b}$ 2.8×10^{-2}
輸送用機械器具 製造業	1	$E_{a,b}$ 7.0×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 1.0×10^0	$E_{a,b}$ 2.4×10^{-2}	$E_{a,b}$ 7.1×10^{-2}
	2	$E_{a,b,c}$ 1.9×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 9.8×10^{-1}	$E_{a,b}$ 2.4×10^{-2}	$E_{a,b,c}$ 5.1×10^{-1}
	3	$E_{a,b,c}$ 6.8×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 7.9×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 1.0×10^0	$E_{a,b,c}$ 1.6×10^{-3}
	4	$E_{a,b,c}$ 1.9×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 6.7×10^{-1}	$E_{a,b,c}$ 9.2×10^{-3}	$E_{a,b,c}$ 6.8×10^{-2}

*1; 従業員数が20人以下, 2; 21人以上49人以下, 3; 50人以上299人以下, 4; 300人以上

4. 1. 3. 取扱量の推計

取扱量の推計は以下の式(2)により行った。

$$H_{est} = R T_{PRTR(a,b,c)} / E_{a,b,c} \dots \text{式(2)}$$

ここで、 H_{est} は取扱量の推計値 (kg)、 $R T_{PRTR}$ はPRTRの届出データのうち排出量と移動量との合計 (kg)、 E は排出率を表す。

なお、前節で算出した排出率の妥当性を検証するために、2019年度のPRTR届出データと排出率を用いて、物質別の取扱量を推計し、化審法の優先評価化学物質の製造・輸入数量²⁾との比較を行った。製造・輸入量の多い20物質について、製造・輸入量に対する推計取扱量の比を表1.3に示した。比は0.16～39と幅があり、1.0以上の物質が多くみられた。取扱量には他の事業所で製造されたものを使用した場合、二重に計上されるため、比が1.0を超えてもおかしくはない。大きく桁が異なるということでもないため、推計取扱量はほぼ妥当であると考えた。

表1.3 業種別の推計取扱量／化審法の優先評価化学物質の製造・輸入数量比

物質名	①製造・輸入数量 (トン)	②推計取扱量 (トン)	②／①比
キシレン	6,849,107	25,348,746	3.7
ベンゼン	3,275,258	6,543,424	2.0
スチレン	1,909,335	3,944,786	2.1
エチルベンゼン	1,103,485	2,577,251	2.3
1,3-ブタジエン	1,046,881	40,502,399	39
トルエン	1,031,124	18,430,327	18
フェノール	510,919	3,472,504	6.8
テレフタル酸	420,003	250,048	0.60
アクリロニトリル	397,564	1,374,172	3.5
1,2-ジクロロエタン	321,830	51,578	0.16
クメン	302,484	307,299	1.0
アクリル酸	301,033	3,863,082	13
エチレンオキシド	270,512	908,231	3.4
酢酸ビニル	211,344	1,174,417	5.6
イブシロン-カプロラクタム	198,814	578,224	2.9
イソブレン	137,945	3,316,279	24
ナフタレン	115,292	62,260	0.54
エビクロロヒドリン	115,220	594,871	5.2
ホルムアルデヒド	105,162	181,989	1.7
フタル酸ビス(2-エチルヘキシル)	103,620	2,705,801	26

4. 1. 4. 在庫率の算定

前節において、取扱量の推計が可能となったことを示したが、これは年間の取扱量であり、災害・事故が発生した瞬間の量には該当しない。

PRTR制度において年間の取扱量の算定方法は、「4月1日の在庫量」＋「外部調達量」＋「製造量」－「3月31日の在庫量」とされている。「4月1日の在庫量」または「3月31日の在庫量」は、その事業所内で1日間存在する化学物質の量に近い量であると想定し、排出量・移動量もしくは取扱量から在庫量を推計できないかとの考えに至った。排出量、移動量、取扱量及び在庫量が全て把握されているデータセットとしては、環境省が平成13年度に実施したPRTRパイロット事業によるもの、あるいは、福島県が独自要綱に基づき収集されているものがあるが、今回は、環境省より平成13年度PRTRパイロット事業のデータを提供いただき、解析を行うこととした。データ数は3,069件で、物質数は233種類、業種数は36業種であった。

データ数が100件以上あるキシレン、ジクロロメタン、トルエン及び鉛及びその化合物について、取扱量と在庫量との分布図を示した(図1.5(a)～(d))。それぞれの物質で取扱量と存在量との相関係数は0.855、0.778、0.852及び0.844で、いずれも有意な相関関係($p < 0.01$)がみられた。

同様に、業種別にデータ数が200件以上ある化学工業、金属製品製造業及び電気機械器具製造業、また、従業員数規模別に「20人以下」、「21人以上49人以下」、「50人以上299人以下」及び「300人以上」についても相関係数を算出した。結果を、前述の全データ及び物質別とあわせて表1.4に示した。物質別、業種別あるいは従業員数規模別のいずれの分類であっても、取扱量と在庫量との間に良好な相関関係のあることが分かった。このことから、以降の検討は、物質別のみで行うこととした。

なお、排出量・移動量と在庫量の間についても調べた。排出量・移動量と在庫量との間に良好な関係が認められれば、公表されているPRTRデータから直接的に在庫量を推計できる可能性がある。しかしながら、一例として示したキシレン及びトルエンの在庫量と排出量・移動量の和との分布図(図1.6(a)及び(b))からは、図1.5(a)及び(c)にみられるほどの良好な関係性は確認されなかった。

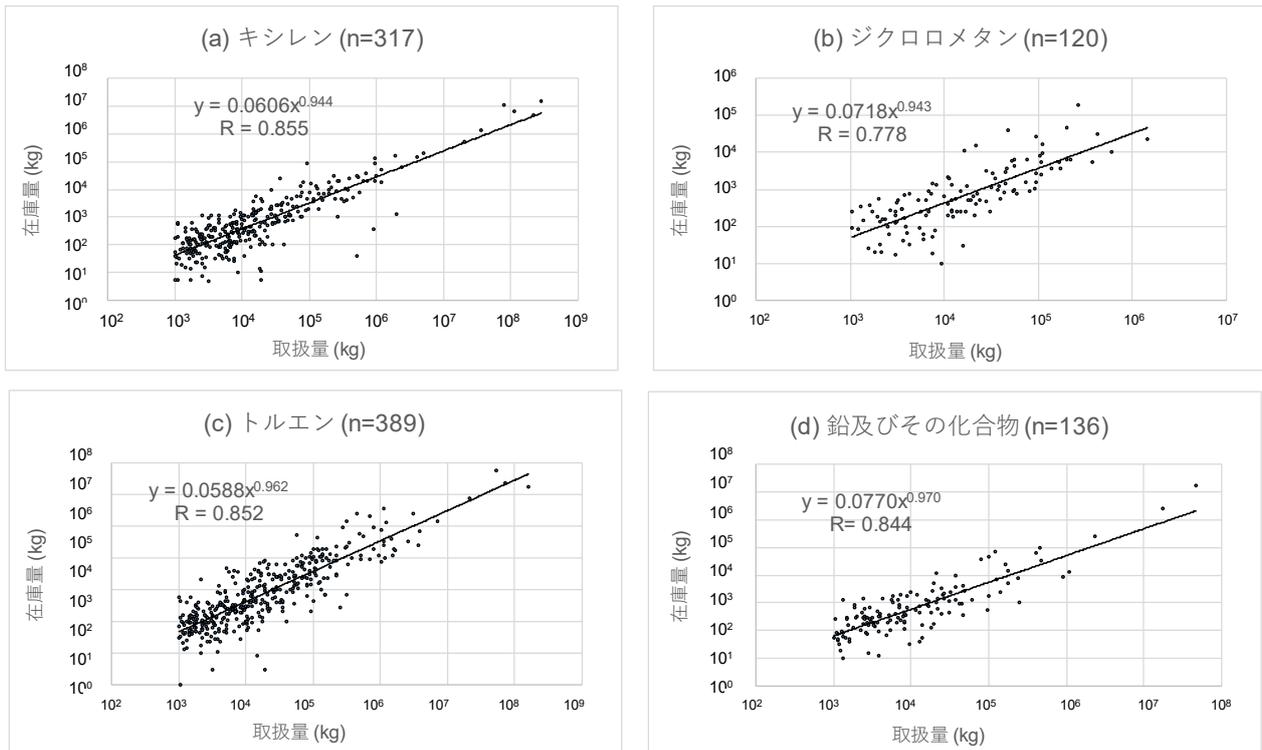


図1.5 4物質における取扱量と在庫量との関係
(a)キシレン、(b)ジクロロメタン、(c)トルエン、(d)鉛およびその化合物

表1.4 3分類における取扱量と在庫量との相関係数

分類	データ数	相関係数(r)	統計的有意性
[全データ]	3,069	0.865	**#
[物質]			
キシレン	317	0.855	**
ジクロロメタン	120	0.778	**
トルエン	389	0.852	**
鉛及びその化合物	136	0.844	**
[業種]			
化学工業	1,238	0.868	**
金属製品製造業	246	0.714	**
電子機械器具製造業	303	0.806	**
[従業員数 (n)]			
n ≤ 20	28	0.672	**
21 ≤ n ≤ 49	601	0.827	**
50 ≤ n ≤ 299	1,639	0.881	**
n ≥ 300	801	0.863	**

#) 「**」は1%で有意であることを示す。

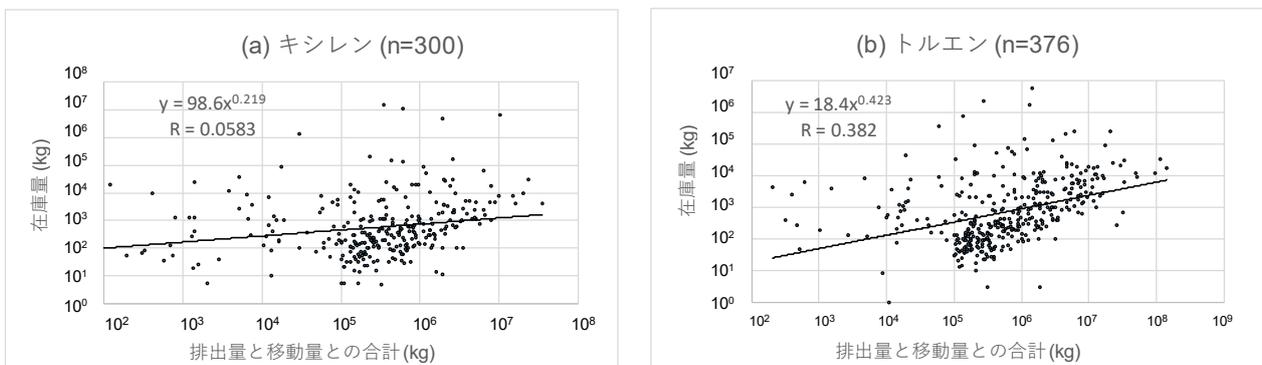


図1.6 2物質における排出量・移動量の和と在庫量との関係
(a)キシレン、(b)トルエン

事業所での化学物質の在庫量を取扱量から算出するために、在庫量と取扱量との比を「在庫率」と定義し、以下の式で算出した。

$$S_R = S / H \dots \text{式(3)}$$

ここで、 S_R は在庫率、 S はある時点での在庫量 (kg)、 H は年間の取扱量 (kg) を表す。なお、在庫量は4月1日 (年度開始日) と3月31日 (年度終了日) の在庫量の平均値を用いた。

表1.5 化学物質の在庫率

物質コード	物質	データ数	在庫率	物質コード	物質	データ数	在庫率
[全物質]		2,302	4.6%				
[金属及び無機化合物]		637	5.4%	[有機化合物]		1,665	4.4%
1	亜鉛の水溶性化合物	63	5.0%	4	アクリル酸及びその水溶性塩	22	4.0%
31	アンチモン及びその化合物	45	4.0%	13	アセトニトリル	15	5.0%
87	クロム及び三価クロム化合物	46	6.5%	20	2-アミノエタノール	38	3.8%
88	六価クロム化合物	41	4.8%	30	直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩	20	4.4%
132	コバルト及びその化合物	21	9.4%	37	ビスフェノールA	8	3.3%
272	銅水溶性塩	25	3.5%	53	エチルベンゼン	74	3.1%
305	鉛化合物	136	6.2%	80	キシレン	317	3.9%
308	ニッケル	44	7.6%	104	HCFE-22	23	5.3%
309	ニッケル化合物	53	5.4%	125	クロロベンゼン	10	8.4%
332	砒素及びその無機化合物	6	5.0%	127	クロロホルム	10	7.4%
374	フッ化水素及びその水溶性塩	37	4.2%	134	酢酸ビニル	20	4.0%
405	ホウ素化合物	63	6.1%	186	ジクロロメタン	120	3.8%
412	マンガン及びその化合物	57	5.4%	232	N,N-ジメチルホルムアミド	42	5.4%
				240	スチレン	57	3.9%
				258	ヘキサメチレンテトラミン	12	5.5%
				262	テトラクロロエチレン	24	8.3%
				281	トリクロロエチレン	53	4.4%
				297	1,3,5-トリメチルベンゼン	25	4.6%
				298	トリレンジイソシアネート	20	3.1%
				300	トルエン	389	3.9%
				318	二硫化炭素	9	4.7%
				349	フェノール	37	3.8%
				354	フタル酸ジ-n-ブチル	46	7.0%
				355	フタル酸ビス(2-エチルヘキシル)	64	4.6%
				400	ベンゼン	33	3.6%
				407	ポリ(オキシエチレン)アルキルエーテル	45	4.2%
				410	ポリ(オキシエチレン)ノニルフェニルエーテル	58	5.4%
				411	ホルムアルデヒド	49	3.8%
				420	メタクリル酸メチル	25	4.9%

データ数が20件以上、もしくは、2019年度の全国のPRTR データの上位30物質を含む42物質について、それらの在庫率を表1.5に示した。在庫率は3.1~9.4%と幅があるが、箱ひげ図 (図1.7) に示したように多くが3.9~5.4%の間に分布した (中央値は4.6%)。また、金属・無機化合物13物質と有機化合物29物質とに分けて分布をみたところ、それぞれ、中央値が5.4%及び4.4%の異なる分布を示すとともに、平均値でみれば金属・無機化合物の方が有意に大きい ($p < 0.05$) ことが分かった。このことから、検討対象の物質数は少ないものの、金属・無機化合物の在庫期間の方が若干長いことが示唆された。

3.9~5.4%の在庫率は、365日換算すれば年間で約2週間~20日分に相当する。藤木ら³⁾は、ベンゼン、フェノール、シアンを対象にそれぞれ2~3ヶ所の代表的な工場・事業場に対して在庫量の聞き取り調査を行ったところ、在庫量は物質や工場・事業場によって2~73日と大きくばらつくものの、2週間がデータ全体のほぼ中央値に相当すると報告しており、本検討結果はそれと大きな差はなかった。

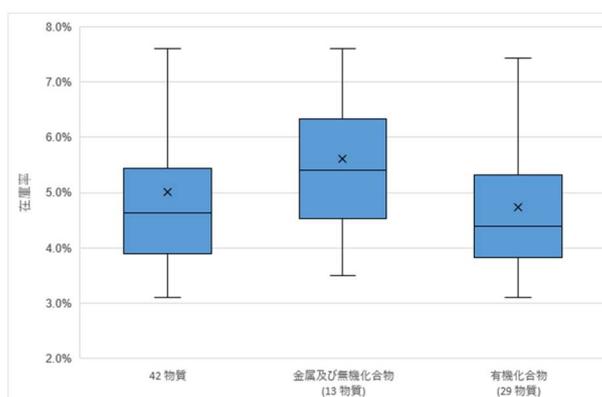


図1.7 42物質の在庫率の箱ひげ図

算出した在庫率の妥当性を検証するために以下の検討を行った。2017年度の福島県内の事業所の化学物質の届出取扱量に表1.7に示した物質各々の在庫率（在庫率1）を乗じて、推計在庫量を算出した。この推計在庫量と届出在庫量との比率（推計在庫量/届出在庫量）の平均値を物質ごとに算出し、その結果を「在庫率1より算出した比率（以下、「比率1」と記す。）」として表1.6に示した。

また、金属・無機化合物及び有機化合物の在庫率を、それぞれ一律5.4%及び4.4%（在庫率2）として算出した結果を「在庫率2より算出した比率（以下、「比率2」と記す。）」として、あわせて示した。なお、物質は、データ数が5件以上ある60物質（うち、比率1の対象は34物質）を選定した。

比率1では0.34~2.6の幅があったが、34物質の平均値及び中央値はいずれも1.0であり、うち24物質が0.7~1.3と1.0から±30%の範囲にあった（図1.8（a））。また、過小評価となっても0.3程度、過大評価となっても3倍程度であり、ほぼ同等のオーダーでの推計が可能であった。このことから、今回の検討で得られた在庫率を用いることにより、ほぼ妥当な在庫量が算出されると考えられた。

表1.6 推計在庫量と届出在庫量との比

物質コード	物質	データ数	比率1 ¹	比率2 ²	物質コード	物質	データ数	比率1 ¹	比率2 ²
1	亜鉛の水溶性化合物	18	1.3	1.4	258	ヘキサメチレンテトラミン	8	1.9	1.5
4	アクリル酸及びその水溶性塩	5	1.0	1.2	265	テトラヒドロメチル無水フタル酸	5	—	0.42
13	アセトニトリル	22	0.87	0.76	272	銅水溶性塩	6	0.97	1.5
16	2,2'-アゾビスイソプロピロニトリル	5	—	0.69	277	トリエチルアミン	15	—	0.63
18	アニリン	5	—	0.96	281	トリクロロエチレン	13	1.1	1.1
20	2-アミノエタノール	10	0.69	0.80	296	1,2,4-トリメチルベンゼン	34	—	1.2
30	直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩	11	1.0	1.0	297	1,3,5-トリメチルベンゼン	21	1.2	1.3
31	アンチモン及びその化合物	17	1.0	1.4	300	トルエン	132	0.91	1.0
37	ビスフェノールA	6	2.2	3.0	302	ナフタレン	12	—	0.64
53	エチルベンゼン	71	0.87	1.2	305	鉛化合物	30	0.81	0.71
56	エチレンオキシド	5	—	1.4	308	ニッケル	25	1.3	0.90
57	エチレングリコールモノエチルエーテル	8	—	0.55	309	ニッケル化合物	36	1.2	1.2
59	エチレンジアミン	5	—	0.50	333	ヒドラジン	12	—	0.52
71	塩化第二鉄	30	—	1.3	349	フェノール	19	0.86	0.99
75	カドミウム及びその化合物	5	—	1.1	355	フタル酸ビス(2-エチルヘキシル)	13	0.81	0.78
80	キシレン	109	0.97	1.1	374	フッ化水素及びその水溶性塩	25	0.86	1.1
82	銀及びその水溶性化合物	12	—	1.4	384	1-プロモプロパン	25	—	1.3
86	クレゾール	5	—	0.58	395	ペルオキシ二硫酸の水溶性塩	7	—	0.96
87	クロム及び三価クロム化合物	29	1.2	0.98	400	ベンゼン	7	0.62	0.75
88	六価クロム化合物	11	0.83	0.94	405	ホウ素化合物	43	0.97	0.86
127	クロロホルム	9	1.4	0.81	407	ポリ(オキシエチレン)アルキルエーテル	15	0.54	0.57
132	コバルト及びその化合物	22	2.6	1.5	410	ポリ(オキシエチレン)ニルフェニルエーテル	10	0.34	0.28
133	エチレングリコールモノエチルエーテルアセテート	5	—	1.0	411	ホルムアルデヒド	18	0.73	0.85
144	無機シアン化合物	11	—	1.2	412	マンガン及びその化合物	33	1.3	1.3
186	ジクロロメタン	29	0.53	0.62	413	無水フタル酸	6	—	1.0
188	N,N-ジシクロヘキシルアミン	5	—	2.3	415	メタクリル酸	8	—	1.3
207	2,6-ジターシャリーブチル-4-クレゾール	11	—	1.1	420	メタクリル酸メチル	11	1.2	1.1
232	N,N-ジメチルホルムアミド	19	0.46	0.38	438	メチルナフタレン	38	—	1.4
234	臭素	6	—	0.52	448	メチレンビス(4,1-フェニレン) = ジイソシアネート	9	—	1.3
240	スチレン	20	0.80	0.91	453	モリブデン及びその化合物	21	—	1.1

*1 表1.7の各々の化合物の在庫率（在庫率1）で算出した推計在庫量と届出在庫量との比

*2 無機化合物の在庫率を5.4%及び有機化合物の在庫率を4.4%（在庫率2）として算出した推計在庫量と届出在庫量との比

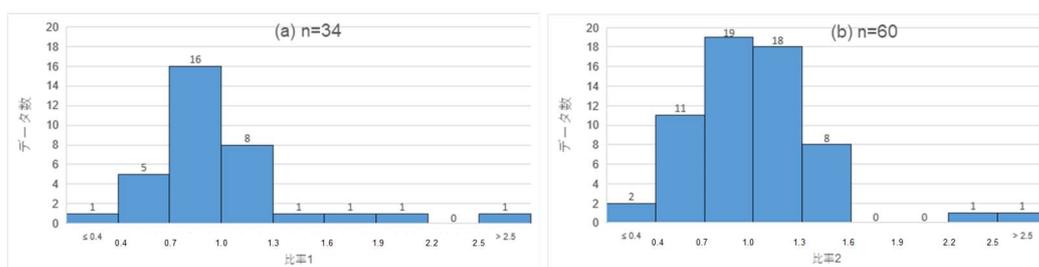


図1.8 推計在庫量と届出在庫量との比率の頻度分布

(a) 在庫率1から算出した比率1の頻度分布 (b) 在庫率2から算出した比率2の頻度分布

4. 1. 5. 在庫量の推計

在庫量の推計は以下の式(4)により行った。

$$S_{\text{est}} = S_{\text{R}} \times H_{\text{est}} \quad \cdots \text{式(4)}$$

ここで、 S_{est} は推計在庫率 (kg)、 H_{est} は推計取扱量 (kg) を表す。

4. 1. 6. PRTR届出のすそ切り以下事業所の市区町村別在庫量の推計

すそ切り以下事業者とは、PRTR 制度で規定する業種のうち、「常用雇用者数が21人未満」もしくは

「第一種指定化学物質の年間取扱量が1トン未満（特定第一種指定化学物質については0.5トン未満）の事業所のみを有する」事業者である。すなわち、たとえ化学物質を多く取り扱っていても、従業員数が21人未満の場合には届出が免除されることになる。しかし、1事業所あたりの化学物質の取扱量が規定の量より少ない場合であっても、同様の事業所が稠密に集積する地域では、トータルとしての環境リスクは高いと考えられる。よって、すそ切り以下事業所における化学物質の在庫量についても無視することはできない。そこで、本研究では、すそ切り以下事業所での化学物質の在庫量の推計を試みた。

市区町村別のすそ切り以下排出量は、製造業を対象とし、以下の式(5)により算出した。

$$R_k = \sum_i \sum_j R_{ij} \times \frac{M_{ij}}{M_{nj}} \times \frac{M_{ijk}}{\sum_k M_{ijk}} \quad \dots \text{式(5)}$$

ここで、 R_k は市区町村kにおけるすそ切り以下排出量 (kg)、 R_{ij} は化学物質iの業種jにおけるすそ切り以下排出量 (kg)、 M_{ij} は都道府県の業種jの事業所数、 M_{nj} は全都道府県の業種jの事業所数、 M_{ijk} は都道府県lの市区町村kにおける業種jの事業所数、 $\sum_k M_{ijk}$ は都道府県lにおける業種jの事業所数を表す。

なお、国の推計⁴⁾における都道府県単位への按分では、すそ切り以下事業所数を把握することは困難であることから、経済センサス活動調査結果⁵⁾に示された都道府県別の全事業所数に比例するものと仮定されている。本研究でも市区町村単位のすそ切り以下事業所数を把握することは困難であるため、同様の仮定を行うこととした。

すそ切り以下の事業所の年間取扱量は、以下の式(6)により推計した。

$$H_k = R_k / E_{a,b} \quad \dots \text{式(6)}$$

ここで、 H_k は市区町村kにおける年間取扱量の推計値 (kg) を示す。

また、すそ切り以下の事業所の在庫量は、以下の式(7)により推計した。

$$S_k = H_k \times S_R \quad \dots \text{式(7)}$$

ここで、 S_k は市区町村kにおけるある時点での1日の在庫量 (kg) を示す。

4. 1. 7. 在庫量の推計方法のまとめ

PRTR届出事業所における在庫量と届出外事業所（すそ切り以下）における市区町村別の在庫量とを推計するためのフローを図1.9に示した。

また、このフローに基づき、都道府県別の推計在庫量を算出し、分布図を図1.10に示した。

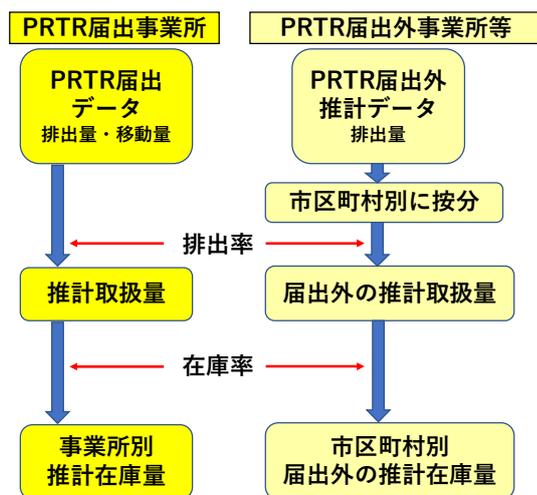


図1.9 国の公表データから化学物質在庫量を推計するためのフロー

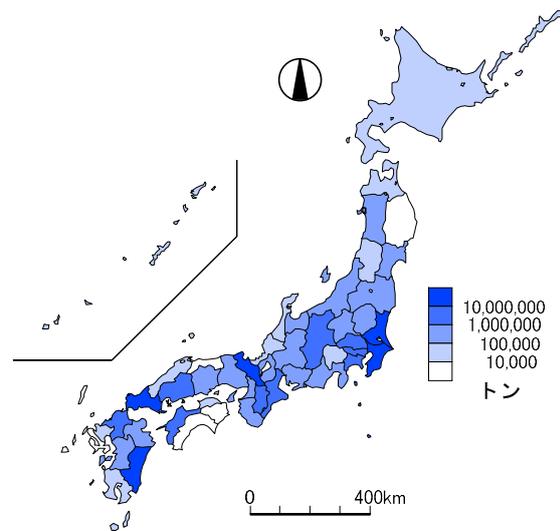


図1.10 都道府県別推計在庫量の分布図

さらに、東海・近畿地方の南海トラフ巨大地震の津波到達想定エリア内の市町村における、化学物質在庫量の推計結果を図1.11に示した。三重県から和歌山県にかけての太平洋側では在庫量が少ないものの、コンビナート立地エリアや都市部周辺を中心に在庫量の多い地域がみられた。

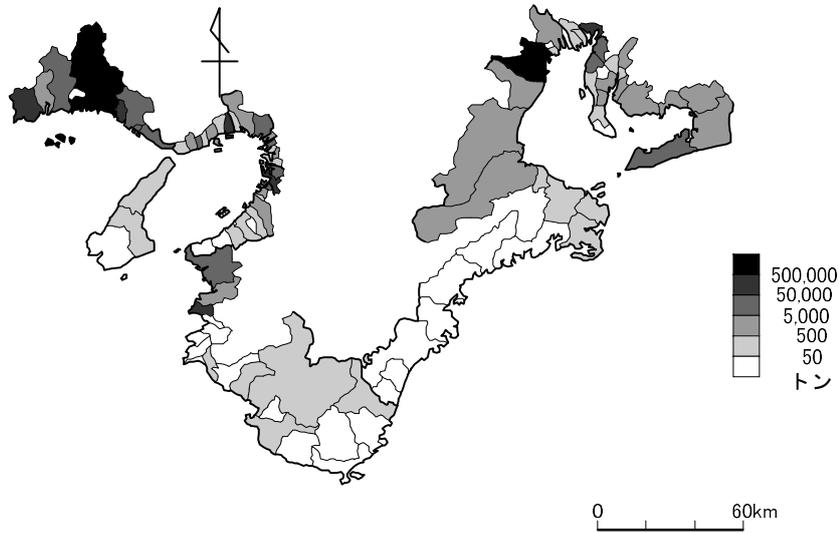


図1.11 東海・近畿地方の南海トラフ巨大地震の津波到達想定エリア内の市町村における化学物質の推計在庫量の分布

同エリア内の化学物質の推計在庫量の総量は528万トンであり、関係5府県全域の推計在庫量の総量(611万トン)の86.5%を占めた。このことから、関係5府県の化学物質取扱事業所の多くが津波到達想定エリア内に立地すると考えられた。

なお、津波への事前の対策がなされておらず、在庫分の528万トンの化学物質が全て漏洩すると仮定した場合、関係5府県における年間の化学物質排出量(2.53万トン)の約200倍、すなわち、200年分の排出量が一瞬で漏洩することになる。化学物質漏洩によるリスクを低減するためには、行政等による防潮堤の整備等のほか、各事業者が事業所内を津波等の災害に対して強靱化することが必須である。

4. 2. 存在量データのGIS化

4. 2. 1. データベースの作成

4.1.での算出結果をもとに、全国のPRTR届出事業所の各物質単位で、所在地、緯度経度、業種、従業員数、物質、排出量、移動量、推計取扱量及び推計在庫量を入力したデータベースを作成した(図1.12)。また、業種、従業員数、物質、排出量、移動量から取扱量および在庫量を推計できるシステムも作成した(図1.13)。

排出年度	都道府県コード	市区町村コード	コード	都道府県	市区町村	町域名	緯度	経度	事業者名	事業所名	従業員数	従業員数区分	業種名	業種コード	物質名	物質コード	排出量(大気)	排出量(公共用水域)	排出量(土壌)	排出量(埋立処分)	移動量(下水道)	移動量(廃棄物)	推計取扱量(kg)	推計在庫量(kg)
2019	1	101	1101	北海道	札幌市中央	***	43.03710	141.32195	***	***	216	3	医療業	8800	メチルナフタ	438	8.6	0	0	0	0	0	1,683	74
2019	1	101	1101	北海道	札幌市中央	***	43.04030	141.30341	***	***	936	4	医療業	8800	メチルナフタ	438	24	0	0	0	0	0	5,725	252
2019	1	101	1101	北海道	札幌市中央	***	43.06493	141.31216	***	***	10	1	燃料小売業	5930	エチルベンゼ	53	1.5	0	0	0	0	0	14,790	460
2019	1	101	1101	北海道	札幌市中央	***	43.06493	141.31216	***	***	10	1	燃料小売業	5930	キシレン	80	6.2	0	0	0	0	0	78,192	3,039
2019	1	101	1101	北海道	札幌市中央	***	43.06493	141.31216	***	***	10	1	燃料小売業	5930	1, 2, 4-トリメチルベンゼン	296	0	0	0	0	0	0	51,600	2,270
~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
2019	47	361	47361	沖縄県	島尻郡久米	***	26.33162	126.77216	***	***	13	1	電気業	3500	メチルナフタ	438	27	0	0	0	0	0	5,397	237
2019	47	375	47375	沖縄県	宮古郡多良	***	24.65699	124.71400	***	***	7	1	電気業	3500	メチルナフタ	438	92	0	0	0	0	0	18,389	809
2019	47	381	47381	沖縄県	八重山郡竹	***	24.05859	123.78243	***	***	7	1	電気業	3500	メチルナフタ	438	60	0	0	0	0	0	11,993	528
2019	47	382	47382	沖縄県	八重山郡竹	***	24.45592	122.98768	***	***	160	3	燃料小売業	5930	トルエン	300	1.8	0	0	0	0	0	3,718	146
2019	47	382	47382	沖縄県	八重山郡竹	***	24.45592	122.98768	***	***	6	1	電気業	3500	メチルナフタ	438	210	0	0	0	0	0	41,976	1,847

図1.12 推計取扱量・推計在庫量データベース

取扱量・在庫量の推計用シート
PRTRの公表データから取扱量及び在庫量を推計するためのシートです。

【操作手順】
入力セルは黄色の網掛けの箇所のみです。それ以外のセルには触れないでください。
1. 「物質名」をプルダウンで選択してください。
2. 「業種名」をプルダウンで選択してください。
3. 「従業員数」を入力してください。
4. 「排出量（大気～埋立）」、「移動量（下水道～廃棄物）」を入力してください。
5. 「推計取扱量」及び「推計在庫量」が表示されます。
セルが足りない場合は、行単位で下にコピーしてください。
※なお、物質によっては推計できないものもあります。

物質コード	物質名	業種コード	業種名	従業員区分	従業員数	排出量 (大気) kg	排出量 (公共用水域) kg	排出量 (土壌) kg	排出量 (埋立) kg	移動量 (下水道) kg	移動量 (廃棄物) kg	排出量 合計 kg	移動量 合計 kg	排出量・移動量 合計 kg	推計取扱量 kg	推計在庫量 kg
80	880_キシレン	2000	2000_化学工業（以下の3つの数）	3	100	300	0	0	0	0	500	300	500	800	4.7E+04	1.8E+03
0	000_入力してください	0	0000_入力してください									0	0	0	#N/A	#N/A
0	000_入力してください	0	0000_入力してください									0	0	0	#N/A	#N/A
0	000_入力してください	0	0000_入力してください									0	0	0	#N/A	#N/A
0	000_入力してください	0	0000_入力してください									0	0	0	#N/A	#N/A
0	000_入力してください	0	0000_入力してください									0	0	0	#N/A	#N/A
0	000_入力してください	0	0000_入力してください									0	0	0	#N/A	#N/A
0	000_入力してください	0	0000_入力してください									0	0	0	#N/A	#N/A
0	000_入力してください	0	0000_入力してください									0	0	0	#N/A	#N/A
0	000_入力してください	0	0000_入力してください									0	0	0	#N/A	#N/A
0	000_入力してください	0	0000_入力してください									0	0	0	#N/A	#N/A

図1.13 取扱量・在庫量の推計用シート

4. 2. 2. 存在量データのGIS表示

図1.12のデータベースを用いることにより、全国の推計取扱量および在庫量データをGISで表示できる。（なお、事業所が特定されることを避けるために、本報告書では図の掲載は行わない。）

また、テーマ1の情報基盤（D.ChemCore）及びテーマ2の迅速対応統合プラットフォームにおいても、化学物質の推計取扱量および在庫量が本検討でのデータベースを活用してGIS表示がなされている。

4. 3. 関係機関の連携構築に関する検討

4. 3. 1. 全国自治体の地域防災計画や地域強靱化計画における各自治体内での環境部局の役割

各都道府県の地域防災計画における化学物質災害への対応の記載状況を調査した（表1.7）。ほとんどの自治体計画において、消防法、火薬類取締法、高圧ガス保安法や毒物及び劇物取締法に基づく危険物、火薬類、高圧ガス、毒劇物への対応についての記載がなされているが、大気汚染防止法・水質汚濁防止法・PRTR法に規定される有害物質や指定化学物質への対応について記載されている自治体計画は少ない。また、化学物質に係る災害時での環境部局の役割として、「環境モニタリングを行う」との記載は多くの自治体計画でみられるが、「化学物質に関する情報共有」について言及されている自治体計画はほとんどない。なお、各部局間での通報連絡体制や業務体制がフローで示されているのは、新潟県と大阪府のみである。

また、環境省は令和元年に防災業務計画⁶⁾を改正し（現行版は令和3年版）、地域防災計画の作成の基準となるべき事項の整備を自治体に求めることとしているが、現時点で対応できている自治体は少ない。

次に、各都道府県・政令指定都市の地域強靱化計画における化学物質災害への対応の記載状況を調査した。当該計画には「有害物質の大規模拡散・流出」の項があるが、主な都府県の計画での記載内容を抜粋して表1.8に示した。同計画には、危険物、毒劇物、有害物質について、それぞれの担当部局が行う対策が記載されており、各部局間での連携については、大阪府（二次災害の拡大防止及び消防活動の安全性を向上するため、府から市町村消防局等に対して、対象事業者の管理化学物質の取扱いに係る情報を提供し、相互情報共有する）で記載があるのみであった。

以上のことから、大規模災害等に起因する化学物質の飛散・漏洩事故が発生した場合の対応として、関係部局間の連携は多少あるものの、基本的には、各部局所管の関係法令のもとで各部局が対応を行うというシステム（平時での事故対応）から抜け出せていないように考えられた。また、環境部局が有する化学物質に関する情報（特に、一部の自治体で、公表しないことを前提で収集した取扱量の情報）を他部局に提供するためには、大阪府のように、災害時に事業所の情報を提供できるように条例で定める必要があると考えられる。なお、本研究で得られた手法で算出した推計取扱量・推計在庫量を環境部局で算出し提供する方法は有用になると考えられる。

表1.7 各都道府県の地域防災計画における化学物質災害への対応の記載状況

都道府県	地域災害計画での記載ページ	危険物	火薬類	高圧ガス	毒劇物	大防法・水濁法 有害物質	化学物質
北海道	本編：第9章 事故災害対策計画 第5節 危険物等災害対策計画(p211)	○	○	○	○		
青森県	地産・津波災害対策編：第4章 災害応急対策計画 第24節 廃棄物等処理及び環境汚染防止(p193) 地産・津波災害対策編：第4章 災害応急対策計画 第22節 危険物施設等災害応急対策(p216)	○	○	○	○	○(p194)	
岩手県	本編：第3章 災害応急対策計画 第22節 廃棄物処理・障害物除去計画(p1-3-163) 本編：第3章 災害応急対策計画 第29節 危険物施設等災害対策計画(p1-3-204)	○	○	○	○		
宮城県	地震編：第3章 災害応急対策計画 第26節 危険物施設等の安全確保(p305)	○	○	○	○	○(p308)	
秋田県	本編：第2章 災害応急対策計画 第20節 危険物施設等災害対策計画(p284)	○	○	○	○		
山形県	震災対策編：第3編 災害応急対策計画 第12章 各種施設災害応急対策関係 第10節 危険物等施設災害応急対策(p303)	○	○	○	○	○(p306)	
福島県	一般災害対策編：第3章 災害応急対策計画 第24節 危険物施設等災害対策(p281)	○	○	○	○		
茨城県	地震災害対策計画編：第3章 災害応急対策計画 第4節 被害軽減対策 第6 危険物等災害防止対策(p241)	○	○	○	○	○(p244)	
栃木県	火災・事故災害対策編：第3節 放射性物質・危険物等事故対策 第3章 応急対策(p59)	○	○	○	○		
群馬県	事故災害対策編：第4部 危険物等災害対策 第2章 災害応急対策(p321)	○	○	○	○	○(p329)	
埼玉県	本編：第6編 事故災害対策編 第2節 危険物等災害対策計画(p6編-21)	○	○	○	○		
千葉県	本編：第5編 大規模火災等編 第3節 危険物等災害対策 第3節 応急対策計画(大-3-5)	○	○	○	○		
東京都	震災編：第2節 地産への具体的計画 第3章 安全な都市づくりの实现 第5節 具体的な取組【応急対策】 3 危険物等の応急措置による危険防止(p153)	○	○	○	○	○(p162)	
神奈川県	風水害等災害対策計画：第11編 危険物等災害対策編 第2章 災害時の応急活動計画(p289)	○	○	○	○		
新潟県	個別災害対策編：第10章 危険物等事故災害対策 第2節 危険物等事故災害応急対策(p166)	○	○	○	○	○(p171)	
富山県	事故災害編：第5章 危険物等災害対策 第2節 危険物等災害応急対策(p374)	○	○	○	○		
石川県	地震災害対策編：第3章 地震災害応急対策計画 第18節 危険物の応急対策(p225)	○	○	○	○		
福井県	車禍災害対策編：第5節 危険物等災害対策 第4章 災害応急対策計画(p68)	○	○	○	○		
山梨県	本編：第3章 災害応急対策 第1節 生活関連事業等の応急対策(危険物施設) 危険物施設保安対策(p189)	○	○	○	○		
長野県	風水害対策編：第3章 災害応急対策計画 第21節 危険物施設等災害活動(p305)	○	○	○	○	○(p311)大防法のみ	
岐阜県	一般災害計画：第3章 災害応急対策 第42節 危険物等災害対策(p259)	○	○	○	○		
静岡県	大規模事故対策編：第3章 災害応急対策計画 第3節 危険物等の搬出・取組に対する応急措置(p13)	○	○	○	○		
愛知県	風水害等災害対策計画：第9編 災害応急対策 第11章 環境汚染防止及び地域安全対策(p187)	○	○	○	○	○(p187)DXN法含む	○(p187)
三重県	風水害等災害対策編：第6節 事故等による災害対策 第1章 重大事故対策 第1節 危険物施設等の事故対策(p399)	○	○	○	○	○(p404)	
滋賀県	震災対策編：第3章 災害応急対策計画 第20節 危険物施設等災害対策(p245)	○	○	○	○		
京都府	事故災害対策編：危険物等災害対策計画編 第3編 応急対策計画(p90)	○	○	○	○	○(p96)	
大阪府	基本対策編：事故等災害応急対策 第5節 危険物等災害応急対策 第2～5 危険物・高圧ガス・火薬類・毒劇物等災害応急対策(p332)	○	○	○	○		○(p337)
兵庫県	基本対策編：事故等災害応急対策 第5節 危険物等災害応急対策 第5 管理化学物質災害応急対策(p337)	○	○	○	○	○(p323)	
兵衛県	風水害等災害計画：第3編 災害応急対策計画 第3章 内河川災害活動の展開 第13節 環境対策の展開(p323)	○	○	○	○		
奈良県	風水害等災害計画：第3編 災害応急対策計画 第3章 各地の災害の応急対策の推進 第3節 危険物等の事故の応急対策の推進(p372)	○	○	○	○		
和歌山県	水害・土砂災害等編：第3章 災害応急対策計画 発災時の対応 第16節 危険物施設等災害応急対策計画(p274)	○	○	○	○		
鳥取県	基本計画編：第3編 災害応急対策計画 第12章 危険物等災害応急対策計画 第1～4節 危険物施設・火薬類・高圧ガス・毒劇物等災害対策計画(p318)	○	○	○	○		
徳島県	基本計画編：第3編 災害応急対策計画 第12章 危険物等災害応急対策計画 第7節 有害物質流出等災害対策計画(p325)	○	○	○	○	○(p325)	
香川県	大規模事故対策編：第2節 災害応急対策計画 第6章 危険物等災害応急対策(p392)	○	○	○	○		
高松県	風水害等災害編：第3編 危険物等災害対策計画 第2節 災害応急対策(p447)	○	○	○	○		
岡山県	風水害等災害編：第3編 災害応急対策計画 第13章 事故災害応急対策 第11節 有害ガス等災害対策(p266)	○	○	○	○	○(p266)DXN法含む	
広島県	震災対策編：第3章 災害応急対策計画 第6節 救助・救急・医療及び消火活動 第5項 危険物等災害対策計画(p182)	○	○	○	○		
山口県	震災対策編：第3編 災害応急対策計画 第12章 水防・消防・危険物等対策計画 第3節 危険物・高圧ガス・毒劇物等災害対策計画(p3-12-9)	○	○	○	○		
徳島県	共通対策編：第3章 災害応急対策計画 第28節 公共土木施設等の応急対策 第10節 危険物施設(p181)	○	○	○	○		
香川県	一般災害編：第3章 災害応急対策計画 第36節 危険物等災害対策計画(p193)	○	○	○	○		
愛媛県	風水害等災害編：第3章 災害応急対策計画 第27節 事故等による災害対策 第10節 危険物等災害対策(p178)	○	○	○	○		
高知県	火災及び事故災害対策編：第10章 危険物等災害対策(p27)	○	○	○	○		
福岡県	事故対策編：第5編 危険物等災害対策編 第3章 災害応急対策計画(p70)	○	○	○	○		
佐賀県	風水害対策編：第3章 災害応急対策計画 第35節 危険物等の保安計画(p230)	○	○	○	○		
長崎県	基本計画編：第3編 災害応急対策計画 第9章 危険物等災害対策計画(p250)	○	○	○	○		
熊本県	一般災害対策編：第2章 災害予防計画 第5節 危険物等災害予防計画(p29)	○	○	○	○		
大分県	事故等災害対策編：第5編 各種災害対策 第5節 危険物等災害対策(p29)	○	○	○	○		
宮崎県	第2巻 第9編 危険物等災害対策編 第3章 危険物等災害応急対策計画(p508)	○	○	○	○		
鹿児島県	一般災害対策編：第4部 特殊災害 第5章 危険物等災害対策 第2節 応急対策(p4-5-5)	○	○	○	○		
沖縄県	地震・津波編：第2章 災害応急対策計画 第26節 危険物等災害応急対策計画(p142)	○	○	○	○		

表1.8 主な都府県の地域強靱化計画における「有害物質の大規模拡散・流出」の記載状況

都道府県	記載内容
東京都	<p>有害物質の大規模拡散・流出</p> <ul style="list-style-type: none"> 放射線を使用する医療機関において、引き続き立入検査を実施するとともに、大規模災害時においても、迅速かつ確実に対応できるよう、マニュアルや研修により管理体制を強化していく必要がある。 放射線使用施設については、施設の入室管理や機器の安全管理を引き続き適正に行うとともに、長期的には施設や機器の老朽化を踏まえ、ソフト・ハード両面から長期的な安全確保を図っていく必要がある。 毒物・劇物による危害の未然防止のため、毒物・劇物保管管理施設への立入検査や講習会等により、保守点検の励行や、事故発生時の対応措置、防災訓練の実施等を指導する必要がある。
神奈川県	<p>有害物質の大規模拡散・流出</p> <ul style="list-style-type: none"> 危険物施設の事業者に対し、施設・設備の耐震化を促進するとともに、保安体制の充実、防災教育、防災訓練の実施など、必要な対策を講じるよう指導します。また、先端技術の発展に伴う化学物質の安全対策を促進します。 高圧ガス事業者に対して、津波浸水想定や津波に対する有効な対策等の情報を提供します。 危険物等施設の従事者に対する安全対策についての研修を、関係団体と共同して実施します。
埼玉県	<p>有害物質等の流出対策の確実な実施</p> <p>毒物劇物の化学物質による事故を未然に防止するため、毒物劇物の製造業者等に対して適切な管理状態を確保するよう指導する。化学物質による環境リスクの低減を図るため、事業者の排出削減の取組を促進し、環境コミュニケーションの普及や分かりやすい情報発信を行う。</p> <p>水質事故の未然防止の重要性を事業者に啓発するとともに、事故時には「異常水質事故発生時における危機管理マニュアル」に基づき、事故状況の把握、原因調査、汚染拡大防止、被害発生防止を図る。</p> <p>石綿（アスベスト）の飛散防止、中皮腫等の健康被害の予防のため、石綿除去の無届工事の防止、工事の際のリスクコミュニケーションの実施指導、適切な解体工事の実施指導、大気中の石綿濃度のモニタリング調査を行う。また、民間建築物の石綿分析調査、一定規模以上の石綿除去等工事への支援を行う。</p>
愛知県	<p>有害物質の大規模拡散・流出</p> <ul style="list-style-type: none"> 有害物質の大規模拡散・流出等による健康被害や環境への悪影響を防止するため、事業所への立入検査等の機会を捉え、化学物質の管理方法や事故発生時の対応計画等を定めた「特定化学物質等管理書」の作成等を指導する必要がある。 震災発生時の倒壊建屋等からの適切な石綿除去作業が実施されるよう、立入検査等の機会を捉え、解体業者に対し「建築物の解体等に係る石綿飛散防止対策マニュアル」の徹底を指導する必要がある。 地震や津波により生じる石綿管の浮き上がり、露出による破損やその処理の際に発生する石綿の飛散を未然に防止するため、石綿管から塩ビ管等への更新を進める必要がある。 保管中のPCB廃棄物の漏えい等による健康被害や環境への悪影響を防止するため、保管事業者に対し、PCB廃棄物の適正な保管や早期に処分を完了するよう指導する必要がある。また、県有施設の中には地震発生時に避難場所として使われるものが多いため、特に早期に処分を完了させる必要がある。 大規模災害時にも、環境面における県民の安全・安心を確保するため、環境測定設備等の整備を進める必要がある。

大阪府	<p>有害物質の大規模拡散・流出</p> <p>① 石油コンビナート防災対策（評価結果は5-2①に記載）</p> <p>② 管理化学物質の適正管理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 南海トラフ巨大地震等の大規模災害時には、<u>有害物質の環境への流出による周辺住民の健康被害や大気、水質、地下水などの環境汚染が懸念されており、地震発生に伴う有害化学物質の周辺環境への飛散・流出が原因となる二次災害を防止するため、「大阪府化学物質適正管理指針」に基づき、事業者による環境リスク低減対策が必要である。</u> ・ <u>二次災害の拡大防止及び消防活動の安全性を向上するため、府から市町村消防局等に対して、対象事業者の管理化学物質の取扱いに係る情報を提供し、相互情報共有することが必要である。</u> <p>③ 有害物質（石綿、PCB）の拡散防止</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 南海トラフ巨大地震発生に伴う建物の倒壊、火災、津波などにより、有害物質の保管場所が破損及び流出するおそれがあり、法令に基づき事業者に対して有害物質の適正保管及び早期処理の指導が必要である。 ・ 事業者に対して法令の規定によらない指導を行うことは困難であるため、建物の倒壊や流出等を想定した具体的な対策の講じられていない保管場所もある事業者に対し、巨大地震発生を想定した有害物質の保管について協力を求めることが必要である。 ・ 地震発生時に、建物倒壊等により発生する可能性がある石綿、PCB等有害物質の周辺環境への拡散・漏洩を防止するため、適正処理を解体業者等に働きかける必要がある。 <p>④ 毒物劇物業者における防災体制</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>地震発生時に、貯蔵施設の破壊等により周辺環境への漏洩等を防止するため、毒物劇物業者に対し、定期的な立入検査を実施し、毒物劇物の適正な使用・保管管理、法令遵守を徹底するよう働きかける必要がある。</u>
-----	--

4. 3. 2. 防災部局と環境部局とが連携した図上訓練の実施

本研究からの呼びかけに対応するかたちで、令和2年1月17日に、南海トラフ巨大地震にともなう石油コンビナート災害、危険物等災害などを想定した図上訓練を、大阪府の危機管理部局、環境部局、衛生部局と各市の消防部局とが協力して実施した。環境部局は対策本部に対し、発災した事業所の化学物質取扱量データの提供とともに、環境中濃度の把握（モニタリング）と検出濃度の評価を行った。

今後も、化学物質による大規模災害を想定し、関係部局が連携した訓練を定期的に行っておくことが重要と考えられた。（なお、令和2年度及び3年度は、新型コロナウイルス対策のため、部局間連携の訓練は実施できなかった。）



図1.14 防災本部訓練（令和2年1月17日実施）の様子

4. 4. APSを用いたモニタリング手法の確立

4. 4. 1. 化学物質に応じたAPSの開発

APSを構成する膜と吸着剤を最適化することで、高親水性有機化合物および界面活性剤に適用可能なAPSを開発した。農薬やシロアリ防除剤として広く利用されているネオニコチノイド系農薬、廃棄物から浸出水からの流出が問題となっている1,4-ジオキサンを対象高親水性有機化合物とした。また、直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウム(LAS)を対象界面活性剤とした。なお、これらの化合物は市販のAPSではサンプリングできなかった。

ネオニコチノイド系農薬に適した吸着剤と膜を選択した。ポリマー系3種、活性炭系3種の計6種の吸着剤候補を用いて吸着試験と回収試験を行った結果、ネオニコチノイド系農薬に対する強い吸着力と回収効率の高さから、ENVI-Carbを選定した。Polyethersulfonate (PES) 膜とpolytetrafluoroethylene (PTFE) 膜を用いて透過試験を行った結果、ネオニコチノイド系農薬はPTFE膜へは吸着はせず、PES膜への吸着はごく僅かであった。したがって、ネオニコチノイド系農薬に対してはPES、PTFEの両フィルターが適用可能であることが示唆された。選定された吸着剤 (ENVI-Carb) と2種 (PES、PTFE) のフィルターを用いて校正試験を行い、APSの能力 (サンプリングレート、吸着容量、適用期間) を評価した。サンプリングレートは見かけ上の吸着速度定数であり、吸着量/設置期間をサンプリングレートで除することにより設置期間中の濃度を計算することができる。その結果、PESフィルターを用いた新規APSは、既存のAPSより大きな吸着容量、長い適用期間を有していることがわかった。災害時の極端な濃度変動によって、既存のAPSの吸着剤が破過するため濃度を過小評価することが報告されている（詳細は②災害時濃度変動に対するAPSの吸着特性に記載）が、本手法で開発した新規APSはこの問題を解決できることが示唆された。一方で、フィルターとしてPTFE膜を用いたAPSは、フィルターとしてPESを用いたAPSよりもサンプリングレートが高いものの適用期間が短いことから、短期間で高感度を要するモニタリングには適しているが、長期間のモニタリングには適していないことが示唆された。

上記と同様の試験を実施し、1,4-ジオキサンとLASに適用可能なAPSを開発した。1,4-ジオキサンに最適な膜はシリコンとPESの2重膜、吸着剤は活性炭系のAC2だった。1,4-ジオキサンは分子量が小さく親水性が高いために、膜を透過する速度が高く、既存のPES膜ではAPSの適用可能期間が短かった。シリコン膜を併用することで物質移動を抑制し、1,4-ジオキサンへの適用可能期間の長期化を実現した。LASはPES膜に吸着してしまい膜を透過できず、吸着剤への吸着量が少なかった。吸着力の弱いPTFE膜を用いることでLASの膜への吸着を低減し、LASに適用可能なAPSが開発された。

ネオニコチノイド系農薬、1,4-ジオキサン、LASに適用可能なAPSを開発した経験から、APS開発のフローチャートを作成した(図1.15)。まず、化学物質の疎水性の指標であるオクタノール-水分配係数(K_{ow})を用い、 $2 < \log K_{ow}$ であるかどうかを検討する。対象化合物が $2 < \log K_{ow}$ を満たしていれば、吸着剤はHLBがよい。さらに、対象化合物がAPSによく使われるPES膜を透過するかどうか試験する。対象化合物がPES膜をできればPES膜、透過できなければPTFE膜を採用する。対象化合物が $2 < \log K_{ow}$ を満たしていない場合は、最適吸着剤を選定するバッチ試験を実施し吸着剤-水分配係数(K_{sw})を算出する。最適吸着剤が $4 < \log K_{sw}$ である場合は、最適吸着剤とPES膜の組み合わせがよい。対象化合物の吸着性が弱く最適吸着剤が $4 < \log K_{sw}$ でない場合(例えば、1,4-ジオキサン)、水相からAPS内部への物質移動を抑制するためにシリコン-PES二重膜などを用いる。APS開発のフローチャートを用いることで、新規物質に対するAPS開発の検討時間が短縮されることが示唆された。また、この手法を用いることにより、本法は取扱量が多いほとんどのPRTR第1種指定化学物質に適用可能であることが分った。

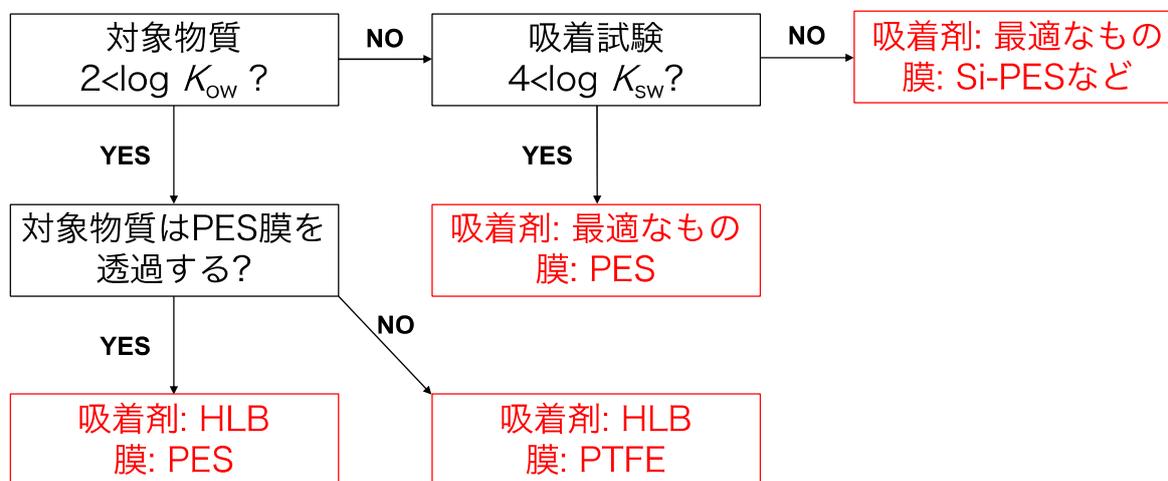


図1.15 新規APS開発のフローチャート

4. 4. 2. 災害時濃度変動に対するAPSの性能評価

災害時の河川中の流出化学物質濃度を模擬的に表すために、AIST-SHANEL（国立研究開発法人産業技術総合研究所作成の水系暴露解析モデル）を用いた計算を行った。モデル化学物質は全国的に保管量が多く、AIST-SHANELによる実績もあり結果に信頼性が高いと考えられるLASとした。具体的な手法としては、大阪府南部の河川沿いにある仮想の工場からLASがその保管量の2%が流出したと想定し、シミュレーションを行った。LASの保管量は、PRTRデータ及び4.1.3の手法を参照し、大阪府内で最もLASの取扱量の多い工場を選択し、その取扱量の2%を保管量とした。その結果、河川中の化学物質濃度は約1日後に最高濃度となり、その後、約1日間で半分の濃度まで低下することが確認できた。

AIST-SHANELを用いた計算結果を基に、濃度変動を再現する室内チャンバー（図1.16）を構築した。このチャンバー内で市販のAPSを用いて試験を行い、その能力を評価した。ネオニコチノイド系農薬、LAS、ビスフェノールAを用いて試験した。最大濃度は、「平成24年度災害時における化学物質のリスク低減事業報告書（大阪府）」⁷⁾を参考に3つの条件(10、100、1000 $\mu\text{g/L}$)に設定した。その結果、1000 $\mu\text{g/L}$ では既存のAPSの吸着剤（Oasis HLB）が破過することによって、また長期間のサンプリングでは脱着によってAPSによるネオニコチノイド系農薬算出濃度が過小評価することが示唆された。さらに、同様の試験をネオニコチノイド系農薬に最適化されたAPS(吸着剤としてENVI-Carbを使用)で行うと、破過することによる過小評価は見られなかった。したがって、吸着剤としてENVI-Carb使用したAPSを用いることで事故災害時の濃度変動を捉えることが可能であることが示された。また、LASとビスフェノールAについても、APSによって事故災害時の濃度変動を捉えられることを示す結果が得られた。

室内チャンバーの性能を評価するため、室内チャンバー試験と同様の試験をスイス水環境科学技術研究所(Eawag)に設置された人工水路(図1.17)で実施し、結果を比較した(図1.18)。室内チャンバーお

よび人工水路の両方のほとんどの結果が、理論値比50-150%の範囲内にあり、どちらの試験系もAPS性能評価に適していることが示唆された。人工水路は700 Lのサンプル水を要し、1部屋を占有する規模であることから、排水処理や維持のコストが高い。室内チャンバーに必要なサンプル水は30 Lであり、卓上サイズであることから低コストで運用できる。さらに、廃液処理が容易であることから1 mg/L程度の高濃度条件を再現することも可能である。よって、化学物質流出事故を想定した条件におけるAPSの性能評価には、我々が開発した室内チャンバーが有効であると考えられる。

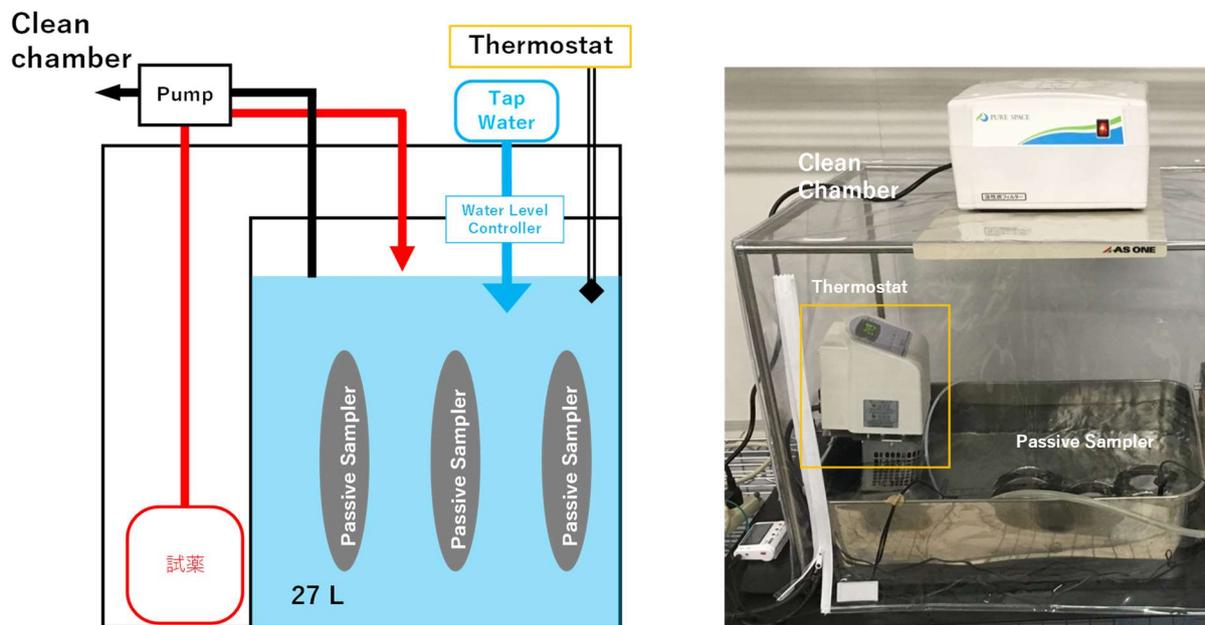


図1.16 室内チャンバーの写真

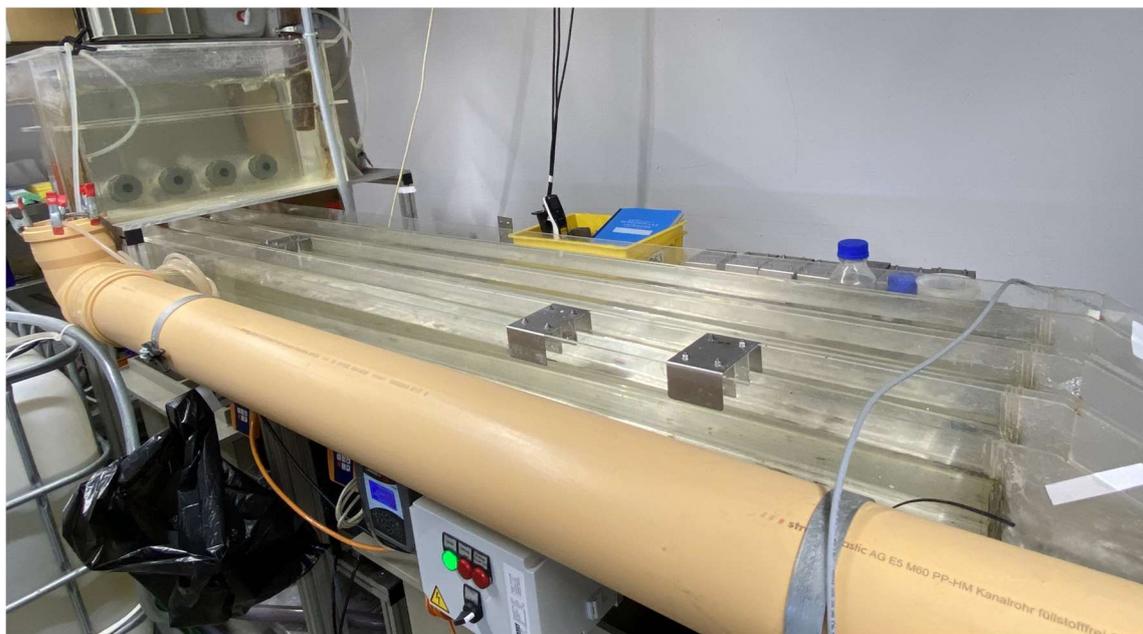


図1.17 スイス水環境科学技術研究所 (Eawag) に設置された人工水路の写真

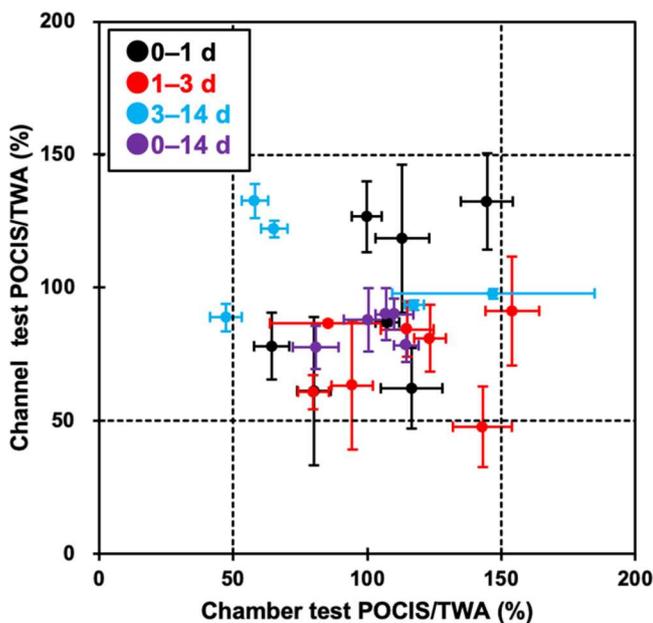


図1.18 室内チャンバーと人工水路の比較

縦軸が人工水路、横軸がチャンバーの結果。100%が理論値を示す。エラーバーは標準偏差、サンプル数は3。

5. 研究目標の達成状況

サブテーマ1では、①災害・事故への対応において基礎となる化学物質の存在量を、PRTRデータ等の公表データに基づき推計する手法を開発すること、②化学物質の所在や性状等に関する情報基盤データベースを構築し、地理情報システム（GIS）による地図表示機能を整備すること、③これらの情報基盤を災害発生直後に地域内外の環境部局だけでなく消防防災部局などの各機関でどのように共有し協力体制を構築するかについて検討すること、④災害発生後の環境中残留化学物質の中長期的な監視や対策範囲の特定を効率的・網羅的・低コストで行うためのAPS手法を確立することを目標としていた。

①については、PRTRの公表データから全国の化学物質の在庫量を推計する手法が確立できた。②については、①の結果より作成したデータベースをもとに、化学物質の所在等についてGISで表示できるようになった。③については、大阪府の協力のもと図上訓練を実施し、関係部局間での情報共有や協力体制の検討ができた。また、④については、対象とする化学物質に適用できるAPS手法を確立できた。これらのことから、研究目標を十分に達成できたと考えられる。

6. 引用文献

- 1) 環境省，経済産業省：PRTRけんさくん、<http://www.env.go.jp/chemi/prtr/kaiji/index.html>、2023年3月31日現在
- 2) 経済産業省：一般化学物質等の製造・輸入数量（2019年度実績）について、https://www.meti.go.jp/policy/chemical_management/kasinhou/information/2019jissekimatome.html、2023年3月31日現在
- 3) 藤木修、中山義一、中井博貴：地震による河川水質汚染の影響評価について、EICA、14、28-36（2009）
- 4) 環境省：対象業種を営む事業者からのすそ切り以下の排出量、<http://www.env.go.jp/chemi/prtr/result/todokedegaiR01/syosai/1.pdf>、2023年3月31日現在
- 5) 総務省統計局：平成28年経済センサス-活動調査 事業所に関する集計 産業横断的集計、<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&toukei=00200553&tstat=000001095895>、2023年3月31日現在
- 6) 環境省：環境省防災業務計画、<https://www.env.go.jp/other/bousai/bousai.pdf>、2023年3月31日現在
- 7) 大阪府環境農林水産部環境管理室環境保全課：平成24年度災害時における化学物質のリスク低減事業報告書（2013）

II-2 災害・事故発生時に環境中に残留する化学物質への対策実施と継続監視のためのモニタリング手法開発

(研究代表者)

国立研究開発法人国立環境研究所 環境リスク・健康領域 基盤計測センター 計測化学研究室
室長 橋本 俊次

(研究分担者)

国立研究開発法人国立環境研究所 環境リスク・健康領域 基盤計測センター 環境標準研究室
室長 高澤 嘉一

国立研究開発法人国立環境研究所 環境リスク・健康領域 基盤計測センター 環境標準研究室
研究員 家田 曜世

[要旨]

汚染範囲の確定とその経過を観察するため、事故発生後に環境中に漏えいし残留する化学物質を中長期的かつ面的にモニタリングすることが求められる。またPRTR情報などに基づき、災害事故時に環境中に漏えいする可能性がある主要物質の監視の他に、不純物や副生成物、火災や化学反応による生成物による汚染が発生する可能性も十分に考えられる。このような想定外の物質も網羅的に捕捉し、かつ物質の同定(特定)も行えるような観測手法の開発は、化学物質汚染による総合的なリスク評価のためには、非常に重要である。この課題では、「災害発生後の残留物質の監視を効率的かつローコストで面的に展開することを可能とするサンプリング手法の開発」と、「副生物や反応生成物など事故等から直接に想定される以外の物質も捕捉可能な新たな網羅分析法とデータ解析手法の開発」を行った。

「災害発生後の残留物質の監視を効率的かつローコストで面的に展開することを可能とするサンプリング手法の開発」では、外部電源の供給が不要で設置場所を選ばないセミアクティブサンプラーによる大気サンプリング法を開発した。汚染地に残留し再揮発する可能性のある半揮発性の化学物質を効果的に捕集するためポリジメチルシロキサン(PDMS)を吸着材に採用し、通気量を制御することで大気濃度の推算が可能な乾電池で2週間以上駆動するパッシブサンプラーを開発した。冬季と夏季、大阪とつくばにおける検証を行い、次の結果を得た。3~6塩素化ビフェニル、PeCBz、HCH、クロルデン類に代表される半揮発性成分の捕集に効果があった。捕集期間は1週間程度が適当と予想され、それ以上は頭打ちの傾向があった。標準法との比較から、冬季は低揮発成分、夏季は高揮発成分のPDMSへの吸着(捕集)量の減少がみられ、対象物質の蒸気圧などの物性と気温は捕集量に大きく影響することが確認されたが、地点間差が観測でき、季節を合わせた化学物質の調査や監視には有効と考えられた。

「副生物や反応生成物など事故等から直接に想定される以外の物質も捕捉可能な新たな網羅分析法とデータ解析手法の開発」では、高分離・高分解な包括二次元ガスクロマトグラフ-飛行時間型質量分析計(GC×GC-ToFMS)による網羅分析とそこから得られる膨大な精密質量情報を解析することで、未知物質も含めた物質群全体の掌握を図ることを計画した。熱脱離法(TD)により大気や水質試料を直接GC×GC-ToFMSに導入する方法により、試料調整過程における物質ロスを極力抑えることに成功し、包括的・網羅的な分析が可能になった。スクラップ集積場火災調査などをケーススタディとして、開発した手法の検証を行った。ミニポンプサンプリングによりTenax樹脂に捕集した成分をTD-GC×GC-ToFMSで測定したところ、1時間程度のサンプリングで、大量の化学物質の捕集と検出が可能であった。鎮火後一週間後の大気からも対照地より多数で高濃度の化学物質を検出した。精密質量を利用したデータ処理により、火災現場周辺大気からフェノール、ベンゼン、ダイオキシン、ビフェニルを骨格に持つ多数の有機ハロゲン化合物を検出した。非常に粗い推算では、1kg程度の有機ハロゲン化合物が大気中に放出された可能性が示唆された。

このように、サブテーマ2では、外部電源の供給が不要で設置場所を選ばないセミアクティブサンプラー等による大気サンプリング法として、乾電池のみで1~2週駆動するサンプラーを開発し、大気中の残留性半揮発化学物質の同季節監視における有効性を確認した。また、GC×GC-ToFMSなどの多次元分離技術の応用により、分析過程の物質損失を極力削減しつつ、物質の特定も可能な網羅的な分離分析法を開発し、現場試料測定のための最適化を行った。幾つかのケーススタディを通して、開発手法が包括的かつ物質検索可能であることを確認した。

1. 研究開発目的

本サブテーマでは、災害・事故後の化学物質による汚染範囲の特定と汚染レベルの監視、汚染除去対策の効果の包括的評価、問題物質の特定等、行政対策への貢献に直結する情報の提供を可能にすること

を目指し、災害・事故等の後に環境中に残留する主要物質から生成物等まで詳細に把握するサンプリングから測定・データ解析までの手法を提示することを目的とする。

2. 研究目標

災害・事故後の残留物質の中長期的な監視や対策範囲の特定を効率的・網羅的・低コストで面的な展開も可能とするサンプリング・調査手法を開発する。

不純物や反応生成物など事故等から直接に想定される以外の物質も捕捉可能な新たな網羅分析法とデータ解析手法を開発する。

3. 研究開発内容

3. 1. サンプリング・調査手法の開発

災害事故発生後の大気サンプリングでは、調査地点が限られる一方で面的な展開も必要なことから、サンプラーのデザインとしては安価で数量の確保が容易であることに加えて、持ち運びしやすい形状であり軽いことが重視される。そこで、メーカーの協力のもと個人曝露用サンプラーとして販売されている市販製品を改良し、図2.1に示す大気サンプラー（セミアクティブ大気サンプラー：SAAS）を製作した。このサンプラーは、災害時に面的および空間的な化学物質の濃度把握を効率的に実施することを想定したものであり、市販の単1形乾電池を動力源として最長で2週間の連続モニタリングが実施できる仕様となっている。サンプラー本体の全長は22cm、乾電池をセットした重量は約300gであるため、持ち運びやすく設置場所の制限も極めて少ないと言える。サンプラー内部の後段に簡易なファンを取り付けてあり、ファンの回転により乱流を与えることでサンプラー内部の拡散体（捕集材）で化学物質を捕まえる構造となっている。大きな特長としては、大気の通気量もカウントできるため化学物質の大気中濃度の推算が可能であることが挙げられる。通常のパッシブサンプリングではサンプリングレートの算出やサンプリング期間における吸着限界などに十分な留意が必要となるが、このサンプラーは「一般的な大気捕集で用いられる交流電源が必要なアクティブ型のハイボリウムサンプラー」と「接触した空気量の推測が必要なものの電源が不要なパッシブサンプラー」の中間的な位置付け、すなわちセミアクティブ型となっており、比較的正確な大気の通気量を求められる。



図2.1 セミアクティブ大気サンプラー（SAAS）の全体像（左）と内部に取り付けるステンレス製メッシュホルダー（右）

そのため、漏洩した物質の物性に適した捕集材を選定すれば、大気中の濃度を効率的に把握することも可能であると期待される。その一方で、このような小型の捕集材、特に熱脱着分析が可能なタイプの捕集材は、サンプリングから機器分析に至るまでの迅速性と相性も非常に良好である。実際に、SAASを熱脱着分析用の捕集材と組み合わせて利用すれば、捕集した物質（サンプリング後の捕集材）に対して抽出や試料精製を伴わない機器分析が実現できる。特に後述する包括的ガスクロマトグラフィ/飛行時間型質量分析法を利用することで、漏洩した物質の情報が不明な状況下においても捕集した物質の網羅的な組成情報が得られる可能性が高く、副生物や反応生成物など事故等から直接に想定される以外の物質の測定も期待できる。

3. 1. 1. セミアクティブ大気サンプラー（SAAS）の性能確認

事前検討段階における捕集材としては、ポリジメチルシロキサン（PDMS）と活性炭フェルト繊維（ACF）を用いて検討を行った。PDMSは、災害発生後の汚染地における吸気曝露を想定し、蒸気圧がやや高めで残留しやすい化学物質の吸着を想定したものである。試料の分析は加熱脱着法による試料の全量導入を想定し、PDMSを表面にコーティングしたSAAS用の石英捕集管（内径4mm、外径6mm、長さ60mm、拡散捕集面積880mm²）を作製するとともに、これとは別に、残留性有機汚染化学物質（POPs）の捕集にも用いられるACFを短冊状に加工したもの（幅5mm、長さ60mm）を捕集材とした。なお、SAASの採取口はねじ加工を施しており、捕集の際には石英製捕集管やACFを直接吊り下げることが可能となっている。なお、PDMS

石英捕集管はサンプリングを開始する前に、溶媒洗浄と加熱脱着装置による追い出しが行われている。ACF捕集材についても溶媒抽出によるブランクの追い出しを事前に実施したものを検討に利用した。



図2.2 PDMS石英捕集管（左）と吊り下げ型ACF捕集材（右）

3. 1. 2. 規格化されたPDMS捕集材を用いたSAASの捕集能試験

先の検討結果を受けて、ここでの検討ではPDMSが均一にコーティング（厚さ1mm）された小型攪拌子を捕集材に用いた。SAAS内部にPDMS攪拌子を設置して、国立環境研究所屋内実験室にて2週間連続でサンプリングを実施した。本検討での分析対象成分は、ポリ塩化ビフェニル（3塩素化同族体：TrCBs、4塩素化同族体：TeCBs、5塩素化同族体：PeCBs、6塩素化同族体：HxCBs、HCB、ヘキサクロロシクロヘキサン（*a*-HCH、*g*-HCHおよび*d*-HCH））とした。また、成分検出は包括的ガスクロマトグラフィ/飛行時間型質量分析法（GC×GC-ToFMS）を用いており、PDMSに捕捉された成分のほぼ全量を加熱脱着装置にてガスクロマトグラフへ導入した。PDMS攪拌子はサンプリングを開始する前に300℃で3時間、流量175mL/minでエージングを行ったものを使用した。

	利点	欠点
活性炭繊維フェルト ACF 	<ul style="list-style-type: none"> 脱吸着速度が大きい 比表面積が大きい（1500 m²/g） 揮発性化合物の捕集に適する 形状の加工が容易 安価 	<ul style="list-style-type: none"> 捕集後の溶媒抽出が必要（迅速分析不適） 捕集した化合物の感度不足が生じやすい 事前洗浄と厳格なブランク管理が必要
ポリジメチルシロキサン PDMS 	<ul style="list-style-type: none"> 中揮発性化合物まで比較的広い沸点範囲の化合物に対応 捕集後の前処理が不要（迅速分析） ブランク管理が比較的容易 	<ul style="list-style-type: none"> やや高価

図2.3 PDMSとACFの主な特性

3. 1. 3. 環境大気におけるSAAS-PDMS捕集とハイボリウムサンプリング（HV）の比較

2020年4月中旬から5月下旬にかけて、茨城県つくば市の国立環境研究所屋上にて3台のSAASを用いて1週間サンプリングを繰り返し実施した。SAASのサンプリング量は平均4.42m³/週であった。これにあわせてHV（100 L/min、1週間サンプリングにより1008m³を捕集）もSAASと並行して実施した。SAASで捕集した試料の測定には、ZOEX社製KT2006 GC×GCモジュレーターを内蔵したアジレント社製7890GC-7200B四重極飛行時間型質量分析装置（Q-TOF）を用いた。試料の導入は熱脱着装置により行い、溶媒抽出や前処理を省略することで成分の損失を防いだ。TDは50℃で1分保持した後、720℃/minで280℃まで昇温し、10分間保持した。GC×GCの1stカラムにはInertCap 5MS/Sil（45 m length, 0.25 mm i. d., 0.1 μm film thickness; GLサイエンス社製）を、2ndカラムには BPX-50（0.9 m length, 0.10 mm i. d., 0.10 μm film thickness; SGE社製）を用い、GC×GCのモジュレーションピリオドは6.5秒とした。GCオープンは、50℃で2分間保持したのち、3℃/minにて350℃まで昇温した。キャリアガスにはヘリウムを用い、流量は1.8 mL/minとした。Q-TOFはMS/MSの機能を利用せず、EI法にてイオン化を行ったのち、m/z 33-1000の質量範囲で全ての精密質量スペクトルを取得した。データ取り込み速度は25 Hzとした。定量は絶対検量線法を用いて行った。一方、HVで捕集した試料は、アジレント社製6890GCと日本電子社製JMS-700 MStation高性能二重収束質量分析計を用いて測定を行った。GCカラムにはENV-8MS（30 m length, 0.25 mm i. d. 0.25 μm film thickness; 関東化学社製）を用いた。GCオープンは、60℃で5分間保持したのち、30℃

/minにて200℃まで昇温、さらに5℃/minにて290℃まで昇温した。キャリアガスにはヘリウムを用い、流量は1.0 mL/minとした。質量分析装置の測定条件は、環境省のモニタリング調査マニュアルに基づいて設定しEI+にて測定を行った。定量はサロゲート法で実施した。ここでの分析対象成分はHVでも捕集される揮発性化学物質とし、なお且つ広範な物性を有するPCBs等を選定した。



図2.4 PDMS撹拌子

3. 1. 4. SAASの実用試験

2022年1月中旬から2月中旬（冬季）および2022年7月中旬から8月中旬（夏季）にかけて、茨城県つくば市の国立環境研究所（NIES）、大阪府羽曳野市の大阪府立環境農林水産総合研究所（RIEAF）および大阪府泉大津市の市役所庁舎（Izumi）の各屋上にて、SAAS（ $n=3$ ）とHV（ $n=1$ ）を用いた大気サンプリングの並行試験を実施した。具体的なサンプリングのスケジュールを図2.5に示す。

				冬季					夏季						
				2022					2022						
検討内容	捕集材数	ホルダー	捕集期間	1/13	1/20	1/27	2/3	2/10	検討内容	捕集材数	捕集期間	7/13	7/20	8/9	8/16
NIES (SAAS)	1	無	1週間, $n=3$	←→					NIES (SAAS)	1	1週間, $n=3$	←→			
	1	無	1週間, $n=3$		←→				NIES (HV)		1週間, $n=1$	←→			
	1	無	2週間, $n=3$	←→	←→				RIEAF (SAAS)	1	1週間, $n=3$	←→			
NIES (HV)		無	1週間, $n=1$	←→					RIEAF (HV)		1週間, $n=1$	←→			
RIEAF (SAAS)	1	無	1週間, $n=3$	←→					NIES (SAAS)	1	1週間, $n=3$				←→
RIEAF (HV)		無	1週間, $n=1$	←→					NIES (HV)		1週間, $n=3$				←→
NIES (SAAS)	1	無	1週間, $n=3$					←→	Izumi (SAAS)	1	1週間, $n=3$				←→
	1	有	1週間, $n=3$					←→	Izumi (HV)		1週間, $n=1$				←→
	2	有	1週間, $n=3$					←→							
Izumi (SAAS)	1	無	1週間, $n=3$					←→							
Izumi (HV)		無	1週間, $n=1$					←→							

図2.5 大気サンプリングのスケジュール

なお、1週間サンプリングによりSAASでは約4.5m³を、HVでは1008m³を捕集しており、大気捕集後のSAASおよびHVの機器分析条件は、3.1.3.に記載した方法と同様である。

3. 2. 網羅分析手法の開発

3. 2. 1. 多次元ガスクロマトグラフィ/質量分析による網羅分析

事故・災害によって流出・放出される不純物や二次生成物など未想定 of 化学物質をも包括的に把握するため、次の要件を満たす計測手法として包括的ガスクロマトグラフィ/飛行時間型質量分析法（GC×GC-ToFMS）を採用した。GC×GCは通常のGCに対し数十倍の成分分離能力を有し、ToFMSは全成分の精密質量スペクトルが採取できるため、多成分の分離と検索に高い能力を発揮すると期待された。

要件① 中長期にわたる大気・水質経由の直接暴露を想定し、残留性のある比較的 low molecular weight 分子を対象とする

要件② 分析走査中の物質のロスを防ぐため、試料（あるいは抽出液）を直接測定する

要件③ 物質の検索・同定が可能である

使用した装置と条件を、表2.1に示す。相対保持指標（RI）による物質同定の補助を可能にするため5%フェニルメチルシリコン系と50%フェニルメチルシリコン系GCカラムによる一律昇温を採用した。

表2.1 装置と測定条件

TD	
熱脱離装置	Gerstel TDU
条件	Transfer mode: fix, temp.: 340 °C Desorption mode: splitless, sample mode: sample remove from 40 °C holding for 1 min (delay 0.5 + initial 0.5) to 180 °C at rate 720 °C min ⁻¹ holding for 0 min to 340 °C at rate 50 °C min ⁻¹ holding for 5 min
冷却装置	Gerstel CIS4
条件	Heater mode: standard, cryo cooling: enabled from 0 °C holding for 0.2 min (equilib 0.1+ initial 0.1) to 300 °C at rate 12 °C min ⁻¹ holding for 3 min
GCxGC	
装置	Agilent 7890 GC
モジュレーター	Zoex KT2006 (in 7890GC)
1st カラム	GL Science InertCap 5MS/Sil (45 m length, 0.25 mm i.d., 0.1 µm film thickness)
2nd カラム	SGE BPX-50 (0.9 m length, 0.1 mm i.d., 0.1 µm film thickness)
昇温条件	from 50 °C holding for 2 min to 350 °C at rate 3 °C min ⁻¹ holding for 0 min
注入法	TDU&CIS4(Gerstel)
キャリア	type: He, mode: constant flow, initial head pressure: 324 kPa at 50 °C
モジュレーション	period: 7 sec, releasing: 0.15 sec
ToFMS	
装置	Agilent 7200B
イオン源	mode: EI+, temp: 280 °C ionizing voltage: 70eV, ionizing current: 35 µA
分析部	resolution: 10,000, recording range: 33 - 1,000 m/z, cycle: 50 Hz
検出器	MCP voltage: 750 V, PMT: 650 V

3. 2. 2. データ差異解析

(1) 河川試料

埼玉県環境科学国際センターの協力を経て小河川のモニタリング地点から採取した6日分の水試料を用いて、開発した網羅分析法の再現性と試料間差（群間差）の検出可能性について評価した。試料を採水した河川は、畑を中心とした田園地帯を流れ、農業用水としても利用されている。地点上流には、化学インク工場が一つあり、それ以外には特に注目すべき施設はなく、いくつかの住宅地からの排水の影響は受けていると考えられた。試料は2015年8月に数日間隔でガラス容器に採水し、その後、密封遮光し、15°C以下に保ち研究室まで運んだ。その後、測定まで4°Cで保存した。

(2) 試料の抽出

6日分の水試料から、それぞれ5つの分割試料（各50ml）を作成し、計30試料について、攪拌子固相抽出（SBSE）を行った。水試料に、それぞれ10%(v/v)、20%(w/w)になるようにアセトン（PCB分析用、和光純薬）とNaCl（PCB分析用、関東化学）を加えた後、ポリジメチルシロキサン（PDMS）皮膜を施したゲステル製Twister（長さ20mm、膜厚0.5mm）を入れて密封し、24時間マグネチックスターラーで攪拌しつつ抽出を行った。ノンターゲット環境モニタリングの実現のためには、試料の処理中に起きる物質の損失・変質・付加を防ぐ必要があることから、本法では、抽出以降の精製などの処理を一切省いた。

(3) 測定

測定の直前に、Twisterに各500pgの¹³C-PAHを塗布し、加熱脱着（TD）-GC×GC-HRTToFMSにより測定を行った。加熱脱着はゲステル製TDU2を用いた。測定には、Zoex2006 GC×GCモジュレーターを内蔵したアジレント7890GC、アジレント社製7200B QTOFを使用した。

(4) データ処理

GC×GC-ToFMS測定により得られたデータを、GCImage R. 2.6あるいはR. 2.7（GCImage社製）に読み込み、二次元トータルイオンクロマトグラム（2D-TIC）で自動ピーク検出を行い、検出された数千のピークから、保持時間、ピーク強度を広くカバーするように80の成分を選択した。計30データ（6日×5）において、この80成分と同じ保持時間に現れる成分について、保持時間（一次および二次保持時間）、マ

スペクトル、TIC強度の比較を行った。

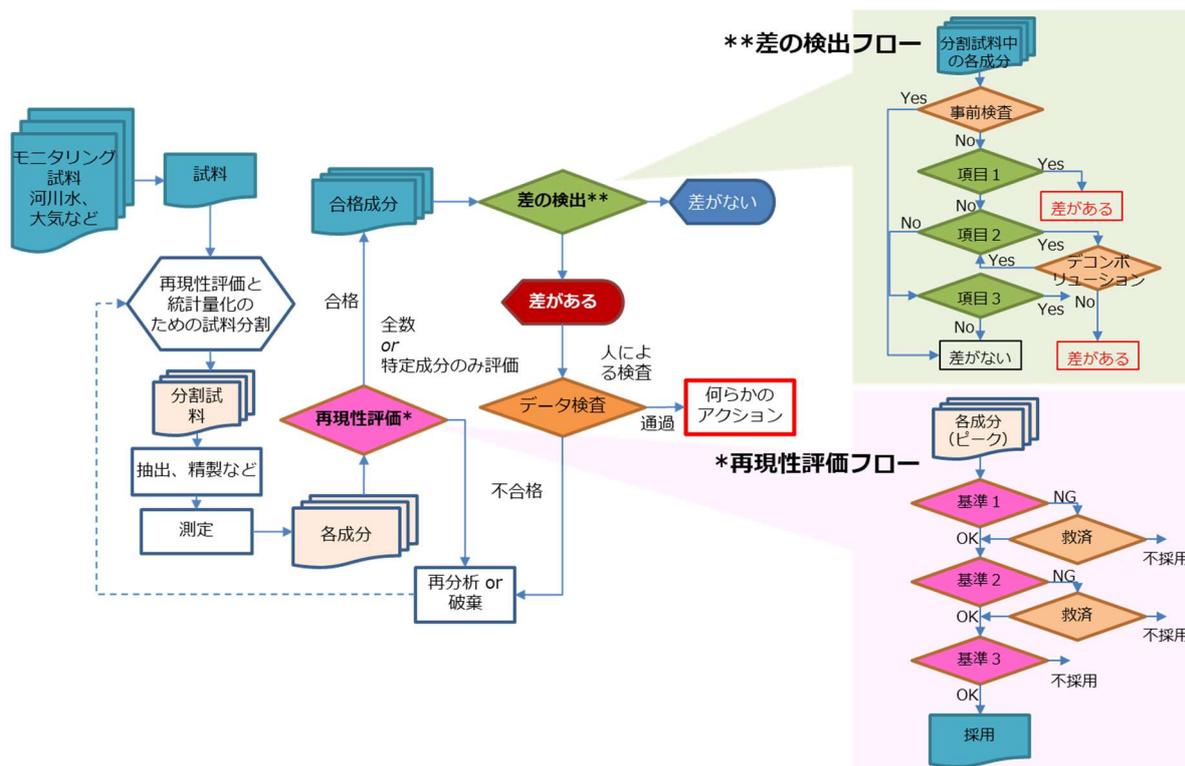


図2.6 質量分析法による包括的モニタリングのワークフロー

① ノンターゲットモニタリングデータの比較

この研究では、物質の同定を行った後にその定量値を比較するという従来の方法ではなく、将来の自動処理化を念頭に置いているため、ノンターゲット測定データの直接比較による差の検出（異常検出）を試みた。

ノンターゲットデータによる異常検出の全体ワークフローを図2.6に示す。今回は、河川水試料をGC×GC-ToFMS測定したデータを用いたが、ワークフローは、試料や測定手法に依存することなく一般的な拡張が可能である。

再現性の評価は、次のような3つの基準を設け、全ての基準を満たす成分についてのみ、試料間の比較（群間差、異常検出）に用いることとした。再現性の評価フローを図2.6中「再現性評価フロー」に示す。なお、これらの基準は手法の検証のために筆者らの経験に基づき暫定的に設定したものであり、対象や地点、目的によって最適化することが望ましい。

基準1: GC1および2における保持時間がそれぞれ ± 0.25 、 ± 2.5 %の範囲内。

基準2: マススペクトルが同じ (NISTライブラリサーチによる第一候補名が同じ)。

基準3: 総イオン強度の相対標準偏差(RSD)が15%以下、あるいは強度値が ± 25 %の範囲内。

基準1と3のための計算と比較はMicrosoft Excel (マイクロソフト社、USA) 上で行った。また、基準2のマススペクトルの比較では、今回は、統計学的手法ではなく簡便さを重視した。MS Search 2.0 (NIST、USA) によるNIST14 (NIST) マスライブラリサーチ (ノーマルサーチ) の結果、第一候補として挙げられた物質名称 (あるいはCAS. No.) を用いた。すなわち、結果が一致したか否かによって判定を行った。

上記の再現性評価の基準の全てを通過した成分について、試料間差が検出可能か評価した (図2.6中「差の検出フロー」)。試料間差の評価には、ノンパラメトリックな群間差検定法の一つであるクラスカルウォリス検定を用いた。統計計算は、R バージョン2.2.3を用いEZR 1.35¹⁾上で行った。

3. 3. ケーススタディ (未知物質の検索・同定)

3. 3. 1. 渥美大島におけるタンカー流出オイルの漂着沿岸環境の大気調査

2018年1月6日、中国・上海沖合の東シナ海で、タンカー (イランの海運会社所有のSANCHI (サンチ))、パナマ船籍) が、中国の貨物船 (香港籍) と衝突、14日に奄美大島の西約315キロメートル付近で沈没し、タンカー積載物 (コンデンセート [超軽質原油]) 約13.6万トン、残燃料油約2,120トン (A重油約120トン、C重油約2,000トン) が流出し、2月2日に奄美大島北岸の各地に流出物由来と思われるオイルボールが多数漂着した。比較的速やかに漂着油は回収されたものの、周辺への影響が懸念されたことから、漂着海

岸の4地点において、大気調査を実施した。2月8日と9日に、柴田科学社製MP-W5Pおよびガステック社製GSP-400FT携行型ミニポンプにより、ゲステル社製Tenax-TA樹脂捕集管に流速0.5 L/minで1時間（夜間は0.5 L/minで8-12時間）大気を捕集した。捕集量はそれぞれ、30L、240L、360Lであった。捕集管を密封し持ち帰った後、TD-GC×GC-ToFMSによる網羅測定を行った。

3. 3. 2. 茨城県常総市におけるスクラップ集積場火災による周辺大気調査

(1) 試料

2019年5月、日本の関東地方にあるリサイクル資源中間集積場で出火し、5600平方メートルに山積みされた廃家電のプラスチックくずや金属くずなど（推定1万t）を焼き12日後に鎮火されるという火災が発生した。火災規模が大きいため、周辺環境への影響が懸念されたため、大気の調査を行った（図2.7）。調査は、火災中と鎮火7日後に実施した。大気の捕集は火災現場風下約100mの地点と、対照地として風上約1.2kmの地点において、柴田科学社製MP-W5Pおよびガステック社製GSP-400FTミニポンプにより行い、流速0.1L/minと0.4L/minで1時間、Tenax-TA（ゲステル社製）に捕集した。捕集量はそれぞれ6.0L、24Lであった。捕集管をガラス管に密封、遮光し、持ち帰った後、測定まで-20℃で保管した。



図2.7 火災現場とサンプリング風景

(2) 測定

測定装置への試料の導入は加熱脱着装置（ゲステル社製TDU2）により行い、溶媒抽出や前処理を省略することで成分の損失を防いだ。測定装置には、ZOEX社製KT2600 GC×GCモジュレーターを内蔵したアジレント社製7890GC-7200B QTOFを用いた。

(3) データ処理

① データの準備

TD-GC×GC-ToFMSによる測定データは、GCImage R. 2.7（GCImage社製）に読み込んだ後、（この時、netCDF形式（AIAフォーマット）に自動的に変換）同ソフトの自動ピーク（blob）検出機能を用いてTIC上でピーク検出を行った。各試料で検出されたピーク情報から、GCImageのExtract area objects from blobs機能を用い、ピークの形状および保持時間を内包するテンプレート（GCImage用語ではGraphics）を作成した。テンプレートは試料毎（火災時、鎮火後、対照のそれぞれについて流速0.1および0.4L/minの2種類の計6試料分）に作成した。

② マスデフェクトフィルタリング

塩素、臭素を含む有機ハロゲン化合物に由来するマススペクトルを選択的に抽出するために、我々が開発したマスデフェクトフィルター「MDF」を用い測定データを処理することにより、マススペクトルの精製を行った。このMDFではユーザーが0から1.0の間の任意の値に設定することができ、例えば、質量欠損（MD）を0.4に設定した場合、ソフトウェアは全データから小数点以下の値が0.0～0.6のマススペクトル

ルを削除する。(塩素または臭素1原子あたりの質量欠損は、それぞれ0.0311 (^{35}Cl , 35(公称) - 34.9689(正確))、0.0817 (^{79}Br , 79(公称) - 78.9183(正確)) 今回は、MDを0.5に設定しデータ処理を行った。MDFで処理したデータについても、同様の過程でテンプレートを作成した(火災時、鎮火後、対照のそれぞれについて流速0.1および0.4L/minの2種類の計6試料分をそれぞれMDF処理したもの)。

③ ピーク(成分)のマススペクトルの試料間比較

GCImage上で、作成した計12種のテンプレートをそれぞれのデータに適用し、同じテンプレートによって抽出された全成分のマススペクトルとその強度を試料間で比較した。例えば、火災時・0.4L/min・MDF処理なしデータによって作成されたテンプレートを、鎮火後や対照地データにも適用することで、全ての成分(ピーク)について同じGC保持時間範囲内のマススペクトルの比較を行った。

この時、GCImageのTemplate matching機能は使わずに、検出したピーク(blob)からGCImageのExtract area objects from blobs機能により作成したGraphics(GCImage上の用語)を他の試料データにImportした後、Set area機能によってピーク(blob)領域情報を抜き出した。このピーク領域情報(精密マススペクトルを含む)をtext形式ファイルにexportした。このtext形式ファイルをMS-Excel(マイクロソフト社製)に読み込み、excelファイル形式に変換した。

試料間のデータ比較(1対1比較)は、MS-Excel上で、自作マクロプログラムにより逐次実施した。質量誤差が ± 0.03 内のマススペクトルは合併し、2試料間の各成分のマススペクトルを最小二乗法による一次線形回帰により評価した。得られた決定係数により類似度(質的評価)を、決定係数が大きいもの(おおむね0.98以上)については、一次回帰式の傾きにより量的評価を行った。

④ 物質検索

GCImageの「blob detection」機能により検出された全てのピークについて、一般的な検索条件(Identity-Normal)を用い、NIST 17マススペクトルライブラリ検索を行った。検索後、臭素および塩素化合物は、ライブラリ検索結果の化合物リストの中から、組成式中から「Br」あるいは「Cl」を探すことにより、抜き出した。

4. 結果及び考察

4. 1. サンプリング・調査手法の開発

4. 1. 1. セミアクティブ大気サンプラー(SAAS)の性能確認

製作したSAASの平均流速を繰り返し計測した結果、0.486L/minであった。一方、PDMSを表面にコーティングしたSAAS用の石英捕集管を用いて、国立環境研究所敷地内において2週間の大気捕集を実施した結果、ヘキサクロロベンゼン(HCB)やヘキサクロロブタジエンに関して国内大気中濃度の一般値と比較したところ、PDMS石英捕集管による捕集効率は1/1000~1/100程度の結果を示した。この要因としては、検討に用いた石英捕集管に塗布されたPDMS膜は極めて薄いことに加えて(5回繰り返し塗布)、捕集管表面への直接的な吸着剤コーティングでは、その表面積を完全にコントロールできていないことが再現性の低い結果をもたらしたと考えられた。そのため、今後の検討ではSAAS動作時の捕集能を比較するため、PDMSが均一にコーティング(厚さ1mm)された小型攪拌子を捕集材に用いて検討を実施することにした。

4. 1. 2. 規格化されたPDMS捕集材を用いたSAASの捕集能試験

図2.8において、PDMS10mmはSAASの中に長さ10mmのPDMS小型攪拌子を設置し動作させた場合を、PDMS20mmは同様に長さ20mmのPDMS小型攪拌子を設置し動作させた場合を、ファンOFFはSAASの中に長さ20mmのPDMS小型攪拌子を設置しSAASのファンを動作させなかった場合を、直置きは対照群として長さ20mmのPDMS小型攪拌子を実験室内に2週間放置した場合を示す。なお、ファンOFFおよび直置き試料は静的な流量となるため、PDMS10mmおよび20mmとの比較ではこの期間のSAASの動的な平均通気量である 0.98m^3 を通気量として用いた。この図より、SAASを動作させた場合には、自然換気法となるファン未動作および直置きの場合と比較して捕集材が捕捉する化学物質の量は明確に増加していることがわかった。また、ファン未動作と直置き試料を比較すると、SAAS内部に小型攪拌子を設置した場合には直置き試料よりも測定値が低い傾向を示した。この要因としては、SAAS採取口の取付に伴う拡散速度の低下が要因であると考えられた。また、PDMS(10mm)とPDMS(20mm)とでは、塗布された吸着剤の表面積は計算上2倍程度異なるが、実際に捕集量(0.98m^3)から濃度を算出すると、明確な相関は得られなかった。本試験は屋外から常時吸気される室内(ファン付)にて実施していることから汚染質輸送が分子拡散律速となる可能性は小さいものの、結果的に吸着剤表面の物質伝達率が過度に大きくなったことで、実現象に対応しなくなり、PDMS吸着剤の性能を過大評価している可能性も考えられた。また、ヘキサクロロベンゼン(HCB)に関して国内大気中濃度の一般値(文献:環境省(2020)化学物質と環境(詳細版)、https://www.env.go.jp/chemi/kurohon/2019/sokutei_monita.html)と比較したところ、PDMS石英捕集管による捕集効率は、1/4程度と推定された。そのため、市販のPDMS被膜捕集材であるゲステル社製PDMS攪拌子(20mm長)を用いたところ、吸着容量の大幅な改善が確認された。

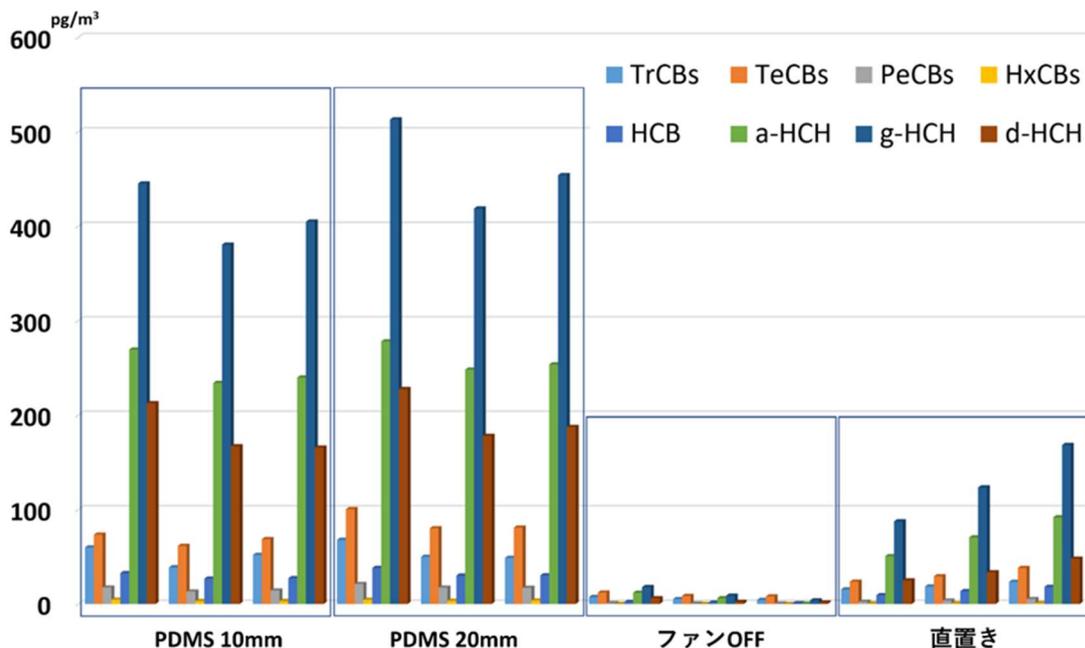


図2.8 PDMS捕集材を用いたセミアクティブサンプラーの捕集能試験

4. 1. 3. 環境大気におけるSAAS-PDMS捕集とハイボリウムサンプリング (HV) の比較

ここでは、SAAS内部を通気した大気中の物質が全て捕集材に捕集されたと仮定して、大気濃度を算出した。図2.9にSAASとHVで得られた大気中有機ハロゲン化合物の推算値、定量値および組成を示す。HV定量値に関しては、これまでに報告されている環境省の実態調査結果と比較してほぼ同程度であり信頼性の高い値と思われた。SAAS-PDMSの推算値合計はHV定量値の64～130%に収束していた。また、サンプリング期間で比較をした場合、4回のうち3回はSAAS-PDMSの推算値合計はHV定量値よりも低い値を示した。この傾向について詳細な理由は不明であるが、この3回の期間の降水量は41～86mmと多くなっており、SAAS-PDMSはHVよりも湿度の影響を受けやすい可能性が考えられた。同一期間内のSAAS-PDMSの推算値を比較すると、大きなばらつきは抑えられていたことから、サンプリングや測定の実験の再現性は一定程度あるものと推察された。一方、組成に関しては、同一期間におけるSAAS-PDMSの結果は非常に類似した結果を示しており、特に4塩素化PCBsは高い組成比を示した。期間を通じてSAAS-PDMSの4塩素化PCBs推算値は、HVの240% (平均値：180～360%) に及んでおり、HV定量値とは差異のある結果であった。また、ペンタクロロベンゼン (PeCB) のSAAS-PDMS推算値はHV定量値の29% (平均値：17～42%) を示し、4塩素化PCBsとは異なる傾向にあった。この要因としては、PDMSに対してHVの捕集材である石英繊維フィルター、ポリウレタンフォームおよび活性炭素繊維フェルトの間では捕集効率に差があること、さらには、SAASとHVでは捕集量に大きな違いがあることなどが挙げられる。ここで示すSAAS-PDMSの推算値はブランクを差し引いた値であるが、特にSAASの場合には捕集量が少ないことから (本検討では約4.5m³)、ブランク管理がより一層重要であると考えられる。そのような背景のある中で、3塩素化PCBs、クロルデン及びノナクロルの捕集法に依らず類似した組成比を示した。この結果は、捕集量が限定されるSAAS-PDMSでも捕集材や器具類の管理に留意すれば、HV定量値に近い結果 (半定量よりも良好な結果) が得られることを示唆している。

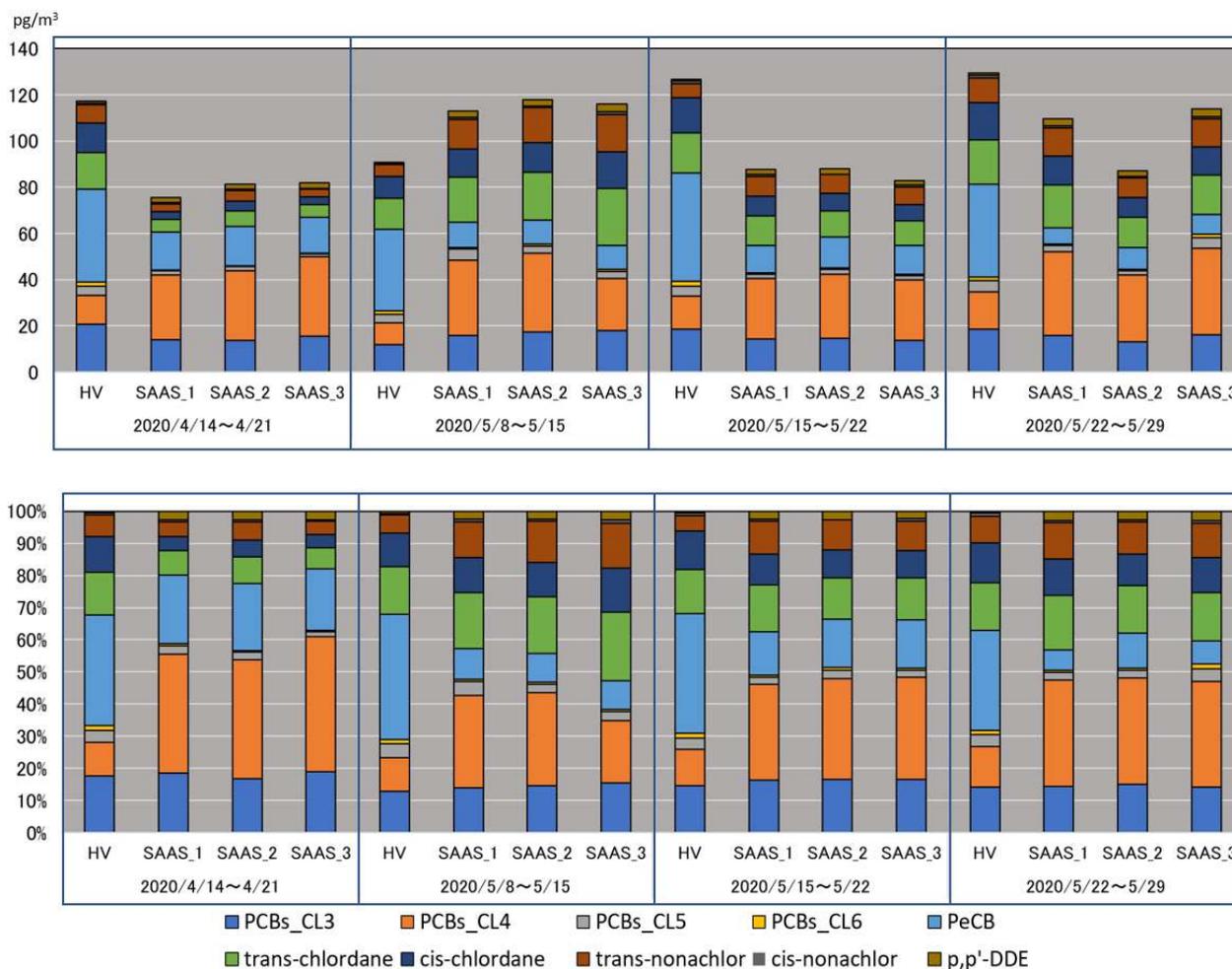


図2.9 各期間における濃度推算値と定量値（上）および組成（下）

図2.10にSAAS-PDMS推算値とHV定量値の相関図を、表2.2に一次回帰式と各化合物の蒸気圧を示す。表2.2において、一次回帰式 x の係数はSAAS-PDMS定量値とHV定量値の関係性を示しており、係数が1よりも大きいほど、SAAS-PDMS定量値がHV定量値よりも高い傾向を示した事を意味する。図中、PeCBはSAAS-PDMSでより低い定量値を示しているが、HV分析時の添加回収率に問題はないことから、おそらくSAAS-PDMSでは蒸気圧の高いPeCBを十分に捕集できていない可能性が示唆される。4塩素化PCBsについては捕集した個別異性体の確認が必要だが、今回の検討からSAAS-PDMSは、ノナクロルからPCBs程度の蒸気圧を有するものへの適用は可能であるものと推察された。しかしながら、気温や湿度は対象とする物質の捕集効率に大きく影響することが予想されることから、環境条件や対象物質に応じた捕集材の選択は重要な課題と言える。

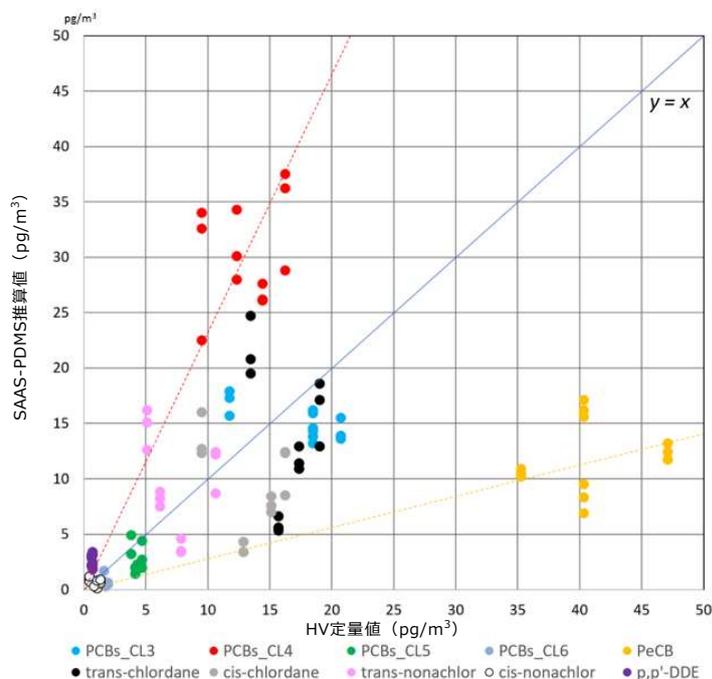


図2.10 SAAS-PDMS推算値とHV定量値の相関図

表2.2 相関図における一回帰式と各物質（群）の蒸気圧

	Linear regression	R-squared	Vapor pressure/Pa (25°C)
PCBs_CL3	$y = 0.87x$	0.93	0.057
PCBs_CL4	$y = 2.18x$	0.93	0.030
PCBs_CL5	$y = 0.64x$	0.92	0.0022
PCBs_CL6	$y = 0.49x$	0.65	***
PeCB	$y = 0.28x$	0.95	2.0
trans-chlordane	$y = 0.85x$	0.75	0.0039
cis-chlordane	$y = 0.67x$	0.72	0.0029
trans-nonachlor	$y = 1.20x$	0.72	0.00039
cis-nonachlor	$y = 0.75x$	0.72	0.00039
p,p'-DDE	$y = 3.98x$	0.93	0.00087

4. 1. 4. SAASの実用試験

図2.11に各地点におけるHV定量値の結果を示す。この図から、各地点で検出されるPOPs類の濃度は非常に良く似ていることがわかる。その一方で、全体の傾向では大阪府の2地点は茨城県の国立環境研究所での定量値よりも濃度が高く、その傾向は冬季よりも夏季で顕著であった。特に3～5塩素化PCB、クロルデン類、ヘキサクロシクロヘキサン（HCH）では冬季と夏季の間での濃度差、さらには大阪府と茨城県の間での濃度差が大きなものとなっていた。一方、ヘキサクロロベンゼン（HCB）は地点間の濃度差が小さい結果となっており、これはHCBの物理化学的性質を考慮した場合、非常にリーズナブルな結果と言える。また、検出されたPOPs類の全体的な濃度幅は、これまでに実施された環境省の化学物質環境実態調査と同程度のものであり、確度の高いデータであると推察された。

図2.12に各地点におけるSAAS-PDMS推算値とHV定量値を比較した結果を示す。この図から、SAAS-PDMS定量値はいずれの地点でもHV定量値より低い濃度を示す傾向にあった。この傾向は4.1.3.での検討結果と同様であり、近傍の発生源や突発的なイベント等の影響を受けない環境下であれば、SAASとHV間の捕集効率の違いや気温・湿度の影響が現れることを示唆していた。この傾向は、ここで取り上げた中揮発性化学物質全般について当てはまっていたが、その中でも特にHCBはその傾向が顕著であり、冬季と夏季のいずれにおいても、SAAS-PDMS推算値とHV定量値には大きな差が生じた。この比較結果から、冬季では低揮発成分、夏季では高揮発成分のPDMSへの吸着（捕集）量の減少が確認された。そこで、両者の差を明確にするため、図2.13にSAAS-PDMS推算値とHV定量値の相関図を示す。この相関図から、冬季においては各物質群内における濃度のバラツキは少なく、蒸気圧の低い物質群はSAAS-PDMS推算値およびHV定量

値とともに低濃度で推移していることがわかった。一方、蒸気圧の比較的高い3~4塩素化PCBでは、SAAS-PDMS推算値はHV定量値とほぼ一致する結果となった。また、HCBについてはHV定量値側に大きく寄っており、SAAS-PDMS推算値はHV定量値の1/5~1/10の範囲にあった。夏季においては冬季と比較して、捕集法にかかわらず全体的な検出濃度の上昇が確認されたが、例えば、冬季ではHV定量値と良好な相関を示した3~4塩素化PCBのSAAS-PDMS推算値は、場合によってはHV定量値の1/10に近い濃度を示すなど、SAAS-PDMSにおける高揮発成分の捕集量減少が確認された。その要因としては、PDMS吸着能の飽和や気温の影響など考えられるが、このあたりの状況は個々の対象物質の物性にも密接に関連している可能性が高い。今回の調査で得られたSAAS-PDMS推算値における階層クラスター分析で得られた樹形図を図2.14に示す。本分類では「2021年夏季・2022年冬季」と「2022年夏季」は大別され、さらにp,p'-DDEの比率によって「RIEAF・Izumi（大阪府）」と「NIES（茨城県）」にグループ化された。このように、大気モニタリングに対するSAASの適用はHV同様に地域特性を確認できることから、面的および空間的な化学物質の濃度把握が求められる際には有効な手段と考えられる。また、これまでの検討結果から、PDMSを捕集材としたSAASによる大気捕集は、ノナクロルからPCBs程度の蒸気圧を有する化合物に対しては、特に有用なものであることがわかった。

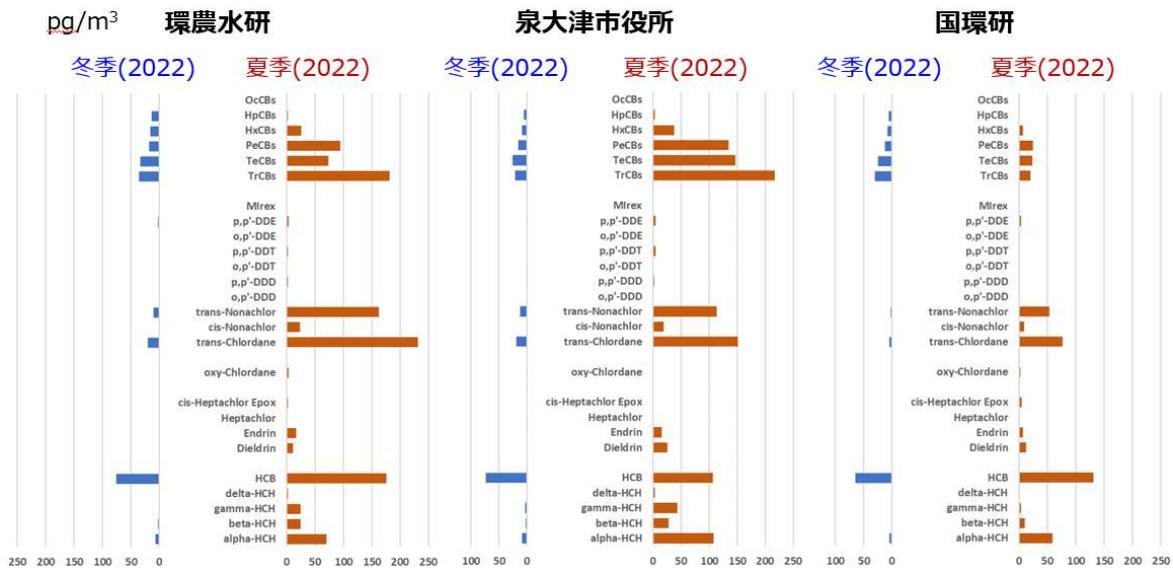


図2.11 各地点におけるHV定量値の比較

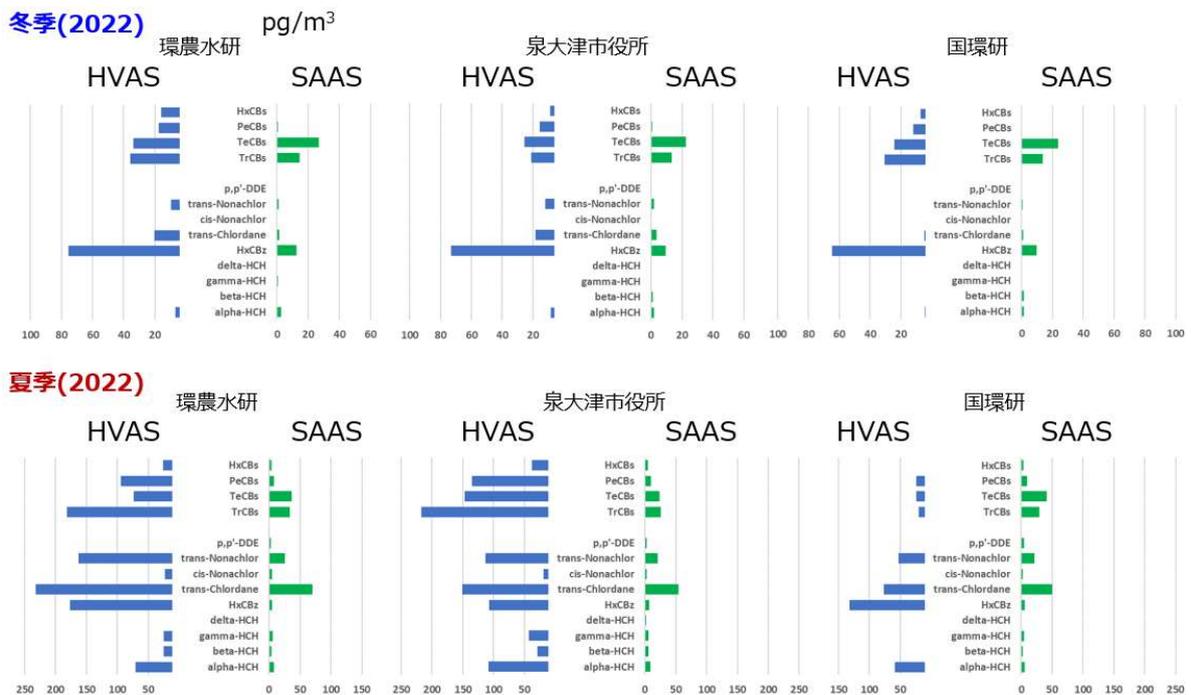


図2.12 SAAS-PDMS推算値とHV定量値の比較

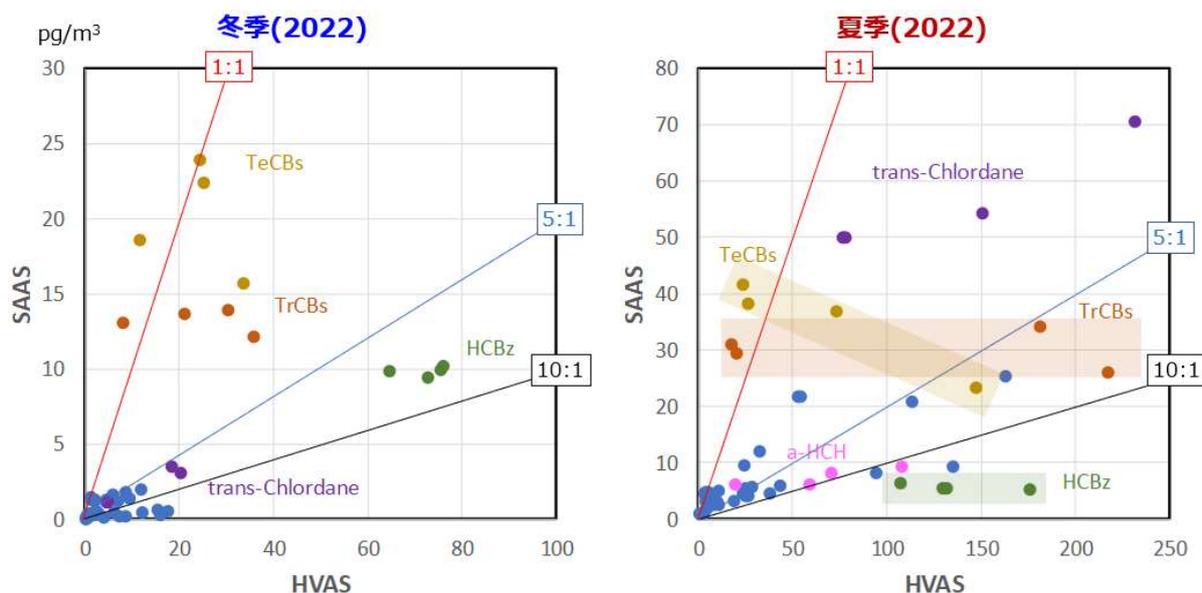


図2.13 SAAS-PMDS推算値とHV定量値の相関図

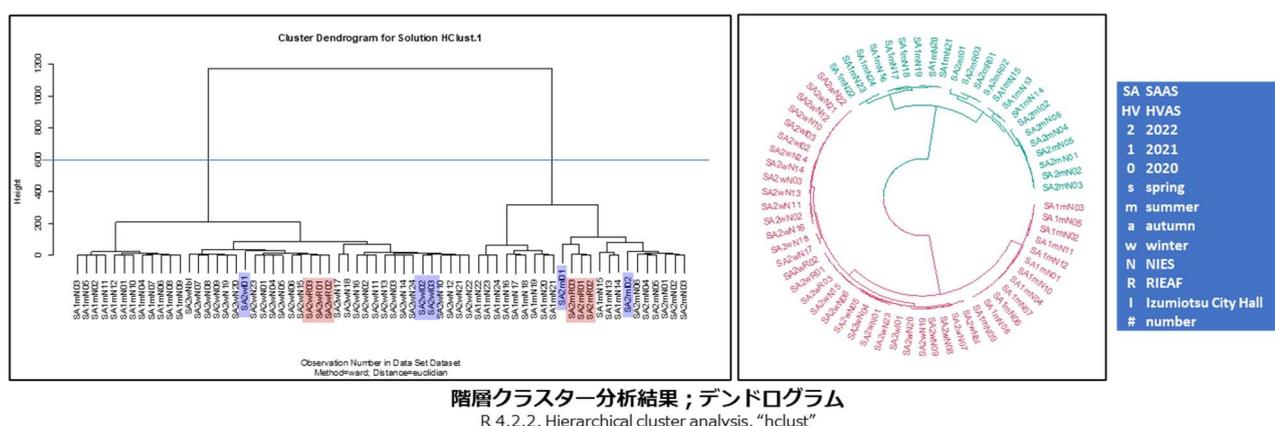


図2.14 SAAS-PMDSで検出されたPOPs濃度に対するクラスター分析結果

4. 2. 網羅分析手法の開発

4. 2. 1. 多次元ガスクロマトグラフィ/質量分析による網羅分析

(1) 測定条件の決定

残留性有機汚染化学物質 (POPs) の標準品の測定により、GC×GC-MSの基本測定条件を設定した。相対保持指標 (RI) による物質同定の補助を可能にするため5%フェニルメチルシリコーン系と50%フェニルメチルシリコーン系GCカラムによる一律昇温を採用した。決定した条件は、表2.1 (第3節) に示した通りである。この手法により、一般大気の場合で2千から4千、一般河川水質の場合で千から2千成分が分離検出でき、通常のGC/MS法より数十倍の分離性能があることが確認され、概ね想定通りとなった。しかしながら、大気試料の場合、常時含まれる炭化水素成分が極めて多種類であるため、GC×GCを使用しても、成分分離は不十分であった。そのため、精密マススペクトルを利用したデータ解析は必要であった。

(2) ブランクレベルの確認

災害・事故発生時に迅速に対応するためには、機材をいつでも使える状態に保つ必要があり、セミアクティブエアサンプラー (SAAS) による大気サンプリングに使用する捕集材についても、そのブランクを日頃から把握しコントロールすることが大切である。そこで、捕集材の一つであるTwister (ガステル社製) を一定期間保管し、ブランクレベルの変化を確認した。

Twisterは、洗浄・エージングを行った後、TD-GC×GC - ToFMSで測定し、保管前のブランクデータを取得した。続いてTwisterを容器 (洗浄済み2 mLガラスバイアル) に入れ、一定期間 (1週間、1か月、半年) 2種類の温度 (冷蔵、室温) で保管した後、同条件で測定し、結果を比較した。装置の日間感度差を補正するため、Twisterにはあらかじめ¹³C-PAHs 50 pgを添加した。なお、¹³C-PAHs 50 pgを添加したTwisterの連続測定時のRSD (n=6) は4~9%であった。

図2.15に保管前後のTwisterの測定例を2D-TICとして示した。半年保管後のTwisterの2D-TIC（図中右）では、一次元GC保持時間の20-45分あたりに帯状の成分の増加が見られた。これは、炭化水素類と判断され、程度に差はあるものの他の保管Twisterでも観測されたことから、長期保管中に大気中の成分の吸着が起きていることが示唆された。保管前後のTwisterブランクレベルを比較した結果、トータルイオン強度では、保管期間や保管温度の違いによる大きな差は見られなかったが、 ^{13}C -Fluorantheneとの相対比では、半年間冷蔵保管したTwisterのみ約3倍となっていた。 ^{13}C -Fluorantheneの添加量に問題があった可能性もあり、原因は定かではない。また、Twisterブランクデータに含まれていた3塩素化ビフェニル(TricBs)のピークエリアは、半年間常温保管したTwisterで約4倍に増加していた。 ^{13}C -Fluorantheneとの比では、全てのTwisterでTricBsの増加が確認され、もっとも高いもので約6倍であった。PCBsのうち低沸点のものは揮発しやすく、一般環境大気からもよく検出されることから、保管中にTricBsの吸着が起きた可能性は否定できない。

その一方で、保管前のTwisterブランク (n=18) のトータルイオン強度は個体差が大きく、最小値と最大値で2.6倍の差があった。そのため、Twisterで捕集された成分についてノンターゲット解析を行う場合には、あらかじめTwisterブランクデータを測定してから保管し、使用することが望ましい。また、ノンターゲット解析を行う際は、保管前のTwisterブランクデータとサンプリング後のデータを比較しながら解析を行う必要がある。

より密閉性の高い保管容器の検討や災害時の備えを想定したより長期間（例えば1年）の保管試験の実施、Twisterエージング条件の再検討や新品Twisterのブランクレベルの確認（再利用Twisterとの差があるか等）が求められる。

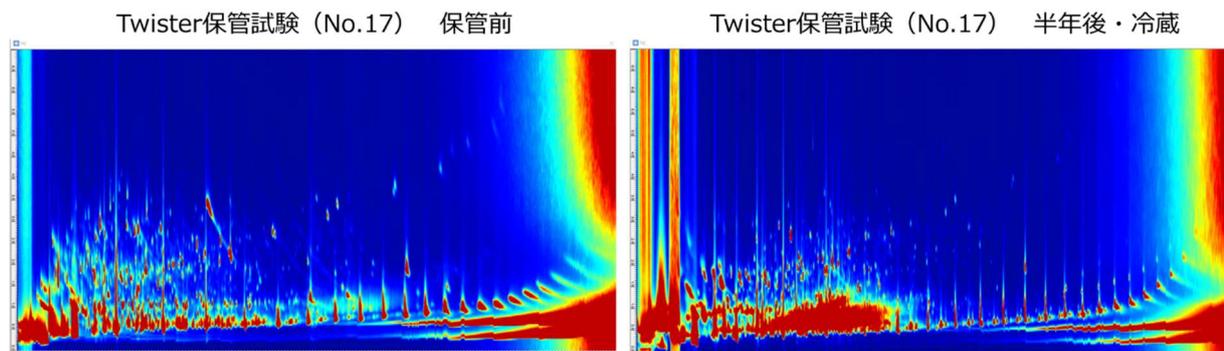


図2.15 保管前後のTwisterのTD-GCxGC-ToFMS測定結果の例（2D-TIC）

4. 2. 2. データ差異解析

(1) 測定の再現性の評価

① ノンターゲットモニタリングデータ（精密質量マススペクトル）における差の検出

環境ノンターゲットモニタリングでは、従来の環境モニタリングのように特定の物質が環境基準を超えているかどうかを監視するのではなく、「異常」、言い換えれば、いつもとは異なる状態を検出することが肝心である。そのためには、日常（平常）の状態を知る必要があると同時に、日常と定義された状態との差を検出できる手法を確立することが重要になる。環境ノンターゲットモニタリングにおける測定値の誤差が小さければ、異常の検出感度と精度が高くなると予想される。

環境ノンターゲットモニタリングでは、GC×GC-ToFMS測定データの時系列的比較を行った。従来の方法では、物質同定できない成分が多数ある（むしろ、同定できない成分がほとんど）うえに、物質の同定までのデータ解析に時間がかかることが問題であったが、新しい方法は、迅速で解析によるデータの取りこぼしや誤同定がない、自動化がし易いといった利点がある。

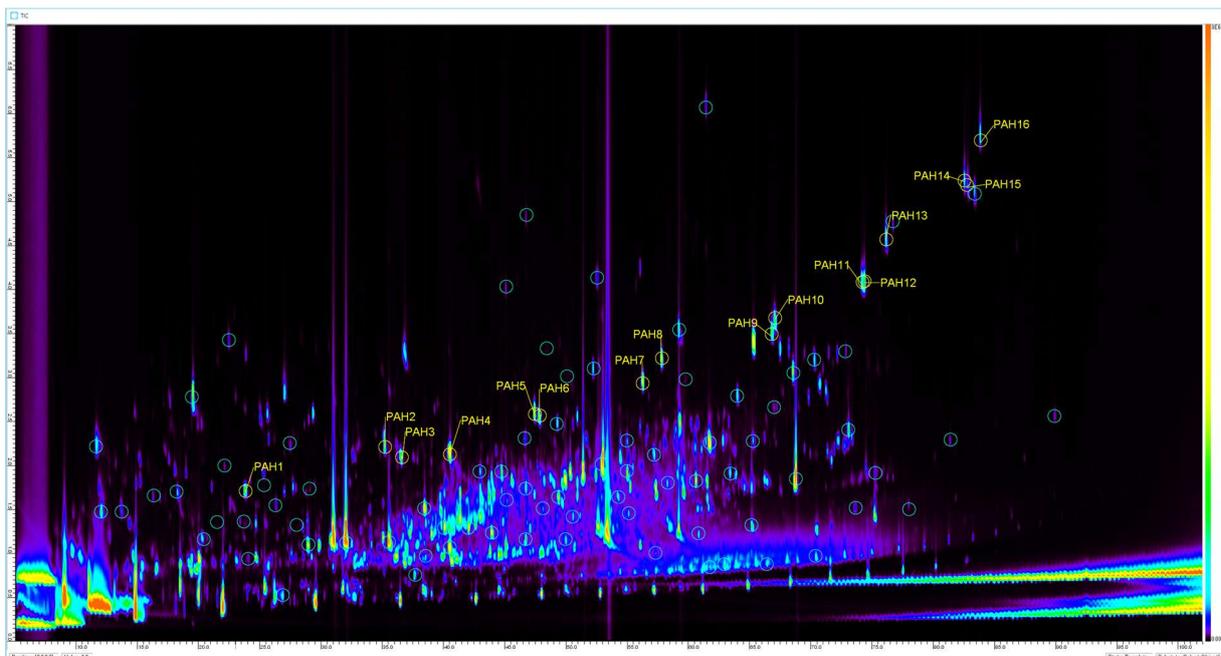


図2.16 TD-GC×GC-ToFMSで測定した河川水試料の2次元トータルイオンクロマトグラムの一例
 緑色の丸印 (○) で示した80個のピークについて、定量的および定性的に再現性を評価した。
 16種類の¹³C標識PAHをPAH+番号で示す。

分析の結果、一例として図2.16に示すように、何れの試料からも2,000を越す成分が検出された。実際の環境モニタリングでは、その全てについて異常検出を行う必要があるが、今回は手法の検証のためにその一部を対象とした。具体的には、その中から2Dクロマトグラム上の全域をカバーし、強度も検出下限付近のものから最大値付近のものも含むように80成分(図2.16中丸印)を選定し、個々に定性・定量再現性と試料間差を評価した。

まず、検出成分のうち、80成分について、分割試料(n=5)の測定再現性を評価した。再現性が高ければ、手法の信頼性が高いといえ、異常の検出を敏感かつ精度よく行える可能性がある。再現性の評価は、先に示した3つの全ての基準を満たす成分についてのみ、試料間の比較(群間差、異常検出)に用いることを考えた。

今回、6日分の水質の網羅分析結果について、各基準の通過率を80成分×分割数5の総数400に対する比として求めたところ、基準1、2、3の通過率は、それぞれ、51-75%、39-53%、22-43%となった。この時、基準2と3には、外れ値を除外した残りの数が4以上で、かつ当該基準を満たせば救済するという措置を採ったところ、基準1、2の通過率は66-89%、56-78%となった。3つの基準をすべて満たす成分は、全体(80成分)の2-4割ほどしかなかったことになり、使用した網羅分析法の再現性には改善の余地が認められた。ここで、基準1はGC×GCの再現性、基準2はMS(特にイオン化と感度)の再現性、基準3は分割試料の均質性・抽出操作と加熱脱着の再現性およびMSの再現性を表していると考えられ、基準3の通過率が低いことは手法全体の再現性に問題があることを意味しており、MS感度の補正のほかに抽出法と加熱脱着法の補正が必要であることを示している。その場合、抽出操作前の内標準物質の添加とその測定値による感度補正が一法として考えられるものの、内標準として何を何種類選ぶかということがノンターゲット分析では問題になるものと考えられる。

表2.3 再現性評のための80成分のTIC強度の相対標準偏差 (RSD%)

ID Name	Peak value RSD(%)						ID Name	Peak value RSD(%)					
	201508 05BZ	201508 12BZ	201508 19BZ	201508 25BZ	201508 28BZ	201508 30BZ		201508 05BZ	201508 12BZ	201508 19BZ	201508 25BZ	201508 28BZ	201508 30BZ
chk01	26	24	23	49	18	9	chk41	36	53	40	31	23	33
chk02	19	19	12	44	8	13	chk42	28	56	30	26	114	71
chk03	18	6	4	11	11	18	chk43	6	9	79		4	
chk04	16	21	18	44	16	14	chk44	8	9	16	18	18	27
chk05	14	10	12	11	16	15	chk45	7	9	15	17	13	19
chk06	40	11	9	80	7	5	chk46	6	6	14	7	13	14
chk07	11	8	15	12	12		chk47	43				28	
chk08		17		42	19	35	chk48	8			14	13	23
chk09	6		79		135		chk49	6	7	3	79	11	13
chk10	23	27	106	127	104	68	chk50	13	23	12	20	11	
chk11		35	57	57		69	chk51	38	29		51	22	
chk12	7	19	30	25	4	18	chk52	40	79	46	42	93	77
chk13	75	73	51	112	77	37	chk53	5	6	4		9	12
chk14	6	15	14		14	24	chk54	11	10	19	20	19	25
chk15		18	58	50	55	9	chk55	15	13	11	12	9	19
chk16		13			25	15	chk56	15	14	22	21	21	33
chk17			39	38	29		chk57	8	9	20	62	16	21
chk18							chk58		18		7	6	7
chk19	40	27	28	30	11	24	chk59	5					
chk20		147	11	72	27	43	chk60	7	29	17	16	39	24
chk21		21	14	10	7	11	chk61				42		
chk22	45	26	36				chk62	29	15	51			
chk23	8	6	7		8		chk63				39		30
chk24			13	37		29	chk64		7	16			
chk25	10	10	18	8	9	11	chk65	29	23	19	38	39	54
chk26	5	5	13	11			chk66	20	22	18	39	18	67
chk27	11	10	12			17	chk67	77			67		160
chk28	8	10	8	73	12		chk68	30	41	2	21	43	
chk29	7	9	35		36	15	chk69			51	13	19	32
chk30	28	65	47	26	137	48	chk70		10			18	27
chk31		2		12		11	chk71	17		12	10	16	20
chk32	21	3	13	49	11	38	chk72	43	22	6	22	11	30
chk33	11			43	66	34	chk73	6	6	22	16	17	
chk34	28	55	90		126	61	chk74	0	7		11	16	23
chk35	8		18	10	14	15	chk75		10			32	30
chk36		61	56	29	121	31	chk76	7	6	7	7	8	12
chk37	7	5	14	9	11	14	chk77						
chk38	18	13	11	14	26	19	chk78	43		18	10	9	31
chk39	9		12	8	45	24	chk79	23				8	
chk40	16	6	27	25	22	36	chk80		19				

表2.4 80成分のうち基準2まで通過したデータにおけるクラスカルウォリス検定の結果 (p値)

Peak ID	p-value						
chk01	0.00644	chk21	0.00178	chk41	0.00118	chk61	0.00817
chk02	0.00251	chk22	0.148	chk42	0.0426	chk62	0.0176
chk03	0.00205	chk23	0.00390	chk43	0.00972	chk63	0.754
chk04	0.0456	chk24	0.237	chk44	0.00116	chk64	0.00226
chk05	0.130	chk25	0.00451	chk45	0.00065	chk65	0.00233
chk06	0.0523	chk26	0.00282	chk46	0.00009	chk66	0.0531
chk07	0.452	chk27	0.00088	chk47	0.0144	chk67	0.00018
chk08	0.973	chk28	0.00624	chk48	0.00067	chk68	0.00313
chk09	0.521	chk29	0.00061	chk49	0.00118	chk69	0.00586
chk10	0.0851	chk30	0.0113	chk50	0.00105	chk70	0.00697
chk11	0.146	chk31	0.00462	chk51	0.0322	chk71	0.117
chk12	0.0179	chk32	0.00321	chk52	0.0139	chk72	0.00440
chk13	0.0592	chk33	0.101	chk53	0.00035	chk73	0.00120
chk14	0.118	chk34	0.0469	chk54	0.00057	chk74	0.00091
chk15	0.0817	chk35	0.0714	chk55	0.00173	chk75	0.236
chk16	0.0087	chk36	0.0413	chk56	0.00112	chk76	0.00005
chk17	0.184	chk37	0.0426	chk57	0.00064	chk77	0.0495
chk18		chk38	0.00142	chk58	0.0919	chk78	0.00356
chk19	0.00540	chk39	0.0117	chk59	0.0182	chk79	0.00329
chk20	0.149	chk40	0.0881	chk60	0.0145	chk80	0.0144

表2.3に80成分のTIC強度 (n=5) のRSD一覧を示す。当初設定したRSD15%以下という基準3を通過可能な

ものは、154/480 と3割ほどであったが、基準をRSD50%以下とすると、323/480 で約6割が通過可能となった。また、RSDが大きい（再現性が悪い）成分には偏りがみられた。例えば、成分ID：chk09、10、13、34、67などは、6日分のどの試料でもRSDが大きく、極めて検出が不安定な成分であることが分かった。また、総じて言えることは、個々の成分の測定値はばらつきが大きく、従前として行われているn=1分析値による環境評価や環境モニタリングの危うさを改めて認識することになった。

（2）差の検出可能性の評価

次に、基準2まで通過した成分（救済措置を含む通過率は56-78%）について、試料間差が検出可能かを評価した。試料間差の評価には、ノンパラメトリックな群間差検定法の一つであるクラスカルウォリス検定を用いた。当初の計画では、基準3まで通過したデータについて試料間差の検定を実施する予定であったが、前述のとおり基準3までの通過率が低かったため、基準2の通過データに対象を拡大した。その別の理由は、試料間差の検出感度と堅牢性の確認をすることであった。

表2.4は、80成分のうち基準2まで通過したデータにおけるクラスカルウォリス検定の結果をp値で示した一覧である。p値が小さいほど有意な試料間差が認められることを表していると言える。結果より、p値が0.01未満のものは40成分あり、検定した成分の半数超となった。p値0.05未満とした場合、53/75 と約7割となった。このことから、測定値のばらつきが比較的大きい（RSD>15%）データであっても、多くの成分で試料間差が検出可能であることが確認できた。

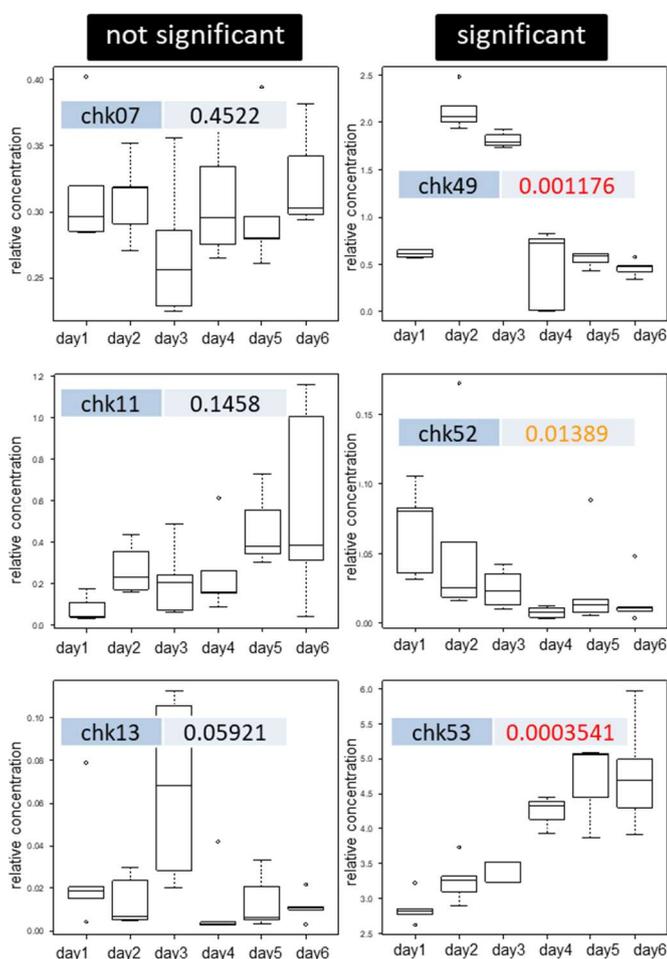


図2.17 成分濃度の時系列変化の例（ボックスチャート）
有意水準：Kruskal-Wallis検定で求めた $p < 0.05$

各成分のトータルイオン信号強度を四分位グラフとして、試料毎に時系列に並べたものの例を図2.17に示す。図2.17（左）に示したchk07、11、13は総じて強度のばらつきが大きく、有意な試料間差は見られなかった。一方、（右）に示すchk49、52、53には有意差が認められた。また、検定で有意差がみられた成分の中には、経時的に増加・減少傾向がみられるものがあつた。これらの成分について、NIST14およびNIST17によるライブラリ検索を行ったところ一致係数（MF）700以上で、増加傾向にあつたものの例として、butylhydroxytoluene (CAS No. 128-37-0)、2,2,4-trimethyl-1,3-pentanediol diisobutyrate

(CAS No. 6846-50-0)、methyl 2-benzoylbenzoate (CAS No. 606-28-0) などが、減少傾向にあったものとして2,3,4,5,6-Pentachloroaniline (CAS No. 527-20-8)、p-isopropenylphenol (CAS No. 4286-23-1)、benzo[k]fluoranthene (CAS No. 207-08-9) などが挙げられた。

以上のように、測定値のばらつきが比較的大きくても試料間差が検出可能であることが確認できたことから、比較的堅牢な異常（非定常）検出法開発への道筋を示すことができたと考えられる。試料採油から測定までの変動要因の除去と安定化、多変量比較の簡易化と低リソース化、全行程の自動化により、ノンターゲット環境モニタリングの実装が可能になるものと見込まれる。

4. 3. ケーススタディ（未知物質の検索・同定）

4. 3. 1. 奄美大島におけるタンカー流出オイルの漂着沿岸環境の大気調査

2018年1月6日、中国・上海沖合の東シナ海で、タンカー（イランの海運会社所有のSANCHI（サンチ）」、パナマ船籍）が、中国の貨物船（香港籍）と衝突、14日に奄美大島の西約315キロメートル付近で沈没し、タンカー積載物（コンデンセート[超軽質原油]）約13.6万トン、残燃料油約2,120トン（A重油約120トン、C重油約2,000トン）が流出した事故で、2月2日に奄美大島北岸の各地に流出物由来と思われるオイルボールが多数漂着した。

2月8日と9日に漂着海岸の4地点において、大気調査を実施した。その結果、対照地とした奄美市街地（奄美、阿木名）と流出油漂着地点（今里2、朝仁）の大気から検出される成分に目立った差は認められなかった。また、多環芳香族（PAH）のスクリーニング結果（表2.5）にも大きな差はなかった。

表2.5 奄美大島における油漂着影響調査のための大気中PAH類測定結果（単位：ng/m³）

地点	今里2	朝仁	奄美	阿木名
試料ID	TX1	TX3	TX5	TX7
試料量 大気 (L)	29.26	326.18	286.99	28.59
採取日時	2018/2/8 17:53-18:53	2018/2/8 20:58- 2018/2/9 8:02	2018/2/8 21:32- 2018/2/9 7:34	2018/2/9 11:14-12:14
Acenaphthene	<1	0.4	0.5	<1
Acenaphthylene	5	<0.1	<0.1	<1
Anthracene	<2	<0.2	<0.2	<2
Benz[a]anthracene	<5	<0.5	<0.5	<5
Benzo[a]pyrene	<10	<1	<1	<10
Benzo[b+k]fluoranthene ※1	<20	<2	<2	<20
Benzo[ghi]perylene	<10	<1	1	<10
Chrysene	<10	<1	<1	<10
Dibenz[a,h]anthracene	<1	<0.1	<0.1	<1
Fluoranthene	<2	<0.2	0.4	<2
Fluorene	<5	<0.5	<0.5	<5
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	<10	<1	<1	<10
Naphthalene	<5	<0.5	<0.5	<5
Phenanthrene	<20	<2	<2	<20
Pyrene	<2	<0.2	3	<2

ただし、調査地点や時期、期間の設定が適切であったかは課題である。また、事故前の環境調査情報がないため、調査地点における事故の影響を厳密に評価することは難しく、対照地の選定も課題であると考えられた。災害・事故調査にあたっては、このような課題（準備時間がない、発災前の情報がない）を念頭に置く必要がある。

4. 3. 2. 茨城県常総市におけるスクラップ集積場火災による周辺大気調査

（1）ミニポンプ大気捕集による火災現場における大気中化学物質の捕集・検出の概要

今回の調査では、火災現場への立ち入り制限のため、サンプリング時間が一地点あたり1時間と限られた。そのため、捕集できた大気量は最大で24L（0.4L/min時）であった。今回、捕集量の直線性と吸着容量（破瓜）の確認のため、0.1 L/minと0.4 L/minの流速でのサンプリングを同時に行った。

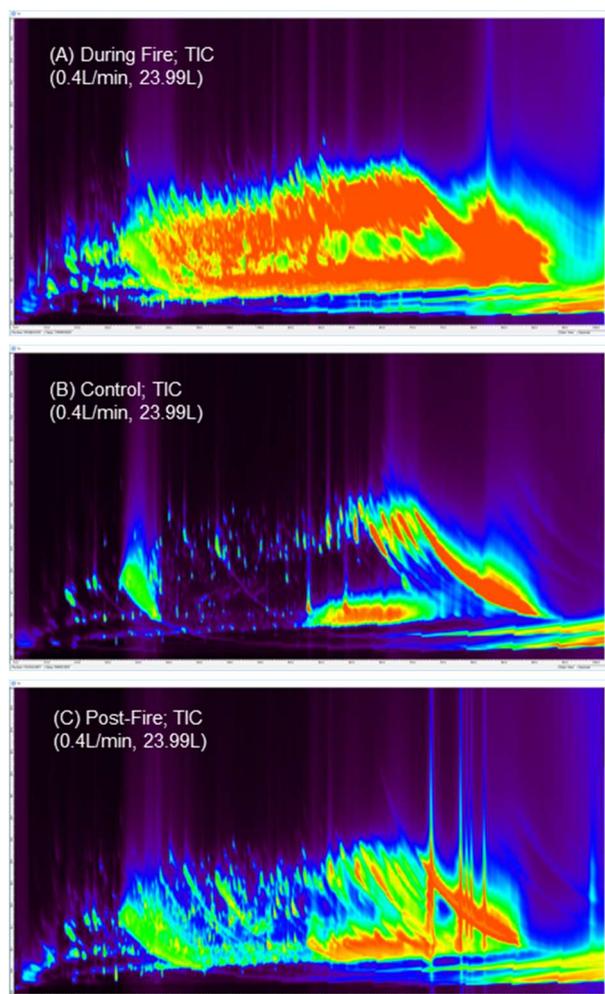


図2.18 火災発生時、鎮火後および対照地から採取した大気試料のGC×GC/ToFMS測定二次元トータルイオンクロマトグラム (2D-TIC)

図2.18の各大気試料の網羅分析結果（二次元トータルイオンクロマトグラム：2D-TIC、横軸が一次元GCの保持時間（分）、縦軸が二次元GCの保持時間（秒）、色は赤>黄>緑>青>黒の順でシグナル強度を表している。）に示すように、火災時の大気（図2.18（A））からは対照地（B）と比べ、多種多量な成分が検出され（図中赤色の部分が多い）、鎮火後（C）には対照地と近くなっていた。このことから、火災により大量の化学物質が大気中に放出されたことが分かる。また、1時間、24Lの通気量で極めて多数の化学物質がTenax-TA管に捕集され、TD-GC×GC-ToFMSで充分検出可能であることが分かった。0.1L/minの流速捕集でも、多数の化学物質が検出できており、火災などの高濃度に化学物質が発生する現場では、さらに短時間のサンプリングでもノンターゲット分析可能な捕集量を得られると推測される。火災現場の大気では、恐らく10L前後の大気捕集量で、相当数の成分が捕集・検出できる可能性がある。しかしながら、対照地では検出成分が少なく、平常時のモニタリングでは、対象物質によっては捕集量が不足すると考えられた。また、この火災では、鎮火7日後の大気試料から対象地試料よりも多くの成分が検出されており、火災により発生した化学物質が現場周辺に残留し、それらが空气中に再揮発している可能性が示唆された。

（2）火災現場周辺大気中のハロゲン化合物の検索

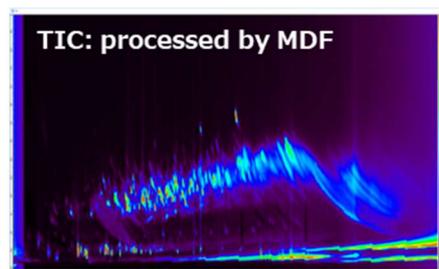
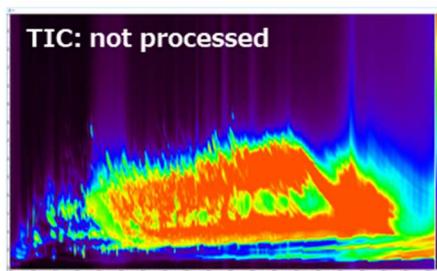
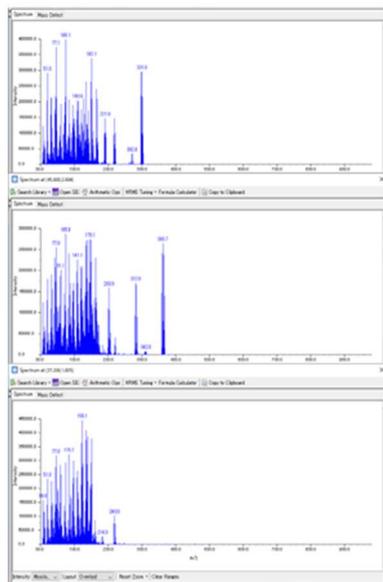
今回の火災現場には大量（推定1万トン）の廃家電があり、そのほとんどが焼失した。廃家電には臭素系難燃剤を含むプラスチックや塩化ビニルなどが使用されていたものと推測され、この火災によって大量の臭素・塩素化合物が大気中に放出されたことが予想される。そこで、GC×GC-ToFMS測定データから臭素・塩素化合物の検索を行い、それらの有無の確認を行った。

火災時大気試料（0.4L/min保有時）からGC×GC/MSの解析ソフトウェアであるGCImageにより検出分離されたピーク数は、5,571であったが、このうち、マススペクトルライブラリNIST17による検索で、有機ハロゲン系の化学物質と見做されたものは209ピーク（成分）であった。このうち、ライブラリとの合致指数であるmatch factor（MF）が750以上のものは176成分、850以上のものは0、reverse match factor

(RMF)が850以上のものは321成分、probabilityが90%以上のものは27成分であった。しかしながら、調査した試料に含まれる大気由来および燃焼で発生した多量かつ多種類の炭化水素類は、GC×GCを使用してさえも、他の成分との、あるいは炭化水素個々の分離が不十分であった。それ故、それらのマススペクトルが複雑に混合し、正確な物質検索を妨げていることが予想された。従って、まずは、その大量に含まれる炭化水素由来のマススペクトルのデータからの除去を試みた。

自作ソフトウェアMDFにより、窒素原子以上の質量欠損（公称整数質量と精密質量の差）を利用したマススペクトル抽出を行い、抽出（精製）されたマススペクトルデータについて、改めてライブラリ検索を行った。図2.19にMDF処理前後の火災時大気試料（0.4L/min保有時）の2D-TICと幾つかのマススペクトル例を示した。MD=0.5と設定したことにより、質量欠損が0～-0.5の範囲のマススペクトルのみが抽出されている。図から分かるようにMDF処理により2D-TIC中央下よりに見られた炭化水素（主に炭素と水素のみで構成されるため、整数質量と精密質量の差がプラスになる）由来の団塊の大部分が除かれ、2D-TIC中央に分離した多数のピークが確認可能になった。また、個々のマススペクトル例では、MDF処理によりm/z 200以下の炭化水素由来のものと推測されるマススペクトルが除去されていることが視認できる。この結果、MDF処理後に検出分離されたピーク数は1,690であり、NISTライブラリ検索の結果、塩素・臭素化合物のピーク数は386となった。MDF未処理データにおける物質数と比較し、約1.8倍である。また、物質数としての内訳は含フッ素：10、含塩素：75、含臭素：160、含塩素臭素：58、含フッ素塩素：5であった。検索された有機ハロゲン化合物を物質群ごとに整理したところ、検索された主な物質には、塩素化（あるいは塩素化臭素化）ダイオキシン類：40種、塩素化（あるいは臭素化）フェノールとその派生物：20種、同ベンゼンとその派生物：42種、PCB：12種などの芳香族ハロゲン化合物が多く見られた。しかしながら、ほぼ全ての成分がライブラリ検索の一致度（Match Factor）が750を下回った。MDFにより、質量欠損が設定範囲（0～-0.5）にないマススペクトルが除去されることから、MFが低くなったとも考えられる。（RMFは、850以上のものが134、probability 90%以上が19であった。）検出された物質のほとんどはNIST17ライブラリに未収録の物質（言い換えれば、未知物質）である可能性がある。

Mass spectra: not processed



Mass spectra: processed by MDF

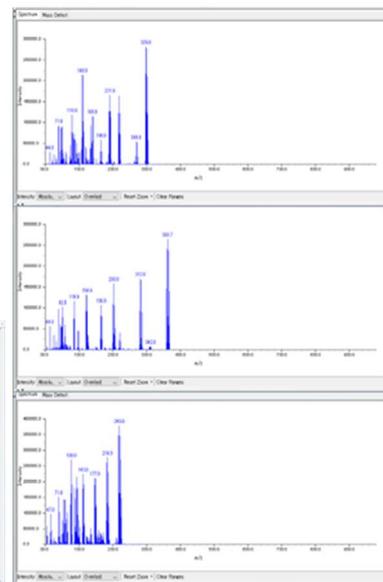


図2.19 GC×GC/ToFMSで測定した火災時の大気試料の質量欠陥フィルタリング（MDF）処理前後のTICとマススペクトルの例

（3）発生した有機ハロゲン化合物量の推算

何が検出されるか事前にわからないというノンターゲット分析の性格上、標準品を用いた正確な定量はできない。しかし、定量的考察のため、次のような方法で検出された有機ハロゲン化合物量の概算を行った。①試料と同じ測定条件でPCDD/Fs17種、PCBs27種、PBDEs28種、POPs27種を含む混合標準液をGC×GC-ToFMSで測定する。②その測定データを試料と同じようにMDF処理する。③個々の標準品成分の装置導入絶対量（200pg、400pg）をTIC強度合計値で除した係数を標準品全成分について個別に算出する。④③で得られた係数の平均値を算出する。⑤試料のMDF処理データにおいて、塩素あるいは臭素同位体クラスターマススペクトルが確認されたピークについてTIC強度に④の平均係数を乗じ、ピーク毎の検出絶

対量を算出した。この方法により、煤煙を含む捕集大気（23.99L）中の有機ハロゲン化合物濃度は、およそ1,600ng/m³と計算された（表2.6）。また、表2.7に示した推定値と計算式から、火災により発生した煙の総量は1.08×10⁹m³、発生した有機ハロゲン化合物の総量は1.73kgと推算された。もちろん、この推計には仮定が多く含まれているため、この値をそのまま採用することはできないが、これくらいの量の有機ハロゲン化合物が発生した可能性も否定できない。即ち、ひとたび、このような大量の廃家電やプラスチックを含む廃棄物の火災が発生すれば、それに伴い大量の有機ハロゲン化合物が発生する可能性があるということと言える。臭素系難燃剤（を含むプラスチック）の燃焼により、臭素化難燃剤そのものの拡散の他²⁾、臭素化ダイオキシン類が生成することが、実験やe-waste火災現場の実測^{3, 4)}によっても確認されている。この他にも様々な有機ハロゲン化合物を含む有害化学物質の発生が示唆されているが、この研究では、網羅的（捕集）分析手法を用いながら、火災から発生する大量の有機ハロゲン化合物について質的・量的な考察に踏み込むことができた。事故・災害により発生する有害化学物質の包括的把握に向け、このようなアプローチに改良を加えながら研究を推進していく予定である。

このケースでは、燃焼過程で発生する化学成分の多さとその同定の妥当さが課題となった。場合によっては対象物質を絞った捕集法や前処理法の選択が必要であると考えられた。また、測定機器の測定精度（精密質量の測定誤差など）や精密質量スペクトルライブラリの整備は、物質の同定精度を大きく左右するため重要である。また、スクリーニングのためにはハイスループットな物質検索法の準備も必要である。

表2.6 スクラップ集積場火災大気からGCxGC/ToFMSにより検出されたピーク割合と推定濃度

分類 ^{*1}	割合	推定濃度 (ng/m ³) ^{*2}
Halogenated ^{*3} phenol	13.2%	211
Halogenated benzene	9.6%	154
Halogenated dibenzo-p-dioxin	9.6%	153
Halogenated dibenzofuran	8.4%	134
Halogenated biphenyl	7.4%	119
Halogenated toluene	6.4%	102
Halogenated diphenyl ether	3.9%	62
Halogenated benzene,derivative	3.9%	62
Legacy POPs	3.0%	48
Halogenated benzene,amine	2.8%	44
Halogenated mercury	2.0%	32
Halogenated dioxane,derivative	1.0%	16
Halogenated thiophene,derivative	0.7%	11
Halogenated pyridine	0.6%	9.8
Halogenated xylene	0.6%	9.2
Halogenated furan	0.2%	2.5
Halogenated PAH	0.04%	0.6
Halogenated phenol,derivative	0.02%	0.3
Degradient	10%	165
Unclassified	16%	264
total	100%	1,601

*1 同じ基本骨格構造をもつ物質群

*2 本文「発生した有機ハロゲン化合物量の推算」中に記載の方法で計算

*3 フッ素、塩素、臭素をもつ化合物（NISTライブラリ検索結果）

表2.7 スクラップ保管施設の火災によるハロゲン化合物排出量の推定値

項目	記号	設定値・計算値	計算式・注
サンプリング量 (L)	a	23.99	
サンプリング時間 (min)	b	60	
検出ピーク (成分) 数	c	1,690	質量欠損 0.5 - 0.0 の範囲の精密質量スペクトルによるトータルイオンクロマトグラム (TIC) から自動検出
成分の平均量 (pg)	d	100	TIC上での標準品 (ES-5521, CIL)との相対強度より算出
有機ハロゲン化合物数	e	386	NIST17ライブラリサーチ結果 (マッチ率は必ずしも高くない)
有機ハロゲン化合物の割合		0.23	検出した全成分に対する有機ハロゲンのTIC強度比 (e/c)
試料中の有機ハロゲン化合物総量 (pg)	f	38,600	(d*e)
大気中の有機ハロゲン濃度 (pg/L, ng/m ³)	g	1,600	(f/a)
火災現場からの距離 (m)		100	凡その距離
サンプリング地点の煙の断面積 (m ²)	h	2,500	目視により 50m×50m と推定
サンプリング地点での煙の移動速度 (m/min)	i	60	目視により推定
サンプリング期間中の煙の発生量 (m ³)	j	9,000,000	(h*i*b)
大気試料中の煙の割合	k	1	大気中の煙の割合。最大見積り 1/1 とした
サンプリング期間における煙中有機ハロゲン化合物量 (ng)	l	1.44E+14	(g*j/k)
火災継続時間 (h)	m	120	5 日間と見積もった
火災による煙発生量 (m ³)		1080000000	(i*m)
火災で発生した有機ハロゲン化合物量 (kg)		1.73	(l*m/10 ¹²) ※非常に粗い推測値であることに注意

5. 研究目標の達成状況

サブテーマ2では、①災害発生後の残留物質の中長期的な監視や対策範囲の特定を効率的・網羅的・低コストで面的な展開も可能とするサンプリング・調査手法を開発する。②火災や化学反応による二次生成物による汚染が新たに発生する可能性も十分に考えられ、このような不純物や反応生成物など事故等から直接に想定される以外の物質も捕捉可能な網羅分析法とデータ解析手法を開発する。ことを目標としていた。

①については、外部電源の供給が不要で設置場所を選ばないセミアクティブサンプラー等による大気サンプリング法として、乾電池のみで1~2週駆動するサンプラーを開発し、大気中の残留性半揮発化学物質の同季節監視における有効性を確認した。②については、GC×GC-ToFMSなどの多次元分離技術の応用により、分析過程の物質損失を極力削減しつつ、物質の特定も可能な網羅的な分離分析法を開発し、現場試料測定のための最適化を行った。幾つかのケーススタディを通して、開発手法が包括的かつ物質検索可能であることを確認した。

これらのことから、研究目標を十分に達成できたと考えられる。

6. 引用文献

- 1) Kanda, Y. : Investigation of the freely available easy-to-use software 'EZR' for medical statistics. *Bone Marrow Transplant.* **48**, 452-458 (2013) .
<https://doi.org/10.1038/bmt.2012.244>
- 2) Alexandrino, G.L., Tomasi, G., Kienhuis, P.G.M., Augusto, F., Christensen, J.H. : Forensic Investigations of Diesel Oil Spills in the Environment Using Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography-High Resolution Mass Spectrometry and Chemometrics: New Perspectives in the Absence of Recalcitrant Biomarkers. *Environmental Science & Technology* **53**, 550-559 (2019) . <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05238>
- 3) Weber, R. : Relevance of BFRs and thermal conditions on the formation pathways of brominated and brominated-chlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans. *Environment International* **29**, 699-710 (2003) . [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00118-1](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00118-1)
- 4) Zhang, M., Buekens, A., Li, X. : Brominated flame retardants and the formation of dioxins and furans in fires and combustion. *Journal of Hazardous Materials* **304**, 26-39 (2016) .
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.10.014>

II-3 残留化学物質の除去対策技術の開発

(研究代表者)

国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 准教授 井上 大介

(研究分担者)

国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 教授 池 道彦

国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 助教 黒田 真史 (平成30～令和元年度)

(研究協力者)

国立大学法人大阪大学 大学院工学研究科 特任研究員 Ghaju Shrestha Rajani (令和2～4年度)

[要旨]

災害・事故後に発生する残留化学物質を除去し、環境リスクを低減するための既存の物理的、化学的、生物学的技術を網羅的に検索し、適用可能な物質、汚染現場の状況、コスト、エネルギー消費量、副次的リスク等の多元的観点から体系的に評価・整理し、汚染現場が有する制約条件を考慮して有望技術を抽出するデータベースを構築した。また、低コスト・低環境負荷で多様な化学物質の除去に対応可能な技術として、多機能型人工湿地 (VCW) システムに着目し、各種化学物質の除去に対する有効性を実験的に検証し、その適用方法を提示した。

PRPR第一種指定化学物質462種を対象物質として選定し、各種情報を収集・整理した上で、物性に基づき分類した5つのグループ (①無機物、②低揮発・親水性有機物、③低揮発・親油性有機物、④揮発・親水性有機物、⑤揮発・親油性有機物) に分類した。また、環境浄化及び排水処理に用いられている43種の化学物質除去・無害化処理技術を対象技術として、実行可能性、副次的リスク、コスト、緊急対応への適用性、費用対効果に係る19項目に対して評価し、除去対象物質と汚染現場に特有の制約条件を入力することにより、適用可能な候補技術を抽出するデータベースを構築した。

他方、グループ①～④に属する化学物質の除去に対するVCWシステムの有効性を様々な条件下で実験的に検討し、VCWシステムが物性の異なる多様な有害化学物質の除去に対して有効であり、非常時の経済的・エネルギー的・資源的に不利な状況下での化学物質リスク低減に有望な浄化技術の一つであることを明らかにした。

1. 研究開発目的

災害・事故に伴って環境中に漏出する化学物質の一部は環境中に残留し、人々や野生生物にとってリスク要因となる可能性があることから、適切に除去するか無害化することにより、リスクを低減することが必要である。一方、これまでに物理的、化学的、生物学的な様々な化学物質除去対策技術 (環境浄化技術、排水処理技術) が開発されているが、災害・事故後に想定される各種の制約条件下において実際に適用可能な技術について体系的な知見は得られていない。そこで本サブテーマでは、災害・事故発生後の残留化学物質除去対策に係る情報・技術基盤を構築することを目的とした。

2. 研究目標

残留化学物質を物性等に基づいて分類するとともに、既存の物理的・化学的・生物学的な化学物質除去技術を網羅的に検索して多元的観点から体系的に整理し、残留化学物質の分類ごとに有望技術を選定したデータベースを構築する。

また、他のテーマ・サブテーマの成果を踏まえ、上記分類群からそれぞれ優先的に取り組む化学物質 (数物質) を選定し、VCWシステムを用いた処理方法を開発する。

3. 研究開発内容

3.1. 残留化学物質の分類

PRTR第一種指定化学物質462種を対象物質とし、物性 (融点、沸点、比重、蒸気圧、 $\text{Log}K_{ow}$ 、水溶性、解離定数等)、分解性 (好氣的生分解性、嫌氣的生分解性、非生物的分解性、加水分解性)、環境中における分配 (水/大気/土壌/底質)、有害性 (急性毒性、慢性毒性、発がん性等)、存在量 (全国における排出量・移動量、大阪府・愛知県・埼玉県・神奈川県における取扱量 (2016年度データ)) の各項目について文献情報の収集を行った。さらに、3.2の既存除去対策技術の体系化、ならびに3.3のVCWシステムの適用性の検討を実施するため、整理した情報のうち物性情報に基づいて、462種の対象物質を5つのグループに分類し、各グループから代表物質を選出した。

3.2. 既存除去対策技術の体系化

文献等の情報を基に、環境浄化及び排水処理に適用されている様々な物理的、化学的、及び生物学的技術について調査した。抽出された各技術に対して、3.1において分類した各グループの化学物質の除去に対する適用可能性、災害・事故後に想定される各種制約条件下における実行可能性、副次的リスク、コスト、緊急対応への適用性、費用対効果を評価するための評価指標を設定し、多元的観点からの評価を行った。さらに、汚染現場において実際に直面する制約条件に応じて有効な除去技術を選択することを支援する簡便なデータベースを構築し、本プロジェクトにおいて構築された「災害・事故時の環境リスク管理に関する情報基盤」にそのデータベースを収載することを試みた。

3.3. 多機能型人工湿地（VCW）システムの開発

災害・事故後に残留する化学物質の除去（汚染環境の浄化）のための技術には、表3.1に示す要件が求められると考えられる。そこで、これらの要件を満足し、多様な物性の残留化学物質による汚染に対応し得る除去対策技術として、本研究ではVCWシステムに着目した。VCWシステムは、図3.1の左側に示しているように、カラム容器に基材（砂利など）を入れて水生植物を植え付けたものが基本構成であり、残留化学物質を含む水をこのカラムの上部から流して、残留化学物質の除去を行う。カラム内では、基材、植物、ならびに基材表面及び植物根表面に付着する微生物による様々な化学物質除去機能が総合的に作用することにより、多種多様な化学物質を除去・無害化することが可能である。また、VCWシステムは、①大がかりなインフラ整備を必要としない、②太陽光のみをエネルギー源として運転できる、③浄化現場に存在する容器、基材、植物を活用することもできる、といった特徴を有し、経済性と環境適合性に非常に優れており、災害・事故等において想定される経済的・エネルギー的・資源的（物的・人的資源）に不利な状況下においても適用可能であり、かつ、一定の除去効果が得られるものと期待される。

VCWシステムの確立に向け、まず、人工湿地システムに関する既往研究を調査し、VCWシステムにおいて使用可能な植物種及び基材に関する情報を整理した。次に、有望な植物及び基材を用いたVCWシステムを構築し、3.1において分類したグループ①～④に含まれる様々な化学物質を対象とした処理実験を実施し、VCWシステムによる多様な物性の化学物質に対する除去効果を検証した。本研究のVCWシステムによる処理実験は、大阪大学吹田キャンパス内に設置された温室内（6-18時に一定光量照射、夏季は天井部を開け、冬季はヒーターを用いて加温）、あるいは実験室内（6-18時に一定光量照射、28℃）において、表3.2に整理している通り、処理対象物質及び検討内容に応じて、VCWシステムの構成（基材、植物、段数）、通水方法（連続回分／連続通水）、水理学的滞留時間（HRT）などの処理条件を変更して実施した。図3.2には段数及び通水方法の異なるVCWシステムの模式図、図3.3には温室内における処理実験の様子を示している。各処理実験では、流入水及び処理水中の対象物質を分析し、除去効率を求めるとともに、一般的な水質項目（水温、pH、ORP、溶存酸素濃度、COD濃度、窒素・リン濃度）を測定した。

表3.1 非常時の浄化技術に求められる様々な要件¹⁾

- 設置・運転に必ずしも高度な専門知識を必要としない。
- 復興・復旧の妨げになる多大な資源（人員・資金・エネルギー・物資）投入を必要とせず、現場で調達可能な物資でも設置でき、最小限のエネルギー投入で運転できることが望ましい。
- 自治体等で常備しておくこともできる。
- 汚染の緊急度に応じた異なる対策方法に柔軟に対応できる。
- 物性の異なる多種多様な化学物質に対応できる。

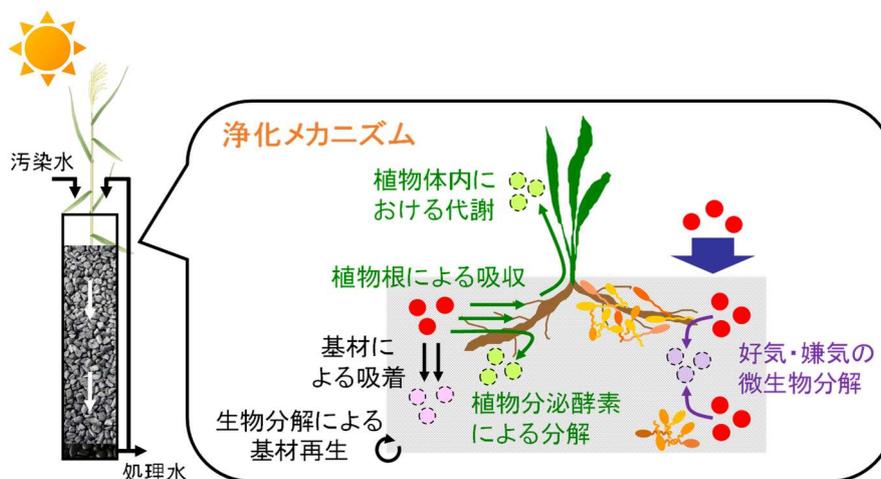


図3.1 VCWシステムの基本構成と浄化メカニズムの概念図

表3.2 VCWシステムを用いた処理実験条件

実験	対象物質 (グループ)	処理条件
1	1,4-ジオキサン (④)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基材：砂利 ・ 植物：イグサ／ガマ／ヨシ ・ VCWシステム：1段式 ・ 1,4-ジオキサン濃度：10 mg/L ・ 連続回分処理 (21日まで水循環あり→その後、循環なし) ・ 実験期間：58日間
2	Cr(VI)、Cu、Mn、Ni (①)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基材：赤玉土／砂利／石灰石／活性炭／木質ペレット ・ 植物：なし ・ VCWシステム：1段式 ・ 各金属濃度：6 mg/L ・ 水循環ありの連続回分処理 (2日ごとに流入水を入替) ・ 実験期間：10日間
3	Cr(VI)、Mn、Ni (①)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基材：赤玉土／活性炭 ・ 植物：ヨシ ・ VCWシステム：1段式 ・ 各金属濃度：60 mg/L ・ 水循環ありの連続回分処理 (2日ごとに流入水を入替) ・ 実験期間：24日間
4	Se(VI) (①)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基材：赤玉土 ・ 植物：ヨシ ・ VCWシステム：1段式 ・ Se(VI)濃度：60 mg/L ・ 乳酸ナトリウム (20 mM)：あり／なし ・ 水循環ありの連続回分処理 (1-2日ごとに流入水を入替) ・ 実験期間：28日間
5	ビスフェノールA (BPA; ③)、及び構造類似物質 (ビスフェノールF (BPF)、ビスフェノールP (BPP)、ビスフェノールS (BPS)、4,4'-チオビフェニール (TDP))	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基材：なし ・ 植物：ヨシ (無菌) ・ 微生物群：池水より回収した微生物群 ・ 各化学物質濃度：20 mg/L ・ 水循環なしの回分処理 (実験室内で実施) ・ 実験期間：～42日間
6	N,N-ジメチルアセトアミド (②)、N,N-ジメチルホルムアミド (④)、N-メチル-2-ピロリドン	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基材：砂利 ・ 植物：ヨシ ・ VCWシステム：1段式 ・ 各化学物質濃度：100 mg/L ・ 連続通水処理 (滞留時間4日) / 水循環ありの連続回分処理 (4日ごとに流入水を入替) ・ 実験期間：32日間
7	BPA (③)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基材：砂利／レンガ片／活性炭 ・ 植物：ヨシ ・ VCWシステム：1段式／2段式 ・ ビスフェノールA濃度：5 mg/L ・ 酢酸塩、プロピオン酸塩、フミン酸塩共存 (tCOD：200 mg/L) ・ 水循環ありの連続回分処理 (7日ごとに流入水を入替) ・ 実験期間：35日間
8	フェノール (③)、BPA (③)、Cr(VI) (①)、Mn (①)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基材：砂利／活性炭 ・ 植物：ヨシ ・ VCWシステム：2段式 ・ 各化学物質濃度：30 mg/L ・ 酢酸塩、プロピオン酸塩、フミン酸塩共存 (tCOD：510 mg/L) ・ 水循環ありの連続回分処理 (1-5日ごとに流入水を入替；5日から1日に順次短縮) ・ 実験期間：96日間

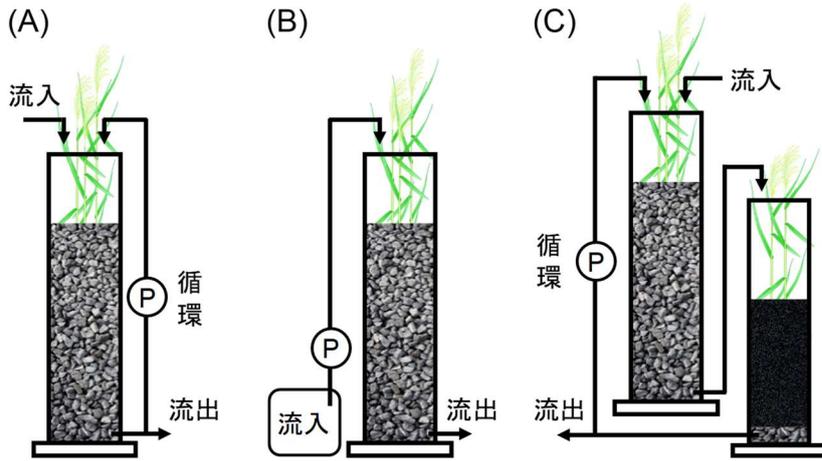


図3.2 処理実験に用いたVCWシステムの模式図. (A)1段式-連続回分処理、(B)1段式-連続通水処理、(C)2段式-連続回分処理



図3.3 VCWシステムを用いた処理実験の様子

4. 結果及び考察

4.1. 残留化学物質の分類

本研究で対象としたPRTR第一種指定化学物質462種について、物性（融点、沸点、比重、蒸気圧、 $\log K_{ow}$ 、水溶性、解離定数等）、分解性（好氣的生分解性、嫌氣的生分解性、非生物的分解性、加水分解性）、環境中における分配（水/大気/土壌/底質）、有害性（急性毒性、慢性毒性、発がん性等）、存在量（移動量・取扱量）²⁾の収集を行った。図3.4はその一部を抜粋したものである。次に、収集した情報に基づき、462物質の分類を行った。様々な分類方法があり得るが、本研究では、分類した各グループに対して有効な除去対策技術を紐付けすることを想定し、物性に基づいて分類を行った。すなわち、まず、無機物と有機物に分け、有機物は、さらに、揮発性/低揮発性（沸点 $\leq 150^{\circ}\text{C}$ 及び環境省が示している揮発性有機化合物100種に該当するものを揮発性、その他を低揮発性と定義）と親水/親油性（ $\log K_{ow} < 3.0$ に該当する化学物質を親水性、 $\log K_{ow} \geq 3.0$ の化学物質を親油性と定義）によって細分化することにより、グループ①：無機物（34種）、グループ②：低揮発・親水性有機物（143種）、グループ③：低揮発・親油性有機物（151種）、グループ④：揮発・親水性有機物（102種）、グループ⑤：揮発・親油性有機物（32種）の5つのグループに分類することができた（図3.5）。

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
政令番号	CAS	物質名*1	無機・有機	揮発性	分子式	分子量	融点(°C)	沸点(°C)	常温での状態	比重	密度 (g/cm³)	蒸気圧(mmHg, 25 °C)	LogKow	加水分解性	解離定数(pKa)	水溶性							
1	-	亜鉛の水溶性化合物	無機物																				
2	279-06-1	アクリルアミド	有機物	揮発	C3H5NO	71.1	84.5°C	87.0~125(固体)		1.122~1.127													
3	3140-88-5	アクリル酸エチル	有機物	揮発	C5H8O2	100.12	-71°C	98.9°C(760液体)			0.9234(20°C)	38.6 mmHg (=5.14×11.32, 1.18半減期: 2.8年(pH=7, 解離なし)	1.50×10 ³ mg/1,000g										
4	4-(79-10-7)	アクリル酸 (アクリル酸及びその水溶性塩)	有機物	揮発	C3H4O2	72.06	12.5°C	141.4°C(141液体)			1.0511(20°C)	4.0mmHg(25°C), 3.0x35, 0.46安定 (pH = 3, 7, 11)	4.25 (25°C), 自由に溶和, 1.00E+										
5	2439-35-2	アクリル酸2-(ジメチルアミノ)エチル	有機物	高揮発	C7H13NO2	143.18	<-75°C(凝)	75°C(2,926液体)			0.938(20°C)	0.51mmHg (20°C)	0.43	アクリル酸及びN,N=ジメチルエタ, 自由に溶和									
6	618-61-1	アクリル酸2-ヒドロキシエチル	有機物	揮発	C5H8O3	116.12	-60.2°C	191°C(760液体)			1.011(23°C)	0.0524mmHg(25°C)	0.21	加水分解しない(25°C), 解離なし									
7	1741-32-2	アクリル酸n-ブチル (アクリル酸 n-ブチル)	有機物	揮発	C7H12O2	128.17	-63.6°C	-146.6°C(760液体)			0.8898(20°C)	5.48 mmHg (=731Pa) 2.36, 2.3828日後の分解率は2%未満 (pH 7)	1.4×10 ³ mg/L (20°C)										
8	896-33-3	アクリル酸メチル	有機物	高揮発	C4H6O2	86.09	<-75°C	-146.6°C(760液体)			0.9535(20°C)	82.5 mmHg (=11×100.80, 0.74半減期: 2.8年(25°C), 解離なし)	4.94×10 ⁴ mg/1000g										
9	9107-13-1	アクリルニトリル	有機物	高揮発	C3H3.5N	53.06	-82°C	77.3°C	液体		0.8004 (25 °C)	100mmHg (23°C), 0.25	アクリルアミドを経て	解離なし									
10	10107-02-8	アクロレイン	有機物	高揮発	C3H4O	56.06	-87.7°C	52.6°C	液体		0.840(20°C), 0.0210mmHg(20°C), 27.0-0.01, 0.0なし	213g/L(25°C), 211.0											
11	1126628-22-8	アジ化ナトリウム	無機物	塩子状	N3Na	65.0099	275°C	300°C (揮発)			1.846 (20°C)	1Pa (20°C)	0.3	文獻なし	解離なし	41.7g/100ml (17°C)							
12	1275-07-0	アセトアルデヒド	有機物	高揮発	C2H4O	44.1	-123.5°C	21°C	液体		0.788 (20°C)	740mmHg(20°C), 99.043	文獻なし	解離なし	自由に溶和, 1.00E+								
13	1375-05-8	アセトニトリル	有機物	高揮発	C2H3N	41.05	-43.8°C	-81.6°C	液体			0.7857	88.8mmHg(25°C), 74.0-0.34	アセトアミドを経て前	4.30	溶和, 1.00E+06 mg/L							
14	1475-86-5	2-ヒドロキシ-2-メチルプロパニトリル (アセチルアミン)	有機物	揮発	C4H7NO	85.11	-19°C	171°C	液体		0.93	0.341mmHg (25°C)	-0.03			1×10 ³ mg/L (実測値)							
15	15-63-32-9	アセチルアミン	有機物	揮発	C2H5NO	59.07	17.1°C	77.3°C	液体		1.222(20°C)	2.50×10 ³ mmHg(25°C) 3.96, 3.92なし		解離なし	3.80 mg/1000g (25°C)								
16	16-78-67-1	2,2-アゾビスイソブチロニトリル	有機物		C8H12N4	164.21	105°C	101分解(107°C)	液体		約 1.1	6.1×10 ³ mmHg(25°C)	1.10	半減期: 304日 (pH 7, 25°C)	2.350mg/L (25°C)								
17	17-90-04-0	o-アニシジン	有機物	揮発	C7H9NO	123.17	5°C	225°C	液体		1.098(15/15°C)	0.08(25°C)	1.18	pKa=4.52(25/14g/L (25°C)									
18	18-62-53-3	アニリン	有機物	揮発	C6H7N	93.13	-6.2°C	184°C	液体		1.022(15/15°C)	40 Pa(0.3 mmHg) (20 °C)		9.3(20°C)	34g/L (20°C)								
19	19-82-45-1	1-アミノ-9,10-アントラキノン	有機物	揮発	C14H9NO2	223.23	253.5°C	> 300°C	固体			1.2×10 ⁴ Pa (100°C)	3.74		3×10 ⁴ mg/L (25°C)								
20	20-141-43-5	2-アミノエタノール	有機物	揮発	C2H7NO	61.1	110.5°C	10171°C(760液体)			1.0180(20/4°C)	1.0180(20°C)	0.404mmHg(25°C), 0-1.31(19°C), -1.31, -1.91	9.50 (25°C)	自由に溶和, 1.00E+								
21	21-1698-60-8	5-アミノ-4-クロロ-2-フェニルビダジン-3(1H)	有機物		C10H8ClN3	221.65	205°C	配位なし	固体		1.54 (20°C)	4.50x10 ² mmHg(20°C)	1.19 (pH 7)			50~500mg/L (20°C)							
22	22-120068-37-5	5-アミノ-1-[2,6-ジクロロ-4-(トリフルオロメチル)フェニル]-1H-1,2,4-トリアジン	有機物		C12H4Cl2F3N3	437.15	202.7-203.1	配位なし	固体		1.477~1.626(20.2.86-0.99mmHg (20°C)					2mg/L							
23	23-123-30-8	p-アミノフェノール	有機物	揮発	C6H7NO	109.13	186°C	181.284°C (760液体)			1.290 (α form), 0.075mmHg(20°C), 4.004 (pH=なし)			pKa=5.48 (1.55×10 ³ mg/1,000 g/L)									
24	24-5911-27-5	m-アミノフェノール	有機物	揮発	C6H7NO	109.13	122.5°C	116.4°C(11m固体)			1.195	9.55×10 ³ mmHg (20.021 (pH=なし)		pKa=4.37 (2.56×10 ³ mg/1,000 g/L)									
25	25-21087-64-9-4	アミノ-6-tert-ブチル-3-メチルテオ-1,2,4-トリアジン	有機物	揮発	C8H14N4O	214.3	126.2°C	240°C以上(液体)			1.31(20°C/4°Cwater)	0.058mPa (20°C), +1.6(pH5.6, 20°C)											
26	26-107-11-9	アリルアミン (3-アミノ-1-プロペン)	有機物	高揮発	C3H7N	57.1	-88.2°C	55-58°C	液体		0.76 (20/20°C)	242 mmHg (25°C)	0.03		1000g/L (25°C)								
27	27-41394-05-2-4	アミノ-3-メチル-6-フェニル-1,2,4-トリアジン	有機物		C10H10N4C	202.21	169°C	配位なし	固体		1.3529 g/cm3	0.0000086Pa (20°C)	0.83		1.7 g/L (20°C)								
28	28-107-18-6	アリルアルコール	有機物	高揮発	C3H6O	58.08	-129°C	-97.0°C, 96°C	液体		0.8540(20°C)	26.1mmHg(25°C)	0.17	なし	15.50 (25°C)	1.00E+06 mg/L (20°C)							
29	29-106-92-3	1-アリルオキシ-2,3-エポキシプロパン	有機物	揮発	C6H10O2	114.14	-100°C	154°C	液体		0.9698 (20°C,4°C)	4.7 mmHg(25°C)	0.34		14g/100mL								
30	30-	置換アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩	有機物																				
31	31-	アンチモン及びその化合物	無機物																				
32	32-120-12-7	アントラセン	有機物	揮発	C14H10	178.23	215.76°C	339.9°C(760固体)			1.28(25°C)	2.67×10 ⁴ mmHg (25/4.45±0.05なし)		解離なし	0.0431 mg/1000g (24°C)								
33	33-1332-21-4	石炭	無機物	不明				配位なし						不溶									
34	34-4098-71-9	3-イソシアナトメチル-3,5,5-トリメチルシロキ	有機物	揮発	C12H18N2C	222.28	-50°C	約310(分解)	液体		1.062(20°C), 1.14, 76×10 ³ mmHg(20/2.41-4.75			水中での半減期は約1時間	約15mg/L(23°C), 急激								
35	35-78-84-2	イソブチルアルコール	有機物	高揮発	C4H8O	72.11	-65.9°C	64.5°C	液体		1.73×10 ³ mmHg(25°C)	0.74			8.9×10 ³ mg/L (25°C)								
36	36-78-79-5	イソブタン	有機物	高揮発	C5H8	68.1	-145.98°C	34.067°C	液体		0.681 (20°C)	493 mmHg(20 °C), 7(2.3)			300 mg/L (20 °C)								
37	37-80-05-7	ビスフェノールA (4,4'-イソプロピリデンジフェノール)	有機物	揮発	C15H16O2	228.29	153°C	159/220°C(4mm固体)			1.195(25/25°C)	1.195(25/25°C)			解離なし	120mg/L (25°C)							
38	38-4162-45-2	2,2'-イソプロピリデンビス[(2,6-ジプロモ-4	有機物		C19H20Br4I	631.98	107°C	407-582°C	固体			9.68×10 ³ mmHg(推)	6.78		1.59×10 ⁴ mg/L (推定)								

図3.4 PRTR第一種指定化学物質に関する各種情報の整理 (一部抜粋)

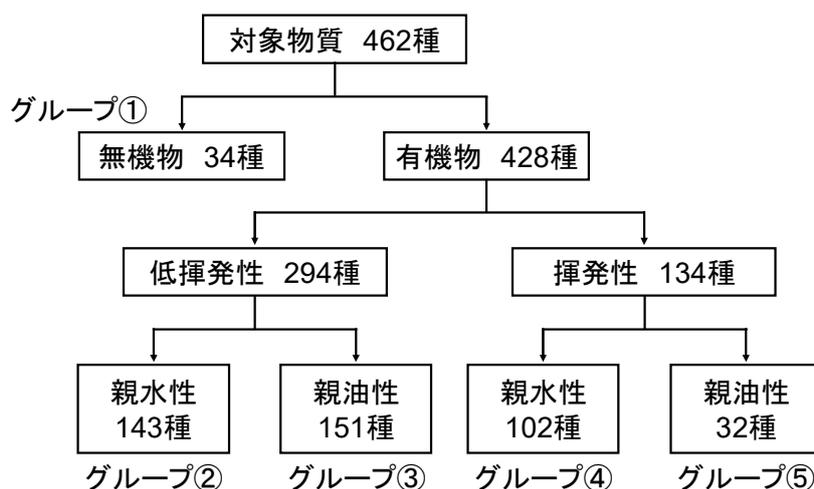


図3.5 物性に基づくPRTR第一種指定化学物質462種の分類結果

4.2. 既存除去対策技術の体系化

4.2.1. 除去対策技術の選定及び多面的評価

環境浄化及び排水処理に用いられている化学物質除去・無害化処理技術の中から、データベース構築に含める技術として、43種の技術を選定した(表3.3)。次に、実行可能性、副次的リスク、コスト、緊急対応への適用性、費用対効果の評価するための19の評価指標(表3.4)を設定し、各技術のスコアリングを行った。なお、評価指標のうち、中分類「対象物質は技術的に処理可能か?」に関しては、同じグループに属する化学物質であっても各々に異なっており、対象とした全462物質に対してスコアリングすることは困難であることから、各グループから代表物質(合計29種;表3.5)を選出し、それらについて多面的評価を行い、各技術に固有のスコアを設定した。また、代表物質以外に関しては、各グループの代表物質におけるスコアの平均値を当てはめ、各技術の多面的評価を行った。

一方、災害・事故後の汚染現場では制約条件が各々に異なっているため、例えば技術的に有効であっても現場の制約条件下では適用できない、あるいは適用が困難な場合が想定される。そこで、データベースでは、汚染現場における制約条件を入力し、技術固有のスコアと現場特有の制約条件を掛け合わせることで、汚染現場に適用可能な技術の候補を抽出することとした。すなわち、使用者は、除去対象となる化学物質を選択するとともに、表3.6に示す18の評価項目に対して1(最低)～3(最大)のスコアを入力するという仕様とした。

データベースはMicrosoft Excelファイルで作成した。図3.6に構築したデータベースにおけるヒアリングシートを示している。使用者は、ピンク色セル(除去対象物質、18の評価項目;選択式、必須)及び薄黄色セル(その他の情報;自由記述)に情報を入力する。ここでは、直鎖アルキルベンゼンスルホン酸及びその塩を除去対象とし、各評価項目を入力した例を示している。入力が完了すると、技術固有スコアと現場特有条件を掛け合わせたスコアリングが自動で行われ、別シートにおいて5つの候補技術

表3.3 データベースに含めた除去対策技術

掘削埋戻し法	金属鉄還元法	水酸化物沈殿法	ストリッピング法
不溶化処理	酸化分解法	硫化物法	触媒分解法
酸化還元	酸分解燃焼法	亜硫酸還元法	不連続点塩素処理法
溶融固化	湿式加熱分解法	鉄(II)塩還元法	活性汚泥法
土壌洗浄	煮詰法(煮詰高温燃焼法)	有機水銀排水の処理法	生物還元法
吸引	水酸化物法	吸着法	生物処理法
アルカリ塩素法	酸化沈殿法	活性炭吸着法	バイオレメディエーション
イオン交換法	置換法	凝集濾過法	ファイトレメディエーション
逆浸透膜法	電解還元法	凝集沈殿法	膜活性汚泥処理法
オゾン酸化法	電解酸化法	濾過法	揮散法
共沈法	フッ化カルシウム法	紺青法(難溶性錯体化合物沈殿法)	

が、各評価項目のスコアとともに、抽出される（図3.7）。スコアリングの制約等のため、出力されるスコア自体は絶対的な意味を持つものではない点には留意が必要であるが、例えば同等のスコアを示す技術において、どのような評価項目で差が生じているのか等を確認することができるようになっている。

最終的に構築したデータベース（Microsoft Excelファイル）は、本プロジェクトの「災害・事故時の環境リスク管理に関する情報基盤」に収載した。また、同情報基盤ページにおいては、現場特有条件を入力せず、除去対象物質のみを選択することにより、適用可能な技術を簡易抽出することもできるようにした。

表3.4 各技術の多面的評価に用いる項目とスコアリング

評価項目			スコア			
大分類	中分類	小分類	3	2	1	0
1. 実行可能性	対象物質は技術的に処理可能か？	処理可能物質	適している	処理可能	不可能ではない	不可能
	必要面積は確保できるか？	必要面積	広い	中規模	小規模	
	搬入出可能か？	必要車両サイズ	中型トラック	大型トラック	超大型車両	
		必要台数	ほぼ搬送の必要なし	適宜搬送必要	多量の日常搬送必要	
	資材は確保できるか？	水利用	水利用特になし	水利用量小	水利用量大	
		電気利用	発電機でも対応可	系統電力使用中	系統電量使用量大	
		通信利用	通信不要		通信が必須	
		燃料利用	必要燃料大	必要燃料中	燃料不要	
		特殊な消耗品利用	消耗品ほとんど必要なし	一般消耗品が必要	特殊消耗品が必要	
		必要有資格者の希少性	資格者必要なし	一般資格者必要	希少資格者必要	
	人員は確保できるか？	装置設置・運転作業員	少人数で対応可能	ある程度の人数必要	多人数必要	
		宿泊場所必要性	少人数で対応可能	ある程度の人数必要	多人数必要	
2. 費用		騒音/振動/臭気	騒音/振動/臭気 なし	騒音/振動/臭気 中	騒音/振動/臭気 大	
		周辺環境への影響は問題ないか？	地盤沈下リスク	リスクなし	リスク中	リスク大
3. 効果	生態系への影響	影響小	影響中	影響大		
	イニシャルコストは高いか？	ランニングコスト	低	中	高	
	ランニングコストは高いか？	ランニングコスト	低	中	高	
緊急に対応できるか？	処理に必要な期間	1~2ヶ月	半年程度	1年超		
	被害削減額が大きいか？	費用対効果	効果大	効果中	効果小	

表3.5 各グループの代表物質

グループ	物性	代表物質	
		管理番号	物質名
①	無機物	305	鉛化合物
		87	クロム及び3価クロム化合物
		309	ニッケル化合物
		412	マンガン及びその化合物
②	低揮発性－親水性	270	テレフタル酸
		76	ε-カプロラクタム
		414	無水マレイン酸
		413	無水フタル酸
③	低揮発性－親油性	296	1,2,4-トリメチルベンゼン
		34	3-イソシアナトメチル-3,5,5-トリメチルシクロヘキシル=イソシアネート
		447	メチレンビス(4,1-シクロヘキシレン)=ジイソシアネート
		448	メチレンビス(4,1-フェニレン)=ジイソシアネート
		15	アセナフテン
④	揮発性－親水性	37	ビスフェノールA
		240	スチレン
		300	トルエン
		400	ベンゼン
		9	アクリロニトリル
		127	クロロホルム
		411	ホルムアルデヒド
		56	エチレンオキシド
⑤	揮発性－親油性	94	クロロエチレン
		297	1,3,5-トリメチルベンゼン
		53	エチルベンゼン
		80	キシレン
		181	ジクロロベンゼン
		252	フェンチオン
		251	フェニトロチオン
83	クメン		

表3.6 汚染現場に特有の制約条件の入力項目

大分類	評価項目		スコア		
	中分類	小分類	3	2	1
1. 実行可能性	必要面積は確保できるか？	利用可能土地面積	余裕あり	制限あり	設置場所なし
		搬入出可能か？	通行可能車両サイズ	超大型車両	大型トラック
	資材は確保できるか？	通行可能台数	制限なし	制限あり	日常通行は困難
		水道・工水復旧状況	余裕あり	制限あり	確保困難（給水車）
		電気復旧状況	余裕あり	制限あり	確保困難（発電機）
		通信復旧状況	通信可能	通信不可	通信不可
		燃料入手状況	必要燃料大	必要燃料中	燃料不要
		サプライチェーン	特殊消耗品含め確保可能	一般薬品確保可能	確保困難
	人員は確保できるか？	資格者確保	希少資格も含め確保可能	一般資格確保可能	資格保有者確保困難
		人員確保	確保可能	招集必要	確保は難しい
宿泊場所確保		近隣で確保可能	少し離れば確保可能	確保困難	
2. 費用	周辺環境への影響は問題ないか？	周辺状況	周囲に住宅あり	周囲に住宅少ない	周囲に住宅なし
		地盤状況	過去より強固な地盤	不明	埋立地
	周辺環境	国立公園あり	希少生物保護区あり	特になし	
	インシヤルコストは高いか？	確保可能な初期費用	費用より処理優先	費用範囲内で処理実施	費用はかけられない
3. 効果	ランニングコストは高いか？	確保可能な維持管理費用	費用より処理優先	費用範囲内で処理実施	費用はかけられない
	緊急に対応できるか？	処理期間	被害拡大懸念・緊急性大	急な被害拡大想定せず	拡散・自然低減も可
	被害削減額が大きいのか？	被害総額	被害総額大	被害総額中	被害総額小

【既存の化学物質除去対策技術の非常時適用性の評価とその体系化によるデータベース構築】 Ver. 1.24

漏洩状況ヒアリングシート（記入例あり）

※記入例に上書きして下さい
 の色がついたセルは標準入力セルになります
 の色がついたセルはプルダウンセルになります

項目	内容・数値	単位	補足説明	備考
会社名	(株) □□□	—	会社名を記載して下さい	
工場名	京都工場	—	工場名を記載して下さい	
主たる業	化学工業	—	主たる業を記載して下さい	
ヒアリング日	2022年8月3日	—	ヒアリング日を入力して下さい (YYYY/M/D)	
漏洩日	2022年7月4日	—	漏洩日を記載して下さい (YYYY/M/D)	
経過日数	30	日	自動計算	
住所	京都府京都市○○区		国土院地籍情報検索リンク ・距離・方位計測などのデータが取得可能 ・詳細な使用方法は国土院地籍情報検索	https://map.kada.go.jp/

項目	内容・数値	単位	補足説明	備考
検出物質検索	ベンゼン		・和名（カタカナ・漢字）で検出物質の名前を記載して下さい ・検出が出ていない場合、名称を部分的に記載して下さい（例：アセトニトリウム、アルキルベンゼン、アルキル）	
漏洩物質	漏洩アルキルベンゼン系化合物及びその類（アルキル系の炭素数が10から14までのもの及びその混合物に属する）		上の「検出物質検索」の欄に物質名の候補を含め物質リストがあります。プルダウンを入力（日本語）※左の「漏洩物質」のプルダウンより対象物質のDBに含められない可能性がある場合は、「DB原本」シートの内容を確認して該当する物質を選んで下さい	
漏洩物質分類	③		危険発生の観水性物質	自動入力
急性毒性	0		急性毒性が高い場合緊急対応が必要	自動入力
発がん性	0		発がん性が高い場合緊急対応が必要	自動入力
漏洩量	10	m3	タンク破損	

項目	内容・数値	単位	補足説明	備考
原因	地震によるタンク倒壊	—		
漏洩先	河川→海	—		
漏洩先までの距離	1	km	漏洩先までの距離を近い公共水事の本拠地	上記国土院地籍情報より引用可能
利用可能な地盤種	制限あり	—	設備設置場所、廃棄物貯蔵場所	プルダウンリストより選択
最大通行可能車両サイズ	大型トラック	—	搬入搬出時の車両サイズ	プルダウンリストより選択
通行可能台数	制限あり	—	搬入搬出時の台数	プルダウンリストより選択
水の確保	余裕あり	—	水道（工業用水）の確保	プルダウンリストより選択
電力の確保	制限あり	—	電力の確保	プルダウンリストより選択
通信の確保	通信可能	—	インターネット環境の確保	プルダウンリストより選択
燃料の確保	制限あり	—	燃料確保の可能性	プルダウンリストより選択
消耗品の確保	一般薬品確保可能	—	消耗品の確保可能性	プルダウンリストより選択
有資格者の確保	希少資格も含め確保可能	—	処理に必要な有資格者の数	プルダウンリストより選択
人員確保	確保可能	—	処理に必要な人員	プルダウンリストより選択
宿泊場所確保	近隣で確保可能	—	滞在人数が多い場合	プルダウンリストより選択
周辺状況	周囲に住宅あり	—	騒音、振動、臭気等の影響	プルダウンリストより選択
地盤状況	過去より強固な地盤	—	大型設備の設置可否	プルダウンリストより選択
周辺環境（生態系）	特になし	—	固有種等の存在有無	プルダウンリストより選択
確保可能な初期費用	費用範囲内での処理を実施	—	確保可能なインシヤルコスト	プルダウンリストより選択
確保可能な維持管理費用	費用範囲内での処理を実施	—	確保可能なランニングコスト	プルダウンリストより選択
処理期間	時間をかけての拡散・自然低減も可	—	処理にかけられる時間	プルダウンリストより選択
被害総額	被害総額中	—	周辺被害の概算	プルダウンリストより選択

項目	内容	備考
担当者	○○ ××	
所属	製造部課長	
所属	係長	
連絡先 (TEL)	090-1970-XXXX	
連絡先 (E-Mail)	○○@mail.□□□.com	

図3.6 構築したデータベースのユーザー入力シート（ヒアリングシート）

【簡易評価(グラフ)】

【候補技術(上位5技術)】

【候補技術】	合計スコア	土地・道路状況			必要なユーティリティ					人員			周辺環境への影響			I/C/R/C	工期	費用対効果	
		設置面積	車両サイズ	車両台数	水利用	電気利用	通信利用	燃料利用	消耗品	習熟度(有資格者等)	人数	宿泊場所	騒音、振動、臭気、塵埃の発生	地盤沈下の発生	生態系への影響				イニシャルコスト
活性炭吸着法	100	4	2	4	6	4	9	6	2	9	6	3	1	9	3	4	2	2	4
ファイトレメディエーション	92	2	2	6	6	6	9	6	6	9	9	3	3	9	3	6	2	1	4
バイオレメディエーション	90	2	2	6	6	6	9	6	4	9	9	3	3	9	3	6	2	1	4
逆浸透膜法	84	4	4	4	6	4	3	6	2	9	6	9	3	9	3	4	2	2	4
生物処理法	84	2	2	4	6	6	9	6	6	9	9	3	2	9	3	4	2	1	4

【評価項目まとめ(標準化)】

【候補技術】	土地・道路状況	必要なユーティリティ	人員	周辺環境への影響	I/C/R/C	工期	費用対効果
活性炭吸着法	0.37	0.60	0.67	0.48	0.33	0.22	0.44
ファイトレメディエーション	0.37	0.73	0.78	0.56	0.44	0.11	0.44
バイオレメディエーション	0.37	0.69	0.78	0.56	0.44	0.11	0.44
逆浸透膜法	0.44	0.47	0.89	0.56	0.33	0.22	0.44
生物処理法	0.30	0.73	0.67	0.52	0.33	0.11	0.44

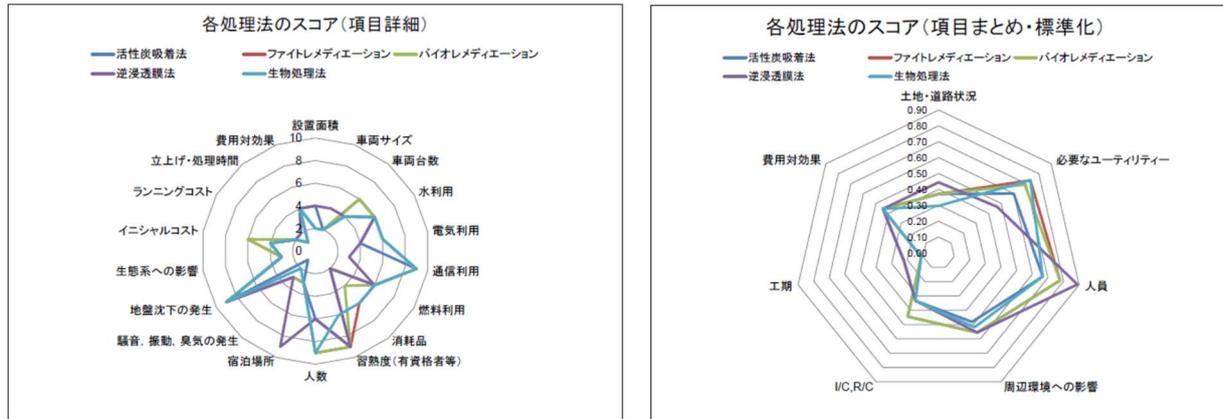


図3.7 構築したデータベースによる候補技術の抽出例

4.3. VCWシステムの開発

4.3.1. 有望な植物種及び基材の選定

人工湿地に広く使用される植物種を検索した結果、ヨシ (*Phragmites australis*)、ガマ (*Typha*)、イグサ (*Juncus effusus*)、アブラガヤ (*Scirpus*)、ハルイ (*Eleocharis*)、キショウブ (*Iris pseudacorus*) などが汚濁物質や有害化学物質の除去に用いられていることが確認された^{3,4)}。これらの中で、ヨシ、ガマ、イグサは北海道～九州・沖縄の日本各地に分布していることから、災害・事故時であっても現地において入手できる可能性が高い植物種であると考えられた。そこで、これらの植物種を主な対象として研究を進めることとした。

他方、基材については、砂利や赤玉土が多くの人工湿地で汎用されている他、多様な化学物質に対する吸着能に優れている活性炭やゼオライト、pH調整機能のある石灰石、さらに、木質ペレットなどのバイオマス基材など様々な基材を使用している例があることが明らかとなった^{3,5,6)}。すなわち、災害・事故後で資材調達が容易でない場合には現地で入手できるものを基材として利用することが可能といえる。ただし、以降の実験2 (4.3.3) で示す通り、基材ごとに化学物質除去能は大きく異なることも考慮する必要がある。

4.3.2. 実験1 (表3.2参照、以下同様) における成果

基材として砂利を用い、ヨシ、ガマ、イグサを植栽したVCWシステムを構築し、1,4-ジオキサン (グループ④) の処理実験を行った。その結果、一般的に難分解性であり水中に長期間残留する1,4-ジオキサンが時間とともに水中から除去されることが確認された。植物の有無・種類と比べると、水の蒸発散及び1,4-ジオキサン除去は、非植栽系に比べて植栽系において高く、水循環を行うことで高くなったが、3種の植物種では明確な差異は見られなかった (図3.8)。これらの結果から、グループ④のうち特に難分解性のものに関しては、植物種は水の蒸発散を介して水中から除去できることが明らかとなり、VCWシステムを適用する際には、蒸発した化学物質を活性炭等で捕集することで周囲への拡散を防ぎつつ除去を進めることが可能であると考えられた。

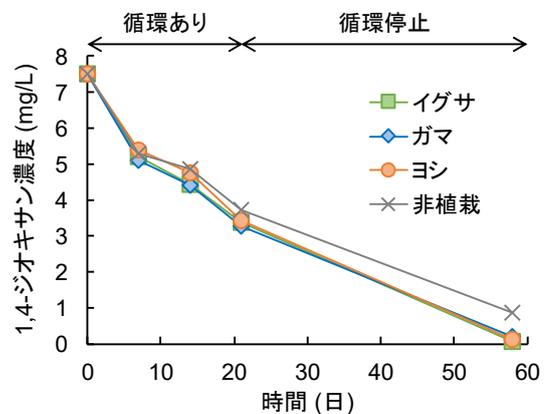


図3.8 植栽・水循環がVCWシステムによる1,4-ジオキサン除去に及ぼす影響

4.3.3. 実験2における成果

グループ①（無機物）のうち、Cr(VI)、Cu、Mn、Niを対象物質に選定し、VCWシステムによる除去効果を検証した。無機物は、主に基材への吸着と、植物による吸収が主な除去機構である。そこで、5種類の異なる基材（赤玉土、砂利、石灰石、活性炭、木質ペレット）を用いてVCWシステムを構築し、各金属の除去効果を調査した。その結果を図3.9に示す。赤玉土と活性炭泥はすべての金属を良好に除去できることが明らかとなった（除去率はそれぞれ95%以上、87%以上）。また、木質ペレットはCr(VI)、Mnの除去率がそれぞれ81%、84%であったが、Cu、Niはほぼ完全に除去できた。他方、砂利と石灰石はCu、Mn、Niは90%以上除去できるものの、水中でアニオンとして存在するCr(VI)はほぼ除去できなかった。以上の結果から、金属類は様々な基材により除去可能であるが、残留する金属の種類によっては適切な基材を選択する必要があること、また、赤玉土や活性炭、木質ペレットは金属のイオン形態によらず高い効果が発揮され、有望な基材であることが示唆された。

4.3.4. 実験3における成果

実験2で金属除去に特に有効であることが示唆された赤玉土と活性炭を用いたVCWシステムを構築し、災害・事故時に高濃度の金属汚染水が継続的に発生することを想定し、60 mg/LのCr(VI)、Mn、Niを含む流入水を2日ごとに12回入れ換えて処理する実験を実施した。また、本実験では、ヨシ植栽の有無による効果についても同時に調査した。図3.10に結果を示す。赤玉土を用いたVCWシステムは、植栽の有無によ

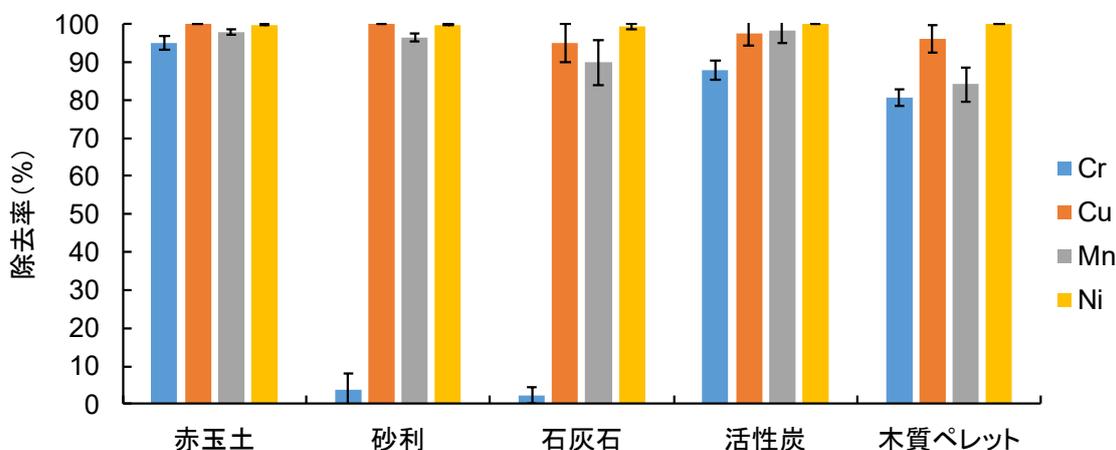


図3.9 異なる基材によるCr(VI)、Cu、Mn、Niの除去能（添加濃度：6 mg/L、n=5）

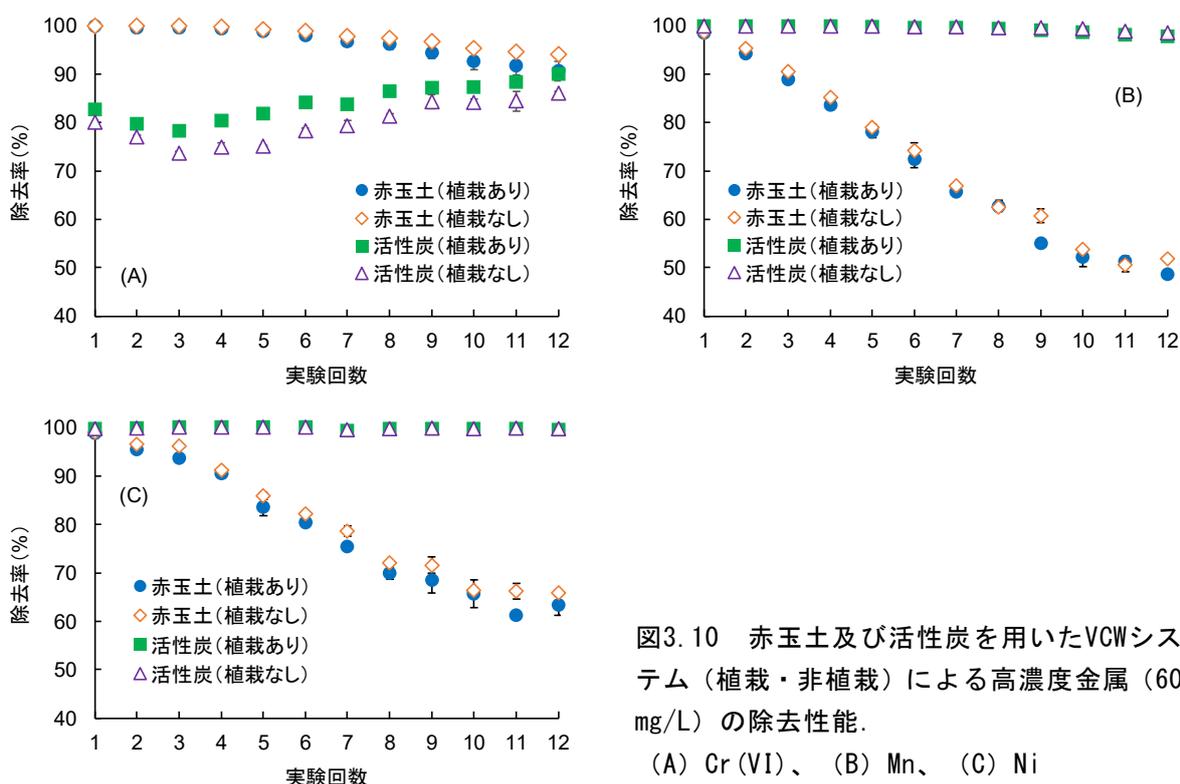


図3.10 赤玉土及び活性炭を用いたVCWシステム（植栽・非植栽）による高濃度金属（60 mg/L）の除去性能。
(A) Cr(VI)、(B) Mn、(C) Ni

らず、Cr(VI)に対して優れた除去性能を示し、処理の継続により若干低下するものの90%以上の除去率を維持した。また、Mn、Niは初期には完全に除去できたが、処理の継続により大幅に除去率が低下し、最終的にはMn除去率は50%程度、Ni除去率は65%程度に達した。一方、活性炭は、Cr(VI)の除去能では赤玉土に劣ったが、処理の継続により除去率が徐々に高まり、最終的には赤玉土に見劣りしない除去性能を示した。また、ヨシ植栽がCr(VI)除去能を高める効果も観察された。さらに、Mn、Niは実験期間を通してほぼ完全に除去することができた(Mn除去率：97.8-99.9%、Ni除去率：99.4-100%)。実験終了時に基材に吸着した金属及び植物に蓄積した金属を抽出し、マスバランスを調査した結果(図3.11)、本研究で用いているVCWシステム(鉛直カラム型で、化学物質を含む水を下降流で供給・循環)では、いずれの金属も基材への吸着が主な除去メカニズムであることが示された。以上の結果から、無機物(金属類)の除去においては基材の選択が重要であり、適切な基材の選択により、高負荷処理、長期間の継続処理にも対応可能であることが示唆された。

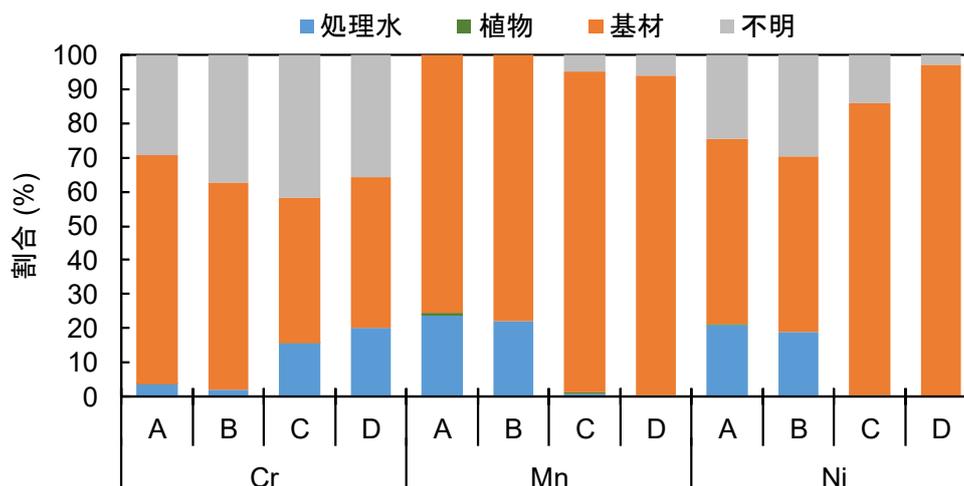


図3.11 赤玉土及び活性炭を用いたVCWシステム(植栽・非植栽)による高濃度金属除去実験における各金属のマスバランス。

A: 赤玉土-植栽あり、B: 赤玉土-植栽なし、C: 活性炭-植栽あり、D: 活性炭-植栽なし

4.3.5. 実験4における成果

Seは水中でオキソアニオンの形態(セレン酸塩、亜セレン酸塩)で存在する金属であり、微生物の還元作用により無害な元素態Seあるいは揮発性のSe(-II)に変換されることから、生物学的及び非生物学的作用を有する人工湿地によって効率的に除去される可能性がある。そこで、赤玉土を基材に用い、ヨシを植栽するVCWシステム及び植栽しないVCWシステムを構築し、乳酸塩を添加/非添加のSe含有水の処理を実施した。その結果、Se除去性能は乳酸塩の有無により顕著に異なった(図3.12)。乳酸塩を添加していない流入水を処理した場合、開始直後には98%以上の除去率を示したが、処理の継続とともに低下し続け(低下率はHRT 2日では1サイクルにつき $3.4 \pm 2.1\%$ (n=20)、HRT 1日では1サイクルにつき $2.9 \pm 4.5\%$ (n=12))、土壌粒子表面が徐々に閉塞し除去性能が低下したことが示唆された。一方、乳酸塩を添加した流入水を処理した場合、初期には基材への吸着の競合阻害によって除去率が80%前後まで低下したものの、その後、微生物作用が活発になることでSe還元が促進され、ほぼ完全なSe除去が長期にわたり維持されることが明らかとなった。特に、植栽したVCWシステムでは、Se除去能の早期回復及び優れたSe除去能の維持が可能であることが観察され、植栽も間接的ではあるもののSe除去に重大な貢献を果たすことが示唆された。以上の結果から、安定して優れたSe除去性能を発揮させるためには、植栽を行い、かつ、基材への吸着の競合阻害を過度に起こさな

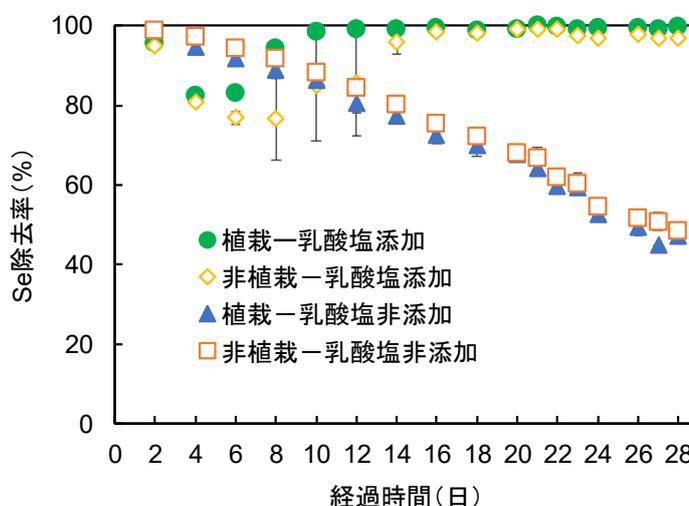


図3.12 植栽及び非植栽のVCWシステムにおけるSe除去性能(乳酸塩添加・非添加)

い濃度で炭素源を添加して生物学的還元を活性化させることが重要であることが示唆された。

4.3.6. 実験5における成果

グループ③（低揮発・親油性有機物）に分類されるビスフェノールA（BPA）やその構造類似物質は、水生植物と根圏微生物との共生作用によって分解し得ることが知られている⁷⁻⁹。そこで、BPA及び4種類の構造類似物質（BPF、BPP、BPS、TDP）を対象として、ヨシと水環境中から回収した微生物群の有無を組み合わせた実験系を作成し、バッチ式の分解試験を実施した。その結果、いずれの物質も、揮発による除去は生じず、ヨシと微生物群の両方が存在する実験系で最も良好に除去されることが明らかとなった（図3.13）。一方、ヨシと微生物群による作用は物質により異なった。BPFは微生物群が存在する実験系で有意に除去されたことから、主に微生物分解が働き、ヨシは微生物群の増殖あるいは生理活性を活性化させたものと考えられた。他方、BPAを含む他の4物質では、ヨシのみでもある程度の除去効果が見られたことから、ヨシによる取り込み、分解、重合化が作用したものと考えられたが、微生物群集との共存により除去効果が高まり、また、物質によっては代謝物の生成も確認されたことから、植物による作用に伴い微生物分解が生じるようになったものと考えられた。以上の結果から、BPAとその構造類似物質は一般的には難分解と言われているが、植物と微生物群が共存するVCWシステムでは比較的容易に除去可能であることが示唆された。

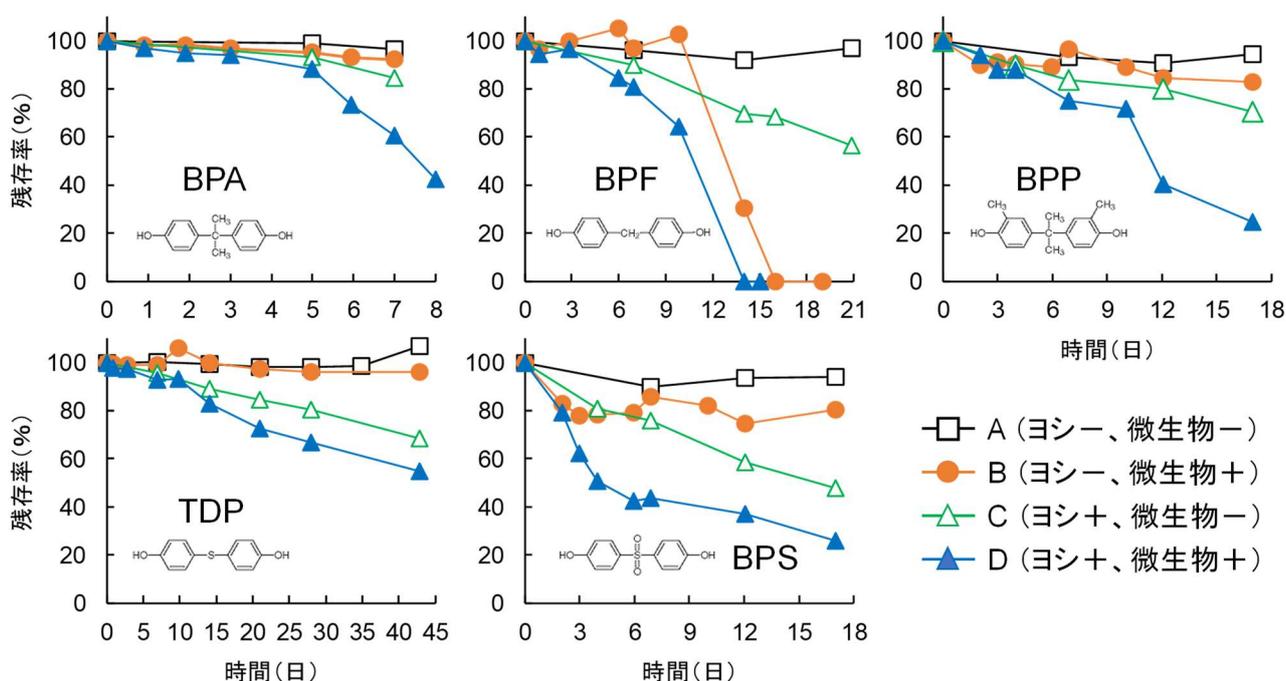


図3.13 ヨシと微生物群集の組合せによるBPA及び構造類似物質の除去ポテンシャル

4.3.7. 実験6における成果

グループ②に分類される*N,N*-ジメチルアセトアミド（DMAC）、グループ④に分類される*N,N*-ジメチルホルムアミド（DMF）、それらの構造類似物質である*N*-メチル-2-ピロリドン（NMP）は非プロトン性溶媒であり、水などに完全に混和する。砂利を基材とする植栽及び非植栽のVCWシステムで、連続通水式あるいは連続回分式で処理を行った（図3.14）。その結果、いずれの物質でも処理の継続により除去性能が向上する傾向が確認され、植栽系が非植栽系よりも優れた除去性能を示した。また、DMAC及びNMPは、連続回分式よりも連続通水式において良好な除去性能を示し、植栽系に連続通水式で流入水を供給した場合には途中から完全な除去が達成された。一方、DMFの除去性能は他の物質に比べて低く、除去率は最大でも60%に止まった。これらの物質の除去には主に微生物分解が作用し、植物は微生物作用を活性化する効果を発揮したものと推察され、流入水を一度に流入させ、システム内が高濃度化する連続回分式よりも、システム内が一気に高濃度化しない連続通水式の方が有効であったものといえる。また、基材については実験しなかったが、赤玉土や活性炭のように強力な吸着や微生物作用の活性化が期待される基材への変更により、除去性能を向上できる可能性があるものと考えられる。

4.3.8. 実験7における成果

実際の浄化においては、主要な除去対象となる有害化学物質が易分解性有機物と共存していることも

十分にあり得る。そこで、BPAを除去対象とし、易分解性有機物の共存下での除去を試みた。また、ここでは、基材の種類と組合せ、処理段数の異なる5種類のVCWシステム（砂利のみを用いた1段式（CW1）、活性炭を砂利で挟んだサンドイッチ構造の1段式（CW2）、レンガ片を砂利で挟んだサンドイッチ構造の1段式（CW3）、砂利を入れたカラムと活性炭を入れたカラムを連結した2段式（CW4）、砂利を入れたカラムとレンガ片を入れたカラムを連結した2段式（CW5））を構築し、各々の効果を調査した。各VCWシステムによるBPA除去性能を図3.15に示す。活性炭を用いた2種類のVCWシステムではBPAは常に完全に除去され、その除去が速やかに進行することから、主に活性炭への吸着により除去が行われたものと示唆された。他方、砂利カラムとレンガ片カラムの2段式VCWシステムでも、一時的な除去率低下を除き、完全なBPA除去が達成された。また、砂利のみの1段式VCWシステム及びレンガ片を用いた1段式VCWシステムでは、初期のBPA除去率がそれぞれ60%及び70%であり、処理の継続により除去性能は向上したものの、他の

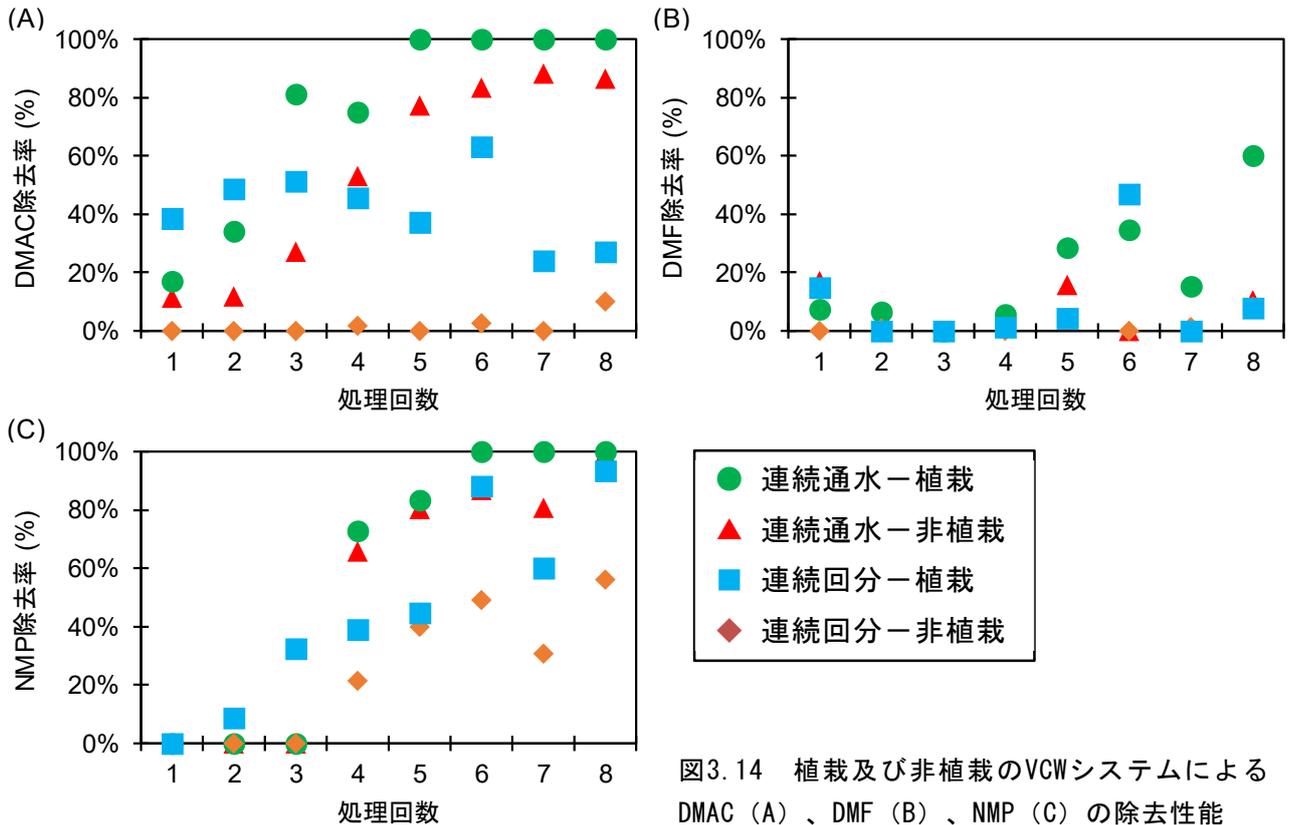


図3.14 植栽及び非植栽のVCWシステムによるDMAC (A)、DMF (B)、NMP (C) の除去性能

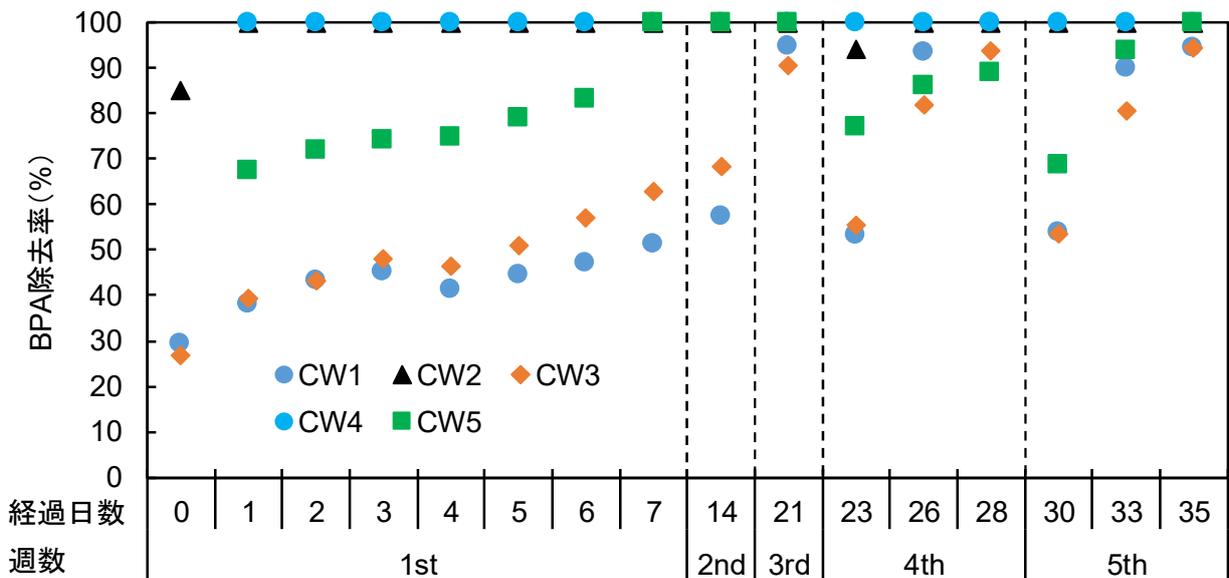


図3.15 基材の種類と組合せ、処理段数の異なる5種類のVCWシステムによる易分解性有機物共存下におけるBPA除去性能

VCWシステムに比べて低かった。処理実験終了後の基材及び植物根に付着する微生物を調査したところ、従属栄養細菌は6.8-7.6 log CFU/g基材、8.2-8.3 log CFU/g植物根で検出され、BPA分解菌は5.8-6.4 log CFU/g基材、7.5-7.6 log CFU/g植物根で検出され、植物表面で微生物の集積効果が確認された。すなわち、実験5でも示唆されたように、植物と微生物の共存による優れたBPA分解能が発揮されたものと考えられ、これが砂利及びレンガ片を含むVCWシステムによるBPA除去に貢献したものと推察された。

4.3.9. 実験8における成果

実験7よりも多種の有害化学物質が共存するケースとして、フェノール（グループ③）、BPA（グループ③）、Cr(VI)、Mn（グループ①）を除去対象とし、易分解性有機物の存在下における除去について実験した。本実験では、1段目に砂利、2段目に活性炭を入れたカラムを連結した2段式VCWシステム（植栽、非植栽を含む）を用い、連続通水式及び連続回分式で処理を実施し、さらに、処理期間中にHRTを順次短縮することにより、高負荷処理への耐性についても実験した。4種の除去対象物質の除去率をHRTごとに整理して図3.16に示す。フェノールは、植栽の有無及びHRTによらず93%を上回る除去が達成され、高負荷であってもVCWシステムによりほぼ完全に除去可能であることが示された。また、BPAに対しても概して優れた除去性能を示し、連続通水する非植栽のVCWシステム以外では、HRTを1日まで短縮してもほぼ完全なBPA除去を達成することが確認され、難分解なBPAの除去に対してVCWシステムが有効であることが示された。しかし、フェノールに比べて、通水方法、植栽の有無、HRTによる差異が顕著であった（通水方法：連続回分式>連続通水式、植栽の有無：植栽>非植栽、HRT：5日>3日>2日>1日）。他方、Cr(VI)及びMnの除去率は、連続通水式で連続回分式よりも高く、HRT短縮（負荷量の増大）に伴って低くなり、連続通水式と連続回分式における除去率の差は短いHRTにおいて顕著であった。以上の結果から、VCWシステムは、物性の異なる多様な有害化学物質が共存する場合でも、各物質を除去することが可能であり、特に連続回分式の通水が有効であることが示された。一方、負荷量の増大は特に金属類の除去性能の悪化につながるため、処理の実行に際しては、負荷量あるいはHRTの調整が重要であると示唆された。

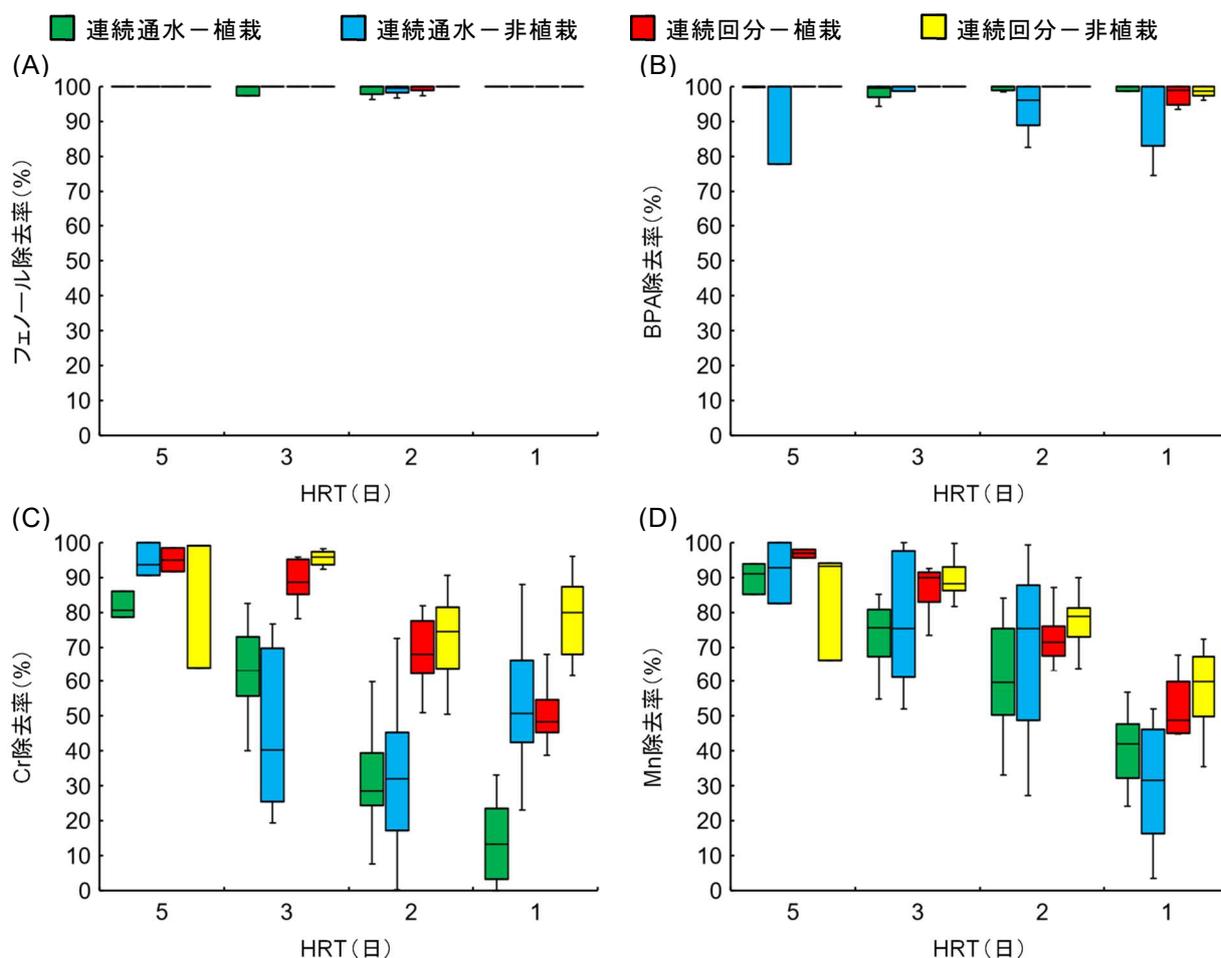


図3.16 2段式VCWシステム（1段目：砂利、2段目：活性炭）による易分解性有機物共存下におけるフェノール、BPA、Cr、Mnの除去性能

4.3.10. VCWシステムの災害・事故後の環境リスク管理への適用可能性と適用方法

本研究で実施した種々の処理実験の成果から、VCWシステムは物性の異なる多様な有害化学物質の除去に対して有効であることが示された。本研究で提案するVCWシステムは、汚染現場付近にある容器と基材（砂利、土壌など）、植物を用いて容易に作製できることが重要な特徴である。また、必要な外部エネルギーはポンプ動力のみであり、小型の太陽光パネルと蓄電池があれば運転することも可能であることも確認している。そのため、電力供給が望めない復興・復旧時でも運用することができ、重篤なリスクを回避するための応急措置的な浄化を速やかに実行することもできる。他方、可搬型のユニット装置であることから、平常時には下水処理場や埋立地浸出水の処理施設において微量化学物質汚染対策のためのフェイルセーフとして日頃から常備／活用しておく、あるいは自治体において“非常時の備え”として保有しておく、非常時にはそれを汚染現場に持ち込んで使用するという運用方法も可能である。平常時から常備しておく場合には、活性炭のように吸着能力の高い基材を用いることにより、どのような有害化学物質を処理することになるかが予想できない非常時でも、速やかに優れた浄化性能を発揮させることが可能である。このように、VCWシステムは非常時の経済的・エネルギー的・資源的に不利な状況下での化学物質リスク低減に有望な浄化技術であり、図3.16に示す様々な方法で適用することが可能と考えられた。

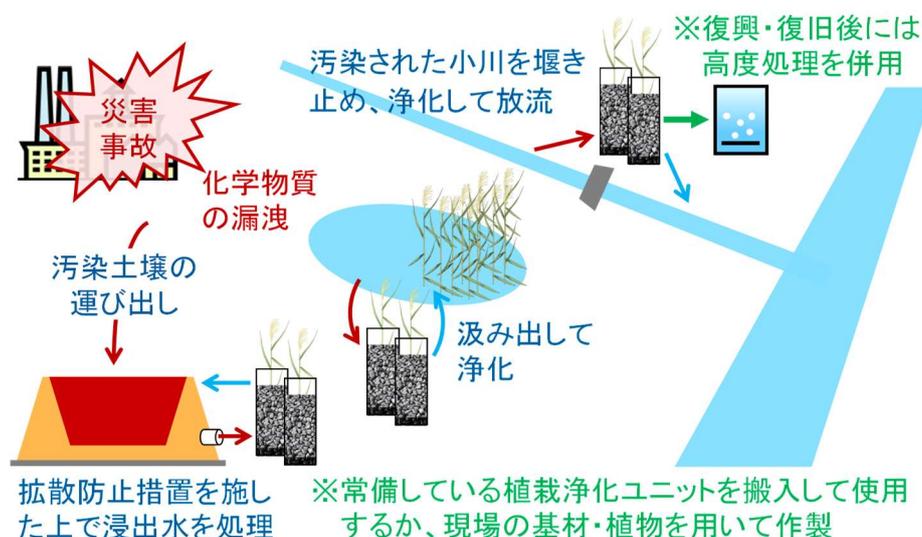


図3.17 災害・事故後の残留化学物質除去対策へのVCWシステムへの適用例¹⁾

5. 研究目標の達成状況

本サブテーマでは、①災害・事故後に環境中に残留する化学物質の除去に適用可能な既存の物理的、化学的、生物学的な除去対策技術を体系的に整理し、災害・事故後に想定される制約条件下で有望技術の選定を支援するデータベースを構築すること、②低コスト・低環境負荷型の高効率残留化学物質除去対策技術として有望と考えられる多機能型人工湿地（VCW）システムの、多様な化学物質及び条件下における処理性能を実験的に検証し、その適用方法を提示することを目標とした。

①に関しては、取扱量や移動量の大きいPRTR第一種指定化学物質462種を対象物質として各種情報を整理し、適用する除去対策技術の選定において重要となる物性の観点から5つのグループへの分類を行った。また、環境浄化や排水処理に適用されている既存の物理的、化学的、及び生物学的を多元的な観点から評価し、5つのグループに属する化学物質に対する適用可能性を体系的に取りまとめるとともに、災害・事故後の汚染現場で遭遇する可能性のある種々の制約条件下において有効な候補技術を抽出し、最終的な適用技術選定を支援するデータベースを構築し、「災害・事故時の環境リスク管理に関する情報基盤」に掲載することができた。さらに、②に関しては、分類した5グループのうち4グループの代表物質等に対する除去性能を調査し、多様な物性をもつ化学物質の除去に対して適用可能であることを明示するとともに、優れた除去性能を発揮するために必要となるシステム構成や運転条件などを明らかにすることができた。以上の研究成果から、研究目標は十分に達成できたものと考えられる。

6. 引用文献

- 1) 井上 大介: 非常時リスクに対応する高機能型植栽環境浄化ユニットの開発、バイオインダストリー、38(7)、27-35 (2021)

- 2) 中村智、田和佑脩、矢吹芳教：緊急の災害・事故に備えた大阪府の化学物質対策への取り組み、環境化学、**29(3)**、119-128 (2019)
- 3) United States Environmental Protection Agency: A handbook of constructed wetlands. Volume 1 General Considerations
- 4) Jan Vymazal: Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. Ecological Engineering, **61P**, 582-592 (2013)
- 5) Yanting Wang, Zhengqing Cai, Sheng Sheng, Fei Pan, Fenfei Chen, Jie Fu: Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands. Science of the Total Environment, **701**, 134736 (2020)
- 6) Zehua Ji, Wenzhong Tang, Yuansheng Pei: Constructed wetland substrates: A review on development, function mechanisms, and application in contaminants removal. Chemosphere, **286**, 131564 (2022)
- 7) Tadashi Toyama, Yusuke Sato, Daisuke Inoue, Kazunari Sei, Young-Cheol Chang, Shintaro Kikuchi, Michihiko Ike: Biodegradation of bisphenol A and bisphenol F in rhizosphere sediment of *Phragmites australis*. Journal of Bioscience and Bioengineering, **108(2)**, 147-150 (2009)
- 8) Hiroshi Okuhata, Masahiko Ninagawa, Naomichi Takemoto, Hezhe Ji, Hitoshi Miyasaka, Ai Iwamoto, Masaki Nagase, Yasuhiro Ishibashi, Koji Arizono: Phytoremediation of 4,4' -thiodiphenol (TDP) and other bisphenol derivatives by *Portulaca oleracea* cv. Journal of Bioscience and Bioengineering, **115(1)**, 55-57 (2013)
- 9) A. F. Toro-Vélez, C. A. Madera-Parra, M. R. Peña-Varón, W. Y. Lee, J. C. Bezares-Cruz, W. S. Walker, H. Cárdenas-Henao, S. Quesada-Calderón, H. García-Hernández, P. N. L. Lens: BPA and NP removal from municipal wastewater by tropical horizontal subsurface constructed wetlands. Science of the Total Environment, **542(A)**, 93-101 (2016)

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) 中村智、田和佑脩、矢吹芳教：環境化学、**29**(3), 119-128 (2019)
緊急の災害・事故に備えた大阪府の化学物質対策への取り組み doi:10.5985/jec.29.119
- 2) Kazushi Noro, Yabuki Yoshinori, Banno Arisa, Yusuke Tawa, Satoshi Nakamura: Journal of Water and Environment Technology, **17**(6), 432-447 (2019) (h-index:2)
Validation of the application of a polar organic chemical integrative sampler (POCIS) in non-steady-state conditions in aquatic environment. doi:10.2965/jwet.19-057
- 3) 杉浦隆介、水谷聡、中村智、貫上佳則：土木学会論文集G(環境)、**75**(7), III_65~III_72 (2019)
震災時における化学物質汚染の予測に向けた化学物質の排出・移動量と取扱量の関係の評価ー大阪府化学物質管理制度を活用してー doi:10.2208/jscejer.75.7_III_65
- 4) Kazushi Noro, Satoshi Endo, Yohei Shikano, Arisa Banno, and Yoshinori Yabuki: Environmental Toxicology and Chemistry, **39**(7), 1325-1333 (2020) (h-index:154)
Development and calibration of the polar organic chemical integrative sampler (POCIS) for neonicotinoid pesticides. doi:10.1002/etc.4729
- 5) 田和佑脩、矢吹芳教、野呂和嗣、田澤慧、水谷聡、杉浦隆介、中村智：リスク学研究、**30**(3)、177-185 (2021)
PRTRデータを活用した化学物質取扱量の推計 doi:10.11447/jjra.SRA-0340
- 6) 中村智、田和佑脩、野呂和嗣、矢吹芳教：環境化学、**31**、98-105 (2021)
災害・事故に備えた化学物質の在庫量の推計 doi:10.5985/jec.31.98
- 7) 中村智、山崎耕平、水谷聡、野呂和嗣、矢吹芳教：環境化学、**31**、120-126 (2021)
PRTRすそ切り以下工場・事業場における全国市区町村での化学物質の在庫量の推計 doi:10.5985/jec.31.120
- 8) 水谷聡、杉浦隆介、山崎耕平、田和佑脩、中村智、矢吹芳敬、野呂和嗣：環境技術、**50**(6)、325-332 (2021)
PRTRを活用した少人数事業所からの化学物質排出量分布の推定 doi:10.5956/jriet.50.6_325
- 9) 山崎耕平、水谷聡、池田歩夢、中村智：大阪市立大学都市防災研究論文集、**8**、7-12 (2021)
PRTRのすそ切り以下排出量データを用いた大阪府下の各市区における小規模事業者からの化学物質排出量の推計 doi:10.24544/ocu.20211115-016
- 10) 小口正弘、大久保 伸、谷川 昇、中村 智：環境科学会誌、**35**、189-198 (2022)
算出方法の実態から見たPRTR届出排出移動量データの信頼性 doi:10.11353/sesj.35.189
- 11) Kazushi Noro, Etienne Vermeirssen, Arisa Banno, Junko Ono, and Yoshinori Yabuki: Environmental Toxicology and Chemistry, **40**(11), 3010-3018 (2021)
Comparative Evaluation of the Polar Organic Chemical Integrative Sampler in Two Types of Validation Systems Simulating Peak Concentration Events. doi:10.1002/etc.5204
- 12) Kazushi Noro, Yoshinori Yabuki, Junko Ono, Satoshi Nakamura: Journal of Water and Environment Technology, **20**(1), 11-20 (2022)
Development and Evaluation of the Performance of the Polar Organic Chemical Integrative Sampler for Linear Alkylbenzene Sulfonate. doi:10.2965/jwet.21-116
- 13) 水谷聡、池田歩夢、杉浦隆介、中村智：大阪公立大学都市防災研究論文集、**9**、13-18 (2022)
化学汚染災害廃棄物の処理計画策定における優先化学物質の選定方法の検討～堺泉北臨海工業地帯を例として～

- 14) Kazushi Noro, Satoshi Endo, Daisuke Inoue, Natsumi Suzuki, Hiroshi Kameoka, Junko Ono, Satoshi Nakamura, and Yoshinori Yabuki : *Environmental Toxicology and Chemistry*, **42**(2), 296-302(2023) (h-index:154)
Development of a new polar organic chemical integrative sampler for 1,4-dioxane using silicone membrane as a diffusion barrier
- 15) 水谷聡、池田歩夢、田和佑脩、中村智、矢吹芳教、野呂和嗣、小口正弘 : 環境技術、掲載待ち
事業所の規模の違いによる化学物質の管理・漏洩防止対策の比較

【サブテーマ 2】

- 1) Teruyo Ieda, Shunji Hashimoto, Tomohiko Isobe, Tatsuya Kunisue, Shinsuke Tanabe : *Talanta*, **194**, 461-468 (2019)
Evaluation of a data-processing method for target and non-target screening using comprehensive two-dimensional gas chromatography coupled with high-resolution time-of-flight mass spectrometry for environmental samples. doi: 10.1016/j.talanta.2018.10.050
- 2) Shunji Hashimoto, Nobutoshi Ohtsuka, Yumiko Onizuka, Teruyo Ieda, Daisuke Nakajima, Noriyuki Suzuki : *Environmental Monitoring and Contaminants Research*, **1**, 28-36 (2021)
Preliminary statistical investigation of anomaly detection in non-target environmental monitoring by comprehensive two-dimensional gas chromatography/time-of-flight mass spectrometry. doi:10.5985/emcr.20200001
- 3) Ryo Omagari, Takashi Nakayama, Takashi Miyawaki, Mayuko Yagishita, Shunji Hashimoto, Kiwao Kadokami, Daisuke Nakajima : *Chemosphere*, **285**, 131401 (2021)
Evaluation of identification accuracy using AIQS for GC-MS for measuring heavily contaminated samples. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131401
- 4) Ryo Omagari, Yuichi Miyabara, Shunji Hashimoto, Takeshi Miyawaki, Masashi Toyota, Kiwao Kadokami, Daisuke Nakajima : *Environment International*, **159**, 107017 (2021)
The rapid survey method of chemical contamination in floods caused by Typhoon Hagibis by combining in vitro bioassay and comprehensive analysis. doi:10.1016/j.envint.2021.107017
- 5) 家田曜世、高澤嘉一、橋本俊次 : *分析化学*、**70**(6)、397-402 (2021)
セミアクティブエアサンプリング/熱脱着分析を用いた環境残留性有機汚染物質の網羅的モニタリング手法の開発 doi:10.2116/bunsekikagaku.70.397
- 6) Shunji Hashimoto, Yoshikatsu Takazawa, Teruyo Ieda, Ryo Omagari, Daisuke Nakajima, Satoshi Nakamura, Noriyuki Suzuki : *Chemosphere*, **303**(1), 135021 (2022)
Application of rapid air sampling and non-targeted analysis using thermal desorption comprehensive two-dimensional gas chromatography/time-of-flight mass spectrometry to accidental fire. doi:10.1016/j.chemosphere.2022.135021
- 7) 家田曜世、高澤嘉一、橋本俊次 : *Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan*, **70**(4)、284-286 (2022)
高分解能質量分析計を用いた火災に起因する化学物質の網羅分析. doi:10.5702/massspec.S22-78

【サブテーマ 3】

- 1) Rajani Ghaju Shrestha, Miki Nakai, Daisuke Inoue, Michihiko Ike : *Journal of Water and Environment Technology*, **19**(1), 13-23 (2021)
Potential for enhanced degradation and removal of various bisphenols by interaction between common reed (*Phragmites australis*) and microorganisms. doi:10.2965/jwet.20-117

- 2) Rajani Ghaju Shrestha, Daisuke Inoue, Michihiko Ike : Water Science and Technology, **84**, 1428-1437 (2021)
Effects of Selection and Compiling Strategy of Substrates in Column-Type Vertical-Flow Constructed Wetlands on the Treatment of Synthetic Landfill Leachate Containing Bisphenol A. doi:10.2166/wst.2021.349
- 3) Rajani Ghaju Shrestha, Daisuke Inoue, Michihiko Ike : Japanese Journal of Water Treatment Biology, **58(4)**, 137-148 (2022)
Effectiveness of column-type two-stage constructed wetlands for simultaneous removal of organic compounds and heavy metals focusing on the impact of feeding modes and hydraulic retention time. doi:10.2521/jswtb.58.137

<査読付論文に準ずる成果発表>

【サブテーマ1】

- 1) 矢吹芳教、野呂和嗣、伴野有彩：環境技術、**49(5)**、252-253 (2020)
パッシブサンプリングによる水環境中の農薬測定手順 doi:10.5956/jriet.49.5_251
- 2) 矢吹芳教、野呂和嗣、伴野有彩：環境技術、**49(5)**、246-250 (2020)
パッシブサンプリングによる水環境中の農薬濃度の中長期的な観測
doi:10.5956/jriet.49.5_246

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項無し。

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項無し。

<その他誌上発表（査読なし）>

【サブテーマ1】

- 1) 矢吹芳教、野呂和嗣、伴野有彩：植調、**55**、13-18 (2021)
パッシブサンプリング法による環境中の除草剤（農薬）のモニタリング手法

【サブテーマ2】

- 1) 橋本俊次：地球環境、**24(1)**、3-14 (2019)
包括的二次元ガスクロマトグラフィーと精密質量分析による環境モニタリングの試み
- 2) 橋本俊次、高澤嘉一、家田曜世：環境と測定技術、**48(2)**、27-34 (2021)
災害・事故発生時に環境に残留する化学物質への対策実施と継続監視のためのモニタリング手法
- 3) 高澤嘉一：現代化学、**606**、62-65 (2021)
災害への備えと発災時の化学物質モニタリング

【サブテーマ3】

- 1) 井上大介：バイオインダストリー、**38(7)**、27-35 (2021)
非常時リスクに対応する高機能型植栽環境浄化ユニットの開発

(2) 口頭発表（学会等）

【サブテーマ1】

- 1) 田和佑脩、矢吹芳教、中村智：第45回 環境保全・公害防止研究発表会 (2018)

- 事業所における化学物質の取扱量の推定に関する検討—大阪府を事例として—
- 2) 矢吹芳教：環境技術学会第18回年次大会（2018）
“環農水研”での化学物質の新たな調査手法及び情報基盤整備に関する取組
 - 3) 水谷聡、貫上佳則：第29回廃棄物資源循環学会研究発表会（2018）
PRTR情報を活用した化学物質保有量の推定方法に関する検討
 - 4) 野呂和嗣、矢吹芳教、中村智：第53回日本水環境学会年会（2019）
非定常状態における水中用パッシブサンプラーの適用の検証
 - 5) Kazushi Noro, Arisa Banno, Yoshinori Yabuki, Satoshi Nakamura：SETAC Ninth Biennial Meeting of SETAC Africa（2019）
Validation of the application of a polar organic chemical integrative sampler (POCIS) in unsteady state conditions
 - 6) Satoshi Mizutani, Ryusuke Sugiura, Satoshi Nakamura, Yoshinori Yabuki, Yusuke Tawa, Kazushi Noro, Yoshinori Kanjo：the 5th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management(3RINCs 2019)（2019）
The relationship between businesses' handled amount and released/transferred amount of chemical substances according to the PRTR system
 - 7) 田和佑脩、矢吹芳教、野呂和嗣、田澤慧、中村智：第46回 環境保全・公害防止研究発表会（2019）
PRTR制度における排出量・移動量を用いた取扱量推定の検討
 - 8) 杉浦隆介、水谷聡、貫上佳則、中村智、田和佑脩：第30回廃棄物資源環境学会（2019）
震災時の化学汚染廃棄物の推定に向けた注視すべき化学物質の選定方法の検討
 - 9) 中村智、田和佑脩、矢吹芳教、野呂和嗣：日本リスク研究学会第32回年次大会（2019）
PRTRデータを活用した化学物質存在量の推計
 - 10) Ryusuke Sugiura, Satoshi Mizutani, Satoshi Nakamura, Yusuke Tawa, Yoshinori Kanjo：The 10th Forum on Studies of Environmental and Public Health Issues in Asian Mega-cities（2019）
Evaluation of Relationship between Businesses' Handled Amount and Released / Transferred Amount of Chemical Substances Aimed for Predicting Chemical Pollution due to Earthquake Disaster by Using PRTR Data
 - 11) Kazushi NORO, Yoshinori YABUKI, Arisa BANNO, Yusuke TAWA, Satoshi NAKAMURA；WET（Water and Environment Technology Conference）2019（2019）
Validation of the application of a polar organic chemical integrative sampler (POCIS) in unsteady state conditions
 - 12) 野呂和嗣、伴野有彩、田和佑脩、矢吹芳教、中村智；第22回日本水環境学会シンポジウム（2019）
化学物質漏洩事故に対応した河川モニタリング用パッシブサンプラーの開発
 - 13) Kazushi Noro, Banno Arisa, Satoshi Nakamura, and Yabuki Yoshinori；SETAC Europe 30th annual meeting（2020）
A new Polar Organic Chemical Integrative Sampler (POCIS) for Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS)
 - 14) 野呂和嗣、伴野有彩、矢吹芳教、中村智；第54回日本水環境学会年会（2020）
Polar Organic Chemical Integrative Sampler (POCIS)への温度影響とその補正
 - 15) Ryusuke Sugiura, Satoshi Mizutani, Yusuke Tawa, Satoshi Nakamura, Yoshinori Yabuki, Kazushi Noro, Yoshinori Kanjo：the 6th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management(3RINCs 2020)（2020）
Visualization of chemical substances information by GIS aimed for predicting the

- chemically contaminated wastes generation due to great earthquake disaster
- 16) 野呂和嗣、小野純子、矢吹芳教、中村智；第55回日本水環境学会年会(2021)
界面活性剤に最適化した極性有機化合物積算サンプラー(POCIS)
 - 17) 野呂和嗣、遠藤智司、伴野有彩、矢吹芳教；Japan XR Science Forum 2020 in US Midwest (2020)
水相パッシブサンプラーのネオニコチノイド系農薬への最適化
 - 18) 山崎耕平、水谷聡、小口正弘、早水輝好、貫上佳則；PRTR制度におけるすそ切り以下事業者からの化学物質排出量の推計精度、環境科学会2020年会 (2020)
 - 19) 山崎耕平、水谷聡、小口正弘、貫上佳則；PRTRにおけるすそ切り以下事業者からの化学物質排出量の推計精度のトレンド、第20回環境技術学会年次大会 (2020)
 - 20) 中村智；第29回環境化学討論会特別公開セッション (2021)
災害・事故に起因する化学物質漏洩・飛散に備えた情報基盤の整備
 - 21) 中村智；日本リスク学会第34回年次大会 (2021)
PRTRデータを活用した化学物質存在量の推計
 - 22) 野呂和嗣、Vermeirssen L.M. Etienne、矢吹芳教；第56回日本水環境学会年会 (2022)
室内チャンバーと人工水路による水相パッシブサンプラーの性能評価
 - 23) 矢吹芳教、野呂和嗣、伴野有彩；第38回農薬環境科学研究会 (2021)
水相パッシブサンプリングおよびグラブサンプリングによる河川中の農薬濃度の比較
 - 24) 矢吹芳教；第44回農薬残留分析研究会 (2021)
パッシブサンプリング法を用いた河川水中の残留農薬分析について
 - 25) 中村智、矢吹 芳教、野呂 和嗣；第30回環境化学討論会 (2022)
南海トラフ巨大地震津波浸水想定エリアにおける化学物質在庫量の推計
 - 26) 中村智；第37回全国環境研協議会東海・近畿・北陸支部研究会 (2023)
南海トラフ巨大地震ともなう化学物質漏洩リスクの推計
 - 27) 野呂和嗣、遠藤智司、井上大介、矢吹芳教；第57回日本水環境学会年会 (2023)
1,4-ジオキサンに最適化した水相パッシブサンプラーの開発

【サブテーマ2】

- 1) Hashimoto Shunji; The 3rd International Conference on Econometrics and Statistics (EcoSta 2019) (2019)
Preliminary application of multi-dimensional non-target analysis data by GC×GC/HRTofMS for environmental monitoring.
- 2) 橋本俊次；統計数理研究所共同研究「令和元年度 統計学的アプローチによる問題解決のための環境化学分析の最適化・高度化に関する研究集会」(2019)
廃棄物中間貯蔵所火災におけるノンターゲット分析の実際
- 3) Yoshikatsu Takazawa; 9th Analysis Training of Persistent Organic Pollutants in East Asian Countries (2019)
Analysis of Airborne PFAS and HCBd for the Global Monitoring: application of TenaxTA
- 4) Yoshikatsu Takazawa, Yasuyuki Shibata, Young-son Do, Young-hee KIM; 19th Korea-Japan Co-operative Joint Research on POPs and Other Relative Chemicals (2020)
Environmental Monitoring of POPs and Other Priority Pollutants: Comparison with HV and TD method
- 5) Yoshikatsu Takazawa and Yasuyuki Shibata; 13th Workshop on Environmental Monitoring of POPs in East Asian Countries (2020)
Analytical Methods for Short-Chain Chlorinated Paraffins and Current Issues: Application of various air sampling

- 6) 高澤嘉一、日韓共同研究実務者会議 (2021) オンライン開催、Cooperative research on environmental monitoring of POPs and other priority pollutants
- 7) 橋本俊次：第29回環境化学討論会 (2021)
ノンターゲット環境モニタリング～平時と事故災害時～＜招待講演＞
- 8) 高澤嘉一：令和3年度福島県環境創造センター成果報告会
環境残留性有機汚染物質の網羅的モニタリング手法の開発
- 9) Teruyo Ieda, Shunji Hashimoto: 19th International GCxGC Symposium, Abstracts, 44 (2022)
Environmental analysis using GC×GC-HRToFMS at the National Institute for Environmental Studies (NIES), Japan.
- 10) 高澤嘉一；令和4年度福島県環境創造センター成果報告会
災害・事故発生時に環境中に残留する化学物質の迅速モニタリング手法の開発
- 11) Yoshikatsu Takazawa; 11th Analysis Training of Persistent Organic Pollutants in East Asian Countries (2022) <招待講演>
Review of hexabromocyclododecanes (HBCDs) in the environmental monitoring: application of thermal desorption analysis to airborne trace contaminants

【サブテーマ3】

- 1) Daisuke Inoue, Daiki Fujii, Masashi Kuroda, Michihiko Ike; 17th World Lake Conference (2018)
Removal of linear alkylbenzene sulfonate by vertical flow constructed wetlands
- 2) 井上大介、中井美希、池道彦；第56回環境工学研究フォーラム (2019)
ヨシ根圏における5種類のビスフェノール類の分解・除去促進
- 3) Rajani Ghaju Shrestha, Kazuki Nishihata, Daisuke Inoue, Michihiko Ike: The Thirteenth Annual Conference on the Challenges in Environmental Science and Engineering (2020)
Performance of constructed wetlands with different substrates for removal of heavy metals
- 4) 西畑和貴、Rajani Ghaju Shrestha、井上大介、池道彦：第57回環境工学研究フォーラム (2020)
ラボスケール人工湿地に用いる基材による高濃度重金属除去の検討
- 5) Rajani Ghaju Shrestha, Daisuke Inoue, Michihiko Ike: Water and Environment Technology Conference 2021 (2021)
Importance of substrate selection and compiling strategy in lab-scale constructed wetland on the treatment of synthetic landfill leachate containing bisphenol A
- 6) 井上大介、西畑和貴、池道彦：第58回環境工学研究フォーラム (2021)
鉛直流式人工湿地ユニットによるセレン含有廃水処理

(2) -2 ポスター発表 (学会等)

【サブテーマ1】

- 1) 野呂和嗣、矢吹芳教、中村智、第53回日本水環境学会年会 (国内・山梨県) (2019) 非定常状態における水中用パンプサンプラーの適用の検証
- 2) K. Noro, A. Banno, Y. Yabuki, S. Nakamura, SETAC Ninth Biennial Meeting of SETAC Africa (国外・南アフリカ) (2019) Validation of the application of a polar organic chemical integrative sampler (POCIS) in unsteady state conditions
- 3) S. Mizutani, R. Sugiura, S. Nakamura, Y. Yabuki, Y. Tawa, K. Noro, Y. Kanjo, the 5th

- 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management (3RINCs 2019) (国外・タイ) (2019) The relationship between businesses' handled amount and released/transferred amount of chemical substances according to the PRTR system1)
- 4) Kazushi Noro, Banno Arisa, Satoshi Nakamura, and Yabuki Yoshinori; SETAC Europe 30th annual meeting (国外・アイルランド) (2020)
A new Polar Organic Chemical Integrative Sampler (POCIS) for Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS))
- 5) Ryusuke Sugiura, Satoshi Mizutani, Satoshi Nakamura, Yusuke Tawa, Yoshinori Kanjo : The 10th Forum on Studies of Environmental and Public Health Issues in Asian Mega-cities (国内・岐阜県) (2019)
Evaluation of Relationship between Businesses' Handled Amount and Released / Transferred Amount of Chemical Substances Aimed for Predicting Chemical Pollution due to Earthquake Disaster by Using PRTR Data
- 6) 水谷聡、杉浦隆介、田和佑脩、中村智、矢吹芳教、野呂和嗣、貫上佳則；震災時の化学汚染廃棄物の発生予測に向けた対象化学物質の選定方法に関する検討，第31回廃棄物資源循環学会研究発表会 (2020)

【サブテーマ2】

- 1) 黒田啓介、高澤嘉一、白石不二雄、山崎美穂、中島大介；第27回環境化学討論会 (国内・沖縄県) (2018)、2016年熊本地震後の熊本市における環境水中エンドトキシシン濃度
- 2) 黒田啓介、高澤嘉一、白石不二雄、山崎美穂、中島大介；第52回日本水環境学会年会 (国内・山梨県) (2018)、2016年熊本地震後の熊本市の地下水・表流水水質ーバイオアッセイを用いた追跡調査1) 田和佑脩、矢吹芳教、中村智；第45回 環境保全・公害防止研究発表会 (2018) 事業所における化学物質の取扱量の推定に関する検討ー大阪府を事例としてー
- 3) Shunji Hashimoto, Hideaki Matsukami, Teruyo Ieda, Go Suzuki ; 39th International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants, Abstracts (2019)
Comprehensive analysis of PXDD/Fs and halogenated compounds in discharge water samples by GC×GC/TOFMS.
- 4) 高澤嘉一、家田曜世、橋本俊次；日本分析化学会第69年会 (2020)
大気中有害化学物質の探索的・迅速サンプリング手法の検討
- 5) 家田曜世、高澤嘉一、橋本俊次；日本分析化学会第69年会 (2020)
セミアクティブエアサンプラーと網羅分析手法による災害・事故発生時に環境中に残留する化学物質のモニタリング手法開発-データ抽出方法の検討-
- 6) 高澤嘉一、家田曜世、橋本俊次；第29回環境化学討論会 (2021)
災害時における大気中有害化学物質の迅速サンプリング手法の予備的検討
- 7) 橋本俊次、高澤嘉一、家田曜世、中村智、鈴木規之；第30回環境化学討論会 (2022)
精密質量データの直接比較による全成分の質と量の差の同時検出-リサイクル資源中間集積場火災により発生したハロゲン化合物の網羅的分析による包括的把握-
- 8) 家田曜世、高澤嘉一、橋本俊次、中村智；環境化学物質3学会合同大会 (2022)
災害・事故発生時に環境中に残留する化学物質の網羅的モニタリング手法の開発

【サブテーマ3】

- 1) Daisuke Inoue, Daiki Fujii, Masashi Kuroda, Michihiko Ike, 17th World Lake Conference (国内・茨城県) (2018) Removal of linear alkylbenzene sulfonate by vertical flow constructed wetlands 1)
- 2) 井上 大介、中井 美希、池 道彦；第56回環境工学研究フォーラム (国内・岡山県) (2019)

ヨシ根圏における5種類のビスフェノール類の分解・除去促進

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 中村智：環境問題特別講演会（主催：大阪環境分析測定事業者協会、令和元年11月19日、大阪産業創造館、参加者約100名）にて講演
災害・事故に起因する化学物質リスクへの対応力強化について
- 2) 水谷聡：SDGs Tech Meeting（主催：公立大学法人大阪 大阪市立大学・大阪イノベーションハブ、令和元年12月17日、グランフロント大阪ナレッジキャピタルコンベンションセンター、参加者約100名）にて講演
災害時の化学物質漏洩に備える？PRTRを活用した化学物質存在量の推定
- 3) 中村智：徳島県化学物質の適正管理に関する講演会（主催：徳島県、令和2年1月31日、徳島県庁11F講堂、参加者約100名）にて講演
緊急の災害・事故に備えた大阪府の化学物質対策への取り組み
- 4) 田和佑脩：大阪府化学物質対策セミナー（主催：大阪府・大阪市・堺市、令和2年2月17日、大阪市立阿倍野区民センター、参加者約500名）にて講演
事業者における災害・事故時のリスクと管理手法
- 5) 中村智、井上大介：S17公開講演会（主催：国立研究開発法人国立環境研究所、令和2年2月21日、TKP東京駅日本橋カンファレンスセンター、参加者約350名）にて講演
PRTRデータを活用した化学物質存在量の推計、災害・事故後に環境中に残留する化学物質汚染の除去対策
- 6) 田和佑脩、中村智：環農水研シンポジウム2020（主催：大阪府立環境農林水産総合研究所、令和3年2月22日、Web開催、参加者約200名）にて発表
もしものときどうする？～災害・事故に起因する有害化学物質リスク低減のための情報基盤の整備～
- 7) 鈴木規之、浅見真理、井ノ上哲志、中村智：IASシンポジウム シリーズ第54回（主催：横浜国立大学先端科学高等研究院、令和3年11月5日、Web開催、参加者約80名）にて講演
災害・事故に起因する化学物質リスク評価・管理手法の体系的構築
- 8) 鈴木規之、浅見真理、井ノ上哲志、中村智：第34回日本リスク学会大会公開シンポジウム（主催：日本リスク学会、令和3年11月20日、Web開催、参加者約80名）にて講演
災害・事故に起因する化学物質放出に伴う環境リスクの評価・管理手法の体系的構築に関する研究～PRTRデータを活用した化学物質存在量の推計～
- 9) 山崎耕平、水谷聡：第8回 大阪市立大学都市防災研究シンポジウム（主催：大阪市立大学都市防災教育研究センター、令和3年11月6日、Web開催、参加者約40名）にて講演
PRTRのすそ切り以下排出量データを用いた大阪府下の各市区における小規模事業者からの化学物質排出量の推計
- 10) 中村智：日本水環境学会関西支部第38期支部セミナー（主催：日本水環境学会関西支部、令和4年11月1日、キャンパスプラザ京都（ハイブリッド開催）、参加者約200名）にて講演
災害・事故にともなう化学物質の流出リスクの推計
- 11) 水谷聡：第9回 大阪公立大学都市防災研究シンポジウム（主催：大阪公立大学都市防災教育研究センター、令和4年11月12日、大阪公立大学学術情報総合センター（ハイブリッド開催）、参加者約40名）にて講演
化学汚染災害廃棄物の処理計画策定における優先化学物質の選定方法の検討～堺泉北臨海工業地帯を例として～
- 12) 水谷聡：大阪公立大学開学記念シンポジウム（主催：大阪公立大学工学研究科都市系専攻、令和5年1月20日、大阪公立大学田中記念館ホール（ハイブリッド開催）、参加者約100名）にて講演

小規模事業者からの化学物質排出量の推計～大阪府下の災害廃棄物処理計画に向けて～

- 13) 中村智：徳島県化学物質の適正管理に関する講演会（主催：徳島県、令和5年1月31日、グランヴィリオ徳島、参加者約70名）にて講演
災害・事故にともなう化学物質の流出リスクの推計
- 14) 中村智、橋本俊次、井上大介：S17公開講演会（主催：国立研究開発法人国立環境研究所、令和5年2月28日、航空会館（ハイブリッド開催）、参加者約230名）にて講演
排出推定と自治体の取り組み、包括的な汚染監視、環境中に流出した化学物質の除去技術

（４）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項無し。

（５）本研究費の研究成果による受賞

- 1) （公社）日本水環境学会関西支部第15回奨励賞、2020年11月、大阪府立環境農林水産総合研究所、野呂和嗣、化学物質漏洩事故時の水環境モニタリングに適用した新規パッシブサンプラーの開発
- 2) 環境科学会2020年会優秀発表賞（富士電機賞）優秀賞、2020年11月、大阪市立大学大学院工学研究科、山崎耕平、PRTRにおけるすそ切り以下事業者からの化学物質排出量の推計精度のトレンド
- 3) 第24回環境技術学会論文賞、2022年10月、大阪公立大学大学院工学研究科、水谷聡、PRTRを活用した少人数事業所からの化学物質排出量分布の推定
- 4) 環境科学会2023年度論文賞、2023年2月、国立環境研究所、小口正弘他、算出方法の実態から見たPRTR届出排出移動量データの信頼性

（６）その他の成果発表

- 1) 中村智：環境省 令和2年度化学物質アドバイザー制度に関する講習と意見交換会（令和3年3月21日、Web開催）
大阪府における化学物質対策について～大阪府化学物質管理制度と大規模災害事故への備え～
- 2) 中村智：環境省 令和4年度災害事故対応に向けた地方公共団体向け講習会（令和5年3月2日、Web開催）
災害・事故にともなう化学物質の流出リスクへの自治体の対応
- 3) 中村智：環境省 令和4年度化学物質アドバイザー制度に関する講習と意見交換会（令和5年3月11日、Web開催）
災害・事故にともなう化学物質の流出リスクへの自治体の対応

IV. 英文Abstract

Study on strengthening the ability to respond to disasters and accidents

Principal Investigator: Satoshi NAKAMURA

Institution: Research Institute of Environment, Agriculture and Fisheries, Osaka
Prefecture, Shakudo 442, Habikino city, Osaka, JAPAN

Tel: +81-72-958-7064 / Fax: +81-72-956-9790

E-mail: NakamuraSato@knsk-osaka.jp

Cooperated by: National Institute for Environmental Studies, Osaka University,
University of Shizuoka

[Abstract]

Key Words: Chemical substance abundance, Information sharing, Environmental monitoring, Environmental restoration technology

In this theme, we developed methods for estimating the amount of residual chemical substances potentially present in disaster- and accident-prone areas. We studied the information sharing system between the environmental, fire, and other departments in charge of disaster prevention to develop monitoring and removal technologies for residual chemical substances from the environment for a long duration after the advent of a disaster or accident. Three sub-themes were set for achieving these objectives.

In sub-theme 1, we developed a method for estimating the abundance of chemical substances based on published data such as PRTR data, which are foundational for disasters and accident response. We built an information infrastructure database for the location and properties of chemical substances, consequently developing a map display function using the geographic information system (GIS). In addition, we examined the manner in which these information infrastructures could be shared in the aftermath of a disaster with both the environmental departments and various organizations, such as the fire and disaster prevention departments, within and outside the region to build a cooperative system.

In sub-theme 2, we developed sampling and survey methods that enabled efficient, comprehensive, and low-cost implementation of the medium- to long-term monitoring of residual substances and identification of the scope of post-disaster countermeasures. In addition, since there was potential for fresh contamination via secondary products resulting from fire or chemical reactions occurring at the disaster site, we developed a comprehensive data analysis method that captured a wider scope of residual substances, such as impurities and reaction products.

In sub-theme 3, we comprehensively investigated the countermeasure technologies for removing existing chemical substances (purification and restoration technologies). The information on residual substances was systematically organized based on various factors, such as applicable substances, contaminated environments, scale, cost, energy consumption, and environmental impact. Consequently, a database of potentially applicable technologies was established. In addition, based on the results of other themes and subthemes, we examined a treatment method for chemical substances that need to be prioritized, using high-efficiency residual chemical removal technology (Versatile Constructed Wetland system) with low-cost and -environmental impact.