

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

S-17-1 災害・事故に対する化学物質リスク管理基盤の構築  
(J P M E E R F 1 8 S 1 1 7 1 0)

平成30年度～令和4年度

Development of chemical risk assessment and management system as disaster and emergency response

〈研究代表機関〉

国立研究開発法人国立環境研究所

〈研究分担機関〉

大阪大学

お茶の水女子大学

明治大学

横浜国立大学

静岡県立大学

〈研究協力機関〉

お茶の水女子大学（令和元年5月23日まで）

一般財団法人食品薬品安全センター

国立大学法人東京農工大学、金沢大学

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・事故での非常状態のリスク評価手法の開発とリスク管理基盤の構築による総括	・・・・・・・・・・	18
(国立研究開発法人国立環境研究所)		
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-2 災害・事故等のリスク管理における対策オプションの評価に関する研究		
(大阪大学、お茶の水女子大学)		
	・・・・・・・・・・	33
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 非定常状態における健康リスク評価手法の基礎的検討  
(明治大学)

・・・・・・・・・・ 48

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－４ 災害・事故等の非定常状況下における曝露量把握手法に関する研究  
(横浜国立大学、静岡県立大学)

・・・・・・・・・・ 63

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

・・・・・・・・・・ 77

Ⅳ. 英文Abstract

・・・・・・・・・・ 87

## I. 成果の概要

課題名 S-17-1 災害・事故に対する化学物質リスク管理基盤の構築

課題代表者名 鈴木 規之 (国立研究開発法人国立環境研究所企画部フェロー)

研究実施期間 平成30年度～令和4年度

### 研究経費

328,995千円(合計額)

(各年度の内訳：平成30年度：58,795千円、令和元年度：67,550千円、令和2年度：67,550千円、令和3年度：67,550千円、令和4年度：67,550千円)

### 研究体制

(サブテーマ1) 災害・事故での非定常状態のリスク評価手法の開発とリスク管理基盤の構築による総括(国立環境研究所)(JPMEERF18S11701)

(サブテーマ2) 災害・事故等のリスク管理における対策オプションの評価に関する研究(大阪大学)(JPMEERF18S11702)

(サブテーマ3) 非定常状態における健康リスク評価手法の基礎的検討(明治大学)(JPMEERF18S11703)

(サブテーマ4) 災害・事故等の非定常状況下における曝露量把握手法に関する研究(横浜国立大学)(JPMEERF18S11704)

### 研究協力機関

お茶の水女子大学(令和元年5月23日まで)、一般財団法人食品薬品安全センター、国立大学法人東京農工大学、金沢大学

本研究のキーワード 非定常リスク評価、対策オプション、曝露量把握、情報システム、排出・曝露シナリオ

## 1. はじめに(研究背景等)

### 1) 研究の背景

東日本大震災の際には、火災や流出、また市民の健康にかかわるリスク懸念が生じたが、特に有害物質への対応が適切に行われたとは言えない。一方、災害・事故に伴う化学物質の流出や拡散は多く経験されてきた。わが国では危険物施設の火災および流出事故は増加傾向にあり、環境汚染の視点から対応が求められるが、その方法、体制は確立されていない。したがって、高頻度・小規模の火災・流出等事故から大災害の対応まで体系的な方法論の確立が必要である。

### (2) 本研究の位置づけと意義

事故の防止を目指す安全工学的研究は広く進められてきた。これらは、工場におけ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に主眼があり、環境側から、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。本研究は、環境の視点から災害・事故に伴う環境保全上の支障に対処する方法について、迅速監視手法、予測手法、変動する非定常的なリスク要因への評価手法、および災害・事故への対応力強化を課題ととらえ体系的に取り組む。これにより、環境科学としての新たな領域を創出するとともに、科学的成果の社会実装の道筋までを提示する。これにより、科学研究としての革新性、先導性および社会実装に結び付く将来の発展性を有する。

### (3) 緊急に実施する必要性

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、事故・災害への対応力強化を早急に確立することが必須である。

#### (4) 本研究の目的

以上を踏まえ、本研究では、災害・事故に対応する迅速な監視手法の整備、汚染拡散の予測手法の整備、災害・事故に伴う非定常的なリスク事象に対する評価手法の確立、さらには情報基盤や事例に即したリスク管理体制の整備を目指す研究を構想し、これを具体的に展開するための課題、研究方法と体制を検討する。

## 2. 研究開発目的

S-17-1課題は、S-17課題全体のうち、災害・事故での化学物質リスク管理で想定される非定常リスク評価手法、リスク管理における対策オプションの評価の研究、曝露把握手法などの研究、および、S-17全体の成果を統合して格納し、情報や技術を広く行政、市民に活用可能とするための情報基盤の構築を担当する。

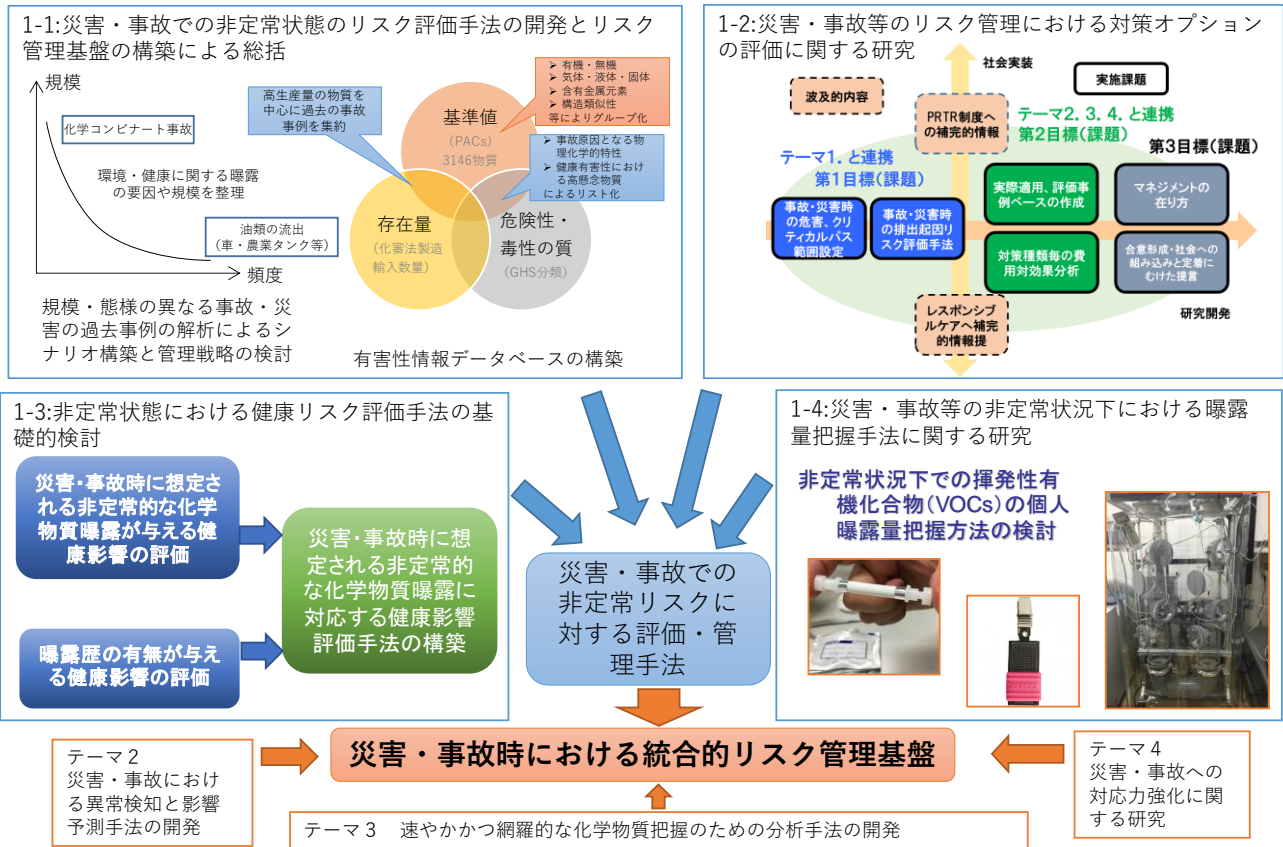
サブテーマ1では、災害・事故での非定常状態のリスク評価手法の開発、災害・事故における化学物質等の漏出・排出シナリオの策定、および全テーマの成果を広く利用可能とするための統合的リスク管理基盤の構築の3つの検討を行う。また、全テーマの成果を集約して活用可能とする統合的リスク管理基盤の構築を行う。

サブテーマ2では、非平常時を対象として、リスク論に基づいた対策オプションの評価を通じて災害・事故の原因、規模、事象、大気・水・土壌などの被影響先の性質を考慮した対策オプションの有効性を評価する。同時に、リスク管理戦略の構築のための情報を提供する。前半年次においては既往の文献調査を行い、対策オプションを種類別、関係主体別に、整理・類型化する。この類型に基づき、リスク懸念および対策有効性が大きいと見込まれる代表的なシナリオを構築し、リスクと費用対効果を評価する。後半年次においては、他のサブテーマと連携し、この整理の枠組みと評価結果を発展させ、得られた知見をもとに代表シナリオの追加と対策オプションの評価手法の拡張を通じて、事例評価を継続する。

サブテーマ3では、非定常状態という新たな健康リスク評価における実験的影響評価手法を、化学物質の「曝露歴の有無が与える健康影響」および「曝露量の変動が与える健康影響」について実験動物を用いて構築する。それぞれ、従来の健康影響評価手法との相違を比較し、構築した評価法の有用性を検討する。

サブテーマ4では、災害・事故等の非定常状況下における化学物質への曝露状況を迅速に把握するため、VOCに関しては動力が必要ない小型携帯捕集法の一つである拡散型パッシブサンプラーを用いた個人曝露量把握方法を検討する。また、VOC以外の半揮発性有機化合物（SVOC）には、ハンドワイプ法やシリコンパッシブ法等の適応可能性を検討する。最終的に、生体に対する影響の観点から曝露量を迅速に把握する手法を構成し、サブテーマ1、3等におけるリスク評価のための曝露知見を直接的に取得する手法を開発する。

# S-17-1 災害・事故に対する化学物質リスク管理基盤の構築



## 3. 研究目標

全体目標	災害・事故に起因する化学物質リスク管理に必要な、災害・事故での非常状態のリスク評価の概念と化学物質、シナリオ、評価手法などの例示、段階的リスク論に基づく対策オプション評価モデル、災害・事故時の個人曝露量の新たな評価手法を確立し、これらをテーマ2-4の成果も併せて迅速に事象の推移に応じて必要な主体に提供可能とする。
サブテーマ1	災害・事故での非常状態のリスク評価手法の開発とリスク管理基盤の構築による総括
サブテーマリーダー/所属機関	鈴木規之 国立研究開発法人国立環境研究所
目標	災害・事故での非常状態のリスク評価手法の方向性および災害・事故における化学物質等の漏出・排出シナリオを体系的に提示する。また、S-17全体を統括し、全サブテーマごとの研究成果を横断的に統合し、災害・事故に起因する化学物質リスクに対処する主体が活用可能な形で情報基盤として提供する。
サブテーマ2	災害・事故等のリスク管理における対策オプションの評価に関する研究

サブテーマリーダー/所属機関	東海明宏 大阪大学
目標	災害・事故の発生のタイミングと活用データの組合せで構成した段階的リスク論に基づいた対策オプション評価モデルを構築するとともに、包括的整理で抽出された政府、自治体、学会等が推奨する対策オプションを踏まえ、気圏、水圏、土壌圏の3つの環境媒体をとりあげた代表事例の対策評価を通じて、PRTR対象物質を範囲として適用可能な災害・事故時のリスク対応戦略を提案する。

サブテーマ3	非定常状態における健康リスク評価手法の基礎的検討
サブテーマリーダー/所属機関	川口真以子 明治大学
目標	実験動物を用いて、化学物質の「曝露歴の有無が与える健康影響」および「曝露量の変動が与える健康影響」について毒性学的検討を行い、災害や事故で想定される非定常状態の健康リスク評価のための実験的影響評価手法を構築する。

サブテーマ4	災害・事故等の非定常状況下における曝露量把握手法に関する研究
サブテーマリーダー/所属機関	三宅祐一 静岡県立大学
目標	災害・事故時のVOCsの個人曝露量評価を行うために、パッシブサンプラーを用いた個人曝露量評価法の精度評価を行い、個人曝露量の算出に不可欠なサンプリングレートの実測値を拡充する。また、サンプリングレートの推算法を提案し、得られたサンプリングレートの推算値と実測値をサブテーマ1で作成した情報基盤に実装する。さらに、SVOCsの個人曝露量評価法として、シリコーン素材を用いた個人曝露量評価法の実用性を評価する。

#### 4. 研究開発内容

災害・事故に起因する化学物質リスクの評価・管理手法の体系的構築に関する研究では、1～4のテーマの連携により、災害・事故で想定し得る非定常環境における異常検知の手法、迅速及び網羅的分析法、拡散予測の手法、曝露及びリスク評価の科学的手法の確立、および化学物質の基礎情報（物性、毒性等）や化学物質の所在と排出可能性の情報を整備、並びにリスク管理対策の有効性の評価などの行政・社会的手法を確立し、科学的手法とあわせて活用可能な統合リスク管理基盤として提供することとしている。

本テーマでは、非定常的なリスク因子に対するリスク評価手法の構築と管理の方向性、影響の観点から、多様な形態が想定される災害・事故に伴う化学物質に関するリスク管理オプションの有効性を検討し、曝露量把握の手法の開発を行う。サブテーマ(2)では、災害・事故等に適用し得るリスク管理の対策オプションの有効性を検討し、サブテーマ(3)では災害・事故で想定される非定常のリスク評価を実施するための基礎的な毒性学的検討を行う。サブテーマ(4)では、生体への影響の観点等から曝露量を直接把握する手法を検討し、これらサブテーマ(2)から(4)とテーマ2 から4 の成果を統合してリスク評価手法として利用可能とする統合情報基盤の構築をサブテーマ(1)で行う。この統合基盤を通じて、施策形成の基礎知見及び研究成果の行政及び防災諸分野等への提供を目指す。

サブテーマ1では、災害・事故での非定常状態のリスク評価手法の開発、災害・事故における化学物質



等の漏出・排出シナリオの策定、および全テーマの成果を広く利用可能とするための統合的リスク管理基盤の構築の3つの検討を行う。化学物質等の排出シナリオの策定の課題では、災害・事故において想定される化学物質等の排出可能性の予測手法として排出シナリオの構成を目指す。災害・事故のさまざまな時間スケール、自然災害、火災・爆発・流出等の事故態様、原因事象の規模、化学物質の物質特性や用途特性などに着目し、まず過去の事故事例の分析を行ってシナリオ構築のための類型化を検討する。災害・事故での非定常リスク評価手法の開発では、非定常リスクとして想定される突発的な、不測の、あるいは破壊的なさまざまな時間スケールを念頭に非定常リスク評価手法としての一般化の方向性を検討する。比較的少数の物質について詳細な基礎的検討がなされると期待されるサブテーマ1-3の成果を受けつつ、より多くの範囲の物質への一般化を可能とすることを意図した検討を進める。統合的リスク管理基盤の構築の課題では、サブテーマ1-2～1-4およびテーマ2～4の各課題の成果を搭載し、また、排出シナリオ、物質、推定手法、分析法、評価手法などを横断的に検索および統合的に活用するためのシステム設計と開発を行う。このため、各サブテーマおよびテーマ代表者と緊密に連携し、それぞれの課題の具体的な検討の状況を随時吸収しながら設計と開発を行う。

サブテーマ2では、非平常時を対象として、リスク論に基づいた対策オプションの評価を通じて災害・事故の原因、規模、事象、大気・水・土壌などの被影響先の性質を考慮した対策オプションの有効性を評価する。同時に、リスク管理戦略の構築のための情報を提供する。前半年次においては既往の文献調査を行い、対策オプションを種類別、関係主体別に、整理・類型化する。この類型に基づき、リスク懸念および対策有効性が大きいと見込まれる代表的なシナリオを構築し、リスクと費用対効果を評価する。後半年次においては、他のサブテーマと連携し、この整理の枠組みと評価結果を発展させ、得られた知見をもとに代表シナリオの追加と対策オプションの評価手法の拡張を通じて、事例評価を継続する。

サブテーマ3では、非定常状態という新たなリスク評価における実験的影響評価手法を、化学物質の「曝露量の変動が与える健康影響」および「曝露歴の有無が与える健康影響」について実験動物のラットを用いて構築する。評価対象物質としては、製造量と毒性の強度、事故・災害時の環境への漏出のしやすさ等から考え、ヒトへの曝露の可能性が高い物質を候補とし、曝露量の変動する場合の毒性の影響評価指標の信頼性を高めるため、すでに科学的知見が集積されているものを選択する。陽性対照として毒性が認められている単回または反復曝露群、陰性対照として溶媒投与群も併せて試験を行う。「曝露量の変動が与える健康影響の評価」では、曝露量はGlobally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS) などにおける単回または反復曝露の毒性が認められた曝露量と総曝露量が同じになるよう調整し、減衰曝露する。「曝露歴の有無が与える健康影響の評価」では、GHSなどの曝露において毒性が認められた曝露量を曝露歴なし群で用い、事故・災害経験を想定した再曝露群での再曝露時の投与量を曝露歴なし群の投与量と同じとする。毒性の指標として体重・摂餌量などの測定、活動量などの行動学的検討を行う。また、曝露終了後に採血し、血球数などの血液学的検査、総蛋白量・血糖などの血液生化学検査および血中ホルモン測定による内分泌学的検討を行う。加えて、GHSなどの毒性が認められている臓器は病理組織学的解析を行う。

サブテーマ4では、災害・事故等の非定常状況下における化学物質への曝露状況を迅速に把握するため、VOCに関しては動力が必要ない小型携帯捕集法の一つである拡散型パッシブサンプラーを用いた個人曝露量把握方法を検討する。各対象物質のサンプリングレートを算出していく過程で、サンプリングレートに大きく影響を与える環境条件（風速、湿度、温度、濃度変化等）を明確化する。特に、非定常状況下では濃度変化が大きいことが想定されるため、重点的に検討する。また、VOC以外の半揮発性有機化合物（SVOC）には拡散型のパッシブサンプラーは使用できないことが予想されるため、ハンドワイプ法やシリコンパッシブ法に関する情報を収集することで、適応可能な物質の種類やその濃度範囲を把握する。また、実際にPRTR対象物質や公募方針に記載されている対象物質の中でSVOCに分類される物質を用いて、非定常状況下での環境条件を想定したSVOCのサンプリングレートなどの評価を行う。次に、災害・事故等の非定常状況下での影響が大きい曝露経路を統合的に把握するために化学物質の曝露関連

情報を網羅的に調査し、主要な曝露経路を抽出する。これら化学物質の物性情報などから、曝露可能性（曝露性ランク）をクラス分けし、高懸念となる化学物質の曝露経路を推定できる方法を提案し、災害・事故時のような状況において効率的な調査が可能となる。最終的に、生体に対する影響の観点から曝露量を迅速に把握する手法を構成し、サブテーマ1-1、1-3等におけるリスク評価のための曝露知見を直接的に取得する手法を開発する。

## 5. 研究成果

### 5-1. 成果の概要

#### 5-1-1. 統合的リスク管理基盤および漏出・排出シナリオに関する成果

テーマ1およびS17全体の成果を格納し応用するための仕組みとして、統合的リスク管理基盤を構築した。本基盤は、多様な機能を有したWebシステムとして構築した。システムは外部公開サーバとクライアントサイド（利用者のPCやスマホなど）の連携で動作する仕組みとして設計した（図0.1）

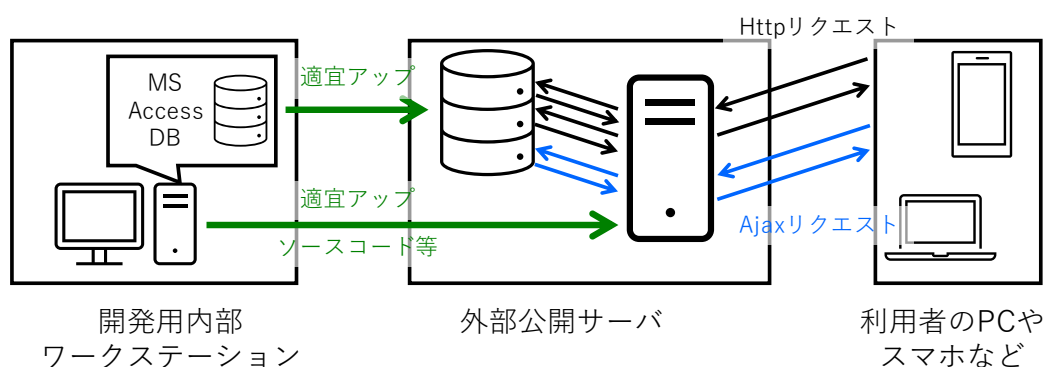


図0-1 統合的リスク管理基盤 (D.Chem-Core) の概要

本システムの開発においては、複数の仮想事例を共通シナリオとして設定してこれを応用の場と装丁することにより開発を進めた。化学物質の環境放出を伴う過去の事故事例のレビューおよび関係者との議論により、5つの漏出・排出シナリオ（①油、②界面活性剤、③火災、④農薬、⑤有機VOC）を設定した。これらのシナリオに対し、排出先媒体（大気・水域・土壌）、排出時間（短期・長期）、放出物質

表0-1 共通シナリオとして設定した5つの仮想事例

カテゴリ	事故の起動要因	仮想事例	想定対象物質	排出量及び時間	シナリオ設定場所
油	洪水、温暖化等の豪雨 あるいは単独の流出	豪雨での冠水により鉄工所で、2000Lタンク10個分の低粘度油（焼入れ用）が河川および周辺土壌に流出。	パラフィン系低粘度鉱油	20,000kg 瞬時的	佐賀県佐賀市 （内陸、郊外） 六角川
界面活性剤	地震 あるいは単独の事故	自動車部品の製造工場で、処理剤である界面活性剤が工場内でもれ、排水処理場に流入。処理剤過多で多量の泡が発生し処理水が流下。	ポリ（オキシエチレン） アルキルエーテルとLASの 混合物	10ton 2h	京都市 淀川水系
火災	火災	大型倉庫（プラスチック製品を大量保管）で発生した火災が数日にわたり継続。消火剤の散布もあり、大気経由の健康影響と周辺農地への影響、消火流出物による周辺農地への影響の懸念。	PAHs、難燃剤、消火液 （界面活性剤）および廃水	- 300h	埼玉県 （内陸、田舎） 流出先河川を設定
農薬	津波等の自然災害 あるいは単独の事故	農薬運搬中の交通事故により、積載していた農薬が側溝へ流出。大気および河川経由の健康影響、農業影響の懸念。	エンドスルファン、シマジン、ダイアジノン、フェントロチオン、イソキサチオン、イミダクロプリドのいずれか一つ	3.5ton 1h	岩手県紫波郡 北上川
有機VOC	地震、津波など自然災害 あるいは単独の事故	可塑剤等の製造工場で、1,2-ジクロロエタン回収中に爆発事故。火災発生で溶剤や医薬・農薬中間体に燃え広がる。	1,2-ジクロロエタン、トルエン、ジフェニルホスホルルモノクロリド、りん酸トリフェニル	6,000kg 12h	愛知県半田市 （コンビナート）

の把握可否（明白・検出可能・不明）、放出源（事業所・交通事故）等の要因を具体化し、これらの要因の組合せを可能な限り網羅するよう5つの仮想的な事象例を設計した（表0-1）。

具体例としてのシナリオの試行を通じた開発により、システムの動作を設計し、Controller, Library, Model, Viewの各要素をによりリクエストの入口・出口の制御からユーザーによる情報取り出しまでを進めるシステムとして開発した（図0-3、表0-2）。本システムによって、S-17全成果の格納を可能とするとともに、災害・事故に伴って必要となる情報リクエストに対して迅速かつ効果的な出力を可能となる仕組みとして完成させた。

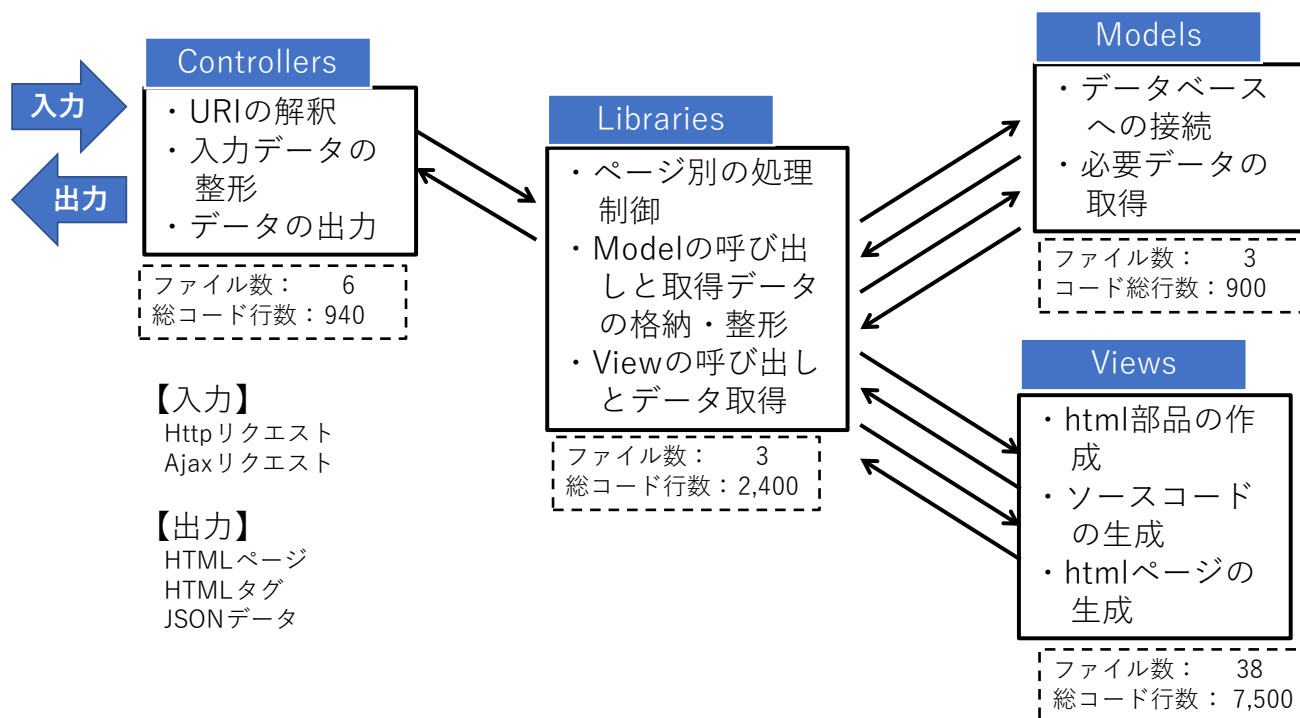


図0.3 システム設計とリクエスト処理の概念図

表0.2 システム内のテーブル群の概要

分類	格納データについて	テーブル数	レコード総数※
内部制御用	HTML基本情報やHTMLブロック作成のための入力情報	8	522
情報タグ	起動要因や要素情報等の情報タグのマスターデータやデータ構造	9	2,856
個別情報	個別情報単位での掲載情報と関連する情報タグ等	6	95,003
化学物質の分類	化学物質を分類から検索する際に利用する情報	5	91,717
毒性	物質別情報に掲載する毒性情報を情報源別に格納	4	1,565
カスタム情報	大気モデルの結果や除去技術情報など目的別メニューで個別にページを作成した情報	3	409
地図	地図表示やその関連機能で利用する情報	4	1,575,474
PRTR	PRTR届出データや在庫量推計に関連する情報	7	410,003
外部リンク	物質別の外部リンク情報	3	5,982
その他	地方自治体コードなど	2	134
<b>合計</b>		<b>51</b>	<b>2,183,665</b>

※当該テーブル群の合計レコード数

## 5-1-2. 対策オプション評価手法に関する成果

図-0.4に示すような、災害・事故の事象把握、対応の時制にしたがった、段階的評価の枠組みを作成し、急性毒性管理フェーズ、亜急性毒性管理フェーズ、慢性毒性管理フェーズに分けて、対策オプションのリスク削減率、回復までの期間を定量し、先行研究の組合せを通じて、代表シナリオを設計し、対応するTiered型対策オプション評価手法の検討を行った。

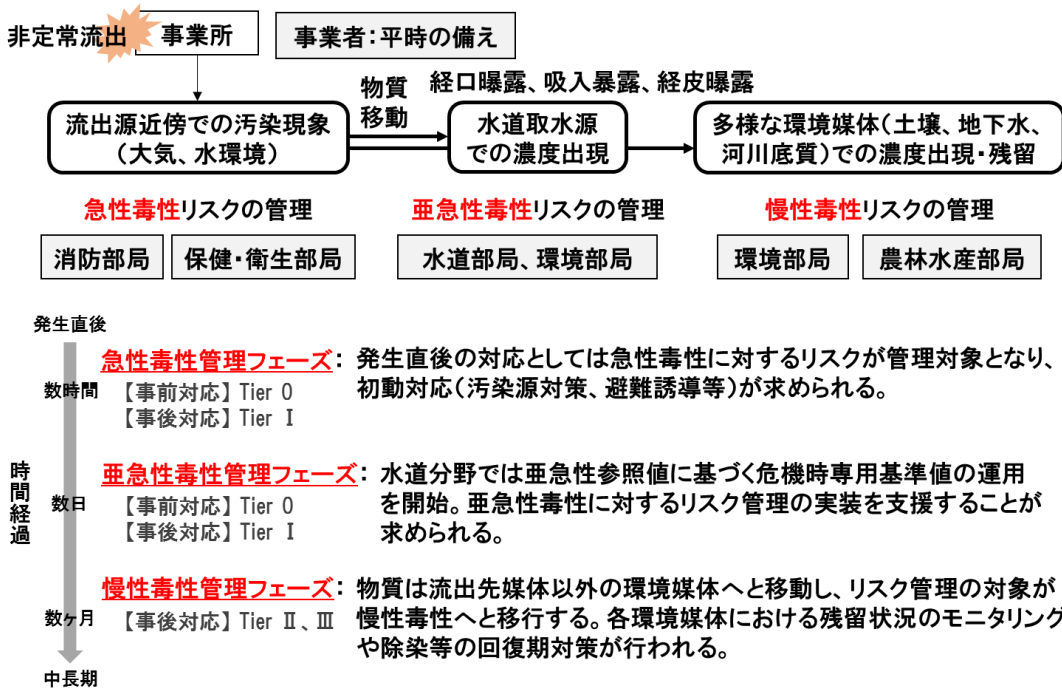


図-0.4 段階的評価の枠組み

うち亜急性毒性管理フェーズにおける分析では、淀川において流出事故が起きた場合のシミュレーションを行い、対策オプションとして、緊急遮断弁、活性炭吸着、またその双方のオプションを行った場合の影響を定量的に検討した。図0-5に示すようなシミュレーション結果が得られ、これに対策オプションを当てはめて検討した結果、事前対策として、化学物質を取り扱う事業所が緊急遮断弁といった事前対策を導入しておくことが、社会影響を可能な限り低減させるオプションとして有効であることが分かった。

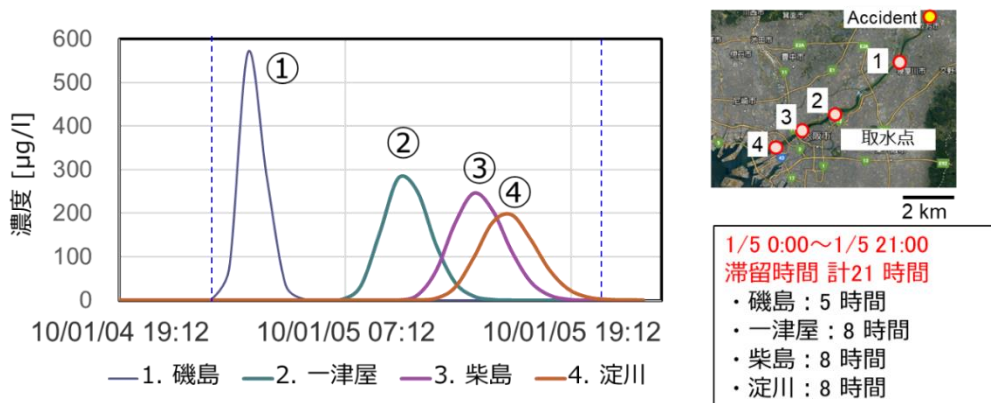


図0.5 河川水中の濃度 (アクリル酸メチルの例)

さらに河川水中の濃度変化についてもシミュレーションを行ったところ、淀川においては高濃度の水塊は、事業所に一番近い磯島取水点において、他の取水口より約2倍の高い濃度で通過することが分かったため、事故現場付近の取水口からの取水を一定時間中止するといった措置を実施することも重要である。

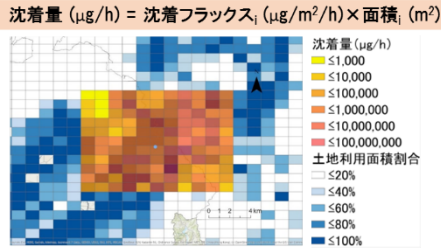
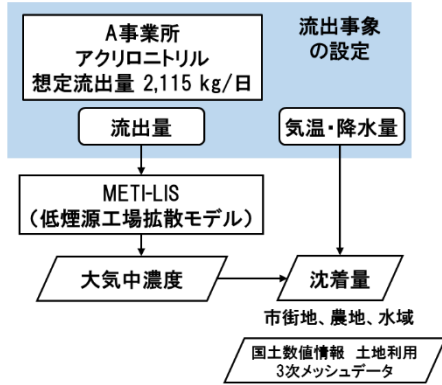
また、オゾン処理及び粒状活性炭(GAC)処理を含む高度浄水処理を有する浄水場に対し、発生頻度や影響の大きさによって過去に発生した水源水質事故事例を抽出、浄水処理による低減効果、浄水場で可能な対策オプションによる対応戦略について検討した。ここでは揮発性有機化合物検出事故の原因物質であるジクロロメタン(DCM)を取り上げ、現在の粒状活性炭処理による除去率を求め、対策オプションとしてGACの更新周期を短縮した場合(対策1・2)、エアレーション処理を導入した場合(対策3)、粉末活性炭を注入した場合(対策4)の除去率と比較した(表0.3)。本研究で扱った事例においては、粒状活性炭の更新周期を現行の5年から1年短縮して4年とすることが最も費用対効果に優れていた。他の化学物質の流出に対してもオゾン処理の強化等を含めて同様の方法で評価することが可能である。

表-0.3 対策オプション等の費用対効果分析

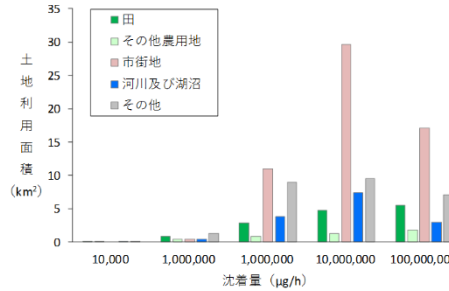
		現状	対策1	対策2	対策3	対策4
GAC更新周期		5年	4年	3年	5年	5年
追加対策		—	—	—	エアレーション 施設導入	粉末活性炭注入
費用 (千円)	事業費	—	—	—	6,114,900	—
	更新費	—	—	—	1,558,700	—
	維持管理費	—	74,837	199,564	3,157,560	100,526
	総費用	0	74,837	199,564	10,831,160	100,526
除去率	GAC処理	24%	31%	41%	24%	24%
	GAC処理以外	—	—	—	90%	0%
	総除去率	24%	31%	41%	92%	24%
ジクロロメタン 濃度低減量(mg/L)	※流入濃度が ジクロロメタン 0.036 mg/Lの場合	0.009	0.011	0.015	0.033	0.009
低減後の濃度(mg/L)		0.027	0.025	0.021	0.003	0.027
対策実施後の 水質基準超過回数		12	8	6	0	12
0.02 mg/Lの低減に 要する追加費用 (千円)		—	134,116	270,412	6,512,241	232,700

慢性毒性管理フェーズにおいて、アンチモン流出事故のケーススタディーでは、流出地点の周辺環境において、土壌・側溝泥などに吸着することで区域内に残留するが懸念され、中長期的なモニタリングや除染対策が潜在的な検討事項として挙げられる。一方でアクリロニトリル流出事故の場合、消火用水や雨水、下水処理水への移行による河川水濃度の増加を考慮した短期的な環境管理対策が検討課題となりうるということが明らかとなった(図0.6)。このように、物質の移動傾向の把握が慢性毒性フェーズにおける対策立案の支援となることが期待される。

- 対象物質：アクリロニトリル
- 対象地域：淀川水系
- 事故発生から24時間の平均大気中濃度を推計。大気からの沈着量が最大となるファーストケース(物質が放出された翌日の降雨により、大気に浮遊する全量が湿性沈着により地表面に沈着するケース)を想定した。



図：市街地を対象とした沈着量の推計



図：沈着フラックス区分での土地利用別面積の推計

図-0.6 回復期にむけた戦略の絞り込み

### 5-1-3. 非定常曝露の健康影響に関する基礎的検討の成果

非定常的曝露として、「実験1：曝露歴の有無が与える健康影響の評価」および「実験2：曝露量の変動が与える健康影響の評価」（図0.7）についてWistar-Imamichi系雄ラットを用いて行った。評価対象物質は難燃剤の一つであるtris-(1,3-dichloro-2-propyl)phosphate (TDCIPP、CAS No. 13674-87-8) および染料原料、殺菌・殺虫剤として使用されているAcenaphthene (CAS No. 83-32-9) とした。

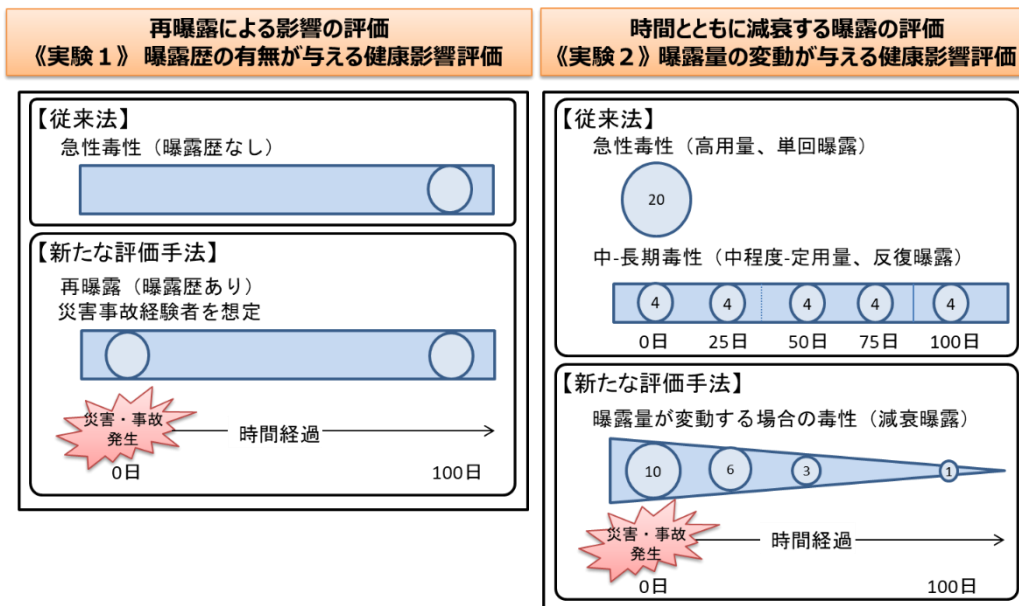


図-0.7 本サブテーマが構築する非定常的曝露の影響評価手法のイメージ図

一連の実験のうち〔実験1：TDCIPPの曝露歴の有無が与える健康影響の評価〕の結果を図0.8に示す。実験群はそれぞれ、新生仔期・成熟期ともに0ilを投与した00群、新生仔期0il・成熟期TDCIPPを投与した0T群、新生仔期TDCIPP・成熟期0ilを投与したT0群と新生仔期・成熟期ともにTDCIPPを投与したTT群である。副腎重量、血清鉄、UIBC各々、00群とT0群の間では有意差が認められなかったため、これ

らのOT群とTT群の間の有意差は新生仔期曝露の影響ではなく、新生仔期曝露と成熟期曝露の相互作用により表れたと考えられる。その他の項目に関しては、曝露歴による影響は検出されなかった。本研究結果より、新生児期に災害・事故等によって化学物質に曝露され、成人期に再曝露されるケースの健康リスクは、従来法の単回曝露、もしくは反復曝露では評価できない可能性があることが示され、曝露歴の有無を考慮した健康影響評価法の有用性が示唆された。

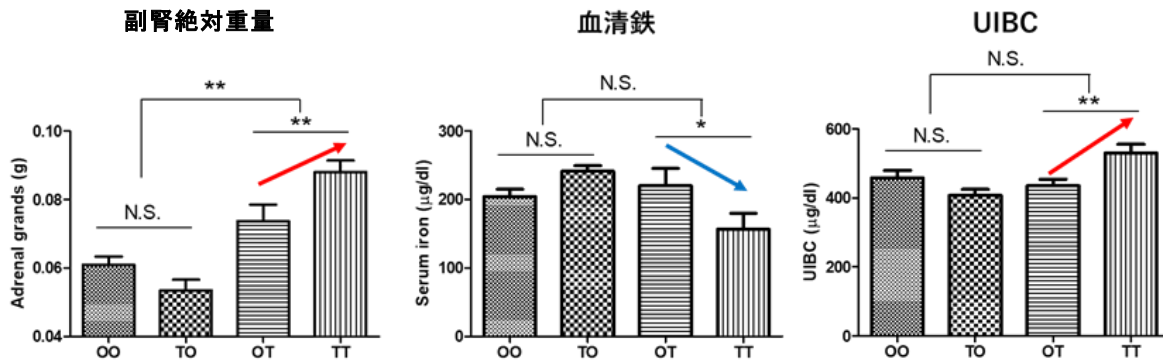


図0.8 新生仔期のTDCIPP曝露により成熟期曝露に変化のあった毒性学的測定項目  
(\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ )

#### 5-1-4. 個人曝露量把握手法に関する成果

事故・災害時に流出などが特に懸念される物質として、作業管環境測定の対象物質であるトルエン、スチレン、エチルベンゼンなど計33種類の揮発性有機化合物 (VOC) を選定した。また、事故・災害時の化学物質の曝露量把握手法として、多孔質テフロンチューブに異なる活性炭を充填剤として使用している2種類のパッシブサンプラー (ヤシ殻由来のチャコール活性炭: PAS、石油由来の球状活性炭: CBP) を対象とし、上記33種類の対象物質についてサンプリングレート (SR) の測定を行った。サンプリングレートの測定には、我々の既往研究にて開発したパッシブサンプラー性能試験用のチャンバー (図0.9) を用い、アクティブサンプラーを用いたVOC濃度の測定も同時に行った。

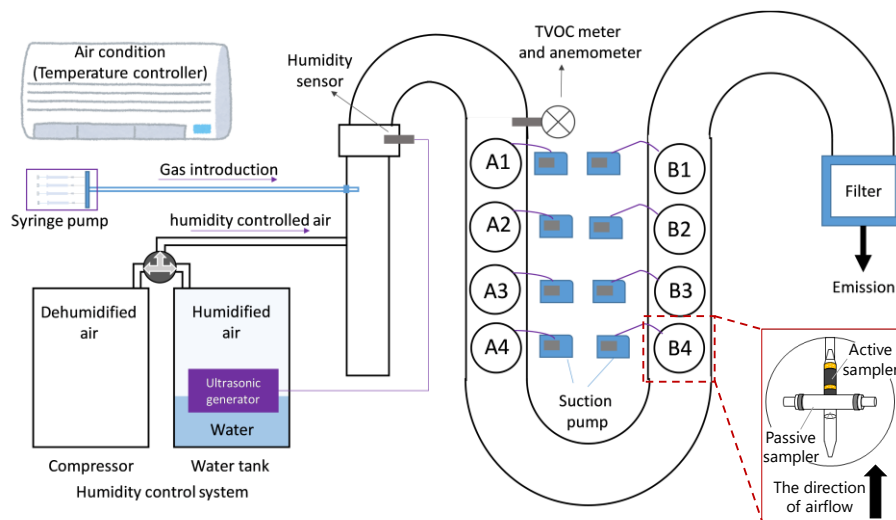


図0.9 パッシブサンプラー性能試験用のチャンバーの概略図

サンプリングレート (SR) ( $L \text{ min}^{-1}$ ) は次式により求めた。

$$SR = \frac{W_p}{C_a \times t} \quad (1)$$

ここで、 $W_p$ はパッシブサンプラーによるVOC捕集量 ( $\mu\text{g}$ )、 $C_a$ はアクティブサンプラーから算出したVOC濃度 ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )、 $t$ は捕集時間 (min) である。

33種のVOCsのサンプリングレートの相対標準偏差は、PASの場合は2.1-16%であり、CBPの場合は1.6-13%であった。このことから、本サブテーマで対象とした33種のVOCsにおいては、温度、湿度、風速およびVOC濃度の環境要因のサンプリングレートに対する影響は、無視できるレベルであることが示唆された。

また、災害・事故時の緊急事態においては、様々な化学物質による影響を迅速に把握する必要があることから、サンプリングレートの実測値が存在しないVOCsであっても、その曝露量が迅速に推算できる手法が望まれる。そのため、本サブテーマでは、VOCsのサンプリングレートの推算を試みた。分子拡散係数、臨界温度、臨界圧力等の物性値から推算式を構成し、33種の実測値との検証を経て、165物質に対するサンプリングレートを推算したデータベースを構築した。

VOCの他、燃焼や爆発等に伴う災害・事故時における準揮発性有機化合物 (SVOC) である多環芳香族炭化水素類 (PAHs) が大量に生成されることが考えられる。本研究では、シリコーンリストバンドをパッシブサンプラーとしてPAHsを捕集する妥当性の評価を行った。開発した分析方法では対象としたすべてのPAHsの回収率が60-116%であり、良好であった。次に、多くのPAHsに対して、アクティブ法を用いた空気中の実測濃度値とシリコーンリストバンドでの捕集量を比較したところ、正の相関関係が見られた。そのため、シリコーンリストバンドは、PAHsを捕集できることが示唆された。また、風速により捕集効率の影響を検討した結果、ほぼ無風状態、0.5、1、2、4  $\text{m s}^{-1}$ の条件下において、モデル物質の捕集量が最大1.4倍であり、本研究の背景と考えると、その変化が無視できるレベルであった。

PAHsは物質により、空気中における存在状態 (ガスと粒子) が異なることが知られており、本研究では、物質の存在状態を考慮しながらシリコーンリストバンドについてパッシブサンプラーとしての妥当性を評価した。測定対象としたPAHs・XPAHsについて、大気中濃度とシリコーンリストバンドでの捕集量の相関係数を図0.10に示す。環境中に低濃度で存在する一部の物質については有意な相関関係は認められなかったが、51種のガス態・粒子態PAHs・XPAHsにおいても同様に正の相関関係が認められ、シリコーンリストバンドでの捕集量から大気中濃度を推算できることが明らかになった。

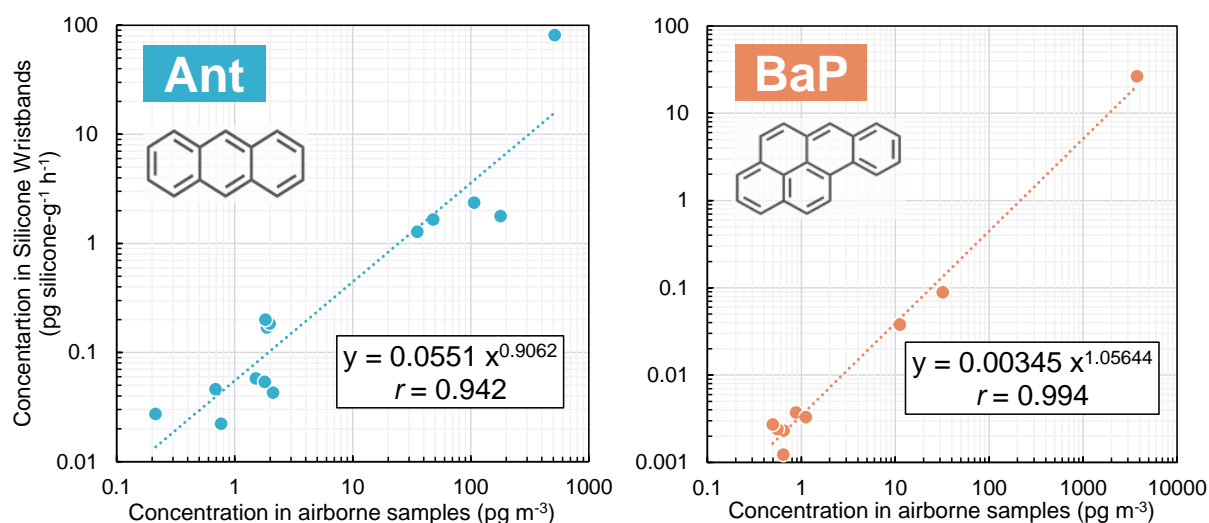


図0.10 大気中濃度とシリコーンリストバンドでの捕集量の関係



また、シリコーンリストバンドの捕集効率に関する風速条件の影響を、大気中でほぼ一定の濃度で観測される四塩化炭素 (CCl<sub>4</sub>) を指標物質として評価した。CCl<sub>4</sub>、phenanthrene (Phe)、2-chloroanthracene (2-ClAnt)、BaPおよび6-bromoBaP (6-BrBaP) の結果を図0.11に示す。ガス態および粒子態PAHs・XPAHsは、シリコーンリストバンドを用いたパッシブサンプリングにおいて、本研究の範囲内で風速影響をほとんど無視できることが示唆された。

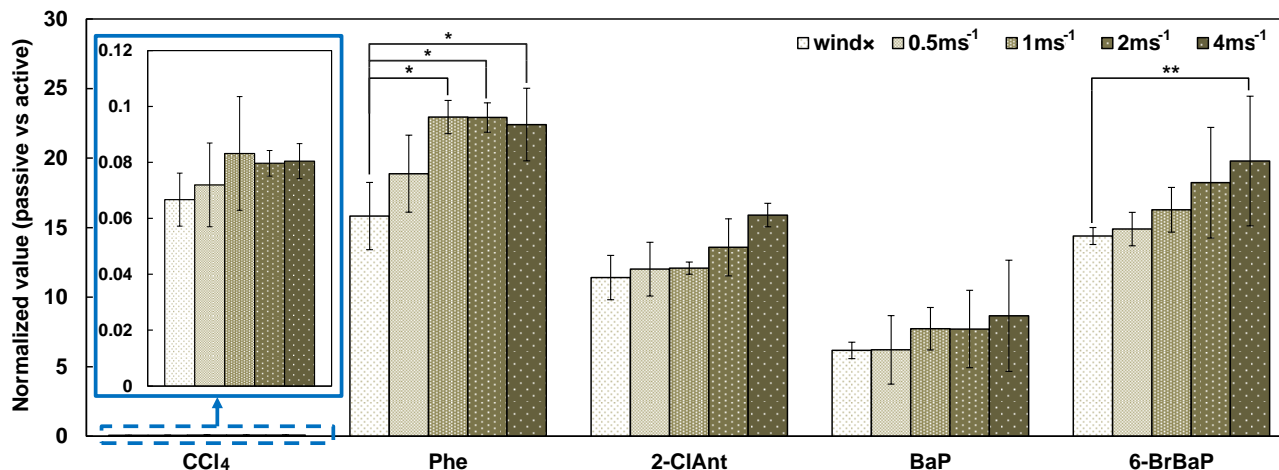


図0.11 異なる風速条件下において測定対象物質の捕集量

## 5-2. 環境政策等への貢献

### <行政等が既に活用した成果>

環境省における「災害・事故化学物質漏洩流出対応検討会」に本研究のテーマリーダーの多くが参画し、災害等対応時における地方公共団体環境部局への支援の枠組み、化管法における化学物質管理指針の改正に関する検討、また、化学物質に係る災害事故対応マニュアル策定の手引き策定に関する検討に貢献した。

災害等対応時における地方公共団体環境部局への支援の枠組みについては、環境省が実施したヒアリング等にメンバーの一部が参加して枠組み作りに貢献した。

化学物質管理指針の改正に関する検討では、化学物質管理指針に災害・事故時に関連する内容を追加する検討に参加し、化学物質管理指針の改正に結び付ける成果となった。

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策定では、本研究の成果に基づく知見を提供し、マニュアル策定に貢献した。

### <行政等が活用することが見込まれる成果>

本研究の課題は、環境研究としても環境政策としても新しい課題であることから、成果のうち具体的に活用されたものはまだ一部であるが、今後の環境政策の実施における以下のような具体的貢献、または今後の貢献の基礎として期待できると考える。

- ・S17課題全体の実施を参考として、環境省および自治体における災害・事故時の化学物質管理の基本的な考え方を提供し、施策立案の基礎として今後活用されたと考える。
- ・災害・事故時のリスク懸念物質また事例とシナリオ研究による知見は、今後の管理の対象をより典型的に理解し、対策を容易にするための基礎の一つとなりえると考えられる。
- ・複数の事例における具体的なケーススタディを通じて対策オプションのあり方を示すことにより、産業界あるいは行政における将来の取り組みにおける基礎を提供すると期待される。
- ・非正常状態でのリスク評価手法の基礎研究を具体的に示すことが出来た。これにより、災害・事故に

伴うリスク評価を実施する際に一つの知見として活用できると期待される。

・災害時の個人曝露量把握に適用するためのパッシブ分析法の開発と、サンプリングレートなど基礎知見を確立した。これにより、今後の災害時の個人曝露量評価の有効な手法となると期待される。

### 5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>災害・事故に起因する化学物質リスク管理に必要なとなる、災害・事故での非定常状態のリスク評価の概念と化学物質、シナリオ、評価手法などの例示、段階的リスク論に基づく対策オプション評価モデル、災害・事故時の個人曝露量の新たな評価手法を確立し、これらをテーマ2-4の成果も併せて迅速に事象の推移に応じて必要な主体に提供可能とする。</p>	<p><u>目標どおりの成果をあげた。</u>            災害・事故での非定常状態のリスク評価の概念、化学物質の種類、シナリオ等をサブテーマ1が中心になり全テーマの連携によって明らかにした。段階的リスク論に基づく対策オプションの評価をいくつかの事例研究により示した。非定常のリスク評価につながる具体的な毒性学的知見をサブテーマ3において示した。災害・事故時の個人曝露量評価に必要なとなるパッシブサンプラーの精度評価と実用性を明らかにした。また、全テーマの成果を迅速に事象の推移に応じて提供可能とするD. Chem-CoreのWeb情報システムを開発した。これらにより、目標通りの成果を挙げたと考える。</p>

サブテーマ1目標	目標の達成状況
<p>災害・事故での非定常状態のリスク評価手法の方向性および災害・事故における化学物質等の漏出・排出シナリオを体系的に提示する。また、S-17全体を統括し、全サブテーマごとの研究成果を横断的に統合し、災害・事故に起因する化学物質リスクに対処する主体が活用可能な形で情報基盤として提供する。</p>	<p>目標通りの成果をあげた。            具体的には、災害・事故での非定常リスク評価手法の方向性については、共同で実施したサブテーマ3の成果に示す通りその方向性を示すことが出来た。化学物質等の漏出・排出シナリオの体系的な提示を行うことができた。また、全サブテーマの研究成果を横断的に統合する情報基盤については、D. Chem-Coreの公開を行った。</p>

サブテーマ2目標	目標の達成状況
<p>災害・事故の発生のタイミングと活用データの組合せで構成した段階的リスク論に基づいた対策オプション評価モデルを構築するとともに、包括的整理で抽出された政府、自治体、学会等が推奨する対策オプションを踏まえ、気圏、水圏、土壌圏の3つの環境媒体をとりあげた代表事例の対策評価を通じて、PRTR対象物質を範囲として適用可能な災害・事故時のリスク対応戦略を提案する。</p>	<p>目標を大きく上回って達成した。            気圏、水圏、土壌を対象としたプロトタイプモデルを構築し、対策オプション評価とその費用効果分析を実施し、対応戦略の優先順位を明らかにした。また当初の目標課題を拡張し、気圏では事故が伝搬するドミノ効果への対策、水圏では津波の遡上の際のリスク評価、土壌圏では流出した化学物質の二次生成物の評価まで拡張して行うことができた。</p>

サブテーマ3 目標	目標の達成状況
<p>実験動物を用いて、化学物質の「曝露歴の有無が与える健康影響」および「曝露量の変動が与える健康影響」について毒性学的検討を行い、災害や事故で想定される非定常状態の健康リスク評価のための実験的影響評価手法を構築する。</p>	<p>目標通りの成果を挙げた。          おおよそ計画通りに達成した。2つの評価対象物質(TDCIPPとAcenaphthene)を対象に、曝露歴の有無が与える健康影響評価、および曝露量の変動が与える健康影響評価を完遂した。また、TDCIPPにおいては「曝露歴の有無が与える健康影響の評価」で有意な影響を見出したことから、曝露歴を考慮した評価手法が有用であることが分かった。また、TDCIPPの新生仔期の曝露歴は影響を及ぼすが、若齢期の曝露歴やAcenaphtheneでは影響がみられなかったことから、曝露歴には時期特異性と物質特異性がある可能性が示唆された。</p>

サブテーマ4 目標	目標の達成状況
<p>災害・事故時のVOCsの個人曝露量評価を行うために、パッシブサンプラーを用いた個人曝露量評価法の精度評価を行い、個人曝露量の算出に不可欠なサンプリングレートの実測値を拡充する。また、サンプリングレートの推算法を提案し、得られたサンプリングレートの推算値と実測値をサブテーマ1で作成した情報基盤に実装する。さらに、SVOCsの個人曝露量評価法として、シリコン素材を用いた個人曝露量評価法の実用性を評価する。</p>	<p>目標通りの成果を挙げた。          災害・事故等の非定常状況下における化学物質への曝露状況を迅速に把握するため、揮発性有機化合物(VOCs)に関しては動力が必要ない小型携帯捕集法の一つである拡散型パッシブサンプラーを用いた個人曝露量把握方法を検討した。各対象物質のサンプリングレートを算出していく過程で、サンプリングレートに大きく影響を与える環境条件(風速、湿度、温度、濃度変化等)を明確化すること試み、今回用いたパッシブサンプラーに関して、捕集量に対する環境要因の影響は非常に小さく、災害・事故を想定した実環境で十分使用可能であることを示すことができた。また、幅広い物性を持つVOCsに適用できるサンプリングレートの推算方法を検討し、合計165物質についてサンプリングレートデータベースを構築することができた。加えて、VOC以外の半揮発性有機化合物(SVOCs)には拡散型のパッシブサンプラーは使用できないことが予想されるため、シリコンパッシブ法に関する情報を収集し、その適用可能性を検討した。多環芳香族炭化水素類とそのハロゲン化誘導体(PAHs・XPAHs)について検討した結果、51種のガス態・粒子態PAHs・XPAHsにおいて、シリコンリストバンドでの捕集量から大気中濃度を推算できることが明らかになった。以上のように、目標どおりの成果をあげることができた。</p>

## 6. 研究成果の発表状況

### 6-1. 査読付き論文

<件数>

27件

<主な査読付き論文>

- 1) 小山陽介、鈴木規之:環境化学、29, 3 (巻, 号), 95-105 (2019). 災害・事故における化学物質汚染の管理対象物質の考察
- 2) Y. KOYAMA, Y. IMAIZUMI and N. SUZUKI: Global Environmental Research, 24, 2(2021) Systematic Analysis of Environmental Release Process and Emergency Response in Chemical Accident.
- 3) 豊田真弘, 伊藤理彩, 石田剛久, 小島直也, 中久保豊彦, 多田悠人, 東海明宏: リスク学研究, 33, 1 (2023) PRTRすそ切り以下事業所における自然災害時の化学物質の流出事故を想定した潜在的流出規模の推計. (印刷中)
- 4) Z. Xu, L. S. dos Muchangos, L. Ito, A. Tokai: J. Clean. Prod, 397, 136503 (2023) Cost and health benefit analysis of remediation alternatives for the heavy-metal-contaminated agricultural land in a Pb-Zn mining town in China.
- 5) Z. Xu, L. Ito, L. S. dos Muchangos, A. Tokai: Environ. Geochem. Health, doi.org/10.1007/s10653-022-01445-z (2022) Health risk assessment and cost-benefit analysis of agricultural soil remediation for tailing dam failure in Jinding mining area, SW China.
- 6) 田中健太, 伊藤理彩, L. S. dos Muchangos, 東海明宏: リスク学研究, 32, 2 (2022) 下水処理場における水素エネルギーキャリアとしてのアンモニアの合成プラント導入のリスク評価.
- 7) T. AKIMOTO, S. KOBAYASHI, A. NAKAYAMA, A. ISOBE, K. ABE, T. HATAKEYAMA, R. OHTA, R. YANAGISAWA, E. KOIKE, N. SUZUKI and M. KAWAGUCHI: J. Appl. Toxicol. 42, 9, 1503-1509 (2022) (IF:3.4), Toxicological effects of Tris (1,3-dichloro-2-propyl) phosphate exposure in adult male rats differ depending on the history of exposure in the neonatal period.
- 8) S. KOBAYASHI, N. KAWANO, K. MIYADO, R. Ohta, T. AKIMOTO, T. HATAKEYAMA and M. KAWAGUCHI: J. Vet. Med. Sci, 84, 1, 153-156 (2022) (IF: 1.2), Effects of tris(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate on epididymal sperm parameters in adult male rats.
- 9) Q. Wang, M. Tokumura, Y. Miyake, T. Amagai, Optimization of method for extracting 46 volatile organic compounds (VOCs) from an activated carbon-silica gel active sampler to evaluate indoor work environments, Air Quality, Atmosphere & Health, 14, 1341-1348 (2021). (IF: 5.804)
- 10) K. Sei, Q. Wang, M. Tokumura, Y. Miyake, T. Amagai, Accurate and ultrasensitive determination of 72 parent and halogenated polycyclic aromatic hydrocarbons in a variety of environmental samples via gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry, Chemosphere, 271, 129535 (2021). (IF: 8.943)

### 6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない

### 6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	4件
口頭発表（学会等）	81件
「国民との科学・技術対話」の実施	10件
マスコミ等への公表・報道等	1件
本研究費の研究成果による受賞	8件
その他の成果発表	0件

### 7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない

### 8. 研究者略歴

研究代表者：鈴木 規之

東京大学工学部卒業、工学博士、国立環境研究所 環境リスク・健康研究センター センター長、現在、国立環境研究所 企画部 フェロー

研究分担者：

- 1) 東海明宏、阪大院博士修了、（独）産総研化学物質リスク管理研究センター、現在、阪大院工研教授
- 2) 中久保豊彦、阪大院博士修了、阪大助教、現在、お茶の水女子大学 基幹研究院 准教授
- 3) （新）伊藤理彩、東大院博士修了、阪大特任研究員、現在、阪大院 工学研究科 助教(2020.1～)
- 4) （旧）小島直也、阪大院博士修了、阪大院 工学研究科 助教（2018.3-2019.12）
- 5) 川口 真以子  
横浜市立大学大学院医学系研究科修了、武蔵野大学薬学部助手・助教・講師、現在、明治大学農学部准教授
- 6) 三宅 祐一  
横浜国立大学大学院環境情報学府修了、博士（工学）、静岡県立大学食品栄養科学部 助教、現在、横浜国立大学大学院環境情報研究院 准教授

## II. 成果の詳細

### II-1 災害・事故での非定常状態のリスク評価手法の開発とリスク管理基盤の構築による総括

国立研究開発法人国立環境研究所

企画部		鈴木 規之
環境リスク・健康領域	リスク管理戦略研究室	小山 陽介
環境リスク・健康領域	病態分子解析研究室	小池 英子
環境リスク・健康領域	病態分子解析研究室	柳澤 利枝
環境リスク・健康領域	リスク管理戦略研究室	今泉 圭隆
資源循環領域	資源循環社会システム研究室	小口 正弘

#### 【要旨】

①災害・事故での非定常状態のリスク評価手法の開発、②災害・事故における化学物質等の漏出・排出シナリオの策定、および③全テーマの成果を広く利用可能とするための統合的リスク管理基盤の構築の3つの検討を行った。ただし、①災害・事故での非定常のリスク評価手法の検討は、サブテーマ1-3との連携により実施したため、この検討課題個別の報告は本報告書では行わない。

②災害・事故における化学物質等の漏出・排出シナリオの策定の検討は、リスクガバナンスの観点による災害・事故に伴う化学物質リスクへの対処の概念的な枠組みの考察（3-1、4-1）、および災害・事故において想定されうる化学物質等の排出シナリオおよび統合的リスク管理基盤を構築するための概念的シナリオの構築（3-2、4-2節）の2つのサブパートとして検討した。

リスクガバナンスの観点による災害・事故に伴う化学物質リスクへの対処の概念的な枠組みの考察では、災害・事故に起因する化学物質リスクの管理において、化学物質の平時のリスク評価の概念と、災害時のリスクの概念を融合し、それにより射程を延長することによって、我々が取り組むべき災害・事故時の化学物質リスクを定義する要因とリスク管理への統合の概念化を行った。これによって、各課題の災害のリスクに対するリスクガバナンス上の位置づけがそれぞれおよそ明らかになると同時に、S17課題全体の取り組みを通じて、災害・事故時の化学物質リスクの管理に関わるリスクガバナンス上の課題をほぼ網羅的にカバーできていることが確認できた。また、S17課題でやや取り組みの少ない、Event scenarioの領域については、同じく環境研究総合推進費1-1904課題（代表：三宅淳巳（横浜国立大学））をあわせて二つの課題全体としてより網羅的に必要な課題をカバーできることを確認した。

災害・事故において想定されうる化学物質等の排出シナリオおよび統合的リスク管理基盤を構築するための概念的シナリオの構築では、欧米で使用されている緊急時用の毒性判断値と日本国内における化学物質の存在量に関する入手可能な情報を組み合わせることにより、事故・災害時に管理対象とする化学物質の序列化について試行的検討を行い、複数の優先対象物質リストを作成した。

また、過去の事故事例の分析のため「一般環境への化学物質の放出」の可能性のある事例を収集するため、災害情報データベースに掲載の事例について、Web等で入手可能な情報を参照し、事例のスクリーニングを行った。この分析より、取扱物質の放出時間については、1日以上事例は3件であり、1日以内の事例の約4割は、放出時間が10分以内であった。放出した可能性のある取扱物質および生成物質の名称について、一般的な化学物質名での回答のほか、いわゆる化学物質の名称とは言い難い物質名も多く見られ、事故発生時には、このような情報から物質を判断していくことが課題と考えられた。

優先対象物質や事例解析の検討に加えて、具体的な事例によってサブテーマ間の連携を取って研究を進めるため、共通ケーススタディ物質および共通シナリオの設定を検討した。災害・事故で懸念される物質の範囲と、それぞれの想定に対する分析、評価、管理などのアプローチは極めて多様であり、すべてのテーマ・サブテーマを横断する共通ケーススタディ物質を見出すことは出来なかったが、化学物質の環境放出を伴う過去の事故事例のレビューおよび関係者との議論により、5つの漏出・排出シナリオ（①油、②界面活性剤、③火災、④農薬、⑤有機VOC）を設定した。

全テーマ・サブテーマ群の成果を格納し活用可能とするため、各課題の成果を掲載し、また、物質や分析法などを多角的に検索し、統合的に活用するための統合的リスク管理基盤を開発した。事象の特徴を把握しやすくするために、その要素となる情報（以降、「シナリオ要素」という。）を時間軸と要素の種類（情報の種類）の二次元で整理し、掲載情報の単位化と各個別情報に紐づける二次元のシナリオ要素のコード化（情報タグ）を行った。全ての掲載情報に必ず要素情報のタグを紐づけ、可能な場合は起動要因のタグも紐づけることとした。なお、要素情報は二次元だけでなくさらに細かい分類が可能のように二次元の大分類に加えて中分類、小分類と整理することとした。起動要因は大分類と中分類するなどの情報として整理した。情報タグは将来的に用語が修正されたり、新しい分類を追加したりという変更への対応を可能にした。個別情報については、単なる単票形式ではなく、物質リストが含まれることなどに対応すべくデータ構造を工夫した。リスク管理基盤としてのWeb情報基盤システム構築では、サーバサイドとクライアントサイド（利用者のPCやスマホなど）それぞれで動くプログラムを作成した。さらに、利便性を高めるために非同期通信（Ajax）技術も活用した。

## 1. 研究開発目的

S-17-1課題は、S-17課題全体のうち、災害・事故での化学物質リスク管理で想定される非定常リスク評価手法、リスク管理における対策オプションの評価の研究、曝露把握手法などの研究、および、S-17全体の成果を統合して格納し、情報や技術を広く行政、市民に活用可能とするための情報基盤の構築を担当する。

サブテーマ1では、災害・事故での非定常状態のリスク評価手法の開発、災害・事故における化学物質等の漏出・排出シナリオの策定、および全テーマの成果を広く利用可能とするための統合的リスク管理基盤の構築の3つの検討を行う。また、全テーマの成果を集約して活用可能とする統合的リスク管理基盤の構築を行う。

## 2. 研究目標

災害・事故での非定常状態のリスク評価手法の方向性および災害・事故における化学物質等の漏出・排出シナリオを体系的に提示する。また、S-17全体を統括し、全サブテーマごとの研究成果を横断的に統合し、災害・事故に起因する化学物質リスクに対処する主体が活用可能な形で情報基盤として提供する。

## 3. 研究開発内容

災害・事故に起因する化学物質リスクの評価・管理手法の体系的構築に関する研究では、1～4のテーマの連携により、災害・事故で想定し得る非定常環境における異常検知の手法、迅速及び網羅的分析手法、拡散予測の手法、曝露及びリスク評価の科学的手法の確立、および化学物質の基礎情報（物性、毒性等）や化学物質の所在と排出可能性の情報を整備、並びにリスク管理対策の有効性の評価などの行政・社会的手法を確立し、科学的手法とあわせて活用可能な統合リスク管理基盤として提供することを目指す。

テーマ1では、非定常的なリスク因子に対するリスク評価手法の構築と管理の方向性、影響の観点から、多様な形態が想定される災害・事故に伴う化学物質に関するリスク管理オプションの有効性を検討し、曝露量把握の手法の開発を行う。サブテーマ2では、災害・事故等に適用し得るリスク管理の対策オプションの有効性を検討し、サブテーマ3では災害・事故で想定される非定常のリスク評価を実施するための基礎的な毒性学的検討を行う。サブテーマ4では、生体への影響の観点等から曝露量を直接把握する手法を検討し、これらサブテーマ2から4とテーマ2 から4 の成果を統合してリスク評価手法とし

て利用可能とする統合情報基盤の構築をサブテーマ1で行う。この統合情報基盤を通じて、施策形成の基礎知見及び研究成果の行政及び防災諸分野等への提供を目指す。

サブテーマ1の具体的課題として、①災害・事故での非定常状態のリスク評価手法の開発、②災害・事故における化学物質等の漏出・排出シナリオの策定、および③全テーマの成果を広く利用可能とするための統合的リスク管理基盤の構築の3つの検討を行う。また、統合的リスク管理基盤への各テーマ、サブテーマの成果の集約により、S17課題全体の統括を行う。

①災害・事故での非定常のリスク評価手法の検討は、サブテーマ1-3との連携により実施する。この検討課題では、サブテーマ1-3での高度に専門的な毒性学的検討の成果を、他サブテーマ、テーマからの成果と合わせて統合的リスク管理基盤に格納し、広く利用可能とするための開発を担当する。このため、この検討課題の実験的成果はサブテーマ(3)の中でとりまとめて報告する。また、統合的リスク管理基盤への格納に関する検討は、統合的リスク管理基盤の構築の一環として進めるため、その中でまとめて報告する。このため、この検討課題個別の報告は本報告書では行わない。

②災害・事故における化学物質等の漏出・排出シナリオの策定の検討では、研究を進める過程で大きく二つの課題に分けて検討を進めた。すなわち、研究計画に設定した災害・事故における化学物質等の漏出・排出シナリオの策定の検討は、リスクガバナンスの観点による災害・事故に伴う化学物質リスクへの対処の概念的な枠組みの考察(3-1、4-1節)、および災害・事故において想定されうる化学物質等の排出シナリオおよび統合的リスク管理基盤を構築するための概念的シナリオの構築(3-2、4-2節)のパートに分けて、それぞれ3-1節、3-2節に研究開発内容を、4-1節、4-2節に結果及び考察を記述する。これらに引き続き、③統合的リスク管理基盤の構築の検討の結果について、3.3節に研究開発内容を、4.3節に結果及び考察を記述する。

### 3-1. リスクガバナンスの観点による災害・事故に伴う化学物質リスクへの対処の概念的な枠組みの考察

災害・事故に伴う化学物質リスクへの対処の概念的な枠組みをリスクガバナンスの観点から考察し、全テーマ、サブテーマ群が担う課題のリスクガバナンス上での位置づけと役割を明らかにする。具体的には、平常時の化学物質リスクに関するリスクガバナンスの構造に対して、災害・事故時の化学物質リスク管理に関するリスクガバナンスの概念を整理し、これにリスクガバナンスの概念に対する各テーマ・サブテーマのリスクガバナンス上の位置づけを明らかにする。また、逆に各テーマ・サブテーマが取り組む課題のリスクガバナンス上の位置づけを考察し、それぞれの課題が災害・事故時のリスクガバナンス上のどのような課題の解決を目指すかを明らかにする。これらの成果を全テーマ・サブテーマで共有することにより、各サブテーマが取り組むべき課題と位置づけを相互に共有しながらS17課題全体を進める。

### 3-2. 災害・事故において想定されうる化学物質等の排出シナリオおよび統合的リスク管理基盤を構築するための概念的シナリオの構築

化学物質の放出を伴う事故・災害時の対応に関して、主に毒性判断値に関する視点から国内外の取組を調査し、これらを国内における化学物質の存在量に関する入手可能な情報と組み合わせることで、災害時の優先対象物質の検討を行う。また、災害・事故のさまざまな時間スケール、自然災害、火災・爆発・流出等の事故態様、原因事象の規模、化学物質の物質特性や用途特性などに着目し、事業者へのアンケート調査等に基づく過去の事故事例の分析を行い、シナリオ構築のための類型化を検討する。災害時の優先対象物質の検討および実際の事故の類型化と排出シナリオ構築の検討に基づき、机上演習のための共通ケーススタディ物質および共通シナリオを設定する。机上演習では仮想的な事故事例に対し、災害対応時に求められる情報を洗い出し、これらの情報の体系的整理を実施する。この検討は、



S17全テーマにおける共通の課題でもあることから、本サブテーマのみでなく、全テーマのサブテーマとの議論を行いつつ進める。

### 3-3. 統合的リスク管理基盤の開発

全テーマ・サブテーマ群の成果を格納し活用可能とするためのWeb情報基盤システムを開発した。具体的には、サブテーマ1-2～1-4およびテーマ2～4の各課題の成果を掲載し、また、物質や分析法などを多角的に検索し、統合的に活用するためのシステム設計および構築を実施した。このため、各サブテーマおよびテーマ代表者と緊密に連携し、それぞれの課題の成果を随時吸収しながら設計と開発を進める。

システム開発は担当研究者が中心になり内部で設計・構築を進めた。担当研究者はWebkis-Plus (<https://www.nies.go.jp/kisplus/>) という化学物質の環境リスク情報を提供するシステムを構築・運用している実績を有し、学習コストが最小限に抑えられたことで内製を可能にした。通常システム開発では想定利用者やユースケースなどを整理して各種の要件を決めていくのだが、本研究では前述した通りユースケースの整理やシステムが有すべき機能の整理自体を進めつつ開発していく必要があり、またシステムの拡張性・将来性のある程度維持しつつ開発することも重要と考えた。全研究テーマの中で扱う多様な情報を蓄積し、利用者に提供するシステムにおいて最も重要なのはデータ構造である。そこで、本研究では1、2年目にはデータベース構造の構築とそこへのデータ蓄積（暫定データ含む）を中心に実施し、3～5年目にシステムの構築を進める。研究期間終了後の運用時含めて、全ての開発段階で、将来性・拡張性の確保を重視した設計を意識しつつ内部でシステム構築することで、公開後の低コストでの運用を可能にする。

## 4. 結果及び考察

### 4-1. リスクガバナンスの観点による災害・事故に伴う化学物質リスクへの対処の概念的な枠組みの考察の結果と考察

S-17研究は、環境の視点から災害・事故に伴う環境保全上の支障に対処する方法について、監視、予測、評価及び対応力の諸課題に体系的に取り組むことにより、環境科学としての新たな領域を創出するとともに、科学的成果の社会実装までの道筋を提示することを目標とする。このため、必要とされる課題と研究構成をS-17研究に先立つ課題調査研究で詳細に検討して図1.1に示す4テーマによって取り組むこととし、科学研究としての革新性、先導性及び社会実装に結び付く将来への方向性を提示する目標により研究を開始した。

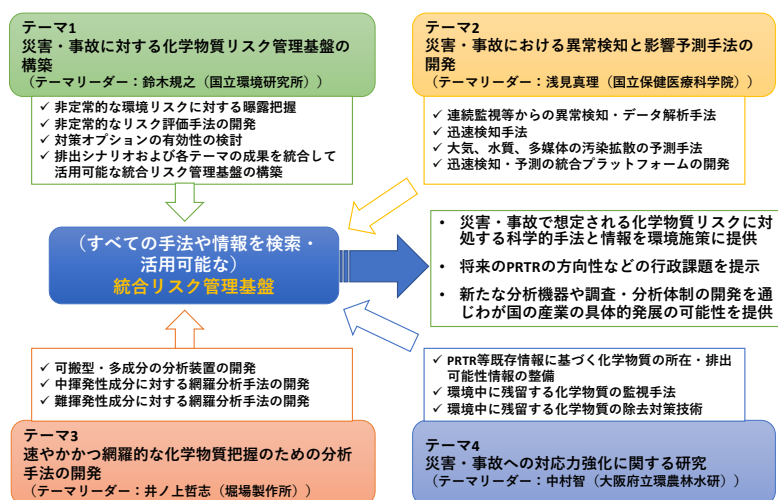


図1.1 S-17課題全体の研究構成

研究を開始後、アドバイザーボード会合等での議論の中で、本研究が取り組むべき災害・事故時の化学物質リスク管理の概念を整理し、リスクガバナンスとしての課題の位置づけを明確にすべきという示唆を受けた。そこで本課題を新たに設定し、メンバー全員による全体ワーキング会合等で議論を進めた。

災害・事故に起因する化学物質リスクの管理において、考慮すべき基礎は（平時の）化学物質のリスク評価と災害におけるリスク評価の主に2つの枠組みと考えられた。S17研究では、化学物質リスク評価の概念と、災害時のリスクの概念を融合し、それにより射程を延長することによって、我々が取り組むべき災害・事故時の化学物質リスクを定義する要因とリスク管理への統合の概念化が可能となる。図1.2に2つの枠組みの融合と拡張の考え方を整理した。

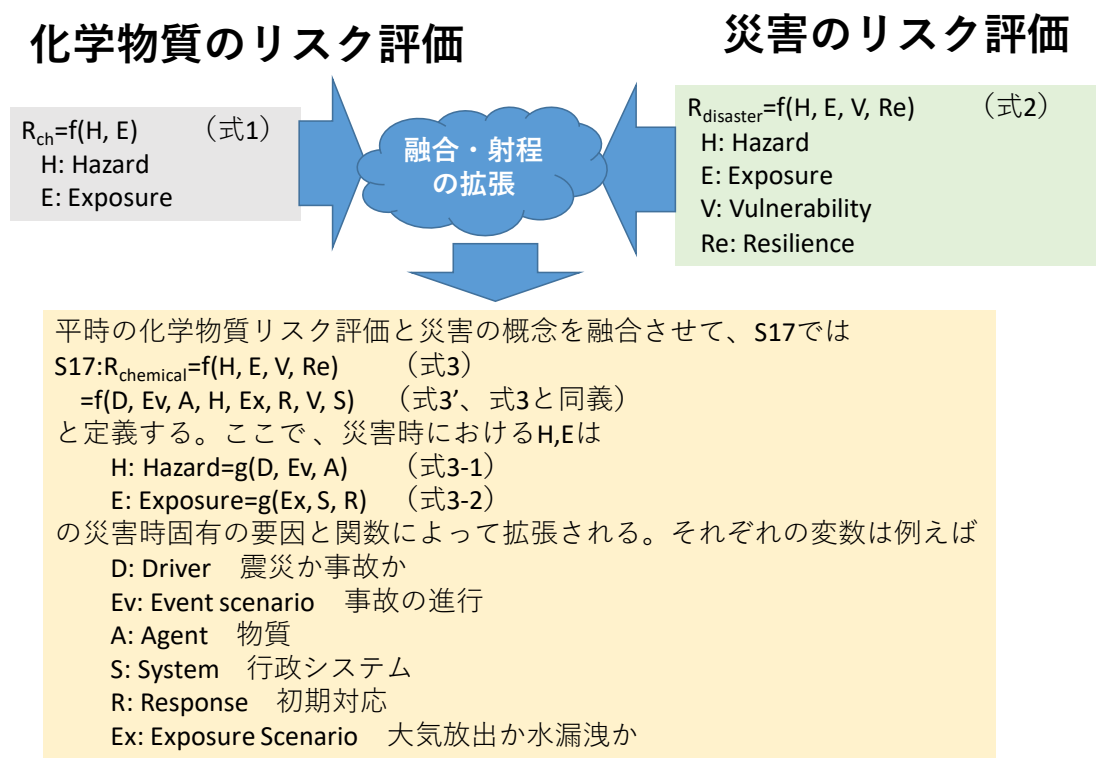


図1.2 S17研究における災害・事故時の化学物質リスクを定義する要因の定義と概念

図1.2の通り、化学物質のリスク評価はhazardとexposureによって規定される（式1）との考えが一般的であり、災害のリスク評価ではこれに加えて、vulnerabilityとresilienceを考慮する必要がある（式2）。S17研究の課題である災害・事故時の化学物質リスク管理では、両者を融合させた（式3）を課題全体の概念的定義として提示できる。このうち、災害・事故時にはhazardとexposureはそれぞれ災害・事故の態様や初期対応などの要因によってさらに規定される動的な事項（式3-1、式3-2）と想定できて、これらを加えることによって式3または式3と等価な式3'を構成しS17課題の構造を定義できると考えられる。

図1.2の定義に基づいて、各サブテーマが取り扱う課題領域を、式3および3'に対して位置づけると図1.3ようになる。この整理により、各課題の災害のリスクに対するリスクガバナンス上の位置づけがそれぞれおよそ明らかになると同時に、図1.3上に置いた各課題の領域とカバー範囲からS17課題全体の取り組みを通じて、災害・事故時の化学物質リスクの管理に関わるリスクガバナンス上の課題をほぼ網羅的にカバーできていることが確認できた。

なお、S17課題でやや取り組みの少ない、Event scenarioの領域については、同じく環境研究総合推進費1-1904課題（代表：三宅淳巳（横浜国立大学））で安全工学的見地から取り組まれており、1-1904

課題とはこれまで密接な連携を図ってきた。これにより、二つの課題全体としてより網羅的に必要な課題をカバーできると考える。

テーマ	サブテーマ	D: Driver	Ev: Event scenario	A: Agent	H: Hazard	Ex: Exposure	S: System, V, Re	R: Response	各サブテーマの位置づけ
1	(1)	← 情報基盤 →						情報基盤	E,Aも扱う。情報基盤として横断的統合
	(2)	← 地域CS:対策オプション →						地域CS:対策オプション	対策オプションを軸に大阪府で横断的CS
	(3)	← 非常リスクの評価 →						非常リスクの評価	非常リスクの評価に集中
	(4)	← 曝露把握測定 →						曝露把握測定	曝露量把握に集中
2	(1)	← 迅速検知と管理 →						迅速検知と管理	迅速検知から管理手法を水道CSとして
	(2)	← 検知手法 →						検知手法	検知手法に集中
	(3)	← 予測手法 →						予測手法	予測手法に集中
	(4)	← 曝露から影響把握手法 →						曝露から影響把握手法	団体の曝露から影響把握
3	(1)	← 現場観測 →						現場観測	直後の現場観測
	(2)	← 観測ネットワーク →						観測ネットワーク	集中観測ネットワーク
	(3)	← 観測手法 →						観測手法	観測手法開発
4	(1)	← 行政システム →						行政システム	初動から対応までの行政システム
	(2)	← 継続監視手法 →						継続監視手法	継続監視の手法
	(3)	← 対策技術 →						対策技術	対策技術

図1.3 S17研究のサブテーマが取り扱う課題

IRGC framework*	災害・事故に起因する化学物質リスク管理における課題	S17における取り組み	横断的、関連
リスク事前評価	情報の準備 基礎方法の準備	1(1)物質、シナリオ 4(1)物質、排出源情報の準備 1(3)非常リスク評価手法 1-1904課題	1(2)大阪府での横断的ケーススタディー 2(1)水道での横断的ケーススタディー
リスク見積もりと関心の評定	迅速検知・モニタリング手法 予測・評価手法	1(4)曝露把握 2(2)迅速検知 2(3)予測手法 3(1)(2)(3)観測、検知 4(2)継続監視	
受け入れられるか判断	情報共有手法 判断手法	2(4)情報共有、表示 1(1)リスク評価手法	
行動への意思決定と実践	意思決定支援 実践技術	1(1)情報基盤 2(1)迅速検知と対応 4(1)自治体の対応 4(3)対策技術	

\*リスクガバナンス論からみた震災復興過程のリスク評価の方向, 盛岡 (2012)環境情報科学、またWhite paper on risk governance, IRGC (2005)

図1.4 リスクガバナンスの観点からの災害・事故に起因する化学物質リスク管理の課題

図1.3の整理を、リスクガバナンスの見地からサブテーマごとに整理した結果を図1.4に示す。IRGC（国際リスクガバナンスカウンスル）では、リスクの事前評価から行動への意思決定と実践に至るステップとしてリスクガバナンスの概念を定義しており<sup>1)</sup>、これに基づいて災害・事故に起因する化学物質リスク管理における課題と、S17研究における各サブテーマの位置づけを図1.4のように整理することが出来た。

S17課題における各サブテーマにおいて、これらリスクガバナンスの構造における各課題の位置づけと目標を共有することにより、自らの課題に求められる課題全体からの目標を意識することが出来て、

また、それによりさらに密接な連携を進めて成果を得るべく各テーマ・サブテーマにおいて研究を進めることが出来た。

#### 4-2. 災害・事故において想定される化学物質等の排出シナリオおよび統合的リスク管理基盤を構築するための概念的シナリオの構築の結果と考察

災害時の優先対象物質を検討するにあたり、化学物質の放出を伴う事故・災害時の対応について、主に毒性判断値に関する視点から国内外の取組を調査した。欧米で使用されている緊急時用の毒性判断値と日本国内における化学物質の存在量に関する入手可能な情報を組み合わせることにより、事故・災害時に管理対象とする化学物質の序列化について試行的検討を行った。存在量情報については、工業用途物質（化審法およびPRTR法関連物質）と農薬の2グループについての情報を参照し、PACやADI等の既存の毒性判断値との紐づけにより複数の優先対象物質リストを作成した（図1-5）。

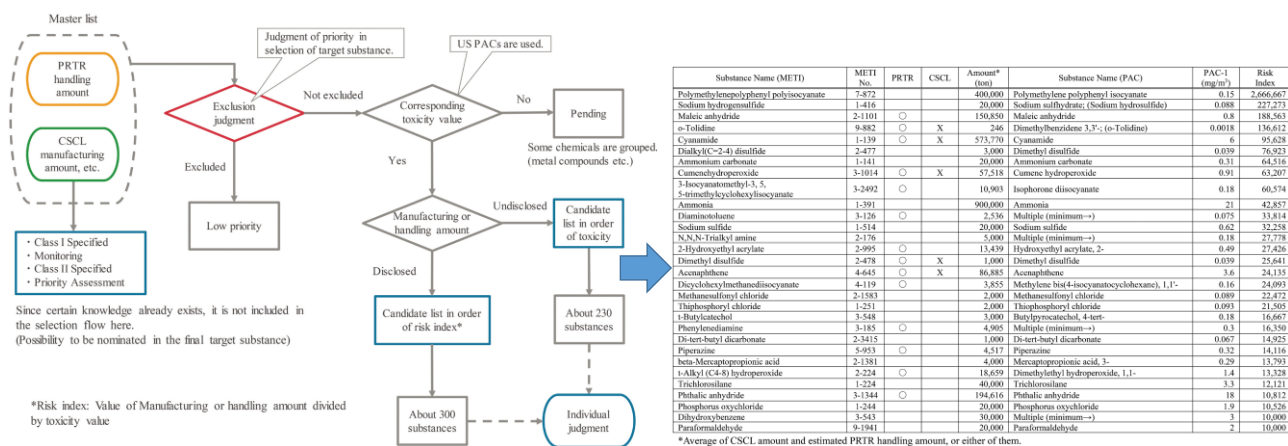


図1-5 優先対象物質の選定プロセスおよび物質リストの一例（工業用途、リスク指標順）

工業用途物質については、リスク指標に基づく約300物質の物質リスト（製造輸入数量または取扱量が得られた物質）および毒性判断値に基づく約230物質の物質リスト（製造輸入数量等が非公表の物質群）を作成し、農薬については、リスク指標に基づく約250物質の物質リストを作成した。工業用途物質のリスク指標の上位となる物質群は、無機物としては、アンモニアや硫黄化合物、シアナミド、三塩化シラン、オキシ塩化リン等であった。有機物としては、製造輸入数量も大きく毒性も比較的強い、イソシアネート類、製造量が強く効くものとして、アルコール類やパラホルムアルデヒド、毒性が比較的強く効くものとして、硫黄を含む脂肪族化合物や、塩素を含む芳香族化合物、アミン類等であった。対象物質の選定プロセスでは、低優先とする物質群について個別判断を加えることにより、既往の環境規制では必ずしも注目されていない物質が、上位物質に挙げられた。なお、本研究のリスト作成における対象物質として、ここでは、化審法およびPRTR対象物質、農薬について検討したが、その他、医薬品や、毒劇物・危険物など他法令で規制されている有害物質は考慮できておらず、そのような物質との関連性は今後整理していく必要があると考えられる。

過去の事象事例の分析においては、まず「一般環境への化学物質の放出」の可能性のある事例を収集するため、災害情報データベースに掲載の事例について、Web等で入手可能な情報を参照し、事例のスクリーニングを行った。このスクリーニング結果をもとに、事故時の事業所における取扱物質や事故により生成された物質、それらの環境中への排出状況、事故後の推移などを調査するため、当該事業者へアンケート調査票を配布し、Webアンケートを実施した。事例の選定においては、化学工業を営む事業所において発生した事例や、近年発生した事例を中心に200件を選定し、そのうち63件について回答が得られ、事故の分類としては、火災・爆発を伴うものが36件、流出・漏洩に該当するものが27件であった。以下、本アンケート調査の分析結果を概説する。

取扱物質の放出時間については、1日以上事例は3件であり、多くは1日以内であった。1日以内の事例の約4割（29件）は、放出時間が10分以内であり、これらの多くは初期対応により放出を停止出来たものと考えられた。ただし、火災・爆発を伴う事例のうち、6件は瞬間的な爆発によるもので、飛散による環境放出の可能性が考えられ、実際に敷地外環境での分析調査が実施された例もみられた。

放出した可能性のある取扱物質および生成物質の名称については、59件の事例（91物質）で回答があり、事故による生成物質の名称は、推定によるものも含めて12件の事例（15物質）で回答が得られた。取扱物質については、塩素、ベンゼン、フェノール、水酸化ナトリウムなど、一般的な化学物質名での回答のほか、いわゆる化学物質の名称とて言い難い物質名（例：「～油」、「～樹脂」、「シンナー」など）も多く見られた。事故発生時には、初期情報として、製品名や混合物しか把握できないことも多く、環境調査を実施する場合、このような情報からモニタリング対象物質を判断できるようにしておくことが重要な課題と考えられた。

環境中の濃度測定の実施内容については、13件の事例で回答が得られ、濃度測定の方法は2種類に大別できると考えられた。1つは、取扱物質等に関して日常的に測定している方法により分析を実施する場合で、もう1つは環境基準の設定項目に対し分析を実施する場合であった。後者に該当した3件の事例は、いずれも火災事故におけるもので、火災事故においては放出物質の特定が困難であることから、環境基準の設定物質に対し、網羅的な分析が実施されたものと考えられる。

今回のアンケート調査結果で、事故時に排出される化学物質の事故時および事故直後の情報把握手法をより改善する必要があることが明らかになった。情報を把握する方法としては、今回実施したようなアンケートやヒアリングによる当事者への確認のほか、関連する排出量・取扱量等のデータを利用することが考えられる。事故の当事者への確認については、精度が高い情報を把握できる可能性があるものの、事故の発生直後には当事者が対応不可な場合や、確認に相当程度時間を要する可能性もあり、緊急対応の面では必ずしも現実的ではない。PRTR届出データは、容易に利用可能であり、環境リスクが比較的高い物質及び事業者の両面について大枠はカバーできている。しかし、今回の調査では、環境中への排出があったと回答した事業者のうち、半数程度はPRTR届出事業者ではなく、PRTR届出事業者においても、回答物質とPRTR届出物質が合致する（あるいは関連性が予測できる）事例はほとんどなく、事故時の放出物質との関連性は必ずしも高くなかった。いずれの方法も短所があり、単独の方法で事故発生時に必要となる情報を迅速に把握することは容易ではない。これらの情報を適宜、参照・収集しつつ排出された可能性のある物質に対して、環境調査を実施していくことが現時点では最善の方法であり、事故時に関連情報を迅速に入手することが可能になるよう情報収集と整備を進めていくことが重要である。

事故事例の解析結果に基づき、放出後に想定されるシナリオの一般化を試みた。事故に伴う事業所等からの化学物質の排出による一般環境のリスクを考えるためには、化学物質の排出から曝露に至るまでの環境中の物質挙動を整理しておくことが有用であると考え、起こりうる様々なケースを網羅することを念頭に、環境中の物質挙動と想定される対応を整理した（図1-6）。排出時に起こり得る状況に応じて様々な対応が想定され、ここでは、これらの対応を「把握」と「低減」の2つに大別して整理した。さらに、それぞれの対応について、媒体内の状態に対して行うものと媒体間の移動に対して行うものに別けて整理した。これらの対応の中には、例えば、消火活動のように大気への移動量を軽減する一方で、河川等への移動量を増加させ、あるいは別の物質の排出を伴う可能性を持った対応も存在する。このような点も含めて、環境中での現象を整理するとともに、時間経過や対応による現象の変化を整理しておくことが重要になる。

また、曝露に至るまでの排出シナリオは、排出形態や事業所の立地状況により異なり、対応も排出形態や対象物質により変わってくることに注意が必要である。しかしながら、このように排出後に起こり得るシナリオと、把握と低減に関する対応を網羅的に整理し、過去事例において実施された（されなかった）措置やその理由を検討することで、今後の発災時における適切な対応に繋げることができると考えられた。

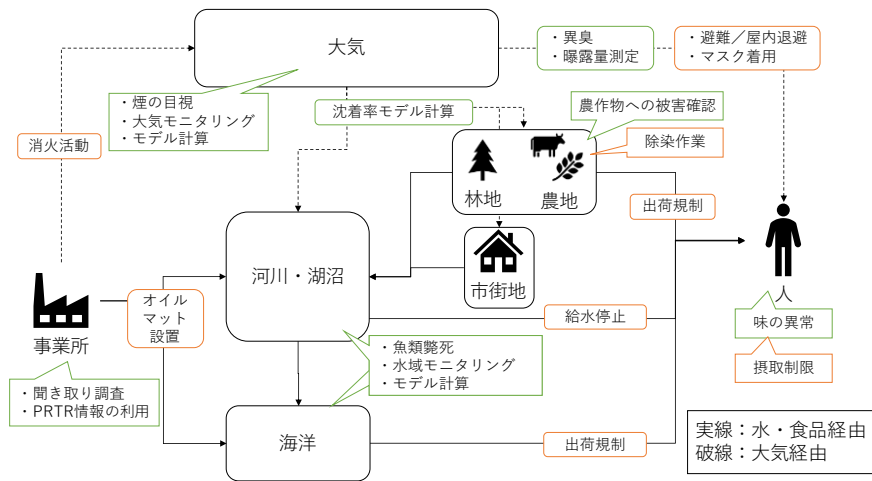


図1-6 一般環境への放出後の排出シナリオと対応の整理 (緑：把握、橙：低減)

優先対象物質や事例解析の検討に加えて、具体的な事例によってサブテーマ間の連携を取って研究を進めるため、共通ケーススタディ物質および共通シナリオの設定を検討した。本検討では、まず前述の災害時の優先対象物質の検討で作成された物質リストに加え、全テーマのメンバーからサブテーマごとの必要性、有効性の観点での意見を集約し、共通物質の抽出を試みることにした。意見集約により対象物質を絞り込んだ後、対応可能性の観点から各サブテーマとの関連性を整理した結果を表1-1に示す。

表1-1 ケーススタディ物質検討結果および各テーマにおける対応可能性

分類	CAS	PRTR	物質名	テーマ・サブテーマ														
				1			2				3			4				
				2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3		
①	-	305	鉛化合物	○	×			×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×
	-	87	クロム及び三価クロム化合物	○	×			×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	○
	-	309	ニッケル化合物	○	×			○	×	×	○	×	×	×	○	×	×	○
	-	412	マンガン及びその化合物	○	×			×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	○
			アンモニア類 (重炭酸アンモニウム等)	○	×	×	○	○	×	×	○	×	×	×	○	×	×	×
②	100-21-0	270	テレフタル酸	○	○		×			×			×				○	
	105-60-2	76	ε-カプロラクタム	○	×	×	×	×	○	○		×	○	○	×	○	×	
	108-31-6	414	無水マレイン酸	○	×		×		○	○			×	×			○	×
	85-44-9	413	無水フタル酸	○	×		×		○			×					○	
③	95-63-6	296	1,2,4-トリメチルベンゼン	○	×	○	×	○	×	○			○	×	○		○	○
	4098-71-9	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	○	×		×	×		○		×			×	×	×	×
	5124-30-1	447	ジシクロヘキシルメタンジイソシアネート	○	×		×	×	×	×		×			×	×	×	×
	101-68-8	448	メチレンビス (4,1-フェニレン) =ジイソシアネート	○	×		×	×	×	○		×			×	×	×	×
	83-32-9	15	アセナフテン	○	○		×						○	×		○	○	
	80-05-7	37	ビスフェノールA	○	×			○		○		×	○	○	○	×		○
④	100-42-5	240	スチレン	○	×	○		○		○			○	×	○		○	○
	108-88-3	300	トルエン	○	×	○		○		○		○	○	×	○	×	○	○
	71-43-2	400	ベンゼン	○	×	○		○		○		○	○	×	○	×	○	○
	107-13-1	9	アクリロニトリル	○	×			○		○				×	○	○		
	67-66-3	127	クロロホルム	○	×	○		○		○				×	○	×		○
	50-00-0	411	ホルムアルデヒド	○	×	○		○	○	○			×	×	○		×	
	75-21-8	56	エチレンオキシド	○	×			○	○	○				×	○	○	×	
	75-01-4	94	クロロエチレン (塩化ビニル)	○	×		×	○		○			×	×	○		×	○
⑤	108-67-8	297	1,3,5-トリメチルベンゼン	○	×	○	×	○		○			○	×	○		○	○
	100-41-4	53	エチルベンゼン	○	×	○	×	○		○		○	○	×	○	×	○	○
	1330-20-7	80	キシレン	○	×	○		○	×	○		○	○	×	○	×	○	○
	95-50-1			○	×	○		○		○			○	×	○	×		○
	106-46-7	181	ジクロロベンゼン	○	×	○	×	○		○	○		○	×	○	×		○
	55-38-9	252	MPP	○	○			○				×	○	○	○	○	×	×
	122-14-5	251	MEP	○	○			○		×		×	○	○	○	○		
	98-82-8	83	クメン (イソプロピルベンゼン)	○	×		×	×		○			○		×	○	○	○

※①無機物、②低揮発性－親水性、③低揮発性－親油性、④揮発性－親水性、⑤揮発性－親油性

災害・事故で懸念される物質の範囲と、それぞれの想定に対する分析、評価、管理などのアプローチは極めて多様であり、すべてのテーマ・サブテーマを横断する共通ケーススタディ物質を見出すことは出来なかった。これらの検討を踏まえ、サブテーマ横断で実施する机上演習においては、様々な視点を組み込めるように、複数の仮想事例を共通シナリオとして設定することとした。まず、化学物質の環境放出を伴う過去の事故事例のレビューおよび関係者との議論により、5つの漏出・排出シナリオ（①油、②界面活性剤、③火災、④農薬、⑤有機VOC）を設定した。これらのシナリオに対し、排出先媒体（大気・水域・土壌）、排出時間（短期・長期）、放出物質の把握可否（明白・検出可能・不明）、放出源（事業所・交通事故）等の要因を具体化し、これらの要因の組合せを可能な限り網羅するよう5つの仮想的な事故事例を設計した（表1-2）。

表1-2 共通シナリオとして設定した5つの仮想事例

カテゴリ	事故の起動要因	仮想事例	想定対象物質	排出量及び時間	シナリオ設定場所
油	洪水、温暖化等の豪雨 あるいは単独の流出	豪雨での冠水により鉄工所で、2000Lタンク10個分の低粘度油（焼入れ用）が河川および周辺土壌に流出。	パラフィン系低粘度鉱油	20,000kg 瞬時的	佐賀県佐賀市 （内陸、郊外） 六角川
界面活性剤	地震 あるいは単独の事故	自動車部品の製造工場で、処理剤である界面活性剤が工場内でもれ、排水処理場に流入。処理剤過多で多量の泡が発生し処理水が流下。	ポリ（オキシエチレン） アルキルエーテルとLASの 混合物	10ton 2h	京都市 淀川水系
火災	火災	大型倉庫（プラスチック製品を大量保管）で発生した火災が数日にわたり継続。消火剤の散布もあり、大気経由の健康影響と周辺農地への影響、消火流出物による周辺農地への影響の懸念。	PAHs、難燃剤、消火液 （界面活性剤）および廃 水	- 300h	埼玉県 （内陸、田舎） 流出先河川を設定
農薬	津波等の自然災害 あるいは単独の事故	農業運搬中の交通事故により、積載していた農薬が側溝へ流出。大気および河川経由の健康影響、農業影響の懸念。	エンドスルファン、シマジン、ダイアジノン、フェントロチオン、イソキサチオン、イミダクロプリドのいずれか一つ	3.5ton 1h	岩手県紫波郡 北上川
有機VOC	地震、津波など自然災害 あるいは単独の事故	可塑剤等の製造工場で、1,2-ジクロロエタン回収中に爆発事故。火災発生で溶剤や医薬・農薬中間体に燃え広がる。	1,2-ジクロロエタン、トルエン、ジフェニルホスホルモノクロリド、りん酸トリフェニル	6,000kg 12h	愛知県半田市 （コンビナート）

Web情報基盤システムの構築に関する検討として、事故対応にあたる利用者が本基盤に何らかの情報を求める状況として、5段階の対応状況（①事前、②発生直後、③調査・検討、④事中の対策、⑤事後の対応）を想定し、各対応段階において利用者が求める情報を階層的に構造化した。5つの仮想事例と5段階の対応状況の組合せ毎に、情報・機能に関する意見、また、それぞれの専門分野から提供可能な情報・機能等を研究グループ内の専門家から収集した。具体的事例を想定して収集したこれらの意見を参考に、各対応段階において広く必要とされる情報を整理した。例えば、“②発生直後”には物質や事業所、放出先の特定に関する意見が多く、“④事中の対策”では、拡散予測や水道・利水施設への影響予測など行政判断に活用するための情報を求める意見が多くみられた。また、分析法や過去事例に関しては、各対応段階において状況に応じた情報を求める意見が多かった。本検討で集約した各対応段階において利用者が求める情報を階層的に構造化し、状況別メニューとして、参考となる情報へと誘導されるよう設計した。

#### 4-3. 統合的リスク管理基盤の構築と考察

開発したWeb情報基盤システムについて記述する。なお、セキュリティを確保するために一部で具体的な名称の記載を避けるなどの対策をとった。3-3節で記載したように基本的には担当研究者によりシステムを構築したが、Webセキュリティ対策については外部の専門家によるチェックを経て安全性等を確保した。なお、本システム（D.Chem-Coreと命名）は2023年5月に国立環境研究所ホームページ内

(<https://www.nies.go.jp/dchemcore/>) で公開予定である。

共通シナリオや排出シナリオを整理する際に検討し、事象の特徴を把握しやすくするために、その要素となる情報（以降、「シナリオ要素」という。）を時間軸と要素の種類（情報の種類）の二次元で整理することとした。それを踏まえて、データベース構造の設計では、掲載情報の単位化（「個別情報」という1ユニット化）と各個別情報に紐づける二次元のシナリオ要素のコード化（情報タグ）を進めた。また、排出・漏出事象の原因となった要因（起動要因）についても個別情報に紐づけるためにコード化した。ここでは要素情報と起動要因を含めた紐づけ情報を情報タグとし、全ての掲載情報は必ず要素情報のタグを紐づけ、可能な場合は起動要因のタグも紐づけることとした。なお、要素情報は二次元だけでなくさらに細かい分類が可能のように二次元の大分類に加えて中分類、小分類と整理することとした。起動要因は大分類と中分類とした。

情報タグについては全てコードで整理し、将来的に用語が修正されたり、新しい分類を追加したりという変更への対応を可能にした。個別情報については、単なる単票形式ではなく、物質リストが含まれることなどに対応すべくデータ構造を工夫した。また、各個別情報を“情報種別”で分類し、検索の際に情報種別ごとの件数を表示するようにして、利用者が必要な情報を取得しやすいように工夫した。

多様な機能を有したWebシステムを構築するために、本システムではサーバサイド（外部公開サーバ）とクライアントサイド（利用者のPCやスマホなど）それぞれで動くプログラムを作成した。さらに、利便性を高めるために非同期通信（Ajax）技術も活用した。公開データは内部データベースで管理し、その一部を、適宜公開用データベースとして適した構造等に変換した上で公開サーバにアップロードしている（図1-7）。内部データベースは設計や運用方針を工夫することでミスや矛盾の発生を少なくするなどデータ管理に適した設計を心掛けた。一方、公開用データベースではリクエストの処理速度を向上させることを意識して設計した。サーバサイドプログラムではHttpリクエスト（ブラウザでWebサイトを表示する際のクライアントから送られるリクエスト）に応じて必要なデータ（ブラウザで表示される情報等）をクライアントに返す挙動を制御する。クライアントサイドプログラムでは、サーバと情報の授受はせずにブラウザ側だけで見た目などを変更するため、処理が速くなる。なお、非同期通信の際には、クライアントプログラムで制御しつつサーバにリクエスト（Ajaxリクエスト）を送り、必要データの取得を実施している。これにより不必要なデータ授受を避けてページの更新を迅速に実現できる。これらの技術を活用しつつページ遷移やページ内での挙動制御を実装していった。

本システムでは利用者による外部公開サーバへのデータの追加・更新・削除等は実装していない。セキュリティの確保やユーザー管理など、技術的なハードルが高いことに加えて、利用者の追加したデータの取り扱いなど運用面での方針整理が必要であり、データベースに蓄積するデータの種類と構造を検討することと同時並行で行うことは困難だと判断した。実際の現場対応では取得した環境中濃度等のデータを公表することが難しいことも過去にあったため、利用者がデータをアップしないシステムであることのメリットもあると考えた。

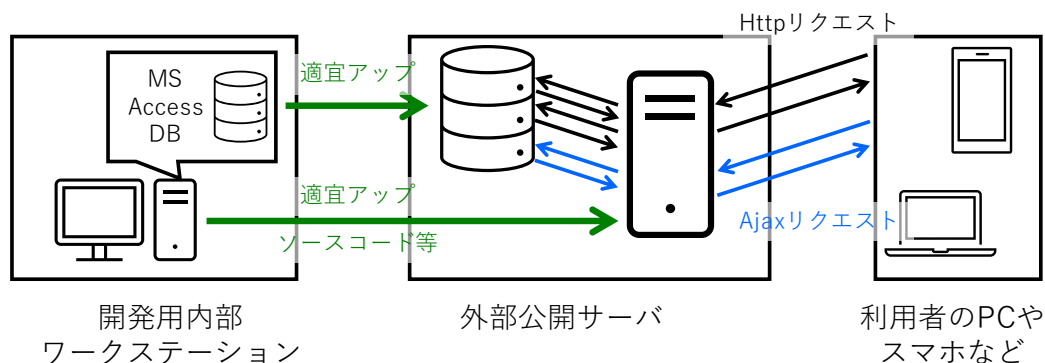


図1-7 データ管理・システム運用の概要



システム開発にはWebフレームワーク（Webシステムを開発するための基盤）を活用した。システム設計ではMVC（Model-View-Controller）モデルという設計手法を参考に役割ごとにファイル（Webフレームワークにおいては、クラスとほぼ同義）を整理した。MVCモデルではControllerにて受け取ったリクエストの解釈や制御を担うが、本システムでは異なるURL（Uniform Resource Locator）でも同じ内容のHTML要素（以下、ブロックという。）を生成する箇所が多数あるため、メインのシステムの挙動はLibraryに集中させ、Controllerはリクエストの入口・出口の制御のみを分担させることにより、より効率的なシステム設計を達成した（図1-8）。利用したWebフレームワークではURLを拡張したURI（Uniform Resource Identifier）の活用を前提としたシステムであり、それにより複雑なシステム内部の相互リンク等を動的に生成することを達成した。また、HTML構造は同じで表示内容が異なるブロックを効率的に生成するために、情報源やデータ絞り込み条件、HTMLの種類などをデータベースに格納し、その情報からブロックを生成するプログラムを作成し、内包させることで、多様なデータ表示ブロックを迅速に構築することを可能にして、開発時間の大幅な短縮を達成した。

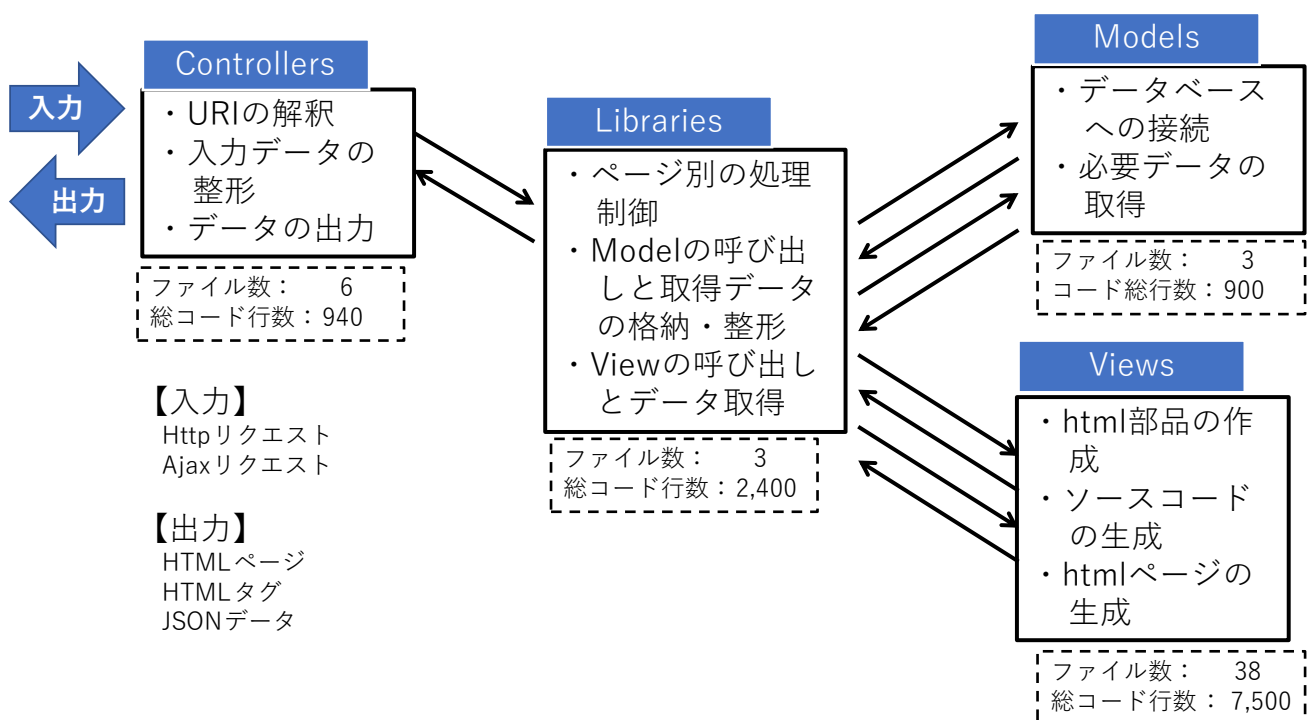


図1-8 システム設計とリクエスト処理の概念図

本システムで利用しているテーブル群を表1-3に示す。情報タグについては、階層的なタグ構造であり、コードマスタ（コードとその意味・説明を格納するテーブル）が階層ごとに必要になるためテーブルの数が多し。また、個別情報については、情報タグと個別情報という多対多の関係を格納したテーブルもあり、掲載個別情報の件数よりもかなり多いレコード数になっている。そのほか、地図表示を高速に実現するために対象データの検索用テーブルと描画用テーブルを分けるなど、データ格納だけでなく、Webシステムに適した形でテーブル群を構築した。

表1-3 テーブル群の概要

分類	格納データについて	テーブル数	レコード総数※
内部制御用	HTML基本情報やHTMLブロック作成のための入力情報	8	522
情報タグ	起動要因や要素情報等の情報タグのマスタデータやデータ構造	9	2,856
個別情報	個別情報単位での掲載情報と関連する情報タグ等	6	95,003
化学物質の分類	化学物質を分類から検索する際に利用する情報	5	91,717
毒性	物質別情報に掲載する毒性情報を情報源別に格納	4	1,565
カスタム情報	大気モデルの結果や除去技術情報など目的別メニューで個別にページを作成した情報	3	409
地図	地図表示やその関連機能で利用する情報	4	1,575,474
PRTR	PRTR届出データや在庫量推計に関連する情報	7	410,003
外部リンク	物質別の外部リンク情報	3	5,982
その他	地方自治体コードなど	2	134
合計		51	2,183,665

※当該テーブル群の合計レコード数

#### ○ページ構成と各主要ページの説明

トップページには、災害・事故時等の緊急時の様々な状況に対応できるように多角的なメニューを配置し、初めて本サイトを訪れた利用者でも必要な情報に効率的に到達できるような構成にした(図1-9)。また、それらメニューのほかに、情報源別の掲載物質数や利用規約などインターネットで公開するために必要な情報等を整備した。

The screenshot shows the top navigation bar of the D.Chem-Core website. The header includes the logo 'D.Chem-Core' and the text '-災害・事故時の環境リスク管理に関する情報基盤-' (Information Base for Environmental Risk Management in Disasters and Accidents). The National Institute for Environmental Studies logo is also present. Below the header is a horizontal menu with the following items: Top, 状況別メニュー (Menu by Situation), 目的別メニュー (Menu by Purpose), 情報全体からの検索 (Search from All Information), 有用情報リンク集 (Collection of Useful Information Links), and 更新履歴 (Update History). The main content area starts with the heading 'はじめに' (Introduction) and a paragraph explaining the website's purpose: '本ウェブサイト (D.Chem-Core、ディーケムコア、災害・事故時の環境リスク管理に関する情報基盤、Chemical Risk Assessment and Management Resource Core for Disaster and Emergency) は、災害・事故に起因する化学物質の環境リスクへの対応のために必要な情報を提供することを目的としています。主に事故等に対応する行' (This website is intended to provide necessary information for responding to environmental risks of chemicals caused by disasters and accidents. The main purpose is to respond to accidents, etc.).

図1-9 トップページの各メニュー部分

状況別メニューとして、4-2で述べたように利用者が把握・考慮すべきことを効率的に調べるためのページを作成した。状況別に、利用者が知りたい情報を迅速に収集できるように整理した。当該ページでは状況をクリックすると状況別詳細メニュー(調べたい情報のリスト)が表示され、さらにクリックすると、内容を確認できる。各内容からはD.Chem-Core内の別ページへのリンクや外部リンクを説明とともに掲載しており、初見でも理解しやすいように工夫した。参考として、調べたい情報として整理した項目の一部を表1-4に整理する。

表1-4 状況別詳細メニューの一部抜粋

状況	詳細メニュー（一部抜粋）
事前	<ul style="list-style-type: none"> <li>・物質や事業所の所在を知りたい</li> <li>・物質の存在量を知りたい</li> <li>・事故に備えたシミュレーションを知りたい</li> <li>・対策を立てたい</li> <li>・過去の事故事例を知りたい</li> </ul>
発生直後	<ul style="list-style-type: none"> <li>・何が排出されているか分からない。物質を特定できない</li> <li>・放出量を知りたい</li> <li>・放出先情報を知りたい</li> </ul>
調査・検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>・環境調査計画にむけて</li> <li>・適した分析法を知りたい</li> <li>・シミュレーションで予測したい</li> <li>・過去の調査事例を知りたい</li> </ul>
事中の対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緊急的対策手法を知りたい</li> <li>・過去の事例における対策を知りたい</li> </ul>
事後の対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>・健康影響や土壌汚染の可能性を知りたい</li> <li>・物質の除去技術を知りたい</li> </ul>

知りたい情報が明確な場合を想定して、目的別メニューを作成した。具体的には「物質情報検索」「地理情報検索」「分析法検索」「曝露予測」「発災シナリオとケーススタディの検索」「除去技術」である。以下、項目ごとに整備した機能等を説明する（表1-5）。

表1-5 目的別メニューの概要

目的別メニュー	目的別詳細メニュー	機能の概要
物質情報検索	物質名称等からの検索	物質名の一部から掲載物質のリストを表示、リンクから物質情報ページを開く
	カテゴリからの検索	物性やGHS分類などの物質カテゴリを選択し、該当する物質リストを表示、リンクから物質情報ページを開く
地理情報検索	地図検索	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地図上で選択した地点の緯度経度表示</li> <li>・選択した緯度経度の近傍のアメダスデータ表示（直近3日のみ対象）</li> <li>・河川の描画</li> </ul>
	地図からのPRTR事業所検索	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地図上でPRTR届出事業所を表示（物質選択や業種選択が可能）</li> <li>・選択したPRTR届出事業所の届出物質リストの表示</li> <li>・各物質の推定在庫量表示（S17-4-1成果）</li> </ul>
	ユーザーデータ表示	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ユーザーが作成した緯度経度と値（実測データを想定）を値に応じた色で地図に描画する。</li> <li>・GISデータのインポートとエクスポート</li> </ul>
	住所からのPRTR事業所検索	都道府県、市区町村を選択し、事業所リストを表示。さらに事業所選択することで当該事業所からの届出物質一覧表示など。
分析法検索	条件を選択して検索	物質の分類や媒体などから分析法を絞り込みリストとして表示（S17-1-4、S17-2-2、S17-3-1、S17-3-2、S17-3-3、S17-4-2成果）

曝露予測	大気モデル	物質、大気安定度、風速などを選択し、流出速度（単位時間あたりの流出量）に対するガイドラインの範囲（距離）を一覧表で表示（S17-2-3成果）
	河川モデル	モデル計算対象範囲を地図で表示し、モデルのページへのリンクを表示（S17-2-3成果）
発災シナリオとケーススタディの検索	条件を選択して検索	媒体やTier（想定する時間軸で急性、亜急性、慢性の3段階）を選択し、発災シナリオとケーススタディを一覧表で表示（S17-1-2成果）
除去技術	条件を選択して検索	PRTR物質を物質名で検索・選択すると、当該物質に適した除去技術のリスト（上位3技術）を表示する。また、元になった「既存の化学物質除去対策データベース」（S17-4-3成果）のダウンロードも可

情報全体からの検索ページでは、情報タグ（起動要因と二次元の要素情報）を選択することで、個別情報を検索する。二次元の要素情報に関しては、実際に個別情報に紐づいた情報タブのみ表示するようしており、さらにページ上で情報タブを選択・選択解除するたびに、該当する個別情報の件数を自動でサーバから取得し表示するようにしたため、該当件数を確認しつつ条件を変更でき、利便性の高いページとした。さらに、該当する個別情報のリンクを表示させて、そこから個別情報を確認できる。

個別情報を掲載するページでは、上部に当該情報の概要等基礎的な情報を掲載し、その下に紐づけられた起動要因やシナリオ要素という情報タグを掲載、さらにその下にシナリオ要素に関する詳細情報や紐づけられた化学物質リストを表示する。さらに、関連個別情報の検索機能として、表示している個別情報から検索に用いるシナリオ要素（情報タグ）を選択し、同じ情報タグを含む個別情報の一覧を表示する機能を実装した。

一つの物質についての情報を集約した物質情報ページでは、当該物質の毒性等の情報や、当該物質を関連物質として含む個別情報の一覧、関連情報の内部リンク・外部リンク、該当する化学物質の分類を表示することができる。それにより、さらに内部で関連情報を探索できるようになっている。

それぞれのページからは、関連するページへのリンク（内部リンク）とともに、外部リンクも充実させた。それにより、なるべく関連する情報へ到達できるように工夫した。掲載情報は

## 5. 研究目標の達成状況

災害・事故での非定常リスク評価手法の方向性については、共同で実施したサブテーマ3の成果に示す通りその方向性を示すことが出来た。化学物質等の漏出・排出シナリオの体系的な提示を行うことができた。また、全サブテーマの研究成果を横断的に統合する情報基盤については、D.Chem-Coreの公開を行った。以上により、サブテーマ1の研究目標を達成した。

## 6. 引用文献

- 1) International Risk Governance Council, <https://irgc.org/risk-governance/irgc-risk-governance-framework/>, accessed 5 April, 2023

## II-2 災害・事故等のリスク管理における対策オプションの評価に関する研究

国立大学法人 大阪大学

大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻 環境マネジメント学領域 東海 明宏

同 小島直也（平成30年～令和元年）

同 伊藤 理彩（令和元年～5年）

国立大学法人 お茶の水女子大

基幹研究院 自然科学系 環境評価学研究室 中久保 豊彦（令和元年～5年）

<研究協力者>

国立大学法人 京都大学

防災研究所 流域災害研究センター 都市耐水研究領域 米山 望（令和4～5年）

国立大学法人 大阪大学

大学院工学研究科 環境エネルギー工学専攻 環境マネジメント学領域 森口 暢人（令和4～5年）

同 濱本 翔吾（令和4～5年）

同 柳瀬 修平（令和4～5年）

同 田中 健太（令和4～5年）

同 山上 颯太（令和4～5年）

### [要旨]

サブテーマ(2)では、非平常時を対象として、リスク論に基づいた対策オプションの評価を通じて災害・事故の原因、規模、事象、大気・水・土壌などの被影響先の性質を考慮した対策オプションの有効性を評価した。同時に、リスク管理戦略の構築のための情報を提供した。水圏、気圏、土壌圏を介した影響を対象に、既往の文献調査を行い、対策オプションを、その種類別、関係主体別に、整理・類型化した。この類型に基づき、リスク懸念および対策有効性が大きいと見込まれる代表的なシナリオを構築し、リスクと費用対効果を評価した。さらに、ドミノ効果や津波遡上が発生したケース、流出物質の二次生成物の評価に拡張し、複数のケースにおいて対策オプションの評価を行った。また、他のサブテーマと連携し、得られた事例評価を統合的リスク管理基盤（D.Chem-Core）に反映させた。

### 1. 研究開発目的

本研究の目的は、ばく露、有害性に関するデータが比較的充足している物質群を対象として、災害や事故を想定した非定常状態下での化学物質流出を与件とし、リスク論に基づいた対策オプションの評価を手法の開発とその実際適用を通じた手法の有効性の検討を行う。災害時における有害物質の流出を対象としたリスク評価は、Natech (Hazardous material releases caused by Natural disaster) 研究として知見の蓄積とその共有が国際的に進められてきた。日本では、東日本大震災時における有害物質の流出知見について、消防庁（2011）により危険物施設を対象とした詳細な流出事故事例が報告されている。災害による化学物質の突発的な流出は、事業所内での労働ばく露、周辺住民への健康影響、公共用水域への影響と浄水場での給水停止、環境の中長期的な汚染など、空間軸・時間軸上で広がりをもつリスク事象を生みださうる。さらに水圏への非定常流出は、生態系を構成する生物への被害、用排水系都市サービスへの被害につながり、気圏への非定常流出は、発生源周辺への急性的影響につながり、そして災害廃棄物は、都市代固体廃棄物処理系への負荷となる。日本では、平常時の環境を想定した各種のシステマ的対策を充実させてきた。本研究では、非平常時の有害化学物質流出対策の評価手法をリスク論に基づいて開発する。そして、評価手法の実際適用を通じて、リスク管理方策の在り方を検討する。非平常時におけるリスク管理対策の態様から、平常時を念頭に設計されてきた制度の在り方についても考察する。

## 2. 研究目標

災害・事故の発生のタイミングと活用データの組合せで構成した段階的リスク論に基づいた対策オプション評価モデルを構築するとともに、包括的整理で抽出された政府、自治体、学会等が推奨する対策オプションを踏まえ、気圏、水圏、土壌圏の3つの環境媒体をとりあげた代表事例の対策評価を通じて、PRTR対象物質を範囲として適用可能な災害・事故時のリスク対応戦略を提案する。

## 3. 研究開発内容

非平常時を対象として、リスク論に基づいた対策オプションの評価を通じて災害・事故の原因、規模、事象、大気・水・土壌などの被影響先の性質を考慮した対策オプションの有効性を評価した。対策オプションの評価結果に基づき、規制と自主的管理の組合せの観点で対策オプションの導入に向けた管理指針を作成した。災害・事故に関する学協会・行政・自治体の文献調査を行い、対策オプションを種類別、関係主体別に、整理・類型化した。この類型に基づき、リスク懸念が大きい地域や施設と、有効性が大きいと見込まれる対策から、代表的なシナリオを構築した。空間バウンダリを限定した曝露解析および対策オプション評価のプロトタイプモデルを構築する。曝露解析をエンドポイントでのリスク評価、費用対効果へ拡張した。エンドポイントは、健康・生態・都市機能不全リスクを取り上げた。構築したシナリオとプロトタイプモデルを掛け合わせ、科学的に根拠のあるオプション評価を実施し、リスク管理戦略構築の基盤となる情報を提供した。

## 4. 結果及び考察

### 非定常時の水・大気・土壌等を介したばく露シナリオを類型化し、代表的なシナリオを作成

図-0.4に示すような、災害・事故の事象把握、対応の時制にしたがった、段階的評価の枠組みを作成し、急性毒性管理フェーズ、亜急性毒性管理フェーズ、慢性毒性管理フェーズに分けて、対策オプションのリスク削減率、回復までの期間を定量し、先行研究の組合せを通じて、代表シナリオを設計した。本研究におけるTiered型対策オプション評価手法を図-2.1、図-2.2に示す。図2.1における想定外力のレベルは、再現期間を反映する軸であるが、自然災害の発生頻度に比べて、ここで扱っている災害やその他突発的事象を生み出す要因との複合事象の再現期間の推定が今後求められる。それを与件として、対策のフェーズ、ライフステージとの組合せで、対策オプションの範囲を限定することが容易になる。図-2.2は、急性から慢性までの広がりをもつ評価エンドポイント毎に、推計値を与えるモデル、調査・分析手法の実際適用を通じて得られるデータの取得時期を踏まえて整理したものである。これらの空間の各点において、対策オプションの導入の有無のもとで、リスク削減幅、回復時間を推定するモデルとなっている。以下に推算式(1)を示す。

$$\text{対策オプションの評価：} (\text{Risk}_{\text{有事}}/\text{Risk}_{\text{平時}})_{\text{対策有}} / (\text{Risk}_{\text{有事}}/\text{Risk}_{\text{平時}})_{\text{対策無}} \quad \text{式(1)}$$

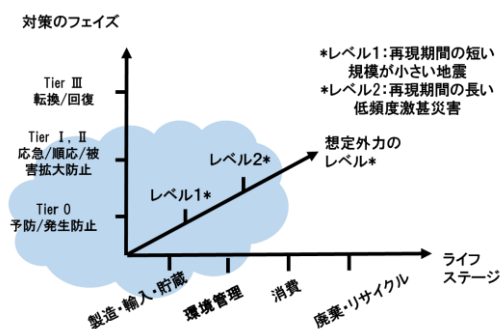


図-2.1 想定外力のレベル

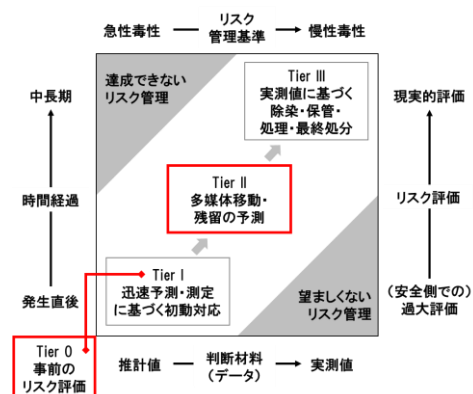


図2.2 Tiered型アプローチ

以上のモデルに基づき、PRTR第一種指定化学物質を取り上げ、ニューラルネットワークを用いた類型化の結果を踏まえ、水圏、気圏、土壌圏における類型シナリオを作成し、ケーススタディを実施した。想定事象は、内陸直下型地震とし、対象地域は事業所の密度が高く、居住地との距離も近い大阪とした。本ケーススタディにおいては、毒性が高い化学物質を多量に取り扱う事業所から、化学物質が流出したことを想定し、それらの物質の環境動態のシミュレーションを行うことで、まず環境・ヒト健康影響へのリスクを定量化した。その上で、そのようなリスクを最小限に抑えるために、最も効果の高い対策オプションを導入したときの環境・ヒト健康影響を示し、導入の有無でリスクをどれだけ削減できるか定量化した。また、慢性毒性管理フェーズにおけるリスク管理・対策検討にあたっては、物質の環境媒体での移動・残留に着目した。扱う環境媒体として大気、市街地、農地、河川の4つの対象を設定し、PRTR第一種指定対象物質（全462物質）の物性値を環境媒体中での移動現象に影響する各媒体内での移動特性に基づき、整理した。その後、ケーススタディ物質を選定し、物性値の違いによる環境中での移動の違いや特徴の比較を行った。

### 急性毒性管理フェーズ（気圏）

[石油コンビナート火災] 本研究では、南海トラフ巨大地震を対象として屋外タンク貯蔵所への地震動と津波およびドミノ効果を想定し、揮発性有害化学物質が大気拡散することによる隣接地域の住民へのヒト健康影響の評価を行う。気象庁<sup>1)</sup>によれば、南海トラフ沿いの大規模地震は今後30年以内に70～80%の確率で発生する可能性があり、前回発生した昭和東南海地震および昭和南海地震から既に70年以上が経過していることから、切迫性が高い状態にある。南海トラフ巨大地震は、2011年に発生した東北地方太平洋沖地震と同様の海溝型地震であり、M9クラスの地震動のみならず大規模な津波が太平洋側を襲来する可能性が高い。したがって、屋外貯蔵タンクへの被害として、地震動によるものだけでなく、津波によるものも考慮する必要がある。そこで本研究の代表シナリオとして、南海トラフにより津波が発生した場合としなかった場合にシナリオを分け、さらにドミノ効果によるタンクの熱座屈起きたに石油化学コンビナートからトルエンが流出した場合のシナリオを作成し、エンドポイントをヒト健康影響として、リスクを削減させるための対策を考察した（図-2.3）。特定タンクの場合、冬季の方が夏季に比べ気温が約20℃程度低いにもかかわらず、夏季よりも冬季の方が110分後のタンク温度は高くなる傾向があることが分かった。その要因として、風向による影響、すなわち風により火炎がなびく方向が変化し、対象事業所のタンクの配置において冬季の方が夏季よりも火炎との距離が近くなったことが考えられる。夏季昼間ケースと冬季昼間ケースはそれぞれ西南と西南西の風であり、風向角度が22.5°だけ異なることがタンク温度に影響したといえる。また、熱伝達率による熱損失の効果と、輻射熱強度による入熱の効果（図-2.4）によって、正味の熱エネルギーが増加すればタンク温度は風速変化にともない高くなり、正味の熱エネルギーが減少すればタンク温度は風速変化によって低くなった。さらに、隣接タンクの風上にプールが位置する場合、風速が小さいほどタンク温度は高くなる傾向があり、反対に隣接タンクの風下にプールが位置する場合、風速が大きいほどタンク温度は高くなる傾向があった。また、風速が10 m/sを超える場合、ほとんどのタンクでタンク温度が低くなることが分かった。一部のタンクでは、プールとの位置関係や風速に関係なく熱座屈を起こしている。実際、大阪府沿岸部の発生元タンク隣接タンクとの前面間距離は6 m, 7 m, 9 m, 10 m, 15 mであり、対象事業所の中では比較的密接し

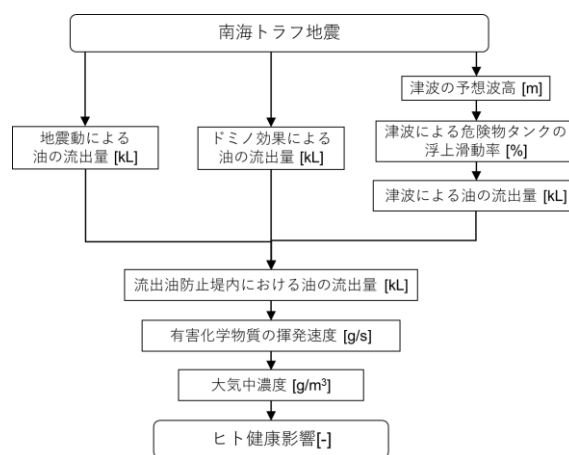


図-2.3 急性毒性管理フェーズにおける代表シナリオと評価の枠組み

ているため、火炎との距離が非常に近くなり、多くのタンクで熱座屈を生ずる可能性が高い。ヒト健康影響評価について、図-2.5に示すように、ドミノ効果(図-2.4)を考慮した場合、排出地点から100 m以内にAEGL3(致死レベル)を超過するメッシュが存在する一方、コンビナート区域外の隣接地域では急性影響は発生しないことが分かった。なお、図-2.4において、 $T_{air}$ :気温 [°C]、 $T_{threshold}$ :  $\alpha_1$ : 熱座屈の閾値温度、 $V$ :タンクの体積、 $\alpha_1$ :日射吸収率 (=0.5)、 $h_1$ :外表面熱伝達率 [W/(m<sup>2</sup> K)]、 $I$ :鉛直面日射量[W/m<sup>2</sup>]、 $\rho$ :ステンレスの密度、 $c$ :ステンレスの比熱 [J/kg・K]、 $\alpha_2$ :火炎輻射熱吸収率[-](= 0.6)、 $q$ 火炎輻射熱の最大値[W/m<sup>2</sup>]、 $S$ : 受熱部面積[m<sup>2</sup>]、 $h_0$ : 外表面熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>K]を示す。

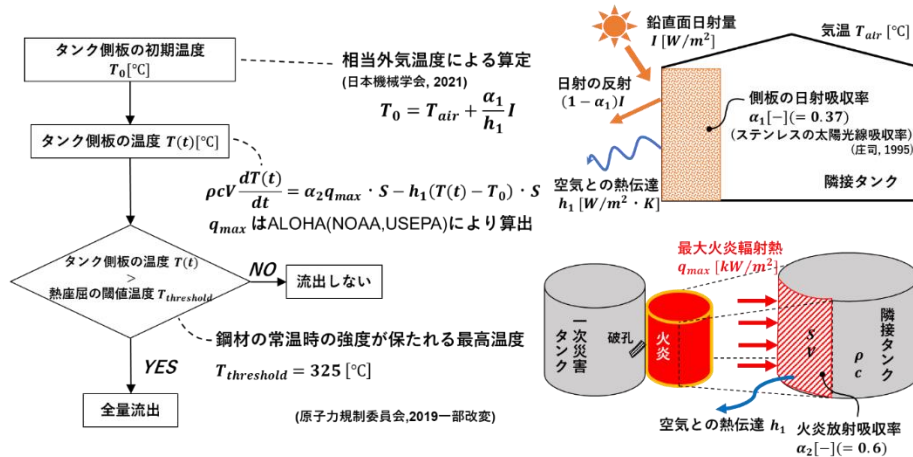


図-2.4 ドミノ効果による熱座屈の評価体系

急性毒性管理フェーズにおいては、化学物質が大気へ拡散する事故のリスクが高くなる可能性が高い。石油化学コンビナートにおいては、火災発生元タンクと隣接タンクの位置が近い(前面間距離10 m前後)ことと、風速変化ケース I とから、タンクを配置設計する際、タンクの前面間距離を20 m程度以上空ける等の対策が有効であると考えられる。初期貯蔵率20%の場合は津波による浮き上がりまたは滑動が起りやすく、初期貯蔵率80%の場合では起りにくい結果となった。その要因として、タンクの鉛直荷重に対して浮力の方が大きくなることにより、浮き上がりや滑動が起りやすくなるためと考えられる。よって、津波の被害を受けやすい地域においては、貯蔵率を常に80%近くに保つことが、被害の低減につながると考えられる。ヒト健康被害については、発生地点から100 m以内で致死レベルの濃度となることから(図-2.5)、現場従業員は、地震発生後、流出等を確認した場合は、直ちに現場から100 m以上離れた地点に避難することが求められる。

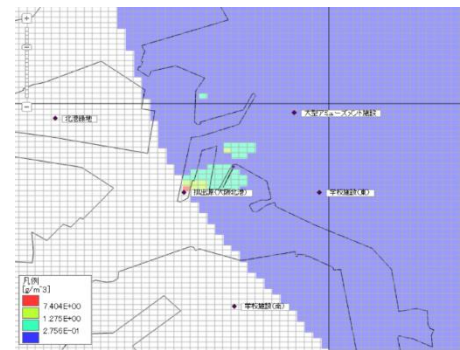


図-2.5 冬季昼間におけるトルエンの大気中濃度分布(ドミノ効果あり、初期貯蔵率20%のケース)

### [土砂災害]

日本では、降水量の増加に伴い、土砂崩れが増加する傾向にあり、地滑りによる産業および経済活動への被害が懸念される。このような背景を踏まえ、産業施設の土砂災害リスク評価手法を確立し、対策案の費用対効果分析を実施した。具体的には、土砂災害危険地域に位置する化学物質を取り扱う産業施設をピックアップし、土砂災害による化学物質の放出事故による健康リスクを評価した。ここでは対象化学物質としてn-ヘキサンを選択し、事故後の大気中濃度を算出し、急性被ばくガイドラインレベルに基づく想定シナリオ下で、対策工事費や補償等の事故費用を算定した。その結果、被害者への補償が事故費用の約97%を占め、費用対効果を考慮した事前対策の有効性が示された。

具体的には、タンク付属配管破損ケースでは、防油堤が機能しない場合はAEGL-3の超過範囲に事業所と住宅3軒が該当し、AEGL-2の超過範囲には住宅21軒が含まれるという結果となった(図-2.6(左))。



一方、防油堤が機能する場合は事業所のみがAEGL-2, AEGL-3の超過範囲に該当した。次にタンク付属配管破損ケースにおける濃度の時間変化について、タンク転倒ケースと同様に事業所付近の屋外濃度は5分以内にAEGL-3を超過しており、屋外にいる従業員はAEGL-3を超える濃度に曝露する可能性が高いことが分かった（図-2.6(右)）。また、住宅地付近の屋外濃度は流出地点から約30分後にAEGL-2の濃度を超過した。したがって、30分以内に流出地点から330 m以上離れる、もしくは屋内に避難することでAEGL-2の濃度における曝露を防ぐことが二次的な人的リスクを回避する上で有用な手段となることが示された。さらに、防油堤が機能する場合においても事業所内の屋外濃度は5分以内にAEGL-3の濃度を超過した。したがって、タンク転倒ケースと同様に、屋外にいる従業員はAEGL-3の濃度に曝露すると可能性が高いことが分かった。

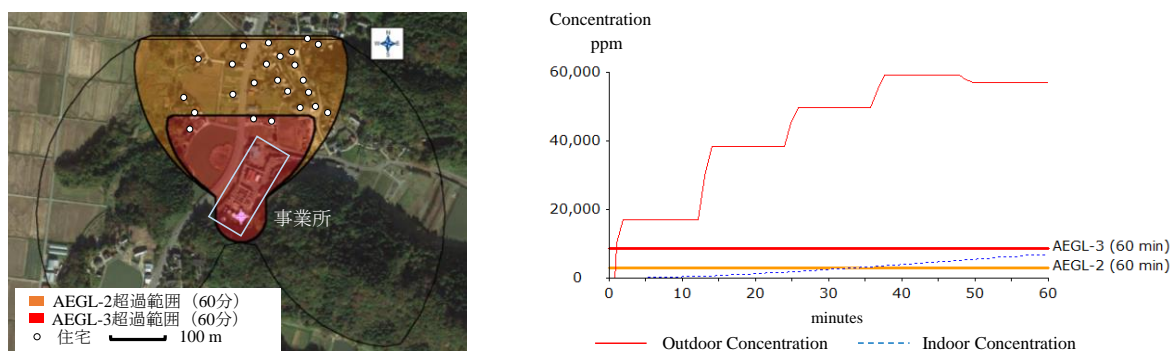


図-2.6 防油壁が機能しない場合の配管破裂事例の濃度分布(左)と放出点から50mでの濃度の時間変化(右)

一方、防油堤が機能する場合は事業所のみがAEGL-2, AEGL-3の超過範囲に該当した。次にタンク付属配管破損ケースにおける濃度の時間変化について、タンク転倒ケースと同様に事業所付近の屋外濃度は5分以内にAEGL-3を超過しており、屋外にいる従業員はAEGL-3を超える濃度に曝露する可能性が高いことが分かった（図-2.6）。また、住宅地付近の屋外濃度は流出地点から約30分後にAEGL-2の濃度を超過した。したがって、30分以内に流出地点から330 m以上離れる、もしくは屋内に避難することでAEGL-2の濃度における曝露を防ぐことが二次的な人的リスクを回避する上で有用な手段となることが示された。さらに、防油堤が機能する場合においても事業所内の屋外濃度は5分以内にAEGL-3の濃度を超過した。したがって、タンク転倒ケースと同様に、屋外にいる従業員はAEGL-3の濃度に曝露すると可能性が高いことが分かった。

対策施工費用の算出結果、全体の工事費用である請負工事費は9,579,000円となった。また、急傾斜地の崩壊対策において、維持管理費用は1年当たり148,900円となった。

続いて、便益の算出結果を流出ケースごとに表-2.1に示す。便益の期待値は松田, 中谷 (2020)<sup>2)</sup>の式(2)によって算出された1年間の土砂災害発生確率0.344%を乗じて算出された。ここで、PT: T年間で1回以上土砂災害が発生する確率である。

$$P_T = 1 - (1 - P_{24})^{\frac{T}{24}} \quad (2)$$

防油堤が機能する場合は、タンク転倒ケース、付属配管破損ケースともに被災者数が同じとなるため、事故による損失額は同額となった。損失額の評価項目の中で最も金額が大きくなった項目は被災者への補償であり、本研究で行った試算では被災者の数が損失額の合計に大きな影響を与えるという結果となった（表-2.1）。また、防油堤が機能する場合は防油堤が機能しない場合と比べて、損失額が約5億円減少していることがわかる。これは防油堤によって、化学物質の影響範囲が縮小し、被災者数が減少したことが反映された結果である。また、避難あり（被災者が0）のケースでは、費用便益比が1.20となった。この結果から、被災者が0の場合でも対策導入による便益が費用を上回り、対策が経済的に合理的であるという結果となった。

総じて全ての流出ケースにおいて、便益が費用を上回ることが分かった（表-2.1）。したがって、法律で定められている防油堤設置に加え、導入費用は高額となるが、土砂崩れそのものを防ぐ事前対策

も、事故が起きる確率を考慮すると経済的にも合理的な対策であることが分かった。

表-2.1 便益計算と費用便益分析の結果（単位：千円）

	避難あり	防油堤が機能する	タンクの転倒 (防油堤が機能しない)	タンク付属配管の破損 (防油堤が機能しない)
①建物や設備等の損失	171,730	171,730	171,730	171,730
②救護・医療費	0	2,543	14,178	13,301
③給与支払い	924	924	924	924
④被災者への補償	0	6,214,369	6,750,620	6,750,620
⑧生産停滞	27,415	27,415	27,415	27,415
⑨事故調査費用	154	154	154	154
⑩罰金、課徴金、過料	0	1,000	1,000	1,000
損失額の合計	200,223	6,418,135	6,966,021	6,965,144
便益の期待値	689	22,078	23,963	23,960
<b>費用便益分析結果</b>				
50年間の総便益	15,393	493,255	535,369	535,302
50年間の総費用	12,906	12,906	12,906	12,906
費用便益比	1.2	38.2	41.5	41.5

### 亜急性毒性管理フェーズ(主に水圏)

[直下型地震]

化学物質が水圏に流出した場合、例えば淀川では、化学物質が川下まで流下するのに約1日かかること、また河川底泥などに化学物質が吸着することにより、急性よりやや長いフェーズで生態系等への影響が発生することが考えられる。そこで、本フェーズの代表シナリオとして、淀川下流に位置する浄水場を対象として、上流に立地する事業所に対して直下型地震を与件として災害・事故のシミュレーションを実施した。

河川での流出事故が起きた場合、上水道システムに対して潜在的リスクの高い物質として、浄水場での対応が困難かつ、生態系への影響が大きい化学物質を抽出するため、①半数致死量  $LD_{50} \leq 300$  mg/kg、②水溶解度  $\geq 10,000$  mg/L、③オクタノール/水 分配係数  $\log Kow < 1.5$ に該当する物質をPRTR対象物質の中からスクリーニングした。その結果、エチレンオキシド、ホルムアルデヒド、アクリル酸メチル、アニリン、アクリロニトリル、アクリル酸、フェノール、アクリルアミド、エピクロロヒドリン、2,2-ジブromo-2-シアノアセトアミド、グルタルアルデヒドが抽出された。抽出された物質は、環境運命予測からも、水へ分配されやすい物質であったことが明らかになった（図-2.7（上））。

PRTR対象物質において、スクリーニング物質は図-2.7(下)の色付け部分となった。このことからPRTR対象物質として主に注視されているのはオクタノール水分配係数が高く、水溶性の低い物質が中心であり、それらの物質の排出・移動量が把握されがちになっているが、水圏への突発的な流失事故時においては、PRTRで抽出されやすい物質群ではないことに注意が必要である。つまり、現状の法制度においては、河川流域沿いの事業所が取り扱う化学物質において、地震等の災害が起きたとき、特に対策が必要となる物質が見逃されやすく、また平常時の貯蔵量が把握できない状態となっている。よって、今後、条例レベルでもPRTR対象物

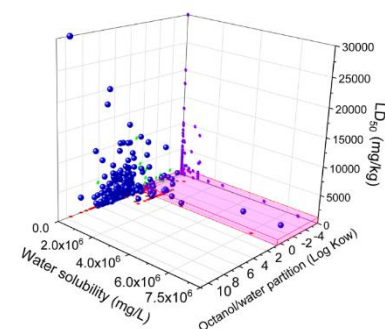
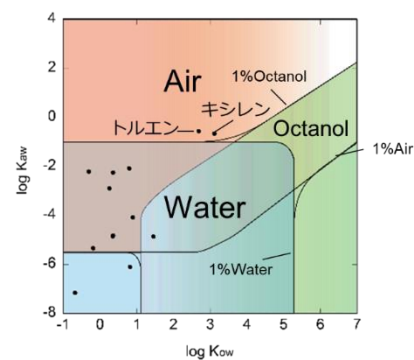


図-2.7 抽出物質の環境運命予測(上)とPRTR対象物質における位置づけ(下)

質外においても、特定の物性においては取扱量の把握ができるようなシステムを導入することが望ましい。

また給水人口の最も多い河川の1つである淀川の河川流量について10年間の流量変動のシミュレーションを行ったところ、1～3月、11～12月にかけて低流量日が続く傾向にあることが分かった(図-2.8)。よってこれらの時期は、事故が起きた場合は、希釈水が少なく、worst caseが発生しやすいことが予想される。

スクリーニングで抽出した化学物質に加え、年間取扱量が多くなる傾向が高いトルエン、キシレンを加え、ヒト健康、生態リスク、またそれらに伴う給水停止リスクによる都市機能不全を評価エンドポイントとして、淀川において流出事故が起きた場合のシミュレーションを行った結果を図-2.9(左、右)に示す。対策オプションとして、緊急遮断弁、活性炭吸着、またその双方のオプションを行った場合の影響を定量的に示した。ここで、ヒト健康影響の影響度は、浄水中最高濃度/ヒトの亜急性毒性基準の比率によって評価を行った図-2.9(右)。またこの値が1を超えた場合、給水停止による都市機能不全が起きる可能性が高いとした。一方、生態系への影響は、原水中濃度(高濃度水塊平均)/水生生物急性毒性基準の比率によって評価した図-2.9(左)。ここで、水生生物急性毒性基準とは、各生態系の急性毒性値をアセスメント係数(10、または100)で除した値とした。アセスメント係数については、環境省初期リスク評価方法の基準(A～C)に従い、以下の方法でアセスメント係数を設定した。

水生生物への影響度を図-2.9(左)に示す。なお数字の1～13はそれぞれ、トルエン、エチレンオキシド、ホルムアルデヒド、アクリル酸メチル、キシレン、アニリン、アクリロニトリル、アクリル酸、フェノール、アクリルアミド、エピクロロヒドリン、2,2-ジブromo-2-シアノアセトアミド、グルタルアルデヒドを示している。対策なしの場合、アクリル酸、アニリン、キシレンなどの5物質が水生生物急性毒性基準を2～6倍超過するが、緊急遮断弁の導入(最大2.2%の流出)により、全ての物質が基準値未満となる

ことが明らかとなった。ヒト健康への影響度を図-2.9(右)に示す。対策なしの場合、浄水場が行う活性炭吸着オプションのみの場合、ホルムアルデヒドなどの3物質がヒトの亜急性毒性基準値を超過するため、給水停止となる可能性がある。一方、緊急遮断弁の導入(最大2.2%の流出)により、全ての物質が基準値未満となる。

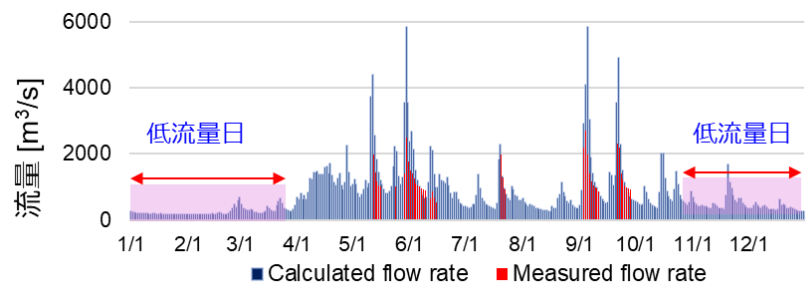


図-2.8 淀川河川流量の変動の推算結果

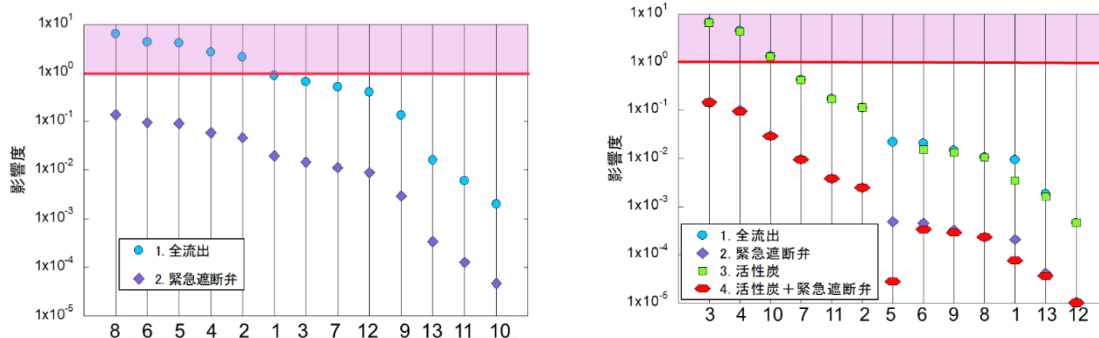


図-2.9 原水影響度評価結果(左)と浄水影響度評価結果(右)

また活性炭の吸着オプションによって効果が見られた物質は、アニリン、トルエンであったが、その効果は緊急遮断弁に比べると低かった。これらの結果より、事後の対策オプションである活性炭だけでは給水停止リスクを大きく下げることが困難であり、事前対策として、化学物質を取り扱う事業所が緊急遮断弁といった事前対策を導入しておくことが、社会影響を可能な限り低減させるオプションとし

て有効であることが分かった。さらにアクリル酸メチルを取り上げて、河川水中の濃度変化についてもシミュレーションを行ったところ（図-0.5）、淀川においては高濃度の水塊は、事業所に一番近い磯島取水点において、他の取水口より約2倍の高い濃度で通過することが分かったため、事故現場付近の取水口からの取水を一定時間中止するといった措置を実施することも重要である。各取水点を高濃度水塊が通過する時間は5～8時間であることから、事中のオプションとして、取水口の開閉操作も給水停止リスク削減のための重要なオプションとなり得ることが分かった。一方で、生物濃縮のリスクが低い親水性の高い物質は、浄水場での除去が困難となることが確認された。また事前の対策オプションとして、緊急遮断弁は全ての化学物質において、河川水中の濃度を給水停止となる基準値未満に抑えることが可能であることが明らかとなり、今後一層の導入が期待される。

#### [南海トラフ地震]

南海トラフ地震により浄水場の取水口の下流にある複数の届出外事業所(対象業種に該当せず、従業員数20人以下で年間取扱量が1 t未満の排出量等の届出が義務付けられていない事業所)から大量のHMTが流出した場合を想定し津波遡上後の取水口付近での河川水中のヘキサメチレンテトラミン(HMT)濃度の時間変化、浄水場で生成する潜在的なFA濃度を定量的に推定した。

図-2.10に解析対象地の地図を示す。地震による液状化で、事業所に貯蔵されているHMTの貯蔵タンクが転倒し、1分間でその全量が河川に流出するシナリオ<sup>3)</sup>を想定した。本研究では2つのケースを設定した。ケース1では淀川大堰下流の右岸から流出するとした。濁水時は淀川大堰を越流する水量がないため、この地点に流出した場合、HMTが希釈されず、津波が到達するまで高濃度のHMTが滞留することが予想される。ケース2では上水取水口の近辺に流出した場合を想定し、流出地点を設定した。また従業員数を振り分け指標とし、メッシュ単位で届出外排出量からHMT貯蔵量を推計した。生態系へのリスク評価指標として、河川水中濃度とその継続時間の積を、水生生物の中で最も急性毒性に対する耐性が低いミジンコの毒性値と毒性試験での継続時間の積で除したRisk scoreを定義し、1より大きい場合はリスク懸念ありとした<sup>3)</sup>。HMT1 gあたり1.1 gのFAが生成する<sup>4)</sup>とし、取水した全量のHMTが塩素と反応した場合のFA濃度を推算した。

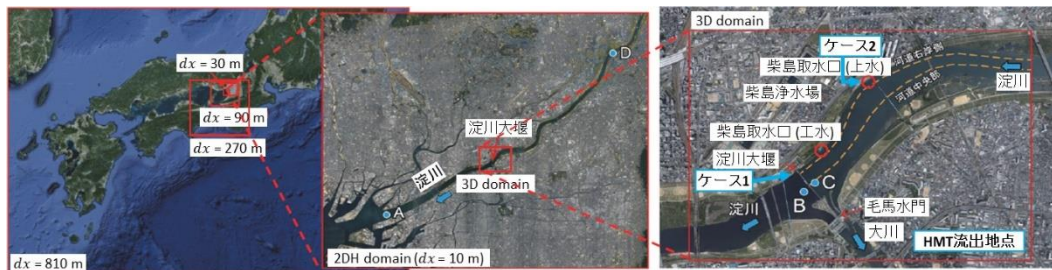


図-2.10 解析対象地図。dxは解析格子の大きさであり、810 m～10 mと大堰周辺ほど細かく設定した。

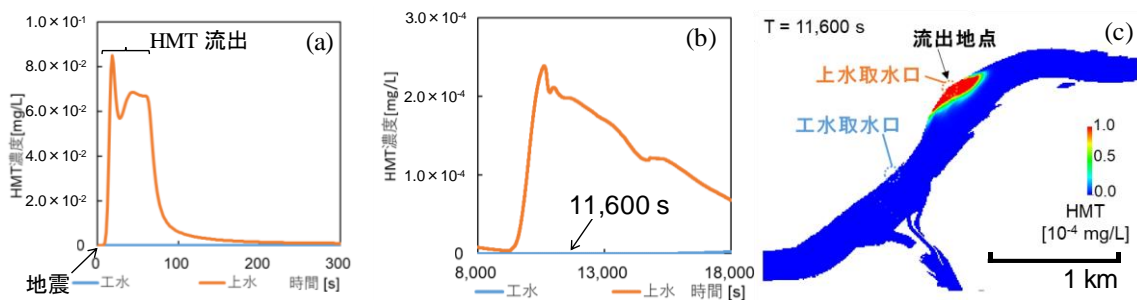


図-2.11 (a) 流出直後のHMT濃度変化、(b) 津波到達後のHMT濃度変化、(c) 津波到達後のHMT濃度分布

大阪府全域でHMTの届出外貯蔵量は $4.3 \times 10^6$  kgと推算され、流出メッシュでのHMTの届出外貯蔵量及び流出量は $4.9 \times 10^4$  kgとなった。ケース1では両取水口近辺でのHMT濃度は河川水生生物、ヒト健康ともにリスクは懸念レベルに達しなかった。ケース2では、上水取水口でのHMT濃度は流出直後に最大値 $8.5 \times 10^{-2}$  mg/Lとなった（図-2.11a）。このとき、水生生物に対するRisk scoreは $2.3 \times 10^{-7}$ となり、リスクは懸念レベルに達しなかった。また浄水場で生成し得るFA濃度は、 $5.3 \times 10^{-2}$  mg/Lと推算された。この値は、FAの水質基準値である $8.0 \times 10^{-2}$  mg/Lと同オーダーであったが、水質基準値は慢性毒性値を基準として定められており、本研究でのFAが高濃度で継続する時間は78秒間であったことを考慮すると、上水に対するリスクも懸念レベルにないと考えられる。また、流下したHMTが津波により上流に押し上げられ、一時的に濃度が上昇したが（図-2.11b, c）、その濃度は流出直後の100分の1以下の $2.5 \times 10^{-4}$  mg/Lであり、リスクは懸念レベルに達しないことが分かった。

#### [対策オプション]

オゾン処理及び粒状活性炭(GAC)処理を含む高度浄水処理を有する浄水場に対し、発生頻度や影響の大きさによって過去に発生した水源水質事故事例を抽出、浄水処理による低減効果、浄水場で可能な対策オプションによる対応戦略について検討した。

ここでは揮発性有機化合物検出事故の原因物質であるジクロロメタン(DCM)を取り上げ、現在の粒状活性炭処理による除去率を求め、対策オプションとしてGACの更新周期を短縮した場合(対策1・2)、エアレーション処理を導入した場合(対策3)、粉末活性炭を注入した場合(対策4)の除去率と比較した(表-0.3)。本研究で扱った事例において、原水における流入濃度が水質基準値を超過した日の平均濃度、0.036 mg/LのDCMを水質基準値(0.020 mg/L)以下に低減するために要する費用を算出したところ、粒状活性炭の更新周期を現行の5年から1年短縮して4年とすることが最も費用対効果に優れていた。他の化学物質の流出に対してもオゾン処理の強化等を含めて同様の方法で評価することが可能で、平常時に高リスク物質から優先的に事前評価を進めておくことで、有事においても迅速な浄水処理の対応が可能である。水源水質事故では、浄水中の濃度が水質基準値や目標値を超過する、または着臭のような性状の異常が発生する事象が多くみられる<sup>5)</sup>。そこで、水道原水に検出される物質に対し、淀川水系における対象物質の検出頻度と浄水処理性、及びその対応戦略に関する筆者の考察を図-2.12に示した。現行の浄水処理において、原水に対する浄水の低減率が20%未満であるときを浄水処理性低、80%以上の場合を浄水処理性高とし、対象物質が物質群であるときはそのうち平均的な物質についての値を採用した。比較のため、淀川水系と同様に多くの化学物質が存在する関東地方の利根川下流の江戸川より取水する東京都水道局金町浄水場における平成26年度から平成30年度の水質試験結果<sup>6)</sup>を収集し、同じく図-2.12中に示した。HMTの東京都水道局における浄水処理性は岩永らの報告<sup>7)</sup>を医薬品類及びパーソナルケア製品の浄水処理性は、中田らの報告<sup>8)</sup>を参照した。浄水処理性は、浄水場流入水(原水)と流出水(浄水)とを比較することで算出できるが、利根川の流入水に検出されておらず浄水処理性が不明な水質項目、高度浄水処理が導入されている金町浄水場の処理性を大阪市水道局と同程度とし、図-2.12の分類に適用した。浄水処理による低減が困難なものほど図-2.12の左側に位置しており、利根川水系で流出事例のある過塩素酸イオン<sup>9)</sup>など、現行の高度浄水処理及び対策オプションにより除去することができない物質には、排出源への要望や水源の変更等により対応することになる(図-2.12中の(a))。一方、濁度や色度、及び一般細菌や大腸菌のように取水した原水が日常的に水質基準値を超過している場合は、浄水処理により常時基準値以下まで低減している<sup>10)</sup>(図-2.12中の(c))。

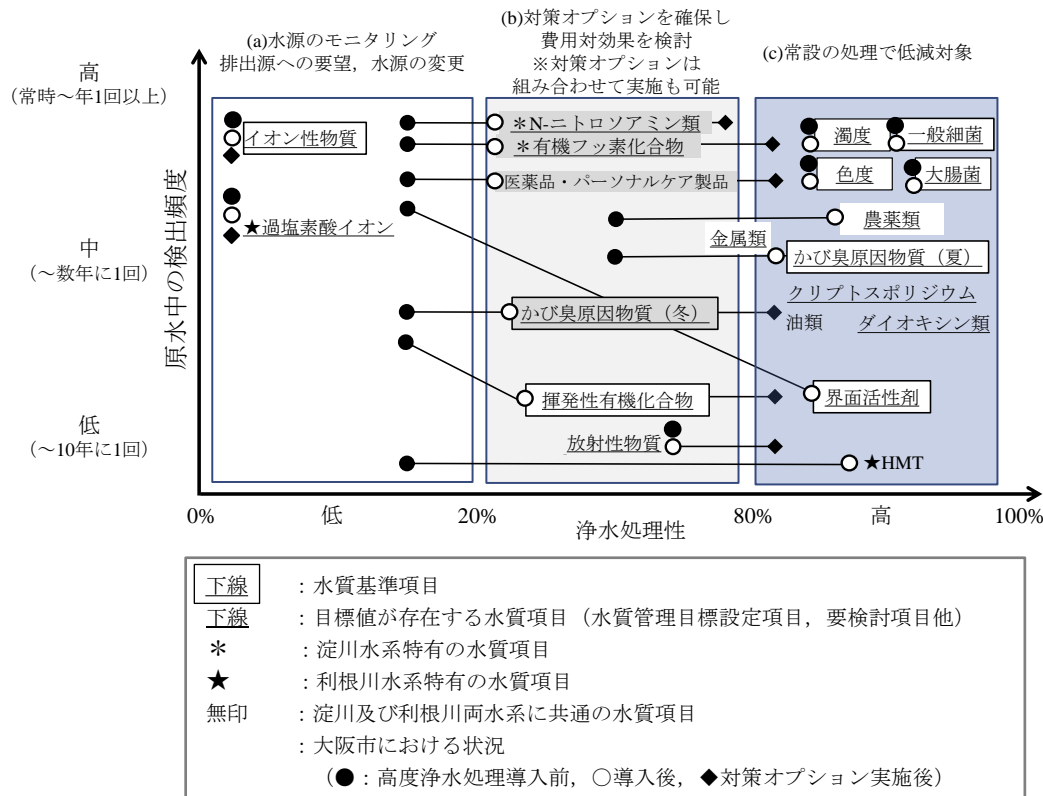


図-2.12 水道原水に含まれる成分及び出現頻度を考慮した対応戦略の分類

よって、これらの中間に位置する物質群(図-2.12中の(b))に対しては、浄水処理性及び対策オプションの事前検討が必要になる。高度浄水処理導入後は特に溶解性物質の多くが低減可能になり<sup>11)</sup>、水源の水質変化または浄水処理性の向上により導入前(●)から導入後の(○)へ変化している。水道水質の向上は貨幣換算が困難である<sup>12)</sup>が、GACの吸着能を強化することが、図-2.12中の(b)に入っている物質の全てに対して対策オプションとして効果があることが分かった。すなわちGAC処理の更新周期を現行の5年から4年または3年に短縮しその吸着機能を強化することは、定常的に河川水に排出される化学物質や微生物に対しても、常時の浄水過程で濃度の低減が可能であり、効果の総量が高いと考えられる。過去に流出事故が発生した、あるいは水源における存在量が大いといった化学物質に対しては特に事前に対応戦略の分類を進め検討結果を収集しておくことで、事故時においても迅速に方針を決めることが可能になる。

### 慢性毒性理フェーズ(土壌圏、多媒体間移動)

#### [土壌圏]

大阪市域の中でも液状化が起りやすい地区を取り上げ、上町断層地震時に土壌に流出した有機系洗剤(テトラクロロエチレン、以下TCE)を取り扱う淀川下流域の事業所から流出が起きた事象をとりあげ、代表的な4つの対策オプションを導入した際の費用と効果を推定した。その結果、遮水壁設置ケース(ケース1)と表層のみの掘削除去+生物浄化ケース(ケース3)における汚染発生から5年後のTCEの帯水層中濃度分布をそれぞれ図-2.13に示す。TCEの地下水基準値は0.01 mg/Lであることから、ケース1では長方形の遮水壁内に基準値を約20,000倍超過したTCEが100年以上残留することが分かった。一方、ケース3では、生物浄化が機能し、汚染発生から5年後までに基準値を超過した領域は消失したことが分かり、掘削除去や事前対策等の対策の有効性が証明された。図-2.14は各計算ケース間で実施した費用効果分析の結果である。ケース3が6,328万円で最も浄化費用等が少ないケースであることが分かった。

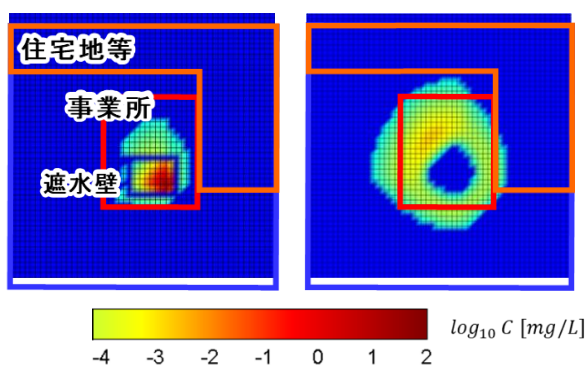


図-2.13 事故後の挙動

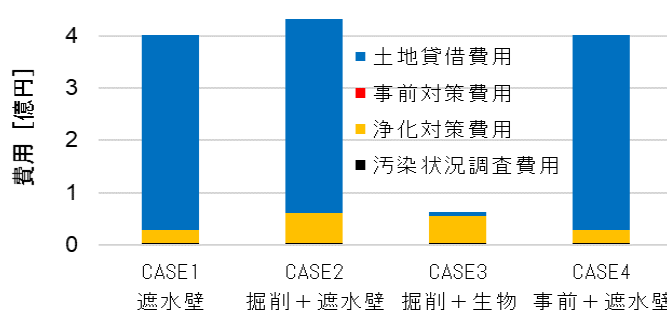


図-2.14 費用効果分析結果

## [多媒体間移動]

災害・事故からの回復期において、曝露・リスク管理の視点からどの環境媒体について優先的にリスクレベルを把握すべきかの判断を支援するための物性値データベースを構築した。ここでは、アンチモンとアクリロニトリルをケーススタディ物質とし、慢性毒性管理フェーズにおけるモニタリング地点の検討（汚染状況の把握）を支援する情報基盤の構築を試みた（図-0.6）。アンチモンの場合、Koc 値が非常に大きいため（ $2.55 \times 10^5$  kg/L）、農地中の土壤粒子に吸着しやすく、中長期的に土壤での残留が懸念されることが分かった。また、消火用水や雨水による移流・拡散された物質は側溝泥に吸着して滞留しやすいことが注視される。下水系に混入して下水処理場まで到達した場合、log (Kow) 値が非常に高いため、下水汚泥の方に移行しやすく、下水汚泥中での高濃度出現が想定すべき事項となる。一方、アクリロニトリルの流出を想定した場合、水溶解度が高く（68、900 mg/L）、消火用水や雨水による移流・拡散が進むことが想定される。下水系に混入して下水処理場まで到達した場合は、大半が処理水の方に移行する傾向があると推察される。消火用水や雨水、処理水を経由して河川に到達した場合、取水源がある地域では表流水中での高濃度出現が想定され、浄水場での除去性能が低く（活性炭への吸着指標K値：3.5、除去性は低い検討の余地あり）、取水停止等の準備が求められる。予想される汚染状況の概観としては、アンチモン流出事故の場合は流出地点の周辺環境において、土壤・側溝泥などに吸着することで区域内に残留するが懸念され、中長期的なモニタリングや除染対策が潜在的な検討事項として挙げられる。一方でアクリロニトリル流出事故の場合、消火用水や雨水、下水処理水への移行による河川水濃度の増加を考慮した短期的な環境管理対策が検討課題となりうる。このように、物性値をデータベース化して把握しておくことにより、物質の移動傾向の把握が可能となり、慢性毒性フェーズにおける対策立案の支援となることが期待される。

次に、PRTR対象物質を土壤吸着係数(Koc)の値で分類し、97パーセンタイルにあたるフタル酸ビス(2-エチルヘキシル) (DEHP)、10パーセンタイルにあたるメタクリル酸を解析対象物質として選定した。また解析対象として、これらの化学物質を取り扱う淀川流域周辺に位置する事業所を選定した。化学物質の貯蔵量は事業所の年間取扱量の2週間分とし、貯蔵量の全量が土壤に流出する条件で解析を行った。事故後の環境媒体中での各化学物質の空間分布や濃度の推計には、環境媒体別に推計が可能な多媒体モデルであるG-CIEMS<sup>13)</sup>を用いた。濃度の空間分布および経時変化を推計した結果、DEHPは事業所周辺の土壤と淀川、神崎川の底質に吸着し、1年以上長期的に残留することが分かった（図-2.15-17）。メタクリル酸に関しては、土壤や淀川、神崎川の底質への吸着性は低く、90日後には流出直後の100分の1以下の濃度になった。また、各媒体における事業所周辺のDEHPの最大濃度からそれぞれのヒトへの曝露量を求め、慢性毒性値と比較した結果、いずれの媒体でもヒトに対する生殖・発生毒性値を超えていなかったが、淀川、神崎川の底質中の濃度が、事故の1日後には甲殻類に対する慢性毒性基準を超え、基準値の104倍以上の濃度で1年以上残留することがわかった。

流出したDEHPは、事業所周辺の大気中および淀川の河川水中では流出後1週間以内で最大濃度となるが毒性値よりも低く経時的に減少していく一方で、土壤および河川底質中には吸着し、底質中濃度が200日後には甲殻類に対する毒性値の約90倍となり大幅に生態毒性値を超える結果となった。また残留

期間については、淀川底質では約430日後まで、神崎川底質では約3年後まで両生類のNOEC値以上の濃度で残留した。一方、メタクリル酸の土壌および底質における濃度は経時的に減少し、90日後には流出直後の100分の1以下となり、長期的なヒト・生態への影響の懸念は少ないと考えられる。本研究によって、2物質における土壌中および底質中濃度の経時変化の比較より、土壌吸着係数の値が残留性に大きく影響することが確認された。流出したフタル酸ビス(2-エチルヘキシル)は淀川、神崎川の河川底質中に1年以上、両生類に対するNOEC値である $2.5 \times 10^4 \mu\text{g}/\text{kg}$ より大きい濃度で残留することが明らかになった。フタル酸ビス(2-エチルヘキシル)といった難揮発性物質は主に河川を通じて事業所から約20km離れた河川底質、及び土壌まで広がった後、吸着し残留したと考えられる(図-2.18)。よって、河川へ通じる経路の事前対策の強化を行うとともに、除染計画においては、両生類のNOEC値を超えた濃度で残留する淀川・神崎川の底質を優先的にモニタリングする必要性が高いことを明らかにした。総じて本研究では、物質の突発的な大量流出後における環境媒体をまたぐ挙動を明らかにし、化学物質の流出後の挙動解析に媒体間移動を考慮する重要性を示した。

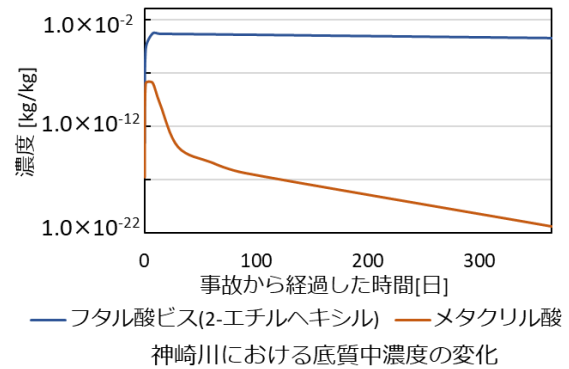
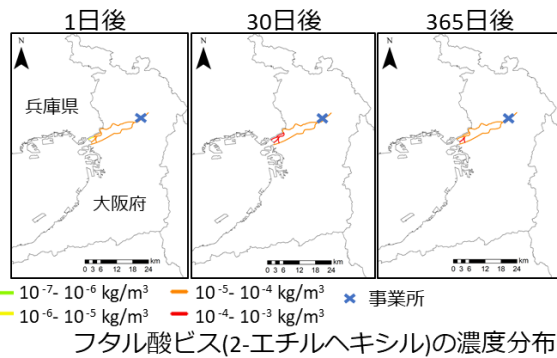


図-2.15 河川水中の濃度分布と変化

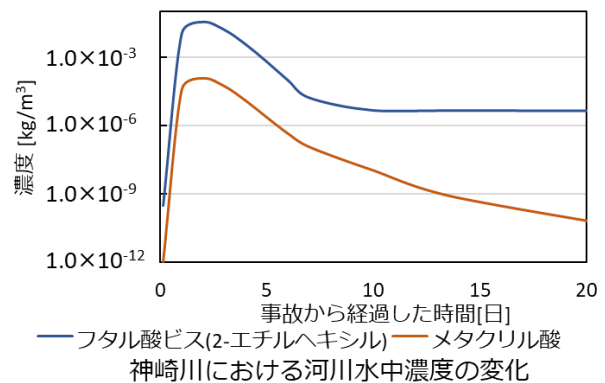
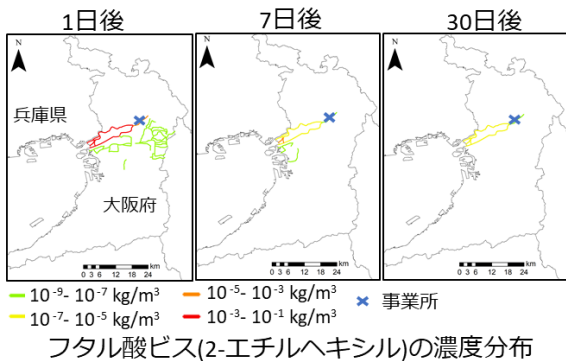


図-2.16 底質中の濃度分布と変化

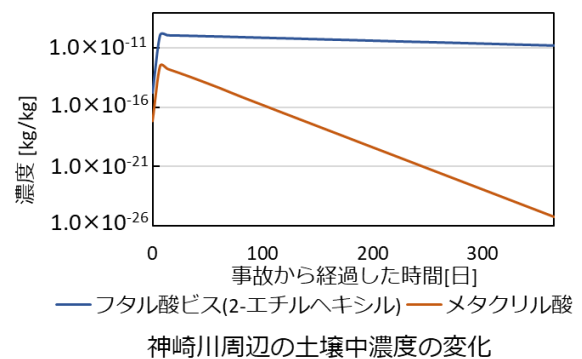
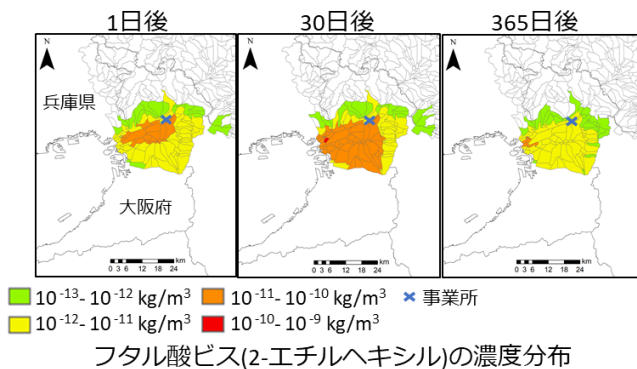


図-2.17 土壌中の濃度分布と変化



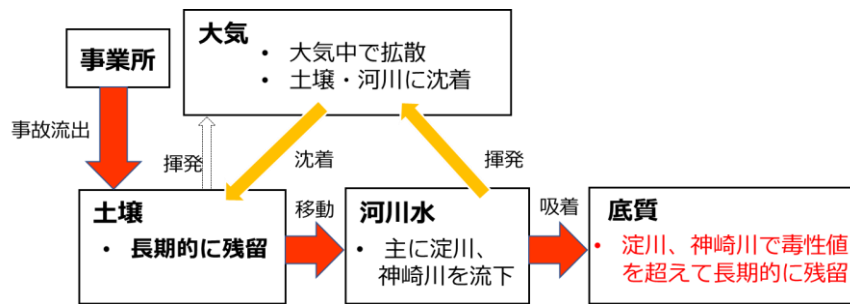


図-2.18 DEHPの媒体間挙動

### シナリオ作成に向けたガイドライン

シナリオ作成に向けたガイドラインとして、決定すべき要素と要素間の関係を整理し、を図-2.19に示した。このように整理することによって、災害・事故の端緒事象がどのように展開されて、リスク評価を実施しているかの過程を明確化する手順を整理した。この展開図にしたがって、考慮した要素、考慮していない要素を確認してリスク評価結果を確認できるとともに、評価結果を事例ベースとして共有可能な形式で集約することを可能にした。

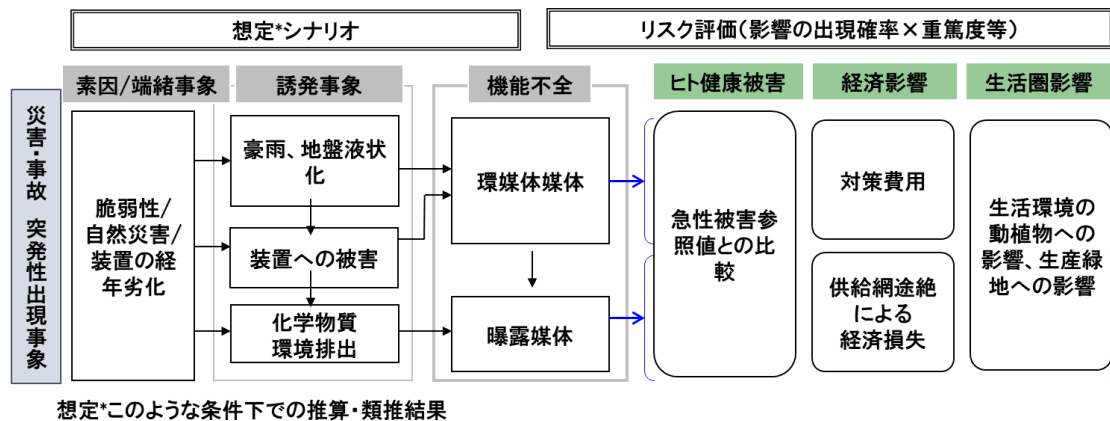


図-2.19 リスク評価の展開図

大阪府下のPRTR届け出事業所の自主的管理の視点での対策の公表状況を図-2.20に示した。概ね従業員数35名を超える規模の事業所では対策オプションを公表していた。これは、個社ベースでのホームページ記載内容等を整理してまとめたものである。

地方自治体での災害・事故時を想定した化学物質管理の対策オプションの公開状況の調査結果を表-2.2に示した。東京都・大阪府・愛知県・埼玉県では、条例の要件を満たす事業者は、災害・事故時の措置を含む化学物質の管理に係る計画書を作成し、自治体に提出する必要がある。また、東京都と大阪府では、災害・事故に備えた化学物質管理に係るマニュアルを公開していた。さらに、東京都の場合、その二十三区を構成する一つの特別区の大田区は、東京都の条例と連動する活動を行っていた。一方、千葉県には東京湾沿岸部に多数化学コンビナートがあるが、東京都や大阪府のような取り組みを行っていなかった。

以上、地方自治体によっては、災害・事故時を想定しての条例等を作成、平時から情報収集等にむけた試みを行っているところもある。事業者は、規模によって対策のレベルに隔たりはあるものの、発生防止、被害拡大防止にむけた対策オプションの整理している。従業員数の少ない事業所が実施できる対策の普及が重要といえる。

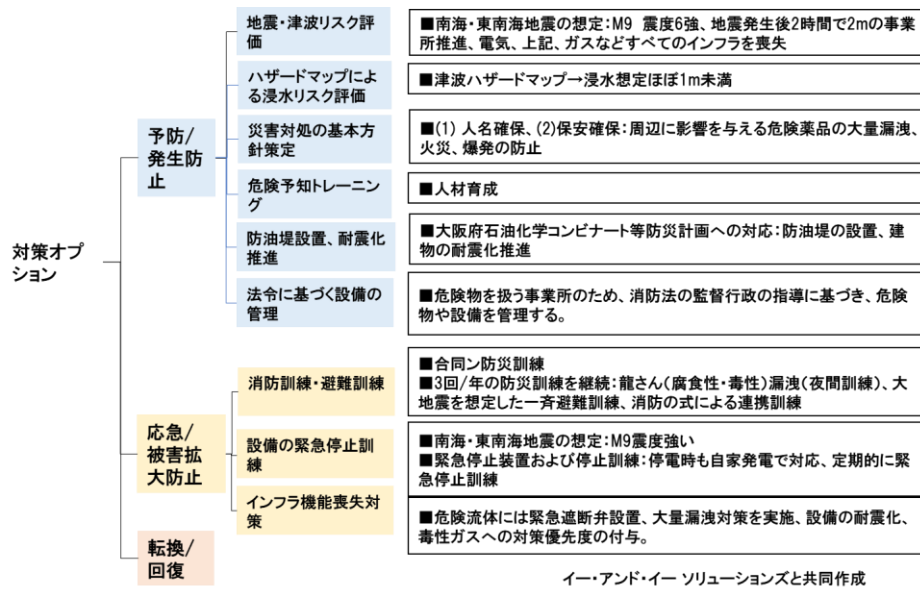


図-2.20 大阪府下のPRTR届け出事業所の自主的管理の視点での対策の公表状況

表-2.2 自治体での災害・事故時を想定した化学物質対策オプションの公開状況

自治体	化管法と相互補完的な位置づけ条例の制定状況	当該条例での災害・事故時の対策の扱い	その他の気付き
東京都	都民の健康と安全を確保する環境に関する条例の第108条～第112条で規定。	<ul style="list-style-type: none"> <li>適正管理化学物質取扱事業者は、化学物質管理方法書を作成し、都・市・区に届出しなければならない。</li> <li>当該方法書には、事故時等の対応を記述する必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>「化学物質を取り扱う事業者のための震災対策マニュアル」(東京都環境局、2013)を公開。</li> </ul>
大田区	N/A	N/A	<ul style="list-style-type: none"> <li>2016年10月から11月まで「適正管理化学物質講習会」を5回開催。主なテーマは「災害時の化学物質対策」(大田区環境対策課、2016)。</li> </ul>
大阪府	大阪府生活環境の保全等に関する条例の第81条の22～31で規定。	<ul style="list-style-type: none"> <li>条例の要件を満たす事業者は、事業所ごとに、化学物質管理計画書を作成し、府・市に届出なければならない。</li> <li>当該計画書には、大規模災害に備えた環境リスクの低減対策の方針を記述する必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>「大阪府化学物質管理制度 届出マニュアルー大規模災害に備えた環境リスク低減編ー」(大阪府、2018)を公開。化学物質管理計画書の「大規模災害に備えた環境リスクの低減のための方策の方針」に係る届出書の作成・提出方法を説明。</li> <li>その他、優良事例集の「化学物質を扱う事業所で今日からできる対策事例～明日起きるかもしれない大地震に備えて～」(大阪府、2016)も公開。</li> </ul>
愛知県	県民の生活環境の保全等に関する条例の第67～71条で規定。	<ul style="list-style-type: none"> <li>条例の要件を満たす事業者は、特定化学物質等管理書を作成し、県に提出しなければならない。当該管理書には、事故の予防及び事故発生時の措置を記述する必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>毎年、県内事業者向けのセミナーを異なるテーマで開催。直近5年間では、2018年度と2015年度のセミナーにて、災害・事故に備えた化学物質管理をテーマとした講演が行われた。</li> </ul>
千葉県	千葉県環境保全条例第9条で規定。	N/A	<ul style="list-style-type: none"> <li>「千葉県化学物質環境管理指針」では、事故・災害・過失等による漏洩防止対策を述べているが、東京都や大阪府のように、事業者に対して対策内容を届出することまでは求めている。</li> </ul>

自治体	化管法と相互補完的な位置づけ条例の制定状況	当該条例での災害・事故時の対策の扱い	その他の気付き
埼玉県	埼玉県生活環境保全条例第 71～75 条で規定。	・ 条例の要件を満たす事業者は、適正管理手順書を作成し、県・市に提出しなければならない。当該手順書には、事故および災害対策に関する事項を記述する必要がある。	N/A
栃木県	栃木県生活環境の保全等に関する条例第 40・41 条で規定。	・ 条例の要件を満たす事業者は、化学物質管理計画書を作成し、公表することに務めなければならない。当該計画書には、事故時の措置に関する事項を記述する必要がある。	・ 2019 年 10 月、「災害に備えた化学物質管理について」のテーマで、事業者向けのセミナーを開催。
福井県	N/A	N/A	N/A

## 5. 研究目標の達成状況

気圏、水圏、土壌・地下水を対象としたプロトタイプモデルを構築し、淀川水系、大阪市を対象とした対策オプション評価を実施し、対応戦略の優先順位を明らかにした。全体として、当初の目標を大きく上回って達成した。

## 6. 引用文献

1) 気象庁：南海トラフ地震に関連する情報。

<<https://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/nreq/index.html>>(2022. 1. 26 閲覧)

2) 松田昌之, 中谷洋明 (2020) 地形・地質に関する主題図を用いた全国における土砂災害発生リスク推定法に関する考察, 国土技術政策総合研究所資料, 1120.

3) Shogo Hamamoto, Lisa Ito, Nozomu Yoneyama, Akihiro Tokai (2021) Case Study for the Predictive Environmental Risk Assessment of Hexamethylenetetramine Release to the Yodo River during a Massive Tsunami Attack, water.

4) 鶴田朋子, 森寛佳二, 平林達也 (2015)ホルムアルデヒド前駆物質の浄水処理性, 大阪市水道局水質試験所調査研究ならびに試験成績 第66集, 19-23.

5) 厚生労働省, 水質汚染事故の発生状況,

<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kikikanri/03.html>, (accessed 2021-12-27).

6) 東京都水道局. 東京都水道局水質年報,

<https://www.waterworks.metro.tokyo.lg.jp/suigen/data/>, (accessed 2021-12-27).

7) 岩永 秀・西田 実・田中武志・栗田 翔・野口綾子・森内裕香・江原和宏, 木村慎一 (2017) 浄水処理対応困難物質の浄水処理過程における挙動調査. 水道協会雑誌, 86 (3) , 2-12.

8) N. Nakada, K. Komori, Y. Suzuki, C. Konishi, I. Houwa and H. Tanaka (2007) Occurrence of 70 pharmaceutical and personal care products in Tone River basin in Japan, Water Science and Technology, 56 (12), 133-140.

9) 小坂 浩司・浅見 真理・松岡 雪子・鴨志田 公洋・国包 章一 (2007) 利根川流域の浄水場における過塩素酸イオンの実態調査, 水環境学会誌, 30 (7), 361-367.

10) 日本水道協会, 水道水質データベース, [http://www.jwwa.or.jp/mizu/ent\\_up.html](http://www.jwwa.or.jp/mizu/ent_up.html), (accessed 2020-7-9).

11) 寺嶋勝彦 (2002) 大阪市の高度浄水処理について. 公衆衛生, 46 (3) , 79-84.

12) 厚生労働省 (2011) 水道事業の費用対効果分析マニュアル,

<https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/jouhou/other/o7.html>, (accessed 2021-12-27).

13) 国立環境研究所・環境リスク研究センターリスク管理戦略研究室：曝露評価関連シミュレーションモデル&ツール, 2013. <[http://www.nies.go.jp/rcer\\_expoass/gciems/gciems.html](http://www.nies.go.jp/rcer_expoass/gciems/gciems.html)>(2021. 4. 21 閲覧)

## II-3 非定常状態における健康リスク評価手法の基礎的検討

明治大学農学部

農学科

動物環境学研究室

川口 真以子

<研究協力者>

明治大学

研究・知財戦略機構

田谷 一善

研究・知財戦略機構

小林 翔平（平成31年～令和3年度）

研究・知財戦略機構

畠山 太一

一般財団法人食品薬品安全センター 秦野研究所

太田 亮

東京農工大学大学院農学研究院

動物生命科学部門

獣医生理学研究室

渡辺 元

### [要旨]

#### 1. 研究開発目的

世界的にも自然災害・事故起因の産業事故による化学物質曝露によるリスクが増加している。そのため自然災害・事故に起因する化学物質対策の確立は急務であるが、対応策については確立されていない。中でも、災害・事故等の非定常状態によって想定される、時間とともに変動する曝露要因に対する健康リスクの評価はほとんど検討されていない。化学物質の健康リスク評価として実施されている試験は、実験動物を用いた化学物質の急性曝露、あるいは一定量を反復投与した慢性曝露の影響を調べるものであり、非定常状態は想定されていない。そこで本サブテーマでは、実際の非定常状態の化学物質曝露として想定される、「曝露歴の有無が与える健康影響の評価」および「曝露量の変動が与える健康影響の評価」について、実験的影響評価手法を構築することにより、化学物質対策に貢献することを目的とした。

#### 2. 研究目標

実験動物を用いて、化学物質の「曝露歴の有無が与える健康影響」および「曝露量の変動が与える健康影響」について毒性学的検討を行い、災害や事故で想定される非定常状態の健康リスク評価のための実験的影響評価手法を構築する。

#### 3. 研究開発内容

非定常的曝露として「実験1：曝露歴の有無が与える健康影響の評価」「実験2：曝露量の変動が与える健康影響の評価」についてWistar-Imamichi系雄ラットを用いて行った。評価対象物質は難燃剤等で用いられるtris-(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate (TDCIPP) および殺虫剤等で用いられるAcenaphtheneとした。

##### 3-1 評価対象物質TDCIPPを用いた検討

[実験1：TDCIPPの曝露歴の有無が与える健康影響の評価]

化学物質への感受性が高い可能性のある新生児期に自然災害・事故により化学物質曝露された人が成人になり、再度自然災害・事故により化学物質曝露されたことを想定し、Wistar-imamichi系の雄ラットにTDCIPPを生後1日齢から7日齢にかけて毎日250 mg/kg/day経口投与（新生仔期、曝露歴）した後、101日齢から107日齢にかけて再び650 mg/kg/day経口投与（成熟期、再曝露）し、体重、飲水・摂食量、活動量、臓器重量を測定し、病理組織学的検査、血液学検査、血液生化学検査を行った。

上記の新生仔期曝露歴試験において曝露歴の影響が認められたが、曝露歴の時期により化学物質への感受性が異なる可能性も考えられたことからそれを検討するため、1回目の曝露時期を新生仔期から若齢期に変えた実験も行った。Wistar-imamichi系の雄ラットにTDCIPPを生後42日齢から7日間毎日250 mg/kg/day経口投与（若齢期）した後、142日齢から7日間650 mg/kg/day経口投与（成熟期）し、体重、

飲水・摂食量、臓器重量測定、病理組織学的検査、血液学検査、及び血液生化学検査を行った。

〔実験2：TDCIPPの曝露量の変動が与える健康影響の評価〕

災害・事故等によって流出した時間経過に伴い減衰する化学物質曝露である減衰曝露を想定し、TDCIPPあるいは溶媒を生後7週目から10日毎に、計10回経口投与した。実験群は、溶媒のみを投与する陰性対照群、高用量を単回投与する群、一定用量を反復投与する群、新しい評価手法である用量を減衰させて投与する群を設定した。陰性対照群以外は500 mg/kgが総曝露量になるようTDCIPPを投与し、体重、飲水・摂食量、臓器重量を測定し、病理組織学的評価、血液学検査、血液生化学検査を行った。

### 3-2 評価対象物質Acenaphtheneを用いた検討

〔実験1：Acenaphtheneの曝露歴の有無が与える健康影響の評価〕

Acenaphtheneを用いてWistar-Imamichi系雄ラットを用い、TDCIPPと同様の新生仔期曝露歴試験を行った。Acenaphtheneあるいは溶媒を生後1日齢から7日齢（新生仔期、曝露歴）にかけて毎日100 mg/kg/day経口投与した後、101日齢から107日齢（成熟期、再曝露）にかけて100 mg/kg/day経口投与し、体重、飲水・摂食量、臓器重量を測定し、病理組織学的検査、血液学検査、血液生化学検査を行った。

〔実験2：Acenaphtheneの曝露量の変動が与える健康影響の評価〕

Acenaphtheneを用いてWistar-Imamichi系雄ラットを用い、TDCIPPと同様の減衰曝露試験を行った。実験群は、溶媒のみを投与する陰性対照群、高用量を単回投与する群、一定用量を反復投与する群、新しい評価手法である用量を減衰させて投与する群を設定した。陰性対照群以外は2000 mg/kgが総曝露量になるようAcenaphtheneを投与し、体重、飲水・摂食量、臓器重量を測定し、病理組織学的検査、血液学検査、血液生化学検査を行った。

## 4. 結果及び考察

### 4-1 評価対象物質TDCIPPを用いた検討

〔実験1：TDCIPPの曝露歴の有無が与える健康影響の評価〕

新生仔期のTDCIPP曝露歴により、成熟期曝露で検出される副腎重量、血清鉄、UIBCへの毒性が有意に増加した。新生児期に災害・事故等によって化学物質に曝露され、成人期に再曝露されるケースの健康リスクは、従来法では評価できない可能性があることが示され、曝露歴の有無を考慮した健康影響評価法の有用性が示唆された。

若齢期のTDCIPP曝露歴は、成熟期曝露の毒性を増悪させなかった。従って、TDCIPPの曝露歴には、時期特異性があることが示された。

〔実験2：TDCIPPの曝露量の変動が与える健康影響の評価〕

TDCIPPの単回投与、反復投与による毒性影響は表れた一方、減衰曝露による毒性影響はほとんど認められなかったことから、TDCIPPの曝露量の変動が与える健康リスクは従来法である程度評価できることが示された。

### 4-2 評価対象物質Acenaphtheneを用いた検討

〔実験1：Acenaphtheneの曝露歴の有無が与える健康影響の評価〕

新生仔期のAcenaphthene曝露歴は、成熟期曝露で検出される毒性には有意な影響を及ぼさなかった。従って、新生児期に災害・事故等によってAcenaphtheneに曝露され、成人期に再曝露されるケースの健康リスクは、従来法である程度評価できることが示された。

〔実験2：Acenaphtheneの曝露量の変動が与える健康影響の評価〕

Acenaphtheneの単回投与、反復投与による毒性影響は表れた一方、減衰曝露による毒性影響は認められなかったことから、Acenaphtheneの曝露量の変動が与える健康リスクは従来法で評価できることが示された。

## 5. 研究目標の達成状況

2つの評価対象物質（TDCIPPとAcenaphthene）を対象に、曝露歴の有無が与える健康影響評価、および曝露量の変動が与える健康影響評価を完遂し、おおよそ計画通りに達成した。

## 1. 研究開発目的

現代社会は、多種多様な化学物質のリスクにさらされている。特に近年世界的に指摘されているのが、自然災害・事故起因の産業事故（natural-hazard triggered technological accidents: Natech）による比較的短期間に多量の化学物質にさらされるリスクである<sup>1,2)</sup>。Natechによるリスクは増加してきているとの指摘があるが<sup>3)</sup>、わが国でも東日本大震災を契機として地震が頻発しており、危険物施設の火災及び流出事故が増加傾向にある<sup>4)</sup>。太平洋側で今後30年間に震度6弱以上の大地震が発生する可能性が高いと予測されていることから、自然災害・事故に起因する化学物質対策の確立は急務であるが、事故発生時の対応策については確立されていない。その中でも、災害・事故等の非定常状態によって想定される、時間とともに変動する曝露要因に対する健康リスク（図-3.1）の評価は世界的にもほとんど検討されていない。複数回同じ化学物質を曝露した研究としては、幼若期のみPCBsを曝露されたラットと胎児期と幼若期の両時期にPoly Chlorinated Biphenylを曝露されたラットを比較し、neuro-molecular phenotypeやbehaviorに対するPCBsの毒性影響が異なることが報告されているのみである<sup>5,6)</sup>。従来、化学物質の健康リスク評価として実施されている試験は、実験動物を用いた化学物質の急性曝露、あるいは一定量を反復投与した慢性曝露の影響を調べるものであり、非定常状態は想定されていない。しかし、非定常状態という新たなリスク評価における実験的影響評価手法は、近い将来に発生が予測されている災害・事故が起こる前に明らかにされるべき事象であり、緊急に実施し、新たな研究分野として構築する必要がある。そこで本サブテーマでは、実際の非定常状態の化学物質曝露として想定される、「曝露歴の有無が与える健康影響の評価」および「曝露量の変動が与える健康影響の評価」について、実験的影響評価手法を構築することにより、非定常状態の化学物質曝露が及ぼす健康リスク評価のための基礎的知見を提供し、化学物質対策に貢献することを目的とした。

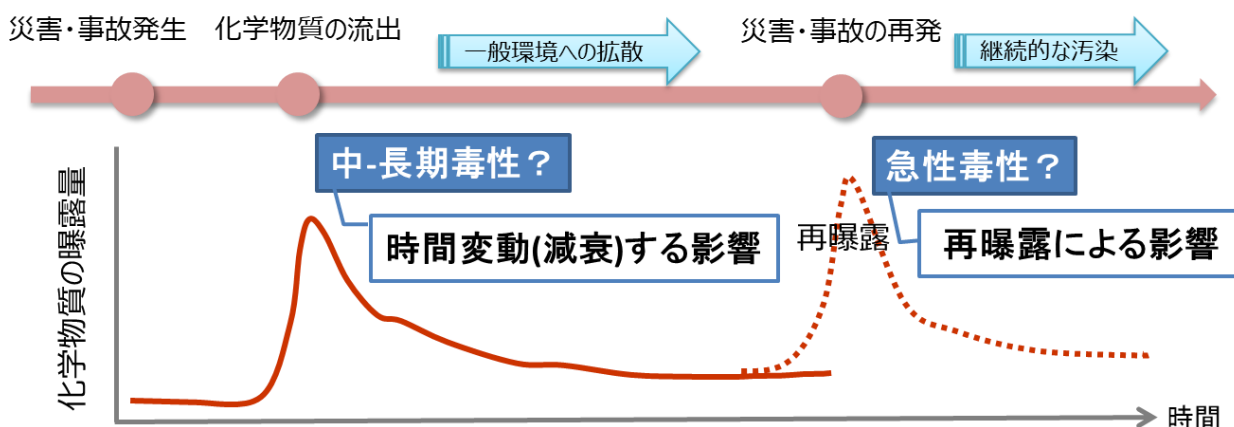


図-3.1 災害・事故時の非定常状態によって想定される健康リスク

## 2. 研究目標

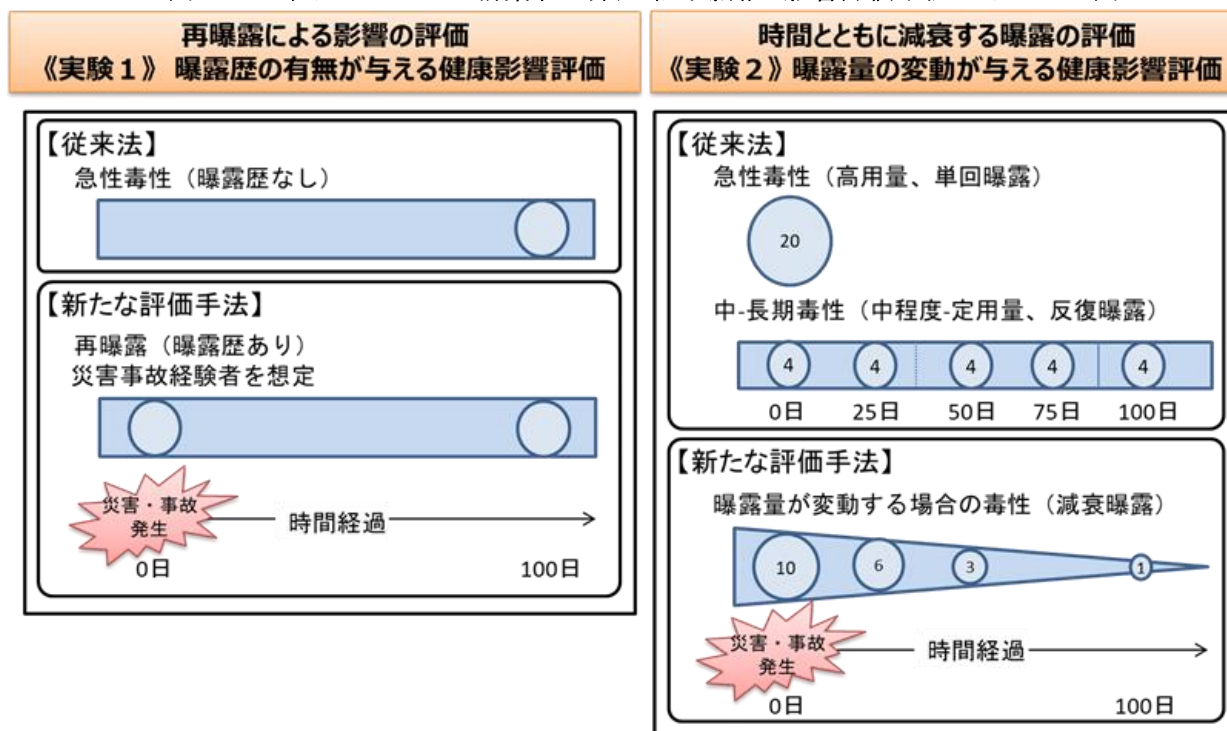
実験動物を用いて、化学物質の「曝露歴の有無が与える健康影響」および「曝露量の変動が与える健康影響」について毒性学的検討を行い、災害や事故で想定される非定常状態の健康リスク評価のための実験的影響評価手法を構築する。

## 3. 研究開発内容

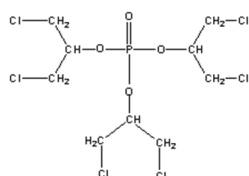
非定常的曝露として、「実験1：曝露歴の有無が与える健康影響の評価」および「実験2：曝露量の変動が与える健康影響の評価」（図-3.2）についてWistar-Imamichi系雄ラットを用いて行った。評価対象物質は経済協力開発機構（Organization for Economic Co-operation Development；OECD）における高生産量化学物質（High Production Volume Chemicals；HPV Chemicals）から二つ選抜した。HPV Chemicalsとは、OECD加盟国において、1カ国以上で、年間の製造量が1,000トンを超える高生産量のもので、安全性の点検を行う対象として、その名称が高生産量化学物質点検事業（HPV Chemicals Assessment Programme）の候補名簿に掲載されている物質である。また、研究計画に則り、日本での製

造量と毒性の強度、事故・災害時の環境への漏出等を考慮し、災害時におけるヒトへの曝露の可能性が高い物質を選択した。一つは様々な生活用品に含有されている難燃剤の一つであるtris-(1,3-dichloro-2-propyl)phosphate (TDCIPP、CAS No. 13674-87-8) とした (図-3.3)。もう一つは染料原料、殺菌・殺虫剤として使用されているAcenaphthene (CAS No. 83-32-9) とした。研究計画当初はDiazinonを用いる予定だったが、テーマ1-1と連携して協議した結果、S17課題のケーススタディ物質でもあるAcenaphtheneを用いることとなった。TDCIPPもAcenaphtheneも、環境中に放出された場合の生体への曝露経路は主に口を介することが予想されること、投与濃度を厳密に操作する必要があることから、本研究での評価対象物質の投与方法は強制経口投与とした。

図-3.2 本サブテーマが構築する非定常的曝露の影響評価手法のイメージ図

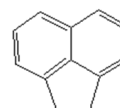


TDCIPP  
: tris-(1,3-dichloro-2-propyl)phosphate



CAS番号: 13674-87-8  
 使用例: プラスチック発泡剤、難燃剤  
 特定標的臓器毒性(反復曝露): 区分1  
 (腎臓・精巣)

Acenaphthene



CAS番号: 83-32-9  
 使用例: 染料原料、殺菌・殺虫剤  
 特定標的臓器毒性(反復曝露): 区分2  
 (肝臓)

図-3.3 本サブテーマで用いた評価対象物質

### 3-1 評価対象物質TDCIPPを用いた検討

TDCIPPの代表的用途である難燃剤は、プラスチック、木材、繊維等の高分子有機材料に使用することで火災による延焼と延焼面積の拡大を低減させる効果があり、建材の断熱材や家電、カーテンやカーペ

ットといったファブリックスなど広く使用されている。難燃剤の中で最も難燃効率の高い臭素系難燃剤は正式に禁止はされていないものの2007年のRoHS規制の制定により使用が控えられる一方<sup>7)</sup>、リン酸エステル系難燃剤の使用量は多い<sup>8)</sup>。TDCIPPはリン酸エステル系難燃剤の一つであり、家財に多く含まれるほか、水道水、室内の埃、食品中など我々の環境中にも存在し<sup>9-11)</sup>、ヒトの母乳や尿・髪・爪からも検出されている<sup>12-14)</sup>。

「化学品の分類および表示に関する世界調和システム」(The Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals : GHS)によると、TDCIPPは腎臓と精巣において特定標的臓器毒性(反復暴露)区分1となっている。この特定標的臓器毒性の根拠となっているのは、ラットの24ヶ月間混餌投与試験において、5 mg/kg/day以上で雄の腎臓曲尿細管上皮の過形成の発生率が増加し、精子過少など精巣への影響が認められたことによるものである。GHSとは化学品の危険有害性を世界的に統一された一定の基準に従って分類し、災害防止及び人の健康や環境の保護に役立てようとするものである。論文による先行研究としては、ヒトではTDCIPP濃度は血中アンドロゲン濃度、血中サイロキシン濃度で負の相関を示し、血中甲状腺ホルモン濃度、血中プロラクチン濃度で正の相関を示すことが報告されている<sup>15)</sup>。動物実験では、TDCIPPを20または80 mg/kg/day 餌を介して24か月間投与したSprague-Dawley系ラットにおいて、肝臓重量、腎臓重量の増加、良性腫瘍および非腫瘍性変化の発生率の増加、高用量群では死亡率の増加と体重減少およびヘモグロビン・ヘマトクリット・赤血球の減少が示されている<sup>16)</sup>。妊娠10日から離乳までTDCIPPを15、50または150 mg/kg/day経口投与されたLong-Evans系ラットでは、高用量群で生まれた仔の体重増加の抑制と肝臓絶対重量の低下が表れる一方、母仔の甲状腺ホルモンおよび仔の生存率・脳重量には影響を及ぼさないことが報告されている<sup>17)</sup>。Zebrafishにおいて500 µg/lのTDCIPPは孵化率の低下、生存率の低下、運動性の低下等を引き起こすことが確認されている<sup>18)</sup>。一方、TDCIPPは*in vitro*でエストロゲン様作用や抗プロゲステロン様作用等、内分泌かく乱化学物質としていくつかの特性を持ち、その中でも特に抗アンドロゲン様作用が強いことが明らかになっている<sup>19)</sup>。関連する*in vivo*の現象としては、生後1~28日齢のWistar-imamichi系のオスラットにTDCIPPを250 mg/kg/day経口投与すると、成熟後の精巣、陰茎重量等が低下し、性行動が抑制されることが報告されている<sup>20)</sup>。

#### 〔実験1：TDCIPPの曝露歴の有無が与える健康影響の評価〕

昨今の自然災害・事故発生間隔を鑑みると、生涯のうちで複数回大規模な災害で被災し、複数回化学物質に曝露されることも十分に考えられる。そこでまずは化学物質への感受性が高い可能性のある新生児期に自然災害・事故により化学物質曝露された人が成人になり、再度自然災害・事故により化学物質曝露されたことを想定し、Wistar-imamichi系の雄ラットにTDCIPPを生後1日齢から7日齢にかけて毎日経口投与(新生児期、曝露歴)した後、101日齢から107日齢にかけて再び経口投与(成熟期、再曝露)するモデルについて検討した。実験群は、(1)新生児期・成熟期ともに溶媒であるSesame Oilを投与した00群(陰性対照)、(2)新生児期Oil・成熟期TDCIPP投与した0T群(陽性対象)、(3)新生児期・成熟期ともにTDCIPP投与したTT群(新しい評価手法)とした。新生児期ラットに対する曝露用量は、予備実験と先行研究<sup>20)</sup>に基づき、250 mg/kg/dayと設定した。成熟期ラットに対する曝露用量は、予備実験において、肝臓・腎臓に対するTDCIPPの毒性影響が検出された650 mg/kg/dayとした<sup>21)</sup>。この予備試験ではほかに、赤血球数やヘモグロビンの低下など、TDCIPPの毒性として報告されていない影響が複数認められた<sup>21)</sup>。試験期間中、体重、飲水・摂食量を経時的に測定した。最終投与翌日、活動量測定、体重、体温、瞳孔反射、握力を測定した後に、深麻酔下にて腹大静脈より採血を行い、その後安楽死させ臓器の採取と重量測定(肝臓、腎臓、脾臓、副腎、心臓、精巣、精巣上体、陰茎、下垂体)を行った。重量を測定した臓器の内、肝臓、腎臓、脾臓、副腎に関しては、病理組織学的な定量評価(肝臓における肝細胞の腫大化・脂肪変性・単細胞壊死・炎症細胞浸潤(グリソン鞘)・微小肉芽・巣状壊死・小胆管増生、腎臓における糸球体の変化・尿細管変性・再生・尿細管拡張・尿円柱の貯留・炎症細胞浸潤(腎盂粘膜下・皮質間質)、脾臓の赤血球系髓外造血・ヘモジデリン色素沈着、副腎の皮質細胞腫大・空



洞化・髄質の増殖性)を行った。また採取した血液を用い、血液学検査(赤血球数、白血球数、網状赤血球数、ヘモグロビン、ヘマトクリット、平均赤血球容積(MCV)、平均赤血球ヘモグロビン量(MCH)、平均赤血球色素濃度(MCHC)、血小板、好中球、リンパ球、単球、好酸球、好塩基球)および血液生化学検査(総蛋白(TP)、アルブミン(ALB)、アスパラギン酸アミノトランスフェラーゼ(AST)、アラニンアミノトランスフェラーゼ(ALT)、アルカリホスファターゼ(ALP)、総ビリルビン(Tbil)、尿素窒素(BUN)、クレアチニン(CRE)、グルコース(Glu)、総コレステロール(Tcho)、中性脂肪(TG)、総胆汁酸(TBA)、乳酸脱水素酵素(LDH)、アミラーゼ(AMY)、リパーゼ(Lipa)、ナトリウム(Na)、カリウム(K)、クロール(Cl)、カルシウム(Ca)、無機リン(IP)、クレアチニンキナーゼ(CPK)、血清鉄、不飽和鉄結合能(UIBC)、総鉄結合能(TIBC))を行った。また、内分泌学的解析として、ELISAによる血中テストステロン濃度の測定を行った。

その結果、一部の測定項目に曝露歴の影響が認められた(詳細は4-1参照)ため、TDCIPPの影響が認められた項目を中心にデータの信頼性を担保するため再度実験を行った。具体的な評価項目は体重、飲水・摂食量、活動量、臓器重量測定(肝臓、腎臓、脾臓、副腎、精巣、精巣上部)、病理組織学的評価(肝臓、腎臓、脾臓、副腎)、血液学検査、血液生化学検査とした。また、曝露歴の作用機序を検討するため、新生仔期のみTDCIPPを投与する群を追加した。従って実験群は、(1)新生仔期・成熟期ともにOil(溶媒)投与したO群(陰性対照)、(2)新生仔期Oil・成熟期TDCIPP投与したOT群(陽性対照)、(3)新生仔期・成熟期ともにTDCIPP投与したTT群(新しい評価手法)、に加え(4)新生仔期TDCIPP・成熟期Oil投与したTO群(陽性対照)とした。その結果、同様に曝露歴の影響が認められた(詳細は4-1参照)。

以上の実験より、TDCIPPにおいては曝露歴により、従来の一般毒性試験とは異なる影響が表れる可能性が示された。次に、化学物質曝露に対する感受性の違いが曝露歴による有害性に影響しうるかについて調べるため、1回目の曝露時期を新生仔期から若齢期に変えた実験を行った。具体的には、思春期以降に自然災害・事故により化学物質曝露された人が、再度自然災害・事故により化学物質曝露されたことを想定し、性成熟後の若齢期となる生後42日齢から7日間、Wistar-imamichi系の雄ラットにTDCIPPを毎日経口投与(若齢期、曝露歴)した後、142日齢から7日間再び経口投与(成熟期、再曝露)するモデルについて検討した。実験群は、(1)若齢期・成熟期ともにOil投与したO群(陰性対照)、(2)若齢期TDCIPP・成熟期Oil投与したTO群(陽性対照)、(3)若齢期Oil・成熟期TDCIPP投与したOT群(陽性対照)、(4)若齢期・成熟期ともにTDCIPP投与したTT群(新しい評価手法)とし、体重、飲水・摂食量、臓器重量測定(肝臓、腎臓、脾臓、副腎、精巣、精巣上部)、病理組織学的評価(肝臓、腎臓、脾臓、副腎)、血液学検査、及び血液生化学検査を行った。

#### [実験2：TDCIPPの曝露量の変動が与える健康影響の評価]

実験1と同様に、TDCIPPを評価対象物質とし、Wistar-Imamichi系雄ラットを用いて実験を行った。災害・事故等によって流出した化学物質濃度は時間経過に伴い減衰することから、本実験では、この減衰曝露を想定し、以下の実験を実施した。

TDCIPPあるいは溶媒のsesame oilを生後7週目から10日毎に、計10回経口投与した。実験群は、(1)陰性対照である溶媒のみを投与する群(Oil: 0群)、(2)陽性対照である高用量を単回投与する群(T群)、(3)陽性対照である一定用量を反復投与する群(RT群)、(4)新しい評価手法である用量を減衰させて投与する群(AT群)を設定した。事前に実施した予備実験において、T群で肝臓絶対・相対重量、腎臓絶対・相対重量等に対する毒性影響が検出された500 mg/kgをO群以外の総曝露量になるよう設定した(表3.1)。AT群は、1回目を333.5 mg/kg、2回目はその1/4、3回目以降は前回曝露量の1/2となるよう減衰させた。RT群は1回あたりを50 mg/kgとした。実験期間中には飲水・摂食量および体重を経時的に測定した。最終投与翌日に解剖を行い、臓器と血液を採取した。なお、実験1の結果を受け、本実験での測定項目は臓器重量(肝臓、腎臓、脾臓、副腎)、血液学的検査(赤血球数、白血球数、網状赤血球数、ヘモグロビン、ヘマトクリット、MCV、MCH、MCHC、血小板、好中球、リンパ球、単球、好酸球、好塩基

球)、血液生化学検査(TP、ALB、AST、ALT、ALP、Tbill、BUN、CRE、Glu、Tcho、TG、TBA、LDH、AMY、Lipa、NA、K、Cl、Ca、IP、CPK、血清鉄、UIBC、TIBC)、病理組織学的評価(肝臓、腎臓、脾臓、副腎)とした。

表3.1 TDCIPPの曝露量の変動が与える健康影響評価における曝露濃度(mg/kg)一覧

投与	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
O群	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T群	0	0	0	0	0	0	0	0	0	500
RT群	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
AT群	333.5	83.4	41.7	20.8	10.4	5.2	2.6	1.3	0.7	0.3

### 3-2 評価対象物質Acenaphtheneを用いた検討

燃焼生成物であるAcenaphtheneは、化石燃料などに含まれているため地震や火山の噴火などの自然災害の二次被害などにより、流出が想定される物質である。Acenaphtheneの主な用途は、染料原料、殺菌・殺虫剤とされている。また、石炭及びディーゼル燃料や様々な化石燃料にも含まれることから、これらの燃焼による大気への排出が報告されている<sup>22)</sup>。Acenaphtheneの人に対する1日の予測最大曝露量はおよそ0.0044/μg/kg/dayである<sup>23)</sup>。

GHSによると、Acenaphtheneは肝臓において特定標的臓器毒性(反復暴露)区分2となっている。この特定標的臓器毒性の根拠となっているのは、ラットを用いた28日間強制経口投与毒性試験において、60~300 mg/kg/day(90日換算:18.7~93.3 mg/kg/day)投与群で影響がみられ、300 mg/kg/day投与群の所見として、雌雄で総コレステロールの増加、肝臓重量の増加、小葉中心性肝細胞肥大、雄で総ビリルビン、リン脂質の増加等がみられたことである。また、健康リスクの初期評価において、Sprague-Dawley ラットに1000 mg/kg/dayのAcenaphtheneを2週間投与し続けた結果、摂食量の低下、ヘモグロビン濃度及びヘマトクリット値の低下、総コレステロール及び総ビリルビンの増加、肝臓及び腎臓重量の増加などが報告されている<sup>24)</sup>一方、単回曝露では、ラットに0、1000、2000 mg/kgを強制経口投与しても死亡例はなく、一般状態や体重、組織への影響を見られないということが報告されている<sup>25)</sup>。

#### [実験1: Acenaphtheneの曝露歴の有無が与える健康影響の評価]

TDCIPPを用いた曝露歴試験の結果、新生児期の化学物質の曝露歴がある状態で、成人期にもう一度化学物質に曝露される非定常状態を想定した健康リスク評価手法は有用であることが示された。しかしその影響はTDCIPP特有のものである可能性があるため、他の物質でも同様の試験を行い、化学物質の種類に関わらず同様の影響が表れるのかを確認する必要がある。そこでもう一つの評価対象物質であるAcenaphtheneを用いて実験を行った。Acenaphtheneあるいは溶媒のCorn oilを生後1日齢から7日齢(新生仔期、曝露歴)にかけて毎日経口投与した後、101日齢から107日齢(成熟期、再曝露)にかけて再び経口投与し影響について検討した。Acenaphtheneの投与濃度は、14週齢のWistar-Imamichi系雄ラットを用いて、溶媒のOilあるいはAcenaphtheneを7日間経口投与した予備試験において、対照群に対して網状赤血球数が有意に低下し総コレステロール・血清鉄・TIBCが有意に増加したAcenaphthene 100 mg/kg/dayと設定した。実験群は、(1)新生仔期・成熟期ともにOil投与したO群、(2)新生仔期Acenaphthene・成熟期Oil投与したAO群、(3)新生仔期Oil・成熟期Acenaphthene投与したOA群(曝露歴なし)、(4)新生仔期・成熟期ともにAcenaphthene投与したAA群(曝露歴あり)とした。具体的な評価項目は、体重、飲水・摂食量、臓器重量測定(肝臓、腎臓、脾臓、副腎)、血液学検査(赤血球数、白血球数、網状赤血球数、ヘモグロビン、ヘマトクリット、MCV、MCH、MCHC、血小板、好中球、リンパ球、単球、好酸球、好塩基球)、血液生化学検査(TP、ALB、AST、ALT、ALP、Tbil、BUN、CRE、Glu、Tcho、TG、TBA、LDH、AMY、Lipa、Na、K、Cl、Ca、IP、CPK、血清鉄、UIBC、TIBC)、病理組織学的評価(肝臓、腎臓、脾臓、副腎)とした。

#### [実験2: Acenaphtheneの曝露量の変動が与える健康影響の評価]

TDCIPPを用いた減衰曝露試験の結果、非定常状態において想定される化学物質の減衰曝露による健康リスクは、従来法である程度評価できるものと考えられた。しかし他の物質では異なる結果となる可能性があることから、他の物質でも同様の試験を行い確認する必要がある。そこでもう一つの評価対象物質Acenaphtheneを用いて減衰曝露試験を行った。Wistar-Imamichi雄ラットを用い、Acenaphthene、あるいは溶媒のCorn oilを7週齢から19週齢にかけて10日毎に10回強制的に経口投与した。実験群は、(1) Oilのみを投与した0群、(2) Acenaphtheneを10回目に単回曝露したA群、(3) Acenaphtheneを反復曝露したRA群、(4) Acenaphtheneを減衰曝露したAA群の4群とした。事前に実施した予備実験において、A群と同じ条件で肝臓絶対重量、腎臓相対重量、赤血球数、ヘモグロビン等に対する毒性影響が検出された2000 mg/kgが、0群以外の投与群の総曝露量となるように設定した(表3.2)。AA群は、1回目を1334.2mg/kg、2回目はその1/4、3回目以降は前回曝露量の1/2となるよう減衰させた。RA群は1回あたりを200 mg/kgとした。実験期間中には飲水・摂食量および体重を経時的に測定した。最終投与翌日に解剖を行い、臓器と血液を採取した。本実験での測定項目は臓器重量(肝臓、腎臓、脾臓、副腎)、血液学的検査(赤血球数、白血球数、網状赤血球数、ヘモグロビン、ヘマトクリット、MCV、MCH、MCHC、血小板、好中球、リンパ球、単球、好酸球、好塩基球)、血液生化学検査(TP、ALB、AST、ALT、ALP、TBill、BUN、CRE、Glu、Tcho、TG、TBA、LDH、AMY、Lipa、NA、K、Cl、Ca、IP、CPK、血清鉄、UIBC、TIBC)、病理組織学的評価(肝臓、腎臓、脾臓、副腎)とした。

表3.2 Acenaphtheneの曝露量の変動が与える健康影響評価における曝露濃度(mg/kg)一覧

投与	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目	7回目	8回目	9回目	10回目
0群	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A群	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2000
RA群	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
AA群	1334.2	333.6	166.8	83.4	41.7	20.9	10.4	5.2	2.6	1.3

## 4. 結果及び考察

### 4-1 評価対象物質TDCIPPを用いた検討

[実験1：TDCIPPの曝露歴の有無が与える健康影響の評価]

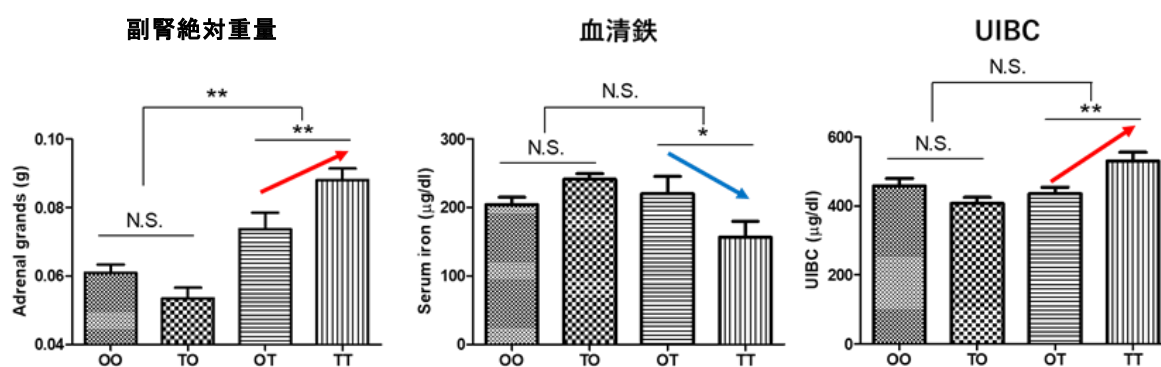


図3.4 新生仔期のTDCIPP曝露により成熟期曝露に変化のあった毒性学的測定項目

(\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ )

まず新生児期の化学物質の曝露歴がある状態で、成人期にもう一度化学物質に曝露される非定常状態を想定した健康リスク評価手法について検討するために、TDCIPPあるいは溶媒のOilを生後1日齢から7日齢(新生仔期)にかけて毎日経口投与した後、101日齢から107日齢(成熟期)にかけて再び経口投与し影響について検討した。その結果、新生仔期の曝露歴により、成熟期曝露後の副腎絶対・相対重量、血清鉄、UIBCが有意に変化した<sup>26)</sup>。一方、副腎の重量増加に伴う病理組織学的変化はみられなかった。結果を図3.4と表3.3、表3.4に示す。実験群はそれぞれ、新生仔期・成熟期ともにOilを投与した00群、

新生仔期Oil・成熟期TDCIPPを投与したOT群、新生仔期TDCIPP・成熟期Oilを投与したTO群と新生仔期・成熟期ともにTDCIPPを投与したTT群である。副腎重量、血清鉄、UIBC各々、00群とTO群の間では有意差が認められなかったため、これらのOT群とTT群の間の有意差は新生仔期曝露の影響ではなく、新生仔期曝露と成熟期曝露の相互作用により表れたと考えられる。その他の項目に関しては、曝露歴による影響は検出されなかった<sup>26)</sup>。本研究結果より、新生児期に災害・事故等によって化学物質に曝露され、成人期に再曝露されるケースの健康リスクは、従来法の単回曝露、もしくは反復曝露では評価できない可能性があることが示され、曝露歴の有無を考慮した健康影響評価法の有用性が示唆された。

表3.3 TDCIPPを用いた新生仔期曝露歴試験および若齢期曝露歴試験における体重・臓器重量・血中ホルモン濃度

項目	新生仔期曝露歴試験				若齢期曝露歴試験			
	1週齢曝露 (新生仔期 曝露歴)の 主効果	14週齢曝露 の主効果	交互作用	OT vs TT	6週齢曝露 (若齢期曝 露歴)の主 効果	19週齢曝露 の主効果	交互作用	OT vs TT
体重	—	—	—		—	↓↓	—	
肝臓 絶対重量	↑↑	↑↑	—		—	↑↑	—	
肝臓 相対重量	↑↑	↑↑	—		—	↑↑	—	
腎臓 絶対重量	—	↑↑	○		—	↑↑	—	
腎臓 相対重量	—	↑↑	—		—	↑↑	—	
脾臓 絶対重量	—	↓↓	○		—	↓↓	—	
脾臓 相対重量	—	↓↓	○		—	↓↓	—	
副腎 絶対重量	—	↑↑	◎	OT < TT	—	—	—	
副腎 相対重量	—	↑↑	◎	OT < TT	—	↑↑	—	
心臓 絶対重量	—	—	—		/	/	/	/
心臓 相対重量	—	—	—		/	/	/	/
精巣 絶対重量	—	—	—		—	—	—	
精巣 相対重量	—	—	—		—	—	—	
精巣上体 絶対重量	—	—	—		—	↑	—	
精巣上体 相対重量	—	—	—		—	↑	—	
陰茎 絶対重量	—	—	—		/	/	/	/
陰茎 相対重量	—	—	—		/	/	/	/
下垂体 絶対重量	—	—	—		/	/	/	/
下垂体 相対重量	—	—	—		/	/	/	/
血中テストステロン濃度	—	↓	○	OT ≧ TT	/	/	/	/

表は二元配置分散分析と交互作用が認められた場合の下位検定の結果を示している。

—：有意な影響なし、↑、↓：P<0.05、↑↑、↓↓：P<0.01、○：P<0.05、◎：P<0.01

一方、本研究では成熟期単独の曝露影響が多くの項目で認められた（表3.3、3.4）。臓器重量では肝臓と腎臓の絶対・相対重量の増加と脾臓絶対・相対重量の低下、血液学的検査では赤血球数・ヘモグロビン・ヘマトクリット・MCH・網状赤血球数の減少と血小板・単球の増加、血液生化学値ではALB・ALT・BUN・CREの増加とALP・Tbil・Glu・Na・K、内分泌学的検討では血中テストステロン濃度の減少が認められた。これらの影響はKobayashiらが論文としてまとめたTDCIPP成熟期曝露の予備試験結果<sup>21)</sup>とほぼ同様であることから、データの堅牢性が示された。一方、Zebrafishに対するTDCIPP曝露は活動量を低下させる<sup>18)</sup>ことから、本試験でも活動量の低下が予測されたが、影響は表れなかった。また、抗アンドロゲン作用を有する<sup>19)</sup>ことから、性行動、雄性生殖器官（本試験で重量を検討したのは精巣・精巣上体・陰茎）や血中テストステロン濃度、精子数への影響が予測されたため性行動試験と精巣上体を用いた精子数の測定も実施したが、性行動の一部と血中テストステロン濃度が成熟期曝露で低下した以外の有意な影響は認められず、また性行動、精子数および血中テストステロン濃度いずれも曝露歴による影響は表れなかった。

表3.4 TDCIPPを用いた新生仔期曝露歴試験および若齢期曝露歴試験における血液学・血液生化学検査

項目	新生仔期曝露歴試験				若齢期曝露歴試験			
	1週齢曝露 (新生仔期 曝露歴)の 主効果	14週齢曝露 の主効果	交互作用	OT vs TT	6週齢曝露 (若齢期曝 露歴)の主 効果	19週齢曝露 の主効果	交互作用	OT vs TT
白血球数	—	—	—		—	—	—	
赤血球数	—	↓	—		—	—	—	
ヘモグロビン	—	↓↓	—		—	—	—	
ヘマトクリット	—	↓↓	—		—	—	—	
MCV	—	—	—		—	↑	—	
MCH	—	↓↓	—		—	—	—	
MCHC	—	—	—		—	↓↓	—	
血小板	—	↑↑	—		—	↑↑	—	
好中球	—	—	—		—	—	—	
リンパ球	—	—	—		—	—	—	
単球	—	↑↑	—		—	↑↑	—	
好酸球	—	—	—		—	—	—	
好塩基球	—	—	—		—	—	—	
網状赤血球数	—	↓↓	—		—	↓↓	—	
TP	—	—	—		—	—	—	
ALB	—	↑	—		—	—	—	
AST	—	—	—		—	—	—	
ALT	—	↑	—		—	↑	—	
ALP	—	↓↓	—		—	↓↓	—	
Tbil	—	↓↓	—		—	↓	—	
BUN	—	↑	—		—	↑	—	
CRE	—	↑↑	—		—	—	—	
Glu	—	↓↓	—		—	↓	—	
Tcho	—	—	—		—	—	—	
TG	—	—	—		—	—	—	
TBA	—	—	—		—	↓↓	—	
LDH	—	—	—		—	↓	—	
AMY	—	—	—		↑↑	—	○	OT < TT
Lipa	—	—	—		—	—	—	
Na	—	↓↓	—		—	↓↓	—	
K	—	↓↓	—		—	↓↓	—	
Cl	—	—	—		—	↓	—	
Ca	—	—	—		—	—	—	
IP	—	—	—		—	—	—	
CPK	—	—	—		—	↓↓	—	
血清鉄	—	—	○	OT > TT	↓	↓↓	○	OT < TT
UIBC	—	—	◎	OT < TT	—	—	—	
TIBC	—	—	—		—	—	—	
BUN/CRE	—	—	—		—	—	—	

表は二元配置分散分析と交互作用が認められた場合の下位検定の結果を示している。

—：有意な影響なし、↑、↓：P<0.05、↑↑、↓↓：P<0.01、○：P<0.05、◎：P<0.01

新生仔期のTDCIPP曝露歴による影響が認められた血清鉄は血清の中でトランスフェリンと結合した鉄であり、UIBCは鉄と結合していないトランスフェリンのことを表す。血清鉄とUIBCは貧血症状を特定する為の指標とされ、貧血とはヘモグロビン量が正常以下に減少した状態のことである。TDCIPPの成熟期曝露はヘモグロビンおよび貧血で併発する赤血球数・網状赤血球数・ヘマトクリット値の有意な低下を示していることから、鉄欠乏性貧血が疑われた。血清鉄、UIBC、フェリチンは貧血症状が確認できた時に測定結果から鉄欠乏性貧血、慢性出血、慢性の血管内溶血、慢性感染症、慢性炎症、サラセミア、

鉄芽球性貧血を特定することが出来る。そこで鉄欠乏性貧血であるか否かを明らかにするためのさらなる検証として フェリチンの測定を行った。しかし、血清中のフェリチン量はTDCIPP曝露により変化しなかったことから、TT群は鉄欠乏性貧血ではないことが分かった。今回の実験からは、曝露歴の有無により血清鉄、UIBC が変化したメカニズムを特定することは出来なかったが、考えられる原因としてTDCIPPの抗アンドロゲン作用による鉄代謝への影響が挙げられる。ペプチドホルモンの一種であるヘプシジンは鉄の吸収を抑制する働きを持ち、体内の鉄代謝と関わりのあるホルモンであり、ヘプシジン合成が抑制されることで鉄の吸収は促進される<sup>27)</sup>。ヘプシジンの発現を抑制する因子は複数確認されているが<sup>28)</sup>、その中の1つにテストステロンが挙げられる。テストステロンもヘプシジンの発現を抑制する機能を持っているが<sup>29)</sup>、TDCIPPには抗アンドロゲン作用が確認され、かつ成熟期曝露により血中テストステロン濃度は低下していたため、ヘプシジンの発現が促進された可能性がある。このことから、TDCIPPの成熟期曝露によりヘプシジンの増加が起これ、新生仔期曝露歴によりさらに増強され、鉄の吸収が抑制されて血清鉄が減少し、UIBCが増加した可能性が考えられる。

新生仔期のTDCIPP曝露歴により重量の有意な増加が認められた副腎は、本実験の病理組織学的検討では変化を見いだせなかったが、TDCIPPはGHSで腎臓の腎臓曲尿細管上皮の過形成の発生率増加が指摘されていることから、腎尿細管細胞の再生を誘発している可能性がある。また副腎はストレス応答系の重要な器官である。ストレスとはホメオスタシスを乱すおそれがある状態のことであり<sup>30)</sup>、ストレス刺激とは視床下部(Corticotropin releasing hormone ; CRHの放出)-下垂体(Adrenocorticotrophic hormone ; ACTHの放出)-副腎皮質の活性化(糖質コルチコイドの放出)、もしくは交感神経・副腎髄質系の活性化(ノルアドレナリン・アドレナリンの放出)を引き起こす刺激である<sup>31,32)</sup>。ストレス刺激が生体にかかった場合の生体反応のうち、上記の視床下部-下垂体-副腎を介すストレス応答系をThe hypothalamic-pituitary-adrenal axis (HPA軸)という。HPA軸においては、まず脳でストレスが感知されると、その刺激が視床下部の神経細胞に伝達される。そしてその神経細胞からCRHが分泌される。CRHは視床下部の下にある脳下垂体前葉の細胞に作用し、その細胞からACTHが分泌される。そして分泌されたACTHは副腎皮質に作用し、副腎皮質から糖質コルチコイド(ヒトではコルチゾール、ラットではコルチコステロン)が分泌される。そして分泌された糖質コルチコイドが血糖値の増加によるエネルギー供給を行い、ストレスに対して身体的な抵抗力を高める。その後、糖質コルチコイドの分泌量が増大すると海馬のGR(糖質コルチコイド受容体)を介してCRHやACTHの合成・分泌を抑制し、結果として糖質コルチコイドの分泌量が抑制される。しかし、慢性的なストレス刺激に晒され続けると心拍数、血圧、体温及び血糖値の低下などが起これ、最終的に死に至る。新生仔期のTDCIPP曝露歴による副腎重量の増加はストレス応答系に影響を与えた可能性があることから、血中ACTH濃度、血中コルチコステロン濃度、海馬内のGR遺伝子発現量、視床下部内のCRH遺伝子発現量、副腎の皮質・髄質面積を測定することにより、ストレス応答系について内分泌学的検討を行った。その結果、血中コルチコステロン濃度は成熟期曝露により有意に増加したが、曝露歴の有意な影響は表れなかった。血中ACTH濃度は成熟期TDCIPP曝露によって減少し、さらに00>T0、0Tとなった。また、視床下部内のCRH遺伝子発現量はTDCIPP曝露による影響がなく、海馬内のGR遺伝子発現量に関しては00<T0、0Tという結果であった。コルチコステロンは負のフィードバックによってHPA軸を抑制することがわかっているため<sup>33)</sup>、今回の結果も副腎肥大に起因するコルチコステロン濃度増加とそれに伴う負のフィードバック増加によってACTH濃度の減少が生じたと考えられる。一方で、コルチコステロン濃度は00群とT0群で差がないにもかかわらず、ACTH濃度では00群>T0群となった要因に関しては、GR遺伝子発現量も同様の結果となっており、CRH遺伝子発現量に関しても交互作用が見られなかったが、多重比較検定で00群>T0群(P<0.05)であったため、T0群では新生仔期TDCIPP曝露が脳内及び下垂体に何らかの悪影響を及ぼし、その結果成熟期になっても遺伝子発現量の低下及びACTH分泌量の低下につながった可能性がある。以上のことから、TDCIPPの成熟期曝露は副腎肥大と血中コルチコステロン濃度の増加を引き起こすが、新生仔期の曝露歴による副腎肥大はストレス刺激のない平常時の血中コルチコステロン濃度の増加等を亢進するほどの影響ではないこと

が示された。しかし、ストレス刺激があった際のホルモン分泌については今後の課題である。

以上のことから、新生仔期の曝露により、成熟期曝露で検出される毒性影響が一部増悪することが明らかとなった。本研究結果より、新生児期に災害・事故等によって化学物質に曝露され、成人期に再曝露されるケースの健康リスクは、従来法の単回曝露、もしくは反復曝露では評価できない可能性があることが示唆され、曝露歴の有無を考慮した健康影響評価法の有用性が示唆された。

研究計画に則り、曝露歴の時期により化学物質への感受性が異なる可能性を検討するため、曝露歴である1回目の曝露を性成熟後の若齢期、2回目の曝露を成熟期とするTDCIPP若齢期曝露歴試験も実施した。その結果、成熟期にTDCIPPを曝露することにより体重、脾臓絶対・相対重量、MCHC、網状赤血球、TBA、Na、K、CPK等が有意に低下し、肝臓絶対・相対重量、腎臓絶対・相対重量、精巣上体絶対・相対重量、血小板、単球等は有意に増加した(表3.3、3.4)。副腎は相対重量のみ2回目の曝露による有意な増加があったが、体重が有意に減少していることから絶対重量の結果を優先するべきと考える。また、若齢期のTDCIPP曝露影響はほぼ認められず、曝露歴による毒性の増悪も現れなかった。新生仔期の曝露歴試験で曝露歴の影響が現れた副腎重量、UIBCにおいては1回目と2回目の投与による交互作用は認められず、血清鉄においては交互作用は認められたが00群に対して0T群は有意に低下する一方、TT群は逆に0T群に対し有意に増加して1回目の投与により2回目の投与の毒性が減弱する結果となった。従って、TDCIPPの曝露歴は、新生仔期においては2回目の再曝露による毒性を増悪するが、若齢期においては大きな影響を及ぼさないことが示された。

TDCIPPの2回目の成熟期曝露による影響の多くは新生仔期曝露歴試験における成熟期曝露の影響とほぼ同じであるが、影響が異なる項目については2回目の曝露の週齢の違いによる可能性がある。また、予備試験においてTDCIPPの成熟期単独曝露が精子運動能に影響を与えることを明らかにしていたことから<sup>34)</sup>、若齢期の曝露歴で独自に影響が表れる可能性を鑑み、各群最終曝露35日後まで生存させた個体を作成し、体重と臓器重量(肝臓、腎臓、脾臓、副腎、精巣、精巣上体)、精子運動解析システム(CASA)を用いた精巣上体の精子数・精子運動能測定も実施した。その結果、この2回目の曝露影響が認められた臓器重量変化のうち、曝露35日後も曝露の影響により有意な増加が表れたのは腎臓絶対・相対重量と精巣上体絶対・相対重量のみであった。従って、肝臓・脾臓重量への成熟期曝露の影響は35日後には回復することが示された。加えて、精子数・精子運動能においては、TDCIPP曝露の影響が認められなかった。抗アンドロゲン物質の成熟期曝露は精巣上体重量の減少、精子数の減少、精子運動性の低下を引き起こすことが報告されている<sup>35-38)</sup>。本試験でのTDCIPPの曝露は、一般的にみられる抗アンドロゲン様作用を示さなかったことが示唆された。

#### 〔実験2：TDCIPPの曝露量の変動が与える健康影響の評価〕

災害・事故等によって流出した化学物質濃度は時間経過に伴い減衰することから、本実験では、この減衰曝露を想定し、TDCIPPあるいは溶媒のsesame oilを、生後7週目から10日毎に、計10回経口投与した。実験群は、陰性対照である溶媒のみを投与する群(Oil: 0群)、陽性対照である高用量を単回投与する群(T群)、陽性対照である一定用量を反復投与する群(RT群)、新たな評価手法である用量を減衰させて投与する群(AT群)である。単回投与は肝臓絶対・相対重量、腎臓絶対・相対重量、ヘモグロビン、ヘマトクリット、AST、ALP、Tbill、TBA、AMY、IP、血清鉄、UIBCに有意な影響を及ぼした。反復曝露群は単球、Tbill、血清鉄に有意な影響を及ぼした。一方、TDCIPPを減衰曝露したAT群では、MCHCが減少した以外の影響は認められなかった。以上のことから、非定常状態において想定される化学物質の減衰曝露による健康リスクは、従来法である程度評価できるものと考えられた。

#### 4-2 評価対象物質Acenaphtheneを用いた検討

##### 〔実験1：Acenaphtheneの曝露歴の有無が与える健康影響の評価〕

TDCIPPを用いた曝露歴試験の結果、新生児期の化学物質の曝露歴がある状態で、成人期にもう一度化

学物質に曝露される非定常状態を想定した健康リスク評価手法は有用であることが示された。そこでその影響が化学物質特異的か否かを検討するため、もう一つの評価対象物質であるAcenaphtheneを用いて同様の実験を行った。実験群は、新生仔期・成熟期ともにOil投与した00群、新生仔期Acenaphthene・成熟期Oil投与したA0群、新生仔期Oil・成熟期Acenaphthene投与した0A群（曝露歴なし）、新生仔期・成熟期ともにAcenaphthene投与したAA群（曝露歴あり）である。臓器重量測定、血液学検査、及び血液生化学検査の結果を表3.5に示す。成熟期曝露によって、肝臓相対重量、BUN、Tcho、Cl、UIBC、TIBC等の増加、ヘモグロビン、網状赤血球数等の減少は見られたが、曝露歴による影響は検出されなかった。以上のことから、新生児期に災害・事故等によってAcenaphtheneに曝露され、成人期に再曝露されるケースの健康リスクは、従来法である程度評価できるものと考えられた。ただし、副腎絶対重量には交互作用があり、0A<AAはP=0.0501であったことから、曝露歴により副腎絶対重量は増加する傾向があった。副腎相対重量では成熟期曝露の主効果はあるものの交互作用が表れなかったことから、この副腎への曝露歴の影響は軽微なものと考えられるが、TDCIPP新生仔期曝露歴においても副腎重量は曝露歴の影響により増加したことから、副腎は曝露歴の影響を受けやすい臓器である可能性が示唆された。

表3.5 Acenaphtheneを用いた新生仔期曝露歴試験における体重・臓器重量・血液学・血液生化学検査

項目	1週齢曝露 (新生仔期 曝露歴)の 主効果	14週齢曝露 の主効果	交互作用	OA vs AA	項目	1週齢曝露 (新生仔期 曝露歴)の 主効果	14週齢曝露 の主効果	交互作用	OT vs TT
体重	—	—	—		TP	—	—	○	OA ≒ AA
肝臓 絶対重量	—	—	—		ALB	—	—	—	
肝臓 相対重量	—	↑↑	○	OA ≒ AA	AST	—	—	—	
腎臓 絶対重量	—	—	—		ALT	—	—	—	
腎臓 相対重量	—	—	—		ALP	↑	—	—	
脾臓 絶対重量	—	↓	○	OA ≒ AA	Tbil	—	—	—	
脾臓 相対重量	—	↓	○	OA ≒ AA	BUN	—	↑↑	—	
副腎 絶対重量	—	—	○	OA ≒ AA	CRE	—	—	—	
副腎 相対重量	—	↑	—		Glu	—	—	—	
白血球数	—	—	—		Tcho	—	↑↑	—	
赤血球数	↓↓	—	—		TG	—	—	—	
ヘモグロビン	↓	↓↓	—		TBA	—	—	—	
ヘマトクリット	↑↑	↑	—		LDH	—	—	—	
MCV	—	—	—		AMY	—	—	—	
MCH	—	—	—		Lipa	—	↑	—	
MCHC	↑	—	—		Na	—	—	—	
血小板	—	↑	—		K	—	—	—	
好中球	—	—	—		Cl	—	↑↑	—	
リンパ球	—	—	—		Ca	—	—	—	
単球	—	—	—		IP	—	—	—	
好酸球	—	—	—		血清鉄	—	—	—	
好塩基球	—	—	—		UIBC	—	↑↑	—	
網状赤血球数	—	↓↓	—		TIBC	—	↑↑	—	

表は二元配置分散分析と交互作用が認められた場合の下位検定の結果を示している。

—：有意な影響なし、↑、↓：P<0.05、↑↑、↓↓：P<0.01、○：P<0.05、◎：P<0.01

#### 〔実験2：Acenaphtheneの曝露量の変動が与える健康影響の評価〕

TDCIPPを用いた曝露量の変動が与える健康影響の評価を検討した結果、時間経過に伴い減衰する非定常状態を想定した健康リスク評価手法は従来法でカバーできる可能性が示された。他の化学物質でもこのような減衰曝露試験が従来法でカバーできるか否かを明らかとするため、もう一つの評価対象物質であるAcenaphtheneを用い同様の実験を行った。実験群は、Oilのみを投与した0群、Acenaphtheneを10回目に単回曝露したA群、Acenaphtheneを反復曝露したRA群、Acenaphtheneを減衰曝露したAA群であ



る。単回曝露の影響は肝臓の絶対・相対重量、脾臓の相対重量、好中球、リンパ球、単球、AST、ALT、BUN、CRE、AMY、Lipa、UIBCで表れた。反復曝露の影響は白血球、好酸球、UIBC、脾臓におけるリンパ球の萎縮で表れた。減衰曝露群は単回曝露との間では白血球、好中球、リンパ球、単球、AST、ALT、BUN、LDH、AMY、Lipa、血清鉄において、反復曝露群との間では副腎絶対・相対重量、TG、血清鉄において、曝露による影響の違いがみられたが、これらの項目は対照群に対しては有意差が表れなかった。また、病理組織学評価において脾臓におけるヘモジデリン沈着は対照群に対し減衰曝露群で増加したが、単回曝露群でも同様に増加した。つまり、対照群に対して減衰曝露群が有意に変化し、かつ従来法より毒性が増強される項目はなかった。以上のことから、Acenaphtheneの減衰曝露の影響は従来法でカバーできることが示された。

## 5. 研究目標の達成状況

おおそ計画通りに達成した。2つの評価対象物質(TDCIPPとAcenaphthene)を対象に、曝露歴の有無が与える健康影響評価、および曝露量の変動が与える健康影響評価を完遂した。また、TDCIPPにおいては「曝露歴の有無が与える健康影響の評価」で有意な影響を見出したことから、曝露歴を考慮した評価手法が有用であることが分かった。また、新生仔期の曝露歴は影響を及ぼすが、若齢期の曝露歴やAcenaphtheneでは影響がみられなかったことから、曝露歴には時期特異性と物質特異性がある可能性が示唆された。

## 6. 引用文献

- 1) World Health Organization. (2018) : Chemical releases caused by natural hazard events and disasters: Information for public health authorities.
- 2) Young, S., Balluz, L., et. al. (2004) : Science of the Total Environment, 322, 3-20.
- 3) Cruz, A. M. & Suarez-Paba, M. C. (2019) : Progress in Disaster Science, 1, 1-7.
- 4) 平成27年消防白書. (2020) : 消防庁危険物保安室「令和元年中の危険物に係る事故の概要」
- 5) Bell, M. R., Hart, B. G., et. al. (2016) : Molecular and Cellular Endocrinology, 420, 125-137.
- 6) Bell, M. R., Thompson, L. M., et. al. (2016) : Hormones and Behavior, 78, 168-177.
- 7) 西澤仁. (2019) : 臭素系難燃剤. 日本ゴム協会誌, 92(6), 211-217.
- 8) 環境省. (2017) : 平成29年度臭素系ダイオキシン類の排出源情報の収集・整理調査業務報告書, <https://www.env.go.jp/air/report/h29-03/> 参照 ; 2023.3
- 9) Ding, J., Shen, X., et. al. (2015) : Science of the Total Environment, 538, 959-965.
- 10) Cristale, J., Aragão Belé, T. G., et. al. (2018) : Environmental Pollution, 237, 695-703.
- 11) Li, J., Zhao, L., et. al. (2019) : Environment International, 127, 35-51.
- 12) Kim, J. W., Isobe, T., et. al. (2014) : Chemosphere, 116, 91-97.
- 13) Butt, C. M., Congleton, J., et. al. (2014) : Environmental Science and Technology, 48(17), 10432-10438.
- 14) Liu, L. Y., He, K., et. al. (2016) : Environmental Science and Technology, 50(6), 3065-3073.
- 15) Meeker, J.D., and Stapleton, H. M. (2010) : Environmental Health Perspectives, 118(3), 318-323.
- 16) Freudenthal, R. I., and Henrich, R. T. (2000) : International Journal of Toxicology,

- 19(2), 69-147.
- 17) Moser, V. C., Phillips, P. M., et. al. (2015) : *Neurotoxicology and Teratology*. 52, Part B, 236-247.
- 18) Li, R., Zhang, L., et. al. (2018) : *Aquatic Toxicology*, 199, 46-54.
- 19) Suzuki, G., Tue, N. M., et. al. (2013) : *Environmental Science & Technology*, 47, 2898-2908.
- 20) Kamishima, M., Hattori, T., et. al. (2018) : *Journal of Applied Toxicology*, 38, 649-655.
- 21) Kobayashi, S., Abe, K., et. al. (2021) : *Journal of Applied Toxicology*, 41, 987-992.
- 22) (社)日本芳香族工業会 編集. (2000) : 芳香族及びタール工業ハンドブック(第3版), 87-89.
- 23) 環境省. (2010) : 化学物質の環境リスク初期評価第8巻,  
<https://www.env.go.jp/chemi/report/h22-01/pdf/chpt1/1-2-2-01.pdf> 参照 ; 2023.3
- 24) 製品評価技術基盤機構. (2007) : 既存化学物質安全性点検データ
- 25) 厚生労働省. (2010) : 職場のあんぜんサイト アセナフテン,  
<https://anzeninfo.mhlw.go.jp/anzen/gmsds/83-32-9.html> 参照 ; 2023.3
- 26) Akimoto, T., Kobayashi, S., et. al. (2022) : *Journal of Applied Toxicology*, 42, 1503-1509.
- 27) Girelli, D., Nemeth, E., et. al. (2016) : *Blood*, 127, 2809-2813.
- 28) Meynard, D., Babitt, J. L., et. al. (2014) : *Blood*, 123(2), 168-176.
- 29) Guo, W., Bachman, E., et. al. (2013) : *Aging Cell*, 12(2), 280-291.
- 30) Chrousos, G.P. (1998) : Stressors, stress, and neuroendocrine integration of the adaptive response. The 1997 Hans Selye Memorial Lecture. *Ann N Y Acad Sci*.
- 31) Natelson, B.H., Creighton, D., et. al. (1987) : *Physiology and Behavior*. 39(1), 117-125.
- 32) McCarty, R., Gold, P. E. (1996) : *Psychosomatic Medicine*, 58(6), 590-597.
- 33) Dallman, M. F., Jones, M. T. (1973) : *Endocrinology*, 92(5), 1367-1375.
- 34) Kobayashi, S., Kawano, N., et. al. (2022) : *Journal of Veterinary Medical Science*, 84(1), 153-156.
- 35) O'connor, J. C., Frame, S. R., et. al. (2002) : *Toxicological sciences*, 69(1), 92-108.
- 36) Bayley, M., Junge, M., et. al. (2002) : *Aquatic toxicology*, 56(4), 227-239.
- 37) Hatef, A., Alavi, S. M. H., et. al. (2012) : *Aquatic toxicology*, 122, 181-187.
- 38) Latchoumycandane, C., Chitra, K. C., et. al. (2002) : *Reproductive Toxicology*. 16(2), 161-172.

## II-4 災害・事故等の非定常状況下における曝露量把握手法に関する研究

国立大学法人横浜国立大学

大学院環境情報研究院

三宅 祐一

静岡県公立大学法人静岡県立大学

食品栄養科学部

徳村 雅弘

### [要旨]

産業で広く利用されている有機溶剤から発生する揮発性有機化合物（VOCs）は、ヒトの健康への悪影響が報告されている。VOCsは容易に揮発し、特に災害・事故現場などにおいて、個人の行動状況によりVOCsへの曝露量は大きく影響され、迅速かつ簡易にVOCsの個人曝露量を把握することが重要である。また、VOCsより揮発性の低い準揮発性有機化合物（SVOC）の一種である多環芳香族炭化水素類（PAHs）等は、燃焼により非意図的に生成する物質群であり、発がん性や変異原性物質も含まれている。燃焼や爆発等に伴う災害・事故時におけるPAHsが大量に生成されることが考えられ、それらの影響が懸念されている。

本研究では、迅速かつ簡易にVOCsの個人曝露量を測定するために、パッシブサンプラーにおけるVOCsのサンプリングレートの推算方法を検討し、サンプリングレートの推算値データベースの構築を一つの目的とする。サンプリングレートを推算するための前提条件として、まずパッシブサンプラーの精度を評価することが重要である。ISO 16107の試験条件に従って、異なる温度、湿度、風速およびVOCs濃度の条件下で、パッシブサンプラーを用いて33種のVOCsのサンプリングレートを測定し、パッシブサンプラーの精度評価を行った。その結果、カーボンビーズパッシブサンプラーにおけるVOCsのサンプリングレートの変動係数がCBPの場合は1.6-13%であり、測定した濃度値の正確さは11-41%であったため、パッシブサンプラーの精度が良好であり、環境要因による捕集効率の影響が小さいことが示された。定量的にパッシブサンプラーの精度を評価するために、ISO 16107に従って分散分析を行った結果、精度の影響要因のうち、標本間の変動（7.0-94%）が最も高く、温度（0-69%）、湿度（0-51%）、風速（0-46%）と濃度（0-10%）による影響は比較的lowであった。サンプリングレートの推算方法はFickの第一法則に基づき、化学物質の構造からサンプリングレートを推算する方法を検討し、有効性評価を行った。チャンバー実験で実測した33種のVOCsのサンプリングレートの実測値と推算値を比較した結果、実測値と推算値に正の相関関係が見られたため、サンプリングレートの推算方法の有効性が示された。さらに、作業環境測定対象物質およびPRTR対象物質のうち、液体の有機化合物（有機溶剤関係）かつ常圧で沸点が50-260°Cの物質を対象に、確立した推算式を用いてサンプリングレートの推算値を算出し、それらのデータベースを構築した（アルデヒド類とイソシアネート類を除いて、計165物質）。

VOCの他、燃焼や爆発等に伴う災害・事故時における準揮発性有機化合物（SVOC）である多環芳香族炭化水素類（PAHs）が大量に生成されることが考えられ、それらの影響が懸念されている。本研究では、シリコーンリストバンドをパッシブサンプラーとしてPAHsを捕集する妥当性の評価を一つの目的とする。開発した分析方法を用い、分析対象物質の回収率を求めた結果、すべてのPAHsの回収率が60-116%であり、良好であった。次に、多くのPAHsに対して、アクティブ法を用いた空気中の実測濃度値とシリコーンリストバンドでの捕集量を比較したところ、正の相関関係が見られた。そのため、シリコーンリストバンドは、PAHsを捕集できることが示唆された。また、風速により捕集効率の影響を検討した結果、ほぼ無風状態、0.5、1、2、4 m s<sup>-1</sup>の条件下において、モデル物質の捕集量が最大1.4倍であり、本研究の背景と考えると、その変化が無視できるレベルであった。

### 1. 研究開発目的

産業で広く利用されている有機溶剤から発生する揮発性有機化合物（VOCs）は、ヒトの健康への悪影響が報告されている。VOCsは容易に揮発し、特に災害・事故現場などにおいて、個人の行動状況により

VOCsへの曝露量は大きく影響され、迅速かつ簡易にVOCsの個人曝露量を把握することが重要である。動力が必要ない小型携帯捕集法である拡散型パッシブサンプラーは、災害・事故等の非定常状況下においても容易に使用することが期待されている。しかし、パッシブサンプラーを用いたVOCsの個人曝露量測定には、物質ごとにサンプリングレートの算出が必要であり、実測値がある物質数は限られている。また、サンプリングレートは環境要因に影響を受けることが知られている。本研究では、活性炭を充填したパッシブサンプラーを用い、幅広い物性を持つVOCsに適用できるサンプリングレートの推算方法を検討し、サンプリングレートデータベースを構築する。

また、VOCsより揮発性の低い準揮発性有機化合物 (SVOC) の一種である多環芳香族炭化水素類 (PAHs) 等は、燃焼により非意図的に生成する物質群であり、発がん性や変異原性物質も含まれている。燃焼や爆発等と伴う災害・事故時におけるPAHsが大量に生成されることが考えられ、それらの影響が懸念されている。本研究では、シリコーンリストバンドを用いたSVOCsの個人曝露量評価法を検討する。

## 2. 研究目標

災害・事故時のVOCsの個人曝露量評価を行うために、パッシブサンプラーを用いた個人曝露量評価法の精度評価を行い、個人曝露量の算出に不可欠なサンプリングレートの実測値を拡充する。また、サンプリングレートの推算方法を提案し、得られたサンプリングレートの推算値と実測値をサブテーマ1で作成した情報基盤に実装する。さらに、SVOCsの個人曝露量評価法として、シリコーン素材を用いた個人曝露量評価法の実用性を評価する。

## 3. 研究開発内容

### 3. 1 VOCsの個人曝露量評価法の開発

本サブテーマでは、事故・災害時に流出などが特に懸念される物質として、作業環境測定の対象物質であるトルエン、スチレン、エチルベンゼン、*o*-キシレン、*m*-キシレン、*p*-キシレン、ノルマルヘキササン、エチレングリコールモノエチルエーテル、エチレングリコールモノノルマルブチルエーテル、1,4-ジオキサン、テトラヒドロフラン、メチルエチルケトン、メチルイソブチルケトン、シクロヘキサノン、メチルノルマルブチルケトン、酢酸メチル、酢酸イソブチル、酢酸イソプロピル、酢酸イソペンチル、酢酸ノルマルペンチル、エチレングリコールモノエチルエーテルアセテート、クロロホルム、1,2-ジクロロエタン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、クロロベンゼン、*o*-ジクロロベンゼン、イソブチルアルコール、イソプロピルアルコール、1-ブタノール、2-ブタノール、イソペンチルアルコール、シクロヘキサノールの計33種類の揮発性有機化合物 (VOC) を選定した。また、事故・災害時の化学物質の曝露量把握手法として、多孔質テフロンチューブに異なる活性炭を充填剤として使用している2種類のパッシブサンプラー (ヤシ殻由来のチャコール活性炭: PAS、石油由来の球状活性炭: CBP) を対象とし、上記33種類の対象物質についてサンプリングレート (SR) の測定を行った。サンプリングレートの測定には、我々の既往研究にて開発したパッシブサンプラー性能試験用のチャンバー (図3.4.1) を用い、A1~A4、B1~B4においてパッシブサンプラーとアクティブサンプラーをそれぞれ設置し、アクティブサンプラーによるVOC濃度の測定も同時に行った ( $n=8$ )。

このチャンバーは、パッシブサンプラーの性能試験の国際標準であるISO 16107:2007にて定められている試験条件 (温度、湿度、風速、VOC濃度) を達成することができる。ここで、VOCs濃度に関しては、作業環境測定物質の管理基準を基に設定した。本サブテーマで行った試験条件を表3.4.1に示す。

サンプリングレート (SR) ( $L \text{ min}^{-1}$ ) は次式により求めた。

$$SR = \frac{W_p}{C_a \times t} \quad (1)$$

ここで、 $W_p$ はパッシブサンプラーによるVOC捕集量 ( $\mu\text{g}$ )、 $C_a$ はアクティブサンプラーから算出したVOC濃度 ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )、 $t$ は捕集時間 (min) である。

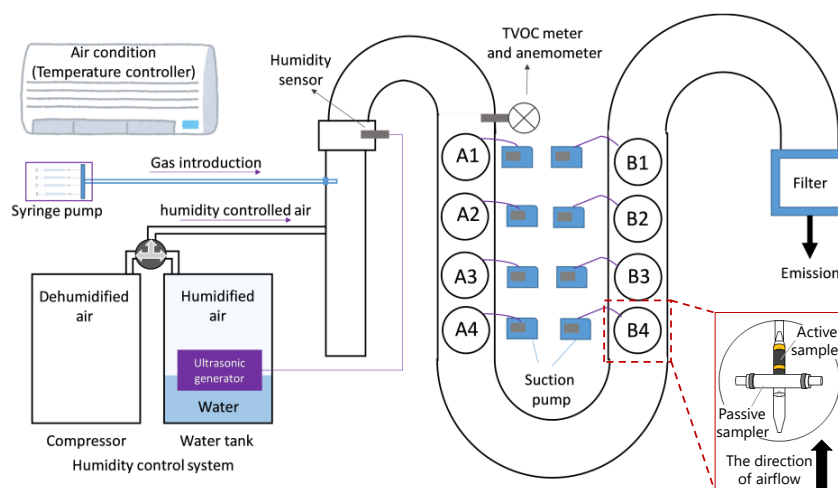


図3. 4. 1 パッシブサンプラー性能試験用のチャンバーの概略図

表3. 4. 1 パッシブサンプラー性能試験条件

	温度 (°C)	湿度 (%)	風速 (m/s)	VOCs濃度	サンプリング時間
run 1	25 ± 3	80 ± 5	0.1 ± 0.05	高	
run 2	25 ± 3	25 ± 5	0.1 ± 0.05	高	
run 3	25 ± 3	25 ± 5	0.1 ± 0.05	低	240分
run 4	25 ± 3	50 ± 5	0.5 ± 0.05	低	
run 5	35 ± 3	25 ± 5	0.1 ± 0.05	高	
run 6	25 ± 3	50 ± 5	0.35 ± 0.05	高	30分間VOCsの曝露 + 210分間空気の曝露
run 7	25 ± 3	50 ± 5	0.35 ± 0.05	高	30分間VOCsの曝露

### 3. 2 SVOCsの個人曝露量評価法の開発

現在報告されているSVOCsの個人曝露量評価法としては、手などの皮膚を溶剤などで拭き取る方法（ハンドワイプ法）が知られているが、近年、シリコーン素材を用いたパッシブサンプリング法が提案されている。O'Connell et al. (2014)は、シリコーンリストバンドを用いてSVOCの個人曝露量評価を行っており、25種類のPAHsを含む49の化学物質が、シリコーンリストバンドを用いて分析が可能であったと報告している<sup>1)</sup>。測定が可能であった化学物質の水-オクタノール分配係数 (Log KOW) の範囲は、-0.07（カフェイン）から9.49（りん酸トリス（2-エチルヘキシル））であった。一方、Okeme et al. (2018)は、シリコーンラバー（グローブ状）を用いてSVOCs（フタル酸エステル類やリン系化合物）の個人曝露量評価を行っており、サンプリングレートは $0.86 \pm 0.29 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1} \text{ dm}^{-2}$ であり、 $4 \text{ ng m}^{-3}$ 以上の濃度のSVOCであれば、24時間サンプリングすることで個人曝露量評価が可能であったと報告している<sup>2)</sup>。また、Hammel et al. (2016)は、シリコーンリストバンドをリン系難燃剤（PFRs）の個人曝露量評価に用いることの有用性を評価した結果、シリコーンリストバンドの捕集量が、尿中代謝物と統計学的に有意な相関があり（ $p < 0.001$ ）、その相関係数はハンドワイプ法と比較して高い値であったと報告している<sup>3)</sup>。Donald et al. (2016)は、シリコーンリストバンドを使用して63種類の農薬の個人曝露量評価を行っており、その有用性について報告している<sup>4)</sup>。以上のように、PAHs、臭素系・リン系難燃剤、農薬などの幅広い物性を持つSVOCsに対して、シリコーン素材を用いた個人曝露量の評価が行われており、本研究にお

いても同様の個人曝露量評価方法を検討することとした。

具体的な分析方法としては、まずシリコンリストバンドをサンプラーとして使用する際、サンプリングの前にシリコンリストバンドの処理方法を検討し、最適化した。また、シリコンリストバンドにより捕集されたPAHsの分析方法を開発、最適化した。風速はパッシブサンプラーの捕集効率に影響する大きな要因の一つであることが知られており、本研究では、一般大気中で濃度が一定である四塩化炭素 ( $CCl_4$ ) を指標物質として、シリコンリストバンドをパッシブサンプラーとしてPAHsを捕集する時に、風速の影響を検討した。検討した風速の範囲は $0.5 \sim 4 \text{ m s}^{-1}$ であった。分析方法のイメージを図3.4.2に示す。

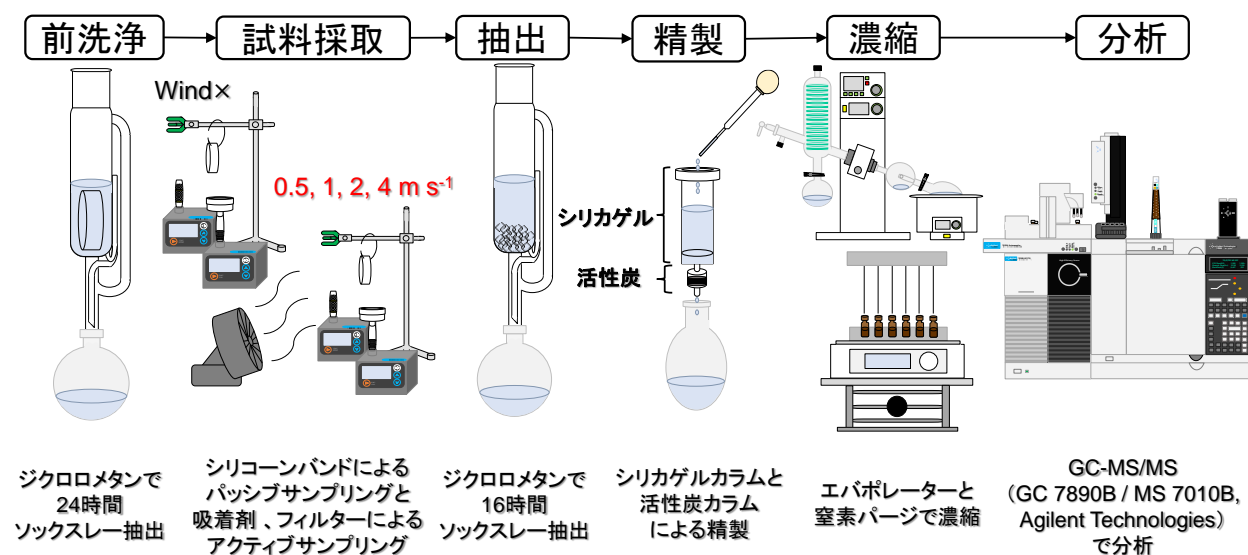


図3.4.2 シリコンリストバンドを用いたPAHs捕集時における風速影響の評価方法

## 4. 結果及び考察

### 4. 1 VOCsの個人曝露量評価法の開発

#### 4. 1. 1 チャンバー実験を用いたパッシブサンプラーの精度評価

ISO 16107の試験条件に従って、異なる温度、湿度、風速およびVOCs濃度の条件下 (run 1-7) で、2種類のパッシブサンプラー (ヤシ殻由来のチャコール活性炭: PAS、石油由来の球状活性炭: CBP) を用いて33種のVOCsのサンプリングレート測定した結果を図4. 4. 1に示す。33種のVOCsのサンプリングレートの相対標準偏差は、PASの場合は2.1-16%であり、CBPの場合は1.6-13%であった。このことから、本サンプラーで対象とした33種のVOCsにおいては、温度、湿度、風速およびVOC濃度の環境要因のサンプリングレートに対する影響は、無視できるレベルであることが示唆された。

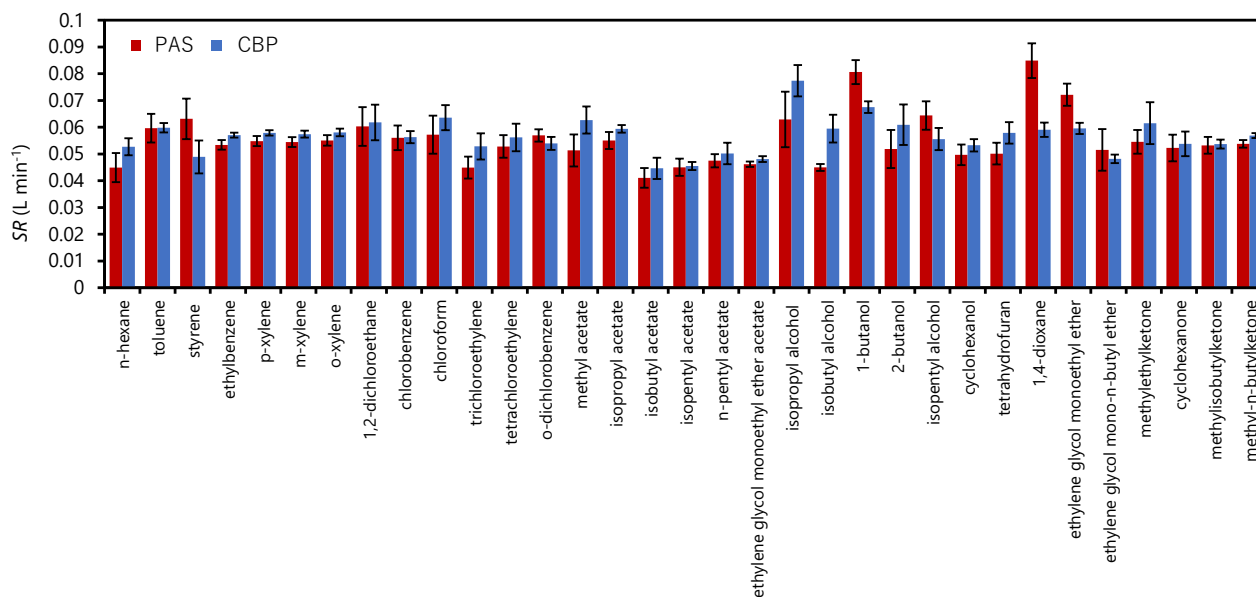


図4. 4. 1 PASおよびCBPを用いた33種のVOCsのサンプリングレート

また、ISO 16107に開示されているプログラムを用い、サンプリングレートの影響要因に対して定量的な評価を行った。このプログラムに、各実験における実測した温度、湿度、風速、ガス濃度、およびパッシブサンプラーにより算出した濃度値を入力し、分散分析を行った。その結果、各実験条件 (run 1-5) における33種類のVOCsの濃度の正確さは11-41%であり、様々な物質や環境条件を変化させてもパッシブサンプラーで測定したVOCs濃度値と真の濃度値 (アクティブサンプラーで求めた濃度値を仮に真値と設定) とは大きな差が見られず、良好な精度が示された。また、パッシブサンプラーの精度の影響要因のうち、標本間の変動 (7.0-94%) が最も高く、温度 (0-69%)、湿度 (0-51%)、風速 (0-46%) と濃度 (0-10%) による影響は比較的lowであった (図4. 4. 2)。つまり、今回用いたパッシブサンプラーに関しては、捕集量に対する環境要因の影響は非常に小さく、災害・事故を想定した実環境で十分使用可能であることが示された。

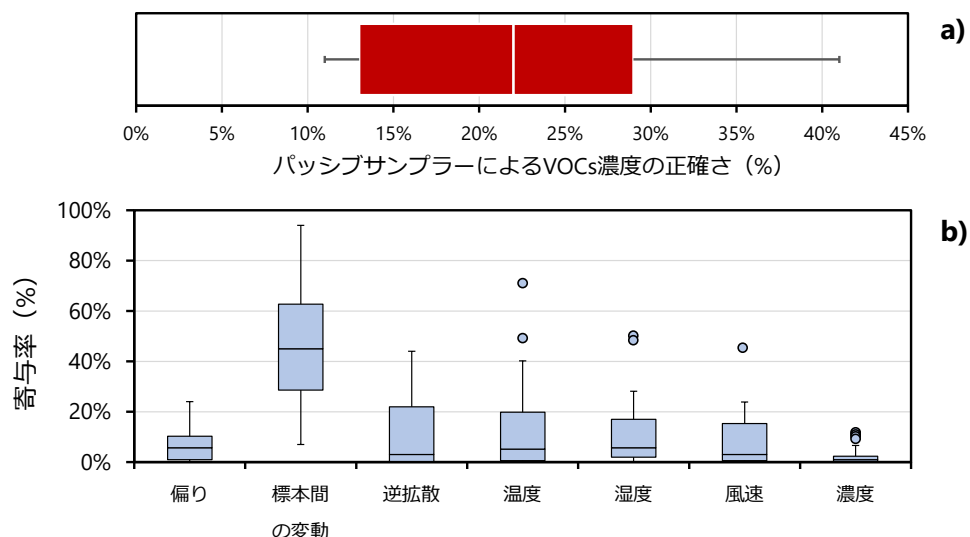


図4.4.2 33種類VOCのサンプリングレート実測値の正確さ (a) およびその影響要因の寄与率 (b)

#### 4. 1. 2 サンプリングレートの推算方法の検討およびその有効性評価

災害・事故時の緊急事態においては、様々な化学物質による影響を迅速に把握する必要があることから、サンプリングレートの実測値が存在しないVOCsであっても、その曝露量が迅速に推算できる手法が望まれる。そのため、本サブテーマでは、VOCsの分子拡散係数からのサンプリングレートの推算を試みた。

パッシブサンプラーは分子拡散によりVOCsを捕集していることから、充填剤の拡散抵抗がパッシブサンプラー内の分子拡散抵抗と比較して十分に小さく、無視できると仮定すれば、Fickの第一法則に基づく次式より、サンプリングレートを推算できると考えられる。

$$SR = \frac{60 \times 10^{-3} \times A \times D_{12}}{Z} \quad (2)$$

ここで $A$ はサンプラーの有効拡散面積 ( $\text{cm}^2$ )、 $D_{12}$ は空気中における化学物質の分子拡散係数 ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ )、 $Z$ は拡散距離 (cm) を示す。同一のパッシブサンプラーにおいては、サンプラー固有のパラメータである $A$ と $Z$ の値は定数となるため、これらのパラメータが既知であるパッシブサンプラーであれば、VOCの分子拡散係数からそのサンプリングレートの推算が可能となる。

図4.4.3に、分子拡散係数の実測値が存在する12種のVOCsに対する、サンプリングレートと分子拡散係数の関係を示す。PASにおいては、サンプリングレートと分子拡散係数の間に統計学的に有意な相関はみられなかったが、CBPでは有意な相関がみられた ( $p < 0.01$ )。このことから、CBPを用いた場合には、分子拡散係数の実測値を基にサンプリングレートを推算できることが示唆された。

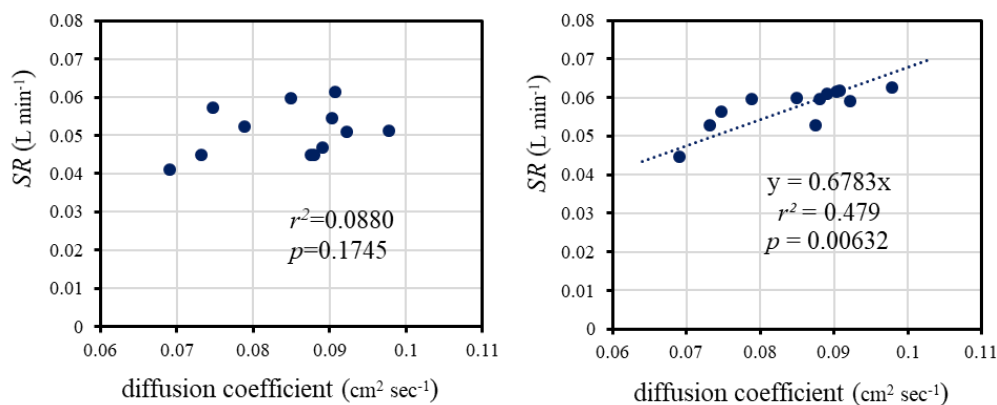


図4.4.3 VOCsのサンプリングレートと分子拡散係数の関係 (左図：PAS、右図：CBP)



次に、分子拡散係数が既知の化学物質は限られており、災害・事故時には分子拡散係数が未知の化学物質による影響が懸念されることが考えられることから、分子拡散係数の推算方法について検討を行った。分子拡散係数の推算には、藤田の式(式3)を用いた。本推算式は、化学物質の臨界温度と臨界圧力から、分子拡散係数を推算することが可能である。臨界温度と臨界圧力の実測値がない場合、Lydersenの推算式(式5と6)を用いることにより、化学物質の化学構造からそれぞれのパラメータを推算することができる。

$$D_{12} = \frac{0.00067T^{1.83}}{P(r_1+r_2)^3} \sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}} \quad (3)$$

$$r_1 = \left(\frac{T_c}{P_c}\right)_1^{\frac{1}{3}}, \quad r_2 = \left(\frac{T_c}{P_c}\right)_2^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$T_c = T_b[0.567 + \sum \Delta T - (\sum \Delta T)^2]^{-1} \quad (5)$$

$$P_c = M(0.34 + \sum \Delta P)^{-2} \quad (6)$$

ここで $T$ は曝露温度 (K)、 $P$ は全圧 (atm)、 $M$ は分子量 ( $\text{g mol}^{-1}$ )、 $T_c$ は臨界温度 (K)、 $P_c$ は臨界圧力 (atm)、 $T_b$ は沸点 (K)、 $\Delta T$ は臨界温度推算加算因子 (-)、 $\Delta P$ は臨界圧推算加算因子 (-)を示す。

本推算法の精度を検討するため、分子拡散係数の実測値が存在する12物質において、まず、臨界定数(臨界温度および臨界圧力)の実測値を用いて、式3より推算した分子拡散係数と実測値を比較した(図4.4.4左図)。推算した分子拡散係数と実測値の間に、統計学的に有意な相関がみられたことから、藤田の式により分子拡散係数が推算可能であることが示唆された。また、Lydersenの推算式と藤田の式を組み合わせて推算した分子拡散係数と実測値を比較したところ、両者に統計学的な有意な相関がみられた(図4.4.4右図)。以上のことから、Lydersenの推算式と藤田の式を組み合わせることで、化学物質の化学構造からサンプリグレート推算することが可能であることが示唆された。また、サンプリグレート推算方法の有効性を評価するために、検討してきた推算方法を用い、チャンバー実験の対象物質である33種類VOCsのサンプリグレートを推算し、チャンバー実験による実測値と比較した(図4.4.5)。33種類のVOCsにおいてサンプリグレートの実測値と推算値に正の相関関係が認められ( $r=0.79$ 、 $p<0.01$ )、サンプリグレート未知のVOCsにこの推算方法が適用できることが示された。つまり、化学構造からVOCsのサンプリグレートを推算することが可能であることが示された。

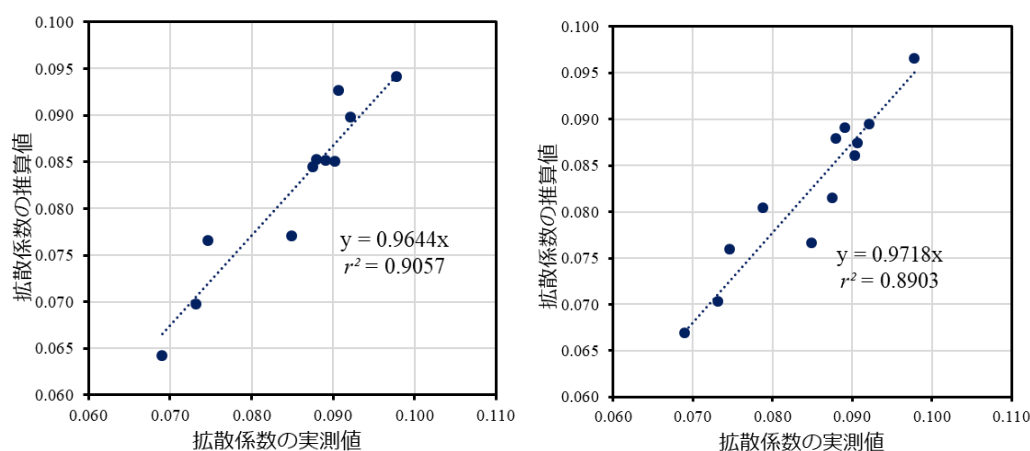


図4.4.4 臨界定数の実測値を用いた藤田の式(左図)およびLydersenの推算式と藤田の式を組み合わせて推算した(右図)分子拡散係数と実測値の比較

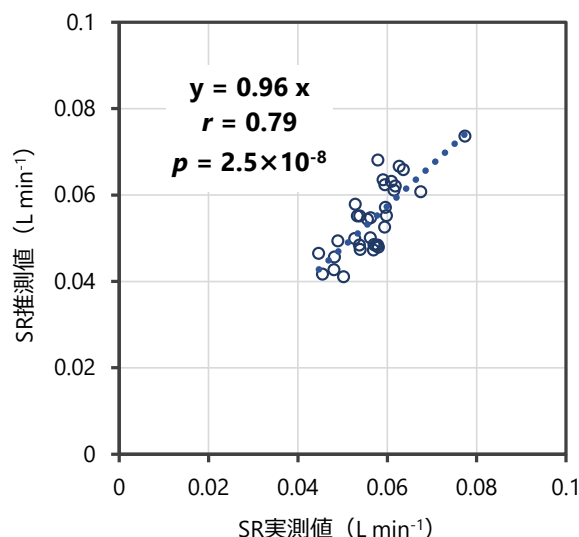


図4.4.5 チャンバー実験の対象物質のサンプリングレート実測値と推算値の比較

#### 4. 1. 3 サンプリングレート推算値のデータベース構築

本研究で検討した推算方法を用い、平時の簡易測定や事故災害時の迅速測定等の際に、パッシブサンプラーを用いた濃度測定を容易に行えるよう、VOCsのサンプリングレートデータベースを構築した。作業環境評価基準が定められている物質に加え、ヒトや生態系への有害性があり、環境中に広く存在し曝露可能性があると思われる物質として指定されているPRTR対象化学物質を対象に物質の選定を行った。作業環境測定対象物質およびPRTR対象物質のうち、液体の有機化合物（有機溶剤関係）かつ常圧で沸点が50-260℃の物質を対象に、確立した推算式を用いてサンプリングレートの推算値を算出した。活性炭捕集が適用できないアルデヒド類とイソシアネート類を除いて、合計165物質についてサンプリングレートデータベースを構築することができた。なお、このデータベースを適用する場合、今回検討したパッシブサンプラー（CBP）を用いることと、パッシブサンプラーからの測定対象物質の回収率を事前に求めることが必要である。

表4.4.1 パッシブサンプラー（CBP）におけるVOCsのサンプリングレート推算値のデータベース

No.	CAS	物質名	分子式	分子量	沸点 (°C)	拡散係数推算値 (cm <sup>2</sup> sec <sup>-1</sup> )	サンプリングレート推算値 (L min <sup>-1</sup> )
1	111-87-5	1-Octanol	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> O	130.23	195.1	0.0548	0.0389
2	112-30-1	n-Decyl alcohol	C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> OH	158.29	231.1	0.0464	0.0330
3	25339-17-7	Isodecyl alcohol	C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> OH	158.29	227.56	0.0469	0.0333
4	3452-97-9	3,5,5-Trimethyl-1-hexanol	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	144.26	194	0.0520	0.0369
5	143-08-8	1-Nonanol	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> O	144.26	213.3	0.0503	0.0357
6	107-19-7	2-Propyn-1-ol	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O	56.06	113.6	0.1102	0.0782
7	107-18-6	Allyl alcohol	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58.08	97	0.1048	0.0744
8	110-80-5	Ethylene glycol monoethyl ether	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	90.12	135	0.0805	0.0571
9	109-86-4	Ethylene glycol monomethyl ether	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	76.1	124.1	0.0914	0.0649
10	556-52-5	2,3-Epoxy-1-propanol	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	74.08	124.16	0.1003	0.0712
11	25103-58-6	tert-Dodecanethiol	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> S	202.4	203.06	0.0407	0.0289
12	78-83-1	Isobutyl alcohol	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74.12	108	0.0880	0.0625
13	67-63-0	Isopropyl alcohol	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	60.1	82.5	0.1013	0.0719
14	123-51-3	Isopentyl alcohol	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	88.2	130.5	0.0753	0.0534

15	108-93-0	Cyclohexanol	C6H12O2	100.2	161	0.0696	0.0494
16	71-36-3	1-Butanol	C4H10O	74.12	117.7	0.0861	0.0611
17	78-92-2	2-Butanol	C4H10O	74.1	100	0.0891	0.0633
18	67-56-1	Methanol	CHO4	32.04	65	0.1520	0.1079
19	590-67-0	1-Methyl cyclohexanol	C7H14O	114.19	168	0.0711	0.0505
20	7443-70-1	cis-2-Methyl cyclohexanol	C7H14O	114.19	165	0.0698	0.0496
21	7443-52-9	trans-2-Methyl cyclohexanol	C7H14O	114.19	167	0.0696	0.0494
22	591-23-1	(cis+trans)-3-Methyl cyclohexanol	C7H14O	114.19	163	0.0700	0.0497
23	7731-28-4	cis-4-Methyl cyclohexanol	C7H14O	114.19	172	0.0691	0.0491
24	7731-29-5	trans-4-Methyl cyclohexanol	C7H14O	114.19	173	0.0691	0.0490
25	106-92-3	1-Allyloxy-2,3-epoxypropane	C6H10O2	114.15	154	0.0645	0.0458
26	106-88-7	1,2-Epoxybutane	C4H8O	72.11	63.3	0.0889	0.0631
27	123-91-1	1,4-Dioxane	C4H8O2	88.11	101.5	0.0894	0.0635
28	646-06-0	1,3-Dioxolane	C3H6O2	74.08	78	0.1014	0.0720
29	2426-08-6	n-Butyl 2,3-epoxypropyl ether	C7H14O2	130.19	165	0.0576	0.0409
30	106-89-8	Epichlorohydrin	C3H5ClO	92.5	117	0.0839	0.0595
31	624-92-0	Dimethyl disulfide	C2H6S2	94.19	109.8	0.0889	0.0631
32	60-29-7	Diethylether	C4H10O	74.12	35	0.0918	0.0652
33	111-76-2	Ethylene glycol mono-n-butyl ether	C6H14O2	118.17	168.4	0.0642	0.0456
34	109-99-9	Tetrahydrofuran	C4H8O	72.1	65.4	0.0966	0.0686
35	149-57-5	2-Ethylhexanoic Acid	C8H16O2	144.22	228	0.0519	0.0369
36	105-39-5	Ethyl chloroacetate	C4H7ClO2	122.55	144.3	0.0700	0.0497
37	598-78-7	2-Chloropropionic acid	C3H5ClO2	108.53	185	0.0780	0.0554
38	111-15-9	Ethylene glycol monoethyl ether acetate	C6H12O3	132.16	156.4	0.0601	0.0426
39	108-05-4	Vinyl acetate	C4H6O2	86.09	72.5	0.0852	0.0605
40	110-49-6	2-Methoxyethyl Acetate	C5H10O3	118.13	143	0.0659	0.0468
41	15798-64-8	cis-2-Butenal	C4H6O2	70.09	104	0.0832	0.0591
42	123-73-9	trans-2-Butenal	C4H6O2	70.09	104	0.0832	0.0591
43	3268-49-3	3-Methylthiopropanal	C4H8OS	104.17	165.5	0.0706	0.0501
44	674-82-8	4-Methylideneoxetan-2-one	C4H4O2	84.08	126.1	0.0950	0.0674
45	108-10-1	Methylisobutylketone	C6H12O	100.16	117	0.0676	0.0480
46	67-64-1	Acetone	C3H6O	58.08	56	0.1049	0.0745
47	110-19-0	Isobutyl acetate	C6H12O2	116.2	116.5	0.0690	0.0490
48	108-21-4	Isopropyl acetate	C5H10O2	102.13	88.6	0.0770	0.0547
49	123-92-2	Isopentyl acetate	C7H14O2	130.2	142.5	0.0590	0.0419
50	141-78-6	Ethyl acetate	C4H8O2	88.11	77	0.0861	0.0611
51	123-86-4	n-Butyl acetate	C6H12O2	116.16	126.1	0.0672	0.0477
52	109-60-4	n-Propyl acetate	C5H10O2	102.13	101.3	0.0768	0.0545
53	628-63-7	n-Pentyl acetate	C7H14O2	130.18	149.2	0.0610	0.0433
54	79-20-9	Methyl acetate	C3H6O2	74.079	56.8	0.0978	0.0694
55	108-94-1	Cyclohexanone	C6H10O	98.2	155.6	0.0706	0.0501
56	78-93-3	Methylethylketone	C4H8O	72.1	80	0.0903	0.0641
57	583-60-8	2-Methylcyclohexanone	C7H12O	112.17	167	0.0689	0.0489
58	591-24-2	3-Methylcyclohexanone	C7H12O	112.17	169	0.0687	0.0488
59	589-92-4	4-Methylcyclohexanone	C7H12O	112.17	169	0.0687	0.0488
60	591-78-6	Methyl-n-butylketone	C6H12O	100.16	127.6	0.0671	0.0476
61	140-88-5	Ethyl acrylate	C5H8O2	100.12	99.4	0.0876	0.0622
62	2439-35-2	2-(Dimethylamino)ethyl acrylate	C7H13NO2	143.19	167.87	0.0559	0.0397
63	818-61-1	2-Hydroxyethyl acrylate	C5H8O3	116.12	191	0.0703	0.0499
64	96-33-3	Methyl acrylate	C4H6O2	86.04	80.2	0.0841	0.0597
65	79-41-4	Methacrylic acid	C4H6O2	86.09	163	0.0798	0.0566
66	688-84-6	2-Ethylhexyl methacrylate	C12H22O2	198.31	230.58	0.0403	0.0286

67	106-91-2	Methacrylic acid, 2,3-epoxypropyl ester	C7H10O3	142.15	189	0.0577	0.0409
68	2867-47-2	2-(Dimethylamino)ethyl methacrylate	C8H15NO2	157.21	186	0.0508	0.0361
69	97-88-1	Butyl Methacrylate	C8H14O2	142.198	160	0.0541	0.0384
70	80-62-6	Methyl methacrylate	C5H8O2	100.12	100.5	0.0732	0.0520
71	71-43-2	Benzene	C6H6	78.11	80	0.0908	0.0645
72	108-88-3	Toluene	C7H8	92.14	110.6	0.0778	0.0552
73	100-41-4	Ethylbenzene	C8H10	106.17	136.1	0.0684	0.0485
74	95-47-6	o-xylene	C8H10	106.17	138.5	0.0681	0.0484
75	108-38-3	m-xylene	C8H10	106.17	139.1	0.0681	0.0483
76	106-42-3	p-xylene	C8H10	106.17	138.3	0.0681	0.0484
77	98-82-8	Cumene	C9H12	120.2	152.4	0.0621	0.0441
78	95-63-6	1,2,4-Trimethylbenzene	C9H12	120.2	169.3	0.0602	0.0428
79	108-67-8	1,3,5-Trimethylbenzene	C9H12	120.2	164.7	0.0606	0.0431
80	90-12-0	1-Methylnaphthalene	C22H20	142.2	240	0.0543	0.0386
81	91-57-6	2-Methylnaphthalene	C22H20	142.2	241.1	0.0543	0.0385
82	101-84-8	Diphenyl ether	C12H10O	170.21	258	0.0823	0.0585
83	96-09-3	Styrene oxide	C8H8O	120.15	194.1	0.0651	0.0462
84	100-42-5	Styrene	C8H8	104.15	145	0.0695	0.0494
85	98-83-9	alpha-Methyl styrene	C9H10	118.18	165.4	0.0614	0.0436
86	80-15-9	1-methyl-1-phenylethyl hydroperoxide	C9H12O2	152.19	232.24	0.0584	0.0414
87	91-14-5	o-Divinylbenzene	C20H20	130.19	187.71	0.0576	0.0409
88	108-57-6	m-Divinylbenzene	C20H20	130.19	187.71	0.0576	0.0409
89	105-67-9	2,4-Xylenol	C8H10O	122.17	210.9	0.0687	0.0488
90	95-48-7	o-Cresol	C7H8O	108.14	191	0.0780	0.0554
91	108-39-4	m-Cresol	C7H8O	108.14	202.2	0.0769	0.0546
92	106-44-5	p-Cresol	C7H8O	108.14	201.9	0.0769	0.0546
93	89-72-5	o-sec-Butylphenol	C10H14O	150.22	228	0.0574	0.0408
94	122-60-1	2,3-Epoxypropyl phenyl ether	C9H10O2	150.18	245	0.0550	0.0390
95	108-98-5	Thiophenol	C6H6S	110.17	169.1	0.0750	0.0532
96	67-66-3	Chloroform	CHCl3	119.38	61.1	0.0928	0.0659
97	56-23-5	Tetrachloromethane	CCl4	153.82	76.8	0.0820	0.0582
98	107-06-2	1,2-Dichloroethane	C2H4Cl2	98.96	83.5	0.0874	0.0621
99	78-87-5	1,2-Dichloropropane	C3H6Cl2	112.99	95.5	0.0783	0.0556
100	75-09-2	Dichloromethane	CH2Cl2	84.93	40	0.1058	0.0751
101	124-48-1	Dibromochloromethane	CHBr2Cl	208.28	120	0.0861	0.0611
102	71-55-6	1,1,1-Trichloroethane	C2H3Cl3	133.41	74	0.0817	0.0580
103	79-00-5	1,1,2-Trichloroethane	C2H3Cl3	133.41	113.8	0.0773	0.0549
104	96-18-4	1,2,3-Trichloropropane	C3H5Cl3	147.43	157	0.0666	0.0473
105	75-27-4	Bromodichloromethane	CHBrCl2	163.83	90	0.0902	0.0640
106	106-94-5	1-Bromopropane	C3H7Br	122.99	71.1	0.0923	0.0655
107	75-26-3	2-Bromopropane	C3H7Br	122.99	59.5	0.0948	0.0673
108	563-47-3	3-Chloro-2-methyl-1-propene	C4H7Cl	90.55	71.5	0.0815	0.0579
109	156-59-2	cis-1,2-Dichloroethylene	C2H2Cl2	96.94	55	0.0952	0.0676
110	156-60-5	trans-1,2-Dichloroethylene	C2H2Cl2	96.944	48.7	0.0989	0.0702
111	10061-01-5	cis-1,3-Dichloropropene	C3H4Cl2	110.97	112	0.0782	0.0555
112	10061-02-6	trans-1,3-Dichloropropene	C3H4Cl2	110.97	112	0.0782	0.0555
113	79-01-6	Trichloroethylene	C2HCl3	131.39	87.2	0.0815	0.0578
114	127-18-4	Tetrachloroethylene	C2Cl4	165.83	121.3	0.0705	0.0501
115	79-34-5	1,1,2,2-Tetrachloroethane	C2H2Cl4	167.85	146.5	0.0722	0.0513
116	95-49-8	o-Chlorotoluene	C7H7Cl	126.59	159	0.0677	0.0481
117	106-43-4	p-Chlorotoluene	C7H7Cl	126.59	162.4	0.0674	0.0478
118	108-90-7	Chlorobenzene	C6H5Cl	112.56	131.7	0.0771	0.0547

119	95-73-8	2,4-Dichlorotoluene	C7H6Cl2	161.03	201	0.0600	0.0426
120	95-50-1	o-Dichlorobenzene	C6H4Cl2	147	180	0.0667	0.0474
121	106-46-7	p-Dichlorobenzene	C6H4Cl2	147	174	0.0673	0.0478
122	100-44-7	Benzyl chloride	C7H7Cl	126.59	179	0.0658	0.0467
123	98-07-7	Benzotrichloride	C7H5Cl3	195.48	221	0.0549	0.0390
124	95-57-8	o-Chlorophenol	C6H5ClO	128.56	174.9	0.0806	0.0572
125	107-13-1	Acrylonitrile	C3H3N	53.06	77.3	0.0941	0.0668
126	75-05-8	Acetonitrile	C2H3N	41.05	59.6	0.1061	0.0753
127	75-86-5	Acetone cyanohydrin	C4H7NO	85.11	171	0.0777	0.0552
128	107-11-9	Allylamine	C3H7N	57.1	53.3	0.1040	0.0738
129	151-56-4	Aziridine	C2H5N	43.07	56	0.1245	0.0884
130	107-15-3	Ethylenediamine	C2H8N2	60.1	117	0.1053	0.0748
131	141-43-5	2-Aminoethanol	C2H7NO	61.08	171	0.1060	0.0752
132	302-01-2	Hydrazine	H4N2	32.05	113.5	0.1637	0.1162
133	57-14-7	1,1-Dimethylhydrazine	C2H8N2	60.1	63.9	0.1040	0.0738
134	121-44-8	Triethylamine	C6H15N	101.19	89.3	0.0659	0.0468
135	100-37-8	2-(Diethylamino)ethanol	C6H15NO	117.19	163	0.0638	0.0453
136	68-12-2	N,N-Dimethylformamide	C3H7NO	73.1	153	0.0788	0.0560
137	127-19-5	N,N-Dimethylacetamide	C4H9NO	87.12	165	0.0717	0.0509
138	88-12-0	N-Vinyl-2-pyrrolidone	C6H9NO	111.14	219.88	0.0676	0.0480
139	108-91-8	Cyclohexylamine	C6H13N	99.18	134	0.0756	0.0537
140	101-83-7	Dicyclohexylamine	C12H23N	181.32	255.8	0.0459	0.0326
141	110-91-8	Morpholine	C4H9NO	87.12	128	0.0884	0.0628
142	112-18-5	N,N-Dimethyldodecylamine	C14H31N	213.41	260	0.0347	0.0246
143	102-82-9	Tri-n-butylamine	C12H27N	185.36	216.5	0.0397	0.0282
144	75-52-5	Nitromethane	CH3NO2	61.04	101.1	0.1061	0.0753
145	88-72-2	2-Nitrotoluene	C7H7NO2	137.14	222	0.0607	0.0431
146	98-95-3	Nitrobenzene	C6H5NO2	123.11	210.8	0.0681	0.0483
147	76-06-2	Trichloronitromethane	CCl3NO2	164.398	112	0.0774	0.0550
148	55-63-0	Nitroglycerin	C3H5N3O9	227.09	250	0.0541	0.0384
149	90-04-0	o-Anisidine	C7H9NO	123.16	224	0.0656	0.0466
150	62-53-3	Aniline	C6H7N	93.13	184.1	0.0793	0.0563
151	95-51-2	o-Chloroaniline	C6H6ClN	127.57	208.8	0.0704	0.0500
152	106-47-8	p-Chloroaniline	C6H6ClN	127.57	232	0.0683	0.0485
153	108-42-9	m-Chloroaniline	C6H6ClN	127.57	230.5	0.0685	0.0486
154	95-68-1	2,4-Dimethylaniline	C8H11N	121.18	214	0.0627	0.0445
155	87-62-7	2,6-Dimethylaniline	C8H11N	121.18	215	0.0626	0.0445
156	121-69-7	N,N-Dimethylaniline	C8H11N	121.18	193.45	0.0605	0.0430
157	95-53-4	o-Toluidine	C7H9N	107.16	200.3	0.0699	0.0496
158	106-49-0	p-Toluidine	C7H9N	107.16	200.4	0.0699	0.0496
159	110-86-1	Pyridine	C5H5N	79.1	115.2	0.0880	0.0625
160	108-99-6	3-Methylpyridine	C6H7N	93.13	144.1	0.0744	0.0528
161	100-69-6	Vinylpyridine	C7H7N	105.14	159.5	0.0684	0.0486
162	91-22-5	Quinoline	C9H7N	129.16	237.1	0.0581	0.0412
163	100-40-3	4-Vinyl-1-cyclohexene	C8H12	108.18	128	0.0666	0.0473
164	110-54-3	n-Hexane	C6H14	86.18	68.7	0.0703	0.0499
165	75-15-0	Carbon disulfide	CS2	76.13	46	0.1160	0.0823

#### 4. 2 シリコンリストバンドを用いたSVOCsの個人曝露量評価法の開発

##### 4. 2. 1 シリコンリストバンドを用いたSVOCsの分析方法の開発

既往研究では、前洗浄及び抽出にアセトン、メタノール、酢酸エチル、ヘキサンなど様々な溶媒を用い、ソックスレー抽出や超音波抽出を組み合わせ、抽出のみで2日間以上必要である。本研究ではジクロロメタンで16時間ソックスレー抽出を行い、事故・災害時などの緊急を要する場合を想定して、時間と操作の短縮を行った。しかし、ジクロロメタンでシリコンリストバンドを抽出する場合、精製をせずに濃縮すると、濃縮液が白濁し、粘性が増加するため、GC-MS/MSによりPAHsの分析が不可能であった。また、この濃縮液を再稀釈して、GC-MSでスキャン分析を行った結果から、夾雑物シリコン由来の物質であるポリシロキサンであることが分かった。そのため、一般的な精製方法（シリカゲルカラム）であれば、夾雑物の除去が困難であることが考えられ、PAH類に対し吸着力の高い活性炭カラムを連結させ、精製を行った。添加回収率実験により本法を検証した結果、対象物質の回収率が60-116%であった（図4.4.6）。

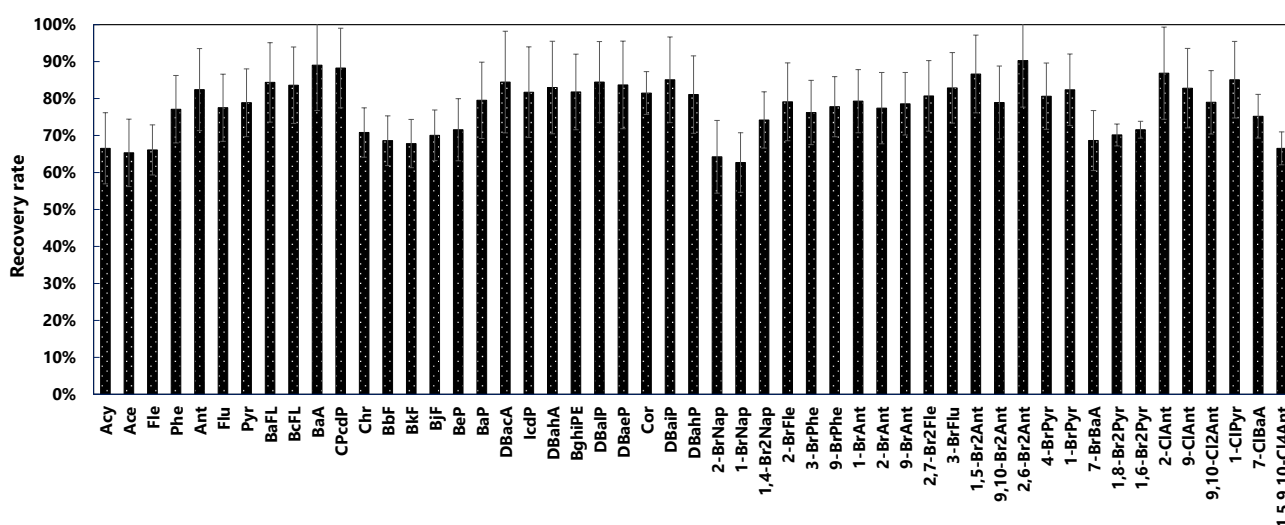


図4.4.6 シリコンリストバンドに添加したPAHsの回収率

##### 4. 2. 2 存在状態の違いによるシリコンリストバンドへの捕集量に関する検討

PAHsは物質により、空気中における存在状態（ガスと粒子）が異なることが知られており、本研究では、物質の存在状態を考慮しながらシリコンリストバンドについてパッシブサンプラーとしての妥当性を評価した。空気中における代表的なガス相、粒子相に分配するPAHsは、Anthracene (Ant、ガス状物質)、benzo[a]pyrene (BaP、粒子状物質)があげられる。そこで、これらのPAHsをモデル物質として、シリコンリストバンドによる捕集された物質の量と、アクティブ法により実測した空気中の濃度の相関関係を求め、本法の有効性の検証を行った。図4.4.7に示したように、Ant、BaPに対して、シリコンリストバンドへの捕集量とこれらの空気中濃度は正の相関関係を示し（いずれも $r > 0.9$ 、 $p < 0.01$ ）、シリコンリストバンドは、ガス態及び粒子態の双方を捕集可能であることが示唆された。また、測定対象としたPAHs・XPAHsについて、大気中濃度とシリコンリストバンドでの捕集量の相関係数を図4.4.8に示す。環境中に低濃度で存在する一部の物質については有意な相関関係は認められなかったが、51種のガス態・粒子態PAHs・XPAHsにおいても同様に正の相関関係が認められ、シリコンリストバンドでの捕集量から大気中濃度を推算できることが明らかになった。

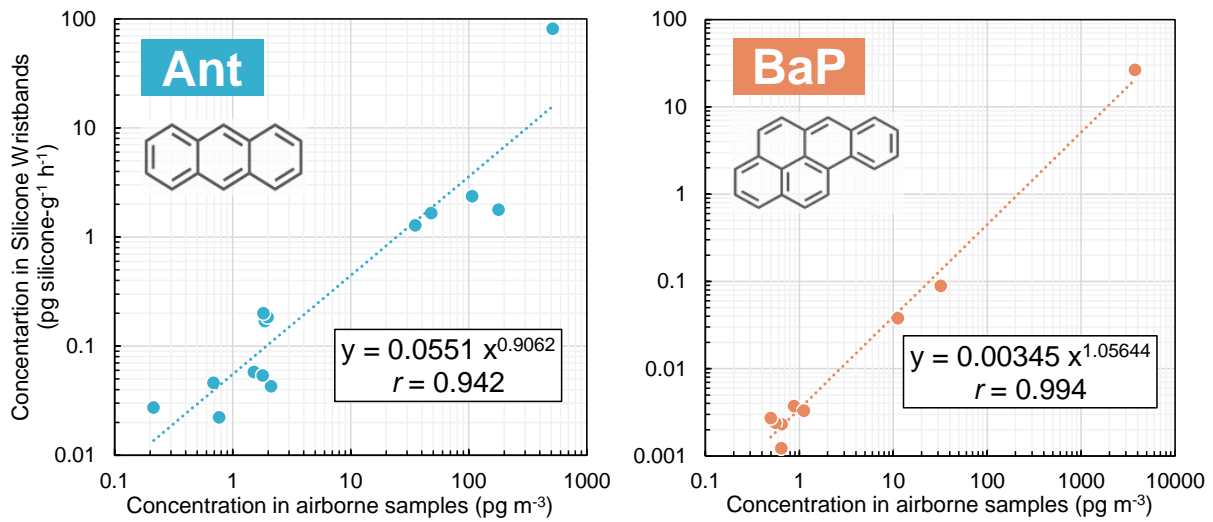


図4.4.7 大気中濃度とシリコンリストバンドでの捕集量の関係

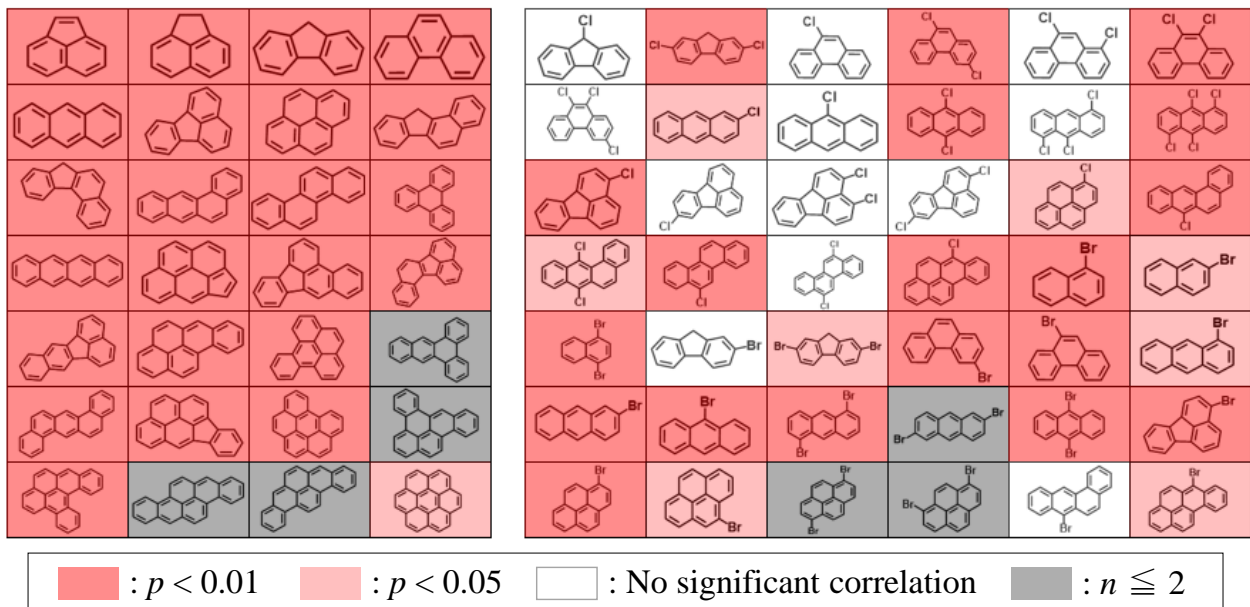


図4.4.8 大気中濃度とシリコンリストバンドでの捕集量の相関係数（ヒートマップ）

#### 4. 2. 3 風速条件による捕集速度への影響

シリコンリストバンドの捕集効率に関する風速条件の影響を、大気中でほぼ一定の濃度で観測される四塩化炭素 ( $\text{CCl}_4$ ) を指標物質として評価した。 $\text{CCl}_4$ 、phenanthrene (Phe)、2-chloroanthracene (2-ClAnt)、BaPおよび6-bromoBaP (6-BrBaP) の結果を図4.4.9に示す。ほぼ無風状態、および風速が $0.5 \text{ m s}^{-1}$ 、 $1 \text{ m s}^{-1}$ 、 $2 \text{ m s}^{-1}$ 、 $4 \text{ m s}^{-1}$ の条件において、 $\text{CCl}_4$ の捕集量は風速影響を受けないことが確認された。ガス態の2-ClAnt、粒子態のBaPについては、 $\text{CCl}_4$ と同様に、風速条件が変化しても捕集量が有意に変化することは無かった。一方、ガス態であるPheの捕集量は、風速上昇により有意に増加した ( $p < 0.05$ ) が、最大1.4倍の増加率であり、風速によって大きな影響を受けないことが示唆された。粒子態である6-BrBaPの場合も、同様の傾向を示した。ガス態および粒子態PAHs・XPAHsは、シリコンリストバンドを

用いたパッシブサンプリングにおいて、本研究の範囲内で風速影響をほとんど無視できることが示唆された。今後、より詳細な調査が必要である。

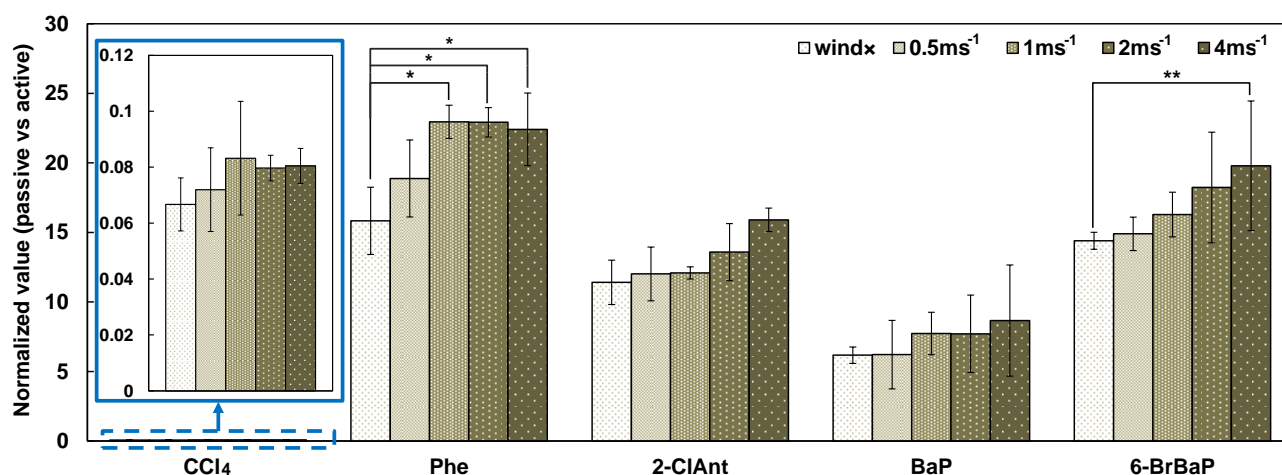


図4.4.9 異なる風速条件下において測定対象物質の捕集量

## 5. 研究目標の達成状況

災害・事故等の非正常状況下における化学物質への曝露状況を迅速に把握するため、揮発性有機化合物（VOCs）に関しては動力が必要ない小型携帯捕集法の一つである拡散型パッシブサンプラーを用いた個人曝露量把握方法を検討した。各対象物質のサンプリングレート算出していく過程で、サンプリングレートに大きく影響を与える環境条件（風速、湿度、温度、濃度変化等）を明確化すること試み、今回用いたパッシブサンプラーに関して、捕集量に対する環境要因の影響は非常に小さく、災害・事故を想定した実環境で十分使用可能であることを示すことができた。また、幅広い物性を持つVOCsに適用できるサンプリングレートの推算方法を検討し、合計165物質についてサンプリングレートデータベースを構築することができた。加えて、VOC以外の半揮発性有機化合物（SVOCs）には拡散型のパッシブサンプラーは使用できないことが予想されるため、シリコンパッシブ法に関する情報を収集し、その適用可能性を検討した。多環芳香族炭化水素類とそのハロゲン化誘導体（PAHs・XPAHs）について検討した結果、51種のガス態・粒子態PAHs・XPAHsにおいて、シリコンリストバンドでの捕集量から大気中濃度を推算できることが明らかになった。以上のように、目標どおりの成果をあげることができた。

## 6. 引用文献

- 1) O'Connell, S. G., Kincl, L. D., Anderson, K. A., 2014. Silicone Wristbands as Personal Passive Samplers. *Environmental Science & Technology*. 48, 3327-3335.
- 2) Okeme, J. O., Nguyen, L. V., Lorenzo, M., et al., 2018. Polydimethylsiloxane (silicone rubber) brooch as a personal passive air sampler for semi-volatile organic compounds. *Chemosphere*. 208, 1002-1007.
- 3) Hammel, S. C., Hoffman, K., Webster, T. F., et al., 2016. Measuring Personal Exposure to Organophosphate Flame Retardants Using Silicone Wristbands and Hand Wipes. *Environmental Science & Technology*. 50, 4483-4491.
- 4) Donald, C. E., Scott, R. P., Blaustein, K. L., et al., 2016. Silicone wristbands detect individuals' pesticide exposures in West Africa. *Royal Society Open Science*. 3.



### 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) 小山陽介、鈴木規之:環境化学、29, 3 (巻, 号), 95-105 (2019). 災害・事故における化学物質汚染の管理対象物質の考察
- 2) 中島大介、鈴木剛、中山祥嗣、白石不二雄、新田裕史、小山陽介、柳下真由子、宮脇崇、中島寛則、木村淳子、門上希和夫:環境化学、29, 3 (巻, 号), 129-137 (2019). 自動同定定量システム (AIQS) を活用した災害時の環境モニタリング～東日本大震災での活用と技術的展開～
- 3) Y. KOYAMA, Y. IMAIZUMI and N. SUZUKI: Global Environmental Research, 24, 2(2021) Systematic Analysis of Environmental Release Process and Emergency Response in Chemical Accident.
- 4) 小口正弘, 大久保 伸, 谷川昇, 中村智 (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. 環境科学会誌, 35 (4), 189-198

##### 【サブテーマ2】

- 1) 豊田真弘, 伊藤理彩, 石田剛久, 小島直也, 中久保豊彦, 多田悠人, 東海明宏: リスク学研究, 33, 1 (2023) PRTRすそ切り以下事業所における自然災害時の化学物質の流出事故を想定した潜在的流出規模の推計. (印刷中)
- 2) Z. Xu, L. S. dos Muchangos, L. Ito, A. Tokai: J. Clean. Prod, 397, 136503 (2023) Cost and health benefit analysis of remediation alternatives for the heavy-metal-contaminated agricultural land in a Pb-Zn mining town in China.
- 3) Z. Xu, L. Ito, L. S. dos Muchangos, A. Tokai: Environ. Geochem. Health, doi.org/10.1007/s10653-022-01445-z (2022) Health risk assessment and cost-benefit analysis of agricultural soil remediation for tailing dam failure in Jinding mining area, SW China.
- 4) 田中健太, 伊藤理彩, L. S. dos Muchangos, 東海明宏: リスク学研究, 32, 2 (2022) 下水処理場における水素エネルギーキャリアとしてのアンモニアの合成プラント導入のリスク評価.
- 5) 森口暢人, 伊藤理彩, 東海明宏: 環境科学会誌, 35, 6, 355-376 (2022) 土砂災害警戒区域内に立地するPRTR対象事業所におけるNatechリスクの抽出.
- 6) 田窪亮介, 米山望, 東海明宏, 伊藤理彩: 土木学会論文集B3(海洋開発), 78, 2, 823-828 (2022) 河川水塩分を考慮した南海トラフ地震津波 来襲時の淀川における化学物質拡散予測.
- 7) 北本靖子, 伊藤理彩, 東海明宏: 環境科学会誌, 35 (3), in press (2021) 水道水源における化学物質流出事故に対する高度浄水処理及び対策オプションの評価.
- 8) 森口 暢人, 伊藤 理彩, 東海 明宏: リスク学研究, 31 (3), in press (2021) 土砂災害を起因とした化学物質流出事故のリスク評価と対策の費用便益分析.
- 9) 山上颯太, 伊藤理彩, レティシア. D. ムシヤングス, 東海明宏: リスク学研究, 31 (4), in press (2021) SIR モデルを用いた南海トラフ地震発生時における COVID-19 感染動向の推定と病床不足数の推算.
- 10) 田窪亮介, 米山望, 伊藤理彩, 東海明宏: 自然災害科学 40 (2), 223-242 (2021) 巨大津波発生時の淀川における化学物質拡散予測に関する 2DH-3D ハイブリッド解析.
- 11) 北本靖子, 小島直也, 東海明宏: 環境科学会誌, 33 (3) (2020) 高度浄水処理導入による消毒副生成物間のトレードオフ評価.
- 12) L. Ito, T. Yamaguchi, A. Tokai and Y. Takahashi: Encyclopedia of the World's

- Biomes, 230-239, Ed. Michael Goldstein and Dominik DellaSala, Elsevier, Amsterdam (2020) Biogeography and Chemical Risks on Islands.
- 13) S. Hamamoto, L. Ito, N. Yoneyama and A. Tokai: *Water*, 13(4), 549 (2021) Case Study for the Predictive Environmental Risk Assessment of Hexamethylenetetramine Release to the Yodo River during a Massive Tsunami Attack.
- 14) S. Hamamoto, L. Ito and A. Tokai: *Water*, 13(4), 572 (2021) Assessment of Renewal Priority of Water Pipeline Network against Earthquake Risk.
- 15) Y. Okazaki, L. Ito and A. Tokai: *Atmosphere*, 12(3), 335 (2021) Health Risk of Increased O<sub>3</sub> Concentration Based on Regional Emission Characteristics under the Unusual State of the COVID-19 Pandemic.

### 【サブテーマ 3】

- 1) T. AKIMOTO, S. KOBAYASHI, A. NAKAYAMA, A. ISOBE, K. ABE, T. HATAKEYAMA, R. OHTA, R. YANAGISAWA, E. KOIKE, N. SUZUKI and M. KAWAGUCHI: *J. Appl. Toxicol.* 42, 9(vol, issue), 1503-1509 (2022) (IF:3.4) , Toxicological effects of Tris (1,3-dichloro-2-propyl) phosphate exposure in adult male rats differ depending on the history of exposure in the neonatal period.
- 2) S. KOBAYASHI, N. KAWANO, K. MIYADO, R. Ohta, T. AKIMOTO, T. HATAKEYAMA and M. KAWAGUCHI: *J. Vet. Med. Sci.*, 84, 1(vol, issue), 153-156 (2022) (IF: 1.2) , Effects of tris(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate on epididymal sperm parameters in adult male rats.
- 3) S. KOBAYASHI, K. ABE, A. ISOBE, A. NAKAYAMA, T. AKIMOTO, T. HATAKEYAMA, Y. SAITO, R. YANAGISAWA, E. KOIKE, N. Suzuki, M. KAWAGUCHI and R. OHTA: *J. Appl. Toxicol.* 41, 6(vol, issue), 987-992 (2021) (IF:3.4) , Novel toxicity of tris (1,3-dichloro-2-propyl) phosphate in adult male rats.
- 4) A. NAKAYAMA, T. HATTORI, A. ISOBE, S. KOBAYASHI, G. SUZUKI, H. TAKIGAMI and M. KAWAGUCHI: *J. Appl. Toxicol.* 40, 12(vol, issue), 1614-1621 (2020) (IF:3.4) , The effects of 28-day early-life exposure to triphenyl phosphate (TPhP) on odor preference and sexual behavior in female rats.

### 【サブテーマ 4】

- 1) Q. Wang, M. Tokumura, Y. Miyake, T. Amagai, Optimization of method for extracting 46 volatile organic compounds (VOCs) from an activated carbon-silica gel active sampler to evaluate indoor work environments, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14, 1341-1348 (2021). (IF: 5.804)
- 2) K. Sei, Q. Wang, M. Tokumura, Y. Miyake, T. Amagai, Accurate and ultrasensitive determination of 72 parent and halogenated polycyclic aromatic hydrocarbons in a variety of environmental samples via gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry, *Chemosphere*, 271, 129535 (2021). (IF: 8.943)
- 3) K. Sei, Q. Wang, M. Tokumura, A. Hossain, M. Raknuzzaman, Y. Miyake, T. Amagai, Occurrence, potential source, and cancer risk of PM<sub>2.5</sub>-bound polycyclic aromatic hydrocarbons and their halogenated derivatives in Shizuoka, Japan, and Dhaka, Bangladesh, *Environmental Research*, 196, 110909 (2021). (IF: 8.431)
- 4) K. Sei, Q. Wang, M. Tokumura, S. Suzuki, Y. Miyake, T. Amagai, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Halogenated Derivatives in a Traditional Smoke-dried Fish

Product in Japan—Occurrence and Countermeasures, ACS Food Science & Technology, 1, 960–966 (2021).

### <査読付き論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない

### <その他誌上発表（査読なし）>

#### 【サブテーマ2】

- 1) (巻頭言) 東海 (2022) 2021の覚書、リスク学研究 31 (3)、139-140
- 2) (情報) 伊藤、東海 (2021) 災害・事故に起因する化学物質リスクの評価・管理手法、リスク学研究 30 (3)、127-131
- 3) (レター) 東海、中久保 (2020) 災害・事故に起因する化学物質リスクの評価・管理手法 (1)
- 4) 落合、他 (2019) 化学物質の非定常流出事象を対象とした環境媒体での移動・残留特性の体系的整理, 日本リスク研究学会第32回年次大会講演論文集, Vol. 32, pp. 194-199.

### (2) 口頭発表（学会等）

#### 【サブテーマ1】

- 1) 今泉圭隆、鈴木規之、小山陽介、小口正弘：第32回日本リスク学会年次大会（2019）「災害・事故時のリスク管理に関する情報の構造化と情報基盤システム構築の検討」
- 2) 小山陽介、今泉圭隆、鈴木規之：第32回日本リスク学会年次大会（2019）「化学物質放出事故に関する事例解析およびシナリオ化の検討」
- 3) 今泉圭隆、小山陽介、鈴木規之、小口正弘：第35回日本リスク学会年次大会（2022）「災害・事故時の環境リスク管理に関する情報基盤システム構築の検討」
- 4) 小山陽介、今泉圭隆、鈴木規之：第35回日本リスク学会年次大会（2022）「化学物質放出事故の各対応段階における必要情報の構造化」

#### 【サブテーマ2】

- 1) 森口暢人、伊藤理彩、東海明宏、京都(国内)、第35回日本リスク学会年次大会（2022）Bayesian networkを活用した土砂災害を起因とする化学物質流出事故のリスク評価
- 2) 伊藤理彩、東海明宏、幕張(国内)、日本地球惑星科学連合2022年大会（2022）大規模自然災害が引き起こす河川の汚染による生態への毒性影響の評価
- 3) 伊藤理彩、岡崎祐樹、北本靖子、中久保豊彦、東海明宏、2021年度 日本リスク学会 第34回日本リスク研究学会年次大会 オンライン（2021）複合災害シナリオ下での化学物質流出事故のリスク評価モデルの検証.
- 4) 西元崇人、伊藤理彩、東海明宏、2021年度 日本リスク学会 第34回日本リスク研究学会年次大会 オンライン（2021）費用効果分析を用いたノニルフェノールのリスク評価.
- 5) 田中航、伊藤理彩、Dos Muchangos Leticia、東海明宏、2021年度 日本リスク学会 第34回日本リスク研究学会年次大会 オンライン（2021）南海トラフ地震に起因する石油コンビナート災害によるヒト健康影響の評価.
- 6) 岡崎祐樹、伊藤理彩、東海明宏、2021年度 日本リスク学会 第34回日本リスク研究学会年次大会 オンライン（2021）非平常時におけるオゾン濃度の増加による健康リスク評価 —コロナ禍での交通量の減少を考慮して—.
- 7) Zongyu Xu, Leticia Muchangos, Lisa Ito and Akihiro Tokai, EcoDesign 2021 Online (2021) Application of disability Adjusted life years in risk assessment for total human

- mercury exposure in China and Japan -An meta-analysis.
- 8) Lisa Ito, Akihiro, Tokai, Society for Risk Analysis 2021 Annual Meeting Online (2021) Complex scenarios of chemical release accident triggered by multiple hazards.
  - 9) T. Ishida, L. Ito and A. Tokai, JpGU-AGU Joint Meeting 2020: Virtual (2020) Impacts of the risk of chemical release from unregistered plant triggered by a future local earthquake in Osaka.
  - 10) S. Hamamoto, L. Ito and A. Tokai, Goldschmidt Virtual 2020 (2020) Estimation of the risk under the accident that hexamethylenetetramine flows out to the river due to a direct earthquake.
  - 11) 森口暢人, 伊藤理彩, 東海明宏, 2020年度 日本リスク学会 第33回年次大会 オンライン (2020) 土砂災害による産業施設からの化学物質流出による影響の評価.
  - 12) 平井宏明, 伊藤理彩, 東海明宏, 2020年度 日本リスク学会 第33回年次大会 オンライン (2020) 気候変動下での豪雨災害による化学物質流出事故のリスク評価.
  - 13) S. Hamamoto, L. Ito, N. Yoneyama and A. Tokai, Society for Risk Analysis 2020 Annual Meeting: Virtual (2020) Risk evaluation of accidentally released formaldehyde precursor considering tsunami run-up.
  - 14) 小島直也、田淵、濱本、松浦、伊藤、東海(2018)自然災害に起因する非定常な化学物質流出シナリオの構築、日本リスク研究学会, コラッセふくしま, 2018/11.
  - 15) 伊藤 理彩、中久保 豊彦、小島 直也、東海 明宏(2019) 大地震によって引き起こされる化学物質流出事故後の浄水場機能に対する影響と対策オプション評価、日本地球惑星科学連合2019年大会、2019/05.
  - 16) 伊藤理彩, 東海明宏, 中久保豊彦, Nguyen Thi Hoa, 小島直也: 自然災害が引き起こす化学物質流出事故の給水機能への影響と対策オプション評価, 環境科学会2019年会, 名古屋大学, 2019/09.
  - 17) 小島直也, 伊藤理彩, 中久保豊彦, Nguyen Thi Hoa, 田淵裕也, 東海明宏: 大阪府での地震被害を想定した化学物質取扱事業所周辺における潜在曝露リスクの評価, 環境科学会2019年会, 名古屋大学, 2019/09.
  - 18) 中久保豊彦, 須藤むつみ, 佐野早希, 大瀧雅寛: 被災・断水環境への適応力を考慮した応急給水計画の策定支援に関する研究, 第47回環境システム研究論文発表会, 東洋大学, 2019/10.
  - 19) 小島直也, 中久保豊彦, 伊藤理彩, 東海明宏: 自治体における自然災害に起因する化学物質流出事故対策に関する考察, 第47回環境システム研究論文発表会, 東洋大学, 2019/10.
  - 20) 東海明宏, 伊藤理彩, 中久保豊彦, 小島直也, Nguyen Thi Hoa: 災害事故時を念頭においた対策オプションの整理と評価の考え方, 日本リスク研究学会2019年次大会, 東京工業大学, 2019/11.
  - 21) 中久保豊彦, 落合遥, 伊藤理彩, 小島直也, 東海明宏: 回復期における対策論とその実装に向けた多媒体移動・残留予測モデルの開発, 日本リスク学会2019年次大会, 東京工業大学, 2019/11.
  - 22) 伊藤理彩, 東海明宏, 中久保豊彦, 小島直也, Nguyen Thi Hoa: 水系での非平常時における化学物質流出に対するリスク削減モデルと事例評価, 日本リスク学会2019年次大会, 東京工業大学, 2019/11.
  - 23) 田中雄大, 東海明宏, 伊藤理彩, 小島直也, Nguyen Thi Hoa: 大阪府における地震が引き起こす化学物質流出事故の土壌圏への影響と対策オプション評価, 日本リスク学会2019年度大会, 東京工業大学, 2019/11.
  - 24) Hoa Thi NGUYEN, Akihiro TOKAI, Lisa ITO, Toyohiko NAKAKUBO, Naoya KOJIMA:

Application on fuzzy c-means clustering and extended self-organizing map to partition chemicals in the disaster scenarios, 日本リスク学会2019年次大会, 東京工業大学, 2019/11.

- 25) Lisa Ito, Akihiro Tokai, Toyohiko Nakakubo, Hoa Nguyen and Naoya Kojima : Practical framework for NATEC risk and option evaluation in connection with chemical management under the disaster scenario in Kansai region of Japan, Annual meeting of Society for Risk Analysis, Arlington, 2019/12.

### 【サブテーマ 3】

- 1) 加藤史也、池田菜央、秋元貴尋、岩田汐央、田中杏苗、佐藤海斗、石井敦大、畠山太一、渡辺元、太田亮、柳澤利枝、小池英子、鈴木規之、川口真以子：環境化学物質 3 学会合同大会 (2022)  
「アセナフテンの曝露量の変動が雄ラットに及ぼす毒性影響」
- 2) 秋元貴尋、畠山太一、鈴木規之、川口真以子：内分泌攪乱化学物質学会第23回研究発表会 (2021)  
「Tris(1,3-dichloro-2-propyl)phosphates(TDCIPP)がストレス応答系に及ぼす毒性影響」
- 3) 柳澤利枝、川口真以子、小池英子、鈴木規之：第91回日本衛生学会 (2021)  
「災害・事故等に起因する化学物質の非定常的曝露による健康影響評価の必要性」
- 4) 秋元貴尋、小林翔平、磯部翔一、畠山太一、太田亮、柳澤利枝、小池英子、鈴木規之、川口真以子：第64回日本薬学会関東支部大会 (2020)  
「Tris(1,3-dichloro-2-propyl)phosphate(TDCIPP)の幼若期曝露は成熟期曝露後の毒性影響に変化を及ぼすか？」
- 5) 秋元貴尋、小林翔平、磯部翔一、畠山太一、太田亮、柳澤利枝、小池英子、鈴木規之、川口真以子：第47回日本毒性学会学術年会 (2020)  
「Tris(1,3-dichloro-2-propyl)phosphate(TDCIPP)の幼若期、成熟期2回曝露が成熟期雄ラットに及ぼす毒性影響」
- 6) 小林翔平、阿部光海、大沼愛美、畠山太一、河野菜摘子、宮戸健二、斉藤義明、柳澤利枝、小池英子、鈴木規之、川口真以子、太田亮：内分泌攪乱化学物質学会第22回研究発表会 (2019)  
「Tris (1,3-dichloro-2-propyl) phosphateの7日間反復経口投与が成熟期雄ラットに及ぼす毒性影響」
- 7) 中山愛里、磯部安菜、阿部光海、坂井亮太、白藤勇登、柳澤利枝、小池英子、鈴木規之、川口真以子：内分泌攪乱化学物質学会第21回研究発表会 (2018)  
「Tris (1,3-dichloro-2-propyl) Phosphate (TDCIPP) の幼若期・成熟期曝露の毒性影響」

### 【サブテーマ 4】

- 1) 西尾 春菜, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 福島 靖弘, 鈴木 義浩, 榎本 孝紀：多孔性チューブ型パッシブサンプラーにおけるVOCsのサンプリングレートの影響要因に関する研究, 第27回環境化学討論会, 沖縄. (2018年5月)
- 2) 清 健人, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史：加熱脱着-GC/MSを用いた粒子状塩素化多環芳香族炭化水素類 (ClPAHs) 分析法の開発, 第27回環境化学討論会, 沖縄. (2018年5月)
- 3) Kento Sei, Qi Wang, Misato Masuda, Masahiro Tokumura, Yuichi Miyake, Takashi Amagai : An Analytical Method for Chlorinated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Particles by Thermal Desorption-GC/MS, the 38th International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants (POPs) & 10th International PCB Workshop

- (Dioxin 2018), Kraków, Poland. (August 2018)
- 4) 清 健人, 王 斉, 増田 美里, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史 : 塩素化多環芳香族炭化水素類 (ClPAHs) 個人曝露評価のための高感度分析法の開発, 環境科学会 2018年会, 東京. (2018年9月)
  - 5) Haruna Nishio, Qi Wang, Masahiro Tokumura, Yuichi Miyake, Takashi Amagai, Yasuhiro Fukushima, Yoshihiro Suzuki, Takanori Enomoto : Effects of Environmental Factors on Sampling Rates of VOCs with Porous Tube-Type Passive Samplers, The Joint Annual Meeting of the International Society of Exposure Science and the International Society for Environmental Epidemiology (ISES-ISEE 2018), Ottawa, Canada. (August 2018)
  - 6) 西尾 春菜, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 福島 靖弘, 鈴木 義浩, 榎本 孝紀 : 有害物質 (VOCs) の個人曝露におけるサンプラーの精確性の検討, 富士山麓A&Sフェア 2018, 静岡. (2018年11月)
  - 7) 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 福島 靖弘, 鈴木 義浩, 榎本 孝紀 : 活性炭・シリカゲルチューブを用いた作業環境における揮発性有機化合物の回収率に関する検討, 平成30年室内環境学会学術大会, 東京. (2018年12月)
  - 8) 清 健人, 王 斉, 増田 美里, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 規制対象の多環芳香族炭化水素類 (PAHs) に対応した網羅的分析法の開発, 第28回環境化学討論会, 埼玉. (2019年6月)
  - 9) 大石純菜, 西尾春菜, 王斉, 徳村雅弘, 三宅祐一, 雨谷敬史, 福島靖弘, 鈴木義浩, 榎本孝紀, 多孔性チューブ型パッシブサンプラーにおける揮発性有機化合物 (VOCs) のサンプリングレートの検討, 第28回環境化学討論会, 埼玉. (2019年6月)
  - 10) 深澤英、王斉、徳村雅弘、三宅祐一、雨谷敬史 , ジブチルアミン含浸シリカゲルを用いたイソシアネートの測定法の開発, 第28回環境化学討論会, 埼玉. (2019年6月)
  - 11) Kento Sei, Qi Wang, Misato Masuda, Masahiro Tokumura, Yuichi Miyake, Takashi Amagai, Development of a Comprehensive Analytical Method for Regulated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, 39th International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants (DIOXIN 2019), Kyoto, Japan. (August, 2019).
  - 12) Junna Ohishi, Haruna Nishio, Qi Wang, Masahiro Tokumura, Yuichi Miyake, Takashi Amagai, Yasuhiro Fukushima, Yoshihiro Suzuki, Takanori Enomoto, Evaluation of Porous Tube-type Passive Samplers for Volatile Organic Compounds according to the ISO 16107, the International Society of Exposure Science (ISES) and the International Society of Indoor Air Quality and Climate (ISIAQ) 2019, Kaunas, Lithuania. (August, 2019)
  - 13) 大石 純菜, 西尾 春菜, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 福島 靖弘, 鈴木 義浩, 榎本 孝紀, 拡散型サンプラーにおける揮発性有機化合物のサンプリングレートの実測と理論的推算法の検討, 環境科学会2019年会, 名古屋. (2019年9月)
  - 14) 深澤 英, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, イソシアネート測定のためのジブチルアミン含浸シリカゲルサンプラーの開発と汚染実態調査, 環境科学会2019年会, 名古屋. (2019年9月)
  - 15) 大石 純菜, 西尾 春菜, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 福島 靖弘, 鈴木 義浩, 榎本 孝紀, 事故・災害時における、有害物質における簡易測定法の検討 , 富士山麓A&Sフェア2019, 沼津. (2019年12月)
  - 16) 深澤 英, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 事故・災害時における、一般家庭の室内空気におけるイソシアネートの汚染実態調査 , 富士山麓A&Sフェア2019, 沼津. (2019年12月)

- 月)
- 17) 大石 純菜, 西尾 春菜, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 福島 靖弘, 鈴木 義浩, 榎本 孝紀, 拡散型サンプラーにおけるサンプリングレート算出のための物性値推算法の検討, 平成31年室内環境学会学術大会, 沖縄. (2019年12月)
  - 18) 深澤 英, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 一般住宅における室内空気中のイソシアネートの汚染実態調査, 平成31年室内環境学会学術大会, 沖縄. (2019年12月)
  - 19) 多田 智彦, 清 健人, 王 斉, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, シリコンリストバンドを用いた多環芳香族炭化水素類及びそのハロゲン化誘導体のパッシブサンプリング法の初期検討, 2020年室内環境学会学術大会, 郡山. (2020年12月)
  - 20) 大石 純菜, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 福島 靖弘, 鈴木 義浩, 拡散型サンプラー捕集法における親水性揮発性有機化合物の抽出法の検討, 2020年室内環境学会学術大会, 郡山. (2020年12月)
  - 21) 清 健人, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, ハウスダスト中の多環芳香族炭化水素類とそのハロゲン誘導体の発生源推定及び発がんリスク評価, 2020年室内環境学会学術大会, 郡山. (2020年12月)
  - 22) 大石 純菜, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 個人暴露量測定のための拡散型サンプラーにおけるサンプリングレート推算法の検討, 環境科学会2020年会, Web. (2020年9月)
  - 23) 清 健人, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, Anwar Hossain, Mohammad Raknuzzaman, 日本及びバングラデシュにおける多環芳香族炭化水素類とそのハロゲン誘導体の発生源推定及び発がんリスク評価, 環境科学会2020年会, Web. (2020年9月)
  - 24) 清 健人, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, GC-MS/MSを用いた72種の多環芳香族炭化水素類及びそのハロゲン誘導体に対する正確かつ高感度な分析法の開発, 環境化学オンライン研究発表会2020, Web. (2020年9月)
  - 25) 王 斉, 大石 純菜, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 福島 靖弘, 鈴木 義浩: 揮発性有機化合物の個人曝露評価におけるパッシブサンプラーのサンプリングレート推算法およびデータベースの構築, 2021年室内環境学会学術大会, 京都. (2021年12月)
  - 26) 多田 智彦, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史: 環境要因による影響を考慮した多環芳香族炭化水素類及びそのハロゲン化誘導体の新規パッシブサンプリング法の検討, 2021年室内環境学会学術大会, 京都. (2021年12月)
  - 27) 滝川 哲也, 多田 智彦, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史: 直接導入法による粒子状多環芳香族炭化水素類およびそのハロゲン化誘導体の分析法開発と室内空気中濃度調査, 2021年室内環境学会学術大会, 京都. (2021年12月)
  - 28) 滝川 哲也, 多田 智彦, 王 斉, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 直接導入 GC-MS/MS による粒子状多環芳香族炭化水素類及びハロゲン化誘導体の分析方法の検討, 第29回環境化学討論会, 大阪. (2021年6月)
  - 29) 多田 智彦, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史: 多環芳香族炭化水素類及びそのハロゲン化誘導体の新規パッシブサンプリングにおける環境条件の影響を考慮した分析法の検討, 環境科学会2021年会, Web. (2021年9月)
  - 30) 滝川 哲也, 多田 智彦, 王 斉, 徳村 雅弘, 三宅 祐一, 雨谷 敬史: 直接導入法による粒子状多環芳香族炭化水素類およびそのハロゲン化誘導体の分析法開発と大気中濃度調査, 環境科学会2021年会, Web. (2021年9月)
  - 31) 滝川 哲也, 王 斉, 野呂和嗣, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 直接導入法を用いた室内空気中の多環芳香族炭化水素類およびハロゲン化誘導体の濃度と潜在的発生源調査, 2022年室内環境学会学術大会, 東京. (2022年12月)
  - 32) 柿本 祐奈, 王 斉, 野呂和嗣, 三宅 祐一, 雨谷 敬史, 室内製品中のイソシアネート含有量と放

- 出実態調査, 2022年室内環境学会学術大会, 東京. (2022年12月)
- 33) 王 齊, 高橋 佑果, 三宅 祐一, 徳村 雅弘, 雨谷 敬史, 福島 靖弘, 鈴木 義浩, パッシブサンプラーを用いた揮発性有機化合物の個人曝露量の予測手法の開発と応用, 環境科学会2022年会, Web. (2022年9月)
  - 34) 高橋佑果, 王齊, 雨谷敬史, 福島靖弘, 鈴木義浩, 三宅祐一, 拡散型パッシブサンプラーを用いた揮発性有機化合物の個人曝露評価のためのサンプリングレート推算法の検討, 環境科学会2022年会, Web. (2022年9月)
  - 35) 田川瑛梨, 多田智彦, 王齊, 雨谷敬史, 三宅祐一, シリコーンリストバンドを用いたパッシブ法における多環芳香族炭化水素類とそのハロゲン化誘導体の物質存在状態別の捕集速度への影響, 環境科学会2022年会, Web. (2022年9月)
  - 36) 滝川哲也, 王齊, 野呂和嗣, 三宅祐一, 雨谷敬史, 直接導入法を用いた室内空気中の粒子状多環芳香族炭化水素類およびハロゲン化誘導体の汚染実態調査, 2022年環境化学物質3学会合同大会, 富山. (2022年6月)
  - 37) 柿本祐奈, 王齊, 野呂和嗣, 三宅祐一, 雨谷敬史, 一般住宅における室内空気中のイソシアネートの発生源調査, 2022年環境化学物質3学会合同大会, 富山. (2022年6月)
  - 38) 高橋佑果, 王齊, 大石純菜, 雨谷敬史, 福島靖弘, 鈴木義浩, 三宅祐一, パッシブ法を用いた揮発性有機化合物の個人曝露評価のためのサンプリングレート推算法及びデータベースの拡張, 2022年環境化学物質3学会合同大会, 富山. (2022年6月)
  - 39) 田川瑛梨, 多田智彦, 王齊, 雨谷敬史, 三宅祐一, シリコーンリストバンドを用いた多環芳香族炭化水素類及びそのハロゲン化誘導体のパッシブサンプリング法の検討, 2022年環境化学物質3学会合同大会, 富山. (2022年6月)
  - 40) 王齊, 滝川哲也, 野呂和嗣, 徳村雅弘, 三宅祐一, 雨谷敬史, 多環芳香族炭化水素類とそのハロゲン化誘導体の室内動態調査, 2022年室内環境学会学術大会, 東京. (2022年12月)
  - 41) 高橋佑果, 王齊, 雨谷敬史, 福島靖弘, 鈴木義浩, 三宅祐一, 分子拡散型パッシブ法における揮発性有機化合物のサンプリングレート推算法の高精度化と網羅的データベースの構築, 2022年室内環境学会学術大会, 東京. (2022年12月)
  - 42) 田川瑛梨, 多田智彦, 王齊, 雨谷敬史, 三宅祐一, シリコーンリストバンドを用いたパッシブ法における多環芳香族炭化水素類およびそのハロゲン化誘導体の捕集機構の検討, 2022年室内環境学会学術大会, 東京. (2022年12月)
  - 43) 柿本祐奈, 王齊, 野呂和嗣, 三宅祐一, 雨谷敬史, 室内空気中のイソシアネートの濃度およびその潜在的発生源である製品中の濃度調査, 環境科学会2022年会, Web. (2022年9月)
  - 44) Qi Wang, Masahiro Tokumura, Yuichi Miyake, Takashi Amagai, A method for the simultaneous determination of polar and non-polar volatile organic compounds using an activated carbon-silica gel active sampler to evaluate indoor work environments, International Society of Exposure Science (ISES) 2022. (2022年9月)
  - 45) Tetsuya Takikawa, A high-sensitive analytical method of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and halogenated PAHs using thermal separation probe coupled to gas chromatograph-triple quadrupole mass spectrometer, International Society of Exposure Science (ISES) 2022. (2022年9月)

### (3) 「国民との科学・技術対話」の実施

#### 【全サブテーマ】

- 1) 一般向け公開講演会「災害・事故での化学物質リスクにどう対処するかー環境研究総合推進費S17課題：災害・事故に起因する化学物質リスクの評価・管理手法の体系的構築に関する研究



の成果よりー」（主催：国立環境研究所、共催：株式会社堀場製作所、地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所、後援：大阪府、国立大学法人大阪大学、国立保健医療科学院、国立研究開発法人産業技術総合研究所、協賛：一般社団法人室内環境学会、2020年2月21日、TKP東京駅日本橋カンファレンスセンター ホール7、参加者約150名）において、テーマ1より「災害・事故での化学物質リスクとその対処ー新たな課題と今後の取り組みー」および「災害・事故等のリスク管理における対策オプションの評価に関する研究」の2講演を行った。

- 2) 公開講演会「災害・事故に伴う化学物質リスクへの対処をどうするか？ー環境研究総合推進費戦略的研究開発課題S-17「災害・事故に起因する化学物質リスクの評価・管理手法の体系的構築に関する研究」予定成果講演会」（主催：国立環境研究所、共催：株式会社堀場製作所、地方独立行政法人大阪府立環境農林水産総合研究所、後援：大阪府、国立大学法人大阪大学、国立保健医療科学院、国立研究開発法人産業技術総合研究所、2023年2月28日、航空会館7階大ホール、参加者延べ 230人（現地参加者 50人、オンライン参加 180人））において、サブテーマ1から「災害・事故時の環境リスク管理に関する情報基盤システム（今泉圭隆、小山陽介）」「さまざまな事例と経験（小山陽介、小野恭子）」サブテーマ2から「災害・事故等のリスク管理における対策オプションの評価に関する研究」サブテーマ3から「非定常状態における健康リスク評価に向けた新たな知見」サブテーマ4から「災害・事故時における化学物質の個人曝露量把握方法」および全テーマの共同として主にサブテーマ1より「災害・事故時の化学物質リスク対応のための情報基盤と演習」の各講演および演習を行った。

#### 【サブテーマ2】

- 1) 日本リスク学会 2021年11月20日（土） オンライン 公開シンポジウム 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～新興リスクへの化学物質リスク評価・管理の進化的対応に向けて～
- 2) 東海、大阪府化学物質セミナー（大阪府） 2019年2月12日
- 3) 東海、第15回 化学物質と環境に関する政策対話（環境省） 2019年9月10日

#### 【サブテーマ4】

- 1) 三宅祐一、環境サマースクールin県大2018「空気の調べ方」にて成果紹介（2018年8月1日、静岡県立大学、聴講者約20人）
- 2) 三宅祐一、環境サマースクールin県大2019「空気の調べ方」にて成果紹介（2019年8月1日、静岡県立大学、聴講者約20人）
- 3) 三宅祐一、サーモフィッシャーサイエンティフィック株式会社オンライン科学セミナー、2021年12月、身近な発がん物質（聴講者約40名）
- 4) 三宅祐一、アジレント・テクノロジー株式会社ユーザーズミーティング、2022年3月、多環芳香族炭化水素類およびそのハロゲン化誘導体の高精度・高感度分析法と環境汚染実態の調査事例（聴講者約60名）
- 5) 三宅祐一、埼玉県環境科学国際センター研究講演会、2022年12月、災害・事故に伴う化学物質曝露・リスク判断のための個人曝露量把握方法の提案（聴講者約15名）

#### (4) マスコミ等への公表・報道等

##### 【サブテーマ1】

- 1) 成果の報道発表（2023年5月（予定）、国立環境研究所、環境省共同発表全国版、「災害・事故時の環境リスク管理に関する情報基盤の公開について—災害・事故が原因で環境中に排出された化学物質への対応を支援するためのウェブサイトを開発・公開し、運用を開始しました—」）

#### (5) 本研究費の研究成果による受賞

- 1) SRA International Travel Award, Annual meeting 2022、The Society for Risk Analysis、2022年12月6日、伊藤理彩
- 2) SRA International Travel Award, Annual meeting 2022、The Society for Risk Analysis、2022年12月5日、森口暢人
- 3) 日本地球惑星科学連合2022年大会学生優秀発表賞、日本地球惑星科学連合、2022年7月12日、小林諒真
- 4) 日本リスク学会第35回年次大会優秀発表賞（口頭発表部門）、日本リスク学会、2022年12月20日、森口暢人
- 5) 第34回年日本リスク学会次大会 大会優秀発表賞（口頭発表部門）、日本リスク学会、2021年11月20日発表(2021年12月15日結果公表)、田中航。
- 6) 第32回日本リスク学会2019年度大会 優秀発表賞受賞「大阪府における地震が引き起こす化学物質流出事故の土壌圏への影響と対策オプション評価」、田中雄大。
- 7) 2020年室内環境学会学術大会 大会長奨励賞：多田 智彦，清 健人，王 斉，三宅 祐一，雨谷 敬史，シリコーンリストバンドを用いた多環芳香族炭化水素類及びそのハロゲン化誘導体のパッシブサンプリング法の初期検討（2020年12月）
- 8) 環境科学会2020年会 優秀発表賞（富士電機賞）：清 健人，王 斉，徳村 雅弘，三宅 祐一，雨谷 敬史，Anwar Hossain, Mohammad Raknuzzaman, 日本及びバングラデシュにおける多環芳香族炭化水素類とそのハロゲン誘導体の発生源推定及び発がんリスク評価（2020年9月）
- 9) 2022年室内環境学会学術大会 大会長奨励賞：高橋佑果，王斉，雨谷敬史，福島靖弘，鈴木義浩，三宅祐一，分子拡散型パッシブ法における揮発性有機化合物のサンプリングレート推算法の高精度化と網羅的データベースの構築（2022年12月）
- 10) 2022年環境化学物質3学会合同大会 優秀発表賞（SETAC賞）：田川瑛梨，多田智彦，王斉，雨谷敬史，三宅祐一，シリコーンリストバンドを用いた多環芳香族炭化水素類及びそのハロゲン化誘導体のパッシブサンプリング法の検討（2022年6月）

#### (6) その他の成果発表

特に記載すべき成果はない



#### IV. 英文Abstract

##### Development of chemical risk assessment and management system as disaster and emergency response

Principal Investigator: Noriyuki SUZUKI, Yosuke KOYAMA, Eiko KOIKE, Rie YANAGISAWA, Yoshitaka IMAIZUMI, Masahiro OGUCHI, Akihiro TOKAI, Naoya KOJIMA, Toyohiko NAKAKUBO, Lisa ITO, Maiko KAWAGUCHI, Yuichi MIYAKE, Masahiro TOKUMURA

Institution: 16-2 Onogawa, Tsukuba City, Ibaraki, JAPAN

Tel: 029-850-2331 / Fax: 029-850-2920

E-mail: nsuzuki@nies.go.jp

Cooperated by: Osaka University, Ochanomizu University, Meiji University, University of Shizuoka, Yokohama National University

[Abstract]

Key Words: Non-steady state chemical risk assessment, Countermeasure options, Exposure estimation, Web-information system, Emission and exposure scenario

Development of methodologies of non-steady state chemical risk assessment and information system for chemical management under disaster environment were studied. Roles and coverages of the focus area of all sub-projects in S-17 project were characterized in the perspectives of risk governance. Both conceptual and realistic exposure scenario were established based on the survey and analysis of existing incidents of chemical accidents. Web information system, named as "D.Chem-Core" was established that is compiling all S-17 outcomes and other relevant information sources. Systematic retrieval of data enables the rapid extraction of necessary information from the system, through the tag-based data organization under scenario in the system.

Sub-theme 2 evaluated countermeasure options considering the causes, scale, and properties of affected parties, such as air, water, and soil under the emergencies caused by natural disasters. We conducted a literature survey on impacts through the hydrosphere and sorted and categorized countermeasure options by type and affected parties. Based on this accident pattern, we constructed a representative scenario with significant risks and effectiveness of countermeasures. Consequently, we expanded the target to the atmosphere and the soil sphere and conducted case evaluations. Finally, the organizational framework was developed by adding representative scenarios and expanding evaluation methods for countermeasure options.

The purpose of sub-theme 3 is to develop methods to evaluate the health effects of exposure history and exposure dose fluctuation, which are assumed to be non-steady-state exposures to chemicals under disasters. Tris-(1,3-dichloro-2-propyl) phosphate (TDCIPP) or acenaphthene, were administered to male rats to investigate toxic effects. Neonatal TDCIPP exposure history significantly increased toxicity to adrenal weight, serum iron, and UIBC detected in mature exposure but not adolescence or acenaphthene exposure history. The health-effects assessment that considers exposure history is suggested to be useful, but it may be time- and substance-specific.

A passive sampling method that does not require external energy input is useful for measuring the personal exposure of VOCs and SVOCs under disaster environment. Passive sampling method requires the determination of sampling rate (SR) for each substance. Limited data are available on the SRs of passive sampler for VOCs and SVOCs. We developed an estimation method of the SRs based on the diffusion coefficient of each VOC and established a comprehensive database of SRs for VOCs including PRTR-designated chemicals. We also evaluated the relationships between the concentrations of SVOCs such as PAHs and XPAHs measured by active sampling and their collection amounts by passive sampling using silicone wristbands.