

PCBを含む残留性有機汚染物質(POPs) の循環・廃棄過程の管理方策に関する 統合的研究

研究代表者・テーマ3リーダー
テーマ1リーダー
テーマ2リーダー

京都大学
国立環境研究所
愛媛大学

酒井伸一
倉持秀敏
高橋 真

本研究課題の背景と目的

- ポリ塩化ビフェニル(PCB)をはじめとする残留性有機汚染物質(POPs)を含む廃棄物は、ストックホルム条約により指定され、国内法令等に基づき処理を実施。
- PCBについては、条約で処分の期限が定められており、これまでの処理方法・事業評価の方向性について総括が必要。処理実績等から、国内使用量・処理量及びPCB使用製品の紛失・漏洩事案を把握している一方、保管中の揮発等明らかでない部分について、処理による環境動態への影響等の研究が必要。
- PCB以外のPOPsについても、近年条約で追加されたデカブロモジフェニルエーテル(DBDE)や短鎖塩素化パラフィン(SCCPs)等は多様な用途・製品に使用され、廃棄物や循環資源として社会に存在し続け、長期的に社会的課題となる。
- 新規追加されたPOPsや将来のPOPs候補物質(新規POPs)について、基礎的な知見やそれらに基づく適切な処理技術の研究が、ライフサイクル全体での化学物質管理の政策的方向性の検討に必要。

本課題研究の成果目標

【全体目標】

- PCB・POPsに関する処理状況や環境動態の経年変化等を把握し、環境負荷に関する処理の効果や抑制の程度に関する知見を獲得する。
- PCB・POPsの性状や環境情報を獲得し、廃棄物及び社会滞留物の処理及び汚染低減に資する基盤情報を提供し、場面によっては提言を行う。
- 有機ハロゲン化合物に関する学術的な国際会議やストックホルム条約締約国会議等で積極的に成果を発信できる成果を得て国際貢献を行う。

【個別目標】

- 新規POPsに対する基礎的な物理化学特性情報の整備
- 環境中のPCB・POPs分析を用いた時系列情報を中心とした環境情報の獲得
- PCB・POPsに関する国内マテリアルフロー解析、環境動態モデル解析等による処理技術と制御方策に関する検討

本研究課題のテーマ構成

テーマ	総括サブテーマ (テーマリーダーが担当)	サブテーマ (公募)
1: 新規POP _s の物理化学特性把握に関わる基礎および応用研究	(1) 新規POP _s の物理化学特性による処理・資源化における挙動解明への応用	(2) 新規POP _s の物理化学特性の把握
2: PCB・POP _s に関する時系列評価と環境管理方策に資する分析化学的研究	(1) 環境・生態系におけるPCB・POP _s に関する時系列評価と環境管理方策の検討	(2) PCB・POP _s の環境負荷解析と生態リスク評価に関する研究 (3) 環境中に存在するPCB・POP _s 関連物質の一斉／網羅分析と時空間分布の解明
3: PCB・POP _s の処理の効果推定・環境管理に関するシステム研究	(1) PCBをはじめとするPOP _s のマテリアルフロー解析および環境動態モデル解析	(2) POP _s の影響低減・抑制のための処理技術に関する研究

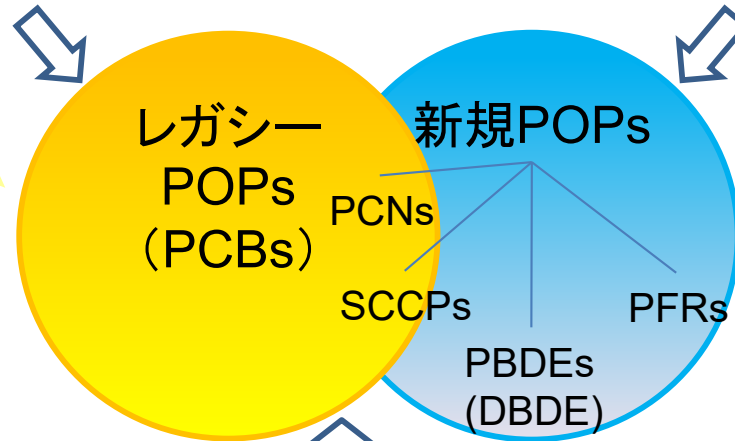
本研究課題の全体構成

- <テーマ2>
- ・時系列評価と環境管理方策検討
 - ・環境負荷解析と生態リスク評価
 - ・一斉／網羅分析と時空間分布解明

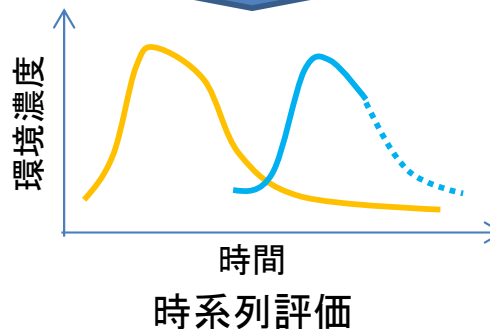
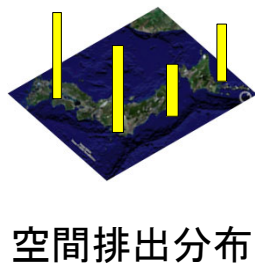
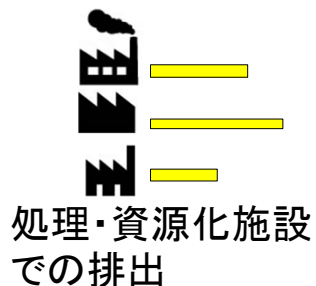
【本研究の主たる背景】
廃PCBの処理期限が迫るなか、その処理効果を環境情報から確認・検証すること、その経験を新規POPs政策に活かすことが政策的に求められている。

- <テーマ3>
- ・マテリアルフロー・環境モデル解析
 - ・処理技術に関する研究

- <テーマ1>
- ・処理・資源化での挙動解明
 - ・物理化学特性の把握



【本研究展開の主たる特徴】
物理化学特性が類似するPOPs、ライフサイクルにおいて同時発生・排出するPOPsがあり、共通して扱うことで、比較考察や統合的な政策検討に資する。



物性情報や処理・資源化での挙動を活用し、環境負荷等情報を踏まえ、空間・時間スケールでPCB・POPsの挙動を把握・予測し、制御管理方策の検討と戦略の策定

政策立案の基礎知見獲得と国際社会へ積極的な発信

S II-3-1 新規POPsの物理化学特性把握に関わる 基礎および応用研究(全体プロジェクト報告分)

(JPMEERF18S20310)

研究代表者(国研)国立環境研究所 / 倉持秀敏

研究実施期間:平成30年度~令和2年度

研究分担機関/研究分担者

サブテーマ①:新規POPsの物理化学物性による処理・資源
化における挙動解明への応用

(国研)国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター
倉持秀敏、松神秀徳

サブテーマ②:新規POPsの物理化学特性の把握

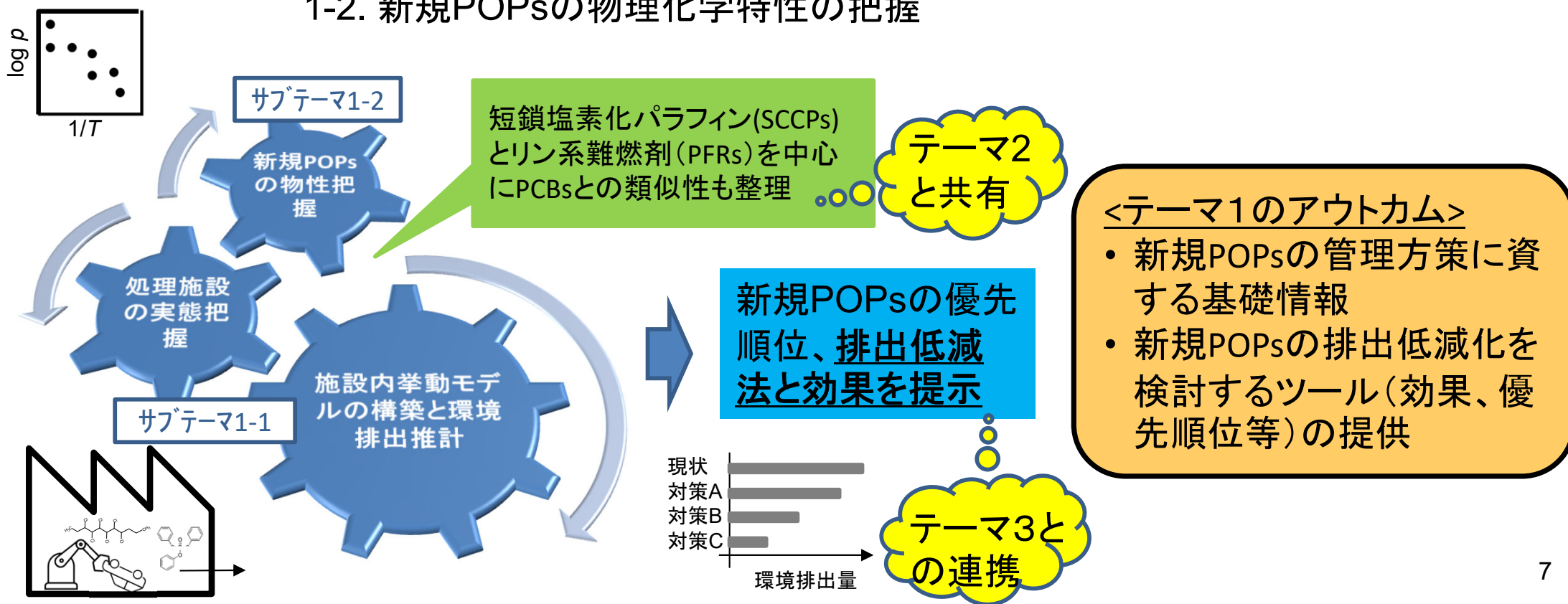
(国研)国立環境研究所 環境リスク・健康研究センター
遠藤智司

テーマ1:新規POPの物理化学特性把握に関わる基礎および応用研究

成果目標:「新規POPの物理化学特性を整備し、処理・資源化施設における挙動解明とモデル化によって、排出低減法とその効果を提示すること」

- 新規POPについて、実測と適切な推算法による信頼性の物理化学特性(物性値)を整備
- 新規POP含有廃棄物の処理・資源化施設におけるそれらの挙動と環境排出の解明
- 物性値を用いた施設内の挙動予測モデルを構築し、環境排出量を推計
- モデルによる処理・資源化における排出削減対策とその効果、管理すべき物質の優先順位を提示

サブテーマ構成: 1-1. 新規POPの物理化学物性による処理・資源化における挙動解明への応用
1-2. 新規POPの物理化学特性の把握



サブテーマ1-1-① 新規POPの物理化学物性による処理・資源化における挙動解明への応用

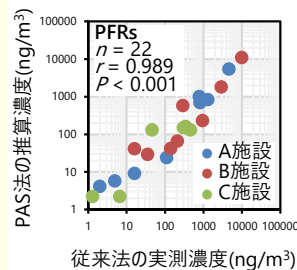
研究目標

- (1) 廃棄物中の新規POPの分析法の確立と廃棄物中の濃度実態把握
- (2) パッシブモニタリング等を用いて廃棄物の処理・資源化施設における新規POPの挙動と環境排出実態の解明

主な研究成果

(1) 分析法の確立

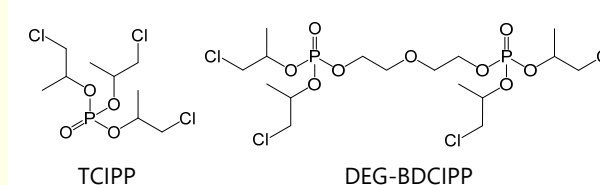
- PFRsとSCCPsの**分析法を開発**
- MCCPsを加え物質網羅性を向上
- 廃棄物含有実態、環境排出実態の把握に貢献
- 環境排出実態調査のための**パッシブ大気モニタリング法を開発**
- 多地点での長期的な大気モニタリングに貢献



従来法の実測濃度とPAS法の推算濃度との関係

(2) 廃棄物含有実態

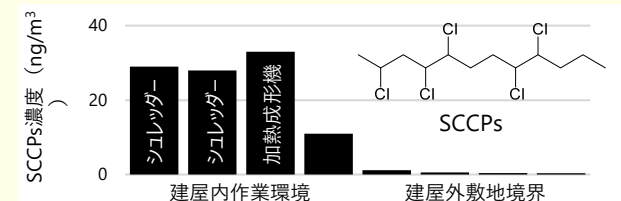
- RPF、ASR、ELV内装材を調査
- **PFRs、SCCPs、MCCPsの物質組成を特定**
- **PFRs、SCCPs、MCCPsの含有廃棄物と使用済み製品を特定**
- PFRs→軟質ポリウレタンフォーム、エンジニアリングプラスチック
- SCCPs/MCCPs→PVC、ゴム
- 環境排出が懸念される廃棄物処理・資源化の選定に貢献



ポリウレタンフォームから検出されたPFRs

(3) 環境排出実態

- 廃棄物処理・資源化施設で作業環境と敷地境界の大気試料、敷地境界の大気降下物試料を調査
- **発生源を特定→廃棄物の破碎処理とRPF製造の加熱成形処理**
- 廃棄物中PFRs、SCCPs、MCCPsの大気経由の環境排出を確認
- **廃棄物処理・資源化に伴うPFRs、SCCPs、MCCPsの大気排出実態に関する基礎データを把握**



作業環境と敷地境界での大気中調査事例

アウトプット

- 廃棄物含有実態と廃棄物処理・資源化に伴う環境排出実態に関する基礎データ
- 排出予測モデルに実測データを提供、**他のテーマ等へ分析技術の提供**

サブテーマ1-1-② 新規POP_sの物理化学物性による処理・資源化における挙動解明への応用

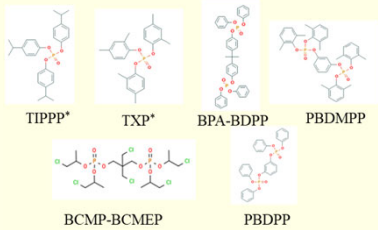
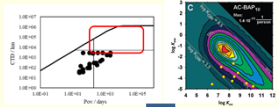
研究目標

- (1) POP_s 様物質、すなわち対策を優先すべき物質を選定
- (2) サブテーマ1-2の物性値を用いて施設内の挙動予測モデルを構築し、環境排出量を推計
- (3) モデルによる処理・資源化における排出削減対策とその効果、管理すべき物質の優先順位を提示

主な研究成果

(1) POP_s様物質の選定

OECDのツール等を用いて、残留性、長距離移動性、**生物蓄積性(追加)**を評価し、対策すべき物質を選定

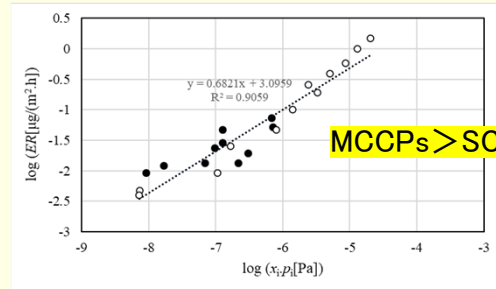


POP_s様の可能性があるPFRs

テーマ2にて成果が活用

(2) 放散速度の測定と解析

- 廃製品からの新規POP_sの放散速度を明らかにし、**物性等との相関関係を提示(サブテーマ1-2の連携)**

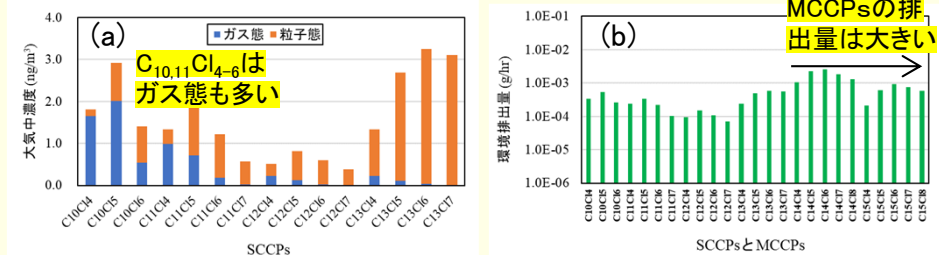


廃ケーブルからの放散速度(縦軸)と含有量と蒸気圧の積(横軸)の関係

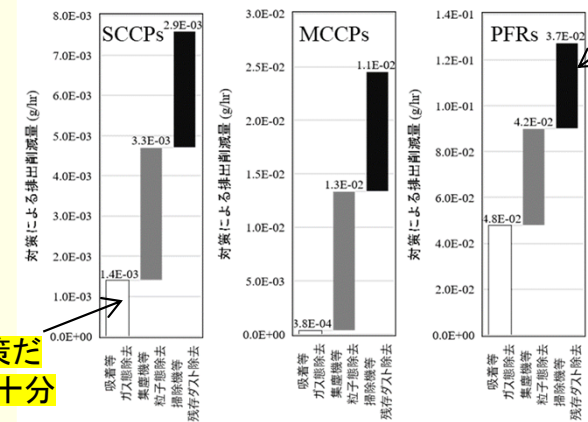
●: SCCPs, ○: MCCPs

廃製品からの放散速度の推計が可能

(3) 環境排出推計と排出削減対策の評価



ガス態と粒子態別大気中濃度(a)と環境排出量(b)



ダスト対策だけでは不十分

施設内に残存するダスト量も多いことが示唆

排出削減対策とその効果

アウトプット

- 施設に対して**環境排出量、排出削減対策と効果を提示**
- 放散速度を予測する関係式

- C_{10,11}Cl₄₋₆のSCCPsはガス態に対する対策が必要、MCCPsはダスト対策で十分な排出抑制効果**
- PFRsは主要成分のTCIPP等はガス態の対策が、POP_s様PFRsはダスト対策が主に必要となる**

サブテーマ1-2 新規POP_sの物理化学特性の把握

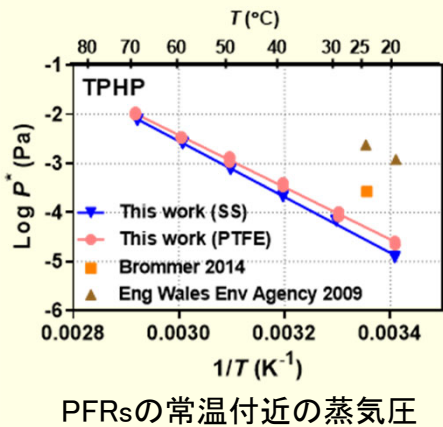
研究目標

- (1) 実測による新規POP_s(SCCP_sやPFR_s)の物理化学特性の解明
- (2) 測定値との比較による適切な推算法の選定とその適用範囲及び精度の評価
- (3) 新規POP_sの環境排出量削減策の検討・環境動態予測に必要な物理化学情報の提供

主な研究成果

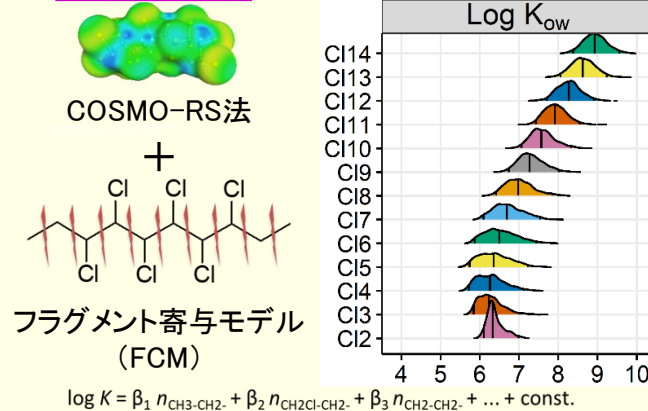
(1) 物性の測定

- 新規物性データを測定
- PFR_sの常温付近蒸気圧を初めて測定
- SCCP_sの同族異性体別物理化学特性の解明



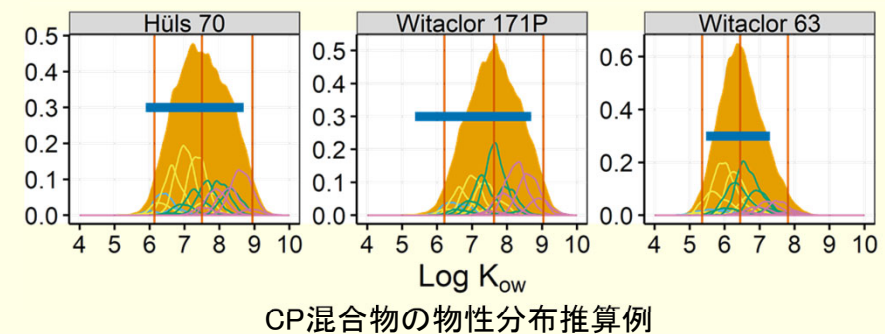
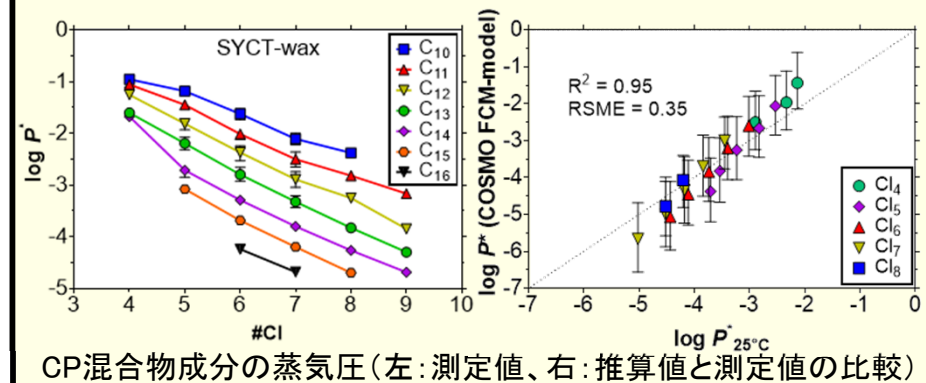
(2) 物性推算法の評価

- 推算法と測定値を比較
- 推算法の誤差を評価
- 従来法で困難であったSCCP物性の新たな推算法を確立
- 数十万種のCP同族異性体の物性推算を実現



(3) 実際の混合物製品における物性 →挙動・動態モデルへの物性提供

- CP混合物の蒸気圧を同族異性体別に測定
- モンテカルロ法による混合物組成の推定を組み合わせ、CP混合物の物性分布を推算



アウトプット

- RコードによるCP物性推算ツール、CP混合物の組成推定ツールをWeb公開
- サブテーマ1-1の排出予測モデル等に物性値を提供

環境政策等への貢献

- 国内における、今後のPOPs含有廃棄物の管理政策への貢献
 - ① 行政調査の計画の際に、注意すべき物質の選定、分析法も含めて本成果がベースとなる
 - ② POPs含有廃棄物の技術的留意事項を検討する際に、物性を含めて本調査及びモデル研究の成果は、安全・環境保全の観点で有用な知見
- POPs条約等への貢献
 - ① 含有廃棄物の濃度規制値(LPC)の議論では、本調査の濃度実態は重要
 - ② BAT/BEPガイダンスを作成する際にも本研究成果(発生源や削減対策とその効果)は有用な技術情報
- 他の環境政策へ期待される貢献
 - ① 物性情報や放散速度等は化審法における曝露リスク評価で必要
 - ② モデルは化管法における排出量推計に応用が可能
- 学術的貢献: 信頼性の高い物性情報や分析法は、質の高い研究では不可欠であり、関連する本成果は学術的ニーズは極めて高い
- 施設調査法へ提案: HVAC法を用いた調査は、設置の制約等に課題。提案のPAS法(+ガス/粒子分配係数(K_p)+モデル)は、簡易に長期間で多点調査が可能で、HVAC法の代替となるポテンシャル。

成果発表の発表状況(主な成果を記載)

誌上発表<査読あり:9報> (*: サブテーマ連携、**: テーマ2との連携)

1. H. Matsukami and N. Kajiwara: Chemosphere, 230, 164-172 (2019) 【IF = 5.8】
2. H. Matsukami, H. Takemori, T. Takasuga, H. Kuramochi, N. Kajiwara: Chemosphere 244, 125531 (2020)) 【IF = 5.8】
3. K. Nishimuta, D. Ueno, S. Takahashi, ... H. Matsukami, H. Kuramochi,... S. Sakai: Environmental Pollution 272, 115587 (2021) 【IF = 6.8】**
4. S. Endo and J. Hammer: Environ. Sci. Technol. 54 (23), 15162-15169 (2020) 【IF: 7.9】
5. J. Hammer, H. Matsukami and S. Endo: Sci. Rep. 11, 4426 (2021) 【IF: 4.0】*
6. S. Endo: Environ. Sci. Process. Impacts (2021) Online published, DOI: 10.1039/D1EM00123J 【IF: 3.2】
7. J. Hammer, H. Matsukami, H. Kuramochi and S. Endo: Chemosphere (2021) Online published, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.130909 【IF: 5.8】*

誌上発表<査読なし:2報>

1. 倉持秀敏、Z. Zhang: POPsの物理化学特性と環境分配特性、廃棄物資源循環学会、29(6), 443-441 (2018)
2. 松神秀徳、梶原夏子、倉持秀敏 環境と測定技術, 47(12), 6-11 (2020)

口頭発表<25件(ポスター発表を含む)>

1. S. Endo, J. Hammer: SETAC North America 41st Annual Meeting (SciCon2), online, (2020)“Prediction of partition coefficients for individual chlorinated paraffin congeners: Combination of COSMO-RS and fragment contribution methods..”
2. 【予定】松神秀徳, 倉持秀敏: 第29回環境化学討論会(2021)「廃棄物処理・再資源化に伴う塩素化パラフィンおよびリン系難燃剤の大気排出実態調査」(講演要旨提出済)

国民との科学・技術対話<全期間:5件>

1. 国立環境研究所公開シンポジウム「変わりゆく環境と私たちの健康」、2019年6月21日、東京、「廃棄物に含まれる残留性有機汚染物質を測る—新規規制対象の短鎖塩素化パラフィン—」をポスター発表、来場者数:625名
2. 国立環境研究所の公開シンポジウム(2019年7月20日、参加者約500名)にてポスター発表

SII-3-2

PCB・POPsに関する時系列評価と環境管理方策に 資する分析化学的研究 (JPMEERF18S20320)

研究代表機関／研究代表者：愛媛大学／高橋 真
研究実施期間：平成30年度～令和2年度

【研究分担機関／分担者】

サブテーマ① 環境・生態系におけるPCB・POPsに関する時系列評価と環境管理方策の検討
分担機関／担当者：愛媛大学／高橋 真(リーダー)・国末達也

サブテーマ② PCB・POPsの環境負荷解析と生態リスク評価に関する研究
分担機関／担当者：新潟大学／半藤逸樹(リーダー)・奈良間千之

サブテーマ③ 環境中に存在するPCB・POPs関連物質の一斉／網羅分析と時空間分布の解明
分担機関／担当者：佐賀大学／上野大介(リーダー)

テーマ2: PCB・POPsに関する時系列評価と環境管理方策に資する分析化学的研究

成果目標:「PCBおよびPOPsの時空間分布および環境負荷の解析と生態リスク評価に基づき、包括的な環境管理方策の提言に資する基礎情報を提供すること」

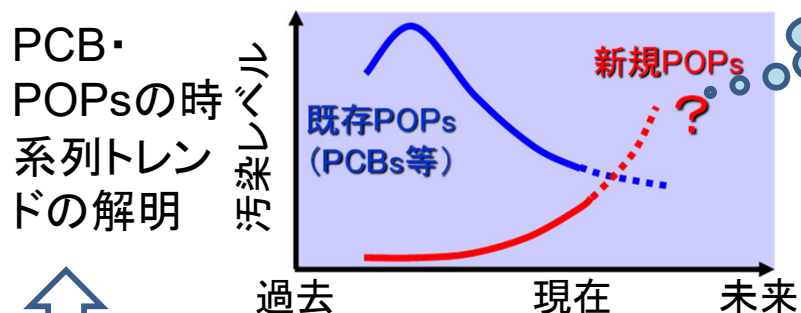
- PCBおよびPOPsによる環境・生態系汚染の過去復元と時系列変化のトレンドの把握
- PCB・POPsの環境負荷解析と生態毒性情報の統合に基づく野生高等動物等への生態リスクの評価
- 多様なPCB・POPs関連物質の一斉／網羅分析による「要検討物質」の基礎情報の補完
- 各テーマの成果に基づくPCB処理の効果検証と生態リスク評価に基づくPCB・POPs管理方策の提言に資する基礎情報の提供

サブテーマ構成:

2-1. 環境・生態系におけるPCB・POPsの時系列評価と環境管理方策の検討

2-2. PCB・POPsの環境負荷解析と生態リスク評価に関する研究

2-3. 環境中に存在するPCB・POPs関連物質の一斉／網羅分析と時空間分布の解明



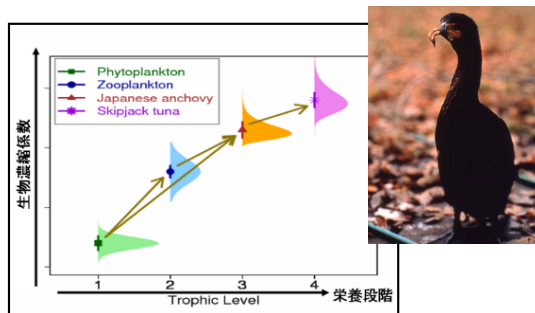
テーマ1
との共有

テーマ3
との連携

環境負荷解析・生態毒性情報の統合による生態リスク評価



PCB・POPs関連物質の一斉／網羅分析と要検討物質の基礎情報の補完



<テーマ2のアウトカム>

- 各種環境・生物相における時系列トレンドの評価に基づくPCB・POPsの処理効果の検証
- PCB・POPsの時空間的な消長を考慮した生態リスク評価と環境管理方策の提言に資する基礎情報の提供

サブテーマ2-1 環境・生態系におけるPCB・POPsの時系列評価と環境管理方策の検討

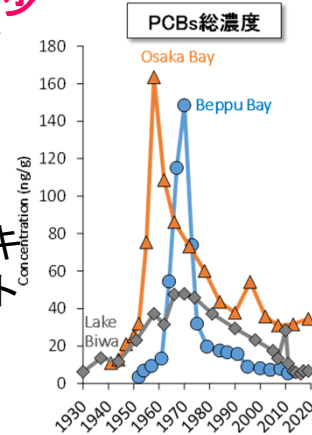
研究目標

- (1) 別府湾、大阪湾、琵琶湖の堆積物柱状試料(底質コア試料)を用いたPCB・POPsの環境負荷に関する時系列変化の解析・評価
- (2) 野生高等動物の長期保管試料を用いた日本の内陸・沿岸・外洋の生態系におけるPCB・POPs汚染の時空間分布の解明
- (3) 研究全体の総括、PCB・POPsに関する包括的な環境管理方策についての検討と基礎情報の提示

主な研究成果

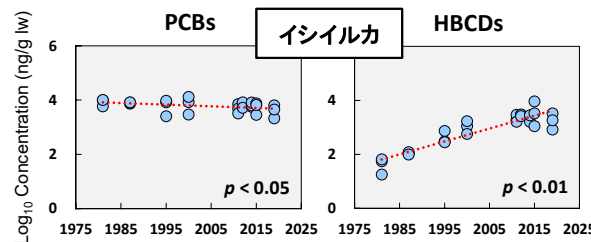
(1) 底質コア時系列トレンド解析

- ・PCB全異性体、PBDEs、NBFRsの簡易・迅速精製法の開発
- ・別府湾・大阪湾・琵琶湖におけるPCBsの時系列トレンドを解明⇒1970年代後半以降の環境負荷減少
- ・PCB異性体データに基づく生源解析
- ⇒CB-11等一部異性体の非意図的発生源の寄与
- ・PBDEs、DBDPE、ダイオキシン類縁化合物の時系列トレンドの解明・TEQ評価
- ・他サブテーマへ試料・データ提供



(2) 生態系時空間分布解明

- ・陸上鳥類(トビ)および沿岸性・外洋性鯨類におけるPCBs・POPsの蓄積と時系列変化を解明
- ⇒生物相・野生高等動物におけるPCB蓄積・曝露の長期化
- ・外洋生態系へのHBCDsの輸送・蓄積レベルの上昇
- ・瀬戸内海スナメリにおける生態リスク評価、魚介類におけるPFRs濃度上昇



(3) 包括的環境管理方策検討

- ・沿岸底質コア試料におけるPCBs時系列トレンドは、サブテーマ3-1のPCBs排出推計の結果と一致
- ⇒国内PCB規制・対策の効果検証
- ・非意図的発生PCBs(CB-11等)に関するレビュー研究(STOTEN出版)
- ・アジア地域における調査結果比較
- ⇒東アジア・東シナ海等におけるPCB環境負荷の再上昇、日本近海へのPCB越境汚染の可能性(サブテーマ2-2の数値モデル予測結果と一致)
- ⇒継続的・広域的なモニタリングによる長距離輸送や発生源の解析・評価の必要性

アウトプット

- ・国内のPCB規制・廃棄物処理対策等の効果検証に資する基礎情報
- ・発生源対策・環境負荷予測など包括的なPCB・POPs管理方策への提言

サブテーマ2-2 PCB・POPsの環境負荷解析と生態リスク評価に関する研究

研究目標

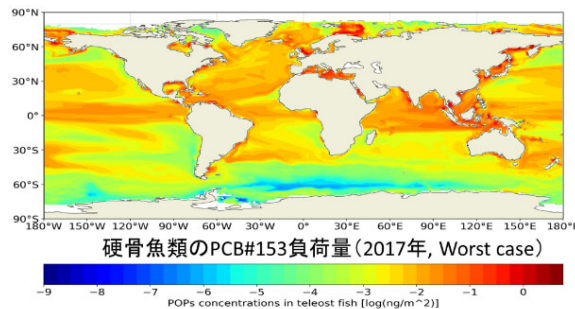
- (1) 全球多媒体モデル「FATE」による曝露量解析とQSPR-QSARモデリングに基づく生態系高次消費者に対する各種POPsの地球規模生態リスクマップの作成
- (2) ChemTHEATREを通じた情報公開と他サブテーマと協働した環境モニタリング・モデリング研究の推進
- (3) 新規物質の導入(化学汚染)のPlanetary Boundariesの定量化や汎用的生態リスクマップの提案など、政策提言に向けた基礎資料の提示

主な研究成果

(1) 全球多媒体モデルFATEの改良とPCB動態予測、不確実性の検証

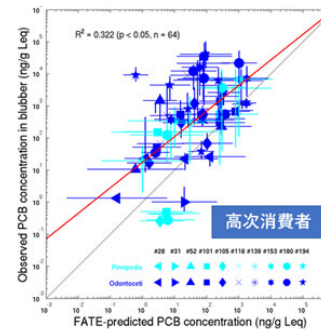
- ・最新のPCB排出インベントリーに基づく高解像度のPCBs動態解析
- ・ベイジアン・エミュレーターを用いた不確実性解析
- ・東シナ海・黒潮域等におけるe-waste排出の影響=PCBフラックス上昇を指摘
- ・深海におけるPCBsフラックスの長期予測
- ・日本近傍の予測結果をサブテーマ3-1と共有

アウトプット



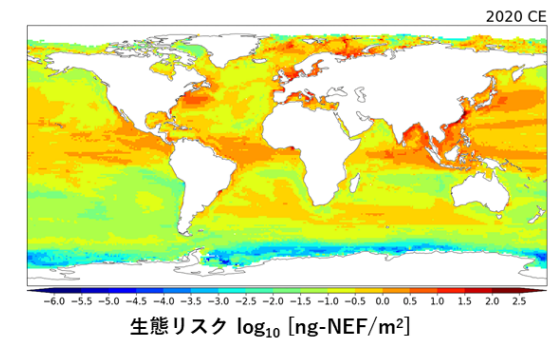
(2) ChemTHEATREの利活用

- ・PCBs・POPs観測データの収集、データベース拡充、モデル予測との比較検証
- ・Webインターフェースの改良、拡張機能⇒FATE予測結果の可視化
- ・サイエンスコミュニケーションイベントの実施(オンラインミーティング事前登録者135名・視聴回数2000回以上)



(3) 全球生態リスクマップ作製

- ・FATEによる曝露量予測と新規QSARモデリングによるPCB異性体毒性等価係数導出
- ⇒ 全球生態リスクマップの提示
- ・Planetary Boundaries(地球の限界)の「新規物質の導入(化学汚染)」に係る制御変数の定量化、生態リスク評価の統合へ道筋



- ・海洋生態系保全の優先対象海域・生物種選定のための基礎情報
- ・オープンサイエンス促進に資する新たなプラットフォームの構築

サブテーマ2-3 環境中に存在するPCB・POPs関連物質の一斉／網羅分析と時空間分布の解明

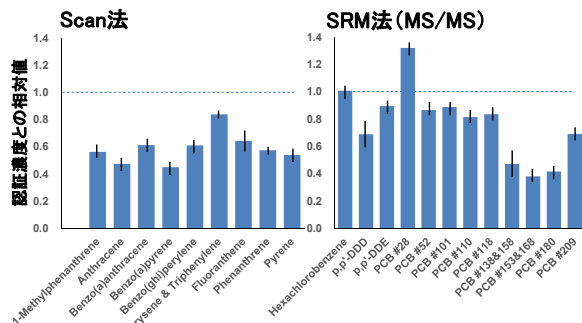
研究目標

- (1) 新規一斉／網羅分析法による底質コア試料の環境化学物質約1500種のスクリーニング分析の実施
- (2) 検出された物質群の時系列変化の解析と経時的濃度上昇を示す「要検討物質」の特定
- (3) 結果の総括並びに化審法・POPs条約等において今後優先的に評価・対策すべき候補物質の選定に資する基礎情報の提示

主な研究成果

(1) 一斉／網羅分析法の改良・検証

- ・AIQSターゲットスクリーニング法(AIQS-TSA)の**対象物質データベースの拡充**
- ・認証標準物質・実環境試料の測定による分析精度・確度の検証(サブテーマ2-1との試料・データ比較)

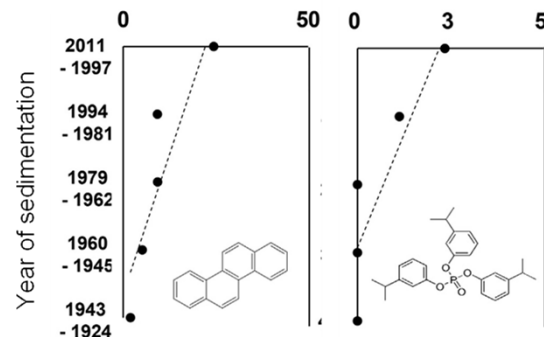


約2000種の微量環境汚染物質のスクリーニング法として十分な分析精度・確度を有することを確認

(2) 時系列トレンドの解析と「要検討物質」の特定

- ・AIQS-TSAにより底質コア試料中約80種の微量環境汚染物質を検出
- ・AIQSデータベースに存在しない物質の時系列トレンドをマスクロマトグラム・プロファイリング法により解析

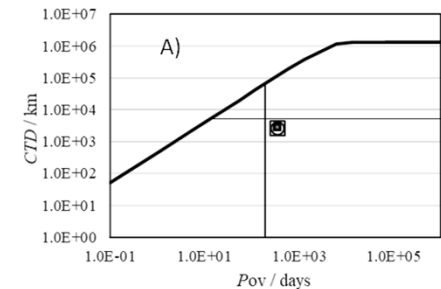
経時的な濃度上昇を示す4物質(TIPPP等)を「要検討物質」として抽出



(3) 物質同定検証、POPs特性評価、関連情報収集

- ・底質コア試料のPCBs・POPsの時系列トレンドはサブテーマ2-1と一致

・LC-MS/MSによるTIPPPの同定検証とPOPs特性の評価(サブテーマ1-1との協働)



- ・TIPPP等に関するPBT特性、製品需要、各国規制情報等収集

TIPPP関連物質がTSCA規制対象
今後優先的に評価・対策を検討すべき候補物質

アウトプット

- ・一斉／網羅分析法の有効性検証、要検討物質の特定および新規環境情報の提示

環境政策等への貢献

➤ 国内のPCB規制・廃棄物処理対策等の効果検証への貢献

PCBsの環境負荷・生体蓄積の変遷に関する総合的な理解と状況把握に有用な知見
PCB規制・諸対策の効果や課題を検証するための根拠データの提示
DL-PCBs発生源・TEQ寄与の評価は、ダイオキシン類対策等の環境政策の評価に係る基礎資料としても有用

➤ POPs発生源対策など今後の環境管理方策の検討における貢献

非意図的生成PCBsの排出実態調査や排出抑制対策を検討する際の根拠資料
今後の環境行政における新規調査・リスク評価対象としての“要検討物質”の選定、
難燃剤等を含有する廃棄物の処理対策などにおいて有用な知見

➤ UNEP等国际的な環境保全プログラムやPOPs条約等への貢献

地球規模での化学汚染の拡大防止に向けた国際的なPOPs監視ネットワークの構築
や長期的モニタリング、生態系保全の重要性を支持する根拠データの提供

➤ その他学術的・技術的・社会的な貢献

Planetary Boundaries「新規物質の導入(化学汚染)」の定量化へのアプローチ
PCB・POPs関連物質のモニタリングやスクリーニングに有用な新規分析技術の確立
・検証・活用法の提示
微量化学物質管理や生態系保全に係るオープンサイエンスの推進、ステークホルダー
のリテラシー向上

成果発表の発表状況(主な成果を記載)

誌上発表(査読付き): **16件**

1. Anh QH, Aono D, Watanabe I, Tsubeki NK, Kuwae M, Takahashi S (2021) Science of the Total Environment, in press. (IF: 6.551)
2. Anh, QH, Aono D, Kawashima A, Hamada N, ..., Takahashi S (2021) Chemosphere, 281, 130867 (IF: 5.778)
3. Kunisue T, Goto A, Sunouchi T, Egashira K, Ochiai M, Isobe T, Tajima Y, Yamada TK, Tanabe S (2021) Chemosphere, 269, 129401 (IF: 5.778)
4. Anh QH, Aono D, Watanabe I, Kuwae M, Kunisue K, Takahashi S (2021) Chemosphere, 266, 129180. (IF: 5.778)
5. Anh HQ, Watanabe I, Minh TB, Takahashi S (2021) Science of the Total Environment, 755, 142504. (IF: 6.551)
6. Takahashi S, Anh HQ, Watanabe I, Aono D, Kuwae M., Kunisue T (2020) Science of the Total Environment, 743, 140767. (IF: 6.551)
7. Nishimuta K, Ueno D, Takahashi S, ..., Matsukami H, Kuramochi H, ..., Sakai SI (2021) Journal of Pollution Effects & Control, Journal of Pollution Effects & Control, 9(4), 283. (IF: 0.48)
8. Nishimuta K, Ueno D, Takahashi S, ..., Matsukami H, Kuramochi H, ..., Sakai SI (2021) Environment Pollution, 272, 115587. (IF: 6.792)
9. Matsuo Y, Miyawaki T, Kadokami K, Nakai K, ..., Ueno D (2019) Chemosphere, 224, 39-47. (IF: 5.778)
10. Koyano S, Ueno D, Yamamoto T, Kajiwara N (2019) Waste Management, 85, 445-451. (IF: 5.448)

その他誌上発表(査読なし): **1件**

1. 国末達也, 高橋 真 (2018). 廃棄物資源循環学会誌, 29(6), 423-432.

口頭発表(学会等): **19件**

1. 国末達也: 化学物質の内分泌かく乱作用に関する公開セミナー, 環境省 (2020) (招待講演)「座礁・漂着鯨類における残留性有機汚染物質の蓄積レベルと経年変化の解析」
2. Takahashi S, Tanabe S: 3rd International Caparica Conference on Pollutant Toxic Ions and Molecules, Caparica, Portugal (2019) (招待講演)“Persistent Organic Pollutants in the Asia-Pacific Region: Its Spatio-temporal Trends and Emerging Issues”
3. Handoh IC, Sakai R, Kawai T, Isobe T, Ohno N, Nakayama K: 9th International Conference on Marine Pollution and Ecotoxicology, Hong Kong SAR, China, (2019) Quantifying the relative importance of chemical versus noise pollution to marine mammal stranding/mortality events.
4. Nakayama K, Lin BL, Isobe T, Uno S, Handoh IC, Ohno N, Kunisue T: SETAC North America 40th Annual Meeting, Toronto, Canada, (2019). Utilization of a web-based tool ChemTHEATRE in exposure and risk assessment for chemicals. ...他

「国民との科学・技術対話」の実施: **9件**

1. 公開フォーラム「データが導くPOPs(ポップス)な科学! ? ~予測と予報~」主催、2021年3月、Web開催、参加者(事前登録者)134人(講演: 半藤逸樹)
2. 愛媛大学高大連携企画・日本環境化学会中国四国地区部会共催公開セミナー「残留性有機汚染物質とダイオキシン問題の過去・現在・未来」主催、2020年1月、愛媛大学農学部三浦記念館、参加者約30人(講演: 高橋 真, 国末達也) ...他

マスコミ等への公表・報道等: **4件** 朝日新聞・全国版(半藤逸樹・新潟大の活動)2020年6月18日・25頁 ...他

本研究に関連する受賞: **1件**

1. 高橋 真: 第28回環境化学学術賞「残留性有機汚染物質(POPs)研究の環境化学分野への国際的貢献」一般社団法人 日本環境化学会(2019年)

令和3年度環境研究総合推進費事後評価対象SII-
3 戦略プロジェクト全体発表分(テーマ3)

テーマ3: PCB・POPsの処理の効果推定・ 環境管理に関するシステム研究

テーマリーダー: 酒井伸一 (京都大学)

研究実施期間: 平成30年度～令和2年度

サブテーマ3-1: PCBをはじめとするPOPsのマテリアルフロー解
析および環境動態モデル解析
京都大学 酒井伸一、平井康宏、矢野順也

サブテーマ3-2: POPsの影響低減・抑制のための処理技術に
関する研究 京都大学 高岡昌輝、藤森 崇



テーマ3: PCB・POPsの処理の効果推定・環境管理に関するシステム研究

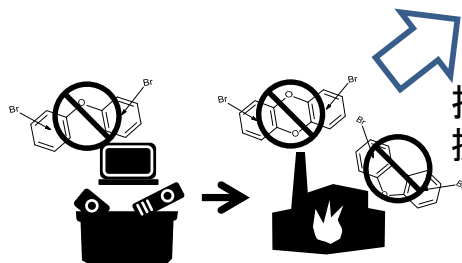
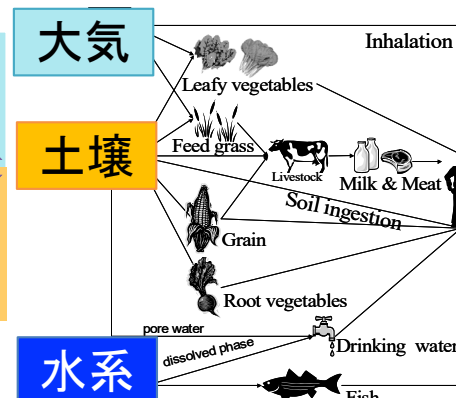
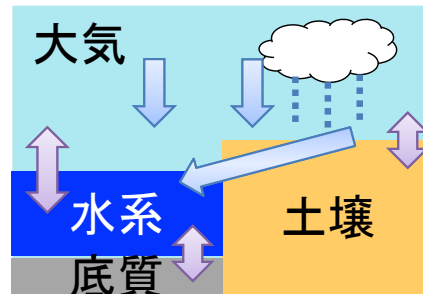
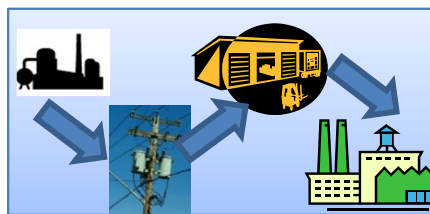
成果目標:「PCB廃棄物処理事業の効果进行评估し、今後のPOPs管理に向けた知見を得ること」

- PCB・POPsの国内マテリアルフロー解析とPCB・POPsの環境動態モデル解析によるPCB処理の効果推定
- PCB・POPsの処理・管理シナリオと効果予測
- POPs汚染の低減・抑制のための処理技術と環境管理方策に関する検討
- 各テーマの成果を活用した政策提言及び有機ハロゲン化合物国際会議との協調企画等による国際発信

サブテーマ構成:

- 3-1. PCBをはじめとするPOPsのマテリアルフロー解析及び環境動態モデル解析
- 3-2. POPsの影響低減・抑制のための処理技術に関する研究

マテリアルフロー解析・環境動態曝露モデルの展開



処理技術に関する研究

＜テーマ3のアウトカム＞

- PCB・POPsの環境負荷に関する処理効果や抑制の程度に関する知見
- POPsの資源循環や汚染低減に資する政策立案の基礎情報

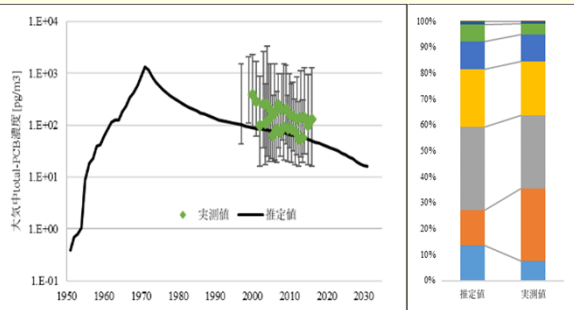
サブテーマ3-1 PCBをはじめとするPOPsのマテリアルフロー解析および環境動態モデル解析

研究目標: PCBおよび新規POPsのマテリアルフロー・環境排出量を推定し、環境動態・曝露モデルにより、PCB処理などの管理シナリオの効果を推定すること

主な研究成果

(1) ライフサイクルフローモデルの構築

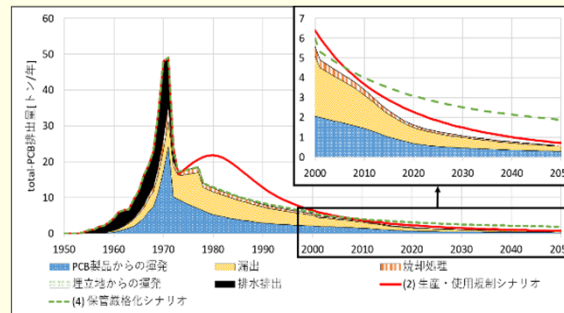
- 製品使用・保管中の揮発、不適正処分、分解処理を考慮したフローモデルを構築
- 環境動態モデルと統合、環境中PCB濃度を動的推定
- 近年の**大気中PCB濃度推定値は実測値の範囲内**、同族体組成も実測値に近い傾向



PCB大気濃度の推定結果と実測値の比較

(2) PCB排出削減効果推定

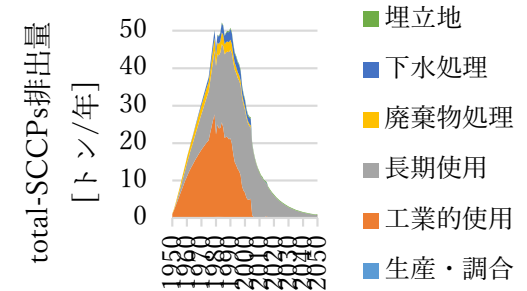
- PCB対策のシナリオ解析から、PCB含有製品・廃棄物の保管は、排出量を一時的に抑える一方、PCBストック・将来の排出リスクの維持
- PCB分解処理は、**PCBストックを減少、即座に排出量を減少するとともに将来の排出リスクも減少**



PCB対策シナリオによるPCB排出量変化

(3) SCCPsフローモデル作成と排出量推定

- 1950年から2050年までのSCCPsのマテリアルフローを推定
- ピーク時の主要発生源は、金属加工油の工業的使用時の水系排出、PVC含有フィルムの長期使用時の揮発
- **電線被覆材用途の長期使用時の排出は将来にわたって継続**



1950～2050年のSCCPsの排出量推定結果

アウトプット

- PCBのフローモデルによるシナリオ解析、PCB分解処理は、PCBストックを減少、即座に排出量を減少するとともに将来の排出リスクも減少する機能を有する
- ライフサイクルフローモデルは、SCCPsなどの新規POPs挙動検討にも有効

サブテーマ3-2 POPsの影響低減・抑制のための処理技術に関する研究

研究目標: 新規POPの処理技術に関する知見を集積するとともに、非意図的生成物を含めた総合的な処理・生成抑制技術を評価すること

主な研究成果

- (1) 新規POPであるDecaBDEおよびSCCPsの廃絶に向け、熱処理および化学処理の適用可能性を確認し、99.999%を上回る分解率の達成条件を見出した(850°C以上, 滞留時間2秒以上)
- (2) 非意図的生成への影響因子を定性・定量分析を通じて検討した。熱処理でBDE-209およびSCCPs(MCCPs)の分解率の達成と同時に非意図的生成を低減させるには特に高温が望ましい
- (3) 化学処理(金属Na分散体法)は液状のSCCPsに対する分解方法として有効と考えられた

新規POP	処理法	温度	滞留時間	酸素濃度 (窒素バランス)	装置条件	分解率	非意図的生成物/ 副生成物	分解率の 達成条件	非意図的生成/ 副生成への影響
DecaBDE 	熱処理	850, 900, 950, 1000 °C	2, 4, 8秒	0, 10, 21%	制御炉	99.383 - >99.9999%	定量: HBB, NonaBDE (BDE-206, 207), OctaBDE (BDE-196, 197) 定性: OctaBDF	850°C以上, 2秒 以上	減少: 高温, 高酸素 濃度(通常の大気), 長い滞留時間 増加: 低酸素濃度
SCCPs, (MCCPs)	熱処理	250, 850, 950°C	2, 19秒	0, 10, 21%	通常炉, 制御炉	>99.999%	定量: PCDDs, PCDFs, DL-PCBs, CBzs, PAHs, Cl-PAHs	850°C以上, 2秒 以上	減少: 高温, 低酸素* 増加: 銅との焼却

*低酸素の場合, PAHsおよびCl-PAHsは増大傾向

新規POP	処理法	温度	反応時間	初期添加量	装置条件	分解率	非意図的生成物	分解率の 達成条件	非意図的生成への 影響
 SCCPs	化学処理 (金属Na分 散体法)	30 - 90°C	10 - 180分	1, 5, 10, 20, 30%	2, 20L 装置	>99.9985 - >99.9995%	定量: PCDDs, PCDFs, DL-PCBs, HCB, PeCB	90°C, 10分以上, 10 - 30%添加	なし

環境政策等への貢献

<行政等が活用することが見込まれる成果>

- 国内でこれまでに行われてきたPCB対策の排出量削減効果を定量的に推定し、個別のPCB対策ごとの効果や追加的なPCB対策を想定した排出量削減効果を推定した。その結果、分解処理を行うことでPCBストックを減少し、ただちに排出量を減少するとともに将来の排出リスクも減少する効果が定量的に示唆され、今後のPCB対策の議論への活用が見込まれる。
- PCB分解処理が完了した後に問題となり得る発生源として、開放系用途などの含有率は小さいが広く存在するPCB使用製品を適切に分解処理しなかった場合、製品寿命によってゆるやかにストックは減少するが、将来にわたって排出が残る可能性が示唆された。その程度に大きさに関する議論を含め、現在、本格化しているPCB分解処理政策の検討が求められる。
- SCCPsおよびDecaBDEについては熱処理によって850°C以上、滞留時間2秒以上で、バーゼル条約の技術ガイドラインで推奨される分解率の目標値(99.999%)を達成し得ることを実験室規模で確認できた。また、ワックス状のSCCPsは化学処理(金属ナトリウム分散体法)により、同様の分解率の目標値を達成し得る。実規模での実証や実装を受けた政策展開が期待される。

研究成果の発表状況

誌上発表（査読付き論文）：国際誌7件、国内誌1件

- 1) N.T. Dien, **Y. Hirai**, J. Koshiba, **S. Sakai** : Chemosphere, 277, 130356 (2021) Factors affecting multiple persistent organic pollutant concentrations in the air above Japan: A panel data analysis. (IF=5.778)
- 2) 小柴絢一郎、**平井康宏**、**酒井伸一**：廃棄物資源循環学会論文誌、32, pp.20-30 (2021) ポリ塩化ビフェニルの生産・使用規制および分解処理の効果検証
- 3) H. Liu, **J. Yano**, N. Kajiwara, **S. Sakai** : Journal of Cleaner Production, 232, pp.910-924 (2019) Dynamic stock, flow, and emissions of brominated flame retardants for vehicles in Japan. (IF=7.246)
- 4) J. Koshiba, **Y. Hirai**, **S. Sakai** : Chemosphere, 232, pp.387-395 (2019) Historical and future polychlorinated biphenyl emission trends in Japan. (IF: 5.778)
- 5) **T. Fujimori**, M. Ogura, **M. Takaoka** : Organohalogen Compounds 81, pp.258-261 (2019) Laboratory-Scale Examination of the Dechlorination of Short-Chain Chlorinated Paraffins Using the Metal Sodium Dispersion Method.
- 6) A. Eguchi, **T. Fujimori**, M. Nishida, **M. Takaoka** : Organohalogen Compounds 81, pp.371-374 (2019) Simplified Analytical Methods for Commercial Mixtures of Short-Chain Chlorinated Paraffins.
- 7) T. Nishida, **T. Fujimori**, A. Eguchi, **M. Takaoka** : Organohalogen Compounds 81, pp.383-386 (2019) Characteristics of High-Temperature-Induced Destruction of Short-Chained Chlorinated Paraffins in Wax.
- 8) Y. Takami, **T. Fujimori**, K. Shiota, K. Mukai, T. Nishida, **M. Takaoka** : Organohalogen Compounds 81, pp.399-402 (2019) Establishment of an Analytical Method for Detecting Decabromodiphenyl Ether and Evaluation of its Thermal Decomposition Products.

誌上発表（査読なし）：国内誌5件

- 1) 平井康宏、酒井伸一：廃棄物資源循環学会誌、29, 6, 442-450 (2018), ポリ臭素化ジフェニルエーテルのマテリアルフロー解析と環境動態
- 2) 高岡昌輝、藤森崇：廃棄物資源循環学会誌、29(6), 461-469 (2018) POPs廃棄物の適正処理-技術と展望- 他

口頭発表（学会等）：国際12件、国内17件

3RINCS 2021 - 7th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, Web (2021)

第31回廃棄物資源循環学会研究発表会、北海道（Web開催）（2020）

Dioxin 2019 - 39th International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants, Kyoto, Japan (2019) 他

「国民との科学・技術対話」の実施

廃棄物資源循環学会関西支部・日本環境化学会関西地区部会連携セミナー（主催：(一社)廃棄物資源循環学会関西支部・日本環境化学会関西地区部会、2019年1月28日、大阪工業大学 梅田キャンパス OIT梅田タワー 3F 常翔ホール、観客約300名）

Dioxin 2019 - 39th International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants, Kyoto, Japan (2019) 参加者約800名

国際発信について



DIOXIN
2019 KYOTO

*39th International Symposium on
Halogenated Persistent Organic Pollutants*

Chair : Shinichi Sakai

Director, Professor, Environment Preservation Research Center
Kyoto University

August 25 ▶ 30, 2019

Kyoto International Conference Center

Dioxin Symposia in Japan

- International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants

🌸 Fukuoka in 1986 (6th Symposium)

Chaired by Prof. Masuda

🌸 Kyoto in 1994 (14th Symposium)

Chaired by Prof. Hiraoka

🌸 Tokyo in 2007 (27th Symposium)

Chaired by Prof. Morita

🌸 Kyoto in 2019 (39th Symposium)