

研究課題名・研究番号 = 残留性化学物質の物質循環モデルの構築とリサイクル・廃棄物政策評価への応用 (K 1 7 3 7)

国庫補助金精算所要額 (円) = 32,500,000

研究期間 (西暦) = 2003-2005

研究年度 (西暦) = 2003-2005

代表研究者名 = 酒井伸一 (京都大学 環境保全センター)

共同研究者名 = 高月 紘 (石川県立大学)、平井康宏 (国立環境研究所)
田辺信介、高橋 真 (愛媛大学)、竹内憲司 (神戸大学)

研究目的 = 各種リサイクル法の施行後 5 年目での見直しが近づく中で、次の一手として最終処分量削減のみならず重金属類や臭素系難燃剤などの残留性化学物質の制御を視野に入れた政策展開が望まれる。化学物質の影響としてはヒトへの曝露のみならず、生態系への影響も重視されつつある。本研究は、社会および自然システム循環における残留性化学物質の挙動を記述するモデル群を開発し、家電リサイクル法などの政策評価に応用することを目的とする。モデル開発はフィールド調査と連携し、1) 自動車シュレッダーダスト (ASR) や廃家電、廃木材リサイクル施設でのプロセス物質収支の調査、2) 中古輸出された家電製品の終着場であるアジア途上国ダンピングサイト周辺環境の調査と野生高等動物を対象とした残留性化学物質汚染の調査、も目的とする。また、将来の経済モデルとの統合を視野に入れ、デポジット制などの環境経済学的評価にも取り組む。

研究方法 = 上記の目的を達成するため、以下の内容の研究に取り組んだ。

自然システム循環における残留性化学物質の動態把握として、カツオ、アジア-太平洋海域の海棲哺乳類、様々な鳥類を指標生物としたポリ臭素化ジフェニルエーテル (PBDEs) の地球汚染モニタリングを行った。過去復元を目的に、1972 ~ 1998 年に北太平洋で捕獲したキタオットセイなどの時系列分析も行った。また、インドやベトナム、カンボジアなどのアジア途上国における都市ゴミ集積場や電子廃棄物集積場に注目し、PBDEs および重金属類による土壤汚染について調査研究を行った。

残留性化学物質の物質循環モデルの開発として、残留性化学物質の社会システムにおける循環をマテリアルフローモデルと個別プロセスの物質収支モデルによって、自然システムでの循環を、環境動態モデルによって記述した。日本での PBDEs の排出インベントリを推定し、この推定結果と発生源近傍の周辺環境濃度測定値との比較により、その妥当性を検討した。排出インベントリでは、10 臭素化物 (DBDE)、1 ~ 10 臭素化物の同族体別の推定を行った。

リサイクルに係るプロセスの物質収支に関するフィールド研究として、家庭製品の循環廃棄過程における残留性化学物質の挙動・リスク解析に向け、自治体 (京都市) を対象に、自治体大型ごみへの家電製品排出実態調査、家庭系有害・危険廃棄物及び家電製品に関する市民アン

ケート調査を実施した。主要な家庭系有害廃棄物の一つである廃蛍光管を取り上げ、蛍光管リサイクルの現状と課題について整理すると同時に、想定されるリサイクルシステムについて、比較・検討を行った。複雑組成廃棄物である自動車破碎残渣（ASR）を対象に、重金属やダイオキシン類縁化合物、有機スズ化合物等の微量有害物質の測定を目的とした試料調整法を開発し、ASR のサンプリングから測定用試料の調整、機器測定までの過程で生じる試験値のばらつきを検証した。

リサイクル制度の環境経済学的評価として、自動車の解体・破碎作業によって得られる利潤を表す理論モデルを作成した。また、自動車部品の1つである鉛電池について検討し、経済的インセンティブを重視した各種政策手段（税、デポジット・リファンド、補助金）を用いた場合の費用効率性について比較検討した。

結果と考察 =

1) 自然システム循環における有機臭素化合物の動態研究

世界各地の外洋域からカツオを採取し PBDEs の化学分析に供した。分析したほぼ全てのカツオから PBDEs が検出され、その汚染は地球規模で広がっていることが明らかとなった。興味深いことに、東シナ海周辺海域で採取したカツオから比較的高い残留濃度の PBDEs が検出され、本海域周辺の途上国に PBDEs 汚染源の存在することが示唆された。また、アジア-太平洋海域の海棲哺乳類を対象とした調査でも、香港沿岸に座礁したスナメリから、最高濃度の PBDEs が検出された。

また、1972～1998 年に北太平洋で捕獲したキタオットセイの冷凍保存試料を用いて汚染の経年の推移を調査した結果、既存 POPs の濃度は 1980 年代初頭で最高値を示し、その後明瞭に低減したのに対し、PBDEs の濃度には 1990 年代後半まで上昇傾向が認められ、その汚染は今後しばらく継続することが予察された。さらに、日本沿岸に集団座礁したクジラや中国で混獲されたイルカでも同様に近年の濃度上昇が認められた。

日本や太平洋外洋域の鳥類を対象とした調査結果では、陸性・沿岸性鳥類から外洋性鳥類よりも高いレベルの PBDEs が検出され、とくに猛禽類のオオタカやオオワシから検出された濃度は、欧米の鳥類における報告値よりも高値を示した。本研究により、PBDEs の陸域環境への流出が継続している、もしくは PBDEs は PCBs に比べ移動拡散しにくい物質であることが示唆された。

2) アジア地域の廃棄物埋立地における PBDEs 検出

アジア途上国の都市ゴミ集積場等における PBDEs の汚染について調査した結果、分析に供した全ての土壌試料から PBDEs が検出され、この種の物質による汚染が途上国にも存在することが明らかとなった。最高濃度（500 ng/g 乾重当り）はベトナム（カントー）の都市ゴミ集積場から検出され、インドやベトナムのゴミ集積場内の土壌から検出された PBDEs 濃度は概して場外の対照地域よりも高値を示した。土壌中 PBDEs の異性体組成に着目すると BDE209 の寄与率が最も高く、高臭素化異性体が卓越していたが、カンボジアやインドの一部集積場では 4～5 臭素化体が比較的高い割合を示した。

3) 残留性化学物質の物質循環モデルの開発と家電リサイクル・臭素系難燃剤への応用

大気への PBDEs 排出インベントリ量は、630～1,650 kg/year と推定された。うち、野外焼却過程が 9 割程度を占めており、これをのぞくと、90 kg/year～157 kg/year と推定された。また野

外焼却過程の同族体分布を見てみると、OcBDEsが支配的な分布であり一般環境中でみられるDeBDEが支配的な同族体分布とは異なっていた。他のライフサイクルにおける排出係数の同族体分布は全てDeBDEが支配的な分布であり、大気へのDeBDE排出量が多かったライフサイクルは、難燃剤の製造過程、次いでDeBDE含有製品の使用過程であった。PBDEsのサブスタンスフロー解析モデルを構築し、大気・水系・土壌への分配を環境動態モデルにより記述した。環境濃度から推計した排出量に比べ1～2オーダー低く、未把握の発生源の重要性が示唆された。

4) リサイクルに係るプロセスの物質収支に関するフィールド研究

自治体大型ごみへの排出実態調査の結果より、多種多様な家電製品が市収集大型ごみや持込ごみとして搬入されていることがわかった。中には、小型家電製品や電池を内蔵したまま排出されている製品も確認された。水銀含有製品の国内フローの解析により、日本において製品由来の水銀は、ライフサイクルを通して年間10～20 t流通しており、そのうち約5 tが蛍光管由来であること、回収される水銀は約0.6 tのみで大半が最終処理・処分されていることがわかった。蛍光管リサイクルの現状は、一部の自治体等で回収・リサイクルが行われているが、全国でのリサイクル率は10%程度と考えられた。回収を行っている自治体でも、回収率は30%程度であり、回収率の向上が重要な課題の一つである。

複雑組成廃棄物である自動車破碎残渣(ASR)には、臭素系難燃剤(PBDEs, TBBPA)や有機スズ化合物が数10～数100ppmのレベルで含まれていたが、シャフト炉式ガス化溶融炉を用いたASRの溶融処理により、その99.99%以上が分解され、排ガスや飛灰、溶融物中の濃度は極めて低値であった。ASRのガス化溶融処理は、臭素系難燃剤や有機スズ化合物の分解制御技術として有効であることが示された。

4) 鉛電池リサイクルの経済評価

鉛電池リサイクルの政策デザインを経済学的な観点から評価するための基礎的研究を行った。理論モデルにより、シュレッダーダストの処理費が上昇するとその発生量は抑制されるものの、有用物価値の低下によっては発生量が増大することを確認した。また、鉛電池リサイクルの政策デザインを経済学的な観点から評価するための実証研究を行い、経済的インセンティブを重視した各種政策手段(税, デポジット・リファンド, 補助金)を用いた場合の費用効率性を明らかにした。

結論 = 社会および自然システム循環における残留性化学物質の挙動を記述するモデル群開発、家電リサイクル法や自動車リサイクル法などの政策評価への応用を主たる目的とした研究を行った。家電リサイクルや自動車リサイクルに深く関連してくる可能性の高いPBDEsについて、アジア途上国の都市ゴミ集積場等を調査した結果、分析に供した全ての土壌試料からPBDEsが検出され、この種の物質による汚染が途上国にも存在することが明らかとなった。残留性化学物質の発生源に関する知見を得ることを目的として、PBDEsのサブスタンスフロー解析モデルを構築し、大気・水系・土壌への分配を環境動態モデルにより記述した。難燃樹脂製造工程や家電リサイクル施設、焼却炉での排ガス濃度測定に基づく排出量推定結果は、これらのモデルを用いて環境濃度から推計した排出量に比べ1～2オーダー低く、未把握の発生源の重要性が示唆された。