

廃棄物処理等科学研究費補助金 総合研究報告書概要版

研究課題名＝家庭系廃製品の残留性化学物質と3Rシナリオ解析

研究番号 ＝K1821, K1953, K2062

国庫補助金精算所要額(円)＝112,189,000

研究期間(西暦)＝2006-2008

研究年度(西暦)＝2006-2008

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＝田辺信介、高橋 真(愛媛大学)、倉持秀敏、滝上英孝(国立環境研究所)
竹内憲司(神戸大学)、平井康宏、浅利美鈴(京都大学)

研究目的＝家庭系廃製品に含有される臭素系化合物や重金属類等の残留性化学物質を取り上げ、物質代替、回収再生などの3R過程や廃棄過程における挙動解明とシナリオ研究を行うことを目的とした。アジア途上国のリサイクル・廃棄工程を対象に、臭素系難燃剤(BFR)、重金属類などの汚染実態、発生源挙動、生物曝露の検討に力を注いだ。家庭製品中の難燃剤使用に関し、再生品利用を含めてハザード・リスク評価の面から留意すべきポイントを抽出し、環境動態モデルにBFR等を適用するための物理化学パラメータを整備するため、それらの測定および推算モデルの開発・評価を行った。そして、家庭系廃製品の購入・消費・廃棄行動について包括的な行動モデル分析をおこない、環境動態モデルを含む物質フローモデルを、家庭製品に対する3Rシナリオ分析に適用することで、残留性化学物質を含む家庭系廃製品の3Rシナリオを実現する社会システムのあり方について検討した。

研究方法＝研究方法としては、①環境の持続性にかかわる事実の発見、②モデル化のための諸解析(物性推算、物質フローモデル、ハザード・リスク特定など)、③3Rシナリオ策定・モデル解析、を統合的に展開し、相互のフィードバックの繰り返しを行う手法を採っている。個別には、下記の研究方法で推進している。アジア途上国の物質循環関連施設や周辺地域において環境試料や生物試料を収集し、臭素系難燃剤・重金属類等の発生源挙動や環境動態、生物曝露について、空間分布や時系列分布を意識して解明し、3Rシナリオ解析のための基礎・検証情報を提供する。3Rシナリオ解析の基礎情報とするため、BFRや非BFRのオクタノール/水分配係数等の物理化学パラメータの測定を行い、また相平衡計算から高分子材から環境への分配性(放出ポテンシャルなど)も検討する。難燃プラスチック製品の使用過程や再生過程(ペレット化等)における挙動評価を行い、再生製品中のBFR等の含有濃度傾向、異性体組成調査、バイオアッセイによる毒性評価を行う。代替難燃剤と考えられる有機リン化合物(芳香族リン酸エステル類等)との比較も視野に入れている。

家電製品(BFRやSb等を含むTVケーシング、BFRやPb、Auを含む電子基板等)や蛍光管(水銀を含む)、廃プラスチック類などの家庭製品を対象とし、廃製品の物理化学特性の把握や消費者の行動把握を試み、社会システムにおける有害物質の循環を、3R行動に関する社会

動態を含めた物質フローモデルによって記述する。本モデルは、環境動態モデルと統合させ、日本やアジア地域への適用を試みる。物質代替・回収再生などの3Rシナリオをたて、開発した物質フローモデルにより、非制御廃棄との比較検討を行う。そして、物質代替・回収再生を優先する3R概念の有効性を検討し、加えて適正処理、不適正処理を対照とする経済分析を行い、総合的な見解をまとめる。

結果と考察＝

1) アジア地域の自然システム循環における残留性化学物質の挙動研究—BFRsによる環境汚染の時空間的分布(田辺信介、高橋 真、Karri Ramu、磯部友彦)

残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約(POPs条約)が2004年5月に発効し、ポリ塩化ビフェニール(PCBs)など12種類の有機塩素化合物について、生産・使用の規制や非意図的生成の削減が世界規模で実行されているところである。条約の対象となったPOPsのほとんどは、先進諸国および多くの途上国ですでに生産・使用・流通が禁止され、その環境汚染レベルは低減傾向にある。一方、現在生産・使用されている物質の中には、既存のPOPsに物理化学的性質が類似し、地球規模での汚染の拡大と生態リスクが懸念される物質、すなわち「POPs候補物質」があり、POPs条約締約国会議において対象物質に加えるよう提案され、国際的に本格的な規制が検討される段階に至っている。例えば電子・電気機器やプラスチック製品に含まれる有機臭素系難燃剤(BFRs)や撥水材、表面処理剤、消化剤等として利用されている有機フッ素化合物は、最近までヒトや環境中の汚染レベルが上昇し、その動向について大きな学術的・社会的関心を集めている。しかしながら、これら新規に登場したPOPs候補物質のモニタリング調査やリスク評価の研究は欧米や日本などの先進諸国が中心で、途上国の汚染実態はほとんど明らかにされていない。経済成長の著しいアジアの途上国では、廃棄物の不適正処理や公害の発生、深刻化する化学汚染などが報告されており、今後POPs候補物質による汚染も顕在化する恐れがある。そこで、愛媛大学の生物環境試料バンク(es-BANK)に保存されている海棲哺乳類や柱状堆積物の試料を用いて、アジア地域におけるBFRs(PBDEs:ポリ臭素化ジフェニルエーテルおよびHBCDs:ヘキサブロモシクロドデカン)汚染の時空間分布の解明を目的とした。

汚染の空間分布の研究は沿岸域と外洋域に注目し、それぞれ二枚貝のイガイ(2003~2005年に採取)およびカツオ(1998~2000年に採取)を供試した。先進工業国汚染の歴史トレンド解明研究は、2002年10月から2003年3月に東京湾の湾央付近3地点で採取した柱状堆積物試料および1972~1998年に三陸沖で捕獲したキタオットセイ(Northern fur seal, *Callorhinus ursinus*, n=35)の脂皮試料を、途上国汚染の過去復元は2000/01年に中国南部沿岸で混獲されたスナメリ(Finless porpoise, *Neophocaena phocaenoides*, n=12)の脂肪組織を用いた。また、遠隔海域汚染の復元研究は、1982年および2001年に日本沿岸に集団座礁したカズハゴンドウ(Melon-headed whale, *Peponocephala electra*, n=10)と1977~2003年に日本沿岸に集団座礁あるいは捕獲されたスジイルカ(Striped dolphin, *Stenella coeruleoalba*, n=20)の脂皮試料を、遠隔陸域汚染の復元研究は、1992年~2005年にロシアのバイカル湖で捕獲したバイカルアザラシ(Baikal seal, *phoca sibirica*, n=30)の脂皮試料を供試した。これらの試料は、愛媛大学のes-BANKに冷凍保存されたものを活用した。

イガイから検出されたPBDEsは、日本だけでなく韓国、香港、フィリピンなどの新興地域でも高い濃度が認められ、アジア途上地域におけるPBDEsの使用と汚染の拡大が示唆された(図1)。一方、HBCDsによるイガイの汚染は日本沿岸域が顕在化しており、途上国の汚染レ

ベルは低値を示した。カツオの分析結果では、PBDEs による東シナ海の高濃度汚染および HBCDs による日本周辺海域の顕著な汚染が認められ、イガイと類似のパターンが観察された。以上の結果より、PBDEs による汚染はアジア途上地域に拡大しつつあるが HBCDs の汚染は未だ先進国にとどまっていることが推察された。東京湾の柱状堆積物やキタオットセイの汚染レベルの歴史トレンドは、日本国内における化学物質の使用実態を反映した。すなわち、BFRs (PBDEs および HBCDs) は 1980 年代以降使用量が急増したため、柱状堆積物やキタオットセイの濃度レベルもそれ以降の年代で急激な上昇傾向を示した。とくに HBCDs の汚染は近年急速に進行していることが判明した。南シナ海の中国沿岸で混獲されたスナメリの BFRs 残留レベルも、1990 年から 2000 年の 10 年間で上昇傾向がみられた。ただし、PBDEs 濃度は過去 10 年間で約 5 倍上昇していたが、HBCDs 濃度は約 2 倍の上昇にとどまった。遠隔海域を回遊するカズハゴンドウの場合、2001 年の個体から検出された BFRs 濃度は 1982 年と比較して、PBDEs は約 10 倍、HBCDs は約 50 倍の高値を示した。この結果は、本種が低緯度地方から中緯度地方を回遊するため、アジア途上国と日本沿岸の両海域で汚染の曝露を受けたことを示唆している。すなわち、PBDEs は過去アジア途上国と日本の両海域で、また HBCDs は近年使用量が増加している日本沿岸でそれぞれ曝露を受け、20 年間の残留レベルが上昇したと推察される。スジイルカも、熱帯から温帯海域を回遊しているため、BFRs の残留レベルの推移はカズハゴンドウと類似の傾向を示した (図 2)。さらに、遠隔陸域のバイカル湖に生息するバイカルアザラシでも PBDEs 汚染の進行と HBCDs 濃度の急激な上昇が認められた。遠隔海域・陸域の野生動物から検出された PBDEs は途上国と先進国に由来する曝露を、一方 HBCDs は主として先進国由来の曝露を受け、急速に汚染が進行したものと推測される。途上地域の HBCDs 汚染の現状は低レベルで推移しているが、今後 PBDEs の代替として利用が進み、環境汚染が拡大することも予想されるため、継続的なモニタリングが必要である。

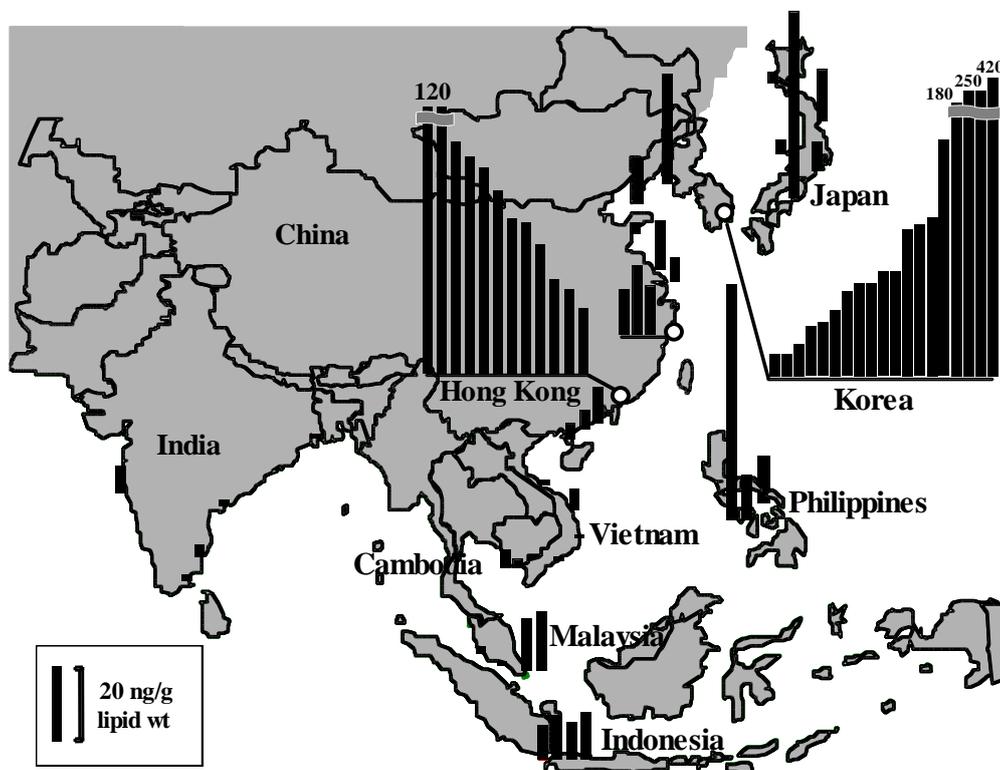


図 1：イガイから検出された PBDEs の汚染分布

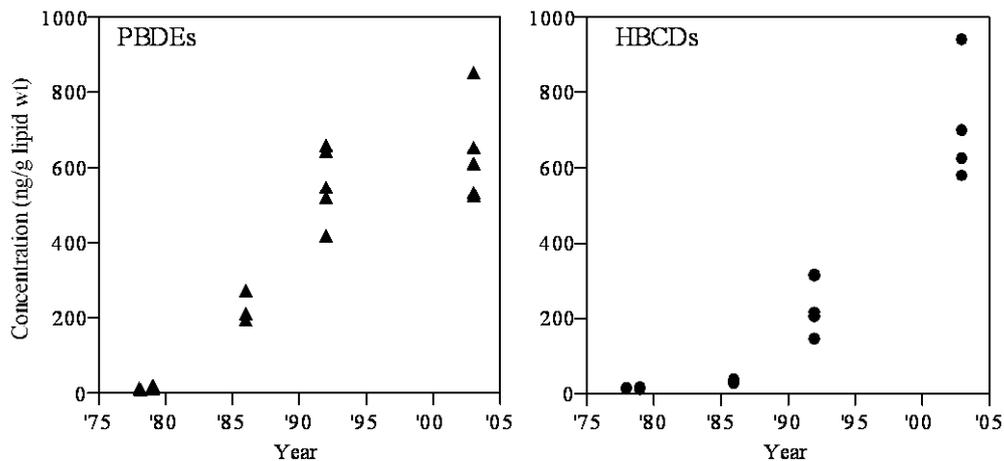


図 2：スジイルカにおける BFRs 濃度の経年変化

2) アジア地域の社会システム循環における残留性化学物質の挙動研究—インドおよびベトナムの電子・電気機器廃棄物 (e-waste) 処理現場における残留性有害物質の人体曝露と環境汚染 (高橋 真、田辺信介、Karri Ramu, Nguyen Minh Tue, 磯部友彦, 阿草哲郎)

近年、経済成長と人口増加の著しいアジア途上国では、環境汚染の深刻化が大きな社会問題となっている。とくに最近では、パソコンやテレビなど電機・電子機器廃棄物 (e-waste) の越境およびそのリサイクル過程における環境汚染が国際的な問題となっている。アメリカや日本等の先進国で不要となった e-waste の多くは、中国やインド等の途上国へリサイクル目的で移動している。e-waste は貴金属や銅などの有価金属以外にも、鉛やカドミウムなどの重金属類、臭素系難燃剤 (BFRs) や PCBs といった様々な有害化学物質を含んでいる。これら e-waste が集積する現地のリサイクル場では、周辺環境や作業従事者への影響に配慮できていない不適切なリサイクル処理や廃棄物の放置・投棄が行われている。実際、中国やインドにおけるこれまでの e-waste 調査から、リサイクルの現場で、金や銅などの有価金属を回収するために、強酸や水銀アマルガムを用いた抽出、野焼き等が行われていることが報告されている。こうした過程で、有害物質が環境中に放出されるだけでなく、リサイクル作業従事者も有害物質に曝露していると推察される。以上のことから、途上国の e-waste 循環過程における汚染実態の解明は、周辺環境への負荷や影響、ヒトの健康リスクを評価するために必要であるとともに、環境保全を前提とした資源循環システム構築のためにも喫緊の課題である。そこで本研究では、インドおよびベトナムの e-waste リサイクル処理現場を対象に、重金属類や PCBs、BFRs、ダイオキシン類縁化合物等の残留性有害物質による環境汚染と人体曝露の実態を調査した。

2006年12月に、インド南部 Bangalore 市の e-waste リサイクル施設および都市スラム内の小規模リサイクル処理場において作業従事者の毛髪を採取した。また、対照地域としてチェンナイの都市域住民からも毛髪を採取した。大気粉じんは、各地点でハイボリウムエアサンプラーを用い、石英ろ紙上にトラップした。毛髪およびフィルター試料を酸分解の後、Pb, Cd, Hg, As 等の重金属類を含む微量元素約 20 種を既法に従い測定した。また Bangalore 市および Chennai 市の e-waste リサイクル施設や都市スラム内の小規模リサイクル処理場から土壌 23 試料、Bangalore 市スラム街の排水処理施設から汚泥堆積物 3 試料を採取した。さらに e-waste 処理が行われていない都市域や農地を対照地域として、土壌 9 試料を採取した。2007年9月にベトナム北部で e-waste 処理が行われている Hung Yen 県の Bui Dau 村、Dong Mai 村、Hai Phog 県の

Trang Minh 村において、母乳 24 検体を採取した。また、対照地域として Hanoi の都市部住民から母乳 9 検体を採取した。土壌および母乳試料の分析は既法に従い、PCBs および臭素化ジフェニルエーテル類 (PBDEs)、ヘキサブROMシクロドデカン異性体 (HBCDs) を測定した。また、インド南部から採取した一部土壌試料を対象に、ダイオキシン類縁化合物 (コプラナーPCBs およびポリ塩素化・ポリ臭素化・1 臭素ポリ塩素化のダイベンゾダイオキシン/フラン類) を測定した。

インド・Bangalore 市のヒト (男性) 毛髪中の微量元素を測定した結果、対照地域に対しリサイクル処理施設またはスラム内の処理場で Cu、Sb、Bi、Pb、Mo、Rb、In、Ag、Cd の濃度が有意に高かった。さらに大気粉じん中の微量元素濃度も、リサイクル施設で高値を示し、Pb、Cu、Sb、Bi、In は、大気粉じんおよびヒト毛髪ともにリサイクル施設で高濃度であった。本研究により、インド・Bangalore 市における e-waste のリサイクル処理活動がヒトへの微量元素曝露要因となっていることが明らかとなった。また、インドで採取した土壌のうち、BFRs およびダイオキシン類縁化合物の濃度が最も高かったのはスラム内の小規模リサイクル場から採取した試料であった。スラム内のリサイクル場でこれら物質の汚染レベルが高かった理由として、この地域内で e-waste が酸処理や野焼きなどの方法で処理されていることが考えられる。また、それらの地域では、塩素化ダイオキシン類 (PCDD/Fs や Coplanar-PCBs) よりも臭素化ダイオキシン類 (PBDD/Fs) が高濃度で残留しており、不適切な e-waste の処理が PBDD/Fs の発生源になることが示唆された (図 3)。ベトナム人の母乳の分析結果、Bui Dau 村などリサイクル地域住民から都市住民より高濃度の PBDEs や HBCDs が検出され、e-waste のリサイクル処理に伴う BFRs の曝露が窺われた。アンケート調査の結果とともに測定データの解析を行ったところ、5~8 塩素の PCBs 同族体は脂肪に富んだ食品の摂取頻度に、BFRs や低塩素化 PCBs 同族体はリサイクル作業の従事頻度に関連して残留レベルが高い傾向が示された。

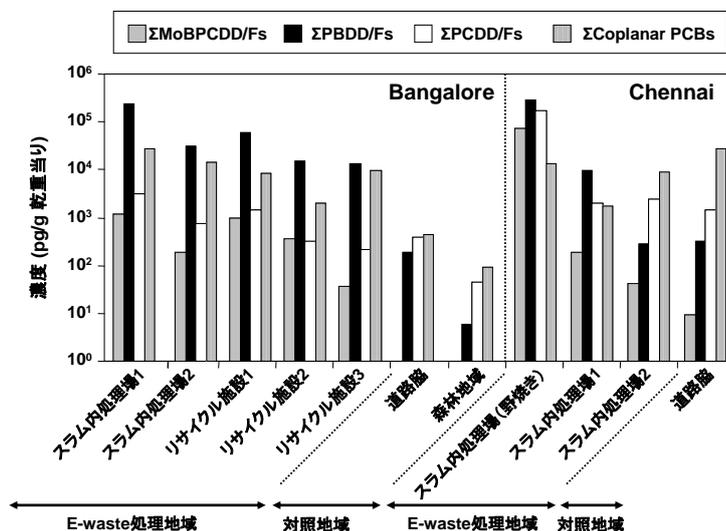


図 3 インド・Bangalore 市および Chennai 市の土壌中ダイオキシン類縁化合物の濃度

3) 家庭や職場環境などの循環系シンクにおける残留性化学物質の挙動と制御（滝上英孝、小瀬知洋、鈴木剛、梶原夏子、野馬幸生）

家庭や職場環境などの循環系シンクにおける残留性化学物質の挙動と制御に関する知見を得て、環境化学的側面から3R政策の進展に資する情報獲得をめざした。なかでも有機臭素系難燃剤（BFRs）等を含む家庭製品の使用過程において、室内環境動態や製品からのBFRs等の化学放散量を定量的に評価し、ハザード・リスク評価の面から留意すべきポイントを抽出することとリスク低減に向けた制御手法について検討を進めることを目的に実施した。

実際の住宅における残留性有機汚染物質の室内動態研究

各住宅における室内空気、ハウスダスト中のBFRsほか、有機ハロゲン化合物濃度について把握し、その媒体間（室内空気／ハウスダスト間）分配について知見を得た。室内空気試料中のトリブロモフェノール類（TBP_s）、ヘキサブロモシクロドデカン（HBCD_s）といったBFRs、及びポリ塩素化ビフェニル類（PCB_s）については、調査住宅において外気よりも室内空气中濃度が高く（ $10^2 \sim 10^3$ pg/m³のオーダー）、室内発生源の存在が示唆された。

ハウスダスト試料は調査住宅において、ポリ臭素化ジフェニルエーテル類（PBDE_s）は 10^2 ng/g、テトラブロモビスフェノールA（TBBPA）は $10^1 \sim 10^2$ ng/g、HBCD_sは $10^2 \sim 10^4$ ng/g、TBP_sは $10^1 \sim 10^2$ ng/gのオーダーで検出された。ダスト中、BFRsの濃度は、同じ家でも採取時期によって濃度のばらつきが観察され、採取場所の違い等に起因するものと考えられたが、HBCD_sのダスト中濃度はBFRsの中で最も高く、カーテンや絨毯など難燃加工した家庭内繊維製品からの寄与が推察された。2住宅において1週間のサンプリング期間における室内空気／ハウスダスト間での残留性化学物質の分配比について求めたところ（図4）、空気／ダスト分配比は、高臭素化PBDE_s、TBBPA、HBCD_sで低く（ダストへの移行性が高い）、低塩素化PCB_s、低臭素化PBDE_s、TBP_sで高かった（室内空気への移行性が高い）。

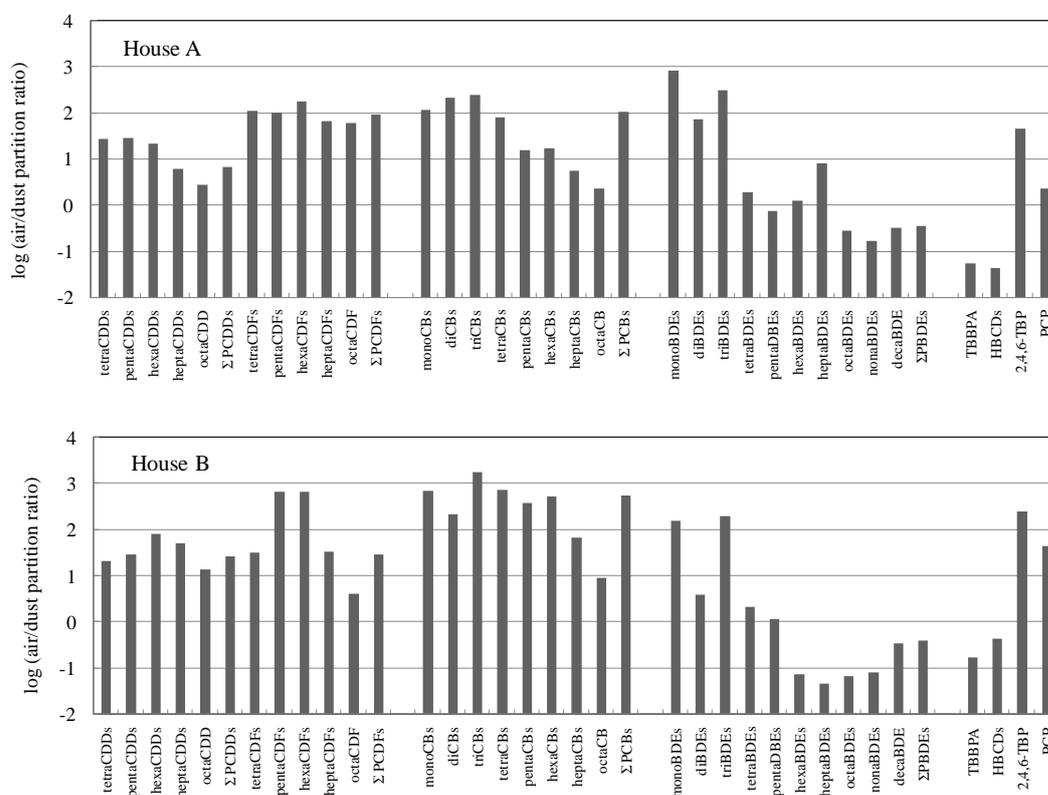


図4 実際の2住宅における有機ハロゲン化合物の空気／ダスト分配比（比の対数値）

モデルルームを用いた製品からの残留性化学物質放散研究

実住宅と同等のモデルハウス内の部屋（3種換気採用）に BFRs を含有する家電製品（テレビ、パソコン）および繊維製品（カーテン）を設置し、室内空気中の BFRs 等、残留性化学物質の濃度を調査することで、より実際の室内環境に近い条件下における BFRs をはじめとする残留性化学物質の室内放散について定量的評価を行った。室内空気中の BFRs について製品設置前後の濃度変化を調べたところ、家電製品負荷時の PBDEs 濃度（80 pg/m³）は、ブランク試験時（16 pg/m³）の約 5 倍に上昇した。同様の傾向は臭素化ダイオキシン類（PBDD/DFs）においても認められた。TBP についても家電製品負荷による濃度上昇が認められ、家電製品がその起源となることが示唆された。一方、HBCDs の室内空気中濃度は繊維製品負荷時に明らかな上昇が認められたことから、HBCDs が主に繊維製品から放散されていることが示された。

試験時の家電製品及び繊維製品の表面積負荷率はそれぞれ 0.37 m²/m³、0.74 m²/m³ であり、製品負荷に伴う室内空気中濃度の増分が PBDEs について 66 pg/m³、HBCDs について 110 pg/m³ であった。ここで PBDEs が家電製品、HBCDs が繊維製品のみから放散され、放散速度には製品毎、部位毎の差が無いと仮定すると、室内の換気速度が 4 回/h であったことから、PBDEs 及び HBCDs の製品からの単位表面積あたりの放散速度はそれぞれ 710 pg/m²・h 及び 620 pg/m²・h と推算された。上記の放散速度に基づくと、試験を実施したモデルルームの環境下においてテレビ 1 台（29 型ブラウン管テレビ）からの PBDEs 年間放散量は 7.0 µg、カーテン 1 枚（220 cm×180 cm）からの HBCDs 年間放散量は 22 µg と推算された。

モデルルームを用いた製品からの残留性化学物質曝露対策研究

BFRs を含有する家庭製品（テレビ、パソコン及びカーテン）をモデルルーム（2種換気採用）に設置し、BFRs 等、残留性化学物質について室内空気濃度、ダストを媒体とした床面堆積量及び床面・壁面への直接沈着量を評価し、放散後の室内挙動（媒体間の分配）についても解析を行った。あわせて、炭を介した室内空気の内部循環及び空気清浄機による残留性化学物質の制御効果についての検討も行った。図 5 に外気、製品設置前（室内ブランク試験）、製品設置後（炭循環換気性能試験）及び製品設置後に炭循環換気に加えて空気清浄機を運転した状態（空気清浄機性能試験）における室内空気中の有機臭素化合物濃度を示す。製品設置後（炭循環換気性能試験時）の PBDEs 濃度（2,400 pg/m³）は、ブランク試験時と比較して 3 オーダー上昇した。同様の傾向は HBCDs においても認められ、製品設置後に 790 pg/m³ となり 2 オーダー上昇した。PBDD/DFs 及び TBBPA についても PBDEs、HBCDs ほど顕著ではないものも 1 オーダー程度の上昇が確認され、製品に由来する汚染源の存在が考えられた。

全ての試験後に床材の有機溶媒による拭き取り試験やハウスダストの採取分析を行い、製品からの放散後の有機臭素化合物の室内媒体（室内空気、ハウスダスト、床面沈着）への分配率について見積もりを行った。比較的濃度が高く、測定値の信頼性が高いと考えられる PBDEs および HBCDs に関しては、沈着およびハウスダスト吸着分への分配率を推算するとそれぞれ 38%、32%であった。

炭循環換気及び空気清浄機による室内空気中の有機臭素化合物の制御に関する検討を行い、炭循環換気性能試験時には、排気のうち 50% は床下に設けられた竹炭による浄化経路に導入し、再給気（再循環）するようにした。空気清浄機性能試験時は、炭循環換気性能試験時の条件に加え、空気清浄機（HEPA 及び活性炭フィルターを装着したもの）の設置運転によって室内空気の制御を行った。炭を通した再給気中の BFRs 濃度は外気レベル、ブランク試験時レベルまで低減できており、2 つの試験時の室内空気（排気）中の BFRs 濃度を比較すると、空気清浄

機稼動時に BFRs 濃度のさらなる減少が確認できた。炭循環換気及び空気清浄機による BFRs の除去速度について求めたところ、それぞれの対策で PBDEs および HBCDs について ng/h 程度の除去能があり、BFRs に対して高い制御効果を示すことが確認できた。

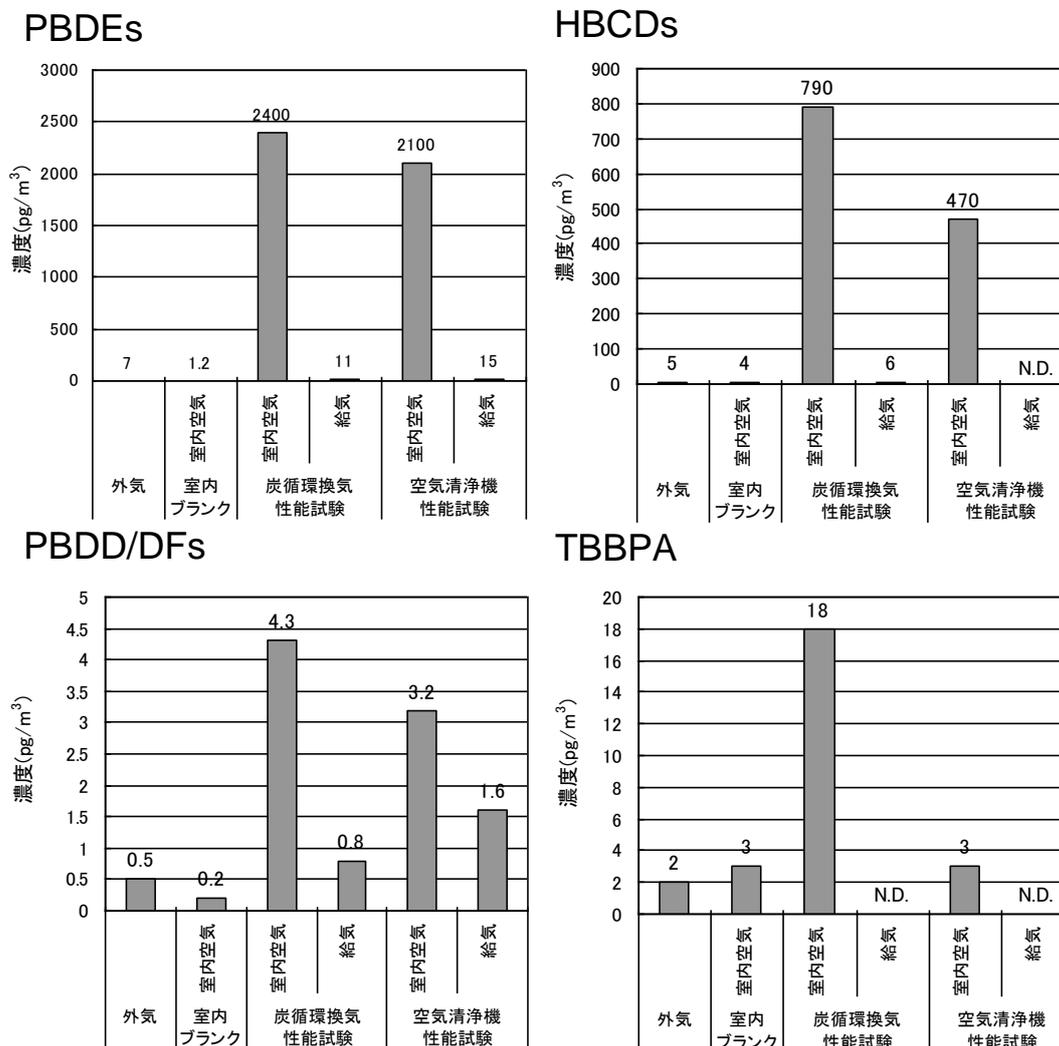


図5 モデルルームを用いた製品負荷試験時における有機臭素化合物の室内空气中濃度と対策（炭循環換気実施及び空気清浄機設置）による低減効果

4) 環境動態モデルのための難燃剤の物理化学パラメータの測定と推算モデルの開発・評価（倉持秀敏）

臭素系難燃剤（BFR）や非 BFR の難燃剤（芳香族リン酸エステル類）を環境動態モデルに適用するためには、それらの水への溶解度（ S_w ）、オクタノール/水分配係数（ K_{ow} ）、蒸気圧などの物理化学パラメータが必要である。本研究では、それらの物理化学パラメータを測定する。また、それらのパラメータ値を推算するためのモデルの開発と評価、解離性の BFR に対する S_w と K_{ow} の pH 依存性の数式化、さらには、BFR の高分子材から大気または水への分配ポテンシャルの推定を行う。

ヘキサブロモシクロドデカン（HBCD）の異性体（ α -体、 β -体、 γ -体）に対して、 S_w 、 K_{ow} 、蒸気圧を測定した。ただし、蒸気圧測定では、ポリブロモジフェニルエーテル（PBDEs）も測定した。 S_w の測定ではジェネレータカラム法を、 K_{ow} の測定法ではスロースターラー法を、蒸気圧の測定では気体流動法を用いた。一方、非 BFR の芳香族リン酸エステル類についても、同

様な測定方法を用いて、 S_w および K_{ow} を測定した。得られた測定データについて、異性体間の違い、 S_w と K_{ow} に対する異性体組成の効果、さらには、PBDEs の値と比較して HBCD や縮合型芳香族リン酸エステル類の環境分配特性を考察した。上記のリン酸エステル類には測定できないパラメータ値があることから、物性推算ソフト EPISuite ver.3.20 と定量的構造物性相関法 (QSPR) を用いて、それらの S_w および K_{ow} を推算し、両方法の有用性を評価した。解離基を有する 2,4,6-トリブロモフェノール (2,4,6-TBP) については、フラスコ法を用いて解離状態の S_w および K_{ow} を測定した。また、それらのデータとテトラブロモビスフェノール A (TBBP-A) の S_w および K_{ow} データに対して、pH 依存性を表す数値モデルを適用し、その有用性を評価した。高分子材 (ポリスチレン) からの BFR の分配ポテンシャルの推定では、ポテンシャルの指標として、ポリスチレン-大気または水間の分配係数 (K_{ra} と K_{rw}) を使い、UNIFAC モデルと実測データを用いて、PBDEs と HBCD に対する両パラメータの推算を行った。

HBCD の異性体単独および異性体混合物で測定した S_w と $\log K_{ow}$ の測定結果を表 1 に示す。 S_w の値は、 α -体、 β -体、 γ -体の順に大きくなった。 α -体と β -体においては、混合物の S_w の方が単独の場合よりも約 6~12 倍高い値となり、 S_w は固体の異性体組成比に大きく影響を受けることが明らかとなった。 $\log K_{ow}$ の結果では、 γ -体の値が他の異性体よりも高く、 γ -体の疎水性が高いことがわかった。しかし、異性体単独と異性体混合物との間に大きな差異はなかった。HBCD の各異性体についての蒸気圧データを図 6 に示す。各

異性体の蒸気圧は 70~90°C の高温にもかかわらず、 10^{-4} ~ 10^{-6} Pa オーダーで、その値は、 γ -体、 β -体、 α -体の順番で大きくなった。また、PBDEs などの他の難燃剤よりも HBCD の蒸気圧はかなり低いことが明らかになった。ただし、HBCD の蒸気圧測定は比較的難しいことから実測データの精度向上を今後行う必要がある。

芳香族リン酸エステル類の S_w および K_{ow} の測定結果を表 2 に示す。粘性および濃度の関係から一部測

定できない点があった。縮合型と非縮合型とを比較すると、縮合型の S_w の値の方が一桁から二桁低く、また、 K_{ow} ではその反対に一桁から二桁程度値が高くなることがわかった。BFR との比較から、縮合型のエステルの S_w と $\log K_{ow}$ は、HBCD もしくは 4 および 5 臭素化 PBDEs とほぼ同等の値を示した。したがって、縮合型のエステルの水環境、土壌、生物への分配性については、これらの BFR とほぼ同等の性質を有する可能性が示唆された。

芳香族縮合型リン酸エステル類の測定において測定できなかった S_w と K_{ow} に対して、EPISuite および QSPR を用いて推算を行った。縮合型を含めた他のリン酸エステル類に対する計算結果と実験結果との比較により、縮合型リン酸エステルに関して

表1 HBCDに対する S_w と $\log K_{ow}$ の測定結

物性値(25°C)	HBCD	
	異性体単独	異性体混合物
$S_w, \Sigma\alpha\beta\gamma / \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$		116.5
S_w (α -体) / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	13.7	81.0
S_w (β -体) / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	2.8	33.3
S_w (γ -体) / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1.5	1.6
$\log K_{ow}$ (α -体)	5.755	5.665
$\log K_{ow}$ (β -体)	5.779	6.005
$\log K_{ow}$ (γ -体)	6.255	6.344

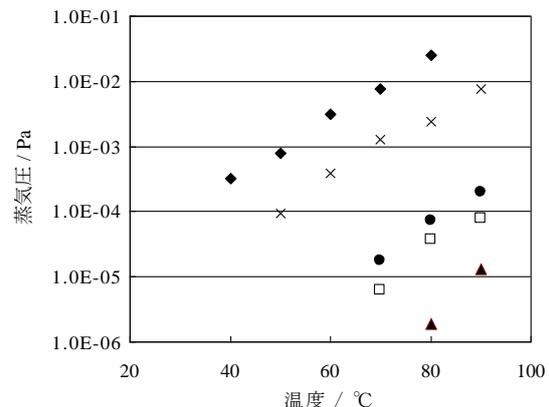


図6 PBDEsとHBCDの蒸気圧測定結果

◆:4臭素化物(TeBDE)、×:5臭素化物(PeBDE)、●: α -HBCD、□: β -HBCD、▲: γ -HBCD

は、QSPR が推算法として有用であることがわかった。

表 2 芳香族リン酸エステル類の S_w と $\log K_{ow}$ の測定結果 (* : QSPR による推算値)

	非縮合型		縮合型		
	TPP	TCP	RDP	BDP	RXP
S_w / mgL^{-1}	2.97	0.277	0.150	1.17×10^{-4} *	3.1×10^{-3}
$\log K_{ow}$	4.54	5.38	5.72	6.09	6.36*

TPP: トリフェニルホスフェート, TCP: トリクレシールホスフェート, RDP: レゾルシノールジフェニルホスフェート, BDP: ビスフェノール A ジフェニルホスフェート, RXP: レゾルシノールジキシレニルホスフェート.

解離基を有する 2,4,6-TBP に対しては、溶液の pH を変化させて S_w および K_{ow} を測定した。測定結果を図 7 に示す。2,4,6-TBP は解離することにより、 S_w の値は二桁以上増加し、 K_{ow} の値は三桁以上減少した。また、物質収支と解離平衡式を組み合わせた Henderson-Hasselbalch 式を用いて両パラメータの pH 依存性を計算し、pH 依存性を再現できることを示した。同様に、Henderson-Hasselbalch 式は TBBP-A についても pH 依存性を良好に再現できた。

ポリスチレンからの BFR の分配ポテンシャルの推定では、UNIFAC モデルにより DeBDE と HBCD の K_{ra} と K_{rw} の値を推算した。 K_{ra} については、HBCD と DeBDE はともに同じレベルであった。しかし、 K_{rw} については、HBCD は DeBDE よりも桁違いに低い結果となった。この結果より、ポリスチレン中の HBCD の大気への分配ポテンシャルは DeBDE と等しいが、HBCD の水への分配ポテンシャルは DeBDE よりも桁違いに大きいことが予想される。

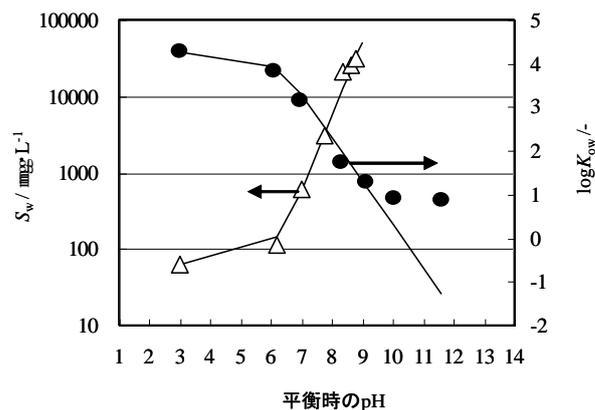


図 7 2,4,6-TBP の水への溶解度 (S_w) およびオクタノール/水分配係数 (K_{ow}) と溶液の pH の関係
 Δ : S_w の実測値、 \bullet : $\log K_{ow}$ の実測値、- : 計算値 (Henderson-Hasselbalch 式)、

5) 家電製品のリサイクル・処理施設におけるレアメタルや有害金属の分配挙動 (平井康宏, 竹林尚紀, 浅利美鈴, 酒井伸一)

家電製品のリサイクルや廃棄物処理システムにおけるレアメタルや有害金属の分配を調査することで、最終製品におけるレアメタルのリサイクルの可能性や BFR の制御特性を考察した。液晶テレビを手分解で徹底的に分解する手法と簡易分解した後破砕する手法、直接破砕する手法の 3 つのリサイクル手法を想定し、レアメタル等の分配挙動を破砕・選別実験により推定した。直接破砕手法では 20 型液晶テレビ 3 台を、簡易分解・破砕手法では 32 型以上の液晶テレビ 4 台を使用した。手分解手法では液晶テレビの素材構成比が簡易分解・破砕手法と同じであると仮定した。実験後の元素分析は、直接破砕手法に関しては ICM-MS 法で、簡易分解・破砕手法、手分解手法については携帯蛍光 X 線装置での測定を行った。インジウムは文献よりパネルガラスに 250mg/kg と仮定した。次に、Rechberger らが提案するエントロピーに基づく評価手法を用いて元素の濃縮具合を示す物質濃縮効率 (SCE : Substance Concentrating Efficiency) を試算して 3 手法を比較した。

破砕実験を行った結果、直接破砕手法では基板が各回収区分に混在し、簡易分解・破砕手法では投入量の約 126kg に対して鉄の回収量が約 70kg と多くなった。素材ごとのレアメタル等の含有濃度結果から、基板、被覆線、パネルガラスに高濃度で存在する元素が多いことが分か

った。分配率に関しては Sb を例にとると、手分解手法と簡易分解手法はほとんど同じ分配を示したが、直接破碎手法では基板が分散したため各回収区分に分散する形となった。エントロピーに基づく評価の試算の結果（図 8）は、直接破碎手法<<簡易分解・破碎手法<手分解手法の順番で濃縮具合が高くなり、簡易分解・破碎手法と手分解手法の差は小さい結果となった。一方、Fe や鉄の合金添加剤の Zn は 3 手法間の差がほとんどなく、磁力選別が機能していることが分かった。

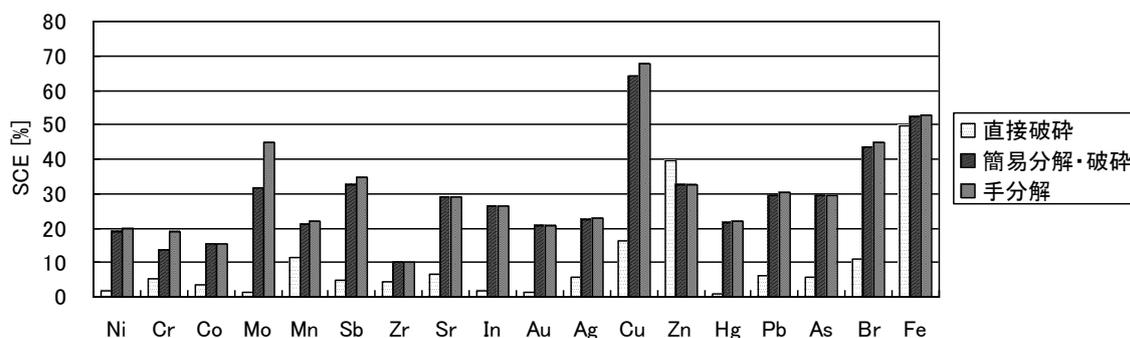


図 8 エントロピー評価試算結果

次に、破碎・焼却処理施設について着目し、レアメタルを含む廃電子電気機器や、臭素系・リン系難燃剤を含む廃繊維製品などの破碎・焼却過程における挙動に関する基礎データを入手することを目的とした。2008年12月2日、都市ごみの破碎処理施設において、破碎ダストや破碎残渣、それらを含めて焼却した排ガス、焼却残渣などの試料を採取した。また同時に、粗大ごみとして破碎機に投入された家電製品の目視調査を行った。分析項目としては臭素系難燃剤成分や輪形難燃剤成分、レアメタル等の金属類を分析した。臭素系・リン系難燃剤については、ガスクロマトグラム質量分析計（GC/MS）によって測定を行い、金属類については、ICP-MS 等により測定を行った。採取した約 30kg の破碎後磁選残渣については組成分析を行い、破碎・縮分作業を行った後、分析した。破碎後磁選回収物は、採取した約 50kg を重量割合で百分の一に縮分した。

目視調査の結果、1日で 209 台の家電製品が破碎機へ投入されている結果となったが、目視で確認できなかったものもあると考えられるため、実際はもう少し多い台数が投入されていると考えられた。破碎後磁選残渣の組成は、重量で見ると金属類が 27%と大きな割合を占めたが、体積で見ると 4%と少なくなった。逆にウレタンや紙・ダンボールは重量で見ると 4%と 2%で少なかったが、体積で見ると 15%と 12%になり大きな割合を示した。木片や木屑は重量、体積どちらで見ても 40%台と高い割合を占めた。焼却炉排ガスの最終出口での臭素化ダイオキシン類、PBDEs（ポリ臭素化ジフェニルエーテル）、HBCD の分析結果を表 3 に示す。PBDEs については、T4BDEs が 0.06ng/m³、D10BDE が 0.30ng/m³ 検出されたが、それ以外については定量下限未満であった。臭素化ダイオキシン類は、全異性体において定量下限未満であった。ダスト、灰および排ガス中のリン酸トリエステル類および縮合型リン系難燃剤の濃度を表 4 に示した。破碎ダストにおいて ppm オーダーの濃度で検出されている結果となった。破碎ダストはこの後、焼却処理されるため、その後の挙動についてはマスフローを踏まえた判断が必要である。

表3 排ガス最終出口 分析結果

媒体	試料名	実測濃度			単位
		臭素化ダイオキシン類	PBDEs	HBCD	
排出ガス	焼却炉排ガス 最終出口	N.D.	0.36	4.0	ng/m ³

表4 リン系難燃剤分析結果

化合物名	略称	焼却炉排ガス(単位はng/m ³ N at 12%酸素)				固体試料(単位はng/g-dry)				操作ブラン ク(固体試 料)
		ボイラ出口	トラベルブ ラック(ボイラ 出口換算)	最終出口	トラベルブ ラック(最終出 口換算)	主灰	飛灰	破砕ダスト バグフィルタ	破砕ダスト サイクロン	
リン酸トリメチル	TMP	<12	<12	<6	<6	<2	<4	<40	<40	<4
リン酸トリエチル	TEP	7.4	15	7.7	7.7	<1 (0.15)	<2 (0.63)	96	110	<2 (0.23)
リン酸トリプロピル	TPP	7.4	8.7	7.7	4.5	0.98	1.6	13	10	3.4
リン酸トリブチル	TBP	18	68	26	35	<0.5 (0.14)	1.9	210	160	3.1
リン酸トリス(クロロプロピル)	TCP	156	176	86	90	0.57	7.5	4300	3900	<0.5 (0.14)
リン酸トリス(2-クロロエチル)	TCEP	24	11	5.2	5.5	<1 (0.10)	4.6	3100	1800	<2 (0.46)
リン酸トリス(エチルヘキシル)	TEHP	<6 (3.6)	<6 (2.6)	<3 (1.6)	<3 (1.3)	1.6	<2 (0.64)	180	69	9.5
リン酸トリス(ブトキシエチル)	TBEP	30	29	12	15	13	6.9	1700	1700	<4
リン酸トリス(1,3-ジクロロ-2プロピル)	CRP	<20	<20	<10 (0.28)	<10	4.4	<6	1900	4200	<6
リン酸トリフェニル	TPhP	8.2	3.9	3.1	2.0	0.22	0.36	2800	3700	0.75
リン酸トリクレシル	TCP	5.2	3.1	1.8	1.6	0.28	0.32	3200	4800	0.52
リン酸ジフェニルクレシル	DCP	26.8	24	12.6	12.3	<0.1	10.7	1080	1100	7.5
リン酸トリキシレニル	TXP	<600	<600	<300	<300	<100	<200	2700	2500	<200
CR-733S	CR-733S	<12	<12	<6	<6	<2	<4	1800	3000	<4
PX-200	PX-200	<6	<6	<3	<3	8.0	<2	87	42	<2
CR-741	CR-741	<60	<60	<30	<30	<10	<20	<20	490	<20
CR-504L	CR-504L	(測定不能)	(測定不能)	(測定不能)	(測定不能)	(測定不能)	(測定不能)	(測定不能)	(測定不能)	(測定不能)

※ < 付きの値は、定量下限値未満であったことを示す。

※ ()内の値は、定量下限値未満であったが、ピークが認識できたため定量した値を示す。ただし、定量下限値未満であるため、不確かさは大きいことに注意。

※ リン酸ジフェニルクレシル(DCP)については、標準品および試料で2本のピークが検出された。ここでの値は、その2本の和。

※ CR-504Lについては、その分子構造から、「高分子化合物でありGC/MS測定は不可能」と判断した。

6) 3Rシナリオに基づく物質フローと環境動態モデルシミュレーションー臭素系難燃剤に着目した廃テレビサイクルのライフサイクルアセスメント(平井康宏、佐藤俊一、酒井伸一)

家電リサイクル工場から出荷される臭素系難燃剤含有プラスチックには、種々のリサイクル・処理方法が適用されている。しかし、それらリサイクル過程における臭素系難燃剤の環境への排出に関する知見は少ない。各種処理方法の優劣を比較する際には、難燃剤等の環境への排出を考慮することが求められる。したがって、本論文では、臭素系難燃剤含有廃プラスチックに着目したテレビバックカバーの各処理方法に対するLCA評価を行った。

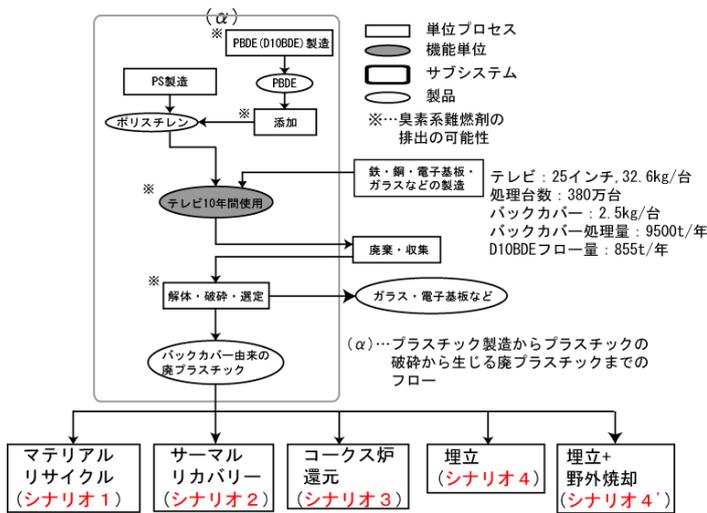


図9 システム境界フロー

機能単位を「25インチテレビの10年間使用」とし、再商品化処理台数を380万台とした。このテレビ台数フローは、中古テレビの輸出などを考えておらず、再商品化施設に持ち込まれ、処理される台数のみとなっている。

評価対象とするライフサイクルは、プラスチック（ポリスチレン:PS）の製造からテレビバックカバーに由来する廃プラスチックの最終処分までとした(図9)。システムの運用段階のみを対象とし、施設建設段階は対象外とした。各シナリオにおいて、家電リサイクル工場にて破碎・選定されるまで(α)は同じ工程である

とし、破碎済みプラスチック 9500 ton, D10BDE 855 ton が発生するとした。その後、マテリアルリサイクル(ビデオカセットテープへの再生、同じ難燃剤プラスチックへの再生:シナリオ1、1')、サーマルリカバリー(ごみ発電:シナリオ2)、ケミカルリサイクル(コークス炉還元:シナリオ3)、埋立処理(シナリオ4)、埋立+野外焼却(シナリオ4')という5つの異なる処理方法がとられるとした。

インベントリ分析の項目としては、CO2 排出量、PBDEs 排出量、PBDD/DFs 排出量、埋立処分量を扱った。PBDEs、PBDD/DFs 排出量については、排出先を一般大気と室内空気とを区別した。両者の特性化係数としては、環境動態モデルで求めた摂取比率を用いた。影響領域間の重み付け手法としては、対策コスト法と被害評価法を用いた。

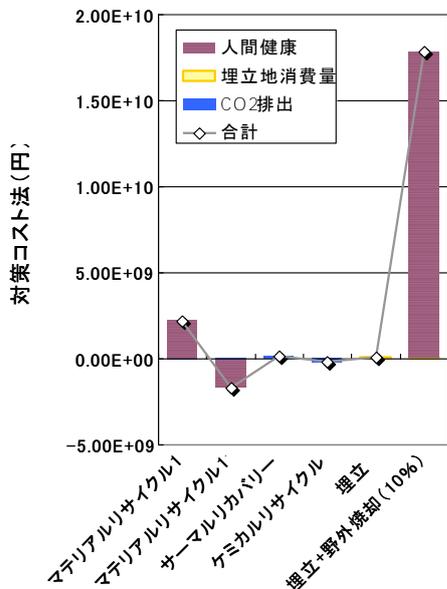


図10 対策コストによる重み付け結果

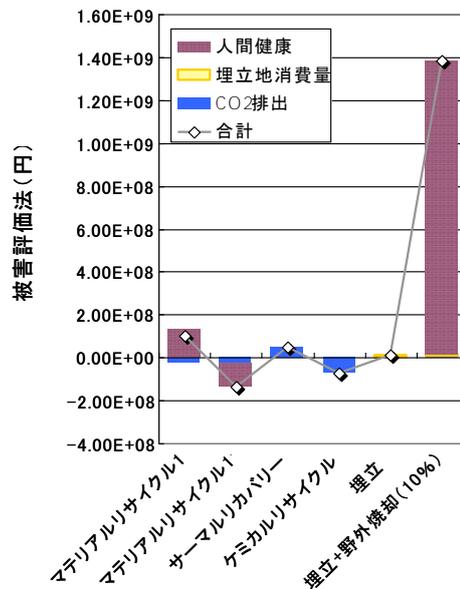


図11 被害評価による重み付け結果

重み付けの結果(図10、11)、どちらの重み付け手法を用いた場合においても、難燃剤含有廃プラスチックを意図的に添加した再生品へのマテリアルリサイクルが最も優位なシナリオで

あった。しかし、非意図的に添加した再生品（ビデオテープ）へのマテリアルリサイクルは環境負荷の高いものであるため、製品企画・設計・回収・適切な処理＋再度の用途を確保する必要がある。次いで、ケミカルリサイクル(コークス炉還元)が優位なシナリオであった。しかし、受入プラスチックの臭素付加により制約には留意が必要である。次いで、埋立、サーマルリカバリー、マテリアルリサイクル埋立＋野外焼却の順に環境負荷の高いプロセスとなった。埋立＋野外焼却のプロセスは、どれくらいの頻度で野外焼却が行われているかで大きく値は変化するので、十分に把握する必要があると思われる。今後の課題として室内における摂取比率の精緻化・ダストの挙動の把握が挙げられる。また、昨年 DeBDE は欧州での使用禁止を受けたので、その代替品である他の難燃剤の挙動の把握、リスク評価なども求められるであろう。

7) 家電製品の購入と廃棄に関する経済学的研究（竹内 憲司）

家庭系製品について適切な 3R 政策を進めるには、製品が消費者によって店頭で選ばれてから廃棄されるまで、家庭内でどのように扱われているかを、包括的に検討する必要がある。特にアジアレベルでの物質循環を想像した政策形成にあたっては、日本だけでなく中国・韓国などにおける実態も踏まえた分析が不可欠である。本研究では家庭系製品の中でもテレビに焦点を当て、これを購入してから廃棄するまでの意思決定プロセスについて、日本・中国・韓国の一般市民を対象としたアンケート調査によって明らかにするものである。

日本、中国、韓国に居住する一般市民を対象に、インターネットを用いたアンケート調査をおこなった。日本については 2007 年 3 月に計 2、359 件のデータを、中国については 2008 年 1 月に 600 件のデータを、韓国については 2009 年 2 月に 530 件のデータを収集した。アンケートで尋ねた内容は、次の 3 点に分けることができる。第 1 に、現在保有あるいは使用している製品についての実態を尋ねた。どのメーカーのものを、いつ、いくらくらいで購入したか。またそのとき、もし前に使っていた製品があれば、それはどう処分したか。もしいま使用している製品が故障したとしたら、どうするか。次に購入するのであれば、どのようなタイプのものを、いつごろ購入するつもりか。第 2 に、表明選考法を用いた仮想的な製品に対する評価である。製品属性の異なる仮想的な製品を数種類提示し、どれがもっとも望ましいかを尋ねる。これを通じて、省エネ性能やリサイクル性能といった環境属性の変化がどの程度、消費者に評価されているかを検討することができる。第 3 に、年齢、性別、所得といった回答者の社会経済的属性を尋ねる質問である。これは、第 1 のパートや第 2 のパートで尋ねた内容と組み合わせ分析をおこなうために有益な情報となる。

回答者の平均年齢は日本が 41.6 歳、中国が 38.5 歳、韓国が 41.3 歳であり、中国が少し若い。世帯あたり所得は中国で 5 万元以上 53% となっているが、これは中国における 1 人あたり所得（都市部で 1.3 万元、農村部で 0.4 万元）を 2 倍したものよりも高い。以降の分析結果については、この点を踏まえておく必要がある。なお韓国の回答者の世帯あたり所得は推定で 3500 万ウォン（約 24,500 ドル）であり、2005 年における 1 人あたり年間所得は 23,180 ドルとそう変わらない。テレビの保有台数は日本が 2.46 台、中国が 2.23 台、韓国が 2.13 台である。中国の台数が直観的にはやや高くなっているように思われるが、調査対象が都市部の富裕層であることを考えると、納得できる。現在もっともよく使用しているテレビのタイプを尋ねたところ、日本ではブラウン管タイプが 73% であったのに対し、中国では 55%、韓国では 59% であった。また液晶テレビ、プラズマテレビについては、日本で 21% および 5%、中国で 37% および 8%、韓国で 31% および 10% という結果が得られた。もっともよく使用しているテレビを購入した時期について訪ねたところ、日本では 5 年前までという回答が 41% であったのに対

して、中国では 68%、韓国では 64%であった。中国や韓国の方が、より最近になってテレビを購入した(買い換えた)人が多いことが分かる。現在もっともよく使用しているテレビを購入したとき、それまで使っていたテレビがあったとしたら、どのような方法で処分したかを尋ねた。すると日本では「家電小売店に引き取ってもらった」という回答が 43%でもっとも多かったが、中国では「そのまま保有しており、別の部屋などで使用している」、「知人や中古品業者に引き取ってもらった」という回答が 47%、26%であり、1 番目、2 番目に多かった。韓国では「そのまま保有しており、別の部屋などで使用している」という回答が 34%で 1 番目に多かった。続いて同率で「家電小売店に引き取ってもらった」、「知人や中古品業者に引き取ってもらった」という回答が 21%で続いた。日本では家電リサイクル法が存在するため、製品を買い替えるときに小売店に引き取ってもらい、リサイクルするという行動が多くなっているのに対し、中国や韓国では家庭内で再利用したり、家庭外へ譲渡・売却したりといったように、リユースにつながる行動が多くなっていることが伺える。

結論＝家庭系廃製品に関係する残留性化学物質として、臭素系難燃剤や重金属類を中心にアジアを中心とした環境汚染実態とその移動、室内やリサイクル処理における挙動、その挙動を支配する物理化学特性、3 R シナリオによる環境負荷や曝露傾向など把握に取り組んだ。その結果、代表的なBFRsであるPBDEsとHBCDsがアジアの生物環境試料から検出され、その汚染は先進国のみならず途上国にまで及んでいること、途上国ではPBDEsの汚染が顕在化した一方、先進国ではHBCDsの汚染が急速に進行したことを明らかにした。さらに海域と陸域の遠隔地に着目し、その汚染実態と経年変動について調査するとともにBFRsによるグローバル汚染の動向を解析した。海域の試料は西部北太平洋に分布する小型歯鯨類を、陸域の試料はロシアのバイカル湖に生息するバイカルアザラシを活用した。分析の結果、陸域・海域の遠隔地生物からPBDEsとHBCDsが検出され、これらBFRsによる汚染が地球規模で拡大したことをあらためて実証できた。歴史トレンドを解析した結果、PBDEsによる汚染は有意に上昇し近年定常もしくは低減状態を示したのに対し、HBCDsは穏やかな濃度上昇の後、今世紀になって急激な汚染レベルの増大が認められた。PBDEs需要の世界的な規制に伴うHBCDsの代替利用増大が、今後のグローバルな汚染動向を決めると予測された。アジア域のe-wasteリサイクル処理現場が残留性化学物質による汚染の‘ホットスポット’となっており、e-wasteの不適正処理が環境汚染やヒトへの曝露を引き起こすことが示唆された。

住宅における実態調査により、室内空気、ハウスダスト中の BFRs ほか、残留性化学物質濃度について把握し、その媒体間（室内空気／ハウスダスト間）分配について知見が得られた。室内環境において、BFRs を使用した家電製品及び繊維製品の設置は室内空気への BFRs の負荷源となることが確認できた。これら製品から放散された PBDEs、HBCDs のうち 1/3 程度はダストへの移行及び床面への直接沈着によって室内に存在することが確認された。炭循環換気と空気清浄機はいずれも室内空気中の BFRs に関して、十分な制御効果を持つことが確認され、有効な対策技術と考えられた。HBCD などの BFR および非 BFR の難燃剤である芳香族リン酸エステル類の水溶解度、オクタノール水分配係数、蒸気圧を測定し、さらに、その実測データより他の物性値も導出した。また、縮合型芳香族リン酸エステル類の中で実測できなかった物理化学パラメータについては、QSPR によって適切な推算値を提供した。実測データの多くは、今までにないデータであり、本研究によって初めて報告されたものである。また一方、解離基を有する BFR については、その pH 依存性を明らかにし、任意の pH における S_w と K_{ow} の値を再現できる式を提示した。さらに、実測データと UNIFAC モデルを用いて、BFR のポリスチレ

ンから大気または水への分配ポテンシャルを推定した。

家電製品のリサイクルや廃棄物処理システムにおけるレアメタルや有害金属の分配を調査することで、最終製品におけるレアメタルのリサイクルの可能性やBFRの制御特性を考察したところ、液晶テレビの場合、素材に注目すると基板、パネルガラスにおいてSb、Srなどのレアメタルが7割ほど、基板、パネルガラスにPb、Asなどの有害物質が約8割という高い割合で分配されていた。したがって、液晶テレビでは基板とパネルガラスを別途回収することによってレアメタルの濃縮具合が高まり、レアメタルのリサイクル可能性が向上し、有害金属の環境排出の回避が可能になると考えられた。エントロピーに基づく評価手法で試算した結果、ほとんどの元素において、直接破碎手法<<簡易分解・破碎手法<手分解手法の順番で物質濃縮効率(SCE)が高くなり濃縮具合が増加していることが分かった。しかし、手分解手法と簡易分解・破碎手法との物質濃縮効率の差はわずかであった。Feに関しては3手法間の差はほとんどなく、磁力選別が機能していることが分かった。また、日本・中国・韓国における消費者のテレビに関する購入・使用・廃棄行動の詳細なアンケート調査を用いて、3R政策の基礎形成を支援するデータ分析をおこなった。

臭素化ジフェニルエーテル(PBDE)を含有する廃テレビのバックカバーに焦点をあて、PBDE製造からテレビの使用、バックカバーの各種リサイクル、再生品の使用、廃棄までの段階を対象としたLCAを実施した。評価項目はCO₂排出量、PBDE排出量、PBDD/DFs排出量、埋立処分量とし、リサイクル・廃棄処理のシナリオとして、マテリアルリサイクル(ビデオカセットや難燃処理プラスチック)、ごみ発電、コークス炉原料化、埋立、埋立+一部野外焼却、を比較した。対策コスト法、被害評価法のいずれの重み付け手法を用いた場合も、難燃剤含有廃プラスチックを意図的に添加した再生品へのマテリアルリサイクルが最も優位なシナリオであった。ついで、コークス炉原料化シナリオが優れると評価された。

英語概要

3R-Scenario Analysis of Persistent Toxic Chemicals from Household Waste Materials

Sakai S¹, Hirai Y¹, Asari M¹, Kuramochi H², Takigami H², Tanabe S³, Takahashi S³, Takeuchi K⁴

¹ Environment Preservation Center, Kyoto University, Japan; ² Research Center for Material Cycles and Waste Management, National Institute for Environmental Studies, Japan, ³ Center for Marine Environmental Studies (CMES), Ehime University, Japan; ⁴ Graduate School of Economics, Kobe University, Japan

Abstract

Hazardous substances such as heavy metals and brominated flame retardants (BFRs) which are contained in various household commodities may be emitted into the environment during the process of recycling and/or waste disposal. Taking into consideration recycling and waste disposal in the Asian region, we conduct research on environmental chemistry and systems analysis. Material recycling and thermal recovery have been set as the primary subject of investigation. In the recent two or three decades,

PBDE levels increased in earlier years and then remained at a steady state or decreased, while concentrations of HBCDs increased moderately in late 20th century and then showed drastic rise in recent years. E-waste recycling sites are hotspots of pollution by toxic heavy metals, BFRs and dioxin-related compounds including brominated dioxins. The BFR levels were analyzed for indoor air and dust samples from actual residential homes, model rooms and e-waste recycling facilities to investigate a suite of pollutants in indoor air and dust. Lifecycle assessment on recycling and waste treatment of plastic back cover of television sets was performed. Material recycling into the same type of plastics had the lowest environmental impact among the six scenarios, followed by feedstock recycling in cokes oven.

Key words: Persistent Toxic Chemicals, Brominated flame retardants (BFR), Heavy Metals, 3R (Reduce, Reuse and Recycle), Electric and Electrical Waste