

京都大学	博士 (工学)	氏名	小柴 絢一郎
論文題目	動的サブスタンスフロー・環境動態モデルによるポリ塩化ビフェニル排出抑制策の効果推定および短鎖塩素化パラフィンの排出量・環境中濃度推定		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、サブスタンスフローモデルおよび環境動態モデルを利用して、過去から現在におけるポリ塩化ビフェニル (PCB) および短鎖塩素化パラフィン (SCCPs) の排出量や環境中濃度を推定するとともに、各種 PCB 排出抑制策による環境中への PCB 排出削減量を評価した結果をまとめたものであって、5章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、本論文の背景と目的ならびに論文の構成を述べている。本研究で対象とした PCB および SCCPs は、どちらも難分解性、生物への高蓄積性、長距離移動性、有害性の4つの性質を持った残留性有機汚染物質 (POPs) である。これら POPs は残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約で規制されており、条約発効時の対象であった12物質群はレガシーPOPsと呼ばれ、条約発効後に規制対象に追加された POPs は新規 POPs と呼ばれている。PCB はレガシーPOPs に属し、国内では1970年代に既に製造禁止となっていた。処理施設の立地は難航し、PCB 廃棄物の処理が本格化したのは2004年からであるが、高濃度 PCB 廃棄物については、処理完了を迎えつつある。PCB の環境排出や環境中での挙動に関して、これまでに多くの研究がなされてきたが、PCB 分解処理事業の効果を事後的に検証することは十分になされていない。SCCPs は新規 POPs に属し、近年まで生産・輸入されていた。PCB に比べ SCCPs の環境排出等に関する知見は不足しており、有効な対策の実施には発生源の把握等が重要である。そこで本論文では、POPs および POPs 含有製品の生産・使用から保管・廃棄までのライフサイクルを対象とした製品用途別のサブスタンスフローモデルを用い、各段階のフローやストックに排出係数を乗じることで、POPs の環境排出量の推移を推定するとともに、推定した排出量を環境動態モデルの入力として環境中濃度の推移を推定している。また、環境中濃度と実測値とを比較することにより、排出インベントリの妥当性の検証や、未考慮の発生源の寄与を検討し、各種 PCB 対策の効果を推定することや、SCCPs の排出経路を把握することを本論文の目的としている。</p> <p>第2章では PCB に関するサブスタンスフローモデルを構築し、1950年から2030年までの環境中への PCB 排出量を推定し、さらに動的推定可能な環境動態モデルを構築し、環境中 PCB 濃度を推定した。環境中濃度推定値と実測値との比較により、サブスタンスフローモデルおよび排出量推定についての手法としての有効性を検証し、考慮できていない PCB 発生源の存在可能性について考察している。PCB のサブスタンスフローモデルにおいては、PCB および PCB 含有製品の生産・使用・保管・漏洩・紛失・不適正処分・分解処理といったプロセスを考慮するとともに、セメント製造等の熱工程からの非意図的な PCB 生成を含めて、大気・水・土壌への PCB の環境排出量を推定している。各プロセスからの排出は、フロー量またはストック量に排出係数を乗じて推定している。特に揮発プロセスでは、物性の違いを考慮し、1塩素化物から10塩素化物までの PCB 同族体別に排出係数を設定している。また、環境動態モデルにおいては、国立環境研究所の作成した定常状態モデル (Mackay レベル3) である MuSEM をベース</p>			

京都大学

博士 (工学)

氏名

小柴 絢一郎

として、環境中濃度の時間的推移を予測可能な動的モデル (Mackay レベル 4) に拡張をしている。対象とする媒体は、大気・水・底質・土壌および植生である。水・底質は淡水と海水を区別し、土壌は自然地・農地・都市部を区別する。環境中濃度実測値としては、環境省による全国 30 地点以上での複数年にわたる測定データや、年代特定された底質コア試料の分析結果を用いている。推定された PCB の環境排出量は、1970 年代にピークを持ち、PCB の生産・使用禁止を受けて排出が急減していた。また、2000 年代後半から本格化した PCB 廃棄物分解処理事業により近年の PCB 排出量の減少が加速しており、2030 年には PCB 製品からの排出ではなく熱工程からの排出が主要な発生源になると推定している。環境中濃度予測値は、実測値での減少傾向をおおむね再現していたが、大気中の 2 塩素化物濃度を過小推定しており、未考慮の発生源 (顔料不純物) の影響と推察している。

第 3 章では、第 2 章で構築した PCB サブスタンスフローモデルを応用することによって、PCB 排出抑制策の効果推定を行なっている。具体的には、過去に実施された PCB の製造禁止などの排出抑制策や、今後実施される将来的な仮想抑制策に関するシナリオを設定し、シナリオ毎に排出量を推定することで、排出抑制策毎の 1950 年から 2050 年までの PCB の環境排出量削減効果を推定している。評価対象とした対策は、1) 生産・使用規制、2) 廃棄物保管、3) 保管厳格化、4) 分解処理、5) 処理促進 I (掘り起こし調査による電気機器類の分解処理量増加)、6) 処理促進 II (シーラント、有機顔料、その他開放系製品を分解処理対象に追加) の 6 種類である。なお、1) から 6) までの対策では排出量に変化しない熱工程からの非意図的 PCB 生成は、シナリオ間での差が生じないことから、第 3 章では評価対象外としている。また、2) 廃棄物保管と 4) 分解処理の削減効果の比較にあたっては、評価期間を 2050 年から 2100 年まで延長した場合や、保管中の紛失率が経年的に増加する場合について、感度解析を実施している。対策効果は、1) 生産・使用規制が最大で、次いで 2) 廃棄物保管と 4) 分解処理が同程度であった。ただし、感度解析の結果、長期的には 4) 分解処理の効果が 2) 廃棄物保管の効果を上回り、分解処理の重要性を指摘している。

第 4 章では、第 2 章で構築したモデルを、新規 POPs である SCCPs について適用し、1950 年から 2050 年までの環境中への排出量を推定している。特に、排出量推定におけるパラメータの知見不足に対応するため、パラメータ不確実性を考慮したモンテカルロシミュレーションを実施している。また、既往研究で考慮されていなかった SCCPs 含有製品のマテリアルリサイクル工程を含めた排出量を推定している。推定の結果、近年の主な発生源は SCCPs 含有製品ストックからの揮発であるとした。また、環境中 SCCPs 濃度を推定し、実測値との比較を行うことで、未考慮の SCCPs 発生源の存在可能性や、モデルの空間分解能の低さによる影響について考察している。

最後に、第 5 章において、本研究の結論、課題および今後の展望を述べている。

氏名	小柴 絢一郎
----	--------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、残留性有機汚染物質を対象としたサブスタンスフローモデルおよび環境動態モデルを構築し、構築したモデルをポリ塩化ビフェニル(PCB)および短鎖塩素化パラフィン(SCCPs)に適用して、両物質の環境への排出量や環境中濃度を推定するとともに、PCBの排出抑制策を評価したものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) PCBの生産・使用・保管・廃棄および熱工程からの非意図的生成を対象としたサブスタンスフローモデルを構築し、1950年から2030年までの日本でのPCBの排出量を推定した。1970年代のPCB製造禁止により、製造過程からの排出や、感圧紙などの短寿命の開放系製品からの排出が削減され、排出量は急激に減少すると推定された。その後、短寿命製品のストックが減少し、電気機器など長寿命PCB使用製品からの揮発・漏出が主な発生源となると、排出量の削減は緩やかになると推定された。さらに、2000年代後半からPCB分解処理が本格化すると、再び排出削減が加速し、2030年にはPCBの主な発生源はPCB製品由来ではなく、熱工程からの非意図的生成になると推定された。環境排出量推定結果をもとに環境動態モデルを用いて環境中PCB濃度を推定し、実測値と比較したところ、両者はおおむね同様の傾向であったが、2塩素化物の大気濃度推定値は実測より低く、未考慮の発生源(顔料不純物)の影響が示唆された。

(2) 種々のPCB排出抑制策の効果を推定するため、6種類の排出抑制シナリオを設定し、PCB排出削減量を推定した。その結果、1950年から2050年までのPCB排出量の累積排出量削減効果が最も大きかった対策はPCB製造禁止であり、次いで、PCB廃棄物保管およびPCB分解処理が同程度の削減効果を示した。しかし、PCB廃棄物保管ではPCBのストックが維持されることにより、ストックからの排出が継続し、評価期間を2100年まで延長した場合には、PCB廃棄物保管の累積削減効果はほぼゼロとなる。将来的な排出量の観点では、PCB分解処理が重要であることが改めて示された。

(3) SCCPsを対象に1950年から2050年までの日本での環境排出量および環境中濃度を推定し、近年の発生源は主にSCCPs含有製品のストックからの揮発であるとした。ただし、環境中濃度の予測値は、排出量の不確実性を考慮しても、近年の実測値より低く、本研究で未推定の発生源(輸入製品中SCCPsや中鎖塩素化パラフィン中不純物等)や、モデルの空間分解能の向上、気温影響の重要性が示唆された。

以上、本論文は、PCBおよびSCCPsを対象にサブスタンスフローモデルおよび環境動態モデルを用いて、対象物質の主要排出経路を推定し、対策効果を定量的に評価したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和5年2月20日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。