

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

**リスク評価技術と制度の連携を通じたリスクガバナンス
(1-1501)**

平成27年度～平成29年度

Risk Governance through the Cooperation of a Risk Evaluation Technology and the Institutional System

〈研究代表機関〉
国立大学法人大阪大学

平成30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. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 技術と制度の組合せの隘路を補完するリスク評価・管理手法の開発 (国立大学法人大阪大学)	14
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
III. 英文Abstract	47

1. 成果の概要

課題名	1-1501 リスク評価技術と制度の連携を通じたリスクガバナンス
課題代表者名	東海 明宏（国立大学法人大阪大学大学院工学研究科教授）
研究実施期間	平成27～29年度
累計予算額	45,436千円（うち平成29年度：14,709千円） 予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード リスクガバナンス、リスク評価、化学物質管理、リスクトレードオフ、化審法、化管法、マテリアルフロー・ストック解析、ライフサイクルアセスメント

研究体制

(1) 技術と制度の組合せの隘路を補完するリスク評価・管理手法の開発(国立大学法人大阪大学)

1. はじめに（研究背景等）

物質や製品の流れを制御する制度とリスク評価技術の連携を通じて我が国の環境リスク管理は進んできた（化審法、化管法）が、屋内貯留分を対象とした評価は進んでいない。一定期間の寿命を有する物質・製品は、閉鎖空間内での曝露に寄与する成分であるとともに、災害時には潜在的排出源となる。環境内でストックされている化学品・製品の管理が従来のフロー制御を相補うことでリスク管理システムが機能構成上完結し、ひいてはWSSD2020の達成目標に貢献することが期待される。

用途地域制で指定された産業・事業所の立地規制と、入り口段階での物質フローを制御する化審法、化管法、そしてend of pipe 段階での発生源対策を主軸とする大気汚染防止法、水質汚濁防止法は、ハザードを特定してフラックスを制御することを意図されており、必ずしもリスクに基づく評価ではない。事業所立地に関わる都市計画用途地域制は、長い時間経過において立地場所周辺の土地利用変容を制御できてはならず、市中における事業所、家屋の立地や代謝特性、物質・製品利用に伴って発生する複数の環境負荷を同時に、かつ対策技術の導入が新たなトレードオフを発生させないか、を評価する枠組みはない。

2. 研究開発目的

本研究では、3つの軸（物質、用途/製品、ライフステージ）で規定された問題空間において、物質軸で行われてきたリスク評価と、廃棄の断面で集約的に行われた廃棄物処理・処分にかかわるリスク評価をストック管理、マルチプルリスク評価を中心コンセプトにしてつなぐ方法を開発するとともに、ケーススタディを実施する。この方法で得られる情報を活用することで、土地利用規制、生産段階と廃棄段階との連携を通じたリスク管理の機能構成改善やpost WSSD 2020 の戦略を検討する。

3. 研究開発の方法

(1) 技術と制度の組合せの隘路を補完するリスク評価・管理手法の開発

a) 化学物質・製品の類型化を踏まえたストック量推計と将来シナリオ解析

フロー・ストック解析に先立ち、化学物質・製品のうち代表的な流入、流出、貯留に関わる特性、および有害性やばく露特性を有する化学物質・製品を、ケーススタディの対象を選定する。

まず、住空間内の化学物質・製品をその流入、流出、貯留特性に着目し、定性的に三つの類型に分類した。第Ⅰ類型は、住空間構成材料である。建築物の施工から廃棄に至るまでを使用期間と捉えた場合、建材中の化学物質と建築物・建材がストックされる。特徴として、その物理的寿命の長さが挙げられ、物理的寿命が尽きるまでの期間において、化学物質の放散特性にしたがい、ヒト健康リスクのばく露源となりうる。第Ⅱ類型は、機器および機器動作に必要な化学物質である。製品の購買・買換えに従い住宅へと流入し、住宅から廃棄物として流出する。機器の物理的寿命だけでなく、機能的な寿命も考慮する必要があり、数年から10年程度の使用期間、住宅内にストックされると見込まれる。住宅内での放散によりヒト健康被害をもたらすだけでなく、住宅内で放散しきらなかった残存化学物質が、廃棄段階で放散されうるため、広域的な環境リスクにつながりうる。第Ⅲ

類型は、屋内快適性維持のための化学物質・製品であり、日用消耗品や機能性化学品がこれにあたる。日常的・定常的に使用される傾向があり、家屋および販売店といった使用の直前の段階で一時的なストックとなる。

次に、化学物質・製品の有害性やばく露特性に基づく分類を行った。PRTR対象物質462物質を対象に、表 1 に示す有害性を表す9変数と、ばく露特性を表す7変数の、計16変数をPRTRインフォメーション広場より収集し、入力データセットを作成した。有害性に関してはPRTRインフォメーション広場でのクラスの判断基準を使用した。排出量データに関しては、解析時点における最新の情報として2015年のPRTR排出量データを使用した。分類方法としてSOM-Wardクラスタ法を用いた。自己組織化マップ(以下、SOM : Self- organization Map)は、大規模、高次元データの視覚化のために有効な手段であり、入力データの類似度を二次元のマップで表現でき、類似度を保持したマップにクラスタ分析を適用することで、クラスタリング手法として用いることもできる。SOMのクラスタ分析におけるデータ間の距離の定義方法は、SOM-Wardクラスタ法を用いた。Ward法は、従来のクラスタ分析で用いられている方法であり、クラスタを併合する際、併合後のクラスタに含まれる対象とそのクラスタ重心の距離の二乗和が最小となるように距離が定義されている。そのため、クラスタ内のサンプルの分散が最小となるように分類される。SOM-Wardクラスタ法は、Ward法に加え、「クラスタ同士がSOMのマップ上で隣接している場合のみ併合する」というルールを追加したものである。このルールによって、マップ上のノードがデータ分布の固有のつながりを保持しているというSOMのメリットを活かすことが可能となる。

表 1 SOM-Ward クラスタ法による PRTR 対象 462 物質の分類に用いた 16 変数

有害性を表す9変数*	ばく露特性を表す7変数**
1. 発がん性クラス (カテゴリー:1,2,3)	10. 総合製造・輸入量区分 (カテゴリー:1,2,3,4,5)
2. 生殖毒性クラス (カテゴリー:1,2,3,4)	11. 届出排出量合計 (スコア=Log[排出量kg])
3. 変異原性クラス (カテゴリー:0,1)	12. 届出移動量合計 (スコア=Log[排出量kg])
4. 経口慢性クラス (カテゴリー:1,2,3,4)	13. 対象業種届出外排出量 (スコア=Log[排出量kg])
5. 吸入慢性クラス (カテゴリー:1,2,3,4)	14. 非対象業種届出外排出量 (スコア=Log[排出量kg])
6. 作業環境クラス (カテゴリー:1,2,3,4)	15. 家庭排出量 (スコア=Log[排出量kg])
7. 感作性クラス (カテゴリー:0,1)	16. 移動体排出量 (スコア=Log[排出量kg])
8. 生態毒性クラス (カテゴリー:1,2,3)	(排出量は2015年値を用いた)
9. オゾン破壊性クラス (カテゴリー:0,1)	

*有害性を表す変数に関して：カテゴリー値が高い程、毒性が強くなるように、化管法で定められるクラスを逆順にしてカテゴリー値を与えた。また欠損値については、化管法が定める最低毒性クラスの基準値の 10⁻¹ の値を有すると仮定して、逆順にして設定したカテゴリー値のさらに-1のカテゴリー値を与えた。変異原性、感作性、オゾン破壊性の3クラスはその化学物質が該当する場合”1”を、該当しない場合は”0”を与えた。

**ばく露特性を表す変数に関して：総合製造・輸入量区分は、区分5：100トン以上、区分4：1トン以上100トン未満、区分3：1トン未満、区分2：0トン、区分1：不明とした。

過去/現在/将来モデルの構築 × ライフサイクル考慮 => 政策評価

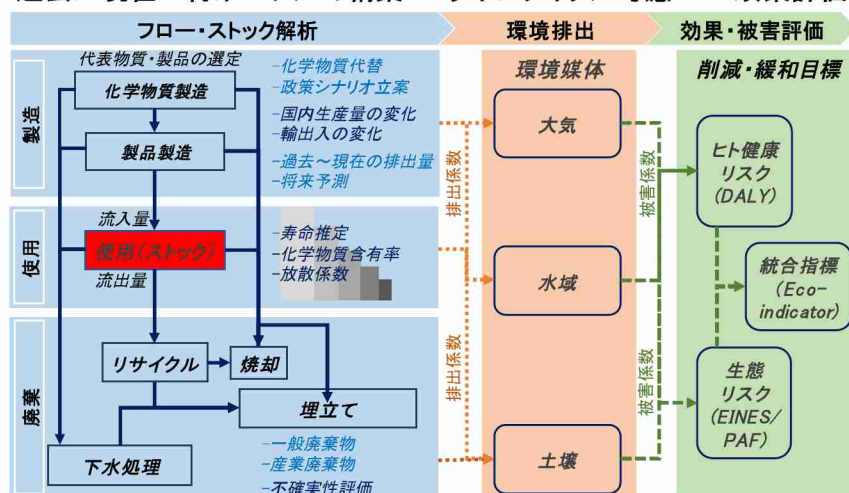


図 1 製品ライフステージ別フロー・ストック解析とマルチプルリスク評価の連携枠組み

以上の方法によって選定した代表的な化学物質・製品に対して、図 1に示す枠組みのもとでリスク評価を行った。具体的には、1) 住空間に着目した化学物質・製品フロー・ストック解析、2) フロー・ストック解析に必要な原料や中間材のフロー・ストック量の収集、3) フロー・ストック解析に基づく住空間内ばく露量および住空間からの環境排出量の推計、そして、4) 種類の異なるリスクを、統合影響指標として比較可能な指標で定量評価する。

1) 2) に関して、まず統計値を収集し、過去から現在までの統計値の推移や、消費傾向に基づき製品使用段階への流入フローの将来値を推計した。製品使用段階の化学物質ストックの経年的な変化は寿命関数により推計し、これに伴う廃棄物処理段階への遅れを有する流出フローが推計される。一般的な寿命関数として、ワイブル分布、正規分布、対数正規分布、ベータ分布、などが挙げられる。これらの内、その適合性の良さからワイブル分布が用いられる研究が多く、本研究でも建物の寿命関数、家庭用空調機器に関する評価でワイブル分布を用いた。また、製品や用途によっては、漏えいや放散過程も流出フローとして考慮する。

3) 4) の推計から得られるばく露やリスク評価は、フローとストックのどちらに由来するか、製品ライフステージのどの段階で排出されたリスクであるかを区別できるように推計し、リスク管理が必要な領域の考察に用いる。

b) リスクトレードオフ解析手法の開発と適用

トレードオフ評価のためには、1つの要素と他の要素を同時に評価でき、かつ改善行動のリスクへの影響を評価できる枠組みを構築する必要がある。また、これまでのリスク管理の戦略の下で、個別に行われてきた化学物質代替施策などを、同一の枠組みで比較し、全体としてどのような目標リスク・対抗リスクの増減をもたらしたかを総体的に考察することは行われてこなかった。そこで、本研究では個別のケーススタディの結果から得られたフロー、ストック推計結果、目標リスク、対抗リスクの評価結果を図 2に定義した同一の縦軸・横軸で示す方法を、リスクトレードオフの管理枠組みとして提案する。



図 2 リスクーリスクトレードオフ管理図の定義 (ToR: Trade-off ratio、FSR: Flow stock ratio)

c) データ・評価基盤の整備

各ケーススタディで用いた基礎データや方法論、政策シナリオの根拠情報などを共有するためのプラットフォームとして、リスク評価の事例ベースの枠組みを構築した。本研究の事例ベースとは、1つのケーススタディに関わる主要な情報を1つのweb page 内に整理し、各pageを集約したポータルサイトとして運用されるものと定義した。各web page は次の3つの情報を提供する様式とした。①評価の前提条件・解析条件: 化学物質・製品およびその用途、時間や空間等のバウンダリ、シナリオ作成の根拠情報となる対策技術や管理水準。②評価結果: ミッドポイントに当たる結果としてシナリオごとのフロー・ストック推計結果、ばく露、有害性の評価結果、エンドポイントに当たる結果としてリスク評価結果、リスク対策による削減効果。③評価に用いた調査統計データや評価手法・評価技術の出典等。

①および②はリスク判定に必要な情報であり、③は根拠データや原著文献へのトレーサビリティ、および評価結果の信頼性を支える情報である。全てのweb page が共通様式でまとめられることにより、リスクトレードオフ評価結果の収集と公開を効率化する事を意図した。

4. 結果及び考察

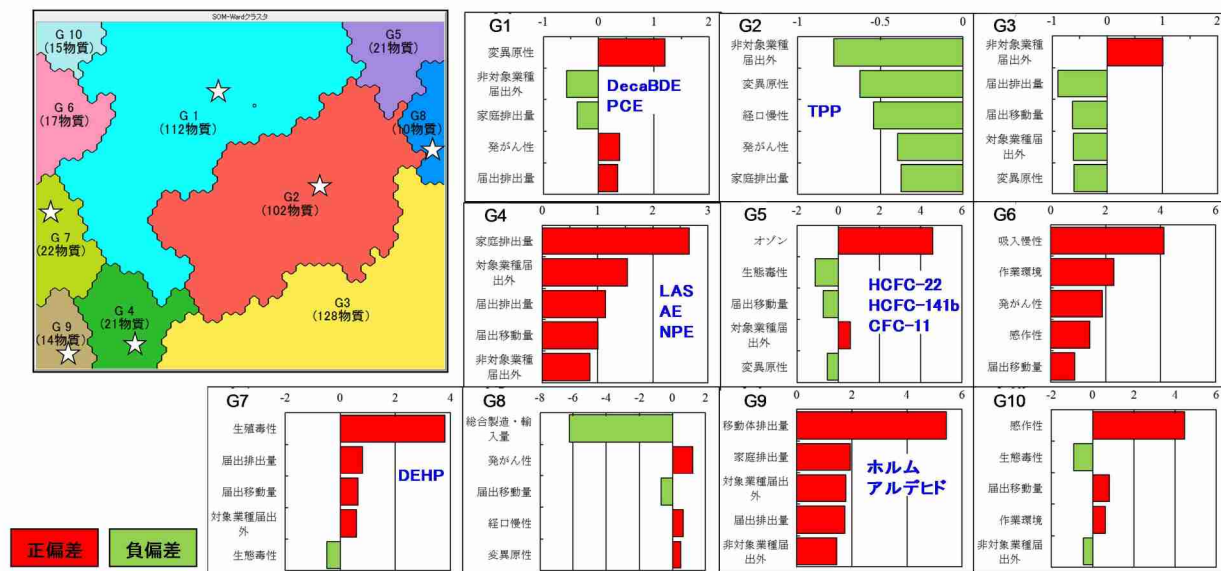
(1) 技術と制度の組合せの隘路を補完するリスク評価・管理手法の開発

a) 化学物質・製品の類型化を踏まえたストック量推計と将来シナリオ解析

PRTR対象462物質の有害性クラス、ばく露量を入力データとし、SOM-Wardクラスタ法によって分類した結果、図 3の10グループに分類された。図 3左上図は化学物質分類の全体マップであり、各グループにどれだけ化学物質が含まれたか示した。図 3右下にあるG1~G10と付した10のグラフは各グループの特徴ウィンドウである。これらは各グループの特徴を簡易に理解するための情報として示した。各特徴ウィンドウに示す5つの変数の選定手順は次の通りである。まず、分類に用いた16変数に対して、グループ平均と全体平均とを比較して有意な偏差であるか否かを決定するためにt検定を実行した。次に、検定結果に基づきt検定の絶対値の降順で16変数を並べ替え、上位 5個を特徴変数として、特徴ウィンドウに表示した。変数値のグループ平均が全体平均より小さい場合は緑色(負偏差)、大きい場合は赤色で示される(正偏差)。

図 3の分類結果から、ケーススタディの対象化学物質は6つのグループから選定されたことが読み取れた。全体マップではケーススタディの対象物質の位置を”☆”で示し、かつ具体的な物質名を特徴ウィンドウ内に示した。これら6グループに含まれる化学物質数は462物質中276物質(63%)であり、現行のPRTR対象物質に基づく分類に対して、偏りがなく物質を選定できたことが示唆された。また、最も多い128物質を含むG3から選定されなかった。G3の特徴ウィンドウに着目すると、非対象業種からの届出外排出量の偏差が正方向であり、住空間内への流入や滞留に着目した本研究において、G3に内在する物質を選定する優先度は低いと考えられた。

以上の SOM-Ward クラスタ法を用いて得られた分類結果である図 3、および住空間内の化学物質・製品の流入、流出、貯留特性による三類型とのクロス表 2 を作成した。表 2 より分類に用いた変数や定性的な貯留特性に関して、偏りがないようにケーススタディが実施されたと言える。



※偏差: 全体データの平均値からクラスタ範囲の平均値の差。単位は全体データの標準偏差(t検定より)。

図 3 SOM-Ward クラスタ法による PRTR 対象 462 物質の分類結果

対象とした化学物質・製品におけるケーススタディの概要は、後述するリスクトレードオフ評価結果と合わせて表 3(※6頁)に整理した。第1列はケーススタディを識別する番号を、第2~3列に対象の化学物質・製品を示した。第4~6列は解析シナリオと、解析シナリオで対象となる目標リスクと対抗リスク、評価期間を示した。第7~13列は、対象製品のライフステージ上のどの段階でどのような目標リスクもしくは対抗リスクが存在するかを、フローとストックの経路別に整理した。第14~17列は、フロー・ストック解析結果およびリスク評価結果を示し、評価結果から相対的なストックの重要性を示した。ヒト健康リスクに関しては、障害調整生存年(以下、DALY: disability adjusted life years)を用いることで、ケース間での比較を可能とした。リスク評価結果は、ライフサイクルアセスメント(以下、LCA: life cycle assessment)の枠組みにおけるエンドポイント評価指標として示しており、目標リス

クと対抗リスクを合計して示した。これにより、フロー・ストックそれぞれに起因する「リスクの寄与率」を明示した。特にストックに由来するリスクが大きい化学物質・製品は、リスクが長期に及ぶことが懸念されるため、「相対的なストック管理の重要度」をVery low, Low, Middle, High, Very high の5段階で示した。Very low は「リスクへの寄与率」が 20% 以下、low は20%~40%、という様に20% 間隔で区切った。

表 2 流入・流出・滞留特性による 3 類型および SOM による 10 類型からみたケーススタディの特徴づけ

製品・化学物質の特徴		SOMによるPRTR対象物質のクラスター分類 ※()内は分類された物質数										
		G1 (112)	G2 (102)	G3 (128)	G4 (21)	G5 (21)	G6 (17)	G7 (22)	G8 (10)	G9 (14)	G10 (15)	
製品・ 化学物質 分類	I 住空間 構成材料	住空間を構成する建材、建築物、 および製品中の化学物質成分					発泡 断熱材				合板用 接着剤	
	II 機器動作 に必要	住空間内での居住者ニーズを機能的 に実現するための製品、および 製品動作・性能発揮に必要な化学 物質	難燃剤	難燃剤			機器用 冷媒		プラスチック 可塑剤			
	III 屋内快適 性維持	居住者の快適性を維持するための 製品(薬剤等)	業務用 洗剤			家庭用 洗剤			プラスチック 可塑剤			

b) リスクトレードオフ解析手法の開発と適用

表 3にケーススタディの概要を示した。ここではまず、3. 研究開発の方法で述べた方法に基づくリスクおよびリスクトレードオフ解析手法の具体的な適用手順とその結果を、電気・電子機器に用いられる難燃剤を取り上げ、説明する。電気・電子機器に用いられる難燃剤 デカブロモジフェニルエーテル（以下、DecaBDE: decabromodiphenyl ether）、およびその代替物質候補のリン酸トリフェニル（以下、TPhP: triphenyl phosphate）について、用いたデータや方法、およびその結果を考察した。

このケーススタディにおける目標リスクはヒト健康被害であり、対抗リスクは生態系影響である。DecaBDE、TPhPともに目標リスクと対抗リスクに影響が見込まれ、代替の有無によるリスクバランスの変化がトレードオフとして懸念された。過去の化学物質代替が行われた実績を踏まえて、製品代替に関するシナリオ作成を行い、リスク評価を実施した。

図 4にDecaBDEおよびTPhPのフロー・ストック解析結果として、電気・電子機器中のプラスチックに用いられる難燃剤の国内需要量、国内製造量、ストック量、排出量を示した。

2015年から2030年にかけての国内需要量および製造量の将来推計に関しては、図 5に示す2つのシナリオを設定した。シナリオAでは1990年代以降の実態に即してDecaBDEからTPhPへの代替が行われ、シナリオBでは1990年代以降も代替が行われず、と設定した。両シナリオとも、2000年～2015年までの実際の難燃剤の需要動向を考慮し、2016年～2030年までの難燃剤需要量は2015年以降変化しないと仮定した。これにより家庭への流入量が推計され、製品の寿命関数および製品ライフステージ別の排出係数を乗じることでストックおよび家庭からの流出量も推計された。

製品ライフステージ別・排出先の環境媒体別の排出係数に関しては、先行研究において知見が少なく、さらにそのスケールは 10^{-5} から 10^{-3} まで分布していたため、ブートストラップ法を用いて排出係数の範囲を推定した。

図 6左側にDecaBDEの排出係数とその信頼区間を示し、図 6右側に排出係数の信頼区間を用いた排出量推計結果を示す。この結果から、排出係数の不確実性により、環境排出量に1/3～3倍程度の不確実性を有することが示された。

さらに、各環境排出量に起因するヒト健康および生態系への影響を、LIME2の被害係数を用いて、統合指標: Eco-indicator Yen (単位としては 円_{eco-indicator}) として算定し、両リスクを評価した(図 7)。図 7左側はシナリオAの結果を示しており、DecaBDEによるヒト健康影響を目標リスクとし、TPhPへの代替によりこれを削減しようとした場合、対抗リスクである生態系影響が大きくなると評価された。ただし、縦軸と横軸の尺度に着目し、ヒト健康影響と生態系影響の合計値で評価すると、TPhPへの代替により影響が小さくなることが読み取れた。そのため、DecaBDEからTPhPへの代替は、総量としてリスクの削減に寄与しうると考えられた。シナリオBでは代替がなされないためヒト健康影響およびリスクの総量が増大し続ける結果となった。また図 7右側は、ヒ

表 3 ケーススタディの概要とリスク評価結果

ケーススタディ番号	化学物質	製品	対策シナリオ	リスク (上段: 目標リスク 下段: 対抗リスク)	解析年度	経路	製品ライフステージ				結果 (2015年値)		相対的な ストック管理 の重要性*	
							製造場	使用場	廃棄場	環境排出量	リスク量 (単位)	リスクへの 寄与率 (%)		
1	HCHO	HCHO形 接着剤	化学物質低含 有型製品への 代替	接着剤中ホルムアルデヒドによる室 内空気汚染	1970 ~ 2030	フロア ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	9.96 (t-HCHO) 9.29 (t-HCHO)	12,911 (DALY) 206 (DALY)	98.4 1.6	Very Low
				接着剤代替によるGHG排出の増加										
2	GFC HCFCs HFCs	建築用 発泡断熱材	低ODP、低GWP 物質への代替	断熱材中発泡フロロン (ODS) の放 散、排出	1972 ~ 2030	フロア ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	838 (t) 37,689 (t) 747 (t) 49,108 (t)	1,644 (DALY) 73,947 (DALY) 164 (DALY) 10,733 (DALY)	フロア由来: 2.1 (%) ストック由来: 97.9 (%)	Very High
				発泡剤中フロロンの代替による高GWP ガスの放散、排出										
3	R22 R410a R32	空調機器 用冷媒	低GWP 物質へ の代替	機器中冷媒フロロン (ODS) の漏え い、排出	1952 ~ 2030	フロア ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	0 (t) 7,108 (t) 4,802 (t) 54,620 (t)	2,054 (DALY) 386 (DALY) 4,023 (DALY) 3,190 (DALY)	84.2 15.8 55.8 44.2	Low Middle
				冷媒フロロンの代替によるGHG排出増 加										
4	DecaBDE TPHP	電気、電子 機器用 難燃剤	健康リスク配慮 物質への代替	難燃剤の環境排出を低減したヒト健 康影響	1976 ~ 2030	フロア ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	149 (t) 3,875 (t)	2,241,034 (yen) 705,584 (yen)	76.1 23.9	Low
				難燃剤代替による生態系影響の増 加										
5	LAS AE	洗剤	健康リスク配慮 物質への代替	洗剤の推計排出による生態系影 響	1970 ~ 2030	フロア ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	9,159 (t) 94,483 (t)	5,132,008 (yen) 180 (yen)	100.0 0.0	Very Low
				洗剤代替による生態系影 響										
6	R12 R134a R600a	冷蔵庫用 冷媒	低GWP 物質へ の代替	機器中冷媒フロロン (GHG) の漏え い、排出	1952 ~ 2030	フロア ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	6,057 (t) 5 (t)	11E-3 (PAF) 3.5 (DALY)	- -	-
				冷媒代替による機器エネルギー消費 (発電部門GHG)の増加										
7	PCE DEHP	ドライ クリーニング 用洗剤	立地規制による 排出源店舗の 移動	店舗からの排出によるヒト健康影響 店舗立地規制、店舗移転によるばく 露量の移動	2005, 2010, 2015	フロア ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	386 (t)	3.8E-01 (DALY)	-	-
				可塑剤の環境排出を低減したヒト健 康影響										
8	DEHP	プラスチック 製品	-	可塑剤の環境排出を低減したヒト健 康影響	1945 ~ 2030	フロア ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	120,321 (t) 1,617,250 (t)	92 (DALY) 2.6E-2 (species/vr)	- -	- -
				環境排出による生物多様性の損失										

* 「相対的なストック管理の重要性」は「リスクへの寄与率」(以下、x)に基づき設定した。Very Low: x<=20; Low: 20<x<=40; Middle: 40<x<=60; high: 60<x<=80; Very High: 80<x。第2列化学物質の名称等: HCHO: formaldehyde, CFC: chlorofluorocarbon, HFCs: (some of) hydrochlorofluorocarbon, PAF: potential for atmospheric forcing, GWP: global warming potential, ODP: ozone depletion potential, LAS: linear alkylate sulphonates, AE: alkyl ethoxy lauryl ether, R-数字: 亜種番号で表す。その他略称等: DALY: disability adjusted life years, GHG: greenhouse gas, GWP: global warming potential, ODP: ozone depletion potential, PAF: potential for atmospheric forcing, GWP: global warming potential, ODP: ozone depletion potential, LAS: linear alkylate sulphonates, AE: alkyl ethoxy lauryl ether, R-数字: 亜種番号で表す。

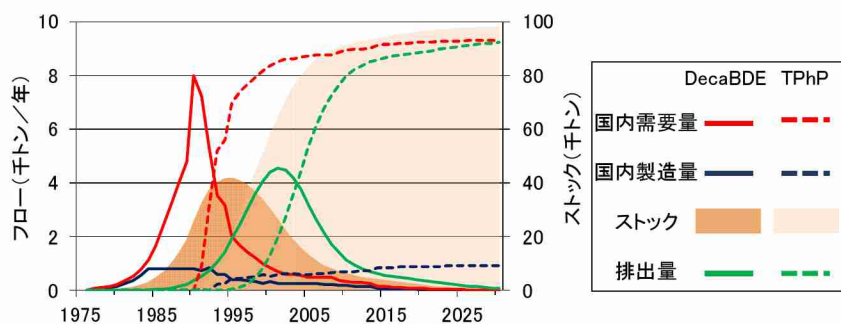


図 4 日本国内の電気・電子機器に関する DecaBDE と TPhP のフロー・ストック解析結果

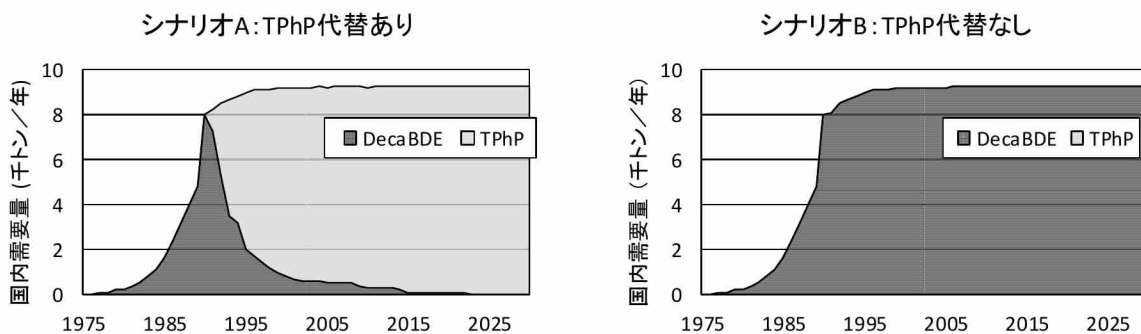


図 5 物質代替によるトレードオフ評価のためのシナリオ設定およびシナリオ別国内需要量

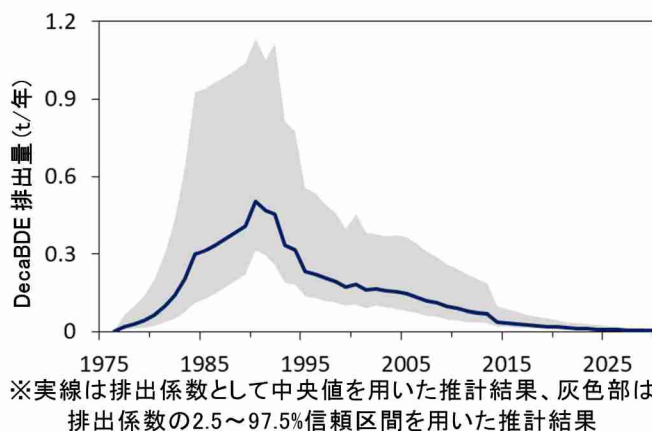
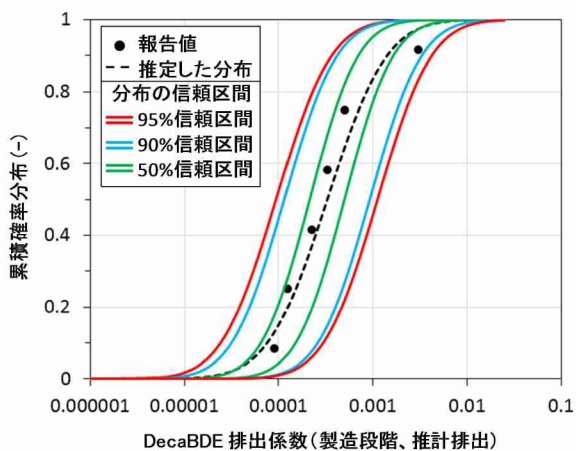


図 6 ブートストラップ法を用いた DecaBDE 排出係数の信頼区間推定とその排出量推計結果

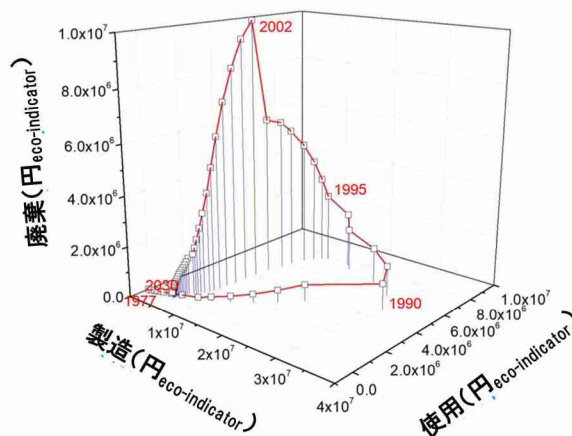
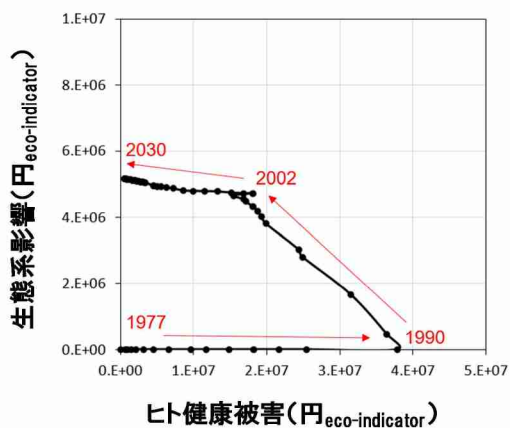


図 7 リスクトレードオフ評価結果およびライフステージ別のリスク評価結果

ト健康影響と生態系影響の合計をライフステージ別に集計したものである。図 4 のフロー・ストック解析結果と合わせて考察すると、DecaBDE のストックが大きくなるにつれて、使用および廃棄段階からのリスクが増大していく事が示された。また、DecaBDE から TPhP への代替によって、DecaBDE 使用量は削減されたものの、使用量の削減がヒト健康リスク総量の削減効果として顕在化するまでに時間的な遅れがあることが示された。

表 3 (※6 頁) に示した8つのケーススタディのうち、ケーススタディ番号 1~5 の 5 つの結果より、図 8 のリスクトレードオフ管理図を作成し、リスクトレードオフ、およびフロー・ストック評価結果の特徴を示した。

図 8 における x 軸は図 2 で定義したトレードオフ比 (以下、 ToR) を表す。 ToR が負の領域、すなわち目標リスク削減量は正であるとの条件下で対抗リスク増加量が負の場合、目標リスクと対抗リスクの両方が削減されているため、その解析シナリオ下でのリスク削減対策、および化学物質代替や製品代替は Win-Win にあると考えられる。また $0 < ToR < 1$ の場合、目標リスク削減量が対抗リスク増加量を上回るため、リスク削減対策は Acceptable であると考えられる。ただし、ここでの Win-Win、Acceptable とは DALY、PAF、Eco-indicator に基づいた、一つの判断の目安と言う位置づけである。y 軸は図 2 で定義したフロー・ストック比変化率 (以下、 FSR) を表す。 FSR は解析シナリオ下で設定した、ばく露評価の対象空間内で化学物質ストック量とフロー量の比の変化から、ヒト健康被害をもたらす化学物質が空間内に残留しやすくなりつつあるかどうかの指標である。

各ケーススタディの結果に関する考察の一例として、図 8 内のプロット “3. 空調機器用冷媒 1990 vs 2020” に着目する。このプロットは、ケーススタディ 3 の基準シナリオ下における 1990 年と 2020 年における評価結果を参照し、 ToR を推計したものである。目標リスク(ここでは、オゾン層破壊に起因するヒト健康影響)の削減量に対して、対抗リスク(ここでは、地球温暖化に起因するヒト健康影響)の増加量が約 30 倍多かった。そのため、x 軸に着目すると、対抗リスクの増加が懸念されると推計された。これは、フロン類から代替フロン類への代替にあたり GWP の大きい物質が採用され、かつそれらが家庭用空調機器の廃棄段階で大気中へ放散されるために化学物質代替の時期から遅れてヒト健康影響が生じたと推計されたためと考えられた。また、y 軸の FSR に着目すると、1990 年と 2020 年における投入量当たり貯留量を比較した結果、2020 年では 1990 年の 2 倍程度と推計された。すなわち、化学物質がストックされやすくなった推定された。

他のケーススタディに関する考察として、図 8 内の “4. 難燃剤 1990 vs 2020” および “4. 難燃剤 1990 vs 2030” に着目すると、 $0 < ToR < 1$ であるため、目標リスクの削減量に対して対抗リスクの増加量は相対的に小さいと位置付けられた。一方で、 FSR は約 3 倍と推計され、代替前後でストックされやすくなると推定された。

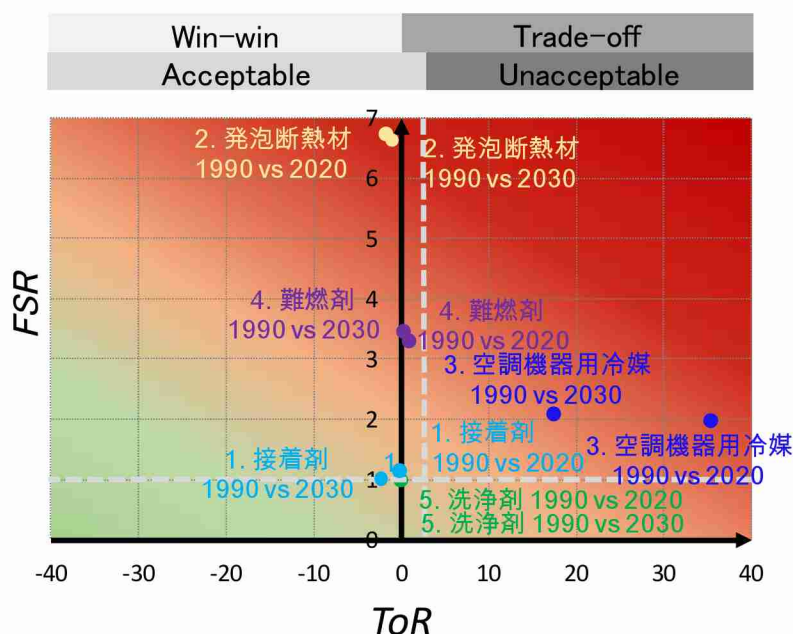


図 8 リスクトレードオフ管理図 (プロットの横の番号は表 3 におけるケーススタディ番号を表す)

c) データ・評価基盤の整備

リスクトレードオフ評価結果を共有するためのプラット・ホームである事例ベースにおける、合板用接着剤の web page を図 9に示す。それぞれの web page には各ケーススタディの背景、目的、方法論、結果、考察までをA4用紙一枚程度の大きさで提供する様式とした。web pageは、5つの表、2つの図、および参考文献等へのリンクで構成される。表 I および図 I はケーススタディの対象と評価バウンダリを示した。表 II は現状の規制動向を整理するとともに、表 III に示す将来評価シナリオの根拠情報を記載した。表 IV はリスク評価に必要な有害性情報、ばく露情報、パラメータやモデルを示しており、表 III と合わせてリスク評価結果の導出過程を整理した。表 V および図 II は、目標リスクと対抗リスクの態様を示し、将来も含めたリスク管理について考察を提供できる様式とした。併せて、関連情報をリンクとして別ページに整理することで、トレーサビリティの確保に努めた。

これらのweb pageとしてケーススタディを集約した事例ベースと、図 8のリスクトレードオフ管理図を通じて、現行制度の補完に向けた考察を行った。

図 10上側に示す現行の化学物質管理では、全物質を対象としたスクリーニング評価を行った後に、リスクが高いと見込まれる物質に対して詳細リスク評価を行うという段階的リスク評価での管理となっている。また評価の結果、リスクが高いと見込まれた第一種および第二種の特定化学物質物質等については追加的な管理措置をとる。これらの段階的リスク評価において考慮されるエンドポイントは物質固有なものに限られており、製品ライフサイクル全体や代替物質を含めたリスク削減の多面的評価については不足している。

本研究では、このような現行の化学物質管理で不足している側面に対して、ライフステージ別のフロー・ストック解析とばく露評価を組み合わせ、リスク評価およびリスクトレードオフ評価を行う枠組みを、ケーススタディとともに実証的に示した。図 10下側はリスクトレードオフ管理図による評価結果からリスク削減策を4つに類型化し、その特徴を示している。このような類型化により、懸念されるトレードオフが発生していないか、ストック性の高い物質への移行が生じていないか、をモニタリングすることが可能になる。これにより、現行制度を補完して、多様なリスクマネジメントに資する知見が提供できると見込まれる。

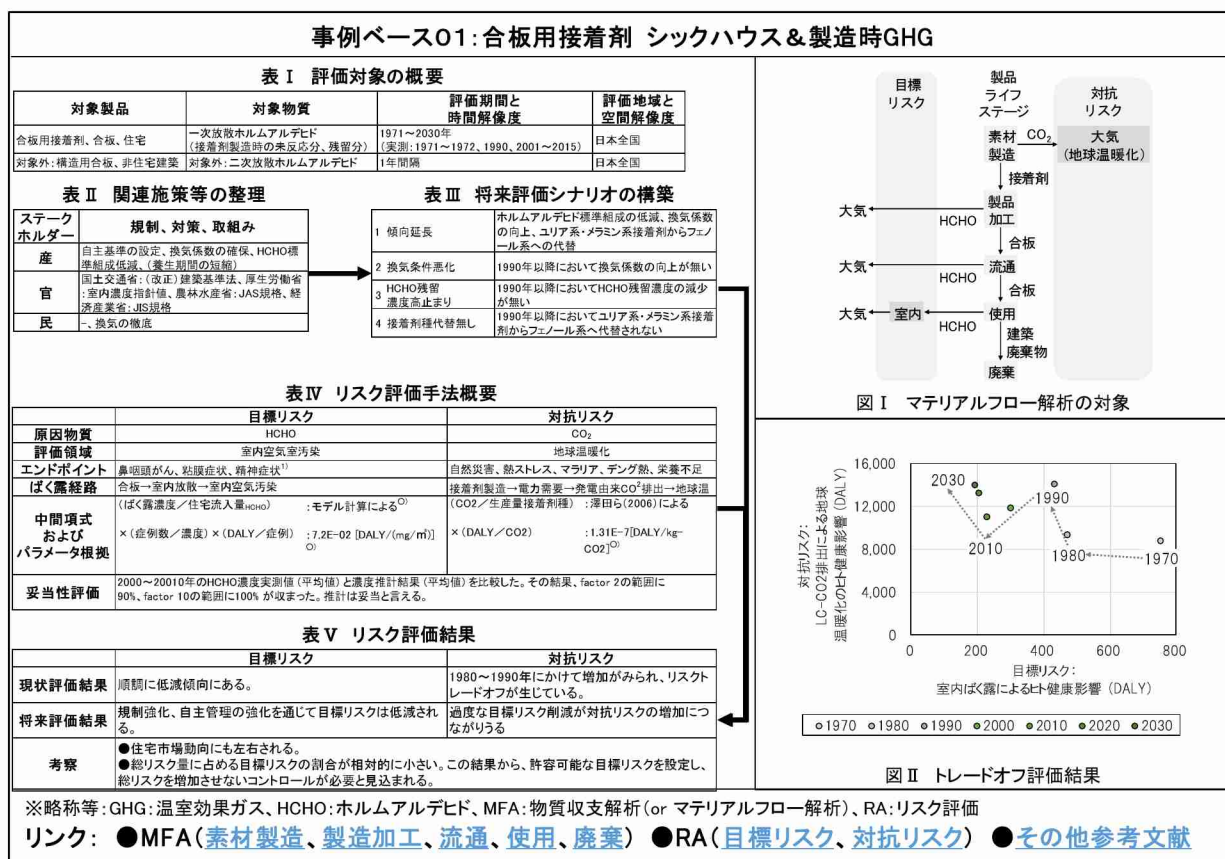


図 9 事例ベース内に集約される各ケーススタディの web page: 合板用接着剤

現行の評価と制度

- ・ スクリーニング+リスク評価による段階的リスク評価
- ・ リスクの高い物質の特定と監視

現行制度の課題

- ・ **エンドポイントが物質固有**
- ・ **リスク削減の多面的評価の不足**

本研究を通じた現行制度の補完

- ・ ライフステージ別、フロー・ストックばく露評価の組み合わせによる補完
- サプライチェーンを通じたばく露評価
- ライフステージ別寄与の明確化
- トレードオフが発生していないか？ストック性の高い物質になっていないか？をモニタリング
- ・ **多重なリスクマネジメントに資する知見の提供**

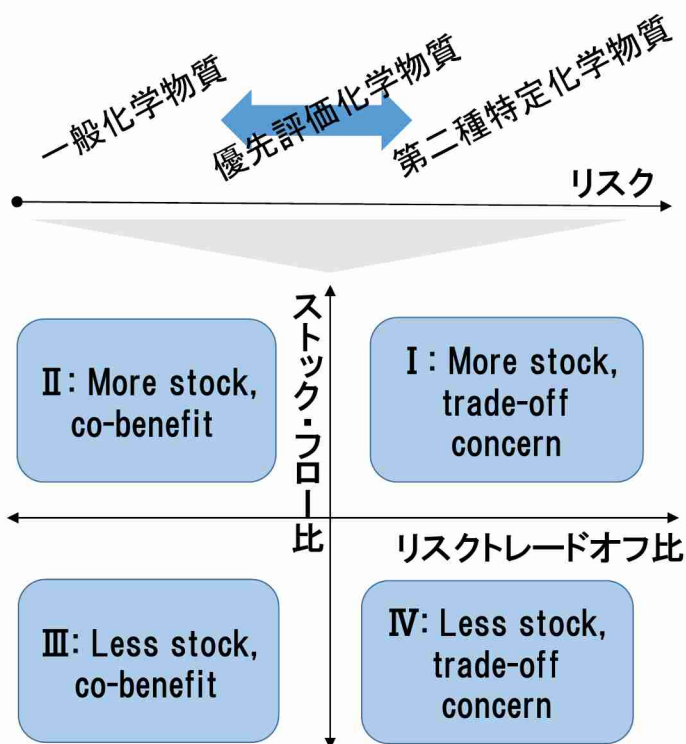


図 10 リスクトレードオフ情報を組み込んだ化学物質管理

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

本研究では、PRTR対象462物質の規制に関する有害性情報とばく露特性による分類結果と、定性的な貯留特性に基づく分類結果からマトリクスを作成し、ケーススタディの対象となる化学物質・製品を8つ選定した。選定した化学物質・製品に関するケーススタディとして、LCAの観点を組み込んだマテリアルフロー・ストック解析、マルチプルリスク評価を行った。得られたリスク評価結果に対して、目標リスクと対抗リスク間でのトレードオフが懸念されるかどうか、またマテリアルフロー・ストック解析結果に対して、化学物質がストックされやすくなるかどうかを判別する俯瞰・比較の枠組みを構築した。

以上の成果から得られた科学的な意義は次の3点にまとめられる。

- ① 製品のライフステージ別、あるいはストック由来・フロー由来といったリスクの発生形態で区別したリスク評価結果が得られた。このような結果は、有効なリスク管理の領域や対象を限定するうえで不可欠な知見であり、ライフステージを限定したこれまでのリスク評価手法に対して、本研究で構築した評価手法の特徴と言える。
- ② 化学物質・製品に内包されるマルチプルリスクを統合指標化して比較するとともに、それら複数を共通の枠組みで、選定、評価、比較することが達成された。特に複数の化学物質・製品間でリスクトレードオフを比較する点について、その必要性は1990年代より言及されてきたものの、定量的な枠組みについては十分に検討されてこなかった。このことから、本研究で示したリスクトレードオフ管理図の枠組み内に過去の施策を前提としたケーススタディを追加していく事で、これまでの化学物質管理の方向性を振り返ることが、将来の施策を前提としたケーススタディを追加していく事で、将来の化学物質管理の方向性に示唆を与えることが可能になると見込まれる。
- ③ 上記の②と関連して、ケーススタディを事例ベースとして整理するweb page の様式を作成した。事例ベースの枠組みの下でweb page が集約されることで、リスクガバナンスに必要な知的基盤整備が効率性を高めて充実していくことが見込まれた。

(2)環境政策への貢献

Post WSSD2020に向け、今後対応が必要となる化学物質リスクの多面性評価や他の環境負荷との関連・相互依存性を与件とした評価のプロトタイプモデルを構築できた。製品類型別フロー・ストック解析手法、リスクトレードオフ評価法であり、実際に8つの製品、16物質に適用することで本手法の有用性が確認した。今後は、適用範囲を拡大することで、リスクトレードオフの態様の明確化や、異種のリスクの優先順位づけにもとづくリスク管理という次の時代の政策課題解決にむけた端緒となりうるものといえる。継続的に過去になされた対策、政策の事後評価を通じて、リスク評価と制度の連携の拡充がみこまれる。

<行政が既に活用した成果>

現時点で、活用には至っていない。なお、これまで、行政担当者と定期的にこの件について意見交換をし、当グループの主旨は共有されてきた。

<行政が活用することが見込まれる成果>

物質の代替は、リスク削減においてこれまで相当数の事例があり、これは産業技術開発の成果そのものであるといえる。実際に代替が進んだ解析事例をリスクトレードオフとストック性という2軸で包括的に評価することで、産業界に対しては、今後の技術開発の方向づけや、政策決定者には、リスクトレードオフとストック性に基づく管理原則の抽出に活用できることが期待される。この観点は、世界的になかったものあり、今後、引き続きIRGC(International Risk Governance Council)、との連携を通じ、SRA Internationalの場を通じて、リスクガバナンスに関する政策展開の議論を推進する端緒を築けたといえる。

6. 研究成果の主な発表状況

(1)主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Naoya KOJIMA, Leticia Sarmiento dos MUCAHAGOS, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: Science of the Total Environment, 622-623, 861-868 (2018), Application of fuzzy c-means clustering to PRTR chemicals uncovering their release and toxicity characteristics.
- 2) Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Naoya KOJIMA, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: Environmental Science and Technology, 51, 22, 13224-13230 (2017), Decabromodiphenyl Ether (DecaBDE) in Electrical and Electronic Equipment in Japan: Stock, Emission, and Substitution Evaluation.
- 3) 小島直也, Mianqiang XUE, 町村尚, Liang ZHOU, 東海明宏: 環境システム研究論文集, 45, II_309-II_319 (2017), 接着剤と合板のマクロなマテリアル・フロー分析に基づく室内ホルムアルデヒド濃度評価手法の構築と規制影響に関する考察.
- 4) Mianqiang XUE, Naoya KOJIMA, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI : Science of The Total Environment, 586, 1308-1315 (2017), Flow, stock, and impact assessment of refrigerants in the Japanese household air conditioner sector.
- 5) Mianqiang XUE, Naoya KOJIMA, Liang ZHOU, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: Journal of Cleaner Production, 145, 172-179 (2017), Dynamic analysis of global warming impact of the household refrigerator sector in Japan from 1952 to 2030.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2)主な口頭発表 (学会等)

<口頭発表>

- 1) Akihiro TOKAI, Naoya KOJIMA, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Leticia Sarmiento dos MUCAHAGOS, Takashi MACHIMURA and Daisuke SUGINOO: Society for Risk Analysis Asia, 2018 Annual Meeting (2018) "Prototype

- model of chemical risk governance based on case studies in Japan.”
- 2) Leticia Sarmiento dos MUCAHAGOS, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Naoya KOJIMA, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: Society for Risk Analysis Asia, 2018 Annual Meeting (2018) “Estimation of flows, stocks and emissions of Di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) in Japan.”
 - 3) Liang ZHOU, Mianqiang XUE, Naoya KOJIMA, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: Society for Risk Analysis Asia, 2018 Annual Meeting (2018) “Probabilistic ecological risk assessment of AE and LAS in household detergents in Japan from 1960 to 2030.”
 - 4) Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Naoya KOJIMA, Leticia Sarmiento dos MUCAHAGOS, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: Society for Risk Analysis Asia, 2018 Annual Meeting (2018) “Comprehensive assessment of chemicals in home appliances.”
 - 5) Naoya KOJIMA, Mianqiang XUE, Takashi MACHIMURA, Liang ZHOU, Leticia Sarmiento dos MUCAHAGOS and Akihiro TOKAI: Society for Risk Analysis Asia, 2018 Annual Meeting (2018) “Risk trade-off analysis of adhesives replacement for laminated wood for housing between reducing indoor air contamination in use stage and increasing GHG emission in product stage.”
 - 6) 小島直也, Leticia Sarmiento Dos MUCAHAGOS, Liang ZHOU, 杉之尾大介, Mianqiang XUE, 東海明宏: 日本リスク研究学会第30回年次大会 (2017) 「リスク評価技術と制度の連携を通じたリスク評価と評価結果に基づくリスクガバナンス実現に向けた提言」
 - 7) Akihiro TOKAI: The Annual Meeting of the Taiwan Chapter of Society for Risk Analysis (keynote speech) (2017) “Prototype model of chemical risk governance based on the risk-risk trade-off analysis.”
 - 8) 小島直也, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, 町村尚, 杉之尾大介, 戎谷舞子, 東海明宏: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, 企画セッション A1-1 (2016) 「リスク評価技術と制度の連携を通じたリスク評価の展開」
 - 9) Mianqiang XUE, Naoya KOJIMA, Liang ZHOU, T. MACHIMURA and Akihiro TOKAI: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, 企画セッション A1-2 (2016) “Human health risk evaluation by the exposure of chemicals flow & stock in the residential house.”
 - 10) 町村尚, 薛面強, 小島直也, 戎谷舞子, 東海明宏: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, 企画セッション A1-3 (2016) 「リスク評価における相互依存性解析プロトタイプモデルを用いた冷媒・空調機器に関する政策評価」
 - 11) Liang ZHOU, 東海明宏: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, 企画セッション A1-4 (2016) 「SOMによる化学物質の分類結果から見た事例研究」
 - 12) 杉之尾大介, 町村尚, 小島直也, 東海明宏: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, 企画セッション A1-5 (2016) 「制度連携を含むリスクガバナンス手法の検討」
 - 13) 東海明宏, 町村尚, 松井孝典, 小島直也, 戎谷舞子, 中久保豊彦: 第28回日本リスク研究学会年次大会, 企画セッション 6 (C-4-1) (2015) 「リスク評価技術と制度の連携を通じたリスク評価の展開」
 - 14) 町村尚, 東海明宏, 小島直也, 戎谷舞子, 中久保豊彦, 松井孝典: 第28回日本リスク研究学会年次大会, 企画セッション 6 (C-4-2) (2015) 「リスク評価における相互依存性に関する研究の現状と課題」
 - 15) 轟晃成, 東海明宏, 町村尚, 小島直也, 戎谷舞子, 阪本悠佑, 志賀優貴, 眞鍋優作: 第28回日本リスク研究学会年次大会, 企画セッション 6 (C-4-3) (2015) 「家庭におけるマテリアルストック由来化学物質のリスク評価方法の検討」
 - 16) 多田悠人, 中久保豊彦, 東海明宏: 第28回日本リスク研究学会年次大会, 企画セッション 6 (C-4-4) (2015) 「地震被害を想定した化学物質流出による浄水場の給水機能への影響評価」

<ポスター発表>

- 1) Naoya KOJIMA, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Takashi MACHIMURA, Maiko EBISUDANI and Akihiro Tokai: Society for Risk Analysis, 2017 Annual Meeting (2017) “Methodology for Policy Characterization Based on the Multiple Risk Evaluation Results: Case Study for Japanese Chemical Replacements.”

- 2) Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Naoya KOJIMA, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: 4th International conference on Final Sinks (2017) “Stock, Emission, and Substitution Assessment of Decabromodiphenyl ether (DecaBDE) in Electrical and Electronic Equipment in Japan.”
- 3) Naoya KOJIMA, Akihiro TOKAI, Takashi MACHIMURA, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Akinari TODOROKI and Maiko EBISUDANI: Society for Risk Analysis 2016 Annual Meeting (2016) “Risk governance through the cooperation of a risk evaluation technology and the institutional system: attention to chemical stock in product.”
- 4) 轟晃成, 東海明宏, 小島直也: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, P-13, (2016)「仮想都市における新製品普及のマテリアルフロー・ストックに由来する化学物質の リスク評価方法の検討」
- 5) 堀本祥平, 東海明宏, 小島直也: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, P-23 (2016)「有害性及び排出・曝露特性に基づく優先評価化学物質分類のための主成分分析, 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会」
- 6) 東海明宏, 小島直也, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, 戎谷舞子: 第44回環境システム研究論文発表会, B-44 (2016)「評価技術と制度の連携を通じたリスクガバナンス」
- 7) 小島直也, 町村尚, Mianqiang XUE, 戎谷舞子, Liang ZHOU, 東海明宏: 環境科学会2016年会, P-46 (2016)「相互依存性解析を通じたマルチプルリスク管理戦略の考察: グリーン家電普及施策および用途地域制下での店舗の立地規制を対象として」
- 8) Mianqiang XUE, 小島直也, Liang ZHOU, 町村尚, 東海明宏: 環境科学会2016年会, P-47 (2016) “Dynamic flow and stock estimation and induced risk assessment of chemicals in a hierarchical structure.”
- 9) Akihiro TOKAI, Akinari TODOROKI, Takashi. MACHIMURA, Mianqiang. XUE, Naoya KOJIMA, Maiko EBISUDANI, Yusuke SAKAMOTO, Yuki SHIGA, Yusaku MANABE and Liang ZHOU: Society for Risk Analysis Annual Meeting, Arlington, Virginia, USA (2015) “Risk governance through the integrating risk evaluation and the institutional systems: case of chemicals management.”

7. 研究者略歴

研究代表者

東海 明宏

大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了、工学博士、現在、大阪大学大学院工学研究科教授

研究分担者

1) 町村 尚

北海道大学大学院農学研究科修士課程修了、博士（農学）、現在、大阪大学大学院工学研究科准教授

2) 松井 孝典

大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、大阪大学大学院工学研究科助教

2) 小島 直也

大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、大阪大学大学院工学研究科助教

II. 成果の詳細

II-1 技術と制度の組合せの隘路を補完するリスク評価・管理手法の開発

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

東海 明宏・町村 尚

松井 孝典・小島 直也

平成27～29年度累計予算額：45,436千円（うち平成29年度：14,709千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

現行の化学物質管理は化学物質・製品に固有の有害性情報に基づき実施される。また、それらのばく露管理は、生産側、あるいは製品ライフステージ上流側のフローが中心である。これらの現行制度を補完するために、化学物質・製品のライフサイクル全体で、複数のリスクが生じている事を前提として、評価枠組みを構築する必要がある。

そこで本研究では家庭での使用段階および廃棄段階も含めたマテリアルフロー・ストック解析を実施し、解析結果から得られる製造・使用・廃棄の各段階におけるフロー・ストックに起因するマルチプルリスク評価モデルを構築する事を目的とした。

これらの一連の評価モデルの枠組みを8つの化学物質・製品の組合せに適応し、ケーススタディを実施した。実測値との比較や、不確実性解析を通じて実態に即したリスク評価が可能であることを示唆した。ケーススタディ個別の、わらにケーススタディ間のリスク評価結果の考察において、ライフステージ間、あるいはマルチプルリスク間でのトレードオフが懸念される水準にあるか否かの判別のための枠組みとしてリスクトレードオフ管理図を提案した。リスクトレードオフ管理図の実際適用に向けて、本サブテーマで実施した5つのケーススタディをプロットした結果、リスクトレードオフの観点から DecaBDE から TPhP への代替や、発泡断熱材に用いられるフロン系発泡剤の代替は目標リスクの削減が可能、かつ対抗リスクの増加を誘発しづらい代替であることが示唆された。構築したリスク評価手法を他の化学物質・製品へ適用するとともに、ケーススタディで用いたデータや方法論、リスク評価結果を事例ベースとして集約する枠組みを提案し、今後の知的基盤形成に資する方法として整備した。

[キーワード]

リスクガバナンス、リスクトレードオフ、化学物質管理、マテリアルフロー・ストック解析、ライフサイクルアセスメント

1. はじめに

物質や製品の流れを制御する制度とリスク評価技術の連携を通じて我が国の環境リスク管理は進んできた（化審法、化管法）が、屋内貯留分を対象とした評価は進んでいない。一定期間の寿命を有する物質・製品は、閉鎖空間内での曝露に寄与する成分であるとともに、災害時には潜在的排出源となる。環境内でストックされている化学品・製品の管理が従来のフロー制御を相補うことでリスク管理システムが機能構成上完結し、ひいてはWSSD2020目標の達成に貢献することが期待される。

用途地域制で指定された産業・事業所の立地規制と、入り口段階での物質フローを制御する化審法、化管法、そしてend of pipe 段階での発生源対策を主軸とする大気汚染防止法、水質汚濁防止法は、ハザードを特定してフラックスを制御することを意図されており、必ずしもリスクに基づく評価ではない。事業所立地に関わる都市計画用途地域制は、長い時間経過において立地場所周辺の土地利用変容を制御できてはならず、市中における事業所、家屋の立地や代謝特性、物質・製品利用に伴って発生する複数の環境負荷を同時に、かつ対策技術の導入が新たなトレードオフを発生させないか、を評価する枠組み

はない。

2. 研究開発目的

本研究では、3つの軸（物質、用途/製品、ライフステージ）で規定された問題空間において、物質軸で行われてきたリスク評価と、廃棄の断面で集約的に行われた廃棄物処理・処分にかかわるリスク評価をストック管理、マルチプルリスク評価を中心コンセプトにしてつなぐ方法の開発することを目的とした。具体的には、類型化を踏まえたフロー・ストック解析と将来シナリオ解析、リスクトレードオフ評価手法の開発、データ・評価基盤を事例ベースとして構築、の3課題である。これらの方法で得られる情報を活用することで、土地利用規制、生産段階と廃棄段階との連携を通じたリスク管理の機能構成改善が期待できる。

3. 研究開発方法

a) 化学物質・製品の類型化を踏まえたストック量推計と将来シナリオ解析

フロー・ストック解析に先立ち、化学物質・製品のうち代表的な流入、流出、貯留に関わる特性、および有害性やばく露特性を有する化学物質・製品を、ケーススタディの対象を選定する。

まず、住空間内の化学物質・製品をその流入、流出、貯留特性に着目し、定性的に三つの類型に分類した。第Ⅰ類型は、住空間構成材料である。建築物の施工から廃棄に至るまでを使用期間と捉えた場合、建材中の化学物質と建築物・建材がストックされる。特徴として、その物理的寿命の長さが挙げられ、物理的寿命が尽きるまでの期間において、化学物質の放散特性にしたがい、ヒト健康リスクのばく露源となりうる。第Ⅱ類型は、機器および機器動作に必要な化学物質である。製品の購買・買換えに従い住宅へと流入し、住宅から廃棄物として流出する。機器の物理的寿命だけでなく、機能的な寿命も考慮する必要があり、数年から10年程度の使用期間、住宅内にストックされると見込まれる。住宅内での放散によりヒト健康被害をもたらすだけでなく、住宅内で放散しきらなかった残存化学物質が、廃棄段階で放散されうるため、広域的な環境リスクにつながりうる。第Ⅲ類型は、屋内快適性維持のための化学物質・製品であり、日用消耗品や機能性化学品がこれにあたる。日常的・定常的に使用される傾向があり、家屋および販売店といった使用の直前の段階で一時的なストックとなる。

次に、化学物質・製品の有害性やばく露特性に基づく分類を行った。PRTR対象物質462物質を対象に、表(1)-1に示す有害性を表す9変数と、ばく露特性を表す7変数の、計16変数を環境省HP¹⁾（PRTRインフォメーション広場）対象化学物質情報）より収集し、入力データセットを作成した。有害性に関してはPRTRインフォメーション広場でのクラスの判断基準を使用した。排出量データに関しては、解析時点における最新の情報として2015年のPRTR排出量データを使用した。分類方法としてSOM-Wardクラスタ

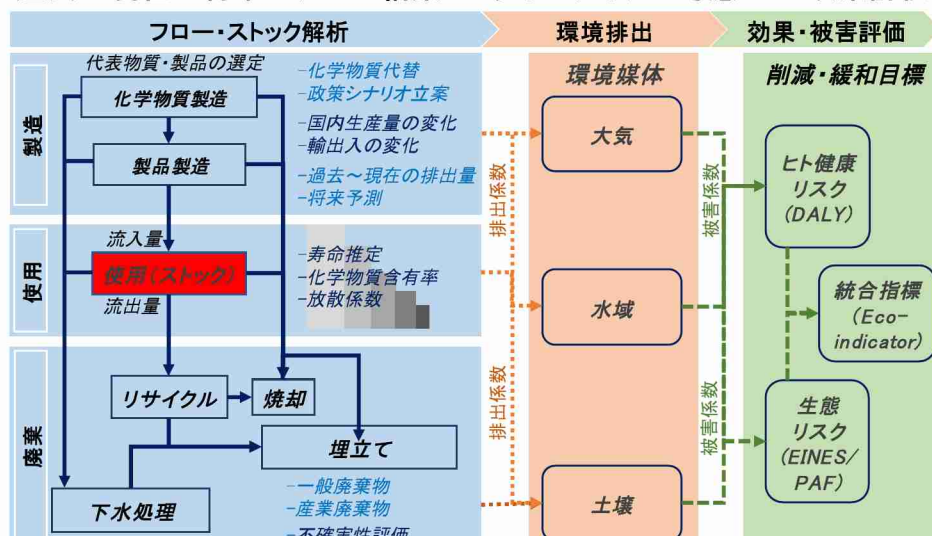
表(1)-1 SOM-Wardクラスタ法によるPRTR対象462物質の分類に用いた16変数

有害性を表す9変数*	ばく露特性を表す7変数**
1. 発がん性クラス (カテゴリー:1,2,3)	10. 総合製造・輸入量区分 (カテゴリー:1,2,3,4,5)
2. 生殖毒性クラス (カテゴリー:1,2,3,4)	11. 届出排出量合計 (スコア=Log[排出量kg])
3. 変異原性クラス (カテゴリー:0,1)	12. 届出移動量合計 (スコア=Log[排出量kg])
4. 経口慢性クラス (カテゴリー:1,2,3,4)	13. 対象業種届出外排出量 (スコア=Log[排出量kg])
5. 吸入慢性クラス (カテゴリー:1,2,3,4)	14. 非対象業種届出外排出量 (スコア=Log[排出量kg])
6. 作業環境クラス (カテゴリー:1,2,3,4)	15. 家庭排出量 (スコア=Log[排出量kg])
7. 感作性クラス (カテゴリー:0,1)	16. 移動体排出量 (スコア=Log[排出量kg])
8. 生態毒性クラス (カテゴリー:1,2,3)	(排出量は2015年値を用いた)
9. オゾン破壊性クラス (カテゴリー:0,1)	

*有害性を表す変数に関して:カテゴリー値が高い程、毒性が強くなるように、化管法で定められるクラスを逆順にしてカテゴリー値を与えた。また欠損値については、化管法が定める最低毒性クラスの基準値の 10^{-1} の値を有すると仮定して、逆順にして設定したカテゴリー値のさらに-1のカテゴリー値を与えた。変異原性、感作性、オゾン破壊性の3クラスはその化学物質が該当する場合"1"を、該当しない場合は"0"を与えた。

**ばく露特性を表す変数に関して:総合製造・輸入量区分は、区分5: 100トン以上、区分4: 1トン以上100トン未満、区分3: 1トン未満、区分2: 0トン、区分1:不明とした。

過去／現在／将来モデルの構築 × ライフサイクル考慮 ⇒ 政策評価



図(1)-1 製品ライフステージ別フロー・ストック解析とマルチプルリスク評価の連携枠組み

法を用いた。自己組織化マップ（以下、SOM：Self-organization Map）は、教師なし学習を行うニューラルネットワークの一種であり、大規模、高次元データの視覚化のために有効な手段である。また、入力データの類似度を二次元のマップで表現でき、類似度を保持したマップにクラスタ分析を適用することで、クラスタリング手法として用いることもできる。SOMのクラスタ分析におけるデータ間の距離の定義方法は、SOM-Wardクラスタ法を用いた。Ward法は、従来のクラスタ分析で用いられている方法であり、クラスタを併合する際、併合後のクラスタに含まれる対象とそのクラスタ重心の距離の二乗和が最小となるように距離が定義されている。そのため、クラスタ内のサンプルの分散が最小となるように分類される。SOM-Wardクラスタ法は、Ward法に加え、「クラスタ同士がSOMのマップ上で隣接している場合のみ併合する」というルールを追加したものである。このルールによって、マップ上のノードがデータ分布の固有のつながりを保持しているというSOMのメリットを活かすことが可能となる。SOM-Wardクラスタ法によるマップ作成にあたり、マインドウェア総研のSOMによるデータマイニングソフトウェア Viscovery□ SOMine³⁾を使用した。

以上の方法によって選定した代表的な化学物質・製品に対して、図(1)-1に示す枠組みのもとでリスク評価を行った。具体的には、1) 住空間に着目した化学物質・製品フロー・ストック解析、2) フロー・ストック解析に必要な原料や中間材のフロー・ストック量の収集、3) フロー・ストック解析に基づく住宅内ばく露量および住宅からの環境排出量の推計、そして、4) 種類の異なるリスクの評価結果を、統合影響指標として比較可能な指標へと換算・定量評価する。

1) 2) に関して、まず統計値を収集し、過去から現在までの統計値の推移や、消費傾向に基づき製品使用段階への流入フローの将来値を推計した。製品使用段階の化学物質ストックの経年的な変化は寿命関数により推計し、これに伴う廃棄物処理段階への遅れを有する流出フローが推計される。一般的な寿命関数として、ワイブル分布、正規分布、対数正規分布、ベータ分布、などが挙げられる。これらの内、その適合性の良さからワイブル分布が用いられる研究が多く、本研究でも建物の寿命関数、家庭用空調機器に関する評価でワイブル分布を用いた。また、製品や用途によっては、漏えいや放散過程も流出フローとして考慮する。

3) 4) の推計から得られるばく露やリスク評価は、フローとストックのどちらに由来するか、製品ライフステージのどの段階で排出されたリスクであるかを区別できるように推計し、リスク管理が必要な領域の考察に用いる。

b) リスクトレードオフ解析手法の開発と適用

リスク学辞典⁴⁾によると、トレードオフとは「複数の要素が関連を持ち、1つの要素を改善すると他の要素が悪化するような状態」と定義され、トレードオフ評価のためには、1つの要素と他の要素を同時に評価でき、かつ改善行動のリスクへの影響を評価できる枠組みを構築する必要がある。さらに、これまでのリスク管理の戦略の下で、個別に行われてきた化学物質代替施策などを、同一の枠組みで比較し、全体としてどのような目標リスク・対抗リスクの増減をもたらしたかを総体的に考察することは行われてこなかった。そこで、本研究では個別のケーススタディの結果から得られたフロー、ストック推計結果、目標リスク、対抗リスクの評価結果を、表(1)-2に定義した同一の縦軸・横軸で示す方法を、リスクトレードオフの管理枠組みとして提案する。

表(1)-2 リスクーリスクトレードオフ管理図の定義

	定義式	備考等
横軸	トレードオフ比 (ToR) = $\frac{\text{対抗リスク増加量}}{\text{目標リスク削減量}}$	目標リスク削減量 > 0の条件下、すなわち目標リスクは増加しないと条件下において： <ul style="list-style-type: none"> ・ ToR < 1：許容可能なトレードオフと定義する。 ・ 1 < ToR：許容困難なトレードオフと定義する。
縦軸	フロー・ストック比変化率 (FSR) = $\frac{(\text{貯留量/流入量})_{\text{after}}}{(\text{貯留量/流入量})_{\text{before}}}$	<ul style="list-style-type: none"> ・ FSR < 1：評価空間内から化学物質・製品が放散されやすくなる傾向が懸念される。 ・ 1 < FSR：評価空間内に化学物質・製品が貯留されやすくなる傾向が懸念される。

※before(/after)：緩和策および適応策実施前(／実施後)の状態。緩和策：化学物質含有率削減、製品使用量削減、など。適応策：化学物質代替、製品代替、など。ToR: trade-off ratio, FSR: flow stock ratio

c) データ・評価基盤の整備

各ケーススタディで用いた基礎データや方法論、政策シナリオの根拠情報などを共有するためのプラットフォーム・ホームとして、リスク評価の事例ベースの枠組みを構築した。本研究の事例ベースとは、1つのケーススタディに関わる主要な情報を1つのweb page 内に整理し、各pageを集約したポータルサイトとして運用されるものと定義した。各web page は次の3つの情報を提供する様式とした。

①評価の前提条件・解析条件：化学物質・製品およびその用途、時間や空間等のバウンダリ、シナリオ作成の根拠情報となる対策技術や管理水準。

②評価結果：ミッドポイントに当たる結果としてシナリオごとのフロー・ストック推計結果、ばく露、有害性の評価結果、エンドポイントに当たる結果としてリスク評価結果、リスク対策による削減効果。

③評価に用いた調査統計データや評価手法・評価技術の出典等。

①および②はリスク判定に必要な情報であり、③は根拠データや原著文献へのトレーサビリティ、および評価結果の信頼性を支える情報である。全てのweb page が共通様式でまとめられることにより、リスクトレードオフ評価結果の収集と公開を効率化する事を意図した。

4. 結果及び考察

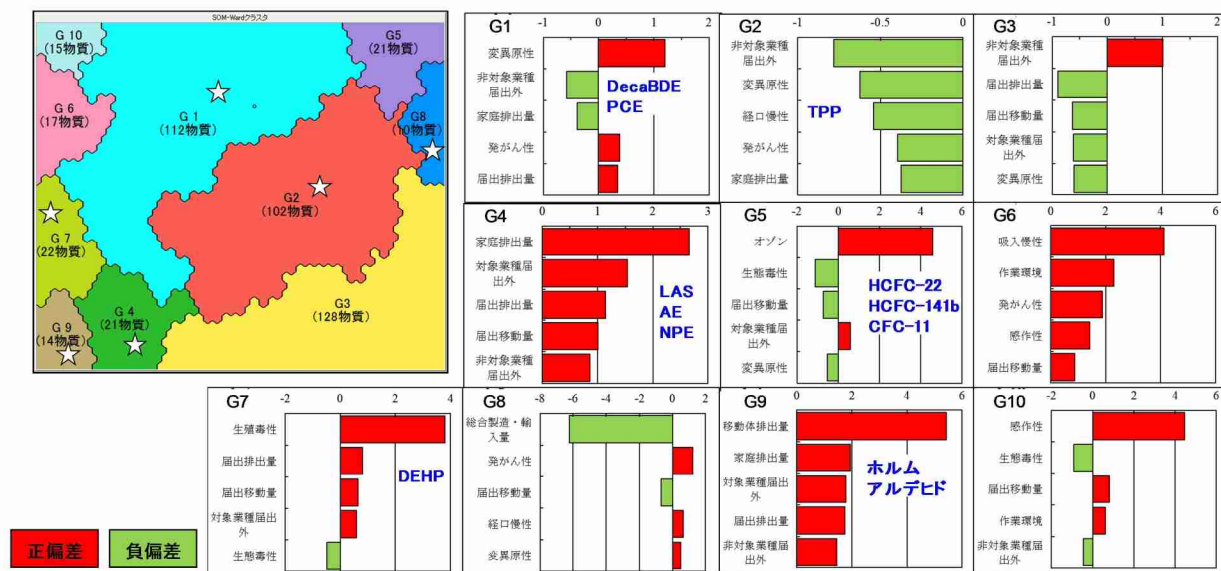
a) 化学物質・製品の類型化を踏まえたストック量推計と将来シナリオ解析

PRTR対象462物質の有害性クラス、ばく露量を入力データとし、SOM-Wardクラスタ法によって分類した結果、図(1)-2の10グループに分類された。図(1)-2左上の図は化学物質分類の全体マップであり、各グループにどれだけ化学物質が含まれたか示した。図(1)-2右下にあるG1～G10と付した10のグラフは各グループの特徴ウィンドウである。これらは各グループの特徴を簡易に理解するための情報として示した。各特徴ウィンドウに示す5つの変数の選定手順は次の通りである。まず分類に用いた16変数に対して、グループ平均と全体平均とを比較して有意な偏差であるか否かを決定するためにt検定を実行した。次に、検定結果に基づきt検定の絶対値の降順で16変数を並べ替え、上位5個を特徴変数として、特徴ウィンドウに表示した。変数値のグループ平均が全体平均より小さい場合は緑色(負偏差)、大きい場合は赤色で示される(正偏差)。

図(1)-2の分類結果から、ケーススタディの対象化学物質は6つのグループから選定されていることが読み取れた。全体マップではケーススタディの対象物質の位置を”☆”で示し、かつ具体的な物質名を特徴ウィンドウ内に示した。これら6グループに含まれる化学物質数は462物質中276物質（63%）であり、現行のPRTR対象物質に基づく分類に対して、偏りがなく物質を選定できたことが示唆された。また、最も多い128物質を含むG3から選定されなかった。G3の特徴ウィンドウに着目すると、非対象業種からの届出外排出量の偏差が正方向であり、住空間内への流入や滞留に着目した本研究において、G3に内在する物質を選定する優先度は低いと考えられた。

以上の SOM-Ward クラスタ法を用いて得られた分類結果である図(1)-2、および住空間内の化学物質・製品の流入、流出、貯留特性による三類型とのクロス表(1)-3を作成した。表(1)-3より化学物質の規制状況や貯留特性に関する偏りがないようにケーススタディが実施されたと言える。

対象とした化学物質・製品におけるケーススタディの概要は、後述するリスクトレードオフ評価結果と合わせて表(1)-4に整理した（※20頁に後掲）。なお、詳細については、7. 研究成果の発表状況（42頁）に示す文献等を参照されたい。表(1)-4について、第1列はケーススタディを識別する番号を、第2～3列に対象の化学物質・製品を示した。第4～6列は解析シナリオと、解析シナリオで対象となる目標リスクと対抗リスク、評価期間を示した。第7～13列は、対象製品のライフステージ上のどの段階でどのような目標リスクもしくは対抗リスクが存在するかを、フローとストックの経路別に整理した。第14～17列は、フロー・ストック解析結果およびリスク評価結果を示し、評価結果から相対的なストックの重要性を示した。ヒト健康リスクに関しては、障害調整生存年⁵⁾（以下、DALY: disability adjusted life years）を用いることで、ケース間での比較を可能とした。リスク評価結果は、ライフサイクルアセスメント（以下、LCA: life cycle assessment）の枠組みにおけるエンドポイント評価指標として示しており、目標リスクと対抗リスクを合計して示した。これにより、フロー・ストックそれぞれに起因するリスクの寄与率を明示した。特にストックに由来するリスクが大きい化学物質・製品は、リスクが長期に及ぶことが懸念されるため、相対的なストック管理の重要度をVery low, Low, Middle, High, Very high の5段階で示した。Very low はリスクへの寄与率が 20% 以下、low はリスクへの寄与率が20%より大きく40%以下、とるようにそれぞれを20% 間隔で区切った。



※偏差: 全体データの平均値からクラスタ範囲の平均値の差。単位は全体データの標準偏差(t検定より)。

図(1)-2 SOM-Wardクラスタ法によるPRTR対象462物質の分類結果

表(1)-3 流入・流出・滞留特性による3類型とSOMによる10類型からみたケーススタディの特徴

製品・化学物質の特徴			SOMIによるPRTR対象物質のクラスター分類 ※()内は分類された物質数										
			G1 (112)	G2 (102)	G3 (128)	G4 (21)	G5 (21)	G6 (17)	G7 (22)	G8 (10)	G9 (14)	G10 (15)	
製品・ 化学物質 分類	I 住空間 構成材料	住空間を構成する建材、建築物、 および製品中の化学物質成分						発泡 断熱材				合板用 接着剤	
	II 機器動作 に必要	住空間内での居住者ニーズを機能的 に実現するための製品、および 製品動作・性能発揮に必要な化学 物質	難燃剤	難燃剤				機器用 冷媒			プラスチック 可塑剤		
	III 屋内快適 性維持	居住者の快適性を維持するための 製品(薬剤等)	業務用 洗浄剤				家庭用 洗浄剤				プラスチック 可塑剤		

b) リスクトレードオフ解析手法の開発と適用

本項ではまず表(1)-4に示す8つのケーススタディの概要をb. 1)からb. 8)までで述べた。さらにb. 9)ではケーススタディ番号1~5の5事例をリスクトレードオフ管理図上に示した。これらを通じて、個別事例における目標リスクと対抗リスク、および個別事例を集約したリスクトレードオフが評価可能であることを示し、リスクガバナンスの観点から考察した。

b. 1) ケーススタディ番号1: HCHO形接着剤

合板用接着剤として用いられるホルムアルデヒド形接着剤3種(ユリア樹脂系接着剤、メラミン樹脂系接着剤、フェノール樹脂系接着剤)と、接着剤に残留成分として含まれるホルムアルデヒドを対象として取り上げ、用いたデータや方法、およびその結果を考察した。

このケーススタディにおける目標リスクはホルムアルデヒド(以下、HCHO)の室内ばく露⁶⁾であり、対抗リスクは接着剤製造時の温室効果ガス排出とした。両リスクとも日本全体のリスクを合算したものと示した。目標リスクと対抗リスクの関係について、図(1)-3左側⁷⁾に示すホルムアルデヒドの含有率が高い接着剤(ユリアおよびメラミン樹脂系)から含有率が低い接着剤(フェノール樹脂系)への製品代替が行われた際に、CO₂排出原単位⁸⁾に着目すると原単位の大きい接着剤への製品代替が行われる(図(1)-3右側)ことによってトレードオフが懸念された。このような代替が行われた実績を踏まえて、製品代替に関するシナリオ作成を行い、リスク評価を実施した。

図(1)-4にシナリオ別に見た製品フロー解析結果を示す。接着剤出荷量は全シナリオで共通であり、2015年までは統計値を、それ以降は住宅着工⁹⁾や人口動態¹⁰⁾等の統計から回帰分析により推計した。

1990年代にいわゆるシックハウス問題の緩和に向けた規制強化に伴いから接着剤代替が行われたが、シナリオAではそのような規制がない場合を想定し、シナリオAでは代替が行われず3種の接着剤構成比が変化しないと仮定した。

シナリオBでは2015年までは統計値で報告される3種の接着剤構成比を用い、実態に即して接着剤代替が行われたと仮定した。2016年以降は接着剤代替が行われないと仮定し、3種の接着剤構成比を2015年と同じ値とした。

シナリオCでは、2015年以降も接着剤代替が行われると仮定した、2030年までにHCHO含有率が最も小さいフェノール樹脂系接着剤への完全代替が行われるとして、3種の接着剤構成比を推移させた。

図(1)-5のシナリオ別の家庭内流入量に基づき、接着剤代替の違いがリスクおよびリスクトレードオフ評価結果に与える影響について考察した。

ここで、家庭内流入量から室内濃度を推計する際には、モンテカルロシミュレーションを行った。室内合板面積、換気量、HCHO放散速度、等に対して既往研究や既往研究レビューから設定した確率分布を付与し、3万回の計算から濃度推計結果の確率分布を得た。2000年から2010年までの濃度推計結果と

表(1)-4 ケーススタディの概要とリスク評価結果

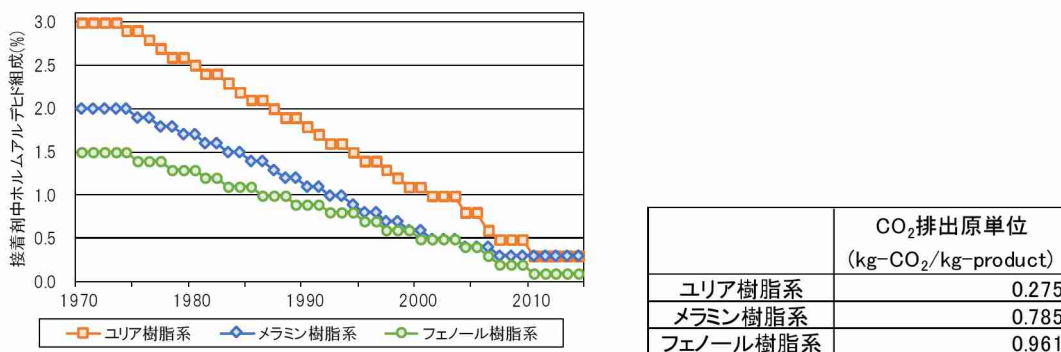
ケーススタディ番号	化学物質	製品	対策シナリオ	リスク (上段: 目標リスク 下段: 対抗リスク)	解析年度	経路	製品ライフステージ				結果 (2015年値)			相対的な ストック管理 の重要性*		
							製造場	使用場	廃棄場	環境排出量	リスク量 (単位)	リスクへの 寄与率 (%)				
1	HCHO	HCHO形 接着剤	化学物質低含有製品への代替	接着剤中ホルムアルデヒドによる室内空気汚染	1970 ~ 2030	フロー ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	9.96 (t-HCHO)	12,911 (DALY)	98.4	Very Low		
				接着剤代替によるGHG排出の増加								9.29 (t-HCHO)	206 (DALY)		1.6	
2	CFC HCFCs HFCs	建築用 発泡断熱材	低ODP、低GWP物質への代替	断熱材中発泡剤フロン(ODS)の放散、排出	1972 ~ 2030	フロー ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	838 (t)	1,644 (DALY)	フロン由来: 2.1 (%)	Very High		
				断熱材中発泡剤フロン(ODS)の放散、排出								37,889 (t)	73,947 (DALY)			
				断熱材中発泡剤フロン(ODS)の放散、排出									747 (t)		164 (DALY)	
				断熱材中発泡剤フロン(ODS)の放散、排出									49,108 (t)		10,733 (DALY)	ストック由来: 97.9 (%)
3	R22 R410a R32	空調機器 用冷媒	低GWP物質への代替	機器中冷媒フロン(ODS)の漏えい、排出	1952 ~ 2030	フロー ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	2,717 (t)	52 (DALY)		Low		
				機器中冷媒フロン(ODS)の漏えい、排出								31,919 (t)	4,121 (DALY)			
				機器中冷媒フロン(ODS)の漏えい、排出									7,108 (t)		386 (DALY)	15.8
4	DecaBDE TPHP	電気、電子 機器用 難燃剤	健康リスク配慮物質への代替	難燃剤の環境排出を低減したヒト健康影響	1976 ~ 2030	フロー ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	4,802 (t)	4,023 (DALY)	55.8	Middle		
				難燃剤代替による生態系影響の増加								54,820 (t)	3,190 (DALY)		44.2	
				難燃剤代替による生態系影響の増加									593 (t)		3 (DALY)	11.5
5	LAS AE	洗剤	健康リスク配慮物質への代替	洗剤の推計排出による生態系影響	1970 ~ 2030	フロー ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	1,208 (t)	23 (DALY)	88.5	High		
				洗剤の推計排出による生態系影響									149 (t)		2,241,034 (yen)	76.1
				洗剤の推計排出による生態系影響									3,875 (t)		705,584 (yen)	23.9
6	R12 R134a R600a	冷蔵庫用 冷媒	低GWP物質への代替	冷蔵庫の環境排出を低減したヒト健康影響	1970 ~ 2030	フロー ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	9,159 (t)	5,132,008 (yen)	100.0	Very Low		
				冷蔵庫の環境排出を低減したヒト健康影響								94,483 (t)	180 (yen)		0.0	
				冷蔵庫の環境排出を低減したヒト健康影響									6,057 (t)		11E-3 (PAF)	-
7	PCE DEHP	ドライ クリーニング 用洗剤	立地規制による排出源店舗の移動	店舗からの排出によるヒト健康影響	2005, 2010, 2015	フロー ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	200 (t)	2.5E-6 (PAF)	-	-		
				店舗からの排出によるヒト健康影響								16,126 (t)	2.5E-6 (PAF)		-	
				店舗からの排出によるヒト健康影響									9.3 (DALY)		-	
8	PCE DEHP	ドライ クリーニング 用洗剤	立地規制による排出源店舗の移動	店舗からの排出によるヒト健康影響	2005, 2010, 2015	フロー ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	190 (t)	3.8E-01 (DALY)	-	-		
				店舗からの排出によるヒト健康影響									1,114 (t)		3.8E-01 (DALY)	-
8	PCE DEHP	ドライ クリーニング 用洗剤	立地規制による排出源店舗の移動	店舗からの排出によるヒト健康影響	2005, 2010, 2015	フロー ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	386 (t)	3.8E-01 (DALY)	-	-		
				店舗からの排出によるヒト健康影響									120,321 (t)		92 (DALY)	-
8	PCE DEHP	ドライ クリーニング 用洗剤	立地規制による排出源店舗の移動	店舗からの排出によるヒト健康影響	2005, 2010, 2015	フロー ストック	目録 リスク	対抗 リスク	目録 リスク	対抗 リスク	1,617,250 (t)	2.6E-2 (species/yr)	-	-		
				店舗からの排出によるヒト健康影響									1,617,250 (t)		2.6E-2 (species/yr)	-

* 「相対的なストック管理の重要性」は「リスクへの寄与率」(以下、x)に基づき設定した。Very Low: x<=20; Low: 20<x<=40; Middle: 40<x<=60; high: 60<x<=80; Very High: 80<x。第2列化学物質の名称等: HCHO: formaldehyde, CFC: chlorofluorocarbon, HFC: hydrofluorocarbon, LAS: linear alkylate surfactant, ODS: ozone depletion potential, ODP: ozone depletion potential, PAF: global warming potential, GWP: global warming potential, R: 数字: 亜種例番号で表す。その他略称等: DALY: disability-adjusted life years, GHG: greenhouse gas, GWP: global warming potential, ODP: ozone depletion potential, PAF: global warming potential, R: 数字: 亜種例番号で表す。

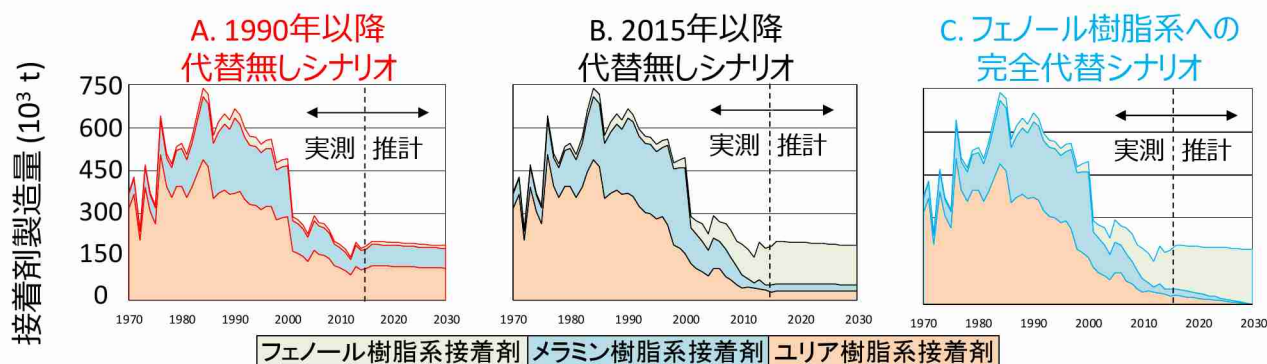
実測値^{11) 12)}を比較した結果(図(1)-6)、推計値は実測値の1/2倍から2倍までの範囲に収まっており、適切な室内濃度推計モデルが構築できたと考えられた。

図(1)-7に目標リスクと対抗リスクの評価結果を示す。目標リスクは、図(1)-5で推計したばく露濃度に、LIME2¹³⁾で用いられたばく露当たりの Δ DALY、新築木造住宅の着工数から推計したばく露人口、等乗じて推計した。対抗リスクは接着剤種別生産量(図(1)-3左側)に生産量当たりCO₂排出原単位(図(1)-3右側)を乗じて推計した。1970年から1990年までのリスクの変化は全シナリオ共通である。1975年から1980年、1985年の期間は目標リスク、対抗リスクともに増加したと推計された。目標リスクである室内空気汚染のリスク増加の時期と、シックハウス問題が社会問題と扱われた時期は期間が重なっており、この面からも実態に即したリスク評価が達成されたことが示唆された。1990年以降はフェノール樹脂系接着剤に代替するシナリオB、CのほうがシナリオAよりも目標リスクの削減が早く達成される傾向にあった。シナリオAにおいても目標リスクが削減され続ける理由は、全シナリオ共通で産業側の努力によりホルムアルデヒドの標準組成が低減されると仮定したためである。2030年におけるシナリオAとシナリオCの目標DALYの差は約1 DALYにとどまった。2030年の両シナリオ間の対抗リスクの差は約5DALYであり、2030年の目標リスクと対抗リスクの合計値で評価した際は、シナリオAが最もリスクを低減できる可能性が見込まれた。

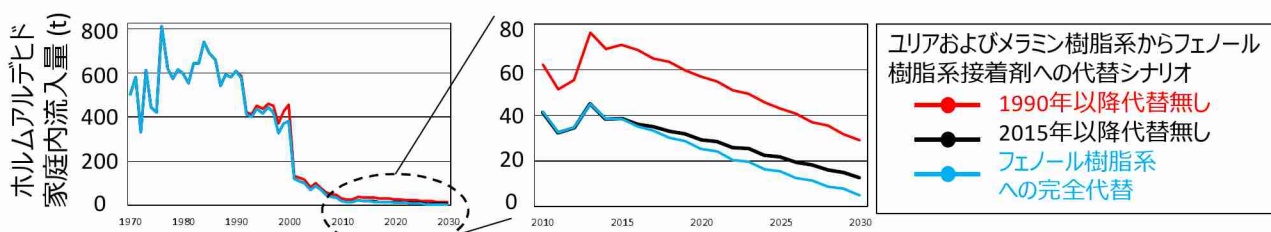
以上から、目標リスクである室内空気汚染によるヒト健康リスクの削減、およびその削減速度を早い時期に進めるためには接着剤代替が有効であるが、対抗リスクを合計した総リスクで評価した際には必ずしも接着剤代替が有効とは言えない可能性が示唆された。本ケーススタディの結果から、目標リスクの削減を優先した際、目標リスクと対抗リスクの合計値の削減を優先した際に、それぞれどのようなリスク削減効果が得られるかを明らかにできた。



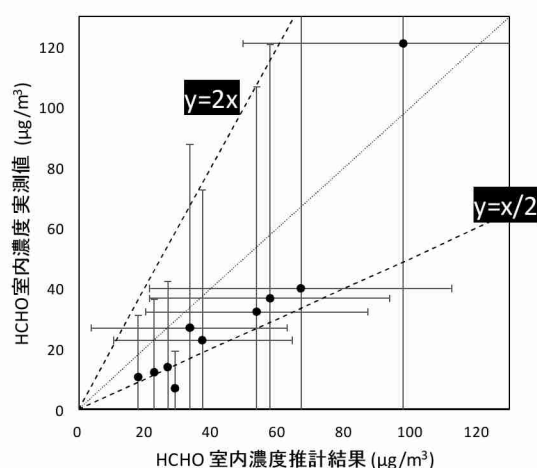
図(1)-3 ホルムアルデヒド形接着剤3種のホルムアルデヒド標準組成の推移とCO₂排出原単移



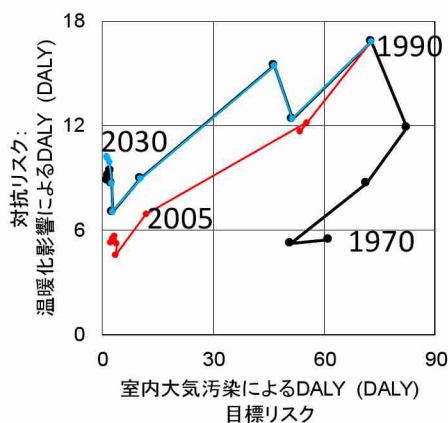
図(1)-4 ホルムアルデヒド形接着剤のシナリオ別生産量推計結果



図(1)-5 シナリオ別ホルムアルデヒド家庭内流入量推計結果 (右図は2010～2030年を拡大)



図(1)-6 HCHO室内濃度推計結果と実測値との比較 (注: 推計値及び実測値ともに●点は平均値を表し、誤差棒は標準偏差の大きさを表す)



図(1)-7 1970年から2030年まで(5年間隔)のシナリオ別リスクトレードオフ評価結果

b. 2) ケーススタディ番号2: 建築用発泡断熱材

建築物の発泡断熱材として用いられる6物質(表(1)-5、以下6物質をまとめて指す際には「フロン類」)を対象として取り上げ、用いたデータや方法、およびその結果を考察した。HFC-134a, HFC-245fa, HFC-365mfc の3物質はPRTR対象物質ではなく、文献調査⁷⁾ から代替後物質として選定された。

このケーススタディにおける目標リスクはオゾン破壊ポテンシャル(以下、ODP: Ozone Depletion Potential)を有する冷媒の大気排出によるオゾン層破壊であり、対抗リスクは地球温暖化ポテンシャル(以下、GWP: Global Warming Potential)を有する冷媒の大気排出による地球温暖化影響とした。目標リスクと対抗リスクの関係は、低ODP物質への物質代替によって導入される冷媒が、代替前よりも高いGWPを有する場合であるが、取り上げた製品ではこのような代替は見られないと見込まれた。そのため、住空間構成材料に使用される寿命の長い製品が、ライフステージ全体を通じてどのようなリスクを有するかについて考察した。

図(1)-8に1971年から1930年までのフロン類のマテリアルフロー・ストック推計結果を示した。図(1)-8および以降の図では、HCFC-22とHCFC-141bの合計値をHCFCとして、HFC-134a、HFC-245fa、およびHFC-365mfcの合計値をHFCとして合算して表示している。1971年から2015年まで⁷⁾は発泡断熱材に関わる建材の製造量やフロン類の出荷量の統計値⁷⁾に基づき、推計した。2016年から2030年においては2015年とフロンの製造量および製造量に占める6つの対象物質の構成比率が変化しないというシナリオの下で、フロー・ストック推計を行った。家庭部門に流入したフロン類は表(1)-6に示すパラメータに従い建材から漏えい・放散される。また、元となる建材の寿命に従い廃棄され、解体工程および処分場で放散を続ける。

図(1)-9は図(1)-8で推計した物質質量に、表(1)-5の大気排出量あたりDALY¹³⁾を乗じた、ヒト健康被害量推計結果である。ここでのリスク・ストックとは、将来のフロー由来ヒト健康リスクとして生じうるポテンシャル量を表している。図(1)-8のフロン類製造量に着目すると1996年でCFCの製造は終

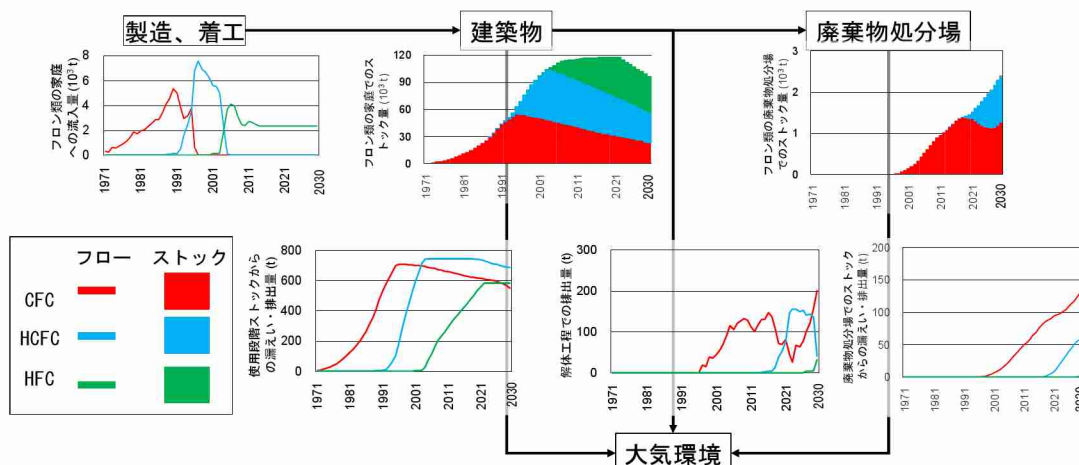
了しているが、製造終了以前に家庭内に流入した CFC が解体後も含めて、長期間にわたりリスク・ストックとして残留し、時間の遅れを伴ってヒト健康リスクを生じることが示唆された。

表(1)-5 ケーススタディ番号2で取り上げるフロンおよび代替フロンの概要

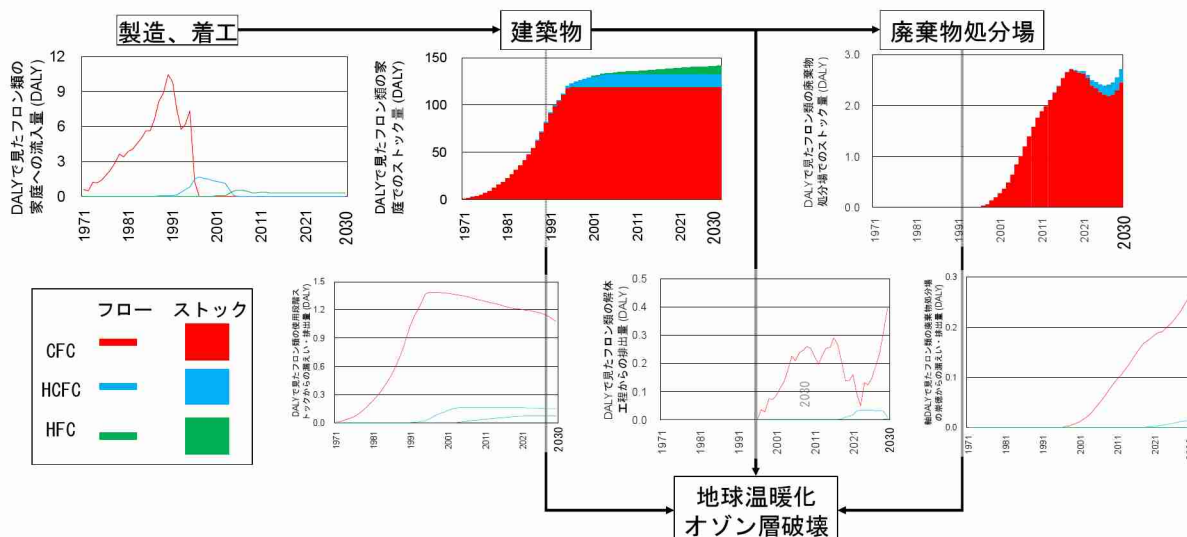
分類	略称 冷媒番号	PRTR 物質番号	オゾン破壊係数	地球温暖化係数	大気排出量当たりDALY	
			ODP	GWP (法律値)	by ODP	by GWP
CFC	CFC-11	288	1	4,750	1.3E-03	6.2E-04
HCFC	HCFC-22	104	0.055	1,810	5.4E-05	2.4E-04
	HCFC-141b	176	0.11	725	1.2E-04	9.5E-05
HFC	HFC-134a	-	0	1,430	0.0E+00	1.9E-04
	HFC-245fa	-	0	1,030	0.0E+00	1.4E-04
	HFC-365mfc	-	0	794	0.0E+00	1.0E-04

表(1)-6 フロン類を含む建材とそれらの建材ストックからのフロン類の排出割合

建材種別	製品寿命(年)	製造および施工時 排出割合 (%)	使用時の1年あたり 排出割合 (%)	廃棄後廃棄物処理 場における1年あたり 排出割合 (%)	解体時の残存量に 占める解体工程で の排出割合 (%)
現場吹付け	50	0	0.015	0.015	0.325
パネル	50	0	0.005	0.005	0.325
ラミネートボード	25	0	0.01	0.01	0.325



図(1)-8 建築用発泡断熱材のマテリアルフロー・ストック推計結果



図(1)-9 化学物質別の建築用発泡断熱材のリスク・ストックとリスク・フローの推計結果

b.3) ケーススタディ番号3: 空調機器用冷媒

空調機器と空調機器用冷媒として用いられるR-22、R-410a、R-410a (表(1)-7) を対象として取り上げ、用いたデータや方法、およびその結果を考察した。R-410aおよびR-32はPRTR対象物質ではなく、文献調査¹⁴⁾ ¹⁵⁾を通じて、R-22の代替後物質として選定された。

このケーススタディにおける目標リスクはオゾン破壊ポテンシャル (以下、ODP: Ozone Depletion Potential) を有する冷媒の大気排出によるオゾン層破壊であり、対抗リスクは地球温暖化ポテンシャル (以下、GWP: Global Warming Potential) を有する冷媒の大気排出による地球温暖化影響とした。目標リスクと対抗リスクの関係は、低ODP物質への物質代替によって導入される冷媒が、代替前よりも高いGWPを有する場合であり、このような代替が行われた実績を踏まえて、物質代替に関するシナリオ作成を行い、リスク評価を実施した。

表(1)-7に対象冷媒の特徴を、図(1)-10にシナリオ評価の基礎となる空調機器のフロー・ストック解析結果を、図(1)-11に空調機器用冷媒の代替シナリオ別フロー・ストック評価結果を示した。

シナリオ A では R-22 から R-410a へ、そして R-410a から R-32 へと冷媒が代替されるとした。1952～1991 年まで空調機器出荷量および R-22 の出荷量が増加傾向にあり、1992 年以降では減少傾向を示し、2008 年に出荷されることはなくなった。一方で R-22 の保有量に着目すると 2000 年まで増加を続け、以降は減少しているものの、2030 年にいたるまで 0 にはならない。1998 年から 2008 年にかけて、オゾン破壊ポテンシャルを有する R-22 は、R-410a へと代替された。R-410a のピーク保有量は 2017 年に 55,994 トンに、ピーク廃棄量は 2023 年に 4,011 トンに至ると推計された。さらに温暖化ポテンシャルが大きい R-410a から、より小さい R-32 への代替が 2013 年以降から行われ、推計期間として設定した 2030 年においてもフロー、ストックともに増加傾向を示すと推計された。

シナリオ B では、R-22 から R-410a の冷媒代替のみが実施されると定した。R-22 のフロー・ストックの変化はシナリオ A と同じである。しかし、R-410a は代替が行われなため、2030 年に至るまで増加し続けると推計された。

シナリオ C では冷媒代替が行われないと仮定したため、R-22 の出荷、保有、廃棄すべてが増加し続け、2030 年にはそれぞれ 5,700 トン、67,000 トン、4,800 トンであると推計された。

図(1)-11に示した冷媒のフロー・ストック解析結果に基づき、使用場、廃棄行程からの冷媒の大気排出によって生じるオゾン層破壊 (目標リスク) と 地球温暖化 (対抗リスク) を推計し、ヒト健康リスクを DALYs として評価した (図(1)-12、図(1)-13)。

まず、図(1)-12の代替シナリオ別ヒト健康影響評価結果に着目する。現状の傾向延長を仮定したシナリオ A における DALY は、1952 年の 5.5 DALY から増加し続け、2018 年に 9,863 DALY とピークを迎え、以降は 2030 年まで減少を続け 7,435 DALY に至ると評価された。R-410a から R-32 への代替が行われないシナリオ B、さらに R-22 から R-410a への代替が行われないシナリオ C と比較すると、シナリオ A では 2030 年にヒト健康被害の削減が達成しうると評価された。1952 年から 2030 年までの、シナリオ A とシナリオ B の累積 DALY の差は、22,911 DALY であり、これが冷媒代替により日本全国で削減された健康被害量と言える。

次に図(1)-13 (イ) のインパクトカテゴリ別の評価結果に着目する。ここでは、シナリオ A における評価結果を示しており、DALY 評価結果をオゾン層破壊によるものと地球温暖化によるもので区別した。同様に、図(1)-13 (ロ) のライフステージ別のヒト健康影響評価結果では、生産・使用・廃棄段階別に DALY 評価結果を区別した。図の右側の数字は各段階における 2030 年の DALY 評価結果を示しており、生産段階における排出に由来する DALY はわずかであるものの、使用段階すなわちストックされた冷媒からの被害が 30%程度を占めており、ストック由来リスクの寄与率が明らかにされた。

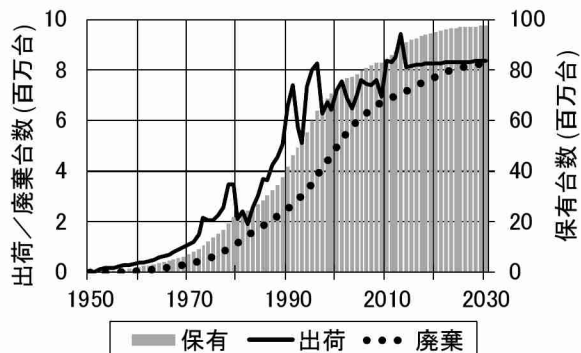
以上の結果を整理すると、冷媒は空調機器の動作に必要な不可欠な化学物質であるが、その一方で化学物質・製品のライフサイクルを通してヒト健康被害をもたらしうることが、その定量的なリスク量とともに、明らかにされた。また、R-22 の出荷量が減少しはじめた 1998 年、出荷量が 0 となった 2008 年、等の時期とを比較すると、その廃棄が 0 に至る時期は 2030 年であると推計されており、使用段階のストックおよび廃棄段階のフローによるリスクは製品出荷後から 10 年以上の遅れを伴って発生する事が明らか

かにできた。また、廃棄段階での排出に由来する被害量が大きい点に関しては、空調機器廃棄時における冷媒の破壊・回収技術が十分でないためであり、管理技術の発展が望まれる。インパクトカテゴリ別の評価結果からは地球温暖化による健康被害が大きいと推計されたため、GWP の小さい冷媒の開発と導入が必要であることが示唆された。

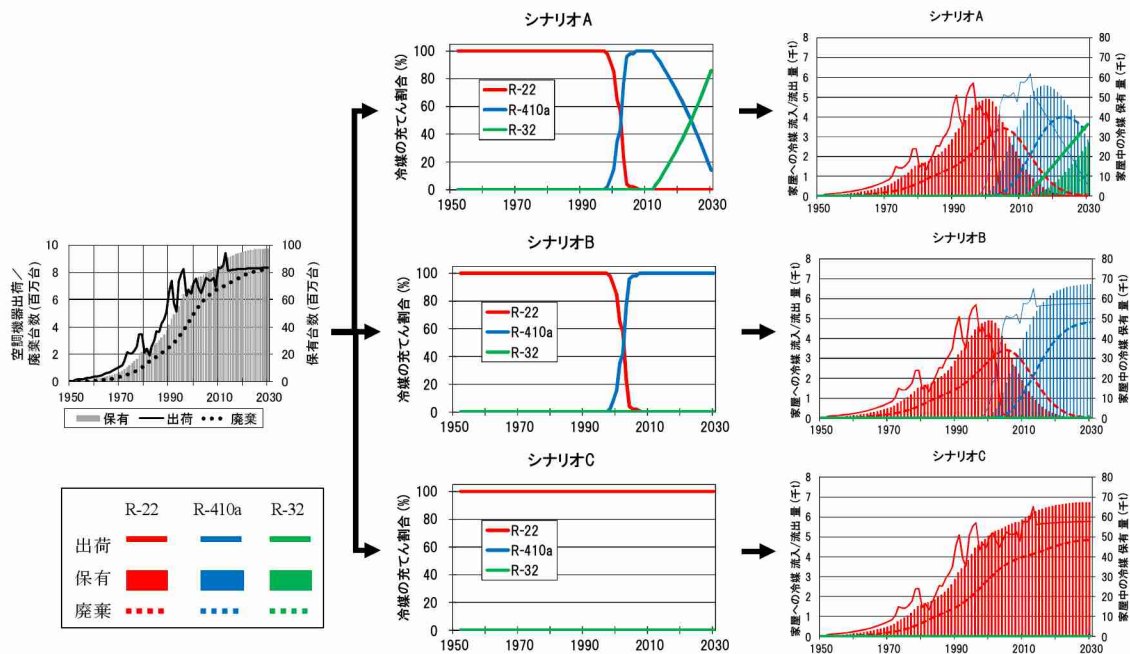
表(1)-7 対象物質の特徴

冷媒番号	化学式	特徴	充填率 (g/kW)	GWP (-)	ODP (-)
R-22	CHClF ₂	無毒性・非引火性	0.250	1810	0.055
R-410a	CH ₂ F ₂ (50%) C ₂ H ₂ F ₅ (50%)	混合冷媒	0.250	2088	0
R-32	CH ₂ F ₂	無毒性・非引火性	0.175	675	0

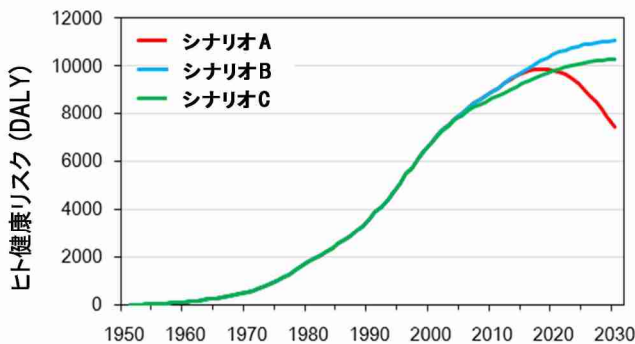
GWP: Global Warming Potential/ 地球温暖化係数
 ODP: Ozone Depletion Potential/ オゾン破壊係数



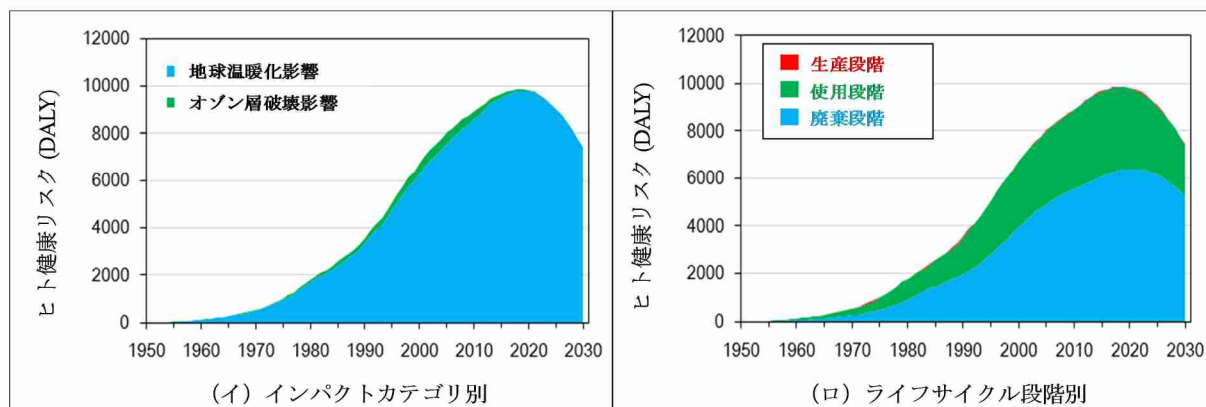
図(1)-10 空調機器の出荷・保有・廃棄台数推計結果



図(1)-11 空調機器用冷媒の代替シナリオ別フロー・ストック評価結果



図(1)-12 空調機器用冷媒の代替シナリオ別のヒト健康リスク評価結果



図(1)-13 インパクトカテゴリ別とライフステージ別のヒト健康リスク評価結果（シナリオA）

b. 4) ケーススタディ番号4: 電気・電子機器用難燃剤

電気・電子機器に用いられる難燃剤 デカブロモジフェニルエーテル（以下、DecaBDE: decabromodiphenyl ether）、およびその代替物質候補のリン酸トリフェニル（以下、TPhP: triphenyl phosphate）について、用いたデータや方法、およびその結果を考察した。

このケーススタディにおける目標リスクはヒト健康被害であり、対抗リスクは生態系影響である。DecaBDE、TPhPともに目標リスクと対抗リスクに影響が見込まれ、代替の有無によるリスクバランスの変化がトレードオフとして懸念された^{16) 17)}。過去の化学物質代替が行われた実績を踏まえて、製品代替に関するシナリオ作成を行い、リスク評価を実施した。

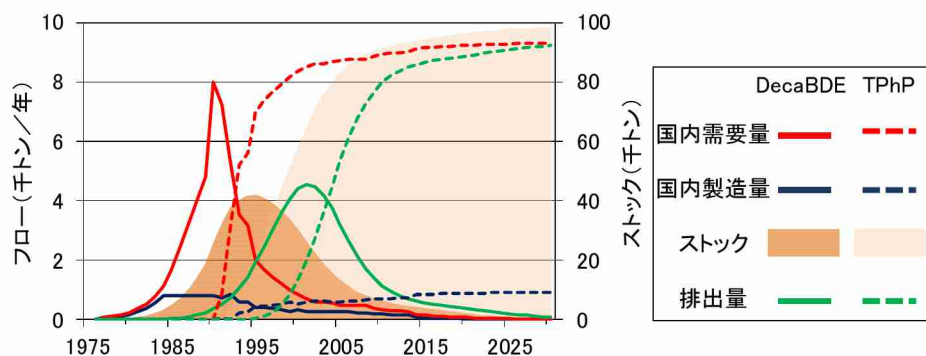
図(1)-14にDecaBDEおよびTPhPのフロー・ストック解析結果として、電気・電子機器中のプラスチックに用いられる難燃剤の国内需要量、国内製造量、ストック量、排出量を示す。国内需要量を家庭への流入量とみなした。また排出量はリサイクル、焼却処分に含まれる以外に、筐体からダスト態としての環境排出も含まれる。

2015年から2030年にかけての国内需要量および製造量の将来推計に関しては、図(1)-15に示す2つのシナリオを設定した。シナリオAでは1990年代以降の実態に即してDecaBDEからTPhPへの代替が行われ、シナリオBでは1990年代以降も代替が行われず、と設定した。両シナリオとも、2000年～2015年までの実際の難燃剤の需要動向を考慮し、2016年～2030年までの難燃剤需要量は2015年以降変化しないと仮定した。これにより家庭への流入量が推計され、製品の寿命関数および製品ライフステージ別の排出係数を乗じることでストックおよび家庭からの流出量も推計された。

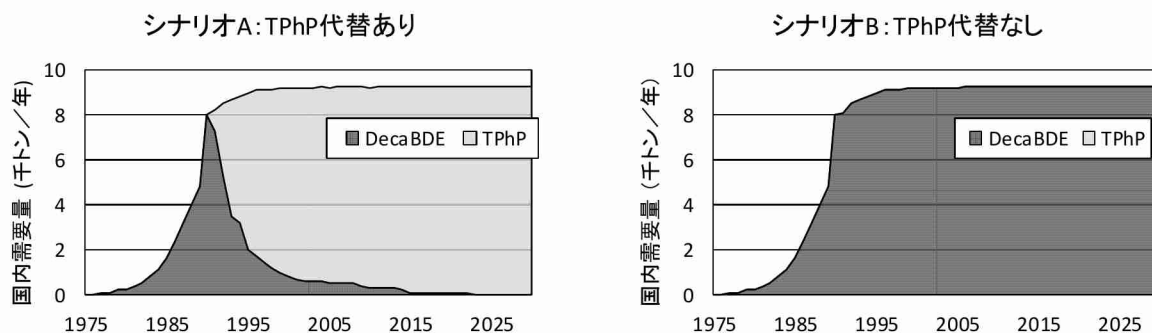
製品ライフステージ別・排出先の環境媒体別の排出係数に関しては、先行研究において知見が少なく、さらにそのスケールは 10^{-5} から 10^{-3} まで分布していたため、ブートストラップ法を用いて排出係数の範囲を推定した。図(1)-16左側にDecaBDEの排出係数とその信頼区間を示し、図(1)-16右側に排出係数の信頼区間を用いた排出量推計結果を示す。この結果から、排出係数の不確実性により、環境排出量に1/3～3倍程度の不確実性を有することが示された。

以上で推定した排出係数（中央値）を用いて推計した環境排出量を、Sanky Diagramとして、排出源側のライフステージ別、排出端側の環境媒体別に図(1)-17に示した。このような一連の推計プロセスを通じて、ライフステージ別、ばく露の発生する環境媒体別のフロー・ストック解析の枠組みが構築されたと言える。さらに、各環境排出量に起因するヒト健康および生態系への影響を、LIME2^{13) 18)}の被害係数を用いて、統合指標: Eco-indicator Yen（単位としては円_{eco-indicator}）として算定し、両リスクを評価した（図(1)-18）。図(1)-18左側はシナリオAの結果を示しており、DecaBDEによるヒト健康影響を目標リスクとし、TPhPへの代替によりこれを削減しようとした場合、対抗リスクである生態系影響が大きくなると評価された。ただし、縦軸と横軸の尺度に着目し、ヒト健康影響と生態系影響の合計値で評価すると、TPhPへの代替により影響が小さくなることが読み取れた。そのため、DecaBDEからTPhPへの代替は、総量としてリスクの削減に寄与しうると考えられた。シナリオBでは代替がされないためヒト健康影響およびリスクの総量が増大し続ける結果となった。また図(1)-18右側は、ヒト健康影響と生態系影響

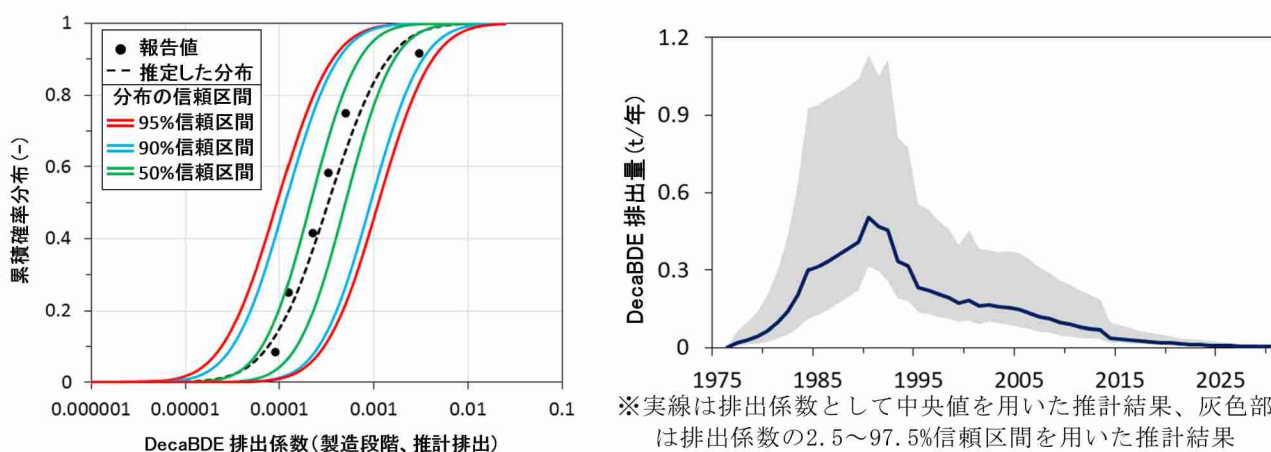
の合計値をライフステージ別に集計したものである。図(1)-14のフロー・ストック解析結果と合わせて考察すると、DecaBDEの市場へのストックが大きくなるにしたがい、使用及び廃棄段階からのリスクが増大していく事が示された。また、1990年代から始まったDecaBDEからTPhPへの代替によって、DecaBDE使用量は削減されたものの、使用量の削減がヒト健康リスク総量の削減効果として顕在化するまでに時間的な遅れがあることが示された。



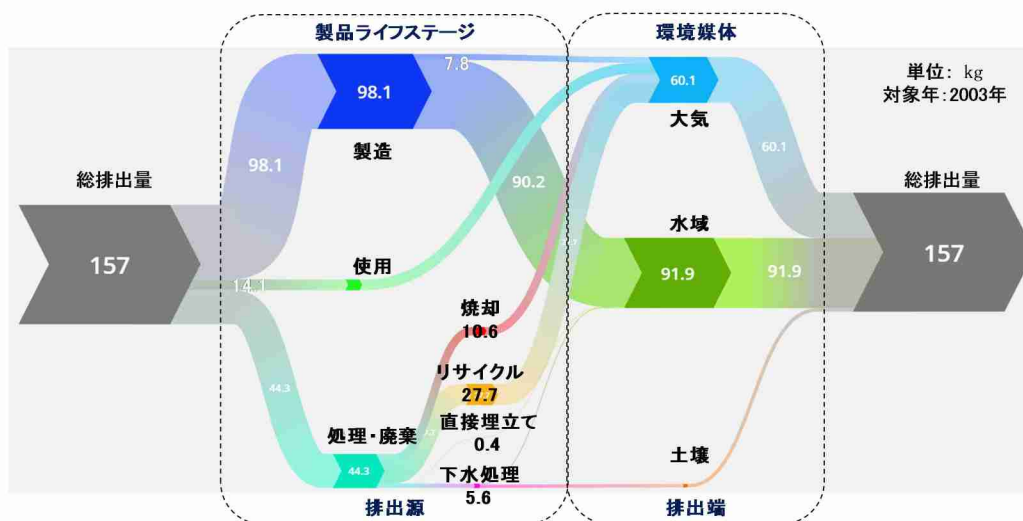
図(1)-14 日本国内の電気・電子機器に関するDecaBDEとTPhPのフロー・ストック解析結果



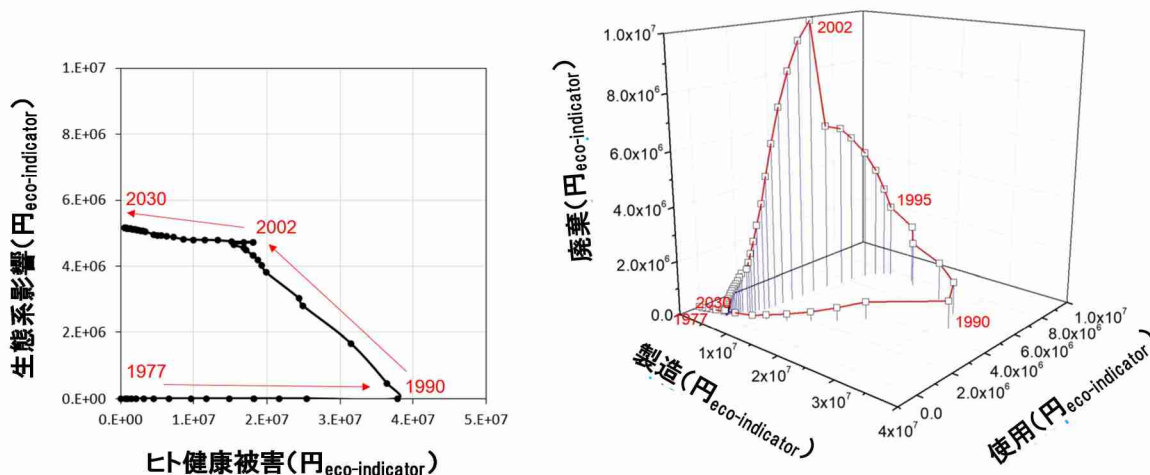
図(1)-15 物質代替によるトレードオフ評価のためのシナリオ設定およびシナリオ別国内需要量



図(1)-16 ブートストラップ法を用いたDecaBDE排出係数の信頼区間推定とその排出量推計結果



図(1)-17 製品ライフステージおよび環境媒体に着目した DecaBDE 排出量のSankey Diagram



図(1)-18 リスクトレードオフ評価結果およびライフステージ別のリスク評価結果

b. 5) ケーススタディ番号5: 洗剤

家庭用の衣類洗剤の界面活性剤成分であるアルコールエトキシレート（アルキル基の炭素数が12から15までのもの及び混合物に限る）（以下、AE: alcohol ethoxylate）、および直鎖アルキルベンゼンスルホン酸塩（以下、LAS: linear alkylbenzenesulfonate）を対象とした。

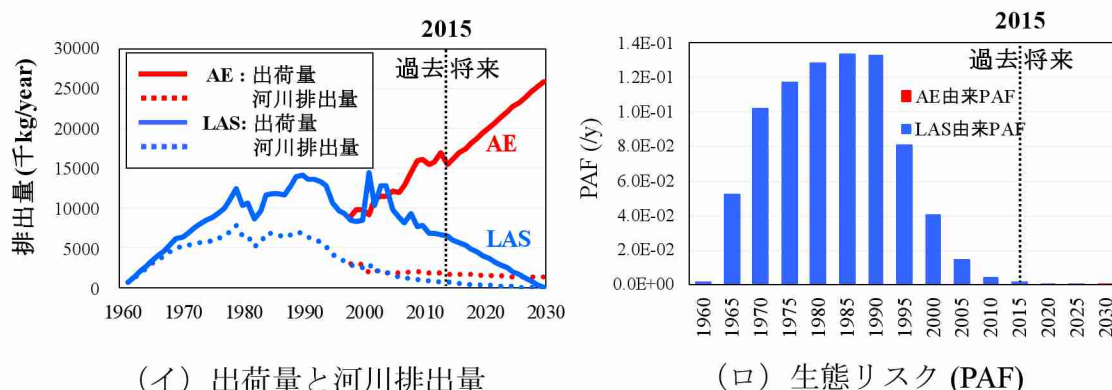
このケーススタディでの目標リスクは生態系へのリスクであり、対抗リスクは洗剤で消費されるエネルギー消費、ひいては温暖化影響によるヒト健康リスクである。AE、LASはともに目標リスクと対抗リスクへの影響を有すると見込まれた。また、下水インフラ、洗剤技術、および洗剤機器の買換え行動も含めた、リスクバランスの変化を懸念されるトレードオフであるとみなし、評価バウンダリに含めた。過去の化学物質代替が行われた実績を踏まえて、製品代替に関するシナリオ作成を行い、近畿圏を対象としたリスク評価を実施した。

図(1)-19 (イ) にAEおよびLASのフロー・ストック解析結果を、図(1)-19 (ロ) に (イ) で推計した河川排出量に起因する生態リスク評価結果を示した。図(1)-19 (イ) の2015年以降の将来シナリオ下において、2030年にLAS全量がAEに代替されると仮定し、2015～2030年の期間では直線内挿した。結果に関して、家庭への流入量、家庭からの排出量、一般使用形態から時間解像度を1年とした際に、ストックは発生しないと推定された。図(1)-19 (イ) で推計した河川排出量を、図(1)-19 (ロ) に示した生態リスクとして評価する方法論として、詳細リスク評価書¹⁹⁾を参照した。リスク評価の概要については、まず、化学物質の水圏環境下での環境運命解析²⁰⁾、および下水道の普及率や下水道での除去率に基づき

生態系へのばく露濃度を推計し、その後「影響を受ける種の割合の期待値（以下、PAF: Potentially Affected Fraction）」指標²¹⁾を用いた生態リスク評価を組み合わせ、PAFを算定した。PAFを用いる理由に関して、代替前後における生態リスクの変化量を統一尺度で評価する必要がある²²⁾。そこで、被代替物質と代替物質の両方で種の感受性分布解析から算出するPAFを用いた。

シナリオ解析のために、表(1)-8に示す5つの評価シナリオを作成した。物質代替の有無に関しては5つの全シナリオで共通とし、2015年までの傾向を踏まえ、2030年にはLASからAEへ完全代替が行われるとした。それ以外のシナリオでは、AEとLAS消費量だけでなく、水消費量やエネルギー消費量に関わる複数のリスク削減策の有無を設定し、図(1)-20に示すパラメータを変化させ、リスクを評価した。

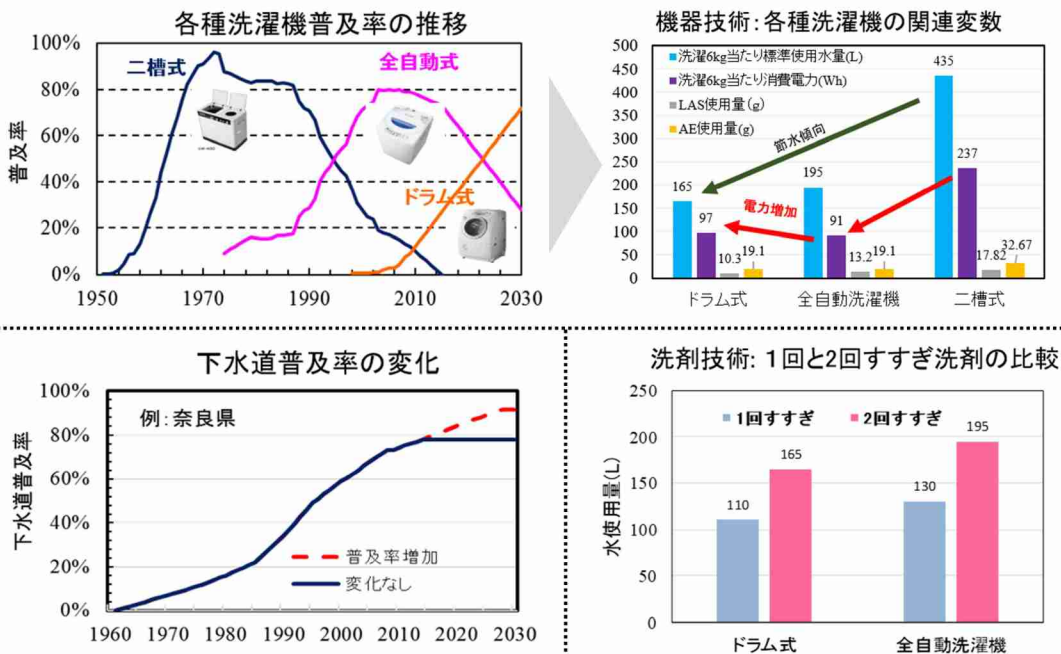
生態系影響のリスク指標を示すPAF評価結果、および地球温暖化影響のDALY評価結果を、図(1)-21に示した。全てのシナリオで、PAFは経時的に削減されるすると推計された。2015年から2030年にかけてのBAUとシナリオ1の比較、すなわち下水道普及率が増加した場合と、増加しない場合の影響・被害変化を比較すると、下水普及率が増加を続けるBAUシナリオではPAFが 10^{-5} 減少したのに対して、下水普及率が変化しないシナリオ1ではPAFが 10^{-1} の減少にとどまった。このことから、生態リスクの減少にあたり、下水道普及率の向上は重要な政策であると示唆された。同様に、BAUとシナリオ2、すなわち洗濯機器技術進歩の有無を比較すると、節水型ドラム式洗濯機の普及により、水消費量が経年的に減少する一方で、電力消費及びGWP由来のDALYが増大すると推計された。BAUとシナリオ3、すなわち洗剤技術進歩の有無を比較すると、1回すすぎ洗剤の普及により、水消費量、電力消費量及びGWP由来のDALY指標値ともに減少すると推計された。シナリオ4はすべての設定を導入するケースであり、PAF、DALYの両方が削減されるため、トレードオフの懸念が最も小さいシナリオと推定された。



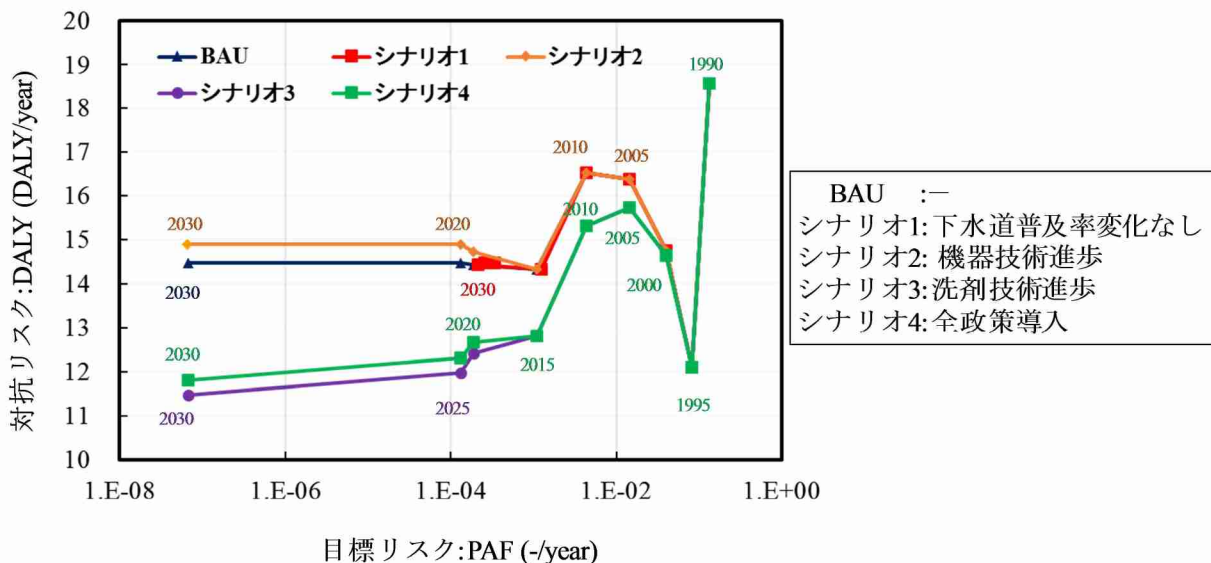
図(1)-19 (イ) AE・LASのフロー量と (ロ) AE・LAS由来生態リスク評価結果

表(1)-8 洗剤中化学物質代替や下水処理技術・洗浄技術更新シナリオの設定

シナリオ No.	物質代替 (LAS →AE)の有無	下水道普及率の向上	洗濯機器技術進歩	1回すすぎ洗剤の普及
(BAU)	有り	向上		
1	有り			
2	有り	向上	有り	
3	有り	向上		普及
4	有り	向上	有り	普及
補足	共通の将来シナリオ			



図(1)-20 将来シナリオごとに变化させたパラメータの概要



図(1)-21 AEとLASの生態リスクと地球温暖化影響のリスクトレードオフ評価結果

b.6) ケーススタディ番号6: 冷蔵庫用冷媒

冷蔵庫と冷蔵庫用冷媒として用いられるR-12、R-134a、R-600a (表(1)-9) を対象として取り上げ、用いたデータや方法、およびその結果を考察した。

このケーススタディにおける目標リスクは冷蔵庫の使用段階及び廃棄段階で排出される冷媒による直接的な地球温暖化リスク (以下、DGW: Direct Global Warming) であり、対抗リスクは冷媒を含有する冷蔵庫のストック期間中の総エネルギー消費量による間接的な地球温暖化リスク (以下、IGW: Indirect Global Warming) とした。

図(1)-22に冷蔵庫用冷媒の代替シナリオとフロー・ストック量の経年変化を示した。冷蔵庫用冷媒の代替シナリオは、これまでに実際に行われてきたシナリオ、および国際機関により検討されている物質代替シナリオに基づき設定した。フロン等の冷媒は、モントリオール議定書や京都議定書といった国際条約の施行を背景に、代替が促進されてきた²³⁾。UNEP¹⁵⁾によると、R-134a とR-600a は、家庭用冷凍に使用されるR-12 の代替候補であり、現在のところエネルギー高効率、低価格を実現できる新たな代替物

質は存在しない。1992年以前では、家庭用電気冷蔵庫に使用される全ての冷媒はR-12であった。R-12がオゾン層破壊に及ぼす影響を考慮し、日本では1993年以降、世界に先駆けて家庭用電気冷蔵庫の冷媒であるR-12の製造中止を率先的に進め、1995年終わり頃には製造が停止された。1996年から2002年までの冷媒は全てR-134aであったが、R-134aが及ぼす地球温暖化影響を考慮し、2003年以降はR-600aが代替物質として採用された。これにより、2006年に新しく生産された冷蔵庫の約20%に、R-600aが採用された。R-600aの使用は、今後も増加することが予測され、2022年には100%に達すると考えられる。

R-12, R-134a, R-600aのすべての冷媒に共通する傾向として、各冷媒ストックの最大値は、inputフローの最大値の約8～12倍高い量に至ると推計された。これは冷媒が毎年一定量ストックされ、かつ耐久性があるという性質によると考えられる。冷蔵庫中の冷媒のストック量推計結果から、同様の性質を持つ製品・化学物質には、使用段階の期間中を通じてヒト健康および環境への潜在的なリスク源となりうるため、ストック量の把握をはじめとした、リスク管理が必要であると考えられる。

図(1)-22の冷媒のフロー・ストック推計結果にもとづき、冷蔵庫からの冷媒排出量推計結果を図(1)-23に示した。文献調査より、冷媒は使用段階および廃棄物管理段階において排出されたと想定され、製造段階における排出は研究対象外とした。使用および廃棄物管理段階における排出係数は、それぞれ0.3%と50%に設定した。冷媒の全排出量は1952年では0.06tであったのが、2011年に247tに増加したのち、2030年には188tに減少した。

1952年から2004年にかけてR-12が冷媒の全排出量において優位を占めていた。2005年から2025年では、R-134aが冷媒排出量のほとんどを占めていたが、2026年から2030年になると、今度はR-600aの排出量が多くを占めた。2030年の冷媒の排出量はR-134aが27%、R-600aが72%を占めると予想された。最後に、1952年から2030年における冷媒の累積排出量をみると、R-12およびR-134aがそれぞれ44%、R-600aが12%を占めると推計された。

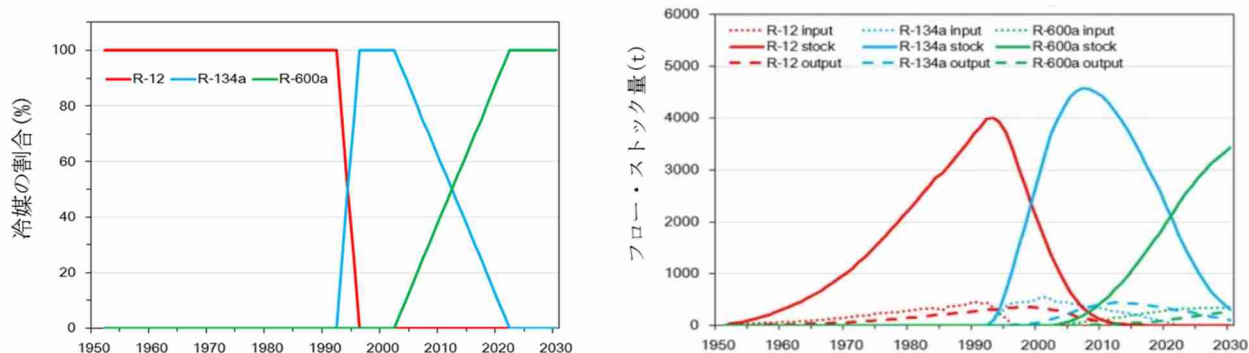
冷媒排出によるDGWと、エネルギー消費によるIGWの推計結果を図(1)-24に示した。DGWとIGWを合計した地球温暖化の影響は1952年から1995年まで上昇し、以降から2030年までは低下すると推計された。冷蔵庫の台数増加と老朽化によって冷蔵庫による地球温暖化影響は増加し、技術の向上と地球温暖化影響の小さい冷媒への代替によって築温暖化影響は抑制されたと考えられる。以上に述べた2つの側面から、1995年までは地球温暖化への影響は増すものの、それ以降は後者の影響が強くなることで、地球温

表(1)-9 対象物質の特徴

冷媒番号	化学式	重点率 (g/L)	GWP (-)	ODP (-)
R-12 (CFC)	CCl ₂ F ₂	0.43	10900	0.82
R-134a (HFC)	CH ₂ FCF ₃	0.39	1370	0
R-600a (HC)	CH(CH ₃) ₂ CH ₂	0.2	20	0

ODP: ozone depletion potential (オゾン破壊係数)

GWP: global warming potential (地球温暖化係数)

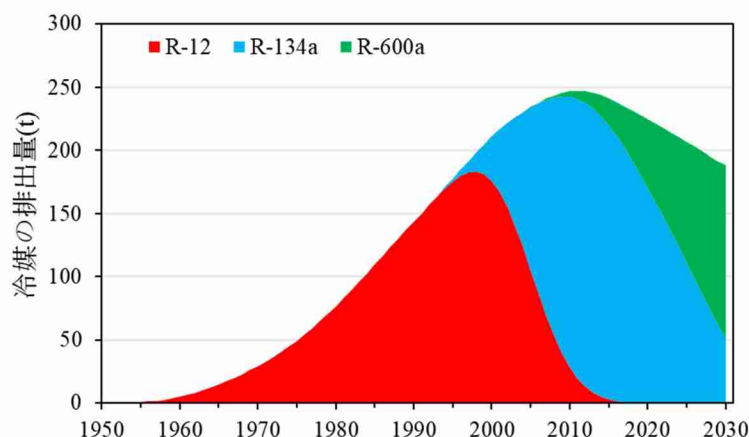


図(1)-22 冷蔵庫用冷媒の代替シナリオとフロー・ストック推計結果

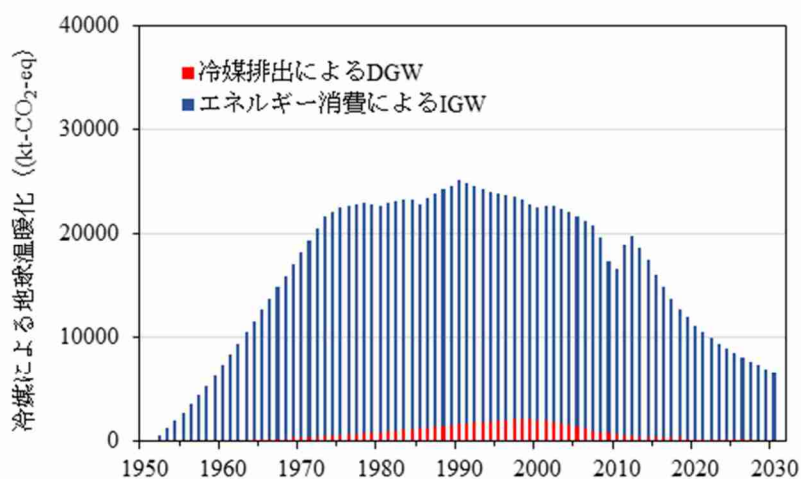
暖化影響が低下すると考えられた。

地球温暖化影響の内訳をみると、冷蔵庫からの IGWが92～99%の割合を占めると推計された。この理由は、冷蔵庫における一台当たりの冷媒充填率が比較的小さいため、冷媒の排出による影響が相対的に小さくなったためと考えられる。また、使用段階における漏出による排出量は比較的低く、反対に廃棄物管理段階における冷媒排出量が多いため、冷蔵庫本体のoutputフローはストックと比較して小さいことも、IGWが相対的に大きくなった理由と考えられた。IGWは1995年に25,065 kt-CO₂-eqに達し、これはエネルギー消費のピーク年と一致している。DGWは1998年に2,022 kt-CO₂-eqに達したが、これは冷媒排出のピークの2年前に当たる。

以上より、使用段階におけるエネルギー消費によるIGW、使用段階および処理段階における冷媒排出によるDGWを評価することを可能とした。



図(1)-23 1952年～2030年の日本における家庭用電気冷蔵庫の冷媒排出量推計結果



図(1)-24 2030年までの日本における冷蔵庫部門の地球温暖化への間接的および直接的影響

b. 7) ケーススタディ番号7: ドライクリーニング用洗浄剤

ドライクリーニング用洗浄剤の一つとして用いられるパークロロエチレン（以下、PCE: perchloroethylene）を対象とした。このケーススタディでは、リスクガバナンスの化学物質管理と土地利用管理の2つの制度の連携を通じたリスク削減の可能性について考察する事を目的とした。そのため化学物質代替や製品代替によるトレードオフを考慮することが目的ではなく、他のケーススタディと性質が異なる。

化学物質排出量の推計手法、およびリスク評価手法を表(1)-10に示した。表(1)-10に基づく、MOE分布の評価結果、および用途地域別・MOEカテゴリ別でみたPCEばく露人口を図(1)-25に示した。このPCEばく露濃度推計結果は、実測濃度の1/2倍から2倍までの範囲に収まることを確認しており、PRTR届出対

象外推計資料に基づいた、濃度分布実態を評価するモデル構築が達成された。

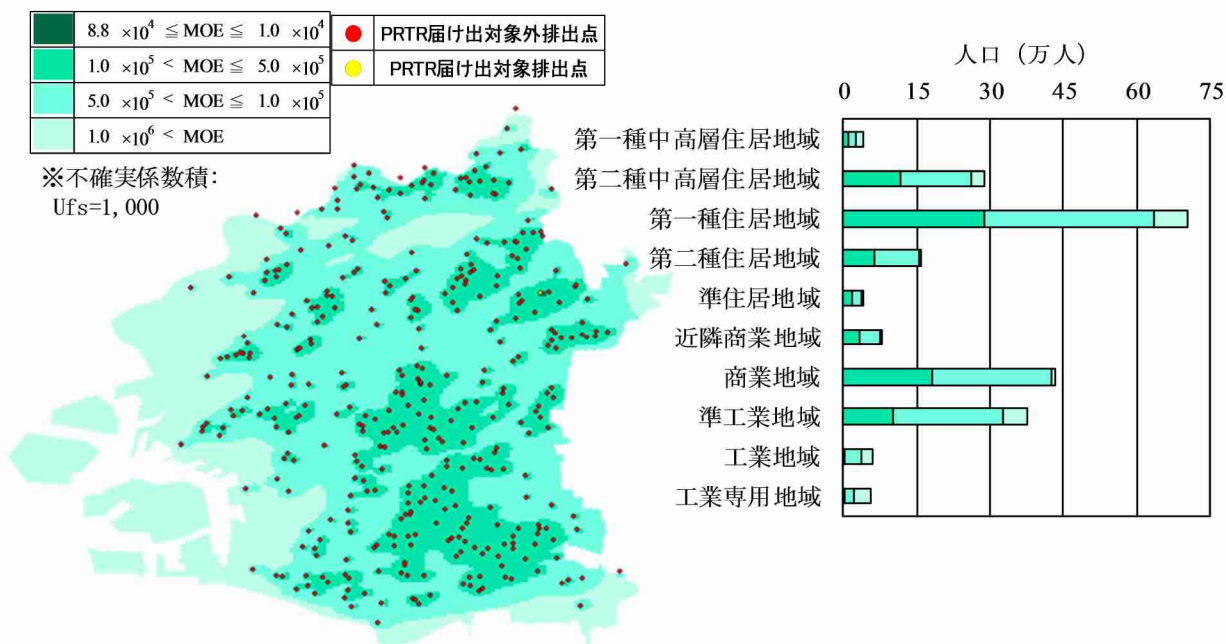
図(1)-25左側の凡例に示すMOE推計結果の値域に着目すると全ての地域で不確実性係数積: 1,000を下回る地域が無かった。この結果から、2005年の大阪市において、設定した許容摂取量に対して懸念すべきリスクは無いと言え、リスク対策の必要性は低い。また、MOEの小さいクラスに存在する人口、すなわちヒト健康リスクが相対的に大きいと見込まれる人口が多い地域は、第二種中高層住居地域、第一種住居地域、商業地域と考えられた。この理由として、排出源と被ばく露集団の距離が近い事、ある範囲内での排出量が大きい事、等が考えられる。特に第二種中高層住居地域、第一種住居地域では、クリーニング需要が大きいことで、小規模店の立地に適した商業環境が形成されていると見込まれる。このような背景から居住者と近い地域でPCE排出されたことが原因と考えられる。

図(1)-25右側の結果から、設定した基準値と比較して、推計したリスクはただちに懸念すべき水準ではなかった。ただし、人口割合が大きい地域でのMOEが高い傾向にあった。この結果に基づき人口密度の高い地域におけるドライクリーニング店の立地を規制する、もしくはPCEの使用を禁止する事によってリスクが削減できると考えた。この前提に基づき、表(1)-11に示す3つのケースを作成し、2005年のMOE評価結果と比較した。図(1)-26のケース別推計結果の全体的な傾向として、3つのケースいずれにおいても、MOEが大きい(濃緑)の人口が減っており、リスク削減効果が期待される。注意すべき点として、Case 3: 工業地域集約では、MOEばく露クラスが小さい集団が新たに生じた。これは、工業専用地域内ではなく、工業専用地域に接する地域でのMOEであった。

以上より、立地規制による土地利用の変更を通じてヒト健康リスクの低減が見込みうることを示唆した。このことから、化学物質管理の制度と、土地利用に関する制度を組み合わせることで、一般市民のリスク削減をなお一層進めることが可能であると考えられ、その削減効果を評価しうるモデル構築が達成された。

表(1)-10 PCEにかかるリスク評価手法の概要

時間	期間：2005年、時間解像度：4時間
空間	対象地域：大阪市、空間解像度：100m×100mメッシュ
対象事業者	PCEを使用するドライクリーニング店 (届出対象事業者、届出対象外(すそ切り以下)事業者両方を考慮する)
事業者の位置情報(排出点源の位置情報)	2016年3月に、WEBページ(i-タウンページ、大阪府クリーニング生活衛生協同組合HP)に掲載されていたクリーニング店の住所を緯度経度情報へ変換し、排出源として設定した。この際、取次店と見込まれる店舗は除外した。
排出量推計	① PRTR届出対象外推計資料 ⁷⁾ から、大阪府におけるPCE使用量を抽出した。 ② 大阪府と大阪市のドライクリーニング事業者数の比を用いて、大阪府のPCE使用量のうち、大阪市での使用量を推計した。 ③ 大阪市のPCE使用量を大阪市のドライクリーニング事業者数(400店舗)に按分し、一事業者当たりの排出量とした。 ※電話帳調査により位置情報が抽出できた事業者のうち、どの事業者がPCEを使用しているかは不明であった。そのため、抽出した全店舗がPCEを使用すると仮定して、大阪市内での全PCE使用量を案分した。この仮定により、総量についてはPRTR届出対象外推計資料と合致しているものの、実際にPCEを使用する店舗周辺のばく露濃度およびヒト健康リスクは過小に、PCEを使用しない店舗周辺で過大に推計される。
ばく露解析 ²⁴⁾	AIST-ADMER(ver 3.0.1)産業技術総合研究所曝露・リスク評価大気拡散モデル
ヒト健康リスク推計 ²⁵⁾	MOE(margin of exposure)でリスク評価を行った。MOEの推計に必要な、一日許容摂取量は一日許容摂取量を210[mg/kg/day]と設定した。この値は、マウスの2年間の吸入ばく露試験のLOAEL 100[ppm](エンドポイントは腎臓の尿細管上皮細胞の核肥大、肝細胞の空胞変性、壊死、炎症性細胞浸潤、など)に基づく。不確実性係数積は 10^3 であり、動物とヒトの間の種間差(10)、個人差(10)、LOAELを用いたことによる不確実性(10)を考慮した。被ばく露者は成人を想定し、夜間人口を被ばく露者の人口分布として設定した。

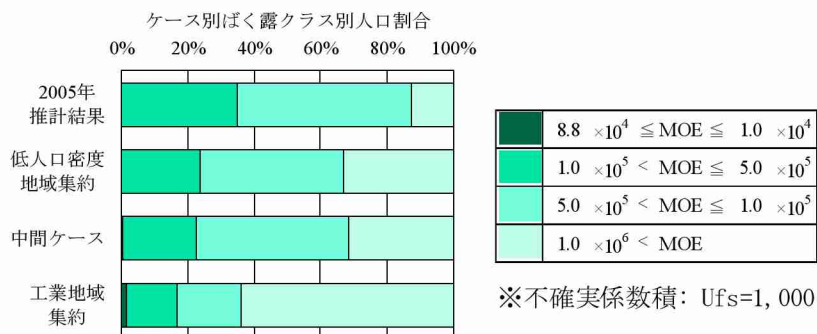


図(1)-25 ドライクリーニング店から排出されるPCEばく露によるヒト健康リスク (MOE) 分布の評価結果 (左図) およびそのMOEばく露クラス別・用途地域別人口 (右図)

表(1)-11 リスク削減のためのPCEの使用規制・立地規制に関する3つケース設計

	Case 1 低人口密度 地域集約	Case2 中間ケース	Case3 工業地域 集約
店舗の事業方式に関するシナリオ	以下の規制を適用した結果, PCEを使用できなくなる事業所は, PCE排出源として扱わず, 取次店として事業を継続したと仮定。		
PCE使用規制・事業所立地規制に関するシナリオ	人口密度の大きい地域でのPCE排出はリスク懸念を高める可能性があるため, 「①人口密度が大きい地域での使用を規制する」, もしくは「②人口密度が0であるとみなせる, 工業専用地域のみで使用を許可する」, という2つの政策シナリオを比較する。		
PCE使用事業者数	130	133	8
一店舗当たりPCE排出量に関するシナリオ	大阪市内のPCE使用量を130事業者に按分	●PCE使用禁止となったクリーニング店で本来使用していたPCE量を, 工業専用地域に立地する事業者へ按分した。 ●その他の地域では2005年の値と同様	大阪市内のPCE使用量を8事業者に按分
事業所当たりPCE排出量 [t/店舗]	1.284	1.089 (個人店) 4.4 (大規模店)	21.412

※ 2005年のMOE評価の際は, 排出点源となる事業者数を401事業者として評価した。



図(1)-26 PCEを使用するドライクリーニング店の立地規制・使用規制ケース別のMOEばく露クラス別人口割合 (総人口: 約240万人)

b. 8) ケーススタディ番号8: DEHPを含むプラスチック製品

プラスチック製品に用いられるDEHP (di(2-ethylhexyl) phthalate) を対象として取り上げ、用いたデータや方法、及びその結果を考察した。図(1)-27は、DEHPの概要をまとめたものである。DEHPを含む軟質塩ビ製品は、一般フィルム・シート、農業用ビニル、レザー、壁紙、床材、電線被覆等の電気絶縁用製品、ホース、文房具・雑貨、家電製品、自動車等幅広く多様な用途で使用されている。

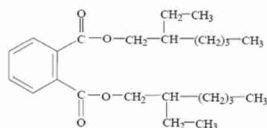
図(1)-28に1975年から2000年までのDEHPの製造数量の実績値をもとに、1974年以前および2001年以降の製造量を、指数関数近似により推算した結果を示した。図(1)-29左側は、用途別のDEHPのストック量の推算結果、図(1)-29右図は用途別廃棄関数を組み込んだ用途別廃棄量の推算結果である。内訳をみると一般フィルム・シート、建材などが多いことがわかり、この傾向は、先行研究²⁶⁾と一致している。以上の結果を日本国内への流入量、ストック量、流出量で集計したものが図(1)-30である。流入の減少傾向を反映しつつも、製品ストックが将来にわたり一定の排出寄与を占めると推計された。

次に、製品ライフステージ別・排出先の環境媒体別の排出係数を乗じることでDEHPの環境排出量を推定した(図(1)-31)。土壌への排出量が最も大きく、2000年では約4,000トンと推定された。ライフステージ別の推定結果に着目すると、使用段階から排出の寄与率が最も大きく、2000年には 5×10^4 トンであると推計された。代表的年次として2000年におけるライフステージを考慮した収支解析結果を図(1)-32に示した。

図(1)-32に示したDEHPの環境排出結果に基づき、生産、使用、廃棄段階別からのヒト健康リスクと生態リスクを評価した(図(1)-33)。ヒト健康リスクと生態リスクとも使用段階すなわちストックされたDEHPからのリスクが最も大きく、ストック由来リスクの寄与率が明らかにされた。

物質名： フタル酸ジ(2-エチルヘキシル), DEHP, フタル酸ジオクチル(フタル酸ジ(n-オクチル)を指す場合もある), DOP (DEHP などの総称), di-sec-octyl phthalate, bis(2-ethylhexyl)phthalate, dioctyl phthalate.

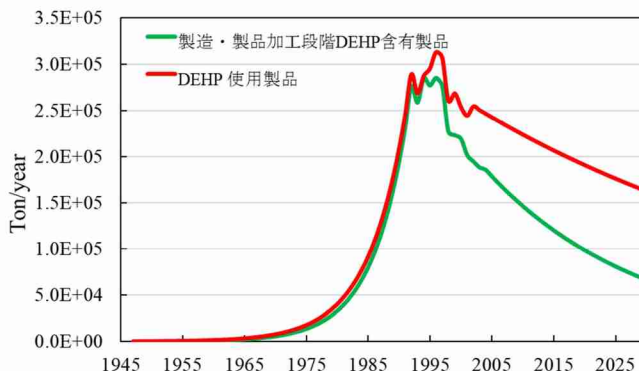
分子式および構造式: $C_{24}H_{38}O_4$



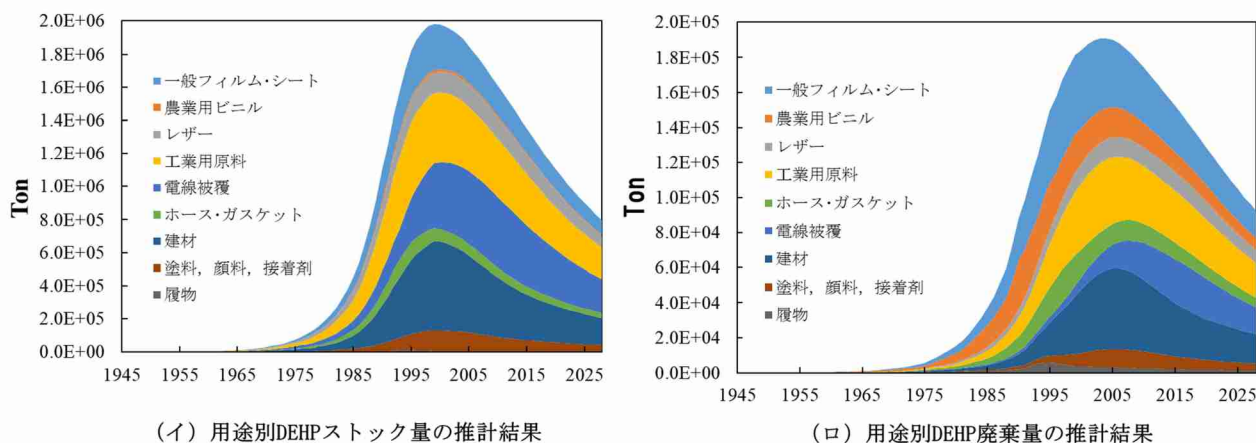
分子量: 390.56

軟質塩ビの可塑剤の用途分類	DEHPの平均含有率 (%)
一般フィルム・シート	14.9
農業用ビニル	11.1
レザー	7.6
工業用原料	20.1
電線被覆	10.8
ホース・ガスケット	7.3
建材	17.1
塗料, 顔料, 接着剤	4.1
履物	1.1
その他	5.5

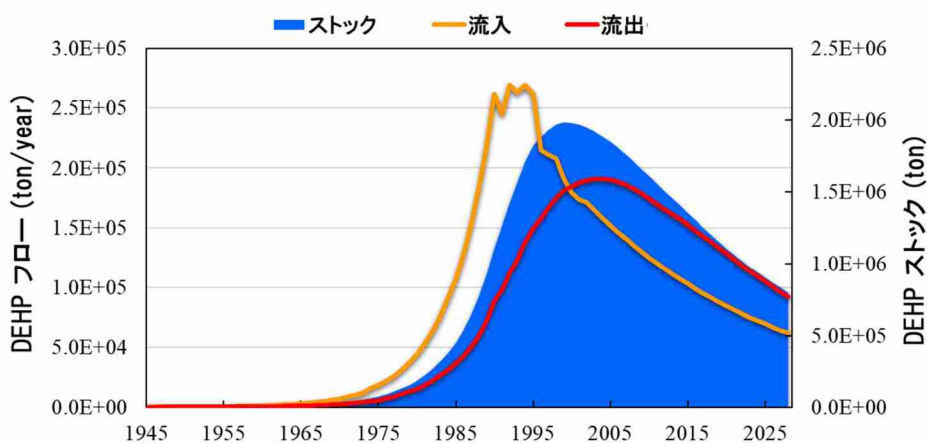
図(1)-27 DEHPの概要



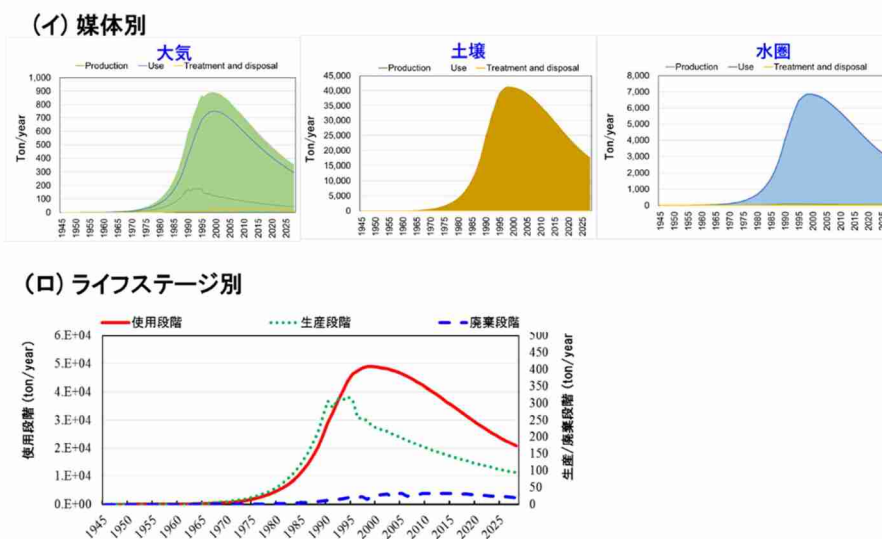
図(1)-28 DEHPの製造量



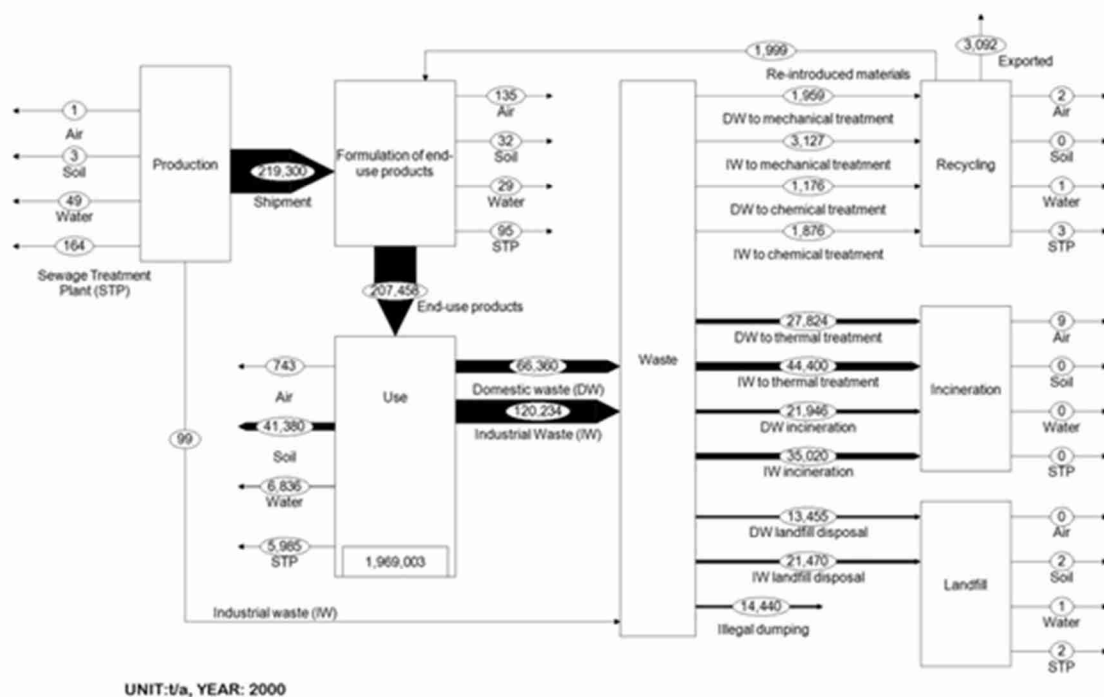
図(1)-29 用途別DEHPの(イ)ストック量と(ロ)廃棄量の推計結果



図(1)-30 DEHPのフロー・ストック推計結果

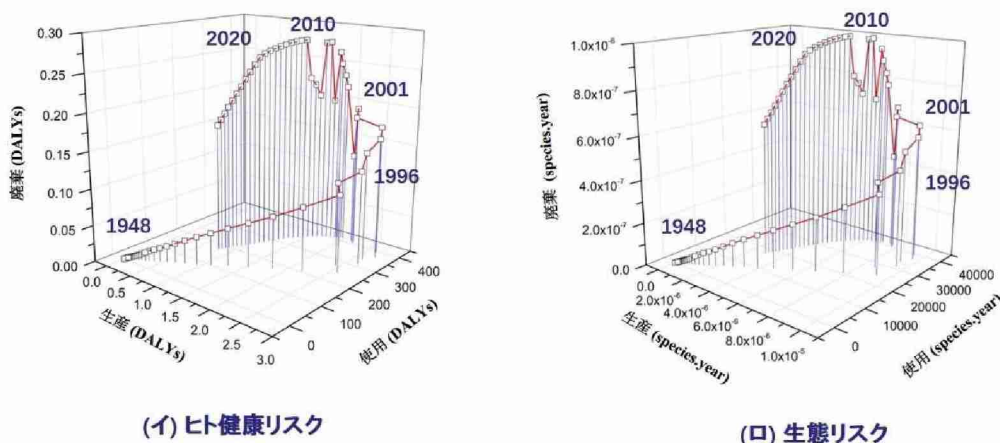


図(1)-31 (イ)媒体別と(ロ)ライフステージ別の環境排出量の推計結果



UNIT: t/a, YEAR: 2000

図(1)-32 代表的年次におけるDEHPの収支解析結果



図(1)-33 ライフステージ別の(イ)ヒト健康リスク評価結果と(ロ)生態リスク評価結果

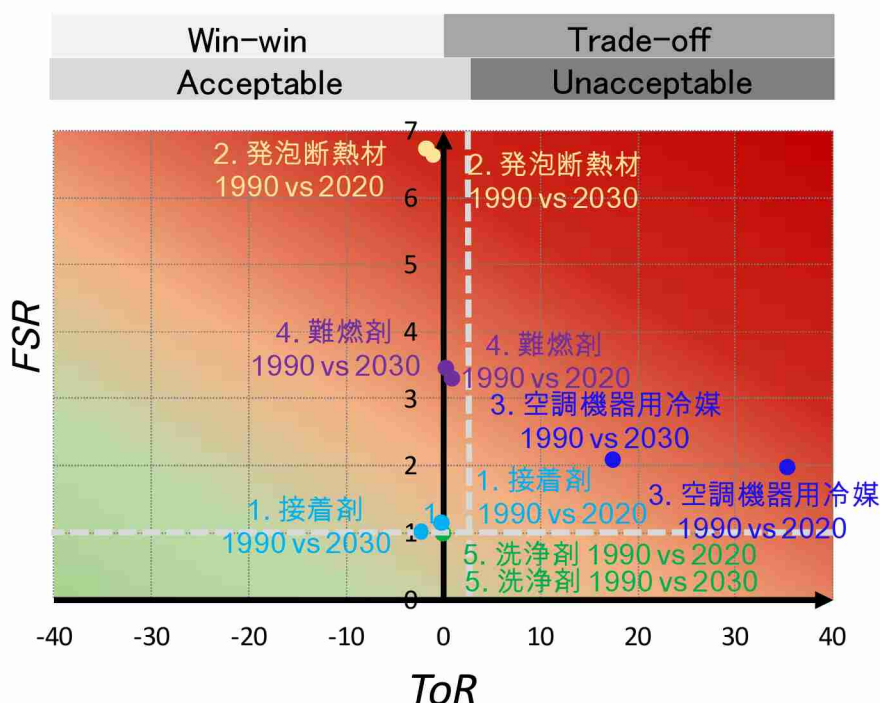
b. 9) リスクトレードオフ解析結果

表(1)-4 に示した 8 つのケーススタディのうち、ケーススタディ番号 1~5 の 5 つの結果より、図(1)-34 のリスクトレードオフ管理図を作成し、リスクーリスクトレードオフ評価結果、およびフロー・ストック評価結果の特徴を示した。

x 軸は表(1)-2 で定義したトレードオフ比 (以下、*ToR*) を表す。*ToR* が負の領域、すなわち目標リスク削減量は正であるとの条件下で対抗リスク増加量が負の場合、目標リスクと対抗リスクの両方が削減されているため、その解析シナリオ下でのリスク削減対策、および化学物質代替や製品代替は **Win-Win** にあると考えられる。また $0 < ToR < 1$ の場合、目標リスク削減量が対抗リスク増加量を上回るため、リスク削減対策は **Acceptable** であると考えられる。ただし、ここでの **Win-Win**、**Acceptable** とは DALY、PAF、Eco-indicator に基づいた、一つの判断の目安と言う位置づけである。y 軸は表(1)-2 で定義したフロー・ストック比変化率 (以下、*FSR*) を表す。*FSR* は解析シナリオ下で設定した、ばく露評価の対象空間内で化学物質ストック量とフロー量の比の変化から、ヒト健康被害をもたらしうる化学物質が空間内に残留しやすくなりつつあるかどうかの指標である。

各ケーススタディの結果に関する考察の一例として、図(1)-34内のプロット“3. 空調機器用冷媒 1990 vs 2020”に着目する。1990年と2020年におけるヒト健康影響を比較した結果、目標リスク（ここでは、オゾン層破壊に起因するヒト健康影響）の削減量に対して、対抗リスク（ここでは、地球温暖化に起因するヒト健康影響）の増加量が約30倍多かった。そのため、x軸に着目すると、対抗リスクの増加が懸念されると推計された。これは、フロン類から代替フロン類への代替にあたり GWP (Global Warming Potential) の大きい物質が採用され、かつそれらが家庭用空調機器の廃棄段階で大気中へ放散されるために化学物質代替の時期から遅れてヒト健康影響が生じたと推計されたためと考えられた。また、y軸のFSRに着目すると、1990年と2020年における投入量当たり貯留量を比較した結果、2020年では1990年の2倍程度と推計された。すなわち、化学物質がストックされやすくなった推定された。

他のケーススタディに関する考察として、図(1)-34内のプロット“4. 難燃剤1990 vs 2020”および“4. 難燃剤1990 vs 2030”に着目すると、 $0 < ToR < 1$ であるため、目標リスクの削減量に対して対抗リスクの増加量は相対的に小さいと位置付けられた。一方で、FSRは約3倍と推計され、代替前後でストックされやすくなると推定された。



図(1)-34 リスクトレードオフ管理図

(プロット横の番号は表(1)-4におけるケーススタディ番号を表す)

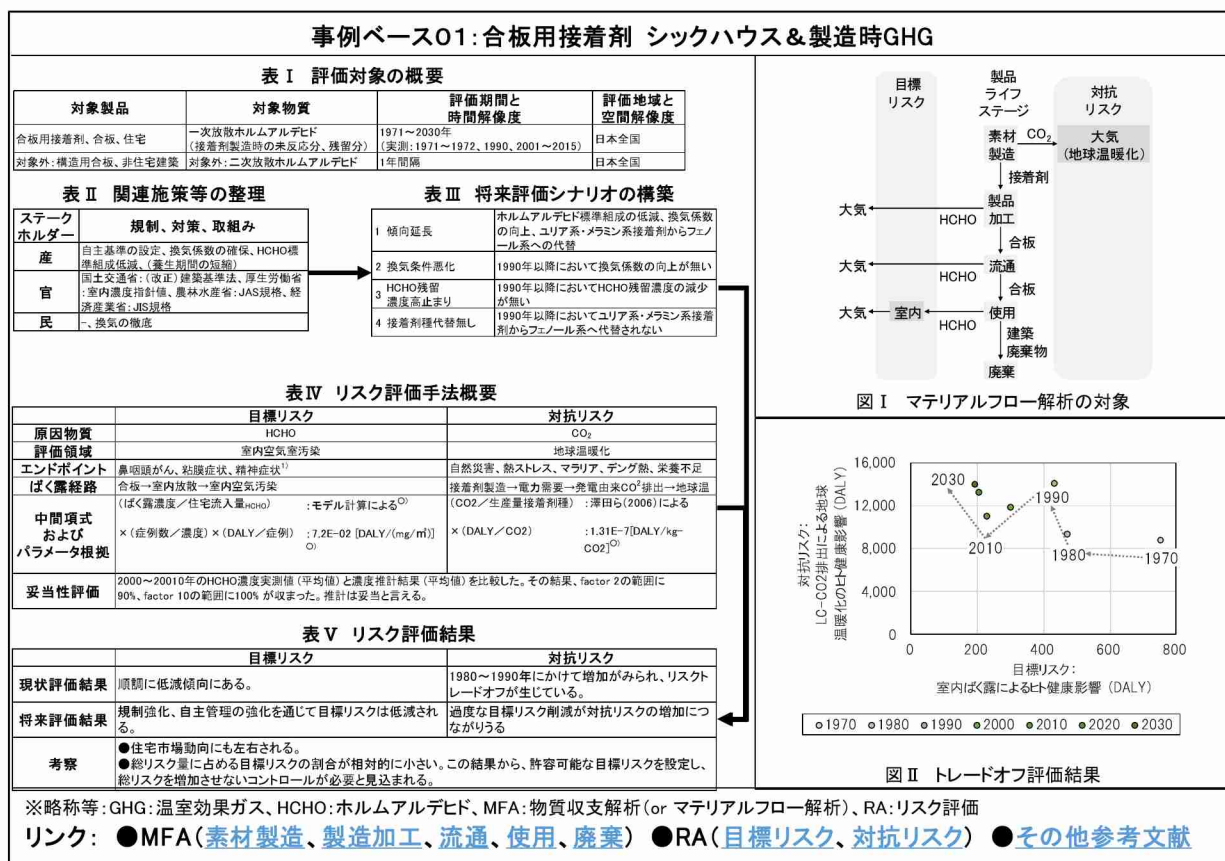
c) データ・評価基盤の整備

リスクトレードオフ評価結果を共有するためのプラットフォーム・ホームである事例ベースにおける、合板用接着剤および建築用断熱発泡剤のweb pageを図(1)-35および図(1)-36に示す。それぞれのweb pageには各ケーススタディの背景から、目的、方法論、結果、考察までをA4用紙一枚程度の大きさで提供できる様式とした。Web pageは、5つの表、2つの図、および参考文献と使用データへのリンクで構成される。表Iおよび図Iはケーススタディの対象と評価バウンダリを示した。表IIは現状の規制動向を整理するとともに、表IIIに示す将来評価シナリオの根拠情報を記載した。表IVはリスク評価に必要な有害性情報、ばく露情報、パラメータやモデルを示しており、表IIIと合わせてリスク評価結果の導出過程を整理した。表Vおよび図IIは、目標リスクと対抗リスクの態様を示し、将来も含めたリスク管理について考察を提供できる様式とした。併せて、関連情報をリンクとして別ページに整理することで、トレーサビリティの確保に努めた。

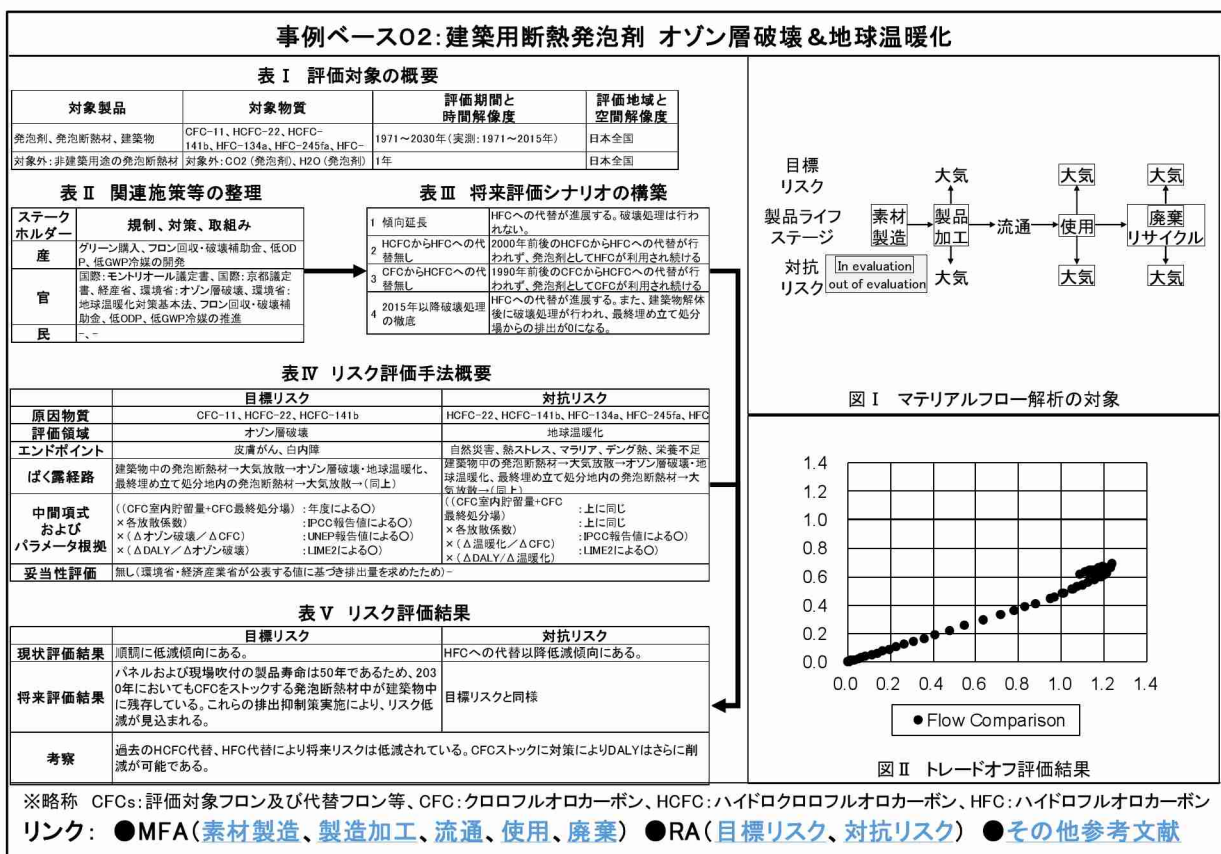
これらのweb pageとしてケーススタディを集約した事例ベースと、図(1)-34のリスクトレードオフ管理図を通じて、現行制度の補完に向けた考察を行う。

図(1)-37上側に示す現行の化学物質管理では、全物質を対象としたスクリーニング評価を行った後に、リスクが高いと見込まれる物質に対して詳細リスク評価を行うという段階的リスク評価での管理となっている。また評価の結果、リスクが高いと見込まれた第一種および第二種の特定化学物質物質等については追加的な管理措置をとる。これらの段階的リスク評価において考慮されるエンドポイントは物質固有なものに限られており、製品ライフサイクル全体や代替物質を含めたリスク削減の多面的評価については不足している。

本研究では、このような現行の化学物質管理で不足している側面に対して、ライフステージ別のフロー・ストック解析とばく露評価を組み合わせ、リスク評価およびリスクトレードオフ評価を行う枠組みを、ケーススタディとともに実証的に示した。図(1)-37下側はリスクトレードオフ管理図による評



図(1)-35 事例ベース内に集約される各ケーススタディのweb page: 合板用接着剤



図(1)-36 事例ベース内に集約される各ケーススタディのweb page: 建築用断熱発泡剤

現行の評価と制度

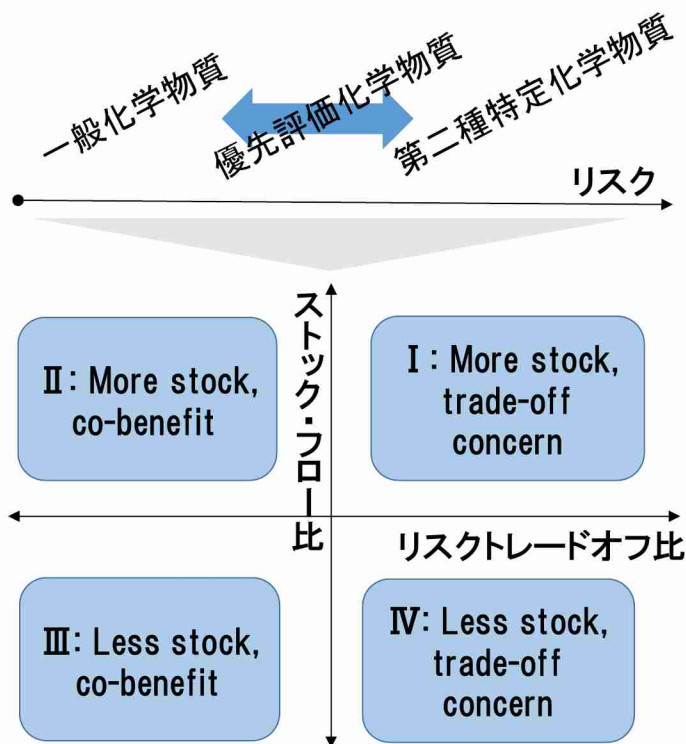
- スクリーニング+リスク評価による段階的リスク評価
- リスクの高い物質の特定と監視

現行制度の課題

- エンドポイントが物質固有
- リスク削減の多面的評価の不足

本研究を通じた現行制度の補完

- ライフステージ別、フロー・ストックばく露評価の組み込みによる補完
 - サプライチェーンを通じたばく露評価
 - ライフステージ別寄与の明確化
 - トレードオフが発生していないか? ストック性の高い物質になっていないか? をモニタリング
- 多重なリスクマネジメントに資する知見の提供



図(1)-37 リスクトレードオフ情報を組み込んだ化学物質管理

価結果からリスク削減策を4つに類型化し、その特徴を示している。このような類型化により、懸念されるトレードオフが発生していないか、ストック性の高い物質への移行が生じていないか、をモニタリングすることが可能になる。これにより、現行制度を補完して、多重なリスクマネジメントに資する知見が提供できると見込まれる。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究では、PRTR対象462物質の規制に関する有害絵師情報とばく露特性による分類結果と、定性的な貯留特性に基づく分類結果からマトリクスを作成し、ケーススタディの対象となる化学物質・製品を8つ選定した。選定した化学物質・製品に関するケーススタディとして、LCAの観点を組み込んだマテリアルフロー・ストック解析、マルチプルリスク評価を行った。得られたリスク評価結果に対して、目標リスクと対抗リスク間でのトレードオフが懸念されるかどうか、またマテリアルフロー・ストック解析結果に対して、化学物質がストックされやすくなるかどうかを判別する俯瞰・比較の枠組みを構築した。

以上の成果から得られた科学的な意義は次の3点にまとめられる。

- ① 製品のライフステージ別、あるいはストック由来・フロー由来といったリスクの発生形態で区別したリスク評価結果が得られた。このような結果は、有効なリスク管理の領域や対象を限定するうえで不可欠な知見であり、ライフステージを限定したこれまでのリスク評価手法に対して、本研究で構築した評価手法の特徴と言える。
- ② 化学物質・製品に内包されるマルチプルリスクを統合指標化して比較するとともに、それら複数を共通の枠組みで、選定、評価、比較することが達成された。特に複数の化学物質・製品間でリスクトレードオフを比較する点について、その必要性は1990年代より言及されてきたものの、定量的な枠組みについては十分に検討されてこなかった。このことから、本研究で示したリスクトレードオフ管理図の枠組み内に過去の施策を前提としたケーススタディを追加していく事で、これまでの化学物質管理の方向性を振り返ることが、将来の施策を前提としたケーススタディを追加していく事で、将来の化学物質管理の方向性に示唆を与えることが可能になると見込まれる。
- ③ 上記の②と関連して、ケーススタディを事例ベースとして整理するweb page の様式を作成した。事例ベースの枠組みの下でweb page が集約されることで、リスクガバナンスに必要な知的基盤整備が効率性を高めて充実していくことが見込まれた。

(2) 環境政策への貢献

Post WSSD2020に向け、今後対応が必要となる化学物質リスクの多面性評価や他の環境負荷との関連・相互依存性を与件とした評価のプロトタイプモデルを構築できた。製品類型別フロー・ストック解析手法、リスクトレードオフ評価法であり、実際に8つの製品、16物質に適用することで本手法の有用性が確認した。今後は、適用範囲を拡大することで、リスクトレードオフの態様の明確化や、異種のリスクの優先順位づけにもとづくリスク管理という次の時代の政策課題解決にむけた端緒となりうるものといえる。継続的に過去になされた対策、政策の事後評価を通じて、リスク評価と制度の連携の拡充がみこまれる。

<行政が既に活用した成果>

現時点で、活用には至っていない。なお、これまで、行政担当者と定期的にこの件について意見交換をし、当グループの主旨は共有されてきた。

<行政が活用することが見込まれる成果>

物質の代替は、リスク削減においてこれまで相当数の事例があり、これは産業技術開発の成果そのものであるといえる。実際に代替が進んだ解析事例をリスクトレードオフとストック性という2軸で包括的に評価することで、産業界に対しては、今後の技術開発の方向づけや、政策決定者には、リスクトレ

ドオブとストック性に基づく管理原則の抽出に活用できることが期待される。この観点は、世界的になかったものあり、今後、引き続きIRGC(International Risk Governance Council)、との連携を通じ、SRA International の場を通じて、リスクガバナンスに関する政策展開の議論を推進する端緒を築けたといえる。

6. 国際共同研究等の状況

平成28年度に、リスクガバナンスに関する公開の国際ワークショップでの研究知見の収集・交流目的で、IRGCで活動する2名の研究者を招聘し、国際共同研究を実施した。平成29年度には、研究協力者という位置づけで貢献いただき、共著の論文: Risk Governance through the Cooperation of a Risk Evaluation Technology and the Institutional System (仮題) を執筆中である。

招へいした研究協力者: Ortwin Renn: Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS) Potsdam (Germany) 所属, Jonathan B. Wiener: School of Law, Duke University (USA) 所属.

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Naoya KOJIMA, Leticia Sarmiento dos MUCAHAGOS, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: Science of the Total Environment, 622-623, 861-868 (2018), Application of fuzzy c-means clustering to PRTR chemicals uncovering their release and toxicity characteristics.
- 2) Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Naoya KOJIMA, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: Environmental Science and Technology, 51, 22, 13224-13230 (2017), Decabromodiphenyl Ether (DecaBDE) in Electrical and Electronic Equipment in Japan: Stock, Emission, and Substitution Evaluation.
- 3) 小島直也, Mianqiang XUE, 町村尚, Liang ZHOU, 東海明宏: 環境システム研究論文集, 45, II_309-II_319 (2017), 接着剤と合板のマクロなマテリアル・フロー分析に基づく室内ホルムアルデヒド濃度評価手法の構築と規制影響に関する考察.
- 4) Mianqiang XUE, Naoya KOJIMA, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI : Science of The Total Environment, 586, 1308-1315 (2017), Flow, stock, and impact assessment of refrigerants in the Japanese household air conditioner sector.
- 5) Mianqiang XUE, Naoya KOJIMA, Liang ZHOU, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: Journal of Cleaner Production, 145, 172-179 (2017), Dynamic analysis of global warming impact of the household refrigerator sector in Japan from 1952 to 2030.

<査読付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)>

- 1) 東海明宏, 小島直也, Mianqiang XUE, Liang Zhou, 戎谷舞子: 第44回環境システム研究論文発表会講演集, 291-296 (2016) 「評価技術と制度の連携を通じた化学物質リスクガバナンス」

(2) 口頭発表(学会等)

<口頭発表>

- 1) Akihiro TOKAI, Naoya KOJIMA, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Leticia Sarmiento dos MUCAHAGOS, Takashi MACHIMURA and Daisuke SUGINOO: Society for Risk Analysis Asia, 2018 Annual Meeting (2018) “Prototype model of chemical risk governance based on case studies in Japan.”
- 2) Leticia Sarmiento dos MUCAHAGOS, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Naoya KOJIMA, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: Society for Risk Analysis Asia, 2018 Annual Meeting (2018) “Estimation of

flows, stocks and emissions of Di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) in Japan.”

3) Liang ZHOU, Mianqiang XUE, Naoya KOJIMA, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: Society for Risk Analysis Asia, 2018 Annual Meeting (2018) “Probabilistic ecological risk assessment of AE and LAS in household detergents in Japan from 1960 to 2030.”

4) Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Naoya KOJIMA, Leticia Sarmiento dos MUCAHAGOS, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: Society for Risk Analysis Asia, 2018 Annual Meeting (2018) “Comprehensive assessment of chemicals in home appliances.”

5) Naoya KOJIMA, Mianqiang XUE, Takashi MACHIMURA, Liang ZHOU, Leticia Sarmiento dos MUCAHAGOS and Akihiro TOKAI: Society for Risk Analysis Asia, 2018 Annual Meeting (2018) “Risk trade-off analysis of adhesives replacement for laminated wood for housing between reducing indoor air contamination in use stage and increasing GHG emission in product stage.”

6) 小島直也, Leticia Sarmiento Dos MUCAHAGOS, Liang ZHOU, 杉之尾大介, Mianqiang XUE, 東海明宏: 日本リスク研究学会第30回年次大会 (2017) 「リスク評価技術と制度の連携を通じたリスク評価と評価結果に基づくリスクガバナンス実現に向けた提言」

7) Akihiro TOKAI: The Annual Meeting of the Taiwan Chapter of Society for Risk Analysis (keynote speech) (2017) “Prototype model of chemical risk governance based on the risk-risk trade-off analysis.”

8) 小島直也, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, 町村尚, 杉之尾大介, 戎谷舞子, 東海明宏: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, 企画セッション A1-1 (2016) 「リスク評価技術と制度の連携を通じたリスク評価の展開」

9) Mianqiang XUE, Naoya KOJIMA, Liang ZHOU, T. MACHIMURA and Akihiro TOKAI: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, 企画セッション A1-2 (2016) “Human health risk evaluation by the exposure of chemicals flow & stock in the residential house.”

10) 町村尚, 薛面強, 小島直也, 戎谷舞子, 東海明宏: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, 企画セッション A1-3 (2016) 「リスク評価における相互依存性解析プロトタイプモデルを用いた冷媒・空調機器に関する政策評価」

11) Liang ZHOU, 東海明宏: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, 企画セッション A1-4 (2016) 「SOMによる化学物質の分類結果から見た事例研究」

12) 杉之尾大介, 町村尚, 小島直也, 東海明宏: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, 企画セッション A1-5 (2016) 「制度連携を含むリスクガバナンス手法の検討」

13) 東海明宏, 町村尚, 松井孝典, 小島直也, 戎谷舞子, 中久保豊彦: 第28回日本リスク研究学会年次大会, 企画セッション 6 (C-4-1) (2015) 「リスク評価技術と制度の連携を通じたリスク評価の展開」

14) 町村尚, 東海明宏, 小島直也, 戎谷舞子, 中久保豊彦, 松井孝典: 第28回日本リスク研究学会年次大会, 企画セッション 6 (C-4-2) (2015) 「リスク評価における相互依存性に関する研究の現状と課題」

15) 轟晃成, 東海明宏, 町村尚, 小島直也, 戎谷舞子, 阪本悠佑, 志賀優貴, 眞鍋優作: 第28回日本リスク研究学会年次大会, 企画セッション 6 (C-4-3) (2015) 「家庭におけるマテリアルストック由来化学物質のリスク評価方法の検討」

16) 多田悠人, 中久保豊彦, 東海明宏: 第28回日本リスク研究学会年次大会, 企画セッション 6 (C-4-4) (2015) 「地震被害を想定した化学物質流出による浄水場の給水機能への影響評価」

<ポスター発表>

1) Naoya KOJIMA, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Takashi MACHIMURA, Maiko EBISUDANI and Akihiro Tokai: Society for Risk Analysis, 2017 Annual Meeting (2017) “Methodology for Policy Characterization Based on the Multiple Risk Evaluation Results: Case Study for Japanese Chemical Replacements.”

2) Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Naoya KOJIMA, Takashi MACHIMURA and Akihiro TOKAI: 4th

International conference on Final Sinks (2017) “Stock, Emission, and Substitution Assessment of Decabromodiphenyl ether (DecaBDE) in Electrical and Electronic Equipment in Japan.”

3) Naoya KOJIMA, Akihiro TOKAI, Takashi MACHIMURA, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Akinari TODOROKI and Maiko EBISUDANI: Society for Risk Analysis 2016 Annual Meeting (2016) “Risk governance through the cooperation of a risk evaluation technology and the institutional system: attention to chemical stock in product.”

4) 轟晃成, 東海明宏, 小島直也: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, P-13, (2016) 「仮想都市における新製品普及のマテリアルフロー・ストックに由来する化学物質のリスク評価方法の検討」

5) 堀本祥平, 東海明宏, 小島直也: 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会, P-23 (2016) 「有害性及び排出・曝露特性に基づく優先評価化学物質分類のための主成分分析, 2016年度日本リスク研究学会第29回年次大会」

6) 東海明宏, 小島直也, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, 戎谷舞子: 第44回環境システム研究論文発表会, B-44 (2016) 「評価技術と制度の連携を通じたリスクガバナンス」

7) 小島直也, 町村尚, Mianqiang XUE, 戎谷舞子, Liang ZHOU, 東海明宏: 環境科学会2016年会, P-46 (2016) 「相互依存性解析を通じたマルチプルリスク管理戦略の考察: グリーン家電普及施策および用途地域制下での店舗の立地規制を対象として」

8) Mianqiang XUE, 小島直也, Liang ZHOU, 町村尚, 東海明宏: 環境科学会2016年会, P-47 (2016) “Dynamic flow and stock estimation and induced risk assessment of chemicals in a hierarchical structure.”

9) Akihiro TOKAI, Akinari TODOROKI, Takashi. MACHIMURA, Mianqiang. XUE, Naoya KOJIMA, Maiko EBISUDANI, Yusuke SAKAMOTO, Yuki SHIGA, Yusaku MANABE and Liang ZHOU: Society for Risk Analysis Annual Meeting, Arlington, Virginia, USA (2015) “Risk governance through the integrating risk evaluation and the institutional systems: case of chemicals management.”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

1) Akihiro TOKAI, Leticia Sarmiento Dos MUCAHAGOS, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, Naoya KOJIMA: Kansai University, Takatsuki Muse campus, Osaka, Japan, 13 March 2018, The Society for Risk Analysis, “Asia Conference 2018 organized session 2: Risk Governance for Chemical Risk Management.”

2) 小島直也, Liang ZHOU, Leticia Sarmiento Dos MUCAHAGOS, Mianqiang XUE, 杉之尾大介: 滋賀大学彦根キャンパス, 2017年10月28日, 日本リスク研究学会第30回年次大会企画セッション「リスク評価技術の制度の連携を通じたリスクガバナンス」

3) 吉田喜久雄 (産業技術総合研究所), 小島直也: 大阪大学吹田キャンパスM3棟5F506号室, 2016年11月29日, オープンセミナー「リスク評価技術と制度の連携を通じたリスクガバナンス」

4) 小島直也, Mianqiang XUE, Liang ZHOU, 町村尚, 杉之尾大介: 大分県ホルトホール大分, 2016年11月26日, 日本リスク研究学会第29回年次大会企画セッション「リスク評価技術の制度の連携を通じたリスクガバナンス」

5) 東賢一 (近畿大学), 小島直也: 大阪大学吹田キャンパスM3棟5階506号室, 2016年11月4日, オープンセミナー「住宅用合板中接着剤に含まれるホルムアルデヒドのフロー・ストック量および室内大気汚染リスクの評価」

6) Ortwin Renn (International Institute for Advanced Sustainability Studies), 東海明宏, Jonathan Baert Wiener (Duke University), 小島直也, Liang ZHOU, Mianqiang XUE, 町村尚, 戎谷舞子: 大阪大学吹田キャンパス 銀杏会館, 2016年9月1-2日, “International workshop on Risk Governance with the Collaboration of Evaluation Method and Institutional Options.”

- 7) 東海明宏, 町村尚, 小島直也, Liang ZHOU, Mianqiang XUE: 大阪大学 吹田キャンパス M3棟 5階 506号室, 2016年 3月 30日, 「環境省H27年度環境研究総合推進費 【I-1501】 リスク評価技術と制度の連携を通じたリスクガバナンスH27年度成果報告会」
- 8) 東海明宏, 町村尚, 轟晃成, 多田悠人: 名古屋大学鶴舞キャンパス基礎研究棟 3階第1講義室, 2015年11月22日, 日本リスク研究学会第28回年次大会企画セッション 6(C-4) 「評価技術と制度の連携を通じたリスクガバナンス」
- 9) 「環境省 環境研究総合推進費 (I-1501) リスク評価技術と制度の連携を通じたリスクガバナンスに関する研究」のHPを立ち上げ、インターネット上での研究成果の継続的な発信を行った、URL: http://www.sec.eng.osaka-u.ac.jp/secem/secem/03_theme_risk_governance_pj/index.html.

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) 環境省 HP (2018) PRTRインフォメーション広場, www.env.go.jp/chemi/prtr/risk0.html (最終閲覧日: 2018年5月8日)
- 2) T. コホネン (著), 徳高平蔵, 大藪又茂, 堀尾恵一, 藤村喜久郎, 大北正昭 (監修) (2012) 自己組織化マップ 改訂版, 丸善出版, 479 pages.
- 3) Viscovery□ SOMine: マインドウェア総研 HP, www.mindware-jp.com/somine/somine/index.html (最終閲覧日: 2018年5月8日).
- 4) 日本リスク研究学会 (編) (2006) リスク学事典 増補改訂版, 丸善出版, 436 pages.
- 5) D. Graham and J.B. Wiener (1995) Risk Vs. Risk: Tradeoffs in Protecting Health and the Environment, Harvard University Press, 337 pages.
- 6) 中西準子, 鈴木一寿 (2009) 詳細リスク評価書シリーズ 17 ホルムアルデヒド, 丸善出版, 183 pages.
- 7) 環境省 HP (2018) 平成13~26年度PRTR届出外排出量の推計方法 平成26年度届出外排出量の推計方法の詳細, https://www.env.go.jp/chemi/prtr/result/todokedegai_siryu.html (最終閲覧日: 2018年5月8日).
- 8) 澤田幸伸, 安藤恵介, 服部順昭, 田村靖夫 (2006) 木質材料に使われる接着剤のインベントリ分析, 木材学会誌, 52(4), 235-240.
- 9) 国土交通省 (2017) 建築着工統計調査.
- 10) 総務省 (2017) 国勢調査.
- 11) 住宅リフォーム・紛争処理支援センター (2006) 平成17年度 室内空気に関する実態調査報告書 概要版.
- 12) 山田智美, 瀬戸博, 千代田守弘, 清水隆浩, 箭内慎吾 (2011) 新築住宅室内空気ホルムアルデヒド及びアセトアルデヒド濃度の調査, 平成23年度室内環境学会学術大会.
- 13) 伊坪徳宏, 稲葉敦 (2010) LIME 2 -意思決定を支援する環境影響評価手法-, 丸善, 666 pages.
- 14) UNEP (2002) 2002 Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps technical options committee, 197 pages.
- 15) UNEP (2010) 2010 Report of the refrigeration, air conditioning and heat pumps technical options committee, 195 pages.
- 16) 中西準子, 東海明宏, 岩田光夫 (2009) 詳細リスク評価書シリーズ 23 デカブロモジフェニルエーテル, 丸善出版, 240 pages.

- 17) 渡辺真也, 中久保豊彦, 東海明宏, 山本祐吾 (2011) 産業界による自主的な化学物質管理を支援するリスク評価手法の構築: テレビ筐体に含有される難燃剤を対象としたケーススタディ, 日本リスク研究学会誌, 21(4), pp. 285-294.
- 18) PRe HP (2018) Eco-indicator 99 Manuals, <https://www.pre-sustainability.com/news/eco-indicator-99-manuals> (最終閲覧日: 2018年5月11日).
- 19) 中西準子, 林彬勅 (2007) 詳細リスク評価書シリーズ14 アルコールエトキシレート (洗剤), 丸善出版, 279 pages.
- 20) 山本 昭子, 西山 直宏, 吉田 浩介, 山根 雅之, 石川 百合子, 三浦 千明 (2010) 直鎖アルキルベンゼンスルホン酸塩 (LAS) の水圏生態リスク評価, 水環境学会誌, 33(1), pp. 1-10.
- 21) Solomon K. R., Baker D. B., Richards R. P., Dixon K. R., Klaine S. J., La Point T. W., Kendall R. J., Weisskopf C. P., Giddings J. M., Giesy J. P.: Ecological Risk Assessment of Atrazine in North American Surface Waters, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 15(1), 31-76, 1996.
- 22) 梶原秀夫, 岸本充生, 井上和也, 石川百合子, 蒲生昌志, 林彬勅 (2012) リスクトレードオフ評価書 工業用洗浄剤, 独立行政法人 産業技術総合研究所 安全科学研究部門, 98 pages.
- 23) 辻賢司 (2015) フッ素製品市場の動向と展望, シーエムシー出版, 227 pages.
- 24) 産業総合研究所 HP (2017) 産総研一曝露・リスク評価大気拡散モデルAIST-ADMER, <https://admer.aist-riss.jp/> (最終閲覧日: 2017年5月11日)
- 25) NITE (National Institute of Technology and Evaluation, 製品評価技術基盤機構), CERI (Chemicals Evaluation and Research Institute, Japan, 化学物質評価研究機構) (2006) 化学物質の初期リスク評価書 Ver. 1.0 テトラクロロエチレン.
- 26) 中西準子, 内藤航, 吉田喜久雄 (2005) 詳細リスク評価書シリーズ 1 フタル酸エステル -DEHP-, 丸善出版, 323 pages.

III. 英文Abstract

Risk Governance through the Cooperation of a Risk Evaluation Technology and the Institutional System

Principal Investigator: Akihiro TOKAI

Institution : National University Corporation Osaka University
1-2 Yamadaoka, Suita-City, Osaka 565-0871, JAPAN
Tel: +81-06-6879-7676 / Fax: +81-06-6879-7677
E-mail: tokai@see.eng.osaka-u.ac.jp

[Abstract]

Key Words: Risk Governance, Risk Evaluation, Chemical Risk Management, Risk Trade-off, Chemical Substance Control Law (CSCL), Pollution Release and Transfer Register (PRTR), Material Flow and Stock Analysis, Life Cycle Assessment (LCA)

Current chemical substance management strategy is implemented for each chemical substance based on the traditional risk assessment framework. Hazard information is specific to chemical substances and products. Moreover, the exposure control mainly focuses on the chemical flow from the production side or upstream side of the product life stage. To supplement these existing systems, it is thus necessary to establish an evaluation framework owing to the fact that multiple risks occur throughout the entire life cycle of chemical substances and products.

In this sub-theme, material flow and stock analysis, integrated risk assessment and subsequent trade-off evaluation were carried out. The aim of this study is to build multiple risk evaluation models resulting from not only flow but also stock from the perspective of life cycle which comprised of manufacturing, use and disposal.

The framework of these series of evaluation models was applied to eight representative chemical substances and products. A total of eight case studies were conducted in detail. The results suggest that it is possible to evaluate risks in line with actual conditions through comparison with measured values and uncertainty analysis. A risk trade-off chart was proposed as a framework for discriminating whether the trade-off between life stages or between multiple risks are concerned at the consideration of the risk assessment result between case studies and case studies individually. By plotting the five case studies implemented in this sub-theme for the practical application of the risk trade-off chart, it was confirmed that substitution from decabromodiphenyl ether (DecaBDE) to triphenyl phosphate (TPhP) for flame retardants, and substitution of chlorofluorocarbons (CFC) for foam insulation, is possible to reduce target risk and it is a difficult alternative to induce increase of counter risk. To apply this model to other chemical substances/products and publish evaluation results as soon as possible, a framework to consolidate data, methodology and critical risk assessment results used in each case study as a case base was proposed. The results provide insights into the decision-making for both industry and government regarding chemical management. This study made important contributions to the formation of a new paradigm for chemical management towards sustainability.