

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 4 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25740045

研究課題名(和文) サプライチェーンを通じた戦略的化学品リスク管理手法の構築

研究課題名(英文) Development of strategic chemical risk management method through supply chain

## 研究代表者

上原 恵美 (Uehara, Emi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10648132

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、持続可能な産業活動の実現に向けたサプライチェーンを通じた戦略的な化学品リスク管理手法の構築を目的とする。具体的には、日本において化学品の大きな排出源であるにもかかわらず、化学品リスク管理体制が不十分である中小企業を対象とし、工業塗装をケーススタディの対象として選定した。揮発性有機化合物(VOC)の排出源として対策が求められている工業塗装について、プロセスに由来する環境負荷物質排出量を推算するためのモデルを構築した。さらに、ライフサイクルアセスメント、リスクアセスメントを用いた環境・健康影響評価を行った。モデルと一連の評価手法を用いた環境配慮型プロセス設計手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：This research is aimed at developing a strategic chemical risk management method through supply chain for achieving sustainability in industrial activities. We focused on small and medium-sized enterprises which are large emission sources of chemicals to the environment, but have troubles in managing chemical risks. Industrial painting, where reduction measures of volatile organic compounds emissions are needed was taken as a case study. Process model was developed to estimate the amount of environmental loads, and life cycle assessment and risk assessment methods were applied for the environmental and health impact assessment. A design flow for environmentally-conscious process design where the developed model and assessment methods were applied was proposed.

研究分野：環境工学

キーワード：化学品リスク管理 サプライチェーン リスク評価 中小企業 持続可能性 塗装

## 1. 研究開始当初の背景

持続可能な産業活動を実現するために、産業における適切な化学物質管理が求められている。従来の化学物質管理は有害性に注目したハザード管理が中心であったが、有害性に加え暴露量を考慮したリスク管理の重要性が高まっている。国際的な化学物質管理のための戦略的アプローチ(SAICM)では、リスクを化学物質のライフサイクル全体において適切に評価・管理することを求めている。化学物質のライフサイクルは製品サプライチェーンと密接に関わっており、リスク削減を実現するためには、定量的なリスク評価に基づく、サプライチェーンを通じた包括的な化学物質管理体制を整備する必要がある。

中小企業は高度な技術により製品製造において重要な役割を果たしている。一方、日本の製造業において中小企業からの環境中への化学物質排出は全体の6割弱を占め、エネルギー消費や廃棄物を含め環境配慮の観点から改善の余地が大きいといえる。しかし、知識やリソースの不足から、中小企業がプロセスで使用する化学物質由来の環境影響を評価し、環境配慮型プロセス設計を実践することは困難な状況にある。

化学物質のリスク評価を目的として、リスクアセスメント(RA)やライフサイクルアセスメント(LCA)などの評価手法の構築が行われてきた。NakanishiらはRAを利用した健康・環境リスクの評価フレームワークを提案し、主要化学物質に対する評価を行った。また、化学物質間のリストレードオフ解析手法の提案が行われている。中小企業の製品製造の現場でリスク評価・管理を実践するためには、これらの既存の手法やツールのプロセス・製品の設計開発への利用方法を具体的に提示する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究は、サプライチェーンを通じた戦略的な化学物質リスク管理に向けた、中小企業における環境配慮型プロセス設計手法の構築を目的とする。事業者が自身のプロセスや製品に由来する化学物質リスクを自ら解析し、プロセス・製品改善を能動的に計画する管理体制を支援する。具体的には、以下の内容を明らかにする。

### ● リスク解析手法と支援ツールの構築

リスク評価に関する専門的な知識が乏しい中小企業による自主的取組みを支援するために、特定の産業分野を対象として定量的なリスク解析手法とその支援ツールを整備する。

### ● 統合的プロセス設計の枠組みの構築

実際のプロセス設計においては、環境・健康影響だけでなく、品質や経済性の考慮が必要となる。環境対策の導入に伴う品質影響やコストの評価を含めた実践的なプロセス改善フローを提案する。

## 3. 研究の方法

### (1) 環境負荷物質排出のモデル化

本研究では、主に中小企業で稼働する製品製造プロセスとして、工業塗装に着目して検討を行った。部材の装飾や保護、防錆を目的として幅広い分野で利用されている工業塗装は、そこで使用される塗料やシンナーが揮発性有機化合物(VOC)の大きな排出源となっている。

工業塗装は塗布、常温乾燥、高温乾燥の3工程から構成され、用いる装置やオペレーション方法が大きく異なる。ある工程で揮発しなかった溶剤は次の工程に持ち込まれることとなるため、1つの工程に限定してVOC排出抑制対策を行っても、他の工程での対策を怠れば無意味となる可能性もある。そのため、工程別の環境負荷物質の排出量を把握して環境影響への寄与を把握したうえで、全体として環境影響の削減につながるような塗料・シンナーの選定、装置、オペレーションの改善を行う必要がある。

環境負荷物質排出量の推算モデルを構築するうえで、まず、3工程における溶剤のマテリアルフローの定式化を行った。塗布、常温乾燥、高温乾燥工程からのVOC排出量を、それぞれ、使用した塗料のうち製品に付着した塗料の割合を表す塗着効率 $[-]$ 、製品に付着した塗料に含まれる溶剤のうち常温乾燥工程において蒸発する溶剤の割合を表す溶剤蒸発率 $y[-]$ 、高温乾燥工程の排気に含まれるVOCの燃焼処理率を表す排気燃焼処理率 $[-]$ というパラメータを用いて定式化した。

さらに、 $x_1$ 、 $y_1$ 、 $x_2$ 、 $y_2$ が既知の現行プロセスに何らかの対策を行った代替プロセスの $x_1$ 、 $y_1$ の推算を目的としたモデルの構築を行った。塗装機器の仕様と排出抑制を行ううえで理想的なオペレーション条件からのずれ、塗料の種類から $x_1$ 、 $y_1$ を推算するモデルを構築した。

溶剤蒸発率 $y$ に関しては、試験片を用いた実験を行い、種々の条件のもと塗料中の溶剤蒸発量を測定し、得られたデータを分析することで推算モデルを構築した。これにより、塗料の希釈率やシンナーの種類、塗布膜厚、乾燥時間を変化させた場合の $y$ の推算が可能となった。

さらに、排出された物質の作業環境中での挙動を分析するために、既存の化学物質暴露モデルの適応を試みた。

### (2) 環境・健康影響評価手法

図1に示すように、ライフサイクルを通じた化学物質リスク多様である。環境配慮を目的としたプロセス改善においては、複数の影響を考慮した総合的な評価を行い、当初ターゲットとしていた影響削減により他の影響が増加し、許容できないトレードオフが発生することを回避する必要がある。

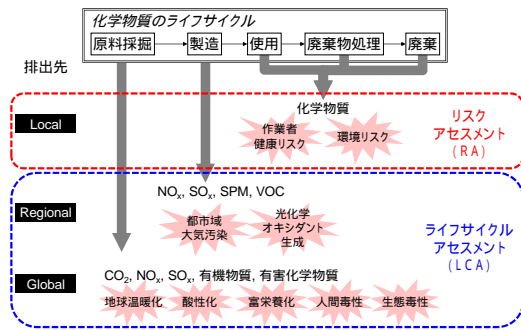


図1 化学物質の利用に伴う多様な環境・健康リスク

本研究では、地域・地球規模の環境影響をLCAによって、工場内やその周辺環境における健康影響をRAによって評価することとした。

#### 4. 研究成果

##### (1) 評価シナリオ

ケーススタディとして、家電・工業用製品の塗装において広く用いられるメラミン樹脂系塗料を用いたプロセスを対象として、構築したモデルの適用、及び、LCA・RAによる環境・作業健康影響の分析を行った。ベースケースに対するVOC排出抑制対策導入シナリオとして、塗布に用いるスプレーの吹き付け角度を適正化した場合、常温乾燥において乾燥時間を短縮した場合、高温乾燥工程において排気燃焼処理を導入した場合、さらに、常温乾燥における乾燥時間の短縮と高温乾燥工程における排気燃焼処理の導入の両方を行った場合の4つを想定した。評価結果のうち、VOCによる光化学オキシダント生成影響（指標：OCEF）とCO<sub>2</sub>による地球温暖化影響（指標：GWP）をLCAによって評価した結果の一部を図2に示した。機能単位は製品表面1m<sup>2</sup>の塗装と設定した。

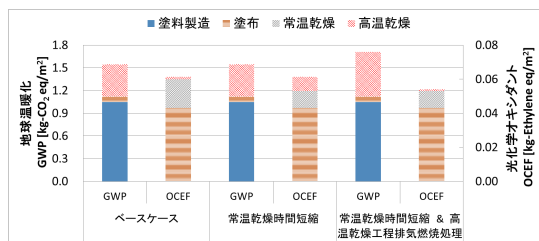


図2 評価結果

ベースケースにおいては、塗料を  $\rho = 0.30$  の条件下で塗布し、常温乾燥において  $y = 0.91$  で会った場合を想定している。塗料製造時のGWPが大きいことが分かる。スプレーの吹き付け角度を適正化し  $\rho$  を向上させることは、塗料消費量の削減、ひいては塗料製造段階由来の環境影響の削減につながる。

常温乾燥時間を短縮することで  $y = 0.55$  となった場合、常温乾燥で蒸発しなかった溶剤は高温乾燥に持ち込まれるため、高温乾燥で対策を行わない場合はOCEFの合計値の変化は小さい。

一方、常温乾燥における乾燥時間の短縮に加え高温乾燥に排気燃焼処理を導入した場合、OCEFの削減につながる。一方、VOCの燃焼に伴い発生するCO<sub>2</sub>によりGWPが増加するというトレードオフが発生する。

従来、工業塗装の現場では塗布工程と高温乾燥工程からのVOC排出が大半を占めると経験的に考えられてきた。しかし、ケーススタディにおける分析によって、常温乾燥工程の寄与が無視できないほど大きいことが分かった。また、高温乾燥工程に排気燃焼処理の導入効果は、常温工程における排出に大きく依存する。塗布した塗料中の溶剤の大半が常温乾燥工程で蒸発し排出された場合、高温乾燥工程における排気燃焼処理効果は小さくなり、処理に伴うエネルギー消費の増加に打ち消されてしまう可能性もある。排気燃焼処理を導入する最には、併せて常温乾燥工程の管理を行う必要性が明らかとなった。

##### (2) プロセスモデルに基づく改善支援

図3に、プロセスモデルに基づくプロセス改善支援のフローを示す。プロセスの環境・健康影響を定量的に評価し改善の指針を得るためには、現場で取得が容易なデータから環境負荷物質の排出量をモデルによって推算する必要がある。現行プロセスの評価結果においては工程別に環境影響を評価し、寄与分析によって改善する余地が大きい工程を明らかにする。改善対象工程に適した代替案作成し、代替案を導入した際の影響の変化を再度モデルを用いて評価する。定量的な環境・健康影響評価に基づき導出された対策には、さらに、品質への影響や経済的な観点からの実行可能性の検討が必要となる。代替プロセスは、環境・品質・経済性といった複数の観点から評価し、現行プロセスと比較することで改善の意思決定支援を行う。

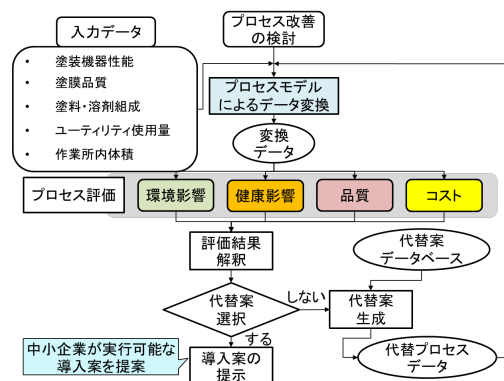


図3 プロセスモデルを用いた改善支援

以上のように、工業塗装を対象として環境負荷物質排出のモデル化を行い、プロセスの評価と改善の指針を示す手法を構築し、中小企業におけるプロセス改善支援の手法を示した。

<引用文献>

経済産業省, 環境省, 平成 25 年度 PRTR データの概要、URL :

<http://www.env.go.jp/chemi/prtr/result/gaiyo.html> (2015)

Nakanishi, J., et al. (2003) Environmental risk evaluation of chemicals: achievements of the project and seeds for future – development of metrics for evaluating risks. *Chemosphere*, 53, 389-398.

新エネルギー・産業技術総合開発機構, 産総研 化学物質リスク管理研究センター[共編](プロジェクトリーダー 中西準子), 「詳細リスク評価書シリーズ」, 丸善株式会社

産業技術総合研究所 (2012) 化学物質の最適管理をめざすリスクトレードオフ解析手法の開発: リスクトレードオフ評価書、URL :

<http://www.aist-riss.jp/main/modules/product>

上原恵美 (2015) 中小企業における環境配慮型プロセス設計、化学工学会第 47 回秋季大会講演要旨集

上原恵美、菊池康紀、平尾雅彦 (2013) 中小企業における環境配慮型プロセス設計の支援: VOC 排出源プロセスを対象として、日本リスク研究学会第 26 回年次大会講演論文集、26 巻、2013、C-4-4  
山岸達矢、上原恵美、小野澤明良、木下稔夫、平尾雅彦 (2016) 工業塗装における環境配慮のためのプロセスモデリング、化学工学会第 81 年会講演要旨集

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

上原恵美、菊池康紀、平尾雅彦、サプライチェーンの川中産業プロセスにおける環境・健康リスク管理のためのマルチ視点アクティビティモデル、化学工学論文集、査読有、40 巻、2014、1-13

DOI: 10.1252/kakoronbunshu.40.174

上原恵美、菊池康紀、平尾雅彦、中小企業における環境配慮型プロセス設計の支援: VOC 排出源プロセスを対象として、日本リスク研究学会第 26 回年次大会講演論文集、査読無、26 巻、2013、C-4-4

[学会発表](計 9 件)

山岸達矢、上原恵美、小野澤明良、木下稔夫、平尾雅彦、工業塗装における環境配慮のためのプロセスモデリング、化学工学会第 81 年会、2016 年 3 月 14 日、関西大学 (大阪府・吹田市)

山岸達矢、上原恵美、平尾雅彦、プロセスモデルに基づく工業塗装プロセスの

改善支援、日本 LCA 学会第 11 回研究発表会、2016 年 3 月 3 日、東京大学 (千葉県・柏市)

上原恵美、中小企業における環境配慮型プロセス設計、化学工学会第 47 回秋季大会、2015 年 9 月 9 日、北海道大学 (北海道・札幌市)

Emi Kikuchi-Uehara, Tatsuya Yamagishi, Masahiko Hirao、Application of LCA to environmentally-conscious process design in SMEs: Case studies in Japanese industrial painting、2015 年 8 月 31 日、ポルドー (フランス)

Emi Kikuchi-Uehara, Yasunori Kikuchi, Masahiko Hirao、Chemicals management for sustainability in small and medium-sized enterprises、The 11<sup>th</sup> International Conference on EcoBalance (EcoBalance2014)、2014 年 10 月 28 日、つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)  
山岸達矢、上原恵美、平尾雅彦、塗装における環境配慮型プロセス設計支援、日本 LCA 学会第 9 回研究発表会、2014 年 3 月 4 日、芝浦工業大学 (東京都)

上原恵美、菊池康紀、平尾雅彦、中小企業における環境配慮型プロセス設計の支援: VOC 排出源プロセスを対象として、日本リスク研究学会第 26 回年次大会、2013 年 11 月 17 日、中央大学 (東京都)

上原恵美、菊池康紀、平尾雅彦、中小企業における環境配慮型プロセス設計の支援、化学工学会第 45 回秋季大会、2013 年 9 月 17 日、岡山大学 (岡山県・岡山市)

Emi Kikuchi-Uehara, Yasunori Kikuchi, Masahiko Hirao、Framework for chemicals management in small and medium-sized enterprises – Practice in metal cleaning processes、7th International Society for Industrial Ecology Biennial Conference (ISIE2013)、2013 年 6 月 25 日、蔚山広域市 (韓国)

6. 研究組織

(1)研究代表者

上原 恵美 (UEHARA, Emi)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号: 10648132