研究論文

現場固有の機能と制約条件に基づく局所リスクと環境影響：
金属部品洗浄における解析

菊池 康紀・平尾 雅彦

Local Risks and Global Impacts Considering Plant-Specific Functions and Constraints:
A Case Study of Metal Parts Cleaning

Yasunori KIKUCHI and Masahiko HIRAO

Synopsis:

Background, aim, and scope. To achieve sustainable development in industrial processes, attributed chemical risks as well as environmental impacts should be managed. Such non-monetary issues have been analyzed by scientific assessment methodologies such as various risk assessment (RA) and life cycle assessment (LCA) procedures. Local risks to be addressed in RA are microenvironments, including the workplace and neighborhood. Although a comprehensive interpretation of such risks is necessitated in industrial decision making, no practical method has been developed to interpret various types of risk with sufficient understandings of plant-specific functions and constraints. Because elaborate model-based approaches are inevitable for practical process development, actual case studies on chemical risks and detailed plant-specific functions and constraints should be performed. Manufacturing processes require that metal parts must be cleaned in preparation for surface treatments or the completion of metal processing. The significant amount of cleansing agents utilized in cleaning processes has become an issue in Japan. Almost all cleaning processes in Japan are carried out by small- and medium-sized enterprises (SMEs). Machinery processes have not been systematically analyzed in terms of chemical risks and, in addition, the environmental management skills of SMEs are generally far behind those of large enterprises. The objective of this study is to reveal the relationships between chemical risks and plant-specific conditions for a practical risk reduction carried out by industrial decision makers. For this purpose, we aimed at the analysis of such relationships in metal cleaning processes. Through this analysis, the correlation between local risks and global impacts were discussed in terms of plant-specific conditions.

Materials and methods. Through several investigations on cleaning processes, plant-specific functions and constraints were determined with process data required for plant-specific RA and LCA. By plant-specific RA, workers' and neighbors' health risks of inhalational exposure to the utilized cleansing agents were evaluated as unit exposure amount [$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}$] and total exposure amount [$\text{mg}\cdot\text{day}^{-1}$] in the workplace and neighborhood. As global environmental impacts, human health impacts were evaluated by LCA using disability-adjusted life years (DALY) through the life cycle of process chemicals including cleansing agents and utilities. On the basis of evaluation results, the relationships among plant-specific conditions and the results were analyzed and discussed by using the results of regression analyses and the Akaike information criterion (AIC).

Results. The impacts due to the use of cleansing agents contributed largely to total human health in the LCA results. The results of the functional unit 'Cleaning of unit weight of products' demonstrated that the magnitudes of total impacts were not considerably different. In plant-specific RA results, the neighborhood concentrations in some cases were higher than the average concentration in Japan. The neighbors' total exposure amounts were highly connected with the emission amount of cleansing agents and population

densities. Because workplace concentrations were different from site to site and do not have a simple relationship to the emission amount of cleansing agents, the exposure amounts of workers indicated complicated trends. According to detailed interpretation of all the results, a relationship between occupational exposure and agent emission was revealed. Some devices that enhance the process functions became emission factors, such as the local ventilation device installed to keep the workplace safe. Additionally, the shapes of metal parts to be cleaned and cleaning requirements increased the emission of cleansing agents to indoors and outdoors directly. Additionally, some regression analyses and AIC comparisons showed that these plant-specific conditions can be regarded as factors having non-negligible effects on local risks and global impacts.

Discussion. In cleaning processes utilizing various agents to meet cleanliness requirements, plant-specific conditions should be taken into account in their assessments to reduce the chemical risks practically. Constraints from decision makers in the other stages of a product life cycle are unchangeable for on-site engineers in a given process. In this regard, however, the process functions for complying with the requirements originating from the constraints can be managed by on-site engineers. To deal with the risks originating from such factors, operations and devices should be appropriately designed. To achieve such designs, statistical approaches and process understandings should be used in a collaboration to reveal the practical relationship among local risks, global impacts and process conditions.

Conclusions. Local risks and global impacts attributable to metal parts cleaning processes were evaluated in terms of workers' and neighbors' health risks and global human health impacts. A careful interpretation of evaluation results revealed that local risks have features different from those of global impacts. In this paper, we demonstrate that local risks are highly connected with plant-specific conditions. For an appropriate practical implementation of local impacts, as well as plant specification, the characteristics of industrial sectors, including related laws and regulations, should be taken into account to address them from the viewpoint of agent emissions, which can be obtained in ordinary LCA. Otherwise, the data collected in life cycle inventory should be sufficiently expanded to estimate the requirements or to specify an appropriate model.

Recommendations and perspectives. The approach to analyze and relate the plant-specific functions and constraints with local risk and global impact can be useful and effective for revealing their factors, which can be supporting information of generating alternatives for reducing them. The application of such an approach can also clarify the plant-specific risk and LCA performance in general. Additionally, the clarified relationship might lead to the increase of the attention of global issues within the decision making including industrial process design and policy making. Several models should be developed for model-based decision making considering plant-specific conditions.

Keywords: Small- and Medium-Sized Enterprises (SMEs); Process Functions and Constraints; Practical Application; Metal Cleaning; Human Health; Local Risks

1. 緒言

産業におけるライフサイクルマネジメント (LCM) では様々な評価指標を考慮する必要がある。作業者や周辺住民へのリスクといった局所リスクは、化学物質を利用するプロセスの管理において考慮されるべき制約条件となるため、適切に把握されなければならない。これらのリスクはリスクアセスメント (RA) において環境、健康、安全リスク (EHSリスク) として認識されている (Kolluru et al. 1996)。局所リスクに加え、一定地域内や地球規模での環境影響も意思決定においては考慮される必要がある。ライフサイクルアセスメント (LCA) は化学物質のライフサイクルにおける環境影響を定量化できる手法である。

これら局所リスクや環境影響はプロセスやオペレーションの設計において総合的に考慮されるべき評価指標といえる。

RAとLCAを統合するいくつかのアプローチが、特にライフサイクル影響評価 (LCIA) の分野で検討されてきている。例えばOMNIITOXプロジェクトでは環境リスクアセスメント (ERA) とLCAの関係について議論されている (Molander et al. 2004)。OMNIITOXプロジェクトによりERAは特定領域における環境毒性をLCIAにおいて定量化する手法として使用されるようになった (Larsen 2007)。また、人間健康影響に関するインパクトカテゴリについても、室内での有毒化学物質への暴露など、

UNEP/SETACライフサイクルイニシアティブのタスクフォースにおいて様々な議論がなされてきた (McKone 2006; Hellweg et al. 2005; Jolliet et al. 2005)。室内暴露に関しては住宅における暴露評価モデル (Meijer 2005a, 2005b, 2006) やsocial LCAにおける職業暴露の影響評価 (Jørgensen 2008) などが検討されてきた。Life cycle impact assessment method based on endpoint modeling (LIME2) (Research Center for Life Cycle Assessment 2007) においてもいくつかの化学物質への室内暴露がインパクトカテゴリとして含まれている。これらの研究アプローチはLCIA手法におけるインパクトカテゴリの一つとして局所リスクを組み込むことを目的としている。これに対して、リスクに基づく意思決定のために産業現場固有の条件に基づきながらRAとLCAを区別して実施する評価手法が提案されている (Kikuchi and Hirao 2008a)。この研究アプローチにおいては局所リスクと環境影響を別々に評価し、それぞれの特徴を考慮しながら解釈することを目的としている。いずれの研究アプローチにおいても局所リスクと環境影響を総合的に評価、解釈して意思決定を行うことを目的としているが、特定の意思決定における評価手法を検討して議論するためには産業プロセス設計に関する評価と解釈のケーススタディが不足しており、これらの研究アプローチの適用範囲を判断することができない。

化学プロセスや印刷プロセス、機械加工などの産業活動において、溶剤は重要な役割を果たしている。プレス加工や切削加工などの金属加工において金属部品は摩擦や発熱を避けるために油を塗布して加工される。塗布したプロセス加工油や金属切削屑は後の工程で不純物となるため除去する必要があり、前処理または後処理としての金属洗浄プロセスが不可欠となっている (Ministry of the Environment 2007 and 2008a)。洗浄プロセスでは様々な化学物質が使用されるとともに、それらが環境中に排出されており、化学物質リスク削減の観点から排出削減が必要となっている。工業用洗浄剤としてジクロロメタン (DCM) やトリクロロエチレン (TCE) といった塩素系溶剤は、安価で高い洗浄力を有し、さらに不燃性であるという理由から幅広く利用されている。しかしPRTR調査結果などから排出量が多いことが分かっている (Ministry of the Environment 2008b)。また、日本では金属部品製造業において中小企業 (SMEs) が大部分を占めており、金属洗浄プロセスの多くが中小の事業所で稼働している。こういった事業所では洗浄プロセスが金属部品の表面改質や熱処理、メッキ加工の前処理プロセスとして存在しており、洗浄の品質が金属部品の機能実現に強く関係していることが分かっている。

金属洗浄プロセスに関しては装置技術の革新によるリス

ク削減が確認され (von Grote et al. 2003)、LCAによる評価も実施されてきた (Kikuchi and Hirao 2008b; European Chlorinated Solvents Association 1996)。既存のLCA結果より、洗浄剤ライフサイクルにおいて洗浄プロセスの寄与率が高いことが分かっている (Kikuchi and Hirao 2008b)。さらに、洗浄プロセスにおける職業暴露に起因する健康影響だけで、洗浄剤ライフサイクル全体からの健康影響と同程度の被害があることも分かっている (Kikuchi and Hirao 2008a)。さらに同じ工場の評価においても局所リスクである職業暴露による健康リスクと地球規模での環境影響との間にトレードオフの関係が生じることもある (Kikuchi and Hirao 2008a)。

中小企業の製造プロセスは様々な機能や制約条件の中で稼働している。これらの条件が現場固有のリスクファクターとなっているため、共通の対策ですべての現場のリスクを実践的に削減することは難しい。現場固有の条件の下で総合的なリスク評価に基づく意思決定を適切に実施していくためには、局所リスクと環境影響を現場固有の条件に基づいて解釈し、その関係を解析していくことが必要である。

本研究では、リスクに基づく意思決定のために局所リスクと環境影響を総合的に評価、解釈する手法の構築を目指す。そのために、金属洗浄プロセスを例として31の異なる実プロセスを解析し、局所リスクと環境影響をそれぞれ評価する。そして得られた結果を基に、現場固有の条件とリスク要因とを関連付けていく。これにより、プロセスの条件と局所リスク及び環境影響を結び付け、意思決定における実践的なRAとLCAの統合に必要な、評価結果の解釈手法を提案する。

2. 解析手法

2.1 局所リスクと環境影響の評価

Figure 1に金属洗浄プロセスの局所リスクと環境影響の評価範囲を概念的に示す。本評価では現場のプロセスエンジニアが化学物質を使用し、管理している洗浄プロセスを中心としている。洗浄プロセスにおいてLCAに必要なデータは、既存の研究 (Kikuchi and Hirao 2008b) にしたがって調査した。評価全体の調査範囲には、洗浄剤ライフサイクル中で入力されている素材やユーティリティのライフサイクルを含んでいる。典型的な洗浄剤ライフサイクルと各ステージにおけるプロセスはFigure 1に含まれている。機能単位としては‘一日の洗浄プロセスの稼働’と‘単位質量あたりの金属部品の洗浄’を設定しそれぞれ評価する。インベントリ分析は現場の調査データと既存のデータベースから収集する (Life Cycle Assessment Society of Japan 2008; Japan Environmental Management

Figure 1. Scope of assessment of local risks and global impacts of metal cleaning process

Association for Industry 2005)。インパクト評価手法としてはLIME2を用い、指標としては障害調整生存年(DALY)、インパクトカテゴリとしては地球温暖化、都市域大気汚染、光化学オキシダント形成、および有害化学物質の排出を取り上げる。なお、室内暴露はLCIAの評価対象に含んでいない。DALYはLCIA手法の中で健康影響の指標として利用されており(Hofstetter 1998; Haes 2002)、これによりRAとLCAの評価結果を健康被害という同じ対象で比較することができる。インベントリとしては上述のインパクトカテゴリに対し、二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、硫酸化合物、窒素化合物、炭化水素、および洗浄剤(DCM及びTCE)を分析する。評価結果は金属部品の単位質量あたり(LC-DALY_{kg} [DALY·kg⁻¹])と一日のプロセスの稼働あたり(LC-DALY_{day} [DALY·day⁻¹])で示す。

Figure 1に示す洗浄プロセスにおいて溶剤消費量(AC)、気相溶剤排出量(AE_{gas})、廃液中溶剤排出量(AE_{wf})、および活性炭吸着量(AE_{ac})はLCAで考慮する溶剤にまつわる基準フローである。このとき環境中に排出される前に、洗浄装置から排出された溶剤の一部が作業環境を經由(AE_{indoor})した場合、作業健康影響の要因となる。同時に洗浄サイトから排出された洗浄剤(AE_{gas})がサイトの周辺環境で周辺住民健康影響の要因となる。作業環境や周辺環境の濃度は、溶剤の消費量などといった基準フローから一意に決定できず、現場に導入されている排気装置や設備、周辺環境や気候条件といった現場固有の条件に依存する。そのため、LCAに加えて現場固有の条件に合わせ

たRAが必要である。既存の健康リスクアセスメントによるとDCMとTCEの主な暴露形態は吸引によるものであることが分かっている(Nakanishi and Inoue 2005; Nakanishi et al 2008)ため、本研究では塩素系溶剤の吸引暴露による作業者と周辺住民への健康リスクを評価する。健康リスクの評価指標は様々なものが存在しており、評価の目的に合わせて適切に選択する必要がある(Kikuchi and Hirao 2008a)。暴露評価と影響評価から成る健康リスク評価において指標間の意味の違いの多くは影響評価方法の違いによるものであり、暴露評価方法は共通である。そこで本研究では様々な評価指標の議論に発展できるように、一日予測暴露量(PDI) [mg·intake·kg⁻¹·day⁻¹]と合計予測暴露量(PDI^{total}) [mg·intake·day⁻¹]を局所リスクの指標として評価した。すなわち、作業健康リスクの評価指標としてはPDI_{worker}とPDI_{worker}^{total}、周辺住民健康リスクにはPDI_{neig}とPDI_{neig}^{total}を用いることとした。計算式をEquation (1)と(2)に示す。

$$PDI = \sum \left(C_i \cdot V_{inh} \cdot \frac{\Delta t_{exposure, i}}{hr_{day}} \right) \cdot \frac{1}{BW_{ave}} \quad (1)$$

$$PDI^{total} = N_{exposed} \cdot BW_{ave} \cdot PDI \quad (2)$$

ここではC_i: 洗浄剤の暴露濃度 ([mg·m⁻³])、V_{inh}: 一日の呼気量 (20 m³·person⁻¹·day⁻¹)、Δt_{exposure, i}: 任意の濃度(C_i)における暴露時間([hr])、hr_{day}: 一日の時間(24 hr)、N_{exposed}: 暴露人数([person])、BW_{ave}: 平均体重(65 kg·person⁻¹)である。洗浄剤への作業者と周辺住民の一日の暴露形態を以下のように定義する。

- 作業者は一日のうち8時間を作業環境濃度(C_{work})、16

時間を日本国内の一般大気濃度の洗浄剤に暴露する。

- 周辺住民は一日中洗浄サイトの周辺環境濃度 (C_{neig}) の洗浄剤に暴露する。

C_{work} と作業人数 (N_{work}) は実プロセスの調査によって収集する。 C_{neig} は洗浄サイトからの洗浄剤排出速度、既存の拡散モデル、および周辺の気候条件から推算する。本研究ではMETI-LISモデル (Ministry of Economy, Trade and Industry 2006) と気候条件 (Meteorological Office 2003) から推算を行う。推算の設定条件として、計算の範囲を洗浄サイトを中心とした1 km²、濃度推算点を地表から1.6 m、評価に用いる値を拡散モデルによる推算結果の平均及び最大の値とした。周辺環境における暴露人数 (N_{neig}) は調査した実プロセスの所在地の人口密度を用いた。

2.2 局所リスクと環境影響の関係解析

局所リスクと環境影響の関係を明らかにするために、洗浄剤排出の経路を特定しながら、プロセス条件との関係を解析する。洗浄剤排出量は現場で入手できる情報から下記のような式により推算できる。

$$AE_{gas} = AC - (AE_{wf} + AE_{ac}) \quad (3)$$

ここで、 AE_{gas} [kg·day⁻¹]、 AC [kg·day⁻¹]、 AE_{wf} [kg·day⁻¹]、および AE_{ac} [kg·day⁻¹] はそれぞれ気相洗浄剤排出量、洗浄剤使用量、廃液含有洗浄剤排出量、および活性炭吸着量である。 AE_{gas} は洗浄剤の総排出量を意味しており、LCAの計算で使用する基準フローである。同時に、周辺環境濃度が洗浄サイトからの洗浄剤排出量に依存するため、 AE_{gas} は周辺住民リスクの要因となる。局所リスク、特に作業健康リスクと環境影響の関係の解析においては、洗浄剤の室内濃度 (C_{indoor}) と AE_{gas} の比、すなわち洗浄剤の室内および室外への排出分配比が重要なパラメータとなる。この分配比は、Equation (4) に示すように、プロセス条件Xによって定量的に表現できると仮定できる。

$$\frac{C_{indoor}}{AE_{gas}} = D(X) \quad (4)$$

ここで $D(X)$ [mg·m⁻³·(kg·day⁻¹)⁻¹] は C_{indoor} と AE_{gas} の比である。Equation (4) における $D(X)$ は AE_{gas} の単位量に起因する室内暴露濃度を意味している。 $D(X)$ がゼロである場合、それはすべての洗浄剤が直接大気に排出されていることを意味する。このとき C_{indoor} は AE_{indoor} の関数であるため、 $D(X)$ は AE_{indoor} と AE_{gas} の関係と解釈することもできる。局所リスクと環境影響の関係は、以下の式に示すような $D'(X)$ を定義して解析することもできる。

$$\frac{PDI_{indoor}}{AE_{gas}} = D'(X) \quad (5)$$

ここで $D'(X)$ [mg·intake·kg⁻¹·day⁻¹·(kg·day⁻¹)⁻¹] は AE_{gas} の単位量に起因する室内暴露量を意味している。同じ AE_{gas} のプロセスがあったとしても、 $D'(X)$ によって室内暴露量が異なることになる。本研究においては Equations (4, 5) と現場プロセスから収集した実データを用いて局所リスクと環境影響の関係を解析する。

2.3 プロセス条件に基づく局所リスクと環境影響の解析

2.3.1 プロセスデータの収集

RAとLCAに必要なプロセスデータとそれぞれの現場固有の条件を実プロセスから調査した。収集した情報には作業環境内の平均洗浄剤濃度や装置周辺の最大濃度といったデータも含んでおり、これらの情報をもとにRAとLCAを実施することができる。調査対象としたサイトには、金属加工工程として切削加工やプレス加工、メッキ処理、および熱処理など様々な主工程の前処理、後処理洗浄プロセスを含んでいる。調査結果をAppendixにまとめる。

2.3.2 考慮するプロセス条件の特定

洗浄プロセスと関連する物質のライフサイクルを Figure 2 にまとめて示す。産業プロセスにおいては製品 (product) とプロセス中で消費する物質 (process chemical) のライフサイクルが交差している。洗浄プロセスにおいて製品は洗浄される金属部品であり、プロセス中で消費する物質は洗浄剤や電力、蒸気、プロセス水、および燃料などである。ライフサイクル中の上流プロセスにおいて決定する金属部品や不純物の特徴、さらに下流プロセスから要求される洗浄清浄度や処理量、納期などは、洗浄プロセスにおける制約条件となる。これら制約条件を満たしてプロセスの機能が実現できるようにプロセス内の装置や運転操作条件が設計されている。装置や運転操作といったプロセスの構成要素と、制約条件や機能の関係を Table 1 にまとめる。中には現場固有のものと洗浄プロセスに一般的なものがあり、これらが局所リスクや環境影響の要因となっている。

洗浄プロセスの目的は金属加工の主工程と強く関係して決まっている。切削加工やプレス加工の後処理としての洗浄プロセスの場合、加工に伴う不純物を除去するためであれば要求される洗浄清浄度は必ずしも高くない。これに対して、メッキ処理加工や表面改質加工など、金属部品の表面に付加価値をつけるような工程において稼働している、前処理としての洗浄プロセスの場合、表面の清浄度が強く加工後の金属部品の性能に影響を与えてしまうことから、要求される洗浄清浄度は高い。ごくわずかな残留不純物や

Figure 2. Process functions and constraints of metal cleaning process where life cycles of cleansing agents (process chemicals) and metal parts (products) are interconnected

Table 1. Process constraints with functions represented by related parameters to meet them

Conditions	Process constraint	Process function
Plant-specific conditions	Process phase of cleaning	Cleansing agent, Washing devices (physical and chemical effect)
	Post-treatment of cutting and pressing	
	Pretreatment of surface processing	
	Cleaning requirement	
	Feature of metal part	
General conditions	Material, shape	Recovery system, local ventilation system
	Throughput	
	Air Pollution Control Law	
	VOC discharge regulation	
	Ordinance on Prevention of Organic Solvent Poisoning	

粒子でも表面改質加工に不具合を生じてしまい、結果として最終製品の品質に影響してしまう。以上のことから、金属加工工程の前処理か後処理かによって洗浄プロセスは異なる側面を持つと考えることができる。

金属部品として多く製造されているのは自動車や電子機器に含まれる部品である。これらの金属部品には実に多種の形状のものが存在している。洗浄プロセスでは小ロットで多品種の金属部品を扱っており、洗浄プロセスは様々な形状や材質の部品を処理できるように設計されている。そのため、プロセスの条件は現場によって大きく異なっており、塩素系溶剤は様々な条件でも高い洗浄性能を発揮できる洗浄剤として利用されてきた。しかし、溶剤蒸気で洗浄するプロセスにおいて、必要以上の洗浄機能は、洗浄剤の排出を促進してしまいかねない。また、金属部品の形状によっては、洗浄剤を持ち出してしまうことも排出の要因として考慮すべきである。この持ち出し排出とは、洗浄装置

内で金属部品が乾燥工程を通過しても乾燥しきれなかった残留溶剤が金属部品とともに装置外に持ち出されてしまうことによる排出である。このような排出は金属部品の形状によるものであり、洗浄プロセスの理解のためには金属部品の形状に基づいた局所リスクと環境影響の解析を行う必要がある。

金属部品の形状に加えて、一日のバッチ数、すなわち洗浄処理量もまた持ち出し排出と関係があるプロセス条件といえる。洗浄プロセスを有する多くの中小事業所は金属部品の請負製造業者であり、処理対象は、小ロット多品種の小さい部品であったり、大ロット少品種の大きい部品であったりなど、実に様々である。そのため、金属部品の条件としては形状だけでなく処理量も含めて、室内及び室外への排出分配比との関係を解析する必要がある。

現場固有の条件に加えて、一般的な制約条件も本研究では解析の対象とする。指定化学物質を使用している産

業にとって法規制は最も強い制約条件である。日本では、労働安全衛生法（安衛法）と有機溶剤中毒予防規則（有機則）が有機溶剤を用いる洗浄プロセスにおいて重要な法規制である（Ministry of Health, Labor and Welfare 2004）。これらの法規制により、室内換気システムの導入が義務付けられているが、その排気方法に関しては現場の判断で選択して構わないことになっている。多くの洗浄サイトでは局所排気装置（局排）を導入している。局排には様々な種類が存在しているが、調査した31プロセスは大きく3つの種類の局排に分割できた。既往の上部開放系洗浄プロセスで導入されている局排の形状をFigure 3にまとめて示す。安衛法における有機則では、さらに、年に2回の作業環境測定を義務付けており、有機溶剤の使用状態が監視される仕組みになっている。局排の風量には法定速度が設定されており、あらゆる現場において法定値以下で局排を稼働させてはならない。このとき、局所排気の方法が最適な形になっていない現場においては、作業環境測定において管理濃度を維持するために局排風量を増大させて対処することがある。しかし、風量の増大により洗浄装置内の洗浄剤がかく乱されて装置からの排出は増大してしまう可能性がある、局排の形状や排出口の位置によって C_{indoor} や AE_{gas} の増大につながりうるため、局排の条件と局所リスク及び環境影響の関係を解析することが必要である。

3. 評価と解析の結果

3.1 局所リスクと環境影響

Figure 4に $LC-DALY_{kg}$ 、 PDI_{worker} 、および PDI_{neig} を、Figure 5に $LC-DALY_{day}$ 、 PDI_{worker}^{total} 、および PDI_{neig}^{total} をそれぞれ示す。LCA結果を見ると、LC-DALYに対して洗浄プロセスは72%から98%と高い寄与率を示していることがわかる。また、2つのLCA結果を比べてみるとそれぞれのサイトの評価結果が大きく変化しているように見える。これはそれぞれのサイトの洗浄処理量が強く洗浄剤消費量と関係しているためであり、 $LC-DALY_{day}$ の差異に比べると、 $LC-DALY_{kg}$ の差異はそれほど大きくないということが確認できる。これは既存の評価結果（Kikuchi and Hirao 2008b）と同じ傾向である。

安衛法において設定されているDCMおよびTCEの管理濃度はそれぞれ50 ppmおよび25 ppmである（2009年現在）。この管理濃度と同じ濃度で作業者が洗浄剤に1日8時間暴露し、残りの16時間を一般大気濃度で暴露したと仮定すると、DCMおよびTCEの PDI_{worker} はそれぞれ $17.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ および $14.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ となる。これらの値とFigure 4における PDI_{worker} を比較するとほとんどの工場で規制値に近い濃度での暴露になっていることが分かる。いくつかのサイトでは最大濃度が規制値を超えている場合もあった。一方、 $LC-DALY_{day}$ の評価に用いる AE_{gas} は PDI_{neig} の評価においても関係する値であり、これらの値が同様な挙動を示していることが結果からわかる。国内

Figure 3. Open-top washing machines with local ventilation systems

Figure 4. LC-human health indicated by DALY and the daily intake amounts of workers and neighbors. The functional unit of LC-human health is "Cleaning of unit amount of metal parts". The dot lines labeled DCM and TCE means that the PDI_{worker} s in the workplace with the standard control concentrations, respectively.

Figure 5. LC-human health by DALY and the total intake amounts of workers and neighbors. The functional unit of LC-human health is "Daily operation of cleaning".

平均濃度 (Nakanishi and Inoue 2005; Nakanishi et al 2008) から評価できるDCMおよびTCEの平均PDIは、それぞれ $8.74 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ および $1.75 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ となる。この値から、 PDI_{worker} には主に作業環境における暴露が寄与していることが分かる。同様に、洗浄サイト周辺の PDI_{neig} が日本平均と比較すると無視できない値であることも分かる。ただし、DCMおよびTCEの慢性毒性閾値 (Nakanishi and Inoue 2005; Nakanishi et al 2008) から計算したPDIがそれぞれ $92.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot$

day^{-1} および $21.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ であり、評価結果の PDI_{neig} は常に閾値以下である。この結果から周辺住民の洗浄剤への暴露は常に閾値以下であると仮定できる。初期リスク評価で用いられる暴露マージン (MOE) (Nakanishi and Inoue 2005; Nakanishi et al 2008; US-EPA) を計算しても、閾値の不確実性から計算される不確実性係数積と比較していずれのケースでも高い値となった。この結果から洗浄プロセスから排出される洗浄剤によって周辺住民に重大なリスクが引き起こされているとはいえないことが確

認できた。なお、DCMおよびTCEに対して、MOEの不確実性係数積はいずれも100であった（Nakanishi and Inoue 2005; Nakanishi et al 2008）。

Figure 5における PDI_{worker}^{total} は現場固有の条件の1つである作業人数（ N_{worker} ）を用いた評価結果であるため、Figure 4における PDI_{worker} とは異なる傾向を示す結果となった。これは各プロセスの所在地である自治体の平均人口密度を用いて計算した PDI_{neig}^{total} においても同様である。Figure 4の結果では、 PDI_{neig} が PDI_{worker} よりもかなり小さい値であるが、Figure 5の結果では PDI_{neig}^{total} および PDI_{worker}^{total} は同じオーダーになっている。これは N_{neig} が N_{worker} よりも大きいことによるものであり、 PDI_{neig}^{total} は強く立地条件に影響を受ける評価指標であることが分かる。

3.2 工場固有の条件を考慮した結果の解釈

得られた評価結果を現場固有の条件と一般的な条件を考慮しながら解釈する。調査したそれぞれのプロセスの評価結果に対して、洗浄剤の種類、金属部品の形状、洗浄工程と金属加工工程の関係、処理量、局所排気装置の形状、回収装置の有無について AE_{gas} と PDI_{worker} の関係を解析し、Figure 6に示した。なお、ここで計算されている PDI_{worker} はFigure 5において平均作業環境濃度を用いて計算されていた値を局所的な室内リスクの代表値として用いている。 AE_{gas} と PDI_{worker} の関係は切片を0とにおいて最小二乗法による回帰分析によって求めている。結果をTable 2とTable 3にまとめる。

3.2.1 洗浄剤の種類に基づく解析

DCMとTCEは洗浄剤として高い性能を有しており、精密洗浄において幅広く利用されてきた。洗浄剤の拡散に関しては化学物質の物性によって決まると考えられるが、Figure 6(a)をみると、化学物質の違いによる AE_{gas} と PDI_{worker} の関係の違いはあまり見られないことがわかる。これはそれぞれの工場において化学物質を利用する際、法規制に基づく管理濃度以下に作業環境濃度が維持されるように管理されているためと考えられる。現場での管理により、化学物質の違いや洗浄剤の排出量から予想されるよりも低い濃度に作業環境濃度が保たれているといえる。化学物質の種類と AE_{gas} - PDI_{worker} の相関がみられないと判断し、Figure 6(a)においては回帰分析を実施しないこととした。

3.2.2 洗浄プロセスの特徴に基づく解析

脱ハロゲンを目標とする大企業が増えたことから塩素系溶剤を使用する洗浄プロセスの数が減ってきているとされている。それでも現在塩素系溶剤を使用しているプロセス

は洗浄の機能や品質といった要求を塩素系溶剤なしに達成することが難しい場合が多い（New Energy and Industrial Technology Development Organization 2003; Ministry of the Environment 2007）。Figure 6(b)及びFigure 6(c)に示されるように、塩素系溶剤は、細孔や止まり穴といった複雑な形状を有する金属部品の表面処理加工における前処理洗浄において利用されていることが分かる。このようなプロセスでは、小さな処理量及び排出量（ AE_{gas} ）であったとしても、比較的高い作業環境濃度になっていることがFigure 6(d)から分かる。Figure 6(b)とTable 2によると補正係数Rが小さいことから金属部品の形状に対する傾きに不確実性が大きく、これだけでは分配比D(X)を決定できないが、過去の調査から、洗浄作業が C_{indoor} と AE_{gas} の比に大きな影響を与えることが分かっており（Ministry of the Environment, Japan 2007, 2008a）、形状が分配比に影響を与えることが示唆されている。金属部品が重なり合っていると、その部分に液体の溶剤が溜まり、そのまま洗浄装置の外へ持ち出されてしまつて AE_{indoor} が増加することがある。同じような現象が細孔や止まり穴を有する金属部品に対しても起きていると考えられる。金属部品内部の穴に入り込んだ溶剤は乾燥させることが難しいため、そのまま洗浄装置から持ち出されて作業環境に排出される可能性がある。なお、作業手順や工程を変更することでこれらのリスク要因を改善することができる。

一方、金属加工の後処理としての洗浄プロセスにおいても塩素系溶剤が利用されている。ここでも、電子機器の内部で導電性が必要な部品、または家庭用品として利用されるものの仕上げ洗浄として、高い洗浄品質が要求されることがある。大物部材であったり、容器型であったりと、やはり持ち出し排出量を増加させうる製品が存在している。

Table 2とTable 3に示す回帰分析の結果から、いくつかのプロセスの特徴が AE_{gas} と PDI_{worker} の関係と相関をもっていることが分かる。決定係数が小さいものもあるが、金属部品の形状、洗浄工程と金属加工工程の関係、処理量はEquation (5)に示す分配係数D(X)と関係があると考えられる。この結果から、たとえば、前処理プロセスとして存在する洗浄プロセスは後処理プロセスとして存在する洗浄プロセスよりも、同じ排出量であったとき、作業環境濃度が高い可能性があると考えられる。

以上のように、プロセスの特徴が AE_{gas} と PDI_{worker} の関係に無視できない影響を及ぼしていることがわかった。なおこのとき、いくつかのプロセスの特徴は製品ライフサイクルの他のステージから供給された制約条件に起因している。

(a) Cleansing agent

(b) Metal parts' shape

(c) Process phase of cleaning

(d) Throughput

(e) Local ventilation type

(f) Recovery system

Figure 6. Relationship between total agent emission and PDI_{worker} based on plant-specific conditions

Table 2. Results of regression analyses between total agent emission and PDI_{worker} with regard to metal parts' shape and process phase

	Metal parts' shape			Process phase	
	Small or pore	Large	Pod	pretreatment	Post-treatment
Coefficients (D'(X))	8.99E-02	6.28E-02	9.60E-02	8.64E-02	6.30E-02
Standard Error	3.42E-02	1.09E-02	6.30E-02	2.85E-02	1.03E-02
t Stat	2.63E+00	5.79E+00	1.52E+00	3.03E+00	6.14E+00
P-Value	1.83E-02	6.72E-04	1.88E-01	6.55E-03	1.70E-04
Multiple R	5.49E-01	9.09E-01	5.63E-01	5.61E-01	8.99E-01
R Square	3.01E-01	8.27E-01	3.17E-01	3.15E-01	8.07E-01
Adjusted R Square	2.39E-01	6.84E-01	1.17E-01	2.65E-01	6.96E-01
Standard Error	8.08E+00	8.50E+00	4.89E+00	7.43E+00	7.98E+00
Observations	17	8	6	21	10

Table 3. Results of regression analyses between total agent emission and PDI_{worker} with regard to throughputs and local ventilation type on site

	Throughput [$\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$]				Local ventilation type		
	<300	<1000	<5000	5000<	Exterior	Enclosed-exterior	Enclosed-hood
Coefficients (D'(X))	6.77E-01	1.29E-01	5.48E-02	9.21E-02	2.29E-01	1.57E-01	5.87E-02
Standard Error	2.50E-01	5.98E-02	9.72E-03	1.63E-02	6.84E-02	3.63E-02	6.43E-03
t Stat	2.71E+00	2.16E+00	5.64E+00	5.65E+00	3.35E+00	4.32E+00	9.12E+00
P-Value	4.20E-02	5.64E-02	1.33E-03	1.32E-03	6.51E-03	7.59E-03	9.54E-07
Multiple R	7.72E-01	5.63E-01	9.17E-01	9.18E-01	7.10E-01	8.88E-01	9.35E-01
R Square	5.96E-01	3.17E-01	8.41E-01	8.42E-01	5.05E-01	7.88E-01	8.74E-01
Adjusted R Square	3.96E-01	2.17E-01	6.75E-01	6.75E-01	4.14E-01	5.88E-01	7.91E-01
Standard Error	7.26E+00	6.21E+00	6.93E+00	6.42E+00	7.83E+00	5.50E+00	5.14E+00
Observations	6	11	7	7	12	6	13

3.2.3 局所排気装置と回収装置に基づく解析

Figure 6 (e) に局所排気装置（局排）の形状に基づく AE_{gas} と PDI_{worker} の関係を解析した結果を示す。局排の形状が強く排出量と作業環境濃度に影響していることが分かる。Figure 3 (a) に示す局排の排気口が洗浄装置開口部の横に設置されている側方外付け型局排は最も単純な構造の装置の一つである。このタイプの局排は装置内の溶剤を攪乱して排出させることがあり、少ない AE_{gas} でも作業環境への排出を増大させて濃度を高める可能性がある。これを改良したものがFigure 3 (b) に示す囲い式外付け型局排である。これは洗浄装置の開口部の周りを囲むように排気口を取り付けたものであり、空気よりも重い溶剤を効果的に捕集して排気することができる。ただし囲い式外付け型局排は開口部からの排出を捕集できるが、金属部品に付着している溶剤や強い攪乱により排出した洗浄剤を捕集できない。Figure 3 (c) に示す囲い込みフード型局排は完全に洗浄装置を囲んでおり、そういった排出にも対応できる。このような局排形状とその特徴がFigure 6(e) の結果にも反映されている。同じ洗浄剤の排出量のときに作業環境濃

度は局排の形状が側方外付け型、囲い式外付け型、囲い込みフード型の順に低下している。回帰分析の結果を見ても、決定係数が高く、分配係数 $D(X)$ と強い相関をもつといえる。

局所排気装置の効果を考える上で回収装置は重要な対策技術といえる。解析結果をFigure 6 (f) に示す。回収装置はエンドオブパイプ技術であるため、排気ダクト内の溶剤を回収することができるが、洗浄装置からの排出を直接削減できない。回収量を増大させるためには排気ダクト内の溶剤濃度を増大させる必要があり、局所排気装置を適切に設計することが必要である。そのため、回収装置は間接的に室内と室外の排出分配比 $D(X)$ に関係する要素となるため、ここでは回帰分析を行わないこととした。

なお、本研究で取り扱う局所排気装置とは、一般に作業環境濃度を調整するための室内排気装置とは異なるものである。Figure 3 に示すように排気口は洗浄装置の開口部付近に設置されており、排気により洗浄装置内部が攪乱されることがある。様々な実験や調査によって、局所排気装置の風速の設定が強すぎる場合に洗浄剤の排出量が増大する

ことが分かっている (Ministry of the Environment 2007, 2008a; Kikuchi and Hirao 2008a, 2008b)。局排によるかく乱は洗浄装置内の溶剤までを排出させてしまいうるため、排出量を増大させるだけでなく作業環境の濃度も増大させる。かく乱によって排出された洗浄剤は局所排気装置や室内排気装置では効果的に回収できない。以上のような理由から、局所排気装置は局所的リスクと環境影響の両方に影響していると考えられる。

3.3 洗浄剤排出量と PDI_{worker} の関係

Table 2 及び Table 3 に示す結果から、局所排気装置の形状は他の回帰分析を行ったプロセス条件に比べて AE_{gas} と PDI_{worker} に対して強い相関を示していることが分かり、局所排気装置が洗浄プロセスにおける溶剤排出の支配的な要因になっていると考えられる。ただしこのとき、局所排気装置よりも相関は小さいとはいえ、他のプロセス条件についても分配比 $D(X)$ にある程度の影響があるといえる。

回帰分析によって得られた近似直線の適合性を比較するために、赤池情報量基準 (AIC) によってモデルの検証と比較を行った。AIC は Equation 6 及び Equation 7 によって計算される。この基準はプロセス工学においてもモデルの比較方法の一つとして適用されている (Arora et al. 2001; Conner et al. 2005) ものであり、値が小さいほどより適応可能性が高いモデルと判断できる指数である。なお、本研究では Microsoft® Excel 内部の分析ツール・回帰分析における残差平方和を最大尤度関数の計算に用いた。

$$AIC = -2 \times \log(\text{max of likelihood function}) + 2 \times k \quad (6)$$

$$\log(\text{maximum of likelihood function}) = n \log \left(\frac{\sum e_i^2}{n} \right) \quad (7)$$

ここで k は変数の数、 n は観測数、 $\sum e_i^2$ は残差平方和を示す。AIC の計算は金属部品の種類、金属加工工程との関係、処理量、局所排気装置形状に分類した重回帰分析の結果をもとにして行った。

Table 4 に AIC の計算結果をまとめる。AIC の基準値としてプロセス条件を考慮せずに回帰分析を行った場合の結果を Table 4 に追加してある。結果をみると、局所排気装

置と処理量は PDI_{worker} と AE_{gas} の関係を決定する要因として統計的にも明らかであることが分かった。一方、金属部品の形状と金属加工工程との関係は基準値よりも大きい AIC を示し、統計学的には相関が小さいという結果になった。ただし、AIC の差が小さいことと、プロセスから収集しているデータに不確実性があることから、この結果だけで分配係数 $D(X)$ との相関がないと確定することはできない。

$D(X)$ はプロセスや工場に固有の条件の複合関数と考えることができる。同時に、溶剤の管理濃度のような一般的な制約条件に合わせて現場の作業者はプロセス条件を変更し、制約条件を満たしたり、機能を実現したりしているため、これらの条件も $D(X)$ には間接的に影響していることになる。AIC は考慮すべきプロセス条件を判断するための一つの指標となりえるが、モデルを決定するにはプロセスの十分な理解が必要である。プロセスの特性化とともに法規制と産業区分との関係を整理していくことが局所的なリスクと環境影響の関係を理解するためには必要となる。

4. 結言

本研究では金属洗浄プロセスにまつわる作業者と周辺住民の健康リスクと地球規模の環境影響に起因する健康被害を評価した。局所リスクの指標である PDI で比較すると、金属洗浄プロセスに関する健康リスクは国内平均濃度から計算される健康リスクよりも大きいことが分かった。このとき、人間への総暴露量が作業者の数や人口密度によって大きく異なり、産業現場によって異なることが示された。PDI や局所空間における総暴露量及び洗浄剤排出量と単位製品製造量の関係を解析したが、現場固有の条件は複雑に環境負荷の支配因子となっているため、単純に解析することはできないことが分かった。そこでプロセス条件に基づき評価結果を詳細に解釈し、局所的なリスクが地球規模の環境影響とは異なる特徴を持っていることを明らかにしながら、現場の条件と評価結果の関係を解析した。現場固有の条件としては総排出量のうちの室内へ分配される排出量について支配因子として経験的に分かっている、洗浄剤の種類、金属部品の特徴、処理量、金属洗浄プロセスと加工プロセスの関係、回収装置を含めた局所排気装置の特徴を

Table 4. AIC analysis of the relativity analyses between AE_{gas} and PDI_{worker}

	Metal parts	Process phase	Throughputs	Local ventilation	Base
Σe^2	1.67E+03	1.68E+03	1.18E+03	1.14E+03	1.71E+03
n	31	31	31	31	31
k	3	2	4	3	1
AIC	1.30E+02	1.28E+02	1.21E+02	1.18E+02	1.26E+02

対象とした。回帰分析の結果より、これらのプロセス条件が洗浄剤排出量と局所空間の濃度に強い相関があることが分かり、経験的に分かっていたプロセスの挙動を定量的に解析できた。このとき、本研究で統計値が得られた回帰分析結果における傾きは、室内と室外の排出分配比であり、同時に溶剤の室内での滞留時間を意味している。赤池情報量基準に基づく回帰分析の有効性をみると、局所排気装置と洗浄処理量がこの室内と室外の排出分配比に有意な影響を与えているといえる。ただし、このような統計解析に加えプロセスの十分な理解が局所リスクと環境影響を管理するために必要となるプロセスモデルを構築する上で重要となる。

プロセス機能と溶剤排出がバランスよく管理されていると判断するための基準を決定することは難しいが、まずは洗浄剤に関するリスクの現状を解析して適切に理解すべきである。本研究では現場固有の条件と局所的なリスクが強い相関をもっていることを明らかにした。工場の解析とともに、法規制をはじめとしたその産業を取り巻く制約条件も加えて考慮することで、通常のLCIにおいて得られる溶剤排出量のような情報からこういった局所的な影響を実践的に解析していくことができるようになる。こういった現場固有の情報をいなければ、LCIで得られるデータを拡大解釈した現場固有の条件の推算やプロセスのモデリングが必要となる。

現場固有の機能や制約条件を解析して局所的なリスクと環境影響を関連付けしていくことによって、それらの要因を明らかにし、削減対策の代替案を生成するための支援情報となりうる。現場の条件と現場固有のリスク、LCAの評価結果の定性的もしくは定量的な関係は産業におけるプロセス設計などといった意思決定や法規制の決定などで利用できる重要な情報となりうる。たとえば、金属洗浄における局所排気装置のように現場固有の条件が局所リスクや環境影響にトレードオフを引き起こすことが分かっている(Kikuchi and Hirao 2008a)。このようなプロセスの特徴に基づくことで、効果的なプロセス代替案を検討できるようになる。さらに、現場固有の条件を考慮したモデルに基づく意思決定を実現するためには、同様な関係をさらに様々なケースで解析していくことがライフサイクル思考を実際の意思決定に組み込んでいくために重要な役割を担っている。

謝辞

本研究において日本産業洗浄協議会から現場プロセスの実データ収集と洗浄プロセスに関わる経験的な知識の収集に関し、協力を得た。日本学術振興会における基盤研究(B)(No. 18310052) 及び特別研究員奨励費 (No. 1811314) を

通して研究助成を得た。また本論文に関して日本生命財団から研究助成を得た。

(平成22年5月31日受付、平成22年8月30日採択)

参考文献

- Arora N., Biegler L. T. (2001): *Comput. Chem. Eng.*, 25, 1585-1599
- Conner J. S., Seborg D. E. (2005): *Ind. Eng. Chem. Res.*, 44, 2767-2775
- European Chlorinated Solvents Association (1996): *Comparison of metallic parts degreasing with trichloroethylene and aqueous solutions*, PO.377, 99pp.
- Haes H. U., Finnveden G., Goedkoop M., Hauschild M., Hertwich E., Hofstetter P., Jolliet O., Klöpffer W., Krewitt W., Lindeijer E., Miller-Wenk R., Olsen S. I., Pennington D., Potting J., Steen B. (2002): *Life-Cycle Impact Assessment: Striving towards Best Practice*, SETAC PRESS, Florida, U.S.A., 272pp.
- Hellweg S., Demou E., Scheringer M., Mckone T. E., Hungerbühler K. (2005): *Environ. Sci. Technol.*, 39, 7741-7748
- Hofstetter P. (1998): *Perspectives in Life Impact Cycle Assessment*, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, U.S.A., 504pp.
- Japan Environmental Management Association for Industry, *Advanced Industrial Science and Technology*, JEMAI-LCA Pro. ver. 2.1.1, Tokyo, JEMAI, (2005)
- Jolliet O., Dubreuil A., Gloria T., Hauschild M. (2005): *Int. J. LCA*, 10 (6), 447-448
- Jørgensen A., Le Bocq A., Nazarkina L., Hauschild M. (2008): *Int. J. LCA*, 13 (2), 96-103
- Kikuchi Y., Hirao M. (2008a): *Environ. Sci. Technol.* 42 (12), 4527-4533
- Kikuchi Y., Hirao M. (2008b): *J. LCA Jpn.*, 4 (2), 147-160
- Kolluru R. V., Bartell S. M., Pitblado R. M., Stricoff R. S. (1995): *Risk assessment and management handbook for environmental, health, and safety professionals*, McGraw-Hill Inc., New York, 688pp.
- Larsen H. F., Hauschild M. (2007): *Int. J. LCA*, 12 (1), 24-33
- Life Cycle Assessment Society of Japan, *JLCA-LCA database 2008 1st edition*, Tokyo, JLCA, (2008)
- McKone T. E., Kyle A. D., Jolliet O., Olsen S. I., Hauschild M. (2006): *Int. J. LCA*, 11 (2), 137-140
- Meijer A., Huijbregts M. A. J., Hertwich E., Reijnders L.

- (2006): Int. J. LCA, 11 Sp. Iss. 1, 64-71
- Meijer A., Huijbregts M. A. J., Reijnders L. (2005): Int. J. LCA, 10 (5), 309-316
- Meijer A., Huijbregts M. A. J., Reijnders L. (2005): Int. J. LCA, 10 (6), 383-392
- Meteorological Office, Annual report on meteorology in 2002, Tokyo, Japan Meteorological Business Support Center, (2003)
- Ministry of Economy, Trade and Industry, METI-LIS (Ministry of Economy, Trade and Industry – Low rise Industrial Source dispersion MODEL) program, version 2.03, Tokyo, JEMAI, (2006)
- Ministry of the Environment, Japan (2007): Manual for self-management on discharge control of volatile organic compounds (VOC) (original title in Japanese), Available at <<http://www.env.go.jp/air/osen/voc/manual1/index.html>>, (2008-6-10)
- Ministry of the Environment, Japan (2008a): Case examples of self-management on discharge control of volatile organic compounds (VOC) (original title in Japanese), Available at <http://www.jicc.org/infomation/voc_jirei.pdf>, (2008-7-9)
- Ministry of the Environment, Japan (2008b): Pollutant Release and Transfer Register. Available at <<http://www.env.go.jp/chemi/prtr/result/index.html>>, (2008-6-10)
- Ministry of Health, Labor and Welfare, Japan (2004): Textbook for chief worker on organic solvent (original title in Japanese), Shin-Nippon Printing, Tokyo, 473pp.
- Molander S., Lidholm P., Schowanek D., Recasens M., Palmer P. F., Christensen F. M., Guinee J. B., Hauschild M., Jolliet O., Carlson R., Pennington D. W., Bachmann T. M. (2004): Int. J. LCA, 9 (5), 282-288
- New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO of Japan) (2003): Research on establishment of EVABAT systems for reduction in chemical risks associated with energy consumption (original title in Japanese), NEDO report 100000553, 86pp.
- Nakanishi J., Inoue K. (2005): The series of in-depth risk assessment of substances 4: Dichloromethane (original title in Japanese), Maruzen, Tokyo, 259pp.
- Nakanishi J., Kajiwarra H., Kawasaki H. (2008): The series of in-depth risk assessment of substances 22: Trichloroethylene (original title in Japanese), Maruzen, Tokyo, 290pp.
- Research Center for Life Cycle Assessment, LIME (Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling) 2nd version (LIME2) (original title in Japanese), Advanced Industrial Science and Technology, online available at <<http://unit.aist.go.jp/lca-center/ci/activity/project/lime2/index.html>>, (2008 -6-10)
- US-EPA (Environmental Protection Agency, the USA), Terms of Environment: Glossary, Abbreviations and Acronyms. US-EPA, Available at <<http://www.epa.gov/OCEPAt/terms/mterms.html>>, (2010-9-22)
- von Grote J., Hurlimann C., Scheringer M., Hungerbühler K. (2003): J. Exposure Anal. Environ. Epidemiol., 13, 325-340

Appendix Process investigation results (Case 1 – Case 7)

		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
Process phase of cleaning		Pretreatment (plating)	Pretreatment (plating)	Pretreatment (plating)	Pretreatment (plating)	Pretreatment (plating)	Pretreatment (plating)	Pretreatment (plating)
Cleaning requirement		Precise	Precise	Precise	Precise	Precise	Precise	Precise
Throughput [kg-month ⁻¹]		1.97E+04	1.48E+04	1.18E+04	5.88E+03	5.88E+03	6.00E+03	6.00E+03
Cleansing agent		TCE	TCE	TCE	TCE	TCE	TCE	TCE
Metal parts	Material	1,2,3,4,5,6,7	1,2,3,4,5,6,7	1,2,3,4,5,6,7,8	1,2,3,4,5,6,7,8	1,2,3,4,5,6,7,8	1,3,4,5,9,10	1,3,4,5,9,10
	Shape	d	d	a,b,c,d	a,b,c,d	a,b,c,d	a,b,c,d,e,h	a,b,c,d,e,h
	Operation	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual	Manual
Process	Local ventilation	Enclosed-hood	Enclosed-hood	Exterior	Enclosed-exterior	Enclosed-exterior	Exterior	Exterior
	Recovery	Null	Null	Installed	Installed	Installed	Null	Null
Input [kg·day ⁻¹]	DCM	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	TCE	9.24E+01	7.41E+01	6.05E+01	1.67E+01	1.31E+01	2.66E+01	1.52E+01
Utility [MJ·day ⁻¹]	Electricity [kWh·day ⁻¹]	8.37E+01	6.28E+01	1.52E+02	5.18E+01	4.35E+01	1.25E+02	1.25E+02
	Kerosene	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (city gas)	9.36E+02	7.12E+02	1.03E+03	3.94E+02	3.62E+02	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (LPG)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (Kerosene)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Workplace concentration [mg·m ⁻³]	Maximum	1.09E+01	1.09E+01	9.83E+01	1.09E+02	5.46E+01	5.32E+01	6.55E+01
	Average	8.74E+00	8.74E+00	4.75E+01	4.75E+01	2.57E+01	2.69E+01	3.04E+01

*1 1: Cu, 2: Al, 3: Fe, 4: SUS, 5: Brass, 6: Bronze, 7: Zn, 8: Plastic, 10: Au, 11: Ag, 12: Steel, 13: Steel with tin-plating

*2 a: Stick, b: Disc, c: Column, d: Plate, e: Ball, f: Pipe, g: Hoop, h: Blind hole, i: Large, j: Concavity and convexity, k: Pod

Appendix (Cnt.) Process investigation results (Case 8 – Case 14)

		Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12	Case 13	Case 14
Process phase of cleaning		Pre/post-treatment (heat treatment)	Pre/post-treatment (heat treatment)	Pretreatment (corrosion control)	Pretreatment (corrosion control)	Post-treatment (cutting)	Post-treatment (cutting)	Post-treatment (cutting)
Cleaning requirement		Precise	Precise	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Throughput [kg-month ⁻¹]		4.50E+03	1.31E+05	4.88E+05	1.12E+05	9.91E+04	9.68E+04	9.89E+04
Cleansing agent		TCE	TCE	DCM	DCM	TCE	TCE	TCE
Metal parts	Material	4,5	11	3,7,11	3,7,11	1	1	1
	Shape	a,b,c,d,e,h	a,b,c,d,e,h,i	a,b,c,d,e,h	A,b,c,d,e,h	fi	fi	fi
	Operation	Hoist	Hoist	Automatic	Hoist	Automatic	Automatic	Automatic
Process	Local ventilation	Enclosed-exterior	Enclosed-exterior	Enclosed-hood	Enclosed-exterior	Enclosed-hood	Enclosed-hood	Enclosed-hood
	Recovery	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Installed
Input [kg·day ⁻¹]	DCM	0.00E+00	0.00E+00	1.73E+02	3.96E+01	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	TCE	2.08E+01	9.67E+01	0.00E+00	0.00E+00	5.43E+02	4.80E+02	3.12E+02
Utility [MJ·day ⁻¹]	Electricity [kWh·day ⁻¹]	1.71E+02	4.83E+02	5.57E+02	1.33E+02	1.61E+03	1.73E+03	1.73E+03
	Kerosene	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (city gas)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.74E+02	4.74E+02
	Steam (LPG)	0.00E+00	0.00E+00	1.71E+04	1.51E+04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (Kerosene)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Workplace concentration [mg·m ⁻³]	Maximum	4.37E+00	1.37E+01	9.13E+01	1.16E+02	3.93E+02	4.24E+02	1.12E+02
	Average	2.73E+00	8.19E+00	2.82E+01	2.82E+01	9.83E+01	1.09E+02	4.53E+01

*1 1: Cu, 2: Al, 3: Fe, 4: SUS, 5: Brass, 6: Bronze, 7: Zn, 8: Plastic, 10: Au, 11: Ag, 12: Steel, 13: Steel with tin-plating

*2 a: Stick, b: Disc, c: Column, d: Plate, e: Ball, f: Pipe, g: Hoop, h: Blind hole, i: Large, j: Concavity and convexity, k: Pod

Appendix (Cnt.) Process investigation results (Case 15 – Case 21)

		Case 15	Case 16	Case 17	Case 18	Case 19	Case 20	Case 21
Process phase of cleaning		Post-treatment (cutting)	Post-treatment (cutting)	Post-treatment (cutting)	Pretreatment (plating)	Post-treatment (pressing)	Pretreatment (coating)	Pretreatment (coating)
Cleaning requirement		Normal	Normal	Normal	Precise	Normal	Precise	Precise
Throughput [kg-month ⁻¹]		1.12E+05	1.15E+05	1.32E+05	8.00E+04	3.00E+04	7.65E+03	6.60E+03
Cleansing agent		TCE	TCE	TCE	TCE	TCE	DCM	DCM
Metal parts	Material	1	1	1	2,3,4	12	3,11	3,11
	Shape	f,i	f,i	f,i	a,b,c,d,e,h,i	c,k	a,c,h,j	a,c,h,j
	Operation	Automatic	Automatic	Automatic	Hoist	Automatic	Hoist	Automatic
Process	Local ventilation	Enclosed-hood	Enclosed-hood	Enclosed-hood	Exterior	Exterior	Exterior	Exterior
	Recovery	Installed	Installed	Installed	Null	Null	Null	Null
Input [kg·day ⁻¹]	DCM	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.13E+01	1.13E+01
	TCE	2.83E+02	1.64E+02	1.51E+02	7.31E+01	3.19E+01	0.00E+00	0.00E+00
Utility [MJ·day ⁻¹]	Electricity [kWh·day ⁻¹]	1.73E+03	4.38E+02	4.38E+02	1.73E+02	5.89E+02	2.30E+02	4.61E+02
	Kerosene	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (city gas)	4.74E+02	1.70E+04	1.70E+04	3.50E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (LPG)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (Kerosene)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Maximum	3.32E+02	2.49E+02	3.78E+02	1.39E+02	1.69E+02	1.91E+02	4.86E+01
Workplace concentration [mg·m ⁻³]	Average	1.11E+02	6.93E+01	9.01E+01	7.15E+01	4.68E+01	1.20E+02	4.51E+00

*1 1: Cu, 2: Al, 3: Fe, 4: SUS, 5: Brass, 6: Bronze, 7: Zn, 8: Plastic, 10: Au, 11: Ag, 12: Steel, 13: Steel with tin-plating

*2 a: Stick, b: Disc, c: Column, d: Plate, e: Ball, f: Pipe, g: Hoop, h: Blind hole, i: Large, j: Concavity and convexity, k: Pod

Appendix (Cnt.) Process investigation results (Case 22 – Case 28)

		Case 22	Case 23	Case 24	Case 25	Case 26	Case 27	Case 28
Process phase of cleaning		Pretreatment (coating)	Post-treatment (cutting)	Post-treatment (cutting)	Pre/post-treatment (heat treatment)	Pre/post-treatment (heat treatment)	Pre/post-treatment (heat treatment)	Pre/post-treatment (heat treatment)
Cleaning requirement		Precise	Precise	Normal	Precise	Precise	Precise	Precise
Throughput [kg-month ⁻¹]		8.16E+03	9.99E+03	1.16E+04	9.36E+03	9.90E+03	1.73E+05	2.27E+04
Cleansing agent		TCE	TCE	TCE	TCE	TCE	TCE	TCE
Metal parts	Material	3,11	4	4	3,7,11	3,7,11	3,7,11	3,7,11
	Shape	a,c,h,j	b,k	b,k	a,b,c,d,e,h	a,b,c,d,e,h	a,b,c,d,e,h	a,b,c,d,e,h
	Operation	Hoist	Automatic	Automatic	Hoist	Automatic	Automatic	Hoist
Process	Local ventilation	Exterior	Enclosed-hood	Enclosed-hood	Exterior	Enclosed-hood	Enclosed-hood	Exterior
	Recovery	Null	Installed	Installed	Null	Null	Null	Null
Input [kg·day ⁻¹]	DCM	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	TCE	1.01E+01	2.70E+01	2.64E+01	7.23E+01	2.41E+01	1.76E+02	4.82E+01
Utility [MJ·day ⁻¹]	Electricity [kWh·day ⁻¹]	2.84E+01	4.48E+01	4.48E+01	9.75E+01	4.40E+01	6.36E+02	2.10E+02
	Kerosene	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (city gas)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (LPG)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (Kerosene)	0.00E+00	7.10E+02	1.03E+03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Maximum	7.10E+00	4.37E+01	4.23E+01	1.43E+02	1.43E+02	1.52E+02	1.52E+02
Workplace concentration [mg·m ⁻³]	Average	5.46E+00	3.70E+01	3.79E+01	4.10E+01	4.10E+01	5.30E+01	5.30E+01

*1 1: Cu, 2: Al, 3: Fe, 4: SUS, 5: Brass, 6: Bronze, 7: Zn, 8: Plastic, 10: Au, 11: Ag, 12: Steel, 13: Steel with tin-plating

*2 a: Stick, b: Disc, c: Column, d: Plate, e: Ball, f: Pipe, g: Hoop, h: Blind hole, i: Large, j: Concavity and convexity, k: Pod

Appendix (Cnt.) Process investigation results (Case 29 – Case 31)

		Case 29	Case 30	Case 31
Process phase of cleaning		Pretreatment (plating)	Pretreatment (plating)	Post-treatment (cutting)
Cleaning requirement		Precise	Precise	Normal
Throughput [kg·month ⁻¹]		5.76E+03	5.76E+03	3.30E+04
Cleansing agent		TCE	TCE	TCE
Metal parts	Material	1,2,3,4,5	1,2,3,4,5	4
	Shape	a,b,c,d,f,h	a,b,c,d,f,h	b,k
	Operation	Manual	Manual	Automatic
Process	Local ventilation	Exterior	Exterior	Enclosed-hood
	Recovery	Null	Null	Installed
Input	DCM	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
[kg·day ⁻¹]	TCE	2.55E+01	1.03E+01	2.01E+01
Utility	Electricity	3.20E+01	3.20E+01	7.55E+01
[MJ·day ⁻¹]	[kWh·day ⁻¹]			
	Kerosene	0.00E+00	0.00E+00	1.86E+03
	Steam (city gas)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (LPG)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	Steam (Kerosene)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Workplace concentration	Maximum	1.47E+02	2.16E+02	4.73E+01
	Average	1.20E+02	1.62E+02	3.26E+01
	[mg·m ⁻³]			

*1 1: Cu, 2: Al, 3: Fe, 4: SUS, 5: Brass, 6: Bronze, 7: Zn, 8: Plastic, 10: Au, 11: Ag, 12: Steel, 13: Steel with tin-plating

*2 a: Stick, b: Disc, c: Column, d: Plate, e: Ball, f: Pipe, g: Hoop, h: Blind hole, i: Large, j: Concavity and convexity, k: Pod