

経済産業省受託プロジェクト
「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
—溶剤・溶媒—
要約版

2014年5月

独立行政法人 産業技術総合研究所
安全科学研究部門

1. はじめに

溶剤・溶媒とは、物質を溶解するために用いる液体物質の総称で、工業用としては、ほぼ「有機溶剤」を指す。具体的な物質としては、トルエン、キシレン、アセトン、アルコール等の揮発性有機化合物 (VOC) である。VOC については、PRTR 制度、有害大気汚染物質の規制・自主管理および VOC 規制等の規制・制度により、排出削減と代替が進んでいる。特に近年は、VOC 規制 (2000 年～2010 年の間に総 VOC を 3 割削減) が、溶剤の削減・代替の動機付けになっているが、VOC 規制は、実は排出物質である VOC 自体の影響ではなく、VOC の二次生成によるオゾン等のリスクが規制の根拠となっている。近年の VOC 排出量の変化の推移を用途別にみると、塗料、印刷インキ、接着剤等が大部分を占めている。以上の背景から、溶剤・溶媒リスクトレードオフ評価書の基本方針を以下のように設定した。

一般大気環境のリスク評価では、ADMER-PRO によって算出されるリスク削減効果の原単位を用い、VOC の二次生成によるオゾン等のリスク (ヒト健康とコメ収量への影響) を主な対象として評価を行う。事例解析では、自動車の塗装工程を対象として日本全体のリスク変化を評価する。室内環境のリスク評価では、開発した室内暴露評価モデル (iAIR) を用いて、塗料、印刷インキ、接着剤等の用途での物質代替による日本全体のヒト健康リスクの変化を推定する。

2. 一般大気環境のリスク評価

2.1 VOC 削減による大気環境リスク削減原単位

2.1.1 リスク削減原単位の考え方

一般に、VOC を削減した場合の化学物質によるリスクの削減効果を推定するためには、種々物質の濃度分布がどのように変化するかを計算することが必要である。これは、本事業で開発した ADMER-PRO を用いることにより比較的容易に推定できるようになったが、なお、一部の事業者にとってはかなりの負担になると考えられる。

リスク削減原単位とは単位 VOC 削減量あたりの化学物質によるリスクの削減効果を示す指標である。この指標をひとたび推定し、その値を提示しておけば、事業者らは所与の VOC 排出量を削減した場合に得られるリスク削減効果を、負担の多い濃度分布計算を行うことなく推定できることになり大変便利である。そこで、本事業では、事業者らがリスク削減効果を推定する方法として、大気モデル ADMER-PRO の直接利用に加え、リスク削減原単位という指標を用いて推定するという方法も提供するために、大気モデルを用いてリスク削減原単位を推定し、提示する。

2.1.2 リスク削減原単位の対象物質と有害影響

対象物質はオゾン、クロロエチレン、ジクロロメタン、トリクロロエチレン、ベンゼン、1,2-ジクロロエタン、アクリロニトリル、トルエン、キシレンの計 9 物質とした。

対象とするヒト健康への有害影響については、オゾンに対しては最も深刻な有害影響と考えられる早期死亡を取り上げた。クロロエチレン、ジクロロメタン、トリクロロエチレン、ベンゼン、1,2-ジクロロエタン、アクリロニトリルについては“がん”、トルエン、キシレンについては“自覚症状”を取り上げた。また、オゾンについては植物への有害影響のうち、コメの減収影響についても考慮することにした。

2.1.3 リスク削減原単位の種類と算出方法

「2.1.1 リスク削減原単位の考え方」で示したように、VOCのリスク削減原単位を推定するためには、有害影響が異なる種々の物質によるリスクを考慮する必要がある。リスクを定量する際に最も直感的に理解しやすい指標は、それぞれの有害影響が発症する件数（または発症確率）であろう。しかし、それぞれの有害影響は重篤度が異なるので、これらの指標を足し合わせることは意味がない。そこで、本事業では、各有害影響の発症数に加え、統一リスク指標も算出し、リスクの定量指標として用いることにした。具体的には以下の6つのリスク指標を用いてリスク削減原単位を計算した(括弧内には対象とする化学物質を記した)。1)～4)が個別のヒト有害影響の発症数および農作物(コメ)の減収量、5)がヒトへの有害影響の統一指標、6)が農作物への影響を含めたすべての影響のリスクの統一指標である。

- 1)年間早期死亡発症数(オゾン)
- 2)年間がん発症数(有害大気6物質(クロロエチレン、ジクロロメタン、トリクロロエチレン、ベンゼン、1,2-ジクロロエタン、アクリロニトリル))
- 3)年間自覚症状(健康状態レベルC¹)発症数(トルエン、キシレン)
- 4)年間コメ収量の減少量(オゾン)
- 5)年間損失QALY(Quality Adjusted Life Year)(全9物質)
- 6)ヒト健康影響(QALY)とコメ収量への影響の金銭換算額(全9物質)

各リスク指標の原単位は、固定蒸発発生源の全業種および3つの個別業種(輸送用機械器具製造業、印刷・同関連業、建築工事業)について(1)式で算出した。

$$\text{リスク削減原単位} = \Delta \text{リスク指標} / \Delta \text{VOC 排出量} \quad \text{式(1)}$$

ここで、 ΔVOC 排出量は対象業種の対象地方における年間VOC排出量のVOC規制前後における変化量(規制前-規制後)であり、2000年度、2008年度の実績値をそれぞれ規制前、規制後の値として使用した。 Δ リスク指標は、上述した1)～6)の各リスク指標のVOC規制前後における変化量であり、1)～4)のリスク指標については各物質に対して以下のように推定した。なお、5)、6)の統一リスク指標の推定方法については後で説明する。

1)の年間早期死亡者数について：

$$\Delta \text{リスク指標} = \text{単位濃度あたり死亡率増分} (1/\text{ppb}) \times \sum (\Delta \text{濃度 } i (\text{ppb}) \times \text{年間ベースライン死亡者数} (/ \text{yr})) \quad \text{式(2)}$$

2)の年間がん発症数、3)の年間自覚症状発症数について：

$$\Delta \text{リスク指標} = \text{年あたり発症ユニットリスク} (1/\text{ppb}/\text{yr}) \times \sum (\Delta \text{濃度 } i (\text{ppb}) \times \text{人口 } i) \quad \text{式(3)}$$

¹ “詳細リスク評価書「キシレン」(牧野&中西、2009)では健康状態A(「手足の筋力が弱くなった」+「耳が聞こえにくい」+「物事に集中できない」)、健康状態B(健康状態A+「臭いがわかりにくい」+「喉の調子がおかしい」)、健康状態C(健康状態B+「言葉がしゃべりにくい」)という3つの健康状態に分けて定量的リスク評価を行っている。健康状態Cはそれらの中で最も悪影響の種類が多い健康状態である。

4)の年間コメ減収量（オゾン）について：

$$\Delta \text{リスク指標 (kg/yr)} = \text{単位濃度あたりの減収率 (1/ppb)} \\ \times \Sigma (\Delta \text{濃度 i (ppb)} \times \text{コメ年間収量 (kg/yr) i}) \quad \text{式(4)}$$

ここで、 Δ 濃度 i は 2000 年度の排出量を入力した場合と、該当業種の VOC 排出量だけを 2008 年度のものに変更させた排出量を入力した場合との間の ADMER-PRO により推定される濃度の差である。 Σ は各地方についての合計を意味する。VOCs の個別成分排出量は、VOC 排出インベントリ（環境省、2010）等既存の文献値に基づき、排出カテゴリー（固定蒸発発生源の各業種、移動発生源、家庭等）ごとに共通の成分組成を仮定し、両年度とも同一として推計に用いた。各メッシュの人口、各メッシュの年間ベースライン死亡者数については中西ら（2009）とほぼ同様の方法で推定した。各メッシュのコメ年間収量は、都道府県レベルでコメ年間収量と評価総地積「田」の関係を原点を通る直線で近似した回帰式（コメ年間収量（kg/yr） $=0.3527 \times$ 田面積（ m^2 ））により、各メッシュの「田」面積より推定した。

計算に使用したオゾンに対する単位濃度あたり死亡率増分（1/ppb）、その他の各物質に対する有害影響年間発症ユニットリスク（1/ppb/yr）、およびオゾンに対する単位濃度あたりの減収率（1/ppb）についての情報を表 1 にまとめた。

表1 計算に使用したユニットリスク等に関する情報

物質名	考慮した影響の種類	単位濃度あたりの死亡率増分 (1/ppb)	1年あたり発症ユニットリスク (1/ppb/yr) *1	単位濃度あたりの減収率 (1/ppb) *2	出典
オゾン	早期死亡	2.0E-04			詳細リスク評価書「オゾン」(中西ら、2009)
	コメ減収			3.4E-03	詳細リスク評価書「オゾン」(中西ら、2009)
クロロエチレン	がん		3.2E-07		IRISデータベース(US EPA, 1995)
ジクロロメタン	がん		5.0E-10		IRISデータベース(US EPA, 1995)
トリクロロエチレン	がん		3.2E-07		IRISデータベース(US EPA, 1995)
ベンゼン	がん		3.6E-07		IRISデータベース(US EPA, 1995)
1,2-ジクロロエタン	がん		1.5E-06		IRISデータベース(US EPA, 1995)
アクリロニトリル	がん		2.1E-06		IRISデータベース(US EPA, 1995)
トルエン	健康状態C ^{*3}		2.2E-07		詳細リスク評価書「キシレン」(牧野&中西、2009)
キシレン	健康状態C ^{*3}		4.2E-07		詳細リスク評価書「キシレン」(牧野&中西、2009)

*1: IRIS データベースでは生涯発がんユニットリスクが (1/μg/m³) の単位で記されている。ここで示したがん発症のユニットリスク値は、これを生涯寿命 (70 年と仮定) で割り、さらに、濃度単位の変換 (20°C、1 atm の条件で) を行ったあとの値である。また、詳細リスク評価書「キシレン」では、1 年あたりの発症ユニットリスクが (1/mg/m³/yr) の単位で記されている。ここで示した健康状態 C 発症のユニットリスク値は、濃度単位の変換 (20°C、1 atm の条件で) を行ったあとの値である。

*2: この指標は、濃度として 10-18 時の生育期間平均値を用いて導出されたものであるが、10-18 時の生育期間平均値と 10-18 時の年間平均値は多くの常時監視測定局でほぼ同じ値であったため、本評価書では、Δリスク指標を導出するために、この指標に掛け合わせる Δ濃度の濃度は、本文で示したとおり 10-18 時の年間平均値とする。

*3: 健康状態 C については先述の脚注参照。

5) の年間損失 QALY についての各物質に対する Δリスク指標は、基本的に、式 (2)、式 (3) で計算される各物質に対する有害影響年間発症数の Δリスク指標に、各々の有害影響 1 件発症の損失 QALY を乗じることにより推定できる。ここで、1 件発症の損失 QALY は、早期死亡は 1 年 (EEA: European Environment Agency, 2011 より)、がん発症は 10 年 (中西ら、2009 より) と仮定した。なお、トルエン、キシレンの有害影響による損失 QALY については、詳細リスク評価書「キシレン」における健康状態 C 以外の健康状態 (健康状態 A、B、および食欲不振) 発症も考慮して算出した²。6) のヒトとコメ収量への影響の金銭換算額の Δリスク指標

²各健康状態の 1 年あたり発症ユニットリスク、および、それぞれの健康状態が 1 件発症する際の損失 QALY は、詳細リスク評価書「キシレン」(牧野&中西、2009) より導出した。なお、キシレン暴露による食欲不振の 1 年あたり発症ユニットリスクは、その、濃度・反応関係がロジスティックと仮定されている (線形と仮定されていない) ため本来的には導出不能であるが、低用量部分は線形近似できると考え、その近似式より導出した。また、トルエン暴露による食欲不振の 1 年あたり発症ユニットリスクは、キシレン暴露によるその 0.59 倍 (=1/1.7 倍) であると仮定した。ここで 1.7 (倍) という数値は、詳細リスク評価書「キシレン」において、トルエンとキシレンの 8 種の共通する自覚症状 (食欲不振を含む) に対して発症率の比を検討して導出された、キシレン暴露による発症率のトルエン暴露による発症率に対する比である。

は以下のように算出した。ヒト健康影響については5)の年間損失 QALY のΔリスク指標に、損失余命1年の金銭価値 (VOLY: Value of Life Year) を乗じることにより得た。VOLYはEEAの報告書 (EEA、2011) を参考にして1000万円/年と仮定した。コメ収量への影響については4)の年間コメ減収量のΔリスク指標に、1 kg あたりのコメの価格 (240 円/kg、中西ら、2009) を乗じることにより得た。

2.1.4 リスク削減原単位の算出結果

表2に各種リスク削減原単位の算出結果を示す。表2では、リスク削減原単位の一例として次節の事例解析で対象とする輸送用機械具製造業についての値を示したが、全業種を対象としたリスク削減原単位についても概要は同じであることは確認している。表2によると、左の4種類の発症数の原単位を見ても、それぞれの有害影響の種類が異なるため、各物質のリスク低減効果への寄与率や、各物質のリスク低減効果の総和は不明である。しかし、右のふたつの統一指標 (QALY およびヒトとコメ収量への影響の金銭換算額) を見ることによりそれらは一目瞭然となる。損失 QALY の原単位からはヒト健康リスク低減効果はオゾン濃度の減少を通じた効果が最も大きく、VOC 規制の目的 (VOC の成分濃度自体でなくオゾン等による光化学大気汚染を低減すること) は合理的であったことを示唆している。しかし、オゾン以外の物質の寄与も35%程度と相当量あるため、VOC の排出削減対策を評価するにあたっては、今回提示したオゾンと VOC 成分の両方を考慮した排出リスク削減原単位は、利用価値が高いといえる。次に、ヒトとコメ収量への影響の金銭換算額の原単位を見ると、コメ収量への影響 (7,367 万円- 2.947 年×1000 万円/年 =4,420 万円) はヒトへの影響 (2.947 年×1,000 万円/年=2,947 万円) に比べて大きいこと、コメ収量への影響も考慮するとオゾンの寄与率 (6,368 / 7,367) は8割を超えること、などがわかる。

表2 各種リスク削減原単位の算出結果 (輸送用機械器具製造業、全国)

各リスク指標の原単位 (輸送用機械器具製造業、全国)	早期死亡発症数 (件/万トン)	がん発症数 (件/万トン)	自覚症状 (健康状態 C) 発症数 (件/万トン)	コメ減収量 (トン/万トン)	損失 QALYs (年/万トン)	ヒトとコメ収量への影響の金銭換算額 (万円/万トン)
オゾン	1.9			184	1.949	6,368
クロロエチレン		0.0000			0.000	0
ジクロロメタン		0.0001			0.001	1
トリクロロエチレン		0.0217			0.217	217
ベンゼン		0.0000			0.000	0
1,2-ジクロロエタン		0.0000			0.000	0
アクリロニトリル		0.0000			0.000	0
トルエン			0.17		0.178	178
キシレン			0.58		0.602	602
総計	1.9	0.0218	0.75		2.947	7,367

注：トルエン、キシレンの損失 QALY は健康状態 C 以外の自覚症状も考慮して導出している点に注意されたい。

リスク削減原単位について各地方間（関東、近畿、東海）の比較を行ったところ、リスク削減原単位は地方により数倍程度の差があり最も大きいのは関東地方であることがわかった。このことから、VOC 排出量を同量削減しても、削減する地方により得られるリスク低減効果は大きく異なることがわかる。また、リスク削減原単位について、各業種間の比較を行ったところ、原単位は業種によりそれほど大きく変化しないことがわかった。

2.2 事例解析 —自動車製造業における塗装工程を例に—

VOC の固定発生源において排出量が最も大きい排出源である塗料をトレードオフ評価の解析対象とした。工場内で自動車や金属製品等への塗装を行う工業塗装分野において溶剤系塗料から水性塗料への代替を行う場合は、乾燥や温湿度調節に要する使用エネルギーの増大、設備（排水処理設備および塗装設備）の改良費用等の負の側面が存在することがわかった。

これらのことから、自動車製造業における VOC 削減対策を解析対象とした。VOC 削減リスクの定量には前節で述べた「リスク削減原単位」を用いた。リスク評価における対象影響、対象年度、対象地域、対象物質等は前節で述べたとおりである。

2.2.1 VOC 排出削減量と削減対策別寄与

表 3 に自動車製造業における塗料種類別の出荷量と塗料使用にともなう VOC 排出量の経年変化を推定した結果を示す。ここで塗料の種類は単純化のため「溶剤系」、「水系」、「無溶剤系」の 3 種類にグループ化した。VOC 排出量は 2000 年度から 2008 年度にかけておよそ半減しているが、溶剤系塗料から水系塗料への代替は出荷量比率で 7%程度と小さく、溶剤系塗料の出荷減少量よりも、溶剤系塗料からの VOC 排出量の減少量の方が 2 倍以上大きいため、VOC 排出量の減少には、溶剤系塗料中の溶剤含有率の削減（希釈に用いる溶剤使用量減少分も含む）が大きく寄与していることが示唆された。

表 3 自動車製造業に対する塗料出荷量と塗料使用による VOC 排出量
(2000 年度、2008 年度、t/年)

塗料の系	塗料出荷量				VOC 排出量		
	2000 年度		2008 年度		2000 年度	2008 年度	変化量
溶剤系 ^{*1)}	123,204	57.2	104,631	50.1%	99,881	51,517	48,364
水系	91,538	42.5%	103,107	49.4%	7,538	2,259	5,280
無溶剤系	812	0.4%	1,181	0.6%	0	0	-
合計	215,554	100%	208,919	100%	107,420	53,776	53,643
VOC 排出インベントリ ^{*2)}	215,553		208,920		107,419	54,412	53,007

[出典 環境省(2010)、日塗工(2010)、日塗工(2003)より算出]

*1) ラッカー系を含む

*2) 本研究での推定値と VOC 排出インベントリ値に差異があるが入手できる変数の有効数字等の違いによるものである。以後 VOC 排出量の合計値は VOC 排出インベントリのものに合わせて解析を行った。

そこで、解析対象の VOC 排出削減対策として①塗料中溶剤含有率削減、②溶剤系塗料から水系塗料への代替（塗料代替）、③塗着効率向上、④回収装置導入を取り上げた。それぞれの排出削減対策の VOC 排出削減量への寄与率推定値を表 4 に示す。寄与率推定にあたって、各

削減対策は単独に行われ、他の対策が行われなかったと仮定した。排出削減への寄与率は、最も大きい①塗料中溶剤含有率削減が73%、続いて②塗料代替(19%)、③塗着効率向上(6%)、④回収装置導入対策(2%)の順と推定された。

表4 排出削減対策種別のVOC排出削減量への寄与推定結果

VOC 排出削減対策	VOC 排出削減量への寄与量(t/年)	寄与率
①塗料中溶剤含有率削減	38,914	73%
②溶剤系塗料から水系塗料への代替	9,887	19%
③塗着効率向上	2,935	6%
④回収装置導入	1,271	2%
削減合計量	53,007	100%

2.2.2 リスク変化量の推定と費用効果分析

各排出削減対策種毎のVOC排出量推定値に対し、「2.1 VOC削減による大気環境リスク削減原単位」で示したリスク削減原単位を乗じることによりリスク削減量(ヒト健康、コメ収量、合計)を算出した上で、QALY1年獲得費用を推定し表5に示した。ここで、コメ減収リスク減少の金銭換算値は対策費用から差し引くことで費用減少分として取り扱った。

$$\text{QALY1年獲得費用} = (\text{対策費用増分} - \text{コメ収量増分の金銭換算値}) / \text{獲得QALY} \quad (5)$$

2000年度から2008年度にかけてのVOC排出削減に対する全獲得QALYは15.4年であり、獲得QALYの金銭換算値は1億5,400万円、コメ収量増加の金銭換算値は2億3,300万円と推定された。リスク減少量(獲得QALY)を排出削減対策別に大きい方から並べると、①塗料中溶剤含有率削減、②塗料代替、③塗着効率向上、④回収装置導入の順と推定された。

対策別のQALY1年獲得費用は高い方から、②塗料代替、④回収装置導入、①塗料中溶剤含有率削減、③塗着効率向上の順であり、塗料代替は最も効率が悪い排出削減対策であることが示唆された。また、③塗着効率向上と④回収装置導入はリスク削減に対する効率は比較的よいものの、全体のVOC排出削減量やリスク削減量に対する寄与は小さいことがわかる。全対策の合計としてQALY1年獲得費用は9億円/年と推定された。

表5 VOC 排出削減対策別のヒト健康リスク変化量と費用効果分析結果
(自動車製造業、全国、2005 年度から 2008 年度にかけての変化)

排出削減対策	VOC 排出削減量(t/年)	獲得 QALY(年/年)	コメ収量増分の金銭換算値(万円/年)	対策費用増分(億円/年)	QALY 1 年の獲得費用(億円)
①塗料中溶剤含有率削減	38,914	11.3	17,200	89	8
②塗料代替(溶剤系から水系へ)	9,887	2.9	4,370	71	25
③塗着効率向上	2,935	0.9	1,297	-26	-a)
④排ガス処理装置導入	1,271	0.4	562	4	10
全対策計	53,007	15.4	23,429	221	9

a) 対策費用がマイナスとなるため、単位リスク変化量あたりの対策費用は算出していない

2.2.3 水系塗料への代替によるリスク削減とエネルギー使用量変化の比較

単位塗装面積(m²)あたりの消費電力量増分を 0.21 kWh/m²と仮定すると、溶剤系塗料から水系塗料への代替による全国での電力使用量の増加は 1,600 万 kWh/年、CO₂ 排出量増加は 7,200 t-CO₂/年と推定された。CO₂ 排出によるリスクの金銭換算値を、EEA(2011)を参考に 3,400 円/CO₂-トンと仮定した場合、溶剤系塗料から水系塗料への代替による電力エネルギー由来の CO₂ 排出量増加によるリスク増分は、2,400 万円と推定された。

溶剤系塗料から水系塗料への代替対策による CO₂ 排出量増加によるリスク増分の 2,400 万円/年は、ヒト健康リスク減少分(2900 万円/年、表 5)と同程度であり、コメ収量の減少分(4,400 万円/年、表 5)の半分程度であることがわかった。ただし、推定に用いた仮定やパラメータの持つ不確実性が推定結果に及ぼす影響について考察することは必要である。

3. 室内環境の評価

3.1 はじめに

改正大気汚染防止法によって消費者製品の原料転換や工程の変更が行われ、室内へ持ち込まれる VOC が減少すると考えられる。本節では、溶剤・溶媒のうち室内で使用される VOC 量を推定し、本研究プロジェクトで開発された室内暴露評価ツール(iAIR)を用いて、2000 年～2008 年までにおける物質代替による室内の VOC 濃度への影響について評価を行った。

3.2 評価対象

3.2.1 対象用途群と対象製品

対象用途群は室内 VOC 持ち込み量の多い、印刷インキ、塗料、接着剤とした。対象製品は

印刷インキについては新聞、チラシ、雑誌、書籍、塗料については家庭用塗料、接着剤については家庭用接着剤とした。

3.2.2 対象化学物質

情報収集の結果、印刷インキではトルエンから酢酸エチルやイソプロパノールへの代替が想定され、さらにグラビア印刷から平板印刷への変更も想定された。塗料では、トルエンやキシレンから石油系炭化水素への代替、および溶剤系塗料から水系塗料への代替が想定された。接着剤では、トルエンからキシレンや酢酸エチルへの代替および溶剤系接着剤から水性接着剤への代替が想定された。これらのことからトルエン、キシレン、酢酸エチル、イソプロパノール、塗料用石油系炭化水素、印刷インキ用高沸点溶剤の6物質を対象とした。

上記6物質の既存の有害性評価の状況および基準値や参照値設定について調査したうえで、本研究での参照値を表のように設定した。

表6 本研究で採用した参照値の一覧

化学物質	NOAEL (mg/m ³)	エンドポイント	不確実性 係数積
トルエン	30	神経系への影響（ヒト）	10
キシレン	39	協調運動失調（動物）	500
イソプロパノール	220	腎疾患（動物）	100
酢酸エチル	225	刺激に対する反応低下（動物）	500
塗料用石油系炭化水素	1000	肝毒性（動物）	500
印刷インキ用高沸点溶剤	1000	肝毒性（動物）	500

3.3 室内VOC濃度の推定

3.3.1 推定方法

本プロジェクトで開発した室内暴露評価ツール（iAIR）を用いて2000年、2005年および2008年の暴露濃度を求め、その差を代替の影響とした。評価地域は日本全国、計算回数は10万回とした。

放散速度は一次減衰定数と初期含有量より算出した。一次減衰定数は、国内製品についての測定例を網羅的に検索し、報告されている放散速度データに対して一次減衰モデルがあてはまると仮定して算出した。書籍の減衰定数は0.0050 h⁻¹、塗料の減衰定数は0.35 h⁻¹、接着剤の減衰定数は0.049 h⁻¹と算出された。

また、室外濃度についてはトルエン、キシレン、酢酸エチル、イソプロパノールについては各物質の実測濃度、高沸点溶剤については主成分の炭素数を参考にトリデカンとテトラデカンの実測合計濃度、石油系炭化水素についても主成分の炭素数を参考にノナン、デカンとウンデカンの実測合計濃度を用いた。

3.3.1.2 計算結果

iAIRによって推定された各用途群を発生源とする暴露濃度を図1に示した。トルエン等の被代替物質の暴露濃度は評価年とともに減少していることが示唆された。一方で、代替物質の暴露濃度は多くで増加が認められた。なお、代替物質の一部では暴露濃度の減少が認めら

れた。これは、被代替物質の使用割合が減少し、代替物質の使用割合が増加しているにもかかわらず、溶剤・溶媒の全体の使用量が減少していることから、実際には代替物質の使用量も減少していることに由来する。

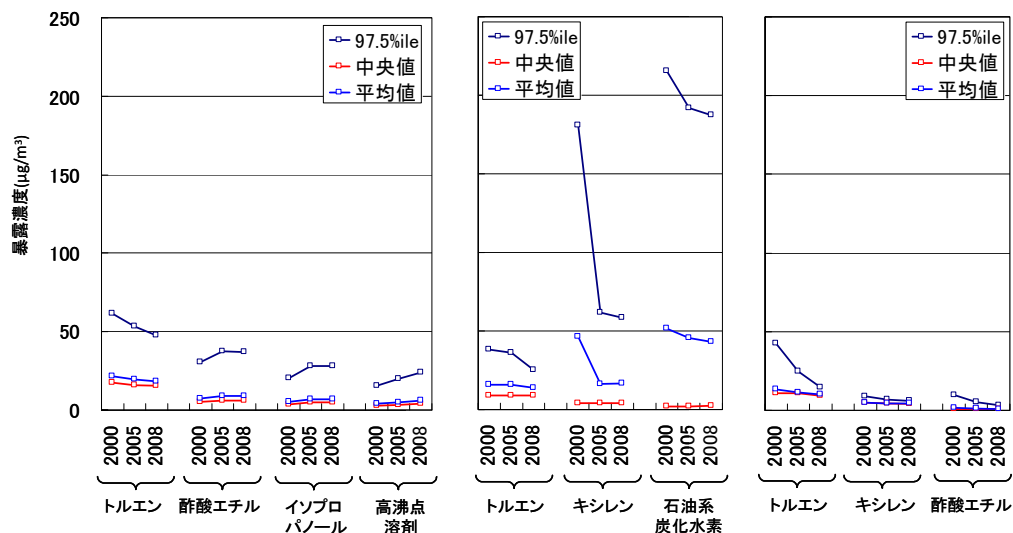


図1 iAIRによって推定された暴露濃度の経年変化（左から印刷インキ、塗料、接着剤）

iAIRによる暴露濃度の推定結果を用いて算出した暴露マージン(MOE)を表7～9に示す。ここで、妥当な暴露濃度の最大値を97.5パーセントイル値と仮定し、この値を先述のNOAELで除してMOEを求めた。各用途群のそれぞれの物質のMOEは一部を除き不確実係数積よりも大きく代替後のリスクは懸念されるレベルにないと考えられた。

表7 印刷インキに使用されている化学物質の暴露マージン

物質	印刷インキ			不確実係数積
	2000年	2005年	2008年	
トルエン	490	560	630	10
酢酸エチル	7,400	6,000	6,000	500
イソプロパノール	11,000	7,800	7,900	100
高沸点溶剤	65,000	50,000	42,000	500

表8 家庭用塗料に使用されている化学物質の暴露マージン

物質	家庭用塗料			不確実係数積
	2000年	2005年	2008年	
トルエン	790	830	1,200	10
キシレン	220	630	670	500
石油系炭化水素	4,600	5,200	5,300	500

表9 家庭用接着剤に使用されている化学物質の暴露マージン

物質	家庭用接着剤			不確実係数積
	2000年	2005年	2008年	
トルエン	700	1,200	2,000	10
キシレン	4,400	5,700	6,400	500

酢酸エチル	23,000	44,000	67,000	500
-------	--------	--------	--------	-----

4. まとめ

一般大気環境については、自動車製造業における塗料使用工程に対する VOC 排出削減対策を対象に、オゾンおよび VOC(8 物質) によるヒト健康リスク削減量を、ADMER-PRO による計算で導出した「リスク削減原単位 (輸送用機械器具製造業)」を用いて推定した。VOC 排出削減による全国のヒト健康リスク削減量は QALY 単位で 15.4 年、QALY の金銭換算値で 1 億 5400 万円、コメ収量増加の金銭換算値は 2 億 3,300 万円、ヒト健康とコメ収量の合計の金銭換算値は 3 億 9,000 万円と推定された。

対策別の費用効果分析では、リスク削減量に対する費用は高い方から、②塗料代替、④排ガス処理装置導入、①塗料中溶剤含有率削減、③塗着効率向上の順であり、塗料代替 (溶剤系から水系へ) は最も効率が悪い排出削減対策であることが示唆された。全対策の合計としての費用効果分析の結果、QALY1 年獲得費用は 9 億円/年、減少リスクの金銭換算値に対する対策費用の比は 35 と推定された。QALY1 年獲得費用だけ見た場合にはリスク削減対策の費用対効果が高いとは言えないが、コメ収量リスクへの影響はヒト健康リスク影響の分よりも大きかったため、コメ収量についても考慮して費用対効果を考察することが重要と思われる。

溶剤系塗料から水系塗料への代替対策に起因するヒト健康およびコメ収量に対するリスク削減量と、同対策による塗装工程でのエネルギー使用 (CO₂ 排出) 増加にともなうリスク増分を金銭換算値で比較した結果、CO₂ 排出増によるリスク増分が VOC 排出削減によるヒト健康とコメ収量のリスク減少分を上回るというリスクトレードオフの状況が現れる可能性は小さいと示唆された。

室内環境については、室内環境に持ち込まれている量が多いと推定された 3 用途群 (印刷インキ、塗料、接着剤) を対象として室内暴露評価ツール (iAIR) を用いて室内濃度と暴露濃度を推定した。トルエン等の被代替物質の暴露濃度は評価年とともに減少していることが示唆された。一方で、代替物質の暴露濃度は多くで増加が認められた。しかしながら、これらの物質においても暴露濃度の 97.5 パーセントイルから算出された MOE が不確実係数積よりも大きく、リスクは懸念されないと考えられた。

参考文献 (主なもの)

- 環境省 (2010) VOC 排出インベントリ. <http://www.env.go.jp/air/osen/voc/inventory.html>
- 揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリ検討会 (2007) 揮発性有機化合物 (VOC) 排出インベントリについて
- 国土交通省 (2006) 平成 17 年度室内空气中の化学物質濃度の実態調査の結果について.
- 産業技術総合研究所, 産業環境管理協会 (2006) JEMAI-LCA PRO オプションデータパック
- 産業構造審議会産業環境リスク対策合同ワーキンググループ (2010) 第 8 回議事録
- 東京都 (2006) 東京都 VOC 対策ガイド (工場内編)、東京都環境局環境改善部有害化学物質対策課、2006 年 4 月
- 中西準子・岸本充生 (2005) 詳細リスク評価書トルエン, 丸善, 東京
- 中西準子・篠崎裕哉・井上和也 (2009) 詳細リスク評価書オゾン—光化学オキシダント—, 丸善, 東京

- 日本印刷産業連合会 (2009) 日印産連 VOC 排出抑制自主行動計画および実施状況
- 日塗工 (2003) 塗料からの主な揮発性有機溶剤排出に関する調査集計結果の報告、2003 年 4 月 25 日付、社団法人 日本塗料工業会 VOC 研究ワーキンググループ
- 日塗工 (2007) 技術レポート、VOC 排出抑制に向けた塗料・塗装の先行技術調査、第 3 報、社団法人日本塗料工業会、2007 年 3 月
- 日塗工 (2010) 平成 20 年度 塗料からの VOC 排出実態推計のまとめ、2010 年 3 月、社団法人 日本塗料工業会
- 日本ペイント (2006) 日本ペイント株式会社 工業用塗料事業本部、和田祐一「紹介-オーデコライン®VerⅢ」、TECHNO COSMOS 2006、Vol. 19、p. 56-57
- 牧野良次・中西準子 (2009) 詳細リスク評価書キシレン、丸善、東京
- CEMA (2004) CEMA (日本塗装機械工業会) VOC 技術シンポジウム資料、第 6 回 (2005 年 7 月 8 日)、2. 事例発表 2-1. 溶剤から粉体塗装への切り替え http://cosmos.amris.co.jp/cema/voc_info/symposium/cema_symposium_6_resume_22.pdf (2012 年 1 月アクセス)
- EEA (2011) Revealing the costs of air pollution from industrial facilities in Europe, EEA Technical report No 15.
- Kannari A, Tonooka Y, Baba T, Murano K (2007) Development of multiple-species 1 km × 1 km resolution hourly basis emissions inventory for Japan, Atmospheric Environment 41: 3428-3439.
- US EPA (1995). Integrated Risk Information System. <http://www.epa.gov/IRIS/> (2011 年 12 月アクセス)
- WHO (1997) Xylenes. Environmental Health Criteria 190. WHO. International Programme on Chemical Safety, Geneva.