

2007 33009A

厚生労働科学研究費補助金  
労働安全衛生総合研究事業

労働曝露推定モデルの開発と検証

平成 19 年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 菅野誠一郎

平成 20 年 3 月

## 目次

I. 総括研究報告	
労働曝露推定モデルの開発と検証.....	1
菅野誠一郎	
II. 分担研究報告	
1. 作業環境濃度と曝露濃度との関係.....	8
山室 堅治、小堀 衛	
2. 混合溶剤の入った拡散律則容器を発生源とする作業場内の成分別濃度分布 の推算法の提案.....	22
小堀 衛、山室堅治、菅野誠一郎	
3. 気中有機溶剤濃度の実測値と数値計算モデルとの比較.....	45
山室 堅治、小堀 衛、菅野誠一郎	
4. 曝露推定モデルの検証.....	64
菅野誠一郎、山室堅治、芹田富美雄	
5. 添付資料	
曝露濃度測定結果.....	75

厚生労働科学研究費補助金 (労働安全衛生総合研究事業)

## I. 総括研究報告

### 労働曝露推定モデルの開発と検証

主任研究者 菅野誠一郎 独立行政法人 労働安全衛生総合研究所

#### 研究要旨

安全衛生マネジメントシステムを遂行するうえで、安全衛生対策の優先順位をきめるためのリスクアセスメントは重要である。リスクアセスメントは対象物質の危険有害性情報および実際の作業での曝露データがあれば行うことができる。危険有害性情報については文献等から情報を得ることができる。曝露データについては、実際に測定を実施することが精度良くリスクアセスメントを行うためには重要であるが、危険有害性情報がある化学物質でも測定法が確立されていないものもある。また、多くの物質についての測定を実施することは多大な経費がかかるため、欧米ではいくつかの曝露推定モデルが開発されている状況である。曝露推定モデルには大きく分けて、1、物性値および経験則に基づく方法、2、気流による希釈過程を数値計算する方法、3、気流そのものを近似計算により求め、物質の輸送(拡散)を計算する方法の3種がある。

英国のEASEモデルに習い、日本での作業環境測定データを用いて濃度推定を行うモデルの開発を行い、実測値と比較することでモデルの検証を行うことを目的とした。

また、数値計算による曝露推定モデルに必要な蒸発速度、混合溶剤の蒸発速度を求める方法につき検討した。

本年度は、以下の研究を行った。

#### 1 作業環境濃度と曝露濃度との関係

平成17年度、18年度に引続き、全国7ブロックにある中災防の地区安全衛生サービスセンター及び大阪労働衛生総合センター並びに各センターで定期的に作業環境測定を実施している事業場の協力を得て、平成19年6～10月の作業環境測定実施時に代表的な作業員(最も有機溶剤蒸気に曝露されるであろうと考えられた作業員)1名に有機ガスモニタ(3M社製)を装着してもらい、作業環境濃度と曝露濃度の測定調査を行った。

3年間の調査で353単位作業場所のデータが得られた。

曝露濃度は、測定時間に対して有機溶剤に曝露される作業時間が短かったなど曝露濃度が低い理由が明らかなデータを除けば、320データ(95.0%)がA測定の幾何平均値以上であったことから、曝露濃度の推定下限値は、A測定の幾何平均値とすればよいと考えられる。

曝露濃度は、274データ(77.6%)がA測定の5%値(日間変動の項を含まない作業環境測定の第1評価値と等しい値)又はB測定値の大きな方の値以下であったが、平成18年度及び19年度の調査の合計221データの内、作業の妨げになるためにB測定で作業員に十分に近づくことができなかつた等、曝露濃度が作業環境濃度よりも大きくなった理由が明らかな26データを除けば、185データ(94.9%)がA測定の5%値又はB測定値の大きな方の値以下であったことから、曝露濃度の推定上限値は、A測定の5%値又はB測定値の大きな方の値とすればよいと考えられる。ただし、単位作業場所外での高濃度曝露があった場合やB測定点が何らかの理由によって作業員から離れてしまった場合などには、曝露濃度はこの推定値を超える可能性があると考えられる。

曝露濃度の推定範囲の下限値をA測定の幾何平均値とし、曝露濃度の推定範囲の上限値をA測定の5%値又はB測定値の大きな方の値として、3年間の作業環境濃度と曝露濃度

の測定調査により得られたデータから、有機溶剤業務の号別区分、換気設備の種類、エアロゾル発生の有無、作業環境測定の評価結果で推定範囲を満足する割合の有意差検定を行った。その結果、一部に有意差はあったものの、有意差があったものはいずれも推定範囲にあるデータ数の割合が多いことにより有意差があるとなったことから、推定範囲は安全側にあると考えられる。

作業環境測定のA測定の幾何平均値を曝露濃度の推定下限値としたときの、曝露濃度の実測値と推定下限値との比をとると、曝露濃度の約40%のデータが推定下限値の1倍以下、約55%のデータが推定下限値の2倍以下、約95%のデータが推定下限値の15倍以下であった。曝露濃度の実測値と推定下限値との比が15倍を超えるデータは少ないが、発生源のそばで連続して作業が行われる場合のB測定値が、A測定の幾何平均値の15倍を超えた場合には、曝露濃度は、推定下限値の15倍を超えることを否定することはできないことから、曝露濃度の推定上限値は、A測定の上側5%値又はB測定値の大きな方の値という条件だけでよいと考えられる。

3年間にわたって得られた作業環境濃度と曝露濃度の測定結果により、曝露濃度の値は、有機溶剤業務の号別区分、換気設備の種類、エアロゾルの発生の有無及び作業環境測定の評価結果にかかわらず作業環境濃度の以下に示した範囲にあると考えられた。

$$\begin{aligned} & \text{A測定の幾何平均値} \\ & \leq \text{曝露濃度の値} \leq \\ & \text{A測定の上側5\%値又はB測定値の大きな方の値} \end{aligned}$$

ただし、単位作業場所外での高濃度曝露があった場合やB測定点が何らかの理由によって作業員から離れてしまった場合などには、曝露濃度はこの推定値を超える可能性があると考えられた。

## 2. 混合溶剤の入った拡散律則容器を発生源とする作業場内の成分別濃度分布の推算法の提案

有機溶剤職場で使用している混合溶剤の液相組成及び液温より、液表面の成分別気相組成は Antoine 式、Wilson 式を用いて、任意温度の含有成分及び空気の2成分相互拡散係数は容器内温度、Wilke-Lee の式、Le-Bass の推算法、粘度データ等を用いて、開口面出口の成分別拡散流束は使用温度、容器深さ、Stefan-Maxwell の多成分拡散式の微分方程式を数値解法で解くことにより、容器からの成分別発生量は推定拡散流束、容器開口面積、分子量より推算することとした。一様流が流れるモデル実験場で酢酸エチル、トルエン、MEK の等容量混合溶剤の入った拡散律則容器を発生源とした実験を行い、推算した成分別発生量の和と発生源重量減少はほぼ一致した。また、発生時の液温に近い温度で実験に用いた等容量混合溶液を入れ、各成分の濃度を測定し、濃度比を比較した結果、成分別拡散流束の比と良い一致を見た。成分別発生量、モデル実験場の3次元形状、障害物、気流情報を入力し、CFDソフトの解析を行い成分別推定濃度分布と多成分濃度実測値はほぼ一致した。

この推算法であれば、Antoine 定数、Wilson 定数が得られていない物質であっても、混合溶剤の配合比、使用温度が分かれば使用配合比の混合溶剤を作り使用温度でのヘッドスペース法で測定することにより、液表面気相組成は測定できるため、成分別濃度分布の推定は可能と思われる。そこで、一連の手順を、混合溶剤の入った拡散律則容器を発生源とする作業場内の成分別濃度分布の推算法について提案する。

## 3. 気中有機溶剤濃度の実測値と数値計算モデルとの比較

出入口を開放したモデル実験場での実測値と CFD 解析結果との比較を行った。

CFD 解析は、繰返し計算回数を増やしながら解析を行ったところ、解析方法のちがいに

り、解析結果が収束する繰返し計算回数が異なっていた。CFD 解析では、各要素体積ごとに出入りする物質やエネルギーを流体力学の基礎方程式である運動量保存式、質量保存式、エネルギー保存式、成分保存式の要素体積の連立有限体積方程式の近似解を繰返し求めながら最終的な解析結果を求めていることから、繰返し計算回数を順次増やしながらか解析結果が収束しているかを確認する必要があると考えられる。

CFD 解析を行うときに、解析範囲の設定や空気流入条件を変えて、3 種類の解析を行ったところ、モデル実験場の外側まで解析範囲を広げ、部屋の給気気流を妨げない場所に強制給気口を設けた解析方法が、最も実測値に近い解析結果であった。排気が行われているが強制給気が行われていない部屋について CFD 解析を行う場合には、部屋の内側のみを解析範囲として給気条件を自然流入とするよりは、部屋の外側まで解析範囲を広げ、部屋の給気気流を妨げない場所に強制給気口を設け解析を行う方法が、実測値に近い解析結果を得ることができると考えられる。

#### 4. 曝露推定モデルの検証

曝露濃度測定結果を、有機溶剤作業の号別作業区分および揮発性評価コードおよび管理区分 1 と管理区分 2 または 3 で分類し、それぞれの A 測定の幾何平均値の平均値、曝露濃度の最大値を抽出し、前年度に作成した曝露推定モデルと比較した。平均値と幾何平均値最大値、上限値と曝露濃度を比較した結果、推定値の上限値を超える例は少なく、多くが推定上限値以下となった。

号別作業区分ヌ（有機溶剤等が付着している物の乾燥の業務）については複数例が上限を超えており、作業の特性から環境濃度より曝露濃度が高くなる可能性が高いことから平均値および上限値を変更した。この変更により、3 年間に測定した延べ 992 例の曝露濃度測定のうちおおむね 90% が推定値の上限以下の値となった。

曝露濃度に直接関連すると思われる有機溶剤の使用量（時間当たり）および単位面積当たりの使用量と曝露濃度との相関は小さく、弱いながら有機溶剤の蒸気圧と曝露濃度の相関が使用量等より高かった。この結果は、揮発性コードで曝露濃度を推定することを支持する。この曝露濃度推定法は、日本の作業環境のデータに基づいており、推定に必要なデータは、蒸気圧と作業形態だけであり非常に簡便に利用できるものとする。

#### 分担研究者

小堀 衛（中央労働災害防止協会労働衛生調査分析センター）  
山室 堅治（中央労働災害防止協会労働衛生調査分析センター）  
菅野誠一郎（独法労働安全衛生総合研究所環境計測管理研究グループ）  
芹田富美雄（独法労働安全衛生総合研究所環境計測管理研究グループ）

#### A. 研究目的

1. 作業環境濃度と曝露濃度との関係を明らかにする。
2. 混合溶剤を発生源とする作業場内の成分別濃度分布の推算法を開発する
3. CFD 解析による曝露推定を行う際のより実態に合致したモデルの設定条件や解析条件等を明らかにする。
4. 作成した曝露推定モデルの信頼性の検証を行う。

#### B. 研究方法

1. 平成 17 年度、18 年度に引続き、全国 7 ブロックにある中災防の地区安全衛生サービスセンター及び大阪労働衛生総合センター並びに各センターで定期的に作業環境測定を実施している事業場の協力を得て、平成 19 年 6～10 月の作業環境測定実施時に代表的な作業員（最

も有機溶剤蒸気に曝露されるであろうと考えられた作業員) 1 名に有機ガスモニタ (3M 社製) を装着してもらい、作業環境濃度と曝露濃度の測定調査を行った。作業環境測定のサンプリングと同時に、サンプリング時の状況も測定を行った作業環境測定士が記録した。

これらの作業環境濃度、曝露濃度及びサンプリング時の状況等のデータから作業環境濃度と曝露濃度との関係を比較検討した。

2. 拡散律則容器内の溶剤蒸気分子の動きを検討し、動きの各工程の推算法を文献調査等から決定し、一様な流れのあるモデル実験場で多成分混合溶剤の入った拡散律則容器を発生源とする実験を行い、各工程の推算法と実測値の比較検討を行ない、多成分混合溶剤の場合の成分別濃度分布推定法を検討した。

3. 出入口を開放したモデル実験場での実測値と CFD 解析結果との比較を行った。幅 3.34m × 高さ 0.88m の排気口が設置された長さ 10.0m × 幅 3.5m × 高さ 2.5m のモデル実験場に、排気口から 6.5m の中央床上 0.84m の位置に発生源を置き、幅 0.8m × 高さ 1.95m の出入口を開放して 105m<sup>3</sup>/min で排気した。発生源は、直径 200mm × 高さ 40mm のステンレスシャーレにトルエンを 8 分目程度入れ、気流にさらした状態でトルエン蒸気を発生させた。空気中のトルエン濃度の測定は、モデル実験場内 11 箇所の床上 0.9m、1.2m 及び 1.5m の高さに加熱脱着分析用捕集管 (PerkinElmer 社製、充填材: PorapakQ) を置き、90 分間の測定を行った。また、実験中のシャーレ重量の減少を測定することによりトルエンの蒸発速度を測定した。

CFD 解析には、Flow Designer (株)アドバンスドナレッジ研究所製) を使用し、実験場の大きさ、排気量、発生源等の条件を入力し、モデル実験場内のみを解析範囲とした場合と、モデル実験場の外側を含めて解析範囲とした場合とで解析を行った。また、モデル実験場の外側を含めて解析範囲とした場合では、モデル実験場の外側への空気の流入を自然流入させた場合と強制的に給気させた場合とで解析を行い、合計 3 種類の方法で解析を行った。

解析は、モデル実験場内は、一辺が 100mm の立方体を要素体積として、モデル実験場の外側は一辺が 1000mm の立方体を要素体積として、K-ε モデルで繰り返し計算回数を 1000 回、2000 回、3000 回、4000 回と増やしながら定常解析を行った。

4. 中央労働災害防止協会に蓄積された作業環境調査結果のデータベースを解析することにより昨年度、作業環境測定値に基づく曝露推定モデルを作成した。今年度は、17、18 年度および今年度に行った曝露濃度測定結果を曝露推定モデルに当てはめ、モデルの検証および改良を行なった

## C. 研究結果

1. 3 年間の調査で 353 単位作業場所のデータが得られた。

曝露濃度は、測定時間に対して有機溶剤に曝露される作業時間が短かったなど曝露濃度が低い理由が明らかなデータを除けば、320 データ (95.0%) が A 測定の幾何平均値以上であったことから、曝露濃度の推定下限値は、A 測定の幾何平均値とすればよいと考えられる。

曝露濃度は、274 データ (77.6%) が A 測定の 5% 値 (日間変動の項を含まない作業環境測定の第 1 評価値と等しい値) 又は B 測定値の大きな方の値以下であったが、平成 18 年度及び 19 年度の調査の合計 221 データの内、作業の妨げになるために B 測定で作業員に十分に近づくことができなかつた等、曝露濃度が作業環境濃度よりも大きくなった理由が明らかな 26 データを除けば、185 データ (94.9%) が A 測定の 5% 値又は B 測定値の大きな方の値以下であったことから、曝露濃度の推定上限値は、A 測定の 5% 値又は B 測定値の大きな方の値とすればよいと考えられる。ただし、単位作業場所外での高濃度曝露があつた

た場合やB測定点が何らかの理由によって作業員から離れてしまった場合などには、曝露濃度はこの推定値を超える可能性があると考えられる。

曝露濃度の推定範囲の下限値を A 測定の幾何平均値とし、曝露濃度の推定範囲の上限値を A 測定の 5% 値又は B 測定値の大きな方の値として、3 年間の作業環境濃度と曝露濃度の測定調査により得られたデータから、有機溶剤業務の号別区分、換気設備の種類、エアロゾル発生の有無、作業環境測定の評価結果で推定範囲を満足する割合の有意差検定を行った。その結果、一部に有意差があったものの、有意差があったものはいずれも推定範囲にあるデータ数の割合が多いことにより有意差があるとなったことから、推定範囲は安全側にあると考えられる。

作業環境測定の A 測定の幾何平均値を曝露濃度の推定下限値としたときの、曝露濃度の実測値と推定下限値との比をとると、曝露濃度の約 40% のデータが推定下限値の 1 倍以下、約 55% のデータが推定下限値の 2 倍以下、約 95% のデータが推定下限値の 15 倍以下であった。曝露濃度の実測値と推定下限値との比が 15 倍を超えるデータは少ないが、発生源のそばで連続して作業が行われる場合の B 測定値が、A 測定の幾何平均値の 15 倍を超えた場合には、曝露濃度は、推定下限値の 15 倍を超えることを否定することはできないことから、曝露濃度の推定上限値は、A 測定の 5% 値又は B 測定値の大きな方の値という条件だけでよいと考えられる。

3 年間にわたって得られた作業環境濃度と曝露濃度の測定結果により、曝露濃度の値は、有機溶剤業務の号別区分、換気設備の種類、エアロゾルの発生の有無及び作業環境測定の評価結果にかかわらず作業環境濃度の以下に示した範囲にあると考えられた。

$$\begin{aligned} & \text{A 測定の幾何平均値} \\ & \leq \text{曝露濃度の値} \leq \\ & \text{A 測定の 5\% 値又は B 測定値の大きな方の値} \end{aligned}$$

ただし、単位作業場所外での高濃度曝露があった場合や B 測定点が何らかの理由によって作業員から離れてしまった場合などには、曝露濃度はこの推定値を超える可能性があると考えられた。

2. 有機溶剤職場で使用している混合溶剤の液相組成及び液温より、液表面の成分別気相組成は Antoine 式、Wilson 式を用いて、任意温度の含有成分及び空気の 2 成分相互拡散係数は容器内温度、Wilke-Lee の式、Le-Bass の推算法、粘度データ等を用いて、開口面出口の成分別拡散流束は使用温度、容器深さ、Stefan-Maxwell の多成分拡散式の微分方程式を数値解法で解くことにより、容器からの成分別発生量は推定拡散流束、容器開口面積、分子量より推算することとした。一様流が流れるモデル実験場で酢酸エチル、トルエン、MEK の等容量混合溶剤の入った拡散律則容器を発生源とした実験を行い、推算した成分別発生量の和と発生源重量減少はほぼ一致した。また、発生時の液温に近い温度で実験に用いた等容量混合溶液を入れ、各成分の濃度を測定し、濃度比を比較した結果、成分別拡散流束の比と良い一致を見た。成分別発生量、モデル実験場の 3 次元形状、障害物、気流情報を入力し、CFD ソフトの解析を行い成分別推定濃度分布と多成分濃度実測値はほぼ一致した。

3. モデル実験場内のみを解析範囲としたときのトルエン濃度の解析結果は、繰返し計算回数 1000 回で、モデル実験場の外側も含めて解析範囲としたときのモデル実験場の周囲に空気が自然流入する条件のときのトルエン濃度の解析結果は、繰返し計算回数 3000 回で、モデル実験場の外側も含めて解析範囲としたときのモデル実験場の外側に強制的に給気する条件の

ときのトルエン濃度の解析結果は、繰返し計算回数 2000 回でほぼ収束していた。3 種類のどの解析方法でも、繰返し計算回数 4000 回ではモデル実験場の各測定点におけるトルエン濃度の解析結果はほぼ収束していたので、これを CFD 解析のトルエン濃度の解析結果として、トルエン濃度測定結果と比較した。

モデル実験場でのトルエン濃度の測定結果は、発生源から排気口に向かって広がる分布をしていたが、排気口に向かって左側に偏った分布をしていた。また、排気口の反対方向にも、わずかではあるが、トルエンが分布していた。

モデル実験場内のみを解析範囲とした場合は、CFD 解析結果では発生源から出入口方向に広く分布していると、測定結果とはまったく一致しなかった。これは、実験時には出入口から排気口の方向にやや偏りながら進むまっすぐな気流が確認されていたのに対して、気流の CFD 解析結果は出入口から排気口と反対方向に偏ってまっすぐ進んでおり、CFD 解析では、実験時の気流を再現できていなかったためと考えられる。

モデル実験場の外側も含めて解析範囲とした場合には、トルエンの濃度分布は測定結果と同じような傾向となったが、モデル実験場の外側に空気が強制給気する条件の方が測定結果により近い結果となった。これは、モデル実験場の周囲に空気が自然流入する条件とした気流の解析結果を見ると、出入口から入る気流の方向は強制給気する条件とほぼ同じであるが、モデル実験場の出入口に最も近い自然流入面から中心部で約 0.5m/s のまっすぐな気流が解析結果としてあり、これがトルエン濃度の解析結果に影響を及ぼし、強制給気する条件とは異なった結果が得られたと考えられる。

また、測定結果と最も近い解析結果であったモデル実験場の外側を解析範囲に含めたときのモデル実験場の外側に強制的に給気する条件の場合の解析結果で、測定点No.7 のトルエン濃度の解析結果は、測定結果よりも約 2ppm 以上低かった。発生源と測定点No.7 の間のトルエン濃度の解析結果を見ると、測定点No.7 より 40cm 排気口側、20cm 発生源側の解析結果は、床上 1.5m では測定点No.7 の測定値 2.30ppm に対して 2.59ppm、床上 1.2m では測定点No.7 の測定値 2.89ppm に対して 3.24ppm、床上 0.9m では測定点No.7 の測定値 2.79ppm に対して 2.56ppm と、測定点No.7 の比較的近い位置に、測定結果に近いトルエン濃度の解析結果が得られた場所があった。

CFD 解析では、各要素体積ごとに入出入りする物質やエネルギーを流体力学の基礎方程式である運動量保存式、質量保存式、エネルギー保存式、成分保存式の要素体積の連立有限体積方程式の近似解を繰返し求めながら最終的な解析結果を求めていることから、繰返し計算回数を順次増やしながら解析結果が収束しているかを確認する必要があると考えられる。

排気が行われているが強制給気が行われていない部屋について CFD 解析を行う場合には、部屋の内側のみを解析範囲として給気条件を自然流入とするよりは、部屋の外側まで解析範囲を広げ、部屋の給気気流を妨げない場所に強制給気口を設け解析を行う方法が、実測値に近い解析結果を得ることができると考えられる。

4. 曝露濃度測定結果を、有機溶剤作業の号別作業区分および揮発性評価コードおよび管理区分 1 と管理区分 2 または 3 で分類し、それぞれの A 測定の幾何平均値の平均値、曝露濃度の最大値を抽出し、前年度に作成した曝露推定モデルと比較した。平均値と幾何平均値最大値、上限値と曝露濃度を比較した結果、推定値の上限値を超える例は少なく、多くが推定上限値以下となった。

号別作業区分ヌ（有機溶剤等が付着している物の乾燥の業務）については複数例が上限を超えており、作業の特性から環境濃度より曝露濃度が高くなる可能性が高いことから平均値および上限値を変更した。この変更により、3 年間に測定した延べ 992 例の曝露濃度測定のうちおおむね 90%が推定値の上限以下の値となった。

曝露濃度に直接関連すると思われる有機溶剤の使用量（時間当たり）および単位面積当たり



の使用量と曝露濃度との相関は小さく、弱いながら有機溶剤の蒸気圧と曝露濃度の相関が使用量等より高かった。この結果は、揮発性コードで曝露濃度を推定することを支持する。この曝露濃度推定法は、日本の作業環境のデータに基づいており、推定に必要なデータは、蒸気圧と作業形態だけであり非常に簡便に利用できるものとする。

D. 健康危険情報

特記事項なし

E. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

山室堅治、小堀衛、菅野誠一郎、櫻井治彦、有機溶剤業務の作業環境濃度とばく露濃度の関係について、第 28 回作業環境測定研究発表会、p58-59、2007

小堀衛、山室堅二、菅野誠一郎、吉田哲、東久保一郎、櫻井治彦、CFD の労働衛生への活用：第 4 報 ワニス含浸職場の気中トルエン・キシレン濃度分布の推定、第 47 回日本労働衛生工学会、p.68～69、2007、名古屋

岡村真吾、小堀衛、澤田厚史、石塚久美、円筒形容器に入った混合有機溶剤の蒸発速度の推算、第 47 回日本労働衛生工学会、p.40～41、2007、名古屋

小堀衛、山室堅治、菅野誠一郎、櫻井治彦：流体解析ソフトを用いたばく露評価の基礎的検討、第 80 回日本産業衛学会、p445、2007、大阪

小堀衛、山室堅治、菅野誠一郎、吉田哲、東久保一郎、櫻井治彦：CFD の労働衛生への活用 - 第 4 報、第 47 回日本労働衛生工学会、p66-67、2007、名古屋

菅野誠一郎、芹田富美雄、小堀衛、山室堅治（2007）作業環境データベースによるばく露推定モデル 個人ばく露との比較、第 47 回日本労働衛生工学会・第 28 回作業環境測定研究発表会抄録集、P78

F. 知的財産権の出願・登録状況

なし

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）

Ⅱ. 分担研究報告

1. 作業環境濃度と曝露濃度との関係

山室 堅治、小堀 衛

中央労働災害防止協会労働衛生調査分析センター

A. 研究目的

曝露推定モデルを構築するに当たり、実測のデータは中災防の作業環境測定データベースが利用できるが、そのデータは作業環境測定のデータである。

そこで、数多くある作業環境測定のデータを曝露推定モデルの構築及び検証に活用できるようにするために、作業環境測定と曝露濃度測定を同時に行い、その関係を明らかにし、作業環境濃度から曝露濃度を推定可能とすることを研究の目的とする。

B. 研究方法

平成 17 年度、18 年度に引続き、全国 7 ブロックにある中災防の地区安全衛生サービスセンター及び大阪労働衛生総合センター並びに各センターで定期的に作業環境測定を実施している事業場の協力を得て、平成 19 年 6～10 月の作業環境測定実施時に代表的な作業員（最も有機溶剤蒸気に曝露されるであろうと考えられた作業員）1 名に有機ガスモニタ（3M 社製）を装着してもらい、作業環境濃度と曝露濃度の測定調査を行った。作業環境測定のサンプリングと同時に、サンプリング時の状況も測定を行った作業環境測定士が記録した。（資料 1 参照）

これらの作業環境濃度、曝露濃度及びサンプリング時の状況等のデータから作業環境濃度と曝露濃度との関係を比較検討した。

C. 研究結果

1 調査で得られたデータの概要

平成 17 年度から 3 年間にわたる調査により 353 単位作業場所のデータが得られた。353 単位作業場所の作業環境測定の評価結果を表 1 に示した。

また、表 2 に示した有機溶剤中毒予防規則の有機溶剤業務の号別区分ごとに単位作業場所数を集計し表 3 に示した。

表 1 単位作業場所の評価結果

第 1 管理区分	第 2 管理区分	第 3 管理区分	合計
277 (78.5%)	43 (12.2%)	33 (9.3%)	353 (100.0%)

表2 有機溶剤予防規則の有機溶剤業務の号別区分

号別区分	有機溶剤業務
イ	有機溶剤等を製造する工程における有機溶剤等のろ過、混合、攪拌、加熱又は容器若しくは設備への注入の業務
ロ	染料、医薬品、農薬、化学繊維、合成樹脂、有機顔料、油脂、香料、甘味料、火薬、写真薬品、ゴム若しくは可塑剤 又はこれらのものの中間体を製造する工程における有機溶剤等のろ過、混合、攪拌又は加熱の業務
ハ	有機溶剤含有物を用いて行う印刷の業務
ニ	有機溶剤含有物を用いて行う文字の書込み又は描画の業務
ホ	有機溶剤等を用いて行うつや出し、防水その他物の面の加工の業務
ヘ	接着のためにする有機溶剤等の塗布の業務
ト	接着のために有機溶剤等を塗布された物の接着の業務
チ	有機溶剤等を用いて行う洗浄（ヲに掲げる業務に該当する洗浄の業務を除く。）又は払しょくの業務
リ	有機溶剤含有物を用いて行う塗装の業務（ヲに掲げる業務に該当する塗装の業務を除く。）
ヌ	有機溶剤等が付着している物の乾燥の業務
ル	有機溶剤等を用いて行う試験又は研究の業務
ヲ	有機溶剤等を入れたことのあるタンク（有機溶剤の蒸気の発散するおそれがないものを除く。以下同じ。）の内部における業務

表3 有機溶剤業務の号別区分ごとの単位作業場所数（重複あり）

号別区分	イ	ロ	ハ	ニ	ホ	ヘ	
単位作業場所数	36 (7.4%)	4 (0.8%)	37 (7.6%)	8 (1.7%)	43 (8.9%)	61 (12.6%)	
号別区分	ト	チ	リ	ヌ	ル	ヲ	合計
単位作業場所数	29 (6.0%)	126 (26.0%)	88 (18.2%)	48 (9.9%)	4 (0.8%)	0 (0.0%)	484 (100.0%)

## 2 作業環境濃度と曝露濃度との関係

作業環境濃度は、A測定とB測定の結果から示されるが、曝露濃度は作業中の作業者の呼吸域の平均的濃度であるので、平成17年度の本研究の報告書では、その関係を単純に示すことが難しいことを述べた。<sup>1)</sup> また、平成18年度の本研究の報告書では、B測定点が発作者の呼吸域から離れてしまった等の場合を除き、曝露濃度は、作業環境測定のア測定の数何平均値以上であり、A測定の上側5%値（日間変動を含まない作業環境測定の数1評価値に等しい値）又はB測定値の大きい方の値以下であり、この範囲を作業環境濃度からの曝露濃度の推定値とすることができることを述べた。<sup>2)</sup>

### 2.1 作業環境濃度からの曝露濃度の下限値の推定

平成17年度から3年間にわたる作業環境濃度と曝露濃度の測定結果で得られた作業環境測

定のA測定の幾何平均値及びA測定の算術平均値を横軸に、曝露濃度を縦軸としてプロットし、図1及び図2に示した。

なお、混合有機溶剤の単位作業場所では、曝露濃度が最も高い値を示した成分のデータを採用し、各单位作業場所から1データのみを採用した。(以下この章では同じ。)

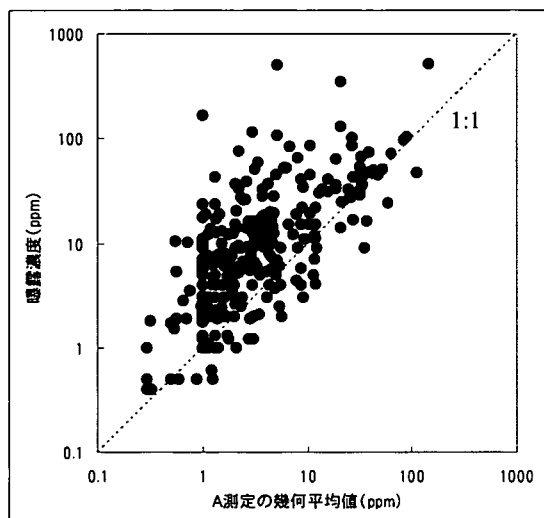


図1 A測定の幾何平均値と曝露濃度

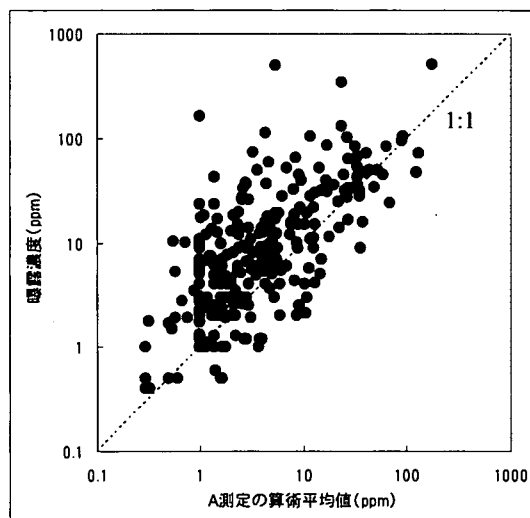


図2 A測定の算術平均値と曝露濃度

ほとんどのプロットが 1:1 の直線の左側にあることから、曝露濃度は作業環境測定で得られたA測定の幾何平均値又は算術平均値以上である確率が高いことがわかる。

曝露濃度がA測定の幾何平均値以上であったデータ数及びA測定の算術平均値以上であったデータ数並びに全データ数に対する割合は表4に示したとおり、全353データに対して、対幾何平均値で320データ(90.7%)、対算術平均値で311データ(88.1%)であった。

なお、数多くある作業環境濃度から曝露濃度を推定し、開発した曝露推定モデルの検証に推定した曝露濃度を使用することを目的としているため、デザインによる誤差やサンプリング誤差、分析誤差を考慮すれば精密な推定を行ってもあまり意味が無いことから、各データは0から100ppm未満のデータについては有効数字1桁に、100ppm以上のデータは有効数字2桁に四捨五入して値を丸めた。(以下この章では同じ)

表4 曝露濃度がA測定の幾何平均値又はA測定の算術平均値以上のデータ数

	データ数	割合
幾何平均値以上	320	90.7%
算術平均値以上	311	88.1%

n=353

曝露濃度がA測定の幾何平均値又は算術平均値未満であったデータのうち、曝露濃度の測定時間に対して有機溶剤に曝露される作業時間が短かったなどの理由があるデータ数は、対幾何平均値で16データ、対算術平均値で23データであった。曝露濃度がA測定の幾何平均値以上であったデータ数並びにA測定の算術平均値以上であったデータ数、曝露濃度がA測定の幾何平均値又は算術平均値未満であったデータのうち測定時間に対して有機溶剤に曝露される作業時間が短かったなど曝露濃度が低い理由が明らかなデータを除いたデータ数及びその割合を表5に示した。対幾何平均値で337データに対して320データ(95.0%)、対算術

平均値で 330 データに対して 311 データ (94.2%) であった。

これらのことから、曝露濃度の推定下限値は、推定範囲により多くのデータを含む A 測定  
の幾何平均値とすればよいと考えられる。

表 5 曝露濃度が低い理由が明らかなデータを除いた  
曝露濃度が A 測定の幾何平均値又は A 測定の算術平均値以上のデータ数

	データ数	理由が明らかなデータを 除いたデータ数	割合
幾何平均値以上	320	337	95.0%
算術平均値以上	311	330	94.2%

## 2.2 作業環境濃度からの曝露濃度の上限値の推定

平成 17 年度から 3 年間にわたる作業環境濃度と曝露濃度の測定結果で得られた作業環境測定  
の A 測定の幾何平均値及び幾何標準偏差から求めた単位作業場所内の濃度の分布の上側から  
5% の値 (以下「A 測定の上側 5% 値」という。日間変動の項を含まない作業環境測定  
の第 1 評価値と等しい値) 及び B 測定値を横軸に、曝露濃度を縦軸にとりプロットしたものを  
図 3 及び図 4 に示した。

いずれも 7 割程度のプロットが 1:1 の直線の右側にあるが、A 測定の上側 5% 値又は B 測定  
値よりも大きい値の曝露濃度データが 3 割程度あった。(表 6 参照)

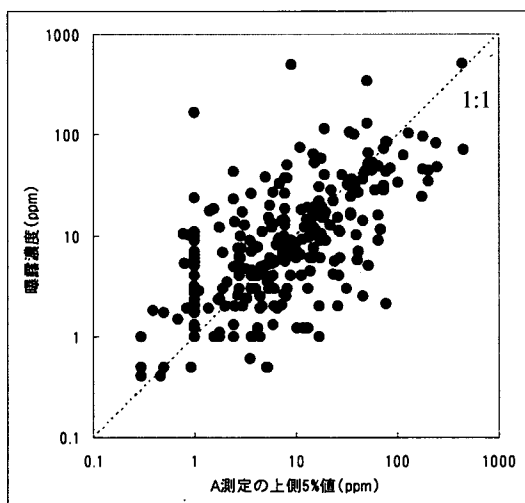


図 3 A 測定の上側 5% 値と曝露濃度

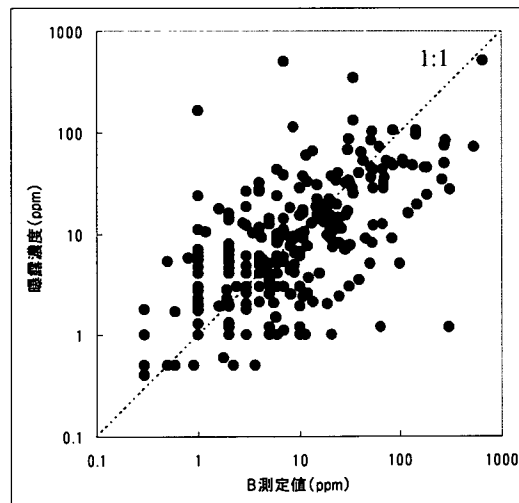


図 4 B 測定値と曝露濃度

表6 曝露濃度がA測定の上側5%値又はB測定値以下のデータ数

	データ数	割合
A測定の上側5%値	238	67.4%
B測定値	241	68.3%

n=353

ここで、A測定の上側5%値又はB測定値の大きな方の値を横軸に、曝露濃度を縦軸にとりプロットし、図5に示した。

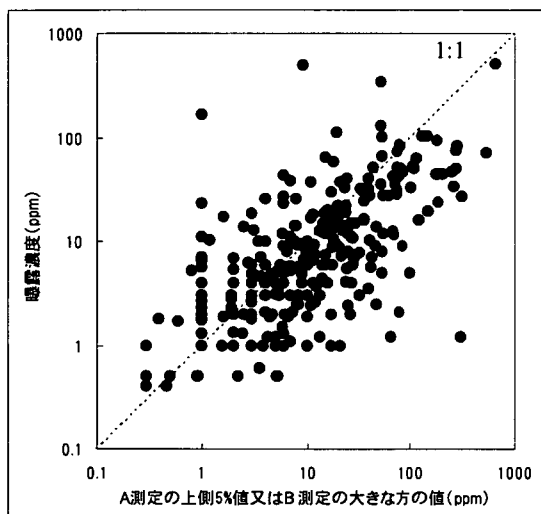


図5 A測定の上側5%値又はB測定値の大きな方の値と曝露濃度

A測定の上側5%値又はB測定値の大きな方の値と曝露濃度を比較すると、約8割のプロットが1:1の直線の右側にあった。(表7参照)

表7 曝露濃度が上側5%値又はB測定値の大きな方の値以下のデータ数

データ数	割合
274	77.6%

n=353

平成18年度及び19年度の調査では、曝露濃度が作業環境濃度と大きく離れた値を示した場合には、考えられる理由をデータと一緒に報告してもらっており、平成17年度のデータを除いて曝露濃度の上限値の検討を行うこととした。

平成18年度及び19年度は221データが得られたが、そのうち185データ(83.7%)で曝露濃度がA測定の上側5%値又はB測定値の大きな方の値以下であった。(表8参照)

表 8 平成 18 年度及び 19 年度の調査で曝露濃度が A 測定の上側 5 % 値又は B 測定値の大きな方の値以下のデータ数

データ数	割合
185	83.7%

n=221

曝露濃度が A 測定の上側 5 % 値又は B 測定値の大きな方の値を超えた 36 データ (16.3%) のうち、作業の妨げになるために B 測定で作業者に十分に近付くことができなかつた等の理由があるデータ数は、26 データ (11.8%) であった。また、原因不明とあつた 10 データ (4.5%) は、部品の有機溶剤による払拭作業やプレートへのネーム入れ、印刷スクリーン、ロールの洗浄作業、FRP の積層作業といった払拭や洗浄状態、製品の状態等を確認するために発生源に呼吸域を近付けて行う作業や作業者が移動しながら行う作業であり、発生源と B 測定点との距離が曝露測定のサンプラーとの距離よりも大きくなりがちな作業であつた。(表 9 参照)

表 9 平成 18 年度及び 19 年度の調査で曝露濃度が A 測定の上側 5 % 値又は B 測定値の大きな方の値を越えたデータ数とその理由

曝露濃度が上側 5 % 値又は B 測定値の大きな方の値を越えた理由	データ数
作業の妨げになるので B 測定で作業者に十分に近付けなかつた	23 (10.4%)
局排のフード内に体を入れて作業が行われることがあつた	2 (0.9%)
他の作業場所での有機溶剤曝露があつた	1 (0.5%)
原因不明	10 (4.5%)
合計	36 (16.3%)

n=221

作業の妨げになるために B 測定で作業者に十分に近付くことができなかつた等の理由が明らかでない 26 データを除いた 195 データの A 測定の上側 5 % 値又は B 測定値の大きな方の値を横軸に、曝露濃度を縦軸にとりプロットし、図 6 に示した。195 データに対して曝露濃度が A 測定の上側 5 % 値又は B 測定値の大きな方の値以下であつたデータ数は、185 データ (94.9%) であつた。(表 10 参照)

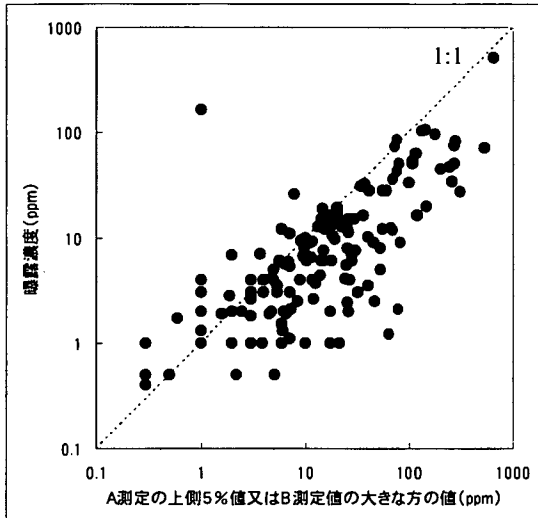


図 6 平成 18 年度及び 19 年度の調査で曝露濃度が高い理由が明らかなデータを除いた A 測定の上側 5 % 値又は B 測定値の大きな方の値と曝露濃度

表 10 平成 18 年度及び 19 年度の調査で曝露濃度が高い理由が明らかなデータを除いた曝露濃度が A 測定の上側 5 % 値又は B 測定値の大きな値以下のデータ数

データ数	理由が明らかなデータを除いたデータ数	割合
185	195	94.9%

これらのことから、曝露濃度の上限の推定値は、A 測定の上側 5 % 値又は B 測定値の大きな方の値とすればよいと考えられる。ただし、単位作業場所外での高濃度曝露があった場合や B 測定点が無理な理由によって作業員から離れてしまった場合などには、曝露濃度はこの推定値を超える可能性があると考えられた。

#### D. 考察

##### 1 有機溶剤業務の号別区分ごとの作業環境濃度と曝露濃度との関係

作業環境測定のア測定値の幾何平均値を曝露濃度の推定下限値、A 測定の上側 5 % 値又は B 測定値の大きな方の値を曝露濃度の推定上限値としたとき、この推定範囲に入る曝露濃度の実測データ数を有機溶剤業務の号別区分ごとに示すと表 11 のとおりとなった。「ロ（有機溶剤等を使用した化成品の製造の業務）」及び「二（文字の書込み又は描画の業務）」は、データ数があまり多くないため、同種の業務である「イ（有機溶剤等の製造の業務）」と「ロ（有機溶剤等を使用した化成品の製造の業務）」及び「ハ（印刷の業務）」と「二（文字の書込み又は描画の業務）」とをそれぞれ合わせて集計した。また、「ヘ（接着剤の塗布の業務）」と「ト（接着の業務）」は、重複しているデータが多いため、2つの業務を合わせて集計した。

推定範囲を満足する割合を有意差検定すると、曝露濃度の推定下限値の以上のデータ数の割合では、「ハ（印刷の業務）」と「二（文字の書込み又は描画の業務）」及び「チ（洗浄又は払拭の業務）」が全データに対して危険率 5% で有意差があった。また、推定上限値の以下のデータ数の割合では、「イ（有機溶剤等の製造の業務）」と「ロ（有機溶剤等を使用した化成品の製造の業務）」が全データに対して危険率 5% で有意差があった。



推定下限値で有意差があった「ハ（印刷の業務）」と「ニ（文字の書込み又は描画の業務）」及び「チ（洗浄又は払拭の業務）」は、いずれも推定範囲にあるデータ数の割合が多いことにより有意差があるとなったことから、推定範囲は安全側にあるので、推定下限値については有機溶剤業務のいずれの号別区分でもA測定の上側5%値又はB測定値の大きな方の値として良いと考えられる。

推定上限値で有意差があった「イ（有機溶剤等の製造の業務）」と「ロ（有機溶剤等を使用した化成品の製造の業務）」も、推定範囲にあるデータ数の割合が多いことにより有意差があるとなったことから、推定範囲は安全側にあるので、推定上限値についても有機溶剤業務のいずれの号別区分でもA測定の幾何平均値として良いと考えられる。

表 11 有機溶剤業務の号別区分ごとの曝露濃度推定範囲内にあった実測データ数  
(重複あり)

号別区分	対象データ数	曝露濃度の推定下限値以上のデータ数	曝露濃度の推定上限値以下のデータ数
イ又はロ	40	35 (87.5%)	37 (92.5% *)
ハ又はニ	45	44 (97.8% *)	33 (73.3%)
ホ	43	35 (81.4%)	38 (88.4%)
ヘ又はト	90	81 (90.0%)	76 (84.4%)
チ	126	122 (96.8% *)	98 (77.8%)
リ	88	78 (88.6%)	62 (70.5%)
ヌ	48	43 (89.6%)	38 (79.2%)
ル	4	4 (100%)	1 (25.0%)
ヲ	0	-	-
全データ	484	442 (91.3%)	383 (79.1%)

\*は全データに対して危険率5%で有意差あり（ただし、ルはデータ数が少ないので有意差検定を行っていない。）

## 2 換気設備の種類ごとの作業環境濃度と曝露濃度との関係

作業環境測定のア測定値の幾何平均値を曝露濃度の推定下限値、A測定の上側5%値又はB測定値の大きな方の値を曝露濃度の推定上限値としたとき、この推定範囲に入る曝露濃度の実測データ数を換気設備の種類ごとに示すと表12のとおりとなった。換気設備の分類は、環境空气中に有害物質を漏れいさせないように制御する密閉設備、囲い式局所排気装置、外付け式局所排気装置、プッシュプル型換気装置を「局排等」とひとまとめとし、それ以外の一度作業場内に有害物質が発散してしまう吸引性能が十分でない局所排気装置、機械換気装置（全体換気装置）、自然換気を「全体換気」とひとまとめにした。単位作業場所の換気設備がどちらに該当するかは、調査時に作業環境測定士が判断した有害物質の制御方法の有効性によるものとした。例えば、局所排気装置等が設置されていても全ての発生源に対して有効な局所排気装置が設置されていないのであれば、「全体換気」に該当するとした。

推定範囲を満足する割合を有意差検定すると、全データに対して、いずれの換気設備も推定下限値及び推定上限値ともに危険率5%では有意差はなかった。

したがって、作業環境濃度から曝露濃度を推定する場合には換気設備の種類にかかわらず、推定下限値をA測定値の幾何平均値とし、推定上限値をA測定値の上側5%値又はB測定値の大きな方の値として良いと考えられる。

表12 換気設備の種類ごとの曝露濃度推定範囲内にあった実測データ数

換気設備の種類	対象データ数	曝露濃度の推定下限値以上のデータ数	曝露濃度の推定上限値以下のデータ数
局排等	149	137 (91.9%)	112 (75.2%)
全体換気	204	183 (89.7%)	162 (79.4%)
全データ	353	320 (90.7%)	274 (77.6%)

### 3 エアロゾル発生の有無ごとの作業環境濃度と曝露濃度との関係

作業環境測定値のA測定値の幾何平均値を曝露濃度の推定下限値、A測定値の上側5%値又はB測定値の大きな方の値を曝露濃度の推定上限値としたとき、この推定範囲に入る曝露濃度の実測データ数をエアロゾル発生の有無ごとに示すと表13のとおりとなった。

推定範囲を満足する割合を有意差検定すると、全データに対してはエアロゾル発生の有無にかかわらず推定下限値及び推定上限値ともに危険率5%では有意差はなかった。

したがって、エアロゾル発生の有無にかかわらずA測定値の幾何平均値を曝露濃度の推定下限値として、推定上限値をA測定値の上側5%値又はB測定値の大きな方の値として良いと考えられる。

表13 エアロゾル発生の有無ごとの曝露濃度推定範囲内にあった実測データ数

エアロゾルの発生	対象データ数	曝露濃度の推定下限値以上のデータ数	曝露濃度の推定上限値以下のデータ数
有	90	79 (87.8%)	66 (73.3%)
無	263	241 (91.6%)	208 (79.1%)
全データ	353	320 (90.7%)	274 (77.6%)

### 4 作業環境測定の評価結果の管理区分ごとの作業環境濃度と曝露濃度との関係

作業環境測定値のA測定値の幾何平均値を曝露濃度の推定下限値、A測定値の上側5%値又はB測定値の大きな方の値を曝露濃度の推定上限値としたとき、この推定範囲に入る曝露濃度の実測データ数を作業環境測定値の評価結果ごとに示すと表14のとおりとなった。

推定範囲を満足する割合を有意差検定すると、全データに対して作業環境測定値の評価結果にかかわらず推定下限値は危険率5%では有意差はなかった。また、推定上限値で有意差があった「第3管理区分」も、推定範囲にあるデータ数の割合が多いことにより有意差があったことから、推定範囲は安全側にあるので、推定上限値についても作業環境測定値の評価結果にかかわらずA測定値の上側5%値又はB測定値の大きな方の値をとって良いと考えられる。

表 14 作業環境測定の評価結果ごとの曝露濃度推定範囲内にあった実測データ数

評価結果	対象データ数	曝露濃度の推定下限値以上のデータ数	曝露濃度の推定上限値以下のデータ数
第1管理区分	277	256 (92.4%)	205 (74.0%)
第2管理区分	43	37 (86.0%)	37 (86.0%)
第3管理区分	33	27 (81.8%)	32 (97.0% *)
全データ	353	320 (90.7%)	274 (77.6%)

\*は全データに対して危険率 5%で有意差あり

5 曝露濃度の実測値と推定下限値との比の分布

作業環境測定のア測定値の幾何平均値を曝露濃度の推定下限値としたときの、曝露濃度の実測値と推定下限値との比の分布を図7に示した。

曝露濃度の約 40%のデータが推定下限値の 1 倍以下、約 55%のデータが推定下限値の 2 倍以下、約 95%データが推定下限値の 15 倍以下であった。曝露濃度の実測値と推定下限値との比の最大は、実測値が推定下限値の 165 倍であった。(表 15 参照)

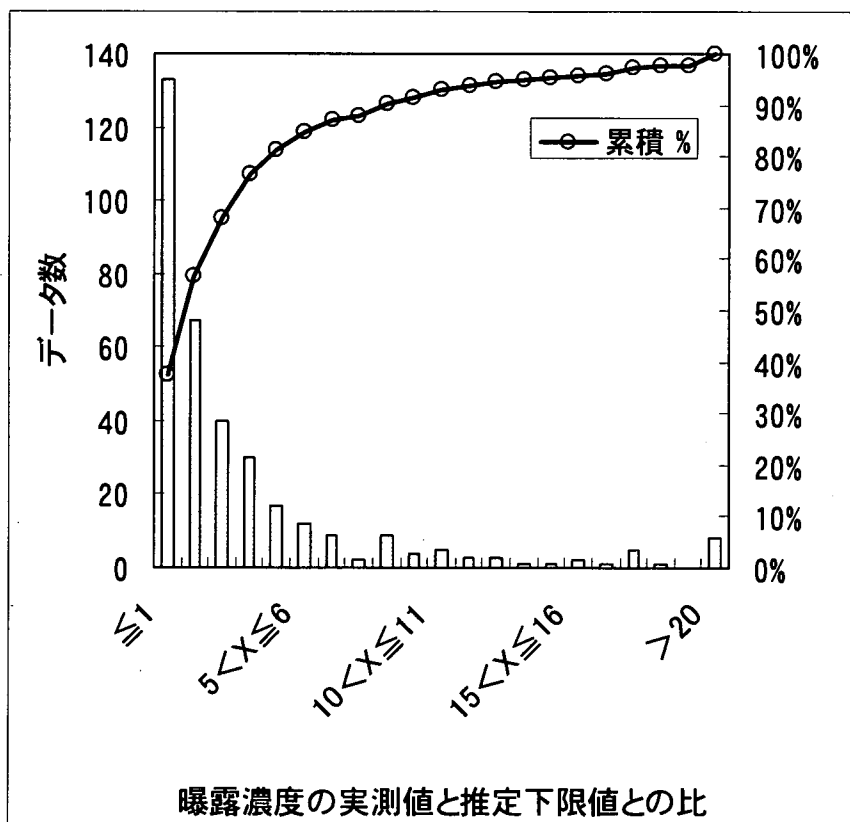


図 7 曝露濃度の実測値と推定下限値との比の分布

表 15 曝露濃度の実測値と推定下限値との比

曝露濃度の実測値 と推定下限値との比	データ数	累積 %	曝露濃度の実測値 と推定下限値との比	データ数	累積 %
≤1	133	37.7%	11<X≤12	3	93.8%
1<X≤2	67	56.7%	12<X≤13	3	94.6%
2<X≤3	40	68.0%	13<X≤14	1	94.9%
3<X≤4	30	76.5%	14<X≤15	1	95.2%
4<X≤5	17	81.3%	15<X≤16	2	95.8%
5<X≤6	12	84.7%	16<X≤17	1	96.0%
6<X≤7	9	87.3%	17<X≤18	5	97.5%
7<X≤8	2	87.8%	18<X≤19	1	97.7%
8<X≤9	9	90.4%	19<X≤20	0	97.7%
9<X≤10	4	91.5%	>20	8	100.0%
10<X≤11	5	92.9%	合計	353	

曝露濃度の実測値と推定下限値との比が 15 倍を超えるデータは少ないが、発生源のそばで連続して作業が行われる場合の B 測定値が、A 測定の幾何平均値の 15 倍を超えた場合には、曝露濃度は、推定下限値の 15 倍を超えることを否定することはできないことから、曝露濃度の推定上限値は、A 測定の 5 割値又は B 測定値の大きな方の値という条件だけでよいと考えられる。

#### E. 結論

3 年間にわたって得られた作業環境濃度と曝露濃度の測定結果により、曝露濃度の値は、有機溶剤業務の号別区分、換気設備の種類、エアロゾルの発生の有無及び作業環境測定の評価結果にかかわらず作業環境濃度の以下に示した範囲にあると考えられた。

$$\begin{aligned}
 & \text{A 測定の幾何平均値} \\
 & \leq \text{曝露濃度の値} \leq \\
 & \text{A 測定の 5 割値又は B 測定値の大きな方の値}
 \end{aligned}$$

ただし、B 測定点が作業者の呼吸域から離れていると、実際の曝露濃度は推定上限値を超えることもあると考えられた。

#### G. 研究発表

##### 1 論文発表

なし

##### 2 学会発表

山室堅治、小堀衛、菅野誠一郎、櫻井治彦、有機溶剤業務の作業環境濃度とばく露濃度の関係について、第 28 回作業環境測定研究発表会、p58-59、2007