

化学物質が空気中でミストの状態が存在する場合、EASEモデルのばく露推定値は、図1-2示した範囲であるが、揮発性評価区分6 (25kPa<V.P.) の局所排気装置の濃度範囲の下限値100ppmを超えるデータは81データ (約0.35%と少なく) と非常に少なかった。これらのデータのうち、最もミストができる可能性のある作業区分イ (塗装作業、ほとんどが吹き付け塗装作業) は7データと少なく、管理濃度が100ppm以上ものが61データあったことから、幾何平均値にはミストの影響はほとんどないと思われる。

図1-4の物質別分圧に対するEASEモデルばく露推定値と物質別B測定値の比較では、分圧が1.5 kPa以下では制御方法が局所排気装置のばく露濃度推定値の範囲を超えるものがかなり増えている。これはB測定値は作業環境測定士が最も濃度が高くなる場所、時間帯を選んで測定した10分間の測定値であることから、換気設備の有効性について情報がないこと等が原因と思われる。B測定は、個人ばく露量において、高濃度短時間ばく露が問題となる物質に設定されている、短時間ばく露限界値 (STEL : short-term exposure limit) と比較するための15分間の個人ばく露測定に近いものである。STELは1日8時間週40時間の平均濃度 (TWA) 比べて1.5~2.0倍程度であり、その意味では比較する意味があると思われる。しかしながら、STELとTWAの測定時間を考えるとその基準値の比は少ないように思える。STELと比較するばく露の測定がリアルタイムモニターで行われていれば比較的容易に測定が行えるが、15分間測定であれば定量下限の問題や最も高濃度になる時間帯については作業員1人1々に専門家がついて測定を行っているのか疑問である。作業環境測定におけるB測定は作業環境測定士が事前に得た高濃度ばく露の情報、現場の作業員から得た情報、A測定を実施しながら作業状況の観察等から時間帯、場所を決定している。EASEモデルのばく露濃度推定値とB測定値との比較はこの辺で止めておく。

表1-5に示した有機溶剤業務の号別区分イ、ロ、ハ、ニ、ホ、ヘ、ト、チ、リ、ヌ、ルに分けた、対象物質別分圧に対する対象物質のA測定値の幾何平均値のグラフを図1-5~1-15に示す。作業区分によりプロットの形状にやや特徴がある。有機溶剤業務は重複しているものもあり、それぞれの有機溶剤業務にプロットされる。特に、ヘ (接着剤塗布)、ト (接着) は重複する割合が高く、図1-11,12はグラフの形状もやや似ている。図1-5,6,8,15は各評価区分の局排のばく露推定値の濃度範囲を超えるものは少ない。特に図1-15は分圧が高いものが多く、幾何平均濃度は低く、検知管のプロットがある。これは、号別区分ル (試験、研究) では純物質の化学品を使うことが多く使用量が少ないためと思われる。表1-12,13は有機溶剤業務の号別区分チ (払拭洗浄)、リ (塗装) は重複した作業も少なくない。図1-11には分圧の高い部分にプロットがあり、検知管のプロットも多いが、図1-13には図1-12検知管のプロットも少なく分圧の高い部分でのプロットも少ない。塗装業務での払拭洗浄で用いる塗料、シンナーは混合溶剤製品が多く、各化学物質のモル分率は低くなるため分圧は低くなる。一方、塗装業務を伴わない洗浄作業は純粋化学物質が多く、検知管のプロットが多くなる。また、モル分率を乗じないものが多いことから分圧 (蒸気圧) は高くなる。

有機溶剤業務の号別区分ごとに分圧に対する幾何平均値のグラフには特徴があり、ばく露推定モデルを構築する上で作業内容による層別化が必要であることが示唆される。

## 1.6 まとめ

国内の作業環境測定結果とEASEモデルのばく露濃度推定値とを比較するために、中災防DBより必要な情報を抽出し、使用している化学物質の工程温度における対象物質の分圧が入った23348データのデータベースを作成した。EASEモデルのガスおよび蒸気の吸引モデルのばく露濃度推定値と国内の作業環境測定におけるA測定値の幾何平均値を比較した結果、対象物質の分圧が  $V.P. \leq 0.5\text{kPa}$ 、 $0.5\text{kPa} < V.P. \leq 1.5\text{kPa}$ 、 $1.5\text{kPa} < V.P. \leq 10\text{kPa}$ 、 $10\text{kPa} < V.P. \leq 25\text{kPa}$ 、 $25\text{kPa} < V.P.$ の条件で、制御方法が局排の条件では、EASEモデルにおける、ばく露濃度推定値の範囲を超えた割合はそれぞれ29.5%、18.2%、8.9%、7.6%、0.3%であり分圧が高くなるにつれて低下した。また、同様の分圧条件において、制御方法がEASEモデルでいう隔離（発散源から2～3m離れた作業位置）の条件下では、EASEモデルのばく露濃度推定値の範囲を超えた割合はそれぞれ4.1%、4.9%、2.0%、2.6%、0%と低い割合であった。また、空気中にミストが存在する場合のばく露濃度推定値に入るデータはほとんどなかった。また、有機溶剤業務の号別区別にばく露濃度推定値と幾何平均値を比較した結果、号別区分によって傾向がやや異なっていることから、国内のばく露モデルを構築するには作業内容の情報を入れたモデルの方がより精度が高くなることが示唆された。

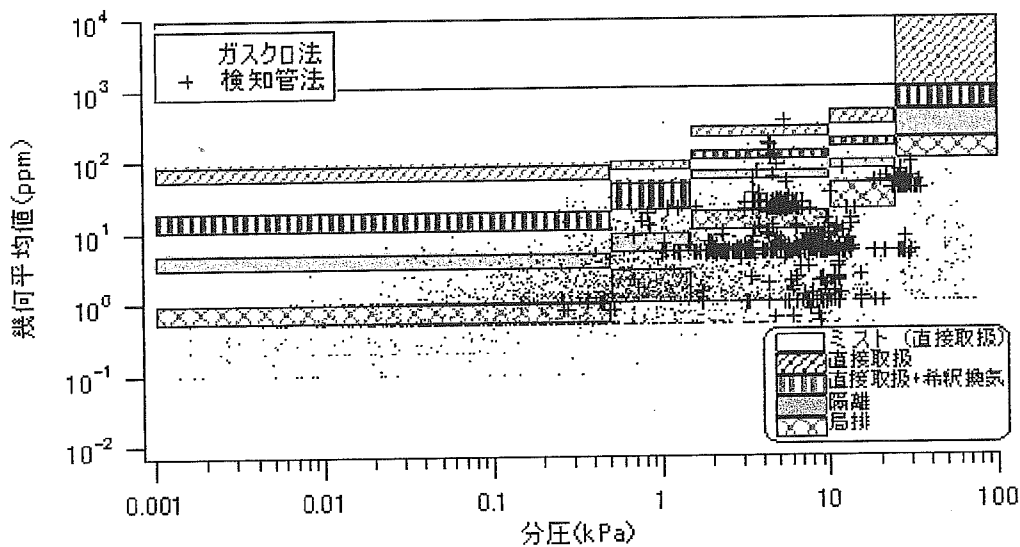


図1-3 分圧に対するEASEモデルばく露推定値と幾何平均値

表1-8 揮発性評価区分ごとの各制御方法区分のばく露推定値範囲を超えるデータ数およびその割合

揮発性評価区分	制御方法区分	ばく露推定値を超えるデータ数	百分率(%)
低い $0.5\text{kPa} \geq \text{V.P.}$	局排	3273	29.5
	隔離	454	4.1
	直接取扱希釈+希釈換気	60	0.5
	直接取扱	4	0.0
	全データ	11095	100.0
低いから中程度 $0.5\text{kPa} < \text{V.P.} \leq 1.5\text{kPa}$	局排	1136	18.2
	隔離	304	4.9
	直接取扱希釈+希釈換気	15	0.2
	直接取扱	1	0.0
	全データ	6232	100.0
中程度 $1.5\text{kPa} < \text{V.P.} \leq 10\text{kPa}$	局排	408	8.9
	隔離	92	2.0
	直接取扱希釈+希釈換気	21	0.5
	直接取扱	113	2.5
	全データ	4582	100.0
中程度から高い $10 < \text{kPa} \leq 25$	局排	55	7.6
	隔離	19	2.6
	直接取扱希釈+希釈換気	8	1.1
	直接取扱	3	0.4
	全データ	727	100.0
高い $25\text{kPa} < \text{V.P.}$	局排	2	0.3
	隔離	0	0.0
	直接取扱希釈+希釈換気	0	0.0
	直接取扱	0	0.0
	全データ	763	100.0

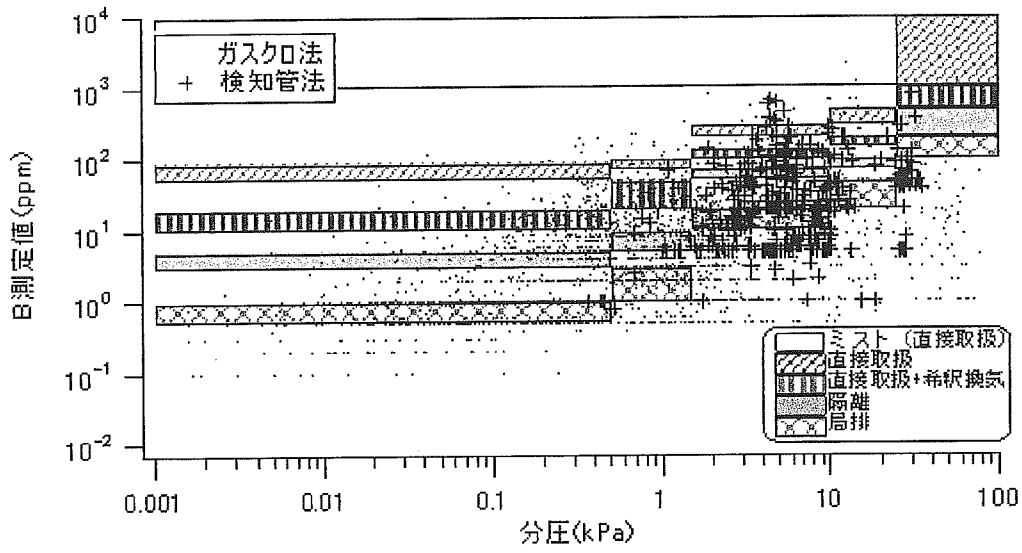


図1-4 分圧に対するEASEモデルばく露推定値とB測定値

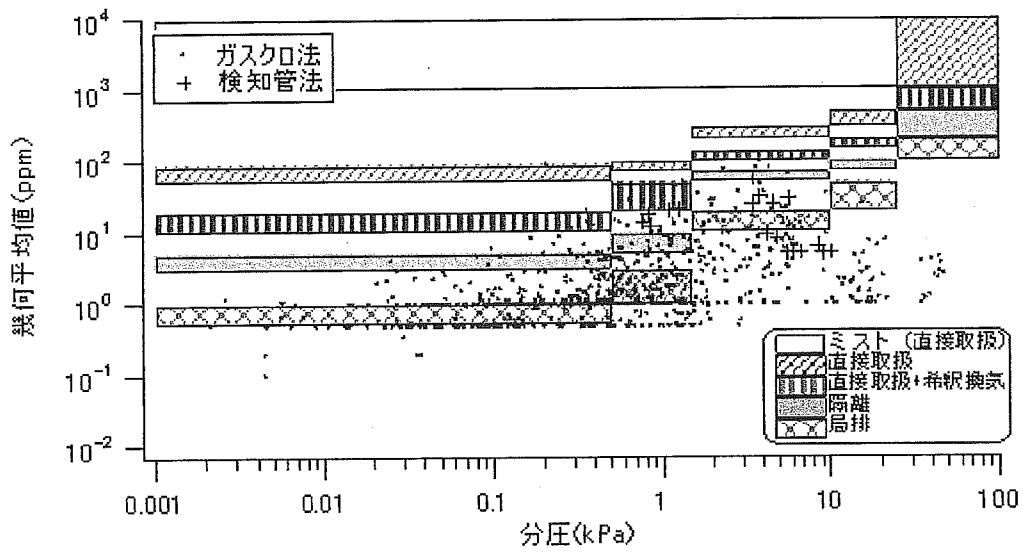


図1-5 分圧に対するEASEモデルばく露推定値と幾何平均値（号別区分イ）

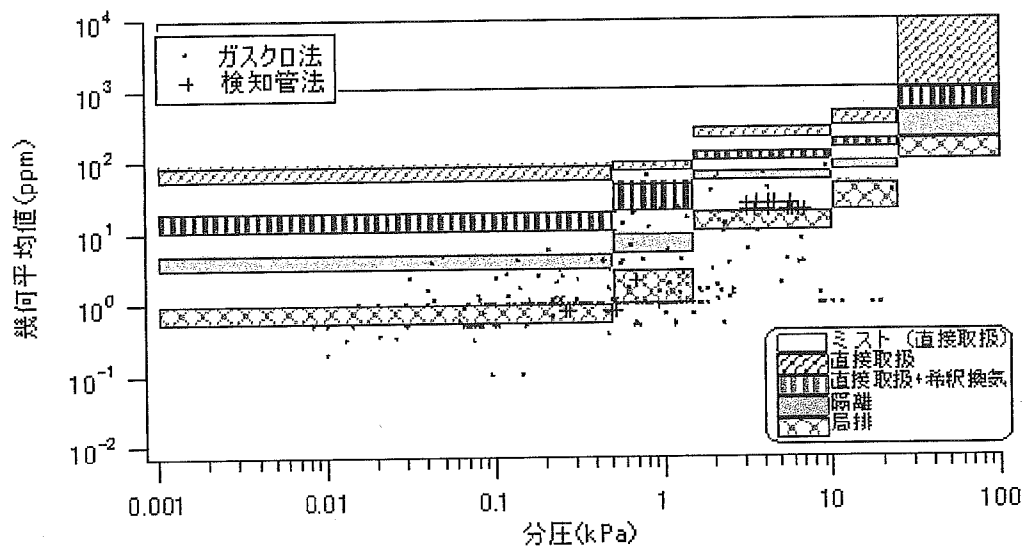


図1-6 分圧に対するEASEモデルばく露推定値と幾何平均値（号別区分ロ）

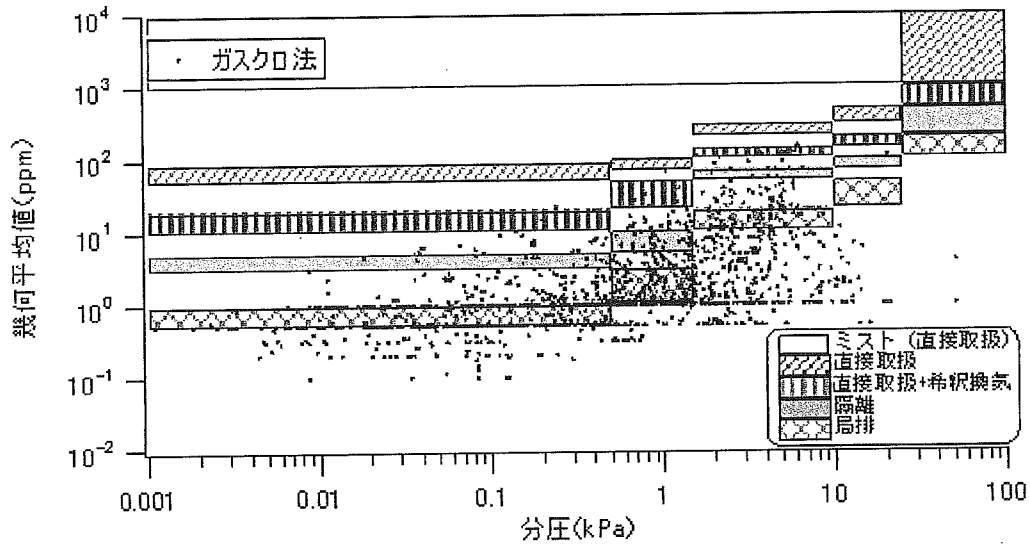


図1-7 分圧に対するEASEモデルばく露推定値と幾何平均値（号別区分ハ）

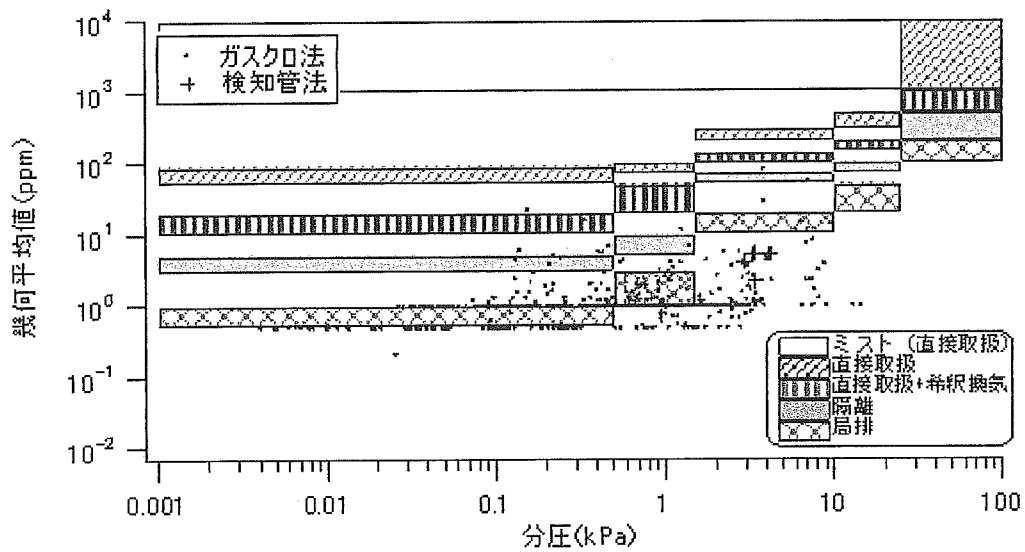


図1-8 分圧に対するEASEモデルばく露推定値と幾何平均値（号別区分ニ）

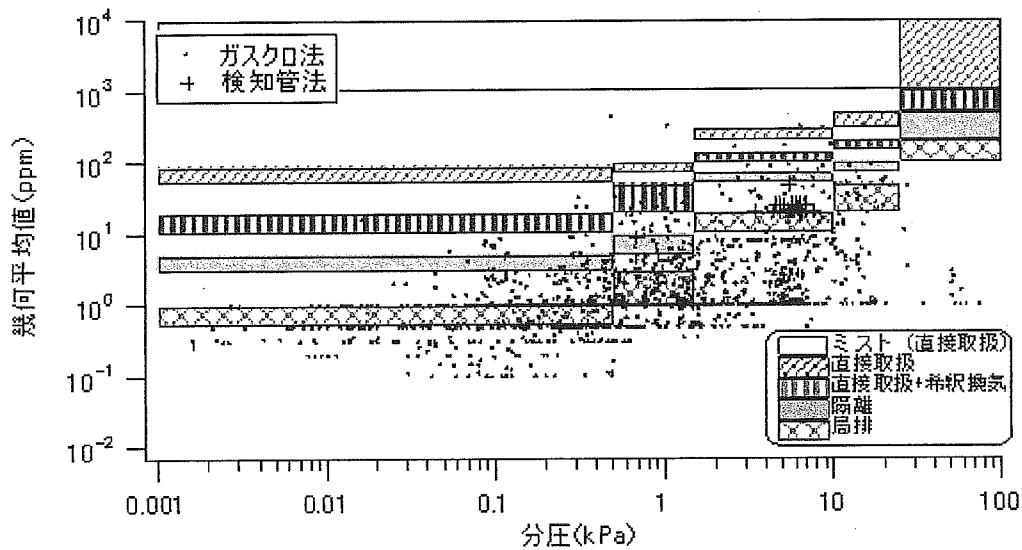


図1-9 分圧に対するEASEモデルばく露推定値と幾何平均値（号別区分ホ）

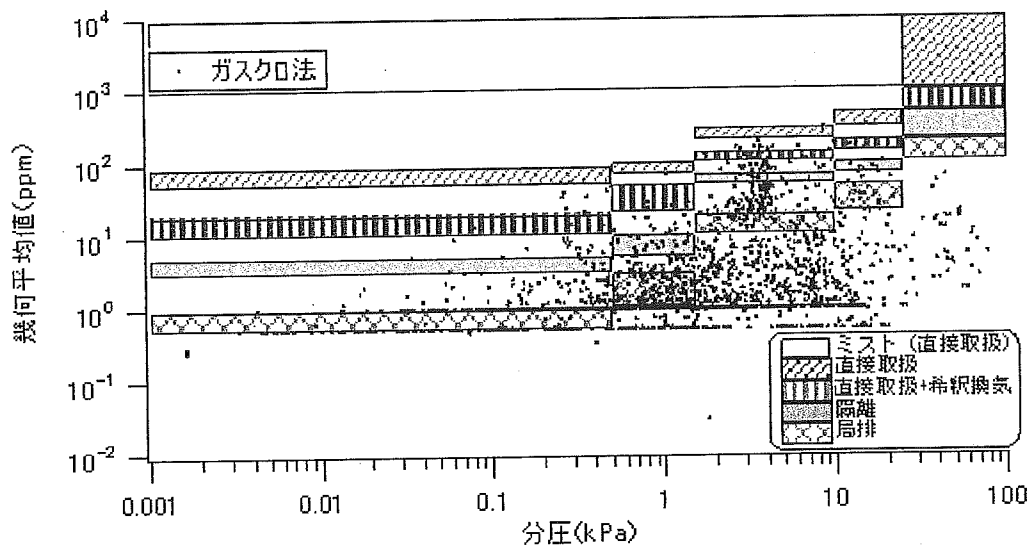


図1-10 分圧に対するEASEモデルばく露推定値と幾何平均値（号別区分へ）

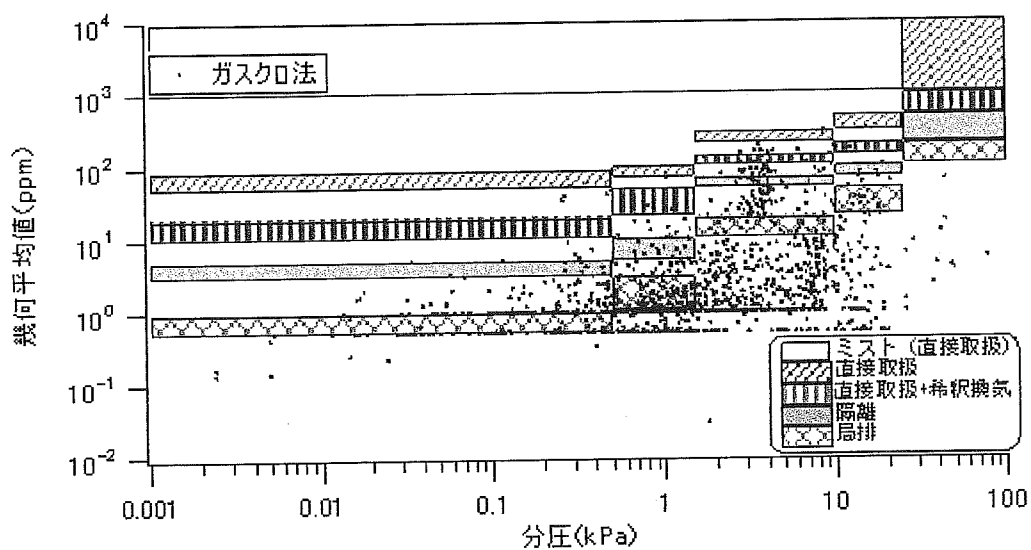


図1-11 分圧に対するEASEモデルばく露推定値と幾何平均値（号別区分ト）

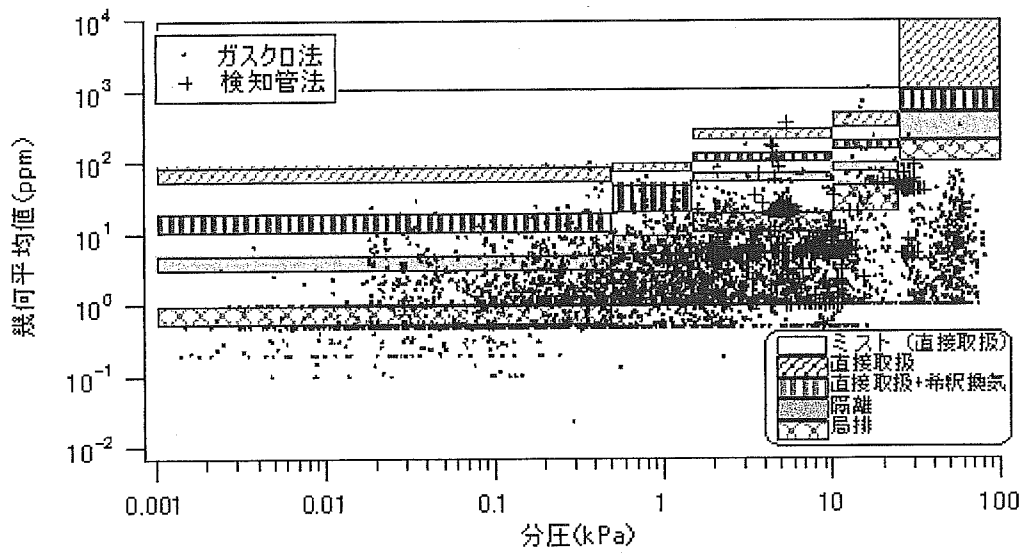


図1-12 分圧に対するEASEモデルばく露推定値と幾何平均値（号別区分チ）

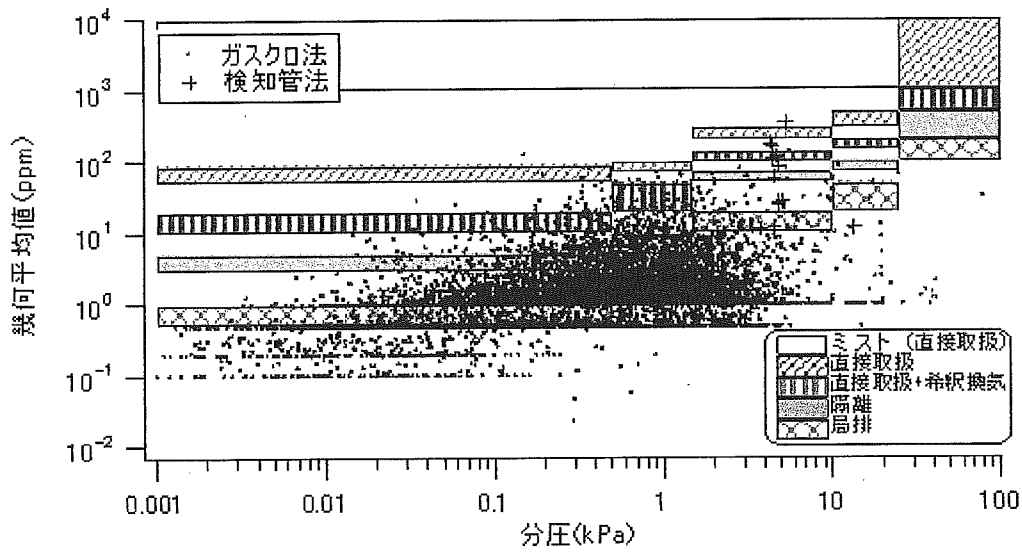


図1-13 分圧に対するEASEモデルばく露推定値と幾何平均値（号別区分リ）



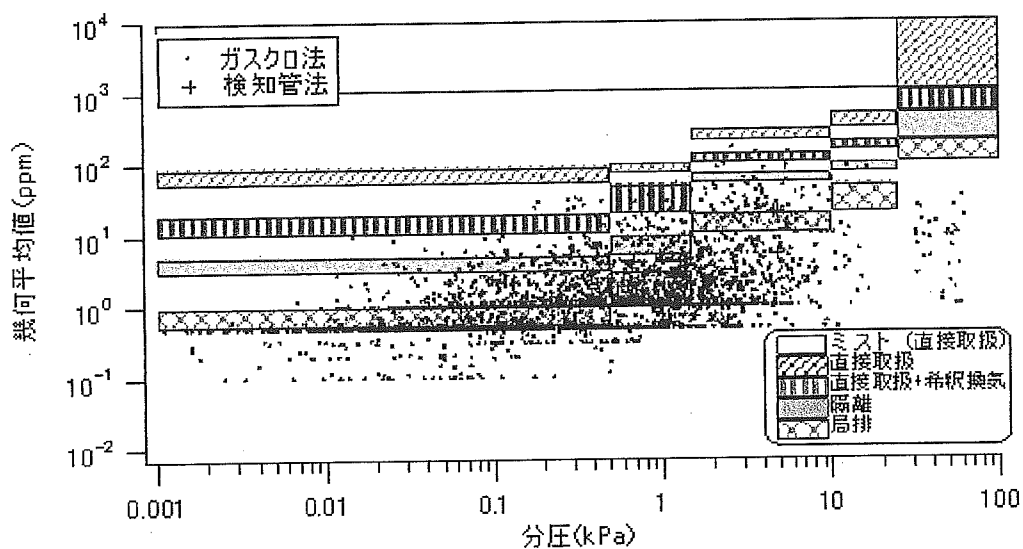


図1-14 分圧に対するEASEモデルばく露推定値と幾何平均値（号別区分ヌ）

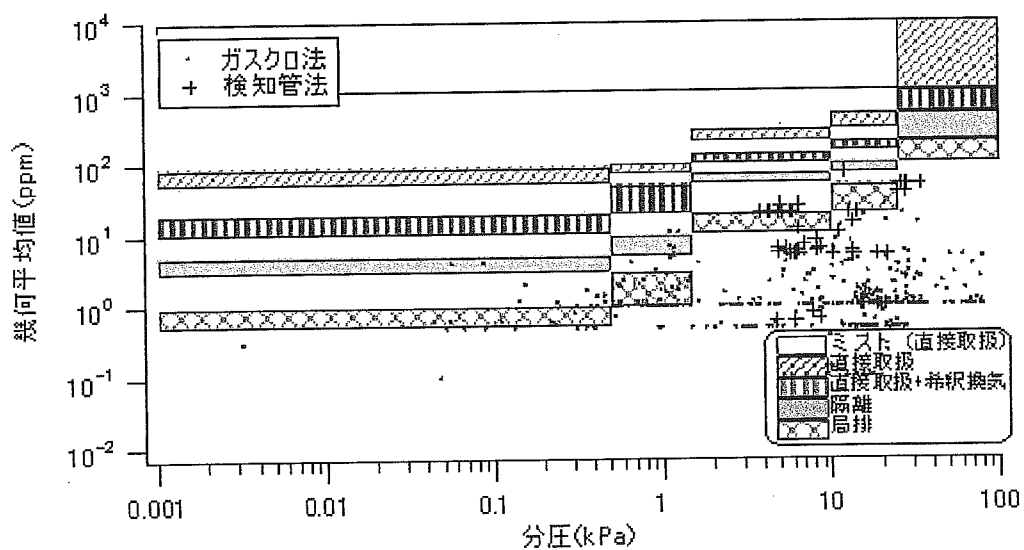


図1-15 分圧に対するEASEモデルばく露推定値と幾何平均値（号別区分ル）

## 2. 暴露推定モデルの開発

菅野誠一郎 芹田富美雄

独法産業医学総合研究所作業環境計測研究部

### A. 研究目的

化学物質の自主管理が進められており、企業は取り扱う化学物質のリスクアセスメントを行うことが求められている。リスクアセスメントには、物質の毒性情報と暴露の程度の比較が必要であるが、適切な分析方法が無いあるいは、事前にアセスメントを行うなどの場合、暴露は、測定ではなく推定で求める必要がある。

本研究では、日本の作業環境に合わせたリスクアセスメント等に使用する暴露推定モデルを開発することを目的とする。

### B. 研究方法

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モデルを作成する。

新しく作成した作業環境測定データベースには、A/B 測定値、幾何平均、算術平均、管理区分、溶剤の種類、有機溶剤作業区分、混合溶剤のモル分率、評価値、揮発性評価コードがある。モデルの作成には、A 測定濃度の幾何平均をモル分率で補正した濃度、管理区分、有機溶剤の号別作業区分を用いた。

### C. 研究結果

#### 濃度推定モデルの概要

物質の揮発性評価コード、取り扱う作業の種類、濃度管理対策の有無に基づき環境濃度の推定を行うこととした。作業の種類については、有機溶剤作業の号別作業区分を用い、濃度管理については有効に働いている場合と、管理がないまたは、有効ではない場合の 2 種とした。揮発性評価コードは、対象物質の蒸気圧を 6 区分にしたものである。(ただし有機溶剤については、もっとも蒸気圧の低い コード 1 (蒸気圧 < 0.001kPa) に相当する物質はない)

測定は、混合溶剤の場合が多いので、幾何平均値をそのモル分率で除して純品として使用された場合の幾何平均値 (以下幾何平均値と呼ぶ) とした。また揮発性評価コードも、補正した幾何平均値について再区分した。

作業区分ごと、揮発性評価コード 2 で第 1 管理区分の測定値の幾何平均値の平均を

求め、同様に評価コード 3, 4, 5 について平均を求めると、表 1 に示すようにデータ数が少ない場合があり、また評価コードと濃度の逆転が見られる場合がある。これを回避するために本研究の蒸発速度の測定から得られた蒸発速度と蒸気圧の回帰式を用いて、揮発性評価コード 3, 4, 5, 6 の平均濃度を求め、良好に管理を行った場合の濃度の予測値とした。評価コード 1 については、蒸発速度と蒸気圧の回帰式から評価コー

表1 作業区分、管理区分ごとのデータ数

	管理区分	管理区分		
		1	2	3
総数		19617	2187	1561
揮 発 性 評 価 コ ー ド	イ	678	81	47
	ロ	97	18	19
	ハ	934	186	197
	ニ	539	34	6
	ホ	1210	97	94
	ヘ	964	133	210
	ト	229	2	8
	チ	3318	327	321
	リ	11106	1270	626
	ヌ	104	24	20
	ル	438	15	13

ド2と大きな違いがないので、評価コード2の平均値より低いとした。

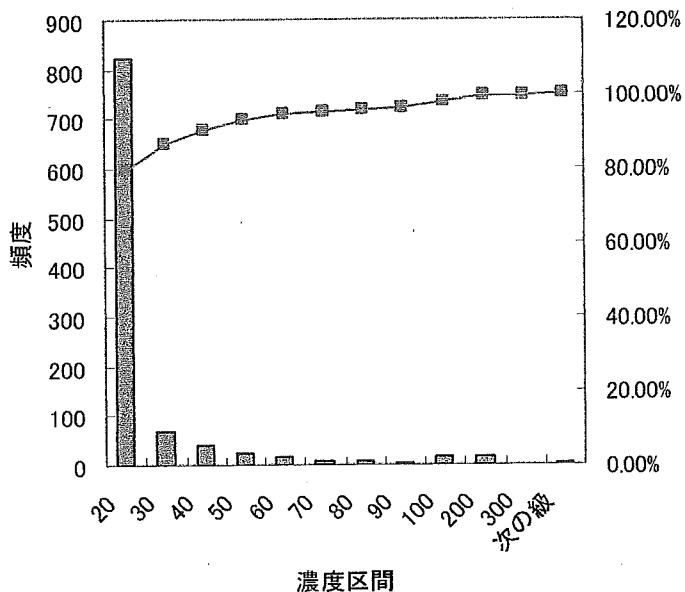
揮発性評価コード別に、管理区分1と管理区分3の幾何平均値の比を求め、これを管理区分1の平均値に掛けて、管理不十分な場合の濃度平均値の推定値とした。

推定濃度の上限を見積もるために、測定値の分布（1例として図1）を見ると、正規分布、対数正規分布とはならず、濃度が低いほうに分布が偏っており、測定下限から最頻値の3倍までにほぼ90%の測定値が入っている。このことから推定した平均値の3倍の値を濃度上限の推定値とした。（平均値は最頻値より高いのでほぼ90%以上が含まれる）評価コード6については、蒸気圧の上限がないことから工学的対策がない場合上限なしとした。（実際には飽和蒸気圧より高濃度になることはない）

#### 暴露推定モデル

得られた暴露推定モデルを（表1及び2）に示す。このモデルでは、対象物質の蒸気圧、作業内容、管理対策の有無のデータのみで濃度の推定が行えるため、簡便である。なお推定値は、1, 5, 10に丸めてある。

図1号別区分ハの濃度分布



濃度管理が良好な場合

揮発性指数 号別区分	1		2		3		4		5		6	
	上限	平均値	上限	平均値	上限	平均値	上限	平均値	上限	平均値	上限	平均値
イ	<10	10	30	10	30	20	60	60	180	80	240	
ロ	<5	5	15	5	15	10	30	30	90	40	120	
ハ	<5	5	15	5	15	10	30	25	75	35	105	
ニ	<15	15	45	20	60	40	120	125	375	170	510	
ホ	<5	5	15	5	15	10	30	30	90	40	120	
ヘ	<10	10	30	15	45	30	90	85	255	115	345	
ト	<2	2	6	5	15	5	15	15	45	20	60	
チ	<5	5	15	5	15	10	30	35	105	50	150	
リ	<5	5	15	10	30	20	60	55	165	70	210	
ヌ	<1	1	3	1	3	5	15	10	30	10	30	
ル	<10	10	30	10	30	20	60	60	180	85	255	

表 1 濃度管理を良好に行った場合の濃度推定表

管理を行わない場合

揮発性指数 号別区分	1		2		3		4		5		6	
	平均値	上限	平均値	上限	平均値	上限	平均値	上限	平均値	上限	平均値	上限(*)
イ	<10	30	90	45	135	90	270	410	1230	245		
ロ	<5	15	45	25	75	50	150	220	660	130		
ハ	<5	15	45	20	60	40	120	180	540	105		
ニ	<15	65	195	95	285	190	570	890	2670	530		
ホ	<5	15	45	25	75	50	150	220	660	130		
ヘ	<10	45	135	65	195	130	390	610	1830	360		
ト	<2	5	15	10	30	20	60	100	300	60		
チ	<5	20	60	30	90	60	180	260	780	155		
リ	<5	25	75	40	120	80	240	380	1140	225		
ヌ	<1	5	15	5	15	10	30	60	180	35		
ル	<10	30	90	50	150	100	300	440	1320	260		

\* 上限は飽和蒸気圧とする

表 2 濃度管理を行わない場合の濃度推定表

#### 解析方法の選択理由

各作業区分とも第1管理区分のデータ数が一番多く、作業区分ごとに第1管理区分の測定値の幾何平均を求めることでその作業区分についての管理された作業場の濃度を推定できる。但し、管理濃度がその蒸気圧と関連しているわけではないため、管理濃度が高い物質と低い物質とで管理の程度が異なっている点に注意を要する。第3管理区分のデータを用いることで、その物質が本来示すであろう濃度を推定するほうが正しい方法かもしれないがデータ数が少ないため第1管理区分のデータを採用した。

管理不十分または管理しない場合の濃度については、第3管理区分のデータを用いて推定したが、以下に示すように作業区分により第3管理区分のデータが少ない場合があり、各作業区分について揮発性評価コード毎に第3管理区分のデータを用いて管理不十分な場合の濃度の推定を行うと十分な信頼性を確保するのが難しい場合があるため、作業区分を分けずに、揮発性評価コード毎に、第1管理区分と第3管理区分の幾何平均値の比を求め、作業区分に共通の係数として第1管理区分の幾何平均値に掛け、第3管理区分の幾何平均値とした。

#### D. 考察

実際の作業環境測定データに基づいており信頼性があるとおもわれるが、この点については今後の実証作業が必要である。また、数値計算モデル、流体力学モデルと比較検討し、実用性を検証することが必要である。

#### E. 結論

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、作業環境管理、物質の揮発性、作業内容から作業環境濃度を推定するモデルを作成した。常温で液体の有機化合物で、ミストの発生を伴わない場合に限られるが、蒸気圧と作業内容及び管理方法が分かれば推定値が求められる。

#### G. 研究発表

1. 論文発表  
なし
2. 学会発表  
なし

#### H. 知的財産権の出願・登録状況

なし

### 3. 有機溶剤の蒸発速度

菅野誠一郎 芹田富美雄  
独法産業医学総合研究所作業環境計測研究部

#### A. 研究目的

リスクアセスメントには、暴露濃度が必要であるが、直接測定ができない場合に用いるために暴露推定モデルが提案されている。モデルには、有害物の発生速度を必要とするもの、有害物の物性値のみから環境濃度を推定するものなどいくつかの方式がある。液体の蒸発は、有害物の発生原因としてごく一般に起こり、蒸発速度の推定式もいくつか提案されている。しかし、これらの推定式は、ダクト内での蒸発速度の測定に基づいており広い室内での蒸発と異なること、及び、推定式に用いられるパラメータに、実際の大きさや長さから直接求めることができないものがあるなど、現実に適用しにくい点がある。本実験では、モデル計算に用いる蒸発速度の推定法を検討するために、有機溶剤の蒸発速度の測定を行った。

#### B. 研究方法

実験室：屋内に設置した幅 3.0m、高さ 2.5m、奥行き 10mの直方体の部屋で、長手方向の壁のほぼ全面に空気の取り入れ口及び反対側に吸引口がある。取り入れ口、および吸引口にはハニカムがたの整流器が設置してあり、ファンで空気を吸引することにより部屋の断面に渡りほぼ一定の気流を流すことができる。また、気流の速度はインバータで、ファンの回転数を変えることにより設定できる。

気流の速度：室内を想定し < 0.05 (吸引ファン停止) 0.15、0.26 m/秒を用いた。

実験装置：実験室の中央のカート上に台秤を置き、縁からおよそ 5mm の深さまで溶剤を入れたシャーレを置き蒸発速度を測定した。重量および溶剤の温度及び気温は、30 秒毎に記録した。気温は制御していない。

容器：シャーレは、直径 10、15、20 cm の 3 種を使用した。

用いた溶剤：エタノール、酢酸エチル、酢酸ブチル、シクロヘキサン、トルエン、キシレン、1,1,1-トリクロロエタン、2-ブタノン 8 種の有機溶剤について測定した。溶剤は、作業現場の使用頻度および、溶剤の種類を考慮して選定した。

蒸発速度：重量の測定値を 7 点の平滑化微分法を用いて微分して求めた。

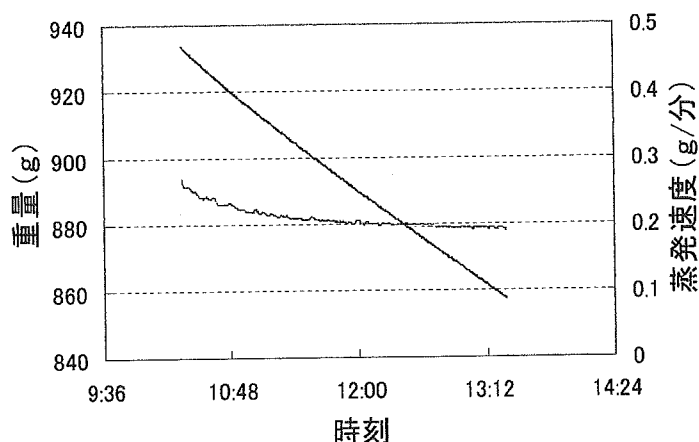
蒸気圧：NIST Chemistry WebBook から Antoine 式のパラメータを検索し計算した。

#### C. 研究結果

図 1 は、シクロヘキサンの蒸発速度測定例である。実験開始後およそ 30 分で、液温が低下しほぼ一定になり、蒸発速度も測定開始時は高く徐々に低くなりほぼ一定となるが、変化の幅は 30% 程度であった。速度が一定になりかつ気温と液温の差が一定となったこの例では 30 分から 90 分の平均値を蒸発速度とした。

図 2 は、各溶剤の測定値を、測定時の液温での蒸気圧に対してプロットしたものである。蒸発速度

図1 シクロヘキサンの例



(mol/m<sup>2</sup>/min) は、開口面積、風速で異なるため、かなりのばらつきを示した。蒸発速度は、風速が高いほど大きくなり、またおおむね開口面が広いほど小さくなる傾向を示した。全データの蒸気圧と蒸発速度の最小二乗法による近似式は、

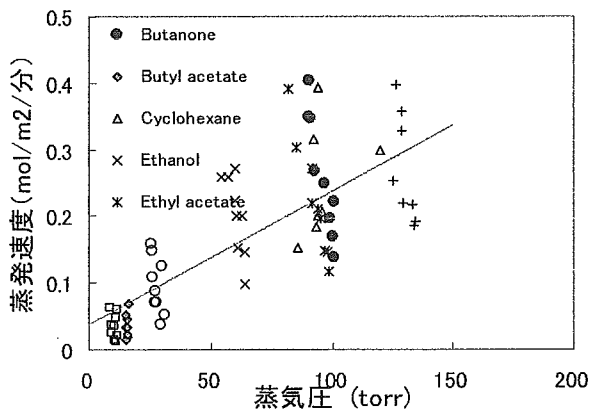
$$\text{蒸発速度 (mol/m}^2\text{/min)} = 0.002 * \text{蒸気圧 (mmHg)} + 0.039$$

となった。

表1は、各溶剤の蒸発速度の平均及び上限値(95%)を示したものである。蒸発速度は、変動係数が50%程度ある場合があり、風速の影響がかなりあることを示している。

表2は、蒸発速度と、蒸気圧及び蒸気圧と拡散係数の積の相関係数を示したものである。相関係数は、蒸気圧よりも蒸気圧と拡散係数の積の方がわずかに高いがほぼ同じである。風速毎の相関係数はかなり高くなるが風速と蒸発速度/蒸気圧の相関係数は0.6と低い。

図2 蒸発速度散布図



推定式との比較

以上の実験は、溶剤が容器の縁近くまで満たされている場合の結果であるが、溶剤がこぼれた場合等の蒸発速度の推定式が提案されている。実験結果と推定式による計算結果を比較した。用いた推定式はいずれも経験式である。

表1 有機溶剤の蒸発速度

溶剤	蒸気圧 (torr)	蒸発速度 (mol/m <sup>2</sup> /min)	最大値	標準偏差
Trichloroethane	130	0.269	0.431	0.081
Butanone	96	0.260	0.441	0.090
Cyclohexane	95	0.232	0.429	0.098
Ethyl acetate	92	0.223	0.397	0.087
Ethanol	60	0.202	0.321	0.060
Toluene	28	0.096	0.180	0.042
Xylene	10	0.036	0.073	0.018
Butyl acetate	15	0.036	0.073	0.019

表2 蒸発速度の相関係数

風速	蒸気圧	蒸気圧* 拡散係数
0.05 m/s	0.86	0.84
0.15 m/s	0.84	0.85
0.26 m/s	0.67	0.77
全データ	0.73	0.76



計算に用いた蒸発速度推定式

$$\text{GRAY : } R = 21.7D^{1.9} \nu^{-0.9} (100D^{-1} \nu W)^{0.625(D^{-1} \nu)^{0.3}} L^{-0.11} \sqrt{\frac{P}{P-P_i} \frac{P_i}{RT}}$$

$$\text{BAU : } R = 1.11 \cdot 10^{-2} D^{0.19} \nu^{-0.15} V^{-0.04} \frac{P_i}{RT}$$

$$\text{Mackey : } R = 4.82 \cdot 10^{-3} D^{0.67} \nu^{-0.67} V^{0.78} L_D^{-0.11} \frac{P_i}{RT}$$

$$\text{SUBTEC : } R = 1.6 \cdot 10^2 D^{0.58} V^{0.68} \frac{P_i}{P-P_i}$$

$$\text{EPA : } R = 2.5 \cdot 10^{-3} V^{0.78} \left( \frac{M_\infty}{M_i} \right)^{1/3}$$

$$\text{NIOH-2 : } R = 1.1 \cdot 10^{-6} V^{0.62} P_i^{1.02} \left[ \frac{(L^{3/4} - L_0^{3/4})^{2/3}}{L - L_0} \right]^{0.86}$$

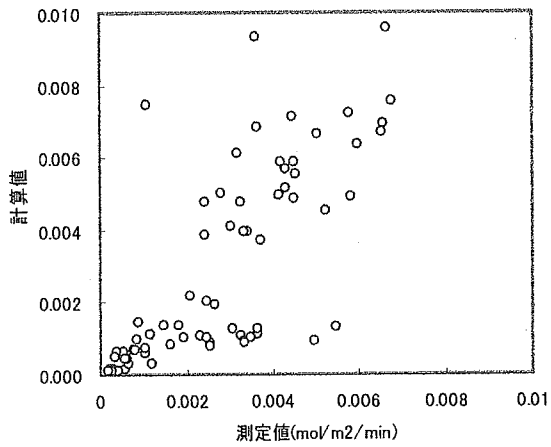
ここで 右辺に記号は、

R : 気体定数、 P : 全圧、 T : 気温、 D : 拡散係数、  $P_i$  : 分圧  
 $\nu$  : 空気の粘性係数、 V : 風速、 L : 液面の長さ、 M : 濃度 である。

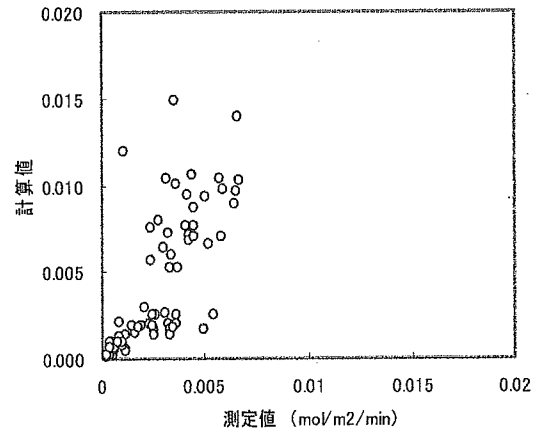
表3は、蒸発速度の実測値と推定値の比を各推定式についてまとめたものである。また各推定式での散布図を示す。散布図中の R は相関係数、A は回帰式の傾きである。傾きが、もともと 1 に近いのは、Mackay 式であるが、最大値最小値の比が 100 程度あり推定のばらつきが大きい。推定式は溶剤がこぼれた場合など、液面の深さが 0 の場合の推定値を求めるものではあるが、風速、蒸発面の大きさが考慮されており、これらを区別しなでプロットした図2と同程度のばらつきがあることは、これらの推定式を容器からの蒸発速度の推定に用いることに問題があるように思われる。

推定法	平均	最大値	最小値
Mackay	0.79	2.60	0.02
SUBTEC	1.18	4.04	0.04
EPA	0.13	0.24	0.03
NIOH2	1.96	7.19	0.09
Gray	1.41	4.82	0.04
BAU	0.98	3.59	0.02

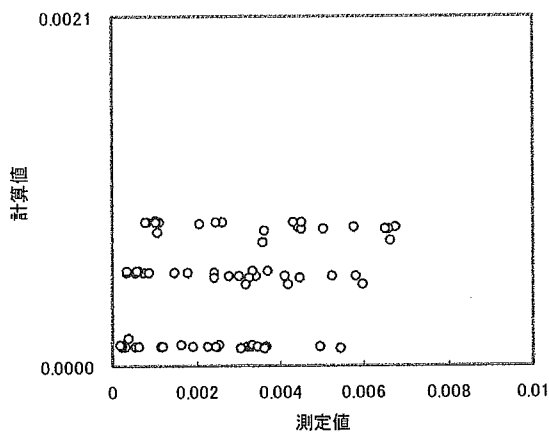
Mackay: R=0.74 A=1.06



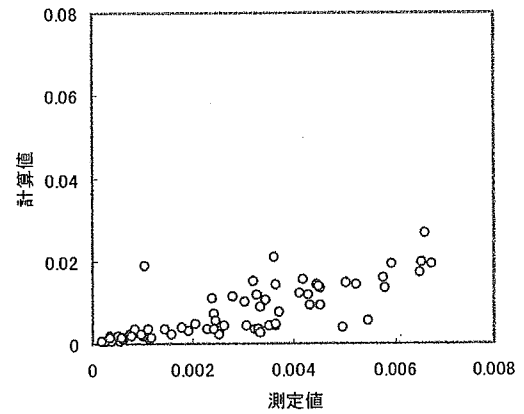
SUBTEC: R=0.72 A=1.52



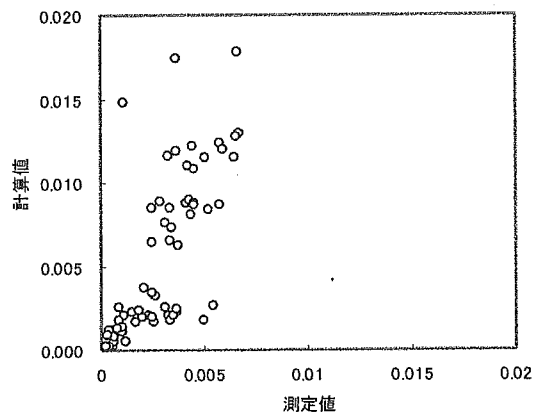
EPA: R=0.26 A=0.04



NIOH2: R=0.78A=2.6



Gray: R=0.73 A=1.87



BAU: R=0.69 A=1.33

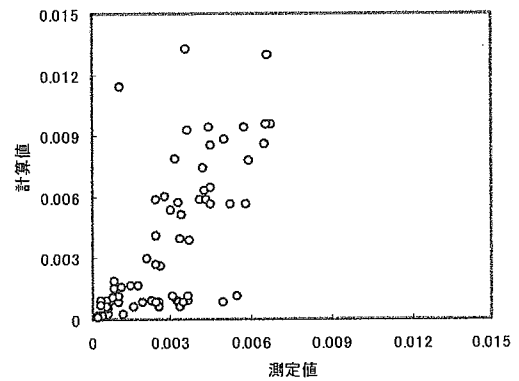


図3 蒸発速度推定値と測定値の散布図

### 液面が深い場合の蒸発速度

液面が浅い場合は、蒸発速度に対する気流の影響が極めて大きいですが、深くなるに従い気流の影響は小さくなるのが推定される。現実に容器の縁近くまで溶剤を入れて作業することはそう多くないものと思われる。蒸発速度の測定を液面の深さを換え同様に測定した。

図4は、液面の深さを変えた場合のアセトンの蒸発速度を、液面から容器（内径 9.5cm）の上端までを拡散経路とみなし、拡散係数と直径から求めた拡散律速の場合の蒸発速度を比較したものである。

拡散係数  $D$   
 拡散経路の断面積  $S$   
 拡散経路の長さ  $L$   
 液面の蒸気の濃度  $C$  とすると  
 拡散速度  $R$  は、 $R=D \times S \times C/L$  となる

液面から容器の縁までの距離は、左から 10、6.5、3、1 cm 風速は 0.15m/秒であった。深さ 3cm まで両者はほぼ一致しており、1cm になると拡散律速の計算値よりも蒸発速度が小さくなる。

図5は、蒸発速度の計算値と測定値の比を経時的に示したもので、この例では、深さ 1cm を超えると蒸発速度は計算値の 0.9 倍となっている。

なお、測定が長時間に亘るため気温の変動が大きいので、蒸気圧は、同一時刻の液温に基づいて計算した。

同様の測定を容器の直径を 6、15、20 cm、風速を 0.05、0.16、0.26m/秒とし、3種の溶媒（アセトン、ジクロロメタン、酢酸エチル）について、蒸発速度を測定し、風速と液面の深さ（1～2 cm、>2cm）について蒸発速度の計算値と測定値の比をプロットした。風速が 0.26m/秒の場合計算値よりも測定値が大きくなる場合が多く気流の影響を受けているが、風速 0.16m/秒以下では、蒸発速度は計算値の 0.7～1.2 の範囲にあり、容器の縁から液面まで距離があり、気流が小さい場合は、拡散律速とみなしてよいことが分かる。

### D. 考察

有機溶剤の蒸発速度は、液面の深さが浅い場合は、拡散律速として計算した蒸発速度より

図4 蒸発速度(アセトン)

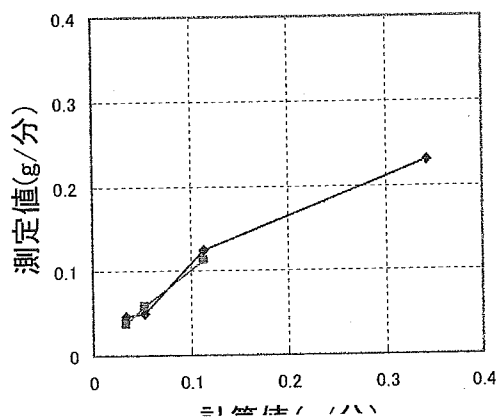


図5 液面深さと蒸発速度 アセトン

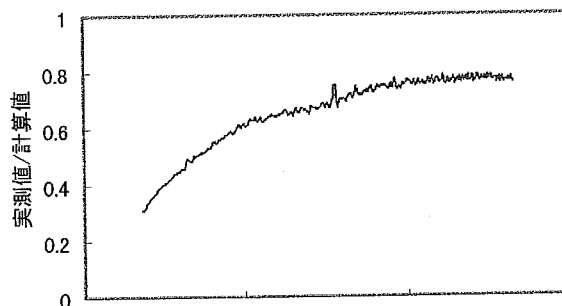
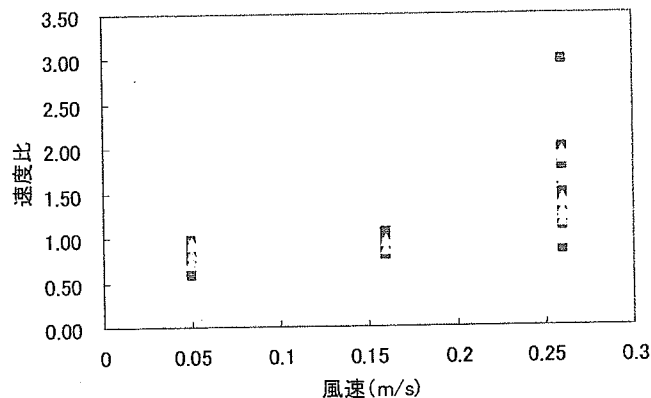


図6 風速と蒸発速度比



りも遅く、拡散ではなく熱の供給速度が律速となる。また、蒸発速度と蒸気圧および蒸発速度と蒸気圧\*拡散係数の相関係数がほとんど変わらないことからこの場合の蒸発速度に分子拡散は無関係であることがわかる。

液面が浅い場合、蒸発速度はばらつきがやや大きいものの蒸気圧から

$$\text{蒸発速度 (mol/m}^2\text{/min)} = 0.002 * \text{蒸気圧 (mmHg)} + 0.039$$

で推定することができる。測定値の標準偏差が最大で 50%あることから、この推定値の 2 倍の速度を上限値の推定値とするほうが現実的であろう。

この式は、蒸気圧が 0 であっても蒸発が起こることになるが、有機化合物の液体では蒸気圧が 0 になることは無く、また飽和蒸気圧が 1 Pa では最大濃度がおおよそ 10 ppm であり、蒸気圧が低い場合は、飽和濃度から暴露濃度の上限を求めることができる。

この実験では液面の深さが 2cm 以上ある場合は、蒸発速度は拡散律速として計算した蒸発速度に近く、風速が遅い場合は、容器の上に蒸気が滞留するために蒸発速度は計算値よりも小さくなる。風速が速い場合は容器内に気流の流れができ、蒸発速度は、計算値よりも大きくなる。この効果は、風速 0.26m/秒で深さ 2~3cm で 2-3 倍と大きいのが、アセトンの例でわかるように容器の口径と同程度の深さがあれば、拡散律速としての蒸発速度とほぼ一致しており溶媒の蒸発速度を拡散律速として推定することが可能である。容器に溶剤を満たして行う作業がないとはいえないが多くの作業でこの条件は満たされるものと推定される。

#### E. 結論

有機溶剤の蒸発速度は、液面の深さが浅い場合は、次式で推定できる。

$$\text{蒸発速度 (mol/m}^2\text{/min)} = 0.002 * \text{蒸気圧 (mmHg)} + 0.039$$

ただし、風速、口径等の影響で 50%程度のばらつきがある。

液面の深さが深い場合は、蒸発速度は拡散律速となり、次式で推定できる。

$$\text{蒸発速度} = \text{拡散係数} * \text{表面積} * \text{蒸気圧} / \text{液面の深さ}$$

液面が口径よりも深い場合ほぼ上限の蒸発速度と考えてよい。

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

なし

##### 2. 学会発表

菅野誠一郎、芹田富美雄 (2005) 有機溶剤の蒸発速度の測定、第 45 回日本労働衛生工学会 P74-75、高松

#### H. 知的財産権の出願・登録状況

なし