

2. 曝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、物質の毒性情報と曝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、曝露は、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曝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、昨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、濃度推定モデルの概要

物質の揮発性評価コード（章末表9参照）、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、最も蒸気圧の低い 指数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。

有機溶剤作業の号別作業区分（章末表10参照）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、同様に評価指数3, 4, 5について平均を求めると、データ数が少ない場合があり、また評価指数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。評価指数1については、蒸発速度と蒸気圧の回帰式から評価指数2と大きな違いがないので、評価指数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倍までにはほぼ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）評価指数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）なお推定値は、1, 5, 10に丸めてある。

2、曝露濃度測定データの概要

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

一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18年9～11月の作業環境測定実施時に代表的な作業者（もともと有機溶剤蒸気に曝露されるであろうと考えられた作業者）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。この2年間の調査により256単位作業場所のデータが得られた。

曝露濃度を測定した作業を有機溶剤作業の号別作業区分に分類したものが表1である。

表1 有機溶剤作業の号別作業区分

	イ	ロ	ハ	ニ	ホ	ヘ	ト	チ	リ	ヌ	ル
イ	57	0	0	0	0	2	0	15	0	2	0
ロ	0	13	12	0	0	0	0	0	0	0	0
ハ	0	12	84	0	15	9	5	11	0	1	0
ニ	0	0	0	12	0	0	0	3	0	0	0
ホ	0	0	15	0	99	14	7	9	0	37	0
ヘ	2	0	9	0	14	102	54	12	0	9	0
ト	0	0	5	0	7	54	56	11	0	0	0
チ	15	0	11	3	9	12	11	217	28	20	1
リ	0	0	0	0	0	0	0	28	263	61	0
ヌ	2	0	1	0	37	9	0	20	61	121	0
ル	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	3
専一	39	1	44	9	37	32	2	131	185	12	2
専一作業 (%)	68%	8%	52%	75%	37%	31%	4%	60%	70%	10%	67%

作業は区分ごとにその作業のみ専一に行われる場合があるが、複数の作業を重複して行う場合も多い。また混合溶剤を使用している場合が多いため、有機溶剤ごとの曝露濃度測定値の延べ数は1018件となる。例えば作業リでは、リの作業において測定されたこの有機溶剤の測定結果は、専一作業で185件、全体217件の70%となっている。

曝露濃度を測定した作業場の管理区分を有機溶剤作業の号別作業区分ごとに分類すると表2となる。

表2 有機溶剤作業の号別作業区分ごとの単位作業場所の管理区分

	イ	ロ	ハ	ニ	ホ	ヘ	ト	チ	リ	ヌ	ル	
専一作業	総数	39	1	44	9	37	32	2	131	185	12	2
	区分1	32	1	36	9	34	30	2	100	130	12	2
	区分2	7	0	3	0	1	0	0	20	32	0	0
	区分3	0	0	5	0	2	2	0	11	23	0	0

この表では、単位作業場所に重複があるため正確ではないがおおむね第1管理区分が8割、第3管理区分は1割弱となっている。ロ、ト、ヌ、ルの作業はすべて第1管理区分であった。次に有機溶剤作業の号別作業区分ごとの揮発性評価コードの分布を表3に示す。

表3 有機溶剤作業の号別作業区分ごとの揮発性評価コード

	イ	ロ	ハ	ニ	ホ	ヘ	ト	チ	リ	ヌ	ル	総数
1	0	0	0	1	2	0	0	0	1	1	0	5
2	31	7	30	1	47	22	13	61	131	56	0	399
3	11	4	23	4	22	20	13	43	79	22	3	244
4	12	3	29	5	17	45	22	72	43	26	0	274
5	1	0	1	1	11	8	5	13	1	7	0	48
6	1	0	0	0	0	7	3	22	6	9	0	48

揮発性評価コード1および5, 6に相当する使用例が少ない。

昨年度に作成した曝露濃度推定表は、号別作業区分および揮発性評価コードにより分類を行ったが、集積した曝露濃度測定データについて、濃度と相関があると思われるパラメータ、単位時間当たりの有機溶剤の使用量 (モル/時間)、単位面積当たり単位時間当たりの有機溶剤使用量 (モル/時間・m²)、蒸気圧 (mmHg) と、曝露濃度、B 測定濃度、幾何平均濃度、日間変動を含まない幾何平均濃度の上側95パーセントイル (Ea1) の相関係数を表4に示した。

表4 濃度測定値と溶剤の使用量、蒸気圧との相関係数

	パラメータ	曝露濃度	B 測定濃度	幾何平均濃度 上側95%*	幾何平均濃 度
全体 n=636	使用量 (Mol/Hr)	-0.003	0.037	0.107	0.048
	使用量 Mol/Hr/m ²	-0.005	0.006	0.043	0.017
	蒸気圧 (mmHG)	0.140	0.084	0.075	0.138
分 1 管 理 区 n=467	使用量 (Mol/Hr)	0.000	-0.004	0.028	0.000
	使用量 Mol/Hr/m ²	0.003	-0.001	0.006	0.027
	蒸気圧 (mmHG)	0.233	0.305	0.249	0.265
分 2 管 理 区 n=108	使用量 (Mol/Hr)	-0.069	0.340	0.384	0.167
	使用量 Mol/Hr/m ²	-0.080	0.184	0.214	0.004
	蒸気圧 (mmHG)	-0.067	0.011	-0.024	0.052
分 3 管 理 区 n=61	使用量 (Mol/Hr)	-0.026	0.148	0.391	0.533
	使用量 Mol/Hr/m ²	0.001	0.121	0.330	0.448
	蒸気圧 (mmHG)	0.032	0.080	0.154	0.282

* : 日間変動を含まない Ea1 値

単位時間当たりの有機溶剤の使用量は、管理区分2を除いて曝露濃度およびB測定値との相関が低く、単位面積当たり単位時間当たりの有機溶剤使用量も同様に相関が低い。一方管理区分2, 3では、幾何平均濃度およびEa1との相関は高く、管理に不備がある場合は、有機溶剤蒸気が、作業場所に広がり、使用量と平均濃度の相関が高くなるものと推定される。全体で曝露濃度と相関が高いのは、蒸気圧であり使用量等との相関は小さいが、管理区分2, 3で、相関が無い原因は不明であるが、曝露の測定をもっとも曝露が大きくなると推定される作業者にお願いしたために、平均的な濃度よりも高い、例えば発生源近傍の作業などが多かった可能性が考えられる。

3、曝露濃度推定表と測定値の比較

有機溶剤作業の重複がある場合を含めて解析を行うと号別作業ごとの曝露の大小の区別が失われるため、曝露濃度測定結果のうち、有機溶剤作業の号別作業区分の重複が無い、つまり単一の作業のみを行っていた事例のみを抽出し、有機溶剤作業の号別作業区分および揮発性評価コードで分類し、それぞれの A 測定の幾何平均値の平均値、Ea1 の平均値、Ea1 の最大値、B 測定値の最大値、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。

表 5 は、そのうち濃度を良好に管理した場合（管理区分 1 の場合）で、平均値の欄は、各区分の Ea1 の平均値、上限の欄は、Ea1 の最大値を示している。この 2 つの値が同じ場合は、測定例が 1 つしかない場合である。

号別区分イー揮発性評価コード 6、号別区分ホー揮発性評価コード 4、号別区分ホー揮発性評価コード 5、号別区分トー揮発性評価コード 4、号別区分チー揮発性評価コード 4 の場合（網掛けの欄）推定値よりも集計値が高くなっている。このうち号別区分イー揮発性評価コード 6 は、Ea1 の平均値が高いものの Ea1 の最大値は推定値よりも低く、実際の A 測定値の 95% 以上がこの範囲内に収まることを示している。号別区分チー揮発性評価コード 4 の場合、高い値は 38 例中 2 例で 1 つは、曝露濃度 113ppm、B 測定値 9ppm、もう 1 つは、曝露濃度 16ppm、B 測定値 122ppm である。ほかの 3 区分では、上限値（Ea1 の最大値）が推定値より高いが、最大で 30% 程度である。

表 6 は、管理区分 2 または 3 である作業場での比較表である。ここでは、号別区分チー揮発性評価コード 4 の平均値（Ea1 の平均値）が、推定値よりも高いが Ea1 の最大値は、上限値を下回っており、この区分としては、95% 以上の A 測定値がこの範囲内に入るものと推定される。

表 7 は、管理区分 1 である作業場での比較表である。平均値の欄は、曝露濃度の平均値、上限の欄は、B 測定値と曝露濃度測定値の大きいほうの値を示している。

号別区分イー揮発性評価コード 4、号別区分ハー揮発性評価コード 3、号別区分ホー揮発性評価コード 2、号別区分トー揮発性評価コード 4、号別区分チー揮発性評価コード 3、4、5、号別区分リー揮発性評価コード 2、号別区分ルー揮発性評価コード 3 で、B 測定値または曝露濃度の大きいほうの値が、推定値を上回っている。そのうち 号別区分ハ、リ、ルの場合、ほぼ 2 倍となっており大きく上回っている。号別区分ハー揮発性評価コード 3 では、7 例のうち 1 例の曝露濃度が 27 ppm であり、ほかは B 測定値とあわせて最大値が 4.7 ppm である。号別区分チー揮発性評価コード 3、4、5 の場合、それぞれ 2 件 / 18 件、2 / 38、2 / 18 超過する値があるが、いずれも B 測定値と曝露濃度の両方が高いわけではなく、比率が 5 - 20 と大きい。号別区分リー揮発性評価コード 2 では、総数 69 例のうち、3 例、38、23、18 ppm を除くと最大値は、6.1 ppm である。号別区分ルー揮発性評価コード 3 では、測定例が 2 例であるが、21 - 52 ppm と高い値を示した。号別区分ホー揮発性評価コード 2 では、16 例中 1 例、号別区分トー揮発性評価コード 4 では、15 例中 2 例であるが、B 測定値と曝露濃度測定値が、上限値を大きく上回っている訳ではない。号別区分チー揮発性評価コード 3 では、測定が 1 例であり、上限を上回ってはいない。

表 8 は、管理区分 2 または 3 である作業場での比較表である。平均値の欄は、曝露濃度平均値、上限の欄は、B 測定値と曝露濃度測定値の最大値を示している。

号別区分ハー揮発性評価コード 3 と、号別区分ハー揮発性評価コード 4 で、B 測定値と曝露濃度測定値の最大値が推定値の上限を上回っている。号別区分ハでは、高濃度を示した B 測定値があるが、対応する曝露濃度測定値は ~1 ppm と低濃度である。

号別区分チー揮発性評価コード3では、上限を超える値は7件のうち1件である。号別区分チー揮発性評価コード4では、Ea1の平均値は高いものの、B測定値と曝露濃度測定値の最大値は、上限に入っている。

D 結果と考察

昨年度作成した推定表は、2万4千件のA測定データにより、曝露濃度測定値の殆どは、環境濃度の平均値からB測定値の間にあるものとの仮定に基づいて作成したものである。2年間の曝露濃度測定値およびB測定値は、少数の例外を除き、A測定値の幾何平均濃度の3倍程度に収まっている。推定値の上限を超えるようなB測定値および、曝露濃度測定値の高濃度値は、殆どがどちらか一方が高く他方が低い値であり、曝露濃度が高いと想定される作業者の曝露濃度を測定した値としては例数が少ないため信頼性に疑問が残る。

平均値については、各区分の幾何平均値の平均から求めたものであり、曝露濃度を作業場内をランダムに動く多数の作業者について測定した場合にはその平均は幾何平均で近似されるものであるため、今回は見直しを行わなかった。

全体を見て、号別区分チの作業については、高濃度を示した例が複数あるため揮発性評価コード3の平均、上限濃度を、10、30 ppmに、揮発性評価コード4の平均、上限濃度を、20、60ppmに変更する。チの作業は、洗浄および払拭であり、塗装作業とともに有機溶剤蒸気発生源から近い（手元の）作業であり、環境濃度と曝露濃度が大きく異なる可能性がある。塗装作業では、塗装面積が大きくなると環境濃度と曝露濃度の差が顕著でなくなる可能性がある。修正を加えた曝露濃度推定表を表11に示す。

表5 作業場管理区分1

揮発性コード	1		2		3		4	
	作業区分	上限	平均値	上限	平均値	上限	平均値	上限
イ	<10		10.0 1.8	30.0 8.4	10.0 1.7	30.0 7.3	20.0 8.6	60.0 15.2
ロ	<5		5.0	15.0	5.0 2.0	15.0 2.0	10.0	30.0
ハ	<5		5.0 0.9	15.0 4.2	5.0 2.9	15.0 8.0	10.0 2.4	30.0 7.7
ニ	<15		15.0 4.2	45.0 0.5	20.0 1.3	60.0 2.9	40.0 1.0	120.0 1.0
ホ	<5		5.0 0.1	15.0 7.8	5.0 2.5	15.0 6.2	10.0 10.4	30.0 41.3
ヘ	<10		10.0 0.6	30.0 1.0	15.0 1.4	45.0 2.0	30.0 1.7	90.0 8.6
ト	<2		2.0	6.0	5.0	15.0	5.0 10.2	15.0 17.3
チ	<5		5.0 1.3	15.0 2.8	5.0 3.3	15.0 13.4	10.0 8.8	30.0 64.6
リ	<5		5.0 0.5	15.0 5.7	10.0 4.1	30.0 23.8	20.0 5.8	60.0 22.1
ヌ	<1		1.0 1.0	3.0 1.0	1.0 1.0	3.0 1.0	5.0 0.8	15.0 2.0
ル	<10		10.0	30.0	10.0 8.2	30.0 15.3	20.0	60.0

カラム内上段は、曝露推定モデルの推定値（平均および上限値）

下段は、平均値の欄は、A測定値のEa1の平均値、上限はEa1の最大値。

網掛けは、推定値よりも実測値が大きい場合を表す。

表6 作業場管理区分2, 3

揮発性コード	1		2		3		4		5		6	
	作業区分	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	<30	30.0 8.1	90.0 26.6	45.0 1.8	135.0 1.8	90.0 78.4	270.0 78.4	410.0	1230	245.0		
ロ	<15	15.0	45.0	25.0	75.0	50.0	150.0	220.0	660.0	130.0		
ハ	<15	15.0	45.0	20.0 13.3	60.0 19.1	40.0 6.5	120.0 11.9	180.0	540.0	105.0		
ニ	<65	65.0	195.0	95.0	285.0	190.0	570.0	890.0	2670	530.0		
ホ	<15	15.0 1.0	45.0 1.0	25.0 17.8	75.0 17.8	50.0	150.0	220.0 84.4	660.0 84.4	130.0		
ヘ	<45	45.0	135.0	65.0	195.0	130.0 14.3	390.0 14.3	610.0	1830	360.0 65.2	65.2	
ト	<5	5.0	15.0	10.0	30.0	20.0	60.0	100.0	300.0	60.0		
チ	<20	20.0 9.5	60.0 19.5	30.0 27.8	90.0 79.7	60.0 93.4	180.0 152.7	260.0 73.2	780.0 73.2	155.0 34.8	34.8	
リ	<25	25.0 8.3	75.0 40.9	40.0 23.2	120.0 60.4	80.0 29.6	240.0 54.5	380.0	1140	225.0		
ヌ	<5	5.0	15.0	5.0	15.0	10.0	30.0	60.0	180.0	35.0		
ル	<30	30.0	90.0	50.0	150.0	100.0	300.0	440.0	1320	260.0		

カラム内上段は、曝露推定モデルの推定値（平均および上限値）

下段は、平均値の欄は、A測定値のEa1の平均値、上限はEa1の最大値。

網掛けは、推定値よりも実測値が大きい場合を表す

表7 作業場管理区分1

揮発性コード	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	
イ	<10	10.0	30.0	10.0	30.0	20.0	60.0	60.0	180.0	80.0	240.0	
		3.0	13.7	3.9	15.5	15.0	65.0			63.0	63.0	
ロ	<5	5.0	15.0	5.0	15.0	10.0	30.0	30.0	90.0	40.0	120.0	
				2.0	2.0							
ハ	<5	5.0	15.0	5.0	15.0	10.0	30.0	25.0	75.0	35.0	105.0	
		1.5	9.1	6.0	27.0	6.8	17.6					
ニ	<15	15.0	45.0	20.0	60.0	40.0	120.0	125.0	375.0	170.0	510.0	
		1.0	0.5	0.5	2.1	4.8	1.0	1.0	1.0	1.0		
ホ	<5	5.0	15.0	5.0	15.0	10.0	30.0	30.0	90.0	40.0	120.0	
		0.1	2.4	18.6	3.1	9.0	4.5	30.0	3.5	20.0		
ヘ	<10	10.0	30.0	15.0	45.0	30.0	90.0	85.0	255.0	115.0	345.0	
		0.5	1.0	1.4	2.0	2.6	29.0	1.0	5.0	9.5	45.0	
ト	<2	2.0	6.0	5.0	15.0	5.0	15.0	15.0	45.0	20.0	60.0	
						13.5	22.0					
チ	<5	5.0	15.0	5.0	15.0	10.0	30.0	35.0	105.0	50.0	150.0	
		1.6	9.0	8.5	42.9	13.1	122.0	11.2	32.0	65.3	503.0	
リ	<5	5.0	15.0	10.0	30.0	20.0	60.0	55.0	165.0	70.0	210.0	
		0.2	2.9	38.0	3.5	19.0	5.0	19.7				
ヌ	<1	1.0	3.0	1.0	3.0	5.0	15.0	10.0	30.0	10.0	30.0	
		1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	2.0			2.3	4.0	
ル	<10	10.0	30.0	10.0	30.0	20.0	60.0	60.0	180.0	85.0	255.0	
				30.0	52.0							

カラム内上段は、曝露推定モデルの推定値（平均および上限値）

下段は、平均値の欄は、A測定値のEa1の平均値、上限はEa1の最大値。

網掛けは、推定値よりも実測値が大きい場合を表す

表8 作業場管理区分2, 3

揮発性コード	1		2		3		4		5		6	
	作業区分	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	<30	30.0	90.0	45.0	135.0	90.0	270.0	410.0	1230	245.0		
		8.1	24.0	1.8	2.0	78.4	13.6					
ロ	<15	15.0	45.0	25.0	75.0	50.0	150.0	220.0	660.0	130.0		
ハ	<15	15.0	45.0	20.0	60.0	40.0	120.0	180.0	540.0	105.0		
				13.3	192.0	6.5	301.8					
ニ	<65	65.0	195.0	95.0	285.0	190.0	570.0	890.0	2670	530.0		
ホ	<15	15.0	45.0	25.0	75.0	50.0	150.0	220.0	660.0	130.0		
		1.0	1.0	17.8	58.3			84.4	420.0			
ヘ	<45	45.0	135.0	65.0	195.0	130.0	390.0	610.0	1830	360.0		
						14.3	17.0			65.2	75.0	
ト	<5	5.0	15.0	10.0	30.0	20.0	60.0	100.0	300.0	60.0		
チ	<20	20.0	60.0	30.0	90.0	60.0	180.0	260.0	780.0	155.0		
		9.5	34.0	27.8	122.0	93.4	176.0	73.2	68.0	34.8	34.0	
リ	<25	25.0	75.0	40.0	120.0	80.0	240.0	380.0	1140	225.0		
		8.3	48.5	23.2	73.8	29.6	144.0					
ヌ	<5	5.0	15.0	5.0	15.0	10.0	30.0	60.0	180.0	35.0		
ル	<30	30.0	90.0	50.0	150.0	100.0	300.0	440.0	1320	260.0		

カラム内上段は、曝露推定モデルの推定値（平均および上限値）

下段は、平均値の欄は、A測定値のEa1の平均値、上限はEa1の最大値。

網掛けは、推定値よりも実測値が大きい場合を表す

表 9 揮発性評価コード

評価コード	蒸気圧（対象物質分圧）範囲	揮発性分類
1	非常に低い	V. P. \leq 0.001KPa
2	低い	0.001 < V. P. \leq 0.5KPa
3	低いから中程度	0.5 < V. P. \leq 1.5KPa
4	中程度	1.5 < V. P. \leq 10KPa
5	中程度から高い	10 < V. P. \leq 25KPa
6	高い	V. P. > 25KPa

表 10 有機溶剤作業の号別作業区分

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。）の内部における業務

表 1 1 修正した曝露濃度推定モデル (表)
濃度管理を行う場
合

揮発性コード	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	
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	10	30	10	20	60	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	

濃度管理を行わない場合

揮発性コード	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*	
イ	30	30	90	45	135	90	270	410	1230	245		
ロ	15	15	45	25	75	50	150	220	660	130		
ハ	15	15	45	20	60	40	120	180	540	105		
ニ	65	65	195	95	285	190	570	890	2670	530		
ホ	15	15	45	25	75	50	150	220	660	130		
ヘ	45	45	135	65	195	130	390	610	1830	360		
ト	5	5	15	10	30	20	60	100	300	60		
チ	20	20	60	30	90	60	180	260	780	155		
リ	25	25	75	40	120	80	240	380	1140	225		
ヌ	5	5	15	5	15	10	30	60	180	35		
ル	30	30	90	50	150	100	300	440	1320	260		

*: 飽和蒸気圧まで

E. 結論

曝露濃度測定結果のうち、有機溶剤作業の号別作業区分の重複が無い、つまり単一の作業のみを行っていた事例のみを抽出し、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測定値の幾何平均値の平均値、Ea1の平均値、Ea1の最大値、B測定値の最大値、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 B 測定値または曝露濃度の大きいほうを比較した結果、推定値の上限値を超える例は少なく、上限値を超える場合も B 測定値または曝露濃度のどちらかが大きく、他方は小さい場合が多く曝露濃度測定値の多くが推定上限値以下となった。号別作業区分チ（有機溶剤等を用いて行う洗浄又は払しょくの業務）については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。

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。

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、小堀衛、山室堅治、(2006) 作業環境測定データベースによる曝露推定モデル. 第 46 回日本労働衛生工学会抄録集、p 194

H. 知的財産権の出願・登録状況

なし

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

小堀 衛、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

A. 目的

作業者の呼吸位置の高さの水平面における気中有害物質の濃度分布が推定でき、作業者の行動が分かれば、労働者の曝露濃度は推定できる。近年、数値計算モデルは、数値流体力学（CFD：Computational Fluid Dynamics）の解析ソフトが伸展してきており、計算速度が格段に速くなってきた。濃度分布を計算するためには作業場及び障害物の3次元の形状、発生源の形状、対象物質の蒸発速度、気流の情報等が必要であるが、一度これらのデータが入力されていれば、異なる位置で別の化学物質が使用されていたとしてもその化学物質の蒸発速度が分かれば、濃度分布の計算は容易にできる。また、気流、濃度が3次元で計算できるため、作業場の工学的対策にも有用である。発生源の濃度については、蒸気圧データ及び使用温度で推定できるが、蒸発速度の推定は困難である。また、モデル実験場では発生源の形状、気流状況及び温度条件等を固定することができるが、実際の作業現場では発生源の形状、気流状況及び温度条件等をどのような値をとれば実態に合うか分かっていない。

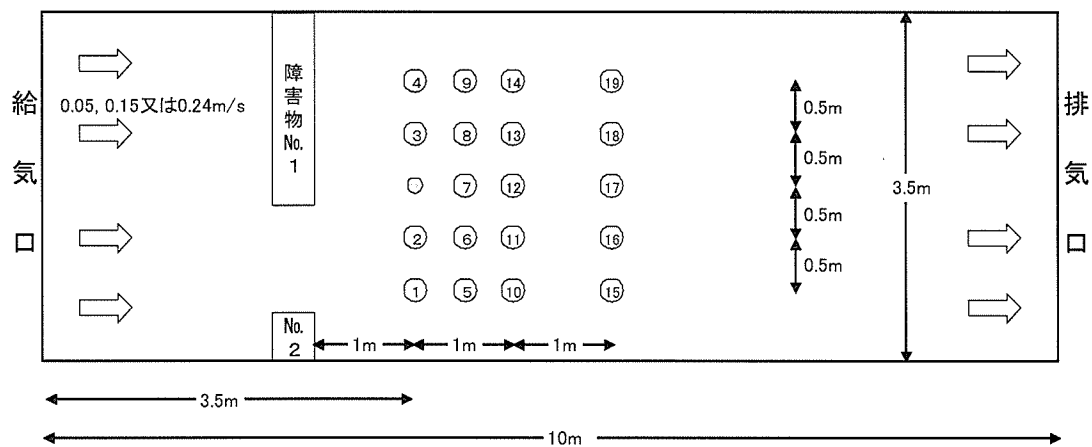
本研究では、作業環境測定結果や個人曝露濃度測定結果などの実測値と CFD 解析によって得られた気中対象物質濃度を比較することで、CFD 解析による曝露推定を行う際のより実態に合致した有害物質発生の状況を明らかにし、CFD 解析を有効に利用するための基礎情報を提供することを目的とする。

B. 研究方法

1 モデル実験場での実測値と CFD 解析結果との比較

長さ 10.0m×幅 3.5m×高さ 2.5m のモデル実験場に一樣な気流を発生させ、給気口から 3.5m の中央床上 0.84m の位置に発生源を置き、発生源の風上に障害物を置いた。（図 1 参照）発生源は、直径 150mm×高さ 100mm のステンレスシャーレに酢酸エチルを 8 分目程度入れ、気流にさらした状態で酢酸エチル蒸気を発生させた。空気中の酢酸エチル濃度の測定は、図 1 に示した床上 0.7m、0.9m 及び 1.1m の高さに加熱脱着分析用捕集管（PerkinElmer 社製、充填材：PorapakQ）を置き、約 120 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酢酸エチルの蒸発速度を測定した。モデル実験場内の気流や障害物の数、測定点位置を変え、表 1 に示した 7 種類の実験を行った。

CFD 解析には、Flow Designer（㈱アドバンス・ナレッジ研究所製）を使用し、図 1 及び表 1 にある実験場の大きさ、気流、発生源等の条件を入力し、一辺が 100mm の立方体を要素体積として、定常解析で計算を行わせた。また、乱流モデル解析及び層流モデル解析の両方の解析方法で計算を行わせた。なお、乱流モデル解析には、K-ε モデルを使用した。



①, ②, ③…… : 酢酸エチル濃度測定点 (各測定点高さ 0.7, 0.9 及び 1.1m)

⊙ : 発生源、高さ 84cm の台上の直径 20mm のシャーレに入れた酢酸エチル

□ : 障害物、No.1 は長さ 2m×幅 0.4m×高さ 2m、No.2 は長さ 0.5m×幅 0.4m×高さ 2m

図 1 モデル実験場の平面図と測定点

表 1 モデル実験場での実験条件

	気流 (m/s)	障害物	測定点			測定時間
			高さ 0.7m	高さ 0.9m	高さ 1.1m	
実験 1	0.24	No.1	No.1~14	No.1~14	No.1~9	120 分間
実験 2	0.15	No.1	No.1~14	No.1~14	No.1~9	132 分間
実験 3	0.24	No.1&2	No.1~14	No.1~14	No.1~9	134 分間
実験 4	0.15	No.1&2	No.1~14	No.1~14	No.1~9	117 分間
実験 5	0.05	No.1&2	No.1~14	No.1~14	No.1~9	122 分間
実験 6	0.24	No.1&2	No.1~19	No.1~19	—	123 分間
実験 7	0.15	No.1&2	No.1~19	No.1~19	—	120 分間

2 作業場での実測値と CFD 解析結果との比較

コイルにワニスを含浸させる作業場で有機溶剤濃度の実測値を測定し、CFD 解析結果との比較を行った。

実測値の測定は、図 2 に示した測定点で作業環境測定を行い、同時に図 3 に示した床上 0.9m、1.2m 及び 1.5m の高さに加熱脱着分析用捕集管を置き、126 分間の連続測定を行った。また、作業環境測定の測定点 No.5 の床上 1.2m に VOC モニター (RAE SYSTEM 社製 ppb RAE PGM-7140) を置き、1 分間ごとのリアルタイム連続測定を行った。

Flow Designer に図 2 及び図 3 の作業場の大きさ、換気条件、発生源等の条件を入力し、床上 2.8m 以下はモデルエッジのほか一辺が約 100mm の立方体を要素体積として、床上 2.8m 以上は水平面が一辺約 100mm、高さ方向は約 400mm の直方体を要素体積として気流について定常解析で計算を行わせ、その後の有機溶剤蒸気の発生に合わせて定常解析又は非定常解析を行った。なお、全て乱流モデル解析で計算を行わせた。

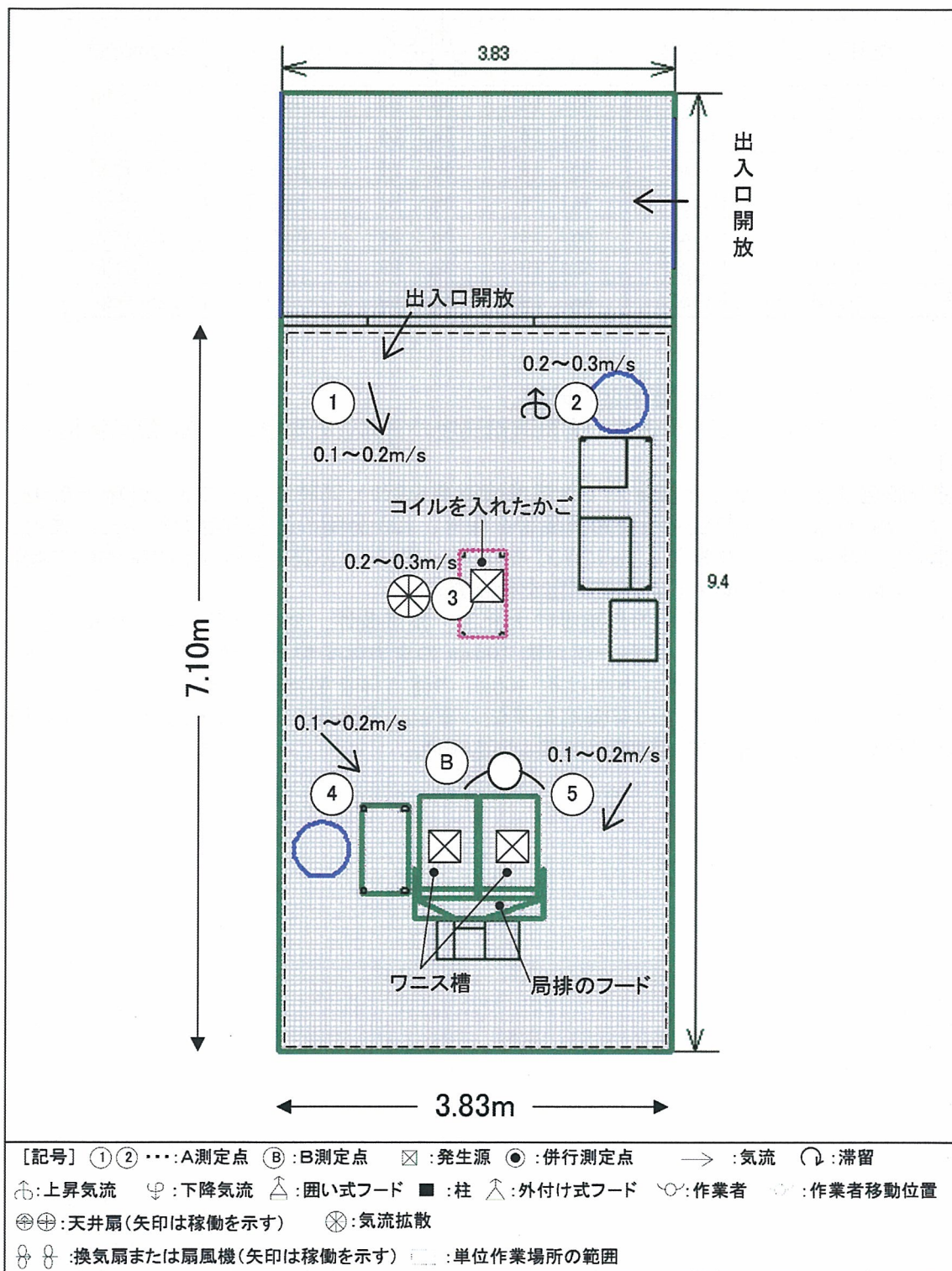


図 2 実測値を測定した作業場所と作業環境測定の測定点等を示す図面

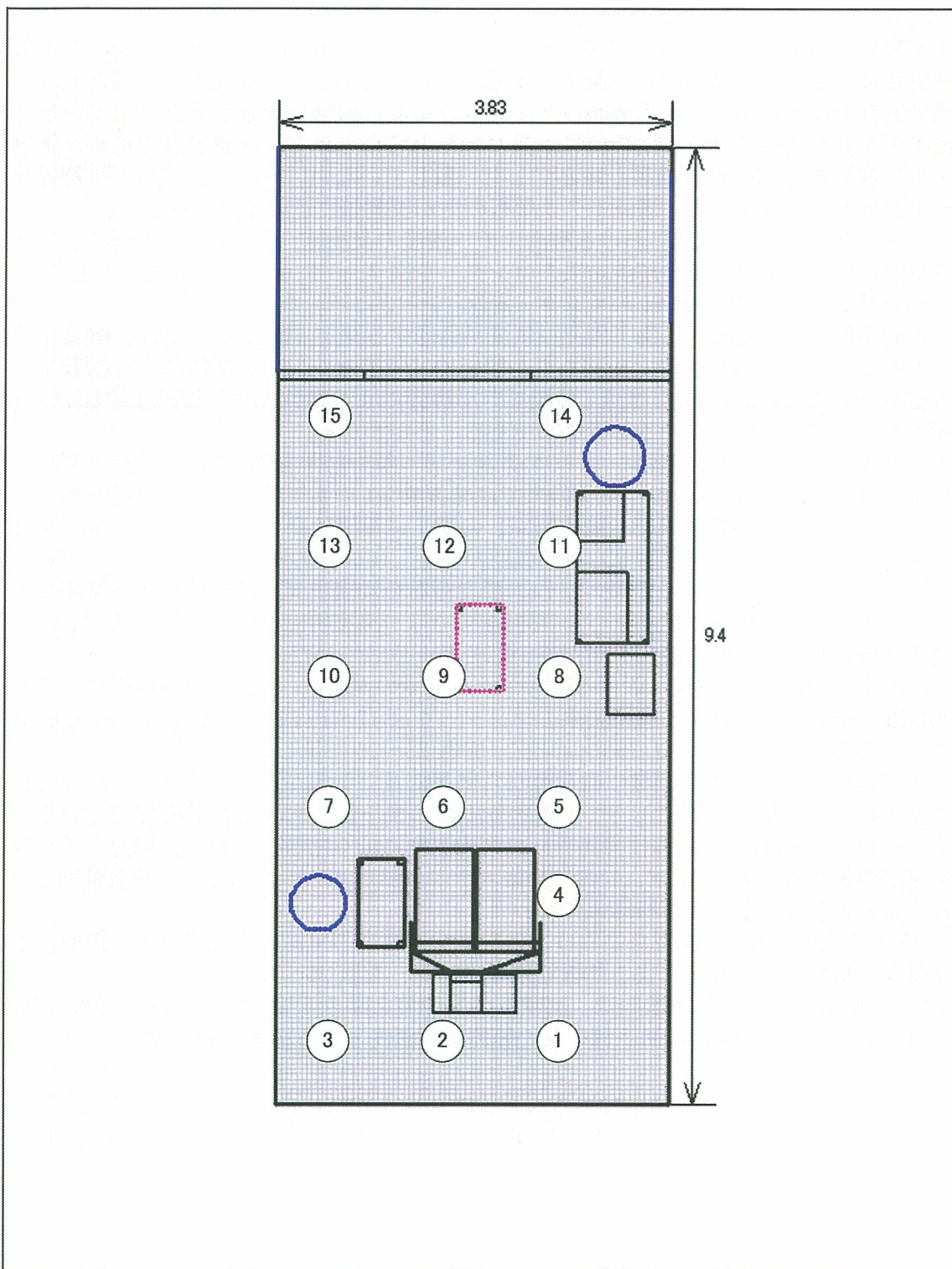


図 3 加熱脱着分析用捕集管による連続測定を行った測定点を示す図面

C. 研究結果

1 モデル実験場での実測値と CFD 解析結果との比較

モデル実験場で実施した 7 種類の実験における酢酸エチルの蒸発速度、気中酢酸エチル濃度の実測値及び CFD 解析による気中酢酸エチル濃度を表 2 に示した。乱流モデル解析では、大きな風の流れを捉えながら、要素体積以下の大きさの渦の影響も考慮して計算しているため、乱流モデルと層流モデルとの解析結果が異なると考えられる。各測定点で見ると気中酢酸エチルの実測値と CFD 解析結果とは必ずしも一致していない。また、乱流モデル解析と層流モデル解析とを比較すると、層流モデル解析の方が実測値に近い結果を示した。

実験 1 の床上 0.7m の各測定点における酢酸エチル濃度の実測値、乱流モデル解析による解析結果及び層流モデル解析による解析結果のコンターを図 4~6 に示した。また、床上 0.9m のコンターを図 7~9 に、床上 1.1m のコンターを図 10~12 に示した。

実験 1 の実測値は、発生源から風下側及び気流が通過する測定点 No.2, 6, 11 側に、酢酸エチルが広く拡散しているのに対して、乱流モデル解析では障害物 No.1 の風下側に広く拡散している解析結果であることがわかる。また、層流モデル解析では気流が通過する測定点 No.2, 6, 11 側に酢酸エチルが広く拡散している解析結果であることがわかる。

実験 1 の床上 0.9m における気流についての乱流モデル解析結果を図 13 に、層流モデル解析結果を図 14 に示した。乱流モデル解析結果では障害物 No.1 の風下側に発生源を通る渦流を作っている。層流モデル解析結果でも障害物 No.1 の風下に渦流は発生しているが、発生源付近では排気口に向かう気流に引き寄せられる気流が発生しているのがわかる。図 15 及び 16 には、実験 1 の床上 0.9m における酢酸エチルの濃度分布を乱流モデル解析結果及び層流モデル解析結果で示した。実験 1 の乱流モデル解析結果では、障害物 No.1 の風下側に発生した発生源を通る渦流と酢酸エチルの濃度分布が高い部分が一致していた。

実験 2 の床上 0.7m の各測定点における酢酸エチル濃度の実測値、乱流モデル解析による解析結果及び層流モデル解析による解析結果のコンターを図 17~19 に示した。また、床上 0.9m のコンターを図 20~22 に、床上 1.1m のコンターを図 23~25 に示した。

実験 2 の実測値は、実験 1 と同様に発生源から風下側及び気流が通過する測定点 No.2, 6, 11 側に、酢酸エチルが拡散するのに加えて、障害物 No.1 の風下側にも少し拡散を広げている。乱流モデル解析では実験 1 と同様に障害物 No.1 の風下側に広く拡散しており、層流モデル解析では気流が通過する測定点 No.2, 6, 11 側に酢酸エチルが拡散するのに加えて、障害物 No.1 の風下側にも広く拡散するという解析結果であった。

実験 3~7 の床上 0.7m の各測定点における酢酸エチル濃度の実測値、乱流モデル解析による解析結果及び層流モデル解析による解析結果のコンターを図 26~40 に示した。

実験 3~7 の酢酸エチルの拡散傾向は、実験 5 の実測値を除きほぼ実験 2 と同じであった。実験 5 の実測値は、障害物 No.1 の風下側の狭い範囲が高濃度となる結果であった。

表 2 モデル実験場における気中酢酸エチル濃度実測値
及び CFD 解析結果 (その 1)

		実験1			実験2		
気流		0.24m/s			0.15m/s		
障害物		No.1			No.1		
蒸発速度		226mg/min			237mg/min		
測定点No.	高さ(m)	実測値 (ppm)	解析値(ppm)		実測値 (ppm)	解析値(ppm)	
			乱流モデル	層流モデル		乱流モデル	層流モデル
1	0.7	1.0	0.1	0.1	6.6	0.1	0.2
	0.9	2.1	0.1	0.1	4.0	0.1	0.1
	1.1	2.0	0.1	0.0	3.8	0.1	0.1
2	0.7	17.2	10.8	28.9	66.4	16.5	46.7
	0.9	39.7	11.0	16.6	69.3	18.3	26.0
	1.1	24.7	8.8	2.2	17.8	14.2	4.0
3	0.7	7.2	38.1	10.6	21.5	54.5	33.6
	0.9	8.6	38.4	7.3	14.9	56.2	14.5
	1.1	7.6	35.0	7.4	9.0	51.4	14.4
4	0.7	5.8	43.7	7.5	17.3	58.4	14.0
	0.9	7.1	54.5	8.4	8.8	78.1	15.8
	1.1	6.1	55.6	9.5	3.1	83.7	16.9
5	0.7	1.8	0.2	0.3	4.7	0.3	0.4
	0.9	3.0	0.2	0.1	3.2	0.2	0.2
	1.1	3.0	0.1	0.0	3.6	0.2	0.1
6	0.7	6.5	14.3	13.7	24.0	26.5	23.6
	0.9	9.1	13.1	4.9	24.1	28.1	8.8
	1.1	10.6	9.2	2.3	8.0	16.2	4.4
7	0.7	31.4	17.8	5.6	66.9	31.7	11.5
	0.9	39.8	23.9	5.5	34.6	41.7	11.0
	1.1	14.2	25.1	5.0	10.3	41.4	10.0
8	0.7	16.7	32.8	9.3	24.1	56.4	28.6
	0.9	18.4	85.4	8.3	16.8	153.8	15.8
	1.1	10.3	144.0	9.1	8.6	234.7	17.6
9	0.7	7.1	49.8	9.3	16.3	82.0	23.1
	0.9	7.7	93.4	9.0	10.9	146.5	16.5
	1.1	5.7	94.3	9.9	5.6	125.7	19.5
10	0.7	2.6	0.3	0.3	5.5	0.4	0.5
	0.9	2.5	0.2	0.1	7.0	0.3	0.2
11	0.7	8.8	13.8	4.9	12.4	25.5	9.2
	0.9	6.9	12.1	3.0	9.5	24.9	5.6
12	0.7	10.3	11.0	6.3	27.6	19.5	13.1
	0.9	6.8	10.5	5.7	6.8	18.1	11.8
13	0.7	10.3	16.0	8.8	20.3	28.9	22.3
	0.9	7.3	19.4	8.5	6.1	37.0	16.6
14	0.7	8.3	22.0	11.4	10.9	32.3	24.5
	0.9	5.8	26.6	10.1	10.7	45.9	22.0
最小値		1.0	0.1	0.0	3.1	0.1	0.1
最大値		39.8	144.0	28.9	69.3	234.7	46.7
算術平均		10.4	27.9	6.8	16.8	44.6	13.6
標準偏差		9.5	32.2	5.7	17.1	50.5	10.8
幾何平均		7.4	8.4	3.1	11.6	13.2	5.8
幾何標準偏差		2.33	9.68	5.85	2.30	10.72	6.78
第1評価値		43.7	413.8	69.8	67.4	759.3	163.7
第2評価値		13.2	138.6	18.6	20.6	274.4	45.5

表 2 モデル実験場における気中酢酸エチル濃度実測値
及びCFD解析結果（その2）

		実験3			実験4		
気流		0.24m/s			0.15m/s		
障害物		No.1 & No.2			No.1 & No.2		
蒸発速度		239mg/min			331mg/min		
測定点No.	高さ(m)	実測値 (ppm)	解析値(ppm)		実測値 (ppm)	解析値(ppm)	
			乱流モデル	層流モデル		乱流モデル	層流モデル
1	0.7	0.7	0.0	0.0	1.6	0.1	0.0
	0.9	1.4	0.0	0.0	0.7	0.1	0.0
	1.1	2.3	0.0	0.0	1.6	0.1	0.0
2	0.7	2.8	2.9	5.0	7.0	5.9	11.2
	0.9	10.9	4.1	11.2	16.8	8.6	24.8
	1.1	16.9	3.4	1.5	10.4	7.3	3.2
3	0.7	2.8	25.1	7.6	31.1	50.3	17.6
	0.9	2.9	26.4	6.8	16.0	54.5	15.8
	1.1	3.0	27.3	6.3	11.0	57.0	13.9
4	0.7	2.7	46.4	4.1	17.7	94.5	8.9
	0.9	2.7	48.4	4.5	12.6	99.5	9.8
	1.1	2.9	50.3	4.6	9.5	103.4	10.1
5	0.7	1.6	0.2	0.2	0.8	0.4	0.5
	0.9	2.7	0.3	0.5	2.0	0.5	1.1
	1.1	3.8	0.2	0.2	2.0	0.5	0.4
6	0.7	3.0	7.9	18.2	6.8	17.2	38.9
	0.9	8.8	10.9	13.2	13.6	25.2	29.5
	1.1	14.4	6.1	2.4	11.2	13.4	5.5
7	0.7	4.4	19.4	8.3	64.5	50.9	17.4
	0.9	11.5	13.4	7.0	77.7	34.8	15.0
	1.1	18.3	13.3	6.5	20.9	28.6	14.1
8	0.7	3.7	41.4	22.7	42.8	84.0	50.1
	0.9	4.1	76.2	7.6	29.3	146.0	16.9
	1.1	4.0	31.1	6.9	12.8	64.0	15.6
9	0.7	3.0	38.4	7.6	20.8	78.1	15.0
	0.9	2.8	41.4	4.6	17.2	84.8	9.8
	1.1	2.6	41.2	4.3	7.6	89.0	9.8
10	0.7	2.7	0.5	1.0	2.3	1.1	2.1
	0.9	5.2	0.7	1.7	2.1	1.5	3.7
11	0.7	5.7	10.2	9.8	6.1	23.4	22.2
	0.9	7.8	8.7	3.9	4.4	20.1	9.1
12	0.7	7.2	9.2	7.8	33.7	20.4	16.4
	0.9	9.4	10.7	8.2	14.4	23.4	17.2
13	0.7	6.2	35.0	14.9	32.6	86.2	33.1
	0.9	5.0	47.0	10.7	9.7	112.6	21.9
14	0.7	5.3	47.3	16.5	17.8	100.4	34.5
	0.9	4.7	62.6	13.0	5.4	132.1	22.9
最小値		0.7	0.0	0.0	0.7	0.1	0.0
最大値		18.3	76.2	22.7	77.7	146.0	50.1
算術平均		5.4	21.8	6.7	16.1	46.5	14.5
標準偏差		4.2	21.0	5.5	17.0	43.3	11.8
幾何平均		4.2	7.4	3.6	9.3	15.0	7.3
幾何標準偏差		2.01	8.07	4.66	3.23	9.31	5.42
第1評価値		20.8	273.9	56.3	85.6	693.1	144.6
第2評価値		6.8	82.2	14.6	23.1	226.1	37.9