

図 12 床上 0.9m 水平面の酢酸エチル濃度分布

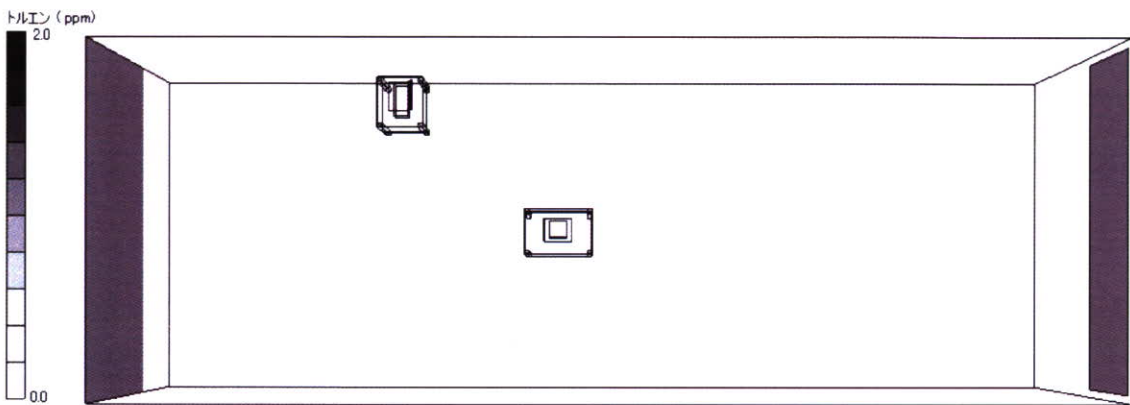


図 13 床上 0.9m 水平面のトルエン濃度分布

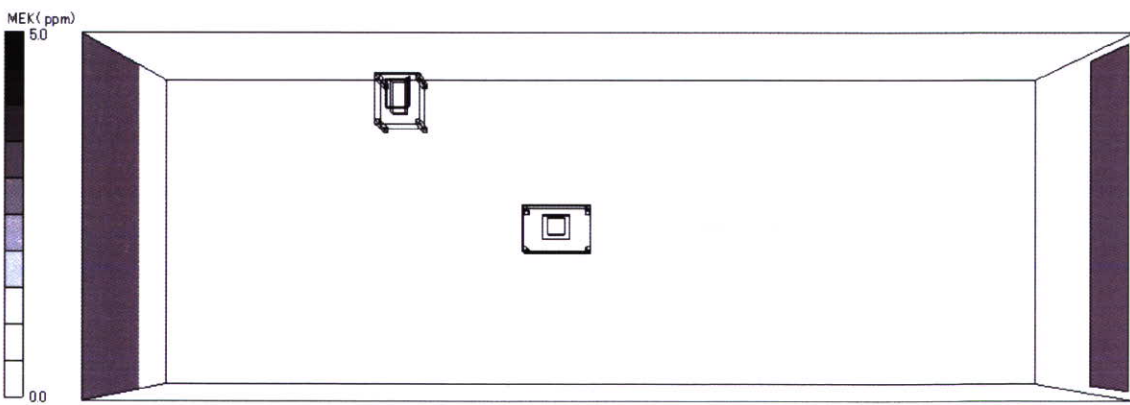


図 14 床上 0.9m 水平面の MEK 濃度分布

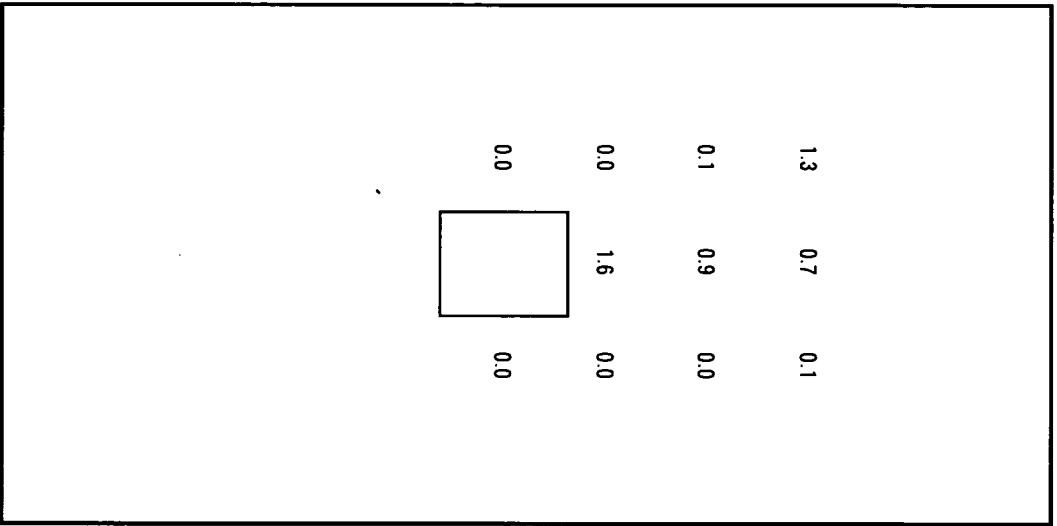


図 15 床上1.50m水平面の酢酸工チル濃度分布 (ppm)

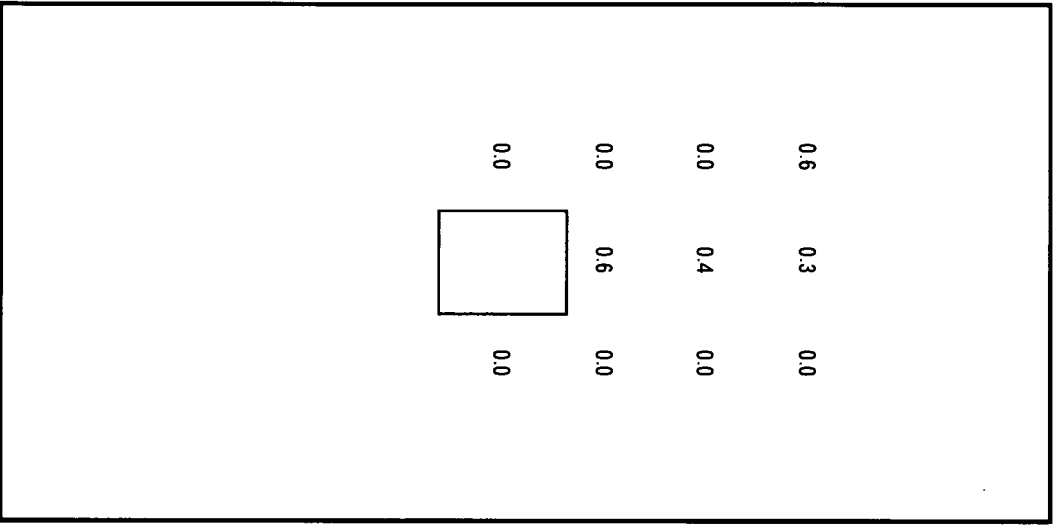


図 16 床上1.50m水平面のトルエン濃度分布 (ppm)

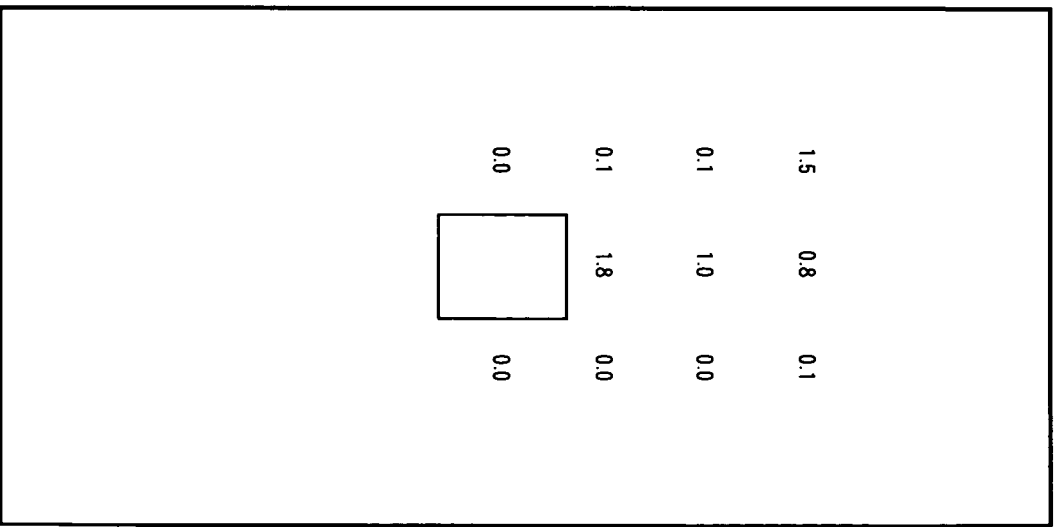


図 17 床上1.50m水平面のMEK濃度分布 (ppm)

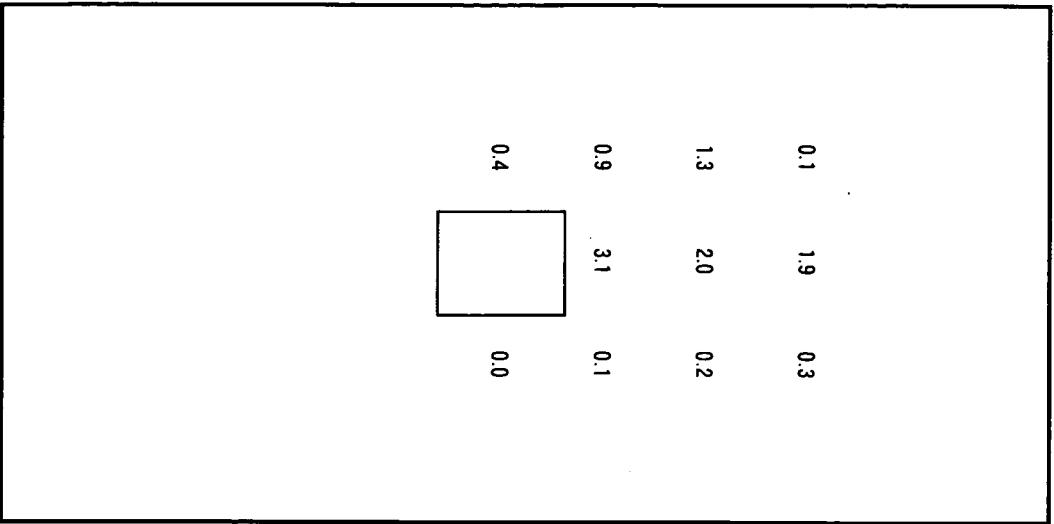


図18 床上1.20m水平面の酢酸エチル濃度分布

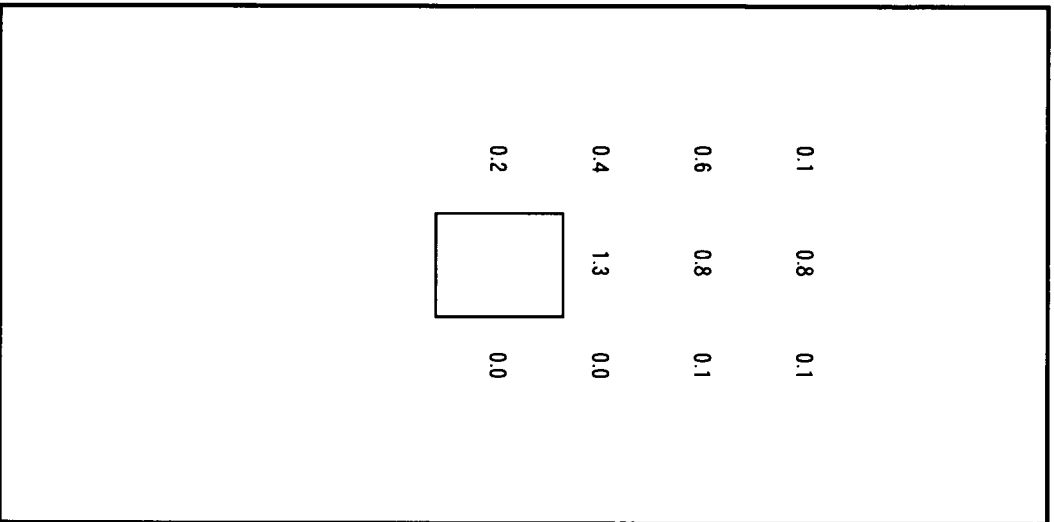


図 19 床上1.20m水平面のトルエン濃度分布 (ppm)

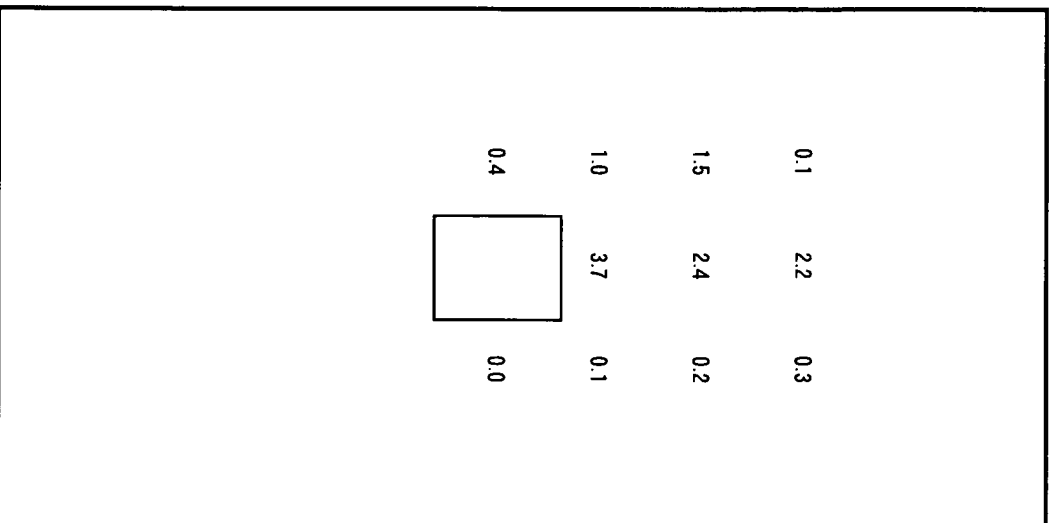


図 20 床上1.20m水平面のMEK濃度分布 (ppm)

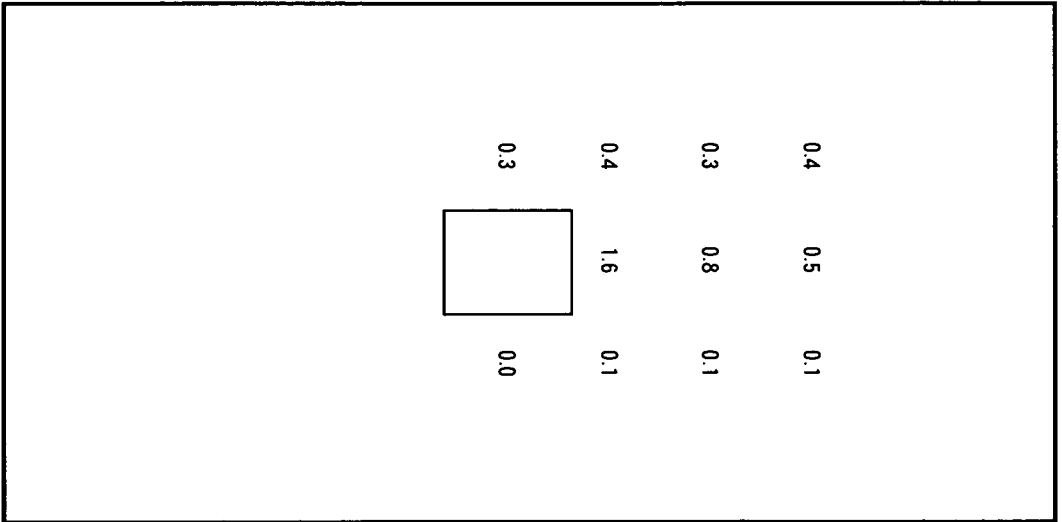


図 21 床上0.90m水平面の酢酸エチル濃度分布

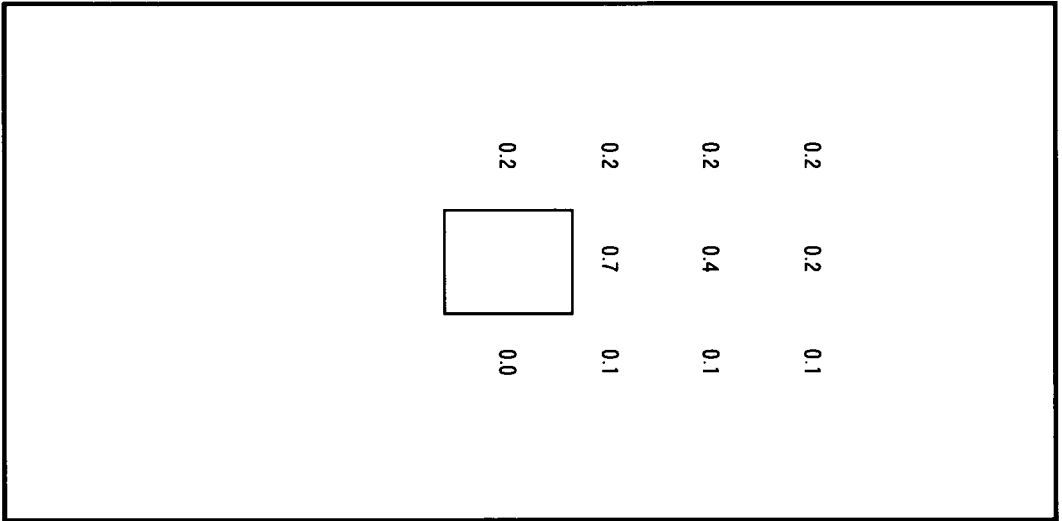


図 22 床上0.90m水平面のトルエン濃度分布 (ppm)

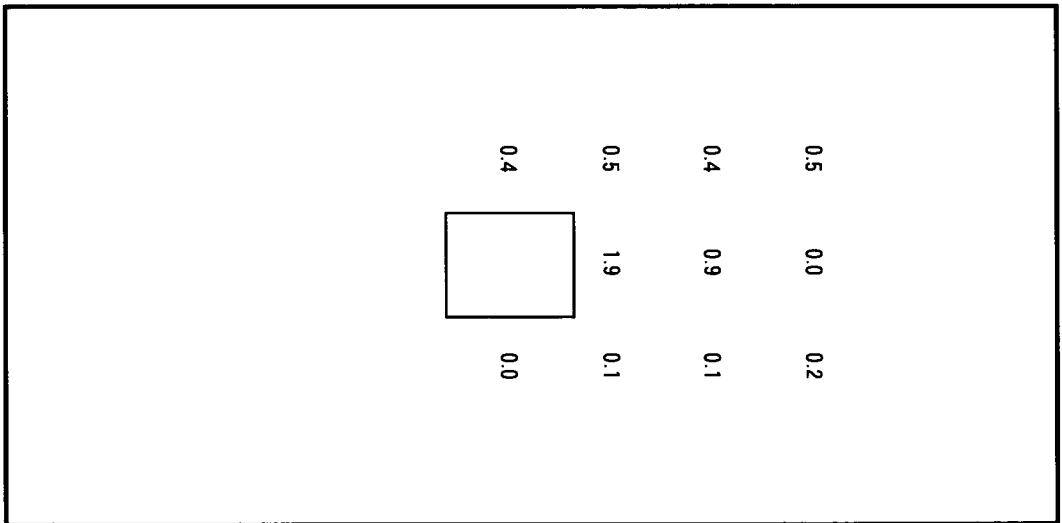


図 23 床上0.90m水平面のMEK濃度分布 (ppm)

ちなみに今回モデル実験場で使用した、直径 18.0cm の円筒容器では、気流 1.0m/s 程度の気流であれば、開口面から液面までの深さ 2~3cm で拡散律則の容器となる。発生源を特定した状況であるが、物理化学的実測値が不足している溶剤でも最小の実験を追加することにより、任意の温度で使用している混合溶剤の入った拡散律則容器を発生源とする作業場の成分別濃度分布の推定が可能である。

図 24 に提案する混合溶剤の入った拡散律則容器を発生源とする成分別濃度分布の推定法の流れ図と関連項目を示す。左側の四角内には実行すべき内容、右側の点線四角内には関連項目を記してある。

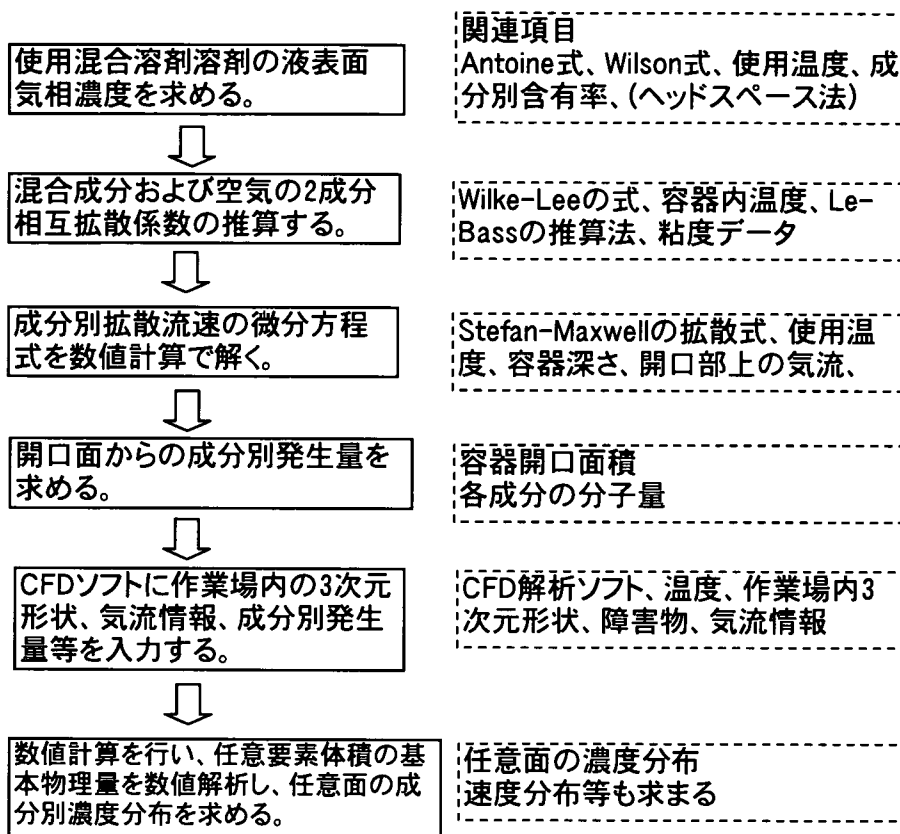


図 24 混合溶剤の入った拡散律則容器を発生源とする作業場内の成分別濃度分布の推算法の流れ図および関連項目

E. 結論

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、図 24 に示した、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。

F. 健康危険情報

特記事項なし

G. 研究発表

1.論文発表

なし

2.学会発表

1 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

2 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

H. 知的財産権の出願・登録状況

なし

謝辞

部分的な推算法の選択等に際して、中央労働災害防止協会北海道安全衛生サービスセンターの岡村真吾氏のご協力をいただきました。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大江修造, 「気液平衡データ集」講談社サイエンティフィック(1988)
- 2) 小堀衛、西野修、戸上善夫、工藤光弘、大江修造, 「労働衛生における気液平衡の活用(第1報:気液平衡データを作るための自動分析法の検討)」, 第36回日本労働衛生工学会学会(1996)
- 3) 平田光穂 他:「物性推算ハンドブック」マグローヒル(1985)
- 4) 「エクセルを用いたルンゲクッタ法で微分方程式を解く」
<http://homepage1.nifty.com/gfk/rungekutta.htm>
- 5) Wilke, C. R. W., and C. Y. Lee: Ind. Eng. Chem.,47: 1253 (1955)
- 6) Le Bas, G:”The Molecular Volumes of Liquid Chemical Compounds,” Longmans, Green, NewYork,1915
- 7) Nuefeld, P., A.R.Janzen,and R. A. Aziz: J. Chem, Ohys.,57:1100 (1972)

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

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

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

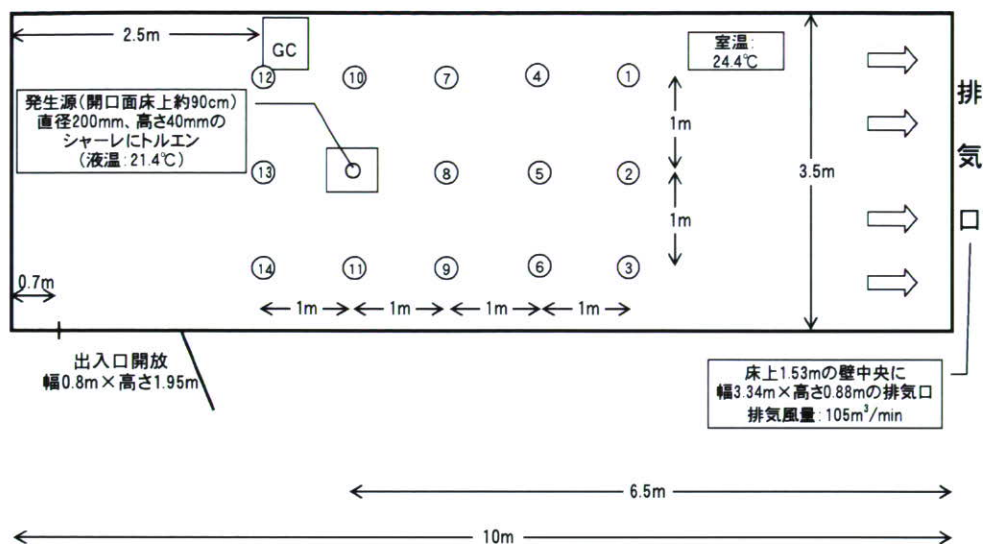
作業者の呼吸位置の高さの水平面における気中有害物質の濃度分布が推定でき、作業者の行動が分かれば、労働者の曝露濃度は推定できる。近年、数値計算モデルは、数値流体力学（CFD：Computational Fluid Dynamics）の解析ソフトが伸展してきており、計算速度が格段に速くなってきた。濃度分布を計算するためには作業場及び障害物の3次元の形状、発生源の形状、対象物質の蒸発速度、気流の情報等が必要であるが、一度これらのデータが入力されていれば、異なる位置で別の化学物質が使用されていたとしてもその化学物質の蒸発速度が分かれば、濃度分布の計算は容易にできる。また、気流、濃度が3次元で計算できるため、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、気流の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、気流の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等の実測値と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モデルの設定条件や解析条件等を明らかにし、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

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105m³/minで排気した。（図1参照）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、図1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（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、図1にある実験場の大きさ、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。



- ①,②,③…… : トルエン濃度測定点 (各測定点高さ 0.9,1.2 及び 1.5m)
- : 発生源、高さ 84cm の台上の直径 200mm×高さ 40mm のシャーレに入れたトルエン

図1 モデル実験場の平面図と測定点

モデル実験場内のみを解析範囲としたときのモデルの配置を図2に示した。図2右側の青い線は、排気口のモデルである。図2下側の青い線は、出入口のモデルで、排気する時のバランスで空気が自然流入するようにモデルの条件を設定した。

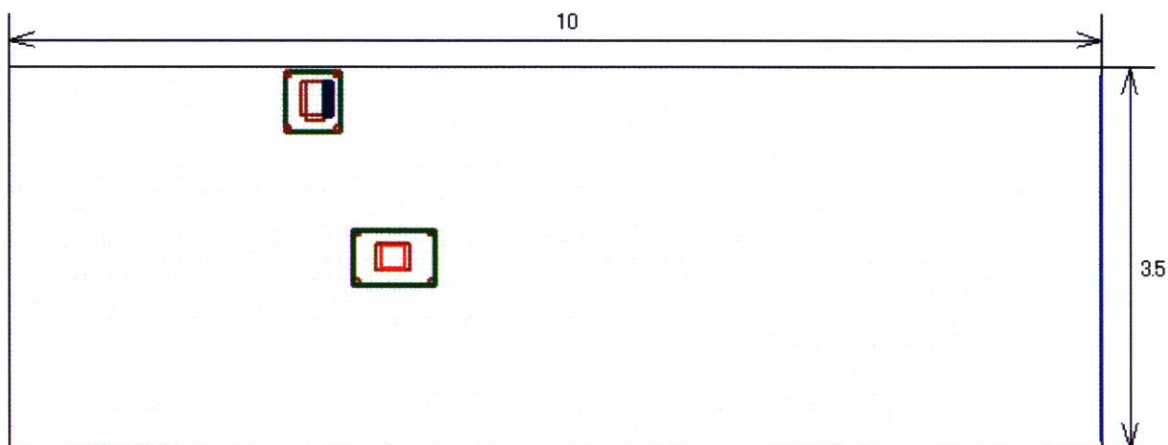


図2 モデル実験場内のみを解析範囲としたときのモデルの配置

モデル実験場の外側を含めて解析範囲とした場合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モデルの配置を図3に示した。モデル実験場の周囲及び上方にモデル実験場とほぼ同じ大きさの空間を作り、これを解析範囲として、図3の青い線で囲まれた解析範囲の境界4面から排気のバランスで空気が自然流入するようにモデルの条件を設定した。

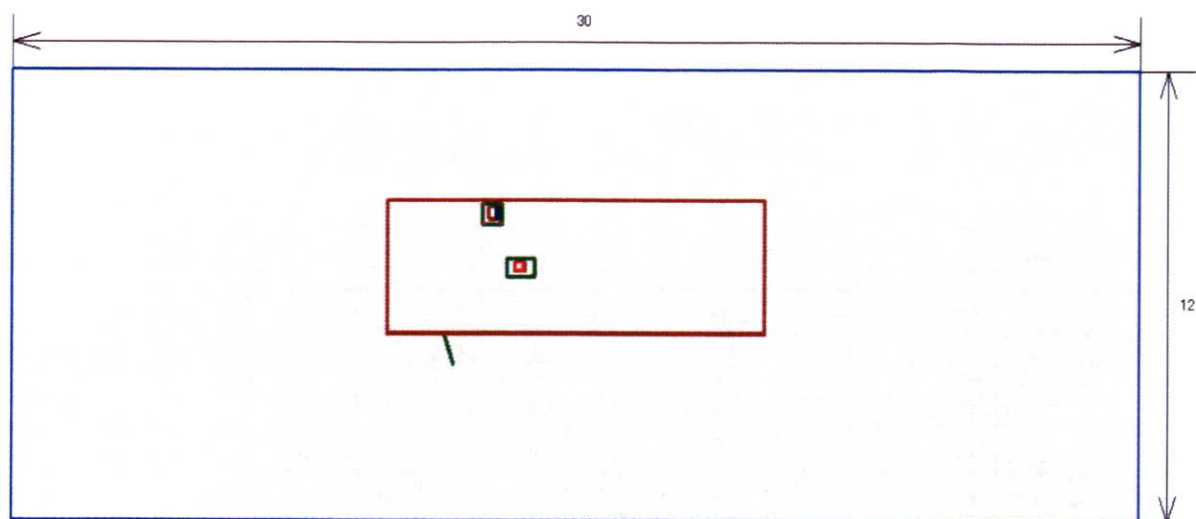


図3 モデル実験場外も解析範囲としたときのモデルの配置（空気自然流入）

モデル実験場の外側を含めて解析範囲とした場合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モデルの配置を図4に示した。モデル実験場の周囲及び上方にモデル実験場とほぼ同じ大きさの空間を作り、これを解析範囲として、図4のモデル実験場の右側の青い線で示した実験場の排気口の真裏にあたる実験場の外側に、排気口と同じ大きさ、同じ風量の給気口のモデルを置いた。

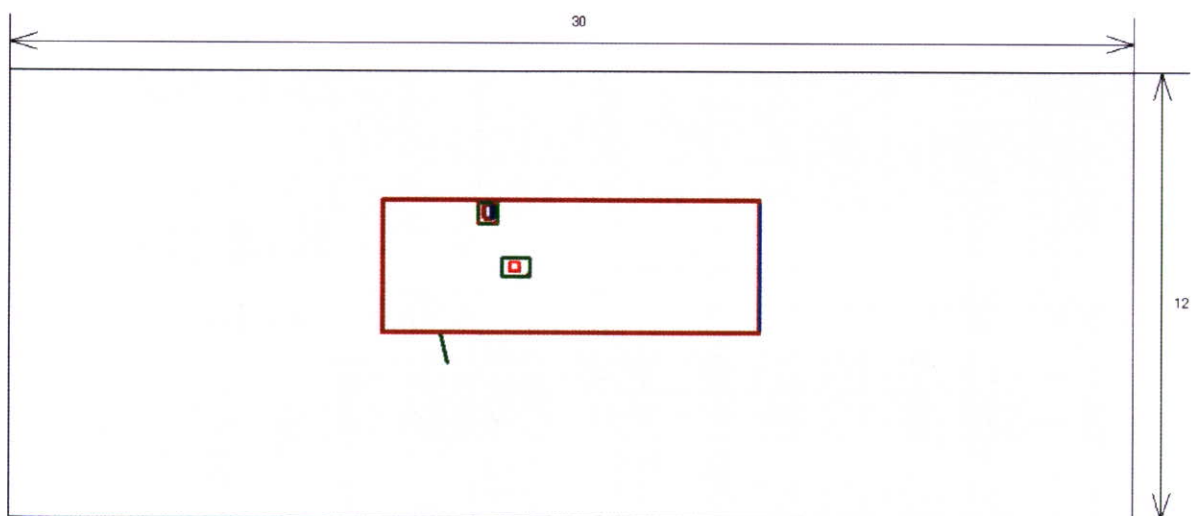


図4 モデル実験場外も解析範囲としたときのモデルの配置（空気強制給気）

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、 $K-\varepsilon$ 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。

C. 研究結果

1 モデル実験場のトルエン濃度の測定結果

モデル実験場の各測定点の測定結果及びトルエンの蒸発速度を表1に示した。

トルエンは、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。

表1 モデル実験場の各測定点のトルエン濃度の測定結果とトルエンの蒸発速度

高さ	測定点No	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
1.5m		1.59ppm	0.64ppm	0.53ppm	2.66ppm	1.00ppm	0.72ppm
1.2m		1.91ppm	0.79ppm	0.59ppm	3.97ppm	1.09ppm	0.61ppm
0.9m		2.34ppm	1.15ppm	0.89ppm	4.56ppm	1.55ppm	0.87ppm
高さ	測定点No	No.7	No.8	No.9	No.10	No.11	蒸発速度
1.5m		2.30ppm	0.49ppm	0.49ppm	0.63ppm	0.54ppm	218mg /min
1.2m		2.89ppm	0.59ppm	0.50ppm	0.93ppm	0.74ppm	
0.9m		2.79ppm	0.86ppm	0.51ppm	0.87ppm	0.99ppm	

2 モデル実験場のCFD解析結果

2.1 トルエン濃度のCFD解析結果

モデル実験場内のみを解析範囲としたときの各測定点におけるトルエン濃度の解析結果のうち、濃度の高い6測定点における繰返し計算回数が1000回、2000回、3000回、4000回でのトルエン濃度解析結果の変化を図5に示す。

繰返し計算回数1000回でトルエン濃度の解析結果は、ほぼ収束していた。

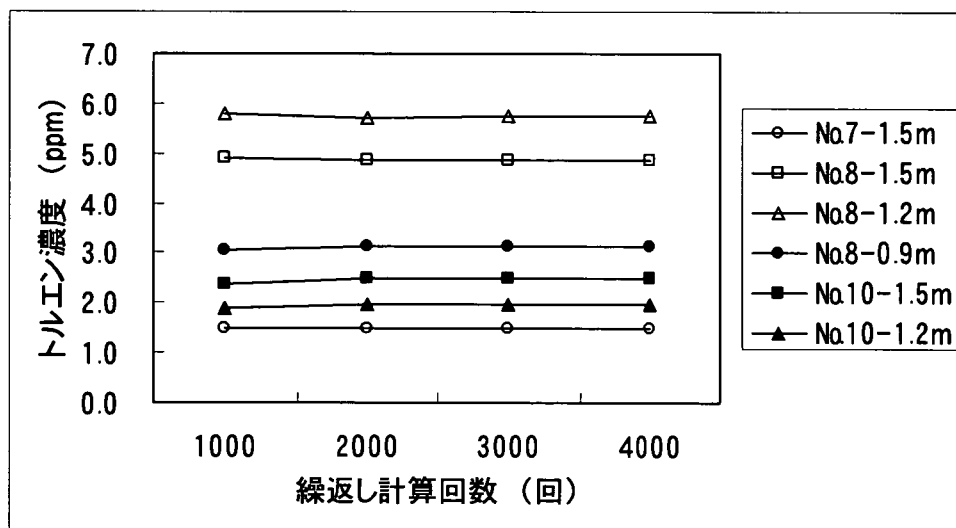


図5 モデル実験場内のみを解析範囲としたときの繰返し計算回数とトルエン濃度の解析結果（濃度上位6測定点のみ）

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各測定点におけるトルエン濃度の解析結果のうち、濃度の高い6測定点における繰返し計算回数が1000回、2000回、3000回、4000回でのトルエン濃度解析結果の変

化を図 6 に示す。

繰返し計算回数 3000 回でトルエン濃度の解析結果は、ほぼ収束していた。

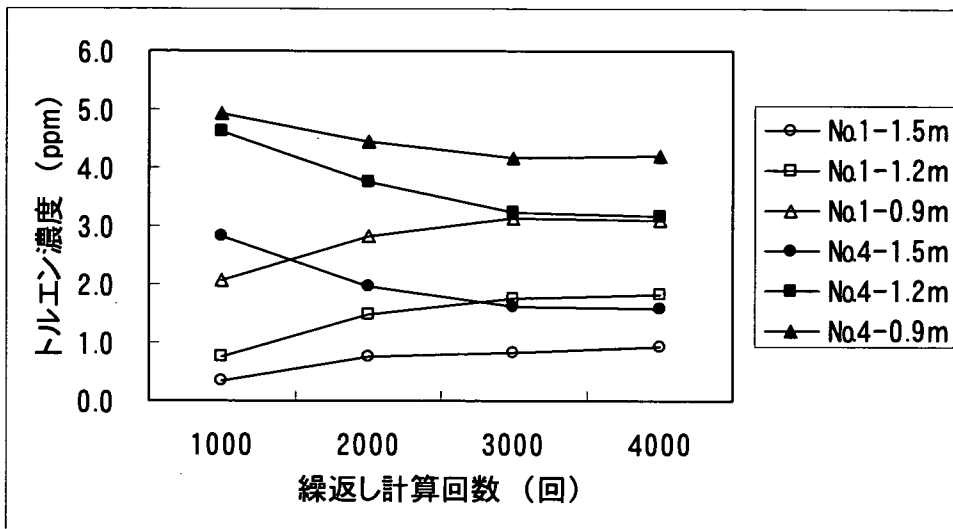


図 6 モデル実験場外も含めて解析範囲としたときの繰返し計算回数とトルエン濃度の解析結果 (空気自然流入、濃度上位 6 測定点のみ)

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各測定点におけるトルエン濃度の解析結果のうち、濃度の高い 6 測定点における繰返し計算回数が 1000 回、2000 回、3000 回、4000 回でのトルエン濃度解析結果の変化を図 7 に示す。

繰返し計算回数 2000 回でトルエン濃度の解析結果は、ほぼ収束していた。

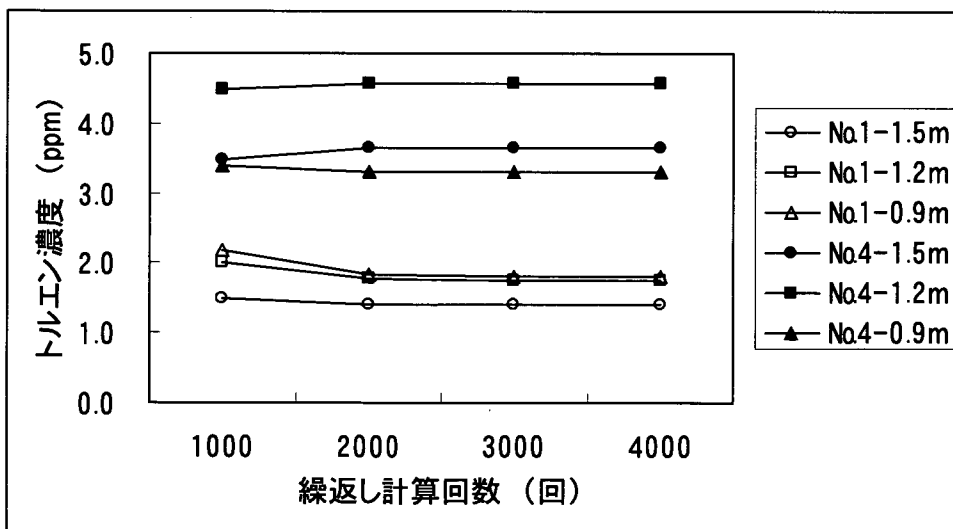


図 7 モデル実験場外も含めて解析範囲としたときの繰返し計算回数とトルエン濃度の解析結果 (空気強制給気、濃度上位 6 測定点のみ)

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、表 2 に繰返し計算回数 4000 回ときの各測定点の解析結果を示す。また、床上 1.5m、1.2m 及び 0.9m におけるトルエンの濃度分布の解析結果を解析方法の種類ごとに図 8

から図 16 に示す。

表 2 モデル実験場における各測定点の解析方法ごとのトルエン濃度の解析結果

解析範囲		トルエン濃度解析結果(ppm)		
		実験場内のみ	実験場外を含む	実験場外を含む
		自然流入(出入口)	自然流入(周囲の壁)	強制給気(排気口の裏)
測定点No.	高さ(m)			
1	1.5	0.82	0.92	1.40
	1.2	0.85	1.81	1.75
	0.9	0.87	3.10	1.82
2	1.5	0.74	0.03	0.23
	1.2	0.77	0.02	0.21
	0.9	0.81	0.01	0.17
3	1.5	0.55	0.06	0.30
	1.2	0.57	0.06	0.31
	0.9	0.50	0.05	0.32
4	1.5	1.22	1.60	3.64
	1.2	1.91	3.18	4.57
	0.9	1.12	4.21	3.30
5	1.5	0.95	0.02	0.13
	1.2	1.02	0.03	0.09
	0.9	1.03	0.03	0.04
6	1.5	0.64	0.05	0.30
	1.2	0.57	0.05	0.30
	0.9	0.42	0.03	0.27
7	1.5	1.51	0.02	0.37
	1.2	1.38	0.01	0.18
	0.9	0.99	0.01	0.06
8	1.5	4.88	0.03	0.26
	1.2	5.75	0.01	0.18
	0.9	3.13	0.00	0.11
9	1.5	1.07	0.00	0.01
	1.2	0.90	0.00	0.00
	0.9	0.59	0.00	0.00
10	1.5	2.48	0.00	0.01
	1.2	1.98	0.00	0.00
	0.9	1.08	0.00	0.00
11	1.5	1.04	0.00	0.01
	1.2	0.77	0.00	0.01
	0.9	0.43	0.00	0.00

モデル実験場内のみを解析範囲とした場合には、図 8 から図 10 で分かるように、トルエンは発生源から出入口側に広がる分布をしていた。モデル実験場の外側も含めて解析範囲とした場合には、図 11 から図 16 で分かるように、トルエンは発生源から排気口に向かって広がる分布をしているが、発生源から排気口に向かって左側に偏った分布をしていた。モデル実験場の周囲に空気が自然流入する条件に比べて、モデル実験場の外側に空気を強制給気する条件の方が、より広くトルエンが分布していた。

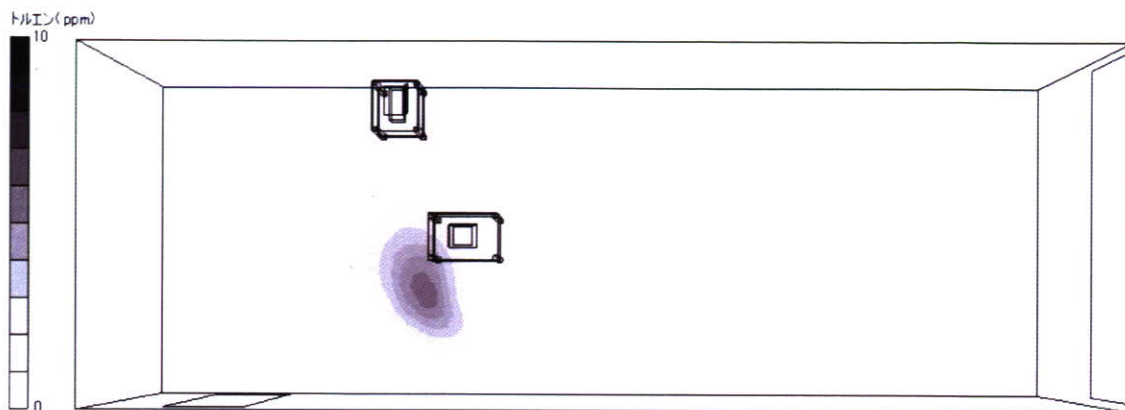


図8 モデル実験場内のみを解析範囲としたときの床上1.5mにおけるトルエンの濃度分布の解析結果

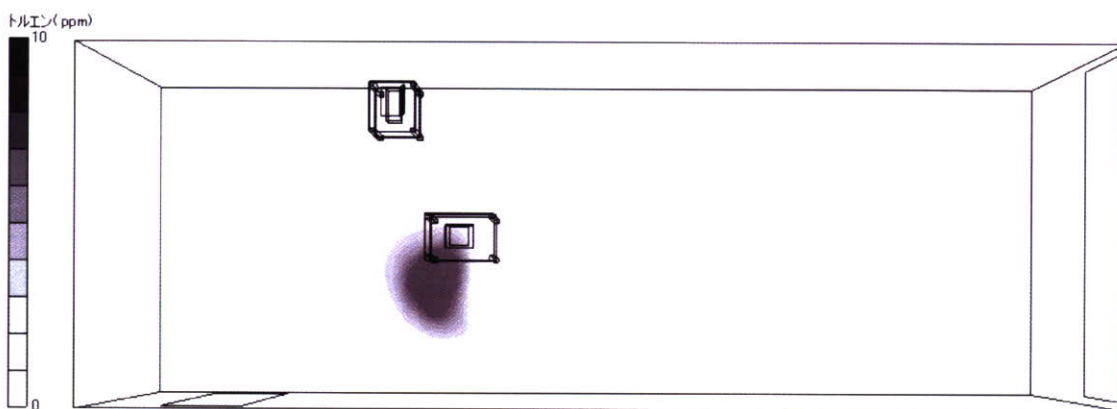


図9 モデル実験場内のみを解析範囲としたときの床上1.2mにおけるトルエンの濃度分布の解析結果

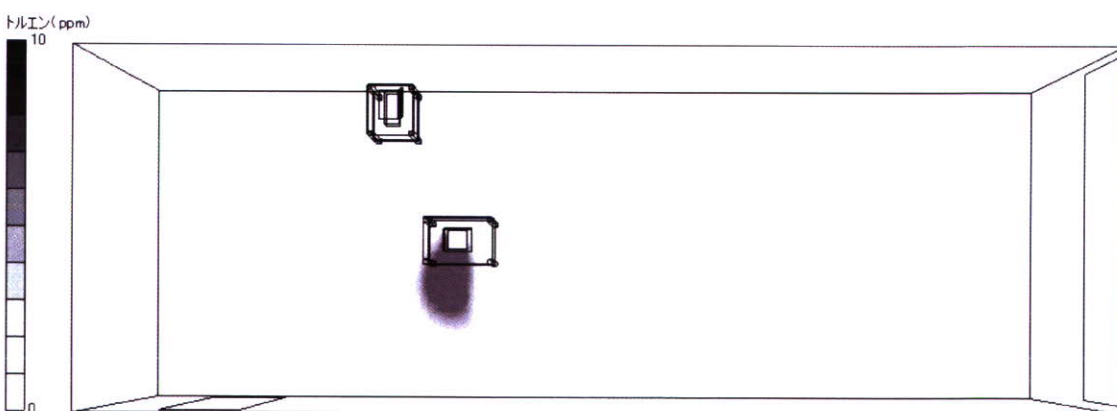


図10 モデル実験場内のみを解析範囲としたときの床上0.9mにおけるトルエンの濃度分布の解析結果

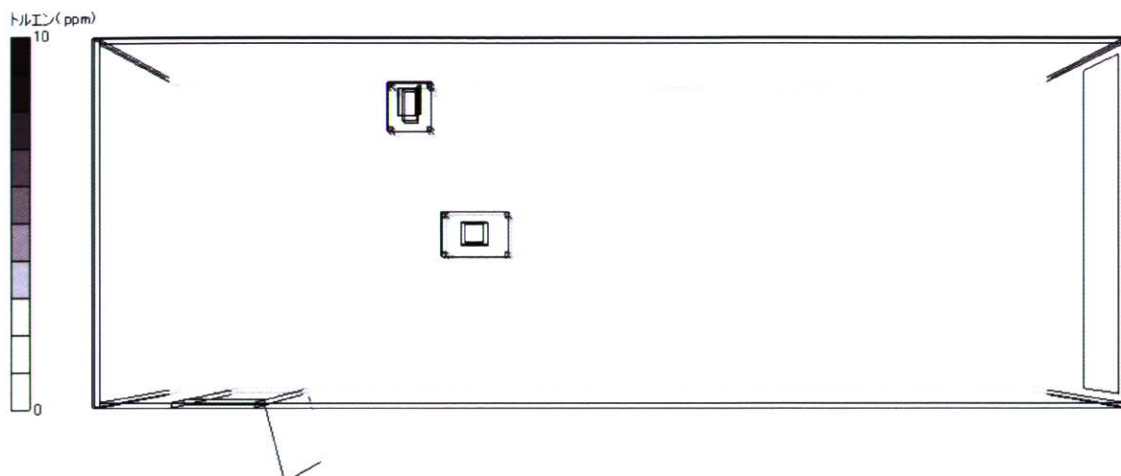


図 11 モデル実験外も含めて解析範囲としたときの床上 1.5m におけるトルエンの濃度分布の解析結果（空気自然流入）

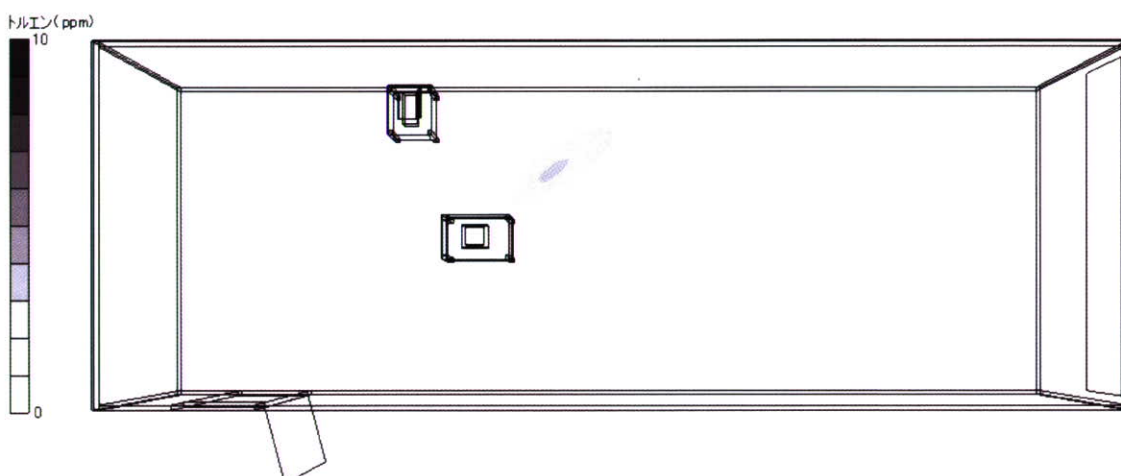


図 12 モデル実験外も含めて解析範囲としたときの床上 1.2m におけるトルエンの濃度分布の解析結果（空気自然流入）

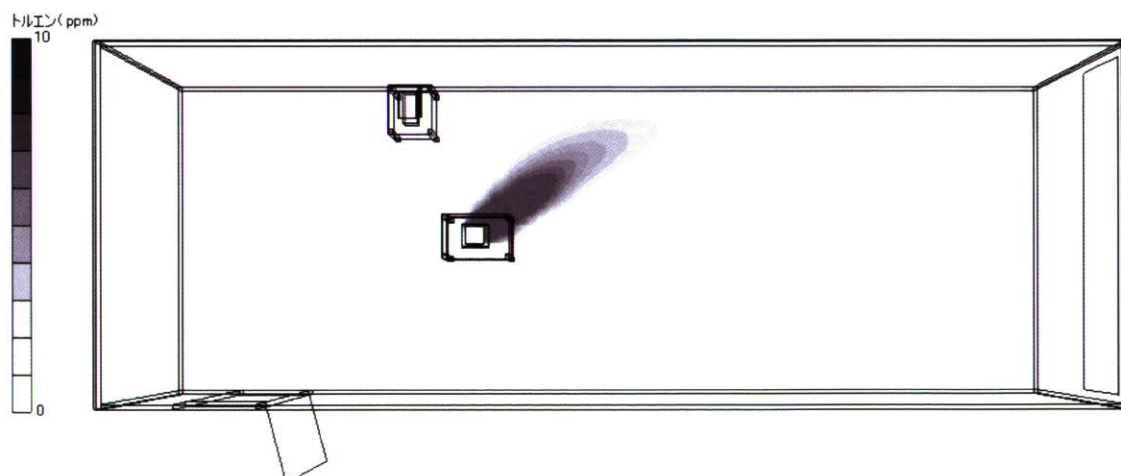


図 13 モデル実験外も含めて解析範囲としたときの床上 0.9m におけるトルエンの濃度分布の解析結果（空気自然流入）

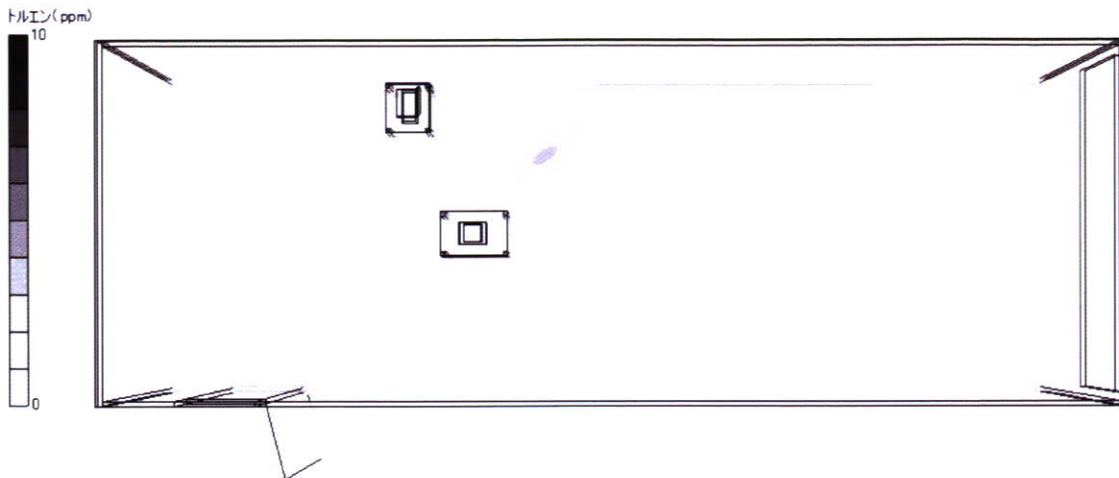


図 14 モデル実験外も含めて解析範囲としたときの床上 1.5m におけるトルエンの濃度分布の解析結果（空気強制給気）

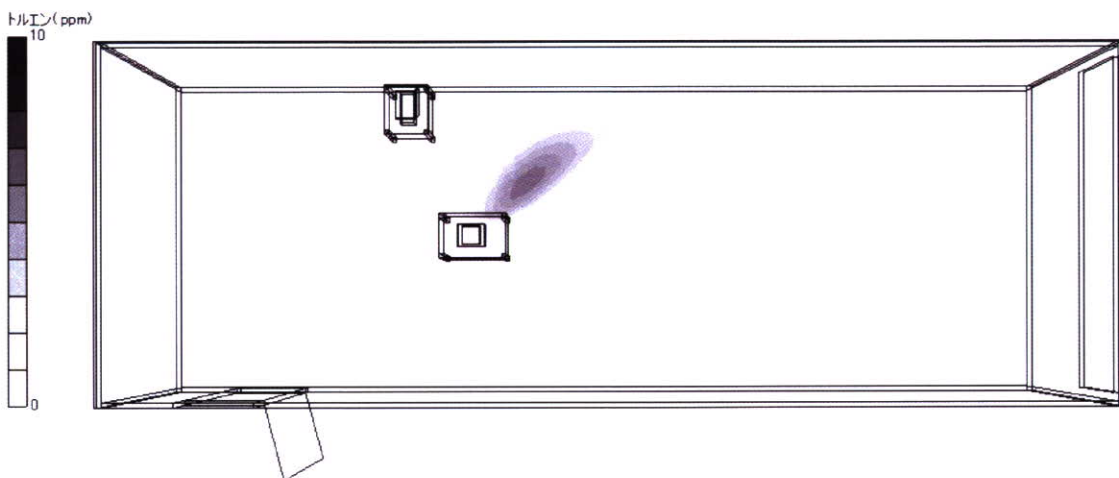


図 15 モデル実験外も含めて解析範囲としたときの床上 1.2m におけるトルエンの濃度分布の解析結果（空気強制給気）

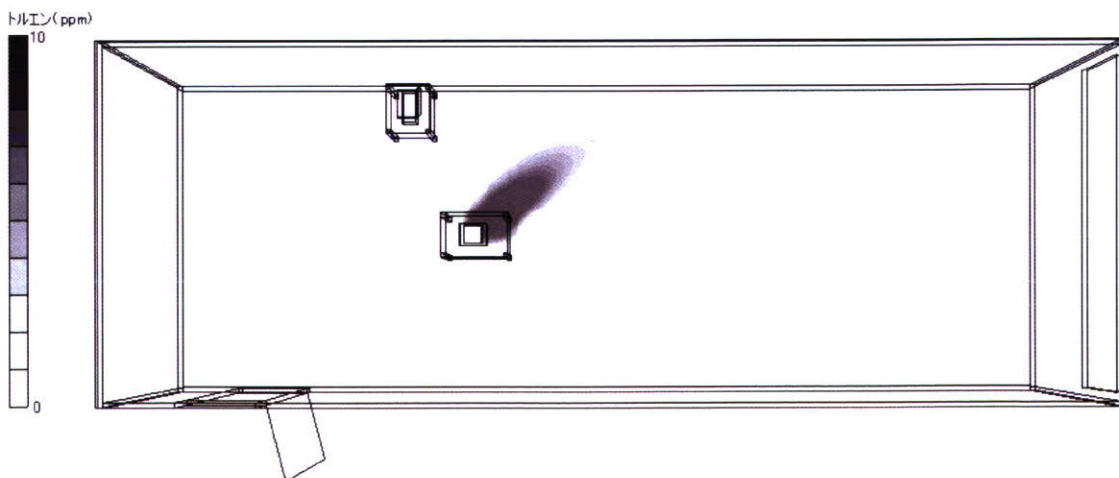


図 16 モデル実験外も含めて解析範囲としたときの床上 0.9m におけるトルエンの濃度分布の解析結果（空気強制給気）

2.2 気流のベクトルと速度分布の解析結果

モデル実験場内の気流のベクトルと速度分布の解析結果は、モデル実験場内のみを解析範囲とした場合でも、モデル実験場の外側も含めて解析範囲とした場合でも、トルエン濃度と同様に繰返し計算回数 4000 回までには収束していた。そこで、繰返し計算回数 4000 回を気流のベクトルと速度分布の解析結果として、床上 1.5m、1.2m 及び 0.9m における解析結果を解析方法の種類ごとに図 17 から図 25 に示す。

モデル実験場内のみを解析範囲とした場合には、気流は、図 17 から図 19 で分かるように、空気は出入口から入り込み、排気口とは反対方向にやや偏りながらまっすぐに進み、排気口とは反対側の壁に当たってから渦を巻きながら排気されるという解析結果であった。

モデル実験場の外側も含めて解析範囲とした場合には、トルエンは、図 20 から図 25 で分かるように、空気は出入口から入り込み、排気口の方向にやや偏りながらまっすぐに進み、出入口正面の壁に当たってから渦を巻きながら排気されるという解析結果であった。モデル実験場の周囲に空気が自然流入する条件では、図 20 から 22 にあるとおり、空気の自然流入面から出入口付近まで中心部で約 0.5m/s のまっすぐな気流が発生しているという解析結果であった。一方、モデル実験場の外側に空気が強制給気する条件のでは、図 23 から図 25 にあるとおり、モデル実験場の外側の気流は、実験場の出入口付近を除いて、0.15m/s 未満であった。

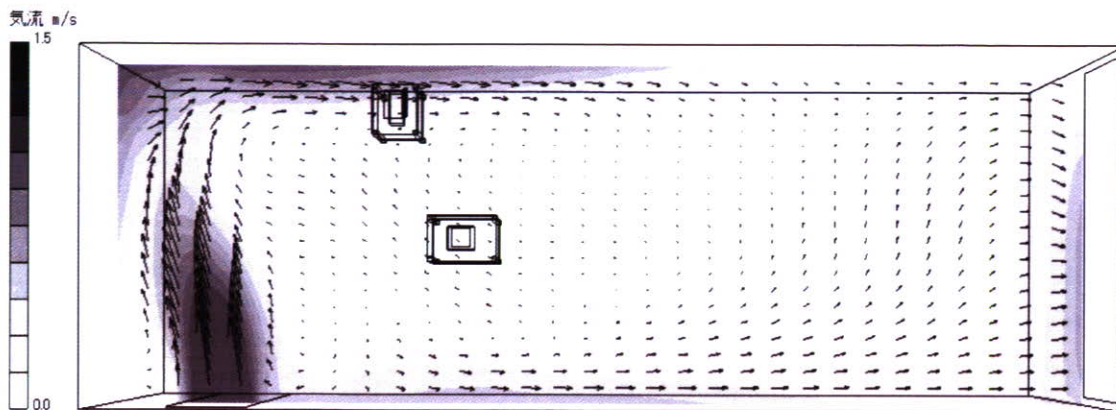


図 17 モデル実験場内のみを解析範囲としたときの床上 1.5m における気流のベクトルと速度分布の解析結果

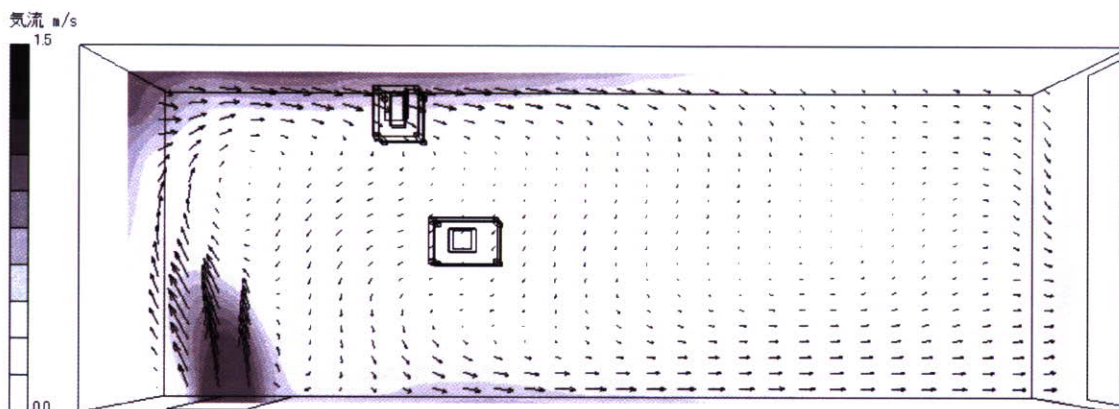


図 18 モデル実験場内のみを解析範囲としたときの床上 1.2m における気流のベクトルと速度分布の解析結果

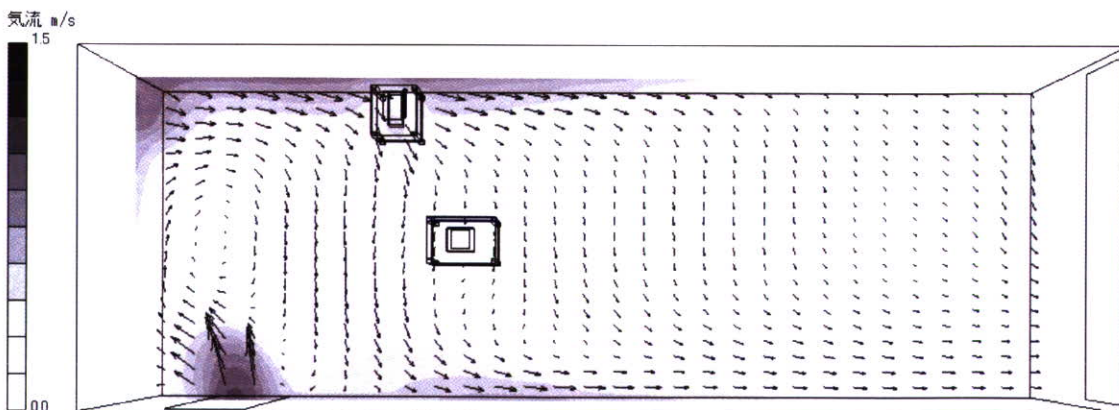


図 19 モデル実験場内のみを解析範囲としたときの床上 0.9m における気流のベクトルと速度分布の解析結果

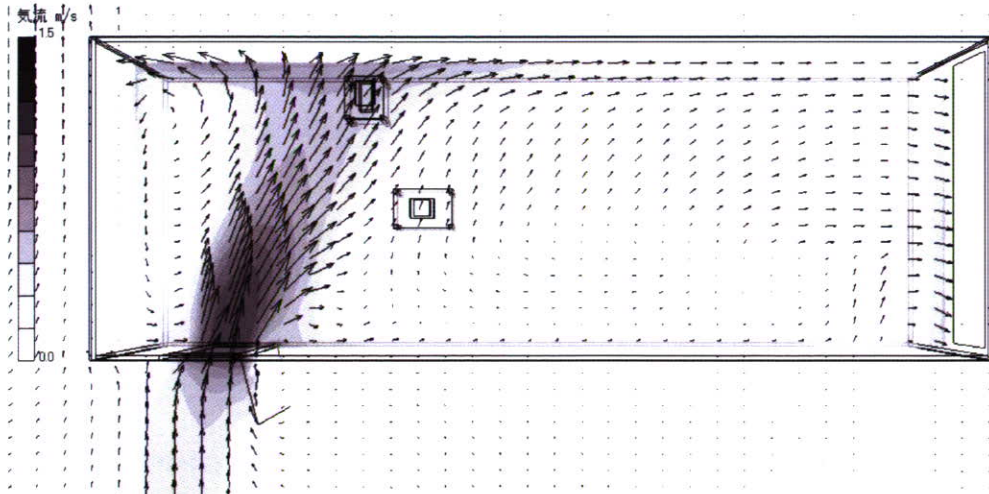


図 20 モデル実験場外も含めて解析範囲としたときの床上 1.5m における気流のベクトルと速度分布の解析結果（空気自然流入）

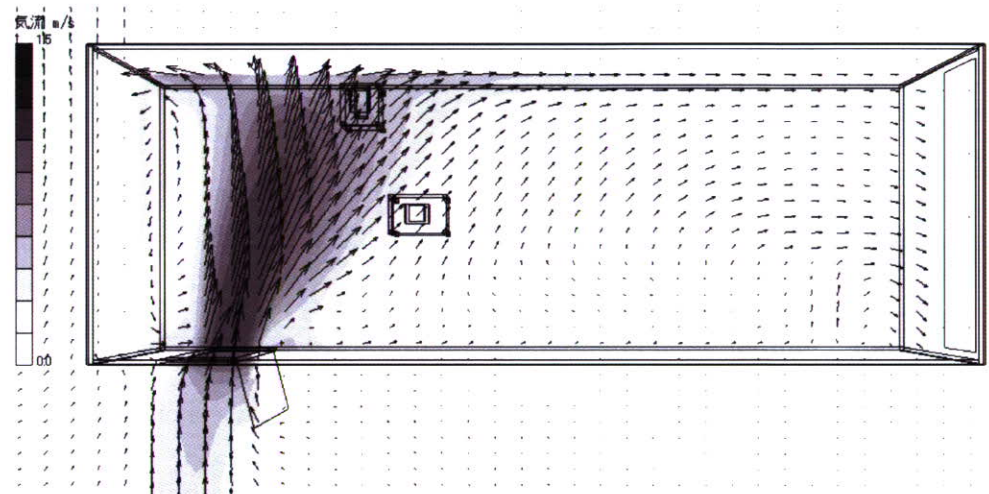


図 21 モデル実験場外も含めて解析範囲としたときの床上 1.2m における気流のベクトルと速度分布の解析結果（空気自然流入）

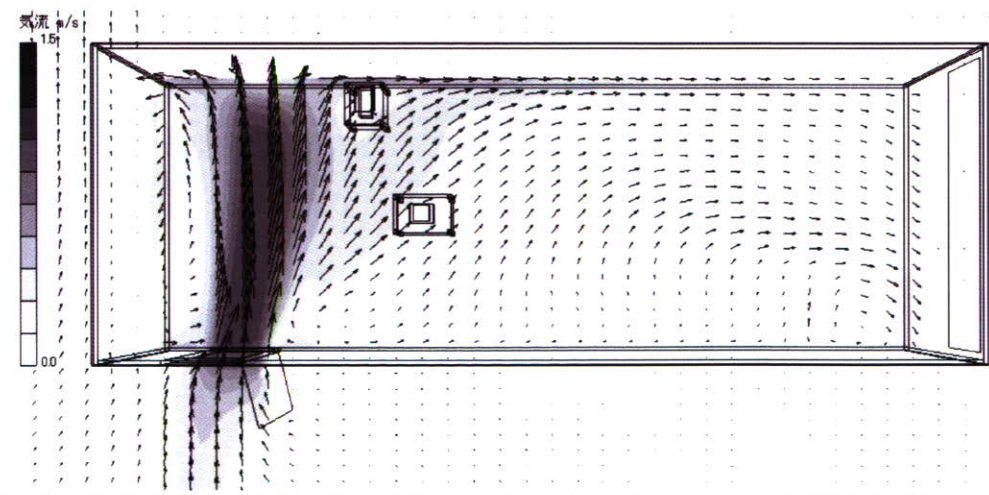


図 22 モデル実験場外も含めて解析範囲としたときの床上 0.9m における気流のベクトルと速度分布の解析結果（空気自然流入）

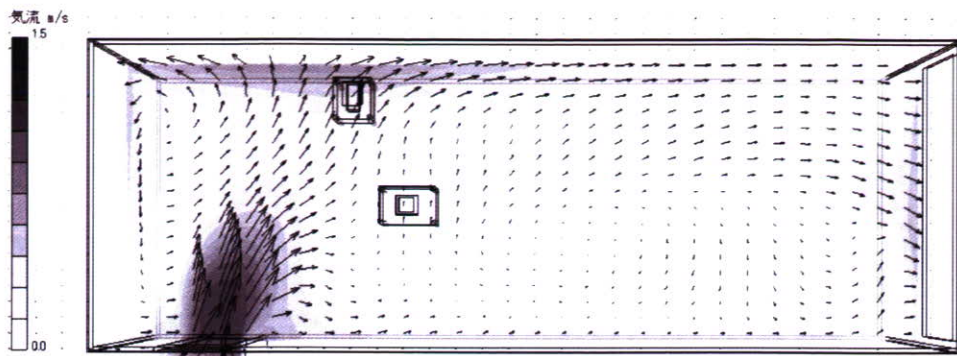


図 23 モデル実験場外も含めて解析範囲としたときの床上 1.5m における気流のベクトルと速度分布の解析結果（空気強制給気）

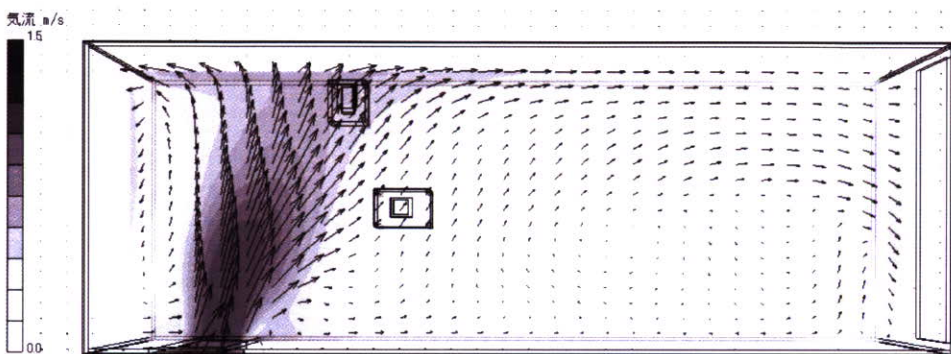


図 24 モデル実験場外も含めて解析範囲としたときの床上 1.2m における気流のベクトルと速度分布の解析結果（空気強制給気）

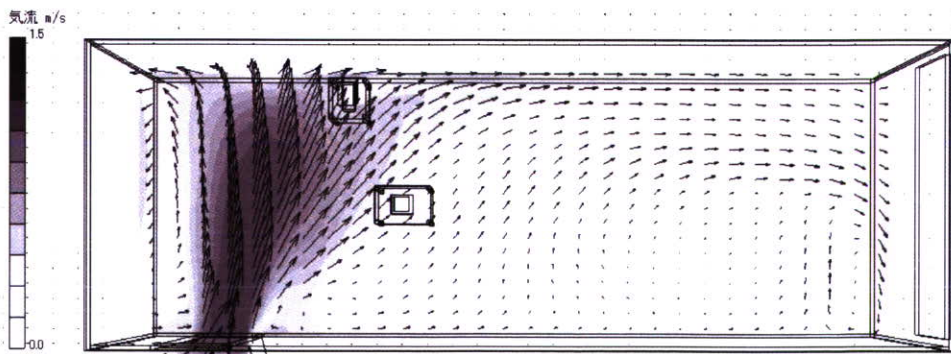


図 25 モデル実験場外も含めて解析範囲としたときの床上 0.9m における気流のベクトルと速度分布の解析結果（空気強制給気）

D. 考察

1 CFD 解析の繰返し計算回数

モデル実験内のみを解析範囲とした場合では繰返し計算回数 1000 でほぼ収束した解析結果が得られたのに対して、モデル実験場の外側も含めて解析範囲とした場合の給気条件を自然流入とした場合では繰返し計算回数 3000 回、給気条件を強制給気とした場合では繰返し計算回数 2000 回でほぼ収束した解析結果が得られている。

CFD 解析では、各要素体積ごとに入出力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、繰返し計算回数を一律に決めることはできないので、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ことを確認した後に、収束した解析結果を CFD の解析結果とする必要があると考えられる。

2 モデル実験場のトルエン濃度の測定結果と CFD 解析結果

モデル実験場でのトルエン濃度の測定結果及び CFD 解析結果をまとめて表 3 及び図 26 から図 28 に示す。

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。

これらのことから、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。