

## 4. 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

### 4.1 はじめに

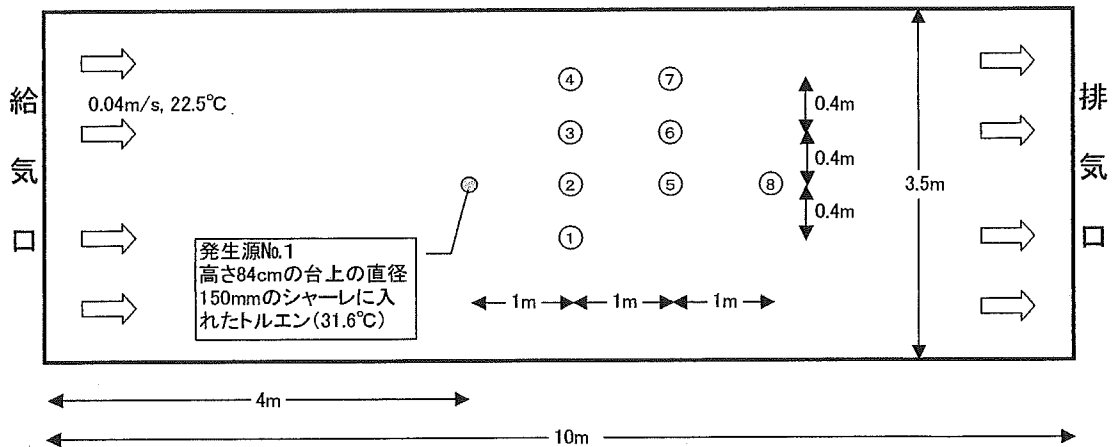
作業者の呼吸位置の高さの水平面における気中有害物質の濃度分布が推定でき、作業者の行動が分かれば、労働者のばく露濃度は推定できる。近年、数値流体力学の解析ソフトが伸展してきており、計算速度が格段に速くなってきた。濃度分布を計算するためには作業場及び障害物の3次元の形状、発生源の形状、対象物質の蒸発速度、気流の情報等が必要であるが、一度これらのデータが入力されていれば、異なる位置で別の化学物質が使用されていたとしてもその化学物質の蒸発速度が分かれば、濃度分布の計算は容易にできる。また、気流、濃度が3次元で計算できるため、作業場の工学的対策にも有用である。発生源の濃度については、蒸気圧データ及び使用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、実験的に蒸発速度を測定し、作業環境測定結果や個人ばく露濃度測定結果と比較することで、より実態に合致した有害物質発生の状況を明らかにし、数値計算モデル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しているが、本年度はモデル実験場内でトルエン蒸気を一定速度で発生させ、実験場内の気中濃度の実測値と数値計算ソフトのシミュレーション結果との比較を行った。

## 4.2 実測値の測定方法

### 4.2.1 発生源1ヶ所での実測値の測定方法

長さ10.0m×幅3.5m×高さ2.5mのモデル実験場に0.04m/sの一樣な気流を発生させ、給気口から4.0mの中央床上0.84mの位置に発生源を置いた。発生源は、直径150mm×高さ100mmのステンレスシャーレにトルエンを8分目程度入れ、ヒーターで31.6℃に保ちながらトルエン蒸気を発生させた。トルエン濃度の測定は、発生源より風下の図4.1に示した床上1.2mの高さにVOCモニター（RAE SYSTEMS社製 pbb RAE PGM-7240）を置き、10秒毎の連続測定を行った。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発生速度を測定した。

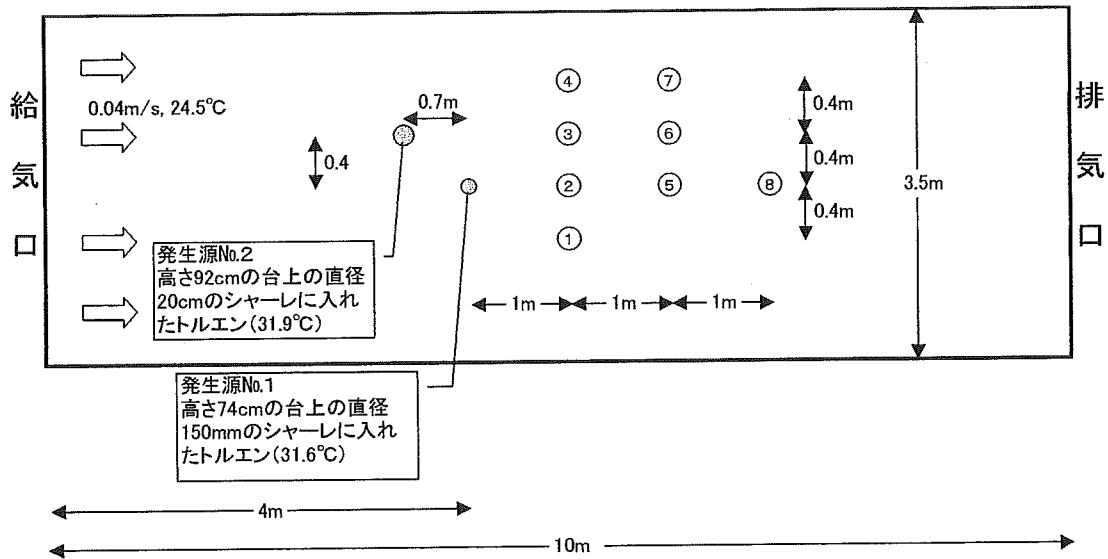


①,②,③…… : トルエン濃度測定点 (高さ1.2m)

図4.1 発生源1ヶ所するときのモデル実験場の平面図と測定点

#### 4.2.2 発生源2ヶ所での実測値の測定方法

図4.1に示したモデル実験場の発生源No.1の風上0.70mの中央から図面上側に0.40mずれた床上0.92mの位置に、トルエンの発生源No.2を置いた。発生源No.2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、ヒーターで32.1℃に保ちながらトルエン蒸気を発生させた。トルエン濃度の測定は、図4.1と同じ測定点の床上1.2mとし、VOCモニターによる10秒毎の連続測定を行った。(図4.2及び写真4.1)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発生速度を測定した。



①, ②, ③…… : トルエン濃度測定点 (高さ 1.2m)

図 4.2 発生源2ヶ所するときのモデル実験場の平面図と測定点

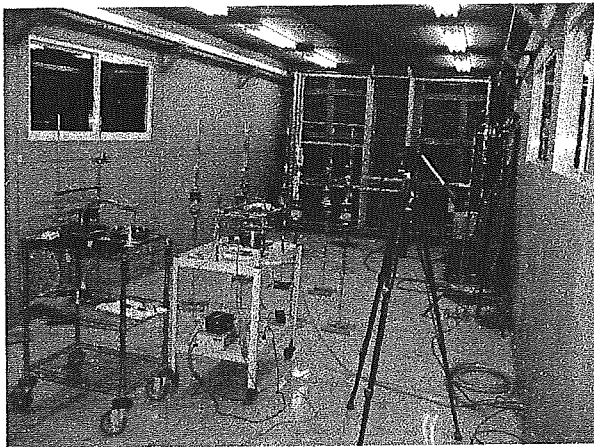


写真 4.1 発生源2ヶ所するときのモデル実験場の写真

#### 4.3 実測値の測定結果

##### 4.3.1 発生源1ヶ所での実測値の測定結果

発生源のシャーレに入れたトルエンの蒸発量、蒸発量の測定時間及び蒸発速度を表4.1に示した。

表 4.1 発生源1ヶ所のときのトルエンの蒸発量、蒸発量の測定時間及び蒸発速度

| 蒸発量 (g) | 測定時間 (min) | 蒸発速度 (g/min) |
|---------|------------|--------------|
| 2.2     | 30         | 0.073        |

図 4.3 に測定点No.2 の測定開始から約1時間経過後の30分間の実測値の10秒毎の濃度変化を示した。10秒毎の測定値はばらつきが大きいので、30分間の平均濃度を実測値として採用することにした。

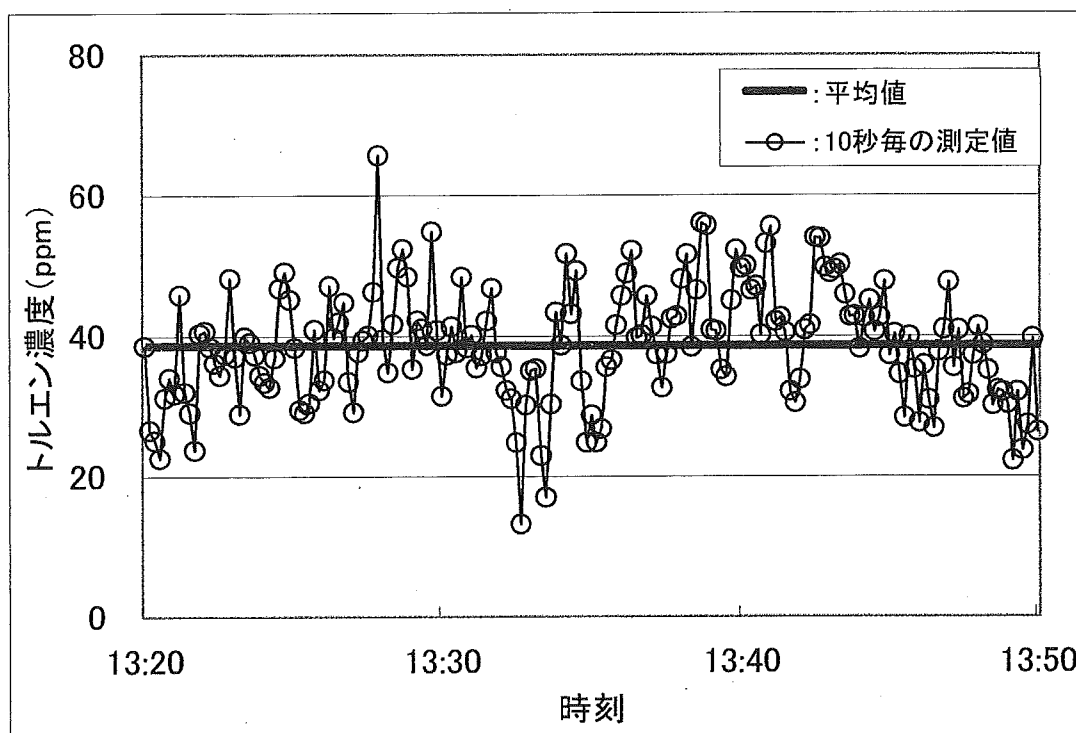


図 4.3 測定点No.2 の実測データと平均値

他の測定点も測定No.2と同じように10秒毎の測定値にばらつきが大きいので、測定開始約1時間後の30分間の平均濃度を実測値として採用することとした。各測定点の実測値の測定結果を表4.2に示した。

表4.2 発生源が1ヶ所の際の各測定点の実測値測定結果

| 測定点No. | 1    | 2    | 3    | 4   | 5    | 6    | 7   | 8    |
|--------|------|------|------|-----|------|------|-----|------|
| 平均値    | 21.7 | 38.6 | 4.6  | 0.0 | 37.8 | 6.2  | 0.1 | 26.3 |
| 標準偏差   | 14.1 | 8.3  | 7.1  | 0.0 | 9.0  | 7.3  | 0.0 | 7.9  |
| n      | 180  | 180  | 180  | 180 | 180  | 180  | 180 | 180  |
| 最大値    | 58.4 | 65.7 | 32.6 | 0.1 | 70.0 | 36.2 | 0.1 | 47.7 |
| 最小値    | 0.2  | 13.2 | 0.1  | 0.0 | 8.3  | 0.1  | 0.0 | 0.7  |

[単位：ppm]

#### 4.3.2 発生源2ヶ所での実測値の測定結果

発生源2ヶ所の際の各シャーレのトルエンの蒸発量、蒸発量の測定時間及び蒸発速度を表4.3に示した。

表4.3 発生源2ヶ所の際の各発生源のトルエンの蒸発量、蒸発量の測定時間及び蒸発速度

| 発生源   | 蒸発量 (g) | 測定時間 (min) | 蒸発速度 (g/min) |
|-------|---------|------------|--------------|
| No. 1 | 2.2     | 30         | 0.073        |
| No. 2 | 15.2    | 109.5      | 0.15         |

発生源が1ヶ所するときと同様に10秒毎の測定値にばらつきが大きいため、測定開始約1時間後の30分間の平均濃度を実測値として採用することとし、各測定点の実測値の測定結果を表4.4に示した。

表4.4 発生源が2ヶ所するときの各測定点の実測値測定結果

| 測定点No. | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 平均値    | 13.0 | 38.8 | 42.0 | 14.0 | 45.1 | 40.6 | 12.9 | 31.5 |
| 標準偏差   | 10.7 | 7.4  | 11.4 | 10.9 | 8.4  | 8.4  | 11.6 | 6.8  |
| n      | 180  | 180  | 180  | 180  | 180  | 180  | 180  | 180  |
| 最大値    | 47.3 | 67.0 | 73.7 | 45.6 | 67.6 | 70.6 | 53.5 | 49.3 |
| 最小値    | 0.2  | 21.1 | 10.8 | 0.2  | 20.2 | 12.6 | 0.1  | 8.1  |

[単位：ppm]

#### 4.4 数値計算ソフトによるシミュレーション結果

数値計算ソフトは、Flow Designer（アドバンス・ナレッジ（株）製）を使用し、図4.1及び4.2にある実験場の広さ、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、気流については定常解析で、トルエン濃度については非定常解析で計算を実施した。

##### 4.4.1 発生源1ヶ所するときのシミュレーション結果

###### (1) 気流のシミュレーション結果

発生源が1ヶ所するときの床上1.2mの気流の方向と速度分布のシミュレーション結果を図4.4に、発生源から風下1.0mの垂直断面における気流の速度分布のシミュレーション結果を図4.5に、中央を通る長方向垂直断面における気流の方向と速度分布のシミュレーション結果を図4.6に示した。壁、床及び天井に接する境界層では、気流がやや遅くなり、障害物の風下もその形状に沿って気流がやや遅くなるというシミュレーション結果であった。実測値の測定点とした床上1.2m水平面では、壁付近を除けば給気口から排気口に向かって0.04m/sのほぼ一様な気流が流れているが、発生源では加温による上昇気流が発生し、発生源を通り過ぎた気流はやや上向きの気流となることがシミュレーション結果として示されている。

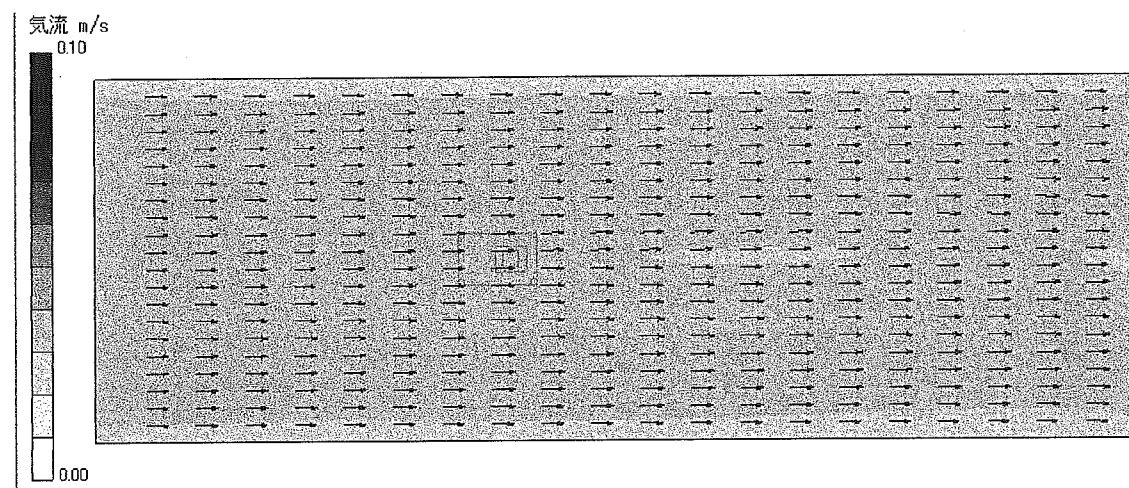


図 4.4 床上 1.2mにおける気流の方向と速度分布のシミュレーション結果  
(発生源1ヶ所)

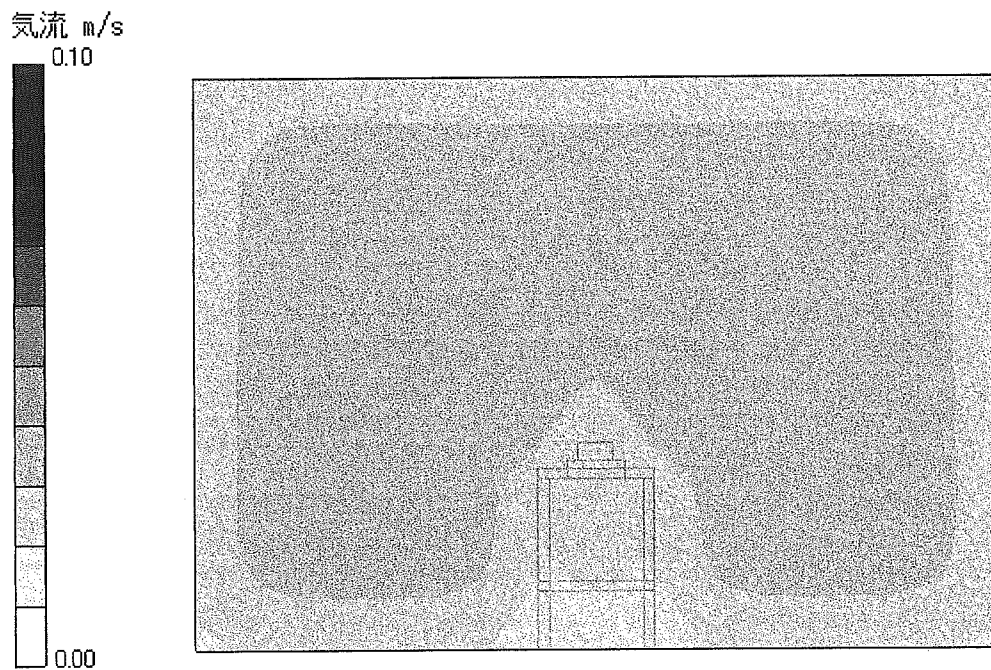


図 4.5 発生源から風下 1.0m の垂直断面における気流の速度分布のシミュレーション結果（発生源 1ヶ所）

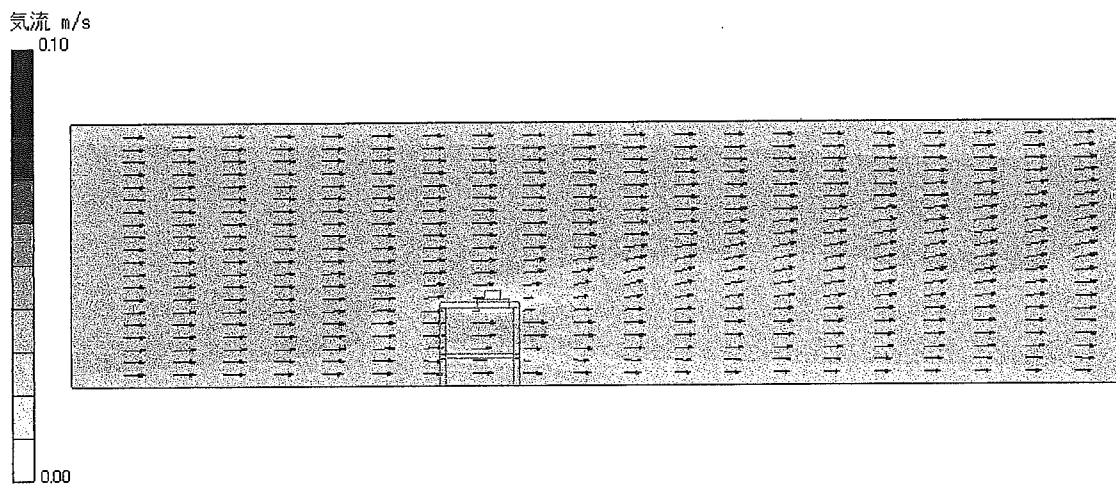


図 4.6 中央を通る長方向垂直断面における気流の方向と速度分布のシミュレーション結果（発生源 1ヶ所）



(2) トルエン濃度のシミュレーション結果

発生源が1ヶ所の際のモデル実験場の実測値の各測定点における計算結果を図4.7に示した。

各測定点の濃度は、測定点No.4及びNo.7を除き、時間経過とともに増加し、一定濃度に収束するというシミュレーション結果であった。一定濃度に収束した後の各測定点の計算結果を表4.5に示した。

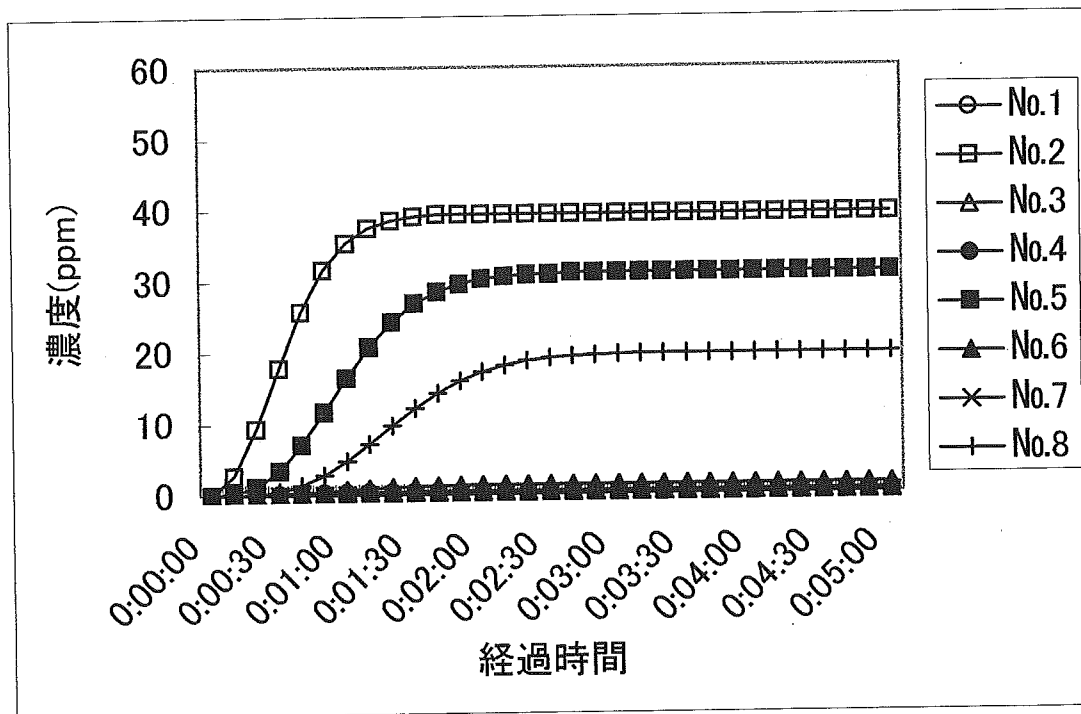


図 4.7 発生源が1ヶ所の際の各測定点の数値計算ソフトによるトルエン濃度の計算結果

表 4.5 発生源が1ヶ所の際の数値計算ソフトによる各測定点のトルエン濃度計算結果 (濃度収束後)

| 測定点No.      | 1   | 2    | 3   | 4   | 5    | 6   | 7   | 8    |
|-------------|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|------|
| トルエン濃度の計算結果 | 0.4 | 39.4 | 0.4 | 0.0 | 31.1 | 1.3 | 0.0 | 19.7 |

[単位 : ppm]

発生源が1ヶ所のとときの各測定点がそれぞれ一定濃度に収束した後の床上1.2mのトルエンの濃度分布のシミュレーション結果を図4.8に、発生源から風下1.0mの垂直断面におけるトルエンの濃度分布のシミュレーション結果を図4.9に、中央を通る長方向垂直断面におけるトルエンの濃度分布のシミュレーション結果を図4.10に示した。発生源から風下に向かってトルエンの濃度分布はたなびいているが、発生源が加温されているためにその濃度分布はやや上向きに伸びた同心円状に広がっているというシミュレーション結果であった。

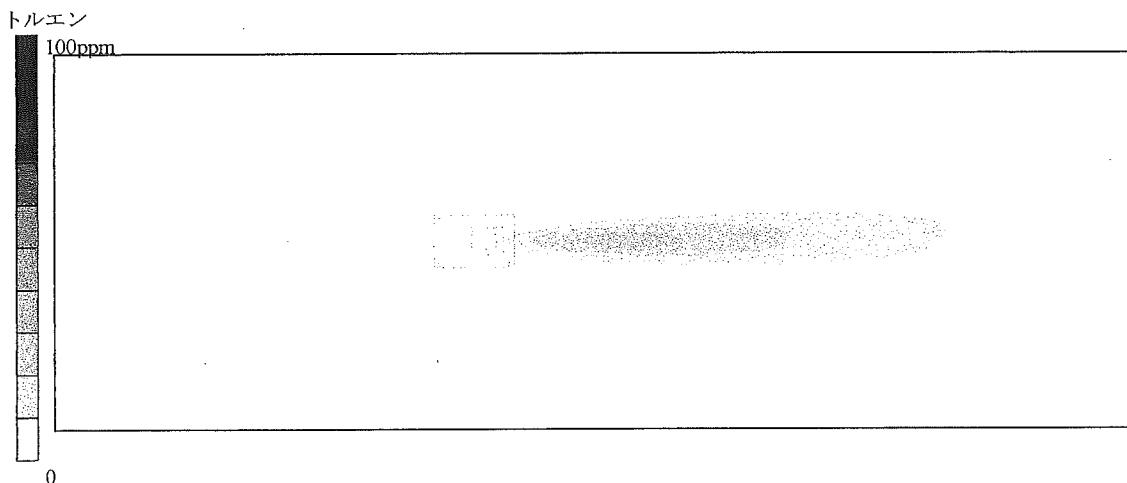


図 4.8 床上 1.2mにおけるトルエンの濃度分布のシミュレーション結果 (発生源1ヶ所)

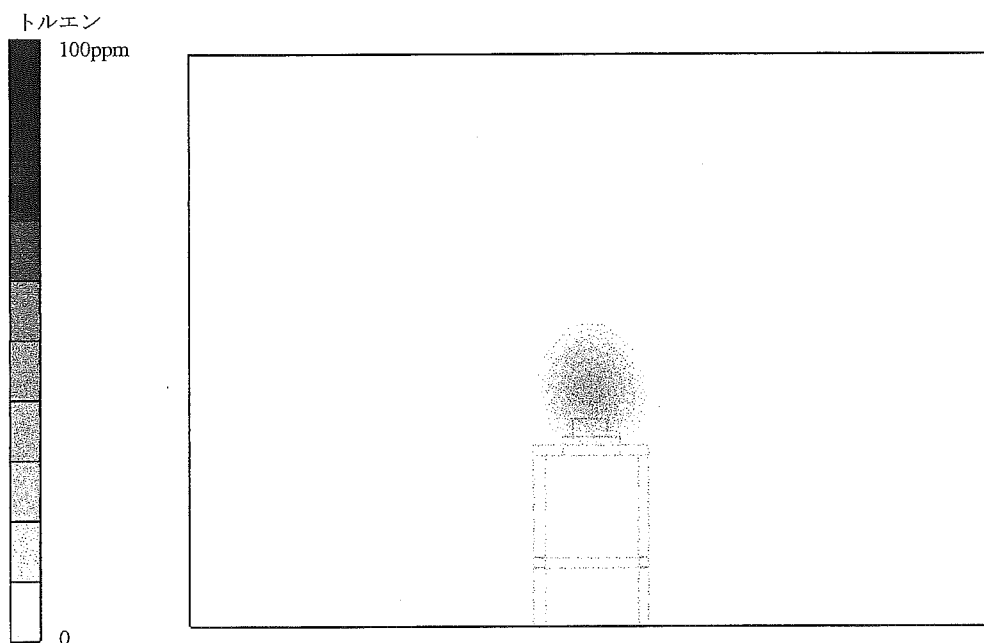


図 4.9 発生源中央から風下 1.0m の垂直断面におけるトルエンの濃度分布のシミュレーション結果 (発生源1ヶ所)

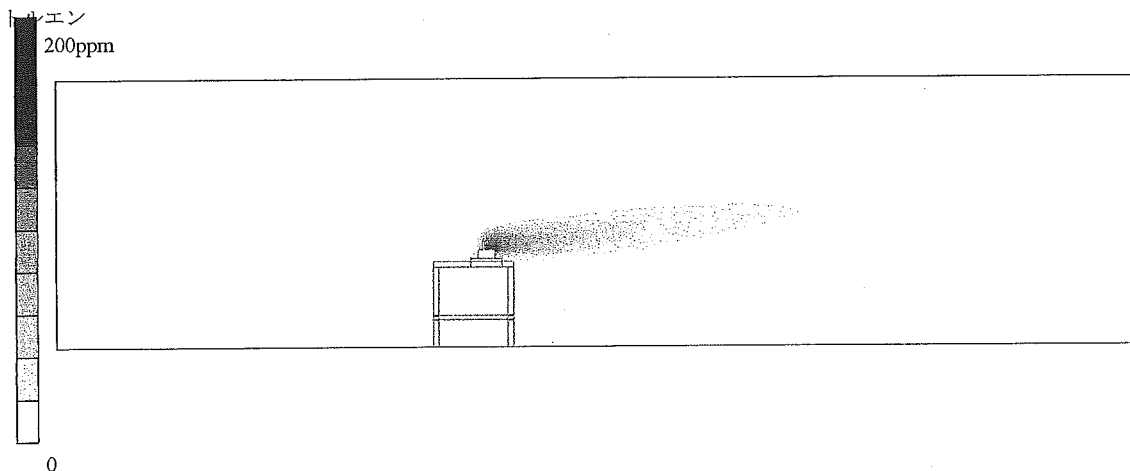


図 4.10 中央を通る長方向垂直断面におけるトルエンの濃度分布のシミュレーション結果（発生源 1ヶ所）

#### 4.4.2 発生源 2ヶ所の際のシミュレーション結果

##### (1) 気流のシミュレーション結果

発生源が 2ヶ所の際の床上 1.2m の気流の方向と速度分布のシミュレーション結果を図 4.11 に、発生源から風下 1.0m の垂直断面における気流の速度分布のシミュレーション結果を図 4.12 に、中央を通る長方向垂直断面における気流の方向と速度分布のシミュレーション結果を図 4.13 に、発生源No.2 中央を通る長方向垂直断面における気流の方向と速度分布のシミュレーション結果を図 4.14 に示した。発生源が 1ヶ所の際と同様に、壁、床及び天井に接する境界層では気流がやや遅くなり、障害物の風下もその形状に沿って気流がやや遅くなるというシミュレーション結果であった。実測値の測定点とした床上 1.2m 水平面では、壁付近を除けば給気口から排気口に向かって 0.04m/s のほぼ一様な気流が流れているが、発生源では加温による上昇気流が発生し、発生源を通り過ぎた気流はやや上向きの気流となることがシミュレーション結果として示されている。

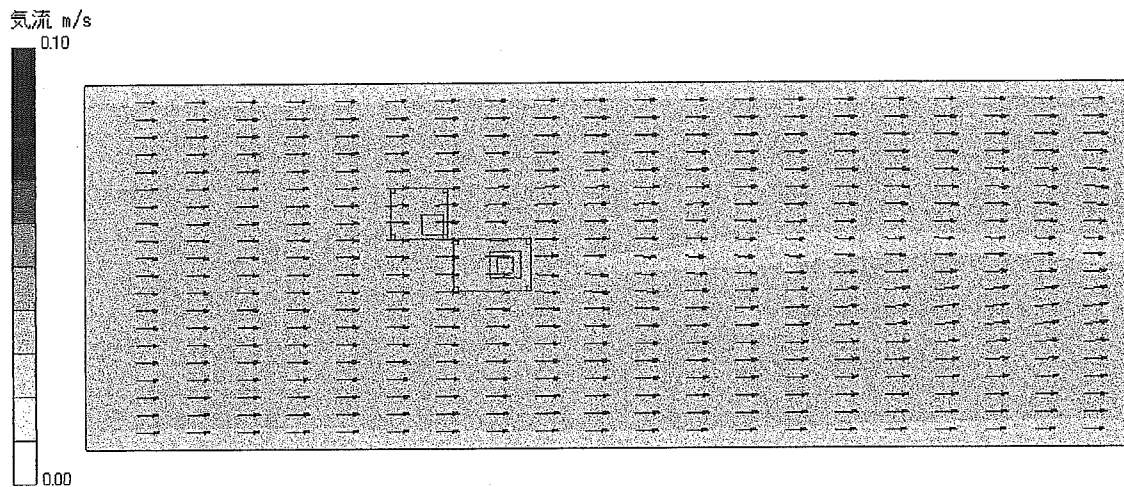


図 4.11 床上 1.2mにおける気流の方向と速度分布のシミュレーション結果(発生源 2ヶ所)

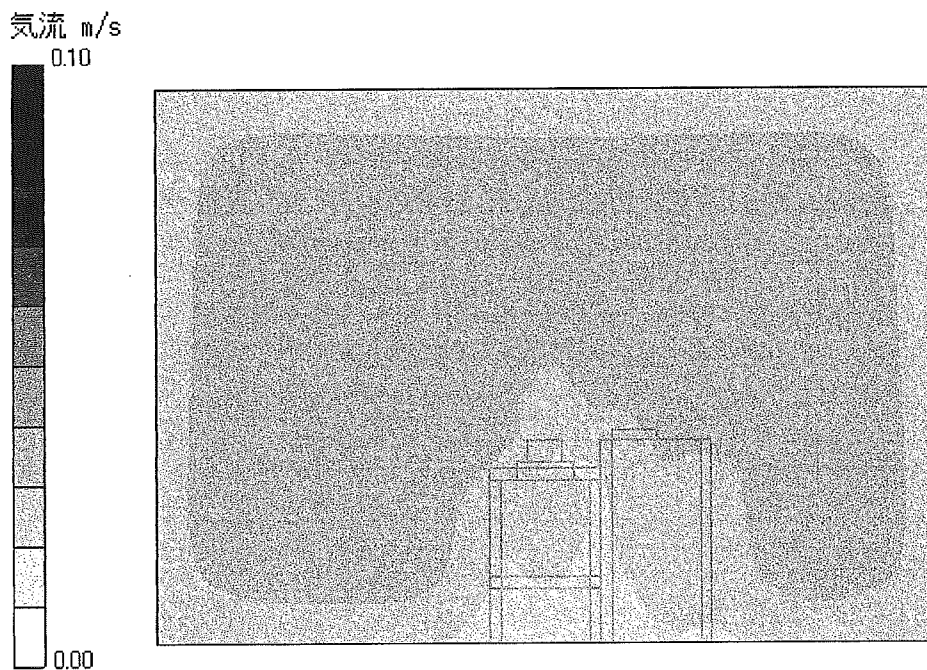


図 4.12 発生源中央から風下 1.0m の垂直断面における気流の速度分布のシミュレーション結果 (発生源 2ヶ所)

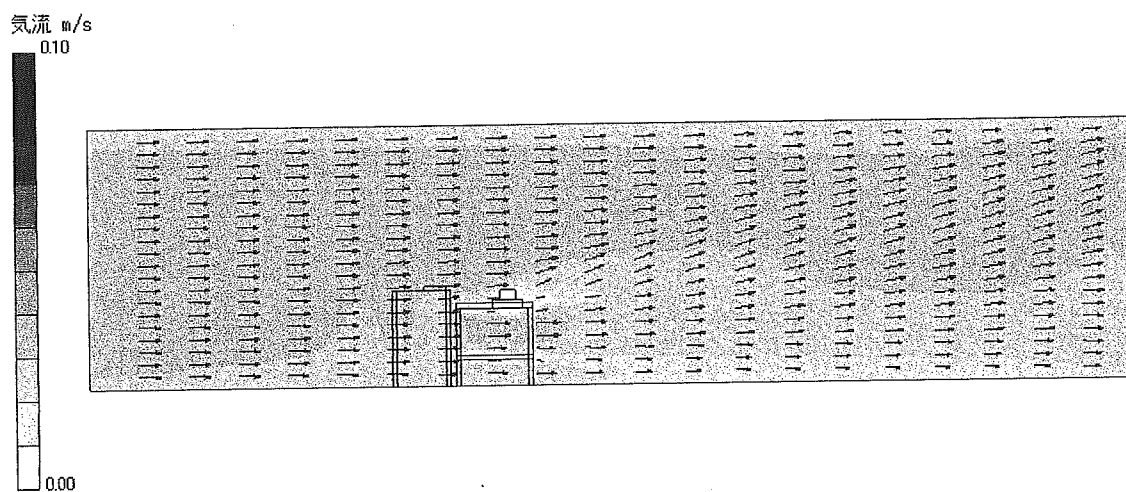


図 4.13 中央を通る長方向垂直断面における気流の方向と速度分布のシミュレーション結果 (発生源 2 ヶ所)

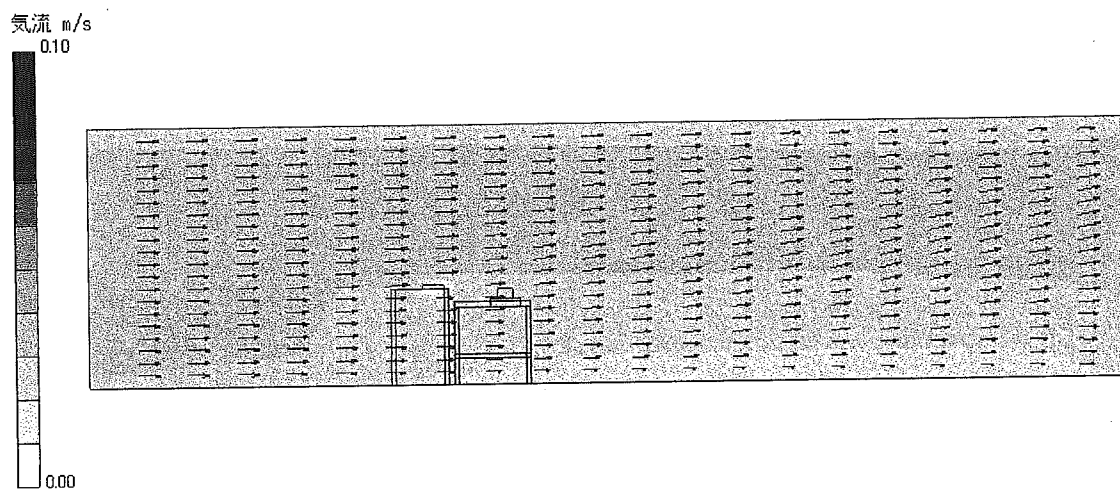


図 4.14 発生源No.2 中央を通る長方向垂直断面における気流の方向と速度分布のシミュレーション結果 (発生源 2 ヶ所)

(2) トルエン濃度のシミュレーション結果

発生源が2ヶ所のときのモデル実験場の実測値の各測定点における計算結果を図4.15に示した。

各測定点の濃度は、時間経過とともに増加し、一定濃度に収束するというシミュレーション結果であった。一定濃度に収束した後の各測定点の計算結果を表4.6に示した。

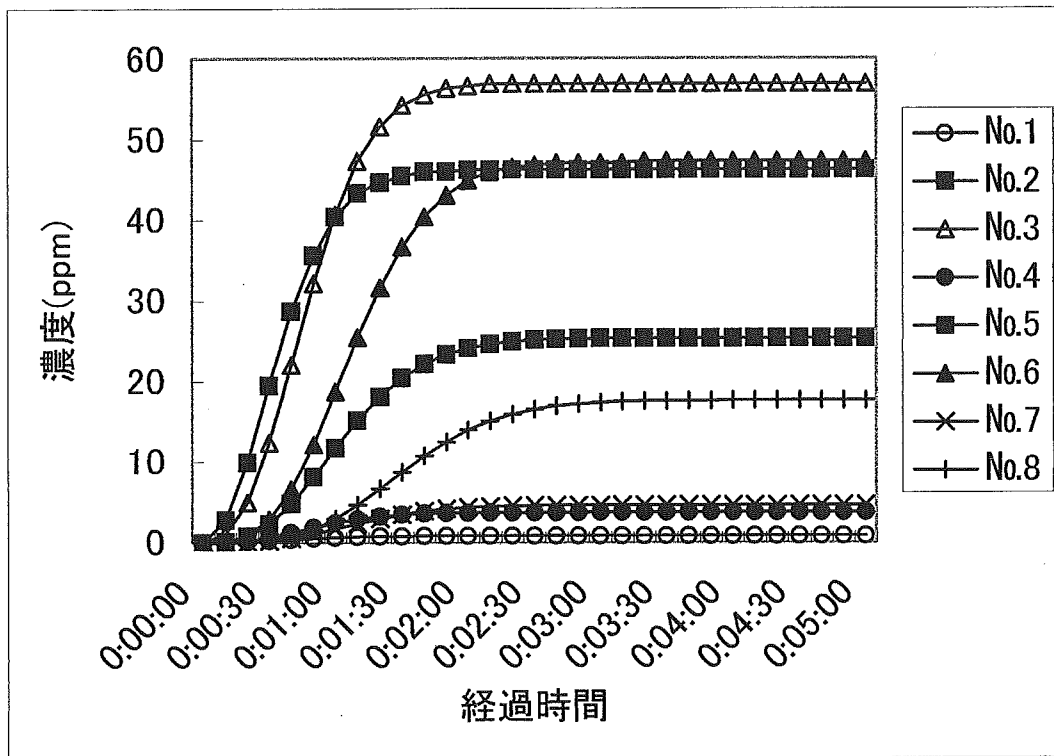


図 4.15 発生源が2ヶ所のときの各測定点の数値計算ソフトによるトルエン濃度の計算結果

表 4.6 発生源が2ヶ所のときの数値計算ソフトによる各測定点のトルエン濃度計算結果（濃度収束後）

| 測定点No.      | 1   | 2    | 3    | 4   | 5    | 6    | 7   | 8    |
|-------------|-----|------|------|-----|------|------|-----|------|
| トルエン濃度の計算結果 | 0.8 | 46.3 | 56.9 | 3.8 | 25.3 | 47.3 | 4.7 | 17.6 |

[単位：ppm]

発生源が2ヶ所のときの床上 1.2m のトルエンの濃度分布のシミュレーション結果を図 4.16 に、発生源から風下 1.0m の垂直断面におけるトルエンの濃度分布のシミュレーション結果を図 4.17 に、中央を通る長方向垂直断面におけるトルエンの濃度分布のシミュレーション結果を図 4.18 に、発生源No.2 中央を通る長方向垂直断面におけるトルエンの濃度分布のシミュレーション結果を図 4.19 に示した。発生源が1ヶ所するときと同様に、各発生源から風下に向かってトルエンの濃度分布はたなびき、発生源が加温されているためにその濃度分布はやや上向きに伸びた同心円状に広がる分布が合成されたシミュレーション結果であった。

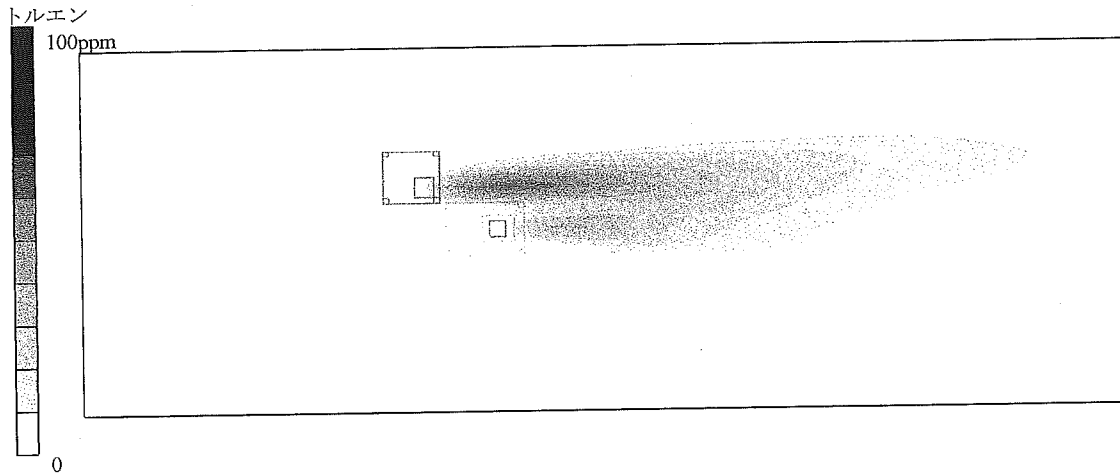


図 4.16 床上 1.2mにおけるトルエンの濃度分布のシミュレーション結果  
(発生源2ヶ所)

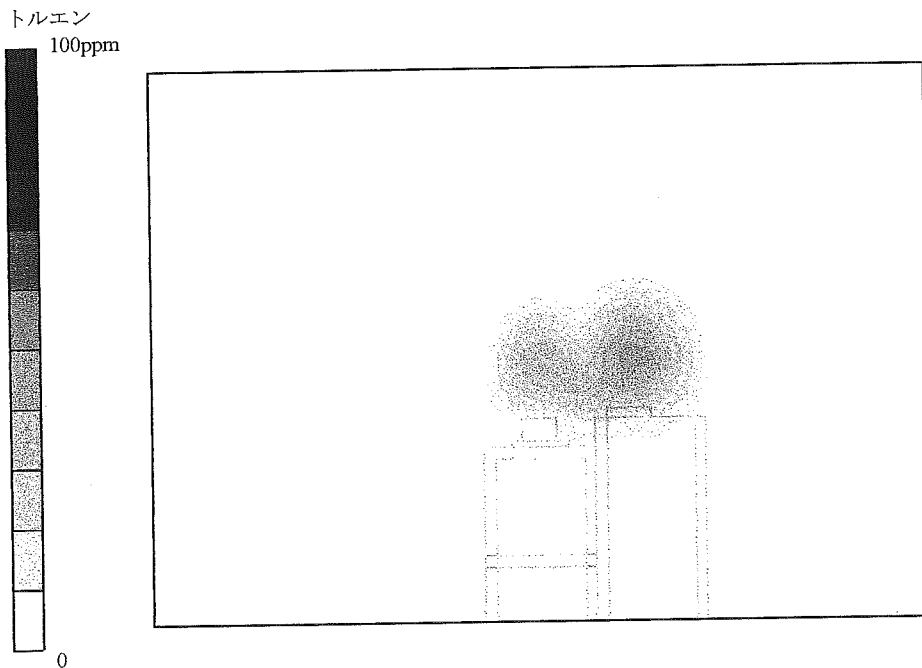


図 4.17 発生源No.1 中央から風下 1.0m の垂直断面におけるトルエンの濃度分

布のシミュレーション結果（発生源2ヶ所）

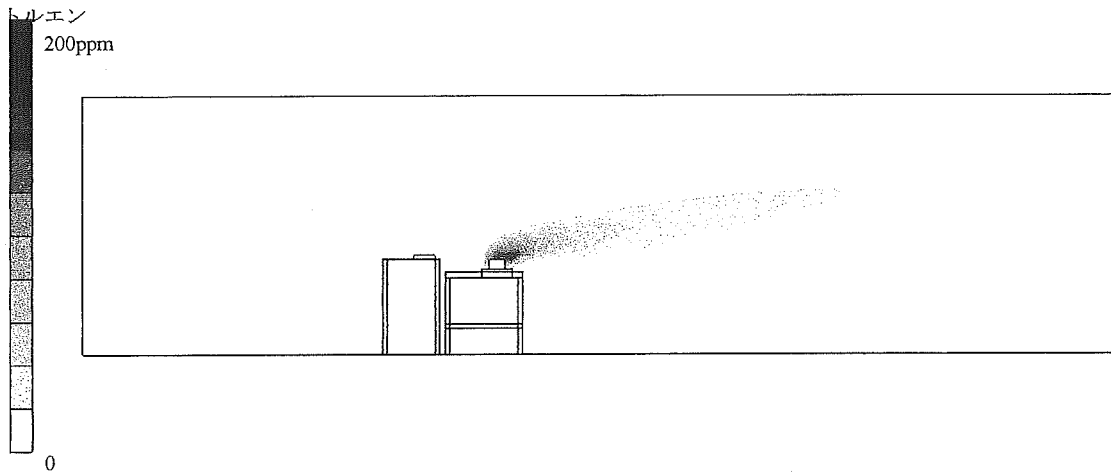


図 4.18 中央を通る長方向垂直断面におけるトルエンの濃度分布のシミュレーション結果（発生源2ヶ所）

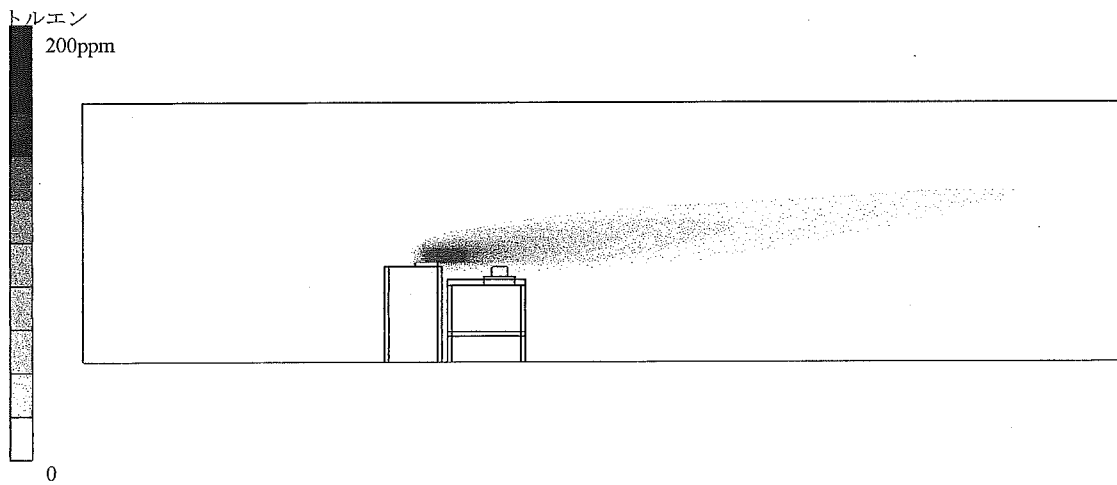


図 4.19 発生源No.2 中央を通る長方向垂直断面におけるトルエンの濃度分布のシミュレーション結果（発生源2ヶ所）



#### 4.5 モデル実験場におけるトルエン濃度の実測値と数値計算ソフトによる計算結果との比較

##### 4.5.1 発生源1ヶ所の際の実測値と数値計算ソフトによる計算結果との比較

モデル実験場における発生源が1ヶ所の実験の実測値と数値計算ソフトの計算結果を表4.7に示した。

数値計算ソフトの計算結果は、全ての測定点で実測値の分布の95%の範囲内（平均値±1.960×標準偏差）であった。

表 4.7 発生源が1ヶ所の際の各測定点のトルエン濃度の実測値と数値計算ソフトによる計算結果

| 測定点No.                | 1                | 2                 | 3                | 4               | 5                 | 6                | 7               | 8                 |
|-----------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| 実測値<br>(平均値)<br>(ppm) | 21.7             | 38.6              | 4.6              | 0.0             | 37.8              | 6.2              | 0.1             | 26.3              |
| 実測値の<br>標準偏差<br>(ppm) | 14.1             | 8.3               | 7.1              | 0.0             | 9.0               | 7.3              | 0.0             | 7.9               |
| 実測値の<br>変動係数          | 65%              | 22%               | 154%             | 0%              | 24%               | 118%             | 0%              | 30%               |
| 実測値の<br>95%の<br>範囲    | 0.0<br>～<br>49.4 | 22.3<br>～<br>55.0 | 0.0<br>～<br>18.6 | 0.0<br>～<br>0.1 | 20.2<br>～<br>55.4 | 0.0<br>～<br>20.5 | 0.0<br>～<br>0.1 | 10.9<br>～<br>41.7 |
| ソフトの<br>計算結果<br>(ppm) | 0.4              | 39.4              | 0.4              | 0.0             | 31.1              | 1.3              | 0.0             | 19.7              |

##### 4.5.2 発生源2ヶ所の際の実測値と数値計算ソフトによる計算結果との比較

モデル実験場における発生源が1ヶ所の実験の実測値と数値計算ソフトの計算結果を表4.8に示した。

数値計算ソフトの計算結果は、測定点No.5及びNo.8を除けば実測値の分布の95%の範囲内（平均値±1.960×標準偏差）であった。実測値の分布の95%の範囲を外れた測定点No.5及びNo.8についても、実測値の分布の99%の範囲内（平均値±2.576×標準偏差）であった。

表 4.8 発生源が2ヶ所の際の各測定点のトルエン濃度の実測値と数値計算ソフトによる計算結果

| 測定点No.                | 1                | 2                 | 3                 | 4                | 5                 | 6                 | 7                | 8                 |
|-----------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 実測値<br>(平均値)<br>(ppm) | 13.0             | 38.8              | 42.0              | 14.0             | 45.1              | 40.6              | 12.9             | 31.5              |
| 実測値の<br>標準偏差<br>(ppm) | 10.7             | 7.4               | 11.4              | 10.9             | 8.4               | 8.4               | 11.6             | 6.8               |
| 実測値の<br>変動係数          | 82%              | 19%               | 27%               | 78%              | 19%               | 21%               | 90%              | 22%               |
| 実測値の<br>95%の<br>範囲    | 0.0<br>～<br>33.9 | 24.4<br>～<br>53.3 | 19.6<br>～<br>64.5 | 0.0<br>～<br>35.4 | 28.5<br>～<br>61.6 | 24.0<br>～<br>57.1 | 0.0<br>～<br>35.7 | 18.2<br>～<br>44.9 |
| ソフトの<br>計算結果<br>(ppm) | 0.8              | 46.3              | 56.9              | 3.8              | 25.3              | 47.3              | 4.7              | 17.6              |

#### 4.6 まとめ

モデル実験場での実測値が1ppm以上の測定点を見ると、実験場の気流及びトルエンの蒸発速度が安定した実験開始約1時間経過後であっても、トルエン濃度実測値の変動係数が19～154%と大きなばらつきを持っている。一方、数値計算ソフトでは、理想的な状態での計算が行われているため、一様な気流を発生させたこの実験場の計算結果は、3分程度経過すれば、各測定点のトルエンの濃度は一定の濃度に収束している。実測値が大きなばらつきを持っていることを考慮すれば、数値計算ソフトによる気中濃度の計算結果のほとんどが実測値の分布の95%の範囲内にあったことから、一定の条件下の作業場の発生源、気流、温度等のデータを入力することによって、数値計算ソフトによる計算によってその作業場の気中濃度の推定が可能であると考えられる。

次年度は、実際の作業場での作業環境濃度及びばく露濃度を測定し、数値計算ソフトの計算結果と比較することにより、発生源の形状、発生速度、及び気流状況等によどのようなデータを入力すれば、より実測値に近い計算結果を得ることができるかを検討する予定である。

## 5. 作業環境濃度とばく露濃度との関係

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

### 5.1 はじめに

ばく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みである。

そこで、作業環境測定とばく露濃度測定を同時に行い、その関係を明らかにすることによって、数多くある作業環境測定のみをばく露推定モデルの構築及び検証に活用可能となることを期待できる。

### 5.2 調査方法

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17年9～11月の作業環境測定実施時に代表的な作業員（もともと有機溶剤蒸気にばく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、作業環境濃度とばく露濃度の測定を行った。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5-1参照）

### 5.3 調査結果

#### 5.3.1 調査で得られたデータの概要

この調査により133単位作業場所のデータが得られた。133単位作業場所の作業環境測定の評価結果を表5.1に示した。

また、有機溶剤中毒予防規則の有機溶剤業務の号別区分別の単位作業場所数を表5.2に示した。

表 5.9 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       |
|---------|---------|---------|----------|
| 102     | 16      | 15      | 133      |
| (76.7%) | (12.0%) | (11.3%) | (100.0%) |

表 5.10 有機溶剤業務の号別区分別の単位作業場所数（重複あり）

|             |              |               |               |              |               |               |                 |
|-------------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|---------------|-----------------|
| 号別区分        | イ            | ロ             | ハ             | ニ            | ホ             | ヘ             |                 |
| 単位作業<br>場所数 | 10<br>(5.6%) | 2<br>(1.1%)   | 14<br>(7.9%)  | 6<br>(3.4%)  | 19<br>(10.7%) | 24<br>(13.5%) |                 |
| 号別区分        | ト            | チ             | リ             | ヌ            | ル             | ヲ             | 合計              |
| 単位作業<br>場所数 | 13<br>(7.3%) | 43<br>(24.2%) | 30<br>(16.9%) | 16<br>(9.0%) | 1<br>(0.6%)   | 0<br>(0.0%)   | 178<br>(100.0%) |

### 5.3.2 作業環境濃度とばく露濃度との相関

横軸にばく露濃度を、縦軸に作業環境測定のア測定値の幾何平均値（以下「 $M_1$ 」という）及びB測定値をとりプロットし、図 5.1 及び図 5.2 に示した。図 5.1 及び図 5.2 に、直線回帰式と寄与率も示した。

ばく露濃度と  $M_1$  との間には、ばく露濃度側に傾いた正の弱い相関（相関係数=0.453）が見られており、ばく露濃度と B 測定値との間には、ばく露濃度と  $M_1$  との相関よりも更に弱い正の相関（相関係数=0.271）が見られていた。また、ばく露濃度と B 測定値との直線回帰式は、約 9 の y 切片がある。これは、ばく露濃度が 1ppm 未満の非常に低濃度のところであっても B 測定値が 9ppm を超えるようなことが数多くあることを示しているが、ばく露濃度は作業中の作業者呼吸域の平均的濃度であるのに対して、B 測定値は単位作業場所内で最も気中濃度が高くなると思われる時間に、その作業が行われる場所で 10 分間測定した値であるため、妥当な結果であると考えられる。

原材料等の投入、設備の点検等間歇的に有害物質の発散を伴う作業が作業環境測定中に 1 回行われ、他に対象物質の発散を伴う作業が無いような場合は、ばく露濃度よりも B 測定値が高くなるのが考えられる。また、有害物質を発散するおそれのある装置、設備等の近くで行う作業が連続して行われているのであれば、ばく露濃度と B 測定値は同じような値となる。最も気中濃度が高くなると思われる作業を見逃してしまった場合には、ばく露濃度よりも B 測定値が小さくなる。最も気中濃度が高くなると思われる作業を見逃していない場合でも、呼吸域より下方の作業者に近い位置に有害物質の発生源があり、側方吸引型外付け式フードの局所排気装置が設置されているところで、作業者がフードに正対し、腰を折り曲げてフードに頭部が近づく姿勢が取られる場合に、個人ばく露濃度が B 測定値を大きく上回った例が報告されている。この例では、発生源から作業者に沿った気流が発生することが流体計算ソフトで確認されている。<sup>1)</sup> このように、ばく露濃度と B 測定値との関係は、様々なケースによってその値の大小の関係が変わってくることから、データを層別化しなければ相関を良くすることができないことが推察される。