

塩化ビニル (PVC) シートからの準揮発性有機化合物の放散速度測定

野口 美由貴*¹, 山崎 章弘*²

Measurement and evaluation of emission rate of semi volatile organic compounds (SVOC) from PVC sheets

Miyuki NOGUCHI*¹, Akihiro YAMASAKI*²

ABSTRACT : Emission rate of bis (2-ethylhexyl) phthalate, DEHP, a SVOC (Semi Volatile Organic Compounds), contained in poly vinyl chloride (PVC) sheet as a plasticizer, was measured with passive gas flux sampling method. A gas sampler made of glass petri dish attached with a glass filter was placed on the surface of the PVS sheet for a given sampling time, and the component captured onto the glass filter was analyzed. The sampling temperature was 25°C and 50°C, and the DEHP contents were changed in the range of 0.16% to 32.3%. The saturation concentration of DEHP at the surface of the PVC, C^* , was determined based on the experimental results and the emission model considering the time lag before reaching the steady-state diffusion. The observed saturation concentration was in proportional to the DEHP content in the PVC sheet. The saturation concentration would give essential information for evaluating the personal exposures to DEHP.

Keywords : Semi Volatile Organic Compounds (SVOC), emission rate, sampling,

(Received April 4, 2014)

1. はじめに

化学物質による室内空気汚染は、居住者に対してシックハウス症候群などの様々な健康被害をもたらすことが知られている。汚染物質としては様々なものが考えられ、それらはガス相のものと固相のものに大別できる。ガス相の汚染原因物質としては、 NO_x やオゾンなどの無機ガスと、揮発性有機化合物(Volatile Organic Compounds, 以下VOCs)があげられる。VOCは、沸点が50°Cから260°Cの有機化合物の総称である(WHO)。室内空気中に存在する13種のVOCsについては、厚生労働省より室内濃度指針値が示されるなど様々な対策が講じられている。また、平成15年(2003年)施行の改正建築基準法では、VOC類によるシックハウス対策として、0.5回/時を実現できる機械換気設備を設置すること、居室内の壁、床、天井等の内装仕上げ材として、VOCの一種であるホルム

アルデヒドの放散量が小さいもの(0.5 $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 以下)を使用することが義務付けられた。これによって、室内のホルムアルデヒド濃度は劇的に低下したが、アセトアルデヒドなどは、その有害性にもかかわらず室内における濃度がそれほど低下しておらず、指針値物質以外のVOCが高濃度を示す例も少なくない。

室内空気汚染を低減するための対策としては、換気を行うことで屋外の清浄空気を室内に導入することが最も効果的であるが、室内における発生源の把握とその発生源の低減といった発生源対策も重要である。室内におけるVOC類の発生源としては、内装材の他に、居住者が持ち込む日用品、喫煙、暖房器具の使用、調理など居住者の行動によるものが考えられ、それぞれの発生源に応じた発生源低減対策が望まれる。

本研究では、室内空気質の汚染物質として準揮発性有機化合物(Semi Volatile Organic Compounds, SVOC)に着目した。SVOCはVOCのうち沸点の高い化合物(240-260°C)にさらに高沸点(260-400°C)の有機化合物を加えた有機化合物群と定義されている。SVOCは高沸点であるため、

*¹ : 物質生命理工学科 特別共同研究員

*² : 物質生命理工学科 教授

室温では蒸気圧が非常に低く、室内空気汚染物質としてこれまであまり注目されてこなかった。さらにSVOCはガス相だけでなく固相（エアロゾルおよび微小粒子付着物質）としても存在するため^{1),2),3)}、SVOCの個人曝露量、さらには健康影響を評価するために必要な環境中濃度の定量的評価が困難であるとされている。

室内におけるSVOCの発生源としては、防虫剤、抗菌剤、難燃剤、可塑剤などがあげられる^{4),5)}。本論文では、プラスチック製品の可塑剤として用いられるフタル酸エステル類（PAE）に着目した。PAEは、塩化ビニル(PVC)製品に広く用いられており、含有割合は用途によって重量比で数%から数10%におよぶ⁶⁾。塩化ビニル製品は壁紙など室内で多く使用されている素材であることから、PVCに含まれるPAEの放散による室内空気汚染、への寄与は少なくないと考えられ、暴露による健康影響が懸念される。フタル酸エステル類の室内空気中濃度指針値は、フタル酸ジ-*n*-ブチル（DBP）で $220 \mu\text{g m}^{-3}$ 、フタル酸ビス（2-エチルヘキシル）（bis (2-ethylhexyl) phthalate, $\text{C}_{26}\text{H}_{40}\text{O}_4$ ）以下DEHP）で $120 \mu\text{g m}^{-3}$ となっており、また、住宅内空気中濃度の調査研究結果によると、住宅での最大計測値はそれぞれDBPで $7.22 \mu\text{g m}^{-3}$ 、DEHPで $2.38 \mu\text{g m}^{-3}$ と報告されている²⁾。本研究では、PAEの中でも最も多く使用されているDEHPを対象とした。DEHPは分子量 $390.56 \text{ g mol}^{-1}$ 、沸点 385°C 、 25°C における蒸気圧は $1.0 \times 10^{-7} \text{ mmHg}$ である。さらに、最近の研究報告ではDEHPの暴露経路としてガス相の経気暴露だけでなく、微小粒子を介した経皮暴露による相当量の個人曝露量について検討が必要であることが指摘されている⁷⁾。

DEHPのようなSVOCによる個人曝露量推定のためには、例えばチャンバー法によりPVC中に含有されているDEHPの放散量を定量的に評価する方法が考えられる。しかしDEHPの放散速度は極めて小さく、気相中に放散されたDEHPもかなりの割合で固相であるチャンバー内壁に再付着すると考えられるため、DEHPでは通常VOCsの放散速度測定で用いられるチャンバー法の適用が困難である^{8),9),10)}。JISでは、ガラス製マイクロチャンバー内に試料を設置して清浄ガスを流通させ、試料表面から放散したPAEを吸着剤に捕集したのち、チャンバーを高温（ $200\text{-}250^\circ\text{C}$ ）で加熱することによりチャンバー内壁に付着したPAEを放散させ吸着剤に捕集し測定し、両者を合算することによって放散速度を推定する方法が用いられている¹¹⁾。しかし、この方法は高価で特殊な装置を必要とするため、本手法による測定を行える機関は限られるという問題点がある。簡便な試料からのVOC放散量測定法として拡散型フラックスサンプラー（PFS）を用いた方

法がある^{12),13)}。これは、試料表面から放散されるVOCを直接強いVOC吸着性を有する吸着剤で捕集する方法である。

以上の背景の下で、本研究では、異なるDEHP含有割合を有するPVCを試料として、試料表面から放散するDEHPを直接捕集するPFSによる放散速度の測定法の開発と放散速度推定モデルの構築を試みた。

2. 材料と実験方法

2.1 PVC試料

PVCメーカーより入手した様々なDEHP含有量（0.16 wt%-32.3 wt%）をもつPVCシートを試料とした。また一部の試料には、DEHPの他、難燃剤としてトリフェニルホスフェート（TPHP）が3.4~8.5wt%含有されている。

2.2 測定装置および手法

ガラス製シャーレ（直径 41 mm、高さ 3 mm）に捕集材としてガラスフィルター（以下GF）を装着したものをサンプラーとして用いた（Fig. 1）。さらに拡散長を変化させるためにサンプラーと同径のガラス製リングを重ね、3種類の拡散長（3 mm、5 mm、7 mm）を持つサンプラーを作製した。なお、サンプリングの前処理としてガラス製シャーレ、リングおよびGFを 300°C のオーブンで3時間加熱した。



Figure 1 Snapshot of the SVOC sampler.

サンプラーを試料であるPVC板上にのせ（Fig. 2）、 25°C および 50°C のチャンバーに一定時間（2-24 時間）静置した後、サンプラーからGFを取り出し、ガラス製加熱脱着チューブに挿入してTD-GC/MS（加熱脱着一質量分析ガスクロマトグラフィー）によりDEHPの捕集量を定量した。

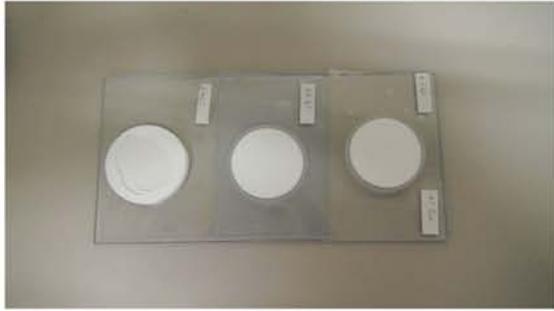


Figure 2 Sampling method; the samplers are mounted on the PVC sheet.

3. 実験結果および考察

3. 1 バッグ法による放散量測定

予備的な実験として、DEHP添加割合が最も大きい試料（DEHP含有量 32.3 wt%）を用いて、バッグ法による放散量測定を行った。密閉可能なプラスチックバッグ内に 10 cm×10 cmの試料片を入れ、さらにプラスチックバック内壁面の代表としてGFを設置した。バッグ内を窒素ガス 2 Lで満たした後、20°Cあるいは 50°Cの恒温槽内にバッグを 24 時間静置した。その後、バッグ内空気を加熱脱着チューブ（Tenax/Carboxen）中に全量捕集し、GC/MSにより測定した。その結果、20°C、50°Cの両温度条件共、バッグ内空気中のDEHP濃度は検出限界以下であった。一方、バッグ内に設置したGF上には、50°Cの場合で 1183 ng（toluene換算）のDEHPが捕集されていることがわか

Table 1 Amounts sampled for different sampling conditions for a sample containing 32.3% DEHP.

| Temperature [°C] | Time [h] | Diffusion length [mm] | Amount [μg] |
|------------------|----------|-----------------------|-------------|
| 25 | 6 | 3 | 0.023 |
| 25 | 6 | 5 | 0.037 |
| 25 | 6 | 7 | 0.026 |
| 50 | 2 | 3 | 1.08 |
| 50 | 4 | 3 | 2.91 |
| 50 | 6 | 3 | 4.75 |
| 50 | 6 | 3 | 4.27 |
| 50 | 6 | 5 | 1.59 |
| 50 | 6 | 7 | 0.92 |
| 50 | 10 | 5 | 2.19 |
| 50 | 10 | 7 | 1.81 |
| 50 | 15 | 3 | 5.35 |
| 50 | 15 | 5 | 2.68 |
| 50 | 15 | 7 | 1.45 |
| 50 | 24 | 3 | 10.7 |
| 50 | 24 | 5 | 6.38 |
| 50 | 24 | 7 | 3.44 |

った。この結果からPVC単位面積当たりの放散速度を求めると $97.6 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ となった。

以上の結果から、PVCから放散されたDEHPは気相中にはほとんど存在せず、バッグ内壁面に吸着されたものと推測される。なお、バッグ内壁面とGFでは材質が異なるため、バッグ法によりDEHPの全放散量を求める場合、DEHPとGFあるいはバッグ素材との相互作用による付着量の違いから生じる誤差を考える必要がある。

3. 2 サンプラーによる放散量測定

Table 1 にDEHP含有量が 32.3%の試料（3.1のものと同じ）について、PFSサンプラーによるDEHP捕集量を示した。20°C恒温槽内で静置した試料では、ブランク値（0.040 μg）を考慮するとDEHPの放散量を測定するために十分な捕集量が得られなかった。50°Cの恒温槽内における結果より、拡散長の増大に伴いDEHPの捕集量は減少し、捕集時間の増加に伴い、DEHPの捕集量は増加することが示された。

次に様々なDEHP含有量のPVC試料について、拡散長 $L=3 \text{ mm}$ 、恒温槽内温度 50°C、捕集時間 15 時間とした場合の捕集量をTable 2 に示す。DEHPの含有量が多いPVCほどDEHPの捕集量も多くなり、厚さが 0.5 mmより小さいPVC試料では、DEHPの放散量が含有量に比して小さくなる傾向が見られた。ただし、同一のDEHP含有量のPVCを比較すると、厚さの違いによる捕集量の差はほとんど見られなかった。

Table 2 Amounts sampled for PVC sheets with different DEHP contents.

| DEHP [%] | Thickness [mm] | Amount [μg] |
|----------|----------------|-------------|
| 11.0 | 2 | 2.28 |
| 18.4 | 2 | 6.25 |
| 32.3 | 2 | 5.35 |
| 0.16 | 2 | 0.128 |
| 5.1 | 0.5 | 1.37 |
| 5.7 | 0.1 | 1.37 |
| 5.7 | 3 | 1.90 |
| 5.9 | 1 | 2.71 |
| 5.9 | 2 | 2.25 |
| 6.5 | 0.3 | 0.14 |
| 12.3 | 0.15 | 1.04 |
| 15.0 | 1 | 4.45 |
| 16.1 | 0.3 | 1.72 |
| 16.1 | 0.5 | 1.75 |
| 17.2 | 0.3 | 5.87 |
| 17.1 | 0.5 | 5.70 |

4. 放散過程のモデル化と解析

4.1 実験系のモデル化

サンプラーによる本実験系は、Fig. 3 のように 1 次元の平面での放散過程としてモデル化することができる。

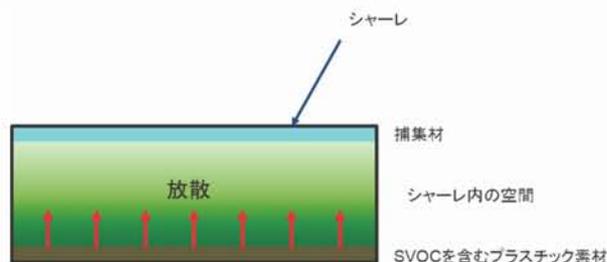


Figure 3 Schematic drawing for the emission model.

シャーレの片側に設置したSVOCを含むプラスチック素材からSVOCが放散され、シャーレ内の空間を拡散し、シャーレの逆側に設置した捕集剤表面に捕集される。放散過程は、次の3つのメカニズムからなると考えられる。

- 放散過程：PVC表面からのDEHPの気化
- 移動過程：シャーレ空間内におけるDEHPの移動（濃度差を駆動力）
- 捕集過程：捕集剤（ガラスフィルター）によるDEHPの捕集

放散過程をモデル化するにあたって、Fig. 4 のような座標系をとり、SVOCの輸送過程に関して以下のような仮定を置くことにする。

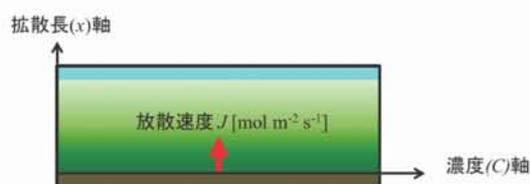


Figure 4 Coordinate system for modeling of emission process of SVOC.

【放散過程】

放散源の表面では常に放散平衡が成立しているおり、また放散源 (PVC) 中のDEHPの量は放散量に比べて十分に過剰に存在する。このことから、PVC表面近傍における気相中のDEHPの濃度 C^* は一定であり、温度のみの関数とみなすことができる。

【移動過程】

シャーレ空間内をDEHPが分子拡散、すなわちFickの法則にしたがって移動するとする。また、拡散係数は濃度に依存せず一定であるとす。

【捕集過程】

放散されたDEHPはGFがすべて取り込み、放散量に対してGFの吸着容量が十分大きいとする。このとき、吸着剤表面近傍の濃度は常に0と仮定できる。

以上の仮定の下で、放散過程 (x 軸は0 (発生源) から L (捕集剤) まで) の基礎式は以下のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

$C(x,t)$ は空間濃度分布であり、 D は分子拡散係数である。境界条件として、

1. 発生源であるPVC表面近傍の気相中DEHP濃度が一定値 C^* である

$$C(0,t) = C^* \quad (2)$$

2. 捕集剤の表面近傍の気相中SVOC濃度が一定値 C_e である

$$C(L,t) = C_e \quad (3)$$

となる。捕集量 $M(t)$ は、GF($x=L$)表面での放散速度 $J(L,t)$ を時間0から t まで積分して、

$$M(t) = \int_0^t J(L,t) dt = - \int_0^t D \frac{\partial C(L,t)}{\partial x} dt \quad (4)$$

また、PVC表面での放散速度は、

$$J(0,t) = -D \left[\frac{\partial C}{\partial x} \right]_{x=0} \quad (5)$$

で与えられる。上の基礎式は解析解を持つ¹⁴⁾。

$$C(x,t) = C^* + (C_e - C^*) \frac{x}{L} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_e \cos n\pi - C^*}{n} \sin \frac{n\pi x}{L} \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2}{L^2}t\right) \quad (6)$$

$$J(0,t) = -D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{D}{L} (C^* - C_e) + \frac{2D}{L} \sum_{n=1}^{\infty} (C_e \cos n\pi - C^*) \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2}{L^2}t\right) \quad (7)$$

$$M(t) = D(C^* - C_e) \frac{t}{L} + \frac{2L}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C^* \cos n\pi - C_e}{n^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{Dn^2\pi^2}{L^2}t\right) \right] \quad (8)$$

定常状態においては、

$$C(x,t) = C^* + (C_e - C^*) \frac{x}{L} \quad (9)$$

$$J(0,t) = -D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{D}{L} (C^* - C_e) = J(L,t) \quad (10)$$

捕集量に関しては、(8)式がそのまま適用できるが、定常に達するまでの時間に比べて、定常状態での捕集時間

が十分に長い場合には、級数項が無視できて、

$$M(t) = D(C^* - C_e) \frac{t}{L} \tag{11}$$

のような簡単な式になる。通常のパッシブサンプラーの解析では、(11)式を用いた解析が行われる。 D, C^*, C_e が一定とすると、拡散長が一定の場合、捕集時間 t と捕集量 $M(t)$ は比例する。また、一定捕集時間に対しては、拡散長の逆数 $1/L$ と捕集量 $M(t)$ が比例する。Fig. 5 にTable 1のデータのうち、捕集時間6hで一定とした場合の $1/L$ と捕集量 $M(t)$ の関係を示す。実測データは直線近似できるが、原点を大きく外れている。これは、(11)式で与えられる定常状態に達するまでの時間(遅れ時間)がSVOCのために長くなり、非定常状態での捕集の割合が大きいためであると考えられる。

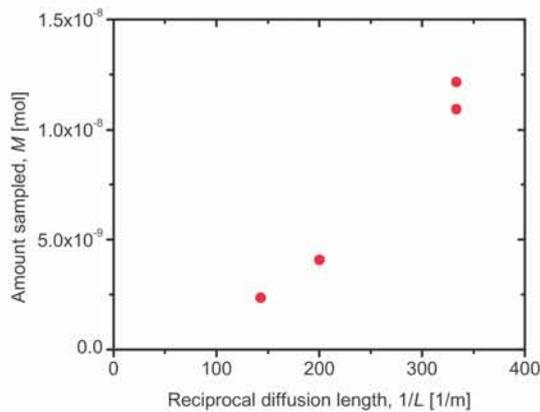


Figure 5 Relationship between reciprocal diffusion length, $1/L$ and amount sampled, $M(t)$. PVC sample with DEHP 32.3%, 6 h sampling time.

定常状態に達するまでの遅れ時間が長くなるのは、DEHPの蒸気圧や放散速度が通常のVOCに比べてきわめて小さいためであると考えられる。したがって、(8)式の級数項は無視できない。捕集量が小さく、捕集剤であるGF表面の濃度が極めて小さく、捕集時間中0と仮定すると、(8)式の級数和を求めることができ、

$$M(t) = \frac{DC^*}{L} \left(t - \frac{L^2}{6D} \right) \tag{12}$$

となる。この式は、捕集量の捕集時間に比例する部分から、非定常状態での捕集量を補正した形になっている。式(12)から、

$$M(t) = \frac{DC^*}{L} t - \frac{LC^*}{6} \tag{13}$$

したがって、拡散長一定で、捕集時間 t に対して捕集量をプロットすれば、直線が得られ、時間軸との交点と直線の勾配から D, C^* のパラメータを算出できることになる。図から直線の式を求めると、

$$M(t) = \frac{DC^*}{L} \left(t - \frac{L^2}{6D} \right) = 6.06 \times 10^{-13} t - 1.50 \times 10^{-9} \tag{14}$$

となった。これから、 $t_0 = 2475$ s, $D = 6.06 \times 10^{-10}$ m²/s, $C^* = 3.0 \times 10^{-6}$ mol/m³となった。 C^* を理想気体の法則を用いて気相中分圧に換算すると $p^* = 8.1 \times 10^{-3}$ Paとなる。この値は、この温度のDEHPの飽和蒸気圧 $p_{sat} = 10^{-3}$ Pa¹⁵⁾と同程度の値になっている。

拡散長を変化させた場合も式(13)を用いて、各パラメータを算出することができる。捕集時間を一定とすると、捕集量は拡散長 L の関数として、

$$M(L) = DC^* t \frac{1}{L} - \frac{C^*}{6} L \tag{15}$$

で与えられる。(15)式を用いてフィッティングを行った結果をFig. 7に示す。これから、 $D = 4.0 \times 10^{-9}$ m²/s, $C^* = 2.5 \times 10^{-6}$ mol/m³となった。拡散係数の値は式(12)による解析の場合と1オーダーずれるが、 C^* の値はほぼ同程度の値となった。

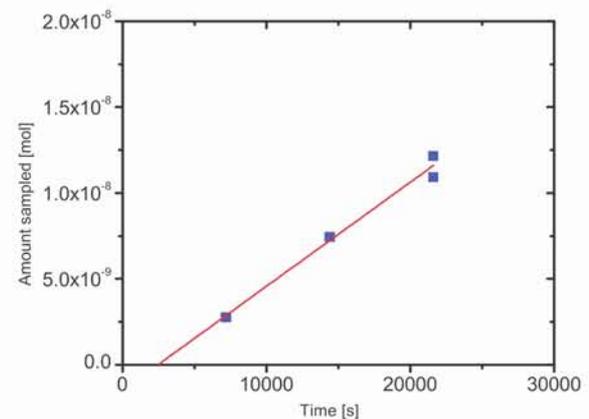


Figure 6 Relationship between sampling time and amount sampled.

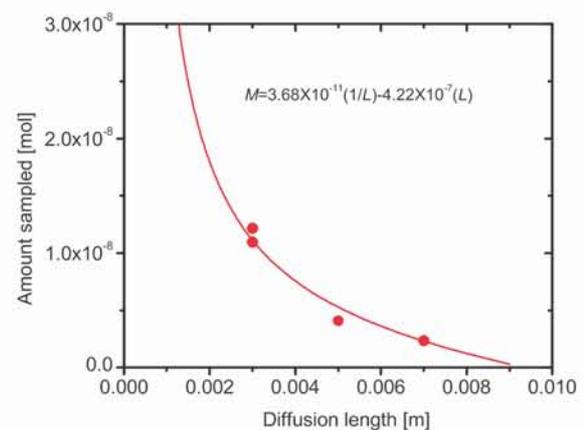


Figure 7 Curve fitting of the amount sampled with diffusion length based on Eq. (15) for the experimental results of PVC containing 32.3% DEHP shown in Table 1.

SVOCの場合、捕集時間を長くすれば、定常に達するまでの遅れ時間に比して、定常状態での捕集の割合が大きくなることを期待できる。Figure 8 に異なる捕集時間の結果を示す。

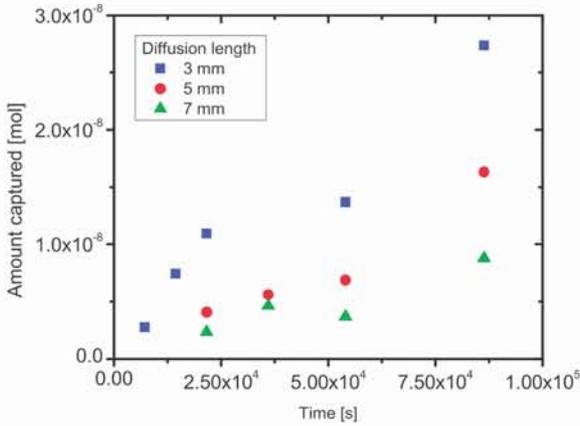


Figure 8 Amounts sampled for longer sampling periods.

長時間捕集によって得た各パラメータの値をTable 3に示した。拡散係数の値に関してはいずれの拡散長の場合もほぼ一致した値が得られており、また飽和濃度についてもオーダーは一致している。

以上の解析方法を、DEHP含有割合の異なるPVCシートに対して行った結果に対して適用し得られた飽和濃度C*の値をFigure 9に示す。図からわかるように、PVCシート中のDEHP含有割合Qと飽和濃度C*の間にはほぼ比例関係（Henry則）が見られた。

$$C^* = KQ \tag{16}$$

Table 3 Parameters obtained with longer sampling time experiments.

| L [mm] | 拡散係数 D [m ² /s] | 飽和濃度C* [mol/m ³] |
|--------|----------------------------|------------------------------|
| 3 | 6.0×10 ⁻¹⁰ | 3.0×10 ⁻⁶ |
| 5 | 6.9×10 ⁻¹⁰ | 1.5×10 ⁻⁶ |
| 7 | 5.8×10 ⁻¹⁰ | 1.7×10 ⁻⁶ |

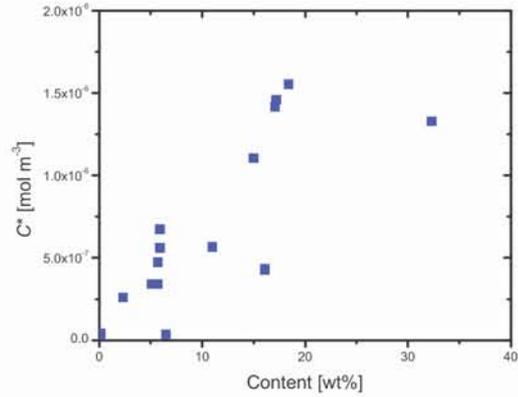


Figure 9 Relationship between DEHP content and saturation concentration, C*. Diffusion length = 3 mm, sampling time = 15 h.

5. 結論と今後の展望

PFS法によるSVOCであるDEHPのPVCシートからの放散量測定およびモデル解析を行い、DEHPでは定常放散に達するまでの時間遅れが無視できず、時間遅れを用いた解析により基材表面濃度であるC*と拡散係数Dを算出する手法を提案した。その結果、様々な試料の放散量測定から、DEHP含有率と基材表面濃度C*の間には正の相関関係があることがわかった。これらの値は、居住環境における放散速度推定の基礎データとなるものである。

以上のパラメータと、居住空間における環境及び居住者の行動による移流拡散モデルを組み合わせることで、DEHPあるいは他のSVOCによる曝露評価を行うことが可能であると考えられる。居住空間のモデル化については、既存の曝露モデルを利用することが可能であると考えられるが、ハウスダストなどの固相に吸着したSVOCからの二次的な放散についてはさらなる検討が必要である。

なお、測定とモデルの妥当性については、JISで規定されているチャンバー法との整合性をとる必要があると考えられる。また、今回の測定法をさらに広範囲の条件(温度や素材、SVOCの種類)に適用することで、手法の妥当性の確認とSCOVの室内環境における個人曝露量の推定につなげることができるものと期待される。

謝辞

本研究は、経済産業省平成25年度「化学物質のリスク評価手法の開発・改良に資する科学的知見の充実に向けた調査」、「室内空気中の準揮発性有機化合物の定量的評価と個人曝露量推定に関する調査」によるものである。ここに感謝の意を表す。

引用文献

- 1) メリキザットアブラト、堀雅宏、室内空气中フタル酸エステル類の捕集方法の検討、室内環境、vol. 14, 15-23, 2011.
- 2) 斉藤育江、大貫文、瀬戸博、上原眞一、藤井孝、空气中フタル酸エステル類及び有機リン酸エステル類の分析法、東京都衛生研究所年報、vol. 52, 201-207, 2001.
- 3) メリキザットアブラト、藤井修二、鍵直樹、VOC デニューダーによる室内空气中フタル酸エステル類のガス・粒子態の分離測定に関する検討、室内環境、vol. 16, 3-13, 2013.
- 4) 斉藤育江、大貫文、上原眞一、瀬戸博、上村尚、家庭電化製品・OA 機器から発生するフタル酸エステル類およびリン酸エステル類、東京都健康安全研究センター研究年報、vol. 55, 247-252, 2004.
- 5) 高木麻衣、吉永淳、日本人小児のハウスダストを介した化学物質曝露のリスク評価、室内環境、vol. 12, 103-114, 2009.
- 6) 経済産業省、最終製品消費段階におけるプラスチック添加剤の排出シナリオ文書、2012/9.
- 7) C. J. Weschler, W. W. Nazaroff, SVOC exposure indoors: fresh look at dermal pathways, *Indoor Air*, vol. 22, 356-377, 2012.
- 8) S. Król, B. Zabiegala, J. Namieśnik, Monitoring and analytics of semivolatatile organic compounds (SVOCs) in indoor air, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 400, 1751-1769, 2011.
- 9) M. Marć, B. Zabiegala, J. Namieśnik, Testing and sampling devices for monitoring volatile and semi-volatile organic compounds in indoor air, *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 32, 76-86, 2012.
- 10) B. Lazarov, R. Swinnen, M. Spruyt, E. Goelen, M. Stranger, G. Desmet, E. Wauters, Optimisation steps of an innovative air sampling method for semi volatile organic compounds, *Atmospheric Environment*, vol. 79, 780-786, 2013.
- 11) 日本工業規格 JISA1904, 建築材料の準揮発性有機化合物 (SVOC) の放散測定方法—マイクロチャンバー法, 2012/10/22
- 12) 藤井実、甲斐雄也、村瀬陽子、篠原直秀、熊谷一清、落合聖史、常名美貴、義之信司、柳沢幸雄、パッシブフラックスサンプラー (PFS) を用いた化学物質放散特性の解析方法、室内環境、vol. 7, 17-23, 2004.
- 13) Y. Ni, K. Kumagai, Y. Yanagisawa, Measuring emissions of organophosphate flame retardants using a passive flux sampler, *Atmospheric Environment*, vol. 41, 3235-3240, 2007.
- 14) J. Crank, *Mathematics of Diffusion*, 2nd ed., Oxford, 1975.
- 15) C.A. Staples, D.R. Peterson, T. F. Parkerton, W.J. Adams, The environmental fate of phthalate esters: A literature review, *Chemosphere*, vol. 35, 667-749, 1997.