

**総 説** 特別講演3**室内空気汚染の健康リスク**

東 賢 一

近畿大学医学部 環境医学・行動科学教室

**Health risk due to indoor air pollution**

Kenichi Azuma

Department of Environmental Medicine and Behavioral Science  
Kindai University Faculty of Medicine**要約**

日本では、居住環境の室内空気汚染による健康影響問題に対して、13の物質に室内濃度指針値を策定するなどの取り組みが行われてきた。しかしながら、指針値策定物質の代替物質への移行、準揮発性有機化合物による健康影響の懸念など、さらに検討すべき課題がある。これらの課題に対応するには、健康リスク評価に基づいた継続的な取り組みが必要である。準揮発性有機化合物では、揮発性が低いと室内ダストに含まれる割合が高くなり、吸入、経口、経皮の3つの曝露経路が複雑に関与する。また、多種類の製品に利用され多媒体曝露を生じる準揮発性有機化合物では、発生源対策が重要となる。さらに、居住環境では多種類の化学物質に混合曝露しているため、既存の化学物質の濃度測定に基づく健康リスク評価手法ではなく、生体影響に関する環境バイオマーカー等の評価手法を開発し、低濃度混合曝露や代替物質による健康影響を防止する取り組みが必要である。 (臨床環境 25 : 76-81, 2016)

**《キーワード》** 健康リスク、混合曝露、室内空気汚染、多媒体曝露、リスク評価**Abstract**

The types and concentrations of indoor air pollutants have not been consistent over time and have changed with alterations in lifestyle and the development of novel products used in indoor environment. Health effects of Semi-Volatile Organic Compounds (SVOCs) have been reported over the past decade. Continuous assessment and management based on the health risks are required. Low volatile SVOCs are often contained in indoor dust and their three exposure pathways of inhalation, ingestion, and dermal exposure involve to health effects in humans. An integrated multipollutant and multicompart-ment approach for those pathways appears essential in order to determine the extent of the threat to public health posed by indoor dusts. In addition, the source control is required for SVOC used in various products, which has multimedia exposure pathways to humans. Combined exposure to multiple low-level pollutants is appeared in indoor environment. Novel approach for health risk assessment using

受付：平成28年8月28日、採用：平成28年9月12日

別刷請求宛先：東 賢一

近畿大学医学部環境医学・行動科学分野

〒589-8511 大阪狭山市大野東377-2

environmental biomarker for evaluating biological or health effects is therefore needed instead of existing health risk assessment based on measurement of air concentration. This approach will prevent health effects caused by the combined exposure to multiple low-level pollutants or exposure to alternative chemicals that pose potentially the risk of impairing human health.

(Jpn J Clin Ecol 25 : 76 – 81, 2016)

---

《Key words》 Combined exposure; health risk; Indoor air pollution; Multimedia exposure; Risk assessment

---

## はじめに

日本では1990年代に入り、居住環境に起因する健康影響の問題として、いわゆるシックハウス問題が発生し、その中でも特に化学物質による室内空気汚染の問題が明らかにされてきた。そのため1997年から2002年にかけて、13の化学物質に対して室内濃度指針値が策定され、2種類の化学物質が建築基準法で使用規制されるなど、いくつかの対策が行われてきた。

しかしながら、その後、指針値が策定されている化学物質の代替物質として新たな化学物質が使用されているとの指摘がなされ、準揮発性有機化合物 (SVOC: Semi-Volatile Organic Compound) による健康影響が疫学研究や動物実験等で報告されており、室内空気汚染の問題にはいくつかの課題がある。そこで本報では、室内空気汚染に関するこれまでの取り組みと今後の課題について概説したい。

## 室内空気汚染に対する取り組みと課題

室内空気汚染に対する取り組みには、建物側だけの規制では十分対処できないほどさまざまな因子が複雑に関与する。また、居住環境の管理は、大気や労働環境とは異なり一般住民の居住者が中心となること、室内濃度は温度や発生源からの減衰の影響を受けて大きく変動するため単一の測定結果では判断できないことなどから、室内空気汚染に対する規制は容易ではない。そのため、対策等の行動を起こすべきかどうかの判断をするための濃度、あるいは室内空間の設計目標や室内濃度の低減目標となる濃度として汚染物質濃度の指針値を定め、その指針値に基づき建材や家具等の汚染源に対する放散基準を設定する取り組みが適切だとされている<sup>1)</sup>。

日本では、1980年代以降、主に建材から放散される

揮発性有機化合物 (VOC: Volatile Organic Compound) の実態調査がなされ、1997年にホルムアルデヒド、2000年から2002年にかけてトルエンやパラジクロロベンゼン等、合計13物質に対して室内濃度指針値が策定された<sup>2)</sup>。この数十年、欧米でもその傾向は同様である<sup>3)</sup>。

この当時、指針値設定対象物質の選定基準は、以下の6項目であった<sup>4)</sup>。(1) 世界保健機関 (WHO) などにより気中濃度のガイドラインが提示されている。(2) 全国調査の結果から室内濃度が高く、その理由が室内の発生源によると考えられる。(3) パブリックコメントから特に要望があった。(4) 外国で新たな規制がかけられたこと等の理由により早急に指針値の策定を考慮する必要がある。(5) 主要な用途からみて万遍なく網羅している。(6) 主要な構造分類からみて万遍なく網羅している。この基準では、化学物質の有害性やヒトに対する健康リスクの大きさが十分考慮されていなかった。しかし1990年代半ば以降、室内空気汚染による健康被害の問題が社会的に大きくなる中、厚生労働省は、化学物質による健康被害を生じさせない上で望ましいと判断された値を早急に策定する必要があった。そこで、全国調査の結果から室内濃度が比較的高く室内に発生源があると考えられる物質と諸外国における既存の規制等を考慮し、指針値設定対象物質が選定され、指針値が策定された。この施策の結果、ホルムアルデヒド、トルエンやキシレンなどの芳香族系の有機溶剤、塩素系や有機リン系殺虫剤などの室内濃度は減少し、シックハウスの問題は大きく改善された<sup>5)</sup>。

その後約10年が経過し、指針値設定物質の代替物質の使用が増えているとの指摘があること、SVOCによる健康影響の懸念が指摘されてきたことなどを踏ま

え、リスク評価による優先付けを取り入れて、より一層の改善を行うよう検討を進めている<sup>6)</sup>。代替物質については、以前から大きな課題であった。シロアリ防除剤として、1980年代半ばまで有機塩素系化合物のクロルデンが使用されていたが、1986年に化学物質審査規

制法でクロルデンの製造・使用・輸入が禁止された。その後、有機リン系化合物のクロルピリホスが使用されるようになったが、シックハウス症候群対策として、2002年の改正建築基準法で住宅へのクロルピリホスの使用が禁止された<sup>7)</sup>。ところが現在、シロアリ防除剤

**表1 全国602家屋（既築）における49物質の健康リスク評価結果の抜粋（文献10をもとに作成）**

表1 全国 602 家屋（既築）における 49 物質の健康リスク評価結果の抜粋（文献 10 をもとに作成）

	冬期（2012年～2014年）						夏期（2012年～2014年）						
	測定値		MOE		MOE	N	測定値		MOE		MOE		
	( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )				超過率		( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )				超過率		
	平均	最大	平均	最大	(%)	平均	最大	平均	最大	(%)			
アクロレイン	581	0.8	8.5	0.1	0.0	85.9	アクロレイン	587	0.9	4.8	0.1	0.0	89.3
二酸化窒素	591	219.6	2009.8	0.2	0.0	58.7	プロパナール	587	7.4	36.8	1.2	0.2	28.4
ベンゼン	590	2.4	18.6	0.7	0.1	50.5	ベンゼン	570	1.3	13.6	1.3	0.1	21.2
ギ酸	591	54.1	437.6	0.7	0.1	32.8	ギ酸	579	27.9	244.7	1.3	0.1	19.9
塩化水素	591	2.7	153.8	1.0	0.0	27.6	塩化水素	564	1.9	149.9	1.4	0.0	13.7
プロパナール	581	4.1	61.5	2.2	0.1	9.8	パラジクロロベ ンゼン	592	117.9	12637.4	1.8	0.0	7.1
アセトアルデヒド	581	21.1	233.0	2.3	0.2	6.7	アセトアルデヒド	587	18.7	211.8	2.6	0.2	5.5
クロトンアルデ ヒド	581	0.5	18.2	3.4	0.1	4.1	二酸化窒素	581	13.4	98.7	3.0	0.4	3.8
パラジクロロベ ンゼン	590	31.0	2107.6	6.9	0.1	3.4	1,2-ジクロロエ タン	592	0.2	11.1	9.9	0.1	3.4
クロロホルム	591	1.1	212.8	3.7	0.0	1.9	酢酸エチル	591	8.5	646.8	8.8	0.1	2.7
酢酸エチル	591	5.7	782.6	13.2	0.1	1.0	クロロホルム	592	0.7	16.2	5.4	0.2	2.5
二酸化硫黄	592	2.2	483.6	9.1	0.0	0.7	クロトンアルデ ヒド	587	0.2	18.4	8.3	0.1	1.5
1,2,4-トリメチ ルベンゼン	590	6.4	189.4	11.4	0.4	0.5	$\alpha$ -ピネン	490	30.1	1879.5	14.9	0.2	1.2
トルエン	590	10.8	763.8	24.0	0.3	0.3	ホルムアルデヒド	586	33.5	215.5	3.0	0.5	1.2

MOE: Margin of Exposure (曝露余裕度)、有害性の評価値と曝露濃度の比であらわされる。MOE が小さいほどリスクが大きい。

MOE 超過率: 調査した家屋のうち MOE が 1 未満であった家屋の割合。

としてネオニコチル系化合物の使用が増加し、日本の研究でヒトへの影響が懸念されている<sup>8)</sup>。

### 室内空気汚染物質による健康リスク

居住環境の室内空気からは、多種類の化学物質が検出されており、リスク管理の優先付けを行うにあたっては、健康リスクの大きさに基づいた初期スクリーニングが重要である。著者らは、1995年から2005年までに公表された全国規模の室内濃度の実態調査結果をもとに、93の物質に関する有害性評価を実施し、その健康リスク評価を行った。その結果、室内濃度指針値が策定されているホルムアルデヒド、パラジクロロベンゼン以外に、アクロレイン、テトラクロロエチレン、ベンゼン、ベンゾ (a) ピレンの健康リスクが高いことを明らかにした<sup>9)</sup>。

その後、2012年から2014年にかけて全国602の住宅から得られた室内濃度の実態調査をもとに、49物質に関する有害性評価を実施し、その健康リスク評価を行った (表1)<sup>10)</sup>。その結果、アクロレイン、二酸化窒素、ベンゼン、ギ酸、塩化水素のリスクは、冬期と夏期のいずれにおいても高かった。特にベンゼン、二酸化窒素、アセトアルデヒドは冬期に健康リスクが高い傾向にあり、生活習慣や燃焼型暖房器具からの排出物が関与している可能性が推定される。パラジクロロベンゼンは室内濃度指針値策定物質であるが、いまだにハイリスクであった。

49物質の健康リスク評価結果に対して主成分分析を行ったところ、パラジクロロベンゼンは独立した因子であったが、アルデヒド類、脂肪族炭化水素、芳香族炭化水素、酢酸エステル類は、同じ健康リスクの成分に分類された。従って、これらの同族、あるいは健康影響が類似した物質群による健康リスク評価やリスク管理は、多種類の低濃度化学物質で汚染された居住環境の室内空気の健康リスクを低減するには有効であると考えられる。

### フタル酸エステル類の多媒体曝露

フタル酸エステル類は、プラスチックを柔らかくする材料として、主に塩化ビニル樹脂に幅広く使用されてきた。室内では、壁紙、床材、テーブルクロス、電線被覆材、子供用玩具などにフタル酸エステル類を使用

した製品がある。その他、輸液用バッグやチューブなどの医療器具、電気絶縁テープ、農業用フィルム、食品包装用フィルム、衣類包装用フィルム、ワッペン、水着用バッグなど、幅広く使用されている。フタル酸エステル類は、揮発性が低いため、SVOCに分類され、室内ダストからも検出されている<sup>11)</sup>。

室内ダストでは、乳幼児が手や物を口に入れる行動 (マウシング) や床の上を這うことなどで、手に付着したダストを経口摂取することがある。また、食品や食器などに付着したダストを経口摂取する場合もある。室内でのヒトの活動 (歩行や清掃等) などによって室内に浮遊したダストを吸入する、ダストが皮膚に付着して体内に経皮曝露する場合もある<sup>12)</sup>。従って、室内でヒトがダストに曝露する経路だけを見ても、吸入、経口、経皮の3つを考えなければならない。

このように、フタル酸エステル類の発生源は多岐にわたり、ヒトは室内空気、室内ダスト、製品、外気、飲食物、土壌、地表水などの多媒体を経由してフタル酸エステル類に吸入、経口、経皮曝露する (図1)<sup>13)</sup>。

デンマークにおける小児の調査結果では、フタル酸ジエチル (DEP)、フタル酸ジ-n-ブチル (DnBP)、フタル酸ジ-イソブチル (DiBP)、フタル酸ブチルベンジル (BBzP)、フタル酸ジ-2-エチルヘキシル (DEHP) における曝露経路別の週あたり平均摂取量を推算したところ、揮発性が低い DEHP と BBzP ではダストの経口摂取の比率が高かった。しかし、揮発性が高い DEP、DnBP、DiBP では、ガス状物質としての曝露経路の比率が高かった (図2)<sup>14)</sup>。従って、揮発性が低いフタル酸エステル類では、ダスト中に存在

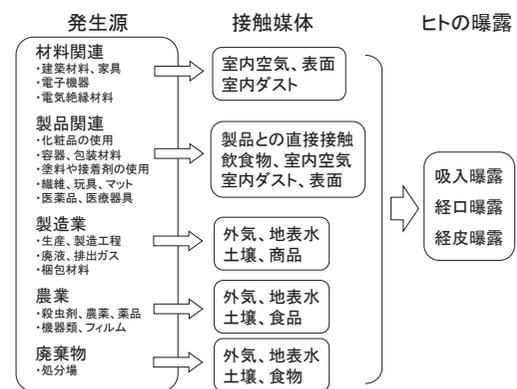


図1 フタル酸エステル類の発生源と曝露経路 (文献13を改訂)

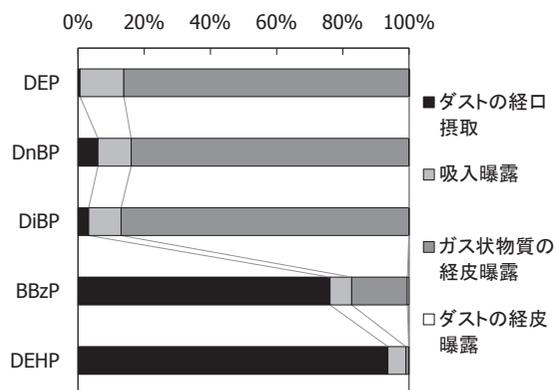


図2 室内における曝露経路別の週あたり平均摂取量比率 (文献14をもとに作成)

する比率が高くなり、その多くが経口によって体内に摂取される。

欧州で年齢別及び曝露経路別にフタル酸エステル類の摂取量を調査した結果では、揮発性の高いフタル酸ジメチル (DMP) では室内空気からの摂取比率が高く、DEP では肌の手入れやシャンプー等のパーソナルケア製品からの摂取比率が高かった<sup>13)</sup>。DiBP や DEHP では食品からの摂取比率が高かったが、乳幼児ではダストからの経口摂取の比率が DiBP で約3割、DEHP で約4割程度を占めていた。BBzP では、乳幼児のダストからの経口摂取の比率が約7割を占めていた。これらの結果からも、揮発性の低いフタル酸エステル類では、特に乳幼児において、ダストからの経口摂取の比率が高いことがわかる。

室内ダスト中のフタル酸エステル類と子どもの喘息やアレルギー症状との関連性が報告されている<sup>15)</sup>。フタル酸エステル類の室内濃度と成人の尿中代謝物濃度との関連性が示唆されており、室内におけるフタル酸エステル類への曝露の重要性が指摘されている<sup>16)</sup>。居住環境におけるフタル酸エステル類への曝露と喘息やアレルギー疾患との関連については、縦断研究や介入研究など、さらなる研究が必要とされているが、これまでの科学的根拠を考慮すると、多媒体によるフタル酸エステル類への曝露を低減することは推奨されるべきと考えられている<sup>17)</sup>。

室内ダスト中の化学物質に関しては、測定方法の標準化が容易ではなく、室内ダスト中の化学物質に対する基準値を設定している諸外国はみあたらない。また、

室内で多くの製品に利用され、多媒体による曝露経路がある物質については、発生源対策が重要となる。デンマークでは、2013年12月1日より、DEHP、BBzP、DnBP、DiBP の1つ以上を0.1% 以上含む室内で使用される製品及び皮膚や粘膜経路で曝露する製品の輸入と使用を禁止する決定 (室内で使用される特定フタル酸エステルの含有制限を定めた政令) を行った<sup>18)</sup>。一般的に、プラスチックに対するフタル酸エステル類の含有量は、数%から数十%必要であるため、0.1%の基準は実質的には使用禁止に相当する措置である。しかしながら、欧州連合 (EU) における手続き上の問題から、デンマークは本政令の施行を断念して撤回した。

EU は、今回対象となった4種のフタル酸エステル類以外のフタル酸エステル類に対する懸念や、4種のフタル酸エステル類のリスクを示す新たな科学的証拠が示された場合には、新たに EU で制限手続きを実施する可能性を示唆していた<sup>19)</sup>。その後欧州では、電子・電気機器における特定有害物質の使用制限に関する EU 指令である RoHS 指令において、2015年6月より DEHP、BBzP、DnBP、DiBP が規制対象として正式に追加された<sup>20)</sup>。EU 加盟国は、2016年12月31日までに上記指令に対応する国内法の整備が求められる。各物質の最大許容濃度は、DEHP が0.1wt%、BBzP が0.1wt%、DnBP が0.1wt%、DiBP が0.1wt%となっている。カテゴリー8および9以外の電気・電子機器は2019年7月22日以降上市分から、カテゴリー8および9の医療機器、監視制御機器は2021年7月22日以降の上市分から適用が開始される。

## おわりに

新たな技術の導入、我々の暮らしの変化、関係業界による規制への対応などにより、室内空気汚染は変化していく。そのためこれらの変化に対応するためには、健康リスク評価に基づいた継続的な取り組みが必要である。また、揮発性が低いSVOCでは、室内ダストに含まれる割合が高くなり、吸入、経口、経皮の3つの曝露経路が複雑に関与する。さらに室内で多くの製品に利用され、多媒体による曝露経路があるSVOCについては、発生源対策が重要となる。ただし、多種類の化学物質に混合曝露している居住環境では、健康リスクの評価方法において、既存の化学物質の濃度測

定に基づく健康リスク評価手法ではなく、刺激や発がん、神経毒性等の生体影響に関する環境バイオマーカー等の評価手法を開発し、低濃度混合曝露や代替物質による健康影響を防止する取り組みが必要である。

## 引用文献

- 1) Seifert B. Regulating indoor air. Proceeding of the 5th International Conference Indoor Air Quality and Climate 5: 35-49, 1990
- 2) 東 賢一, 内山巖雄. 室内環境汚染と健康リスク. 公衆衛生74 (4): 289-294, 2010
- 3) 東 賢一. 室内空気汚染対策に関する世界的動向と今後の対策. 公衆衛生78 (8): 533-540, 2014
- 4) 厚生省. シックハウス (室内空気汚染) 問題に関する検討会中間報告書 - 第1回~第3回のまとめ, 平成12年6月26日
- 5) Osawa H, Hayashi M. Status of the indoor air chemical pollution in Japanese houses based on the nationwide field survey from 2000 to 2005. *Build Environ* 44 (7): 1330-1336, 2009
- 6) 厚生労働省. シックハウス (室内空気汚染) 問題に関する検討会の開催について. 第11回シックハウス (室内空気汚染) 問題に関する検討会配付資料, 平成24年9月28日
- 7) Azuma K, Uchiyama I. et al. The regulations for indoor air pollution in Japan: a public health perspective. *J Risk Res* 11 (3): 301 - 314, 2008
- 8) Marfo JT, Fujioka K, et al. Relationship between urinary N-Desmethyl-Acetamiprid and typical symptoms including neurological findings: A prevalence case-control study. *PLoS ONE* 10 (11): e0142172, 2015. doi: 10.1371/journal.pone.0142172
- 9) Azuma K, Uchiyama I, et al. The risk screening for indoor air pollution chemicals in Japan. *Risk Anal* 27 (6): 1623 - 1638, 2007
- 10) Azuma K, Uchiyama I, et al. Assessment of inhalation exposure to indoor air pollutants: screening for health risks of multiple pollutants in Japanese dwellings. *Environ Res* 145: 39 - 49, 2016
- 11) 東 賢一. ダスト中の汚染物質による公衆衛生上の問題. *空気清浄* 52 (3): 164-169, 2014
- 12) Mercier F, Glorennec P, et al. Organic contamination of settled house dust, a review for exposure assessment purposes. *Environ Sci Technol* 45 (16): 6716-6727, 2011
- 13) Wormuth M, Scheringer M, et al. What are the sources of exposure to eight frequently used phthalic acid esters in Europeans? *Risk Anal* 26 (3): 803 - 824, 2006
- 14) Bekö G, Weschler CJ, et al. Children's phthalate intakes and resultant cumulative exposures estimated from urine compared with estimates from dust ingestion, inhalation and dermal absorption in their homes and daycare centers. *PLoS ONE* 8 (4): e62442, 2013. doi: 10.1371/journal.pone.0062442
- 15) Jaakkola JJ, Knight TL. The role of exposure to phthalates from polyvinyl chloride products in the development of asthma and allergies: a systematic review and meta-analysis. *Environ Health Perspect* 116 (7): 845-853, 2008
- 16) Adibi JJ, Whyatt RM, et al. Characterization of phthalate exposure among pregnant women assessed by repeat air and urine samples. *Environ Health Perspect* 116 (4): 467-473, 2008
- 17) North ML, Takaro TK, et al. Effects of phthalates on the development and expression of allergic disease and asthma. *Ann Allergy Asthma Immunol* 112 (6): 496-502, 2014
- 18) Retsinformation.dk. Bekendtgørelse om forbud mod import og salg af varer til indendørs brug, som indeholder ftalaterne DEHP, DBP, BBP og DIBP, og varer hvor dele med disse stoffer kan komme i kontakt med hud eller slimhinder. BEK nr 1113, 26 November, 2012
- 19) European Commission. Information from European Union Institutions, bodies, offices and agencies: on the finalisation of the restriction process on the four phthalates (DEHP, DBP, BBP and DIBP) under Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). *Official Journal of the European Union*, 2014/C 260/01, 2014
- 20) European Union. Commission Delegated Directive (EU) 2015/863 of 31 March 2015. *Official Journal of the European Union*, L 137/10-12, 2015