

特集：建築衛生

<総説>

室内空気環境における新たな汚染物質

鍵直樹

東京工業大学

Contamination trends in indoor air environments

Naoki KAGI

Tokyo Institute of Technology

抄録

建築物における衛生的環境の確保に関する法律（建築物衛生法）における空気環境に関する建築物環境衛生管理基準の項目として、浮遊粉じん、二酸化炭素、一酸化炭素、ホルムアルデヒドがある。しかし、室内の空気汚染物質については、上記の他にも数多くある。そこで本報告では、室内空気汚染に関する問題及び研究動向について、海外のレビュー論文を元に概説すると共に、近年の研究の動向から新たに注目される今後の室内空気汚染の課題について検討を行った。1950年代からの室内汚染の変遷としては、建築材料、内装材料の変化、生活習慣の変化などから、汚染物質が減少したものの、増加したのものがあること、今後は浮遊微生物やそれに関連して微生物から発生する微生物由来揮発性有機化合物（MVOC）などが課題となることを示した。更に、今後の注目すべき室内空気汚染について、MVOC、微粒子及びハウスダストについて、既往の研究を元に概説した。MVOCについては、それぞれの微生物に対して発生するVOCについて紹介し、それぞれのVOCと健康影響に関する知見について示したが、未だMVOCの直接的な影響において不明な点が多いことを述べた。微粒子については、PM_{2.5}を中心にその室内発生源と、PM_{2.5}濃度の特徴について述べた。室内の発生源については、燃焼によるものの他に、化学物質の二次生成やレーザープリンタからの超微粒子の発生などについても示し、室内濃度の傾向としては、建築物の空調機に装着されているエアフィルタの重要性について示唆した。最後に、ハウスダストの問題として、ハウスダストに吸着する準揮発性有機化合物（SVOC）と健康影響、ハウスダスト中に含有するSVOC濃度の現状について示し、今後のデータの蓄積により、SVOCと症状との因果関係についての議論の期待について述べた。

キーワード：建築物衛生，室内空気質，浮遊粒子，ハウスダスト，揮発性有機化合物

Abstract

This paper reported the indoor air quality for airborne particles and gaseous contaminants. First, the results of previous studies were discussed to demonstrate changes in indoor pollutants from the past to the future. Since the 1950s, levels of certain indoor pollutants, such as formaldehyde and aromatic solvents have increased and then decreased. Levels of other indoor pollutants such as phthalate esters and brominated flame-retardants have increased and remain high. It is also reported that the molds and

連絡先：鍵直樹

〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1

2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan.

Tel: 03-5734-2908

Fax: 03-5734-2908

E-mail: kagi.n.aa@m.titech.ac.jp

[平成26年7月4日受理]

allergen contaminations in damp buildings will become a serious problem in the future. Second, the importance of microbial volatile compounds was reported as the secondary contamination for not only new buildings but also old ones. Airborne particles, especially PM_{2.5}, in indoor environments were introduced by previous studies of emission sources of fine particles in indoor environment and field measurements for indoor PM_{2.5}. Moreover, the emission sources of ultrafine particles in indoor environments were shown, such as the penetration from outdoor air, emission from photocopiers and laser printers, and secondary organic aerosols reacted from volatile organic compounds. In addition, the countermeasure of indoor PM_{2.5} was highlighted. Finally, it was demonstrated household dusts acted as Semi Volatile Organic Compounds (SVOC) contaminants in indoor environments. Specifically, this paper showed the health effects of household dust containing SVOC, and the SVOC concentrations of household dusts in various indoor environments from previous studies.

Keywords: building environment, indoor air quality, suspended particle matter, household dust, volatile organic compound

(accepted for publication, 4th July 2014)

I. はじめに

建築物における衛生的環境の確保に関する法律（建築物衛生法）における空気環境に関する建築物環境衛生管理基準の項目として、浮遊粉じん、二酸化炭素、一酸化炭素、ホルムアルデヒドがある。ホルムアルデヒド以外は、この法律の制定時（1970年）に設定され、ホルムアルデヒドについては、2003年の改正の際に、シックハウス症候群として問題となった室内汚染物質として加えられたものである。二酸化炭素については換気の指標として使用されているが、その他の物質については健康への影響の観点から、建築物衛生法に適用される特定建築物において、管理されているところである。しかしながら、室内の空気汚染物質については、上記の他にも数多くある。更に、人の健康に有害となる成分は極微量存在するものが対象となり、これらの物質を検出し、濃度のレベルを確認し、健康への悪影響について検討すると共に、発生源を発見し、除去するための対策を打ち立てることが室内空気質の維持に必要なこととなる。

室内空気汚染物質としては、ガス状物質と粒子状物質に分けられる。この分類には、室内汚染対策としてガス状物質は外気による希釈、粒子状物質は換気と共に空気清浄機などのエアフィルタによる除去が主となることなどから、この分類は都合が良い。ガス状物質の中には、一酸化炭素や二酸化炭素の他に、シックハウス症候群の主要原因となっているホルムアルデヒドやトルエンなどの揮発性有機化合物（VOC: Volatile Organic Compounds）などがある。粒子状物質としては、生物と非生物物質に分けられ、生物物質の中には真菌、細菌、ウイルス、アレルギーなどそれ自体で人に影響するものがある。非生物については、スモッグやたばこ煙など燃焼によって排出されるものや、大気中から人工又は自然発生源から排出されたものなどが室内に侵入して問題となることがある。近年では、PM_{2.5}の話題についても、記憶に新しい

ところである。

このような背景から本報告では、室内空気汚染に関する問題及び研究動向について、海外のレビュー論文を元に概説すると共に、近年の研究の動向から新たに注目される今後の室内空気汚染の課題について検討を行った。

II. 室内空気汚染の変遷

50年代からの室内汚染の変遷 [1] について、海外における室内空気環境、特に化学物質を中心とした今までの50年間の建物の変化と室内空気汚染の変化、そして今後の空気質に関しての記述があった。日本の状況とは若干異なるところもあるが、表1にこのレビュー論文で記載されていた建物環境と室内空気環境の変遷についてまとめた。建物側の変化としては、建築材料・内装材料があり、室内で居住者が使用する家庭用品の変化もある。そのため、例えば複合材からホルムアルデヒドの発生やPVCパイプ、ワイヤー、ケーブル、家電製品から準揮発性有機化合物（SVOC）の発生が多くなった、とある。実際に日本においても、住宅にはフローリング、オフィスなどにはカーペットを多用し、什器の種類によっては化学物質の発生が多くなり、室内の空気質を悪化させる原因となっていると考えられる。

また、室内における酸化や加水分解など化学反応による汚染物質の二次生成についても指摘されている。これは、空気清浄機や脱臭器などでオゾンが発生する機器が存在する場合、室内で使用される消臭剤に含まれているリモネンとの酸化反応により生成する有機酸類、有機エアロゾルに関して盛んに研究が行われるようになった。更に、接着剤と加水分解を起こして、室内におけるホルムアルデヒドの濃度が時間を経てもなかなか減少が見込めないのも、これが原因である。

住み手の生活習慣も非常に重要な要素であり、喫煙、室内での過ごし方などが挙げられている。また、近年室内においてペットを飼う家庭が増えてきていることから、

表1 建物環境と室内空気質の変化 (文献 [1] より作成)

建物環境の変化		室内空気質の変化
建築材料と製品	建築材料	複合材 (ホルムアルデヒド), PVCパイプ・ワイヤー・ケーブル (SVOC)
	製品	カーペット, 床材 (リノリウム→PVC), 塗料 (Texanol, リモネン), 家具, パーティション, 洗浄剤, 消臭剤 (テルペン類), 家電製品 (SVOC), 衣服 (ドライクリーニング)
化学反応による生成	酸化反応	アルデヒド類, 有機酸類, 有機エアロゾルの生成 テルペン類 (塗料, 消臭剤)
	加水分解	PVC (可塑剤から2エチル1ヘキサノール) ラテックス塗料 (Texanol) ホルムアルデヒド (接着剤)
生活習慣	喫煙	室内における喫煙の減少
	室内における時間の過ごし方	室内での時間が多くなる
	室内ペット	ペットアレルギー
建物の特性	気密性の向上	省エネの観点から
	空調	オフィス及び住宅でも換気的重要性
	ダンプ	カビ, ダニの増殖

室内におけるペットアレルギーによる室内空気質の悪化も危惧されるところである [2].

建物の特性も変化しており, 省エネの観点から建物の気密性が向上して, 自然換気が期待できず, 室内の濃度が上昇する要因にもなっている. 日本で住宅においては居住者の意思により, 窓開け換気が行われなかったり, 24時間換気システムがある住宅であっても, それが適切に動作していない, 居住者によって停止されることなど, 換気が適切に行われていない場合がある. 上記の化学物質を発生するような建築材料の使用, 住まい方の変化により, 日本においては, シックハウス症候群が大きな問題となったと言われている.

ところで上述した建築物衛生法では, 二酸化炭素濃度 (1,000ppm以下) についても, 2ヶ月1回測定し, 基準値と照合することが義務づけられており, それを達成するためにオフィスビルのような建築物については, 空調・換気設備により適切に換気が行われている. この基準により化学物質などの濃度も同様に適切に管理されるものである. よって, 日本においてはこの制度により, 欧米のようにシックビル症候群が顕在化しなかった要因であると考えられている.

近年, 建築環境の分野においては, 「ダンプ」という言葉がよく聞かれる. ダンプは, 「Damp」, 「Dampness」であり, 湿気, 湿った, じめじめした, という意味で, 建築内部の結露などによる環境の悪化を示したものである. WHOにおいても, ダンプに関するガイドライン [3] が作成されたところである. ここで述べているダンプビルディング (ハウス) とは, 住宅や建築物の湿度環境が過剰であること, これにより微生物の発生, 材料の劣化, カビ臭, 湿度過剰の問題が起きる建物である. 室内のダンプによって微生物, アレルゲン, VOCや他の化学物

質濃度が上昇し, ヒトの健康影響を生じさせる. アレルゲン (ダニ・カビ)・細菌を上昇するだけでなく, 室内化学物質, 特に微生物から発生するVOC (MVOC: Microbial Volatile Organic Compounds) の発生も促進させるものである.

ダンプとシックハウス症候群の関係については, 疫学的な検討 [4] が行われている. ここでは, シックハウス症候群の症状と住宅のカビ臭さ, 水漏れ, 窓枠及び壁の結露などとの関連があることが示されている. これをもって直ちにダンプがシックハウスの原因とは言い切れないものの, 重要な要素になっていることが示唆されるものである.

また, 先の文献 [1] 中のTable2には, 今後の汚染物質の濃度の動向について予測が記載されている. 表2はその一部を抜き出したものである. 表中の↑や↓は, 今後の傾向として増加や低減となることを示している. 従来から汚染として問題視されてきたCO, NOxやラドン, 化学物質でも建材からの発生の低減が進められているホルムアルデヒドや脂肪族・芳香族炭化水素については, 既に汚染発生のメカニズムも解明され, 対策も確立されていることから, 低減となると予測している. 増加と予想しているのは, 前述したような化学反応により二次的に生成するアルデヒド類や酸化防止剤, 可塑剤などのSVOCが増加傾向になるのではないかとしている. また粒子状物質については, 室内における喫煙の減少, 大気汚染の改善から浮遊粉じん濃度としては減少すると予想している. しかしながら, ダンプや室内ペットにより, 浮遊微生物やアレルゲン粒子などの濃度が増加する可能性を示唆している. 更には, それらの汚染物質による健康影響について注視することが, 今後必要となってくるものと考えられる.

表2 今後の室内空気汚染物質の動向予測 (文献 [1] より作成)

汚染物質の種類	汚染物質の今後の動向
無機ガス	CO, NOx, ラドン↓ オゾン? (コピー機, イオン発生器)
VVOC	ホルムアルデヒド↓ アセトアルデヒド↓? (室内化学反応)
VOC: アルデヒド	ヘキサナール, ノナナール, デカナール↑? (室内化学反応)
VOC: アルカン・芳香族	アルカン, 芳香族↓ テトラクロロエチレン↑, ↓ (ドライクリーニング)
VOC: フタル酸類, シロキサン類	DMP, DEP↑ (化粧品類) D5↑ (化粧品, 制汗剤)
SVOC	BHT, DBP, BBP↑ (酸化防止剤, 可塑剤) DEHP↑↓ (製品 (おもちゃ) 含有の減少)
金属, 繊維	アスベスト↓
粒子	アレルゲン↑? (ダンプ, ベット) 真菌・細菌↑? (ダンプ) 浮遊粒子↓ (喫煙の減少, 大気の減少)

表3 既往の研究からカビから発生したMVOCの一覧

種類	物質名
Alcohols	Ethanol, 1-Butanol, 1-pentanol, 2-pentanol, 1-hexanol, 2-propanol, 3-octanol, 2-ethyl-1-hexanol, 2-methyl-1-butanol, 3-Methyl-1-Butanol, 1-Octen-3-ol, 2-octen-1-ol
Ketones	Acetone, 2-Butanone, 2-Heptanone, 2-Pentanone, 3-Octanone, 4-methyl-2-pentanone, Methyl Isobutyl Ketone,
Furans	2-methylfuran, 3-methylfuran
Alkanes	2-Methyl-butane, Heptane, Isoprene
Limo, pinene	Limonene, Pinene
Aldehydes	Acetaldehyde, Benzaldehyde, Formaldehyde
Acids	Acetic acid, Hexanoic acid
Benzenes	Acetophenone, Benzene, Butylated hydroxytoluene, Styrene, Xylenes, Phenol
Sulfides	Dimethyl disulfide, Dimethyl disulfide, Dimethyl tetrasulfide, Dimethyl trisulfide, dimethyldisulfide,

III. 今後の室内空気汚染

1. 微生物由来揮発性有機化合物

前述したように、ダンプビルにより微生物が発生し、その微生物から発生するMVOCの発生も促進させることが注目されている。真菌や細菌などの微生物は、増殖と代謝の過程において、有機物質を分解し、その生成物としてアルコール類などのカビ臭の元となる化学物質が発生する。この中には、一般的に空気中によく見られる物質もあれば、特徴的に発生している物質、いわゆるカビ臭に関係する物質など様々で、人には影響のない物質、ある物質、においに関係する物質などがある。

カビから発生するMVOCの成分については、朴ら [5]によりオフィスビルのダクト、吹き出し口で検出

された *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp., *Cladosporium* sp., *Alternaria* sp. を対象に、これらから発生するVOCを測定したところ、アルコール類、ケトン類が検出された。また、S. Matysikら [6] は、*Penicillium expansum*, *Penicillium chrysogenum*, *Aspergillus versicolor*, *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus niger*, *Cladosporium cladosporoides* を培地およびが壁紙に生育させ分析したところ、2-pentanol, 2-pentanone が全てのカビを付着したサンプルから発生し、その他カビの種類によって特定のVOCが検出されたことを明らかにした。

カビなど真菌から発生するVOCについて、既往の研究によりまとめたものを表3に示す。アルコール類、ケトン類の他にも、アルデヒド類、酸類、テルペン類など、室内でも良く検出される物質が挙げられている。これらの物質は、室内ではMVOCの他にも発生源が存在する

物質もある。

MVOCと健康影響については、J.L.Kimら [7] がスウェーデンの小学校児童を対象に、健康状態のアンケート調査とMVOC濃度などについて調査を行った。結果として室内のMVOC濃度が高いとき、夜間の息切れやぜんそくが多く見られ、MVOCが子どものぜんそく症状の危険因子となる可能性について指摘している。また、R. Walinderら [8] は、スウェーデンの20歳～54歳の男女を対象に、清浄空気とMVOCの一つである3-methylfuranをそれぞれ曝露する実験を行った。その結果、3-methylfuranを曝露後、目の表面を覆う涙液層が不安定になっていたこと、努力肺活量の減少が見られたことから、目、気道への影響を示唆した。A. Arakiら [9] は、住宅のMVOC濃度とアンケートにより居住者の症状を評価し、1-octen-3-olと鼻や目、のどの粘膜の炎症との関係があることから、粘液症状との関連を示唆したものである。以上のように、MVOC単体の健康への影響は、まだ研究の発展途上であるが、化学物質の一つとして考えれば、ある程度の濃度、曝露量になれば、通常の化学物質と同様に問題となる可能性があるが、MVOCの直接的な影響については不明な点が多い。

2. 微粒子

室内において従来対象となっていた浮遊粉じん濃度については、建築物衛生法により測定されている粒子として、粒径 $10\mu\text{m}$ 以下（100%カット）の粒子が対象となっている。室内における浮遊粉じんの発生源については、室内に堆積・付着しているものの再飛散、たばこ煙、ガス・石油系燃料の室内燃焼、そして大気からの侵入などがある。これらは、浮遊粉じんの質量濃度で評価され、一般に比較的粗大な粒子を対象とし、管理されてきたものである。よって、空調機に装着されているエアフィルタの高性能化による除じん能力の向上、住宅で使用されている空気清浄機の性能の向上及び室内において分煙、禁煙が進んだことにより粉じんの発生が少なくなり、粉じん濃度が低下の傾向となっているのは上述したとおりである。

一方大気においては、従来の浮遊粒子状物質（粒径が $10\mu\text{m}$ 以下のもの）に加え、近年ディーゼル排ガスなどの微小粒子状物質（ $\text{PM}_{2.5}$ ）について、濃度と健康影響との関係が粗大粒子よりも大きいとの報告 [10] がある。そこで、我が国でも一般大気環境において、その科学的知見を蓄積することを目的に、「微小粒子状物質曝露影響調査研究」が行われた [11]。この知見を基に、 $\text{PM}_{2.5}$ に係わる環境基準として、2009年に1年平均値が $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、かつ、1日平均値が $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下と制定された。

室内における $\text{PM}_{2.5}$ を含む微粒子の発生源については、大気からの侵入に加え、大気と同様に室内での燃焼物によって発生することが知られている。一次発生源として、従来から粉じんの発生源として注目されているものではあるが、調理、ろうそく、アロマ、ヘアースプレー・ドラ

イヤ、タバコ煙、ガスストーブなどが、室内空気中の実測、又はチャンバーを用いた発生試験により確認されている [12, 13]。これらは、発生物質を $\text{PM}_{2.5}$ として計測している訳ではないが、発生した粒子に粒径 100nm 以下の超微粒子（ナノ粒子）を中心に含んでいることに注目している。ナノ粒子も $\text{PM}_{2.5}$ の一部であり、同様に重要である。また更には、コピー機やレーザープリンタなどの情報機器からの発生 [14] も注目されている。コピー機からの汚染物質の発生については、Brown [15] によってホルムアルデヒドやトルエンなどのVOC、オゾン、粉じん（粒径 $10\mu\text{m}$ 以下）の発生量の測定結果が報告されていた。並木ほか [16] は、レーザープリンタとインクジェットプリンタの発じん試験を行い、発生粒子の個数濃度、粒径分布の測定、発生粒子の特性及び発じん機構の解明を行った。結果として、粒径 30nm 付近にピークを有する粒径分布の超微粒子が発生していることを確認した。通常、レーザープリンタに使用されるトナー粒子は、粒径 $6\mu\text{m}$ 程度であり、トナー粒子がそのまま発じんしたものではないことを示したものである。また、Heほか [17] は、数十種類のプリンタを事務室で使用し、空間中の超微粒子の濃度を計測して、その濃度レベルによりプリンタの発じん量に関する格付けを行い、プリンタからの超微粒子の発生について注目された報告でもある。

室内における化学反応によるナノサイズの二次生成粒子についても多く議論されるようになり、オゾンとリモネンや α -ピネンなどテルペン類との反応について検討が盛んに行われている [18, 19]。実際の室内環境において、実測を基に二次生成粒子の生成の可能性、室内空気質に与える影響について測定した例もある [20]。テルペン類の発生源としては、建築材料として使用されている木材からの発生も考えられるが、家庭用品として消臭剤に含まれる成分が想定されている。またオゾンについては、外気からの侵入、脱臭器でオゾンが発生するものその他、空気清浄機の一部でオゾンが発生するものがある。そこで、オゾンとVOC濃度が換気及び還気を考慮し、更に設備への沈着などによる影響したときの粒子の生成と室内の粒径別の濃度について発展させた研究もある [21]。以上のように、室内における発生源についても、従来から粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の浮遊粉じんの発生源であったものが、 $\text{PM}_{2.5}$ にも当てはめることができ、たばこ煙や燃焼器具からの排出が $\text{PM}_{2.5}$ の発生源となっているものと考えられる。

室内超微粒子に関する健康影響に関する研究はまだ数が少なく、既往の研究では、超微粒子と小児喘息の関係を検討 [22] しているものの、まだ不明な点が多い。室内における $\text{PM}_{2.5}$ の実態を把握するために、表4に文献調査による室内における $\text{PM}_{2.5}$ 濃度の一覧を示す。インドにおける住宅の $\text{PM}_{2.5}$ の室内及び外気の濃度を、道路沿い、都市部、農村部において調査したもの [23] では、平均 $\text{PM}_{2.5}$ 濃度は、道路沿い、都市部、農村部でそれぞれ、 137.93 、 173.03 、 $135.55\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、日本の大気

表4 室内のPM_{2.5}濃度の調査例

国	建物	PM _{2.5} 濃度[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	備考
インド	住宅	137.93	道路沿い
		173.03	都市部
		135.55	農村部
クウェート	住宅	46-80	台所
		24-32	寝室
香港	住宅	73.6/66.1 (OA)	道路沿い
		60.0/38.7 (OA)	都市部
		39.6/26.4 (OA)	農村部
チェコ	学校	7.6-44.0	昼間, 夜間で変わらず
オーストラリア	事務所ビル	8	高性能なフィルタで低減

の基準値に比べても非常に高い値であった。大気においても自動車排ガスや工場の排ガス等で高い値であると共に、室内において木材などを用いた暖房機器が使用されることが多く、また適切な換気設備がない場合が多いため、室内粒子濃度が高くなるとしている。

クウェートにおける住宅の台所、居間、寝室におけるPM_{2.5}の濃度の調査 [24] では、PM_{2.5}の濃度は台所で最も高くなり (46-80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、寝室で最も低い値 (24-32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) となった。室内の濃度が高くなるのは、調理や喫煙などの人間の行動が要因であることを示したものである。

香港における住宅の実測 [25] においては、道路沿い、都市部、農村部の平均室内/外気のPM_{2.5}濃度がそれぞれ、73.6/66.1, 60.0/38.7, 39.6/26.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ となり、I/O比がいずれも1を超えていた。室内の粒子には、バイクの排ガス起因の可能性が高く、外気の侵入が示唆された。

チェコの学校教室において、PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁の質量濃度の調査を行った結果 [26], PM_{2.5}の平日日中の室内濃度は、7.6-44.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ で夜間及び週末とでは違いが見られなかった。

我が国における事務所建築物において浮遊粉じん濃度とPM_{2.5}濃度の実測と共に、粒径分布の実測調査 [27] がある。この実測より、10 μm 以下の浮遊粉じん濃度に対するPM_{2.5}の割合については、概ね8割程度となり、粉じんの質量濃度においても、多くを占めていた。また、冬期に行った事務所建築物におけるPM_{2.5}濃度を測定した事例がある [28]。2013年3月の冬期において、東京都、福岡県、大阪府に所在する事務所建築物を対象とした。F-02には居室に接して不完全な喫煙室があったが、他については建物内禁煙であった。図1に室内及び外気のPM_{2.5}濃度の測定結果、及び室内と外気濃度の比を表すI/O比を示す。冬期の測定では、中国からの越境汚染で話題となった2013年3月であったため、外気濃度が高く、室内濃度が10-370 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ となった。特に福岡においては室内外共に高い値となった。なお、F-02については不完全な喫煙室があり、たばこ煙の影響を強く受けているため、外気よりも高い濃度となった。外気と室内の比であ

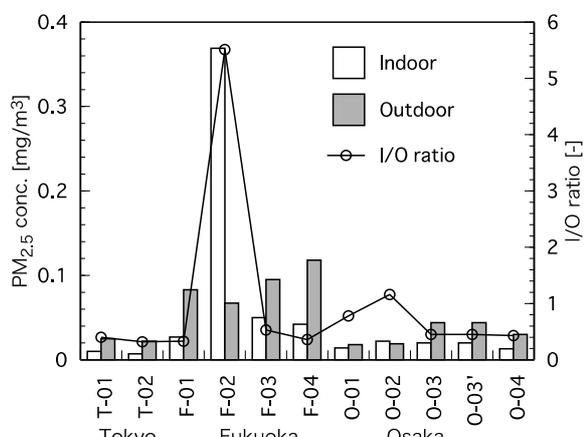


図1 各建物における室内及び外気のPM_{2.5}濃度とI/O比

るI/O比は、喫煙室のあるF-02及び小規模建築物で換気装置が不十分なO-01, O-02を除けば、0.5程度となった。室内の発生が支配的でない場合には、建物の特性、即ち外気からの侵入、外調機等の特性によるものと考えられる。室内PM_{2.5}濃度については、室内での燃焼発生源がある場合、また外気からの侵入により、その濃度が高くなる可能性があることから、室内の発生源、外気からの侵入について詳細に検討する必要があると考えられる。

3. ハウスダスト

ハウスダストとは、一般的にハウスダストアレルギーとの関連から、ダニの中体及びフンなどのアレルゲンを中心に、ペット、カビなどアレルゲンを指すことが多く、室内の床表面などに堆積した粒子である。一方、室内環境中には、プラスチックの添加剤として用いられる可塑剤 (フタル酸エステル類, アジピン酸エステル類), 難燃性可塑剤 (リン酸トリエステル類) など、多くのSVOCが使用された製品が存在している。SVOCは、低揮発性であるため、室内空気中にはガス状では存在しにくく、厚生労働省の化学物質の指針値が存在するものの、

その濃度に到達することは通常の気温ではない。しかしながら近年の知見により、ハウスダストから種々のSVOCが検出されることが報告されており、その中でも200件の住宅の床に堆積したハウスダスト中のDEHP (di-2-ethylhexyl phthalate) 量と小児喘息の発症に有意な相関があることが示された [29]。これには、室内環境中においてハウスダストの巻き上げにより呼吸器に侵入する

可能性、ダストに手で接触することで経口摂取する可能性などが考えられているが、その経路については未解明である。また、空気中におけるサンプリングでは、ガス状SVOCの検出が困難であることが多いが、住宅においてハウスダストのサンプルすることは比較的簡便であり、疫学的な研究においても、多く報告されるようになってきた。表5は、既往の研究による床上に堆積したハウス

表5 既往研究によるハウスダスト中に含有するSVOCの存在量 [μg/g]

	Min.	25%	Med.	Mean	75%	95%	Max.	対象	
DBP	-	-	47.0	55.6	-	129.6	141.4	Apartment in Germany [30]	
BBP	-	-	29.7	86.1	-	218.5	815.7		
DEHP	-	-	703.4	775.5	-	1542	1763		
DEP	-	-	6.1	44.6	-	159.6	632.2		
DMP	-	-	1.5	10.8	-	46.4	157.9		
DMPP	-	-	37.5	54.6	-	144.4	161.3		
DEP	0	-	0	31	-	115	2425	Homes in Sweden [29]	
DINP	0	-	41	639	-	1930	40667		
DIBP	0	-	45	97	-	311	3810		
BBzP	0	-	135	319	-	599	45549		
DnBP	0	-	150	226	-	568	5446		
DEHP	0	-	770	1310	-	4069	40459		
DEP	0	-	0.35	-	-	-	6.3	Homes in Japan [31]	
DiBP	0.5	-	2.4	-	-	-	21.8		
DnBP	5.1	-	22.3	-	-	-	549		
BBzP	0	-	2.4	-	-	-	35.8		
DEHP	220	-	1200	-	-	-	10200		
DiNP	4.0	-	116	-	-	-	13100		
DEHA	1.9	-	6.6	-	-	-	608		
TBP	0	-	1.1	-	-	-	2.7		
TCiPP	10.3	-	50.9	-	-	-	462		
TCEP	0	-	9.8	-	-	-	70.7		
TEHP	0	-	2.1	-	-	-	6.6		
TBEP	5.9	-	164	-	-	-	749		
TDCPP	5.8	-	22.3	-	-	-	127		
TPhP	0	-	14.3	-	-	-	175		
BHT	0.6	-	2.4	-	-	-	17.5		
DMP	0	-	0.03	0.01	-	-	0.1	Homes in Kuwait [32]	
DEP	0.1	-	1.8	1.5	-	-	16		
DBP	8.3	-	45	51	-	-	160		
DnHP	0	-	0.39	0.2	-	-	4.0		
BzBP	0	-	8.6	6.4	-	-	160		
DcHP	0	-	2.9	0.3	-	-	910		
DEHP	380	-	2256	1700	-	-	7800		
DnOP	0	-	14	14	-	-	1300		
DMP	0	-	0.1	0.4	-	0.9	24.0		
DEP	0	-	0.2	0.9	-	3.1	33.9	Homes in China [33]	
DBP	0	-	23.7	52.3	-	176	2150		
BBP	0	-	1.6	2.9	-	9.7	38.7		
DEHP	0.3	-	183	462	-	1750	9950		
DOP	0	-	0.1	1.3	-	7.9	39.5		
DEP	0	0	0.28	-	0.45	-	2.9		Homes in Japan [34]
DiBP	0.21	1.2	2.4	-	5.5	-	262		
DnBP	0	10.5	19.3	-	51.2	-	2100		
BBzP	0	0.8	1.9	-	3.9	-	60.5		
DEHP	98.2	424	759	-	1410	-	12100		
DiNP	9.12	51.8	95	-	198	-	5820		
DEHA	0.39	2.7	4.6	-	8.5	-	692		
TCiPP	0	3.83	8.69	-	1.84	-	132.75	Homes in Japan [35]	
TCEP	0	2.98	5.83	-	11.61	-	338.45		
TBOEP	6.24	137.65	508.32	-	1417.5	-	5890.0		
TPhP	0	2.81	4.51	-	7.64	-	245.08		
DiBP	0	1.5	3.1	-	6.1	-	97.4	Homes in Japan [36]	
DnBP	0	7.5	16.6	-	32.4	-	1670		
BBzP	0	0	2.0	-	5.4	-	139		
DEHP	213	786	1110	-	1740	-	7090		
DINP	11.9	66.1	139	-	276	-	2100		
DEHA	0	4.6	8.0	-	13.6	-	1100		
DiBP	0	-	233.8	900.98	-	-	7228.34	Homes and office buildings in China [37]	
DnBP	3.64	-	134.77	447.78	-	-	4357.32		
DEHP	0.09	-	581.50	798.61	-	-	3475.73		

ダスト中に含まれるSVOCの含有量についてまとめたものである。この中では、可塑剤として用いられるDEHPが他の物質よりも多く検出されている。日本、中国、北欧などで積極的に調査が行われているが、室内の内装材料や家庭用品、掃除の頻度などにより異なってくるものが考えられている。更にこれらのデータと居住者の健康状態により、ハウスダスト中に含まれるSVOCと症状の因果関係についての議論が行われているところであり、その成果が期待される場所である。

IV. まとめ

本報告においては、建築物における室内空気汚染の概要として、レビュー論文より、過去から現在までの室内空気汚染の変遷を紹介した。更に、今後筆者が注目している室内空気汚染について、MVOC、PM_{2.5}及びハウスダスト中SVOCの概要及び今後の課題について述べた。

参考文献

- [1] Weschler CJ. Changes in indoor pollutants since the 1950s. *Atmospheric Environment*. 2009;43:153-69.
- [2] Yanagi U, Ikeda K, Kagi N, Sakaguchi M, Arashima Y. A study on indoor air contamination related to pets in Japanese dwellings. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2006;5(2): 355-60.
- [3] WHO Europe. Dampness and mould. WHO Guidelines for Indoor Air Quality. 2009.
- [4] Kishi R, Saijo Y, Kanazawa A, Tanaka M, Yoshimura T, Chikara H, Takigawa T, Morimoto K, Nakayama K, Shibata E. Regional differences in residential environments and the association of dwellings and residential factors with the sick house syndrome: a nationwide cross-sectional questionnaire study in Japan. *Indoor Air*. 2009;19:243-54.
- [5] 朴俊錫, 川尻第貴, 池田耕一, 藤井修二. 真菌由来揮発性有機化合物による空気調和機汚染に関する研究. *日本建築学会計画系論文集*. 2002;552:43-8.
- [6] Matysik S, Herbarth O, Mueller A. Determination of volatile metabolites originating from mould growth on wall paper and synthetic media. *Journal of Microbiological Methods*. 2008;75:182-7.
- [7] Kim JL, Elfman L, Mi Y, Wieslander G, Smedje G, Norbäck D. Indoor molds, bacteria, microbial volatile organic compounds and plasticizers in schools: associations with asthma and respiratory symptoms in pupils. *Indoor Air*. 2007;17:153-63.
- [8] Wälinder R, Ernstgård L, Johanson G, Norbäck D, Venge P, Wieslander G. Acute effects of a fungal volatile compound. *Environmental Health Perspectives*. 2005;113(12):1775-8.
- [9] Araki A, Kawai T, Eitaki Y, Kanazawa A, Morimoto K, Nakayama K, Shibata E, Tanaka M, Takigawa T, Yoshimura T, Chikara H, Saijo Y, Kishi R. Relationship between selected indoor volatile organic compounds, so-called microbial VOC, and the prevalence of mucous membrane symptoms in single family homes. *Science of the Total Environment*. 2010;408:2208-15.
- [10] Wilson WE. The U.S. Environmental Protection Agency promulgates new standards for fine particles. *大気汚染学会誌*. 1998;33:A67-76.
- [11] 環境省. 微小粒子状物質曝露影響調査報告書. 2007.7.
- [12] Hussein T, Glytsos T, Ondracek J, Dohanyosova P, Zdimal V, Hameri K, Lazaridis M, Smolik J, Kulmala M. Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house. *Atmospheric Environment*. 2006;40:4285-307.
- [13] Afshari A, Matson U, Ekberg LE. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air*. 2005;15:141-50.
- [14] Kagi N, Fujii S, Horiba Y, Namiki N, Ohtani Y, Emi H, Tamura H, Kim YS. Indoor air quality for chemical and ultrafine particle contaminants from printers. *Building and Environment*. 2007;42:5:1949-54.
- [15] Brown SK. Assessment of pollutant emissions from dry-process photocopiers. *Indoor Air*. 1999;9:259-67.
- [16] 並木則和, 大谷吉生, 藤井修二, 鍵直樹. オフィス用プリンタからの超微粒子の発生. *エアロゾル研究*. 2006;21(1):59-65.
- [17] Morawska CHL, Taplin L. Particle emission characteristics of office printers. *Environ Sci Technol*. 2007;41:6039-45.
- [18] Nazaroff WW, Weschler CJ. Cleaning products and air fresheners: exposure to primary and secondary air pollutants. *Atmospheric Environment*. 2004;38: 2841-65.
- [19] Chen X, Hopke PK. Secondary organic aerosol from α -pinene ozonolysis in dynamic chamber system. *Indoor Air*. 2009;19:335-45.
- [20] Morawska L, He C, Johnson G, Guo H, Uhde E, Ayoko G. Ultrafine particles in indoor air of a school: possible role of secondary organic aerosols. *Environ Sci Technol*. 2009;43(24): 9103-9.
- [21] Xuraimi MS, Weschler CJ, Tham KW, Fadeyi MO. The impact of building recirculation rates on secondary organic aerosols generated by indoor chemistry. *Atmospheric Environment*. 2007;41:5213-23.

- [22] Weichenthal S, Dufresne A, Infante-Rivard C. Indoor ultrafine particles and childhood asthma: exploring a potential public health concern. *Indoor Air*. 2007;17: 81-91.
- [23] D Massey, J Masih, A Kulshrestha, M Habil, A Taneja. Indoor/outdoor relationship of fine particles less than 2.5 μ m (PM_{2.5}) in residential homes locations in central Indian region. *Building and Environment*. 2009;44:2037-45.
- [24] Yassin MF, Bothaina EY, Eman AA, Al-Mutiri E. Assessment of indoor PM_{2.5} in different residential environment. *Atmospheric Environment*. 2012;56:65-8.
- [25] Cao JJ, Lee SC, Chow JC, Cheng Y, Ho KF, Fung K, Liu SX, Watson JG. Indoor/outdoor relationships for PM_{2.5} and associated carbonaceous pollutants at residential homes in Hong Kong - case study. *Indoor Air*. 2005;15:197-204.
- [26] Branis M, Rezáková P, Domasova M. The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ in a classroom. *Environmental Research*. 2005;99:143-9.
- [27] 鍵直樹, 柳宇, 西村直也. 事務所ビルにおける室内浮遊微粒子の特性とPM_{2.5}濃度の実態調査. *日本建築学会技術報告集*. 2012;18(39):613-6.
- [28] 鍵直樹, 柳宇, 大澤元毅, 金勲. 事務所建築物におけるPM_{2.5}濃度の実態調査. 第48回空気調和・冷凍連合講演会; 2014.4.16-18; 東京. 同講演集. p.201-4.
- [29] Bornehag C, Sundell J, Weschler CJ, Sigsgaard T, Lundgren B, Hasselgren M, Hägerhed-Engman L. The Association between asthma and allergic symptoms in children and phthalates in house dust: A nested case-control study. *Environmental Health Perspective*. 2004;112(14):1393-7.
- [30] Fromme H, Lahrz T, Piloty M, Gebhart H, Oddoy A, Rüden H. Occurrence of phthalates and musk fragrances in indoor air and dust from apartments and kindergartens in Berlin (Germany). *Indoor Air*. 2004;14:188-95.
- [31] Kanazawa A, Saito I, Araki A, Takeda M, Ma M, Saijo Y, Kishi R. Association between indoor exposure to semi-volatile organic compounds and building-related symptoms among the occupants of residential dwellings. *Indoor Air*. 2010;20:72-84.
- [32] Gevao B, Al-Ghadban AN, Bahloul M, Uddin S, Zafar J. Phthalates in indoor dust in Kuwait: implications for non-dietary human exposure. *Indoor Air*. 2013;23:126-33.
- [33] Qi Zhang, Xiao-Mei Lu, Xiao-Ling Zhang, Yong-Gang Sun, Dong-Mei Zhu, Bing-Ling Wang, Ren-Zheng Zhao, Zheng-Dong Zhang. Levels of phthalate esters in settled house dust from urban dwellings with young children in Nanjing, China. *Atmospheric Environment*. 2013;69:258-64.
- [34] Bamai YA, Shibata E, Saito I, Araki A, Kanazawa A, Morimoto K, Nakayama K, Tanaka M, Takigawa T, Yoshimura T, Chikara H, Saijo Y, Kishi R. Exposure to house dust phthalates in relation to asthma and allergies in both children and adults. *Science of the Total Environment*. 2014. p.153-63.
- [35] Araki A, Saito I, Kanazawa A, Morimoto K, Nakayama K, Shibata E, Tanaka M, Takigawa T, Yoshimura T, Chikara H, Saijo Y, Kishi R. Phosphorus flame retardants in indoor dust and their relation to asthma and allergies of inhabitants. *Indoor Air*. 2013. p.1-13.
- [36] Bamai YA, Araki A, Kawai T, Tsuboi T, Saito I, Yoshioka E, Kanazawa A, Tajima S, Shi C, Tamakoshi A, Kishi R. Associations of phthalate concentrations in floor dust and multi-surface dust with the interior materials in Japanese dwellings. *Science of the Total Environment*. 2014. p.47-157.
- [37] Xinke Wang, Wei Tao, Ying Xu, Jiangtao Feng, Fenghao Wang. Indoor phthalate concentration and exposure in residential and office buildings in Xi'an, China. *Atmospheric Environment*. 2014;87:146-52.