
総 説 シンポジウム 3**室内空気環境における新たな課題**

鍵 直 樹

東京工業大学大学院情報理工学研究科

New problems in indoor environments

Naoki Kagi

Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

要約

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、増加したものがあること、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、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。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。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た。

(臨床環境 24 : 10-15, 2015)

《キーワード》 室内空気質, 揮発性有機化合物, PM_{2.5}, ハウスダスト

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 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

受付：平成27年4月17日 採用：平成27年8月21日

別刷請求宛先：鍵 直樹

〒152-8552 目黒区大岡山2-12-1

Reprint Requests to Naoki Kagi,

introduced by previous studies of emission sources of fine particles in indoor environment and field measurements for indoor PM_{2.5}. Finally, it was demonstrated household dusts acted as 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. (Jpn J Clin Ecol 24 : 10 – 15, 2015)

《Key words》Indoor air quality, Volatile organic compound, PM_{2.5} House dust

1. はじめに

住宅を含む建築物については、気密性の向上、使用する内装材料や家庭用品など、建物及び住まい方の変化で室内空気環境も変わりつつある。シックハウス症候群の主要原因である化学物質については、接着剤を多用する現代の建物内装においてホルムアルデヒド等の発生量の増加と省エネによる換気量の減少により、室内において濃度が高くなったことが原因であった。その他の化学物質や微粒子、微生物などその他の汚染物質についても、室内において変化が見られる。

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、研究の動向から新たに注目される今後の室内空気質の課題について述べる。

2. 室内浮遊粒子状物質の研究動向

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(ポリ塩化ビニル)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(Semi Volatile Organic Compounds : 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た。

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を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、有機エアロゾルが対象となる。また、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現象もある。

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、室内におけるペットアレルゲン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。

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

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	ペットアレルゲン
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の重要性
	ダンプ	カビ, ダニの増殖

も、ダンプに関するガイドライン³⁾が作成された。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)・細菌を上昇させるだけでなく、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の Table 2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, NO_x 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。

3. 今後の室内空気汚染

3.1 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。

MVOCと健康影響については、Kimら⁵⁾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、Walinderら⁶⁾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。Arakiら⁷⁾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ものの、MVOCの直接的な影響については不明な点が多い。

3.2 微粒子

室内において従来対象となっていた浮遊粉じんについては、建築物衛生法により粒径10 μ 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、そして大気への侵入などがある。現在は、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。

一方大気においては、近年ディーゼル排ガスな

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, ペット) 真菌・細菌↑? (ダンプ) 浮遊粒子↓ (喫煙の減少, 大気の減少)

どの微小粒子状物質 (PM_{2.5}) について、我が国でも一般大気環境においては、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。しかし、室内においては特に基準はない。

室内における PM_{2.5}を含む微粒子の発生源については、大気の侵入に加え、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、ヘアスプレー・ドライヤー、タバコ煙、ガストーブなどが、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^{8,9)}。ナノ粒子も 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¹⁰⁾も注目されている。並木ほか¹¹⁾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30 nm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 μm 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¹²⁾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^{13,14)}。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¹⁵⁾。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 μm 以下の浮遊粉じんの発生源であったものが、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 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¹⁶⁾しているものの、まだ不明な点が多い。

3.3 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、ダニの虫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¹⁷⁾。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。既往の研究による床上に堆積したハウスダスト中に含まれるSVOCの含有量については、文献18にまとめられたものがある。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ことが考えられている。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ところである。

4. 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. *Atmos Environ* 43: 153-169, 2009
- 2) Yanagi U, Ikeda K, et al. A Study on Indoor Air Contamination Related to Pets in Japanese Dwellings. *J Asian Archit Build Eng* 5: 355-360, 2006
- 3) WHO Europe. Dampness and Mould. WHO Guidelines for Indoor Air Quality. 2009
- 4) Kishi R, Saijo Y, et al. 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* 19: 243-254, 2009
- 5) Kim JL, Elfman L, et al. Indoor molds, bacteria, microbial volatile organic compounds and plasticizers in schools - associations with asthma and respiratory symptoms in pupils. *Indoor Air* 17: 153-163, 2007
- 6) Wålinder R, Ernstgård L, et al. Acute Effects of a Fungal Volatile Compound. *Environ Health Perspect* 113: 1775-1778, 2005
- 7) Araki A, Kawai T, et al. Relationship between selected indoor volatile organic compounds, so-called microbial VOC, and the prevalence of mucous membrane symptoms in single family homes. *Sci Total Environ* 408: 2208-2215, 2010
- 8) Hussein T, Glytsos T, et al. Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house. *Atmos Environ* 40: 4285-4307, 2006
- 9) Afshari A, Matson U, et al. Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber. *Indoor Air* 15: 141-150, 2005
- 10) N. Kagi, S. Fujii, Y. Horiba, N. Namiki, Y. Ohtani, H. Emi, H. Tamura and Y.S. Kim. Indoor air quality for chemical and ultrafine particle contaminants from printers. *Build Environ* 42: 5: 1949-1954, 2007
- 11) 並木則和, 大谷吉生, 他. 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*. 21: 59-65. 2006
- 12) He C, Morawska L, et al. Taplin. Particle Emission Characteristics of Office Printers. *Environ Sci Technol* 41: 6039-6045, 2007
- 13) Nazaroff WW, Weschler CJ. Cleaning products and air fresheners: exposure to primary and secondary air pollutants. *Atmos Environ* 38: 2841-2865, 2004
- 14) X. Chen X, Hopke PK. Secondary organic aerosol from α -pinene ozonolysis in dynamic chamber system. *Indoor Air* 19: 335-345, 2009
- 15) L. Morawska, C. He, G. Johnson, H. Guo, E. Uhde and G. Ayoko. Ultrafine Particles in Indoor Air of a School: Possible Role of Secondary Organic Aerosols. *Environ. Sci. Technol.* 43: 24: 9103-9109, 2009
- 16) S.Weichenthal, A. Dufresne and C. Infante-Rivard. Indoor ultrafine particles and childhood asthma: exploring a potential public health concern. *Indoor Air*. 17: 81-91, 2007
- 17) Bornehag C, Sundell J, et al. The Association between Asthma and Allergic Symptoms in Children and Phthalates in House Dust: A Nested Case-Control Study. *Environ Health Perspect* 112: 14: 1393-1397, 2004
- 18) 鍵直樹. 室内空気環境における新たな汚染物質, *保健医療科学*, 63 : 350-358, 2014