

室内化学物質空気汚染とサステナビリティ

Indoor Air Chemical Pollution and Sustainability

加藤 信 介*・村 上 周 三**

Shinsuke KATO and Shuzo MURAKAMI

1. はじめに サステナビリティと室内空気汚染

サステナビリティは、今はまだ存在しない子孫が現存する者と同等の権利を持つ自由を担保する。生存する権利、健康に暮らす権利、資源を利用する権利など人の持つあらゆる権利に関して後世代が現世代より不利にならないこと、後世代への付け回しをしないことは、サステナビリティの要件である。

現代においても未だあまねく保証されているわけではないが、安全に暮らすこと、健康に暮らすことは、人の基本的な権利である。健康や安全を脅かす環境が、現世代の責任で生じたとするならば、これを現世代で解決し、後世代に問題の先送りをしていないことは、サステナビリティの基本要件である。大気汚染、室内空気汚染、河川、海洋の汚染など、現世代の責任で生じた安全や健康への脅威は、現世代が解決すべきものである。

大気、河川、海洋などのマクロ的な環境の汚染は、環境が自然に持つ様々な物質の生成と消散サイクルの能力以上に、人の活動が原因で汚染物質が生成し蓄積される、あるいは必要物質が消費されてしまう循環のアンバランス（化学的な物質生成と消散のアンバランス）により生じたものと考えられる。一方、室内の空気汚染などミクロ的環境の汚染は、生成と消散のアンバランスのほか、その間を繋ぐ局所的な移流、拡散過程（物理的な輸送過程）が人の活動圏と重なることにより問題が生じている。

人は、その寿命の90%以上を室内で過ごす。1日あたりの室内空気の呼吸量は10 kg/day程度と評価され、食物、飲料の摂取量を圧倒的に凌ぐ。室内空気の汚染はその意味で人の健康に大きな影響を及ぼす可能性を秘める。室内は、屋外に比べ人の活動や人工物などにより汚染物質の生成や放散が生ずるリスクが高い。これら汚染が人の健康を脅かすとするれば、健康に暮らすという人の基本的な権利

が人の行為や活動が原因で侵害されることを意味し、サステナビリティの基本が脅かされていると言わざるを得ない。室内化学物質汚染は、この意味でサステナビリティ達成の障害となる。

発展途上国の住居において、炊事用燃焼生成物による室内空気汚染が炊事を担当する女性や一緒に暮らす幼児の健康に極めて深刻な問題をもたらしていることは、よく知られている。先進国においては、このような室内における燃焼生成物による汚染問題こそある程度克服されているものの、異なる形で室内の空気汚染問題が引き起こされている。本稿では、シックハウス、シックビルなどの名で社会問題にもなっている室内空気汚染、とくに揮発性有機化合物による汚染に関して、その問題の所在と解決への道を考察する。

2. VOCによる室内空気汚染と社会的対応

近年、日本国内で生活者や住宅関係者の間からホルムアルデヒドやVOCによる室内空気汚染という言葉をよく耳にするようになった^{文1)}。VOCは、揮発性有機化合物(Volatile Organic Compounds)の省略形である。近年、日本では住宅の気密性の向上に伴い、室内の建材や人々の生活行動により発生したホルムアルデヒドを含むVOCの室内空気中の滞在率が高まってその気中濃度が高まり、健康影響が懸念される事態となっている。社会的関心も高く、学際的な対応研究^{文2)}も進められている。

図1と図2には、室内の化学物質による空気汚染に関わる要素を洗い出してその相関、因果、対策等をまとめて示す。汚染源から放散された汚染質は、室内気流により輸送され室外に排出される。汚染は燃焼などにより直接気中に生成物が放出される場合、建材内部で蓄積または生成された汚染質が建材表面に浸透し、気中に放散される場合など様々なケースがある。気中に放散された汚染質の一部は呼吸により人体に吸入される。人体が吸入する汚染質量は、汚染質の室内放散量と、人体の吸入前に室外排出される効

*東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター

**東京大学生産技術研究所 第5部

率, 人体の吸入前に気中から吸着材に吸着される効率などに依存する. 汚染質の人体影響は, 人体への直接観察, 動物実験, 細胞片実験など様々な方法で評価され, 気中濃度ガイドラインが整備される. この気中濃度のガイドラインは, 建物内の一般環境, 健康管理が前提となる労働環境, 屋外大気など, リスク評価により場所場所によって変えられており, 一般に建物内一般環境の値は労働環境と大気の間位置されることが多い. 人体吸入空気の状態を担保するには, この気中濃度に対するガイドラインの整備のほか, 微量な化学物質の気中濃度の正確な測定・評価法, 汚染源からでの汚染物質放出量の測定・評価法, 室内の換気性状の測定・評価・設計法, 吸着材への吸着性能の測定・評価などが必要である. 現在, 様々な化学物質に対する標準的な気中濃度の測定法, 汚染源から放散される放出量の測定法が国際標準化機構 ISO^{文3)}, 日本工業規格 JIS や日本農林規格

JAS などで整備されつつある. また室内空気汚染の測定法に関しても ISO^{文4)} などで整備されつつある. しかし室内の換気性状や室内での換気の不均一性, 対応する汚染質濃度の不均一性, 人体呼吸空気質と室内空気質の関係などに関しては測定・評価法の開発を含め, 未だ整備の途上にある. これらの成果を総合し, 健全な室内空気環境を形成・設計するための標準的なガイドラインも ISO^{文5)} や国内外の関係学会で学会基準などの形で整備されつつある.

3. VOC の室内環境基準

呼吸による VOC などの化学物質の摂取とその健康影響の医学的な因果関係は, 必ずしも明解でない点もある. しかし世界保健機構 WHO は現状の学術データの範囲内で, 室内空気中の各化学物質の濃度に関するガイドラインを示している. 日本においても概ねこのガイドラインに沿った

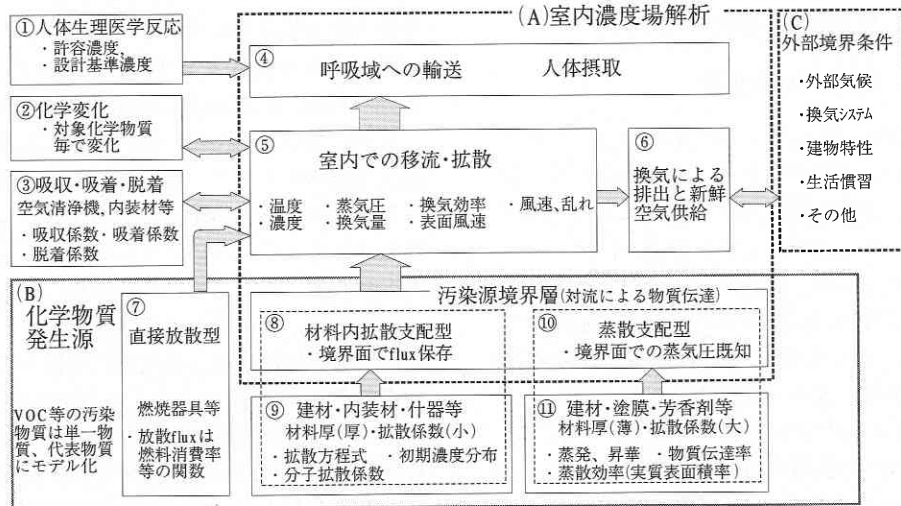


図1 化学物質による室内空気汚染の要因とその相関図

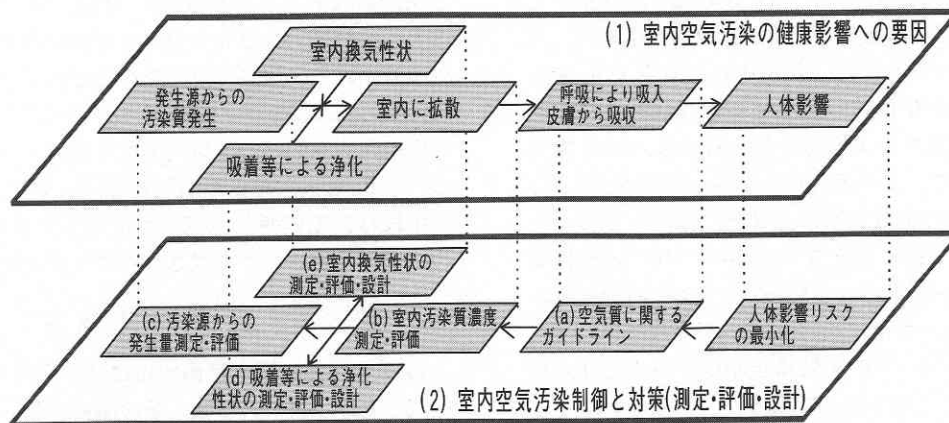


図2 室内空気汚染の要因と対策

基準が定められている。よく知られているものは、TVOC(総揮発性有機化合物)に対する室内濃度 0.3 mg/m^3 やホルムアルデヒド室内濃度 0.1 mg/m^3 などがある。これは一酸化炭素の一般居室の基準 10 ppm (大まかに 10 mg/m^3)に比べ、低濃度、微量であることが知れる。

4. 室内 VOC 濃度測定と濃度実態

室内の VOC 濃度は一般に極めて微量であり、多くの化学種を含むので、その物質同定と濃度測定には高度の化学分析手法が必要とされる。簡易で実用的な測定法もあるが、様々な条件下で再現性のある安定した測定結果が得られる訳ではないため、その使用は注意が必要とされている。

日本の住宅やオフィス空間でも VOC の濃度測定は既に種々行われている。測定結果には室内における VOC 濃度がかなり高く、WHO の室内環境基準を達成できていない例も多い^{文1, 文2}など。日本では、欧米に比べ対策が多少後手にまわったこともあり、特に揮発性の高いホルムアルデヒドの室内濃度の高い例が数多く報告されている。

5. 室内 VOC 発生源

室内の VOC 発生源は、内装材などの建材の他、燃焼器具の排気ガス、殺虫剤、芳香剤など様々なものがある。殺虫剤、芳香剤などは、適切な使用量、使用法により室内への放散量を減少させることが可能であろう。

建材からの発生に関しては、建材製造時に封じ込まれた VOC 成分が、徐々に室内に放散される場合と、建材中で分解、その他の事由により生成された VOC 成分が室内に放散される場合の2種類に大きく分けることができる。封じ込まれた VOC 成分が室内に放散する場合は、一般に時間の経過とともに室内への放散量は減少する。しかし、分解などの事由により建材内部で VOC 成分が絶えず生成される場合には、時間経過によりあまり VOC 成分が減少しない。

建材からの VOC 発生は、建材中の VOC 成分が建材中を通過するし易さの程度に支配される。合板や、壁紙材、ゴム製品、プラスチックなどは、材料中にこれら VOC 成分を通過させる小孔が存在し、また材料自身にも材料中を VOC が拡散する性質を有する場合があるため、VOC 成分が建材中を拡散して、その表面から室内へ放散が生じる。この VOC の材料中の拡散係数は、材料、温度などによって大きく変化し、一概に言えないが $10^{-7} \sim 10^{-14}\text{ m}^2/\text{s}$ 程度のオーダーのものが報告されている^{文2}。VOC の空気中の分子拡散係数 $10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ 程度に比べ $10^2 \sim 10^9$ 程度小さい(その分通過抵抗大きい)。この拡散係数が小さいことは、材料厚に左右されることはむしろであるが、拡散が終了するのに時間がかかることを意味している。実際、多くの数 mm、数 cm 厚の建材からの VOC 放出は数年から数十年継

続し、なかなか涸れない。なお、まだ乾いていないペイントなどでは、VOC の放散速度は建材内の拡散速度よりは建材表面空気境界層内の拡散に大きく影響される。このような VOC 放散特性をもつものを蒸散支配型の VOC 放散と称し、材料内の拡散がその放散速度を支配する拡散支配型と区別している。

なお、建材は一般にくぎ穴や材料切断部、接合部など、VOC 透過が容易となる箇所も多い。このような部位の放散速度に関する検討も今後の重要な課題となっている。

6. 室内 VOC の換気による排出と室内吸着

定常的に放散される VOC の室内平均濃度は、放散後、室外に排出されるまでの室内平均滞在時間に比例する^{文6}。すなわち室内濃度を低下させるには、発生した VOC の室内平均滞在時間(余命時間)を可能な限り短くすることが必要である。発生汚染質の余命時間の短縮は、建材から室内に放散される VOC に限らず、室内で発生する汚染質一般の汚染対策の鉄則である。

余命時間の短縮は、汚染発生源が室内で特定できる場合に行われる汚染源近傍の空気を局所排気する「局所換気」が有効になる。汚染源が室内全体にあるなどの理由で局所換気が意味をなさず、室全体の換気を行う「全般換気」による場合は、室内の単位時間の空気の入れ換え回数を示す換気回数をまずあげることが重要となる。室内で空気が良く混合せず、空気が入れ替わらない場所が生じると、そのような場所に汚染質が長く滞在して室全体で見た汚染質の余命時間が増加する。全般換気を行う居室では、なるべく室内空気をよく混合することが一般的に重要となっている。しかし、室内気流とそれに伴う室内の換気性状は個別性が高く、一般的論議を行うことが難しい。そのため、個々の条件に対応する CFD(計算流体力学)解析や、実験による解析が、発生汚染質の余命時間を短縮するための最も有力な解析法となっている。

室内に放散された VOC の一部は、室内に設置されたカーテン、絨毯、什器など様々な材料に吸着されて気中から取り除かれる。脱着が生じないほどに十分な吸着物質があれば、これは換気による室内排出と同様に、室内発生 VOC の室内余命を短縮し、室内濃度を低減する効果を期待できる^{文7}。ただし、発生源から吸着材に VOC を運ぶ最も有力な手段は、室内平均気流の移流効果である。VOC 放散源の風下に吸着物質が設置されることが重要になる^{文7}。

7. 呼吸空気質

VOC の人体影響を評価するには、室内の VOC 濃度分布性状と人体呼吸による吸入量の関係を明らかにすることが必要となる。図3は、人体の吸気がどの部分から生じるかを CFD(数値計算流体力学)により解析した例を示す^{文8}。

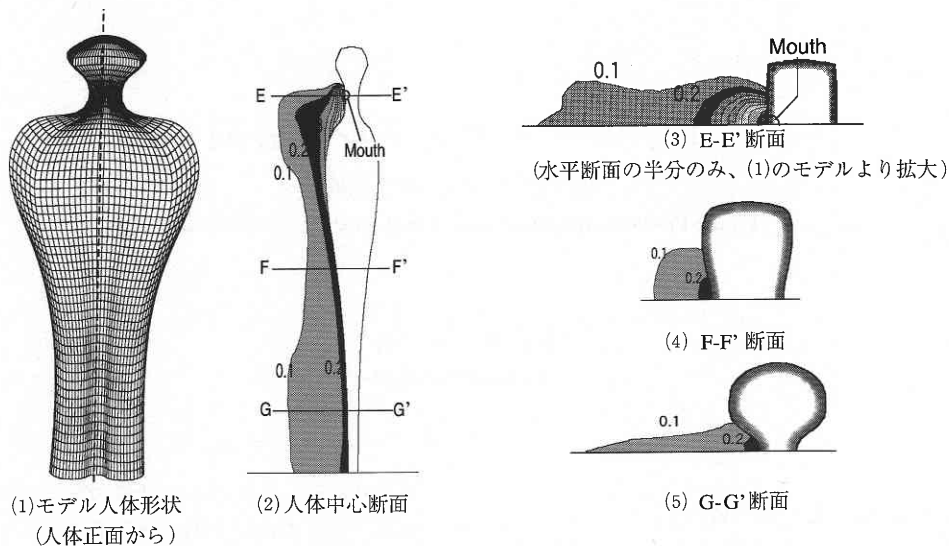


図3 静穏室内の発熱する人体（立位）の吸気範囲のCFD解析
(図中の数値はその場の空気が呼吸により吸引される割合を示す)

人体は絶えず放熱しているため、周囲に上昇流が生じている。この上昇流の作用により、その吸気の多くは室内下部から得ている。室内下部、床面でのVOC放散を低減することは人体の吸入空気質管理の面から重要となる。

8. 結 語

室内空気汚染は、人の行為や活動を原因とする健康への脅威であり、サステナビリティに対する基本的な脅威である。建材などから室内に放散される揮発性有機化合物VOCは、極めて低濃度、微量で健康影響があると考えられている。健康影響リスクを低減するには建材からのVOCの室内放散量を減らすことがまず、重要な対策となる。室内に放散されたVOCの余命時間を短くする換気システムの開発が次善の対策となる。人体の呼吸空気質には、人体放熱にともなう周辺の熱上昇流が少なからず影響を与えている。このような人体周辺の微気象を考慮したキメの細かい対策も重要である。

(2000年2月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 例えば、田辺新一：室内化学汚染—シックハウスの常識と対策—、講談社現代新書 1998。
- 2) 例えば科学技術振興調整費による「室内化学物質空気汚染の解明と健康・衛生居住環境の開発（研究代表者 村上周三東大教授）」平成10年度研究報告書、科学技術庁 1999。
- 3) 例えばISO, TC 89, ワーキングレポート。
- 4) 例えばISO, TC 146, SC 6, ワーキングレポート。
- 5) 例えばISO, TC 205, WG 1, ワーキングレポート。
- 6) Kato, S. and Murakami, S.: New ventilation efficiency scales based on spatial distribution of contaminant concentration aided by numerical simulation. ASHRAE Transactions 94 (2), pp. 309-330 1988。
- 7) 山本明, 村上周三, 加藤信介, 近藤靖史, 伊藤一秀: 揮発性有機化合物の室内放散・吸脱着等のモデリングとその数値予測: 第13回数値流体力学シンポジウム, D 10-2 1999。
- 8) 林立也, 加藤信介, 村上周三, 高島伸成: 室内化学物質による呼吸空気質汚染の数値解析とその制御に関する研究(その2) 姿勢の違いによる吸気勢力範囲のCFD解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-2, pp. 707-708 1999。