

揮発性有機化合物 2-エチル-1-ヘキサノールが検出された 公共建築物における機械換気を用いた室内濃度低減効果について

橋本博之, 豊崎緑, 橋本レイコ, 草原紀子, 田中智子, 中里みさ子, 藤浪裕士¹⁾, 金谷敦子²⁾, 長濱裕介²⁾, 鈴木和広²⁾, 遠藤幸男

Effect of mechanical ventilation on concentration reduction in a government office building where volatile organic compounds 2-ethyl-1-hexanol were detected

Hiroyuki HASHIMOTO, Midori TOYOZAKI, Ruiko HASHIMOTO, Noriko KUSAHARA, Satoko TANAKA, Misako NAKAZATO,
Yuji FIJINAMI, Atsuko KANATANI, Yusuke NAGAHAMA, Kazuhiro SUZUKI and Yukio ENDO

要旨

2-エチル-1-ヘキサノール(2E1H)が高濃度で検出された公共建築物の 2 つの会議室について、機械換気時および 24 時間換気停止時に 2E1H の室内濃度を測定し、機械換気を用いた室内濃度低減効果を確認した。冬期(2月)および夏期(6月)に測定をおこなった結果、冬期、夏期ともに換気時にはほとんど検出されなかったものの、24 時間換気停止時には両会議室で高濃度に検出され、夏期が高い傾向を示した。2 つの会議室は気積や機械換気能力が異なり、換気停止時の 2E1H の室内濃度および換気シミュレーターでの機械換気状況の評価に差がみられた。機械換気による一定の濃度低減効果は確認されたが、室内環境を良好に保つためには、それぞれの会議室の窓や扉、換気能力などの違いを考慮し、最適な換気の方法について個別に検討することが必要と考えられた。

キーワード：揮発性有機化合物、2-エチル-1-ヘキサノール、アクティブサンプラー法、シックハウス症候群、機械換気

Keywords : volatile organic compounds, 2-ethyl-1-hexanol, active air sampler, sick house syndrome, mechanical ventilation

(令和 2 年 9 月 28 日受付 令和 2 年 11 月 17 日受理)

はじめに

シックビルディング症候群は、1980 年代に欧米諸国で目、鼻、喉の痛み、頭痛、吐き気、めまい等様々な症状を起こすことで社会的に認識され、本邦では 1990 年代に注目を浴び、厚生労働省室内空気質健康影響研究会¹⁾において「居住者の健康を維持するという観点から問題のある住宅において見られる健康被害の総称」の用語としてシックハウス症候群という言葉が用いられた。シックハウス症候群の原因の多くは化学物質であり、そのほとんどが合板の塗料、接着剤などから揮発するホルムアルデヒドなどの揮発性有機化合物(VOCs)と考えられている。わが国でも新築・改築改修後の住宅や学校で、目、鼻、喉の痛み、頭痛、吐き気、めまい等、居住者に様々な健康影響が生じている状況が数多く報告されており、²⁾ これを受けて厚生労

働省は、室内空気汚染の低減化を促進し、快適で健康な室内空間を確保することを目的に、1997~2002 年にかけて 13 物質に対して室内濃度指針値を定めた(表 1)。また、未規制物質を含めた VOC による汚染を全体として低減させ、より快適な室内環境を実現するための補完的指標として総揮発性有機化合物(Total VOC : TVOC, ガスクロマトグラフによる分析において n-ヘキサンから n-ヘキサデカン間に溶出する VOC の総和)の暫定目標値を 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に設定している。

2017 年 8 月に竣工した公共建築物において、4 階大会議室利用時に異臭があり、目の痛みがあるという相談を受けた。そこで、異臭などの報告があった当該公共建築物の 4 階大会議室について VOCs およびアルデヒド類の室内濃度を測定し、原因の推定を行った。一連の測定では VOCs

¹⁾ 千葉県健康福祉部衛生指導課

²⁾ 香取健康福祉センター(香取保健所)

表 1 室内濃度指針値設定物質と指針値

物質名	指針値 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
ホルムアルデヒド	100
アセトアルデヒド	48
トルエン	260
キシレン	200
エチルベンゼン	3800
スチレン	220
パラジクロロベンゼン	240
テトラデカン	330
クロルピリホス	1 小児 0.1
フェノブカルブ	33
ダイアジノン	0.29
フタル酸ジ-n-ブチル	17
フタル酸ジ-2-エチルヘキシル	100

およびアルデヒド類の計 57 種類の測定を行っているが、本報告では、目、鼻、喉の痛みなどの自覚症状が推定される高濃度で検出された 2-エチル-1-ヘキサノール(2E1H)に注目し、機械換気による室内濃度低減効果について検討したので報告する。

実験方法

1. 測定場所および測定時期

2017 年 8 月に竣工した千葉県北東部にある公共建築物(RC 造・S 造一部 SRC 造 4 階建、敷地面積 5145.19 m^2 、延床面積 6070.4 m^2)の会議室 2 室(3 階小会議室、4 階大会議室)を対象とした。会議室の大きさを表 2 に、機械換気装置を表 3 に示す。室内空気の採取・測定は、2019 年 9 月(使用開始から 2 年目)に 4 階大会議室を、2020 年 2 月(2 年 5 ヶ月目)および 6 月(2 年 9 ヶ月目)に 3 階小会議室

表 2 会議室の大きさ

室名	床面積 (m^2)	天井高 (m)	容積 (m^3)
3 階小会議室	40.4	2.70	109.1
4 階大会議室	201.7	5.39	1087.2

数値は実測値に基づく

と 4 階大会議室を実施した。

2. 測定方法

三脚を用いて約 1.2 m の高さに設置したミニポンプ(柴田製 MP-W5P)に VOCs 採取用のサンプラー ORBO-91T(Supelco 製: 20366-U)を接続、別のミニポンプにアルデヒド類採取用のサンプラー LpDNP H S10L(Supelco 製: 505358)およびアクティブサンプラー用オゾンスクラバー(シグマアルドリッチ製: 505285)を連結接続し、両ポンプともに 1.0 L/min の流速で 30 分間、計 30 L の空気を採取した。VOCs の測定にはガスクロマトグラフ質量分析計 GC7890A・MS5975C(アジレント・テクノロジー製)、アルデヒド類の測定には LCMS-Nexera(島津製作所製)を用いた。測定対象物質は、シグマアルドリッチ製混合試薬(Cat.No.4M9148-U)に個別に調製した 2E1H、ナフタレン、2,2,4-トリメチル-1,3-ペンタジオールジイソブチレート(TXIB)、テキサノールを混合した VOCs 44 種類およびアルデヒド類 13 種類の計 57 種類とした。採取方法および測定方法は、「室内空气中化学物質の室内濃度指針値および標準的測定方法」³⁾に従い、2 試行の平均値を測定結果とした。

結果および考察

1. 2019 年 9 月の測定結果

2019 年 9 月 27 日に採取した 4 階大会議室(機械換気停止、測定時は無人)の室内空気において 2E1H が 1286 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.241 ppm)と高濃度で検出された。1997~2002 年にかけて 13 化学物質の室内濃度指針値が設定されたことにより、指針値設定後は指針値設定物質の検出率やその濃度が低減した⁴⁾ものの、未規制の代替物質が多数利用されるようになった⁵⁾。2E1H は室内濃度指針値が設定されていない未規制の VOCs のひとつであり、多くの新築建築物で検出例が報告されている^{2,6-8)}。

このような状況を受け、厚生労働省の化学物質安全対策室を事務局とする「シックハウス(室内空気汚染)問題に関する検討会」⁹⁾は、2E1H の室内濃度指針値設定値案を 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.02 ppm)とし、2017 年 6 月にパブリックコメントを実施した。その結果、関係者が対策を講ずるに当たり、科学的知見のさらなる収集が必要であり、また技術的観点から実効性に疑義がある値が提案されているとの意

表 3 会議室の機械換気装置

室名	風量(CMH ^{※1})		型式		設置 個数	ボックス(mm)
	吸出口	吸込口	名称	サイズ(mm)		
3 階小会議室	500		VHS ^{※2}	300×300	1	400×450×300
		500	GVS ^{※3}	300×300	1	400×450×300
総計	500	500	—	—	2	—
4 階大会議室	552		VHS	500×200	5	650×300×300
		690	CL-8 ^{※4}	1000	4	1200×300×350
	390		VHS	400×20	6	550×350×300
		585	CL-8	1000	4	1200×300×350
	290		VHS	400×200	6	550×350×400
		870	CL-8	1000	2	1200×300×300
	500		VHS	500×200	5	650×350×300
		500	CL-8	1000	5	1200×300×350
総計	9340	9340	—	—	37	—

※1 : CMH cubic meter per hour (m³/h)

※2 : VHS ユニバーサル型吹出口

※3 : GVS スリット型吸込口

※4 : CL-8 カームライン型吸込口

見があり、「ヒトへの安全性に係る情報」、「代替物の情報」などを引き続き集積し、国際動向も踏まえながら指針値を再検討することとなった。一方、欧州連合では室内空気由来の継続曝露が人に対して刺激などの悪影響を与えない最小の値(EU-LCI: 最小影響濃度)として2E1HのEU-LCIを300 µg/m³と設定している¹⁰⁾。EU-LCIは建材の欧州VOC排出試験法(CEN TS 16516)¹¹⁾に従い材料の放散試験でのみ使用されることが強調されている値ではあるが、室内濃度値で設定されていることから、健康影響を評価する目安とした。

今回、測定を実施した4階大会議室は、スラブコンクリートにタイルカーペットを直貼りした床の施工を行っており、スラブコンクリートのアルカリ水とタイルカーペット裏側の樹脂(塩ビバック材)中のフタル酸ジ-2-エチルヘキシルとの接触により加水分解反応が生じ、その結果2E1Hが発生したと推察された¹²⁾。2E1Hの室内濃度は65.5~336 µg/m³に集団としての症状過剰出現の閾値があると報告がある⁴⁾。4階大会議室の2E1Hの室内濃度は、EU-

LCIの約4倍と高濃度で検出されており、またTVOCの暫定目標値である400 µg/m³を1物質のみで大幅に超過していた。

以上の結果から、床施工の状況、2E1H以外の物質が検出されておらず、またEU-LCIおよびTVOCを超過し、自覚症状の出現閾値を超えた高濃度で検出されていることから、4階大会議室の異臭、目の痛みの原因物質は2E1Hであると推察した。

2. 2020年2月の測定結果

2019年9月に測定した2E1Hの測定結果を報告したところ、当該公共建築物の管理者は4階大会議室の機械換気を常時稼働することとした。2019年9月の空気採取・測定時は機械換気を停止した状態での測定値であった。そのため、機械換気時の測定値(2020年2月25日)および24時間機械換気および窓扉を使用した換気すべてを停止した状態での測定値(同年2月26日)を比較し、機械換気の室内濃度低減効果を確認することとした。また、3階小会

議室は、4 階大会議室と同様の床施工を実施していることから、2E1H の発生を疑い、同様に換気の前後で測定を行った。なお、2019 年 9 月と同様に会議室は無人の状態で機械換気時の空気を採取後に機械換気を止め、24 時間経過した室内空気を 24 時間換気停止時のサンプルとした。結果を表 4 に示す。

機械換気時には 3 階小会議室では定量下限値未満、4 階大会議室では 66.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.013 ppm) の濃度で検出された。一方、24 時間換気を停止したところ、3 階小会議室、4 階大会議室でそれぞれ 214.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.040 ppm)、163.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.031 ppm) の室内濃度であった。機械換気を 24 時間停止した時の室内濃度は 2019 年 9 月測定時の約 1/6 と大幅に低い値であった。2019 年 9 月測定時は会議室利用時のみ機械換気を運転することとしており、会議室の使用予約記録により、室内空気採取時は 8 日間機械換気を停止していたことが確認された。また、2E1H の発生機序とされるコンクリート中のアルカリ水とタイルカーペット裏側のフタル酸ジ-2-エチルヘキシルとの加水分解反応は外気温が高く、躯体のコンクリート温度が高くなると促進される¹³⁾。これらの状況から、2019 年 9 月と今回の測定値との差は機械換気停止時間の違いおよび外気温の影響が大きいと考えられた。

3. 2020 年 6 月の測定結果

2E1H の発生状況は外気温との影響が示唆されているた

表 4 2E1H の室内濃度結果—冬期— ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

室名	2020 年	2020 年
	2 月 25 日 (換気実施時)	2 月 26 日 (換気停止時)
3 階小会議室	N.D.	214.4
4 階大会議室	66.9	163.2

N.D.: 定量下限値 66.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満

表 5 2E1H の室内濃度結果—夏期— ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

室名	2020 年	2020 年
	6 月 29 日 (換気実施時)	6 月 30 日 (換気停止時)
3 階小会議室	N.D.	566.2
4 階大会議室	N.D.	510.9

N.D.: 定量下限値 66.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満

め、外気温が上昇した夏期の測定として、2020 年 6 月 29 日および 30 日に機械換気の前で測定を行った。結果を表 5 に示す。機械換気時には 3 階小会議室、4 階大会議室ともに定量下限値未満であった。一方、24 時間換気停止時の室内濃度は 3 階小会議室、4 階大会議室でそれぞれ 566.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.106 ppm)、510.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.096 ppm) であり、2020 年 2 月測定時の 2~3 倍の濃度であった。外気温の影響で夏期に高濃度で検出されるという既報¹⁴⁾と同様の結果であった。気象庁の発表では、当該公共建築物の所在地の月別平均気温(1999-2010 年)は、2 月は 4.4 $^{\circ}\text{C}$ 、6 月は 20.3 $^{\circ}\text{C}$ となっている。2 月に比べ 6 月の室内濃度が 2~3 倍高い状況は外気温の影響と考えられた。

4. 換気シミュレーターによる機械換気状況の評価

当該会議室の 2E1H の室内濃度低減には十分な換気の実施が必要と考えられる。会議室設計時の必要換気量の求め方は、部屋の種類や用途などにより異なり、大きく分けて建築基準法に定められる方法、部屋の必要換気回数から求める方法、室内の汚染進度から求める方法などがある¹⁵⁾。

今後の会議室利用に際し、必要となる換気方法の一助とするために、日本産業衛生学会が作成した換気シミュレーター ver.1.0¹⁶⁾を用いて 2 つの会議室の機械換気状況の評価を行った。換気シミュレーターは、新型コロナウイルス感染症対策用に作成されたものではあるが、室内空気質の評価として化学物質にも適用可能と考えられる。シミュレートする際の設定項目および入力値を表 6 に示した。シミュレーター結果は予測 CO₂ 濃度と換気状態の評価およびコメントにより評価される。

シミュレーションの結果、予測 CO₂ 濃度は 3 階小会議室、4 階大会議室でそれぞれ 900 ppm、530 ppm であった。会議室の収容人数を 3 人/m² としてシミュレートした両会議室の予測 CO₂ 濃度において、3 階小会議室は 4 階大会議室に比べ約 2 倍の濃度となっており、換気状態に差があった。また、容積(m³)あたりの換気量(CMH)、つまり 1 時間あたりの会議室の換気回数は、3 階小会議室は 4.6 回、4 階大会議室は 8.6 回であり、予測 CO₂ 濃度同様に約 2 倍の差があった。両会議室ともに換気状態は「良い」、コメント「良好でありこの状態を保つ」と評価されたものの両会議室において機械換気状況の差が確認された。

表 6 換気シミュレーターの設定項目および入力値

設定項目	入力値	
	3 階小会議室	4 階大会議室 ^{※1}
床の縦の長さ (m)	5.34	14.20
床の横の長さ (m)	7.56	14.20
天井の高さ (m)	2.70	5.39
部屋にいる人の数 ^{※2}	14	68
人の活動状態	標準時	標準時
換気装置はありますか？	はい(あります)	はい(あります)
換気量 (設計値等) はわかりますか？	はい(わかります)	はい(わかります)
どのデータを使いますか？	換気量(設計値等) 500 m ³ /h	換気量(設計値等) 9340 m ³ /h

数値は実測値および設計図面にに基づき入力した

※1 4 階大会議室は長方形ではないため、床面積を実測し、床の縦および横の長さを床面積の平方根で入力した

※2 3 m²/人として床面積(m²)から算出した

まとめ

異臭、目の痛みの相談があった新築公共建築物の 2 つの会議室において室内濃度指針値が設定されていない 2E1H が高濃度で検出された。2020 年 2 月および 6 月に実施した機械換気時および 24 時間換気停止時の室内濃度の結果から、機械換気によりほぼ十分な濃度低減効果が確認された。また、2E1H の室内濃度は夏期が高い傾向を示した。

2E1H の室内濃度低減には、発生原因となっている床の改修工事の実施が最も効果的であると考えられるが、すでに利用中の会議室であり、またコスト面で施工は難しい。2E1H が最初に検出された 2019 年 9 月以降、当該公共建築物の会議室は常時機械換気を実施しており、機械換気運転費用も増加している。今後、季節変動および経費削減を考慮し、機械換気停止時間の違いによる室内濃度の状況および異臭や目の痛みなどの自覚症状がなくなる濃度（例えば定量下限値）となるのに要する必要換気時間などの検討が必要と考えられる。

今回同じ用途で使用する 2 つの会議室において設計時の機械換気量が異なり、また換気シミュレーターの結果および換気停止時の 2E1H の室内濃度に違いが見られた。機械換気に加えて会議室の扉や窓などを開放するこ

とにより、より効果的な室内換気が可能となるが、4 階大会議室は開放可能な窓を用いた効率的な換気が可能ではあるが、3 階小会議室の窓はすべてはめ殺しの窓であり、窓を使用した換気は不可能であった。室内環境 VOCs を低減させるためには、それぞれの会議室の窓や扉、機械換気能力などの違いを考慮し、最適な換気の方法について個別に検討していくことが必要と考えられる。

引用文献

- 1) 「室内空気質健康影響研究会報告書：～シックハウス症候群に関する医学的知見の整理～」の公表について (URL : <https://www.mhlw.go.jp/houdou/2004/02/h0227-1.html>)
- 2) 角田ら：都内建築ビルにおける室内空気中の化学物質の実態調査，東京健安研年報，67，253-259 (2016)
- 3) 厚生労働省 室内空気中化学物質の室内濃度指針値および標準的測定方法について，医薬発第 0207002 号 2002
- 4) 国土交通省：平成 17 年度室内空気中の化学物質濃度の実態調査の結果等について，平成 18 年 11 月
- 5) 斎藤ら：近年の室内空気汚染問題について 未規制物質による健康リスク，日本リスク研究学会誌 21，91 - 100 (2011)

- 6) 上島ら：2-エチル-1-ヘキサノールによる室内空気汚染
室内空気，発生源，自覚症状について，日本公衛誌，
12，1021-1030(2005)
- 7) 上野ら：小学校室内の 대기およびダストを介した児童
の化学物質暴露，九州環境管理協会，44，39-46 (2015)
- 8) 大貫ら：図書館及び保育園における室内空气中化学物
質濃度の実態調査-アルデヒド類，VOC 類及びTVOC に
ついて，東京健安研年報，64，165-171 (2013)
- 9) 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 23 回までのまとめ
(URL : <https://www.mhlw.go.jp/content/000470188.pdf>)
- 10) Agreed EU-LCI values – substances with their established
EU-LCI values and summary fact sheets
(URL : <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/39985>)
- 11) OPPL R. : New European VOC emissions testing
method CEN/TS 16516 and CE marking of construction
products, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 74,3 62-68, 2014
- 12) Chino, S. et al. : Study on emission of decomposed
chemicals of esters contained in PVC flooring and adhesive,
The 6th International Conference on Indoor Air Quality,
Ventilation &Energy Conservation in Buildings (IAQVEC
2007), Sendai, Japan, 28-31 October, 2007
- 13) 栗木ら：コンクリート直貼工法における 2-エチル-1-
ヘキサノールの発生に関する実験的研究，戸田建設技術
研究報告，第 37 号，2-2～2-5(2011)
- 14) 山内ら：新築公共建築物の室内空気質推移（第 3
報），地方衛生研究所全国衛生化学技術協議会年会
(2019)
- 15) 三菱電機 必要換気量の求め方
(URL : https://www.mitsubishielectric.co.jp/ldg/ja/air/guide/support/knowledge/detail_01.html)
- 16) 日本産業衛生学会新型コロナウイルス(COVID-19) 感
染症対策用換気シミュレーター
(URL : http://jsoh-ohe.umin.jp/covid_simulator/covid_simulator.html)