

# プレハブ仮設校舎における室内空気汚染

## Indoor Air Pollution in Temporary Prefabricated School Buildings

氏家 愛子 菊地 秀夫 林 都香  
濱名 徹

Aiko UJIIE, Hideo KIKUCHI, Kunika HAYASHI  
Toru HAMANA

宮城県内 A 高等学校では新校舎建設のため、H20 年 4 月からプレハブ 2 階建ての仮設校舎を使用しているが、供用直後からめまいや頭痛などのシックハウス症候群を発症した職員および生徒が出始めた。原因物質等を探るため揮発性有機化合物（VOC）40 物質について調査を実施した結果、総揮発性有機化合物（TVOCs）濃度は 36～2100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ で、音楽室の室内濃度だけが TVOCs 暫定目標値を超過したが、他の教室等では目標値以下であった。また、指針値が設定されているトルエン、キシレン、エチルベンゼン、スチレン、p-ジクロロベンゼン及びテトラデカンの教室等室内濃度は、全て指針値の 4% 未満であり全体的に非常に低い濃度であった。ロシア産アカマツ材を壁材、巾木などに多用した音楽室等では、 $\alpha$ -ピネン及びリモネンなどのテルペン類が高濃度であったため、VOC 低減対策としてアカマツ材の封じ込めや除去を行い、また全教室への活性炭吸着方式空気清浄機の設置及び換気の徹底などを講じた結果、TVOCs 濃度は 9.3～83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （対策前の濃度の 4%～59%）に低下した。また、VOC 個別濃度についても低減対策後には、嗅覚閾値と比較してほとんど無臭レベルまで低下しており、低減対策は有効であったと考えられる。

キーワード：揮発性有機化合物； $\alpha$ -ピネン；テルペン類；シックハウス症候群；アカマツ；GC/MS

**Key words**：Volatile Organic Compound；Alpha-Pinene；Terpene；Sick House Syndrome；Red Pine；GC/MS

### 1 はじめに

宮城県内 A 高等学校では新校舎建設のため、H20 年 4 月からプレハブ 2 階建ての仮設校舎を使用しているが、供用直後からめまいや頭痛などのシックハウス症候群症状を訴える職員および生徒が出始めた。プレハブ仮設校舎供用直前の建設業者が実施した室内空気測定では、ホルムアルデヒド等指針値が設定されている VOC は検出下限値未満の濃度であったが、供用後数ヶ月経た後も症状が改善されることなく継続した。このため、当所に原因物質等についての調査依頼があり、学校の休暇期間内に VOC 濃度について実態調査（対策前調査）を行った。また、この調査結果を受けて講じた VOC 低減対策後の室内空気中の濃度についても調査（対策後調査）を実施したところ知見が得られたので報告する。

### 2 方法

ホルムアルデヒド及びアセトアルデヒド測定については民間分析機関が実施したため、当所はトルエン等 VOC 40 物質（表 1）の調査を行った。

#### 2.1 試料採取

学校における空気環境測定については、学校環境衛生基準<sup>1)</sup>によりパッシブサンプラーでの 8 時間以上の暴露、または 1L/min の流速で 30 分間採取・測定することになっている。業者が実施したパッシブサンプラーによるプレハブ仮設校舎供用前後の VOC 測定では、県有施設のシックハウス対策マニュアル<sup>2)</sup>に定めるホルムアル

デヒド、トルエン、キシレン、スチレン、エチルベンゼンが検出されていなかった。このため、VOC 捕集量を増やすことを目的として、一般住宅と同じ採取方法、すなわち、毎分 100ml で 24 時間連続吸引する方法<sup>3)</sup>を採用した。

- 1) 調査日：a) 対策前調査：H20 年 7 月 29 日～8 月 1 日、室内温度平均 24.3 $^{\circ}\text{C}$ 、室外温度平均 25.0 $^{\circ}\text{C}$ 、b) 対策後調査：H20 年 10 月 25 日～26 日、室内温度平均 21.7 $^{\circ}\text{C}$ 、室外温度平均 20.2 $^{\circ}\text{C}$
- 2) 調査地点：学校が実施したアンケート調査の結果、有症回答数が多かった普通教室 4 教室（1 階：2 教室、2 階：2 教室）、保健室、相談室、体育館、音楽室、トイレ（いずれも 1 階）の 9 地点及び対照としての校舎外（外気）1 地点で実施した。
- 3) 採取方法：エアーサンプラーは(株)ガステック製 GSP-250FT 及び柴田科学(株)製 MP $\Sigma$ 30 を使用し、これらを教室のほぼ中央に床上約 1.5m の高さで設置した。対策前調査では高濃度による破過を想定し、VOC の捕集用に柴田科学(株)製チャコールチューブ 2 本をシリコンチューブで直列に繋いで使用した。捕集管をサンプラーに設置しアルミホイルで遮光した後、100mL/分で 24 時間空気を吸引・採取した。対策後の調査では、音楽室を除く 9 ヲ所の試料採取はチャコールチューブ 1 本で行った。音楽室は対策前調査で VOC の濃度が特に高い値であったため、対策後調査においてもチャコールチューブ 2 本を直列に繋いで試料採取

を行った。

2.2 標準品

標準原液は関東化学(株)製の VOC 混合標準原液 (室内環境測定用, 1000 $\mu\text{g}/\text{mL}$ , 二硫化炭素溶液) 及びトルエン-d8 標準原液 (室内環境測定用, 1000 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) を使用した。検量線用標準溶液は VOC 混合標準原液を二硫化炭素でそれぞれ希釈して 0.1 $\mu\text{g}/\text{mL}$ , 0.5 $\mu\text{g}/\text{mL}$ , 1.0 $\mu\text{g}/\text{mL}$  を調製し, 各 1ml に内部標準物質としてトルエン-d8 (100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) を 1 $\mu\text{L}$  加えて検量線を作成した。

2.3 試料溶液調整

試料を採取した捕集管, トラベルブランク及び操作ブランク用の捕集管から活性炭 (全部) を共栓試験管に取り出し, 二硫化炭素 1mL 及びトルエン-d8 (100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ ) を 1 $\mu\text{L}$  加え時々振とうして 2 時間放置し抽出した。二硫化炭素層を採取して GC/MS 試料溶液とした。

2.4 装置及び分析条件

- 1) 装置: Agilent 社製 GC/MS 6890/5973A
- 2) 分析用カラム: DB-1 (0.25mm i.d.×60m, 膜厚 1 $\mu\text{m}$ )
- 3) 測定条件: 昇温条件: 40 $^{\circ}\text{C}$  (7分)  $\rightarrow$  10 $^{\circ}\text{C}/\text{分}$   $\rightarrow$  280 $^{\circ}\text{C}$  (2分), 注入法: パルスドスプリットレス, 注入口温度: 250 $^{\circ}\text{C}$ , 注入量: 1 $\mu\text{L}$ , 平均線速度: 26cm/秒, 定流量モード, SIM 測定; 表 1 に示す定量イオン及び確認イオンを使用し, 二硫化炭素の溶媒ピークが溶出し終わる 10.5 分からデータの取り込みを開始した。SCAN 測定;  $m/z = 35 \sim 330$ 。

3 VOC 濃度低減対策

供用開始直後の 6 月には発症程度の重い生徒が在籍する普通教室 2 について, 換気扇の増設及びスチームクリーニングを実施した。対策前調査 (7 月) 実施後には, テルペン類の濃度が高かった音楽室等ロシア産アカマツ材を多用した教室を対象に, 石膏ボード貼り付けによるアカマツ材の封じ込め措置及び巾木等の除去・交換を実施した。また, 全ての普通教室や特別教室など 44 教室には活性炭方式空気清浄機を 1 教室当たり 2~3 台, 合計 99 台設置するとともに換気を徹底した。体育館及び 1 階北女子トイレについては特に対策は講じなかった。

4 結果及び考察

4.1 総揮発性有機化合物濃度

調査対象とした VOC は表 1 に示す 40 物質であり, 前調査及び後調査における各測定カ所での濃度範囲を表 1 に示した。40 物質の濃度を合計した TVOCs 濃度は, 対策前調査において既にスチームクリーニングや換気による対策を行った 1 階普通教室 2 での 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (最小値) から音楽室での 2100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (最高値) であった。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設定された TVOCs の暫定目標値 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  にこれらの濃度を比較すると, 目標値の約 5 倍の濃度であった音楽室を除き全地点で暫定目標値以下であった (図 1)。比較対照

として, 当所が測定を実施した, H17 年新築の県有庁舎供用 3 ヶ月後の事務室等 5 カ所の濃度及び一般住宅 (鉄骨プレハブ; 入居 5 ヶ月後) の TVOCs 濃度<sup>4)</sup> を示した。芳香族炭化水素類及び脂肪族炭化水素類を主とした事務所及び一般住宅の室内空気の TVOCs 濃度は, 100~200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  であったが, 仮設校舎の対策前調査では音楽室, 相談室及び普通教室 1, 3, 4 の 5 カ所でこれらの濃度を上回っていた。一方, VOC 低減対策後の調査では, 全ての教室等で 9.3~83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (対策前の濃度の 4%~59%) に低下していた。対策前/対策後の濃度比率をみると, ほぼ同じ VOC 対策を実施した普通教室 1, 3, 4 では, 普通教室 1 及び普通教室 4 の TVOCs 濃度が対

表 1 揮発性化合物の定量イオン, 室内濃度および検出下限値

揮発性有機化合物名	定量イオン(イ)	確認イオン(イ)	確認イオン(イ)	室内濃度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		検出下限値 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
				実態調査	VOCs対策後	
2-ブタン	43	72	57	ND~5.0	ND~1.7	0.81
酢酸エチル	61	43	70	0.32~1.8	0.43~1.2	0.20
ヘキサン	86	57	43	0.52~4.9	0.30~1.4	0.10
クロロホルム	83	47	85	ND~0.44	0.14~0.40	0.11
1,2-ジクロロエタン	62	49	98	ND~0.27	ND	0.13
2,4-ジメチルペンタン	43	57	85	ND~0.10	ND~0.11	0.08
1,1,1-トリクロロエタン	97	99	61	ND	ND	0.10
1-ブタノール	56	41	43	0.33~7.2	ND~1.7	0.17
ベンゼン	78	52	77	0.25~1.0	0.19~0.90	0.15
四塩化炭素	117	119	121	0.43~0.66	0.28~0.57	0.12
1,2-ジクロロプロパン	63	76	62	ND	ND	0.12
トリクロロエチレン	130	95	132	ND	ND	0.11
2,2,4-トリメチルペンタン	57	41	56	ND~0.18	ND~0.38	0.09
ヘプタン	57	71	43	0.36~6.4	ND~1.0	0.13
メチルイソブチルケトン(MIBK)	43	58	85	0.48~25	0.08~1.2	0.08
トルエン	91	92	65	2.1~10	0.78~5.3	0.07
ジブロモクロロメタン	129	127	131	ND	ND	0.14
酢酸ブチル	43	56	73	1.2~89	0.14~4.6	0.04
オクタン	85	43	57	0.33~7.1	ND~0.83	0.10
テトラクロロエチレン	164	131	166	ND	ND	0.12
エチルベンゼン	91	106	77	0.44~3.4	0.16~1.6	0.10
キシレン	91	106	105	1.2~10	0.19~3.7	0.11
スチレン	104	78	103	ND~0.27	ND~0.33	0.07
ノナン	57	43	85	0.6~13	ND~3.4	0.09
$\alpha$ -ピネン	93	77	91	7.5~1900	1.8~58	0.11
1,3,5-トリメチルベンゼン	105	120	77	0.24~4.0	ND~1.3	0.11
1,2,4-トリメチルベンゼン	105	120	77	0.87~11	0.15~3.6	0.10
デカン	57	43	71	1.2~14	0.12~1.1	0.07
p-ジクロロベンゼン	146	111	148	0.33~1.3	ND~0.61	0.10
1,2,3-トリメチルベンゼン	105	120	77	0.26~1.9	ND~1.0	0.10
リモネン	68	93	136	0.50~160	0.15~4.9	0.09
ノナール	57	70	98	1.8~9.9	0.60~3.7	0.11
ウンデカン	57	71	85	0.61~10	ND~3.3	0.07
1,2,4,5-テトラメチルベンゼン	119	134	91	ND~0.33	ND	0.10
デカナール	57	70	82	0.26~3.9	ND~0.65	0.11
ドデカン	57	71	85	0.41~4.8	ND~2.0	0.08
トリデカン	57	71	85	0.15~3.6	ND~5.3	0.08
テトラデカン	57	71	85	0.12~2.7	ND~3.2	0.08
ペンタデカン	57	71	85	0.21~1.5	ND~0.24	0.08
ヘキサデカン	57	71	85	ND~1.6	ND~0.27	0.10
TVOCs				36~2100	9.3~83	

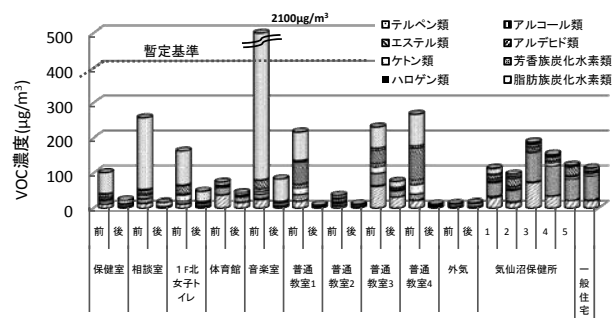


図 1 仮設校舎における VOC 濃度 (対策前後)

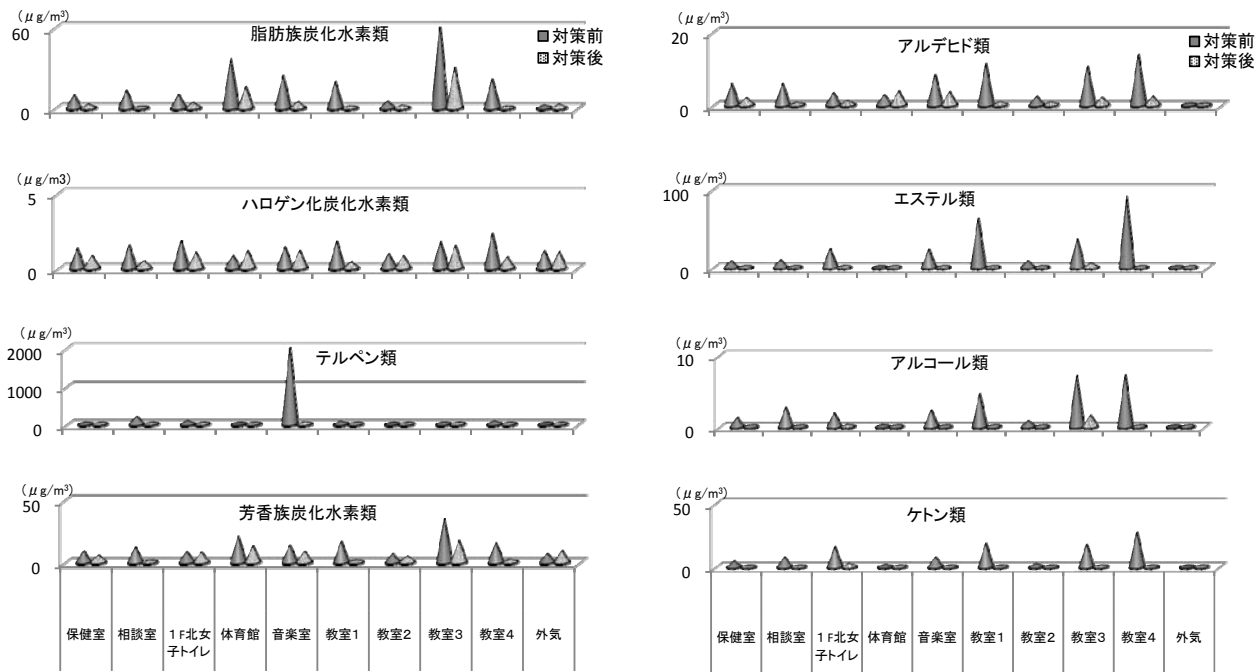


図2 VOC低減対策前後の各教室等における種別VOC濃度

策前の濃度の4%まで減衰した。一方、調査時に、2台設置された空気清浄機のうち1台のみ稼働していた普通教室3では33%であり、他教室に比較してVOC対策後の減衰率が低かった。このことから、活性炭吸着方式空気清浄機がVOC低減対策として非常に有効であることが確認された。

#### 4.2 VOC種類別濃度

検出されたVOCを種類別にみると、対策前調査では音楽室、相談室、保健室及び1階北側トイレの室内空気では、木材等から由来するα-ピネン及びリモネンなどのテルペン類がTVOCs濃度の約60%~96%を占めた。また、体育館ではニス、ワックス由来と考えられるノナン、デカン等の脂肪族炭化水素類濃度が約50%、トリメチルベンゼンが約22%を占めた。普通教室4教室の室内空気ではテルペン類が22%~38%、油性ラッカー、ビニール樹脂用接着剤や壁紙等に含まれる酢酸ブチル、MIBK、ブタノール、トルエン、キシレンが33%~49%を占め、各室内空気中のVOC発生源がそれぞれ異なっていることが示唆された。VOC低減対策前後の濃度について種類別に比較を行ってみると、対策後ではエステル類、アルデヒド類、ケトン類、テルペン類及び脂肪族炭化水素類の濃度の顕著な減衰が認められた(図2)。しかし、普通教室3の室内空気中の脂肪族炭化水素類の減衰は対策前の濃度の約1/2であり、他教室等における減衰割合に比較して低い値となった。これは前項でも述べたとおり、普通教室3の活性炭吸着方式空気清浄機2基のうち1基が調査時に運転されていなかったためと考えられた。塩素化炭化水素類についてみると、1,1,1-トリクロロエタン、1,2-ジクロロプロパン、トリクロロ

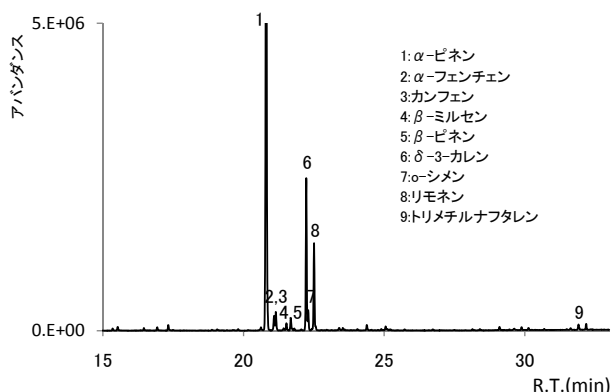


図3 GC/MS-SCAN測定により検出されたVOCのクロマトグラム(音楽室)

表2 VOC室内濃度と嗅覚閾値濃度との比

調査箇所	VOC	室内濃度/嗅覚閾値濃度 (対策前調査)				室内濃度/嗅覚閾値濃度 (対策後調査)			
		酢酸ブチル	α-ピネン	ノナン	デカン	酢酸ブチル	α-ピネン	ノナン	デカン
保健室		0.1	0.5	2.3	0.3	0.0	0.1	0.6	0.2
相談室		0.1	1.7	2.3	0.3	0.0	0.1	0.3	0.0
1F北女子トイレ		0.3	0.8	1.4	0.1	0.0	0.2	0.5	0.1
体育館		0.0	0.1	1.2	0.1	0.0	0.1	1.7	0.1
音楽室		0.3	17	3.1	0.6	0.0	0.5	1.6	0.1
普通教室1		0.7	0.7	4.0	1.0	0.0	0.0	0.3	0.1
普通教室2		0.1	0.1	0.9	0.2	0.0	0.0	0.3	0.1
普通教室3		0.4	0.5	3.7	0.9	0.1	0.1	0.7	0.2
普通教室4		1.1	0.7	4.6	1.4	0.0	0.0	0.9	0.2
外気		0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0

エチレン、ジブromoklorometan、テトラクロロエチレンの5物質は、対策前後の両調査において検出されなかった。また、クロロホルム、四塩化炭素及びp-ジクロロベンゼンは低濃度であり、対策前後調査での濃度はほぼ同程度であった。

### 4.3 指針値との比較

指針値が設定されているトルエン、キシレン、エチルベンゼン、スチレン、p-ジクロロベンゼン及びテトラデカンの室内空気中濃度についてみると、対策前調査では全教室等で指針値の4%未満、対策後には2%未満であり全体的に非常に低い濃度であった。キシレン及びスチレン（普通教室3を除く）は、トルエン及びエチルベンゼンに比べて低減対策後の顕著な濃度減衰が認められた。また、暫定指針値が設定されているノナナールは、対策前調査では指針値の5%（普通教室2）～24%（普通教室4）であり、普通教室では教室2を除く3教室で20%以上と他の室内濃度より高い傾向が認められた。対策後調査では全教室等で $3.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ （9%）未満に低下した。

### 4.4 SCAN分析

対策前調査において試料溶液のGC/MS-SCAN分析を行い、混合標準溶液に含まれていないVOCの検索を行った。この結果、木材を多用している相談室及び音楽室（図3）では木材防腐剤として使用されるトリメチルナフタレンが検出されたほか、 $\delta$ -3-カレン、カンフェン、 $\beta$ -ピネン、シメン等8種類のテルペン類が検出された。これらのテルペン類の多くは混合標準溶液に入っていないため定量はできなかったが、そのピーク面積からテルペン類の濃度はかなり高いと推定された。

### 4.5 嗅覚閾値との比較

VOC 40物質のうち、文献値<sup>5)</sup>による嗅覚閾値が求められる30物質の室内空気中濃度について、「室内濃度／嗅覚閾値濃度」の比率を算出した（表2）。嗅覚閾値との比率が1となる濃度は、ヒトの嗅覚で臭いが感じられる程度の濃度である。表中網掛け部分に示したとおり、VOC対策前調査では酢酸ブチル、 $\alpha$ -ピネン、ノナナール及びデカナールの濃度が1以上の値であった。特に $\alpha$ -ピネンは音楽室において嗅覚閾値の17倍の濃度であった。また、加齢臭の原因物質とされるノナナールは、対策前調査においてスチームクリーニングを実施した普通教室2を除く全教室で1以上の値であり、特に普通教室3教室で高かった。対策後調査では、体育館及び音楽室を除きこれら4物質は全て嗅覚閾値未満となり、VOC低減対策によりほとんど無臭に近い空気環境になったものと考えられた。

## 5 まとめ

プレハブ仮設校舎の室内空気環境について40種類のVOC濃度の調査を実施した結果、音楽室ではTVOCs暫定目標値の5倍を超える $2100\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。その95%以上がテルペン類であり、発生源としては建材として使用されているロシア産アカマツが疑われた。テルペン類は森林浴の主な成分であり、この香りにはストレスを緩和させる効能や消臭・脱臭効果、抗菌・防虫効果がある<sup>6)</sup>が、このような香りでも、高濃度で多量に暴露されると不快感を生起させる。また、テルペン類にはオゾンとの共存下で、反応生成物による気道刺激性が報告<sup>7)</sup>されており、人体に悪影響を及ぼすことが知られている。このため、仮設校舎の室内VOC低減対策として、石膏ボードによるアカマツ材の封じ込めや中木等の除去、換気扇増設や24時間換気などによる換気の徹底及び活性炭吸着方式空気清浄機の設置を行った。この結果、調査対象とした全教室等の室内TVOCs濃度は $9.3\sim 83\mu\text{g}/\text{m}^3$ と暫定目標値の約1/5以下まで低下した。また、嗅覚的にも一部を除きほとんど無臭レベルまで減衰した。以上のことから、VOC低減対策として講じた措置は有効であったと考えられる。

## 参考文献

- 1) 文部科学省スポーツ・青少年局長通知「『学校環境衛生の基準』の改訂について」平成16年2月10日、15文科ス第402号（2004）。
- 2) 宮城県：「県有施設のシックハウス対策マニュアル」、平成19年3月（2007）。
- 3) 厚生労働省医薬局長通知「室内空気中化学物質の室内濃度指針値及び標準的測定方法等について」平成13年7月25日、医薬発第828号（2001）。
- 4) 長船達也、氏家愛子、赤間仁、大江浩：宮城県保健環境センター年報、21、75-79（2003）。
- 5) 永田好男、竹内教文：（財）日本環境衛生センター年報、17、77-89（1990）。
- 6) 岩橋基行：「香りと環境」、理工図書（1995）。
- 7) Wolkoff, P., Clausen, P.A., Jensen, B., Nielsen, G.D., Wilkins, C.K. : Indoor Air, 7, 92-106（1997）。