

4. 拡散サンプラーを用いる空气中ガス状化学物質の分析

分担研究者 内山茂久（千葉大学），櫻田尚樹（産業医科大学），稲葉洋平（国立保健医療科学院）
研究協力者 清水萌花，齋藤みのり，坂元宏成，小倉裕直（千葉大学）

研究要旨

特定建築物 242 施設内のガス状化学物質濃度を夏期と冬期に分けて測定した。化学物質の捕集には 4 種類の拡散サンプラー（オゾン、カルボニル化合物測定用、VOC 測定用、酸性ガス測定用、塩基性ガス測定用）を使用した。これらの拡散サンプラーは電源を必要とせず騒音を発生しないのでオフィス環境の測定に適していた。また、就業時間の 8 時間でも十分な分析感度が得られた。特定建築物内の化学物質濃度は、全国における一般住宅より全体的に低い値を示したが、一施設でホルムアルデヒドが $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に高い値を示した。この施設ではアセトアルデヒドも高濃度（ $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）であった。厚生労働省の室内濃度指針値を超過した物質は全 242 施設中、ホルムアルデヒドが 1 施設（0.4%）、アセトアルデヒドが 8 施設（3.3%）、トルエンが 1 施設（0.4%）、TVOC が 4 施設（1.7%）であり、アセトアルデヒドの超過率が高いことが分かった。この他、2,2,4,6,6-ペンタメチルヘプタン（イソドデカン）が推定 $20000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 検出された。この物質を TVOC として計算すると厚生労働省のガイドライン値（ $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）を大幅に超えることになる。これらの施設では、何らかの対策が必要である。今回測定した全物質の中で最も高濃度を示したのはエタノールで最大値は夏期 $1100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、冬期 $9200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。エタノールの毒性は比較的低いが木材とエタノールが接触することで発ガン性のアセトアルデヒドが生成することが報告されているので注意が必要である。最近、新型コロナウイルス感染症対策としてエタノール系の消毒剤を使用する機会が多いので、アセトアルデヒドの生成メカニズムを詳細に検討する必要がある。

A. 研究目的

近年、建材や家庭用品等から発生する化学物質による健康への影響が懸念されている。これらの物質の中には、シックハウス症候群やがんの原因物質ばかりでなく、居住者を不快にする臭気物質も存在する。化学物質の人体への健康影響や発がんリスク、快適性等を検討するためには、精度の高いモニタリングが不可欠である。

室内濃度や個人暴露濃度の測定には、吸引ポンプ等の動力や電力を必要とせず、分子拡散の原理に基づきガス状化学物質を捕集する拡散サンプラーが適している。拡散サンプラーは、小型軽量なため、郵送等による遠隔地での捕集や同時多地点での測定などの利点もある。また、ポンプを用いないので騒音を発生しない。

本研究では各種の拡散サンプラーを用いて、オゾン、アルデヒド類、ケトン類、ギ酸、酢酸、二酸化窒素、二酸化硫黄、アンモニア、揮発性有機化合物（VOCs）を特定建築物（オフィスビル等）で測定し、汚染の実態を調査した。また、施設の種類や生活用品の使用状況などのアンケート調査を同時に実施し、室内空气中の化学物質濃度との関連を考察した。

B. 研究方法

B.1 拡散サンプラー（PSD サンプラー）

構造：拡散サンプラー（Passive Sampling Device, PSD-sampler）は拡散浸透媒体である PSD-diffusion filter、分析時に抽出容器になる glass tube そして、反応吸収剤試薬を含浸させたシリカゲルまたは炭素系吸着剤 Carbon molecular sieves から構成される¹⁻³。PSD-sampler の構造と、測定手順の概要を Fig. 1 に示す。また、実際のサンプリング風景を Fig. 2 に示す。サンプラーの大きさは、直径 1.2 cm、長さ 5.5 cm であり、diffusion filter の吸収剤が接触する有効面積は 3.93 cm^2 、厚さは 1 mm である。反応試薬含浸シリカゲルを diffusion filter より glass tube へ移動させてから溶出操作を行う。溶出液をガスクロマトグラフィー質量分析計で揮発性有機化合物（Volatile Organic Compounds, VOCs）、カルボニル化合物を高速液体クロマトグラフィー、イオン成分をイオンクロマトグラフィーで分析を行う。各種の反応試薬を含浸させたシリカゲルや炭素系吸着剤を使用することにより、VOC、カルボニル化合物、オゾン、酸性ガス、塩基性ガスを選択的に捕集することが可能である。

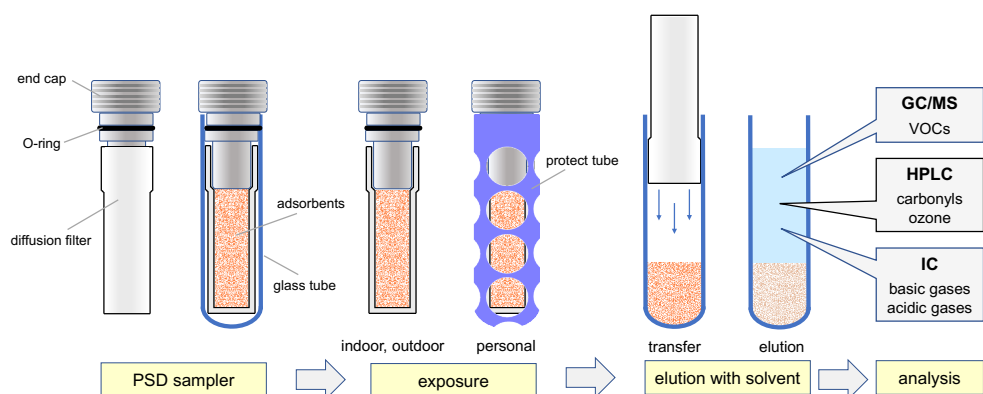


Fig. 1. Measuring gaseous chemical compounds using the PSD sampling device. The collection and the elution steps are conducted by transferring the adsorbent from the PSD-diffusion filter to glass tube.

捕集方法: 捕集場所に、太さ 1 mm の糸の一端を固定する。PSD-sampler の入ったアルミ製保存袋からサンプラーを取り出し、拡散フィルター部が床から約 1.5 m になるように糸の先端に取り付ける。捕集開始時にサンプラーを覆っている glass tube を取り外す。(Fig. 2) 捕集終了時に glass tube を取り付け、アルミ製保存袋に入れる。

溶出方法: 捕集後の PSD-sampler をアルミ製保存袋から取り出す。glass tube を取り外した後 end cap を上方向に引き抜き、拡散フィルター内の充填剤を glass tube に移す。glass tube に所定の溶出液を一定量添加し攪拌する。一定時間放置した後、溶出液の分析を行う。

B.1.1 オゾン、カルボニル化合物測定用拡散サンプラー (PSD-BPE/DNPH) ²

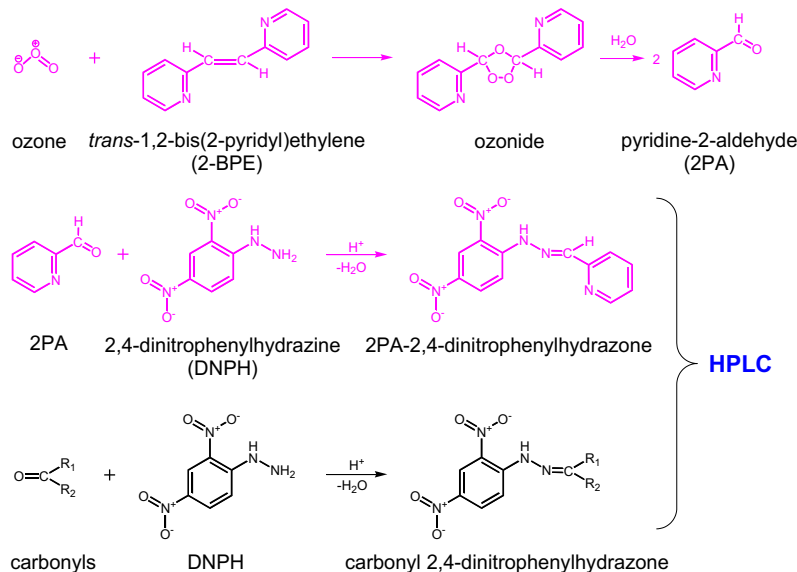
原理: Scheme 1 にオゾンとカルボニル化合物同時測定の概略を示す。空気中のカルボニル化合物は 2,4-ジニトロフェニルヒドラジン (DNPH) と反応してヒドラゾン誘導体を生成する。また、オゾンは *trans*-1,2-ビスピリジルエチレン (BPE) と反応してピリジン-2-アルデヒド (2PA) を生成する^{4,6)}。この 2PA を DNPH でヒドラゾン誘導体にして、他のアルデヒド誘導体と共に高速液体クロマトグラフ (HPLC) で分析することにより、オゾンとカルボニル化合物の同時測定が可能になる^{4,6)}。また、DNPH 及びアルデヒドのヒドラゾン誘導体はオゾンで破壊されることが報告⁷⁻⁹⁾されているが、DNPH と共存する BPE はオゾン



Fig. 2. Collection of gaseous chemical compounds in indoor air by using four kinds of PSD samplers.

スクラバーとしても機能し、破壊を防ぐことができる。

作製方法: シリカゲル 100 g を水、メタノール、アセトニトリルでよく洗浄した後、BPE (7 g)、



Scheme 1. The simultaneous determination of ozone and carbonyls.

DNPH 塩酸塩 (1 g), リン酸 (1.2 mL) を添加する. 窒素ガス気流中でロータリーエバポレーター (40°C) を用いて減圧乾固させてから密封容器に保存する. この BPE/DNPH 含浸シリカ 270 mg を空の拡散サンプラー (PSD) に充填し PSD-BPE/DNPH とした. PSD-BPE/DNPH はアルミ製保存袋に入れ密閉した.

分析方法: 捕集を終えたサンプラーの充填剤を 5 mL のバイアルに移す. ジメチルスルホキシド/アセトニトリル (25/75) 混合溶液 5 ml で溶出し, HPLC で分析する. この際, DNPH 誘導体の異性化⁴⁻⁶⁾を考慮し, これらの標準溶液にリン酸を 0.1% 添加して異性体比を一定にした後, 分析を行なった. オゾン及び 21 種のカルボニル化合物 (1, DNPH; 2, ホルムアルデヒド; 3, アセトアルデヒド; 4, アセトン; 5, アクロレイン; 6, プロパナール; 7, クロトンアルデヒド; 8, 2-ブタノン; 9, ブタナール; 10, ベンズアルデヒド; 11, *i*-ペンタナール; 12, *n*-ペンタナール; 13, *o*-トルアルデヒド; 14, *p*-トルアルデヒド; 15, ヘキサナール; 16, 2,5-ジメチルベンズアルデヒド; 17, ヘプタナール; 18, オクタナール; 19, 2-ノネナール; 20, ノナナール; 21, デカナール) を HPLC で定量可能である. Fig. 3 に標準溶液と典型的な室内空気, 屋外空気のクロマトグラムを示す.

B.1.2. PSD-TEA (酸性ガス測定用拡散サンプラー)

原理: 大気中の二酸化窒素, 二酸化硫黄, 塩化水素などの酸性ガスはトリエタノールアミン (TEA) と反応し, 対応する陰イオンを生成する. この各種陰イオンをイオンクロマトグラフィー (IC) で分析することにより, 酸性ガスを定性, 定量する⁷⁾.

作製方法: シリカゲル 100 g を純水, アセトニトリルでよく洗浄した後, トリエタノールアミンを 10 ml 添加する. 40°C でロータリーエバポ

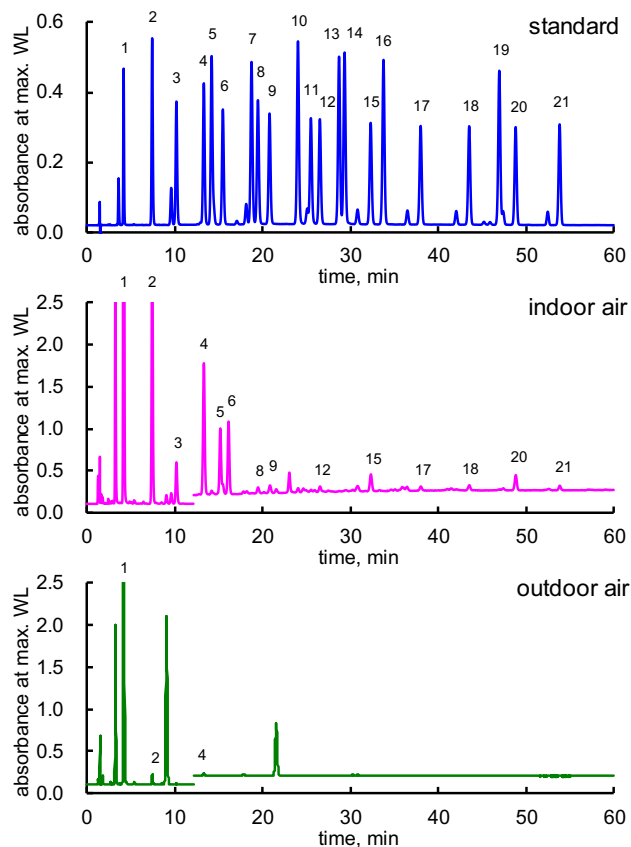
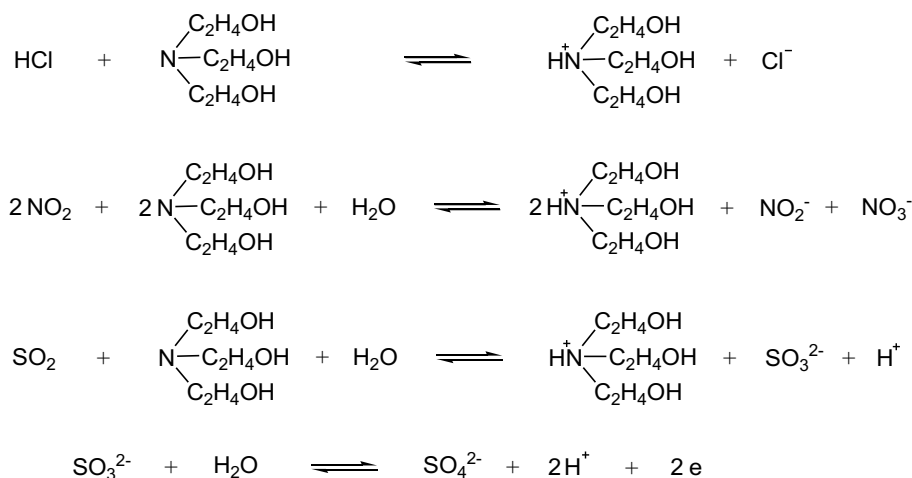


Fig. 3. HPLC chromatographic profiles of carbonyl compounds on standard and sample solutions.

レーターを用いて減圧乾固させてから, 密封容器に保存した. この TEA-silica 250 mg を空の拡散サンプラー (PSD) に充填し PSD-TEA とする. PSD-TEA はアルミ製保存袋に入れ密閉した.

分析方法: 捕集を終えたサンプラーの充填剤を 5 mL のバイアルに移す. 純水 5 ml で溶出した後, 溶出液中の陰イオンをイオンクロマトグラフィー (IC) で定量する. IC の分離カラムには Dionex IonPac AS11-HC を使い, KOH 2 mM→35 mM のグラ



Scheme 2. Reaction of acidic gases with triethanolamine.

ジェントモードで分析を行った。陰イオン標準溶液のクロマトグラムを Fig. 4 に示す。1, 酢酸イオン; 2, ギ酸イオン; 3, 塩化物イオン; 4, 亜硝酸イオン; 5, 臭化物イオン, 6, 硝酸イオン; 7, 硫酸イオンが分析可能である。

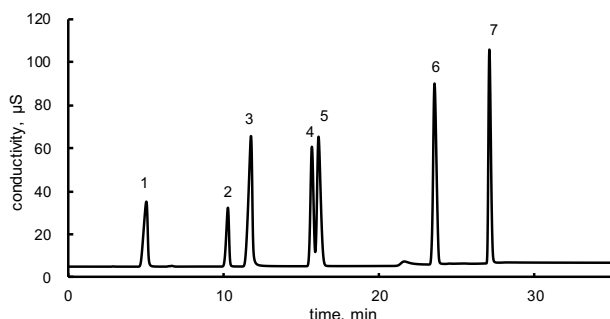
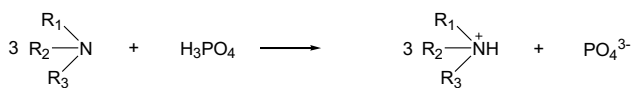


Fig. 4. Chromatographic profile of anion standard solution by ion chromatography.

B1.2.3 PSD-NH₃ (塩基性ガス測定用拡散サンプラー)

原理: 大気中のアンモニアやトリメチルアミンなどの塩基性ガスはリン酸と反応して、対応する陽イオンを生成する。この陽イオンを IC で分析することにより、アンモニアを定性、定量する³。IC の分離カラムには Dionex IonPac CS16 を用い、メタンスルホン酸 30mM のアイソクラティックモードで分析を行った。



Scheme 3. Reaction of amines with phosphoric acid.

作製方法: シリカゲル 100 g を純水, アセトニトリルでよく洗浄した後, リン酸を 5 ml 添加する。40°C でロータリーエバポレーターを用いて減圧乾固させてから, 密封容器に保存した。このリン酸-silica 250 mg を空の拡散サンプラー(PSD)に充填し PSD-PO₄ とする³。PSD-PO₄ はアルミ製保存袋に入れ密閉した。

分析方法: 捕集を終えたサンプラーの充填剤を 5 mL のバイアルに移す。純水 5 ml で溶出した後, 溶出液中の陽イオンを IC で定量する。IC の分離カラムには Dionex IonPac CS6 を用い, メタンスルホン酸 30mM のアイソクラティックモードで分析を行った。陽イオン標準溶液のクロマトグラムを Fig. 5 に示す。陽イオンとして, 1, リチウムイオン; 2, ナトリウムイオン; 3, アンモニウムイオン; 4, カリウムイオン; 5, マグネ

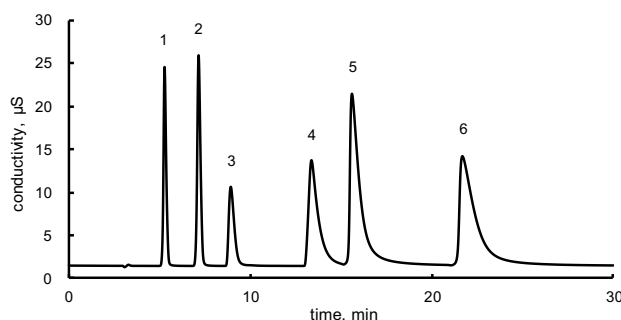


Fig. 5. Chromatographic profile of cation standard solution by ion chromatography.

シウムイオン; 6, カルシウムイオンが分析可能である。

B1.2.4 PSD-CX (VOC 測定用拡散サンプラー)

原理: 大気中の揮発性有機化合物 (Volatile Organic Carbons, VOCs) は炭素系吸着剤 Carbon molecular sieves Carboxen 572 に物理的に吸着する。吸着した VOCs を溶出し, ガスクロマトグラフィー質量分析計 (Gas chromatography / Mass spectrometry, GC/MS) で分析を行う。

分析方法: 捕集を終えた Carboxen 572 粒子を 2 mL バイアルに移し, 二硫化炭素を 1 mL 添加する。内部標準溶液 (0.5 µg/mL トルエン d8 溶液) を 20 µL 添加して攪拌した後, GC/MS で分析を行った。

分離カラムには, ジーエルサイエンス社製 InertCap AQUATIC-2, 60m, 0.25 mm i.d., d = 1.4 µm を使用した。イオン化電圧は 75 eV, イオン源温度は 200°C, トランスファー温度は 200°C, 注入量は 1 µL, スプリット比は 1:10 である。カラムの昇温プログラムを Table 1 に示す。

Table 1. Temperature program of GC/MS

time, min	Column temperature, °C
0	40
6	40
42	250
60	250

定量用のイオン (m/z) は, エタノール, 45; ヘキサン, 57; 2,4 ジメチルペンタン, 57; 2-ブタノン, 43; 酢酸エチル, 43; トリクロロメタン, 83; 2,2,4-トリメチルペンタン, 57; 1,1,1-トリクロロエタン, 97; ヘプタン, 43; カーボンテトラクロライド, 117; 1-ブタノール, 56; ベンゼン, 78; 1,2-ジクロロエタン, トリクロロエチレン, 130; 1,2-ジクロロプロパン, 63; メチルイソブチルケトン, 100; オクタン, 43; トルエン D8, 98; トルエン, 91; 酢酸ブチル, 43; テトラクロロエチレン, 166; ノナ

ン, 57; ジブロモクロロエチレン, 129; エチルベンゼン, 91; 62;*m,p*-キシレン, 91; *o*-キシレン, 91; スチレン, 104; α -ピネン, 93; デカン, 57; 1,3,5-トリメチルベンゼン, 105; 1,2,4-トリメチルベンゼン, 105; 2-エチル-1-ヘキサノール, 83; *d*-リモネン, 93; ウンデカン, 57; 1,2,3-トリメチルベンゼン, 105; *p*-ジクロロベンゼン, 146; ノナナール, 98; ドデカン, 57; 1,2,4,5-テトラメチルベンゼン, 119; デカナール, 112; トリデカン, 57; テトラデカン, 57; ペンタデカン, 57; ヘキサデカン, 57; テキサノール 89 である。

本研究における分析条件での標準試料のクロマトグラムを Fig. 6 に示す。本分析条件で, 44 成分(エタノール, ヘキサン, 2,4 ジメチルペンタン, 2-ブタノン, 酢酸エチル, トリクロロメタン, 2,2,4-トリメチルペンタン, 1,1,1-トリクロロエタン, ヘプタン, カーボンテトラクロライド, 1-ブタノール, ベンゼン, 1,2-ジクロロエタン, トリクロロエチレン, 1,2-ジクロロプロパン, メチルイソブチルケトン, オクタン, トルエン *d*8, トルエン, 酢酸ブチル, テトラクロロエチレン, ノナン, ジブロモクロロエチレン, エチルベンゼン, *m,p*-キシレン, *o*-キシレン, スチレン, α -ピネン, デカン, 1,3,5-トリメチルベンゼン, 1,2,4-トリメチルベンゼン, 2-エチル-1-ヘキサノール, ウンデカン, 1,2,3-トリメチルベンゼン, *p*-ジクロロベンゼン, ノナナール, ドデカン, 1,2,4,5-テトラメチルベンゼン, デカナール, トリデカン, テトラデカン, ペンタデカン, ヘキサデカン, テキサノール) を分析することが可能である。

C 結果と考察

C1 拡散サンプラーの捕集速度(サンプリングレート)

拡散サンプラーの捕集原理

PSD (Passive Sampling Device) サンプラーは分子拡散の原理に基づき化学物質を捕集する器具であるが, 捕集した物質の大気濃度を求めるためには物質ごとに捕集速度(サンプリングレート)を求めておく必要がある。

微量成分が細孔を通り, 気体成分が *x* 方向に拡散する場合のフラックスは Fick の第一則により次式で表わされる。

$$N = -D \frac{dC}{dl} \quad [1]$$

ここで, *N* は気体のフラックス(mol/cm²/s), *D* は気体の拡散係数(cm²/s), *dc/dl* はサンプラーの気

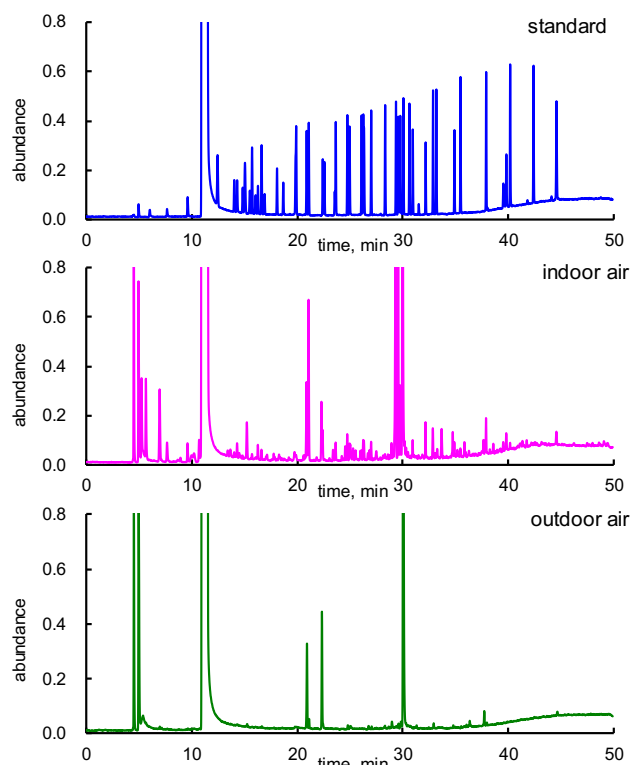


Fig. 6. GC/MS chromatographic profile of VOC mixture standard and sample solutions

体浸透媒体内部における濃度勾配である。捕集剤の吸着・吸収力が十分に強ければ, 気液境膜における気体濃度は 0 になる。したがって, 濃度勾配(*dc/dl*)は(*C/L*)で置き換えることができる。ここで, *C* (ppb)は大気中濃度, *L* (cm)は気体の濃度勾配が成立する気体浸透媒体の厚さである。

[1]式は[2]式で置き換えることができる。

$$N = D \frac{(C - C_0)}{L} \quad [2]$$

PSD サンプラーの捕集速度, *W/t* (mol/s)は *N* に拡散面積 *A* (cm²) を乗じることで求めることができる。

$$\frac{W}{t} = NA = D \frac{A}{L} (C - C_0) \quad [3]$$

ここで, *W* は吸着・吸収した化学物質の量(mol), *t* は捕集期間(h)である。従って, 目的成分の大気濃度(ppb)は次式で計算することができる。

$$C = \left(\frac{L}{DA} \right) \frac{W}{t} = r \frac{W}{t} \quad [4]$$

ここで, *C* は目的成分の空气中濃度(ppb), *r* は比例定数(ppb sec/mol)であり, *r* の逆数 1/*r* がアップテイクレートである。アップテイクレート, *R* を

あらかじめ求めておけば、Wを測定することにより大気中濃度Cを計算することができる。

[6]式からサンプリングレートは分子拡散係数Dに比例する。したがって特定の化学物質の拡散サンプラーのサンプリングレートを実験で求めておけば、各物質の拡散係数からサンプリングレートを計算することができる。拡散係数が未知の場合は次式により算出できる⁸。

$$D_{AB} = \frac{1.00 \times 10^{-3} T^{1.75} (1/M_A + 1/M_B)^{1/2}}{P \left[(\Sigma_V)_A^{1/3} + (\Sigma_V)_B^{1/3} \right]^2} \quad [5]$$

ここで、 D_{AB} (cm²/s)は気体の拡散係数、 P (atm)は大気圧、 T (K)は絶対温度、 M_A と M_B は成分 A と B の分子量である。 Σ_V は原子あるいは分子の diffusion volume であり、それぞれの atomic diffusion volume から算出できる。

拡散サンプラーは温度や圧力により、捕集速度が変化するが、この影響は[5]式から推定することができる。すなわち、[5]式から

$$D_{AB} \propto T^{1.75} \quad [6]$$

$$D_{AB} \propto \frac{1}{P} \quad [7]$$

の関係が得られ、温度・圧力の補正が可能である。

この他、グレアムの法則から各種化学物質の sampling rate を算出することもできる⁹⁾。グレアムの法則により、定温定圧の条件のもとで気体が薄い細孔を通して圧力の低い側へ流出する速度は、その密度Z(したがって分子量M)の平方根に反比例する。

$$D_{gr} \propto \frac{1}{\sqrt{Z}} \propto \frac{1}{\sqrt{M}} \quad [8]$$

したがって、ホルムアルデヒドの拡散係数を M_f とした場合、目的物質の拡散係数 D_{gr} は次の式から算出できる。

$$D_{gr} = D_f \sqrt{\frac{M_f}{M_d}} \quad [9]$$

そして sampling rate (R)は次式から算出できる。

$$R = \frac{D_d}{D_f} R_f \quad [10]$$

tは捕集期間(h)である。従って、目的成分の大気濃度(ppb)は次式で計算することができる。

実験で求めたホルムアルデヒドのサンプリングレート (Fig. 7, 71.9 mL/min) を基に、グレアムの法則により求めた各カルボニル化合物のサンプリングレートを Table 2 示す。また、このサンプリングレートを用いて算出した大気濃度も Table 2 に示す。アクティブサンプリングで算出した大気濃度とほぼ一致している。カルボニル化合物以外の化学物質のサンプリングレートにもグレアムの法則の適用は可能である。

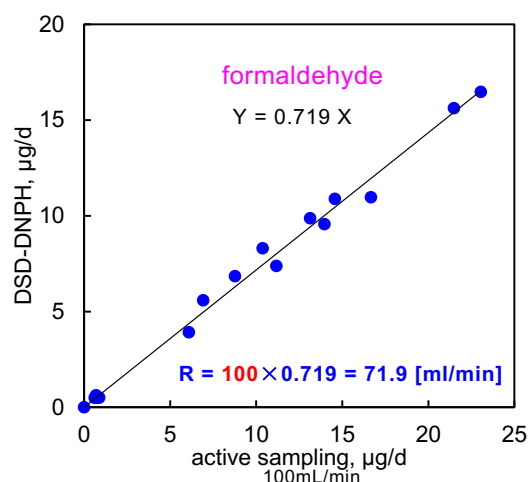


Fig. 7. Relationship between DSD-DNPH method and active sampling method in case formaldehyde.

Table 2. Concentrations of carbonyl compounds measured by PSD-DNPH and active sampling. Active sampling was performed at 100 mL/min and sampling duration is 24 h.

compounds	PSD-DNPH		active sapling	
	R (mL/min)	conc. (µg/m ³)	R (mL/min)	conc. (µg/m ³)
formaldehyde	71.9	27	100	27
acetaldehyde	59.4	24	100	25
acetone	51.7	31	100	32
formaldehyde	71.9	27	100	27
acetaldehyde	59.4	24	100	25
acetone	51.7	31	100	32
acrolein	52.6	0.2	100	0.3
propanal	51.7	1.9	100	1.9
crotonaldehyde	47.1	0.3	100	0.2
2-butanone	46.4	13	100	14
butyraldehyde	46.4	2.0	100	2.0
cyclohexanone	39.8	2.4	100	1.9
benzaldehyde	38.2	2.7	100	2.3
isopentanal	42.5	0.6	100	0.4
pentanal	42.5	2.1	100	1.8
o-tolualdehyde	35.9	3.2	100	2.7
m,p-tolualdehyde	35.9	1.7	100	0.9
hexanal	39.4	7.0	100	7.7
2,5-DMBA	34.0	1.3	100	0.7
heptanal	36.9	1.1	100	1.5
octanal	34.8	1.1	100	1.6
nonanal	33.0	4.8	100	4.8
decanal	31.5	1.0	100	1.2

C2. 特定建築物内化学物質濃度の測定結果

特定建築物内の化学物質濃度を前述した4種類の拡散サンプラーを用いて分析した。調査は夏期と冬期に分けて行い、冬期の調査は、2020年12月14日～2021年4月6日(W1, 56施設)および2022年1月20日～2022年2月14日(W2, 75施設)、夏期の調査は2021年8月20日～2021年9月30日(S, 111施設)の計242施設で実施した。なお、捕集時間は就業時間を基本とし8時間程度である。

それぞれの期間におけるカルボニル化合物濃度、VOC、無機成分の平均値、パーセンタイル値(50%ile, 95%ile, 100%ile)をTable 3に示す。

C.2.1 特異に高濃度を示した物質

ホルムアルデヒド

全体的に夏期の方が冬期より濃度が高い傾向であるが、冬期(W1)の一施設でホルムアルデヒドが160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に高い値を示した。この施設ではアセトアルデヒド(100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、アセトン(140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、トルエン(61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、d-リモネン(37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、などが他の施設に比べ特異に高濃度であった。

アセトアルデヒド

冬期(W1)の一施設でアセトアルデヒドが200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に高い値を示した。他のVOC、カルボニル化合物濃度も他の施設に比べやや高い傾向にある。

ベンゼン

冬期(W1)の一施設でベンゼンが24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と非常に高い値を示した。令和2年度の環境大気濃度(0.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)⁹の30倍、環境基準値の約3倍の値である。施設内に発生源があり注意が必要である。

エタノール

エタノール濃度の平均値は、夏期(S)1100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、冬期(W2)9200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、全物質を通して最も高い値を示した。

国立医薬品食品衛生研究所(国衛研, NIHS)が2001年、2002年、2003年に実施した一般住宅における冬期を中心とした全国調査¹⁰によると、エタノール濃度平均値はそれぞれ1600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、890 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、490 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。また最大濃度も、それぞれ15000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、19000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、4900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ を示し、最も濃度が高い物質である。今回調査した特定建築物においても一般住宅同様最も濃度が高い物質である。木材とエタノールが接触することでアセトアルデヒドが生成することが報告¹¹されているので注意が必要である。

2,2,4,6,6-ペンタメチルヘプタン(パーメチル99)

当初、夏期(S)の一施設でデカンが20000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ と定量された。しかし、GC/MSのスペクトルを

精査すると、デカンではなく2,2,4,6,6-ペンタメチルヘプタン(イソドデカン)であることが明らかになった。標準溶液にこの物質が含まれていなかったため正確な定量はできないが、ドデカンの異性体であり同じ分子式、分子量であることを考慮すると20000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に近い濃度であることが示唆される。イソドデカンをTVOCに含めると20000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上になり、ガイドライン値を大幅に超過することになる。

C.2.2 室内濃度指針値、環境基準値

厚生労働省が室内濃度指針値を策定している物質として、ホルムアルデヒド(FA)、アセトアルデヒド(AA)、トルエン(TL)、キシレン(XY)、エチルベンゼン(EB)、スチレン(ST)、パラジクロロベンゼン(PDB)、テトラデカン(TD)、総揮発性有機化合物(TVOC)、環境省が環境基準値を策定している物質として、ベンゼン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、オキシダント(オゾン)、二酸化窒素、環境省が悪臭防止法に基づき規制基準を策定している物質として、アンモニア(NH₃)の濃度を夏期、冬期それぞれTable 4～6に示す。それぞれの物質の指針値、基準値は以下の通りである。

ホルムアルデヒド	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
アセトアルデヒド	48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
トルエン	260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
キシレン	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
エチルベンゼン	3800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
スチレン	220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
パラジクロロベンゼン	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
テトラデカン	330 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
総揮発性有機化合物 TVOC	400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
2-エチル-1-ヘキサノール	(案) 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
テキサノール	(案) 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
ベンゼン	3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
トリクロロエチレン	130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
テトラクロロエチレン	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
オキシダント(オゾン)	(60 ppb) 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
二酸化窒素	(40 ppb) 77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
アンモニア(NH ₃)	(1000 ppb) 709 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

これらの物質の中で厚生労働省の室内濃度指針値を超過した物質は全242施設中、ホルムアルデヒドが1施設(160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、アセトアルデヒドが8施設(48, 48, 53, 55, 62, 81, 100, 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、トルエンが1施設(400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、TVOCが4施設(440, 640, 680, 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)であり、アセトアルデヒドの超過率が高いことが分かった。

C.2.3 一般住宅との比較

NIHSは2001年～2003年に一般住宅における冬期を中心とした全国調査^{7,10}を行っている。また、国立保健医療科学院(NIPH)では2012年～2014年の夏期と冬期に日本全国602戸の一般住宅で化学物質濃度の調査を行っている¹²。今回行った特定建築物とこれら全国調査との比較をTable 7に示す。全体的に、一般住宅より特定建築物の方が化学物質濃度が低いことが分かった。

オゾンは外気濃度が圧倒的に高く、屋内に流入したオゾンは急激に分解するため、屋内のオゾン濃度は換気の指標になる。特定建築物のオゾン濃度（夏期 $14\mu\text{g}/\text{m}^3$ 冬期 $8.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）が一般住宅（夏期 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 冬期 $1.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）より高いことは、換気が多く行われていたことを表している。そのため化学物質濃度が低くなったことが推測される。

D. 結論

本研究では特定建築物 242 施設内のガス状化学物質濃度を夏期と冬期に分けて測定し、汚染物質の実態を明らかにした。

化学物質の捕集には 4 種類の拡散サンプラー（オゾン、カルボニル化合物測定用 PSD-BPE/DNPH, VOC 測定用 PSD-CX, 酸性ガス測定用 PSD-TEA, 塩基性ガス測定用 PSD-PO4）を使用した。これらの拡散サンプラーは電源を必要とせず騒音を発生しないので就業時間におけるオフィス環境の測定に適していた。

今回測定した物質の中で厚生労働省の室内濃度指針値を超過した物質は全 242 施設中、ホルムアルデヒドが 1 施設 ($160\mu\text{g}/\text{m}^3$)、アセトアルデヒドが 8 施設 (48, 48, 53, 55, 62, 81, 100, $200\mu\text{g}/\text{m}^3$)、トルエンが 1 施設 ($400\mu\text{g}/\text{m}^3$)、TVOC が 4 施設 (440, 640, 680, $800\mu\text{g}/\text{m}^3$) であり、アセトアルデヒドの超過率が高いことが分かった。

今回測定した全部質の中で最も高濃度を示したのはエタノールで最大値は夏期 $1100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、冬期 $9200\mu\text{g}/\text{m}^3$ である。エタノールの毒性は比較的低いと木材とエタノールが接触することで発ガン性のアセトアルデヒドが生成することが報告されているので注意が必要である。最近、新型コロナウイルス感染症対策としてエタノール系の消毒剤を使用する機会が多いので、アセトアルデヒドの生成メカニズムを詳細に検討する必要がある。

E. 参考文献

1. Uchiyama, S.; Aoyagi, S.; Ando, M., Evaluation of a diffusive sampler for measurement of carbonyl compounds in air. *Atmospheric Environment* **2004**, *38*, (37), 6319-6326.
2. Uchiyama, S.; Inaba, Y.; Kunugita, N., A diffusive sampling device for simultaneous determination of ozone and carbonyls. *Analytica Chimica Acta* **2011**, *691*, (1-2), 119-124.
3. Yamada, T.; Uchiyama, S.; Inaba, Y.; Kunugita, N.; Nakagome, H.; Seto, H., A diffusive sampling device for measurement of ammonia in air. *Atmospheric Environment* **2012**, *54*, (0), 629-633.
4. Uchiyama, S.; Ando, M.; Aoyagi, S., Isomerization of aldehyde-2,4-dinitrophenylhydrazone derivatives and validation of high-performance liquid chromatographic analysis. *J. Chromatogr. A* **2003**, *996*, (1-2), 95-102.
5. Uchiyama, S.; Matsushima, E.; Aoyagi, S.; Ando, M., Measurement of acid-catalyzed isomerization of unsaturated aldehyde-2,4-dinitrophenylhydrazone derivatives by high-performance liquid chromatography analysis. *Anal. Chim. Acta* **2004**, *523*, (2), 157-163.
6. Behforouz, M.; Bolan, J. L.; Flynt, M. S., 2,4-Dinitrophenylhydrazones - a Modified Method for the Preparation of These Derivatives and an Explanation of Previous Conflicting Results. *Journal of Organic Chemistry* **1985**, *50*, (8), 1186-1189.
7. Uchiyama, S.; Tomizawa, T.; Tokoro, A.; Aoki, M.; Hishiki, M.; Yamada, T.; Tanaka, R.; Sakamoto, H.; Yoshida, T.; Bekki, K.; Inaba, Y.; Nakagome, H.; Kunugita, N., Gaseous chemical compounds in indoor and outdoor air of 602 houses throughout Japan in winter and summer. *Environmental Research* **2015**, *137*, (0), 364-372.
8. Fuller, E. N.; Ensley, K.; Giddings, J. C., Diffusion of halogenated hydrocarbons in helium. The effect of structure on collision cross sections. *The Journal of Physical Chemistry* **1969**, *73*, (11), 3679-3685.
9. 環境省, 令和 2 年度 有害大気汚染物質モニタリング調査結果報告書.
10. 安藤正典, 化学物質過敏症等室内空气中化学物質に係わる疾病と総化学物質の存在量の検討と要因解明に関する研究 厚生労働科学研究費補助金 健康安全総合研究経費 がん予防等健康科学総合研究, 研究報告書 200301361A, 2003.
11. Tohmura, S.-i.; Ishikawa, A.; Miyamoto, K.; Inoue, A., Acetaldehyde emission from wood induced by the addition of ethanol. *Journal of Wood Science* **2012**, *58*, (1), 57-63.

12. 樺田尚樹, シックハウス症候群の発生予防・症状軽減のための室内環境の実態調査と改善対策に関する研究 厚生労働科学研究費補助金 健康安全確保総合研究 健康安全・危機管理対策総合研究, 究報告書 H23-健危-一般-010, 2013.

F. 研究発表

1. 論文発表

Win-Yu Aung, Hironari Sakamoto, Ayana Sato, Ei-Ei-Pan-Nu Yi, Zaw-Lin Thein, Myint-San Nwe, Nanda Shein, Htin Linn, Shigehisa Uchiyama, Naoki Kunugita, Tin-Tin Win-Shwe, and Ohn Mar: Indoor Formaldehyde Concentration, Personal Formaldehyde Exposure and Clinical Symptoms during Anatomy Dissection Sessions, University of Medicine 1, Yangon, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18 (2), 712-728.

Hironari Sakamoto, Shigehisa Uchiyama, Tomohiko Isobe, Naoki Kunugita, Hironao Ogura, Shoji F. Nakayama: Spatial Variations of Indoor Air Chemicals in an Apartment Unit and Personal Exposure of Residents, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18 (21), 11511-11521.

Hironari Sakamoto, Shigehisa Uchiyama, Moka Shimidzu, Hironao Ogura: Simple Ozone Scrubber Using a Glass Fiber Filter Impregnated with Hydroquinone for the Quantitative Analysis of Ambient Air Samples, *Analytical Sciences*, 2021, 37, 1713-1718.

2. 学会発表

Hironari Sakamoto, Shigehisa Uchiyama, Tomohiko Isobe, Naoki Kunugita, Hironao Ogura, Shoji F. Nakayama: Influence of chemical compounds in

indoor air on personal exposures, *Healthy Buildings America* 2021, January 2022.

坂元宏成; 内山茂久 Determination of Carbonyl Compounds in Air Using Hydroquinone Coated Frits for Ozone Removal 日本化学会第 100 春季年会, 2020 年 3 月

坂元宏成; 内山茂久 ヒドロキシベンゼンをコーティングしたポリエチレン焼結フィルターによるオゾン除去 第 61 回大気環境学会年会, 2020 年 9 月

坂元宏成; 佐藤綾菜; 内山茂久; Win-Yu AUNG; Tin-Tin WIN-SHWE; 稲葉洋平; 樺田尚樹; 牛山明 解剖学教室におけるホルムアルデヒド個人曝露量の測定 第 79 回日本公衆衛生学会総会, 2020 年 10 月

小山真緒; 内山茂久; 野口真由美; 坂元宏成; 稲葉洋平; 牛山明 室内環境に存在する化学物質の挙動と居住者の曝露評価 2020 年室内環境学会学術大会, 2020 年 12 月, 福島

坂元宏成; 内山茂久; 佐藤綾菜; 稲葉洋平; 牛山明 有害化学物質の個人曝露濃度を与える室内濃度の影響 2020 年室内環境学会学術大会, 2020 年 12 月, 福島

坂元宏成; 内山茂久; 磯部 友彦; 樺田尚樹; 小倉 裕直; 中山 祥嗣 室内空間各所における化学物質濃度と個人曝露に与える影響 第 79 回日本公衆衛生学会総会, 2021 年 6 月

G. 知的財産権の出願・登録状況 (予定含む)

予定なし

Table 3. Concentrations of chemical compounds in the office buildings. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

compounds	Winter (W1, n = 56) Dec. 2020 to Apr. 2021				Summer (S, n = 111) Aug. 2021 to Sep. 2021				Winter (W2, n = 75) Jan. 2022 to Feb. 2022			
	mean	50%ile	95%ile	100%ile	mean	50%ile	95%ile	100%ile	mean	50%ile	90%ile	100%ile
formaldehyde	11	6.7	20	160	13	12	25	60	6.9	6.3	12	21
acetaldehyde	15	5.6	60	200	11	8.0	30	62	8.0	6.6	22	27
propanal	6.1	4.5	16	46	2.1	n.d.	7.4	23	0.7	n.d.	4.0	12
valeraldehyde	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3.9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
i-valeraldehyde	0.1	n.d.	n.d.	4.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
hexanal	0.4	n.d.	n.d.	21	0.3	n.d.	n.d.	15	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
heptanal	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
octanal	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
nonanal	0.7	n.d.	n.d.	23	0.7	n.d.	n.d.	38	0.2	n.d.	n.d.	15
decanal	0.3	n.d.	n.d.	15	0.2	n.d.	n.d.	19	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
acrolein	0.2	n.d.	n.d.	9.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
crotonaldehyde	0.6	n.d.	n.d.	6	0.2	n.d.	n.d.	6.2	n.d.	n.d.	n.d.	1.8
2-nonenal	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
benzaldehyde	0.2	n.d.	n.d.	5.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
o-tolualdehyde	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
p-tolualdehyde	0.2	n.d.	n.d.	8.6	n.d.	n.d.	n.d.	4.1	n.d.	n.d.	n.d.	2.2
2,5-DMBA	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
acetone	16	8.0	85	140	12	9.7	23	66	13	11	23	60
2-butanone	2.3	n.d.	15	34	n.d.	n.d.	n.d.	2.6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MIBK	0.1	n.d.	0.4	3.2	0.2	n.d.	0.6	1.6	n.d.	n.d.	n.d.	1.2
total carbonyls	53	27	170	480	40	33	66	240	29	26	53	85
hexane	15	7.1	27	270	5.2	2.7	11	200	5.0	4.2	12	29
cyclohexane	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.3	n.d.	4.5	66	2.6	0.7	5.3	61
heptane	0.8	0.3	2.5	3.8	0.5	n.d.	2.9	12	1.9	0.4	2.3	99
octane	0.5	0.3	1.5	7.2	1.0	n.d.	3.5	8.8	0.8	0.6	2.2	6.2
nonane	1.9	0.6	3.8	35	0.6	n.d.	2.0	39	1.0	0.5	2.7	29
decane	17	1.9	13	740	15	14	29	35	13	9.6	28	84
undecane	2.3	1.5	4.3	23	1.2	0.6	3.7	32	1.4	0.7	6.4	20
dodecane	9.1	9.2	19	25	5.4	3.5	16	78	7.7	6.3	14	57
tridecane	7.6	6.7	15	42	4.5	1.8	7.1	140	2.6	2.3	5.2	12
tetradecane	9.5	9.1	20	32	9.4	6.5	20	110	11	10	20	28
pentadecane	3.1	1.5	15	21	0.1	n.d.	0.6	3.6	0.3	0.3	0.7	1.8
hexadecane	3.9	3.1	9.1	15	0.4	n.d.	2.0	4.5	1.0	1.0	1.8	3.5
benzene	1.6	0.9	3.0	24	1.6	1.2	3.0	5.0	0.9	0.8	1.8	3.1
toluene	16	5.0	40	400	8.7	5.9	19	130	5.5	4.5	12	21
ethylbenzene	4.8	1.3	15	70	1.9	1.6	5.6	11	1.2	0.9	3.4	4.8
o-xylene	1.5	0.6	6.5	9.6	0.6	0.4	2.3	5.5	0.6	0.4	1.2	5.4
m,p-xylene	4.4	2.0	18	35	1.9	1.5	5.3	12	1.4	1.0	3.2	10
1,3,5-TMB	0.3	0.1	1.4	3.0	0.3	n.d.	1.6	3.8	0.3	0.2	0.8	2.4
1,2,4-TMB	1.3	0.7	4.6	9.9	1.2	0.6	4.4	15	1.2	0.8	3.6	9.9
1,2,3-TMB	0.3	n.d.	1.2	3.1	0.2	n.d.	0.8	8.9	0.3	0.2	0.8	2.5
1,2,4,5-TMB	0.2	n.d.	0.9	1.6	0.1	n.d.	n.d.	15	0.1	n.d.	0.3	1.4
styrene	0.1	n.d.	0.1	2.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.1	1.1
p-DCB	2.7	0.4	5.2	100	0.9	0.6	2.2	14	0.9	0.5	3.7	4.8
trichloromethane	0.7	0.3	2.5	13	0.7	n.d.	1.5	41	0.4	0.4	0.7	0.9
tetrachloromethane	0.2	n.d.	0.6	2.5	n.d.	n.d.	n.d.	2.2	0.2	n.d.	0.8	1.1
dibromochloromethane	n.d.	n.d.	n.d.	1.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
1,2-dichloroethane	0.1	n.d.	0.5	2	n.d.	n.d.	n.d.	1.8	n.d.	n.d.	n.d.	2.3
1,1,1-TCE	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
trichloroethylene	0.3	n.d.	1.3	1.8	0.2	n.d.	1.7	2.9	0.8	n.d.	1.0	4.4
tetrachloroethylene	0.1	n.d.	0.2	1.5	n.d.	n.d.	n.d.	3.3	0.1	n.d.	0.5	0.8
ethanol	—	—	—	—	1100	540	3200	18000	3000	2600	7000	9200
2-ethyl-1-hexanol	3.3	1.8	11	16	4.3	1.9	20	33	0.6	n.d.	3.2	4.7
texanol	2	1.6	5.3	15	3.0	2.9	7.2	14	2.5	1.9	4.1	22
ethylacetate	5.1	3.5	14	32	5.1	3.5	13	46	3.9	2.6	9.2	27
butylacetate	1.6	0.5	5.2	25	0.6	n.d.	2.7	12	1.7	1.4	3.1	5.9
2,2,4-TMP	0.1	n.d.	0.3	2.3	n.d.	n.d.	n.d.	3.1	n.d.	n.d.	0.1	1.3
α -pinene	0.4	n.d.	1.5	6.2	n.d.	n.d.	n.d.	1.5	0.2	0.2	0.6	1.0
d-limonene	4.4	1.8	18	57	1.7	n.d.	3.4	94	8.6	2.2	14	390
TVOC	130	83	380	800	160	130	370	730	140	120	260	680
ozone	6.2	4.1	16	33	14	11	24	48	8.2	7.8	12	20
formic acid	—	—	—	—	20	20	30	49	13	12	22	27
acetic acid	—	—	—	—	89	89	140	250	39	32	79	93
hydrogen chloride	—	—	—	—	8.7	5.5	14	90	18	16	30	59
nitrogen dioxide	—	—	—	—	15	14	25	64	15	12	26	110
total acidic gases	—	—	—	—	130	130	240	450	85	72	180	290
ammonia	—	—	—	—	12	12	17	24	3.6	3.2	6.1	7.8

Table 4. Concentrations of chemical compounds for which guideline or standard values are specified. (W1, µg/m³)

name	FA	AA	TD	TL	EB	XY	ST	pDCB	EH	TX	TVOC	BZ	TrCE	TeCE	O ₃	NO ₂	NH ₃
W1-1	15	48	16	8.9	2.3	5.7	n.d.	0.3	16	2.2	140	2.3	n.d.	n.d.	0.9	—	—
W1-2	18	53	16	8.7	2.3	5.5	n.d.	0.3	15	1.6	130	1.8	n.d.	n.d.	0.9	—	—
W1-3	8.2	9.8	7.2	6.8	1.4	4.4	n.d.	0.8	4.2	2.4	130	0.7	n.d.	n.d.	0.5	—	—
W1-4	6.7	4.6	11	4.0	1.0	2.7	n.d.	n.d.	1.1	2.9	70	0.7	n.d.	n.d.	1.3	—	—
W1-5	9.0	8.3	7.7	4.6	1.0	2.7	n.d.	100	4.5	2.1	180	1.0	0.8	1.5	2.0	—	—
W1-6	5.9	5.3	9.1	3.0	0.8	2.1	n.d.	n.d.	0.8	1.1	78	0.7	n.d.	n.d.	1.5	—	—
W1-7	6.5	4.1	9.0	5.3	1.2	2.3	n.d.	0.3	1.6	1.8	78	0.8	n.d.	n.d.	0.6	—	—
W1-8	11	6.3	21	1.8	0.5	1.9	n.d.	n.d.	n.d.	1.4	92	1.1	n.d.	n.d.	4.9	—	—
W1-9	21	10	6.9	3.7	3.9	6.2	n.d.	2.8	0.9	1.4	81	0.9	n.d.	n.d.	2.7	—	—
W1-10	7.7	5.6	17	2.4	0.9	1.7	n.d.	n.d.	2.2	1.5	84	0.6	n.d.	n.d.	3.2	—	—
W1-11	7.2	2.8	5.5	5.5	1.2	3.1	n.d.	0.3	n.d.	2.3	120	0.4	n.d.	n.d.	0.9	—	—
W1-12	1.7		5.8	0.4	0.8	1.2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	39	n.d.	n.d.	n.d.	0.2	—	—
W1-13	160	100	17	61	6.0	15	n.d.	5.1	2.8	5.8	270	10	n.d.	1.4	7.2	—	—
W1-14	12	23	14	18	3.3	7.3	n.d.	0.5	3.4	2.0	130	2.0	1.6	n.d.	0.1	—	—
W1-15	20	31		7.0	2.1	3.1	n.d.	0.4	0.9	n.d.	32	1.9	n.d.	n.d.	2.8	—	—
W1-16	13	11	1.3	9.7	4.2	16	n.d.	6.1	4.2	n.d.	440	1.2	n.d.	n.d.	8.3	—	—
W1-17	42	200	32	33	6.1	22	2.0	2.1	7.4	4.0	360	24	n.d.	n.d.	3.1	—	—
W1-18	13	81	14	5.9	1.3	4.1	n.d.	n.d.	1.6	1.8	70	2.6	n.d.	n.d.	3.4	—	—
W1-19	11	5.5	4.9	2.9	0.5	1.5	n.d.	n.d.	n.d.	2.6	54	0.9	n.d.	n.d.	1.8	—	—
W1-20	3.7	4.6	13	3.2	0.8	1.3	n.d.	0.2	1.3	1.3	57	1.1	n.d.	n.d.	9.6	—	—
W1-21	4.1	5.5	16	7.5	0.6	1.8	n.d.	0.2	2.3	1.2	100	1.1	n.d.	n.d.	5.2	—	—
W1-22	4.9	7.1	3.6	5.1	1.2	1.3	n.d.	0.7	1.6	2.2	79	1.0	0.1	n.d.	3.2	—	—
W1-23	8.2	7.1	21	6.9	1.5	2.2	n.d.	1.2	1.7	0.9	150	0.9	1	n.d.	3.4	—	—
W1-24	5.1	5.7	13	17	2.2	7.4	n.d.	0.5	0.6	2.5	120	4.1	n.d.	n.d.	8.1	—	—
W1-25	10	7.0	16	4.6	1.1	1.8	n.d.	0.8	2.2	1.3	95	0.5	n.d.	n.d.	11	—	—
W1-26	12	17	13	5.8	2.7	3.4	n.d.	0.9	n.d.	1.6	110	1.6	0.4	0.7	4.8	—	—
W1-27	14	8.1	15	20	34	29	0.1	1.7	2.6	4.9	180	0.8	n.d.	n.d.	2.9	—	—
W1-28	7.4	6.1	14	6.8	1.2	2.2	n.d.	0.5	1.5	1.4	94	1.0	0.4	n.d.	4.6	—	—
W1-29	7.9	5.3	19	11	1.9	2.9	n.d.	0.2	2.0	2.7	140	1.0	n.d.	n.d.	4.0	—	—
W1-30	1.4	1.8	1.4	2.5	0.9	1.2	n.d.	0.2	1.2	n.d.	24	1.3	n.d.	n.d.	4.6	—	—
W1-31	1.7	3.3	13	6.7	2.2	3.0	n.d.	0.6	7.9	0.5	97	0.6	n.d.	n.d.	0.9	—	—
W1-32	2.3	3.6	0.9	7.5	1.7	1.7	n.d.	n.d.	1.7	n.d.	34	1.1	1.0	n.d.	1.5	—	—
W1-33	2.3	3.7	15	400	70	45	0.5	n.d.	1.6	3.6	640	1.8	1.8	n.d.	1.6	—	—
W1-34	3.2	6.4	14	100	61	38	0.2	0.3	1.3	n.d.	320	1.5	1.8	n.d.	3.7	—	—
W1-35	2.3	2.8	0.7	1.5	0.6	0.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	11	0.4	n.d.	n.d.	4.5	—	—
W1-36	2.1	1.8	2.6	1.9	0.7	0.9	n.d.	n.d.	7.6	1.8	43	0.5	n.d.	n.d.	9.4	—	—
W1-37	3.0	2.6	1.8	6.1	2.1	2.6	n.d.	0.6	4.2	n.d.	58	0.5	n.d.	n.d.	3.0	—	—
W1-38	1.9	1.6	0.9	1.8	3.2	2.5	n.d.	n.d.	0.5	n.d.	20	0.5	n.d.	n.d.	11	—	—
W1-39	1.8	3.0	1.3	4.5	4.1	3.8	n.d.	4.0	0.9	0.3	49	0.5	0.4	n.d.	4.2	—	—
W1-40	2.4	2.7	0.5	2.5	0.8	1.1	n.d.	n.d.	11	n.d.	28	0.6	1.1	n.d.	3.9	—	—
W1-41	3.1	2.8	2.4	2.7	0.9	1.1	n.d.	n.d.	11	2.5	66	0.8	0.8	n.d.	3.1	—	—
W1-42	2.5	2.7	3.0	2.5	0.8	1.0	n.d.	0.2	12	2.0	65	0.7	0.8	n.d.	2.2	—	—
W1-43	2.6	2.0	13	4.5	4.1	21	0.1	0.9	5.2	2.0	120	0.4	n.d.	n.d.	4.6	—	—
W1-44	4.8	3.8	18	3.6	2.6	14	n.d.	0.6	5.4	1.2	130	0.8	0.5	n.d.	25	—	—
W1-45	7.3	4.7	17	4.8	1.1	2.8	n.d.	0.4	3.2	1.0	82	0.7	n.d.	n.d.	10	—	—
W1-46	4.2	3.0	16	1.8	0.8	1.2	n.d.	0.5	0.8	1.4	71	0.4	n.d.	n.d.	27	—	—
W1-47	11	7.8	1.1	5.0	1.0	1.2	n.d.	1.1	8.0	n.d.	40	0.9	0.6	n.d.	14	—	—
W1-48	6.3	8.1	1.9	22	8.5	7.7	n.d.	0.9	1.4	15	140	1.1	1.2	n.d.	9.3	—	—
W1-49	6.7	6.7	2.9	10	2.9	3.1	n.d.	0.7	1.6	5.2	70	0.7	0.2	n.d.	12	—	—
W1-50	12	11	1.6	3.2	0.9	1.3	n.d.	1.1	2.2	1.2	40	0.8	n.d.	n.d.	4.9	—	—
W1-51	7.9	7.9	1.1	9.9	2.5	2.7	n.d.	0.5	1.9	7.1	64	0.9	0.8	n.d.	12	—	—
W1-52	4.7	6.3	18	7.9	2.4	4.2	n.d.	0.2	1.3	1.0	100	1.6	0.5	n.d.	12	—	—
W1-53	5.1	3.4	2.7	1.9	0.7	0.8	n.d.	0.1	2.0	2.1	53	0.3	n.d.	n.d.	12	—	—
W1-54	5.1	4.0	17	2.5	0.7	1.4	n.d.	0.3	2.6	1.6	86	0.3	0.3	n.d.	6.5	—	—
W1-55	12	7.4	2.7	3.6	1.2	2.2	n.d.	0.5	1.0	4.4	800	0.4	0.3	n.d.	33	—	—
W1-56	7.5	29	1.3	2.1	0.9	1.5	n.d.	5.7	3.1	0.7	48	0.5	0.4	n.d.	12	—	—

FA, formaldehyde; AA, acetaldehyde; TD, tetradecane; TL, toluene; EB, ethylbenzene; XY, xylenes; ST, styrene; *p*-dichlorobenzene, PDC; EH, ethylbenzene; TX, texanol; TVOC, total volatile organic compounds; BZ, benzene; TrCE, trichloroethylene; TeCE, tetrachloroethylene; O₃, ozone; NO₂, nitrogen dioxide; NH₃, ammonia

Table 5. Concentrations of chemical compounds for which guideline or standard values are specified. (S, µg/m³)

name	FA	AA	TD	TL	EB	XY	ST	PDC	EH	TX	TVOC	BZ	TrCE	TeCE	O ₃	NO ₂	NH ₃
S-1	16	7.4	4.3	6.9	0.9	1.2	n.d.	0.7	3.6	3.0	49	2.3	n.d.	n.d.	13	5.5	8.3
S-2	13	19	2.6	14	2.1	2.5	n.d.	1.0	29	2.3	97	3.5	n.d.	n.d.	8.9	20	11
S-3	16	26	9.3	12	5.4	6.8	n.d.	1.3	33	4.1	110	3.0	n.d.	n.d.	7.9	7.4	23
S-4	24	11	4.1	16	1.5	2.2	n.d.	0.5	4.8	3.1	94	2.3	1.7	n.d.	8.2	9.8	13
S-5	7.1	8.0	6.5	8.5	2.4	3.1	n.d.	2.2	5.3	6.0	56	2.5	n.d.	n.d.	9.1	15	15
S-6	12	10	3.9	21	2.1	2.7	n.d.	1.9	3.1	2.4	71	2.9	1.0	n.d.	19	16	14
S-7	6.5	12	6.8	5.1	1.3	1.3	n.d.	1.5	9.0	1.7	44	2.2	n.d.	n.d.	11	13	12
S-8	13	5.2	2.4	2.7	1.1	1.7	n.d.	n.d.	4.8	6.6	38	2.3	n.d.	n.d.	8.3	4.7	16
S-9	11	8.3	1.7	4.7	1.9	2.1	n.d.	1.3	2.9	1.8	39	3.1	n.d.	n.d.	19	18	11
S-10	13	48	3.7	9.5	2.6	3.7	n.d.	1.6	9.5	1.3	99	3.1	n.d.	n.d.	5.6	17	14
S-11	9.9	19	2.6	9.9	2.4	3.1	n.d.	1.2	12	1.6	72	3.3	n.d.	n.d.	6.2	13	13
S-12	9.4	7.1	4.1	6.5	2.7	2.7	n.d.	0.8	1.1	4.2	51	1.9	n.d.	3.3	5.1	37	12
S-13	33	17	10	10	3.9	4.5	n.d.	1.6	22	4.4	100	2.0	n.d.	n.d.	6.1	8.8	21
S-14	11	5.4	2.8	7.1	1.3	2.7	n.d.	n.d.	2.4	4.1	40	2.2	n.d.	n.d.	7.5	14	9.4
S-15	21	7.2	1.8	4.9	1.8	3.0	n.d.	1.1	1.5	0.8	47	1.8	n.d.	n.d.	7.9	27	14
S-16	5.2	20	4.4	6.0	1.7	2.5	n.d.	0.6	1.8	3.2	44	2.9	n.d.	n.d.	6.1	27	10
S-17	11	13	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	30	2.2	n.d.	n.d.	8.7	14	12
S-18	13	4.7	5.1	4.8	1.2	1.6	n.d.	1.5	3.5	2.9	38	1.9	n.d.	n.d.	8.8	64	18
S-19	10	7.7	1.0	7.2	2.5	2.9	n.d.	0.3	3.1	14	51	1.7	n.d.	n.d.	4.3	7.8	11
S-20	16	6.4	4.1	5.0	0.7	1.3	n.d.	n.d.	20	3.8	56	1.7	n.d.	n.d.	7.7	5.4	12
S-21	12	7.5	3.1	4.2	1.0	0.1	n.d.	n.d.	1.6	0.9	31	2.2	n.d.	n.d.	8.7	26	13
S-22	48	55	5.2	14	3.2	3.4	n.d.	0.8	6.2	4.5	200	2.5	n.d.	n.d.	7.1	16	15
S-23	13	4.0	3.5	7.3	1.3	4.0	n.d.	0.4	2.7	1.5	37	1.9	n.d.	n.d.	5.3	4.2	10
S-24	11	6.6	2.2	9.1	11	15	n.d.	1.8	8.7	5.2	81	2.0	n.d.	n.d.	10	17	12
S-25	11	8.4	3.2	3.8	0.7	1.7	n.d.	1.2	2.5	1.4	35	2.2	n.d.	n.d.	11	9.2	12
S-26	14	9.3	5.2	19	5.2	10	n.d.	0.8	1.9	3.0	69	2.4	n.d.	n.d.	8.0	14	17
S-27	13	7.6	4.9	3.4	0.7	1.1	n.d.	0.4	2.2	1.7	33	1.1	n.d.	n.d.	8.7	8.4	12
S-28	13	7.6	2.2	5.9	2.2	2.8	n.d.	1.7	2.3	2.6	49	1.7	n.d.	n.d.	16	13	14
S-29	7.5	5.8	5.9	4.2	0.7	1.3	n.d.	0.6	8.8	5.1	39	2.0	n.d.	n.d.	4.2	18	7.5
S-30	11	6.2	16	2.2	4.8	8.7	n.d.	n.d.	2.2	1.9	39	1.5	n.d.	n.d.	6.2	9.9	11
S-31	13	7.6	3.4	4.3	1.4	2.5	n.d.	0.9	6.8	2.1	43	2.2	n.d.	n.d.	9.1	11	17
S-32	7.4	4.9	2.2	4.4	1.6	1.9	n.d.	1.2	0.5	1.2	29	1.6	n.d.	n.d.	14	25	12
S-33	16	6.6	3.2	6.1	2.5	4.5	n.d.	0.8	2.4	4.6	49	2.2	n.d.	n.d.	8.6	8.5	14
S-34	16	9.1	2.8	7.6	1.5	3.7	n.d.	0.3	4.7	1.4	48	2.3	n.d.	n.d.	9.6	14	14
S-35	16	17	2.1	8.2	1.3	1.8	n.d.	1.3	7.0	3.0	73	1.7	n.d.	n.d.	8.0	13	13
S-36	19	5.6	4.2	7.1	1.3	1.6	n.d.	1.2	4.1	3.2	140	1.8	n.d.	n.d.	11	4.1	15
S-37	17	19	4.6	6.5	2.1	2.9	n.d.	0.9	14	1.3	69	2.4	n.d.	n.d.	18	20	11
S-38	12	9.3	4.9	7.1	1.0	1.5	n.d.	2.1	2.6	3.0	42	1.9	n.d.	n.d.	6.5	23	15
S-39	12	3.4	2.1	5.0	1.6	1.8	n.d.	0.9	3.0	1.0	34	2.0	n.d.	n.d.	48	9.0	15
S-40	7.4	8.2	4.2	6.3	2.5	4.4	n.d.	n.d.	4.4	4.3	43	1.9	n.d.	n.d.	10	3.4	16
S-41	7.6	7.1	4.8	4.5	0.9	1.3	n.d.	0.7	3.7	0.4	29	1.0	n.d.	n.d.	11	9.2	
S-42	18	8.6	2.1	6.7	1.3	1.6	n.d.	0.8	14	2.9	68	2.1	0.5	n.d.	23	6.3	15
S-43	8.2	4.0	0.9	2.6	0.9	1.6	n.d.	n.d.	1.9	6.6	31	2.3	n.d.	n.d.	13	21	8.4
S-44	15	14	6.7	4.1	1.6	2.6	n.d.	n.d.	4.3	4.1	53	2.3	n.d.	n.d.	11	14	11
S-45	9.9	4.9	19	4.6	2.0	8.6	n.d.	n.d.	3.0	12	45	0.8	n.d.	n.d.	25	7.2	8.6
S-46	9	10	14	5.3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4.3	38	1.1	n.d.	n.d.	10	6.6	8.3
S-47	10	9.8	13	8.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	36	1.6	n.d.	n.d.	23	21	10
S-48	6.5	3.9	17	2.6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16	1.1	n.d.	n.d.	46	17	8.8
S-49	14	13	12	5.7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5.0	43	1.3	n.d.	n.d.	10	11	8.5
S-50	12	9.1	6.5	8.2	4.6	3.2	n.d.	0.7	n.d.	n.d.	43	0.8	n.d.	n.d.	12	21	6.3
S-51	8.2	9.5	14	5.1	1.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5.8	44	0.8	n.d.	n.d.	11	10	6.2
S-52	4.6	8.1	14	2.8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16	0.8	n.d.	n.d.	15	9.7	21
S-53	12	9.1	12	1.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7.1	33	1.0	n.d.	n.d.	17	7.4	8.5
S-54	5.9	4.8	11	1.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	14	1.1	n.d.	n.d.	9.7	7.6	5.5
S-55	13	8.8	5.3	4.4	1.4	1.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	31	0.4	n.d.	n.d.	13	8.3	3.8
S-56	7.7	6.6	15	12	1.9	1.8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	37	0.6	n.d.	n.d.	6.6	18	9.5
S-57	13	6.6	10	5.3	1.6	2.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	34	1.0	n.d.	n.d.	26	15	16
S-58	25	20	9.1	6.4	2.1	2.2	n.d.	n.d.	n.d.	5.3	71	0.9	n.d.	n.d.	13	21	18
S-59	18	31	23	3.5	n.d.	n.d.	n.d.	0.6	10	n.d.	74	0.9	n.d.	n.d.	12	9.0	13
S-60	14	6.0	14	2.9	0.8	0.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	27	1.0	n.d.	n.d.	12	10	10
S-61	8.5	5.8	13	6.3	1.9	2.5	n.d.	0.8	n.d.	n.d.	30	0.9	n.d.	n.d.	24	18	11
S-62	12	12	16	4.5	2.6	2.3	n.d.	n.d.	n.d.	5.5	42	0.7	n.d.	n.d.	4.6	17	14
S-63	11	28	17	6.8	2.3	2.3	n.d.	n.d.	n.d.	5.5	63	1.2	n.d.	n.d.	9.4	11	8.0
S-64	9.3	12	13	4.9	2.4	5.1	n.d.	n.d.	n.d.	3.3	40	0.7	n.d.	n.d.	6.8	4.1	11
S-65	5.5	3.4	13	4.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3.8	23	0.8	n.d.	n.d.	28	15	6.6
S-66	58	44	24	8.9	3.7	5.2	n.d.	n.d.	11	7.1	140	1.1	n.d.	n.d.	12	31	24
S-67	13	12	8.6	2.6	2.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4.0	35	0.8	n.d.	n.d.	7.8	10	7.5
S-68	8.9	7.0	14	2.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4.4	24	0.8	n.d.	n.d.	12	6.0	7.9
S-69	8.4	6.5	21	2.6	n.d.	n.d.	n.d.	1.1	n.d.	4.1	27	0.9	n.d.	n.d.	17	28	8.7
S-70	13	6.1	16	6.5	n.d.	0.9	n.d.	1.1	17	n.d.	55	1.0	n.d.	n.d.	14	31	12
S-71	9.1	10	12	7.3	1.3	2.1	n.d.	0.7	n.d.	n.d.	37	0.6	n.d.	n.d.	7.9	19	8.7
S-72	14	9.4	15	2.0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	27	0.8	n.d.	n.d.	12	6.8	n.d.
S-73	14	9.3	16	10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.7	40	1.0	n.d.	n.d.	10	7.9	13

name	FA	AA	TD	TL	EB	XY	ST	PDC	EH	TX	TVOC	BZ	TrCE	TeCE	O ₃	NO ₂	NH ₃
S-74	8.0	9.7	21	19	n.d.	n.d.	n.d.	0.9	n.d.	3.8	51	1.0	n.d.	n.d.	14	13	13
S-75	8.8	8.0	13	3.8	n.d.	n.d.	n.d.	1.0	n.d.	n.d.	24	0.9	n.d.	n.d.	22	21	12
S-76	14	6.3	9.4	5.4	n.d.	n.d.	n.d.	2.2	n.d.	n.d.	36	0.8	n.d.	n.d.	38	16	13
S-77	14	6.3	6.2	4.6	2.0	n.d.	n.d.	0.5	n.d.	3.2	38	0.8	n.d.	n.d.	45	14	10
S-78	14	6.7	5.4	4.5	1.3	n.d.	n.d.	0.4	n.d.	n.d.	35	0.8	n.d.	n.d.	40	14	14
S-79	13	14	26	10	2.2	2.3	n.d.	2.1	1.8	3.7	65	3.1	0.7	n.d.	48	19	15
S-80	12	6.4	6.4	6.0	1.1	1.3	n.d.	0.9	3.9	3.4	39	2.0	n.d.	n.d.	14	7.6	9.1
S-81	18	16	6.4	9.5	3.2	2.5	n.d.	0.7	2.3	2.4	61	1.5	n.d.	n.d.	13	20	11
S-82	18	26	110	6.1	1.8	1.8	n.d.	5.1	4.2	2.1	77	2.9	n.d.	n.d.	17	11	19
S-83	9.3	3.8	3.1	4.2	1.1	1.9	n.d.	n.d.	n.d.	3.1	30	2.4	n.d.	n.d.	22	14	12
S-84	60	62	10	72	5.6	7.0	n.d.	14	28	7.3	340	5.0	2.0	n.d.	15	46	23
S-85	17	12	4.4	7.9	2.0	2.4	n.d.	8.2	3.1	2.5	78	2.5	1.0	n.d.	14	18	15
S-86	25	8.5	3.2	4.1	7.3	7.8	n.d.	2.0	6.8	5.3	70	1.9	n.d.	n.d.	7	8.6	15
S-87	21	13	3.6	9.2	2.8	3.3	n.d.	1.6	3.9	2.3	72	2.6	n.d.	n.d.	16	24	20
S-88	17	17	8.0	130	5.7	11	n.d.	0.8	12	5.9	270	2.2	n.d.	n.d.	5.3	9.2	11
S-89	9.8	4.3	15	5.0	1.8	1.7	n.d.	1.5	9.2	n.d.	39	0.8	n.d.	n.d.	11	27	14
S-90	6.6	7.6	8.7	7.8	3.6	3.4	n.d.	n.d.	n.d.	10	45	0.9	n.d.	n.d.	13	10	12
S-91	5.6	4.1	5.2	3.8	1.4	1.2	n.d.	n.d.	n.d.	8.4	30	0.7	n.d.	n.d.	6.9	5.5	9.1
S-92	7.0	5.2	9.4	2.5	1.1	1.2	n.d.	1.0	n.d.	13	45	0.8	n.d.	n.d.	12	9.9	14
S-93	11	36	5.5	7.9	2.9	2.6	n.d.	0.9	n.d.	n.d.	68	1.0	n.d.	n.d.	13	13	16
S-94	11	14	13	7.8	2.4	2.0	n.d.	0.3	n.d.	4.3	53	0.9	n.d.	n.d.	14	15	9.5
S-95	10	8.1	5.9	16	8.0	5.7	n.d.	1.3	n.d.	n.d.	62	0.9	n.d.	n.d.	15	21	6.9
S-96	9.9	3.8	13	3.5	1.1	0.9	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	23	0.5	n.d.	n.d.	18	16	7.7
S-97	6.4	5.2	14	3.6	1.7	1.7	n.d.	0.7	5.2	n.d.	33	0.9	n.d.	n.d.	24	9.1	9.1
S-98	8.7	6.6	7.5	5.7	1.2	1.4	n.d.	0.5	n.d.	2.8	36	1.0	n.d.	n.d.	22	18	14
S-99	12	5.8	9.6	2.7	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	11	n.d.	37	0.8	n.d.	n.d.	24	7.3	6.3
S-100	6.1	2.1	12	7.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3.7	22	0.8	n.d.	n.d.	35	11	8.6
S-101	6.0	3.0	5.1	57	4.6	4.3	n.d.	n.d.	n.d.	4.0	100	0.6	1.7	n.d.	8.4	23	12
S-102	8.0	13	7.7	27	6.9	4.7	n.d.	n.d.	n.d.	2.3	83	1.2	2.9	n.d.	11	32	8.7
S-103	8.0	4.6	5.3	3.4	0.9	0.7	n.d.	n.d.	n.d.	5.1	34	0.6	n.d.	n.d.	5.2	19	6.5
S-104	2.4	2.1	8.2	1.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.9	21	0.9	n.d.	n.d.	18	9.2	9.0
S-105	3.9	5.2	14	6.6	6.2	6.0	n.d.	2.6	n.d.	3.7	84	0.8	2.7	n.d.	13	24	9.4
S-106	8.7	5.8	7.6	5.4	1.5	2.2	n.d.	n.d.	22	2.5	57	1.9	n.d.	n.d.	6.4	8.8	6.2
S-107	8.5	5.9	5.2	4.9	1.7	1.6	n.d.	n.d.	16	1.6	50	1.0	2.4	n.d.	11	14	6.3
S-108	6.6	4.7	7.1	5.8	1.7	1.8	n.d.	n.d.	21	1.9	53	0.9	1.9	n.d.	14	14	6.9
S-109	10	5.9	15	7.2	n.d.	n.d.	n.d.	0.7	n.d.	n.d.	30	0.8	n.d.	n.d.	11	15	4.9
S-110	16	19	4.6	8.9	1.6	3.5	n.d.	0.4	0.7	1.1	57	0.3	n.d.	n.d.	9.2	9.9	5.3
S-111	12	12	19	11	5.1	17	n.d.	3.4	6.5	6.1	93	0.3	n.d.	n.d.	9.1	5.7	17

FA, formaldehyde; AA, acetaldehyde; TD, tetradecane; TL, toluene; EB, ethylbenzene; XY, xylenes; ST, styrene; *p*-dichlorobenzene, PDC; EH, ethylbenzene; TX, texanol; TVOC, total volatile organic compounds; BZ, benzene; TrCE, trichloroethylene; TeCE, tetrachloroethylene; O₃, ozone; NO₂, nitrogen dioxide; NH₃, ammonia

Table 6. Concentrations of chemical compounds for which guideline or standard values are specified

name	FA	AA	TD	TL	EB	XY	ST	PDC	EH	TX	TVOC	BZ	TrCE	TeCE	O ₃	NO ₂	NH ₃
W2-1	5.9	4.5	6.9	2.4	0.3	0.6	n.d.	0.5	0.9	2.0	87	0.4	n.d.	n.d.	15	n.d.	2.7
W2-2	5.1	6.3	1.6	7.2	1.9	2.4	n.d.	1.4	n.d.	1.6	91	0.9	0.5	n.d.	6.2	7.3	1.9
W2-3	3.8	6.3	2.4	1.6	0.3	0.9	n.d.	0.3	0.7	1.9	59	0.5	n.d.	n.d.	4.6	22	2.5
W2-4	7.4	5.1	15	4.9	0.4	1.0	n.d.	0.5	0.8	2.3	200	0.8	44	n.d.	9.0	11	3.9
W2-5	11	7.3	15	2.9	0.7	1.0	n.d.	0.3	n.d.	1.7	120	0.7	0.3	n.d.	13	14	2.7
W2-6	5.8	27	11	7.0	1.3	2.8	n.d.	4.1	n.d.	2.2	260	1.7	0.6	n.d.	3.4	20	5.8
W2-7	3.5	7.0	13	7.6	2.5	2.6	n.d.	0.4	0.2	1.9	130	1.0	0.7	n.d.	6.3	24	3.4
W2-8	11	23	8.2	9.1	2.1	2.6	n.d.	4.0	3.4	1.5	190	1.1	1.0	0.5	7.8	16	5.8
W2-9	3.5	3.8	11	2.5	0.4	0.8	n.d.	0.3	n.d.	1.6	67	0.8	n.d.	n.d.	12	4.5	2.3
W2-10	14	12	2.9	5.4	4.8	5.0	n.d.	1.3	3.2	1.8	170	0.8	n.d.	n.d.	4.7	3.0	6.3
W2-11	6.6	13	13	8.2	1.7	2.3	n.d.	1.3	n.d.	1.0	150	1.3	1.0	n.d.	3.7	23	n.d.
W2-12	5.6	6.5	n.d.	6.6	0.9	1.3	n.d.	0.2	n.d.	2.3	71	0.7	0.5	n.d.	4.4	10	0.9
W2-13	9.6	16	11	3.4	0.7	1.5	n.d.	0.2	n.d.	3.1	170	0.2	n.d.	n.d.	5.4	14	3.6
W2-14	6.5	4.2	5.6	2.9	0.6	2.1	n.d.	0.4	n.d.	1.9	67	1.2	n.d.	n.d.	5.2	40	2.1
W2-15	7.0	23	8.2	3.6	0.4	0.8	n.d.	1.2	n.d.	1.6	120	0.7	n.d.	n.d.	13	14	3.7
W2-16	8.4	8.5	14	2.0	0.7	1.5	n.d.	0.4	n.d.	2.5	110	0.6	n.d.	n.d.	11	8.9	3.2
W2-17	3.9	4.7	9.0	2.4	0.7	1.0	n.d.	0.5	n.d.	1.3	82	0.6	0.7	n.d.	9.3	7.9	2.2
W2-18	7.1	11	9.4	2.6	0.5	0.7	n.d.	0.5	3.6	1.2	110	0.7	n.d.	n.d.	11	11	4.8
W2-19	4.3	4.9	9.9	2.9	0.8	0.8	n.d.	1.6	n.d.	1.3	71	0.5	n.d.	n.d.	16	11	4.1
W2-20	10	9.7	7.4	9.6	1.8	4.9	n.d.	0.3	0.8	2.1	170	1.0	n.d.	n.d.	3.9	32	6.4
W2-21	11	6.8	22	3.2	1.3	1.5	n.d.	0.2	n.d.	1.9	150	0.9	n.d.	n.d.	8.1	5.3	5.1
W2-22	7.6	7.0	13	9.9	1.3	1.7	n.d.	1.3	n.d.	2.5	130	1.2	1.6	n.d.	9.1	23	5.3
W2-23	5.2	4.4	1.2	3.6	0.9	1.3	n.d.	0.4	n.d.	1.4	84	0.9	n.d.	n.d.	9.0	17	2.1
W2-24	13	10	18	10	2.1	2.5	n.d.	0.5	n.d.	2.9	680	1.2	n.d.	n.d.	7.8	4.7	3.0
W2-25	6.1	5.8	2.0	6.8	1.4	1.9	n.d.	0.5	n.d.	22	160	0.9	0.5	n.d.	9.5	18	4.2
W2-26	6.7	4.1	9.4	2.4	0.4	0.9	n.d.	0.5	n.d.	1.2	81	1.0	0.3	n.d.	7.7	14	1.8
W2-27	5.7	11	7.0	2.5	0.4	0.6	n.d.	n.d.	0.8	1.6	87	0.9	n.d.	n.d.	7.1	1.0	2.0
W2-28	7.0	9.8	7.4	20	3.1	4.1	n.d.	1.7	0.7	2.0	260	1.8	0.9	n.d.	6.0	27	2.2
W2-29	9.0	6.3	2.1	12	3.3	4.5	0.7	1.9	0.5	2.2	110	1.2	n.d.	n.d.	6.6	2.8	2.9
W2-30	8.0	8.3	15	6.7	1.0	1.2	n.d.	4.4	2.0	1.9	130	0.8	0.5	n.d.	7.6	19	5.9
W2-31	6.6	3.9	18	5.8	1.4	2.5	n.d.	0.7	n.d.	1.8	140	0.9	0.3	0.4	7.2	23	3.0
W2-32	4.0	4.2	5.7	2.9	0.5	0.7	n.d.	0.1	n.d.	0.6	70	0.8	n.d.	0.3	13	6.8	1.8
W2-33	8.6	9.1	13	11	4.4	4.2	n.d.	1.4	0.8	2.3	180	2.9	n.d.	n.d.	9.7	42	6.0
W2-34	8.2	9.8	4.5	1.2	0.3	0.6	n.d.	0.3	n.d.	1.5	97	0.6	n.d.	n.d.	8.8	4.5	4.3
W2-35	6.3	4.6	12	3.3	0.7	0.9	n.d.	0.4	n.d.	1.1	88	1.0	n.d.	n.d.	9.4	5.1	1.3
W2-36	8.3	11	7.3	2.0	0.6	1.2	n.d.	2.6	0.5	2.0	130	0.5	n.d.	n.d.	8.6	7.5	6.1
W2-37	9.9	21	3.5	6.6	2.7	3.6	n.d.	1.9	2.2	2.1	160	1.4	0.5	n.d.	6.0	14	6.9
W2-38	6.2	5.1	3.2	7.1	1.8	2.5	n.d.	0.6	n.d.	1.0	88	1.4	n.d.	n.d.	11	19	2.9
W2-39	7.3	7.3	14	3.7	0.5	1.8	n.d.	2.1	n.d.	1.3	120	1.1	n.d.	n.d.	6.0	4.3	2.7
W2-40	4.2	4.7	9.3	1.9	0.4	0.9	n.d.	1.8	n.d.	1.4	150	1.0	n.d.	n.d.	11	4.2	2.1
W2-41	8.6	6.4	6.8	4.5	0.7	1.0	n.d.	1.4	0.6	2.1	100	0.7	n.d.	n.d.	9.7	8.9	6.1
W2-42	5.2	5.5	9.2	2.2	0.8	1.2	n.d.	0.4	n.d.	1.3	82	0.9	n.d.	n.d.	8.0	14	4.0
W2-43	8.6	4.9	15	1.0	0.3	0.9	n.d.	n.d.	n.d.	8.7	110	0.5	n.d.	n.d.	13	6.8	3.6
W2-44	2.6	3.9	20	3.6	0.7	1.1	n.d.	0.2	0.8	2.5	100	n.d.	n.d.	n.d.	7.5	11	1.5
W2-45	8.7	19	17	8.6	1.7	2.5	1.1	2.2	n.d.	2.7	240	1.8	n.d.	0.3	6.9	13	7.8
W2-46	2.5	1.9	8.4	7.7	1.4	1.3	n.d.	4.8	0.7	1.1	88	0.7	n.d.	n.d.	9.5	13	2.6
W2-47	5.7	8.6	9.4	6.9	3.5	3.3	n.d.	0.6	0.9	19	180	0.2	0.4	n.d.	4.9	24	3.7
W2-48	5.0	7.5	19	5.5	1.1	1.5	n.d.	2.1	1.7	3.1	160	0.5	0.5	n.d.	7.6	14	4.7
W2-49	4.2	7.1	13	11	3.4	4.1	n.d.	0.6	3.7	2.6	130	1.1	1.3	n.d.	7.1	32	2.3
W2-50	4.0	3.8	12	1.4	0.4	0.7	n.d.	0.6	n.d.	2.0	120	0.3	n.d.	0.8	9.4	9.1	3.3
W2-51	7.4	6.8	11	4.4	3.2	15	0.1	n.d.	2.4	1.7	260	1.3	n.d.	n.d.	9.3	18	2.8
W2-52	21	22	11	21	0.9	1.9	n.d.	0.6	n.d.	4.8	380	3.1	n.d.	n.d.	4.2	23	6.1
W2-53	4.1	4.0	8.7	4.6	0.7	1.0	n.d.	0.8	2.3	2.9	70	0.2	n.d.	n.d.	10	8.9	2.1
W2-54	4.6	4.4	9.8	4.6	1.1	1.5	n.d.	0.5	2.1	2.9	76	0.8	0.8	n.d.	7.0	20	2.6
W2-55	7.0	9.2	10	5.9	1.0	1.7	n.d.	1.2	1.0	1.4	110	0.7	0.6	n.d.	4.7	12	2.9
W2-56	7.9	7.8	20	3.3	1.1	1.5	n.d.	0.4	0.7	2.0	130	0.3	n.d.	n.d.	7.2	29	4.5
W2-57	4.1	6.2	15	2.6	0.6	0.8	n.d.	3.6	n.d.	1.8	100	n.d.	n.d.	n.d.	8.8	5.6	3.8
W2-58	5.9	6.0	9.8	3.3	0.5	0.8	n.d.	0.2	n.d.	1.5	120	1.8	n.d.	n.d.	9.6	12	3.5
W2-59	19	11	13	8.0	2.7	5.4	0.3	0.3	0.9	2.6	270	2.1	0.8	n.d.	4.9	110	2.4
W2-60	5.9	8.9	14	6.7	2.0	2.1	n.d.	0.4	n.d.	2.7	140	0.6	0.5	n.d.	9.6	18	6.6
W2-61	6.3	4.7	14	2.3	0.8	1.2	n.d.	0.2	n.d.	2.2	110	0.4	n.d.	n.d.	6.4	5.6	2.6
W2-62	3.7	3.5	9.2	3.3	0.7	1.3	n.d.	0.7	n.d.	2.7	97	0.9	n.d.	n.d.	3.3	6.4	2.8
W2-63	6.3	6.6	9.3	12	2.1	2.6	n.d.	0.5	n.d.	2.5	150	0.7	0.4	n.d.	3.8	21	3.6
W2-64	6.2	5.5	13	4.2	1.1	1.8	n.d.	0.7	n.d.	1.3	96	1.3	0.2	n.d.	4.7	5.1	2.5
W2-65	4.5	1.8	5.7	2.8	0.5	0.8	n.d.	n.d.	n.d.	0.6	65	1.4	n.d.	n.d.	20	30	2.0
W2-66	7.1	6.8	26	6.9	1.7	2.5	n.d.	0.6	4.7	2.0	150	0.8	0.8	0.6	8.1	22	n.d.
W2-67	4.7	4.4	13	3.3	0.6	0.9	n.d.	0.5	n.d.	1.5	81	0.5	0.6	0.5	7.4	9.6	3.7
W2-68	5.6	6.4	16	7.6	1.4	1.7	n.d.	0.4	n.d.	1.6	120	0.6	1.2	n.d.	9.5	24	6.2
W2-69	6.6	7.1	13	2.3	0.6	1.1	n.d.	n.d.	n.d.	1.3	110	1.1	0.3	n.d.	9.0	6.1	3.9
W2-70	4.0	5.0	5.9	1.2	0.3	0.6	n.d.	0.1	n.d.	1.0	68	0.7	n.d.	n.d.	5.4	2.8	1.6
W2-71	6.9	9.3	18	6.8	0.8	3.2	n.d.	0.5	n.d.	2.3	170	1.1	n.d.	n.d.	3.2	4.2	7.1
W2-72	4.9	3.1	5.8	1.0	0.3	0.6	n.d.	0.2	n.d.	2.6	79	0.6	n.d.	n.d.	15	12	3.8
W2-73	4.5	3.2	0.8	5.5	1.4	1.5	n.d.	0.3	n.d.	1.4	69	0.8	0.6	n.d.	9.6	19	1.9
W2-74	6.2	11	15	11	0.5	1.1	n.d.	0.8	2.7	2.1	190	0.8	n.d.	n.d.	4.9	8.2	4.4
W2-75	6.9	6.8	28	9.8	1.1	1.7	n.d.	0.6	1.0	3.8	140	0.7	n.d.	0.8	7.2	11	2.5

Table 7. Concentrations of chemical compounds in office building and general housing. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

compounds	Office building on the proposed study						NIPH				NIHS	
	Winter Dec. 2020 to Apr. 2021		Summer Aug. 2021 to Sep. 2021		Winter Jan. 2022 to Feb. 2022		Summer 2012 - 2014		Winter 2012 - 2014		Winter Oct. 2002 to Mar. 2003	
	mean	max.	mean	max.	mean	max.	mean	max.	mean	max.	mean	max.
formaldehyde	11	160	13	60	6.9	21	34	220	13	58	27	120
acetaldehyde	15	200	11	62	8.0	27	19	210	21	230	24	150
propanal	6.1	46	2.1	23	0.7	12	7.4	37	4.1	62	1.9	18
valeraldehyde	n.d.	n.d.	n.d.	3.9	n.d.	n.d.	1.9	35	0.8	11	2.1	12
i-valeraldehyde	0.1	4.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.1	4.6	0.5	9.3	0.6	2.9
hexanal	0.4	21	0.3	15	n.d.	n.d.	7.0	110	3.2	23	7.0	63
heptanal	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.7	7.6	0.8	9.3	1.1	29
octanal	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.6	13	1.0	7.5	1.1	15
nonanal	0.7	23	0.7	38	0.2	15	12	37	4.3	33	4.8	28
decanal	0.3	15	0.2	19	n.d.	n.d.	3.7	15	1.4	32	2.0	120
acrolein	0.2	9.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.9	4.8	0.8	8.5	0.2	0.9
crotonaldehyde	0.6	6.0	0.2	6.2	n.d.	1.8	0.2	18	0.5	18	0.3	34
2-nonenal	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.3	3.4	0.6	5.2	n.d.	n.d.
benzaldehyde	0.2	5.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.3	16	0.8	25	2.7	50
o-tolualdehyde	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.2	13	0.8	61	3.2	250
p-tolualdehyde	0.2	8.6	n.d.	4.1	n.d.	2.2	1.9	15	1.0	120	1.7	6.1
2,5-DMBA	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.6	19	0.9	11	1.3	17
acetone	16	140	12	66	13	60	22	490	27	2500	31	270
2-butanone	2.3	34	n.d.	2.6	n.d.	n.d.	1.7	99	1.3	23	13	210
MIBK	0.1	3.2	0.2	1.6	n.d.	1.2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
total carbonyls	53	n.d.	40	n.d.	29	n.d.	120	n.d.	84	n.d.	130	n.d.
hexane	15	270	5.2	200	5.0	29	3.5	240	2.8	160	29	1400
cyclohexane	n.d.	n.d.	1.3	66	2.6	61	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5.4	100
heptane	0.8	3.8	0.5	12	1.9	99	2.0	68	3.9	250	4.9	38
octane	0.5	7.2	1.0	8.8	0.8	6.2	2.0	110	2.8	110	16	280
nonane	1.9	35	0.6	39	1.0	29	6.6	540	11	460	21	410
decane	17	740	15	35	13	84	7.8	320	13	420	31	1300
undecane	2.3	23	1.2	32	1.4	20	18	310	19	580	20	710
dodecane	9.1	25	5.4	78	7.7	57	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	10	250
tridecane	7.6	42	4.5	140	2.6	12	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4.1	130
tetradecane	9.5	32	9.4	110	11	28	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3.1	57
pentadecane	3.1	21	0.1	3.6	0.3	1.8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.2	8.7
hexadecane	3.9	15	0.4	4.5	1.0	3.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.5	4.0
benzene	1.6	24	1.6	5.0	0.9	3.1	1.3	14	2.3	19	3.3	62
toluene	16	400	8.7	130	5.5	21	12	330	9.6	370	56	1100
ethylbenzene	4.8	70	1.9	11	1.2	4.8	5.8	180	5.3	710	13	480
o-xylene	1.5	9.6	0.6	5.5	0.6	5.4	2.6	77	3.4	120	7.5	120
m,p-xylene	4.4	35	1.9	12	1.4	10	4.4	240	8.2	430	18	570
1,3,5-TMB	0.3	3.0	0.3	3.8	0.3	2.4	1.2	45	1.9	49	3.3	50
1,2,4-TMB	1.3	9.9	1.2	15	1.2	9.9	4.0	150	6.4	190	12	180
1,2,3-TMB	0.3	3.1	0.2	8.9	0.3	2.5	0.9	31	1.7	46	3.4	55
1,2,4,5-TMB	0.2	1.6	0.1	15	0.1	1.4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.0	19
styrene	0.1	2.0	n.d.	n.d.	n.d.	1.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4.2	98
p-dichlorobenzene	2.7	100	0.9	14	0.9	4.8	120	13000	31	2100	57	1000
trichloromethane	0.7	13	0.7	41	0.4	0.9	0.7	16	0.7	16	0.7	5.4
CCl ₄	0.2	2.5	n.d.	2.2	0.2	1.1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.6	0.1
DBCM	n.d.	1.5	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6.7	0.1	12	0.1	1.9
1,2-dichloroethane	0.1	2.0	n.d.	1.8	n.d.	2.3	0.2	11	n.d.	9.4	0.1	0.3
1,1,1-TCE	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.2	40	0.1	26	0.4	9.1
trichloroethylene	0.3	1.8	0.2	2.9	0.8	44	n.d.	1.9	0.1	2.5	1.2	23
tetrachloroethylene	0.1	1.5	n.d.	3.3	0.1	0.8	0.2	18	0.4	45	0.9	34
ethanol	n.d.	n.d.	1100	18000	3000	9200	—	—	—	—	890	19000
2-ethyl-1-hexanol	3.3	16	4.3	33	0.6	4.7	—	—	—	—	0.6	8.8
texanol	2.0	15	3.0	14	2.5	22	—	—	—	—	0.9	12
ethylacetate	5.1	32	5.1	46	3.9	27	8.5	650	5.4	780	8.6	230
butylacetate	1.6	25	0.6	12	1.7	5.9	6.2	410	3.8	220	4.0	210
2,2,4-TMP	0.1	2.3	n.d.	3.1	n.d.	1.3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.4	4.1
α -pinene	0.4	6.2	n.d.	1.5	0.2	1.0	30	1900	5.6	180	86	1000
d-limonene	4.4	57	1.7	94	8.6	390	17	260	24	440	20	150
total VOCs	130	800	340	21000	140	680	250	—	160	—	450	—
ozone	6.2	33	14	48	8.2	20	10	62	1.7	27	n.d.	n.d.
formic acid	—	—	20	49	13	27	28	240	54	440	n.d.	n.d.
acetic acid	—	—	89	250	39	93	130	840	93	330	n.d.	n.d.
hydrogen chloride	—	—	8.7	90	18	59	1.9	150	2.7	150	n.d.	n.d.
nitrogen dioxide	—	—	15	64	15	110	13	99	220	2000	71	590
ammonia	—	—	12	24	3.6	7.8	37	590	16	350	n.d.	n.d.

