

一般住宅における石油ファンヒーター使用時の換気による揮発性有機化合物 (VOC) 濃度の減少効果

山下晃子*・薩摩林光**・込山茂久*・山浦由郎***

一般住宅 8 畳間 (36.8 m³) で石油ファンヒーターを使用した場合の、脂肪族炭化水素発生量を求めた。燃焼開始から 30 分間の脂肪族炭化水素の発生量は約 140 μg/min であった。ファンヒーターを使用後、窓開け換気を実施し換気量を求めた。換気量は 3.9 m³/min であった。求めた発生量及び換気量を使って室内濃度の予測を行った。

床、壁、天井等への吸着は特に考慮せず、流入の風速は 0.1 m/sec と仮定した条件においては、窓を 30 cm の幅で 1 時間に 5 分の割合で開放する (換気回数 0.44 回/hr 相当) か、常時 2.5 cm の幅で窓を開放する (換気回数 0.44 回/hr 相当) ことにより、換気回数 0.5 回/hr を確保した場合と同程度の換気効果が期待できると考えられる。

キーワード：室内空気, VOC, 石油ファンヒーター, 換気

1. はじめに

「シックハウス症候群」や「化学物質過敏症」と呼ばれる健康障害と室内空気中の化学物質との関連が指摘されている^{1),2)}。このため、平成 9 年度から 10 年度にかけて厚生労働省及び国立医薬品食品衛生研究所を中心に居住環境内における揮発性有機化合物 (VOC) の全国実態調査が行われた³⁾。本調査に参加した当所の結果⁴⁾では冬期の暖房機器や換気の方法の違いにより、脂肪族炭化水素類及びトリメチルベンゼン類の濃度に大きな差がみられた。

そこでこれらの室内濃度が高い傾向を示した開放型の石油ファンヒーターを使用して、VOC の発生量及び窓開け換気による減少量を求め、一般住宅における開放型石油ファンヒーター使用時の換気効果を検討した。

2. 調査方法

2.1 測定期間及び対象

平成 15 年 2 月に、長野市内の築 5 ヶ月木造 2 階建住宅の 2 階で調査を実施した。測定した部屋は、8 畳 (36.8 m³) の洋室で天井高さが 2.45 m あり、幅 0.9 m 高さ 2.0 m の引戸式扉、幅 0.9 m 高さ 1.8 m の引戸式窓が 1 ヶ所、幅 0.45 m 高さ 0.45 m の引き上げ式窓が 2 ヶ所ある。内装は、壁および天井がビニールクロス、床はフローリングで、室内の家具は

鏡台が置いてある。なおこの住宅は、いわゆる常時換気システムを持つ高気密住宅ではなかった。

2.2 測定項目

VOC (表 1 に示す 41 物質) は、カーボンモレキュラーシープ充填 (スペルコ製 ORBO-91L) の捕集管に 0.1 l/min の流量で吸引捕集した。

二酸化炭素 (CO₂) 濃度は、検知管 (ガステック製 No. 2LL) を用いて測定した。

温度及び湿度は、部屋の水平方向床上 1.2 m の高さで部屋の中央を含む 3 地点、また部屋の中央垂直方向に床上 0.2 m, 2.1 m の計 5 地点で 5 分間毎に測定した。

VOC 及び CO₂ 測定は、部屋の中央床上 1.2 m の地点で行った。参考として屋外における VOC 濃度を庭地上 1.6 m で捕集した。

2.3 測定方法

測定開始前に部屋の窓及び扉を 30 分間すべて開放し室内を室外の空気です置換した後、窓及び扉を閉め、燃焼開始前の室内空気を 1 時間連続吸引捕集した。その後石油ファンヒーター (M 社製 6 ~ 8 畳用) を連続 2 時間燃焼させ、燃焼開始から 30 分間隔で室内空気を 4 回捕集し VOC 濃度を求めた。その際ファンヒーターの設定温度を 15, 20, 25℃ とし、それぞれの温度で測定した。CO₂ は燃焼開始後から検知管法により 0, 20, 50, 80, 110 分後に測定した。

* 長野県環境保全研究所 保健衛生チーム 〒380-0944 長野市安茂里米村 1978

** 長野県環境保全研究所 環境保全チーム, *** 現 長野女子短期大学

一方ファンヒーターを1時間燃焼した後に、高さ1.8 mの窓を20 cmの幅で2分間開放し、その前後30分間のVOC濃度を求め換気前後の濃度を比較した。同時にCO₂濃度も換気前後で測定した。

なお測定中は、空気を攪拌させるために扇風機を微弱で運転した。

2.4 VOC濃度の分析

捕集管をカットして中の充填剤を試験管に取り出し、二硫化炭素（和光純薬製、作業環境測定用）1 mlを添加した。更に内部標準溶液としてトルエン-d₈（100 μg/ml）1 μlを加えて密栓し振り混ぜ1時間放置後、この上清液をGC/MS-SIMで測定した。標準物質は、混合標準原液（関東化学製、45種混合）を用い二硫化炭素で希釈し、標準液とした。

GC/MS分析条件

GC：HP社製 5890 シリーズ II

MS：日本電子(株)製 AUTOMASS 50

カラム：DB-1 0.25 mm×60 m, 膜厚 1 μm

カラム温度：40℃ (5 min) - 10℃/min - 300℃ (3 min)

注入口温度：250℃

イオン源温度：210℃

キャリアーガス：He

カラムヘッド圧：16.5 psi

試料注入法：スプリットレス (15 sec)

インターフェイス温度：250℃

検出法：SIM検出法

3. 結果及び考察

3.1 室内VOC及びCO₂濃度

ファンヒーターの設定温度毎に測定した燃焼開始後30~60分間のVOCの平均濃度を表1に示す。

α-ピネンが燃焼開始前71 μg/m³及び燃焼時150 μg/m³とやや高濃度に検出された。α-ピネンはこの住宅が木造住宅で、部屋の床が木製フローリングのため建材由来と推測される。なお、使用した捕集管ORBO-91Lは、テルペン類の特にα-ピネンの捕集効率が低いことが報告されている⁵⁾ことから、実際の濃度はこれより高い可能性が考えられる。

30分間毎の室内TVOC（41物質の総量）濃度及びCO₂濃度の経時変化を設定温度別に図1及び図2に示す。また室温の経時変化を図3に示す。なお、プロットした経過時間は燃焼開始後の捕集時間（30 min）

表1 燃焼開始前及び燃焼開始後30~60分間の平均濃度 (n=3)

分類	物質名	燃焼開始前 (μg/m ³)	30~60分燃焼 (μg/m ³)	
脂肪族炭化水素類	ヘキサン	2.9	4.4	
	ヘプタン	3.0	8.1	
	オクタン	4.4	13	
	ノナン	8.4	24	
	デカン	11	31	
	ウンデカン	11	32	
	ドデカン	6.8	22	
	トリデカン	4.0	15	
	テトラデカン	2.2	8.5	
	ペンタデカン	1.1	4.4	
	ヘキサデカン	0.5	1.4	
	2,4-ジメチルペンタン	0.2	0.4	
	2,2,4-トリメチルペンタン	0.8	0.8	
	total	56	160	
芳香族炭化水素類	ベンゼン	3.7	4.4	
	トルエン	20	29	
	エチルベンゼン	16	9.3	
	m, p-キシレン	15	17	
	o-キシレン	5.7	7.8	
	スチレン	0.7	1.4	
	1,3,5-トリメチルベンゼン	1.5	3.2	
	1,2,4-トリメチルベンゼン	7.3	17	
	1,2,3-トリメチルベンゼン	2.2	5.6	
	1,2,4,5-テトラメチルベンゼン	0.2	0.3	
	total	73	96	
	テルペン類	α-ピネン	71	150
		リモネン	3.9	8.4
total		75	160	
ハロゲン類	クロロホルム	<0.2	0.4	
	1,1,1-トリクロロエタン	0.6	1.7	
	四塩化炭素	0.4	0.5	
	1,2-ジクロロエタン	<0.2	0.2	
	トリクロロエチレン	1.1	1.1	
	1,2-ジクロロプロパン	<0.2	0.2	
	テトラクロロエチレン	<0.3	0.3	
	ジブロモクロロメタン	<0.3	0.3	
	p-ジクロロベンゼン	0.3	0.5	
	total	2.4	5.2	
エステル類	酢酸エチル	4.1	7.1	
	酢酸ブチル	0.6	1.2	
	total	4.6	8.3	
ケトン類	メチルエチルケトン	1.5	2.3	
	メチルイソブチルケトン	1.6	3.0	
	total	3.1	5.3	
アルコール類	1-ブタノール	0.7	1.4	
	total	0.7	1.4	
アルデヒド類	ノナナル	7.8	10	
	デカナール	<1.0	1.0	
	total	7.8	11	
TVOC		220	450	

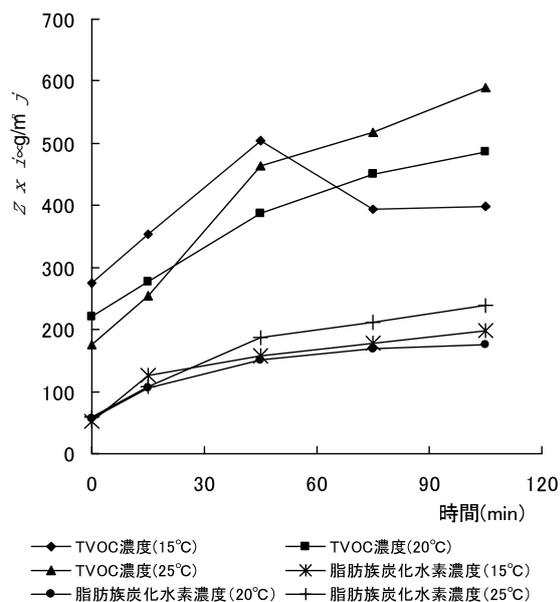


図1 設定温度別TVOCと脂肪族炭化水素濃度の時間変化
設定温度はヒーターの表示温度

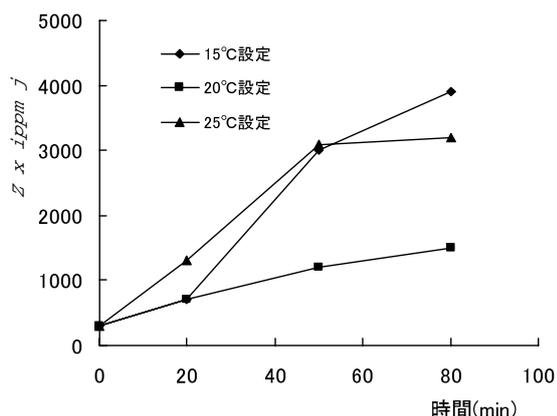


図2 設定温度別CO₂濃度の時間変化
設定温度はヒーターの表示温度

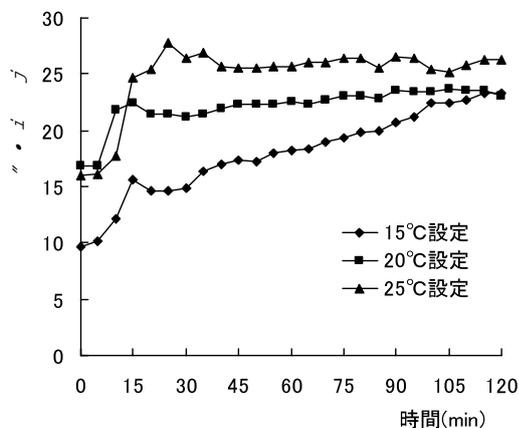


図3 設定温度別室温の経時変化
設定温度はヒーターの表示温度

の中間時間である。TVOC濃度 (41物質の総量)、脂肪族炭化水素濃度及びCO₂濃度はいずれも、燃焼開始直後に濃度が上昇し、その後上昇率が減少した。これは、図3の室温の変化が示すように、室温が一定の温度に達するとヒーターの燃焼が調整されるためと考えられる。15°C設定時の脂肪族炭化水素濃度が20°C設定時よりも高い傾向を示したのは、図3に示すように燃焼開始前の室温が15°C設定時は9.7°C、20°C設定時は16.8°Cで、20°C設定時に比べ15°C設定時の室温がかなり低く、ヒーターの燃焼が強かったためと思われる。個々の成分毎にみるとα-ピネン以外は濃度が上昇しその後横這いの傾向を示した。α-ピネンの濃度が15°C設定時のみ30~60分の濃度に比較して60~90分で1/3に減少したが、減少の原因は不明である。

3.2 発生量の算出

燃焼開始後30分間の室温は設定温度以下であり、燃焼状態が比較的安定していたと考えられることから、この30分間の値を平均し次式により発生量を求めた (表2)。

$$M = (C_t - C_0) / t \times V_R$$

M: 発生量 (μg/minまたはml/min)

C_t: t時間後の濃度 (μg/m³またはml/m³)

C₀: 開始時の濃度 (μg/m³またはml/m³)

t: 時間 (min)

V_R: 部屋の容積 (m³)

脂肪族炭化水素の発生量は140 μg/min、CO₂の発生量は1100 ml/minであった。

燃焼開始時にエチルベンゼン及びm, p-キシレンがやや高い濃度で検出された20°C設定の測定値を除いて、燃焼開始後の時間毎の平均濃度から脂肪族炭化水素及び芳香族炭化水素の発生量を求めた (図4)。脂肪族炭化水素の発生量は、室温の上昇に伴ってファンヒーターの燃焼が調整されるため減少した。一方、芳香族炭化水素も同様に減少したが室温が設定温度に到達した後半での発生量がやや増加する傾向がみられた。例えば、25°C設定の60~90分では、室温が26.0°C、トルエンが24.8 μg/m³、m, p-キシレンが20.1 μg/m³であったが、90~120分では、室温が25.9°C、トルエンが27.6 μg/m³、キシレンが23.6 μg/m³と濃度が上昇した。芳香族炭化水素の発生量が脂肪族炭化水素の発生量に比べ減少が少ないのは、ファンヒーター由来に加えて室温の上昇に伴い建材由来の成分が揮発したのものによると考

表2 石油ファンヒーターからの脂肪族炭化水素と二酸化炭素の発生量

	脂肪族炭化水素			二酸化炭素		
	15℃	20℃	25℃	15℃	20℃	25℃
開始時の濃度C ₀ (μg/m ^{3*} , ppm ^{**})	52.7	57.3	59.4	300	300	300
t 時間後の濃度C _t (μg/m ^{3*} , ppm ^{**})	126	106	109	700	700	1300
発生量 (平均μg/min*, 平均ml/min ^{**})	180.7	119.4	121.0	735	735	1839
	140			1100		

*脂肪族炭化水素, **二酸化炭素

燃焼時間は脂肪族炭化水素は 30 分間捕集したので平均し 15 分間とした二酸化炭素は燃焼開始 20 分後に測定したので 20 分間とした. 部屋の容積 36.77 m³.

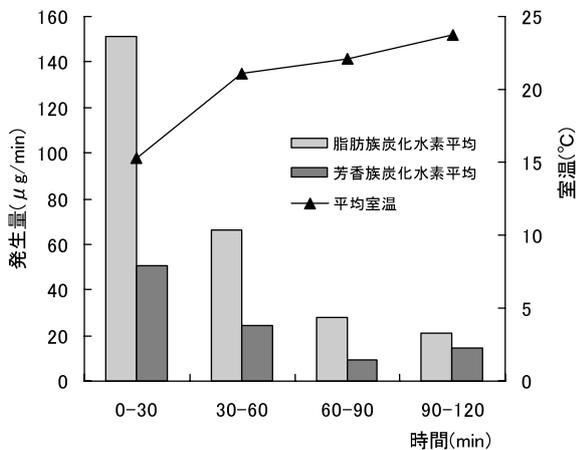


図4 燃焼開始から 30 分毎の脂肪族及び芳香族炭化水素の発生量

えられる.

3.3 窓開け換気による換気量の算出

ファンヒーターの燃焼を停止後, 高さ 1.8 m の窓を開け幅 20 cm で 2 分間開放し, その前後での室内濃度より次式⁶⁾から換気量を算出した(表3). 開放時の室温は 22℃, 外気は 9℃であった.

$$V = 2.303 \times V_R / t \times \log \{ (C_t - C_0) / (C_1 - C_0) \}$$

V: 換気量 (m³/min)

V_R: 部屋の容積 (m³)

t: 窓開放時間 (min)

C_t: t 時間後の濃度 (μg/m³またはml/m³)

C₁: 開始時の濃度 (μg/m³またはml/m³)

C₀: 室外濃度 (μg/m³またはml/m³)

脂肪族炭化水素濃度を用いて算出した換気量は 3.9 m³/min 及び CO₂ 濃度を用いた換気量は 3.0 m³/min でほぼ一致した. なお, この値を用いる

表3 窓開け換気による換気量の算出

	脂肪族炭化水素	二酸化炭素
換気前の濃度C ₁ (μg/m ^{3*} , ppm ^{**})	340	3600
換気後の濃度C _t (μg/m ^{3*} , ppm ^{**})	276	3100
外気濃度C ₀ (μg/m ^{3*} , ppm ^{**})	2.3	300
換気量 (m ³ /min)	3.9	3.0

*脂肪族炭化水素, **二酸化炭素

換気時間 2 min, 部屋の容積 36.77 m³

と窓からの流入の風速は, 0.14~0.18 m/sec と計算される.

3.4 発生量と換気量による室内濃度の予測

3.2 及び 3.3 で求めた発生量 (140 μg/min) と換気量 (3.9 m³/min) から次式によりこの部屋でファンヒーターを使用した時の室内濃度を予測した.

$$dC/dt = -kC + E/V_R$$

$$dC/dt = -V/V_R \times C + E/V_R$$

短時間では次式が成立する

$$C = -V/V_R \times (C_{n-1} - C_0) \times \Delta t + E/V_R \times \Delta t + C_{n-1}$$

C: 濃度 (μg/m³)

-k: 換気速度 (/min)

E: 発生量 (μg/min)

V: 換気量 (m³/min)

V_R: 部屋の容積 (m³)

t: 時間 (min)

C_0 : 部屋の外部から入る濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ または ml/m^3)

C_{n-1} : 求める濃度の1分前濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ または ml/m^3)

①換気をしないで表2に示す発生量でファンヒーターを稼働した場合, ②ファンヒーターを稼働せずに換気量を算出した時と同条件(高さ1.8m, 開け幅20cm)で常時開放した場合, ③同条件で窓を常時開放しファンヒーターを稼働した場合の脂肪族炭化水素濃度の時間変化を図5に示す. ①の場合の脂肪族炭化水素濃度は, 直線的に増加し, ②の場合は, 指数関数的に急激に減少し, ③の場合は, 上昇しその後横這いとなった.

ファンヒーターを稼働し, 同条件で高さ1.8mの窓を1時間に1回5分間開放した場合の脂肪族炭化

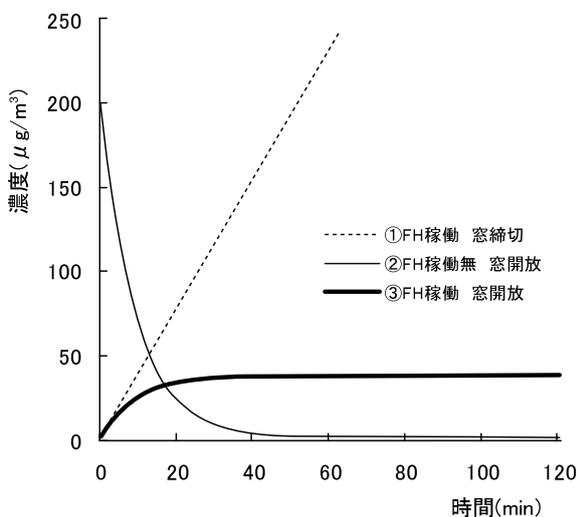


図5 脂肪族炭化水素濃度の時間変化

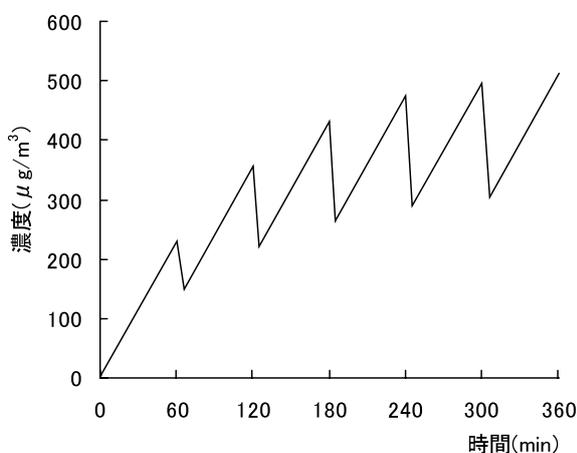


図6 1時間毎に5分間窓開け換気した時の脂肪族炭化水素濃度(予測値)

水素濃度の経時変化(計算値)を図6に示す. この場合, 部屋の換気回数は, 計算上0.66回/hrとなる. 室内濃度は換気時に一時的に減少し, これを繰り返しながら全体としては増加の傾向を示した.

3.5 窓の開放による換気の効果

表2に示す発生量を用いて, 天井高さ2.45mの8畳洋室(36.8 m^3)においてファンヒーターを使用した場合の換気方法の違いによる脂肪族炭化水素濃度の経時変化を予測した. 窓より流入する外気量は, 室内外の温度差, 室外の風速や風向の影響を受けるが, 床, 壁, 天井等への吸着は特に考慮せず, 流入の風速は0.1m/secと仮定した.

窓の開放時間は1時間あたり5分間とし, 高さ

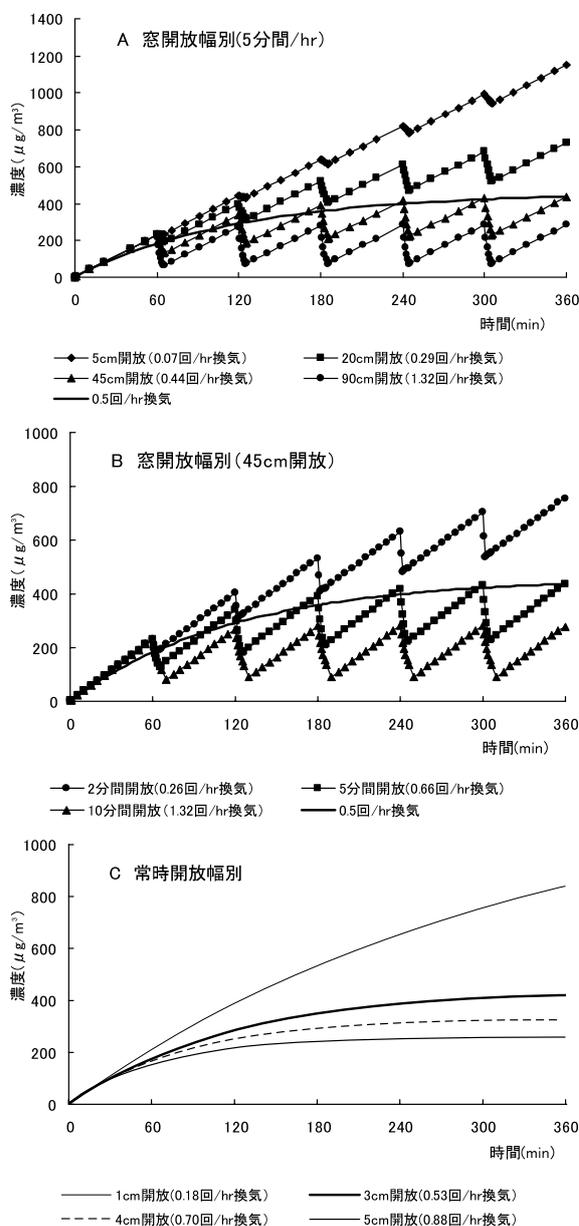


図7 換気条件別脂肪族炭化水素濃度(予測値)

1.8 m窓の開放幅を変えて室内濃度を予測した(図7A)。建築基準法の改正に伴いホルムアルデヒド対策として住宅の場合は換気回数0.5回/hr以上の機械換気設備(いわゆる24時間換気システムなど)の設置が義務付けられた⁷⁾。そこで参考としてこの部屋の条件での換気回数0.5回/hrで換気を続けた時の濃度も示す。窓を開放することで室内の濃度が減少し、閉じることで濃度が増加する。窓の開け幅が小さいと室内濃度の減少が小さく、結果として濃度は上昇した。

次に、窓を同じ幅で開けた場合の開放時間の違いによる室内濃度の経時変化を図7Bに示す。窓は開け幅を45 cmと仮定し、開放は1時間に1回とすると、開放時間が短いと増加と減少を繰り返しながら上昇の傾向を示した。

一方、窓を常時一定の開け幅で開放した場合の室内濃度の経時変化を予測した(図7C)。開け幅が小さいと濃度は上昇し、開放幅が大きいと室内濃度は上昇後一定となった。

ファンヒーターの実際の燃焼は室温が設定温度に近づくと燃焼は調整されることから、燃焼開始から30分に対して30分から60分の脂肪族炭化水素濃度を用いて3.2に示す式により発生量を求めた。15, 20, 25°C設定時の30~60分間の平均発生量は62.7 $\mu\text{g}/\text{min}$ であり、燃焼開始から30分の発生量の約2分の1であった。求めた発生量を用いて予測した脂肪族炭化水素濃度と実際の濃度の関係を示す(図8)。この発生量による予測濃度と実測値を比較するとよく一致した。そこで、発生量62.7 $\mu\text{g}/\text{min}$ を用いて、窓を30 cmの幅で1時間に5分の割合で開放した場合、常時2.5 cmの幅で窓を開放した場合及びこの部屋で換気回数0.5回/hrを確保した場合の室内濃度の経時変化を図9に示す。この部屋の条件においては、窓を45 cmの幅で1時間に5分の割合で開放する(換気回数0.44回/hr)か、常時2.5 cmの幅で窓を開放する(換気回数0.44回/hr)ことにより換気回数0.5回/hrを確保した場合と同程度の換気効果が期待できると考えられる。

今回の実験では、風速を0.1 m/secと仮定し風速や温度差については考慮していないので、風の強い日や外気温と室温の差が著しい日は外気の流入量の増加が見込まれる。また別の窓や扉の開放や換気扇の併用等により、空気の流れを利用するとさらに換気による効果が高まると推測される。なお、現在は熱交換型の換気扇も市販されており、これらを利用

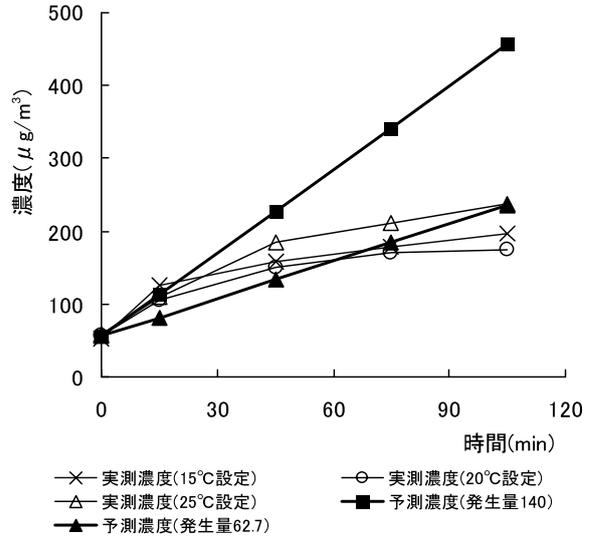


図8 設定温度別脂肪族炭化水素濃度と予測濃度

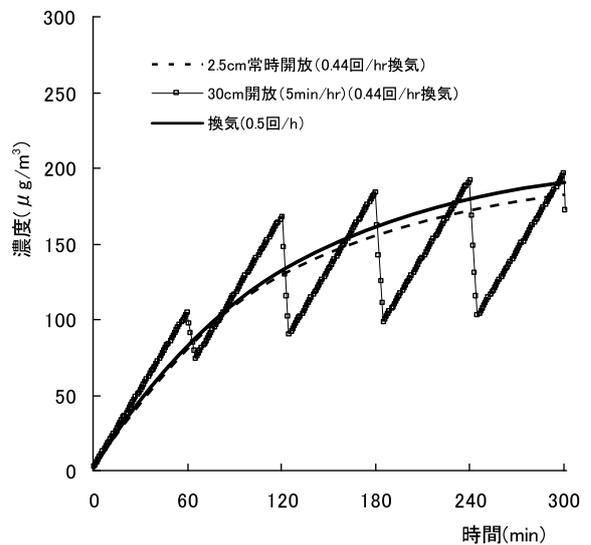


図9 換気条件別脂肪族炭化水素濃度(予測値)

すると室温の低下を抑えた上で換気効果が得られると思われる。

4. おわりに

- (1) 一般住宅で石油ファンヒーターによる、脂肪族炭化水素発生量を求めた。燃焼開始から30分間の脂肪族炭化水素の発生量は約140 $\mu\text{g}/\text{min}$ 、30~60分間の発生量は約63 $\mu\text{g}/\text{min}$ であった。ファンヒーターを使用後、窓開け換気を実施し換気量を求めた。換気量は3.9 m^3/min であった。求めた発生量及び換気量を使って室内濃度の予測を行った。
- (2) 床、壁、天井等への吸着は特に考慮せず、発生量は約63 $\mu\text{g}/\text{min}$ 、流出入の風速は0.1 m/secと仮

定した条件においては、窓を 30 cm の幅で 1 時間に 5 分の割合で開放する（換気回数 0.44 回/hr に相当）か、常時 2.5 cm の幅で窓を開放する（換気回数 0.44 回/hr に相当）ことにより、換気回数 0.5 回/hr を確保した場合と同程度の換気効果が期待できると考えられる。

- (3) 石油ファンヒーターは持ち運びができ、スイッチを入れてから短時間で室温を上昇できるので便利な暖房機器である。使用する場合は、建物の気密性を考慮した上で換気量が十分でない場合は、1 時間に 1 回の窓開け換気を実施するかまたは窓を数 cm 開放するなど自然換気を有効に取り入れて室内空気汚染を防止していく必要があると思われる。

文 献

- 1) 池田耕一 (1996) 室内空気汚染の健康影響, 公衆衛生研究, 45, 391-408.
- 2) 市川勇, 松村年郎 (1997) 室内空気環境基準の現状, 衛生化学, 43, 162-173.
- 3) 厚生省 (1999) 居住環境内における揮発性有機化合物の全国実態調査.
- 4) 山下晃子, 山浦由郎, 小山和志, 込山茂久 (2001) 長野県内一般住宅の揮発性有機化合物濃度, 長野県衛生公害研究所研究報告, 24, 13-18.
- 5) 安藤正典 (2002) 化学物質過敏症等室内空気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, 平成 13 年度総括・分担研究報告書.
- 6) 日本薬学会 (2000) 「衛生試験法・注解 2000」, p 1004-1008.
- 7) 「ホルムアルデヒドの発散による衛生上の支障がないようにするために必要な換気を確保することができる居室の構造方法を定める件」(平成 15 年 3 月 27 日付, 国土交通省告示 273 号).

Effect of Ventilation on Concentration of Volatile Organic Compounds in Indoor Air of Private Houses

Akiko YAMASHITA*, Hikaru SATSUMABAYASHI, Shigehisa KOMIYAMA
and Yoshio YAMAURA

* Nagano Environmental Conservation Research Institute, Public Health Team, 1978 Komemura, Amori,
Nagano-shi, 380-0944 Japan.