

原著論文

## Bake-out による VOCs 汚染の低減とその効果の評価

劉 瑜

[受付 2001. 3. 30] [受理 2001. 9. 7]

## Evaluation of the Bake-out Method to Decrease Indoor Air Pollution Caused by Volatile Organic Compounds

Yu Liu

[Received Mar 30, 2001] [Accepted Sep 7, 2001]

## 要 旨

近年、室内空気汚染の主な原因物質として建材などから発生する揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) が注目され、盛んに研究が行われている。事務所ビルの改修においては、居住者が工事終了直後に入居するケースが多いため、VOCs による汚染に対する対策を施すことが重要である。

室内濃度を低減するには、換気量を増やす以外の手段で、汚染発生量を低減することがもっとも有効であると考えられる。VOCs の発生量の低減策として Bake-out 手法が用いられている。Bake-out は数日間に亘って対象室を加熱 (30℃強) し、建材等からの VOCs の発生を促進して、その発生量を初期段階において多く排除する方法である。Bake-out の目的は、室内の初期発生量の低減と、それにより室内濃度が基準値を上回る期間を短縮するという2点にあると思われる。しかしながら、このような視点で Bake-out の効果を定量的に評価する研究報告は見当たらない。

筆者は改修直後のあるオフィスに対して Bake-out を実施し、またその後の半年間に亘って室内 VOCs 濃度を定期的に測定した。本研究はその結果を基に、Bake-out による初期発生量の低減とその後の室内濃度の低減への影響について定量的な評価方法を提案するものである。

## Abstract

Volatile Organic Compounds (VOCs) generated from building materials are gaining attention as a major cause of indoor air pollution and they have been adopted as the subject of many researches projects. It is important to take measures against VOCs pollutions especially in renovated office buildings, where occupants are likely to move into the buildings immediately after the renovation work is completed.

Seen from the standpoint of the mass balance of indoor air pollutants, the most effective approach to reduce the concentration of VOCs in the indoor air, other than increasing the air exchange rates, is to reduce the VOCs emission rates. Building bake-out is a method used for this purpose. The bake-out method will allow VOCs to escape from building materials at an early stage, by keeping the entire room heated at a temperature of 30 degrees Celsius or higher for several consecutive days, and subsequently ventilating the room to accelerate VOCs emissions. The two purposes of the bake-out method are: (1) to reduce the indoor VOCs generation in the initial stage, and (2) to shorten the period in which the indoor VOCs concentration exceeds the standard value. So far no research report has been found that quantitatively evaluates the effectiveness of the bake-out method in respect to this problem.

The author implemented the bake-out method in an office where the renovation work was just completed and then measured the indoor VOCs concentrations regularly for a period of six months. Based on the results of the above examination, this paper will propose the bake-out method as a way to reduce the initial-stage indoor VOCs generation, it will also present a quantitative evaluation method to verify the bake-out method's effectiveness in the reduction of the subsequent indoor VOCs concentration.

**Key words:** office building, volatile organic compounds, bake-outs, evaluation method

## 1. はじめに

新築や改修直後のオフィス内では VOCs の濃度が高く、その TVOC (Total VOC) 濃度が WHO の基準値

0.3 mg/m<sup>3</sup>まで減衰するのに数ヶ月間を要することを筆者らの研究により明らかにしている<sup>1)</sup>。VOCs による汚染を軽減するための一つの手法として Bake-out



TVOCの発生量を求めた。Bake-out 終了直後は、空調を数時間運転し、室内の温度が平時の状態に戻った時点で室内定常濃度を測定し、式(2)よりTVOCの発生量を求めた。Bake-outを行った3日後の入居日は、朝の空調運転開始時までの数時間のデータ(非定常値)を用いて式(1)よりTVOCの発生量を求めた<sup>6)</sup>。

$$M = Q(C - C_{oe}^{-mt}) / (1 - e^{-mt}) - C_s Q \quad (1)$$

$$M = Vn(C - C_o) \quad (2)$$

ここでは、

- M: TVOCの発生量 (mg/h)
- Q: 換気量 (m<sup>3</sup>/h)
- C: 室内TVOC濃度 (mg/m<sup>3</sup>)
- C<sub>o</sub>: 室内初期TVOC濃度 (mg/m<sup>3</sup>)
- C<sub>s</sub>: 外気濃度 (mg/m<sup>3</sup>)
- n: 換気回数 (h<sup>-1</sup>)
- t: 経過時間 (h)
- V: 室容積 (m<sup>3</sup>)

### 2.3 測定期間

Bake-out 期間中、その前後の室内諸状況を Table 1 に示す。Bake-out は8月7日から13日まで延べ137hにおいて平時より多くの外気を導入して行った(全外気換気)。なお、Bake-out 期間中において換気のみで室内温度を30℃前後に維持できたため、室内に内部発熱は与えなかった。

### 2.4 結果

Fig.1にトレーサガス SF<sub>6</sub>を用いて測定した換気回数の結果を示す。平時とBake-out 時の換気回数はそれぞれ1.07回/hと1.82回/hであることが分かった。

Fig.2にGC-MS法とPAS法で得られたTVOC濃度の関係を示す。両測定法の間により相関関係があり、PAS法で得られた相対濃度の信頼性は高いことを再確認した。以下に示すPASで得られた結果は、Fig.2に示す回帰式より換算したものである。

Fig.3にBake-out 前後の室内TVOCの発生量を示す。Bake-out 中の室内TVOCの発生量はBake-out 前の約2.8倍になり、Bake-out 直後から3日後まで低くなる傾向が見られる。この結果からBake-out 時に多くのVOCが発生し、換気により除去されることを確認した。

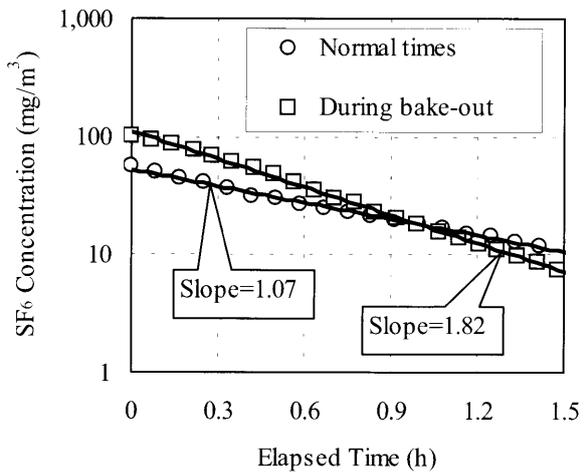


Fig.1. Air exchange per hour measured by trace gas

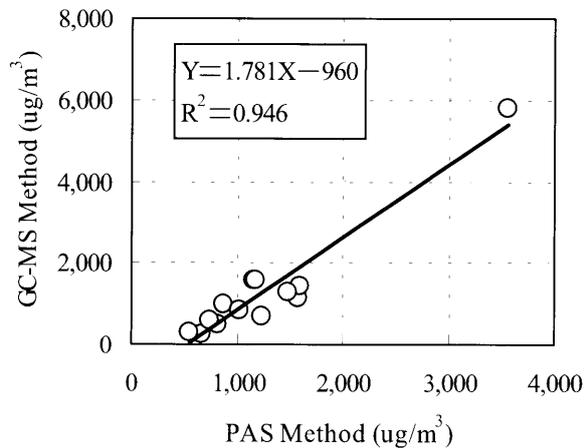


Fig.2. Relationship between GC-MS and PAS method

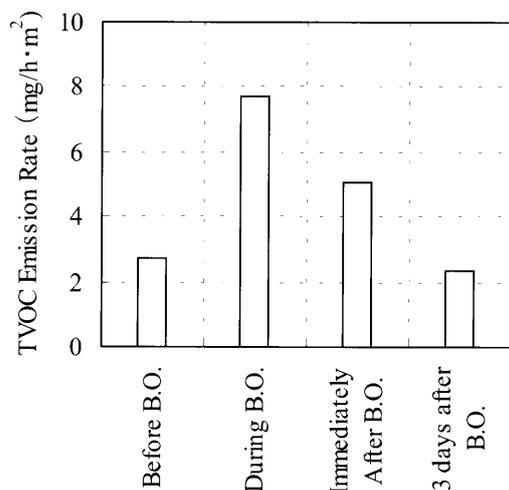


Fig.3. TVOC emission rates before and after bake-out

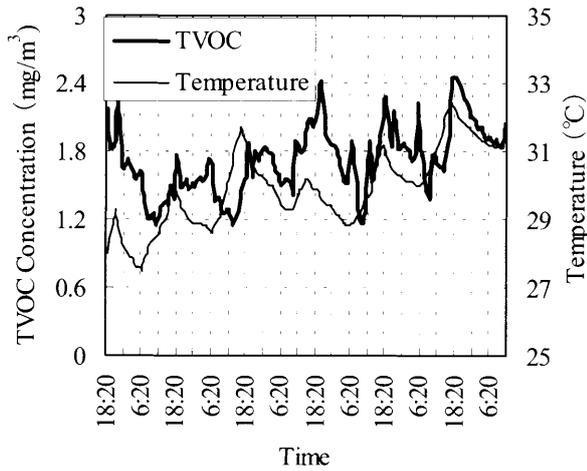


Fig.4. TVOC concentration and air temperature during the bake-out

Fig.4に Bake-out 時の TVOC 濃度と室温を示す。総じて室温の変化（上がるまたは下がる）に少し遅れて、室内の TVOC 濃度が室温と同じ傾向の変化を示している。Bake-out 時に除去される TVOC の量を式 (3) より求めた結果、306 g であった。

$$M = \sum C_i Q_i t \quad (3)$$

ここでは、

- C<sub>i</sub>: i 時間目の TVOC 濃度 (mg/m<sup>3</sup>)
- Q<sub>i</sub>: i 時間目の換気量 (m<sup>3</sup>/h)
- t: 経過時間 (h)

Fig.5に Bake-out 後3日目(8月16日)からの室内 TVOC 濃度の減衰を示す。TVOC 濃度は改修直後から 2~3 ヶ月後に WHO の基準値 0.3 mg/m<sup>3</sup> を下回るまで指数関数的に減衰することが分かった。なお、Fig.5に示す回帰式中の指数項の T は経過日数である。

### 2.5 実験結果に関する考察

ここで、まず建材から室内へ VOCs の放出のメカニズムについて考察を行う。Fig.6に建材内の VOCs が気中に放出されるモデルを示す。建材から室内空気中への拡散は Fick の第1法則 (式(4)) により表される。

$$dq/dt = D (\Delta C / \Delta L) \quad (4)$$

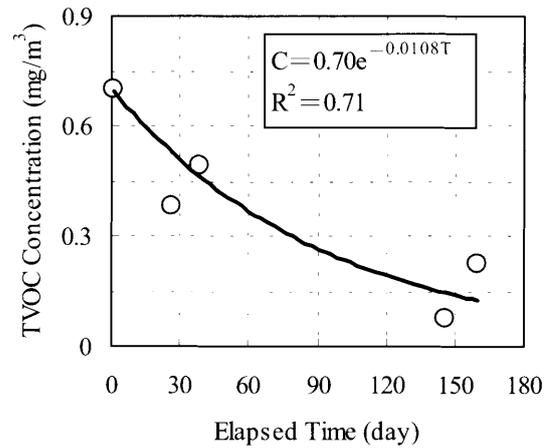


Fig.5. Time decay scale of TVOC concentration

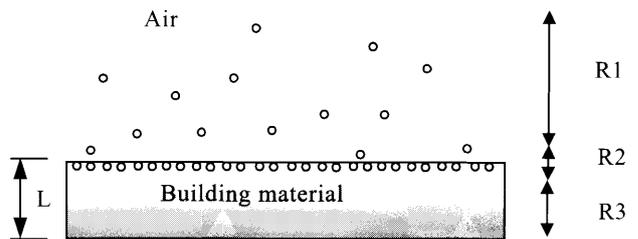


Fig.6. Diffusion model of VOCs moving from building material to indoor air

$$D = \Delta L / R \quad (5)$$

$$R = R1 + R2 + R3 \quad (6)$$

ここでは、

q: 単位面積の表面を通るモル数

t: 時間

D: 拡散係数

$\Delta C$ : 濃度差

$\Delta L$ : 建材の厚さ

R: 拡散抵抗係数

R1: 気中における拡散中の分子間衝突による抵抗

R2: 表面における分子の溶媒和状態の変化による抵抗

R3: 建材内における拡散中の分子間衝突による抵抗

式(4), (5)より建材内の VOCs が気中へ輸送(拡散)する量は濃度こう配に比例し、拡散抵抗係数に反比例することが分かる。一般的に  $(R1 + R2) \ll R3$  の場合は外部拡散支配型、 $(R1 + R2) \gg R3$  の場合は内部拡

散支配型とされている。塗料のような仕上げは外部拡散支配型で、殆ど全ての VOCs が初期の段階で放出される。合板内の接着剤などの拡散は内部支配型で、長期間に亘って徐々に空中へ放出される。

Bake-out は外部拡散支配型の発生量に対して効果が大きいばかりではなく、内部支配型のそれに対しても一定の効果が期待される。即ち、室内空気温度が上がることによって建材内の温度は上昇し、VOCs の平衡蒸気圧も指数関数的に上昇する。それに伴って拡散抵抗係数  $R_3$  が低下し、建材内の VOCs の気中放出速度が促進される。Girman ら<sup>3)</sup>の研究では、Bake-out 期間中に室温を 23℃ から 32~39℃ まで上げると、建材内溶媒の拡散係数および蒸気圧の増加はそれぞれ約 10% と 200% であることを明らかにしている。

本研究では、Bake-out 期間中の室温は  $29.9 \pm 1.2$ ℃、その期間中の TVOC の平均発生量は  $7.70 \text{ mg/h}\cdot\text{m}^2$  であり、Bake-out 前の  $2.74 \text{ mg/h}\cdot\text{m}^2$  の 2.8 倍である。これは、上記のように温度の上昇による建材内の拡散と蒸気圧の上昇に起因するものと考えられる。村上らの研究グループの数値解析研究結果によれば<sup>7)</sup>、室温を 23℃ から 30℃ に上昇させることで建材中の TVOC 拡散係数は約 4 倍、気中への放散量は約 2 倍増加している。本研究では村上らと同様な結果を得た。

また、Bake-out 中室内の TVOC 濃度（発生量）の変動が室温の変動に少し遅れて追隨しているのは、建材自体が熱容量を持っているため、空気から建材内部に熱を伝達するのに時間の遅れが生じるためと考えられる。

### 3. Bake-out 効果の評価

#### 3.1 評価方法

Bake-out による TVOC 濃度の低減を、室内 TVOC の初期濃度の低減とその濃度が基準値を下回るまでの期間の短縮という 2 点から評価すべきであると考えられる。Bake-out を実施した場合の TVOC の濃度減衰特性は Fig.5 に示している通りである。ここでは、Bake-out を実施しない場合の濃度減衰特性を予測し、Fig.5 との比較から Bake-out の効果を評価する。

室内 TVOC 濃度が長期的に指数関数的に減衰すること、取り入れ外気量が定風量であることから、室内 TVOC の発生量は指数関数的に減衰することが推測される。即ち、室内 TVOC の発生量は式(7)により表される。

$$M = M_0 \cdot e^{-AT} \quad (7)$$

ここでは、

$M_0$  : TVOC の初期発生量 (mg/h)

$A$  : 減衰係数 ( $\text{day}^{-1}$ )

$T$  : 経過日数 (day)

測定結果から (Bake-out 前, Fig.3 参照),  $M_0 = 2.74 \text{ (mg/h}\cdot\text{m}^2) \times 290 \text{ (m}^2) = 795 \text{ (mg/h)}$ ,  $Q = 1.07 \text{ (h}^{-1}) \times 711 \text{ (m}^3) = 760 \text{ m}^3/\text{h}$  であるため、Bake-out を行わない場合の濃度減衰は式(8)により表される。

$$C = M/Q = (M_0/Q) e^{-AT} \\ = (795/760) e^{-AT} = 1.05 e^{-AT} \quad (8)$$

仮に、「室内の TVOC の発生量、とりわけ発生量の減衰特性は室内温度、湿度、換気などの要素によって決定されるものである」との仮定が成立するとすれば、Bake-out の有無に拘わらず、同じ減衰係数を有する。即ち、式(8)の指数項の減衰係数  $A$  に Fig.5 の回帰式の 0.0108 値を用いることができる。従って、Fig.5 と同じ時間軸 (7 日から 9 日間が経過した 16 日) においての TVOC 濃度は式(9)となる。なお、式(9)の初期濃度は式(8)より求めた ( $C = 1.05 \times e^{-0.0108 \times 9} = 0.95$ )。

$$C = 0.95 e^{-0.0108T} \quad (9)$$

Fig.5 の回帰式と式(9)を用いることによって、Bake-out の効果を定量的に評価することができる。

#### 3.2 結果

Fig.7 に Bake-out を行う場合とそうでない場合の室内 TVOC 濃度の減衰を示す。Bake-out を行った場合は Fig.5 の回帰式、そうでない場合は上記の式(9)を用いた。

Fig.7 より、Bake-out を行うことによって、室内 TVOC の初期濃度は  $0.25 \text{ mg/m}^3$  (28%) 低くなること、室内 TVOC 濃度が WHO の基準値  $0.3 \text{ mg/m}^3$  以下になるまでの期間が 29 日間を短縮できることが推測された。

#### 3.3 Bake-out 効果に関する考察

以下に、Bake-out 時の除去量と、その後の室内濃度低減の関係について考察する。

Bake-out を行う場合、室内 TVOC 濃度が基準値

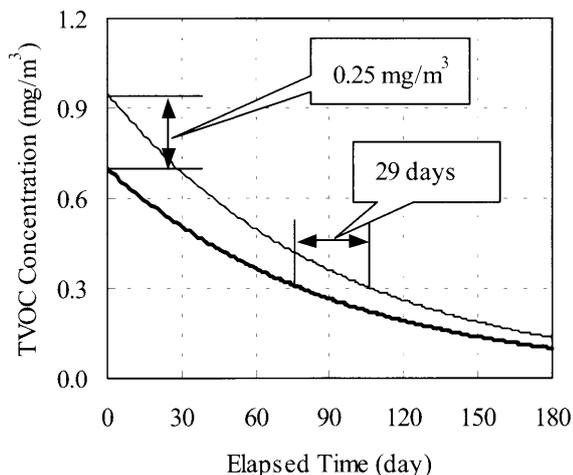


Fig.7. Comparison of TVOC Concentration with and without Bake-out

0.3 mg/m<sup>3</sup>以下になるのに79日間かかり (Fig.7参照), この間の換気による TVOC の除去量 ER は452 gであった (式(10)参照)。なお, 式(10)の Q は排気量 (= 換気量) であり, 実際の運転時間より算出した (Q = 760 m<sup>3</sup>/h × 16 h/day = 12,160 m<sup>3</sup>/day)。

Bake-out を行わない場合は, 上記と同じ方法で求めると79日間の除去量は614 gであり, 上記の452 gとの差は162 gである。同様に T → ∞ の条件で求めた場合, その差は282 g になり, Bake-out 時における TVOC の除去量 306 g (前出) と同程度である。このことから, Bake-out 時除去される TVOC の量とその後の室内濃度低減の効果を左右することが明らかになった。

$$\begin{aligned}
 ER &= \int_0^{79} QCdT \\
 &= \int_0^{79} 12,160 \times 0.70e^{-0.0108T} dT \\
 &= 452,358 \text{ mg} \Rightarrow 452 \text{ g} \quad (10)
 \end{aligned}$$

#### 4. まとめ

改修直後のオフィスに対して Bake-out を実施し, その効果を Bake-out 後の長期測定データに基づいて定量的に評価した。その結果, 以下のことが明らか

になった。

- (1) Bake-out の効果は初期発生量の低減と室内 TVOC 濃度が関連基準値を下回るまでの期間の短縮という2点から評価する方法を提案した。本評価方法を用いて評価を行った結果, Bake-out (137 h, 29.9 ± 1.2 °C) を実施することによって, 初期発生量 (濃度) は28%の低減, 基準値まで減衰するのに29日間を短縮できることが推測された。
- (2) Bake-out 時除去された TVOC の量 (306g) は, その後の室内濃度の低減効果を左右する。

注: 本論文は平成12年度室内環境学会総会にて発表した内容<sup>8)</sup>を, 加筆・修正したものである。

#### 参考文献

- 1) 劉 瑜, 平岡憲司: 改修直後の事務室内における VOC 濃度及びその減衰, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 827-828 (1998).
- 2) Indoor Air BULLETIN, Vol.2, NO.7.
- 3) Girman, J. R., L.Alevantis, G. Kulasingam, M. Petreas, and L. Webber, 1987: The Bake-out of an Office Building, In Seifert et al (Eds), Indoor Air '87, Proceedings of the 4th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol.1, 22-26. (1987).
- 4) Offermann, F. J., Loiselle, S. A., Ander, G. D., and Lau, H.: Indoor Contaminant Emission Rates Before and After a Building Bake-out, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol.6, 687-692 (1993).
- 5) 野崎淳夫, 飯倉一雄, 吉澤晋, 池田耕一, 堀雅宏: 室内化学物質汚染低減化対策としてのベイクアウトの効果 (その1) 室内 VOC, ホルムアルデヒド汚染に関する研究 (その2): 日本建築学会計画系論文集, 第530号, 61-66 (2000).
- 6) 劉 瑜, 平岡憲司, 稲毛亮太: 改修後の事務室内における VOC 濃度の減衰特性とその低減方法その2 - 低減方法の検討, 日本建築学会学術講演梗概集, 853-854 (2000).
- 7) 村上周三: 室内の化学物質汚染の実態と防除対策 - 基礎から先端まで -, 日本学術会議50周年記念, 第2回環境工学サロン (1999).
- 8) 劉 瑜: Bake-out 効果の評価方法, 平成12年度室内環境学会総会講演集, 158-161 (2000).