

# 化学物質による室内環境汚染の実態

保利 一<sup>1)</sup>

1) 産業医科大学産業保健学部第1環境管理学

## Indoor air pollution by chemical compounds

Hajime Hori<sup>1)</sup>

1) Department of Environmental Management-I, School of Health Sciences University of Occupational and Environmental Health, Japan

### 要約

室内に存在する代表的な環境汚染物質であるたばこ煙 (ETS)、揮発性有機化合物 (VOCs)、ホルムアルデヒドおよび窒素酸化物 (NO, NO<sub>2</sub>) について、測定結果をもとに室内環境汚染の実態について概説した。喫煙室を設け、空気清浄機を設置している事務系の事業所で環境中の粉じんおよびCO<sub>2</sub>を測定した結果、喫煙室とその周辺でたばこ煙と見られる基準値を超える粉じんが検出された。喫煙者が多ければ環境たばこ煙の濃度は基準値を容易に上回るため、低減するには局所排気装置などの屋外に排気するシステムの導入が必要である。また、新築家屋でVOCおよびホルムアルデヒド濃度を測定した結果、ホルムアルデヒドについては、入居後も夏場を中心に数百ppbのガスが検出され、トルエンなども比較的長期間残留した。暖房器具からの窒素酸化物の発生は石油ファンヒーターからが大きく、ガスストーブや電気ストーブからはきわめて少ないか、またはほとんど検出されなかった。

### Abstract

Typical air pollutants in indoor air, that is, environmental tobacco smoke (ETS), volatile organic compounds (VOCs), formaldehyde and nitrogen oxides concentrations were measured to survey actual conditions. The ETS concentrations (suspended particles (SP) and carbon monoxide (CO)) were measured in an office with a smoking room. In the smoking room, the SP concentration was elevated up to greater than 1.5 mg/m<sup>3</sup> that is more than ten times higher than the control level in the guidelines (0.15 mg/m<sup>3</sup>). Even corridors near the smoking room, the SP concentration often exceeded the control level. To reduce the SP concentration in the smoking room, a ventilation system that can exhaust the contaminated air to outdoors directly. The VOCs and formaldehyde concentration in a new house were measured for 1 year. More than 1200 ppb of formaldehyde gas was detected before the residents moved into the house and several hundreds ppb of gas had been remained even 1 year after. In the VOCs, toluene and trichloroethylene vapors were remained for a long period of time. Hexane was detected at first, but it decreased quickly and it was not detected in the next month. Nitrogen oxides released from 4 different types of heaters were measured in a model room (45m<sup>3</sup> in volume). Large amounts of nitrogen oxides were released from an oil fan heater and a convection oil heater, while a gas heater and an electric heater did not or scarcely release nitrogen oxides.

《Key words》 indoor environment, environmental tobacco smoke, volatile organic compounds, formaldehyde, nitrogen oxides

別刷請求宛先: 保利 一

〒807-8555 北九州市八幡西区医生ヶ丘1-1 産業医科大学産業保健学部第1環境管理学講座

Reprint Requests to Hajime Hori, Department of Environmental Management- I, School of Health Sciences University of Occupational and Environmental Health, 1-1 Iseigaoka, Yahatanishi-ku, Kitakyushu 807-8555 Japan

## I. はじめに

近年、Sick Building Syndrome (SBS) や化学物質過敏症などと関連して室内における環境汚染が注目されてきている。代表的な室内環境汚染化学物質としては、たばこ煙、建材や家庭用品から発生する揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) およびホルムアルデヒド、さらに暖房器具等から発生する窒素酸化物 (NO, NO<sub>2</sub>) や一酸化炭素 (CO) などがある。ここでは著者らの測定結果、および産業医科大学で行われた調査結果をもとに、化学物質による室内環境汚染の実態について述べる。

## II. 室内環境汚染物質の分類と特徴

### 1. たばこ煙

環境たばこ煙 (Environmental Tobacco Smoke, 以下ETSと略す) は、ガス状物質と粒子状物質とからなるが、その中に含まれる化学物質は同定されているものだけでも4000種類以上、同定されないものを含めると10万種類にもものぼるとされており<sup>1)</sup>、室内における最大の環境汚染物質であると考えられる。たばこ煙に含まれる有害化学物質としては、ガス相では一酸化炭素 (CO) が圧倒的に多いが、そのほかには硫酸カルボニル、窒素酸化物、ホルムアルデヒド、ベンゼンなどが比較的多く含まれている<sup>2)</sup>。一方、粒子相における代表物質はタールとニコチンであるが、フェノールやカテコールも数10~300 μg程度含まれており、さらに2-ナフチルアミンやo-トルイジン、ベンゾ (a) ピレン、ベンゾ (a) アントラセンなどの発がん物質も多数含まれている<sup>2)</sup>。

たばこ煙には主流煙と副流煙とがあるが、一般に副流煙の方が主流煙よりも高濃度の有害物質を含んでおり、喫煙者のみならず非喫煙者においても、喫煙者から発する副流煙を吸入するいわゆる受動喫煙による健康影響が懸念されている。特に、1日の約1/3を過ごす職場において非喫煙者の受動喫煙を防止することはきわめて重要である。このため労働省では、平成8年2月に職場における喫煙対策のためのガイドライン<sup>3)</sup>を策定し、職場での受動喫煙を防止するための対策を講ずるよ

う事業者に求めている。

### 2. 揮発性有機化合物 (VOC)

VOC (Volatile Organic Compounds) は揮発性を有する有機化合物の総称で、室内環境では300種類以上の物質が検出されている<sup>4)</sup>。室内環境中のVOCの発生源としては、木材、合板、畳、塗料、接着剤、防腐剤などがあげられる。VOCは多種類の化学物質からなっているので、測定および評価の方法もまちまちである<sup>5)</sup>。代表的な評価方法としては、いくつかの代表物質について、ガスクロマトグラフ (GC) またはガスクロマトグラフ質量分析計 (GC/MS) を用いてそれぞれの物質の濃度を算出し、それらの総和または平均濃度を用いる方法、GC等で検出されたピークの総面積をある代表物質 (トルエンなど) で換算し、全揮発性有機化合物 (TVOC) として一括定量する方法、および、検出されたピークを低沸点成分と高沸点成分に分け、それぞれ異なる代表物質で換算する方法などがある<sup>6)</sup>。

### 3. ホルムアルデヒド

ホルムアルデヒドは沸点が-19.5℃の刺激性のガスである。室内におけるホルムアルデヒドの発生源はホルマリン消毒液、建材 (尿素ホルムアルデヒド接着剤を用いるパーティクルボード、ファイバーボード等) や家具などであるが、前に述べたようにたばこ煙にも含まれている。ホルムアルデヒドは動物実験において発がん性<sup>7)</sup>が認められており、IARC<sup>8)</sup>は、ホルムアルデヒドを発癌可能性物質に分類している。

### 4. 窒素酸化物・その他

窒素酸化物は工場や自動車の排ガス等に含まれており、一般大気中にも存在するが、室内における窒素酸化物の発生源は、石油ストーブや石油ファンヒーターなどの燃料 (灯油) 中に含まれる窒素分が中心である。灯油の燃焼により、燃料中の窒素が酸化されてNOやNO<sub>2</sub>が発生する。また、灯油等にはほとんど含まれていないが、重油には硫黄分が含まれており、重油ヒーターなどからは硫黄分の燃焼によりSO<sub>2</sub>が発生する。一酸化炭素 (CO) や二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) も燃焼に伴って発生する。特に不完全燃焼の場合にはCOの発生量が

高くなる。

このほか、コピー機や静電式の空気清浄機等、高電圧を発する機器からはオゾンが発生することが知られている<sup>9)</sup>。

### Ⅲ. 室内環境汚染物質の調査結果

#### 1. 喫煙室を設置した某事業所における環境たばこ煙 (ETS) の濃度測定

コンピュータを用いて事務処理を行っている某事業所において、たばこ煙 (ETS) の環境調査を行った<sup>10)</sup>。Fig.1に部屋のレイアウト図を示す。この事業所では200名程度が勤務しており、そのうちの約半数が喫煙者であった。床面積16m<sup>2</sup> (容積45m<sup>3</sup>) の小会議室が喫煙室に改造されており、カウンター型の空気清浄機 (1台あたりの処理風量15m<sup>3</sup>/min) が3台 (処理容量45m<sup>3</sup>/min) 導入されていた。喫煙室には本来ドアがあったが、出入りの邪魔になるので取り払われていた。

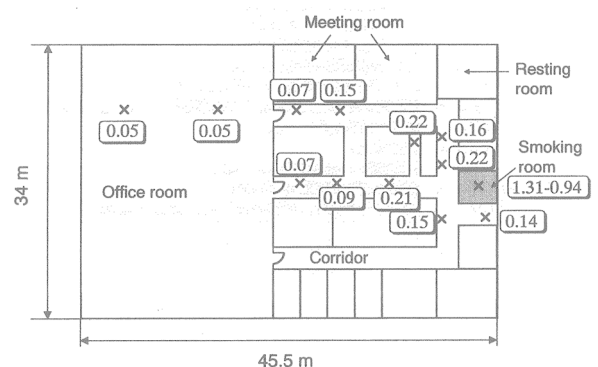


Fig.1 Office layout and profile of suspended particle concentrations in ppm.

×; sampling points

ETSには前に述べたように多数の物質が含まれているが、汚染の状態を迅速かつ定量的に把握するため、ここではガイドラインに従い、環境中の浮遊粉じん濃度と一酸化炭素<sup>3)</sup> (CO) 濃度について測定した。図に示す各点で、ピエゾバランス粉じん計 (カノマックス製) およびデジタル粉じん計 (柴田科学、P-5H型) で粉じん濃度の測定を行った。また、デジタル粉じん計に記録計 (横川北辰電気、Type3057) を接続し、喫煙室内の粉

じんの濃度を24時間以上にわたって連続的にモニターした。CO濃度の測定にはガス検知管 (ガステック製) を使用した。

粉じん濃度の測定結果をFig.1中に数字 (ppm) で示している。喫煙室内の粉じんはほとんどがたばこ煙と考えられるが、その濃度は0.9-1.3mg/m<sup>3</sup>と、ガイドラインに示す粉じん濃度の基準 (0.15mg/m<sup>3</sup>) を遥かに超える濃度の粉じんが観測された。

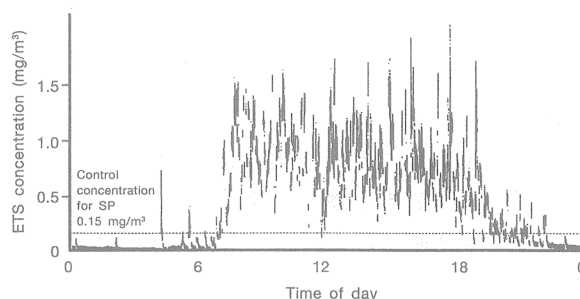


Fig.2 Temporal change of ETS concentration in the smoking room.

Fig.2には喫煙室内におけるたばこ煙濃度の経時変化を示している。午前7時頃から午後7時頃まではガイドライン値を下回することはほとんどなく、ピーク時の粉じん濃度はガイドライン値の10倍に相当する1.5mg/m<sup>3</sup>以上にまで上昇していることがわかる。喫煙室には常時数名が喫煙しており、ピーク時には10名以上が同時に喫煙していた。ここでは1日に1,200本を超えるたばこが消費されており、昼間は1時間に90本近いたばこが消費されている時間帯もあった。喫煙室の外の廊下では、喫煙室から離れるに従って粉じん濃度は低くなっており、事務室 (執務室) では0.05mg/m<sup>3</sup>と、ガイドライン値を十分満たす結果が得られている。このことから、非喫煙者に対する分煙対策は一応成功していると考えられる。しかしながら喫煙室内の粉じん濃度が極めて高いこと、また、公共スペースである廊下でも喫煙室に近いところでは粉じん濃度がガイドラインの値を超えていることを考えると、喫煙室におけるたばこ煙対策をさらに進める必要がある。

この喫煙室内では、処理風量を室内容積で除し

て求めたいいわゆる換気回数に相当する値は60回/hにもなっている。それにもかかわらず、このようにたばこ煙の濃度が高いのは、空気清浄機の能力に比較して喫煙者数が多いことと、カウンターの開口面に煙が有効に吸い込まれていないことが主な原因と考えられる。1本のたばこからの煙の発生量は約10mg<sup>11)</sup>であるので、1回の喫煙を5分とすると、喫煙者が1人の場合、たばこ煙の発生速度は2mg/minとなる。このとき、発生した煙がいったん室内に拡散した後、空気清浄機に吸い込まれ、集じん機で100%処理されると仮定すると、処理風量が45m<sup>3</sup>/minであれば、4人以上が同時に喫煙するとガイドラインの基準である0.15mg/m<sup>3</sup>を超えることが推測される<sup>12)</sup>。ただし、設置している空気清浄機のたばこ煙に対する集じん率はカタログ値で77%程度であるので、実際には4名未満でも基準を超えることが予想される。

したがって、喫煙者の数が多い場所では、室内循環型の空気清浄機では限界があることがわかる。喫煙室といえども、やはりガイドライン値を満たすよう努力する必要がある、そのためには、独立した排気設備を持つ局所排気装置の設置が望まれる。

なお、CO濃度についてはいずれの測定点でも検知管の定量下限(5ppm)以下であり、すべての測定点でガイドラインに示されている基準値(10ppm)を下回っていた。

## 2. 新築住宅におけるVOCおよびホルムアルデヒドの測定

一戸建て新築住宅(鉄骨ユニット)を対象に、入居前および入居後における室内の有機汚染物質の測定を行った<sup>9)</sup>。VOCの測定については、活性炭300mgを充填した有機ガスサンプラー(柴田科学)を用い、ガスクロマトグラフ質量分析計(GC/MS、日本電子製DX303)により未知試料の同定を行った後、FID付ガスクロマトグラフ(Hewlett Packard,5890A)を用いて濃度を定量した。

ホルムアルデヒドの分析方法にはいろいろな方法があるが、ここではNodaらの方法<sup>13)</sup>を用いた。すなわち、蒸留水にホルムアルデヒドを吸収させ、

この溶液に1-ヒドラジノフタラジンを加えて生成する誘導体(s-トリアゾロ[3,4a]-フタラジンを)を高速液体クロマトグラフ(HPLC法)により定量した。

Fig.3に入居前のVOCの測定結果を示す。室内からは17種類の物質が検出されている。トリクロロエチレンが最も多く、ついでヘキサン、トルエンの順であったが、そのほかにベンゼン、エチルベンゼンなどの芳香族炭化水素類、メチルエチルケトン(MEK)やメチルイソブチルケトン(MIBK)などのケトン類、さらに脂肪族炭化水素類などが検出されている。また、この図には示されていないが、ホルムアルデヒドも寝室で約1200ppb、その他の部屋でも400ppb以上とWHOの環境基準80ppbを遥かに上回っていた。

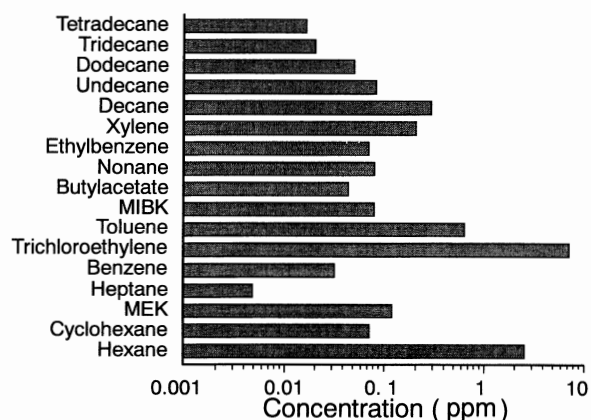


Fig.3 VOCs detected in a new house.

入居前に濃度が高かった3種類のVOCおよびホルムアルデヒドについて、1年間にわたって濃度の経時変化を調べた結果をFig.4に示す。ヘキサンについては、入居後には検出されなくなったが、トルエンおよびトリクロロエチレンについては比較的長期間にわたって検出されている。

ホルムアルデヒドについては、入居時にはすべての部屋で濃度は低下しているが、その後は夏場を中心に高濃度の状態が続き、約1年経過しても数百ppbのホルムアルデヒドガスが残留していた。

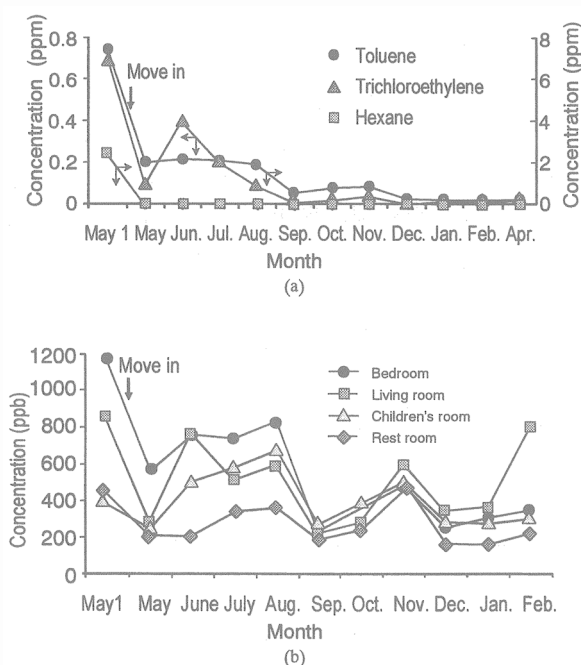


Fig.4 Temporal change of VOC and formaldehyde gas concentration in the new house.

(a):VOCs (b):formaldehyde

### 3. 暖房器具から発生する窒素酸化物の測定

NO<sub>2</sub>の個人曝露濃度は冬季に高く、夏季に低い傾向がある。この原因としては、冬季に使用される暖房器具から発生する窒素酸化物が考えられる。そこで、広さ約10畳 (床面積18m<sup>2</sup>、気積45m<sup>3</sup>のモデルルームを使用し、室内で種々の暖房器具を使用した場合のNO<sub>x</sub>濃度を測定した<sup>9)</sup>。このモデルルームは入口のドアの下に約6 cmほどの隙間があり、換気扇を作動しない場合でもこの空間を通して室内の空気は換気される。この中で、石油ファンヒーター、対流式石油ストーブ、ガストーブおよび電気ストーブを使用したときの室内のNO<sub>x</sub> (NO、NO<sub>2</sub>) 濃度を経時的に測定した。

Fig.5 (a) は石油ファンヒーターを運転したときの室内のNO、NO<sub>2</sub>およびNO<sub>x</sub>濃度の測定結果を示している。発生したNO<sub>x</sub>の多くはNOであった。運転開始と同時にNO、NO<sub>2</sub>とも上昇するが、約2時間ではほぼ横ばいになっている。これは、室内の濃度が高くなると、ドアの隙間などから室

外に排出されるガスの量もそれに比例して大きくなるので、約2時間で室外に排出される窒素酸化物の量とストーブからの発生量がほぼ等しくなったためと考えられる。運転を停止するとNO<sub>x</sub>濃度は急速に低下し、停止後約3時間でほぼ運転前の濃度に近づいている。

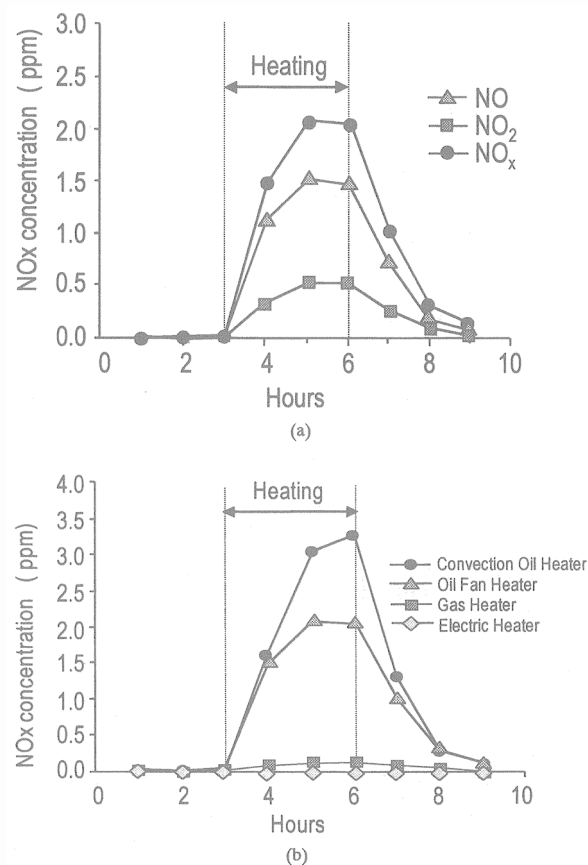


Fig.5 NO<sub>x</sub> concentration in a model room generated from heaters.

(a):Temporal change of NO,NO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> concentrations when an oil fan heater is operating.

(b):Temporal change of NO<sub>x</sub> concentrations released from various heaters.

Fig.5 (b) は4種類の暖房器具を使用した時のNO<sub>x</sub>濃度の経時変化を示している。対流式石油ヒーターと石油ファンヒーターでは、NO<sub>x</sub>の濃度は点火と同時に急激に上昇しているが、ガストーブではNO<sub>x</sub>の上昇は小さかった。これらの暖房器具では、いずれも運転を停止するとNO<sub>x</sub>濃度は低下している。使用終了後に濃度が低下するのは、

ドアの隙間などを通じて室内の空気が換気されるためと考えられる。また、電気ストーブからはほとんどNO<sub>x</sub>は発生しなかった。NO<sub>x</sub>濃度の上昇が電気ストーブやガスストーブではほとんど認められないかきわめて低く、石油系のヒーターではNO<sub>x</sub>が顕著に増加したことから、NO<sub>x</sub>主な発生源は灯油に含まれる窒素分であると推測される。

このNO<sub>x</sub>の経時変化から、この部屋の換気量を推定することができる。すなわち、単位時間あたりのNO<sub>x</sub>の発生量をG (mg/h)、部屋の気積をV (m<sup>3</sup>)、室内の濃度をC (mg/m<sup>3</sup>) 換気量をQ (m<sup>3</sup>/h) とすると、室内のNO<sub>x</sub>の濃度変化は(1)式で表すことができる。

$$V \frac{dC}{dt} = -CQ + G \quad (1)$$

(1) 式を解くと

$$\left. \begin{aligned} C &= \frac{Q}{G} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{Q}{V}t\right) \right\} & (t \leq t_0) \\ C &= \left(C_0 - \frac{G}{Q}\right) \exp\left(-\frac{Q}{V}(t-t_0)\right) & (t > t_0) \end{aligned} \right\} (2)$$

となる。ただし、 $t_0$ は、燃焼終了までの時間、 $C_0$ は燃焼終了時のNO<sub>x</sub>ガスの濃度である。これから、Fig.5の測定値に最も合致するような換気量Qを求めたところ、 $Q=40 \text{ m}^3/\text{h}$ となった。これから、この条件でのモデルルーム ( $V=45 \text{ m}^3$ ) の換気回数 ( $=Q/V$ ) は1回弱と計算される。これは、特別の換気を行っていない場合であるが、換気回数を大きくすればするほど環境中のNO<sub>x</sub>濃度は低くなる。たとえば、この部屋の換気回数を一般事務室なみの12回程度にすればNO<sub>x</sub>濃度は0.2ppm以下に押さえることができる。また、家庭用換気扇 (排風量約15m<sup>3</sup>/min) を使用すれば、室内濃度は環境基準に近い0.1ppm程度にまで低減することができる。したがって、冬季に暖房器具、特に石油ファンヒーターを使用する場合、部屋の換気に気をつけ、十分な換気回数を確保することが重要である。

#### IV. まとめ

代表的な室内汚染物質であるETS、VOC、ホルムアルデヒドおよびNO<sub>x</sub>について、測定結果をもとに室内汚染の実態について述べた。まず、たばこ煙 (ETS) であるが、JTの調査によると平成9年度における我が国の喫煙率は、男性約56%、女性約14%であり、男性は減少傾向にあるのに対し、女性はほぼ横ばいである。欧米ではオフィス等の室内では全面禁煙としているところが多いが、我が国の事情を考えると全面禁煙は難しい。ただし、非喫煙者がたばこ煙の曝露を受けないよう配慮する必要があり、そのためには喫煙室を設ける空間分煙が現実的と思われる。その場合、喫煙者数を勘案し、適切な処理風量を有する空気清浄機または排気システムを導入する必要がある。

VOCやホルムアルデヒドは室内環境汚染の代表物質であるが、特に新築家屋やビル等ではしばしば高濃度の物質が検出されている。これらの物質は、建材や家具等由来のものが大部分であると考えられる。このため、最近では材料や工法を改良することによって建材中に含まれる環境汚染物質を減少させる方法が検討されてきている。しかし、最近の建物は気密性が高く、いったん大気中に放出された物質の濃度を低減させるには、十分な換気回数を確保する必要がある。また、このほか、生活に伴って発生する物質もあるが、これらについても適切な換気を行うことで環境濃度を低減させることができる。暖房器具から発生するNO、NO<sub>2</sub>、CO等についても同様のことが言える。

このように、室内環境にあっては、換気が重要な因子となる。十分な換気回数を確保することはもちろんであるが、必要以上の換気を行うと、特に夏場や冬場には空調に影響を与えることが考えられるので、この点を考慮して、適切な換気を行う必要がある。

## 文献

- 1) 労働省労働安全衛生部編：やさしい空気環境へ—職場における喫煙対策推進マニュアル—。中央労働災害防止協会。1996,pp207
- 2) NIOSH:Environmental tobacco smoke in the workplace.Lung cancer and other health effects.Publication DHSS(NIOSH)1991,pp91-108
- 3) 労働省安全衛生部環境改善室編：職場における喫煙対策ガイドラインと解説。中央労働災害防止協会。1996
- 4) Crump DR, Madany IM: Daily variations of volatile organic compounds concentrations in residential indoor air. Saarela K, Kallioski P, et al (eds): Indoor Air '93, Proceedings of the 6th international Conference on Indoor Air Quality and Climate, Helsinki, 1993, Vol.12, pp.1520
- 5) Knoppel H: Sampling and analytical issues pertaining to the characterization of indoor source emissions. Ann NY Acad Sci 641:112-124
- 6) 日本建材産業協会：平成8年度通商産業省工業技術院委託 建材分野の国際統合化調査研究成果報告書。1996
- 7) NIOSH: Formaldehyde; Evidence of carcinogenicity. Joint NIOSH and OSHA Bulletin, No.34.1980
- 8) International Agency for Research on Cancer: IARC Monograph on the evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to man, some aromatic amines hydrazine and dyestuffs. International Agency for Research on Cancer, Lyon, 1982, Vol.29, pp345-389
- 9) 見玉 泰、香川 順、他：室内環境における化学物質汚染および発生源の検索。公害健康被害補償予防協会委託業務報告書、家庭環境の整備に関する調査報告書。1991, pp129-174
- 10) Yamato H, Hori H, et al: Environmental tobacco smoke and policies for its control. Industrial Health 34:237-244, 1996
- 11) 木村菊二：作業環境と快適職場。1. 空気環境。快適職場づくり参考書。中央労働災害防止協会、1993, pp11-23
- 12) 保利 一、大和 浩、他：職場における喫煙対策の方法。空気清浄 34:13-19, 1996
- 13) Noda H, Minemoto M, et al: High performance liquid chromatographic determination of formaldehyde accomplished using hydrazine. Chem Pharm Bull 34:3499-3510, 1986