自然換気の室内における粉塵および金属の性状

CHARACTERISTICS OF PARTICULATE DUSTS AND METALS IN INDOOR AIR WITH NATURAL VENTILATION

宮崎 竹二*, 檜崎 正也**
Takeji MIYAZAKI and Masaya NARASAKI

Concentrations and size distributions of the particulate dusts and metals in indoor and outdoor air were measured in the experimental room with Andersen air sampler and low volume air sampler.

It was shown that Indoor/Outdoor concentration ratios and logarithm of MMD for the particulate dusts and metals were correlated closely. I/O concentration ratios and MMD of the indoor particulate dusts and metals when the window was opened, much increased than them when the window was closed. Similar measurement was carried out in a private house to confirm the results above.

Keywords : *dust, metal, ion, particle size, indoor air*
粉塵, 金属, イオン, 粒径, 室内空気

1. はじめに

室内環境中の粉塵, 粉塵中金属の測定は, 竹内¹⁾, 長良²⁾, D. J. Moschandreas³⁾などによってなされてきた。粉塵の測定はそれ自体人体影響の面から重要であるが, 金属の測定は, 特に有害な金属については特殊の場合以外は濃度的にも低いので, あまり重要でないと思われる。しかし粉塵中金属成分の割合を知ることは, 大気中の粉塵についてよくなされているように, 例えば喫煙の寄与など粉塵の発生源を同定するのに有効である。別報で事務室などの粉塵にその手法を適用する予定である。

室内粉塵濃度を考えるとき, 外気濃度の影響をまづ知ることが必要であるが, 粉塵の室内濃度と外気濃度との関係についての研究も, 過去には数多くなされている^{4)~8)}。しかし, まず室内発塵のない, また除塵されない自然換気の条件での室内外の関係を調べる必要がある。室内での発生源がない場合, 空調がなされていないならば, 室内粉塵濃度に影響する因子として外気粉塵濃度とその粒径分布, 換気量, 開口条件などが考えられる。また諸因子のうち, 外気濃度が変化した場合, その濃度に比例して室内濃度が決まると考えられている。そこで, いままで粉塵の外気濃度に対する室内濃度の比 (以下 I/O 比とする) について 0.80 (Biersteker et al.,

1965)⁹⁾, 0.69 (Ib Andersen, 1972)¹⁰⁾などの値が発表されているが, L. Alzona (1979)¹¹⁾によって報告されているように, その比は換気量, 粉塵の粒径分布, 開口条件などによって異なってくると考えられる。

粉塵の粒径分布については, 今回の結果からも外気の MMD (Mass Median Diameter, 質量中央径) は, 0.90~3.8 μm の範囲であるが, 金属の MMD については, 種類により大きく異なり, 今回の外気の結果から, Fe の MMD 5.1 μm から V の MMD 0.63 μm まで大きく変化するが, 1 山型の特定の金属に限れば MMD はおおよそ一定である¹²⁾。それゆえ, 粒径と I/O 比の関係をみるのに, 粉塵濃度だけでなく粉塵中の金属成分も分析すれば, 広い範囲での粒径についての情報を得ることができ, その結果, 外気の濃度と粒径分布から室内への影響をある程度知ることができる。

本研究の目的は, 自然換気と想定されうる当研究所の研究室で約 2 年にわたって, 粉塵の発生がない場合について, 室内外粉塵および金属濃度とそれらの粒径分布を測定した結果に基づいて, 外気粉塵や金属の MMD と I/O 比の関係および換気量と I/O 比の関係について検討することである^{13), 14)}。また, 自然換気の住宅においても同様の測定を行い, 研究室の結果と比較検討した¹⁵⁾。

本論文の一部については, 昭和 63 年度, 平成元年度および 2 年度の日本建築学会大会学術講演会にてその概要を発表した。

* 大阪市立環境科学研究所・工修

Osaka City Institute of Public Health and Environmental Sciences,
M. Eng.

** 大阪大学工学部 教授・工博

Prof., Faculty of Engineering, Univ. of Osaka, Dr. Eng.

それらの関係を知ることによって、外気の粉塵および金属濃度やそれらの粒径分布から室内濃度へのそれらの影響を予測することが可能となる。

2. 測定方法

2.1. 研究所における測定

粉塵および金属の実測に用いた部屋は、当研究所の7階のFig.1に示す研究室(容積, 71 m³)である。本来は、空調がなされているが、吹出し口を塞ぐことによって自然換気のみとした。吸込み口はない。

粉塵の発生源については、この部屋が倉庫として用いられているため、測定器の流量の確認や紙の取り替えなどのため立ち入る以外は入室は少なく、そのため歩行などによる人体からの発生は少ないと考えられる。喫煙は、この部屋では禁じられている。

測定は、昭和61年8月から63年6月(中断約3カ月)まで行ったが、そのうち昭和62年9月までは部屋の窓を閉めた状態で、奇数月は室内外粉塵および金属濃度とそれらの粒径分布を、2台のアンダーセンエアサンプラー(高立機器製, 2100型, 以下A.S.と略す)により、前半、後半の2回に分けて測定した。(昭和61年8月のみ3回に分けた)その吸引流量は28.3 l/minである。A.S.は、インパクター方式により、粉塵を粒径別に全部で9段に分けて捕集できる測定機である。

偶数月は外気のみ粒径分布の測定を行う一方、1-4日の採気日数でローボリウムエアサンプラー(10 μm以上の粒子も含む, 以下L.V.と略す)により室内外粉塵および金属濃度の測定を行った。A.S.では半月程度の長期のサンプリングが必要であり、換気量との関係を知るためにL.V.での短期の測定を行った。その吸引流量は20 l/minである。

昭和62年10, 11月と昭和63年4, 5, 6月においては、部屋の窓(高さ120 cm, 幅73 cm, 開口面積0.876 m²)を開放して、室内外の粉塵および金属濃度とそれらの粒径分布の測定を行った。廊下側のドアは閉められている。また同時に、L.V.による室内外の粉塵および金属の測定を行った。

トレーサーガス(低濃度でのCO)による部屋の換気

Fig.1 Room where dust and metals were measured (seventh floor)

回数の測定を、窓を閉めた状態で昼間のみ延べ128回行った。また窓を開放した状態で、窓中央での風速の連続測定を、昭和62年10月1-5日の間行った。測定には、微風速計(柴田科学)およびデータプリンター(ダイレック製, DY-9000)を用いた。なお、A.S.の吸引流量は28.3 l/minなので、換気回数に変換すると0.024回/hとなり少ないので、測定による影響は考慮しなかった。

2.2. 住宅における測定

大阪府下の戸建て住宅(以下M宅とする)で、昭和63年11月13日から12月8日までの期間、粉塵および粉塵中金属、イオンの測定を行った。室内での測定箇所は2Fの洋室(約36 m³)中央であり、高さ約1 mである。この部屋は人の出入りが少なく、また喫煙もなされていない。外気は洋室の南側に面したベランダから少し突き出して測定した。測定方法は、10 μmカットを行わずにL.V.(吸引流量は20 l/min)による測定であり、時間は朝7時半頃から夜10時頃までである。12月3日と4日は、前半は窓を開放し、後半は閉鎖した。なおその他の日は、窓はほとんど閉鎖されているが一時開放されることがある程度である。

また平成2年4-6月にはA.S.による室内外粉塵濃度の測定を追加した。室内外の測定は同時ではなく、隔日に1台のポンプで内外を交互に測定した。吸引流量は28.3 l/minであり、測定時間はローボリの場合と同様朝7時半頃から夜10時頃までである。窓の開閉状態は、季節からしてローボリの測定時期より開放されることが多かった。

2.3. 粉塵濃度および粉塵中の金属成分、イオン成分濃度の測定

A.S.およびL.V.とも、粉塵の捕集には石英ろ紙(東洋ろ紙QR100)を用い、ろ紙の秤量は恒温恒湿室(温度20°C, 湿度50%)に1日以上放置後行った。

金属の測定は、A.S.では研究室の場合1カ月分を、住宅の場合3カ月分をひとまとめにして分析した。L.V.では研究室、住宅ともに1月分ごとに粉塵濃度ランク別に2-8日分をひとまとめにして分析した。分析方法は、ろ紙の半分について硝酸、過塩素酸で湿式灰化後V, Mn, Fe, Cu, Zn, Cd, Pbを原子吸光光度法で分析した。残りのうち、ろ紙の1/4について、蒸留水で超音波抽出後、同じく原子吸光光度法によってNa⁺, Mg²⁺, K⁺, Ca²⁺を分析した。M宅では、水抽出試料についてCl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺のイオンの分析を追加したが、イオンクロマトグラフィーによった。これらの金属やイオンは、浮遊状態では酸化物や塩などの形で存在していると思われる。

粉塵および金属の粒径分布の作図は、粒径の累積度数分布曲線を粒径の対数で微分することにより求めたが、その簡易計算法である角脇による方法によった¹⁶⁾。

Fig. 2 Comparison of two Andersen air samplers

2.4. アンダーセンの機差

研究所や住宅の室内外の粉塵および粉塵中金属の粒径分布を比較する前に、外気測定用と室内測定用の A. S. の機差について検討した。測定期間は、昭和 62 年 12 月から 63 年 2 月にかけてであり、外気について 5 回行った機差試験の結果を Fig. 2 に示す。粉塵濃度については外気用 $61.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ に対して室内用 $60.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ とほとんど差がない。粒径分布については機差がみられるものの常に一定の傾向にあるので、機差試験の結果から、室内用、外気用ともに各ステージの重量割合がそれらの平均値になるように補正係数を求め、それを掛けることにより補正した。以下、すべて補正後のデータに基づいている。

3. 測定結果

3.1. 研究所における粉塵濃度、粉塵中金属成分濃度および換気回数の測定

(1) A. S. の測定結果

室内外の粉塵濃度およびその MMD の経月変化を Fig. 3 に示す。外気については、冬に粉塵濃度は高く、MMD は小さく、夏にそれらの逆になる傾向が認められる。室内については、濃度、MMD とほぼ一定である。

窓を閉めた状態での室内外の粉塵、および金属のうち Mn, Fe, Pb についてのみ粒径分布を、Fig. 4 に示す。外気は昭和 61 年 8 月から昭和 62 年 9 月までの平均（粉塵 $N=31$ 、金属 $N=15$ ）、室内は昭和 61 年 9、11、昭和 62 年 1、3、5、7、9 月の平均（粉塵 $N=14$ 、金属 $N=7$ ）である。

窓を開けた状態での同様の結果を、Fig. 5 に示す。室内外とも、昭和 62 年 10、11 月と昭和 63 年 5、6 月の平均（粉塵 $N=8$ 、金属 $N=4$ ）である。昭和 63 年 4 月後半は、黄砂現象がみられた時であり、平均値からは除いた。

外気の粉塵、Mn の粒径分布は、 $0.5 \mu\text{m}$ と $4 \mu\text{m}$ 付近

Fig. 3 Changes of outdoor and indoor dust concentrations and those MMD

Fig. 4 Size distributions of dust, Mn, Fe and Pb (closed window)

にピークを示す 2 山型を示し、Fe は大粒径に、Pb は小粒径にピークをもつ 1 山型を示す。室内でのそれらの粒径分布は、外気と比較して大粒径ほど低くなる。窓を開放すれば、閉じた時より外気に粒径分布が近くなる。

今回の測定期間中において、外気の粉塵の MMD（以下 MMD_0 とする）の範囲は、黄砂時の $3.8 \mu\text{m}$ は例外として最大 $2.8 \mu\text{m}$ 、最小 $0.9 \mu\text{m}$ である。それに対して金属については、1 山型の金属の場合粒径の大きい順に、Fe $7.8\text{--}4.2 \mu\text{m}$ 、 Ca^{2+} $5.0\text{--}3.1 \mu\text{m}$ 、 Mg^{2+} $4.2\text{--}2.6 \mu\text{m}$ 、Zn $1.5\text{--}1.05 \mu\text{m}$ 、Pb $1.05\text{--}0.69 \mu\text{m}$ 、 K^+ $0.88\text{--}0.58 \mu\text{m}$ 、Cd $0.83\text{--}0.57 \mu\text{m}$ であり MMD_0 の変化は少ない。2 山型の Mn では $4.6\text{--}1.5 \mu\text{m}$ と、粉塵と同様に広範囲であ

Fig. 5 Size distributions of dust, Mn, Fe and Pb (open window)

る。2山型の粉塵や金属はそれぞれのピークに対応した少なくとも2つ以上の発生源をもっていることになり、それ故 MMD₀ が大きく変化する。

(2) L.V. の測定結果

窓閉鎖時の測定回数 N は 140 であり、粉塵濃度の平均および標準偏差は外気 $65.9 \pm 34.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、室内 $32.1 \pm 13.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。これらのデータのうち、風向が比較的一定の時のデータを、換気量と I/O 比の関係を調べるのに用いた。粉塵中金属成分濃度は、分析したが今回の解析には用いなかった。

窓開放時の測定回数 N は 35 であり、粉塵濃度の平均および標準偏差は外気 $89.2 \pm 44.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、室内 $54.7 \pm 27.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。外気濃度は、窓閉鎖時と比較すると、高かった。

(3) 換気回数の測定結果

トレーサガスによる部屋の換気回数の測定を、窓を閉めた状態で昼間のみ延べ 128 回行ったが、その平均および標準偏差は 1.18 ± 0.69 回/h であった。換気回数の算出方法は、Seidel の式によった。またその時の大阪管区气象台（当研究所の北西 2.3 km に位置する）の風向、風速データより西風の場合の風速と換気回数との関

Fig. 6 Air change rate as a function of wind velocity (closed window)

Fig. 7 Changes of dust concentration at Home M (L.V.)

係、北風の場合の風速と換気回数との関係を求めたのが Fig. 6 である。ただし、西北西から西南西の範囲の風を西風、北北西から北北東の範囲の風を北風とした。部屋の窓が西向きであり、ベランダの奥にあるため、北風による換気回数の増加は少ないが、西風では著しく増加し、相関も高い。

窓を開放した状態で、窓中央での風速の連続測定を行ったが、その期間は風速は比較的穏やかであった。その平均風速が 0.086 m/s であることから予想される換気回数は 3.8 回/h であった。風向については、数回の測定より西側のベランダから東側の廊下への気流が主体であるが、逆の場合もあった。

3.2. 住宅における粉塵濃度、粉塵中金属成分、イオン成分濃度の測定

(1) L.V. の測定結果

住宅における測定結果を Fig. 7 に示す。室内粉塵濃度は、窓をほとんど閉鎖し、時折開放する程度の一般の日（以下「通常」とする）と比較して、窓を開放した 3

Fig. 8 Size distribution of dust at Home M

日と4日の前半は外気濃度に近くなるが、窓を閉鎖した同日の後半は外気濃度に比較して低くなる。

「通常」での粉塵濃度の平均および標準偏差は、外気について $63.6 \pm 39.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、室内について $32.3 \pm 17.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。窓開放での外気の平均濃度は $95.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、「通常」での値より高く、窓閉鎖での平均濃度は $124.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ とさらに高かった。

(2) A. S. の測定結果

粉塵濃度は外気 $50.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、室内 $38.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、L. V. の濃度と比較して外気は低く、逆に室内は高い。室内外の粉塵の粒径分布についてのみ Fig. 8 に示すが、大粒径では室内が外気に比較してある程度低くなるが、小粒径ではそれほど違わない。

4. 考 察

4.1. 研究所における外気粉塵濃度と MMD_0 の関係

室内と関係付けるための外気粉塵濃度 (C_0 とする) とその MMD_0 の関係を Fig. 9 に示す。全体では相関係数はそれほど高くないが、室内を測定しているときの窓閉鎖時に限れば -0.733 と高い負の相関を示す。高濃度が小粒径粒子の増加によって生じることが多いことを示している。

また、比較的風向が安定しているときの L. V. の測定期間中の平均風速と外気粉塵濃度の関係を北風と西風にわけて Fig. 10 に示すが、ともに高い負の相関である。

Fig. 10 Outdoor dust concentration (L. V.) as a function of wind velocity

Fig. 11 I/O ratio as a function of outdoor dust concentration (L. V.)

Fig. 12 I/O ratios of dust as a function of outdoor dust concentration

Fig. 9 MMD_0 for outdoor dust as a function of outdoor dust concentration

先の Fig. 6 に示したように、風速と換気量との間に高い正の相関があったことから、風速により換気量が増える状況では、外気粉塵濃度が低くなる傾向にある。

4.2. 研究所における外気粉塵濃度と I/O 比の関係

L. V. による外気粉塵濃度と I/O 比の関係を Fig. 11 に示す。窓を閉鎖した場合、I/O 比は濃度と負の相関であるが、窓を開放した場合、濃度が変化しても I/O 比はそれほど変わらない。

A. S. での外気粉塵濃度と I/O 比の関係を Fig. 12 に示す。その傾向は L. V. の場合と同様であるが、窓閉鎖あるいは開放どちらの場合も A. S. での I/O 比が L. V. の場合と比較して高いのは、測定期間が長時間のため平均化され、外気粉塵濃度の範囲が狭くなっていることも一因であると考えられる。

4.3. 研究所における MMD_0 と I/O 比の関係

A. S. の各ステージにおける粉塵の I/O 比を Fig. 13 に示すが、窓閉鎖、開放の場合共に粒径が $2 \mu\text{m}$ 以下では I/O 比はそれほど変化しないが、 $2 \mu\text{m}$ 以上では I/O

比は著しく低下する。

粉塵についての MMD_o の対数と I/O 比の関係を図 14 に示すが、相関は低く、また窓を閉めた場合正の相関であり、大粒子はサッシなどのフィルター効果により室内に侵入しにくいことからすると矛盾する。その原因として、外気粉塵濃度が高い時、 MMD_o は小さくなり (Fig. 9), I/O 比も小さくなり (Fig. 12), 結果として MMD_o と I/O 比の間に正の相関がみられたと考えられる。

A. S. での粉塵、金属濃度およびそれらの MMD の測定結果を Table 1 (窓閉鎖), Table 2 (窓開放) に示す。Fig. 4, Fig. 5 と同じ期間での平均値である。それらの結果より、粉塵および金属の MMD_o の対数と I/O 比の

Fig. 13 I/O ratios as a function of particle size of dust

Table 1 Concentration and MMD for dust and metals (closed window)

	Concentration ng/m ³		I/O ratio	MMD μm	
	Indoor	Outdoor		Indoor	Outdoor
Dust	27.7*	49.2*	0.56	0.70	1.45
Na ⁺	849	1540	0.55	1.20	2.4
Mg ²⁺	61	151	0.40	1.8	3.8
K ⁺	294	422	0.70	0.59	0.70
Ca ²⁺	302	737	0.41	1.35	4.0
V	3.41	5.15	0.66	0.50	0.63
Mn	24.2	53.8	0.45	0.89	2.6
Fe	384	1434	0.27	2.2	5.1
Ni	6.4	10.3	0.62	0.92	1.30
Cu	19.9	37.7	0.53	0.70	1.6
Zn	179	268	0.67	0.84	1.25
Cd	2.35	2.98	0.79	0.57	0.66
Pb	62.6	89.9	0.70	0.62	0.80

* μg/m³

Fig. 14 I/O ratios of dust as a function of MMD for outdoor dust

Fig. 15 I/O ratios as a function of MMD for outdoor dust and metals

関係を、窓を開けた場合と閉めた場合について Fig. 15 に示す。両方とも高い負の相関を示しているが、窓を閉めた方が開けた場合より I/O 比が低くなる。粉塵についての Fig. 14 では、窓閉鎖の場合正の相関であった。粉塵の場合、各データについては外気濃度、気象条件なども異なってくるが、Fig. 15 では長期間の同一気象条件での結果のため相関が高くなったと考えられる。

粉塵の各粒径範囲別にみると (Fig. 13), 粒径が 2 μm 以下では I/O 比がそれほど変わらないが、2 μm より大きくなるにつれてその比が小さくなるのに対して、粉塵や金属の MMD と I/O 比との関係では直線的となる (Fig. 15)。

4.4. 研究所における MMD_o と MMD_i の関係

粉塵についての MMD_o の対数と室内での MMD (MMD_i とする) の対数の関係は、Fig. 16 に示すとおり、相関はある程度高く、特に窓開放の場合相関係数は 0.911 である。

粉塵および金属についての MMD_o と MMD_i の関係を Fig. 17 に示すが、高い正の相関を示す。小粒径では窓の開閉による差は少ないが、大粒径ではその差は大き

Table 2 Concentration and MMD for dust and metals (open window)

	Concentration ng/m ³		I/O ratio	MMD μm	
	Indoor	Outdoor		Indoor	Outdoor
Dust	43.9*	58.7*	0.75	0.85	1.30
Na ⁺	1450	1880	0.77	1.20	1.75
Mg ²⁺	82	137	0.60	2.6	3.8
K ⁺	388	459	0.85	0.63	0.72
Ca ²⁺	401	705	0.57	2.8	4.6
V	4.31	5.22	0.83	0.53	0.68
Mn	45.5	62.5	0.73	1.30	2.3
Fe	811	1407	0.58	3.2	4.6
Ni	6.8	90	0.76	1.2	1.6
Cu	32.3	44.1	0.73	0.89	1.7
Zn	278	330	0.84	1.00	1.20
Cd	2.94	3.26	0.90	0.68	0.74
Pb	94	109	0.86	0.72	0.80

* μg/m³

Fig. 16 MMD for indoor dust as a function of MMD for outdoor dust

Fig. 17 MMD for indoor dust and metals as a function of MMD for outdoor dust and metals

Fig. 18 I/O ratio of dust (L.V.) as a function of wind velocity (closed window)

Fig. 19 I/O ratio of dust as a function of outdoor dust concentration at Home M (L.V.)

くなる。粉塵についての Fig. 16 と比較すると、粒径範囲が広く、また傾きも大きくなっている。

4.5. 研究所における換気量と I/O 比の関係

窓を開放することによる換気量の増加は、Fig. 11, Fig. 12 に示したように、I/O 比を増加させるが、窓を閉鎖した状態での換気量の増減の I/O 比に及ぼす影響について検討した。

先述したように、北風あるいは西風別には風速と換気回数との間に正の相関関係があることから、換気量の代わりに風速と L.V. による粉塵の I/O 比との関係をみたが Fig. 18 である。北風の場合、風速が高いほど I/O 比も高くなっている。その原因として、Fig. 10 に示されているように、風速が高いほど外気粉塵濃度が低くなり、また先に Fig. 11 で示したように、外気粉塵濃度が低いほど I/O 比が高くなることが考えられる。

西風の場合、北風と比較して同程度の風速であれば、Fig. 6 より換気量が多いと思われるが、I/O 比はそれほど変わらない。窓を閉鎖した状態での外部風速による換気量の増加の I/O 比への影響はそれほど大きくはないと思われる。

4.6. 住宅における外気粉塵濃度と I/O 比の関係

L.V. による外気粉塵濃度と I/O 比の関係を Fig. 19 に示す。「通常」と比較して例数は少ないが、窓を開放すると、その比が大きくなり、窓を閉鎖するとその比が小さくなることが示されている。

I/O 比に外気粉塵濃度が影響することから、窓開放および窓閉鎖の場合と外気粉塵濃度の条件をできる限り一致させるために、外気粉塵濃度が $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上の日のみを選び求めた「通常」での粉塵および金属の平均濃度と、窓開放および窓閉鎖の場合の平均濃度を Table 3 に示す。粉塵の I/O 比は、窓開放の場合 0.80、窓閉鎖の場合 0.31 であるのに対し、「通常」ではその間の 0.48 であった。

Table 3 Concentrations of dust, metals and ions at Home M (L.V.)

	A ¹ (N=7)			B ² (N=2)			C ³ (N=2)		
	I	O	I/O	I	O	I/O	I	O	I/O
	ng/m ³			ng/m ³			ng/m ³		
Dust	52 ⁴	109 ⁴	0.48	76 ⁴	95 ⁴	0.80	39 ⁴	124 ⁴	0.31
Na ⁺	360	950	0.38	510	640	0.80	260	550	0.47
Mg ²⁺	52	171	0.38	73	95	0.77	42	142	0.30
K ⁺	300	530	0.57	480	710	0.68	310	760	0.41
Ca ²⁺	400	1470	0.27	610	930	0.66	360	1530	0.24
Mn	26	62	0.42	26	35	0.74	14	45	0.31
Fe	490	1800	0.27	480	990	0.50	210	1110	0.19
Zn	185	285	0.65	118	186	0.63	137	542	0.25
Pb	141	207	0.68	105	134	0.78	—	—	—
Cl ⁻	280	2420	0.12	1670	2870	0.58	460	5480	0.08
NO ₃ ⁻	1930	7360	0.26	4460	5840	0.76	1360	7390	0.18
SO ₄ ²⁻	3570	5200	0.69	4140	4910	0.84	3010	4640	0.65

— Not measured

¹A: Almost closed window (average of data on days when outdoor dust concentrations are more than $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

²B: Open window

³C: Closed window

⁴ $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Table 4 Concentrations and MMD for dust, metals and ions at Home M (Apr. -Jun. 1990)

	Concentration ng/m ³		I/O ratio	MMD μm	
	Indoor	Outdoor		Indoor	Outdoor
Dust	38.4 [*]	50.7 [*]	0.76	1.8	2.7
Na ⁺	328	533	0.61	1.8	2.8
Mg ²⁺	59.8	118.0	0.51	2.6	3.3
K ⁺	301	321	0.94	0.63	0.67
Ca ²⁺	401	551	0.73	2.9	4.1
V	2.8	4.2	0.67	0.42	0.48
Mn	18.6	31.8	0.58	2.0	3.4
Fe	614	1054	0.58	4.0	4.4
Zn	74.5	113.4	0.66	0.75	0.83
Cd	0.79	1.11	0.71	0.70	0.84
Pb	39.9	48.4	0.82	0.65	0.83
NH ₄ ⁺	1409	1604	0.88	0.49	0.53
Cl ⁻	133	299	0.44	4.9	4.5
NO ₃ ⁻	834	1435	0.58	3.6	4.1
SO ₄ ²⁻	5106	6142	0.83	0.58	0.67

^{*} $\mu\text{g}/\text{m}^3$

A.S. の測定結果を Table 4 に示す。A.S. での I/O 比は L.V. の窓開放時の I/O 比に近い。その原因として、測定時の窓の開閉の程度が異なることもあるが、A.S. での外気濃度が L.V. と比較して低いことがあげられる。

Fig. 20 I/O ratio as a function of MMD for outdoor dust, metals and ions at Home M

Fig. 21 I/O ratios of dust, metals and ions (L.V.) as a function of MMD for outdoor those at Home M

Fig. 22 MMD for indoor dust, metals and ions as a function of MMD for outdoor those at Home M

4.7. 住宅における MMD₀ と I/O 比の関係

A. S. のデータより粉塵および金属、イオンの MMD₀ と I/O 比の関係を示したのが Fig. 20 である。相関係数

は -0.791 と高く、その回帰直線は研究所での窓開放と閉鎖の間にある。

A. S. の粉塵および金属、イオンの MMD₀ と L. V. の窓開閉別の I/O 比との関係をみたのが Fig. 21 である。窓閉鎖および開放時の相関係数はデータが少ないためもありそれほど高くないが、窓を開放することによる MMD の大きな金属の I/O 比の増加が示されている。

金属種の I/O 比については、A. F. Cohen によれば住宅平均で Ca 0.23 Fe 0.25 Pb 0.53⁸⁾、J. Alzona によれば気密性の高い住宅の寝室で Fe 0.27 Pb 0.70、機密性の低い住宅の寝室で Fe 0.33 Pb 0.47 などの値が出されているが¹¹⁾、それらの値は今回の結果のうち窓閉鎖時の研究室での結果と近似している。

4.8. 住宅における MMD₀ と MMD_i の関係

A. S. の粉塵および金属、イオンの MMD₀ と MMD_i との関係を Fig. 22 に示すが、相関係数も 0.980 と高い。短期間での住宅での測定結果ではあるが、長期間での研究所での測定結果と傾向が一致している。

5. まとめ

外気粉塵による室内影響を予測するとき、室内発生がない場合、室内濃度は外気濃度に一定の係数 (I/O 比) を乗じて得られれば便利である。本来、I/O 比は、自然換気の場合、外気濃度に関係なく、外気の粒径分布、開口条件、換気量などによって決まると考えられる。すなわち粒径が大きければ、I/O 比は小さく、窓を開放していれば閉鎖したときと比較して大きく、換気量が大きければ大きくなると推測される。

発生源がほとんどないと考えられる、吹出し口を塞いだ部屋および自然換気の住宅で、室内外の粉塵および金属、イオン濃度とそれらの粒径分布の測定を行い、以下の結論を得た。

1) 開口条件、換気量が一定の時、外気粉塵の粒径が大になると、室内への流入時のフィルター効果や室内での沈積作用が強く作用し、濃度の減少割合、すなわち I/O 比は小さくなることが実証できた。開口条件、換気量が一定ならば、外気の粒径分布 (MMD₀) が得られると、I/O 比がある程度予測できる (Fig. 15, Fig. 20, Fig. 21)。また MMD_i は MMD₀ のべき関数として決まり、ある粒径以上になると室内にほとんど流入しない (Fig. 16, Fig. 17, Fig. 22)。

2) 開口条件で窓開放時と閉鎖時を比較すると、I/O 比は常に窓開放時の方が大であり、1 に近い。このことは、一般に換気量が大になると、I/O 比が大になる傾向を示している。しかし、現実には外気粉塵濃度と粒径分布は発生源、外部風などにより変化するし、またその室内への影響は、開口条件、換気量などにより変わる。これらの要因が互いに複雑に関係しあっている。

3) 今回の測定では、風速大になると、外気濃度は小となり (Fig. 10), MMD_0 は大となる (Fig. 9)。その結果、I/O 比は小なる傾向を示すはずであるが結果は逆であった。(Fig. 11, Fig. 12, Fig. 19)。一方、風速大になると、開口条件一定ならば、換気量は大となり (Fig. 6), I/O 比は大になる傾向を示すはずである。

したがって、風速変化による換気量と MMD_0 の変化が I/O 比に対して相反する作用をしており、外気濃度と粒径分布だけから I/O 比を決めることができないことがわかった。すなわち、窓閉鎖時、外気濃度が大きくなるとき、 MMD_0 が小さくなり、I/O 比は大になると考えられるが逆の結果を得た。これは、濃度が大きいとき、風速小で換気量も小さく、この換気効果が強く影響し、I/O 比は小さくなったと解釈できる。

以上、室内外の粉塵、金属、イオンの濃度とその粒径分布の関連を調べてきたが、外気濃度と I/O 比の関連は一義的には決まらず、その粒径分布、開口条件、換気量などを明確にして論じなければならない。また、この意味から室内外の金属、イオンの分析は価値あるものと考えられる。

なお、今後は一層多くの I/O 比とその諸要因との関連を決める資料を積み重ねる必要があろう。

また、外気粉塵濃度とその発生源や気象条件との関連や喫煙など室内発生のある場合のその室内での寄与などについて調査する必要がある。

参考文献

- 1) 長良健次：室内浮遊塵の粒径分布と元素組成について、*空気清浄*，第 22 巻，第 6 号，pp. 28～31，1985
- 2) 竹内貢三ほか 2 名：室内浮遊粉塵中の金属成分について、*空気清浄*，第 12 巻，第 2 号，pp. 33～42，1974
- 3) D.J. Moschandreas et al. : Fine Particle Residential Indoor Air Pollution, *Atmospheric Environment*, Vol. 13, pp. 1413～1418, 1979
- 4) 石堂正三郎ほか 2 名：住居内の空気条件について，特に

- 塵あい数及び細菌数についての考察，大阪市立大学家政学部紀要，第 3 巻，第 4 号，pp. 127～135，1955
- 5) J.E. Yocom et al. : Indoor/Outdoor Air Quality Relationships, *A.P.C.A.*, Vol. 21, No. 5, pp. 251～259, 1971
- 6) F.B. Benson et al. : Indoor-Outdoor Air Pollution Relationships : A Literature Review, *E.P.A.* 1972
- 7) C.R. Thompson et al. : Outdoor-Indoor Levels of Six Air Pollutants, *A.P.C.A.*, Vol. 23, No. 10, pp. 881～886, 1973
- 8) A.F. Cohen et al. : Protection from being Indoors against Inhalation of Suspended Particulate Matter of Outdoor Origin, *Atmospheric Environment*, Vol. 14, pp. 183～184, 1980
- 9) K. Biersteker et al. : Indoor Air Pollution in Rotterdam Homes, *Int. J. Air Wat. Poll.* Vol. 9, pp. 343～350, 1965
- 10) Ib Andersen : Relationships between Outdoor and Indoor Air Pollution, *Atmospheric Environment*, Vol. 6, pp. 275～278, 1972
- 11) J. Alzona et al. : Indoor-Outdoor Relationships for Airborne Particulate Matter of Outdoor Origin, *Atmospheric Environment*, Vol. 13, pp. 55～60, 1979
- 12) 宮崎竹二ほか 2 名：大阪市立環境科学研究所調査研究年報，44，pp. 19～23，1981
- 13) 宮崎竹二，檜崎正也：室内環境における粉塵および金属濃度 その 1，外気由来の粉塵および金属濃度とそれらの粒径分布，*日本建築学会大会学術講演梗概集*，pp. 1201～1202，昭和 62 年 10 月
- 14) 宮崎竹二，檜崎正也：室内環境における粉塵および金属濃度 その 2，換気と粉塵および金属濃度，*日本建築学会大会学術講演梗概集*，pp. 797～798，昭和 63 年 10 月
- 15) 宮崎竹二，檜崎正也：室内環境における粉塵および金属濃度 その 3，事務室および住宅における実測例，*日本建築学会大会学術講演梗概集*，pp. 647～648，1989
- 16) 角脇 怜：大気浮遊粉じん中のケイ素およびアルミニウムの粒度分布と濃度比，*日本化学会誌*，pp. 1911～1916，1977

(1991 年 3 月 30 日原稿受理，1991 年 12 月 9 日採用決定)

英文要約 (Summary)

Concentrations and size distributions of the particulate dusts and metals in indoor and outdoor air were measured in the experimental room with Andersen air sampler and low volume air sampler.

It was shown that Indoor/Outdoor concentration ratios and logarithm of MMD for the particulate dusts and metals were correlated closely. I/O concentration ratios and MMD of the indoor particulate dusts and metals when the window was opened, much increased than them when the window was closed. Similar measurement was carried out in a private house to confirm the results above.

From the results of investigation, we can introduce that I/O concentration ratios are estimated approximately under the conditions of the given ventilation rates and the windows when the concentration and the size distribu-

tion of outdoor particulate dusts and metals are obtained.

But the changes of wind velocity and direction bring the changes of outdoor concentration and size distribution, and at the same time the ventilation rates make change also. Therefore it is found to be hard to estimate I/O ratios.