

住宅の内外における大気浮遊粉塵の挙動

青木 敦・春山 洋一・三村 泰一郎*

Behaviour of Airborne Dust inside and outside a Dwelling-house

ATSUSHI AOKI, YOICHI HARUYAMA and TAICHIRO MIMURA*

A filtrating function of a dwelling-house for airborne dust has been studied. The present experiment was carried out using two dwelling-houses of different structure and environmental conditions. Elemental concentrations and particle size distributions of airborne dust were measured simultaneously outside and inside a dwelling-house. It appears that filtrating effect is remarkable for coarse particles whose main components are terrestrial ones, however, is hardly observed for fine particles which contain many toxic elements of artificial origin.

By using a micro-computer system, wind direction and wind speed were also measured automatically. The concentrations of airborne dust inside a dwelling-house were affected by the speed of wind.

緒言

環境大気中には天然および人工起源の多くの大気汚染物質が存在するが、大気浮遊粉塵もその一つとして注目される。これらの汚染物質は住宅の外部境界を通過して住宅内に拡散・侵入するが、その態様および挙動については殆ど研究されていない。ただこれに類するものとして走行自動車内空気中の重金属についての研究とビル内の室内浮遊粉塵の粒径分布と大気中のそれとの比較等があるのみである。しかし、このことは交通量の多い道路や鉄道線路に面した住宅に終日生活している住民や、汚染レベルの高い地域の住民にとっては重要な意味を持つものと考えられる。我々はこの点に

注目し、まず、ローボウリム・エアサンプラーによるサンプリングと中性子放射化分析（INAA）の技法を用いて住宅の内外での浮遊粉塵の質量濃度および元素濃度の比を測定し、住宅がもつ浮遊粉塵に対する遮断効果の概略を把握し、さらにカスケードインパクターによるサンプリングと荷電粒子X線分析法（PIXE）により、大気浮遊粉塵中の種々の元素について、浮遊粉塵の粒径と遮断効果の関係を調べた。また、大気浮遊粉塵の挙動は風向、風速等の影響を受けることが考えられるので、これらの気象要素を浮遊粉塵濃度と同時に測定して両者の相関について解析を行なった。これらについて以下に報告する。

京都府立大学生活科学部応用物理学講座

Laboratory of Applied Physics, Faculty of Living Science, Kyoto Prefectural University

* 京都府立大学生活科学部住居環境学講座

* Laboratory of House Environment, Faculty of Living Science, Kyoto Prefectural University

測定および分析

1. 実験住宅

立地条件および構造の異なる2軒の住宅（以下A住宅、B住宅と呼ぶ）を用いて実験を行なった。

A住宅は泉南工業地帯に隣接する大阪府泉佐野市高松北にある木造瓦葺2階建住宅で、北側には南海電鉄の軌道があり、南側は舗装されていない道路になっている。東、西には2階建の民家が連なっている。実験は階下南西の和室（図1）で行なった。部屋の南側

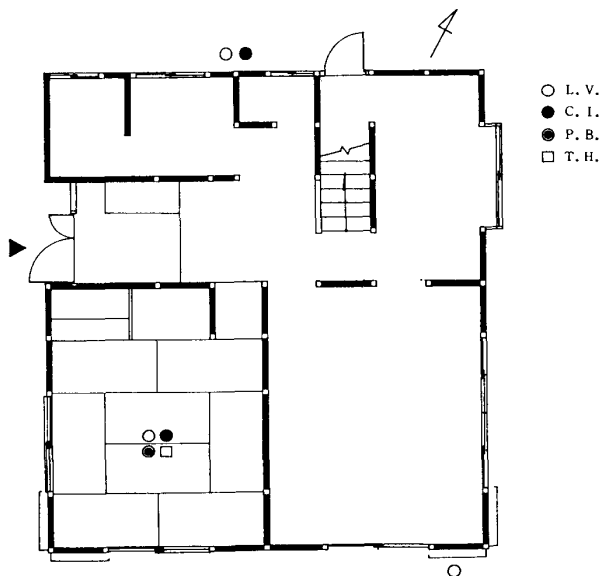


図1 実験住宅1階平面図（A住宅）
木造瓦葺2階建，泉佐野市高松北
L. . . ローポリウム・エアサンプラー
C. I. . . カスケードインパクター
P. B. . . ピエゾバランス粉塵計
T. H. . . 自記温湿度計

は2重のアルミサッシのテラス戸，西側は2重のアルミサッシのガラス窓で，共に内側に障子がある。天井は合板の打上げ，壁面は和風吹付塗装が施こされている。押入れは開放し，他の建具は全て閉鎖して実験した。

B住宅は京都市左京区にあるRC造3階建集合住宅の2階中央にあり，実験は南西の和室（図2）で行なった。南側の窓は普通のアルミサッシのガラス窓で，内側に2重のカーテンがしてある。隣室との境は引き違いの板戸で，天井は合板の打上げ，壁面は和風吹付塗装がされている。押入れは開放し，他の建具は全て閉鎖して実験した。この集合住宅棟の南側には約1000㎡の露地の駐車場があり，西側には交通信号のある地区の主要道路があるが，全体としては閑静な住宅街と

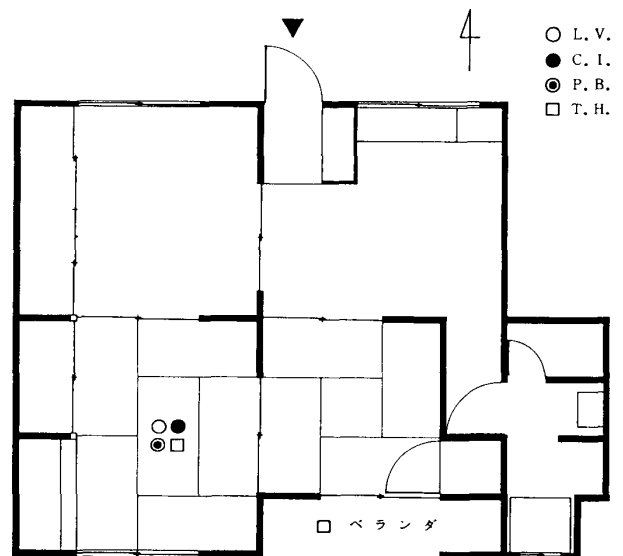


図2 実験住宅1階平面図（B住宅）
鉄筋コンクリート造3階建集合住宅2階
京都市左京区
L. V. . . ローポリウム・エアサンプラー
C. I. . . カスケードインパクター
P. B. . . ピエゾバランス粉塵計
T. H. . . 自記温湿度計

なっている。

2. サンプルングおよび分析

大気浮遊粉塵の採取には，ミリポアフィルター（孔径 $1.2\mu\text{m}$ ）を装着したローポリウム・エアサンプラーとカスケードインパクター（ピクシーインタナショナル社製）を用い，A住宅では1985年8月19日から8日間，B住宅では1985年12月14日から12日間実験した。A住宅におけるサンプルング場所およびB住宅内でのサンプルング場所を図1，図2に示す。ここに，L. V. はローポリウム・エアサンプラー，C. I. はカスケードインパクターを表わす。なお，P. B. はピエゾバランス粉塵計，T. H. は自記温湿度計を表わしている。B住宅の屋外のサンプルングはB住宅棟の屋上で行なった。

ローポリウム・エアサンプラーで採取した試料は，粉塵量を秤量後，INAAおよびPIXE法により元素分析を行なった。また，カスケードインパクターで採取した試料は，PIXE法により元素分析を実行した。INAAには京都大学研究用原子炉を，またPIXE法には京都大学理学部のダンデム型バンデグラーフ加速器および京都大学工学部放射実験室のバンデグラーフ加速器を利用した。

サンプルング装置および大気浮遊粉塵の元素分析の方法については既に報告したものによった。

3. 気象要素と浮遊粉塵との同時観測

住宅内の浮遊粉塵の挙動には屋外の風向、風速等の気象要素が大きく関係することが考えられる。そこで、住宅内にマイコン（富士通FM-11 AD2）に連結したピエゾバランス粉塵計（図1, 2のP. B.）を置き、粒計が $2\mu\text{m}$ 以上の浮遊粉塵の濃度を観測した。室内の温度は室中央の高さ90cmの台上に自記温湿度計を置いて自記記録させた。A住宅の場合には、風速はA住宅と同じ道路沿いで東に30m離れた地上約4.5mの高さの位置で、デジタル式熱線風速計（日本科学工業アネモマスター6071型）および小型ハンディタイプの風向計（大田計器製ハンド風向計）を用いて8月21日の正午から翌日の正午まで、昼間は1時間毎に、また深夜は3時間毎に測定した。しかし、この方法では長期間の連続測定が困難であるので、B住宅の実験では測定の自動化を計り、熱線風測計のアナログ出力をマ

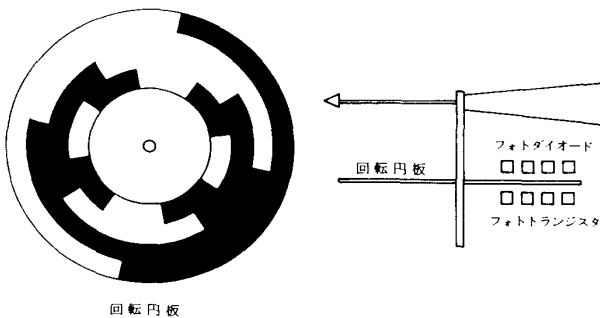


図3 風向エンコーダ部略図
グレイコードで符号化された円板とフォトセンサー部を示す。

イコン（富士通FM-8）に入力して、10秒毎の値を測定した。また、風向に関しては、上記のハンディタイプの風向計の矢羽根の軸に図3に示すグレイコードでマークされた回転板を取り付け、この円板を挟んで上下にそれぞれ赤外線フォトダイオードとフォトトランジス

タを4個宛向き合せて取り付け自作のエンコーダを用いて、16方位の風向を4ビットの信号として取り出し、インターフェース（自作）を通して上記のマイコンに入力して処理した。データの記録は長時間にわたる野外使用を考慮してカセットテープを使用した。10秒毎の風速、風向を測定時間と共に記録する場合、90分テープの片面で約30時間分のデータの記録が可能であった。

結果および考察

1. 遮断効果（立地）

ローボリウム・エアサンプラーを用いて採集した大気浮遊粉塵のINAAおよびPIXE分析から、15元素につき元素濃度を求め解析を行なった。A住宅に関する結果の一部を表1に示す。表のA, B, Cは、それぞれ、屋内、屋外で鉄道線路側および道路側における粉塵濃度、A/BおよびA/Cはこれらの濃度の比の値で、この内外濃度の比の値は住宅の浮遊粉塵に関する遮断効果を示す指標を与えるものといえる。以後、この比の値を単に「濃度比」と呼ぶことにする。表の右端の欄に分析法を附記した。INAAの括弧の中のS, Lはそれぞれ短寿命核、長寿命核の測定によることを表わしている。表より、Fe, Al, Scの濃度比は線路側、道路側共0.3以下で、これらの元素を含む浮遊粉塵に対する住宅の遮断効果が大きいことがわかる。一方、V, Zn, Crに対する濃度比は殆どが0.7以上となっている。なお、線路側でCuの濃度比が道路側の値の1/2以下となっているのは、線路側では架線の銅による影響が大きいと考えられる。Feについても同様の傾向がうかがわれる。逆に、Al, Scは道路側に対して大きな遮断効果が見

表1. 大気浮遊塵の元素濃度（泉佐野市）

	元素濃度 (ng/m^3)			濃度比		分析法
	A	B	C	A/B	A/C	
Fe	450	1830	1550	0.25	0.29	INAA (L)
Cu	110	480	190	0.23	0.58	PIXE
Al	360	1350	3100	0.27	0.12	INAA (S)
Sc	0.07	0.25	0.51	0.28	0.14	INAA (L)
V	12	17	19	0.71	0.63	INAA (S)
Zn	104	143	136	0.73	0.74	PIXE
Na	630	1760	1880	0.36	0.34	INAA (S)
Mn	20	58	62	0.34	0.32	INAA (S)
Cr	27	35	29	0.77	0.93	INAA (S)

泉佐野市高松北 1985. 8. 22-26 A: 屋内 B: 屋外（線路側） C: 屋外（道路側）

られるが、これは舗装されていない路面からの土ぼこりの影響と考えられる。

次に、B住宅に関する結果を表2に示す。Aは屋内、Bは屋外（屋上）、A/Bは濃度比を表わしている。

表2. 大気浮遊塵の元素濃度（京都市）

	元素濃度 (ng/m ³)		濃度比	分析法
	A	B		
Fe	33	53	0.62	INAA (L)
Al	208	550	0.37	INAA (S)
Sc	0.005	0.012	0.40	INAA (L)
V	2.6	6.6	0.39	INAA (S)
Zn	16.5	17.1	0.96	INAA (L)
Na	290	650	0.45	INAA (S)
Mn	7	17	0.41	INAA (S)
Cl	1530	3200	0.48	INAA (S)

京都市左京区 1985. 12. 18-21, A: 屋内 B: 屋外

表1と表2を比べると、A住宅の環境はB住宅に比べて全体に元素濃度が高く、それだけ汚染レベルが高いことがわかる。その結果、A住宅内の元素濃度はB住宅のそれに比べて常に高い値を示している。一方、表2の濃度比の値は表1の値よりも大きい。これは住宅外の大気汚染がA住宅の場合よりも少ないためと、部屋が2階にあるため土ぼこりの影響が小さいためと考えられる。しかし、Al, Scは遮断効果が大きく、Zn

は小さく、A住宅の場合と同様の傾向がうかがえる。

2. 遮断効果（粒径）

カスケードインパクトを用いて粒径で分級採取した試料のPIXEスペクトルは、元素により特徴的な粒径依存性を示した。その一例として、A住宅の場合を図4（住宅外）と図5（住宅内）に示す。ここに、横軸は特性X線のエネルギーを、縦軸は通気量および陽子ビーム量を規格化したときの各エネルギーでのX線計数値を表わしており、ピーク面積（ハッチを入れた部分）が試料中に含まれる相対的な元素量を示している。図の右側の数字はカスケードインパクトのステージ番号で、ステージ番号1, 2, 3, 4, 5, 6, 7の空気動力学的遮断粒径は、それぞれ、0.25 μm, 0.5 μm, 1 μm, 2 μm, 4 μm, 8 μm, 16 μmである。すなわち、第5ステージには4~8 μmの粒子が捕捉される。図4から、屋外ではFeは粒径の大きい粒子に多く、Pb, S, Znは逆に粒径の小さな粒子に多く含まれていることがわかる。また図4と図5の比較から、住宅内では粒径の大きな粒子に含まれているFeは大きく減少しているが微小粒子中のPb, S, Zn等は殆ど変化がないことがわかる。これより、ローボリウム・エアサンプラーの試料で認められた元素による濃度比の差異は、大気浮遊粉塵の粒径が主要な原因であると理解される。

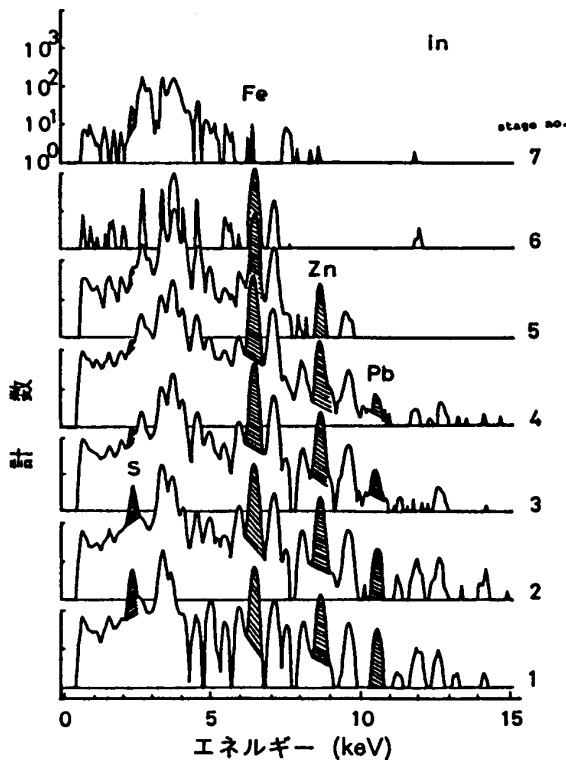


図4 カスケードインパクト試料のPIXEスペクトル（住宅外）

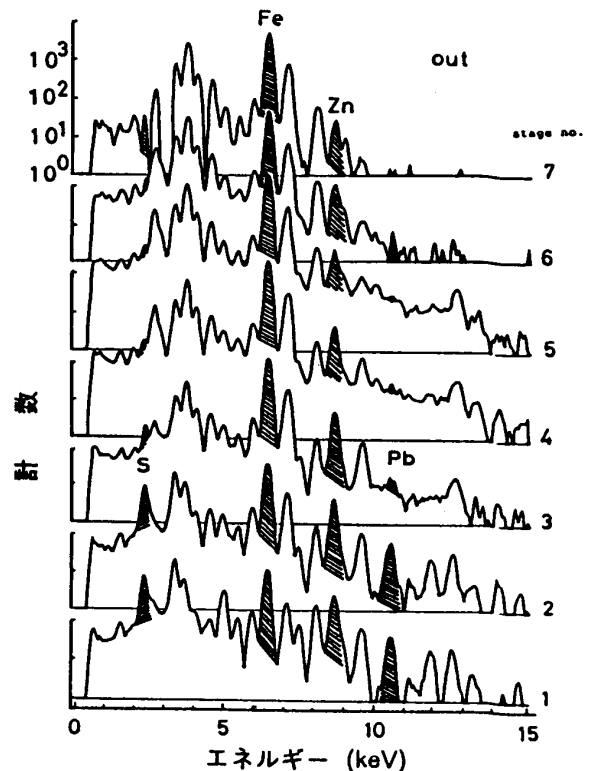


図5 カスケードインパクト試料のPIXEスペクトル（住宅内）

3. 粉塵濃度と風速

ピエゾバランス粉塵計を用い、粒径が $2\mu\text{m}$ 以下の

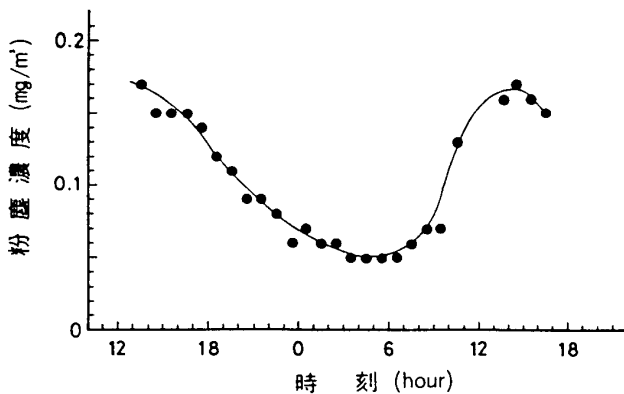


図6 屋内粉塵濃度 ($\leq 2\mu\text{m}$) の日変化

浮遊粉塵の質量濃度をA住宅内で測定した結果を図6に示す。横軸は時刻を、縦軸は粉塵濃度を表わす。図より粉塵濃度には顕著な日変化が認められる。

このような室内の濃度変化と風速の関係を明らかにするために風速と濃度の相関図を作成した(図7)。

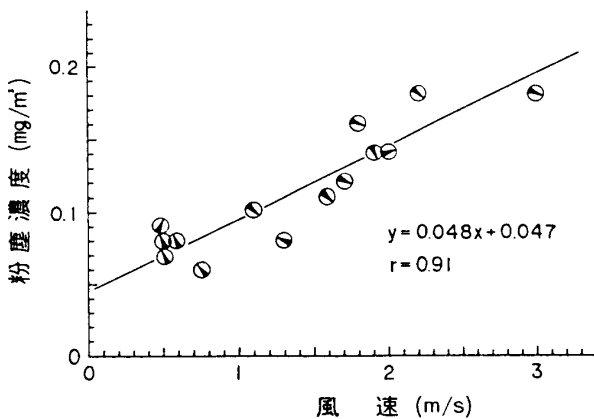


図7 風速と屋内粉塵濃度 ($\leq 2\mu\text{m}$) の相関

図の直線は測定点に最小自乗法で引いた直線で、これより風速と粉塵濃度との相関係数は0.91となる。

住宅内の浮遊粉塵濃度は風向にも影響されることが考えられるので、図6の測定点に矢印を附して風向を示した。方位は図の上方が北、右方が東に当たる。風速 1.4m/s を境に左側は南、東の風向成分が多く、右側は西、北の風向成分が多い。前者は夜間で後者は昼間の風にあたる。このように、風向も粉塵濃度と一定の傾向を示すので多少の曖昧さは残るが、風速と住宅内の $2\mu\text{m}$ 以下の浮遊粉塵濃度との間には強い相関が認められた。

B住宅では、住宅内の粉塵濃度が低く、ピエゾバランス粉塵計では、はっきりしたデータは得られなかった。

4. 粉塵濃度と風向

泉佐野市での実験の際には、実験期間中風は毎日同じように吹いたが、京都市左京区での実験の際は図8の風配図に見られるように、第1回目(12月14日~18日)と第2回目(12月18日~21日)の測定では風向が逆転した。そこで、風向と住宅内の浮遊粉塵濃度の関係を見るために、先ずカスケードインパクト試料の元素分析の結果を用いて、粒径が $2\mu\text{m}$ まで(ステージ1~3の合計)と粒径が $2\mu\text{m}$ 以上(ステージ4~6の合計)の2つに分けて、代表的な元素であるFeとZnにつき濃度比を求めた(表3)。Feについて見ると粒径が $2\mu\text{m}$ 未満の微小粒子については第1回目、第2回目共濃度比の値は0.98で風の影響は認められない。粒径が小さい程住宅の遮断効果が小さいというA住宅での前述の結果と一致する。一方、粒径が $2\mu\text{m}$ 以上の粗大粒子では、第1回目が濃度比の値が0.51と微小粒子に比べると約 $1/2$ になっているが、第2回目についてはこの値が0.23と更に $1/2$ 以下になっている。Znについても同様の結果が見られる。

風によって運ばれる浮遊粉塵の量は、近似的にその方向から吹いて来た風の量に比例すると考えられ、また、風量はその方向の時間積分値に比例する。図8にある風量図は方位別に10秒毎の風速を積算して求めたもので、第1回目はフルスケールを 20000m 、第2回目はその $1/10$ の 2000m として描いてある。第1回目の測定のとときは南西の風が卓越し、風量も多いが、第2回目の測定のとときは弱い北東の風で風量も少なくなっている。実験を行なった部屋は図8の略図のハッチの入った部分にあり、第1回目は部屋の窓に風が直接あたる方向から吹いているため、粒径の大きい粉塵についても室内濃度が高くなり、その結果濃度比が大きくなったものと解釈される。一方、第2回目のときは屋外の粉塵濃度は粒径のすべてについて第1回目より増加していたが、風向が第1回目と逆になったため、微小粒子については大きな相違は認められなかったが、粗大粒子については隣室が遮断効果を高めて、その結果、住宅内外の濃度比が小さくなったものと考えられる。

結語

住宅内外における大気浮遊粉塵の挙動は、以上の結果を総合すると、1)住宅外の環境大気の大気浮遊粉塵濃度が高い場合には住宅内の粉塵濃度も高くなる、2)浮遊粉塵が住宅内に侵入する程度は主として粉塵の粒

表3. 住宅内外濃度比 (京都市左京区)

元 素		Fe		Zn	
粒 径		2 μm 未満	2 μm 以上	2 μm 未満	2 μm 以上
濃度比	第1回	0.98	0.51	0.98	0.42
	第2回	0.98	0.23	0.74	0.19

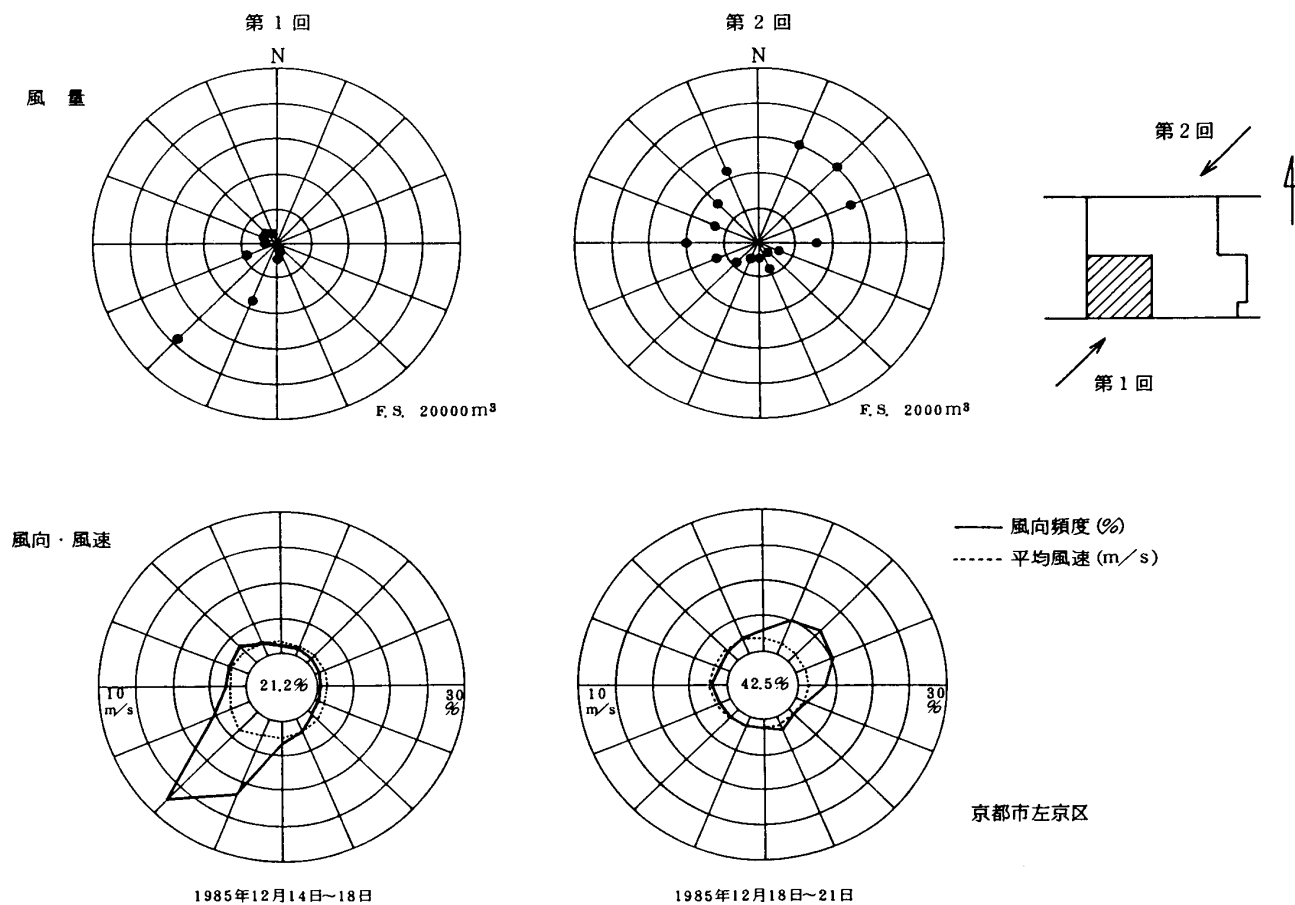


図8 風配・風量図 京都市左京区 1985年12月14日~21日

径に依存し、その内外濃度比は粗大粒子では小さく住宅の遮断効果が大きい、微小粒子ではこの濃度比が大きく、従って余り遮断されない。その結果、Al, Sc, Fe等、土壌粒子成分に主として含まれている元素に対する住宅の遮断機能は大きい、人工起源の汚染元素と見られるV, Zn等を多く含む微小粒子に対しては、通常の住宅は顕著な遮断機能を有しない、3) 住宅の構造による遮断効果の違いは、A住宅が二重窓であるため、各元素について濃度比をB住宅と比べてみると、全体としてA住宅の方が多少遮断効果が

優れているように見える、4) 住宅内の浮遊粉塵濃度は屋外の風向、風速の影響を受けるように見えるということがわかった。

これらの因子と濃度比との関係を明確にするために、(a)立地条件、(b)観測時期、(c)住宅構造の内1つの項目が異なり、他の2つの項目が同一である住宅について大気浮遊粉塵の濃度の測定を行い、データの蓄積を計ることが今後の課題と考える。

本研究を行なうにあたり、実験住宅の提供等色々御世話いただいた泉佐野市高松北の東丸真一氏と京都大学農学部助手片山幸士氏に厚くお礼を申し上げます。また、利用の便宜を計っていただいた、京都大学原子炉実験所、京都大学理学部タンデム・バンデグラーフ実験室および京都大学工学部放射実験室の関係各位に深く感謝します。

本研究の一部は、昭和60年度科学研究費補助金一般研究(c)によるものである。

(1986年8月15日受理)

文 献

- 1) 青木 敦 他, 「環境科学」研究報告集, B-265-R15-7, 1 (1985)
- 2) 広野 富雄他, 大気汚染研究, 12, 209 (1977)
- 3) 長良 健次, 田中 卓也, 第20回大気汚染学会講演要旨集, 439 (1979)
- 4) 青木敦, 石井孝, 富山毅, 山本勲, 京府大学報 (理学・生活科学) 第27号, 39 (1976)
- 5) 青木敦, 春山洋一, 片山幸士, 吉田紘二, 京府大学報 (理学・生活科学) 第36号, 79 (1985)