

室内 PM_{2.5} の現状と対策Situations and Countermeasure for Indoor PM_{2.5}

東京工業大学
Tokyo Institute of Technology
鍵 直樹
Naoki KAGI

キーワード：浮遊微粒子 (Airborne Particle Matter), 室内発生 (Indoor Emission), 侵入 (Penetration), たばこ煙 (Tobacco Smoke), 空気調和機 (Heating and Ventilating Air Conditioning System)

1. はじめに

一般室内における粒子状の汚染物質については、たばこ煙や燃焼器具から発生する非生物粒子、カビや細菌など微生物粒子などがあり、居住者の健康を損なう可能性があるため、古くから問題視されていた。室内における浮遊粉じんに関する基準値として、建築物における衛生的環境の確保に関する法律 (建築物衛生法) により、事務所や公共の建物などある規模以上の不特定多数の居住者が使用するような建築物に対し、粒径 10 μm 以下の粒子を対象として、質量濃度で 0.15 mg/m^3 以下とする建築物環境衛生管理基準がある。室内の主要な粉じんの発生源はたばこ煙であったが、近年では建物内における分煙又は禁煙が推し進められたことにより、浮遊粉じん濃度が劇的に低下している¹⁾。

また、外気についても工場の排ガスなどを念頭に、環境基本法において大気汚染に係わる環境基準として、浮遊粒子状物質 (粒径が 10 μm 以下のもの) があるが、ディーゼル排ガスなどの微小粒子が健康影響で問題となり、微小粒子状物質 (粒径 2.5 μm の粒子を 50% の割合で分離できる分級装置を用いて、より粒径の大きい粒子を除去した後に採取される粒子: PM_{2.5}) に係わる環境基準として、2009 年に 1 年平均値が 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、かつ、1 日平均値が 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下であることが制定された。

一方建築物室内においては、PM_{2.5} に関する室内環境の基準などはない。室内空気は外気を取り入れて換気を行うため、また室内で微小粒子の発生があれば、大気同様室内も PM_{2.5} は存在する。しかしながら、室内における PM_{2.5} に関する知見が少ないのが現状である。そこで本報告では、事務所建物内における PM_{2.5} の実態について、実測結果を報告すると共に、建築物における空調方式との関係について考察し、対策について述べる。

2. 既往研究による室内 PM_{2.5} の特徴

2.1 PM_{2.5} の発生源

大気における PM_{2.5} の発生源として、物の燃焼などによって直接排出されるもの (一次生成) と、環境大気中での化学反応により生成されたもの (二次生成) とがある。室内においてもこの大気の侵入に加え、大気と同様に室内での燃焼物によって発生することが知られている。一次発生源として、従来から粉じんの発生源である調理、ろうそく、アロマ、ヘアースプレー・ドライヤー、タバコ煙、ガラストーブなどが確認されている^{2,3)}。これらは、発生した粒子に粒径 100 nm 以下の超微粒子 (ナノ粒子) が中心に含まれ、ナノ粒子も PM_{2.5} の一部であり、質量濃度として多くを占める。また、コピー機やレーザープリンタなどの情報機器からの発生⁴⁾も注目されている。さらに、室内における化学反応による二次生成粒子についても多く議論されるようになり、オゾンとリモネンや α -ピネンなどテルペン類との反応について検討が行われている^{5,6)}。よって、PM_{2.5} の発生源としては、従来からの粒径 10 μm 以下の浮遊粉じんの発生源も多く含まれていることになる。

2.2 室内における PM_{2.5} の特徴

室内における PM_{2.5} の実態を把握するために、既往の研究について調査を行った。表-1 に今回文献調査を行った室内における PM_{2.5} 濃度の一覧を示す⁷⁻¹⁰⁾。チェコの学校教室において、PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ の質量濃

度の調査を行った結果、PM_{2.5}の平日日中の室内濃度は、7.6-44.0 μg/m³で夜間及び週末とでは違いが見られなかった。また、オーストラリアの交通量の多い道路や住宅に囲まれた建築物において、外調機に捕集効率の良いエアフィルタに改善した際に、室内のPM_{2.5}濃度の変化について検討を行ったものがある。対象とした建築物室内では、平均8 μg/m³であり、高効率のエアフィルタとした場合に55%減少させることができた。

我が国においては、事務所建築物において浮遊粉じん濃度とβ線法によるPM_{2.5}濃度の実測と共に、粒径分布の実測調査¹¹⁾がある。多くの建築物において、PM_{2.5}濃度が10 μg/m³以下であったが、喫煙を許している建物、分煙しているもののそれが不完全な建物においては、20 μg/m³以上となっていた。

表-1 室内のPM_{2.5}濃度の調査例

国	建物	PM _{2.5} 濃度[μg/m ³]	備考
インド	住宅	137.93	道路沿い
		173.03	都市部
		135.55	農村部
クウェート	住宅	46-80 24-32	台所 寝室
香港	住宅	73.6/66.1(OA)	道路沿い
		60.0/38.7(OA)	都市部
		39.6/26.4(OA)	農村部
チェコ	学校	7.6-44.0	昼間、夜間で変わらず
オーストラリア	事務所ビル	8	高性能なフィルタで低減

3. 事務所ビルにおけるPM_{2.5}の実測

3.1 実測方法

PM_{2.5}の測定方法については、大気環境に関するものが参考となる¹²⁾。環境大気中に浮遊する粒子状物質のうち空気力学的特性が粒径2.5 μmで50%のカット特性をもつ分粒装置により分粒された粒子状物質についてロウボイウムエアサンプラを用いてフィルタ上に採取し、精密天秤によって質量を測定するものである。フィルタ上に捕集された粒子へのガス状物質の吸着や再揮発など様々な妨害要因や不確定要素を含んでおり、厳密な測定の困難さが指摘されている。また、秤量を行わない相対濃度計として、1時間ごとの測定が可能なβ線吸収法、光散乱法、圧電天秤法が環境基準を評価する方法として存在する。

室内で測定を行う際には、装置の大きさ、騒音、吸引流量の多さなど、大気用の測定器を用いることは現実的ではない。また、昨今の室内粉じんの低濃度化により、秤量を行うのに可能となるサンプル流量、サンプル時間が多大となり、測定及び評価が困難となる場合がある。

そこで本研究では、多くの既往の研究において用いられている可搬型のPM_{2.5}計(TSI DustTrak DRX 8533)を用いることとした。この装置は、光散乱法を用いており、1分毎の濃度を記録するものである。ただし、粒子の性状によりこの機器が表示する濃度と実際の質量濃度は異なることが知られており、換算係数を乗じて濃度とするのが一般的である。本研究においては、この係数を1として以後表示するが、実際の濃度よりも高い濃度となることに注意が必要である。

本研究で測定対象とした建物は、表-2に示すような東京都、福岡県、大阪府に所在する事務所建築物である。測定は、2013年3月及び2014年2月の冬期、2013年8月及び9月の夏期に行った。建物によっては、冬期のみ測定もある。

建物は、延床面積3000 m²以上の特定建築物を中心に、延床面積3000 m²未満の非特定建築物も含まれて

いた。また、F-02には居室に接して不完全な喫煙室があったが、その他については建物内禁煙であった。

各建物の空気調和方式については、外調機を有する中央方式、ビルマル及び全熱交換機によって換気を行う個別方式、そしてビルマル及び外調機を有する中央・個別方式と空調方式を分類した。

各建物における測定には、各室内において30分程度装置を設置して連続測定を行い、その平均値で評価することとした。また同様に外気においても測定を行った。

表-1 対象とした建築物と空調方式

ID	地域	測定時期	空調方式	備考
T-01	東京	冬期・夏期	中央	喫煙所
T-02		冬期・夏期	中央	
T-03		冬期・夏期	中央	
F-01	福岡	冬期・夏期	個別	
F-02		冬期・夏期	個別	
F-03		冬期・夏期	個別	
F-04		冬期・夏期	中央	
O-01	大阪	冬期	中央	
O-02		冬期	個別	
O-03		冬期	中央・個別	
O-03'		冬期	個別	
O-04		冬期・夏期	中央	
O-05		冬期・夏期	中央・個別	
O-06		冬期・夏期	個別	
O-07		冬期・夏期	個別	
O-08		冬期・夏期	中央・個別	
O-09		冬期・夏期	中央・個別	

3.2 実測結果

図-1に冬期及び夏期における東京、福岡、大阪の事務所建築物及び外気のPM_{2.5}濃度の測定結果、及び室内と外気濃度の比を表すI/O比を示す。冬期の測定では、中国からの越境汚染で話題となった2013年3月及び2014年2月であったため、外気濃度が高く、室内濃度が10-370 µg/m³となった。特に福岡においては室内外共に高い値となった。なお、F-02については不完全な喫煙室があり、たばこ煙の影響を強く受けているため、外気よりも高い濃度となった。I/O比については、喫煙室のあるF-02を除けば、概ね0.5-1の範囲となった。なお、個別方式及び中央個別方式のO-02、O-07、O-08、O-09については、他よりも若干高い値となっていた。

夏期においては、全般的に外気濃度が低くなり、喫煙室のあるF-02以外は、50 µg/m³以下となった。I/O比についても、概ね1以下となっていた。

冬期及び夏期の両方の測定を行った建物のPM_{2.5}濃度及びI/O比の比較を図-2に示す。F-02を除けば、季節毎には大差はなく、I/O比に関しても、両季節共に1を下回っていた。よって、室内の汚染物質の侵入の指標となるI/O比については、室内の発生が支配的でない場合には、季節に関係なく建物の特性、即ち外気からの侵入、外調機等の特性によるものが考えられる。

以上のように、室内PM_{2.5}濃度については、室内での燃焼発生源がある場合、また外気からの侵入により、その濃度が高くなる可能性がある。また、大気環境基準値とは単純に比較はできないが、例えば1日平均として35 µg/m³以下とある基準値を超過する例もあることが分かった。

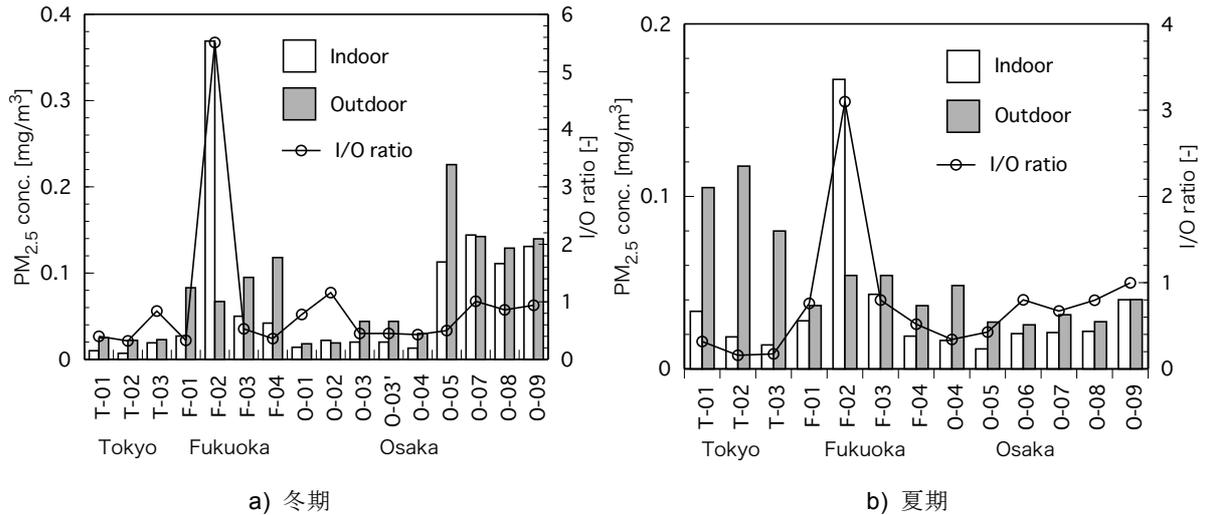


図-1 各建物における室内及び外気の PM_{2.5} 濃度と I/O 比

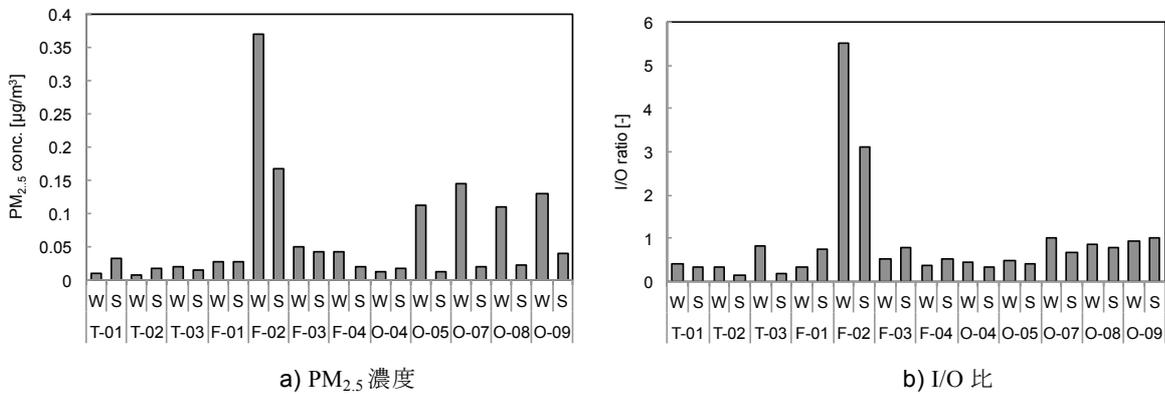


図-2 冬期及び夏期の PM_{2.5} 濃度と I/O 比の比較

4. 空調方式の分類による PM_{2.5} 濃度の特徴

上述のように、室内 PM_{2.5} 濃度については、室内の発生と共に、外気の侵入が寄与していることが示唆された。また、建築物においては外気からの侵入に外調機フィルタが、室内の粒子の除去には環気空気を処理する空調機フィルタが室内濃度に影響することが考えられる。そこで、表-2 に示した通り、中央方式、個別方式、中央・個別併用方式に空調機を分類した際の、PM_{2.5} 濃度、I/O 比の箱ひげ図を図-3 に示す。なお、喫煙所のある F-02 については、室内に発生量が他と比べて明らかに多いため、今回の解析からは除いた。

PM_{2.5} 濃度及び I/O 比共に、個別方式及び中央・個別併用方式よりも、中央方式の方が低い値となっていた。即ち、中央式においては、外気の粉じんを外調機により効率よく除去及び室内粉じんを空調機により除去できていることを示しており、効率の良いエアフィルタが寄与していることが考えられる。逆に個別方式においては、中央方式ほどの効率のエアフィルタを備えていないために、比較すると濃度が高く、I/O 比についても高い値になったものと考えられる。

PM_{2.5} 濃度の測定と並行して、パーティクルカウンタ (リオン, KR-12A) による粒径別粒子の個数濃度測定を行った。図-4 には、各空調方式別の粒径 0.3 µm 以上及び 2 µm 以上の粒径別個数濃度による I/O 比を示す。いずれも個別方式において I/O 比が高くなっていることから、同様にエアフィルタの特性が表れているものと考えられる。更に粒径 2 µm 以上については、I/O 比の平均値が 1 以下であったものの、粒径 0.3 µm 以上では 1 を超過する割合が大きくなった。エアフィルタの捕集効率は粒子の粒径によって大きく異なり、粒径 0.3 µm 前後においてはフィルタの最大透過粒径となるので、特に個別方式においては、この粒径範囲の外気の侵入が多いことが考えられる。室内における粉じんの粒径別質量濃度分布は、微小粒径側での粒径 0.2-0.3 µm 付近にピークが存在することが確認されており⁹⁾、この主ピークが PM_{2.5} を占めていることから、

この粒径範囲を除去することが室内 PM_{2.5} の制御には重要となってくる。

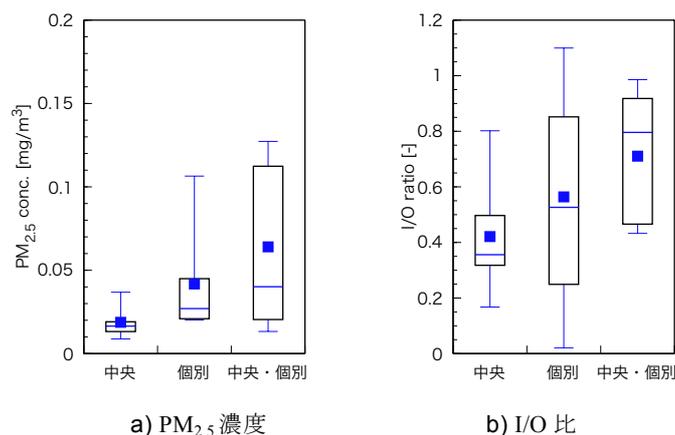


図-3 空調方式別の室内 PM_{2.5} 濃度及び I/O 比

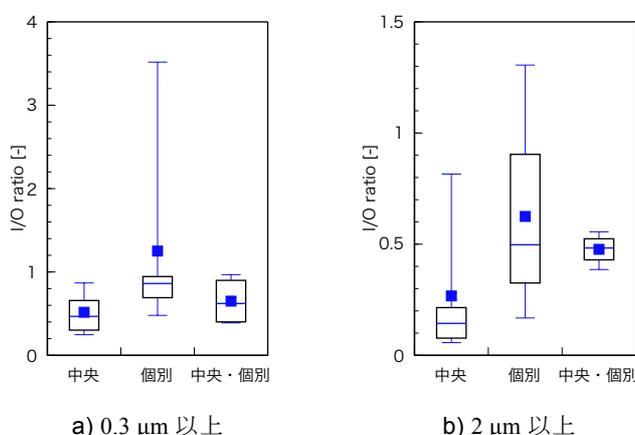


図-4 パーティクルカウンタによる空調方式別の個数濃度の I/O 比

5. 室内 PM_{2.5} の対策

室内の PM_{2.5} の対策としては、通常の室内汚染物質と同様に、室内に入れない、室内で発生させない、発生したら速やかに除去することが基本となる。室内の発生源については、先に述べたように、従来からの浮遊粉じんと変わるものではないため、できる限り粉じんの発生源となるようなものは室内で使用しないことが重要である。また、例えば室内に燃焼物がある場合には、局所換気設備により（例えば厨房の換気扇）、速やかに除去することが効果的であると考えられる。

発生した微粒子の除去には、換気の他にエアフィルタによる除去が期待できる。空調機を有するような建築物においては、外気処理及び環気空気の浮遊粉じん浄化のために、エアフィルタが装着されている。なお、このような建築物で使用されているものは、中性能フィルタと呼ばれ、比色法で 60% 程度以上の捕集効率を持つもので、主に比較的粗大な粒子を捕集することを目的としたものである。フィルタの捕集効率は粒子の粒径によって大きく異なり、粒径 0.3 μm 前後においてはフィルタの最大透過粒径となるので、上述の比色法の捕集効率とは全く異なる値となる。正確にフィルタの捕集性能評価を行う場合には、PM_{2.5} のような広い粒径範囲ではなく、粒径別の効率で評価するのが通常である。PM_{2.5} に関する捕集性能の評価方法が求められるところではあるが、試験対象とする粉じんを含む空気を規定する必要があると考えられ、簡単ではない。

家庭用の空気清浄機についてもその性能の試験が行われている¹³⁾。空気清浄機には HEPA (High Efficiency Particulate Air) フィルタを装着していることが多く、上記の中性能フィルタよりも、最大透過粒径での捕集効率が格段に高い。このような空気清浄機を用いれば、PM_{2.5} の粒径の範囲であれば、効率よく除去することが可能である。空気清浄機の性能表示については、たばこ煙を用いて、粒径 10 μm 以下の浮遊粉じんを対象とした試験により行っていた。公益社団法人全国家庭電気製品公正取引協議会においては、空気清浄機の表示として、「PM_{2.5}」への対応として、「0.3 μm~2.5 μm サイズ粒子を○○%以上キャッチ」と表示することを示

した。これはあくまで規定された試験方法として、試験的に作り出した空間の粒子の粒径特性に依存するため、決して正確な情報ではないが、現状ではある程度は参考になる値となっている。また、この協議会では、「この空気清浄機では 0.3 μm 未満の微小粒子状物質については、除去の確認ができていません。また、空気中の有害物質のすべてを除去できるものではありません。」と注書きすることを義務づけており、あくまでも参考として使用すべきである。以上より、室内で発生した及び外気から侵入する PM_{2.5} を完璧に除去及び侵入の防止をすることは困難ではあるが、ある程度の効果は期待できるものである。

6. おわりに

本報告では、室内 PM_{2.5} に関する概要及び汚染対策について述べた。

- ・PM_{2.5} 濃度測定の結果、喫煙室のある建物を除けば、外気と同等かそれよりも低い濃度となった。
- ・冬期及び夏期の I/O 比については、季節毎の違いがなく、外気からの侵入が建物の特性によるものと考えられた。
- ・空調方式別に I/O 比を比較すると、粉じんの捕集効率の良いエアフィルタを有している中央方式の空調システムの方が、個別及び中央・個別方式よりも低い値となった。また、粒径 0.3 μm 以上の粒子についてもその傾向が確認でき、PM_{2.5} の主ピークの除去が室内 PM_{2.5} 濃度の制御には重要であることを述べた。
- ・対策としては、エアフィルタによりある程度の除去は可能であるため、外気の侵入を外調機エアフィルタで除去するとともに、空気清浄機なども効果が期待される。

参考文献

- 1) (財)ビル管理教育センター：建築物における環境衛生に関する研究，平成 16 年度厚生労働科学研究費補助金報告書，p.10，2005
- 2) T. Hussein, T. Glytsos, J. Ondracek, P. Dohanyosova, V. Zdimal, K. Hameri, M. Lazaridis, J. Smolik, M. Kulmala: Particle size characterization and emission rates during indoor activities in a house, *Atmospheric Environment*, 40, 4285-4307, 2006.
- 3) A. Afshari, U. Matson and L.E. Ekberg: Characterization of indoor sources of fine and ultrafine particles: a study conducted in a full-scale chamber, *Indoor Air*, 15, 141-150, 2005
- 4) N. Kagi, S. Fujii, Y. Horiba, N. Namiki, Y. Ohtani, H. Emi, H. Tamura and Y.S. Kim: Indoor air quality for chemical and ultrafine particle contaminants from printers, *Building and Environment*, 42, 5, 1949-1954, 2007.
- 5) W.W. Nazaroff and C.J. Weschler: Cleaning products and air fresheners: exposure to primary and secondary air pollutants, *Atmospheric Environment*, 38, pp. 2841-2865, 2004.
- 6) X. Chen and P.K. Hopke: Secondary organic aerosol from α -pinene ozonolysis in dynamic chamber system, *Indoor Air*, 19, p.335-345, 2009.
- 7) D. Massey, J. Masih, A. Kulshrestha, M. Habil, A. Taneja: Indoor/outdoor relationship of fine particles less than 2.5 μm (PM_{2.5}) in residential homes locations in central Indian region, *Building and Environment*, 44, 2037-2045, 2009.
- 8) Mohamed F. Yassin, Bothaina E.Y., AlThaqeb, Eman A.E., Al-Mutiri: Assessment of indoor PM_{2.5} in different residential environment, *Atmospheric Environment*, 56, 65-68, 2012.
- 9) J.J. Cao, S.C. Lee, J.C. Chow, Y. Cheng, K.F. Ho, K. Fung, S.X. Liu, J.G. Watson: Indoor/outdoor relationships for PM_{2.5} and associated carbonaceous pollutants at residential homes in Hong Kong – case study, *Indoor Air*, 15, 197-204, 2005.
- 10) Martin Branis, Pavla Rezáková, Markéta Domasová: The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ in a classroom, *Environmental Research*, 99, 143-149, 2005.
- 11) 鍵直樹，柳宇，西村直也：事務所ビルにおける室内浮遊微粒子の特性と PM_{2.5} 濃度の実態調査，日本建築学会技術報告集，第 18 巻，第 39 号，pp. 613-616，2012.6
- 12) 環境省：微小粒子状物質健康影響評価検討会報告書，2008.4
- 13) M.S. Waring, J.A. Siegel and R.L. Corsi: Ultrafine particle removal and generation by portable air cleaners, *Atmospheric Environment*, 42, pp. 5003-5014, 2008.