

〈特集〉

PM2.5の環境基準，標準的計測法の国際動向

神谷 秀博

東京農工大学大学院・生物システム応用科学府
(〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16 E-mail: kamiya@cc.tuat.ac.jp)

概要

PM2.5の国際的な規格化に基づいた定義から健康影響，環境基準制定の歴史的背景や国際的な動向，発生源や排出機構などPM2.5の基本的な事項を概観し，PM2.5排出量の標準的計測法について紹介する。

キーワード：PM2.5，ISO，環境基準，国際標準計測法
原稿受付 2014.12.2

EICA: 19(4) 41-44

1. はじめに

中国からの報道などにより急激に認知が広がった「PM2.5」であるが，その定義から健康影響，環境基準の国際的な動向，発生源や遠距離飛来の仕組み，更に環境中への拡散防止法など，様々な点で科学的根拠を明確にした説明が十分なされていない。ここでは，その定義，発生原因，健康影響，環境基準などPM2.5の基本的な事項を概観した上で，PM2.5排出量の標準的計測法について紹介する。健康影響や廃棄物焼却場など他の固定発生源からの排出の詳細や，本文でほとんど触れていない移動発生源，越境汚染，モニタリング技術等については，本特集の記事を参照いただけると幸である。

2. PM2.5とは何か，その定義

「PM2.5」の「PM」とは粒子状物質 (Particulate Matter) の略称であり，「2.5」は，粒子の大きさを意味し，その単位は μm である。「直径が $2.5\mu\text{m}$ 以下の微粒子」という理解で，概ね間違っていない。しかし，実は， $2.5\mu\text{m}$ 以下の粒子だけを100%分離する技術は確立できておらず，国際規格であるISOでは，この技術的な制約を考慮したPM2.5の定義を1995年に，ISO7708として確定した¹⁾。Fig. 1は，横軸が粒子の大きさ，縦軸がその大きさを分離できる割合を示している。図中の破線のように， $2.5\mu\text{m}$ より小さい粒子は0%， $2.5\mu\text{m}$ より大きい粒子は100%と， $2.5\mu\text{m}$ でズバッと大小粒子に分けられるのが理想である。しかし，現実的な装置では， $2.5\mu\text{m}$ より大きい粒子が小さい方に，小さい粒子が大きい方に混入することは防げない。ISO7708では，この混入の度合いがどの程度

であれば許容されるかを，Fig. 1中の曲線で規定した。この曲線は， $2.5\mu\text{m}$ の大きさの粒子は50%分離でき， $5.0\mu\text{m}$ の粒子は95%， $1.0\mu\text{m}$ の粒子は5%が分離されることを意味している。この曲線で規定される大きな粒子の分離性能を有する装置で，大きな粒子を除いた気体中に含まれる粒子の濃度をPM2.5の濃度と規定している。この図には，併せて $2.5\mu\text{m}$ 以下の微粒子，PM10についても記載している。

20年近く前に，PM2.5が問題になることを予見し，ISO7708を作っていた欧米の先見性には感服する。後述する最新の分離装置の性能をFig. 1中に示しているが，この分離性能曲線とデータは，ほぼ一致しており，技術的予見という点でも優れている。

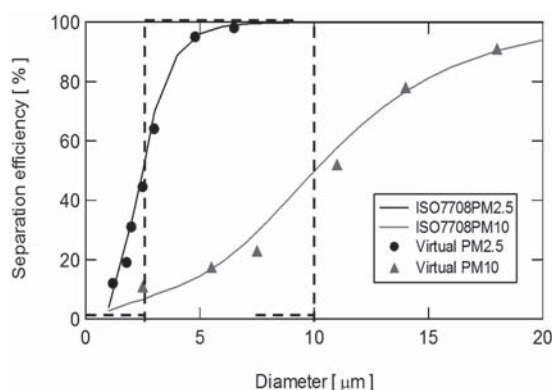


Fig. 1 Ideal and ISO7708 prescribed separation efficiency of PM2.5 and PM10

3. PM2.5の健康影響

3.1 疫学調査によるPM2.5の平均寿命への影響

PM2.5が健康に影響する可能性は，様々な科学的

研究成果に基づいている。健康とのかかわりを調べた代表的な研究は、1995年に発表された Dockary らの研究²⁾がある。彼らは、人口規模と喫煙率がほぼ同程度の米国内の6都市を選び、硫黄酸化物、窒素酸化物、オゾンなど、PM2.5を含む様々な環境汚染物質の年間の平均濃度と平均寿命の関係を求めた。彼の論文のデータをまとめた結果を Fig. 2 に示す。横軸は、各都市の様々な環境汚染物質の濃度、縦軸はリスク比 (Risk Ratio) と呼ぶ平均寿命の指標である。リスク比 1.0 の都市の平均寿命は、全米の平均寿命の 76.4 歳、6 都市中最も高いリスク比 1.25 の都市の平均寿命は 73.5 歳である。この都市の全住民の寿命は、全米平均より約 3 年短いことを示している。

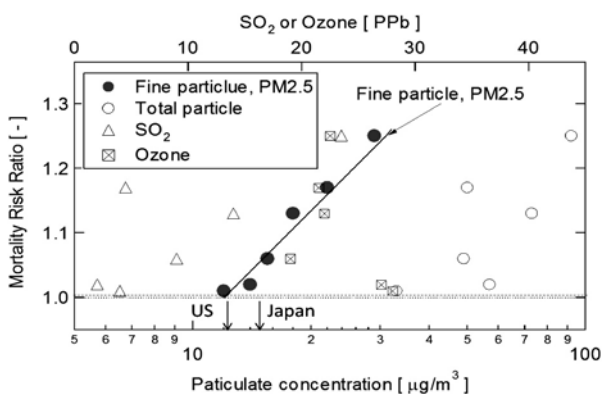


Fig. 2 Relationship between risk ratio and various environmental pollutants concentration in different six cities in USA

日常生活で健康へのリスクが最も高いのは喫煙で、そのリスク比は、2.0、平均寿命は 67.9 歳まで短くなる。各都市のリスク比と、硫黄酸化物、オゾンなど様々な環境汚染物質濃度の関係は、必ずしも相関関係が明確でない。例えば、硫黄酸化物は、呼吸器疾患を起こす有害物質であるが、6 都市の硫黄酸化物濃度では、平均寿命に影響するレベルでなく、もっと高濃度でないと寿命への相関が現れないと考えられる。一方、PM2.5 濃度だけは図中の直線に示すように、見事にリスク比と比例関係にあり、平均寿命と明確な因果関係を示している。調査対象とした各都市では、PM2.5 以外の環境汚染物質は、寿命に影響ない程度に抑制されているのに対し、PM2.5 だけが影響を及ぼす濃度レベルであることを示唆している。リスク比が 1.0 である都市の PM2.5 の濃度は、10~15 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ の範囲であり、15 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ を超えた都市のリスク比は、1.0 より明確に大きい。PM2.5 の年間の平均濃度が 10~15 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ より低ければ、平均寿命への影響はないと推察されることから、先進国の環境基準値は後述するようにこの値が目安として設定されている。

何故、PM2.5 が健康に影響するのか、その理由を

検討した研究も、米国で 1994 年に報告された³⁾。人が、粒子を呼吸により吸引した場合、粒子の大きさにより鼻・咽喉、または、肺の深部に沈着する割合を計算機シミュレーションにより求めた結果の概要を Fig. 3 に示した。鼻や咽喉では、主に 10 μm 以上の粒子が捕捉され、それより小さい粒子は、鼻や咽喉では捕捉できず呼吸器内部、気管、気管支、そして肺の最深部である肺内胞まで到達し沈着する。肺内胞での沈着率は、2.5 μm 程度で増加しはじめ、粒子径の減少に伴い増加し、20~30 nm で最大になる。さらに小さい粒子は沈着せず呼吸とともに排出されるため、沈着率は減少する。肺内胞への沈着率が増加する 2.5 μm 以下の粒子を High risk 粒子と定義された。

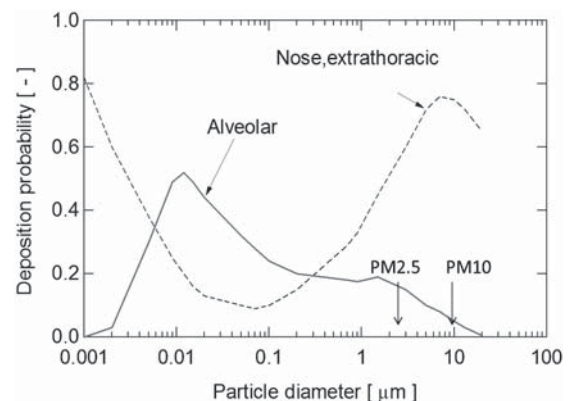


Fig. 3 Simulation for particle size dependence on deposition efficiency on different position

3.2 PM2.5 の大気環境基準

こうした疫学調査結果に基づいて、PM2.5 の大気環境基準値が、米国や欧州、さらに日本で相次いで決められた。中国でも 2012 年に基準値は決められたが、適用開始は 2016 年度からである。各国、EU などの基準値を Table 1 にまとめて示した。米国は、2012 年に基準値を 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ から 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ と下方修正した。わが国は、年平均値が 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ で、一日の平均許容濃度が 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ である。環境汚染物質の濃度は、年間を通じて変動するため、一日の平均値が年

Table 1 Environmental standards of PM2.5 in each country

国	アメリカ ¹⁾	EU ²⁾	日本 ³⁾	中国 ⁴⁾
日平均 (短期基準)	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	(none)	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
年平均 (長期基準)	12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
基準設定年度	1997 基準制定 2002 規制開始 2012 基準改定	2008 年 基準制定 2015 年 規制開始	2009 年 基準制定	2012 年 基準制定 2016 年 規制開始

1) US Environmental Protection Agency (2012). *National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter*

2) European Parliament Council (2008). *EU Directive 2008/50/EC*.

3) 環境省 (2009). 環境省告示第 33 号.

4) 中国環境保護部 (2012). 環境空気質量標準 GB3095-2012.

間の平均許容値を越えても健康へのリスクは低いいため、年間許容値よりも高く設定されている。

報告されている国内のPM2.5濃度測定値は、年平均は概ね許容濃度以下ではあるが、一日平均値が許容値付近に達した例も報告されている。厳しい排出規制が行われて、高性能の除塵装置の設置が義務付けられているわが国の場合、PM2.5の環境濃度は、自然界由来や大陸からの越境汚染の占める割合が高いと思われるが、特に大規模な固定発生源からの排出量の調査がほとんど公表されていないため、国内の人為発生源の寄与率に関する科学的根拠が乏しいのが実情である。

4. PM2.5の人為発生源と排出量測定法

4.1 PM2.5の人為発生源の分類とその寄与率変化

PM2.5の発生源は、大別して自然界起源と、人為的な産業活動起源がある。人為的な発生源は、ディーゼル車や船舶、航空機など移動発生源と、工場、発電所、廃棄物処分場など固定発生源がある。環境省の調査で予測されたわが国の浮遊性粒子状物質の発生源別寄与率の推定結果を **Table 2** に示した⁴⁾。

Table 2 Impact estimation on PM2.5 concentration in Kanto area, Japan

Source		2000	2005
Stationary	Industry origin	20%	38.4%
	Consumer		3.0%
	Combustion	—	1.1%
Mobile	Car	35%	11.0%
	Ship	—	3.4%
	Airplane		2.3%
	Construction		4.0%
Natural sources		33%	36.7%
Total concentration			29.9 mg/m ³

平成12年の予測では、移動発生源の寄与率が大きいとの予測だったが、ディーゼル車の排ガス対策が進んだこともあり、5年間で、固定発生源の寄与率が20から38%に増加している。人為発生源としてはこの他に、焼畑など農業起源もあり、東南アジアでは特に深刻である。また、黄砂など大陸から越境して飛来する粒子に人為起源の微粒子の混入も考えられ、対策を考える上では、自然起源と人為起源の分離評価も必要である。PM2.5の発生源や生成・排出機構自体が多様であり、各発生源、特に固定発生源からの排出状態や排出量の評価方法自体がまだ研究段階にある。人為発生源から排出されたPM2.5が、生活圏での大気環境中のPM2.5濃度とどのような相関関係があるかも未解明である。

4.2 固定発生源からのPM2.5の排出機構

固定発生源からのPM2.5の排出を防止するためには、まず、排出機構を理解する必要がある。第一の機構は、固定発生源に設置されている集じん装置を通過する粒子である。集じん機の性能は向上しているが、粒子を100%捕集できる装置は存在しない。第二の機構は、集じん機通過時は、気体状、蒸気であるが、その後、煙道や大気放散時の希釈・冷却の過程で粒子化する凝縮性粒子がある。蒸気状態から凝縮・析出するため微粒子、ナノ粒子となっている。この二種類の機構による排出量の質量濃度による評価法はISO化されている。

第三の機構が、集じん機を経ずに装置から漏れ、建屋などから排出する粒子である。わが国の場合、装置からの漏れは少ない上、建屋集じんも行っているため、環境中への排出量は極めて低濃度で抑制されているが、アジア諸国では、この機構による排出量が多いと予測される。特に、過剰な流量の排ガスや粉じんの負荷により集じん機の圧力損失が増加し、装置の破損やフィルターの損傷を防ぐため、集じん装置の上流の煙道を開け、排ガスを大気中に放散させる「バイパス」という操作がある。わが国では30年以上前に禁止され、集じん装置の上流の煙道に開放弁を設けること自体が認められていない。しかし、アジア諸国では、製品の生産や発電設備の増設に対し、集じん装置の増設が追い付かないため、この操作が常態化するケースがある。実際に、中国のセメント工場で後述するバーチャルインパクターを用いた方法により測定を行った結果、サイクロンという粗粒子用集じん装置だけを経た排ガス中のPM2.5濃度は、数100 mg/m³あった。バグフィルターなど高性能集じん装置通過排ガスでは数 mg/m³以下であるので、バイパスを行うと100倍以上の濃度で大気中に放散することが確認された。

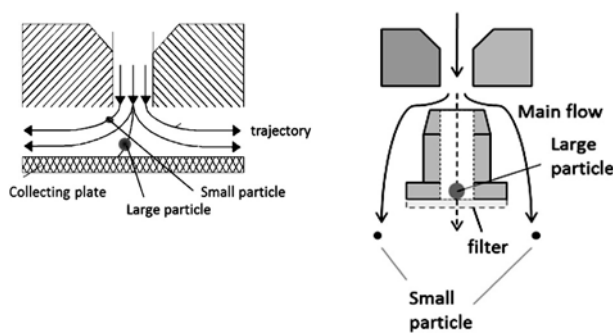
第4の機構は、煙突から排出される際には、気体であるVOCなどが、成層圏まで到達し、紫外線などにより粒子化する二次粒子である。

4.3 PM2.5の排出濃度計測法

大気中に存在する、あるいは工場や自動車など人為発生源から排出するPM2.5/PM10の量を計測するには、気中に浮遊・含有している粉塵の中から **Fig. 1** の性能を有する装置により10 μmそして2.5 μm以上の粒子を分離した上で、フィルターなどに捕集して質量濃度を計測する方法のISOが、国際標準法として策定された。

大きな粒子を分離する原理は、**Fig. 4** に示した手法がある。**Fig. 4(a)** のインパクター法は、ノズルから粒子を含む高速気流を平板に衝突させて大きな粒子を板上に捕集する方法で、ISO23210で規格化された⁵⁾。

ある大きさより小さな粒子は、衝突板に衝突しないで気流に同伴され下流に流れる。一方、大きな粒子はその慣性力で気流から剥離して板に衝突し捕集される。高速で衝突するため、衝突板にはグリースなど粘着性の物質を塗布⁶⁾しないと粒子が捕集できず、跳ねて下流に流れてしまう。その結果、大きな粒子もPM2.5として含まれ、PM2.5の濃度を過大に評価することになる。大気環境の測定ではグリースなど粘着剤が使えるが、工場の煙道などでPM2.5を測定する場合は、煙道内が高温で反応性の物質の蒸気なども存在するためグリースが変質する。実際に、グリースを使わないと、2.5 μm 以上の粒子の捕集効率は70%程度であることが報告されている⁷⁾。そのため、この方法による煙道中でのPM2.5濃度計測法に関するISO23210では、2.5 μm 以上の粒子径範囲の分離捕集効率が70%までの装置であれば、使用してよいと規格化されている⁵⁾。ただ、粒子の質量は粒子径の3乗に比例して増加するため、大きい粒子は、特にしっかりと分離しないと正確な質量濃度評価ができない。実際に大きな粒子が分離できていないと、PM2.5の排出質量濃度が数十%から場合によっては数倍多く見積ることになる^{8,9)}。



(a) Real impactor (b) Virtual impactor

Fig. 4 Principle of PM2.5 separation from gas

この問題を解決するため、Fig. 4(b)に示した、大きな粒子を対向ノズルで捕集するバーチャルインパクトが開発され¹⁰⁾、ISO化も2012年6月に、わが国主導で作製、公開された¹¹⁾。この方法の上流側のノズルはFig. 4(a)と同様であるが、上部ノズルを出た気流流量の10%が、対向ノズルに導入され、残りの90%の気流は、対向ノズルを通らずノズル側面から後流に流す。その結果、大きな粒子は慣性力で対向ノズルに捕集され、小さい粒子は90%の流れに同伴されて後流に流すことで、大小粒子を分級することができる。対向ノズルによる粒子捕集は、グリースなどを使用しなくても、はね返り現象が防止できるため、煙道など高温反応性雰囲気中での測定に適している。大気環境中のPM2.5は濃度も薄く、グリースも使用できるので、Fig. 4(a)の装置も使用可能であるが、固定発生源の煙道では、使用は推奨できず、JISでは、

Fig. 4(b)のバーチャルインパクト法のみを標準計測法とした。

PM2.5の第二の排出機構である凝縮性粒子は大気放散状態や放出時の風向きなどにより生成量や粒子径が著しく変化する。そこで、大気放散状態を模擬した希釈器¹²⁾と呼ばれる装置を用い、排ガスと清浄空気を混合・希釈して発生する粒子の質量や粒子径分布の測定が試みられている。蒸気から析出する粒子のため、生成する粒子は100 nm以下のナノ粒子状であることが報告されている。凝縮性粒子がPM2.5の排出濃度に及ぼす影響は、質量濃度で計測すると数~数10%程度と言われているが、集じん機を通過した粒子より微細な粒子が多く、凝縮性成分に有害成分が多いため、濃度は、個数濃度や表面積濃度で評価すべきとの議論もある。詳細は文献^{12,13)}を参照いただきたい。

5. 終わりに

PM2.5に関し、その定義や主に固定発生源を対象とした排出機構、その計測法を概観した。固定発生源は、燃料種や燃焼方法、燃焼条件、装置規模も著しく異なり、集じん機や排ガス処理法也多岐にわたっている。また、環境保全設備も国によって規制が異なり、規制のある総粉じん量に対するPM2.5の割合や、排出実態もほとんど公表された計測例もないのが実情である。計測法のISO化、JIS化が進み、標準法が確立されたので、まずは排出実態の把握と、環境濃度への影響を明らかにした上で、適切な排出防止策の策定や排出基準の設定が望まれる。

参考文献

- 1) ISO 7708: 1995 Air quality — Particle size fraction definitions for health-related sampling
- 2) Dockery, D. W. et. al., The New England Journal of Medicine, 329, 1754–1759 (1993)
- 3) International Commission on Radiological Protection. 1994 ICRP 24
- 4) 微小粒子状物質健康影響評価検討会報告書、環境省、pp. 3–58, 59 (2008)
<http://www.env.go.jp/air/report/h20-01/index.html>
- 5) ISO 23210: 2009
- 6) Kauppinen, E. and Pakkanen, T. A., Environ. Sci. Technol., 24, 1811–1818 (1990)
- 7) John, A. C., Kuhlbusch, T. A. J., Fissan, H., Bröcker, G., Geueke, K.-J., Aerosol Sci. & Techn. 37 694–702 (2003)
- 8) 和田ら、粉体工学会誌, 46, 520–525 (2009)
- 9) 神谷ら、エアロゾル研究, 29, s27–s37 (2014)
- 10) Luckner, H. J., Szymanski, W. W., et. al., Journal of aerosol science, 31, S779–S780 (2000)
- 11) ISO 13271: 2012
- 12) England, G. C. et al., 2007, J. Air Waste Manag. Assoc. 57, 65–78
- 13) Lee, S. Win et al. (2010). Fuel 89: 874–882