

## 微小粒子状物質の粒径について

微小粒子状物質健康影響評価検討会報告を基に、粒子状物質の特性からの検討（粒径分布、成分、粒子成長、寿命）、大気中挙動からの検討（粒子の地理的均一性、室内への侵入率）、体内中の挙動からの検討、科学的知見の蓄積等からの検討を踏まえた適切な微小粒子状物質の粒径の大きさについて整理を行った。

粒子状物質は、形状や粒径も多様であり、また発生源によって異なる成分を含みうることから、化学的、物理的性質が異なる。粒子状物質の持つこれらの多様な性質が、呼吸を通じて吸入する粒子の気道内の沈着場所及び除去の経路を決定することになる。

これまで、世界各国において行われた粒子状物質の環境基準の設定や、多くの研究者による粒子状物質の健康影響に関する研究において、様々な性質を有する粒子状物質を定義するにあたり、空気力学径によりカットポイントを設定して基準や研究の対象となる粒径範囲を特定してきた。これは、粒子状物質の大気中の挙動や気道内に吸入した後の体内の挙動から、粒子の粒径がヒトへの健康影響に関して重要な要素となるためである。

我が国では、粒子状物質の指標に関して、粒径に着目し、粒径  $10\mu\text{m}$  以上の粒子を 100%カットする浮遊粒子状物質（SPM）の環境基準を 1973 年に設定した。

この理由は、以下に示す当時の医学的な知見に基づくものであり、米国では当時、全浮遊粒子（TSP : Total Suspended Particles）を対象としていたことを考えると、日本ではより小さな粒子に着目していたと言える。

- (1)  $10\mu\text{m}$ 以下の粒子は、沈降速度が小さく、大気中に比較的長期間滞留する。
- (2)  $10\mu\text{m}$ を超える粒子状物質は鼻腔及び咽喉頭でほとんど捕捉されるが、 $10\mu\text{m}$ から $5\mu\text{m}$ の粒子は90%が気道及び肺胞に沈着し、呼吸器に影響を与える。
- (3)  $2\sim 4\mu\text{m}$ の間の粒子状物質の肺胞沈着率は最大である等の当時の医学的な知見に基づいているものである。

一方、米国では、1997 年に、空気力学径で  $10\mu\text{m}$  以下の粒子状物質（ $\text{PM}_{10}$ ）に加えて  $2.5\mu\text{m}$  以下の粒子状物質（ $\text{PM}_{2.5}$ ）に関する基準も追加している。これは、粒径が  $2.5\mu\text{m}$  以下の粒子に関する健康影響の知見の存在や微小粒子や粗大粒子の発生源の相違、体内の挙動の相違によるものである。

今般、粒子状物質の特性、生体内沈着及び体内動態、疫学研究等の科学的知見の蓄積を踏まえ、微小粒子状物質の対象となる粒径の大きさについて検証した。

### (1) 粒子状物質の特性からの検討

環境大気中に存在する粒子は広い粒径範囲に分布するが、質量（体積）濃度分布では、粒子径が  $1\mu\text{m}$  付近に谷を持つ二峰型を示し、この峰のうち粒径の大きい方が粗大粒子、小さい方が微小粒子に相当する。微小粒子は、核形成モード、蓄積モードに分類され、

核形成モードの粒子は、凝集により速やかに蓄積モードの粒子に移行するが、0.1～1.0 $\mu\text{m}$ の大きさとなった蓄積モード粒子は粗大粒子にはほとんど成長しない。その一方、相対湿度の高い状態下では、吸湿性の蓄積モード粒子は、微小粒子と粗大粒子が重複するサイズ（1 $\mu\text{m}$ ～3 $\mu\text{m}$ ）、場合によってはそれより大きい粒子に成長する。

粗大粒子は地殻物質及び有機堆積物等の機械的な破碎や磨耗等により微細化して発生するが、微小粒子は燃焼に伴う元素状炭素（EC）や有機炭素（OC）等ならびにガス状物質からの光化学反応による硫酸塩、硝酸塩、有機化合物等の粒子として存在しており、主な発生源は人為由来である。

粒子状物質の大気中での滞留時間には、気象条件と粒径が大きく影響する。粗大粒子は主として、重力沈降、超微小粒子は拡散による沈着や凝集による微小粒子への成長により除かれていくが、拡散や重力沈降の影響を受けにくい微小粒子は大気中での滞留時間が最も長く、降水に伴う除去が主要機構となるため数週間の寿命を持っている。よって、超微小粒子や粗大粒子の大気中での半減期は数分から数時間であるのに対し、微小粒子（蓄積モード粒子）は数日から数週間に亘り大気中に存在することから、空間的により均一に存在し、微小粒子による環境やヒトへの健康に大きく影響することになる。

PM<sub>2.5</sub>に該当する微小粒子は粗大粒子や超微小粒子に比べて地域内での濃度の差が小さいことも知られている。さらに、PM<sub>2.5</sub>は、粗大粒子に比べ屋内に侵入しやすく、屋外濃度との差が小さいことから、PM<sub>10</sub>以上に個人曝露濃度との相関が強く、PM<sub>2.5</sub>の環境濃度は、個人曝露濃度の代替指標として適していることを示している。

## （2）体内中の挙動からの検討

粒子の呼吸器系への沈着部位や沈着量を決定する要素として、粒子の粒径、粒径分布、粒子の形、表面の性状、密度のほか吸湿性、水溶性等の物理・化学的性状や気道の構造、気道内での気流の状態や呼吸のパターン（口呼吸か鼻呼吸、呼吸回数や一回換気量等の換気因子）などがある。

上気道領域、下気道領域、肺泡領域における粒子の沈着率の傾向を分析している研究によると、呼吸器系領域により沈着率に差異がみられている。一般に、0.1～1 $\mu\text{m}$ の蓄積モード粒子は肺内に沈着しにくいものの、一部の粒子は肺の中で保持されている時に次第に沈着されるものもあり、呼吸器内の湿度の影響を受けて膨潤化して沈着するものもある。吸湿性が気道内粒子沈着パターンに影響を及ぼすことにも留意が必要になる。

## （3）科学的知見の蓄積等からの検討

粒子状物質のヒトへの健康影響を調査するため、毒性学や疫学に関する膨大な研究が行われている。これらの文献レビュー結果から、粒子状物質を粒径で分画して微小粒子の影響を見る研究は、カットポイントを2.5 $\mu\text{m}$ とする研究が大半であった。この理由は、米国において、微小粒子状物質による健康影響に関する研究が先導的に実施されており、1970年代に当時の新式の2分級サンプラでは2.5 $\mu\text{m}$ のカットポイントが選択され、微小粒子として測定されてきたことが発端になっている。

米国において、1997年にPM<sub>2.5</sub>の大気環境基準の設定に伴い、PM<sub>2.5</sub>の測定法が制定

され、測定データがさらに蓄積されたことによって  $PM_{2.5}$  を微小粒子のカットポイントとする考えがさらに一般化され、米国以外の国の研究機関や研究者が行う研究にも影響を与えたと推察される。また、米国では微小粒子のカットポイントを  $1\mu m$  とする案も検討されたが、相対湿度が高い条件下において、微小粒子が成長して粒径の上端が  $2.5\mu m$  を超えるものが発生することから、微小粒子をより完全に捕集する必要があることからカットポイントを  $2.5\mu m$  とすることを妥当としている。

#### (4) 微小粒子状物質の対象となる粒径の大きさ

微小粒子状物質の対象となる粒径の大きさについて、以上の視点から総合的に検証すると、①毒性に関与しうる微小粒子は人為発生源からの排出ガスに多く含まれ、制御がより容易であること、②微小粒子のうち蓄積モード粒子は大気中に長期間滞留し、一定地域内ではより均一に存在し、屋内にも侵入しやすく、微小粒子の大気環境測定結果はヒトへの曝露量とみることができること、③粒径による体内の沈着は複雑で、沈着率の割合から明確なカットポイントを示すことは困難であるが、微小粒子は肺泡領域にまで侵入しやすいこと、④多くの健康影響に関する研究論文や測定データは微小粒子を  $PM_{2.5}$  と扱い科学的知見が蓄積されていること、⑤高湿度等の条件でも  $PM_{2.5}$  は微小粒子の大半を捕集することができることから、粒子状物質に関する微小粒子と粗大粒子の間のカットポイントとして欧米と同様に  $2.5\mu m$  とすることが妥当である。

また、我が国では、粒子状物質の指標に関し、粒径に着目し、粒径  $10\mu m$  以下の浮遊粒子状物質(SPM、測定においては粒径  $10\mu m$  以上の粒子を 100%カット)の環境基準を設定している。粗大粒子については  $10\mu m$  を超える粒子は上気道領域で捕捉されるが、 $10\mu m$  以下の粒子は下気道領域や肺泡領域での沈着率が高く、粗大粒子を含めた粒子状物質のカットポイントの上端を  $10\mu m$  とする従前の知見とは変わりがないことを確認した。

なお、カット特性については、 $PM_{2.5}$  は米国における環境基準で用いられている 50%カットであるが、粗大粒子を含めた粒子状物質に関するカット特性については  $10\mu m$  の粒子について、50%カットの  $PM_{10}$  と 100%カットの SPM の 2 通りある。なお、SPM を  $PM_{10}$  と同じ基準で表した場合は  $PM_7$  程度となる。

## 参考文献

環境省(2007) 微小粒子状物質曝露影響調査報告書.

環境省(2008) 微小粒子状物質健康影響評価検討会報告書