

PM2.5とナノ粒子

～次世代へのリスクを減らすために知っておきたいこと～



東京理科大学戦略的環境次世代
健康科学研究基盤センター講師

梅澤 雅和

2014年6月24日、梅澤先生にPM2.5とナノ粒子についてご講演をいただいた。

1、ナノ粒子の特徴と健康影響の懸念

ナノ粒子とは、PM2.5（直径 $2.5\mu\text{m}$ （マイクロメートル）以下の粒子）の中でもさらに小さい、直径100nm（ナノメートル）以下の超微小粒子を言う（100nmは $2.5\mu\text{m}$ の25分の1）。

ナノ粒子は新規の有用材料として期待されているため、生体影響をはじめとする安全性の評価が必要とされている。現在、大気環境中のPM2.5、特にナノ粒子、ならびに工業的に生産されるナノ粒子に関して動植物やヒトに対するリスク研究の要請が強い。

製品に含まれるナノ粒子の例として、抗菌効果を期待したナノ銀やナノ化された化粧品（健康な皮膚は通過しないが、アレルギーや外傷がある場合は安全性を保証できないので使わないよう注意書がある）などは身近である。カーボンナノチューブは、電子部品や繊維などの工業材料としての応用が期待される。

ナノ粒子の特徴は、人の髪の毛の数十分の1の大きさの微粒子の中でもさらに小さいことである。微粒子は直径が小さいほど、同質量あたりの表面積や個数が大きくなる。例えば、粒子の直径が10分の1だと同質量での表面積は（径に反比例して）10倍、個数は（径の3乗に反比例して）1000倍になる。これらがナノ粒子の性質を考える上で重要な特徴である。

微粒子は、その表面が様々な反応の場になる。そのため、表面積を大きくすることで反応が桁違いに促進されて有用性をもたらすが、同時に有害な生体影響も増大させることが懸念されてきた。

細胞に大量のナノ粒子を作用させると、酸化ストレスが増大し、抗酸化防御→炎症→細胞死を生じるという報告が数多い。

魚（オオクチバス）で最初に脳への影響が認められ、炭素ナノ粒子をマウスに投与した実験では、粒子が小さいほど脳への影響が大きいという結果が出ている。

分子レベルではナノ粒子が表面上で生体高分子を変性させ、例えば可溶性タンパク質の不溶化が生じる可能性が報告されている。

ナノ粒子の微小さにより体内動態も独特で、気道のより奥まで到達したり、肺以外の組織にも移行することが知られている。10～100nm程度の粒子は腎臓から排出されずに体内に留まりやすいことも指摘されている。

2、大気中微小粒子PM2.5の疫学

2013年初め、中国での大幅な濃度上昇が米国大使館により指摘されて以来、国境を越えたPM2.5の拡散（越境汚染）が問題となっている。

微粒子の健康影響が注目されるきっかけとして、1950年代のロンドンスモッグ事件（大気汚染公害）が挙げられる。この公害では、亜硫酸ガスと浮遊粉じんが原因となり1万人以上が死亡したと言われている。

米国EPAによると、疫学調査の結果、PM2.5の短期ばく露と呼吸器の有害症状、喘息発作、脳卒中、心筋梗塞の頻度との間に、同じく長期ばく露と死亡（特に心血管疾患）、気管支炎の発症率との間

にそれぞれ正の相関のあることが報告されている。

日本では、中国からの越境汚染に加えディーゼル車の排ガス中のナノ粒子も大気汚染の原因になっている。マスク、空気清浄機もナノ粒子に対応したフィルター性能が必要となってくるのではないだろうか。

3、ナノ粒子の次世代健康影響

ディーゼル排ガスの妊娠期ばく露は、マウスの出生仔の中樞神経系に影響を及ぼし、自発運動量低下などがみられた。

妊娠マウスにナノ粒子を投与すると、240nm以下の粒子は胎盤を通過し、出生仔の脳の嗅球、大脳皮質等から検出される。

気管内投与、点鼻投与、皮下投与と方法を変え、酸化チタン、酸化亜鉛、フラーレン、カーボンナノチューブなど素材を変えても、妊娠期ナノマテリアルばく露は仔の脳の病理所見・機能変化をはじめ、脳、精巣、その他の組織（免疫系等）に影響が及ぶことがわかっている。

二酸化チタンナノ粒子の妊娠期投与による中枢神経系への影響については、伝達物質・情動といった高次機能に関わる遺伝子発現変動が、生後成長するのに伴って現れてくることが分かっている。仔の肝臓や腎臓への移行、蓄積も認められる。

カーボンブラックナノ粒子を妊娠マウスに投与した研究の結果では、生まれて2～3カ月（ヒトの青年期に相当）後の脳血管周囲マクロファージの細胞数が顕著に減少することが分かっている。

ただし、胎児に移行したナノ粒子が胎児の発達に直接作用するのか、母体に生じた炎症や酸化ストレス等の影響が、胎児の発達に間接的に影響するのかは、まだ分かっていない。ナノ粒子による次世代影響がどのようなメカニズムで起こるのかは、今後の検証が待たれる課題である。

4、PM2.5データ・情報を読み取る場合の注意点（ばく露評価に備えて）

PM2.5の数値を解釈するにあたっては、

①一時点での値なのか、日平均値なのか、年平均値なのか、に注意する。

大気中のPM2.5濃度は日内変動が大きい。風向

きによっても変化するし、交通量等の人為的要因で日中に上昇する。PM2.5の環境基準は年平均値は15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、日平均値は35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ となっているが、例えばあるときに「45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 」という濃度が測定されたとしても、それがあつた1時間だけの平均として出たのか、一日平均としてその濃度だったのかで全く意味が違つるのである。

例えば、2008年の皇居前広場内周辺でのナノ粒子数を1秒ごとに測定した結果を紹介する。まず、平均は3万個/cm³ほどだが、幹線道路脇（歩道上）では3万個台の時もあるのに対し、その道路から200mも離れるとナノ粒子数はほぼずっと3万個台/cm³になっている。大気中の微小粒子濃度は、場所によっては短時間で大きく変動するのである。なお、ナノ粒子の個数濃度は千葉県野田市（郊外）では4千～8千個で、1万を超えないことがほとんどである。

②基準値や他の時期の数値と比べてどのレベルか、に注目する。

健康影響の大きさを推測するためには、基準値との比較が不可欠であるし、高濃度が短期的か長期的かも重要である。また、高濃度が何に由来したものを調べるためには、「その地点での」粒子濃度の経年変化を見ることも重要である。環境省・中央環境審議会大気環境部会の報告を見ても分かるように、大気環境中の粒子濃度にはもともと地域差があることに注意する必要があるのである。

5、ナノ粒子のリスク管理に向けて解決すべき課題

ハザード評価（物質固有性質としての有害性評価）に関して

①有害性評価指標の確立

様々な性質を持つナノ粒子ごとの安全性を低コストかつ網羅的に評価できる方法と評価指標の確立が求められる。

②ナノ粒子の高感度かつ定量的な検出技術の確立

生体試料中に分布した微量のナノ粒子を定量的に検出できる技術の改善・確立を要する。これが確立されなくては、ナノ粒子の体内動態の評価も困難である。高感度の電子顕微鏡では広範囲の観察は困難で定量性を確保できず、ICP-MSではある元



素がある組織中に何 g あるかはわかるが詳細な分布はわからない。

ばく露評価（ヒトへの実際の曝露量の推定）に関して

③曝露シナリオの区別を要する。

医薬なのか化粧品なのか、環境放出は限定的なのか、職業ばく露が問題なのか等、ナノ材料がどの用途に応用され、どのようにヒトに触れるのかによって、リスク評価も変わってくる。

今後の研究課題としては、高感受性集団（子ども、高齢者等）への影響、次世代影響、動物とヒトとの種差、低用量での影響、化学組成・物性と生体影響との相関性、「質量濃度」で十分か？（表面積こそ問題）、経皮毒性の問題等がある。

環境放出される粒子も多様である。PM_{2.5}については、成分を解析することで発生源が推定される。例えば硫酸イオンを含んだ粒子は固定発生源由来であるが、すでに国内からの排出は少なく、中国

からの越境汚染の指標になる（ただし、東京湾沿岸部など大きな工業地帯は今も硫酸イオンの発生減である）。

6、リスク回避のためにできること

PM_{2.5}による健康影響を防ぐために今すぐできることとしては、持病があったり体調の悪い人は外出前にPM_{2.5}情報をチェックし、危険な外出を控えることや、高フィルター性能のマスクや空気清浄機を利用することが挙げられる。

リスク管理のレベルでは、疫学研究できず行政レベルでの規制が難しい中、企業においても法令遵守に留まらない妊産婦等保護の工夫が期待される。さらに、妊産婦や子ども等、高感受性集団の生活環境や、局所的な高濃度地点に対しては特に働きかけをして、効果的なリスク回避を促すことが有効であるだろう。

（報告：理事・菊地 美穂）