

地下鉄構内環境中の粒子状物質の化学分析と毒性評価

Chemical Analysis and Toxicity Evaluation of Particulate Matter in Subway Premises Environment

慶應大・理工（非）*奥田 知明

Tomoaki Okuda*

*Keio University

1. はじめに

空気中を浮遊する粒子状物質（PM）は、気管支喘息や肺がん等の呼吸器系や循環器系および免疫系の疾患リスクを増加させていることが報告されている。人々が長時間滞在する半閉鎖空間（屋内環境や地下鉄構内など）においては、浮遊するPMの物理的・化学的特性が一般環境大気中（屋外）のPMとは異なることから、実態を反映した詳細な健康影響評価が求められている。地下鉄環境（または地下鉄に限らず鉄道一般の地下部分も含まれるが、本項では合わせて地下鉄環境と表記する）においては、レール、車輪、ブレーキシステム、架線等の摩擦や摩耗によってPMが生成されるため、鉄(Fe)や銅(Cu)といった金属を含むPM濃度が屋外よりも高いことが予想される。PMに含まれる金属成分はその毒性の主要な要因の一つと考えられており、地下鉄環境中のPMに含まれる金属成分の健康影響についての関心が高まっている。例えば、地下鉄環境中PMは道路交通由来のPMよりもDNA損傷を引き起こしやすいことが報告されており¹⁾、また、地下鉄構内で長時間勤務する作業員の血液中では、心血管系への悪影響や炎症反応の指標が増加していることが示されている²⁾。さらに、喘息患者においては、地下鉄環境中のPMへの曝露によって炎症反応が顕著に増加することも報告されている²⁾。一方で、PM中の金属化合物の詳細な化学状態についてのデータが不足しているため、それらの健康影響を正確に理解することが困難となっている。PM中の金属成分は単一の物質ではなく、排出源での化学反応や輸送過程を経て多様な化学状態を取ることが知られている。そして、同じ金属元素であっても化学状態によって生物学的影響が大きく異なることが報告されている。本稿では、まず筆者による日本の地下鉄環境中のPM濃度の調査結果を示す。次に、地下鉄環境中のPMの化学特性をより詳細に評価するためにX線吸収微細構造解析(XAFS)を用いてFeおよびCuの化学状態を解析した結果を示す。さらに、地下鉄環境中のPMを想定した細胞曝露実験を行い、異なる化学状態を持つ金属成分が細胞に対してどのような影響を及ぼすのかを調査した結果を示す。

2. 日本における地下鉄環境中のPMの現状調査

地下鉄のプラットホームにおいて、PM_{2.5}モニタや光散乱式粒子計数器等の多数の測定機器を用いた詳細な粒子状物質の調査を実施した³⁾。調査は2018年7月の平日に、地下鉄t駅のホームにて行われた。地上においてPM_{2.5}モニタを稼働させた4:20~5:00の間、および地下鉄構内の観測機材を撤去して地上に出た20:20~21:00の間においては、PM_{2.5}の測定値は約20~30 μg/m³の範囲を示し、これは調査日当日の地上の大気中PM_{2.5}濃度と同程度であった。地下鉄構内のPM_{2.5}濃度は始発列車の到着とともに徐々に上昇し、列車の到着本数が多くなる午前7~8時台（約20本/時間）を過ぎた時間帯でピークに達した。その後、PM_{2.5}濃度は徐々に減少し、午後（運行本数約10本以下/時間）にはほぼ一定の値を示した。午前6時から午後8時までの14時間における地下鉄構内のPM_{2.5}濃度の平均値は80±17 μg/m³であり、午前7~9時のピーク時には同日の地上におけるPM_{2.5}濃度の約5倍に達した。さらに、地下鉄環境中のFeの濃度は屋外観測地点と比較して非常に高く、TSPで約450倍、PM_{2.5}で約230倍の高濃度を示した。同様に、Ti, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn等の金属類も、地下鉄環境中では屋外観測地点の数十倍から百倍以上の高濃度であった。Feおよびこれらの金属類の発生は、車輪とレールの摩擦やブレーキの摩耗といった、地下鉄の運行に伴うものと考えられた。

次に、2019年12月の平日に3台のPM_{2.5}モニタを使用し、東京都内の鉄道会社3社が運行する8路線18駅において地下鉄環境中のPM濃度の調査を実施した⁴⁾。調査は、朝夕のラッシュアワーを避け、1時間あたりの電車の運行本数が比較的安定している11:30~14:30の時間帯を行った。その結果、PM_{2.5}濃度は駅ごとに大きく異なることが明らかになった。今回の調査で最もPM_{2.5}濃度が高かったのは、α社B線のh駅（72±11 μg/m³）であり、これは上述のt駅での測定結果とほぼ同等の値であった。調査対象の18駅のうち、地上ホームを持つ駅は3駅あり、いずれの駅においてもPM_{2.5}濃度は低かった。地下駅と地上駅のデータを分けて解析した結果、地下駅のPM_{2.5}濃度（23±19 μg/m³）は、地上駅（1.7±1.5 μg/m³）と比較して10倍以上の値を示した。さらに、地下ホームのみの測定結果を用いて鉄道会社3社間の比較を行ったが、統計的に有意な差は確認されなかった。また、今回の調査では、フルスクリーンタイプのホームドア（上部に開口部あり）が設置されている複数の駅におけるPM_{2.5}濃度を測定したが、ホームドアがPM_{2.5}濃度の低減に寄与しているとは言えない結果となった。今回の調査から、地下鉄環境における粒子状物質濃度は、駅ごとに大きく異なることが改めて確認された。このため、日本における地下鉄環境の粒子状物質対策を進めるにあたっては、まず各駅の環境状況を詳細に調査し、PM_{2.5}濃度の高い駅を優先的に対策する必要があることが示唆された。

3. 地下鉄環境 PM 中の金属成分の化学状態と細胞曝露応答⁵⁾

2019年6月に東京都内の地下鉄駅構内の3か所（地点A, B, C）と、比較対象として屋外（慶應義塾大学矢上キャンパス、横浜市）においてPMの採取を実施した。PMの採取にはフィルター捕集法を使用し、5.0 L/minの流量で吸引した。採取したPMの金属成分濃度を測定するため、エネルギー分散型蛍光X線（EDXRF）分析を実施した。さらに、XAFS解析を用いてFeおよびCuの化学状態を特定した。XAFSは、放射光施設（SAGA-LS）におけるビームライン（BL11）で測定し、吸収端近傍構造（XANES）のデータを取得した。

その結果、地下鉄環境中のTSP（全浮遊粒子状物質）中の元素濃度は、屋外のPMと比較して有意に高かった。特にFe成分の濃度は、地点AにおいてTSPでは屋外の30倍、PM_{2.5}では26倍と顕著に高かった。また、Cu成分も屋外PMと比較して有意に高く、地点AのTSPでは11倍の濃度であった。さらに、Ti, Mn, Cr, Ca等の元素も地下鉄環境中のTSPおよびPM_{2.5}において屋外の2倍以上の濃度で検出された。これらの金属成分は、主に鉄道車両もしくは関連設備の摩耗に由来すると考えられた。XAFS分析により、地下鉄環境中PMではFe₃O₄やγ-Fe₂O₃が高濃度であり、摩擦過程で高温酸化されたことが示唆された。Cuに関しては、屋外PMでは二価のCu化合物が主であったのに対し、地下鉄環境中のPMでは一価のCu₂Oが卓越した。標準粒子を用いた細胞毒性試験では、Fe₃O₄が濃度依存的に細胞傷害を引き起こしたほか、Cu₂OはCuOよりも強い細胞障害性を示した。これらの結果より、地下鉄環境中のPMの健康影響評価においては、金属の化学状態を考慮する重要性が示された。

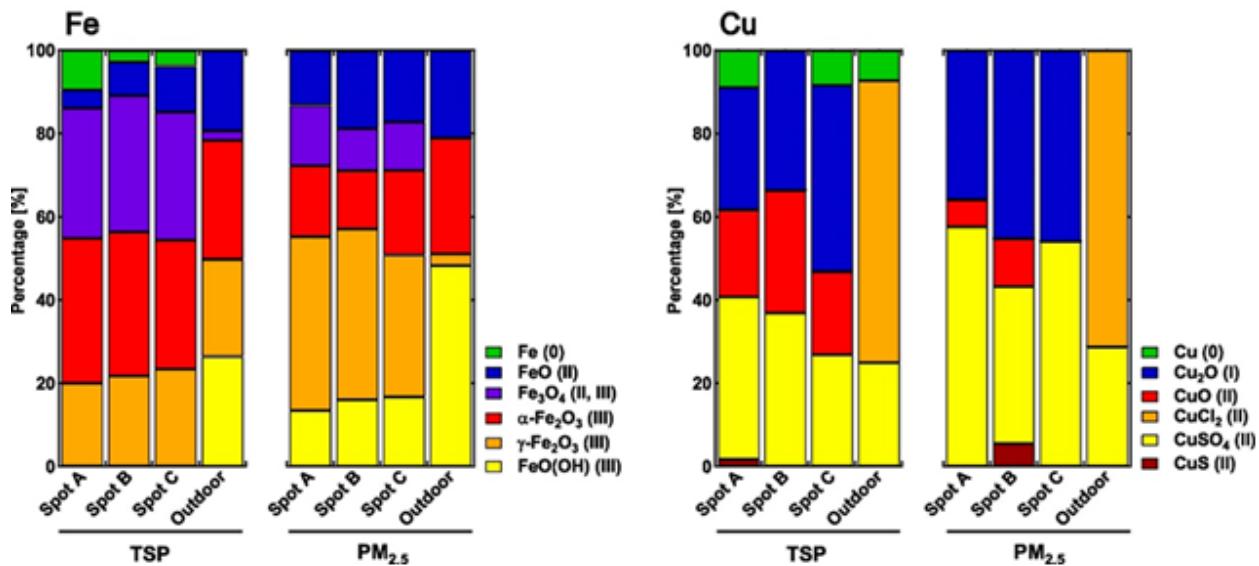


Fig. 1 Chemical speciation results in the Fe and Cu components in subway and outdoor PMs.

4. 日本における地下鉄環境中の粒子状物質に関する法規制の課題

日本では、地下鉄構内のPMに対する法規制が不十分であることが環境対策の遅れにつながっていると言える。例えば、地下鉄構内は屋外ではないことから現状では環境省のPM_{2.5}環境基準が適用されず、また建築基準法上の「建築物」にも該当しないため厚生労働省の建築物環境衛生管理基準の対象外である。従って、現状では地下鉄構内のPM_{2.5}に関する明確な基準がない。さらに国土交通省は地下駅に換気設備の設置を義務付けているが、粒子状物質に関する規定はない。このように地下鉄環境中のPM管理に責任を持つ省庁が明確でないため、日本の地下鉄空気環境対策は海外と比べて遅れていると考えられる。大規模な環境調査には鉄道事業者の協力が必要であるが、現行の法令では事業者にとって調査協力のメリットが乏しい。また鉄道事業者は安全運行を優先とするため、環境対策への経営資源の配分が難しいことも考えられる。この状況を改善するためには省庁横断的な産官学連携が不可欠であり、海外の事例を参考にしながら関係各所が協力して地下鉄構内の空気環境管理を進める必要がある。

文献

- 1) Karlsson, H.L., Nilsson, L., Möller, L. (2005) Subway particles are more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cells. *Chem. Res. Toxicol.*, 18, 19–23.
- 2) Klepczyńska Nyström, A., Svartengren, M., Grunewald, J., Pousette, C., Rödin, I., Lundin, A., Sköld, C.M., Eklund, A., Larsson, B.M. (2010) Health effects of a subway environment in healthy volunteers. *Eur. Respir. J.*, 36, 240–248.
- 3) 奥田・坂出・藤岡・田端・黒澤・野村・岩田・藤原 (2019) 地下鉄構内空気中粒子状物質の特性調査, 大気環境学会誌, 54 (1), 28–33.
- 4) 奥田知明 (2020) 地下鉄環境における粒子状物質の現状, 日本職業・環境アレルギー学会誌, 27 (2) 25–31.
- 5) Okamoto, T., Iwata, A., Yamanaka, H., Ogane, K., Mori, T., Honda, A., Takano, H., Okuda, T. (2024) Characteristic Fe and Cu compounds in particulate matter from subway premises in Japan and their potential biological effects. *Aerosol Air Qual. Res.* 24 (3), 230156, 16 pages.