

地下鉄におけるPM2.5濃度に関する現地調査からの考察



若 者

胡 毓 瑜*

Consideration from the field survey on PM2.5 concentration
in the subway

Key Words : PM2.5, Subway, Metro platform

はじめに

近年、PM2.5問題を中心とする大気汚染問題が注目されている。PM2.5とは、大気中に浮遊している直径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の粒子であり、非常に微細なため肺の奥まで入り込んでしまう危険があるのが特徴である[環境省HP]。またPM2.5への曝露と心血管系の罹患率および死亡率との間に因果関係があり、これらを原因とした世界における死者数が年間880万人に上るとドイツの研究チームが試算している[Jos 2019]。またこの問題に直面するのは、中国、インドなどの発展途上国だけでなく、先進国でも重視しなければならないと考えられている。日本の場合も、一般には空気質が基本的に改善されたと認識されているが、特定な場所において高濃度のPM2.5汚染が発生する可能性が示唆されている。

中でも本研究が目指す空間は、地下鉄の車内及び駅構内である。その理由として、まず、地下鉄及び関連空間はもはや特別な場所とは言えなくなり、現在日本の場合、地下鉄の営業路線総延長が764kmであり、利用者が1日あたり1700万人に達している[日本地下鉄協会HP]。つまり、多くの人々が地下鉄を利用しているからこそ、彼らの健康がこの空間の空気質の影響を受けていると考えられる。また、奥田らの研究チームは2018年7月のある平日に、横浜市営地下鉄のある駅に対して、一日の

PM(粒子状物質)の測定及び質量分析を行った。その結果として地下鉄が運行している時間帯に、地下鉄構内におけるPM2.5の質量濃度は屋外と比較して明らかに高く、平均 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上であり¹、かつ地下鉄構内ではFeを含んだ粒子が多いことを見いだした[奥田2019]。つまり、地下鉄において高濃度のPM2.5が発生する現象が存在していることが実証されたのである。この成果は極めて貴重であるものの、限定的な調査であるために、このような現象が一般的であるかという点においては疑問が残る。つまり、横浜の他の駅、あるいは他の都市、駅構内のPM2.5濃度も同様なのか、また、より滞在時間が長い地下鉄車内の状況は駅構内と同じなのかどうか等についてであり、これらについて確かめてみる必要があると考えられる。

そこで、本稿では、本研究チームの成果として、日本の全ての地下鉄がある各都市において屋外から車内まで現地測定を実施することにより地下鉄の車内及び駅構内の状況を包括的に把握し、また得られた情報に基づいて、各都市の地下鉄空間の特徴を分析した論考を簡単に紹介したい。

現地観測の方法と経緯

本研究の調査方法は、主に現地での観察と測定である。つまり現地の状況を観察しながら、PM2.5を測定した。現地観測の前に、観測地域の基本状況、地下鉄開発の基本状況及び地下鉄駅の基本状況(地下鉄構造図を含む)に関する情報を収集した。測定装置はAIRMASTER(図1)である。本装置は、リアルタイムでPM2.5濃度を確認でき、また5秒ごとにデータを自動的に記録している。さらに

* Yuyu HU

1984年1月生まれ
大阪大学大学院 人間科学研究科 人間
開発学専攻博士後期課程(2016年)
現在、大阪大学大学院 人間科学研究科
専攻 特任助教 人間科学博士
TEL : 06-6879-4687
FAX : 06-6879-4687
E-mail : hzryx@hus.osaka-u.ac.jp



¹ PM2.5濃度と立方メートルあたりに含まれる
粒径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の粒子状物質の重量、その単
位は $\mu\text{g}/\text{m}^3$ である。

PM2.5だけでなく、PM10、CO₂の濃度も測定可能である。



図1 測定装置のAIRMASTER

まず現地観測の方法は2種類があり、「移動観測」と「定点観測」である。

① 移動観測：全体的に対象地域の状況を把握するために、移動しながらそれぞれの駅の状況、移動中の地下鉄のPM2.5濃度の挙動を確認することである。また、移動観測の結果に基づいて、定点測定を実施するかどうかを判断した。

② 定点観測：比較分析（地域間の比較、同じ駅の場所の違いによる比較）のために、定点観測も行った。定点観測とは場所を固定して測定を行うことである。具体的に言うと、まず移動観測及び資料調査によって対象都市ごとに3つの対象駅を決める。さらに対象駅の「出口」、「改札口」、「ホーム」、「車内」と「屋外」の5つの場所、4日間以上毎日数回にそれぞれの場所で1分間以上に測定し、安定なデータ（最頻値かつ10秒以上変化なし）を代表値として記録した。また、写真を撮りながら現状を確認・記録した。

以上のような方法により、2018年1月から2021年3月まで、日本の11都市において、地下鉄駅と地下鉄を対象に総計45日のPM2.5の現地測定および参与的観察を実施した。その経緯は以下の通りであり、そのうち、括弧がある場合は、移動観測だけを行った。

2018年1月16日から30日までの7日（大阪）
2019年10月、11月の8日 大阪

2020年2月26日から29日まで 博多
2020年8月12日から15日まで 広島（神戸）
2020年9月30日から10月3日まで 名古屋
2020年11月11日から14日まで 仙台
2020年11月22日、23日（大阪、京都）
2020年11月25日から27日まで
東京（横浜、埼玉）
2020年12月22日（京都）
2021年3月17日から24日 札幌、東京

現地観測の結果

まず移動観測について、一日自動的に記録されたデータは少なくとも1000個（測定時間は1時間以上）であり、長い時間の場合は5000個（7時間以上）であった。それら全てのデータを整理した結果を表1に示す。

表1 各都市の移動測定の総覧

都市	平均値 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	最大値 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	最小値 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	標準 偏差	測定 日数 (日)
大阪	18.65	82	1	15.72	17
広島	8.67	32	3	3.61	4
博多	26.83	38	5	7.53	4
名古屋	28.55	57	7	9.68	4
京都	24.67	41	2	7.02	2
神戸	29.01	36	8	5.02	1
東京	39.86	72	8	13.55	7
仙台	24.83	54	3	6.76	4
横浜	38.89	48	22	5.32	1
札幌	8.41	36	4	3.44	4
埼玉	37.06	47	26	4.98	1

この表の中で、参照する意義が高いのは平均値と標準偏差である。まず平均値は、地下鉄で移動する際の、身の回りのPM2.5濃度の平均値であり、これにより各都市の状況及び順位が確認できる²。しかし移動観測のために、駅構内では頻りに移動し、またホームにより長く滞在していることがあるので、

² 各都市のPM2.5濃度の状況が見えるが、元々都市の空気質が原因か、地下鉄が原因かという疑問が残っている。ここでも説明することができるが、後述する定点観測の結果からわかりやすい。

実際の状況と比較すると少し差異が生じている³。一方、標準偏差も重要な指標である。標準偏差に影響する要因は3つある。すなわち、①車内のPM2.5濃度の変化、②駅間の差異、③外から車内までの変化である。③は定点観測の中心内容であるが、①と②の影響を受けると考える。標準偏差の値が小さい場合、少なくとも①と②が小さい場合、定点観測の対象として選ばれた駅の代表性が強く、逆もまた同様と考えられる。表1の標準偏差の値から見ると、大阪と東京がより大きいことが認識できる。また、現地観測によって、大阪は②が大きく、東京は①と②が相対的に大きい。また他の都市の場合は、①と②は相対的に小さいことが分かった。ただし、定点測定から③を説明するとき、この点も注意しなければならない。最大値について、元々最大値が発生する場所に留意すべきであるが、実際には出口に近接して例えば居酒屋や焼き肉店がある駅は少なくはないので、その時濃度が一気に上昇する現象が見られ、東京、大阪、仙台と札幌にてこのような状況が観測された。最後に最小値については、最小値が発生する場所は大阪以外全て屋外である。最小値が高い場合、屋外の空気質が悪いことを意味するが、神戸、横浜、埼玉での測定日数は1日だけで、参照する意義が高いとは言えないと考えた。

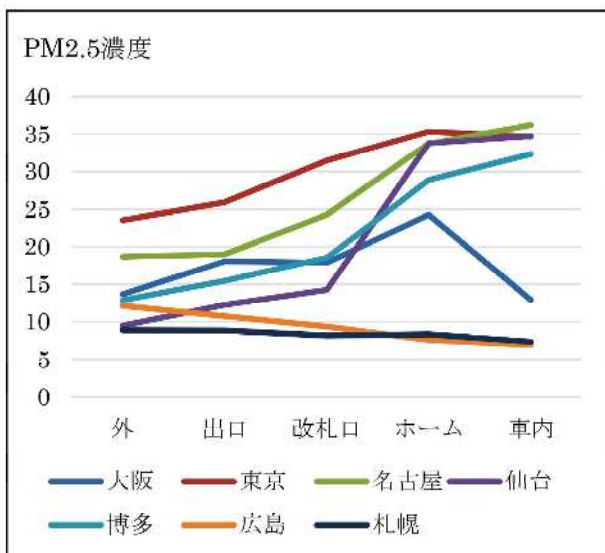


図2 各都市の定点観測の平均値

一方、定点観測の場合、大阪と東京は3つの駅で7日総計84回の測定⁴を行い、名古屋、博多と札幌は3つの駅で4日総計48回、そして仙台と広島は2つの駅で4日32回である。各都市における、屋外から車内までのPM2.5濃度の平均値を算出して図2に示した。

このPM2.5濃度の挙動から見ると、7都市は3種、つまり「大阪」、「広島と札幌」、「他の都市」に類別化できるが、移動観測からの情報と併せても、本研究では「大阪と東京」、「広島と札幌」、「他の都市」について、それぞれに分けて議論すべきであると考えた。

まず、「他の都市」の挙動について見てみると、出口からホーム・車内までPM2.5濃度は上昇する傾向が見られた。そして、このような挙動は、日本の地下鉄の一般的な状態であると考えられた。つまり、定点測定を実施しなかった都市を含めて7都市の状況が似ていることが確認できた。加えて、図2から各都市のホームと車内ではPM2.5濃度の差異が大きくないことが確認できた。さらに、同じ都市における各駅の場合、ここでは7都市の中に、駅間の差異が最も大きかった名古屋の状況を例として示した(図3)。

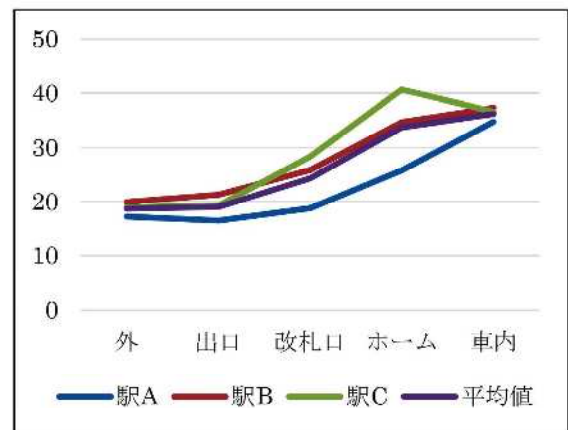


図3 名古屋の測定結果

本研究で選択した駅Aと駅Cは、それぞれホームの濃度が高い駅と低い駅であり、その差異は $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以内である。また移動観測の結果を含めて

³ 実際の状況の場合、乗車時間がより長いと考える。車内の濃度が明らかに高い都市の状況、いわゆる博多、名古屋、京都、神戸、仙台のPM2.5濃度は表の中の平均値より高い。また、大阪はより低い、他の都市はほぼ同じと推測される。
⁴ 外から車内まで、あるいは車内から屋外まで、5つの決められた場所の測定が完了したら、1回と認める。大阪の一日目は予備測定である。

もホームは $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ から $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、また車内は $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ から $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ であることが示されたものの、大きい差があるとは言えない。また、同じ場所の数回の測定結果の場合、出口と改札口の濃度は屋外の濃度によって変化する傾向が見えるが、ホームと車内があまり変化しないことも確認した。しかし、「あまり変化しない」ことは定点測定の結果で、実際にはホームから地下鉄の移動によりPM2.5濃度が変化するの普通である。また階段の所のPM2.5濃度が、基本的にホームの他の所と比べて低く、あるいは、空気の運動によって、急速に変化することも確認した。

つぎに東京と大阪については、変化が大きいことを現場で確認した。大阪の場合、車内の濃度の変化は激しくないが、駅間の差異が大きいとわかった(図4)。

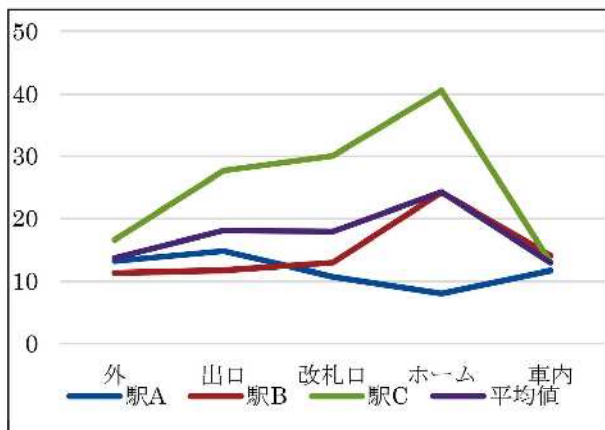


図4 大阪の測定結果

平均値から見ると濃度が最も高い所はホームであり、車内に入ると、濃度がかかなり低くなるのが分かる。しかし、駅によって、その挙動がかかなり異なるので、定点測定を実施した3駅の平均値から各駅の状況はむろんのこと、大阪の駅の平均値と近いということも確定できない。また外から車内まで、差異が最も大きいのはホームの濃度変化であり、例えば、定点測定対象駅のAはホームの平均濃度が屋外より低いが、駅Cは外よりかなり高かった。また、移動測定で記録したデータの中で、最も低い場合、その測定場所は駅のホームである(PM2.5濃度が $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、屋外は $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ くらい)。さらに車内の濃度が低くて安定しており、いわゆる大阪の状況は他の都市と異なり、また現地での実際の状況を併せると、

相対的に深刻ではないと考えられる。

一方、東京の場合、平均値から見ると、屋外から車内までPM2.5濃度の挙動が一般的な挙動と類似するが、差異が大きいことが特徴である。その差異について、駅間の差異は大阪ほど大きくないが、他の都市と比べると明らかに大きい。また、車内のPM2.5濃度は変化が激しく、さらに定点測定の値がかかなり異なることもあり、この現象はそれ以外の都市においては、一度も確認しなかった。しかもこの差異を確認した時には、屋外のPM2.5濃度がほぼ同じであった。逆に、屋外の濃度がかかなり変化しても(例えば $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ と $50\mu\text{g}/\text{m}^3$)、地下鉄の車内と駅構内の濃度がかかなり変化していないことも確認できた。つまり、屋外の濃度の変化が激しくない限り($50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下)、駅内の挙動にかかなり影響しないと考えられる。よって、東京の状況が一番複雑であると考えられる。

最後に、札幌と広島の場合は、屋外から車内まで、PM2.5濃度がかかなり変化しない、あるいは、やや減少している状況である(図5)。

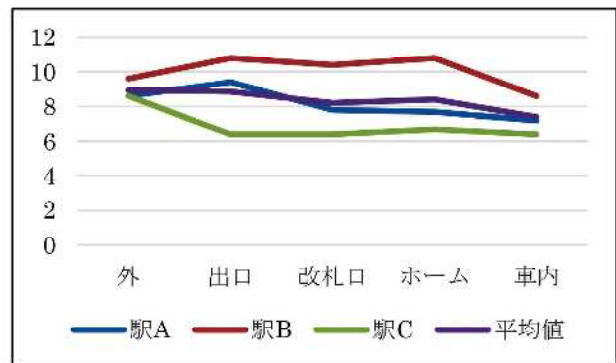


図5 札幌の測定結果

つまり、PM2.5に関する空気質の問題がか全く存在しないと考える良い。

以上、総括すると、札幌と広島以外の都市において、地下鉄の空間にPM2.5問題が存在し、その濃度は駅の出口からホーム・車内まで増加している。また、ホームと車内に $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ から $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ までのPM2.5が発生するのが一般的な現象であることが明らかとなった。

原因分析

地下鉄車内及び駅構内の高濃度のPM2.5の発生

源について、先行研究では屋外からのPM2.5あるいは地下鉄の運行により発生することが示唆されている[何 2016]。また本研究ではこれまで中国の各都市地下鉄の状況も測定・分析しているが、その主要な原因は屋外からのPM2.5であることが明らかとなった[胡 2018]。しかし、日本の場合、上記の結果に基づくと、明らかに地下鉄の運行により発生することが原因となると断言できる。当然ながら、外気の空気質が悪くなっても地下鉄構内の濃度が上昇しないわけではないが、現実的には外のPM2.5濃度が変化しても、地下鉄車内の濃度と駅構内の濃度があまり変化しないことが一般的な状態である。

一方、都市によりPM2.5濃度の挙動が異なる現象に関し、特に、札幌、広島、大阪と東京の状況については、議論すべき余地が残されており、以下考察を深めていく。札幌の地下鉄の場合、日本地下鉄協会の公開資料によると、全線においてゴムタイヤ車両を導入しており、それが大きな特徴となっている。ゴムタイヤで運行する場合、PM2.5があまり発生しないと考えられ、発生源が存在しないので、当然PM2.5問題がないと考えられる。広島については、まず地下駅は3駅しかなく、地下部分を走る区間が短いこと、ホームが閉鎖式であること（地下鉄が運行する空間とホームは別空間）、地下鉄が新しいこと（開業年は1992年）という特徴がある。つまり、PM2.5の発生量が少ないのと同時に、駅構内に入りにくく、さらに空気は外気と交換しやすいので、PM2.5問題がないと考えられる。大阪の場合、ホームのPM2.5濃度が低い駅に対して、さらに積み重ねて調査を行った結果、概して2種類があることが分かった。一つ目はホームが広くて天井が高い駅である。このような駅には空間が大きいので、PM2.5が分散して濃度もそれなりに減少していくことが示唆される。もう一つは出口からホームまでの距離が近い駅、特に改札口がホームの隣にあるか出口の隣か、いわゆる階段が一段しかない駅である。このような駅の場合、外気との空気交換率が高いので、それによって、PM2.5濃度が減少すると考えられる。また、車内の濃度が低い現象に対しての一つの考察は、ホームと車内が空気交換していることである。この考察から逆に他の都市における地下鉄車内のPM2.5濃度の揺らぎ、あるいはホームと車内の関係にある程度解釈できるが、大阪の車

内は明らかに濃度が低くかつ安定した状況にあることに対しては、解釈できないと考えられる。現状では、大阪の地下鉄が走る通路は、屋外とよく空気交換していること、あるいは車内の空調施設には空気清浄機能が装備されているという、この二つの仮説を提起したい。最後に東京については、PM2.5濃度の挙動の複雑性に対して、その地下鉄システムの複雑さと関係があると考えられる。しかし、具体的な現象、例えば、同じ場所の定点測定の結果が異なることに対して、今のところ、説得力がある考えには至らず、今後更なる検討を加えていきたい。

今後の展望

今回示した観測と分析によって、地下鉄の運行によりほとんどの都市において、地下鉄の車内と駅構内に $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ から $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ くらいPM2.5が発生していることを確認した。幸いなのは外の空気質が良好であるということも事実である。この場合、自然な風を含む空気流動を促進するのは一つの有効な解決方法ではないかと示唆される。また、地下鉄に乗る場合、一般的に車内にいる時間がより長いという現実の状況に鑑みると、車内に空気清浄機能を持つ装置を設置することも一つの解決方法であり、また閉鎖的な空間で空気清浄の効率もより高いと考えられる。

一方、地下鉄の車内と駅構内に高濃度のPM2.5が発生する場合、人にどのような影響を与えるかが重要な課題と考えられる。我々の研究チームもこの課題に対して、精神状態の変化という側面から研究しており、興味深い結果が得られているため、引き続きこれらを包括的に捉えつつ、さらなる解明を試みていきたい。

以上、本稿で扱ってきた地下空間のPM2.5汚染は、いまだ研究がほとんど着手されていない領域であり、大都市における地下空間の開発促進に鑑み、より一層注目される課題であると考えられ、今後の研究の進展に期待していきたい。

参考文献

- 1) 環境省. "微小粒子状物質 (PM2.5) に関するよくある質問 (Q&A)" 環境省ホームページ.
- 2) <https://www.env.go.jp/air/osen/pm/info/attach/faq.pdf> (参照 2021-03-1)

- 3) 一般社団法人日本地下鉄協会の公開資料「令和2年度地下鉄事業の現況」
<http://www.jametro.or.jp/japan/>
(参考 2021-03-1)
- 4) Jos Lelieveld, Klaus Klingmüller, Andrea Pozzer, Ulrich Pöschl, Mohammed Fnais, Andreas Daiber, Thomas Münzel : Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions, *European Heart Journal*, Volume 40, Issue 20, pp.1590–1596 (2019)
- 5) 奥田知明, 坂出壮伸, 藤岡謙太郎, 田端凌也, 黒澤景一, 野村優貴, 岩田歩, 藤原基 : 地下鉄構内空气中粒子状物質の特性調査, *大気環境学会誌*, 2019,54 (1), pp.28-33(2019)
- 6) 何生全, 金龙哲, 吴祥, 不同地铁环控系统可吸入颗粒物研究及防治, *中国安全科学学报*, 2016, 26 (3) pp.128-132(2016)
- 7) 胡毓瑜, 李欣, 張曼青, 許俊卿, 三好恵真子, 关于中国地铁高浓度PM2.5污染现象的分析, 第十二届國際學術會議“現代中國與東亞新格局 : 改革開放 40 年的歷史認識論文集”, pp.481-494(2018)

