The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	中日地铁PM2.5浓度调查与分析
Author(s)	胡, 毓瑜; 李, 欣; 张, 曼青 et al.
Citation	大阪大学中国文化フォーラム・ディスカッションペーパー. 2021, 2021-1, p. 1-15
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/79004
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Osaka University
Forum on China

Discussion
Papers
in
Contemporary
China
Studies

No.2021-1

中日地铁PM2.5浓度调查与分析

胡毓瑜 李欣 张曼青 许俊卿
金吉男 王石诺 三好惠真子

大阪大学中国文化论坛 讨论文件 No.2021-1

中日地铁 PM2.5 浓度调查与分析

2021 年 3 月 10 日

胡毓瑜[α] 李欣[β] 张曼青[γ] 许俊卿[δ]

金吉男[ε] 王石诺[ζ] 三好惠真子[η]

[α] 大阪大学大学院人间科学研究科特任助教（hzryxm@gmail.com）
[β] 大阪大学大学院人间科学研究科修士（rikin2015@yahoo.co.jp）
[γ] 大阪大学大学院人间科学研究科博士后期課程 2 年（chocobana22@gmail.com）
[δ] 大阪大学大学院人间科学研究科博士后期課程 2 年（xujunqing0709@gmail.com）
[ε] 大阪大学大学院人间科学研究科博士后期課程 3 年（adieukim@gmail.com）
[ζ] 大阪大学大学院人间科学研究科博士后期課程 3 年（zenkaigirlishi@yahoo.co.jp）
[η] 大阪大学大学院人间科学研究科教授（emako@hus.osaka-u.ac.jp）

前言

PM2.5 大气污染问题为当今中国急需解决的重大环保课题之一。关于 PM2.5 的概念、现状、重要性（危害性）等内容，本文将不详细介绍[1]。而需要强调的是，PM2.5 的重要成因之一是机动车的尾气排放。在中国生态环保部网页的主页上，环保部于 2017 年 9 月 15 日发布的《大气颗粒物源解析：北京市 PM2.5 来源解析》中提及，北京市全年 PM2.5 来源中本地污染排放贡献占 64-72%。而在本地污染贡献中，机动车占 31.1%。作为结论，报告并认为机动车对 PM2.5 产生综合性贡献。由此可见，控制机动车的尾气排放实为首要之务。而发展地铁以减少市民出行时对机动车的依赖则被认为是一项重要举措。而即使不考虑环保因素，发展地铁也有其历史的必然性。事实上，当今世界各发达国家拥有百万以上人口的大都市，大都通过修建地铁来缓解和改善交通拥挤的状况。在中国，随着经济的快速增长以及城市化进程的提速，城市人口数量剧增，交通拥堵的情况已成为常态，对此修建地铁可谓大势所趋。根据中国报告大厅的《全国地铁排名数据分析》，截至 2017 年 1 月，中国已有 31 个城市开通了地铁，总里程长达 4238.09 千米。而在“十三五”期间（2016-20），中国还要加快实现 300 万以上人口城市的轨道交通成网的规划，新增城市轨道交通运营里程约 3000 千米。在地铁客流量方面，统计数据显示，中国城市轨道交通年客运量由 2012 年的 87 亿人次增加至 2016 年底的 160.9 亿人次，日均客流由 2448.2 万人次增加至 4408 万人次。另一方面，在日本，最早的地铁建设始于 1927 年“东京地下铁道”开通的上野—浅草段，此后伴随着城市化的发展，地铁建设不断向地方中枢城市延伸拓展。从北海道到九州，日本的地铁总里程达到了 764 千米，日均乘车人数达到了 1700 万人。从日本地铁协会公布的 2020 年度地铁基本状况报告中可以看到，截止到 2020 年，仅东京地铁的总里程就有 195 千米，且 2019 年的年客运量就有 27.65 亿人次，日均客流达到 755.5 万人次。由这些数据可以推测的是，地铁将越来越走进市民的生活，或者说，即使排除地铁系统相关职业人群，一般市民乘坐地铁的平均时间也将越来越长，这是笔者想要提请关注的一个基本事实。

在大气污染严重的大中城市，发展地铁工程，不仅有利于改善交通状况、还有利于控制机动车尾气排放，此外选择地铁出行也被视为减轻呼吸系统遭受外界大气污染影响的可靠方式之一，尤其是和其他非机动车类的出行方式相比，优点显著。然而近年这一观点也开始受到了挑战。甚至一度有报道称地铁中的PM2.5浓度为大气中的16倍[2]，此类报道固然有着眼于博人眼球，缺乏科学依据的嫌疑，但其相关内容却不得不受到重视。事实上，进入21世纪之后，各国和地区针对包括地铁在内的轨道列车空气质量的研究已从无到有并渐入佳境，内容涵盖污染物浓度水平、化学物质种类、相关来源和健康风险评价等多个方面[黄宇 2020]。而在地铁空气质量相关的先行研究中，程刚等于2017年6月到8月测定了北京、上海、广州三地10条地铁线路的 PM2.5浓度，测试区域分为站外、大厅、站台和车内。其结论认为：地铁系统PM2.5浓度由大到小依次为站外、大厅、站台、车内；但当

[1] 在第九次及第十次“现代中国与东亚新格局”会议中，大阪大学理学研究科的丰田岐聪教授有过介绍且内容收录在论文集中。

[2] 据笔者了解，16倍之说源于名为达尔问的环境研究所于2013年1月测定了地铁站台和室外测定数值，对比后发现地下PM2.5数值相当于室外16倍。之后有多家媒体报道了这一消息。之后有达尔问环境研究所的负责人回应报道，称研究所并没有对地铁环境进行过系统的研究，也并非为得出结论而刻意采集地铁的PM2.5数值；报道中引用的数据是个例，并不具备借鉴价值。然而媒体大量引用数据，进行相关报道却是事实。为此，达而问研究所还专门联合蓝天实验室于2015年1-10月在北京地铁进行了补充性的PM2.5多点采样观测，其结论可参考《蓝天实验室系列测试报告之一 :“PM2.5 与出行方式选择”——测试活动与成果报告》
（http://www.bjep.org.cn/UploadFiles/Users/admin/2016/p/admin20160105223520862.pdf）

站外PM2.5浓度极低时，地铁系统PM2.5浓度呈现的规律正好相反；地铁载客量对车内PM2.5浓度无影响[程刚 2014][程刚 2013]。樊越胜等于2013年6月对西安地铁2号线各监测车站的站厅、站台、车厢及室外的PM10、PM2.5、CO2的污染水平进行了监测分析，认为在站台和车厢环境中PM10和PM2.5有强烈的相关性，二者有共同的来源[樊越胜 2014]。何生全等对北京地铁站外以及5个不同形式[3]的地铁系统站台和车厢空气中的PM2.5和PM10在列车驶入前后的浓度指质量浓度大小,以及站台和车厢空气中PM2.5和PM10浓度随时间的变化规律进行了研究，外界雾霾严重时,站内空气污染加重,地铁驶入后引起PM10浓度增加,屏蔽门和车门的打开使得站台和车厢空气中的PM10浓度加速上升,以PM2.5为主,且其浓度的变化随屏蔽门的启闭呈现一定的规律性[何生全 2017]。并认为在列车刹车过程中，地铁与轨道摩擦产生金属颗粒物、乘客、外界送风及活塞风带来的可吸入颗粒物是地铁PM2.5的来源[何生全 2016]。谷雅秀等通过对北京地铁6号线和8号线的PM2.5和PM10的质量浓度的实测分析也得出类似的结果[谷雅秀 2018]。此外，奥田等对日本横滨地铁内空气的颗粒物进行过分析。具体而言，于2018年7月的某工作日，利用多种测定装置对颗粒物质量浓度、粒径分布、粒径化学成分等多种属性进行了测定，通过与站外空气对比的形式分析考察了地铁站内空气中粒子的分布和特征。结果来看，地铁站内粒径高于0.5μm的较粗大粒子质量浓度高于站外；站内金属颗粒物尤其是铁的浓度远高于站外，并认为这些金属类颗粒物源于地铁运行中的摩擦；列车运行后空气中含铁粒子增加，此特征在始发列车运行后最为明显[奥田 2019]。

先行研究提供了许多重要的信息，对于本研究在测定指标选择和分析方法优化上都有很大的参考价值。然而也存在一定的局限性。首先较明显的问题就是，多数研究测定对象较少，测定次数（天数）较少。例如有的研究尽管在三地进行了测定，但并没有比较三地的差异，且每个城市的样本偏少，其中北京仅测试了两天。故而难以判断某个现象或规律是否是发生在某个特定时间段的?还是持续存在的?是否是某个地铁站特有的?还是某个城市特有的?又或者是否是普遍存在的?其次可能受篇幅限制，先行研究中往往集中介绍数据分析的结果，却较少说明测定地的情况、测定方式、测定次数等基本信息，不仅参考价值打了折扣，也不利于他人客观地验证结果。且多着眼于分析定量数据，却不太讨论与定性相关的信息。在测定过程本身的介绍不详细的情况下，得出某些结论难以让人信服。有的研究在结论中提到站外 PM2.5 浓度极低时，地铁站内浓度才会高于外界浓度，却没有说明什么是“浓度极低”，且根据其给出的数据来看，当外界 PM2.5 浓度的数值在 96.8 的时候，地铁站内浓度已经在 87.2-91.2 之间，已经与外界相差无几。因此笔者认为，进行对更多城市的更大样本的测定，结合定量的数据和定性的信息进行综合分析非常重要。

本研究团队由自然科学和社会科学中不同专业的研究者组成，确保对这一课题做一个更为全面的观测和更为系统的分析。在2018年8月的国际会议上曾经对初步阶段的研究内容作过一个阶段性的总结[胡毓瑜 2018]，而本文将在此基础上，结合之后长达两年的多处现地测定的结果，以试图给出中日各城市地铁、地铁站PM2.5浓度变化的一般情况和规律，并分析其变化的原因（影响因素），探寻更为具体的应对之策。

Ⅰ．现场观测的方式与经过

本研究的调查方法以现场测定为主。在现场测定之前，会对观测点所在城市的基本情况、地铁发展基本情况以及地铁站基本情况（包括地铁构造图）进行信息收集。现场测定采用的测定仪器为

[3] 分别是西直门（敞开式系统）、五道口（半高安全门系统）、西土城（全高安全门系统）和北土城（屏蔽门系统）。

“Air MASTER 2”（图 1）。

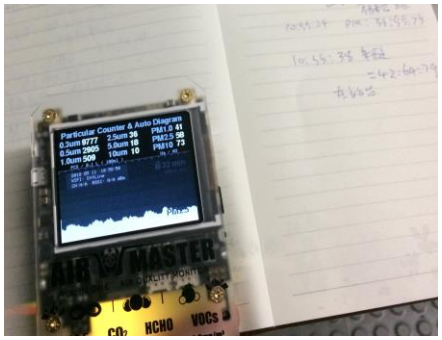

图 1 测定仪器

该仪器可同时测定 PM2.5、PM10、HCHO、VOC s 、CO2、温度和湿度等指标[4]。每 5 秒自动测定和记录时间和上述各指标的数据。此外，该测定仪器轻巧，测定过程中不会影响测定人员的其他行为。

测定方式有两种，其一为便携式移动测定。即测定人员在乘坐地铁的全程打开测定仪器，观测其数据变化，以对整个城市的地铁情况作整体把控。其二为定点测定，即在一个城市中选定 2 到 3 个车站，每个车站确定 4 到 5 个测定点，多日多次在同一地点进行测定。

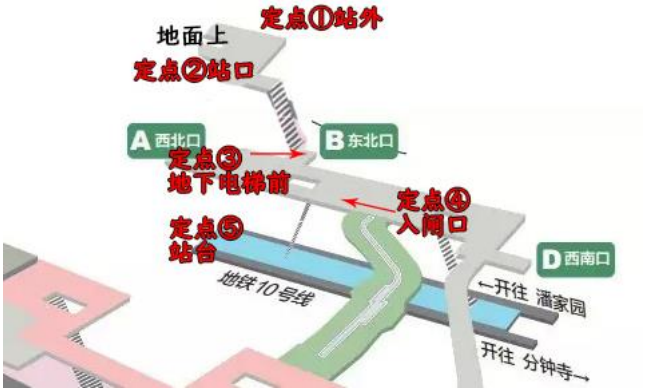

图 2 定点测定位置示意图

图 2 给出的是第一次定点测定（北京某地铁站）的位置示意图。当时选择了站外、站口、电梯前、闸口、站台 5 个位置，进入地铁后还会进行一次测定。之后考虑其他城市，尤其是日本的地铁站构造与中国不同，故而去除了电梯前的测定。测定时会停留在测定地点 1 分钟左右，记录下稳定值（测定时间内的众数且保持不变在 10 秒以上）。同时观测周边情况（人流、噪音、顶面高度、与出入口距离、空气流动情况等）并拍照记录。定点测定获得的数据主要用于比较分析。

从 2017 年 12 月至 2020 年 12 月，共对中国 6 座城市和日本 10 座城市进行了现场测定，测定天数累计在 60 天以上。具体测定时间和地点如下所示。

2017 年 12 月 26、27 日（北京）

2018 年 1 月 16 日至 30 日 期间 7 日 （大阪）

2018 年 3 月 19 日 （昆明）

2018 年 5 月 7 日至 15 日 北京

[4] PM2.5 浓度指标的单位为 μg/m3。文章中所有关于 PM2.5 浓度的表述都是以此为单位。此外，CO2 的单位为 PPM。

2018 年 10 月 6 日　（上海）

2019 年 3 月 9、10 日　（杭州）

2019 年 5 月 7、8 日　（武汉）

2019 年 9 月 14 日　（广州）

2019 年 10 月、11 月期间 8 日　大阪

2019 年 11 月 13 日至 19 日 杭州

2020 年 2 月 26 日至 29 日　博多

2020 年 8 月 12 日至 15 日　广岛（神戸）

2020 年 9 月 30 日至 10 月 3 日　名古屋

2020 年 11 月 11 日至 14 日　仙台

2020 年 11 月 22 日、23 日　（大阪、京都）

2020 年 11 月 25 日至 27 日　東京（横浜、埼玉）

2020 年 12 月 22 日 （京都）

其中，括号代表只进行了移动测定，没有括号则意味着同时进行了定点测定和移动测定[5]。

Ⅱ．观测结果

移动测定数据概要如表 1 所示。

表 1 移动测定 PM2.5 浓度数据概要

城市	平均值	最大值	最小值	标准差	测定天数
北京	67.21	237	16	42.61	10
杭州	36.05	68	24	7.83	9
武汉	32.22	41	22	9.67	2
广州	41.85	74	30	11.62	1
昆明	34.88	90	18	10.48	1
上海	38.77	58	23	11.27	1
大阪	18.65	82	1	15.72	17
广岛	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
神户	29.01	36	8	5.02	1
东京	39.86	67	12	11.85	3
仙台	24.83	54	3	6.76	4
横滨	38.89	48	22	5.32	1
琦玉	37.06	47	26	4.98	1

[5] 需要留意的是，原本的计划是在中国进行更多城市的现场观测，但受疫情影响而无法实行，故而集中在日本进行观测，目前已经完成了除札幌外所有拥有地铁的城市的测定。

需要留意的是，这里的数据，尤其是平均值和方差受测定天数影响较大，同时也受移动方式影响，例如某次移动坐在车内的时间很长，则往往方差会较小，且平均值多体现车内浓度。而最大值还容易受特殊事情影响，如在站口遇到有人抽烟，或是在站内路过烤肉店。

另一方面，中国有两座城市进行了定点观测，为北京和杭州。在北京针对某地铁站进行了 8 天共计 19 次的定点测定。其观测数据（部分）如图 3 所示。

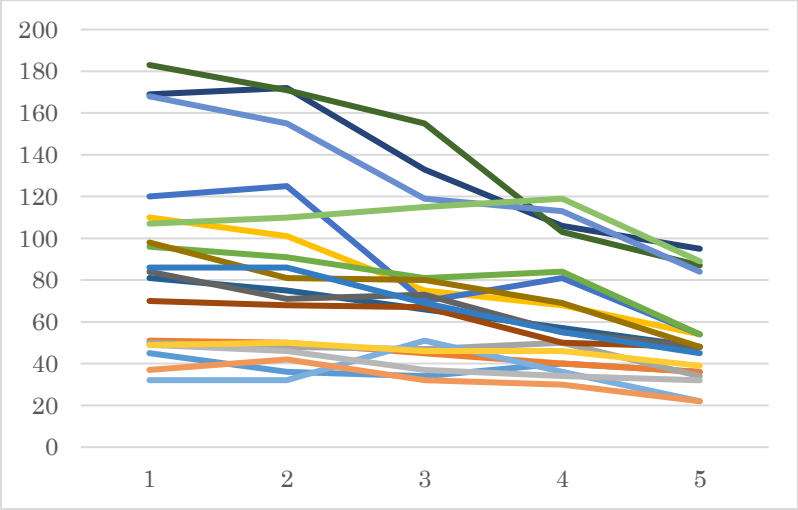

图 3 北京的 PM2.5 浓度数据

从 1 到 5 分别代表站外、站口、闸口、站台和车内[6]，图 4-图 8 中的 1 到 5 也代表相同意思。杭州的定点观测数据（部分）如图 4 所示。选定了 3 个地铁站，进行了 7 天共计 84 次的测定。

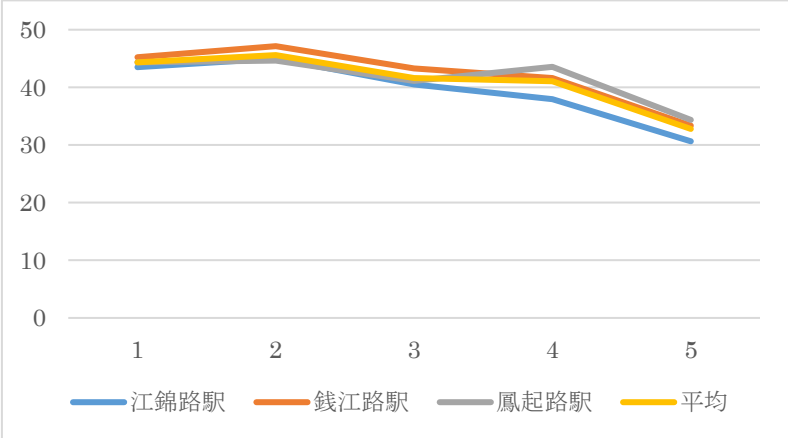

图 4 杭州的 PM2.5 浓度数据

由于测定期间外界 PM2.5 浓度变化不大（变化幅度在 20 以内），且测定次数较多，把所有观测数据都显示在 1 张图上反而不利于确认信息，故而显示的是每个地铁站的各定点的测定平均值（7 日 28 次的观测值的平均值）和各站的平均值。

[6] 北京是第一次进行定点测定的城市，由于经验不足，有几次测定的数据不完整。此外，定点位置也和其他城市略有不同。所以这里的数据有删减和补充。

在日本进行了定点观测的城市有 6 座，东京选择了 3 个地铁站，进行了 3 天共计 36 次测定；名古屋、博多选择了 3 个车站，进行了 4 天共计 48 次的测定；广岛和仙台选择了 2 个地铁站，进行了 4 天共计 32 次测定，大阪选择了 3 个地铁站进行了 7 天共计 84 次的测定。不妨先进行城市间的比较。平均观测数据如图 6 所示。

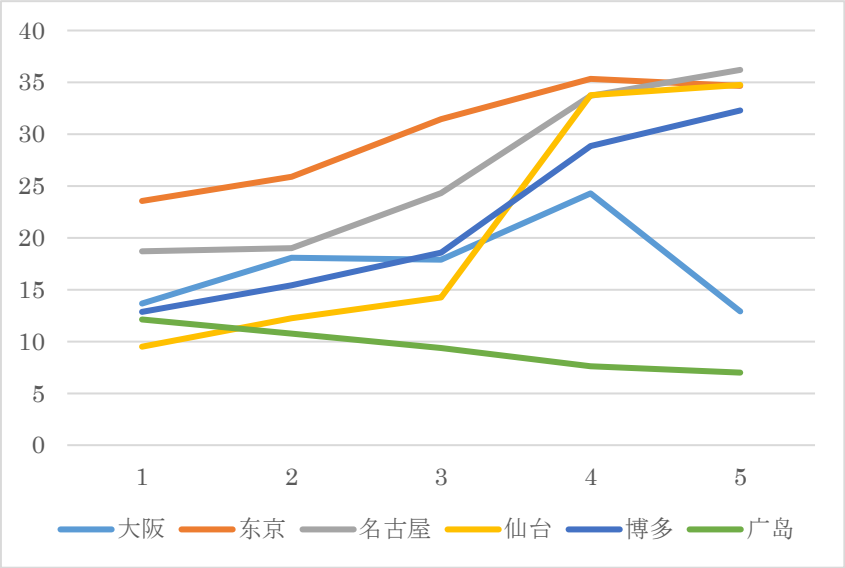

图 5 日本城市 PM2.5 浓度数据

其中，东京、名古屋、仙台和博多的变化趋势相对一致，以名古屋为代表进行图示（图 6）。而图 7 和图 8 则是大阪和广岛的数据。

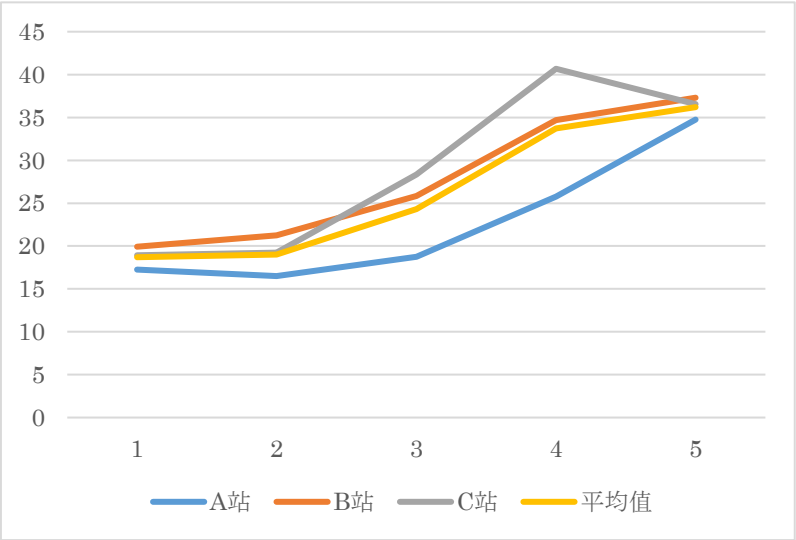

图 6 名古屋的 PM2.5 浓度数据

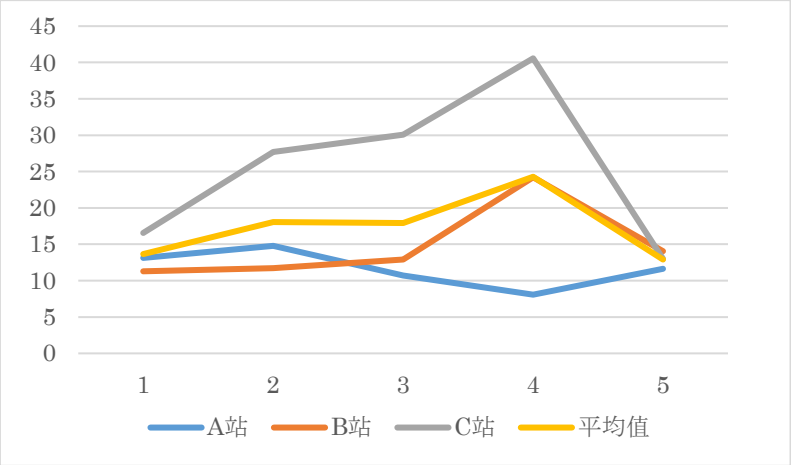

图 7 大阪的 PM2.5 浓度数据

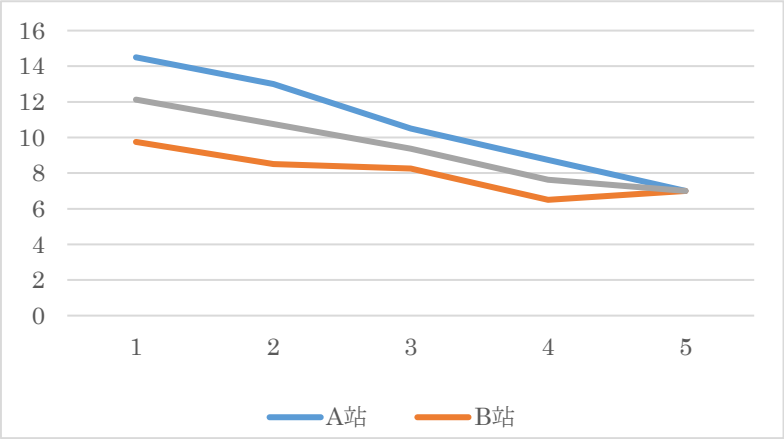

图 8 广岛的 PM2.5 浓度数据

基于上述数据，结合观测人员在现场获得的其他信息，认为有几点现状和现象值得讨论：

1）外界的 PM2.5 浓度

外界的 PM2.5 浓度有着明显的差异。从平均值来看，中国城市中，北京为最，数值在 80 左右，上海、杭州和广州较为相似，在 40-60 区间，而武汉和昆明则在 30 左右。日本城市中，东京为最，在 25 左右，名古屋次之，在 20 左右，其余城市都在 15 以下。从变化程度来看，中国城市中，北京独具一格，在 9 天左右的测定日，高的时候超过 200，低的时候在 30 左右。其余城市变化幅度都不大，上下一般在 30 以内。日本的城市中，数值上看变化幅度最大的是大阪，高达 60，其次是东京，为 30 左右。但在大阪的测定日长达 17 天，东京的测定日只有 3 天，故而笔者认为变化程度最大的应该是东京。其余城市的变化幅度都较小，一般在 20 以内。需要留意的是，一些城市的测量日较短，故而测量的数值不能代表该城市的 PM2.5 浓度情况，只能代表测量日的情况，以及一定程度说明城市的情况。

2）地铁站构造差异

中国地铁站构造相对统一。无论是哪个城市，无论是中转站还是人流较少的“小站”，几乎所有的地铁站都有相似的构造。图 9-11 给出的是杭州某地铁站的照片，却能代表中国地铁的一般样貌。进入地铁站后，就是一段长距离的扶手电梯（图 9），之后通过长距离的通道连接大厅，大厅非常空旷

且天花板高，这里设有购票设备和安检设备，进入之后再通过扶手电梯往下移动，可到达站台（图11）。站台为封闭模式（站台和地铁运行空间有墙体、玻璃们隔开），长度等同于地铁长度，天花板相对较矮，天花板处有空调设备。某些地铁站有通道连接地下商店街或商城的地下层（图 10），但地铁系统里面不会有商店存在，连自动贩卖机都不多见。

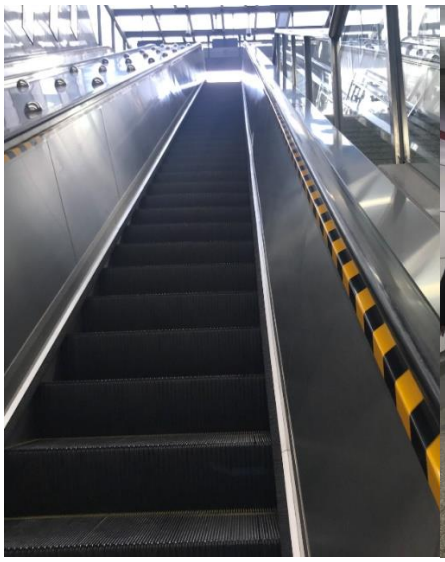

图 9 站口的扶手电梯图

图 10 地铁站内的通道

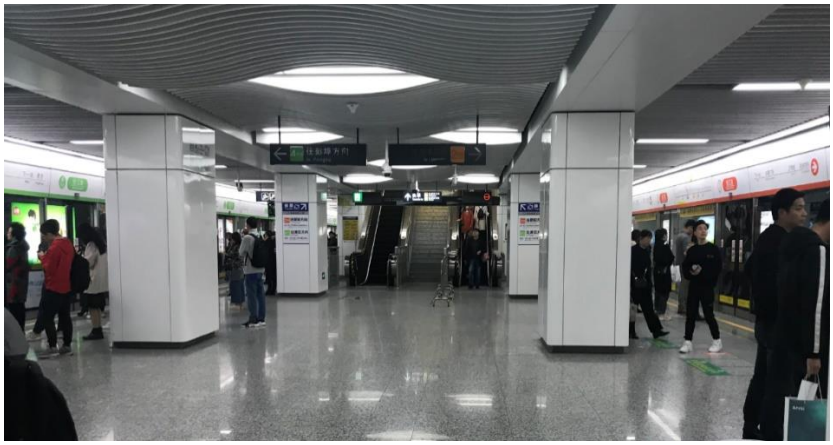

图 11 杭州某地铁站内的站台

另一方面，日本的地铁构造则表现出多样性。首先日本地铁站的规模大不相同，某些地铁站的出口数可以超过 20 个，而某些地铁站可以从站台望到站口。其次，站台的构造也各不相同，这一特征在大阪尤其明显。图 12-图 14 展示的是大阪三个主要地铁站的站台照片，可见 A 站台天花板高，B 站台宽阔，而 C 站台相对狭小，但却是日本最普遍的站台模式。

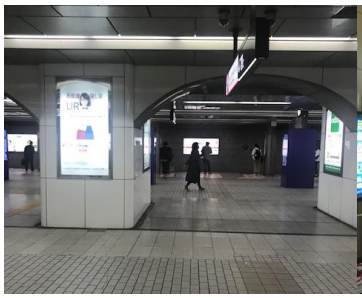

图 12 A 站台　　图 13 B 站台　　图 14 C 站台

此外，几乎所有的站台都是开放模式（站台与地铁运行空间没有隔离），站台长度会超过地铁长度。唯一例外的是广岛的站台，如图 15 所示，采用的是封闭模式。

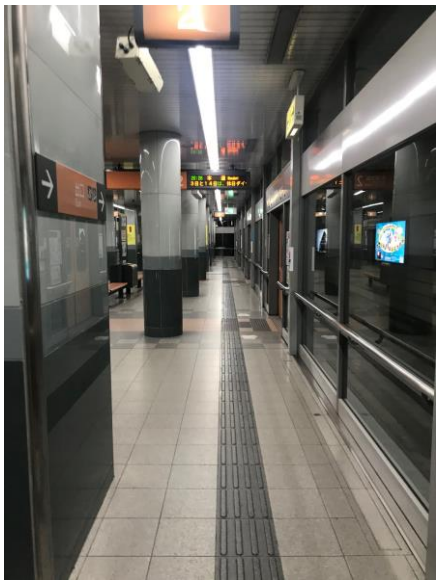

图 15 广岛某地铁站的站台

地铁系统内也不乏其他设施，尤其是闸口到站口之间，有不少地铁站有便利店或餐饮店。某些地铁站在站台处也会有便利店或餐饮店，自动贩卖机很常见。

3）PM2.5 浓度变化模式

首先在中国进行移动测定时，一个非常明显的感受是，在不同地铁站内都表现出了相似的变化规律。这一点由图 4，也就是杭州的定点测定结果中也能清晰的反映出来。反过来也说明了，在北京尽管只对一个地铁站做了定点测定，但这个结果也基本能代表北京的地铁站的情况。而按照北京的定点测定获得的 PM2.5 浓度数值，进行高低排序的话为，依次为站口、站外、闸口、站台和车内。这个变化规律和其他城市也基本一致。但北京外界 PM2.5 浓度变化大，当外界 PM2.5 浓度差异较大的时候，地铁系统内的浓度顺位会发生变化。数值低于 40 的时候，从站外到列车内，数值略有波动，但变化不大。当外界 PM2.5 浓度在 40 到 100 之间的时候，会呈现在站外上升，在站口、电梯口持续高位甚至继续上升，之后开始下降，到列车内多低于外界数值。而当外界 PM2.5 浓度数值在 150 以上的时候，从站口乘扶手电梯下行时，数值就开始降低，到最后进入列车，数值不断下降。然

后我们可以发现，北京外界 PM2.5 浓度在 40 到 100 之间的时候的变化情况，和杭州、上海广州相似，而在 40 以下的时候又武汉昆明相似。笔者甚至可以提出一个假说 A，中国地铁系统内 PM2.5 浓度变化模式基本一致，或者有很多因素会影响其变化，但这些因素中能称为变量的只有一个：外界 PM2.5 浓度。

另一方面，对于日本的情况，按照定点测定的全国平均值，进行高低排序的话为，依次为站口、站外、闸口、站台和车内。其中，东京、名古屋、博多和仙台的变化趋势相似，且和全国平均值的变化趋势一致。不仅如此，结合移动测定的结果来看，神户、京都、横滨和琦玉的变化趋势亦是如此。但我们同样也关心同一城市内地铁站之间有无差别。事实上，广岛和博多各站间几乎没有差别，仙台略有变化，名古屋和东京就能感受到明显的差别，而大阪的差别特别大。把这两个信息结合在一起，可以认为，除了大阪和广岛日本地铁站内 PM2.5 浓度普遍高于外界。对于例外的大阪而言，从定点测定的平均数据来看，车内浓度和外界仿佛，都低于闸口和站口，最高的则是站台。但我们需要注意的是，正因为各站变化模式不一样，尤其是站台浓度差别特别大（幅度在 50 以上），定点测定的平均值能就会难以代表大阪的一般变化模式，或者说会更因为定点测定的选择得出的大相径庭的结论。事实上笔者在整个测定过程中得到的数值最低的一次测定（数值为 1）就是在图 13 的 B 站台测得的，而该站并不是定点测定的站台。所以对于定点测定给出的信息，我们需要重视的不是通过 3 个地铁站的平均值来把握大阪地铁系统变化的一般模式，而是通过 3 个地铁站各不相同的状态来专注大阪地铁的特征和确认站台浓度高的地铁站。对于另一个例外的城市广岛而言，地铁站内浓度会低于外界，且其变化趋势和中国的地铁站内的变化趋势更为相似。当然我们也注意到广岛地铁构造有和中国地铁站更为相似，且建筑年代也在 20 世纪 90 年代，也和中国地铁建造时期更为接近。

4）短时间内 PM2.5 浓度波动

上边讨论的是整体情况，但其实在某个观测点进行定点观测的时候，PM2.5 浓度并非一成不变。尤其是站台的 PM2.5 浓度经常处于不稳定的状态。中国的站台，站台处的数值往往会在列车进站时上升，在开门时数值下降，多低于平均值，车开走后又会回升。人流高峰时间，列车进出站频繁，车站数值平均较低，在普通时段，数值反而较高。而在通道处（例如车站内部连接上下层的扶手电梯附近），PM2.5 浓度数值往往突然增加。而在日本，站台处的数值也会随列车进站而上升，除广岛之外，其余城市的多数地铁站的站台，其上升程度甚至超过中国。但站台的通道口附近却往往是站台中 PM2.5 浓度最低的地方，如果位于站台面向扶手电梯或台阶，伴随迎面而来的空气流动，PM2.5 浓度的变化（降低）非常明显。

Ⅲ．综合分析

上节中的结果表明，如果按照 PM2.5 浓度数值高低进行顺序的话，中国是站口、站外、闸口、站台和车内，而日本平均是车内、站台、闸口、站口和站外。这里一个朴素的疑问是，这种变化趋势是否是明显的、或者是一般性的。对此笔者对各城市的站口、站外、站台和车内的定点数据两两进行了配对 t 检验，分析结果显示，在置信水平 0.05 的条件下，北京、杭州站外、站口的 PM2.5 浓度高于站台、车内具有显著性，杭州站口高于站外具有显著性；博多、仙台、名古屋的站台和车内高于站外、站口具有显著性。其余结果不具有显著性。需要提到，大阪和仙台的结果在预想之中，但是东京的结果没有显著性，笔者认为原因在于某日外界 PM2.5 浓度较高（平均 40 以上和站内相

似），且东京测定天数较少，非常容易影响统计结果。另一方面，先行研究认为地铁运行、乘客、外界 PM2.5 是站内 PM2.5 的三大来源，我们不妨来探讨一下这 3 个因素起多大作用。先行研究已经证实了 CO2 和人流的正相关的关系，因此我们可以用 CO2 的浓度对应“乘客”这一因素。针对 16 座城市的移动测定数据，计算了各城市 CO2 和 PM2.5 的相关系数，结果发现在 0.05 的置信水平下，北京的 PM2.5 与 CO2 呈现出负的低相关，而昆明的 PM2.5 与 CO2 呈现出正的低相关，其余城市的相关性不显著。此外，测定人员在现场也没有感受到人流和数据变化的关系。由此可见人流对站内 PM2.5 浓度影响有限。接着针对 8 座城市的定点测定数据，计算了站外 PM2.5 浓度和站台、车内的 PM2.5 浓度的关系系数。结果发现，中国的两座城市，也就是北京和杭州呈现高相关，而日本的城市其相关性都不显著。进一步，以外界 PM2.5 浓度为自变量，站台和车内的浓度分别作为因变量对北京和杭州的定点测定数据进行回归分析。只有一个自变量的分析似乎有些不尽如人意，但这其实和笔者前文中提出的假设 A 是相符合的。

同时外界 PM2.5 也确实是地铁内外界 PM2.5 的来源，且外界 PM2.5 浓度的信息也容易确认，而站内或车内则往往不会有相关数据。因此通过回归分析由站外浓度来推测站内及车内浓度符合回归分析的原理也符合实际情况。首先是北京外界与站台的回归分析结果，其R^2为 0.714，说明自变量对因变量的解释度达到 71.4%。F 检验的 P 值为 0.001，说明回归模型显著。而回归模型为

站台 PM2.5 浓度数值=外界 PM2.5 浓度数值×0.496＋20.111 （1）

且自变量影响的显著性检验（T 检验）的 P 值小于 0.05。该结果说明，站台的 PM2.5 浓度数值会随外界 PM2.5 浓度数值增加而增加。增加速度约为外界一半。当外界 PM2.5 浓度数值大于 40 时，站台内数值将低于外界。另一方面当外界数值为 0 时，站台内 PM2.5 浓度数值则同为 20 左右。按照相同方式得到的其他 3 个回归方程分别是

北京，外界-车内，R^2为 0.703，F 检验 P 值为 0.000, T 检验 P 值为 0.000

车内 PM2.5 浓度数值=外界 PM2.5 浓度数值×0.416＋19.169 （2）

杭州，外界-站台，R^2为 0.715，F 检验 P 值 0.000, T 检验 P 值为 0.000

站台 PM2.5 浓度数值=外界 PM2.5 浓度数值×0.767＋7.040 （3）

杭州，外界-车内，R^2为 0.658，F 检验 P 值 0.000, T 检验 P 值为 0.000

车内 PM2.5 浓度数值=外界 PM2.5 浓度数值×0.606＋5.253 （4）

很显然，四个方程有相似的结果。方程中的常数项，即可视为地铁运行造成的影响，而自变量“外界 PM2.5 浓度”前的系数则代表了外界 PM2.5 浓度数值影响地铁内的浓度的程度。容易发现，北京和杭州的常数项数值有一定差异，也就是说地铁运行产生的影响不一样，北京会高于杭州，这可能和地铁建成时间有关。另一方面，代表影响程度的系数小于 1,这或许是正常现象，但是我们也应该注意到，地铁系统是一个半开放的空间，某些城市外界 PM2.5 浓度非常稳定，这种情况下，根据熵增原理，最终应该会达到内外浓度的平衡。考虑到这一点，我们认为也不排除存在人为因素的影响，例如设置站台的空调系统和车内空调系统发挥可净化作用。事实上，观测人员也在站台的天花板处与车内确认到了空调的运作。

另一方面，日本的数据无法建立清晰的回归模型，关键是在于外界浓度这个适合用作自变量的因素不起作用。这当然不是说当外界 PM2.5 浓度高的时候，日本的地铁内还会保持低浓度的状态，而是强调在外界 PM2.5 浓度就是较低的事实，且相比于中国城市，日本地铁站站台与地铁运行处于同一空间，且建造时间久，地铁运行的影响自然会更大。那么，问题在于日本城市之间，甚至是地

铁站之间的 PM2.5 浓度差异的原因何在。根据测定人员在现场的观察，正是在前文已经呈现过的地铁构造。作为特例的广岛地铁站，其浓度变化应当与其构造关系密切，且特点应该是运行中产生的颗粒物少且难以进入站台或车内。而大阪地铁站间 PM2.5 浓度的差别之所以大，就是因为大阪地铁线路多且地铁站构造差别大[7]。其中有两种构造 PM2.5 浓度会明显偏小。其一是出口近在眼前的小站，尽管是地铁站但通风顺畅，实现了外界和站内高效的空气交换。其二是站台特别空旷的大站，如图 13 那样，假设地铁运行产生相同数量的颗粒物，换算到浓度，自然也低了不少。而如图 14 那样的站台，或者说在这种日本各城市中最为一般的地铁构造下，地铁运行产生的颗粒物一定程度在站台和车内积蓄，形成了日本地铁中普遍存在的高浓度 PM2.5 的现象，并会一定程度影响身心健康[8]。

结语

基于目前为止的测定工作和分析结果，可以得出以下结论：从浓度数值上来看，在中国，地铁系统中 PM2.5 浓度最高的区域为入口与通道，而站台和列车内浓度数值往往低于外界。且影响整个地铁系统 PM2.5 浓度的主要因素可视为源于外界的 PM2.5。因此一般情况下，尤其是在外界发生高浓度 PM2.5 的时候，地铁环境会更加安全。但需要注意的是，这里没有考虑 PM2.5 成分的影响，且多数情况下中国地铁内的浓度不会低于日本地铁内的浓度，故而同样需要留意长时间的地铁环境对身心健康的影响。另一方面笔者认为列车内数值较低可能与空调系统有关，而站台数值较低是因为与列车频繁交换，或站台也有空气交换系统在运行。因此，目前而言，开发高质量甚至带有空气净化效果的空调系统或许是保障列车内空气质量的有效方法，而解决大气中 PM2.5 问题则是降低整个地铁系统 PM2.5 浓度的根本方式。此外，通道的通风问题也应该得到一定程度的重视，尤其是今后若是想要发展地铁经济或开发地下城市建设。在日本，PM2.5 浓度最高的区域是地铁站台和车厢内，而地铁运行则是整个地铁系统 PM2.5 数值较高的主要因素。考虑到外界 PM2.5 浓度一般较低，促进与外界的空气交换或许是一种有效的方法。而在车厢内或一些浓度特别高的地方设置带有空气净化效果的空调系统等方式也值得考虑。

今后还将从以下几个方向进行进一步的研究和探讨。其一是加大现场测定的力度。具体而言，对北海道札幌市的测定有利于完整把握日本总体的情况；对东京的重新测定也有利于明确的把握这个地铁最为集中的城市的情况；在中国进行更多的定点测定，则更能够说明现实情况和问题，并对现有结论，尤其是数理模型进行验证或补充。其二是进一步进行实验或实测，分析长时间的地铁环境会对人体造成什么影响。考虑到本研究团队所掌握的技术，该方向会集中在对人的神经系统所造成的影响。最后是结合质谱分析进行更深入的研究。大阪大学理学研究科的丰田岐聪教授是这方面的世界顶级专家，也开发了能在现场进行实时测定的质谱仪。借助质谱分析，解析地铁中 PM2.5 的成分，相信对于进一步阐明其形成原理有重要帮助。

[7] 东京地铁线路和地铁站数量当然更多，但移动测定当日外界 PM2.5 较高，导致车内和站台浓度几乎没有变化，故而难以区分东京的情况是更接近大阪还是和其他城市相似，需要再测定进行确认。

[8] 笔者已经通过实验证实了地铁环境下部分人群的精神状态会受到影响，但与本文主题没有直接关系，故不展开。

参考文献

http://dqhj.mep.gov.cn/dqhjzl/dqklwyjx/201709/t20170915_421691.shtml《大气颗粒物源解析：北京市 PM2.5 来源解析》，2018 年 6 月 3 日确认

http://www.chinabgao.com/k/ditie/29291.html《全国地铁排名数据分析》，2018 年 6 月 3 日确认

http://www.jametro.or.jp/japan/一般社団法人日本地下鉄協会《日本の地下鉄》2021 年 1 月 20 日确认

http://www.jametro.or.jp/upload/data/CkOHPMmVTmCN.pdf 《令和 2 年度地下鉄事業の現況》2021 年 1 月 20 日确认

程刚，臧建彬(2014)，〈地铁系统 PM2.5 浓度测试与分析〉，《制冷技术》, 2014 (5) , pp.13-16

程刚，臧建彬，朱羽松(2013),〈北京上海广州三地地铁系统 PM2.5 测试分析〉，《上海市制冷学会学术年会》, pp.262-265

樊越胜，胡泽源，刘亮，谢伟，艾帅(2014)，《西安地铁环境中 PM10、PM2.5、CO2 污染水平分析》，《环境工程》, 32 (5) , pp.120-124

谷雅秀，王姣姣，谢静超，刘加平，潘嵩，王新如(2018)，〈不同地铁环控系统颗粒物污染分布实测研究〉，《西安理工大学学报》,34 (1), pp.55-60

何生全，金龙哲，吴祥，慈慧鹏(2017)，〈北京典型地铁系统可吸入颗粒物实测研究〉，《安全与环境工程》, 24 (1), pp.40-44

何生全，金龙哲，吴祥(2016)，〈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》, 26 (3), pp.128-132

黄宇，李荣，崔龙，胡塔峰，樊灏，苏婷，曹军骥，李顺诚(2020)，〈轨道交通列车内空气质量研究现状与展望〉，《地球环境学报》, 11 (41), pp.345-363

胡毓瑜，李欣，張曼青，許俊卿，三好恵真子(2018)，〈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

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(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), pp.28-33.

盘石环境与能源研究所(2017), 《北京地铁空气PM2.5暴露及通勤者应对行为特征调查分析和健康风险评价（讨论稿）》, pp.1-40

大阪大学中国文化フォーラム・ディスカッションペーパー No. 2021-1
Discussion Papers in Contemporary China Studies, Osaka University Forum on China No.2021-1

中国と日本の地下鉄におけるＰM2.5 濃度に関する調査と分析

胡毓瑜　李欣　张曼青　许俊卿
金吉男　王石诺　三好惠真子

Investigation and Analysis of PM2.5 Concentration in Subways in China and Japan

HU Yuyu　LI Xin　ZHANG Manqing　XU Junqing
JIN Jinan　WANG Shinuo　MIYOSHI Emako

近年中国では地下鉄が急速に発展しており、この動向により、交通混雑の緩和のみならず、地下鉄の利用により車の排ガスを抑制できて空気質量を改善できるという見解もみられる。しかし、「地下鉄内のＰM2.5 濃度は室外より高い」という新聞報道も散見され、人々にとって地下は果たして安全・安心な空間であるかどうかについての疑問は払拭できない。

他方で、地下鉄の高濃度 PM2.5 汚染に関しては、日本でも横浜市営地下鉄を事例に慶応義塾大学グループの貴重な報告があり、空気質が既に改善されたと認識されている日本でも、地下空間において高濃度の PM2.5 汚染に直面する可能性が示唆されている。したがって、地下鉄駅の地下空間と地下鉄内の空気質の状況を明らかにするのは重要な課題であると考えられるものの、これまでの先行研究では特定の都市、あるいはそれほど多くない複数の駅を対象として調査がなされてきた。さらに、それぞれの研究の結論が一致しているとも言い難い。つまり、貴重な情報が得られたとしても、駅の特徴に依存するものか、その地域の特徴に依拠するのか、あるいは、一般的な現象であるかどうかについて、確定することは難しいと考えられる。

そこで、本研究では、地下鉄駅の空気質の状況を包括的に把握するために、2017 年 12 月から 2020 年 12 月にかけて、中国の６都市と日本の 10 都市において、地下鉄駅と地下鉄を対象に総計 60 日以上の PM2.5 の現地測定および参与的観察を実施した。結果として、総じて中国と日本の状況が異なることが明らかとなった。中国における地下鉄駅・車内のＰM2.5 濃度の挙動を比較すると、外気は比較的高い濃度の PM2.5 であるのに対して、地下鉄の駅の場合は、出口から車内までその濃度は徐々に減少するのは一般的である。また、各都市におけるそれぞれの駅の構造が類似し、ホームが閉鎖型であること、駅のホーム、地下鉄内のＰM2.5 濃度は外気の濃度との関係性が高いことが分かった。つまり、特に外の濃度が低い場合には駅内の濃度も低いことなどのいくつの現象から判断して、駅内・地下鉄内のＰM2.5 の主要の発生源は、「外気の PM2.5」であると考えられ

る。

一方、日本における地下鉄駅・車内のＰM2.5 濃度の挙動については、都市によって状況が異なり、中国ほど一致しているとは言えないものの、概して基本地下鉄の駅には出口からホーム・車内に向かうにつれてその濃度は上昇し、ホーム・車内に高い濃度のＰM2.5 の状況が一般的に存在することが分かった。また、駅の構造によって、ホーム・地下鉄内の濃度が異なり、空気交換を行っている場所の濃度が低いこと、外気の濃度が違異なっていても、駅内の濃度があまり変わらないことから、日本の場合、その主要な発生源は明らかに「地下鉄の運行」に関連すると示唆された。

以上の結果に基づき、改善方向を検討するならば、中国の場合、地下鉄内の空気質が比較的良いという事実に鑑みると、空気質を改善するために、空気清浄施設あるいは、空気清浄効果が高い空調施設が重要であると考えられる。しかしながら、主要な発生源は外気であるため、根本的には外の空気質の改善が必須であると考えられる。一方、日本の場合、外気の空気質にほぼ問題がないので、自然な風を含む空気流動を促進することが有効な方法であると考えられ、また実測によって問題のある場所を特定し、留意したり、あるいはその特定箇所に装置を設置して清浄したりすることで改善できると考えられた。

担当委員（許　衛東[†]）

http://www.law.osaka-u.ac.jp/~c-forum/box2/discussionpaper.htm

[†] 大阪大学大学院経済学研究科准教授