

地域・産学連携プロジェクト研究
〔研究論文〕

小型大気計測センサを用いた仙台港周辺での環境測定

丸尾 容子¹⁾, 澤石 諒¹⁾, 金子 善明¹⁾
石垣 陽^{2, 3)}, 松本 佳宣⁴⁾, 佐藤 雅俊³⁾

Measurement of air pollutant levels in Sendai port area using small sensors

Yasuko YAMADA MARUO¹⁾, Ryo SAWAISHI¹⁾, Yoshiaki KANEKO¹⁾,
Yang ISHIGAKI^{2,3)}, Yoshinobu MATSUMOTO⁴⁾, Masatoshi SATO³⁾

Abstract

Nitrogen dioxide (NO₂), ozone (O₃) and fine particulate matters (PM_{2.5}) are air pollutions that effect on mortality and allergy, and measurement of the pollutant levels in residential area is important for estimating the personal exposure levels. In this work, we had evaluated the performance of the small PM_{2.5} sensor which employed the light scattering method and passive samplers of NO₂ and O₃, by comparing the PM_{2.5} sensor's and samplers' output with PM_{2.5}, NO₂ and O₃ values that were measured in some of Sendai-city's environmental monitoring stations. It was found that there were positive correlations between sensor's and station's values, and that the PM_{2.5} sensor was available in the temperature and humidity ranges of 5.0 – 25.0 °C and 50 – 90% R.H. The positive correlation between values of nitrogen dioxide (NO₂) passive sampler and monitoring station was also found. We had carried out the environmental monitoring around the Sendai port area in which coal-fired plant had been build, using the PM_{2.5} sensor, the NO₂ and the O₃ passive samplers. It was confirmed that both the PM_{2.5} sensor and the NO₂ passive sampler were effective tools for monitoring the PM_{2.5} levels and NO₂ levels in residential area.

1 はじめに

現在, 大気環境問題として世界的に微小粒子状物質 (PM_{2.5}) が注目されている^[1-4]。ハーバード大学の研究で米国東部6都市の中から無作為に選ばれた25歳から74歳までの

-
- 1) 東北工業大学工学部
Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology
 - 2) 電気通信大学大学院
The University of Electro-Communications
 - 3) ヤグチ電子工業
Yaguchi Electric Corp.
 - 4) 慶應義塾大学理工学部
Keio University

8111人の白人被験者を対象として年齢、性別、喫煙、教育、BMIなどの因子を調節したところ、PM_{2.5}濃度と総死亡、呼吸疾患死亡、心肺疾患死亡との間に有意な正の相関が認められた^[5]。PM_{2.5}は呼吸により吸入され、呼吸器系への影響や血流に入り込むことによる循環器系への影響が心配されている。このため、PM_{2.5}による大気汚染に対する対策を講じるには現状の環境中濃度、個人暴露量を把握する必要がある。また、光化学反応によりPM_{2.5}の生成に関わっていると考えられる二酸化窒素(NO₂)や光化学オキシダントの主成分であるオゾン(O₃)に対しても同様である。NO₂は喘息の原因物質と推測され、厚生労働省の報告によると成人での喘息有病率は5.4%とされている。今後高気密住宅で生活を営む人の増加によりさらに増加することも予想される。また2016年世界保健機関(WHO)の報告によると大気汚染での子供の死亡が推計60万人に及ぶとされており、今後ますます大気汚染物質に対する個人暴露量の把握の必要性は高まっていくと考えられる。個人暴露量の把握においては、自治体が大気環境測定局で用いている大型の測定器を用いることでは実現が難しく、小型・省電力の測定器やセンサが有用なツールとなると考えられる。ただそれらにおいて個人暴露量を可能な限り正確に評価するためには、小型測定器やセンサの性能を見極め、使用していくことが重要である。そこで本研究では小型・省電力であるPM_{2.5}センサ、NO₂及びO₃パッシブサンプラの性能評価を行い、それらセンサ等を用いて実環境での環境測定を行って小型センサの性能及び有効性を評価したのでその結果について報告する。

2 実験及び方法

2.1 PM_{2.5}センサ、NO₂サンプラ、O₃サンプラ

PM_{2.5}センサは慶應義塾大学及び電気通信大学によって研究開発^[6]され、ヤグチ電子工業株式会社から販売されているポケットPM_{2.5}センサ^[7]を用いた。ポケットPM_{2.5}センサはスマートフォンやタブレット端末に接続し、電力供給を受けてPM_{2.5}及びPM₁₀の濃度を表示、記録できる。測定方式は光散乱方式を用いており、粒子の流路の設計により粒径による分粒が可能となっている。また、ファンによる吸引で1秒毎にデータの取得が可能である。屋外測定にはこのセンサをタブレット端末に接続して用いた。また、大気環境測定局との並行運転を行った際はタブレット端末と接続しておくことはできないため、ポケットPM_{2.5}センサを改良した設置型PM_{2.5}センサを用いた。設置型PM_{2.5}センサは防水の筐体内にセンサ部分を設置して、吸引口に長さ15cm、内径6mmの透明プラスチックチューブを接続し、筐体からチューブを出して外気を吸引する構成とした。また電源はソーラーパネルによる太陽光発電と蓄電池を用い、商用電源は不要であり、この状態で数ヶ月の動作を確認した。データは一旦装置内に蓄積されインターネットを介してデータの転送・蓄積が可能である。

NO₂パッシブサンプラは本研究室で開発されたものを分析チップとして使用した^[8]。分析チップは孔径4nmの多孔質ガラスを基板として用い、多孔質ガラス内にザルツマン試薬を含浸させ、NO₂を含む大気に暴露することで生じるアゾ色素量を光の透過率により求め、透過率をNO₂濃度に換算する測定原理である。実際の屋外での測定はNO₂分析チップを前面が外気に接したプラスチックケースへ入れパッシブサンプラとした。その後プラスチックケースの片端をクリップで留め、光の遮蔽のため黒画用紙で内側を覆った紙コップの中に糸で吊るし、空気の対流が起きる状態で高さ約1.5m付近の箇所に設置した。

また、NO₂濃度を算出するため、紫外可視分光光度計（V-730日本分光）で曝露前後の吸光度測定を行い、その後報告されている換算式^[8]を用いて濃度に換算した。

O₃パッシブサンプラは本研究室で開発された検知紙を用いた^[9]。検知紙は多孔体である濾紙を基板として用い、濾紙にインジゴカルミンを含浸させ、保湿剤により高感度に調製したものをを用いた。この検知紙はO₃を含む大気に暴露することでインジゴカルミンが分解され退色する。この退色量を画像解析により評価してO₃濃度に換算する測定原理である。実際の屋外での測定はO₃検知紙をプラスチック板に固定してパッシブサンプラとした。その後プラスチック板の片端をクリップで留め、光の遮蔽のため黒画用紙で内側を覆った紙コップの中に糸で吊るし、空気の対流が起きる状態で高さ約1.5m付近の箇所に設置した。退色量は未曝露と曝露後の検知紙を同じ照明の下、同一の画像として撮影した画像のRGB値を用いて評価した。報告されている（R - B）値と濃度の換算式を用いて濃度に換算し、その後湿度補正を行った。湿度補正は報告されている方法^[9]を用いた。

2.2 性能評価

屋外でのセンサ、パッシブサンプラの性能評価は大気環境測定局との並行運転により行った。並行運転は仙台市測定局のうち、苦竹自動車排出ガス測定局（苦竹自排局）及び榴岡一般環境大気測定局（榴岡一般局）で行った。苦竹自排局は交通量が多い国道45号線沿い、榴岡一般局は仙台駅東口から約2kmにある榴岡公園内に位置する測定局である。測定をする際は設置型PM_{2.5}センサを測定局の屋上、NO₂、O₃パッシブサンプラは測定局付近の手すりに取り付けた。

2.3 実環境測定

実環境での環境測定は2017年10月から仙台港に建設された石炭火力発電所が本運転を始め、住民の関心事であるため、その石炭火力発電所の周辺の公園6か所を選び、PM_{2.5}、NO₂及びO₃の測定を行った。また、測定箇所から近い測定局である福室一般環境大気測定局（福室一般局）と値の比較を行った。図1に国土地理院の電子地形図（タイル）に測



図1 実環境測定の地図と測定時の写真

定地点 (①～⑥), 石炭火力発電所, 福室一般局, 石炭火力発電所の運営会社が公表している最大着地濃度地点, および高速道路 (緑線) を追加した地図を示した。高速道路の通行量は平成 27 年度の交通量調査では 2,300 台/時間となっている。また, 各測定地点における測定時の写真も示した。PM_{2.5} は各測定地点において公園内に設置されていた机の上に PM_{2.5} センサとタブレット端末を設置して測定した。NO₂ および O₃ パッシブサンプラは写真に示したように公園内の木や鉄棒に設置して測定を行なった。

PM_{2.5} は 2017 年 8 月 29 日～9 月 7 日のうち 5 日間, 2017 年 10 月 27 日～11 月 8 日のうち 5 日間の計 10 日間測定を行った。NO₂, O₃ はその期間の中で小雨の 1 日を除く 9 日間測定を行なった。測定は 12～15 時の 3 時間, PM_{2.5} は 1 秒間隔で測定を行いタブレット端末にデータを蓄積し, 測定後データを収集した。

3 結果及び考察

3.1 性能評価

PM_{2.5} 測定は 15 分間隔のため 1 時間平均値を算出し, 測定局のデータ 1 時間値と比較した。図 2 (a), (b) に苦竹自排局, 榴岡一般局での並行運転時の時系列結果を示す。両者の値には正の相関が確認され, 相関係数は 0.83 であった。榴岡一般局も同様に正の相関が確認され, 相関係数は 0.74 であった。また, 近似線の傾きは苦竹自排局では 1.05, 榴岡一般局で 1.06 であった。

NO₂ 測定は屋外測定のため, NO₂ パッシブサンプラの表面汚れの付着を考慮して使用回数 5 回以内のデータを用いて評価を行った。図 3 は苦竹自排局と NO₂ パッシブサンプラとの相関を示す。相関係数は 0.68 であり, NO₂ パッシブサンプラが苦竹自排局に対し, 1.27 倍値を示す結果であるが, 屋外での測定は可能と判断した。O₃ 測定において榴岡一

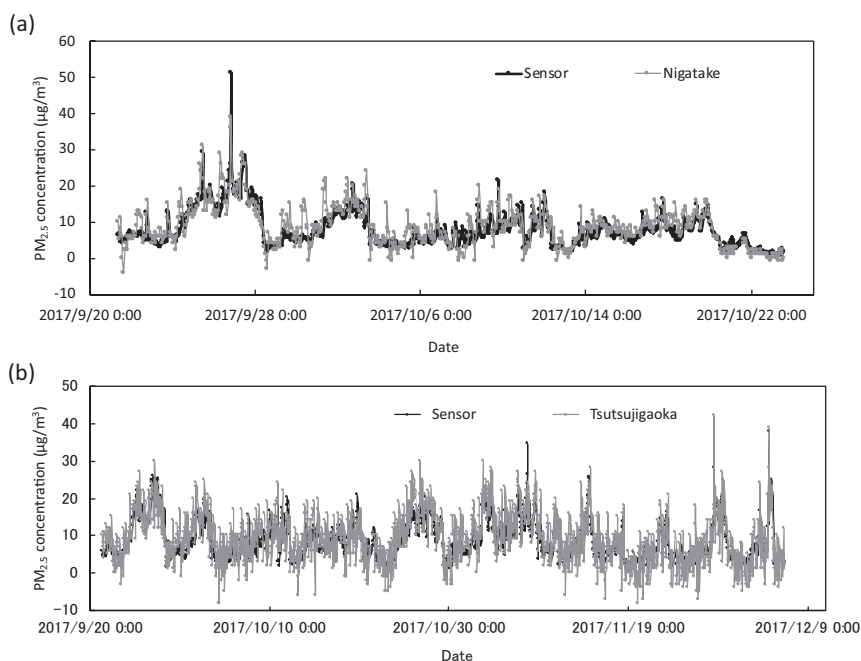


図 2 大気環境測定局との平行運転時の時系列結果 (a) 苦竹自排局, (b) 榴岡一般局

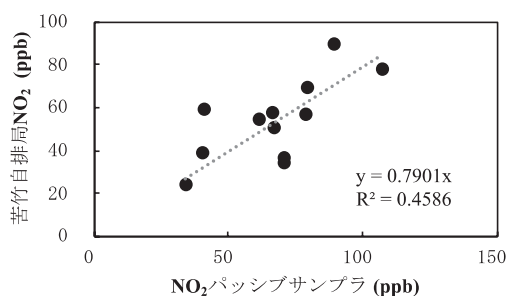


図3 苦竹自排局とサンプラの相関

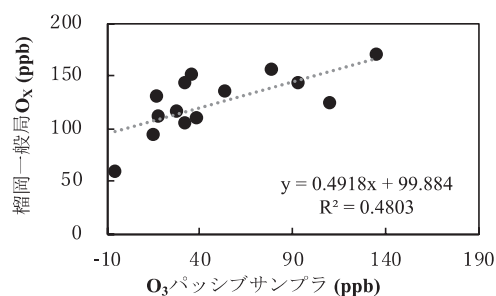


図4 榴岡一般局とサンプラの相関

般局の結果を図4に示す。榴岡一般局のO₃濃度とO₃パッシブサンプラのO₃濃度には正の相関が認められ、相関係数は0.69であった。しかし、O₃パッシブサンプラが榴岡一般局よりも低い値を示し、理由として湿度や植物など局所大気の影響が示唆された。この結果を受け屋外測定においてはO₃パッシブサンプラを用いては絶対値の評価ではなく、相対値の評価を行うこととした。

3.2 実環境測定

測定地点①は海風が強く、他の設置地点とは環境が異なる為、解析には用いなかった。測定期間中で風向が南東時は7日間、北西時は2日間あった。図5に9月6日南東時のPM_{2.5}濃度の時系列変化と福室一般局の1時間値を示す。南東時は図5のように測定箇所各平均PM_{2.5}濃度が福室一般局平均PM_{2.5}濃度よりも高い傾向があった。また、風向が北西時は測定地点各平均PM_{2.5}濃度は福室一般局平均PM_{2.5}濃度と同程度もしくは低い傾向があった。そのことから風向により濃度分布が異なり、南東風向時に仙台火力発電所から同心円状にある測定点⑤、⑥より福室測定局の濃度が低いため、PM_{2.5}の原因は主に道路であると考えられた。

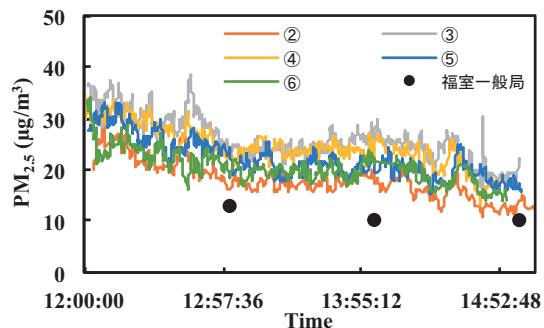


図5 風向南東時の各測定箇所でのPM_{2.5}濃度の時系列と福室一般局の1時間値

図6に福室一般局とNO₂パッシブサンプラの相関を示す。福室一般局と各測定地点で測定したNO₂には正の相関が確認された。次に測定地点毎に分類し、点源である石炭火力発電所は距離の2乗で拡散すると仮定し、また、点源の集まりである線源の高速道路からの拡散は1次に近似できると仮定し、各近似線の傾きと距離の関係を検討した。その結果、距離が遠くなるにつれて傾きが小さく

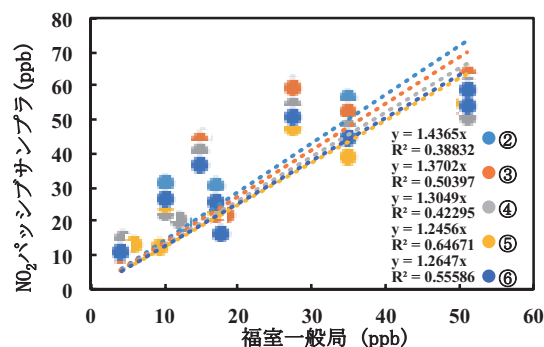


図6 福室一般局とサンプラの相関

なり、また、各測定地点で測定したNO₂の発生源は点源である石炭火力発電所の排出ガスと線源である高速道路を含む周辺の道路を走行する自動車からの排出ガスの両方であると推測される結果が得られた。

福室一般局と測定地点で測定したO₃パッシブサンプラの値とは正の相関が確認され、相関係数は0.56であった。その後、測定地点により測定結果を分類して考察を行なった。相関係数が0.5以上の測定地点の結果を図7-1、相関係数が0.5未満の測定地点の結果を図7-2に示す。図7-1の測定地点②、④、⑥はサンプラを公園内の手すりなどの人工物に吊るし、図7-2の測定地点③、⑤では公園内の木に吊るし、測定を行った。相関係数が0.5未満の測定地点では木や葉にO₃が吸着したため相関係数が小さくなったと考察し、O₃パッシブサンプラを使用する時は木や葉が多い場所は避けるべきであることが示唆された。

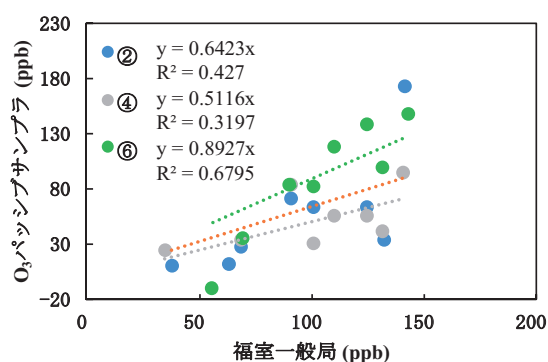


図7-1 福室局と測定値の相関（相関係数0.5以上）

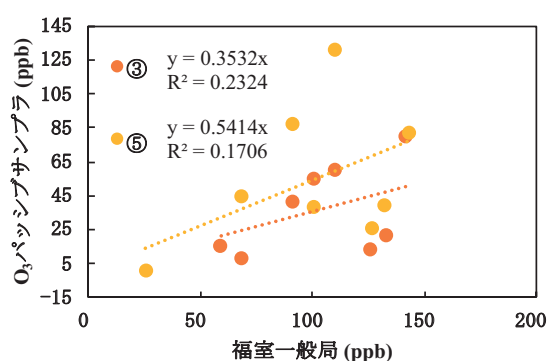


図7-2 福室局と測定値の相関（相関係数0.5以下）

4 まとめ

小型PM_{2.5}センサ、NO₂及びO₃パッシブサンプラを用いて、大気環境測定局との並行運転を行い、性能評価を行った。小型PM_{2.5}センサの出力値は測定局と正の相関が確認され、苦竹自排局では相関係数0.83であり、近似線の傾きは1.05であった。NO₂パッシブサンプラは苦竹自排局の測定データと正の相関が確認され、相関係数は0.68であり、NO₂パッシブサンプラが苦竹自排局に対し、1.27倍値を示す結果であった。O₃パッシブサンプラは榴岡一般局と正の相関が得られ、相関係数は0.69であった。しかし、O₃パッシブサンプラが榴岡一般局よりも低い値を示し、その原因は植物や湿度などの局所環境が一因と考えられた。また、それらを用いて仙台港周辺での環境測定を行った。PM_{2.5}は風速が南東時に測定地点の各平均PM_{2.5}濃度が福室一般局平均PM_{2.5}濃度よりも高い傾向があり、北西時は測定地点の各平均PM_{2.5}濃度の方が低い傾向があった。風向での考察から各測定箇所測定したPM_{2.5}は周辺の道路を走行する自動車排出ガスが主たる原因と推測された。NO₂は福室一般局と各測定地点で正の相関が確認された。各測定地点で測定したNO₂の発生源は点源である石炭火力発電所の排出ガスと線源である高速道路を含む周辺の道路を走行する自動車からの排出ガスの両方であると推測された。本研究から小型PM_{2.5}センサ、NO₂及びO₃パッシブサンプラを組み合わせた小型なセンサは複数台利用することで大気汚染物質の動態解析に有効であることが示された。

謝辞

本研究を行うにあたり大気環境測定局での測定において御理解、御協力下さった仙台市職員の方々に厚く感謝致します。また、本研究は、東北工業大学地域連携センターの地域・産学連携プロジェクト(実用化試験研究)の助成を受けて実施されたものです。関係の方々に感謝いたします。

参考文献

1. Eftim S.E., et al., *Epidemiology*, 2, (19), 209-216 (2008).
2. Krewski D., et al., *Health Effects Institute*, 140, 1-140 (2009).
3. Chen L.H., et al., *Environ. Health Perspect.*, 12, (113), 1723-1729 (2005).
4. Miller K.A., et al., *N. Engl. J. Med.*, 356, 447-458 (2007).
5. Dockery D.W., et al., *N. Engl. J. Med.*, 24, (329), 1753-1759 (1993).
6. 石垣 他, 第58回大気環境学会年会予稿集 544 (2017).
7. ヤグチ電子工業株式会社 : <<https://www.yaguchidenshi.jp/development>> (参照 2018-1-23).
8. Y.Y.Maruo, et al., *Sens. and Actua. B*, 173, 191-196 (2012).
9. Y.Y.Maruo, *Sens. and Actua. B*, 126, 485-491 (2007).