

小型環境計測器が開く新しい大気環境科学

New era of atmospheric environmental science created by small environmental sensors

松見 豊^{1*}・中山 智喜²

Yutaka MATSUMI and Tomoki NAKAYAMA

¹名古屋大学宇宙地球環境研究所

²長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科

¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University

²Graduate School of Fisheries and Environmental Sciences, Nagasaki University

概 要

大気成分のローコストで小型で比較的精度の高い大気環境センサの開発により、1家庭に1個、1人に1個のレベルでの環境計測が可能になりつつある。今後の数年でこの小型計測器の活用を中心に大気環境科学が大きく変革され、第三世代の[大気環境科学 3.0]が始まろうとしている。コンパクトなセンシング技術と小型で高機能で高速なプロセッサの発達により生まれた小型センサ技術だけでなく、携帯電話回線や高速ネット環境などの電子情報網の発達により様々な大量のデータがリアルタイムで集まり、人工知能を応用して解析されて有用なアウトプットを得ることができるビッグデータの情報基盤、さらには、様々な技術を総合するスマートシティの構築もこの[大気環境科学 3.0]を進めていく大きな原動力である。我々が行っている小型センサの開発と評価、そして我々が実際に展開している小型センサの応用とその成果について紹介し、さらに小型大気環境センサがもたらす新しい大気環境科学について述べる。

キーワード：アジアの大気環境、新しい大気環境科学、小型大気環境センサ、個人曝露、PM_{2.5}

keywords：atmospheric environment in Asian countries, new atmospheric environmental science, small atmospheric environment sensor, personal exposure, PM_{2.5}

1. はじめに

最近の計測技術進歩と情報通信機器の発達により、小型でローコストな計測器が大気環境の計測において大きな役割を果たそうとしている。今では、大気中の微小粒子状物質 PM_{2.5}をはじめとして O₃、NO₂、NO、CO などの大気中の有害ガス成分を計測する小型のセンサが市販されており、1センサあたり数千円から数万円のコストで測定が一応できる段階にある。本稿では、我々が行っている小型センサの開発と評価、そして我々が実際に展開している小型センサの応用とその成果について紹介し、さらに小型大気環境センサがもたらす新しい大気環境科学について述べる。

大気成分のローコストで小型で比較的精度の高い大気環境センサの開発により、1家庭に1個、1人に1個のレベルでの環境計測が可能になりつつある。著者らは今後の数年でこの小型計測器の活用を

中心に大気環境科学が大きく変革していくと考えている。図1に示したように、20世紀後半から発達してきた大気環境科学を振り返ると、第一世代[大気環境科学 1.0]は、日本では四日市ぜんそくや光化学スモッグとその解明が重要な役割を果たしてきた。第二世代[大気環境科学 2.0]は、各自治体と環境省の大気汚染物質広域監視システム「そらまめ」に代表されるような精度が確立した高度な観測機器とそれに基づいた専門家による研究が重要な役割を果たしてきた。これからの新しい第三世代の大気環境科学[大気環境科学 3.0]は、1人に1台、一家庭に1台のコンパクトでローコストな環境計測器が中心になって新たな価値を創出する科学となっていくと予想している。コンパクトなセンシング技術と小型で高機能で高速なプロセッサの発達により生まれた小型センサ技術だけでなく、携帯電話回線や高速ネット環境などの電子情報網の発達により様々な大量のデータがリアルタイムで集まり、人工知能を応

受付：2019年4月25日、受理：2019年5月27日

* 〒464-8601 名古屋市千種区不老町 F3-3, E-mail: matsumi@nagoya-u.jp

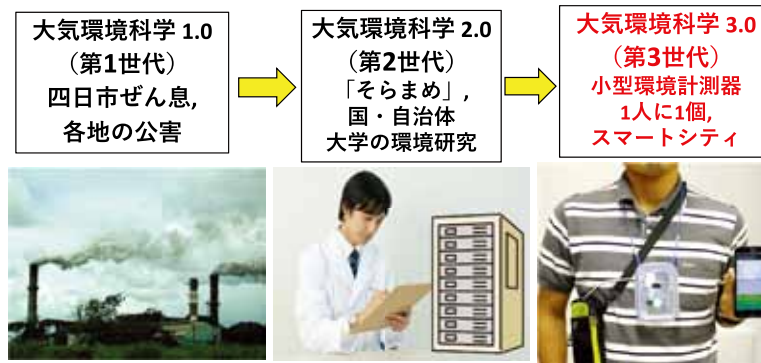


図1 大気環境研究の世代, 過去・現在・未来.



図2 小型環境計測器の社会や環境科学へのインパクト.

用して解析されて有用なアウトプットを得ることが出来るビッグデータの情報基盤もこの[大気環境科学 3.0]を進めていく大きな原動力である。近い将来、地域の学校や公園、自宅の庭などの大気汚染を正確にモニタリングでき、収集したデータをリアルタイムで住民が見ることができるようになると期待される。これまで大気環境のデータは行政が計測した比較的広域のものしかなく、きめ細かな対策は難しいのが実情だったが、高密度なデータを誰もが容易に手に入れられるようになることで、環境汚染対策のあり方も大きく変わる可能性が出てきている。著者が考えている小型環境センサがもたらす新しい大気環境科学や社会に対するインパクトについて、**図2**に六つの項目をまとめたが、これについては第3章で詳説する。大型の大気環境計測機器による精度の高い測定や、専門家による大気科学研究と得られる知見はもちろん今後も重要であるが、小型計測器との相乗作用により今までにない新たな大気環境科学の発展が期待される。

小型でローコストな大気環境計測器を多数用いた計測は、今、世界中で注目を集めており、世界各国で様々な取組がなされている。残念ながら日本ではまだ十分にその重要性が認識されておらず、取組が十分にはなされていない。例えば、アメリカでは米国環境保護庁(Environmental Protection Agency: EPA)がこの小型計測器と市民参加型の環境計測に注目しており、「環境保護の市民科学」(Citizen Science for Environmental Protection)の一環として小型の大気環境計測器の普及活動を行っている。また、アメリカ西海岸では州政府も後押しして、高密度な大気環境計測網が発達してきている(EPA, 2017)。ヨーロッパのスイスでは路面電車や自動車、自転車、人などに小型環境計測器を配置して、地域の環境マップを提供している(OpenSense, 2015)。台湾では、行政の支援を受けた市民参加型のネットワークにより、2,400個以上の小型大気計測器が設置されている(Academia Sinica, LASS, 2019)。日本では内山ほか(2014)及び北大のグループ(坂内ほか,

2015)の先進的な取組, 慶応大学の中澤らと藤沢市との協力でごみ収集車の環境計測器を備えて町中を測定したりリアルタイムのデータ収集の取組(丸山, 2016)などがあるが, まだまだ小型センサの十分な活用はなされていない。

小型でローコストな大気環境計測センサが世界中で活用されだした状況の中で, 2018年5月に世界気象機関(World Meteorological Organization: WMO)が地球大気化学国際協同研究計画(International Global Atmospheric Chemistry: IGAC)などと協力して, 小型センサの技術的到達点とこれからの開発・応用への指針のレポートを出している(WMO, 2018)。小型環境計測器は, まだ技術的に発展途上で, 十分な精度が得られていないものが多い。しかしながら, 「高精度・高性能な大気環境センサの開発が進むまで, 広く人々の間に普及させても意味がない」という考え方では, 技術発展から取り残されると著者らは考えている。

2. 名古屋大学での小型大気環境センサの開発と評価

2.1 PM_{2.5} センサの開発

PM_{2.5}の濃度を測定する連続大気粒子モニターとしてはベータ線吸収法やフィルタ重量法などがあり全国の環境測定局や研究観測に用いられている。しかしながら, これらの測定法の大型計器は, 非常に高価であり, 長時間の積算が必要である。そこで, 我々はパナソニック(株)との共同研究により, 手のひらに載る大きさの小型でリアルタイム計測が可能なPM_{2.5}計測器を開発してきた(図3)(Nakayama *et al.*, 2018)。開発した小型PM_{2.5}センサは, LEDを光源として大気中のPM_{2.5}粒子1個1個による散乱

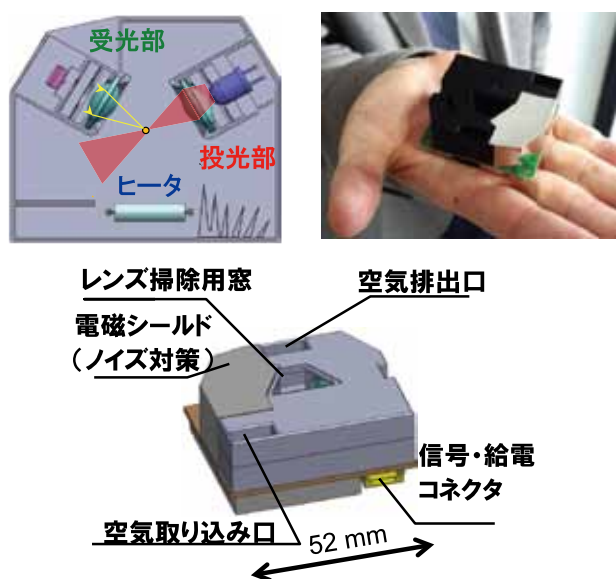


図3 名古屋大学とパナソニックで開発したPM_{2.5}センサ。

光を受光器で計測するものである。最小検出直径は0.3 μmである。CPUを内蔵して光散乱強度から複数の粒子径範囲毎の粒子数を得るOptical Particle Counter(OPC)の原理を採用して, PM_{2.5}の重量濃度を算出している。2.5 μmより大きな粒子は, 空気流入口の構造で入り難くなっており, さらに, 光散乱強度が大きく2.5 μmより大きいと推定された粒子の信号は除外している。また, 非常に高い濃度の時にも対応できるような信号処理アルゴリズムを用いている。

粒径と信号強度の対応関係は, 粒径が既知のポリスチレンラテックス(PSL)粒子を用いて, 校正している(Nakayama *et al.*, 2018)。PM_{2.5}の全体積からPM_{2.5}重量濃度を算出する際に, 粒子の比重を考慮する必要がある。PSL粒子の比重は1.05 g/cm³と実大気粒子の比重に比べて小さいことから, 実大気粒子を計測する際には, 小型PM_{2.5}センサの出力値に1.3から1.4程度の補正ファクターをかけて, 実大気粒子に対応するPM_{2.5}重量濃度を算出している(Nakayama *et al.*, 2018; Ly *et al.*, 2018)。開発してきた小型PM_{2.5}センサの精度の検証を行うため, 複数の小型PM_{2.5}センサおよび標準的な大型のベータ線吸収測定装置で同一地点(大阪府門真市)での測定を実施したところ, 高い相関が得られ, 良い精度をもつことが実証された(図4)(Nakayama *et al.*, 2018)。また, 測定原理からわかるようにゼロレベルの揺らぎなどは問題にならない。

このPM_{2.5}センサは家庭用空気清浄機に組み込まれている。学術・環境応用として, 小型で簡便なPM_{2.5}計測装置は様々な可能性をもつ。大型計器に近い精度を有し, コストが大幅に低い小型PM_{2.5}計を実現できたことで, 例えば地域に多数の測定器を置いて高密度な計測を行うことにより, 局所汚染や

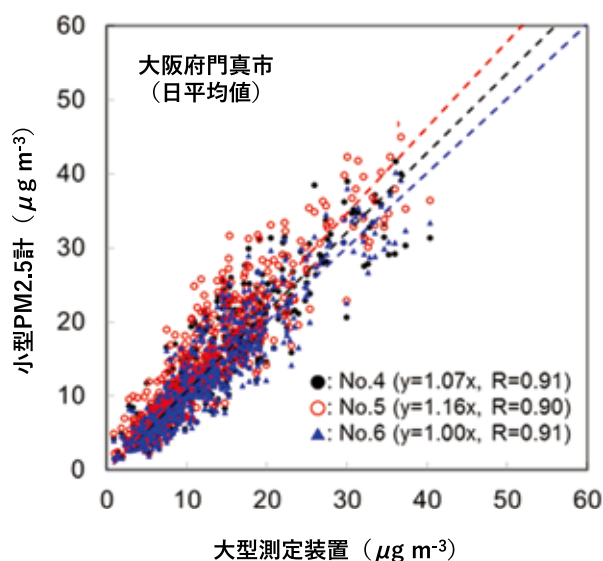


図4 大阪府門真市の同一地点での3台の小型PM_{2.5}計と大型測定装置(Thermo Fisher Scientific, SHARP 5030)の比較(Nakayama *et al.*, 2018)。



図5 ベトナムのハノイにて、据え置き型の小型PM_{2.5}計の設置の様子。左と中：屋外のPM_{2.5}センサとケース，右：センサからのUSBケーブルを室内に取り入れノートパソコンで記録・データ処理の様子。



図6 著者らのこの2年余のアジア各地への小型PM_{2.5}計の設置の状況。

越境汚染の区別が可能となる。

小型PM_{2.5}センサは、1分程度の時間分解能で安定した値が得られるのでPM_{2.5}の素早い変化に追いつくことができ、PM_{2.5}の移流などの解析にも使用することができる。大型計器は大気を吸引したフィルターの重量相当の時間ごとの変化量を計測するので、1時間程度の計測値はしばしばマイナスの値になったり、大きなバラツキをもつことがある。高い時間分解能を有する小型PM_{2.5}センサは、大型計器の時間的な補間及び異常な測定値の確認に用いることもできる。さらに、後述するようにアジアの国々での測定結果から、PM_{2.5}の濃度が数100 $\mu\text{g m}^{-3}$ から1,000 $\mu\text{g m}^{-3}$ を超えるような状況でも、大型機器との相関が非常に良いことがわかった。小型でローコストなセンサを科学的に活用する場合は、このような精度の検証が非常に重要であると考えている。(注1)

2.2. 据え置き型のPM_{2.5}計の製作と活用

著者のグループは、開発した小型PM_{2.5}センサを屋外の天候に耐えるような通気のあるケースに入れてパソコンで記録・表示する、小型の据え置き型のPM_{2.5}計測装置を製作して、多数の場所で計測を行っている。設置が簡単でほとんど維持管理が不要で、インターネットでデータを取得できる。図5

に、ベトナムのハノイにおいてセンサを屋外に設置している様子の写真を示す。屋外に設置する小型PM_{2.5}センサは百葉箱風のガラリをつけた箱の中に置いている。PM_{2.5}センサからの信号はUSB-Serial変換ケーブルとUSB延長ケーブルにより室内に取り込み、ノートパソコンでデータを記録している。ノートパソコンの代わりとして、消費電力の小さいArduinoやRaspberry Piのシステムを使う測定器も開発している。電気が供給されない場合には、50 cm角の太陽光発電パネルと小型電池で昼夜の連続運転が可能である。1セットの原価は5万円程度である。

この据え置き型のPM_{2.5}計を著者らのグループは様々な研究者と共同で国内および国外の観測点で活用している。国内ではこの2~3年で50か所以上に設置し、大学、地方自治体の環境研究所の方々と共同研究を進めている。国際的にもこの2~3年でアジアを中心に50か所以上の観測点に日本や現地の研究者と協力して設置している。図6にアジアにおける我々の小型PM_{2.5}計測器の設置状況をプロットにした地図を示した。

国際的な計測の共同研究の観測結果の例をいくつか述べる。ベトナムではハノイ市内のハノイ理工科大学の建物の3階の窓の外に2016年6月に設置し

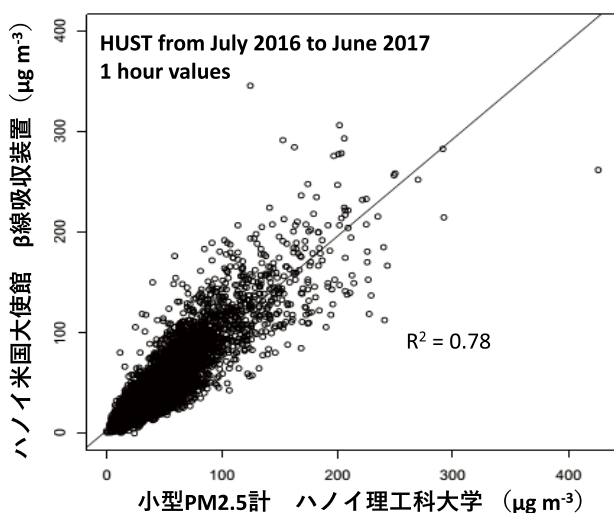


図7 ハノイ理工大学での小型PM_{2.5}計とハノイの米国大使館の大型のベータ線吸収PM_{2.5}測定装置の比較 (Ly et al., 2018).

て、現在まで連続観測している。ハノイのアメリカ大使館の大型の計測器での測定結果がインターネットで公開されているので、それと小型センサの結果を比較した相関図を図7に示す。PM_{2.5}の濃度が300 $\mu\text{g m}^{-3}$ を超える状況までよく計測結果が一致していることがわかる。ハノイでの小型計測器でのPM_{2.5}の測定結果から、PM_{2.5}と気象条件などとの関係を明らかにした (Ly et al., 2018)。マレーシアのクアラルンプールの小学校の教室の中と外のPM_{2.5}の濃度を計測して児童が曝露されている量を計測した (Othman et al., 2019)。図8にその結果を示す。モンゴルのウランバートル市内のモンゴル国立大学内の建物の2階の窓の外に2016年8月より設置して連続観測している。冬季は、外気温がマイナス30°Cになるが、順調に計測できている。その結果、冬季に1,000 $\mu\text{g m}^{-3}$ を超える非常に高い濃度のPM_{2.5}が観測された。我々の小型PM_{2.5}計は時間分解能が1分と高いので、PM_{2.5}値が大きく時間とともに変動していることをとらえることができた (Byambatseren et al., 2018)。おそらく、市郊外のゲル(テント住居)地区の暖房や炊事の燃焼排ガスに含まれる高濃度のPM_{2.5}が風向きにより市内の観測点に到達していると思われる。インドのニューデリー市内のデリー大学では2016年10月より計測している。小型PM_{2.5}計で瞬間的に1,000 $\mu\text{g m}^{-3}$ を超える非常に高い濃度を示す値が観測されたが、市内のアメリカ大使館の計測値ともよく合っている。インドネシアでは、パームヤシの焼き畑や泥炭火災によるヘイズの被害が問題になっている。そこで、スマトラ島及びカリマンタン島に設置して、2016年秋より観測を行っている。

2.3. 首から下げる携帯型PM_{2.5}計の製作と活用

著者のグループは持ち歩くことのできる携帯型のPM_{2.5}計測器も開発している。一般に市販されてい

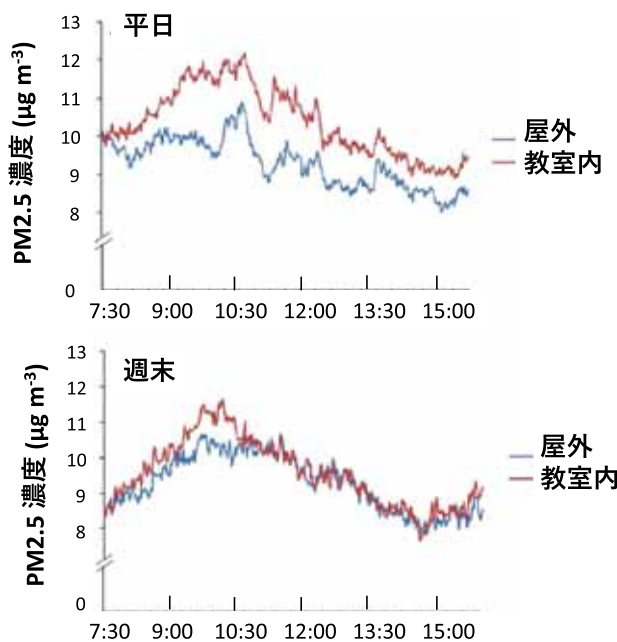


図8 マレーシアのクアラルンプールの小学校でのPM_{2.5}の計測例 (Othman et al., 2019).

るAndroidのスマートフォン(携帯電話器)を利用している。スマートフォンにはGPSが搭載されているので位置情報がわかり、また携帯電話回線でDropboxなどのインターネットのクラウドサーバーへデータをリアルタイムで送ることができる。図9に首から下げて簡便にPM_{2.5}測定ができる開発した装置の写真を示す。非常にコンパクトなシステムなので、生活中に測定するのにほとんど邪魔にならない。センサは熱対流を使って外気を取り込んでいるので、全く無音である。ただし、センサは外気取り入れ口が下に来るように垂直方向に装着する必要がある。センサからスマートフォンへの信号送信タイプとして、USBケーブルで送るタイプ、WifiやBluetoothなどの無線で送るタイプがある。画面に測定データのグラフ表示することもできる。一般に市販されているスマートフォン用の充電電池を使用することにより、24時間以上の連続計測が可能である。1セットの原価は3万円以下である。

図10に、著者の研究グループの一人が、センサが胸のところにくるように、首から携帯型PM_{2.5}計測器をさげて、1日の生活の中でのPM_{2.5}曝露の状況を計測した。朝に自宅から大学までの徒歩・地下鉄による通勤、午前中は大学で仕事をしており、昼休みは道路を歩いて昼食を取り、午後は自動車で喫茶店に行き打合せを行い、夕食を焼肉パーベキューの店でとり、自宅に帰って就寝している。この日は、屋外でのPM_{2.5}の濃度は10 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以下であった。14:00頃の自動車での移動の際に500 $\mu\text{g m}^{-3}$ の高濃度が測定されているのは、センサ着者が助手席に乗車していたところで運転者が喫煙したためである。14:30頃の喫茶店での100 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以上の計測値は、隣のテーブルの喫煙者からの受動喫煙の



図9 著者らが製作している携帯型の小型PM_{2.5}計の例。オプションとして、COやNO₂のガス計測の電気化学センサも付加できる。センサの信号はBT(Bluetooth transmitter)でスマートフォン(スマホ, Android)に送られる。センサデータはGPS位置情報とともにリアルタイムでクラウドサーバーに送ることができる。また、スマホ上にグラフ表示される。

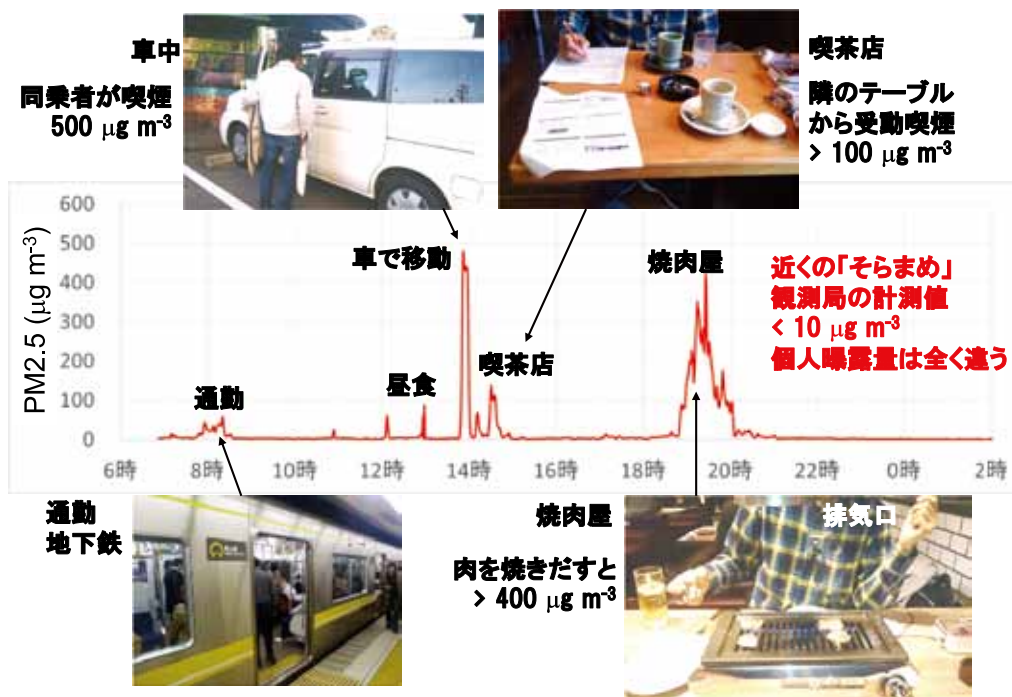


図10 個人曝露計を用いた1日のPM_{2.5}記録の例。

ためである。19:00頃の焼肉バーベキューレストランでは、ガス焼肉レンジがテーブルにあり、すぐ上に排気用のダクトが設置されていた。店内に入っただけで100 $\mu\text{g m}^{-3}$ 以上の計測値になり、自分たちで焼肉を開始すると、胸のところのセンサで400 $\mu\text{g m}^{-3}$ 近くの高濃度が検出された。さらに、地下鉄などの通勤路で比較的高いPM_{2.5}濃度が検出されているのも特徴的である。この個人曝露の測定装置を利用することにより、PM_{2.5}の個人曝露量を正確に測定できるので、疫学研究に有用と考えている。

これまでの疫学調査では主に地域の大气観測局の計測値をもとに個人曝露量が推定されてきたが、個々人のいろいろな生活環境により、正確な曝露量は大きく違ってくると考えている。また、仕事場での作業環境の測定にも応用できると考えている。多数の人や車・バイク・自転車に装着してもらい地域

の大气汚染のマップを作成することも可能であり、大气環境に対する意識を高める効果もあると考えている。

2.4 市販の大气ガス成分センサのテスト

著者のグループは大气環境に関連するガス成分の小型センサそのものは開発していないが、市販のガスセンサをテストしている。現状で、大气レベルのガス濃度(ppbレベル)で計測できる小型でローコストなセンサは非常に限られる。ガス成分を計測できるセンサの多くはppm濃度レベルのガス警報器に使われるもので、著者らが探した限りでは、大气濃度レベルが測定できる国産品はなかった。世界の小型大气ガスセンサを応用した研究例では英国のAlphasense社の電気化学センサがよく使われている(Lewis *et al.*, 2016)。我々はAlphasense社の一酸化炭素(CO)、二酸化窒素(NO₂)、オキシダント

(Ox), 一酸化窒素(NO), 二酸化硫黄(SO₂)計測用小型センサを購入して標準ガスや実大気に対して大型の標準的な計測装置と測定値を比較している。図11に小型NO₂センサと大型の化学発光法のNO_x計で同時に実大気測定を行った結果を示す。測定の間隔はかなりのあるが、数10 ppbの濃度レベルで一応は測れている。長時間ではベースラインの揺らぎがかなりあり、また感度の温度依存性や経年変化がある。Oxセンサは、大型の紫外光吸収オゾン計と同時計測することにより、測定値からNO₂の小型センサの測定値を差し引けば、オゾン(O₃)の測定がそれなりにできることが分かった。一方、SO₂センサは、NO₂に対してSO₂と同程度でマイナスの感度があり、通常の実大気中ではSO₂より

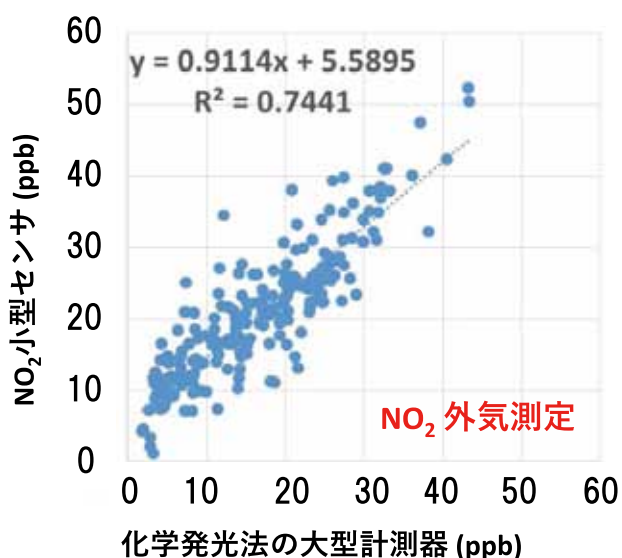


図11 NO₂の小型電気化学センサ(Alphasense社 NO2-B42F)と大型の化学発光法のNO₂計測器(Thermo 42i-TL)の外気の同時観測結果の相関。

NO₂の方がはるかに濃度が高いので、マイナス側でNO₂により信号が変動しており、SO₂計としては実用的でなかった。しかし、火山の火口付近や温泉地に持って行くと、実大気中のppmレベルの濃度に対応するSO₂の信号が見られた。電気化学センサの使用上の注意点として、ベースラインが安定するために測定前に数時間から数日の長時間の予備運転が必要であることがある。

図12に名古屋大学で試作したマルチガス大気計測装置の写真を示す。ドローンによる空中での大気環境を計測するために試作したものである。独自に開発したPM_{2.5}センサと、先ほど述べたNO, Ox, CO, SO₂, NO₂の小型電気化学センサ(Alphasense社), およびSenseair社のCO₂計を搭載している。これを用いて火山の火口の近くで測定した。また、大気汚染で問題になっている焼き畑からの有害ガス成分の総量をドローンで空中から3次元で測定することを目指しており、まずは予備実験として人工的な焚火の上で測定した。さらには、図9に示すようにPM_{2.5}とNO₂センサまたはCOなどの2種類のセンサを搭載した首から下げられる大きさのものを試作して試験している。

2.5 小型大気環境計測器の評価まとめ

小型大気環境計測器に求められる機能は、1)小型、2)ローコスト、3)高精度、4)メンテナンス不要、5)適切な観測項目(測定ガス種類、粒子など)の点である。著者らが独自に開発したPM_{2.5}の計測センサに関しては前章に書いてきたように、かなり精度や安定度の良いものできていると自負しているが、そのほかの大気ガス成分のセンサについては、単独で長期に安定して測定するにはまだまだ発展途上であると感じている。WMOのレポートでもこれからの小型センサの改良の課題が報告されてい

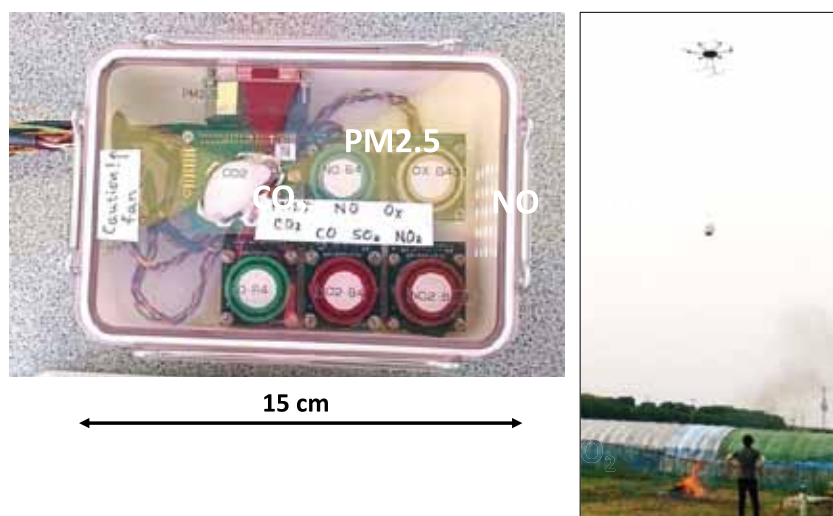


図12 (左)製作したマルチガスセンサ。独自に開発したPM_{2.5}センサと、NO, Ox, CO, SO₂, NO₂の小型電気化学センサ(Alphasense社), 及びSenseair社のCO₂計を搭載している。(右)マルチガスセンサをドローンに搭載して、焼き畑を模した焚火の上空で計測の様子。

る(WMO, 2018)。

実は大型で高価な大気環境計測器でも、実際の測定においては、純空気ガスや標準濃度ガスの供給が無いと測定精度は大幅に落ちるし、測定部単体のみでメンテナンスなしでは長期に十分な精度の測定はできない。現在の大気観測局で使われているような標準測定法の紫外光吸収法のオゾン計、非分散赤外分光法のCO計、化学発光法のNOx計なども、高価で大型であるゆえに、補正・校正のための補助装置や純空気・標準ガスを定期的に測定する機能を付属品として備えることで高精度を保っている。小型環境センサには小型・ローコスト・メンテナンス不要という要件があるので、小型センサに複雑な補正・校正機能の補助装置を一緒に設置したり、純空気や標準ガスのシリンダなどを持ち歩いたりすることは非現実的である。このような厳しい条件での精度の高い小型でローコストなセンサの開発が求められている。

さらに、小型センサの一般への普及とセンサの技術レベルの向上の両立は難しい問題である。信頼性のあるローコスト小型計測器のある程度の技術確立が普及には不可欠であり、現状ではその技術開発が重要な課題となっていると考えている。中途半端な性能の小型センサを広く普及してしまうと人々から信頼を失ってしまうかもしれない。しかし、センサ技術の確立を待ってから広めていくのでは情報化社会の発展の中でチャンスを逸する。センサの改良とセンサを人々に広めていく活動を注意深く同時に進めていく必要がある。そこでは、センサの計測値を過剰に信頼しない、一人一人が装置の限界を認識してもらう、精度を超えた議論をしないなどの注意点が必要と思われる。例えば、ベースラインが安定しないのならば、変化量だけに注目して利用することが考えられる。

個人個人が持つ大気環境センサを気軽に感度校正できるような施設を地域に設けるような取り組みも必要であろう。標準的な状態のサンプルやゼロガスなどの供給施設があり、短時間で校正ができるよう

な施設である。実際に米国のカリフォルニアではそのような取り組みも現れている(AQ-SPEC, 2019)。

3. 小型環境センサがもたらす新しい大気環境科学

著者が考えている小型環境センサがもたらす新しい大気環境科学のインパクトについて図2に六つの項目をまとめている。これらのインパクトの各項目について詳説する。

インパクト1：綿密な環境計測

近い将来にすべての交差点、街角、家庭、学校、仕事場に小型大気計測装置を設置するようになって考えている。図13にその模式図を示す。特に子供たちの健康配慮としてすべての学校・教室に設置する。こうした高密度な大気環境計測器の設置が行われるようになると、今までとは質的に異なる綿密な環境計測と対策が可能になる、例えばすべての交差点に設置されていれば、排ガスの異常な車両の検知と追跡が可能となる。また、工場や工事現場、飲食店など局所的な有害物質の排出源の発見とその対策が可能になる。さらに、大型環境測定機器を設置している自治体などの大気観測局の場所が地域の代表点としてふさわしいかどうかをチェックすることができる。

小型環境計測器を重要な環境データとして取り扱うとなると以下のような否定的な意見が出てくるであろう。

- ・小型環境計測器は精度が悪いから測定値には信頼性が無いので参考にならない。
- ・測定機によっては、たまに変な測定値が出て来て混乱が起こる。
- ・悪意のある人が大きな値が出たと騒ぎ立てる。
- ・細かい環境問題を掘り起こされても対応が難しい。

確かに現時点では問題点はあるが、新しい革新的な技術を育てることが重要だと著者らは考えている。それは、ちょうど20年前のインターネットによる情報革命のときの教訓として、一人一人が情報を世

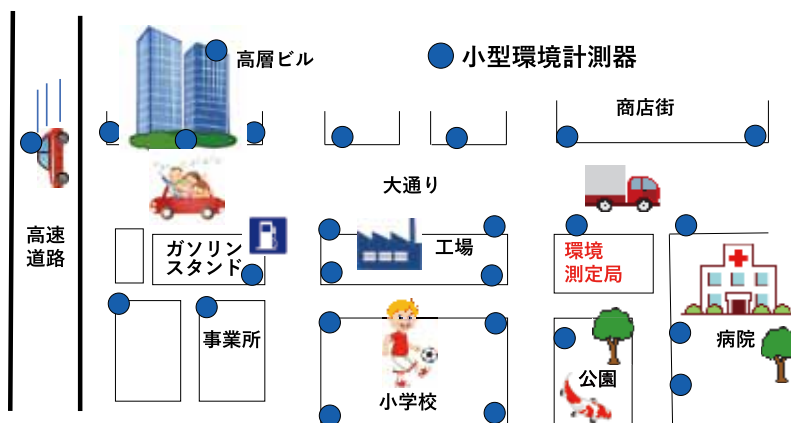


図13 小型大気環境センサは街中に展開できる。

界へ発信・その享受できる時代の出現に対して、「インチキな情報がいっぱい」、「悪意のある人がいるから危険」というように、頭から新しい技術を否定すると時代に取り残された前例がある。第2章に書いたように、充分でないけれどもかなり良い小型環境センサがすでにできているので、走りながら問題点を克服しながら、良い面を生かして技術を育てることが重要であると考えている。

インパクト2：専門家だけでなく皆で行う環境計測と解析

これまで大気環境は、少数の専門家が高価で高度な計測器で測定してきた。また、ネットなどでデータ公表はされているが、国・自治体が基本的には大気環境データを把握・管理している。一家庭・一個人・各学校に一個ずつ計測器を設置する、さらに歩いて、走って、自動車や自転車計測する時代になる。そこでは、一人一人が主人公となって大気環境を計測して、データを集める。人々にとって今まで見えなかったものがリアルタイムで見えるようになるので、個々人が大気環境を考え、健康を守り、より良い環境を目指して行動する。すべての小中高の学校に配置することにより、データをその場で見ながら環境教育と学習を実際的に進めることが可能である。そこでは、以下のようなことが期待できる。

- ・個人の職場・家・子供の学校の環境を詳しく把握できる。
- ・健康弱者(ぜん息を持っているなど)が身を護る行動を独自に考案することができる。
- ・野焼き焚火など環境汚染につながる行動の結果をその場で知ることができるので、そうした行動を抑える行動変容が期待できる。

現在、疫学研究などを通じて環境規制の公的な有害大気成分の規制基準値が決められている。そのうえで、小型計測器を皆が持つ状況になると、一人一人が自分自身に合わせた環境基準を個々人が考えるようになる。一人一人が自分でどういうときに体調が悪くなるかを自分の計測器を見ることにより経験的に把握することができる。これにより自分自身に合った環境基準を考案することが可能になる。

その基準に従って、

- ・私はこの地点は行くのを避けたほうが良い
 - ・私はこの作業をやめたほうが良い
 - ・今日は外出を控えたほうが良さそうだ
 - ・発作が起こる可能性が高いのでお酒は控えよう
- などの個人的な対策を自分に合わせて考えることができる。例えば、喘息やアレルギーの疾患を持つ場合には、毎日の計測と体調を本人がよく観察して、行動習慣を変える対策などをとることができる。

インパクト3：人工知能 AI によるビッグデータ処理

現在、人工知能 AI による機械学習やビッグデータ解析が、自動運転、医療、金融など様々な分野で注目を集めており、人間が行っている複雑で経験的

な解析や仕事も AI にとって代わる可能性が話題になっている。小型環境計測による大量のデータと AI 解析は非常に相性が良い。すなわち、AI や機械学習でサイエンスとしての大気環境科学のあり方が変わる。囲碁・将棋において定石(法則、因果関係)を知らなくても AI で強い攻撃法を編み出すことができるように、大気環境科学においても化学過程や物理法則が不明でも、機械学習でデータそのものに聞くことにより、大気環境の将来予測や対策ができる可能性がある。また、大気環境データだけでなく、AI 解析の入力・出力として、気象データ、健康データ、病院受診データ、交通データ、農作物データ、薬品・マスクの販売データ、観光客データなど様々な異質なデータ(ビッグデータ)を活用して予測を行い、環境規制やビジネスに応用できる可能性がある。

図14に大気環境データをニューラルネットワークを用いた機械学習で処理する概念図を示す。この図は、実際に行っている機械学習の内容ではなく、このようなプロセスが機械学習により将来実現可能であろうという予想図である。大量の過去の大気環境データや他のデータを入力して、出力として大気環境の将来予測や体調変化の予測、健康関連グッズの販売量予測などが出せる。実際に大気環境データに機械学習を適用して大気環境の予測を行っている例がある(Park *et al.* 2017)。大気環境データの機械学習の例ではないが、気象データと喘息発作の相関を機械学習して、数日前の気象データから喘息発作の可能性を予想してユーザーに健康状態の注意喚起するスマートフォンのアプリも出現している(JMDC・日本気象協会, 2018)。

インパクト4：大気環境のプラスの方向

これまでの大気環境科学はどちらかというと、健康被害、環境悪化、環境規制などマイナスのイメージが多かった。小型環境計測器の普及を契機に、これからの新しい大気環境科学は明るいプラスの方向にも発展していくと考えている。住居、生活経路、観光旅行といった選択の重要な基準となるなど、個々人のより良い生活や健康の実現に向けた取組の重要な柱となりうる。また、大気環境計測がビジネ

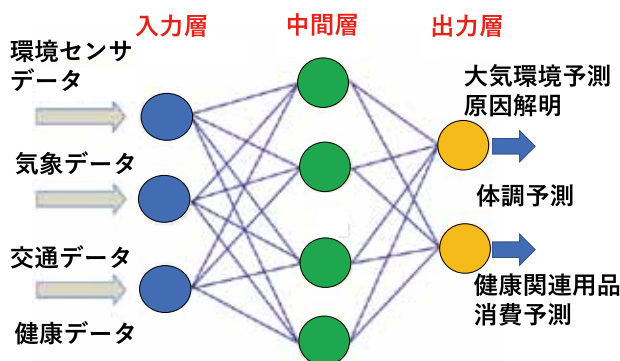


図14 ニューラルネットワークによる機械学習の模式図。

スへの貢献をするようになる。

小型大気環境計測器は、Internet of Things (IoT) 機器として、様々な応用が可能である。住みやすく働きやすく、効率的な仕事環境や住居環境を能動的に制御するスマートビルディングで活用がなされる。仕事、余暇、睡眠に、快適で省エネルギーとなる空調管理や温湿度設定に重要なセンサとなる。

スマートシティでも大気環境計測器が重要な IoT として活躍するであろう。スマートシティとは、IoT をエネルギーや生活インフラの管理に用いることで、生活の質の向上や都市の運用及びサービスの効率向上、そして都市の競争力をつけ、現在と次の世代が経済・社会・環境の観点で需要を満たすことができるような都市のことである(国土交通省都市局, 2018)。

例えば町全体に高密度に NO_x のセンサがあれば、空気の移流や滞留状況を判断しながら、各交差点で NO_x が大きくなるように交通制御を行うことが可能になる。問題となる車種の通行路変更や交差点信号のタイミング制御が考えられる。さらには、天気や大気の滞留状況から高濃度のオゾンや NO_x が予想される時間には、交通や物流システムの制御にも反映することが可能である。空気の浄化にうまく成功すれば、観光事業にも長所として売り込むことが可能になる。

これまで大気環境に関する行政の環境部門は規制が主な仕事であったが、これからはこのようなプラスの面に関しても積極的に取り組んでほしい。大気環境をスマートシティなどのビジネスに積極的に取り組むためには、行政の環境部門がこれまでの規制業務で培った知識と経験を活かし、縦割り行政を超えてビジネスや健康増進の部門と協力して進めてほしい。

インパクト 5：世界で、特にアジアの国々での計測、衛星データ検証

アジアの国々では、大気中の高濃度な粒子状物質 (PM_{2.5} など) や NO_x や O₃ などの有害気体の健康影響が問題になっており、その削減・解決には詳しい計測や疫学的調査が必要である。大型の観測器は高価だけでなく、空調や安定した電源を確保する必要があり、標準ガスやゼロガスの供給とともに、専門技術者の頻繁な保守も必要である。アジアの諸国の中で、先進国からの ODA 援助で高価な大型の大気観測装置が導入されていることがあるが、数年たつと維持管理の費用もなく、技術もないので動いていないことがある。小型大気環境センサを応用した計測器は、ローコストで、専門家による保守もほとんど不要で、高価な消耗品も不要である。初期投資が少ないので、頻繁に更新することも可能である。その国の広い領域に多数配置して高濃度の PM_{2.5} の発生源の解明や対策に役立てることができる。停電が多いあるいは電源が無い条件、ほこりの多い条

件、建物のない問題、メンテナンスの困難性、防犯上の問題などがある装置環境において、測定が可能である。高価な機器であると少数しか設置できないので、どうしても人口の多い都市部に数台だけ置くことになる。小型でローコストな計測器の場合、都市部だけでなく農村の村々や学校において測定することもでき、また太陽電池を電源に野山に設置することもできる。国中の広範な範囲で大気汚染が広がっている場合も多く、越境汚染が寄与していることもあるので、広域での多数の観測は実態と原因の解明に非常に有用である。

さらに、人工衛星からの画像データから地上付近の PM_{2.5} や NO₂、CO、CO₂ などを算出する研究がなされているが、直接的に測定できず種々のアルゴリズムを駆使して算出しているため、その検証が重要である。小型の大気計測装置を世界中の都市、農村、海洋、ジャングル、凍土、極地など様々な場所に配置してその場での計測を行えば、衛星観測から求めた値の検証を行うことができる。

図 6 に示すように書者らのグループは、アジアの各地の研究者の要望に応じて、すでに多数の PM_{2.5} の小型計測器を設置し、彼らと協力して計測を行っている。

インパクト 6：個人曝露計測による健康影響解明、疫学研究

小型大気環境センサは、首から下げ、小型の電池で駆動できるので、一人一人が実際にさらされて呼吸している大気中の成分を測定することができる。今までの疫学研究では、地域の大気観測局のデータを曝露量として用いてきたが、一人一人の行動、職場や家庭の建物の空調、家庭内での調理や家族の喫煙などによって曝露量は大幅に異なってくる。

先に図 10 で、ある 1 日に朝から晩まで PM_{2.5} 個人曝露計を首から下げて、PM_{2.5} の曝露量を測定した例を示したが、周囲の喫煙状況や焼き肉屋などで非常に大きな PM_{2.5} 値が観測された。日本では最近 PM_{2.5} の大気環境基準の達成率が高く(環境省, 2018)、図 10 の測定結果においても、焼き肉屋や喫煙などだけが目立って大きな PM_{2.5} 値を示している。しかし、アジアの国々では質の悪い石炭、木材、牛糞、タイヤなどを燃料とする調理器やストーブが室内に存在して、室内外に大量の PM_{2.5} が出ていることがある。こうした環境では、特に女性や子供の健康影響が心配される。国連のユニセフの発表では、世界で 1,700 万人の子供たちが、高い PM_{2.5} 濃度のために健康を害するだけでなく、脳の発育が阻害されている懸念があると報告している (UNICEF, 2017)。先に書いたように、アジアのそのような国々での PM_{2.5} 計測を著者のグループは現地の研究者と協力して行っており、今後、健康調査・疫学研究を進める。さらに現地の人々自身が小型計測装置での計測を行うことにより、大気環境の

健康影響に対する問題行動を避ける行動変容が起こることを期待している。

4. まとめ

小型でローコストな大気環境センサの進歩が、情報処理・ネットワーク技術の発展とあいまって、大気環境科学分野のみならず、スマートシティなど大きく社会生活を革新していこうとしている。今まさに世界中でそれが始まっているが、日本ではまだ十分にその意義が理解されていないので、より多くの方々に取り組んでいただきたいと考えている。その一助にこの解説が役に立つことを期待している。

謝 辞

我々のグループと一緒に、小型センサの開発と応用に協力してくださっている皆様に謝辞を記す。PM_{2.5} センサの共同開発を行ってきたパナソニックライフソリューションズ社の皆様、研究をいろいろ支えてくださっている名古屋大学宇宙地球環境研究所の坪木和久教授、計測装置の開発を行ってきた名古屋大学全学技術センターの山崎高幸氏及び岡本渉氏と(株)ささごの笹子宏史氏、電気化学センサのテストを共同で行った首都大学東京の加藤俊吾博士、さらに大勢になるのでお名前は書ききれないが、PM_{2.5} 計の活用を著者らと共同で行っている多数の国内・国外の研究者の皆様に感謝する。

引用文献

- Academia Sinica, Location Aware Sensing System (LASS) (2019) *PM_{2.5} Open Data Portal*. Retrieved from <https://pm25.lass-net.org/> (2019年4月25日確認)
- Air Quality Sensor Performance Evaluation Center (AQ-SPEC) (2019) *California Air District Website Links*. Retrieved from <http://www.aqmd.gov/aq-spec> (2019年4月25日確認)
- 坂内俊暁・村尾直人・山形 定・山口高志・深澤達矢 (2015) 札幌市のPM_{2.5} 濃度に対する都市・越境汚染の寄与評価. 土木学会論文集 G(環境), 71 (5), I_227-223.
- Byambatseren, Ch., Michidmaa, N., Sonomdagva, Ch. and Matsumi, Y. (2018) The some results of study on outdoor and indoor ambient PM_{2.5}. *Proceedings of the Mongolian Academy of Sciences*, 58, 01, 225 Retrieved from <https://www.mongoliajol.info/index.php/PMAS/article/view/971> (2019年4月25日確認)
- Environmental Protection Agency (EPA) (2017) *Citizen Science for Environmental Protection*. Retrieved from <https://www.epa.gov/citizen-science> (2019年4月25日確認)
- JMDC・日本気象協会(2018)「ぜんそくリスク予報」スマートフォン用アプリケーションを無料で提供開始. Retrieved from https://www.jmdc.co.jp/mypage/news/uploadfile/docs/news_20180920.pdf (2019年4月25日確認)
- 環境省(2018)平成28年度大気汚染状況について(一般環境大気測定局,自動車排出ガス測定局の測定結果報告). Retrieved from <https://www.env.go.jp/press/105288.html> (2019年4月25日確認)
- 国土交通省都市局(2018)スマートシティの実現に向けて[中間とりまとめ]. Retrieved from <http://www.mlit.go.jp/common/001249774.pdf> (2019年4月25日確認)
- Lewis, A. C., Lee, J. D., Edwards, P. M., Shaw, M. D., Evans, M. J., Moller, S. J., Smith, K. R., Buckley, J. W., Ellis, M., Gillot S. R. and White, A. (2016) Evaluating the performance of low-cost chemical sensors for air pollution research. *Faraday Discuss.*, 189, 85-103. <https://doi.org/10.1039/c5fd00201j>.
- Ly, B. T., Matsumi, Y., Nakayama, T., Sakamoto Y., Kajii, Y. and Nghiem, D. T. (2018) Characterizing PM_{2.5} in Hanoi with new high temporal resolution sensor. *Aerosol and Air Quality Research*, 18 (9), 2487-2497. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.10.0435>
- 丸山 篤(2016)ゴミ収集車による環境データ収集する慶應大×藤沢市の取り組み, マイナビニュース. Retrieved from <https://news.mynavi.jp/article/20160831-fujisawa/> (2019年4月25日確認)
- Nakayama, T., Matsumi, Y., Kawahito, K. and Watabe, Y. (2018) Development and evaluation of a palm-sized optical PM_{2.5} sensor. *Aerosol Science and Technology*, 52(1), 2-12. <https://doi.org/10.1080/02786826.2017.1375078>
- OpenSense (2015) *Urban air quality and health*. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=5Dnud99k2qk>
- Othman, M., Latif, M. T. and Matsumi, Y. (2019) The exposure of children to PM_{2.5} and dust in indoor and outdoor school classrooms in Kuala Lumpur city centre. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, 739-749. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.042>
- Park, S., Kim, M., Kim, M., Namgung, H.-G., Kim, K.-T., Cho, K.-H. and Kwon, S.-B. (2017) Predicting PM10 concentration in Seoul metropolitan subway stations using artificial neural network (ANN). *Journal of Hazardous Materials*, 341, 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.>

2017.07.050

内山政弘・奥村 聡・河上由行・中川太郎(2014)エアロゾル個数濃度エアロゾル・センサによるPM_{2.5}の推定. エアロゾル研究 29 (1), 33-38.

UNICEF (2017)大気汚染：子どもの脳の発達に及ぼす影響. Retrieved from <https://www.unicef.or.jp/news/2017/0264.html> (2019年4月25日確認)

World Meteorological Organization (WMO) (2018) *Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications*. Retrieved from https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/Draft_low_cost_sensors.pdf

注

注1) 著者らとパナソニックで開発したPM_{2.5}センサは、ロガーを備えた計測器として柴田科学(株)が試験販売をしている。連絡先：柴田科学(株)新規事業部 takanori@sibata.co.jp



松見 豊/Yutaka MATSUMI

名古屋大学宇宙地球環境研究所・研究員。管理的な仕事がなくなりましたので、毎日、研究を楽しくやっています。計測器関連の課題は、本稿のPM_{2.5}などの小型大気計測器の装置開発と日本やアジアでの計測応用、もう一つは、地球温暖化の温室効果気体CO₂のカラム濃度を正確に計測するコンパクトでローコストな機器の開発です。どちらもアジアをはじめ世界の人々に活用いただき、健康被害や地球環境問題の解決に役立てることができたらと夢見ています。機器開発は「物」との対話で進めますが、「物」の心を少し読めるようになりました。また、日本やアジアで環境や健康・社会問題に取り組んでおられる方々との新たな出会いに感動しています。



中山 智喜/Tomoki NAKAYAMA

長崎大学大学院水産・環境科学総合研究科(環境科学領域)准教授。兵庫県出身。2001年に神戸大学理学部化学科を卒業後、2006年に名古屋大学大学院理学研究科博士課程を修了、博士(理学)。京都大学大学院工学研究科助手・助教、名古屋大学太陽地球環境研究所(宇宙地球環境研究所)助教・講師を経て、2018年より現職。専門は、大気化学、エアロゾル科学、大気環境科学。大気微量気体やエアロゾル粒子(PM_{2.5}等)の計測装置の開発および、室内実験・観測研究を行っている。小学校・中学校・高校で大気環境に関する出前授業を行うなど、アウトリーチ活動にも積極的に参画している。