

## PM2.5自動成分分析装置PX-375を用いた 大気環境DXの実践例

Using PM2.5 Automatic Component Analyzer PX-375 Practical Examples of Air Quality DX

山口 佳津紀

YAMAGUCHI Kazuki

大気環境の監視は環境保全や健康被害防止の観点から継続的に行われており、主に窒素酸化物やオゾンの監視が中心だったが、近年では粒子状物質(PM)やそこに含まれる重金属による健康影響への関心が高まっている。従来の粒子状物質の成分分析手法は、試料前処理や専門知識を要し、リアルタイム性に課題があった。これに対し、「PX-375」と「Eco-WEB」を活用したモニタリング手法とデータ活用手法を提案する。PX-375は粒子状物質中の含有元素を短時間で連続測定可能であり、Eco-WEBはデータのリアルタイム収集・解析を実現する。これにより迅速かつ効率的な環境監視が可能となり、工業地域や製造業における環境負荷低減に貢献することが期待される。

Monitoring of the atmospheric environment has been conducted continuously from the viewpoints of environmental preservation and health hazard prevention, mainly focusing on monitoring nitrogen oxides and ozone, but recently there has been growing interest in the health effects of particulate matter (PM) and heavy metals contained therein. Conventional methods for analyzing particulate matter components require sample pretreatment and expertise, and have real-time performance issues. We propose a monitoring method that utilizes the PX-375 and Eco-WEB: the PX-375 enables continuous measurement of elements contained in particulate matter in a short time, while Eco-WEB realizes real-time data collection and analysis. The Eco-WEB enables quick and efficient environmental monitoring and is expected to contribute to the reduction of environmental burdens in industrial areas and manufacturing industries.

### はじめに

大気環境の監視と管理は、環境保全および健康被害防止の観点から極めて重要であり、これまでも継続的に行われてきた。その重要性は現在も高まり続けており、工業地域においては大気汚染物質の排出が地域住民の健康や周辺環境に与える影響が懸念されており、正確かつ継続的な監視体制の構築が急務である。大気環境の監視にはハイボリュームエアサンプラなどで大気中の粒子状物質 (Particulate Matter, PM) を捕集フィルタ上に採取し、ICPMS/AES (ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry): 誘導結合プラズマ質量分析, ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy): 誘導結合プラズマ発光分光分析) などを用いて含有元素の種類と量を測定している。

しかし、この方法では24時間捕集したサンプルを酸分解や

試料前処理といった多数の工程で処理し、測定には専門的な知識と技術が求められる<sup>[1]</sup>。結果としてサンプリング後の分析に時間がかかり、リアルタイムなデータ収集や解析が困難という課題がある。また、得られたデータは24時間捕集した粒子状物質の総量であり、1日のどの時間帯に捕集されたものかを判別することは難しい。

これらの課題を解決するために、「PM2.5自動成分分析装置PX-375」<sup>[2],[3]</sup> (以下、PX-375) と大気環境監視システム「Eco-WEB」 (以下、Eco-WEB) を活用した大気環境モニタリングの手法を提案した。本手法は、データのリアルタイム収集と自動解析を通じて、迅速かつ効率的な環境監視を実現するものである。

PX-375は、質量濃度分析部と元素濃度分析部を内蔵した装置であり、大気中の粒子状物質をテープ上に捕集し、粒子状物質中の質量および特定元素を、最短30分間隔で連続測

定することが可能である (Figure 1)。これにより粒子状物質に含まれる元素を調べることで、どのような場所から排出されたものであるかを簡単、迅速に推測することが可能となる (Figure 2)。

一方でPX-375は標準で15種類の元素を自動的に連続測定可能であるため、日々膨大なデータが生成される。これらを手作業で解析するには時間と労力を要し、迅速な対応が困難となる。そこで当社ではPX-375のデータを統合的に収集・処理するシステム「Eco-WEB」を開発した。Eco-WEBは複数の計測機器を接続することが可能な計測ネットワークを構築することで環境データの収集及びデータの解析を容易にするためのシステムである (Figure 3)。

このシステムにより、従来困難だったリアルタイムなデータ収集と解析が可能となり、効率的な大気監視が可能となった。

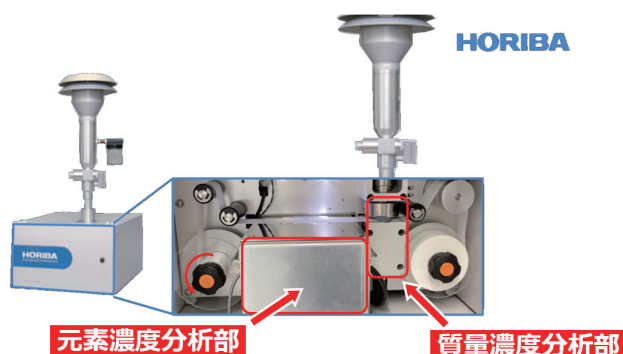


Figure 1 Continuous Particulate Monitor with X-ray Fluorescence PX-375.

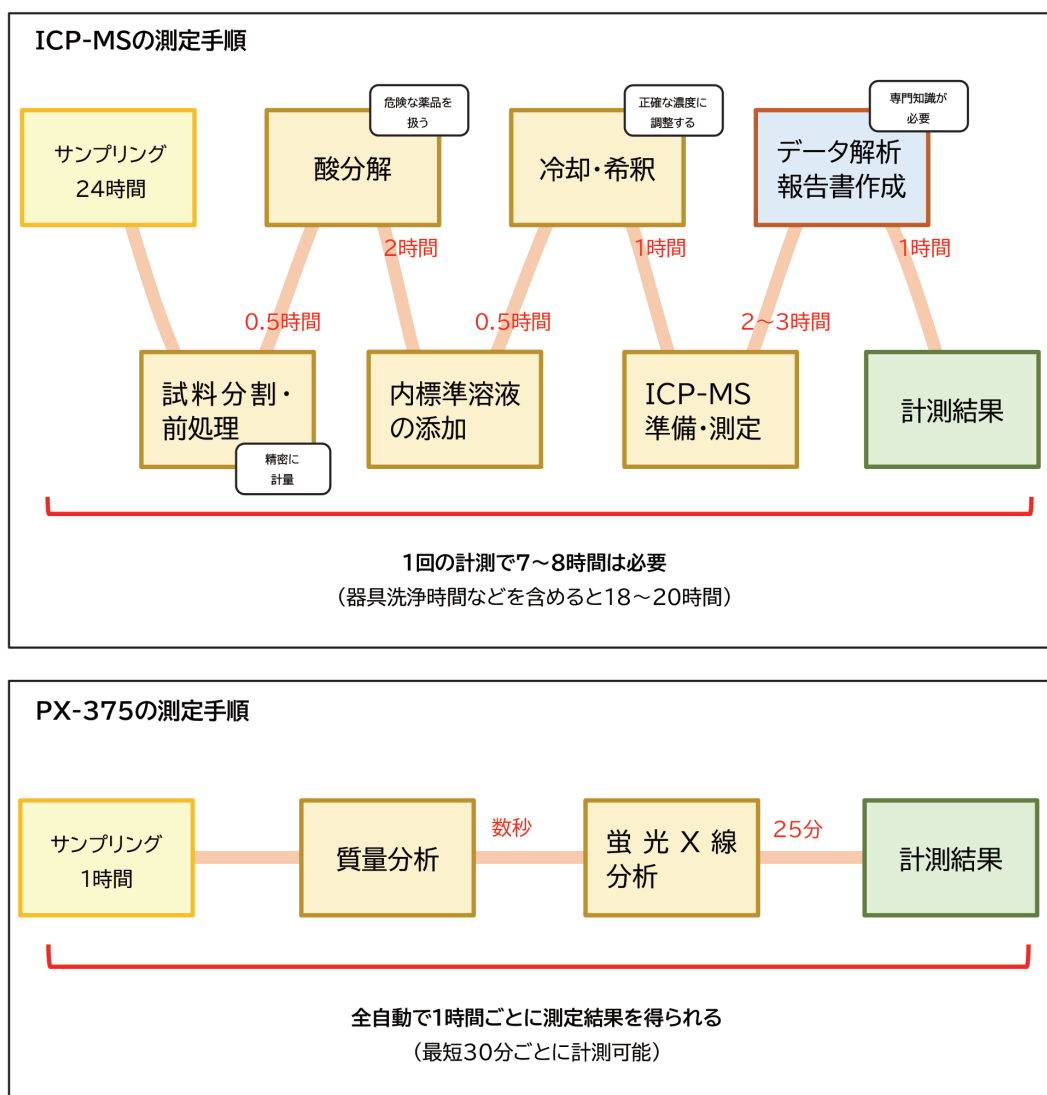


Figure 2 Measurement Procedure Image of ICP-MS and PX-375.

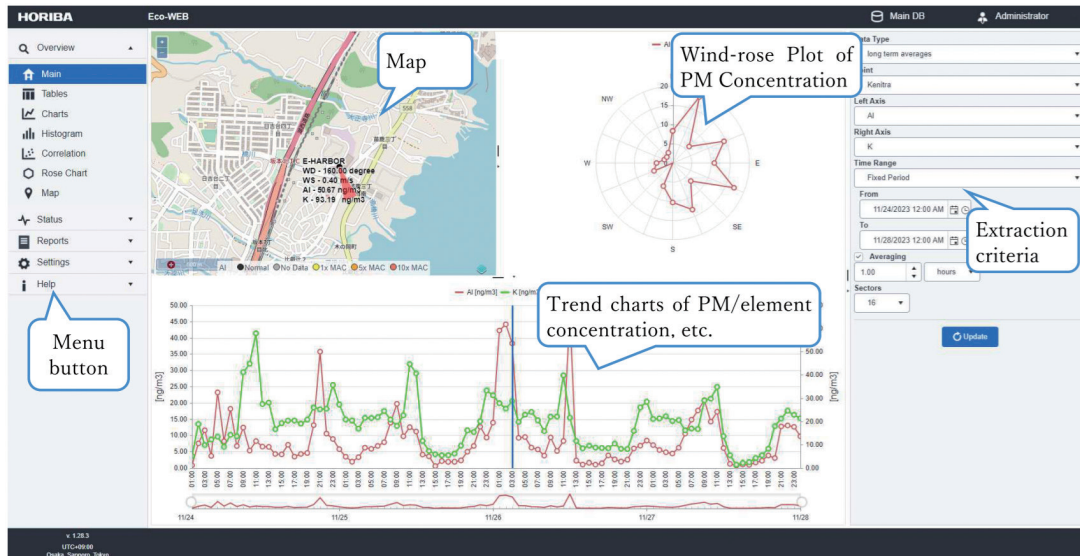


Figure 3 Main Screen of the Air Quality Monitoring System 'Eco-WEB'.

### PX-375による粒子状物質の自動成分分析

粒子状物質は大気汚染物質の中でも特に重要であり、その成分把握は排出源の特定や発生メカニズムの解明に直結するため、大気環境対策の立案に不可欠である。大気中の粒子状物質に含まれる元素の解析には従来ICP-MSやICP-AESなどの高感度なICP分析法が用いられてきたが、前処理に危険な薬品を要し、時間とコストがかかるため迅速なトレンド把握には不向きである。

一方、PX-375は蛍光X線分析法(XRF)を採用しており、前処理なしで全自動測定が可能である。標準で15元素(Al, Si, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb)に対応し、校正により対象元素を追加することもできる(Figure 4)。

XRF法はICP法に比べ感度はやや劣るが、試料を直接分析できる利点があり、質量濃度と同様の時間分解能で元素濃度の連続測定が可能である。PX-375はその信頼性と測定速度から環境省の大気測定局にも導入され、2017年4月以降、全国4地点で4時間ごとに15元素の連続測定が行われている。これにより、従来では困難だった短時間での成分変動や発生状況の把握が可能となった。

民間企業では、PX-375は主に自社工場の製造工程に伴う環境負荷物質の監視目的で導入されており、排出管理や周辺環境への影響評価、環境対策の一環として活用されている。

|            |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |  |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|--|
| H          |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | He |  |
| Li         | Be |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | B  | C  | N  | O  | F  | Ne |  |
| Na         | Mg |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Al | Si | P  | S  | Cl | Ar |  |
| K          | Ca | Sc | Ti | V  | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |  |
| Rb         | Sr | Y  | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Pd | Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I  | Xe |  |
| Cs         | Ba |    | Hf | Ta | W  | Re | Os | Ir | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |  |
| Fr         | Ra |    | Rf | Db | Sg | Bh | Hs | Mt | Ds | Rg | Cn | Nh | Fl | Mc | Lv | Ts | Og |  |
| lanthanoid |    | La | Ce | Pr | Nd | Pm | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |    |  |
| actinoid   |    | Ac | Th | Pa | U  | Np | Pu | Am | Cm | Bk | Cf | Es | Fm | Md | No | Lr |    |  |

#### Detectable Elements

- \* ○ —Standard parameters, calibrated by standard calibration materials at factory.
- \* To measure element concentration, analyzer needs to be calibrated by standard calibration materials.
- \* Please contact separately about elements, marked as non-detectable.

Figure 4 Detectable elements of PX-375

## PX-375およびEco-WEBの導入事例

PX-375は大気中の粒子状物質を短時間で連続測定する装置であり、Eco-WEBはそのデータをリアルタイムで解析・管理するシステムである。これらを組み合わせることで、排出源の特定や迅速な排出対応を行うことが可能となり、工場環境負荷低減に大きく貢献する（Figure 5）。

ある工場では、工場から排出される化学物質の排出源を特定し、環境負荷を低減することが早急の課題となっていた。先に記述したようにハイボリュームエアサンプラとICP法を用いた測定方法では「24時間平均値」や「年平均値」で評価することを前提としているため、環境負荷物質が検出されてもその物質が24時間のサンプル中のどの時間に排出されたかの判断が困難であった。そのため、リアルタイム性に優れたPX-375を導入し、詳細な監視体制を構築する取り組みが開始された。PX-375を軽トラックに設置した移動式測定局を導入し、工場内の各地点で大気環境を計測することで、排出される元素成分を把握し、排出源を推定できるようになった。

測定の結果、工場内の複数の場所でさまざまな物質が排出されていることが判明し、事前に想定していた排出源に加え、想定外の排出源も確認された。また、工場の製造プロセスと排出物質の関係性を解析することで、特定の大气汚染物質がどの製造プロセスで排出されているのかを高い精度で推定することができた。

ところが、工場が停止中に高濃度の金属元素が検出されることがあった。当初、工場が停止しているため敷地外からの発生が疑われたが、場内作業を確認した結果、燃焼炉停止時に行われた煙突内の清掃作業中に高濃度の金属元素が検出されていることが判明した。燃焼炉が稼働中には稼働していない煙突内のファンがあり、清掃時にこのファンを

回した際に内部に堆積していた金属元素が排出されたことが原因であった。

また、移動式測定局で得られたデータと工場の製造プロセスや風向風速データと組み合わせ、特定の製造プロセスが稼働している時に特定の方向から検出されることを統計的に解析することで、データの信頼性を証明することができた。

この事例を通じて、燃焼炉が停止中でも意外な場所から金属元素が排出される可能性が示され、常時観測の重要性が認識され、固定測定局が導入されることとなった。

一方で、移動式測定局ではUSBメモリでデータ回収をして、表計算ソフトウェアにてデータ解析を行っていたため、運用に手間がかかる課題があった。これらの課題を解決するため、固定測定局の導入と同時に、データ収集と解析処理を自動化するシステム「Eco-WEB」が導入された。Eco-WEBはPX-375が取得したデータ（PMの質量・濃度・含有元素濃度）を自動で収集・整理し、リアルタイムで視覚化する機能を備えている。また、事前に設定されたしきい値を超える濃度が検出された場合には、関係者に自動で警報メールを送信する機能も搭載している。これにより、異常値が発生した際には即座にその要因を把握し対象となる時間帯や検出元素を確認のうえ、関連部署へ連絡して現場の作業内容を確認するという迅速な対応が可能となった。

従来の手作業によるデータ処理では困難であったリアルタイム対応が、PX-375とEco-WEBの連携によって実現された。これにより、排出源の特定や迅速な対策が可能となり工場全体の環境負荷を大幅に低減することに成功した。さらに、常時監視を通じて実施した対策の有効性を継続的に評価し、改善を進める仕組みが確立された。



Figure 5 'Eco-WEB' Air Quality Monitoring System Configuration.

## データ解析と発生源推定手法

Eco-WEBは日常的な監視機能と高度なデータ解析機能の両方を備えている。日々の監視においては、元素ごとに濃度のしきい値(警報値)を設定することが可能であり、測定値がこれを超過した際には関係者に対して自動的にメールで警報が送信される。

一方で、発生源の特定を目的とした解析では、蓄積された測定データに対してトレンドチャート、レーダーチャート、相関グラフなどを活用して多角的な分析を行う。たとえば、同じPM濃度であっても含有元素の組成比が異なることがあり、これらの違いや、検出された方位・時間帯・各元素間の相関関係を分析することで、発生源をより精緻に絞り込むことが可能となる。

解析の進め方としては、まず全体的な傾向を把握するためにトレンドチャートを用いて、監視対象元素の濃度が高くなる日時やその変動パターンを確認する。その上で、関係が深い可能性のある元素同士の相関係数を確認し、相関の高い元素群を抽出する。特定の元素が増加する際に同時に増加する傾向を持つ元素が存在する場合、これらは同一の排出源に由来する可能性が高いと考えられる。

PM全体の濃度に注目するだけでは、元素間の関係性に気づけない場合がある。そのため、相関係数や相関グラフを用いて各元素の関連性を把握することが重要である。ただし、相関係数が高くてもデータにばらつきがある場合や外れ値が含まれる場合には、相関が見えにくくなることもある。また、相関は線形に限らず非線形の可能性もあるため、グラフを直接確認しながら判断する必要がある。外れ値を除外することで、より正確な評価が可能となる(Figure 6)。

相関関係から特定の元素と関連の深い元素が明らかになった場合は、それらについてトレンドチャートや相関グラフ

を用いて発生パターンを詳しく分析する。さらに、風向・風速データを活用することで、対象元素の検出方位を特定でき、特定の方向から継続的に高濃度が検出される場合は、排出源がその方向に存在する可能性が高いと推定される。類似した排出源が同一方向に複数ある場合は、元素比(例：Pb/As)を比較することで識別できることがある。自社由来と外部由来では元素比が異なる場合があるため、特定の条件下で計測を行うことで、比率の比較により成分の由来推定が可能となる場合がある。

発生源推定手法としては、PMF法(Positive Matrix Factorization)<sup>[4]</sup>やCPF法(Conditional Probability Function)<sup>[5]</sup>などが一般的に用いられているが、風向・風速・濃度データを統合的に扱うCBPF法(Conditional Bivariate Probability Function：条件付き二変量確率関数)<sup>[6]</sup>を活用することで、発生源の位置と寄与度の理解がより深まる\*。

Figure 7はCBPF法で描画したグラフの例だが、風速を放射状軸上に置き、グラフの中心が風速0m/sを表し、外円が最高風速を表す。またグラフ上の色は青→緑→赤の順に観測が多いことを表している。

グラフに表示するデータの絞り込み条件を変えることで、多様な知見が得られると考えられる。たとえば、高濃度のPMのみを抽出して描画した場合、北東方位に赤色のデータが現れると仮定すると、これは北東から高濃度PMが検出され、風速が疑似的に距離を示していることを意味する。このとき実際の地図と照合すれば、その方位に排出源が存在する可能性が高いと推定できる。また、Ni、Cr、Mnなど特定の重金属に条件を変えて描画すれば、それぞれの排出源に関する追加的な知見が得られると期待される。これらの分析を通じて、CBPF法が発生源の特定や寄与度評価に有効であることが示唆される。

\*CBPF法は実装に向けて開発中であり、実用化に向けた評価を進めている。

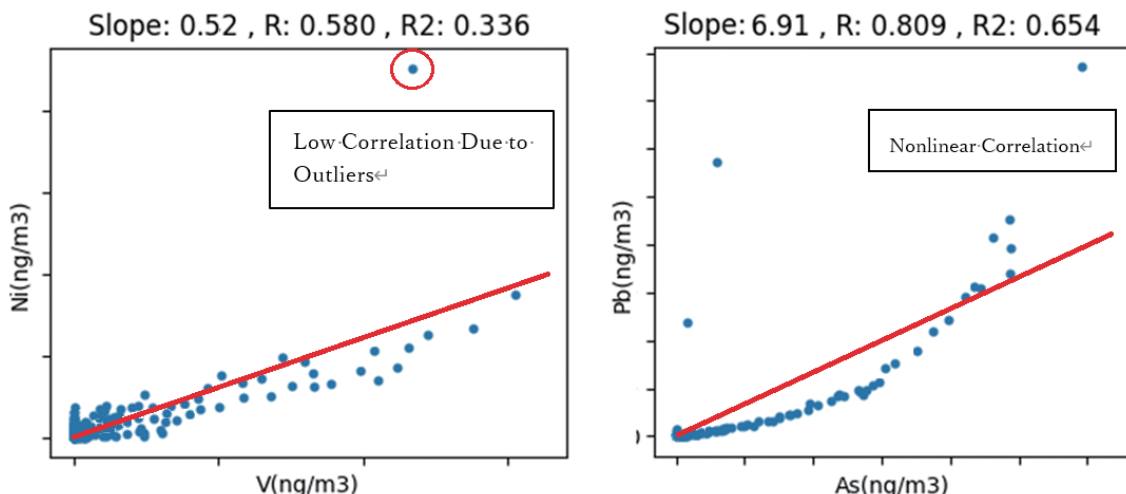


Figure 6 Example of Low Correlation.

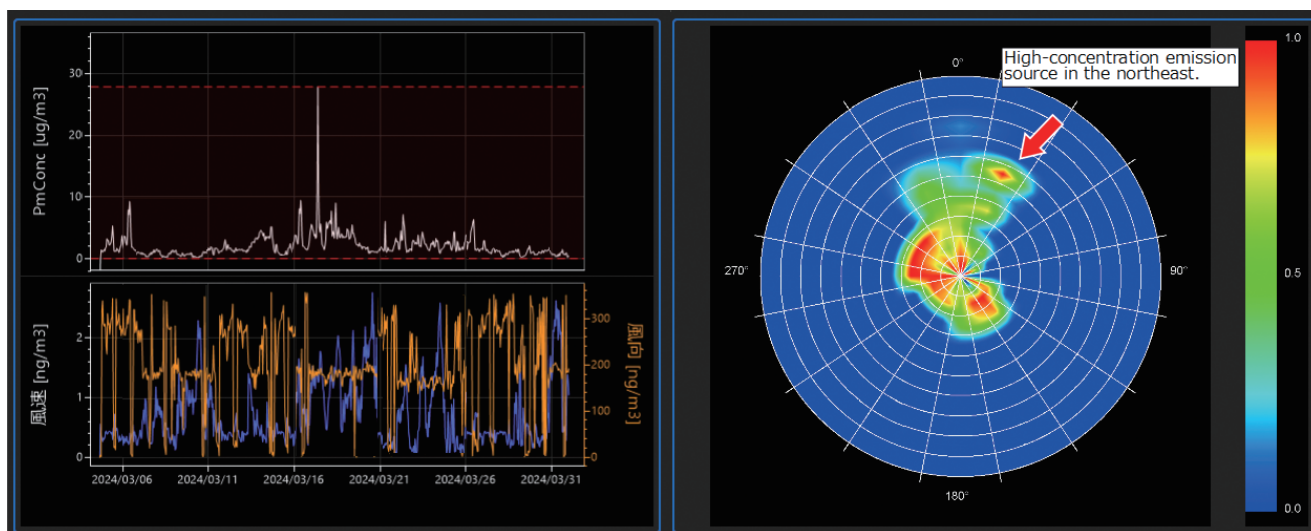


Figure 7 CBPF-Based Distribution of PM Concentration by Wind Direction and Speed.

## 今後の展望

計測機器から得られたデータを数学的に処理・解析することで、一定の傾向や特徴を把握することは可能である。しかし、得られた結果が全ての現象を説明できるとは限らず、その意味を正しく解釈するためには、データの背景や文脈を理解する力が求められる。

実際の観測データには、特定の方位や時間帯に限って検出される物質もあれば、あらゆる方位から常時検出される物質もあり、それぞれに異なる特徴が存在する。さらに、測定されたデータを解析・解釈するプロセスは依然として自動化が難しく、経験に基づいた判断が必要となることが多いため解析業務の俗人化が進んでいる。加えてデータ解析の知見を持つ技術者の不足も課題となっている。

これらの背景を踏まえ、今後はデータ解析に必要な情報を統合的に扱い、ユーザーが様々な観点からデータを検証・解釈できるシステムの構築が求められる。解析結果を人間が正確に読み解くためには、他の関連情報と組み合わせた可視化や整理が不可欠であり、それらを効果的に支援するプラットフォームの開発が今後の重要な課題であると考えられる。

データ解析は専門家だけが行うものではなく、専門家でもなくても行えるものとしてシステムを進化させていくことを目指している。

## おわりに

大気環境モニタリングにおける課題を解決するソリューションとして、PX-375とEco-WEBを活用した新しいモニタリング手法を提案した。これにより、従来の手動プロセスに依存したデータ収集・解析の課題を克服し、リアルタ

イム性と効率性を兼ね備えたモニタリング体制の構築が可能となることを示した。

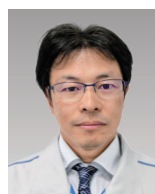
特に、PX-375による粒子状物質の自動成分分析と、Eco-WEBによるデータの統合的な収集・解析機能は、環境保全や健康被害防止において重要な役割を果たすことが期待される。また、これらの技術は、工業地域や製造業における排出ガス管理の効率化にも寄与し、持続可能な社会の実現に向けた一助となる。

今後は、データ解析のさらなる自動化やAIを活用した予測分析の導入などトータルなソリューションを提供できるように努めていきたい。

\*編集局注：本内容は特段の記載がない限り、本誌発行年時点での自社調査に基づいて記載しています。

## 参考文献

- [1] 微小粒子状物質の成分分析/大気中微小粒子状物質(PM2.5)成分測定マニュアル-無機元素測定法(環境省ホームページより)  
<https://www.env.go.jp/content/900400186.pdf>  
(参照日: 2025/6/25)
- [2] 松本絵里佳: “PM2.5自動成分分析装置 PX-375”, *Readout (HORIBA Technical Report)*, 50, p.29-34(2018)
- [3] Xiaoyang YANG, Ph.D, Shijie LIU, Ph.D.: “Study on time variations of elemental composition and source of PM2.5 in Beijing”, *Readout(HORIBA Technical Report)*, 50, p.16-28 (2018)
- [4] Pentti Paatero, Unto Tapper, U.: Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values, *Environmetrics*, 5, p.111-126 (1994)
- [5] Eugene Kim 1, Philip K Hopke, Eric S Edgerton: Source Identification of Atlanta Aerosol by Positive Matrix Factorization, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53, p.731-739(2012)
- [6] Iratxe Uria-Tellaetxe, David C. Carslaw: Conditional bivariate probability function for source identification, *Environmental Modelling & Software*, 59, p.1-9(2014)



## 山口 佳津紀

YAMAGUCHI Kazuki

株式会社堀場製作所  
開発本部 ガス・流体計測開発部サブリーダー  
Assistant Leader

R&amp;D Division

Gas &amp; Fluid Analysis R&amp;D Dept. HORIBA, Ltd.