

小型で精度の高い大気中の微粒子(PM_{2.5})計測器の開発と実用化 ～広域で迅速なPM_{2.5}観測による詳細なPM_{2.5}情報収集へ期待～

1. はじめに

名古屋大学太陽地球環境研究所(所長・町田 忍)の松見 豊(まつみ ゆたか)教授の研究グループとパナソニック株式会社は、共同研究により大気中の微粒子で2.5ミクロン以下の粒子径のもの(PM_{2.5})の小型かつ、比較的精度の高い簡便な小型計測装置の開発に成功しました。

中国で高濃度な微粒子 PM_{2.5} の発生が話題となっており、日本でも、大陸からの微粒子の日本への飛来や、光化学スモッグ、および二次有機エアロゾルなどの様々な微粒子の移流や発生が問題となっています。図1には、環境省の発表した日本におけるPM_{2.5}の環境基準の達成状況を示してあります。西日本に非達成の場所が多いのは、大陸からの影響である可能性があります。2.5ミクロン以下の粒子径のもの(PM_{2.5})は、肺の奥深くまで入りやすく、喘息や気管支炎などの呼吸器系疾患への影響のほか、肺がんのリスクの上昇や循環器系への影響も懸念されています。PM_{2.5} 微粒子の計測に関しては、フィルタ法による質量濃度測定やそれを自動化したフィルタ振

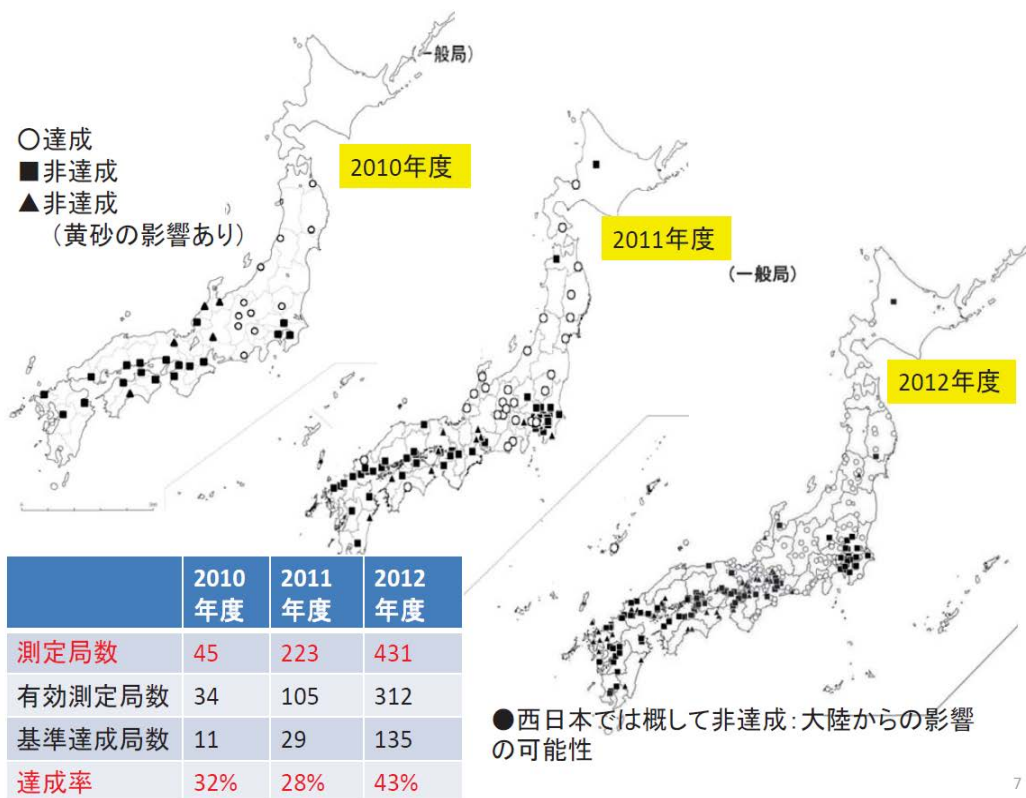


図1 PM_{2.5}環境基準達成状況(環境省)

動法、 β 線吸収法の自動測定機が公定法として国や自治体の観測施設で使われていますが、いずれも高価で大型のものであり、身近な多地点での計測は困難です。このため、小型でローコストでありながら、比較的精度の高いPM2.5の計測器が求められていました。

今回、光散乱法に基づく手のひらに乗るようなコンパクトでローコストなPM2.5計測装置を開発しました。2.5 μm 以下の粒子の質量濃度を判定する独自の「粒径判別アルゴリズム」により、より高い精度での判定を実現しました。空気清浄機への組み込み(パナソニック製 空気清浄機)や、身近な多地点での観測により、PM2.5に対するきめ細かな対応が可能となります。

2. 開発した小型PM2.5計測器

図2左には、今回開発した小型PM2.5計測器の外観図を示しております。図2右に示すように、PM2.5測定器には、粒子の光散乱を測定する光散乱法を用いています。この内部には、発光ダイオード(LED)を用いた光源、粒子が光源からの光を散乱して生じる散乱光の受光部、PM2.5粒子が測定器内部へ流入し、外部へ流出する流路部から成っています。光源と受光部には集光用非球面レンズを設け、また、散乱光以外の迷光成分を効率よく閉じ込めて減衰させるための迷光トラップ構造を配置しております。これにより、粒子からの散乱光のみを検出できるように高S/N比を実現して、非常に小さい粒子(0.3 μm まで)の粒子の光散乱まで計測できるようにしました。また、PM2.5粒子の大気中に存在するほぼ全体の粒子径範囲、最小粒子径0.3 μm から2.5 μm をカバーすることができるようになりました。表1に示すように、サイズは長辺で52mm程度の小型のものです。これまでのPM2.5粒子の計測器と比べると、1/10程度に非常にコンパクトで小さくなっています。

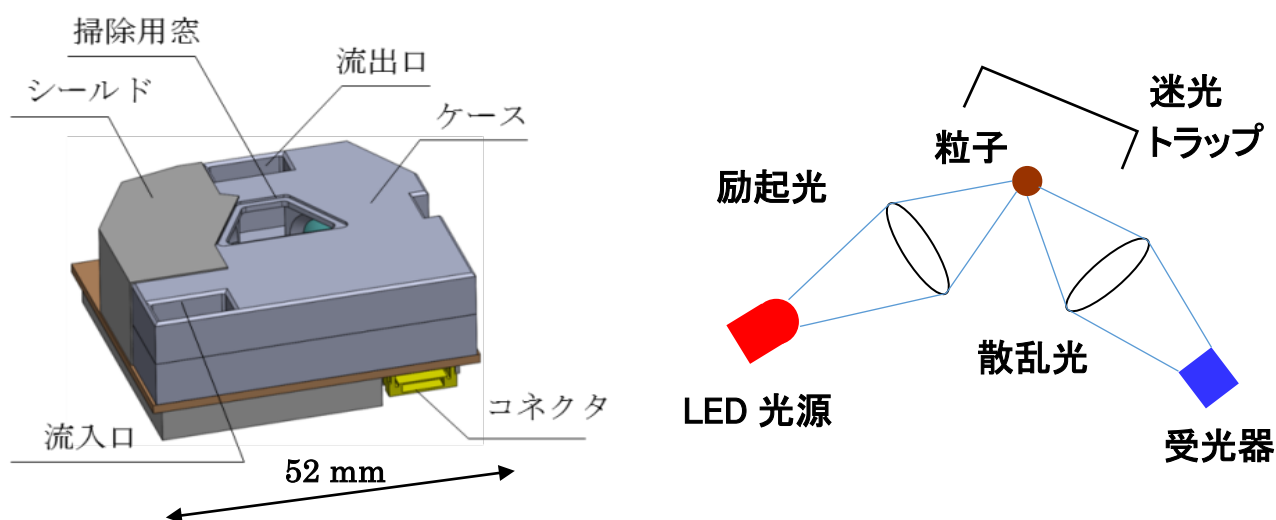


図2 開発したPM2.5測定器の外観(左図)と測定原理(右図)

表 1. 開発した PM2.5 測定器の性能

最小検知粒子径 (μm)	0.3
最大検知濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	600
サイズ (mm)	52 × 45 × 22

3. 標準粒子測定による小型 PM2.5 粒子の計測の高精度化

PM2.5 の環境基準は、質量濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) の単位が用いられ、「PM2.5 の粒子の濃度は1年平均値 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下 かつ 1日平均値 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下」というように定められています。そこで、粒子測定器として PM2.5 粒子の光散乱強度を、環境基準となっている質量濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) に換算する必要があります。図 3 に示すように、大きな粒子では、濃度がほぼ質量濃度に比例するため、換算は簡単であるが、PM2.5 のような微小な粒子では、粒子径が検出光の波長 (約 $0.6\mu\text{m}$) に近くなるになると、光散乱強度は急激に小さくなり、粒子の質量に比例しなくなります。その様子を図 3 に示してあります。したがって、光散乱強度から質量濃度を算出するのは、単純に比例計算では済まなくなります。特に、微小粒子の寄与が過少に評価されてしまいます。

そこで、今回、粒子による光散乱強度から、質量濃度を算出する方法をより精密なものにしました。正確な粒径の粒子のみを発生させて、その粒子による光散乱強度を測定しました。粒子を噴

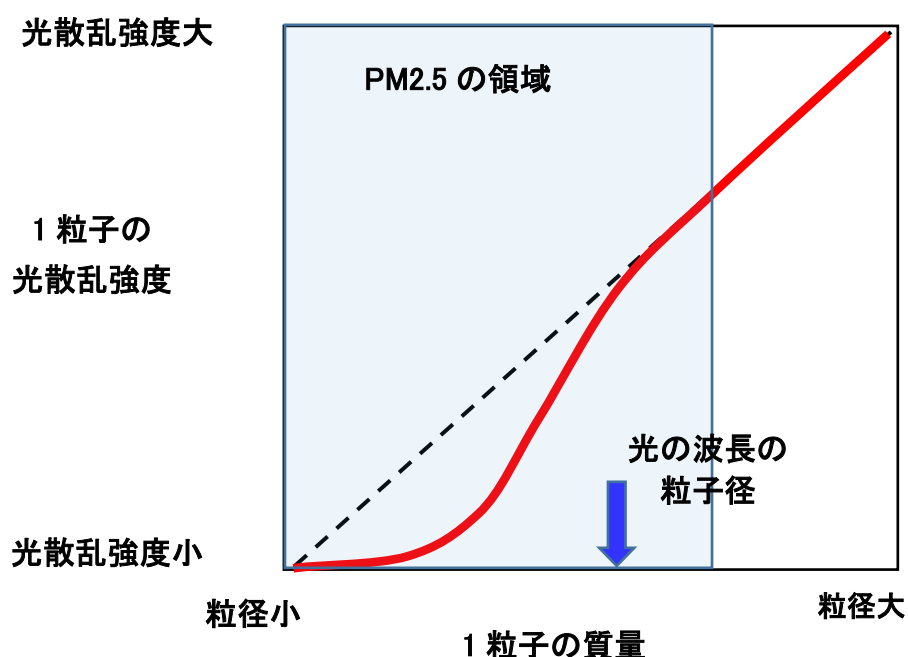


図 3 粒子の光散乱強度と質量濃度の関係

霧させた時に2個や3個の多数の粒子が一緒に張り付いた粒子が多くできるので、正確な粒子径の粒子のみを発生させるのは大変難しいです。

本研究では、図4に示す高度な粒子選別の装置を同時に2種類用いました。標準粒子の高分子の粒子を噴霧させる部分、静電気と空気の粘性で粒子の大きさを分ける装置(静電分級器)、高速で回転して遠心力と静電気力をバランスさせて特定の粒子径を選別させる装置(APM)の二重の選別器を用いました。図5に示すように、標準粒子を噴霧させただけでは、二量体や三量体などの多量体がたくさんあって、特定の粒子径の選択的な分布になっていません。高度な2種類の分級器を直列に用いて使用することにより、粒子径のきちんと決まっている標準空気サンプルを生成させました。このサンプルを用いて小型PM2.5計測器の測定値の光散乱強度と粒子質量との関係を明確にした。様々な粒子径で光散乱強度から質量濃度への換算係数を実際に測定しました。

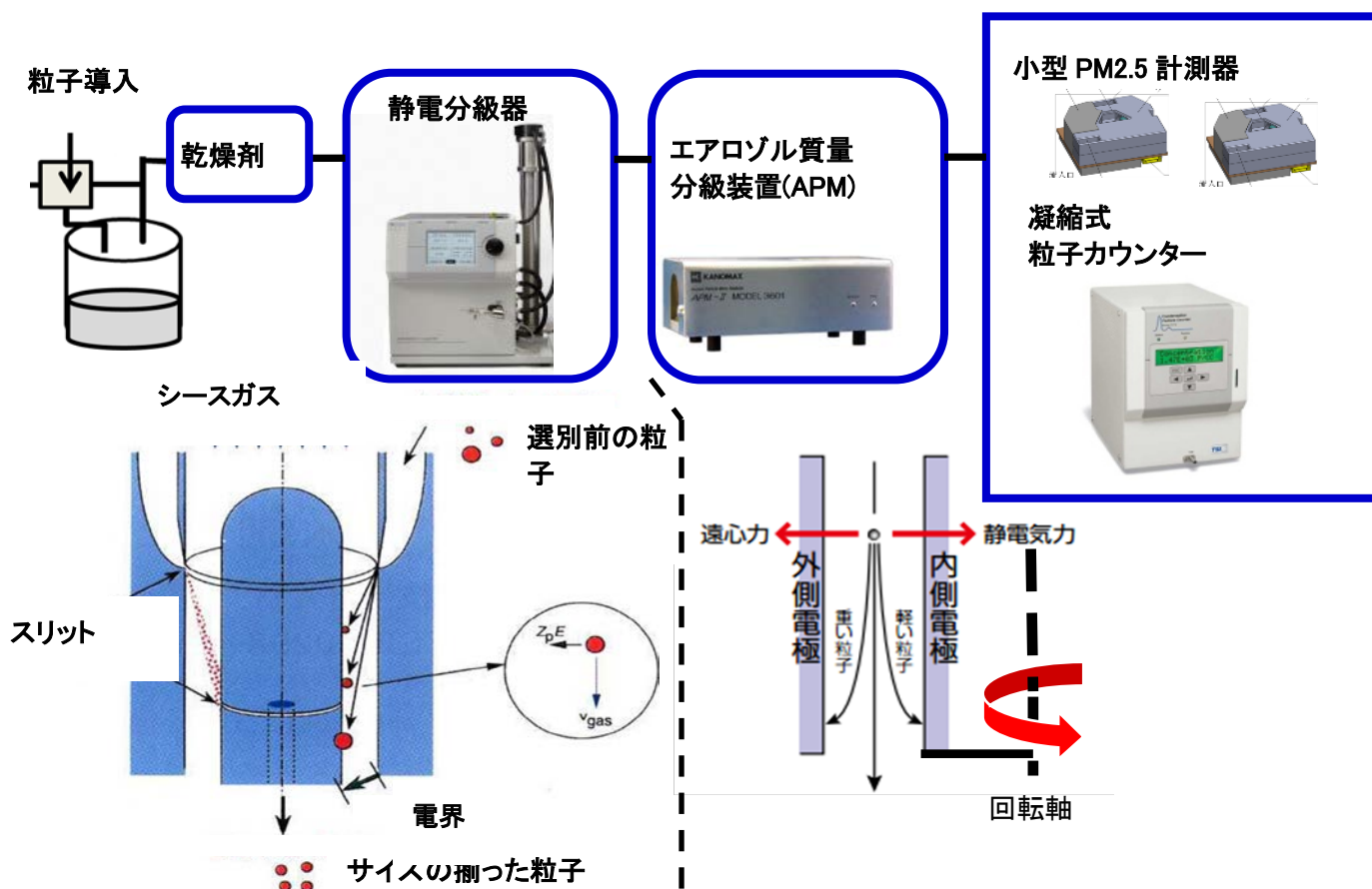


図4 粒子径選別を行い正確な粒子径の標準サンプルを生成する装置

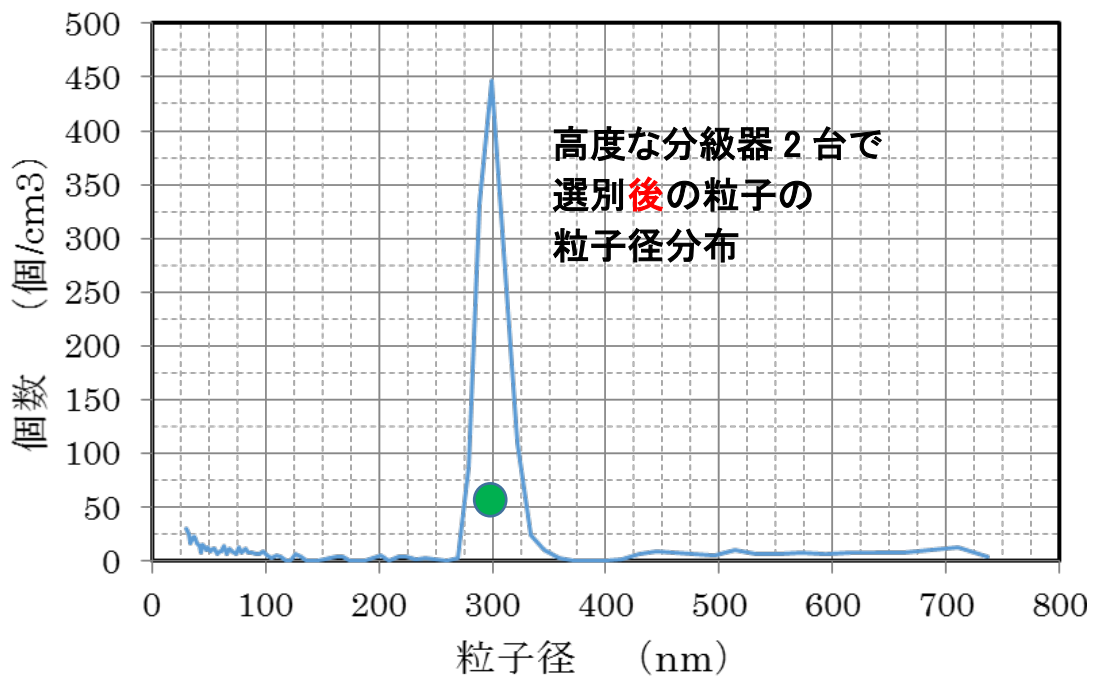
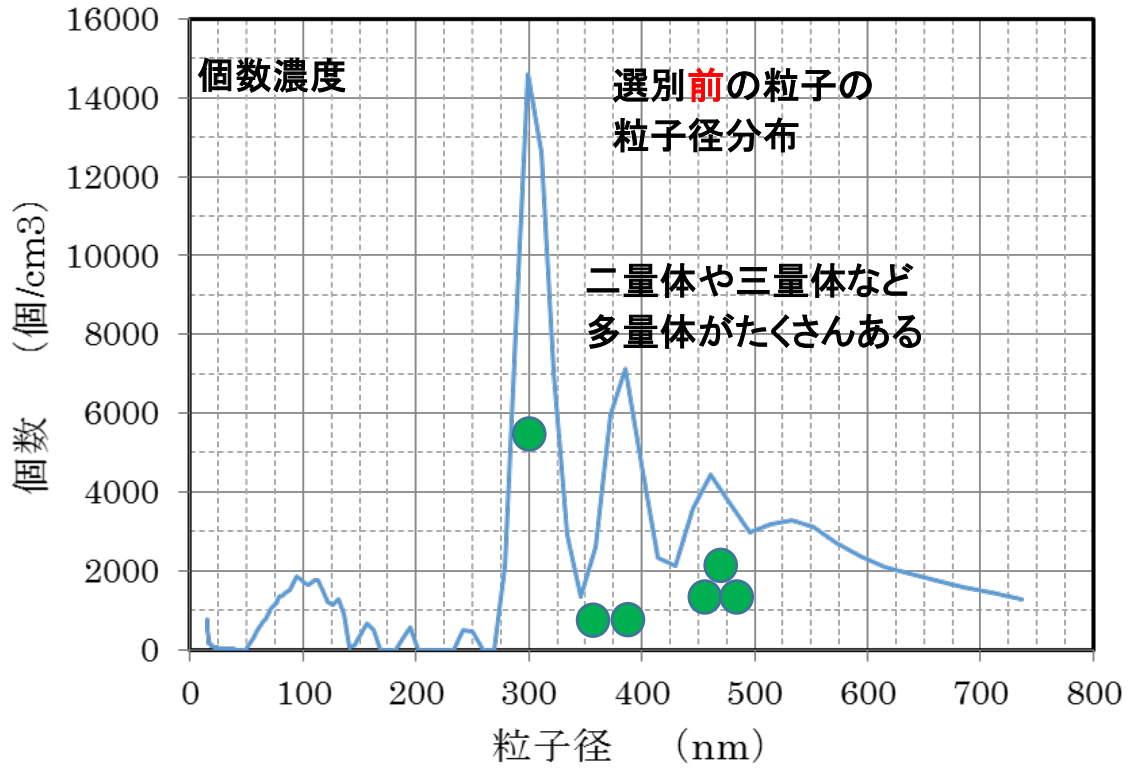


図5 上記の図4に示した装置を用いて正確な粒子径選別を行った時の粒子径分布。これにより開発したPM2.5測定器の粒子径別の光散乱強度を正確に求めた。

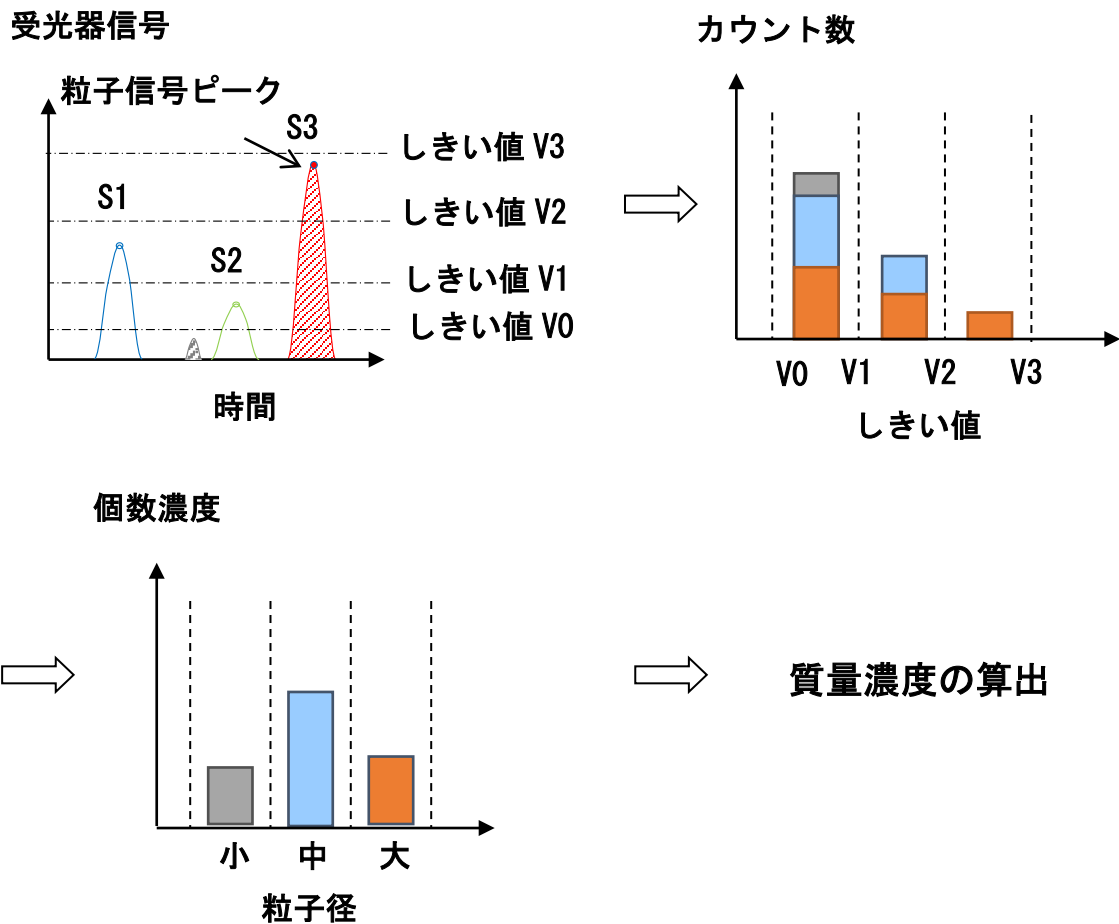


図 6 PM2.5 粒子の光散乱強度から、より正確に質量濃度を導出するアルゴリズム。

さらに図 6 に示すような 1 つずつの粒子による光散乱強度から粒子径を推定して、質量濃度を算出する新しいアルゴリズムを開発しました。また、本開発では高濃度領域においても高精度計測を可能とするため、独自のアルゴリズム技術を開発しました。このため、表 1 に示すように $600\mu\text{g}/\text{m}^3$ の非常に高濃度まで測定できます。

4. 開発した小型 PM2.5 計測器の特性の測定結果

次に、大阪府門真市のパナソニック株式会社構内の屋上で観測したフィールド試験データ(2/3 ~5/28 の 114 日間における 1 時間値、サンプル数:2468)を図 7 に示します。開発した小型 PM2.5 計測器と、国や自治体で環境計測に用いている公定法である大型の PM2.5 自動測定機 (Thermo Fisher 社 5030 型)とで同時に測定しています。フィールド試験の相関性評価結果を図 8 に示します。相関係数 R として 0.82 が得られ、高い相関性を有していることを実証しました。

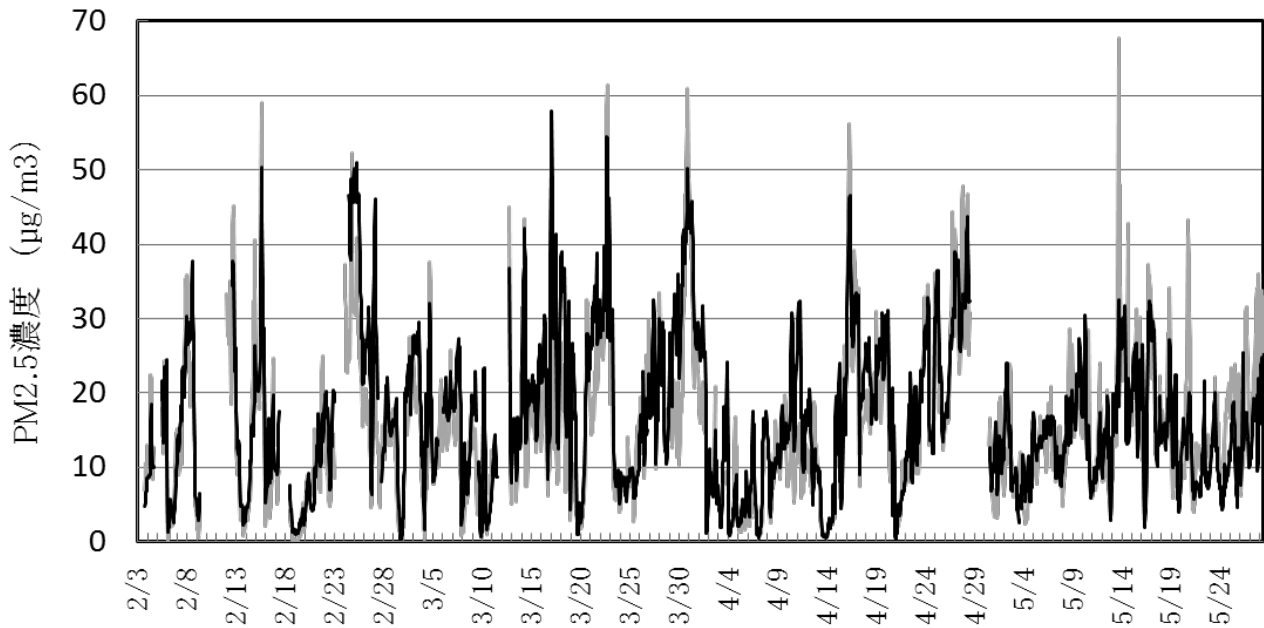


図7. フィールド試験結果(2015/2/3~2015/5/28)。公定法の大型のPM2.5自動測定機(Thermo Fisher社 5030型)の測定値(黒線)と、開発した小型PM2.5計測器の測定値(灰色線)。

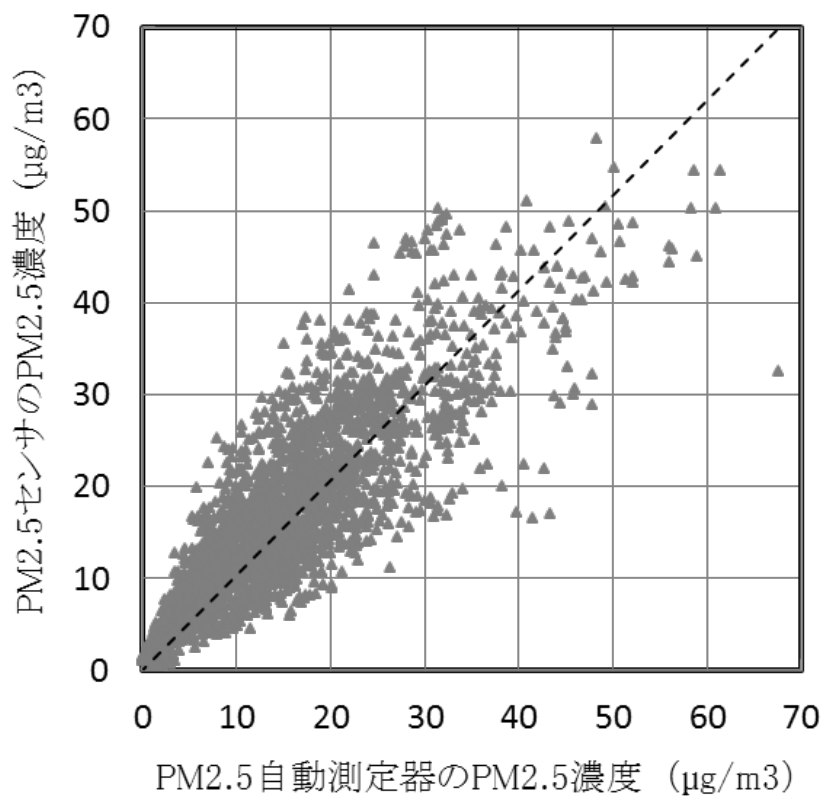


図8. 公定法の大型のPM2.5自動測定機(Thermo Fisher社 5030)の測定値と、開発した小型PM2.5計測器の測定結果として高い相関が得られた。

5. 今回開発した小型 PM2.5 計測器の応用

今回開発した小型 PM2.5 計測器の応用のひとつは、空気清浄機の製品への応用があります。空気清浄機に内蔵して PM2.5 粒子の状況をモニタすることが可能となります。図 9 にパナソニックで開発した空気清浄機を示します。

もう一つは、PM2.5 の動態解明への応用がある。1 個あたりの PM2.5 計測器のコストが 1/100 くらいになるので、様々な PM2.5 発生源に対応して、100 倍位の高い密度で様々な場所で多数のセンサによる計測が可能になります。図 10 のように、身近な発生源による局所汚染に対応でき、局所的な大気汚染物質の動態の解明などに応用できます。



図 9 空気清浄機への応用例
(パナソニック社)

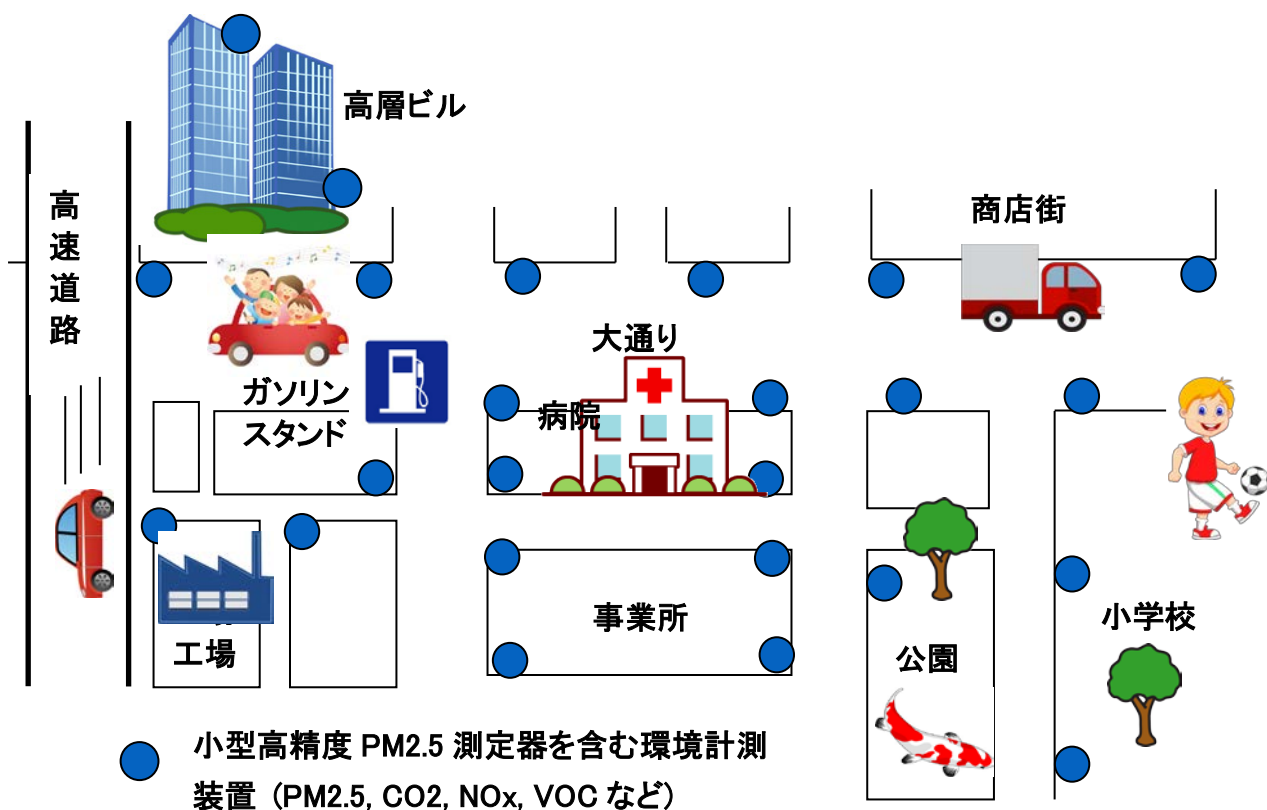


図 10 ローコスト(1/100)なので、高密度で高精度な PM2.5 測定器の環境計測への応用ができる。都市における局所的な大気汚染物質の動態の解明の例。

6. 今後の研究開発

ひとつは、より小さな粒子を検出できる装置の開発を行っています。現在、環境基準の規制値として定められている PM2.5 の質量濃度に対しては、 $0.3 \mu\text{m}$ 以下の粒子はほとんど寄与しません。しかし、そのような微細粒子が健康に影響を及ぼすという報告もあるので、重要ではないというわけではありません。 $0.3 \mu\text{m}$ 以下の微小粒子の計測は非常に難しい。現状では、数 100 万円の機器が必要になります。私達は、なんとか $0.3 \mu\text{m}$ 以下の微小粒子をローコストで精度よく測定できるように技術開発を進めています。例えば、光散乱検出の光源として最近になって低価格になってきた波長 300nm 台のレーザーや LED を使用することにより、より微小な粒子の検出を目指しています。

もう一つは、現在、光散乱の簡便な計測で、PM2.5 の化学成分も推定できる装置の開発を名古屋大学で行っています。粒子の質量濃度だけでなく、有害な粒子が多いのかどうかを判断できるものを開発しています。現状では、PM2.5 に関しては、 1 m^3 に含まれる粒子の重量(重量濃度)で

のみ環境基準が設定されています。質量濃度だけでなく、化学的に危険な成分がどれだけあるかを判定することがこれからは重要になります。単なる砂塵の舞い上がりかどうかを区別したいが、従来の PM2.5 の化学分析では、サンプリングや分析に 1 日かかり、その分析装置は大型で高価です。より小型でローコストの PM2.5 の化学成分を迅速にその場で推定できる機器を開発しています。これにより、身近な環境での PM2.5 の危険性を判定できるようにすることを目指しています。

以上