

自動車排ガス中の微粒子に関する計測法と動向

中村 成男 (株)堀場製作所 技術顧問

はじめに

自動車より排出される微細な固体状・液体状の物質は、粒子状物質 (PM : Particulate Matter) と呼ばれている。近年、このPM排出量が厳しく規制されるようになってエンジンの改良が進み、黒い煙を吐いて走る車はほとんど見かけなくなってきた。PMは排出質量で規制されているが、排出量が少なくなるにしたがって計測が難しくなっている。その一方、健康影響の点で特に問題があるのはPMの中でも質量の小さい微小粒子、との意見もある。このような状況を受けて計測法の再検討が進み、現在ではPMを質量でなく個数で計測するという方向性も出されている。本稿では、このような自動車からの微小粒子の計測技術の動向について紹介する。

PMとは

環境基本法では、人体への健康影響を考慮し、浮遊粒子状物質 (SPM : Suspended Particulate Matter) の環境基準を定めている。SPMは、大気中に浮遊する粒子のうち粒径が $10\mu\text{m}$ 以下の粒子と定義され、粒径 $2\mu\text{m}$ 付近を境に粗大粒子と微小粒子の二山型の分布を示す。このうち、大きい方は土埃などの天然物起源のものが中心で、逆に小さい方は燃焼排出物など人為由来の物質であることが多い。SPMの中でも粒径 $2.5\mu\text{m}$ 以下の

微小粒子状物質はPM_{2.5}とも称され、近年、その有害性が問題視されている。自動車から排出されるPMの大きさは 10nm から数 μm であり、多くがこのPM_{2.5}に属する微小粒子と考えられている。

自動車からのPMはSPMの一種であるが、その実質的な定義は自動車業界固有の計測法によっている。図1に、自動車PMの計測法の概念図を示す。自動車からの排出ガスを「全量希釈トンネル」という装置に導き、空気希釈して温度が 52°C 以下になるようにする。さらに、希釈されたガスの一部をフィルタに通す。このとき、フィルタ上に捕集される物質がPMである。つまり、自動車からのPMは、その物質としての特性で規定されているのではなく、「フィルタ上に捕集されたもの」として定義され、その総質量で規制されている。

図2に、自動車からのPMの模式図を示す。このようにPMは、固体状炭素の粒子からなる核を中心に、炭化水素や硫酸ミストなどが凝集したものとされている。その組成を議論する場合は通常、有機溶剤に溶ける炭化水素、固体のすす、硫化物に大きく区分される。このようにPMの構成物質には、希釈率や温度で凝集の仕方が変化する炭化水素が含まれる上、計測器を校正するための標準PMが定義されていないこともあり、

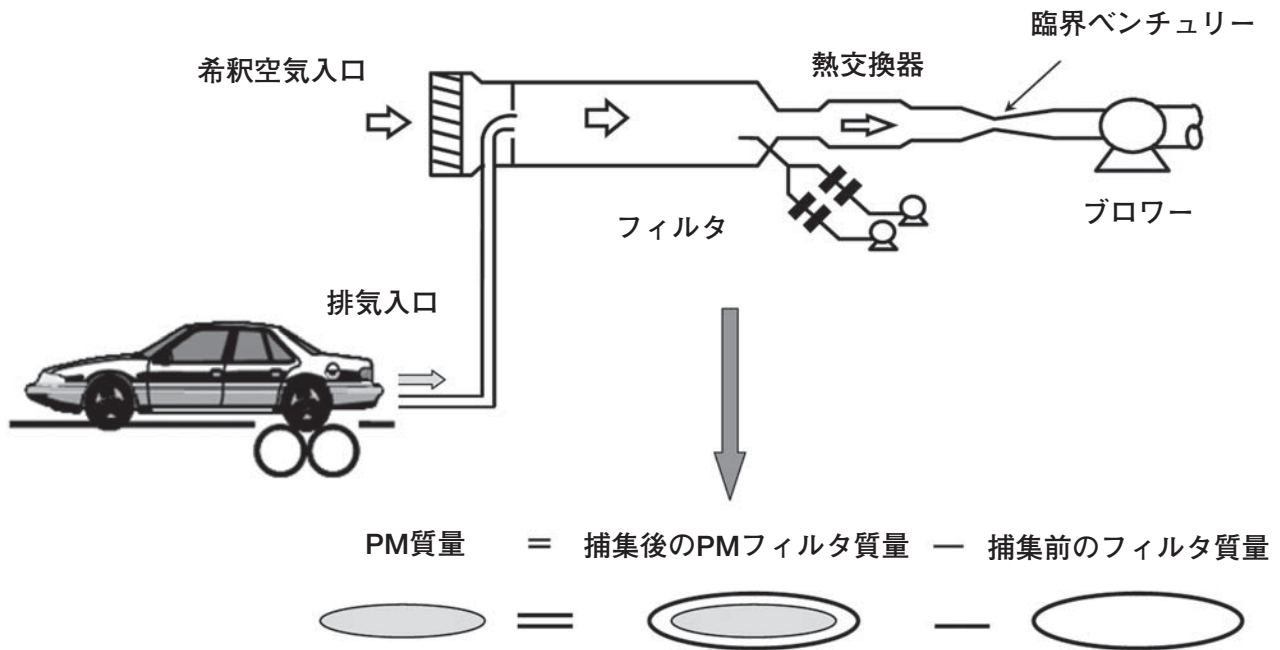


図1 希釈トンネルによるPMの計測法

その計測は大変難しい。また、新聞紙上などですすや黒煙という用語がPMの意味で使われるのを目にするが、すすや黒煙はPMの一部を指すもので、正しい表現ではない。

規制の強化と微小粒子の問題

1999年頃、東京都の石原知事がPMの入ったペットボトルを盛んに振って、PM規制強化を訴えていたことを記憶されている方も多いと思う。実際に、その頃よりPM排出量の規制が厳しくな

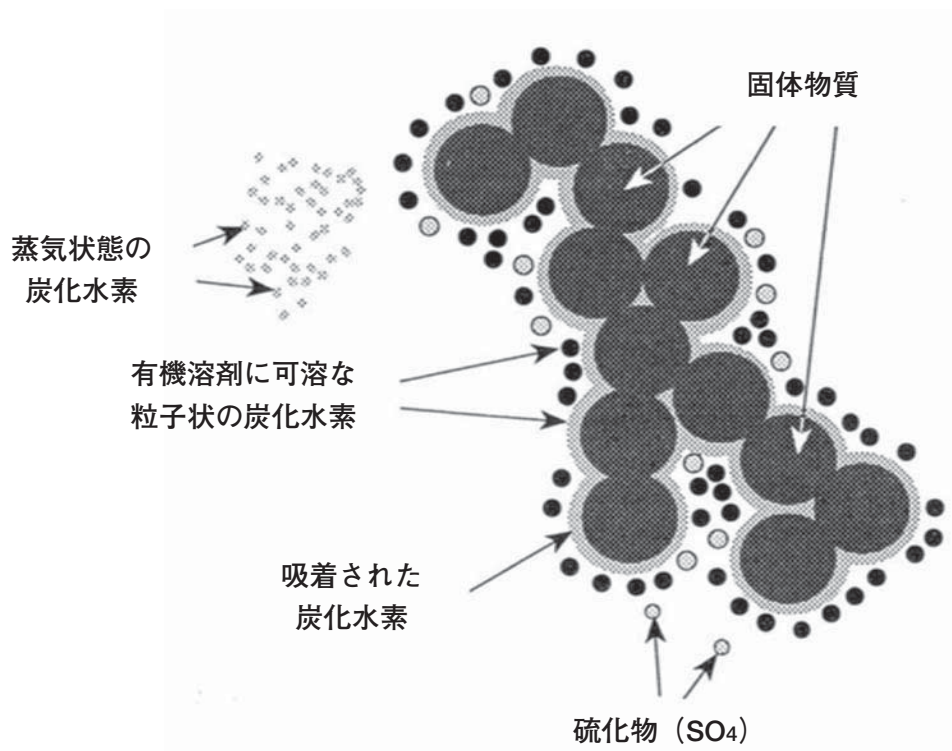


図2 PMの模式図と蒸気状態の物質¹⁾

り、エンジンの燃焼改良や排出ガス後処理装置の技術開発が急速に進んだ。結果として、フィルタ上に捕集されるPMの量が微量になり、風袋であるフィルタに対するPM質量の割合が小さくなって秤量が難しくなってきた。たとえば90 mgのフィルタ上にPMが0.1mg堆積すると、それだけでPM規制値を超えてしまう。日々行なわれているエンジン改良試験においては、規制値のさらに1/100程度の計測が求められるが、このレベルでの測定精度をいかに確保するかが大きな課題となっている。

また最近では、微小粒子ほど人体の呼吸器の奥深くまで進入しやすく、細胞の中まで入り込むリスクがある、との説が注目されるようになった。さらに、このような健康影響は粒子の表面にある物質と人体の反応によると考えられ、影響の度合いが表面積に支配されるとの意見もある。この場合、同じ質量であれば小さい粒子ほど総表面積が大きいいため、より問題となる可能性がある。

以上のように、PM規制強化に伴うPM排出抑制技術の開発により、PMの排出質量計測が難しくなっている。加えて微小粒子こそ規制すべきとの考え方が出され、粒子数を計測しようという動きに発展してきた。

粒子数計測法の検討

粒子数計測の原理は一般の大気計測の分野ですでに実績があり、その応用はさほど困難ではない。ところが、実際のエンジン排出ガスで粒子の粒計分布を計測してみると、小さい粒子の個数が希釈空気の温度条件などで大きく増減し、計数値がたいへん不安定であるという問題が浮上してきた。この現象が精力的に解析された結

果、液状の揮発性物質がこの微小粒子を構成していること、さらに温度条件によって液体粒子になったり気体になったりして計測を不安定にしていることが判明した。このためPMの粒子数を再現性よく計測するには、状態が安定している固体粒子のみを計数するべきとの意見が大勢となってきた。

以上の状況を踏まえ、欧州が中心となって自動車PMの粒子数計測方法が新たに考案された。この方法では、排出ガスを空気で希釈した後、加熱により揮発性粒子を完全に気化させ、さらに希釈・冷却して固体粒子のみを取り出す。この計測装置の試作機を複数の研究機関で持ち回って、計測法の妥当性の評価する試験も行なわれている。この粒子数計測は、微小粒子の計測の必要性が最初の動機となっていながら、結局微小粒子を除去する計測法に落ち着くという、ある意味矛盾した結果となっている。このように、いろいろな問題も包含しているものの、欧州では、試験サイクルを走行した際に排出される粒径23nm~2.5 μ mの固体粒子数（単位：個/km）として、次期規制に取り入れられる予定である。

なお、この計測方法に基づいた粒子数計測機は、掘場製作所でも開発されている。図3に、装置の再現性についてモード走行を用いて確認した例を示す。再現性のよい粒子数計測データがリアルタイムに得られていることが分かる。

自動車からのPMの削減と健康影響の評価

PMに関しては多くの分野で研究が進められている。ここでは、エンジンからの排出量を減らすための技術開発動向と健康影響に関する検討について紹介する。

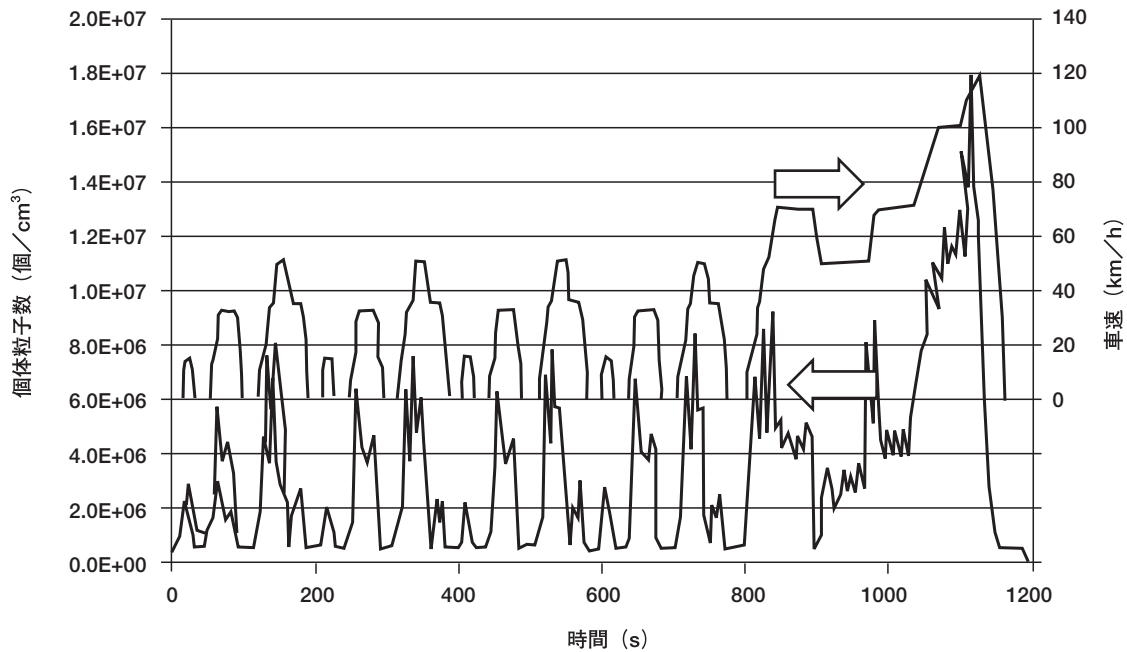


図3 モード走行時のPM計数再現性試験

エンジン内でのPMの発生量を減らすには、燃料をより微粒化し、酸素との混合を促進してよく燃えるようにすればよい。ところが、そうすると燃焼温度が上がり、PMと並んで削減が求められている窒素酸化物（NO_x）が増加してしまう。このように相反する課題があることから、エンジン改良のみでPMとNO_xを同時に削減するのは非常に難しい。これを反映して、現在いくつか実用化されている排出削減方法は、いずれも排気後処理装置と組み合わせたものとなっている。現在の主流となっている方法の一つは、エンジン側でNO_x排出を抑え、PMについては排気管にフィルタ（DPF）を装着してトラップし、たまったPMは適当な周期で燃焼させてフィルタを再生するというものである。また別の方法として、エンジンの燃焼温度を上げてPMの発生を抑制し、その代わりに増加するNO_xを尿素水と触媒を使った後処理装置で削減する方法もある。これ以外には、予混合圧縮着火とよばれる、PMもNO_xもほとんど生成されない新しい燃焼方式が研究されているが、安定して燃焼させることが難しいのが現状である。そのため、本格的な実用化はまだ先になると思われる。

一方、微粒子と健康影響に関する研究も進められている。微粒子を構成する物質が細胞内に取り込まれ、脳に蓄積されたという報告が新聞

紙上をにぎわしたこともあるが、それが本当にPM由来であるとの証明は難しい。現在、疫学的研究、代替粒子によるモデル実験、実際のエンジン排出ガスによる小動物の長期微粒子曝露試験などが進められている。これらはいずれもまだまだ研究途上にあり、結論が得られるまでには時間がかかると思われる。

微小粒子計測の今後

さまざまな分野でナノスケールの技術や現象が話題となる中、PMについてもナノの大きさの微小粒子が関心を集めて研究が進められてきた。しかし、まだまだ多くの課題が山積しているのが現実である。中でもエンジンからのPMが「計測法で定義されたもの」であることが、代替計測法の確立や成分組成の解析を困難にしている。自動車からのPM排出量が極めて微量となった現在、その計測はさらに難しさを増している感がある。質量基準でのPM低減は確実に進んでいるものの、微小粒子の健康影響については未だ不明である。健康影響が大きいことが判明してから規制しても手遅れとの指摘もあり、予防的に排出量を規制する施策なども模索されているところである。

1) J.H.Johnson *et.al.* A Review of Diesel Particulate Control Technology and Emissions Effects. SAE 940233