

エンジン排気管内におけるナノ粒子の挙動

環境研究領域

河合 英直

後藤 雄一

小高 松男

1. 概要

近年,エンジン等から排出される排出微粒子(PM)の中でも特にナノ粒子と呼ばれる粒径100nm以下程度の極微少粒子の人体影響が危惧されている。しかしながら,このナノ粒子は周囲条件に強く影響され,その挙動が不安定であるため計測の再現性を保つことが非常に困難であり,計測手法も確立されていない。

本研究では,エンジンから排出されたナノ粒子が排気管内を移動し,大気に放出されるまでの挙動を計測することによりナノ粒子の特性を明らかにし,安定的に計測する手法を見いだす一助となることを目的とした。

2. はじめに

ナノ粒子はその粒径が非常に小さいが故に現状のPM測定法で規定されているフィルタで捕集しその重量を測定する手法では計測限界に近づきつつあり,誤差が大きく正確な測定が非常に困難である。最近,今後のPM計測法の高度化が議論されており⁽¹⁾。さらにPM粒径の大小により人体への健康影響の度合いやその機構が異なる可能性も示唆されている。

正確な現象の理解には粒子全体での重量等による濃度計測のみではなく粒子個数,濃度,表面積を含めた粒径分布計測も必要であり,近年のナノ粒子に関する研究では,米国ミシガン工科大学のJohan H. Johnsonらが行った大型ディーゼル車両の過渡試験モードでの排出粒子変動の調査⁽²⁾や同じく米国ミネソタ大学のDavid Kittelsonらによる排気ガス希釈過程が粒径分布に与える影響を調べたもの⁽³⁾,大型トレーラーの後ろを追跡して計測器を積んだ車で追跡し排気微粒子を計測したもの⁽⁴⁾,全量希釈トンネルを用いた場合の影響を調べたもの⁽⁵⁾,

ギリシャ国アリストテレ大学 Zissie Samaras らの道路上の実際の通行車両による粒子排出特性を調査した研究⁽⁶⁾,などがある

これらの研究より,自動車排気ガスに含まれるナノ粒子はその挙動が非常に不安定であり,運転状態や計測方法,計測状態さらには計測時の気温や湿度といった諸条件に大きく影響されることが明らかになってきているが,ナノ粒子の生成メカニズムや排気管内,さらには大気放出後の希釈過程におけるナノ粒子の挙動について詳細に研究された例はなく,早急にこれらナノ粒子の生成,希釈メカニズムを明らかにし,安定して再現性のある計測手法を見いだすことが将来のPM規制動向を決定する観点からも要求されている。

本調査では,ディーゼルエンジンから排出された排気微粒子が排気の冷却,希釈過程においてどのように変化していくかを調べ,排気微粒子の生成および成長のメカニズムを明らかにし,正しい計測法を確立する一助となることを目的に研究を行った。

3. 実験装置

実験装置の概略図を図1に,供試機関の主要諸元を表1に示す。コモンレール式直接噴射8リットルディーゼルエンジンからの排出ガスは排気管を通り全量希釈トンネル(フルトンネル)に導かれる。排出されるナノ粒子の粒径別個数分布を,排気管上流からフルトンネル出口にいたる4点において走査型モビリティ粒径分析器(SMPS: Scanning Mobility Particle Sizer, TSI社 model 3936)により計測した。

本研究では,それぞれ過給器タービン出口から,1.1mのサイレンサー手前,2.6mのサイレンサー出口直後,9m後流のフルトンネル入口,13m後流のフルトンネル出口の4箇所に計測点を設定した。排気ガス濃度が高い上流部3箇所の計測点では,ロータリーディ

スク型希釈装置 (Matter Engineering, MD-19⁽⁷⁾) と SMPS を使用し 最も下流のフルダイリュージョントンネル出口の測定点では SMPS のみで測定した。図2に使用したエンジンとガスサンプリング部の写真を示す。

表1 エンジン主要諸元

J08C (平成10年度排気ガス規制適合)

Engine Type	Common Rail Turbo Charged with Intercooler
Bore × Stroke	114 × 130 mm
Total Displacement	7.961 liter
Max Power	191 kW (260ps) / 2700 rpm
Max Torque	745 Nm (76.0kgm)
Max Speed at Full Load	3100 rpm
Idling Speed	550rpm

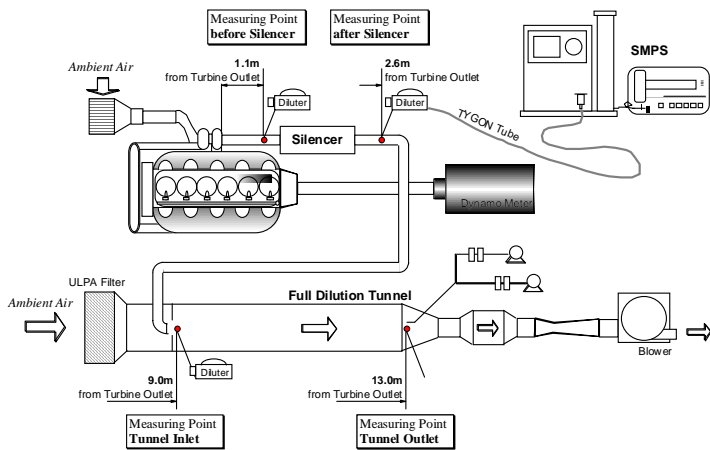


図1 実験装置概略

表2に供試燃料の標準試験成績を示す。燃料中の硫黄分のナノ粒子生成が問題であるが、今後の自動車用燃料規制により軽油中の硫黄含有量は低減されることから、本研究では硫黄含有量 31ppm の低硫黄軽油を供試燃料とした。

表2 供試燃料標準試験成績表

密度 (15) g/cm ³	(JIS K2249)	0.8336
反応	(JIS K2252)	中性
引火点	(JIS K2265)	66.0
動粘度(30) mm ² /s	(JIS K2283)	3.736
流動点	(JIS K2269)	-7.5
10%残油残留炭素 %	(JIS K2270)	0.01
硫黄分 wt.ppm	(JIS K2241)	31
目詰り点	(JIS K2288)	-10.0
セタン指数	(JIS K2204 4.7)	55.1
分留性状 90%留出温度	(JIS K2254)	345.0



図2 供試エンジンと粒子サンプリング部

4. 実験方法

様々な排気ガス温度条件でナノ粒子粒径分布を計測するために以下のような手順で実験をおこなった。

図3にエンジン運転状態と排気ガス温度の関係を模式的に示す。まず始めに比較的高い負荷で一定期間エンジンを運転し排気ガスが所定の温度に達した時点で、エンジン運転を瞬時にアイドリング状態に切り替える。エンジンから排出される排気ガスはアイドリ

ング時の排気組成となるが、エンジン本体および排気管、サイレンサー等の熱容量により、排気ガス温度は急激には低下せず、徐々に低下する。

この現象を利用して、エンジン運転条件はアイドリング一定で、排気ガス温度のみが変化していく条件を作り実験を行った。

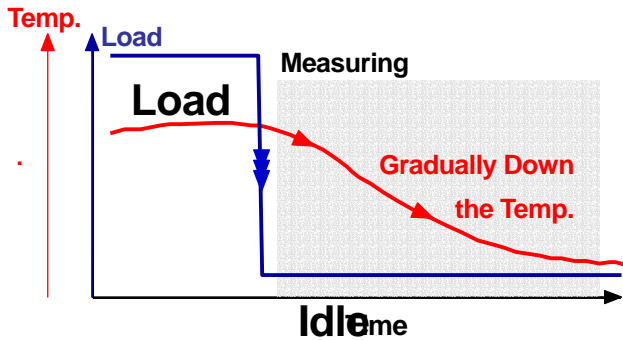


図3 エンジン運転状態と排気ガス温度の関係

図4に計測期間中の各測定点における排気ガス温度変化を示す。SMPSでは1点の測定に2分間を要するため、計測期間中にも排気ガス温度は変化する。本研究では、測定期間中にこのような温度変化があることを考慮した上で解析をすすめた。

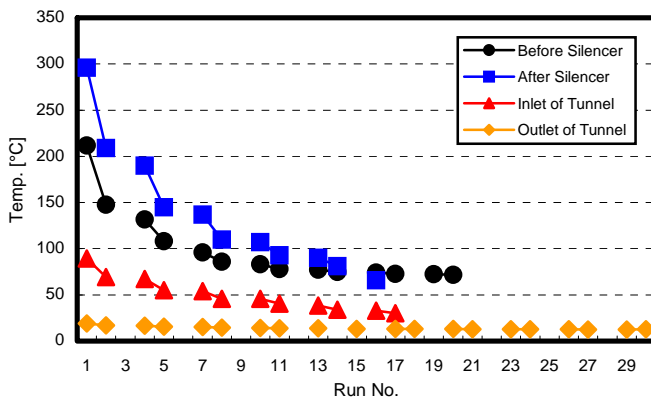


図4 測定期間中の排気ガス温度の変化

エンジン運転条件は、アイドリング条件(550rpm, 0Nm)、低負荷条件(1200rpm, 98Nm)、中負荷条件(1620rpm, 450Nm)そして条件によっては高負荷条件(2160rpm, 588Nm)の4条件で実験を行った。なお、ロータリーディスク型ダイリユータの希釈比は50倍に設定した。

5. 実験結果

排気温度の影響

測定部の温度条件を変化させ、微粒子に対する排気温度の影響を調べた。

温度条件を変化させるためにエンジン本体および排気管が持つ熱容量によって排気ガス温度が緩やかに低下することを利用し、一定のエンジン運転条件で、排気ガス温度のみを変化させた。

図5にエンジンアイドリング運転条件において排気温度を変化させた場合のサイレンサー前測定部(ターボチャージャー出口から約1.1m後流)での粒径分布を示す。粒子数密度は全て希釈前の密度に換算して表示している。

グラフ一番手前に示した排気温度が211と高い場合は、粒径分布はAccumulationモード⁽⁵⁾のみからなるモノモーダルな分布を示すが、排気温度の低下に伴い10nmをピークとするNucleiモード⁽⁵⁾粒子の個数濃度が増大し、粒径分布はNucleiモードとAccumulationモードの二つからなるバイモーダル分布へと変化する。なお、本来ならば、10nm以下の粒径分布も測定すべきであるが、今回は実験装置の都合により10nm以下の粒径については測定できていない。

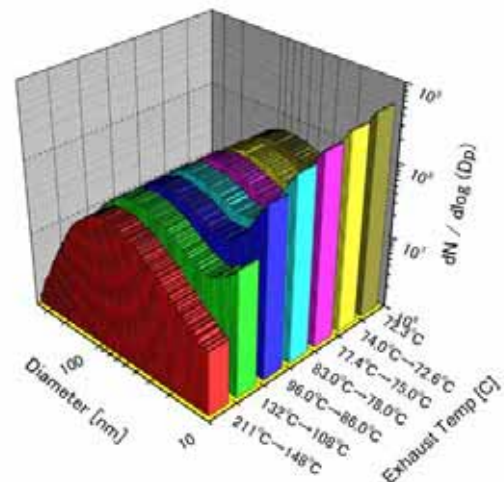


図5 サイレンサー前測定部における排気粒径分布に対する排気温度の影響

図6に全量希釈トンネル出口測定部(ターボチャージャー出口から約13m後流)での測定結果を示す。この測定位置においては、エンジンからの排気ガスはフルダイリユーショントンネルによって希釈されている

ため、サンプルガスはロータリーディスク型ダイリユーターを用いることなく直接SMPSに導入して計測した。本実験条件における全量希釈トンネルの希釈比は約28である。

測定結果は他の計測位置の場合と定性的にはほぼ同様の傾向を示している。これは、トンネル出口でガス温度は20度以下と室温程度に低下しているにも係わらず、エンジン排気弁近くの排気管上流で生成された粒子は、ほぼそのままの粒径分布を保ったままトンネル出口に達していることを示す。しかしながら、トンネル出口の計測結果では、図5に示したサイレンサー前における粒径分布と異なり、排気温度が高い条件でも10nm付近の粒径分布に小さいピークが観測できる。これは、希釈トンネルを用いた希釈とロータリーディスク型ダイリユーターを用いた場合の希釈方法の違いに起因していると考えられる。ロータリーディスク型ダイリユーターは内部での水分等の凝縮を防ぐために希釈器内部を150℃に加熱保温し希釈空気も昇温されているが、それに対して全量希釈トンネルの希釈空気は室温であり、トンネル入口で高温の排気ガスが室温空気により一気に冷却、希釈されることにより少量のナノ粒子が生成したと考えることが出来る。

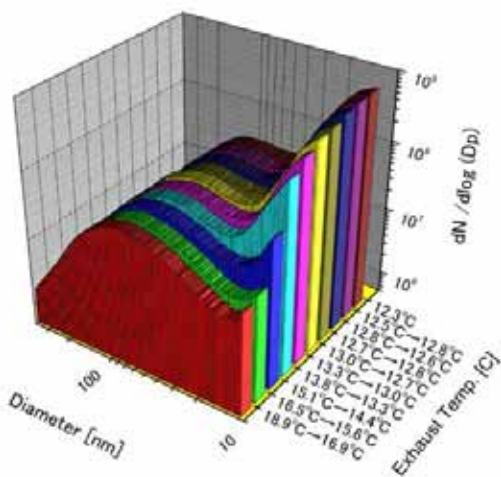


図6 トンネル出口における排気粒径分布に対する排気温度の影響

図7に各測定点における排気ガス温度と粒子個数濃度の関係をNucleiモードとAccumulationモードそれぞれの代表直径を用いて示す。本研究では、それぞれのモードを表す個数濃度分布カーブのピーク粒径

(Nucleiモード：10nm, Accumulationモード：80nm)をそれぞれの代表直径とした。

測定点を移動してもAccumulationモード粒子代表直径は排気ガス温度、すなわち雰囲気温度によらずほぼ一定の値を示すが、Nucleiモード粒子は周囲温度が高くなるにしたがって個数濃度が減少し、特に排気管上流部の温度が低い場合ほど多数のナノ粒子が生成され、いったん生成されたナノ粒子は、低温の排気管下流へ移動しても大きくは減少しないことがわかる。このことからNucleiモード粒子はエンジン排気弁から排出された後の排気ガスの冷却履歴によりその生成が大きく影響を受け、エンジン排気弁から放出された排気ガスが急激に素早く冷却される方が、比較的高温(200以上)で時間をかけて緩やかに冷却される場合よりも生成されるNucleiモード粒子は多くなり、さらに、一旦エンジン排気弁直後で急激に冷却され生成したNucleiモード粒子は、その後比較的時間、広い温度範囲において存在し続けると考えられる。

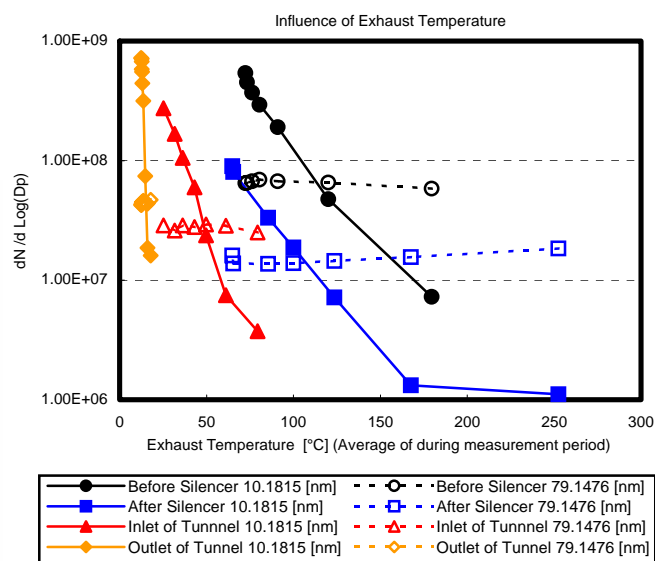


図7 排気温度の影響

エンジン運転状態の影響

次にエンジンの運転条件が排出微粒子の粒径分布に与える影響について調べるために、エンジン運転条件をアイドリング運転、低負荷、中負荷および計測条件によっては高負荷と変化させた場合のサイレンサー後およびダイリユーシヨントンネル出口測定位置における粒径分布をそれぞれ図8, 9に示す。

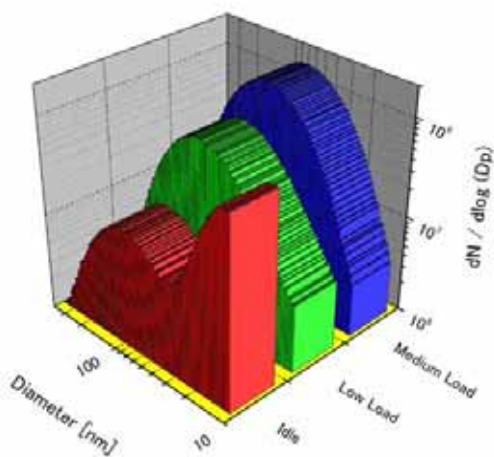


図8 サイレンサー後測定部における粒径分布に対するエンジン負荷の影響

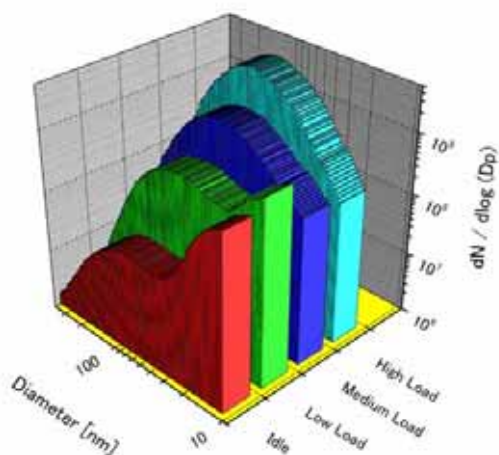


図9 トンネル出口における粒径分布に対するエンジン負荷の影響

双方のグラフを比較した場合、低負荷条件での粒径分布に差が見られるが、これは前述のロータリーディスク型ダイリユータ使用の有無による差と考えられる。

どちらの測定位置においても、エンジン負荷の上昇に従い、粒径 80nm をピークとする Accumulation モード粒子は増加しているのに対して、粒径 10nm をピークとする Nuclei モード粒子はそのピークが消失し、Accumulation モード粒子の粒径分布曲線の裾野に埋もれてしまっている。このような場合、10nm 付近の粒径粒子が Nuclei モードにより生成された粒子なのか、

そうでないのかを粒径分布データのみから判断することは難しい。

図 10 にエンジン負荷の違いによる排気微粒子個数濃度の変化を、それぞれのモードの代表径を用いて表した。点線で示した Accumulation モード粒子が負荷の上昇と共に大きな値を示し、図 9, 10 に示した Accumulation モード粒子の挙動を正しく表現できているが、実線で示した粒子径 10nm の個数濃度の値は、Nuclei モード粒子の動向を正しく表しているかどうかは現時点では明らかでない。

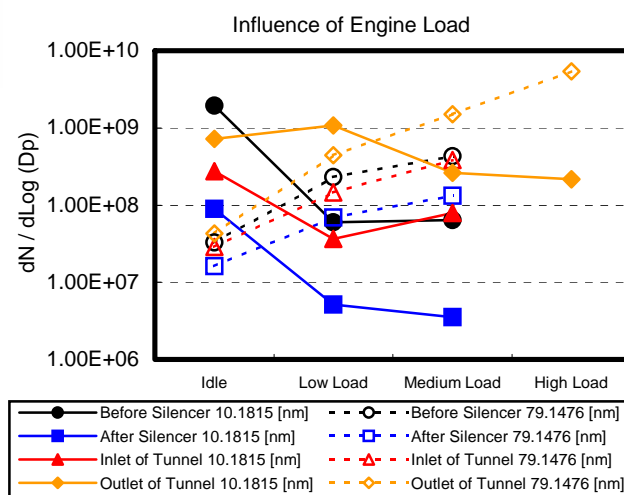


図 10 エンジン負荷の影響

6. まとめ

以上の研究より Nuclei モード粒子はエンジン排気弁から排出された後の粒子の冷却履歴によりその生成が大きく影響され、エンジン排気弁から放出された排気ガスが急激に素早く冷却される方が、比較的高温 (200 以上) で時間をかけて緩やかに冷却される場合よりも多量の Nuclei モード粒子が生成されることが明らかになった。さらに、Nuclei モードと Accumulation モード、それぞれのモードを代表する粒子径が存在し、それぞれの代表径の排出粒子濃度を用いることで、エンジンからの粒子排出状況を評価できる可能性が高いと考えられる。

参考文献

- 1) Particle Measurement Program (GRPE/PMP):
Health Effects, Measurement and Filtration of
Solid Particles emitted from Diesel Engines, 2001
- 2) David B. Kittelson, John H. Johnson: Variability in
Particle Emission measurements in the Heavy
Duty Transient Test, SAE Paper, No.910738,
1991
- 3) Imad Abdul-Khalek, David Kittelson, Fred Brear:
The Influence of Dilution Conditions on Diesel
Exhaust Particle Size Distribution measurement,
SAE Paper, 1999-01-1142, 1999
- 4) David Kittelson, Jason Johnson, Winthrop Watts,
Qiang Wei, Marcus Drayton, Dwane Paulsen,
Nicolas Bukowiecki: Diesel Aerosol Sampling in
the Atmosphere, SAE Paper, 2000-01-2212, 2000
- 5) Qing Wei, David B. Kittelson, Winthrop F. Watts:
Single-Stage Dilution Tunnel Performance, SAE
Paper, 2001-01-0201, 2001
- 6) Samaras, Zisis: CHARACTERISTION OF
EXHAUST PAERTICULATE EMISSIONS
FROM ROAD VEHICLES, FISITA 2002, Paper
Code: F02E331, 2002
- 7) M. Kasper, U. Matter, H. Burtscher, N. Bukowiecki,
A. Mayer: NanoMet, a New Instrument for
On-line Size- and Substance- Specific Particle
Emission Analysis, SAE Paper, 2001-01-0216,
2001