

## 論文の内容の要旨

論文題目： 船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質の  
粒径分布計測に関する研究

氏 名： 佐々木 秀次

ディーゼル機関は他の熱機関と比べて単体での効率が最も高く、単位出力当たりの二酸化炭素の排出が少ない。低速、中速機関では、低質な燃料も使用が可能であることから、経済性にも優れている。そのため、船舶の主機関、発電機関としては、最も多く利用されている。その反面排ガスに含まれる粒子状物質(Particulate Matter, PM)、窒素酸化物(Nitrogen Oxide, NO<sub>x</sub>)、炭化水素(Hydrocarbon, HC)等の有害物質は他の機関と比較して多く、また、船舶では燃料油の硫黄分に起因する硫黄酸化物(Sulfur Oxide, SO<sub>x</sub>)も多い。これらの大気汚染物質に起因する、酸性雨や光化学スモッグ等の環境への悪影響、呼吸器障害や発ガン要因等の健康への悪影響が危惧されている。船用ディーゼル機関から排出されるNO<sub>x</sub>は、その削減手法の研究に伴って様々な形式の機関を対象に排出濃度の計測、排出特性の把握が行われているが、粒子状物質に関しては規制の対象となっていないこともあって、計測例は少ない。また、大気汚染物質の低減対策についても、粒子状物質については検討例が非常に少ない。

粒子状物質 (PM) は JIS B8008-1 にて、ろ過した清浄な空気 で 4 倍以上に希釈し、一次捕集フィルタの直前において、315K(42 ) を超え 325K(52 ) 以下まで希釈した排気から、決められたフィルタ上に捕集するすべての物質と規定され、フィルタ重量による評価が行

われてきた。しかし、自動車の分野では、近年 PM 排出量が少なく重量評価が難しくなったことや、計測技術の進化によって、PM の個数濃度計測、粒径分布計測の研究が多く行われている。また、欧州では PN 値(Particle Number, 個数濃度)による規制が開始される。一方、船舶から排出される PM に関しては、これらの研究は少なく、現状 PM の排出量は、主に排ガスを希釈・冷却し、フィルターによる捕集重量の計測で行われている。しかし、PM は粒径別に空中の浮遊時間や人体への影響度が異なるため、これらの把握を行うことは重要かつ急務である。

排ガス中の PM の粒径分布は、排気管内と、大気へ放出された後で異なり、排気管内では、排ガス温度が高く、揮発性物質は凝縮していないと考えられる。また、大気へ放出された排ガスは、大気にて冷却され PM 中の揮発性物質は核生成する。しかし、大気による希釈も同時に行われるため、核生成、凝集の状態は変化し、その影響は明らかではない。そのため、排ガス中の PM の粒径分布の計測は、希釈の過程や、計測条件によって計測結果が変化することが考えられる。

本論文では、船用ディーゼル機関から排出される PM の計測条件が粒径分布に与える影響を明らかにするとともに、粒径分布および粒子濃度を把握することを目的として、船用 2 ストロークディーゼル機関、船用 4 ストロークディーゼル機関から排出される PM を対象に、粒径分布を Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)および Electrical Low Pressure Impactor (ELPI)を 2 種類の計測器を用いた計測を行った。

船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスを対象として、ISO8178-1 および JIS B8008-1 に準拠した希釈トンネルを使用して、凝縮性成分の割合が高い、SOF 分割率が最も高い発電機特性の低負荷率時(負荷率：30%)の排ガスを対象に、希釈トンネルにおける希釈率、希釈空気温度を変化させ粒径分布の計測を行った。続いて、発電機特性上で、PM 濃度、SOF 分割率とも、低負荷率時より低い負荷率 75%の排ガスをを用いて同様の検討を行った。

発電機特性の負荷率 30%の排ガス中の PM 粒径分布は粒径 60 nm 付近に個数濃度のピークを持ち、このピークは、希釈トンネル希釈率の増加により粒径が小さい方へシフトする。また、希釈率を考慮した排気管内の排ガス濃度に換算した場合においても希釈空気温度の上昇によりピーク値は減少する。また、SMPS によって計測した総個数濃度は希釈率の上昇によって高くなる。発電機特性の負荷率 75%の排ガス中の PM は、粒径 50 nm 付近および粒径 150 nm 付近に個数濃度のピークを持つバイモーダルな粒径分布となる。粒径の大きい方のピークは希釈トンネル希釈率、希釈空気温度によって変化しない。粒径の小さい方のピークは、希釈空気温度が低いほど、また希釈トンネル希釈率が高いほど濃度が高くなる。希釈条件によって変化する個数濃度のピーク値では、希釈空気温度が低いほど、個数濃度のピーク値が高くなるのは、SMPS によって計測されなかった SOF 分が、希釈空気温度の低下によって凝縮し、粒子となることで粒径 50~70 nm 程度の粒子が出現したためだと考えられ、また、希釈率が低いほど、個数濃度のピーク値が小さくなり、かつモード径が

大きくなるのは、希釈率が低い場合には、希釈トンネル内での粒子濃度が高いため、ブラウン運動による凝集もしくは粒子同士の衝突が頻繁に生じることによると考えられる。SMPS の計測粒径範囲において SOF 分割の高い排ガスでは、希釈トンネルの希釈条件によって個数濃度とともに重量濃度にも変化があるが、SOF 分割の小さい排ガスでは個数濃度、重量濃度ともに希釈条件の影響が少ないと考えられるとともに、希釈率が高い程、ピークが変化したのは、揮発性成分は希釈されるほど核生成される粒子数は減少すると考えられるが、希釈トンネルの希釈率が 8~12 程度では、希釈による濃度低下より希釈空気による冷却が大きく影響したためである。希釈トンネルの希釈率によって計測される濃度は大きく変化するが、その変化は主に粒径が 500 nm 未満であり、重量濃度には大きく影響していない。また、SMPS の個数濃度と、数種類の粒子密度を仮定した ELPI の個数濃度を比較すると、ELPI では粒径 500 nm 以下の PM の密度は 0.1 g/cm<sup>3</sup> 程度として扱う必要があると考えられる。

船用 4 ストロークディーゼル機関から排出される排ガスを対象に、ホットダイリユーシオンによって排ガスに含まれる粒子状物質の粒径分布の計測では、機関は船用特性及び発電機特性の 2 種類の負荷特性において、それぞれ低負荷率から高負荷率の 4 負荷率の排ガスを対象に計測を実施し排ガスに含まれる PM の粒径分布を明らかにした。また、ホットダイリユーシオンの計測結果と希釈トンネルによる希釈を比較した。

ホットダイリユーシオンによって SMPS で計測を行った結果、計測される粒子状物質の粒径分布は発電機特性の低負荷時を除き、モード径が 100~120 nm のモノモーダルな粒径分布となる。発電機特性の低負荷時には、希釈倍率によって小粒径領域の核生成状況が大きく変化することから揮発性成分が多く高濃度で含まれることが確認出来る。

ホットダイリユーシオンと希釈トンネルによる希釈排ガスを比較すると、揮発性成分が高濃度である発電機特性の負荷率 30% では 100 nm 以下の粒子で大きく増加する。また、発電機特性の負荷率 75% の排ガスでは、40 nm 以下の粒径で濃度の上昇が見られたが、それ以上の粒径において濃度の低下が確認された。SMPS によって計測した粒子の総個数濃度では、単位体積あたりでは船用特性の 75% にて極大値となった。総排出個数では負荷率が高い程高い値となったが、排出個数率では低負荷率ほど高い濃度となること明らかとなった。船用 4 ストロークディーゼル機関から排出される PM は排気管内の排ガスにおいて個数濃度は粒径 200 nm 未満にピークを持つ分布であり、粒子の大部分が非常に小さい核で形成されている。

船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される排ガスを対象に、ホットダイリユーシオンおよび希釈トンネル希釈を行い排ガスに含まれる粒子状物質の粒径分布を計測を行い、ホットダイリユーシオンおよび希釈トンネルによる希釈時の粒径分布の計測を行った。

負荷率 50%、75% ともに粒径 38nm をモード径とするモノモーダル分布であり、大部分

の粒子が粒径 100nm 以下である。

ホットダイリューションによって同負荷率の船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスと船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスを比較すると、船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される粒子状物質は粒径の小さい方にピークを持ち、ピーク濃度も高い。kWh あたりの排出個数率も船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスの方が高いことが明らかとなった。ホットダイリューションによって計測した粒径分布と比較し、希釈トンネル内の粒子生成を確認した所、生成される粒子は大部分が 100 nm 以下である。船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスと比較した場合、船用 2 ストロークディーゼル機関から排出される個数濃度は高く、かつ小さい粒径がピーク濃度となる。

燃料油の違いが計測される粒径分布に及ぼす影響を確認するために、船用 2 ストロークディーゼル機関を HFO(Heavy Fuel Oil)を燃料油として船用特性の負荷率 50 %で運転し、粒径分布の計測を実施した。希釈はホットダイリューションおよび希釈トンネルと 2 次希釈器により行った。ホットダイリューションでは、SMPS によって計測を行い、希釈トンネルによる希釈では SMPS とともに ELPI による計測を実施した。また、A 重油による運転時の負荷率の排ガスとの比較を実施した。

HFO にて運転した排ガスを対象にホットダイリューションによる希釈排ガスを SMPS によって計測した粒径分布では、粒径の最も小さい粒径 10 nm と 70 nm にピークを持つ分布となる。HFO による運転時の排ガスでは核生成が活発に発生し、かつ計測系において検出部である CPC に近い箇所においても核生成があると考えられる。

HFO による運転時の排ガスと A 重油による運転時の排ガスを比較すると、個数濃度に大きな差は無いが、HFO 運転時の方がモード径は大きく、重量濃度が高い。希釈トンネルによる希釈排ガスでは、A 重油による運転時の排ガスの方が個数濃度のピーク値は高い。希釈トンネル内の粒子生成状態では、粒径 40 nm ~ 90 nm の粒径範囲では A 重油による運転時の排ガスの方がきわめて多くの粒子が生成されることが明らかとなった。