静電サイクロン方式集塵による船用ディーゼル機関の PM 低減*

－ 縦型静電サイクロン方式集塵装置による船用 2 ストローク

ディーゼル機関の PM 低減

佐々木 秀 次** 塚 本 達 郎**
古 堅 宗 勝*** 牧 野 義 ****

Development of Electrostatic Cyclone Precipitator for Marine Diesel Engines
- PM Reduction with Vertical Type ESP-cyclone System in Exhaust Gas
from Two-Stroke Marine Diesel Engine

By Hidetsugu SASAKI, Tatsuro TSUKAMOTO, Munekatsu FURUGEN, And Tadashi MAKINO.

Particulate matter (PM) produced from diesel engines has several serious effects on human health and the environment. Black Carbon (BC) in PM falls on sea ice in high-latitude regions promotes sea ice melting. Then marine diesel engines are strongly required to reduce PM emissions in exhaust gas. However, the diesel particulate filter (DPF) has yet to be used in a practical manner for marine diesel engines. In this study, we have developed an electrostatic-cyclone (ESP-C) precipitator system to reduce PM emissions from marine diesel engines. PM concentrations and particle size distributions in the exhaust gas from a two-stroke marine diesel engine at the inlet and outlet of the ESP-C system were measured to investigate the collection efficiency of the ESP-C system. The experimental results showed that the ESP-C system can reduce more than 60 % of PM emissions from the test engine and that cooling of the exhaust gas is effective in improving PM collection efficiency of the ESP-C system. The ESP-C system showed high reduction efficiency for particles under 500 nm in diameter.

1. はじめに

船用ディーゼル機関は、安価な重質油の利用が可能なことや、機関単体の熱効率が高いことから、船舶の主機関、補機関で多く採用されている。

一方で、船用ディーゼル機関から排出される有害物質として窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)、PM(粒子状物質)等が挙げられる。国際海事機関(IMO)では、船舶から排出される NO_x 、 SO_x の排出量について段階的に規制¹⁾を強化しており、 NO_x に関しては SCR による後処理や機関からの排出を低減する EGR システムの利用や水混合エマルジョン燃料の利用²⁾、 SO_x に関しては燃料油の低硫黄化や、排ガスの SO_x を低減するスクラバの技術開発とその水処理システムの開発等³⁾が盛んに行われている。

一方、現在では一部の海域を除いて排ガス中の粒子状物質に関して直接的な規制は実施されていないものの、2010 年に行われた IMO の MEPC 60 (海洋環境保護委員会)において北極域におけるブラックカーボ

ン(BC)の影響に関する問題提起が行われ、その後、BC の定義、計測法に関する検討⁴⁾が進められおり、船舶からの粒子状物質低減に関する技術開発も急務であると考えられる。

ディーゼル機関から排出される粒子状物質の低減技術として、自動車用の機関では多くがセラミックフィルターによる集塵方式(セラミック DPF)を使用している。セラミック DPF はセラミックのハニカムフィルターによって排ガス中の粒子を捕集する。捕集後の粒子の加熱燃焼等によってフィルターの再生を行い再度使用するが、自動車用機関と比較して 1 回の運用時間が長時間で重質油が燃料油として使用される船舶では、この使用法と運用法が難しいと考えられる。また、長時間 PM を捕集する場合、セラミック DPF では、粒子の捕集とともに、圧損が増加することによる燃料消費率の悪化も懸念される。さらには、船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質は揮発性成分も多く含まれているため、排ガスが高温で通過するセラミック DPF では一部が粒子化せずにそのまま通過し大気へ排出されると考えられる。このような課題から、静電集塵技術とサイクロン集塵技術を組み合わせ

* 原稿受付 平成30年11月13日。

** 正会員 東京海洋大学(東京都江東区越中島2-1-6)。

*** 正会員 古堅・牧野技術研究所。

**** 古堅・牧野技術研究所。

た集塵システムの開発と高効率化を進めている。既往の研究^{5,6)}では、船用4ストロークディーゼル機関のPM低減を対象に実験を行い、高い捕集効率を確認した。本報では、PM中のSOF分割割合が高い船用2ストロークディーゼル機関の粒子状物質^{7,8)}の低減を目的に、縦型の静電サイクロン集塵実験装置を製作した。その実験装置を使用して、陸上に設置された船用2ストロークディーゼル試験機関を使用して、捕集効率計測、粒径分布計測を行う台上試験を実施した。

2. 静電サイクロン方式集塵の概要

静電集塵装置は、主に放電電極もしくは放電線と集塵壁から構成され、圧力損失が小さく、粒径の小さな粒子の集塵に適しているが、集塵壁面に捕集された粒子が電子を放出することで流れに再飛散することを考慮する必要がある。サイクロン集塵装置は、粒径の大きい粒子や密度の高い粒子の捕集に適しているが、粒径の小さい粒子では捕集率が低くなる。

図1に静電サイクロン方式集塵の概要を示す。静電サイクロン方式集塵は、主に静電集塵装置(以降、静電集塵部と記す)とその下流に設置するサイクロン集塵装置(以降、サイクロン部と記す)で構成され、処理対象の排ガスは最初に静電集塵部に流入する。静電集塵部では、負の高圧直流電圧を印加した電極からのコロナ放電によって排ガス中の粒子を帯電させる。帯電した粒子は、電極と集塵壁間の電界によって集塵壁へと引きつけられ壁面へ捕集される。壁面に捕集された粒子はある程度の厚みが堆積すると、排ガス流によって塊として剥離もしくは再飛散をする。塊となること、すなわち粒径の大きい粒子となることで下流のサイクロン部で捕集される。このように、粒径の小さい粒子の

Fig. 1 Schematic of the electrostatic-cyclone system and the PM collection mechanism.

Table. 1 Specifications of the test engine

Name	3UEC37LA
Bore	370 [mm]
Stroke	880 [mm]
Cylinder number	3
Output	1,103 [kW]
Engine speed	188 [rpm]

捕集を得意とするが再飛散のある静電集塵技術と、粒径の大きい粒子の捕集を得意とするサイクロン集塵技術の利点と欠点を相互に利用する方式である。

3. 船用2ストローク機関による台上試験

3.1 実験装置の概要

実験装置の概要を図2に示す。実験装置は供試機関(Test engine)、排ガスの熱エネルギーを回収する熱交換器(Heat exchanger)、静電サイクロン方式集塵装置で構成される。供試機関の概要を表1に示す。供試機

Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

関は船用2ストローク低速ディーゼル機関(3UEC37 LA, 1103 kW, 188 rpm)である。供試機関の排ガスは、熱交換器(水冷式)によって冷却され、静電集塵部、サイクロン集塵部の順番に通過する。

静電集塵部は内寸(排ガス流路)断面が、226 mm × 236.4 mm であり、流れ方向の長さが1,211 mm である。本研究では、静電集塵部内の排ガス流れ方向が、鉛直上方となるように設置した。静電集塵部には、排ガス流れ方向断面中心に放電線を放射状に固定した放電電極棒を設置した。静電集塵部における放電電極棒の固定は、中空のアルミナセラミック管の内部に電極棒を通し、内外を固定することで行っており、アルミナセラミック管の外周は、沿面放電を防止するためにシールガスによって表面を汚れから保護している。また、サイクロン部のサイズは、最大直径160 mm、高さ1200 mm である。

集塵装置通過時の排ガス中の粒子状物質の変化を観察できるように、図中に示す2カ所(図2内 P-1, P-2, 以降、サンプリングポイントと呼ぶ)から排ガスサンプリングを行えるようにサンプリングプローブとトランスファーチューブを設置した。サンプリングプローブは、各サンプリング箇所の排気流路断面の中心に挿入した。また、トランスファーチューブはヒーティングチューブとなっており、チューブ内における排ガス中水分の凝縮・結露、温度低下による粒子状物質の堆積生成を低減している。

3.2 粒子状物質の計測概要

本研究ではフィルターによる質量濃度、Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) によるモビリティ粒径分布、Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) によるエアロダイナミクス粒径分布を対象に粒子状物質の計測を行った。

a) フィルターによるPM濃度計測

フィルターによるPM濃度計測は、ISO 8178-1⁹⁾に準拠した方法で行った。本研究では各排ガスサンプリング箇所から希釈トンネル内にトランスファーチューブを経由して排ガスの一部を導く(部分希釈)。希釈トンネルでは、濾過した清浄な希釈空気によって、排ガスは希釈されるとともに冷却される。その後、さらに一部を分流し、フィルターによって粒子状物質を捕集する。希釈冷却された排ガスの温度がフィルターの上流において、47±5℃以内となるように希釈空気流量・温度を調整した。希釈トンネルにおける希釈率はCO₂濃度計(CGT-7000, Shimadzu)によって計測した希釈前排ガス、希釈後排ガス、希釈空気のCO₂濃度から算出した。希釈前排ガスは前述の静電集塵部シールガスによる希釈も考慮し、サンプリングポイントP-1の値を全ての計測で採用している。

使用したフィルターはフロロカーボン被覆のガラスファイバ(TX-40HI, φ47 mm, Pall)であり、捕集前後の秤量は、温度22±3℃、相対湿度45±8%を満たした状態の秤量室に静置後、秤量を行った。フィルターの捕集前後の重量、希釈トンネル希釈率から排ガスの粒子状物質重量濃度を算出した。

b) SMPSによる粒径分布計測

SMPSによる粒径分布計測では、図2に示した排ガスサンプリングポイント(図2内 P-1, P-2)から排ガスをサンプリングし、ロータリーディスク型希釈器(MD19-3E, Matter engineering)にて希釈して計測を行った。使用したSMPS (Model 3034, TSI 製)は、主に静電式分級器(DMA, Differential Mobility Analyzer)と、凝縮粒子カウンター(CPC, Condensation Particle Counter)で構成される。SMPSへ送られた排ガスは、最初にインパクターにより粗大粒子を取り除き、その後、中和器(線源: ²⁴¹Am (241・アメリカシウム))によって粒子が中和されDMAへと流入する。DMA内では印加電圧を変化させることで電場条件を変化させ、内部のスリットへ流入する粒子を分級する。分級された粒子は、凝縮粒子カウンター(CPC, Condensation Particle Counter)によって、光学的に粒子個数濃度として計測される。

c) ELPIによる粒径分布計測

ELPIによる粒径分布計測は、図2に示した排ガスサンプリングポイント(図2内 P-1, P-2)から排ガスをサンプリングし、エゼクタ希釈器(FPS-4000, Dekati)にて希釈して計測した。使用したELPI (ELPI, Dekati)は、粒子に帯電させるためのコロナチャージャー、12段のインパクターで構成される。ELPIに流入した粒子(Particulate)は、最初にコロナチャージャーによって帯電する。帯電した粒子は、インパクターによって空気動力学径で分級される。各インパクターで分級された粒子は、周りと絶縁された衝突板に捕集されると同時に電子を衝突板へ放出する。その放出した電子は、ELPI内の微電流を計測できる電流計によって電流として計測され、各ステージで捕集された粒子濃度として計測される。

3.3 装置の捕集効率評価と実験の概要

静電サイクロン方式集塵装置の評価には捕集効率($\eta_{PM}\%$)を用いた。捕集効率(η_{PM})は、3.2項(a)に記述したPM濃度を使用して式(1)に示す方法で算出した。

$$\eta_{PM} = \left[1 - \frac{P-2 \text{ における } PM \text{ 濃度}}{P-1 \text{ における } PM \text{ 濃度}} \right] \times 100 \quad (1)$$

機関負荷率の違いによって排ガス温度、排ガスのPM濃度、PMのSOF分(Soluble organic fraction)割

合等は変化する．これら因子の装置捕集効率に及ぼす影響を検討するため，供試機関の 4 負荷率（船用特性の機関負荷率 25 %，50 %，75 %，100 %）の排ガスを用いて装置の捕集効率を評価した．また，捕集効率に対する排ガス冷却効果を検証するために，4 負荷率で熱交換器における冷却を行う実験とともに，機関負荷率 50 %，100 %では，熱交換器において排ガスの冷却を行わない実験を行った．さらに PM 濃度計測のフィルターをソックスレー抽出することによって，SOF 分を分離，秤量して SOF 分割割合の計測を実施した．なお冷却時では，静電集塵部入口排ガス温度が 383 K となるように，熱交換器の冷却水流量を調整した．表 2 に燃料油の性状を示す．機関の運転に使用した燃料油は，市販の低硫黄 A 重油（JIS1 種 1 号，硫黄分 0.071 %）である．

計測は機関負荷調整後，機関の過給器出口排ガス温度，過給器回転速度等と，静電サイクロン方式集塵装置の静電集塵部入口温度が整定した後に開始した．装置における排ガス処理流量は，集塵装置入口(P-1)排ガス状態における体積流量が，150 m³/h となるように調整して実験を行った．

Table. 2 Specifications of the fuel oil

Cetane number (JIS K2204)	46
Density	0.8623 (g/cm ³)
Flash point	84.5 (°C)
Sulfur content	0.071 (%)
Calorific value (net)	42510 (kJ/kg)

3.4 実験結果

a) PM濃度による捕集効率

図 3 にサンプリングポイント P-1(機関出口直後)における PM 濃度を示す．図は横軸に機関負荷率，縦軸に PM 濃度(質量濃度)を示している．PM 濃度は，各負荷率で 3 回の計測を行った．PM 濃度は，機関負荷率 25 %から 50 %に上昇するにつれて濃度が高くなり極大値となる．それ以上の機関負荷率では低下し，100 %時の PM 濃度が最も低くなる．

図 4 に機関負荷率と捕集効率の関係を示す．図は横軸に機関負荷率，縦軸に PM 捕集効率を示しており，図中に示す丸のプロットは，熱交換器による冷却を行った実験，三角のプロットは熱交換器による冷却を行わなかった実験結果を示している．サンプリングポイント P-2 では，各機関負荷率，各条件において，それぞれ 3 回の PM 濃度計測を実施し，P-1 における PM 濃度(3 回の計測の平均値)を用いて捕集効率を算出した．なお，P-1 における排ガス温度は，機関負荷率 25 %

Fig. 3 PM concentration (P-1)

Fig. 4 Engine load vs. Collection efficiency
(Exhaust gas flow rate: 150 m³/h)

で 467 K，50 %で 475 K，75 %で 482 K，100 %で 475 K であり，熱交換器による冷却後の排ガス温度は，前述のように全ての負荷率で 383 K である．

熱交換器による冷却を行った場合の PM 捕集効率 η_{PM} (図 4 中，丸のプロット)は概ね 60 %以上の高い値を示し，特に機関負荷率 50 %時において約 87 %となった．機関負荷率 25 %の捕集効率 η_{PM} は同条件の計測にも関わらず，53 % ~ 71 %とばらつきが出ているが，1 回目の計測値において η_{PM} が 53 %，2 回目の計測で 63 %，3 回目の計測で 71 %となっており，時間が経過するにつれて捕集効率が上昇した．これは，実験開始時に捕集壁面が洗浄直後で，実験開始後に堆積した PM による捕集壁面の表面抵抗率等の変化が捕集効率に影響したためであると考えられる¹⁰⁾．機関負荷率，実験装置各部の排ガス温度の整定を確認して計測を開始したが，時間経過とともに計測値が変化しており，ディーゼル機関の排ガスを扱い，凝集，再飛散を扱う静電集塵部の実験では，静電集塵装置内の捕集壁面の PM 堆積状況を考慮した計測の必要がある．

熱交換による冷却を行わなかった PM 捕集効率 η_{PM} (図 4 中，三角のプロット)は，冷却を行った場合と比較して低い値となった．図 5 に機関負荷率 50 %における ISF 濃度と SOF 濃度，図 6 に機関負荷率 100 %

Fig. 5 ISF and SOF concentration of the PM (Engine load : 50 %)

Fig. 6 ISF and SOF concentration of the PM (Engine load : 100 %)

における ISF 濃度と SOF 濃度を示す。図は縦軸が PM(ISF, SOF)濃度となっており、横軸にサンプリングポイントを示している。左から、P-1 における PM(ISF, SOF)濃度、P-2 における PM(ISF, SOF)濃度、排ガス冷却を行った P-2 における PM(ISF, SOF)濃度を示している。

機関負荷率 50 %の図 5 では、P-1 の PM(ISF, SOF)濃度に対して、冷却を行わない場合において ISF, SOF の両方が低減されている。冷却を行った場合には、さらに SOF が低減されていることがわかる。静電集塵は基本的に帯電粒子が捕集されるメカニズムであるが、冷却を行わない場合においても、Soot 等を核とする粒子表面に SOF が凝縮しており、静電集塵によって両者が一緒に捕集されたと考えられる。冷却を行った場合においては、排ガス温度の低下とともに、ガス状であった SOF がさらに凝縮し、捕集されたと考えられる。

一方、機関負荷率 100 %の図 6 では、P-1 の PM(ISF, SOF)濃度に対して、冷却を行わない場合において SOF の低減率が低い結果となった。機関負荷率 50 %と 100 %では、P-1 における排ガス温度は、ほぼ同じ値であるが、機関負荷率 100 %の排ガスでは、この温度条件においても凝縮せずにガス状であったと考えら

れ、負荷率 50 %時の SOF より高沸点成分が多かったことや、SOF 濃度の差による SOF の露点温度に違いが出たためと考えられる。冷却を行わない場合と行った場合を比較すると、冷却を行うことで SOF 分は大きく低減される。

Fig. 7 Reduction rate of ISF concentration (Engine load : 50, 100 %)

図 5 および 6 に示した機関負荷率 50 %と 100 %の PM(ISF, SOF)濃度から、ISF の捕集効率を算出した。図 7 に ISF の捕集効率を示す。図は、縦軸に ISF の捕集効率 η_{ISF} を示しており、左から、機関負荷率 50 %の冷却を行わない場合と行った場合、機関負荷率 100 %の冷却を行わない場合と行った場合を示している。排ガスが高温な状態においても、固形成分である ISF では、冷却を行わない場合においても概ね 60 %が捕集されていることがわかる。また、機関負荷率 50 %と 100 %で、捕集効率に大きな変化が無いことがわかる。本実験では、P-1 ポイントにおける排ガス体積流量を同様の値としているため、冷却を行わない場合と比較して、冷却を行った場合に捕集効率が上昇するのは、冷却によって排ガス体積が減少し、静電集塵部内の流速が低下したためと考えられる。

b) SMPSによる粒径分布の計測

図 8 に機関負荷率 50 %の SMPS による粒径分布を示す。図は冷却を行った場合の P-1 および P-2 における粒径分布を示しており、横軸に粒径(モビリティ径)、縦軸に質量濃度($dW/d\log D_p$)を示している。SMPS の計測では、希釈器(ロータリーディスク型希釈器)において 250 倍に希釈を行っている。図に示す個数濃度は、希釈器による希釈率を考慮し、サンプリングポイントにおける濃度に換算した値である。また、前述の通り静電集塵部において排ガスヘシールガスが混合するため、P-2 ポイントにおける個数濃度は、シールガスによる希釈も考慮して P-1 における排ガス濃度状態に換算した値である。SMPS は光学的に個数濃度で計測されるが、ここでは、粒子が完全球形あり、密度が 1.2 g/cm^3 であると仮定して換算を行った。

P-1 では、粒径が 170 nm 付近の粒子質量濃度が最も高い。P-2 においては、排ガス冷却を行った場合、行わなかった場合ともに大幅に質量濃度が低減する。P-2 においては、冷却を行った場合と比較して、冷却を行わない場合に粒径 180 nm 付近を中心とした粒子が多く検出される。

Fig. 8 Particle size distribution of PM (SMPS)
(Mass concentration, Engine load : 50 %)

図 9 は機関負荷率 50 %において、排ガスの冷却を行った場合と行わない場合の P-2 における粒径分布を示している。横軸に粒径(モビリティ粒径)、縦軸に個数濃度($dN/d\log Dp$)を示している。図 8 と同様に、希釈率、シールガスによる希釈を考慮して P-1 における排ガス濃度に換算した値である。冷却を行った場合の粒径分布がモノモーダル分布であるのに対して、冷却を行わない場合では粒径 10~30 nm および 100~200 nm において個数濃度が高くなるバイモーダル分布となる。粒径 10~100 nm 付近の粒子は核生成モード (Nuclei mode) 粒子であり、排ガスに含まれる SOF が高濃度であるため、P-2 から SMPS へのガスサンプリング過程において核生成が起こり検出されたと考えられる。また、冷却を行わない場合は 100~200 nm に個数濃度のピークがあるが、これは冷却を行った場合の個数濃度ピークより粒径が大きく、個数濃度は低下している。図 10 に図 8 に示した P-2 の計測値を縦軸を拡大して示す。図 10 から、排ガスの冷却を行った場合には、行わない場合と比較して、粒子状物質の質量濃度が大きく低下する。前述の通り、排ガスの冷却によって SOF の捕集効率が向上するが、その結果 500 nm 未満の粒子状物質排出量が大きく減少することがわかった。

c) ELPI による粒径分布の計測

図 11 に機関負荷率 50%の ELPI による粒径分布を示す。図は冷却を行った場合の P-1 および P-2 における粒径分布を示しており、横軸に粒径(空気動力学径)、縦軸に個数濃度($dN/d\log Dp$)を示している。ELPI の計測では希釈器によって 150 倍(P-1)、180 倍(P-2)の

Fig. 9 Particle size distribution of PM (SMPS)
(Exhaust gas with cooling and without cooling, Number concentration, Engine load : 50 %, P-2)

Fig. 10 Particle size distribution of PM (SMPS)
(Exhaust gas with cooling and without cooling, Mass concentration, Engine load : 50 %, P-2)

希釈を行っている。図に示す個数濃度は、希釈器による希釈率を考慮し、サンプリングポイントにおける濃度に換算した値である。また、前述の通り静電集塵部において排ガスへシールガスが混合するため、P-2 における個数濃度は、シールガスによる希釈も考慮している。

P-1 における粒径分布は、粒径 80 nm 付近の粒子個数が最も多く、また、粒子状物質の殆どが 400 nm 以下であることがわかる。冷却を行った場合の P-2 における粒径分布は、粒径 40 nm 付近で最も個数濃度が高く、粒径が大きくなるにつれて個数が減少する。P-1 の計測結果と比較して個数濃度は大きく低減する。冷却を行わない場合の粒径分布は、粒径 130 nm 付近で個数濃度が最も高いモノモーダル分布となるが、P-1 と比較すると、大幅に濃度が低減している。冷却を行った場合と行わない場合の粒径分布を比較すると、行った場合の方が小さい粒径で個数濃度が高くなり SMPS による計測結果と同様の傾向を示す。

図 11 に示した ELPI による粒径分布から、各計測ステージ毎に、P-2 の P-1 に対する低減率を算出した。図 12 に粒径と低減率の関係を示す。図は横軸に粒径、縦軸に低減率を示している。図 11 に示した粒径分布

では、粒径が8300 nmの大きさまで計測しているが、P-1において、1280 nm以上の粒子は検出していない(個数濃度が0)ため、冷却を行った場合の低減率はプロットしていない。

冷却を行った場合の低減率では、1280 nmにおいて粒子が検出されたため、捕集効率0としてプロットしている。冷却を行った場合には、粒径の小さい粒子で低減率が低くなっているが、粒径80 nmより大きい粒子においては80%以上低減できることが確認できた。一方、冷却を行っていない場合では、粒径80 nmの粒子で最も低減率が高く、粒子が大きくなるにつれて低減率が低くなっている。特にP-1で検出されていない粒径1280 nmの粒子がP-2で低濃度であるが検出されたことから、静電集塵部で粒子状物質が捕集、凝集後、粗大塊となっていることが推測されるとともに、サイクロン部ダストボックスに粒子が捕集はされているが、再飛散現象も発生していると考えられる。

Fig. 11 Particle size distribution of PM (ELPI) (Number concentration, Engine load: 50%)

Fig. 12 Relationship between the particle diameter and reduction rate in PM number concentration (ELPI, Engine load: 50%)

4. 結論

PM中のSOF割合が高い船用2ストロークディーゼル機関の粒子状物質低減を目的に、縦型の静電サイクロン集塵実験装置を製作した。船用2ストロークディーゼル試験機関の排ガスを対象とした、捕集効率計測、粒径分布計測を行い、以下の知見を得た。

- ・静電サイクロン方式集塵装置は、排ガス冷却によってSOFの捕集効率を向上させることが可能であり、SOF割合の高いPMも捕集できることがわかった。
- ・排ガス冷却を行った場合でも、行わなかった場合でもISFの捕集効率は概ね60%以上の値を示す。
- ・SMPSおよびELPIによる粒径分布計測から、静電サイクロン方式集塵装置を用いることで船用2ストロークディーゼル機関から排出される粒子を大幅に低減できることがわかった。また、排ガス冷却を行うことで粒径500 nm未満の排出質量をさらに低減することが可能である。
- ・ELPIによる、静電サイクロン方式集塵装置の排ガス入口および出口の計測から、装置内における粒子状物質の凝集が確認できた。また、わずかではあるがサイクロン集塵部からの再飛散の発生が示唆された。

References

- 1) MARPOL Annex VI, International Maritime Organization (IMO).
- 2) N. Hiraoka et.al., The World's First Onboard Verification Test of UE Engine with Low Pressure EGR complied with IMO's NOx Tier III Regulations, Mitsubishi Juko giho, 53-2 (2016), 37-44.
- 3) Y. Watanabe, Development and Installation of Marine Use Hybrid SOx Scrubber System that Complies with IMO SOx Emission Regulations, Mitsubishi Juko giho, 53-2 (2016), 45-49.
- 4) A. Masuda et.al, Determination of Black Carbon Concentration from Marine Diesel Engines by Multi-Instrumental Measurements, Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering ISME, (2017), B13-315.
- 5) H. Sasaki et.al., Reduction of Particulate Matter Emission from four-stroke Marine Diesel Engine by Electrostatic Cyclone DPF (Analysis of Particulate Size Distribution), Transactions of the JSME, 77-775 (2011), 860-866.
- 6) H. Sasaki et.al., Reduction of PM Emission from 4-Stroke Marine Diesel Engine by Electrostatic Cyclone DPF, J. JIME, 45-6 (2010), 139-145.
- 7) H. Sasaki et.al, Study on the measurement method and characteristics of particulate matter from marine diesel engines, 28th CIMAC World Congress (2016), Paper No. 205.
- 8) T. Tsukamoto et.al., Characteristics of Particulate Emission from Marine Diesel Engines - Comparison between High Speed Four-stroke Engine and Low Speed Two-stroke Engine -, J. JIME, 33-4 (1998), 306-310.
- 9) ISO 8178-1, Reciprocating internal combustion engines -- Exhaust emission measurement -- Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions (2017).
- 10) Y. Ohashi et.al., Study on characteristics of back-corona in the electrostatic precipitator for marine diesel engine, Proceedings of the 86th Annual Meeting of JIME, (2016), 55-56.