ディーゼル排ガスの静電集塵プロセスに関する研究*

－ 船用ディーゼル機関の粒子状物質の状態と電気抵抗率

佐々木 秀 次** 工 藤 康 平*** 塚 本 達 郎**

Study on Electrostatic Precipitator for Diesel Exhaust Gas

－ Composition and Electrical Resistivity of Marine Diesel Exhaust Particulates

By Hidetsugu SASAKI, Kohei KUDO, Tatsuro TSUKAMOTO

One of the technologies to reduce PM emissions is an electrostatic precipitator. Electrical resistivity of the target particles is an important parameter in determining the performance of an electrostatic precipitator. If the resistivity of particles captured on the collection wall is low, re-scattering of the collected particles will occur. On the other hand, reverse ionization or the back-corona phenomenon occurs in the case of high resistivity, eventually resulting in sparkover. The resistivity of PM emitted from marine diesel engines is not fully understood. In this study, the authors developed a new instrument to measure particle resistivity, and used it to calculate the apparent electrical resistivity of PM exhausted from marine diesel engines. The results found that the apparent resistivity of PM exhausted from two-stroke engines was higher than that of PM from four-stroke engines. This is due to the high ratio of SOF contained in PM from two stroke engines. Therefore, when the ESP system is utilized to treat exhaust gas from two-stroke diesel engines, it is necessary to pay considerable attention to reverse ionization or the back-corona phenomenon.

1. はじめに

船用ディーゼル機関の排ガスに含まれる大気汚染物質には、窒素酸化物(NO_x)や燃料中の硫黄分に起因する硫黄酸化物(SO_x)、粒子状物質(PM)等が挙げられる。

IMO(国際海事機関)では、船舶から排出される NO_x , SO_x , GHG の排出量について段階的に規制や目標値を定めて排出削減を強化¹⁾している。船用ディーゼル機関から排出される NO_x に関してはSCRによる後処理、EGR システムの適用や、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、排ガス中の SO_x を低減する EGCS 装置の技術開発と、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、排ガス中の粒子状物質に関して、現在では直接的な規制値は定められていないものの、近年、環境意識の更なる高まりや極海における地球温暖化や氷雪融解の要因となるブラックカーボンの排出問題に関する議論等も起こり、その計測法、排出実態の解明が進められている⁴⁾。

陸上のオンロード機関やオフロード機関では排ガスの粒子状物質低減の多くにセラミックフィルタを使用^{5,6)}している。セラミックフィルタは排ガス流路内に多孔質セラミックスを設置して、排ガスを通過させることで粒子を捕集する。捕集するとともにフィルタは目詰まりするため、使用を続けるためには、捕集した粒子の加熱燃焼等によって再生を行う必要がある。船用機関では、自動車と比較して運用時間が長く、重質油が燃料油として使用されるため、このような運用は難しいと考えられる。また、粒子の捕集とともにフィルタが目詰まりすると、圧損が大きくなり燃料消費率の悪化が懸念される。さらに粒子状物質に揮発性成分が多く含まれる場合、これらは高温の排ガス中では気体であるため、フィルタを通過し大気に排出される。フィルタ再生時に燃焼に至らず気化した揮発性成分が大気に放出される懸念もある。このため、目詰まりのない静電集塵によって船用ディーゼル機関の排ガス中の粒子状物質を捕集する研究が行われている。この技術では、コロナ放電によるコロナ電子によって排ガス中の粒子状物質に荷電を行い、その後、電界によって捕集壁へ粒子状物質を捕集する。粒子状物質は、捕集壁に捕集されるとともに電子を放出しクーロン力を失う。捕集壁上の粒子は排ガス流によって再飛散するが、こ

*原稿受付 令和2年4月19日。

**正会員 東京海洋大学(江東区越中島2-1-6)。

***正会員 研究当時 東京海洋大学大学院(現 IHI 原動機)

れを防止するために、粒子をそのまま排ガス流から分離するホール型集塵技術⁷⁾や、再飛散した粒子が粗大化する特性を利用し、その下流においてサイクロン集塵器によって粒子状物質の捕集を行う静電サイクロン方式集塵技術等の研究や開発が行われている。

これらの静電集塵プロセスにおいて、捕集壁面に堆積した粒子状物質の電気抵抗率は捕集効率に大きな影響を及ぼす。捕集壁面上に堆積した粒子状物質の抵抗率が高い場合、逆電離(Back-corona)現象や火花放電(Spark-over)が発生し、その結果、捕集効率低下や、静電集塵装置自体の停止が発生する。JIS B 9915⁸⁾では粒子の見掛け電気抵抗率測定方法が記載されており、平行平板電極によって上部の電極(面積: 10 cm^2 、電極質量: 100 g 、粉体: 10 g/cm^2 の荷重)と下部の電極間の抵抗値を計測し厚みから電気抵抗率(見掛け電気抵抗率)を算出する。捕集対象粒子の電気抵抗率が、 $10^4\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 未満では捕集壁からの再飛散に留意する必要がある、逆に $10^{10}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ 以上になると逆電離現象が生じ、静電集塵における捕集効率が低下する⁹⁾。そのため、静電集塵において捕集対象となる粒子状物質の抵抗率を把握することが重要であるが、船用ディーゼル機関の排ガスに含まれる粒子状物質を対象に抵抗率を計測した研究例は少なく、これらを明らかにする必要があると考える。

本研究では、静電集塵装置によって船用ディーゼル機関の排ガスを扱う場合に重要な情報となる、PMの見掛け電気抵抗率を調べることを目的として、JIS B 9915を参考に、圧縮荷重測定、粉体温度の変更、放電試験が可能な電気抵抗率計測装置を製作した。研究例が比較的多いJIS試験粉体1(Fly ash)を使用した装置の特性検証を行うとともに、船用2ストロークディーゼル機関および4ストロークディーゼル機関の排ガス中から静電集塵によって捕集した粒子状物質の見掛け電気抵抗率の計測を行った。

2. 静電集塵メカニズムと船用ディーゼル機関のPM

Fig. 1 Schematic of the Electrostatic precipitator

2.1 静電集塵の概要と逆電離現象

静電集塵の概要を図1に示す。図は静電集塵装置の一例を示しており、装置内の断面を示している。図の下方は電極(負極)、上方は捕集壁(陽極・接地極)を示しており、負極に設置されている鋸歯が放電電極であり、負極には負の電圧が印加される。静電集塵装置で処理する排ガスは図中の左から右へ流れる。

左側から排ガスとともに流入した粒子状物質は、放電電極のコロナ放電によって生成された負イオンによって負の電位に荷電される。対向する電極との電位差による電界によって、荷電された粒子は異なる極性を持つ電極(ここでは捕集壁)に引き寄せられ捕集される。

捕集壁に捕集された粒子は荷電されていた電子を放出するとともに堆積するが、排ガス流や重力によって再飛散する。

しかし、捕集壁に堆積した粒子の層が高い電気抵抗となった場合、その表面に捕集される荷電された粒子から電子が放出されず堆積層に蓄積する。電子が蓄積されると層内に電界を形成し、その後、絶縁破壊が起こると逆電離が生じる。逆電離が生じると陽イオンが発生し、負イオンを中和して効率を低下させるだけではなく、進行すると火花放電を引き起こす。火花放電は過大な電流を生じるため、負極に電圧を印可している電源装置は出力を停止する。これらの要因で、静電集塵装置は捕集効率が低下する。

2.2 船用ディーゼル機関のPM

船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質は、通常ISO8178-1¹⁰⁾(JIS B8008-1¹¹⁾)に準拠した濃度計測が行われる。この計測は、排ガスの一部を希釈トンネルにおいて、濾過した清浄な空気希釈し、 $47\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で、その希釈排ガスをろ紙を通して濃度を算出する。一例として船用2ストロークディーゼル機関のPM濃度を図2に示す。

Fig. 2 PM mass concentration of 2-stroke marine diesel engine

図は電子制御式船用2ストローク低速ディーゼル機関を低硫黄A重油(MDO)で運転した排ガスのPM濃度を示している。機関の負荷率によって濃度は異なるが、60~110 mg/Nm³のPM濃度である。また、PMをソックスレー抽出によってISF(Insoluble organic fraction, 不可溶性有機成分)濃度とSOF(soluble organic fraction, 可溶性有機成分)濃度に分離し、図中の濃度として示している。図から、PM中のSOF分は高い割合であり、PM中に油分が多く含まれていることがわかる。油分は電気抵抗率が非常に高いため、捕集壁面の堆積状況によっては逆電離を誘発することが考えられる。

3. 見掛け電気抵抗率計測装置の検証

3.1 計測装置概要

図3に製作した見掛け電気抵抗率計測装置の構成を示す。図の左側は計測用電極の寸法を示し、右側は計測装置の構成を示す。装置は主に上部電極を固定する可動スタンド、計測用電極(上部電極、主電極、ガード電極)、絶縁抵抗計(または直流高圧電源装置)、圧縮荷重を計測する電子天秤から構成される。計測用電極の寸法はJIS B 9915を参考に製作した。上部電極とそれを固定している可動スタンドは取り外すことが可能で、上部に放電電極を設置して電圧を印可することで、計測する粉体の状態を変えずに、印可電圧-放電電流(V-I)特性等の計測を行うことが可能な構造とした。

計測対象の粉体を電極間に設置し電圧を印加して電流の計測値から見掛け電気抵抗率 $\rho_d[\Omega \cdot \text{cm}]$ を式(1)によって求めた。

$$\rho_d = \frac{V}{I} \cdot \frac{S}{t} \quad [\Omega \cdot \text{cm}] \quad (1)$$

ここで、印加電圧: $V[\text{V}]$ 、電流: $I[\text{A}]$ 、主電極面積: $S[\text{cm}^2]$ 、試験粉体の堆積層厚: $t[\text{cm}]$

Fig. 3 Experimental apparatus for measurement of Electrical resistivity

(Left side : Dimension of electrode, Right side : overall view)

3.2 試験粉体概要(Fly ash)

JIS B 9915 の解説では見掛け電気抵抗率の計測例に Fly ash を使用しており、試作した計測装置の信頼性を検証するため、本研究では試験粉体に JIS Z 8901¹²⁾試験用粉体 1 の 5 種、10 種(Fly ash)(以降、Fly ash 5 種、Fly ash 10 種と呼ぶ)を使用した。Fly ash の主要目を表 1、粒子径分布を表 2 に示す。Fly ash の主成分は二酸化ケイ素(SiO_2)で、粒子は大半が球形で構成されているとされる。粒子径分布で 5 種と 10 種に分類され、10 種の粒径は 5 種と比べて細かく、また、静電集塵においては高抵抗ダストに分類され、既往の研究では Fly ash の堆積状況に伴う逆電離の発生が報告されている¹³⁾。

Table. 1 Specifications of Fly ash (JIS Test powder 1)

二酸化ケイ素 [% (質量基準)]	45 以上
湿分 [%]	1 以下
強熱減量 [%]	5 以下
粒子密度 [g/cm^3]	1.95

Table. 2 Size distribution of Fly ash (JIS Test powder 1)

5 種(Class 5)		10 種(Class 10)	
粒径 [μm]	オーバーサイズ [%]	粒径 [μm]	オーバーサイズ [%]
5	84±5	2	82±5
10	60±5	4	60±5
20	32±3	8	22±3
30	15±3	16	3±3
40	8±3		
106	1 以下		

3.3 試験用粉体による検証

図4に Fly ash 10 種を用いて計測した、圧縮荷重と見掛け電気抵抗率の関係を示す。図は横軸に圧縮荷重、縦軸に見掛け電気抵抗率を表している。計測は、雰囲気温度 25.2 °C、湿度 44 %、抵抗計測のための電極間印可電圧は 1kV、粉体が無荷重状態で層厚 5 mm で実施した。10 種 Fly ash の計測では、圧縮荷重 10 g/cm² 以下で $2.5 \times 10^8 \sim 3.5 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ の見掛け電気抵抗率を示し、圧縮荷重の増加とともに見掛け電気抵抗率は低下する。概ね 100 g/cm² 以上の圧縮荷重では見掛け電気抵抗率の変化がなく、約 $1.5 \times 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ を示す。このように粉体では、圧縮荷重が低いほど、見掛け電気抵抗率が高抵抗となるとともに、一定の圧縮荷重以上では、粉体が密接することによって、ほぼ一定の電気抵抗率となることがわかる。

図5に Fly ash 10 種の粉体温度と見掛け電気抵抗率の関係を示す。図は、横軸に粉体温度、縦軸に見掛け電気抵抗率を表している。計測は、圧縮荷重 100 g/cm²、

層厚 10 mm で昇温法(粉体を加熱しながら計測を行う)によって実施した。粉体温度が上昇すると、見かけの電気抵抗率は高くなる。粉体温度が 16°C の時と比較して、91°C では約 50 倍の抵抗となる。

Fig. 4 Relationship between compressive load and apparent electrical resistivity

(Class 10 Fly ash, Measurement conditions: 25.2 deg.C 44 %RH)

Fig. 5 Relationship between powder temperature and apparent electrical resistivity

(Class 10 Fly ash, Measurement conditions: 100 g/cm²)

Fig. 6 Relationship between compressive load and apparent electrical resistivity

(Class 5, 10 Fly ash)

図 6 に Fly ash 5 種と 10 種の、圧縮荷重と見かけ電気抵抗率の関係を示す。図は横軸に圧縮荷重、縦軸に見掛け電気抵抗率を示している。図中の Fly ash 10 種

の見掛け電気抵抗率は、図 4 に示した値であり、電極間電圧は 1 kV の計測結果である。一方 Fly ash 5 種では 250 V の計測を行っている。Fly ash 5 種は、10 種と比較して計測した圧縮荷重範囲において、100~150 倍程、高い抵抗率となる。

JIS B9915 1989 解説において、Fly ash の見掛け電気抵抗率の計測例が示されている。計測例の昇温法による計測では、粉体の温度が約 75 °C において、 $1 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ であり、その後、約 150°C まで抵抗率が上昇し、それ以上の温度範囲では、温度が高いほど抵抗率が低下することが記されている。図 5 に示した粉体温度と見掛け電気抵抗率の関係では、粉体温度が約 65 °C で、見掛け電気抵抗率が $1 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ を示しており、一般的に計測される見掛け電気抵抗率とほぼ等しい値を示していることがわかる。

前記のとおり、捕集対象粒子の抵抗率が、 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 未満では捕集壁からの再飛散に留意する必要があり、逆に $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上になると逆電離現象が生じることから、Fly ash 10 種で粉体温度が高い場合に逆電離現象が生じる可能性があり、逆に雰囲気温度が外気温程度であると再飛散を生じる可能性があることが考えられる。

4. 船用ディーゼル機関の粒子状物質の見掛け電気抵抗率

4.1 粒子状物質の概要

粒子状物質は実際の船用ディーゼル機関の排ガスから静電集塵装置(静電サイクロン方式集塵^{14,15})によって捕集した。静電サイクロン方式集塵装置の概要を図 7 に示す。

Fig. 7 Schematic of ESP-Cyclone system

静電サイクロン方式集塵装置は、静電集塵装置(ESP)とサイクロンで構成される。静電集塵装置では排ガス中の粒子にコロナ放電によって荷電し、電極間の電界によって荷電した粒子を捕集電極へ堆積させる。堆積後、ある厚みになったところで排ガス流によって剥離する。下流のサイクロンではその剥離した粒子を捕集する仕組みとなっている。静電サイクロン方式集塵装置は、処理を行う排ガス温度によって高温型と低

高温型に分類しており、高温型では高温時に粒子となっている Soot 等を選択的に捕集することができる。また、低温型では排ガスの冷却を行い、高温時にガス状である SOF も捕集する方式である。本研究では、高温型によって捕集した粒子状物質を試験粉体とした。したがって、採取した試験粉体は冷却を行わない排気管内で既に粒子化している物質を対象として、実際に静電集塵装置の捕集壁面に堆積した物質である。

本研究で用いた試験粉体は、船用 2 ストロークディーゼル機関(出力 1275 kW, MDO による運転)および 4 ストロークディーゼル機関(出力 3500 kW, MFO による運転)の排ガスから採取した。

4.2 船用 2 ストロークディーゼル機関の粒子状物質

図 8 に静電集塵装置による捕集粒子粒径分布を示す。図は船用 2 ストロークディーゼル機関を低硫黄 A 重油で運転した排ガスを静電集塵装置に通過させた場合に、装置によって低減される個数濃度を ELPI (Electric Low pressure Impactor)によって計測した濃度から算出している。図は横軸に粒径、縦軸に個数濃度(捕集量)(対数軸)を示している。ELPI による計測は、2 段希釈を採用しており、1 段希釈を 13.6 倍(170°C)、2 段希釈を 119 倍(100°C)の高温希釈を行っている。また、個数濃度(捕集量)は、静電集塵装置電圧無印可状態(停止時)と印可状態(稼働時)の差を捕集粒子としている。

Fig. 8 Particle size distribution of collected particles in ESP-cyclone system
(2-stroke marine diesel engine, MDO)

図から船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスから静電集塵によって捕集された粒子は、粒径 4 μm 以下で構成されており、大部分が粒径 0.5 μm 以下の粒子であることがわかる。

図 9 に静電集塵装置で採取した粒子状物質の圧縮荷重と見掛け電気抵抗率の関係を示す。図は横軸に圧縮荷重、縦軸に見掛け電気抵抗率を示しており、図中の

三角のプロットが試験粉体、丸のプロットが Fly ash 10 種、菱形プロットが Fly ash 10 種を示している。

Fig. 9 Relationship between compressive load and apparent electrical resistivity
(2-stroke marine diesel engine, MDO)

船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスから静電集塵によって採取される粒子状物質の見掛け電気抵抗率は、Fly ash 5 種、10 種より高く、圧縮荷重 70 g/cm² 以下では、 $1 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ より高くなる。このことから、船用 2 ストロークディーゼル機関の粒子状物質を静電集塵する場合、捕集壁に粒子状物質が堆積した場合、逆電離現象に留意する必要があることがわかる。

また、圧縮荷重による見掛け電気抵抗率の変化率は、Fly ash 5 種、10 種より船用 2 ストロークディーゼル機関の粒子状物質の方がやや大きく、粒子の密度依存が大きいことが分かる。これは、Fly ash より船用 2 ストロークディーゼル機関の粒子状物質の方が、粒子間の接触抵抗による変化が大きいと考える事が出来る。

Fig. 10 Relationship between particle size and cumulative frequency of collected particles

図 10 に捕集粒子の粒径と累積度数の関係を示す。図は横軸に粒径、縦軸に累積度数(オーバーサイズ)を示している。船用 2 ストロークディーゼル機関の粒子状物質は、図 8 に示した粒径分布から、粒子がすべて

の粒子径において一定密度であり球形であると仮定して質量濃度に換算した累積度数である。また、Fly ash 10 種と 5 種は、表 2 に示した粒子径分布を参考としてプロットしている。オーバーサイズ 60 %を示す値は、Fly ash 5 種で $10\mu\text{m}$ 、10 種で $4\mu\text{m}$ であり粒径が小さいほど見掛け電気抵抗率は小さい値となり、粒子間の接触面積が大きいことため電気抵抗率が低下していると考えられる。船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスから採取した試験粉体は、オーバーサイズ %で 60 %を示す値が個数濃度基準で約 $0.05\mu\text{m}$ (すべての粒子径で密度を一定と仮定した場合の質量基準で約 $1.7\mu\text{m}$) であり、接触面積は大きい、粒子自体の抵抗が大きいことや、粒子表面に高抵抗の物質が凝集しているため、電気抵抗率が大きくなったと考えられる。

4.3 船用 4 ストロークディーゼル機関の粒子状物質

図 11 に船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスから静電サイクロン方式集塵装置によって採取した粒子状物質の見掛け電気抵抗率と圧縮荷重の関係を示す。図は横軸に圧縮荷重、縦軸に見掛け電気抵抗率を示している。また参考として図 9 に示した船用 2 ストロークディーゼル機関の粒子状物質の見掛け電気抵抗率を示す。船用 4 ストロークディーゼル機関の粒子状物質では、2 ストロークと比較して約 $1/10000$ の見掛け電気抵抗率になる。図 9 に示した Fly ash 5 種、10 種と比較しても低い値となる。前記のとおり、電気抵抗率が $10^4\ \Omega\cdot\text{cm}$ 未満では再飛散、 $10^{10}\ \Omega\cdot\text{cm}$ では逆電離に留意する必要があるが、4 ストロークディーゼル機関の粒子状物質では、捕集壁面の過度な堆積状態を形成しない限り、静電集塵装置の運用に問題が無いと考えられる。

Fig. 11 Relationship between compressive load and apparent electrical resistivity
(2-stroke and 4-stroke marine diesel engine)

4.4 粒子状物質に含まれる油分の影響

既往の研究^{16,17)}で、船用 4 ストロークディーゼル機

関と 2 ストロークディーゼル機関の PM の SOF 分に関する検討が行われており、2 ストローク機関ではすべての負荷率で高い SOF 分割率であり、4 ストローク機関では、負荷率の上昇とともに SOF 分割率が低下することが報告されている。油分である SOF の含有は体積抵抗率に影響を与える¹⁸⁾ことから、ここでは船用 2 ストロークディーゼル機関の粒子状物質に関して、SOF 分が見掛け電気抵抗率に与える影響に関して検討を行った。図 12 に直接法による粒子状物質の質量濃度(ダスト濃度)を示す。ダスト濃度の計測は、排気管内の排ガスを希釈せず、高温を保ったままフィルタに通過させ、フィルタの捕集前後の質量差、ガス通過流量から濃度を算出しており、JIS Z8808 に準拠した計測を行っている。この計測で対象となる粒子(ダスト)は、排ガスの希釈と冷却を行わないことから、排気管内で既に粒子化している質量濃度であることが考えられ、すなわち、静電集塵で捕集される物質と同様であると考えられる。

Fig. 12 Dust concentrations of exhaust gas
(2-stroke marine diesel engine, MDO)

図は、船用 2 ストロークディーゼル機関を低硫黄 A 重油で運転した際の排ガスを計測しており、縦軸に質量濃度、横軸に機関負荷率を示している。直接法による粒子状物質の質量濃度は機関負荷率が 25 %から 50 %に上昇するとともに高くなり、それより高い 75 %, 100 %では、負荷率の上昇とともに濃度が低下していく。

ここで、各負荷率と、ダスト濃度に対する ISF 濃度(図 2)の割合を算出したものを図 13 に示す。図の棒グラフはダストに対する ISF の割合(縦軸)を示しており、横軸には機関負荷率を示している。図から、ダストに対する ISF の割合が全ての負荷率で 0.24~0.29 程であり、SOF が 7 割ほどダストとしてフィルタ上に捕集されていることが考えられる。これは、排気管内で既に揮発性成分である SOF が凝縮し、ダストととして計測されたことが考えられる。

Fig. 13 Ratio of ISF to Dust concentration
(2-stroke marine diesel engine, MDO)

船用2ストロークディーゼル機関の排ガスに静電集塵を行う場合には、油分であるSOF分が粒子とともに捕集壁面に堆積することによって、堆積粒子の抵抗率が高くなっていることが考えられる。

船用2ストロークディーゼル機関の粒子状物質を加熱処理によって、油分を蒸発させ見掛け電気抵抗率の変化を調べた。

油分を蒸発させるために、粒子状物質をステンレス容器に入れ、ホットプレート型のセラミックヒータで加熱を行った。ステンレス容器は、直径90 mm、高さ20 mmであり、上面に気化した油蒸気を容器外に放出させるため穿孔加工をした。穿孔は加熱時に粒子状物質の酸化による変化量を低減するため、容器外の空気が容器内に極力入らないように直径2 mm、1穴とした。

Fig. 14 Effect of heating treatment
for apparent electrical resistivity
(2-stroke marine diesel engine, MDO)

加熱処理は粒子状物質を上記のステンレス容器内に入れプレート上で30分間行った。加熱処理後は容器を開放せずにそのまま室温にて冷却した。加熱温度は200°C、400°Cの2ケースを行った。図14に加熱処理による見掛け電気抵抗率変化を示す。図は横軸に圧

縮荷重、縦軸に見掛け電気抵抗率を示しており、図中の緑線は加熱処理前、青色の破線は処理温度200°C、赤色の破線は処理温度400°Cの見掛け電気抵抗率である。

加熱処理前の粒子状物質に対して、処理温度200°Cの粒子では、見かけの電気抵抗率に殆ど変化が無い。これは、静電サイクロン方式集塵装置による粒子状物質捕集時に、船用2ストロークディーゼル機関の排ガスを250°C程度で通過させており、それより低い温度では、粒子状物質の状態に変化が無かったためであると考えられる。

一方、処理温度400°Cの粒子では、見掛け電気抵抗率は加熱処理前と比較して1/10⁶程度となり、加熱処理によって見掛け電気抵抗率が大幅に低下した。これは、400°Cの加熱処理時に油分の多くが蒸発し、粒子自体の抵抗率の低下や、粒子表面に凝集した油分の蒸発による表面性状の変化によるものと考えられる。なお、400°Cで加熱処理した粒子を、円筒ろ紙を用いてジクロロメタンを溶媒とするソックスレー抽出を行った結果、SOF質量は1.0%未満であった。

これらのことより、静電集塵装置にて船用2ストロークディーゼル機関の排ガスを扱う場合には、温度が高い状態で処理するほど見掛け電気抵抗率が低い状態の粒子が捕集されることが考えられるとともに、排ガス温度を低下させるとSOF分も静電集塵装置によって捕集できるが、捕集壁の堆積粒子が高抵抗となるため、堆積層が厚くならないようにすること等の逆電離現象の防止に留意する必要がある。

5. まとめ

本研究では、見掛け電気抵抗率を計測するための計測装置を制作し、電気抵抗率が既知であるFly ashの計測を行うとともに、船用ディーゼル機関の排ガスから静電集塵装置によって採取した粒子状物質の計測を実施した。Fly ash 5種、10種を用いた検討の結果、制作した計測装置は既知の値とほぼ等しい値を示し、装置の妥当性が確認できた。

船用2ストロークディーゼル機関の排ガスを静電集塵装置によって集塵した場合、捕集される粒子状物質は、大部分が粒径4 μm以下で構成される。また、質量基準で累積度数に換算した場合、JIS試験用粉体(Fly ash 5種、10種)より、粒径は小さい粒子で構成されるが、見掛け電気抵抗率は高い値を示す。その結果、船用2ストロークディーゼル機関の排ガスを静電集塵装置によって扱う場合には、逆電離現象に留意する必要があることがわかった。また、小さい粒径で構成されているが高抵抗となるのは、凝縮性成分が影響

していると考えられる。

船用 4 ストロークディーゼル機関の粒子状物質は、2 ストロークディーゼル機関より見掛け電気抵抗率が低い値を示すことがわかった。

静電集塵技術をディーゼル機関の排ガスに適応させる場合、船用 4 ストロークディーゼル機関の排ガスでは、逆電離現象等に問題が生じることは少ないと思われるが、船用 2 ストロークディーゼル機関の排ガスに適応させる場合には、捕集壁面において粒子状物質の積層厚さにさらなる制限を行う運用方法や、下流でサイクロン集塵等を併用する場合には、壁面から飛散(剥がれ落ち)しやすい形状や表面粗度等の工夫が必要であると考えられる。

謝辞

本研究に用いた一部の粒子状物質サンプル採取に関して、臼井国際産業、古堅・牧野技術研究所に協力を頂きました。また、計測部分の一部は、科研費(17K06961)による助成を受けて実施しました。厚く御礼申し上げます。

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) Y. Miyairi et. al, Research and Development Trend of Ceramic Filter for DPF, Journal of Society of Automotive Engineers of Japan 70(11) (2016), 65-70
- 6) S. Sakashita, Ceramics that Cleans Diesel Engine Exhaust Gas, J. JSME, 113/1102, (2010), 726-727.
- 7) H. Miyashita et. al, Removing Diesel Exhaust Particulate with Hole-type Electrostatic Precipitator, Journal of JIME, Vol. 52, No. 6 (2017), 97-102.
- 8) JIS B9915, Measuring Methods for Dust Resistivity (with Parallel Electrodes), (1989).
- 9) Handbook of electrostatics, ohm, (2006).
- 10) ISO 8178-1, Reciprocating internal combustion engines -- Exhaust emission measurement -- Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions (2017).
- 11) JIS B8008-1, Reciprocating internal combustion engines -- Exhaust emission measurement -- Part 1: Test-bed measurement systems of gaseous and particulate emissions (2009)
- 12) JIS Z8901, Test powders and test particles (2006).
- 13) S. Masuda, Reverse Ionization Phenomena in Electrostatic Precipitator, J. Inst. Electr. Engrs, 80,865 (1960), 1482-1489.
- 14) 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.
- 15) H. Sasaki et. al., 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, J. JIME, 54-3 (2019), 128-134.
- 16) 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.
- 17) K. Maeda, Reduction of PM from marine diesel engines by filter type DPF, J. JIME, 46-6 (2011), 38-45.
- 18) Y. Ohashi et. al, Study on characteristics of back-corona in the electrostatic precipitator for marine diesel engine - Influence of particles type on back-corona phenomenon, Proceedings of the 87th Annual Meeting of JIME, (2017), 79-80.