β 線吸収法PM計測システムの開発と実船測定*

大橋 厚人**, 高杉 喜雄***, 石村 恵以子****

Development of On-board Measuring System for Diesel Particulate Matter Using β -ray Absorption Method

By Atsuto Ohashi, Yosio Takasugi, Eiko Isimura

An on-board measuring system for diesel particulate matter (PM) is proposed. The system uses β -ray attenuation to measure PM weight and incorporates a partial flow dilution unit. We compared results of the new system with those of the conventional method on a research engine. Both sets of results agreed when those of the new system were corrected for the filter efficiency of PM collection. In addition, we measured PM for an on-board generator and a main engine using the new system. The PM emission (g/kWh) from the generator did not depend on the engine load and varied widely at 25% load. The PM concentration (mg/m³) from the generator was proportional to the engine load. On the main engine, a few data for PM emission were observed at around 20% load.

1. はじめに

ディーゼル機関から排出される粒子状物質 (PM) は、人体に甚大な影響を与える恐れがあると認識されている。しかし、船用ディーゼル機関ではIMO及び国内法による規制がないため、実船における排出実態の報告例も少ない。前田ら^{1,2)}は部分希釈トンネルを用いたフィルタ重量法により実船測定をおこなうとともに、使用した計測装置を実験室内に再現し、計測条件がPM計測値に及ぼす影響を明らかにした。我々も部分希釈トンネルを実船に持ち込む検討を行ったが、装置が大がかりとなるため、運搬・設置場所など実船の測定には支障が大きく、実態調査を目的とした多数の船舶での測定が困難と考えた。そこで、PM排出実態を調べるためには持ち運び可能な実船用測定系の確立が必要と判断し研究を進めてきた^{3,4,5)}。以前おこなったフィルタ振動法 (R&P社製 TEOM-1400a) による測定系では、時間分解能が速いという利点がある一方、船体動揺の影響を受ける、希釈器の吸引ノズル周りにP

Mの沈着が多いなどの問題点があった。

今回その対策として、動揺については β 線吸収法による測定器を採用し、さらに、市販のエアガンを用いたエジェクタ式吸引器を使用した希釈器を開発した⁶⁾。この β 線吸収法PM計測システムと、部分希釈トンネルを用いたフィルタ重量法 (ISO規定準拠⁷⁾) とを実験機関で比較し、結果の違いについて検討するとともに、「旧銀河丸」主機用ディーゼル機関と、停泊中に補助発電機用ディーゼル機関において実船測定を実施したので、この結果をあわせて報告する。

2. 供試機関および燃料

今回の研究に供したディーゼル機関の概要と使用した燃料について表1に示す。表1に示した実験機関の中型中速ディーゼル機関と「旧銀河丸」補助発電機用ディーゼル機関の内径、行程は類似しているが、最大回転数については、後者の方が大きくなっている。3台のディーゼル機関ともA重油を使用している。性状の違いがあるが、CH比は中型中速ディーゼル機関のA重油が大きく、硫黄分については中型中速ディーゼル機関と補助発電機用ディーゼル機関の燃料が0.08%と0.13%であり、どちらもA重油としては少ないものであった。なお、「旧銀河丸」での使用燃料の水素分、炭素分については、以下の式⁸⁾により密度、窒素分、

*原稿受付 平成17年2月10日

**非会員 (独立行政法人) 海上技術安全研究所
(三鷹市新川6-38-1)

***正会員 元 (独立行政法人) 海上技術安全研究所
(三鷹市新川6-38-1)

****正会員 (独立行政法人) 海上技術安全研究所
(三鷹市新川6-38-1)

表1 供試ディーゼル機関諸元と燃料性状

型式	中型中速実験機 立形4サイクル 3シリンダ 過給機, 空気冷却器付き	「旧銀河丸」補助発電機 立形4サイクル 6シリンダ 過給機, 空気冷却器付き	「旧銀河丸」主機 立形2サイクル 6シリンダ 過給機, 空気冷却器付き
ボア×ストローク 定格×回転数 発電出力	φ230 mm × 380 mm 350 PS × 420 rpm	φ220 mm × 300 mm 840 PS × 720 rpm 560 kW	φ520 mm × 1050 mm 6200 PS × 175 rpm
油種	A重油	A重油	A重油
密度@15℃(g/cm³)	0.8553	0.8590	0.8695
動粘度@50℃(mm²/s)	2.532	2.402	2.61
引火点(℃)	82	75	71.7
流動点(℃)	-25.0	-22.5	-10.0
10%残炭(mass%)	0.65	0.28	0.60
水分(vol%)	0.00	0.01	0.05
灰分(mass%)	0.00	0.001	0.01
水素(mass%)	15.0	13.0956 (計算)	12.870 (計算)
炭素(mass%)	84.9	86.7563 (計算)	86.457 (計算)
窒素(mass%)	0.01	0.0181	0.023
硫黄(mass%)	0.08	0.130	0.65

硫黄分から計算により求めた.

$$H = (26 - 15 * d) * \{1 - 0.01 * (S + N)\}$$
$$C = 100 - (H + S + N)$$

水素分 (mass%) : H
炭素分 (mass%) : C
窒素分 (mass%) : N
硫黄分 (mass%) : S
密度@15℃ (g/cm³) : d

3. β線吸収法PM計測システム

図1には、実船実験で使用したβ線吸収法PM計測システムを示す.

3. 1 エジェクタ式吸引器を用いた希釈器 PMの測定では、希釈システムが必要である⁷⁾. 以前使用していた市販の希釈器にある排ガス吸引ノズルは、排ガスサンプリング側の内径が2mmまで狭められ、この部分に多くのPMが沈着し、サンプリング管が目詰まりを起こして測定が困難であった. そこで図2に示すエアガンをエジェクタ式吸引器として用いた希釈器を開発した. エアガンには、給気口(1次エア)と吸気口(2次エア)と噴射口があり、粉体を移送する道具として使われている. 1次エアがエアガンの内部でノズルから噴出され負圧を作り、吸気口から2次エアを吸引し、一緒に噴射口からはき出す構造となっている.

ここでは、ドライクリーンエアユニットからの清浄空気を給気口に接続し、吸気口にボールバルブ経由で排ガスのサンプリング管を接続した. 排ガスの吸引流量は1次エアである清浄空気の流量により調整できる. 排ガスサンプリングにはステンレス管を用い、排ガスの流れに沿わせるために排ガス管と平行に曲げるとともに、先端の管壁の外側をなめらかに削った. 内径4mm以上のサンプリング管を用意し、この内径と排ガスの吸引流量に基づいて等速吸引し、希釈係数が4以上⁷⁾となるように調整した. ただし、実験機関の中型中速ディーゼル機関での測定ではほぼ等速吸引となったが、

図1 β線吸収法PM計測システム

実船実験では調整が難しく等速吸引にはならなかった。等速吸引の影響については、前田ら²⁾が“ディーゼル微粒子は等速吸引の影響を受けないものと考えられる。”と報告しており、測定結果には大きな影響を及ぼさないものと考えている。今回開発した希釈器では、排ガス吸引側が排ガスサンプリング管の内径より狭められることがなく、安定してサンプリングすることができた。噴射口からでた排ガスと清浄空気は、混合室で混合された後、その一部がβ線吸収法によるPM計測器（Thermo Electron Corporation 製 FH62-C14；装置Aと称す）へ送られる。

3. 2 β線吸収法によるPM計測器 放射線源から放出されるβ線は、透過する質量に応じて減衰する。β線吸収法は、この現象を利用して、フィルタ上に捕集されたPM質量を測定するものである。従って、計測器の構造上、船体動揺の影響を排除することができる。図3にPM計測器の機能構成図を示す⁹⁾。PMはテープフィルタ上に集められ、フィルタ下に設置された放射線源 (¹⁴C) からβ線を上側の比例計数管で検出する。比例計数管は、検出器の有感領域内での電離数に応じた出力が得られるため、環境中に存在するラドン子孫核種からのα線を弁別することができる特性を持っている。サンプリングの捕集流量は、16.7 l/min

図2 エアガンをエジェクタ式吸引器として用いた希釈器

図3 PM計測器 (FH62-C14) の機能構成図⁹⁾

(1 : Detector, 2 : Particulate collection and measurement,
3 : Movable suction chamber plate, 4 : C14 beta source <100 μCi)

で一定となるようポンプがコントロールされているとともに、基準状態 (0°C, 1 気圧) 換算の流量も求めている。そしてフィルタ上に蓄積された質量と捕集流量から希釈排ガス中のPM濃度を求める。

フィルタ上に捕集されたPM質量は以下の式⁹⁾によって求められる。

$$\text{PM質量} = Fcal * \ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$$

PM捕集前のカウントレート (1/s) : R_0

PM捕集後のカウントレート (1/s) : R

校正係数 (μg) : $Fcal$

ただし、放射線源の崩壊は統計変動するため、カウントレートも変動する。計測器の持つ時定数 (τ) によりPM質量の標準偏差は次の式となる。

$$\text{標準偏差} = Fcal * \sqrt{\frac{1}{2\tau R_0} + \frac{1}{2\tau R}}$$

この式にそれぞれの概算値を代入し、概算の標準偏差を求めると $11\mu\text{g}$ となる ($Fcal: 6600(\mu\text{g})$, $\tau = 33(\text{s})$, $R_0: 10000(1/\text{s})$, $R: 10000(1/\text{s})$)。そこで少なくとも $300\mu\text{g}$ 以上捕集し、崩壊の統計変動による相対標準偏差が3%台以下となるように測定することとした。

3. 3 ガス濃度計とPM排出率の計算 図1の破線で示した部分は、排ガスおよび希釈排ガスの酸素と二酸化炭素の濃度測定系である。これらのガスは前処理装置 (島津製作所製 CFP-301) を経由し、酸素濃度測定器あるいは二酸化炭素濃度測定器にいたる。酸素濃度の測定には (株) テスト製 GSV-350 を用い、二酸化炭素濃度には濃度レベルに応じて、島津製作所製 CGT-10-2A (0-15%) と扶桑理化製品株式会社製 CD-602B (0-5%) を使い分けた。また、測定している気体の温度・湿度を、神栄株式会社製 TRH-3A を用いて測定した。

希釈排ガス中のPM濃度から排ガス中のPM濃度を求めるには希釈器の希釈係数が必要となる。希釈係数は、排ガス、希釈排ガス、希釈空気中の酸素あるいは二酸化炭素濃度から計算した。但し、測定した値が乾き濃度であるので湿度補正係数⁷⁾により湿度濃度に換算している。希釈係数の計算式を以下に示す。

$$\text{希釈係数} = \frac{a-c}{b-c}$$

排ガス中のトレーサガス濃度 (vol%) : a

希釈排ガス中のトレーサガス濃度 (vol%) : b

希釈空気中のトレーサガス濃度 (vol%) : c

(トレーサガス : 酸素あるいは二酸化炭素)

PM排出率は g/kWh で比較されるので、さらに、排ガス流量とエンジン出力が必要となる。排ガス流量は、完全燃焼を仮定した炭素バランス法またはユニバーサル酸素バランス法⁷⁾により計算した。計算に必要な燃料流量、エンジン出力、環境条件はPM計測中に記録した。なお、以下で示すPM排出量、PM濃度は、エンジンの吸気湿度から計算した湿度補正係数⁷⁾を含んでいる。

4. 実験結果および考察

4. 1 検証実験 検証実験は、実験機関の中型中速ディーゼル機関において行った。フィルタ重量法によるPM測定はファームテック社製 MIT-1000 (装置Bと称す)¹⁰⁾を用いた。装置Bでは、部分希釈トンネルの一つであるダブルダイリュージョントンネル方式を採用するとともに、フィルタ (PALLFLEX PRODUCTS CORP. 製 TX40HI-20-WW) を2枚使用するマルチフィルタ法を採用している。PM重量は、フィルタをPMのサンプリングの前後に恒温恒湿槽にて温度 25°C 、湿度 50% で 24 時間放置し、フィルタ重量の差から求めた。PMの捕集効率が異なる可能性があるので、装置Aで使用するテープフィルタの形を整え、装置Bで使用し (CASE2)、従来のフィルタ (CASE1) との捕集効率の比較を行った。このとき、装置Aでの測定条件 (面速度 : 捕集流量を捕集面積で割った値) と同じになるように、捕集面積を調整した。更に、新測定システムのサンプリング管を装置Bのサンプリング部と同じ位置にするとともに同時に測定 (CASE3) を行った。

図4に検証実験の結果を示す。CASE1 で2回、CASE2 で3回測定した平均値を示す。CASE3 では、CASE1, 2と同じ時間に測定した5回分の平均値を示す。なお、

図4 検証実験の結果
(誤差棒は測定値間の標準偏差を示す)

検証実験中のエンジン出力は25%で固定した。装置Bの1枚目のフィルタの捕集量はCASE2の方が少なく、フィルタ自体の捕集効率が異なることがわかった。一方、2枚の合計では、良い一致を示した。CASE2の1枚目の捕集量は合計の85%を示し、これから判断するとCASE3ではCASE2と同一フィルタを用いていることからCASE2の一枚目の捕集量と同程度の値となることが望まれる。CASE3の結果は 0.101 ± 0.005 (g/kWh, 誤差は測定値間の標準偏差)となり、装置Bで測定した5回の平均値の0.85倍 ($0.125 \text{ g/kWh} \times 0.85 = 0.106 \text{ g/kWh}$)と誤差内で一致した。従って、新計測システムの結果は、フィルタの捕集効率を補正することで、部分希釈トンネルを用いたフィルタ重量法を代用できることが証明できた。

主機の測定では、排ガスサンプリング管とエアガンの間を1mの加熱導管でつないだ。そのため、同じ条件で比較実験も行ったが、両者はフィルタの捕集効率を補正することで一致した。

4.2 補助発電機用ディーゼル機関での測定 「旧銀河丸」補助発電機用ディーゼル機関での測定では、過給機の下流にあるドレイン抜き管を取り外して新測定系のサンプリング管を取り付けた。以前観測された^{3,4)}変動周期(200秒)を考慮してこの整数倍の測定時間(400秒又は600秒)のPM積算重量を使い、PM濃度を求めた。

図5 実船計測の結果

測定結果を図5に示す。この図中の横軸は軸出力を示している。図中のPM濃度とPM排出率は、フィルタの捕集効率の違いを補正するため、前節で求めた0.85で割っている。エンジン出力約25%で4回、約45%で2回、約60%で2回測定を行った。希釈係数は二酸化炭素濃度を用いて計算し、軸出力に対する変化はほとんどなく、4程度の値となった。PM排出率は0.25~0.46 (g/kWh)となり、約25%出力の4点で大きくばらついた。検証実験に使用した中型中速ディーゼル機関と比較すると2倍以上大きな結果となった。一方、同じ25%出力のデータでも排ガス中のPM濃度では、22~28 (mg/m³)とばらつきは小さくなった。約25%出力の4点でPM濃度よりPM排出率のばらつきが大きくなる原因は、値の変換に使われる排ガス流量とエンジン出力のばらつきに起因している。この4点でエンジン出力は2割の幅がある一方、排ガス流量の計算に必要な燃料流量は5割変化しており、このことが大きな原因ではなかろうかと考えている。ただし、結論を得るにはデータの蓄積とさらなる考察が必要と考えている。

排ガス中のPM濃度は、出力上昇とともに濃度が増加した。塚本らの4ストローク機関の発電特性の結果¹¹⁾では、エンジン出力30%から85%においてPM濃度は出力とともに減少しており、今回の結果は傾向が異なった。また、この出力範囲で平均のPM濃度を比較すると、今回の結果は数分の1の小さな値を示した。エンジンのPM排出率の評価には試験サイクルに規定されたエンジン出力の結果が必要であるし、上で述べたばらつきの理由を明確にするためにも、データの蓄積が必要である。

4.3 主機での測定 「旧銀河丸」主機の排ガスは、2号過給器排ガス出口からサンプリングした。サンプリング管とエアガンを1mの加熱導管でつないだ。主機での測定結果を図5に示す。できるだけ一定の出力で航行するよう協力して頂き、約20%出力で4点の測定ができた。

前田ら²⁾の結果とPM排出率を比較すると、20%付近のエンジン出力で今回の結果は2倍弱程度大きな値を示した。一方、PM濃度を塚本らの2ストローク機関の結果(エンジン出力:25%)¹¹⁾と比較すると、今回の結果は4倍程度大きな値となった。今後さらに別のエンジン出力での測定が必要である。

5. おわりに

持ち運び可能なPM計測システムの開発を目指して、β線吸収法によるPM計測器の採用、エアガンをエジェクタ式吸引器として用いた希釈器の開発を行った。

ISO規定に準拠したフィルタ重量法と比較すると、8割強の値を示し、この違いはフィルタの捕集効率に関わる問題であることがわかった。従って、捕集効率の補正をおこなえばフィルタ重量法を代用できることが証明できた。

この測定システムを用いて「旧銀河丸」の主機用ディーゼル機関と、停泊中に補助発電機用ディーゼル機関においてPM測定を行った。補助発電機用ディーゼル機関では、各軸出力において、ほぼ一定の希釈率の下で測定を行った。25%出力でPM排出率は、大きくばらつき、軸出力に対しては、変化が見られなかった。

一方、PM濃度は出力に比例して大きくなった。主機用ディーゼル機関では、約20%出力で4点の測定ができた。これらの結果は、既発表の結果と傾向等が異なる部分があり、さらに議論を進めるためには測定データを増やす必要がある。

本報告の実船実験は、(独)航海訓練所との共同研究により実施された。同所関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 前田ほか3名, 日マリ学講, 63 回論集(平 11-10), 125-128.
- 2) 前田ほか4名, 日マリ学誌, 38-1(平 15-1), 28-35.
- 3) 松崎ほか4名, 日マリ学講, 64 回論集(平 12-5), 85-88.
- 4) 大橋ほか4名, 船舶技術研究所研究発表会, 74 回論集(平 12-6), 37-40.
- 5) 大橋ほか4名, 日マリ学講, 65 回論集(平 13-5), 1-4.
- 6) 特願 2001-273331, 特願 2001-273332 (船舶用浮遊性微粒子状物質測定システム及びガス希釈器)
- 7) ISO/DIS 8178-1 ~ 7, Reciprocating internal combustion engines -Exhaust emission measurements-
- 8) 淡井信幸ほか2名, 陸舶中・大型ディーゼル機関用燃料油, 1994, 株式会社山海堂.
- 9) Thermo Electron Corporation, Operating Instructions Dust Monitor FH62-C14 online, 1999.12.07.
- 10) 中島ほか7名, 船舶技術研究所研究発表会, 73 回論集(平 11-6), 218-223.
- 11) 塚本ほか3名, 日舶学誌, 33-4(平 10-4), 306-310.

著者紹介

姓 名 大橋 厚人

・1964 年生

・所 属 海上技術安全研究所
環境・エネルギー研究領域

・最終学歴 名古屋大学大学院 工学研究科
博士前期課程 原子核工学専攻

・専門分野 保健物理学, エアロゾル工学

姓 名 石村 恵以子

・所 属 海上技術安全研究所

環境・エネルギー研究領域

・最終学歴 東京職業訓練短期大学校

・専門分野 情報処理