PM 計測における排気採取位置の影響*

大 橋 厚 人** 中 村 真由子**

Effect of Sampling Positions along Exhaust Pipe on PM Measurement

By Atsuto OHASHI, Mayuko NAKAMURA

In order to study the effect of sampling positions along an exhaust pipe on PM measurement, we measured PM emitted from a medium speed 4-stroke marine diesel engine. The marine diesel engine was operated at steady state using low sulfur marine diesel oil for PM measurement. Two partial flow dilution systems were used to measure PM emitted from the engine. First of all, in order to check the equivalence of the two partial flow dilution systems, they had the almost same sampling positions on the exhaust pipe of the engine. Since PM emission levels can change slightly even during steady state operation of the engine, it was necessary to perform simultaneous PM measurement in order to compare the results from the two partial flow dilution systems with high accuracy. It was confirmed through this statistical process that the two systems have equivalent performance. Then PM was measured simultaneously after the sampling position of one of the two systems was moved approximately 12 meters on the exhaust pipe. It was found that the emission levels from the downstream system were two to four percent lower than those from the upstream system, and that the results from the two systems were well-matched. We believe that when the engine operates steadily, it is possible to select sampling positions within the distance described in this report.

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と同時に、PM に含まれるブラックカーボン (BC) が、気候変動の原因物質としても注目されている。国際海事機関においては、BC に関して議論が始まり、現在適切な BC 計測法を選択するための議論が続いている。この議論に関係して、著者らは、種々の BC 計測装置の計測結果と、PM に含まれる元素状炭素の計測結果を比較してきた^{1), 2)}。この比較実験では、排気中の粒子を計測対象としていることから、これらの粒子と排気管内壁との相互作用により、排気管の長さ方向の排気採取位置において、計測結果に違いが出る可能性がある。そのため、同一の排気採取位置より排気を採取することが望ましい。しかし、多数の装置を排気管に接続するため、排気採取位置を同一にすることが難しく、10m 程度離れた場合もあった。

排気採取位置の違いによる PM 計測結果への影響に関して議論した報告は、非常に少ない。土屋と山崎は、自動車用ディーゼル機関を対象とし、全流希釈法と分流希釈法による PM 計測結果を、分流希釈法の排気採

取位置を変えて比較した³⁾。分流希釈法の排気採取位置を全流希釈法の 1m と 5m 上流に設置して、Federal Test Procedure (FTP) と European Steady State Cycle (ESC) のテストサイクルにおいて、全流希釈法の結果に対する分流希釈法の比を示した。その結果、排気採取位置が 4m 下流になることにより、FTP では -9%、ESC では -4% の違いがあった。この違いについて、テストサイクルに依存した排気温度変化により排気管内において PM 成分の吸脱着現象が起き、それぞれの排気採取位置において PM となる成分の量が異なるためと考察している。

一方、著者らの比較実験^{1), 2)}では、供試機関を定常運転し、排気採取位置での排気温度変化が小さくなった後に比較実験を行った。そのため、排気採取位置での計測中の温度変化が小さい一方、それぞれの排気採取位置での排気温度には違いがあった。また、BC 計測装置や PM 捕集装置の排気採取位置は、10m 程度離れた場合もあり、土屋と山崎の実験条件³⁾より排気採取位置が 2 倍以上離れていた。したがって、定常運転時で 10m 程度の排気採取位置の違いにより、BC や PM の計測結果がどの程度変化するのかについてはこれまで報告がなく、知見を得る必要があると考えた。

本研究では、当所所有の分流希釈装置を基本として、これの一部を改良して複製し、両装置による比較実験により、PM 計測における排気採取位置の違いの影響

*原稿受付 平成30年4月9日。

**正会員 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 環境・動力系(三鷹市新川6-38-1)。

を評価する。まず、両装置をほぼ同等の排気採取位置に設置して、供試機関を定常運転し、両装置の同等性について確認する。その後、これらの装置を使い、排気採取位置がおよそ 12m 離れた場合について比較実験を行い、その結果を考察する。

2. PM 捕集装置の複製と同等性評価

2.1 PM 捕集装置の複製

Fig. 1 に当所の分流希釈装置の概要を示す。本装置は、JIS B 8008-1:2000 準拠のエフテクノ製分流希釈装置 (MIT-2000CT) であり、以下装置 A とする。排気の一部を、排気管の中心線上で上流に向けた開口管から採取し、希釈トンネルに導き入れる。装置 A の希釈トンネルは、5k50A のフランジを介して排気管に取り付ける構造となっている。したがって、このフランジと排気管の中心線までの距離に応じて、排気を導き入れる排気導入管の長さを調整する必要がある。この排気導入管の希釈空氣が当たる部分には、前田らが報告した改良^{4), 5)}を施し、直管の二重管構造とした⁶⁾。希釈トンネルの中で排気と希釈空氣を混合し、得られた希釈排気の全量をフィルタに通して PM を捕集する、全量捕集方式を採用している。装置 A では、内径 0.026m、長さ 0.53m の希釈トンネルを使用した⁷⁾。Fig. 1 に示した装置の中で、排気管に取り付ける希釈トンネル部と、排気と希釈排気の CO₂ 濃度計測にかかわる装置 (CO₂ 計度計 2 台、CO₂ 計用ポンプ、前処理装置) 以外は、以下の四つの部分で構成されている。

- ・システム制御部 (縦 x 横 x 高 : 0.48x0.78x0.44m, Fig. 1 の Part 1) : 装置 A の操作や、計測データの保存や処理を行い、タワー型パーソナルコンピュータ (PC)、モニタ、インタフェース装置からなる。

- ・流量制御部 (0.5x0.6x0.9m, Fig. 1 の Part 2) : 空氣源から供給された空氣を希釈空氣とするための処理装置や、希釈空氣の流量を制御するマスフローコントローラ (MFC)、希釈排気の流量を制御する MFC などからなる。

- ・トンネル制御部 (0.53x0.53x0.7m, Fig. 1 の Part 3) : 差圧計、温度計、ダミーフィルタ、ダミーフィルタと計測用フィルタを切り替える電磁弁からなる。

- ・ポンプ部 (0.5x0.83x0.8m, Fig. 1 の Part 4) : 希釈排気を吸引するポンプと運搬用ワゴンからなる。

なお、装置 A の運転には、100V と 3 相 200V 電源を使用する。

PM 計測における排気採取位置の違いの影響を評価するために、装置 A と同等な装置を入手する必要がある。ところが、装置 A と同等な分流希釈装置は現在入手できないため、これの一部を改良して複製するこ

Fig. 1 Schematic of Partial flow dilution system (MIT-2000CT, F-Technology Ltd.)

ととし、以下装置 B とする。装置 B は、以下の方針により製作した。

- ・装置 A を複製することを基本とする。
- ・PC と電磁弁を別装置で代替する。
- ・使用電源を 100V のみとする。
- ・運搬と設置を容易にする。

装置 A では、PC と電磁弁が故障して計測に支障がでた事例が過去にあった。そこで、装置 B では、PC を経由した装置制御を行わないこととした。MFC、差圧計、温度計についての信号を、装置 B ではデータロガーに記録することとし、これらのデータ処理は、別に用意した PC で行うこととした。また、電磁弁での配管切り替えの代用として、装置 B ではレバーハンド式のボールバルブを手動で使用した。電源については、より確保が容易な 100V 仕様の機器に統一し、装置 A では 3 相 200V 仕様であった希釈排気吸引用のポンプを、装置 B では 100V 仕様に変更した。また、これまでの報告によれば、実船における PM 計測では、限られたスペースに装置を設置するため、各構成機器を分割・配置できるような構造にする必要があると述べられている⁵⁾。本研究では、装置 A と装置 B の比較実験を計画しており、単純に装置 A をそのまま複製した場合、両装置を同時に設置することが非常に困難であることが予測できた。そのため、装置 B は、限られたスペースに設置できるように、構成機器を分割し、運搬と設置を容易にした。

以上より、装置 B のシステム制御部は、装置の操作やデータ処理に関する機能を省き、装置の運転データをデータロガーに記録して表示する機能のみを残した。流量制御部は、空氣源から供給された空氣を希釈空氣とするための処理装置を別置きとし、2 台の MFC をそれぞれ分けて設置できるようにするとともに、手動

運転できる仕様に変更した。トンネル制御部は、電磁弁をレバーハンド式のボールバルブに置き換え、差圧計や温度計は先のデータロガーに接続した。ダミーフィルタについては、PM 捕集用と同じホルダとフィルタを使用した。ポンプ部については、希釈排気吸引用のポンプを 100V 仕様に変更し、ポンプ運搬用のワゴン (0.4x0.6x0.6m) に収めた。装置 B のポンプ部は、装置 B を構成する機器の中で最大の容積を占めたが、装置 A の構成装置と比べて小さく、構成機器分割することにより、運搬と設置を容易にすることが可能となった。

2.2 装置 A と装置 B の同等性評価

Table 1 に装置 A と装置 B の比較実験に使用した供試機関の主要目を示す。供試機関として、船用中速 4 ストロークディーゼル機関 (型式: 6L19HX, 燃料噴射を電子制御に改造) を使用した。供試機関の運転には、低硫黄 A 重油 (硫黄分 0.04~0.05% m/m) を使用した。供試機関の排気管への希釈トンネルの設置状況を Fig. 2 に示す。上流側の位置 X に装置 A を設置し、装置 B は 0.5m 下流の位置 Y に設置した。位置 Y においては、装置 B を取り付けるフランジが 5k50A ではなかったため、レデューサーを介して設置した。そのため、排気導入管の長さが装置 A と異なった。また、装置設置の制限から装置 B の希釈トンネル (内径 0.026m) をレデューサーの長さ程度短くした。これらの違いを Table 2 に示す。排気と希釈排気の CO₂ 濃度は、CO₂ 濃度計 (島津製作所製 CGT-7000) により計測した。なお、排気中の CO₂ 濃度計測においては、前処理装置 (島津製作所製 CFP-8000) により前処理を施した。PM の捕集には、フッ素樹脂処理ガラス繊維フィルタ (東京ダイレック製 TX40HI20-WW, 70φ) を使用し、恒温恒湿槽 (東京ダイレック製 PWS-80NF) 内に設置した天びん (メトラー・トレド製 XP6V) によりフィルタを計量した。希釈比については両装置で同じ値になるように調整し、PM 捕集時間については両装置で同一にした。したがって、両装置の結果に違いがある場合、PM 捕集量の違いとなって現れる。この違いを精度よく比較するためには、PM 排出率が相対的に高くなる低負荷率が有利と考え、50% 負荷率以下において定常運転時に比較実験を行った。比較実験を行った結果を Fig. 3 に示す。横軸に装置 A の PM 排出率を、縦軸に装置 B の PM 排出率を示した。希釈比は、8 ~ 11 の範囲であった。Fig. 3 の Point 1 においては、8 回同時計測を行い、平均値を示した。Point 1 以外は、同時計測を行わずそれぞれの条件・装置で 2~3 回計測し、平均値を示した。両結果が一致した場合、Fig. 3 に示した直線上に計測結果が表示される。その結果、装置 B は装置 A に対し

Table 1 Specification of the test engine

Bore [mm]	190
Stroke [mm]	260
Number of cylinder	6
Output [kW]	750
Engine speed [min ⁻¹]	1000
Fuel injection system	Electronically controlled

Fig. 2 Measurement positions along the exhaust pipe of the test engine

Table 2 Length of sampling probes and dilution tunnels

Position	X	Y	Z
System	A	B	B
Length of sampling probes [m]	0.48	0.59	0.69
Length of dilution tunnels [m]	0.53	0.40	0.40

Fig. 3 Result of comparative experiment at position X and position Y

て -3~+5%の範囲を示し、良く一致した。

大橋らは、2 台の異なる型式の分流希釈装置による比較実験を報告し、両装置の結果は±3 割以内で一致したことを示した⁹⁾。この結果と比べ、本研究の両装置の結果は、差異が1桁小さく、良く一致した。この原因は、装置 B が装置 A の複製として作られたためと考える。さらに、Fig.2 に示した位置 X と位置 Y の 0.5m の排気採取位置の違いや、Table 2 に示した排気導入管の長さや希釈トンネルの長さの違いは、大きな影響を与えなかったと考える。

Fig. 3 中の Point 1 の 8 回同時計測の結果を、計測した順に Fig.4 に示す。同時計測ごとに両装置の結果を棒グラフで示し、右端には平均値を示すとともに標準偏差をエラーバーで示した。装置 B の平均値は装置 A の平均値に対して -1%を示し、両装置の結果は標準偏差の範囲内で一致した。Fig. 4 の各計測結果は、装置 A については装置 A の平均値に対して -4~+2%を示し、装置 B については装置 A の平均値に対して -3~+1%を示した。両装置の結果は、どちらも前半低く、後半高くなる傾向を示しており、両装置の平均値の違いに比べて、大きく変化した。この原因は、定常運転しているにも関わらず、何らかの影響で供試機関の PM 排出自体が変化したためと考える。このような変動があるにも関わらず、同時計測をしたため平均値が非常に良く一致した。したがって、分流希釈装置の比較を精度良く行うためには、同時計測をする必要があることが分かった。また、Fig.3 の Point 1 以外は、同時計測を行うことができなかったため、両装置の一致の度合いが若干低かったと考える。

装置 A と装置 B の同等性について、統計的手法により評価を行うこととし、JIS B 8008-1: 2009 付属書 D “システムの同等性評価”を参考にした。本方法では、“装置 B で計測された PM 排出率の母集団の平均値が、装置 A の PM 排出率の母集団の平均値と異なる”という仮説を検証する。仮説は、以下に示す式 (1) による F 検定と、式 (2) による t 検定により、5%優位水準を基準に検定する。Table 3 に下記の式による“F 値”と“t 値”の限界値を示す。これらの限界値より小さい場合には、仮説を承認し両装置は同等である。なお、JIS B 8008-1: 2009 付属書 D においては、比較実験を“なるべく同時”に行うこととし、同時計測に限定していない。一方、本報告では同時計測を前提としたため、式 (2) において計算式を整理した。

$$\bar{x}_A = \frac{\sum_i x_{Ai}}{n}, \quad \bar{x}_B = \frac{\sum_i x_{Bi}}{n}$$
$$S_A^2 = \frac{\sum_i (x_{Ai} - \bar{x}_A)^2}{n-1}, \quad S_B^2 = \frac{\sum_i (x_{Bi} - \bar{x}_B)^2}{n-1}$$

$$F = \frac{S_{major}^2}{S_{minor}^2} \dots (1)$$

(S_A または S_B のいずれか大きいほうを分子にする。)

$$t = (\bar{x}_A - \bar{x}_B) \times \sqrt{\frac{n}{S_B^2 + S_A^2}} \dots (2)$$

n : 同時計測の回数

x_A : 装置 A の PM 排出率 (g/kWh)

x_B : 装置 B の PM 排出率 (g/kWh)

JIS B 8008-1: 2009 付属書 D においては、“少なくとも 7 回の試験”を行うこととしているため、Fig. 4 に示した実験結果を使用することとした。式 (1) と式 (2) の計算結果を Table 4 に示す。その結果、F 値と t 値は Table 3 で示した限界値を下回り、両装置は、同等であることが確認できた。

Fig. 4 Result of Point 1 in Fig. 3

Table 3 Upper limit of Eq. (1) and Eq. (2)

n	F-test	t-test
7	4.284	2.179
8	3.787	2.145

Table 4 Result of Eq. (1) and Eq. (2) for point 1 in Fig. 3

Position	X	Y
System	A	B
	x_A (g/kWh)	x_B (g/kWh)
1	0.164	0.165
2	0.165	0.166
3	0.172	0.169
4	0.170	0.169
5	0.175	0.171
6	0.173	0.170
7	0.174	0.173
8	0.173	0.173
$\bar{x}$	0.171	0.169
S^2	1.61E-05	8.60E-06
S	4.02E-3	2.93E-3
n	8	
F	1.876	
t	0.987	

3. 排気採取位置影響評価実験

Fig. 2 に示した位置 Z は、位置 X からおよそ 12m 下流に当たる。この二つの位置で、PM 排出率がどの程度異なるかについて比較実験を行った。位置 X に装置 A を設置し、位置 Z に装置 B を設置して、これ以外の計測機器は前章と同じ機器を使用した。位置 X と位置 Z に取り付けけた排気導入管の長さや希釈トンネルの長さを Table 2 に示した。位置 Z では、フランジの違いから位置 Y よりさらにレデューサーを入れる必要があり、排気導入管が長くなった。供試機関の運転には、低硫黄 A 重油（硫黄分 0.05% m/m）を使用した。負荷率 50% 以下において、定常運転時に比較実験を行った。同時計測により比較実験を行った結果を Fig. 5 に示す。横軸に装置 A の PM 排出率を、縦軸に装置 B の PM 排出率を示した。希釈比は、両装置共に 9 ～ 10 の範囲であった。Fig. 5 の Point 2 では 7 回、それ以外は 3 回計測をし、平均値を示した。両結果が一致した場合、Fig. 5 に示した直線上に計測結果が表示される。その結果、装置 B は装置 A に対して -4%～2% の違いを示し、全点で装置 B の結果は若干低くなったものの、両装置の結果は良く一致した。この違いは、同時計測を行わなかった Fig. 3 の両装置の違いや、Fig. 4 に示した時系列変化の範囲内であった。したがって、排気採取位置が 12m 離れた場合でも、その減少率は供試機関の定常運転時の変動範囲にはいる程度と考えられる。

Fig. 5 の Point 2 に示した 7 回同時計測の結果を、計測した順に Fig. 6 に示す。同時計測ごとに両装置の結果を棒グラフで示し、右端には平均値を示すとともに標準偏差をエラーバーで示した。装置 B の平均値は装置 A の平均値に対して -3% を示し、装置 B の結果は若干低くなったものの、両装置の結果は標準偏差の 2 倍程度で一致した。なお、計測期間中位置 Y では排気温度はおよそ 400℃、位置 Z ではおよそ 300℃あり、下流の位置 Z の排気温度には 100℃の温度低下があった。位置 X と位置 Z の間には、フランジなどの放熱部があるため、100℃の温度低下が起こったと考える。この放熱部で PM 成分が凝縮または沈着し、わずかに減少した可能性がある。

以上の結果から、定常運転時には排気採取位置が 12m 離れた場合でも PM 排出率の減少量はわずかであることが分かった。したがって、排気採取位置を近づける方が望ましいが、本研究より近い範囲であれば PM 排出率の減少量はわずかであり、排気採取位置を確保することが可能と考える。

前章で行った検定を Fig. 6 に示した結果に適用し、式 (1) と式 (2) の計算結果を Table 5 に示す。この

結果を Table 3 に示した限界値と比較すると、F 値については限界値を下回ったが、t 値については限界値を上回り、同等であることは確認できなかった。

Fig. 5 Result of comparative experiment at position X and position Z

Fig. 6 Result of Point 2 in Fig. 5

Table 5 Result of Eq. (1) and Eq. (2) for point 2 in Fig. 5

Position	X	Z
System	A	B
	x_A (g/kWh)	x_B (g/kWh)
1	0.124	0.119
2	0.124	0.120
3	0.126	0.123
4	0.126	0.123
5	0.126	0.123
6	0.126	0.122
7	0.127	0.122
$\bar{x}$	0.125	0.122
S^2	1.82E-06	3.11E-06
S	1.35E-3	1.76E-3
n	7	
F	1.714	
t	4.397	

4. まとめ

本研究では、当所の分流希釈装置を基本として、これの一部を改良して複製し、両装置による比較実験により、PM 計測における排気採取位置の違いの影響を評価した。船用中速 4 ストロークディーゼル機関の排気管を使用し、低硫黄 A 重油で定常運転して、比較実験を行った結果、次の結論を得た。

1. 両装置を 0.5m 離して設置した場合の比較実験によれば、

(1) 同時計測を行わなかった条件も含めて、両装置の結果は、-3~+5%の範囲内で良く一致した。

(2) 同時計測を 8 回した事例では、両装置の結果は標準偏差の範囲内で一致した。

(3) 定常運転時でも PM 排出率は若干変化するため、比較実験を精度良く行うためには、同時計測をする必要があることが分かった。

(4) 同時計測を 8 回した事例から、JIS B 8008-1: 2009 付属書 D を参考にして、統計的な手法により両装置の同等性を確認することができた。

2. 両装置を 12m 離して設置して、同時計測をした場合の比較実験によれば、

(1) 下流側の装置の PM 排出率は -4~2%の違いにとどまり、若干低くなったものの、両装置の結果は良く一致した。

(2) 同時計測を 7 回した事例から、統計的手法により両装置の同等性を確認することはできなかった。

(3) 同時計測を 7 回した事例では、両装置の結果は標準偏差の 2 倍程度で一致した。

(4) これらの結果から、排気採取位置を近づける方が望ましいが、定常運転時には PM 排出率の減少量はわずかであるため、本研究より近い範囲であれば排気採取位置を確保することが可能と考える。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP16K0922, JSPS 科研費 JP17K06974 の助成を受けたものです。国立研究開発法人 水産研究・教育機構 水産大学校 前田和幸 特命教授、津田 稔准教授および耕洋丸の皆様には、“可搬式高精度 PM 計測システム”の使用経験に関して、情報を頂きました。関係各位に深く感謝申し上げます。

References

- 1) A. Masuda, M. Nakamura, C. Takahashi, A. Ohashi, S. Nishio, Y. Niki, Determination Black Carbon Concentration from Marine Diesel Engines by

Multi-instrumental Measurements, Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering (ISME), October 15-19, 2017, Tokyo, Japan, 414-415.

- 2) M. Nakamura, A. Ohashi, A. Masuda, C. Takahashi, S. Nishio, Study of Thermal Optical Analysis Protocol for Marine Diesel Engines Exhaust Gas, Proceedings of the 86th Annual Meeting of JIME (2016), 7-8.
- 3) K. Tuchiya, H. Yamazaki, Comparison of the Partial Flow Dilution System and the Full Flow Dilution System in PM Measurement, JARI Research Journal, 25-5(2003), 149-152.
- 4) K. Maeda, K. Takasaki, G. Kon, M. Tuda, M. Hori, PM Emission from Ships - How to measure and reduce PM during voyage, 26th CIMAC, No.87 (2010).
- 5) Guidline for Particulate Matter Measurement Emitted from Marine Diesel Engines, JIME-PM-01-0001, 2011.3, JIME.
- 6) A. Ohashi, Z. Xu, H. Sasaki, T. Tsukamoto, Comparative Experiments of PM Concentration Measurements by Partial Flow Dilution Method, J. JIME, 49-1 (2014), 126-131.
- 7) A. Ohashi, M. Ikame, E. Ishimura, Influence of Deposition Loss in Dilution Tunnel on Particulate Matter Measurements, J. JIME, 47-1(2012), 97-104.