

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06974

研究課題名(和文) 振動を利用した炭素粒子の沈着・再飛散に関する研究

研究課題名(英文) Study on deposition and reentrainment of carbon particles using vibration

研究代表者

大橋 厚人(OHASHI, ATSUTO)

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：20358394

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：粒子状物質(PM)計測で使用する排気導入管内のPM損失対策に関して、以下の知見を得た。1：炭素粒子発生装置で発生させた粒子による実験では、排気導入管に衝突を加えても、沈着と再飛散を相殺させる条件を見つけることはできなかった。2：PM計測精度が再飛散により低下している場合の判断方法を提案した。3：PM計測前後に排気導入管内に沈着した粒子を除去する方法を提案した。4：PM損失を低減する排気導入管を試作した。2台のPM捕集装置の同等性を確認するとともに、これら2台の装置により、排気管の長さ方向の排気採取位置の違いがPM計測に与える影響を、評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質(PM)の計測は、計測法に依存した不確実性がある。本研究では、PM捕集装置の一部である排気導入管に着目し、計測精度が再飛散により低下している場合の判断方法の提案、計測法で決められていない洗浄方法の提案、PM損失を低減する排気導入管の試作を行い、計測法の改善を進めることができた。

当所が所有する実験施設や装置は、国内では極めてまれな施設や装置であり、これらの基礎情報として、装置の同等性や、計測環境の均一性が確認でき、これらの存在価値をさらに高めることが出来た。

研究成果の概要(英文)：In order to reduce the particulate matter (PM) loss in the sampling probe used in PM measurement, we were able to obtain the following results. 1: In the experiment using the carbon particle generator, it was not possible to find the condition that offset the deposition and reentrainment of carbon particles even if the sampling probe was impacted. 2: A method was proposed to find out that PM measurement precision was degraded due to reentrainment. 3: A method was proposed to remove the deposited particles in the sampling probe before and after PM measurement. 4: A sampling probe that reduced PM loss was prototyped. After checking the equivalence of two partial flow dilution systems for PM measurement, the effect of the difference in the sampling positions for PM measurement along the exhaust pipe of a marine diesel engine was evaluated by these two dilution systems.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：PM計測 振動 衝突 沈着 再飛散

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

船用ディーゼル機関から排出される粒子状物質 (PM) の計測は、規格 (JIS B 8008-1) に基づいて行われる。この規格には、排気を 4 倍以上に希釈する計測条件や、使用燃料中の硫黄含有率に 0.8% の上限があることが、記述されている。船用燃料では、この上限を超える重質油を使用することが多く、重質油を使用した実験において、希釈条件に依存して 2.5 倍計測結果が異なる事例が報告されている¹⁾。この原因は、希釈条件により計測系内の PM 損失が異なるためと考えられる。しかし、計測系内にどの程度の損失があるか、計測系内のどの部位で損失しているかについては、報告が少ない。PM は、人体に悪影響があり、排出実態調査、リスクアセスメント、リスクマネージメントを至急行う必要がある。しかし、計測法に依存した不確実性が解消されない限り、これらを正確に行うことは難しい。

計測法の改善を目指して、当所では、図 1 に示す PM 捕集装置 (JIS B 8008-1:2000 準拠、有限会社エフテクノ製: MIT-2000CT) について、計測系内の PM 損失を評価してきた^{2),3)}。損失評価を行うため、PM に含まれる 2 種の物質をトレーサーとして使用した。排気管内から直接得たトレーサーと、PM として捕集されたトレーサーの比較から、装置内の損失を求めた。その結果、我々が使用している希釈条件では、半分程度が損失していた。装置内の PM 損失部位については、これまでに図 1 に示した希釈トンネルに関して取り上げた事例がある⁴⁾。

本研究では、損失部位として図 1 に示した排気導入管に着目した。排気導入管については、日本マリンエンジニアリング学会より、希釈空気が接触する部分を二重管の直管構造とすることが提案⁵⁾され、図 2 に示す通り、当所においてもこの構造を取り入れた排気導入管を使用している。しかし、対象が粒子である限り沈着をなくすことはできず、実際に排気導入管内にスートとみられる沈着を確認した。そのため、排気導入管内の PM 損失対策が必要と考えた。

2. 研究の目的

本研究では、排気導入管内の PM 損失に対する改良を最終的な目的とする。改良の方法として以下の方法を提案した。排気導入管の二重管構造を保持しているスペーサーを操作して、加振器や船用ディーゼル機関で発生する振動を利用し、二重管の間に振動に起因した衝突を起こさせる。このことにより排気導入管内に沈着した粒子の再飛散を促進し、沈着と再飛散を相殺し、損失を防ぐことを目指した。そのため当初以下の二つを目的とした。

(1)炭素粒子発生装置で発生させた粒子を使った基礎実験

排気導入管で使用するステンレス管に炭素粒子発生装置で発生させた粒子を流し、このステンレス管に振動や衝突を加えて、沈着と再飛散のプロセスを解明する。

(2)当所実験機関を使用した検証実験

当所実験機関の振動を調べ、利用可能な振動をしらべる。PM 損失を相殺するために適切な排気導入管を製作し、効果の検証実験を行う。

しかし、基礎実験の結果から相殺が難しいこと、沈着した粒子はその後の計測に悪影響が起こることが明らかとなった。そのため、相殺できないのであれば、排気導入管に沈着した粒子を除去する必要があると考え、この方法や、PM が損失しにくい排気導入管への改良についても検討した。

3. 研究の方法

(1)炭素粒子発生装置による実験

炭素粒子発生装置で発生させた粒子をステンレス管に流し、ステンレス管での粒子捕集と捕集された粒子の回収について、実験概要を図 3 に示す。粒子源として炭素粒子発生装置 (PALAS GmbH 製: DNP2000) を使用した。本装置は、窒素ガス中で黒鉛電極の間に高電圧をかけて放電させ、このことにより、電極から炭素粒子を発生させる構造となっている。放電周波数を変えることにより、単位時間当たりの発生重量を調整でき、さらに空気で希釈することにより重量濃度と試料流量を調整できる。発生させた炭素粒子を、長さ

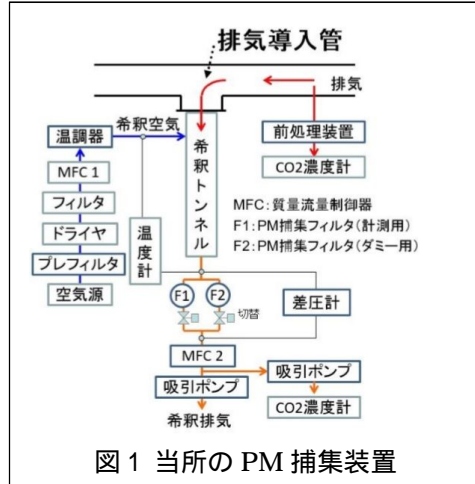


図 1 当所の PM 捕集装置

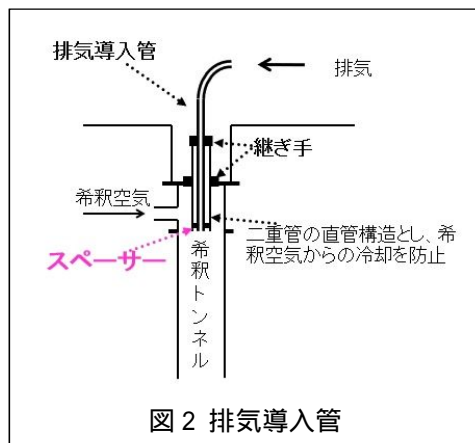


図 2 排気導入管

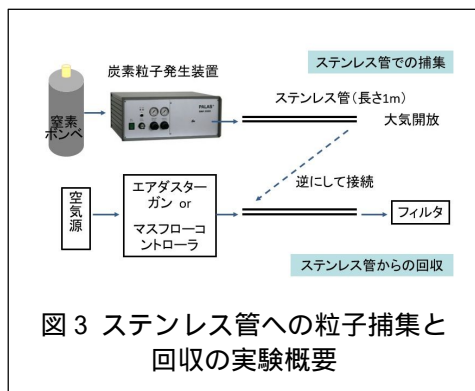


図 3 ステンレス管への粒子捕集と回収の実験概要

1mのステンレス管(スウェージロック社製:SS-T8M-S-1.0M-2MJk、SS-T6M-S-1.0M-2MJk)内に流し、管内に炭素粒子を捕集した。ある時間捕集後、ステンレス管内の炭素粒子をエアダスターガン(トラスコ中山株式会社:TD-30、使用圧力0.4MPa)又はマスコフローコントローラ(コフロック株式会社:8550MC)を使用して反対側から空気を流し、捕集した粒子を再飛散させて、フッ素樹脂処理ガラス繊維フィルタ(東京ダイレック株式会社製:TX40HI20-WW)へ回収した。回収前後でフィルタ重量を計量することにより、回収した炭素粒子の重量を求めた。回収終了後、ステンレス管内を洗浄し、ステンレス管を再利用した。洗浄時に若干の炭素粒子を確認したが、以下の報告ではこの重量を無視した。捕集実験時の室温は22~25であった。

発生させた粒子の粒径を、粒径計測装置(Dekati Ltd.製:HR ELPI+)を使用して計測した。

ステンレス管に衝突を加える実験概要を図4に示す。ステンレス管の粒子発生装置側を固定し、出口側に振動を加えた。加振点付近の設置例を図5に示す。振動発生装置(エミック株式会社製512-A)に、10の穴をあけた器具(排気導入管の二重管の外管を想定)を取り付け、この穴にステンレス管をとおし、ステンレス管に衝突させた。振動発生装置を、ファンクションジェネレータ(IWATSU ELECTRIC CO., LTD.製FG-350)で発生させたサイン波をアンプ(エミック株式会社製371-A)により増幅して駆動させた。ステンレス管の出口をより径の大きな管の中に入れ、ステンレス管の周りにも清浄な空気を流し、ステンレス管内を通過した試料と一緒にフィルタへ吸引させ、粒子を捕集した。振動計測は、振動計(リオン株式会社製VA-12)を使用した。

(2)船用ディーゼル機関による実験

表に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)を使用した。排気管とPM捕集装置の設置位置を図6に示す。位置Xは、PM捕集装置を設置できる最上流位置にあたる。ここから0.5m下流に位置Yがある。これらからさらに下流に、排気を採取可能なフランジ群がある。今回実験に関係した位置Zは、位置Xから12m下流に位置する。

4. 研究成果

(1)炭素粒子発生装置による実験

図7に炭素粒子発生装置で発生させた粒子の粒径計測例を示す。計測した炭素粒子の質量濃度は、5 mg / m³N (N:0、101325Pa換算)であった。30秒間の計測結果の平均値を示した。空気力学径15nm付近に個数分布の最大値を示した。

図8に、炭素粒子を装置の最大発生条件で発生させ、0.007m³N/分の流量でステンレス管(内径6mm)に流した場合の捕集重量を、捕集時間をかけて求めた結果を示す。粒子の回収にはエアダスターガンを使用した。時間経過とともに捕集量が増大したが、同じ捕集時間でも捕集量に違いがある場合があった。発生させた濃度は、16~21 mg/m³Nであり、供試機関の元素状炭素の排出濃度程度にした。

上の結果から、全発生量に対するステンレス管内に捕集された重量の比率を、捕集率として求めた結果を図9に示す。時間経過とともに捕集率が増加する傾向があった。この条件では管内は層流となるため、層流中の拡散沈着の半実験式⁶⁾により沈着率を求めるとおよそ2%となり、図9の結果は、これより大きくなっ

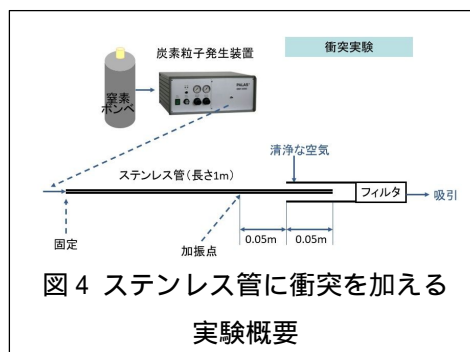


図4 ステンレス管に衝突を加える
実験概要

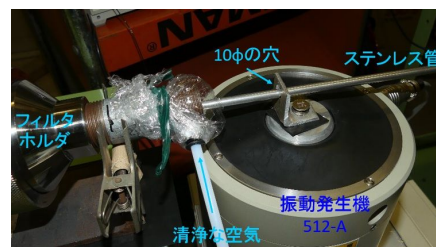


図5 加振点付近の設置例

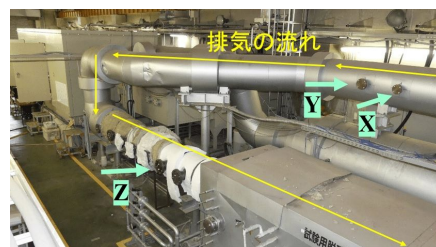


図6 PM捕集装置の設置位置

表1 供試機関

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

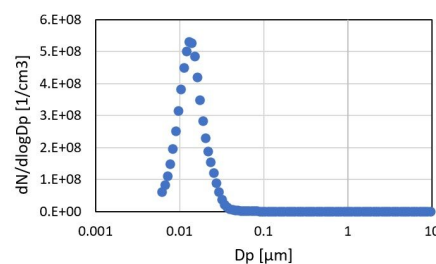


図7 炭素粒子発生装置出口の粒径

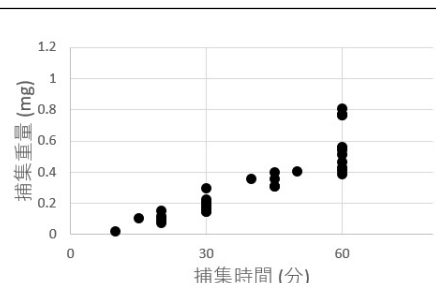


図8 ステンレス管内の捕集重量

た。半実験式の結果より大きくなった理由として、放電で発生させた粒子であるため粒子が電荷を帯びており沈着が促進される⁷⁾、沈着した粒子により管内の表面積が増大し沈着を促進させるなどの理由が考えられる。

上と同じ条件で 60 分捕集させたステンレス管に、マスフローコントローラで1分間空気を流して捕集粒子を再飛散させ、再飛散率を求めた。図 10 に結果を示す。50%再飛散率は、内径 6mm で 0.06m³N/分付近、内径 4mm では 0.025m³N/分付近であった。管内平均流速に換算すると、内径 6mm と内径 4mm とともに、同程度となった。流量を上げることで再飛散を促進するのであれば、内径 4mm (JIS B 8008-1 で指定される排気導入管の最小径) が有利であることが分かった。

図 11 には、ステンレス管 (内径 6 mm) に上と同じ条件で 60 分捕集させた後、マスフローコントローラで 0.01m³N/分の空気を 1 分間流して再飛散させ、炭素粒子を回収したフィルタの写真を示す。フィルタ上に不均一な黒点が観察された。これは、炭素粒子が壁面で凝集したため、装置で発生させた粒子より大きくなり、流体抵抗を受けて再飛散し、フィルタ上で不均一に回収されたためであると考えられる。したがって、PM 捕集において、排気導入管で再飛散が起こる場合には、同様の現象が観察されるはずであり、再飛散が起こることで精度が落ちる場合の指標として、利用可能と考える。(「5 . 主な発表論文等」学会発表、2018 年参照)

図 5 に示した衝突実験の前段階として、ステンレス管への捕集時に、振動や衝突を加える実験も行った。しかし、振動を加えない場合と違いがみられなかった。そこで、上と同じ粒子発生条件でステンレス管 (外径 8mm、内径 6 mm) に 60 分捕集させた後に、捕集条件と同じ 0.007m³N/分の流量で窒素を流し、衝突させる実験を実施した。今回使用したアンプは最大 3A の出力が可能な仕様であるが、加振中に異常を検知した場合、電源が遮断される構造となっている。そのため、事前に 1 分間衝突させることができる最大の出力と振動発生機の変位を調べ、実験を行った。実験条件を表 2 に示す。その結果、表に示した中でアンプ出力が最も大きな 20Hz でさえ、再飛散率は 5% 未満であった。以上から、今回用意できた振動発生機の条件では、十分な再飛散を起こすことができず振動や衝突により再飛散を促進し、沈着と相殺すること現実的には難しいと判断した。

(2) 船用ディーゼル機関による実験

排気導入管の改良効果を検証するためには、2 台の同等な PM 捕集装置が必要である。そのため、図 1 に示した PM 捕集装置を複製した。図 6 に示した位置 X と位置 Y では、2 台の PM 捕集装置が同等の結果をもたらすかどうかを確認する実験を行った。図 6 に示した位置 X と位置 Z では、これらの 2 台の装置を使い、排気採取位置の違いにより、どの程度 PM 計測結果に違いが出るか、つまり当所の実験場の計測環境がどの程度均質であるのかについて実験を行った。その結果、位置 X と位置 Y においては、PM 排出率の平均値が標準偏差の範囲内で一致し、位置 X と位置 Z においても平均値が標準偏差の 2 倍程度で一致した。PM 中のサルフェートについても分析し、サルフェート排出率も同様の結果であることを示した。図 12 に、一例として、低硫黄 A 重油を使用し船用特性 50% 負荷率で定常運転した時に、位置 X と位置 Z の PM 排出率を比較した結果を示す。7 回同時計測を行いそれぞれの結果を示すとともに、一番右に平均値と標準偏差の 2 倍を誤差棒で示した。(「5 . 主な発表論文等」雑誌論文 と学会発

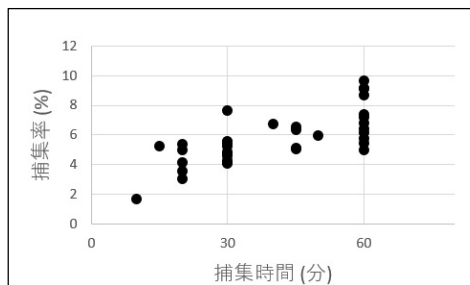


図 9 ステンレス管内の捕集率

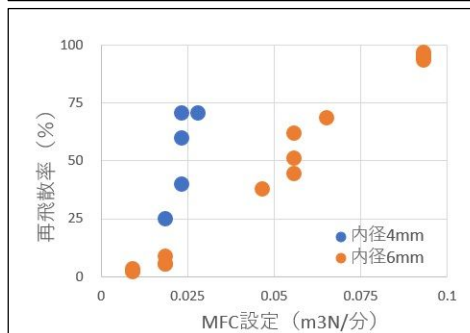


図 10 管内流量 VS 再飛散率



図 11 再飛散粒子の捕集例

表 2 加振条件

周波数 (Hz)	アンプ出力 (A)	振動発生機 等価 p-p 値(mm)
20	1.4	4.5
35	1.0	5.5
50	0.8	3.9

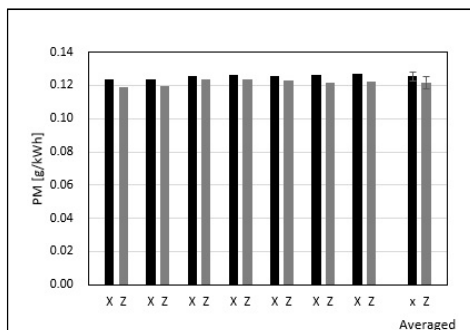


図 12 PM 排出率の比較

表、2019年参照)

供試機関において振動計測を行った。図13に、一例として、位置Xと位置Zの排気管の支柱にて計測した結果を示す。およそ40Hz弱に最大のピークが観察された。この振動数は、船用特性50%負荷率(エンジン回転数794min⁻¹)4ストローク、6気筒から計算される爆発周期を示していた。

図14に衝突制御排気導入管の概略図を示す。これを試作し、位置Xに設置した事例では、エンジンが過渡状態の時に、内管制御用のピンを操作することで、衝突をon/offすることができた。しかし、炭素粒子発生装置による実験によりPM損失の相殺が難しいことが分かり、改良効果の検証実験は行わなかった。(3)排気導入管に沈着した粒子を除去する方法と排気導入管の改良

図11に示した通り、沈着した粒子は粗大化して再飛散し、以後のPM計測に精度の低下などの悪影響を与える可能性がある。また、図9に示した通り、沈着した粒子はそれ以後の沈着を促進する可能性もある。そのため、相殺できないのであれば沈着した粒子を除去する必要があると考えた。なお、PM計測の規格(JIS B 8008-1)には、排気導入管の洗浄に関する記述は見当たらなかった。図15にPM計測手順を示す。横軸に時間、縦軸に排気導入管内の流量を示した。縦軸のプラスの範囲は、PM捕集装置内への排気の吸引を示す。PM捕集の待機状態では希釈空気を増やし、排気導入管から逆流させることにより、排気による装置内の汚染を防いでいる。この時、図1に示したMFC2は0.1m³/分、MFC1は0.11m³/分とし、F2側の流路が開いている。この状態で、図1のF2を外し、希釈トンネル側の出口を押さえることで、希釈空気全量を排気導入管へ流すことができ、沈着粒子の除去に使用可能とわかった。また、図10の結果から、内径4mmの排気導入管を使用することが、再飛散を促進する上で有利であることが分かった。今後、この手順をPM計測に組み込むとともに、内径4mmの排気導入管に変更して、PM計測を行う予定である。

図15に示した様に、計測待機時には排気導入管へ希釈空気が逆流している。したがって、この間、排気導入管が冷却されることとなる。排気吸引に切り替えたとき、冷却された排気導入管で排気が冷やされて、沈着を促進する可能性がある。これを避ける方法として、図16に示すとおり、清浄な空気を排気温度まで加温し、排気導入管の先のT字部から入れ、希釈空気を逆流させなくとも、排気が装置内に入らない構造に改良することを提案し、試作した。

以上で述べた、排気導入管に沈着した粒子を除去する方法と排気導入管の改良は、排気導入管内でのPM損失の低減につながると考える。残念ながら、これらの効果の検証実験は、実験機関の故障でできなかった。

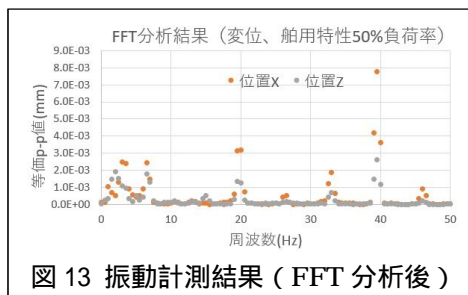


図13 振動計測結果 (FFT分析後)

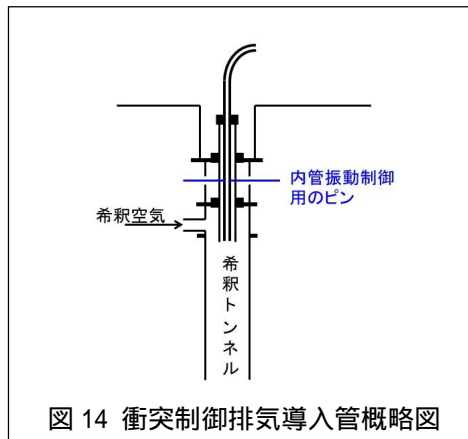


図14 衝突制御排気導入管概略図

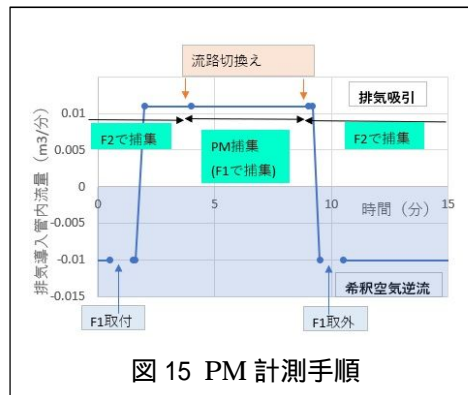


図15 PM計測手順

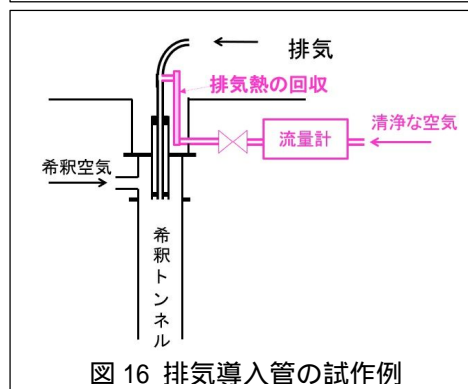


図16 排気導入管の試作例

<引用文献>

- 1) L. Ntziachristos, et al., 28th CIMAC Congress 2016, Helsinki, Paper No. 165.
- 2) 大橋、他 4 名、日マリ学誌 45 (3) 127-132 (2010)。
- 3) 大橋、徐、第 13 回海上技術安全研究所研究発表会講演集、海上技術安全研究所、137-144 (2013)。
- 4) 大橋、他 2 名、日マリ学誌 47(1)、97-104 (2012)。
- 5) 日本マリンエンジニアリング学会、JIME-PM-01-0001-2010。
- 6) P. G. Gormley and M. Kennedy, Proc. R. Ir. Acad. 52A, 163-169(1949).
- 7) 私信

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 大橋厚人、中村真由子	4. 巻 54
2. 論文標題 PM計測における排気採取位置の影響	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 マリンエンジニアリング	6. 最初と最後の頁 644-649
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.5988/jime.54.644	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大橋厚人、中村真由子
2. 発表標題 分流希釈装置の複製と比較実験
3. 学会等名 日本マリンエンジニアリング学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大橋厚人
2. 発表標題 ステンレス管内での炭素粒子の捕集
3. 学会等名 日本マリンエンジニアリング学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	宮田 修 (MIYATA OSAMU)		