

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：82627

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15224

研究課題名（和文）船用ジェット式小型スクラバ内部におけるSOx除去予測モデルの構築

研究課題名（英文）Development of Prediction Model for SOx Removal in Small Marine Scrubber

研究代表者

馬 驍 (Ma, Xiao)

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：10825920

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：船舶由来の排ガスに含まれる硫黄酸化物（SOx）を効率的に除去可能な手法として、排ガスと同じ流れ方向に洗浄水液滴を高速で噴射して除去する技術（ジェット式スクラバ）がある。当該手法はSOxを高効率で除去できると知られているが、定量的な除去量の予測はできていなかった。本研究では、スクラバ内で生じている蒸発等を考慮するとともに、スクラバ内に噴射される洗浄水液滴径の分布を直接可視化計測により詳細に取得することで、ジェット式スクラバによるSOx除去を定量的に予測可能な解析モデルを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は船舶由来の排ガスに含まれるSOxを主対象とし、スクラバによる除去効率を定量的に解析できるようになった。任意のガス種の物性を組み込むことで、当該解析モデルはスクラバによるガス処理効果・効率を提供できる。今後船舶由来の排ガスに対してさらなる規制強化が予測されている中で、代替燃料の開発や、新しい主機の開発について、ガス処理の視点から環境対策技術の開発に資する重要な役割を果たしており、学術的・社会的意義を有している。

研究成果の概要（英文）：One effective technique for the efficient removal of sulfur oxides (SOx) from ship exhaust gases is the use of a jet scrubber. This device works by injecting cleaning water droplets at high velocity in the same direction as the exhaust gas, effectively removing SOx. Despite the acknowledged high efficiency of this method, accurately predicting the amount of SOx removal has remained a challenge. In this research, we have developed an analytical model capable of quantitatively predicting SOx removal by jet scrubbers. This model takes into account various factors, including evaporation, that occur within the scrubber. In addition, we have obtained detailed information on the size distribution of scrubbing water droplets injected into the scrubber through direct visualization and measurement.

研究分野：船舶海洋工学

キーワード：排ガス処理 SOx 湿式スクラバ 混相流 相変化

1. 研究開始当初の背景

これまで特定の海域を除いては、燃料油中の硫黄分が 3.5% まで認められていたが、2020 年 1 月 1 日より全船種を対象に、硫黄分 0.5% までと規制強化されることが決まっている^[1]。対応策の一つとして、排ガスを大気に排出する前に脱硫処理する SO_x スクラバの利用がある。当該手法は、他の燃料そのものを変更する手法に比べてエンジンシステムの換装が不要であり、容易に導入可能であることから注目を集めている。SO_x スクラバ (図 1) は大まかに 2 つの区間で構成されている。一つ目は、スプレーノズルから洗浄水を噴射して排ガスを冷却する区間、二つ目は、洗浄水と排ガスを接触させてガス処理を行う区間である。後者は充填剤で満たした脱硫塔を採用する場合が多く、それゆえ SO_x スクラバシステムとして大型化してしまう課題があった。

他方で先行して実施した実機スケールの試験計測^[2]では、冷却区間で排ガスの冷却と同時に、ガス吸収が十分に行える条件が存在することを確認した。mm オーダーから μm オーダー程度の液滴を排ガスに吹きかけるだけの簡易な構造であり、ジェット式スクラバと呼ばれている。この手法が様々な運転条件に対応できれば、従来の SO_x スクラバ装置が大型化する要因であった脱硫塔を省いたシステムを構築可能となり、大幅なサイズダウンが期待される。これにより、これまで SO_x スクラバの搭載が困難であった比較的小型の船舶に対しても適応できる装置となりえる。しかしながら当該スクラバを想定した、脱硫に関する物理モデルが無く、脱硫能力を発揮するための条件が定かでない。

2. 研究の目的

高い脱硫効率を維持するためには、ジェット式スクラバ (以下、スクラバ) 内部における排ガスおよび洗浄水各相の状態を詳細に把握した上でスクラバを設計する必要がある。

本研究では、スクラバ内における熱・物質の移動に着目し、先行の試験計測条件を再現する解析モデルの構築を目的とする。本研究では SO₂ を主対象として、解析モデルでは主機負荷率に連動して変化する排ガス温度、排ガス流量、必要な洗浄水流量について考慮する。さらに、洗浄水噴霧を形成するためのスプレーノズルにおいても大、中、小の 3 種類用意し、それぞれのノズルに流れる洗浄水流量が形成する液滴径分布も考慮する。このモデルが達成できれば、SO₂ 以外の任意のガス除去に適応できるだけでなく、排ガス内に含まれるブラックカーボン等を含む粒子状物質 (PM) の除去にも応用が可能であり、今後も強化が続く環境規制への対応手段としてさらに有用性が増すものと考えられる。

3. 研究の方法

(1) スクラバ内に存在する液滴径分布を把握するため、図 3 の概要図で示す可視化計測を行う。先行研究で活用した噴口径が異なる 3 種類のノズル (Large, Middle, Small) を使用し、流量を変化させることで、各ノズルの特性を詳細に取得する。高速度カメラに対して背面に LED ライトを設置し、カメラのシャッタータイミングと同期して光源を発光させることで噴射液滴のシ

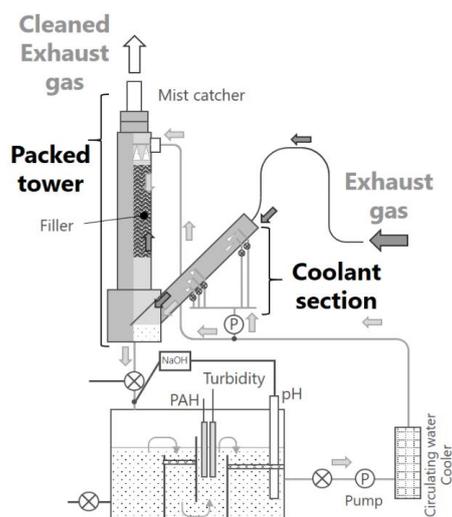


図 1 SO_x スクラバの概要図

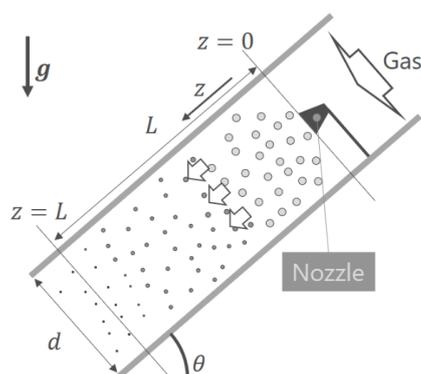


図 2 冷却部内の概要図

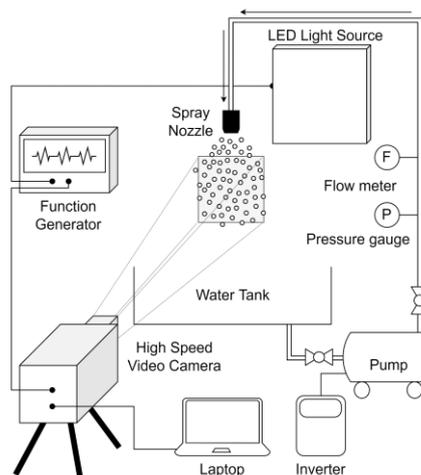


図 3 可視化計測装置概要図

ャドウグラフを撮影する。撮影画像について画像処理を施すことで、各ノズル各流量条件における液滴径分布の特徴を捉える。

(2) スクラバ内における物理現象を特定するため、解析モデルを構築する。本モデルの構築に当たって、熱と物質の移動を検討する必要がある。本研究で取り扱う船用排ガス温度は概ね 300°C 以上で、そこに 30°C 程度の洗浄水を噴射する体系である。高温なガスに接触する洗浄水液滴界面においては、蒸発が促進され、系全体の温度が冷却されると考えられる。他方で、物質の輸送については、排ガス中に含まれるガス（本研究では SO₂）濃度が高く、液滴にはガスが溶解していない条件である。スクラバ内を移動しながら液滴内に気相中の SO₂ が移動すると考えられる。これら熱と物質の移動について考慮したモデルを開発する。

(3) 先行研究で実機を用いて計測した値と、解析モデルを用いて計算した値の比較を行う。計算では液滴径分布を考慮しない、液滴径はノズルのみに依存する単純化した条件と、流量条件に依存して液滴径分布を形成するより現実に即した条件で計算を実施する。計測結果と計算結果の両者の差異についてそれぞれ検証するとともに、SO₂ 除去に必要な洗浄水流量と必要なスプレーノズルの特徴についてまとめる。

4. 研究成果

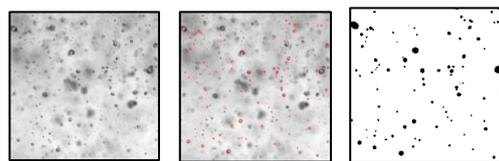
(1) 図 3 の体系で撮影した画像について焦点が合う液滴のみを選択して、以下の対数正規分布で近似した一例を図 4 に示す。ここで D_e は液滴直径、 μ および σ はパラメータである。

$$f(D_e) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma D_e} \exp\left(-\frac{(\log D_e - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

当該手法を 3 種類のノズルに適応し、流量条件を変化させた。図 5 は流量変化に伴う平均液滴径変化について、各ノズルの特性を示した。その結果、いずれのノズルにおいても、流量が増加することで形成される平均液滴直径 $D_{e,mean}$ が小さくなる傾向を示した。取得したノズルの情報を基に、任意のノズルとそこに流れる流量から、形成される液滴径分布を予測、使用するノズルの組み合わせでスクラバ内全体の液滴径分布を推定した。

(2) 質量、運動量、エネルギーそれぞれの保存式に加えて、液滴の蒸発、SO₂ ガスの移動、補完式で構成される、流れ方向のみに物理量が変化する一次元定常モデルの方程式系を構築した。ここで、洗浄水の物理量は IAPWS^[3] が報告している水の値を参照し、気相の組成については化学反応計算ソフトの Cantera^[4] を参照した。液滴の蒸発は先行研究^[5] に倣い Spalding の式を用いることで、液滴の直径や温度などの情報を更新した。ガスの移動については気相-液相間の濃度差で駆動する Fick の法則を組み込んだ。なお、スクラバ内においては液滴は均一に空間に存在し、スクラバ壁面で形成する液膜、液滴同士の衝突、気相に含まれる水分の凝縮は無視した。

(3) 表 1 で示す計算条件に基づき、先行研究でエンジン負荷率 75% の条件で計算を行った結果を図 6、図 7 に示す。横軸がスクラバ入り口からの距離で、縦軸は排ガス温度および SO₂ 濃度を示している。図内◇は計測結果であり、ノズル流量が異なる 3 条件で解析モデルによる計算



(a)元画像 (b)液滴抽出 (c)二値化

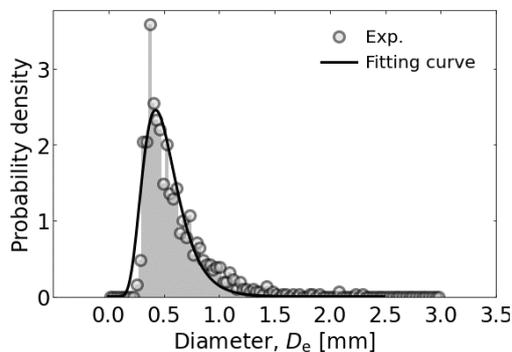


図 4 取得した液滴径分布

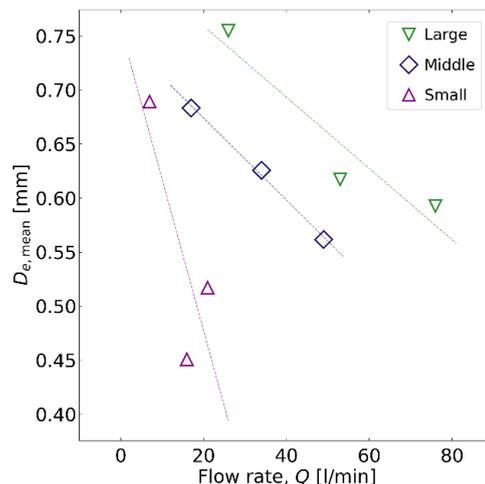


図 5 各ノズルにおける平均液滴直径と流量の関係

表 1 計算条件

スクラバ直径	D	[m]	0.3
スクラバ全長	L	[m]	1.0
刻み幅	dz	[m]	0.2×10^{-3}
初期圧力	P_0	[kPa]	100.0
初期ガス温度	T_{g0}	[°C]	320.0
初期液滴温度	T_{l0}	[°C]	19.0

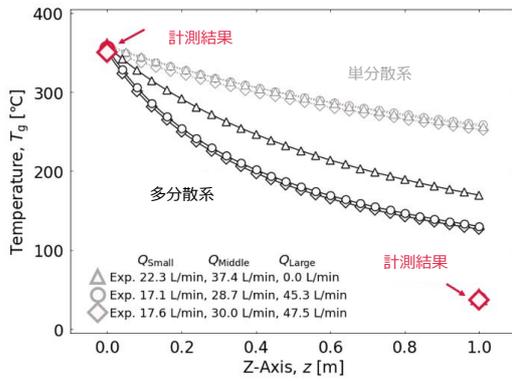


図6 ジェット式スクラバ内の温度変化

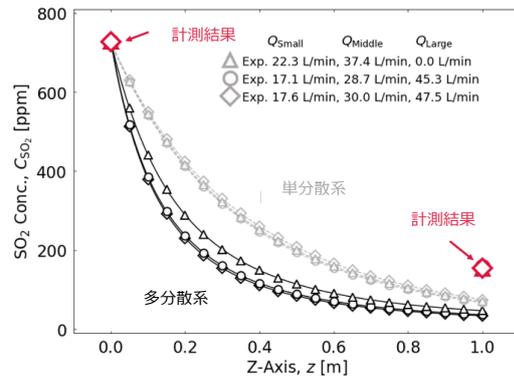


図7 ジェット式スクラバ内のSO2濃度変化

値を算出した。単分散系は液滴径分布がノズルのみに依存すると簡略化した条件（液滴直径=0.3mm, 0.5 mm, 0.7mm）^[6]、多分散系はノズルに流れる流量により液滴径の分布が形成されると考慮した条件である。この結果、図6のスクラバ内温度変化については、液滴径分布を考慮することで計算結果が計測結果に近づいた。図7のSO₂濃度変化については、液滴径分布を考慮することで計測したSO₂濃度よりも高いSO₂除去性能が表れた。これらは、分布を考慮することで従来モデルでは検討できていなかった直径0.3mm以下の液滴による効果が表れたためであると思われる。両図を見比べると、直径が小さい液滴の効果は、ガスの吸収よりも温度の冷却に大きく寄与していることが確認された。他のエンジン負荷率でも同様に、計測した結果とモデルによる計算結果を比較すると、SO₂の除去には直径が0.2 mm ~ 0.4 mm程度の液滴が大きく寄与した結果を得た。

続いて、スクラバ内の状態とSO₂除去率の関係性を定量的に評価した。スクラバ内の気液全体の相流量に対する洗浄水流量の比を β 、スクラバ内における液滴径分布のザウター平均径をSMD、スクラバ通過により除去されたSO₂の比率を ε ($\varepsilon=1.0$ でスクラバ出口SO₂が0 ppm)と定義する。この関係性を図8に示す。表示したプロットは全てIMOが定めるSO_x排出の基準を満たしている条件である。この結果から、SMDが大きい程多量の洗浄水流量が必要であり、他方でSMDが小さい程少量の洗浄水流量でSO₂を除去できることが見て取れる。またSMDが0.5 mm程度においては β が0.1から0.3まで幅広く存在している。この結果から、当該条件において β が0.3の条件はやや過剰に洗浄水を噴射していると推察できる。実機を使用した試験では実施していないが、SMDが小さく、かつ、 β も大きい図内右上に相当する領域においてもSO₂除去率は十分達成できると考えられる。しかしながら、この条件ではSO₂を必要以上に除去することになるため、スクラバ内に洗浄水を供給するためのポンプ負荷をかけることに直結し、消費電力との兼ね合いが推察される。今後はSO₂以外のガス除去への適応性検証や微粒子除去への拡張^[7]を継続して検討するとともに、これまで無視していたスクラバ管壁に存在する液膜の影響や、液滴同士の相互干渉を加味することで、今後多様な船用エンジンの開発に対抗可能な排ガス除外装置としての開発を進めていく予定である。

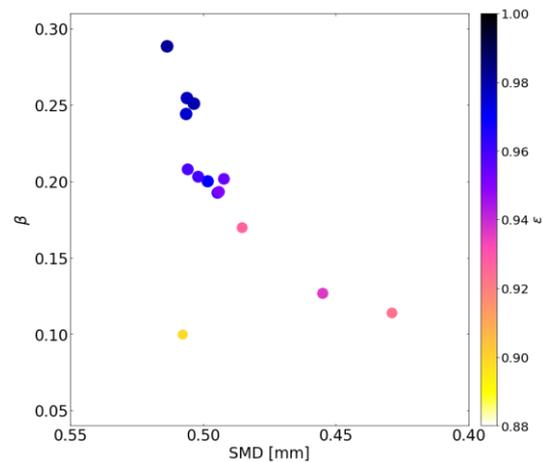


図8 スクラバ内状態とSO2除去率の関係

<引用文献>

- [1] MARPOL Annex VI, Regulation 14.
- [2] 平田宏一、市川泰久、高橋千織、益田晶子、中村真由子、馬驍、SO_xスクラバの小型化に関する研究、海技研研究発表会、PS-16、2019.
- [3] <http://iapws.org/index.html>
- [4] David G. Goodwin, Raymond L. Speth, Harry K. Moffat, and Bryan W. Weber, Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes, <https://www.cantera.org>, 2018. Version 2.4.0. doi:10.5281/zenodo.1174508
- [5] M. Takagi, S. Kawauchi, T. Kishi, E. Muraoka and T. Nagai, Prediction of Deactivation and Regeneration of DeNO_x Catalyst Using Simple Reaction Model – 3rd Report: Effect of

Decomposition of Urea Water Solution, *J. JIME*, 46-5(2011), 119-124.

- [6] X. Ma, A. Masuda, A. Kimura, Y. Niki, and K. Hirata, Development of Analytical Model for SO_x Removal by Marine SO_x Scrubbers and of Small Scrubbers, *J. JIME*, 57-1(2022), 104-114.
- [7] X. Ma and A. Masuda, Numerical calculation for elucidation of BC particle removal mechanism by marine jet scrubber, *The 60th Annual Meeting of Japan Society for Atmospheric Environment*, (2019), 2E1045.

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 0件）

1. 著者名 馬 駿, 益田 晶子, 木村 新太, 仁木 洋一, 平田 宏一	4. 巻 57
2. 論文標題 船用SOxスクラバにおけるSOx除去解析モデル構築と小型スクラバの開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 マリンエンジニアリング	6. 最初と最後の頁 104-114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5988/jime.57.104	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 馬駿、益田晶子
2. 発表標題 船用ジェット式スクラバによるBC粒子除去メカニズム解明に向けた数値計算
3. 学会等名 第60回大気環境学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬駿、益田晶子
2. 発表標題 小型化に向けた船用ジェット式スクラバによるSOx除去に 関する数値計算
3. 学会等名 第89回（2019年）マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 馬駿、益田晶子
2. 発表標題 小型ジェット式スクラバの噴霧液滴可視化計測と解析モデル
3. 学会等名 第92回（2022年）マリンエンジニアリング学術講演会
4. 発表年 2022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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------