

令和 3 年 5 月 24 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04555

研究課題名(和文) 蒸気圧により自己加圧されるロケットエンジン酸化剤の流動特性解明と高精度モデル化

研究課題名(英文) High precision modeling of a self-pressurized oxidizer flow in a rocket engine

研究代表者

中田 大将 (NAKATA, DAISUKE)

室蘭工業大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90571969

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)は常温で高い蒸気圧(~7MPa)を持ち、これによる自己加圧排出が可能であることから、ハイブリッドロケット酸化剤に広く用いられている。一方で気液二相流の流量予測は困難であり、流動様式の同定と圧損特性のモデル化が望まれる。本研究ではまず、従来困難であった7MPaの高圧管路を可視化し、高速度カメラにより気泡流速と気泡径を明らかにした。また、静電容量型ポイド率を用い、ポイド率と圧損特性の関係について論じた。数値計算では押し圧とインジェクタ縮流係数との関係について、実験結果と定性的によい一致を見た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気液二相流への実験的アプローチは広く行われているが、とりわけ1-7MPaでの高圧管路における高圧条件下での流動様式を明らかにすることは困難が大きいものであった。今後の展開としては、亜酸化窒素は蒸発潜熱も大きいため、気泡径に及ぼす熱力学的な効果についても学術的調査が必要と考えられる。社会的意義としては、小型ロケットエンジンで広く用いられている亜酸化窒素の流量予測モデル確立に向け、多くの実験データを残し、国際学会においても多くの議論を喚起した。

研究成果の概要(英文)：Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) has a high vapor pressure (~7MPa) at room temperature and is capable of self-pressurizing discharge, so it is widely used as a hybrid rocket oxidant. On the other hand, it is difficult to predict the flow rate of gas-liquid two-phase flow, and it is desirable to identify the flow mode and model the pressure drop characteristics. In this study, we first visualized the 7MPa high-pressure pipeline, which was difficult in the past, and clarified the bubble flow velocity and bubble diameter with a high-speed camera. We also discussed the relationship between the void ratio and the pressure drop characteristics using the capacitance type void ratio. In the numerical calculation, we found a qualitatively good agreement with the experimental results regarding the relationship between the pressing pressure and the injector discharge coefficient.

研究分野：航空宇宙用エンジン

キーワード：混相流 自己加圧 ポイド率 ハイブリッドロケット

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

亜酸化窒素 (Nitrous Oxide,  $N_2O$ ) は常温での蒸気圧が極めて高く ( $\sim 7\text{MPa}$ ), 自己加圧による簡素な供給系を構築可能である。米国の有人宇宙船 Space Ship 1 で用いられた事例を皮切りに, 小規模なロケットエンジンの酸化剤として広く利用されている。押しガスにより一定圧で加圧される従来の供給系とは異なり, ある初期圧力・温度で充填された  $N_2O$  の排出流量履歴を正確に予測することは容易ではない。

初期状態で常温 ( $290\text{K}$ ) の亜酸化窒素は約  $5\text{MPa}$  の蒸気圧を有する。液を排出するとタンク空隙容積を補うだけの  $N_2O$  が蒸発し, 蒸発潜熱によりタンク内温度は低下, 飽和蒸気圧で決まるタンク内圧力も次第に低下する。蒸発潜熱や蒸気圧の温度依存性は非常に大きく, 流量履歴モデル化における温度の僅かなズレが時間発展的に大きな誤差を生む要因となる。温度特性を正しく把握するには流動系の伝熱特性の把握が必須である。タンク内減圧による自己蒸発発生時には加熱壁面上で発生する沸騰気泡とは異なり, 液体バルク内で微細な気泡が発生するが, このような環境下での気液相間の伝熱特性は学術的に未解明の点が多い。また, このような減圧沸騰気泡流は上流から下流にかけて次第に発達し, インジェクタを通過する際の流出係数や管壁との熱伝達係数は非定常に変化していると考えられる。多角的な実験観察手法を用いた流動様式の定量的把握が求められる。

### 2. 研究の目的

タンク内の温度成層や, 気泡径, 気泡流速などの観測事実に基づいた自己加圧供給系の高精度流量推定モデルを独自に提案する。

タンク内の温度の差異は上部と下部で十数度に達している。気液界面では排出プロセスにおいて生じた空間を埋めるべく液相から気相への変換が絶え間なく行われているが, 全体の温度勾配がどのようなものとなっているかを動的に把握する。複数本の温度センサを用い, 初期条件 (外気温度, 充填量) を変えながらタンク内部の温度分布について観察する。

### 3. 研究の方法

まず, 様々な圧力条件におけるインジェクタ圧損を明らかにするための流動試験装置を構築し, 非圧縮式におけるインジェクタ縮流係数を明らかにした。次いで, 可視化管路と高速度カメラを用いた観察により, 高圧流路の気泡観察, 静電容量式ボイド率計を用いたボイド率の観測を行い, 流動様式が圧損特性に及ぼす影響を調査した。数値計算では OpenFoam (InterForm ソルバ) を用いた CFD 計算により, 実験での計測点を補間して流動系全体の圧力・温度・流速分布を推定した。実験系全般を室蘭工業大学が担当し, 数値計算を東京都市大学が担当した。

### 4. 研究成果

室蘭工大の分担項目である実験研究では高速度カメラと静電容量式ボイド率計の併用により, 流動中の亜酸化窒素の様子を可視化観察し, 気泡速度や気泡径などを明らかにすることが出来た。具体的には, 高速度カメラは, シャッタースピード:  $1/500,000\text{s}$ , 撮影速度:  $100,000\text{fps}$ , 解像度:  $256 \times 160\text{pixel}$  として撮影を行い, 気泡流速は  $10\text{m/s}$  前後, 気泡径はメディアフィルタをかけた結果, 数十  $\mu\text{m}$  オーダーのものが多数観察された (図 1 ~ 3)。また, サブクール度や押し圧を変化させた条件での流れ場を取得し, インジェクタにおける圧力損失との相関関係を明らかにした。都市大の分担項目である数値計算の側では, 亜酸化窒素の蒸発凝縮を含んだ気液二相流を数値的に模擬するために, オープンソースの CFD 解析ソフトである OpenFOAM を利用し, 亜酸化窒素 (液相・気相) と空気が混ざった三相流れを再現することを試みた。室蘭工大のハイブリッドロケット試験設備を模した計算領域において, 二次元及び三次元の数値計算を実施した。二次元計算では, インジェクタ入り口角部からの剥離に伴うキャビテーションが確認され, インジェクタ内部における縮流の影響による流量減少が明らかになった。縮流係数から流量係数を計算した結果, 数値計算結果から算出した値は実験結果の値と定量的には一致しなかったが, 押し圧上昇に伴って流量係数が下がるなどの定性的な傾向を明らかにした。三次元計算については十分な格子解像度で計算できなかったが, 定性的な傾向は二次元の計算結果とほぼ同様であることを確認した。

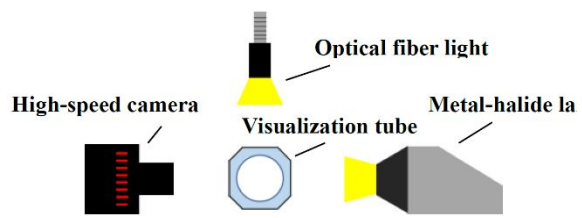


図1 可視化高速撮影のレイアウト

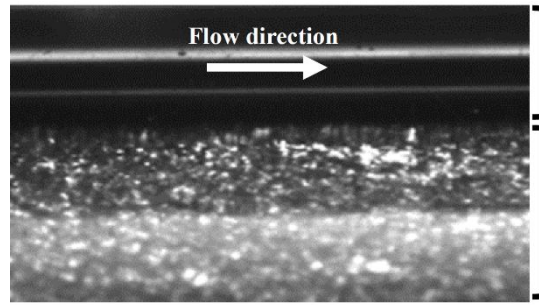


図2 二相流撮影結果

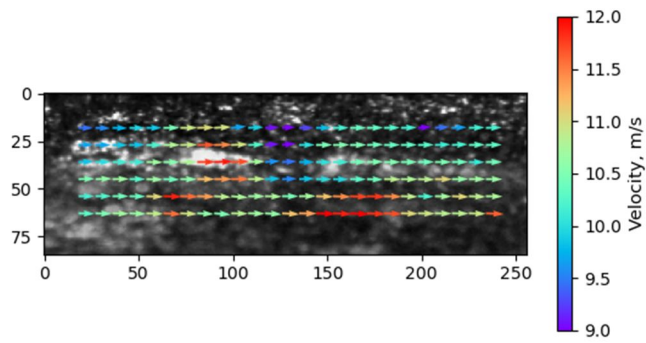


図3 速度ベクトル分布

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 Yasuda Kazuki, Nakata Daisuke, Uchiimi Masaharu, Okada Kugo, Imai Ryoji	4. 巻 143
2. 論文標題 Fundamental Study on Injector Flow Characteristics of Self-Pressurizing Fluid for Small Rocket Engines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluids Engineering	6. 最初と最後の頁 21307
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/1.4048688	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5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kazuki YASUDA, Daisuke NAKATA, Masaharu UCHIUMI, Kugo OKADA, Ryoji IMAI
2. 発表標題 FUNDAMENTAL STUDY ON INJECTOR FLOW CHARACTERISTICS OF SELF-PRESSURIZING FLUID FOR SMALL ROCKET ENGINES
3. 学会等名 AJKFLUIDS2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安田 一貴・中田 大将・内海 政春
2. 発表標題 亜酸化窒素の充填・排出・流動特性に関する評価
3. 学会等名 第2回ハイブリッドロケットシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安田一貴, 中田大将, 内海政春, 岡田空悟, 今井良二
2. 発表標題 亜酸化窒素自己加圧排出に伴う気液二相流流動特性計測
3. 学会等名 日本機械学会 第96期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安田一貴, 中田大将, 内海政春, 岡田空悟, 今井良二
2. 発表標題 自己加圧による亜酸化窒素の気液二相流タンク排出特性
3. 学会等名 第19回キャピテーションに関するシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuki Yasuda, Daisuke Nakata, Kugo Okada, Masaharu Uchiumi, Kazuyuki Higashino, Ryoji Imai
2. 発表標題 N2O Tank Emptying Characteristics on a Running Rocket Sled
3. 学会等名 AIAA Propulsion and Energy Forum 2018 (国際学会)
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 分担 者	渡邊 力夫  (Watanabe Rikio)  (20308026)	東京都市大学・理工学部・准教授   (32678)	

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
---------	---------