

# 外気温が亜酸化窒素自己加圧排出特性に及ぼす影響

安田一貴<sup>\*1</sup>, 中田大将<sup>\*2</sup>, 内海政春<sup>\*2</sup>, 岡田空悟<sup>\*1</sup>, 今井良二<sup>\*3</sup>

## Influence of Outside Temperature on Nitrous Oxide Self-Pressurized Discharging Characteristics

Kazuki YASUDA<sup>\*1</sup>, Daisuke NAKATA<sup>\*1</sup>, Masaharu UCHIUMI<sup>\*1</sup>, Kugo OKADA<sup>\*1</sup>, Ryoji IMAI<sup>\*1</sup>

### ABSTRACT

Nitrous oxide has a high saturated vapor pressure at room temperature and it can be supplied by self-pressurization without external pressuring systems. Since the room temperature is close to the critical temperature of N<sub>2</sub>O, its thermo properties such as vapor pressure and latent heat of evaporation strongly depend on the ambient temperature. Therefore, the self-pressurized discharge characteristics of N<sub>2</sub>O largely change by the ambient temperature. In our study, N<sub>2</sub>O cold flow tests were conducted in various ambient temperature conditions and the discharging characteristics of N<sub>2</sub>O self-pressurized tank were examined. As a result, it became clear that the influence of the filling process (vent process) is bigger than the influence of the ambient temperature on the initial condition of the tank before discharging. It is considered that the flashing of N<sub>2</sub>O inside the tank decreases the temperature of N<sub>2</sub>O. In order to estimate the self-pressurized discharging accurately, it is necessary to evaluate the venting during the filling process.

**Keywords:** Hybrid rocket, Nitrous oxide, Two-phase flow, Self-pressurized tank, Cold flow test

### 概要

室温にて高い飽和蒸気圧を有する亜酸化窒素 (N<sub>2</sub>O) は、別途加圧・昇圧機構を必要とせず、推進剤の自己加圧供給が可能である。一方で、室温は N<sub>2</sub>O の臨界温度に近いので、飽和蒸気圧や蒸発潜熱といった熱物性の温度依存性は極めて高い。そのため、外気温の差異により、N<sub>2</sub>O の自己加圧排出特性は大きく変動する。そこで、あらゆる温度環境において N<sub>2</sub>O コールドフロー試験を実施し、外気温ごとの排出特性を検証した。その結果、外気温が排出直前のタンク内初期条件に与える影響に比べ、充填工程 (ベント工程) による影響がより支配的であることが明らかになった。これは、ベントによりタンク内の N<sub>2</sub>O が減圧沸騰し液相温度を低下させることが原因であると推察される。今後、自己加圧排出特性を高精度に予測する上では、充填時のベントについてもより詳細に評価する必要がある。

### 1. はじめに

ハイブリッドロケットは、燃料と酸化剤を分けて貯蔵・運用ができるため、液体ロケットや固体ロケットに比べて極めて安全性が高い。さらに、低コスト化や推進システムの小型・軽量化、再着火・推力制御といった推進性能の高機能化が可能であるため、液体ロケットと固体ロケット、双方の特長を有するロケットエンジンとして長年研究が進められている。代表的なハイブリッドロケットの酸化剤は気体酸素や液体酸素である。一方で、液体酸化剤として亜酸化窒素 (Nitrous oxide: N<sub>2</sub>O) を選択するランチャーが世界的に増加してきている<sup>1, 2)</sup>。N<sub>2</sub>Oの特徴として、極低温流体である液体酸素と異なり常温で取り扱うことができる上、室温における飽和蒸気圧が極めて高い (293 Kで5

MPa) 点が挙げられる。そのため、別途推進剤供給システム（加圧タンク等）を必要とせず、タンクに充填された $N_2O$ の自らの飽和蒸気圧により酸化剤を供給（自己加圧供給）することが可能であるため、システムの簡素・軽量化に大きく貢献する<sup>3)</sup>。

ハイブリッドロケットのみならず液体ロケットにおいても、推進性能を正しく見積るうえでは推進剤の供給流量すなわち供給圧力の高精度な推定は極めて重要である。しかし、 $N_2O$ を室温程度で使用する場合、その温度環境は $N_2O$ の臨界温度（309.52 K）に近い場合、飽和蒸気圧や蒸発潜熱といった熱物性の温度依存性が極めて高くなる。

とりわけ自己加圧供給では、タンク内部にて断熱膨張や減圧沸騰、蒸発による吸熱などの現象が同時に起きるため、温度・圧力変化は極めて非定常性の強いものとなる。そこで、自己加圧排出特性を解明し推進剤排出流量を正確に予測するための物理モデルの構築が国内外にて試みられている<sup>4) 5)</sup>。しかしながら、依然として一般性のあるモデルは構築されておらず、各々の実験結果を満足するに留まっている。

したがって、タンクや充填する $N_2O$ の温度制御を行っていない場合、外気温が $N_2O$ の自己加圧排出特性に及ぼす影響は極めて大きいと考えられ、中田らにより構築された自己加圧排出特性の物理モデルによる解析結果でもその影響が示唆されている<sup>6)</sup>。そこで、本稿では、様々な外気温にて行った $N_2O$ 流し試験の結果を示すと共に、外気温が自己加圧排出特性に及ぼす影響について検討した結果を述べる。

## 2. 試験装置・計測項目

大小二種類のタンクを用いて $N_2O$ 流し試験を実施した。試験の際、燃料グレインの取り付け、点火は行わず、 $N_2O$ を大気圧環境に噴射し、自己加圧排出特性を取得した。小型・大型タンクそれぞれを用いた場合の試験装置や計測項目について次項以降で詳細に述べる。なお、これらの試験はすべて室蘭工業大学が有する白老エンジン実験場内の高速走行軌道試験設備にて実施した。

### 2.1. 小型タンク

小型タンクを用いた試験装置の外観を図1に、概観図と計測項目を図2に示す。小型タンクの容積は15 L、直径200 mm、全長1.5 mである。試験工程は、まずメインバルブを閉じ充填バルブを開くことによってポンペ内の $N_2O$ をタンク下部から充填する（図2 青色矢印）。試験中はタンク上部に取り付けられたベントチューブ（1/16インチ）を介して気相 $N_2O$ が系外へ放出されながら液相 $N_2O$ が充填される。また、ベントチューブと併せてタンク上部に取り付けられた充填バルブ（1/4インチ）を短秒時開けることで充填を促進させることも可能である。続いて充填バルブを閉じメインバルブを開くことによってタンク内の $N_2O$ が排出されインジェクタに供給される（図2 橙色矢印）。

充填工程にて $N_2O$ ポンペの重量を計測することで小型タンクへの充填量を推定している。また、タンクでは圧力（ $P_{\text{tank}}$ ）と上部・下部の2箇所の温度（ $T_{\text{top}}$ ,  $T_{\text{btm}}$ ）、インジェクタ上流では温度と圧力を計測している。

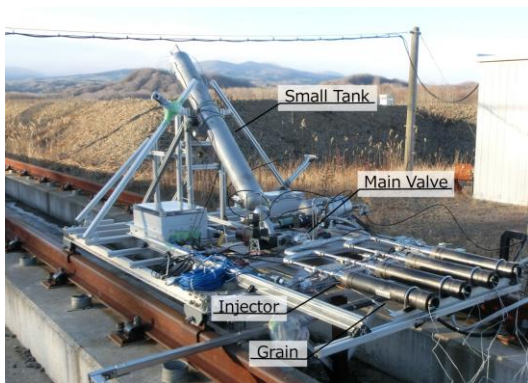


図1 試験装置外観（小型タンク）

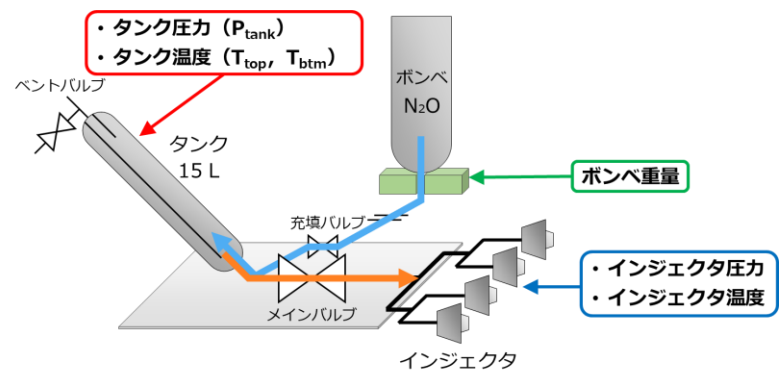


図2 試験装置概観図と計測項目（小型タンク）

## 2.2. 大型タンク

大型タンクを用いた試験装置の外観を図3に、概観図と計測項目を図4に示す。大型タンクの容積は40 L、直径300 mm、全長1 mである。試験工程は、前述の小型タンクを用いた場合と同様である。

計測項目は、小型タンクを用いた試験での計測項目に加え、新たにタンク重量計測とタンク内温度の計測点を増設（2点→10点）した。タンク内温度（ $T_{Z100} \sim T_{Z1000}$ ）の計測位置を図5に示す。これらの改修により、タンク内温度を詳細に計測すると共に、タンクへの充填・排出量をリアルタイムに計測することが可能となった。

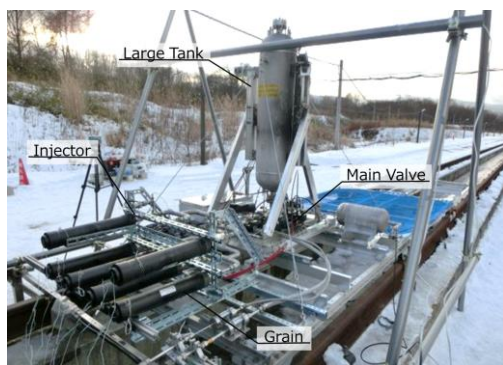


図3 試験装置外観（大型タンク）

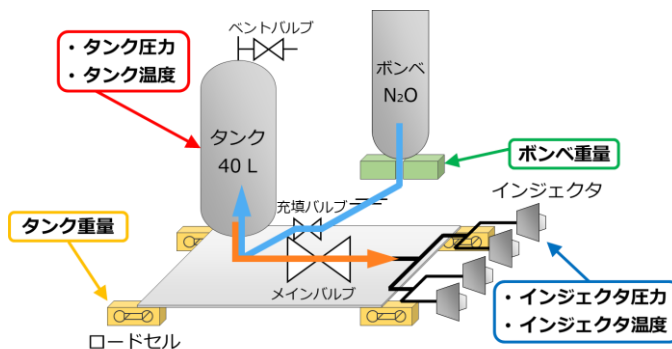


図4 試験装置概観図と計測項目（大型タンク）

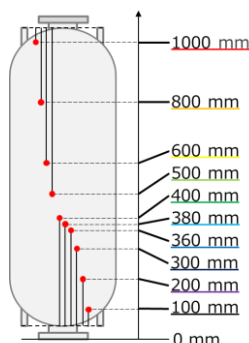


図5 タンク内温度計測位置

## 3. 試験結果・考察

本稿にて掲載する試験条件を表1に示し、小型・大型タンクを用いた試験それぞれの結果については次項以降にて詳細に述べる。これらの試験は全て、 $t = 0$  sでメインバルブを開き、タンク内の $N_2O$ を全て自己加圧排出させた。

表1 試験条件

	Flow06	Flow07	Flow12
タンク容積	15 L	15 L	40 L
外気温 (飽和蒸気圧)	300.8 K (6.0 MPa)	287.9 K (4.5 MPa)	293.7 K (5.1 MPa)
充填量	13.2 kg	10.5 kg	19.0 kg
インジェクタ	4つ	1つ	8つ

### 3.1. 小型タンク

小型タンクを用いた試験結果としてFlow06 (図6), Flow07 (図7) について述べる.

#### 3.1.1. Flow06

Flow06では, 充填完了後のタンク内初期条件は290 K, 4.8 MPaであり, その際頂部温度 ( $T_{top}$ , 図6 赤色) と底部温度 ( $T_{btm}$ , 図6 青色) は一致していた. しかし, この際の外気温やその飽和蒸気圧 (300.8 K, 6.0 MPa) とタンク内初期条件を比較すると, タンク内に充填された $N_2O$ の温度は外気温よりも約10 K低かった. これは, 充填前は外気温と熱平衡状態にあったボンベ内の $N_2O$ が充填に伴う断熱膨張と相変化することにより, 周囲の液相 $N_2O$ は潜熱が奪われたために温度が低下したと考えられる.

排出が始まると共に両者の温度は線形的に低下し, やがて $T_{top} \geq T_{btm}$ となっている. タンク圧に着目すると, 排出過程の途中 ( $t=4$  s) から圧力カーブの傾きが変化している. これは排出過程の前半 ( $t=0 \sim 4$  s) は気液二相流, 後半 ( $t=4 \sim 10$  s) は単相気体の $N_2O$ が排出させていると考えられ, この挙動は自己加圧排出特性に関する関連研究報告と一致している<sup>4-6</sup>. 図6中の橙色破線は $T_{btm}$ に対する飽和蒸気圧を示しており, タンク圧の実測結果と良く一致している. このことから, タンク圧は $T_{btm}$ すなわちタンク内 $N_2O$ の液相温度に極めて強く依存していると考えられている<sup>9</sup>.

#### 3.1.2. Flow07

Flow07における, 充填完了後のタンク内初期圧力は3.6 MPaであった. タンク内初期温度は $T_{top}$ と $T_{btm}$ が一致したFlow06の場合と異なり,  $T_{top}$ と $T_{btm}$ の間には10 Kの温度差が生じており,  $T_{top} = 290$  K,  $T_{btm} = 280$  Kであった. この際の外気温は291.9 Kであったため,  $T_{top}$ は外気温とおおむね同じ温度といえるが,  $T_{btm}$ は外気温よりも約10 K低い結果となった.

一方で,  $T_{btm}$ に対する飽和蒸気圧と実測したタンク圧を比較すると, 両者は良い一致を示した. このことから, Flow06の場合と同様に, タンク圧は液相温度により決まると考えられる.

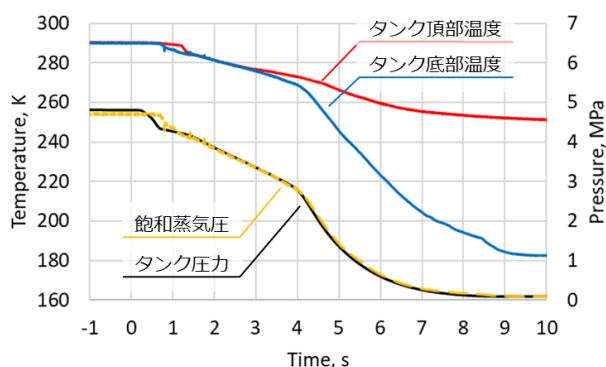


図6 タンク内温度・圧力履歴 (Flow06)

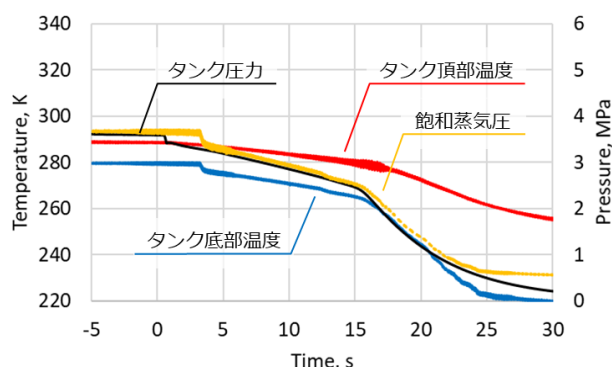


図7 タンク内温度・圧力履歴 (Flow07)

#### 3.1.3. 充填工程の影響

前述の通り, 充填完了後のタンク内初期条件に着目すると, Flow06とFlow07どちらの試験でもタンク内の液相温度は外気温を大きく下回っていた. また双方の試験を比較すると, Flow06では気相温度 ( $T_{top}$ ) と液相温度 ( $T_{btm}$ ) が一致していたのに対し, Flow07では気相温度と液相温度はかい離していた.

これらの原因として, 充填工程による影響を考えた. Flow06およびFlow07における充填工程の温度・圧力履歴を図8, 9に示す. どちらの試験においても充填を開始すると同時に $T_{top}$ は急上昇,  $T_{btm}$ は急低下しており, これらの傾向はFlow06およびFlow07以外の試験でも確認された. タンク内下部温度の低下は, 3.1.1で述べたように, 充填開始直後に相変化に伴う潜熱と断熱膨張により冷却された $N_2O$ がタンク内に流入したためと考えられる. また, タンク内上部の温度上昇の原因は, タンク下部からの充填によりタンク内に先行して流入した気体 $N_2O$ が断熱圧縮されたためと考えられる.

Flow06では、①  $t = -145$  sと②  $t = -103$  sのタイミングでタンク上部のベントバルブから気相 $N_2O$ を排出することで、液相 $N_2O$ の充填を促進した(図8)。この工程により、タンク圧やタンク内温度が低下することが明らかになった。また、ベントによりタンク内上部の高温になった気相 $N_2O$ が系外に放出されることで、タンク内温度がおおむね一様になったと推察される。

一方で、Flow07では、ベントを行っていないためタンク内の上部と下部の温度差が保たれていると考えられる。しかしながら、前述の通り充填開始直後に液相 $N_2O$ の温度が大きく低下し、充填完了後も外気温までは回復しないため、Flow06の場合と同様に充填完了後のタンク圧は、外気温における飽和蒸気圧よりも低くなっている。

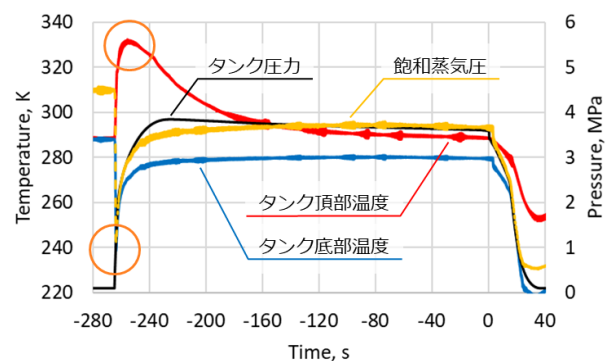
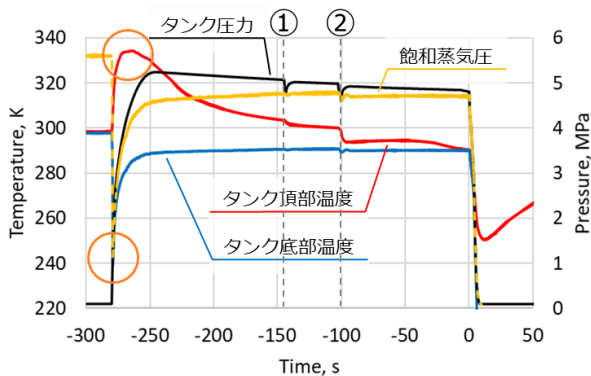


図8 充填工程における温度・圧力履歴 (Flow06) 図9 充填工程における温度・圧力履歴 (Flow07)

### 3.1.4. 排出流量による影響

Flow06は4つのインジェクタから $N_2O$ を排出したのに対し、Flow07では1つのインジェクタから排出させた。これにより、タンクからの総排出流量はFlow06の場合で約3300 g/s、Flow07の場合で約700 g/sであった。しかしながら、総排出量の違いによる $N_2O$ の排出特性の大きな差異は確認されず、インジェクタ1つ当たりの排出流量もおおむね一致していた。

## 3.2. 大型タンク

タンク内温度を10か所で計測すると共にタンク重量を計測した試験としてFlow12で取得した結果について述べる。

### 3.2.1. Flow12

Flow12におけるタンク内温度履歴、タンク圧・インジェクタ圧履歴、タンク重量履歴をそれぞれ図10～12に示す。図10より、充填完了時 $T_{Z100} \sim T_{Z500}$ はおおむね同一な温度であるが、 $T_{Z600} \sim T_{Z1000}$ は温度がばらついており、温度成層を形成していた。このことから、タンク内の気液界面はタンク底部からおおよそ500～600 mm当たりであったと推察される。

温度・圧力カーブの傾きの変化より、 $t = 0 \sim 4.4$  sは気液二相流、 $t = 4.4 \sim 9$  sは単相気体の $N_2O$ が排出されたと考えられる。また、タンク圧が液相 $N_2O$ の温度における飽和蒸気圧に良く一致しており、これらの温度・圧力変化は小型タンクを用いた試験と同様の傾向を示している。

タンクの大型化に伴い、タンク下部にロードセルを取り付け、タンク重量の時間変化を計測した(図12)。この計測結果を時間微分することで、タンクから排出される $N_2O$ の瞬時流量を推定した結果、気液二相流排出区間ではインジェクター1つ当たりの排出流量は500～600 g/sであった。

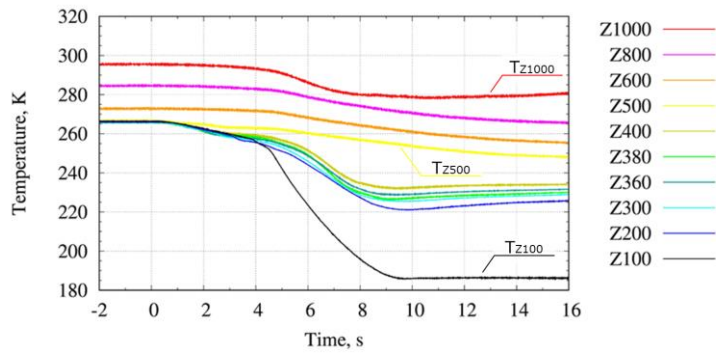


図10 タンク内温度履歴 (Flow12)

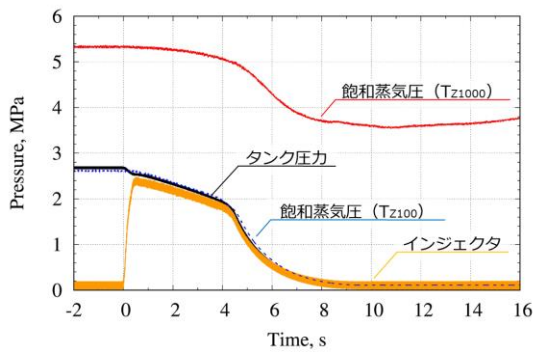


図11 タンク圧・インジェクタ圧履歴 (Flow12)

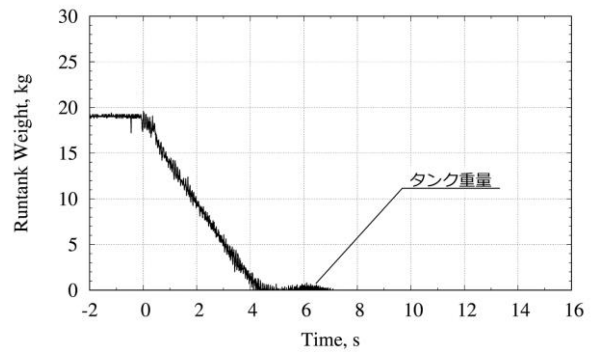


図12 タンク重量履歴 (Flow12)

### 3.2.2. ベントによる温度・圧力への影響

Flow12の充填工程において、ベントがタンク圧・温度に及ぼす影響をより詳細に検証することを目的として、計4回のベントを実施した(図13, 14 ①10秒間, ②20秒間, ③60秒間, ④10秒間)。その結果、Flow06と同様にベントの度にタンク内温度(図13)やタンク圧(図14)が低下していることが明らかになった。

タンク上部の温度成層の一部が破壊された原因は、充填工程において断熱圧縮により高温化した気相 $N_2O$ が放出されたためである。一方で、液相温度が低下した原因としては、ベントによるタンク圧低下に伴ってタンク内の $N_2O$ が減圧沸騰し、気泡形成の際に周囲の液相 $N_2O$ から吸熱し、蒸気が系外に放出されたためであると推察される。

これらのベントにより、液相 $N_2O$ の温度は約14 K、タンク圧は約1.1 MPa低下している。したがって、充填完了後のタンク内初期条件は、外気温のみならず、充填の時間やベントの回数、間隔といった充填工程にも大きく影響することが明らかになった。

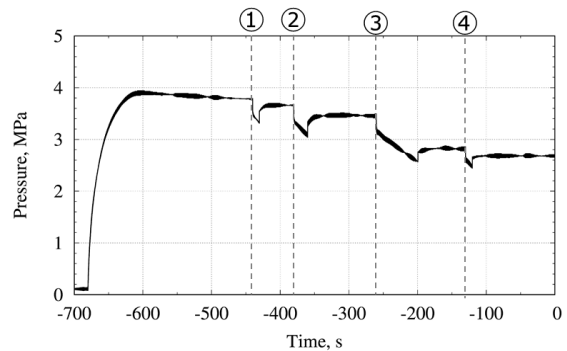
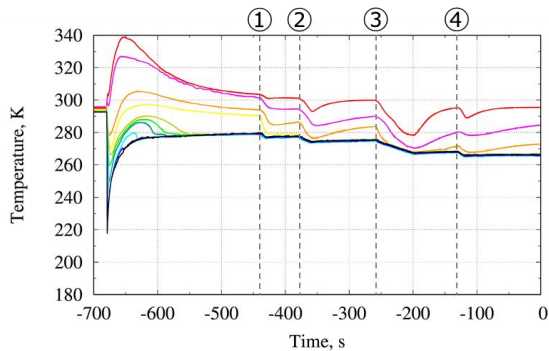


図13 充填工程におけるタンク内温度履歴 (Flow12) 図14 充填工程におけるタンク圧履歴 (Flow12)

#### 4. 結論

ハイブリッドロケットの代表的な酸化剤の一つである $N_2O$ について、様々な温度環境で $N_2O$ の流し試験を実施することで、外気温が $N_2O$ 自己加圧排出特性に及ぼす影響について検証し、得た結果を以下にまとめる。

- ・外気温が異なる二つの試験結果を比較した結果、タンク内初期温度がおおむね一定な場合 (Flow06,  $T_{top} = T_{btm}$ ) と上下で温度が異なる場合 (Flow07,  $T_{top} > T_{btm}$ ) が確認された。しかし、この差異の原因は、充填工程におけるベントであると推察される。
- ・タンク圧は内部の液相  $N_2O$  温度における飽和蒸気圧により決まるため、タンク内初期条件は充填される  $N_2O$  の温度すなわち外気温に大きく影響を受けるはずである。しかし、外気温によるタンク内初期条件への大きな影響は確認されなかった。
- ・充填工程におけるタンク内温度・圧力履歴より、充填開始直後、タンク上部は流入してきた気相  $N_2O$  が断熱圧縮され高温化し、タンク下部は蒸発潜熱による吸熱と断熱膨張により冷却された液相  $N_2O$  が流入することで瞬間的に温度が低下することが明らかになった。
- ・充填工程において、タンク上部からベントを行うと、気相  $N_2O$  内の温度成層が一部破壊されると共に、液相  $N_2O$  温度とタンク圧の低下がみられた。この影響は、外気温がタンク初期条件へ及ぼす影響よりもより強いと考えられる。
- ・タンク内温度の詳細計測を行った結果、液相  $N_2O$  はおおむね均一な温度になるのに対し、気相  $N_2O$  には温度成層が形成され、上部ほど高温になることが明らかになった。  
これらの知見を踏まえ、今後は充填工程とベントが充填完了後のタンク内初期条件に及ぼす影響についてより詳細は評価を進める。

#### 参考文献

- 1) M. Kobald, U. Fischer, K. Tomilin, and A. Petrarolo, “Hybrid Experimental Rocket Stuttgart: A Low-Cost Technology Demonstrator,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 55, No. 2, March–April 2018, pp. 484-500.
- 2) Yen-Sen Chen, Bill Wu, “Development of a Small Launch Vehicle with Hybrid Rocket Propulsion,” 2018 Joint Propulsion Conference, AIAA Propulsion and Energy Forum, Cincinnati, Ohio, AIAA 2018-4835.
- 3) Martin J. Chiaverini and Kenneth K. Kuo, “Fundamentals of Hybrid Rocket Combustion and Propulsion,” *Progress in astronautics and aeronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, U.S.A., 2007, pp. 593-638.
- 4) R., Akiba, Y., Aoki, S., Kayuta, A., Fujii, H., Nagata and S., Satori, “Leading studies of the Staged Combustion Hybrid Rocket,” *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Science (in Japanese)* Vol. 65, No. 2(2017), pp. 141-150
- 5) Zimmerman, J. E., Waxman, B. S., Cantwell, B. J., and Zilliac, G. G., “Review and Evaluation of Models for Self-Pressurizing Propellant Tank Dynamics,” 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Joint Propulsion Conferences, San Jose, CA, AIAA 2013-4045.
- 6) D., Nakata, K., Yasuda, K., Okada, K., Higashino, and R., Watanabe, “ $N_2O$  Flow History Prediction in an Oxidizer Feed Line of Hybrid Rockets,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, Vol. 16, No. 1, pp. 81-87, 2018

\*1 室蘭工業大学 大学院 生産システム工学専攻

(Muroran Institute of Technology, Division of Production Systems Engineering)

\*2 室蘭工業大学 航空宇宙機システム研究センター

(Muroran Institute of Technology, Aerospace Plane Research Center)

\*3 室蘭工業大学 もの創造系領域 航空宇宙システム工学ユニット

(Muroran Institute of Technology, College of Design and Manufacturing Technology, Aerospace System Engineering Research Unit)