

# 宇宙航空研究開発機構研究開発報告

## JAXA Research and Development Report

---

### 展開ノズル耐熱燃焼試験予備試験報告書

Report on Preliminary Static Firing Test of the Heat Durability of  
Deployable Nozzle

森下 直樹, 北川 幸樹, 荒川 聡, 鈴木 直洋, 芳仲 敏成  
岩淵 頌太, 竹内 伸介

MORISHITA Naoki, KITAGAWA Koki, ARAKAWA Satoshi, SUZUKI Naohiro  
YOSHINAKA Toshinari, IWABUCHI Shota and TAKEUCHI Shinsuke

2021年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

# 目次

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 概要                      | 1  |
| 1. 背景と試験目的              | 2  |
| 2. 展開ノズル供試体             | 3  |
| 3. ロケット系                | 4  |
| 3.1. 概要                 | 4  |
| 3.2. 推進特性の評価式           | 4  |
| 3.2.1. ノズルスロート径の時刻歴     | 4  |
| 3.2.2. 横推力              | 5  |
| 3.3. 推進特性とノズル温度の評価      | 6  |
| 4. スタンド系                | 16 |
| 4.1. 概要                 | 16 |
| 4.2. モータスタンドセット         | 16 |
| 4.3. 推力計測系              | 16 |
| 4.3.1. 主推力 $F_x$        | 16 |
| 4.3.2. 横推力のモーメントアームについて | 16 |
| 4.3.2.1. 横推力 $F_y$      | 16 |
| 4.3.2.2. 横推力 $F_z$      | 16 |
| 4.4. 真空槽の運用             | 16 |
| 4.5. 拡散筒                | 16 |
| 4.6. 不具合                | 17 |
| 5. 計測系                  | 31 |
| 5.1. 目的・概要              | 31 |
| 5.2. 計測系                | 31 |
| 5.3. 計測系の構成             | 32 |
| 5.4. 較正結果               | 32 |
| 5.4.1. 高圧系較正            | 32 |
| 5.4.2. 低圧系較正            | 32 |
| 5.5. 不具合報告              | 34 |
| 5.6. 計測結果               | 35 |
| 5.6.1. 第一回燃焼試験          | 35 |
| 5.6.2. 第二回燃焼試験          | 39 |
| 6. 赤外線カメラによる温度計測        | 43 |
| 6.1. 目的                 | 43 |
| 6.2. 供試体                | 43 |
| 6.3. 熱画像計測              | 43 |
| 6.3.1. 計測方法             | 43 |
| 6.3.2. 透過率補正值           | 46 |
| 6.4. 計測結果               | 46 |
| 6.4.1. 第1回燃焼試験          | 46 |
| 6.4.2. 第2回燃焼試験          | 49 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 6.5. 評価                   | 52 |
| 6.5.1. 温度分布               | 52 |
| 6.5.2. 熱電対と熱画像による温度測定結果比較 | 54 |
| 6.5.3. 熱電対温度測定値比較         | 55 |
| 6.6. まとめ                  | 55 |
| 6.6.1. 成果                 | 55 |
| 6.6.2. 今後の課題              | 55 |
| <br>                      |    |
| 7. 結言                     | 56 |
| <br>                      |    |
| 謝 辞                       | 56 |
| <br>                      |    |
| 参考文献                      | 56 |
| <br>                      |    |
| 付録：展開ノズル耐熱燃焼試験予備試験計画書（抜粋） | 57 |

# 展開ノズル耐熱燃焼試験予備試験報告書

森下 直樹<sup>\*1</sup>, 北川 幸樹<sup>\*2†</sup>, 荒川 聡<sup>\*2</sup>, 鈴木 直洋<sup>\*2</sup>, 芳仲 敏成<sup>\*2</sup>, 岩淵 頌太<sup>\*1</sup>, 竹内 伸介<sup>\*2</sup>

## Report on Preliminary Static Firing Test of the Heat Durability of Deployable Nozzle

MORISHITA Naoki<sup>\*1</sup>, KITAGAWA Koki<sup>\*2†</sup>, ARAKAWA Satoshi<sup>\*2</sup>, SUZUKI Naohiro<sup>\*2</sup>,  
YOSHINAKA Toshinari<sup>\*2</sup>, IWABUCHI Shota<sup>\*1</sup> and TAKEUCHI Shinsuke<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

This report summarizes experimental data from the preliminary static firing heat-durability test of a deployable nozzle and presents the conclusions drawn from the experiment, which was conducted at the JAXA/ISAS Akiruno Research Center over November 1-14, 2016. The test used  $\phi 110$  solid-motors and deployable nozzles made of titanium alloy plate (about 1 mm thick), which had an expansion ratio of 50-100. The first static firing test was on November 9th, the second on the 11th. Test results showed that the nozzles absorbed less heat than predicted and that there was no observable deformation or erosion. It was determined that thinner nozzles would pass the test, so it was decided to move on with the main test in which the thermal environment will be the same as that for the flight model.

**Keywords:** Deployable Nozzle, Solid Rocket Motor, Static Firing Test, RR

### 概要

本報告書は、2016年11月1日～14日にかけてJAXA宇宙科学研究所あきるの実験施設において実施した「展開ノズル耐熱燃焼試験予備試験」の試験目的から得られた実験データまでをまとめたものである。この試験では $\Phi 110$ 固体モータを使用して、開口比約50～100の部分を展開ノズルを想定したチタン合金板製ノズル(板厚約1mm)とし、11/9及び11/11の2回の燃焼試験を実施している。試験の結果、チタン合金板製ノズルに対する熱入力事前の予測よりも小さく、またノズルの変形やエロージョン等も特に観察されていない。これより、より薄いノズルでも試験が成立する可能性が高い事が確認され、実機と熱環境を同等とする「本試験」実施に移行する事とした。

---

\* 2020年11月30日受付 (Received November 30, 2020)

<sup>\*1</sup> 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 (Research and Development Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency)

<sup>\*2</sup> 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 (Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency)

<sup>†</sup> 現所属: 九州工業大学 大学院工学研究院 (Current affiliation: Faculty of Engineering, Kyushu Institute of Technology)

## 1. 背景と試験目的

固体推進系の打ち上げ能力向上の一手段として、固定ノズルの後方に薄い金属板で作られた展開式のノズル（以降展開ノズルと呼称）を取り付けることを提案している。現時点（注：2016年時点、以下同）では収納時には図 1-1 に示す様な形状で折り畳まれて拘束されており、拘束が解除されると自身の弾性力により図 1-1 右下の様に展開する事を想定している。収納状態で弾性変形の範囲内に留まるためには板厚が極めて薄く弾性域の広い金属板を使用する必要があり、現時点では直径 1 m 弱のノズルで板厚 0.25mm 程度の Ti 合金板を想定している。

一方で固体推進系の場合は比較的加熱率が大きく、現在金属製ノズルの使用を想定している開口比 50 以上の領域でも壁面 1000 度を超えるという予測がある。それに対して Ti は 900 度を越える辺りから急激に強度が低下し、大きなクリープ変形を生じる可能性が出てくるため、注意が必要である。また金属製のノズルでは、固体ロケット燃焼ガス中のアルミナ粒子によりエロージョンを受けるのではないかとの懸念も挙げられている。

上記を背景として、本試験は固体推進系への金属製ノズルの適用に必要なデータの取得を目的とする。具体的に今回の予備試験では、サブスケールの  $\Phi 110$  固体モータ・固定ノズル（ベークライトおよびグラファイト）・金属製延長ノズルを用いて短時間の燃焼試験 2 回を実施し、軸推力・横推力・ノズル壁面温度等の計測を行う。その計測手法、実験手法の確立そのものも試験の目的である。また試験終了後には、ノズルの 3 次元計測を実施し、ノズルの変形や損傷について確認する。

なお本予備試験の結果を踏まえて、将来  $\Phi 250$  固体モータを用いた燃焼試験を行い、より実用的なデータの取得を「本試験」として実施する計画である。また展開ノズルの熱伝達に関する CFD も並行して実施し、実機での展開ノズル適用可否判断を行う予定である。

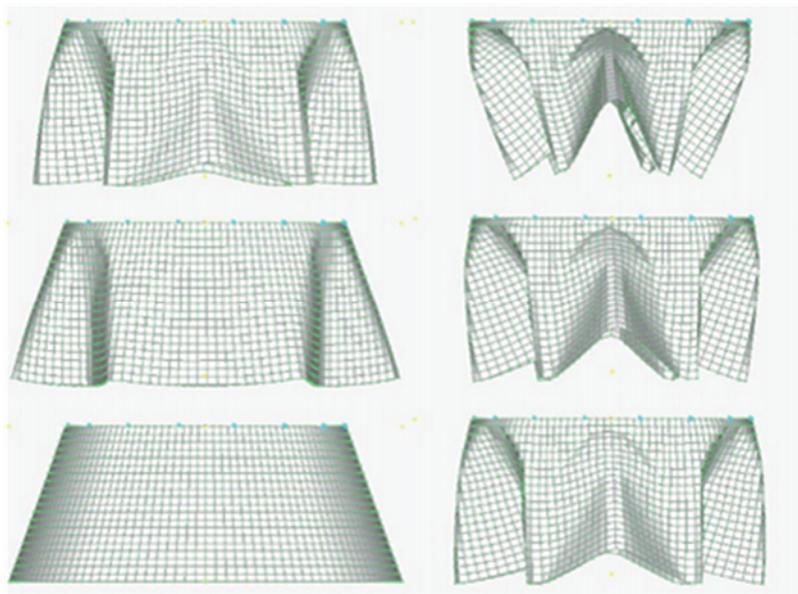


図 1-1：展開ノズルの収納・展開概念図

なお、本予備試験においては、将来的に下記の学術的な意義への拡張も念頭に置いて試験データの取得を行う。

- ・固体モータのノズルの熱伝達に関しては、現状、ノズル材からの熱分解物質の湧き出しによる冷却効果など、詳細な知見が得られていない状況である。一連の試験により、ノズルの熱流束データを得ることで、ノズル壁近傍での詳細な現象のメカニズムを理解し、固体モータ設計技術の向上に資する。具体的には、ベーク材製とグラファイト材製の固定ノズルを用意し、それらのデータ比較を行う事で本項目を検証する。

- ・サーモグラフィや二色温度計測法などの非接触温度計測技術を試行し、固体モータノズルの熱流束および温度を計測する技術の向上を図る。具体的には、ノズルに固定した熱電対等のデータとの較正を行い、サーモグラフィの実効放射率等を決定し、次回試験に生かす。

- ・試験で得られた基礎データと合わせて、ノズル熱伝達に関する新たな数値解析モデルを構築することによって、より精度の高いノズル温度予測が可能になり、固体モータ設計技術が向上できる。

## 2. 展開ノズル供試体

展開ノズルの供試体は、実機での使用を想定しているチタン合金 SP-700 (Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo) で製造されている。SP-700 は加工後に熱処理を行う事で形状記憶効果を持たせられるチタン合金であり、超弾性状態 (形状記憶効果が発現する温度が常温以下) で用いる事で見かけ上高い弾性歪みを実現することができる。供試体の寸法を図 2-1 に示す。

供試体は約 1mm 厚の SP-700 板で製造されている。板厚が「約」1mm であるのは、1mm の SP-700 合金板をロール加工した後に溶接してこの形状にするためであり、板厚は 1mm よりも若干薄くなる。この板厚の場合、燃焼時に発生する応力は約 0.3MPa 程度と予想されており、充分小さいため高温でもクリープ等は生じないか、仮に生じた場合でも極めて小さく試験実施上問題はないと考えている。なお本供試体は板厚の関係上収納・展開は不可能であるが、素材としては熱処理を行い、実機想定 of 超弾性合金として試験を実施する。

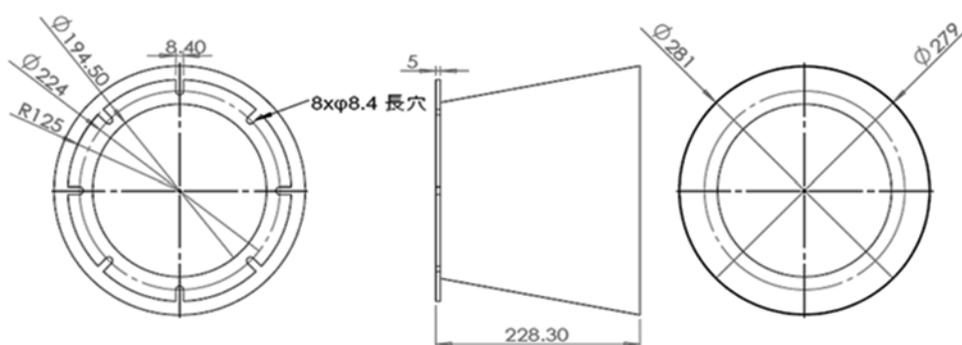


図 2-1：ノズル供試体寸法

### 3. ロケット系

#### 3.1. 概要

今回の予備試験では、サブスケールの $\phi 110$  固体モータ・固定ノズル（ベークライトおよびグラファイト）・展開ノズルを用いて短時間の燃焼試験2回を実施し、軸推力・横推力・ノズル壁面温度等の計測を行った。供試体概要を図 3.1-1 に示す。供試体は点火モータ、鏡板、モータケース、推進薬（コンポジット系、薬量 5kg）、スロートインサート、固定ノズル（ベークライト、グラファイト）、展開ノズル（展開なし）、ラプチャディスクで構成される。スロートインサート直径は 27.5mm で、固定ノズル部の開口比は 50、展開ノズル先端部における開口比は 100 である。

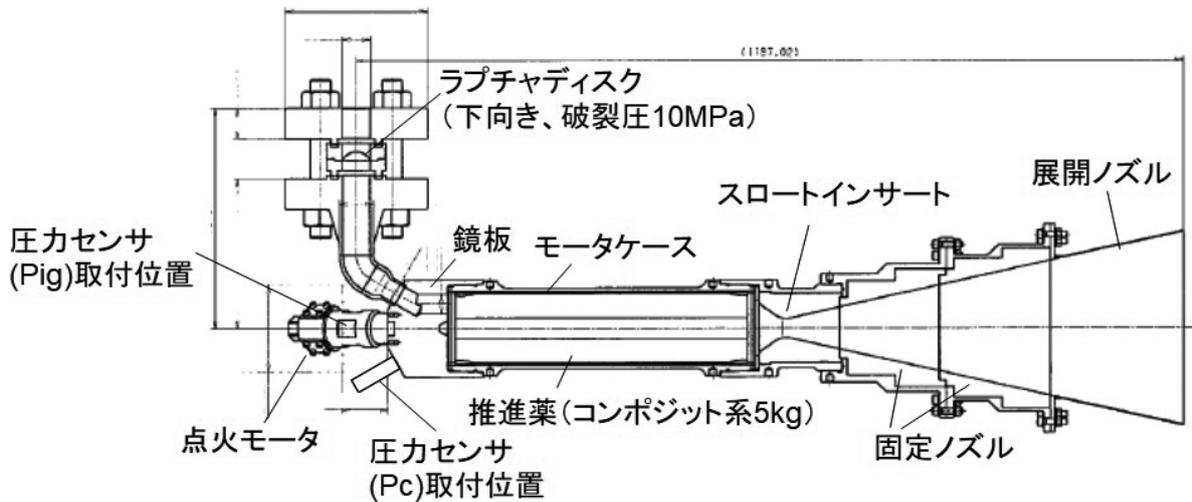


図 3.1-1 供試体概要

#### 3.2. 推進特性の評価式

2 回の燃焼試験からそれぞれ得られた計測結果から、推進特性を求めた。ここでは、その際に用いた評価式を示す。

##### 3.2.1. ノズルスロート径の時刻歴

真空推力 $F_v$ は、計測により得られた主推力 $F_x$ 、真空槽内圧 $P_t$ およびノズル出口面積 $A_e$ より

$$F_v = F_x + P_t A_e \quad \dots(1)$$

で求めることができる。

理想ロケットエンジンを仮定した際に定義される、真空における推力係数 $C_F$ は

$$C_F \equiv \frac{F_v}{A_t P_c} = \sqrt{\frac{2\gamma^2}{\gamma-1} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \left\{1 - \left(\frac{P_e}{P_c}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right\}} + \frac{P_e A_e}{P_c A_t} \quad \dots(2)$$

である。ここで、 $\gamma$ は排出ガスの比熱比、 $P_c$ は燃焼室内圧、 $A_t$ はノズルスロート部の面積である。また、等エントロピ流れを仮定した超音速ノズルにおける $P_c$ と $P_e$ は、開口比 $\varepsilon$ と次の関係式を満たす。

$$\varepsilon \equiv \frac{A_e}{A_t} = \frac{\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}}{\left(\frac{P_e}{P_c}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \left\{1 - \left(\frac{P_e}{P_c}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right\}}} \quad \dots(3)$$

実際の燃焼試験ではスロート下流における効率の低下があり、測定値を用いて $F_v/A_t P_c$ を求めると、得られる値は

$$\eta_{C_F} \cdot C_F = \frac{F_v}{A_t P_c} \quad \dots(4)$$

となる。時間に依存する $\beta$ 係数 $\beta(t)$ を、

$$\beta(t) \equiv F_v/P_c \quad \dots(5)$$

を用いて定義すると、(3)、(4)より $\beta$ 係数を

$$\beta(t) = \eta_{C_F} \cdot C_F \cdot A_t \quad \dots(6)$$

と表すことができる。(5)式の右辺のうち、 $\eta_{C_F}$ の値は時間変化が小さいと考えると、ある時刻 $t_b$ における $\eta_{C_F}$ の値を全時間に適用して $A_t(t)$ 等の量を評価することができる。 $C_F$ もおおよそ一定であるとする、ノズルのスロート径の時刻歴 $D_t$ は、

$$D_t = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{\beta(t)}{\pi\eta_{C_F}C_F}} = 2\sqrt{\frac{F_v}{\pi\eta_{C_F}C_F P_c}} \quad \dots(7)$$

と表すことができる。

### 3.2.2. 横推力

特性排気速度 $C^*$ は、質量流量 $\dot{m}$ 、(一般)気体定数 $R(=8.31[\text{J}/(\text{K} \cdot \text{mol})])$ 、各気体の分子量 $m$ 、各気体の比熱比 $\gamma$ 、燃焼室内温度 $T_c$ を用いて、

$$C^* \equiv \frac{P_c A_t}{\dot{m}} = \sqrt{\frac{RT_c}{\gamma m} \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad \dots(8)$$

と定義される。

実験の計測値から、 $\dot{m} = P_c A_t / C^*$ と考えて燃料の消費量

$$M'_p \equiv \frac{1}{C^*} \int_{t=t_s}^{t=t_f} P_c(t) A_t(t) dt \quad \dots(9)$$

を計算することが可能であるが( $t_s, t_f$ は、それぞれ燃焼開始時刻と燃焼終了時刻)、スロート上流の効率の低下から、実際に燃焼した推進薬質量 $M_p$ と $M'_p$ は一致しない。この効率の低下分を $\eta_{C^*}$ として、 $M_p$ が

$$M_p = \frac{1}{\eta_{C^*} C^*} \int_{t=t_s}^{t=t_f} P_c(t) A_t(t) dt \quad \dots(10)$$

と表せると仮定すると、(8)、(9)より $\eta_{C^*}$ は

$$\eta_{C^*} = M'_p / M_p \quad \dots(11)$$

と計算できる。ここで求めた $\eta_{C^*}$ を用いて、各時刻の質量流量 $\dot{m}(t)$ 、すなわちモータの単位時間あたりの質量減少の時刻歴を

$$\dot{m}(t) = \frac{P_c(t) A_t(t)}{\eta_{C^*} C^*} \quad \dots(12)$$

と求めることができる。(12)を用いて、重力加速度 $g$ がかかる環境に置かれたモータに加わる鉛直下向きの力の減少分の時刻歴 $\Delta F_z(t)$ は、

$$\Delta F_z(t) = \int_{t=t_s}^t g \dot{m}(t) dt = \frac{g}{\eta_{C^*} C^*} \int_{t=t_s}^t P_c(t) A_t(t) dt \quad \dots(13)$$

と求められる。

### 3.3. 推進特性とノズル温度の評価

ここでは、2回の燃焼試験それぞれによって得られた計測結果の分析を行い、推進特性を評価した結果を示す。また、各試験で得られた展開ノズル温度(展開ノズルに取り付けたK熱電対により取得)も示す。

#### 第一回燃焼試験(ベークライト固定ノズル)

図 3.3-1 に、モータ内圧  $P_c$  および点火モータ内圧  $P_{ig}$  を示す。 $P_c$  について、着火直後に若干燃焼圧が高い状態が生じた。このときの値は点火モータ推進薬を加味した燃焼圧より高いため、浸食燃焼が発生していた可能性が考えられる。

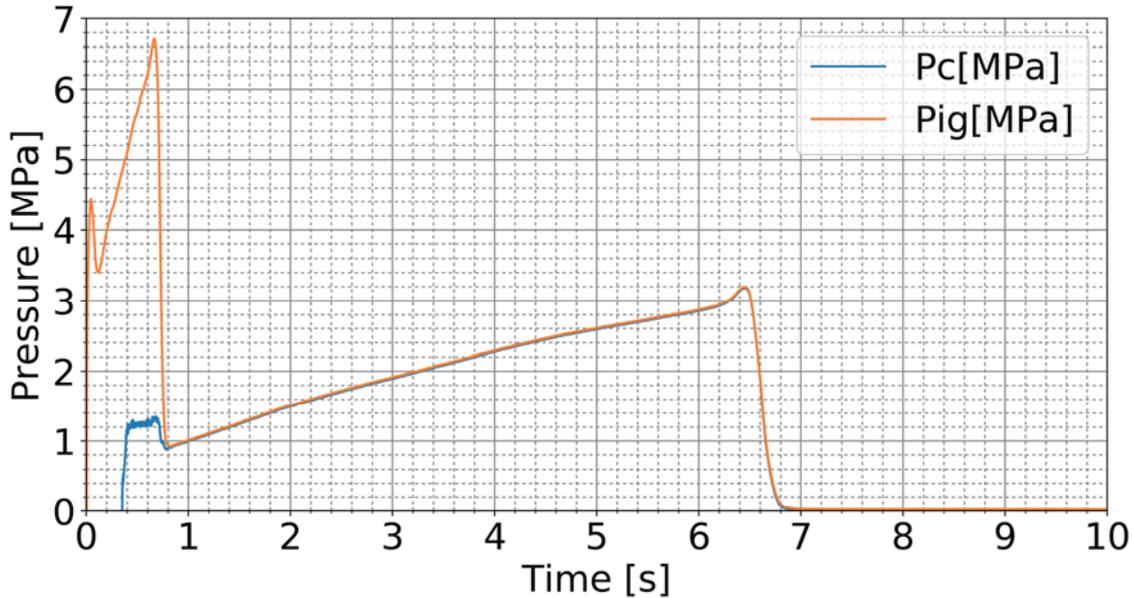


図 3.3-1 モータ内圧  $P_c$ , 点火モータ内圧  $P_{ig}$

図 3.3-2 に、 $P_c$  と  $F_x$  の比較を示す。ここで、約 2.7 秒と 4.5 秒あたりで、推力  $F_x$  の変動が見られる。このとき、高速度ビデオの画像でも同時刻に明るくなることが確認できた。 $P_c$  は変動していないため、スロート下流での現象と考えられる。

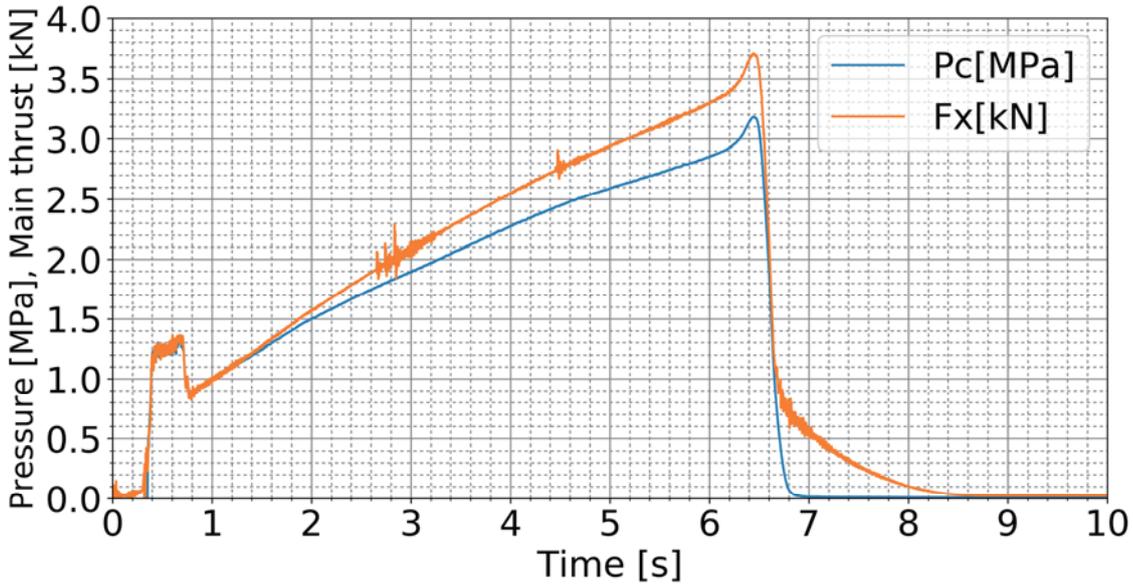


図 3.3-2 Pc と Fx の比較

図 3.3-3 に、真空槽内圧  $P_t$ 、バッファタンク内圧  $P_{bt}$ (絶対圧)を示す。燃焼中の真空槽圧はほぼ一定であった。燃焼終了後、燃焼室圧の上昇を伴って、バッファタンクからの逆流が起こっている可能性がある。

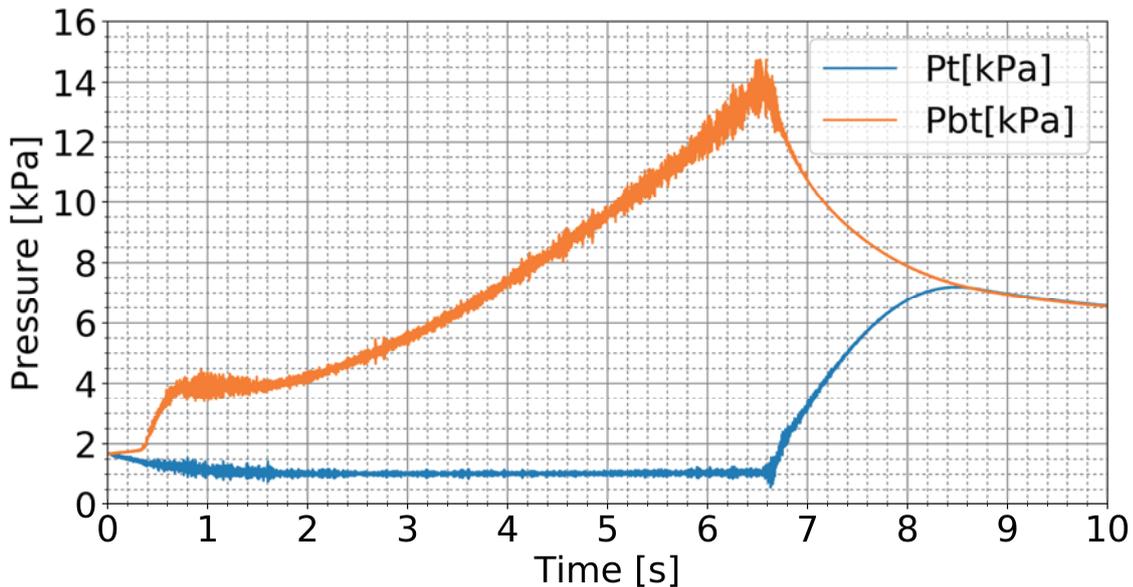


図 3.3-3 真空槽内圧  $P_t$ 、バッファタンク内圧  $P_{bt}$ (絶対圧)

図 3.3-4 に、 $P_c$  および(1)式から求めた真空推力  $F_v$  を示す。ノズル出口直径の設計値  $D_e = 0.275\text{m}$  より、ノズル出口面積は  $A_e = \pi(D_e/2)^2 \cong 0.0594\text{m}^2$  とした。ここで、 $F_v$  の 0.35s 以前と 6.5s 以降の値は、燃焼圧立ち下がり の 6.5~6.6s の  $P_c$  と  $F_v$  の関係 ( $F_v/P_c \cong 1.409 \times 10^{-11} P_c + 1.143 \times 10^{-3}$  [N/Pa]) を当てはめて補正した。また、データは全て  $\pm 13\text{ms}$  の移動平均値を用いている。

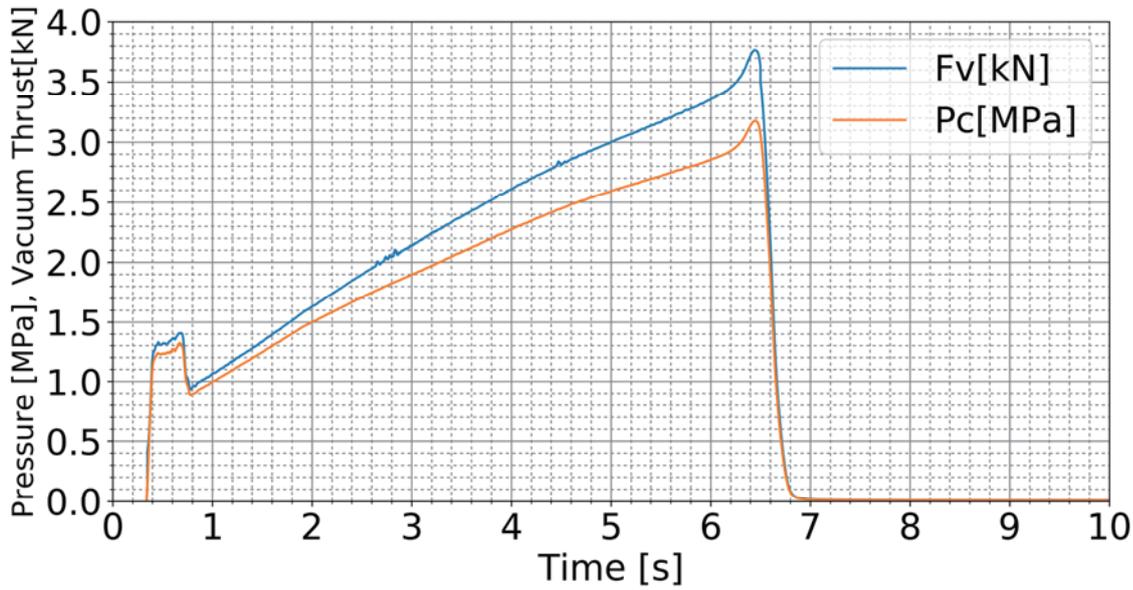


図 3.3-4 モータ内圧  $P_c$  および真空推力  $F_v$

今回の推進薬では比熱比は  $\gamma = 1.166$  なので、開口比  $A_e/A_t = 100$  を(3)式に代入し、 $P_e/P_c = 7.735 \times 10^{-5}$  と求まる。この値を(2)式に代入すると、真空中の推力係数は  $C_F = 2.002$  となる。さらに、推力の振動が見られる 4.5 秒時に初期スロート径  $A_{t_0} = 27.5\text{mm}$  であるとする、(4)～(6)式より  $\eta_{C_F} = C_F A_{t_0} / \beta(t = 4.5\text{s}) = 0.9682$  と求めることができる。この値を用いて、 $C_F = 2.002$  で一定であると仮定すると、(7)式より図 3.3-5 のようにノズルスロート径の時刻歴  $D_t(t)$  を求めることができる。このとき、 $D_t(t)$  の 6.5s 付近の最大値 27.92mm と燃焼終了後のスロート径の測定値 27.87mm は、誤差 0.05mm の精度で一致する。

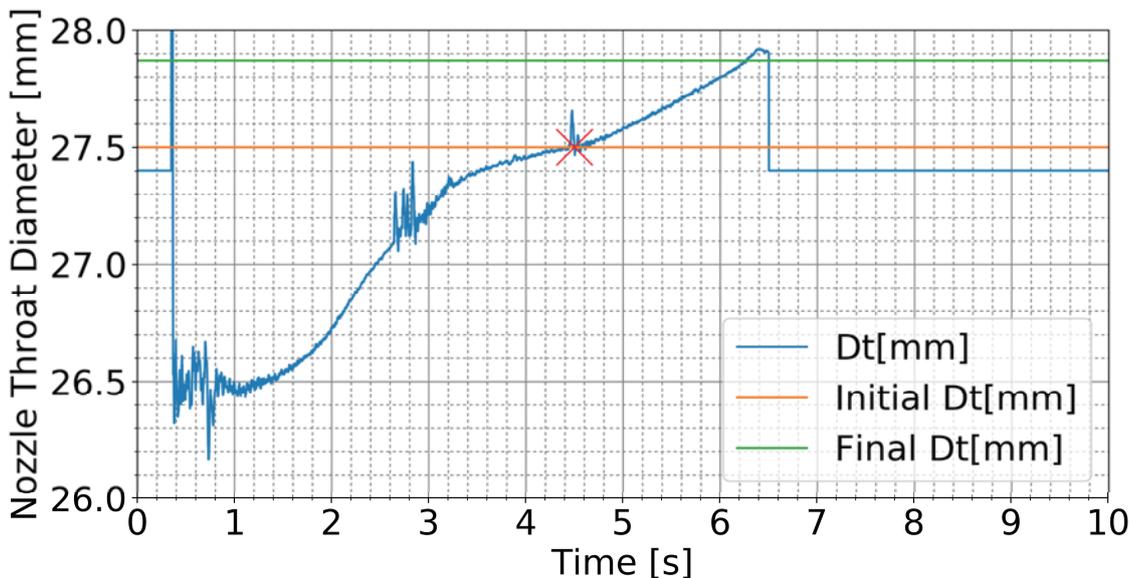


図 3.3-5 ノズルスロート径の推定値

図 3.3-5 から、燃焼初期にスロートにアルミナが付着しスロート径が小さくなり、時間とともにアルミナが剥がれ、4.5 秒時点からスロートのエロージョンが始まったと考えられる。

今回の試験に用いた推進薬は、排気ガスの平均分子量はおよそ  $m = 29.092$  [g/mol]、燃焼室内温度はおよそ  $T_c = 3434$  [K] であるので、(8)式より  $C^* = 1544$  m/s となる。5.02 [kg] の推進薬が全て燃焼したと仮定すると、(9)~(11)式より  $\eta C^* = 0.973$  となる。また、(12), (13)より、モータの重心に加わる推進薬重量分の荷重の減少の時刻歴を求めたものを図 3.3-6 に示す。

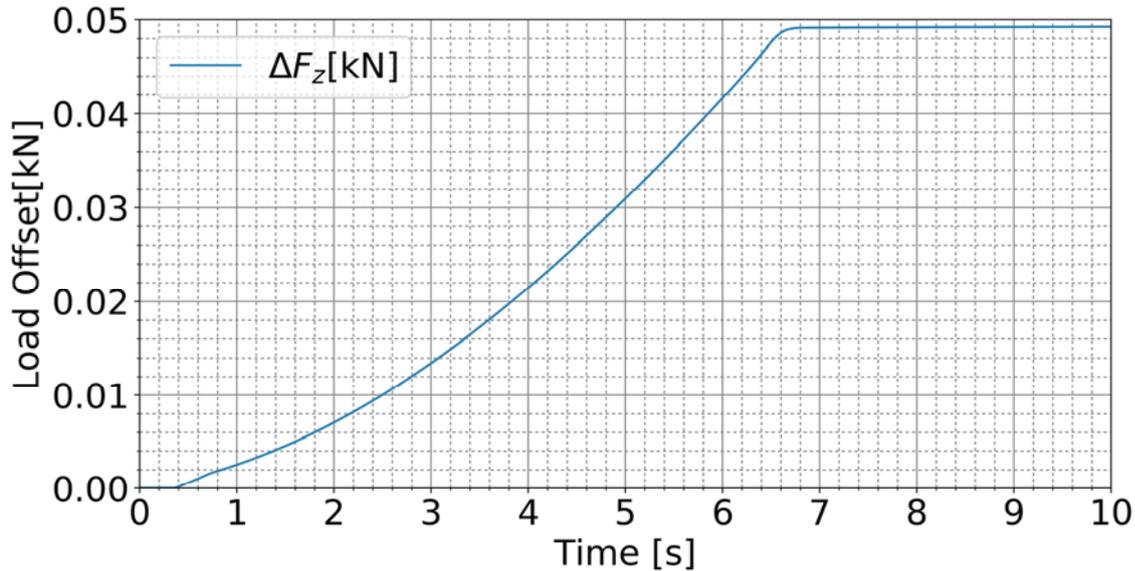


図 3.3-6 荷重減少  $\Delta F_z(t)$

ここで、ノズル出口部を評定部とした横推力  $F_y, F_z = 1.06(F_{z1} + F_{z2})$  を考えるとき、 $F_y, F_z$  を計測するロードセルは  $F_x$  のロードセル中心からおおよそ 470 [mm]、ノズル出口部はおおよそ 1375.9 [mm] に位置するため、横推力の値としては計測値を 470/1375.9 倍する必要がある(スタンド班の報告書を参照)。また、推進薬の重心点は  $F_x$  のロードセル中心からおおよそ 530 [mm] に位置するため、 $\Delta F_z(t)$  は同様に 530/1375.9 倍して、 $F_z$  から差し引く必要がある。

主推力  $F_x$  と横推力  $F_y, F_z$  を図 3.3-7 に示す。横推力に関しても、主推力と同じタイミングで推力の値の変動が見られる(2.7s, 4.5s 付近)。ここで、 $F_y, F_z$  について、それぞれ  $\pm 105$  ms,  $\pm 22$  ms の移動平均処理を行っている。

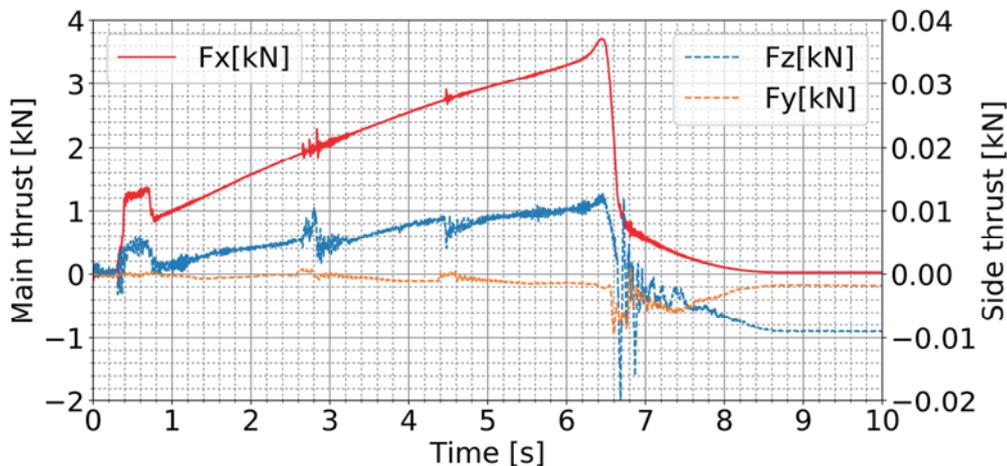


図 3.3-7 主推力  $F_x$ , 横推力  $F_y, F_z$

ここで、 $F_y, F_z$  に関しては、ゼロ戻りが計測値と同じオーダーで悪い。このことから、今回の計測では  $F_y, F_z$  に関しては細かい議論は難しい。しかしながら、 $F_y$  は 0.001-0.002kN のオーダー、 $F_z$  は 0.01-0.02kN のオーダーであり、 $F_z$  のほうが  $F_y$  よりも 10 倍程度大きい。この原因として、重力により、展開ノズルが鉛直方向に変形していた可能性が考えられる。今回の試験では、横推力は主に  $F_z$  の寄与で、主推力の 0.3-0.5% 程度であった。

図 3.3-8 に、展開ノズル外壁に取り付けた熱電対による温度計測の結果を示す。燃焼終了時まで、 $T_n-1, 2, 3$ (上流, 中流, 下流)の順に、温度が高くなっていることが分かる。最大温度は、 $T_n-1$  のおおよそ  $440^{\circ}\text{C}$  であった。

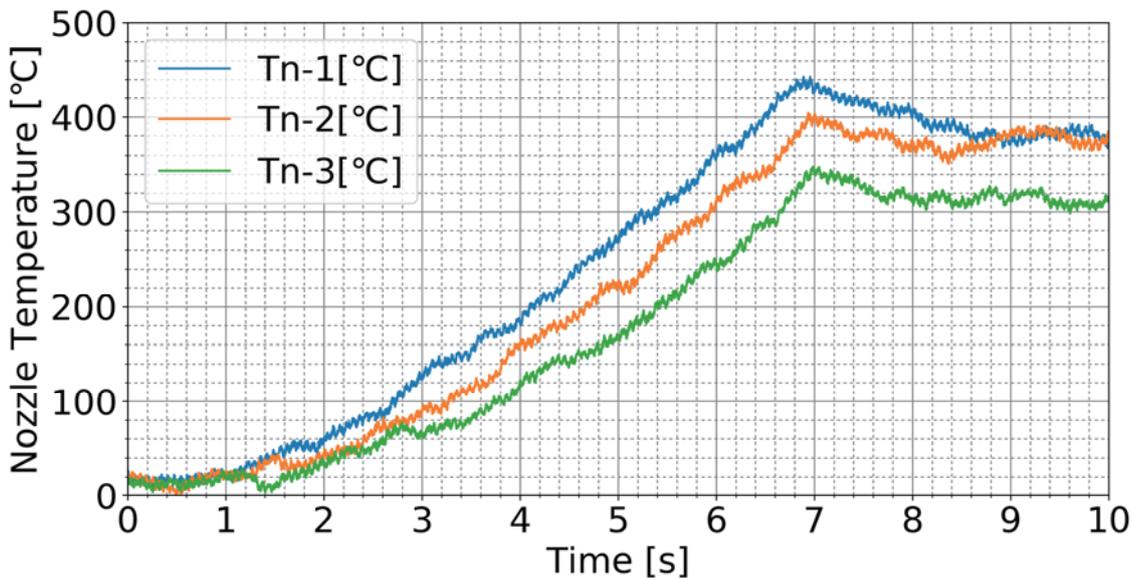


図 3.3-8 ノズル外壁温度 (熱電対)  $T_n-1, T_n-2, T_n-3$  ( $\pm 180\text{ms}$  移動平均)

#### 第二回燃焼試験(グラファイト固定ノズル)

図 3.3-9 に、モータ内圧  $P_c$  および点火モータ内圧  $P_{ig}$  を示す。これを見ると、 $P_c, P_{ig}$  がどちらもなまっている。後に、計測器のフィルタを誤って 1Hz に設定していたためと判明した(熱電対のノイズの原因を探るため、アンプの設定をいじったこと、またそれを直前にチェックしなかったこと、計測系のチェックリストの不備が原因)。  $P_c$  について、着火直後に若干燃焼圧が高い状態が生じた。このときの値は点火モータ推進薬を加味した燃焼圧より高いため、浸食燃焼が発生していた可能性が考えられる。

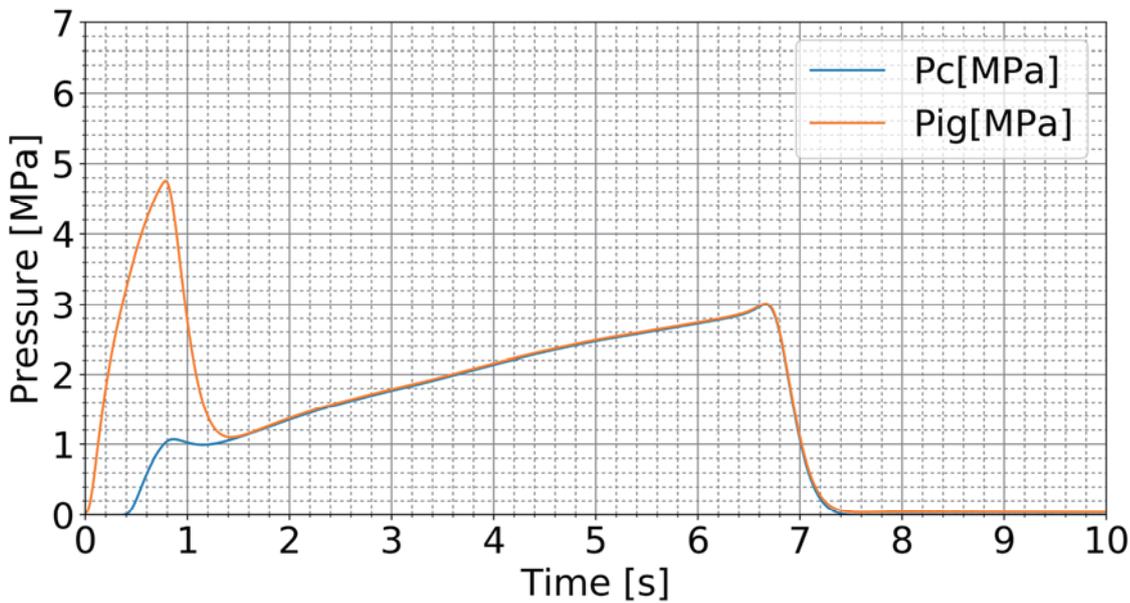


図 3.3-9 モータ内圧  $P_c$ , 点火モータ内圧  $P_{ig}$

図 3.3-10 に、 $P_c$  と  $F_x$  の比較を示す。フィルタがかかっている効果で、 $P_c$  が  $F_x$  に対して遅れているように見える。ここで、元の  $P_c$  の時刻歴の推定を行うため、次の操作を行った。

- (ア)  $P_t$  と  $F_x$  の、ある時刻  $t$  に対する  $t-500\text{ms}$  から  $t\pm 0\text{ms}$  までの区間の移動平均を取り  $P_t', F_x'$  として、(1)式を用いて真空中の推力を求め、これを  $F_v'$  とする(図 3.3-11)
- (イ) なまった  $P_c(P_c'$  とする) と、上で求めた  $F_x'$  から、 $P_c'(t)/F_v'(t)$  を求め、さらに横軸を  $F_x'$  とした  $P_c'(F_x')/F_v'$  を考える
- (ウ)  $F_x'$  が  $1\text{kN}$  から  $3\text{kN}$  の範囲で区間を 4 分割し、それぞれ線形近似で  $P_c'(F_x')/F_v'$  を表す(図 3.3-12)
- (エ) 上で求めた  $P_c'(F_x')/F_v'$  の線形近似を用いて、 $P_c(t)$  を  $P_c(t) = F_v \times P_c'(F_x')/F_v'$  で逆算する(図 3.3-13)

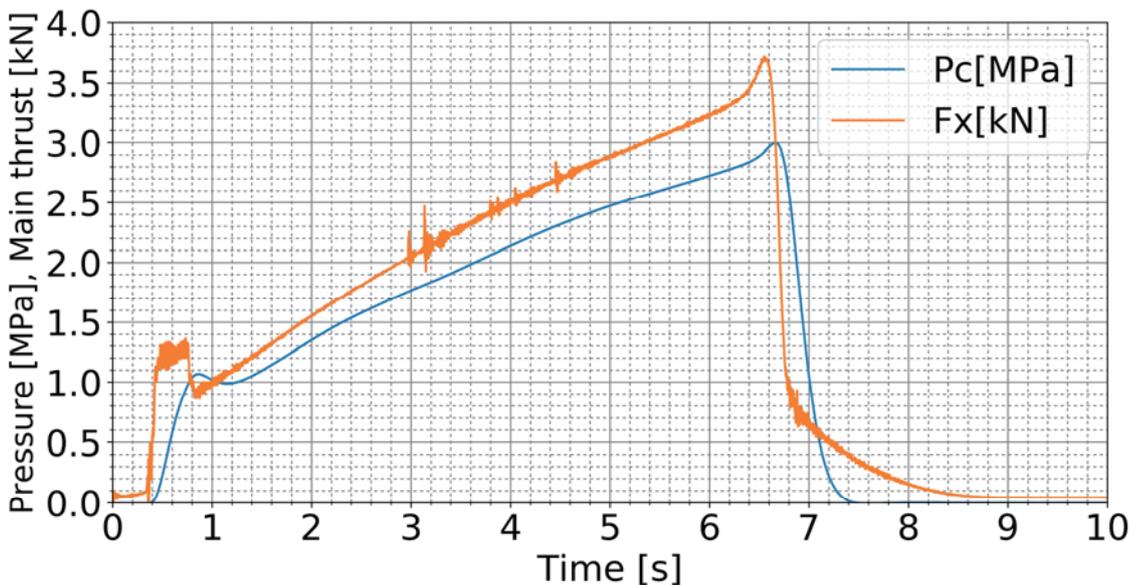


図 3.3-10  $P_c$  と  $F_x$  の比較

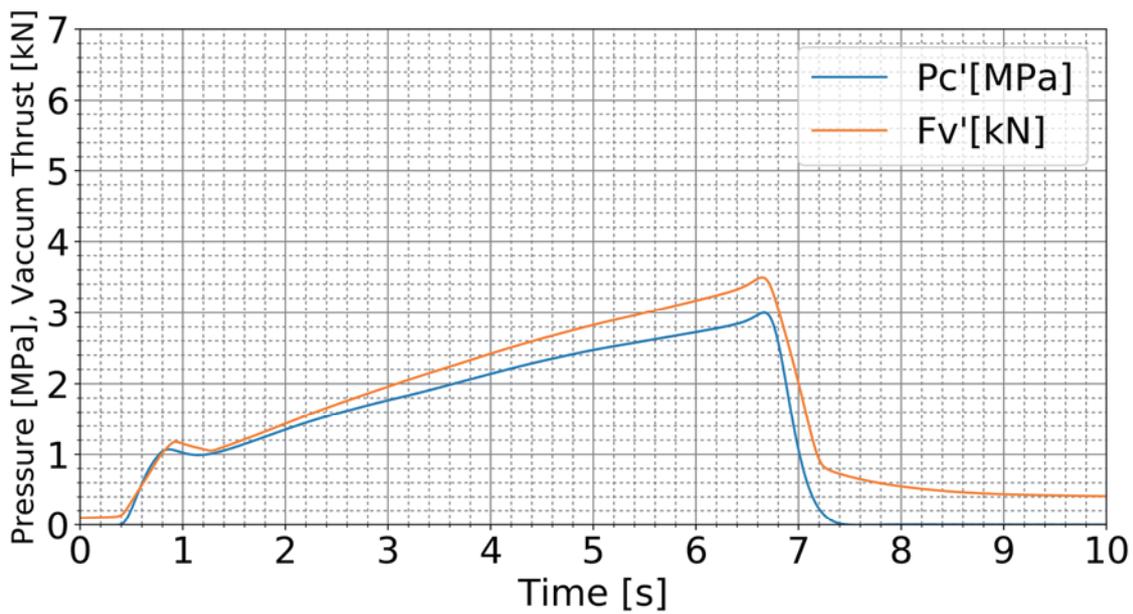


図 3.3-11 Pc'とFv'の比較 (Fv'は-500ms から 0ms の移動平均)

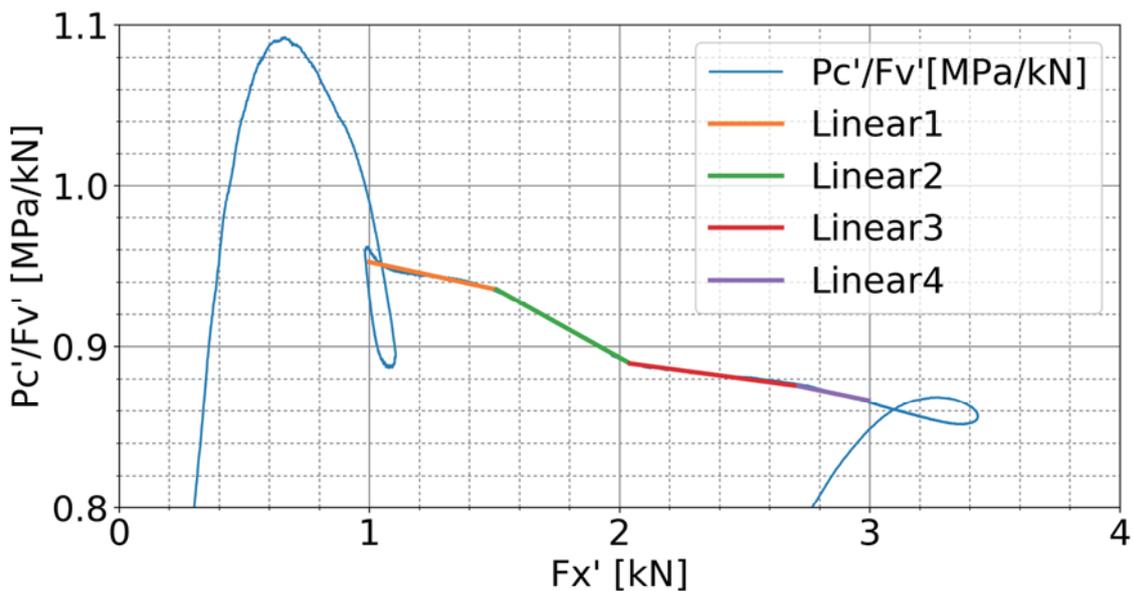


図 3.3-12 Pc'/Fv'と線形近似

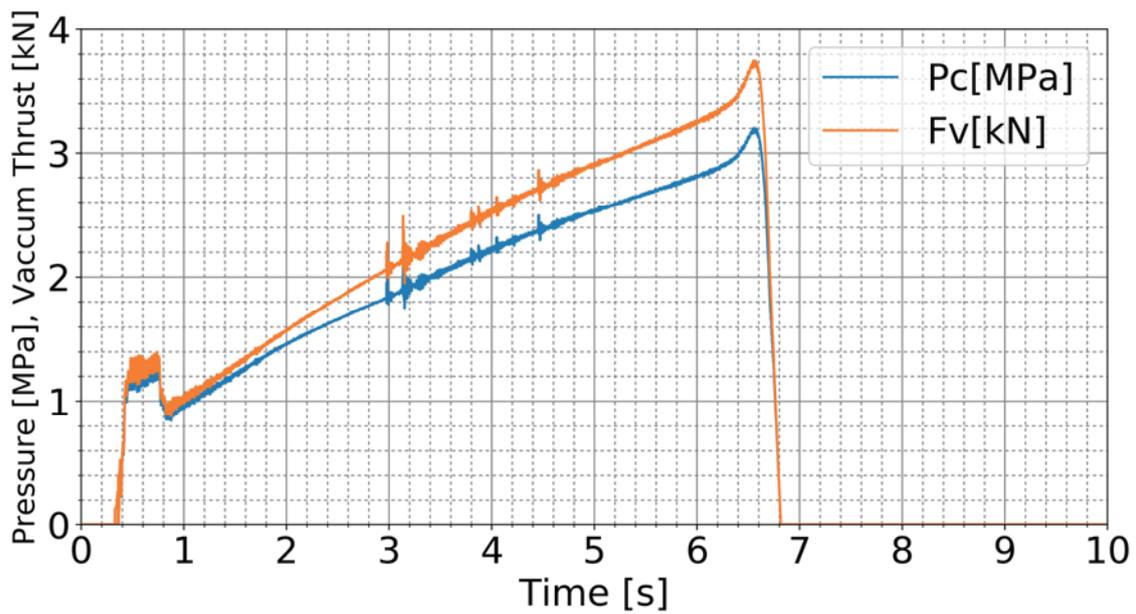


図 3.3-13 逆算した Pc と Fv

以降の解析には、図 3.3-13 に示した、逆算した Pc を用いた。

図 3.3-14 に、真空槽内圧 Pt, バッファタンク内圧 Pbt(絶対圧)を示す。燃焼中の真空槽圧はほぼ一定であった。燃焼終了後、燃焼室圧の上昇を伴って、バッファタンクからの逆流が起こっている可能性がある。

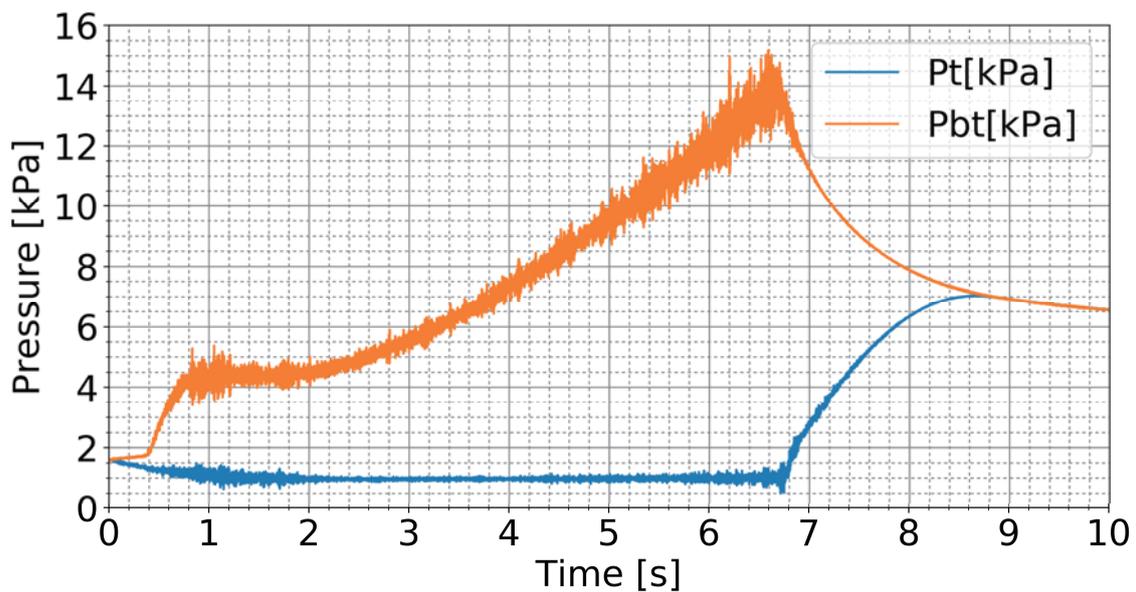


図 3.3-14 真空槽内圧 Pt, バッファタンク内圧 Pbt(絶対圧)

推力の振動が見られる 4.5 秒時に初期スロート径  $A_{t_0} = 27.5\text{mm}$  であるとする、(4)~(6)式より  $\eta_{C_F} = C_F A_{t_0} / \beta (t = 4.5\text{s}) = 0.9627$  と求めることができる。この値を用いて、 $C_F = 2.002$  で一定であると仮定すると、(7)式より図 3.3-15 のようにノズルスロート径の時刻歴  $D_t(t)$  を求めることができる。このとき、 $D_t(t)$

の 6.5s 付近の最大値 27.83mm と燃焼終了後のスロート径の測定値 27.87mm は、誤差 0.04mm の精度で一致する。

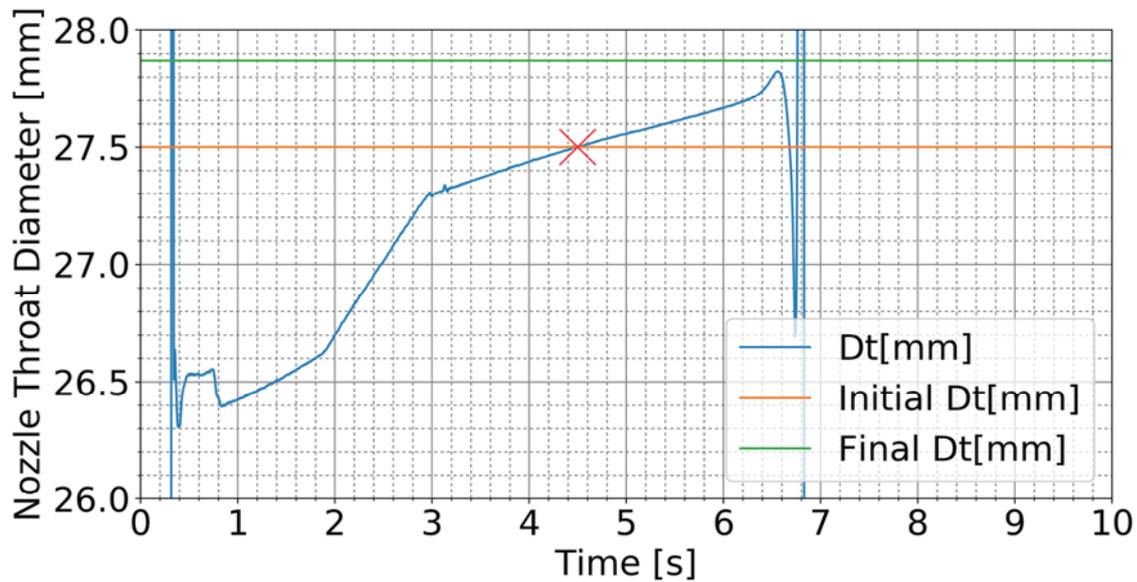


図 3.3-15 ノズルスロート径の推定値

横推力について、5.02[kg]の推進薬が全て燃焼したと仮定すると、(9)～(11)式より $\eta C^* = 0.972$ となる。また、(12), (13)より、モータの重心に加わる推進薬重量分の荷重の減少の時刻歴を求めたものを図 3.3-16 に示す。

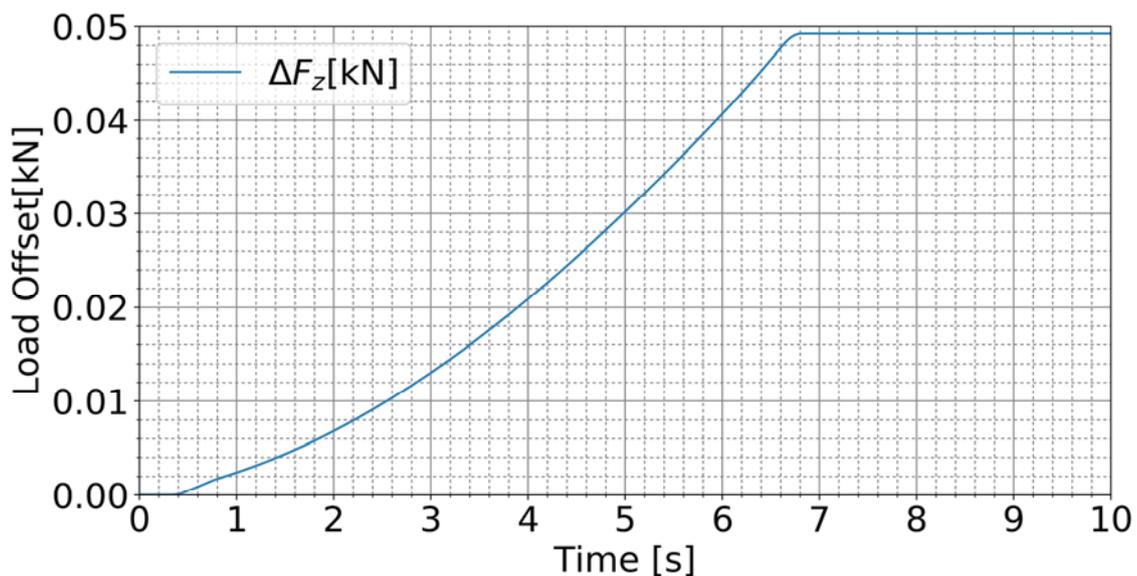
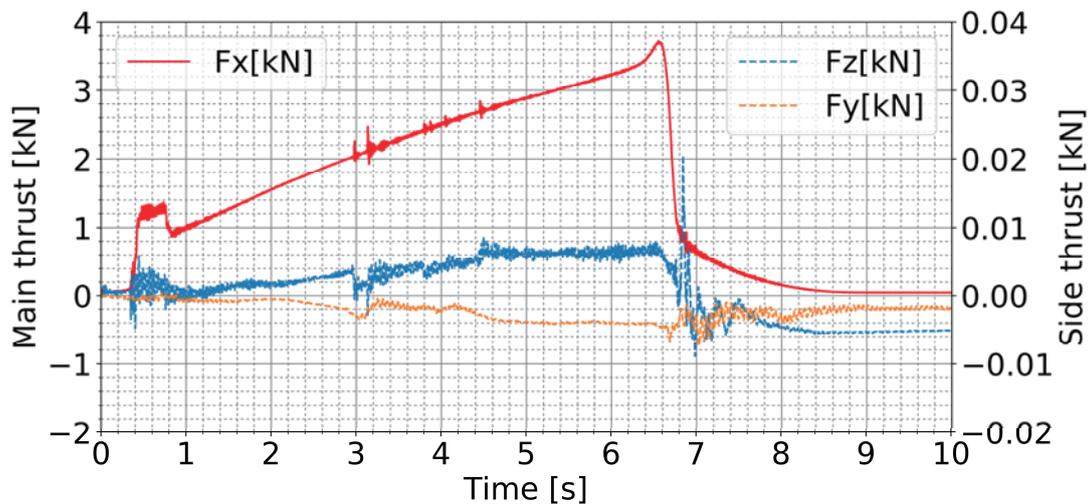


図 3.3-16 荷重減少  $\Delta F_z(t)$

図 3.3-17 主推力  $F_x$ , 横推力  $F_y, F_z$ 

ここで、 $F_y, F_z$  に関しては、ゼロ戻りが第一回燃焼試験と同様に、計測値と同じオーダーで悪い。このことから、今回の計測でも  $F_y, F_z$  に関しては細かい議論は難しい。今回は、 $F_y, F_z$  ともに 0.005-0.01kN のオーダーであるが、 $F_z$  の方がやや大きい値を示す。また、今回の試験では、横推力はゼロ戻り分のずれを考慮すると 0.015kN 程度の値であった可能性があるが、これは主推力の約 0.4% 程度である。

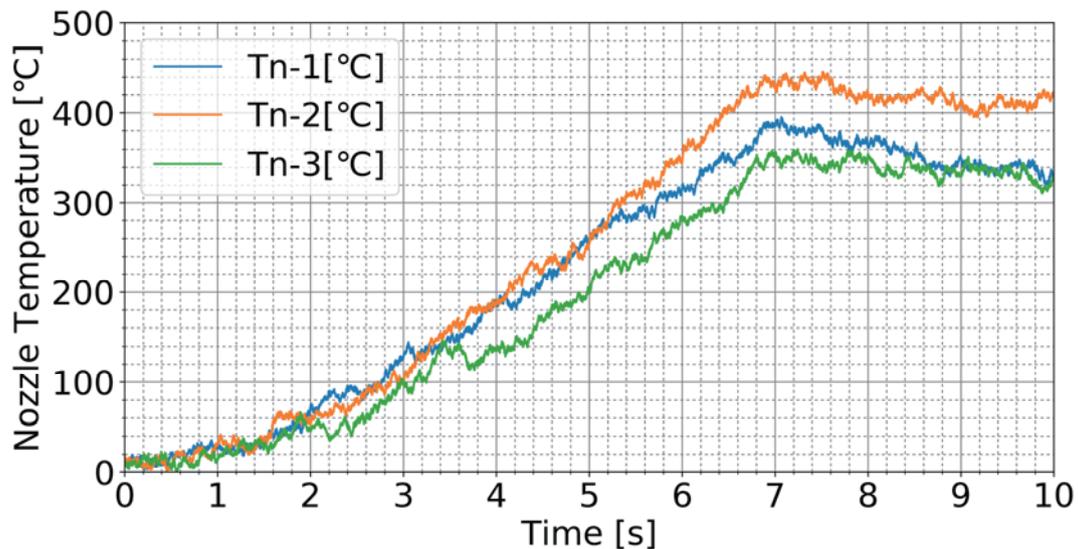
図 3.3-18 主推力  $F_x$ , 横推力  $F_y, F_z$ 

図 3.3-18 に、展開ノズル外壁に取り付けた熱電対による温度計測の結果を示す。途中で、 $Tn-2$  が  $Tn-1$  を逆転している。この原因として、 $Tn-1$  の取り付け位置が固定ノズル側に近かった可能性、また一回目の燃焼試験で用いたベークライト固定ノズルと比べ、二回目の燃焼試験で用いたグラファイト固定ノズルの方が熱伝達率が高いことが影響した可能性が考えられる。最大温度は、 $Tn-2$  のおよそ 440°C であった。

## 4. スタンド系

### 4.1. 概要

今回はあきる野 11m<sup>3</sup> 小型真空槽と、66m<sup>3</sup> バッファタンクを拡散筒でつないで真空引きを行った後、ブローダウンにて真空燃焼試験を 2 回行った。従来からの懸垂方法と異なり、Fz 方向に 2 点懸垂、Fy 方向に 1 点支持という形態で行った (図 4-1)。計測結果がシンプルで作業性が良いメリットもあったが、実際には、ピッチを拘束して、重心の前後を懸垂することが重要であることを経験した。

### 4.2. モータスタンドセット

芯の高さは 755mm を目標に、左右は通常通り定盤中心を目指して、さしがね、下げふりを使用して心出しを行った。

推力計測では、通常、推力計測較正装置のロックピンは抜いて計測するが、今回はピッチを拘束していないアンバランスによって、本来発生していない横推力を計測してしまう恐れもあることから、ピンを入れたままとした。

### 4.3. 推力計測系

センサに関しては計測班の報告を参照。

#### 4.3.1. 主推力 Fx

主推力計測較正装置の単体較正の結果は表 4-1 に示す。荷重伝達率は±0.09%には入っていた。ただし、今回は 1 点吊りであるため、推力計測較正装置の上下のロックピンを入れて計測を行った (ロックピンがない状態でのモータ組み込み後の荷重伝達率は、+0.06%程度であった。)。表 4-2 にインプレースの歪一歪、表 4-3 にインプレースの歪一電圧を、表 4-4 にマイクロチェッカ入力の歪値、表 4-5 にマイクロチェッカ入力の電圧を示した。また、各係数を、表 4-6、表 4-7 に示した。

#### 4.3.2. 横推力のモーメントアームについて

図 4-2 に横推力較正時の荷重印加点を示した。今回の回転中心は従来からの主推力 Fx のフレキシヤ中心ではなく、主推力 Fx のロードセルダイヤフラム中心である。今回は懸垂一点吊りを行ったため、ピッチングモーメントを拘束することができず、主推力計測較正装置のロックピンを入れたまま試験を行ったためである。図 4-3 に、横推力計測部を示す。

##### 4.3.2.1. 横推力 Fy

荷重の印加は Fy 計測位置の裏側、供試体で言えば 180 度ずれた位相から較正用ロードセルを押し付けた。較正結果を、表 4-8 に示す。図 4-4 に Fy 方向荷重印加の様子を示す。

##### 4.3.2.2. 横推力 Fz

Fz について、後較正として、11/11 に作業を行っている。

データにはゼロ戻りが良くないものもあり、1mm 単位や切片を議論できる内容ではない。

ただし、Fz1, Fz2 計測電圧にそれぞれにもととの係数をかけた荷重の和にモーメントアーム 470mm を掛け、ノズル出口までのモーメントアーム 1375.9 で割ったものに、1.06 倍程度したものが横推力という関係になっている。表 4-9 に全体、表 4-10 に係数の表を示した。図 4-5 に Fz 方向荷重印加の様子を示す。

### 4.4. 真空槽の運用

エジェクター、二台の真空ポンプを使用し、真空引きを行った。エジェクター使用には発電機が必要である。図 4-6 に、発電機の接続の様子を示す。

### 4.5. 拡散筒

今回は水冷ではなく、SGP 管 (SS400) にグラファイトの円筒をはめることにした。両者はテーパ部

で軽く KE-45 を塗って固定した。前後に拘束はなく、伸びがあっても割れない構造とした。材料の線膨張係数の違いから、半径方向についても割れることがないことを確認し、問題なく運用できた。図 4-7 に拡散筒外筒、図 4-8 に拡散筒内筒を示した。L/D=5 とした。拡散筒表面温度履歴を図 4-9、図 4-10 に示した。1 回目よりも 2 回目の試験の方が温度上昇が高く、再現性がないのは熱電対の貼り付け加減によるものと考えている。その 2 回目でも  $0.1^{\circ}\text{C}/\text{sec}$  程度の温度上昇であるが、常温付近であり、問題のないことが確認できた。

図 3.3-3 および図 3.3-14 に示された真空槽・バッファタンク履歴から、燃焼終了となる 6.5 秒あたりから逆流が発生していると思われるが、燃焼中の真空槽圧力はほぼ定常であり、燃焼中の拡散筒としての機能には問題がないことが確認できた。ただし、図 4-11 のように、X+1sec あたりから燃焼時の逆流は多少あった。取り外し時には少し力を必要としたが、円周方向に徐々に力を加え、人力で外すことができた。使用したグラファイトの物性は、表 4-11 に示した。

#### 4.6. 不具合

##### 1) アダプターの加工

ターンバックルの寸法が図面通りでなかったか、点火モータとの干渉を最初は反映していたのに製作直前に何らかの誤解があり変更し干渉してしまった。サンダーで干渉部分を削り対処した(図 4-12)。

##### 2) 拡散筒外筒長さ

DOM4 用拡散筒のスペーサーである二つのリングが使えると勘違いしていたが、内径が小さい為使えないことを現場で気づき、小型真空槽をバッファタンク寄りに約 100mm 移動して対処した。

##### 3) 推力校正

真空引き状態での推力較正は省略をしたが、真空引きによりロードセルのゼロ点の変化はあった。

##### 4) DC アンプ

DC アンプとしても使えていた AM32 がひずみアンプとしてしか使用できなかった。やむをえず熱電対起電力をそのまま収録した。

##### 5) 静歪計

静歪計が二台故障していた。修理依頼をしたが修理不能であった。金額的には今後購入が望ましい。

##### 6) ロードセルの入力抵抗

横推力に使用したロードセルは入出力抵抗が高いために、現場からのダミー信号を入れるやり取りができない。今後、ダミーセルやマイクロチェッカを新規製作すること等が必要である。

##### 7) 動特性

動特性の取得を行うことを失念した。

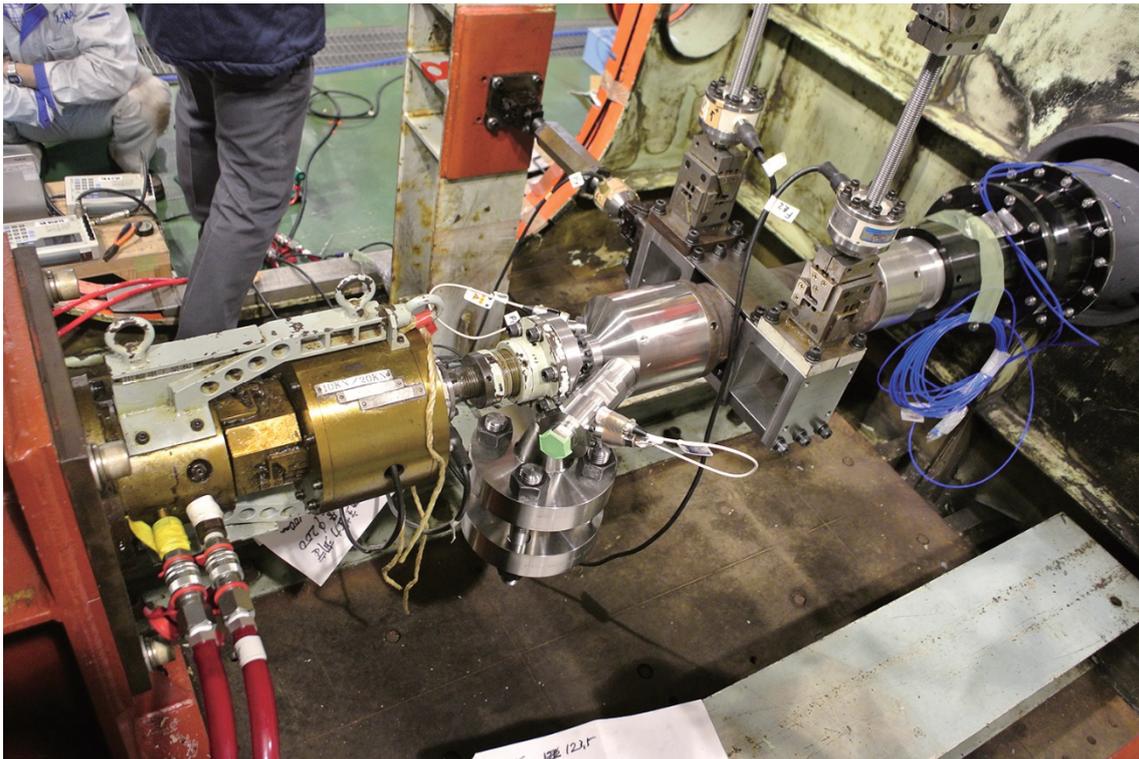


図 4-1 スタンドセット概要

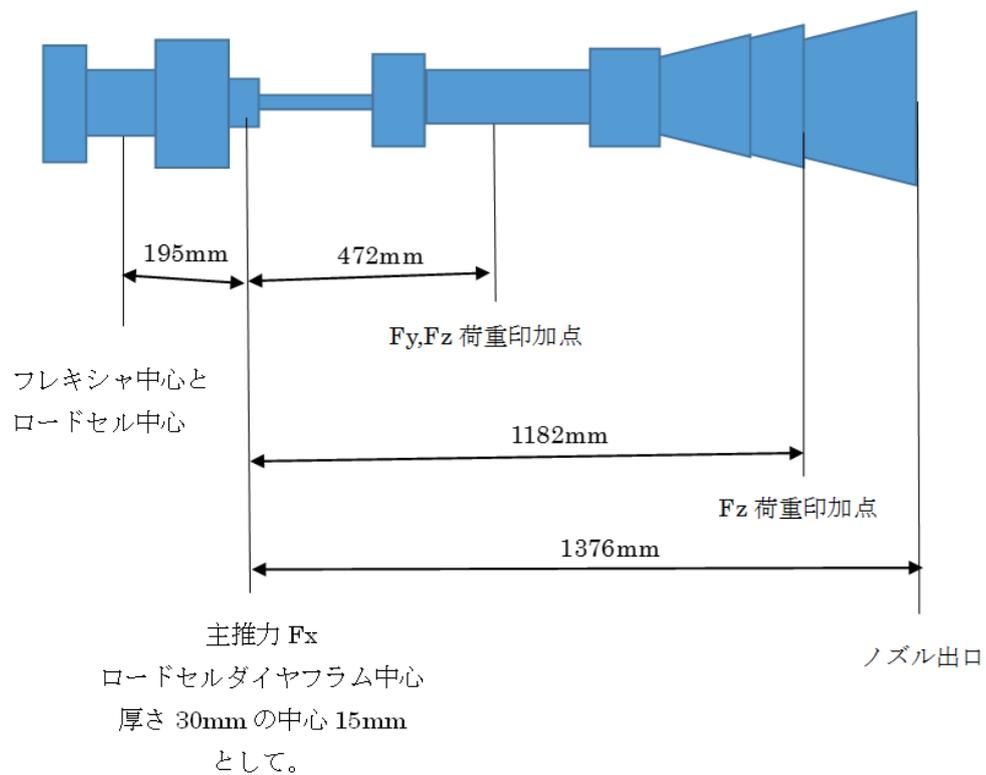


図 4-2 横推力荷重印加位置



図 4-3 横推力計測部

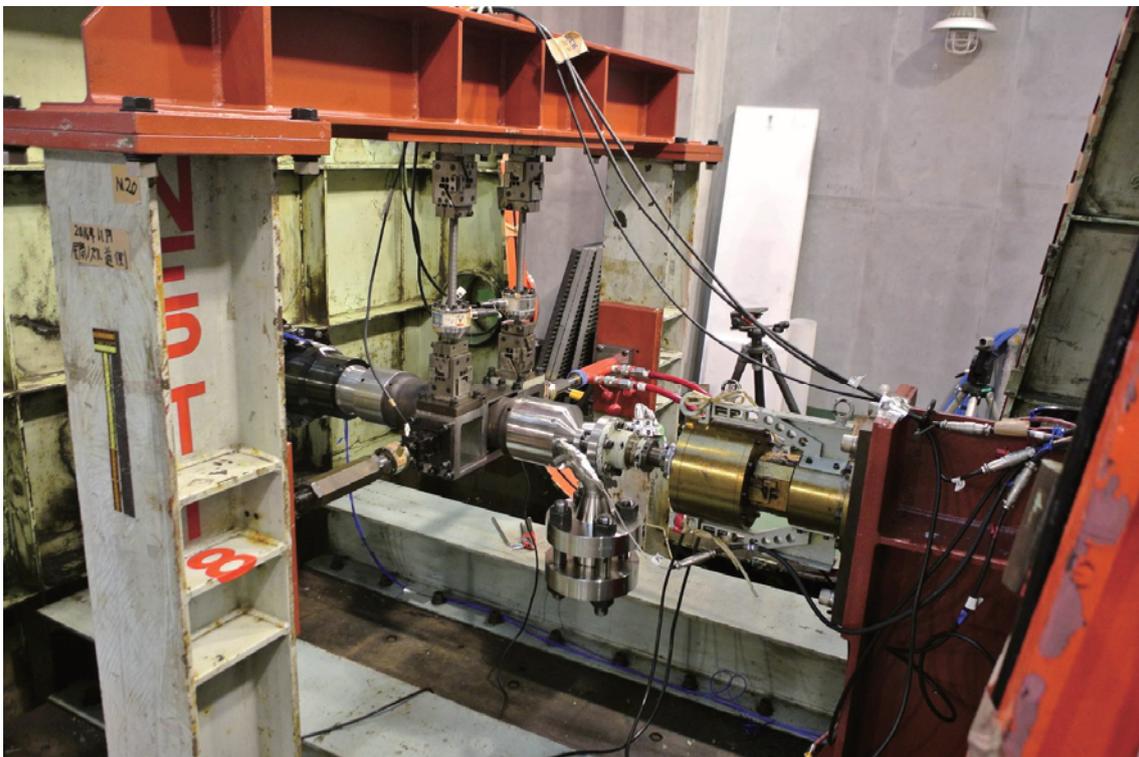


図 4-4  $F_y$  方向荷重印加



図 4-5 Fz 方向荷重印加

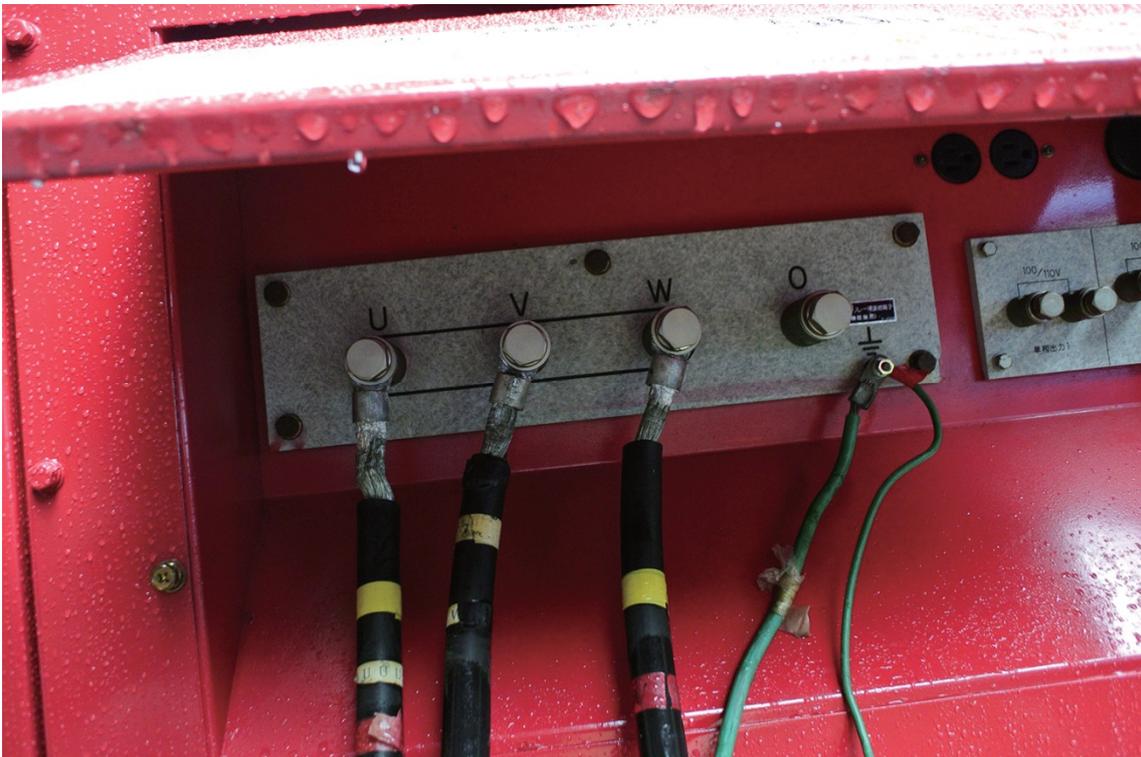
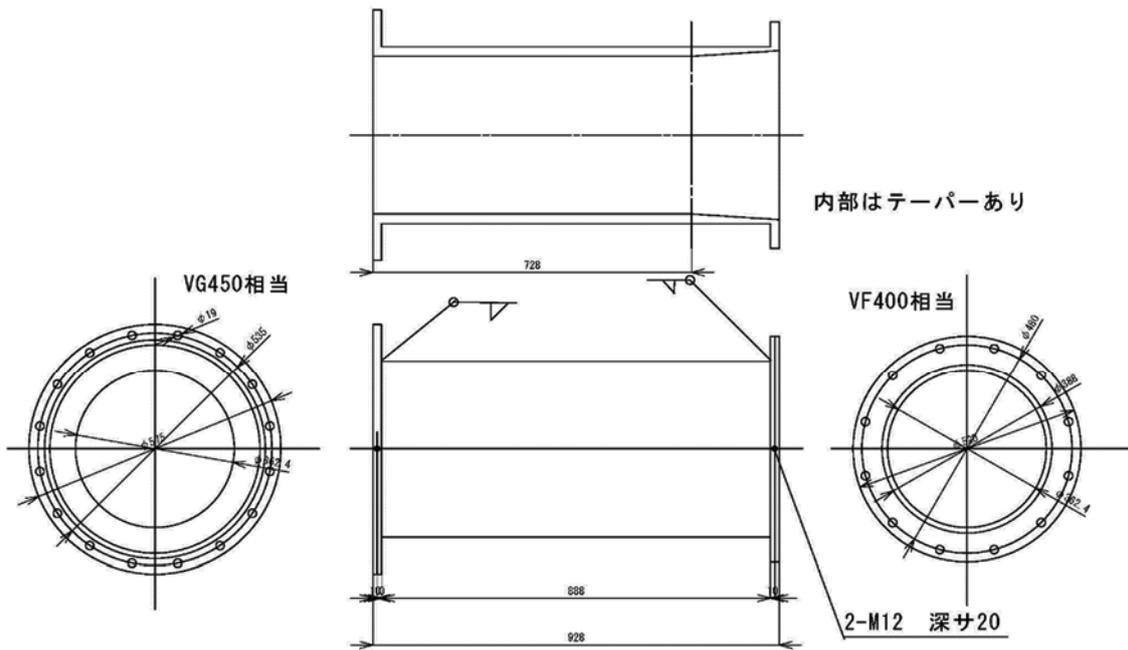


図 4-6 発電機の接続



材料：SGP鋼管、SS400 個数：1個  
 外径 x 厚サ = 406.4 x 22.0

図 4-7 拡散筒外筒

素材：グラファイト 個数：1個 入口R10、他面取りは1

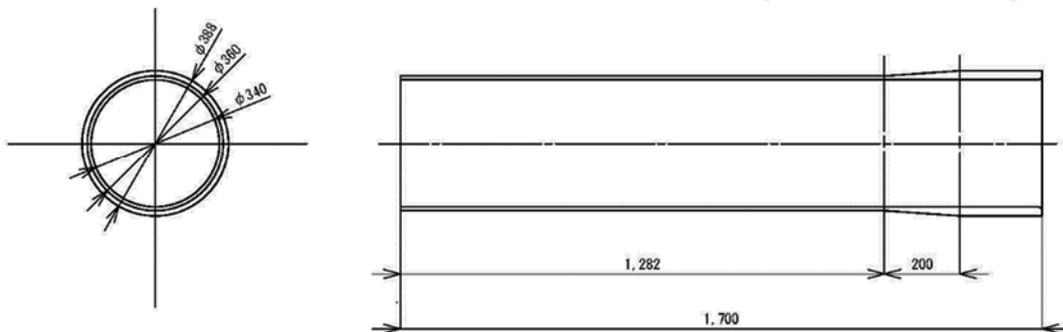


図 4-8 拡散筒内筒

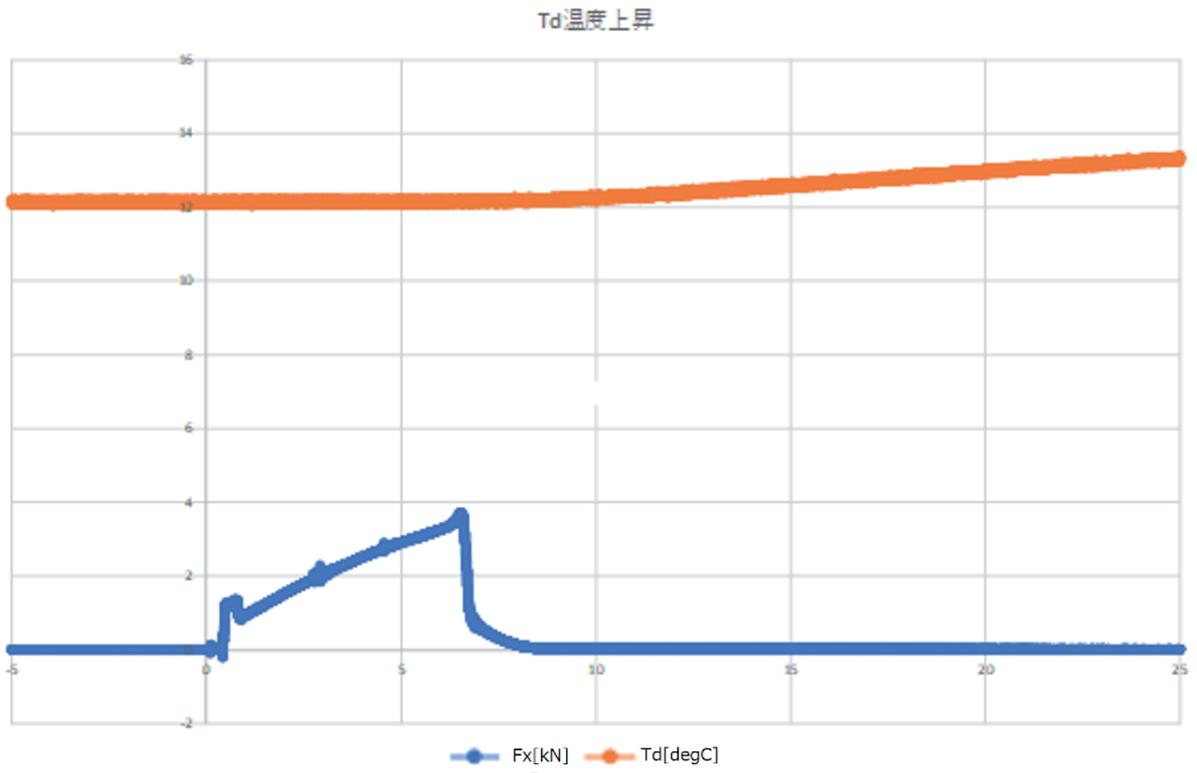


図 4-9 拡散筒表面温度上昇 (1 回目)

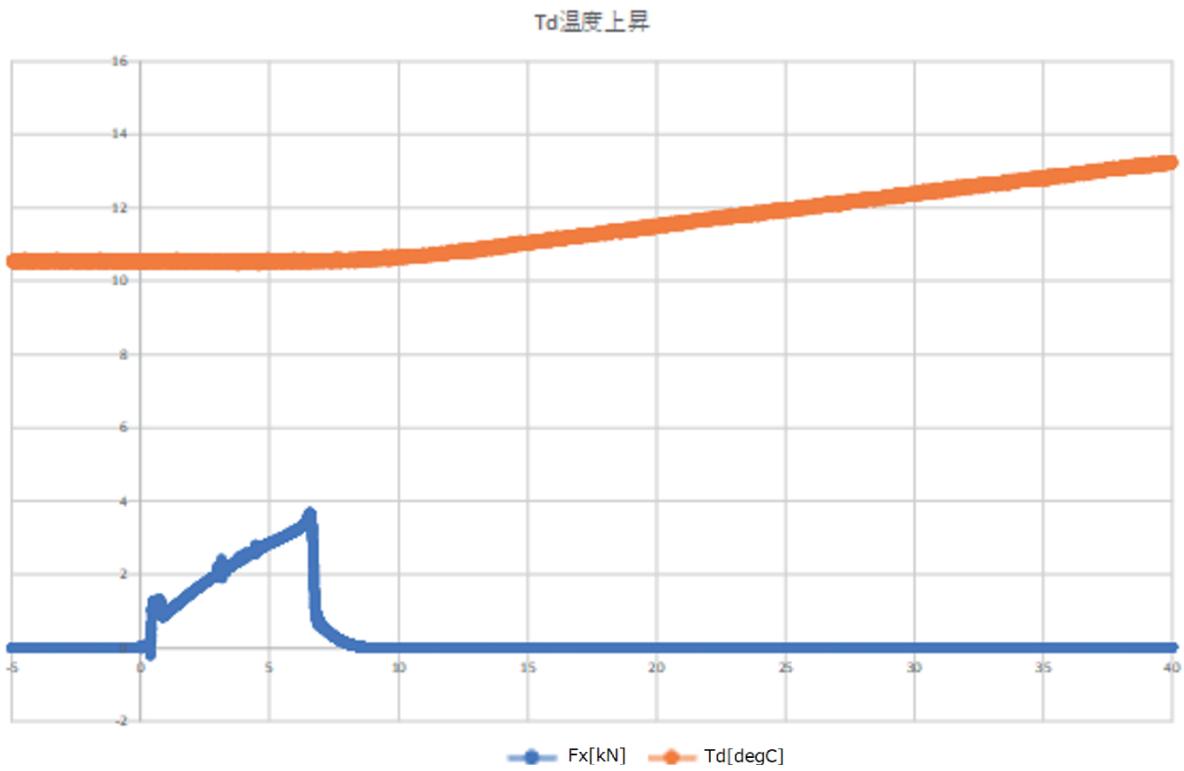


図 4-10 拡散筒表面温度上昇 (2 回目)

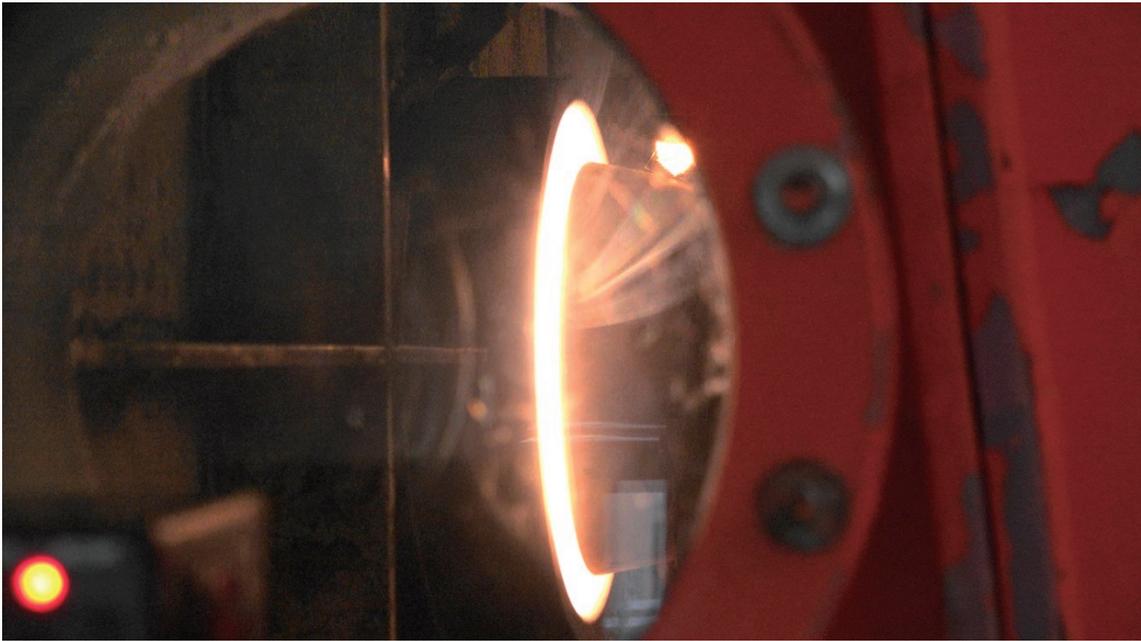


図 4-11 ノズル出口 (1 回目、X+1sec 程度)

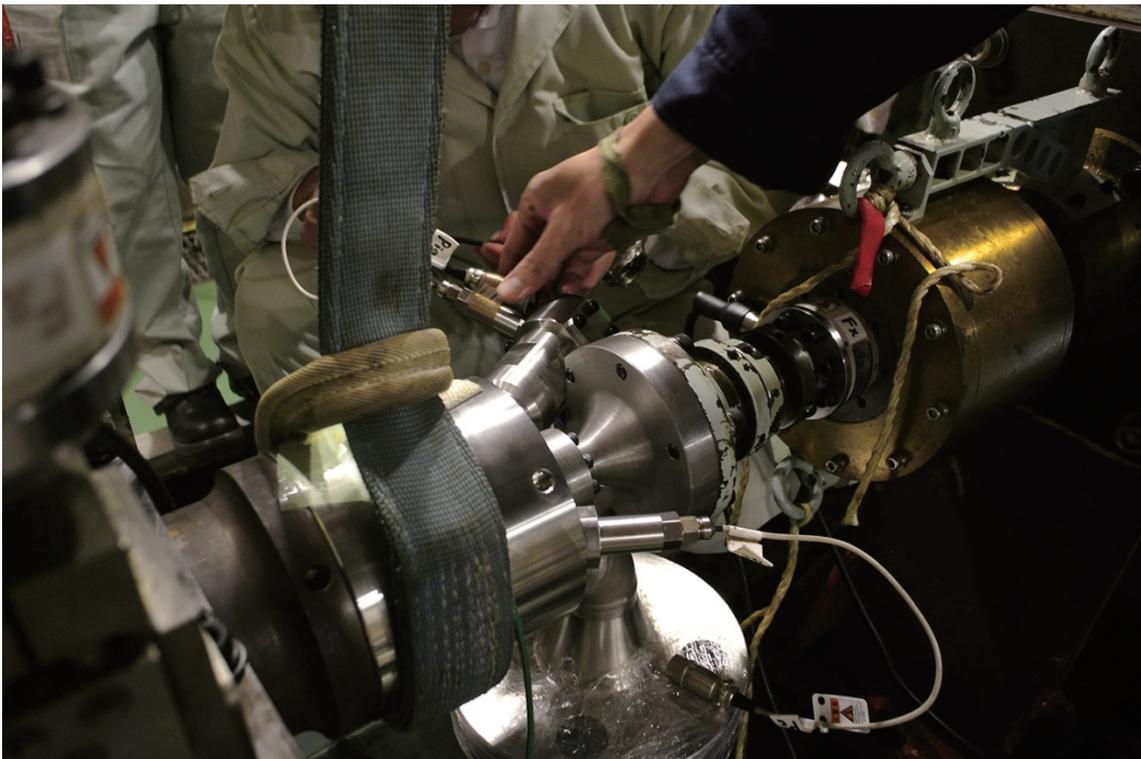


図 4-12 点火モータと干渉部分を削った

表 4-1 主推力計測較正装置単体較正結果

| 第1回     |        | 2016.11.2 | ビン無し          | 縦置き    |        |         |         |           |           |           |  |  |  |
|---------|--------|-----------|---------------|--------|--------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|--|--|--|
| 開始時刻    |        |           |               |        |        |         |         |           |           |           |  |  |  |
| 開始油温    |        |           |               |        |        |         |         |           |           |           |  |  |  |
| 目標      | 生データ   |           |               | 補正データ  |        | 荷重      |         | 非直線性      |           |           |  |  |  |
| 荷重 (kN) | 較正 (μ) | 計測 (μ)    | (計測/較正)-1 (%) | 較正 (μ) | 計測 (μ) | 較正 (kN) | 計測 (kN) | 荷重上昇      | 荷重下降      | ヒステリシス    |  |  |  |
| 0.0     | 25.1   | -7.9      |               | 0.0    | 0.0    | 0.000   | 0.000   |           |           |           |  |  |  |
| 0.6     | 631.2  | 573.1     | -0.052%       | 606.1  | 581.0  | 0.731   | 0.730   | -0.015%   |           |           |  |  |  |
| 1.2     | 1008.6 | 935.0     | -0.039%       | 983.5  | 942.9  | 1.186   | 1.185   | -0.019%   |           |           |  |  |  |
| 1.8     | 1509.8 | 1416.3    | 0.017%        | 1484.7 | 1424.2 | 1.790   | 1.790   | -0.001%   |           |           |  |  |  |
| 2.4     | 1989.7 | 1876.6    | 0.015%        | 1964.6 | 1884.5 | 2.368   | 2.369   | -0.002%   |           |           |  |  |  |
| 2.9     | 2493.4 | 2359.9    | 0.020%        | 2468.3 | 2367.8 | 2.975   | 2.976   | 0.002%    |           |           |  |  |  |
| 3.5     | 2953.5 | 2801.2    | 0.018%        | 2928.4 | 2809.1 | 3.530   | 3.531   |           |           |           |  |  |  |
| 2.9     | 2444.4 | 2312.8    | 0.021%        | 2419.3 | 2320.7 | 2.916   | 2.917   | 0.003%    | 0.001%    |           |  |  |  |
| 2.4     | 1965.9 | 1853.7    | 0.016%        | 1940.8 | 1861.6 | 2.340   | 2.340   | -0.001%   | -0.003%   |           |  |  |  |
| 1.8     | 1491.8 | 1398.9    | 0.013%        | 1466.7 | 1406.8 | 1.768   | 1.768   | -0.003%   | -0.002%   |           |  |  |  |
| 1.2     | 999.7  | 926.8     | 0.002%        | 974.6  | 934.7  | 1.175   | 1.175   | -0.005%   | 0.014%    |           |  |  |  |
| 0.6     | 523.5  | 469.9     | -0.039%       | 498.4  | 477.8  | 0.601   | 0.601   | -0.010%   | 0.005%    |           |  |  |  |
| 0.0     | 25.2   | -8.1      |               | 0.1    | -0.2   | 0.000   | 0.000   |           |           |           |  |  |  |
| 終了時刻    |        |           |               |        |        |         |         | max0.00%  | max0.00%  | max0.01%  |  |  |  |
| 終了油温    |        |           |               |        |        |         |         | min-0.02% | min-0.01% | min-0.00% |  |  |  |
| 第2回     |        | 2016.11.2 | ビン無し          | 縦置き    |        |         |         |           |           |           |  |  |  |
| 開始時刻    |        |           |               |        |        |         |         |           |           |           |  |  |  |
| 開始油温    |        |           |               |        |        |         |         |           |           |           |  |  |  |
| 目標      | 生データ   |           |               | 補正データ  |        | 荷重      |         | 非直線性      |           |           |  |  |  |
| 荷重 [kN] | 較正 (μ) | 計測 (μ)    | (計測/較正)-1 (%) | 較正 (μ) | 計測 (μ) | 較正 (kN) | 計測 (kN) | 荷重上昇      | 荷重下降      | ヒステリシス    |  |  |  |
| 0.0     | 25.2   | -8.1      |               | 0.0    | 0.0    | 0.000   | 0.000   |           |           |           |  |  |  |
| 0.6     | 509.3  | 456.6     | 0.087%        | 484.1  | 464.7  | 0.584   | 0.584   | 0.009%    |           |           |  |  |  |
| 1.2     | 1034.3 | 960.1     | 0.040%        | 1009.1 | 968.2  | 1.216   | 1.217   | 0.003%    |           |           |  |  |  |
| 1.8     | 1471.4 | 1379.0    | 0.005%        | 1446.2 | 1387.1 | 1.743   | 1.743   | -0.013%   |           |           |  |  |  |
| 2.4     | 1974.3 | 1862.2    | 0.050%        | 1949.1 | 1870.3 | 2.350   | 2.351   | 0.013%    |           |           |  |  |  |
| 2.9     | 2472.8 | 2340.2    | 0.036%        | 2447.6 | 2348.3 | 2.950   | 2.952   | 0.004%    |           |           |  |  |  |
| 3.5     | 2950   | 2797.9    | 0.031%        | 2924.8 | 2806.0 | 3.526   | 3.527   |           |           |           |  |  |  |
| 2.9     | 2464.3 | 2331.7    | 0.026%        | 2439.1 | 2339.8 | 2.940   | 2.941   | -0.004%   | -0.008%   |           |  |  |  |
| 2.4     | 1986.2 | 1873.3    | 0.039%        | 1961.0 | 1881.4 | 2.364   | 2.365   | 0.005%    | -0.008%   |           |  |  |  |
| 1.8     | 1506.9 | 1413.4    | 0.035%        | 1481.7 | 1421.5 | 1.786   | 1.787   | 0.002%    | 0.015%    |           |  |  |  |
| 1.2     | 869.7  | 802.2     | 0.048%        | 844.5  | 810.3  | 1.018   | 1.019   | 0.005%    | 0.002%    |           |  |  |  |
| 0.6     | 506.8  | 453.9     | 0.028%        | 481.6  | 462.0  | 0.581   | 0.581   | 0.000%    | -0.010%   |           |  |  |  |
| 0.0     | 25.3   | -8.0      |               | 0.1    | 0.1    | 0.000   | 0.000   |           |           |           |  |  |  |
| 終了時刻    |        |           |               |        |        |         |         | max0.01%  | max0.01%  | max0.01%  |  |  |  |
| 終了油温    |        |           |               |        |        |         |         | min-0.01% | min-0.00% | min-0.01% |  |  |  |

表 4-2 主推力計測較正装置インプレース較正（歪一歪）結果

| 第1回     |        | 2016.11.8 | 歪一歪           | 固定ビン抜き忘れるな。  | 今回は一点吊りのため、固定ピンは入れたままとする。 |         |         |           |           |           |  |  |  |
|---------|--------|-----------|---------------|--------------|---------------------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|--|--|--|
| 開始時刻    |        |           |               |              |                           |         |         |           |           |           |  |  |  |
| 開始油温    |        |           |               |              |                           |         |         |           |           |           |  |  |  |
| 目標      | 生データ   |           |               | 補正データ        |                           | 荷重      |         | 直線性       |           |           |  |  |  |
| 荷重 (kN) | 較正 (μ) | 計測 (μ)    | (計測/較正)-1 (%) | 較正 (μ)       | 計測 (μ)                    | 較正 (kN) | 計測 (kN) | 荷重上昇      | 荷重下降      | ヒステリシス    |  |  |  |
| 0.0     | 25.9   | 17.8      |               | 0.0          | 0.0                       | 0.000   | 0.000   |           |           |           |  |  |  |
| 1.2     | 1016.9 | 970.1     | 0.202%        | 991.0        | 952.3                     | 1.195   | 1.197   | 0.011%    |           |           |  |  |  |
| 1.8     | 1510.6 | 1444.1    | 0.164%        | 1484.7       | 1426.3                    | 1.790   | 1.793   | 0.002%    |           |           |  |  |  |
| 2.4     | 1984.2 | 1898.9    | 0.155%        | 1958.3       | 1881.1                    | 2.361   | 2.364   | -0.002%   |           |           |  |  |  |
| 2.9     | 2499.5 | 2393.8    | 0.152%        | 2473.6       | 2376.0                    | 2.982   | 2.986   | -0.005%   |           |           |  |  |  |
| 3.5     | 2966.9 | 2842.8    | 0.153%        | 2941.0       | 2825.0                    | 3.545   | 3.551   | -0.005%   |           |           |  |  |  |
| 4.7     | 3918.3 | 3756.9    | 0.159%        | 3892.4       | 3739.1                    | 4.692   | 4.700   |           |           |           |  |  |  |
| 3.5     | 2949.1 | 2825.1    | 0.140%        | 2923.2       | 2807.3                    | 3.524   | 3.529   | -0.015%   | -0.010%   |           |  |  |  |
| 2.9     | 2491.3 | 2385.6    | 0.143%        | 2465.4       | 2367.8                    | 2.972   | 2.976   | -0.010%   | -0.005%   |           |  |  |  |
| 2.4     | 1963.3 | 1878.3    | 0.132%        | 1937.4       | 1860.5                    | 2.335   | 2.339   | -0.013%   | -0.011%   |           |  |  |  |
| 1.8     | 1511.9 | 1445.1    | 0.152%        | 1486.0       | 1427.3                    | 1.791   | 1.794   | -0.003%   | -0.005%   |           |  |  |  |
| 1.2     | 1084.8 | 1034.6    | 0.125%        | 1058.9       | 1016.8                    | 1.276   | 1.278   | -0.009%   | -0.020%   |           |  |  |  |
| 0.0     | 26.4   | 17.6      |               | 0.5          | -0.2                      | 0.001   | 0.000   |           |           |           |  |  |  |
| 終了時刻    | 11:50  |           |               | -25.40694444 |                           | -0.03   |         | max0.01%  | max-0.00% | max-0.00% |  |  |  |
| 終了油温    |        |           |               |              |                           |         |         | min-0.00% | min-0.01% | min-0.02% |  |  |  |
| 第2回     |        | 2016.11.8 | 歪一歪           |              |                           |         |         |           |           |           |  |  |  |
| 開始時刻    |        |           |               |              |                           |         |         |           |           |           |  |  |  |
| 開始油温    |        |           |               |              |                           |         |         |           |           |           |  |  |  |
| 目標      | 生データ   |           |               | 補正データ        |                           | 荷重      |         | 直線性       |           |           |  |  |  |
| 荷重 [kN] | 較正 (μ) | 計測 (μ)    | (計測/較正)-1 (%) | 較正 (μ)       | 計測 (μ)                    | 較正 (kN) | 計測 (kN) | 荷重上昇      | 荷重下降      | ヒステリシス    |  |  |  |
| 0.0     | 26.4   | 17.6      |               | 0.0          | 0.0                       | 0.000   | 0.000   |           |           |           |  |  |  |
| 1.2     | 1038.7 | 990.7     | 0.236%        | 1012.3       | 973.1                     | 1.220   | 1.223   | 0.017%    |           |           |  |  |  |
| 1.8     | 1508.3 | 1441.6    | 0.192%        | 1481.9       | 1424.0                    | 1.786   | 1.790   | 0.008%    |           |           |  |  |  |
| 2.4     | 2006.5 | 1920.1    | 0.179%        | 1980.1       | 1902.5                    | 2.387   | 2.391   | 0.004%    |           |           |  |  |  |
| 2.9     | 2502.4 | 2396.3    | 0.168%        | 2476.0       | 2378.7                    | 2.985   | 2.990   | -0.002%   |           |           |  |  |  |
| 3.5     | 2979.2 | 2854.4    | 0.170%        | 2952.8       | 2836.8                    | 3.559   | 3.566   | -0.001%   |           |           |  |  |  |
| 4.7     | 3894.2 | 3733.5    | 0.171%        | 3867.8       | 3715.9                    | 4.662   | 4.670   |           |           |           |  |  |  |
| 3.5     | 2998.0 | 2872.2    | 0.168%        | 2971.6       | 2854.6                    | 3.582   | 3.588   | -0.002%   | -0.001%   |           |  |  |  |
| 2.9     | 2487.4 | 2381.6    | 0.161%        | 2461.0       | 2364.0                    | 2.967   | 2.971   | -0.006%   | -0.004%   |           |  |  |  |
| 2.4     | 1981.2 | 1895.5    | 0.169%        | 1954.8       | 1877.9                    | 2.356   | 2.360   | -0.001%   | -0.005%   |           |  |  |  |
| 1.8     | 1531.5 | 1463.7    | 0.184%        | 1505.1       | 1446.1                    | 1.814   | 1.818   | 0.005%    | -0.003%   |           |  |  |  |
| 1.2     | 1081.1 | 1031.2    | 0.208%        | 1054.7       | 1013.6                    | 1.271   | 1.274   | 0.010%    | -0.007%   |           |  |  |  |
| 0.0     | 26.5   | 17.6      |               | 0.1          | 0.0                       | 0.000   | 0.000   |           |           |           |  |  |  |
| 終了時刻    | 12:10  |           |               |              |                           |         |         | max0.02%  | max0.01%  | max-0.00% |  |  |  |
| 終了油温    |        |           |               |              |                           |         |         | min-0.00% | min-0.01% | min-0.01% |  |  |  |

表 4-3 歪一電圧

| 歪/電圧計測    |        |                  |        |               |        |        |         |         |           |           |           |
|-----------|--------|------------------|--------|---------------|--------|--------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
|           | 油圧ユニット | 移動式検査ユニット        |        |               |        |        |         |         |           |           |           |
|           | 推力印加   | 油圧シリンダ           |        |               |        |        |         |         |           |           |           |
|           | 操作:    | 機側手動 マイクロチェッカ外して |        |               |        |        |         |         |           |           |           |
| 第1回       | 開始時刻   |                  |        |               |        |        |         |         |           |           |           |
|           | 油温     |                  |        |               |        |        |         |         |           |           |           |
| 目標荷重 (kN) | 生データ   |                  |        | (計測/較正-1) (%) | 補正データ  |        | 荷重      |         | 直線性       |           | ヒステリシス    |
|           | 較正 (μ) | 計測 (V)           |        |               | 較正 (μ) | 計測 (V) | 較正 (kN) | 計測 (kN) | 荷重上昇      | 荷重下降      |           |
| 0         | 0.0    | 26.2             | 0.001  |               | 0.0    | 0.000  | 0.000   | 0.000   |           |           |           |
| 120       | 1.2    | 1028.2           | 1.533  | -0.031%       | 1002.0 | 1.532  | 1.208   | 1.207   | -0.017%   |           |           |
| 180       | 1.8    | 1504.0           | 2.263  | 0.081%        | 1477.8 | 2.262  | 1.781   | 1.783   | 0.018%    |           |           |
| 240       | 2.4    | 2007.0           | 3.033  | 0.083%        | 1980.8 | 3.032  | 2.388   | 2.390   | 0.025%    |           |           |
| 300       | 2.9    | 2510.0           | 3.803  | 0.085%        | 2483.8 | 3.802  | 2.994   | 2.997   | 0.032%    |           |           |
| 360       | 3.5    | 3007.1           | 4.563  | 0.065%        | 2980.9 | 4.562  | 3.593   | 3.596   | 0.023%    |           |           |
| 480       | 4.7    | 3918.5           | 5.956  | 0.034%        | 3892.3 | 5.955  | 4.692   | 4.694   |           |           |           |
| 360       | 3.5    | 2979.6           | 4.516  | -0.047%       | 2953.4 | 4.515  | 3.560   | 3.559   |           | -0.062%   | -0.0850%  |
| 300       | 2.9    | 2482.7           | 3.756  | -0.057%       | 2456.5 | 3.755  | 2.961   | 2.960   |           | -0.057%   | -0.0898%  |
| 240       | 2.4    | 1947.4           | 2.936  | -0.116%       | 1921.2 | 2.935  | 2.316   | 2.313   |           | -0.074%   | -0.0992%  |
| 180       | 1.8    | 1522.3           | 2.286  | -0.141%       | 1496.1 | 2.285  | 1.804   | 1.801   |           | -0.067%   | -0.0851%  |
| 120       | 1.2    | 1005.3           | 1.495  | -0.234%       | 979.1  | 1.494  | 1.180   | 1.178   |           | -0.067%   | -0.0505%  |
| 0         | 0.0    | 26.4             | -0.002 |               | 0.2    | -0.003 | 0.000   | -0.002  |           |           |           |
|           |        |                  |        |               |        |        |         | Max     | max0.03%  | max-0.06% | max-0.05% |
|           |        |                  |        |               |        |        |         | Min     | min-0.02% | min-0.07% | min-0.10% |
|           | 終了時刻   |                  |        |               |        |        |         |         |           |           |           |
|           | 油温     |                  |        |               |        |        |         |         |           |           |           |
| 第2回       | 開始時刻   |                  |        |               |        |        |         |         |           |           |           |
|           | 油温     |                  |        |               |        |        |         |         |           |           |           |
| 目標荷重 (kN) | 生データ   |                  |        | (計測/較正-1) (%) | 補正データ  |        | 荷重      |         | 直線性       |           | ヒステリシス    |
|           | 較正 (μ) | 計測 (V)           |        |               | 較正 (μ) | 計測 (V) | 較正 (kN) | 計測 (kN) | 荷重上昇      | 荷重下降      |           |
| 0         | 0.0    | 26.4             | -0.002 |               | 0.0    | 0.000  | 0.000   | 0.000   |           |           |           |
| 120       | 1.2    | 1088.0           | 1.623  | 0.084%        | 1061.6 | 1.625  | 1.280   | 1.281   | 0.00%     |           |           |
| 180       | 1.8    | 1509.2           | 2.269  | 0.140%        | 1482.8 | 2.271  | 1.787   | 1.790   | 0.02%     |           |           |
| 240       | 2.4    | 1978.8           | 2.987  | 0.099%        | 1952.4 | 2.989  | 2.354   | 2.356   | 0.01%     |           |           |
| 300       | 2.9    | 2497.1           | 3.781  | 0.113%        | 2470.7 | 3.783  | 2.978   | 2.982   | 0.02%     |           |           |
| 360       | 3.5    | 2994.2           | 4.542  | 0.110%        | 2967.8 | 4.544  | 3.578   | 3.581   | 0.02%     |           |           |
| 480       | 4.7    | 3914.0           | 5.949  | 0.088%        | 3887.6 | 5.951  | 4.686   | 4.690   |           |           |           |
| 360       | 3.5    | 2949.4           | 4.470  | 0.031%        | 2923.0 | 4.472  | 3.524   | 3.525   |           | -0.04%    | -0.06%    |
| 300       | 2.9    | 2478.8           | 3.750  | 0.030%        | 2452.4 | 3.752  | 2.956   | 2.957   |           | -0.04%    | -0.05%    |
| 240       | 2.4    | 1968.1           | 2.968  | 0.008%        | 1941.7 | 2.970  | 2.341   | 2.341   |           |           |           |
| 180       | 1.8    | 1553.5           | 2.333  | -0.028%       | 1527.1 | 2.335  | 1.841   | 1.840   |           |           |           |
| 120       | 1.2    | 1007.6           | 1.498  | -0.047%       | 981.2  | 1.500  | 1.183   | 1.182   |           | -0.03%    | -0.04%    |
| 0         | 0.0    | 26.1             | -0.002 |               | -0.3   | 0.000  | 0.000   | 0.000   |           |           |           |
|           |        |                  |        |               |        |        |         | Max     | max0.02%  | max-0.03% | max-0.04% |
|           |        |                  |        |               |        |        |         | Min     | min-0.00% | min-0.04% | min-0.06% |
|           | 開始時刻   |                  |        |               |        |        |         |         |           |           |           |
|           | 油温     |                  |        |               |        |        |         |         |           |           |           |

表 4-4 マイクロチェッカ歪の計測

| 計測用ロードセルにマイクロチェッカを接続して静歪計で値を測定 |        |           |         |        |  |
|--------------------------------|--------|-----------|---------|--------|--|
| 計測用ロードセル                       |        | マイクロチェッカ  |         | 較正用静歪計 |  |
| 表示値(μ)                         | 検定時測定歪 | 今回生データ(μ) | 0補正值(μ) | 開始時刻   |  |
| 0                              | 0      | 19.2      | 0       | 13:50  |  |
| 1000                           | 0      | 1020.2    | 1001    |        |  |
| 2000                           | 0      | 2022.8    | 2003.6  |        |  |
| 3000                           | 0      | 3019.6    | 3000.4  |        |  |
| 4000                           | 0      | 4034.7    | 4015.5  |        |  |
| 3000                           | 0      | 3019.7    | 3000.5  |        |  |
| 2000                           | 0      | 2022.8    | 2003.6  |        |  |
| 1000                           | 0      | 1020.2    | 1001    | 終了時刻   |  |
| 0                              | 0      | 19.2      | 0       | 13:55  |  |

表 4-5 マイクロチェッカ歪の電圧計測

| マイクロチェッカ入力アンプ<br>CAL |                |              | アンプ電気CAL(マイクロ<br>チェッカ有り) |                |              |
|----------------------|----------------|--------------|--------------------------|----------------|--------------|
| 表示歪量<br>( $\mu$ )    | 今回アンプ<br>電圧(V) | 0補正<br>電圧(V) | アンプ歪<br>CAL( $\mu$ )     | 今回アンプ<br>出力(V) | 0補正<br>電圧(V) |
| 0                    | 0.001          | 0.000        | 0                        | 0.000          | 0.000        |
| 1000                 | 1.598          | 1.597        | 1000                     |                | 0.000        |
| 2000                 | 3.199          | 3.198        | 2000                     |                | 0.000        |
| 3000                 | 4.790          | 4.789        | 3000                     |                | 0.000        |
| 4000                 | 6.410          | 6.409        | 4000                     | 6.398          | 6.398        |
| 3000                 | 4.790          | 4.789        | 3000                     |                | 0.000        |
| 2000                 | 3.199          | 3.198        | 2000                     |                | 0.000        |
| 1000                 | 1.598          | 1.597        | 1000                     |                | 0.000        |
| 0                    | 0              | -0.001       | 0                        |                | 0.000        |
| ⑤ロードセルの電圧感度(kN/V)    |                | +側           | 上り                       | 0.78818        |              |
|                      |                |              | 下り                       | 0.78817        |              |

表 4-6 Fx の係数 (1 回目)

| 計測<br>(V) | 校正<br>(kN) |      |          |
|-----------|------------|------|----------|
| 0         | 0          |      |          |
| 1.532     | 1.20786691 |      |          |
| 2.262     | 1.78142288 |      |          |
| 3.032     | 2.38776724 |      |          |
| 3.802     | 2.99411161 |      |          |
| 4.562     | 3.59334379 |      |          |
| 5.955     | 4.69199639 |      |          |
| 4.515     | 3.56024396 |      |          |
| 3.755     | 2.96124442 |      |          |
| 2.935     | 2.31595473 | 傾き   |          |
| 2.285     | 1.80350816 |      | 0.787596 |
| 1.494     | 1.18027861 | 切片   |          |
| -0.003    | 0.00024109 |      | 0.001054 |
| 0         | 0          | R2乗値 |          |
| 1.625     | 1.27971209 |      | 0.999998 |
| 2.271     | 1.78745016 |      |          |
| 2.989     | 2.35353229 |      |          |
| 3.783     | 2.97832014 |      |          |
| 4.544     | 3.57755232 |      |          |
| 5.951     | 4.68633075 |      |          |
| 4.472     | 3.52359758 |      |          |
| 3.752     | 2.95630199 |      |          |
| 2.97      | 2.34066692 |      |          |
| 2.335     | 1.84087782 |      |          |
| 1.5       | 1.18281011 |      |          |
| 0         | -0.0003616 |      |          |

表 4-7 Fx の係数 (2 回目)

| FX較正值<br>2回目       | 2016. 11. 10               |           |        |                |           |
|--------------------|----------------------------|-----------|--------|----------------|-----------|
| 較正ロードセル<br>ひずみ [μ] | 較正ロードセル<br>ひずみ [μ]<br>ゼロ補正 | 較正荷重 [kN] | Fx [V] | ゼロ補正<br>Fx [V] |           |
| 26.1               | 0                          | 0.032     | -0.001 | 0              | 傾き        |
| 1075               | 1048.9                     | 1.296     | 1.632  | 1.633          | 0.7749    |
| 1516.5             | 1490.4                     | 1.828     | 2.318  | 2.319          | 切片        |
| 2060.9             | 2034.8                     | 2.485     | 3.165  | 3.166          | 0.03148   |
| 2581.3             | 2555.2                     | 3.112     | 3.974  | 3.975          | R2乗値      |
| 3010               | 2983.9                     | 3.629     | 4.642  | 4.643          | 0.9999987 |
| 3907.2             | 3881.1                     | 4.710     | 6.037  | 6.038          |           |
| 3028.7             | 3002.6                     | 3.651     | 4.669  | 4.67           |           |
| 2465.4             | 2439.3                     | 2.972     | 3.792  | 3.793          |           |
| 2000               | 1973.9                     | 2.411     | 3.069  | 3.07           |           |
| 1546.7             | 1520.6                     | 1.864     | 2.364  | 2.365          |           |
| 1072.1             | 1046                       | 1.292     | 1.626  | 1.627          |           |
| 26.1               | 0                          | 0.031     | -0.001 | 0              |           |

表 4-8 Fy の較正

| Fy計測用ロードセル |              |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|------------|--------------|------------|---------|--------------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|----------|------|-----|------------|--|
| 製造メーカー     | TEAC         |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| 型番         | TU-PGRS 100K |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| SN         | G46151       |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| 計測日        | 2016.10.24   |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| 正側         |              | 1回目        |         | 2回目          |         | ゼロ補正     |         | ゼロ補正     |         | 負側       |          | ゼロ補正 |     | ゼロ補正       |  |
| 荷重(kg)     | 荷重(KN)       | 1回目        | 2回目     | 1回目          | 2回目     | 平均       | 1回目     | 2回目      | 1回目     | 2回目      | 平均       | 1回目  | 2回目 | 平均         |  |
| 0          | 0.000        | 18.7       | 18.5    | 0            | 0       | 0        | -36.1   | -35.9    | 0       | 0        | 0        | 0    | 0   | 0          |  |
| 20         | 0.196        | 803.4      | 803.7   | 784.7        | 785.2   | 784.95   | -820.9  | -820.9   | -784.8  | -785     | -784.9   |      |     |            |  |
| 40         | 0.392        | 1588.6     | 1588.7  | 1569.9       | 1570.2  | 1570.05  | -1605.8 | -1605.8  | -1569.7 | -1569.9  | -1569.8  |      |     |            |  |
| 60         | 0.588        | 2373.4     | 2373.6  | 2354.7       | 2355.1  | 2354.9   | -2390.6 | -2390.8  | -2354.5 | -2354.9  | -2354.7  |      |     |            |  |
| 80         | 0.785        | 3158.2     | 3158.2  | 3139.5       | 3139.7  | 3139.6   | -3175.5 | -3175.4  | -3139.4 | -3139.5  | -3139.45 |      |     |            |  |
| 100        | 0.981        | 3942.7     | 3942.6  | 3924         | 3924.1  | 3924.05  | -3960   | -3960    | -3923.9 | -3924.1  | -3924    |      |     |            |  |
| 80         | 0.785        | 3158       | 3157.95 | 3139.3       | 3139.45 | 3139.375 | -3175.1 | -3175.2  | -3139   | -3139.3  | -3139.15 |      |     |            |  |
| 60         | 0.588        | 2373.2     | 2373.3  | 2354.5       | 2354.8  | 2354.65  | -2390.3 | -2390.3  | -2354.2 | -2354.4  | -2354.3  |      |     |            |  |
| 40         | 0.392        | 1588.3     | 1588.4  | 1569.6       | 1569.9  | 1569.75  | -1605.4 | -1605.4  | -1569.3 | -1569.5  | -1569.4  |      |     |            |  |
| 20         | 0.196        | 803.5      | 803.5   | 784.8        | 785     | 784.9    | -820.5  | -820.6   | -784.4  | -784.7   | -784.55  |      |     |            |  |
| 0          | 0.000        | 18.5       | 18.6    | -0.2         | 0.1     | -0.05    | -35.9   | -35.8    | 0.2     | 0.1      | 0.15     |      |     |            |  |
|            |              |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          | 傾き   |     | -0.0002499 |  |
|            |              |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          | 切片   |     | -2.307E-05 |  |
|            |              |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          | R2乗値 |     | 0.99999998 |  |
| Fy較正       | 1回目          |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| 2016.11.8  |              |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            | 歪(μ)         | 電圧(V)      |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| 設定         | 1000         | 8.313      |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            | -1000        | -8.266     |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | ゼロ補正       |         |              |         |          | ゼロ補正    |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 1回目        |         | 2回目          |         | ゼロ補正     |         | ゼロ補正     |         |          |          |      |     |            |  |
| 荷重kgf      | 目標値          | 較正荷重 [μ]   | 計測(V)   | 較正荷重 [μ]     | 計測(V)   | 較正荷重 [μ] | 計測電圧    | 較正荷重 [μ] | 計測電圧    | 較正荷重 [μ] | 計測電圧     |      |     |            |  |
| 0          | -20          | -21.2      | 0.005   | -21.2        | 0.009   | 0        | 0       | 0        | 0       | 0        | 0        |      |     |            |  |
| 10         | 388          | 392.4      | -3.336  | 395.4        | -3.361  | 413.6    | -3.341  | 416.6    | -3.37   |          |          |      |     |            |  |
| 20         | 780          | 781.6      | -6.509  | 793.1        | -6.62   | 802.8    | -6.514  | 814.3    | -6.629  |          |          |      |     |            |  |
| 30         | 1172         | 1177.8     | -9.703  | 1184         | -9.775  | 1199     | -9.708  | 1205.2   | -9.784  |          |          |      |     |            |  |
| 20         | 780          | 774        | -6.432  | 769.8        | -6.413  | 795.2    | -6.437  | 791      | -6.422  |          |          |      |     |            |  |
| 10         | 388          | 377.3      | -3.244  | 375.8        | -3.236  | 398.5    | -3.249  | 397      | -3.245  |          |          |      |     |            |  |
| 0          | -20          | -21.1      | 0.009   | -21.1        | 0.012   | 0.1      | 0.004   | 0.1      | 0.003   |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 較正荷重 [kN]  | 電圧 [V]  |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | -3.244E-05 | 0       |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 1.035E-01  | -3.341  |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 2.009E-01  | -6.514  | 傾き           |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 3.000E-01  | -9.708  | -0.0309 kN/V |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 1.990E-01  | -6.437  | 切片           |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 9.970E-02  | -3.249  | -6.46E-05    |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | -7.411E-06 | 0.004   | R2乗値         |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | -3.244E-05 | 0       | 0.999985     |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 1.042E-01  | -3.37   |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 2.038E-01  | -6.629  |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 3.016E-01  | -9.784  |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 1.979E-01  | -6.422  |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 9.933E-02  | -3.245  |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | -7.411E-06 | 0.003   |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| Fy較正       | 1回目          |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| 2016.11.10 |              |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            | 歪(μ)         | 電圧(V)      |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| 設定         |              |            |         |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | ゼロ補正       |         |              |         |          | ゼロ補正    |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 1回目        |         | 2回目          |         | ゼロ補正     |         | ゼロ補正     |         |          |          |      |     |            |  |
| 荷重kgf      | 目標値          | 較正荷重 [μ]   | 計測(V)   | 較正荷重 [μ]     | 計測電圧    | 較正荷重 [μ] | 計測電圧    | 較正荷重 [μ] | 計測電圧    | 較正荷重 [μ] | 計測電圧     |      |     |            |  |
| 0          | -20          | -21.5      | 0.007   | 0            | 0       | 0        | 0       | 0        | 0       | 0        | 0        |      |     |            |  |
| 10         | 388          | 407.2      | -3.434  | 428.7        | -3.441  |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| 20         | 780          | 779.4      | -6.544  | 800.9        | -6.551  |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| 30         | 1172         | 1171.8     | -9.699  | 1193.3       | -9.706  |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| 20         | 780          | 773.8      | -6.467  | 795.3        | -6.474  |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| 10         | 388          | 419.2      | -3.586  | 440.7        | -3.593  |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
| 0          | -20          | -21.4      | -0.028  | 0.1          | -0.035  |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 較正荷重 [kN]  | 電圧 [V]  |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | -3.244E-05 | 0       |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 1.073E-01  | -3.441  |              |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 2.004E-01  | -6.551  | 傾き           |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 2.986E-01  | -9.706  | -0.0308 kN/V |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 1.990E-01  | -6.474  | 切片           |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | 1.103E-01  | -3.593  | -0.000231    |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              | -7.411E-06 | -0.035  | R2乗値         |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |
|            |              |            |         | 0.999941     |         |          |         |          |         |          |          |      |     |            |  |

表 4-9 Fz 後較正

| Fz後較正            |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
|------------------|----------|-------------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|-----------|-----------|-----|-----|-------------|--------------|-----|---------|-----|------|-----|------|-----|
| 2016.11.11       |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| zero-cal         |          | Fz1相当荷重     |         | Fz2相当荷重 |         | Fz1相当荷重  |          | Fz2相当荷重 |           | Fz1       |     | Fz2 |             | Fz1ゼロ補正      |     | Fz2ゼロ補正 |     | 正側傾き |     | 負側傾き |     |
| [μ]              | [kN]     | [kN]        | [kN]    | [kN]    | [kN]    | [V]      | [V]      | [V]     | [V]       | [V]       | [V] | [V] | [V]         | [V]          | [V] | [V]     | [V] | [V]  | [V] | [V]  | [V] |
| 0                | 1.93E-05 | -2.9284E-05 | 0       | 0       | -0.627  | -0.364   | 0        | 0       | 0.070865  | 0.073439  |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 500              | 0.62945  | 0.60570     | 0.62943 | 0.60573 | 8.255   | 7.884    | 8.882    | 8.248   |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | 5.38E-05 | 8.22E-05    | 0       | 0       | -0.627  | -0.364   | 0        | 0       |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| -500             | 0.62977  | 6.06E-01    | 0.62972 | 0.60638 | -9.479  | -8.59    | -8.852   | -8.226  | -0.071139 | -0.073714 |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 2016.10.24       |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 正側               |          | 1回目         |         | 2回目     |         | 1回目      |          | 2回目     |           | 平均値       |     | 傾き  |             | R2乗値         |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | 8.4      | 8.4         | 8.4     | 0       | 0       | 0        | 0        | 0       | 0         | 0         | 0   | 0   | 0.000250272 | -2.34379E-05 |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.196133         | 792.3    | 792.3       | 792.3   | 783.9   | 783.9   | 784      | 783.95   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.392266         | 1576.3   | 1576.3      | 1576.2  | 1567.9  | 1567.8  | 1567.85  | 1567.85  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.588399         | 2360.1   | 2360.1      | 2360.1  | 2351.7  | 2351.6  | 2351.65  | 2351.65  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.784532         | 3143.5   | 3143.5      | 3143.5  | 3135.1  | 3135.1  | 3135.1   | 3135.1   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.980665         | 3927.1   | 3926.9      | 3926.9  | 3918.7  | 3918.5  | 3918.6   | 3918.6   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.784532         | 3143.3   | 3143.2      | 3143.2  | 3134.9  | 3134.8  | 3134.85  | 3134.85  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.588399         | 2356.9   | 2356.9      | 2356.6  | 2348.5  | 2348.5  | 2348.5   | 2348.5   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.392266         | 1575.9   | 1575.9      | 1575.6  | 1567.5  | 1567.6  | 1567.55  | 1567.55  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.196133         | 792.3    | 792.3       | 792.3   | 783.9   | 783.9   | 783.9    | 783.9    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | 8.4      | 8.6         | 8.6     | 0       | 0.2     | 0.1      | 0.1      |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 負側               |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | -46      | -46.2       | -46.2   | 0       | 0       | 0        | 0        |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.196133         | -831     | -831.2      | -831.2  | -785    | -785    | -785     | -785     |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.392266         | -1615.9  | -1616       | -1616   | -1569.9 | -1569.8 | -1569.85 | -1569.85 |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.588399         | -2400.6  | -2400.6     | -2400.6 | -2354.6 | -2354.4 | -2354.5  | -2354.5  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.784532         | -3185    | -3185.1     | -3185.1 | -3139   | -3138.9 | -3138.95 | -3138.95 |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.980665         | -3969.5  | -3969.5     | -3969.5 | -3923.5 | -3923.3 | -3923.4  | -3923.4  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.784532         | -3185    | -3185       | -3185   | -3139   | -3138.8 | -3138.9  | -3138.9  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.588399         | -2400.4  | -2400.4     | -2400.4 | -2354.4 | -2354.2 | -2354.3  | -2354.3  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.392266         | -1615.7  | -1615.7     | -1615.7 | -1569.7 | -1569.5 | -1569.6  | -1569.6  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.196133         | -830.9   | -831        | -831    | -784.9  | -784.8  | -784.85  | -784.85  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | -46.2    | -46.3       | -46.3   | -0.2    | -0.1    | -0.15    | -0.15    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 共和電業             |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| LUK-A-5KN        |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| FY2080005        |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 2016.10.25       |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 正側               |          | 1回目         |         | 2回目     |         | 1回目      |          | 2回目     |           | 平均値 [μ]   |     | 傾き  |             | R2乗値         |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | -40.7    | -40.7       | -40.7   | 0       | 0       | 0        | 0        | 0       | 0         | 0         | 0   | 0   | 0.0012589   |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.196133         | 115      | 115         | 115     | 155.7   | 155.7   | 155.7    | 155.7    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.392266         | 270.9    | 270.9       | 270.9   | 311.6   | 311.6   | 311.6    | 311.6    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.588399         | 426.6    | 426.8       | 426.8   | 467.3   | 467.5   | 467.4    | 467.4    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.784532         | 582.5    | 582.4       | 582.4   | 623.2   | 623.1   | 623.15   | 623.15   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.980665         | 738.3    | 738.3       | 738.3   | 779     | 779     | 779      | 779      |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.784532         | 582.5    | 582.5       | 582.5   | 623.2   | 623.2   | 623.2    | 623.2    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.588399         | 426.8    | 426.7       | 426.7   | 467.5   | 467.4   | 467.45   | 467.45   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.392266         | 270.9    | 270.9       | 270.9   | 311.6   | 311.6   | 311.6    | 311.6    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.196133         | 115.1    | 115.1       | 115.1   | 155.8   | 155.8   | 155.8    | 155.8    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | -40.7    | -40.7       | -40.7   | 0       | 0       | 0        | 0        |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 負側               |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | -51.3    | -51.3       | -51.3   | 0       | 0       | 0        | 0        |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.196133         | -207     | -206.9      | -206.9  | -155.7  | -155.6  | -155.65  | -155.65  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.392266         | -362.6   | -362.7      | -362.7  | -311.3  | -311.4  | -311.35  | -311.35  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.588399         | -518.4   | -518.4      | -518.4  | -467.1  | -467.1  | -467.1   | -467.1   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.784532         | -674.2   | -674.1      | -674.1  | -622.9  | -622.8  | -622.85  | -622.85  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.980665         | -829.9   | -829.9      | -829.9  | -778.6  | -778.6  | -778.6   | -778.6   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.784532         | -674.2   | -674.3      | -674.3  | -622.9  | -623    | -622.95  | -622.95  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.588399         | -518.5   | -518.5      | -518.5  | -467.2  | -467.2  | -467.2   | -467.2   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.392266         | -362.8   | -362.7      | -362.7  | -311.5  | -311.4  | -311.45  | -311.45  |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.196133         | -207     | -207        | -207    | -155.7  | -155.7  | -155.7   | -155.7   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | -51.3    | -51.2       | -51.2   | 0       | 0.1     | 0.05     | 0.05     |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 共和電業             |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| LUK-A-5KN        |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| FL8250048        |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 2016.10.25       |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 正側               |          | 1回目         |         | 2回目     |         | 1回目      |          | 2回目     |           | 平均値 [μ]   |     | 傾き  |             | R2乗値         |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | 18.2     | 18.2        | 18.2    | 0       | 0       | 0        | 0        | 0       | 0         | 0         | 0   | 0   | 0.0012115   |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.196133         | 180.6    | 180.0       | 180.0   | 162.4   | 161.8   | 162.1    | 162.1    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.392266         | 342      | 341.9       | 341.9   | 323.8   | 323.7   | 323.75   | 323.75   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.588399         | 503.9    | 503.9       | 503.9   | 485.7   | 485.7   | 485.7    | 485.7    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.784532         | 665.9    | 665.8       | 665.8   | 647.6   | 647.6   | 647.65   | 647.65   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.980665         | 827.8    | 827.7       | 827.7   | 809.6   | 809.5   | 809.55   | 809.55   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.784532         | 665.8    | 665.8       | 665.8   | 647.6   | 647.6   | 647.6    | 647.6    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.588399         | 503.9    | 503.9       | 503.9   | 485.7   | 485.7   | 485.7    | 485.7    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.392266         | 342      | 342         | 342     | 323.8   | 323.8   | 323.8    | 323.8    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.196133         | 180.1    | 180.1       | 180.1   | 161.9   | 161.9   | 161.9    | 161.9    |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | 18.2     | 18.2        | 18.2    | 0       | 0       | 0        | 0        |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 負側               |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | 5.7      | 5.7         | 5.7     | 0       | 0       | 0        | 0        |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.196133         | -156     | -156        | -156    | -161.7  | -161.7  | -161.7   | -161.7   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.392266         | -317.6   | -317.6      | -317.6  | -323.3  | -323.3  | -323.3   | -323.3   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.588399         | -479.4   | -479.4      | -479.4  | -485.1  | -485.1  | -485.1   | -485.1   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.784532         | -641.1   | -641.1      | -641.1  | -646.8  | -646.8  | -646.8   | -646.8   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.980665         | -802.9   | -802.9      | -802.9  | -808.6  | -808.6  | -808.6   | -808.6   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.784532         | -641.1   | -641.1      | -641.1  | -646.8  | -646.8  | -646.8   | -646.8   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.588399         | -479.5   | -479.5      | -479.5  | -485.2  | -485.2  | -485.2   | -485.2   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.392266         | -317.7   | -317.7      | -317.7  | -323.4  | -323.4  | -323.4   | -323.4   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0.196133         | -155.9   | -155.9      | -155.9  | -161.6  | -161.6  | -161.6   | -161.6   |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 0                | 5.8      | 5.8         | 5.8     | 0.1     | 0.1     | 0.1      | 0.1      |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |
| 1回目のデータはミスがあり削除。 |          |             |         |         |         |          |          |         |           |           |     |     |             |              |     |         |     |      |     |      |     |

表 4-10 Fz の係数

| 正側傾き [kN/V] |         |
|-------------|---------|
| Fz1         | Fz2     |
| 0.0709      | 0.0734  |
| 負側傾き [kN/V] |         |
| Fz1         | Fz2     |
| -0.0711     | -0.0737 |

表 4-11 拡散筒内筒グラファイトの物性値

| 項目    | 値  |
|-------|--|
| かさ比重  | 1.72g/cm                                       |
| 曲げ強さ  | 24.5MPg  |
| 固有抵抗  | 750 $\mu \Omega$ cm                            |
| 硬さ    | 44 ショア   |
| 熱膨張係数 | 3.6 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$          |
| 熱伝導率  | 140kcal/m $\cdot$ h $\cdot$ $^{\circ}\text{C}$ |
| 灰分    | 0.1%   |
| 最大粒子径 | 2.3mm  |

## 5. 計測系

### 5.1. 目的・概要

本実験の2回の短時間燃焼試験における軸推力・横推力・ノズル壁面温度等の計測を目的とし、計測系の設置、センサの校正、燃焼試験中のデータ収録作業を実施した。本節では、これらの作業に係る使用機材の仕様、計測系の構成、センサ校正結果および計測結果等について示す。

### 5.2. 計測系

計測項目を表 5.2-1～表 5.2-3 に示す。

表 5.2-1 計測項目（推力）

| 計測項目  | 項目記号 | センサ型式     | S/N       | 定格   | 想定される計測値のレンジ  |
|-------|------|-----------|-----------|------|---------------|
| 主推力   | FX   | LUK-A-5KN | FL8250049 | 5 kN | 0～3.5 kN      |
| 横推力#1 | FY   | TU-PGRS   | G46151    | -    | -0.35～0.35 kN |
| 横推力#2 | FZ1  | LUK-A-5KN | FY2080005 | 5 kN | -0.18～0.18 kN |
| 横推力#3 | FZ2  | LUK-A-5KN | FL8250048 | 5 kN | -0.18～0.18 kN |

表 5.2-2 計測項目（圧力）

| 計測項目     | 項目記号 | センサ型式        | S/N       | 定格                   | 想定される計測値のレンジ    |
|----------|------|--------------|-----------|----------------------|-----------------|
| モータ内圧    | Pc   | PHL-A-10MP-B | FX8920006 | 10 MPa               | 1～3 MPa         |
| 点火モータ内圧  | Pig  | PHL-A-10MP-B | FX8920005 | 10 MPa               | 4～5 MPa         |
| 真空槽圧     | Pt   | -            | K7X0020   | 2kgf/cm <sup>2</sup> | 1.3kPa～16.0 kPa |
| バフファタンク圧 | Pbt  | -            | K580662   | 2kgf/cm <sup>2</sup> | 2.7kPa～16.0 kPa |

表 5.2-3 計測項目（温度）

| 計測項目        | 項目記号     | センサ型式     | 定格        | 想定される計測値のレンジ |
|-------------|----------|-----------|-----------|--------------|
| 真空槽温度 1     | Tt-1     | K 熱電対     | 0～1200℃   | 0～1200℃      |
| 真空槽温度 2     | Tt-2     | K 熱電対     | 0～1200℃   | 0～1200℃      |
| バフファタンク温度 1 | Tbt-1    | K 熱電対     | 0～1200℃   | 0～1200℃      |
| バフファタンク温度 2 | Tbt-2    | K 熱電対     | 0～1200℃   | 0～1200℃      |
| バフファタンク温度 3 | Tbt-3    | K 熱電対     | 0～1200℃   | 0～1200℃      |
| 拡散筒温度       | Td       | K 熱電対     | 0～1200℃   | 0～1200℃      |
| 展開ノズル温度 1   | Tn-1     | K 熱電対     | 0～1200℃   | 0～1200℃      |
| 展開ノズル温度 2   | Tn-2     | K 熱電対     | 0～1200℃   | 0～1200℃      |
| 展開ノズル温度 3   | Tn-3     | K 熱電対     | 0～1200℃   | 0～1200℃      |
| 展開ノズル壁温     | (サーモカメラ) | R300SR-H  | -40～2000℃ | 0～1500℃      |
| 展開ノズル壁温     | (高速度カメラ) | (二色温度計測法) | -         | 0～1500℃      |

### 5.3. 計測系の構成

計測系の構成を図 5.3-1 に示す。

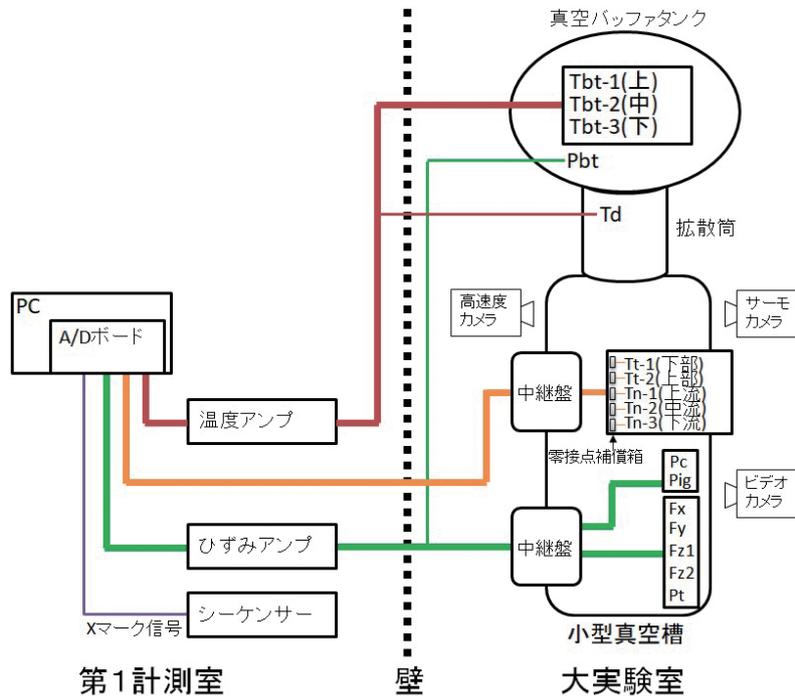


図 5.3-1 計測系配線図

### 5.4. 校正結果

本節では圧力センサの校正結果について記載する。推力計測用のロードセルについては別章に記載する。熱電対については校正を行わず、表 5.4-1 のように係数を得た。すべての校正係数を表 5.4-2、表 5.4-3 に示す。

表 5.4-1 熱電対の電圧 - 温度換算係数の出展

|                     |   |
|---------------------|---|
| Tbt-1, Tbt-2, Tbt-3 | 温度アンプの設定 500°Cで 5V より、1V で 100°C換算。                                     |
| Tn-1, Tn-2, Tn-3    | JIS C 1602 K の表の 350°C/0.014293V より。誤差は、実温度 10°Cで-0.28°C、500°Cで+1.16°C。 |
| Tt-1, Tt-2          | JIS C 1602 K の表の 25°C/0.001V より。誤差は、実温度 10°Cで-0.075°C、40°Cで+0.3°C。      |

#### 5.4.1. 高圧系校正

本実験ではモータ内圧  $P_c$  および点火モータ内圧  $P_{ig}$  の 2 項目を高圧系圧力センサで測定した。これらの校正は実配線で行った。圧力の印加については、ポンペ供給による窒素を用い、ブルドン管を正とし、 $P_c$ 、 $P_{ig}$  の 2 センサを接続して同時に校正を行った。圧力ステップは 0, 1, 3, 5, 7 MPa (1 往復) とした。

#### 5.4.2. 低圧系校正

本実験では真空層圧  $P_t$  およびバッファタンク圧  $P_{bt}$  の 2 項目を低圧系圧力センサで測定した。これらの校正は真空槽の真空引きの際に実配線・実取付位置で行い、真空槽のポートに接続した基準圧力計を正とした。校正結果の残留誤差を図 5.4-1 に示す。

表 5.4-2 試験#1 較正係数一覧

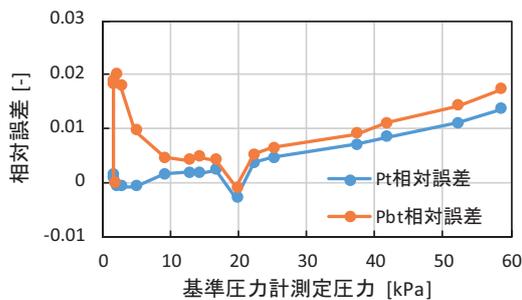
| 計測項目 | 関数型      | a        | b        |
|------|----------|----------|----------|
| Fx   | $y=aV+b$ | 0.787546 | 1.39E-03 |
| Fy   | $y=aV$   | 0.0309   | -        |
| Fz1  | $y=aV$   | 0.0733   | -        |
| Fz2  | $y=aV$   | 0.0728   | -        |
| Pc   | $y=aV+b$ | 0.9986   | 0.083806 |
| Pig  | $y=aV+b$ | 0.9982   | 0.08666  |
| Pt   | $y=aV+b$ | 13.25163 | 100.5312 |
| Pbt  | $y=aV+b$ | 14.2791  | 101.2726 |

| 計測項目  | 関数型    | a        | b |
|-------|--------|----------|---|
| Tbt-1 | $y=aV$ | 100      | - |
| Tbt-2 | $y=aV$ | 100      | - |
| Tbt-3 | $y=aV$ | 100      | - |
| Td    | $y=aV$ | 100      | - |
| Tn-1  | $y=aV$ | 24487.51 | - |
| Tn-2  | $y=aV$ | 24487.51 | - |
| Tn-3  | $y=aV$ | 24487.51 | - |
| Tt-1  | $y=aV$ | 25000    | - |
| Tt-2  | $y=aV$ | 25000    | - |

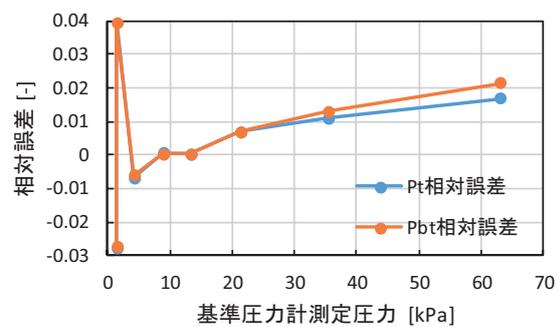
表 5.4-3 試験#2 較正係数一覧

| 計測項目 | 関数型      | a        | b        |
|------|----------|----------|----------|
| Fx   | $y=aV+b$ | 0.774942 | 1.15E-05 |
| Fy   | $y=aV$   | 0.0307   | -        |
| Fz1  | $y=aV$   | 0.0732   | -        |
| Fz2  | $y=aV$   | 0.0727   | -        |
| Pc   | $y=aV+b$ | 0.9986   | 0.084037 |
| Pig  | $y=aV+b$ | 0.9982   | 0.087637 |
| Pt   | $y=aV+b$ | 13.3171  | 101.1526 |
| Pbt  | $y=aV+b$ | 14.36192 | 102.0071 |

| 計測項目  | 関数型    | a        | b |
|-------|--------|----------|---|
| Tbt-1 | $y=aV$ | 100      | - |
| Tbt-2 | $y=aV$ | 100      | - |
| Tbt-3 | $y=aV$ | 100      | - |
| Td    | $y=aV$ | 100      | - |
| Tn-1  | $y=aV$ | 24487.51 | - |
| Tn-2  | $y=aV$ | 24487.51 | - |
| Tn-3  | $y=aV$ | 24487.51 | - |
| Tt-1  | $y=aV$ | 25000    | - |
| Tt-2  | $y=aV$ | 25000    | - |



(a) 試験#1 較正



(b) 試験#2 較正

図 5.4-1 低圧系圧力計較正における残留誤差

## 5.5. 不具合報告

### 2 回目試験時の X マーク電圧異常

|       |   |
|-------|---|
| 発生事象  | 2 回目の燃焼試験において X マークの計測値が約 5 V の値で計測されるはずであったが、X 時刻を過ぎても 0 V のままであった。  |
| 原因    | 電源回路に接続されていなければならなかった 9 V 乾電池が接続されていなかった。これは、前日に電池電圧を確認した際に電圧の低下が確認されたために、電池を取り外したことを失念していたことから生じた。             |
| 影響・処置 | 電源回路は接地されていなかったが、X 時刻に接点が閉じ、AD 変換器内部の GND と接続されたことによるノイズ減少が測定でき、このノイズ減少が生じた時刻を X 時刻とした。よって、計測データの時刻情報への影響はなかった。 |
| 対策案   | 試験開始直前にシーケンスチェックを実施する。  |

### 2 回目試験時の Pc, Pig アンプのフィルタ設定ミス

|       |  |
|-------|--|
| 発生事象  | 2 回目の燃焼試験において、アンプのフィルタ設定を 10 kHz としなければならないところを 1 Hz に設定していた。                      |
| 原因    | 使用した 2 種類のアンプでフィルタのダイヤルとアッテネータのダイヤルの位置が逆であったため、アッテネータの操作を行う際に誤操作し、その後戻す値を誤ったと推測する。 |
| 影響・処置 | 収録データの時間分解能が想定より低下した。その点を注意してデータを取り扱うこととした。  |
| 対策案   | ダイヤルを固定しておく。最後の操作の後に設定を確認する。   |

### 5.6. 計測結果

本実験で得られた計測結果(サーモカメラ・高速度カメラを除く)を図 5.6-1~5.6-16 に示す。

#### 5.6.1. 第一回燃焼試験

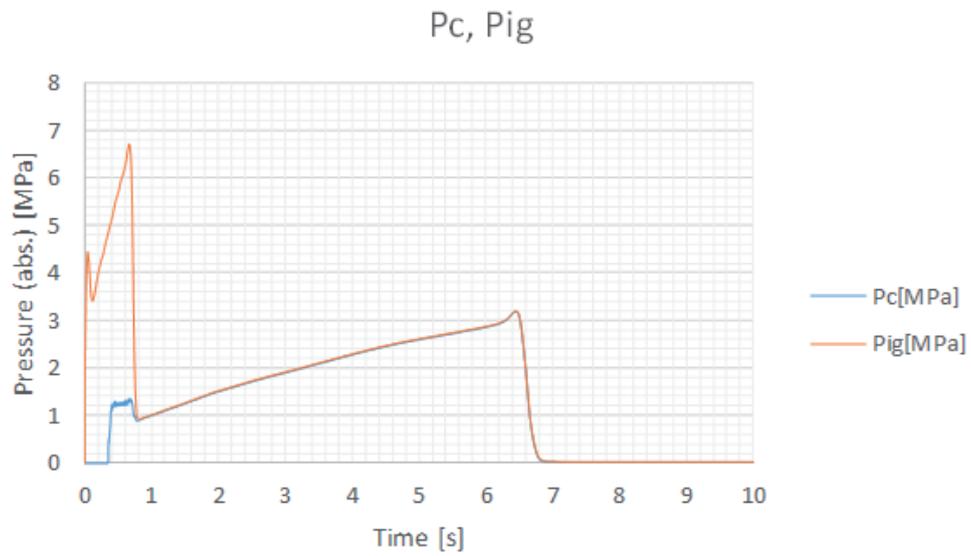


図 5.6-1 モータ内圧  $P_c$ , 点火モータ内圧  $P_{ig}$

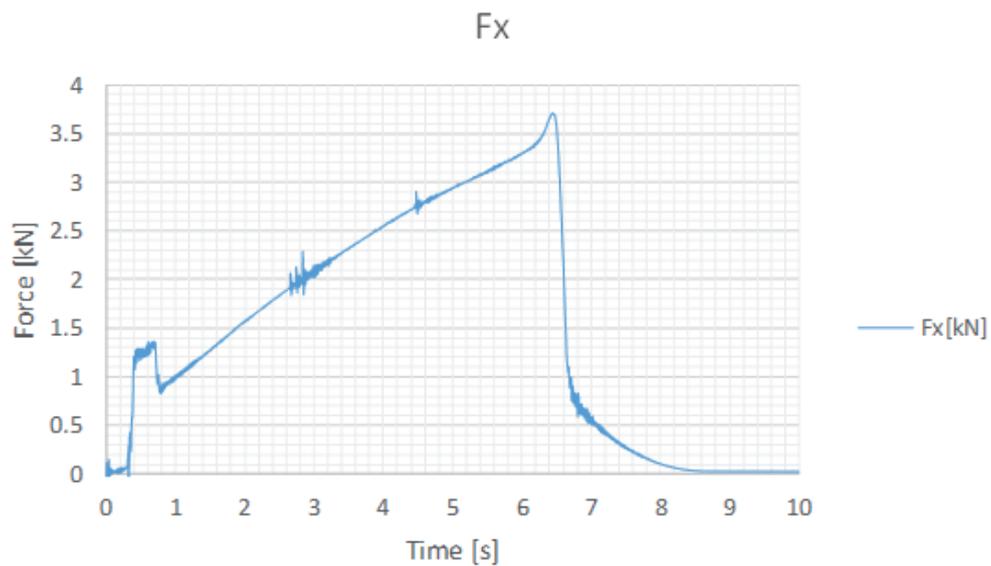


図 5.6-2 主推力  $F_x$

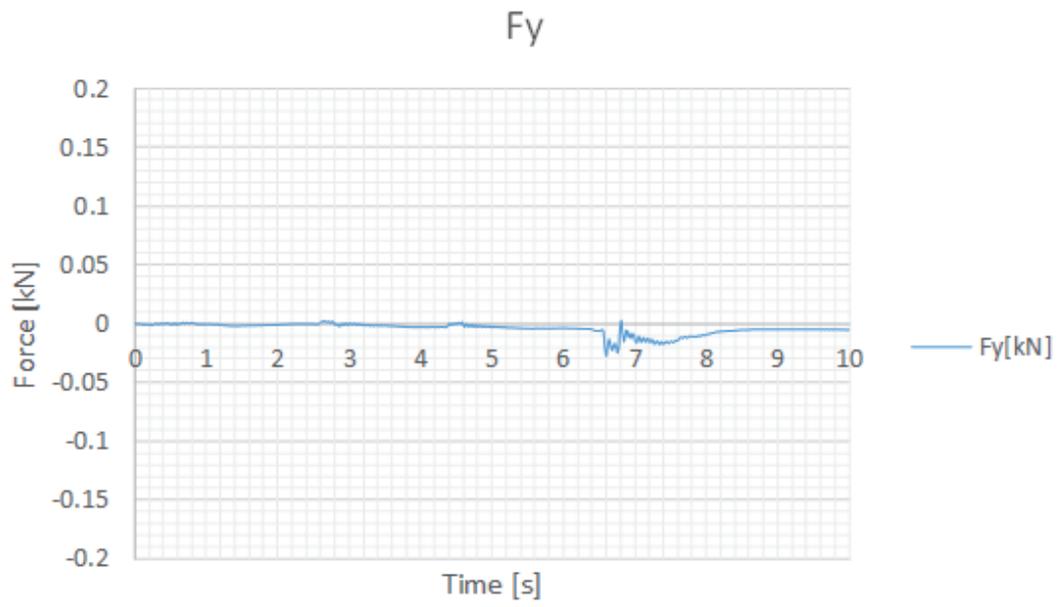


図 5.6-3 横推力 Fy

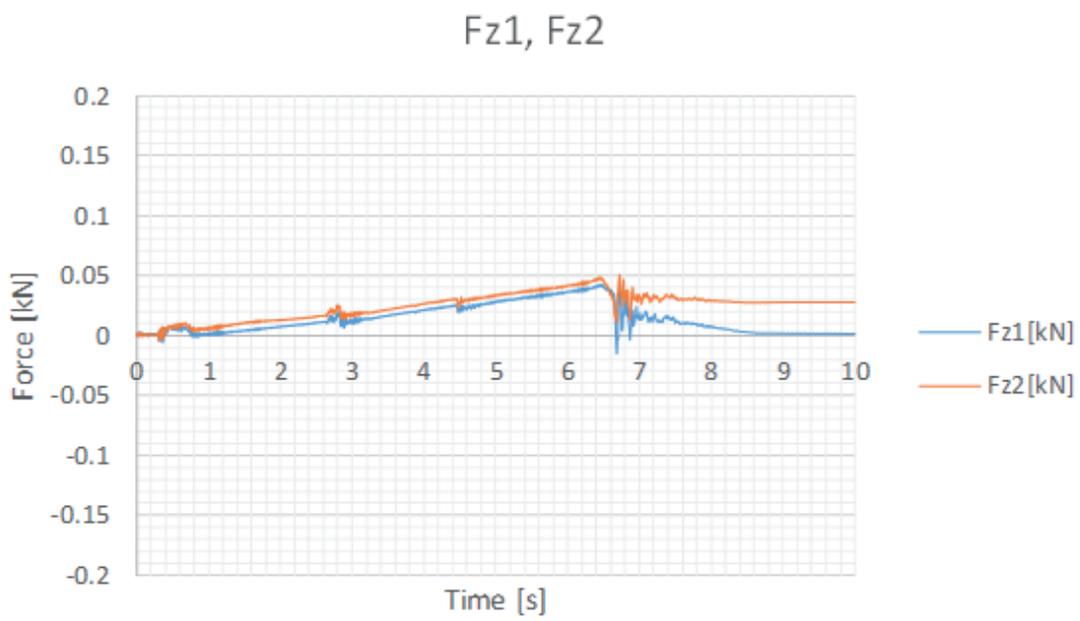


図 5.6-4 横推力 Fz1, Fz2

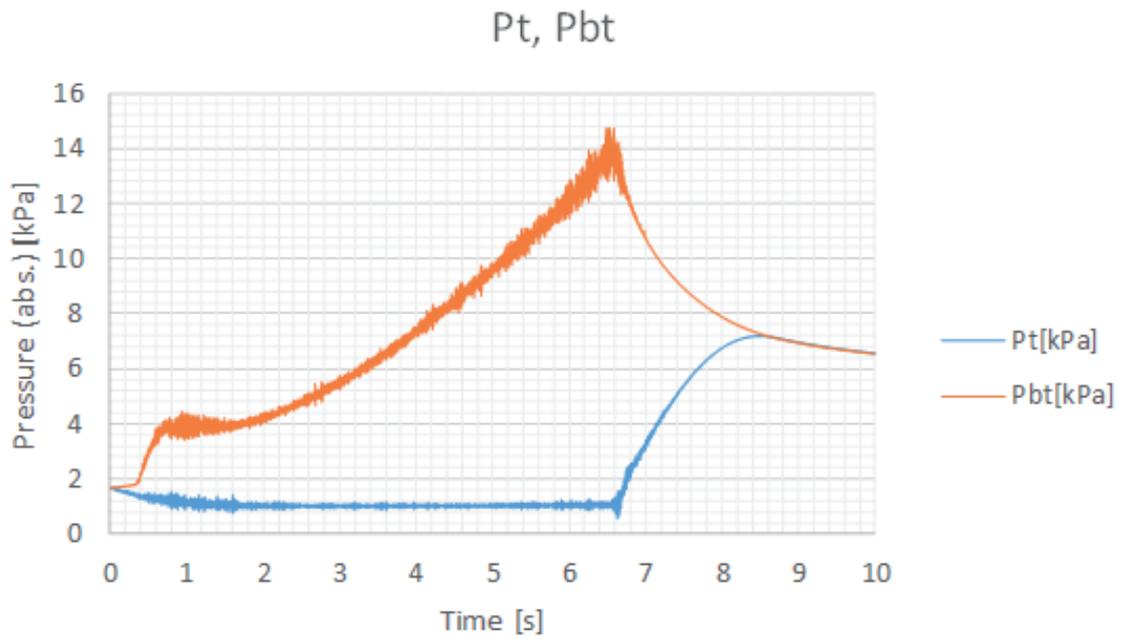


図 5.6-5 真空槽内圧 Pt, バッファタンク内圧 Pbt

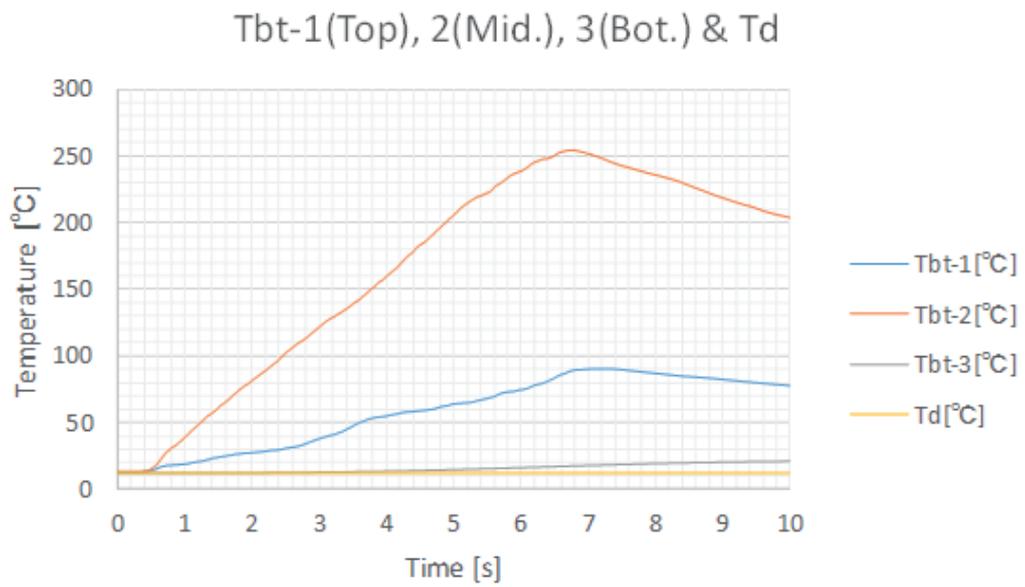
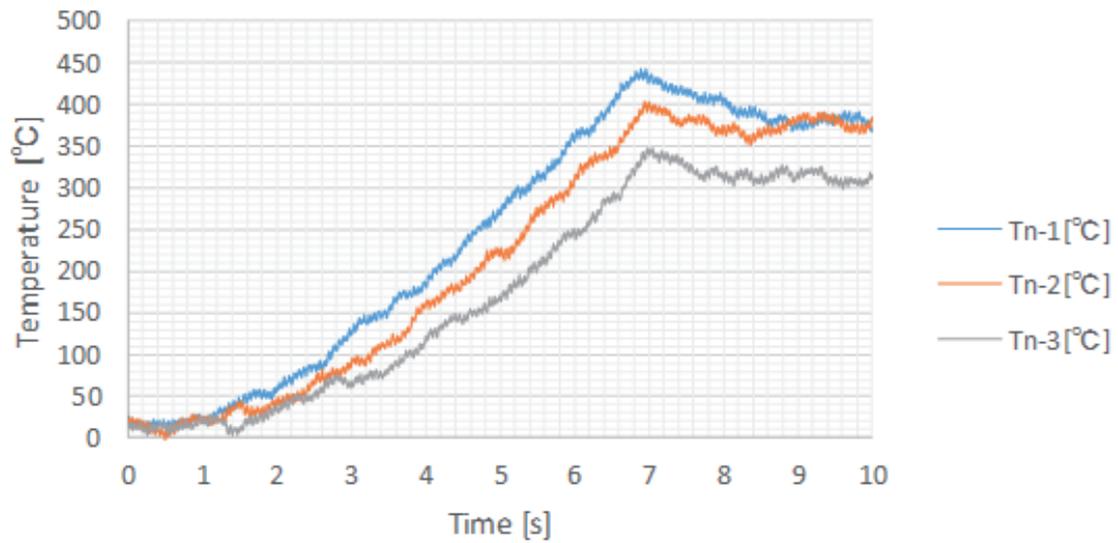
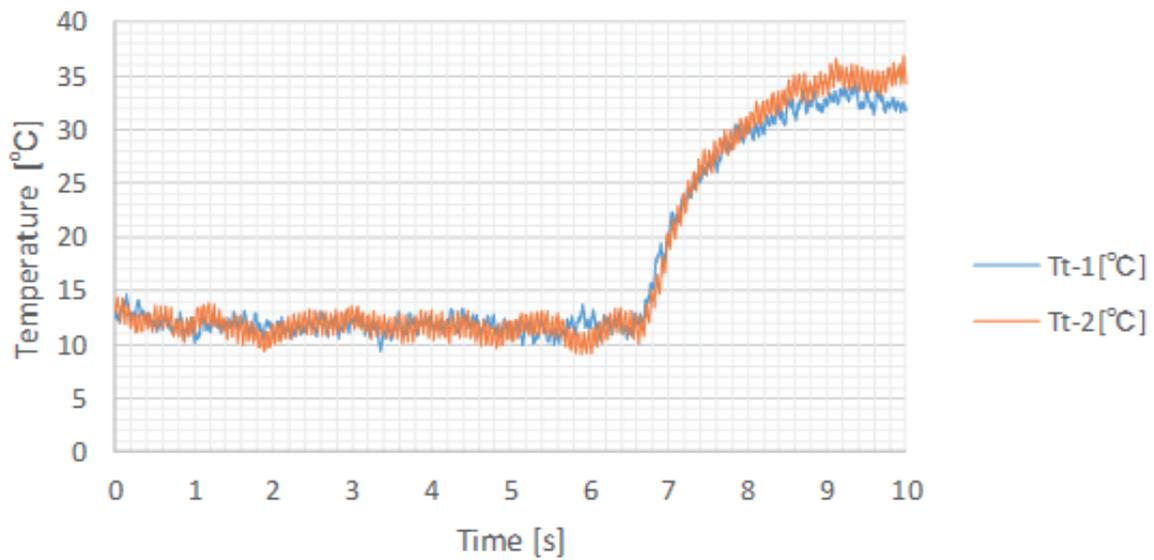


図 5.6-6 バッファタンク温度 Tbt-1, 2, 3, 拡散筒内筒外壁温度 Td

Tn-1(Up), 2(Mid.), 3(Down) ( $\pm 180\text{ms}$ )図 5.6-7 展開ノズル温度 Tn-1, 2, 3 ( $\pm 180\text{ms}$  移動平均)Tt-1(Down), 2(Up) ( $\pm 180\text{ms}$ )図 5.6-8 真空槽内温度 Tt-1, 2 ( $\pm 180\text{ms}$  移動平均)

5.6.2. 第二回燃焼試験

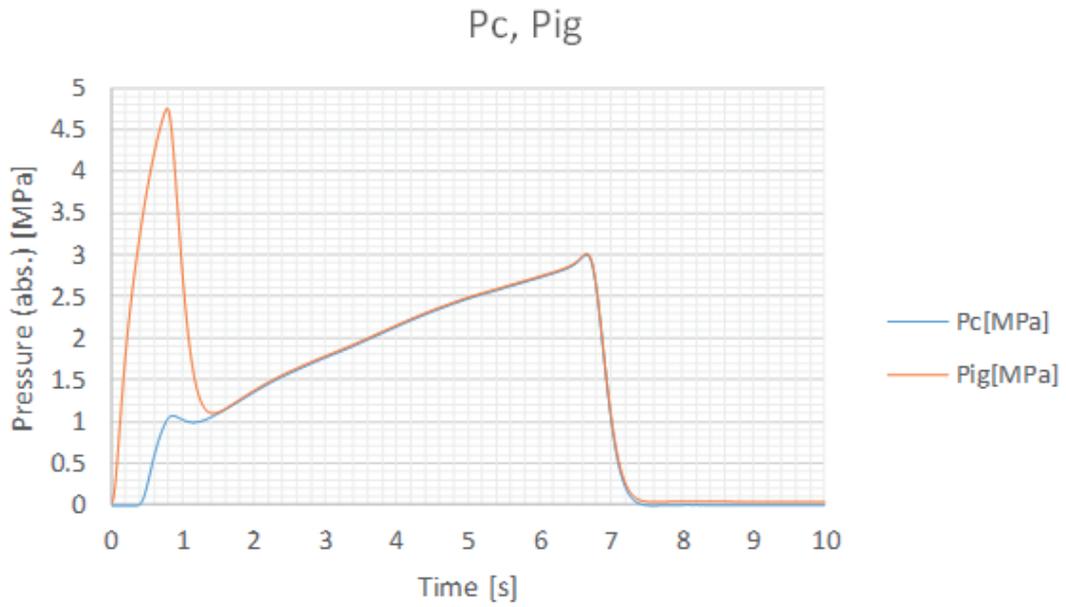


図 5.6-9 モータ内圧 Pc, 点火モータ内圧 Pig(1Hz のフィルタがかかっている)

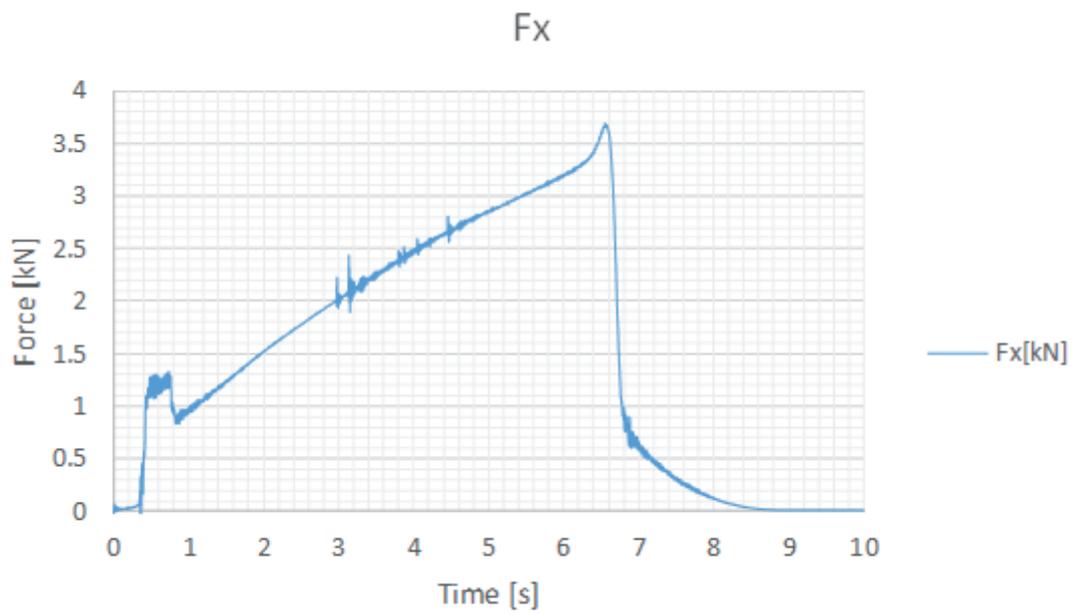
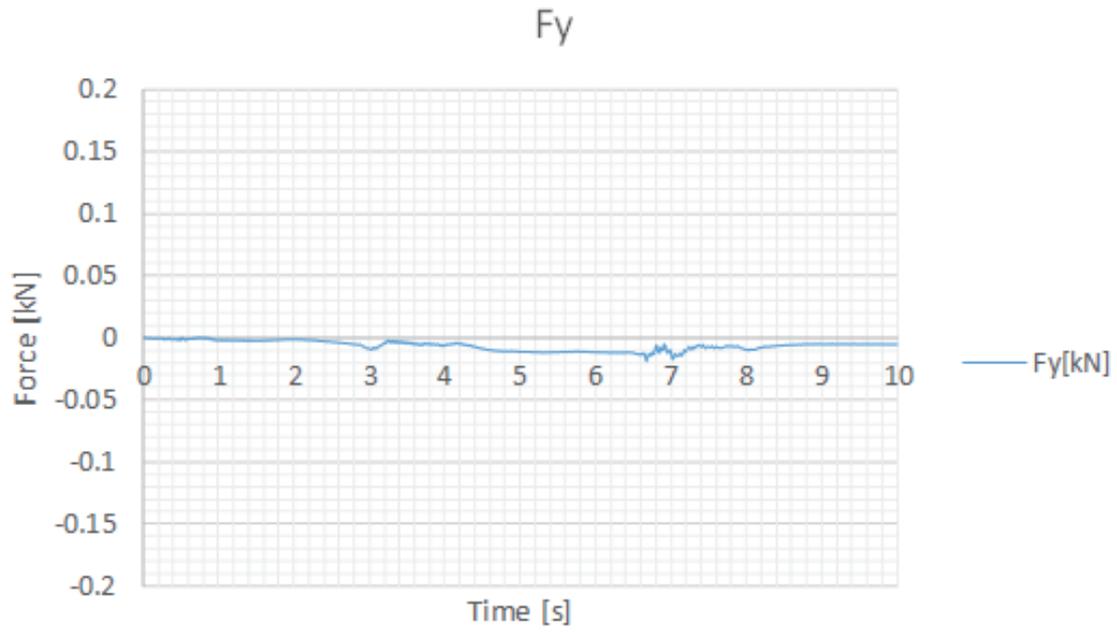
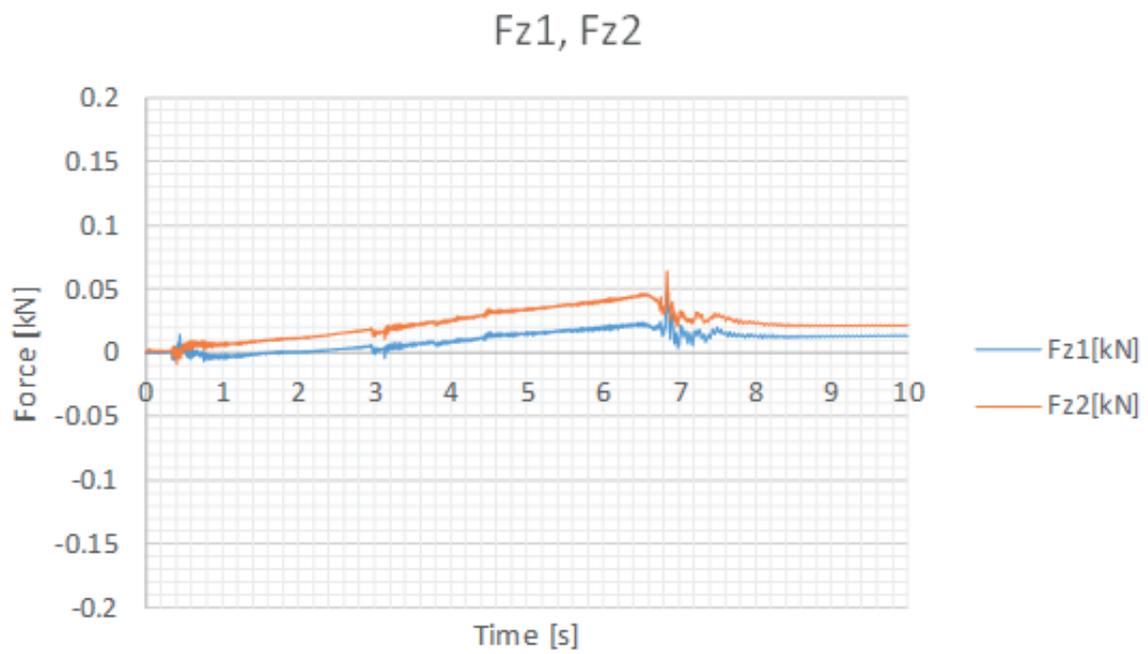


図 5.6-10 主推力 Fx

図 5.6-11 横推力  $F_y$ 図 5.6-12 横推力  $F_{z1}$ ,  $F_{z2}$

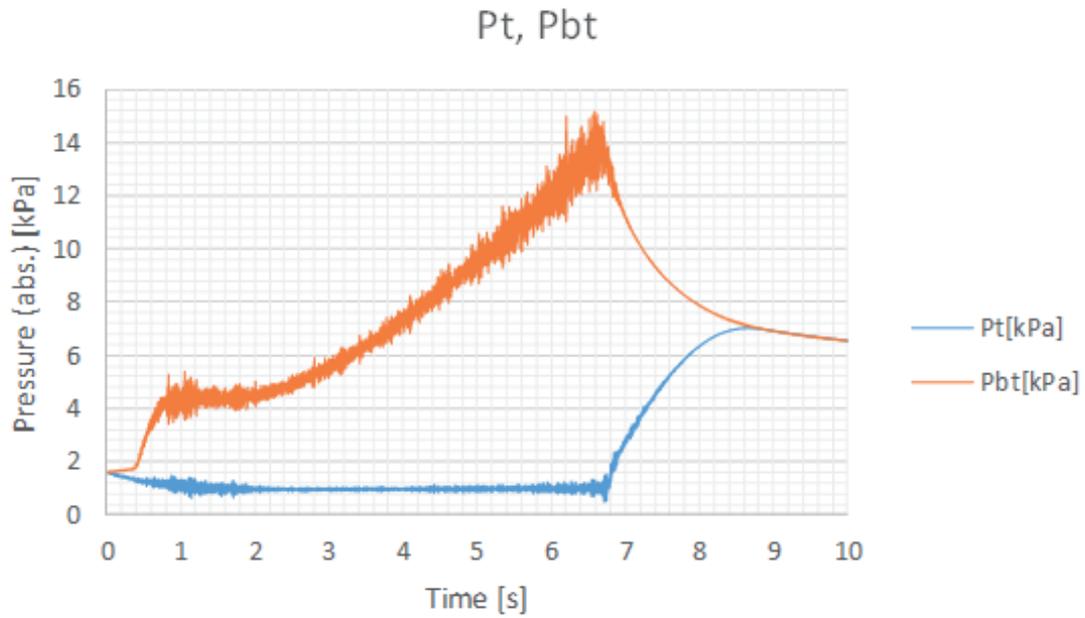


図 5.6-13 真空槽内圧 Pt, バッファタンク内圧 Pbt

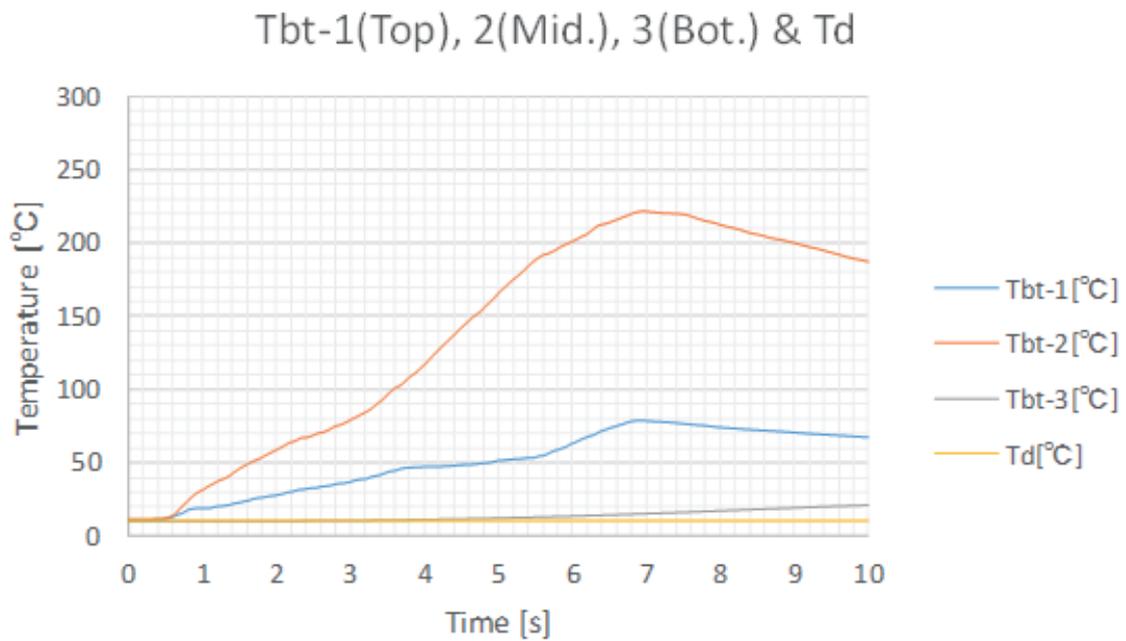
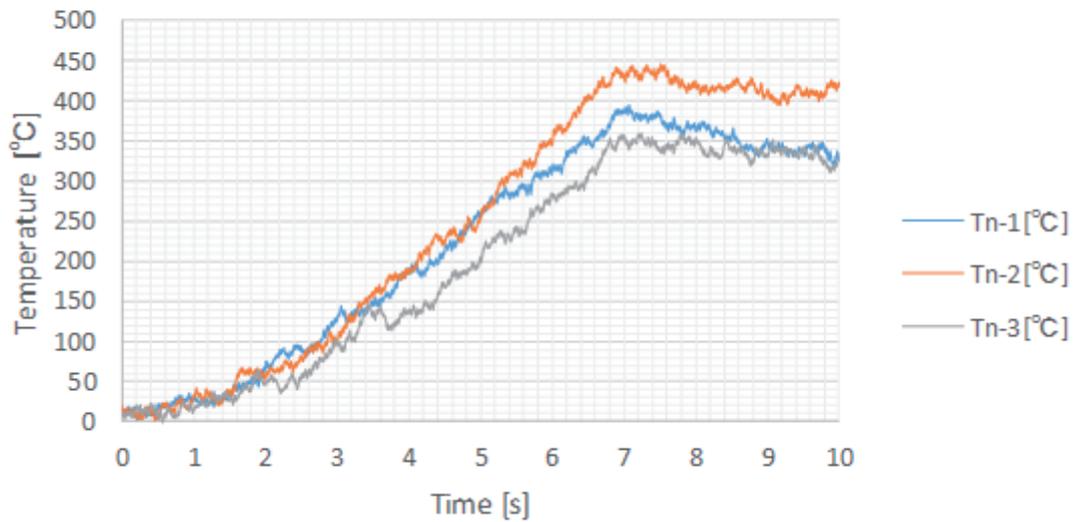
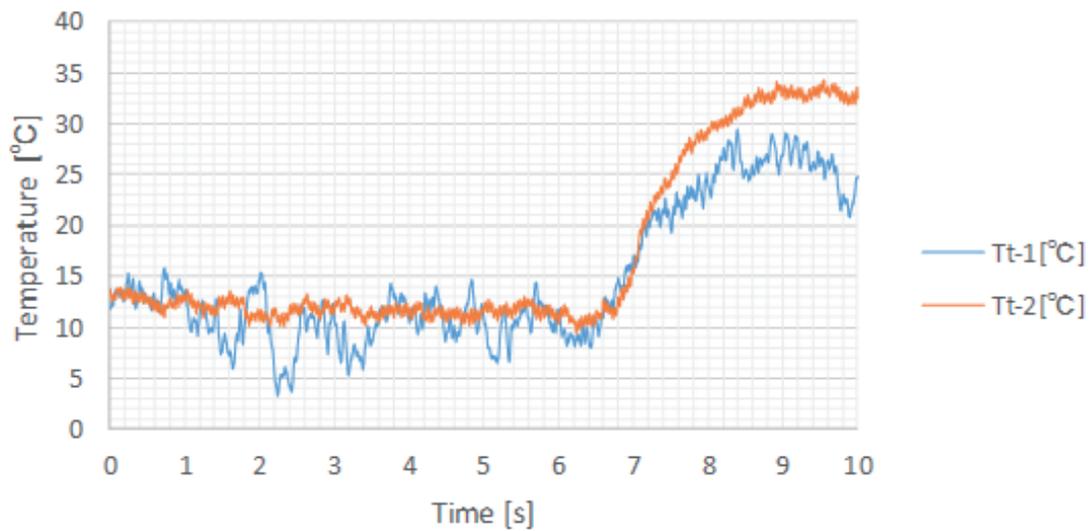


図 5.6-14 バッファタンク温度 Tbt-1, 2, 3, 拡散筒内筒外壁温度 Td

Tn-1(Up), 2(Mid.), 3(Down) ( $\pm 180\text{ms}$ )図 5.6-15 展開ノズル温度 Tn-1, 2, 3 ( $\pm 180\text{ms}$  移動平均)Tt-1(Down), 2(Up) ( $\pm 180\text{ms}$ )図 5.6-16 真空槽内温度 Tt-1, 2 ( $\pm 180\text{ms}$  移動平均)

## 6. 赤外線カメラによる温度計測

### 6.1. 目的

展開ノズル材耐熱予備試験で赤外線サーモグラフィを用いて展開ノズルの温度分布を計測した。得られた成果と明らかになった課題について報告する。

### 6.2. 供試体

点火モータ、鏡板、モータケース、固定ノズル（ベークライトおよびグラファイト）、展開ノズル（Ti合金 SP700）、ラプチャディスク等で構成される。展開ノズル表面上の3箇所(T<sub>n-1</sub>, T<sub>n-2</sub>, T<sub>n-3</sub>)に熱電対が貼付けられた。図 6.2-1 に供試体、図 6.2-2 に熱電対貼り付け状況の概要を示す。図面、供試体、熱画像上での位置関係を把握するため、中心線と展開ノズルと固定ノズルの接触面を原点とした。第1回燃焼試験ではベークライト、第1回燃焼試験ではグラファイトの固定ノズルが使用された。

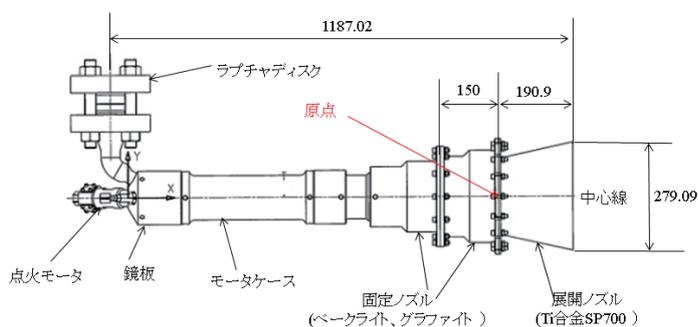


図 6.2-1 供試体

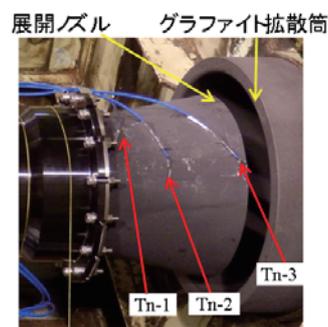


図 6.2-2 熱電対貼付（上から撮影）

### 6.3. 熱画像計測

#### 6.3.1. 計測方法

赤外線サーモグラフィを真空槽外（山側）に設置し、USB 延長 Cable、LAN Cable、USB Extender を介して山側計測室の PC と接続した。また、Video Cable を介して Video Deck と接続した。Ge 窓を通して供試体の温度分布を赤外線サーモグラフィで計測し、熱画像計測用 PC と Video deck に熱画像を転送した。燃焼前 25 秒時に Video deck に Sequencer から Trigger 信号が送られて自動で熱画像の収録が開始され、1/1000 秒単位で時刻も記録された。同時刻に PC で(手動<sup>\*1,2</sup>)熱画像の収録を開始した(収録速度は 60Hz)。試験後に Video と PC の熱画像を比較して時刻補正を行った。使用した機器とソフトウェアを以下、熱画

\*1：R300SR-H に PC を接続した状態では Trigger 信号受信時に熱画像収録を開始することが出来ない（R500EX-Pro なら可能）。そのため、手動で収録開始して燃焼試験後で時間補正を行った。

\*2：R300SR-H 単体（PC に接続しない）で使用し熱画像を SD カードに記録するのであれば Trigger 信号受信時に熱画像収録開始が可能（但し、トリガ入力から熱画像の収録記録開始までの時間はかかる）。また、その場合の熱画像収録速度は 10Hz となる。

像計測の概要を図 6.3-1、赤外線サーモグラフィと供試体の位置関係を図 6.3-2 に示す。

(1) 赤外線サーモグラフィ

機種 R300SR-H 製造番号 4021639

(2) 付属機器

① USB 延長 cable

(10m) 500-USB005 (<http://direct.sanwa.co.jp/ItemPage/500-USB005>)

② USB Extender (USB/LAN 変換 adaptor)

Icron Cat5 USB エクステンダー USB 2.0 Ranger 2101/2104

([http://ysol.co.jp/usb/ext/icron/ranger\\_2101\\_2104.html](http://ysol.co.jp/usb/ext/icron/ranger_2101_2104.html))

(3) ソフトウェア

温度計測：日本アビオ製 InfReC Analyzer NS9500 Professional

Data 処理：日本アビオ製 InfReC Analyzer NS9500 Standard

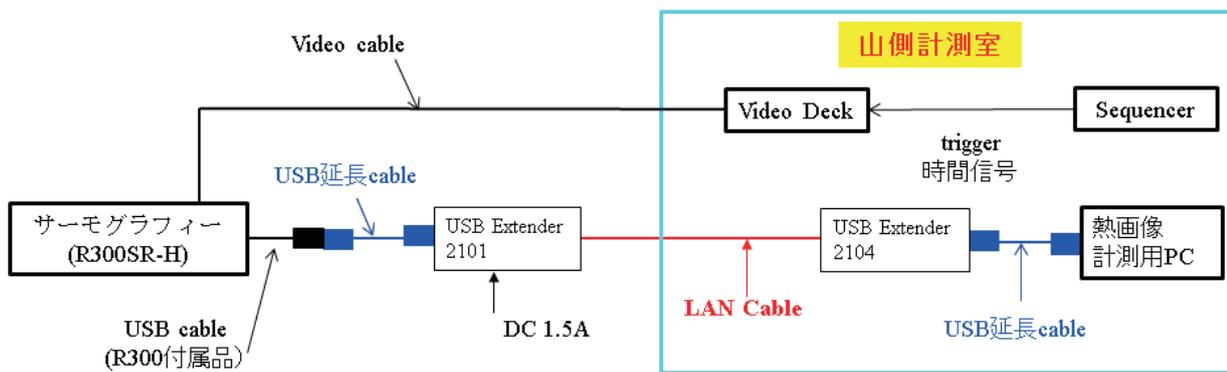
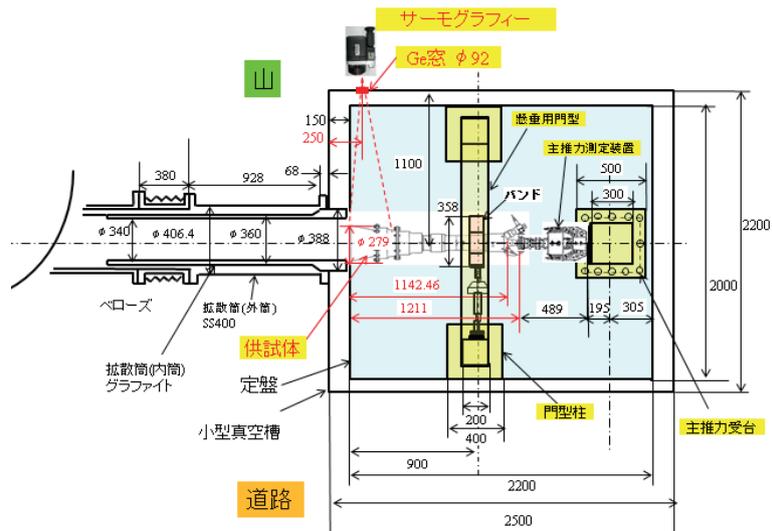
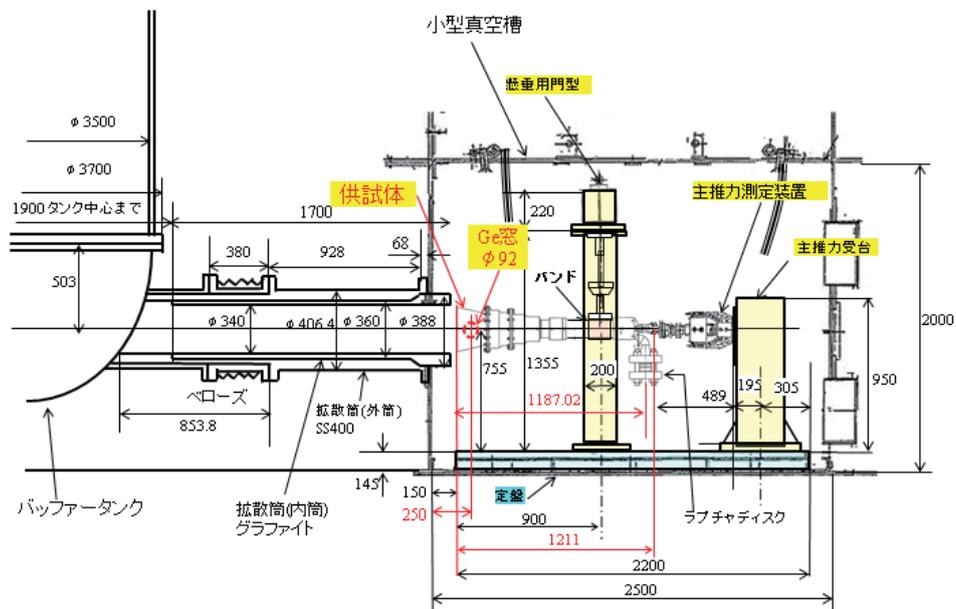


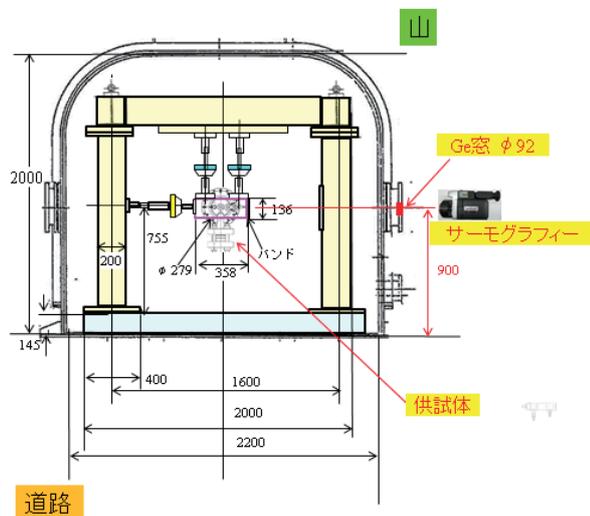
図 6.3-1 熱画像計測系統図



(a)上から



(b)道路側から



(c)背後から

図 6.3-2 赤外線サーモグラフィと供試体の位置関係

### 6.3.2. 透過率補正值

本実験で用いた Ge の透過率（図 6.3-3 に示す）を 8-14nm で平均して補正値を算出したところ 0.84 となった。展開ノズルに放射率が 0.94 の塗料を塗布したので、熱画像取得時には放射率を  $0.79(=0.94 \times 0.84)$  とした。（第 1 回燃焼試験時は 1.0 に設定しデータ処理時に 0.79 に補正した）

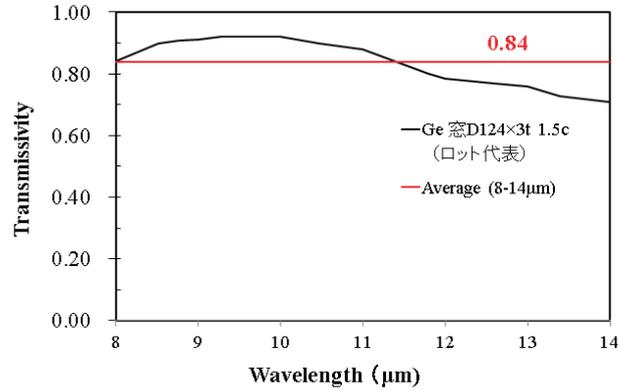


図 6.3-3 Ge の透過率

## 6.4. 計測結果

### 6.4.1. 第 1 回燃焼試験

#### (1) 位置関係

図 6.4-1 に第 1 回燃焼試験での供試体と熱画像の位置関係、表 6.4-1 に供試体各箇所の座標値\*3 を示す。①～⑨は展開ノズルと固定ノズルを締結するボルト、 $T_n-1X, T_n-2X, T_n-3X$  は中心軸上でのそれぞれの熱電対 ( $T_n-1, T_n-2, T_n-3$ ) に対応する位置、原点を⑤にした。排気 Duct を避けるように赤外線サーモグラフィの設置したため、展開ノズルの一部が Ge 窓わくに隠れた（第 2 回燃焼試験では改善して展開ノズル全てが入るようにした）。

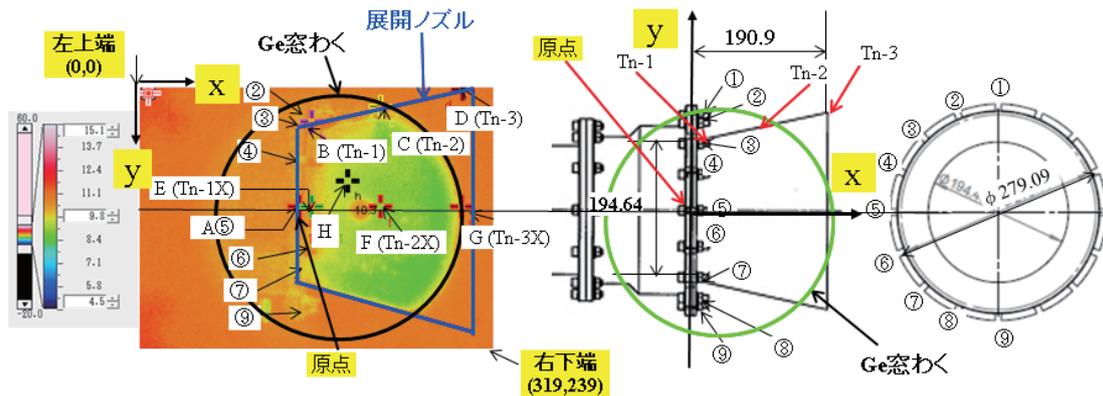


図 6.4-1 第 1 回燃焼試験での供試体と熱画像の位置関係

\*3：図面と熱画像を見比べながら各箇所の座標値を決めた。そのため、2-3mm の誤差は不可避と考える。

表 6.4-1 第 1 回燃焼試験での供試体各箇所の座標値

|              |              |      | 第1回燃焼試験 |        |       |     |
|--------------|--------------|------|---------|--------|-------|-----|
|              |              |      | 図面      |        | 熱画像   |     |
| ID           |              | x    | y       | x      | y     |     |
| 展開ノズル<br>取付部 | ①            |      | 0       | 139.5  | 152   | 6   |
|              | ②            |      | 0       | 128.9  | 151   | 7   |
|              | ③            |      | 0       | 98.7   | 150   | 31  |
|              | ④            |      | 0       | 53.4   | 147   | 67  |
|              | ⑤            | A    | 0       | 0      | 144   | 109 |
|              | ⑥            |      | 0       | -53.4  | 144   | 150 |
|              | ⑦            |      | 0       | -98.7  | 144   | 183 |
|              | ⑧            |      | 0       | -139.5 | 143   | 208 |
|              | ノズルス<br>カート部 | Tn-1 | B       | 14.2   | 101.3 | 155 |
| Tn-2         |              | C    | 94.2    | 118.6  | 217   | 17  |
| Tn-3         |              | D    | 189.9   | 139.3  | 291   | 1   |
| Tn-1X        |              | E    | 14.2    | 0      | 155   | 109 |
| Tn-2 X       |              | F    | 94.2    | 0      | 217   | 109 |
| Tn-3 X       |              | G    | 189.9   | 0      | 291   | 109 |
| 燃焼終了時の温度最高点  |              | H    | 55.7    | 30.4   | 188   | 85  |

原点

(2) 時刻補正

供試体の最高温度到達時刻を基準に時間補正した。最高温度到達時刻はそれぞれの時計で以下の通りで、Video Deck と熱画像計測用 PC で取得した時刻から 0.420(=6.903-6.483)sec 補正した。Video Deck と熱電対は同期が取れているので補正の必要はない。尚、燃焼時間は 6 秒である。

Video Deck : 6.903 sec

赤外線サーモグラフィ : 6.483 sec

熱電対 : 6.958 sec

(3) 放射率再設定

燃焼試験時は ε=1.0 に設定したためデータ処理時は ε=0.79 で(1)式を用いて供試体の温度を計算した。計算値に不合理な点が見つかった(「評価」で後述)ため、Data 処理ソフトで再計算した。

$$\sigma T_0^4 = \epsilon \sigma T_1^4 \tag{1}$$

ε:emissivity(0.79),σ: Stefan-Boltzmann constant, T<sub>0</sub>:温度計測値, T<sub>1</sub>:温度再計算値

(4) 温度履歴

燃焼開始からの各点の温度履歴、温度分布の変化をそれぞれ図 6.4-2, 6.4-3 に示す。熱電対から取得した電圧値にはノイズが大きかったので、±180ms の移動平均値を採用した。

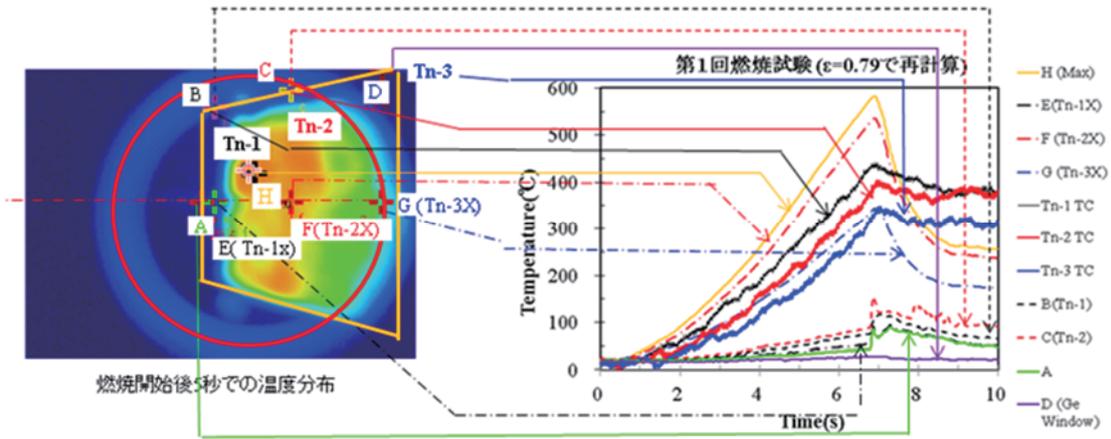


図 6.4-2 第 1 回燃焼試験での温度履歴

- ・ 展開ノズルは最高で 582.6°C に達した。
- ・ 燃焼試験終了時点で展開ノズルの温度は定常に達しなかった。
- ・ F, G 点での熱画像測定値が熱電対測定値 ( $T_n-2, T_n-3$ ) より高く、E 点での熱画像測定値が熱電対測定値 ( $T_n-1$ ) より非常に低かった。
- ・ 中心軸上での熱画像測定値 ( $T_n-1X, T_n-2X, T_n-3X$ ) が熱電対位置 (B, C 点) より高かった。
- ・ B, C 点の熱画像測定値が熱電対測定値 ( $T_n-1, 2$ ) より著しく低かった。
- ・ A, C 点で 6.9 秒近辺で急な温度上昇が見られた。
- ・ D 点の温度変化は見られなかった。

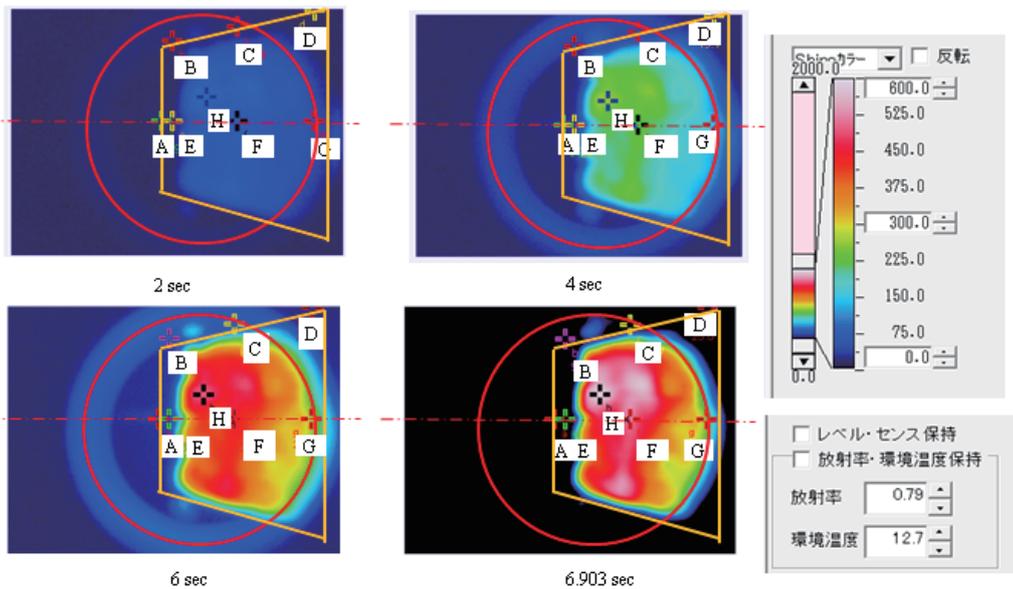


図 6.4-3 第 1 回燃焼試験での温度分布変化

- ・固定ノズルとの境界面に近い部分（H点周辺）とノズル下端との中間での温度が高くなった。
- ・固定ノズルとの境界面近辺がぼやけて見えてボルトの識別ができなかった。

6.4.2. 第2回燃焼試験

(1) 位置関係

図 6.4-4 に第2回燃焼試験での供試体と熱画像の位置関係、表 6.4-2 に供試体各箇所の座標値を示す。赤外線サーモグラフィの設置位置と角度を変更し、展開ノズルが全て捉えられるようにした。また、燃焼試験前に展開ノズルの背後に人立ってもらってピントの調整をしたので第1回燃焼試験よりは鮮明な熱画像の撮影ができた。しかし、詳細な位置決めは目分量でせざるを得ないため、2-3mm の誤差は不可避と考える。

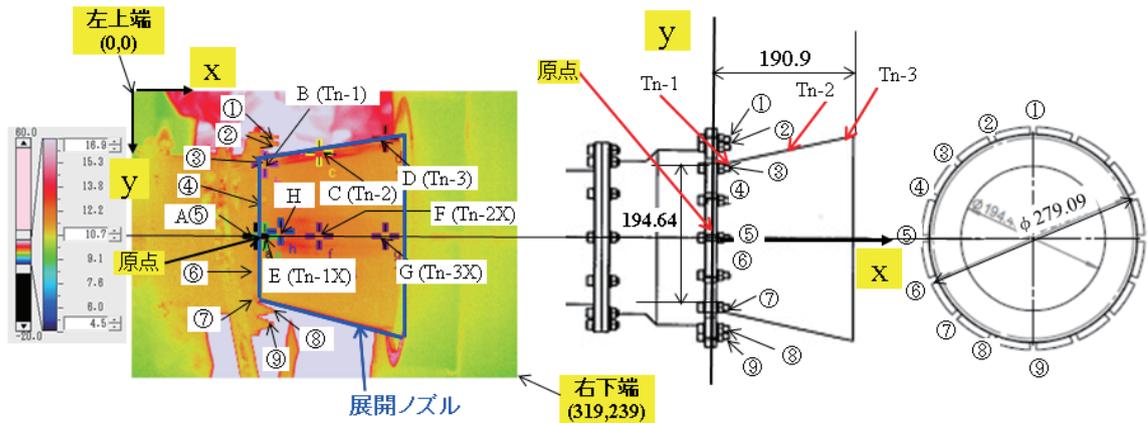


図 6.4-4 第2回燃焼試験での供試体と熱画像の位置関係

表 6.4-2 第2回燃焼試験での供試体各箇所の座標値

|             |        | 第2回燃焼試験 |       |        |     |     |
|-------------|--------|---------|-------|--------|-----|-----|
|             |        | 図面      |       | 熱画像    |     |     |
|             |        | ID      | x     | y      | x   | y   |
| 展開ノズル取付部    | ①      |         | 0     | 139.5  | 105 | 37  |
|             | ②      |         | 0     | 128.9  | 104 | 43  |
|             | ③      |         | 0     | 98.7   | 102 | 62  |
|             | ④      |         | 0     | 53.4   | 102 | 89  |
|             | ⑤      | A       | 0     | 0.0    | 103 | 121 |
|             | ⑥      |         | 0     | 53.4   | 101 | 153 |
|             | ⑦      |         | 0     | 98.7   | 102 | 182 |
|             | ⑧      |         | 0     | -128.9 | 101 | 194 |
| ノズルスカート部    | Tn-1   | B       | 11.3  | 100.6  | 110 | 61  |
|             | Tn-2   | C       | 86.4  | 116.9  | 155 | 51  |
|             | Tn-3   | D       | 178.2 | 136.8  | 210 | 39  |
|             | Tn-1X  | E       | 11.3  | 0      | 110 | 121 |
|             | Tn-2 X | F       | 86.4  | 0      | 155 | 121 |
|             | Tn-3 X | G       | 178.2 | 0      | 210 | 121 |
| 燃焼終了時の温度最高点 |        | H       | 33.3  | 6.7    | 123 | 117 |

## (2) 時刻補正

供試体の最高温度到達時刻を基準に時間補正した。最高温度到達時刻はそれぞれの時計で以下の通りで、Video Deck と熱画像計測用 PC で取得した時刻から 1.096(=7.213-6.117)sec 補正した。Video Deck と熱電対は同期が取れているので補正の必要はない。尚、燃焼時間は 6 秒である。

Video Deck : 7.213 sec

赤外線サーモグラフィ : 6.117sec

熱電対 : 7.513 sec

## (3) 放射率

燃焼試験時は  $\epsilon=0.79$  に設定したため、得られた値をそのまま適用した。

## (4) 温度履歴

燃焼開始からの各点の温度履歴、温度分布の変化をそれぞれ図 6.4-5, 6.4-6 に示す。熱電対から取得した電圧値にはノイズが大きかったので、 $\pm 180\text{ms}$  の移動平均値を採用した。

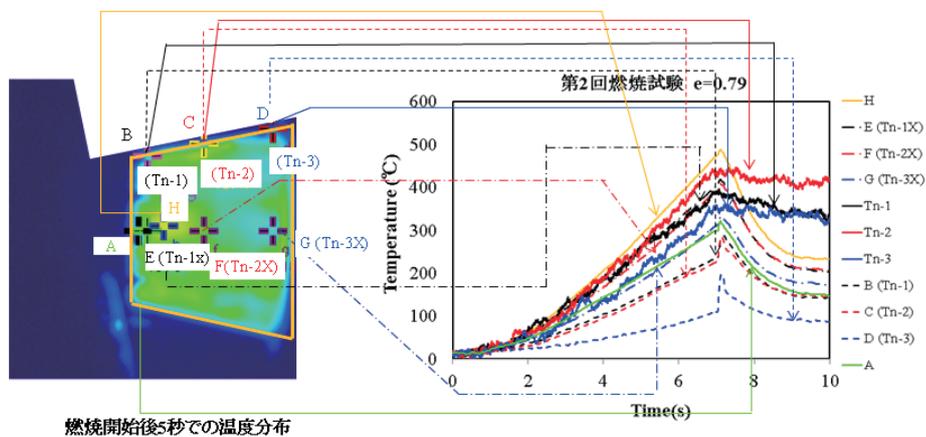


図 6.4-5 第 2 回燃焼試験での温度履歴

- ・ 展開ノズルは最高で  $487.9^{\circ}\text{C}$  に達した。
- ・ 燃焼試験終了時点で展開ノズルの温度は定常に達しなかった。
- ・ E 点での熱画像測定値が熱電対測定値 ( $T_n-1$ ) とほぼ同じで、F, G 点での熱画像測定値が熱電対測定値 ( $T_n-2, T_n-3$ ) より低かった。
- ・ 中心軸上での熱画像測定値 ( $T_n-1X, T_n-2X, T_n-3X$ ) が熱電対位置 (B, C 点) より高かった。
- ・ B, C, D 点の熱画像測定値が熱電対測定値 ( $T_n-1, T_n-2, T_n-3$ ) とより低かった。
- ・ A, B, C, D 点で 7.1 秒近辺で急な温度上昇が見られた。

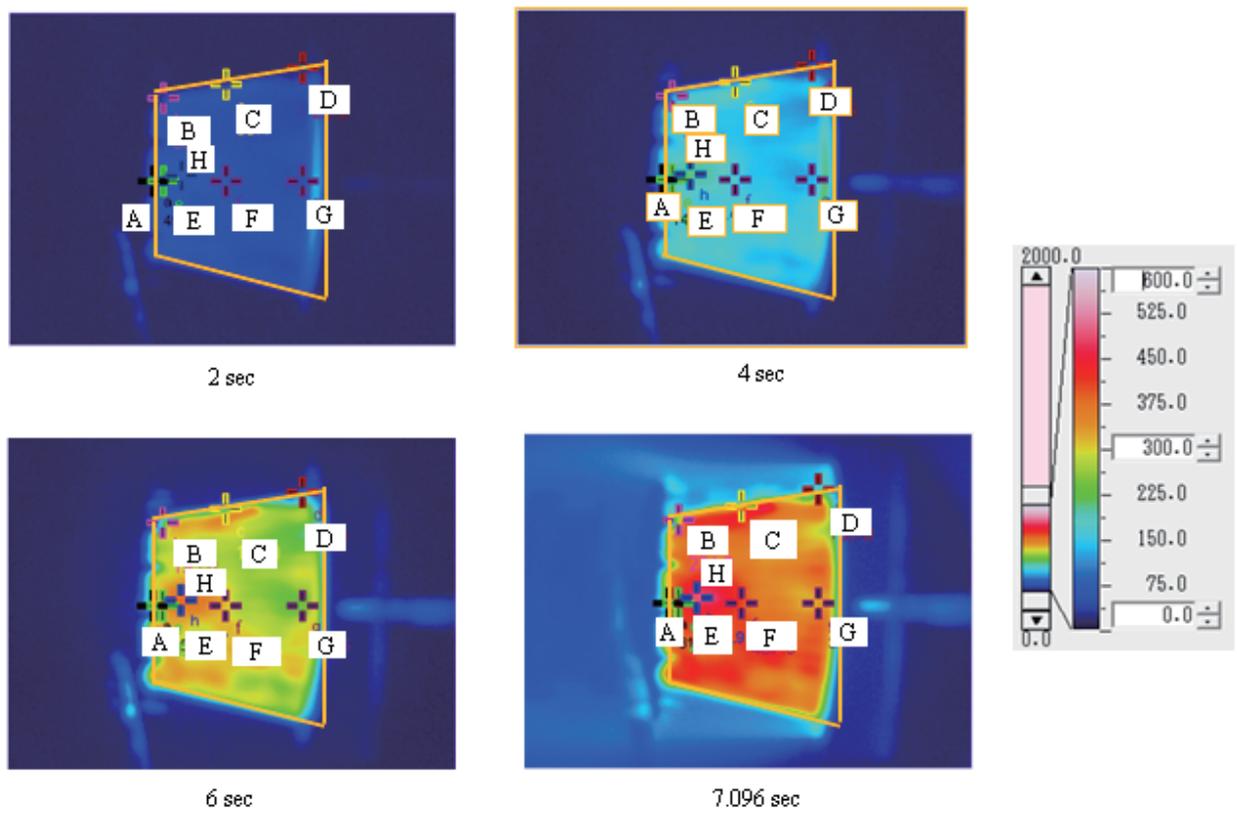


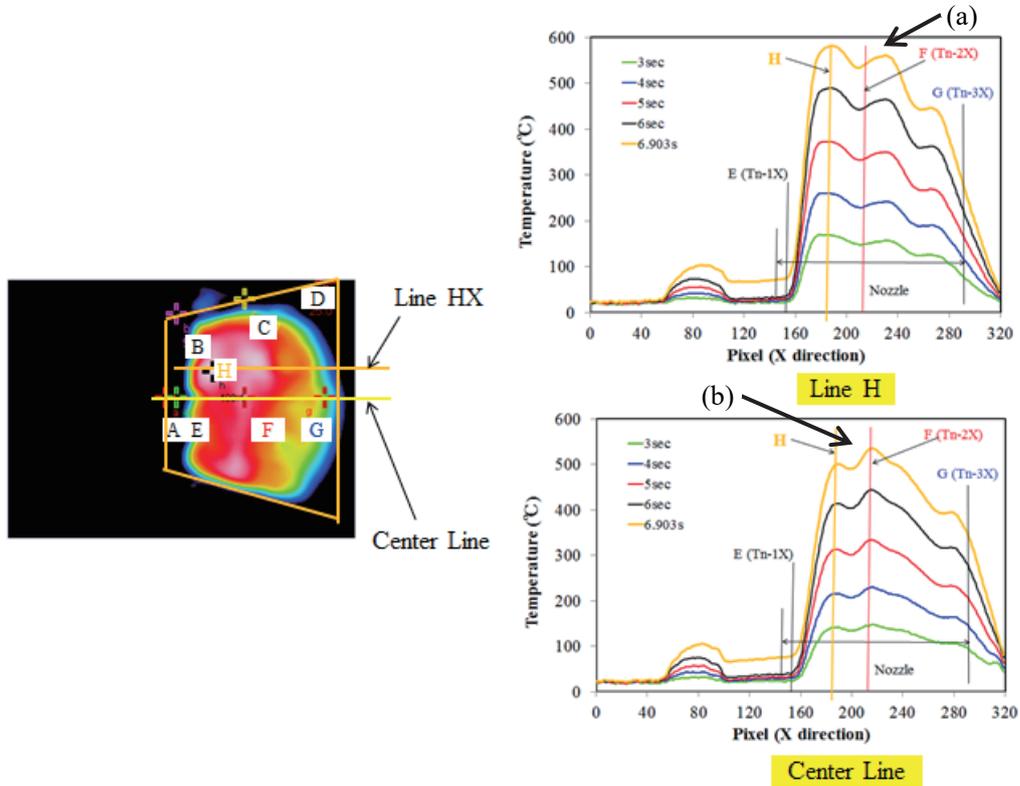
図 6.4-6 第 2 回燃焼試験での温度分布変化

- ・ 固定ノズルとの境界面に近い部分 (B,H,E,F 点近傍) での温度が高くなった。
- ・ 固定ノズルとの境界面が第 1 回燃焼試験より鮮明に識別できた。

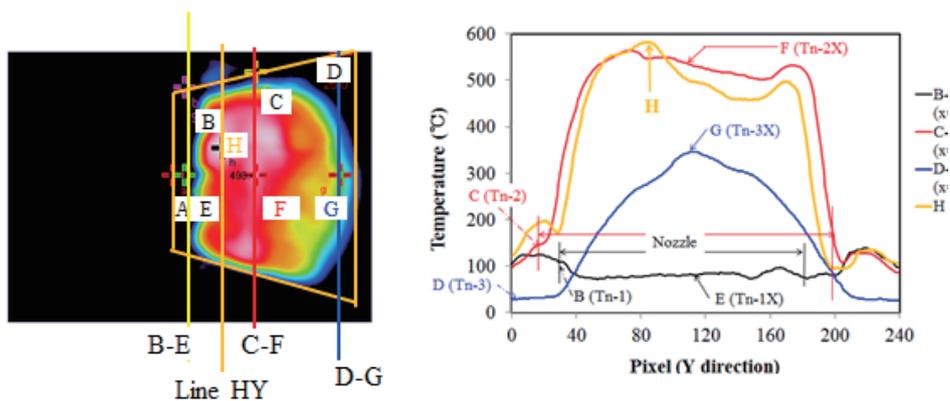
## 6.5. 評価

### 6.5.1. 温度分布

第1回および第2回燃焼試験での最高温度到達時の機軸（X軸）とそれに垂直な方向（Y軸）の温度分布を図6.5-1, 6.5-2にそれぞれ示す。

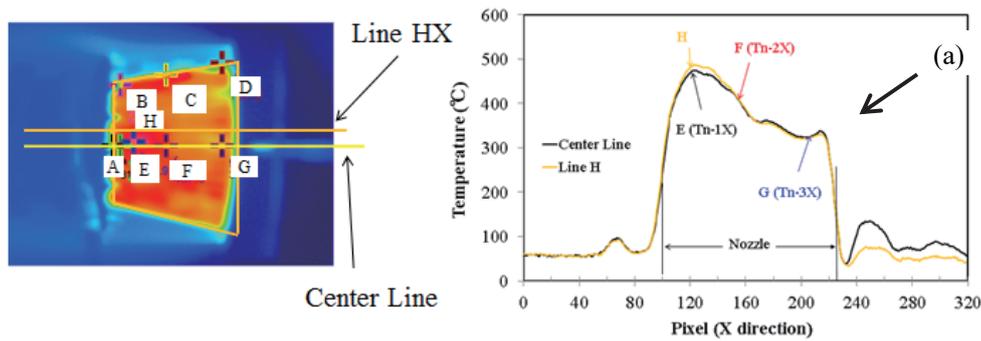


(1) X軸方向の温度分布

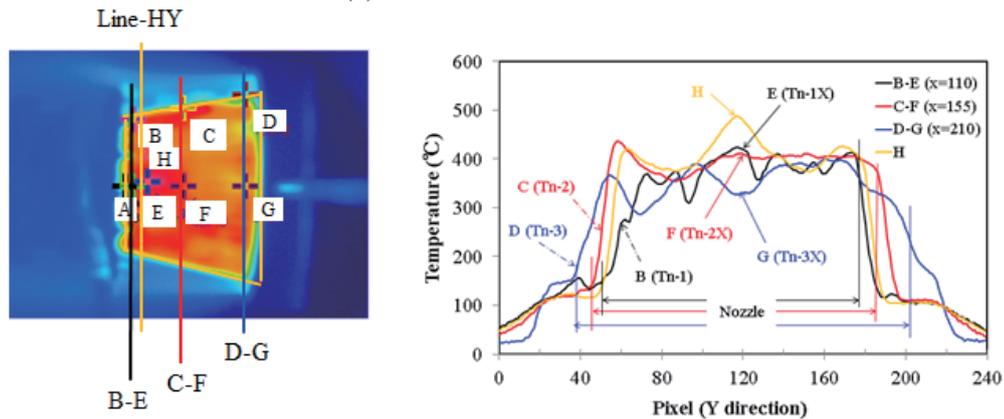


(2) Y軸方向の温度分布（6.903秒時）

図 6.5-1 第1回燃焼試験での温度分布



(1) X 軸方向の温度分布



(2) Y 軸方向の温度分布

図 6.5-2 第 2 回燃焼試験で最高温度到達時の温度分布

- ・ 第 1 回、第 2 回燃焼試験ともに機軸 (X 軸) 方向については、上流から下流へ向けて温度が低下する傾向が見られた。燃焼ガスの温度は流れ方向の下流に向けて低下する<sup>1)</sup>ことから概ね妥当な計測結果と考える。
- ・ 第 1 回燃焼試験では Line HX 上で H 点より下流 (Pixel 値 230 近辺) での温度上昇 (図 6.5-1(1)矢印 (a)) が見られた。中心軸上では F 点より上流では温度が低くなったり、Pixel 値 190 近辺で温度上昇して 200 近辺で低下する (図 6.5-1(1)矢印(b)) など Line-H とは異なる傾向を示した。ノズルの周方向 (Y 軸) については、Line-HY, C-F 線上ではノズルの上から下にかけて温度が低下するが下部 (Line HY では Pixel 値 155 近辺、CF では Pixel 値 160 近辺) で温度上昇が見られた。これらより展開ノズル上に温度分布 (Heat Spot の存在) が生じていると考える。なお D-G 線については Ge 窓で遮られたために Line H や C-F 線上での温度分布とは異なると考えられる。
- ・ 第 2 回燃焼試験では機軸 (X 軸) 方向の温度が徐々に低下したが下端付近で約 10°C の温度上昇が見られた (図 6.5-1(2)矢印(a))。下端付近での温度上昇の理由は現時点では不明である。ノズルの周方向 (Y 軸) を見ると、Line-HY, B-E 線、C-F 線、D-G 線上にも温度分布が見られた。これらより展開ノズルの周方向にも温度分布 (Heat Spot の存在) が生じていると考える。

### 6.5.2. 熱電対と熱画像による温度測定結果比較

- ・ 図 6.5-3 に示す様に第 1 回、第 2 回燃焼試験ともに熱電対貼り付け位置での赤外線サーモグラフィによる温度測定値が熱電対によるそれらより非常に低かった。電気の不良導体\*4 の放射率は立体角が 50 度まではほぼ一定であるがそれ以上になると小さくなる<sup>2)</sup>こと、赤外線サーモグラフィと熱電対との立体角度が 0 度に近いため、熱電対による測定値より低い値が測定されたと考えられる。熱電対と赤外線サーモグラフィ測定値の相関を把握するためには熱電対貼り付け位置の検討が必要と考える。(第 1 回燃焼試験では Tn-3 は Ge 窓で遮られたために除外した。)

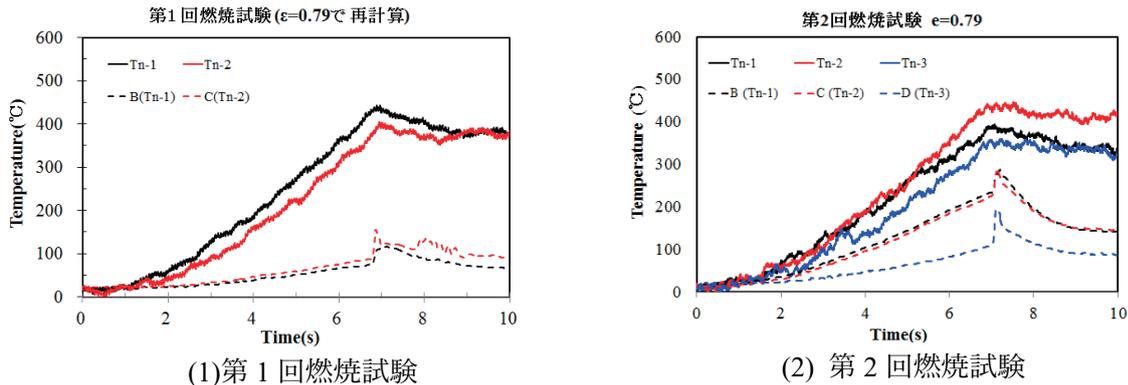


図 6.5-3 赤外線サーモグラフィと熱電対の測定値比較

- ・ 中心軸上で熱電対貼り付け位置に相当する箇所 (E,F,G) での赤外線サーモグラフィによる測定値と熱電対によるそれらと比較して図 6.5-4 に示す。第 1 回燃焼試験では Tn-3 と G での測定値が、第 2 回燃焼試験では Tn-1 と E、Tn-3 と G での測定値が近かった。展開ノズル上の周方向に温度分布ができていたため評価は難しい。

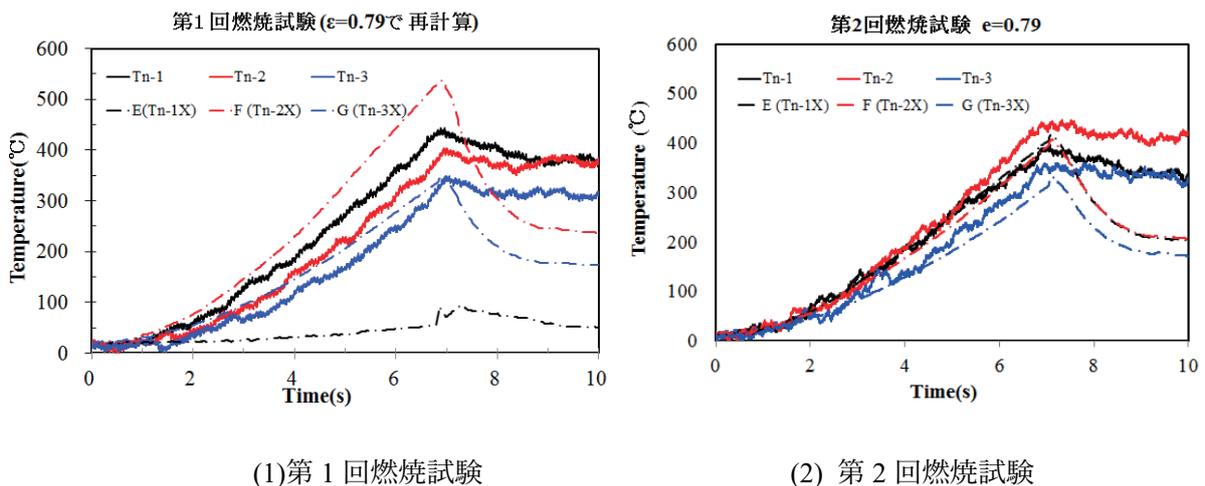


図 6.5-4 赤外線サーモグラフィと熱電対の測定値比較

\*4：展開ノズルには放射率 0.94 の黒色塗料が塗布されており電気の不良導体と考える。また、黒色塗料の放射率は立体角が 40 度より大きくなると低下することが報告されている。

### 6.5.3. 熱電対温度測定値比較

図 6.5-5 に第 1 回、第 2 回燃焼試験での熱電対測定値を示す。第 1 回燃焼試験では Tn-1, Tn-2, Tn-3 の順序で温度が低くなり展開ノズル上流から下流にかけて温度が低下したことがわかる。一方、第 2 回燃焼試験では Tn-2 が Tn-1 よりも高くなり、展開ノズル中央付近に heat spot が生成されたことになる。熱伝導率はベークライトでは  $1.4\text{W/m}\cdot\text{K}$ 、グラファイトでは  $40\text{W/m}\cdot\text{K}$  以上<sup>4)</sup>である。温度不均一が生じやすいのは熱伝導率の小さいベークライト製の展開ノズルを用いた第 1 回燃焼試験と考えるが、原因は不明である。

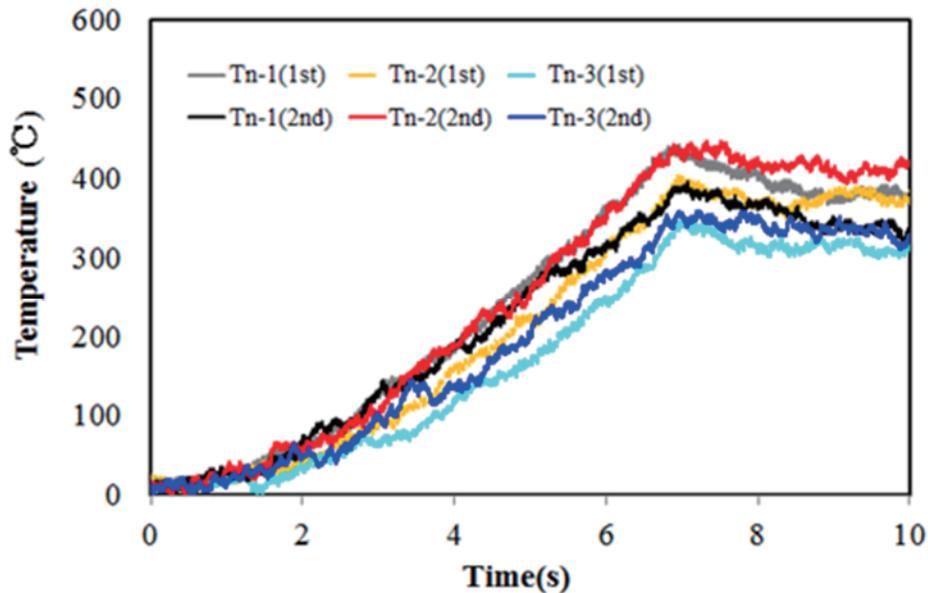


図 6.5-5 燃焼試験での熱電対測定値比較

## 6.6. まとめ

### 6.6.1. 成果

展開ノズル材耐熱予備試験で赤外線サーモグラフィによる温度分布を計測した。温度は、定常状態を仮定した Bartz の式による予測値(付録: 展開ノズル耐熱燃焼試験予備試験計画書を参照)よりも低くなることが分かった。また、展開ノズル上に温度分布が生じることがわかった。

### 6.6.2. 今後の課題

#### (1) 透過率補正

Ge の透過率から Ge 窓を通して熱画像を取得する際の補正值 0.84 を採用して温度計測した。正しい補正值を求めるには、黒体炉と Ge 窓を用いて放射率を測定する必要がある。

#### (2) 熱画像の焦点

室温で赤外線サーモグラフィの焦点を合わせ、測定レンジを  $0\text{--}2000^\circ\text{C}$  に設定した。その際に光軸上にレンズ filter が挿入されるため焦点が甘くなるのは不可避(日本アビオによる)。高温発熱体での焦点合わせを考える必要があることが分かった。また、室温でのより精密の焦点を合わせるために、展開ノズル表面とは放射率の異なる物質を用いる必要がある。

#### (3) 熱電対との相関

熱電対測定値との相関を把握するため、サーモグラフィとの立体角度が  $50$  度以下の位置に熱電対を貼り付けることを考える必要があることが分かった。

## 7. 結言

固体推進系への金属製展開ノズルの適用に必要なデータの取得を目的とする、 $\phi 110$  モータを用いた展開ノズル耐熱試験予備試験を実施した。2回の燃焼試験で、モータ内圧・推力・展開ノズル温度の計測を実施し、ノズル効率・横推力の値が異常な値ではないこと、また展開ノズル部温度が異常に高い値にならないことが確認された。これらの計測値を用いた、展開ノズル部に対する噴流からの熱入力を予測する手法を、今後確立する。

今回の予備試験で得られたデータから、より実機に近い条件の「展開ノズル耐熱試験本試験」が実施可能と判断できる。また、計測・スタンド・サーモカメラ系のそれぞれで判明したいくつかの不具合・要修正点は、「本試験」の改善に寄与する。

## 謝辞

展開ノズル耐熱燃焼試験予備試験をサポートして下さった、安田誠一氏、吉田裕二氏、戸部裕史先生、徳留真一郎先生に感謝します。

## 参考文献

- 1) 久保田 浪之介, 「ロケット燃焼工学」, 日刊工業新聞社 (1995)
- 2) J. P. Holman, “Heat Transfer” 5th ed., McGraw-Hill Book Company (1981)
- 3) Frank P. Incropera, David P. DeWitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, John Wiley & Sons, Inc. (2002)
- 4) 日本熱物性学会, 「熱物性値ハンドブック」訂正第2版, 養賢堂 (2000)

## 付録: 展開ノズル耐熱燃焼試験予備試験計画書(抜粋)

## 試験概要と目的

固体推進系の打ち上げ能力向上の一手段として、固定ノズルの後方に薄い金属板で作られた展開式のノズルを取り付けることを提案している。現時点では収納時には図左上の様な形状で折り畳まれて拘束されており、拘束が解除されると自身の弾性力により図右下の様に展開する事を想定している。収納状態で弾性変形の範囲内に留まるためには板厚が極めて薄く弾性域の広い金属板を使用する必要があり、現時点では直径1m弱のノズルで板厚0.25mm程度のTi合金板を想定している。

一方で固体推進系の場合は比較的加熱率が大きく、現在金属製ノズルの使用を想定している開口比50以上の領域でも壁面1000度を超えるという予測がある。それに対してTiは900度を越える辺りから急激に強度が低下し、大きなクリープ変形を生じる可能性が出てくるため、注意が必要である。

上記を背景として、本試験は固体推進系への金属製ノズルの適用に必要なデータの取得を目的とする。

今回の予備試験では、サブスケールのΦ110固体モータ・固定ノズル(ペークライトおよびグラファイト)・延長ノズルを用いて短時間の燃焼試験2回を実施し、軸推力・横推力・ノズル壁面温度等の計測を行う。また、その計測手法、実験手法の確立も目的として、実験を行う。

予備試験の結果を踏まえて、Φ250固体モータを用いた燃焼試験を行い、より実用的なデータの取得を別途、本試験として実施する計画である。

展開ノズルの熱伝達に関してのCFDも並行して実施し、実機での展開ノズル適用可否判断を行う予定である。

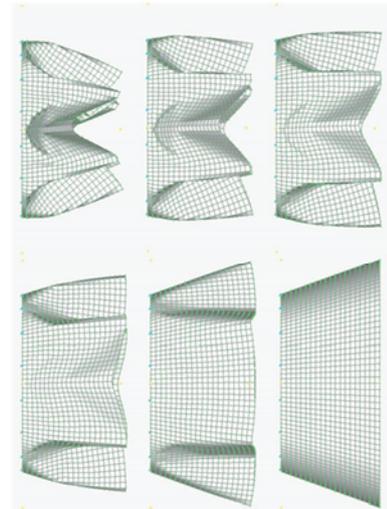


図 展開式ノズルの収納・展開

## 固体モータ分野における学術的意義

・固体モータのノズルの熱伝達に関しては、現状、ノズル材からの熱分解物質の湧き出しによる冷却効果など、詳細な知見が得られていない状況である。

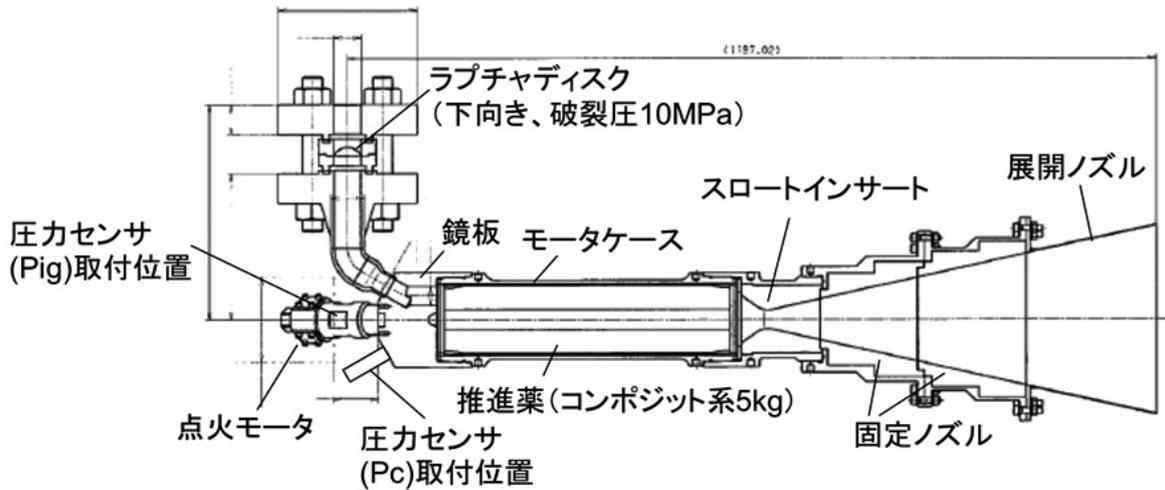
一連の試験により、ノズルの熱流束データを得ることで、ノズル壁近傍での詳細な現象のメカニズムを理解し、固体モータ設計技術の向上に資する。

・サーモグラフィーや二色温度計測法などの非接触温度計測技術を試行し、固体モータノズルの熱流束および温度を計測する技術の向上を図る。

・試験で得られた基礎データと合わせて、ノズル熱伝達に関する新たな数値解析モデルを構築することによって、より精度の高いノズル温度予測が可能になり、固体モータ設計技術が向上できる。

・展開ノズル適用可能となれば、SLIMキックステージが軽量化でき、能力を向上できる。

## 供試体

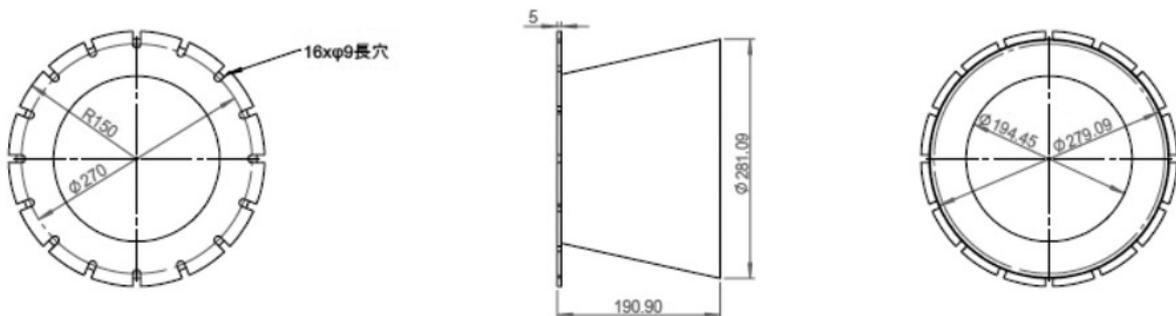


点火モータ、鏡板、モーターケース、推進薬、スロートインサート、固定ノズル(ベークライト、グラファイト)、展開ノズル(展開なし)、ラプチャディスクで構成される。

点火モータおよびモーターケースは、過去に製作された実績のあるものを再使用している。設計圧力10MPaで、安全率1.5として設計している。

ラプチャーディスクは市販のものを使用し、破裂圧力は10MPaである。

## 展開ノズル



展開ノズルは、使用を予定しているTi合金SP700で作られており、板厚は約1mmを想定している\*1。これは直径1m弱のノズルでの板厚約4mmに相当し、予想される応力は0.3MPaと充分小さく、クリープ変形がもし生じたとしても小さいと考えている。SP700は加工後に熱処理をする事で3%程度の形状記憶性を発揮するTi合金であり、フライトではこの形状記憶性(超弾性)を利用する予定である。

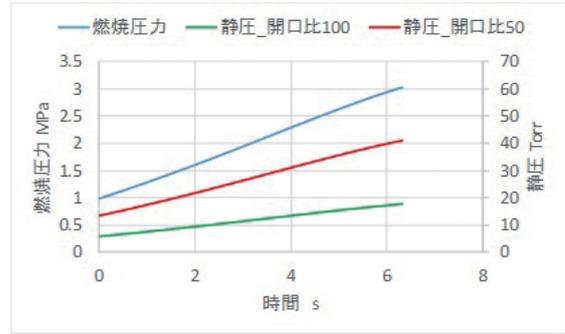
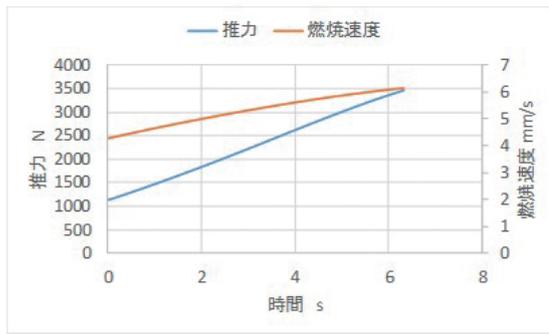
本試験でも事前の熱処理により、超弾性状態として試験を実施する。

\*1: 厚さ1mmの板のロール加工で製造予定のため、1mmより若干薄くなる。

# 燃焼特性履歴予測

- ・燃焼ガスデータは、燃焼圧力に関わらず、燃焼圧力2MPaのCEA凍結流のデータを用いた。
- ・各種履歴は、0.01s刻みでステップ状に計算。
- ・初期圧力が1MPaとなるように、スロート径を設定。結果として、スロート径は27.5mm。スロート径拡大は考慮していない。

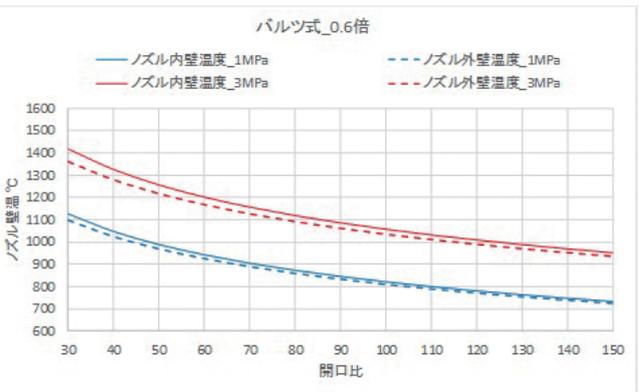
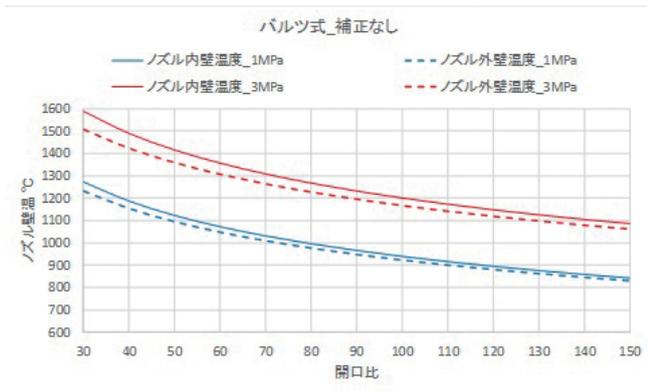
|                   |                           |       |             |             |                  |
|-------------------|---------------------------|-------|-------------|-------------|------------------|
| 基準燃速<br>mm/s      | 圧力指数                      | 比熱比   | 分子量(気体)     | 断熱火炎温度<br>K | 定圧比熱<br>J/(kg K) |
| 7.3               | 0.33                      | 1.165 | 29.092      | 3434        | 2016.8           |
| 燃焼圧力2MPaAでの値      |                           |       |             |             |                  |
| ガス定数<br>J/(K mol) | 推奨密度<br>g/cm <sup>3</sup> | C*効率  | 理論C*<br>m/s | 実際C*<br>m/s |                  |
| 8.31451           | 1.813                     | 0.97  | 1544        | 1498        |                  |



最大燃焼圧力:3MPa 最大推力:3.5kN 燃焼時間:6.3s

# ノズル壁温予測

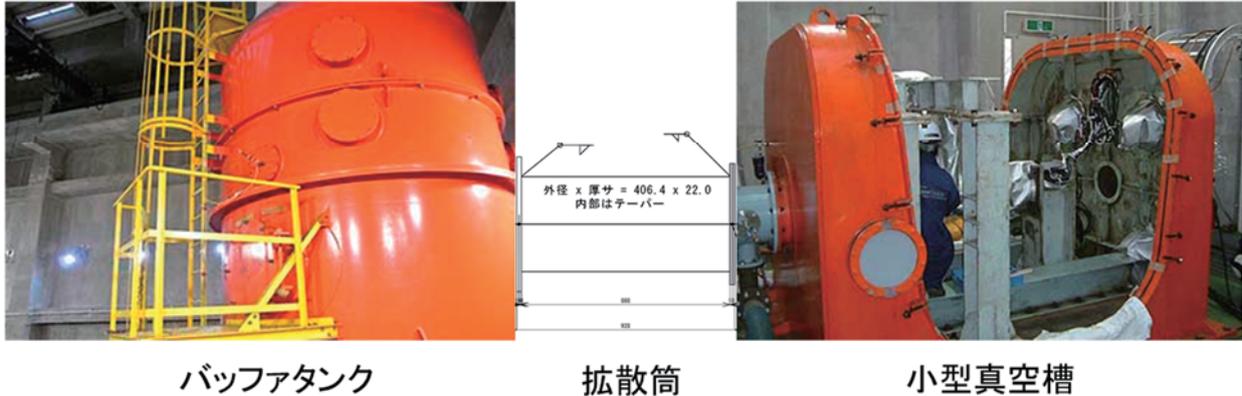
- ・Bartz式を用いてノズル壁温を計算(定常状態)
- ・ノズル内燃焼ガスからの熱輸送とノズル内熱伝導、ノズル壁からの放射を考慮
- ・ノズル内流れは、一次元定常、断熱、等エントロピー流れと仮定して計算
- ・Bartz式を0.6倍に補正した場合も計算。(文献から熱流束が低くなる可能性が示唆されているため)



| 燃焼圧力<br>MPa | 特性線気速度<br>m/s | 粘性係数*燃焼室<br>Pa s | 定圧比熱*燃焼室<br>J/(kg K) | 熱伝導率*燃焼室<br>W/(m K) | プラントル数*燃焼室 | 燃焼室圧力<br>MPa | 特性線気速度<br>m/s | 粘性係数*燃焼室<br>Pa s | 定圧比熱*燃焼室<br>J/(kg K) | 熱伝導率*燃焼室<br>W/(m K) | プラントル数*燃焼室 |
|-------------|---------------|------------------|----------------------|---------------------|------------|--------------|---------------|------------------|----------------------|---------------------|------------|
| 1           | 1532          | 1.532E-05        | 2012.1               | 0.411               | 0.484      | 3            | 1590          | 1.590E-04        | 2019.8               | 0.419               | 0.487      |
| スロート直径<br>m | スロート輪郭半径<br>m | 燃焼室内ガス温度<br>K    | 比熱比*燃焼室              | 放射率                 | 分子量*燃焼室    | スロート直径<br>m  | スロート輪郭半径<br>m | 燃焼室内ガス温度<br>K    | 比熱比*燃焼室              | 放射率                 | 分子量*燃焼室    |
| 0.0275      | 0.0275        | 3358             | 1.167                | 0.94                | 28.832     | 0.0275       | 0.0275        | 3478             | 1.164                | 0.94                | 29.242     |

開口比50(展開ノズル先端)の位置で、最大1400°Cに達する可能性がある。その場合、展開ノズルは変形する可能性がある。

## スタンド設備



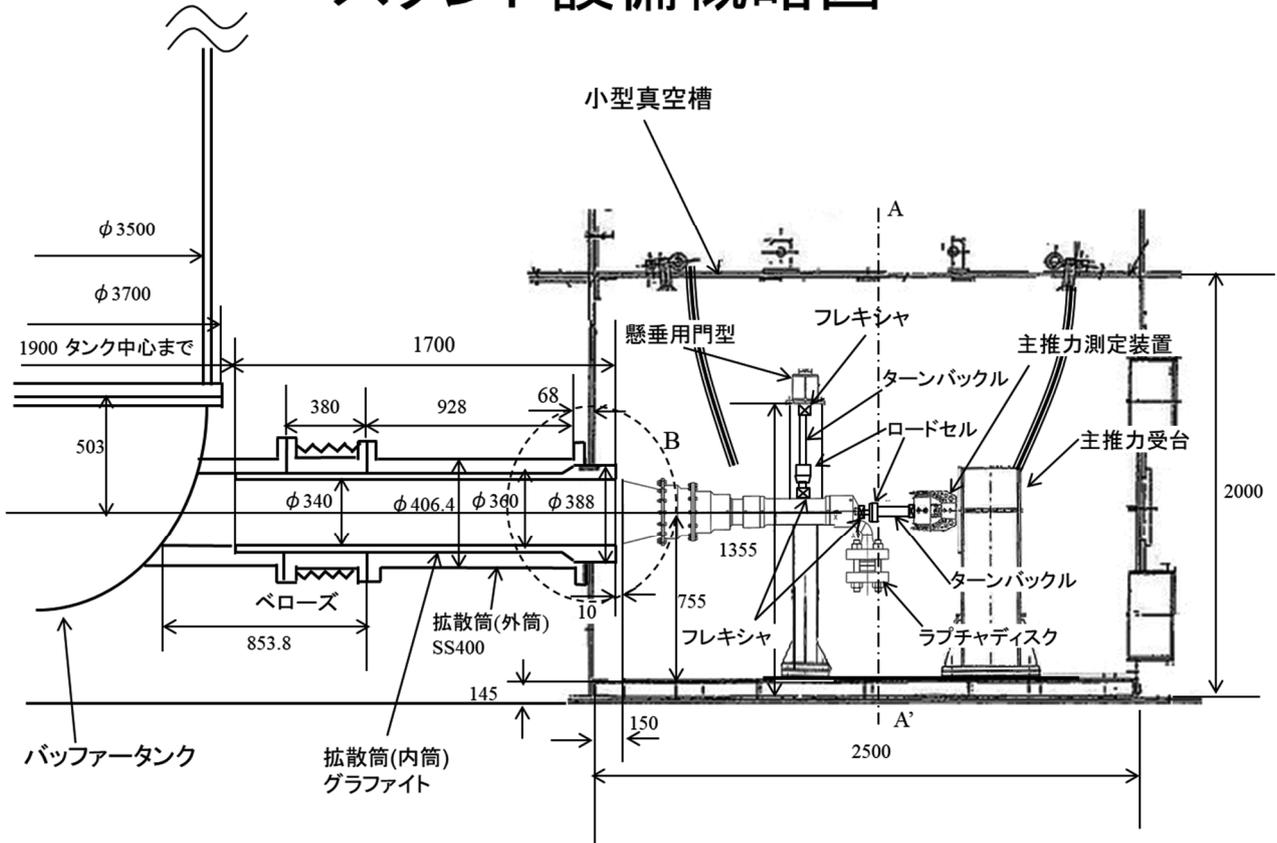
- ・ 供試体は小型真空槽内に設置し、初期真空槽圧は20torr程度とする。
- ・ 真空槽は新規製作の拡散筒を介して、バッファタンクに接続する。
- ・ 拡散筒は外筒（SS400、外径406.4mm、厚さ22mm、長さ928mm）と内筒（グラファイト、外径380mmおよび360mm、内径340mm、長さ1700mm、L/D=5）で構成する。内筒はテーパーを介して外筒に支持され、バッファタンク側を固定しないことで、燃焼ガスによる加熱による熱膨張に対応している。
- ・ 外筒の温度上昇は、温度分布が一様であると仮定して計算した結果、 $\Delta 35^{\circ}\text{C}$ であり問題ないと判断する。

## テストスタンド概要

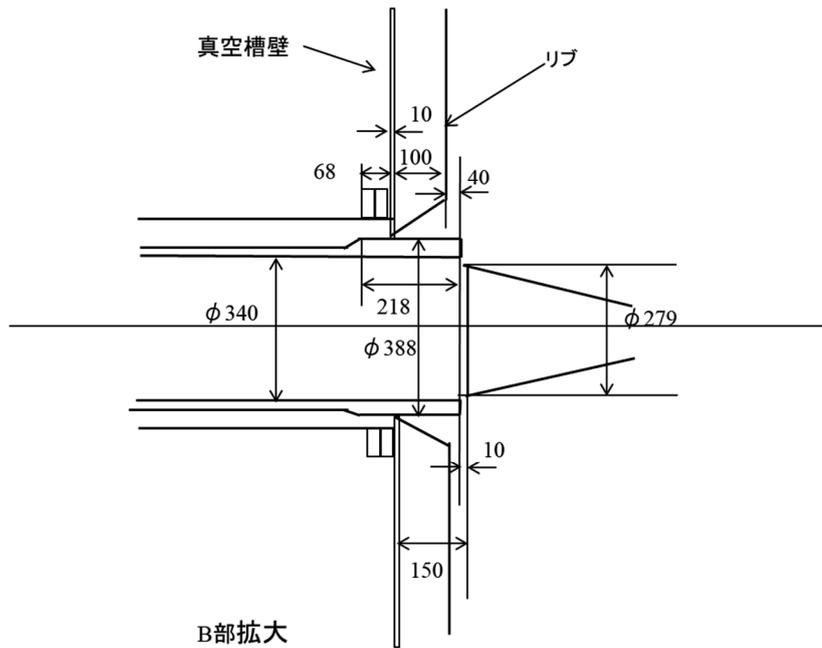
- ・ 供試体は門型にロードセル・フレキシャ・ターンバックルを介して垂直、水平方向に固定する。また、軸方向にもロードセル・フレキシャ・ターンバックル・推力計測校正装置を介して推力受け台に固定する。
- ・ 下表に示すようにスタンド系の耐荷重を見積もり、安全余裕が十分であることを確認した。

|                           | 場所<br>(弱いところ、太字は最弱)    | 断面積<br>[mm <sup>2</sup> ] | 荷重<br>[N] | 発生応力<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 許容応力<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 安全率  | 材料      | 材料の強度<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 備考  |
|---------------------------|------------------------|---------------------------|-----------|------------------------------|------------------------------|------|---------|-------------------------------|---|
| 主推力Fx                     | ロードセル                  | -                         | 3500      | -                            | -                            | 2.14 | -       | -                             | 定格5kN、許容過負荷7.5kN、共和電業製                          |
|                           | <b>M12のニゲまたは谷</b>      | 80.2                      | 3500      | 43.6                         | 60                           | 1.4  | S45C    | 343                           | 引張衝撃荷重として(実際には圧縮だが、同等と判断)                       |
|                           | 推力計測校正装置               | -                         | 3500      | -                            | -                            | 5.7  | -       | -                             | 定格20kN用   |
|                           | 推力受け台                  | -                         | 3500      | -                            | -                            | 2.8  | SS400   | -                             | 1ton用=9.8kN用                                    |
| 横推力Fy                     | ロードセル                  | -                         | 350       | -                            | -                            | 4.3  | アルミ合金   | -                             | 定格1kN、許容過負荷1.5kN、TEAC製                          |
|                           | M8のニゲまたは谷              | 34.7                      | 350       | 10.1                         | 60                           | 5.9  | S45C    | 343                           |   |
|                           | M12の谷                  | 80.2                      | 350       | 4.4                          | 60                           | 13.8 | S45C    | 343                           |   |
|                           | ロードセル固定ボルト             | 24.8                      | 350       | 14.1                         | 60                           | 4.2  | SCM435  | 785                           | M4を3本   |
| 横推力Fz                     | フレキシャ                  | -                         | 350       | -                            | -                            | 14   | SNCM439 | 883                           | 0.5ton用=4.9kN用                                  |
|                           | ロードセル                  | -                         | 675       | -                            | -                            | 11.1 | -       | -                             | 定格5kN、許容過負荷7.5kN、共和電業製。2点吊りなので、自重+横推力を半分になっている。 |
|                           | <b>M12のニゲまたは谷</b>      | 80.2                      | 675       | 8.4                          | 60                           | 7.1  | S45C    | 343                           | 引張衝撃荷重として                                       |
|                           | W3/4の谷                 | 196                       | 675       | 3.4                          | 60                           | 17.4 | S45C    | 343                           | 引張衝撃荷重として                                       |
| 門型                        | フレキシャ                  | -                         | 675       | -                            | -                            | 29   | SNCM439 | 883                           | 2ton用=19.6kN用                                   |
|                           | <b>門型200 x 200 H型鋼</b> | 6353                      | 1350      | 0.2                          | 30                           | 141  | SS400   | 215                           | 200x200x8x12 H型鋼 ねじりの衝撃荷重として                    |
| 明らかに強度の足りているプレート等は省略している。 |                        |                           |           |                              |                              |      |         |                               |   |
| ラプチャディスク破損時               |                        |                           |           |                              |                              |      |         |                               |   |
| 横推力Fz                     | ロードセル                  | -                         | 6500      | -                            | -                            | 1.2  | -       | -                             | 定格5kN、許容過負荷7.5kN、共和電業製。2点吊りなので、13kNを半分になっている。   |
|                           | M12のニゲまたは谷             | 80.2                      | 6500      | 81.0                         | 343                          | 4.2  | S45C    | 343                           |   |
|                           | W3/4の谷                 | 196.0                     | 6500      | 33.2                         | 343                          | 10.3 | S45C    | 343                           |   |
|                           | フレキシャ                  | -                         | 6500      | -                            | -                            | 3.0  | SNCM439 | 883                           | 2ton用=19.6kN用                                   |

# スタンド設備概略図

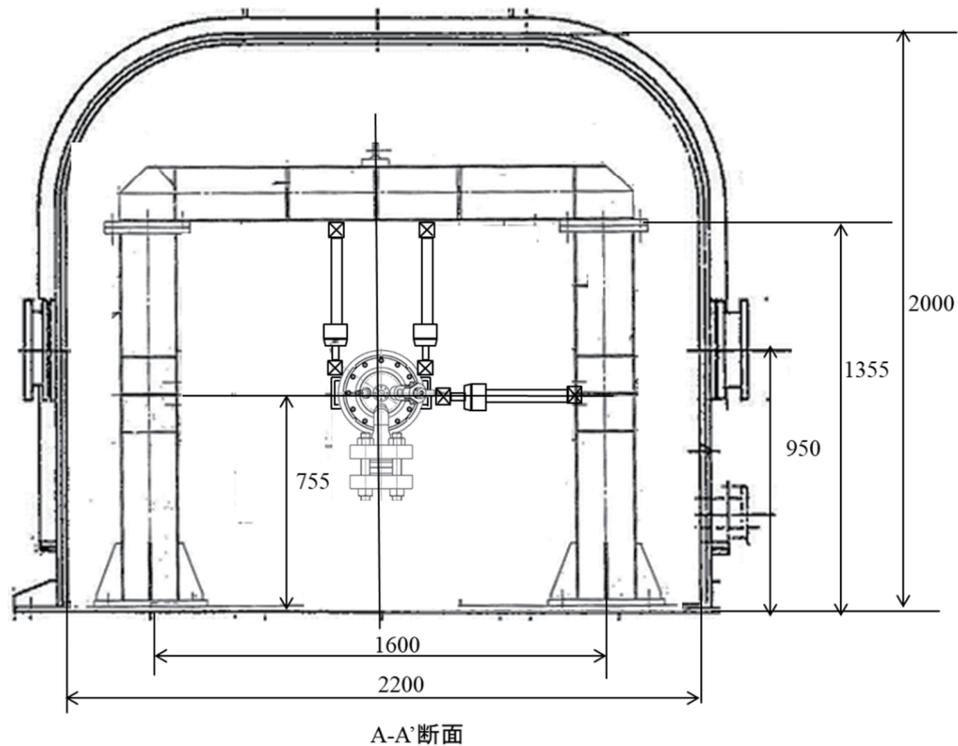


# スタンド設備概略図 (B部拡大)



拡散筒、ノズル、リブ間の干渉はない

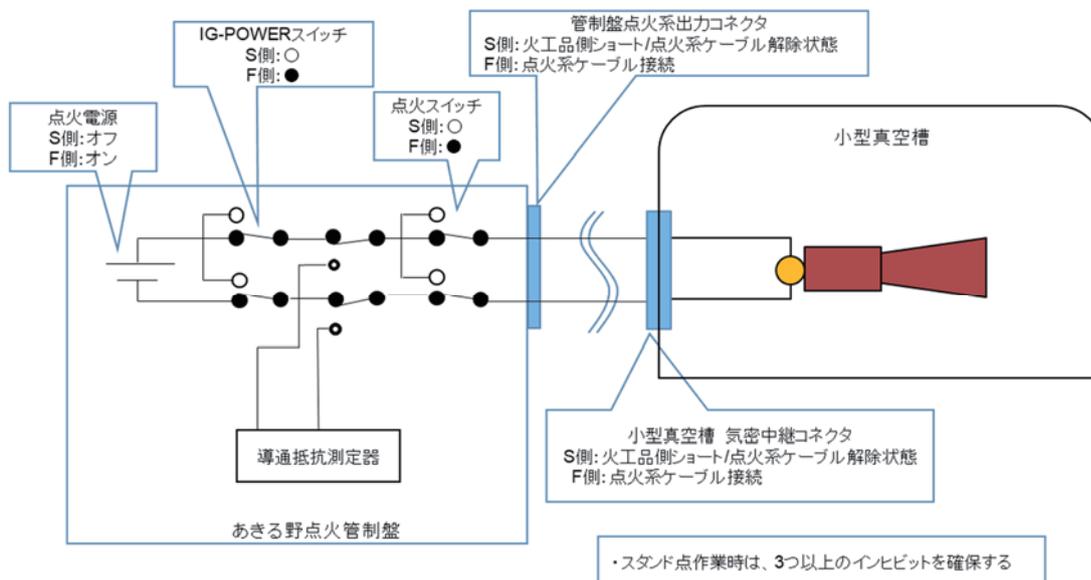
## スタンド設備概略図(A-A'断面)



## 点火系

本試験における点火系の構成を下記に示す。

点火管制盤は既存のあきる野点火管制盤を使用し、点火管制盤に具備されたスイッチおよび火工品までの点火系ラインにおけるコネクタ接続状態によりインヒットを確保する計画である。



## 計測項目

| 項目                     | 予測レンジ                                      |          |
|------------------------|--|----------|
| モータ内圧                  | 1~3MPa                                     |          |
| 点火モータ内圧                | 4~5MPa                                     |          |
| 主推力                    | ~3.5kN                                     |          |
| 横(Y)推力                 | 1kNロードセル(0.35kN程度までを測定)                    |          |
| 横(Z1)推力                | 5kNロードセル(0.35kN程度までを測定)<br>(0.18kN程度までを測定) |          |
| 横(Z2)推力                | 5kNロードセル(0.35kN程度までを測定)<br>(0.18kN程度までを測定) |          |
| 真空槽圧                   | 10Torr~120Torr                             |          |
| 真空槽温度1                 | (K熱電対で測定)                                  |          |
| 真空槽温度2                 | (K熱電対で測定)                                  |          |
| 拡散筒外壁温                 | (K熱電対で測定)                                  |          |
| バッファタンク圧               | 20Torr~120Torr                             |          |
| バッファタンク温度1             | (K熱電対で測定)                                  |          |
| バッファタンク温度2             | (K熱電対で測定)                                  |          |
| バッファタンク温度3 TBD         | (K熱電対で測定)                                  |          |
| 展開ノズル壁温(サーモカメラ)        | ~1200°C                                    | 真空槽外から撮影 |
| 展開ノズル壁温(高速カメラ、二色温度計測法) | ~1200°C                                    | 真空槽外から撮影 |
| 展開ノズル壁温(K熱電対)          | K熱電対で展開ノズル外壁3箇所測定                          |          |

燃焼前後にノズル形状の計測を行う。(レーザー計測:解像度0.05mm,精度0.03mm)

映像記録 - デジタルビデオカメラで供試体周りの健全性をモニタ

## 実験スケジュール

- 11/1 機材搬入、スタンド系・計測系・点火系・ロケット系準備
- 11/2 スタンド系・計測系・点火系・ロケット系準備  
供試体組立、点火モータスタンドセット
- 11/4 真空引き、点火モータ燃焼試験、データ分析、点火モータ分解・洗浄  
供試体組立、ノズル形状計測、供試体スタンドセット
- 11/7 真空引き、燃焼実験1回目、ノズル形状計測、  
供試体分解・洗浄、データ分析
- 11/8 供試体組立、ノズル形状計測、供試体スタンドセット
- 11/9 真空引き、燃焼実験2回目、ノズル形状計測、  
供試体分解・洗浄、データ分析
- 11/10 撤収
- 11/11 予備日

# 試験手順書

| ロケット・点火管制系  | スタンド系  | 計測系          |
|---|--------|--------------|
|   |        | 計測系ウォームアップ   |
| 点火系安全側確認  |        | 計測系電流カット確認   |
| 各班スタンド点最終点検/ モータスタンドセット確認   |        |              |
| 大実験室内 退避(点火系作業者を除く)   |        |              |
| 点火系導通チェック <ul style="list-style-type: none"> <li>・点火具組付け結線</li> <li>・点火系結線(中継盤/管制盤)</li> <li>・点火系導通/絶縁チェック</li> <li>・点火系安全側戻し(中継盤/管制盤)</li> </ul>             |        |              |
| 大実験室内 退避解除(真空槽内 総員立入り禁止)  |        |              |
|   | 真空槽蓋締め | 計測系電流オン      |
|   | 真空引き開始 | 計測系調整        |
|   | 真空引き停止 | 計測系CAL2      |
|   |        | 光学系計測最終セット確認 |
| 大実験室内 退避(点火系作業者を除く)   |        |              |
| 点火系導通チェック <ul style="list-style-type: none"> <li>・気密中継盤点火系コネクタ接続</li> <li>- 総員退避 -</li> <li>・管制盤 点火系コネクタ接続</li> <li>・管制盤-オン</li> <li>・点火系導通/絶縁チェック</li> </ul> |        |              |
| 点火電源オン IG-POWER SW オン   |        |              |
| コントローラスタート x-30sTBD   |        |              |
|   |        | 計測系集録開始      |
| 点火 x  |        |              |
|   |        | 計測系集録停止      |
| コントローラ リセット   |        |              |
| 安全確認 保安主任のみ大実験室退避解除 大実験室内安全確認 → 大実験室内退避解除 スタンド班 真空槽大気戻し、天蓋解放  |        |              |

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-20-006

JAXA Research and Development Report

展開ノズル耐熱燃焼試験予備試験報告書

Report on Preliminary Static Firing Test of the Heat Durability of Deployable Nozzle

---

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 2021年2月19日

電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

---

