

# 超小型ラムジェットエンジンの点火および保炎に関する実験的研究

## An Experimental Study on Ignition and Flame Stabilization of subminiature ramjet engines

\*広瀬 航  
丸 祐介

(静岡大学院)  
(JAXA)

吹場 活佳

(静岡大学)

\*Wataru HIROSE<sup>1</sup> Katsuyoshi FUKIBA<sup>1</sup> Kenji NAKASHIMA<sup>1</sup> Yusuke MARU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Shizuoka University  
3-5-1 Jyohoku, Naka-ku, Hamamatsu 432-8561

<sup>2</sup> JAXA

JAXA 宇宙科学研究所を中心とするグループにより、気球を用いたスペースプレーンの実証実験が進められている。ここで用いられる超小型ラムジェットエンジンの、ジュール加熱を用いた点火器の伝熱特性を評価することを目的とする。本実験では、様々な飛行条件により変化する燃焼器内の環境を考慮し、点火器の着火・保炎限界を実験により調査した。

### NOMENCLATURE

$C$	: オリフィス流出係数	[-]
$L$	: 循環領域長さ	[m]
$Nu$	: ヌッセルト数	[-]
$P_0$	: 全圧	[Pa]
$Pr$	: プラントル数	[-]
$Q$	: 熱交換量	[W]
$Ra$	: レイリー数	[-]
$T_0$	: 全温	[K]
$T_w$	: 物体壁面温度	[K]
$T_\infty$	: 流体温度	[K]
$V_0$	: 基準電圧値	[V]
$\tau$	: 混合気滞留時間	[s]
$\tau_c$	: 臨界燃焼時間	[ms]
$\phi$	: 当量比	[-]

BOV#3 からスケールダウンしたことによって、エンジンサイズが制約されたことが挙げられる。以下の図 1.3 に BOV#3 kBOV#1 の主要機器搭載図を示す。kBOV#1 の全長は BOV#3 の全長の 1/2 程度であるため、エンジンスケールについては縦横 100 mm 程度の燃焼器が求められている。BOV#3 で用いられる予冷ターボジェットエンジン点火器としては火花点火式点火器が用いられていた。火花点火式点火器の特徴として、始動時に点火ノイズが発生することや、昇圧用のトランス、コイル等を用いるため点火機器が大型化するデメリットが存在する。そのため燃焼器サイズの制限内で火花点火式点火器の使用が難しくなっている。そこで本研究では、ジュール加熱を用いた熱面点火式点火器を提案する。熱面点火式点火器は、高温状態に保った電熱線に空気と燃料の混合気を当てることで点火する方法である。この点火方法の特徴として、直列回路を用いることから点火ノイズの発生が小さいことに加え、低電力で高温状態を作り出すことができるので乾電池でも動作させることができ、小型、軽量化に繋がると期待できる。以上のことから本研究では熱面点火式点火器を kBOV#1 の極小エンジン内の燃焼器に使用することを提案する。この点火器は電熱線を用いてジュール加熱するため、電熱線の伝熱特性がとても重要となる。

## 1. 序論

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 JAXA による微小重力実験機の開発

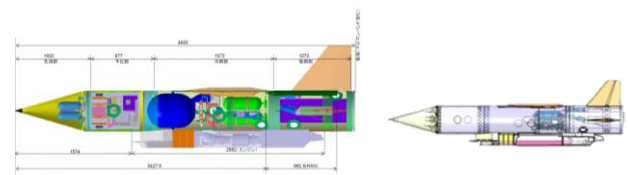
JAXA 宇宙科学研究所を中心とするグループにより、気球を用いたスペースプレーンの実証実験が進められている。良質の微小重力実験を適切なコストで提供する試みとして、高高度気球を用いた微小重力実験システムである気球無重力実験機 (the Balloon-based Operation Vehicle, BOV 図 1.1) を提案し、その開発を行っている。機体内部に微小重力実験部をもって、高高度気球によって高度 40 km 程度の高空まで上昇した後、気球から切り離されて落下し自由落下に近い状態が実現される<sup>[1]</sup>。気球を利用した場合には、空気密度の小さい高高度から落下させることで、超音速状態を創り出すことが簡単であるため、効率的に大気中の高速飛行実験が実施可能である。2010 年に実施された BOV#3 実験では、高高度からの落下により飛行マッハ数 1.9 まで達し、超音速飛行環境を得る実験システムとしての有効性を示した。一方でパラシュートの開傘に失敗し、実験システムとしての実証はできていない。そこで、実験システムとしての実証実験にあたり新しく実験機システムを構成した。このシステムでは、BOV#3 から相似形状のままスケールダウンした超音速機を用い、これを kBOV#1 と呼称する。

#### 1.1.2 kBOV#1 のエンジンサイズ

BOV#3 では、供試ジェットエンジンとして予冷ターボジェットエンジンを搭載していたが、kBOV#1 では、ターボジェット部分を省略したラムジェットエンジンを搭載する。ここでラムジェットエンジンが採用された理由として、



図 1.1 微小重力実験機 BOV#3 外観図<sup>[1]</sup>



(a) BOV#3

(b) kBOV#1

図 1.2 主要機器搭載図

## 1.2 先行研究

### 1.2.1 電熱線に関する過去の研究

水平円柱周りの自由対流熱伝達に関しては非常に多くの研究があるが、細長い線についてはいまだ解決すべき問題が残されている。昭和 57 年に藤井らが水平細線周りの自由対流に関する論文を発表している。藤井らは厚い境界層方程式の数値解を求め、平均熱伝達係数を表す式を提案した。しかし、それは従来の多くの実験値や、藤井らの比較的精密な諸実験値のいずれよりも低い値を予想するものであった。このようなモデルを小さい物体にも適用してよいか否かは疑問であって、それが平均熱伝達係数に関する理論と実験との差異をもたらした可能性がある。その疑問を解決するため、ここでは細線の理論に関して従来の諸研究をも参照して、細長い水平細線周りの自由対流現象を詳細に解明した。<sup>[2]</sup>

また、1964 年に佐野らによって細線周りの強制対流熱伝達に関する論文が発表されている。直径 1 mm 以下の細線に対する強制対流空気の場合は、垂直の場合および平行の場合の 2 通りが考えられる。ちなみに、一般的に自然対流状態では水平に張られた細線の場合垂直流、鉛直に張られた場合には平行流と考えることができる。強制対流中の垂直流については、従来多くの報告がある。McAdams<sup>[6]</sup>は強制対流と自然対流で円筒について  $Nu$  を与える曲線を示している。また、自然対流について坪内らは極細線 (0.00489 ~ 0.061 mm  $\phi$ ) を用い、 $Nu$  の測定を行っている。一方、平行流についての報告は少ない。強制対流では、Nusselt の相当直径を用いることが考えられるが、流路の直径に比し円筒直径が著しく小さい場合にはこれは適当でない。そこで佐野らは、細線と乱流空気流の間の伝熱係数について、平交流の場合と垂直流の場合について 2 式を報告した。ただし、垂直流については、Van der Hegge Zijnen 式を最も信頼できるものとして考えている。<sup>[3][4][5]</sup>

## 1.3 研究目的

本研究では、以下の図 1.3 に示すようなジュール加熱を用いたコイル状熱面点火式点火器を提案する。作成した熱面点火式点火器は、混合気流への熱の逃げを抑えるため、加熱部の電熱線をコイル状に巻いている。ところが 1.2.1 項の電熱線に関する過去研究で上述したように、コイル状電熱線の伝熱特性に関する先行研究はない。そのため本研究の目的の一つとして、細線に関する先行研究を基にコイル状熱面点火式点火器の伝熱特性を明確にすることとし、実験によりコイル状電熱線の伝熱特性を評価した。また、kBOV#3 を用いた飛行実験では、自由落下中の燃焼器に流入する空気の気流条件は飛行条件により大きく変化することから、広い気流条件 (全圧: 0.5~1.0 atm, 気流流速: 10~40 m/sec) 下での着火が要求されている。そこで本研究の目的の 2 つ目として、様々な (圧力は一定) 環境を想定し、基礎実験により導いた伝熱特性を基に着火実験を行い、着火の可否より着火・保炎条件範囲を特定することを掲げる。さらに、2 種類の保炎器形状の違いによる保炎性能への影響を調査することとした。

## 2. 点火器

### 2.1 熱面点火式点火器

#### 2.1.1 ニクロム電熱線

本実験では以下の図 2.1 のようなニクロム線を用いた点火器を作成した。熱面点火式点火器とは、可燃ガスに高温熱面を接触させることにより点火を達成するものであるため、高温に耐えうる材料である必要がある。そこで用いた電熱線は ELPA (朝日電器株式会社) 製品 ニクロム線 HK-

NK05H である。ニクロム線は安価でありながら、耐熱温度が約 1000 °C と高く、低電力で高温状態を保つことができる素材である。組成の違いによって様々な種類が存在し、合金材料にはニッケルとクロム以外の物も含まれている。電熱線としては電熱用ニッケルクロム線や電熱用鉄クロム線などがある。<sup>[6]</sup>下記の表 2.1 に本実験で用いたニクロム線の仕様を示す。ここで、本実験に用いるニクロム線の密度と抵抗値を実測する。密度は、ニクロム線を 0.65, 3.22, 3.87 m の長さで切断し、それぞれの重さを計測した後体積で除することで密度を概算した。それぞれの長さから求めた密度を長さによる荷重平均として算出した。また抵抗値は、比抵抗 [ $\Omega$  m] を断面積で除した導体抵抗 [ $\Omega$  /m] を用いて算出した。ニクロム線は電熱線として一般に普及されている安価な材料であるが、高い耐熱温度と抵抗を持つため幅広く利用される。本実験では K 型熱電対をニクロム線の発熱部に設置することで、電熱線温度を計測している。

#### 2.1.2 コイル状ニクロム細線点火器

2.1.1 項のニクロム電熱線で示したニクロム線を発熱部として熱面点火式点火器を作成する。長さ 70 mm のニクロム線を、より気流への放熱量を少なくするため、内径 1.0 mm でコイル状に巻く。コイル状のニクロム線の放熱量に関する詳細は 3 章の基礎実験にて示す。このコイル状に巻いたニクロム線の両端を 3 mm 程度残し、銅管に圧着し固定する。圧着固定されたニクロム線と銅管を長さ 20 mm のセラミックの絶縁管で覆っている。また、点火器上部の発熱部には、銅管を保護、固定するために耐熱温度 1100 °C の耐火パテを使用している。点火器下部は市販のバスコークにより固定をしている。ここで、一般的なニクロム線の融点は約 1450 °C であることが知られているが、本実験では経験的に求められたコイル状点火器の限界温度 980 °C として使用する。これは、電熱線の温度上昇かつ火炎による急激な酸化が原因であると考え、実験的に得られた結果から限界値を設定した。

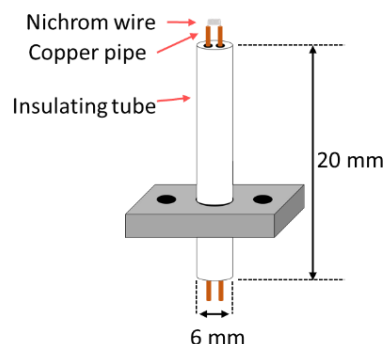


図 1.3 新しく提案する熱面点火式点火器

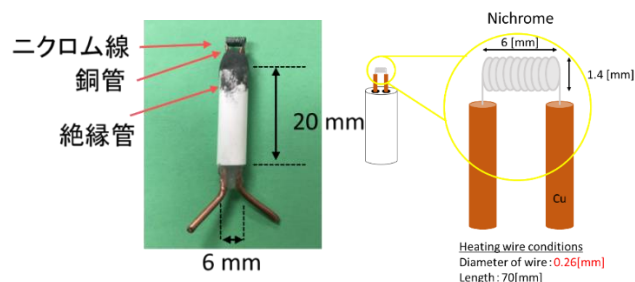


図 2.1 コイル状ニクロム細線点火器

### 3. 基礎実験

#### 3.1 実験概要

本実験の最終目標は様々な環境条件における着火実験である。ここでは基礎実験と称し、その着火実験において必要となるコイル状点火器の伝熱特性を、実験値と理論値計算を比較することで正確に把握する。コイル状点火器の加熱特性を調査することで、ニクロム線の加熱温度制御を可能にする。着火実験における電熱線の条件として、約 500 °C (ラムジェットエンジン燃料である水素着火温度かつ、ほぼ同等であるプロパン燃料着火温度) 以上であることが挙げられる。この着火温度を達成するために印加電力を過大にすると電熱線の変形、破断に繋がり、また一方で印加電力が小さいと着火温度に達しないことが考えられる。3 章の基礎実験では電熱線温度がこれらの条件を満たす印加電力範囲を特定するため、コイル状点火器の伝熱特性を調査した。

#### 3.2 自然対流下実験

##### 3.2.1 実験機器

強制対流下での実験において、コイル状点火器が有効であるのかを調査するために、まず自然対流下で伝熱特性を検証した。自然対流下実験で使用した測定機器の仕様を以下の表 3.1 に示す。また、以下の図 3.1 に自然対流下実験の様子を示す。ここでは、電源、アンプ、熱電対のみで実験を行っている。図 3.1 のように熱電対をコイル状点火器発熱部に接触させ、点火器に電源から設定した電圧をかけジュール熱を発生させる。この時の、供給電圧と電熱線温度からコイル状点火器の伝熱特性評価を行う。

##### 3.2.2 実験方法

自然対流下において、印加電力の変化による電熱線温度に与える影響を実験により調査、検討する。

本実験では、点火器に一定電圧を与えたときの経過時間、および電圧付加後、十分に時間が経過した後の平衡温度を測定した。ニクロム細線を用いた点火器を電源と直列で接続し、発熱部にジュール熱を与える。電源での電圧値をテスターにより測定し、点火器発熱部の温度を点火器発熱部に接触させた K 型熱電対を用いて測定した。これらは、電源のつまみを調節することで、印加電圧を 0 V - 3.0 V の範囲で 0.5 V 刻みで上昇させ、各点の概算電圧を実測温度と平均電流値、また温度抵抗率を考慮した抵抗値から算出した。

##### 3.2.3 付加電圧に対するコイル状点火器の平衡温度

ここでは、本研究で自然対流下におけるヌッセルト数の理論値として基本的な伝熱面形状として水平細線の熱伝達を取り上げ、以下にその表示式を示す。この式(3.1)は藤井ら[7]による自然対流下での実験データを元に平均ヌッセルト数の近似多項式を求めたものである。

また空気の物性値は膜温度  $T_f$  で計算する。この  $T_f$  は壁面温度  $T_w$  と周囲流体温度  $T_\infty$  の平均値である。また、 $\nu$  は動粘度 [m<sup>2</sup>/sec] である。

本実験では、実験値を整理するために式(3.1)を用いてヌ

$$\frac{2}{Nu} = \ln\left(1 + \frac{3.3}{C(Pr)Ra^n}\right) \quad (3.1)$$

ここで

$$C(Pr) = \frac{0.671}{1 + (0.492/Pr)^{9/16}}^{4/9} \quad (3.2)$$

$$n = \frac{1}{4} + \frac{1}{(10 + 5Ra^{0.175})} \quad (3.3)$$

ッセルト数を算出した。実際に使用した電熱線はコイル状に巻いてあるため、藤井らが提案した式(3.1)とは条件が異なるが、評価の比較指標としてこの値を用いることとする。

ここから、実験における印加電力に対する空気への熱伝達特性について検討する。印加電力に対するニクロム細線の平衡温度の推移を図 3.2 に示す。図中の実線は水平細線における自然対流熱伝達の理論値である。

図 3.2 よりコイル状点火器に印加電力を与えた場合、約 2.6 V, 700 °C までは水平細線に比べて平衡温度が高くなっている。理論値との誤差は、水平細線と本実験点火器のコイル状では形状が異なることが影響していると考えられる。このことから、同じ長さの電熱線で同じ印加電圧をかけた場合、コイル状の方が水平細線よりも空気への伝熱量が小さいということがわかる。よって、コイル状に変形させた方がより低電圧で高い温度に達することができ、より省エネな点火器として有利であると考えられる。

しかし、約 2.6 V, 700 °C を超える電力を与えるとコイル状点火器の平衡温度上昇率が突然小さくなっている。これは電熱線の変形による影響が理由として考えられる。本実験では、コイル状点火器の電熱線部分に直接熱電対を接触させている。経験上では 700 °C 以上の高温状態になった電熱線は軟化し変形し始める。実際に実験中の電熱線を見てみると、赤熱したコイル状電熱線は各線の距離が開いていた。これにより熱電対の接触が悪くなり、実際の電熱線温度よりも低い測定値が計測されたのではないかと考える。



図 3.1 自然対流実験写真

表 3.1 計測機器仕様

実験機器	メーカー	機器名称	レンジ	単位
直流安定化電源	A&D	AD 8724D	0 - 30 0 - 2.5	[V] [A]
アンプ	CHINO	DI 1000	-200 - 1370	[°C]
温度測定器	八光電機	K 型熱電対	-200 - 1000	[°C]

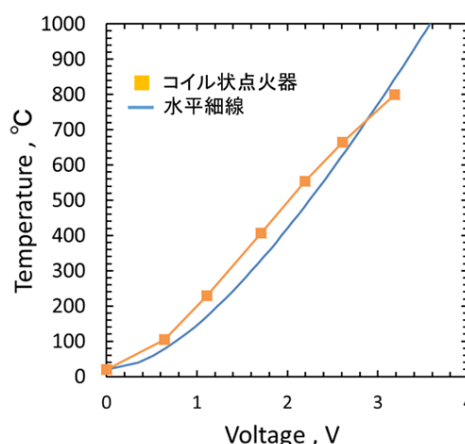


図 3.2 印加電圧に対する平衡温度



### 3.3 強制対流下実験

強制対流下において着火実験で使用するコイル状点火器の印加電圧に対する平衡温度を調査する。着火実験において、電熱線条件はプロパン燃料の着火温度約 500 °C (実用の水素燃料でも約 500 °C) 以上が必要となっている。しかし印加電圧が大きすぎると電熱線が破断してしまい、逆に小さすぎると着火温度に達しないということが考えられる。そこで本実験では、強制対流下でのコイル状点火器の伝熱特性を正確に把握することを目標とした。主流空気の流れを変化させ、その時の電熱線の平衡温度の応答を調査した。

#### 3.3.1 実験装置

本実験に用いた強制対流下実験装置の全体写真と概略図を図 3.3、図 3.4 に示す。また、図 3.5 にテストセクション周りの図面を示す。このテストセクションは本研究室のラムジェットに関する過去研究<sup>[8]</sup>にて製作されたものである。内壁は、ダクト部分と等しい断面積となるようにセメントによって埋められている。

本実験はインバータを用いて周波数を変化させることによりブローアの空気流速を調整した。ブローアから生成された空気流はオリフィスと整流筒を通過した後、テストセクションへと運ばれ点火器の伝熱面に強制対流を起こす。実験では電熱線への電源供給電圧に加え、オリフィス前後圧力差を計測し、空気流量を算出しテストセクション断面積で割ることで主流空気流速として整理した。

#### 3.3.2 実験方法

強制対流下において、印加電力の変化による電熱線温度に与える影響を実験により調査、検討する。

インバータにより調整されるブローアの周波数を 30 Hz から 60 Hz まで 10 Hz 刻みで変化させた。ブローアの周波数は空気流速に比例するため、4 通りの場合に分けて実験できる。そのそれぞれに対して自然対流下実験と同様に、点火器に一定電圧を与え十分に時間が経過した後の平衡温度を測定した。コイル状点火器を電源と直列で接続し、発熱部にジュール熱を与える。電源での電圧値をテスターにより測定し、点火器発熱部の温度を点火器発熱部に接触させた K 型熱電対を用いて測定した。電源のつまみを調節することで、印加電圧を 0 V - 3.0 V の範囲で 0.5 V 刻みで上昇させ、各点の概算電圧を実測温度と平均電流値、また温度抵抗率を考慮した抵抗値から算出した。



図 3.3 実験装置全体写真

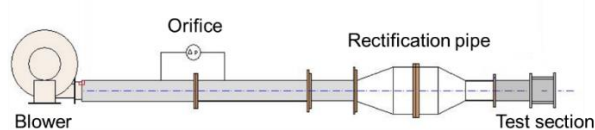


図 3.4 実験装置概略図

#### 3.3.3 実験結果

熱伝達による放熱量はヌッセルト数によって決定される。強制対流下ではヌッセルト数はレイノルズ数が支配的であり、レイノルズ数とヌッセルト数の関係を知ることで、強制対流下での伝熱特性を評価できる。そこで以下の図 3.6 にレイノルズ数とヌッセルト数の関係を実験値と理論値とで比較した。理論値は Van der が提案する水平細線の理論式より求めた<sup>[9]</sup>。ここで採用した理論値は垂直流での理論値である。1.2.1 項の電熱線に関する過去研究で前述したように、直径 1 mm 以下の細線に対する強制対流空気の場合は、垂直の場合および平行の場合の 2 通りが考えられる。本実験で使用した電熱線はコイル状に巻いている。そのため理論値と正確な比較はできないが、一つの比較指標として評価する。この図 3.6 から実験値のヌッセルト数は、低レイノルズ数においては低いが、高レイノルズ数になるにつれて水平細線理論値よりも大きくなることが確認できる。この時のヌッセルト数とレイノルズ数の実験値から関係式を最小二乗近似式で求めた。以下にその近似式(3.4)を示す。

$$Nu = 0.0491Ra + 0.725 \quad (3.4)$$

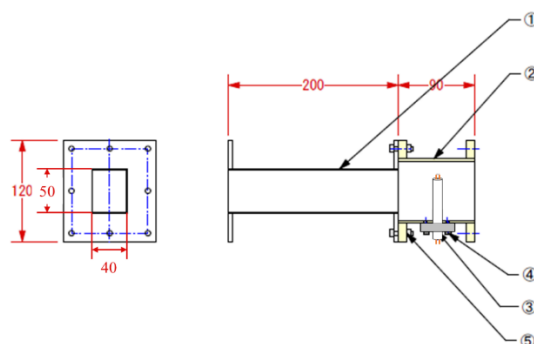


図 3.5 テストセクション断面図

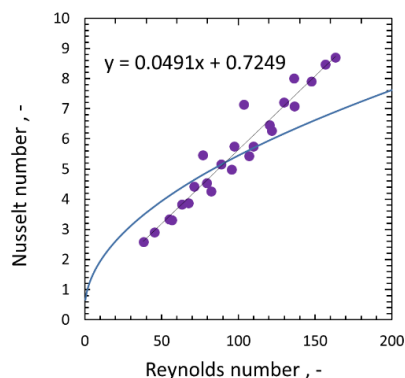


図 3.6 レイノルズ数に対するヌッセルト数

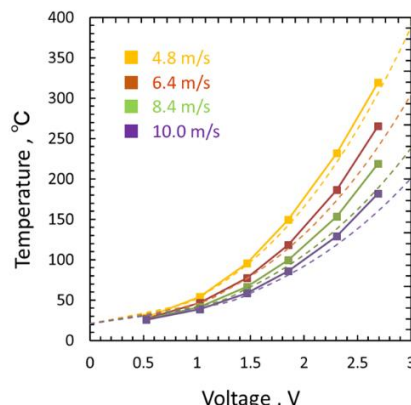


図 3.7 空気流速に対する電熱線平衡温度

図 3.7 において式(3.4)を整理式として、各空気流速に対するコイル状点火器の印加電圧に対する平衡温度の変化を実験値と比較した。これより、空気主流流速が速くなると電熱線の放熱量も大きくなり、同じ印加電圧に対して平衡温度が低くなることが確認できる。また、低流速においては実験値と理論値はほぼ等しいが、高流速においては誤差が生じている。これは、整理式として最小二乗近似式を用いたことによるものだと考えられる。

この実験値より各空気流速における電源の印加電圧と点火器平衡温度の相関式を求めた。この近似式を用いて、4章の屋外着火実験に用いるコイル状点火器温度が燃料着火温度を達成するための設定電圧を決定した。

## 4. 屋外着火実験

### 4.1 着火実験概要

#### 4.1.1 着火実験目的

本実験では、3章の基礎実験にて前述した自然対流実験と強制対流実験によって求められたコイル状ニクロム細線の伝熱特性を用いて、実際にブタン燃料とプロパン燃料を使用した着火実験を行った。ここでの実験の目的は、ブタン燃料と簡単な保炎器を用いて熱面点火式点火器における着火実験を実施することである。その後、プロパン燃料を用いて各当量比、混合気流速などのパラメータを変化させ、本研究で作成したコイル状熱面点火式点火器の着火条件範囲を特定する。

本研究ではさらに2種類の保炎器を作成し、それぞれの保炎器における着火限界の違いを調査する。着火実験の後、燃焼無しの条件下で循環領域の全圧分布を計測し循環領域滞留時間を求めた。着火限界は混合気の循環領域滞留時間と密接に関係するため、これらの実験結果から保炎性能を評価することとしている。ここで着火限界とは、着火はできているが安定的に保炎出来ていない場合を指している。着火試験における評価方法については、4.4.4項の燃焼実験結果による保炎性能評価で後述する。保炎性能を明確にすることにより、保炎の可否を示すだけでなく、より実機運用に向けた基礎研究を進めることができる。

#### 4.1.2 ブタン燃料とプロパン燃料

屋外着火実験の燃料はモル質量の近いブタン燃料とプロパン燃料を使用している。ブタン燃料は岩谷産業製のイワタニカセットガス（以下 IG と記す）と、イワタニカセットガス パワーゴールド（以下 IGP と記す）を使用している。IG と IGP は、イソブタンとノルマルブタンの2種類の含有物質があるが、それぞれイソブタンとノルマルブタンの含有量が異なる。IG はイソブタン 30 %、ノルマルブタン 70 %、IGP はイソブタン 70 %、ノルマルブタン 30 % となっている。

またプロパン燃料は「い合液化石油ガス」を用いた。含有物質は、プロパン 95 % 以上、エタンとエチレン 5 % 以下、ブタジエン 0.5 % 以下である。

以上が本実験で使用した燃料である。ブタン燃料とプロパン燃料を使用した意図は、実験条件における外的要因がある。外気温の低下により、ブタン燃料の蒸気圧がより低くなるため安定した供給が出来なくなる。そこで、低温でも蒸気圧の高いプロパン燃料を使用した。以下の表 4.1 に、それぞれの燃料仕様を示す。

### 4.2 理論 MR (質量比) 計算

ここで、当量比計算に必要な理論燃空比の計算方法を記す。ブタン燃料とプロパン燃料の場合で、それぞれモル質量から理論燃空比を算出する。完全燃焼した場合に、ブタンの理論燃空比は 6.45 %。プロパン燃料に関して同様に計算を

行くと、プロパンの理論燃空比は 6.36 % となる。

これらの値を理論燃空比として用い、ブタン燃料とプロパン燃料を使用した場合の当量比を算出した。実際の混合気の燃空比は、流入した燃料流量に対する主流空気のチョーク流量の比で算出している。

## 4.3 ブタン燃料による燃焼実験

### 4.3.1 実験機器

ブタン燃料を使用した実験は、4.4 節のプロパン燃料による燃焼実験で後述するプロパン燃料を用いた実験のための基礎実験である。ここでは、本研究で作成した点火器による熱面着火が可能か否かを確認することを第一の目標とした。そのため、燃焼器は作成せずに混合気出口に簡単な保炎器と点火器を設置しただけで実験を行い、着火の有無を調査した。本実験で使用した保炎器の概略図を以下の図 4.1 に示す。燃焼器出口は、外径 0.013 m、内径 0.0097 m の配管を使用している。3.3.4 項の実験結果より、点火器周りの混合気流速が大きいほど電熱線の放熱量が大きくなるため、強制対流下では着火温度を達成するためには点火器周囲で混合気流速を落とす必要がある。また着火においては、点火器周囲で循環領域を作り、火炎伝播速度以上の混合気滞留時間を確保する必要がある。そこで、点火器の上流部分に三角柱型保炎器を配置した。保炎器の材質はアルミを使用し、上流接触部分を鋭角に切削したものを用いた。

### 4.3.2 実験装置

実験機器の外観と系統図を図 4.2, 4.3 に示す。実験では、コンプレッサーを用いて空気流を生み出し、レギュレータによって主流空気圧力を調整することで空気流量を調整している。コンプレッサーから流入された空気は2股に分かれており、片方は主流空気として流れる配管、もう一方は燃料の配管の制御を行う電磁弁に繋がっている。この電磁弁の開閉により、空気圧をかけることで空圧弁の開閉を行う。電磁弁への電源の入切により燃料流入のタイミングを決定する。本実験の主要な配管経路として主流空気が流れる配管と燃料の配管の2つある。

主流空気が流れる配管には、オリフィスが配置してあり、これにより主流空気が安定的に供給される。また、オリフィス前には管内温度と管内圧力を測定するための熱電対と圧力計が配置されている。レギュレータによって調整された主流空気は、これらの実験機器を通り、燃焼器に流入する。

表 4.1 燃料仕様

物質名	モル質量 [g/mol]	発火点 [°C]	蒸気圧(20°C) [MPaG]	沸点 [°C]
ノルマル ブタン	58.1	430	0.11	-0.5
イソブタン	58.1	430	0.11	-11.7
プロパン	44.1	467	0.73	-42.09

※出典：備える.jp

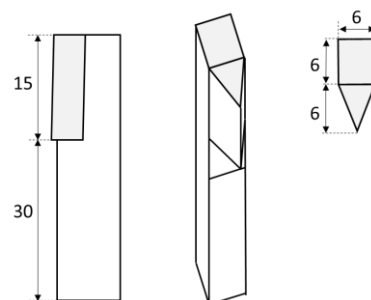


図 4.1 保炎器[mm]

また燃料の配管では、ブタンガスボンベから流入されたブタンガスが空圧弁と調整弁により制御されている。空圧弁の圧力供給用として前述した電磁弁が配置してあるため、この電磁弁の電源を ON しない限り主流空気と混合されないようになっている。さらに、流量計の下流に逆止弁を配置している。この逆止弁は、逆止弁下流で混合気が発生されないよう安全のために用いている。この燃料配管は、主流空気の配管と燃焼器直前で合流しており、主流空気に燃料が流入することで予混合気が発生され、燃焼器に流入する仕組みとなっている。

#### 4.3.4 実験条件

以下の表 4.2 にブタン燃料を使用した場合の実験条件を示す。コンプレッサーにより流入された空気を、レギュレータによって 150 kPaG に制御する。これにより配管出口の空気流速が 10.5 m/s と設定される。ここで、供給電圧を初期電源電圧の 7.0 V から 0.5 V 刻みで 8.0 V まで流し、点火器温度を変化させた場合に着火するか否かを調査する。ここでは、あくまで着火が目的であるので、着火するまで電による着火性能は調査できていない。また、保炎についてもここでは実験を行っていない。全温は主流空気配管内の温度を K 型熱電対により測定している。

#### 4.3.5 実験結果

以下の表 4.3 に実験条件と結果を示す。試験番号 4 の条件で着火に成功した。ブタン燃料流入後、着火までは約 5 秒かかり、またブタン燃料が点火器に流入した瞬間ニクロム線の赤熱が弱くなり、時間経過とともに徐々に赤熱が回復することが確認された。これはブタン燃料流入時に、低温により液体となったブタン燃料が流れ込み、一時的に混合気

温度と点火器電熱線温度が低くなったためであると考えられる。またブタン燃料分の流量が増加したことも要因の一つと考えられる。

また以下の図 4.4 に着火時の火炎の画像を表す。この図は着火 3 秒後の火炎の様子であり、大きな火炎が確認できた。火炎は時間が経過するにつれて赤色になり最終的に点火器部が非常に明るく発光したが、点火 7 秒後に突然火炎が消滅した。実験後、点火器の電熱線を確認すると中心部分で断裂していることが確認できた。これは、点火後の大きな火炎が電熱線部分に接触し、急激な酸化によるものであると考えられる。電熱線が破断したことにより、高温状態を保持できなくなり火炎は消滅したと考えられる。

以下の図 4.5 は試験番号 4 の条件における当量比の時間変化を示している。空気主流流量はほぼ一定であるため、この図からブタン燃料流入後、約 5 秒でブタン燃料流量が安定していることが分かる。このことから、燃料流入時間は安定状態に達するまで 5 秒以上必要であり、ほぼ目標の当量比に近づく。また印加電力は 7.46 V で不着火、8.03 V で着火したことから、当量比 4.0 付近では印加電圧が 8.0 V 程度

表 4.2 実験条件

パラメータ	記号	実験条件	単位
空気全圧	P <sub>0</sub>	150	[kPaG]
全温	T <sub>0</sub>	6.7 - 6.9	[°C]
燃料タイプ	Type	ブタン	[-]
供給電圧	E	7.1, 7.5, 8.0	[V]
ブタン流量	Q <sub>B</sub>	4.0	[L/min]
点火時間	T	1.0 - 20	[sec]

表 4.3 ブタン燃料着火実験条件

No.	外気温 [°C]	電源電圧 [V]	ブタン流量 [L/min]	点火時間 [sec]	結果
1	6.9	7.11	4.0	1.0	×
2	6.9	7.11	4.0	10.0	×
3	6.9	7.46	4.0	20.0	×
4	7.1	8.03	4.0	20.0	○

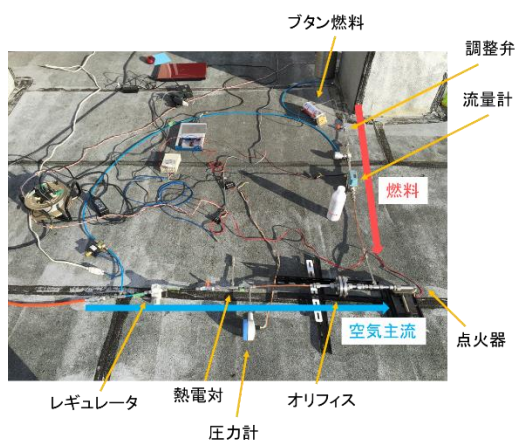


図 4.2 着火実験外観

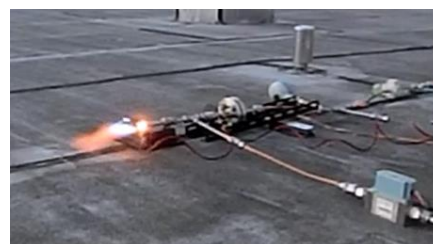


図 4.4 着火写真

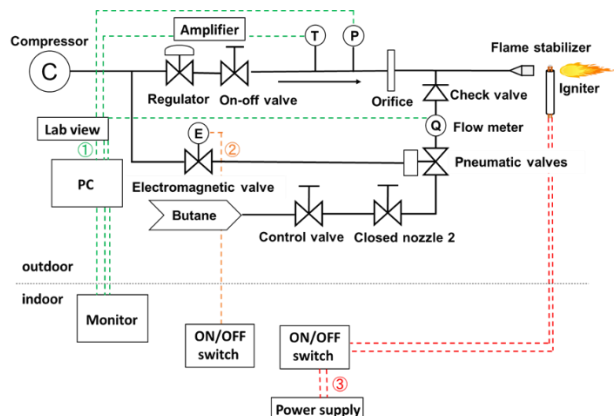


図 4.3 着火実験系統図

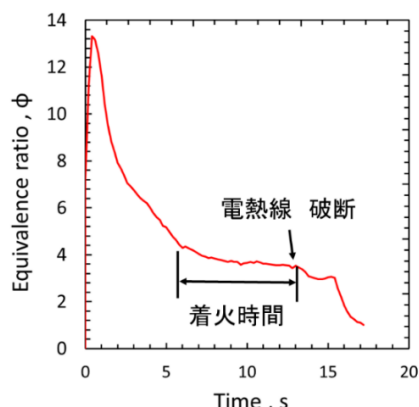


図 4.5 当量比の時間変化



で着火可能であると分かった。以上より本実験で作成したコイル状点火器は当量比と印加電圧を調整することで着火が可能であることが確認できた。次の4章の着火実験では、この結果を基に燃焼器を作成し、実験を行った。

## 4.4 プロパン燃料による燃焼実験

### 4.4.1 実験装置

以下の図4.6に本実験の外観、図4.7に経路図を示す。実験では、コンプレッサーを用いて空気流を生み出し、レギュレータによって主流空気圧力を調整することで空気流量を調整している。コンプレッサーから流入された空気は2股に分かれており、片方は主流空気として流れる配管、もう一方は燃料の配管の制御を行う電磁弁に繋がっている。この電磁弁の開閉により空圧弁に供給する空気を制御する。電磁弁の電源の入切により燃料流入のタイミングを決定する。本実験の主要な配管経路として主流空気が流れる配管と燃料の配管の2つある。

主流空気が流れる配管には、オリフィスが配置してあり、これにより主流空気が安定的に供給される。また、オリフィス前には管内温度と管内圧力を測定するための熱電対と圧力計が配置してある。レギュレータによって調整された主流空気は、これらの実験機器を通り、燃焼器に流入する。

また燃料の配管では、プロパンガスボンベから流入されたプロパンガスが空圧開閉弁と調整弁により制御されている。空圧弁の空気供給配管系には前述した電磁弁が配置してあるため、この電磁弁の電源をONしない限りプロパンが主流空気と混合されないようになっている。さらに、流量計の下流に逆止弁を配置している。この逆止弁は、逆止弁下流で混合気が発生されないよう安全のために用いている。この燃料配管は、主流空気の配管と燃焼器直前で合流しており、主流空気に燃料が流入することで予混合気が発生され、燃焼器に流入する仕組みとなっている。

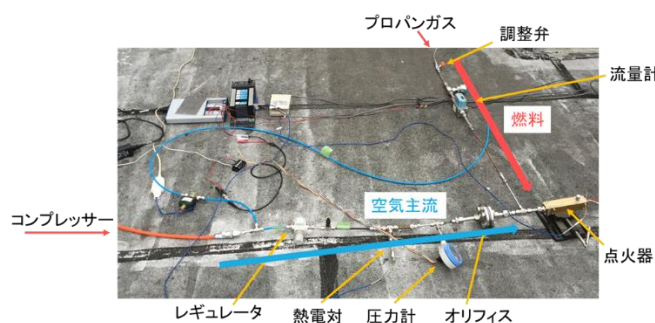


図 4.6 着火実験外観

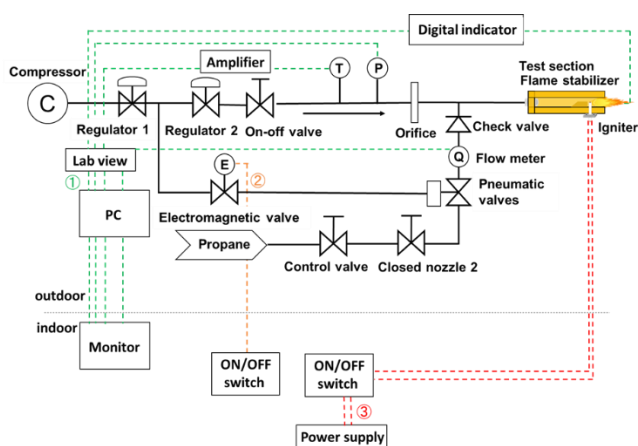


図 4.7 着火実験系統図

### 4.4.2 燃焼器

以下の図4.8に本実験で作成した燃焼器の断面図と寸法、図4.9に2種類の保炎器形状を示す。この燃焼器の材質は真鍮を使用している。熱伝導性が比較的高いため、局所的な加熱にも耐えられると考え使用した。また、保炎器下流に点火器が配置できるようになっている。この点火器は土台と一体となっており、燃焼器にボルトで固定されている。

また、本実験では保炎器を2種類用いた。それぞれの保炎器は、放電加工により精密に加工されている。ここで3章の基礎実験で述べたように、強制対流下では伝熱面に接触する主流速度が大きいほどノズセルト数が増加し、加熱面からの放熱量が大きくなることが分かっている。そこで、保炎器を用いることで電熱線温度を保つことができ、より低い供給電力で着火温度を達成できると考えた。また、保炎器を用いることで下流に混合気の循環領域を作り出すことができ、混合気の温度をも上昇させることが出来る。点火器の形状は台形と三角形の2つ使用し、それぞれの形状の違いによる保炎性能への影響を調査した。

### 4.4.3 実験条件

以下の表4.4にプロパン燃料を使用した場合の実験条件を示す。コンプレッサーにより流入された空気流を、レギュレータによって150, 200, 240, 280 kPaGの4通りに分けて設定する。これにより、燃焼器入口の空気流速が5.18, 6.21, 7.04, 7.87 m/secとなる。それぞれの場合において、調整弁によりプロパン流量を2.5-6.3 L/minの間で適当に振り当て、当量比を変化させた場合に着火するか否かを調査する。供給電圧は7.4Vで一定とする。これは、3章の基礎実験で求められた点火器温度の近似曲線より、プロパン着火温度467℃を超え、且つ経験的に求められたコイル状点火器の限界温度980℃を超えない最大温度として設定している。そのため、本実験では点火器温度の違いによる保炎性能は調査できていない。また、燃焼時間は5secとしているが、これは混合気を流入している実時間である。実際の点火器点火時間は3secであり、点火器を加熱していない2secの間で保炎の有無を確認する。また、火炎全温は火炎温度を燃焼器出口に配置されたK型熱電対により測定している。

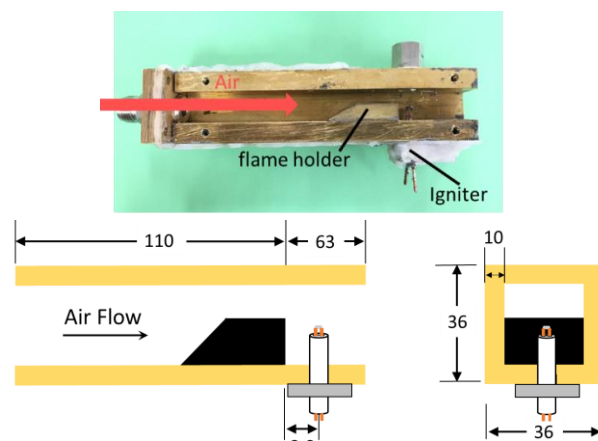
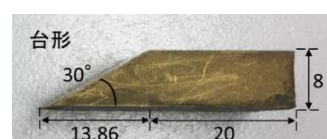
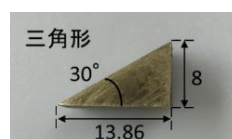


図 4.8 燃焼器断面図と寸法



(a)台形



(b)三角形

図 4.9 保炎器形状[mm]

#### 4.4.4 燃焼実験結果による保炎性能評価

収録されたデータより、当量比と空気流速の関係とその際の保炎の可否を調査した。以下の図 4.10 は着火時の写真である。

以下の図 4.11, 4.12 に保炎器形状が台形と三角形の場合の各当量比と空気流速における保炎の可否を示す。縦軸に空気流速、横軸に当量比を取っており、完全保炎を○、不完全保炎を△、着火無しを×として評価している。ここでの不完全保炎△を着火限界と考え近似線を取り、保炎器形状が台形の場合と三角形の場合で比較する。

保炎器形状が台形と三角形の両方の場合において、当量比が  $\phi < 1$  の希薄領域であるため、当量比  $\phi$  が大きいほど着火しやすいと考えられる。また 3 章の基礎実験より、空気流速が高いほど着火しにくいことが分かっている。そのため保炎形状の違いに関わらず、空気流速が高くなるにつれて着火限界の当量比が高く推移していることが確認できる。また保炎器形状が台形の場合、着火限界の当量比が約 0.85 から 0.95 の範囲であるが、三角形の場合、着火限界の当量比が約 0.75 から 0.85 の範囲である。この結果から、三角形の方が、当量比の 10 % 程度低いところで着火限界に達しているため、台形に比べると着火しやすい保炎器形状と考える。

#### 4.4.5 全圧分布測定 (燃焼なし)

台形保炎器と三角形保炎器を使用した場合の着火限界の違いを考察するために、混合気流方向に対して保炎器下流の全圧分布を、全圧管を用いて計測した。ただし、ここでの実験では燃焼は行っていないことに留意されたい。全圧管を保炎器背面から 1 mm ずつ後退させる。その度に高さも同様に 1 mm ずつ燃焼器底面から上面まで上昇させ、全圧を記録していく。保炎器下流の混合気循環領域 (差圧がマイナスとなる範囲) が底面にて存在しなくなるまで後退させる。すべて正圧になった時点で計測を終了する。

測定結果は Excel を用いて等高線で表し以下の図 4.13, 4.14 に示す。本実験では、コンプレッサー圧力を 150, 240 kPa で計測した。どちらの場合も全圧分布における傾向が同じであったため、ここでは 240 kPa のみ取り上げる。ここでは、横軸は保炎器背面からの水平距離、縦軸は燃焼器鉛直方向の高さを示す。ここで示す赤線は保炎器下流の混合気

表 4.4 実験条件

パラメータ	記号	実験条件	単位
空気全圧	$P_0$	0.15, 0.2, 0.24, 0.28	[kPaG]
全温	$T_0$	約 6.0 - 25.0	[°C]
燃料タイプ	Type	プロパン	[-]
供給電圧	E	7.4	[V]
プロパン流量	$Q_p$	2.5 - 6.3	[L/min]
点火時間	T	5.0	[s]

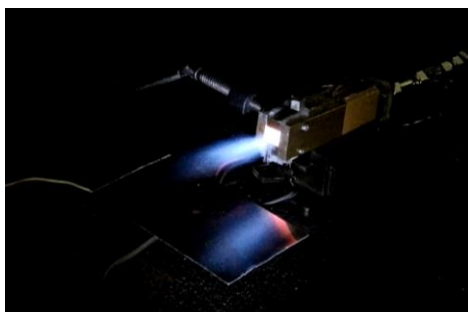


図 4.10 着火写真

循環領域と混合気流との境界線である。本実験における全圧管を用いた計測では、逆流領域における全圧を正しく計測することができない。したがって循環領域における全圧分布は示さないこととする。循環領域外の圧力分布は外気大気圧との差圧で計測し、0 - 150 Pa の間で濃淡により評価する。色の濃い部分が全圧の低い部分、薄い部分が全圧の高い部分である。図 4.15 の台形保炎器下流の流れにおいては最大全圧が約 140 Pa となっており、図 4.16 の三角形保炎器下流の流れにおいては最大全圧が約 80 Pa となっている。共に同じ全圧範囲で評価しているので三角形の保炎器を用いた場合は、色の濃淡に差があまりないことが確認できる。

ここで、保炎器形状の違いによって着火限界に差が表れたことについて検討する。基本的に保炎器下流の混合気循環領域を中心に保炎されるものとし、循環領域下流の流速 (図 4.17 における速度  $v_2$ ) と循環領域長さ  $L$  から循環領域における混合気滞留時間  $\tau$  を定義する。 $\tau$  の定義式を以下の式(4.3)に示す。

$$\tau = \frac{L}{v_2} \quad (4.3)$$

この循環領域における滞留時間  $\tau$  は着火安定における重要なパラメータである。着火成立条件は、この循環領域における滞留時間  $\tau$  が燃料の臨界燃焼時間  $\tau_c$  を上回ることとする。例として、当量比 0.7-1.0 の場合、ガソリン-空気混合気の臨界燃焼時間  $\tau_c$  は 0.3 - 1.1 msec である<sup>[12]</sup>。(図の転載は基本的にアウト。)

滞留時間が短ければ、臨界燃焼時間  $\tau_c$  を下回り、火炎は消える可能性がある。逆に言えば、循環領域における滞留時間  $\tau$  が長ければそれだけ着火しやすくなるということである。そこで、この定義式(4.3)を用いて本実験の循環領域における滞留時間をそれぞれの保炎器形状で比較する。三角形の保炎器の場合、循環領域長さ  $L$  が台形の場合と比べて非常に大きい。循環領域長さ  $L$  が非常に大きい場合循環領域における滞留時間  $\tau$  が長くなり、その結果、三角形の保炎性能が高かったと考えられる。

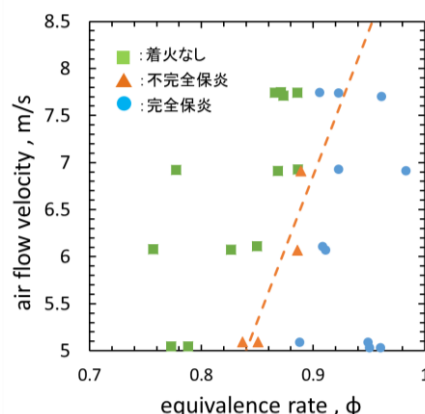


図 4.11 各当量比と空気流速における保炎の可否 (台形保炎器を用いた場合)



## 5. 結論

本研究では超小型ラムジェットエンジン内燃焼器に使用する、ジュール加熱を用いたコイル状熱面点火式点火器を提案した。そして基礎研究により熱面点火式点火器の伝熱特性を明確にし、その結果を基に着火実験を行った。着火実験より、本研究で提案したコイル状点火器を使用した場合の着火・保炎条件範囲を特定し、2種類の保炎器形状の違いによる保炎性能への影響を調査した結果、得られた結論は以下の通りである。

### 基礎実験

- 自然対流，強制対流下の両方でコイル状ニクロム細線の加熱特性を調べ，実験結果より各空気流速における電源の印加電圧と点火器平衡温度の相関式を求めた。この近似式を用いて，屋外着火実験に用いるコイル状点火器温度が燃料着火温度を達成するための設定電圧を決定した。

### 屋外着火実験

- 空気-ブタン燃料の混合気を用いた着火実験により，本実験で作成したコイル状熱面点火式点火器による着火が可能であることを確認できた。
- 空気-プロパン燃料の混合気を用いた着火実験により，2種類の保炎器形状を用いた場合の各当量比における着火限界を求めた。保炎器形状が台形の場合，着火限界の当量比は約 0.85 から 0.95 の範囲であるが，三角形の場合，着火限界の当量比は約 0.75 から 0.85 の範囲である。これより三角形保炎器の方が，当量比の10%程度低いところで着火限界に達しているため，台形に比べると着火しやすい保炎器形状と考える。

### 全圧分布測定

- 台形保炎器と三角形保炎器を使用した場合の着火限界の違いを考察するために，混合気流方向に対して保炎器後方の全圧分布を，全圧管を用いて計測した。三角形保炎器を使用した場合，循環領域長さ  $L$  が台形保炎器に比べ非常に大きいため循環領域における滞留時間  $\tau$  が長く，保炎性能が高かったと考えられる。

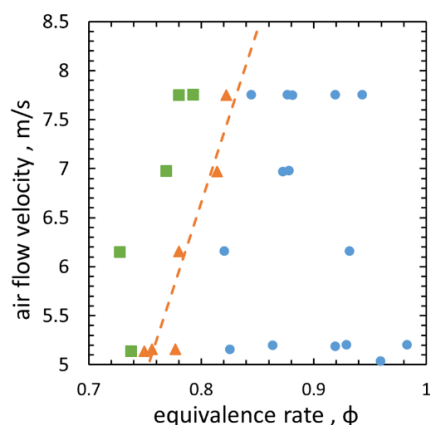


図 4.12 各当量比と空気流速における保炎の可不可 (三角形保炎器を用いた場合)

## REFERENCES

- [1] 丸 祐介 他；高々度気球を用いた超音速空気吸込式エンジンの飛行実験計画，日本マイクログラビティ応用学会誌 Vol. 26, No. 1, p. 43 – 50, (2009)
- [2] 藤井 哲；空気の水平細線まわりの自由対流に関する理論と実験，日本機械学会論文集(B 編) 48 巻 431 号，p1312 – 1319, (昭和 57 年)
- [3] 佐野 雄二 他；細線電熱に対する絞り板の影響，第 30 巻 第 2 号，p135, (1966)
- [4] 佐野 雄二 他；空気流と細線との間の伝熱係数 6, 第 28 巻 第 4 号，p257, (1963)
- [5] McAdams, W.H. ; Heat Transmission 3<sup>rd</sup> ed. P.259
- [6] 中嶋 賢二；ラムジェットエンジン点火器に用いるニクロム細線の加熱特性，(2015)
- [7] 藤井 哲 他；空気の水平細線まわりの自由対流に関する理論と実験，日本機械学会論文集(B 編), 48 巻 431 号，(昭 57-7).
- [8] 森村 俊紘；ラムジェット燃焼器におけるインジェクタ周り流れ場の特性，p2 – p5, (2014)
- [9] Van der Hagge Zilinen,B,G ; Appl. Sci. Res. A-6 129, (1953)

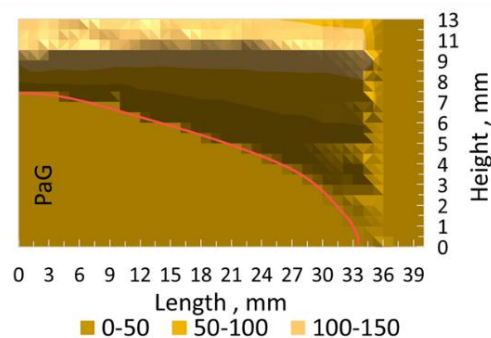


図 4.13 全圧分布 (台形保炎器を用いた場合)

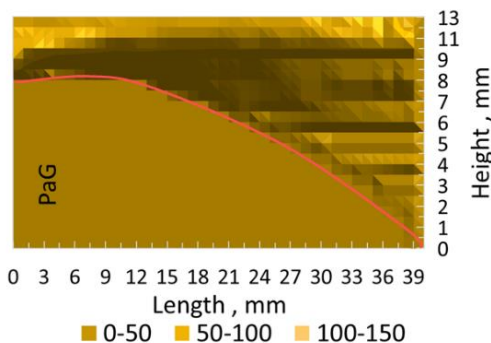


図 4.14 全圧分布 (三角形保炎器を用いた場合)