

低圧環境下におけるジュール加熱を用いた点火器の温度制御

Temperature Control of Igniter Using Joule Heating Under Low-Pressure Conditions

*広瀬 航 (静岡大学院) 吹場 活佳 (静岡大学)
 中嶋 賢二 (静岡大学) 丸 祐介 (JAXA)

*Wataru HIROSE¹ Katsuyoshi FUKIBA¹ Kenji NAKASHIMA¹ Yusuke MARU²
¹ Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Shizuoka University
 3-5-1 Jyohoku, Naka-ku, Hamamatsu 432-8561
² 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。ここで用いられるラムジェットエンジンの、ジュール加熱を用いた点火器を作成し、その特性を評価することを目的とする。燃烧器に流入する空気の圧力は飛行条件により変化する。本実験では、様々な圧力環境における点火器の加熱特性を実験により調査した。

NOMENCLATURE

k	[J/K]	Heat capacity
C_p	[-]	Pressure drop coefficient
Q_{in}	[W]	Electricity of apply
Q_{out}	[W]	Heat quantity
Nu	[-]	Nusselt number
Ra	[-]	Rayleigh number
Q_{Tc}	[W]	Heat quantity to thermocouple
Q_{conv}	[W]	Convection radiation heat
Q_{tr}	[W]	Heat quantity caused by heat radiation

1. 緒言

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。^[1] 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。今回実施された 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ものの、実験システムとしての実証はできていない状況である。そこで、実験システムとしての実証実験にあたり自由落下中のロケットブースターの確実な着火を課題として設定し、H28 年度実験として新しく実験機システムを構成した。実験機部は、BOV#3 から相似形状のままスケールダウンしたものを、kBOV#1 と呼称する。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、サイズの制約などの影響から圧縮機部分等を簡略化したラムジェットエンジンを搭載する。ここで用いられるラムジェットエンジンの点火器として、従来では火花点火式点火器が用いられていたが、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器が大型化するデメリットが存在する。そこで以下の図 1 に示すような、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流入させ点火する方法であるが、直列回路を用いることから点火ノイズの発生が小さく、さらに、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。一方、燃烧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。特に H28 年度に行われる kBOV#3 を用いた飛行実験は、飛行プランが未定であるため、広い気流条件（全圧:0.5~1.0atm, 気流流

速:10~40m/s) 下での着火が要求されている。そこで本実験では、点火器に着目し、様々な圧力環境におけるジュール加熱を用いた熱面点火式点火器の加熱特性を実験により調査した。

2. 実験装置

本実験では以下の図 1 のようなニクロム線と白金線を用いた点火器を作成した。(白金線点火器については 5. 低圧環境下実験で後述する。) 長さ 70mm のニクロム線を銅管に圧着し、銅管を絶縁体である長さ 100mm のセラミックで覆っている。このとき、ニクロム線の形状は、より気流への放熱量を少なくするため、内径 1mm のコイル状に巻いてある。このコイル状の部分に、K 型熱電対を設置することで、電熱線温度を計測している。ここで、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。本実験では、一般的な電熱線としてニクロム線を用いる。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。本実験では常圧環境下でニクロム線を用いて加熱実験を行う一方、低圧環境下での実験では白金線を使用した。その理由として、低圧環境下での実験では真空チャンバを作成し使用したため熱電対の設置が困難であり、熱電対を使用しない温度測定方法として白金測温抵抗体を用いたためである。ニクロム線と白金線はそれぞれ、市販のものを使用したため、以下の図 2 の様に、仕様に多少の誤差があることに留意する。

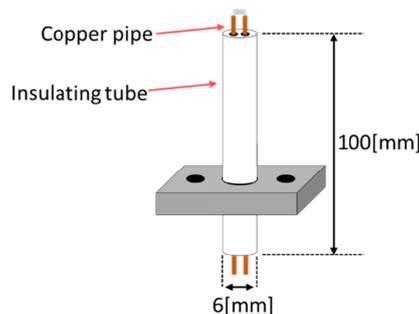


Fig1. Schematic view of igniter

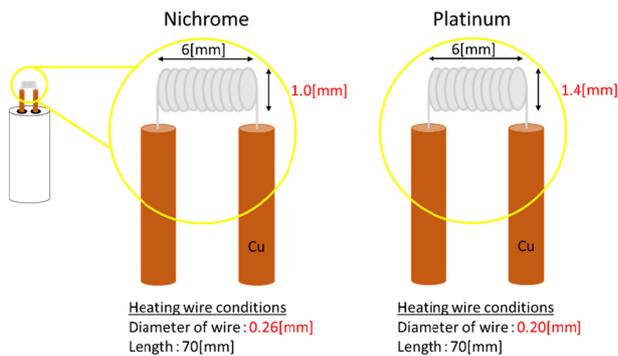


Fig.2 Specifications of Nichrome and Platinum wire

2.1 実験条件

本実験で考慮した各環境条件として、①大気圧下自然対流、②大気圧下強制対流、③低圧環境下自然対流で実験を行った。これらの様々な環境下で、熱面点火式点火器の加熱特性を理解することで、ニクロムと白金細線の加熱温度制御を可能にする。電熱線の条件として、500℃（ラムジェットエンジン燃料である水素着火温度）以上であること。また、出力が過大になると電熱線の破断、変形に繋がり、一方で出力が小さいと着火温度に達しないことが考えられる。そのため、実験を行う上で、電熱線温度がこれらの範囲の中に納まるよう加熱を行った。

2.1 評価方法

伝熱特性を正確に把握するために必要な要素として、ヌッセルト数が挙げられる。ヌッセルト数とは、流体とそれに接する物体との間の対流による伝熱の大きさを表す無次元数のことを指している。そこで、電熱線長さや太さに関らず比較することができるヌッセルト数を用いて伝熱特性を評価することにする。また、ヌッセルト数は電熱線形状に依存することから、その電熱線形状に最適な式を用いる必要がある。先行研究として円柱（太線）や、細線などはデータが存在しているが、本実験で使用しているコイル状かつ細線に適した式は過去にデータが存在していない。自然対流については、ヌッセルト数とレイリー数、強制対流についてはヌッセルト数とレイノルズ数で評価することにする。ここで、レイリー数とは自然対流における熱伝達を特徴づける無次元数のことである。

3. 大気圧環境下実験

本実験の目的は広い環境条件において安定した点火を可能にすることである。その前提条件として、大気圧環境下での安定着火が求められる。そこで、ここでは低圧環境下での点火実験に向けて(1) 大気圧環境下、自然対流、(2) 大気圧環境下、強制対流、の2つの環境条件において、ニクロム電熱線を用いた伝熱特性を調査する。

3.1 自然対流

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。

3.1.1 実験方法と条件

ニクロム細線を用いた点火器を30V、2.5Aまで出力できる電源と直列で接続し、発熱部にジュール熱を与える。計測項目として、電源での電流値をテスターにより測定し、点火器発熱部の温度は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0V~3.0Vの範囲で0.5V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、また温度低効率

を考慮した抵抗値から算出した。以下の表1に今回使用したニクロム線条件を示す。

Table 1. Condition of the Nichrome wire

Density [kg/m ³]	Mass [kg]	Specific heat [J/kgK]	Temperature coefficient [1/T]
7624	2.83E-05	461	5.00E05

3.1.2 実験結果

ニクロム細線における印加電力によ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に示す。図中の点線は水平細線における自然対流熱伝達の理論値である。理論値の計算には、藤井らによって提案されている平均ヌッセルト数を求める式を用いた。^[2]これより、実験で用いたニクロム細線の放熱量を算出し、発熱量と放熱量が等しい時に平衡温度となるとし、発熱量と平衡温度の関係を求めた。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。コイル状の方が同発熱量に対して高温状態を保持できることが分かる。ただし、700℃を超えた時に細線理論値よりも放熱量が高くなることが確認された。kBOV#1に搭載されるラムジェットの水素燃料発火温度は500℃であり、その時の発熱量（電力）は約2.5Wと非常に小さな電力である。このことから、本実験点火器は乾電池程度の小さな電源でも動作可能であることがいえる。

また、図4に実測値と理論値（水平細線、円柱^{[2],[3]}）のレイリー数とヌッセルト数の関係を示す。この図より、本実験点火器のヌッセルト数は水平細線の値よりも低い、円柱形状より高くなることが確認できた。つまり、自然対流下では、本実験点火器の形状は、円柱形状よりも放熱量が高く、水平細線よりは小さいことが分かった。

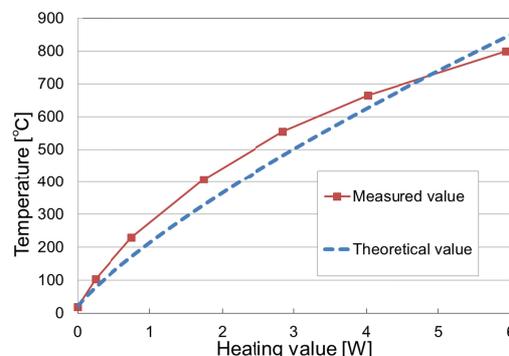


Fig3. Igniter temperature versus electric power : comparison between the measured value and the theoretical value

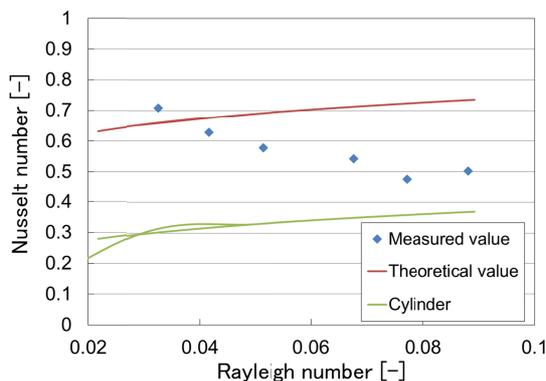


Fig4. Rayleigh number versus Nusselt number : comparison between the measured value and the theoretical value

3.2 強制対流

ここでは、強制対流下での点火性能を調査するためにニクロム細線に、ブローアから設定流量の気流を流し、本実験のコイル状ニクロム細線点火器を用いて伝熱特性を調査する。

3.2.1 実験方法と条件

強制対流下実験装置の全体図とテストセクション拡大図を図6と図7に示す。本実験はブローアにより管内に強制対流を生み出す。ブローアからの空気流はオリフィスを通じたのち整流筒へと運ばれ、その後テストセクションにおいて点火器に強制対流熱伝達を起こす。実験では3.1で示したニクロム線への供給電圧等に加え、オリフィス前後圧力とブローア周波数を計測し、流量を算出してテストセクション断面積で割ることで主流流速とした。

3.2.2 実験結果

図8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^[4]。実験値のヌッセルト数は、レイノルズ数が増加するにつれて、水平細線理論値よりも大きくなることが確認できる。

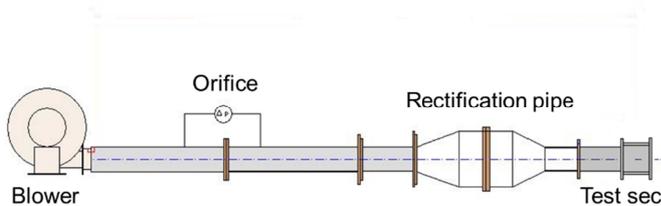


Fig6. Schematic drawing of a experimental apparatus in forced convection

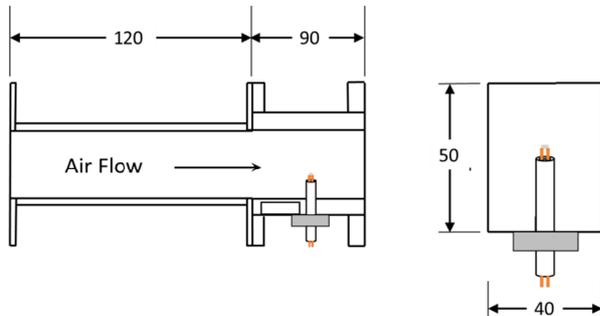


Fig7. Magnification of the test section

図8よりヌッセルト数とレイノルズ数の関係式を示す。ここでの細線ヌッセルト数は Van der が提案する水平細線の理論式より求めた^[5]。これより、レイノルズ数が増加すると水平細線理論値よりも実験値は大きくなることが確認できる。そこで、図8よりヌッセルト数とレイノルズ数の実験値から近似式を求めた。以下にその近似式(1)を示す。

$$Nu = 0.0491 \times Ra + 0.725 \quad (1)$$

図9において、式(2)を用いて算出した入力電圧に対する平衡温度の変化を実験値と比較した。結果として、高電圧時にずれを生じるものの、全体として実験結果をよく再現できることが分かった。この実験データを用いて、後述する4.屋外点火実験において、使用する燃料の点火温度に達する

よう点火器の温度調整を行う。

$$V = \sqrt{Q \times R} = \sqrt{Q(L \cdot \gamma) \cdot (1 + \beta T)} \quad (2)$$

ここで、電熱線長さ L m, 比抵抗 γ Ω/L , 温度低効率 β $1/T$ とする。

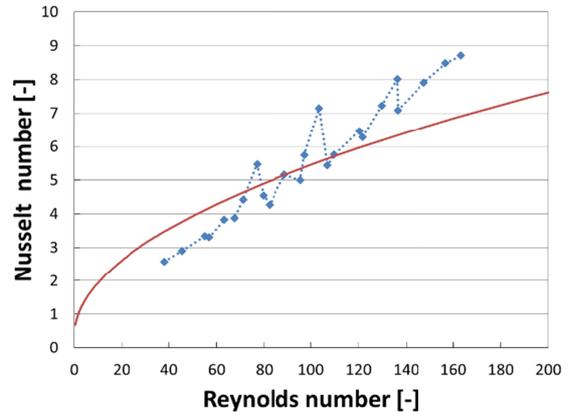


Fig8. Magnification of the test section

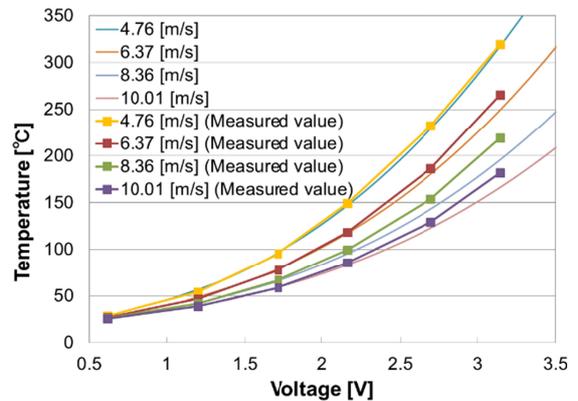


Fig9. Magnification of the test section

3.2.3 熱電対による影響

ニクロム線温度を測定する際、熱電対をコイル状に巻いたニクロム線内部に接触させている。このときの現象として、赤熱を保った電熱線に室温と同じ温度の熱電対を近づけると、赤熱面の色が赤から黒（ニクロム線常温の色）に変化することが確認できた。このことから、電熱線温度を測定する際、熱電対側に熱の逃げがあるのではないかと考えられた。そこで、以下の図10の様に実際に発生している熱量を Q_{conv} 、電源電圧から与えられた熱量を Q_{in} 、熱電対に吸収される熱量を Q_{Tc} として仮定すると、以下の式(3)のように仮定できる。

$$Q_{in} = Q_{conv} + Q_{Tc} \quad (3)$$

この関係式から、熱電対を考慮していないヌッセルト数と、熱電対の影響を考慮したヌッセルト数の値を比較できる。

熱電対を考慮していないヌッセルト数 : $Nu = \frac{d}{\lambda} \cdot \frac{Q_{in}}{(T_w - T_{\infty})S}$

熱電対を考慮したヌッセルト数 : $Nu_{Tc} = \frac{d}{\lambda} \cdot \frac{Q_{conv}}{(T_w - T_{\infty})S}$

$$Nu > Nu_{Tc}$$

熱電対を考慮していないヌッセルト数は、熱電対を考慮したヌッセルト数より大きい。つまり、実放熱量は白金線から熱電対に逃げた熱量分、白金線から自然対流への放熱量は小さくなっているはずである。図9では、理論値よりも白金線温度が小さくなっているが、これには熱電対の放熱

量分影響があると考えられる。以上のことから、図 9 の理論値と実験地の誤差は熱電対によるものと考えられる。

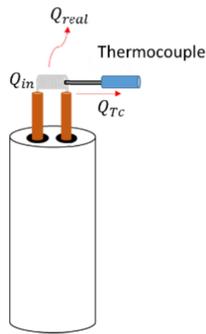


Fig.10 Schematic view of igniter with thermocouple

また、ニクロム線温度を測定する際、熱電対に逃げた熱と、それ以外に銅管に逃げた熱も考えられる。これは、今の段階で測定できていない。今後の課題として、銅管による熱損失の影響を定量的に考察する必要があると言える。

4. 屋外着火実験

大気圧環境下で実験を行った結果、強制対流下での点火器の温度制御が可能となった。そこで、屋外において実際に燃料を用いて着火実験を行った。以下の図 11 に着火実験の系統図、また表 2 に着火実験における実験条件を示す。

Table 1. Condition of the 4th Ignition experiment.

Test number	Supply Voltage [V]	LPG flow rates [L/min]	Ignition time [s]	Consequence
1	7.11	4.0	1.0	×
2	7.11	4.0	10.0	×
3	7.46	4.0	20.0	×
4	8.03	4.0	20.0	○

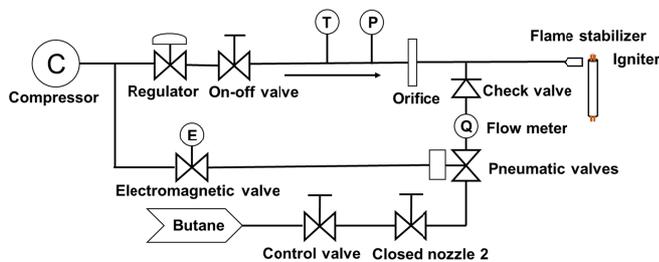


Fig11. Schematic drawing of a experimental apparatus in ignition experiment

4.1 実験方法

図 9 の結果より、流速が大きいほど放熱量が大きくなるため、自然対流下と比べて高温状態を保つためには高電力が必要である。したがって、本実験流れ場において着火温度を達成するためには点火器周囲で流速を急激に落とす必要がある。そこで、点火器の上流部分に三角柱型保炎器を配置し放熱量を下げるよう試みた。

本着火実験では、コンプレッサー内の高圧空気により空気を生み出し、そこにブタンガスを噴射し、混合ガスを作り出して点火器上流へ流す。この空気流については、オリフィスの上流圧が 150kPaA になるようにレギュレータを調節することで、チョーク状態を保つ。全圧 150kPaA において、空気チョーク質量流量は 0.89 g/s である。またブタン質量流量は 0.16 g/s になるように調節弁を調節した。当量比はブタン流量と空気流量から算出し、2.92 とした。

実験手順として、閉止弁 1 を開放し管内に空気流がある状態で点火器に 7-8 V の印加電力を与える。電力供給後 20s (自然対流下実験図 5 において、点火器最高温度に達するまでの所要時間) で電磁弁を開放しボタンを主流内に流入し混合気を生成する。流入後 20s で電磁弁を閉じ、点火器への電力供給を止める。ボタン燃料流入中で着火の有無をビデオで記録した。

4.2 実験結果

表 2 における試験番号 4 の実験で着火に成功した。電磁弁を開放しボタンが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増すことが確認された。これはボタン燃料流入時に、低温により液体となったボタン燃料が流れ込み、一時的に混合気温度が小さくなり、またボタン燃料分の流量が増加したためと考えられる。

図 12 に点火時の火炎の画像を表す。この図は、点火 3s 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 7s 後に突然火炎が消滅した。実験後、点火器のニクロム細線部分を確認すると高温状態での酸化により断裂していることが確認できた。ニクロム細線が破断したことにより、高温状態を保持できなくなった結果、火炎は消滅したと考えられる。

以下の図 13 は過渡応答に対する当量比を示している。1 回目、2 回目は共にボタン燃料が安定しなかった。一方、3 回目、4 回目はボタン燃料流入後約 5s で安定している。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、着火可能となる当量比が 3 で、5 秒後にその当量比となる。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、これらの印加電圧の間に着火電圧が存在していることがわかる。

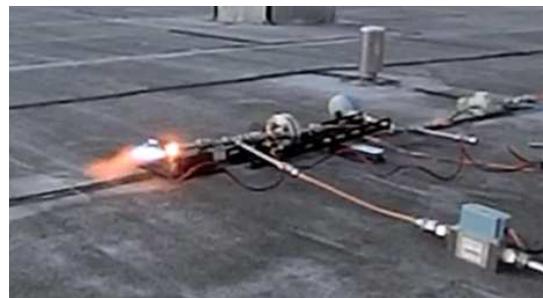


Fig.12 Image of ignition

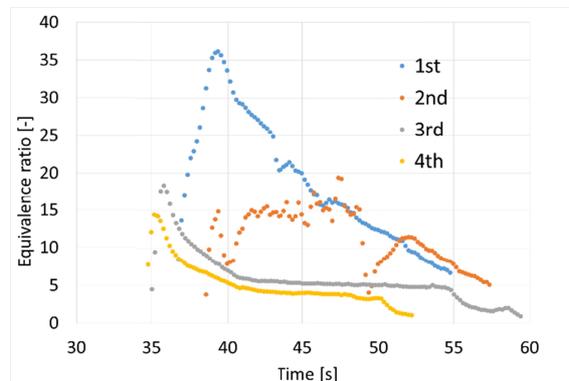


Fig.13 The equivalent ratio for the response

5. 低圧環境下実験

低圧環境下自然対流における実験装置を以下の図 14 に示す。点火器は、大気圧環境下でも使用したものと同等のものを使用する。円管は内径 114 mm の VU100 ポリ塩化ビニル薄肉管を長さ 300 mm で使用した。フランジと閉止フランジの間には、漏れ防止用パッキンが挿入されている。側面左手には、ガス抜き用のボールバルブ、管内圧力測定用の真空計 (CONVUM 製, MPS-V33) が設置してあり、側面右手には、真空ポンプ用穴、本実験で作成した熱面点火式点火器 (白金線)、管内温度測定用の熱電対が設置してある。管内圧力は、真空ポンプの ON, OFF により一定圧力に保つよう制御する。

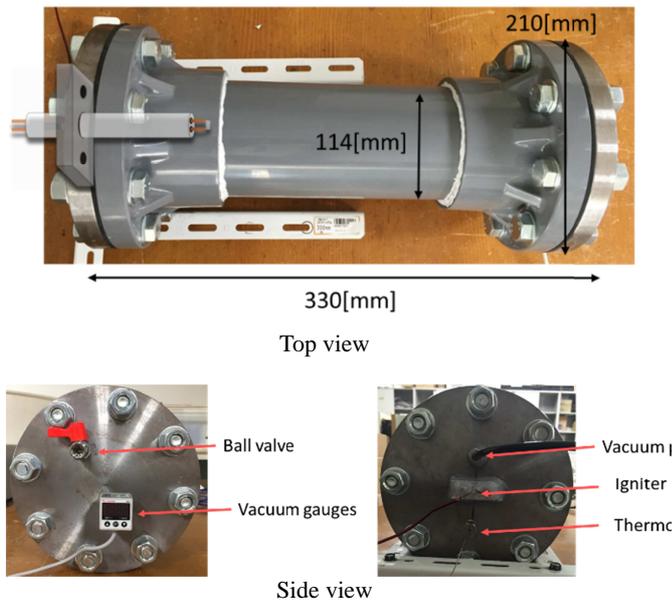


Fig.14 Vacuum chamber

5.1 実験条件と測定方法

低圧環境条件として、真空ポンプを用いて大気圧である 0 atm から -0.2 atm 刻みで圧力低下させ、-0.8 atm まで計測する。ここで、漏れの影響が 10%程度あることから設定圧力の ± 0.03 atm の範囲で 10 s 間測定を行い、デジタル式データレコーダ (National Instruments 社製) を用いて各項目を計測し、平均値を実験値として採用した。ここでの測定項目は、電源電圧、電源電流、シャント電圧とした。これらの値から、オームの法則を用いて白金線抵抗値と電力を計算した。ここでの白金線抵抗値から、白金測温抵抗体の原理 (5.2 で後述する。) を用いて白金線温度を測定する。

5.1.1 真空チャンバ

点火器には電源から直接電圧を制御することができるよう接続する。点火器本体にはアルミ製の土台が付属しており、閉止フランジにボルトで付属させることができる。ここで、アルミ製の土台と閉止フランジとの間に微小な隙間が存在し漏れが生じてしまうので、高機能性シリコン系充填剤であるパスコーク N (セメダイン社製) を閉止フランジから外部に見える点火器部分全体を覆うように塗り、漏れを防ぐ。

5.1.2 回路

点火器に、セメント抵抗 (0.5Ω) を含めた回路を作成する。セメント抵抗は 1Ω のものを 2 つ並列に接続させ回路に

直列に接続した。印加電圧を 0V~3.0V の範囲で 0.5V 刻みで上昇させ、その時の電源電圧値、電源電流値、セメント抵抗電圧値を実測し、白金線抵抗値を算出する。この白金線抵抗値から点火器の温度を算出 (算出方法は 5.2 節で後述) する。

5.2 白金測温抵抗体

低圧環境下での実験では、大気圧環境下で使用していたニクロム電熱線ではなく、白金電熱線を使用した。大気圧環境下実験では、点火器本体に直接触れることができるため点接触を利用した熱電対で温度測定を行った。一方で、低圧環境下実験では、点火器が真空チャンバ内に設置してあるので、直接点火器に触れて熱電対を調整することが困難である。以上のことから、熱電対を使用しないで点火器温度を測定する方法として白金線を用いた。金属では一般に、電気抵抗は温度にほぼ比例することが言われている。低温では、電子が金属内をスムーズに流れることができるが、高温になるにつれて金属分子の運動が激しくなり、電気抵抗が上昇する。この原理を利用して温度を測定するのが、白金測温抵抗体温度センサーとなる。ここで、白金が使用される要因として、広い温度範囲で温度と抵抗の関係が一定であること、また、高い温度まで化学的に安定で、耐食性に優れ経年変化が少ないこと、固有抵抗の大きい金属であることが挙げられる。また、熱電対と比較した場合の白金測温抵抗体の特徴として、温度に対する抵抗値変化 (感度) が大きく、熱電対に必要な基準温接点が必要ないため、常温付近の温度測定に有利であることが挙げられる。さらに、安定度が高く長期にわたって使用できること、温度と抵抗の関係が既知であるため、精度が高い測定が可能であることなどが特徴として挙げられる。以下の図 15 に、予備実験で測定した白金線抵抗値に対する白金線温度を示す。予備実験では、点火器にセメント抵抗 (0.5Ω) を含めた回路を作成し、印加電圧を 0V~3.5V の範囲で 0.5V 刻みで上昇させ、その時の電源電圧値、電源電流値、白金電圧値、セメント抵抗電圧値をテスターにより実測し、白金線抵抗値を算出した。実験は真空チャンバの外部で行い、熱電対を用いて温度計測を実施した。図 16 に白金線抵抗値と熱電対により測定したそのときの白金線温度との関係を示す。点線は各点を 2 次近似した近似曲線である。R 値は 0.99 を示すことから、2 次近似は適切であるとみなす。これより、点火器の実測抵抗値から、白金線の温度を測定することが可能となる。

5.3 実験結果

以下の図 16 において、低圧になるにつれて白金線の温度は低下しているが、0.6 atm 以下の圧力下では、ほぼ一定の温度を示している。熱の伝わり方には 3 種類存在し、固体内または静止した流体内で、高温から低温へと熱が移動する現象である熱伝導や、運動している流体とそれに接する固体表面の間の熱移動減少である熱伝達、また、物体表面からその温度に応じて放射される電磁波の放射熱エネルギーである熱輻射がある。^[5]真空状態では、熱伝達による熱の移動がないと考えられるため、白金線から空気への移動はないと考えられる。そのため、低圧ほど熱の逃げは小さくなる予測ができるが、この図 16 から低圧でも一定放熱量で収束していることが確認できる。そのため、熱伝導あるいは熱輻射の影響が考えられる。

5.4 熱輻射

熱輻射とは、2 つの物体の間に媒介する物質が存在しなくても、熱が移動する現象である。また、放熱される熱エネルギーは絶対温度の 4 乗に比例する。^[6]ここで、今回の実験

系を簡易的に 2 つの円筒間での熱移動と考え、熱輻射の影響を考察する。白金線の放射率 0.1 として計算する。正味の輻射熱伝達量は、電熱線から射出される単位面積当たりの総エネルギーと、真空チャンバ壁面から射出された総エネルギーの差である。これと、電熱線表面積から熱輻射による熱量 Q_{tr} が算出できる。ここで、白金線温度 627°C で $Q_{tr} = 0.21 \text{ W}$ である。これと、電熱線温度 627°C で電熱線から空気への熱伝達による熱量 $Q_w = 3.96 \text{ W}$ を比較すると、影響は 5%程度となる。 $Q_{tr} \ll Q_w$ であるので、本実験の点火器について、熱輻射の影響は非常に小さいことが確認できた。

以下の図 17 は各圧力状態におけるヌッセルト数の変化を示している。ここで、理想状態を考える。電熱線から銅管への熱損失がなく、かつ自然対流への熱損失もなく、熱輻射の影響もないと仮定すると、各圧力変化に対してもヌッセルト数は等しくなるはずである。しかし、図 17 から各点のヌッセルト数は各圧力でそれぞれ異なっていることから、これら 3 つの影響が支配的であると考えられる。ここで、熱輻射の影響は以前述べたように、影響は 3%程度である。したがって、本実験の点火器においては、熱輻射の影響はほぼ無視できる。以上のことから、各圧力でのヌッセルト数の変化は、電熱線から銅管への熱損失と、自然対流への熱損失が支配的であると考えられる。

5. 結 言

本研究では、様々な圧力環境におけるジュール加熱を用いた熱面点火式点火器の加熱特性を実験により調査し、以下の結言を得た。

- [1] 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、実験結果より印加電力と点火器温度の相関式を求めた。
- [2] 空気-ブタンの混合気を用いた着火実験により、本実験で作成したニクロム細線で熱面点火が可能であることを確認した。
- [3] 低圧環境下において、 $1.0 \sim 0.6 \text{ atm}$ の範囲では圧力の低下とともに点火器温度が減少するが、 0.6 atm 以下では一定の値となる。

REFERENCES

- [1] 丸 祐介 他：「気球を利用したスペースプレーン技術実証機の研究」, 平成 27 年度, Balloon Symposium 2015.
- [2] 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).
- [3] 関 信弘 他：伝熱工学, 第 1 版第 19 刷, 2012, 森北出版株式会社.
- [4] 佐野 雄二, 西川新三：「細線の伝熱に対する乱れの影響」, 化学工業 Vol. 29 (1965) No. 4 P 251-252, a1
- [5] Van der Hagge Zilinen, B, G : Appl. Sci. Res. A-6 129 (1953)
- [6] 中山 顕 他：熱流体力学-基礎から数値シミュレーションまで-, p2, (2002)

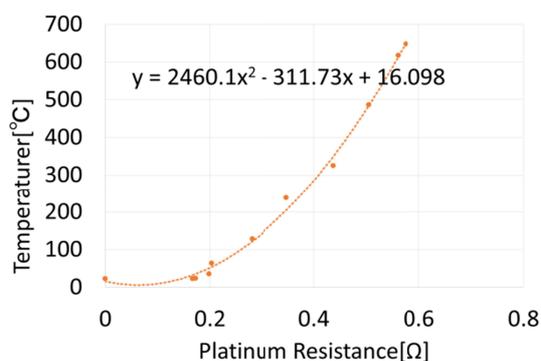


Fig.15 Effect of platinum resistance on the platinum temperature

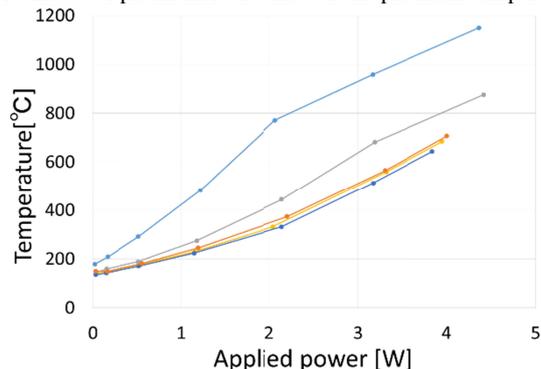


Fig.16 Effect of pressure change on the platinum temperature

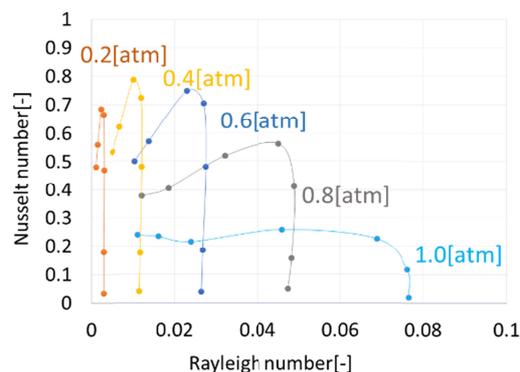


Fig.17 Effect of pressure change on the Nusselt number