

メタン酸素点火器を用いたハイブリッドロケット燃料の 減圧下における着火条件

粒良 幸利^{*1}, 櫻井 毅司^{*2}

Ignition condition of grain under subatmospheric pressure using CH₄/O₂ igniter for hybrid rocket engines

Yukitoshi TUBURA^{*1}, Takashi SAKURAI^{*2}

ABSTRACT

We developed an igniter using methane and oxygen for applying to the A-SOFT hybrid rocket which has ability to re-ignite the rocket at the high altitude of more than 100 km. The objective of this study is to acquire the fundamental data of the igniter for igniting a polypropylene fuel grain, and the experiment was carried out under subatmospheric condition. As the environmental pressure decreased, the fuel grain could be ignited by smaller amount of methane and oxygen flow rate of igniter than those at atmospheric pressure. The ignition condition was evaluated from the viewpoint of heat balance between the heat input of the igniter and necessary heats of melting and evaporating of fuel grain. It was clarified that the heat flux given to the fuel grain by the igniter was dominant for ignition comparing with the quantity of heat and the heat input rate.

Keywords: Hybrid Rocket, Igniter, Ignition condition, Methane, Polypropylene

概要

高高度での再着火性を有する A-SOFT ハイブリッドロケットの実現に向けて、著者らはメタンと酸素を用いるハイブリッドロケット用点火器を研究開発している。本研究はハイブリッドロケット用燃料の一つであるポリプロピレンに対するメタン酸素点火器の基礎データ取得を目的としており、雰囲気圧力 10kPa までの着火条件を調査した。雰囲気圧力が低下するほど燃料グレインは少量の点火器用メタン・酸素流量で着火するようになった。燃料グレインの着火条件を熱量的観点から考察した結果、グレインの着火には点火器の噴流火炎によって与えられる熱流束が熱量や熱供給率よりも大きく影響することを明らかとした。

1. はじめに

酸化剤に気体または液体、燃料に固体を用いるハイブリッドロケットエンジンは高い安全性、低環境負荷、推力制御及び再着火が可能である等の利点を有する。一方で、燃料後退速度が小さい事や当量比制御が容易ではなく理論比推力を得ることが難しいという欠点を有する。ISAS/JAXAを中心に各大学によって構成され、本研究室も参加するハイブリッドロケット研究ワーキンググループ(HRrWG)では、この欠点を解消し、再着火性を有するA-SOFTハイブリッドロケットエンジンの開発を行っている。現在、HRrWGでは高度約100kmでの高層大気観測を研究目標としており、ここでは高度約100kmでの再着火が想定されているため、低圧化での再着火を可能とする点火器が求められている。

これまで本研究室では、ハイブリッドロケットエンジンの着火方式としてモデルロケットを改良したモデルロケットイグナイタを採用してきた。この着火方式は再着火不可能である事と製作不良により不着火が生じるといった欠点がある。これを受け、著者らはモデルロケットイグナイタに替

わる CH_4/O_2 を用いた再着火可能な点火器を研究している。これまでに CH_4/O_2 点火器を製作し、確実性のある燃焼条件と燃焼室形状を見出し、大気圧下での燃料グレインの着火条件を明らかにしている[1]。

本研究では高空での再着火を想定し、 CH_4/O_2 点火器を用いた燃料グレインの減圧下における着火条件を明らかにすることを目的とする。想定される再着火環境は高度約 100km であり気圧は 1Pa 以下であるが、実際の打上げでは酸化剤等のガスをエンジン内に供給し、ある圧力雰囲気の下でエンジンへの着火を行うものと考えている。そこで、本研究では圧力を段階的に低下させ、着火に与える影響や着火条件を調査した。

2. 実験装置および実験条件

本研究で使用した CH_4/O_2 点火器の概略図を図 1 に示す。燃焼室形状及びデフレクタ形状は推力 5 kN 級エンジンに用いているモデルロケットイグナイタを参考にした。 CH_4 と O_2 の流入口を対向させ混合を促進し、点火プラグを配置することで混合気を速やかに着火する。図 2 に点火器と燃料グレインの概略図を示す。グレインは円板型ポリプロピレン (PP) である。点火器からグレイン表面までの距離は推力 5 kN 級エンジンと一致させている。これらを低圧用容器内に入れ、真空ポンプを用いて容器内を所定の圧力まで減圧させ、真空引きを行いながら実験を行った。実験の点火シーケンスを図 3 に示す。 CH_4/O_2 点火器の点火プラグを始動した 0.2 秒後に、 CH_4/O_2 を 2 秒間供給し点火器の燃焼を継続した。点火プラグ始動から 0.8 秒後にグレイン平板上に酸素を 2 秒間供給する。周囲圧力が着火に及ぼす影響を調べるため、点火器に供給するメタン及び酸素を各々 0.5, 10L/min 毎に変化させグレインの着火範囲を取得した。なお、本実験における体積流量は 1atm, 25°C における値である。グレインには温度測定用に表面と深さ 1mm, 2mm の位置に熱電対を設置した。使用した熱電対は素線径 0.1 mm の K 熱電対であり、0.01 秒刻みで記録した。温度履歴はメタン流量 2.5L/min, 点火器用酸素 30L/min, 平板上酸素流量 20L/min で実験を行った。

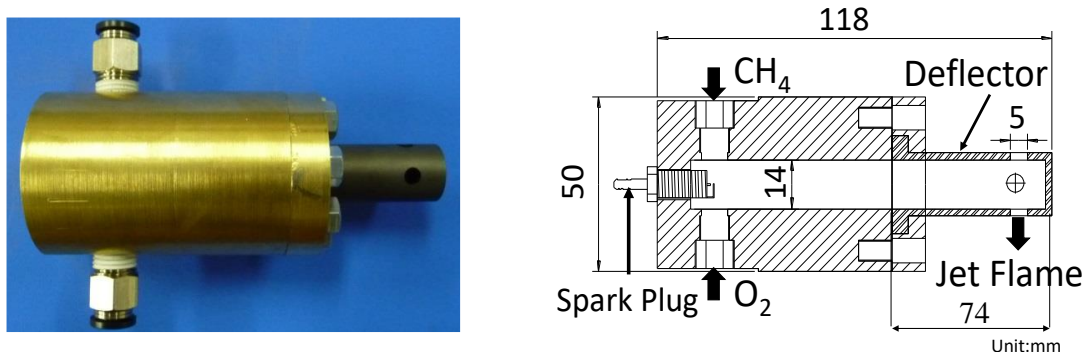


図 1 メタン酸素点火器概略図

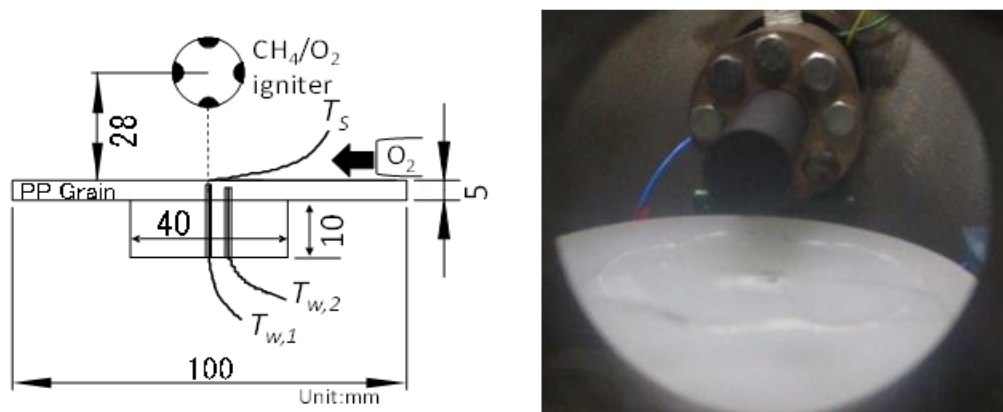


図 2 実験装置概略図

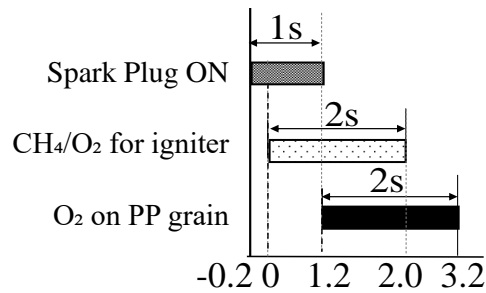
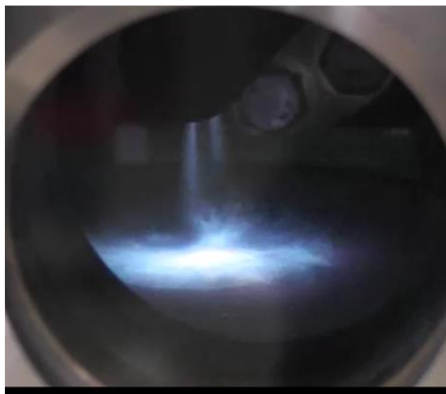


図3 点火シーケンス

3. 実験結果および考察

燃焼実験時の様子を図4に示す。点火器からの噴出火炎がグレイン表面に当たり全体に広がる場合と、噴出火炎がほとんど確認できない場合があった。前者は噴出火炎の勢いが強く点火器燃焼中は噴出火炎とグレイン表面に形成される火炎の見分けが付かない。後者はCH₄/O₂の供給終了後にグレイン表面に拡散火炎が形成され、グレインが着火・燃焼した事を確認した。なお、点火器燃焼終了後にPPと平板上酸素との火炎が保炎されている場合をグレインの着火と定義した。



(a)点火器からの噴出火炎がグレイン表面に当たり全体に広がる場合



(b)噴出火炎が確認できない場合

図4 燃焼実験の様子

3.1. 燃料グレインの減圧下における着火範囲

雰囲気気圧 3~60kPa で実験を行った。平板上酸素流量は 20L/min で一定である。圧力 3kPa ではいずれの条件でも着火しなかった。図5に 10, 20, 60kPa における燃料グレインの着火範囲を示す。比較として大気圧下での着火範囲も示す。縦軸及び横軸の値は点火器のメタンと酸素流量を示している。図中の各線より上の領域がグレインの着火範囲である。全体的な傾向として低圧化すると着火範囲が広がる事が分かる。各圧力で見ると、点火器に供給する酸素流量を増加させるに従って着火に要するメタン量が減少する事が分かる。10kPa 及び 20kPa では酸素流量 10L/min においてメタン流量を増加させても着火しない事が分かった。

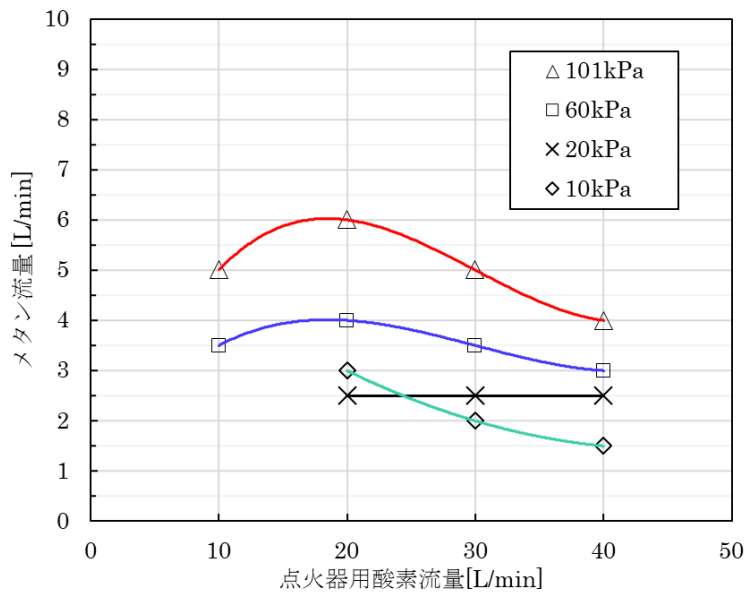


図5 燃料グレインの減圧下における着火範囲（平板上酸素流量 20L/min）

3.2. 減圧下におけるグレインの着火条件

各雰囲気圧力における燃料グレインの表面温度履歴を図6に示す．時間は点火器のCH₄/O₂供給開始時を0秒としている．10kPa及び30kPaで着火し，40kPa及び80kPaで不着火となった．表面温度はCH₄/O₂供給開始後に各圧力で約470°Cまで上昇し，平板上酸素が供給される前後で，着火する場合は約300°Cまで降下する．一方，不着火の場合は平板上酸素の供給付近で表面温度が約120~220°Cまで降下している．CH₄/O₂供給終了直後の2秒付近では，10kPaの表面温度は375.8°C，30kPaでは394.8°Cに到達しPPの着火温度367°C[2]を上回った．その後1400°C付近まで上昇し，30kPaでは断線した．

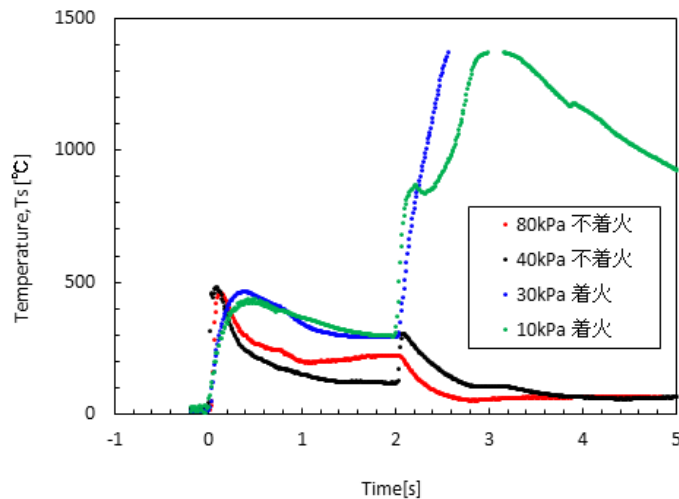


図6 各圧力における燃料グレインの表面温度履歴
(メタン流量 2.5L/min, 点火器用酸素流量 30L/min, 平板上酸素流量 20L/min)

計測した平板温度履歴の一例を図7に示す．圧力10kPaでは，グレイン内の深さ1mmでは表面温度の上昇から約1秒遅れて温度が上昇し，最大で約20°C上昇した．深さ2mmではさらに遅れて値が上昇し，最大で約1°C上昇した．

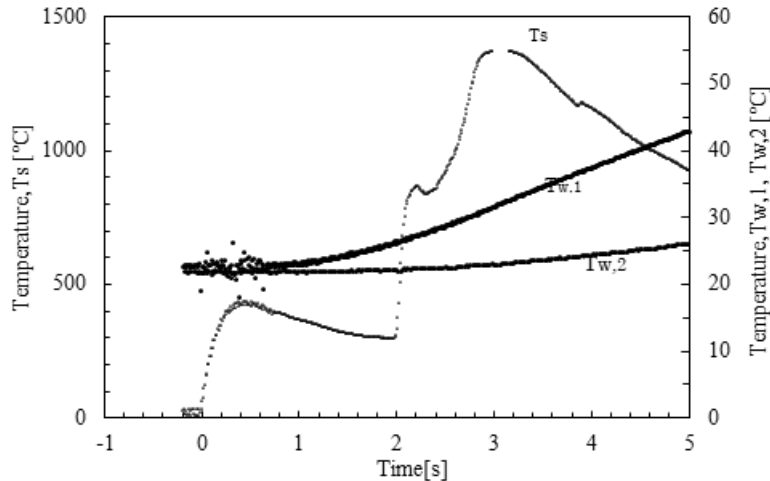


図7 着火時の燃料グレインの温度履歴
(圧力10kPa, メタン流量2.5L/min, 点火器用酸素流量30L/min, 平板上酸素流量20L/min)

3.3. 着火に要する熱量と燃料質量流束

ポリプロピレン燃料を着火するには図8に示すように燃料を熱分解し液化・気化させて分解生成ガスを発生させる必要があり, その分解生成ガスが可燃範囲内にある必要がある. 燃料を熱分解させガス状に気化させるためには外部からの熱量が必要である. そこで, 着火及び不着火の場合でグレインに与えた熱量が, 燃料分解生成ガスを発生させるために要する熱量を満足していた否かを調べた.

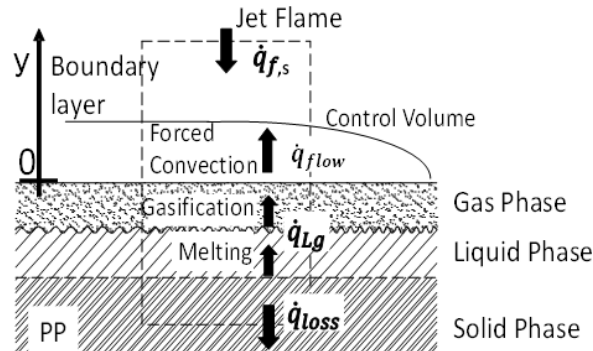


図8 メタン酸素点火器による燃料グレインの着火モデル

まず, グレインに与えた熱量を調べるために, 各圧力で取得した温度履歴を用いてグレイン表面に与えた熱流束, 熱流量を算出する. 噴出火炎によってグレインに与えられる熱流束 $\dot{q}_{f,s}$ は次式で算出する.

$$\dot{q}_{f,s} = -\lambda_s \left. \frac{dT}{dy} \right|_{y=0} \cong \lambda_s \frac{T_s - T_{w,1}}{\Delta y} \left[\frac{kW}{m^2} \right] \quad (1)$$

ここで λ_s はPPの熱伝導率0.15 W/(mK), T_s はグレインの表面温度, $T_{w,1}$ はグレインの表面から深さ1 mmの温度, $\Delta y=1$ mmである. 熱流量は式(1)で算出した $\dot{q}_{f,s}$ の熱流束履歴及びメタン酸素火炎により加熱された面積 A_{heat} を用いて次式から算出する.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = \dot{q}_{f,s} \times A_{heat} \text{ [W]} \quad (2)$$

熱量は式(2)で算出した熱流量履歴及び加熱時間 (メタン酸素供給開始から供給終了までの2.0秒間とする) から算出する.

$$Q = \int \Phi dt \text{ [J]} \quad (3)$$

加熱面積は実験映像から確認する事が難しかったため, メタン酸素を供給している2.0秒間で変形

した領域を加熱面積とした。加熱面積を計測するためのシーケンスは通常の着火実験と異なり、メタン酸素供給終了時に平板上酸素の供給も停止する事でグレインが着火しないようにした。これにより、変形した面積はメタン酸素火炎のみによって変形した領域であると考えられる。以上より得た、グレインに実際に与えた熱量及び加熱面積の一覧を表1に示す。不着火時に点火器がグレインに与えた熱量は着火時での与えられた熱量に比べて小さい事が分かる。低圧化によりグレイン表面温度の低下が抑えられ、グレインに与える熱量が増加したと考えられる。

表1 グレインに実際に与えた熱量と \dot{m}_{cr} を生成するに要する熱量

圧力 P [kPa]	着火の有無	与えた熱量 Q [J]	加熱面積 A_{heat} [mm ²]	臨界質量流束 \dot{m}_{cr} [g/(m ² ・s)]	必要な熱量 Q' [J]
10	着火	206.2	1792	1.53	10.4
30	着火	142.1	1437	1.63	8.9
40	不着火	85.7	1972	1.68	12.6
80	不着火	109.7	1611	1.88	11.5

次に、燃料分解生成ガスを発生させるために必要な熱量を調べる。燃料を着火するには燃料の分解生成ガスが可燃範囲内にある必要がある。この可燃下限界の分解生成ガスの質量流束を臨界質量流束 \dot{m}_{cr} と呼び次式で表される。

$$\dot{m}_{cr} = \frac{\dot{m}_{loss,cr}}{A_{heat} \times t_{heat}} \quad [g/(m^2 \cdot s)] \quad (4)$$

ここで、 $\dot{m}_{loss,cr}$ は臨界燃料質量[g]、 t_{heat} は加熱時間[s]である。Soniaらの調べでは、 \dot{m}_{cr} は雰囲気圧力 P [kPa]を用いて次式で表される事が分かっている[3]。

$$\dot{m}_{cr} = 0.005P + 1.48 \quad [g/(m^2 \cdot s)] \quad (5)$$

各圧力で \dot{m}_{cr} を算出し、実験値の A_{heat} 及び t_{heat} を用いて $\dot{m}_{loss,cr}$ を算出した。グレインに与えた熱量が全てPPの気化に使われると考え、次式から臨界質量流束を生成するに要するエネルギーが算出できる。

$$Q' = \dot{m}_{loss,cr} \times L_g = (\dot{m}_{cr} \times A_{heat} \times t_{heat}) \times L_g \quad [J] \quad (6)$$

ここで、 L_g はPPの気化に必要なエンタルピーを表し、Cone CalorimeterによるPPの評価値[2]より $L_g = 1.9$ kJ/gを用いる。

グレインを着火するために要する熱量及び実際にグレインに与えた熱量を表1に示す。臨界質量流束は圧力と比例関係にあるため、燃料分解生成ガスを発生させるために要する熱量は低圧化に伴い減少することが分かる。着火する場合は、140～200Jの熱量を与えられていたのに対し、不着火の場合ではそれより小さい85～110Jの熱量を与えていたことが分かる。しかしながら不着火の場合でも、燃料分解生成ガスを発生させるために要する熱量よりも60～90J程度大きい熱量をグレインに与えていることが分かる。従って、着火及び不着火時にグレインに与えた熱量は、燃料分解生成ガスを発生させるために要する熱量を満足していた事が分かった。

3.4. 着火に要する熱流束

着火に要する熱流束について考える。図8に破線で示す燃料グレイン表面近傍から内部までを熱収支の検査体積とする。検査体積内の温度分布および熱移動は一次元的であると仮定する。火炎からの流入熱流束を $\dot{q}_{f,s}$ 、可燃下限界の燃料分解ガスの生成に要する熱流束を \dot{q}_{Lg} 、グレイン内部の熱伝導を \dot{q}_{loss} 、平板上酸素流の熱伝達により燃料表面から酸素流へと向かう熱流束 \dot{q}_{flow} とすると、着火条件は以下の関係式で表すことができる。

$$\dot{q}_{f,s} \geq \dot{q}_{Lg} + \dot{q}_{loss} + \dot{q}_{flow} \quad \left[\frac{kW}{m^2} \right] \quad (7)$$

今回は、着火に要する熱流束を式(7)の最低値として考え、 $\dot{q}_{f,s}' = \dot{q}_{Lg} + \dot{q}_{loss} + \dot{q}_{flow}$ とする。式(5)を

用いて、 \dot{m}_{cr} を生成するに要する熱流束は次式で表せる。

$$\dot{q}_{lg} = \dot{m}_{cr} \cdot Lg \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right] \quad (8)$$

検査体積から流出するグレイン内部の熱伝導損失 \dot{q}_{loss} は次式で表せる。

$$\dot{q}_{loss} = -\lambda_s \frac{dT}{dy} = \lambda_s \frac{T_{w,1} - T_{w,2}}{\Delta y} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right] \quad (9)$$

ここで $T_{w,2}$ はグレインの表面から深さ2 mmの温度、 $\Delta y=1$ mmである。

平板上酸素流により燃料表面から酸素流へと向かう熱流束 \dot{q}_{flow} は、平板に沿う熱伝達として次式で表せる。

$$\dot{q}_{flow} = h_c(T_s - T_0) \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right] \quad (10)$$

ここで、 T_s は表面温度であり、着火直前にはグレイン表面は着火温度367°C付近まで昇温すると考えた。 T_0 は平板上酸素流の温度として27°Cとした。熱伝達率 h_c は以下の式を用いた[4]。

$$h_c = 0.332 \frac{kPr^{\frac{1}{3}} \sqrt{u_{\infty} x / \nu}}{x \left[1 - (\xi/x)^4 \right]^{\frac{1}{3}}} \left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right] \quad (11)$$

ここで、 u_{∞} は平板上酸素流速、 Pr および ν は酸素流のプラントル数及び動粘性係数、 ξ はグレイン前縁から加熱開始位置までの距離、 x はグレイン前縁からの距離を表す。実験映像よりグレインの着火はデフレクタ孔直下付近で生じている事から $x = 0.05\text{m}$ とし、加熱面積から加熱開始位置を調べる事で ξ を算出し、デフレクタ孔直下での熱伝達率を算出した。

以上より算出した必要熱流束を表2に示す。低下圧下に伴い可燃下限界の燃料分解ガスの生成に要する熱流束は減少することが分かる。グレイン内部の熱伝導損失の値は各圧力で最大値をとっている。10kPa及び30kPaの着火する場合は40kPaの不着火時に比べて表面温度が高いため内部に伝わる伝熱量も増加して内部への熱伝導量も増加すると考えられる。一方で80kPaでは着火時の内部への熱伝導損失0.62[kw/m²]よりも約2倍大きい1.28[kw/m²]という値をとっている。これは、熱電対のポート位置が適切ではなく、 $T_{w,1}$ 及び $T_{w,2}$ が実際にはより表面に近い温度を計測していた可能性がある。平板上酸素流の熱伝達による熱流束は低下圧下に伴い減少することが分かる。これは、式(11)で示される熱伝達率に含まれる動粘性係数が密度に関する値であることが原因と考えられる。

$$\nu = \mu / \rho \quad [\text{Pa}\cdot\text{s}] \quad (12)$$

酸素密度は周囲圧力と比例関係にあるため、低下圧化に伴い平板上酸素密度が低下する事で熱伝達率が低下する。そのためグレイン表面から平板上酸素流へと向かう熱流束が小さくなる。結果として、着火に必要な熱流束は低下圧化に伴い減少することが分かる。つまり同じ熱流束を与えても、より低下圧の方が着火し易くなる可能性がある事を示す。これは先程3.1節で示した同じメタン酸素流量でも低下圧化に伴い着火範囲が広がる現象の原因と考えられる。表2より、着火する場合は着火に要する熱流束に対し2倍以上の熱流束をグレインに与えている一方で、不着火の際は着火に要する熱流束を下回っていることが分かった。従って、着火条件としてグレインに与える熱流束が必要熱流束を上回る必要があると言える。

表2 着火に要する熱流束と実験値

圧力P [kPa]	着火の有無 -	実験値 [kw/m ²]	$\dot{q}_{f,s}$ [kw/m ²]	\dot{q}_{lg} [kw/m ²]	\dot{q}_{loss} [kw/m ²]	\dot{q}_{flow} [kw/m ²]
10	着火	46.0	13.1	2.9	0.62	9.6
30	着火	41.3	19.8	3.1	0.63	16.1
40	不着火	14.4	22.2	3.2	0.18	18.9
80	不着火	29.4	32.5	3.6	1.28	27.7

4. まとめ

本研究では、メタン酸素点火器を用いて雰囲気圧力3~80kPaにおいて平板型PPグレインの着火・燃焼実験を行い、着火範囲及びグレイン表面・内部温度履歴を取得して以下の知見を得た。

- 雰囲気圧力10~101kPaの範囲では、低圧化に伴いPPグレインの着火範囲は広がる。
- 10kPa下において、点火器のメタン流量2.5L/min, 酸素流量30L/min, 平板上酸素流量20L/minではグレインの着火はメタン酸素供給終了付近で生じる。
- 10~80kPaでの燃料グレインの表面温度履歴から、平板上酸素が供給される前後でグレインの表面温度はいったん降下する。また、グレインが着火するためには点火器の噴出火炎によってPPの着火温度367°C以上に昇温させる必要がある。
- グレインの温度履歴から熱収支を計算した。着火には可燃下限界の分解生成ガスを生じるに必要となる熱流束よりも大きな熱流束を点火器によって与える必要がある。この着火に要する熱流束は低圧化に伴い減少する。

参考文献

- [1] 高橋瞬、櫻井毅司：ハイブリッドロケットエンジン用燃料グレインのメタン/酸素火炎による着火、第53回燃焼シンポジウム、C212、2015, pp.242-243.
- [2] Lyon, R.E., and Janssens, M.L., DOT/FAA/AR-05/14, 2005.
- [3] Sonia, F. et.al., Combustion and Flame 158, 1301-1306, 2011.
- [4] Eckert, E., and Drake, R., Heat and mass transfer, McGraw Hill, 1959.

*1 粒良幸利, 首都大学東京大学院 (Yukitoshi Tsubura, Tokyo Metropolitan University)

*2 櫻井毅司, 首都大学東京 (Takashi Sakurai, Tokyo Metropolitan University)