

中層大気中における火炎維持装置の開発

樋口 健¹⁾, 服部 司²⁾, 今村 幸³⁾, 板倉 嘉哉^{4)*}

¹⁾千葉大学教育学部・学部生 ²⁾千葉大学大学院融合理工学府・修士課程

³⁾日本大学生産工学部 ⁴⁾千葉大学教育学部

Development of Flame Holding Chamber under Low Pressure and Low Temperature Environment

HIGUCHI Ken¹⁾ HATTORI Tsukasa²⁾ IMAMURA Osamu³⁾ ITAKURA Yoshiya⁴⁾

¹⁾Chiba University, Faculty of Education, Undergraduate Student

²⁾Chiba University Graduate School of Science and Engineering, Master's Program

³⁾Nihon University, College of Industrial Technology

⁴⁾Chiba University, Faculty of Education

千葉大学の学生団体「おりがみ」による「Earth Light Project」なる火炎越しの地球の映像撮影を実現する企画において、服部・樋口が火炎維持装置の開発を担当することになった。目標到達地点の中層大気中は低圧・低温環境であり、火炎を維持するために酸素濃度と燃料供給量の維持が課題となる。これを達成するために、独自の圧力維持機構と燃料供給路の断熱・保温機構をもつ火炎維持装置を設計した。製作した試作品について、低圧・低温環境での特性を地上実験装置において検証した結果、圧力維持機構が低圧かつ-20℃までの低温環境下で設計通りに機能し、低圧環境では空気流量の変化によらず機能することが確認できた。低温環境では、燃料供給路の断熱材の効果が確認できたが、火炎は消炎または不安定な挙動を示し、燃焼ノズル内での燃料液化の可能性が明らかになった。また、燃焼室内への煤の付着が確認されたため、低圧実験で煤の付着状況の特性を検証した。その結果、空気流量を変化させると、火炎の挙動と煤の付着状況に変化が生じることが明らかになった。実験を通して、減圧に伴う空気供給量の変化、撮影装置の停止、燃焼室上部の加熱といった課題点もわかり、企画の実現に向けてさらなる研究・開発が必要であることが明白となった。

キーワード：中層大気 (Middle Atmosphere), 火炎維持装置 (Flame Holding Chamber),
拡散火炎 (Diffusion Flame),
低圧・低温環境 (Low Pressure and Low Temperature Environment)

1. はじめに

本研究の発端は、千葉大学の学生団体「おりがみ」による「Earth Light Project」(以下ELP)なる企画である。ELPは、人種や国家間の問題が噴出する現代において必要な「共生」のメッセージを、東京オリンピック・パラリンピックの開催国である日本から、若者が主体となって全世界に発信することを目的に発足した。聖火リレーに代表されるように、火炎は人と人を繋ぐ、共生の象徴として活用されてきた。そこで、火炎維持装置と撮影装置からなるペイロードを気球で中層大気中に打ち上げ、図1のように火炎越しの地球の映像を撮影し、これを共生の象徴として全世界に発信することを目標に掲げた。これは類似する研究や開発された事例が存在しない、史上初の試みである。この企画の実現に向けて、服部・樋口が独自の装置開発を担当することになった。

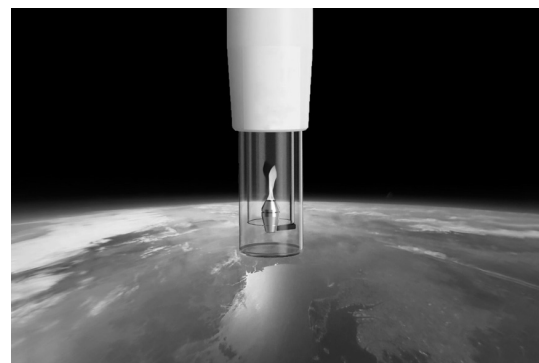


図1 中層大気中での火炎の撮影イメージ
(背景画像：名古屋大学宇宙開発チームNAFT提供¹⁾)

本企画でのペイロードは、ヘリウムガスを充填したラジオゾンデ用ゴム気球を用いて打ち上げる。打ち上げの流れとしては、図2のように、地上で火炎維持装置に点火し、撮影を開始してから放球する。気球は外気圧の減

連絡先著者：板倉嘉哉 y_ita@faculty.chiba-u.jp

少に伴って膨張しながら上昇していき、最高到達高度の30 km近傍で破裂する。下降に転じた後はパラシュートを開傘することにより減速し、着水後に回収する。打ち上げから着水までのフライト時間は約2.5時間と想定した。実施場所は、打ち上げに適した地理・気候条件を検討し、沖縄県宮古島沿岸から打ち上げ、洋上に着水させることとした。

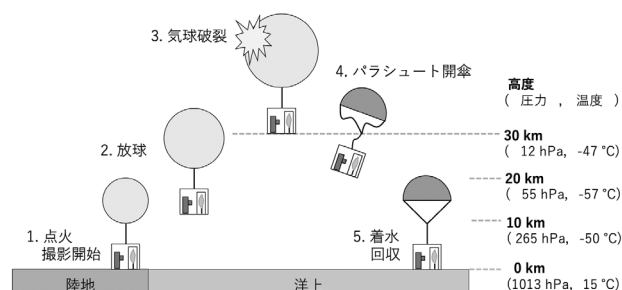


図2 気球による打ち上げの流れ

打ち上げの際、中層大気環境²⁾で火炎を維持するためには、主に2つの問題点がある。

問題点1：低圧環境における火炎の燃焼実験を行ったところ、約130 hPa（高度15 km相当）で消炎した。よって、高度30 km（約12 hPa）の中層大気中では、燃焼に必要な酸素量が供給できず、消炎することになる。このことから、低圧環境下でも火炎を維持する仕組みが必要となる。

問題点2：高度30 kmまでの中層大気中は最低温度約-57 °Cで、ガス燃料の液化による燃料供給量の不足が起こりうる。また、火炎温度の低下によって燃焼に必要な熱量が不足する可能性がある。よって、低温環境下でも燃料供給量を維持し、燃焼を継続させる仕組みが必要である。

ELPの目標を実現させるためには、この2つの問題点を解決し、火炎を維持する装置の開発が必須である。そこで、本研究では中層大気中の低圧・低温環境下でも火炎を維持できる装置を開発した。そして、中層大気環境を再現できる地上実験装置により、低圧・低温環境下における火炎維持装置の特性検証実験を実施した。その結果について報告する。

2. 火炎維持装置の開発

2.1 燃焼形式の検討³⁾

燃焼形式として拡散火炎と予混合火炎のどちらを採用するか検討した。検討にあたっては、各燃焼形式の特性を理解する必要がある。燃焼反応は、燃料ガスと酸化剤の混合気への着火によって始まる。このとき、燃焼反応は約0.1 mmの薄い領域で起こる。この領域を火炎面といい、火炎面内で燃料と酸化剤が燃焼ガスに変化する。なお、火炎面の位置は、反応速度と燃料・酸化剤の流速によって決まる。その上で、燃焼形式は予混合火炎と拡

散火炎に分けられる。図3は例として燃料ガスと酸素による燃焼形式を示している。右側の予混合火炎は、燃料と酸化剤の混合気を火炎面に供給する形式である。火炎面の位置は反応速度と混合気の流速によって決まる。特別な場合を除き、予混合火炎には気体燃料が用いられる。一方、左側の拡散火炎は、燃料と酸化剤を異なる経路で火炎面に供給する形式である。燃料と酸化剤の濃度は火炎面でゼロになり、両者の分子が火炎面に向かって拡散することで燃焼反応が持続する。このとき、火炎面は完全燃焼する燃料と酸化剤の割合（理論混合比）になる位置に形成される。拡散火炎には気体燃料だけでなく、液体燃料や固体燃料の場合、火炎面からの熱で燃料が気化することにより燃焼反応が持続する。

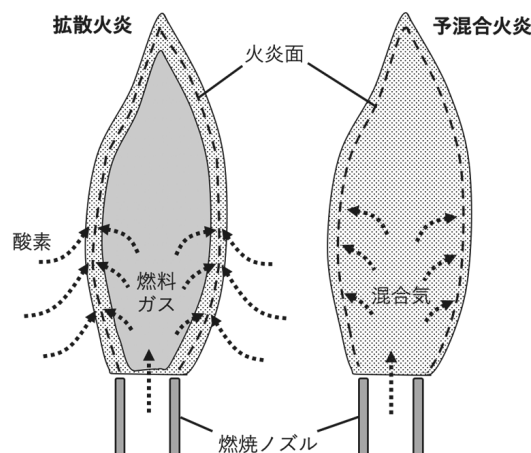


図3 各燃焼形式の概観

以上のように、予混合火炎と拡散火炎では火炎の構造が異なるため、火炎の色に差が生じる。構成原子に炭素を含む燃料の場合、予混合火炎では、火炎面は基本的に青色になる。これは、燃焼反応中に生じる化学活性種と呼ばれる中間生成物のうち、励起状態にあるCHやC₂などがエネルギー散逸する過程で青色や緑色の発光を呈するためである。拡散火炎でも、火炎面は同様に青色になる。しかし、火炎面への燃料ガス供給側では、火炎面からの熱によって燃料ガスが分解し、炭素を遊離する。遊離炭素は高温によって赤熱し、橙色に輝くことにより、青色の火炎面が見えにくくなるので、拡散火炎は全体として橙色に見える。ただし、炭素を含まない燃料では予混合火炎、拡散火炎ともに異なる色合いになる。

中層大気中で火炎を撮影する際、背景には暗黒の宇宙空間と紺碧の海面が存在する。このとき、火炎は背景と同化しない色で、映像で認識できる明るさを保っている必要がある。この点、拡散火炎は背景と同化しない橙色であるが、予混合火炎は海面と同じ青色である。よって、ELPの目標に適した燃焼形式として、拡散火炎形式を採用することにした。

2.2 燃焼方式の選定

燃焼方式の選定条件は、拡散火炎形式による燃焼を実現できるもののうち、入手が容易で、取り扱いにあたって比較的規制の少ないものとした。条件に合う候補とし

て、ろうソク（パラフィン）、アルコールランプ（バイオエタノール）、ガスバーナ（プロパン・ブタン混合ガス）の3種を挙げた。なお、ガスバーナの燃料でプロパン・ブタン混合ガスを選定した理由は、低温環境への対策である。ブタンは沸点が -0.45°C であるため、中層大気中の低温環境では液化する。そこで、沸点が -42.05°C のプロパンガスを40%含有するプロパン・ブタン混合ガスを候補とした⁴⁾。また、市販のガスバーナ用ボンベのうち、ボンベ内に浸透性素材が充填されており、液化燃料の移動による燃料供給量の減少を防止している製品を候補とした。3種の候補について、火炎維持装置を簡易的に模擬した吸気・排気口付きガラス容器を用いて、容器内での燃焼特性を比較したところ、以下の特性が明らかになった。

ろうソク：火炎は橙色で、明るい。大量の煤がガラス容器内壁に付着する。燃料供給量の調整はできない。衝撃を受けると、液化したろうが火炎維持装置内に飛散し、燃料供給量が不安定になる。

アルコールランプ：容器に入れて綿糸を芯として点火すると、火炎は橙色であるが、ろうソクと比べて暗い。煤の付着量はろうソクと比べて少ない。燃料供給量の調整はできない。衝撃を受けると容器内で燃料が移動し、燃料供給量が不安定になる。

ガスバーナ：火炎は橙色で、ろうソクと同様に明るい。煤の付着量はろうソクと比べて少なく、アルコールランプより多い。単純な弁機構による燃料供給量の調整が可能である。浸透性素材を使用したガスボンベでは、衝撃を受けても燃料供給量は安定している。

それぞれの燃焼特性を踏まえ、ELPの目標に適した火炎の特性について、以下の観点ごとに検討した。

色と明るさ：燃焼形式の検討時と同様に、火炎は中層大気中で背景と同化せず、明るく輝いている必要がある。この点では、ろうソクとガスバーナは明るい橙色で、撮影に適しているといえる。一方、アルコールランプは暗く、撮影時に認識しづらいため、適さない。

煤の付着量：ガラス容器内壁への煤の付着量が多いと、火炎の撮影を阻害する。この点では、煤の付着量が比較的少ないアルコールランプとガスバーナが適しているといえる。

燃料供給量の調整可否：火炎維持装置での燃焼において、燃料供給量を調整することで、装置の大きさや空気供給量に合わせて安定した火炎維持が可能となる。この点では、燃料供給量の調整が可能なガスバーナが適している。

衝撃に対する特性：気球での上昇中は、突風によって火炎維持装置が衝撃を受ける可能性がある。その際に火炎の挙動を安定して保つ必要がある。この点では、ろうソクは液化したろうの飛散を防ぐことができないので、適

さない。一方、ガスバーナは、浸透性素材を使用したガスボンベによって安定した燃料供給量を保ち、適している。アルコールランプも同様に、浸透性素材を用いた工夫によって燃料供給量を安定化できる可能性がある。

その他の特性：ろうソクは、燃焼の進行に伴ってろうが消費され、火炎の位置が低下する。火炎の位置が変化すると、撮影時に画角から外れ、火炎全体を記録できなくなる可能性があり、この点でろうソクは適さない。

以上の観点から、ELPの目標に適した燃焼方式として最も適しているガスバーナ（プロパン・ブタン混合ガス）と浸透性素材を使用したガスボンベの組み合わせを採用した。

2.3 火炎維持装置の設計

前節までで検討した結果をもとに、火炎維持装置を設計した。設計にあたっての前提条件は、中層大気環境の圧力と温度に注目して検討する必要があった。

図4のように、高度30 kmまでの中層大気中では、約12 hPaまで圧力が下がる。この環境では酸素濃度が少なく、火炎を維持することができない。酸素濃度を維持するためには、外界とは異なり圧力を一定に保つ燃焼空間が必要となる。しかし、燃焼空間に火炎を入れて完全に密閉した場合、燃焼反応によって時間とともに空間内の酸素濃度が減少し、燃焼後に生成されたガスが増加して消炎に至る。そこで、燃焼空間は一定圧力を保ちながら、常に酸素を供給し、燃焼後に生成されるガスを速やかに排気する仕組みが必要となる。

また、高度30 kmまでの中層大気中では、最低温度が約 -57°C となる。選定したガスバーナ（プロパン・ブタン混合ガス）は、ブタンの沸点が -0.45°C 、プロパンの沸点が -42.05°C であるため、燃料配管内で液化し、火炎への燃料供給量が減少する可能性がある。そこで、燃料の液化を防ぐ対策が必要となる。

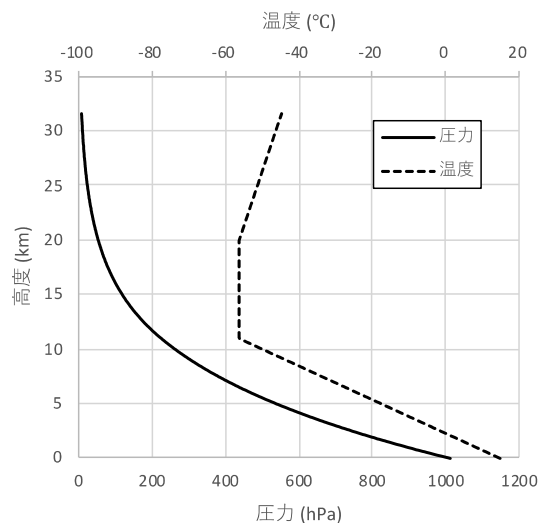


図4 高度30 km までの圧力と温度²⁾

これらの条件をもとに火炎維持装置を設計し、図5のような試作品を製作した。火炎全体に耐熱ガラス管を被

せ、燃焼室下部で固定して燃焼空間をつくる設計である。模式図のように、空気は燃焼室の下部から空気ポンペ（帝人エンジニアリング㈱、カーボンFRP容器ALT639J）で供給し、上部のリリーフ弁から排気する。燃料は燃料ポンペ（新富士バーナー㈱、業務用パワーガス・プロRZ-860）から燃焼ノズルを通して供給することで、拡散火炎を実現する。酸素濃度の維持にあたっては、燃焼室の吸気側から排気側までの空気の流れを機械的に制御する設計にした。吸気側については、空気ポンペに充填されている約300気圧の乾燥空気を、レギュレータで約10気圧まで減圧後、流量制御弁によって調整することで、燃焼室内への空気供給量を一定に保つ構造にした。燃焼室内では、空気の供給口を下部、リリーフ弁を上部に設置することで、火炎の下部から空気が供給され、燃焼により生成されたガスが火炎上部から速やかに排気されるようにした。なお、空気ポンペに充填する気体については、実験時やフライト中の安全性の観点から検討し、酸素ではなく乾燥空気を選定した。

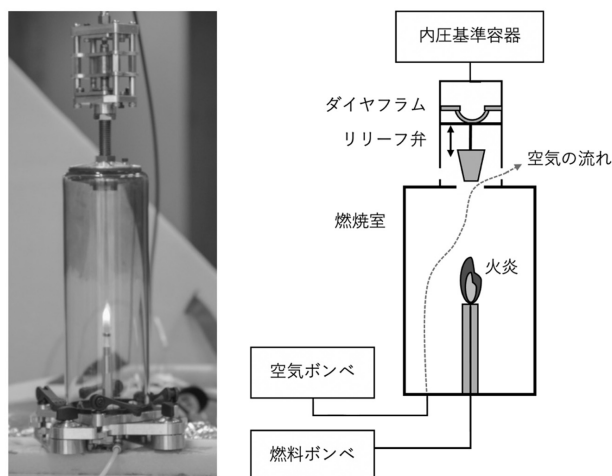


図5 火炎維持装置試作品の外観（左）と模式図（右）

また、燃焼室上部には独自の圧力維持機構を搭載した。図5の模式図のように、機構内では、内圧基準容器に密閉した1気圧の空気で、ダイヤフラム越しにリリーフ弁を押さえ付ける。これにより、燃焼室内圧力が一定値を上回るとリリーフ弁が開放され、排気する。この機構により燃焼室内を一定の圧力に維持する設計にした。燃料供給量の減少を防ぐ対策としては、燃料供給配管の外側にヒータを取り付け、合成ゴム製断熱材で覆って配管内を加熱・保温した。これにより、配管内における燃料の液化を防止した。また、燃料ポンペからの供給量を一定に保つため、ポンペ表面は厚さ20mmのポリスチレンフォーム素材で断熱した。これらの対策により、中層大気中で燃料供給量を維持する設計にした。空気供給口の設計については、図6のように、燃焼ノズルの周囲に空気供給用の環状ノズルを設置し、ノズル下部に開けた複数の穴から空気を吹き出すことで、火炎全体に空気が均等に供給されるようにした。また、燃焼ノズルについては、ノズル上方に内径1.9mmの真鍮パイプを用いた。ノズル先端に1～2mm以上の厚みがある場合（バーナ・

リム）、燃焼ガスによる還流領域の形成によって火炎が安定化することが知られており⁵⁾、同様の効果をもたせるためにノズル先端を厚くする設計にした。

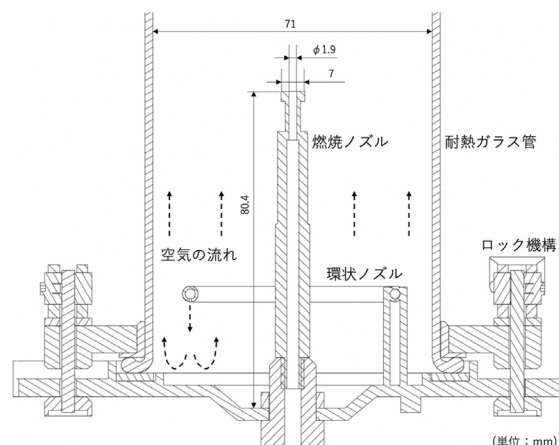


図6 燃焼室下部の断面図

3. 実験装置と方法

3.1 低圧・低温実験の概要

製作した試作品の中層大気中での特性を検証するため、低圧・低温実験を実施した。実験にあたって、図7に示す日本大学生産工学部所有の低圧環境研究共同システム（LINCS：Low-pressure INvestigation Cooperation System）の真空チャンバー設備を使用した。



図7 低圧環境研究共同システム（LINCS）の外観

実験は図8のように、真空チャンバー内に火炎維持装置（燃焼室、内圧基準容器、空気ポンペ、燃料ポンペ）と火炎撮影用のカメラを入れ、点火した後に真空チャンバー内を減圧した。実験中は、燃料ポンペ表面の温度、カメラ表面の温度、ガラス管上部・下部の金属部品の温度、真空チャンバー内圧力、燃焼室内温湿度・圧力をセンサで計測し、データロガーで記録した。

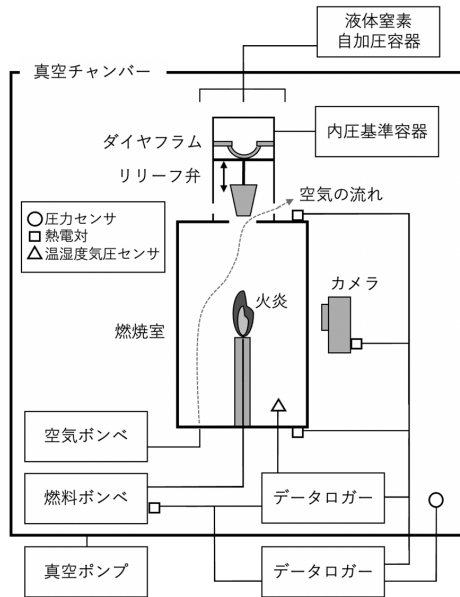


図8 低圧・低温実験の模式図

低圧・低温実験に使用した実験装置の詳細を表1に示す。実験では真空ポンプ（油回転式）を使用して減圧し、計測には用途に応じたセンサを使用した。また、データロガーは配線の都合上、真空チャンバー内外に分けて2台設置した。外部では真空チャンバー内圧力および装置表面温度を記録し、内部では装置表面温度および燃焼室内温湿度・圧力を記録した。

表1 低圧・低温実験に使用した実験装置一覧

実験装置	製品名(型番)	製造元
真空チャンバー	特注	(株)ネッケン
真空ポンプ(油回転式)	KRP-7500	大亜真空(株)
自加圧容器	SP-120S	(株)ジェック東理社
圧力センサ(チャンバー内)	SW-1	(株)ULVAC
圧力センサ(燃焼室内)	VUS-31-N	(株)PISCO
温湿度気圧センサ(燃焼室内)	BME280	BOSCH(株)
熱電対(装置表面)	シース熱電対(K種Φ1.6)	坂口電熱(株)
空気流量センサ	PFM710	SMC(株)
データロガー(チャンバー外)	GL220	グラフテック(株)
データロガー(チャンバー内)	Arduino Nano Every	Arduino.cc
カメラ(火炎撮影用)	GoPro HERO7 Black	GoPro

実験条件は、高度30 km相当圧力の約12 hPaまで減圧後、液体窒素を真空チャンバー内に放出して装置全体を冷却するという設定である。液体窒素は自加圧容器に充填して真空チャンバー外部に設置した。液体窒素の放出にあたっては、銅管を真空チャンバー外部の自加圧容器からチャンバー内まで接続し、銅管先端の放出口を火炎維持装置に向けて設置した。装置全体を冷却するために、放出口は3箇所に分岐させた。減圧後に、装置表面の温度センサ出力値を外部で観測しながら、自加圧容器の流量調整弁を開閉して温度制御を行うこととした。冷却目標温度はフライト中の最高高度となる30 km相当の-47℃に加え、最低温度となる20 km相当の-57℃としてそれぞれ実験した。

3.2 低圧実験の概要

低圧・低温実験の結果を踏まえて、低圧環境での火炎挙動と煤の付着状況について調べるため、低圧実験を行った。実験にあたって、図9に示す自作真空チャンバーを使用した。



図9 自作真空チャンバーの外観

実験は図10のように、真空チャンバー内に火炎維持装置（燃焼室、内圧基準容器、空気ボンベ、燃料ボンベ）と火炎撮影用のカメラを入れ、点火した後に真空チャンバー内を減圧した。実験中は、燃料ボンベ表面の温度、カメラ表面の温度、ガラス管上部・下部の金属部品の温度、真空チャンバー内圧力、燃焼室内温湿度・圧力に加え、空気・燃料の流量をそれぞれセンサで計測し、データロガーで記録した。低圧実験に使用した実験装置の詳細を表2に示す。実験では真空ポンプ（油回転式）を使用して減圧し、計測には用途に応じたセンサを使用した。また、データロガーは配線の都合上、真空チャンバー内外に分けて2台設置した。外部では真空チャンバー内圧力および空気・燃料の流量を記録し、内部では装置表面温度と燃焼室内温湿度・圧力を記録した。煤の付着状況については、実験後の燃焼室内壁への煤の付着量を観察した。毎回の実験前に燃焼室内の煤を同一の手順で除去しておき、一定時間の実験前後の燃焼室側面を撮影した。撮影後の画像を用いて、各空気流量における煤の付着状況を比較した。

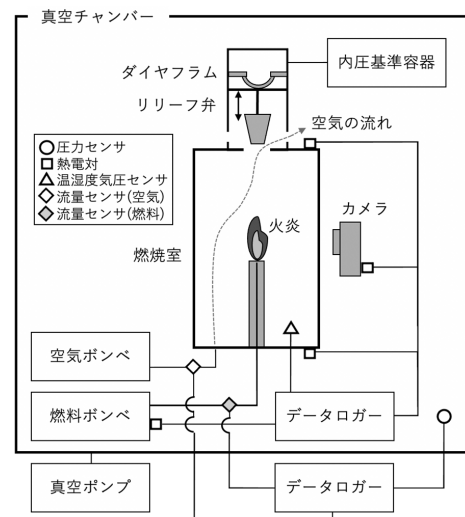


図10 低圧実験の模式図

表2 低圧実験に使用した実験装置一覧

実験装置	製品名(型番)	製造元
真空チャンバー		自作
真空ポンプ(油回転式)	VR16F3	(株)日立製作所
圧力センサ(チャンバー内)	VUS-31-N	(株)PISCO
温湿度気圧センサ(燃焼器内)	BME280	BOSCH(株)
熱電対(装置表面)	—	Off-brand
空気流量センサ	PFM710	SMC(株)
燃料流量センサ	PFMV505 (計測部) PFMV300 (モニタ)	SMC(株)
データロガー	Arduino Nano Every	Arduino.cc
カメラ(火災撮影用)	GoPro HERO7 Black	GoPro

実験条件は、自作真空チャンバーの下限圧である高度20 km相当の約55 hPaまで減圧後、30 分間燃焼を維持し、その際の火災挙動と煤の付着量を観察するという設定である。燃料流量は0.1 L/minに固定し、空気流量を1～4 L/minの範囲で変更することとした。この設定値にした根拠としては、まず、火災が高さ約30 mmの層流火災として撮影に適した状態になるよう、燃料流量を調整する必要があった。調整の結果、燃料流量は0.1 L/minとして固定することにした。次に、空気流量を決めるにあたっては燃料と完全燃焼する空気量を計算した⁶⁾。炭化水素の燃料の分子式を C_nH_m とすると、完全燃焼する場合の化学反応の基礎式は式(1)のとおりとなる。

$$C_nH_m + (n + m/4)O_2 = nCO_2 + (m/2)H_2O \quad (1)$$

式(1)に従い、プロパン(C_3H_8)とブタン(C_4H_{10})それぞれについて化学反応式を立式し、プロパン40 %・ブタン60 %の混合ガス燃料が完全燃焼する場合に必要な酸素量を計算すると、燃料と酸素の体積比は1:5.9となる。乾燥空気における酸素の体積割合は20.9 %であるから、完全燃焼する燃料と乾燥空気の体積比は、理論的には1:28.1となる。よって、燃料流量が0.1 L/minのとき、理論的な完全燃焼には2.81 L/minの空気が必要になる。そこで、実験ではその前後の範囲で空気量を調整して比較することとし、範囲を1～4 L/minと定め、1.0 L/min, 1.5 L/min, 2.0 L/min, 3.0 L/min, 4.0 L/minの5条件で実験を実施した。

4. 実験結果および考察

4.1節で日本大学の真空チャンバー設備を使用した低圧・低温実験について、4.2節で自作真空チャンバーを使用した低圧実験について述べる。低圧・低温実験は高度20 kmおよび30 km相当温度の再現実験の結果について述べる。

4.1 低圧・低温実験

4.1.1 高度20 km相当温度の再現

図11に示すとおり、実験時の真空チャンバー内圧力を約5 hPaまで減圧し、その後液体窒素を放出した。液体窒素放出開始後、装置表面温度は約-90℃まで急激に低下した。冷却目標温度は-57℃だったが、液体窒素放出量の微調整が困難であったため、急激な冷却となった。チャンバー内圧力は、液体窒素放出開始に伴い約150

hPaまで上昇した。このとき、火災は液体窒素放出開始から約8分後に消炎した。

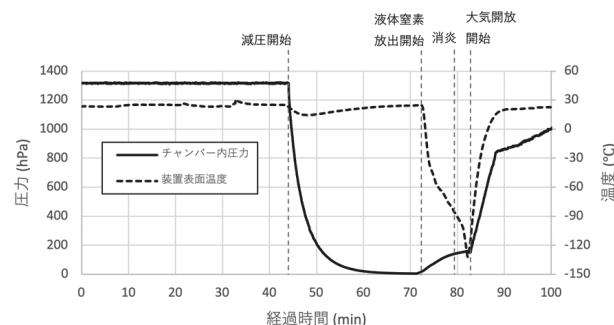


図11 チャンバー内圧力と装置表面温度の変化

消炎の原因としては、燃料供給量の減少と火炎温度の低下が考えられる。まず、燃料供給量について考察する。図12に示すとおり、燃料ポンペ表面の温度はほぼ変化がなく、断熱材の効果が確認できた。よって、燃料ポンペからの燃料供給量はほぼ一定に保たれていると考えられる。また、燃料供給配管は加熱・保温していたため、ここでの燃料液化の可能性は低いと考えられる。

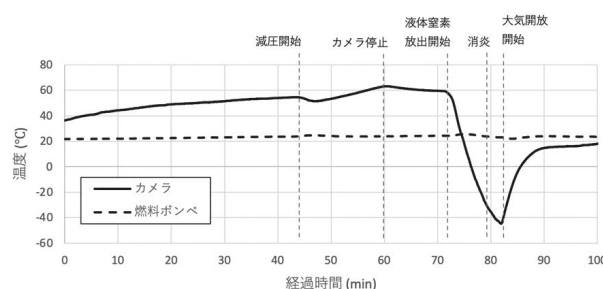


図12 カメラ表面と燃料ポンペ表面の温度変化

一方、燃焼室下部に位置する金属部品の外側表面温度は、図13のとおり約-35℃まで冷却されていたことから、金属部品と接続している燃焼ノズルも同様に冷却されたと考えられる。よって、燃焼ノズル内での燃料液化の可能性はある。続いて、火炎温度の低下については、燃焼室の冷却で燃焼室内温度が低下し、火炎温度の低下につながった可能性がある。しかし、火災の挙動は消炎直前まで安定しており、色や高さはほぼ変化していなかったことから、主たる原因は燃料供給量の減少だと考えられる。なお、燃焼室内の温湿度・圧力については、チャンバー内データロガーの不具合により記録することができなかった。現時点では情報が不足しているため、今後の研究で特性を明らかにしていく必要がある。

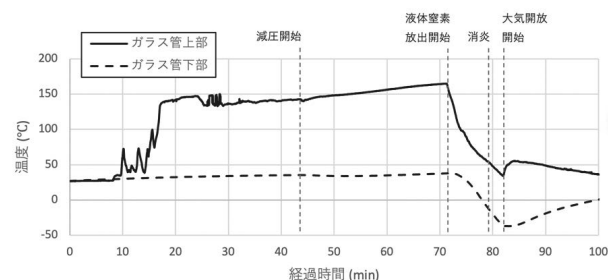


図13 ガラス管上部・下部の金属部品の温度変化

火炎挙動の他に明らかになった点が3点ある。1点目は、カメラの停止である。カメラは実験中の火炎記録用として、燃焼室から約50 mmの距離に設置して撮影したが、減圧後約17分で停止した。原因としては、カメラ内の発熱、火炎からの放射熱、放熱量の減少が考えられる。図12のとおり、停止前までは表面温度が上昇し、停止後に低下していることから、撮影中のカメラ内の発熱が確認できた。加えて、カメラと燃焼室の距離が近く、火炎からの放射による加熱があったと考えられる。また、減圧で対流による熱移動が少なくなり、カメラ外への放熱量が減少する。これらの原因によってカメラが作動限界温度に達し、自動停止したと考えられる。今後、中層大気中での撮影装置の開発にあたっては、熱移動に関する検証を入念に行う必要がある。

2点目として明らかになったのは、燃焼室上部の加熱である。図13のとおり、ガラス管上部金属部品の外側表面温度は減圧後に最大で約160℃まで上昇していることが確認できた。これは、火炎からの放射熱に加え、高温の燃焼ガスが燃焼室上部から排気される際の加熱が原因だと考えられる。燃焼室上部は金属と耐熱ゴム部品によって構成されており、実験後の損傷はなかったが、より長時間の減圧ではさらに高温になる可能性があるため、加熱への対策を検討する必要がある。

3点目として明らかになったのは、煤の付着である。減圧開始後、燃焼室内壁に大量の煤が付着した。煤の付着量は時間とともに増大し、火炎の撮影を妨げる結果となった。原因としては、空気流量や燃料流量の変化に伴う適正な空燃比からの逸脱が考えられる。空気流量については、空気ボンベからレギュレータで減圧後に流量制御弁で調整しているが、使用したレギュレータは外気圧の低下によって出力圧が低下するという特性がある。そのため、チャンバーの減圧に伴って出力圧が低下し、燃焼室への空気供給量が減少した可能性がある。今後、空気供給量制御の方法を検討するとともに、煤の発生・付着を抑制する空燃比について確認する必要がある。

4.1.2 高度30 km相当温度の再現

図14に示すとおり、実験時の真空チャンバー内圧力を約8 hPaまで減圧し、その後液体窒素を放出した。液体窒素放出開始後、装置表面温度は約-20℃まで低下した。冷却目標温度は-47℃だったが、実験途中で自加压容器内の液体窒素残量がなくなり、目標温度までは到達しなかった。そこで、約20分間の液体窒素放出終了後に約40分間実験を継続し、火炎の挙動を観察した。その結果、減圧開始から約90分後の実験終了時まで火炎が維持された。

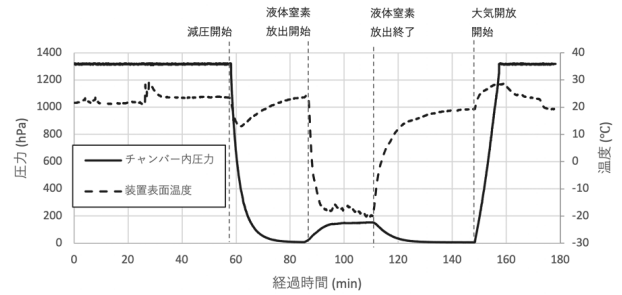


図14 チャンバー内圧力と装置表面の温度変化

このとき、図15に示すとおり、燃焼室内の圧力はチャンバー減圧後に約1,600 hPaでほぼ一定に維持されていた。よって、独自の圧力維持機構が設計通りに機能していることが確認できた。チャンバー減圧中に燃焼室内圧力が上昇している点については、圧力維持機構内のダイヤフラムが外気と接しているため、外気圧の低下に伴ってリリーフ圧力が上昇したことが原因だと考えられる。今後は外圧とリリーフ圧力の関係についてより詳細に把握する必要がある。

続いて燃焼室内の温度についてみると、図15のとおり液体窒素の放出開始前は上昇傾向で、放出開始後に約40℃から約20℃まで低下していたことが確認できた。温度上昇は火炎による加熱、低下は燃焼室全体の冷却および空気供給配管内での空気冷却が原因と考えられる。なお、計測開始から130分以降の燃焼室内圧力・温度については、チャンバー内データロガーの不具合により記録することができなかった。

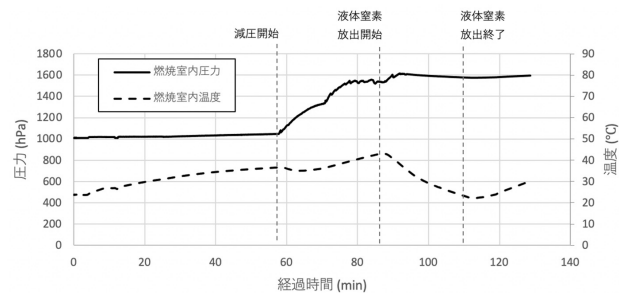


図15 燃焼室内の圧力と温度変化

火炎の挙動については、液体窒素放出開始後、装置の冷却に伴って火炎の明るさは暗く、高さも小さくなっていった。液体窒素放出終了後は、火炎が数分間やや明るくなる変化が2度観察され、それ以外では暗い状態が継続した。大気開放時には火炎が明るくなっていき、実験開始時の明るさに戻った。なお、煤の付着により、液体窒素放出終了後は火炎の高さや色の観察ができなかった。

火炎の挙動変化の原因としては、レギュレータ特性による空気供給量の減少に伴う酸素濃度の低下が考えられるが、一時的に明るくなった理由は解明できていない。燃料供給については、図16のとおり、燃料ポンペ表面の温度はほぼ一定に維持されていたことから、ポンペからの燃料供給量はほぼ一定に保たれていると考えられる。また、図17のとおりガラス管下部温度は約20℃までの冷却にとどまっていたので、燃焼ノズル内での燃料液化の可能性は低い。実験中は空気・燃料の流量を計測しておらず、原因を完全には特定できていないが、今後の課題の1つとして引き続き検討していく必要がある。

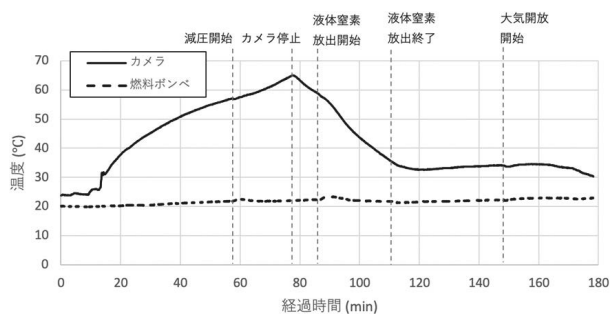


図16 カメラ表面と燃料ポンペ表面の温度変化

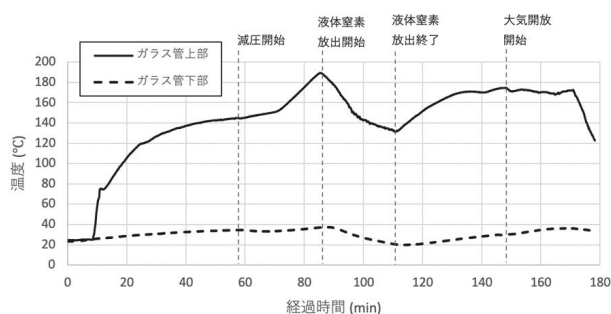


図17 ガラス管上部・下部の金属部品の温度変化

高度20 km相当温度の再現実験と同様に、カメラの停止、燃焼室上部の加熱、煤の付着が確認された。カメラは図16のとおり、表面温度約65℃で停止したことから、作動限界温度が60~65℃前後の範囲であると考えられる。燃焼室上部の加熱については、図17のとおりガラス管上部金属部品の外側表面温度が最大で約160℃まで上昇していることが確認できた。部品に損傷はなかったが、減圧時間が長いとより高温になる可能性があると考えられる。煤の付着については、減圧後に燃焼室内壁に大量の煤が付着し、火炎の観察を妨げた。これらの点について、さらに詳細なデータを収集し、対策を検討する必要がある。

以上のとおり、2種の低圧・低温実験から多くの知見が得られた。実験を通して、低圧かつ-20℃の低温環境では火炎が維持されたことから、独自の圧力維持機構が設計通りに機能していることが確認できた。一方、急激な冷却では消炎し、燃料・空気の流量制御についてのさらなる検討が必要であるとわかった。また、両実験で減圧後に大量の煤が燃焼室内に付着し、火炎の撮影を妨げるという問題が発生した。カメラの停止、燃焼室上部の加熱といった問題も明らかになった。これらの点について、今後の研究で対策を検討する必要がある。

4.2 低圧実験

低圧・低温実験で明らかになった課題点をもとに、図10に示す自作真空チャンバーを用いて低圧実験を行った。燃料は0.1 L/minに固定して実験した結果、空気流量が1.0 L/minのときは燃焼室の密閉から約2分後、真空チャンバーの減圧前に消炎した。1.5 L/min以上のときは真空チャンバーを高度20 km相当目標圧力の約55 hPaまで減圧後、30分間の実験終了時まで火炎が維持された。このとき、図18に示すとおり、真空チャンバーの減圧開始後に空気流量が減少していることが確認できた。空気流量にかかわらず、減圧後は初期設定量の約85%まで減少していた。これは、レギュレータの特性によるものだと考えられる。

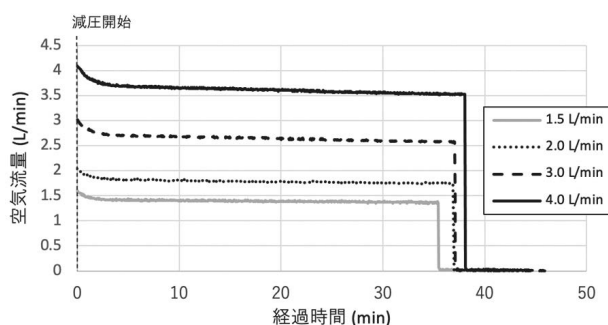


図18 空気流量の変化

図19に示すとおり、空気流量ごとに異なる火炎の状態が観察できた。なお、図19において空気流量1.0 L/minは消炎直前の状態、1.5 L/min以上は目標圧力到達から20分後の状態を示している。1.0 L/minでは、燃焼室密閉後に暗く青い火炎になっていき消炎したことから、燃焼に必要な酸素濃度が維持できていなかったと考えられる。1.5 L/min以上のときは、空気流量が多いほど明るい火炎になり、特に3.0 L/min以上では安定した挙動を示した。2.0 L/min以下では、理論的な完全燃焼に必要な空気量2.81 L/minを満たしていないため、燃焼反応が不活発であったと考えられる。

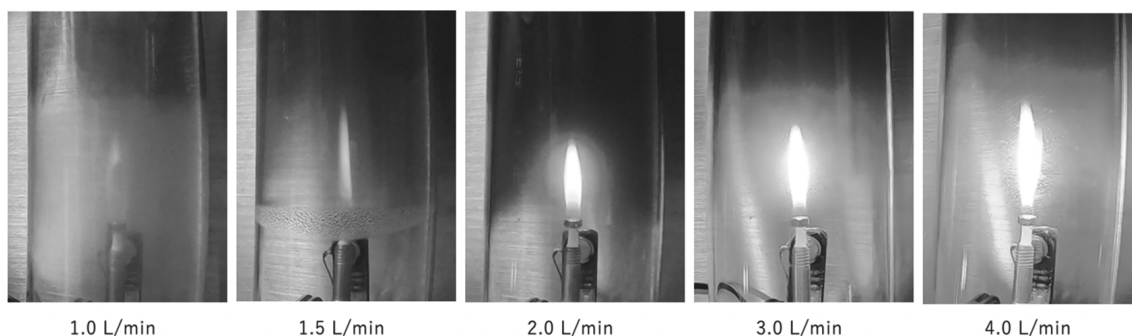


図19 各空気流量における火炎の状態

続いて、図20、図21、図22は減圧開始後における燃焼室内の圧力、温度、湿度、の変化についてそれぞれ比較したグラフである。圧力については、図20に示すとおり空気流量にかかわらず1,500 hPa前後でほぼ一定に維持されていた。よって、圧力維持機構が空気流量の変化に関わらず設計通りに機能していることが確認できた。温度については、図21に示すとおり空気流量にかかわらずほぼ同様の上昇傾向が確認でき、実験終了時には40℃前後まで上がっていた。より長時間の燃焼ではさらに高温になる可能性があり、今後の研究でデータを収集する必要がある。相対湿度については、図22に示すとおり減圧後に5%未満の状態を保っていた。供給しているのは乾燥空気であり、燃焼ガス中の水蒸気は速やかに排気されていたためだと考えられる。

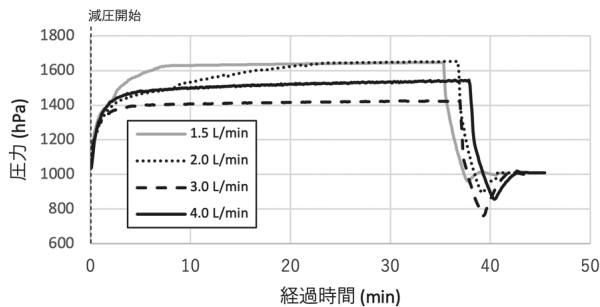


図20 各空気流量における燃焼室内圧力変化

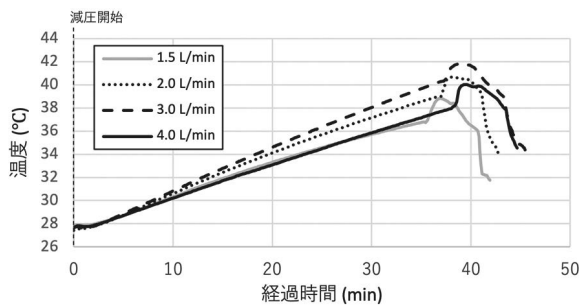


図21 各空気流量における燃焼室内温度変化

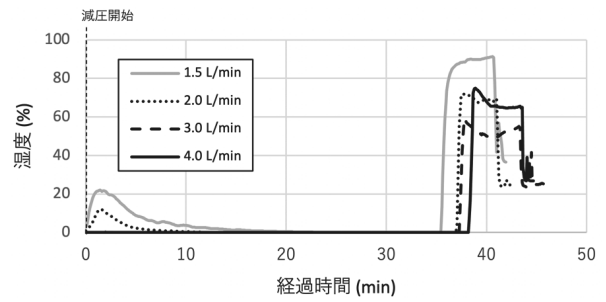


図22 各空気流量における燃焼室内湿度変化

実験後の煤の付着状況は、図23に示すとおり、空気流量ごとに違いが見られた。煤はどの実験でも燃焼室内壁の燃焼ノズルより上部の範囲に付着していたが、2.0 L/minのときに付着部分が最も多く、4.0 L/minのときに最も少ないという結果になった。以上の結果から考察すると、1.5 L/minのときは燃焼反応が不活発だったことから、煤の発生量が少なかったと考えられる。また、3.0 L/minと4.0 L/minのときは、完全燃焼に近づき煤の発生量が減少した可能性がある。加えて、空気流量の増加に伴って排気速度が増加しているため、煤が速やかに排気され、燃焼室内壁への付着の抑制につながったと考えられる。打ち上げの際に搭載できる空気ポンベの容量には限りがあるため、少ない空気容量で煤の発生・付着を抑制するためのさらなる検討が必要である。

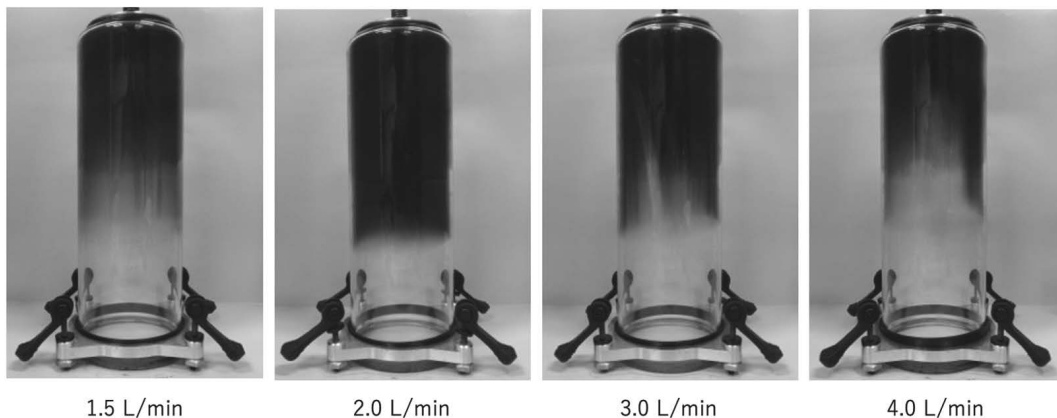


図23 各空気流量における煤の付着状況

5. おわりに

本研究では、中層大気中の低圧・低温環境下における火炎維持装置を設計・製作した。そして、地上実験装置を用いて、低圧・低温環境下における火炎維持装置の特性検証実験を実施した。その結果、独自の圧力維持機構が低圧かつ-20℃までの低温環境下で設計通りに機能し、低圧環境では空気流量の変化によらず機能することが確認できた。低温環境では、燃料ポンプ表面の断熱材の効果が確かめられたが、火炎は消炎または不安定な挙動を示す結果となり、燃焼ノズル内での燃料液化や空気供給量の低下が課題となった。同時に、カメラの停止、燃焼室上部の加熱、燃焼室内への煤の付着といった問題点が明らかになった。低圧環境で空気流量を変化させると、0.1 L/minの燃料に対して3.0 L/minおよび4.0 L/minの空気流量に設定した場合、火炎が安定した状態で燃焼することがわかった。また、煤の付着状況は空気流量によって変化することが確認できた。今後はより詳細なデータを収集し、明らかになった課題点をもとに設計を改良する必要がある。

ELPの打ち上げに向けては、本研究で実施した低圧・低温実験のほか、フライト中の衝撃への耐性を検証する衝撃実験、洋上への落下時の耐性を検証する着水実験等の実験を行う必要がある。カメラについては、実験結果をもとに過熱による停止を防ぐための熱管理を検討する必要がある。また、本研究で開発した火炎維持装置の他に、システム全体としてバルーンや通信装置等の開発が必要である。同時に、打ち上げ装置全体の安全性を詳細に検討し、法規に則った打ち上げ環境の整備が必須となるため、計画的に開発を行っていく必要がある。

謝辞

本研究の遂行にあたり、千葉大学大学院人文公共学府博士後期課程・学生団体おりがみ代表の都築則彦氏には本研究の発端となるELPの企画・実行を通じて火炎維持装置開発の機会を与えて戴いた。また、東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻・津江光洋教授、同専攻博士課程・久保勇貴氏、株式会社Tryfunds・Vice President大橋昭文氏には装置設計・実験に関する有益なご討論とご助言を戴いた。東京大学の今村俊雄氏、河野麗氏、豊島拓氏、戸田寛人氏、藤澤天馬氏には計測装置開発等を通じて実験遂行にご協力戴いた。この場をお借りして感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 名古屋大学宇宙開発チーム NAFT ホームページ, <https://naft.space>, (参照日: 2020/10/23).
- 2) 日本航空宇宙学会編, 航空宇宙工学便覧 第2版, 丸善出版, pp.7-11, 1992年.
- 3) 新岡嵩, 燃える - ろうそくからロケットの燃焼まで -, オーム社, pp.19-39, 1994年.
- 4) 日本機械学会, 技術資料 流体の熱物性値集, 日本機械学会, p.20, 1983年.
- 5) 水谷幸夫, 燃焼工学, 森北出版, p.117, 1977年.
- 6) 田坂英紀, 現象から学ぶ燃焼工学, 森北出版, pp.84-86, 2007年.