

ⅢⅢ 「きぼう」利用重点課題テーマ「FLARE」ⅢⅢ
(解説)

Solid Combustion テーマおよび固体燃焼実験装置の概要

菊池 政雄

Overview of the “Solid Combustion” Experiment and the Solid Combustion Experiment Module

Masao KIKUCHI

Abstract

This paper describes overview of the “Solid Combustion” experiment to be performed in Kibo on the ISS. In this experiment, three types of solid material (polyethylene insulated wires, thin PMMA sheets and thin filter papers) are selected as test samples. Flammability of these materials are quantitatively determined in microgravity by evaluating the limits of two fundamental processes of solid material combustion, which are (1) ignition limit of the solid material, and (2) flame spread limit (extinction limit) over the solid material. Results from “Solid Combustion” will play an important basis of another experiment called “FLARE”. Overview of the Solid Combustion Experiment Module, to be developed for executing the “Solid Combustion” and “FLARE” experiment, is also introduced in this paper.

Keyword(s): Solid Combustion, Material Flammability, Microgravity, Kibo, ISS

Received 7 Aug. 2015, accepted 15 Oct. 2015, published 31 Oct. 2015

1. はじめに

国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験棟「きぼう」では、液滴群燃焼実験“Group Combustion”¹⁾が燃焼科学分野で最初の実験テーマとして実施される予定であり、実験機器本体の打上げも近く予定されている。それに続く燃焼実験として、固体材料の微小重力環境下における燃焼性に関する2つの実験テーマの実施が計画されている^{2,3)}。1つは、「きぼう」船内実験室第2期(後半)利用公募にて2010年3月に選定された“Solid Combustion”テーマ^{2,3)}であり、もう1つは「きぼう」船内実験室第3期利用公募にて重点研究課題として2012年11月に選定された“FLARE”テーマ²⁾である。

Solid Combustion テーマについては、既に他報での概要紹介がなされており²⁻⁴⁾、FLARE テーマに関する詳細についても、今回の特集号において他の著者により別の原稿が作成される予定である。そのため、本稿においては FLARE テーマの基礎を担う Solid Combustion の概要について短く紹介したうえで、両テーマで共通的に使用する想定で現在開発の初期フェーズにある、固体燃焼実験装置の概要に主な焦点を当てて報告することとする。

2. Solid Combustion テーマの概要

Solid Combustion テーマの正式名称は、「宇宙火災安全性評価の基礎となる重力条件による固体材料燃焼性変化の定量的把握」である。代表研究者 (PI) は、FLARE テーマと同じ藤田 修 教授 (北海道大学) である。Solid Combustion では、重力条件の違いが固体材料の着火限界や燃え広がり火災の消炎限界にどのような影響を与えるかについて、基礎的な立場から明らかにすることを研究目的としている。

実験試料としては、ポリエチレン (PE) 被覆電線、薄い PMMA (ポリメタクリル酸メチル) シートおよび濾紙を使用する。これらの試料は、有人宇宙船内で主に使用される難燃性材料ではないが、短時間の微小重力実験でも一定の知見が得られることから地上研究で多用される標準的な試料である。物理的、化学的特性も比較的良く解明されており、数値シミュレーションによる燃焼メカニズムの検証等も容易であることから、材料の燃焼性に対する重力影響に焦点を当てた研究としては最適なものである。

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門きぼう利用センター 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
JEM Utilization Center, Human Spaceflight Technology Directorate, Japan Aerospace Exploration Agency,
2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505 Japan
(E-mail: kikuchi.masao@jaxa.jp)

Solid Combustion では、以下の 4 種類の実験内容の実施を予定している。

実験 1：PE 被覆電線への過電流印加による通電着火限界の明確化

実験 2：PE 被覆電線上の火炎燃え広がり と 消炎限界の明確化

実験 3：PMMA シート上の火炎燃え広がり と 消炎限界の明確化

実験 4：濾紙上の火炎燃え広がり と 消炎限界の明確化

全ての実験において、材料の着火あるいは消炎の限界条件の明確化が共通した目的となっている。これらの限界条件は短時間微小重力実験での取得は難しく、ISS における長時間の微小重力環境を活用した貴重なデータの取得と、その限界条件を決定するメカニズムを明らかにすることを意図している。

軌道上での実験 1 により取得を想定する被覆電線の着火限界マップの概念図を Fig. 1 に示す。横軸は被覆電線への印加電流、縦軸は雰囲気酸素濃度を表している。また、通常重力環境における着火範囲は Region 1 で表されている。これまでの短時間微小重力実験の結果によれば、微小重力環境においては通常重力環境に比べて着火範囲が低電流側に拡大する (Region 2) ことが示されている^{2, 5-6)}。しかし、実験時間の制約から、短時間微小重力実験では着火が起こる限界条件を明確にすることはできない。そこで、「きぼう」での軌道上実験により、長時間微小重力環境における着火限界 (Region 3) を明確化する。実験 1 では、比較的低電流を連続的に通電した場合の着火限界に加え、短時間に高電流が印加された場合の着火限界についても調べられる。後者については、ショート等に起因する過電流が被覆電線に流れ、ブレーカー等の保護機構が作動した場合の着火限界に相当するものである。微小重力環境では、電流印加が停止された後に気相での着火が起こる可能性のあることが示されており、着火限界を決定づけるメカニズムの解明は、宇宙火災安全性の観点から非常に重要な内容である。

次に、実験 2~4 で取得を想定する、固体材料上を燃え広がる火炎の消炎限界マップの概念図を Fig. 2 に示す。横軸は材料表面に並行且つ火炎の燃え広がり方向と反対向きの強制対向流速を、縦軸は雰囲気酸素濃度を表している。これまでの短時間微小重力実験の結果から、消炎限界酸素濃度の最小値 (MLOC: Minimum Limiting Oxygen Concentration) は、低流速条件で、通常重力場における値よりも小さくなり得ることが示唆されている。「きぼう」での軌道上実験では、後述する燃焼容器内の燃焼実験部に

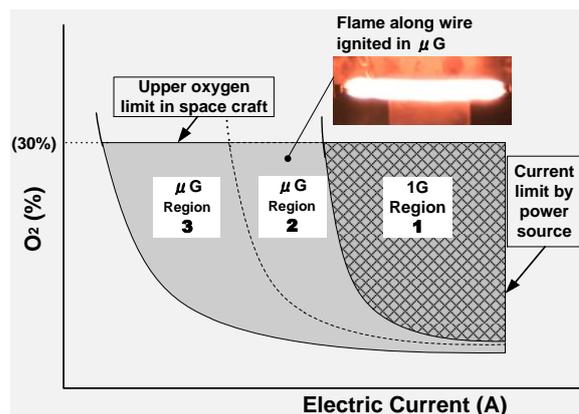


Fig. 1 Schematic on the concept of ignition map for the overloaded wires²⁾

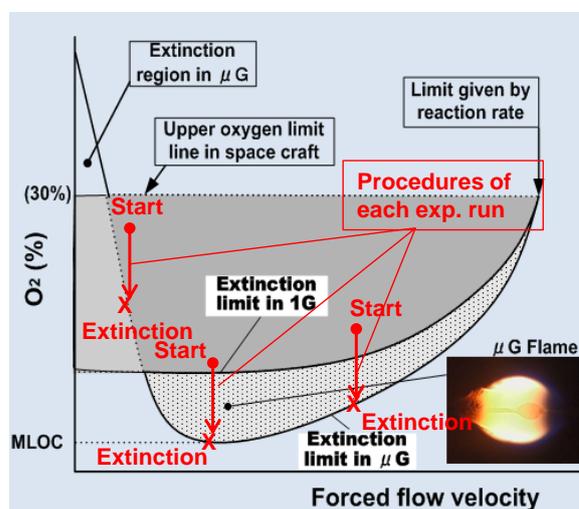


Fig. 2 Schematic on the concept of extinction map for flame spread over solid materials⁴⁾

設置された固体材料上の火炎燃え広がりを、対向流速一定の条件下で観察する。燃焼の継続と共に容器内の酸素濃度は低下するため、ある酸素濃度で消炎が起こる。この消炎限界酸素濃度を対向流速条件を変えて複数取得し、その材料の MLOC およびその際の流速条件を明らかにする。PE 被覆電線については、心線を通した熱輸送の影響が重要となるため、熱伝導率の異なる材質の心線による実験を行う。シート状試料については、PMMA と濾紙の 2 種類について実験を行うのは、燃え広がり時に炭素残渣の生成有無が消炎限界に与える影響を調べるためである。

シート状試料に関する実験 3 および 4 では、スケール解析により予測される消炎限界⁷⁾の検証を行うことが重要な目的の 1 つである。このためには、燃え広がり速度の計測に加え、火炎先端近傍における気相および固相の予熱帯長さを定量的に取得することが必要となる。軌道上実験では、

マイケルソン干渉計と赤外カメラを用いてこれらの計測を行う予定である。固体材料の燃焼性に関する軌道上実験は NASA 等によりこれまでもいくつか行われているが、それらの多くは火炎燃え広がり挙動の単純観察に留まっており、気相や固相の温度分布などの精緻な定量的計測は行われていない。Solid Combustion においては、高性能な観察機器を用いてこれらの定量的な計測を軌道上で初めて行うものであり、固体材料の微小重力環境下における燃焼性を考慮するうえで、今後、貴重なリファレンスデータとして世界的に幅広く活用されることが期待される。

3. 固体燃焼実験装置の概要

3.1 システム概要

Solid Combustion で使用する固体燃焼実験装置は、「きぼう」船内実験室に設置されている多目的実験ラック (MSPR)、もしくは H-IIB ロケット 5 号機/無人補給機「こうのとり」5 号機により 2015 年夏に打上げ、「きぼう」に届けられる予定の多目的実験ラック 2 号機 (MSPR2) のワークボリューム (WV) への設置を想定している。また、MSPR (もしくは MSPR2) の小規模実験エリア (SEA) には、実験に必要な含酸素ガスを充填したガスボトルが設置され、WV と SEA の貫通ポートを介して WV 内の実験装置にガスを供給する。Solid Combustion では、先に述べた Group Combustion 実験で使用すると同等なガスボトルを使用する。ただし、Group Combustion 実験では酸素濃度 21%、窒素濃度 79% のほぼ空気と同等のガス組成を充填したのに対し、Solid Combustion 実験では、実験条件の関係で酸素濃度 45%、窒素濃度 55% の組成で充填する必要がある。このため、ガスボトル本体を含め、高濃度酸素に曝される可能性のあるサブシステムに対しては、高濃度酸素雰囲気における火災防止への適切な対応が必要となる。実験装置へのガス供給系としては、ガスボトルからの含酸素ガス供給系に加え、ISS/「きぼう」からの GN2 (純窒素ガス) 供給系がある。

3.2 実験装置の概要

固体燃焼実験装置は、Solid Combustion 及び FLARE 両テーマの効率的な実施を念頭に置き、両テーマで共有するバス部と各テーマで独自に準備するミッション部から構成される。バス部は、燃焼容器、観察装置、電源・通信・制御装置、ガス給排気装置等で構成され、両テーマで共通的に必要となる機能を提供する。一方、ミッション部は、実験インサート、実験に必要なガスボトル等で構成され、各テーマで固有に必要な機能を実現する。実験装置が MSPR の WV に設置された状態の正面図を Fig. 3 に示す。

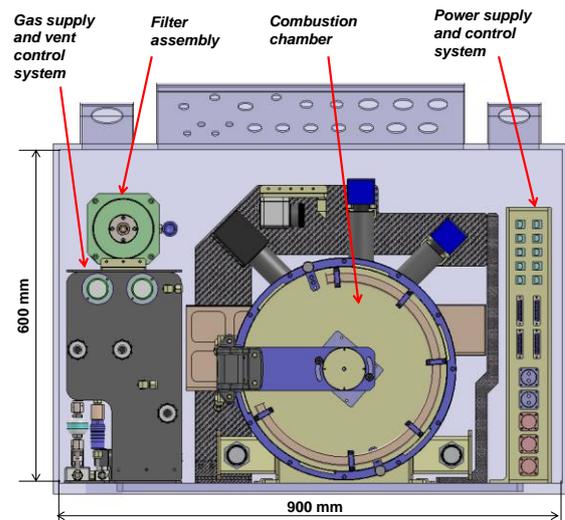


Fig. 3 Schematic of the Solid Combustion Experiment Module in the WV of the MSPR

実験装置は、幅 900 mm、高さ 600 mm、奥行き 700 mm の WV 内に設置される。WV のほぼ中央に位置するのが燃焼容器であり、実験インサートを内部に收容した状態で燃焼実験が行われる。燃焼容器の内容積は約 35 L、最大設計圧力 (MDP) は 0.2 MPa abs を予定している。燃焼容器正面の円形フランジ部には蓋があり、クレーによるハンドルの回転操作により、短時間に開閉が可能である。また、燃焼容器内には実験インサートの挿入・固定・取り外しを確実且つ容易に行うためのスライドレールが設置される。燃焼容器の上部円周方向には、外部に設置した観察装置による燃焼現象の観察を行うために、6 個の観察用窓が設置される。窓材としては、赤外カメラ観察用窓のゲルマニウムを除き、サファイアガラスを使用予定である。燃焼容器には、ガスボトルからのガス供給用ポート、ISS からの GN2 供給ポート (x2)、MSPR (MSPR2) のガス排気ラインを通じたガス排気用ポートの計 4 個のガス給排気ポートが設置されている。Solid Combustion 実験における燃焼生成物として、これまで毒性レベル 1 以上と評価された物質は無い (毒性レベルは 0) もの、毒性レベル 1 の物質でも安全に封入するため、開閉蓋、観察用窓、ガス給排気ポートの QD 等、燃焼容器からのリーク経路になり得る箇所は全て 2 重シール設計となっている。

燃焼容器周囲に配置された観察装置を斜め方向から見た図を Figure 4 に示す。観察装置としては、高速度ビデオカメラ、可視カメラ (x3)、赤外カメラ、およびマイケルソン干渉計 (可視カメラ含む) がある。高速度ビデオカメラは、実験 1 において被覆電線への過電流印加による気相での着火位置および着火遅れ時間を高精度に特定するために使用されるほか、実験 2 において被覆電線上を燃え

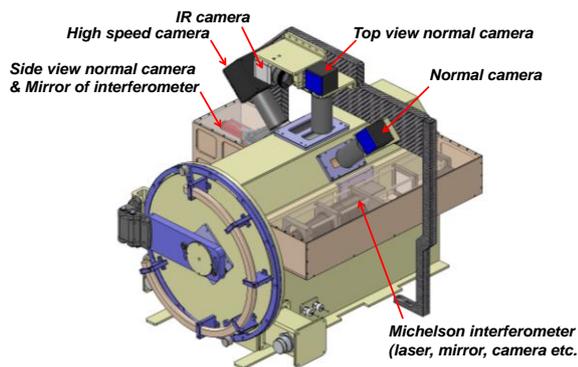


Fig. 4 Schematic of the observation devices around the combustion chamber

広がる火炎のバックライト撮影により、熔融した被覆材の非定常挙動およびスス粒子の形成挙動の観察にも使用される。複数の可視カメラは、各実験において、それぞれ異なる方向からの実験試料・火炎の観察、および燃焼容器内部全体の状態把握等に使用される。赤外カメラは、試料表面温度の計測に、またマイケルソン干渉計は試料表面近傍の気相密度分布の計測に使用される。マイケルソン干渉計の軌道における光軸調整は、可動ミラーを地上からのコマンド操作で調整することにより実施する。

電源・通信・制御装置は、MSPR(MSPR2)から供給された電力を、実験装置の各機器に必要な電圧に変換のうえ供給するほか、地上からのコマンド入力およびシーケンスファイルによる実験装置各機器の制御、各種計測機器からのテレメトリデータの出力等の機能を担う。ガス給排気装置は、ガスボトルからの含酸素ガス供給系、ISSからのGN2供給系、MSPRガス排気ラインへのガス排気系等で構成される。各系統には、安全の確保に必要となる冗長系を含め、レギュレータ、圧力センサ、各種バルブ、不純物除去フィルター等が多数設置される。ガス給排気装置の操作により燃焼容器内に所定条件の雰囲気（酸素濃度、圧力）が形成され、燃焼実験が行われる。燃焼後は、ガス排気系に設置されたフィルタ Assy を通して必要な浄化処理を行ったうえで、ガスをISS外部へ排気する。フィルタ Assy はクルーによる交換が可能であり、各実験の燃焼ガス浄化に最適な吸着剤が充填される。

次に、ミッション部の主要サブシステムである実験インサートについて説明する。Solid Combustion では、2種類の実験インサートを使用する。実験インサート1は、被覆電線を試料とする実験1および2に使用され、実験インサート2は、シート状試料を用いる実験3および4に使用される。実験インサート1および2の概略図を Fig. 5 および Fig. 6 にそれぞれ示す。

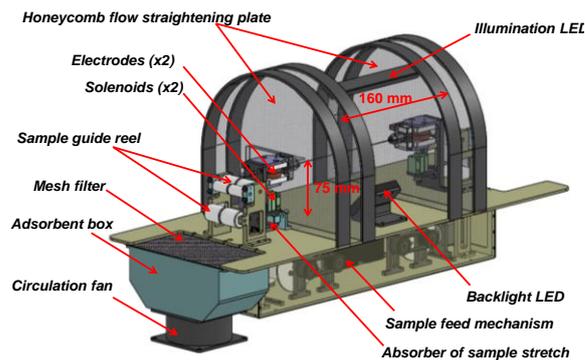


Fig. 5 Schematic of the experimental insert #1

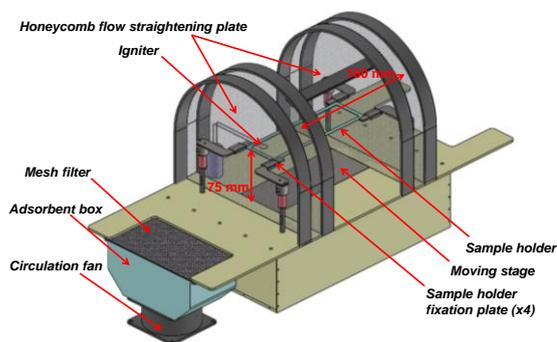


Fig. 6 Schematic of the experimental insert #2

両インサートとも、上部と下部を分けるプレートの上部にハニカムによる整流部、下部には試料収容部、ファン、吸着剤を収容したフィルター部が配置される。実験インサートを燃焼容器内に設置することにより、インサート上部と下部を循環する流路が燃焼容器内に形成され、ファンの回転数により内部流速の制御を行う。試料の燃焼は、プレート上部に配置された上流側と下流側のハニカム整流板間の燃焼実験部で行われる。燃焼実験部の長さは160 mmの予定である。下流側ハニカム整流部を通過した燃焼ガスは、メッシュフィルターを透過した後に吸着剤を収容したフィルター部に吸い込まれる。二酸化炭素ガスや水蒸気等の燃焼生成物はフィルター剤に吸着され、酸素と窒素で構成されるガスがプレート下部の流路内を移動し、プレート上部の上流側ハニカム整流部を通過して再度燃焼実験部に循環する。実験数の蓄積に伴うフィルター性能の低下を想定し、フィルター部はクルーによる交換が可能な設計とする。また、燃焼実験部の最大流速は25 cm/sを想定している。一方、両テーマで要求される、静止雰囲気を除く最小流速は0.5 cm/sとなっている。このような極めて低速の流れ場において高精度に速度計測を行うことは難しい。そのため、インサートのプレート下部流路内にオリフィスを



Fig. 7 Picture of a prototype unburned sample reel⁴⁾

設置して局所的に流速を上げ、軌道上ではそこでの流速を計測する予定である。ファンの回転により誘起される流速に対する重力の影響はほぼ無視できると考えられるので、打上げ前に通常重力場において PIV（粒子画像流速計測法）等によりオリフィス部と燃焼実験部における流速の相関を把握しておくことにより、軌道上実験時における流速制御に使用する予定である。

実験インサート 1 と 2 では、試料の収容形態および燃焼実験部への供給機構が大きく異なる。被覆電線を試料とする実験インサート 1 では、試料はプレート下部の試料保管スプールに巻きつけられた状態で保管され、プレート下部および上部のガイドリール、ハニカム整流板に設置された小径の穴を介して燃焼実験部に入り、反対側の整流板、ガイドリールを通して最終的にはプレート下部の試料回収スプールに巻き取られる。試料保管スピールの写真を Fig. 7 に示す。試料の送り、巻き取りはプレート下部のモータにより行われる。実験 1 および 2 に使用される被覆電線には、被覆厚さが異なるものや心線材質が異なるものもあるが、それらは全て 1 本の線として結合された状態でスプールに設置される。

上流側（下流側）ハニカムの更に上流側（下流側）には、電線への過電流印加による着火現象の観察を行う実験 1 において、電線に通電を行うための電極が配置される。また、実験 1 用試料については電極位置付近の被覆を予め剥がした状態で試料が設置される。電極への通電を行うことにより、ハニカム間の燃焼実験部において電線被覆の着火現象が観察される。1 つの条件実施後は、所定量だけ試料を送り、次の実験条件を実施する。各電極は、通電時には電線を上下から挟み込むような形であるが、実験終了後の試料送りの際には上下の電極部が離れ、スムーズな試料送りを行えるようになっている。実験 1 は全て静止雰囲気中での実験であり、燃焼実験中の試料送りは行わない。一方、被覆電線上の燃え拡がり観察と消炎条件の探索を行う実験 2

においては、燃焼実験部に設置される電熱線により試料に着火した後、火炎燃え拡がり速度と同等の速度で逆向きに試料送りを行うことにより、燃焼実験部のほぼ中央に火炎を定在させる制御を行いつつ現象の観察を行う。これは、熔融被覆材体積の時間変化、燃え拡がり速度の定常性確認等に比較的長時間を要する一方、バックライト画像による拡大映像等の視野は、一定の範囲に限定されるためである。火炎の位置および燃え拡がり速度は、制御装置内に組み込まれたソフトウェアが観察画像を基に自動的に解析し、必要な試料送り制御を行う。

実験インサート 2 においては、シート状の試料は個別の試料ホルダに設置される。試料ホルダは内部に開口部を持つ薄い 2 枚の板で試料を上下から挟み込む形で構成される。板の開口部幅により燃焼実験に供される試料幅が決定される。開口部の最大長（燃焼実験に供される試料の最大長）は 150 mm の予定である。試料幅の異なる 2 種類の試料ホルダの概念図を Fig. 8 に示す。

実験インサート 2 のプレート下部には、数十枚の試料ホルダを上下方向に積み重ねる形で収容した試料保管部がある。実験時には、試料保管部の最も上部にある試料ホルダが、試料カード自動交換機構によりプレート上面の燃焼実験部まで移動、配置される。試料への着火は、燃焼実験部に設置される電熱線により行われ、燃え拡がり・消炎挙動の観察が行われる。その後は、試料カード自動交換機構

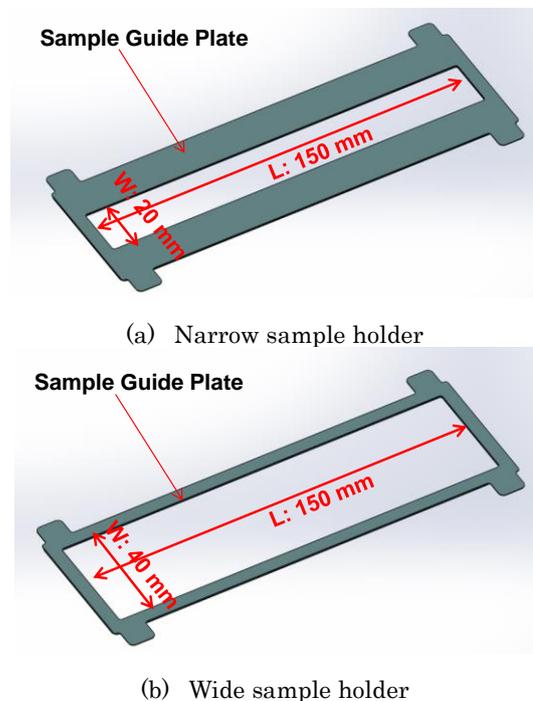


Fig. 8 Schematic of the sample holders for sheet materials⁴⁾

が試料ホルダをプレート下面の試料回収部まで移動、収容する。試料回収部には、試料保管部と同量の試料ホルダを収容可能である。実験インサート 2 の大きな特徴として、試料回収部の使用済試料ホルダの回収および試料保管部への新しい試料ホルダの設置を、クルーが行う点が挙げられる。これにより、試料カード自動交換機構を含むインサート本体を継続的に利用しつつ、試料ホルダのみの打上げ・交換により多くの実験を実施することが可能となる。

3.3 開発状況および今後の予定

固体燃焼実験装置については、2014 年 11 月にシステム要求審査 (SRR) が実施され、装置に対するシステム要求が制定された。また、これを受け開発メーカ選定のための技術提案公募が 2014 年 12 月に発出され、評価の結果、(株) IHI 検査計測 (IIC) が 2015 年 3 月に開発メーカとして選定された。現在は、実験装置の予備設計および要素試作試験を実施中である。また、本装置においては高濃度酸素を使用する点等、安全性に関する検討・設計が重要であることから、正式な安全審査に先立ち、JAXA 及び NASA の関連部署との各種確認・調整を早い段階から実施し、手戻りのない開発を実現するよう留意している。

なお、これまで述べてきた固体燃焼実験装置の機能・性能等は現状の想定に基づくものであり、今後の設計進捗等によっては変更の可能性がある点にご留意頂きたい。装置開発における次のマイルストーン審査としてはシステム定義審査 (SDR) が想定されており、早ければ年内に実施を予定している。現在想定している実験装置開発スケジュール (案) では、2017 年中のフライト品完成を予定し、2018 年以降の軌道上実験実施を目指している。

4. おわりに

本稿で述べてきた Solid Combustion テーマであるが、今後、大きな見直しが行われることが最近になり決定した。2015 年 7 月 1 日付の JAXA 組織再編により、これまで Solid Combustion の開発を担ってきた宇宙科学研究所 (ISAS) ISS 科学プロジェクトグループは、有人宇宙技術部門きぼう利用センターに統合された。一方、きぼう利用センターでは元々 FLARE テーマを推進していた。今後は、Solid Combustion テーマとしては取りやめとなり、そのうえで FLARE テーマの目的遂行のために Solid Combustion の必要な要素を取り込み、再構築していく予定である。装置開発においては、これまでも両テーマ実施のために最も効率的な形態を選択してきているが、より一層のコスト低減

を求められることとなる。

Solid Combustion テーマは、宇宙船内での火災を考えるうえで基礎的な過程である着火および材料表面上の火炎燃え広がりについて、それらの限界条件に対する重力環境の影響を基礎的な観点から明らかにすることを目指している。Solid Combustion により得られる結果は、燃焼学の更なる体系化・発展に貢献することはもちろん、“重力による固体材料燃焼性変化の科学的理解”に基づく“新たな宇宙材料火災安全性評価基準の提案”を目指す後続の FLARE テーマの基礎を担うものである。何故そのような結果が生まれるのか、どのような物理的、化学的プロセスが関与しているのか等、現象の本質に対する科学的な理解を有しない限り、実用材料の微小重力環境下における燃焼実験をいくら行ったとしても、それは単なるデータベースにしか過ぎない。一度、条件が変わると、どのような影響があるのかを予測する術は持たないのである。

このような Solid Combustion テーマが有していた重要な役割は、FLARE テーマの目的達成においても必要不可欠なものであり、今後の FLARE テーマの再構築、軌道上実験により得られる科学的成果の最大化、地上および宇宙での火災安全性向上に向けた具体的な成果の還元に向け、引き続き努めて行きたい。

謝辞

Solid Combustion および FLARE テーマの推進に対しご支援頂いている研究チーム各位、IIC をはじめとする JAXA 内外の関係者に謝意を表します。

参考文献

- 1) M. Mikami: J. of the Combustion Society of Japan, **56** (2014) 101.
- 2) O. Fujita: J. of the Combustion Society of Japan, **56** (2014) 117.
- 3) O. Fujita: Int. J. Microgravity Sci. Appl., **28** (2011) 90.
- 4) M. Kikuchi, O. Fujita, S. Takahashi, A. Ito, H. Torikai, Y. Nakamura and S.L. Olson: Proc. 45th International Conference on Environmental Systems, ICES-2015-213, to be published.
- 5) O. Fujita, T. Kyono, Y. Kido, H. Ito and Y. Nakamura: Proc. 33rd International Symposium on Combustion, 2011, p. 2617.
- 6) Y. Takano, O. Fujita, N. Shigeta, Y. Nakamura and H. Ito: Proc. 34th International Symposium on Combustion, 2013, p. 2665.
- 7) S. Takahashi, T. Ebisawa, S. Bhattacharjee and T. Ihara: Proc. 35th International Symposium on Combustion, 2015, p. 2535.