

宇宙システム部の「売りの技術」

宇宙システム部では、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）の協力の下、国際宇宙ステーション（以下、ISS）日本実験棟きぼうでは初の燃焼実験装置となる GCEM（液滴群燃焼実験装置：Group Combustion Experiment Module）を開発し、地球の軌道上で運用されることにより、噴霧燃焼現象に対する貴重な成果を収めた⁽¹⁾⁽²⁾。ここでは GCEM の装置概要およびその成果について紹介する。

1. 装置開発の背景

噴霧燃焼は、液体燃料を微細な液滴に霧化した上で燃焼させる一般的な方式であるが、相変化および化学反応が混在する非常に複雑な現象であるため、噴霧燃焼機器の開発は依然として経験則によるところが大きい。

液滴群燃え広がり現象の詳細な観察・解析には、実際の噴霧における液滴よりも大きなスケールの液滴（直径 1mm 程度）を対象とする必要があるた

め、地上で実験を行った場合は自然対流の影響を大きく受けてしまう。軌道上の恒常的で良質な微小重力環境を用いれば、自然対流の影響を受けない液滴群の燃え広がり現象を観察することができる。

本実験装置は、3 種類の実験が実施できる。

(1) 実験 1

液滴群要素（5 個液滴）およびランダム分散液滴群（最大 152 個液滴）の燃え広がりを観察する。

(2) 実験 2

直線状に配置され、その直線方向に移動可能な状態の液滴群について、燃え広がりおよび液滴自体の移動挙動を観察する。

(3) 実験 3

2～5 個の液滴から成る液滴クラスタ間の燃え広がりを観察する。

2. 本実験装置の開発コンセプト

本実験装置に対する特に重要な必要条件を以下に示す。以降に各項目の詳細を述べる。

- (1) 火災安全性設計
- (2) 軌道上運用での使いやすさ
- (3) 高精度な液滴径の再現

2.1 火災安全性設計

ISS での運用を行う実験装置は、ミッションに対する機能的な要求を実現するだけでなく、安全審査を受審し、各種安全性を立証しなければならない。本実験装置はその成り立ち上、「火」を扱うことが避けられないため、とりわけ火災安全性については慎重な設計が必要とされた。

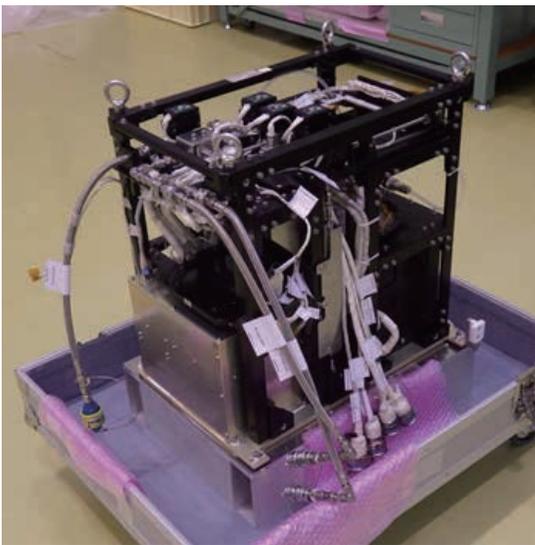


図 1 GCEM 外観

燃焼実験以外のフェーズにおいては、意図しない発火が生じないように2故障許容設計としている。例として、着火信号が誤発出されたとしても、燃料を吐出するためのガラス管ニードルが退避カバー内に退避・隔離されていれば発火に至らない。さらに、この退避を検知するリミットスイッチが退避を誤検出した場合であっても、もう1つの検知方法であるカメラ画像による検知がこれをカバーする。

一方で、燃焼実験フェーズにおける燃焼現象は、意図的に発生させなければならない「火」である。この「火」の発生が許容できる領域は燃焼容器のみに制限し、封入可能な設計とすることで、燃焼現象は制御下にある「火」として取り扱いを可能にした。



図2 大西宇宙飛行士による GCEM の組立
(©JAXA)

2.2 軌道上運用での使いやすさ

ISSには複数のクルーが常駐しており、実験にかかわる各種作業を依頼可能ではある。しかしながら軌道上クルーの作業時間は、ISS内で実施されるさまざまな実験等との間で共有しなければならないため、極めて貴重な時間である。したがって、軌道上クルーに依頼する作業は必要最低限に抑えることが必要である。

本実験装置においても、軌道上クルーに依頼する作業は、実験装置の組立・分解、雰囲気ガス充填用空気ボンベおよび燃料シリンジの交換等に抑えており、燃焼実験については、地上からの遠隔操作のみで運用が可能な設計としている。

例えば、実験条件数としては合計200近くが計画されているため、各条件における実験装置の動作シーケンスは、実験条件数分の「実験シーケンスファイル」で定義している。地上からのコマンド発行により、当該ファイルを読み込み、実行すれば、1つの実験条件が自動的に完了する。

さらに、実験条件の主要パラメータである液滴配置等、液滴生成に関する設定は「液滴生成パターンファイル」として定義し、前述の「実験シーケンスファイル」の中から呼び出す構造とした。頻繁に変更することが予想される部分を別ファイル化することにより、ファイル更新範囲を限定することができるため、急な液滴配置変更の必要性が生じた場合においても、変更箇所の把握が容易であり、変更ミスの低減効果も期待できる。

2.3 高精度な液滴径の再現

液滴を精度良く生成することは、燃焼開始時の初期条件を整えるために非常に重要である。実験における要求液滴径精度は、「目標径 $\pm 5\%$ 」となっている（目標径は標準で1mm）。

燃料である正デカンと比較的揮発性が低いものの、150個程度の多数液滴群を生成するためには

30分程度を要することから、蒸発の影響は無視できない。単純に1mm径の液滴を生成し続けたのでは、30分後には序盤と終盤に生成した液滴の大きさに差が生じてしまう。本実験装置では、燃料の吐出量制御に液滴の蒸発予測を盛り込むことによって、目標径に揃った多数液滴群を生成することができる。

例えば、軌道上初期検証時の液滴生成精度確認において、ランダム分散液滴群（97個液滴）を生成した結果、液滴径 $1\text{mm}\pm 5\%$ の達成率は95%以上となった（図3参照）。



図3 97個液滴群の生成結果画像（©JAXA）

3. GCEM の概要

3.1 全体概要

本実験装置は以下の主なサブシステムから構成されており、「きぼう」内の多目的実験ラックに搭載された状態で運用する（図4参照）。

(1) 燃焼容器

本容器内で燃焼現象を発生させる。詳細を3.2節に示す。

(2) 観察系

高解像度デジタルカメラおよび高速度カメラ（実験2専用）から構成され、現象を撮影する。

(3) 燃料供給系

正デカンが充填されたシリンジユニットとシリンジを定量押しするための燃料供給機構から構成され、燃焼容器内に燃料を供給する。

(4) 給排気系

雰囲気ガスが充填されたボンベからの空気供給、ISSからの窒素供給および燃焼容器内雰囲気ガスの排気を制御する。

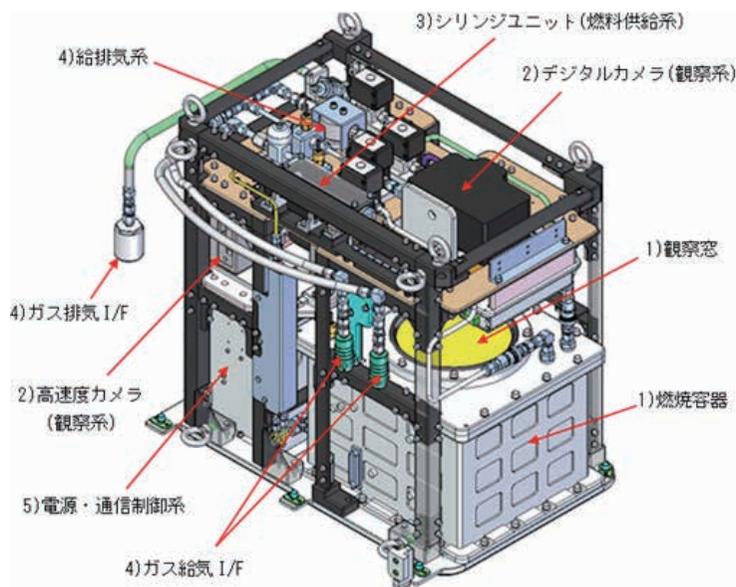


図4 GCEM 装置構成

(5) 電源・通信制御系

多目的実験ラックから電源供給を受け、各機器へ分配する。また、地上と通信（テレメトリ送信、コマンド受信等）を行いつつ本実験装置を統括制御する。

3.2 燃焼容器概要

燃焼容器内には以下の機器が設置されており、この内部で燃料液滴群を生成し、着火する（図5参照）。

(1) 液滴支持装置

SiCファイバ（直径14 μ m）が縦横に4mm間隔で30本ずつ格子状に張られており、その交点に直径1mm前後の液滴を支持する。さらにもう1本、直径78 μ mのSiCファイバも張られており、実験2における移動可能液滴の支持に使用する。

(2) 3軸トラバース機構

液滴支持装置の所定位置に液滴を1つずつ生成するため、燃料吐出部を3軸方向に移動させ

る。また、バックライトも設置されており、液滴の直径計測を目的としたバックライト撮影に用いられる。

(3) 燃料吐出部

ガラス管ニードル（外径50 μ m程度）から燃料を吐出し、液滴支持装置に液滴を生成する。

(4) 着火線

電熱線方式の着火線が、4式設置（バックアップ用含む）されており、これらへ通電することにより液滴の燃え広がりが開始する。

4. 軌道上運用における成果

2017年2月17日、GCEMの軌道上での初期検証中、世界で初めて微小重力環境下においてランダム分散液滴群（97個液滴）を生成し、その燃え広がり現象観察に成功した。この様子を時系列順に図6に示す。

その後、2017年7月初旬にかけ、GCEMは約5ヶ月弱の軌道上実験に用いられた。その間、JAXA、

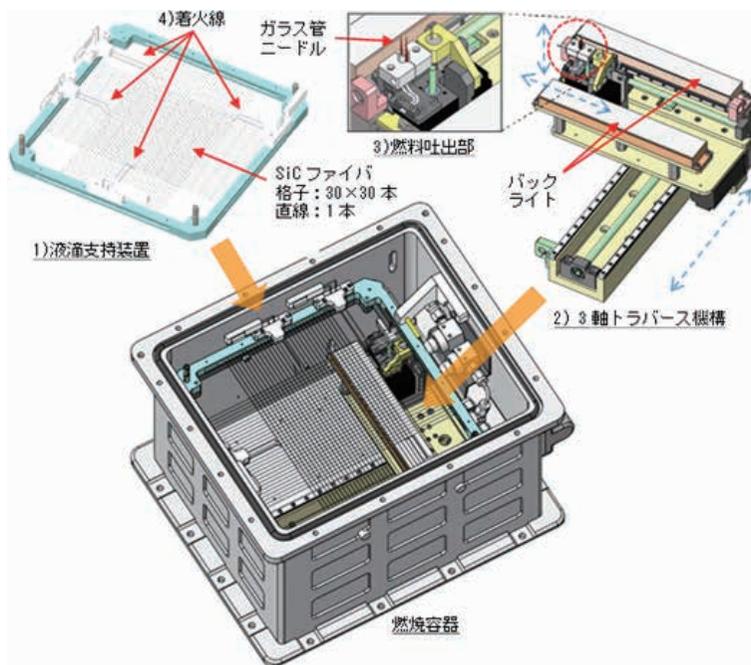
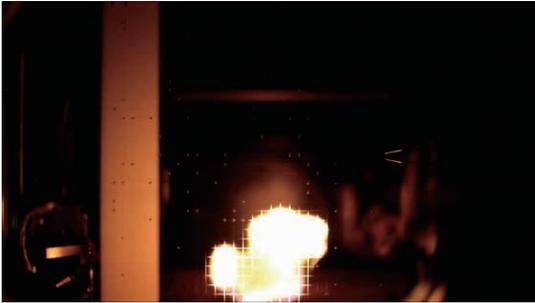
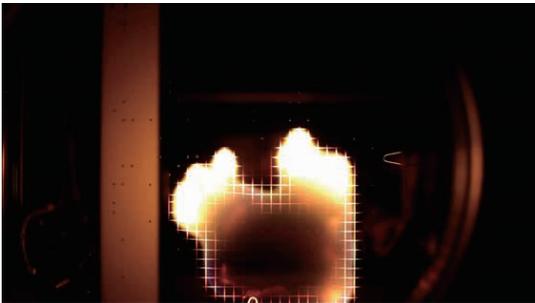


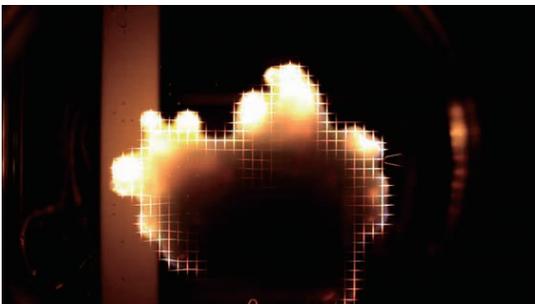
図5 燃焼容器概要



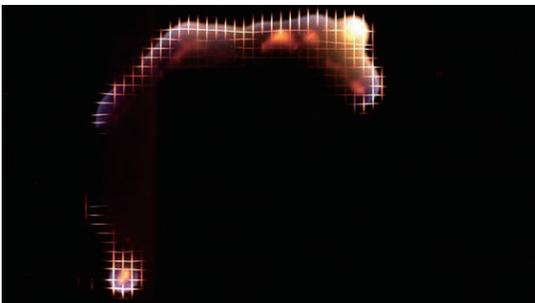
(a) 1/4



(b) 2/4



(c) 3/4



(d) 4/4

図6 97個液滴群の燃焼 (©JAXA)

研究者の諸先生方のご尽力のもと、150回以上の軌道上実験を実施することに成功し、実験1～3に対する貴重なデータを得た。

得られたデータは現在、研究者の手により詳細解析中である。

文責

制御システム事業部 宇宙システム部

次長

石川 知良

参考文献

- (1) 株式会社 IHI 検査計測:宇宙ステーション「きぼう」初の燃焼実験に成功、IHI 技報、第57巻、第3号、2017、pp.18-21
- (2) JAXA ホームページ : <http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/mspr/gcem/>