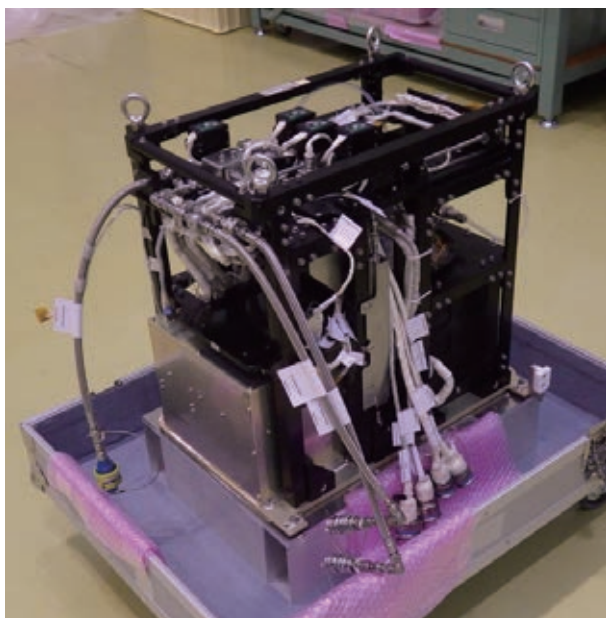


宇宙ステーション「きぼう」 初の燃焼実験に成功

国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟用 液滴群燃焼実験供試体 (GCEM)

地上で燃焼現象を観察する場合、燃料液滴が小さく、現象（反応）も高速であるため、詳細な観察が困難である。宇宙実験では、重力の影響が微小となるため、その分燃料液滴を大きくすることができ、スケールアップした詳細な観察が可能となる。そこで、宇宙実験用の燃焼実験装置を開発した。



液滴群燃焼実験供試体 (GCEM)

研究の背景

自動車・航空機のエンジンや工業炉などの燃焼機器で燃焼の様子を直接目にはみることができないが、液体燃料を効率良く燃やして熱エネルギーに変換する技術は、機器の性能を決定付けるほど重要である。これらの燃焼機器では燃料を微細な液滴として噴霧して燃やす「噴霧燃焼」が広く採用されている。たとえ僅かであっても、その燃焼効率が向上すれば工業界・産業界に与えるインパクトは非常に大きい。

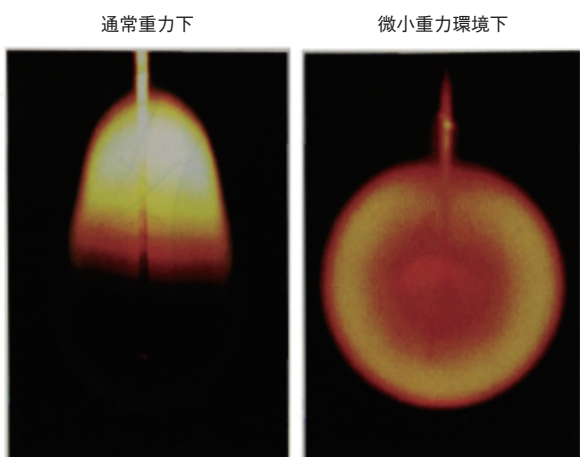
しかしながら、噴霧燃焼は相変化および化学反応が混在する非常に複雑な現象であるため、噴霧燃焼機器

の開発は依然として経験則によるところが大きい。これを打開し、さらなる高効率化を目指すためには、高い精度で噴霧燃焼挙動が予測可能な数値解析コードを実用化する必要がある。

液滴群燃焼実験供試体 (GCEM) の役割

前述した数値解析コードの要となるモデルの検証には実験的なアプローチが必要となる。

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 1 mm 程度）を対象とする必要があるため、地



通常重力下と微小重力環境下における液滴火炎の相違

出典：応用物理 Vol. 62 No. 4 (1993) pp. 329 - 335
無重力下でローソクは燃えるか (河野通方, 新岡 嵩)

上で実験を行うと自然対流の影響を大きく受けてしまう。ここに、この実験を微小重力環境下で行う意義がある。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可能となる。

液滴群燃焼実験供試体 (GCEM: Group Combustion Experiment Module) はこのニーズに応えるため、国際宇宙ステーション (ISS) 「きぼう」日本実験棟初の燃焼実験装置として開発されたものである。従来の軌道上実験においても、NASA (アメリカ航空宇宙局) などによる単一あるいは少数の液滴を対象とした例は存在する。しかし GCEM には、要素的な配置パターンの少数液滴群だけでなく、より応用 (噴霧) に近いランダム分散液滴群 (最大 150 個程度) を対象とした実験が可能などところに大きなアドバンテージがある。

GCEM で実施する実験

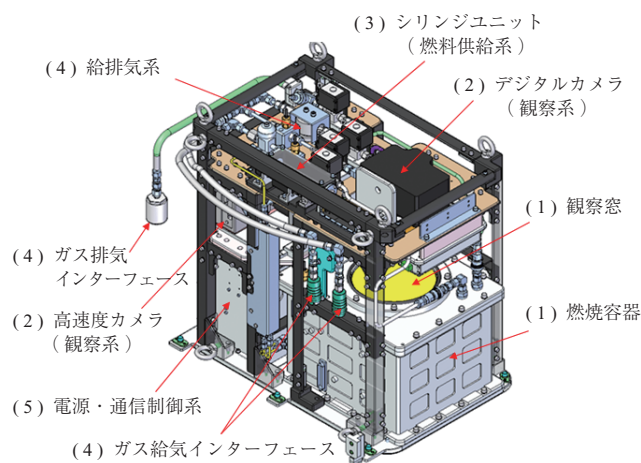
GCEM は、以下に示す 3 種類の実験を実現できるよう、要求仕様を満たしている。なお、実験に使用する燃料は正デカンである。

(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。



液滴群燃焼実験供試体 (GCEM) 概要

(3) 実験 3

2 ~ 5 個の液滴からなる液滴クラスタ間の燃え広がりを観察する。

GCEM の概要

GCEM 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される。

(1) 燃焼容器

本容器内で燃焼現象を発生させる。詳細を次項に示す。

(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、現象の撮影を行う。

(3) 燃料供給系

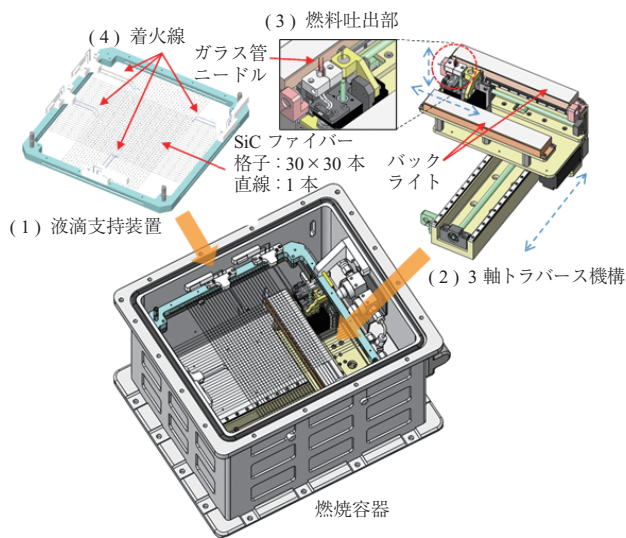
正デカンが充填されたシリンジユニットとシリンジを定量押しするための燃料供給機構から構成され、燃焼容器内に燃料を供給する。

(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。

(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 (テレメトリー送信、コマンド受信など) を行いつつ GCEM を統括制御する。



燃焼容器内概要

燃焼容器の概要

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の生成、着火を行う。

(1) 液滴支持装置

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

(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一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（外径約 $50\ \mu\text{m}$ ）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される。

GCEM に対する必要条件

GCEM に対する特に重要な必要条件は以下のとおり。以降に各項目の詳細について述べる。

- (1) 火災安全性の担保
- (2) 軌道上運用に対するユーザビリティ
- (3) 高精度な液滴生成

火災安全性の担保

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、安全審査を受け、各種安全性を立証しなければならない。GCEM 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。

火災ハザードは ISS クルーの安全を脅かすクリティカルなハザードであるため、装置側には 2 故障の同時発生までを許容できる安全性設計が要求される。

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により、燃焼現象は制御下にある「火」として取り扱い可能な状態とした。

軌道上運用に対するユーザビリティ

ISS には複数のクルーが常駐しており、実験に関わ



大西宇宙飛行士による GCEM の組み立て ©JAXA/NASA



微小重力下における 97 個液滴群の生成 ©JAXA

る各種作業を依頼可能ではある。しかしながらクルーの作業時間は、ISS 内で実施されるさまざまな実験などとの間で共有しなければならないため、極めて貴重なリソースである。従って、クルーに依頼する作業は必要最低限に抑えることが要求される。

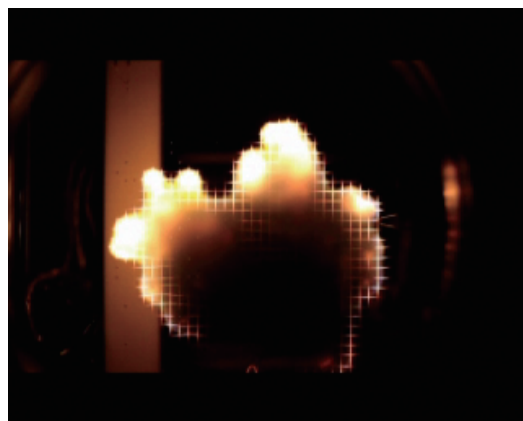
GCEM においても、クルーに依頼する作業は、実験装置の組み立て・分解、雰囲気ガス充填用空気ボンベおよび燃料シリンジの交換などに抑えており、燃焼実験については、地上からの遠隔操作のみで運用が可能な設計としている。

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、一つの実験条件が自動的に完了する。

高精度な液滴生成（目標径 $\pm 5\%$ への挑戦）

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意味で非常に重要である。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 1 mm）。

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 1 mm 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。GCEM 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、目標径にそろった多



微小重力下における 97 個液滴群の燃焼 ©JAXA

数液滴群の生成を可能とした。

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。

軌道上運用における成果

軌道上初期検証が完了した GCEM は、2017 年 2 月 17 日、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。

その後も前述の実験 1～3 を実施し、着実にデータを収集している（2017 年 6 月現在）。

次なる展開

GCEM によって ISS「きぼう」日本実験棟における初めての燃焼実験を実現することができた。引き続き GCEM は軌道上運用に供され、液滴群燃焼に関する基礎データの蓄積が行われている（2017 年 6 月現在）。

次の展開として、液体燃料（燃料液滴群）に続き、固体材料を対象とした燃焼実験装置についても開発中であり、宇宙火災安全規格の制定に資する基礎データの取得に寄与すべく、引き続き挑戦を行っていく。

問い合わせ先

株式会社 IHI 検査計測

制御システム事業部 宇宙システム部

電話（042）523 - 8319

<http://www.iic-hq.co.jp>