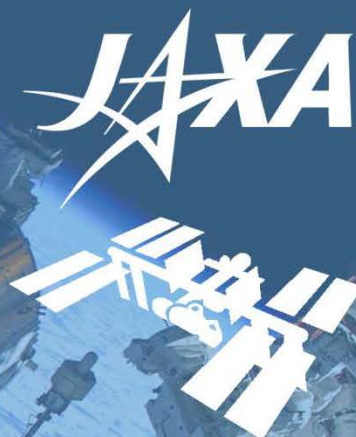


JAXA Academy



宇宙での火災を防ぐ

-宇宙実験で理解する燃焼のメカニズム-



2023.11.27

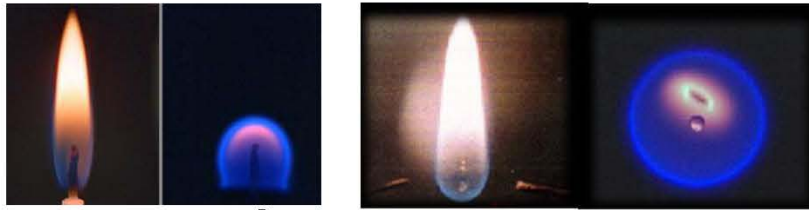
有人宇宙技術部門 きぼう利用センター
菊池 政雄



- 1.はじめに
- 2.宇宙での火災安全について
- 3.固体燃焼実験装置(SCEM)の概要
- 4.FLAREテーマを通じて材料の燃焼性を考えよう
- 5.まとめ

1. はじめに

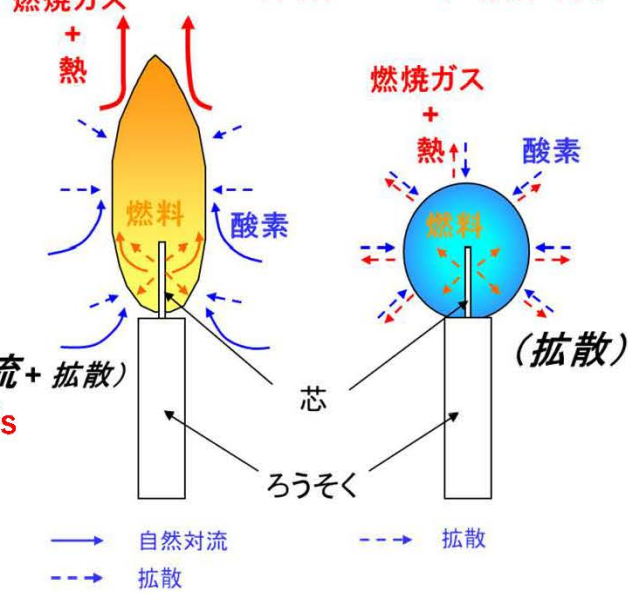
火の燃え方は、重力でどう変わる？



1G μG
ろうそくの燃焼

1G μG
燃料液滴の燃焼

気相で燃える(化学反応が起きる)のは、固体だけでなく液体も同じ！

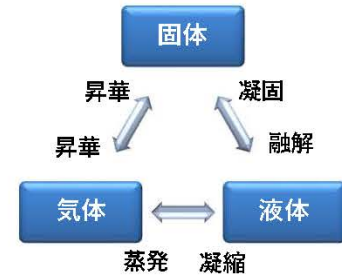


(a) 1G(地上) (b) μG(宇宙)

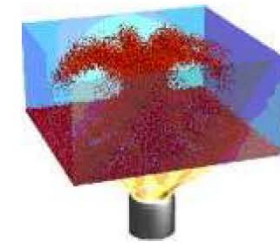
ろうそくの燃焼メカニズム

「ろうそくが燃える」を科学的に表現すると・・・

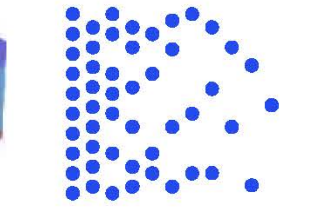
- ① 炎から伝わった熱で固体のろうが融解 (熱輸送、相変化)
- ② 融解した液体のろうが、毛細管現象により芯の中を上昇 (物質輸送)
- ③ 火炎からの熱で、液体のろうが蒸発 (熱輸送、相変化)
- ④ ろうの蒸気が対流と拡散により火炎面まで移動 (物質輸送)
- ⑤ 火炎周囲から対流と拡散により酸素が火炎面まで移動 (物質輸送)
- ⑥ 火炎面で、ろうの蒸気 (燃料) と酸素が反応 (化学反応)
- ⑦ 化学反応により発生した熱が放出 (熱輸送)



物質の状態変化



対流



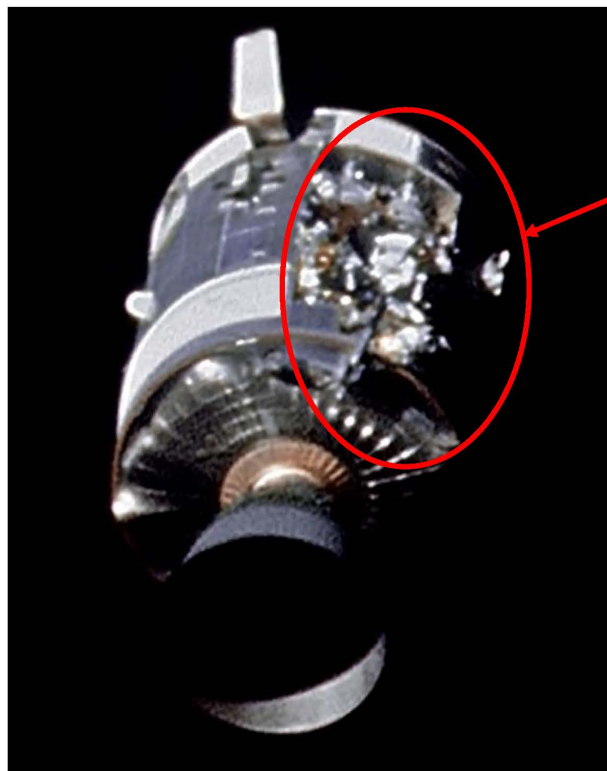
拡散

重力が変化すると、(主に気相での)熱と物質の輸送過程が変わることで、燃焼状態が大きな影響を受ける

2. 宇宙での火災安全について

宇宙船での火災？

「宇宙船で**火災**なんて起きるわけない」 と思っていませんか？



酸素タンクの爆発で損傷した箇所



アポロ13号の月軌道上での酸素タンク爆発事故(1970年)

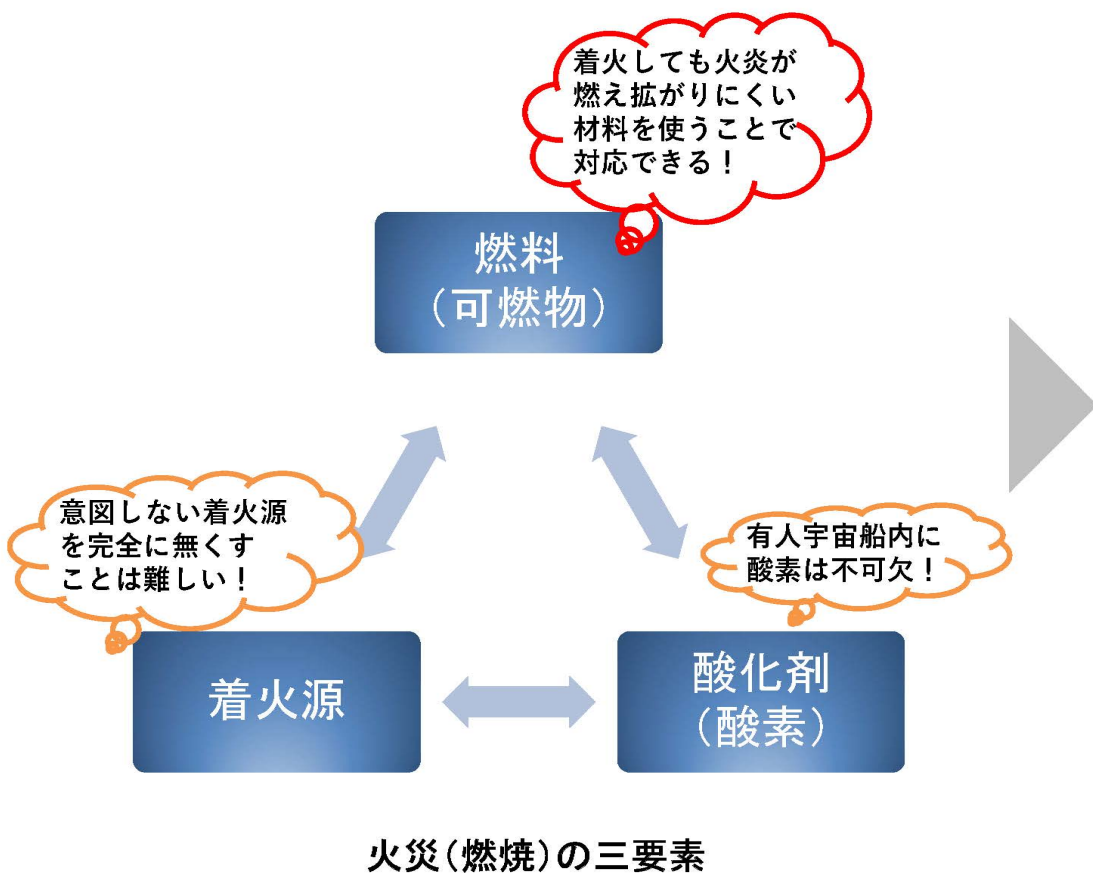
ロシアの宇宙ステーション「Mir」での火災(1997年)

<https://history.nasa.gov/afj/ap13fj/a13-sm-damage.html>

閉鎖空間である有人宇宙船内での火災は、最も重大なハザード（危険な事象）の一つです！

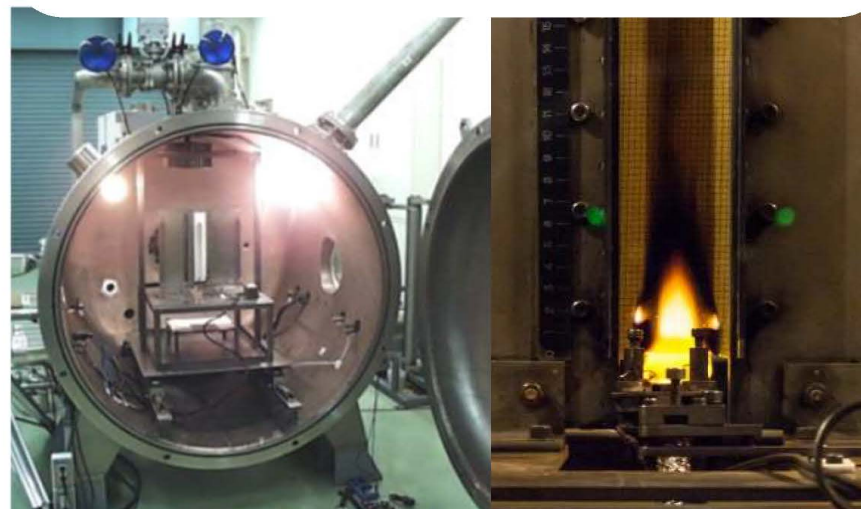
どのように火災を防ぐの？

- 有人宇宙船内での火災リスクを抑制するため、船内で**使用する材料は燃えにくいものを使用することが原則**です！
- ISSプログラムではNASAが定めた試験方法により地上で材料の可燃性試験を行い、使用の可否を判定しています。



➤ NASA基準の試験概要

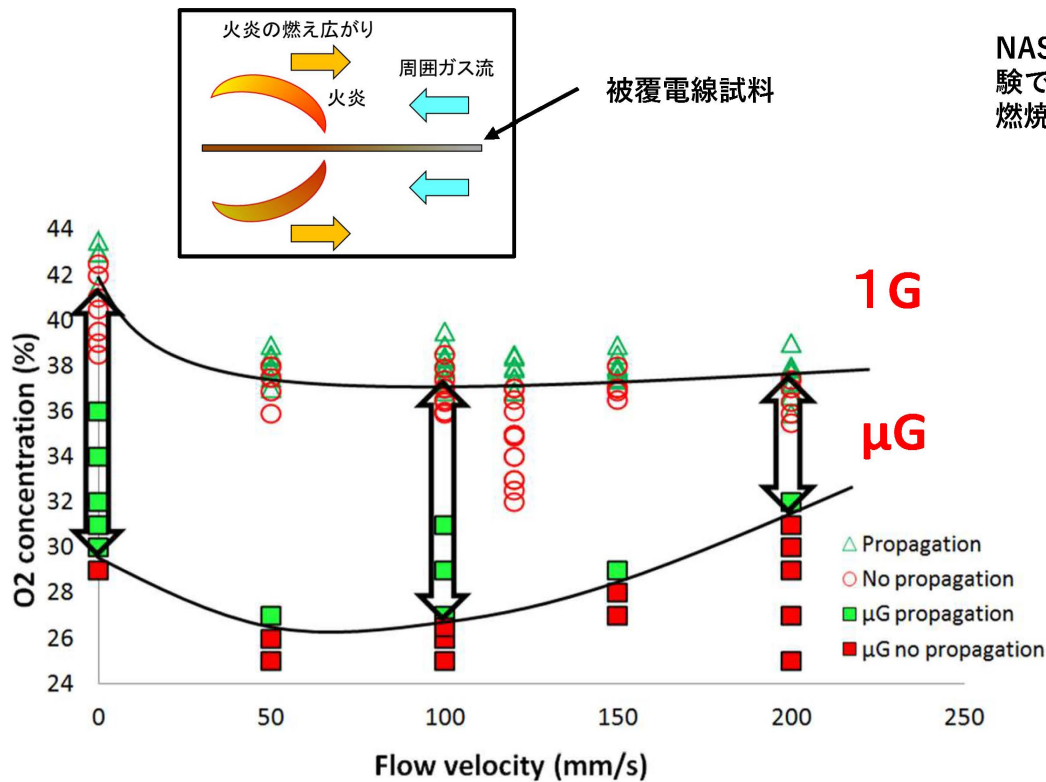
- 試料を垂直に設置し、下部に着火する。
- 試料に沿った**上方への火炎の燃え広がり距離が6インチ(約15 cm)以上だと不合格。**
- 宇宙船内で使用される可能性のある最も高い酸素濃度で試験を実施する (通常は24.1%)。



NASA基準による材料の可燃性試験

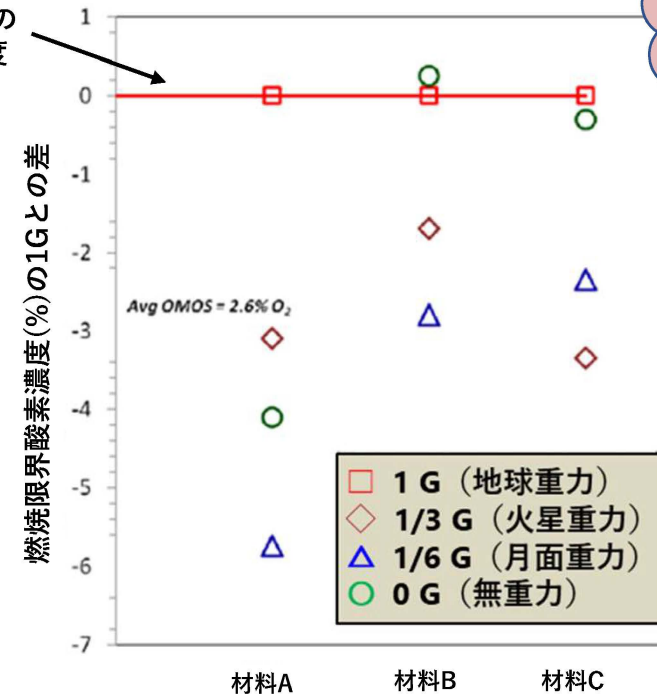
材料は重力がある方が燃えやすいの？

- 材料は1Gのほうが μ Gよりも燃えやすいと思われてきたが、必ずしもそうとは言えないことが分かって来ました。
- 1Gでの可燃性試験に合格しても、低重力での難燃性を常に保証することはできない！



ETFE被覆銅線試料上の火炎燃え広がり限界酸素濃度

1) A. Osorio, et al., *Proc. Combust. Inst.*, 35 (2015), 2683-2689.
2) K. Mizutani, et al., *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 35 (1), 2018.



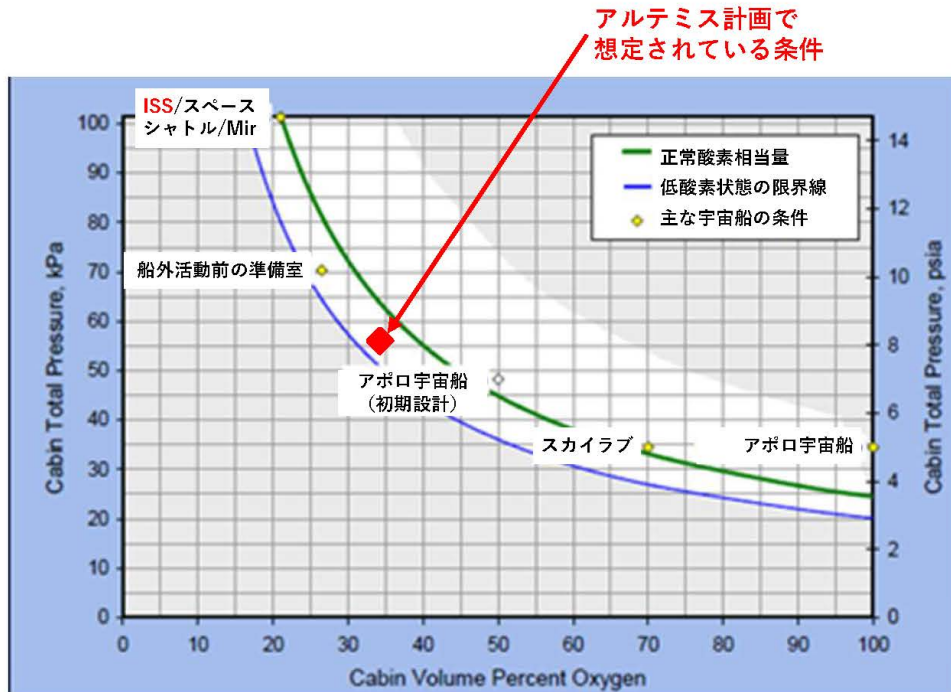
実は地上よりも低重力の方が燃えやすいかも…

様々な重力条件での材料の燃えやすさ

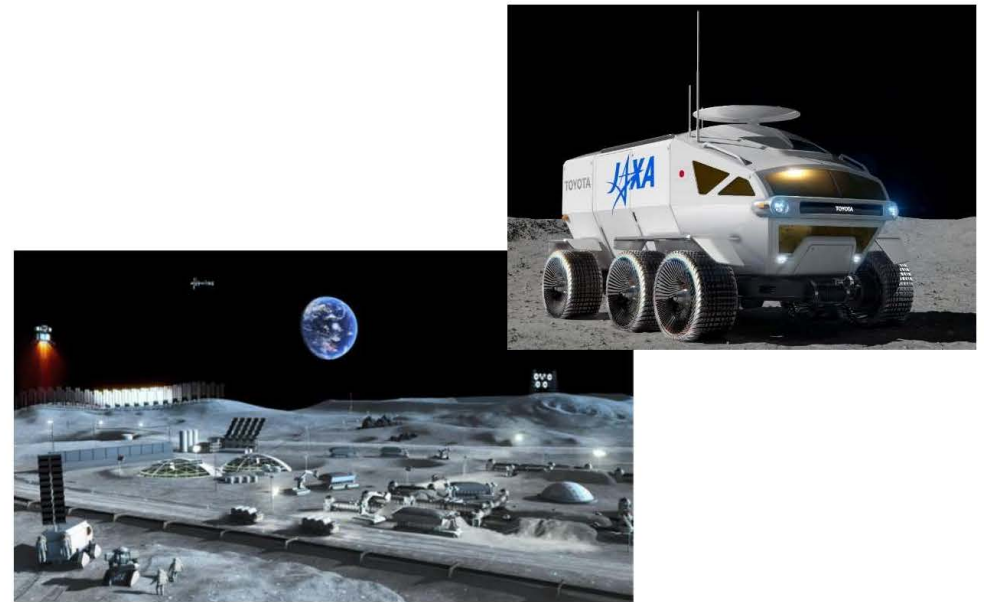
S.L. Olson et al., 42nd International Conference on Environmental Systems, 2012.より編集

有人宇宙探査に向けた課題

- 月面への有人宇宙探査計画(アルテミス計画)では、月面居住施設等における内部雰囲気をも低圧・高濃度酸素条件(約0.56気圧・約34%)とする予定です。
- 酸素濃度が高くなると材料はより燃えやすくなるため、1/6 Gという重力環境も考慮した、適切な可燃性評価手法の構築が求められています！



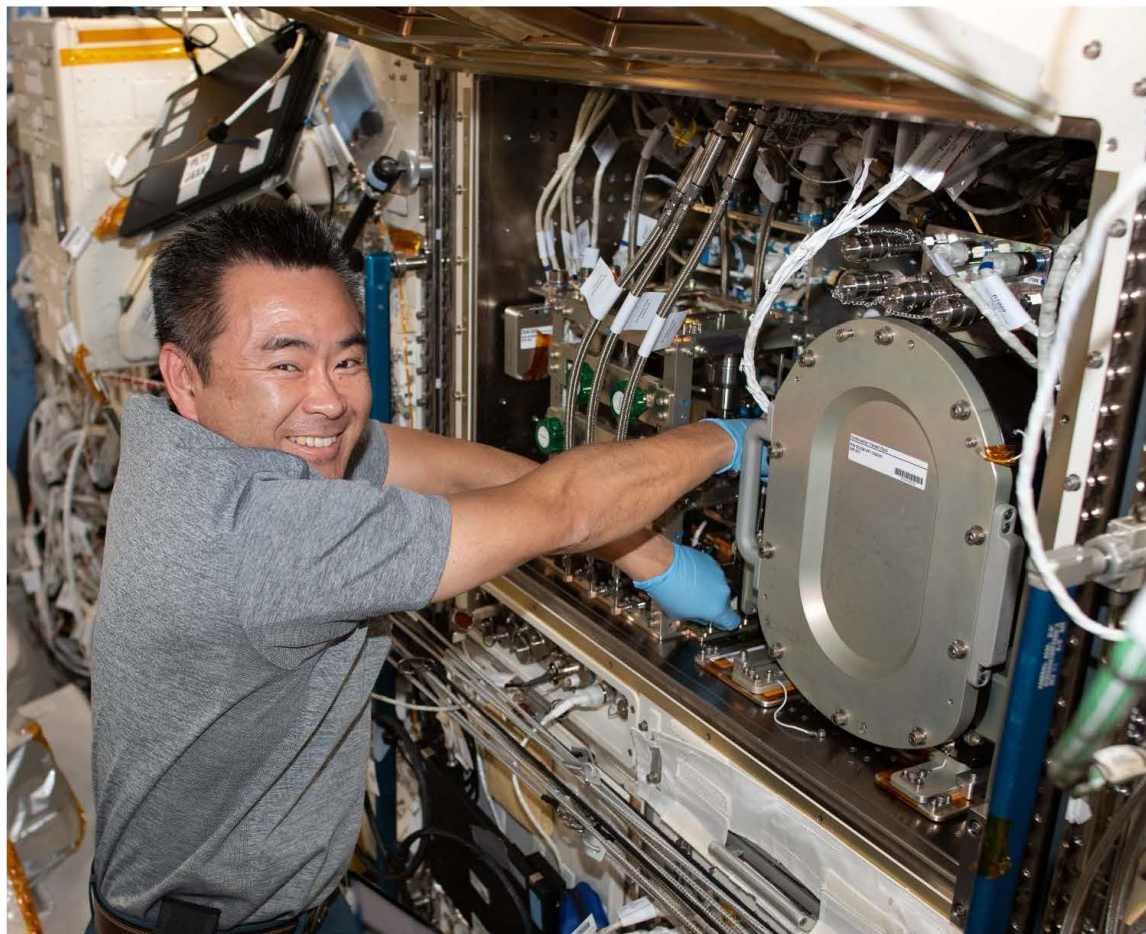
有人宇宙船内の雰囲気条件（圧力・酸素濃度）の比較



有人月面探査のイメージ

3. 固体燃焼実験装置(SCEM)の概要

SCEMの概要(1/2)



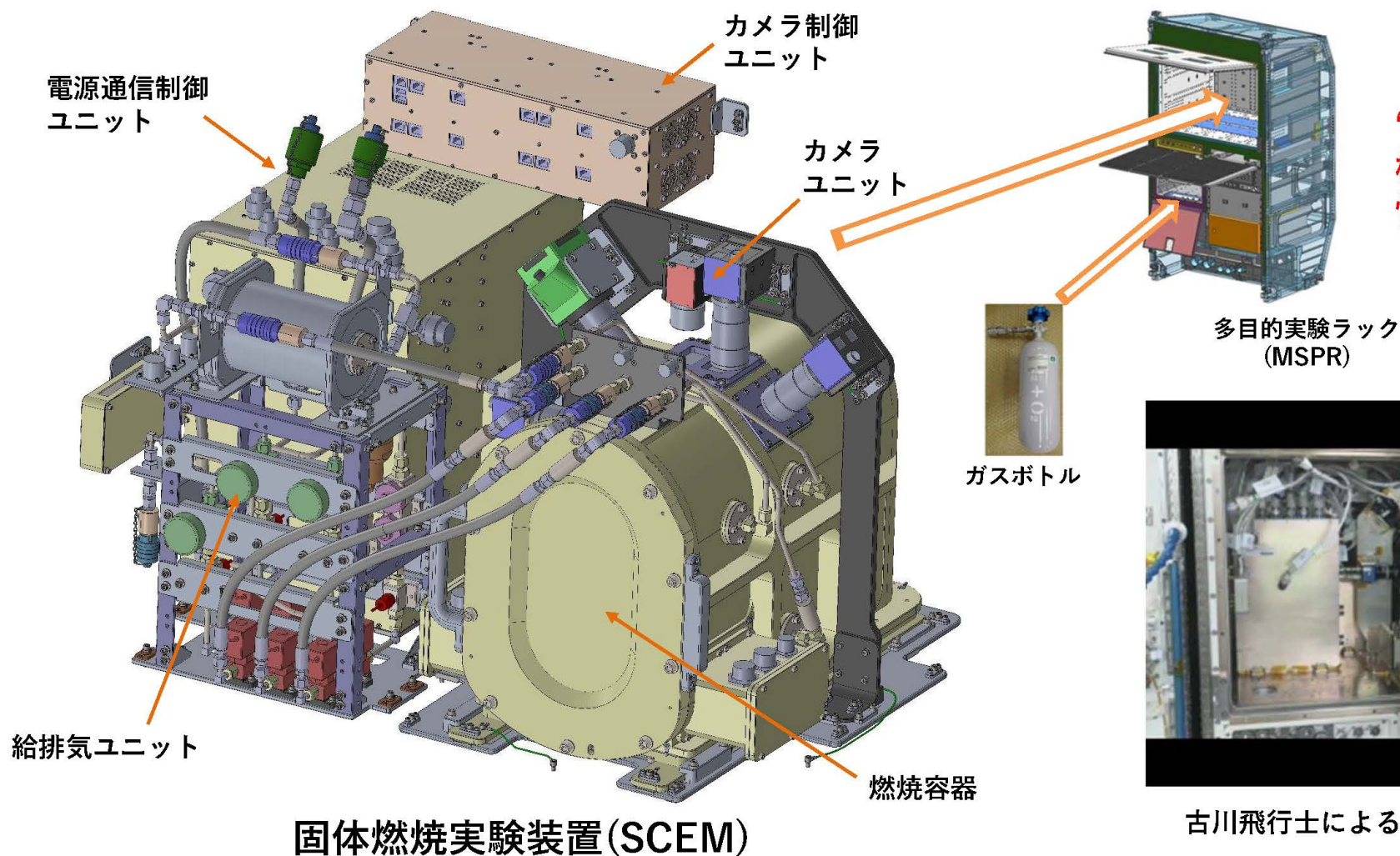
「きぼう」船内でSCEMを用いた実験作業を行う星出飛行士



➤ SCEMの優れているポイント

- アルテミス計画で想定されている**低圧・高濃度酸素**条件での材料燃焼実験を行うことのできる、**世界で初めての軌道上実験装置**です（ISSには、これまでもNASAの実験装置がありましたが、1気圧且つ21%以下の酸素濃度でしか実験できませんでした）。
- 一度にたくさんの実験試料をセットし、その後は地上からの遠隔操作で試料交換しながら実験を実施できるので、**多くの実験を効率的に実施**できます！

SCEMの概要(2/2)



“JAXA”、“SCEM”で
検索して、更に詳しい
情報や動画を見てね！



古川飛行士による組立時の様子(動画)

4. FLAREテーマを通じて 材料の燃焼性を考えよう

材料燃焼実験“FLARE”

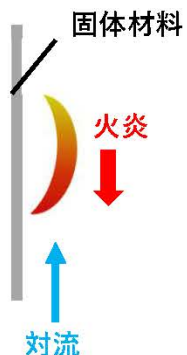
“JAXA”、“FLARE”で
検索して、更に詳しい
情報や動画を見てね！



FLAREのミッションロゴ

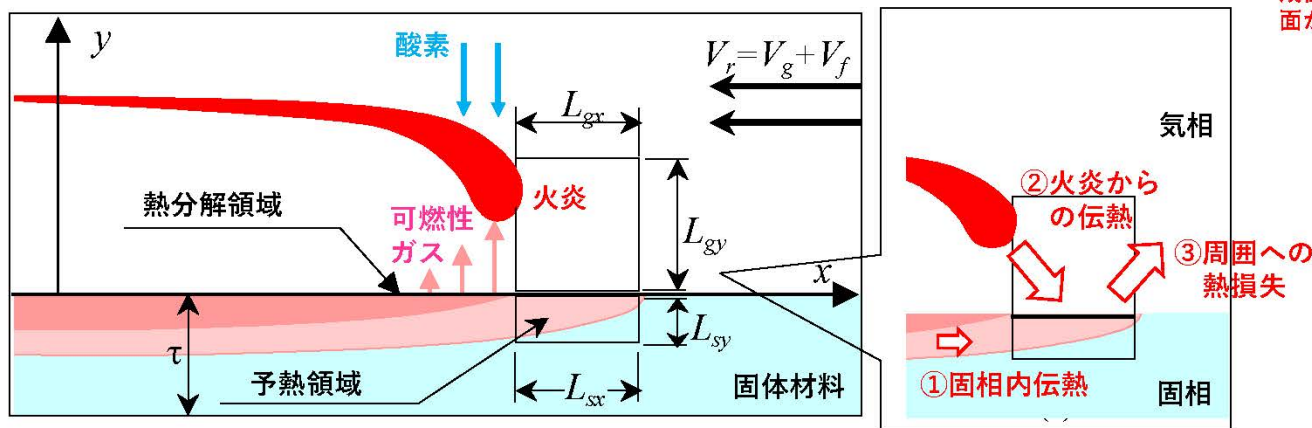
- 2012年度に「きぼう」利用テーマの公募により選定
- Flammability Limits At Reduced Gravity ⇒ FLARE
- 藤田 修 教授(北海道大学)を研究代表者(PI)として、日米欧の4カ国、14機関が参画
- 目的：固体材料の燃焼限界条件への重力影響を明らかにし、微小重力環境(μG)における材料燃焼性評価について、科学的合理性を有する新手法を国際的に提示する。
- 2022年5月から「きぼう」での実験を実施中！

火炎はどのように燃え広がる？



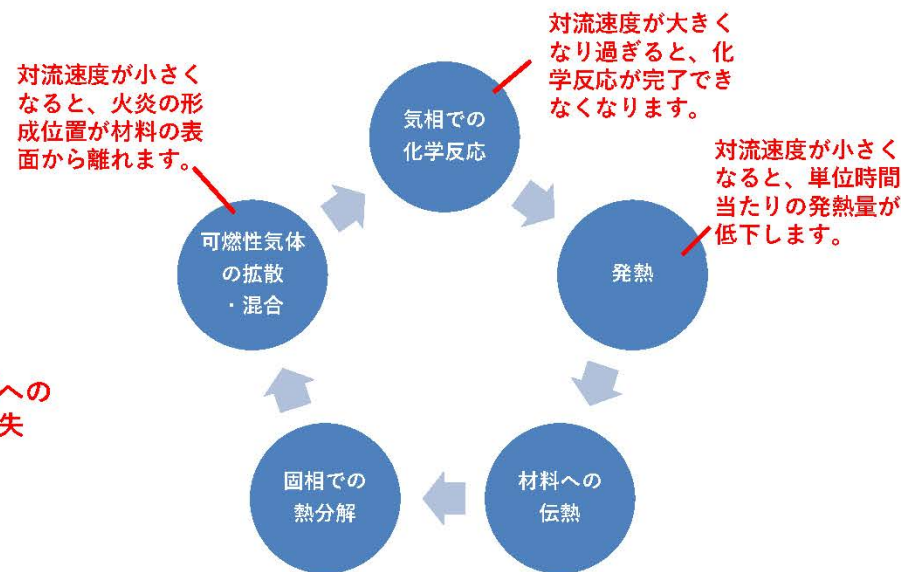
- 固体材料上を火炎が継続的に燃え広がるか否かは、現在のNASA基準における合否の指標です。
- 主に火炎からの伝熱(②)により固体材料表面の温度が上昇し、熱分解温度に達すると、可燃性ガスを発生させます。
- 可燃性ガスは材料表面から拡散して周囲からの酸素と混合し、火炎を形成します。
- このプロセスが連続的に起こることで、定常的な火炎の燃え広がりが起こります。
- サイクルの何れかのバランスが崩れると、火炎が維持できなくなり消炎します。

鉛直下方への火炎燃え広がり



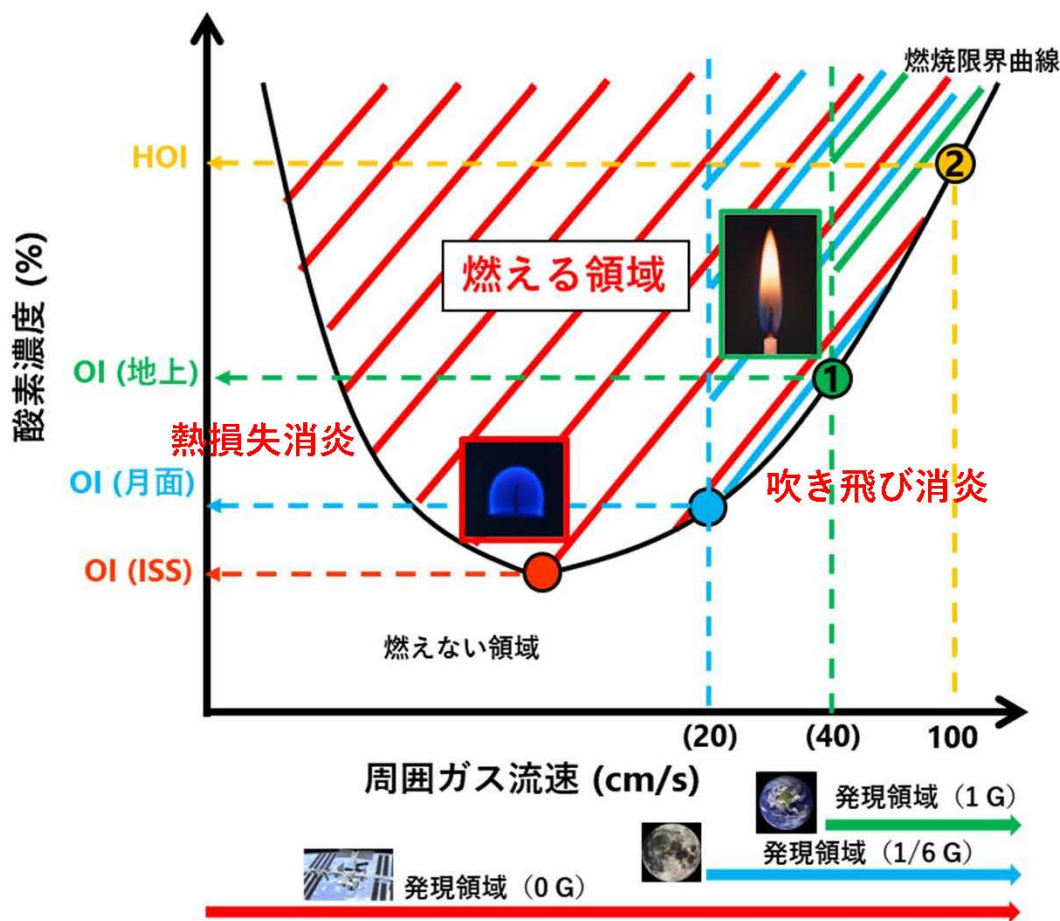
対向流条件において固体材料上を燃え広がる火炎周囲の熱移動

(提供：高橋 周平 教授(岐阜大学))



固体材料上の火炎燃え広がりのサイクル

火炎の維持は周囲流速しだい？



材料の可燃領域マップ(イメージ)

- 固体材料上を燃え広がる火炎には、2つの消炎メカニズムがあります。

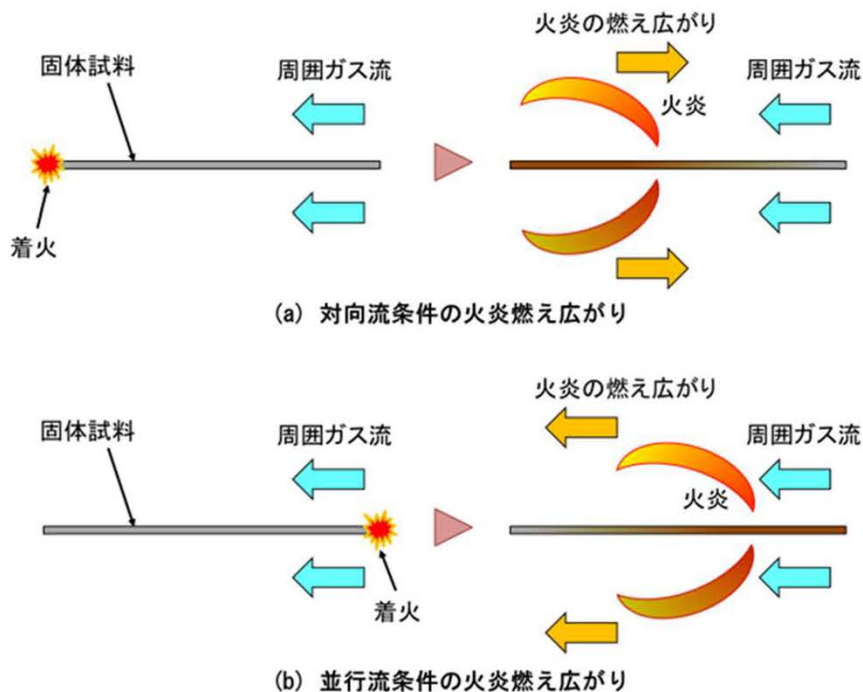
- ・ 周囲流速が大きくなると、火炎での化学反応速度が流れの速度に追従できなくなり、消炎します(吹き飛び消炎)。
- ・ 一方、 μ Gに特有の低周囲流速条件では、流速の低下に伴い発熱と熱損失のバランスが崩れ消炎します(熱損失による消炎)。
- ・ この競合する2つのメカニズムのため、材料の周囲流速に対する可燃領域マップはU字型となります。

FLAREテーマでは、地上での材料燃焼試験(①と②)から、U字型の燃焼限界曲線を予測する世界初の手法を開発しました！

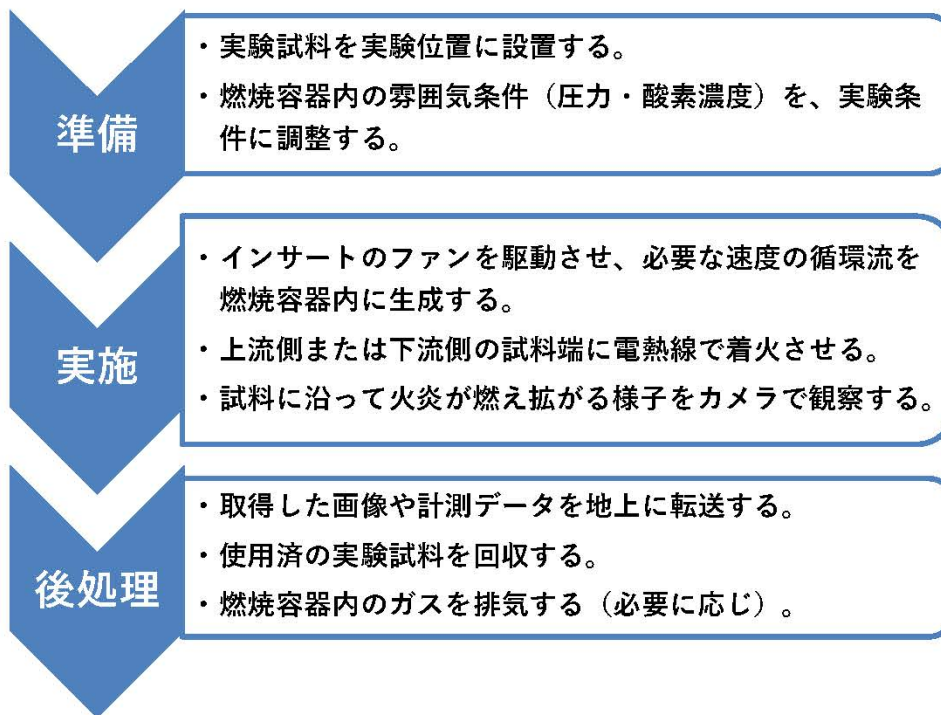
- ・ 使用する宇宙船の酸素濃度が変わっても、試験をやり直す必要無し！
- ・ 月面のような低重力環境での材料の燃焼限界酸素濃度も安全側で評価できる！

「きぼう」でどのような実験を行う？

- 固体材料上を燃え広がる火炎の構造、サイズ、進行速度（燃え広がり速度）、材料表面温度分布、燃焼前後での酸素濃度の変化などのデータを取得する。
- 酸素濃度や周囲流の方向・速度などを変化させて実験を繰り返し行い、**火炎の燃え広がりが維持される限界酸素濃度を明らかにして、新手法の妥当性を検証**します。



固体試料上の火炎燃え広がり形態



1回の燃焼実験の流れ（平板・棒状試料用インサートの場合）

FLAREで使用する実験試料

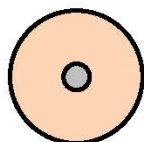
FLAREテーマの軌道上実験では、以下のような様々な材質・形状の固体材料を実験試料として用います。

① 平板試料



- ろ紙
 - アクリル樹脂(PMMA)
 - 綿布 • 船内被服材料
 - NOMEX® • 難燃性材料であり、ISSへの荷物輸送用バッグ等で使われている。
- } 比較的燃えやすい材料で、これまでの微小重力実験データが豊富。モデルの基本的な妥当性検証に使用される。

② 棒状試料



- 低密度ポリエチレン(LDPE) • 比較的燃えやすい材料で、これまでの微小重力実験データが豊富。

③ 被覆電線試料

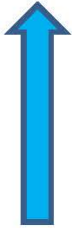


- 低密度ポリエチレン(LDPE) • 比較的燃えやすい材料で、これまでの微小重力実験データが豊富。
- ETFE • 航空宇宙用の電線被覆としても良く使用されている。

試料の断面形状

燃え拡がり火炎の地上と宇宙での差異は？

浮力対流
(40cm/s
程度)



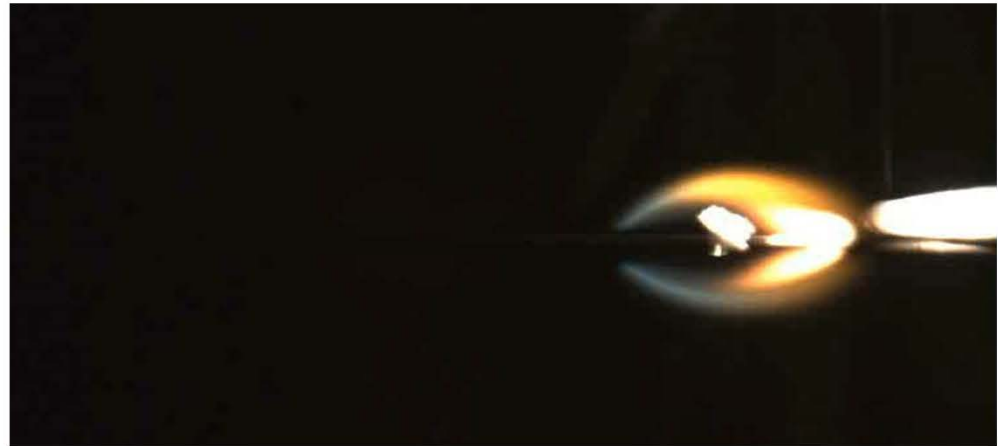
重力方向



1Gでろ紙試料上を下方に燃え拡がる火炎(動画)
(1気圧、酸素濃度21%)

- 1Gでは、静止雰囲気中でも火の粉がかなりのスピードで上方に移動していることが分かる（浮力対流の影響）。また、全体的に黄色味を帯びている。
⇒ 黄色は火炎中の微粒子（ススなど）が高温で赤熱しているため
- 一方、 μ Gの低速周囲流中を燃え拡がる火炎は、比較的穏やかであり、燃え拡がるにつれて青味を帯びた火炎が支配的となる。
⇒ 燃料の消費速度が遅く、火炎温度も低いため

強制対流(20 cm/s)



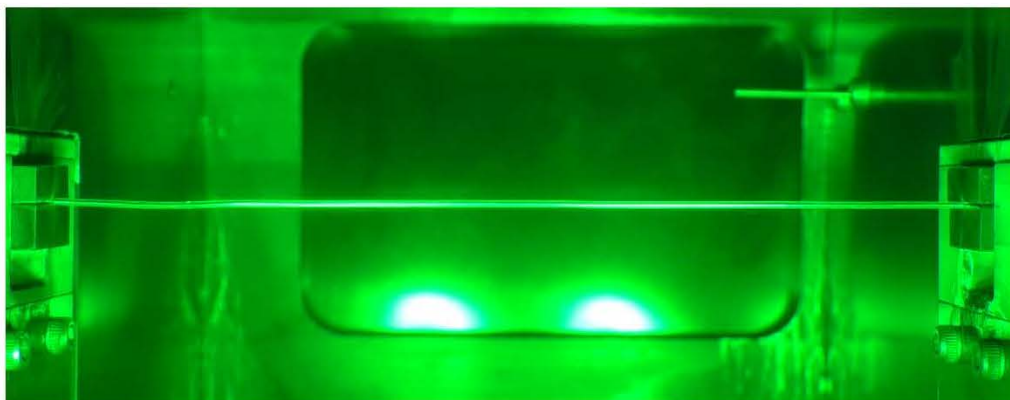
©弘前大学、岐阜大学、JAXA、北海道大学

FLARE軌道上実験で撮影された、ろ紙試料上を燃え拡がる火炎(動画)
(1気圧、酸素濃度17.5%)

燃え拡がり実験の他の予定は？

- FLAREテーマの軌道上実験では、燃え拡がり実験の他に、**被覆電線に電流を流した際の自着火実験**も行う予定です。

1G



- 1Gでは電線試料から発生した熱が浮力対流により上方に運ばれ、溶融した被覆材も下方に滴下するだけで着火には至りません。

μG

(航空機実験)



- μGでは試料の周囲に熱が滞留し、溶融した被覆材も芯線上に液滴状態で付着するため、試料の熱分解により生じた**可燃性ガスの自着火**が起きやすくなります。
- 「きぼう」での実験では、**自着火が起こる限界の電流値**や、その**酸素濃度**や**雰囲気圧力**による変化を詳しく調べ、安全性に関するガイドラインの作成に役立ってます。

ポリエチレン被覆電線試料に過電流を流した際の挙動比較
(電流値: 6.5 A, 通電時間: 3 s, 酸素濃度: 40 %, 雰囲気圧力: 1気圧)

提供: 北海道大学

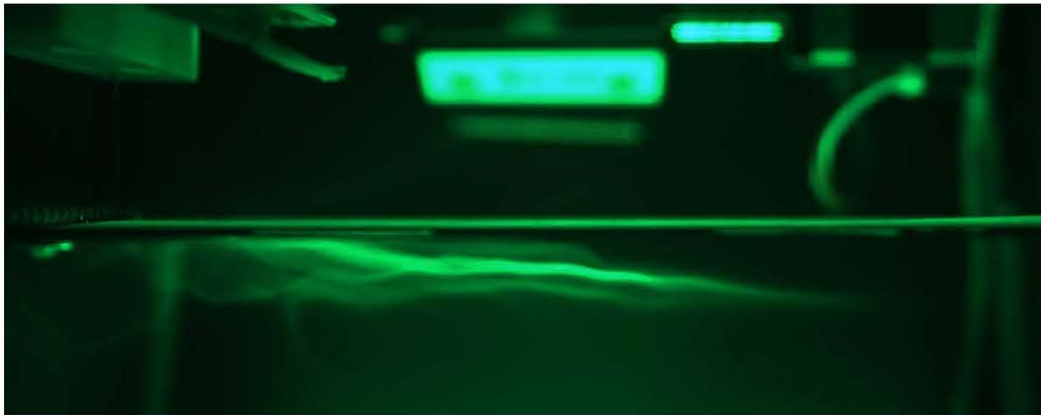
煙の挙動は宇宙ではどうなる？

ファンによる
非常に低速の
流れ



(a) ろ紙試料端を着火線で加熱した際の発煙(動画)

ファンによる
非常に低速の
流れ (途中から)



(b) (a)から1時間以上経過した際の同じカメラ画像(動画！)

- 固体材料の加熱・燃焼時に発生する煙は、1Gでは周囲との温度差による浮力対流により上方に移動する。
- それに対し μG では、周囲流を停止させると煙は動かなくなり、長時間経過した後も空間中に静止しています！
- この結果からも、周囲の気流の状態が低重力環境での物質（酸素・燃料・燃焼生成物など）や熱の輸送に大きな影響を与えることが分かります。

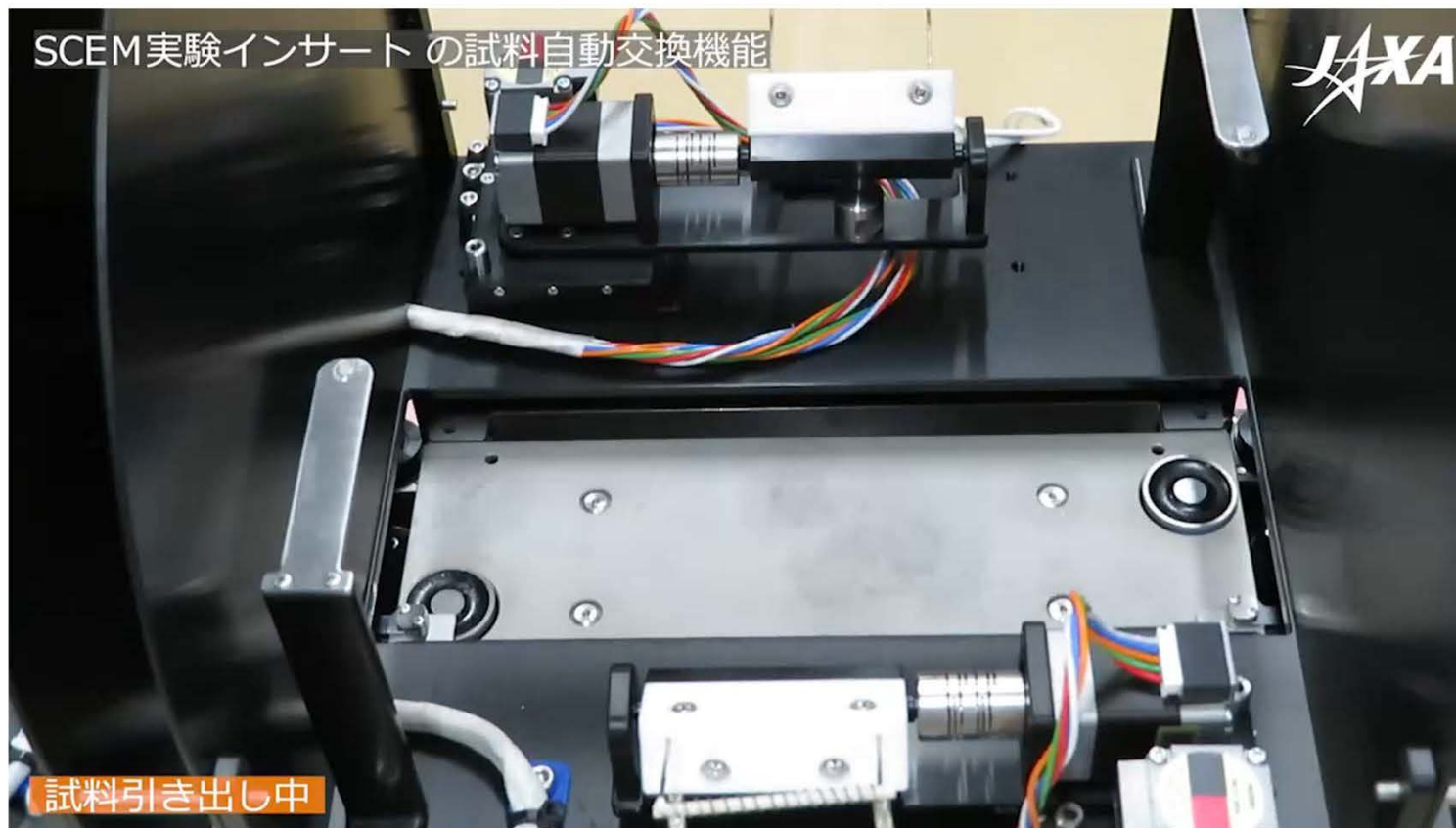
5. まとめ

まとめ

1. 燃焼には燃料、酸化剤、着火源の3つ揃う必要がある。
2. 固体や液体が燃える際には、熱分解や蒸発により可燃性気体が生成され、周囲の酸素と混合して化学反応が起こり、火炎が形成される。
3. 重力は、可燃性気体や酸素などの物質輸送と熱輸送に大きな影響を与えている。このため、重力が変化すると燃焼状態が影響を受ける。
4. 固体材料上を燃え広がる火炎の消炎メカニズムには競合する2種類があり、火炎が維持される限界酸素濃度は周囲流速に依存する。
5. 有人宇宙船内での火災安全性の確保は非常に重要であり、固体燃焼実験装置(SCEM)を活用した研究の進展と、有人宇宙探査に向けた貢献が期待されている。

参考

試料はどのように交換するの？

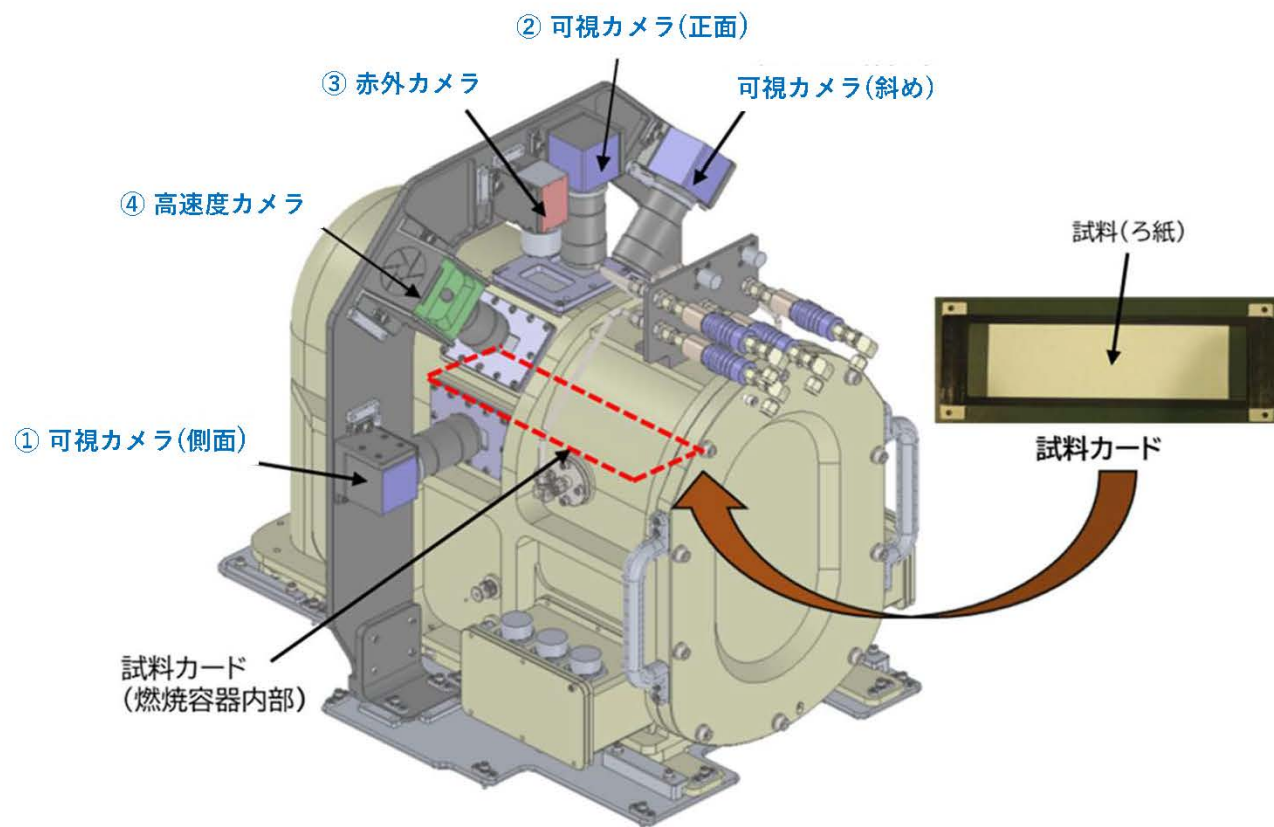


“JAXA”、“SCEM”で
検索して、更に詳しい
情報や動画を見てね！

平板・棒状試料用実験インサートの試料自動交換機構の動作(早送り動画)

どんなカメラで観察するの？

- SCEMには5台のカメラが搭載されており、目的に応じて使い分けます。



燃焼容器周囲に配置されるカメラ



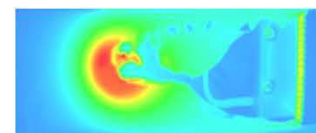
① 可視カメラ(側面)

平板試料では、試料の表面と裏面に形成される火炎を観察できます。火炎の構造を調べるのに適しています。



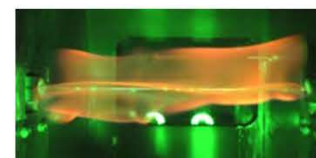
② 可視カメラ(正面)

平板試料では、試料の表面側に形成される火炎を観察できます。燃え広がる火炎の先端位置などを調べるのに適しています。



③ 赤外カメラ

試料の表面温度分布を、20～500℃の範囲で計測できます。②の可視カメラ画像と比較して、火炎周囲の試料がどの程度加熱されているかを調べるのに適しています。



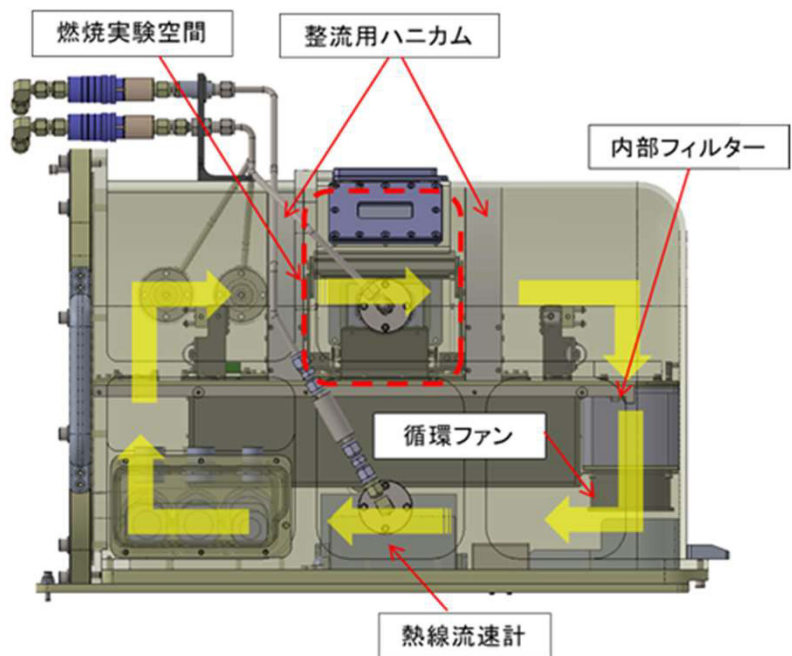
④ 高速度カメラ

毎秒2000コマの高速度撮影を行うことができます。過電流による被覆電線試料の自着火挙動など、短時間で起こる現象の詳細な撮影に適しています。

各カメラで撮影される画像の例

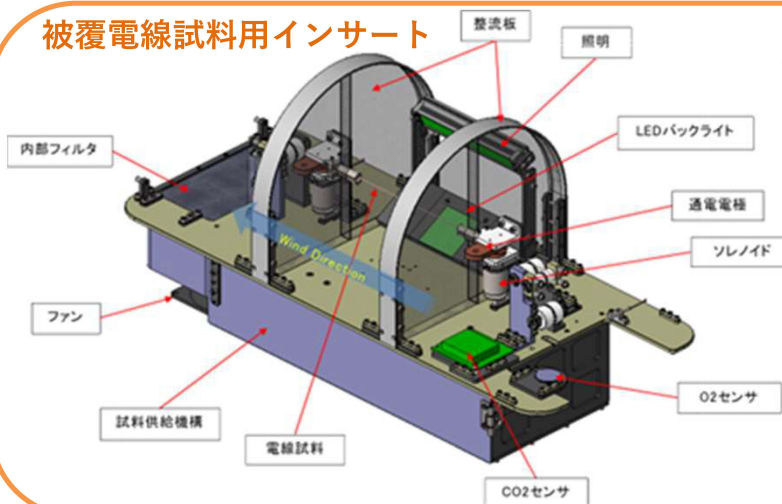
実験インサートについて

- 燃焼容器の内部には、実験インサートが設置されます。インサートに搭載されているファンと整流用のハニカムにより、燃焼容器内部を循環式の風洞とすることができます。
- 整流用ハニカムで仕切られた領域（下図の赤破線で囲まれた部分）で実際の燃焼実験を行います。

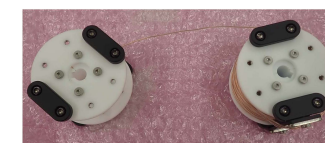


燃焼容器内に形成される循環流の模式図

被覆電線試料用インサート

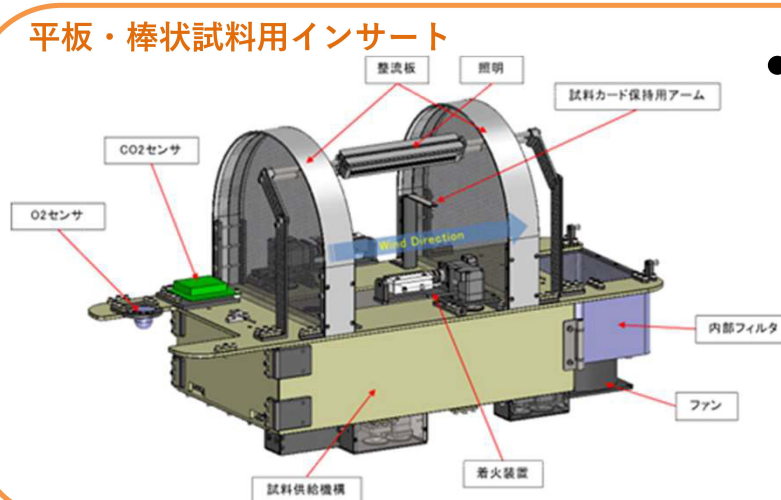


- 試料リールに巻かれた状態の被覆電線試料を、試料送り機構により送り/巻き取りすることで試料を供給します。



試料リール

平板・棒状試料用インサート



- 試料カードホルダに装填された試料カードは、試料送り機構により1枚ずつ実験部に設置され、実験終了後は回収用ホルダに収納されます。



試料カード



試料カードホルダ