

大気球を利用した微小重力燃焼実験（実験結果）

○石川毅彦, 菊池政雄 (ISAS/JAXA), 山本信 ((株)IHIエスキューブ), 澤井秀次郎, 丸祐介
坂井真一郎, 坂東信尚, 清水成人, 吉光徹雄 (ISAS/JAXA), 小林弘明 (ARD/JAXA)
菅勇志, 水島隆成 (ISAS/JAXA), 福山誠二郎 ((株)AES), 岡田純平, 伊藤琢博
梯友哉, 福家英之, 橋本樹明 (ISAS/JAXA)

1. 目的

本研究ではターンアラウンドタイムが短くかつ良好な G 環境が得られる手段として気球を利用した微小重力実験システムの構築を行っている。本書では、平成 26 年度の放球結果について報告する。

2. 実験計画概要

平成16年度から21年度にかけて学術創成研究費によって微小重力実験システム (BOV) の構築が進められた (代表研究者: JAXA宇宙科学研究本部宇宙探査工学研究系橋本教授 [1])。この実験システムでは、落下させる供試体を二重カプセル構造とし、内側のカプセルと外側のカプセルを非接触状態に保つドラッグフリー制御を行うことによって最良のG環境を得る構成を用いた。2回の放球実験によって 10^{-4} Gレベルの微小重力環境が30秒程度維持され、新たな実験手段として活用できることが示されている。ただし、このシステムでは微小重力実験装置が利用できる内カプセルは直径30cm程度の球であり、この中に電源・実験制御系を含めたすべてを納める必要があった。今後、観測機器を初めとする微小重力実験装置要素の小型化を進めれば、このスペースで実施可能な実験も増加すると考えられるが、航空機・落下塔用装置の流用など実験者のアクセスの容易性を考えると、より多くのスペースが必要となると考えられた。

本研究では学術創成研究の成果 (機体設計等) を継承し、これを発展させることにより新しい実験システムの確立を行う。新システムの特徴は

- 1) 落下させる機体は、学術創成研究同様の形状とする。
- 2) 3軸のドラッグフリー制御は行わず、微小重力実験部のスペースを増大させる。
- 3) リニアスライダーにより鉛直方向のみドラッグフリー制御を適用し、 10^{-3} Gの微小重力環境を30秒程度確保する。
というものである (図 1 参照)。

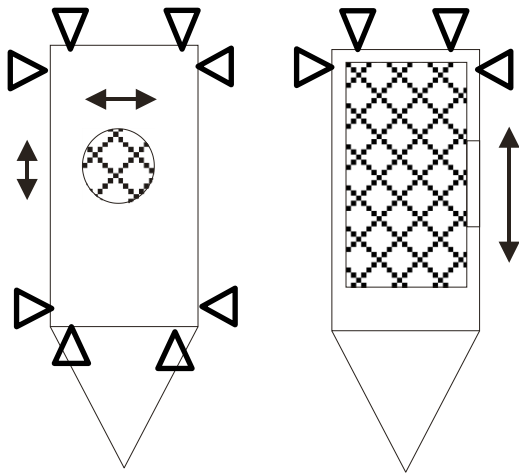


図 1 (左) 3 軸ドラッグフリー (右) 今回のシステム。斜線部が微小重力実験部、△はスラスターを示す。

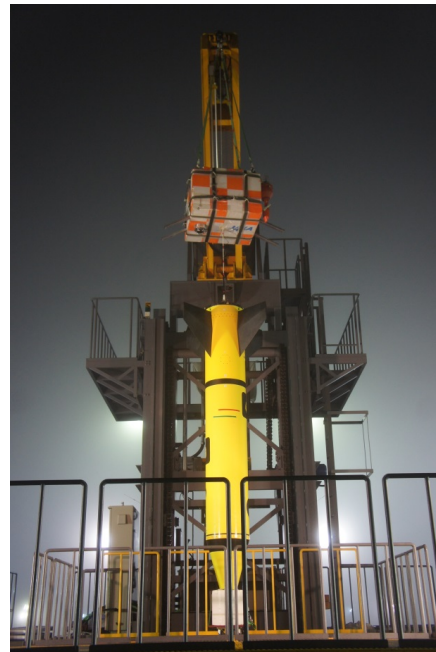


図 2 放球台に設置された実験機体 (黄色)

微小重力実験部においては、燃焼研究分野の「液滴列の火炎伝播挙動の観察実験」を実施する。ISS 科学プロジェクト室では、液滴を直線上に等間隔配置した燃料液滴列の火炎伝播メカニズム解明研究を理論検討・数値シミュレーション・微小重力実験を用いて実施している。落下塔を利用したこれらの短時間微小重力実験の結果を基にして、ESA の TEXUS ロケットを利用した微小重力実験を 2009 年 11 月に実施した。この実験では、予蒸発進行度の誤差低減および現象の観察を容易にするために初期直径の比較的大きな液滴 ($d_0 = 1.5 \text{ mm}$) を用い、予蒸発時間 (t_w) をパラメータとした 3 回の燃焼実験を行った。その結果、液滴列に沿った V_f は、予蒸発の進行に伴う液滴列周囲の可燃混合気層の発達に伴い急激に大きくなるが、予蒸発が一定以上進行した場合はほぼ一定値をとることが示唆された。また、液滴の僅かな予蒸発が燃え広がり速度に非常に大きな影響を与えることが分かった。落下塔実験では、数秒の微小重力時間中に燃焼現象の観察を行うために、予蒸発を促進する目的で比較的小さい液滴を使用している。このため、生成された燃料液滴径のばらつきが比較的大きく、燃え広がり速度の実験誤差も比較的大きくなる欠点がある。そこで、大気球を利用する本実験においては、TEXUS ロケット実験と同じ $d_0 = 1.5 \text{ mm}$ の比較的大きな液滴を用いつつ、落下塔実験で実施可能な t_w と TEXUS ロケット実験で取得された条件で最小の t_w である 5s の中間域の t_w を実験条件とした実験を行い、 V_f に関する高精度データの取得を行うことを計画している[2]。なお、実験装置の詳細については、昨年度の報告書を参照されたい。

3. 放球作業結果

平成26年度はまず5月に放球上での準備作業を行ったが、天候(風)不純によって放球す

ることが出来なかった。このため実験装置を大樹町に保管し、同年8月に再度作業を行ったところ、8月22日に放球することが出来た。放球約3時間後の7時12分に目標高度（約38km）から実験機体は切り離されて落下した（図3）。落下後35秒、シーケンス通りドローグパラシュートを開傘、引き続きパラシュートの開傘を行って機体は無事着水、回収された。回収された機体は翼が破損している以外は損傷がなかった。

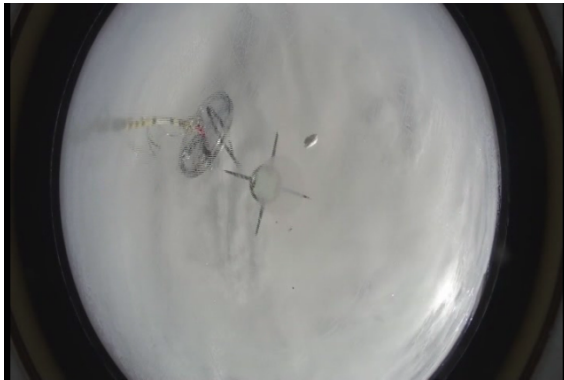


図3 落下直後の機体

3. 1 微小重力環境

図4に微小重力実験部に搭載した加速度計による微小重力環境データを示す。切り離し後約4秒間の擾乱は、機体と微小重力実験部の接合点（リニアスライダ）にかかっていたよじれが解放されたことにともなうものであるが、その後良好な低重力環境が得られている。14秒及び27秒に見られる大きな擾乱は、燃焼実験装置内の空圧シャッターの動作によるものである。また、約14秒前後から周囲の空気抵抗をキャンセルするためのスラスタ噴射が顕著となり、これに伴って若干加速度変動振幅が大きくなっている。27秒以降、若干機体が傾いてG変動がおおきくなっている。パラシュート開傘の35秒以降は大きくGが変動している。図5に加速度変動の周波数解析（1/3オク

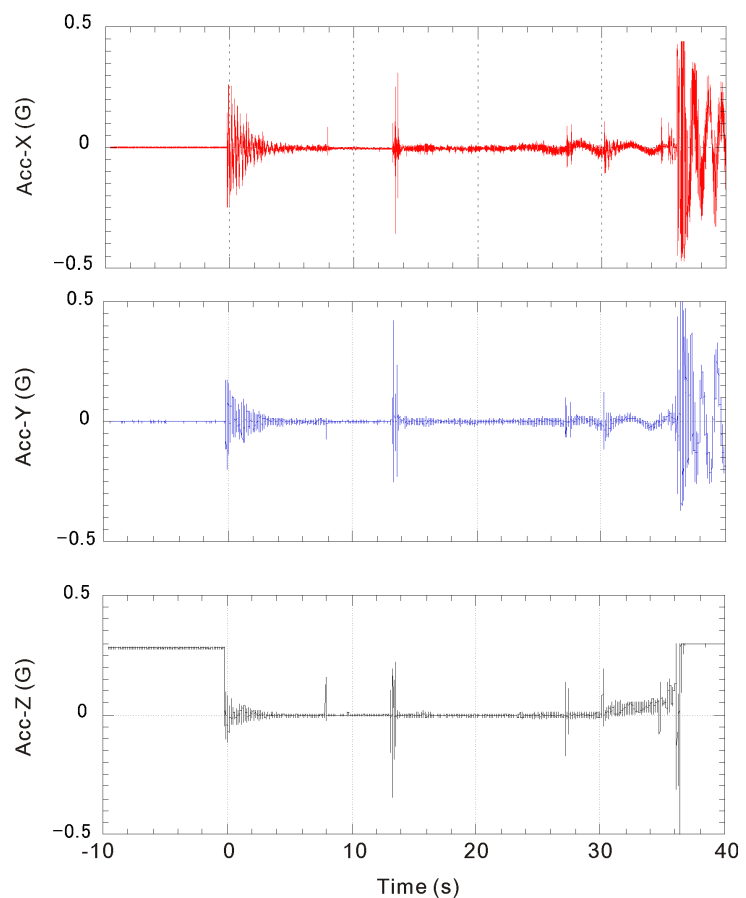


図4 微小重力実験部加速度の時間変化（0が落下開始時、Zが機軸方向）

ターブバンド解析) 結果を示す。スラスター噴射が顕著となってから高周波 (100Hz以上) のGレベルが上昇すること、また20秒以降低周波 (0.1~1Hz) が上昇していくことが見て取れる。0~30秒のGレベル (10Hz以下) は 10^{-3} Gを十分に下回っており、目標とおりの加速度環境を得ることが出来た。

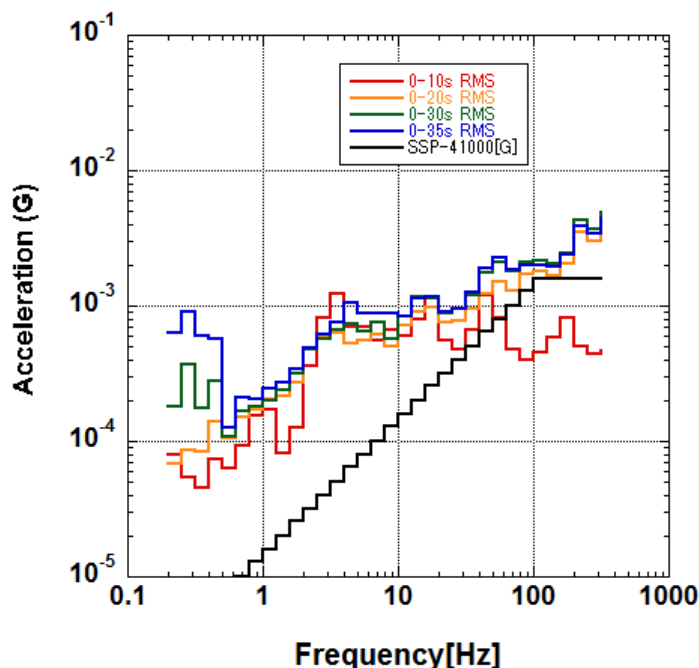


図5 1 / 3 オクターブバンド解析結果。黒：国際宇宙ステーションの設計要求；赤 0~10秒；橙 0~20秒；緑 0~30秒；青 0~35秒

3. 2 燃焼実験

燃焼実験のシーケンスはすべて正常に稼働し、液滴を生成した後イグナイタ (着火線) により着火が試みられた。しかし着火線に近接した燃料液滴への着火が行われず、液滴列の連続燃焼が起こらなかった。機体回収後、搭載した高速度カメラの画像を確認したところ、着火線の赤熱は確認されたが、事前の試験結果と比較して赤熱の程度が低い上時間が短かった。何らかの理由で着火線の発熱温度が低く、再近接液滴の温度が発火点まで上昇しなかった。

4. 燃焼実験不具合解明

実験装置を筑波宇宙センターに持ち帰った後、不具合原因の究明を行った。不具合の再現を確認すべく実験シーケンスを流したが、不具合は再現しなかった。飛行前の試験においても全く問題なかったことから、放球に伴う環境変化に原因が潜んでいると考えた。

図6に微小重力実験部に搭載した温度湿度ロガーの記録データを示す。放球日の深夜、実験機体のアクセスハッチを閉め、微小重力実験部を気密状態にした時、温度は 22°C 、相対湿度は70%である。このまま微小重力実験部に密閉された空気の温度が高度の上昇に伴って低下すると、 16°C で露点に到達することが、調査 (標準空気線図) から明らかとなった。実験実施前の最低温度は 9°C であり、イグナイタに粹瓶が付着 (結露) することによって十分な発熱が得られなかったことが原因として考えられる。

そこで、恒温槽を用いた再現実験を実施した。イグナイタ組立てを恒温槽（初期温度22℃、相対湿度70%に設定）に設置した後、温度を低下させたところ、イグナイタ組み立ての金属部に結露が確認されるとともに、通電させたところ気球実験同様にイグナイタの赤熱量は低下した。実験装置については、相模原の恒温槽（低温試験装置）を用いて低温での挙動確認を行っていたが、その際室内の相対湿度は低く（30%程度）、結露には至らなかった。温度低下に伴う結露に関しては全く見落としていた。なお、イグナイタ組立ては、TEXUSロケット実験における定電流電源から単純な乾電池に変更しているが、乾電池でも発火に十分な電流が低温でも流せることを確認している。

貴重な実験機会を頂きながら、燃焼実験において所期の成果が得られなかったことについて、ここにお詫びいたします。

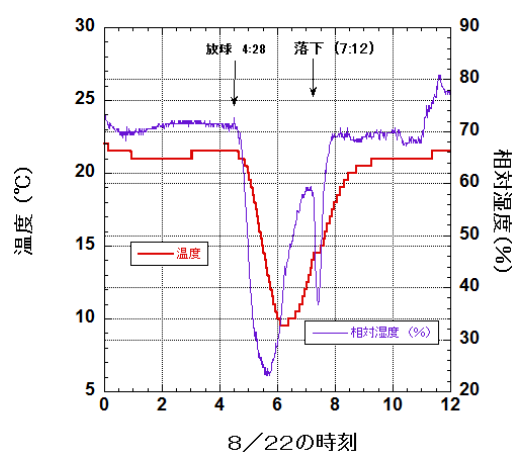


図6 微小重力実験部の温度湿度データ

5. まとめ

- A) 1軸のドラッグフリー制御により10-3G程度の微小重力環境が30秒以上得られた。航空機のパラボリックフライトより良好かつ長時間、落下塔より大幅に長時間であり、なおかつ小型ロケット実験程度のペイロードを搭載できるシステムであり、多種の微小重力科学実験が本システムを用いて実施できる。
- B) 燃焼実験は、機体内の湿気が高度の上昇に伴う温度低下に伴ってイグナイタに結露し、燃料への着火を阻害したため所期の成果が得られなかった。

気球Gの皆様に謝意を表します。

[1]橋本樹明ほか：高々度気球を用いた微小重力実験システムの開発、日本マイクログラフィティ応用学会誌**26**(2009), 9

[2]石川毅彦ほか：大気球を利用した微小重力燃焼実験、平成24年度大気球シンポジウム講演論文集、isas12-sbs-023, 2012