

細管内に封入された無水ヒドラジンの界面観察

利用者 梶原堅一¹、香河英史¹、櫛木賢一¹、長田泰一¹、高橋慶行²

所属 ¹宇宙航空研究開発機構、²ダイナックス

1. はじめに

人工衛星の姿勢制御に使用されている一液式スラスタは、燃焼室内に推薬を噴射しそれを燃焼させることで高温ガスを生成し、ノズルから噴出させることで推力を得ている。これまで、石英ガラスを用いた燃焼室の可視化を行っているが、燃焼が全体的に発生している表面的な状況は分かるもののガスの分解状況や内部の噴射状態や燃焼状態については情報が得られていない。解析等により補間を試みているが、その結果がスラスタの性能向上に結びつかず内部の燃焼構造が実現象と異なっていることも考えられる。中性子ラジオグラフィーを利用した内部観察で、実機状態のスラスタの噴射状態を観察し、推薬の噴射状況や燃焼面の挙動とその分解状況を明らかにすることで解析の精度向上に資することを最終的な目的とする。初年度は、まず、細管内に推薬（ヒドラジン）を充填したサンプルを用いて、観察手法の適合性の確認を行う。

2. 実験方法

-4のステンレス配管（内径3.5mm）内にヒドラジンを封入した可視化供試体を準備した。また、同時に比較用として、脱イオン水、IPA、アンモニアを封入したものも同時に用意して、ヒドラジンとの視認性を比較する事にした。

3. 実験結果

イメージングプレートで得られた画像を図1に示す。

ヒドラジン、脱イオン水、IPAにおいては、管中のメニスカス形状が十分に確認出来る程度の可視化が可能であることが確認できた。なお、アンモニアは残念ながら界面を確認することが出来なかったが、これは供試体準備の段階のアンモニア液充填作業が不備であったためである。

また、ヒドラジンは、IPA、水よりもコントラストが強く、より明細な界面画像取得が可能であることが判った。これは水素原子の数が多いため、ヒドラジンが中性子での可視化に適していることを示しているばかりでなく、今後、安全な流体である水を使ってフィージビリティ事前確認用流体と出来ることを示唆している。



図1 配管内流体の可視化結果

またヒドラジンの封止に使用した手動弁部分の可視化状況を図2に示す。デッドエンド部分に残留したヒドラジン液がシール部に付着している様子が良く捕らえられている。（図2中に赤枠で示した部分に液が付着して白く見えている。）内径3.5mmの撮影が良好であったことから、目的としている0.2mmの細管内の可視化に向けて、より細かい1mm程度の注射針内に水を導入し、可視化を試みた。結果を図3に示す。これらの結果、界面を可視化することが可能であることが確認できた。

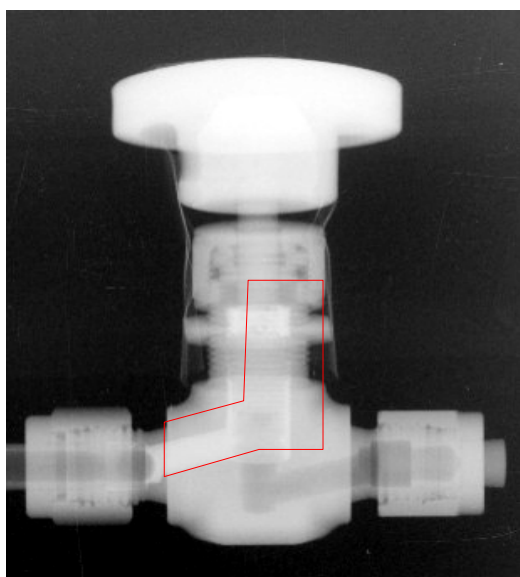


図2 ヒドラジン封止バルブ状況

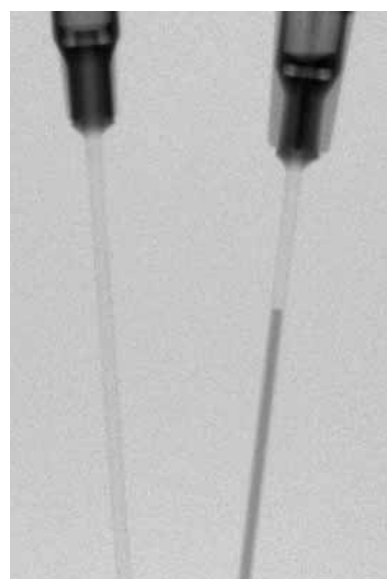


図3 細管内の可視化状況
（左：空気、右：水）

4. まとめ

平成19年度前期の課題として行った細管内に封入された無水ヒドラジンの界面観察の結果は、良好で、中性子ラジオグラフィ技術の宇宙分野への適用の可能性が十分であることを確認した。また、今後の課題が抽出できた。

これらの技術が実現できれば、宇宙分野のみならず一般産業にも適用できる技術であると思われる。

加熱された細管内の流動形態観察

利用者 梶原堅一¹、香河英史¹、櫛木賢一¹、長田泰一¹、高橋慶行²
 所属 ¹宇宙航空研究開発機構、²ダイナックス

1. 試験の目的

人工衛星の姿勢制御に使用されてる一液式スラスタは、燃焼室内に推薬を噴射しそれを燃焼させることで高温ガスを生成し、ノズルから噴出させることで推力を得ている。これまで、石英ガラスを用いた燃焼室の可視化を行っているが、燃焼が全体的に発生している表面的な状況は分かるもののガスの分解状況や内部の噴射状態や燃焼状態については情報が得られていない。中性子ラジオグラフィを利用した内部観察で、実機状態のスラスタの噴射状態を観察し、推薬の噴射状況や燃焼面の挙動とその分解状況を明らかにすることで解析の精度向上に資することを最終的な目的としている。

今回のトライアルでは、「サーマルチョーク事象」として良く知られるスラスタ推薬導管内での推進薬沸騰・熱分解、分解ガスによる流路閉塞不具合の事象把握を目的に、細管内の推進薬流動様式（液流れ、ガス流れ、混相流）の観察、細管壁面温度と流れの様相との相関を取得することを目的とした。

2. 試験供試体

以前のトライアルコースにて、内径0.6mm程度の配管内に封入された流体の気液界面の静的観察が可能であることが確認できたことから、今回は実機同様、下流側から加熱した各種内径（0.2～0.75mm）の金属細管内に擬似推進薬である精製水を送液、回収する可視化実験システムを準備した。

実験システムは、1N/4Nスラスタ用実機フィードチューブ（L605製）を含む、各種内径サイズを持つステンレス細管4本×2組から構成した。（実際の実験では、試験期間の短さから、実機用フィードチューブでの実験のみに留まった）使用したフィードチューブの主要諸元を表1に、また主要な計測項目を図2に示した。

3. 可視化実験結果

3.1 気相・液相の確認（空間解像度の確認）

ヒータ加熱状態での流動可視化試験に先立ち、チューブ内の気相、液相の各バックグラウンドデータ取得を実施した。図3に、取得した画像データを示す。

1Nフィードチューブ可視化の結果を見ると、細管の存在は確認できるが、管内の流体識別までは、視認出来ていない。今回使用した高速度カメラ撮像系の諸元を確認していないものの、一般に高速度撮影に適した高輝度、速光減衰特性をもつとされる蛍光コンバータの空間解像度が100μm程度とされていることを考慮すれば、致し方ない結果と言える。

一方、4Nフィードチューブ可視化の結果を見ると、明瞭には言えないものの、気相、液相が識別可能な画像が取得できている。

以上の結果から、ヒータ加熱系を使用した二相流の可視化実験は、4Nフィードチューブを対象として実施することとした。

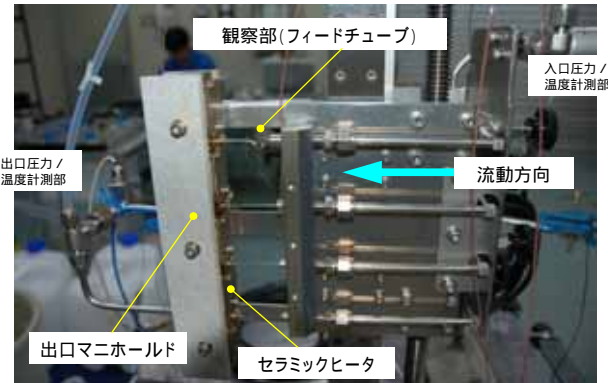


図1 衛星推進系可視化実験システム外観図（供試体部）

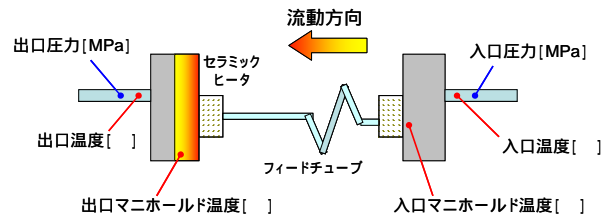


図2 実験システム供試体部の計測項目

表1 フィードチューブ主要諸元

	1N用	4N用
内径 (mm)	0.20	0.75
外径 (mm)	0.60	1.50
材質	L605 (コバルト系耐熱合金)	

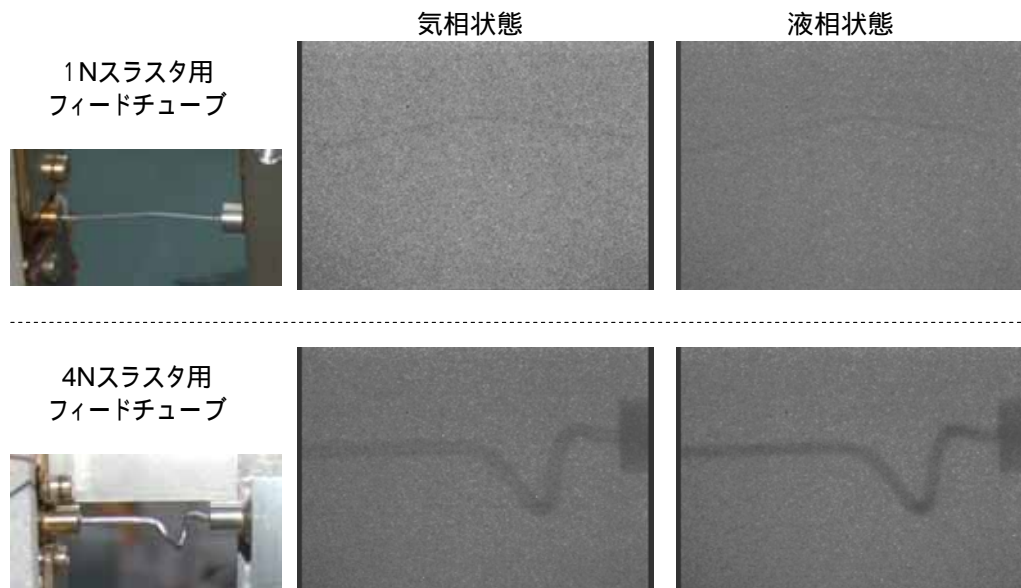


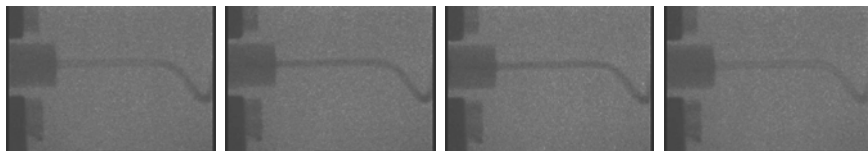
図3 フィードチューブ内の気相・液相バックグラウンド確認結果

3.2 4Nスラスト用フィードチューブによる気液二相流の可視化

4Nフィードチューブ供試体にて、実際にヒータ加熱してチューブ出口温度を300 以上に昇温した状態を初期条件として、擬似推進薬（精製水）の流動可視化実験を実施した。

(1) 各部温度・圧力プロファイルと流動様式の可視化

図4に、初期出口側マニホール温度約350、入口圧力約0.1MPa時の、各部計測温度・圧力プロファイルの結果と、代表フェーズでの可視化画像を示している。



試験開始前 (気相) 擬似推進薬導入時 (液相) 一部沸騰状態 (気液混相) 完全沸騰状態 (気相が支配的)

発生している事象は、およそ以下の通りと考えられる。

流体供給用の電磁バルブを開とする

流動開始に伴い、出口圧力の変動、出口温度の上昇が認められる。出口温度は早い段階で100 を超えることから、チューブ内あるいは出口マニホールド内にて沸騰し始めている状態、一部気液二相流の状態に至る

出口温度が120 程度に至ると、出口圧力が上昇し始め、流体沸騰状態のレベルが上がると。入口圧力が低いケースにおいては、出口側圧力は入口圧力とほぼ同値となるまで上昇し、上下流で圧力差がない状態、すなわち流動が抑制される状態に至る。(スラストのサーマルチョークと同様の事象か)

また、同時に出口側マニホールド内の沸騰継続による潜熱で、徐々に出口マニホールド温度が低下することが確認できる。この時の流動様式は、ほぼガス流の状態(気相が支配的な脈動状態)が観察される。

この状態は、出口マニホールド温度が低下し、ある温度領域に到達するとともに解消され、それに伴い出口圧力の低下が起こる。流体接触面の温度あるいは当該部の熱容量が、間接的に流動様式(気液混相、気相)を左右する影響因子であることを示唆していると考えられる。

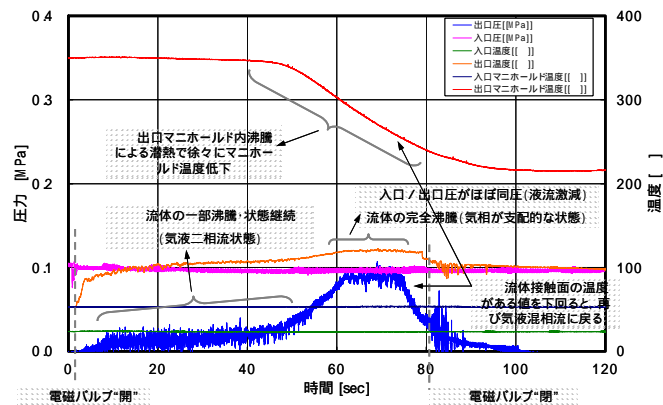


図4 4N用フィードチューブによる可視化実験結果及び各部温度・圧力プロファイル

(2) 入口圧力による各部温度・圧力プロファイル

これらのマクロな事象説明は、入口圧力をパラメータとした場合においても、ほぼ同様に説明可能であること、及び入口圧力が低いケースほど、気相が支配的な流動に至り易いことが確認できた。

3.3 高速度撮影による時間分解能の評価

一般に、気液二相流の気泡挙動といった事象の観察には、少なくとも約500コマ/秒の撮像速度が要求されるが、今回は約30コマ/秒のSIT管カメラを使用し、どこまで流体挙動の可視化が可能か把握すること、また今後のさらなる試験実施時に時間分解能に対する要求を明確化することを目的に、可視化実験を行っている。

動画で見る限りでは、管内の輝度の濃淡が微かに認められる領域でも、30コマ/秒程度のレートで抜き出した画像では、視認することが非常に難しいことが確認できた。

3.4 実験の評価と課題

今回の可視化実験によって、確認された事項、識別される課題は、以下の通りである。

- (1) 空間解像度が100 μm程度では、1Nスラスト用フィードチューブ内部の流体可視化は困難である
- (2) 4Nスラスト用フィードチューブにおいては、気相・液相の可視化が出来た
- (3) 4Nフィードチューブ加熱時に、管内擬似推進薬に起こる事象について、各部温度・圧力プロファイルよりマクロに同定した。ただし、沸騰発生ポイントの特定など詳細な現象同定までには至っていない
- (4) 4Nフィードチューブ加熱時に実現した気液混相流状態、気相状態が、完全ではないものの中性子ラジオグラフィ技術により可視化することが出来た
- (5) より明瞭な画像を得るためには、さらなる空間解像度、時間分解能の向上が必要不可欠である

また今後、実機スラスト、実推進薬(ヒドラジン)での実験遂行にあたっては、以下の項目について留意する必要がある。

(今回の試験形態と実機形態との相違点)

- (1) チューブ出口の圧力条件(実機下流は真空)
- (2) 流体の違い(ヒドラジンの熱分解。発熱反応でありプロファイルが違ってくる)
- (3) 圧力条件の違い(今回は、高圧ガス保安法上、低圧で実施)

前回のトライアル結果から、精製水よりもヒドラジンの方がコントラストが付きやすいことが判っているため、その点は可視化において有利であるとは考えられるものの、今回試験形態とは大きく条件相違があるため、事前の詳細評価が必要である。

4. 今後の追加試験・評価項目

今回のトライアル実験にあたっては、JAEAでの実験ウィンドウと実験システム製作完了時期とが近接していたことから事前の実験システム予備データ取得が充分ではなかった。また実験期間が実質1日しかなかったために、体系的な試験と出来なかったことが反省点として挙げられる。

現在、実験システムは、放射化を冷ますためにJAEAにて保管中であるが、装置が戻り次第、以下の項目について追加オフライン試験、画像解析を実施することで、評価の充実を図る計画である。

(1) フィードチューブ温度分布取得試験

中性子ラジオグラフィ可視化試験時の温度計測点は、マニホールド等の装置側温度を取っているため、実際のチューブ温度と流動様式との相関付けが出来ていない。サーモグラフィを使用して、フィードチューブ内の温度分布を取得する。

(2) 取得可視化画像の詳細解析

本資料中に掲載した画像は、オリジナル動画から切り出したものを、ある輝度、コントラスト調整を施し、極力見やすくしたものであるが、さらなる画像処理を実施することで、流体のボイド率等の定量的な評価に繋げる試みを実施したい。

具体的には、評価区間を区切って(フィードチューブ出口部近傍等)、各種フィルタによるノイズ除去、輪郭強調や、画像輝度をベースとしたボイド率計測等を試行することで、今後の画像処理手法の確立を目指すこととしたい。

タンク内の推進薬界面形状の観察

利用者 長田泰一¹、櫛木賢一¹、香河英史¹、梶原堅一¹、高橋慶行²

所属 ¹宇宙航空研究開発機構、²ダイナックス

1. はじめに

人工衛星で使用される推進タンク内の液面形状を把握することは、宇宙周回軌道上での液面挙動解析及び残推進薬量推定の上で不可欠である。表面張力が支配的な宇宙空間では、タンク壁面と推進薬との接触角（濡れ性）が、液面形状を決める重要なパラメータとなる。人工衛星の推進薬には、無水ヒドラジン（N₂H₄）が使用されている。有毒なため、従来の接触角計による液滴法では特段の注意が必要となる。また、接触角は固体表面の状態や気体の物性などに大きく影響されるため、できる限り実際の推進薬充填状態に合わせた条件で計測する必要がある。

したがって、人工衛星用金属タンク内に充填された推進薬の界面形状を、直接透過撮影できれば、より精度良く接触角を見積もることが可能となる。X線ラジオグラフィーではヒドラジンを可視化することはできないが、中性子ラジオグラフィーを用いることでそれが可能である。金属容器内のヒドラジンを中性子ラジオグラフィーにより可視化できることは、2007年上期トライアルユースにより事前確認されている。

そこで、今回は、人工衛星用タンクに充填された状態での推進薬（無水ヒドラジン）接触角を計測することを目的として、中性子ラジオグラフィーによるタンク及び金属配管内の推進薬界面形状の可視化を行った。

2. 実験方法

図1に示すような1/2インチチタン配管およびチタンタンクに無水ヒドラジンを充填し、イメージングプレート（IP）により中性子ラジオグラフィーを実施した。

接触角は、メニスカス形状から読み取る。メニスカス形状は、配管径が小さいとその影響を受けてしまうため、内径の十分大きい1/2インチ配管（内径10.7mm）を使用した。チタンタンクは、外径160mmの球形で、壁厚は1mm程度である。タンク内部に推進薬排出機構は設置されていない。

前述のように、壁面材料、表面粗さ及び封入気体の種類は、接触角に影響するため実際の衛星条件に合わせる必要がある。1/2インチ配管については、チタン合金（Ti-6Al-4V）材料を加工することにより、材料及び表面粗さを衛星用タンクと同じにした。チタンタンクについては、実際の衛星用タンクであるので、実際の条件と同じである。無水ヒドラジンを真空充填し（タンク：1212.6[g]、配管：4.1[g]）、充填後ヘリウムガスにより0.9MPa(gauge)に加圧した。推進薬充填後は、有毒な無水ヒドラジンが漏洩しないように入出口を封止した。

3. 実験結果

図2にチタン配管の中性子ラジオグラフィー画像を示す。濃い白色の部分がヒドラジンであり、メニスカス形状がはっきりと可視化されている。図3に示すように、接触角は三相界面の表面張力のつり合い（Youngの式）により決まる。 σ_s ：気相に面する固体壁の表面張力、 σ_L ：液相に面する固体-液体の界面張力、 σ_l ：液体の表面張力、 α ：接触角である。界面形状から接触角を見積もることができる。

図2のメニスカスから直接角度を見積もると、30°程度である。これは、Societe d'Etude de Propulsion (SEP)の計測結果(1)とおおよそ一致していると言える。しかし、より正確に界面形状を見積もるためには、三島ら(2)が提案している輝度値から中性子の透過距離を求める方法を用いる必要がある、今後の課題としたい。

図4に、チタンタンクの中性子ラジオグラフィー画像を示す。配管の場合と同様に、内部のヒドラジン界面がはっきりと可視化されている。

4. まとめ

- ・中性子ラジオグラフィーにより、実際の壁面接触条件でメニスカス形状を可視化することにより、接触角を精度良く計測できる見通しを得た。

- ・実際の人工衛星用タンク内部に充填された無水ヒドラジン界面形状を中性子ラジオグラフィーにより、可視化することに成功した。

今後は、より複雑な内部構造（ペーン式やチャンネル式推進薬排出機構）の推進タンクについても、推進薬界面形状を観察することにより、残推進薬量予想やタンク設計の最適化のためのデータ取得が期待される。



図1 1/2inチタン配管（左）および推進薬タンク（右）
配管内径は 10.7mm,管厚1mm. タンク外径 160mm, 壁厚1mm.
材料はいずれもチタン合金（Ti-6Al-4V）. 無水ヒドラジン充填のため、入口にバルブがそれぞれ装着されている。

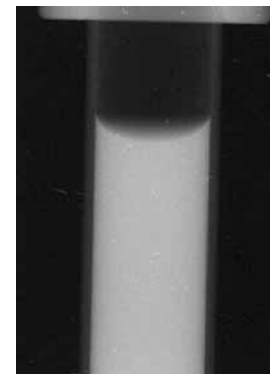


図2 チタン配管の中性子ラジオグラフィー画像（白色部がヒドラジン又は金属壁を示す。）

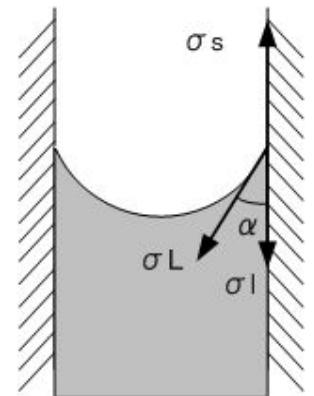


図3 接触角つり合いの模式図
 σ_s ：気相に面する固体壁の表面張力、 σ_L ：液相に面する固体-液体の界面張力、 σ_l ：液体の表面張力、 α ：接触角



図4 推進薬チタンタンクの中性子ラジオグラフィー画像