



## サーモグラフィはロケットの極低温液体燃料タンクの設計に役立っています

宇宙開発分野では燃料に関するテクノロジーは中核技術です。ロケットの推進には燃料が必要ですが、燃料が増えるとその分重くなり、さらに推進力が必要となってしまいます。ロケット開発者はこのジレンマをいかに克服するか常に取り組んでいます。この課題に対するソリューションとして注目されているのが推力重量比の極めて高い極低温液体燃料です。しかし、極低温液体燃料は容易に揮発する(引火しやすい)特性をもっている上に、重力のない宇宙空間での使用にはまだいくつかの課題が残されています。ドイツの研究施設ZARMの研究チームはフリースシステムの赤外線サーモグラフィを使い、この課題のひとつに取り組んでいます。

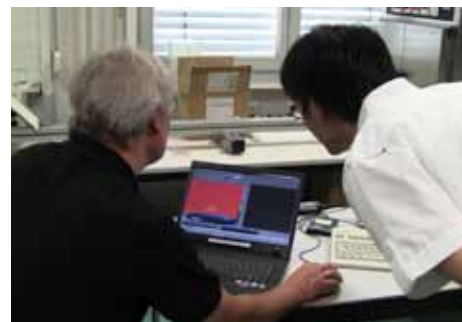
極低温液体燃料は、極低温化でしか液体状態を保つことができませんが、容器当たりの充填エネルギー量が多い(推力重量比が高い)という特長を有しています。一般的な燃料に比べてクリーンであることから、液体酸素と液体水素の組み合わせが最も一般的に使用されています。しかし、宇宙船の燃料として極低温燃料を使用するには、いくつかの課題が残されています。「その一つは、燃料タンクで気化した燃料がエンジンに侵入するのをいかに防ぐかという問題です。」ブレーメン大学生産技術学科に付設したZARM(宇宙応用技術・微小重力センター)のRonald Mairose氏は説明します。「エンジンに気体が侵入すると、キャビテーションと呼ばれる気泡化が起こり、ロケットの部品の損傷や、ときにはエンジン停止が起こる恐れがあるのです。」

地上では重力があるため、液体と気体の比重差から、液体はタンクの底にたまり、気体は上方に向かいます。そのため燃料タンクに気体はいらないようにすることが可能です。宇宙船がいったん地球の重力場から離れても、推力が働いていれば、推力が重力と同じ作用を及ぼします。しかし、宇宙空間でエンジンが停止すると、重力や推力の作用がなくなり、極低温燃料の液体-気体の制御が極めて困難になります。燃料タンク内で液体と気体の両方が浮き上がり、エンジンを安全に再始動することができなくなるのです。

この問題への対応策には2つの方法があります。ひとつは補助推進システムを使う方法で、1969年のアポロ号の月着陸で使用されたことが有名です。この方法では、補助推進システムの推力で液体燃料



サーモグラフィで極低温液体燃料のウィッキング作用の進行状況を測定する



付属のFLIR製ソフトウェアALTAIRを使って赤外線画像を微調整する研究者たち



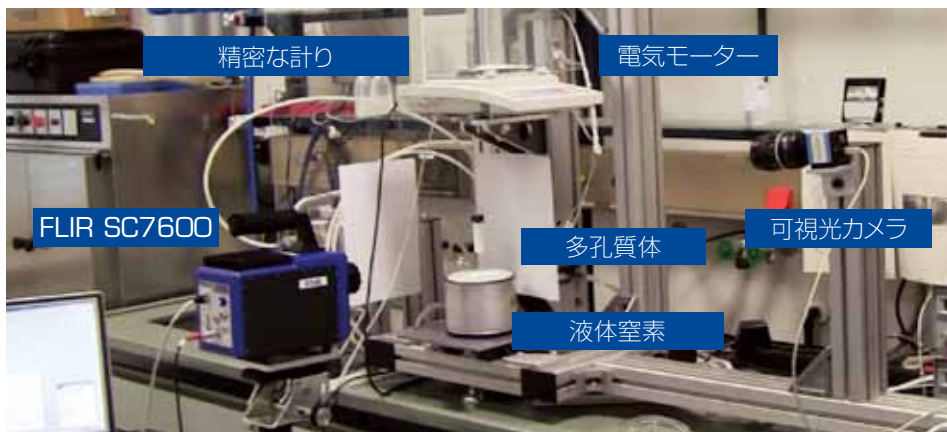
をタンク給液口に押し込むことで気体のエンジンへの侵入を防ぎ、エンジンを再始動させます。しかし、この方法には2つの大きな欠点があります。補助推進システムを積み込むことでロケットの重量が増える点と、ロケットに搭載する燃料の量が制限される点です。

もうひとつの方法は、推進薬管理装置(PMD)と呼ばれるタンク内でステンレス鋼製フィルターなどの多孔質体を使い、常に一定量の液体燃料をタンク給液口に保持する方法です。この方法では、液体は多孔質体を通してエンジンに送られますが、気体は遮断されるため、エンジンへの気体の侵入を防ぐことができます。液体が多孔質体に入り込む作用をウィッキング作用と言います。「ウィッキングは多くの液体に共通する性質です」とMairose氏は説明します。「コーヒーカップの中に角砂糖を沈めたことがある人はこの作用を理解できるでしょう。コーヒーが角砂糖にしみ込むのは、コーヒーと砂糖の間の毛管力が重力に勝るためです。」

「この方法では、多孔質体が十分量の液体を保持する必要があります。多孔質体の一部でも乾いてしまうとそこを気体が通過し、エンジンに侵入してしまうからです。」とMairose氏。「つまり、多孔質体は常に湿った状態を保っていなければなりません。蒸発により多孔質体の一部が乾燥することがあるため、この方法はこれまで蒸発の遅い又は蒸発しない液体にのみ適用されてきました。極低温燃料は蒸発しやすいうえに、そのウィッキング特性についてよく分かっていませんでした。したがって、温度変化や熱伝導による蒸発作用がウィッキング作用よりも大きい可能性がありました。」

## 実験室での試験

ZARMで行われたFLIRサーモグラフィを用いた研究から、新たな洞察が得られました。研究には液体窒素が使用されました。液体窒素は取扱いに注意すれば比較的安全で、液体酸素などの極低温燃料と物理的性質が似ています。この研究の責任者であるZARMの研究助手Ming Zhang氏が説明します。「ガラス又はステンレス鋼製の多孔質体を、液体窒素を入れたジュワービンに沈めます。コーヒーが角砂糖に



この実験では、電気モーターを使って液体窒素に多孔質体を沈め、精密な計りで重量変化を測定し、FLIRサーモグラフィで多孔質体の液体窒素吸収スピードを計測した。

しみ込むように、液体窒素が多孔質体にしみ込めば、液体燃料にウィッキング特性があることが証明されたことになります。」

ZARMの研究施設が所有するFLIR SC7600サーモグラフィはこの研究で中核的役割を担いました。「最初は、液体窒素が多孔質体の構造にどれだけ吸収されたかを正確に測定できずに苦心しました。当初は可視光カメラを使用していましたが、正確な計測はできないことが分かりました。可視光カメラでは、液体窒素の表面的な動きしか確認できず、多孔質体内部にどれだけ侵入したかは見えなかったからです。」

## FLIR SC7600でウィッキング作用を可視化

FLIR SC7600サーモグラフィがこの問題を解決しました。「液体窒素と室温には大きな温度差があるため、多孔質体に入る液体窒素の様子が赤外線画像にはっきりと映し出されたのです。」とZhang氏。「さらに、液体窒素が多孔質体の内部に侵入すると、多孔質体の表面温度が変化するため、多孔質体内部で液体窒素がどの程度侵入しているかをサーモグラフィで正確に計測できたのです。」FLIR SC7600に記録された赤外線データから、液体窒素が多孔質体に入ることが示されました。「この研究が実施されるまで、極低温燃料のウィッキング性や蒸発の影響については分かっていませんでした」とZhang氏。

た」とZhang氏。

## エンジン再始動時の安全確保

サーモグラフィからのデータは、多孔質体の重量増加を精密に測った重量データとあわせて解析されました。「多孔質体に吸収された液体窒素の進行距離のデータと重量データを統合した結果、低温液体のウィッキング特性の詳細が分かりました。」この知識は、極低温液体燃料用の新たな推進薬管理装置の開発に役立つと考えられています。「液体燃料は毛管力により多孔質体に吸い込まれることが分かったため、エンジンに気体が侵入しないようにすることが可能です。この原理を使えば、補助推進システムを使わずに、エンジンを常に安全に再始動させることができます。」



多孔質ガラスを使用したウィッキング試験の結果を示す赤外線画像



ステンレス鋼製フィルターを使用したウィッキング試験の結果を示す赤外線画像

赤外線カメラに関する情報は弊社までお気軽にお問い合わせください。

フリアーシステムズジャパン株式会社  
〒141-0031  
東京都品川区西五反田3-6-20  
西五反田アクセス8F  
電話 : 03-6277-5681  
Fax : 03-6277-5682  
e-mail : info@flir.jp  
www.flir.com