

宇宙からの試料を 魔法瓶で 回収する

2018年11月、宇宙ステーションで生成した宇宙実験サンプルを日本独自の回収機で回収することに初めて成功した。宇宙ステーション補給機「こうのとり」に搭載された小型回収カプセルにはステンレス製真空二重断熱容器(二重魔法瓶構造)が採用された。容器をはじめとして、サンプル回収に関わった技術について紹介する。

国際宇宙ステーションから離脱する「こうのとり」7号機(2018年11月7日)。先端の中央部に見える銀色の丸い部分が小型回収カプセル。

画像提供：JAXA

日本初の独自帰還 有人宇宙飛行への大きな一歩

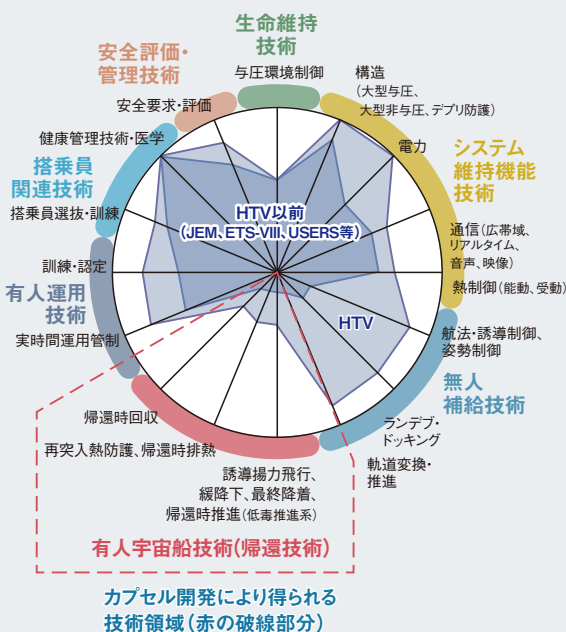
宇宙ステーション補給機「こうのとり」(HTV:H-II Transfer Vehicle)は国際宇宙ステーション(ISS)への補給が済むと、ISS離脱後に大気圏に突入して燃え尽き、役目が終わる。そのため、物資を持ち帰ることができず、これまでISSからの物資回収は、米国やロシアの宇宙船に頼ってきた。ISSから日本が独自にサンプルを回収する技術の確立は、ISSの一層の有効活用のために非常に重要であった。

「こうのとり」搭載小型回収カプセルの開発は単なるサンプル回収機としてだけでなく、他国の有人帰還カプセルと同様の揚力誘導制御機能を搭載することで、帰還時の衝撃や加速度を緩和しながら目標海域に着水できる技術を実証することも大きな目的であった。

今回のミッションでは、3つの開発目的が掲げられている。1つ目はカプセルを低加速度で揚力飛行させて目標範囲に誘導する「揚力誘導制御技術」の実証、2つ目は国産の低密度アブレタにより大気圏再突入時の高温環境からカプセルを保護する「軽量熱防護技術」の実証、3つ目が日本が独自にISSからのサンプル回収技術を獲得することである。

ISSからのサンプル回収技術が確立すれば、有人宇宙船が

●カプセル回収により得られる技術領域(図1)



赤の破線部分で示した技術が、カプセル開発により得られる技術の領域で、有人宇宙船技術(帰還技術)と密接に関連している。これとは別に打ち上げ時の技術領域もあり、有人宇宙船技術の確立には、多岐にわたる技術的蓄積が必要である

画像提供：JAXA

●小型回収カプセルの構造(図2)

側面アブレータ

パラシュートを展開する際に本体から分離する。

パラシュートなど

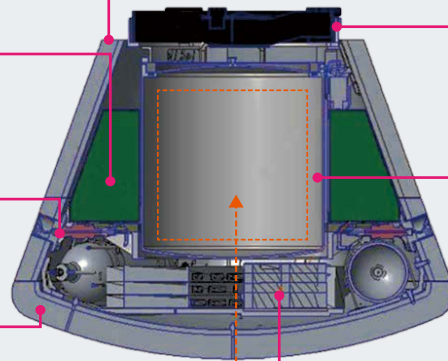
小型回収カプセル用に設計されたパラシュートは、収納スペースに合わせた形でコンパクトに畳めるようになっている。また、海面に浮くためのフローティングバッグもここに収納される。

姿勢制御スラスタ

誘導制御系からの指令に基づきカプセルの姿勢を制御する役割をする。カプセルの周上に8基あり、推進剤には窒素ガスを使用。

底面アブレータ

再突入時の熱からカプセルを守るために、新たに開発された軽量の防護材が採用された。



画像提供：JAXA



回収カプセル放出時のイメージ
画像提供：JAXA

分離機構

「こうのとりの」から分離・離脱するための仕組み。

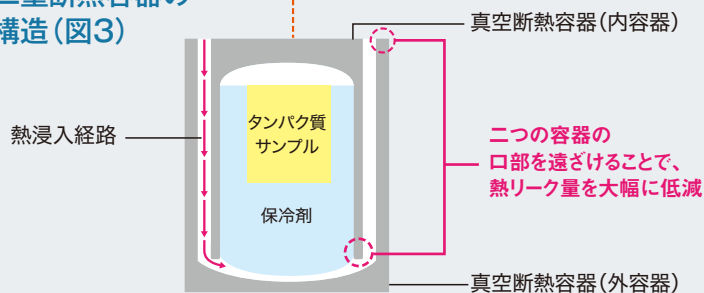
ペイロード(積載物)収納容器

1気圧を維持する構造になっており、真空断熱容器はここの中に収納される。

アビオニクス(航空用電子機器)類

各種制御機器、データ処理装置、電源(バッテリー)などが収納されている。

●真空二重断熱容器の内部構造(図3)



画像提供：JAXA



ISSでのカプセル組立作業の様子

画像提供：JAXA

飛行士を守るための基礎技術に繋がると期待されており、本技術は日本独自の有人宇宙船技術(帰還技術)開発への大きな一歩になると考えられている(図1)。

輸送・回収するサンプルは、今回ISSで生成されたタンパク質結晶が対象となっており、その輸送にはステンレス製真空二重断熱容器による保冷技術が重要になった。

開発された小型回収カプセルは直径約84cm、高さ約66cm、質量約180kg(試料を除く)の円錐形状で、内部にサンプルを格納するペイロード収納容器が収められる構造になっている(図2)。カプセルは熱防護系、構造系、誘導制御系、データ処理・電源系、緩降下・回収系、推進系、分離機構系などから構成され、誘導制御系と推進系が揚力誘導制御技術に、熱防護系が軽量熱防護技術に大きく関わっている。

であり、 $4^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ という低温を3~4日間保つ必要があった。そこで採用されたのが「魔法瓶」の技術であった。回収カプセルにはステンレス製の真空二重断熱容器が搭載された(図3)。

通常使用される水筒のボトルの保温時間は10時間から長くても24時間であるため、蓄冷剤のみで $4\pm 2^{\circ}\text{C}$ の状態を4日以上保つには、通常の魔法瓶には必要のないさまざまな工夫が必要だった。

その一つが、真空断熱容器を二重にすることである。真空断熱層の重ね合わせ部を長く取ることで、内部への入熱量を大幅に低減することを可能にした。さらに2つの容器の入り口を遠ざけることで、熱リーク(漏洩)量を大幅に低減した。

また、強度についても課題があった。通常の水筒と比較して約50倍の容積を持つ大型の真空二重断熱容器は大気圧により歪みが生じてしまう。さらに、着水時には最大で40Gの衝撃がかかるため、真空容器もこれに耐える必要があった。

しかし、真空容器の強度を上げるために肉厚を厚くすると、熱リーク量が増加する上、質量も大きくなってしまふ。シミュレーションが繰り返され、最終的には応力が加わる部位によって、0.1mm単位でステンレス鋼の厚さを変えるなどの工夫をすることでこの課題を解決した。

ステンレス製真空二重断熱容器 4℃を4日間保つ

今回のミッションでISSから持ち帰るサンプルはタンパク質結晶



回収船に引き上げられた小型回収カプセルの様子

画像提供：JAXA

軽量熱防護技術

3段階で高温から守る

小型回収カプセルには新しく開発された炭素繊維強化プラスチック(CFRP)を軽量化したアブレータが採用された。

大気圏に再突入した際、空力加熱(圧縮断熱)によりカプセルの底面は最大約1800℃の高温になる。高温環境下でアブレータはまず、熱分解することで吸熱効果を発揮する。そして、分解後のアブレータは耐熱性の高い炭化層を形成する。さらに熱分解ガスが大気とカプセルの間に境界層を形成し、加熱した大気の熱がカプセルに到達することを防ぐ仕組みになっている。底面アブレータのカプセル内部の温度上昇は200℃以下に抑えられた。

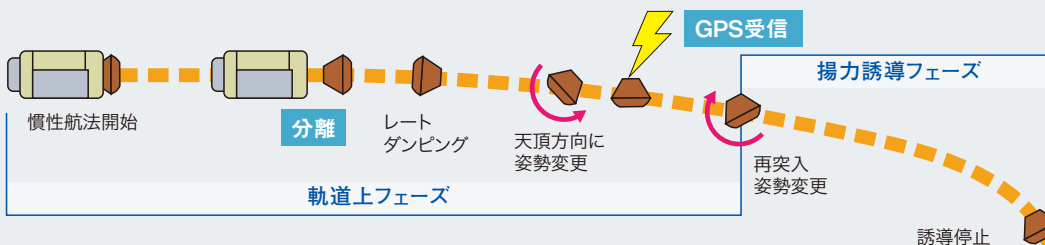
今回開発された軽量アブレータでは「はやぶさ」の回収カプセルで使用されたものの5分の1の軽量化に成功している。

●姿勢を制御するためのスラスタ(図4)

スラスタのノズルは耐熱性が求められることからチタン合金が使用された。3Dプリンターによる粉末焼結により成形されている。



画像提供：JAXA



●バンク角の制御による揚力誘導制御技術(図5)

揚力誘導制御技術は、有人宇宙船並みの加速度で目標範囲に誘導するための技術。カプセルのバンク角を適切に調節することで、カプセルに作用する揚力を制御し目標範囲に誘導する。カプセルの姿勢は8つのスラスタから噴射される窒素ガスにより制御される。「こうのとりのり」から分離し、着水するまでの最大加速度は約3.5Gであった。



JAXA提供資料を元に作成

揚力誘導制御技術 翼の無い飛行機でふわりと着水

今回のミッションの目的の一つである揚力誘導制御技術では、再突入時の加速度を4G以下に抑えることが目標であった。スペースシャトルやロシアの有人宇宙船が帰還する際の加速度は3~4Gである。遊園地のローラーコースターのうち、最大級の加速度をだせるもので4G程度の加速度を感じることができるという。

回収カプセルが揚力を得るためには、大気中での姿勢を最適に保つ必要がある。それを実現するのが、カプセルの周上に均等に配置された8基のスラスタである。推進剤には窒素ガスが採用されている。スラスタのノズルは耐熱性が求められることからチタン合金が使用され、3Dプリンターによる粉末焼結により成形されている(図4)。

スラスタによってバンク角(傾き)を何度か変えることによって、加速度を抑えるだけでなく、目標範囲に誘導することが可能になった(図5)。



日本独自の技術で サンプル回収に成功



2018年9月23日に「こうのとり」7号機を搭載したH-IIBロケット7号機が鹿児島県の種子島宇宙センターから打ち上げられた。「こうのとり」7号機は9月27日にISSに把持され、9月28日には宇宙飛行士が入室し、物資の搬入作業などが始められた。

回収するタンパク質結晶がカプセルの断熱容器に格納されたのは11月6日で、11月8日に「こうのとり」7号機はISSを離脱した。

「こうのとり」7号機が軌道を離脱するまでの待機期間に、地上では天候確認や回収船の移動などが行われた。11月11日早朝、カプセルは「こうのとり」7号機から分離され、大気圏に再突入し、パラシュート開傘と着水が確認された後、航空機による捜索を経て回収船により回収された。

回収されたサンプルは11月13日に航空機に積み替えられ、南鳥島から茨城空港を経由して、筑波宇宙センターまで輸送された。軌道上でのサンプル搭載からユーザーへの引き渡しまでは6日と16時間であった。ステンレス製真空二重断熱容器の保温期間の要求は3～4日であったが、開発の結果、要求以上の性能を発揮し、サンプルを無事に届けることができた。

ISSからのサンプル回収頻度はニーズに対して不足していることから、今回の成功はISSの有効活用に大きく貢献するものと期待されている。さらに、サンプルが日本国内で回収できることから、通関などの手続きが不要で、回収までの時間を短縮できる点も大きなメリットになっている。

現在のシステムは「こうのとり」の離脱・再突入に合わせて運用する必要があるが、JAXAでは今後、独自の軌道離脱機能を備えた回収カプセルも構想していくという。

2018年の世界のロケット打ち上げ数は128基という調査がある*。これは冷戦期の1984年以来の高水準という。世界的に宇宙利用が拡大していく中、日本のサンプル回収技術の活用に期待が持たれる。

*日本経済新聞と英フィナンシャル・タイムズの共同調査

入念に行われたクルーレビュー

サンプルの格納や、カプセルの組立作業など一連の作業はISSクルーによって行われる。カプセルの打ち上げ前には、宇宙飛行士も参加して安全性や作業手順などが確認された。

また、想定されるトラブルについても、事前に検討される。たとえば、保冷剤が変形して格納できない場合はどうするのか、カプセルと「こうのとり」との結合部から空気が漏れた場合はどうするのか、などさまざまなケースを想定した検討が行われる。

クルーレビューに参加した宇宙飛行士は、地上支援クルーとして、実際にISSで作業が行われた際にもサポートを行っている。

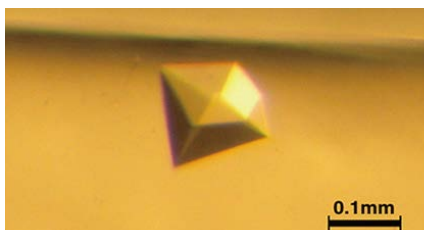


クルーレビューの様子

画像提供：JAXA

期待が高まる 宇宙の有効活用

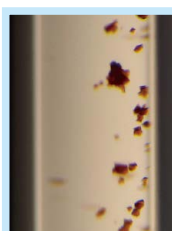
回収された実験サンプルは、ISSの日本実験棟「きぼう」にある実験装置で2か月かけて結晶化したたんぱく質で、今後はSPring-8、Photon Factory、J-PARCなどの研究施設で解析作業が行われ、新薬開発などに有用な知見が得られると期待されている。



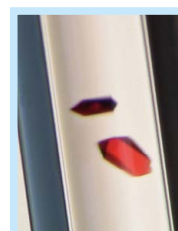
ISSで生成された炎症やアレルギー反応を引き起こす「プロスタグランジンD2 (PGD2)」という物質を合成するたんぱく質の酵素の結晶

画像提供：第一薬科大学/JAXA

[参考写真]別の実験で生成したタンパク質結晶の比較



地上で生成した結晶



宇宙で生成した結晶

画像提供：JAXA