

空と宙

2012 JUL/AUG
<http://www.ard.jaxa.jp/>

隔月刊発行 ISSN 1349-5577

研究開発

世界で売れるスラスタをつくる！
極低温の世界を産む冷凍機技術

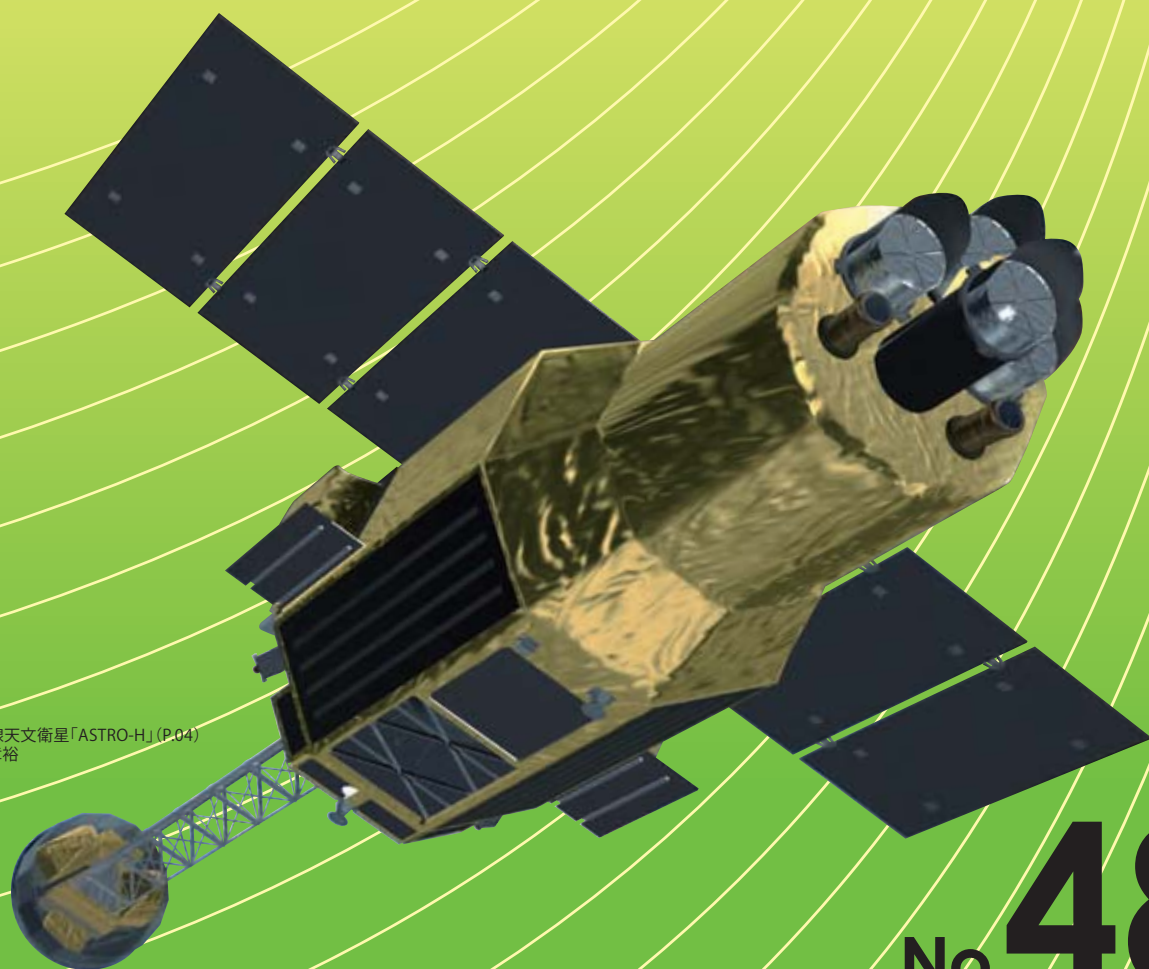
横路散歩

宇宙と温度

空宙情報

「SDS-4」の打上げ成功と今後の意気込み
超伝導ポンプによる液体水素の移送に世界で初めて成功

次期 X 線天文衛星「ASTRO-H」(P.04)
©池下章裕



No. **48**

研究開発本部
Aerospace Research and Development Directorate

世界で売れるスラスタをつくる！

世界最高性能の1Nスラスタを開発

人工衛星が働く宇宙空間は、私たちが生活する地球上とは異なる過酷な環境です。しかも、衛星がもし故障してしまったら、修理はまず不可能な場所でもあります。そのため衛星に搭載される機器類には“高い信頼性”が欠かせません。近年は衛星の長寿命化が進んでおり、機器類にも“長く作動すること”が求められています。また、限られた電力で各種機器を作動させるため、低電力で作動することも重要です。加えて、安くて納期も短かければ、言うことなし。そんな理想像を目指して開発を進めてきたスラスタがついに完成しました(図1、表)。

ところで、スラスタって何でしょう？ ロケットにより宇宙空間へ打ち上げられた人工衛星は、ロケット分離後、自身の推進系によって所定の軌道へ入ります。所定の軌道に入ってから、軌道誤差の修正や南北・東西の位置保持、姿勢制御などに推進系を使います。この推進系の内、実際に推力を発生する部分をスラスタと呼んでいます。

スラスタにはいくつか種類がありますが、今回開発したのはヒドラジンを推進薬とする1液式1N^{※1}スラスタです。^{※2}その仕組みを図2を使って説明します。推進薬となるヒドラ



図1 新規に開発した1液式1Nスラスタ

表 スラスタ性能

	新1Nスラスタ	従来品
寿命	20万Nsec* and 85万パルス以上 ヒドラジン消費量 100kg以上	約4万Nsec
連続比推力(秒)	222以上	210以上
消費電力(W)	3.0以下	6.0

* トータルインパルス [Nsec]：スラスタの発生推力を時間で積分したものの。これがスラスタの寿命を表している。海外製品を上回る限界性能を目指し、目標を達成した。

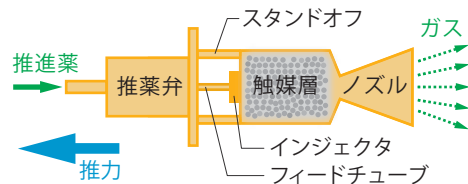


図2 1液式スラスタの仕組み

ジンはまず、スラスタの入り口であり、推進薬の供給や制御を行う推薬弁へ流入します。次に、推薬弁の開閉により流量を制御されつつ、推薬弁と触媒層をつなぐ細管であるフィードチューブへと送られます。フィードチューブを通ったヒドラジンはインジェクタを介して触媒層へ噴出され、内部の触媒粒に分解されてガス化し、ノズルで膨張しながら噴射されます。この反力として推力を得ることができます。

- ※1 1N：地上で約100g程度の質量を支える力。
- ※2 他にも、液体ロケット同様、酸化剤と燃料を反応させることで得られるエネルギーを利用する2液式スラスタや、電気エネルギーを利用する電気推進系スラスタがある。

小さな工夫の積み重ねが大きな成果に

1液式スラスタは、連続噴射やパルス噴射を繰り返すことができます。そしてその寿命は“触媒粒の摩耗(減り具合)”によって決まります。つまり、寿命末期においてもより多くの触媒粒を保持できれば寿命を延ばせるということです。触媒層内に入ってきたヒドラジンは分解されてガス化する際に高い熱を発生し、触媒層は熱くなります。噴射を繰り返すことにより触媒粒には熱サイクルの負荷がかかるのですが、その負荷を抑えることで触媒粒の減少を少なくすることを目指し、インジェクタの設計を工夫しました。またインジェクタの設計変更に伴い、より多くの触媒粒を触媒層に保持できるようになった点も長寿命化の要因の一つです。その結果、トータルインパルスは劇的に大きくなり、海外製品を上回る長寿命を達成できました。

また触媒層で発生した熱は上流に伝熱していくのですが、熱が伝わりにくい構造、言い換えると“熱を切る”構造にすることで、長寿命、ヒートソークバック^{※3}の低減、低電力などを実現しました。従来品はサーマルバリア型と

信頼性の高い長寿命 1N スラスタの開発に成功

呼ばれる構造で触媒層と推薬弁を結合していたのですが、それをスタンドオフ型にして形状を最適化したことがポイントです。

高い信頼性を有することも今回開発したスラスタの特長です。スラスタ固有の問題として、触媒層からフィードチューブに熱が伝わることによりチューブ内を流れるヒドラジンが酸化してしまい、流れが止まってしまうサーマルチョークという現象があります。サーマルチョークはヒドラジンの噴射モードに依存して発生します。サーマルチョークを防ぐために考えられたサーマルシャントという機構があり、私たちは、どの噴射モードでもサーマルチョークを起こさない設計を目標に掲げて開発を進めてきました。断面積を約2倍にして排熱効率を高めるなどの改良を重ね、目標とするサーマルシャントの設計に成功しています。噴射モードの制限をなくしたことで、衛星システムメーカーにとって使いやすいスラスタとなっています。

※3 ヒートソークバック：ヒドラジンの流れを止めると冷える効果がなくなり、上流により多くの熱が伝わる現象。

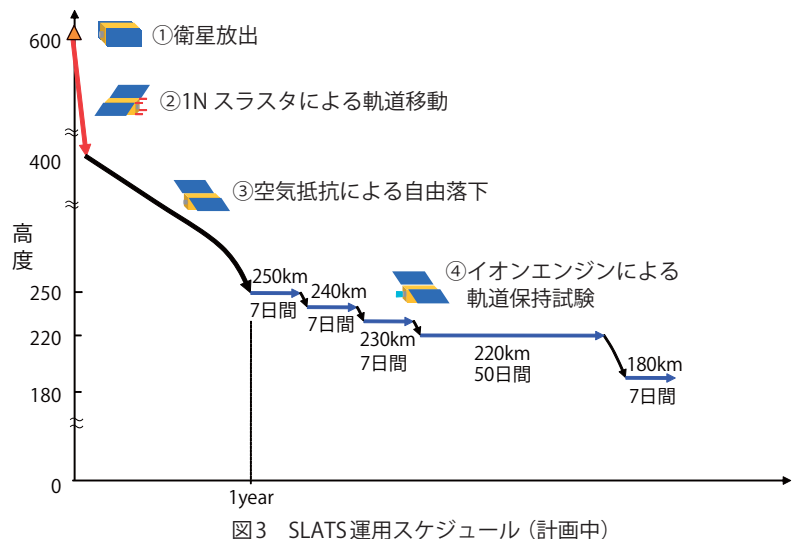
日々の研究が開発への鍵となる

新1Nスラスタは2009～2011年にかけて、JAXA産業連携センターの支援を受けてIHIエアロスペースと共同で開発しました。推進系グループでは、スラスタの長寿命化や高信頼性に関する研究を継続して行っており、開発や改良に活かせるノウハウを蓄積していました。その結果、今回掲げた目標を達成できる目処がつい

ていたこともあり、3年という短期間で世界最高性能の1Nスラスタを開発することができました。

開発を進めているJAXAの超低高度衛星技術試験機「SLATS」に搭載することが決まっており、現在はそのフライト品4式を製造しているところです。SLATSは高度250km以下という超低軌道を周回させるために必要な軌道保持技術を実証するための衛星です。ロケットにて軌道に投入された後、所定の軌道まで移動するのに新1Nスラスタを使います（図3）。

今回は“世界で売れる”を目標として掲げていることもあり、これまでの国産1Nスラスタとは異なり、安くて・短納期であることも大きな特長です。現在、企業が海外へも積極的に売り込みを掛けており、世界の中でも注目を浴びています。



【推進系グループ】

(上段左より) 長田 泰一、梶原 堅一、升岡 正
(下段左より) 増田 井出夫、草間 光治、畑井 啓吾、香河 英史、藤井 剛

極低温の世界を産む冷凍機技術

冷やす技術は欠かせない

ブラックホールに極めて近い領域や銀河団の中心などの激しく活動している場所からは、エネルギーの高い電磁波であるX線が放射されています。このX線を観測することで宇宙誕生の謎に迫ることができると考えられているのですが、地球の大気に遮られてしまうため、地上で観測することは不可能です。そのため、X線を観測する望遠鏡（X線天文衛星）

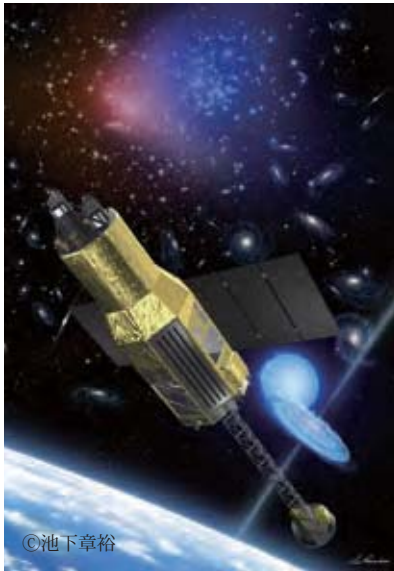
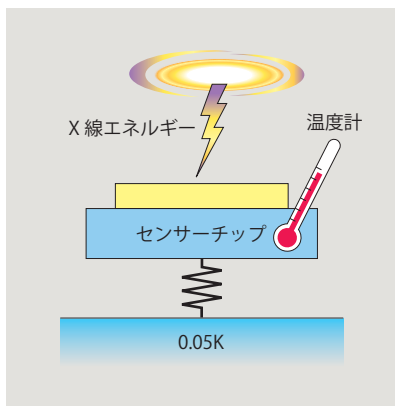


図1 ASTRO-H



X線の持つエネルギーを熱エネルギーに変換し、センサーチップの温度変化を計測します。

図2 X線マイクロカロリメータの検出原理

を宇宙空間に打ち上げて観測を行っています。

日本では1979年にX線天文衛星「はくちょう」を打ち上げて以来、断続的に衛星を宇宙空間へ送っており、2014年度には最新の観測機器を搭載した次期X線天文衛星「ASTRO-H（図1）」の打ち上げを予定しています。ASTRO-Hには2種の望遠鏡と6種の観測装置が搭載される予定で、その一つに、X線のエネルギーの精密な測定を行う「軟X線分光検出器（X線マイクロカロリメータ：図2）」と

いう観測装置があります。マイクロカロリメータはX線によって起こる僅かな温度変化を検知するため、低温に保たなければなりません。そこで0.05K^{*1}という極低温まで冷却するのですが、その冷却システムの一部と排熱システムの開発を当本部の熱グループが担当しています。

※1 ^{ケルビン}K：温度を表す単位。0K=-273.15℃。

機械式冷凍機の技術は世界一！

ASTRO-Hの一つ前の世代、2005年に打ち上げられたX線天文衛星「すざく」もX線マイクロカロリメータを搭載していました。その冷却システムとして、安定した冷却性能が得られる液体ヘリウムと固体ネオンを使っていたのですが、打上げ直後に想定外の事象により液体ヘリウムが枯渇してしまい冷却不可能となり、当初計画していたマイクロカロリメータによる継続的な観測は行えませんでした。^{*2} ASTRO-Hではそれを教訓とし、液体ヘリウムと併せて機械式冷凍機も搭載する冗長設計とすることで、どこかにトラブルが起きても確実に観測を行える様な冷却システムを採用しています。

機械式冷凍機の駆動には電力を要します。冷凍機的方式により高効率な、つまり低電力で冷却可能な温度範囲は異なるため、一つの方式で冷却すると膨大な電力を使ってしまうことになります。電力に限られる宇宙空間ではできるだけ効率良く冷却したいため、各温度範囲で最も高効率な冷却方式を採用し、段階を踏んで目的の温度まで冷却する必要があります。私たちが担当しているのは、100K、20Kと2段階で20Kまで温度を下げる「2段階スターリング冷凍機（ST冷凍機）」と、そのST冷凍機を予冷機として更に低温の4Kまで冷却する「ジュール・トムソン冷凍機（JT冷凍機）」です（図3）。そこから更に低温の0.05Kまでは、NASAが開発を進めている断熱消磁冷凍機が使われます（図4）。

今回開発を進める冷凍機は、国際宇宙ステーション（ISS）の「きぼう」日本実験棟に取り付けられた「超伝導サブミリ波リム放射サウンダ（SMILES）」の冷凍機と同じシステムで

ジュール・トムソン機械式冷凍機の研究開発

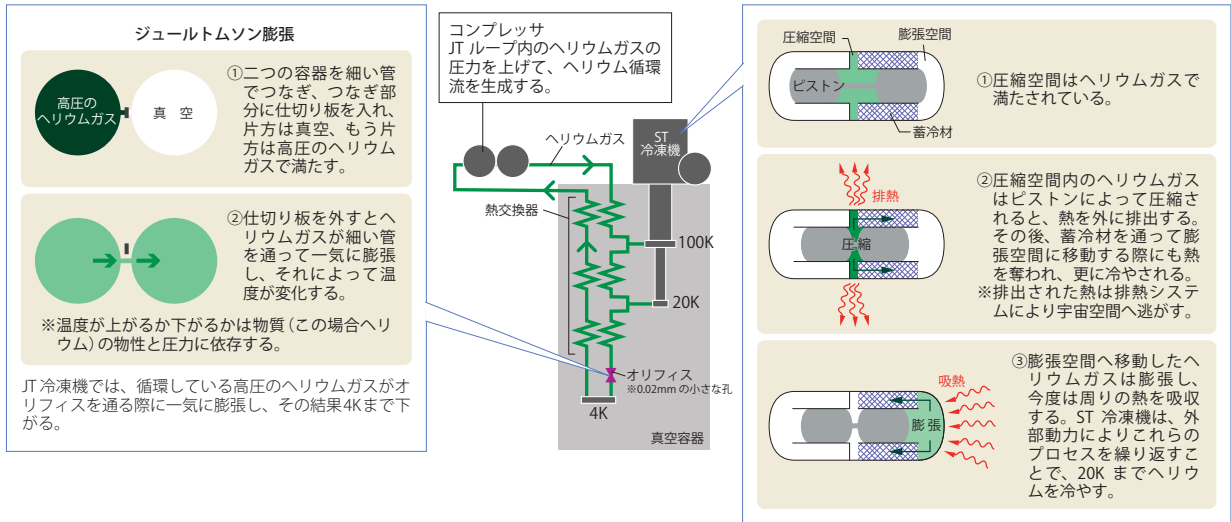


図3 ジュール・トムソン冷凍機の冷却原理

す。ただし改良を加え、信頼性の向上(長寿命化)と冷却能力の大幅な増強(冷却効率をほぼ倍増)を図っています。

SMILESの冷凍機は設計寿命^{※3}を1.5年としていました。ASTRO-Hではその2倍の3年という設計寿命が要求されています。冷凍機の寿命を決める一番の要因は、搭載部品から発生するアウトガスです。アウトガスとは、部品同士をつなぎ接着剤などから発生する水蒸気や二酸化炭素などの不要なガスのことです。それらのガスによって冷凍機内を循環しているヘリウムガスが汚染されると、冷凍能力が落ちてしまい、結果として寿命が短くなります。そのため、接着剤の分量を減らしたり、接着剤を使わない留め方に改良するなどの対策を施しています。また、作動によって部品同士がすれる部分(摺動部)は故障のリスクが高いため、摺動部をできるだけ減らす様に設計を変更し

ています。冷却能力の向上についても、冷却に必要な膨張空間の最適化などの改良を加えています。

- ※2 「すざく」には3種類の観測装置が搭載されており、他の観測装置では予定通り観測が行われている。
- ※3 設計寿命：最低この年数は働くという基準。

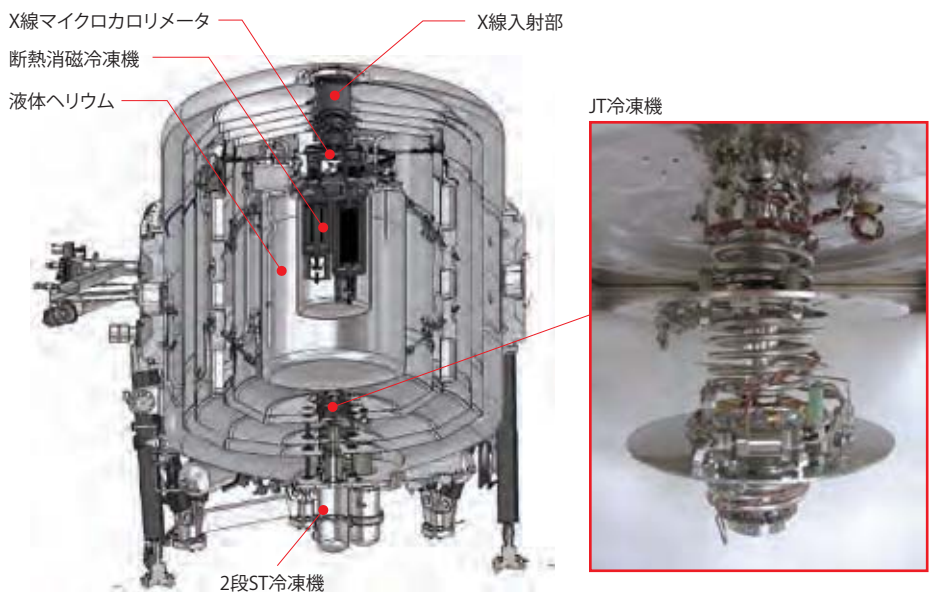


図4 ASTRO-H軟X線分光検出器の冷却システム

ジュール・トムソン機械式冷凍機の研究開発

技術は日々進化する

ASTRO-H搭載用冷凍機のエンジニアリングモデル^{※4}の開発は既に完了しており、現在は、連続運転試験による設計寿命の検証を進めています。2012年6月13日現在で累積駆動時間は12130時間に達していますが、冷却性能の劣化の兆候はなく、健全な動作を確認しています。

今回ASTRO-Hに搭載するST冷凍機は2011年に運用を終了した赤外線天文衛星「あかり」用、JT冷凍機はSMILES用に開発したそれぞれの冷凍機の改良版です。ASTRO-Hでの運用が無事に済み、その性能が十分に確認できたら次は、現在検討が進められている次世代赤外線天文衛星「SPICA」の冷却システムとして搭載することを検討しています。SPICAには望遠鏡として口径3.2mの大きな主鏡を搭載する予定のため、

冷却用の液体ヘリウムを載せるスペースはありません。そこで、各機械式冷凍機を2式ずつ搭載した冗長設計とすることで確実な冷却とスペースを確保します。この様に、開発した技術を次の技術へとつなげることで、宇宙機の開発に貢献しています(図5)。

※4 エンジニアリングモデル：基本設計の妥当性を検討するためのモデル。

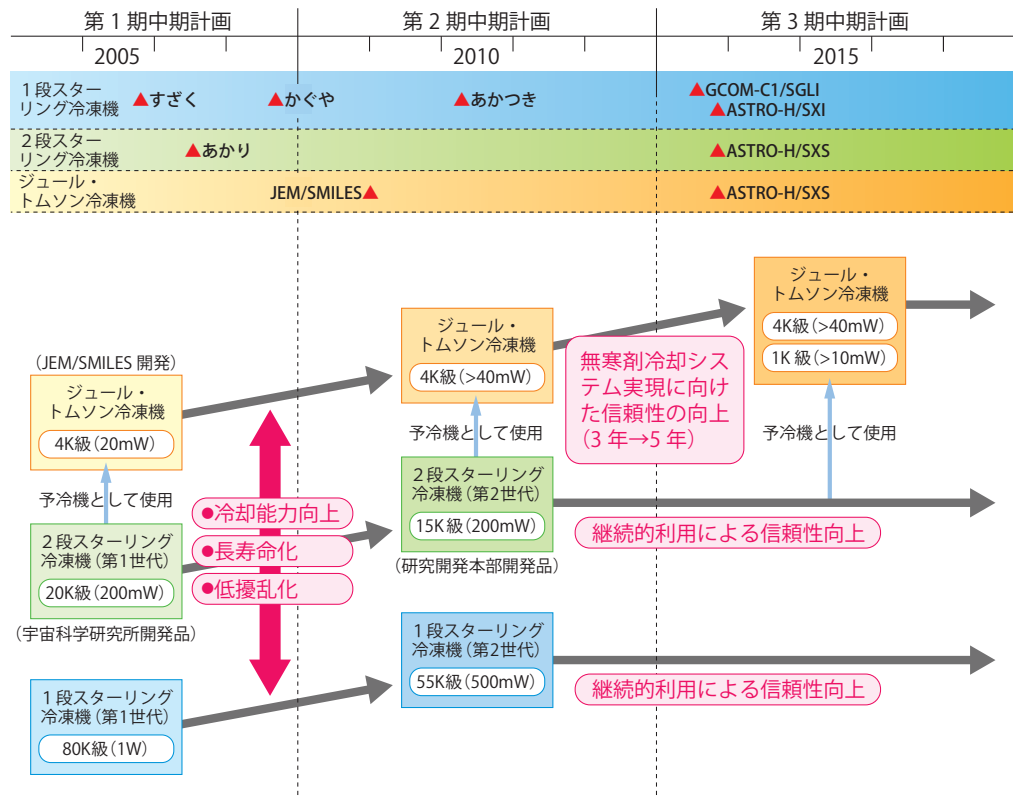


図5 機械式冷凍機開発の流れ



【熱グループ】

(左より) 澤田 健一郎、篠崎 慶亮、佐藤 洋一、杉田 寛之

宇宙と温度

■星の温度は目に見える



図1 いろんな色の星がある

月明かりのない晴れた夜、街灯などの光害もなく空の開けた場所からは、たくさんの星を眺めることができます。それらの星を良く見ると、青っぽかったり赤っぽかったり、いろんな色をしています(図1)。色の違いは、星の温度によって決

まります。赤みが強い星、例えばさそり座のアンタレスの表面温度は約3500Kです。これに対して夏の大きな星のひとつ、こと座のベガは青白く、その表面温度は約9500Kになります。ちなみに、夜には見えない星である太陽の表面温度はその中間、6000K程度です。

■目に見えない光も大切

星に限らず、熱を持っているものは全てその温度に

応じた光を発しています(図2)。*ただ、私たちの目が捉えることのできる光は可視光線のみで、多くの光は人の目では見ることはできません。星の姿、宇宙の姿を正確に知りたいと思ったら、星や宇宙が発している様々な種類の光を捉えられる目が必要です。それらの目でもう一度夜空を眺めてみましょう。今度は、どんな景色が見えるでしょう？

■邪魔な光は温度で操作

JAXAでは可視光はもちろん、様々な光に対応した目として「天文衛星」を宇宙へ運び、観測を行っています(図3)。ところで先ほど、熱を持っているものは全てその温度に応じた光を発していると述べました。天文衛星自身も光を発しているのです。常温の衛星が発するのは「赤外線」です。その光は、遠く宇宙のかなたから届く赤外線の観測を阻むほど強力です。しかし、絶対零度(0K)に近い非常に低い温度まで冷やしてあげれば、衛星からはほとんど赤外線が発せられなくなり、観測が可能になります。そのため赤外線天文衛星には、十分に冷凍が行える冷凍機が搭載されています(P.06参照)。

*星からは、構成物質の種類による光も発せられている。また宇宙空間からは、熱以外の要因による光も発せられている。

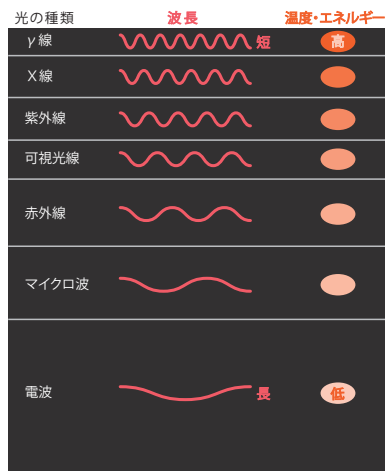


図2 光と温度の関係



©NAOJ/JAXA

太陽は200万Kを超える外層、コロナによって覆われており、そこからはX線が放射されています。太陽表面や前面を通過する月は温度が低くX線を放射していないため、黒く写っています。

図3 太陽観測衛星「ひので」が捉えた日食のX線画像

「SDS-4」の打上げ成功と今後の意気込み

2012年5月18日1時39分、質量約50kgの小型実証衛星4型「SDS-4」が、第一期水循環変動観測衛星「しずく」の相乗り衛星として種子島宇宙センターより打ち上げられました。JAXAでは、利用衛星や科学衛星の信頼性向上のため新規に開発された機器・部品などの実証を目的とした「小型実証衛星プログラム」を進めています。SDS-4は2009年末から当本部の20～30代の若手技術者が主体となってインハウスで開発を行い、この日を迎えました。

さて、人工衛星は打ち上がったからが本番です。筑波宇宙センターにある小型衛星運用室に集合したメンバーは、若干緊張した面持ちで打上げをテレビ画面で見守り、その後、ロケットより分離された人工衛星から初めて電波を受信する1st AOSと呼ばれる運用を行いました。



SDS-4軌道上イメージ(上) 小型衛星運用室(下)

現在、SDS-4は順調に飛行を続けています。SDS-4には、衛星搭載船舶自動識別実験、平板型ヒートパイプの軌道上性能評価、THERMEを用いた熱制御材実証実験、水晶発振式微小天秤などのミッション機器が搭載されており、正常に機能することを確認しました。今後、各ミッション機器の軌道上実験を行い、貴重な実証データを取得する予定です。

(宇宙実証研究共同センター 中村揚介)

超電導ポンプによる液体水素の移送に世界で初めて成功

ジェットエンジン技術研究センターでは、H-IIAロケットで使用されている液体水素燃料を、極超音速旅客機など将来の航空機に適用することを目的として、液体水素を安全に供給する技術について研究を行っています。2012年3月、九州大学の柁川一弘准教授との共同研究により、超電導ポンプによる液体水素の移送実証試験に世界で初めて成功しました。

能代ロケット実験場にて行った実証試験では、充てん容器内の液体水素に浸漬冷却したニホウ化マグネシウム(MgB₂)製の超電導モータを最大毎分1,800回転で同期運転させ、毎分6.5リットルの液体水素を別容器へ移送しました。超電導材には日立製作所のニホウ化マグネシウム線材を適用し、モータには京都大学の中村武恒准教授が提唱する誘導/同期モータの構造を採用しています。超電導線材の適用により、従来に比べて高効率でコンパクトなポンプシステムが実現できます。本試験の成功により、蒸発損失が少なく突沸の恐れのない、安全な液体水素供給システムを実現できる見通しが得られました。

今後は、今回得られた知見を元にして、航空機用ポンプシステムの実用化検討を行いたいと考えています。液体水素用超電導ポンプの開発については、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援をいただきました。



(ジェットエンジン技術研究センター 小林弘明) 液体水素用超電導ポンプシステムと実証試験メンバー