

空と宙

2010 JAN/FEB
<http://www.ard.jaxa.jp/>

隔月刊発行 ISSN 1349-5577

研究開発

熱を逃がす技術

宇宙機が安全に還ってくる

設備紹介

JAXA70mm×70mm 高速衝撃波管

横路散歩

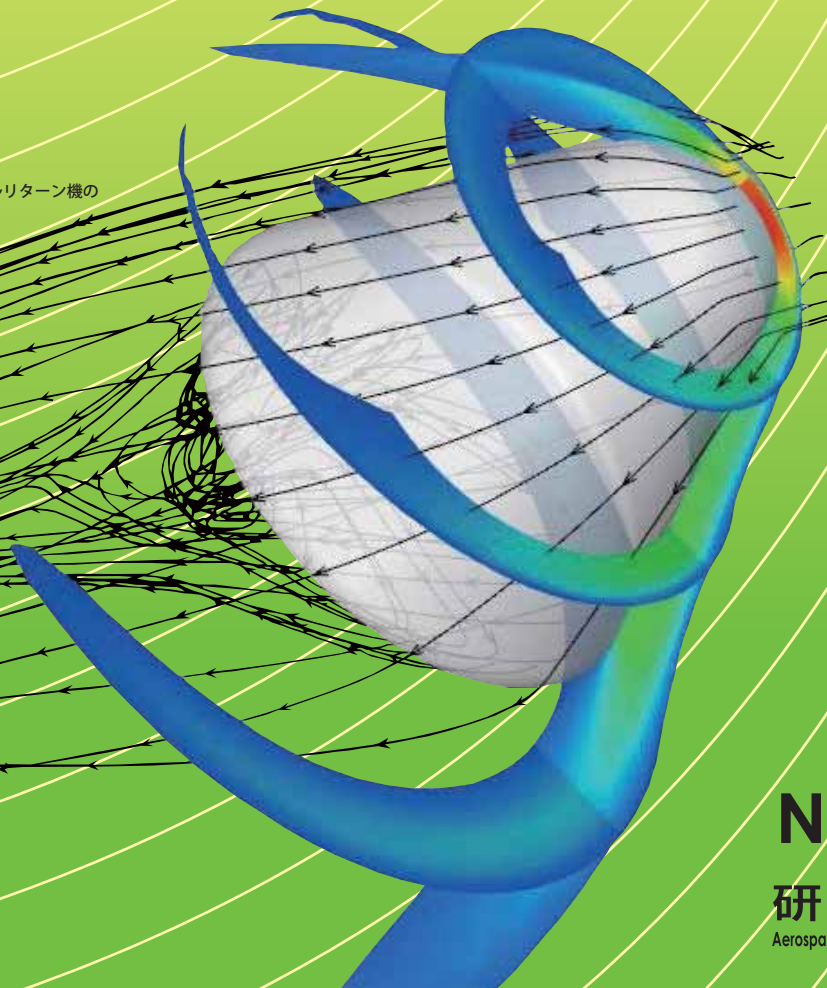
宇宙機の熱環境

空宙情報

「JAXA 宇宙航空技術研究発表会」開催報告

「親子航空教室イベント」開催案内

火星無着陸サンプルリターン機の
流れ場解析結果



No. **34**

研究開発本部
Aerospace Research and Development Directorate

熱を逃がす技術

平板型ヒートパイプの必要性

人工衛星は電子機器の塊であり、電子機器は動作すると熱を発生します。その熱が留まると温度が上がり故障の原因となるため、何らかの方法で熱を機器から逃がさなければなりません。搭載機器の排熱は、主に人工衛星の構体パネルの熱伝導や、構体内に埋め込まれた熱を逃がす素子である「ヒートパイプ (Heat Pipe : HP、図1)」により行われます。

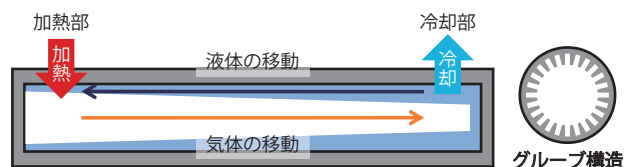
近年の衛星の高機能・高性能化に伴い、搭載される電子機器の発熱量が増加するなど、既存技術による排熱が徐々に困難になってきています。そのため、今後は電子機器間など、狭いスペースから構体まで熱を引き出す方法が必要になってくると考えています。

機器の各部から直接熱を引き出すためには、HPを薄くする必要があります。JAXAでは、汎用的な平板型HP (Flat Plate Heat Pipe : FHP) の実現を目指し、2006年度に開発に着手しました。

FHPを開発し小型衛星で実証だ！

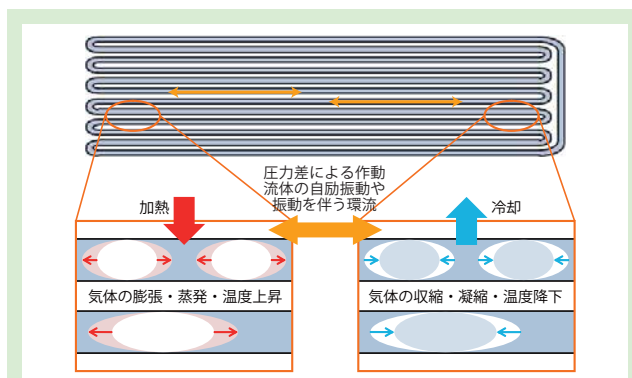
従来型のHPを薄くするために平らにしていくと、気体が行くスペースが十分に確保できないなど、効率的な熱輸送が困難になってしまいます。そこで目を付けたのが、作動流体の圧力差が生む振動を利用する「振動流型ヒートパイプ」です (図2上)。

振動流型HPは加熱部と冷却部を往復する細い管でできており、その内部にはグループ (図1) などの構造が無い場合、薄い平板形状に成形することが可能です。従来のHPに比べると最大熱輸送量は小さくなりますが、管の往復 (ターン) を増やすことで効率良く大きな熱量を運ぶことができます。しかし、この振動流型HPには、熱負荷が小さくなると駆動力である圧力差が小さくなり、動作が不安定になるという問題があります。そこで、熱量が多い「高熱負荷」から熱量が少ない「低熱負荷」までの広い範囲で動作させるべく、「逆止弁」を採用することにしました (図2下)。



HPは、流体の蒸発と凝縮を利用した熱輸送素子です。一般的なHPは両端の閉じたパイプ状になっており、中には作動流体が入っています。作動流体は加熱部で加熱されることで気体に、冷却部にて冷却されることで液体になります。この相変化に用いられる熱のやり取りにより熱を運びます。パイプの内側は軸に沿って細かい溝の入った「グループ構造」になっており、液化した作動流体はグループ構造が生み出す「毛細管力」によって再び加熱部へ送られます。毛細管力とは、ティッシュペーパーが水を吸い上げる力と同じものです。

図1 HPの動作原理



振動流型HPの動作原理

振動流型HPは、加熱部と冷却部を往復する何本もの細管で構成されています。管内にはグループなどの構造はありません。作動流体は加熱部では温められて膨張し、冷却部では冷やされて収縮するため、管内には圧力差が生じます。生じた圧力差により、作動流体は自励振動や振動を伴う循環流となり、発生した熱を加熱部から冷却部へ運びます。

逆止弁

作動流体が加熱部から冷却部へ移動する管内に、逆止弁を取り付けます。逆止弁の中には小さな球が入っており、流路の形状によって逆流を防ぎます。逆止弁に流れ込む側の流路は球形よりも径が小さく、逆止弁から出て行く側の流路は球との間に隙間があるため、作動流体はその隙間を抜けて流れます。逆止弁が流れを一方にそろえるため、低熱負荷の場合でも作動流体が問題なく流れます。

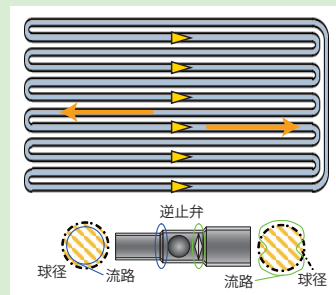


図2 振動流型HP

JAXAでは、100W程度の熱量移送を想定した基本モデル（長さ300mm×幅110mm×厚さ3mm、管数：12、15、18本）を製作し、2007年度から2008年度にかけて、「逆止弁の有効性」「ターン数の比較」「作動流体の封入率の最適化」のための性能評価試験を行いました。試験の結果、逆止弁が低熱負荷時はもちろん高熱負荷時にも有効であること、ターン数が多い方が効率良く熱を移送できることなどが分かりました（図3）。現在は、技術的な成立性を確認するためのブレッドボードモデル（BBM）の評価を終え、設計の妥当性を検討するためのエンジニアリングモデル（EM）を用いてより詳しい評価を行っているところです。

また、微小重力下での動作を確認するため、2011年度に打上げが予定されている小型実証衛星4型「SDS-4」に開発中のFHPを搭載し、宇宙実証試験を行う予定です。

NHK との共同研究

日本放送協会（NHK）放送研究所では、スーパーハイビジョン放送の実現を目指し、フェーズドアレーアンテナを用いた21GHz帯高度衛星放送の研究を進めています。アンテナからの電波は、大量の熱を生ずる188素子もの進行波管（TWT）を高密度に実装した給電アレー部から発せられるため、積極的な冷却が必要となります。そこで、このTWTで構成された給電アレー部の排熱方式の検討についてNHKと共同研究を行っています。

JAXAが担当しているのは、給電アレー部全体の

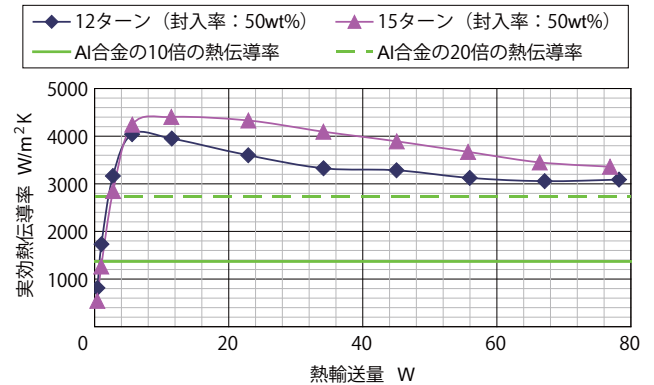


図3 ターン数と熱輸送量の比較

熱設計です。現在検討中の給電アレー部の排熱スペースは3mmと非常に狭いため、中央に加熱部があるダブルタイプのFHPを用いた排熱方式を提案しています。これまでに、温度予測や試験評価のための温度シミュレーションを行っており、良好な結果を得ています（図4）。

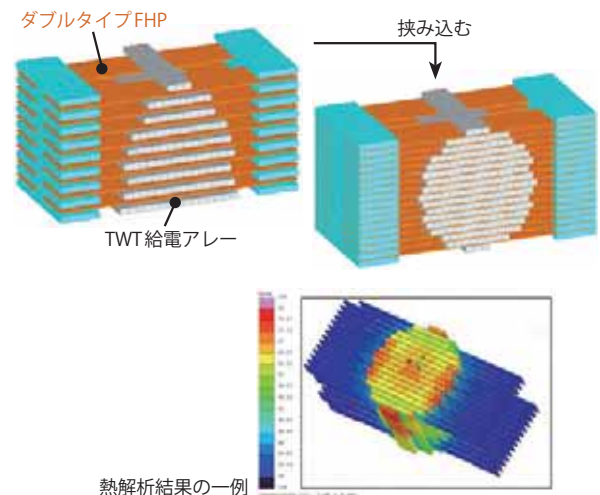


図4 ダブルタイプFHPによる給電アレー部熱制御システム



【熱グループ】

(左より) 杉田 寛之、中村 安雄、前田 真克、岡本 篤、川崎 春夫

宇宙機が安全に還ってくる

還ってくるのは結構大変

物質のほとんど無い真空状態の宇宙空間から、宇宙機が地球へ戻って来ます。大気圏に突入すると、機体は空気による力（空気力）を受けます。前方の空気は強く圧縮されて高温になり、宇宙機は激しく加熱されます（空力加熱）。その温度は太陽の表面温度（約6000K）よりも高く、時には数万度にも達します。その様な環境では空気の成分である窒素や酸素はバラバラに分解した状態になっています（図1）。再突入を想定した宇宙機を設計する際には、宇宙機がどのような空気力や空力加熱を受けるかを正確に予測することが重要となってきます。

その様な特殊な環境のため飛行実証試験は不可欠ですが、そう簡単に行えるものではありません。そのため、地上での十分な検証が鍵となります。JAXAでは、「飛行環境評価技術」と「熱防御技術」というふたつの技術に対して、研究開発を進めています。具体的には、「地上試験の精度と信頼性の向上」および「地上試験を再現し、飛行環境を予測できる数値解析ツールの開発」を進めています。

宇宙機の飛行環境を知りたい！
飛行環境評価技術の開発

宇宙機が再突入する際の環境を詳しく知るために

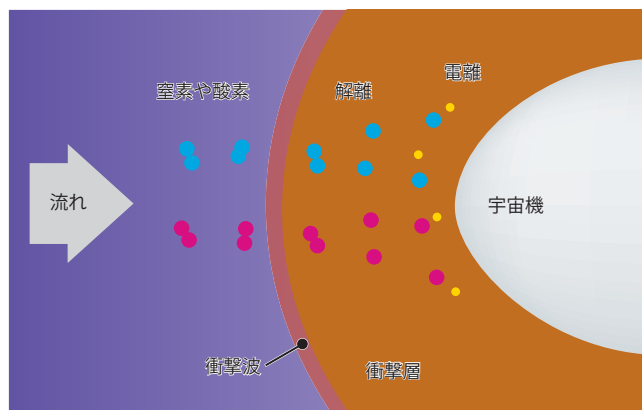


図1 再突入時の空気の状態

は、数値解析によってコンピュータ上に環境を再現する方法が有効です。再突入時には分子が解離や電離などを起こしているため、解析ではそれらの物理過程を忠実に再現していることが要求されます。そこで、分子衝突という微視的過程まで踏み込んだ解析を行い、化学反応速度係数のモデル化を進めています。具体的には、 N_2-N_2 、 N_2-N 、 $CO-O$ 間の衝突による化学反応速度係数の高精度化を実現しています。

大気突入システムを開発するうえで最も困難な点は、大気突入機が遭遇する極超音速の飛行環境を地上試験によって再現することができないため、地上での実証試験に限界があることです。そこで、70mm×70mmの矩形流路を観測部に持つ自由ピストン二段隔膜式の衝撃波管を開発し、熱化学モデルの開発と検証を行っています（P.06参照）。

基礎的な解析や地上試験で得られた高精度の素過程モデルを使用し、再突入時の飛行環境を評価するための各種コード（コンピュータプログラム）の開発を進めています。その内のいくつかを紹介します。

◇反応性CFDコード「JONATHAN」

大気圏再突入時の宇宙機周りの空気は、高圧力かつ高温で高いエネルギーを有した「高エンタルピ流」と呼ばれる状態です。そこで、様々な高エンタルピ流の解析を行える汎用性を導入した共通コードの開発を進めています。

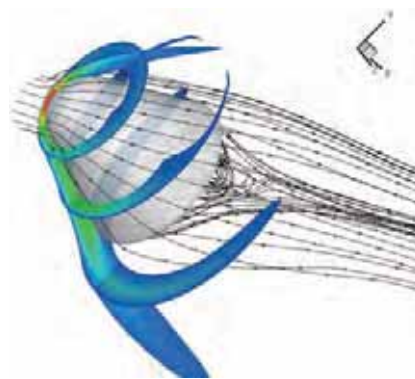


図2 JONATHANによる火星無着陸サンプルリターン機の高迎角飛行時の流れ場解析結果

大気突入システムの「飛行環境評価技術」と「熱防御技術」の研究開発

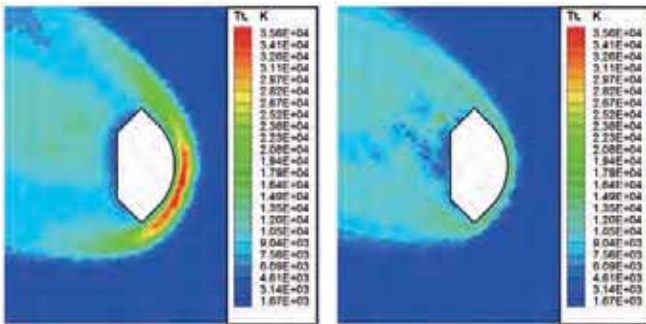


図3 RARAC3Dによるハヤブサカプセル周りの流れ場の解析結果

◇反応性DSMCコード「RARAC3D」

再突入が起こる高高度は地上に比べて大気がとても薄いため、機体周りの気流特性も地上とは異なっています。大気が薄いため分子間の衝突頻度が小さくなり、気流中の輸送現象や化学反応が流れの時間スケールに対して遅くなるからです。また、気流と固体（宇宙機）表面の相互作用も連続流体と考えられる地上とは大きく異なります。そこで、希薄流中の飛行環境の評価を行うことを目的としたコードを開発しました。このコードを使い、大気圏再突入や超低高度衛星の空力性能の評価などを行っています。

宇宙機を熱から守りたい！ 熱防御技術の開発

環境が分かったら、次に重要となるのは環境に即した熱防御技術です。

米航空宇宙局（NASA）が運用している再使用型宇宙往還機（スペースシャトル）は、再突入時の激しい空力加熱に耐えるため、機首や翼前縁部などの表面温度が高くなる部分には炭素系の熱防御材を使用しています。炭素系熱防御材の評価は再突入時の酸化が中心でしたが、再突入時には空気の主成分である窒素も解離しているため、窒化が無視できない

ことが分かってきました。そこで、炭素系熱防御材表面で生じる窒化を考慮した化学反応のモデルの開発と実験的検証を行っています。図4は、グラファイト材料を高温の窒素気流で加熱することにより、炭素系熱防御材の窒化損耗特性を調べている様子です。この実験により、幅広い温度領域に適用可能な窒化反応確率モデルを世界に先駆けて開発しました。

「飛行環境評価技術」および「熱防御技術」の研究開発は、再使用型宇宙往還機はもちろん、地球外惑星への着陸ミッションへの応用も可能です。それらのミッションも視野に入れつつ、今後も研究開発を進めていきます。

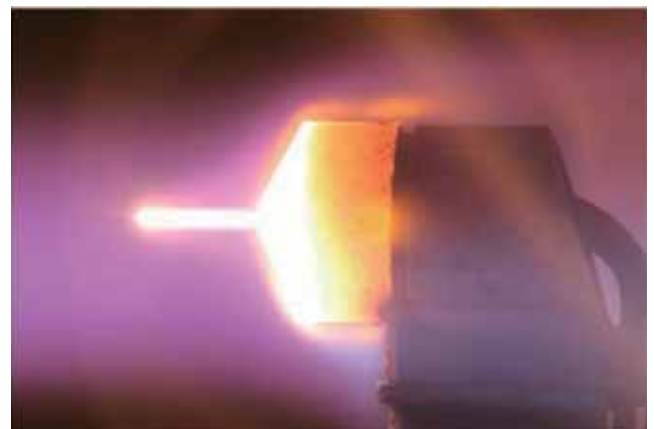


図4 加熱試験による窒化反応確率評価



【流体グループ】

（後左から）高柳 大樹、藤田 和央、鈴木 俊之
（前）山田 剛治

設備紹介

JAXA 70mm×70mm 高速衝撃波管

宇宙往還機や惑星探査機が地球などの惑星大気に突入する時、宇宙機の前方には「衝撃波」が発生し、高温・高圧の環境に曝されます。「高速衝撃波管」はその環境を模擬するための装置です。

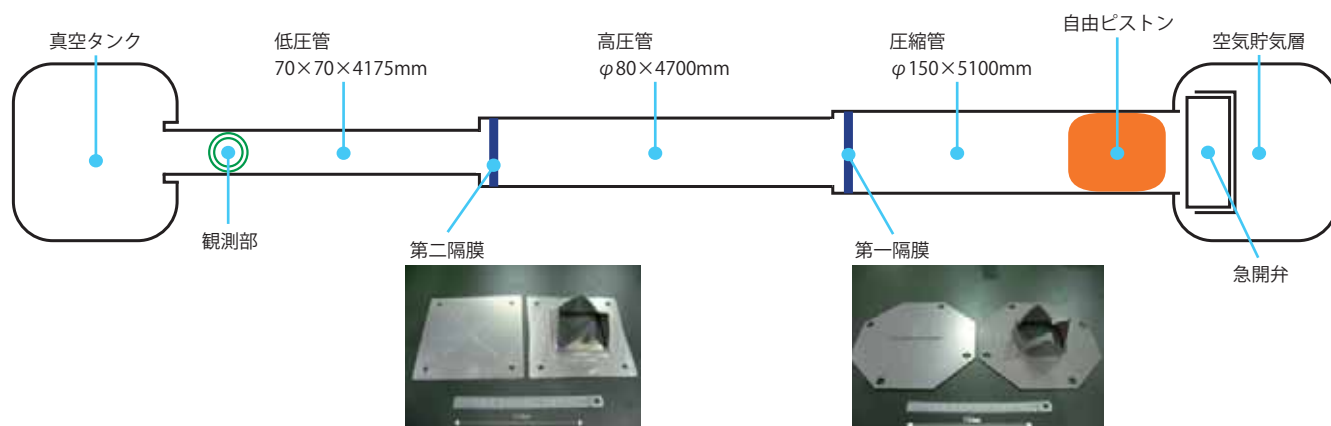
衝撃波管は高圧と低圧の領域を隔膜で隔てた構造をしています。この隔膜を瞬時に切り裂くことで高圧側のガスが低圧側に流れ込み、衝撃波が発生します。再突入時に発生する時速27,000kmを超える高速の衝撃波を発生させるためには、もう一工夫必要です。JAXAが所有している70mm×70mm高速衝撃波管（図1）は、自由ピストン二段隔膜方式を採用しており、非常に速い速度の衝撃波（最高時速

45,000km）を発生させることができます。

衝撃波背後で発生する放射光のスペクトルを観測することにより、気流の熱化学状態を詳細に知ることができます。それにより、宇宙機が再突入する際に受ける空気力や空力加熱を正確に予測することができます。



図2 発生した衝撃波の様子



急開弁を開くと、空気貯気層に封入した約10気圧の空気によって自由ピストンが動き、圧縮管内に封入したヘリウムガスを圧縮します。それにより、圧縮管と高压管を隔てる第一隔膜が破れ、高压管内に衝撃波が発生します。発生した衝撃波は高压管内を進み、第二隔膜に衝突して反射します。衝撃波が通過するとガスは高温・高圧の状態になります。反射により、第二隔膜近くのガスは大変な高温・高圧状態になり、それによって第二隔膜が破れ、低压管内に更に高速の衝撃波が発生します。

※ 発生する衝撃波の速度は、隔膜の厚みと封入するガスの圧力で調整します。

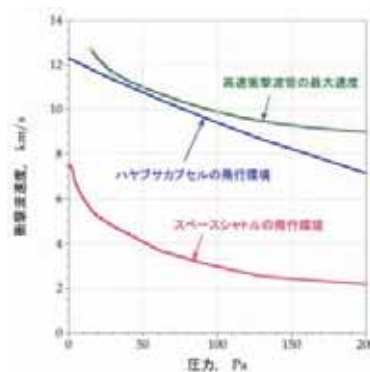


図1 JAXA 70mm×70mm 高速衝撃波管

宇宙機の熱環境

■地球に帰るとき、宇宙機は加熱される

宇宙機が地球へ帰還します。大気への再突入速度は時速約1,400km、新幹線が時速約300km程度ですから、ものすごい速度です。

超高速で飛行する機体の前方には高圧力の空気の壁である「衝撃波」が発生し、機体周り、特に機体前面部の空気は強く圧縮されて高温になります。この高温の空気の熱は機体に入り込んできます。この現象を「空力加熱」と言います。空力加熱は速度が速くなると急激に大きくなり、地球周回軌道からの再突入では、圧縮された空気の温度は数万度に達することもあります。この様な膨大な熱から機体を守るためには熱防御が欠かせません。

■固体とも液体とも気体とも違う状態

衝撃波の内側の高圧部分の空気は、超高温の熱によって窒素 (N_2) や酸素 (O_2) などの分子が窒素原子 (N) や酸素原子 (O) などの原子になった「解離」状態や、分子や原子から電子が分離し、分子や原子がプラスの電子(電荷)を持った「電離」状態になっています。この様な解離や電離を起こした物質は「プラズマ」と呼ばれています (P.04

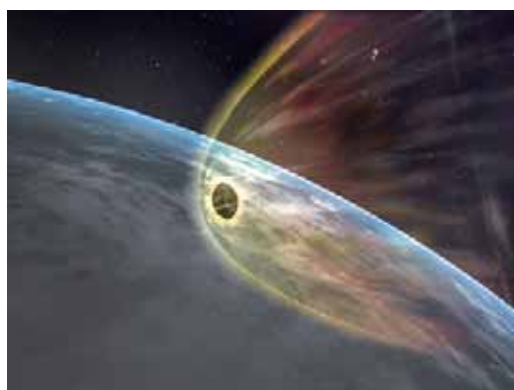


図1 はやぶさ (MUSES-C) の回収カプセル再突入の様子

図1参照)。

プラズマ化した物質が宇宙機にぶつくと、その表面で化学反応を起こします。そのため、宇宙機の表面に貼られている断熱材などは化学反応を考慮して設計されています。

■宇宙にいても熱を受ける

宇宙空間はほとんど物質がない真空の空間です。そのため、地球周回軌道上で働く人工衛星は空力加熱の影響をほとんど受けません。しかし、油断は禁物です。宇宙には、さんさんと照り輝く太陽があります。この太陽からやってくる熱や、地球から放射される赤外線などは地球軌道を周回している人工衛星に影響を与えます (図2)。

自身が発する熱の問題もあります。人工衛星に搭載される電子機器類は、正常に機能するために必要な温度範囲が決まっているため、熱環境の厳しい宇宙空間で正常に動作するよう、断熱や放熱を行う「熱制御系」が欠かせません。そのためJAXAでは、「断熱技術」の研究開発として多層断熱ブランケット (『空と宙』No.25参照)、「放熱技術」としてヒートパイプ (P.02参照)、ラジエータなどの熱制御系の開発を行っています。

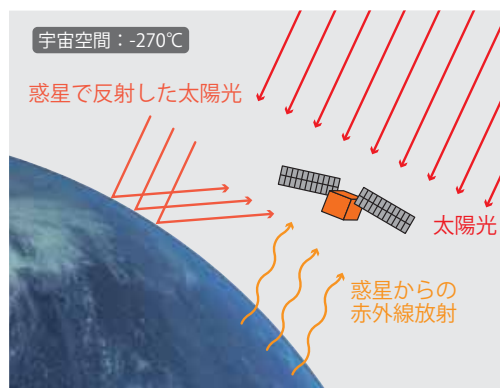


図2 人工衛星の熱環境

空 宙 情 報

JAXA 宇宙航空技術研究発表会

【開催報告】

2009年11月26日（木）、JAXAが取り組む宇宙航空技術の研究を広く一般の人にも紹介するため、「JAXA宇宙航空技術研究発表会」を日本科学未来館（東京）にて開催いたしました。当日は368名の来場者にお越しいただきました。



最新の研究成果を詳しく紹介



東京大学大学院教授 鈴木真二氏による特別講演
「航空の未来：2050年の空を考える」

「親子航空教室」を3月7日（日）に開催します

【開催案内】

航空技術に対する興味をもってもらい、工作を通じてものづくりの楽しさも知ってもらうため、調布航空宇宙センターで親子向けイベントを行います。

日時 2010年3月7日（日）

場所 宇宙航空研究開発機構 調布航空宇宙センター

■ 工作教室

工作教室は事前申込み制です。申込み方法については窓口までお問合せください。

テーマ 「飛行機がとぶしくみ」について話を聞いて、実際に作って飛ばしてみよう。

時間 第1回目 10：00～12：00 第2回目 13：00～15：00

対象年齢 幼児（4才以上）～小学生と保護者（2人で1組）

定員 各回36組

参加費 無料

■ 展示室公開

公開時間 10：00～16：00（見学自由・入場無料）

お問合せ窓口

調布航空宇宙センター広報

TEL：0422-40-3934 FAX：0422-40-3281

<http://www.jaxa.jp/>