

「そら」の技術を身近に感じて ————— そらとそら



空と宙

2010 JUL/AUG
<http://www.ard.jaxa.jp/>

隔月刊発行 ISSN 1349-5577



ダクトファン型飛行ロボット

研究開発

自由自在に飛びたいな
飛行機、火星の空を飛ぶ。

横路散歩

全地球測位システム

空宙情報

「航空100年記念
JAXAから見た日本の航空の歩み」開催案内
「はやぶさ」カプセルのCTスキャン

No. **37**

研究開発本部
Aerospace Research and Development Directorate

自由自在に飛びたいな

滑走路がいない飛行機

飛行機が離着陸をする際、一般的には滑走路を必要とします。これに対し、ヘリコプタの様に垂直離着陸を行うことで滑走路を必要とせず、離着陸の自由度を高めた「垂直離着陸機（Vertical Take-Off and Landing:VTOL機）」と呼ばれる飛行機があります。

VTOL機には様々な形態が考えられています。離着陸時に単純にエンジンの排気を下に向ける「偏向ノズル」を採用した機体や、離着陸時にはヘリコプタの様に上を向いているローターを巡航時には前向きにして飛行する「ティルトローター」、主翼ごとローターの向きを変える「ティルトウィング」、ロケットの様に機体を垂直に立てて離着陸する「テイルシッター」などがあります。他にも、離着陸時と巡航時とは別の推進系を使う機体などが考えられています。

垂直離着陸が行えるというのは大きな利点です。しかし、一般的な飛行機に比べて推進系が複雑になる、離着陸時には翼により発生する揚力が利用できないためにエンジンが重くなり効率が落ちるなどの課題もあります。

型にとらわれないVTOL飛行ロボット

VTOL機をひとが乗らない小型の飛行ロボットとして、もっと手軽な“道具”のように利用できないか。そう考えた時、VTOL機は必ずしも一般的な飛行機の形をしている必要はありません。浮くための「推進系」と方向転換のための「制御系」があれば実現できます。そこで、電動式のファン（回転翼）と簡単な制御システムを組み合わせた「ダクテッドファン型飛行ロボット」の研究開発を進めています（図1）。この機体では、ファン前方から吸い込んだ空気を後方に勢い良く排出することで下向きの推力を得て浮くことができます。ファンはダクトで覆われているため、気流が横に逃げることなく効率的に推力を得ることが可能です。ダクト断面は翼型をしており、前縁に働く揚力が推力を増強する役割を果たしています。また、回転翼が露出していないため安全性が高いという飛行ロボットにとって非常に重要な利点

もあります。

浮く、進む、その場に留まるといった制御はファン後方に配置した4枚のコントロールペーンで行います。制御に必要な情報である「位置」「姿勢」「速度」は一般の航空機同様、搭載した「GPS(P.07参照)」「加速度計」「ジャイロ」などの機器を使って計測します。これらの情報を元に、搭載したコンピュータでコントロールペーンを動かし、制御を行います。

各種実験

このような形状の機体の研究例は世界でもあまり多くありません。そのため、まずはきちんと飛ばすことを目標に研究に着手しました。図2は屋内で行った飛行試験の様子です。風などの外乱が無い状態であれば、自動制御で安定した飛行が可能なが確

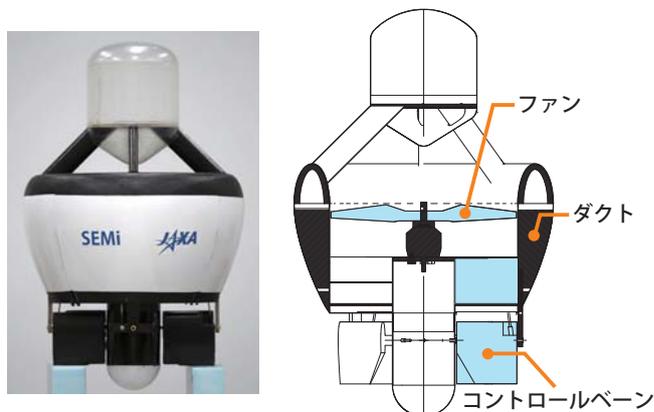
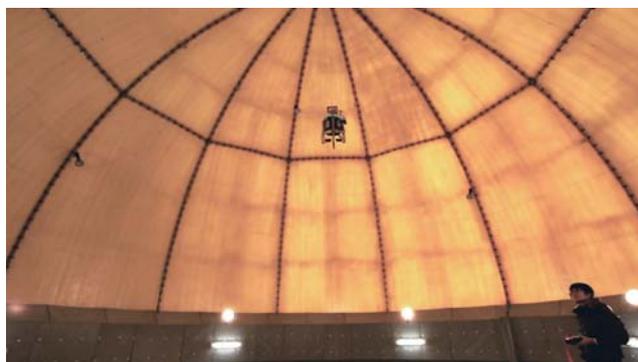


図1 ダクテッドファン型飛行ロボット



制御に利用するGPS電波が透過するドーム内で初期の飛行実験を実施しました。

図2 屋内での飛行試験の様子

ダクトドファン推進型飛行ロボットの研究

認できました。

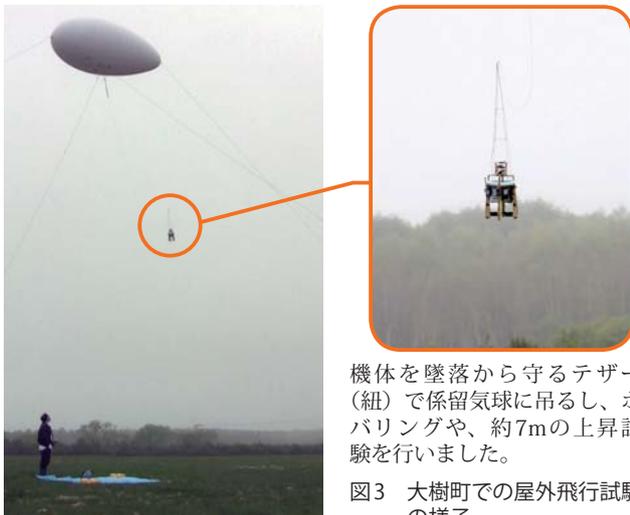
2010年6月にはJAXA大樹実験場（北海道）にて屋外での飛行試験を行いました（図3）。この試験では、上昇飛行の制御系を設計するための基礎データを取得しました。同時に、屋外での飛行試験法の検証なども行いました。併せて、機体形状を設計するための風洞試験も進めています（図4）。

これらの試験により安定な飛行を行うことが可能になると、次に考えなければいけないのは「安全」です。この機体は無人機のため、有人機では対応できないような用途への利用も考えられます。しかしながら、オペレータの目が届かない様な遠方飛行や、完全な自動・無人ミッションなどにおいては、十分な安全性が保障されていなければ飛ばすことができません。そのため、決められた経路を飛ぶことはもちろん、他の機体との衝突を避ける飛行を行えなければなりません。* また、故障などにより仮に墜落してしまった場合でも、被害を最小限に抑える工夫も必要です。例えば、十分な強度は保ちつつも機体をより軽量にすることで、

墜落時の被害を抑えることができると考えられます。そのため、今後は材料の検討も重要になってきます。

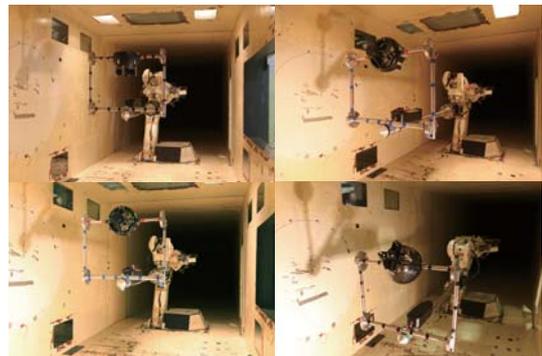
小型VTOL飛行ロボットが実用化できると、災害現場の迅速な被害調査や科学観測、農業などの産業用途での簡易・安価な空撮といった、様々な場面・用途で活躍できると考えています。今後は、得られた各種の実験データを元に、より精度の高い飛行シミュレーションを行い、機体設計技術の確立と、飛行性能の向上を目指して研究開発を進めるつもりです。

* 他の飛行物体との衝突を避ける方法として、周りの対象物をセンサで認識し自動回避するシステムを機体そのものに搭載することが考えられます。しかし、それではその分の重量が重くなるため、今回の様な小型・軽量化を求めた機体には適しません。一方、JAXAでは災害時に救援航空機の運航管理を行うためのシステムである「災害救援航空機情報共有ネットワーク(D-NET)」の研究開発を進めています。航空機と地上局間のデータ通信システムを用いて各機体の飛行データを収集し、現地や中央省庁に設置される対策本部で有効活用できるようにするのが目的です。この様なシステムに無人航空機を組み込んで、他の航空機との衝突を回避しつつ、一緒に有機的に運用する方法なども研究されています。



機体を墜落から守るテザー（紐）で係留気球に吊るし、ホバリングや、約7mの上昇試験を行いました。

図3 大樹町での屋外飛行試験の様子



ダクトドファン型飛行ロボットは低速時に、前後・左右・上昇・下降と全方向に自由に飛行できるため、気流に対して様々な角度を取ります。そこで、 $-90 \sim +90$ 度までの広い迎角で計測を行いました。

図4 風洞を使った実機模型による試験（風速1.5～15m/s）



【飛行技術研究センター】

久保 大輔

飛行機、火星の空を飛ぶ。

火星探査の方法

1998年7月、日本初の火星探査機「のぞみ（図1）」が火星に向けて打ち上げられました。のぞみの目的は、火星の周回軌道から大気の様子などを観測することでした。しかし、火星にたどり着くまでに様々なトラブルに見舞われ、残念ながら火星周回軌道投



図1 火星探査機「のぞみ」



図2 JAXA月・惑星探査プログラムグループが開発を進める月面探査用ローバー

入には至りませんでした。火星探査の方法としては、のぞみの様に星の周回軌道に入り広範囲を上空から観測する方法や、ローバーなどを星に到着させ、地面の組成などを直接観測する方法があります（図2）。

火星は太陽系最高の山である標高27kmのオリンポス山や、やはり太陽系最大の谷であるマリネリス峡谷がある起伏に富んだ星です。ローバーでは近づくことが困難な断崖絶壁も多く、その様な場所を自由自在に観測する道具があれば火星をより詳細に調べることができます。そこで候補となっているのが「飛行機」型の探査機です。飛行機であれば、地表面に近い高度で広い範囲を観測することができます。着陸して地表面の直接観測を行うことも可能です（表1）。

地球と火星の違い

現在JAXAでは、2020年ごろの打上げを目指した火星探査計画を進めています。この計画では、まずは飛行実証を目的に飛行機型探査機を火星の空に飛ばしたいと考えています。

火星で飛行機を飛ばすために考えなければいけないことはなんでしょう？ 表2は地球と火星の違いを示したものです。飛行機が飛ぶための力である「揚力」の大きさは「大気密度」「翼面積」「速度の二乗」

表1 探査能力

	オービター	ローバー	飛行機
範囲	全球	数10～数100m	数100m～数10km
方法	様々な電磁波を用いた周回軌道上からのリモートセンシング	地表面を動き回りながらの電磁波などによる観測および化学観測	電磁波を用いた低高度からのリモートセンシング ※着陸することで化学観測可能
同一面の観測時間	軌道に依存	長時間観測が可能	飛ばし方に依存

航空機型火星探査機を想定した翼型の空力解析技術の研究開発

などの大きさで決まります。^{*1} 火星は地球に比べて重力が1/3と小さいため必要な揚力も1/3になりますが、大気密度が1/100と希薄なため、翼面積や速度を大きくしなければ十分な揚力が得られません。

十分な揚力を得るために火星飛行機を高速で飛ばしたらどうなるでしょう。揚力は、飛行機の翼周りの気流によって生じる翼上下面の圧力差によって発生します。地球の空を飛んでいる飛行機の翼周りの流れは、上流側では翼に沿って綺麗に流れる「層流」状態ですが、途中から乱れた流れである「乱流」に遷移します。一般的に、飛行機の速度が速くなるほど翼前面で遷移が起こります。しかし、火星の様な希薄な大気中では、音速を超えるような速度で飛行機を飛ばしても、翼周りの流れは層流状態を保ちます。層流状態のまま、表面が凸形状になっている物体に沿って気流が流れることは、圧力や気流が持つ運動量の関係から困難です。そのため、翼面から気

流が剥がれる「剥離」という現象が起きやすくなります。剥離が起こると揚力は急激に減少して失速する恐れがあるため、好ましい現象ではありません（図3）。他にも、火星では地球では想定できない現象が起こる恐れがあります。そのため、火星で飛行機を飛ばす際にどのような現象が起こるのかを把握しておく必要があります。

飛行機に起こる空力的な現象を調べるためには「風洞」が使われます。風洞とは、飛行機などの模型周りに空気の流れを発生させることで、実際に飛行している状態を模擬できる装置です。しかし、火星での飛行状態を地球上の風洞で模擬することは困難です。^{*2}

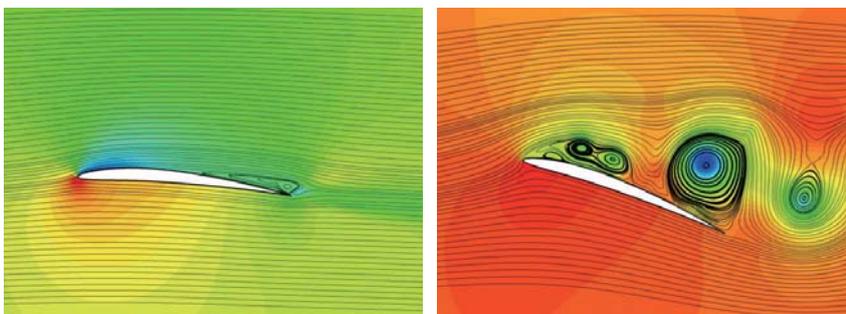
火星飛行機に起こりうる現象

そこで流体グループでは、気流の状態や音の広がりなどを求める解析手法である「数値流体力学

(CFD)」による現象の把握に取り組んでいます。図4は火星の大気中を音速の0.2倍のマッハ0.2 (M=0.2)、迎角4.5°で飛んだ時に翼周りに生じる圧力変動の数値解析結果です。赤い部分が圧力が高く、青い部分が圧力が低いことを表しています。この時、翼端からはある一定の周波数を持った音が発生しているのですが、この音波が翼上面の渦変動生成にフィードバックされて、圧力と渦変動の両方が飛躍的に増大する「音響フィードバックループ」という一種の共鳴現象が起こります。この結果、揚力が大きく変動し、翼が上下に激しく振動する恐れが出てきます。

表2 地球と火星の違い

	半径 (km)	重力 (m/s ²)	表面温度 (K) ※ 1K=273°C	地表面近くの気圧 (hPa)	地表面近くの大気密度 (kg/m ³)	気体構成 (%)
地球	6378	9.8	288.2	1.01×10 ³	1.23	N ₂ 78 O ₂ 21
火星	3396	3.7	213	6.1	1.55×10 ⁻²	CO ₂ 95 N ₂ 2.7



迎角が小さい状態でも翼後縁近くで剥離が見られますが（左）、迎角を上げると翼前縁から気流が剥がれ失速が起こります（右）。

図3 層流状態における剥離

図5はマッハ数や迎角を変化させた時の共鳴現象の状態を表したものです。マッハ数や迎角をわずかに変化させただけで、翼後縁から発生している圧力や渦の振動が大きく変化し、共鳴現象が起こったり消えたりしていることが分かります。

火星で飛行機を飛ばすためにはこのような共鳴現象を起こさないような翼を設計しなければなりません。そこで、まずはどの条件で音波のフィードバックが危機的な程の共鳴現象を起こすのかを正確に把握することを目標に数値解析を進めています。そうすることで、音響フィードバックが原因となる揚力変動が実際に起こった際には、飛行機が自律的にその状態から回避するような機構の開発にも貢献できると考えています。

- ※1 揚力の大きさは次の式で求めることができます。
 $L = 1/2 \cdot C_L \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S$
 揚力係数 (C_L)、密度 (ρ)、速度 (V)、翼面積 (S) が大きいほど、大きな揚力を得ることができます。 C_L は翼の形が同じであれば迎角に依存します。迎角が増加すると C_L も増加しますが、ある迎角以上になると急激に低下してしまいます。
- ※2 通常の風洞実験においては、実機より縮尺された模型を使い、実機の飛行状態を模擬するために「レイノルズ数 (Re)」か「マッハ数 (M)」のどちらかを合わせた試験を行います。レイノルズ数とは、気流が物体周りを流れる時に加わる慣性力と粘性力との比です。レイノルズ数を一致させると、剥離や乱流遷移などの粘性力に支配される現象が実機と同じであると考えることができます。一方、マッハ数は、気流速度と音速との比を表し、気体の圧縮性の効果や機体周りに生じる圧力変動の大きさに影響を与えます。大気密度の低い火星では地球に比べてレイノルズ数が低くなるため、レイノルズ数を合わせようとするモデルをうんと小さくして、さらに気流速度も低くしなくてはなりません。逆に、揚力を得るための高速飛行を想定してマッハ数を合わせようとする、今度はレ

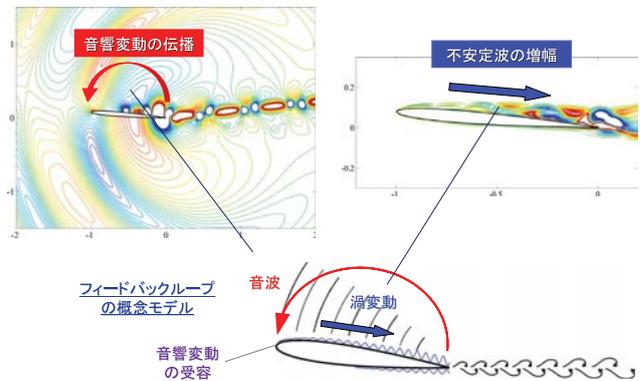


図4 低密度な流れで現れる翼周りの圧力の様子 (M=0.2、 $\alpha = 4.5$ 、Re = 10,000)

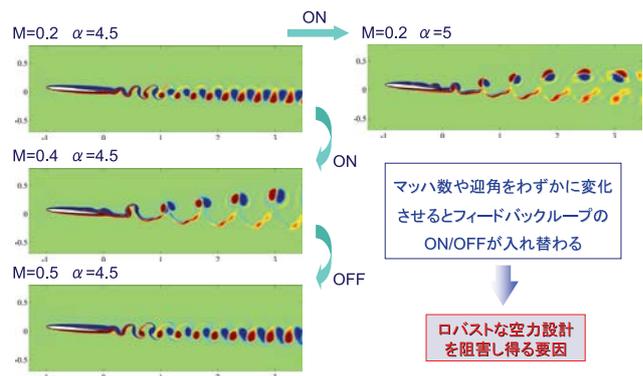
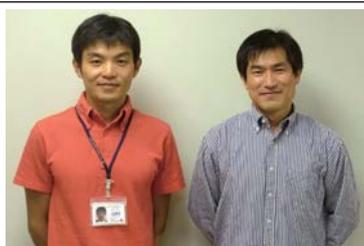


図5 音響フィードバックループによる共鳴現象発生の様子 (Re = 10,000)

イノルズ数が桁違いに大きくなってしまいます。このため、正確に火星の飛行を模擬するためには、JAXA 宇宙科学研究所にある「惑星風洞」や東北大学で開発中の「火星風洞」のように、風洞内の気圧を下げて、実際に密度の小さい流れを作り出さなくてはなりません。



【流体グループ】

(左より) 池田 友明、跡部 隆

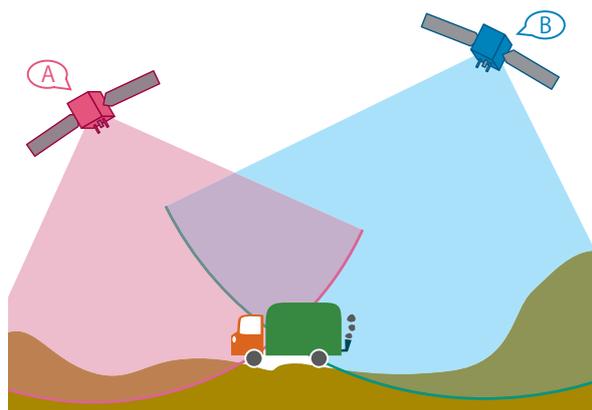
全地球測位システム GNSS (Global Navigation Satellite Systems)

■「位置」を知るシステム

カーナビゲーションシステムや携帯電話を使ったパーソナルナビゲーションシステムなど、ここ数年の間に、自分の位置を知るためのシステムが急速に普及してきました。これらは、アメリカが開発したGPS (Global Positioning System) を利用しています。GPSは電波を発する人工衛星、その衛星を管理する地上管制局、電波を受信する受信機で構成されています。人工衛星は高度約2万kmの6個の軌道の上に各4機以上、2009年1月の時点で31機打ち上げられており、高層ビル群などの遮るものがなければ、地球上のどこにいても常に4個以上の衛星が観測できるようになっています。

■GPSの測位原理

GPS衛星は、アメリカ海軍天文台 (USNO) が提供している協定世界時 (UTC) の時刻情報を電波に乗せて発しています。衛星からある時刻に発せられた電波は、少し遅れてカーナビゲーションシステムやGPS機能付き携帯電話などに



ある時刻に衛星Aから発せられた電波を受信します。電波が発信されてから受信するまでにかかった時間と電波の速さとの積により、衛星Aからの距離を求められます。同様に同時刻に衛星Bからの距離を求めることで、各距離の交わる点、つまり自分の位置を知ることができます。

図1 GPSによる位置測位原理 (2次元)

埋め込まれた受信機に届きます。距離は電波の速さと電波が届くのにかかった時間との積で求められるため、この時間差により衛星と受信側との距離が分かります。ある時刻に3機以上の衛星から発せられた電波を受信することで各衛星との距離が分かり、自分の位置を知ることができます (図1)。ただし、GPS受信機側の時計はUTCとの精度にずれがあるため、その誤差を補正するために4機目の衛星からの電波が必要になります。

■さまざまなGNSSと準天頂衛星

全地球測位システム (GNSS) はアメリカが開発したGPSが有名ですが、それ以外にも、ヨーロッパが開発した「ガリレオ (Galileo)」やロシアの「グローナス (GLONASS)」などが存在します。

JAXAでは、日本のほぼ天頂 (真上) を通る軌道を持つ衛星である「準天頂衛星」を複数機組み合わせることで常に1機の衛星を日本上空に配置するシステムの構築を目指しています。山間部や都心部の高層ビル街など、GPS衛星が複数機見通せない場合でも、ほぼ真上から発せられる準天頂衛星の電波を加えることで正確な位置を知ることが可能になります。



図2 今夏の打上げを目指す準天頂衛星初号機「みちびき」

空 宙 情 報

航空100年記念 JAXAから見た日本の航空の歩み

【開催案内】

1910年12月、代々木練兵場（現 代々木公園）にて日本で初めの動力飛行が成功しました。パイロットは徳川好敏陸軍工兵大尉と日野熊蔵陸軍歩兵大尉、機体は外国から買い付けたアンリ・ファルマン複葉機（フランス製）とハンス・グラデー単葉機（ドイツ製）でした。翌年には、所沢（埼玉県）に日本初の飛行場が開設されています。

それからちょうど100年。2010年は「航空100年」として様々なイベントが行われます。JAXAでも、航空100年を記念した講演会を下記の日時に開催いたします。

日時 2010年9月9日（木） 10:00～16:45
会場 日本科学未来館7F（みらいCANホール、会議室）
東京都江東区青海2丁目41番地

【同時開催】

航空100年記念 日本の航空科学技術の歴史展
主催 日本航空宇宙学会

※事前登録は必要ありません。直接会場までお越しください。

※聴講は無料です。

※プログラムなどの詳細は当本部のHPをご覧ください。下記窓口へお問い合わせください。

お問合せ窓口

JAXA 研究開発本部 研究推進部 広報
TEL : 0422-40-3960 FAX : 0422-40-3281
<http://www.ard.jaxa.jp/>

「はやぶさ」カプセルのCTスキャン

2010年6月13日、7年かけて地球-小惑星間を旅した探査機「はやぶさ」が地球に戻ってきました。「はやぶさ」は、サンプルリターン技術の確立などを目的として、2003年5月に地球と火星の間の軌道を回っている小惑星「イトカワ」を目指してJAXA宇宙科学研究所（ISAS）によって宇宙へ送り出されました。大気圏突入によりその機体は燃え尽きてしまいましたが、試料が入っている可能性のあるカプセルは地球へ帰還し、無事回収されています。

そして6月18日の早朝、窒素で満たされた透明な袋に守られた状態で、カプセルがJAXA研究開発本部にやってきました。当本部では航空機、ロケット、人工衛星などに使われる先進複合材料の研究開発を行っており、目視不可能な材料内部の損傷（内部損傷）を調べるための設備として「X線CT探傷設備」を有しています。カプセルが持ち込まれたのは、カプセル内のサンプルコンテナを取り出すために内部構造の状態を確認するためです。X線によるスキャンの結果、内部の接続部の状態など、サンプルコンテナを取り出すのに必要な情報を確認できました。そして19日未明、サンプルコンテナ内の状態などを詳細に確認するため、再度のスキャンを行いました。

「はやぶさ」は何を持ちかえてきたのか。それが分かるのはこれからです。どんなお土産が入っているか楽しみです。



あ、この部分ですね。



カプセルの状態はどうか？

「はやぶさ」に関するお問合せ窓口

宇宙科学研究所
TEL 042-759-8008
月・惑星探査プログラムグループ
TEL 042-751-3911

空と宙 2010年7月発行 No.37

【発行】宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話：0422-40-3000（代表） FAX：0422-40-3281
ホームページ <http://www.ard.jaxa.jp/>

【禁無断複写転載】『空と宙』からの複写もしくは転載を希望される場合は、研究推進部広報までご連絡ください。