

空と宙

研究開発

大きな人工衛星がエネルギー問題を解決する日
離れているようで離れていない？

設備紹介

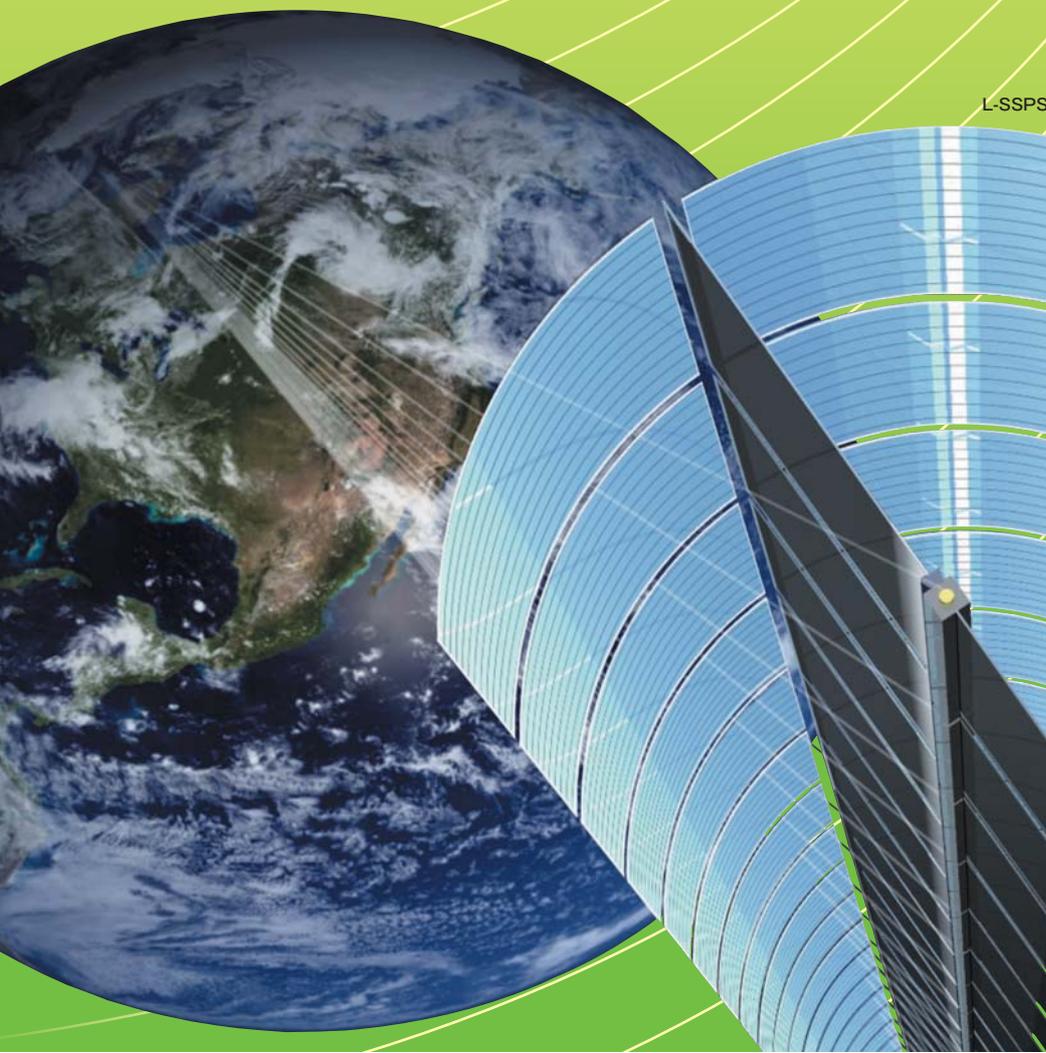
ランデブ・ドッキングシステム開発試験設備

横路散歩

技術試験衛星「きく」

空宙情報

日本ーアメリカ間を2時間で結ぶ極超音速機用エンジン
「JAXA 宇宙航空技術研究発表会」開催報告



No. **28**

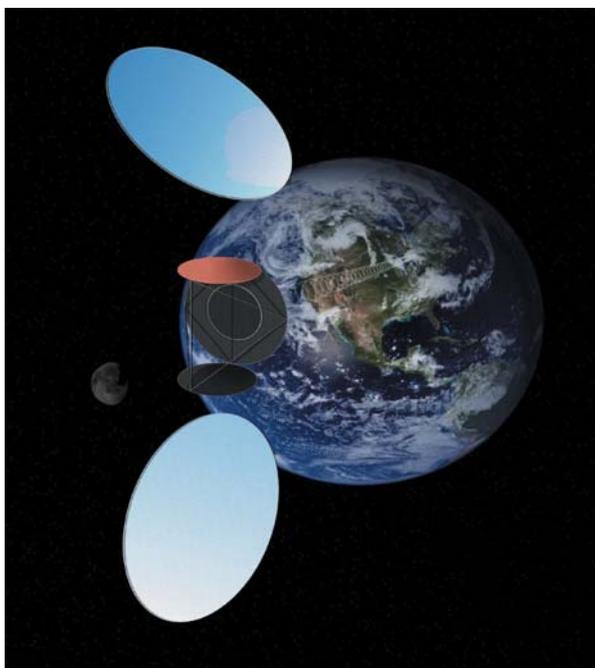
研究開発本部
Aerospace Research and Development Directorate

大きな人工衛星がエネルギー問題を解決する日

環境に優しいエネルギー供給システム

高度約36000kmの静止軌道に浮かぶ大きな大きな人工衛星。そこからは、途切れることなくエネルギーが地上に送られてきています。これは、宇宙太陽光利用システム（Space Solar Power Systems：SSPS）と呼ばれる新しいエネルギー供給システムです。JAXAでは2030年の実現を目指し、SSPSの研究開発を進めています。

SSPSは、地球温暖化への影響が懸念されている二酸化炭素（CO₂）などの物質を発生しない、環境に優しいシステムです。環境に優しい、と聞くと太陽電池を思い浮かべる人も多いと思います。太陽電池は、ビルや民家の屋根などにも設置できる、環境に配慮した優れたシステムです。しかし、地上では



長径3500m、短径2500mもある楕円形の巨大な反射鏡を2基使い、太陽光を太陽電池に集光して発電します。発電した電力は、マイクロ波に変換して地上へ送ります。送られてきたマイクロ波は、直径2000m程度の領域に配置されたレクテナと呼ばれる整流機能付きのアンテナにより再び電力に変換され、商用電力網に送られます。

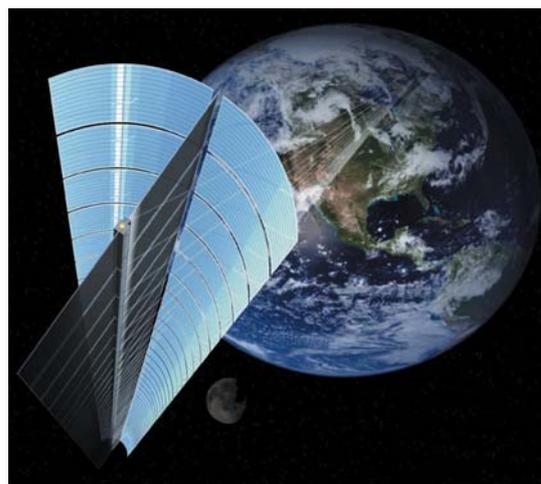
図1 マイクロ波タイプ（M-SSPS）

太陽光の当たらない夜間や雲に覆われた日には発電ができないという制約があります。SSPSであれば、天候に左右されることなく、わずかな蝕期間以外は常時発電することが可能です。

JAXAが検討しているSSPS

JAXAでは、原子力発電所1基分に相当する100万kWの電気を供給できるSSPSを検討しています。そのために必要なのは、静止軌道で太陽光を集めて地上に送る人工衛星と、送られてきたエネルギーを受け取る地上設備です。

集めた太陽光は「マイクロ波」か「レーザー」に変換して地上に送ろうと考えています。マイクロ波とレーザーは波長の異なる電磁波（P.5※参照）です。電磁波は波長によって性質が異なり、マイクロ波は雲などの影響を受けずにエネルギーを地上に送ることができるという特徴があります。しかし、扱えるエネルギー量にかかわらず送受信の設備にはそれなりの大きさが必要になります（図1）。それに対し



集光鏡、レーザー発振部、放熱板からなる基本ユニットを縦に長く並べた構造をしています。集光鏡に集められた太陽光は、レーザー発振部で直接レーザーに変換して地上に送ることができるため、非常に効率的です。レーザーは電力に変換するとともに、燃料電池の燃料となる水素の製造にも活用しようと考えています。

図2 レーザータイプ（L-SSPS）



展開前

展開後

図3 インフレーターブル構造の展開

てレーザーは、扱うエネルギー量に応じて設備の大きさを変更できます。しかし、地上に送る際に雲の影響を受けてしまうことが懸念されています(図2)。

SSPSを実現するためには、エネルギーをどのように高い効率で地上へ送るか、太陽光を受けることで発生する熱をどのように放熱するかなど、様々な課題が山積しています。また、これまで打ち上げたことのないほど大きな人工構造物になるため、宇宙空間でどのように建造するかも大きな課題です。

巨大な構造物をどうつくるか

現在、宇宙でもっとも大きな構造物は、高度約400kmの軌道上を周回する国際宇宙ステーション(ISS)です。ISSは完成するとサッカー場とほぼ同じ大きさ(約108.5×72m)になります。SSPSはさらに大きな構造物となるため、効率的に建造する

ためには工夫が必要です。

宇宙空間にはロケットを使って運びますが、フェアリングの大きさや運べる重量などが決まっており、一度に打ち上げられる量には限界があります。そのため、折りたたむなどして小さく収納し、打ち上げてから展開する方法を考えています。2006年12月に打ち上げられた技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ、P.7参照)はふたつの大きなアンテナが特徴的です。あのアンテナは金属の糸で編まれており、フェアリング内では折り畳み傘の様に小さくたたまれ、宇宙空間で大きく展開されました。その他にも、気体を注入して膨らませて展開するインフレーターブル構造(図3)や、遠心力を使って展開するふるしき構造などが考えられます。これらの展開構造はまだ研究段階のものが多いため、現在は、どの構造がSSPSに最も適しているかを決定するべく基礎的なデータの収集を行っています。



【未踏技術研究センター】
高度ミッション研究グループ

(後列左より) 木皿 且人、瀬在 俊浩、吉田 裕之、鈴木 拓明
(前列左より) 藤田 辰人、佐々木 進、福室 康行、中野 不二男

離れているようで離れていない？

大きい方がいろいろ見える

暗黒物質はどんな物質？ 重力波は本当にあるの？ ブラックホールの仕組みは？・・・宇宙には、まだ解明されていないたくさんの謎があります。これらの謎を解き明かすためには、現在の観測機器よりもさらに精度の高いものがが必要です。

一般的に、観測機器が大きければ大きいほど、高精度な観測を行うことが可能です。例えば光学望遠鏡であれば、光を一点に集める「レンズ部分」とその光を受ける「受光部分（カメラ）」の距離があればあるほど、解像度の高い画を得ることができます。しかし、そのような巨大な構造物は、つくるのも打ち上げるのも一苦勞です。ところが、いくつかの人工衛星を一定の距離を保って飛行させる編隊飛行（Formation Flying：FF）技術を利用すれば、レンズ部分と受光部分、それぞれの役割を持たせた人工衛星を一定の距離に保った状態で飛ばすことができるため、巨大な望遠鏡が実現できます。

そのためには高い制御技術が必要

1997年、JAXAは「技術試験衛星Ⅶ型（ETS-Ⅶ、P.7参照）」を打ち上げました。「おりひめ」「ひこぼし」と名付けられた2機からなるこの衛星は、翌年の7月7日（七夕）にランデブ・ドッキング実験を成功させています。この実験では、衛星同士で編隊を形成する技術、編隊位置を高精度に保持する技術、異常発生時に安全に退避する技術、退避後に元の位置関係に復帰する技術などのFF技術を実証しています。当時実証したこれらの技術は、10年経った今でも世界最高水準を保っています。しかし、今後計画される様々な最先端のミッションを達成するためには、編隊位置を更に高精度に保持することが要求されています（図1）。

相対的な位置を正確に制御するためには、お互いの位置を計測する「相対航法センサ」や推進系である「スラスター」などの精度が高いことが重要です。特に、相対航法センサの高精度化は欠かせません。

そこで、ETS-Ⅶで開発したセンサ技術をベースに、一桁高い計測精度を目指して「FF用画像航法センサ（FINE）」の開発を進めています（図2）。試験の結果、目標とする精度を達成できることが分かりました。

ETS-Ⅶでは、1mの相対距離に対して1cmの制御精度を実証しました。しかし、今後予定されている

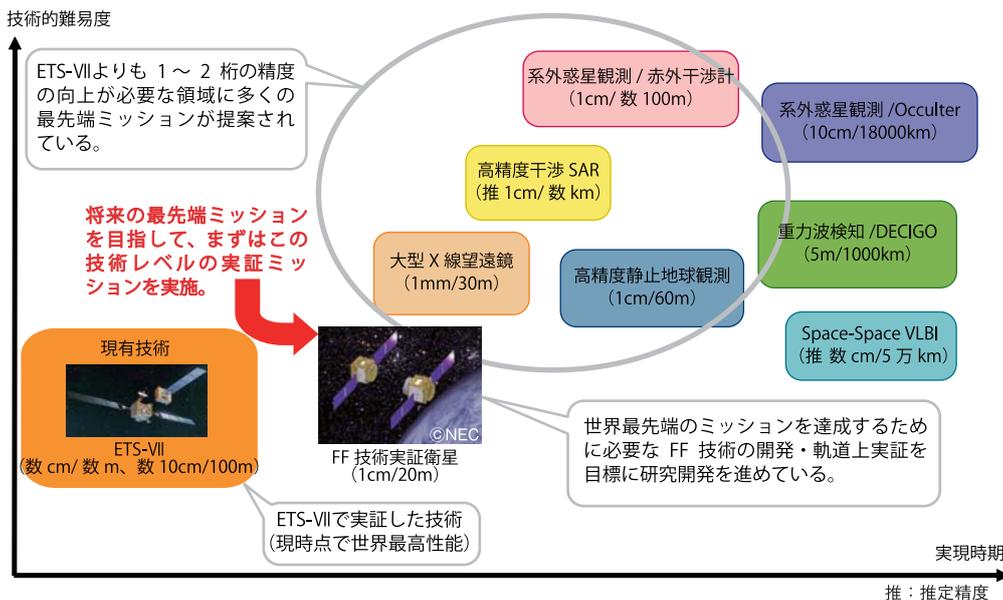
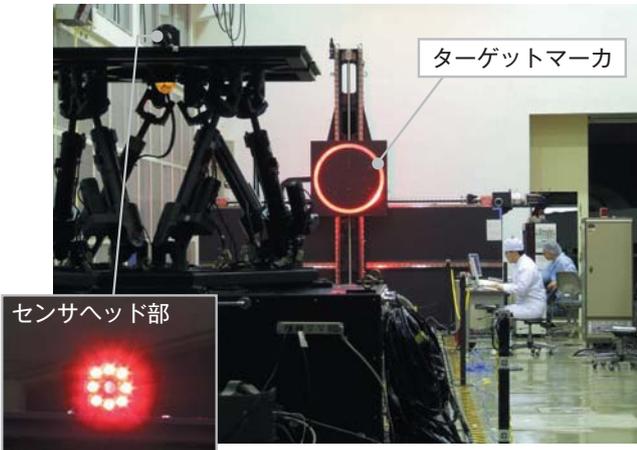


図1 ETS-Ⅶと今後要求されるミッションとの編隊位置制御精度



主衛星には光を発するセンサヘッド部、従衛星にはその光を反射する楕円形のターゲットマーカが付けられています。ターゲットマーカで反射されたその光をセンサヘッド部に取り付けたカメラで捉え、その輪の見え方から上下、左右、前後の位置関係を計測します。

図2 RDOTS (P.6参照) によるFF用画像航法センサ (FINE) 開発試験の様子

様々なミッションでは、例えば数100mの相対距離に対して1cm程度の制御精度が要求されます。そこで、まずは5年後をめどに一桁高い制御技術を目指し、研究開発を進めています。

小型衛星による宇宙実証を目指す

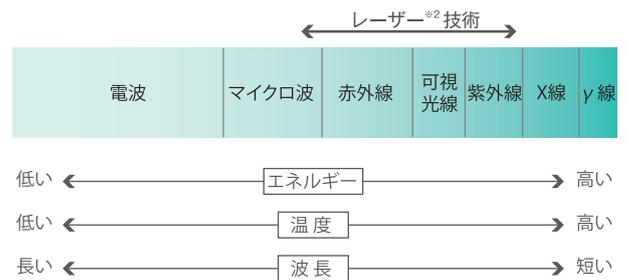
現在、大阪大学を中心に「FFAST (エフファースト) 計画」というFF技術を使ったX線^{*1}望遠鏡システムの実証が検討されており(図3)、JAXAは共同研究機関として参加しています。そこで、FINEをはじめとする様々な機器の試作試験を進めると共に、FF技



図3 FFAST計画 (NEC提供)

術に必要な制御系をひとつにまとめたFFシミュレーションシステムの開発を行っています。

※1 X線：X線は電磁波の1種です。電磁波はその波長によって異なるエネルギーを持っています。エネルギーと温度は密接な関係があり、温度が高いほど高いエネルギーの光を發します。そのためX線望遠鏡では、可視光よりもっと高い温度の光を發する天体、例えばブラックホールなどを観測することができます。



※2 レーザー：特定の波長の電磁波を増幅させたもの。



【誘導・制御グループ】

(左より) 河野 功、山元 透、巳谷 真司

設備紹介

ランデブ・ドッキングシステム開発試験設備

RDOTS — Rendezvous and Docking Operation Test System

ランデブ*・ドッキングシステム開発試験設備 (RDOTS) は、宇宙機がランデブ・ドッキングを行うために必要な航法・誘導・制御系サブシステムを開発するための設備です(図1)。国際宇宙ステーション (ISS) へ物資を輸送する宇宙ステーション補給機 (HTV) のランデブ技術実証のために整備されました。「6自由度モーション装置」「1自由度スライドレール」「2軸テーブル」という3種の駆動装置を有し、実際に宇宙空間を飛行している状態をシミュレーションすることが可能です。

2007年度にHTVのランデブシステムのフライト試験をRDOTSを用いて実施しました(図2)。その後、計測精度を高める改修を行い、現在は高精度フォーメーションフライト技術の核となる相対航法センサ

の機能・性能試験のために利用しています(P.4参照)。

※ランデブ：2機以上の宇宙機が、ドッキングのために宇宙空間で出会うこと。

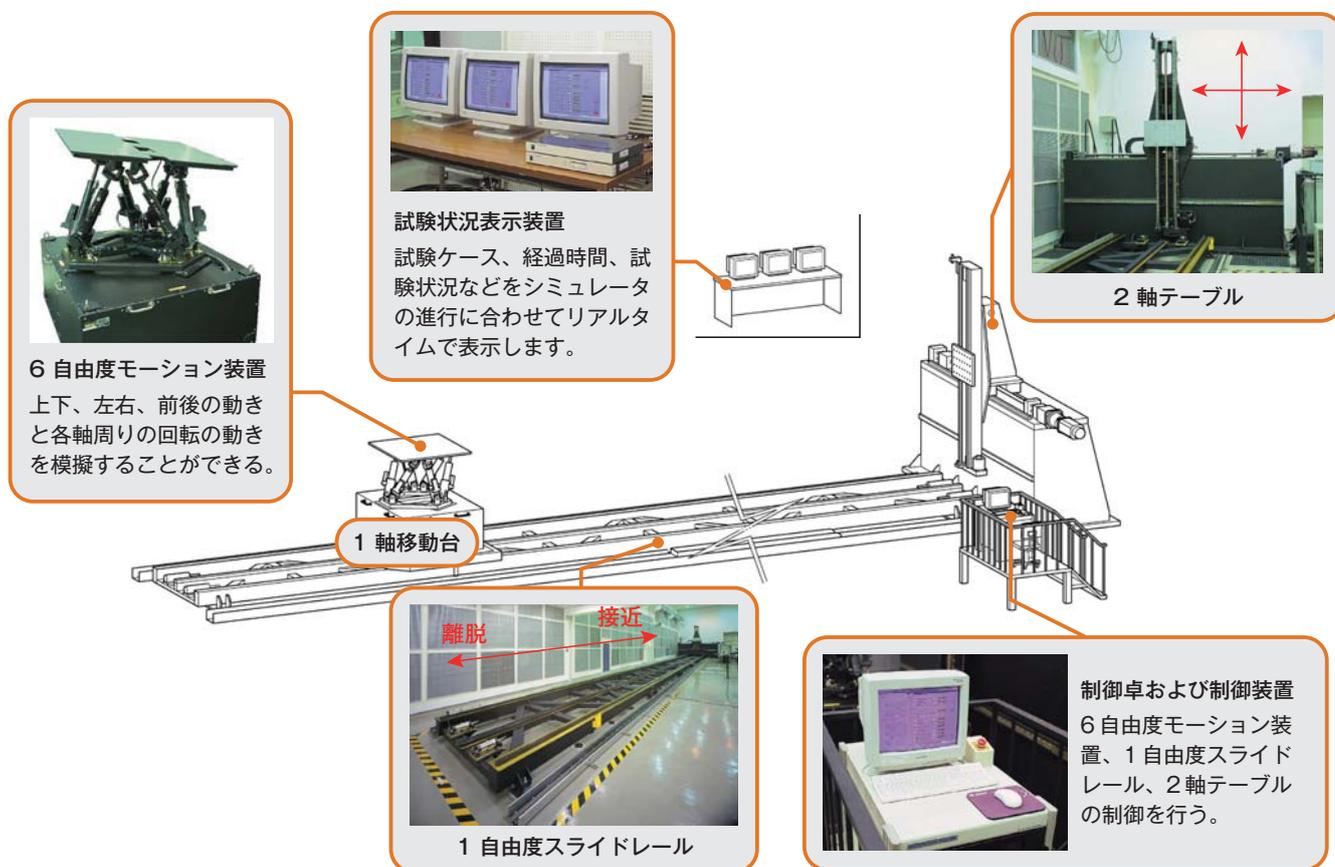


図1 ランデブ・ドッキングシステム開発試験設備 (RDOTS)

技術試験衛星「きく」

JAXAでは、時代のニーズに対応した衛星技術の開発を目的に「技術試験衛星 (Engineering Test Satellite : ETS)」を打ち上げています。「きく」という愛称で親しまれているETSはこれまでに8機が打ち上げられ、日本の衛星技術の開発に貢献しています (表)。

ETS初号機である「きく1号」は日本初の実用衛星打ち上げ用液体大型ロケット「N-Iロケット」の打ち上げ技術や、衛星の軌道投入・追跡および運用技術などの各種技術を総合的に習得することを目的としていました (図1)。「きく1号」は高度1000kmの円軌道で様々な技術を実証し、1982年4月28日に運用を停止しています。

1997年11月28日に打ち上げられた「きく7号」では将来の宇宙活動において必要となる「ランデブ・

ドッキング技術」や「宇宙用ロボット技術」の習得を目的としていました。国際宇宙ステーション (ISS) への物資の補給や軌道上での宇宙機の点検修理、月・惑星からのサンプルリターンなどではランデブ・ドッキング技術が必要になります。ランデブ・ドッキングを行うには、お互いの位置を把握して飛行するフォーメーションフライト (FF) 技術が重要になってきます。きく7号では様々なFF技術を実証しました (P.2参照)。

スペースシャトルやISSで利用されている宇宙用ロボットは、近傍から宇宙飛行士により操作されていますが、今後拡大する宇宙活動を考えると、全ての宇宙ロボットを宇宙飛行士に操作させるのは非効率的です。そのため、地上から遠隔操作可能な宇宙ロボットが望まれています。そこで、衛星搭載ロボットアームの地上

からの遠隔操作実験などを行いました。

もっとも新しいETSである「きく8号 (図2)」は、携帯電話やモバイル機器など通信需要の増大へ対応するために打ち上げられました。テニスコート1面分ほどの大きな展開アンテナを2基持つこの衛星は、日本列島全域をカバーする静止軌道を周回しています。大きなアンテナのおかげで、現在の携帯電話端末と同程度の大きさの端末とも直接通信することができます。そのため、これまで以上にスムーズに移動体通信を行うことが可能です。この展開アンテナの技術は、大型宇宙構造物への応用が可能です (P.4参照)。「きく8号」は現在も運用されており、様々な宇宙実証実験を行っています。



直径約80cm、26面体の衛星でした (重量: 約82.5kg)。

図1 きく1号



ふたつの大型展開アンテナとふたつの太陽電池パドルを持つ、端から端までが40mの大きさの衛星です (重量: 約3トン)。大型展開アンテナ1枚の面積は19m×17mで、これはテニスコート1面分ほどです。静止衛星としては世界最大級のサイズとなります。

図2 きく8号

表 技術試験衛星一覧

衛星名称	打ち上げ年度	打ち上げロケット	目的
きく1号 (ETS-I)	1975年9月9日	N-Iロケット1号機	N-Iロケットの打ち上げ技術、衛星の軌道投入・追跡および運用技術などの習得。 *「菊の節句」に打ち上げられたので、「きく」と命名されました。
きく2号 (ETS-II)	1977年2月23日	N-Iロケット3号機	静止衛星の打ち上げと追跡管制技術、軌道保持、姿勢保持技術の習得。通信機器の宇宙環境での機器試験。
きく3号 (ETS-IV)	1981年2月11日	N-IIロケット1号機	気象衛星、通信衛星、放送衛星など、350kgクラスの静止衛星打ち上げ用N-IIロケットの打ち上げ能力の確認と搭載実験機器の機能試験など。
きく4号 (ETS-III)	1982年9月3日	N-Iロケット7号機	電力を必要とする地球観測衛星などの開発力を高めるために、3軸姿勢制御や太陽電池パドル展開機能の確認、能動式熱制御に関する実験、イオンエンジン装置の作動テストなど。 *開発が遅れたためETS-IVより後の打ち上げとなり、「きく4号」となりました。
きく5号 (ETS-V)	1987年8月27日	H-Iロケット試験機2号機	H-Iロケット (3段式) の試験機の性能確認。静止3軸衛星バスの基盤技術を確立し、次期実用衛星開発に必要な自主技術の蓄積、移動体通信実験の実施。
きく6号 (ETS-VI)	1994年8月28日	H-IIロケット試験機2号機	1990年代における高性能実用衛星開発に必要な大型3軸衛星バス技術の確立。高度の衛星通信のための搭載機器の開発・実験。
きく7号 (ETS-VII)	1997年11月28日	H-IIロケット6号機	ランデブ・ドッキング技術や宇宙用ロボット技術の習得。
きく8号 (ETS-VIII)	2006年12月18日	H-II Aロケット11号機	携帯電話やモバイル機器など通信需要の増大へ対応。

空 宙 情 報

日本－アメリカ間を2時間で結ぶ極超音速機用エンジン

航空機が高速で飛ぶと、エンジンに入る空気が高温になるため、一般的なジェットエンジンは音速の3倍の速度（マッハ3）が作動限界となっています。予冷ターボジェットは、氷点下253℃と非常に温度の低い燃料である液体水素を使って高温の空気を冷やすことにより、マッハ5まで運転可能となる新しいコンセプトのジェットエンジンです。エンジンの空気を冷却することはエンジン性能の向上にもつながります。また燃料に液体水素を使用するため、二酸化炭素を発生しない地球に優しいエンジンでもあります。

JAXAでは予冷ターボジェットの技術実証を主目的とした小型エンジンの研究を2004年より行っており、10月27日～11月14日に北海道大樹航空宇宙実験場にて、第3回目となるエンジンの燃焼実験を行いました。燃焼実験では、約90秒の実験中にエンジンの起動、アフターバーナーの作動やノズル制御などが正常に作動し、エンジンの性能が設計通りであったことを確認しました。同時に、模擬機体への液体水素燃料注入など機体を含めたトータルシステムとしての機能確認を行いました。今後はエンジンの飛行実証を行い、夢の極超音速機実現に向け、技術の熟成をはかりたいと思っております。

(ジェットエンジン技術研究センター 小島 孝之)



実験の様子

JAXA 宇宙航空技術研究発表会

【開催報告】

2008年11月27日（木）、JAXAが取り組む宇宙航空技術の研究を広く一般の方々にも紹介するため、「JAXA宇宙航空技術研究発表会」を日本科学未来館（東京都）にて開催いたしました。当日は小雨のぱらつくあいにくの天気にも関わらず、331名の来場者の方にお越しいただきました。



一橋大学長 杉山武彦氏による特別講演
「競争力を支えるものとしてのモビリティ」



研究発表の様子