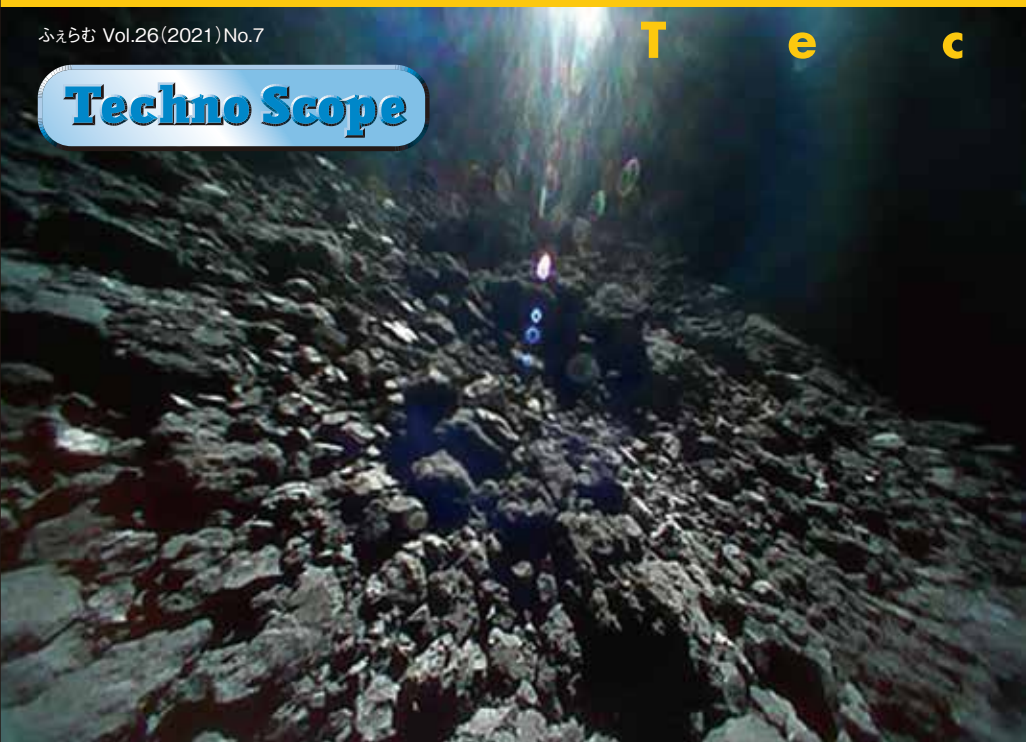
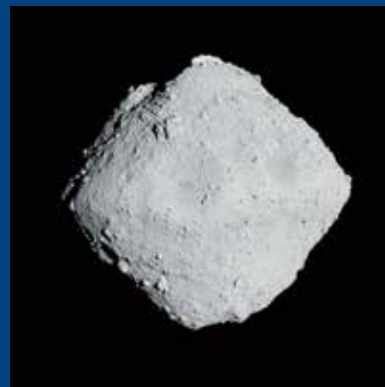




「はやぶさ2」に搭載された小型ローバMINERVA-IIの「Rover-1B」がリュウグウ表面でホップする直前の画像
(2018年9月23日09:46(日本時間)) (©JAXA)



望遠の光学カメラONC-Tによって距離約20kmから撮影されたリュウグウ(2018年6月30日23:13(日本時間)頃の撮影)

(©JAXA、東京大、高知大、立教大、名古屋大、千葉工大、明治大、会津大、産総研)

生命誕生の謎に迫る「はやぶさ2」

2020年、小惑星「リュウグウ」から地球に帰還した小惑星探査機「はやぶさ2」。持ち帰ったサンプルから太陽系の謎を解くカギが見つかるのではないかと期待されている。さらに今号では、今後の深宇宙(地球から200万km以上離れた宇宙)通信システムを担う新アンテナについても紹介する。

小惑星「リュウグウ」を目指す意義

2014年12月、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の小惑星探査機「はやぶさ2」が種子島宇宙センターから打ち上げられた。目的地は、太陽系の小惑星「リュウグウ」である。

惑星や準惑星より小さい小惑星は、その多くが太陽系の火星と木星の間の小惑星帯と呼ばれる部分にある天体である。これまで100万個以上発見されており、大きいものは直径1,000 km程度、小さいものは数m程度の大きさがある。

「はやぶさ2」はなぜ小惑星を目指したのか。それは、小惑星に太陽系や地球の謎を解くための情報が存在すると考えられるからである。

地球などの惑星は、惑星が誕生する時に一度溶けてから固まってできた天体なので、今から46億年前に太陽系が誕生したところから存在する物質についての情報は失われている。一方、小惑星は、途中で溶けていないものもあるため、太陽系誕生当時と同じ情報がある場合もあると考えられている。

小惑星には、「はやぶさ」が訪れた小惑星「イトカワ」のように、石質の物質を主成分とする「S型小惑星^{*1}」や、「はやぶさ2」が目指した小惑星「リュウグウ」のように、表面の岩石に水や炭素を多く含む「C型小惑星^{*2}」がある。水や炭素は、有

機物の材料であり、生物が生まれるために必要な物質である。「リュウグウ」で水や炭素を見つけることができれば、地球に生物が生まれるよりも前に、太陽系に生命の材料となる物質が存在していたことを証明することになり、生命の起源を解明するための手がかりとなる可能性がある。

世界の小惑星探査をリードする技術の蓄積

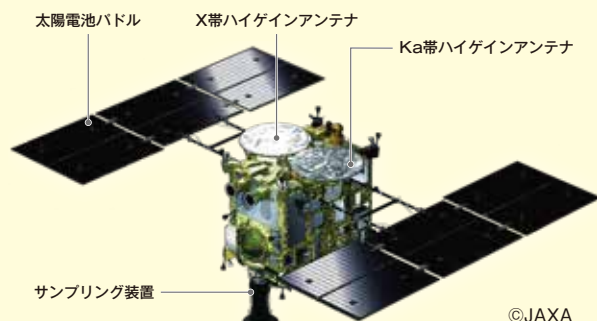
「はやぶさ2」プロジェクトの遂行には、日本独自の深宇宙探査技術をさらに進化させるという、工学的な意義もある。「はやぶさ」では、さまざまな予期せぬトラブルがあった。そこで「はやぶさ2」では、「はやぶさ」の経験を細かく検証し、より確実な技術に発展させるため、探査機の各装置などにさまざまな改良が加えられた(図1)。これまで、月より遠くまで行って天体に着陸してから地球に帰還した探査機は世界でも「はやぶさ」「はやぶさ2」の2例だけである。日本の技術が世界の小惑星探査をリードするためにも、「はやぶさ2」プロジェクトの意義は大きい。

「はやぶさ2」で改良された技術の例として、主な推進機関

*1 S型: Stony(石質の)、またはSilicaceous(ケイ素質)の頭文字に由来。

*2 C型: Carbonaceous(炭素質)の頭文字に由来。

■「はやぶさ2」探査機(図1)

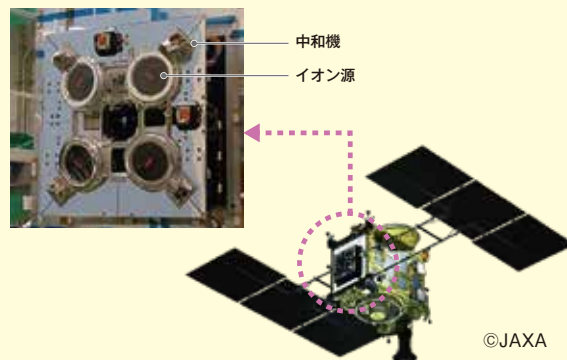


- 探査機の仕様: 約1 m × 1.6 m × 1.2 m
- 重量約 609 kg (燃料込み)
- 周波数: X帯 (8 GHz)、Ka帯 (32 GHz)

「はやぶさ」を元に、Ka帯通信系の追加、イオンエンジンの高推力化などの改良を加え、バックアップ手段や新しい機器を工夫した。

©JAXA

■イオンエンジンのイオン源と中和器(図2)



©JAXA

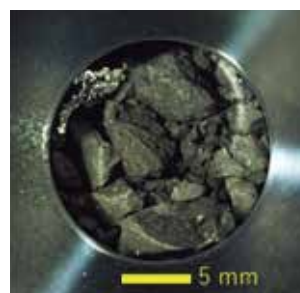
イオンエンジンは、イオン源と中和器とが対になって構成される。イオン源は、プラスの電荷を帯びたキセノンガスを高速で噴射するが、プラスの電荷をもつイオンが放出されると、探査機がマイナスに帯電してイオンを引きもどすため、加速することができない。そこで中和器からマイナスの電荷をもつ電子を放出し、イオンを中和させる。

であるイオンエンジンが挙げられる。イオンエンジンは、地球から小惑星、小惑星から地球へと航行する時の軌道変更に使われる。イオンエンジンは、イオンを電氣的に噴射し、その反動で前進するが、推力を得る効率がよく、化学エンジンの約10分の1という少ない燃料で長い距離を飛行できるという特徴がある。キセノンのイオンを閉じ込める容器の内部に、永久磁石のサマリウムコバルト磁石が使用されている。磁石を固定する部分には軟鉄が使われている。

「はやぶさ」ではイオン源1基のプラズマ点火不良があったため、今回はイオン源の推力発生効率の向上と、点火の確実性とを両立するように入念な調整を行った。また、イオンを中和させて探査機が帯電するのを防ぐ中和器(図2)で、「はやぶさ」では1万～1万5千時間後に劣化や故障が発生した。この対策として、中和器の放電室内壁をプラズマから防護し、必要な電圧が低減されるように磁場を強化した。改良したイオンエンジンの実験室での耐久性試験では、7万時間以上経過しても正常に作動することが確認された。また、イオンエンジン1台当たり最大推力を、従来の8 mNから10 mNに増強することに成功し、今後の宇宙探査で十分な性能を発揮する確証が得られたのは大きな成果である。

宇宙の旅を経て地球に届いたサンプル

「はやぶさ2」は打ち上げ後、地球の軌道と似た軌道で太陽の周りを公転し、2015年に地球の重力を利用して「リュウグウ」に向かう軌道に乗るための地球スイングバイ^{*3}を実施し



「はやぶさ2」が持ち帰ったサンプルは、大きいもので1 cm程度の黒い石が見られる。今回回収されたサンプルは約5.4 gであった。

©JAXA

た。2018年に地球から約3億km離れた小惑星「リュウグウ」の上空20 kmに到着した。

「リュウグウ」の上空からはリモートセンシング観測をし、「リュウグウ」表面の環境計測や写真撮影などは小型ローバや小型着陸機を使用した。表面のサンプル採取は、1回目は表面物質を採取し、2回目は衝突装置によって表面に人工的にクレーターを作った時に噴出した地下の物質の採取を行った。

このような約1年5か月のミッションを終え、「はやぶさ2」は2019年に「リュウグウ」を出発して、2020年に地球へと帰還した。この時、イオンエンジンの状態は極めて良好で燃料の半分が残っていたことから、探査機はそのまま次の天体に向けて飛行を続けている。

一方、サンプルが入ったカプセルは日本に戻り、本格的な分析が2021年6月ごろから始まっている。これから何が明らかになるのか、驚くような研究成果の発表を期待したい。

^{*3} スイングバイ: 天体の万有引力と公転運動を利用して、探査機の運動方向と速度を変更する方法。

深宇宙探査の命綱の役割を担う巨大アンテナ

長野県佐久市の蓼科スカイラインを行くと、森林の中に突然、大きな白いパラボラアンテナが現れる。JAXAが新たに建設した美笹深宇宙探査用地上局の新アンテナ（以下、美笹アンテナ）である（図3）。今後の深宇宙探査で重要な役割が期待される美笹アンテナを紹介する。

地球から200万km以上離れた宇宙を「深宇宙」と呼ぶ。「はやぶさ2」が地球と最も離れた時の距離は約3億kmであり、これほどの遠距離通信は深宇宙探査ミッションの命綱である。地球上から探査機に電波を送り、探査機からの電波を受けるのが地上局の役目であり、そこには高精度なアンテナが不可欠である。JAXAはこれまで臼田宇宙空間観測所にある深宇宙探査用アンテナ（以下、臼田アンテナ）を運用してきた。しかし建設から35年が経過し老朽化が進んだことから世代交代が必要となった。新たなアンテナを建設することにより、今後の深宇宙探査を自立的に継続することが可能となるうえ、海外ミッションの支援により国際貢献にもつながる。

美笹アンテナは世界でも有数の巨大アンテナである。アンテナの主反射鏡部は重量442 t、直径は54 mで、臼田アンテ

ナの64 mより少し小さいが、受信系の高性能化（鏡面精度、指向精度、受信機のパフォーマンス向上）により同等以上の受信性能を維持している。主反射鏡は、360度見渡せ、小惑星探査機からの微弱な電波を受信する。「はやぶさ2」の通信では、従来のX帯より情報伝送容量が大きい、高周波数のKa帯も使用できるようになっており、美笹アンテナは深宇宙通信でKa帯が使用できる日本初のアンテナである。

変形抑制と精度維持に貢献する鉄

美笹アンテナのパフォーマンスを発揮するためには、巨大なアンテナを変形させず、いかに精度よく動かすことができるかが大きな課題である（図4）。

主反射鏡の表面は、それぞれ曲面加工されたアルミニウム製パネル680枚が、1枚ごとに鋼製トラスにより6点で支持されている。鏡面が自重で変形することがないように、トラスの剛性バランスや軽量化を考慮した部材配置が行われている。また鋼製トラスの変形が鏡面に伝わらないよう、支持部には弾性率が低く耐力に優れたアルミ青銅が使用されている。熱変形の抑制も大きな課題である。鏡面を裏から支えるトラス部の

■ 美笹深宇宙探査用地上局の新アンテナ（図3）



●総重量約2,200t、全高69m、主反射鏡直径54m
●周波数：X帯（8GHz）、Ka帯（32GHz） ●設計寿命：20年



建設中の主反射鏡



主反射鏡は10ブロックに分割して組み立てる。上部の鏡面パネルを下部の鋼製トラスが支える。トラスの外側には日よけカバーを取り付ける。

大口径アンテナで重要となる変形抑制

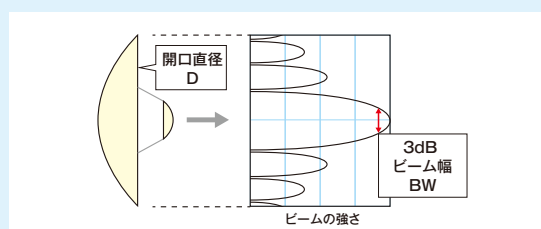
パラボラアンテナは、宇宙からの微弱な電波を効率よく集めるため、開口直径を大きくしている。

一方、パラボラアンテナの主反射鏡が集める電波のビーム幅(BW)と開口直径(D)および使用周波数での波長(λ)の関係は以下のように表される。

$$BW[\text{rad}] = 1.1 \times \lambda / D$$

つまり、開口直径が大きいほどビーム幅が狭くなる(図4)ため、わずかな範囲内で探査機からの電波を精度よく捉えなければならない。そのため、パラボラアンテナは主反射鏡が作動してもできるだけ変形抑制を図り、高い精度を保つ必要がある。

■ パラボラアンテナのビーム幅(図4)



日本電業工作(株)ホームページを元に作成

白色塗装や日よけカバーによる日射入熱の抑制、断熱材による熱伝導抑制、低放射塗装による放射熱の遮断、ファンによる排熱など、多くの対策が盛り込まれている。アンテナ全体では、風や地震に対する強度を確保し、特定の部位に無理な力がかからないような構造としている。また美笹アンテナは周波数が高いKa帯も使用するため、従来以上に変形を少なく抑える必要があり、剛性を確保するために、構造部に構造用炭素鋼材(STK490、SM490など)を多く使用している。このほか、アンテナを駆動させるホイールやギアにはクロムモリブデン鋼(AISI4145、SCM440など)が使用されている。

主反射鏡の鏡面は常に理想形状ではなく、自重や熱による変形や駆動によって形状が変化するため、電波の焦点となる副反射鏡の位置を正確に制御する必要がある。また、アンテナの指向角度制御に重要な役割を果たすのがマスターコリメータ(視準器)であり、これが主反射鏡の指向角度を決めるための絶対基準となる。マスターコリメータの支持構造は、他の部品以上に熱変形を抑える必要があるため、熱膨張率が極めて低いスーパーインバー材が採用された(図5)。

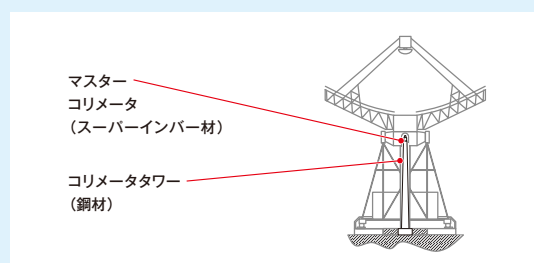
困難を克服した人々の努力

アンテナの建設工事は、寸法精度をミリ単位で高める必要

アンテナの焦点を正確に制御する マスターコリメータ

アンテナの下部中央にはアンテナ構造から独立したタワーと、最上部にはマスターコリメータがあり、アンテナ指向角度のズレを光で測定し、主反射鏡の指向角度を緻密に制御している。マスターコリメータの支持構造部には円柱状のスーパーインバー材が採用された。スーパーインバー材は、鉄、ニッケル、コバルトの合金で、熱膨張率が鉄鋼の約1/10のインバー材より、さらに小さい熱膨張率を有している。

■ スーパーインバー材が使われた マスターコリメータ支持構造の位置(図5)



がある。しかし、臼田アンテナの建設から35年が経ち、当時を知る人はほとんどいなかった。建設を担当した三菱電機(株)では、関連会社、地元協力会社などから集まった、現地工事に携わる100人規模のメンバーと意思疎通を図りながら工事前準備が進められ、時には、一度決めた組立て手順を短時間で見直ししなければならないような苦労もあったという。

とくに難しかった組立て工事の一つが、主反射鏡の組立て調整である。主反射鏡は360度を10分割し、それぞれのブロックを地上で組立てて、所定の高さに設置する。鏡面のパネルは、実際の位置を測定してから、それに合わせて位置を調整していくが、風や日射、足場重量などによる誤差が出やすく、測定時の環境影響を踏まえて調整する作業の繰り返しとなり、長い時間をかけた末に鏡面が完成した。

美笹アンテナの設計寿命は20年であり、耐久性を確保するため、重防食塗装を行い、耐候性の高いシリコン系パッキンを使用している。また地震対策は、免振あるいは制振構造は適用せず、特定部位に負荷がかかりすぎないような構造を採用し、高強度部材の適用で強度を確保している。

2021年4月から本格的な運用を開始した美笹アンテナ。多くの関係者の努力が実を結び、新たな宇宙の夢に向かっていよいよ動き出した。

- 取材協力 宇宙航空研究開発機構(JAXA)、三菱電機(株)
- 文 杉山 香里