

評価項目 1(プロジェクトの目的(プロジェクトの意義の確認)・目標・開発方針に関連する質問

電波天文衛星(ASTRO-G)
プロジェクトの事前評価質問に対する回答

平成 20 年 7 月 4 日
宇宙航空研究開発機構

1-1	日本の電波天文衛星の世界的な位置付け	3 ページ
1-2	全天観測について	4 ページ
1-3	サクセスクライテリアについて	5 ページ
1-4	ミニマムサクセス	7 ページ
1-5	ミッション機器の検証計画	8 ページ

評価項目 2(システム選定及び基本設計要求)に関連する質問

2-1	軌道決定における Galileo システムの利用	10 ページ
2-2	衛星バス	11 ページ
2-3	反射鏡面の 43 GHz での動作について	13 ページ
2-4	基準信号伝送について	14 ページ
2-5	技術波及効果について	15 ページ

評価項目 3(開発計画)に関連する質問

3-1	「はるか」の衛星開発費	16 ページ
3-2	海外との協力について	17 ページ
3-3	国立天文台との協力	19 ページ
3-4	データ公開の方針	20 ページ

評価項目 4(リスク管理)に関連する質問

4-1	ソーラーパネルのリスク管理	21 ページ
-----	---------------	--------

【本資料の位置付け】

本資料は、平成 20 年 6 月 20 日に開催された第 6 回推進部会における電波天文衛星(ASTRO-G)プロジェクトの説明に対する構成員からの質問に対し、独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)の回答をまとめたものである。

評価項目 1(プロジェクトの目的(プロジェクトの意義の確認)・目標・開発方針に関連する質問

【質問番号 1-1】 日本の電波天文衛星の世界的な位置付け

【質問内容】

日本の「電波天文衛星」は、日本のオリジナルで世界に先駆けた取り組みといえるのでしょうか。

世界の各国が取り組んでいる場合、日本のポジショニングはどのあたりになるのでしょうか。

【資料の該当箇所】

【回答者】事務局/JAXA

【回答内容】

P10にも記載があるように、スペースVLBI技術は世界において唯一日本だけが実現している技術であり、日本のオリジナルで世界に先駆けた取組といえます。

世界では、ロシアでラジオアストロンという計画がありますが、スペースVLBI技術は唯一日本だけが実現している技術です。

【質問番号 1-2】 全天観測について

【質問内容】

推進部会に提出された資料には、ブラックホール付近の写真 1 例のみが掲載されていました。また説明の中で、全天観測ということばがでてきたように思います。“はるか”による観測データから、また海外データから、複数の位置にねらいを定めて観測するのか、本当に全天観測するのかについて説明下さい。

【資料の該当箇所】

【回答者】JAXA

【回答内容】

全天を掃く観測方式の観測はしません。

ASTRO-G の観測対象の天体は 100 個以上あり、ほぼ全天に散在しています。

この天体の位置は内外の過去のデータより既知のもので、これらに狙いを定めて観測を実施する計画です。

【質問番号 1-3】 サクセスクライテリアについて

【質問内容】 ミニマムサクセスとして標記してある事柄は工学的な意味としては理解できるが、サクセスクライテリアとしては理学的成果として表現される方が良いと思いますが、如何でしょうか？

【資料の該当箇所】 推進 6-1-2 21 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

現在のミニマムサクセスには、以下のような理学的な成果も内包しており、また、理学コミュニティの了解も得られておりますので、現状の設定でよいかと考えております。

[ミニマムサクセスに内包される理学的成果]

ミニマムサクセスにおいて ASTRO-G による観測性能がもっとも落ちるケースは、観測帯域のうち 8 GHz 帯のうち 1 つの偏波のみで観測が可能となった場合です。この場合でも、以下の科学的成果が得られると期待されます。

- 1) スペース VLBI で観測する天体は、最も高い解像度で観測しているために、天体の動きを追うことができるものが多くあります。(参考、平成 18 年度推進部会資料参考図版 2-2 の 1928+738 など:図 1)4 年でこのように変化するので、「はるか」のデータと組み合わせで観測すると多くの天体について、ジェットやそれを吹き出している中心部の研究をするのに有用な時間変化情報を得ることができます。
- 2) 「はるか」で行った 5 GHz に対して、周波数が高くなったこと、および、遠地点高度が 25,000 km に上がったことにより、約 2 倍の解像度

を得ることができます。これにより、「はるか」で進めていた、活動銀河のジェットの研究を進めることができます。

- 3) 「はるか」で公募観測をおこないましたが、時間の制約およびミッション終了により科学的意義はあるが、観測できなかった観測があります。その観測を行うことができます。



クェーサー1928+738の4年間にわたるモニター観測。
左端の1997年8月から右端の2001年9月まで、観測した時系列に沿って配置している。

ジェット「うねり」構造の解釈は、根元が揺れるというものである。ホースで水まきするときのように、個々のジェット成分は弾道的に飛んだとしても噴き出す根元が動くと、うねったジェット形状が観測される。

クェーサー1928+758を詳細にモニターした結果、ジェットの各成分が弾道的に飛んでいることが示された。このような構造の成因は、活動銀河核中心部の2つの超巨大な天体(ブラックホール)が互いに軌道運動を行い、そのうち的一方からジェットが出ているためと考えられる。

【質問番号 1-4】ミニマムサクセス

【質問内容】

ミニマムサクセスの説明をもう少し具体的にしてほしい。時として、「技術試験衛星としての成功」だけが強調されて科学的成果が全くなくても成功だとされることがある。このミッションはあくまで科学的成功を目指すものであると思われるので、ミニマムサクセスも科学的知見の立場で述べてほしい。100観測以上観測することで、「これまでになかったどのような科学的知見が得られるのか」を説明してほしい。

【資料の該当箇所】 推進6-1-2 21ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

現在のミニマムサクセスには、内包される理学的な成果については、質問番号1-3への回答をご参照ください。

ここに示された成果については、ミニマムサクセスに設定されている100観測で達成できると考えております。

【質問番号 1-5】 ミッション機器の検証計画

【質問内容】ミッション機器の性能は地上試験で完全に検証される計画となっていますか？ アンテナをループに入れた試験は困難と思いますが、ミッション機器の性能および VLBI としての性能は、どのようにして確認されますか？

また、個別試験から総合試験に至る全体の作業フローを示してください。

【資料の該当箇所】 推進 6-1-2 25 および 41 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

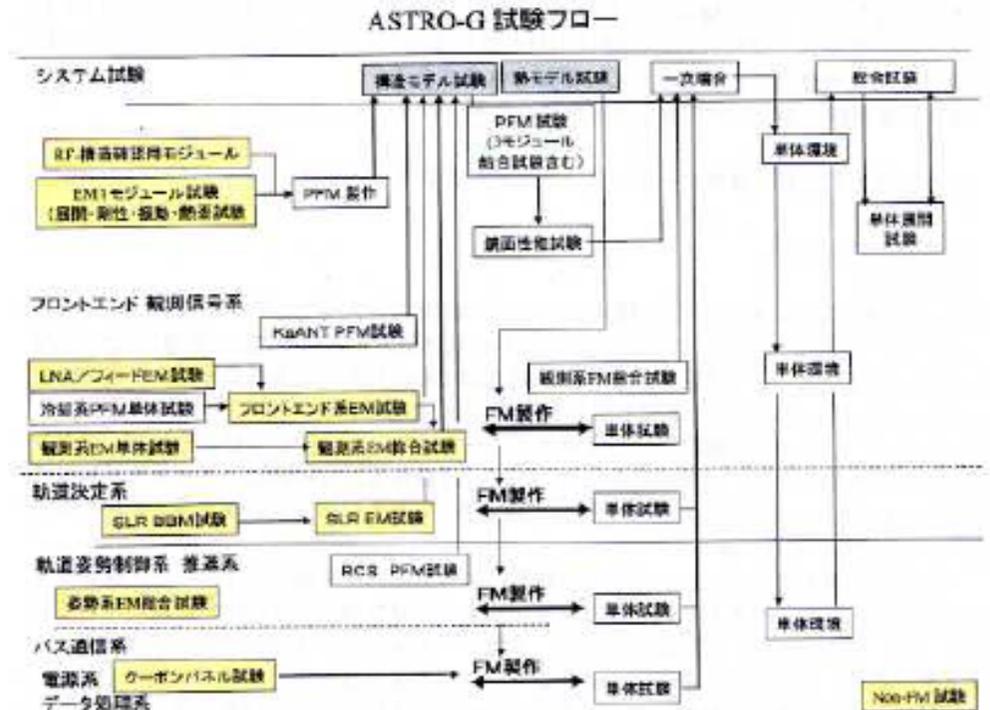
VLBI の観測システムでは、VLBI 観測信号については、(1)大型アンテナ (2)副鏡 (3)ホーンアンテナ (4)(冷却)フロントエンド (5)観測信号処理部 (6)Ka 帯通信系 (7)リンク局(信号受信、データ記録)、また、観測のための高安定度基準信号は、水素メーザ (7) (6) (5)という信号の流れになります。(3)から(7)については、双方向の信号の流れについて、地上での検証が可能と考えています。VLBI システムの確認として、フロントエンドの雑音レベル、観測信号の伝送レベル、遅延特性、位相特性、周波数帯域特性の確認を、Ka 帯リンク系の地上設備を使って観測系 EM 総合試験および一次噛合せ前の観測系 FM 総合試験にて行います。

(1) (3)の部分については、地上での試験による直接的な検証はできません。検証できない理由は、軌道上の無重力および熱環境が地上で十分な精度で模擬した試験ができないからです。そのために、構造数学モデル、熱数学モデル、RF シミュレーションに頼らざるをえませんが、それらのモデル/シミュレーションの妥当性を地上試験で検証し、計測

誤差、試験で抑えられない誤差、およびモデル化の誤差を積み上げて観測システムとして成り立つことを検証します。

作業フローについては別紙に示しました。

質問番号 1-5 別紙



評価項目 2(システム選定及び基本設計要求)に関連する質問

【質問番号 2-1】 軌道決定における Galileo システムの利用

【質問内容】

p.34 で、Galileo システムの利用はオプションとはなっていますが、搭載品として Galileo 対応の GPS 受信機を採用する、となっています。Galileo システムを利用することの利点を、p.34 に追記しておかれていますか、如何でしょうか。

【資料の該当箇所】 推進 6-1-2 34 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

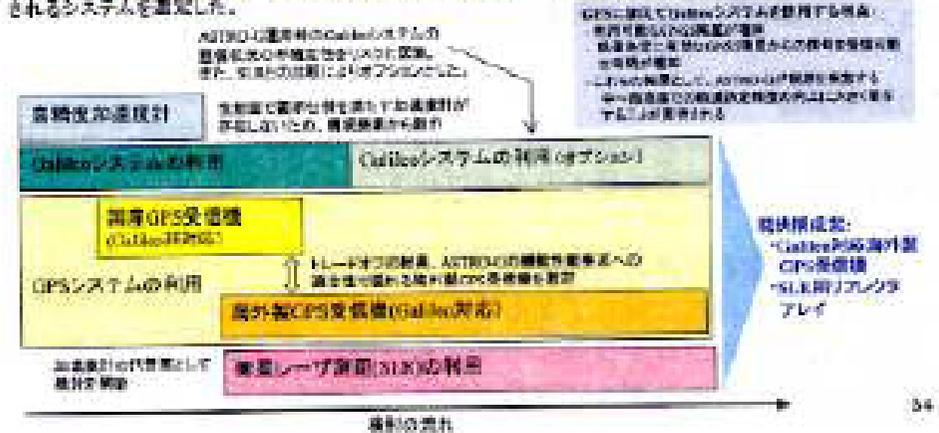
GPS に加えて Galileo システムを併用する利点は以下のとおりとなります。

- ・ 利用可能な GNSS*衛星が増加します。
- ・ 軌道決定に有効な GNSS 衛星からの信号を受信可能な時間が増加します。
- ・ これらの結果として、ASTRO-G が観測を実施する中～高高度での軌道決定精度の向上に大きく寄与することが期待されます。

資料 P.34 にも追記致します。

* GNSS: Global Navigation Satellite System (全世界的航法衛星システム) 米国の GPS、欧州の Galileo、ロシアの Glonass がそれに相当する。

より高い精度での軌道決定の要請は、観測の制約を軽減し、観測計画の柔軟性を高める。
軌道決定系の構成に関しては、達成できる軌道決定精度とリソース制約、技術リスクなどのバランスを考慮し、詳細なトレードオフを行った。
その結果、Galileo 対応の海外製 GPS 受信機システム + 衛星レーザー測距用リフレクタレイから構成されるシステムを選定した。



【質問番号 2-2】衛星バス

【質問内容】

「はやぶさ」、「PLANET-C」、「WINDS」などの JAXA 衛星のバス技術を活用して採用することとしたとありますが、中型衛星バスの標準化をどう考えていますか。

衛星バスに関して、P59 以降のサブシステムの選定理由の欄に「従来衛星で実績のある方式」という記述がありますが、既存のものをそのまま使用する衛星バスのサブシステムを明確にしてください。

商業衛星の場合、全く既存の衛星バスを設計変更無く採用する場合には FM 試験のみの場合もありますが、今回は PFM 試験がかなり行なわれるようですが、このプロジェクトでの衛星バスの開発方式に関する考え方を説明して下さい。

【資料の該当箇所】 推進 6-1-2 59 ページ～

【回答者】 JAXA

【回答内容】

ASTRO-G のような重量 1 トン程度の天文系の中型科学衛星では、ミッション機器が望遠鏡などで多様な形態をとります。液体 He で冷却した光学望遠鏡を搭載するもの、伸展マストで長く伸びるもの、ASTRO-G のように展開アンテナを広げるものなどさまざまです。

従って、衛星形態まで共通となるような標準的な衛星バスを開発することは、費用対成果の上で、現時点での技術、衛星機数を考慮すると、効果的ではないと判断しています。

その上で、バスを構成するサブシステム、あるいは搭載機器のレベルでの従来衛星の実績品、実績技術を ASTRO-G では採用していきます。その例は、p59 - 61 に示されています。

参考情報ですが、これより規模の小さい、400 kg 以下の小型科学衛星では、標準バスを開発することは有効であると判断をしており、別途、そのような計画を準備中です。

「既存のものをそのまま使用する」サブシステムはございません。程度はさまざまですが、ASTRO-G ミッション要求や衛星規模に応じたパラメータや仕様細部が異なります。

ASTRO-G では、プロトモデル (PM) をフライトモデル (FM) と別に製作する機器はありません。ASTRO-G においては、機器の技術成熟度を考慮し、以下の 3 種類の方式を組み合わせることでコスト低減を図りつつ、確実な開発を目指しています。

(1) 実績のある機器

衛星バスのうち、実績のある機器については、打ち上げ約 3 年前ごろに FM として製作に着手して単体試験、総合試験を経て打ち上げます。

(2) 既存品に対してある程度の技術変更が生じる機器

衛星バスのうち、既存品に対してある程度の技術変更が見込まれる機器については、FM 製作よりも早い段階からプロトフライトモデル (PFM) として開発し、早期に試験を行います。その結果に応じてそのモデルに改修を加えてフライトに供します。

(3) 新規性の高い機器

ミッション機器等、新規性の高い機器については、開発の早い段階においてエンジニアリングモデル (EM) を製作し (一部機器については、要素試作を研究開発フェイズにて先行して実施*)、十分な評価を実施した後、FM あるいは PFM の開発を行うことにより、新規開発に伴う技術リスクの低減に努めます。

* フロントローディング参照： 推進 6-1-1 35 ページ～ 40 ページ

【質問番号 2-3】 反射鏡面の 43 GHz での動作について

【質問内容】

9 m のメッシュアンテナが一つのキー技術と思われる。特にこの反射鏡面を使った 43 GHz での動作について質問したい。

- 1) 43 GHz を使う地上設置型アンテナで、最大のアンテナ径、鏡面精度はどの程度であるか。
- 2) 反射鏡面の大型化は利得が得られる反面、ビームがシャープになるため半値角が小さくなる。資料の数値を用いると、半俯角は約 100 分の 5 度になるが、経年変化を考えてどの程度の数値を見込んでいるのか。すなわち、地球と対角をなす点で深宇宙を見たときの角度精度はどの程度と見込んでいるのか。
- 3) 打上げ後、軌道上でのアンテナ特性(最大利得、利得パターン)の測定はどのように計画されているか。

【資料の該当箇所】 推進 6-1-2 35 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

- 1) 43 GHz が使用できる 100 m 径のアンテナは現在世界に 2 つあります。1 つは、ドイツのマックスプランク研究所の 100 m 鏡です。同所のホームページによれば、鏡面精度は、0.5 mm-RMS 以下です。ただしこのアンテナ外周の 20 m 分は網のアンテナで 43 GHz では内側しか使用していません。もう 1 つの 100 m 鏡は米国の国立電波天文台(NRAO)のグリーンバンクにあります。このアンテナは鏡面を観測中に制御して鏡面精度を得る方式を採用しているため、鏡面精度を明示していませんが、約 0.35 mm-RMS 程度です。

また、国立天文台野辺山 45 m 鏡は口径は半分以下ですが、鏡面精度は 0.15 mm-rms 以下であり、電波性能ではドイツの 100 m 鏡を上回ります。

- 2) アンテナの電波軸の指向精度として、1000 分の 5 度を要求値として設計を進めています。指向誤差について、想定以上の経年劣化が軌道上で発生した場合は、その都度強度の強い天体を使って計測し、衛星姿勢を補正します。
なお、アンテナを構成する材料の経年変化による指向誤差、ビーム幅の劣化の程度は、地上における放射線試験等により詳細評価を実施中です。
- 3) 強度のわかっている天体の観測を行います。また利得パターンも点状電波源に対してアンテナをスキャンすることにより取得します。

【質問番号 2-4】 基準信号伝送について

【質問内容】

基準信号伝送(phase transfer)に関して特段の言及が無いのは、「はるか」の技術の延長上にあると見なされているからだと思います。基準信号の周波数は 40 GHz と記されていますが(p.43 の図の中)、この信号の変調はどうされるのでしょうか(無変調というわけにはいかないと思いますので)。

【資料の該当箇所】 推進 6-1-2 43 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

基準信号伝送については、「はるか」の延長と考えております。「はるか」の基準信号伝送は無変調でおこなってございました。ASTRO-G の 40 GHz の信号についても同様と考えております。

40 GHz 帯の CW のアップリンク信号も含め、ASTRO-G の通信系の使用周波数は、SFCG(宇宙用周波数調整会議)、ITU(国際電気通信連合)等の周波数管理をする国際的な機関へ公開はすでに行っており、大きな問題は提示されていません。

【質問番号 2-5】 技術波及効果について

【質問内容】 開発される新技術の産業界への技術波及効果について説明願います。

【資料の該当箇所】

【回答者】 JAXA

【回答内容】

現時点では新技術の産業界への技術波及効果としてお伝えできるものはありません。

しかしながら、衛星レーザ測距用リフレクタについては、従来、海外メーカーに依存していた技術であり、今回、これを国内開発することは、当該技術に関する我が国の独自技術の獲得の起点となることが期待されています。

また、コントロールモーメントジャイロ(CMG)を用いた高速姿勢変更技術や高速テレメトリー技術についても、将来衛星ミッションにおいての採用が検討されており、ASTRO-G で開発した技術が将来ミッションにおいて応用されていく可能性は高いと考えています。

【質問番号 3-1】「はるか」の衛星開発費

【質問内容】比較のため、「はるか」の衛星開発費を提示する。

【資料の該当箇所】推進 6-1-2 42 ページ

【回答者】JAXA

【回答内容】

第 6 回推進部会にて「はるか」の衛星開発費は約 120 億円と回答させて頂きましたが、正確な数字としては 109 億円でした。

なお、主な 1 ton 級天文衛星の衛星開発費、質量は以下のとおりです。

衛星名	衛星開発費	質量
はるか	109 億円	830 kg
ひので	131 億円	900 kg
あかり	134 億円	960 kg

【質問番号 3-2】 海外との協力について

【質問内容】

- (1) スペース VLBI では海外の天文台や関連研究機関との協力が必須ですが、これまでの話し合いの状況、および今後の見通しを、ご説明下さい。ASTRO-G の「開発」移行が認められることは、海外機関各々での予算獲得を後押しすることになりますね。
- (2) 資料上で気付いたことですが、p.48 の図では、アメリカ大陸にリンク局が置かれないように見受けられます。そうなのですか。

【資料の該当箇所】 推進 6-1-2 43, 47～48 ページ

【回答者】JAXA

【回答内容】

- (1) ASTRO-G で国際協力の状況は以下の通りです。
全体的な話としては、2007 年 12 月には相模原で「VSOP-2^{*}国際シンポジウム」を、2008 年 5 月には、ドイツの Max Planck Institute で「VSOP-2 サイエンスワークショップ」を開催し、ASTRO-G による観測で行うべき科学および協力体制について議論をおこないました。さらに、「はるか」で成功した例にならって、VSOP-2 International Science Council (VISC-2) という国際委員会を組織し、2008 年 5 月に最初の会合を行いました。
リンク局
リンク局については、米国で 1 局、スペインで 1 局準備する方向

* VSOP : VLBI Space observatory Programme「はるか」を用いたスペース VLBI 計画
VSOP2 : ASTRO-G を用いたスペース VLBI 計画。VSOP の次の計画

で、2006年11月から3ヶ月に1回程度の頻度で各国と会合を持ってきており、リンク局の設計、予算を確保するためのやりかたについて合意を得ました。合意に基づき、米国のグループは2008年1月にNASAのMission of opportunityの公募に応募しました。6/20に本公募には採択されなかったことが分かりましたが、引き続き予算獲得の努力を続けます。欧州側は、2008年の9月ころに、スペイン、オランダ等の宇宙機関を通じてESAに予算の要求を出す予定です。そのほかに、豪州、南アフリカからのリンク局での参加の可能性も現在検討中です。

地上 VLBI 観測局

ASTRO-Gと共同で観測する地上 VLBI 観測局は、欧州、米国 VLBA、東アジア(日本、韓国、中国)、豪州、南アフリカなどの国の天文台が興味を持って、参加を表明し、各国での参加のための予算確保の努力をしてもらっています。

米国の VLBA のみは、現在予算の確保に苦慮していますが、他の天文台については、参加が可能な見通しです。特に、中国、韓国との協力については、国立天文台が進めている東アジア VLBI ネットワークの中で、スペース VLBI での協力が1つのテーマになっています。これらの国際的な地上 VLBI 観測局の参加については、「はるか」と同様に GVWG(Global VLBI Working Group)を通して行う方針です。

相関局

現在国立天文台および韓国 KASI が協力して ASTRO-G の相関処理にも対応した相関器を建設中です。2010年完成予定です。また、欧州、米国では、オーストラリアで開発されたソフトウェア相関器を基本にした相関器の開発も計画されており、予算が確保できればスペース VLBI 対応の相関器になり、これらの装置でも処理が可能となります。

いくつかの地上装置については、これからの予算要求であるが、ご指摘の通り、ASTRO-G の「開発」移行は、海外機関各々でのこれらの予算獲得を後押し致します。

- (2) リンク局については、すでに既檜のアンテナを使う方向で動いている日本の臼田局、スペインの Yebes 局を想定した場合、3局目をどこに作るかを、建設の実現性を踏まえて検討した結果、北米よりも南半球にリンク局を持った方が、より多くの観測時間を取れることがわかりましたので現在の案になっています。

今後の国際協力情勢によって変わる可能性があります。

【質問番号 3-3】 国立天文台との協力

【質問内容】

国立天文台との協力に関して、p.47 に「『はるか』プロジェクトでは宇宙研とNAOJとの共同でミッションを遂行した。ASTRO-G ではさらに強力な協力関係をもつ。」とあります。国立天文台との協力をより具体的に説明されれば、ミッション遂行の全貌に関する理解がより深まると思います(例えば資料p.47 に追記)。

【資料の該当箇所】 推進 6-1-2 47 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

国立天文台と、宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部の間では、2007年6月に、ASTRO-G に関する共同研究の覚書を取り交わしました。国立天文台は「はるか」時代と比較すると、VERA 計画を立ち上げ、運用し、現在、地上 VLBI 観測についてはトップレベルの観測運用を行っています。地上 VLBI 観測が得意な国立天文台と衛星が得意な JAXA が協力しそれぞれの得意な分野で力を発揮することにより、全体的により良い計画になると考えており、そのような基本的な考え方の下、現在細かい役割分担を検討中です。資料にも追記致します。



他機関、国際協力

国内の研究所、大学との協力

「はるか」プロジェクトでは、宇宙研とNAOJ(ミッション全般+相關局運用)との共同でミッションを遂行した。ASTRO-Gにおいても、VERAプロジェクト等の運用により世界トップレベルの地上VLBI観測運用を行う。NAOJの連携を強化し、NAOJとJAXAのそれぞれの得意分野を土かした協力を進める。さらに、「はるか」開始時と比較すると、VLBI関係の大学接点も、岡山大、山口大、成早大、北海道大、大阪府立大、法政大、筑波大、一橋大、武蔵工大、静岡大、京都大、東京大、理研大などが広がっている。



【質問番号 3-4】データ公開の方針

【質問内容】

世界一級データを広く公開することにより関連分野がより発展すると期待されるが、ASTRO-G のデータ公開の方針を具体的に説明してほしい。

観測提案者に対する専有権をどれだけの期間に設定するか、またどの種類のデータ(生データか画像処理したものか)を公開するかなど、その期間設定の妥当性と根拠もあわせて説明してほしい。

【資料の該当箇所】 推進 6-1-2 14 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

データ専有期間も含むデータ公開の方針は、国際的な天文研究者のコミュニティで現在議論しています。方針が決まるのは、遅くとも ASTRO-G の打ち上げ約 1 年前の第 1 期観測の提案募集時です。「はるか」では観測提案者の専有権は、相関局での相関処理後、観測提案者がデータを受け取ってから約 18 ヶ月でした。この期間は、地上 VLBI 観測の場合の典型的なデータ専有期間に合わせた物で、観測提案者がデータ処理をしてから成果を出版するまでの典型的な期間です。データ提供は生データのみで、画像処理は観測提案者が行っていました。

ASTRO-G では、データ公開については、生データに加えて画像データも必須であるという意見も多く、画像データの公開も検討しています。この場合、画像処理はプロジェクト側の作業になり、その分作業経費が必要となります。

【質問番号 4-1】ソーラーパネルのリスク管理

【質問内容】ソーラーパネルについてはどのようなリスク管理を行っているのか。

【資料の該当箇所】 推進 6-1-2 50 ページ

【回答者】 JAXA

【回答内容】

WINDS の SAP 構造を用いて、「実績」のあるものをベースにします。ただし、A-G の厳しい放射線環境を考慮し、放射線シールドとして 300 ミクロンという通常よりやや厚いカバーガラスを用います。このカバーガラスの変更についてはクーポンパネルを試作して確認します。これ以外については、JAXA が保有する設計基準や過去の不具合情報等の知見をもとに開発を行います。